ISSN 1346-7328
国総研資料 第749号
平 成 ２ ５ 年 ８ 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.749 August 2013

気候変動適応策に関する研究（中間報告）

Interim report on climate change adaptation studies

国土交通省 国土技術政策総合研究所
気候変動適応研究本部

Climate Change Adaptation Research Group
National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料　　Technical Note of NILIM
第 749 号　2013 年 8 月　　No.749　August 2013

気候変動適応策に関する研究（中間報告）

気候変動適応研究本部

Interim report on climate change adaptation studies

Climate Change Adaptation Research Group

概要

国土技術政策総合研究所気候変動適応研究本部は、将来における気候変動に対応するための方策を、治水や利水、環境の観点から多面的に検討し、設定するために必要となる技術的基盤の提示を目的として、平成 21 年度から活動を展開している。本報告書は、プロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の選定・選択を支援する基盤技術の開発」（研究期間：平成 22 年度～25 年度）の成果を中心的題材とし、同研究本部によるそれ以外の研究成果と合わせ、平成 24 年度までの中間的な活動成果報告としてとりまとめたものである。本中間報告は、関連分野の専門家の意見を今後の研究に反映させることを目的に実施した「気候変動に対応する治水方策に関するワークショップ」（平成 25 年 3 月 12 日開催）の報告も納めている。

キーワード：気候変動、影響評価、適応策、治水、利水、環境

Synopsis

Climate Change Adaptation Research Group, National Institute for Land and Infrastructure Management (CCARG-NILIM) was established in FY2009 to conduct cross-cutting research in order to obtain technical basis configuring adaptation measures against adverse impacts of future climate change in terms of water-related disaster mitigation, water utilization and environmental conservation. This note provides overall products by CCARG-NILIM up to FY2012, centering on NILIM project research titled "Development of base technology to support forming a portfolio of management alternatives for large-scale water-related disasters under changing climate" (FY2010 - FY2013). This note also includes the report of the workshop on adaptation measures for flood disaster mitigation responding to climate change CCARG-NILIM held on March 12, 2013 to disseminate the research results and reflect opinions of external researchers in further studies.

Key Words: Climate Change, Impact Assessment, Adaptation Measures, Flood Disaster Mitigation, Water Utilization, Environment

目　次

第Ⅰ部　報告書の概要

1.　本報告書の目的及び位置づけ……Ⅰ－ 1

2.　気候変動適応研究の概要……Ⅰ－ 1

3.　報告書の構成……Ⅰ－ 2

4.　気候変動適応研究の実施体制……Ⅰ－ 3

5.　気候モデルについて……Ⅰ－ 4

参考文献

謝辞

第Ⅱ部　気候変動適応策に関する研究

第1章　個別の研究成果……Ⅱ－ 1

1.1　気候変動に適応する治水方策に関する研究……Ⅱ－ 1

1.1.1　流域一体となった浸水被害軽減方策に関する研究（水害研究室、河川研究室）……Ⅱ－ 1

1.1.2　沿岸環境の変化現況と気候変動に向けた外力設定（海岸研究室）……Ⅱ－ 31

1.1.3　Xバンド MP レーダによる豪雨監視の強化について（水資源研究室）……Ⅱ－ 44

1.1.4　豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響評価（下水道研究室）……Ⅱ－ 55

1.1.5　降雨予測技術を活用したダム洪水調節操作の高度化（水資源研究室）……Ⅱ－ 58

参考文献

1.2　水利用への影響と適応に関する研究……Ⅱ－ 74

1.2.1　気候変動に対応した渇水リスク増加に対応した下水処理水の活用方策に関する研究（下水処理研究室）……Ⅱ－ 74

参考文献

1.3　河川環境への影響に関する研究（河川環境研究室）……Ⅱ－ 78

1.3.1　流量・水質の変動特性……Ⅱ－ 78

1.3.2　流量・水温の変化が河川環境に与える影響に関する検討……Ⅱ－ 83

1.3.3　気候変動が河川環境に与えると考えられる影響……Ⅱ－ 99

参考文献

第2章　治水への影響と適応に関する研究……Ⅱ-105

2.1　気候変動予測の進展とそれを踏まえた検討……Ⅱ-105

2.1.1　気候変動予測の概要（水資源研究室）……Ⅱ-105

2.1.2　気候変動予測結果の翻訳（河川研究室、気候変動研究チーム）……Ⅱ-111

2.1.3　翻訳結果に基づく流域特性の類型化と特徴（河川研究室・気候変動研究チーム）　Ⅱ-130

2.1.4　高潮外力に対する気候変動の影響についての検討（海岸研究室）……Ⅱ-154
参考文献
2.2　諸外国の適応策の分析（流域管理研究官・気候変動研究チーム）……Ⅱ-163
2.2.1　情報収集の方法……Ⅱ-163
2.2.2　共通的流れ……Ⅱ-163
2.2.3　各国の気候変動適応に係る取組み……Ⅱ-168
2.2.4　各国の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法……Ⅱ-187
2.2.5　適応策研究のレビュー……Ⅱ-202
2.2.6　諸外国の適応策検討及び実践から見えてくるポイントと日本の施策との関係についての考察……Ⅱ-206
2.2.7　今後の諸外国の政策モニタリングのあり方について……Ⅱ-207
参考文献
2.3　日本における気候変動適応策検討のポイント……Ⅱ-211
2.3.1　概観（河川研究部）……Ⅱ-211
2.3.1.1　我が国の治水に関わる基本的状況……Ⅱ-211
2.3.1.2　被害の起こり方のコントロールについての議論……Ⅱ-213
2.3.1.3　論点の整理……Ⅱ-217
2.3.2　河川整備手段の拡充の展望……Ⅱ-219
2.3.2.1　河道設計・管理からのアプローチ（河川研究室）……Ⅱ-219
2.3.2.2　予測雨量を活用したダムによる洪水調節操作手法の高度化（水資源研究室）　Ⅱ-222
2.3.2.3　既設ダムの再編や再開発の効果（水資源研究室）……Ⅱ-226
2.3.3　設計以上の外力を受けた治水施設（群）の機能発揮・喪失に関する検討……Ⅱ-232
2.3.3.1　有堤河川の氾濫事象に着目した検討（河川研究室・気候変動研究チーム）……Ⅱ-232
2.3.3.2　氾濫リスクの試算手法（河川研究室・気候変動研究チーム）……Ⅱ-232
2.3.3.3　被害状況の試算結果（河川研究室・気候変動研究チーム）……Ⅱ-235
2.3.3.4　洪水流・堤防システムの挙動および被害状況（河川研究室・気候変動研究チーム）……Ⅱ-238
2.3.3.5　５つの着眼点を応用した検討事例（河川研究室・気候変動研究チーム）……Ⅱ-242
2.3.3.6　ダムの洪水調節（水資源研究室）……Ⅱ-246
2.3.4　災害の起こり方のコントロールというアプローチの強化－氾濫を考慮した治水施策について（水害研究室・河川研究室）……Ⅱ-248
2.3.4.1　背景・目的……Ⅱ-248
2.3.4.2　施策実施条件の整理……Ⅱ-248

2.3.4.3　今後に向けた論点整理 Ⅱ-250
2.3.5　超過洪水を伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題（水害研究室） Ⅱ-252
2.3.5.1　防災対策の転換 Ⅱ-252
2.3.5.2　気候変動に対する適応策 Ⅱ-252
2.3.6　不確実性への対応（流域管理研究官） Ⅱ-257
2.3.6.1　不確実性の種類 Ⅱ-257
2.3.6.2　不確実性の取り扱い事例 Ⅱ-257
2.3.6.3　不確実性への対処 Ⅱ-258
2.3.6.4　総合減災システム Ⅱ-259
2.3.6.5　順応的管理 Ⅱ-260
2.3.6.6　水文モニタリングのあり方 Ⅱ-260
参考文献

第Ⅲ部　気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ開催報告
1.　ワークショップの概要 ..... Ⅲ- 1
2.　議事概要 ..... Ⅲ- 2
2.1　基調講演 ..... Ⅲ- 2
2.2　国総研気候変動適応研究中間報告からの題材提供 ..... Ⅲ- 22
2.3　全体討論 ..... Ⅲ- 36
3.　参考資料 ..... Ⅲ- 39

研究実施者（気候変動適応研究本部）名簿

※本中間報告は、平成 24 年度末の時点で報告すべき成果が整ったものを対象としているので、気候変動適応研究本部の活動内容の全てが収められているわけではない。また分野ⅰに重点を置くなど、分野によって報告内容の密度が異なっている。なお本中間報告の各部分の研究担当は目次に記されている。

所　属	役　職[*1]	氏　名	担当期間	担　当[*2]
国土技術政策総合研究所	所長	西川　和廣	2010.4～2012.8	研究総括
	所長	上総　周平	2012.8～2013.3	
河川研究部	部長	山本　聡	2010.4～2011.3	研究総括
	部長	藤田　光一	2011.4～2013.3	
	流域管理研究官	藤田　光一	2010.4～2011.3	
	流域管理研究官	吉谷　純一	2011.4～2013.3	
河川研究部 河川研究室	室長	服部　敦	2010.4～2013.3	ⅰ
	主任研究官	飯野　光則	2010.4～2011.3	
	研究官	小野田　惠一	2010.4～2012.2	
河川研究部 海岸研究室	室長	諏訪　義雄	2010.4～2013.3	ⅰ
	主任研究官	野口　賢二	2010.4～2013.3	
河川研究部 水資源研究室	室長	鳥居　謙一	2011.10～2012.3	ⅰ、ⅱ
	室長	川﨑　将生	2012.4～2013.3	
	研究官	土屋　修一	2011.12～2013.3	
	研究官	猪股　広典	2011.4～2013.3	
河川研究部 気候変動研究チーム	主任研究官	菊森　佳幹	2010.4～2013.3	ⅰ、ⅱ
	主任研究官	板垣　修	2010.6～2013.3	
	研究官	土屋　修一	2010.4～2011.11	
	研究官	加藤　拓磨	2010.4～2013.3	
	研究官	里村　大樹	2010.4～2011.3	
環境研究部	部長	山本　聡	2011.4～2013.3	研究総括
	環境研究官	吉谷　純一	2010.4～2011.3	
環境研究部 河川環境研究室	研究官	望月　貴文	2010.4～2013.3	ⅲ
下水道研究部	下水道研究官	榊原　隆	2010.4～2011.7	研究総括
	下水道研究官	尾崎　正明	2011.7～2012.3	
	下水道研究官	森田　弘昭	2012.4～2013.3	
下水道研究部 下水道研究室	研究官	藤原　弘道	2011.4～2013.3	ⅰ
	研究官	橋本　翼	2011.4～2013.3	
下水道研究部 下水処理研究室	主任研究官	小川　文章	2010.4～2012.3	ⅱ
	主任研究官	山下　洋正	2012.4～2013.3	
危機管理技術研究センター 水害研究室	室長	伊藤　弘之	2010.4～2013.3	ⅰ
	主任研究官	飯野　光則	2011.4～2013.3	
	主任研究官	水草　浩一	2010.4～2011.2	

*1：役職は研究当時を含む。

*2: ⅰ：治水への影響と適応に関する研究
ⅱ：水利用への影響と適応に関する研究
ⅲ：河川環境への影響と適応に関する研究

第Ⅰ部

報告書の概要

1. 本報告書の目的及び位置づけ

国土技術政策総合研究所は、将来における気候変動による洪水や渇水等の水災害に対応するための方策を、治水や利水、環境の観点から多面的に検討し、設定するための技術的根拠を得ることなどを目的として、気候変動適応研究本部を設置し、複数の研究部を横断して有機的に連携しながら研究を進める体制を取っている。この中で特に水害対応については、プロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の選定・選択を支援する基盤技術の開発」を平成 22 年度から平成 25 年度の研究期間で実施している。本報告書は、上記の気候変動適応研究本部の現時点における成果とりまとめとして、また上記プロジェクト研究の中間報告として、平成 24 年度までの各研究課題の成果を示すことを目的としている。この中で特に治水方策の部分については、より掘り下げた議論を展開している。

また、本中間報告を公表し、関連分野の専門家の意見を今後の研究に反映させることを目的とした「気候変動に対応する治水方策に関するワークショップ」を平成 25 年 3 月 12 日に開催しているので、本報告書では、本ワークショップの開催報告も合わせて行うこととしている。本中間報告及び本ワークショップで得られた意見を踏まえ、今後さらに研究を進め、平成 25 年度終了時点を一つの区切りとして、より実効的な成果の創出につなげていくことをねらっている。

以上のように本報告書は、「中間報告」であり、関係する分野の専門家をはじめ多くの方の意見をいただきながら、実務においてより実効性のある最終成果を得るための「たたき台」として機能することを主眼としているので、完成度よりは、多様な観点から議論を深めるための材料提供としての役割を重視している。よって、記述内容の精度よりは、その記述の示す研究の方向性に意味があることをご理解いただければ幸いである。

2. 気候変動適応研究の概要

気候変動適応研究本部における研究は、気候変動適応策に関して治水、利水及び環境の観点から影響評価や適応策に関する研究に取り組んでいる。それぞれ、「ⅰ．治水への影響と適応に関する研究」、「ⅱ．水利用への影響と適応に関する研究」及び「ⅲ．河川環境への影響に関する研究」に対応している。プロジェクト研究を担当する研究室・チームは、それぞれの分野の下記に示した研究課題に取り組んでいる。さらに、「ⅳ． 統合施策に関する研究」については、ⅰからⅲの観点を統合し、各種の適応策の組み合わせについて、親和性や背反性を整理し、河川流域が持つ特徴に応じたタイプごとに、最適な選択・設定手法を検討するものである。

ⅰ．治水への影響と適応に関する研究
- １．河道の氾濫リスクの影響評価
- ２．水害リスクの影響評価
- ３．流域一体となった浸水被害軽減方策に関する研究
- ４．沿岸環境の変化現況と気候変動に向けた外力設定
- ５．X バンド MP レーダーによる豪雨監視の強化について
- ６．豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響評価
- ７．降雨予測技術を活用したダム洪水調節操作の高度化

ⅱ．水利用への影響と適応に関する研究
- １．気候変動がもたらす渇水リスクや水資源確保への影響評価
- ２．気候変動に対応した渇水リスク増加に対応した下水処理水の活用方策に関する研究

ⅲ．河川環境への影響に関する研究
- １．流量・水質の変動特性

２．流量・水温の変化が河川環境に与える影響に関する検討
３．気候変動が河川環境に与えると考えられる影響
ⅳ．統合施策に関する研究

3. 報告書の構成

本報告書は、報告書の概要、気候変動適応研究の中間成果の報告、及び「気候変動に対応する治水方策に関するワークショップ」の開催報告の３部から構成されている。それぞれの部の内容・構成は、下記のとおりである。

○第Ⅰ部　報告書の概要

第Ⅰ部では、本報告書の目的、位置づけ、研究実施体制、各研究課題に共通する前提条件等について記述している。

○第Ⅱ部　気候変動適応策に関する研究

第１章では、第Ⅰ部で示した構成にしたがって成果を順次述べている。なお、ⅳ．統合施策に関する研究については、ⅰからⅲまでの研究課題を統合することより得られるものであるので、中間報告の段階である本報告書には掲載していない。

第２章では、「気候変動に適応する治水方策に関する研究」と題して、特に治水方策の部分について掘り下げた議論を展開している。

○第Ⅲ部　気候変動に対応する治水方策に関するワークショップ開催報告

ここでは、本ワークショップの開催趣旨や参加メンバー等、ワークショップの概要を示すとともに、発表資料と発表者の発言要旨、本ワークショップの参加者から得られたアンケート結果を載せている。

4.　気候変動適応研究の実施体制

研究実施体制は図-Ⅰ.4.1 に示すとおりである。気候変動外力の設定については、21 世紀気候変動予測革新プログラム（海洋研究開発機構 2013a）と気候変動リスク情報創生プログラムの中で検討を行い、気象予測データの提供を受けている。また、河川・海岸への影響評価においては地方整備局からのデータや解析モデルの提供を受け X バンド MP レーダーの実装に代表されるように、研究成果が地方整備局の現場管理にフィードバックできる工夫も行っている。X バンド MP レーダーによる降雨観測については、防災科学技術研究所等から技術的協力を受け、研究を実施している。本省とは、水管理国土保全局等を中心に，社会資本整備審議会における議論に関わる情報・知見整理等において緊密な連携を図り、また防災・減災施策に関わる方針について認識共有を図るように努めている。さらに、国総研ではカバーできない多分野の学識者より種々のアドバイスを得る体制を取っている。

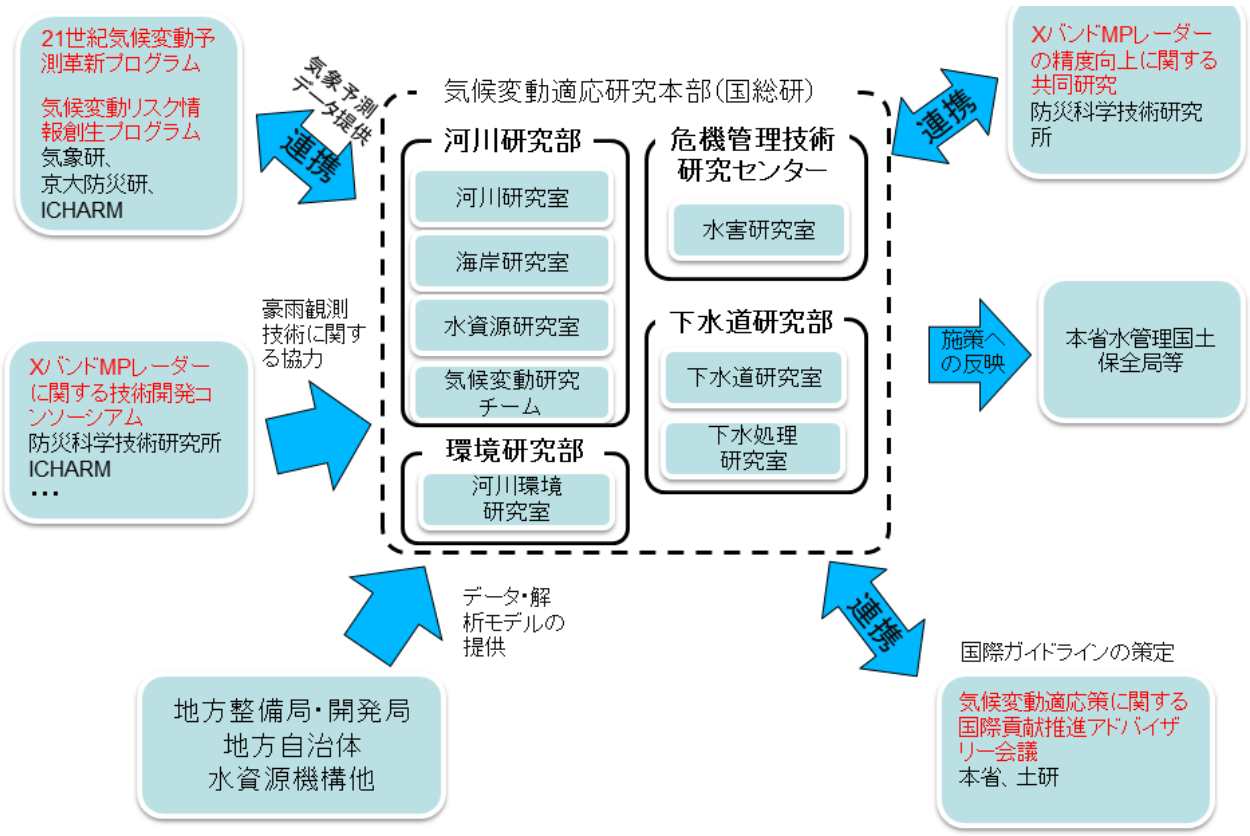


図-Ⅰ.4.1　気候変動適応研究の実施体制

5. 気候モデルについて

本研究では、将来の気候外力として複数の気候モデルの出力値を用いている。本報告書では、気候モデルの種類を統一的に表-Ⅰ.5.1 の略称のように表記することとする。また、これらの気候モデルの出力値は、不確実性（予測値の信頼性の幅）を持つものである。よって、そこから導き出される影響評価や適応策検討に関わる解析結果についても、信頼性の幅をもった値であることに留意する必要がある。

表-Ⅰ.5.1　気候モデル

開発プロジェクト	気候モデル	略称			
		―	現在 (1979-2003)	近未来 (2015-2039)	将来 (2075-2099)
21 世紀気候変動予測革新プログラム（海洋研究開発機構 2013a）	全球気候モデル ［前期実験］ MRI-AGCM3.1S	革新前期 GCM20	革新前期 GCM20 （現在）	革新前期 GCM20 （近未来）	革新前期 GCM20 （将来）
	全球気候モデル ［後期実験］ MRI-AGCM3.2S	革新後期 GCM20	革新後期 GCM20 （現在）	革新後期 GCM20 （近未来）	革新後期 GCM20 （将来）
	領域気候モデル ［前期実験］	革新前期 RCM5	革新前期 RCM5 （現在）	革新前期 RCM5 （近未来）	革新前期 RCM5 （将来）
	領域気候モデル ［後期実験］	革新後期 RCM5	革新後期 RCM5 （現在）	革新後期 RCM5 （近未来）	革新後期 RCM5 （将来）
人・自然・地球共生プロジェクト（海洋研究開発機構 2013b）	全球気候モデル	―	現在 (1979-1998)	―	将来 (2080-2099)
		共生 GCM20	共生 GCM20（現在）	―	共生 GCM20（将来）

参考文献

海洋研究開発機構 2013a：21 世紀気候変動予測革新プログラム：
http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/
海洋研究開発機構 2013b：人・自然・地球共生プロジェクト：
http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/kyousei/

謝　辞

本報告書の基となっている研究の実施に際しては、21 世紀気候変動予測革新プログラム（文部科学省による委託事業：2007～2011 年度）における極端現象予測チーム（チーム代表；鬼頭昭雄 気象庁気象研究所気候研究部長（当時））の活動成果より、最新の気候モデルの出力結果の提供を受け（国総研は、本チームのうち「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」の中のサブテーマ「気候変動に伴う河川管理等への影響評価」の実施機関として参画）、また、同チームが情報・知見共有や議論を行うための定期的な研究会等に参画する機会を得た。こうした研究実施環境は本研究の遂行に必須のものであり、関係各位に深く感謝いたします。

2013 年 3 月 12 日に開催した「気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ」に参加いただき、貴重な講演を賜り、あるいは中間報告書の草稿段階でありながら、我々の研究内容について貴重かつ熱心なコメントを数多くいただいた中央大学研究開発機構教授 福岡捷二先生、京都大学防災研究所教授 中北英一先生、北見工業大学教授 渡邊康玄先生、京都大学防災研究所教授 角哲也先生、東京理科大学准教授 二瓶泰雄先生に対し、ここに深甚の謝意を表します。

研究の実施に不可欠であった実際の河川・流域の現場諸情報の収集に際しては、国土交通省水管理・国土保全局や同地方整備局の関係部署よりご支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。

第Ⅱ部

気候変動適応策に関する研究

第１章　個別の研究成果

1.1　気候変動に適応する治水方策に関する研究

1.1.1　流域一体となった浸水被害軽減方策に関する研究

1.1.1.1 研究の背景・目的

従来より、河道改修、洪水調節施設の整備などの治水対策を整備してきたが、依然として整備率は低く、また治水対策への投資も減少し続ける状況にあるとともに、将来は気候変動による外力の増加とそれに伴う治水安全度の低下が想定されている。

こうした状況を踏まえ、これまでの計画において目標としてきた流量に対し、河道改修や洪水調節施設の整備等を基本とする「河川で安全を確保する治水施策」で対処することに加え、増加する外力に対し「流域における対策で安全を確保する治水施策」を重層的に行うべきであるとの提言（水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方）が、平成 20 年に社会資本整備審議会にてなされている。

気候変動適応策として期待される流域治水施策としては、霞堤、二線堤、輪中堤などの氾濫流制御施設の整備・保全、土地利用や建築の規制などが挙げられるが、その１つとして、遊水機能を有する土地の保全ということがあげられる。具体的には、河道に流れ込む前の雨水の一部を貯留し、または洪水時に河川水があふれ洪水の一部を貯留し、自然に洪水を調節する作用を有する土地のことを言い、河川や周辺の土地の地形等によって、河道のピーク流量を低減させる効果が期待されている土地である。このような土地は基本的には現況を保全することによって、遊水機能を保持させておくことが可能であるが、保持するための具体的な手法や制度はまだ確立されておらず、また、定量的な洪水軽減効果や流域全体の被害軽減への寄与度の評価について研究された事例は少ない。

そこで、本研究では、既存の遊水機能を有する区域を維持・活用した施策事例について調査を行うとともに、その事例の中からモデル河川を選定し、気候変動による外力増加も含めたケーススタディに基づき遊水機能の定量的評価を試み、気候変動適応策としての検討の方向性や課題を抽出・整理することを目的に実施したものである。

1.1.1.2 遊水機能を維持・活用した施策事例調査

a) 調査対象事例

既存の遊水機能を有する区域を維持・活用した施策事例について、関係機関等からの協力が得られた６事例について、文献・現地調査及び関係機関へのヒアリングにより、施策の背景・経緯、現在の状況等を中心に調査を実施した（図-Ⅱ.1.1.1.1 参照）。

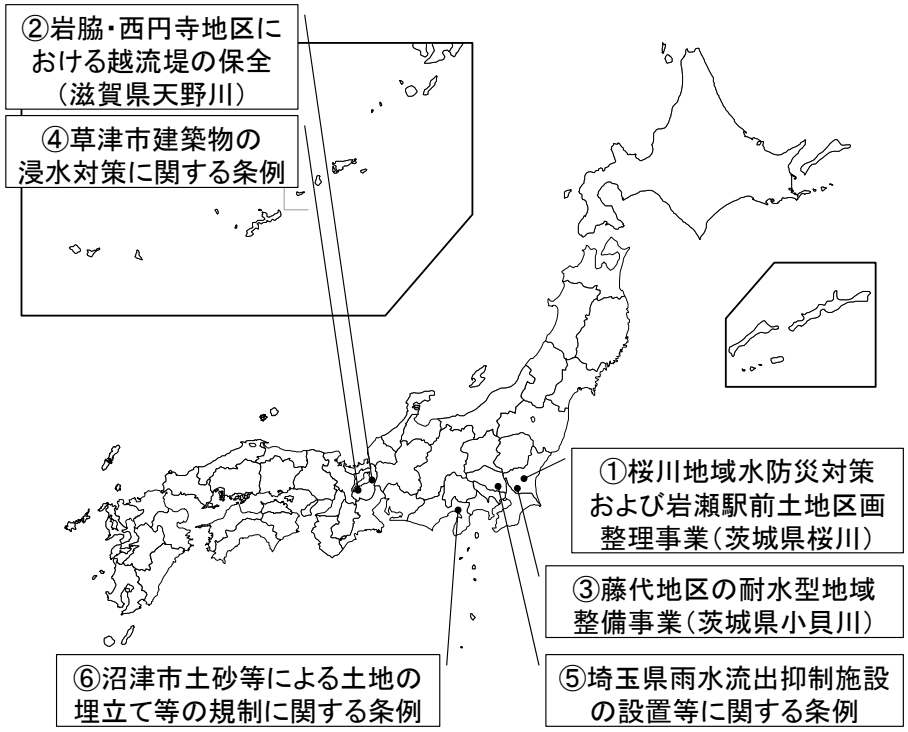


図-Ⅱ.1.1.1.1　対象事例の位置図

①北太田・君島地区水防災対策特定地域及び岩瀬駅前土地区画整理事業（茨城県桜川）

①-1 桜川の概要

利根川水系桜川は桜川市鍬柄山（標高 274.5m）に源を発し、筑西市、つくば市、土浦市を流下し霞ヶ浦に注ぐ流域面積 349km^2、流路延長 64km の茨城県を代表する河川の一つである（図-Ⅱ.1.1.1.2）。上中流部の氾濫原は農地と小集落が存在し、下流部の氾濫原は土浦市街地となっている。

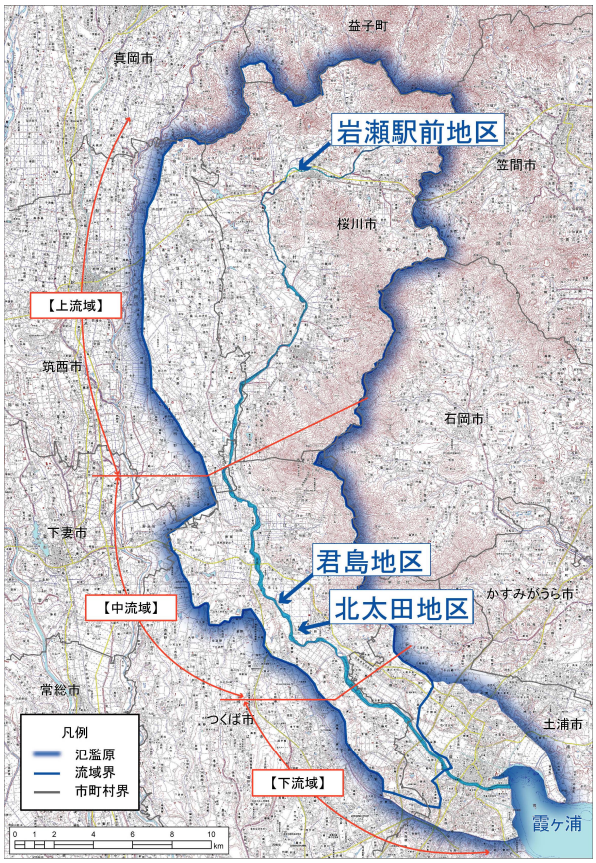


図-Ⅱ.1.1.1.2　桜川流域図（茨城県資料をもとに作成）

①-2 北太田・君島地区水防災対策特定地域

桜川においては、昭和 61 年 8 月台風 10 号により、床上床下あわせて約 1,500 棟の大規模な浸水被害が発生した。この水害を契機として、桜川地域水防災対策計画が平成 7 年に策定された。同計画において、水防災対策特定地域は「計画高水時に浸水する区域」として定義付けられており、氾濫解析結果をベースに、現地の地形状況等を踏まえて設定されている。本調査においては、最下流部に位置する北太田・君島地区（図-Ⅱ.1.1.1.3）を対象に、特に同計画策定時の経緯や現在の土地利用状況等に着目し、文献・現地調査やヒアリング（関係機関、地元住民）を行った。

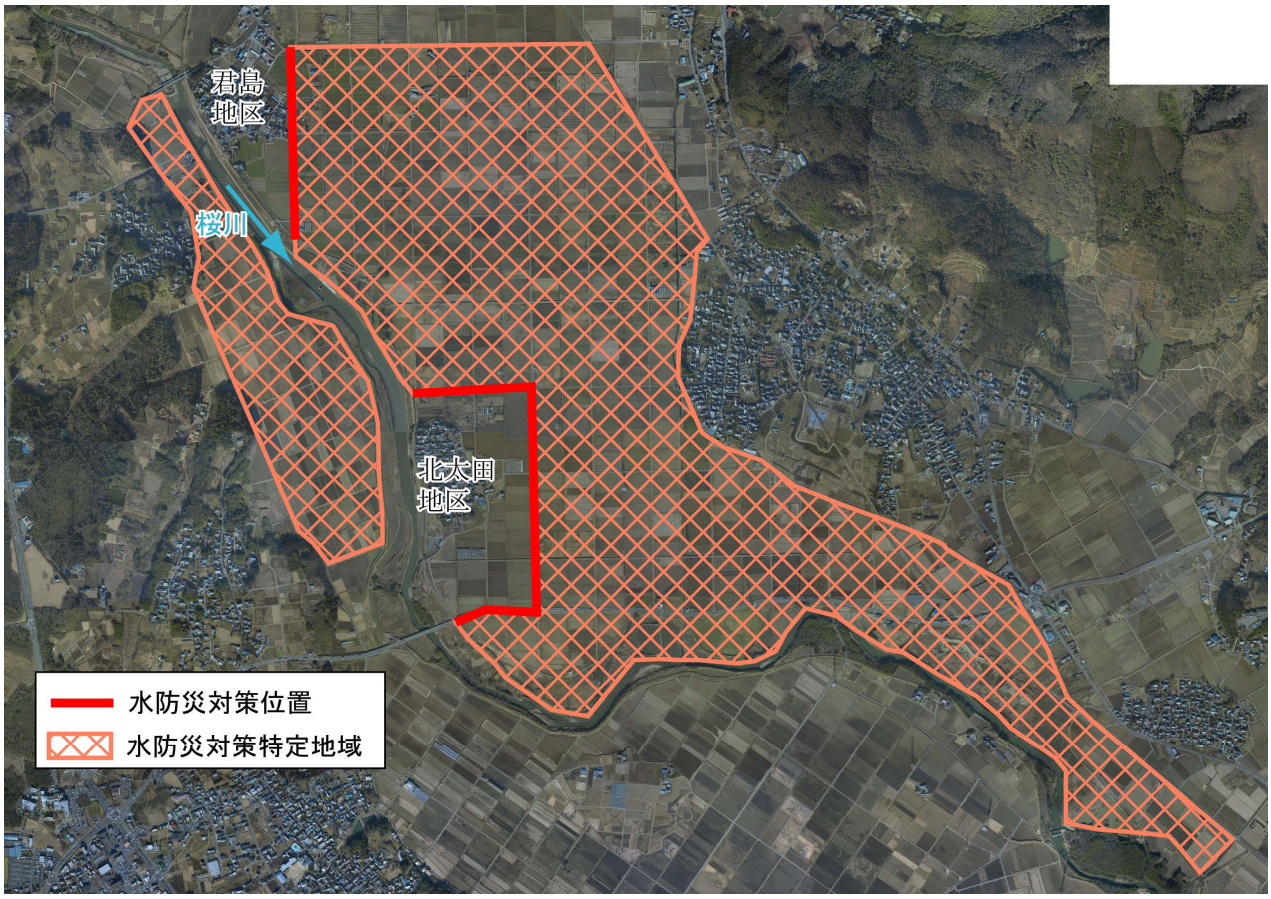


図-Ⅱ.1.1.1.3　北太田・君島地区水防災対策特定地域位置図（茨城県資料をもとに作成）

①-3 岩瀬駅前土地区画整理事業

旧岩瀬町（現桜川市）は茨城県の北西部に位置し、土地区画整理事業の対象地区の岩瀬駅前地区はJR岩瀬駅の北方約200mに位置し、昭和52年に都市計画法に基づいて市街化区域に指定された地域である。国道50号バイパスに伴うスプロール化を防ぐために道路、公園、緑地水路等の公共施設の整備・改善、宅地整備や住み良い市街地の形成を目的とする土地区画整理事業が昭和53年に計画・立案され、平成4年に事業が完了した。同事業においては、防災調整池が計3箇所設置されたが、2箇所は通常の調整池として市街地に整備され（図-Ⅱ.1.1.1.4岩瀬調整池」箇所）、残る1箇所については通常の調整池を整備する代わりに、水田を調整池と見なしている。本調査においては、特に水田を調整池と見なした経緯等に着目し、文献・現地調査及び関係機関へのヒアリングを行った。

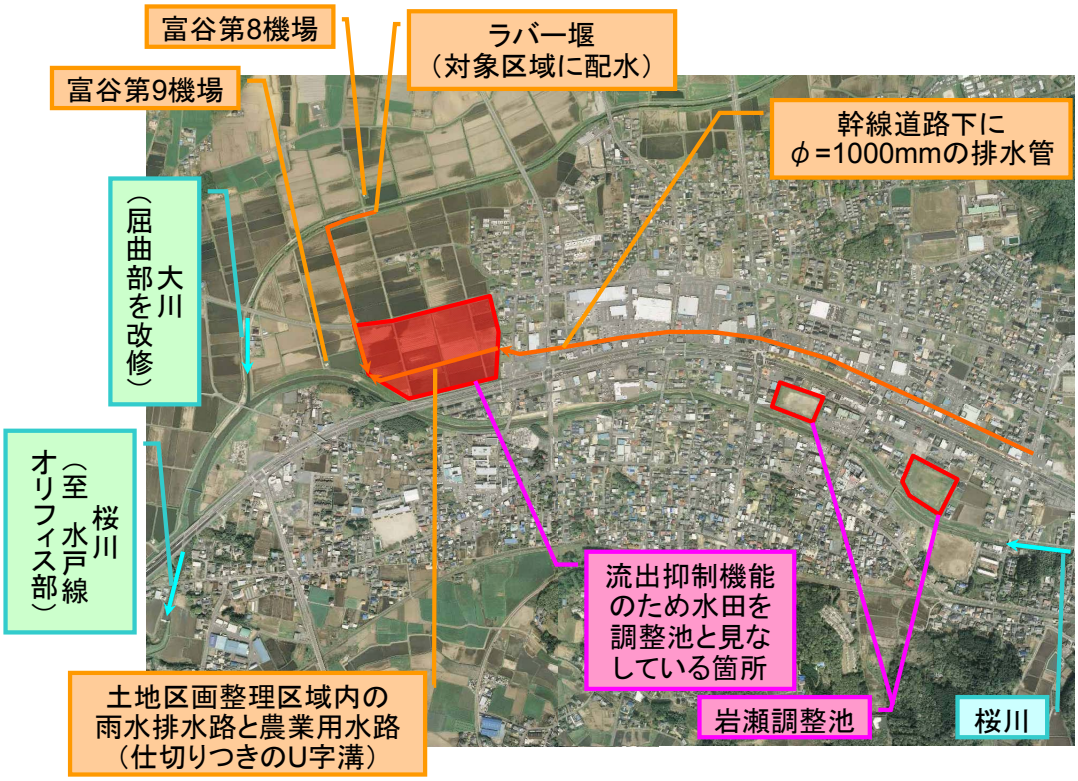


図-Ⅱ.1.1.1.4　岩瀬駅前土地区画整理事業における防災調整池位置図（茨城県資料をもとに作成）

①-4 調査結果概要

【北太田・君島地区】

- 北太田・君島地区の水防災対策特定地域は市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、開発圧力も高くはない。従って、水防災対策特定地域について付加的な規制を実施しなくとも、遊水機能を有する区域が農地として維持されている。
- 中流域の水防災対策特定地域における遊水機能の保全（≒当該地域の田畑の浸水）によって、下流域の洪水時の被害が軽減されるという状況は地元住民も認識している。ただし、現在以上に浸水リスクが上昇することまでは受け入れられてはいない。従って現状では、期待される遊水機能は当該地域で現在有する規模が上限であると考えられる。
- 水防災対策事業による輪中堤の整備によって、田畑における遊水機能の維持を可能とするとともに、地先集落の被害軽減も可能としている。また、輪中堤の整備に伴う湛水面積の減少（=遊水機能の低下）による下流域のリスク上昇分は、河道掘削等の河道改修によって回避されている。これらのことより、本事例では水防災対策事業の実施による浸水リスクの転嫁はなく、流域全体における浸水リスクは事業実施前と後で変わっていない。

【岩瀬駅前地区】

- 土地区画整理事業において調整池と見なされた水田がある地区は、桜川と大川との合流点付近に位置するため、元来出水時には地域一帯が湛水する浸水常襲地域であるとともに、市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、開発圧力も高くはない。また、当該水田の地権者も、このような特性を有する土地であることを十分に認識していた。
- あわせて、土地区画整理事業で別途調整池を設置することになった場合、公共減歩が大きくなってしまうため、可能限り公共減歩を小さくしたいという事業者の意図もあった。
- 計画時には湛水による水田における減収も懸念されたが、排水用のコールゲート管の設置等で湛水量の増加を防ぐ対策をしており、従前の浸水リスクを必要以上に上昇させないことが地権者に容認されたため、実現に至ったものと考えられる。

②岩脇・西円寺地区越流堤（滋賀県天野川）

②-1 天野川の概要

天野川は米原市内を流れ、流域面積 111.6km^2、幹川流路延長 19.0km の河川である。流域は伊吹山や霊仙山などの起伏のある山を抱いているが、天野川流域は古来より河道周辺に広がる土地を開拓するなど、勾配の緩やかな水田が広がっており、主に農地と宅地で構成されている（図-Ⅱ.1.1.1.5）。

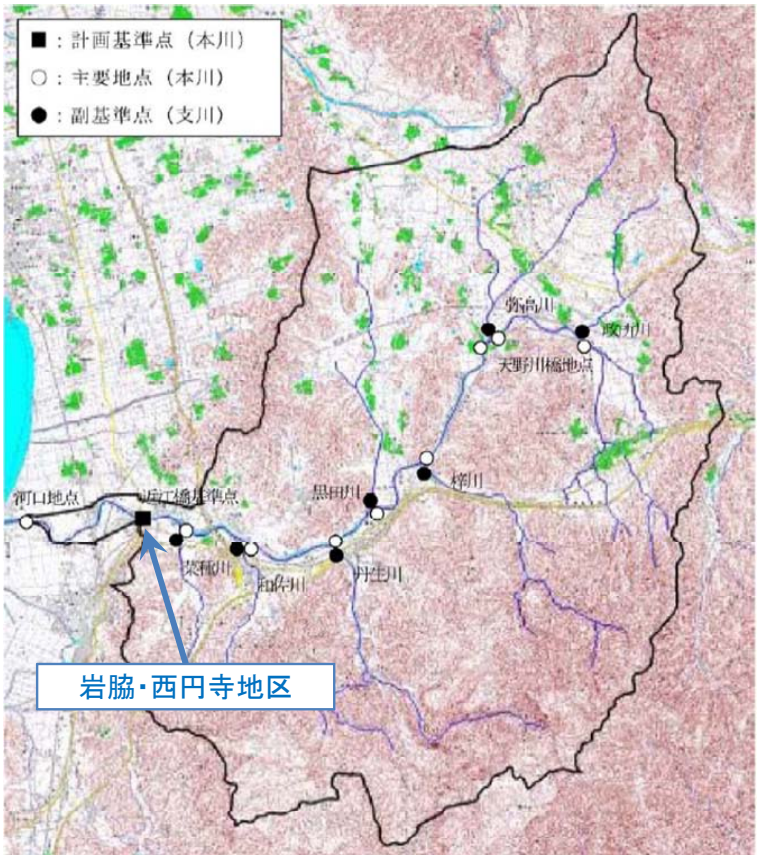


図-Ⅱ.1.1.1.5　天野川流域図　（滋賀県資料を元に作成）

②-2 岩脇・西円寺地区越流堤

岩脇地区（宅地）と西円寺地区（農地）は 3.6k 左岸付近に位置し、西円寺地区に面する近江橋から箕浦橋までの区間の堤防の高さが低く事実上の越流堤となっているため、国道 8 号と東海道本線に囲まれている低地が自然遊水地となっている（図-Ⅱ.1.1.1.6）。本調査においては、特に越流堤が保全されている背景・経緯等について着目し、文献・現地調査及び関係機関へのヒアリングを行った。

図-Ⅱ.1.1.1.6　岩脇・西円寺地区位置図（滋賀県資料をもとに作成）

②-3 調査結果概要

- 遊水機能を有している西円寺地区は、市街化調整区域、農振農用地区域となっており、開発が抑制されている。また、西円寺地区の水田は、元来から良田では無く、営農者もその状況を認識している。
- 西円寺地区で遊水機能を維持することで、直下流の岩脇地区や対岸の箕浦地区の宅地における浸水リスクが軽減されている。また西円寺地区の営農者（兼業農家）は箕浦地区や岩脇地区の住民であることから、西円寺地区の浸水リスクとともに、当該地域が有している遊水機能についても認識した上で、営農を続けている。
- よって、「営農上の制約を受ける代わりに宅地の浸水被害軽減を図る」という利害衡平について、当該地区全体では十分に認識されているとともに、そのバランスが適切な状態にあると判断されているため、越流堤が現在でも保全されていると思われる。

③藤代地区耐水型地域整備事業（茨城県小貝川）

③-1 小貝川の概要

小貝川は栃木県の平野部より発し、平坦な広野を流下して、茨城県の西部を鬼怒川と平行するように貫流し、古来より農業の発展に寄与してきた。その反面、流域が低地であったため、常に洪水の危険性にさらされており、特に下流部に位置する旧藤代町（現取手市）付近では何度も破堤による被害が生じている。また、氾濫形態が完全閉塞貯留型であるため、湛水は長時間続き、被害が甚大となりやすい地域である（図-Ⅱ.1.1.1.7）。

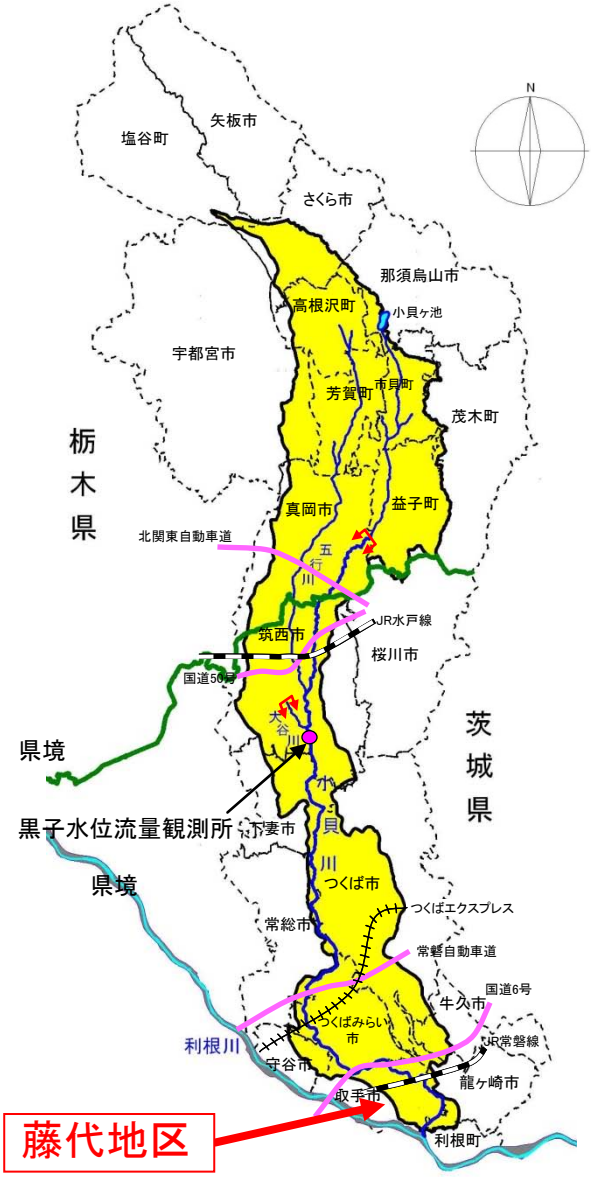


図-Ⅱ.1.1.1.7　小貝川流域図（茨城県資料をもとに作成）

③-2 藤代地区耐水型地域整備事業

完全閉塞貯留型氾濫による被害を受けやすい地域である藤代地区では、水害に強いまちづくりと一体となって浸水被害の防止・軽減を図る観点から氾濫流制御施設の整備を行う耐水型地域整備事業が平成4年から平成16年まで実施された（図-Ⅱ.1.1.1.8）。

耐水型地域整備事業の目的は、氾濫時の水位を考慮に入れた既存道路の嵩上げを行い、氾濫を一時滞留させて被害を軽減するとともに、洪水到達時間を遅らせ、避難時間の確保を図るものである。本調査においては、特に道路嵩上げに伴う浸水リスク変化等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

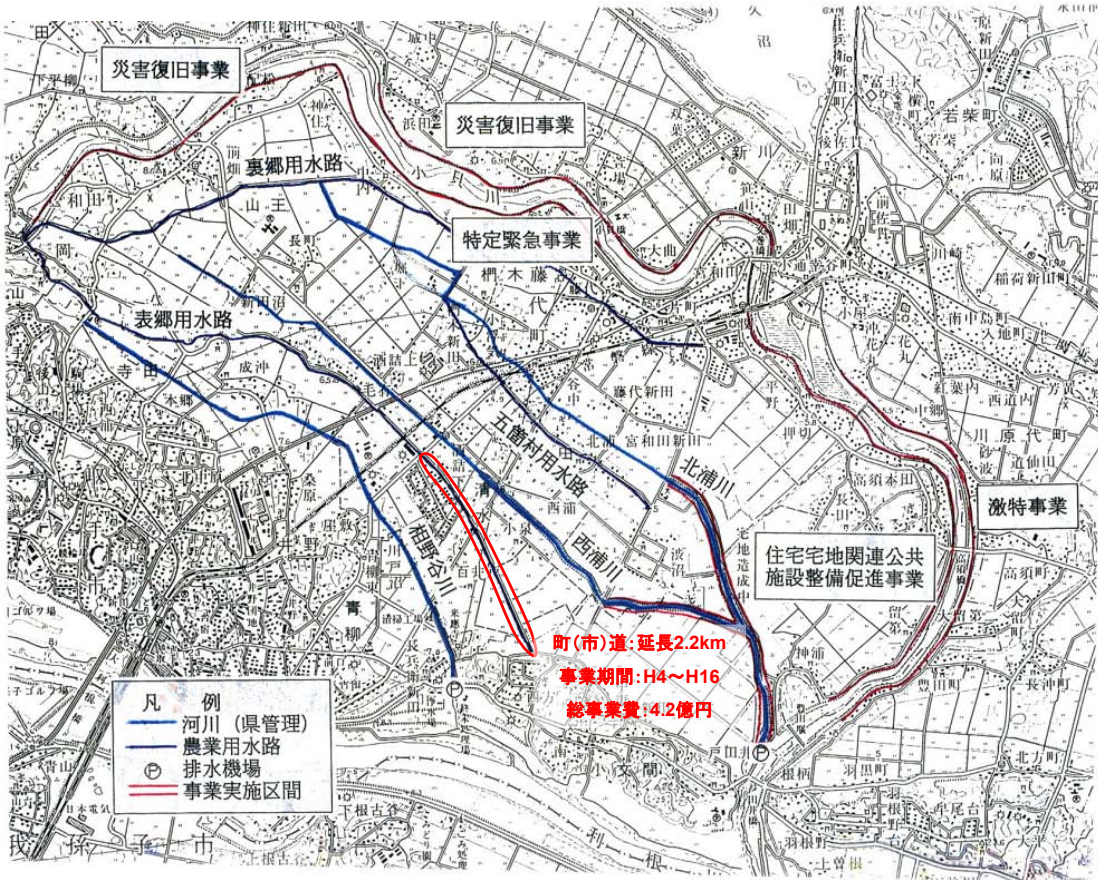


図-Ⅱ.1.1.1.8　藤代地区耐水型地域整備事業位置図　（茨城県資料を元に作成）

③-3 調査結果概要

- 水害常襲地区であるため、浸水が想定されている地域の大部分は市街化調整区域となっており、遊水機能が保全されている。
- 当事業の目的の一つは、地区全体における被害を軽減させること（水深低下区域の面積が水深上昇区域の面積を上回ること）であった。しかし、地元等との調整を経た結果、最終的には、嵩上げ盛土による浸水リスクの変化（盛土により上流側は従前以上に被害を受ける）を回避するために嵩上げは行わず、避難路としての機能を高める整備（歩道拡幅）に留まった。このことから、水害常襲地区である当該地区においては、地先レベルにおける既存のリスクバランスの維持が極めて重要視されていることが判明した。

④建築物の浸水対策に関する条例（滋賀県草津市）

④-1 草津市の概要

草津市は滋賀県の南東部、いわゆる湖南地域にあり、北は守山市、東は栗東市、南は大津市、そして市の西側は琵琶湖に接している。市の地形的特徴の一つとして天井川があり、沖積低地を流下する主な河川（葉山川、草津川、伯母川、北川、狼川）の殆どが堤内地よりも高いところを流れる天井川である。そのうち、市の中央を流れている草津川については平成 14 年に放水路が完成しているが、それ以外の天井川や沖積低地を流下する小河川の排水能力は低いため、梅雨期や台風時には田畑や道路が冠水し、住宅の一部が浸水する等の内水氾濫がしばしば発生している。

④-2 建築物の浸水対策に関する条例

市街地での浸水対策を推進するために、草津市では「建築物の浸水対策に関する条例」を平成 18 年から施行した。この条例は集中豪雨等による建築物及びその利用者の被害を未然に防ぐために、市と市民および事業者の責務を明らかにするとともに、建築物の浸水対策に関する必要な事項を定め、もって市民が安心して暮らすことができる安全なまちづくりに寄与することを目的としている。本調査では、特に条例制定に至った背景・経緯等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

④-3 調査結果概要

- 一般的に人命への影響等を及ぼすリスクが非常に高いというわけではないことから草津市では建築基準法の災害危険区域の指定が困難である。しかし、浸水頻度や今後予想される水害規模の増大を踏まえて、災害危険区域が指定されない結果規制がなされない建築物についても浸水対策を推進する観点から条例が制定された。
- 条例の施行によって浸水対策の情報提供や整備指針の指導が行われている。これに当たって、法的根拠を持つ水害リスクの情報として（水防法に基づく）浸水想定区域図を基にした「浸水のおそれのある区域」を示すとともに、民間の建築物も対象に含め浸水対策の規制・指導を行うための条例となっている。
- 公表されている琵琶湖、草津川、金勝川と野洲川の浸水想定区域図を重ねることによって示される「浸水のおそれのある区域」内の建築物のうち、水害時に防災活動拠点、避難所となる施設を特定建築物として位置づけている。特定建築物の新築・改築にあたり、「浸水のおそれのある区域」に示されている想定浸水深を考慮した浸水対策の実施が義務づけられており、既存の特定建築物の浸水対策は努力義務とされている（図-Ⅱ.1.1.1.9）。
- 特定建築物以外では、「浸水のおそれのある区域」において地下室あるいは非常用エレベーターを設置する場合は届出対象の建築物と位置づけ、建築確認申請時に浸水対策内容の届出を求めている（図-Ⅱ.1.1.1.9）。
- 高い開発圧力を背景に、農家の分家住宅等農地の宅地化も散見されており、市街化調整区域・農振農用地区域の開発規制や災害危険区域の設定による建築規制といった既存制度で規制が困難なものに対する対象となる建築物の追加設定という上乗せ・横出しの規制の役割を担っていると考えられる。

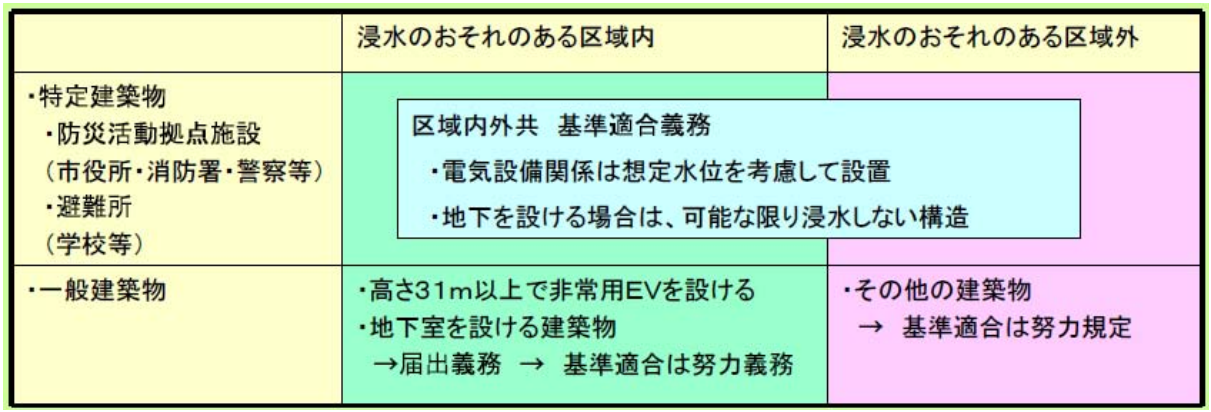


図-Ⅱ.1.1.1.9　草津市建築物の浸水対策に関する条例の仕組み

（草津市都市建設部：草津市における地域防災の取り組み「草津市建築物の浸水対策に関する条例」:「洪水ハザードマップ」より抜粋）

⑤雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（埼玉県）

⑤-1 埼玉県の概要

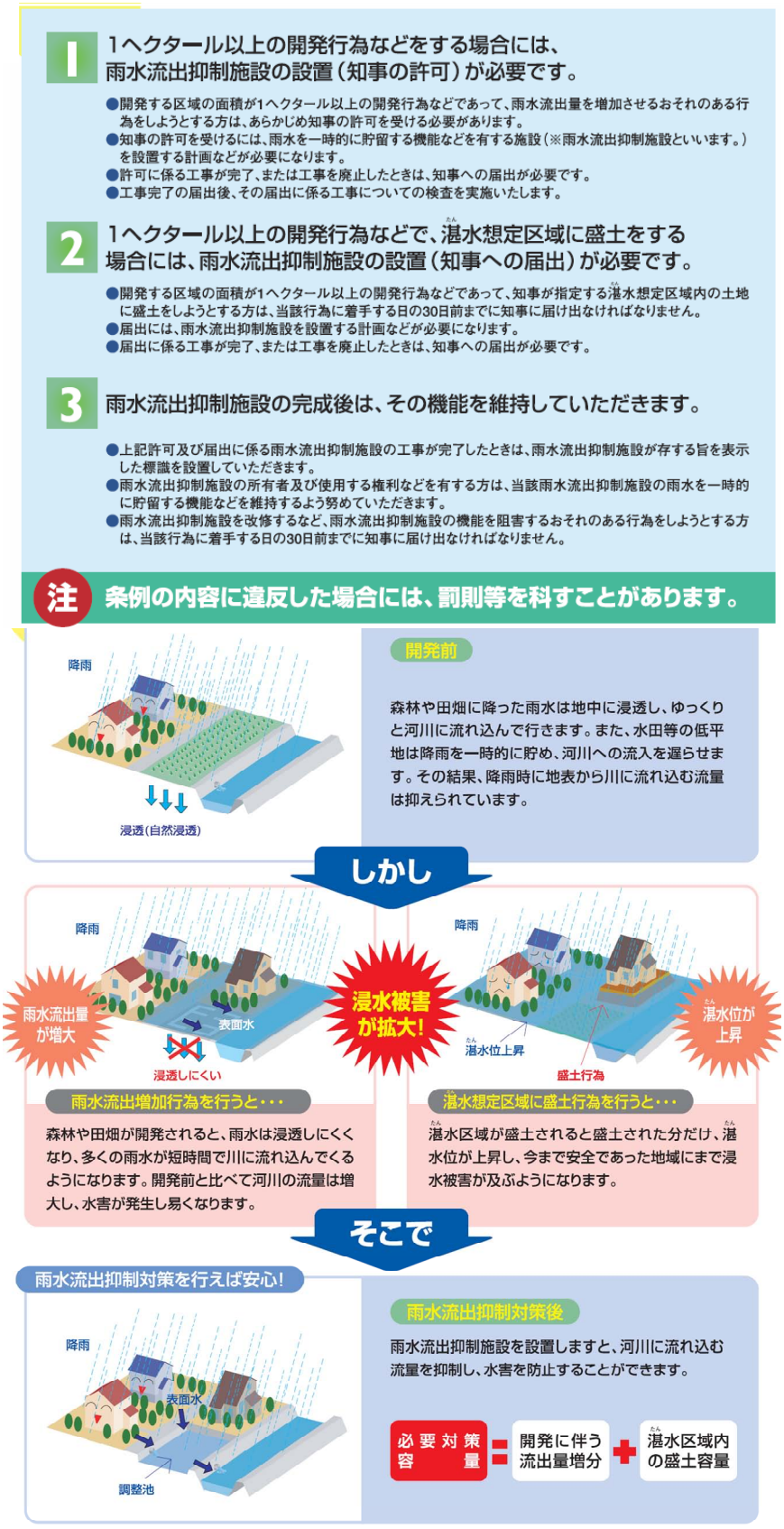
埼玉県では、高度成長期以降に急速に都市化が進展したことにより、特に地形的に浸水しやすい中川低地や荒川低地を中心に、甚大な水害が幾度となく発生している。このような状況に対し、水害の都度、災害復旧事業による再度災害防止対策を実施するとともに、予防保全的な治水対策が強力に推進されてきた結果、浸水戸数は着実に減少してきているものの、その整備水準は低く、依然として河川改修が進んでいない流域では浸水被害が頻発している。

⑤-2 雨水流出抑制施設の設置等に関する条例

近年、突発的・局所的な集中豪雨が発生していること、その発生が今後増加すると予想されることより、流域における浸水被害対策を一層強化する必要があった。そこで、雨水流出量を増加させる恐れのある行為及び過去の洪水状況を基に湛水することが想定される土地での盛土行為に関し、雨水流出抑制施設の設置等の必要な規制を行うことにより、浸水被害の発生及び拡大を防止し、もって県民の生命、身体及び財産の安全の確保に寄与することを目的として、埼玉県は平成 18 年から「雨水流出抑制施設の設置等に関する条例」を施行した。本調査では、特に条例制定に至った背景・経緯等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

⑤-3 調査結果概要

- 昭和 43 年から 1ha 以上の開発行為などを行う者を対象に雨水流出抑制施設を設置するよう行政指導が行われ、流域での浸水被害対策の一層の推進のため、行政指導の内容をより明確にし、公平性、厳格化を図るとともに、浸水被害の発生、拡大を抑制するために条例を制定した。
- 規制内容は、1ha 以上の開発行為などで、雨水流出抑制施設を設置しないと雨水流出量を増加させる恐れのある行為（「雨水流出増加行為」）をしようとする場合や湛水想定区域に盛土をする場合、雨水流出抑制施設の設置等の設置により浸水被害の発生・拡大を抑制するものである（図-Ⅱ.1.1.1.10）。
- 湛水想定区域とは、「現在の河川整備状況を踏まえ、過去における洪水の状況を基に、湛水することが想定される区域として知事が指定する区域」（条例第 10 条）とされ、区域及び想定湛水深を表示した「湛水想定図」が公表されている。



図－Ⅱ．1．1．1．10　埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例の主な内容

（埼玉県：安心・安全な暮らしのために　埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（パンフレット）より抜粋）

⑥土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例（静岡県沼津市）

⑥-1 沼津市の概要

沼津市は静岡県の東部に位置し、東に清水町、三島市、西に富士市、南は駿河湾に面した伊豆半島に連なり、北には愛鷹山を擁している。特に市西部地区は、富士川などからの流出土砂により形成された海岸砂丘の内側にできた低湿地帯であり、広大な流域を持つ愛鷹山を背後に抱えていることから、河川の勾配が極めて小さいうえ、流出する雨水量が多く、低地部の浸水が発生しやすいという地形的特性があり、近年では平成 19 年 7 月の台風 4 号で沼川が氾濫し、家屋被害が発生している。

⑥-2 土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例

平成 15 年ごろから市西部の浮島地区の農地（休耕地・耕作放棄地）で建設残土の不適切な埋立て盛土が見られるようになった。元々、市街化調整区域で農振農用地規制を外した区域において、国道からのアクセスが良いことなどを理由に農地における盛土がなされるようになり、結果周辺の土地の隆起による水の流れの変化や、盛土崩壊、農地の荒廃地化等による影響が生じるようとともに、浮島沼にしか存在しない植物の保全を図る必要があった。そこで、土砂等による土地の埋立て、盛土等について必要な規制を行うことにより災害の防止及び環境の保全を図り、もって安全で良好な生活環境を確保することを目的として、沼津市は平成 22 年から「土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例」を施行した。本調査では、特に条例制定に至った背景・経緯、治水施策への効果等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

⑥-3 調査結果概要

- 条例としては、盛土による周辺地盤の隆起等や耕作放棄地・休耕地等、荒廃地化等を防止する農地保全が主旨であり、県が既に規制している盛土よりも小規模なものも対象としていることから、実態上は既存規制に対する上乗せ・横出し規制としての位置づけとなっている（表-Ⅱ.1.1.1.1）
- 元来が農地対策であるため、直接的に水害リスクを考慮して遊水機能の維持を図ったものではなかったが、盛土の規制を行うことで、従前遊水機能を有していた水田が保全されることとなり、結果的に遊水機能を維持する施策としても機能している（図-Ⅱ.1.1.1.11）。
- 条例の主目的ではないが、対象地域周辺に存する低地帯の浸水被害対策である「沼川（高橋川）流域豪雨アクションプラン」における流出抑制対策（農地等の遊水機能の保全）にも寄与する結果となっている。

表-Ⅱ.1.1.1.1　沼津市土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例の概要

目的	土砂等による土地の埋立て、盛土等について必要な規制を行うことにより災害の防止及び環境の保全を図り、もって安全で良好な生活環境を確保することを目的とする。
適用範囲	⑴ 事業区域の面積が 500 平方メートル以上かつ盛土の高さが 1 メートル以上の事業 ⑵ 土砂等の量が 500 立方メートル以上の事業 ⑶ ⑴⑵に該当しない事業であって、当該事業区域と一団と認められる区域において事業の許可に関する市長への申請の日前 3 年以内に事業が行われ、又は行われている場合は、当該事業区域及び当該事業区域と一団と認められる区域における事業に係る面積又は土砂等の量の合計が、⑴⑵のいずれかに該当する事業
適用外事業	⑴ 国、地方公共団体その他規則で定める公共的団体が行う事業 ⑵ 他の法令の規定による許可、認可等に基づき行う事業。ただし、農地法第 4 条第 1 項又は同法第 5 条第 1 項の許可を受けて行うものを除く。 ⑶ 非常災害のため必要な応急措置として行う事業

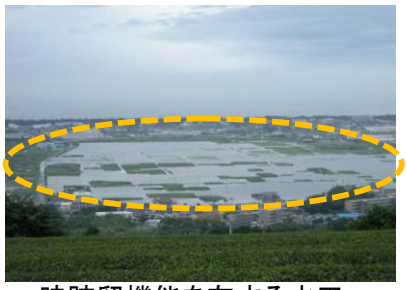
【事例】静岡県沼津市～雨水の一時貯留機能の保全

・沼津市では、市街化調整区域に工事残土が埋立てられ、市街化調整区域の雨水の一時貯留機能の能力が低下。
・市街化調整区域での不適切な埋立てを防ぐため盛土条例を制定し、規制することにより雨水の一時貯留・浸透機能の保全が図られる。

沼津市土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例
（平成22年7月施行）

■条例の目的
市街化調整区域における、農地や山林への、埋立てや盛土が引き起こす、周辺への土砂流出や環境破壊の防止。

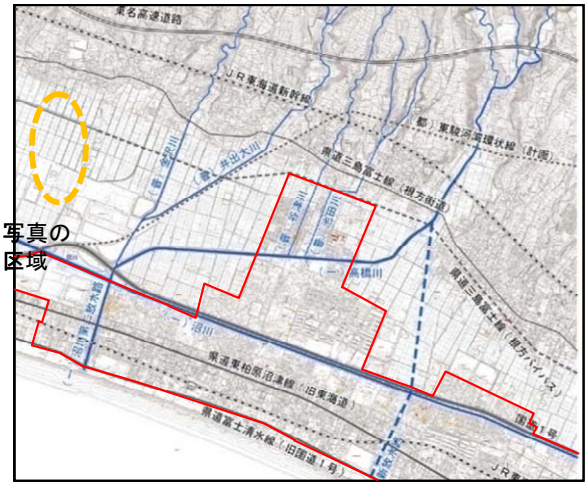
■規制の対象・範囲
土砂の埋立てや盛土を行う事業主は、申請書及び添付書類を市長に提出し許可が必要。
・対象行為　：土砂による土地の埋立て、盛土
・対象区域　：市街化調整区域
・適用範囲　：・事業区域の面積が、500㎡以上かつ盛土の高さが1ｍ以上
・土砂等の量が、500㎥以上　　等



一時貯留機能を有する水田

沼津市写真提供

不適切な盛土　　沼津市写真提供



図－Ⅱ.1.1.1.11　沼津市における雨水の一時貯留機能保全状況の概要

（社会資本整備審議会 都市計画・歴史的風土分科会 都市計画部会 安全・安心まちづくり小委員会資料を元に作成）

b)まとめ

本調査で収集した事例のうち、まずは条例以外の事例について、表-Ⅱ.1.1.1.2に整理した。

表-Ⅱ.1.1.1.2　流域一体となった浸水被害軽減方策の事例（条例以外）

河川名	対象地域	対象とした事例の概要	地域が有する遊水機能の状況、浸水被害軽減策				地域特性、土地利用の状況				浸水被害の可能性の変化とその対応
			浸水の状況	被害の対策			地域の認識	土地利用			
			従来の浸水の状況	遊水機能を有する地域への施策	住宅の被害軽減策	現状において自然遊水機能が存置されているか？	自然遊水機能に関する認識	開発圧力	土地利用の規制	その他遊水機能を有する農地が維持されている要因	施策実施による浸水被害の可能性の変化への対応
桜川	つくば市 北大田、君島地区 等	・昭和61年の水害を契機に水防災対策事業を実施 ・北大田、君島地区の一部で無堤区間を存置 ・宅地防御対策を目的に輪中堤を整備	浸水常襲地域	無堤区間を存置 計画高水位で浸水する区域を水防災対策特定地域に指定し開発抑制に努める	輪中堤整備	○	当該地域の湛水によって下流の洪水被害が軽減されていると認識	低い	市街化調整区域 農振農用地区域	水田なので少人数での耕作が可能のため	輪中堤の整備によって下流で想定される洪水リスクの増加に対応するために河道掘削を実施 田土部構堤は下流のリスク上昇を回避するため存置
桜川	桜川市 岩瀬地区	・土地区画整理事業によって必要となった防災調整池3箇所の内、1箇所で田畑の遊水機能を活用	浸水常襲地域	水田の遊水機能を考慮し、防災調整池とみなす	—	○	出水時には一帯が湛水してしまう地域と認識	低い	市街化調整区域 農振農用地区域	土地区画整理事業で防災調整池を整備すると公共減歩が大きくなってしまうのを避けるため	現状より水田の収穫量が減収にならないことが条件
天野川	米原市 岩脇・西円寺地区	・昭和34年に甚大な洪水被害を受けて、災害復旧助成事業を実施 ・岩脇集落や箕浦集落の住宅地の洪水被害を抑制するために西円寺の越流堤を存置	浸水常襲地域	越流堤を存置	特になし （集落部の水川に堤防・護岸あり）	○	西円寺の越流堤存置によって岩脇集落や箕浦集落の浸水危険性軽減がされていると認識	低い	市街化調整区域 農振農用地区域	水田なら兼業農家でも耕作が可能のため 地権者・営農者が混在しており、土地利用用途変更の際の調整が困難であるため	—
小貝川	取手市 藤代地区	・耐水型地域整備事業を実施 ・氾濫形態が閉鎖貯留型氾濫であるため、氾濫する前の避難が必要 ・道路盛土等の氾濫流制御施設を整備、避難路を確保	浸水常襲地域	—	氾濫流制御施設として道路盛土を拡幅し、避難路として整備	○	利根川本川の背水による影響や小貝川の氾濫による被害を受けやすい低地と認識	—	主として 市街化調整区域	—	氾濫流制御施設整備による被害軽減額が負とならないことが条件 浸水深低下地域の面積が上昇地区の面積を上回ることが条件

表-Ⅱ.1.1.1.2 より、各事例の特徴の類似点について整理すると以下のようなことが挙げられる。

今回調査を行った事例は、遊水機能を有する土地が維持され、その機能の活用をした上で、さらに遊水機能を有する土地やそれに隣接する宅地等の被害軽減のための各種施策が実施されているものであると考えられる。

そもそも遊水機能を有する土地が維持されている地域は、従来からの浸水常襲地域である場合が多い。その中で、今回調査を行った事例は、遊水機能を存置した上で、さらに必要に応じ輪中堤整備や避難路確保等住宅や人命の被害軽減策が取られているものである。なお、ここで遊水機能を有する土地が維持されている地域においては、当該地域が浸水常襲地域であることが地元に認識されていることでその機能が維持されているようである。

また、調査した事例においては、遊水機能を有する土地が維持されている地域は市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、宅地化等の開発が抑制されているとともに、開発圧力自体も低い地域であった。このことから、付加的な土地利用規制が無くとも、開発が抑制され、結果的に遊水機能が維持されているものと考えられ、逆に、開発圧力が高い地域や市街化区域に指定された地域等では、遊水機能を有する土地の維持は困難であることが示唆される。

さらに、営農上の事情から水田を維持する方が有利であったり、土地区画整理事業に際し防災調整池を整備するより既存の遊水機能を活用した方が公共減歩が少なくて済んだりというように被害軽減以外のメリットが存在する場合、遊水機能を有する土地が維持されやすくなる事例が見られた。

この他、遊水機能を有する土地が維持されている地域で、被害軽減策が講じられる場合、遊水機能の維持によって発生する湛水で従前より農業生産上の減収とならないことや氾濫流制御施設の整備による被害軽減額が負とならないこと等、現状のリスクより悪化しないことが条件となっているものが見られた。また被害軽減策として氾濫流制御施設の整備等が行われる場合、施策の実施によって当該箇所以外のリスクが上昇することがないように代替措置が実施されたりすることから、既存の治水バランスのリスクの大小の順序が入れ替わらないことも条件となっているようである。

つまり、今回調査を行った事例においては、既存の遊水機能を有する土地での新規の開発が少ない状況を前提に、既存の遊水機能を保全することで、既存の宅地での新たな浸水被害を回避することとしており、追加的に氾濫流制御施設が整備される場合においても、その整備によって従前の浸水危険性を上回らない範囲で既存の遊水機能を活用するものであることと解することができる。

次に、条例に関する事例を表-Ⅱ.1.1.1.3 に整理した。

表-Ⅱ.1.1.1.3　流域一体となった浸水被害軽減方策の事例（条例）

事例	実施主体	施行年月	概要	追加的土地利用規制等の対象区域の設定	土地利用・建築等に関する規制の内容	浸水被害軽減の上で期待する規制効果
草津市建築物の浸水対策に関する条例	草津市	H18.9施行	・「特定建築物（水害時に防災活動拠点、避難所となりうる施設）」の新築に際し「浸水のおそれのある区域」の想定浸水深を踏まえて、浸水・耐水対策を実施しなければならない（義務付け）。既存施設については浸水対策の実施は努力義務となる。 ・それ以外の建築物については地下室あるいは非常用エレベータを設置する場合には、届出を義務とするとともに、浸水対策を努力義務とする。	○浸水のおそれのある区域 草津市建築物浸水対策に関する条例では、公表されている琵琶湖、草津川、金勝川と野洲川の浸水想定区域図を重ねることによって示される「浸水のおそれのある区域」内の建築物（公共建築物および一般建築物）を対象としている。	建築基準法の災害危険区域の対象とならないものに対する建築物の浸水対策の義務付けまたは指導。	「浸水のおそれのある区域」や浸水対策の整備指針等の情報提供により建築物の整備主体に自衛策を取らせることで被害等を防ぐ。
埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例	埼玉県	H18.10施行	・1ha以上の開発行為などに対する、雨水流出抑制施設の設置等義務付け。 ・1ha以上の開発行為などに対する、湛水想定区域での盛土時の雨水流出抑制施設の設置義務付け。 ・雨水流出抑制施設の完成後の機能の維持。	○湛水想定区域 湛水想定区域とは「現在の河川整備状況を踏まえ、過去における洪水の状況をもとに、湛水することが想定される区域として県知事が指定する区域」とされている。	開発行為などにおける雨水流出抑制施設の設置等義務付け。	雨水流出抑制対策後、河川に流れ込む流量を抑制し、水害を防止する。
沼津市土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例	沼津市	H22.7施行	・土砂の埋立てや盛土を行う事業主は、申請書及び添付書類を市長に提出し許可が必要。 -対象行為：土砂による土地の埋立て、盛土 -対象区域：市街化調整区域 -適用範囲：・事業区域の面積が、500㎡以上かつ盛土の高さが1m以上 ・土砂等の量が、500㎥以上　等	○なし 条例の主目的は元々農地の対策であるため、水害リスクにおける記述はない（結果的に水害対策として寄与）。	県条例で盛土規制の対象とならない小規模な盛土に対する横出し・上乗せでの実施規制。	結果的に対象地域周辺の低地帯の浸水被害対策である「沼川（高橋川）流域豪雨アクションプラン」における流出抑制対策にも寄与している。

表-Ⅱ.1.1.1.3 より、各事例の特徴の類似点について整理すると以下のようなことが挙げられる。

条例による対策としては、草津市、埼玉県の例から見られるように、浸水の危険性が高い箇所での開発等の可能性が出てきたことに対して、追加的な土地利用規制等を行うものである。ただし、沼津市の盛土条例に関しては、主たる目的は農地のための対策であるが、これが結果的に遊水機能の維持に貢献することになったものである。

また、草津市、埼玉県のように、浸水被害への対策を目的とした条例では、浸水の危険性について、浸水範囲等を制度的に根拠ある情報として提供して、対策実施の対象範囲を示している。既存の都市計画法等では規制の対象範囲を十分明確には示せないため、追加的な規制等を行う場合には、被害発生可能性の観点から対象範囲を明確に示した追加的情報の提供が必要であることによるものである。なお、土地利用等の規制に当たっては、草津市、沼津市では、既存の制度等では対象とならないものに対する付加的規制を行っており、既存制度の横出し・上乗せによる対応がされたものとなっている。

ただし、草津市、沼津市の条例においては、遊水機能を有する土地で開発を行う場合には、被害軽減もしくは流出抑制等の対策を実施することで、開発を可能にしており、開発に要する費用等の面から開発の抑制を誘導するものとなっている。このことは同時に土地利用規制によって地先での自衛策を促すものとなっており、その重要性が再確認されるものである。

1.1.1.2 モデル河川における遊水機能の分析・評価

a) ケーススタディ対象河川・地区の選定

2.1.3.2において、事例調査を行った河川のうち、ダム等の洪水調節施設が存在せず、遊水機能と被害軽減効果の関係が比較的把握しやすい流域特性を有する桜川をケーススタディ対象として選定した。

桜川は、流域面積349km^2、流路延長64kmの一級河川であり、田畑が広がる上流部は無堤区間、小集落が散在する中流部は有堤区間と輪中堤、市街地を有する下流部は有堤区間となっている（図-Ⅱ.1.1.1.12)。目標としている治水安全度は1/30であるが、現在の治水安全度は1/10程度となっている。

桜川においては昭和61年8月台風10号により、床上床下あわせて約1,500棟の大規模な浸水被害が発生した。この水害を契機として、中流部の北太田地区においては輪中堤が整備されているとともに、輪中堤周辺の田畑が有する遊水機能により、下流市街地に対しての洪水軽減効果を発揮している。本研究では、北太田地区周辺の田畑が有する遊水機能に着目して検討を進めることとした。北太田地区の概要を図-Ⅱ.1.1.1.13に示す。

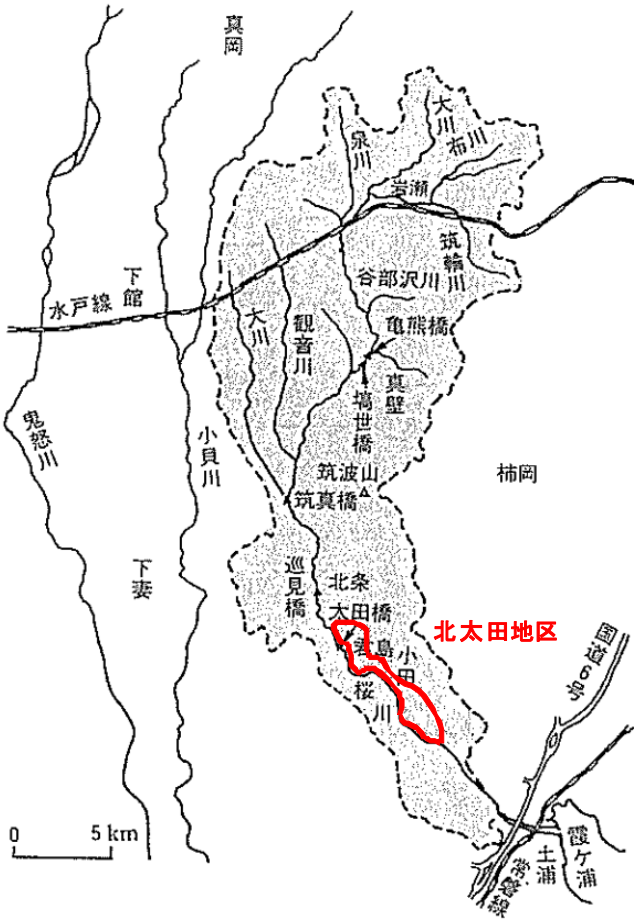
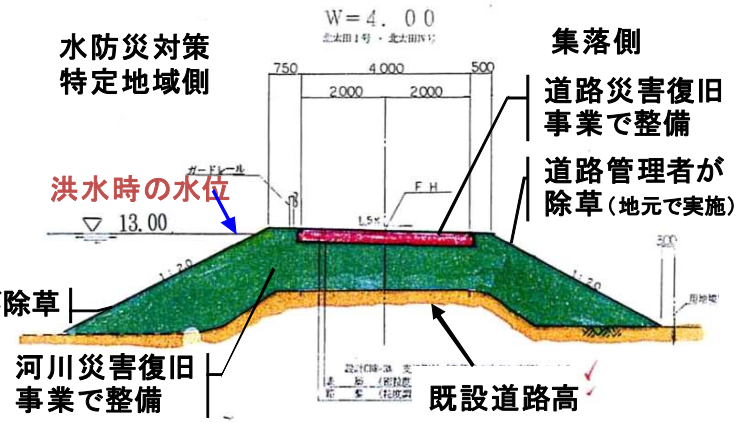


図-Ⅱ.1.1.1.12　桜川流域図（茨城県資料をもとに作成）

つくば市北太田地区の輪中堤

輪中堤横断図



- 事業期間：平成7年度～平成10年度
- 事業箇所：つくば市北太田地先
- 事 業 費 ：2億4千万円
- 事業概要：既存道路嵩上げL=1,490m

図-Ⅱ.1.1.1.13　北太田地区の概要

b)気候変動による降雨量変化の推定

気候変動による降雨量変化については、「21世紀気候変動予測革新プログラム」において、気象庁・気象研究所が開発した20kmの水平分解能を持つ高解像度全球気候モデル（GCM20）による後期実験の計算結果（現在1979～2003、将来2075～2099）から、降雨量変化率を推定した。推定手順については、柏井らの手法を用いた。データ処理及び推定手順を図-Ⅱ.1.1.1.14、地域区分を図-Ⅱ.1.1.1.15に示す。

本研究で対象としている桜川の治水計画は２日雨量に基づいていることから、現在と将来の変化率（年最大降雨量平均値の比）は、図-Ⅱ.1.1.1.16より、関東地域における降雨継続時間48hの50%タイル値を採用し、1.126倍となる。この変化率を、現治水計画における計画対象降雨(1/30規模)に乗じた降雨を気候変動による降雨として設定した。なお当該降雨の確率規模は、現治水計画に基づいて確率評価を行うと1/50程度となる。

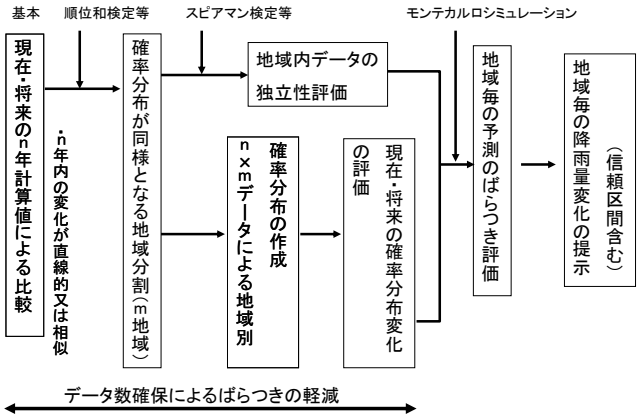


図-Ⅱ.1.1.1.14 将来の年最大降雨量変化のデータ処理及び推定手順

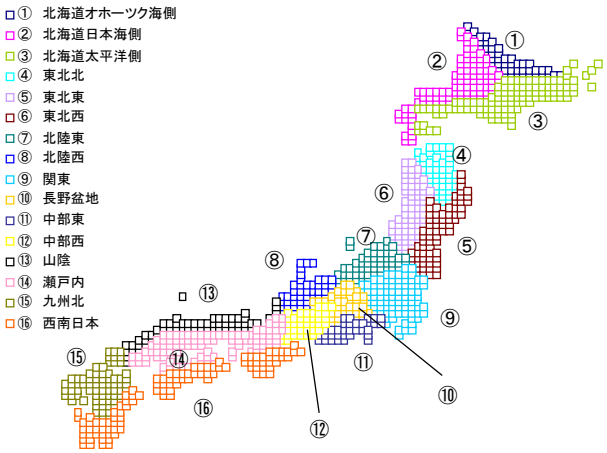


図-Ⅱ.1.1.1.15　地域区分と GCM20 格子点

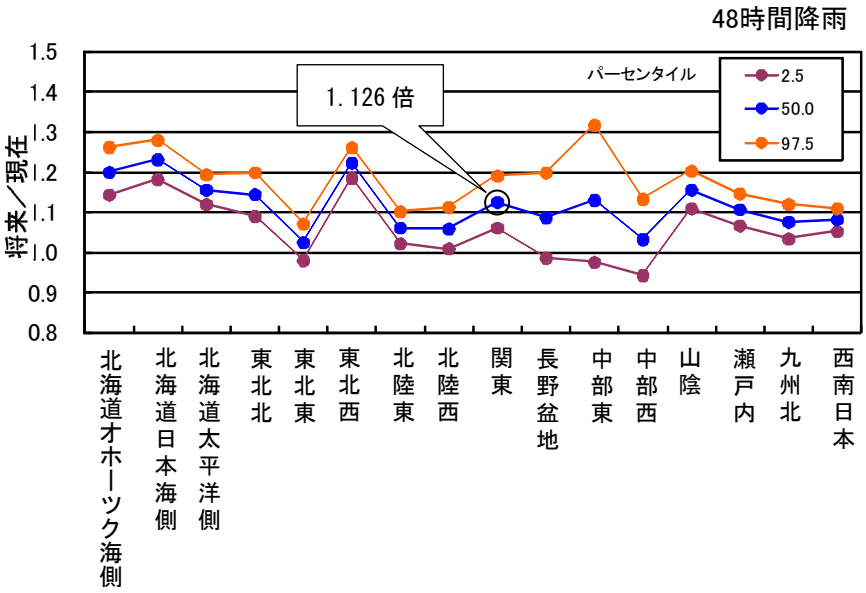


図-Ⅱ.1.1.1.16　各地域における年最大降雨量平均値の将来と現在の比（降雨継続時間：48 時間）

c)現況における遊水機能の分析・評価

北太田地区の遊水機能を評価するために、現況ケース（ケースA)、北太田地区を現計画堤防高による連続堤で整備したケース（ケースB）の2ケースを設定した。ケースＢの設定条件を図-Ⅱ.1.1.1.17に示す。

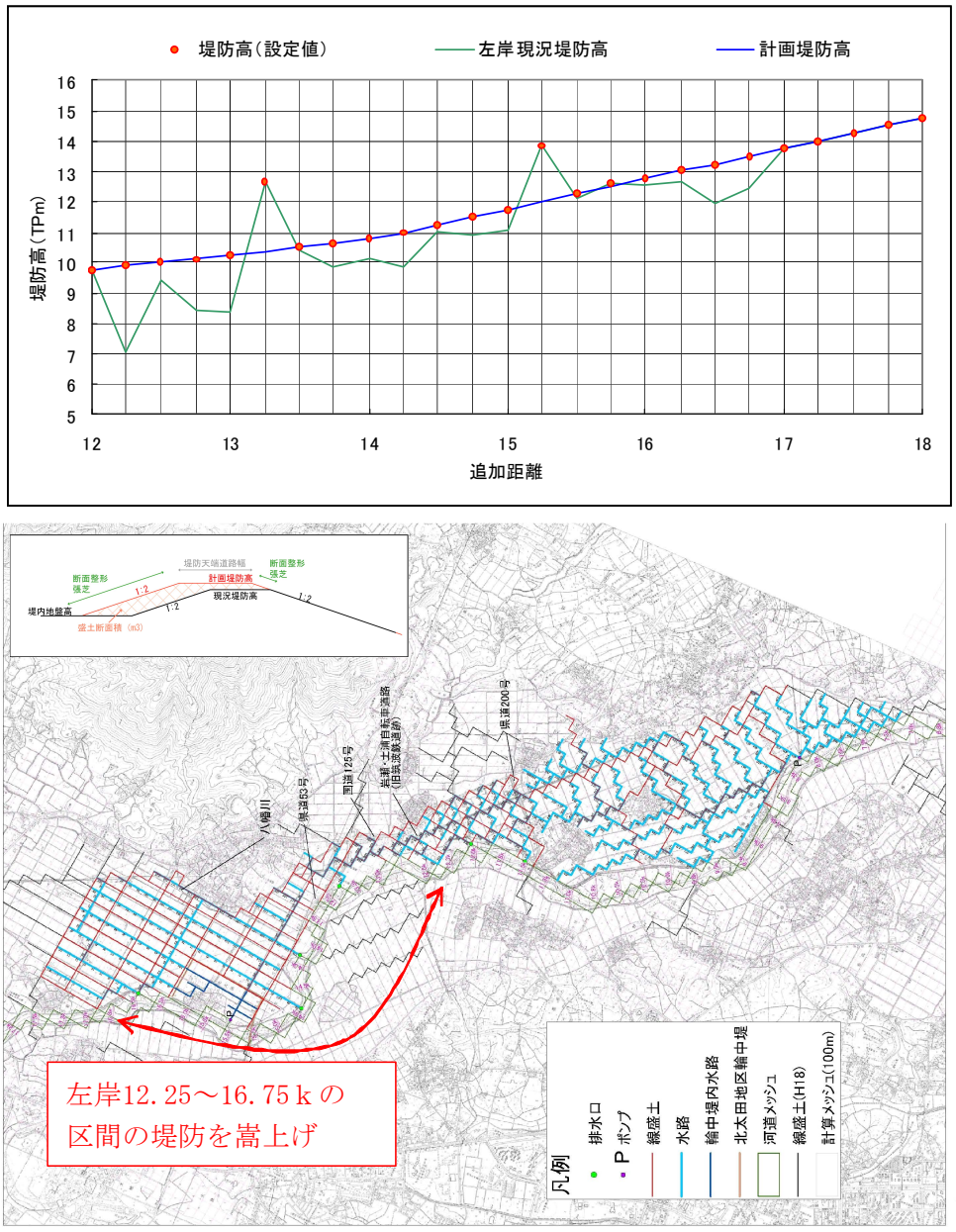


図-Ⅱ.1.1.1.17　ケースＢの設定条件

外力設定は、降雨波形は現治水計画における昭和22年9月洪水型とし、確率規模は1/10、1/20、1/30及び気候変動規模(1.126倍)とした。治水経済調査マニュアル(案)に準じて、流域全体の浸水被害額（一般資産被害額）を氾濫ブロックごとに計算・整理を行い（表-Ⅱ.1.1.1.4)、ケースA、B間の比較分析（被害額の増減比）を行ったものを図-Ⅱ.1.1.1.18に示す。図中のL1～L5は左岸域、R1～R3は右岸域の氾濫ブロックを示している。なお、現況の流域特性（地形、氾濫形態、リスクバランス等）と被害軽減効果の関係をまずは把握するため、破堤地点を想定せず、越水（溢水）による被害額にて評価を行った。

表-Ⅱ.1.1.1.4　氾濫ブロックごとの一般資産被害額（単位：百万円）

ケースA

	1/10	1/20	1/30	1.126倍
L1	0	0	0	0
L2	370	529	562	607
L3	337	794	879	973
L4	0	57	115	198
L5	1,117	2,678	2,985	3,732
R1	0	1,108	3,733	9,284
R2	401	1,238	1,431	1,876
R3	938	3,301	4,112	5,476
全流域	3,164	9,705	13,817	22,146

ケースB

	1/10	1/20	1/30	1.126倍
L1	0	0	0	0
L2	0	0	0	0
L3	0	214	267	343
L4	0	57	115	198
L5	1,117	2,678	2,985	3,732
R1	23	6,507	8,464	31,251
R2	771	1,706	1,824	2,168
R3	938	3,301	4,112	5,476
全流域	2,850	14,463	17,767	43,168

ケースC

	1/10	1/20	1/30	1.126倍
L1	0	0	0	0
L2	361	531	562	607
L3	333	716	783	876
L4	0	57	115	198
L5	1,117	2,678	2,985	3,732
R1	0	2,601	5,687	13,665
R2	401	1,298	1,447	1,876
R3	938	3,301	4,112	5,476
全流域	3,150	11,183	15,691	26,430

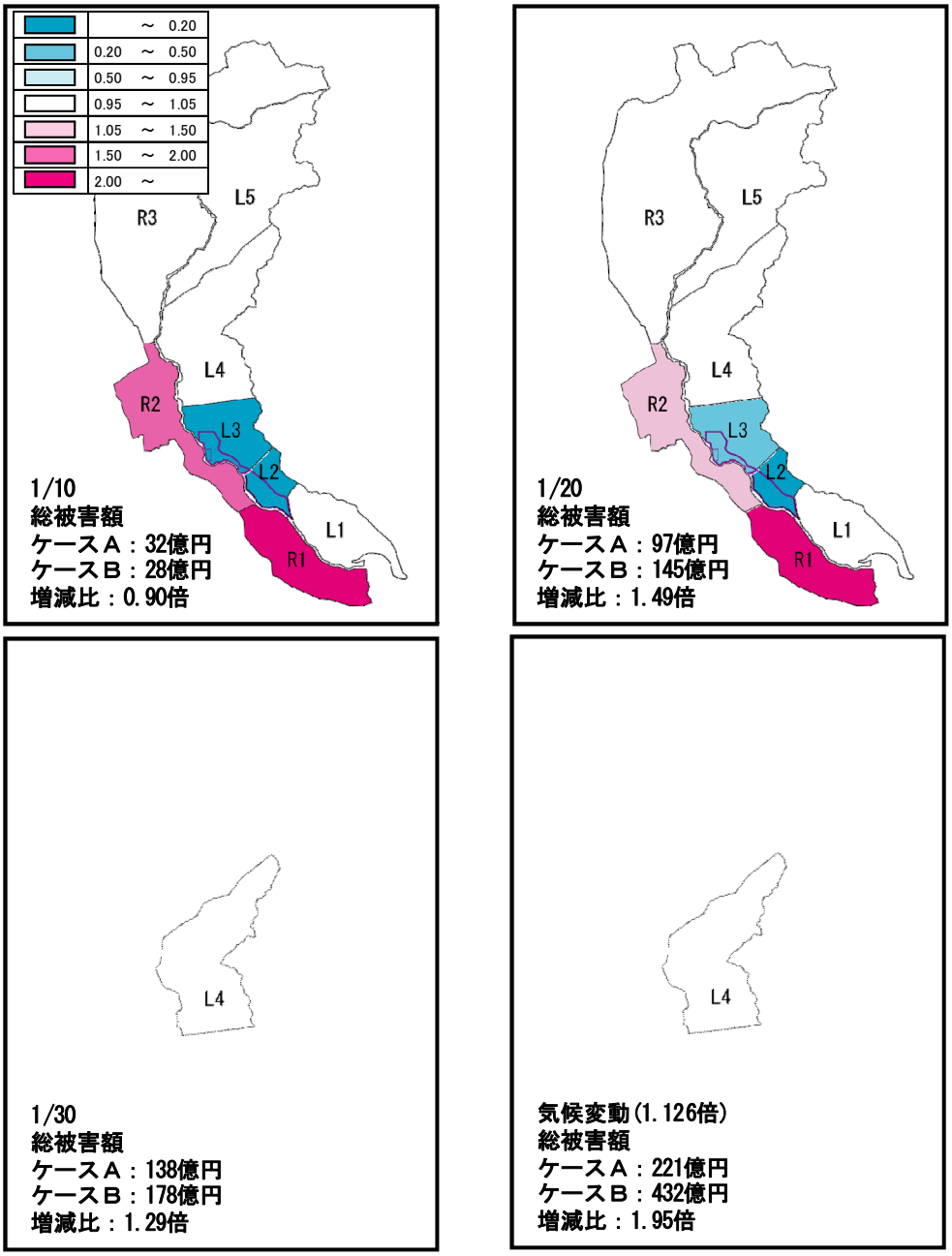


図-Ⅱ.1.1.1.18　氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースＢ／ケースＡ）

現状の治水安全度と同等の1/10規模では、R1･R2で被害額が増加しているが、L2･L3の減少額が大きいため、流域全体としては被害額が減少している。つまり、連続堤整備（ケースB）の方が有効であることが分かった。

一方、1/20規模、1/30規模及び気候変動規模においても、1/10規模と同様な傾向が見られるが、R1･R2の増加額がL2･L3の減少額を上回っているため、流域全体としては被害額が増加している。つまり、現況（ケースA）の方が有効であることが分かった。

d) 浸水許容条件を設定した場合の遊水機能の分析・評価

遊水機能を保全することは、一方で氾濫による被害リスクが存在し続けてしまうという側面もあるため、例えば、地域の合意形成等において、大きな課題となることも考えられる。

そこで、「宅地の被害を皆無にするとともに、田畑の被害リスクを最低限に抑える」ことを目標としたケース設定（ケースC）を行い、3と同様の分析を行った。

具体的には、北太田地区の輪中堤のかさ上げに加え、田畑が存する区域に対しては、土地改良事業計画設計基準に基づき、「浸水深30cm以上が24時間以内」という浸水許容条件を満たすように排水路や樋門等を設定した。確率規模別の排水路、樋門の設定条件を図-Ⅱ.1.1.1.19に示すとともに、ケースB、C間の比較分析（被害額の増減比）を行ったものを図-Ⅱ.1.1.1.20に示す。

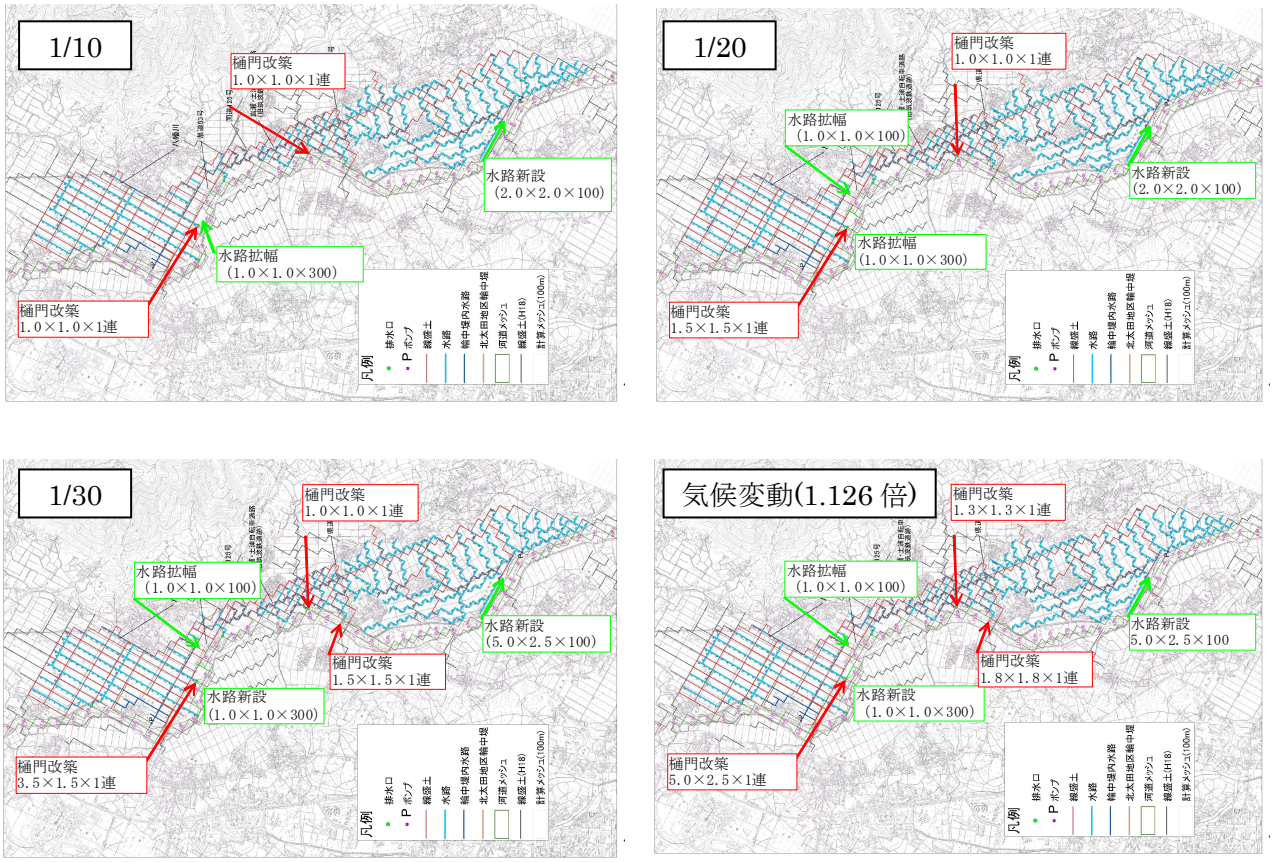


図-Ⅱ.1.1.1.19　ケースCの設定条件

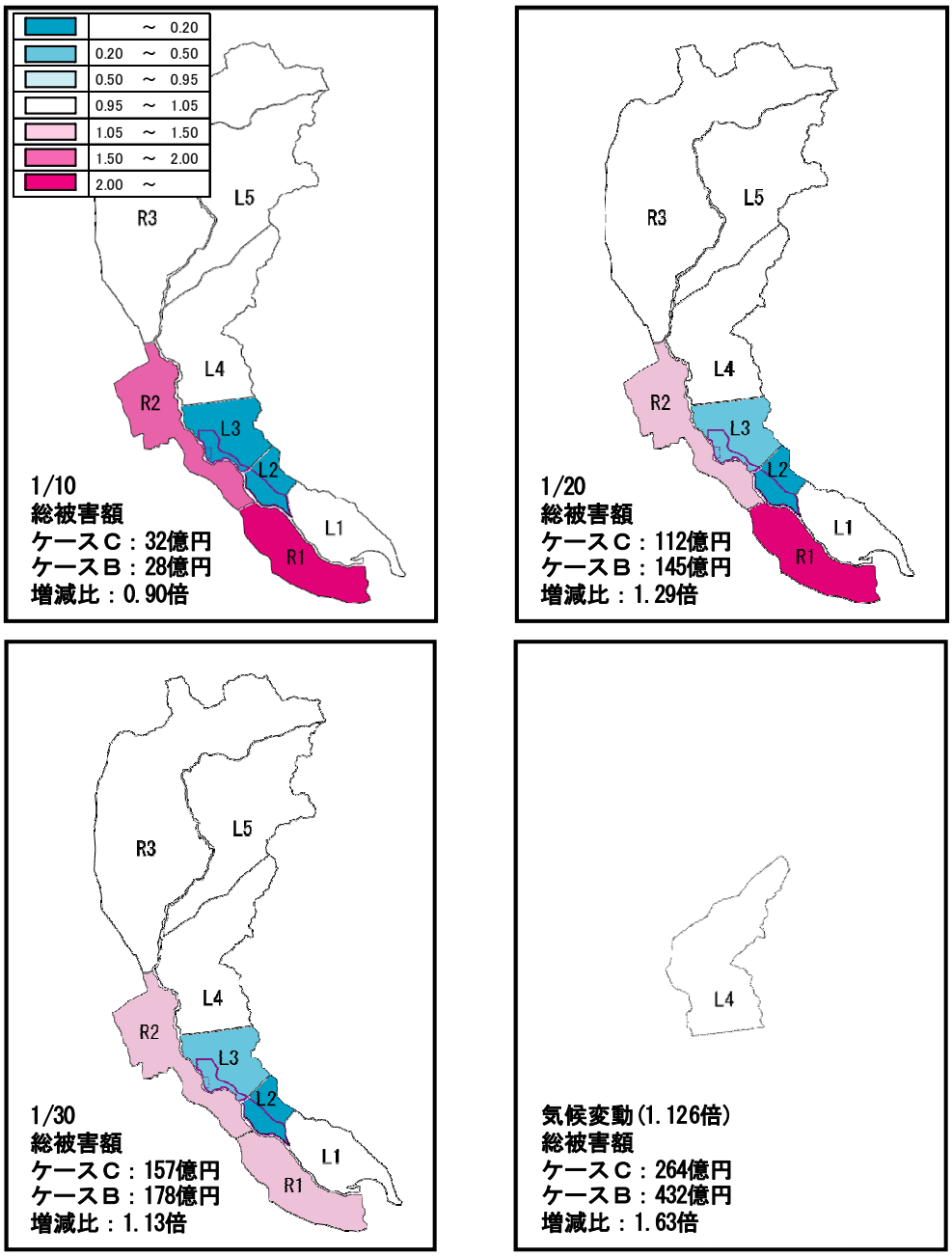


図-Ⅱ.1.1.1.20　氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースＢ／ケースＣ）

図-Ⅱ.1.1.1.10より、現状の治水安全度と同等の1/10規模では、R1･R2で被害額が増加しているが、L2･L3の減少額が大きいため、流域全体としては被害額が減少しており、連続堤整備（ケースB）の方が有効であることが分かった。

また、1/20規模、1/30規模、気候変動規模においても、1/10規模と同様な傾向が見られるが、R1･R2の増加額がL2･L3の減少額を上回っているため、流域全体としては被害額が増加しており、連続堤整備（ケースB）より浸水許容条件設定（ケースC）の方が有効であることが分かった。

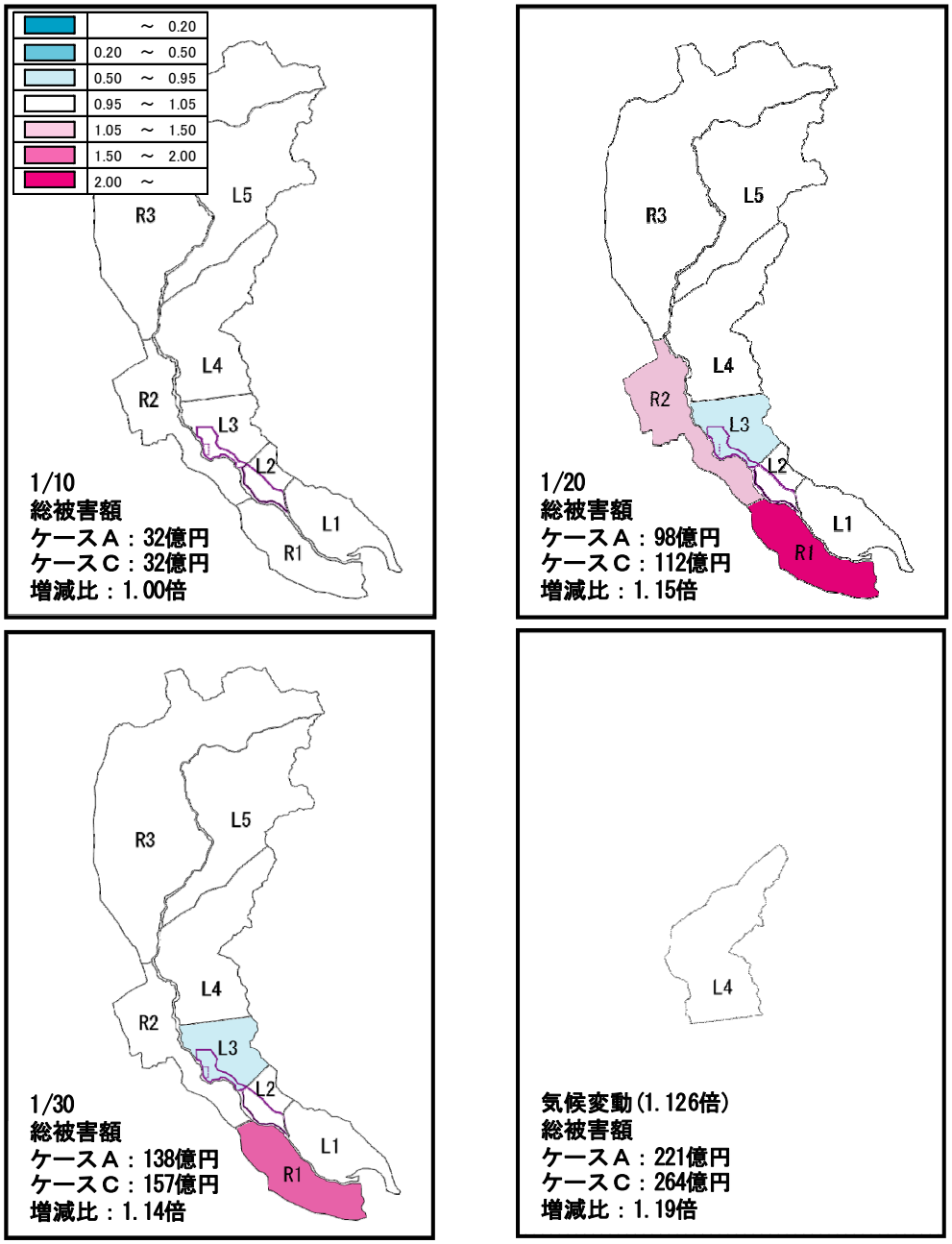


図-Ⅱ.1.1.1.21　氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースＣ／ケースＡ）

さらに、ケースA、C間を比較分析（図-Ⅱ.1.1.1.21）してみると、1/10規模においては、流域全体及び氾濫ブロックごとの被害額が同程度となっている。この要因としては、浸水許容条件として設定した排水路等が、結果として、河道のピーク流量を軽減するバイパス的な機能を果たし、L1やR1･R2へのリスク転嫁がなされていないことによるものである。

なお、1/20規模、1/30規模、気候変動規模においては、図-Ⅱ.1.1.1.20の傾向と同様に、R1･R2の増加額がL3の減少額を上回っているため、流域全体としては被害額が増加しており、浸水許容条件設定（ケースC）より現況（ケースA）の方が有効であることが分かった。

e)まとめ

以上より、1/20、1/30並びに気候変動規模の降雨に対しては、北太田地区の遊水機能の保全により、流域の総被害額が軽減されることが確認できた。

一方で、気候変動適応策としての有効性・実現性の検証を進める上では、外力設定について課題が見出された。具体的には、気候変動による降雨の変化率は、各気候モデルにより異なるとともに、想定された変化率を超える超過外力も発生する可能性もある。さらに本研究では降雨波形は現治水計画に基づく1波形のみの検討に留まっている。

従って、将来予測の不確実性への適応度を評価するためには、より高解像度化された最新の気候モデルによる計算結果を採用するとともに、例えば、複数の降雨波形を設定するなどし、外力の設定ケースを可能な限り増やした上で検証をさらに積み重ねる必要がある。

1.1.2　沿岸環境の変化現況と気候変動に向けた外力設定

1.1.2.1　はじめに

沿岸の外力は、潮位（水深、海面高さ）、波浪、地形によって決定される。これらは、相互的な関係となっている。本項では、気候変動によって一次的に影響を受ける潮位と波浪について、変化傾向もしくは兆候を把握し、近い将来に向けた外力設定の方向性を検討することが狙いである。

海面高さの変化は、海岸構造物の性能、砂浜の侵食、河川の出発水位、塩水の土壌侵入、サンゴ・有孔虫の生息域等の様々な分野に影響を及ぼす重要な現象である。特に、気候変動への適応を考慮した海岸保全施設等の計画・設計を導入しようとする際に、現在まで(既上昇量)と将来へわたる海面上昇量を設定することは避けて通れない。海面の上昇量については気象庁による値が出ているが、事業への反映においては全国一律設定を基本とし沿岸毎の違いによる修正とするのが妥当である。これには、各沿岸の海面変化を把握するために潮位データをより綿密に補正しつつ大胆な設定を設けた解析が必要である。その際、各験潮場のデータを扱うと地盤変動の除去という大きな課題が生じた。

波浪の変化は構造物の安定設計に関わるだけでなく砂浜の漂砂環境にも関わる影響である。波浪は、主として風を起源として生じるがその風は季節風や台風等と発生原因が多様で発生位置も同時多発的で面的に生じることから、ある地点で観測される値は統合的であるとも平均的であるとも言える。このため、兆候をいかにして捉えるかが課題であった。

地形の変化としては、砂浜の侵食と考えられる。砂浜の侵食は、沿岸の外力である海面高さと波浪が作用した結果であるが、海岸構造物にとっては砂浜の侵食により前面水位や砕波点から構造物までの距離が減る等の条件変化となり設定外力の変化の原因となる重要な要素である。しかしながら、砂浜の地形変化の予測は、気候の変化が生じないとした現在においても、過去の変形をお手本とするモデル化による手法が採られている。同時に実態把握として気候変動の影響を既存の地形モニタリング情報から得ることは難しい。したがって、砂浜の地形変化については、種々の外力変数が変化する中で将来の砂浜がどのように変化するかを解析的に予測することは困難であるのが現状である。砂浜の地形変化については、本研究では当面は直接扱わないこととされている。

また、海岸構造物の計画・設計との外力の変化の関係を模式的に示したのが、図-Ⅱ.1.1.2.1 となる。それぞれ、海岸法政令で示された項目によって表現している。地形の変化は、構造物前面の水深が変化することとなり構造物へ作用する外力を変化させるが、煩雑となること、増加と減少の両方の可能性があることからこの図には表現していない。

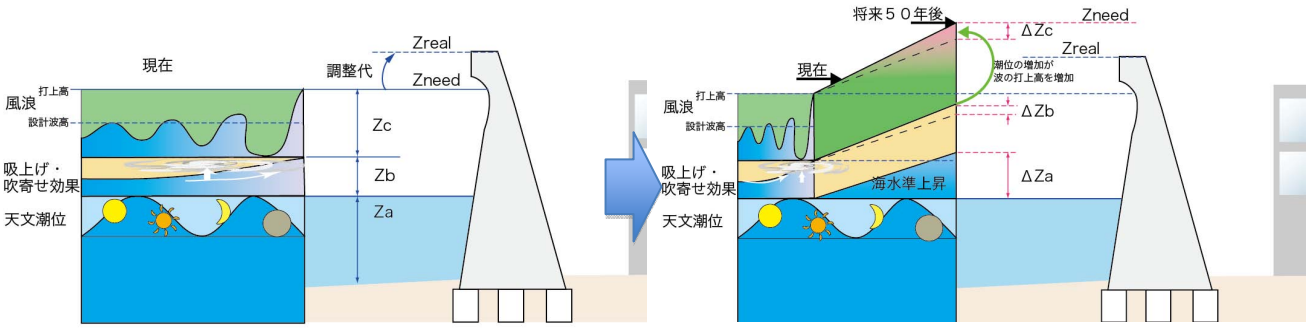


図-Ⅱ.1.1.2.1　気候変動と海岸保全施設（海岸堤防）の設計要素への影響の考え方

1.1.2.2 及び 1.1.2.3 では潮位の変化モニタリングについて、図-Ⅱ.1.1.2.4 では波浪の変化モニタリングについて、1.1.2.5 ではこれらのまとめとして記述する。また、巨大なエネルギーを持ち、大きな災害をもたらす高潮の予測については、第 2 章 2.1.4 に記述する。

1.1.2.2　験潮場・検潮所の観測データの補正と海面変動の状況

日本沿岸の海面水位は、験潮場および検潮所によって観測されている。験潮場は海面を一定として地盤の変動を観測するために、検潮所は潮位の変動を観測するために設置されている。したがって、国内のどの験潮施設も地盤の変動を除去しなくては海水面の変化を求めることは出来ない。そこで、本研究では、平均海面高さについて岩崎ら（2002）に倣った手法による地盤変動を除去した中長期の験潮場データの解析を行っている（野口ら 2010）。岩崎らとの違いは、岩崎らが独自に全国の水準網の解析を行わざるを得なかったのに対して本研究では「2000 年度平均成果」（国土地理院 2003）を用いることが出来た点である。図-Ⅱ.1.1.2.2 は、1906 年に観測が開始された輪島における東京中等潮位に対する観測基準面の変化を示したものである。この図から地盤面が大きく変動していることが分かる。これを除去して潮位の変化として解析したのが図-Ⅱ.1.1.2.3 である。

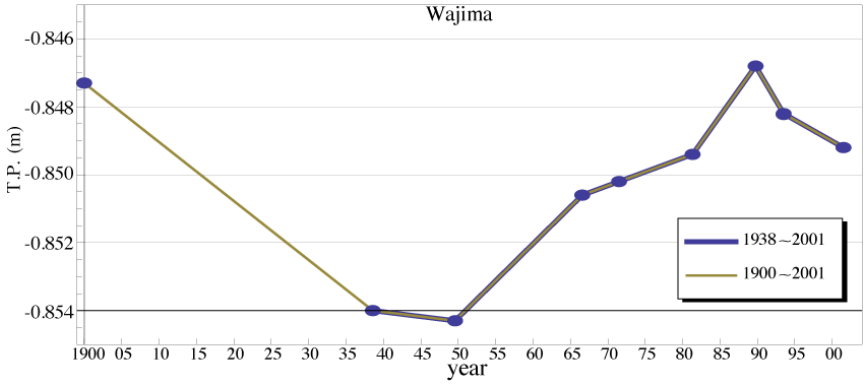


図-Ⅱ.1.1.2.2　輪島験潮場の観測基準面の変化（T.P.基準）

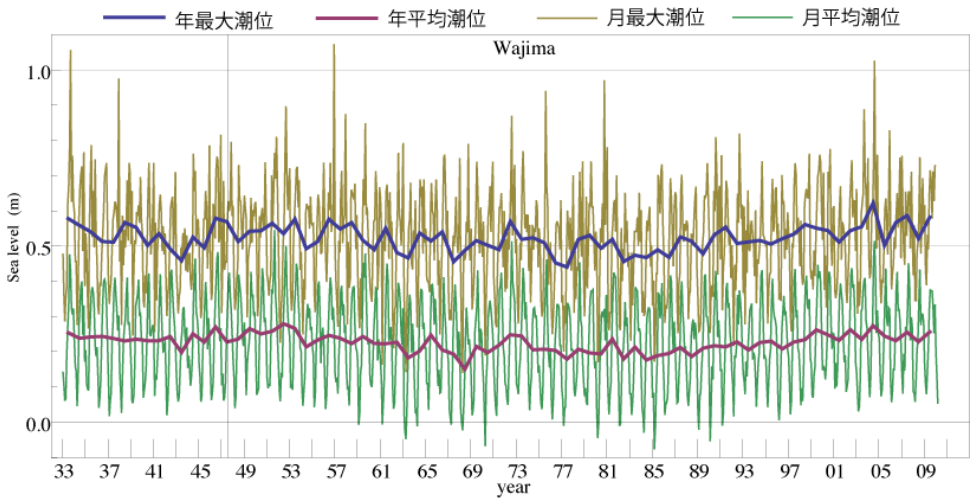


図-Ⅱ.1.1.2.3　観測基準面変化補正後の潮位変動（輪島験潮場）

全国 151 験潮場から 14 験潮場を選定し詳細な解析を行った。各験潮場の状況を表-Ⅱ.1.1.2.1 に示す。長い期間（40 年を目安）のデータを活用できる験潮場を抽出した。ただし、洲本については球分体から取付け水準点までの比高値の変化にばらつきが多く、安定的な期間を十分に確保できず地盤補正後の海面上昇量の算出を断念した。このように、取付水準測量の経緯を追うと水準網では海面上昇を追うにはばらつきが大きすぎる箇所が存在する。これに対して導入されているのが電子基準点であるが、その期間は短く既上昇量の算定には使えない。ただし、2000 年成果とそれ以前ですりつかない箇所で、近年の変化量を電子基準点を用いることで外挿することは可能である。その場合でも電子基準点データ自身の

ばらつきが多く平均値を用いて標高を求めることになる。

表-Ⅱ.1.1.2.1　詳細解析を行った験潮場・検潮所のデータ連続性の状況

番号	験潮場名	所属	観測開始年	験潮場移設(最近年)	球分体再投	その他変更		設置以降年数	毎時データの開始年次	データ解析最終年	解析可能年数	地盤変動調整後の解析年数
1701	忍路	国土地理院	1905	1963				95	1933	2009	46	76
1605	浅虫	国土地理院	1954					46	1954	2009	55	55
1603	柏崎	国土地理院	1955			2007	新潟県中越沖地震	45	1955	2007	52	52
1602	輪島	国土地理院	1894	1938		1986	水準点再投	106	1933	2010	24	77
1401	海南	国土地理院	1953					47	1954	2009	55	55
1403	細島	国土地理院	1894			1936	当初検潮儀へ取り付け	106	1933	2009	73	76
2304	岡田	気象庁	1953			1961	1986噴火のため地盤不連続	47	1963	2009	48	46
2401	串本	気象庁	1895			1961		105	1961	2009	48	48
2405	洲本	気象庁	1936			1995	兵庫県南部地震水準点移転	64	1965	1995	30	---
3702	大湊	海上保安庁	1952		1972			48	1952	2008	36	56
3401	呉	海上保安庁	1962		1985		1957-1961欠測	38	1952	2008	23	56
3402	徳山	海上保安庁	1950	1968				50	1950	2008	40	58
3503	厳原	海上保安庁	1947	1984				53	1947	2008	24	61
3405	西之表	海上保安庁	1965					35	1965	2008	43	43

各地点のデータについて朔望平均満潮位、平均潮位、冬季平均潮位、台風期平均潮位を算出し、各年の値に対して Mann-Kendall 分析を実施した。ここで、Mann-Kendall 分析は正方向のトレンドか負の方向のトレンドかしか解が得られないので、割合についてはその期間の全データについて一次回帰により変化量を求めた。Mann-Kendall 分析でドレンドを有しないと判定が出た場合には変化量は 0 とした。また、1970 年代後半から地球温暖化の影響が現れていると言われている。このことから 1980 年を地球温暖化の影響が顕著となる期間の境としてその前後についても算出した。年平均潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.4、朔望年平均満潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.5 に示す。岡田を除いて全ての験潮場で年平均潮位、朔望年平均満潮位ともに 1980 年以降は上昇に転じている。ただし、岡田、西之表、厳原はともに離島に設置された験潮場である。離島のため、基準点が移動しているのか、験潮場が移動しているのかの判定は不可能である。各図には、年間 3mm 上昇を破線で入れている。多くの験潮場で 1980 年以降に年間 3mm 程度の上昇が確認できる。

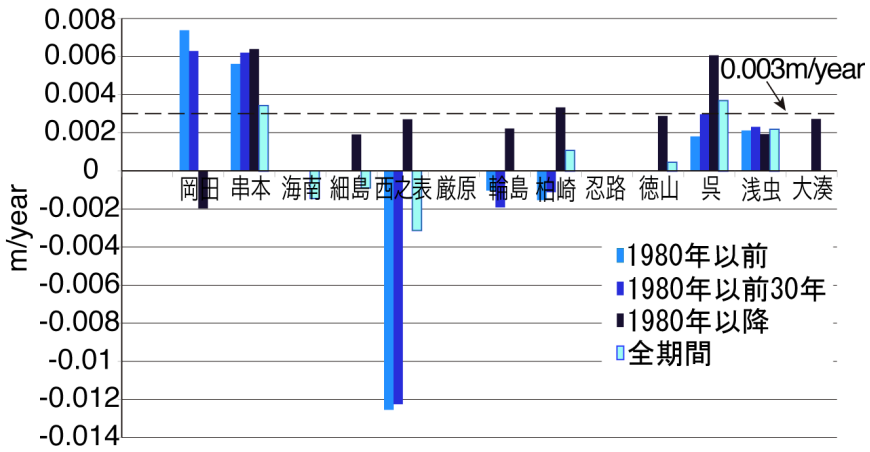


図-Ⅱ.1.1.2.4　年平均潮位

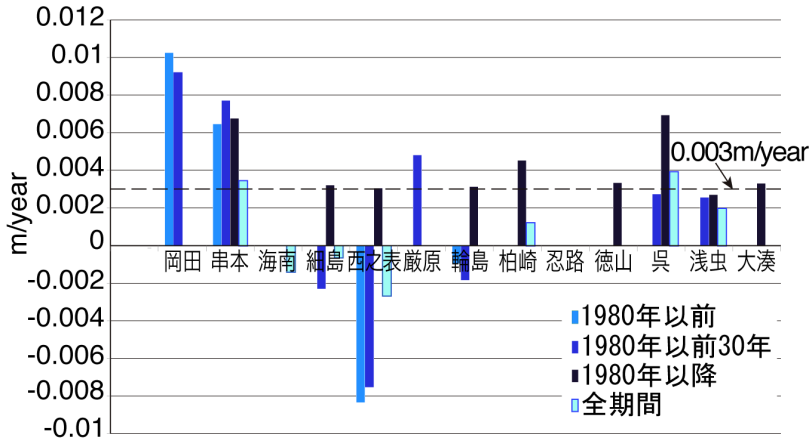


図-Ⅱ.1.1.2.5　朔望年平均満潮位

季節毎の変化を見るために、冬季毎年平均潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.6 に台風期毎年平均潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.7 にしめす。どちらについても年平均潮位変化と比べて、季節特有として上昇が生じているようには見られない。年間を通じた傾向であることが分かる。ただし、細島については太平洋側に相当するにもかかわらず、冬期に上昇し台風期に上昇が認められない。この点については不明である。

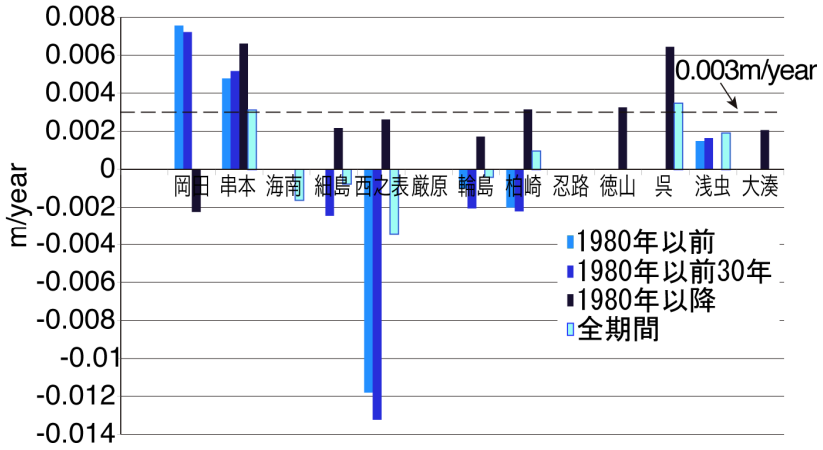


図-Ⅱ.1.1.2.6　冬期毎年平均潮位

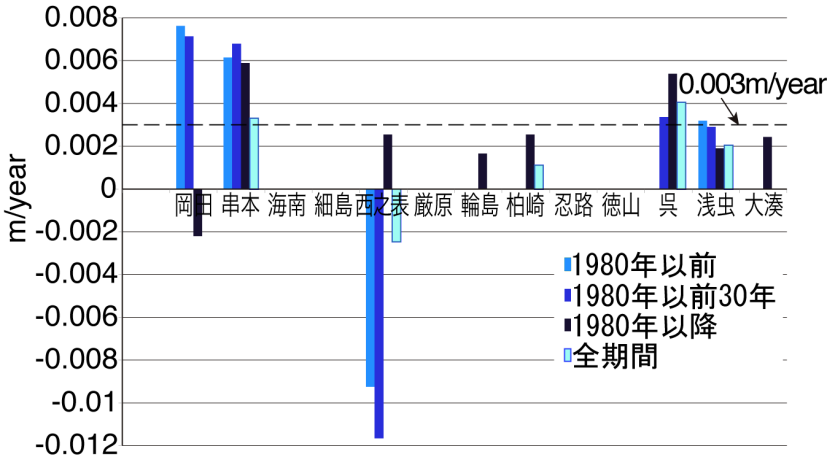


図-Ⅱ.1.1.2.7　台風期毎年平均潮位

1.1.2.3　衛星海面高度計による海面変動の把握

東日本大震災を引き起こした 2011 年東北太平洋沖地震が象徴するように、近年の我が国周辺は地殻の激しい変動期となっている。一方で、全球の海面上昇予測の側面においても、局所的な変化予測は森ら（2011）が示しているように日本海域でばらつきが大きく一定の議論がしにくい状況である。そこで、海面上昇による災害リスクを考える際には現状を正しく把握し、予測計算値を参照しつつ当面の間はその変化が短期的な将来で継続すると仮定して施策を決定せざるを得ない。本報告では、衛星海面高度計による沿岸部の観測期間（野口ら 2010）に近年のデータを追加するとともに離島部に関する解析結果を示す。

衛星海面高度計とは、TOPEX/POSEIDON、JASON1、JASON2 とは、NASA 及び CNES による海洋観測ミッションで打ち上げられた衛星に搭載されたレーダー高度計データでありデータセットを衛星の名称で呼んでいる。いずれも約 10 日の観測周期で全球における海面高度データを取得している。海面高度の測定精度は最も古い TOPEX/POSEIDON については 4～5cm、最新の JASON2 では 2～3cm 程度と想定されており、近年打ち上げられた JASON2 の方が、精度が向上している。1992 年に TOPEX/POSEIDON が打ち上げられてから現在に至るまで、約 20 年分の海面高度データがデータベースに蓄積され、NASA のホームページ等で公開されている。

JASON1 及び JASON2 の海面高度偏差のデータには、観測機器等の問題により、一定のバイアスが付加されていることが報告されている。そこで、NASA 等による資料(2011)を参考に、JASON1、JASON2 の海面高度偏差データにそれぞれ-9.1cm、-17.2cm を加えることでバイアスの影響を除去することで解析を実施した。一方、TOPEX のデータにも、観測機器等の問題により、60 日周期の変動成分が混入していることも報告されている。しかし、本検討では長期的変化に着目して検討を行うため、このエラーが解析結果に与える影響は小さいと考え、これに対するバイアス除去を行わずに検討を行った。初めに、沿岸部に測定点を設定してそれらの測定点の平均値を区分毎の値とした。図-Ⅱ.1.1.2.8 に示すように日本周辺の海域を５つに区分した。

図-Ⅱ.1.1.2.9 に沿岸測定点の海域毎に平均した場合の衛星１公転周期（約 10 日）毎とそれから得られた年平均の海面高さの変化を示した。海域 C における 2002 年から 2004 年に見られる数値の特異な上昇が生じている。

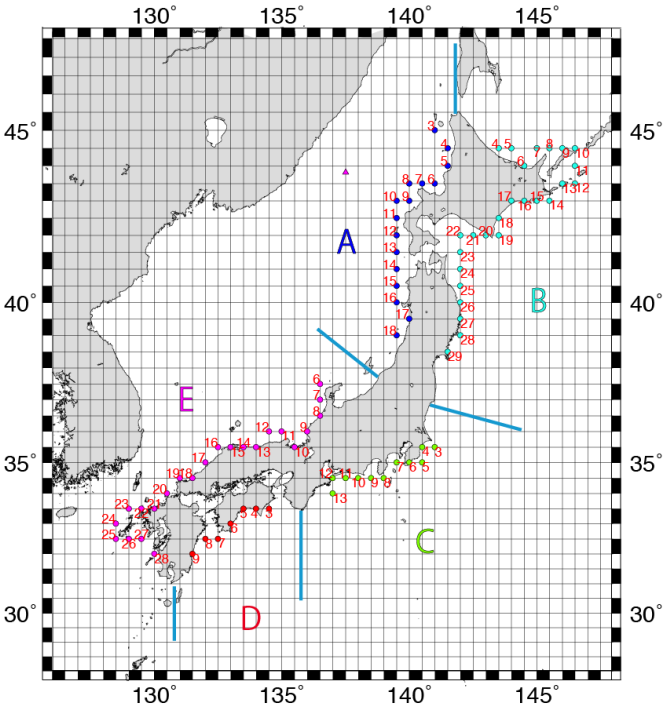


図-Ⅱ.1.1.2.8　衛星海面高度計の解析結果から沿岸部の海面上昇値を調べるための測点配置

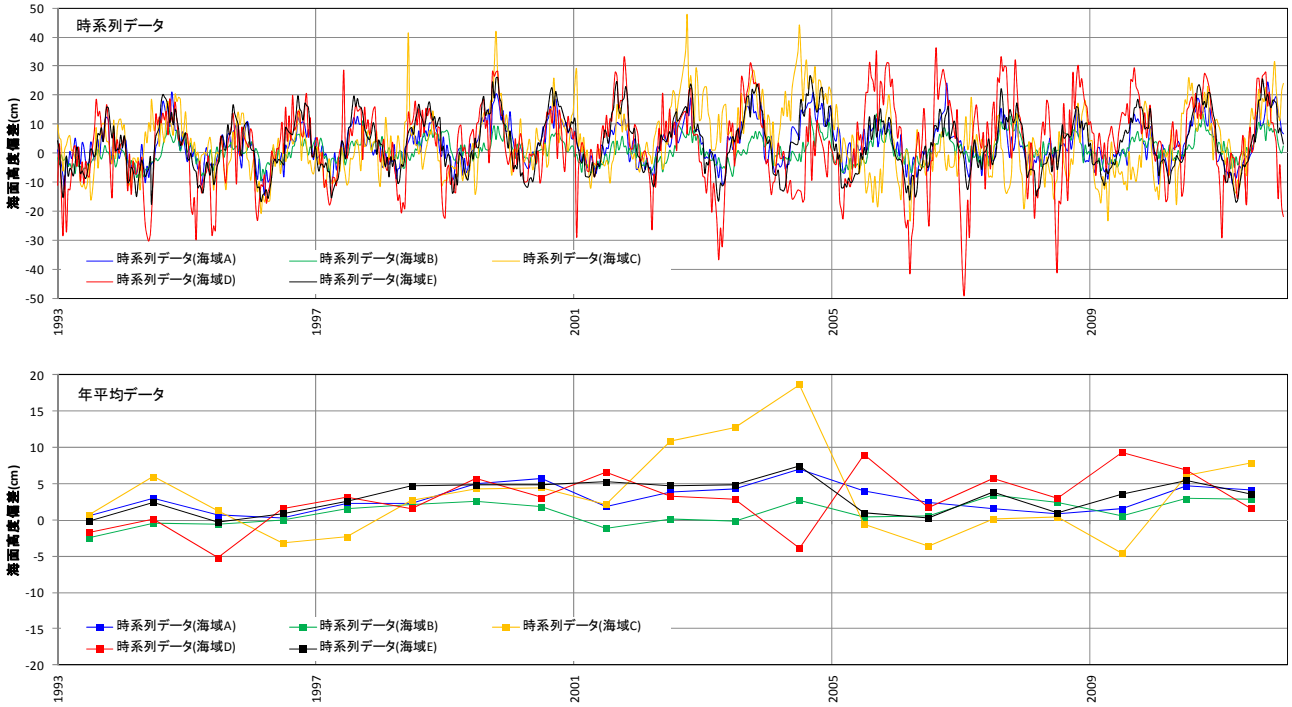


図-Ⅱ.1.1.2.9　沿岸の測定点を沿岸毎に平均した観測時系列値と年平均値

次に、平均する範囲を海域まで広げて上昇量を解析した。図-Ⅱ.1.1.2.10 に各海域の設定範囲を示す。黒潮の蛇行が海域の上昇値とならないように、海域 C と D は黒潮領域を含むように設定した。

沿岸測定点の解析では陸域の影響が生じている可能性があり、海域まで平均する範囲を広げて上昇量を解析した。黒潮の蛇行の範囲を網羅できるように、海域 C と D は黒潮領域を含むように設定した。図-Ⅱ.1.1.2.11 に海域平均の経年変化を示す。海域 C と海域 D は大きく変動しているが、図中の黒潮の最南

下緯度の変動と連動していることが確認できる。一方、沿岸測定点（図-Ⅱ.1.1.2.9）の経時変化と比べると沿岸測定点の経時変化では沖合で生じる海面低下の影響を受けていない。黒潮接岸時には高くなるが、蛇行時に生じる冷水渦は沖に生じることから影響が小さいことが現れている。

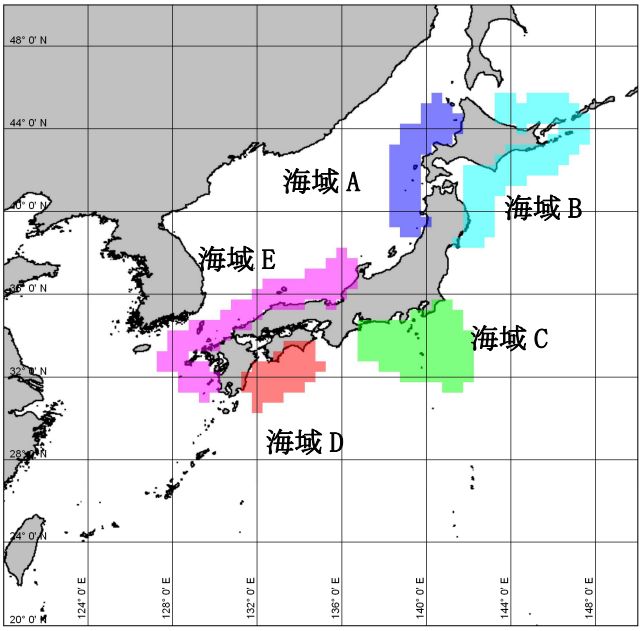


図-Ⅱ.1.1.2.10　海域毎の海面上昇値を求めるための区分（海域CとDは黒潮領域を含むように設定した）

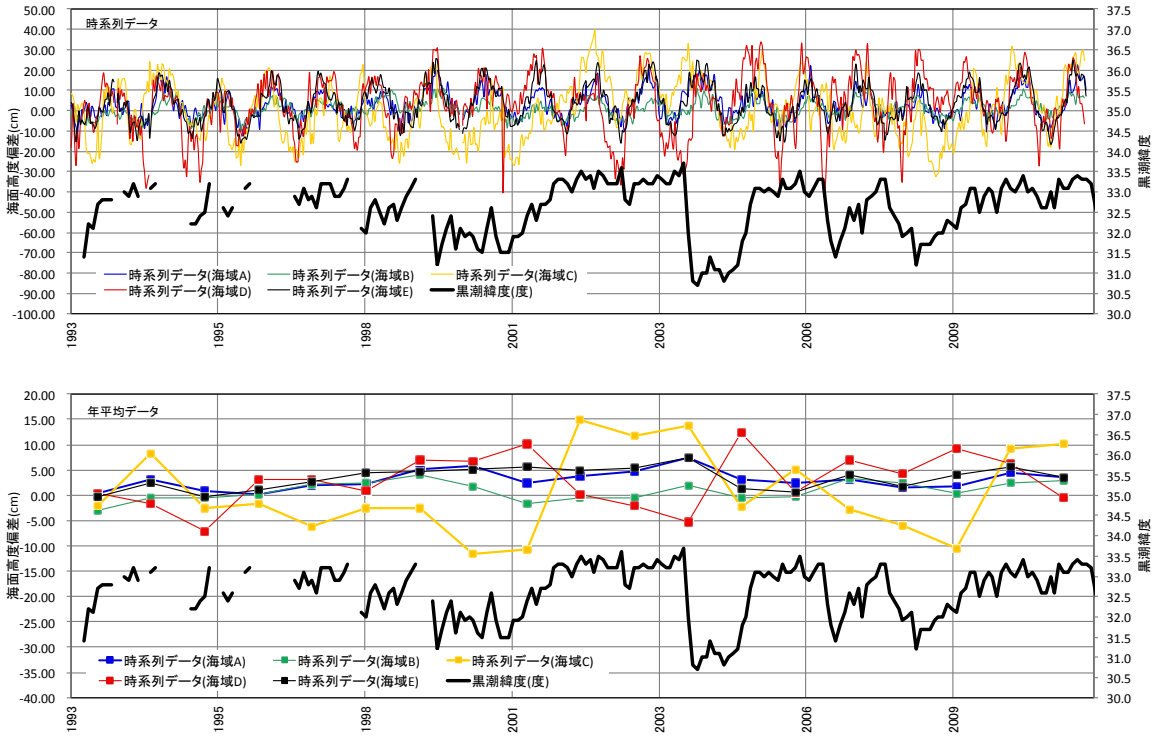


図-Ⅱ.1.1.2.11　衛星海面高度計による海域の海面高さの経時変化

海面高さの変化に関する気象庁の見解は、日本近海では十数年変動が卓越していることから海面上昇

傾向が見られないとしている。しかし、IPCC の 3mm/年は時空間的な平均値であることから何らかの傾向を抽出できるはずである。厳密には周期的変動を除去した後の上昇量を評価すべきであるが、衛星公転周期毎の海面高さの経時変化から単純に一次回帰により変化量として図-Ⅱ.1.1.2.12 にまとめた。但し、Mann-Kendall 分析により傾向の判定を行い有意な傾向がないと判定された場合には変化量は 0 とした.
沿岸と海域では、全体として沿岸部の方が大きな値となっており、海域 D において 1mm/年の違いがある。海域 C と海域 D は全球平均の 3mm/年とほぼ同じになっている。

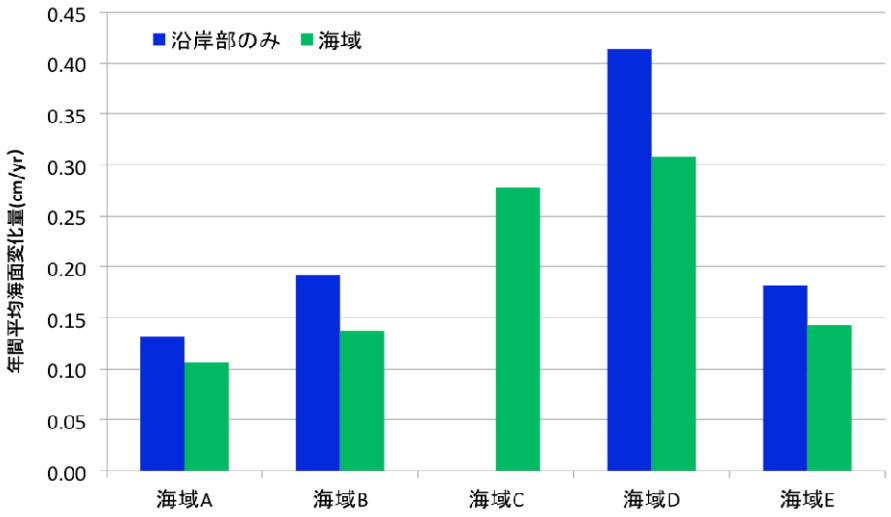


図-Ⅱ.1.1.2.12　衛星海面高度計による海域別年平均海面上昇量

離島部の海面上昇量の把握には、1.1.2.2 に示した列島との水準網と接続した解析ができない。したがって、電子基準点を用いることが考えられるが、電子基準点の設置年数も十分出ない。このため、衛星海面高度計による把握しかないと言える。そこで、主な 11 の離島について衛星海面高度計により変化量を解析した。図-Ⅱ.1.1.2.14 に南西諸島では全球平均の 3mm/年と同等以上の値となっている。沖ノ鳥島、南大東島、種子島については、Mann-Kendall 分析によりドレンドを有しないと判定されたことから変化量は 0 とした。

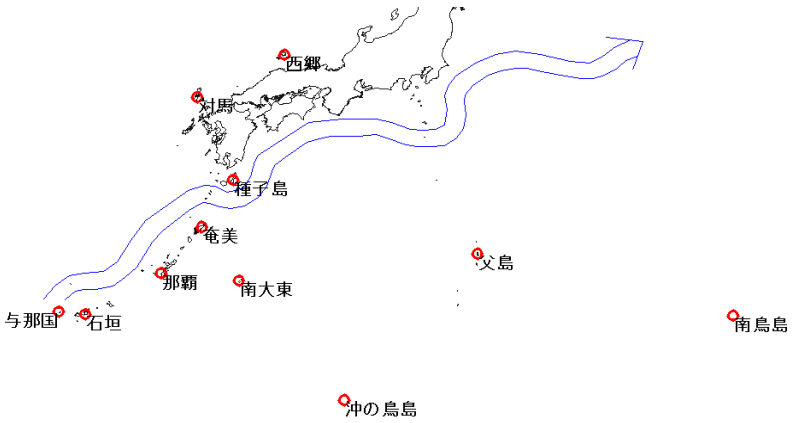


図-Ⅱ.1.1.2.13　解析を行った離島の位置

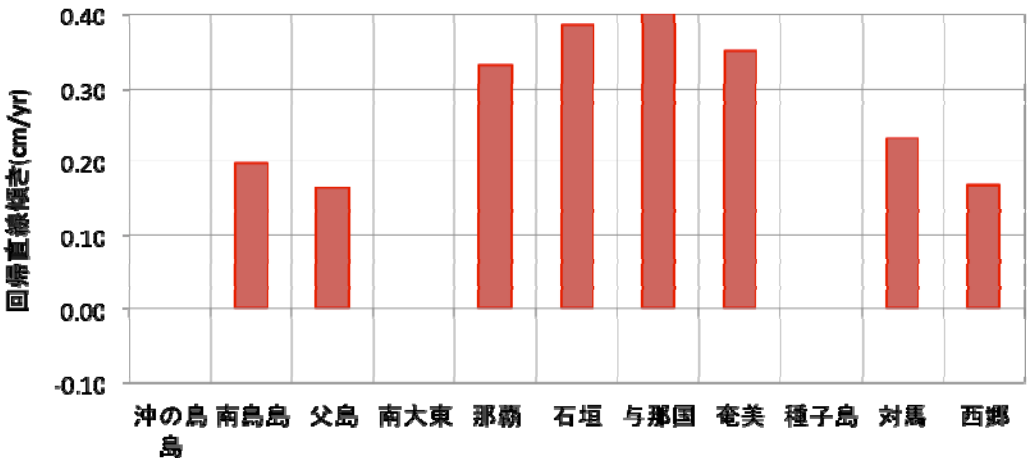


図-Ⅱ.1.1.2.14　衛星海面高度計による離島の年平均海面上昇量

1.1.2.4　海象観測所データの解析による沿岸波浪の変化

気象が海象を形成するので海象は、そこに来襲する波の発生源の気象現象の積算結果と言える。そこで、本研究では日本周辺の海象を特徴付ける台風・低気圧の移動特性により区分した。台風の経路と日本列島の形状を考慮し、6つの領域に区分した(図-Ⅱ.1.1.2.15)。南北に2つに区分する線として関東地方から中国地方を縦断する北緯 35 度線を用いた。東側として東北地方と伊豆諸島付近を通過する東経140度線を、西側を分けるものとして朝鮮半島から沖縄本島を通過する東経128度線により区分した。これにより縦の3列は台風の通過時期や経路の違いを反映でき、南北の2行により低気圧の経路を反映できる。

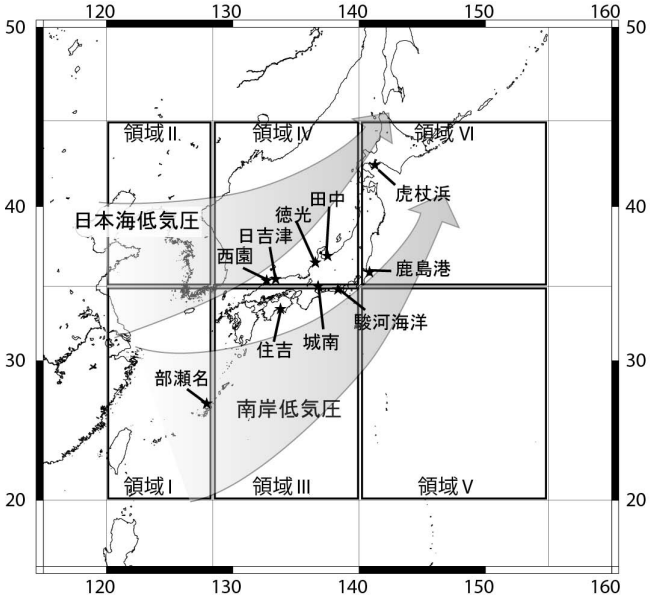


図-Ⅱ.1.1.2.15　気象外力による日本沿岸の区分

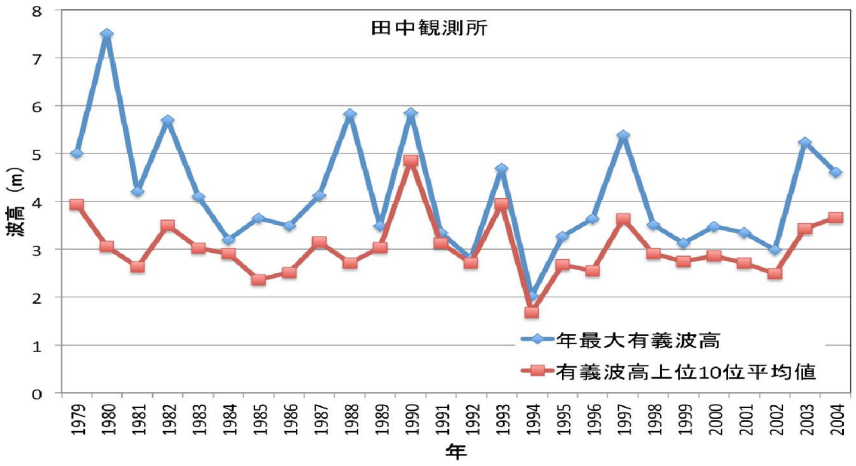


図-Ⅱ.1.1.2.16　田中観測所における年最大有義波高、年上位 10 位の平均値の変化

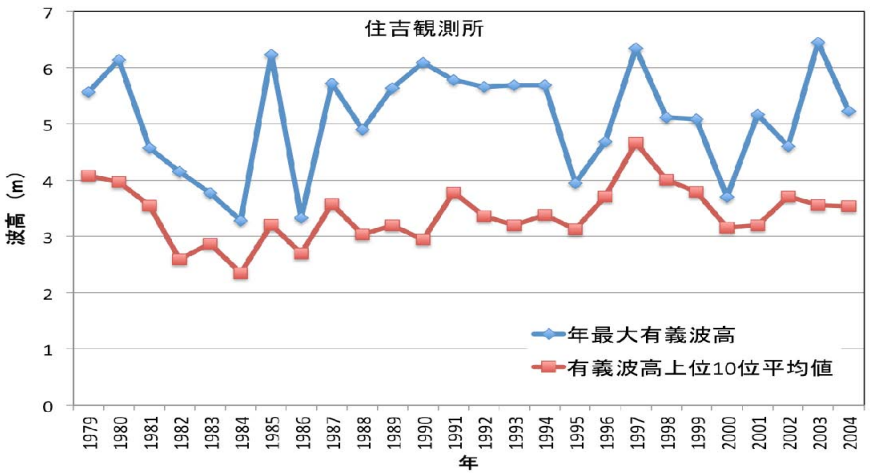


図-Ⅱ.1.1.2.17　住吉観測所における年最大有義波高、年上位 10 位の平均値の変化

災害発生の再起性を検討する場合には年最大波高から再現の確率年を求める。しかし、これは気象環境が変化しないことを前提条件としており、その条件下で発生する確率を議論するためのものである。さらに、ある年の最大値を以てその年の波浪の概況を代表しているとは言い難い。ここで、２つの代表的な観測所の年最大有義波高と有義波高年間上位 10 位の平均値の経年変化をまとめたものを図-Ⅱ.1.1.2.16 および図-Ⅱ.1.1.2.17 に示す。

これらから、年最大有義波高が沿岸波浪の変化概況を示すものと見ることは出来ないことがわかる。また、波高だけの議論では波浪の重要な諸元である周期（波長）について考慮されないことになる。そこで、気候変動による外力の変化を検証しようとする場合には工夫が必要となる。本研究では、長期間のデータが整っている海象統計の波高周期結合頻度表を用いることにした。これは、毎正時に観測した有義波を用いて整理されている。波浪の概況のパラメータとして、結合頻度表の閾値により選択される波高と周期の対についてそれぞれ一波とした時のエネルギーフラックス（H^2T として）を算出して頻度を乗じ、総和をその年のエネルギーフラックスとした。閾値としては、波高、周期、エネルギーフラックスに関して設定した。波高とエネルギーフラックスに関しては 1990 年から 4 年間のエネルギー平均波の波高またはエネルギーフラックスの平均値を、周期に関してはうねり性とされている 8 秒を閾値とした。

これによる経年変化を示したのが図-Ⅱ.1.1.2.18 である。日本海に面する徳光、西園の両観測所では、近年来襲する波浪エネルギーが増大していることがわかる。また、田中観測所においても若干の増加傾向がうかがえる。一方、日吉津観測所では大きな変化が見られない。これは、徳光、西園の両観測所は

ともに西に開いた海岸に面するが、田中・日吉津の両観測所はそれぞれ能登半島と島根半島の遮蔽域となっており地形的な特徴による。領域 III に位置する駿河海洋、城南、住吉の各観測所では、高波浪の来襲エネルギーが増大している。

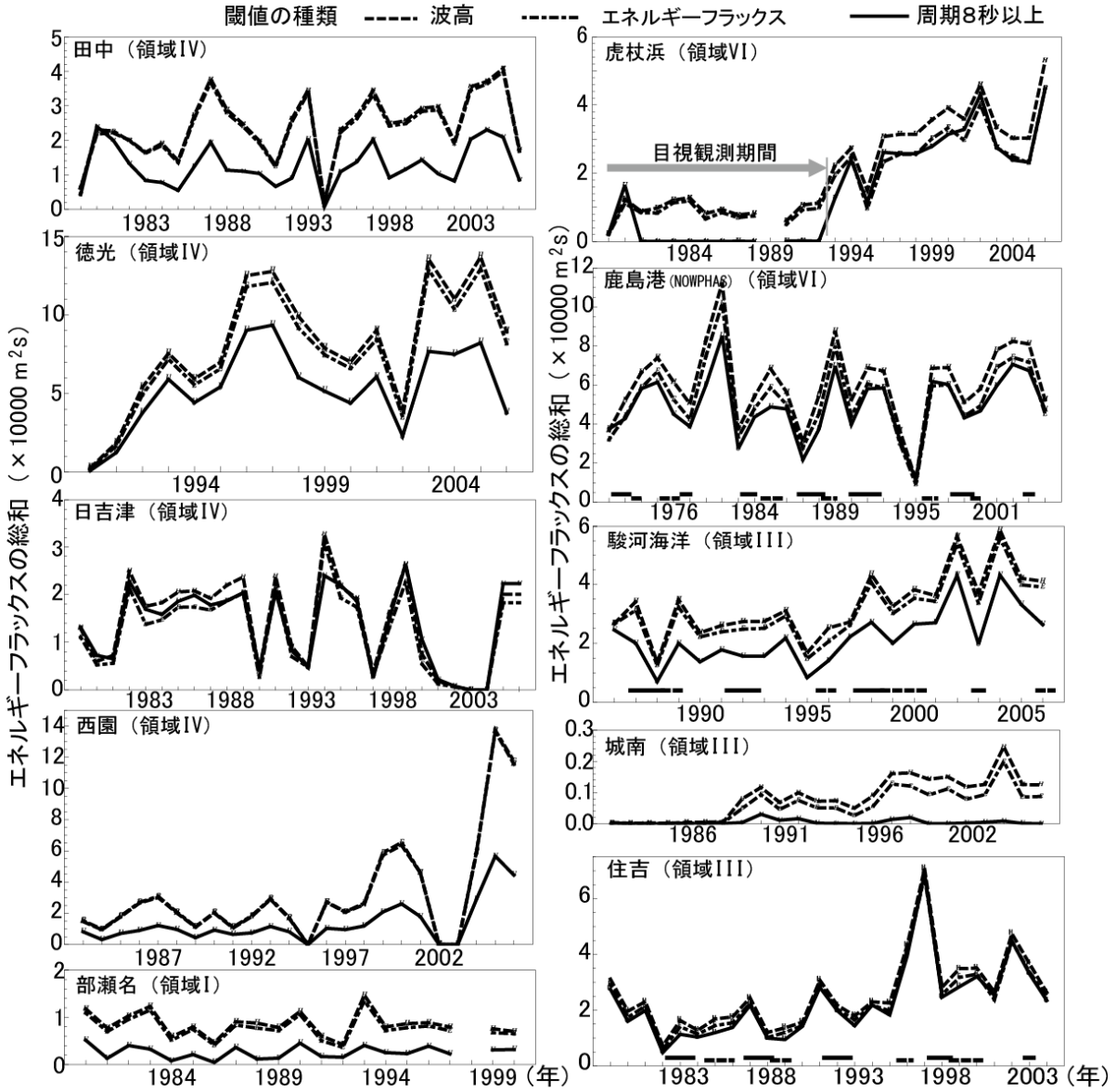


図-Ⅱ.1.1.2.18 閾値設定による波浪エネルギーフラックスの経年変化

次に波浪に影響を与える気象場の変化を見てみる。停滞する冬型の気圧配置や前線等の影響も無視できないが、ここでは天気図から数値化しやすい台風および低気圧を対象として解析した。我が国では 1883 年より天気図が作成されているが、すべての天気図に緯度線と経度線が表記されるようになったのは 1915 年からである。そこで、1915 年から 2007 年 1 月までの印刷天気図を収集し、北緯 20 度～北緯 46 度、東経 122 度～東経 153 度の範囲で中心気圧が 990hPa 以下となった台風を含む低気圧を抽出し、中心気圧や位置のデータベースを作成した。なお、1951 年以降の台風についてはベストトラックデータを使用した。中心気圧は 1hPa 単位、中心位置の緯度経度は 1 度単位とした。1958 年 8 月以降は、現在の印刷天気図形式となっているが、低気圧や台風の中心位置や中心気圧が表示されたのは 1965 年 11 月からである。それ以前のものについては、閉じた等圧線の中心付近を中心位置とし、中心気圧は閉じた等圧線の一番低い等圧線の値とした。したがって、1965 年以前と以後ではデータ精度が異なることに注意が必要

である。また、台風は天気図上や概況分に中心気圧が表記されている場合はその値を採用した。ただし、初期の天気図では、何㎜ Hg 以下と表現されているので、その値を中心気圧とした。作成した低気圧データベースでは、1996 年以降、天気図の時間間隔が 6 時間となっており、それ以前は 12 時間である。

このデータベースから図-Ⅱ.1.1.2.15 で区分した領域毎に台風・低気圧の通過数の経年変化（図-Ⅱ.1.1.2.19 左）とその通過した台風・低気圧が領域内に滞在した時間の年間総計を示した（図-Ⅱ.1.1.2.19 中）。また、各領域を通過する台風・低気圧のその領域内での最低気圧を年毎に総和し平均をまとめた（図-Ⅱ.1.1.2.19 右）。変化も少なく日本への影響が無い領域 II は省略した。

台風の発生域に近い領域 I、III、V では長期として見ると、近年は来襲数、滞在時間ともに上昇傾向がないように見える。しかし、図-Ⅱ.1.1.2.18 によると台風の影響を強く受ける領域 III にある住吉観測所や駿河海洋観測所の来襲波浪エネルギーは上昇している。図-Ⅱ.1.1.2.19（左）の領域 III を詳しく見ると海象観測期間である 1979 年以降で台風数（左）は増加傾向にあり、通過台風の最低気圧の年平均値（右端）も大きな低下傾向にあり年々台風の勢力が強くなっていることを示している。さらに、1915 年に比べ平均値で約 40hPa 低下している。これが住吉、駿河両観測所の高波浪の増大として現れている可能性がある。

一方、図-Ⅱ.1.1.2.18 における徳光観測所や田中観測所の増加傾向の原因は、図-Ⅱ.1.1.2.19 の領域 IV から想定できない。しかし、領域 VI において低気圧が来襲数、滞在時間ともに増加傾向にあり、2008 年 2 月 24 日に生じたような大型の低気圧と付随して生じる気圧の谷が強化している可能性を示唆している。

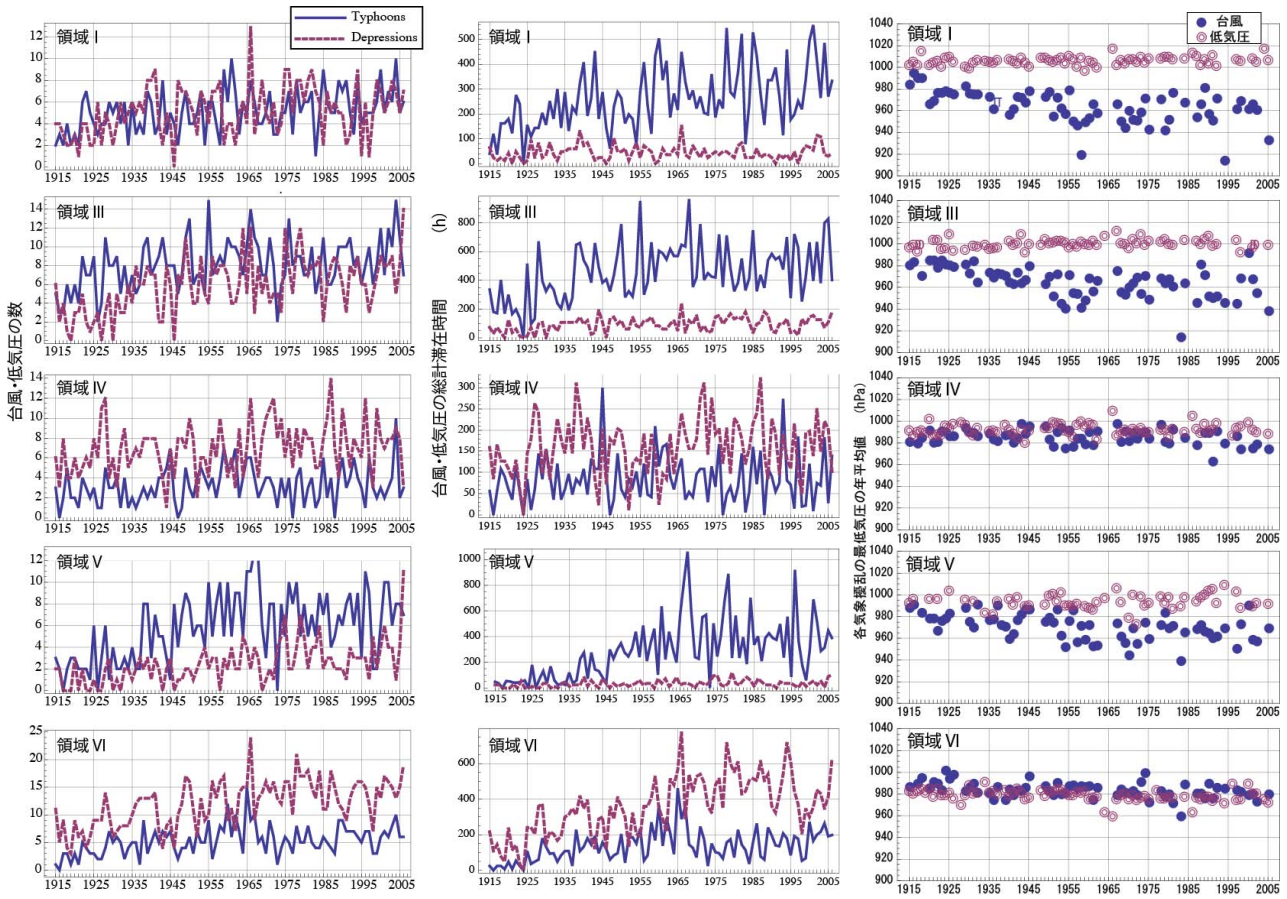


図-Ⅱ.1.1.2.19 台風・低気圧の各領域での通過数(左)、滞在時間(中)、通過期間の最低気圧の年平均値(右)

1.1.2.5 まとめ

本章をまとめると以下のようになる。

海面の上昇については、全国規模の既海面上昇量を設定した後に地先海岸毎に値を調整することを念頭に置いて、計画・設計に反映する既海面上昇量を決定するためのデータの解析法を検討した。その際に、科学的な各国合意として存在する最新の気候変動に関する政府間パネル第 4 次報告書(以下、IPCC AR4)において既上昇量として 1993～2003 年の間で全球平均として 3.1mm/年が示されている。この値を我が国の政策決定時の既上昇量とするとして、沿岸毎に状況に合わせて増減することが妥当であるといえる。海面上昇予測計算は地域精度について問題があることから、特に日本海についてはモニタリングから得られる知見を拡張することが必要となる。黒潮流の影響を受ける南沿岸では、黒潮の将来変化も重要な海面高さ変化の要素となる。

波浪の変化については、異常潮位の傾向は太平洋岸・日本海側を問わず災害リスクが高まる状況があることが示された。また、波浪の原因となる強い風を発生させる停滞・発達する低気圧は、関東地方から北海道南東方で個数・滞在時間ともに、1915 年～2006 年の期間で増加傾向を示している。

1.1.3　X バンド MP レーダによる豪雨監視の強化について

1.1.3.1 X バンド MP レーダの導入の背景

近年、日本の各地で局地的な大雨や集中豪雨が多発し、それらに起因する浸水被害や水難事故が発生している。気象庁の報告（2007）によると短時間強雨や大雨の発生回数はここ 30 年間余りで増加傾向にあることが指摘され、1 時間降雨量 50mm 以上の短時間強雨の発生回数は最近 10 年と 30 年前を比較して約 1.5 倍に増加している（図-Ⅱ.1.1.3.1）。日降水量 400mm 以上の大雨の発生回数についても約 2.5 倍増加している（図-Ⅱ.1.1.3.2）。また、東京大学など合同研究チームの報告（2004）によると今後の大雨の発生回数が地球温暖化の進行に伴って増加すると予測されている（図-Ⅱ.1.1.3.3）。平成 20 年度おいては、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な大雨（以下、豪雨と呼ぶ）により、石川県金沢市街地を流れる浅野川等や愛知県岡崎市街地を流れる伊賀川等が氾濫し、人的被害や床上浸水等の甚大な被害が発生した。また、兵庫県神戸市を流れる都賀川においては、豪雨による河川水位の急激な上昇により河川にいた 5 名が流され亡くなるという水難事故が発生した（土木学会 2009）。

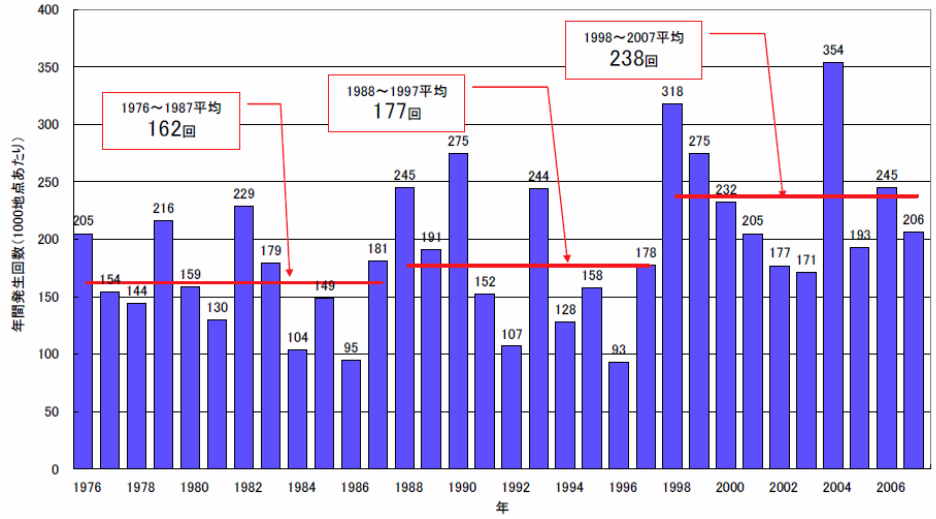


図-Ⅱ.1.1.3.1　1時間雨量50mm以上の降雨の発生回数

（出典：気候変動監視レポート 2007 より）

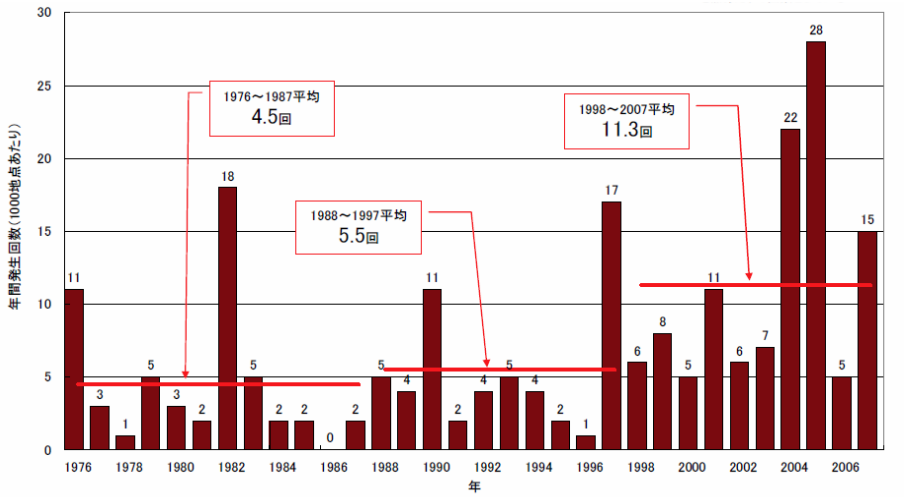


図-Ⅱ.1.1.3.2　日降水量 400mm 以上の降雨の発生回数

（出典：気候変動監視レポート 2007 より）

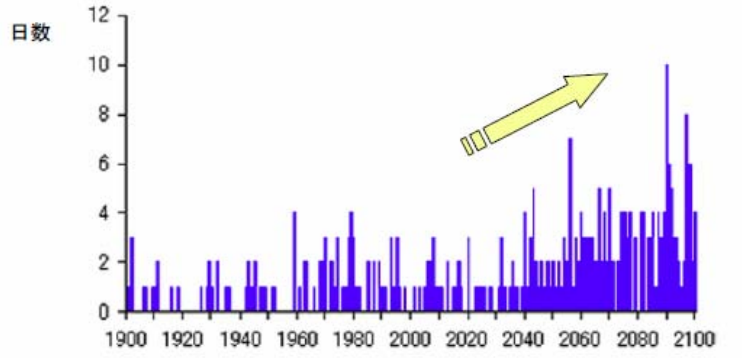


図-Ⅱ.1.1.3.3　日降水量 100㎜ 以上の降雨の発生回数

（出典：東京大学など合同研究チーム報道発表より）

こうした豪雨による災害対策のために豪雨の状況を的確に把握する事は重要であり、面的な雨量情報をリアルタイムに得ることができる気象レーダの有効性は高い。

国土交通省水管理・国土保全局は、昭和 51 年に赤城山に C バンド(約 5cm)の波長の電波を使用する気象レーダ(以下、既存レーダ)を設置して以来 26 基のレーダを配置し、雨量データを河川管理や一般向けの防災情報等に活用している（図-Ⅱ.1.1.3.4)。この既存レーダの面的分解能は、使用する電波の波長帯の関係から 1km メッシュ程度あり、台風や低気圧、前線といった面的スケールの大きい降雨を観測するには十分である一方、局地的な大雨や集中豪雨といった面的スケールが小さい降雨の観測には十分とは言い難い。また、既存レーダは、水平の偏波面を持った 1 種類の電波（単偏波）を発射し、雨滴に当たって戻ってくる電波の強度(反射強度)を受信するのみの単偏波レーダである。反射強度のみによる雨量換算は様々な誤差要因の影響を受け、定量的な観測は難しいことが知られている（Bringi *et al.* 2001)。そのため、国土交通省はテレメータ地上雨量データを用いて既存レーダから算定される雨量の実時間補正を行っている。この補正に用いる地上観測雨量の観測間隔が 5～10 分間隔であることにより、既存レーダの雨量情報の配信が 5 分間隔となっている。地上雨量計を用いた補正を必要とする既存レーダは、補正処理の時間を必要とするために、配信時間に 5～10 分程度以上を必要とし、短時間に急激に成長や衰退をする豪雨を迅速に配信することが難しい。

既存レーダに代わる気象レーダとして、水平と垂直の偏波面を持った 2 種類の電波（二重編波）を送受信する二重偏波レーダの研究開発が、日本では 1980 年代に旧建設省土木研究所を中心に開始された(Yoshino et al 1988)。C バンドの二重偏波レーダが、九州の釈迦岳、八本木、国見山に現業用レーダとして設置された(Matsuura et al 1999)。

その後、S バンド（約 10cm)、C バンドの二重偏波レーダの技術革新が米国(Alexander et al 2005)、日本(Nakakita et al 2007)で進められた。また、X バンド(約 3cm)の二重偏波レーダ（X バンドマルチパラメータレーダ（以下、X バンド MP レーダ)）の研究開発が(独)防災科学技術研究所を中心に進められ、レーダ技術の革新も伴い X バンド MP レーダの降雨観測精度の向上が図られた。防災科学技術研究所は、X バンド MP レーダを製作し(Iwanami et al 2001)、雨量算定に関する研究(Maki et al 2005b)、雨量算定アルゴリズムの検証(Park et al 2005)(Iwanami et al 2003)を経て、実用化に向けた観測(Maki et al 2005a)を行い、地上雨量計との補正を行わなくとも高い精度の降雨観測の可能性を示した。地上雨量計との補正が必要ないということは、地上観測雨量の観測間隔による制約を受けずに短い間隔で観測をすることが可能であり、また、キャリブレーションに要する時間がないことから、観測直後に降雨情報の配信が可能となり、短時間に急激に成長や衰退をする豪雨を時々刻々と捉えることが可能である

ことを意味している。

Xバンド MP レーダは、Xバンドの波長帯を使用しているため既存レーダより高い空間解像度での観測が可能であり、面的スケールの小さい豪雨を詳細に捉えるのに十分な解像度を有している。

Xバンド MP レーダで局地的な大雨や集中豪雨をリアルタイムで時間空間的に詳細に把握することが可能となったため、国土交通省は、豪雨の監視体制を強化するために XRAIN と呼ばれる X バンド MP レーダネットワークの構築を開始した。

国土技術政策総合研究所は、レーダデータの処理・配信システムの構築し雨量情報配信の高度化を実現した。また、レーダネットワークを設計し、豪雨時においても高精度な観測を可能としている。また、観測設定やパラメータチューニング等を行い運用に向けて必要な精度の確保を行うと共に、減衰補正、合成処理の高度化等を行い精度向上を実現している。

図-Ⅱ.1.1.3.4　レーダ雨量計（C バンド）観測網

1.1.3.2　XRAIN の構築状況

XRAIN は、2010 年 7 月より 11 台で構成される X バンド MP レーダネットワークで、三大都市圏等の 4 地域を観測範囲として試験運用を開始した。2011 年度には、15 台、2012 年度には 1 台のレーダがネットワークに追加され、XRAIN は、現在(2013 年 1 月)、11 地域を観測範囲とする 27 台の X バンド MP レーダネットワークとなっている（図-Ⅱ.1.1.3.5)。現在の XRAIN は主要都市を観測範囲としており都市部における豪雨の監視体制の強化が図られ、また、河道閉塞や噴火活動により土砂災害の危険性が高い地域についても監視体制の強化が図られている。また、2013 年度中には、東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下や地震、津波による河川堤防の損壊により、治水安全度が低下している被災地に 8 台のレーダがネットワークに追加され、被災地の豪雨対策強化が図られる予定である。

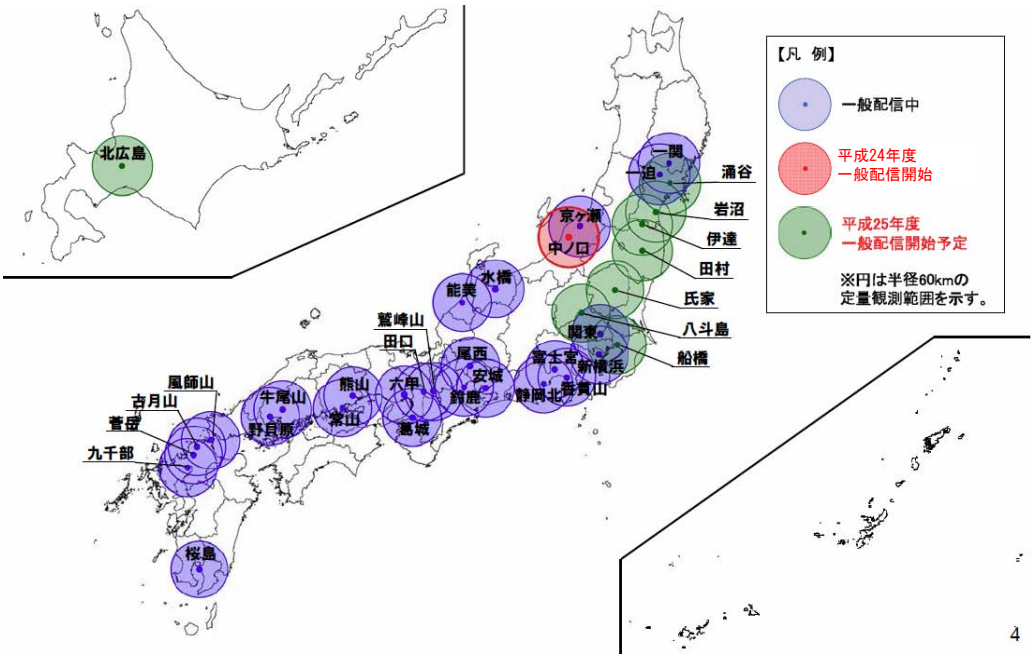


図-Ⅱ.1.1.3.5　XRAIN の整備状況

1.1.3.3 X バンド MP レーダの降雨観測の特徴

X バンド MP レーダのリアルタイム降雨観測は、二重偏波による降雨観測により高精度の降雨観測が可能となったことで実現されている。以下に、二重偏波レーダの降雨観測方法とその特徴を示す。また、参考までに単偏波レーダの観測方法についても示す。

a) 二重偏波レーダの降雨観測と特徴

雨粒は粒径が大きくなる程、球状から扁平した形状になり大気中を落下する。扁平した形状の雨粒の中を電波が通過すると水平と垂直偏波の間で位相差が生じる。二重偏波レーダでは、この位相差から降雨量を換算（Kdp-R 方式）する。雨粒の扁平度によって生じる位相差は、雨粒の粒径の 4 乗に比例する。実際の降雨強度は雨粒の粒径の 3.6 乗に比例することから、この位相差は実際の降雨強度と概ね一致する対応関係にあるため、Kdp-R 方式は定量的な雨量換算が可能となる。また、電波は降雨中を通過すると強度が低下（降雨減衰）するが、Kdp-R 方式では位相信号が検出できれば雨量換算が可能であるため降雨減衰により定量性が損なわれることがない。

以上、位相情報から雨量算定することで、精度向上が図られるとともに降雨減衰の影響を受けず精度良く観測することが二重偏波レーダの主な特徴である。

b) 単偏波レーダの降雨観測と特徴

単偏波レーダは、雨粒に当たり反射した電波の強度（反射強度）から降雨量を換算（Z-R 方式）する。降雨強度が大きければ、強い反射強度が得られるという定性的な関係は得られるが、反射強度は雨粒の粒径の 6 乗に比例、実際の降雨強度は 3.6 乗に比例することから、反射強度から定量的な降雨強度を求めるには、両者を結び付ける対応関係（粒径分布）が必要となる。しかし、この対応関係は、雷雨や台風、低気圧等の降雨タイプで異なり、また時々刻々と変化することが知られており、一義的に定めることができない。そのため、Z-R 方式による定量的な雨量換算は難しい。また、降雨減衰により正確な反射強度を得られなくなることから単偏波レーダで降雨を精度良く観測することは難しい。

1.1.3.4 XRAIN雨量情報の特徴

Xバンド MP レーダは、上記のとおり高い精度の降雨観測が可能であり、地上雨量計により補正を必要としないため、観測後に観測結果を 1～2 分程度の遅れで配信することができ、短時間に急激に成長や衰退をする雨域を時々刻々と捉えることが可能となる。また、Xバンドの波長を使用しているためスケールの小さい豪雨を捉えるのに十分な解像度を有している。

今回、導入されたXバンド MP レーダの特徴をCバンドレーダと比較して整理すると下記のとおりである。

・空間解像度の向上

Cバンドと Xバンドの波長の差により C バンドの波長を使う現行レーダの観測分解能は 1ｋｍメッシュであることに対して Xバンドの MP レーダは 250ｍメッシュの分解能で観測が可能となる。このため現行Cバンドレーダの 16 倍の空間解像度で雨量情報が取得可能になる(図-Ⅱ 1.1.3.6)。

・時間分解能

現行 C バンドレーダ雨量計は、水平偏波の反射強度のみから雨量を推定するため、地上観測雨量とキャリブレーションを行い、レーダパラメータを随時修正することによって雨量換算の精度を確保している。この地上観測雨量の観測間隔が 5～10 分間隔であるため、現行 C バンドレーダでは観測間隔が 5 分間隔となるが、X バンド MP レーダは、地上観測とのキャリブレーションを行わずとも精度良く観測ができるため、キャリブレーションが不要であり地上観測雨量の収集を待つ必要ないため、1 分毎に観測を行うことが可能となる。このため現行 C バンドレーダの 5 倍の時間分解能で雨量情報が取得可能となる。

・リアルタイム性の向上

現行 C バンドレーダは地上観測雨量のキャリブレーションのために、地上観測雨量の収集、キャリブレーション処理のために観測から配信まで 10 分程度を要するが、X バンド MP レーダは、キャリブレーションの必要がないため、観測から 2 分程度の遅れで配信が可能となった。このため、現行Cバンドレーダの 1／5 の遅れ時間で雨量情報を取得可能となる。

Xバンド帯の波長を使用するレーダの欠点として、観測可能なエリアが狭いほか、降雨による電波強度の減衰（降雨減衰）が著しいため、特に豪雨時には観測精度が低下する。しかし、Xバンド MP レーダでは降雨減衰の影響を受けにくい位相情報を用いて雨量推定を行い、さらに複数台のレーダで異なる方向から降雨域を観測することにより、降雨減衰の影響をある程度克服している。また、観測範囲が狭いことについても、複数台の MP レーダをネットワーク化することで克服するようにしている。

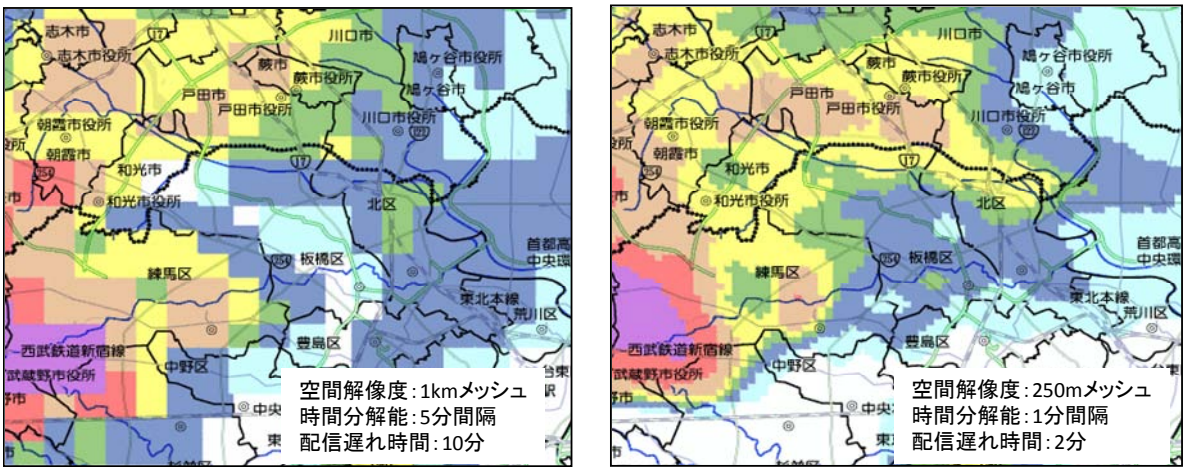


図-Ⅱ.1.1.3.6　現行 C バンドレーダと X バンド MP レーダの空間解像度の比較

1.1.3.5　XRAIN の観測精度

a) XRAIN による豪雨の観測事例

2010 年 7 月 5 日東京都北部で局地的な集中豪雨が発生し、浸水被害が発生した。19 時 30 分～20 時 30 分までの 1 時間に、東京都板橋区役所に設置されている地上雨量計で 107ｍｍの降雨が観測された。その時の X バンド MP レーダによる当該豪雨の観測状況を図-Ⅱ.1.1.3.7 に示す。板橋や練馬の観測所周辺に 1 時間あたりに換算して 100ｍｍを超える雨域が集中し、南に数ｋｍ離れると、ほとんど雨域が観測されていないことが明確に把握できる。なお、X バンド MP レーダは、そのレーダの特性から豪雨時に観測不能エリアが発生する場合があり、これを回避するために特定のエリアは複数台で観測するようにレーダネットワークが設計されている。この雨域が観測されたエリアは 2 台のレーダで観測されていたため、観測不能エリアの発生を回避して観測を継続することができていた。

この豪雨イベントの、X バンド MP レーダ、C バンドレーダ、地上雨量計で観測した 10 分間雨量の時系列図を図-Ⅱ.1.1.3.8 に示す。レーダ雨量は、地上雨量計の設置場所に対応した 1 メッシュの雨量値を示したものである。いずれの地点においても X バンド MP レーダは、C バンドレーダと比較して地上雨量計で観測雨量の時間変化及び降雨量を精度よく観測できていることが確認できる。

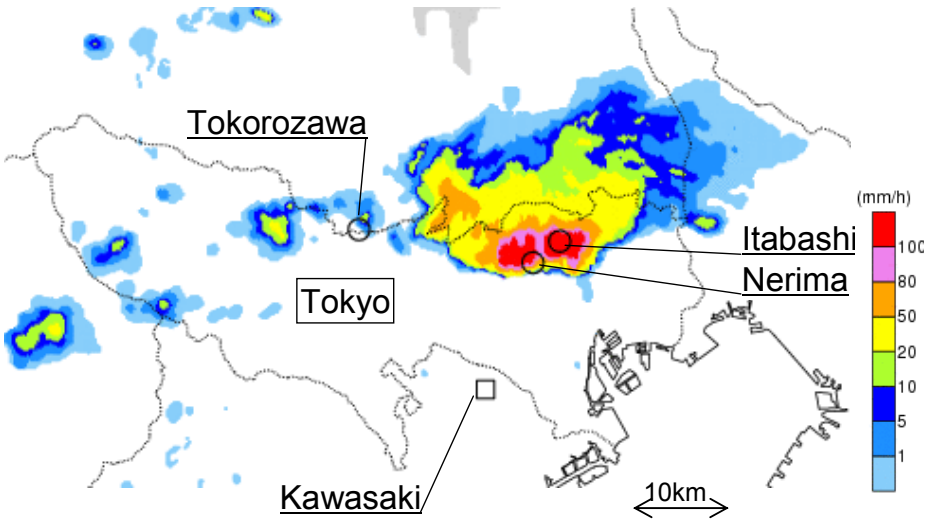


図-Ⅱ.1.1.3.7 X バンド MP レーダによる観測状況（2010 年 7 月 5 日）

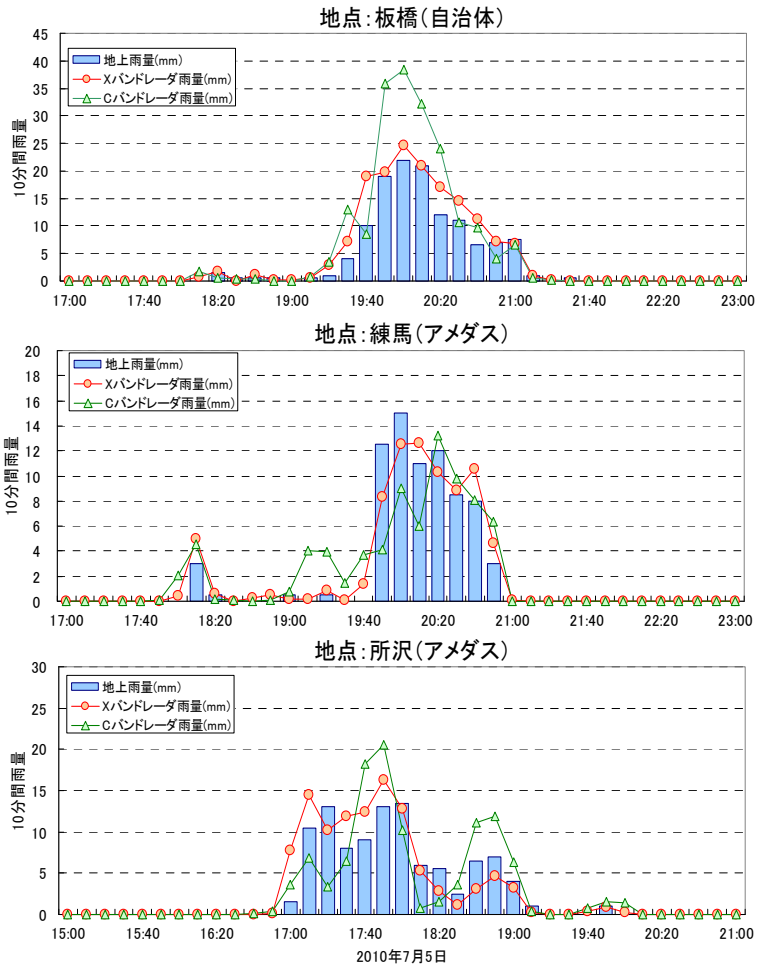


図-Ⅱ.1.1.3.8 X バンド MP レーダ合成雨量と地上雨量の比較（2010 年 7 月 5 日）

b) 個別レーダの観測精度

2010 年 7 月 1 日～9 月 30 日までにおいて各地域の地上雨量計で時間雨量が大きい上位 10 事例を用いて、X バンド MP レーダの雨量観測精度を検証した。各レーダサイトの観測範囲内（半径 60km）にある全ての地上雨量計とそれに対応したメッシュのレーダ雨量を 10 分雨量値で比較した結果を図-Ⅱ.1.1.3.9 に示す。X バンド MP レーダの雨量算出は、1 分間降雨強度で約 14mm/h 以上に相当する降雨の場合は Kdp-R 関係式、約 14mm/h 未満の場合は Z-R 関係式により行われる。図中の黒色で示すプロット点は X バンド MP レーダの 10 分間積算雨量が全て Z-R 関係式で求められた積算雨量を意味し、緑色で示すプロット点は 10 分間積算雨量の 9 割を Kdp-R 関係式で求めた積算雨量を意味する。実線は X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の関係の回帰直線を示している。X バンド MP レーダ雨量は、地上雨量に対してある程度の誤差（ばらつき）を有し、いくつかのレーダサイトではやや過小評価傾向を示していることが確認できる。ただし、X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の比較は、地上雨量計を真値と仮定しているため、レーダ観測固有の誤差の他に、レーダ観測と地上雨量観測の空間的代表性（目標体積中の平均的雨量と点雨量）や時間的代表性（1 分毎の瞬間値の積算と連続積算値）、測定高度（上空と地上の降水）の違い等に起因する誤差を含んだ評価であることに留意する必要がある。

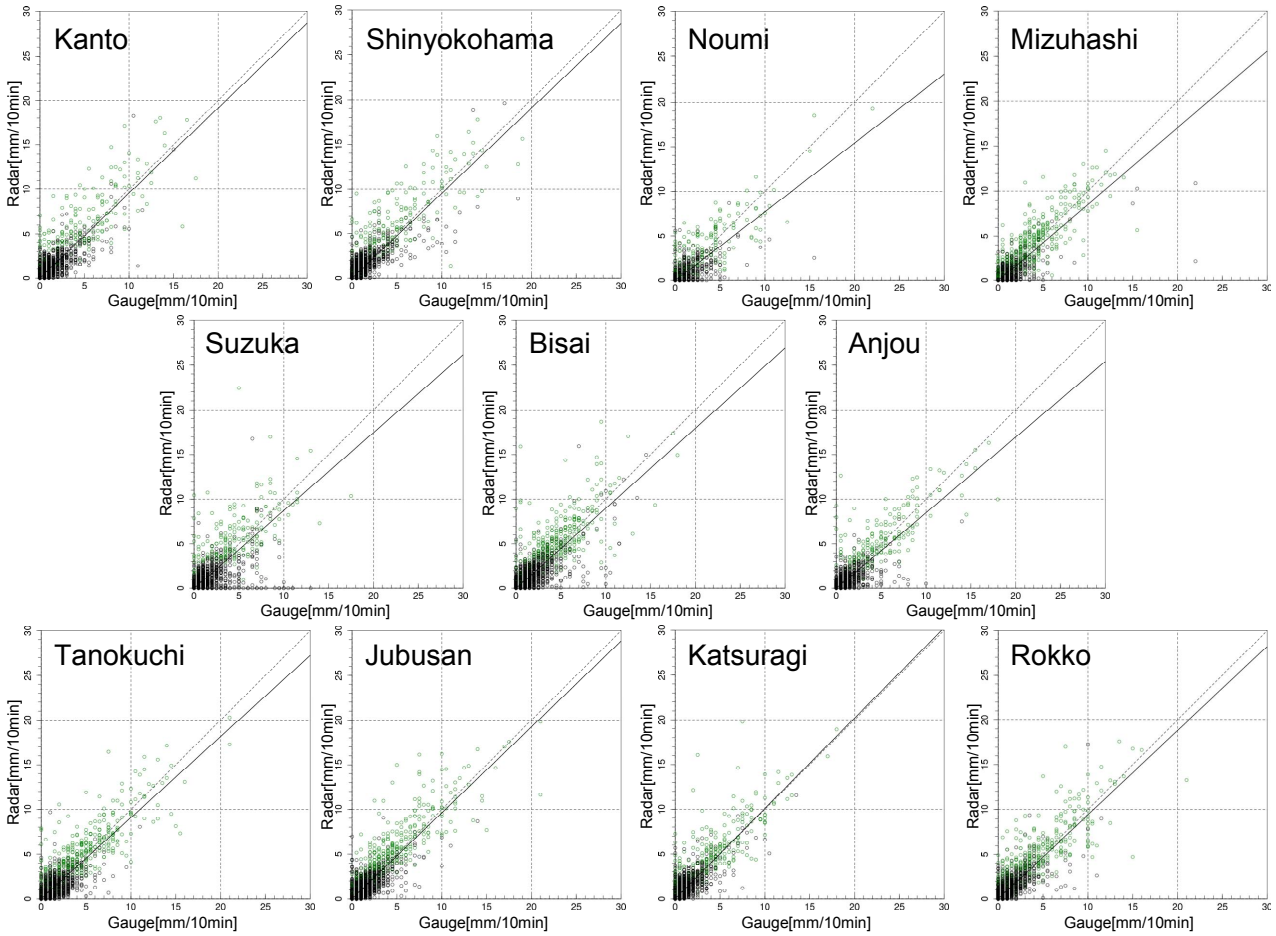


図-Ⅱ.1.1.3.9　X バンド MP レーダの雨量観測精度の検証結果

各レーダサイトの観測範囲内（半径 60km）にある全地上雨量計とそれに対応したメッシュのレーダ雨量を 10 分雨量値で比較したもの

c) レーダの距離別観測精度の特徴

降雨強度の計算は、弱雨時は Z-R 関係式（反射強度による雨量算定)、強雨時は Kdp-R 関係式（位相情報による雨量算定）を使用するコンポジット方式を適用している。そこで、レーダからの距離別の観測精度を雨量算定方式毎に整理する。Kdp-R 関係式で求めたためられた雨量と地上雨量の距離別の比較を図-Ⅱ.1.1.3.10 に示す。また、Z-R 関係式で求められた雨量と地上雨量のレーダからの距離別の比較を図-Ⅱ.1.1.3.11 に示す。Z-R 関係式で求められた雨量は、レーダから遠方になるほど過小評価になることが明確に確認できる。これは、減衰補正が遠方になる程不十分になることに起因する。一方、Kdp-R 関係式で求められた雨量は距離による精度の変化は Z-R 関係式を用いる場合に比べ大幅に小さくなることが確認できる。ただし、60～80km になると、レーダー値が地上雨量よりもやや小さくなる。これらの結果から、特に Z-R 関係式を用いる場合、レーダサイトの遠方ではレーダの観測精度は過小評価傾向になることがわかる。

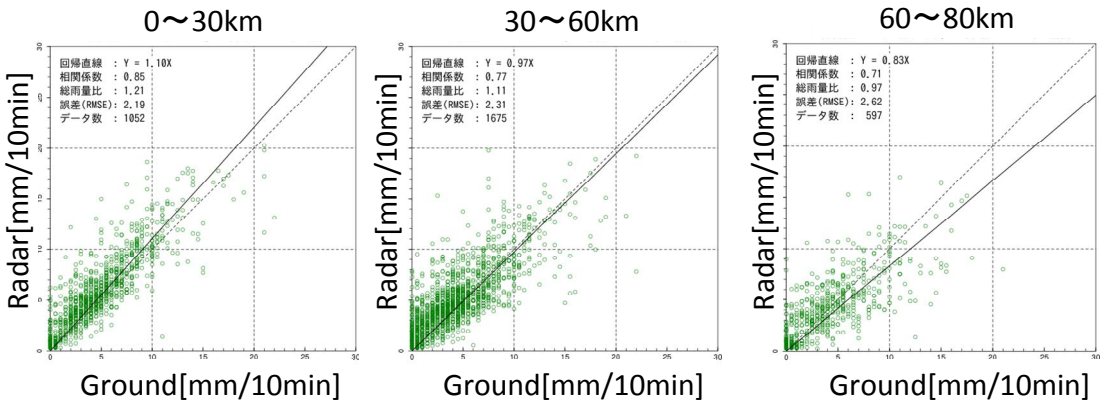


図-Ⅱ.1.1.3.10　Kdp-R 関係式で求めためられた雨量と地上雨量の距離別の比較

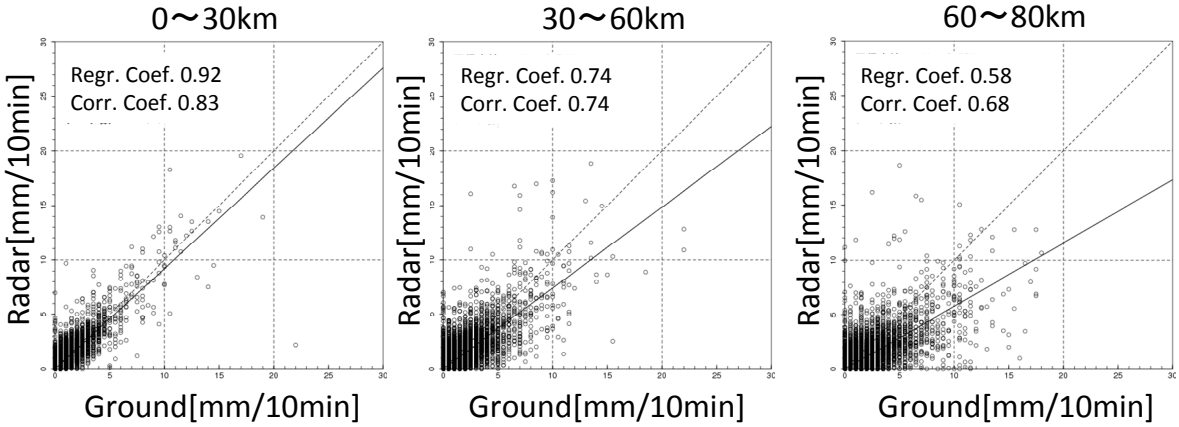


図-Ⅱ.1.1.3.11 Z-R 関係式で求めためられた雨量と地上雨量の距離別の比較

d) レーダ合成雨量の観測精度の特徴

配信されるデータは、各レーダで観測された雨量値を合成処理しているため、レーダサイト近傍であっても遠方のレーダの雨量値が合成に含まれる領域は、過小評価傾向を示す場合がある。図-Ⅱ.1.1.3.12 は、近畿地域のレーダから 60km 以遠のデータが合成に含まれる領域をピンクで示している。図中の〇印はアメダス観測所を示しており〇印の色は、2011 年の台風 12 号事例での X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の回帰係数を示している。ピンクで示される領域内では回帰係数が小さく過小評価傾向であることが確認できる。一方で、レーダから 60km 以内で観測可能な範囲では精度良く観測ができていることが確認できる。

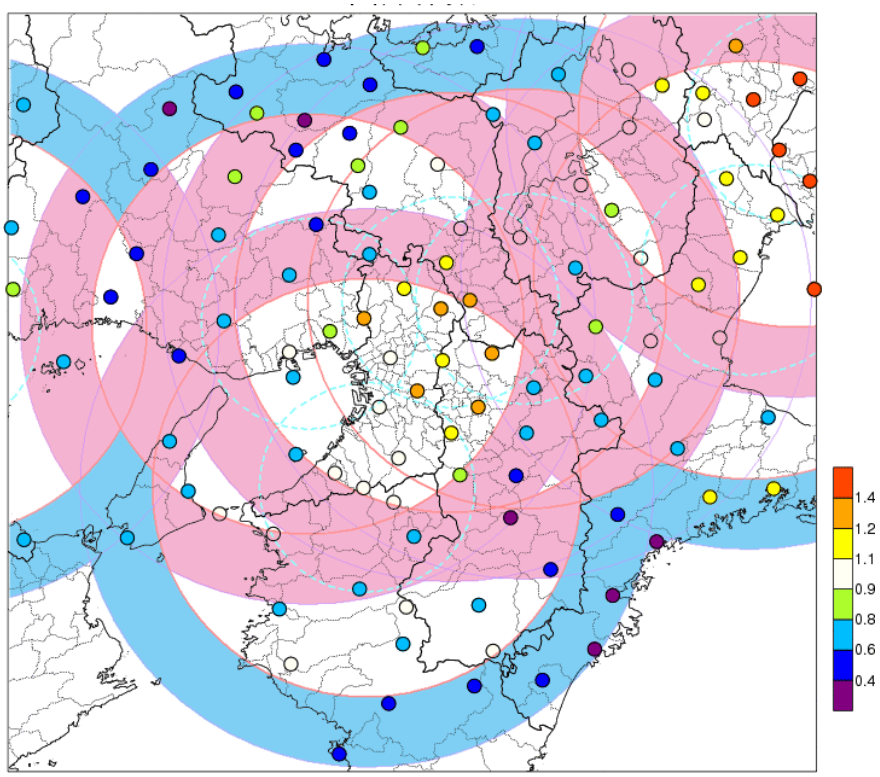


図-Ⅱ.1.1.3.12 レーダから 60km 以遠のデータが合成に含まれる領域の過小評価傾向

e) 1 分雨量の観測精度

図-Ⅱ.1.1.3.7 に示す川崎地点にディスドロメータを設置し降雨を観測した。ディスドロメータにより観測した 1 分間雨量と X バンド MP レーダ雨量を比較した結果を図-Ⅱ.1.1.3.13 に示す。X バンド MP レーダ雨量は、ディスドロメータの設置場所に対応した 1 メッシュの合成雨量(1 分間値)である。実際の降雨は 1 分毎に大きく変動していることが確認できる。X バンド MP レーダ雨量は、1 分毎の降雨の変動をよく捉え、降雨量も高い精度で観測できていることが確認できる。

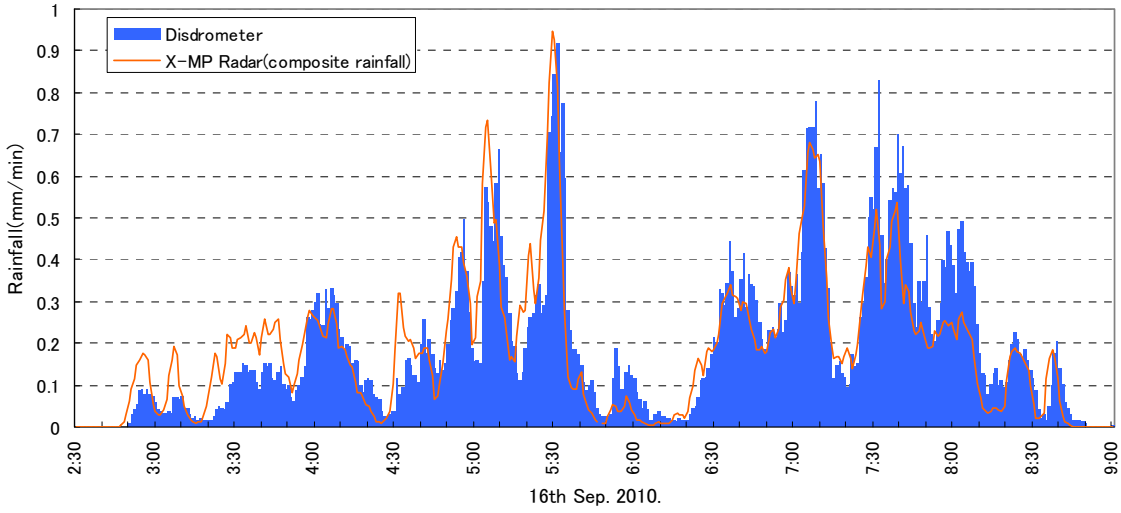


図-Ⅱ.1.1.3.13 X バンド MP レーダ合成雨量とディスドロメータ雨量による 1 分雨量の比較

(観測日時：2010 年 9 月 16 日、観測場所：川崎国道事務所)

1.1.3.6 XRAIN 雨量情報の利活用

X バンド MP レーダ雨量情報は、水防活動、避難情報の発令のための参考情報として利用され始めている。たとえば、平成 23 年台風 12 号による大雨に伴う土砂崩れにより発生した河道閉塞箇所に雨量計を設置するまでの間の代替の雨量情報として、X バンド MP レーダ雨量情報が河道閉塞の決壊監視に利用された。また、決壊監視を支援するために、集水域内の累積雨量に応じてアラートメールを本省、近畿地整の防災担当、TEC-FORCE メンバーへ配信するシステムが実施された（図-Ⅱ.1.1.3.14)。

図-Ⅱ.1.1.3.14 平成 23 年新潟・福島豪雨

この他、土嚢積み等の水防活動の指示、避難勧告・指示、交通規制の実施・継続・解除、パトロール及び体制の準備等に、信濃川下流沿川の自治体職員が X バンド MP レーダ雨量情報を利用した実績も報告されている。

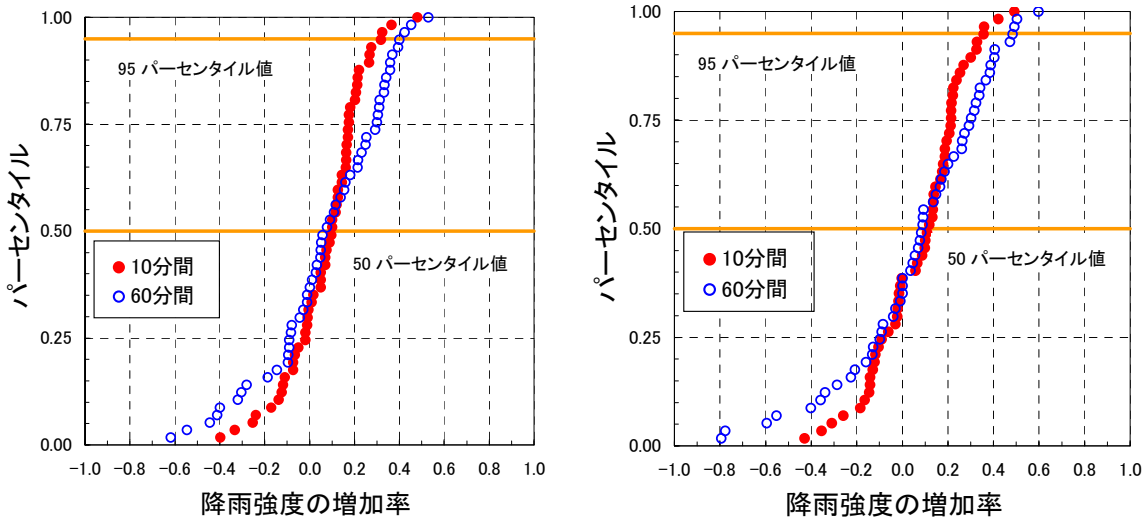
1.1.4　豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響評価

近年、日本各地において時間 50mm 以上の豪雨、さらには 10 分間程度の短時間に集中する豪雨の発生が頻繁に見られるようになっている。各都市においては浸水被害を防ぐための対策が進められているところであるが、長期的に見ると降雨の特性が変化し、5 年や 10 年に一度の頻度で発生する降雨強度が増加傾向を示すと考えられるため、既存の浸水対策のみでは 5 年確率や 10 年確率で発生する豪雨に対応できなくなる可能性がある。そこで、将来的な豪雨の増加が既存の浸水対策に対してどのような影響を与えるのか、浸水シミュレーションを用いた 3 地区のケーススタディで検討した。

1.1.4.1　豪雨の増加傾向の推定と降雨シナリオの設定

豪雨の増加傾向を定量的に推定するため、まずは気象庁の降雨データを整理・分析した。具体的には、1960 年から 2009 年までの 50 年の降雨データを扱い、全国の管区・海洋・地方気象台（全 57 気象台）のデータを収集した。また、データ項目としては気象庁が所有している最大 10 分間降雨強度と、最大 60 分間降雨強度のデータを収集した。

全国 57 気象台における毎年最大降雨強度を用いて、50 年後の 5 年確率の降雨強度の増加率を気象台ごとに算出し、増加率のパーセンタイルを整理した結果を図-Ⅱ.1.1.4.1(a)に示す。これより、全体的には 50 年後の 5 年確率の 10 分・60 分間降雨強度が、現在より 1.1 倍程度（50 パーセンタイル値（中央値））、最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加することが試算された。図-Ⅱ.1.1.4.1(b)に 10 年確率の降雨強度の増加率に関して、同様に整理したものを示す。10 年確率の降雨強度についても 5 年確率の降雨強度と同様な傾向が示された。



(a)　5 年確率降雨強度　　(b)　10 年確率降雨強度

図-　Ⅱ.1.1.4.1　全国 57 気象台における 10 分・60 分間降雨強度の増加率

上記の結果を踏まえ、ケーススタディを実施する各都市における既存計画の降雨強度に対し、10 分・60 分間降雨強度が 1.3 倍に増加したときを想定し、図-Ⅱ.1.1.4.2 に示す既存降雨強度式とシナリオ A～C の降雨パターンを設定してシミュレーションを実施することとした。シナリオ A では、降雨強度が強いピークの 10 分間について降雨強度を 1.3 倍とし、ピーク前後の 60 分間の降雨強度が 1.0 倍となるように設定した。シナリオ B では、ピーク前後の 60 分間の降雨強度を 1.3 倍とし、ピークの 10 分間降雨強度については 1.0 倍とした。シナリオ C ではピーク 10 分間、ピーク前後の 60 分間の降雨強度ともに 1.3 倍とした。

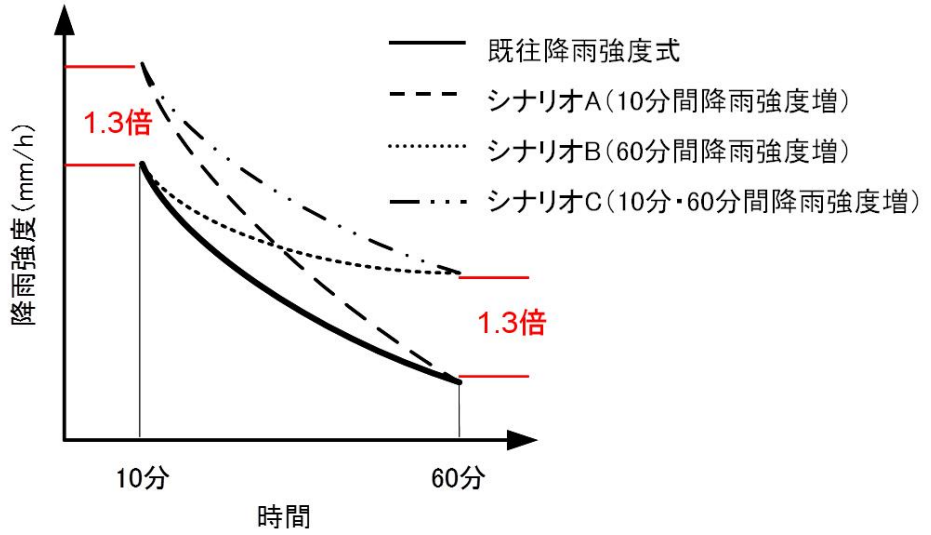


図-Ⅱ.1.1.4.2　降雨パターンの設定イメージ

ケーススタディを実施する対象都市は3都市とし、それぞれの都市における中心市街地を含む地区（X～Z地区）を選定した。対象都市については、地域に偏りが起こらないように選定している。また、シミュレーションに使用したソフトはMOUSEもしくはInfoWorksである。

1.1.4.2　浸水シミュレーションによる影響評価結果

地区別・シナリオ別にシミュレーション結果（浸水状況）の整理を行った結果を表-2.1.6.1に示す。なお、浸水面積については、浸水深20cm以上（床下浸水相当以上）の箇所を算定対象とした。以下にその概要を示す。

① 集水面積が比較的小さなY地区では、既存降雨に対して10分間降雨強度を増加させたシナリオA、シナリオCでの水位上昇が顕著であった。

② 集水面積が比較的大きいX及びZ地区では、60分間降雨強度増のシナリオB、シナリオCでの水位上昇が顕著であった。

③ 10分間降雨強度と60分間降雨強度を共に増加させたシナリオCにおいては、いずれの地区においても浸水深20cm以上（床下浸水相当以上）の浸水面積が既存降雨の時に対して増加した。

これらの結果より、将来的に豪雨の頻度が増加することが想定される場合においては、追加の浸水対策を検討することが望まれる。シミュレーション結果を踏まえると、Y地区については、上流部の枝線部における能力不足が浸水原因と想定され、短時間雨量における影響を考慮することが重要となる。X及びZ地区については、雨水幹線において流下能力を超えたことが浸水原因と想定され、広範囲で排水機能のレベルアップを図ることが有効と考えられる。

また、流下対策はもちろんのこと、雨水貯留浸透の継続的な取り組みも併せて有効と考えられる。さらに、近年の厳しい財政事情を考慮すると、降雨観測技術や内水ハザードマップ等、ソフト面の対策の充実が重要となってくる。

表-Ⅱ.1.1.4.1　浸水シミュレーションによる影響評価結果

地区名			X地区	Y地区	Z地区
排除方式			合流	分流	合流
シミュレーション対象面積			約3,350ha	約62ha	約1,900ha
流出係数			約0.45	約0.60	約0.82
シミュレーション対象降雨		60分間降雨強度	34.3mm/hr	50.0mm/hr	53.4mm/hr
		10分間降雨強度	87.1mm/hr	109.5mm/hr	114.6mm/hr
浸水対策の形態			流下幹線整備中心	貯留池整備併用	貯留幹線整備併用
既存降雨強度での浸水シミュレーション状況			一部開水路確保	一部開水路確保	満管（管頂レベル超）
対象降雨パターン	シナリオA 10分間降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	0.7%	6%	0.4%
		主な浸水集中域	－	上流部	－
	シナリオB 60分間降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	7%	0%	7%
		主な浸水集中域	中流部	－	全体的（GLの低い箇所）
	シナリオC 10分・60分間降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	9%	6%	4%
		主な浸水集中域	中流部	上中流部	全体的（GLの低い箇所）

※既存降雨に対する浸水増加面積率＝（既存降雨に対する浸水増加面積）/（対象地区面積）

※既存降雨に対する浸水増加面積＝（当該シナリオによる浸水面積）－（既存降雨による浸水面積）

1.1.5 降雨予測技術を活用したダム洪水調節操作の高度化

1.1.5.1 はじめに

気候変動に伴って世界的に豪雨が強大化する可能性については、現在までにIPCCレポートやその他の研究において多く指摘されている（例えばIPCC2007）。日本国内に対象とし、将来において豪雨の規模が増大する可能性を示唆する既往研究もある（和田ら2005、柏井ら2008）。このように豪雨の降り方が変化するとダムの洪水調節操作にも影響を与える可能性がある。例えば佐山らは、今後の地球温暖化を考慮した場合の淀川流域における洪水流量の増加、ダム操作への影響について、気象庁の地域気候モデルRCM20のデータを用いて分布型流出モデルにより検討を行っており、例えば日吉ダムにおいては計画規模を越えるような超過洪水頻度が多くなる将来気候においてただし書き操作回数が現在気候と比較して増加することを示している（佐山ら2008）。同様の検討結果は森らの研究からも得られている（森ら2008）。大規模な新規治水施設の建設が今後も望めないとすれば、ダムにおいては上述したような増加する洪水外力に対して既設ダムの従来の操作を高度にすることで対応することが重要となる。

既設ダムの治水機能向上の一つの方策として予測雨量を活用した洪水調節が挙げられる。青山は超過洪水に対し大被害を回避するダム操作として、超過洪水発生が予測された段階で洪水調節開始流量から洪水調節を開始しないで洪水調節容量を温存し、下流河川における水位が大被害発生水位（当該水位を超えると大被害が生じる水位）を超えると予測した段階で当該水位を超えないように洪水調節を行うという方法を提案している（青山2007）。水位上昇の予測は予測雨量を利用して行う。以上の操作によりただし書き操作時に発生する大被害を回避することが可能となる。この操作の課題としては、超過洪水の発生を洪水初期の段階で予測する必要があるとともに、洪水調節中にも下流河川の大被害発生水位以上に水位が上昇することを予測する必要があり高い予測雨量の精度が要求される。また、無害流量以上の放流を行うため、中小規模の氾濫の許容が前提となる。

予測雨量の精度が高ければ、青山が提案するような操作を実施することが可能となるが、近年予測精度は日々向上しているものの予測誤差は未だにゼロとなったわけではないため、ダム洪水調節における予測雨量の定量的な利用は限定的である（鳥居2012）。現在までに行われている予測雨量を活用したダム洪水調節に関する代表的な研究・取り組みとして、洪水調節操作の事前放流操作および後期放流操作における利用が挙げられる。事前放流操作の高度化に関する研究として、秋葉ら、戸谷ら、下坂ら、腰塚らは流入量特性を活用した事前放流量決定手法を提案している（秋葉ら2004）、（戸谷ら2006）、（下坂ら2009）、（腰塚ら2006）。その手法では、過去の洪水データから低減開始時の流入量（または累積降雨量）とそれ以降の総流入量を把握し、実際に洪水が発生した時にその時点の流入量を基にしてその後の総流入量を推定し、その分の利水容量を事前放流するものである。これにより、利水側に支障を来すことなくダムの洪水調節容量を洪水時に一時的に増加させることができる。上記手法は当初は予測雨量を利用せず、実測雨量および実測流量からその後の総流入量を推定していたが、北田らはその手法に予測雨量として気象庁の降水短時間予報（30分間隔で発表される、6時間先までの1時間雨量）を組み合わせ、草木ダムの2007年9月台風9号を対象としてシミュレーションを実施してその効果を確認している（北田ら2010）。

後期放流操作における予測雨量の活用事例として、平成22年7月13日から14日にかけて発生した洪水時の中国地方整備局八田原ダムにおける操作と、平成23年9月の台風15号に伴って発生した洪水に対する三春ダムの操作が挙げられる。八田原ダムにおいてはピーク以降においてはダムの空き容量と比較して予測される雨量が小さいため、規則操作よりも放流量を小さくする（オーバーカット）ことにより、ダムからの放流量を最大約138m^3/s低減させることに成功した。この操作によって流入量と放流量の差は約282m^3/sとなり、下流の目崎地点において約55cmの水位低下に成功した（国土交通省中国地方整備

局八田原ダム管理所2010）。また三春ダムにおいてもほぼ同様の操作が平成23年9月の台風15号に伴う洪水において実施された。この時、三春ダム下流の阿久津地点で計画高水位を上回り、破堤等の重大な被害が想定されたため、降雨予測およびダムの空き容量を勘案し、流入量の全量カットによる洪水調節が実施された。三春ダムの洪水調節によって阿久津地点で約0.5mの水位を低減させる効果があったと考えられ、この時通常の規則操作に従って操作した場合は約0.35mの水位低減効果があったとしている。すなわち、全量カットによる効果は約0.15mの水位低減効果であったとしている（国土交通省東北地方整備局2011）。

上述した流出量特性を活用した事前放流量は、基本的には予測雨量への依存性を極力低下させつつも治水に効果的かつ利水に支障をきたさないことを指向した手法である。この手法は、事前放流を実施することで洪水調節容量を一時的に増やすことができるものの流入量が洪水調節開始流量を超えた後は規則操作に従うため、ダムの計画規模を超えるような大規模出水に対しては効果を発揮するが、流域全体では大きな出水ではあるもののダム流域では中小規模にとどまる洪水などに対しては規則操作と比較して放流量を下げることができず、下流の安全性を高めることはできない。また、洪水後期のオーバーカットについては、予測雨量への依存性自体は低くはないが、予測雨量の精度が十分に高い降り終わりに的を絞って予測雨量を活用する方法であるため、下流の安全性を高めるという点でその効果はまだ限定的である。流域の降雨状況に応じて下流の安全性を高めるための効果的なダム洪水調節手法は未だ提案されていない状況である。

規則操作よりも効果的にダム地点において洪水調節を行い下流の安全性を高めるためには、洪水の全体規模を把握した上で洪水調節終了時において洪水調節容量を100%使い切れるような最適放流量を決定することが求められる。そのためには洪水の全体規模をおおよそ把握することができる予測雨量に対して高い精度が要求される。気象予測技術の進歩により予測雨量の精度は日々改善されているが、その時々の気象状況に応じて予測の誤差は異なると考えられ、予測誤差が完全にゼロになるのは困難またはかなり遠い未来であると考えられる。このような状況では、予測誤差がゼロになるのを待つよりも「予測雨量とは誤差を含んでいるが、それを用いることでダムの洪水調節効果を高める可能性であるデータ」という認識を持ち、その利用法を考えることが重要である。例えば三石らはWRFで計算された予測雨量に対して起こりうる上限値と下限値をそれぞれ設定し、予測の幅を考慮してダム洪水調節を行うことを提案している（三石ら2011a, 2011b）。この研究事例にも示されるような予測の幅を考慮した上でダム操作をどのように行うかという視点が重要であると。ここでは、三石らや鳥居らで述べられている予測雨量の誤差発生確率を考慮したダム洪水調節手法を基に（三石ら2011a, 2011b）（鳥居ら2012）、現在気象分野で盛んに研究が実施されているメソアンサンブル予測雨量（以下、本章において断りがない限り「アンサンブル予測」は「メソアンサンブル予測」を示すものとする。）から得られる予測の幅を利用した下流の安全性を高めるためのダム洪水調節手法について述べる。1.1.5.2ではアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要、1.1.5.3ではシミュレーション実施条件、1.1.5.4ではシミュレーション結果、1.1.5.5では考察、1.1.5.6ではまとめと今後の課題を述べる。

1.1.5.2 アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作方法として、三石らや鳥居らで述べられている予測雨量の予測の幅を考慮した放流量決定手法をベースとし、その手法の概要を述べる。

a) アンサンブル予測雨量

従来、ダム管理の現場においては気象庁のMSM33時間予測に代表されるような確定的な予測雨量が使われてきている。しかし、ダム流域単位で見たときに予測雨量に誤差が含まれていることは様々な調査において指摘されている（例えば和田ら2004、鳥居2012）。そのような中、三石ら、鳥居らは予測

雨量を確定値として扱うのではなく、誤差を持つことを前提として予測雨量の誤差確率分布を把握するための検討を行っている（三石ら2011a, 2011b）（鳥居ら2012）。それらの検討では、気象庁MSMの過去の予測データと観測値を比較することで統計的に予測雨量の誤差確率分布の設定を行っている。しかし、気象予測モデルおよび予測計算の初期値・境界値の改良に伴い予測雨量の精度が日々変化することから、統計解析を実施するに足る同質なデータを蓄積することが難しい。さらに、予測雨量の誤差はその時々の気象状況に依存するためイベント毎に誤差が大きく異なると考えられるため、過去の予測雨量データの蓄積に基づいて誤差確率分布を設定する場合、適用する洪水によっては誤差の幅をかなり広く見積もってしまう可能性がある。

これらのことから本検討では、データの蓄積を必要とせず、かつその時々の気象状況に応じて適切な予測雨量の幅を算出するアンサンブル予測雨量を用いることとした。近年気象予測の分野では、予測計算の初期値に対してある程度のばらつきを与えて複数の初期値（アンサンブルメンバー）に対して予測計算を実施し、計算された予測の幅を評価するアンサンブル予測に関する取り組み・研究が盛んに行われている。これは、一つの初期値による予測では気象の不確実性故の予測の時間推移評価が難しいため、幅を持って評価するべきであるという近年の気象予測に関する認識を反映している。気象庁の1ヶ月や3ヶ月といった長期予測においてはすでに長期アンサンブル予測が現業化されているが、豪雨を対象としたような短期予測に関するアンサンブル予測はまだ現業化されていないが研究は多く実施されている（例えば吉野ら2011、Seko et.al.2011）。

b）アンサンブル予測雨量を用いた洪水時のダム操作方法の考え方

上述したアンサンブル予測雨量を用いたダム放流量決定手法を以下に述べる。

1) 最大放流量がO_1からO_Nまで異なるN通りの操作ケースを設定する。
2) 境界値の予測が更新されるタイミングでアンサンブル予測雨量の計算を行う。ここではメンバー数をMとし、その各アンサンブルメンバーの予測雨量の結果をここではEn 1、En 2…En Mとする。
3) 得られるアンサンブル予測雨量のメンバー1（En 1）についてダム流域を含めた流域全体で流出計算を行う。
4) 3)においてダム流域について得られる予測流入量に対し、操作ケース1（最大放流量O_1）で操作したときの下流基準地点のピーク流量（$Q_{p\_1\_1}$）を計算する。
5) 3)と4)の計算をその他のアンサンブルメンバーについても実施する。
6) 各メンバーの発生確率は等しいものとして、操作ケース1で操作した時の下流ピーク流量期待値（Q_{p_1}）を計算する。各操作の下流ピーク流量期待値は次式で定義される。

$$Q_{p\_i} = \sum_{e=1}^{M} p(e) \times Q_{p\_i\_e}$$

ここに、Qp_i：操作iによる下流ピーク流量期待値、M：アンサンブルメンバー数、$p(e)$：アンサンブルメンバーeの発生確率（全てのアンサンブルメンバーは発生確率が等しいとする）、Qp_i_e：アンサンブルメンバーeから求められる予測流入量に対して操作ケースiで操作した時の下流ピーク流量

7) 全ての操作ケースについて3)～6)の計算を行うことで下流ピーク流量期待値を計算する。
8) 得られた全操作ケースの下流ピーク流量期待値を最小にする操作ケースがその時点における最適操作とし、次の予測更新までその放流量で操作する。
9) 上記計算を境界値の予測が更新されるたびに行い、洪水が終了するまで実施する。

1.1.5.3 シミュレーション実施条件

前節で示したアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作について、実際に発生した洪水事例

を対象としてシミュレーションを行い、その効果を確認する。ここでは対象流域・ダム、計算条件等について示す。

a) 検討対象流域・ダム、対象洪水

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節の検討対象地域として、近年大きな洪水が発生し、洪水調節を実施したダムを含む河川流域を検討対象流域として選定することとした。ここでは平成23年に台風6号、12号および15号により洪水調節操作を実施した蓮ダムを含む櫛田川流域を対象とし、その3つの台風に伴って発生した洪水を検討対象とした。それぞれの台風の対象期間は以下の通りである。

台風6号：7月15日9時～7月20日15時

台風12号：8月29日9時～9月4日15時

台風15号：9月16日9時～9月21日21時

b) アンサンブル予測雨量の計算

アンサンブル予測雨量は、気象庁GSMの84時間予測を境界値として、WRFにより計算した。各台風について上述の対象期間について、GSMの予測が更新（6時間おき）される毎にその予測値を境界値として84時間先までの計算を行う。初期値についてはその時点よりも6時間前に行った予測計算結果を基にHybrid法（Wang2008a, Wang2008b）によりデータ同化による改善とアンサンブルメンバーの発生を行った。ここでアンサンブルメンバーは20とした。また計算領域については図-Ⅱ.1.1.5.1に示し、空間解像度は親領域において15km、子領域において5kmである。また、データ同化に用いたデータとしては、表-Ⅱ.1.1.5.1に示す。

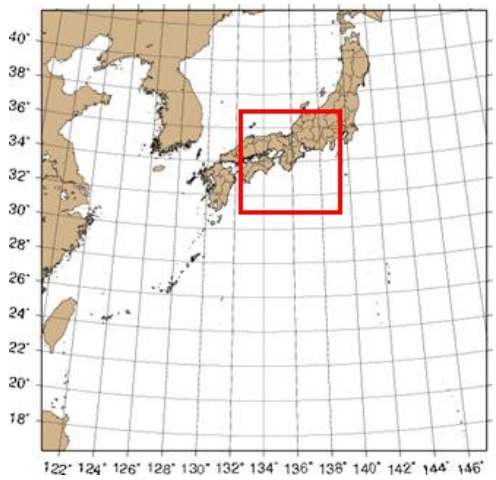


図-Ⅱ.1.1.5.1　計算領域（全体が親領域、赤枠内が子領域）

表-Ⅱ.1.1.5.1　データ同化に用いた観測データ一覧

種別	要素	入手先
気象観測衛星（AMSU-A, B）	気温、水蒸気	NCAR Research Data Archive
衛星大気追跡風	風	
高層実況	気温、風、水蒸気、気圧	
海上実況	気温、風、水蒸気、気圧	
飛行場実況	気温、風、水蒸気、気圧	
航空機実況	気温、風	
地上実況	気温、風、水蒸気、気圧	
ドップラーレーダ	風、反射強度（雨水）	気象業務支援センター

c) 流出計算モデル

アンサンブル予測雨量を入力として河川流量やダム流入量を計算する流出モデルとして、土研分布型モデルを用いた(鈴木ら1996、猪股ら2007)。パラメータ値については、上記3洪水の観測値からSCE-UA法（Duan1992）を用いて決定した。

d) 設定する放流量の操作ケース

b)において、最大放流量が異なる複数の操作ケースを設定することを述べた。ここでは、蓮ダム工事誌によると、ダム計画時においては洪水調節開始流量が200m³/s、最大放流量1000 m³/s、放流率0.55の一定率一定量操作であったことから（蓮ダム工事事務所1993）、200 m³/sから1000 m³/sの間を10等分し、それに洪水調節流量の200 m³/sを加えた200、280、360、440、520、600、680、760、840、920、1000 m³/sの11通りとした。

1.1.5.4 結果

a) 台風15号計算結果

最初に台風15号の計算結果について示す。降雨が降り始める前から降り終わりにかけて6時間おきに84時間予測計算を行っているが代表的な事例として流入量が洪水調節開始流量に到達する2日前および1日前（図-Ⅱ.1.1.5.2）の結果を示す。その結果、台風15号はそれほど長期間に渡る洪水ではなく2日程度のものであったため、GSM84時間予測を用いて計算した結果は降雨の降り始めから終わりまでを見通すことができる結果となった。洪水調節開始の2日前の時点で、アンサンブル平均雨量の積算値としては観測値よりも100mm程度小さい値となっている。また図-Ⅱ.1.1.5.3は洪水調節開始の1日前の結果である。2日前の予測と比較して降雨のピークをより正確に予測できており、積算雨量の値についても、アンサンブル平均値は観測値と相違ない結果となっている。図-Ⅱ.1.1.5.2および図-Ⅱ.1.1.5.3には併せてMSM33時間予測の結果も記載しているが、MSM33時間予測では、予測先行時間33時間と短いため降雨の全体規模が見渡すことができず、洪水の始まりから終わりまでを見通した効率的な洪水調節操作を実施することは難しいと考えられる。この点でも今回計算した84時間の予測はダム操作にとって有効な情報を提供しうるものであると言える。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅱ.1.1.5.4に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約380m³/sを放ることになり、貯水量の最大時において洪水調節容量の9.2%を使用し、下流の両郡橋地点のピーク流量は1,506m³/sとなった。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量200 m³/sの一定量放流となり、貯水量の最大時において洪水調節容量の30.5%を使用し、両郡橋地点のピーク流量は1,321 m³/sまで低減することができ、規則操作と比較して10%程度ピーク流量を低減することができた（図-Ⅱ.1.1.5.5）。このように、アンサンブル予測雨量から得られる情報を活用することで、その時点における最適な放流量を機械的に算出することができるのが本検討で提案する手法のメリットである。

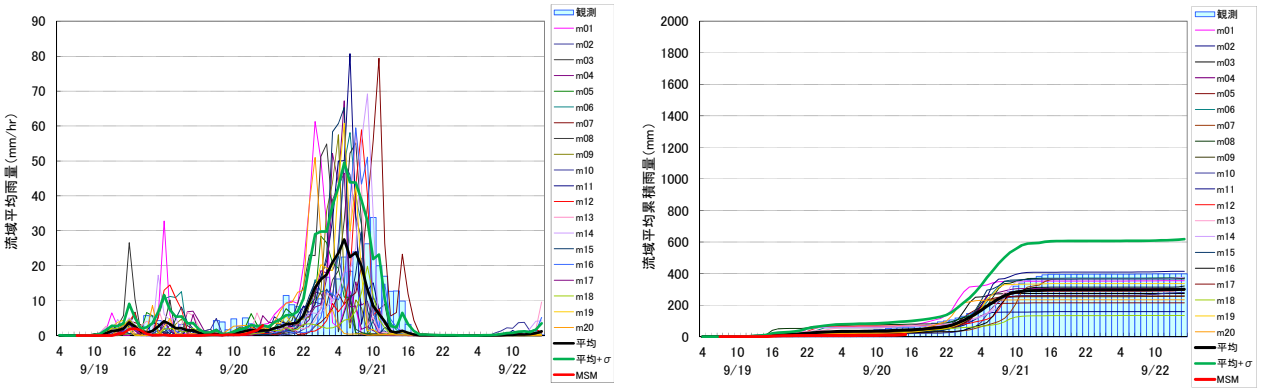


図-Ⅱ.1.1.5.2　9月19日3時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

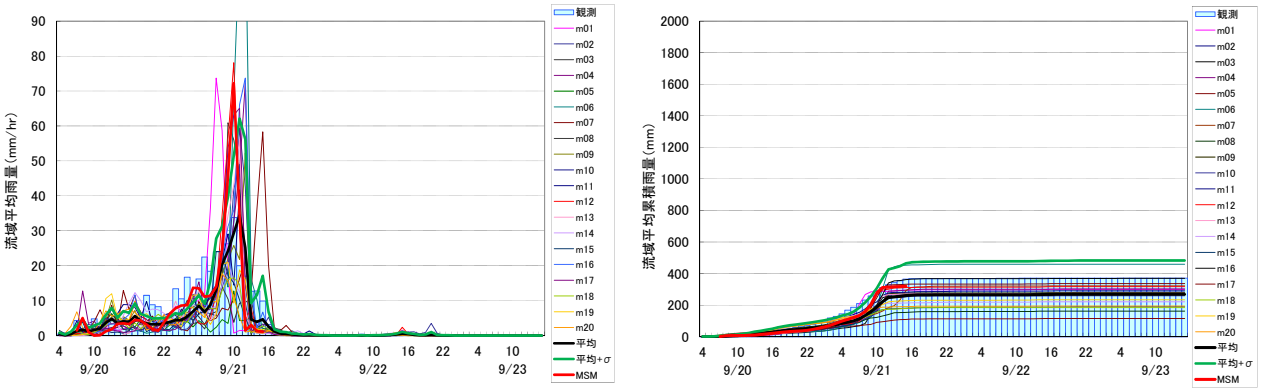


図-Ⅱ.1.1.5.3　9月20日3時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約1日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

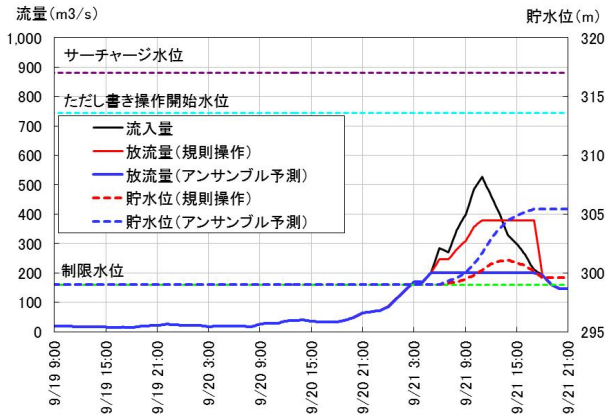


図-Ⅱ.1.1.5.4　台風15号時の蓮ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

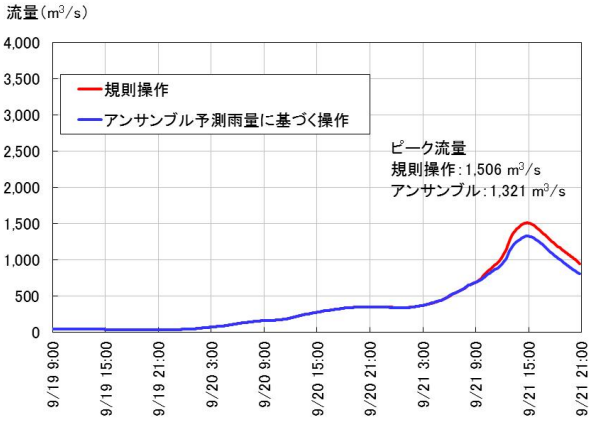


図-Ⅱ.1.1.5.5　台風15号時の両郡橋地点の流量時系列

b）台風6号結果

図-Ⅱ.1.1.5.6および図-Ⅱ.1.1.5.7は、台風6号について計算されたアンサンブル予測雨量の計算結果の一部である。これらの図も台風15号の結果と同様に、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達する2日前および1日前の時点を初期値として予測した結果である。図-Ⅱ.1.1.5.6に示す結果では、降

り始めの直後に発生する40mm/hr程度の雨について予測できていないものの、全体的な傾向は概ね再現されており、ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前から雨の降り終わりまでほぼ見通すことができていることが分かる。その一方で、MSM33時間予測では一山目の終わりまでしか見通すことができていない。しかし、7月20日の未明から朝にかけて雨がほとんど観測されていないにも関わらず、アンサンブル予測ではほぼ全てのメンバーが20～40mm/hr程度の予測をしており、過大評価している。図-Ⅱ.1.1.5.7に示すダム流入量が洪水調節開始流量に到達する1日前の予測結果については、84時間の積算雨量としてはアンサンブル平均値と観測値は近い値を示しているが、予測の前半期間でやや過小評価傾向、後半期間で先述の同様の傾向で過大評価傾向となっている。後半部分の過大評価については、次節でその原因について述べる。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅱ.1.1.5.8に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約450 m³/sであり、貯水量最大時において洪水調節容量の10.7%を使用し、2つある下流の両郡橋地点のピークについては、一つ目および二つ目のピーク流量はそれぞれ1,573m³/sおよび1,893m³/sとなった（図-Ⅱ.1.1.5.9）。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量は7月19日9時～15時にかけての280m³/sであり、その後は200 m³/sまで放流量を落とす結果となった。これは7月19日9時を初期値とした予測では予測雨量が観測値と比較して過大評価であり（図-Ⅱ.1.1.5.10）、放流量を上げて操作していたが、7月19日15時を初期値とした予測では二つ目の降雨ピークが精度良く予測され（図-Ⅱ.1.1.5.11）、過大評価が解消されたことにより放流量を下げることができると判断されたからである。貯水容量の使用率については、貯水量最大時において洪水調節容量の63.5%を使用し、規則操作よりもかなり大きい容量を使用している。下流の両郡橋地点のピークについては、一つ目のピークは1,480m³/s、二つ目のピークは1,662m³/sとなり、それぞれ6%、12%程度低減することができ、台風15号と同様に規則操作と比較して効果的な洪水調節を行うことができた（図-Ⅱ.1.1.5.9）。

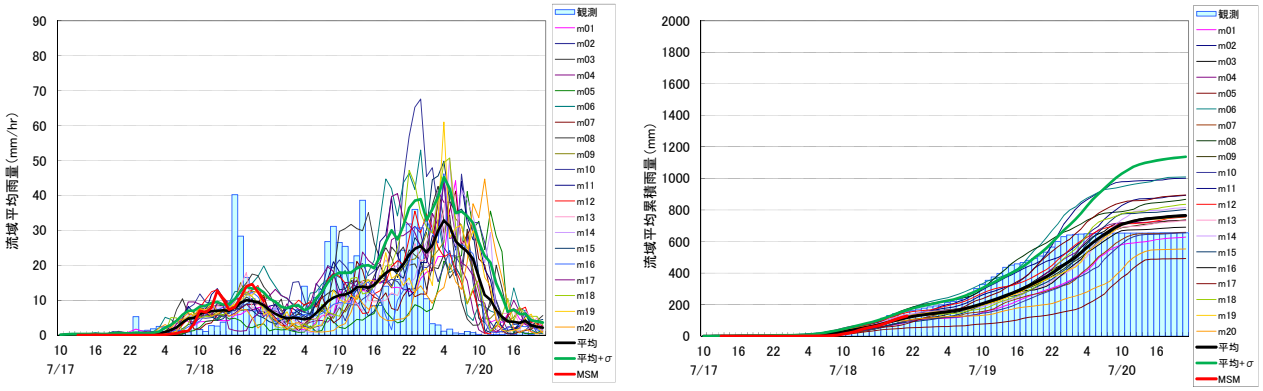


図-Ⅱ.1.1.5.6　7月17日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

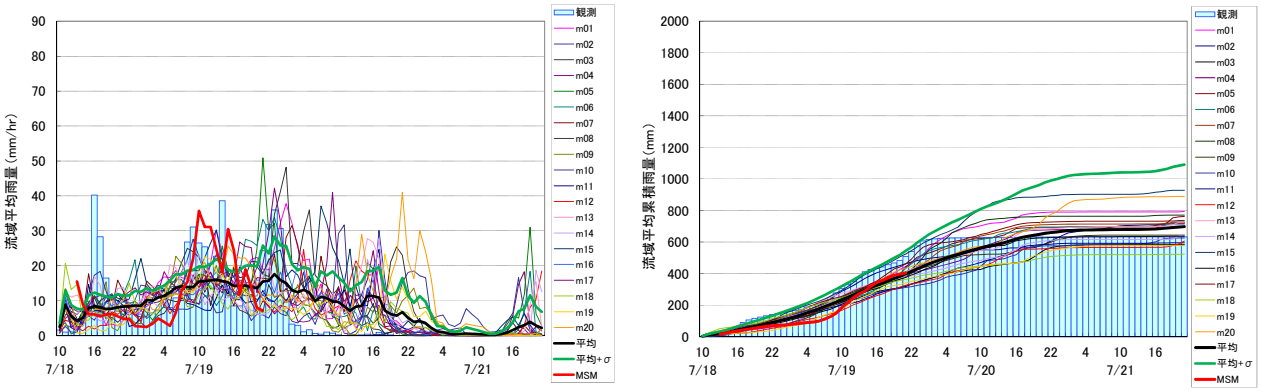


図-Ⅱ.1.1.5.7　7月18日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約1日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

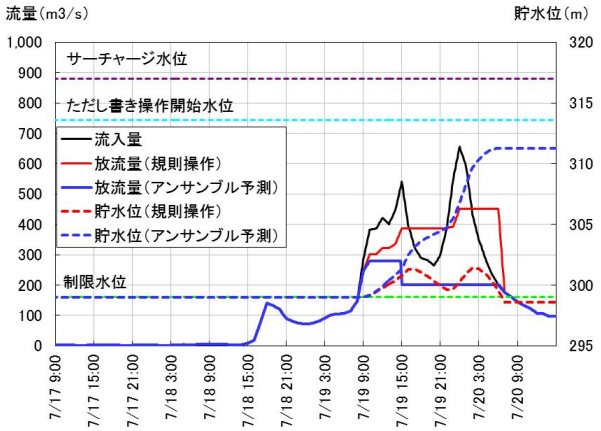


図-Ⅱ.1.1.5.8　台風6号時の蓮ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

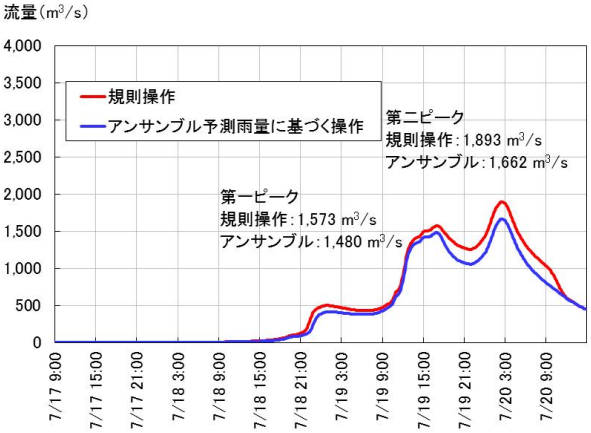


図-Ⅱ.1.1.5.9　台風6号時の両郡橋地点の流量時系列

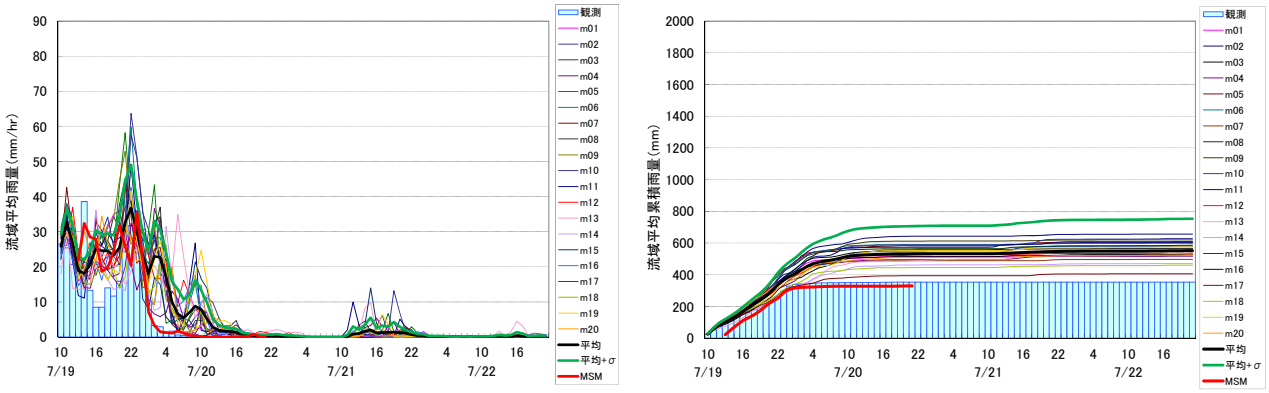


図-Ⅱ.1.1.5.10　7月19日9時（放流量280 m³/sが最適と判断された時）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

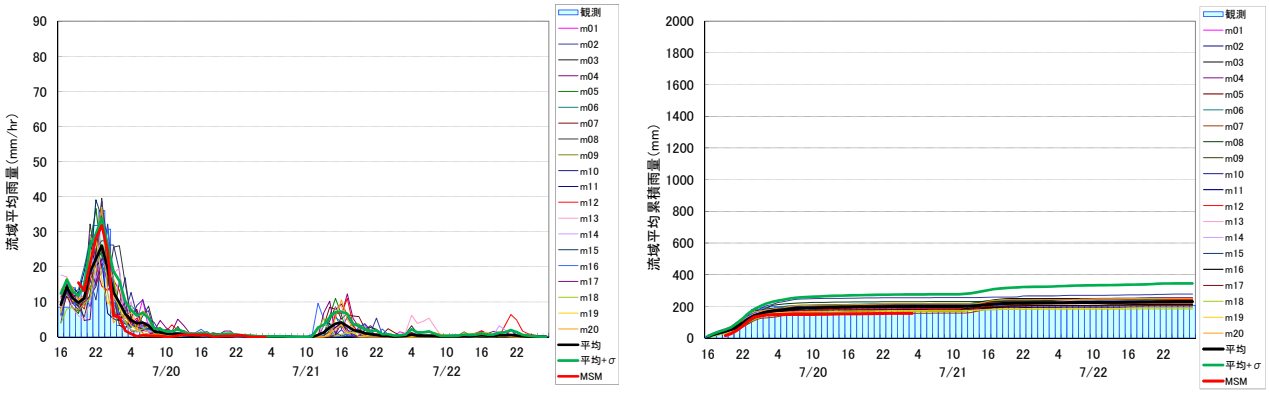


図-Ⅱ.1.1.5.11　7月19日15時（放流量200 ㎥/sが最適と判断された時）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

c）台風12号

図-Ⅱ.1.1.5.12および図-Ⅱ.1.1.5.13は、台風12号について計算されたアンサンブル予測雨量の計算結果の一部である。これらの図も台風15号、6号の結果と同様に、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達した2日前および1日前の時点を初期値として予測した結果である。図-Ⅱ.1.1.5.12においては、全体的な傾向としては再現されているが、積算雨量で見るとやや過小評価傾向であることが分かる。また台風12号は非常に長い時間に渡る降雨であったため、84時間の予測であっても8月31日9時の時点では降雨の降り終わりまで見通すことができない。次に図-Ⅱ.1.1.5.13を見ると、一つ目のピークまではタイミング、雨量共に精度良く予測できている。しかし、ほとんどのアンサンブルメンバーが一つ目の山を過ぎたところで雨が降り止むと予測しているのに対し、実際にはそこから一つ目を上回る二つ目のピークが存在しており、その存在をアンサンブルメンバーの全てが予測できない結果となった。結局この二つ目のピークは実際に雨が降る直前の予測である9月3日9時や15時においても正確に予測することができなかった。この原因についても後述する。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅱ.1.1.5.14に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約500m³/sであり、貯水量の最大時において洪水調節容量の35.9%を使用している。下流の両郡橋地点におけるピークは2山あり、一つ目と二つ目のピーク流量はそれぞれ1,803m³/sおよび1,977m³/sとなった。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、規則操作より洪水調節容量を多く使ってはいるが、ただし書き操作に入ったことで放流量が上がり、580m³/sであった。ただし書き操作を行った結果、下流の両郡橋地点のピークについては、一つ目のピークは1,548m³/sと規則操作よりも低減させることができたが、二つ目のピークは2,052m³/sとなり、4%程度増加させてしまった（図-Ⅱ.1.1.5.15）。二つ目の山のピーク流量を増加させてしまった理由としては、蓮ダムで二つ目のピーク流入を迎えた時にただし書き操作に入っているからであり、その原因としてはアンサンブル予測雨量で二つ目のピークが予測できていないため、アンサンブル予測雨量に基づく操作では一つ目のピークに対して洪水調節容量を使い切るように操作してしまっているからである。その結果として、両郡橋の結果について一つ目のピークについては規則操作よりも低減することができたが、二つ目のピークについて規則操作よりも流量を増加させてしまう結果となった。

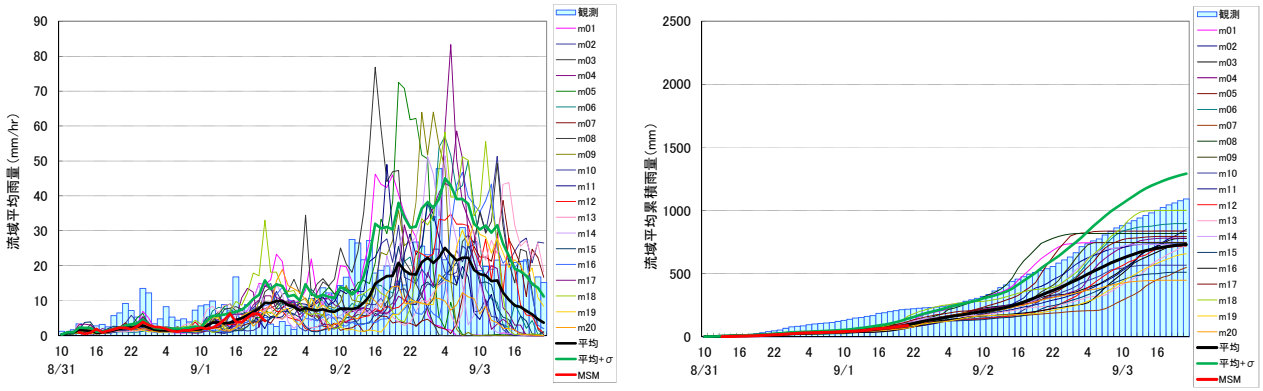


図-Ⅱ.1.1.5.12　8月31日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

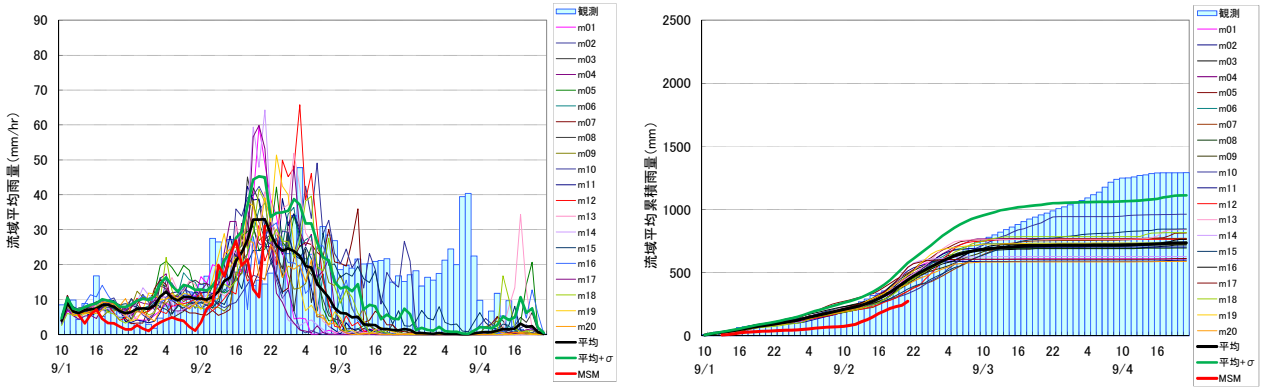


図-Ⅱ.1.1.5.13　9月1日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

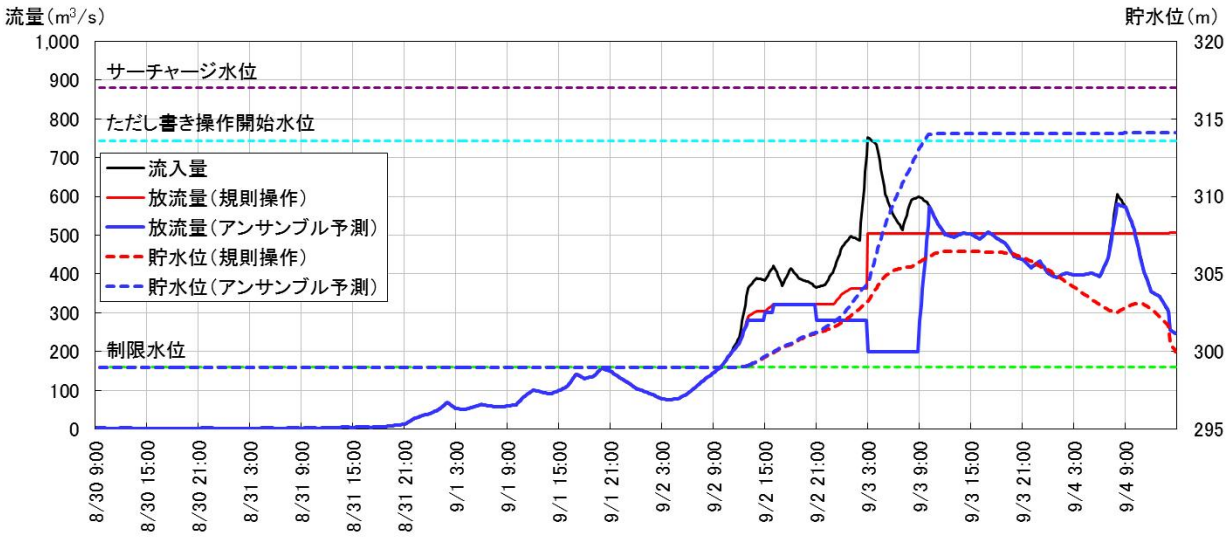


図-Ⅱ.1.1.5.14　台風12号時の蓮ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

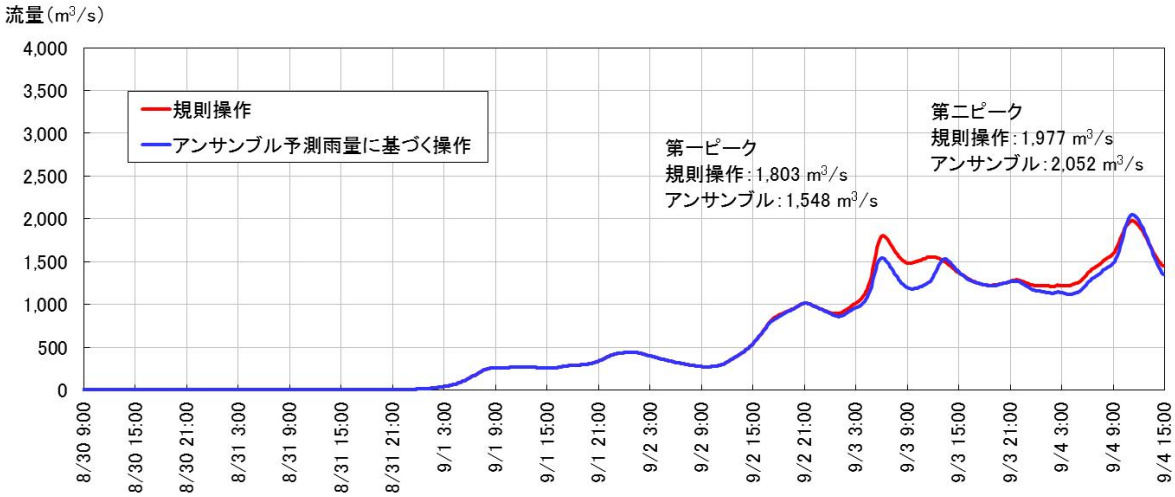


図-Ⅱ.1.1.5.15　台風12号時の両郡橋地点の流量時系列

1.1.5.5 考察

ここでは、台風の予測進路および速度からアンサンブル予測雨量の精度について定性的な考察を行うことで、アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関して考察を行う。

a) アンサンブル予測雨量の精度と台風進路との関係

1.1.5.4で記載したとおり、アンサンブル予測雨量の誤差の傾向も台風毎に異なることが分かった。台風15号で流入量が洪水調節開始流量に到達する約1日前である9月20日3時を初期時刻とした予測では、図-Ⅱ.1.1.5.16に示すとおりアンサンブル予測の進路・速さ共に概ね実際に近いことが分かる。その結果として図-Ⅱ.1.1.5.3に示したように予測の精度が全般的にかなり高い結果となった。次に台風6号の場合、実際の台風は紀伊半島近くまで南から近づいてきた後、一度南東に向けて進み出した。図-Ⅱ.1.1.5.17に示す7月18日9時を初期値とした予測では、アンサンブル予測は実際の進路よりも北寄りの進路を進み、かつ実際の進路よりも大回りしているため、実際よりも蓮ダム付近を通過するタイミングが遅くなり、かつ通過に長い時間を要したことから観測値よりも予測が大きくなったと考えられる。次に台風12号の場合、台風本体が紀伊半島に近づいてきた9月1日9時を初期値とした予測では（図-Ⅱ.1.1.5.18）、48時間後の予測においてはほとんどアンサンブルメンバーについて中国地方から日本海側に台風が抜けると予測されているのに対し、実際には48時間後においても四国の室戸岬近辺に位置している。さらに、72時間後の予測では全てのアンサンブルメンバーの予測について台風の中心は日本海に進出して時間が経過しているのに対し、実際には中国地方をわずかに北に出た程度である。よって、実際の台風は予測よりも長い時間をかけて四国地方から中国地方を通過したものと考えられる。これによって雨が予測よりも長時間に渡って雨が降り続ける結果となった。これが先述した図-Ⅱ.1.1.5.13の二山目の見逃しの原因である。これはアンサンブル予測計算に用いたモデルであるWRFやデータ同化手法というよりは、アンサンブル予測の境界条件として使ったGSM84時間予測がそのような予測を行っているためであると考えられる。

このようにアンサンブル予測雨量の精度は境界条件として用いているGSMの予測精度に依存しており、特に台風12号の二山目の降雨のように、GSMの予測が実際と著しく異なる予測を行っている場合、それを境界条件としたアンサンブル予測も全てのメンバーについて実際とは異なる結果を示す可能性がある。

b) アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作の課題

a)で述べた通り、アンサンブル予測雨量は境界値の予測精度に依存すると考えられ、予測と観測がほ

ぼ一致する場合、予測が観測よりも大きい場合、小さい場合と豪雨によって予測の精度が異なってくる。特に今回検討した3つの台風の事例の中で、ダム操作の観点から最も避けなければいけないのは台風12号で見られたアンサンブル予測雨量に基づく操作が著しく過小評価した結果として規則操作よりも結果が悪くなる操作である。アンサンブル予測雨量の精度が境界条件に依存し、アンサンブル予測のどのメンバーも実際の現象を予測できていないことが起こりうる。そうすると、実用化にあたっては例えば計算されたアンサンブル予測雨量の平均値よりも+σ程度大きい予測雨量を想定しておき、その予測雨量に対して提案した最適放流量決定手法を適用することが考えられる。この場合、例えば台風12号については洪水の前半から図-Ⅱ.1.1.5.14に示した放流量よりも大きい放流を行うため、洪水調節容量を温存する操作となる。結果として、アンサンブル予測雨量の全てのメンバーが二山目を見逃したとしても、温存しておいた洪水調節容量によって対応できる可能性がある。今後はこのような検討を行い、アンサンブル予測が全体的に予測を外した場合でも規則操作より下流の流量を増やさないように操作するための検討を行う必要がある。

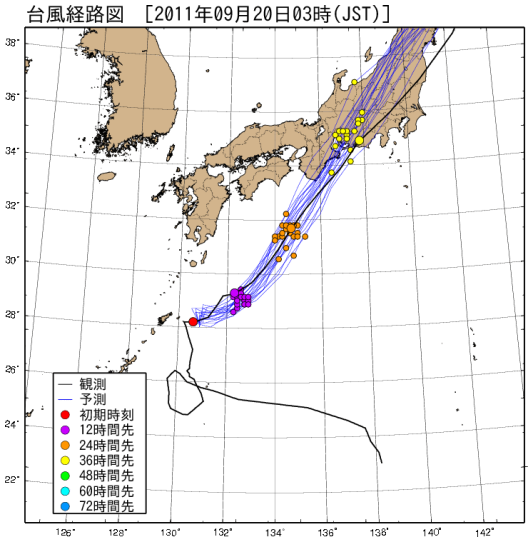


図-Ⅱ.1.1.5.16　アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風15号、9月20日3時予測）

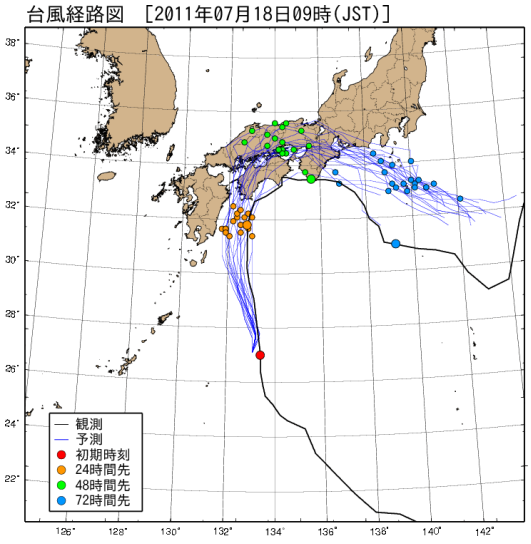


図-Ⅱ.1.1.5.17　アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風6号、7月18日9時予測）

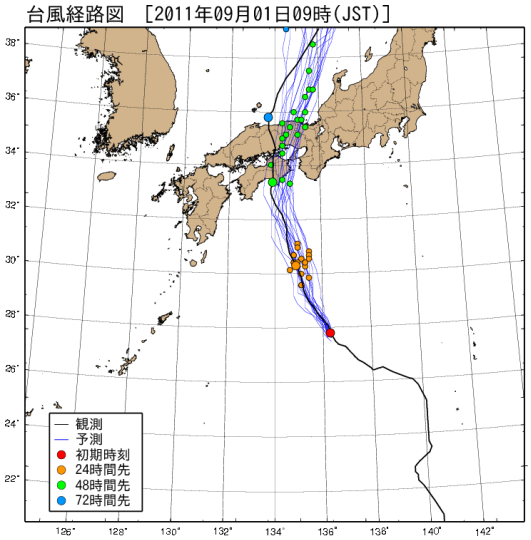


図-Ⅱ.1.1.5.18　アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風12号、9月1日9時予測）

1.1.5.6 まとめと今後の課題

本研究のまとめと課題を以下に示す。

アンサンブル予測雨量の計算について

- GSMの84時間予測を境界値としてWRFによりアンサンブル予測雨量を計算した結果、84時間先の雨量についてもおおよそ把握することができる可能性が示唆された。これは、気象庁のMSMの33時間予測と比較して予測先行時間が非常に長く、ダムの洪水調節操作にとって非常に有益な情報となり得る。
- アンサンブル予測の精度は境界値であるGSMの予測精度に依存する。GSMの予測精度が著しく低い場合、アンサンブル予測のほぼ全メンバーが予測をはずすことがある（台風12号の二山目）。

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作

- アンサンブル予測雨量を利用することで、下流治水基準地点のピーク流量期待値を最小化する放流量を自動的・機械的に算出することができる。予測雨量に基づいて洪水調節操作を行う場合、現在は属人性が入り込む余地が少なからず存在していたが、この手法により自動的・機械的に放流量を決定することが可能となり、属人性が排除される。
- 台風6号、15号についてはアンサンブル予測雨量を活用した洪水調節操作によって規則操作よりも効果的な操作が行えることが分かり、規則操作と比較して下流基準地点のピーク流量を10%程度低減することができた。
- 台風12号では、アンサンブル予測雨量のほぼ全メンバーが二山目のピーク見逃すことから、一山目の流出に対して洪水調節容量を使い切ってしまい、予測で見逃した二山目についてはただし書き操作を行い、洪水調節できなかった。その結果として下流のピーク流量を規則操作と比較して増加させてしまった。アンサンブル予測雨量が全体として精度が低くなった場合においても規則操作と比較して下流の流量を増やさないような操作を今後検討する必要がある。

また、本研究で実施した内容はリアルタイムでのダム洪水調節操作を指向した手法であるが、リアルタイム運用を行うにはアンサンブル予測雨量の計算に時間を要するため、今後はリアルタイム運用に向けた課題整理を併せて検討する必要がある。

参考文献

青山俊樹 2007：大被害発生水位を睨んだダム操作方法に関する提案、リザバー、pp.1-2

秋葉雅章、腰塚雄太、宮本守、戸谷英雄、佐藤直良、山田正 2004：流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第10巻、pp.89-94

飯野光則、伊藤弘之 2012：気候変動を踏まえた河道隣接地域における遊水機能の評価に関する一考察、土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、Ⅱ-049、p. 97-98

猪股広典、深見和彦 2007：吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発、河川技術論文集、第 13 巻、pp.433-438

岩崎伸一、松浦知徳、渡部勲 2002：地殻変動を除去した長期海水変動と海面水温の関係 -本州沿岸域-、海の研究、Vol.11(5)、pp.529-542.

小野田惠一 2012：流域一体となった浸水被害軽減策の実践例に関する調査、国土技術政策総合研究所資料、第665号

柏井条介、土屋修一、石神孝之 2008：気候変動による豪雨時の降雨量変化予測に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第462号

気象庁 2007：気候変動監視レポート

北田悠星、菊地慶、岡部真人、山田正 2010：気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案、水工学論文集、第54巻、pp.523-528

国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所 2010：平成 22 年 7 月 14 日～14 日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について、平成 22 年 7 月 15 日

国土交通省東北地方整備局 2011：台風 15 号による阿武隈川上流等の出水速報について、平成 23 年 9 月 23 日

国土地理院 2003.：「2000 年度平均成果」について -全国の水準点の高さ（標高）を改定して 1 年-, http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/level/2000level.html, 参照 2009-06-03.

腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田正 2006：確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第33回土木学会関東支部技術研究発表会

佐山敬洋、立川康人、寶馨、増田亜美加、鈴木琢也 2008：地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、第21巻、4号、pp.296-313

下坂将史、呉修一、山田正、吉川秀夫 2009：既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案、土木学会論文集B、Vol.66 No.2、pp.106-122

鈴木俊朗、寺川陽 1996：実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発、土木技術資料、第 38 巻、10 号、pp.26-31

東京大学など合同研究チーム 2004：2004年9月16日報道発表（http://www.nies.go.jp/whatsnew/2004/20040916/20040916-2.html）

土木学会都賀川水難事故調査団 2009：都賀川水難事故調査について、平成20年度河川災害に関するシンポジウム

戸谷英雄、秋葉雅章、宮本守、山田正、吉川秀夫 2006：ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案 土木学会論文集B Vol.62 No.1、pp.27-40

鳥居謙一 2012：ダム管理の高度化に向けて、土木学会水工学に関する夏期研修会講義集

鳥居謙一、猪股広典 2012：予測降雨を活用したダム洪水調節効果の評価、国総研レポート 2012、pp.95

蓮ダム工事事務所 1993：櫛田川水系蓮ダム工事誌

三石真也、尾関敏久、角哲也 2011a：WRF による降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性

検討、水文・水資源学会誌、第 24 巻、2 号、pp.110-120
三石真也、角哲也、尾関敏久、矢神卓也 2011b：降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究、ダム工学、第 21 巻、4 号、pp.242-250
森英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治 2008：ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成20年度土木学会関西支部年次学術講演会、pp.II-59
森信人、志村智也、中條壮大、安田誠宏、間瀬肇 2011.：マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測、土木学会論文集B2（海岸工学）、第67巻、pp. 1191-1195.
吉野純、飯田潤士、安田孝志 2011：モデルアンサンブル予報による 2010 年 7 月可児豪雨の予測可能性、水工学論文集、第 55 巻、S475-S480
和田一範、村瀬勝彦、冨澤洋介 2004：気象予測データの利用可能性に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第 210 号
和田一範、村瀬勝彦、冨澤洋介 2005：地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集No.796、II-72、pp.23-37
Matsuura T., Sato T., Fukami K., Kaneki M. 1999.: 直交二偏波レーダにより観測された雨滴粒径分布の時空間分布特性、Proceedings of 2002 Annual conference, Japan society Hydrology and water resources, pp.18-19.
Nakakita E., Takehata H., Nakagawa K. 2007: Validation of Rainfall Intensity Estimated using the Latest C-Band Polarimetric Radar, Annual Journal of Hydraulic Engineering, 51, pp.325-330. (in Japanese)
Yoshino F., Mizuno M., Mizuno H., Igarashi H. 1988.: Observation of Precipitation using Dual-Polarization Doppler Radar, Proceedings of the Japanese Conference on Hydraulics, Vol.32, pp.383-388.(in Japanese)
Alexander V.R., Terry J. S., Donald W. B., Pamela L. H., Scott E.G. 2005: The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.86, No.6, pp.809-824.
Bringi VN., Chandrasekar V. 2001: Polarimetric Doppler Weather Radar, Cambridge University Press, pp.636.
Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K. 1992: Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, Water Resources Research, 28(4), pp.1015-1031
Hiromu Seko, Takemasa Miyoshi, Yoshinori Shoji, Kazuo Saito 2011: Data assimiliation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008, Tellus, 63A, pp.402-414
IPCC 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
Iwanami K., Misumi R., Maki M., Wakayama T., Hata K., Suto M. 2001: Development of Multiparameter Radar System on Mobile Platform, Preprints 30th Inter. Conf. Radar Meteor., pp.104-106.
Iwanami K., Le Bouar E., Testud J., Maki M., Misumi R., Park S-G., Suto M. 2003: Application of the Rain Profiling Algorithm “ZPHI” to the X-band Polarimetric Radar Data Observed in Japan, Proc. 31st Conf. Radar Meteor., pp.274-277.
Maki M, Iwanami K, Misumi R, Park S-G, Moriwaki H, Maruyama K, Watabe I, Lee D-I, Jang M,

Kim H-K, Bringi VN, Uyeda H. 2005b: Semi-Operational Rainfall Observations with X-band Multi-parameter Radar, Atmos. Sci. Letters, 6,pp.12-18

Maki M., Park S-G., Bringi VN. 2005a: Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimate of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, J. Meteor. Soc. Japan, 83, pp.871-893.

Park S-G., Maki M., Iwanami K., Bringi VN., Chandrasekar V. 2005: Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X-band Wavelength. Part II: Evaluation and Application, J. Atmos. Oceanic Technol., 22, pp.1633-1655.

Report of the 2011 Ocean Surface Topography Science Team (OSTST) Meeting、Edited by J. Willis, Jet Propulsion Laboratory、Organized by NASA, CNES, NOAA and EUMETSAT.

Xuguang Wang, Dale M. Baker, Chris Snyder, Thomas M. Hamill 2008a: A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part I: Observing System Simulation Experiment, Monthly Weather Review, Vol.136, pp.5116-5131

Xuguang Wang, Dale M. Baker, Chris Snyder, Thomas M. Hamill 2008b: A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part II: Real Observation Experiments, Monthly Weather Review, Vol.136, pp.5132-5147

発表論文

野口賢二、諏訪義雄、五味久昭、松藤絵理子　2010：気候変動適応に向けたわが国沿岸の既海面上昇基準量の設定にむけて、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、第 66 巻、pp.1256-1260.

野口賢二、福濱方哉、竹内一浩、山本享 2008.：天気図から抽出した擾乱データセットを用いた近年の海岸災害と気象の関係、海岸工学論文集、第 55 巻、pp.1336-1340.

1.2 水利用への影響と適応に関する研究

1.2.1　気候変動に対応した渇水リスク増加に対応した下水処理水の活用方策に関する研究

気候変動による水の利用可能量が減少する可能性が指摘されており、下水処理水再利用の下水処理水は水量・水質の両面で水環境を形成する重要な要素となっている(国土交通省 2009)。再生水の利用増加を進めるうえで農業用水や地下水涵養等をはじめとした用途の拡大が必要とされており、それらの利用における管理方策を確立することが求められている。

香川県多度津町では、金倉川流域下水道の処理水を町の水環境処理施設で高度処理した親水用水（凝集ろ過＋活性炭＋塩素消毒）が親水公園に供給され、公園内の池から地下に浸透している。夏季には農業用水の安定供給のため、親水用水の一部が農業用ため池に送水されている。

2008 年度から 2011 年度にかけて、再生水の涵養利用、農業用水利用における再生水量・水質の管理方策の確立を目的に、香川県多度津町において地下水涵養地周辺の井戸及び農業用ため池等の水質分析を行い、再生水の地下浸透が地下水質に与える影響等を評価するための手法について検討を行った。

1.2.1.1 多度津町における下水処理水および地下水水質調査の概要

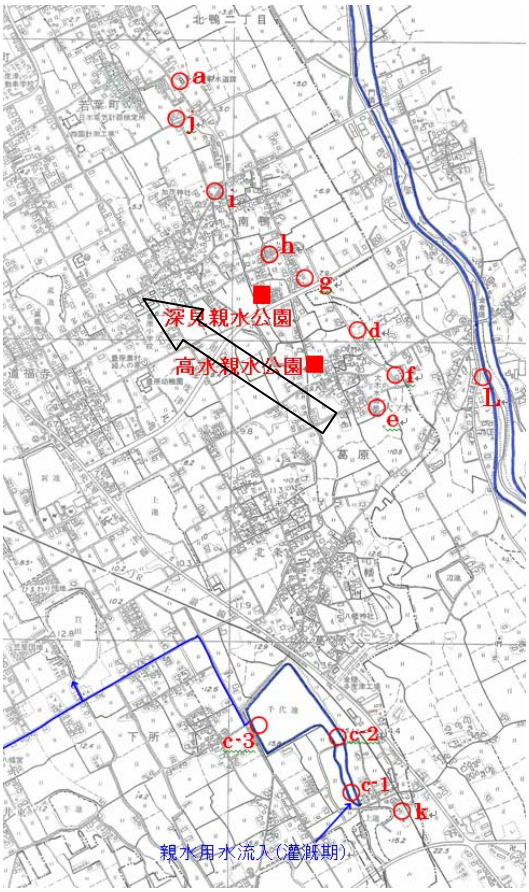


図-Ⅱ.1.2.1.1　調査対象の位置図

図-Ⅱ.1.2.1.1 を参照いただきたい．香川県多度津町では、金倉川流域下水道の処理水を町の水環境処理施設（図中 a）で高度処理した親水用水（活性炭＋塩素処理）を用いて、地下水位低下の解消を目的として、図中の 2 つの親水公園より通年に渡って地下水涵養が行われている。水量は高水親水公園から 2,000m^3/日、深見親水公園から 450m^3/日となっている。これらの親水公園からの涵養は 2004 年に開始され、高水親水公園からの涵養は 2011 年 3 月から中断している。また、夏期の灌漑期には農業用水の安定供給のため、再生水が農業用ため池（図中 c）に送水されている。本調査の目的は再生水の地

下への浸透が地下水（主として浅層地下水）の水質に与える影響を評価する方法について検討することである。

多度津町では水道用水源として県用水受水のほかに浅井戸および深井戸から取水している。本報告では、これらの井戸のうち初回の調査で地下水涵養の影響があると考えられた浅層地下水を対象とした調査結果を報告する。サンプリングは、図-Ⅱ.1.2.1.1 に示した多度津町内に分布する浅井戸を中心に実施した。また、図-Ⅱ.1.2.1.1 の L では、伏流水がこの地域の地下水となっていると考えられる金倉川河川水をサンプリングした。採取したサンプルは現地で水温、pH、外観を測定した。その後、一般細菌、SS、BOD、PO_4-P、T-P、NH4-N、NO_2-N、NOx－N、T-N、EC、濁度、Cl^-の分析を行った。以上の項目に加えて、地下浸透後の再生水のトレーサーとなりうる項目として、微量化学物質（カフェイン、カルバマゼピン、クロタミトン）と窒素同位対比の分析を行った。対象とした微量化学物質は人由来で農業排水には含まれず、疎水性が低いため土壌への吸着が少なく、ng/L のオーダーでは人体や生物への毒性は低いとされている。また、窒素同位体比（$\delta^{15}N$）は発生源により異なった値を示すことが分かっており、硝酸態窒素の $\delta^{15}N$ は、化学肥料・降水由来は低い値を、人し尿・家畜糞尿で高い値を、下水処理水はその中間範囲を示すことが報告されている。たとえば大和田ら(2003)によると、下水処理水で 8～15‰、降水で－8～2‰、化学肥料で－7.4～6‰、家畜糞尿で 10～22‰程度である。以上のことから、これらの項目は再生水による地下水環境への影響範囲を知るための評価指標となりうると考えられる。

平成 21 年度より再生水および浅井戸等の水質の調査を開始し、2011 年度は高水親水公園からの涵養が停止された後の 2011 年 9 月（灌漑期）および 12 月（非潅漑期）に調査を実施した。

1.2.1.2　結果

a) NOx-N（硝酸態窒素および亜硝酸態窒素）

地下水の涵養に利用されている親水用水の NOx-N 含有量は全調査期間を通じて 4.5～8.2ppm、金倉川の河川水では 0.5～3.0ppm であった。浅井戸 d～k では 3.5～7.0ppm と河川水に比較して全体的に高い値を示したが、涵養池からの距離との明確な相関はみられなかった。既往の調査（濱崎ら 2006）より地下水の流動方向はおおむね図-Ⅱ.1.2.1.1 に示した矢印の方向であると推測されるが、下流ほど NOx-N 濃度が高くなる傾向があった。なお、水道水質基準では硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計が 10mg/L 以下とされているが、今回調査した試料はいずれもこの基準を下回っていた。

b)窒素同位体比

本調査での $\delta^{15}N$ 分析結果のうち、親水用水、涵養池周辺の浅井戸、および金倉川河川水の測定結果を図-Ⅱ.1.2.1.2 に示す。涵養池下流側の浅井戸 h、i、j で他の浅井戸より高い 10‰前後となり再生水の影響が示唆された。一方、金倉川河川水も h、i、j 以外の浅井戸より $\delta^{15}N$ が高い 10.4‰という結果であった。金倉川は多度津町より 15km 程度東南のまんのう町に端を発し、満濃池導水路（土器川より導水）と合流した後、満濃池を経て多度津町に至る。この金倉川最上流部および、満濃池より 2km 程度下流側の金倉川河川水についても δ15N を測定した。この結果、前者は 2.8‰、後者は 7.6‰となっており、土器川あるいは満濃池周辺からのし尿を含む排水、あるいは畜産排水等の流入がある可能性が示された。高水親水公園付近の浅井戸 f、h、i、j の $\delta^{15}N$ の経時変化をグラフにしたのが図-Ⅱ.1.2.1.3 である。浅井戸 j、h では 2010 年 9 月の調査から低下傾向にあるが、浅井戸 i では平成 23 年 12 月の調査の際に NOx-N 濃度が親水用水よりわずかに高くなっていたのと同時に $\delta^{15}N$ も 17‰と高い値を示しており、傾向が異なっている。このことから、浅井戸 i は再生水による地下水涵養だけでなく、し尿を含む何らかの排出源の影響を受けている可能性が示唆された。

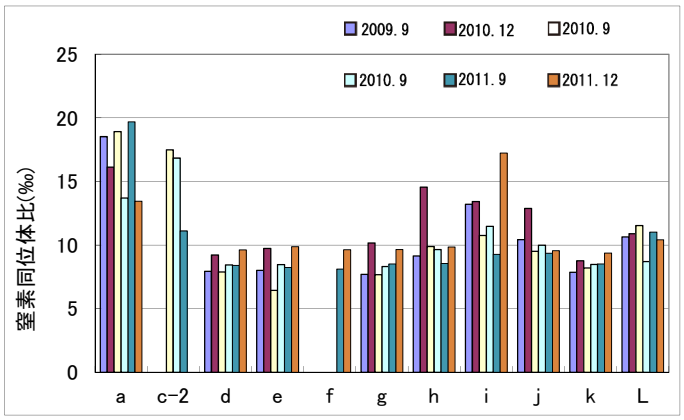


図-Ⅱ.1.2.1.2　窒素同位対比測定結果

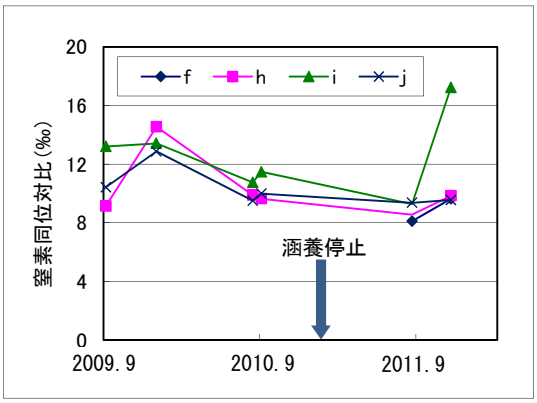


図-Ⅱ.1.2.1.3 涵養池周辺浅井戸の窒素同位体比

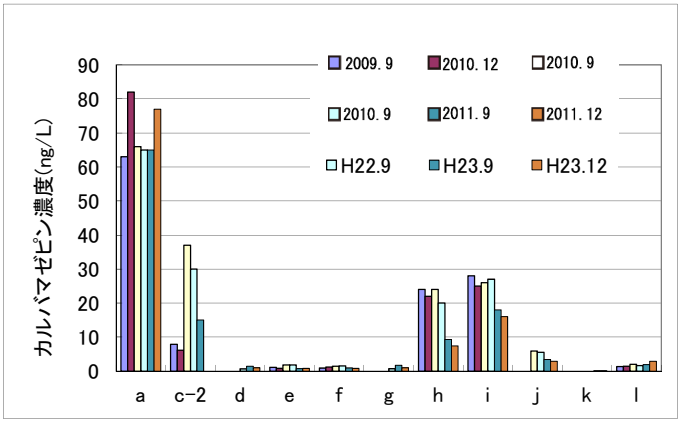


図-Ⅱ.1.2.1.4　カルバマゼピン濃度測定結果

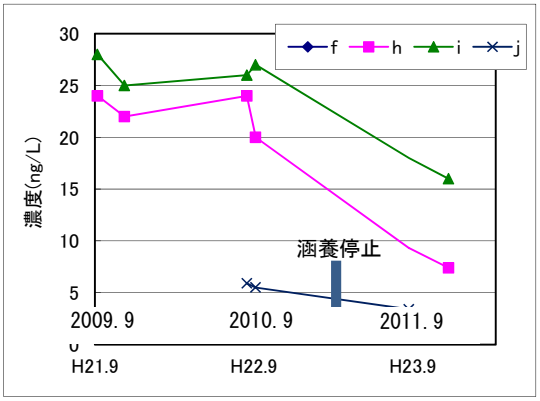


図-Ⅱ.1.2.1.5 涵養池周辺浅井戸のカルバマゼピン濃度経時変化

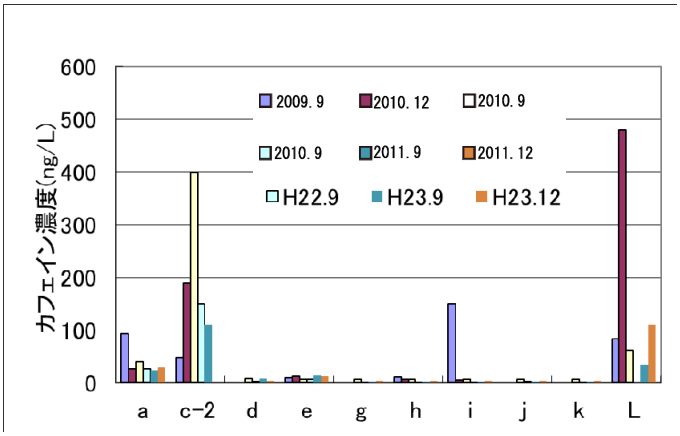


図-Ⅱ.1.2.1.6 カフェイン濃度測定結果

※千代池(c-2)では窒素同位対比、カフェイン、カルバマゼピンともに 2010 年 9 月、12 月、2011 年 9 月のみ測定を実施。f では 2011 年度のみ窒素同位対比の測定を実施。

c)微量化学物質

親水用水、涵養池周辺の浅井戸、および金倉川河川水中のカルバマゼピン測定結果を図-Ⅱ.1.2.1.4に示す。カルバマゼピンは親水用水の他、涵養地点下流のh、i、jの3つの浅井戸で比較的高い値を示した。なお、千代池の入り口から出口の3カ所で測定した濃度はほぼ一定で、環境中で分解されにくいことが示唆された。クロタミトンは親水用水と千代池では検出されたものの、千代池流出地点では流入地点の2/3程度まで減少し、浅井戸では定量下限値以下であったことから、カルバマゼピンと比較して環境中での分解性が高い、あるいは土壌へ吸着されたことが示された。再生水の影響範囲については、他の浅井戸より比較的高濃度のカルバマゼピンが検出されδ15Nも高い浅井戸は、涵養池の地下水流下方向約900m以内の範囲にあった。一方で涵養池からほぼ同じ距離にある別の浅井戸gでは微量化学物質濃度が検出限界以下となった。このことから、再生水は地下水の流下方向に伝播しており、直角方向への拡散は極めて遅い可能性が考えられる。

また、3年間のカルバマゼピンの測定結果を比較すると2011年に涵養地点から地下水流動方向の地点での濃度が過年度に比べて低下している（図-Ⅱ.1.2.1.5）。これは、高水親水公園での地下水涵養が停止したことの影響とみられる。親水用水、涵養池周辺の浅井戸、および金倉川河川水中のカフェインの濃度を測定した結果、涵養水源となっている親水用水中での濃度が定量下限値以下である一方、河川水や、別途調査した深井戸からは検出された（図-Ⅱ.1.2.1.6）。このことから、再生水以外にカフェインの流入源がある可能性があり、地下水中の再生水の影響をみるための指標とすることは難しいと考えられる。

以上より、今回調査対象とした微量化学物質の中では、カルバマゼピンが最も地下水への再生水の影響を評価するための指標として適していた。$\delta^{15}N$単独の結果では再生水とし尿あるいは畜産排水等の影響と判別しにくいが、カルバマゼピン等と併せて行うことでより正確な評価を行うことができると考えられる。

参考文献

大和田茂人・高津有美・福田行剛、山竹定雄 2003:硝酸性窒素発生源における窒素安定同位対比の特性、平成15年度愛媛県衛環研年報、pp.46-49

国土交通省：下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会「報告書　新たな社会的意義を踏まえた再生水利用の促進に向けて」2009　（http://www.mlit.go.jp/common/000037487.pdf）

濱崎修・大八木豊・辻倉裕喜・河原能久 2006. :丸亀平野における水循環系の調査と解析、水工論文集第50巻、pp265-270

1.3 河川環境への影響に関する研究

気候変動により引き起こされると考えられる河川環境への影響には種々のものが想定されている。気温上昇や降雨パターンの変化等の気候変動が生じたとすれば、河川水温上昇や海面上昇、流量の変化を招く。流量や水温は、河川における物理環境、生化学的環境を規定する極めて重要な要素であり、これらの特性が変われば、総体として河川環境に変化を生じせしめるだろうということは想像に難くない。

このように、気候変動が生じたとすれば、河川環境にも影響が生じるであろうというところまでは、ほぼ自明の様に思われるが、その影響は具体的にどのような形で顕在化するのか、またその程度はどれほどのものなのかということが予測できなければ、適切な対応を準備することができない。そのため、気候変動がもたらすであろう河川環境への影響について、その特性や程度を早急に検討する必要があると考えられる。

しかし、流量や水温の変化が河川環境に与える影響の作用機構は複合的であること、河川環境自体が常に変動しており、河川環境の評価自体が未だ発展途上の研究段階にあること、河川環境への人為影響の程度が極めて大きく、既往情報から気候変動の影響を単純に抽出できないことなどの理由により、気候変動が河川環境に与える影響について予測することはたやすいことではない。

本稿では、河川環境の要素として、河川の流量・水質及び生物・生態系を念頭において議論することとする。地球温暖化に伴う気候変動は、このうち河川の流量と水温を直接的に変化させると考えて、これらの変化及びそれらが他の河川環境要素にどのような影響を及ぼしうるのかについて検討した。

1.3.1 流量・水質の変動特性

河川環境を規定する主たる環境要素として、流量及び水質（主として水温）をとりあげ、これらの変動特性について既往の知見を整理した。さらに、全国の流量観測地点及び公共用水域水質測定地点の調査データを用いて、過去 30 年程度における流量・水質の経年変化を整理し、その特徴を把握した。

1.3.1.1 我が国の河川流量及び水温の特徴

a)流量

日本の河川流量は、平水比流量が 1～7m³/s/100km² の間にあり、世界の主要河川（0.023～3.16m³/s/100km²）と比べて比流量が大きいことが指摘されている（高橋ら 1980）。これは日本の河川流量が大きいことと流域面積が小さいことによる。また、最大洪水比流量は、東北の河川で一般に小さく、西南日本の外帯や北陸・九州の河川で大きい（小出 1970）。白川(2005)は、流量年表に記載されている記録を利用して、既往最大比流量を河川ごとに抽出して、流域面積との比較を行っている（図-Ⅱ.1.3.1.1）。流域面積と既往最大比流量の相関は東日本の方が強い。

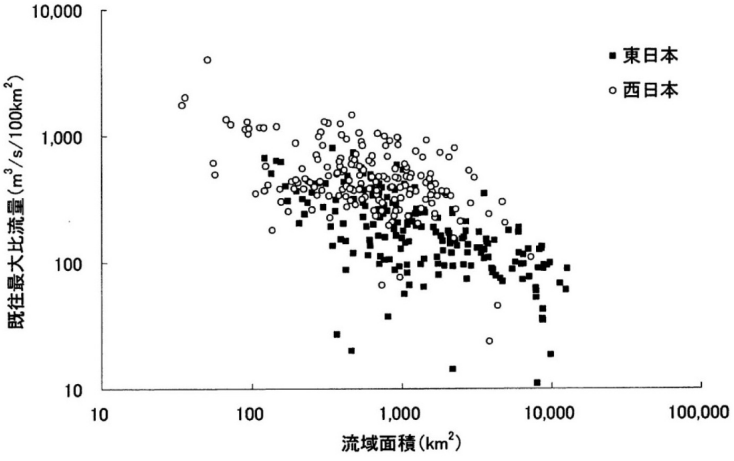


図-Ⅱ.1.3.1.1 流域面積と既往最大流量の関係

b) 水温

河川の水温を決定するもっとも決定的な項目は、気候（日射量、気温、風速)、河川形状、地下水の影響、河川を覆う河畔林の枝葉と考えられる（Poole,et al.2001)。河川水温は、単位体積あたりの水が有する熱量である。熱量は、周囲の媒体と交換されるが、これを周囲からの熱負荷と考えて、水の体積は流量により決まるものであることを考慮すると、河川水温は、熱負荷を流量により除した形でほぼ決定されると考えられる。熱負荷については、季節変化により河川水に加わる熱負荷量が変化することで河川水温も上下することから影響は自明である。例えば、夏季に熱負荷量が増加すれば、水温が上昇する。流量については、夏季において熱負荷量が変わらない場合に取水などで水量が減少すると、分母が小さくなるため、水温は上昇するといった影響を持ちうる。河川水温は、気候等の外部の規定要因と流量という内部の要因から決定される。河川水温は単位水柱にかかる熱負荷とそれを受け入れる水柱の深さや流速により決まるため、河川における水温の年変化は流出型と密接に関係している。日本における河川水温の年変化曲線は、二つに大別される。その一つは、流量の極大が梅雨から台風期に出現する太平洋側型で、もう一つは、融雪による流量極大を持つ日本海型の河川水温変化である（新井ら 1974)。図-Ⅱ.1.3.1.2 には、左の列に太平洋側型、右の列に日本海型の例を並べてこの二つの型を示している。地上におかれた開水面をもつ水塊は、その初期水温にかかわらず水面を通しての受熱・放熱によって、最終的には大気の熱的状態と釣り合った水温を示す。この水温を平衡水温あるいは平衡温度という（新井ら（1974))。図-Ⅱ.1.3.1.2 には、測定された河川水温と平衡温度の両方が示されている。融雪出水がある日本海側の河川（図-Ⅱ.1.3.1.2 の右側列）では、3 月から 5 月ごろまで水温上昇が抑制され、昇温の変化曲線が極端に凹型を示す。この凹型の深さは、その流域の積雪量によって変化する。

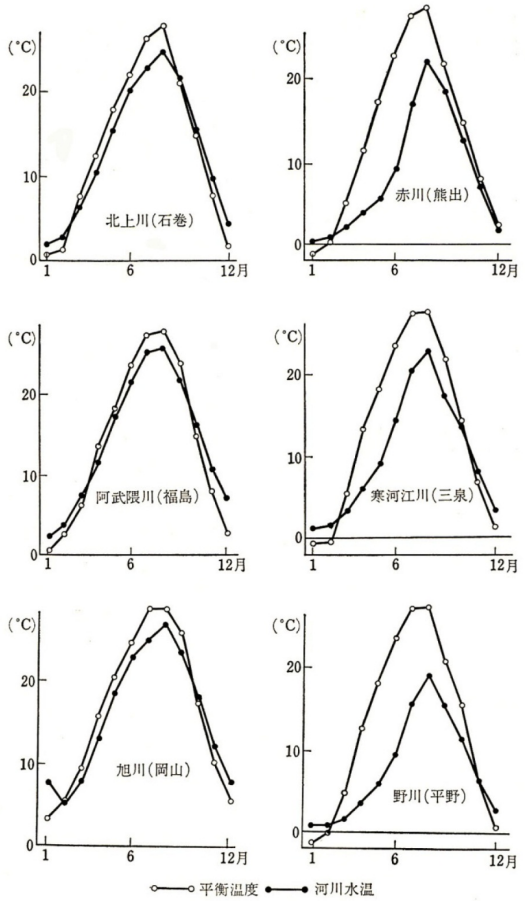


図-Ⅱ.1.3.1.2　積雪の少ない地方（左列）と多い地方（右列）の河川水温変化の比較

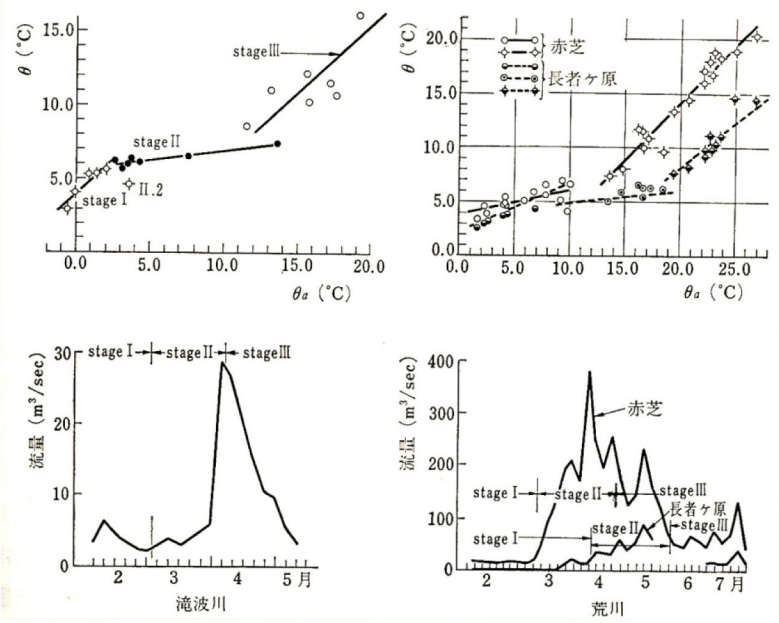


図-Ⅱ.1.3.1.3 滝波川と荒川における融雪期の水温と流量の変化

図-Ⅱ.1.3.1.3 には、荒川（山形県）、滝波川（福井県）で調査された水温と気温の半旬平均値の関係が示されている。昇温初期から 5～6 月までの季節変化は三つのステージを経て夏に向かう。第１ステージは、冬の渇水期から融雪の始まるまで、第２ステージは融雪開始からその最盛期を過ぎて 10 日前後まで、第３ステージは、それ以降の 7 月末から 8 月までの期間である。融雪水のうち、表面流出水の温度は、地下水流出水温よりも低温であると考えられ（新井ら 1974）、第２ステージで気温の上昇に応じて水温が上昇しないのは、融雪水が表面流出水として河川に供給される割合が大きく、この融雪水の供給面積も最大で、水温上昇が最も小さい時期であるためである。日本における太平洋側の河川については、平衡水温から概ね水温変化を推定できるが、日本海側の河川では融雪による影響を考慮する必要があることがわかる。山辺(1967) は、日本の山地河川の水温特性を調べて、気温との関係を表-Ⅱ.1.3.1.1 のように整理している。この表中の b は、水面熱負荷に対する水温の変化率と比例関係にある。これを決定する主な因子は流速と水深であると考えられ、おおまかに流域面積の関数とも考えられている。また、a は水源の水温に近い値と考えられる。

表-Ⅱ.1.3.1.1 日本の山地河川における水温と気温の関係

わが国における河川水温（θ）と気温（θa）の回帰式（$\theta = a + b \cdot \theta a$）

番号	水系	河川名	観測地点	流域面積 (km²)	海抜高度 (m)	統計年数	a	b	平均偏差 (℃)
1	勇別川	勇別川	白滝	127	360	1958～1960	0.61	0.63	±0.7
2	〃	〃	丸瀬布	808	170	〃	−0.18	0.73	0.7
3	常呂川	無加川	厚和	215	430	〃	0.63	0.56	0.7
4	〃	常呂川	置戸	377	220	〃	0.76	0.66	0.7
5	十勝川	音更川	幌加	205	560	〃	−0.33	0.58	0.6
6	〃	利別川	利別	1484	80	1959～1960	0.03	0.77	1.4
7	北上川	猿ヶ石川	二日町	540	230	1958～1960	2.87	0.67	0.8
8	〃	小友川	小友	78	250	〃	4.31	0.59	0.7
9	阿賀野川	只見川	奥只見	518	540	1958～1959	1.57	0.57	1.1
10	信濃川	黒又川	黒又第二ダム地点	110	420	1960～1961	1.17	0.58	1.3
11	庄川	庄川	御母衣	407	620	1957～1960	1.84	0.61	0.5
12	利根川	神流川	万場	282	290	1965～1966	1.60	0.83	0.8
13	天竜川	大千瀬川	浦川	351	130	1958～1959	1.03	0.89	0.8
14	熊野川	東ノ川	大瀬	141	230	1956～1959	2.63	0.70	0.4
15	〃	十津川	風屋	660	210	1957～1959	3.56	0.66	0.6
16	吉野川	吉野川	早明浦	411	240	1956～1960	4.23	0.73	0.4
17	〃	伊予川	伊予川	293	140	1957～1960	1.66	0.78	0.8
18	奈半利川	奈半利川	二又	146	170	1958～1960	5.73	0.68	0.7
19	球磨川	川辺川	平川	456	140	1960	4.13	0.75	1.0

河川水温に関する研究は、旧来数多くなされてきており、またデータも数多く取得されている。既往研究により明らかになっている気温と河川水温の関連を評価することで、将来起こりうる気候変動による水温変化予測については、相当程度正確に実施できると思われる。

1.3.1.2 全国の河川における流量・水質の経年変化の実態調査

a) 調査の狙いと方法

河川の流量・水温に対して適切な管理と目標設定を行うためには，それらの変化の実態を把握するとともに、影響要因を評価することが必要であるが、自然条件や人為影響の大きく異なる河川について、総合的に流量・水質の変化を分析した事例は少なく、変化の実態が明らかにされていないことが課題となっている。そこで、全国の河川における流量・水質の経年変化の実態を把握するため、全国の河川から 20 河川 60 地点を抽出し、流量観測所及び公共用水域水質測定地点の観測データを用いて、過去 30 年間程度（1982-2007 年）を対象に流量・水質の経年変化を気象情報と合わせて整理した。さらに、水温の経年変化の近似曲線の傾き及び全期間平均値を用いてクラスター分析を行い抽出地点を類型区分し、類型ごとに流量・水質・気象情報等の特徴との比較を行った。なお、本調査では、水温以外の水質項目（pH，BOD，COD，TN，TP，SS）についても対象とし、水温や流量の変化との関係を整理した（望月ら 2011）。

b) 調査結果

抽出地点における流量・水質の近似直線の傾きを整理したものを表-Ⅱ.1.3.1.2 に示す。

表-Ⅱ.1.3.1.2　抽出地点の流況・水質の変化の傾向把握　経年変化（近似直線の傾き）

地方	水系名	河川名	流量観測所	豊水流量	平水流量	低水流量	渇水流量	流量トレンド（ア）増加型（イ）減少型（ウ）豊水減少、渇水増加型	水質観測所	水温	pH	DO(mg/l)	BOD(mg/l)	COD(mg/l)	SS(mg/l)	T-N	T-P	降水量
北海道	釧路川	釧路川							新川橋	3.00E-05	5.00E-05	1.00E-04	6.00E-05	6.00E-05	-1.80E-03	3.00E-05	-6.00E-07	
			標茶	1.30E-03	9.00E-04	8.00E-04	7.00E-04	（ア）	開運橋	5.00E-05	5.00E-05	8.00E-05	9.00E-05	-9.00E-06	-3.10E-03	1.00E-05	-2.00E-06	3.76
	常呂川	常呂川							金比羅橋	-7.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	1.00E-05	3.00E-05	-8.00E-04	6.00E-05	3.00E-06	
			北見	1.10E-03	5.00E-04	3.00E-04	2.00E-04	（ア）	若松橋	-2.00E-04	-4.00E-06	4.00E-05	-6.00E-05	-4.00E-05	-6.00E-04	2.00E-05	-5.00E-06	7.82
東北	最上川	最上川	下野	8.90E-03	7.30E-03	4.50E-03	2.20E-03	（ア）	下野	2.00E-04	2.00E-05	6.00E-06	6.00E-05	6.00E-05	-4.00E-04	1.00E-05	-1.00E-07	-0.48
	名取川	広瀬川	広瀬橋	9.00E-04	5.00E-04	2.00E-04	-9.00E-05		三橋	2.00E-04	5.00E-05	7.00E-05	1.00E-04	-2.00E-04	8.00E-04	-6.00E-05	-5.00E-06	4.84
北陸	小矢部川	小矢部川	長江	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	3.00E-06	（ア）	国条橋	3.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	-2.00E-05	6.00E-05	-1.00E-03	-4.00E-05	-4.00E-06	6.75
									守山橋	-1.00E-04	2.00E-05	1.00E-04	-3.00E-05	1.00E-04	-5.00E-04	-3.00E-06	-9.00E-06	
									聖人橋	-4.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	-4.00E-05	1.00E-04	2.00E-05	-4.00E-05	-2.00E-06	
	阿賀野川	阿賀川	山科	1.70E-03	1.30E-03	-1.00E-04	-5.00E-04		宮古橋	6.00E-04	-5.00E-05	3.00E-05	-1.00E-04	-7.00E-05	-4.00E-04	-3.00E-06	-6.00E-06	21.81
			小谷	1.60E-03	2.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	（ア）	馬越橋	5.00E-05	-4.00E-05	-1.00E-05	-7.00E-05	2.00E-05	-4.00E-04	7.00E-06	-8.00E-07	14.94
		阿賀野川	馬下	9.10E-03	7.90E-03	3.40E-03	6.00E-04	（ア）	馬下橋	3.00E-04	2.00E-05	3.00E-06	-4.00E-05	3.00E-06	-1.40E-03	3.00E-06	3.00E-06	19.58
関東	荒川	荒川							葛西橋	2.00E-04	2.00E-05	2.00E-04	-1.00E-04	-6.00E-05	-1.20E-03	-2.00E-05	-1.00E-05	
									岩淵水門	4.00E-04	2.00E-05	3.00E-04	-2.00E-05	-3.00E-04	-1.20E-03	3.00E-04	-2.00E-05	
									戸田橋	2.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	9.00E-05	3.00E-05	-2.40E-03	1.00E-04	-2.00E-04	
									江北橋	3.00E-04	3.00E-05	3.00E-04	-6.00E-05	-2.00E-04	-1.80E-03	8.00E-06	-1.00E-05	
									笹目橋	2.00E-04	3.00E-05	1.00E-04	-8.00E-05	-6.00E-05	-1.90E-03	5.00E-05	-2.00E-04	
									治水橋	1.00E-04	3.00E-05	3.00E-05	7.00E-05	1.00E-06	-1.00E-04	-2.00E-05	-7.00E-05	
									新荒川大橋	3.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	1.00E-05	-1.00E-04	-1.70E-03	3.00E-06	-2.00E-04	
									平井大橋	3.00E-04	3.00E-05	3.00E-04	-2.00E-04	-2.00E-04	-1.10E-03	-7.00E-05	-2.00E-05	
									堀切橋	3.00E-04	3.00E-05	4.00E-04	-2.00E-04	-2.00E-04	-1.60E-03	2.00E-04	-1.00E-05	
	多摩川	多摩川	石原	2.40E-03	1.40E-03	8.00E-04	5.00E-04	（ア）	是政橋	4.00E-04	2.00E-05	2.00E-04	-6.00E-04	-3.00E-04	-7.00E-04	-3.00E-04	4.00E-05	4.59
									多摩川原橋	3.00E-04	-1.00E-05	1.00E-04	-5.00E-04	-1.00E-04	-9.00E-04	-2.00E-04	-2.00E-05	
									大師橋	2.00E-04	-1.00E-05	6.00E-05	-2.00E-04	-1.00E-04	-5.00E-05	-4.00E-04	-1.00E-05	
			調布橋	-6.00E-04	-3.00E-04	7.00E-05	3.00E-04	（ウ）	調布橋	7.00E-03	-9.00E-06	2.00E-05	7.00E-06	8.00E-05	2.00E-04	4.00E-05	-1.00E-06	4.59
									二子橋	1.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-7.00E-04	-4.00E-04	-9.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-05	
									日野橋	4.00E-04	-1.00E-05	8.00E-05	-3.00E-04	-1.00E-04	-8.00E-04	-3.00E-04	1.00E-04	
	鶴見川	鶴見川	亀の子橋	6.00E-04	4.00E-04	8.00E-04	5.00E-04	（ア）	亀の子橋	3.00E-04	-2.00E-05	1.00E-04	-3.00E-04	-4.00E-04	-2.00E-03	-1.00E-04	-4.00E-05	4.82
									大綱橋	4.00E-04	-3.00E-05	1.00E-04	-6.00E-04	-5.00E-04	-2.00E-03	-2.00E-04	-3.00E-05	
									末吉橋	3.00E-04	-3.00E-05	3.00E-04	-9.00E-04	-6.00E-04	-1.70E-03	-3.00E-04	-3.00E-05	
	利根川	鳥川	高松	-9.00E-04	-3.00E-04	-2.00E-04	6.00E-05	（ウ）	高松	2.00E-04	6.00E-05	4.00E-05	-1.00E-04	-2.00E-04	-1.60E-03	9.00E-06	-6.00E-06	4.77
		利根川							佐原	1.00E-04	3.00E-05	-1.00E-04	-8.00E-05	2.00E-05	-7.00E-04	4.00E-05	3.00E-06	
									須賀	1.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-9.00E-05	6.00E-06	-7.00E-04	3.00E-05	1.00E-06	
			布川	-3.30E-03	2.80E-03	3.30E-03	1.30E-03	（ウ）	布川	1.00E-04	3.00E-05	-1.00E-04	-8.00E-05	-2.00E-05	-9.00E-04	3.00E-05	-2.00E-06	4.34
中部	豊川	豊川							下条	8.00E-05	-2.00E-05	7.00E-07	-6.00E-06	4.00E-05	-2.00E-04			
									吉田大橋	6.00E-04	6.00E-06	-1.00E-05	-3.00E-05	-1.00E-05	-4.00E-04	-2.00E-06	-3.00E-06	
			石田	-6.00E-04	-2.00E-04	2.00E-05	1.00E-04	（ア）	江島橋	1.00E-04	3.00E-05	1.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-2.00E-04	-2.00E-05	-2.00E-06	-5.46
			当古	-6.00E-04	-3.00E-04	-1.00E-04	7.00E-06	（ア）	当古橋	3.00E-05	2.00E-05	-6.00E-06	-9.00E-06	1.00E-05	-2.00E-04	-3.00E-05	-1.00E-06	-8.94
	木曽川	長良川	忠節	5.00E-04	2.20E-03	2.00E-03	9.00E-04	（ア）	鏡島大橋	1.00E-04	1.00E-05	3.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-3.00E-05	2.00E-05	-4.00E-07	-2.73
			墨俣	-6.00E-04	2.10E-03	2.50E-03	2.20E-03	（ウ）	長良大橋	3.00E-04	7.00E-06	5.00E-06	-4.00E-05	-2.00E-05	-7.00E-05	-2.00E-06	-8.00E-06	2.87
									東海大橋	9.00E-05	1.00E-05	1.00E-04	-6.00E-05	-6.00E-05	-1.40E-03	-2.00E-05	-8.00E-06	
									南濃大橋	2.00E-04	1.00E-05	2.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-04	-1.10E-03	-4.00E-05	-6.00E-06	
									藍川橋	2.00E-05	1.00E-05	4.00E-05	-3.00E-05	-6.00E-05	-8.00E-05	1.00E-05	-6.00E-07	
	櫛田川	櫛田川							櫛田橋	8.00E-05	3.00E-05	-7.00E-06	2.00E-06	6.00E-05	-9.00E-04	-4.00E-06	-5.00E-08	
			両郡	-7.00E-04	-1.00E-04	-3.00E-05	2.00E-05	（ウ）	両郡橋	8.00E-05	2.00E-05	-2.00E-05	-4.00E-06	5.00E-05	-8.00E-04	-7.00E-05	-7.00E-06	3.74
近畿	九頭竜川	九頭竜川							九頭竜川河口	2.00E-04	1.00E-05	9.00E-05	-4.00E-05	-2.00E-06	-2.00E-04			
			中角	-1.20E-03	-1.60E-03	-1.10E-03	2.00E-04	（ウ）	高屋橋	2.00E-04	6.00E-07	4.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-1.00E-04			5.82
	大和川	大和川							遠里小野橋	6.00E-05	5.00E-05	5.00E-04	-1.50E-03	-9.00E-04	-5.60E-03	-5.00E-04	-1.00E-04	
			王寺	2.00E-04	2.00E-04	9.00E-05	1.00E-04	（ア）	河内橋	1.00E-04	2.00E-05	5.00E-05	-6.00E-04	-2.00E-04	-2.90E-03	-2.00E-04	-2.00E-05	
									御幸大橋	2.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-1.00E-03	-6.00E-04	-3.30E-03	-3.00E-04	-6.00E-05	0.48
									国豊橋	2.00E-04	3.00E-05	1.00E-04	-6.00E-04	-3.00E-04	-3.70E-03	-2.00E-04	-4.00E-05	
			坂東	2.00E-05	1.00E-04	1.00E-04	2.00E-04	（ア）	太子橋	3.00E-04	9.00E-06	2.00E-04	-1.40E-03	-4.00E-04	-1.30E-03	-3.00E-04	-3.00E-05	0.48
			王寺	2.00E-04	2.00E-04	9.00E-05	1.00E-04	（ア）	藤井	3.00E-05	2.00E-05	3.00E-04	-7.00E-04	-4.00E-04	-4.20E-03	-2.00E-04	-3.00E-05	
中国	江の川	江の川	尾関山	-6.00E-04	-4.00E-04	-8.00E-04	-4.00E-04	（イ）	尾関山	7.00E-05	1.00E-05	-3.00E-05	-2.00E-05	6.00E-06	-3.00E-04	4.00E-05	2.00E-06	-1.35
	佐波川	佐波川							新橋	7.00E-05	2.00E-05	8.00E-05	-4.00E-05	6.00E-05	-2.00E-04	1.00E-05	-7.00E-07	
四国	肱川	矢落川	新谷	-6.00E-05	-2.00E-05	-1.00E-06	-3.00E-07	（イ）	新大橋	-2.00E-04	-3.00E-05	-2.00E-04	1.00E-05	4.00E-05	2.00E-04			4.84
									生々橋	-3.00E-05	4.00E-05	-5.00E-05	-8.00E-06	2.00E-05	-5.00E-04			
	重信川	重信川	出合	-4.00E-04	-6.00E-06	7.00E-05	4.00E-05	（ウ）	出合橋	1.00E-04	2.00E-05	3.00E-05	-2.00E-04	-2.00E-04	-5.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-05	3.84
	土器川	土器川	常包	8.00E-06	2.00E-05	1.00E-05	-2.00E-06		常包橋	1.00E-04	9.00E-06	6.00E-05	-4.00E-05	9.00E-06	-1.00E-04	-4.00E-05	-9.00E-07	0.75
九州	筑後川	筑後川	瀬ノ下	-3.10E-03	-2.10E-03	-1.30E-03	-8.00E-04	（イ）	久留米大橋	1.00E-04	4.00E-05	-8.00E-06	-3.00E-05		3.00E-04	9.00E-06	1.00E-06	-6.51

流量観測地点における豊水、平水、低水、渇水流量の変化トレンドは、近似直線の傾きを見ると、(ア)全てが増加している河川、(イ) 全てが減少している河川、(ウ) 豊水、平水が減少し、渇水が増加している河川の大きく 3 つに区分できた。今回抽出した地点の中では、(ア) が最も多い結果となった。本稿ではこれらの要因の検証には至らなかったが、(ア) は都市部では流域の開発による流出量の増加や、農村部では農地の減少による取水量の減少等が、(イ) は中国、四国、九州地方の河川で見られ、降水量の減少や取水量の増加など水利用の変化等が、(ウ) は櫛田川 (蓮ダム) などの集水域割合の大きなダムの竣工が期間内にあった地点では、ダムによる貯水や維持流量の確保等が要因としてありうると考えられる。流量の変化と降水量の変化について回帰式の検定を行った結果、豊水流量と降水量は、有意水準 1%を満たし有意な正の相関が見られたが、平水、低水、渇水の順で相関は低くなり、有意な相関は得られなかった。

水質に関しては、一部の河川を除いて水温、pH、DO については全体的に増加傾向、BOD、TP、SS については全体的に減少傾向、COD、TN については増加・減少が半々程度あった。BOD、COD、TN、SS は、多摩川、鶴見川、大和川等の下流の調査地点では減少率が大きくなる傾向にあり、元々濃度が高かったこれらの地域では、総量規制、高度処理等の汚濁負荷対策の効果が大きいことが示唆された。

次に、1982-2007 年の全期間平均水温とその近似直線の傾きによって、クラスター分析を行い、抽出地点を A~H の 8 つに類型区分した結果を表-Ⅱ.1.3.1.3 に示す。表-Ⅱ.1.3.1.3 の「類型の特徴」は各類型における 1982-2007 年の全期間平均水温と近似直線の特徴を示す。また、「回帰判定」は、時間を説明変数にしたときの水温変化の回帰式の有意性の検定結果、「前半期平均と後半期平均の平均の差の有無」は前半(1982-1995 年)と後半(1995-2007 年)の平均値に有意差があるかの検定結果であり、t 検定による

表-Ⅱ.1.3.1.3　水温の変化に着目した抽出地点の類型化

				1982-2007 (全期間)			1982-1995 (前半期)			1995-2007 (後半期)							
水系名_ 水質調査地点名	類型	類型の特徴 (水温傾き・平均水温)	地方	平均	近似直線の傾き	回帰判定	平均	近似直線の傾き	回帰判定	平均	近似直線の傾き	回帰判定	前半期平均と後半期平均の差の有無(t検定) 片側5%で有意* 1%で有意**	降水量の平均	降水量傾き	平均気温	平均気温傾き
釧路川　開運橋	A	低下・低温型	北海道	9.4	−0.028		9.6	0.010		9.0	0.033		*	1029	3.76	11.6	0.019
常呂川　若松橋			北海道	10.2	−0.024		10.5	0.070		9.7	0.111			763	7.82	11.8	−0.114
阿賀野川　宮古橋	B	低下・平均型	北陸	13.1	−0.066	**	13.4	−0.192	**	12.8	−0.025			1492	21.81	15.7	−0.170
肱川　新大橋			四国	16.2	−0.040		16.4	−0.111		16.0	−0.023			1670	4.84	18.5	−0.105
小矢部川　国条橋	C	横ばい・やや低温型	北陸	13.0	0.010		13.0	0.067		13.0	−0.037			2221	6.75	16.9	0.029
阿賀野川　馬越橋			北陸	12.5	0.012		12.4	0.047		12.7	−0.094			1201	14.94	15.6	−0.111
阿賀野川　馬下橋			北陸	11.5	0.052	*	11.2	0.128	*	11.8	−0.009			1123	19.58	14.4	−0.050
多摩川　調布橋			関東	11.7	0.029		11.6	0.099	*	11.9	−0.046			1497	4.59	14.0	−0.045
利根川　布川	D	横ばい・平均型	関東	15.9	0.031		15.7	0.047		16.1	−0.019		*	1382	4.34	17.7	−0.015
木曽川　横満蔵			中部	16.2	0.031		16.0	0.044		16.3	0.065			1723	−4.39	18.3	0.055
揖斐川　伊勢大橋			中部	16.1	0.029		16.0	0.030		16.3	0.051			2468	−3.11	18.9	0.005
宮川　度会橋			中部	16.2	0.006		16.2	0.087	*	16.2	−0.028			3193	7.90	18.4	0.050
鈴鹿川　小倉橋			中部	17.2	0.004		17.3	0.068		17.1	0.037			1825	−13.85	18.7	0.099
最上川　下野	E	やや上昇・平均型	東北	13.0	0.056		12.7	0.160		13.3	−0.012			1228	−0.48	15.7	−0.059
名取川　三橋			東北	13.7	0.074	*	13.4	0.211	*	14.1	0.013			1244	4.84	16.5	0.071
木曽川　鏡島大橋			中部	13.9	0.079	**	13.4	0.029		14.3	0.153		*	1806	−2.73	16.7	0.075
豊川　当古橋			中部	15.0	0.034		14.7	−0.010		15.2	0.065	*	*	1683	−8.94	17.8	0.003
櫛田川　両郡橋			中部	14.7	0.051	*	14.4	0.090		14.9	0.057		*	2037	3.74	17.9	0.068
九頭竜川　高屋橋			近畿	13.9	0.045		13.6	0.121		14.2	−0.076			2223	5.82	18.0	0.033
江の川　尾関山			中国	14.0	0.049		13.8	0.029		14.3	0.097			1497	−1.35	13.7	−0.017
利根川　高松	F	やや上昇・やや高温型	関東	14.9	0.079	**	14.4	0.021		15.4	0.115		**	1241	4.77	17.6	0.089
木曽川　長良大橋			中部	15.8	0.091		14.6	0.051		15.7	0.047	*	**	1851	2.87	18.2	0.112
豊川　江島橋			中部	14.9	0.071	**	14.4	0.107		15.3	0.042		**	2354	−5.46	18.3	0.021
土器川　常包橋			四国	15.3	0.087	**	14.8	0.105		15.9	0.047		**	1143	0.75	18.6	0.052
筑後川　久留米大橋			九州	16.2	0.059		15.7	0.070		16.8	−0.120		*	1843	−6.51	18.1	0.077
矢作川　米津大橋			中部	16.5	0.063	**	16.1	0.025	**	16.8	0.152		**	1413	0.64	18.5	0.020
櫛田川　櫛田橋			中部	15.5	0.057	**	15.1	0.035		16.0	0.029		**	2037	3.74	18.5	−0.017
豊川　吉田大橋			中部	15.8	0.078	**	15.3	0.057		16.3	0.101	*	**	2354	−5.46	18.8	0.192
長良川　伊勢大橋			中部	16.2	0.073	**	15.7	0.049		16.7	0.061		**	2170	3.24	19.4	−0.020
矢作川　中畑橋			中部	16.8	0.083	**	16.2	0.043		17.2	0.126		**	1413	0.64	19.1	−0.003
雲出川　雲出橋			中部	16.3	0.095	**	15.7	0.117		16.9	0.033		**	1683	−0.43	18.8	0.132
大和川　御幸大橋	G	やや上昇・高温型	近畿	18.4	0.070	*	18.0	0.128		18.8	0.064			1233	0.48	19.6	−0.005
庄内川　庄内新川橋			中部	18.1	0.049	*	17.7	−0.011		18.3	0.117		*	1608	−6.75	19.3	0.058
庄内川　枇杷島橋			中部	18.1	0.044		17.9	0.024		18.4	0.073			1608	−6.75	19.2	0.108
重信川　出合橋			四国	20.7	0.044		17.8	−0.007		18.6	0.013		*	1315	3.84	18.6	0.010
多摩川　是政橋	H	上昇型	関東	17.6	0.133	**	16.7	0.085		18.5	0.145		**	1497	4.59	15.9	0.001
鶴見川　亀の子橋			関東	18.1	0.142	**	17.2	0.153	**	19.1	0.076		**	1571	4.82	16.1	0.008
大和川　太子橋			近畿	18.3	0.109	**	17.7	0.090		19.0	0.174	**	**	1233	0.48	19.0	0.005

ものである。表の下に行くほど、近似直線の傾きが大きく、かつ平均水温が高い類型となる。水温低下・横ばい型の類型 A～D では有意な変化トレンドはほとんど見られなかったが、やや上昇型と上昇型の類型 E～H では有意な上昇トレンドが見られる。前半と後半の水温変化のトレンドの関係には一様な傾向は見られなかったが、全体的に前半のほうが上昇の傾きが大きい。また、上昇傾向にある類型区分では、前半と後半の水温の平均値に有意な差がある河川が多く、この 2 期間で、期間平均的な水温が上昇していることが示唆された。

c）考察

先に述べた各類型の特徴と区分要因について考察する。類型 A~C は，気温の低下と降水量の増加の傾向が共通して見られることが特徴である。このうち類型 A，B に見られる水温の低下傾向は、気温の低下と降水量の増加という自然的要因によって導かれた可能性が高いことが示された。

類型 D~F は，気温は上昇傾向にあるが、降水量の増減は地点によって様々である。さらに、気温の傾き度合いと水温の傾き度合いが類似していることから、これらの類型に見られる水温の上昇傾向は、気温の上昇という自然的要因によって導かれた可能性が高いことが示された。

類型 G、H は、気温は上昇傾向にあり、降水量の増減は地点によって様々であることは類型 D~F と同様であるが、水温の上昇度合いが気温の上昇度合いを大きく上回っていることが特徴であり、自然的要因だけでは水温の上昇を説明できない。類型 G，H は人口密度の高い都市にある地点で構成されており、人口集中による流域の開発（下水道の流入等）といった人為的影響が、本類型を特徴づける要因となっていることが示唆された。

例えば、同じ河川でも異なる類型に分類された多摩川の是政橋（距離標 32.0k）（類型 H）と調布橋（距離標 60.0k）（類型 C）を比較すると、1982-2007 年の期間平均気温は約 2℃、水温は約 6℃の差があり、また、水温上昇の傾きにも 4 倍以上の差があった。この 2 地点間には、取水による河川水量の減少及び下水処理場からの処理排水の流入がある。また、1982-2007 年の期間を含む各年度の「下水道統計」の集計によると、石原（距離標 28.0k）までに流入する下水処理量は 1980 年から 2 倍以上に増加しており、平水流量には大きな変化が見られないことから、河川流量に占める処理水量の増加が水温上昇の原因となっていることが考えられ、是政橋地点では人為影響による水温変化が自然的要因による影響を大きく上回ったことを示した。このように、河川によっては水温も人為影響によるものと見られる変化が現れているようであり、今後の河川水質の変化について検討する場合、人為影響を詳細に評価することの重要性が見受けられた。

1.3.2 流量・水温の変化が河川環境に与える影響に関する検討

本項では、流量及び水温が変化した場合にそれが河川環境にどのような影響を及ぼすかについて、既往の知見を整理するとともに、生物・水質の全国調査データを用いて行った分析の成果を紹介する。

1.3.2.1 既往の知見の整理

a）流量の変化と河川環境

まず、流量の変化が水質に与える影響について述べる。河川流量と水質との間には一般に相関関係が見られることが多い。流量と水質の相関関係を示すものとして、濃度～流量式（C-Q 式）あるいは、負荷量～流量式（L-Q 式）がある。負荷量(L)、水質（C）と流量（Q）との間には、L=CQ の関係があるので、C-Q 式と L-Q 式は独立の関係にはない。これらの関係式を実測データから導き出す場合には、最小自乗近似法などが用いられるが、L-Q 式は相関関係をとる両者に流量が入っているため C-Q 式より相関係数が高くなる傾向がある。このことから、実際には L-Q 式の形で流量変化に伴う負荷量変化という形で河川流量と水質の関係が示されることが多い。

流量変化に伴う水質変化については、その影響を大きく受ける湖沼、貯水池、内湾などの閉鎖性水域へ流入する河川における調査が多く行われている。流量増加に伴い顕著になる水質変化現象としては、土砂による水の濁りがまず挙げられる。櫻井ら(2002)の作成した結果を見ると濁りに関しては、指数部の b が 2 よりも大きいと見られる河川が大半であることがわかる（図-Ⅱ.1.3.2.1)。これは、流量

増加に比して、負荷量増加の割合が大きい、すなわち流量増加に応じて濃度が上昇することを示している。このような関係を持つ水質項目は流域において負荷の発生が面的であり、降雨により流域からの負荷流出が増加する項目である場合が多い。逆に負荷が点源で降雨量とあまり関係がない場合には、降雨に伴う流量増加はこの負荷を希釈する効果を持つため指数部の b が 1 より小さくなる。流量と水質の関係は、このように水質項目毎に流域における負荷の発生および流出形態により大きく影響される。

$$L = aQ^b \quad (1)$$

ここに、L(g/s)：単位時間あたりに流出する負荷質量あるいは L(m^3/s)：単位時間あたりに流出する負荷体積量、Q(m^3/s)：流量、a、 b：地点毎に決定されるパラメータ

塚原ら(1998)は一つの出水中における水中懸濁物質量と流量との関係をプロットし、出水中の同じ流量時において、流量増加期での方が流量減少期よりも濁質濃度が高くなることを示している。これは、出水に伴う濃度の高まりに対する流域における貯留の影響を示唆するものである（図-Ⅱ.1.3.2.2)。

流量と水質との関係は、以上のように種々の形態が見られるが、水質項目、流域特性により、様々な関係を示す。気候変動により流量が変化した場合には、同時に水質変化のパターンも変化することが予想される。

次に、河川流量が生物・生態系に与える影響について述べる。自然の河川流量は河川や周辺の氾濫原における湿地の生態系を規定していることが示されている(Bunn,et al. 2002, Junk,et al. 1989, Poff, et al 1997, Richter, et al 1998, Puckridge, et al 1998）。Bunn, et al. (2002)は、河川流量が河川に

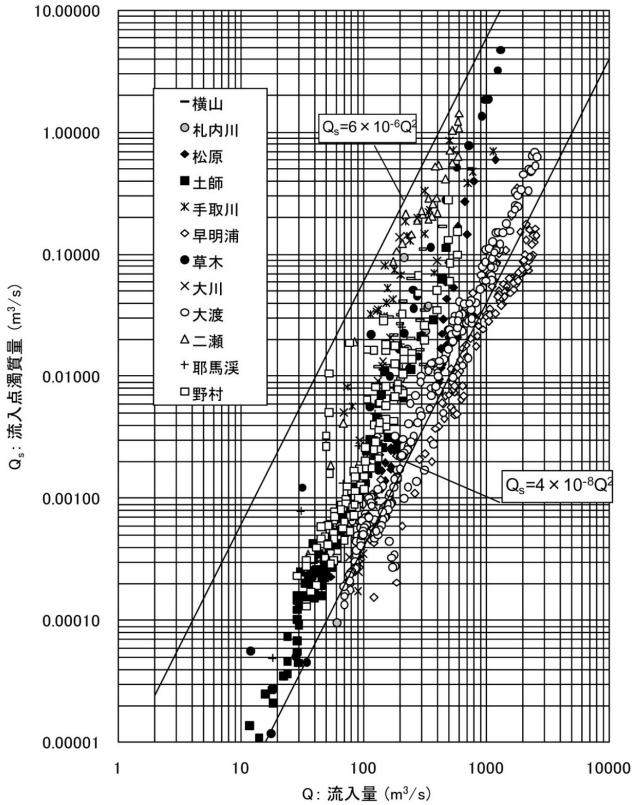


図-Ⅱ.1.3.2.1 貯水池の流入濁質量と流入量の関係

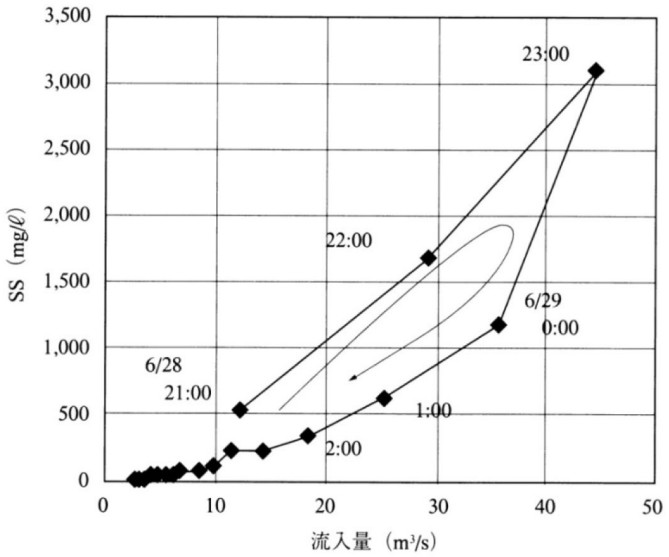


図-Ⅱ.1.3.2.2　流入濁質の出水中の変化

おける水生生物の多様性に影響する観点として、以下のような４つの原理を提示している。

原理１：流れは河川の物理的な生物生息場（ハビタット）を強く規定するもので、この作用により生物構成を規定する。ハビタットのスケールは、流域スケール（河道網規模)、リーチスケール（瀬や淵の分布)、パッチスケール（個々の河床材料に対する水理条件）にわたる。

原理２：水生生物種は主として自然の流量（natural flow regime）に直接反応する形で生活史戦略を進化させてきている。(Blanch,et al. 1999)

原理３：水域の縦横断方向の連結性が自然なパターンにより維持されることが、多くの河川に生息する種の生育にとって重要である。(Ward, et al. 1999)

原理４：流量の改変は、外来種や移入種の定着を促進させる。

Bunn,et al.(2002）が整理したこれら４つの原理を概念図として示すと、図-Ⅱ.1.3.2.3 の様になる。

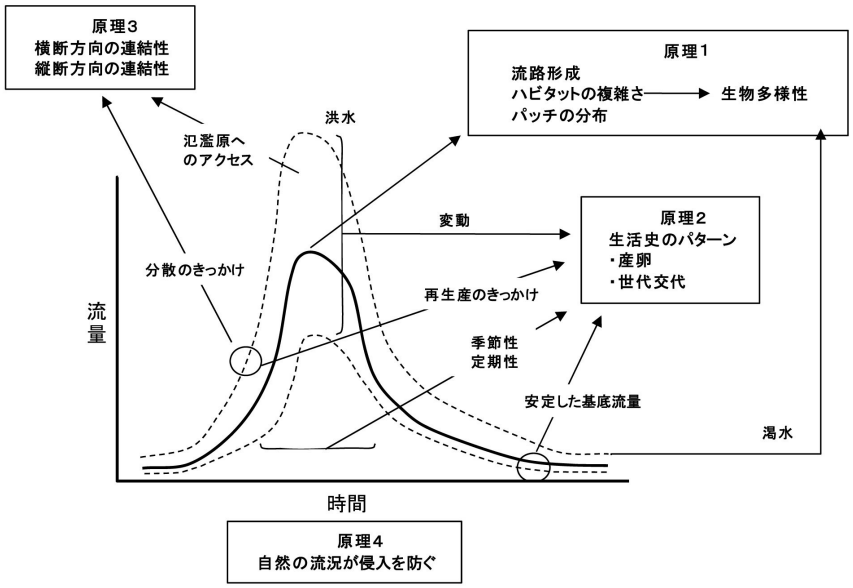


図-Ⅱ.1.3.2.3　水生生物の多様性と河川の自然の流況

皆川(2000）は、日本における研究事例を中心に、出水とハビタット、生物に関する既往研究を収集し、季節的な出水と生物の生活史と関連した役割や機能、出水規模や攪乱の程度に関連したハビタット、生物への役割や機能について整理している（表-Ⅱ.1.3.2.1)。表-Ⅱ.1.3.2.1 の役割・機能の列には、Bunn,et al.(2002）による 4 つの原理に対応させたローマ数字を追加している。我が国においても、河川流量が生物・生態系に及ぼす影響について、現地における観測に基づいた種々の研究が行われていることがわかる。また、それぞれの現象は、Bunn,et al.(2002）が整理した、河川流量が河川における水生生物の多様性に影響する原理と矛盾せずに説明できそうである。

また、生態系に対する河川流量の影響についての検討は、生態系の評価指標の一つである多様性に着目する場合が多い。河川流量が生物多様性に影響する作用機構は攪乱によるものが大きいと考えられる。Huston(1994)の動的平衡モデル（dynamic equilibrium model）は、攪乱と生産性の相互関係から多様性を予測するものであるが、河川における攪乱と多様性を比較する上で参考になる。この概念を図示したものが図-Ⅱ.1.3.2.4 である。生産性が高く、攪乱のほとんどないシステムでは、優占種が競合の結果、他の種を駆逐してしまうために多様性は低くなる。このような場所で攪乱が増加すると優占種の競合力が低下することで他の種を駆逐することができなくなり、結果として多様性が増加する。

逆に生産性が低い場所では、競合による他種の駆逐速度が低いために、攪乱が低くても多様性は高くなる。生産性が低い場所で攪乱が激しいと、攪乱が成長速度の速くない種を再生産が行われる前に消滅させてしまうために多様度は低くなる。生産性が高く、攪乱も頻繁に生じる場所では成長速度が速いものの競合による寡占が生じさせないほど頻繁に攪乱が生じるために多様度は高くなる。

これに対して、Tilman(1982）の不均質な環境における資源競合モデル（theory of resource competition in aheterogeneous environment）は、生物種の多様性は資源の不均一性と生産性に規定されると考える。このモデルの考え方は以下のようである。まず、種数は比較的資源の少ないハビタットで最大になるが、資源がきわめて少なくなると急激に減少し、資源が増大すると徐々に減少する。次に多様性が最も高い集合体においては、多くの種が優占するが、資源が増加するとほとんどの種は数が少なくなり、少数の種により優占される。これらを図示したものが図-Ⅱ.1.3.2.5 である。最後に、ある資源量の基では、特に資源量が少ない場において、空間的不均一性が高いほど種数が増加する。Huston と Tilman のモデルを合わせると、潜在的生産性、攪乱、空間的不均一性が場における多様性を規定する鍵となっているということが示唆される。

流量が生態系に与える影響を検討するには、個々の生物種についての検討の際に考慮した項目に加えて、生物種間の関係を考慮する必要がある。その際には、場の生産性という概念を追加する必要がありそうである。流量が、生物・生態系に与える影響についての研究は、数多く実施されているため、今後さらに包括的なレビューを実施することで、気候変動による流量変化に伴う生物・生態系への影響についての理解が整理されると思われる。

b) 水温と河川環境

河川水温は、水生生物の代謝速度、生理、生活史特性に直接影響し、栄養塩類の循環や生産性といった重要な過程の速度を決定する(Allen1995)という点で、河川環境において非常に重要な項目である。大型生物のみならず、微生物活性も水温に大きく影響されるため、生化学反応による水質変化を規定する極めて重要な要因であるし、水温変化は水の密度も変化させるため、流動にも影響を及ぼしうる。また溶存酸素の飽和濃度は、水温により変化することから、溶存酸素濃度変化という観点を通じてさらに生物に影響する。このように、数多くの水質項目の中でも水温は、河川環境におけるもっとも重要な項目である。河川水温が変化すると、水中に住む変温動物である魚類や無脊椎動物は、体温を調節できないために大きく影響を受ける。水温の持つ環境への影響の一事例として、環境省が設置した水生生物保全

表-Ⅱ.1.3.2.1 出水がハビタット、生物に果たす役割

	出水時期又は出水の規模・攪乱の程度		役割・機能	文献及び研究・調査事例
季節的な出水と生物	春期		・春出水は、魚類の遡上、産卵のトリガーとなる.（Ⅱ）	・河川下流域の魚の多くは、6月の梅雨期に増水した川の河川敷の草地や湿地帯へ侵入して産卵する習性を身につけた (片野 1995) ・春出水による流量増加は、Coregoninae（ｺﾚｺﾞﾇｽ属魚類）の孵化と流下の開始に対して最初のきっかけを与えた(Naesje T et al. 1995)
			・融雪出水による裸地の形成はその後のヤナギ類の種子の定着地となる.（Ⅱ）	・ヤナギ類は、融雪出水の減水期に種子を分散し、融雪出水によって形成された裸地にいち早く侵入する（中村 1999）
			・増水時にワンドや高水敷の草地などが冠水あるいは増水することにより本川と連続し、ワンドやタマリで生活史の一部として利用する生物の存続を維持（Ⅲ）	・千曲川における 1999 年 5 月のワンド調査において、出水による本川の増水に伴い、本川とつながっているワンドに魚類が侵入し、ワンド内の魚類は増加した（建設省土木研究所環境部河川環境研究室 2000）
	様々		・出水による種子散布、及び攪乱による種子の再分散（中村 1999）（Ⅱ）	
出水規模とハビタット・生物	小 ↓ 水域の攪乱 ↓ 大	平常時の数倍以上の河床堆積物が掃流（フラッシュ効果）する程度の出水	・比較的軽い河床付着物や堆積物の掃流、付着藻類の剥離 →付着藻類の活性化、魚類・底生動物の餌資源としての質の向上、自濁作用の防止 →自浄作用の向上 （Ⅰ）	・自然共生研究センター実験河川における人工出水実験（平常時流量 0.1m^3/s を 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0m^3/s に増加、ﾋﾟｰｸ継続時間 20 分）では、出水前の現存量によるが、少なくとも 1.0m^3/s（平常時の 10 倍、掃流力では 5 倍）で、付着藻類は有意に減少する（皆川ほか 2000） ・松浦川水系厳木ダムにおけるﾌﾗｯｼｭ放流（1998.11、厳木川流量0.8m^3/s を 10.7m^3/s に増加、ﾋﾟｰｸ継続時間 2 時間）では、付着藻類の現存量や底生動物の個体数・現存用・群集構造への影響は認められなかったが、比較的移動性の大きい底生動物への行動には影響を及ぼした（皆川ほか 2000）
			・底質に堆積した細粒土砂の掃流 →底生動物ハビタットの改善 （Ⅰ）	・木曽川水系比奈知ダム試験湛水時の流量減少によりｶｹﾞﾛｳ目は激減し，ｲﾄﾐﾐｽﾞ目は増加していたが，フラッシュ放流のﾌﾗｯｼｭ放流（1998.3～4、ダム放流量 0.5m^3/s→11m^3/s に増加（約 1 ヶ月間継続））によって、その分布は試験湛水前に回復する兆候がみられた（辻本 1999）
		河床材料の移動を伴う出水 一般に、無次元掃流力 τ_*＞0.06	・河床材料の移動に伴う付着藻類の剥離、底生動物の変化 →優占種の変化、群集構造の変化 （Ⅰ）	・利根川水系五十里ダムにおけるﾌﾗｯｼｭ放流（出水期 4～7 月に 1 回/月、対象放流は 1997.5）では、ダム放流量 1.0m^3/s→100m^3/s に増加（ﾋﾟｰｸ流量継続時間：20 分）させた．その結果、河床材料の移動（最大粒径約 23cm）、付着藻類は Chl-a で 1/3 に減少（緑藻・珪藻綱は大きく減少、藍藻類綱は残存率高い）、底生動物は早瀬・平瀬でｶｹﾞﾛｳ目やﾄﾋﾞｹﾗ目が減少、深い淵では増加傾向）底質の炭素・窒素含有率が約 1/3 に低下、放流前後の水質では Chl-a 及び大腸菌群数の低下が確認された (角 1998)
			・河床堆積物が動くことによる河床内間隙水域（河川水が河床内に浸透した水域）の溶存酸素を含んだ浸透水の維持 →河床内間隙水域生物のハビタットが維持 （Ⅰ）	・水生昆虫にとって重要な河床内間隙水域を維持するために溶存酸素を含んだ浸透水の存在が必要になり、このような生息場所条件は増等の攪乱時に堆積物が動くことが必要 (竹門 1997)
			・河床材料の移動に伴う底生動物の流出 →優占種の変化、群集構造の変化 （Ⅰ）	・実験により河床材料が移動した時に顕著に、水生昆虫が流出することが把握された (清水ほか 1998) ・流量が安定すると極相として造網型が優占するが、出水による攪乱・流出後は、まず、遊泳型、匍匐型が回復し、その後造網型が回復し、優占種は変更する．伊勢湾台風後の大規模攪乱後の調査結果によると、台風前の状況に回復するのに 7 年を要した（津田 1972） 平常時流量の 7～10 倍の出水後の南浅川における回復過程では優占無き群集→匍匐・造網型優先群集に遷移し、1 年後には洪水前の組成の群に回復 (小倉 1985)
		2～3 年に一度の規模の出水	・瀬や淵等、川の形を形成 （Ⅰ）	・河道の平面形態は低水路満杯流量（平均年最大流量＝2～3 年に 1 回の出水）くらいで規定される (山本 1994)
		5 年に一度の規模の出水	・階段状河床型の淵の形成 （Ⅰ）	千代川上流域における階段状河床形態の淵は、約 5 年確率の洪水に対する階段状形態とよく対応している (藤田 1995)
	水際域から陸域の攪乱 ↓ 大	冠水領域、冠水頻度の増大	・冠水領域の拡大 →本川とワンドやタマリの連続性が高まり、ワンドやタマリを生活史の一部(産卵等)として利用する生物の存続を維持（Ⅲ） ・冠水頻度 →地被状況に大きく関与（Ⅰ、Ⅲ）	・本流が増水し場合には、その周囲が冠水し、本流やワンドに住むフナ類やナマズ、ドジョウなどが冠水した場所で産卵（片野 1998） ・雫石川では冠水頻度が 1～5 日/年を越える場所に裸地が多い（萱場 2000） コロラド川グレン・キャニオンダムにおけるﾌﾗｯｼｭ放流（(1996.3) ダム放流量 200m^3/s→1,270m^3/s に増加、継続時間 8 日)によって、直径 75cm 程度の 10 個の河床材料は全て流下(平均 230m)し、砂浜が形成された（100 ヶ所の砂浜のうち 10%が減少，50%が増加，40%は影響を受けなかった）．河畔植生への影響については、草本植物，特に一年草に有意な減少．外来植生のタマリスクの発芽の若干の抑制効果をみられた．魚類への影響では、在来種は流れの緩やかなところに逃避．移入魚種（帰化魚）も流失せず（鷲谷 1998）(Collier M 1997)
		水際域の浸食・堆積	・水際域の浸食・堆積による砂州の形成（Ⅰ） ・水辺植生の保全（奥田・佐々木 1996）（植生遷移が進まない）（Ⅰ）	
		流路の変更及び砂州の移動 数年～10 数年に一度の出水	・砂州の移動に伴う植生帯が破壊 →裸地河原の再生 →河原に依存して生育生息する生物の保全 （Ⅰ） →生物多様性の維持（鷲谷 1999）（Ⅰ～Ⅲ）	・千曲川においては、1999 年 8 月に生じた観測史上最大規模の出水により、砂州の移動、木本類を含む植物帯の破壊・流出し、規模な裸地河原が再生した (中村 1999) ケショウヤナギの種子は、流路変化などによる攪乱によって生じた砂礫裸地に先駆的に侵入することにより存続を可能にする（建設省土木研究所北陸地方建設局松本砂防工事事務所 1995）

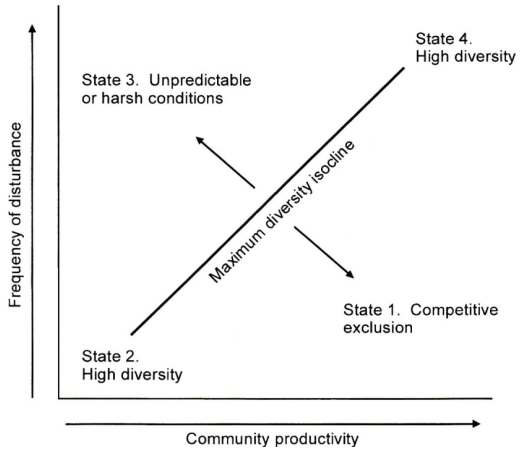


図-Ⅱ.1.3.2.4　生物多様性の動的平衡モデル

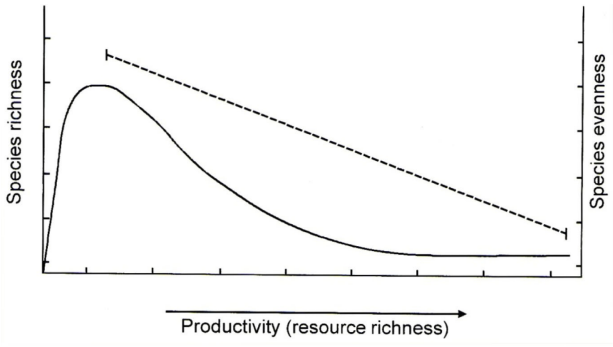


図-Ⅱ.1.3.2.5　Tilmanの資源競合モデル

水質検討会の報告書(環境省 2002)に、日本に広く分布する魚介類の生息水温が整理されている。

1.3.2.2 河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類出現特性による全国一級水系の類型化及び分析

a) 分析の狙いと手法

前項までに述べたように、流量・水質が河川環境に与える影響についての知見は蓄積しつつある。これらの知見を活用し、気候変動に伴う流量・水質の変化により、生息可能範囲が狭まるなどの河川生物への影響を予測し適切な管理を行うためには、現在の河川生物の分布及びその規定要因を把握する必要がある。このような目的に対して、日本全国の生物生息状況を位置情報とともに把握することができれば、近傍の河川環境特性の情報と比較することで、河川環境特性の変化の影響を敏感に受ける指標種の抽出やそれら指標種の生息に必要な河川環境特性に関する検討が可能になる。このために、類似の生物生息状況や河川環境特性の分布を知ることのできる環境類型区分を作成することは有効な手法である。そこで、全国109水系を対象に河川水辺の国勢調査を利用し、水系単位に加えて調査地点単位での類型化を行うとともに、類型化の単位や対象魚種の違いによる類型区分結果の違いやそれぞれの特徴について把握した（望月ら 2012）。

河川水辺の国勢調査は現在までに4巡の調査が実施されているが、本研究ではデータ集積が終了している第3巡目調査（平成16～20年）結果を用いた。本研究では河川環境への依存度が高く、比較的種の同定が細微まで行われている魚類（全確認魚種）を対象とした。

類型化には、調査地点と出現種による分類に使用されることが多いTWINSPAN法を用いた。類型の単位としては水系単位及び調査地点単位の２つのケースで行い、水系単位による類型区分では確認魚種、調

査地点単による類型区分では確認魚種及び確認個体数により区分した。また、対象確認魚種は、全魚種・準淡水魚のみ、回遊魚のみの３つのケースで行った。

b) 分析結果

水辺の国勢調査第３巡目より魚類の生息が確認された840地点を対象とする。

図-Ⅱ.1.3.2.6に、全調査地点が位置するセグメントの割合を示す。セグメントMの割合が少ないことが分かる。河川水辺の国勢調査は多くの調査地点が直轄区間内にあるため、上流部の調査地点が下流に比べて少ない。

図-Ⅱ.1.3.2.7 に、今回確認できた種の種類別の割合を示す。汽水・海水魚が最も多くその割合が半数を超えていた。

各ケースにおける類型化の結果を以下に示す。以降に示す樹状図は、TWINSPAN法による分類の過程を簡易に示したものであり、左の1群から次々と群を分割する。記載の種は各段階で区分の要因となった種を示している。なおここでは、区分の要因となった種が出現した又は個体数が大きい場合に（-）、出現しない又は個体数が小ない場合を(+)で示している。

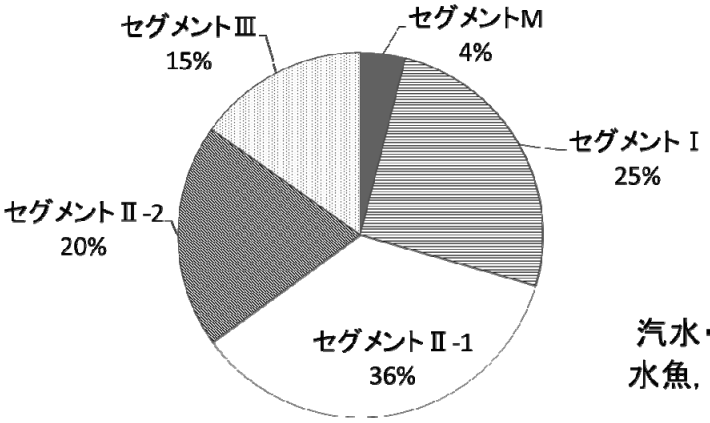


図-Ⅱ.1.3.2.6　調査地点のセグメントの割合

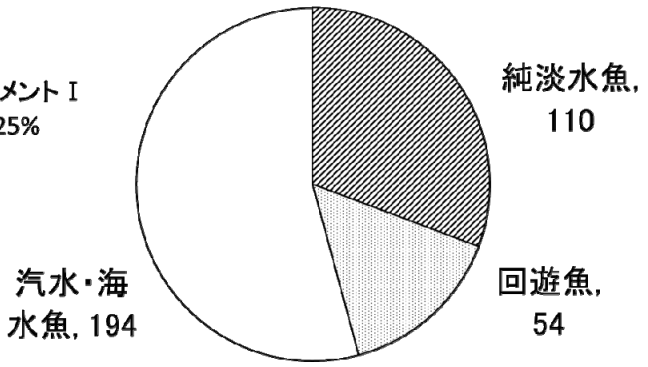


図-Ⅱ.1.3.2.7 確認種の割合（数字は種数）

b-1) 水系単位・全魚種

樹状図を図-Ⅱ.1.3.2.8 に、類型区分結果を図-Ⅱ.1.3.2.9 に示す。第一分類では北海道（類型 8～12）とそれ以外（類型 0～7）で分類された。北海道の固有種であるエゾウグイ、本州に広く分布するオイカワ、カマツカが要因となっている。本州は第二分類で類型 0～3 と類型 4～7 に大別されたが、前者は西日本、後者は東日本に分布する。（ただし、類型 4 は北陸及び中国地方の日本海側に分布する。）要因となった出現種はヤマメ、サケ（東日本に生息）、ウロハゼ、ゴクラクハゼ、ドンコ、カワアナゴ（西日本に生息）等であった。ドンコを除くと汽水・海水魚が要因となっていた。東日本は鶴見川・関川以北は主に類型 6、7 で占められ類型 6 は太平洋側、類型 7 は日本海側の水系が多く、類型 6 はコトヒキ、ザッパ、ビリンゴ等の汽水魚が、類型 7 はアカザ、カジカの淡水魚が出現することで区分されている。西日本は、有明海（類型 0）及び瀬戸内海、日本海側（類型 1）と、太平洋側の内湾（類型 2）及び外洋（類型 3）に分類された。区分の要因の種として類型 0、1 はシモフリシマハゼ、類型 2、3 はシマイサキ、コトヒキ、ボウズハゼと汽水・海水魚が多く見られた。その後の分類では類型 0 のハゼクチ、類型 2 のヌマムツ、類型 3 のギンガメアジ等がそれぞれの類型を特徴づける種となっており、既知の生息域とも一致する。

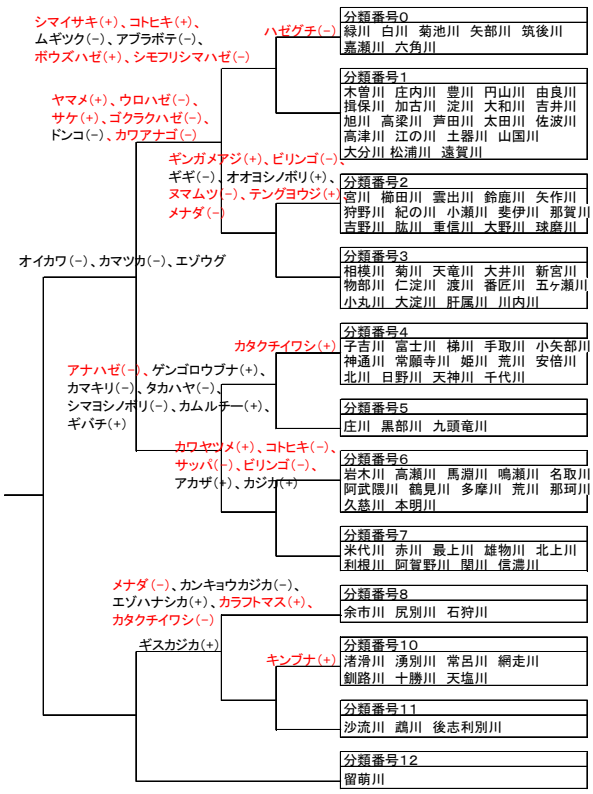


図-Ⅱ.1.3.2.8　水系単位・全魚種での分類結果（樹状図）

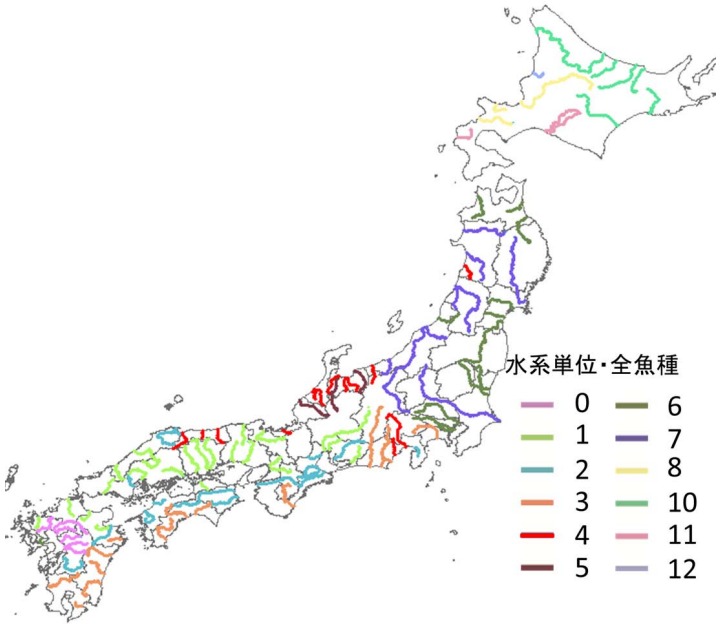
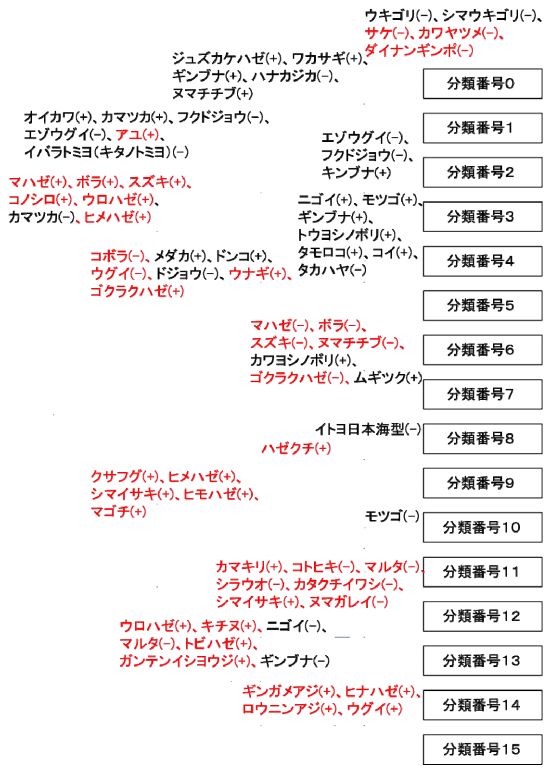


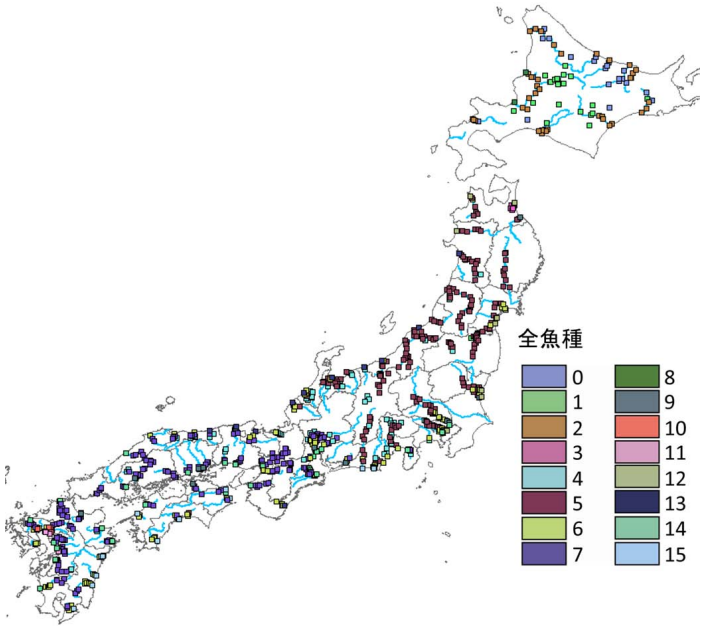
図-Ⅱ.1.3.2.9　水系単位・全魚種での分類結果

b-2) 調査地点単位・全魚種

樹状図を図-Ⅱ.1.3.2.10 に、類型区分結果を図-Ⅱ.1.3.2.11 示す。上流の調査地点と比較して河口・汽水域の調査地点において多様な魚種が確認されるため、これらの地点を区分するための類型が多く生じる結果となった。第一分類で 0～15 の類型は 0～7 と 8～15 の 2 つの類型に大別された。後者はほとんどが下流から河口・汽水域の調査地点であり、マハゼ、ボラ、スズキ、コノシロ、ウロハゼ、ヒメハゼ等の汽水・海水魚の生息状況が区分の要因となっている。



図−Ⅱ.1.3.2.10　調査地点単位・全魚種での分類結果（樹状図）



図−Ⅱ.1.3.2.11　調査地点単位・全魚種での分類結果

類型 8～15 は北海道（類型 8）、瀬戸内海（類型 9）、有明海（類型 10、11）、東日本（類型 12）、本州日本海側（類型 13）、太平洋側・九州（類型 14、15）と地域毎に明確な区分が見られた。類型 0～7 は、北海道(類型 0～2)、東日本（類型 3～5）、西日本（類型 6、7）に大別され、水系と同様、北海道のエゾウグイ、フクドジョウ等の固有種が、西日本はドンコ、ゴクラクハゼ等の生息が分類の要因となっていた。類型 0～7 は類型 8～15 と比較して淡水魚が要因となっていることが多かった。また、類型 0

～7 では、類型 8～15 で見られたような、太平洋側と日本海側等の地域による明確な区分は見られなかった。また、同一水系でも河口・汽水域の調査地点とそれ以外が異なる類型に分類されるものの、それ以外はほぼ同一水系で同一類型となっていた。

b-3) 調査地点単位・純淡水魚種

樹状図を図-Ⅱ.1.3.2.12、類型区分結果を図-Ⅱ.1.3.2.13 示す。第一分類では、北海道（類型 8～15）、本州（類型 0～7）に大別された。ただし、類型 8 は高瀬川のみ 4 地点、類型 12 は小吉川のみ 1 地点、

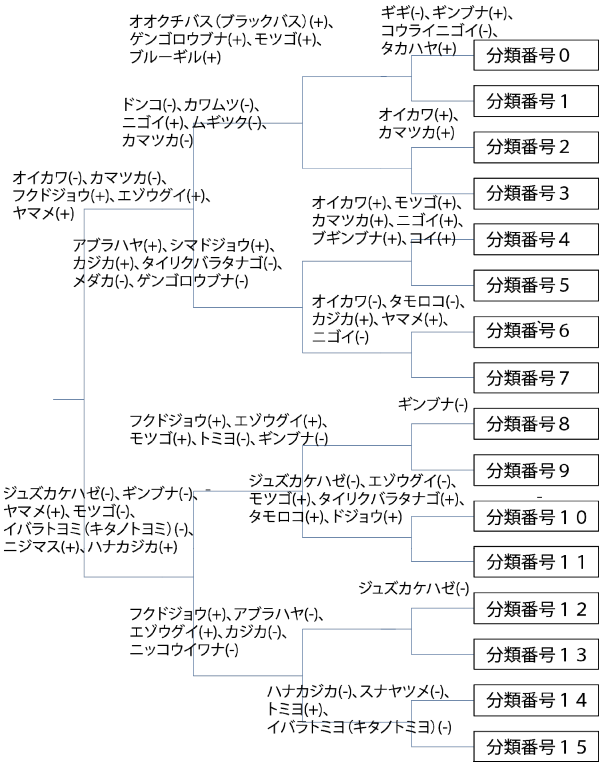


図-Ⅱ.1.3.2.12　調査地点単位・純淡水魚種での分類結果（樹状図）

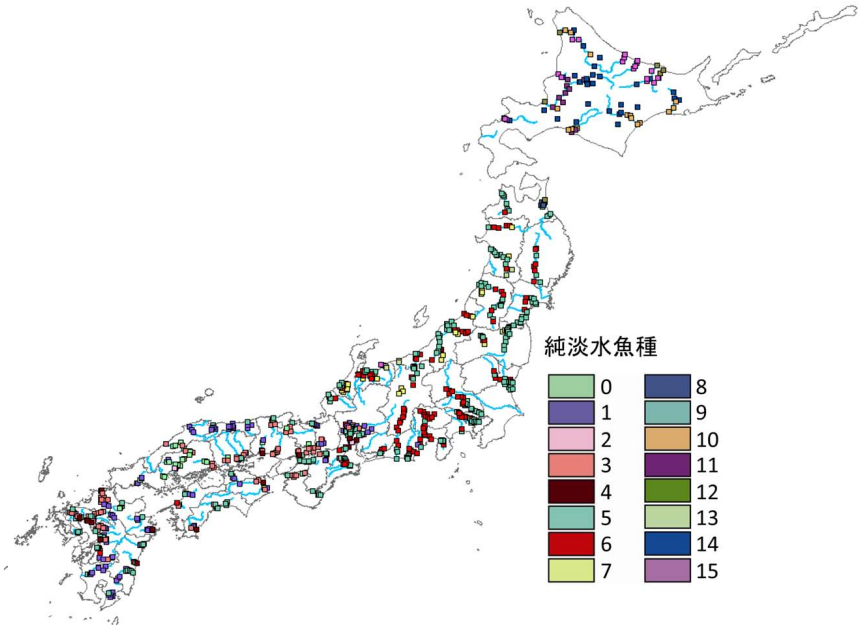


図-Ⅱ.1.3.2.13　調査地点単位・純淡水魚種での分類結果

類型 13 は一部東北・北陸を含む類型で 11 地点でありいずれも少数のみ存在する類型である。その後本州は東日本（類型 5～7）、西日本（類型 0～5）に分けられた。 a)、b)と同様に、北海道のエゾウグイ、フクドジョウ等の固有種の存在により本州と大別され、北海道の中でもそれらの固有種の生息状況に相対的に差があったことから、16 区分中の 8 区分（類型 8～15）を占める結果となった。例えば、日本海側やオホーツク海側に多い類型 14、15 はフクドジョウの出現割合が高く、太平洋側の水系に多い類型 10 はエゾウグイ出現割合が高いこと等の特徴が見られた。東日本の 3 分類に比べ西日本は 6 分類と細かく分類されていた。類型 5 は東日本～西日本全域に存在する類型でほとんどが下流域であり、ニゴイ、モツゴ等の環境の変化に強く比較的幅広い環境で生息できる淡水魚の出現数が多いことが特徴である。b)と異なり全国的に同一の水系でも上流と下流で異なる類型に区分されている河川が多く見られ、例えば東日本では上流側に類型 6、下流側に類型 5 を示す水系が見られる（最上川、荒川、天竜川等）。類型 6 は、アブラハヤ、シマドジョウ、カジカといった中流部に生息するとされる魚種の出現が特徴である。西日本では西日本に生息するドンコ、ムギツク等の出現が特徴的な類型 0、1、3 と類型 5 が混合している水系が見られた。西日本で対象地点の多い類型 1 と類型 3 を比較すると、類型 3 は外来種であるオオクチバスとブルーギル、元々は琵琶湖原産であるが釣りの対象として全国に移植されたゲンゴロウブナの生息等により類型 1 と区分されていた。類型 1 と類型 3 は同一地域の中でも混在しており、移植が魚類出現特性に影響を及ぼしている可能性がある。

b-4）調査地点単位・回遊魚種

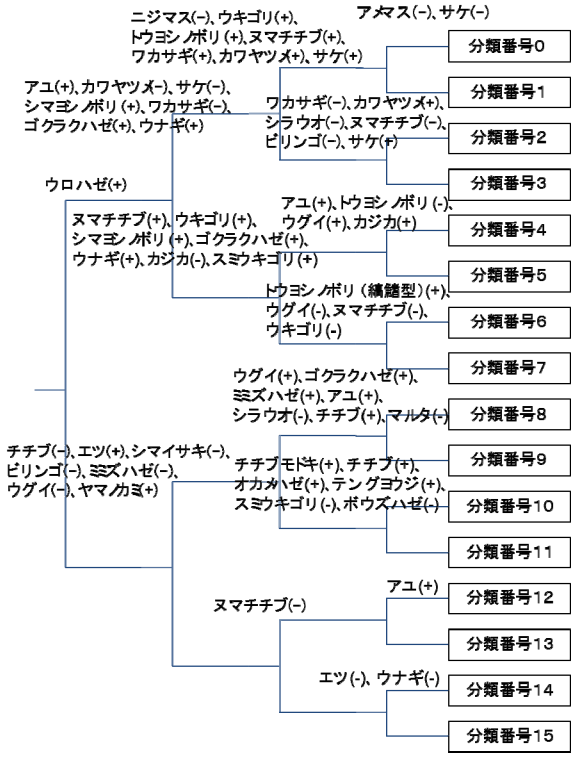
樹状図を図-Ⅱ.1.3.2.14、類型区分結果を図-Ⅱ.1.3.2.15 に示す。第一分類では類型 0～7 の北海道・東日本と類型 8～15 の西日本に大別された。本州では類型 5、類型 6 が多く出現しており、類型 5 が上流に分布し、それより下流に類型 6 が分布する水系が多く見られた。類型 5 の確認魚種が 17 種なのに対して類型 6 では 43 種の出現が確認されており、多様な種が確認される下流部と上流部が区分されていることが確認された。類型 12～13 は有明海の河川が多く、ヤマノカミが出現することが特徴である。b-1)～b-3)で見た類型と比較すると北海道や九州が大別される他は、本州内で多数の類型が混在しており、比較的明確ではなかった。

c）考察

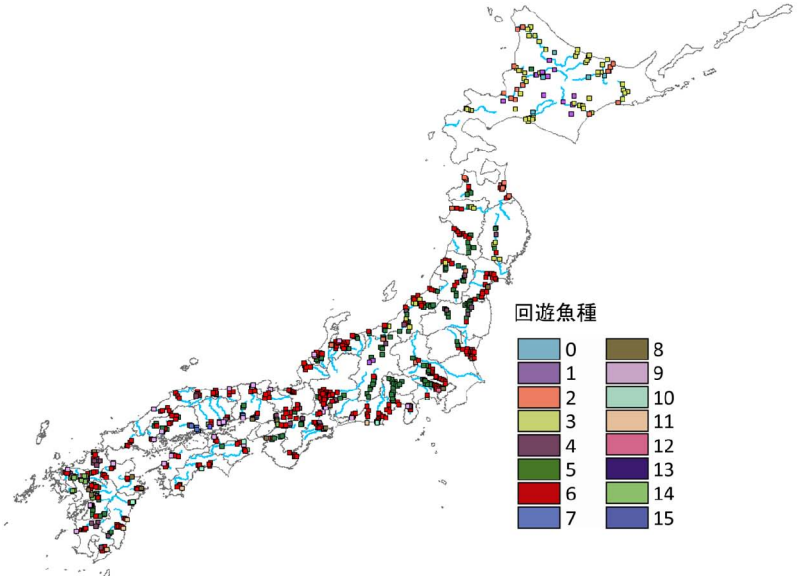
調査地点単位・全魚種のケースでは第一分類で河口・汽水域と上流域に大別され、汽水・海水魚の生息に特徴づけられる河口・汽水域のみで構成される類型が半数を占めている。これらのことは、下流に行くほど出現種数及び出現個体数が多くなることが要因であると考えられる。河口・汽水域の類型は北海道、東日本、西日本、九州、日本海側、太平洋側と地域で比較的明瞭に類型が別れており、これは、海流や潮汐状況等の海域の影響による類型区分となっていると考えられる。

また、調査地点単位の河口・汽水域の類型区分は水系単位・全魚種のケースと類似しており、汽水・海水魚種が水系の類型を特徴づけていたことが示唆された。河川水辺の国勢調査では、多くの調査地点が直轄区間内にあり、上流部や支川での調査が比較的少なかった。このため、本来の汽水・海水域に生息する魚種及び個体数の多さもあり、全ての魚類確認種数及び個体数に占める汽水・海水魚種の割合が大きくなっていると考えられる。このように、水系単位・全魚種のケースにおける類型区分には河口・汽水域の環境特性が及ぼしている影響が大きくなることを考慮しなければならない。また、モニタリング方法に関する課題として上流域における調査地点の不足が示唆された。

全調査地点・全魚種のケースでは、河口域以外の類型は同一の水系内でほぼ同一の類型であった。しかし、純淡水魚に限定した類型区分では同一の水系内でも異なる類型が存在しており、純淡水魚の生息状況は同一水系内で一定というわけではなく、地点毎に異なる河川環境特性により影響を受け、縦断方向で魚類生息状況が異なることが確認できた。



図−Ⅱ.1.3.2.14　調査地点単位・回遊魚種での分類結果（樹状図）



図−Ⅱ.1.3.2.15　調査地点単位・回遊魚種での分類結果

また、全調査地点・全魚種のケースでの河口・汽水域の類型区分は、日本海側・太平洋側で明確な区分があったが、純淡水魚では北海道、東日本、西日本で大別されるものの、日本海側・太平洋側での区分は明確ではなかった。これには以下の要因が考えられる。純淡水魚は陸水系に分布・分散が大きく制限される。渡辺ら(2010)によると、日本の純淡水魚は海峡の成立や山地形成などの歴史的イベントの影響を受けており、北海道石狩平野やフォッサマグナ等の純淡水魚出現特性の境界は、現時点における日本列島の純淡水魚類相の歴史生物地理的な「一般パターン」として位置づけられることが示唆されてい

る。これらのことから、魚類生息状況は系統地理学的な要因によりまず前提となる出現の有無が決定されていることが近年の実測データを用いた本検討からも確認できた。そして、汽水・海水魚は純淡水魚と比較して環境変化への対応能力が高いことから、海流・潮汐等の地域ごとの違いにより太平洋側と日本海側で異なる生物出現特性を持ち、各地域固有の生物生息状況が形成されたと考えられる。

全調査地点・回遊魚のケースでは、北海道や九州が大別される他は、本州内で多数の類型が混在しており、地域ごとに類型を区分することは困難であった。このことは、回遊魚が成長の過程で海洋を利用しており純淡水魚に比較し移動能力高いため、生息場所が多様化しやすいことが要因として考えられる。今回検討を行った 4 つのケースから分かるように、生物出現特性による類型区分はその類型の単位や対象魚種により異なる結果を示す。分析方法や目的に応じて、適切な分類方法を選択することが必要である。

1.3.2.3 河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類及び底生動物の水温・水質への依存性評価

a) 分析の狙いと手法

本項では、河川の環境要素のうち、水温を含む水質に着目し、魚類および底生生物の生息との関連性を明かにすることを目的とした分析を行った。河川の環境要素が水生生物の生息に与える影響を評価しようとする場合、対象とする環境要素を還元的に取り上げ、この環境要素の条件を系統的に変化させた実験が可能であれば、このような実験は影響評価の有力な手段となり得る。実際、水温や水質に関する水生生物の耐性に関する実験は水産対象種を中心に従来数多く実施されてきており、相当な知見が得られてきている。しかし、要素還元的な影響評価は、他の要素の影響を排除するのが困難な事もあり、本質でない間接的な疑似相関に惑わされたりする可能性も否めず、その解釈には細心の注意が必要である。今回の検討においては、水生生物種の存在可能な環境を水温・水質の観点で評価するために、実河川において、ある水生生物種の存在が確認された地点における水温・水質特性を解析することで、その水生生物種の生息可能範囲を推定することを試みた。この様な解析を実施することで上述の実験的アプローチとは異なり、生息のための水温・水質に関する必要条件の絞り込みを行うことになる。この方法を用いて種々の環境下において取得された大量のデータを一度に解析することで、検討対象とする環境要素以外の影響を含みつつも、大量データの持つランダム性によりこの影響を極力排除することを期待した。分析の概要は以下のとおりである。全国 109 一級水系を対象に水質データ、河川水辺の国勢調査データを整理し、全国の最も多くの河川で確認された魚類 5 種、底生動物 5 種、狭温性の冷水魚等 6 種、主要な目に属する底生動物 9 種に関して、これらの種が確認された地点（生物調査地点からの距離が 2km 未満かつ同一河川内）における水温・水質（水素イオン濃度（以下 pH）、 溶存酸素濃度（以下 DO）、 生化学的酸素要求量（以下 BOD）、 化学的酸素要求量（以下 COD）、 懸濁物質濃度（以下 SS））の分布をとりまとめた（天野ら 2011）。また、水温・水質に関しては、全国の全測定データを対象にその分布を整理し、上記の個々の生物種の確認地点における分布と比較することで、個々の生物種の水温・水質への依存性について検討を行った。

b) 分析結果

水温・水質（pH、DO、BOD、COD、SS）の全国全地点全期間における測定値の頻度図を図-Ⅱ.1.3.2.16 に示す。水質項目毎に頻度分布の形状が異なっていることが分かる。

b-1) 水温

水温は、10℃前後と 20℃前後に２つのピークを有する双こぶの分布形状を示した。13℃付近の水温帯で頻度が低くなるのは、地方別に見ても北海道を除く各地方で共通に見られる傾向であった。この理由としては、春から夏への昇温期、秋から冬にかけての降温期にかけて計測される水温帯である 13℃付近

の水温を示す時期が期間的に短いことによると考えられる。

b-2）pH

pH はほとんどが中性を示す 7 から 8 の間の値を取った。酸性河川における測定値と考えられる pH が 6 以下の値は全体の 0/3%程度の頻度でしか存在しない。pH が 9 を超えるのは、富栄養化した湖沼や貯水池において植物プランクトンの光合成に伴って計測されることがしばしばあるものの、河川においては pH が 9 以上の値は全体の 1.5%程度の頻度であり低いものであった。

b-3）DO

DO は 8.5～9.0mg/l をピークにそれ以下では徐々に頻度が減り、それ以上ではまばらに分布する形状を示した。この値は、水温 20～23℃における飽和濃度に相当する。上記よりも低水温時には、9.0mg/l より高濃度の DO が測定されうると考えられるが、このような DO 濃度が測定された頻度は全体の 20%程度であった。順流域の河川水質測定結果からは、水生生物の生息に著しい悪影響を与えるような貧酸素は測定されていない。

b-4）BOD

BOD は 0.5～1.0mg/l をピークにそれ以上の値では徐々に頻度が減少した。近年の河川水質の向上を反映した結果と考えられ、貧酸素が発生しない結果とも整合性がとれている。ただし、BOD=5mg/l 以上の比較的高濃度を示す頻度は 10%程度を占めている。

b-5）COD

COD は 1.5～2.5mg/l をピークにそれ以下､以上の値は徐々に減少する分布であった(図－2 では 10mg/l 以上の頻度は合計しているために頻度が高くなっている。)。BOD の値に比べて全体的に高い値を示す傾向が示された。COD は BOD に比べて難分解性の有機物を捉えるために、このような傾向が示されたと考えられる。また 10mg/l 以上の高い値は、降雨後に陸域から供給される微少な植物片などの有機物を多く含むサンプルで得られた可能性が高いと考えられる。

b-6）SS

SS は 5mg/l 以下の値を取ることが多く､これより高い値の頻度は徐々に減少するという分布であった。公共用水域水質測定が出水時を避けて実施されていることを示唆するとともに、環境基準を超える値がほとんど測定されない結果となっている。

次に、水温及び水質と水生生物の依存性の検討結果を示す。広域に分布する上位 5 種の魚類（ヌマチチブ、アユ、ギンブナ、ウグイ、オイカワ）と狭温性の冷水魚として選定した 5 種の魚類（ナマズ目の

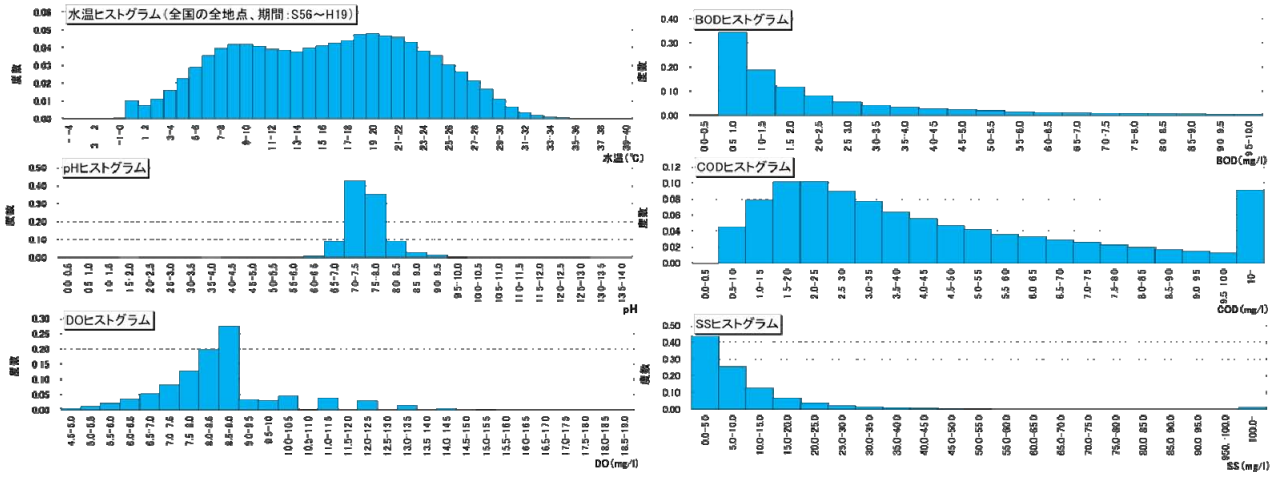


図-Ⅱ.1.3.2.16 全国河川水質測定値頻度分布図

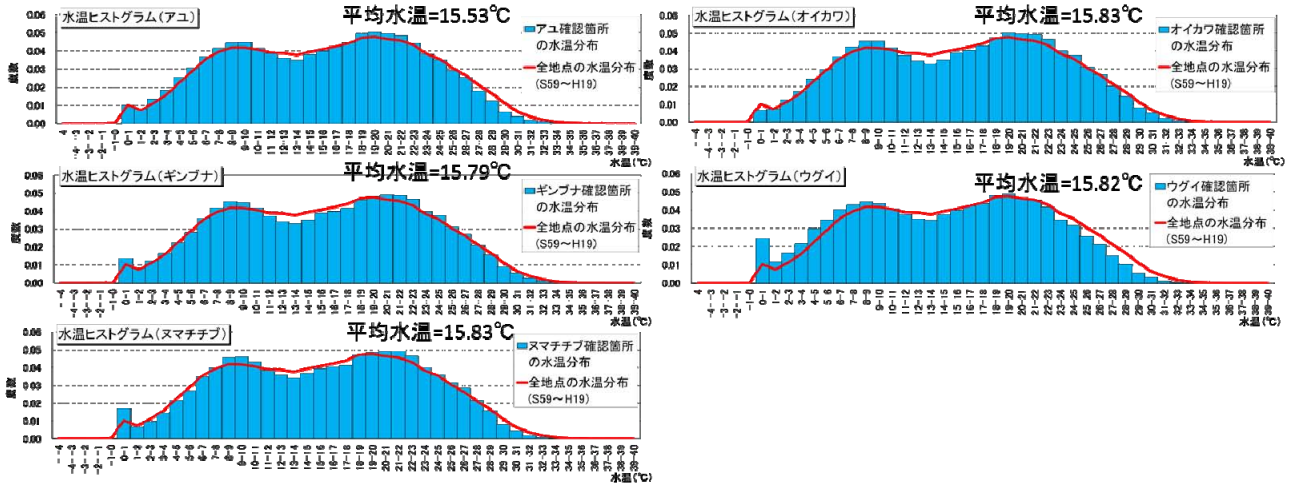


図-Ⅱ.1.3.2.17 広域に分布する魚類の確認地点と全水質調査地点での水温頻度分布の比較

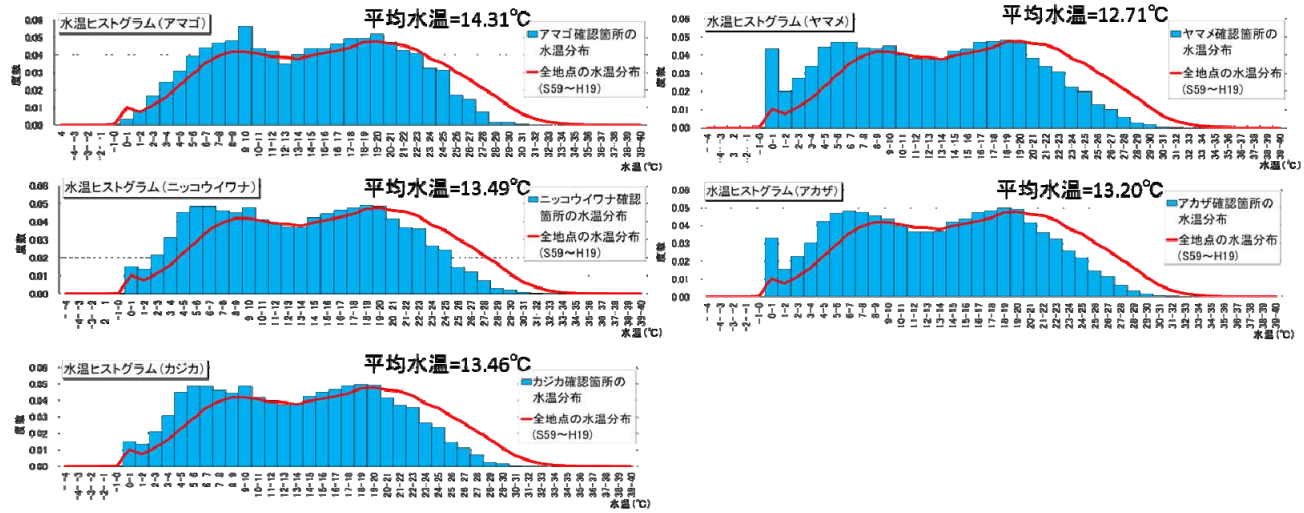


図-Ⅱ.1.3.2.18 狭温性の冷水魚（ヤマメ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

アカザ、カサゴ目のカジカ、サケ目のニッコウイワナ、ヤマメ、アマゴ）が確認された地点における水温の頻度分布図を重ね合わせたものを図-Ⅱ.1.3.2.17 および図-Ⅱ.1.3.2.18 に示して比較する。

広域に分布する上位 5 種の魚類が確認された地点における水温の頻度分布は、全測定地点において計測された水温の頻度分布とほとんど同一の分布形状を示していることから、日本におけるこれら 5 種の魚種の分布は現在の河川水温には規定されていないと考えられる。

これに対して、狭温性の冷水魚とされる 5 種の魚類（アカザ、カジカ、ニッコウイワナ、ヤマメ、アマゴ）が確認された地点における水温頻度分布は、全測定地点において計測された水温の頻度分布と比較して低水温側に偏在しており、これら魚種の生息場所は水温が低い場所であるということが示された。なお、底生動物種についても分析したが、結果として広く分布する種を選定したためと考えられるが、水温に対する依存性は特に見られなかった。

水温以外の水質については、広域に分布する魚種と狭温性の冷水魚の確認地点における水質の相違について遊泳魚であるオイカワとヤマメを取り上げて比較すると、図-Ⅱ.1.3.2.19、20 に見られるようにオイカワが確認された地点における水質（pH、DO、BOD、COD、SS）頻度分布は、全河川における測定値のそれとほぼ同様の分布を示した。これに対してヤマメでは pH では、全河川での頻度分布とほぼ

同様であるものの、DO では 8mg/l 未満の値が計測されることが 10%（全河川における測定値では 33%）と DO が高い地点に生息していることが示された。 BOD については、2mg/l 以上の値が計測されるのが確認地点で 9%に対して全地点で 35%、COD について見ると、4mg/l 以上の値が計測されるのが確認地点で 12%に対して全地点で 44%という様に河川全体と比較して DO が高く、BOD と COD が低い傾向の箇所に生息していることが示された。これに対して SS の頻度分布をヤマメ確認地点と河川全体とで見ると、5mg/l 以下の低い値をとる頻度は確認地点で 53%、全体で 44%となるのに対して、25mg/l 以上の比較的高い値をとる頻度は、確認地点で 8%、全体で 9%とほぼ同等の値であった。ここでは、広域に分布する魚種と狭温性の冷水魚の確認地点における水質の相違について遊泳魚であるオイカワとヤマメを取り上げて比較したが、他の広域に分布する魚種についてはオイカワと他の狭温性の冷水魚についてはヤマメと類似の結果を示した。

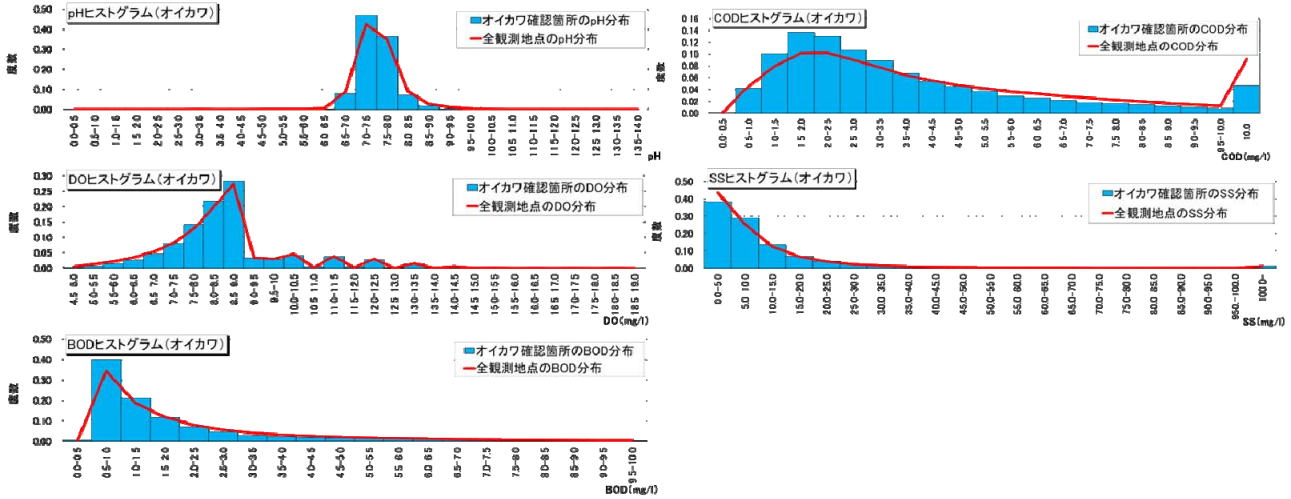


図-Ⅱ.1.3.2.19 広域に分布する魚類（オイカワ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

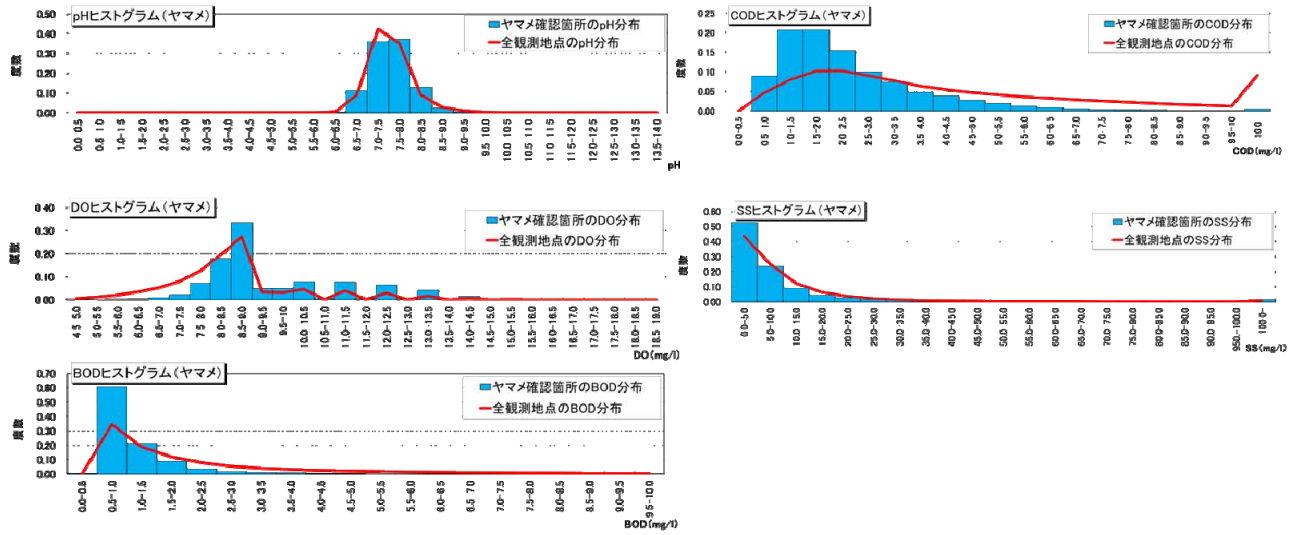


図-Ⅱ.1.3.2.20 狭温性の冷水魚（ヤマメ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

今回解析対象とした底生動物が確認された地点における水質頻度分布については、若干 COD が低い値を多く示していることから水質の良好な箇所を選好していることが示唆されるものの、全地点の水質頻度分布と比較して際だって特徴的な相違は認められなかった。

c）考察

今回の解析対象とした種々の水生生物が確認された地点における水質頻度分布を見ると、狭温性の冷水魚については明らかに水温が低く、DO が高く有機物濃度の低い箇所に生息していることを示す結果となった（図-Ⅱ.1.3.2.18、20）。ただし、図-Ⅱ.1.3.2.18 を見ると、全体的に低水温帯に分布しながら、狭温性の冷水魚が確認された地点において、頻度は低いものの 30℃を超える様な比較的高い水温も測定されている。今回の検討では、一度でもヤマメの存在が確認された地点におけるすべての水質観測値を集計しているため、上記のような高水温が計測された時点で観測地点から離れた場所に移動していた可能性は否定できないが、ヤマメが確認された地点でも、かなり水温が上昇することを示している。そこで、一年ごとに最高水温を求めて、これらの平均をとった平均年最高水温を求めて比較すると、アマゴやヤマメが確認された地点では、平均年最高水温が 26℃以上になる地点は見つからず、この辺りの水温が冷水魚の生息限界と考えて良さそうである。このことは、水生生物の生息を規定する水質影響について考察するために観測データを取り扱う際の留意点を示唆している。今回の様な解析結果から水質（水温）と水生生物の関係について考察する場合、彼らが常に耐えながら生息することができる水温の範囲、すなわち耐忍温度（最高および最低）と、生活史の中で経験はするものの、その期間が限定的であれば、耐えられる水温の範囲を区別する必要があるということである。この例では、年間の最大値にのみ着目しているが、水生生物の生息の規定要因として水質に着目する場合、生活史の段階に応じた確認などの検討が必要になる。人為的な影響としての河川水質の変化は、ダムの建設・運用や、下水処理水の放流などにより発生する。このような場合、水生生物への影響を最小限にするために、種々の検討が行われるが、彼らが常に耐えながら生息することができる耐忍限度と、その期間が限定的であれば、生物には適応力があるため耐えられる水質の範囲を区別して検討することが重要であると考えられる。今後、より詳細な解析が必要である。

1.3.3 気候変動が河川環境に与えると考えられる影響

1.3.3.1 既往の知見の活用

社会資本整備審議会は、「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）(2008)」の中で、地球温暖化に伴う河川環境の変化として、地球温暖化による気候変動が生じた場合、気温の上昇による水温上昇、降水量の変化による流況変動、また流域の環境の変化等も相まって、土砂・栄養塩類等の物質の流出が変化することが予想されるとしている。降水量の変動幅が大きくなることから、異常洪水や異常渇水が発生し、流量の変動幅が大きくなるとともに、積雪量や雪解け時期の変化による流量パターンが変化する。また、異常洪水の発生や大規模な洪水の発生頻度の増加により、土砂・物質の流出量が増加し、水質（濁度）や河床の環境に影響を及ぼすことが予想される。流量パターンの変化は、魚類等のライフサイクルに影響を及ぼし、適応が難しい種は生息数の減少など大きな影響を受けることが予想される。濁度の増加やシルト・粘土質の堆積による河床環境の変化は、魚類、底生動物、付着藻類等への影響が考えられる。また、流況や土砂・物質の流出の変化は、河道内の植生にも影響を与え、攪乱の状況等に応じて種の分布が変わることが考えられる。こうした様々な種の変化は、種間関係を通じ生態系に対しさらなる影響を及ぼすことが考えられる。また、連続性を有する流域の環境の変化は、外来種の繁殖や新たな種の侵入などが考えられる。水質への影響は、流況との関係もあり、予想することは難しい面もあるが、水温の上昇や溶存酸素（ＤＯ）消費を伴った微生物によ

る分解反応が進むことにより、溶存酸素濃度の低下による水質の悪化が懸念される。湖沼や貯水池においては、気温・水温の上昇により湖沼等内部での温度成層や植物プランクトンの活動が影響を受ける等、河川以上に厳しい水質変化が予想される。水質の変化によっても生物への影響は考えられる。気候変化による生態系や水・物質循環系への影響は、現段階において知見やデータも少なく、予測するのは難しい、と総括している（図-Ⅱ.1.3.3.1)。

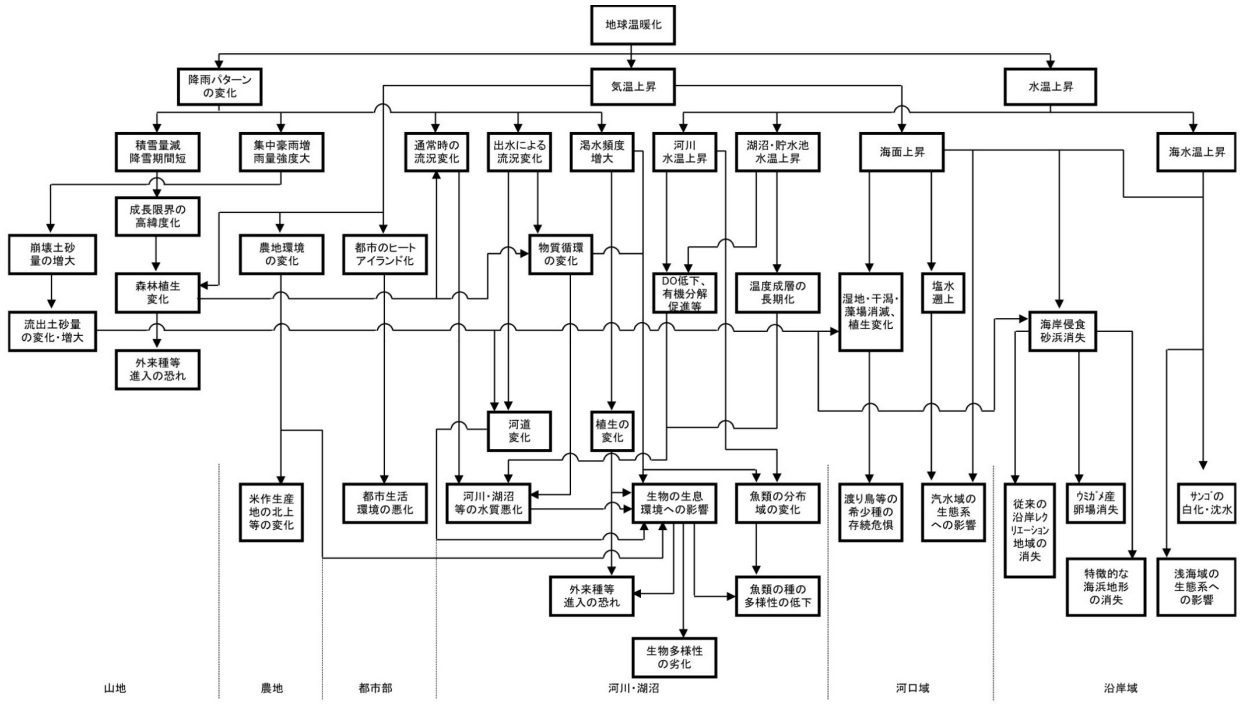


図-Ⅱ.1.3.3.1　地球温暖化に伴う河川環境・流域環境への影響イメージ

魚類への影響に関する既往研究（Vanet et al 1997、Beitinger et al 2000）は、生活史を通して生存可能な上限水温以上にならない限り（一般に卵や稚仔魚は水温の制限が強く作用する)、魚類の個体の成長や再生産速度はむしろ増加すると推定している。しかし、水温上昇が生じた場合、冷水魚は生息地が限定される可能性が高い。この場合、同一河川でも標高の高い場所に生息地が限定される可能性がある。冷水魚の分布域の減少や、残存個体群の分断は温暖化による魚類への重要な影響として予測される。温暖化の影響としては、水温上昇だけではなく流況変化も予測されているが、魚類に対するこのような複合的影響に関する検討も実施されており、水温変化に予測だけでは不十分であるとする結果が報告されている(Jager et al 1999)。複合的影響を含めて、生息環境の変化に対して、動物は生息適地への移動を試みると考えられる。水生生物については、すでに生じている水域の分断が問題を大きくする可能性がある。これらの例のように個別の生物種への影響に関する検討事例は枚挙にいとまがないが、温暖化の生物・生態系への影響評価は、現在行われている河川環境の評価に関する研究成果が相当部分利用可能である。

1.3.3.2 水温上昇に対する簡易影響評価の試み

気候変動により予想されている気温上昇により河川水温も上昇するという仮定の基に、水温の変化による生物生息域の変化を予測するための試行的な検討を行った。全国の公共用水域調査全地点の各地点において測定された最高水温を測定位置（緯度、経度）情報とともに IDW 法により解析して作成した推定水温分布を図-Ⅱ.1.3.3.2 に示す。この推定水温分布は、水域と陸域とを区別していないため、河

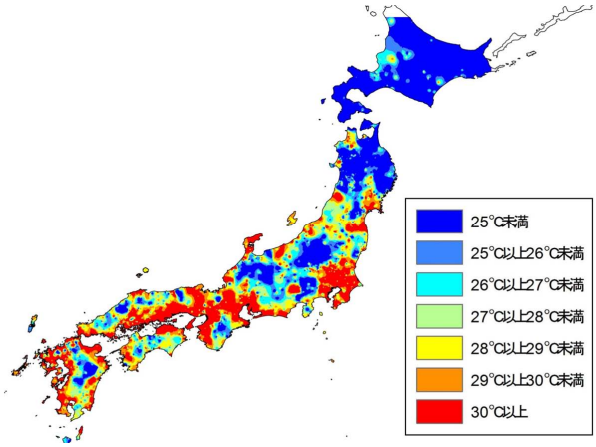


図-Ⅱ.1.3.3.2　最高水温の推定全国分布（現状）

川の延長の中での水温分布の推定とは異なっている。このため、全国の河川水温の空間的分布の近似として認識する必要がある。この図からは、関東以北及び標高の高い山間部で水温が低くなることが数値的に示されている。冷水魚の確認地点ではあまり発現しない水温である 26℃を最高水温が下回る箇所に着目すると、東北以北が該当し、これより西の地域では信州や山地等に部分的に分布している状態である。

この状態から、仮に全国一律で水温が 1℃上昇した場合、また、極端な例として 3℃上昇した場合の分布図を図-Ⅱ.1.3.3.3、図-Ⅱ.1.3.3.4 に示す。また、最高水温ごとに国土面積を算定した。図-Ⅱ.1.3.3.5 はそれぞれの場合に最高水温がある温度（横軸）以下になる国土面積を求め、全国土面積に占める割合で示したものである。現状では最高水温が 20℃未満の地域面積は全体の約 5%、26℃未満の地域面積が約 40%となっている。ここで 26℃以下の地域面積に着目すると、全国の河川において最高水温がおしなべて 1℃上昇すると、全国土面積に占める割合は約 32%に減少し、現状の生息域の約 22%がなくなることになる。アマゴなど西日本に多く分布する生物の生息に影響を及ぼす可能性がある。3℃上昇したとして、これに適応できない場合を想定すると、冷水魚が生息可能な河川が分布する国土面積は約 20%程度に減少し、特に本州における生息地は非常に限定的になる。また、水温の上昇等の生息環

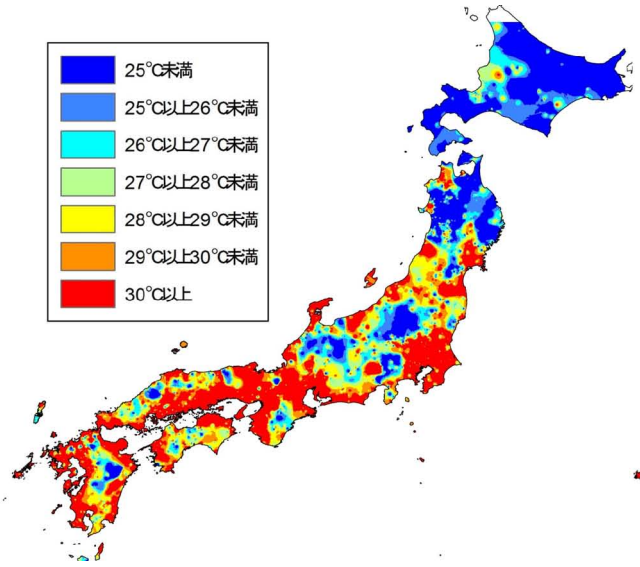


図-Ⅱ.1.3.3.3 最高水温の推定全国分布(1℃上昇)

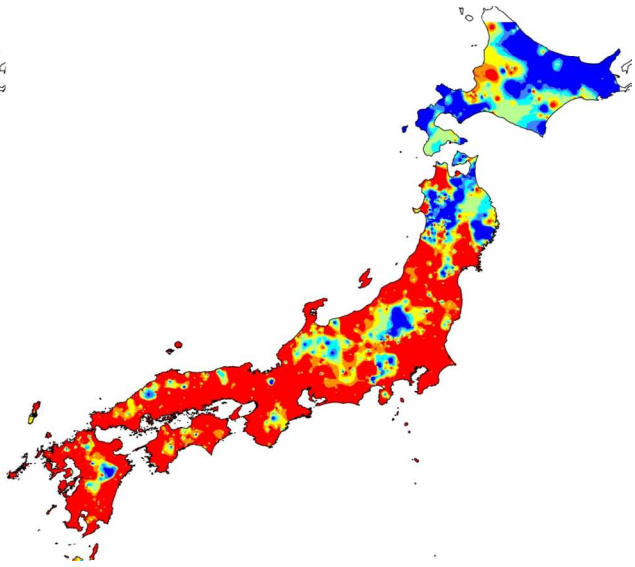


図-Ⅱ.1.3.3.4 最高水温の推定全国分布(3℃上昇)

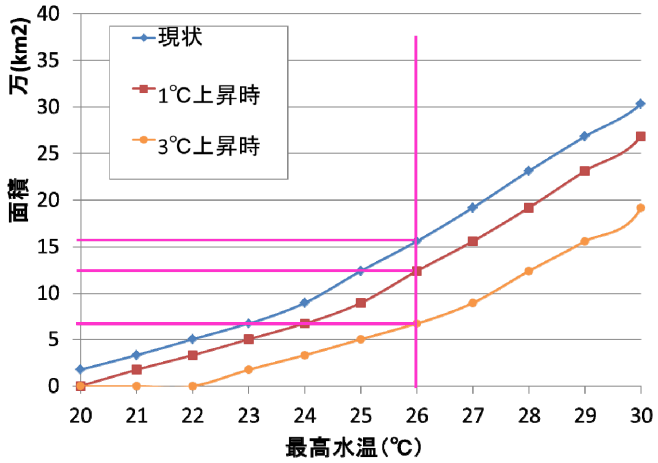


図-Ⅱ.1.3.3.5 最高水温ごとの国土面積の累計（全国土面積に占める割合による表示）

境の変化に対して、生息適地への移動を試みると考えられるが、山地部に部分的な分布があった種や、構造物等により連続性が遮断されている場合は移動が困難になる。

1.3.3.3 今後の検討に向けて

河川環境保全の視点で気候変動に適応するために検討すべき事項は、特殊なものではなく、通常の河川環境保全の延長上に位置するものと考えられる。気候変動による河川環境への影響を評価する場合には、当該河川において、流況や水温変化により駆動される河川の物理環境（地形、水質、流速、河床特性）変化の過程を理解し、現在おかれている河川の状況がすでに大きく攪乱されているものか、比較的環境が保全されているのかについてまず評価し、その後に気候変動がどの程度の新たな攪乱を生じるのかについて評価していくという手順をとるべきと考える。これは、すでに人為的攪乱の程度が高い河川ほど、気候変動による追加的な影響を強く受ける可能性が高い(Palmer et al 2009) ためである。適応策の策定においては、影響がさほど大きくないと予測されるものについては、現象が顕在化してから対応することも可能と考えられるが、影響が顕在化してからでは修復が困難と予測されるものもあると考えられる。今後、気候変動による河川環境に対する影響のうち、顕在化してからでは修復が困難な影響としてどのようなことが予測されるかについて、地域ごとに評価を行い、それらに対する適応策を策定していく必要があろう。そのためには、モニタリング、流量や水温の変化と河川環境への影響の予測が重要であり、それらの結果を活用し、環境の保全・整備の観点から生物の生息範囲の変化に伴う移動の確保（連続性）やダム湖の水質管理等、河川管理者として対応すべき課題を明らかにしていく必要があると考える。

参考文献

天野邦彦、望月貴文 2011.：河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類および底生動物の水温・水質への依存性評価、河川技術論文集、vol.17、pp513-518

新井正、西沢利栄 1974.：水温論、水文学講座10、共立出版株式会社、東京

奥田重俊、佐々木寧 1996.：河川環境と水辺植生、ソフトサイエンス社、東京

小倉紀雄、市川秀夫、安田卓哉 1985.：洪水による南浅川上流域の水生昆虫群集の破壊と現存量の遷移、とうきゅう環境浄化財団研究助成No.77：20

片野修 1995.：新動物生態学入門、中央公論社、東京

片野修 1998.：ナマズはどこで卵を産むのか、創樹社、東京

萱場祐一 2000.：雫石川におけるハビタットの冠水頻度との関連について、環境システム研究、Vol.28, pp.347-352
環境省水生生物保全水質検討会 2002.：「水生生物の保全に係る水質目標について」
建設省土木研究所河川環境研究室 2000.：千曲川後背水域における魚類生態調査報告書
建設省北陸地方建設局松本砂防工事事務所 1995.：上高地梓川河畔林保全に関する基礎調査
小出博 1970.：日本の河川、京大学出版会
櫻井寿之, 柏井条介, 大黒真希 2002.: 日本の多目的ダムにおける微細粒子の捕捉と堆積, 大ダム, n. 181, pp.30-40,
清水高男，皆川朋子，島谷幸宏 1998.：底生動物の掃流に関する基礎研究－実験水路における流量の増加と底生動物の流失量の関係－、第２回応用生態工学研究会、pp. 65-68
社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申），2008.
白川直樹 2005.：流量の自然変動と人為的インパクトの影響、小倉紀雄，山本晃一編著、自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系、pp. 39-55，技報堂出版
角哲也、塚原千明、柏井条介 1998.：ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察、ダム技術No.143、pp. 40-51
高橋裕，阪口豊 1980.：日本の川，阪口豊編、日本の自然、pp. 219-230、岩波書店
竹門康弘 1997.：渓流における水生昆虫の棲み場所保全、砂防学会誌，Vol.50, No.1, p. 210
塚原千明、角哲也、宮井貴大、柏井条介 1998.：カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性、土木技術資料、v. 40、n. 11、 pp. 178-183
辻本哲郎、増田健一、寺本敦子、田代喬 1999.：試験湛水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュ流量、河川技術に関する論文集、No.5、pp.81-86
津田松苗，森下郁子 1972.：水中環境の変化と生物相－その破壊と回復、河川生態系の復元力に関する調査報告書
中村太士 1999.：水辺林の更新動態に与えるダムの影響，応用生態工学2(2):125-139
藤田正治，道上正規 1995.：千代川の淵の構造と魚類の生息、鳥取大学工学部報告、Vol.26, No.1, pp.181-193
皆川朋子 2000.：出水による付着藻類と底生動物の変化、多摩川の総合研究、pp. 771-781
皆川朋子、清水高男、島谷幸宏 2000.：流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討、河川技術に関する論文集 第6 巻、pp. 191-196
望月貴文、菊池佐智子、天野邦彦 2011.：全国の河川における流況・水質の経年変化の実態調査と流域環境との関連性分析、環境システム研究論文発表会講演集、vol.39、pp437-442
望月貴文、天野邦彦 2012.：河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類出現特性による全国一級水系の類型化及び分析,河川技術論文集、vol.18,pp107-112
山田俊郎、清水達雄、井上隆信、橘治国 1999.：降雨時における森林集水域からの水質成分負荷流出特性、環境工学研究論文集、第36 巻、pp. 217-224
山辺功二 1967.：山地河川の流出水温について，水温研，4 号，pp. 42-47
山本晃一 1994.：沖積河川学、山海堂，東京
鷲谷いづみ 1998.：生態系管理における順応的管理、保全生態学研究、Vol.3, pp.145-166
鷲谷いづみ 1999.：生物保全の生態学、共立出版株式会社、東京
渡辺勝俊、高橋洋 2010.：淡水魚類地理の自然史、北海道大学出版会
Allen, J. D. 1995.: Stream ecology: Structure and function of running waters, Chapman & Hall,

New York,p. 388
Beitinger, T. L., Bennet, W. A. and McCauley, R. W. 2000.: Temperature tolerances of North American freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature, Environmental Biology of Fishes, 58, pp.237-275
Blanch, S. J., Ganf, G. G. and Walker, K. F. 1999.: Tolerance of riverine plants to flooding and exposure indicated by water regime, Regulated Rivers: Research and Management, 15, pp. 43-62
Bunn, S. E. and Arthington, A. H. 2002.: Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, Environmental Management, v. 30, n. 4, pp. 492-507
Collier, M., Webb, R.H. and Andrews, E.D. 1997.: Experimental flooding in Grand Canyon, Scientific American, January, pp.82-89
Huston, M. A.: Biological diversity 1994.: The coexistence of species on changing landscapes, Cambridge University Press, Cambridge
Jager, H. I., Van Winkle, W. and Holcomb, B. D. 1999.: Would hydrologic climate change in Sierra Nevada streams influence trout persistence?, Trans. of the American Fisheries Society, 128, pp. 222-240
Junk, W. J., Bayley, P. B. and Sparks, R. E. 1989.: The flood-pulse concept in river-floodplain systems, in Dodge, D. P. (ed.), Proceedings of the international large river symposium (LARS). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Special Publication 106, pp. 110-127
Naesje, T., Jonsson, B. and Skurdal, J. 1995.: Spring flood: A primary cue for hatching of river spawning Coregoninae. Can. J. Fish. Aquat. Sci., Vol.52, No10, pp. 2190-2196
Palmer, M. A., Lettermaier, D. P., Poff, N. L., Postel, S. L, Richter, B and Warner, R. 2009.: Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options, Environmental management, 44(6), pp.1053-1068
Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C. 1997.; The natural flow regime, Bioscience, 47, pp. 769-784
Poole, G. C. and Berman, C. H. 2001.: An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation, Environmental Management, v. 27, n.6, pp. 787-802
Puckridge, J. T., Sheldon, F., Walker, K. F., and Boulton, A. J. 1998.: Flow variability and the ecology of large rivers, Marine and Freshwater Research, 49, pp. 55-72
Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R. and Braun, D. P. 1997.: How much water does a river need?, Freshwater Biology, 37, pp. 231-249
Tilman, D. 1982.: Resource competition and community structure, Princeton University Press, Princeton
Van der Kraak, G. and Pankhurst, N. W. 1997.: Temperature effects on the reproductive performance offish, In: Wood C. M. and McDonald D. G. (eds), Global warming: implications for freshwater and marine fish, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 159-176
Ward, J. V., Tockner, K. and Schiemer, F. 1999.: Biodiversity of floodplain ecosystems: Ecotones and connectivity, Regulated Rivers: Research and Management, 15, pp. 125-139

第 2 章　治水への影響と適応に関する研究

2.1　気候変動予測の進展とそれを踏まえた検討

2.1.1　気候変動予測の概要

気候変動予測は、大気循環モデル(General Circulation Model: GCM)を用いて、大気現象（大気循環、気温変化、物質の相変化、放射収支、物質の化学変化等）と海洋現象（海流、熱、物質循環）または大気現象のみについて力学、熱力学、化学等の物理方程式に基づいて計算し、将来の気候を予測するものである。GCM では大気現象を 3 次元で計算することが一般であり、日々の天気予報に使われる数値予報モデル(GSM, MSM)とは用いる物理過程等が若干異なっている。

GCM は以下ように、大きくは 2 種類に整理することができる。

- 大気海洋結合モデル（CGCM,AOGCM: Coupled Atmosphere and Ocean GCM）
- 大気モデル（AGCM: Atmospheric GCM）

基本的に GCM は、地球全体を計算対象としており、一部の地域の大気現象を計算対象とするモデルは、領域気候モデル(RCM: Regional Climate Model)と呼ばれる。

2.1.1.1　大気海洋結合モデル

大気海洋結合モデルとは、大気物理モデルと海洋物理モデルを結合し、大気と海洋の相互作用による現象（例えばエルニーニョ現象）を表現可能な気候モデルである。温暖化予測実験は、計算初期値と温暖化シナリオ（温暖化ガスの時間変化）を与えて行う。大気、海洋現象が相互作用も含めて扱われるため、温暖化予測の信頼性が高いと言えるが、扱う現象が多いため計算負荷が大きく高解像度の計算が難しい（ただし、CMIP（2.1.1.5 参照）への登録や温暖化研究のため長期間の温暖化予測実験を行っている)。また、海洋物理モデルによって海面上昇量を計算することが可能となっている。

2.1.1.2　大気モデル

大気モデルとは、大気物理モデルのみの気候モデルであり、初期値、温暖化シナリオを与え、CGCM の SST（海面温度）の予測値を底面境界として温暖化予測実験を行う。CGCM と比較して計算負荷が軽いため、CGCM よりも高解像度で、より詳細な大気物理過程を扱った計算が可能であるが、海洋物理モデルを扱っていないことから海面上昇量は計算されない。

2.1.1.3　領域気候モデル

領域気候モデルは、一部の地域を対象とした気候モデルであり、初期値、温暖化シナリオを与え、CGCM の SST を底面境界に、AGCM や CGCM の予測値を側面境界として温暖化予測実験を行う。RCM は、計算対象が限られた領域であることから CGCM や AGCM よりも高解像度で詳細な大気物理過程を扱った計算が可能であるが、AGCM、CGCM の予測値が境界値となるため AGCM、CGCM の予測結果の影響を受ける。

2.1.1.4　国内の気候モデル

国内の気候モデルの一覧を表-Ⅱ.2.1.1.1 に示す。国内では、気象研究所、CCSR/NIES/FRCGC（東大気候システムセンター、国立環境研究所、地球環境フロンティア研究センター）により開発された気候モデルが存在する。気象研究所は、CGCM、AGCM、RCM を開発しており、CCSR/NIES/FRCGC は MIROC と呼ばれる CGCM を開発している。

表-Ⅱ-2.1.1.1　国内の気候モデル一覧（国土交通省水管理国土保全局水資源部（2012）を一部改変して掲載）

（ピンクの網掛けは、表-Ⅰ.5.1に示した気候モデルのうち上４つ（21世紀気候変動予測革新プログラム）に当たる）

気候変動モデル		MRI-CGCM2.3.2	MRI-GCM20	MRI-AGCM3.1S/H	MRI-AGCM3.2S/H	RCM20（地球温暖化予測情報第6版）	MRI-CRCM（地球温暖化予測情報第7版）	RCM5、RCM2	RCM5、RCM2	MIROC3.2medres	MIROC3.2hires	MIROC4h	MIROC5 mid
提供元		気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	CCSR、NIES、FRCGC	CCSR、NIES、FRCGC	CCSR、NIES、FRCGC	CCSR、NIES、FRCGC
発行年		2006年	2006年	2009年	2011年	2004年	2008年	2009年	2011年	2004年	2004年	2010年	2011年
計算対象期間		1851～2000年 2001～2100年	1979年-1998年 2080年-2099年	1979年-2003年 2015年-2039年 2075年-2099年	1979年-2003年 2015年-2039年 2075年-2099年	1981～2000年 2031～2050年 2081～2100年	1981～2000年 2031～2050年 2081～2100年 （寒候期のみ）	1990～1999年 2026～2035年 2086～2095年 （夏季のみ）	1981～2000年 2031～2050年 2081～2100年 （夏季のみ）	1900～2000年 2001～2100年	1900～2000年 2001～2100年	1980～1999年 2030～2049年 2080～2099年	1980～1999年 2030～2049年 2080～2099年
モデル種別		大気海洋結合モデル	全球大気モデル	全球大気モデル	全球大気モデル	地域気候モデル	大気海洋結合 地域気候モデル	全球大気モデル	全球大気モデル	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル
計算エリア		全球	全球	全球	全球	日本周辺	日本周辺	日本周辺	日本周辺	全球	全球	全球	全球
大気	水平解像度	約280km	約20km	約20km/約60km	約20km/約60km	約20km	RCM5：5km RCM2：2km	RCM5：5km RCM2：2km	RCM5：5km RCM2：2km	約300km	約110km	約60km	約150km
	鉛直層数	30層	60層	60層	64層	36層				20層	56層	56層	40層
海洋	水平解像度	経度2.5° 緯度0.5～2.0°	－	－	－	－	－	－	－	約20km	約20km	約20km	約100km
	鉛直層数	23層	－	－	－	－	－	－	－	43層	47層	47層	49層
主な提供気象要素		地上気温、降水量、地表面温度、蒸発量、海面気圧、海面水温、海面水位など	降水量、気温、日最高気温、日最低気温、風向風速、蒸発量など	気温、降水量、風向風速、日蒸発散量、融雪量、流出発生量、比湿、積雪水当量、大気圧など	気温、降水量、日射量、海面水温など	降水量、日平均気温、日最高気温、日最低気温、降雪量、積雪量など46要素	降水量、日平均気温、日最高気温、日最低気温、降雪量、積雪量など	気温、降水量など	気温、降水量など	地上気温、降水量、地表面温度、蒸発量、海面気圧、海面水温、海面水位など	地上気温、降水量、地表面温度、蒸発量、海面気圧、海面水温、海面水位など	気温、降水量、水蒸気量、河川流量、海面水温など	地上気温、降水量、水蒸気量、河川流量、海面水温など
SERS排出シナリオ		A1B、A2、B2	A1B	A1B	A1B	A2	A1B,B1	A1B	A1B	A1B、A2	A1B、A2	RCP4.5、RCP8.5	RCP4.5、RCP8.5
研究実績		日本全体のシミュレーションが多い	共生プロジェクトでの検討実績が多数有	**IPCC-AR5向け**	**IPCC-AR5向け**	地域的な検討実績が多数有	寒候期のみしかないため、あまり実績がない	夏季の豪雨が対象	夏季の豪雨が対象	IPCC-AR4で使用	IPCC-AR4で使用	**IPCC-AR5向け**	**IPCC-AR5向け**
参考論文		Yukimoto, S., and A. Noda (2002) Yukimoto et al. (JMJ:2006)	Mizuta et al. (JMSJ : 2006) Kusunoki et al. (JMSJ : 2006) 和田ほか（水文・水資源：2008）	滝野ほか（水工学論文：2010）	気象研究所技術報告第64号（2011） Mizuta et al. (2011)	Kurihara et al.(SOLA : 2005)	Sasaki et al.(2006)	Kanada et al.(2011), Sasaki et al.(2011)	Kanada et al.(2011) Sasaki et al.(2011)	K-1 model developers (2004)	K-1 model developers (2004)	Sakamoto et al.(2011)	Watanabe et al.(2010)
その他		■ http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/MRI-GCGM2.3.2.htm	■ 人・自然・地球共生プロジェクトで開発されたモデル	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ 海洋・海氷部分は、MRI-COM3から計算。 ■ MRI-AGCM3.1Sで使用しているスキームが異なる	■ 所謂、気候統一シナリオ第2版 ■ MRI-CGCM2.0の結果を境界条件としてダウンスケーリング。 ■ 一般的に用いられている	■ 寒候期のみしかない	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ MRI-AGCM3.1Sを5km/2kmにネスティングしたモデル ■ RCM2は、限られた領域しかない（仙台以南）	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ MRI-AGCM3.2Sを5km/2kmにネスティングしたモデル ■ RCM2は、限られた領域しかない（仙台以南）	■ http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/MIROC3.2_medres.htm	■ http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/MIROC3.2_hires.htm	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ 新しい物理モデルを開発・使用
データ入手の可能性		入手不可能	入手可能 （DIASプロジェクト）	入手可能	入手可能	一般に提供されている	一般に提供されている	利用可能だが、季節が限られている	利用可能だが、季節が限られている	入手可能	入手可能	入手可能	入手可能

2.1.1.5　海外の気候モデル

CMIP とは、Coupled Model Intercomparison Project の略で、各国各研究機関の GCM の出力結果を相互比較するための枠組みである。各国各研究機関の GCM の出力結果は、CMIP に登録され、研究者等はデータをダウンロードし、各 GCM における気温、降水量等の変化やその影響等を相互評価する。CMIP3(CMIP Phase 3)は IPCC 第 4 次報告書(AR4)に向けた GCM の相互比較プロジェクトであり、CMIP5(CMIP Phase 5)は AR5 に向けた相互比較プロジェクトを示す。CMIP5 に登録されているデータは近未来予測実験（2030 年まで）と長期予測実験（2100 年までとそれ以降）からなる。CMIP3 では CGCM のみであるが、CMIP5 では AGCM についても登録されている。CMIP のフェーズは IPCC と合わせることになったため CMIP4 は存在しない。

表-Ⅱ.2.1.1.2 に CMIP3 に登録された各国の GCM の一覧を示す。日本の気候モデルである MIROC の計算解像度が 110km メッシュ程度であり、CMIP3 においては最も計算解像度が高い。

表-Ⅱ.2.1.1.2　CMIP3 に登録された各国の GCM（IPCC AR4 に使われた CGCM）

Num	GCM	Country	Atmosphere Spatial Res. (deg)	Ocean Spatial Res. (deg)
1	BCCR-BCM2.0	Norway	1.9*1.9	0.5-1.5*1.5
2	CGCM3.1 (T42)	Canada	2.8*2.8	1.9*1.9
3	CGCM3.1 (T63)	Canada	1.9*1.9	0.9*1.4
4	CNRM-CM3	France	1.9*1.9	0.5-2.0*2.0
5	CSIRO-MK3.0	Australia	1.9*1.9	0.8*1.9
6	CSIRO-MK3.5	Australia	1.9*1.9	0.8*1.9
7	GFDL-CM2.0	U.S.A. (NOAA)	2.0*2.5	0.3-1.0*1.0
8	GFDL-CM2.1	U.S.A. (NOAA)	2.0*2.5	0.3-1.0*1.0
9	GISS-AOM	U.S.A (NASA)	3.0*4.0	3.0*4.0
10	INMCM3.0	Russia	4.0*5.0	2.0*2.5
11	IPSL-CM4	France	2.5*3.75	2.0*2.0
12	MIROC3.2 (Hires)	Japan (U. of Tokyo...)	1.1*1.1	0.2*0.3
13	MIROC3.2 (Medres)	Japan (U. of Tokyo...)	2.8*2.8	0.5-1.4*1.4
14	MIUB-ECHO-G	German and Korea	3.9*3.9	0.5-2.8*2.8
15	MPI-ECHAM5	German	1.9*1.9	1.5*1.5
16	MRI-CGCM2.3.2	Japan (MRI)	2.8*2.8	0.5-2.0*2.5
17	NCAR-PCM	U.S.A (NCAR)	2.8*2.8	0.5-0.7*1.1

表-Ⅱ.2.1.1.3 に CMIP5 に登録された各国の GCM の一覧を示す。多くの GCM の解像度は 200～300km メッシュであるが、日本の MIROC は 60km、MRI-CGCM は 120km メッシュであり、日本の気候モデルは世界的に最も高解像度の温暖化予測実験が行われていることがわかる。

表-Ⅱ.2.1.1.3　CMIP5 に登録された各国の CGCM

ID	モデル	格子数(大気)
A	bcc-csm1-1	128x64
B	CNRM-CM5	256x128
C	CSIRO-Mk3-6-0	192x96
D	CanCM4	128x64
E	CanESM2	128x64
F	FGOALS-g2	128x60
G	FGOALS-s2	128x108
H	GFDL-CM3	144x90
I	GFDL-ESM2G	144x90
J	GFDL-ESM2M	144x90
K	GISS-E2-H	144x89
L	GISS-E2-R	144x90
M	HadCM3	96x73

ID	モデル	格子数(大気)
N	HadGEM2-CC	192x145
O	HadGEM2-ES	192x145
P	inmcm4	180x120
Q	IPSL-CM5A-LR	96x96
R	IPSL-CM5A-MR	144x143
S	MIROC-ESM	128x64
T	MIROC-ESM-CHEM	128x64
U	MIROC4h	640x320
V	MIROC5	256x128
W	MPI-ESM-LR	192x96
X	MRI-CGCM3	320x160
Y	NorESM1-M	144x96

2.1.1.6　気候変動予測計算の特徴

a)　降水量、気温の予測計算

IPCCAR4 で採用されたモデルの温暖化予測実験結果の特徴について述べる。採用されたモデルは全部で 24 モデルあるが、このうち現在気候については 19 モデル、将来(A1B シナリオ)気候については 17 モデルの結果を用いている。先にも述べたように、IPCC で採用されている気候モデルの計算格子間隔は大きく、日本国土上では数点程度しかない。そこで、日本周辺の海域のデータも含めて特徴を整理する。設定した日本周辺領域例を図-Ⅱ.2.1.1.1 に示す。図-Ⅱ.2.1.1.1 は、気象研究所の CGCM2.3.2 の例である。図-Ⅱ.2.1.1.2・図-Ⅱ.2.1.1.3 に、それぞれ各モデルの 20 世紀（1900～1999 年）及び 21 世紀（2000～2099 年）の日本周辺年平均降水量の時系列変化を示す。図は、1990～1999 年の 10 年間の平均値を基準とした比率で示しており、データ数が少ないことによるばらつきを軽減するため、10 年間の移動平均により平滑化している。図中の青線は各世紀内で増加傾向が見えるもの、赤線は減少傾向が見えるものを示しており、実線は Mann-Kendall のトレンド検定により有意水準 5%で有意な傾向となったものを、破線は有意な傾向とならなかったものをそれぞれ表している。モデルによる比率のばらつきは大きいが、これによると、20 世紀において日本周辺の年降水量が増加傾向を示すモデルは 8 モデル、減少傾向を示すのは 11 モデルであり同程度のモデル数となっている。一方、21 世紀については、1 モデルを除き、全て増加傾向となっており、11 モデルは有意水準 5%で有意な傾向となっている。

図-Ⅱ.2.1.1.4 は日本周辺年平均の気温変化を示したものである。ただし、1980～1999 年の平均値を基準としている。図より、日本周辺の気温は 2000 年前後から上昇が顕著になっており、年降水量変化と符合していることが分かる。図には、RCM20 で用いられている A2 シナリオの結果も併せて示しているが、2080 年程度までは両者の差はほとんどなく、21 世紀末に差が見られるのみである。また、その差も平均値で 1℃程度以下と小さい。こうした傾向は、IPCC 第 4 次報告に示されている全球的な傾向と同様である。日本周辺での気温上昇が若干大きいように思えるが、IPCC 第 4 次報告とは対象モデル数が異なるので一概には言えない。

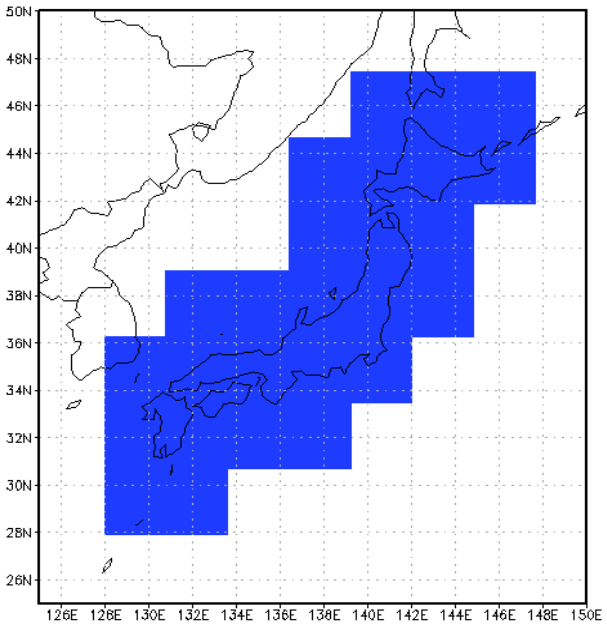


図-Ⅱ.2.1.1.1　設定した日本周辺領域の例(MRI-CGCM2.3.2)

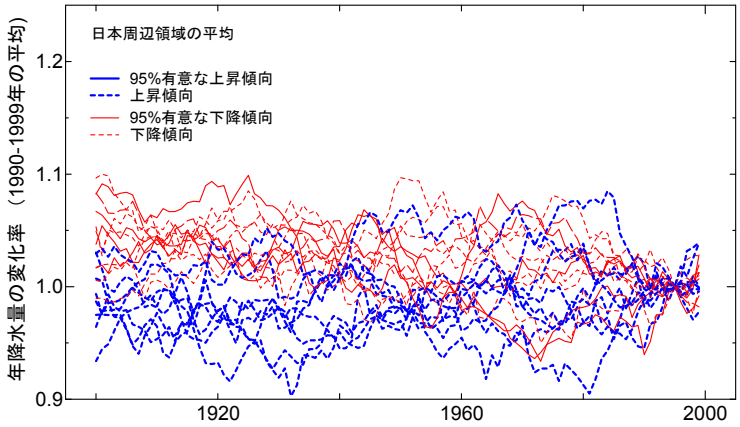


図-Ⅱ.2.1.1.2　日本周辺年平均降水量の時系列変化（1900～1999 年）

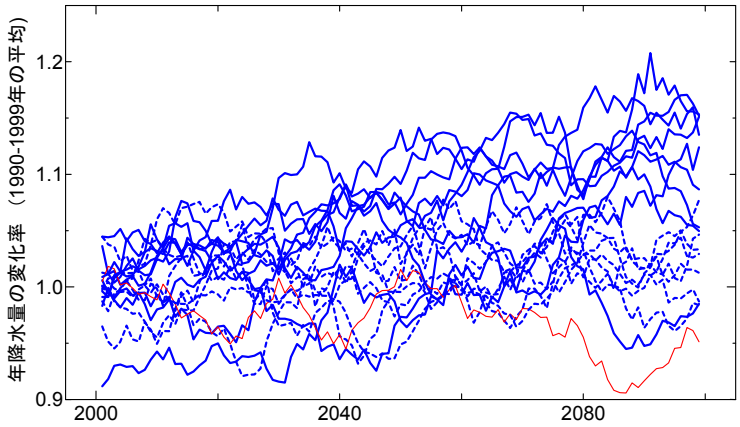


図-Ⅱ.2.1.1.3　日本周辺年平均降水量の時系列変化（2000～2099 年）

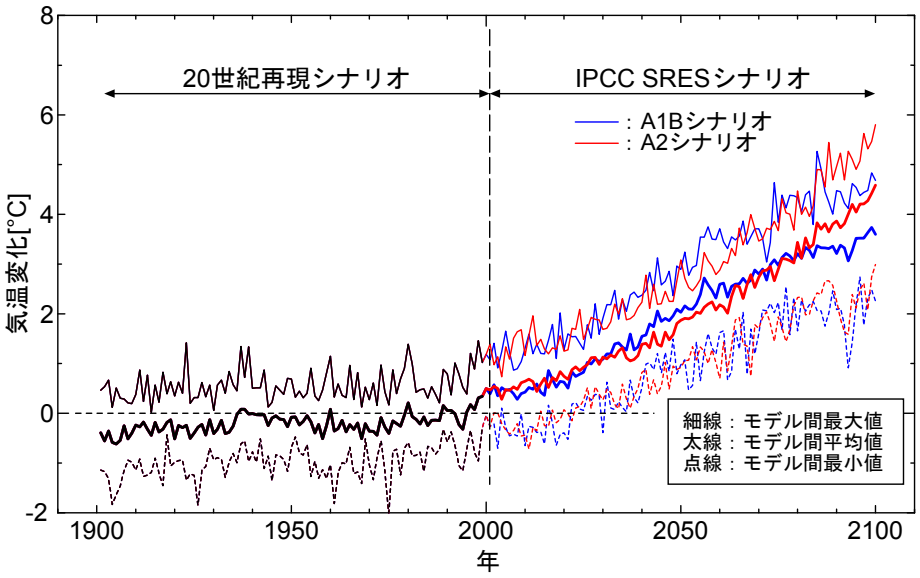


図-Ⅱ.2.1.1.4　日本周辺年平均の気温変化

b)　計算解像度

図-Ⅱ.2.1.1.5 は、革新プログラムで行われた GCM20 及び RCM5 による温暖化予測実験（前期実験）の結果の一例であり（表-Ⅰ.5.1 参照）、2095 年における 72 時間最大雨量の空間分布を示している。5km メッシュモデルは 20km モデルと比較して、地形による降雨の増大効果（地形性降雨）が再現されていることが確認できる。そもそも 20km や 5km というメッシュサイズは図-Ⅱ.2.1.1.1 に示したメッシュサイズに比較してはるか小さく、気候変動予測に用いられる GCM の最近の高解像度化は、少なくとも気象現象を表現する空間スケールという点において、日本の代表的な河川流域のサイズに対応するレベルに達しつつあると言える。

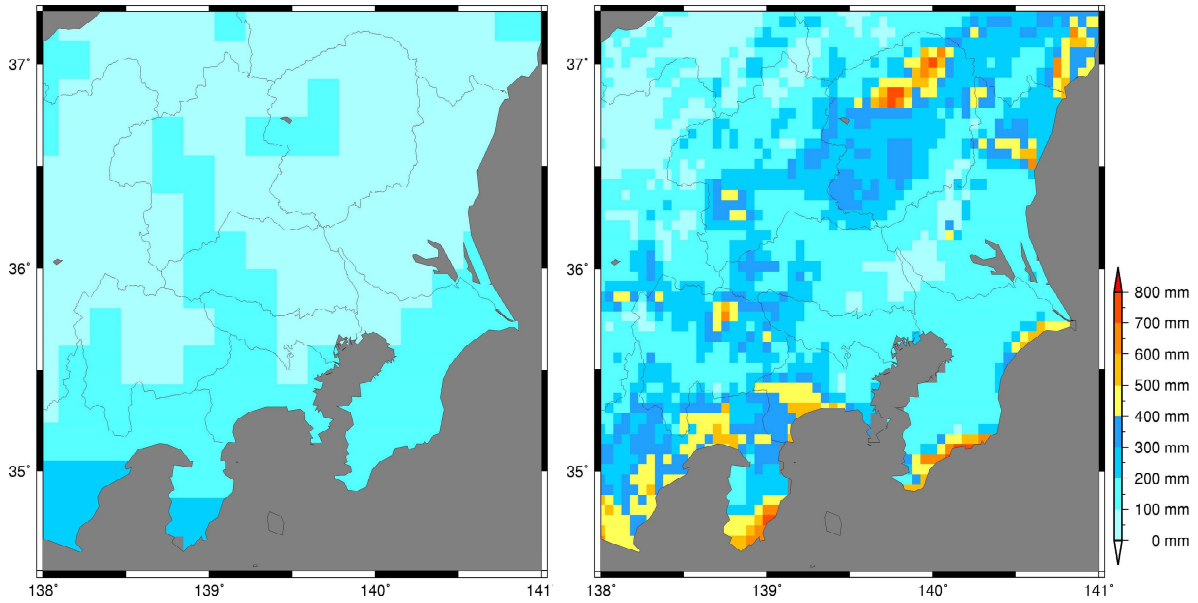


図-Ⅱ.2.1.1.5　GCM20 と RCM5 による降水量分布の比較

2.1.2　気候変動予測結果の翻訳

2.1.2.1　はじめに～気候変動予測結果の翻訳にあたって～

気候変動に伴い、将来的に豪雨が増加傾向にあると予測されており、それは結果的にこれまで積み上げてきた河川および流域の治水安全度を引き下げる方向に働く。また、我が国は、現時点において目標とした治水安全度の確保に向けた河川整備の途上にある。上記２つの事項を勘案した上で、治水安全度の向上を目指すことが、今後、治水施策を検討する上で必要不可欠であるといえる（例えば、社会資本整備審議会河川分科会 2008）。

欧州では、影響評価を活用して施策化に向けた検討がなされており、それを受けた動きも認められる状況である（Defra 2006, Netherlands Assessment Agency 2005, Bavarian Environment Agency 2007）。また日米英蘭 4 か国の治水施策に携わる機関によってとりまとめられた施策事例集（Japan, Netherlands, United Kingdom and United States 2011）には、適応策として活用しうる施策メニューが提示されている。こうした検討の進捗を踏まえ、種々の課題を克服し、気候変動さらには大規模洪水に対する施策をより一層進展させることが望まれる。

その際、気候変動に対する適応策の検討にあたっては、既往の治水計画とは質的に異なることを踏まえる必要がある。治水計画の対象として取り込む出水規模は、過去の降雨・流量観測値に基づく生起頻度を踏まえて、甚大な災害をもたらした既往の大規模出水の規模も勘案するなど「実態」に即して検討されている。それに対して適応策においては、気候変動モデルによる「予測」を主軸に据えての検討とならざるを得ない。

加えて、将来気候下の豪雨の予測は 2.1.1 で述べたように長足の進歩を遂げてきているものの、さらなる信頼性向上の途上でもあり、予測結果にある一定の幅や変化が認められる（文部科学省研究開発局 2012）。したがって、施策の検討上、無視し得ない不確定性を有する外力規模に対して治水・減災施策を検討する考え方を早急に詰めることが重要である。

そうした考え方についてこれまでにも議論されている（国土交通省 2010、辻本 2010）ところであるが、さらに深めて施策に反映できるまでかみ砕き具体化することが求められる。そのための方策の一つとして、将来予測に伴う不確実性がどの程度、治水施策に影響を及ぼすか、定量的な評価を行うことが有効と考えられる。

本研究は、不確実性を有する将来予測降雨に基づいて河川整備における適応策を立案する上で踏まえておくべき要点を明確にすることを目的として、定性的な議論に終始するのを避けるために後述する４つの定量的指標すなわち豪雨量倍率、流量倍率、河川整備労力倍率、氾濫可能性倍率を導入し、その評価結果に基づいて考察を加えたものである。指標の算定にあたっては、複数の気候モデルによる将来予測結果を用いており、各モデルによる年最大降雨量の予測値の違いが指標に及ぼす影響を評価し、考察を加えたものである。

2.1.2.2　日本全国マクロ評価の基本的考え方と分析の流れ

a)　治水施策への影響把握の基本的考え方

気候変動による降水量変化が治水施策に与える影響を考える際には、我が国においては、河川整備が未だ途上にあることをまず理解しておくことが重要である。目標とした治水安全度の確保に向けて今後とも治水整備を進捗させる必要があり、整備を完遂させるには過去の進捗状況から見て数十年以上を要すると推定される。

この間に気候変動が顕在化して降雨量が増加すれば、当初と同一の目標到達までの時間が有意に延びる可能性が出てくる。すなわち、図-Ⅱ.2.1.2.1 に模式的に示すように、現在気候下で「当初整備」によって治水整備率が 100%に到達したとしても、気候変動の影響によって現在と同一の整備目標（確

率規模）に対応する将来の最大降雨量が増加し、それに応じて目標流量も増大するため、これを吸収するための「付加的整備」を実施する必要が生じるためである。この点において、洪水に対する防護施設が既に完成している流域における適応策や、これから本格的な開発並びに治水整備等が同時進行する流域における適応策のあり方との質的な差異が生じうる。

そこで、本研究課題の検討においては、図-Ⅱ.2.1.2.2 に示すように「一定の年数の後に河川整備により到達するはずであった治水安全度を、気候変動の下で降雨に関する極端現象が顕著になった状況においても獲得するための付加的な整備必要量」を算出し、「当初、設定されていた整備必要量からの増大率」と定義される“河川整備労力倍率”を共通指標として、河川整備という多様な実務的施策群（河道の流下能力向上、洪水調節施設の整備、それら維持管理など）に対する気候変動の影響を把握することとする。

河川整備労力倍率は、一義的には、施設整備（いわゆるハード対応）による気候変動への適応の困難度を概括的に表す指標である。施設整備による適応が困難であることは投入が必要となるソフト的施策（施設整備によらない施策）の質・量が増すことを理解すれば、この指標はまた、ハードとソフトを組み合わせた適応策全般の困難度をも評価しうるものとできる。このように、河川整備労力倍率という指標は、気候変動適応の困難度に基づき適応策の方向性の検討を行いやすくすることを狙ったものであり、適応策全てを河川の施設整備（ハード対策）によって行うことを意図したものではない。

また「目標水準相当の流量を超える洪水の発生確率が現在に比べて将来では何倍になるのか」を“氾濫可能性倍率”として定義し、豪雨の増加により氾濫が生じる可能性がどの程度高まるのかを確率規模で算出し、治水安全度の低下とそれを補うために必要な河川整備労力の関係を評価する。

上記指標を算出する際には気候予測モデルを使用するが、この予測値には「幅」があり、その幅は他の評価指標へ増幅して伝播するため、指標別に予測の幅も算定している。

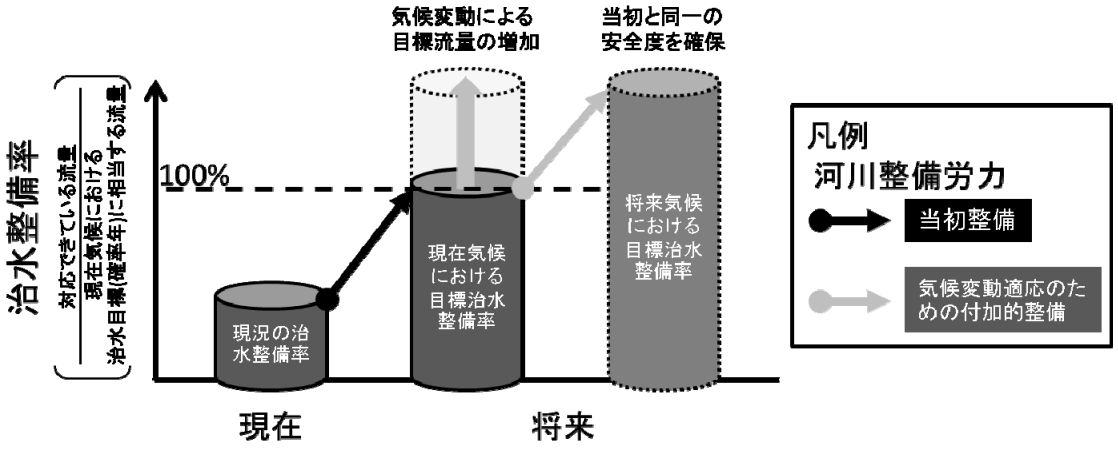


図-Ⅱ.2.1.2.1　河川整備必要量の定義

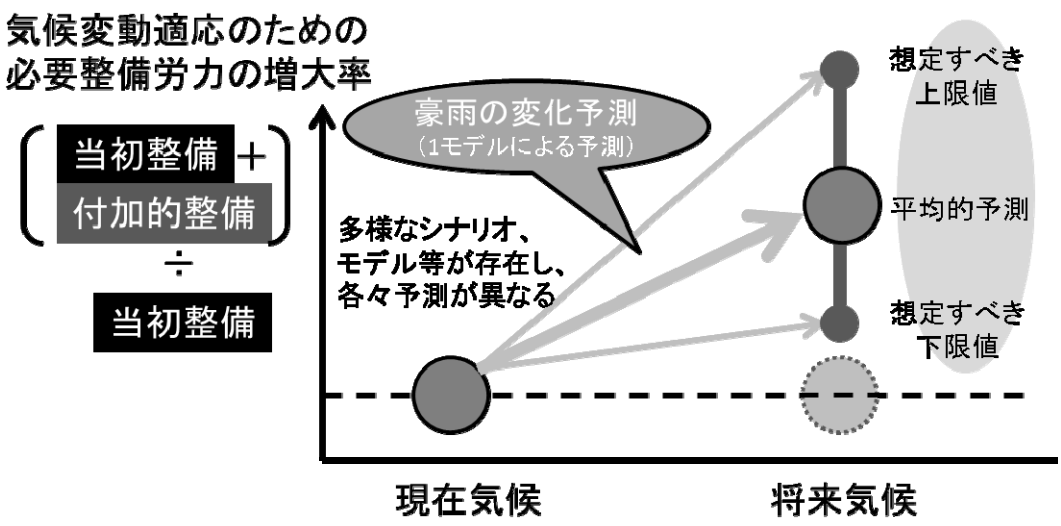


図-Ⅱ.2.1.2.2　整備労力増大率を用いた気候変動の影響把握

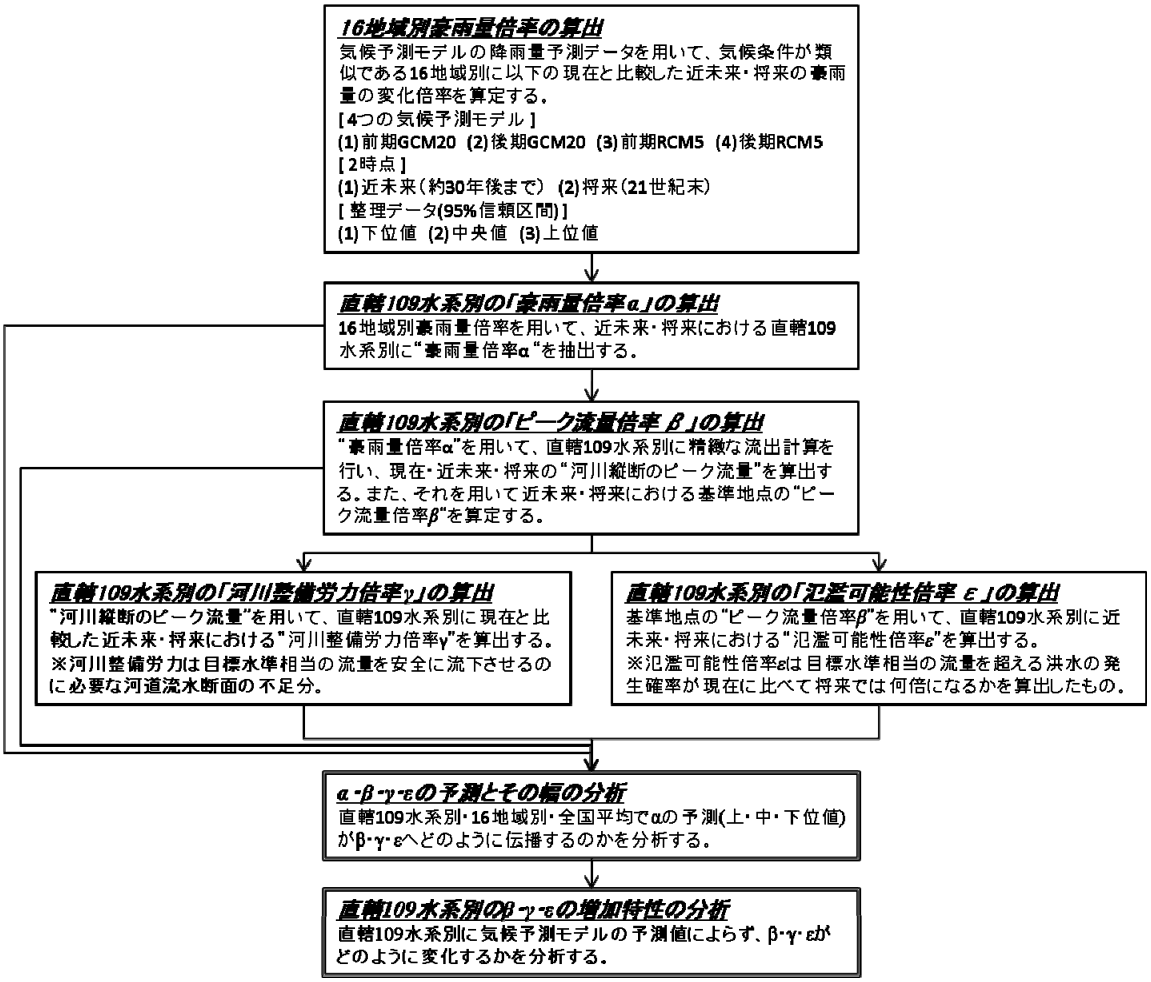


図-Ⅱ.2.1.2.3　本分析の流れ

b) 分析の流れと評価指標

b-1) 分析の流れ

図-Ⅱ.2.1.2.3 に本分析の流れを示す。本分析では気候予測モデルの降雨量の予測データから直轄 109 水系別に、降雨量の現在に対する将来の比である“豪雨量倍率 α”を算出する。“豪雨量倍率 α”と流出解析モデルを用いて、現在と将来における直轄 109 水系別の“ピーク流量の河川縦断変化”と河川の基準点における“ピーク流量倍率 β”を算出する。直轄 109 水系別のピーク流量の算定に際して、降雨量は現在気候においては“河川整備基本方針の降雨量”を使用する。また、将来気候においては“河川整備基本方針の降雨量”に“気候予測モデル予測値から得られた将来気候における現在気候に対する降雨量変化倍率”を乗じたものを使用する。“ピーク流量の河川縦断変化”を用いて“河川整備労力倍率 γ”を、“ピーク流量倍率 β”を用いて“氾濫可能性倍率 ε”を算出する。

豪雨量倍率 α、ピーク流量倍率 β、河川整備労力倍率 γ、氾濫可能性倍率 ε の 4 つの指標の関係を整理し、α の増加に応じた β、γ、ε の増幅傾向を考察する。

b-2) 豪雨量倍率

2.1.2.3 に後述する方法を用いて、気候予測モデルの予測値から、直轄 109 水系別（図-Ⅱ.2.1.2.4）の計画降雨継続時間の豪雨量倍率 α を算出した。現在の降雨量を R_P、近未来・将来の降雨量 $R_F=\alpha\times R_P$ とする。

図-Ⅱ.2.1.2.4　直轄 109 水系位置図

表-Ⅱ.2.1.2.1　流出計算に用いた資料

資料		備考
流出解析関係	流出解析手法	・基本高水、計画高水検討時のモデル ・例)貯留関数法、準線形貯留型モデル等 注:洪水調節施設は基本高水、計画工水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする。
	流域・河道モデル	・基本高水、計画高水検討時のモデル(現況) ・流域分割図(現況) 注:洪水調節施設は基本高水、計画工水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする
	流域定数 (貯留関数モデルの場合)	・基本高水、計画高水検討時の値 ・流域面積A、K、P、Tl、f1、Rsa、Qb
	流域定数 (準線形貯留型モデルの場合)	・基本高水、計画高水検討時の値(現況) ・流域面積A、流域分割毎の土地利用面積、土地利用毎のf1、fsa、Rsa、Qb(現況)
	流域定数 (その他のモデルの場合)	・基本高水、計画高水検討時の値(現況) ・流域面積A、流出計算に使用する定数(現況)
	河道定数 (貯留関数モデルの場合)	・基本高水、計画高水検討時の値 ・河道延長L、K、P、Tl
	河道定数 (不定流計算モデルの場合)	・粗度係数(低水路、高水敷)(現況を基本) ・下流端水位(現況河道検討時)
	確率規模別雨量	・計画降雨継続時間 ・計画降雨継続時間内確率規模別雨量
	計画のハイエトグラフ	・基本高水、計画高水決定に用いた"実績"ハイエトグラフ(洪水波形、時間分布) ・引き延ばし等をやっていれば、引き延ばし後のハイエトについても記載
	ダム操作方式 (対象としているすべてのダム)	・洪水調節方式(定量カット、定率定量、自然放流、その他) ・洪水調節方式毎の諸元 ・治水容量 ・H-V関係 ・貯留池運用方法(初期水位の設定) 注:基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存の直轄、水機構、補助ダムを対象とする。
	遊水地	・位置 ・洪水調節の計算方法(定量カット、水位を用いた洪水調節) ・洪水調節開始流量、越流堤の諸元(長さ、高さ) ・治水容量 ・H-V関係 注:基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存の遊水地を対象とする。
	湖、自然調節池等の流入量－流出量関係式	・H-V関係 ・流入量-流出量関係式 注:基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする。
	放水路等の分派	・位置 ・放水路への分派比率 注:基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする。
	流域対策 (防災調整池、浸透施設等)	・流域対策により流量低減を見込んでいる場合のみに該当 ・位置 ・集水面積、施設規模
	内水域からの流出量	・基本高水、計画高水決定に用いた内水域からの流出量、排水位置
河道形状	横断座標	・基本方針策定に用いた現況河道 ・直轄区間すべて
	断面毎のH-Q関係式	・基本方針策定に用いた現況河道 ・直轄区間すべて ・水位H-流量Q関係(現況河道)
	距離標、区間距離、計画高水位	・直轄区間全て

b-3)　流量倍率

直轄 109 水系を対象に河川計画の実務で用いた流出計算モデル及び河道追跡モデルのモデル定数、計画決定洪水降雨、洪水調節施設諸元（既設）等の流出計算に必要な諸量のデータ（表-Ⅱ.2.1.2.1）に基づき、R_P、R_F を与え、流出計算を行い、ピーク流量 Q を算定した。本稿では流出計算に関する詳細な説明を省略する。現在気候におけるピーク流量を Q_P、近未来・将来気候におけるピーク流量を Q_F、Q_F/Q_P を「流量倍率 β」と設定した。また確率規模別雨量データが存在する水系では、各雨量で流出計算を行い、雨量－流量－確率年の関係式を構築した。

b-4)　河川整備労力倍率

河川整備基本方針に示されている計画規模に相当する洪水を現況の整備途上の河道に流下させると、図-Ⅱ.2.1.2.5 に示すように最高水位 H_P が計画高水位 H_{HWL} を上回る区間が生じる。本研究では、その区間が長大でありかつその区間の川幅が広いほど、さらに計画高水位を上回った水深が大きいほど、今後必要な整備規模が増大すると単純化して取り扱うこととした。そこで整備規模の大きさを表す指標としての灰色部分の水量 W を用いることとし、以降、W を整備必要労力と呼び、式-Ⅱ.2.1.2.1 により算定する。

$$W = \int_0^L B \cdot f(H_P - H_{HWL})dx$$ 式-Ⅱ.2.1.2.1

ここで、B は水位 H_P～H_{HWL} 間の平均川幅、$f(z)$は $z>0$ の場合 $f(z)=z$、$z \leqq 0$ の場合 $f(z)=0$ となる関数である。H_P、H_{HWL}、B はいずれも河口からの距離 x の関数であり、国管理区間の河川総延長 L に渡って定義される。

現在気候下および近未来・将来気候下における河川整備労力 W_P、W_F は、それぞれ当初の整備規模とそれに気候変動の影響を吸収する拡充分を加えた整備規模に対応すると考え、これらの比 W_F/W_P を「河川整備労力倍率 γ」と設定した。高瀬川は河道全体のほとんどが汽水湖である小川原湖であるため、河川整備労力を算出していない。

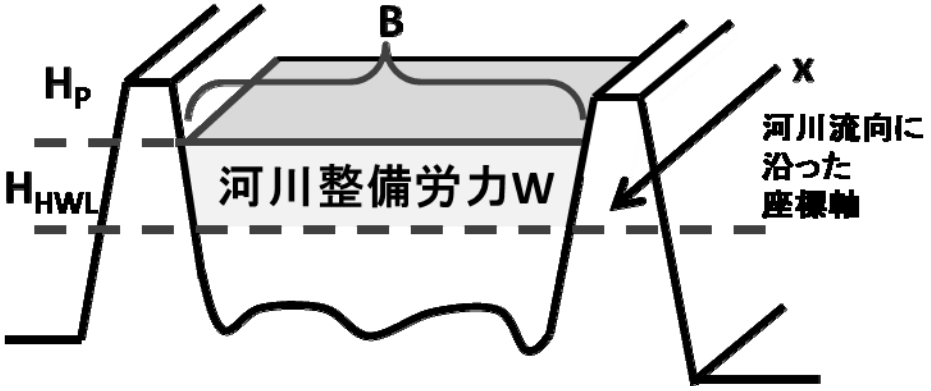


図-Ⅱ.2.1.2.5　河川整備労力の定義

b-5)　氾濫可能性倍率

b-3)で算出した雨量－流量－確率年の関係式を用いて、将来気候における流量－確率年の関係を算定する。氾濫可能性 P は超過確率年 T の逆数で $1/T$ とし、現在気候における氾濫可能性を P_P（$1/T_P$、計画確率規模と同値）、近未来・将来気候における氾濫可能性を P_F（$1/T_F$）、P_F/P_P を「氾濫可能性倍率 ε」と設定した。図-Ⅱ.2.1.2.6 に現在と将来の確率規模とピーク流量の関係を示す。例えば、計画確率規模が 1/100 年確率である場合、P_P は 1/100 であり、将来気候における氾濫可能性 P_F が 1/50 であった場合、ε は 2.0 倍となる。この倍率が大きくなるほど、将来において Q_P 規模の洪水が発生しやすいことを意味する。

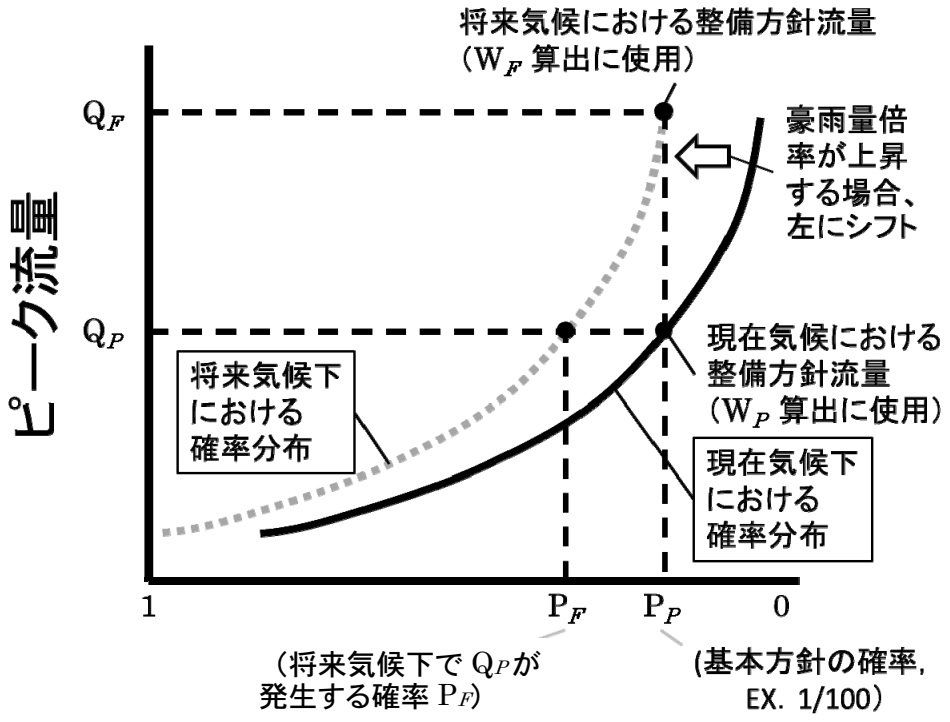


図-Ⅱ.2.1.2.6　氾濫可能性-ピーク流量の関係

2.1.2.3　豪雨量変化倍率の算定

a)　気候予測モデルデータの仕様

日本の豪雨は複雑な地形の影響を強く受けることから、2.1.2.2 に示した分析を行うにあたり、使用する気候予測モデルは、地形の空間スケールに見合う解像度を有し、詳細な標高データを有し、極端現象を再現するものが好ましい。本分析では、表-Ⅱ.2.1.1.1 中のピンク網掛け部分に当たる「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（21 世紀気候変動予測革新プログラム、2007～2011 年度、以後、革新プログラム）（文部科学省研究開発局 2012)」で開発された、高解像度の将来予測をした水平解像度 20km メッシュの（ⅰ)21 世紀気候変動予測革新プログラム GCM20 前期実験（以下、前期 GCM20)、(ⅱ)同後期実験（以下、後期 GCM20)、また前期 GCM20、後期 GCM20 をそれぞれ境界条件として実験された水平解像度 5km メッシュの(ⅲ)前期 RCM5、(ⅳ)後期 RCM5 の 4 つの気候予測モデルデータを使用する(表-Ⅰ.5.1 に示した気候モデルのうち上４つ)。4 つの気候予測モデルの概要を表-Ⅱ.2.1.2.2 に改めて示す。気候予測モデルの予測データは水平解像度 5km と 20km の 2 種類で、現在・近未来・将来の 3 時点が存在し、それぞれ計算期間が異なる。4 モデルのグリッド数、計算期間が異なることから、４モデルの比較を行う際には確率統計上、標本数の違いにより信頼区間の差異が大きく現れる。本研究では 4 つの気候モデル各々の予測結果とその幅が治水施策を検討する上でいかほどのインパクトを持つのかを調べる。

表-Ⅱ.2.1.2.2　4 気候モデルの解像度・計算期間等の概要

		前期GCM20	後期GCM20	前期RCM5	後期RCM5
計算領域		全球		日本領域	
水平解像度		20km		5km	
SRES		A1B			
計算期間	年数	25年間		10年間	25年間
	月	通年		6～10月	
	現在	1979～2003年		1990～1999年	1979～2003年
	近未来	2015～2039年		2026～2035年	2015～2039年
	将来	2075～2099年		2086～2095年	2075～2099年
境界条件		ー		前期GCM20	後期GCM20
グリッド数（日本国土相当分）		1054grids		14,896grids	

b)　気候予測モデルの予測値の統計処理方法

気候予測モデルの予測データはグリッド別にデータが保存されており、例えば、前期 RCM5 は当該グリッドの年最大降雨量は当該時点において 10 個（10 年間分）であり、この標本数で当該グリッドの年最大降雨量に関して議論するには、あまりにデータ数が不足している。そこで本研究では日本全国を同等の気候特性を持つ地域別に分割し、当該地域周辺の複数のグリッドデータを統計処理することで、多くの標本数を確保した上で、地域の年最大降雨量を算出することとした（国土交通省国土技術政策総合研究所 2008)。

同等の気候特性を持つ地域分割を行うための基本ベースとして、ダムの超過洪水検討の際に参考として用いられる地域別比流量図の地域分割（建設省河川局監修 1997)（北海道・東北・関東・北陸・中部・近畿・紀伊南部・山陰・瀬戸内・四国南部・九州）を採用し、順位和検定とスピアマン検定を用いて当該地域内のグリッドデータ間に同一性と独立性がみられるかを検証した。

水平解像度が 20km である前期 GCM20 の予測データを上記の地域に分割し、各時点で当該グリッドの降雨生起確率が地域全体の降雨生起確率と同一と見なせるか順位和検定を行った。同一と見なせるグリッド数の地域全体のグリッド数に対する割合を適合割合といい、地域分割の第一の指標とした。

《順位和検定》

[検定に用いた標本]

標本１：各グリッドの計算期間（10 年もしくは 25 年間）のデータ
（例えば、前期 GCM20 データの場合、25 個）

標本２：地域内の計算期間（10 年もしくは 25 年間）×グリッド数の全データ
（例えば、前期 GCM20 データで北海道を検定する場合、
計算期間：25 年間、グリッド数：246 個であるため、25×246=6,150 個）

[順位和検定式]

$$\frac{m\cdot(m+n+1)}{2}-a\sqrt{\frac{m\cdot n(m+n+1)}{12}}\le T\le\frac{m\cdot(m+n+1)}{2}+a\sqrt{\frac{m\cdot n(m+n+1)}{12}} \qquad \text{式-Ⅱ.2.1.2.2}$$

m，n：対象とするデータ群のデータ数で、ここではm：標本 1 の標本数、n：標本数２の標本数である。すなわち、この場合の同一性の判定は、地域に属するあるグリッドの降雨確率分布（計算期間が 25 年間の場合、25 個で構成される分布）が、その地域の降雨確率分布（25×地域内地点数で構成される）と同一と見なせるかを判定するものである。T：順位和、a：検定の有意水準に対応する定数で、5%有意水準のとき 1.96、1%有意水準のとき 2.57 である。

その一方で、地域の適合割合が大きい場合、地域内のデータ間の独立性が小さくなる可能性がある。そこで地域内の 2 点間の全ての組み合わせについて、そのデータの独立性検定をスピアマンの順位相関係数の有意性検定を適応して実施した。独立性仮説が棄却されなかった組み合わせ数の地域内 2 点間の全ての組み合わせ数に対する比を独立割合といい、これが大きくなる地域分割を適切な地域分割の第 2 の指標とした。

《スピアマン検定》

[検定に用いた標本]

同じ地域内で異なるグリッド 2 点間の年最大降雨量の順位相関係数を求める。ある地域内において、順位相関係数を求める組み合わせの数は、地域内の地点数をnとすると、$n(n-1)/2$である。

[スピアマンの順位相関係数r_sの算出]

$$r_s=1-\frac{6\sum d_i^{\,2}}{n(n^2-1)} \qquad \text{式-Ⅱ.2.1.2.3}$$

ここに、d_i：同じ年に発生した年最大降雨量の、それぞれの地点での順位の差、n：データ年数（＝10 or 25）、また母相関係数=0 を帰無仮説とすると検定統計量t_0は次式で表される。

$$t_0=\frac{|r_s|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_s^{\,2}}} \qquad \text{式-Ⅱ.2.1.2.4}$$

t_0は自由度が$n-2$の t 分布に従い、n=10 の場合、有意水準 5%では$t_0\ge 2.306$、有意水準 1%では$t_0\ge 3.355$で帰無仮説が棄却される。

上記 2 つの検定を行い、基本ベースの地域別比流量図の地域分割から try and error で適合割合、独立割合が良好となるように様々な地域分割を検討したところ、以下の知見、改善案が得られた。

1) 北海道・東北・北陸・中部の大きい地域分割では適合割合が小さい。
2) 地域の特性を考慮し、地域分割の考えるための、標高分布および豪雨量の全国分布を考慮する。
3) 日本海側と太平洋側で降雨特性が大きく異なることから山脈で分割する。
4) 近畿と瀬戸内は雨の少ない地域で、近畿の地点数が少ないことから、近畿と瀬戸内は併合し、瀬戸内近とする。
5) 北海道は、東西に分割するよりもオホーツク海側、太平洋側、日本海側に 3 分割した方が、各降雨継続時間とも適合割合が大きくなる傾向を示す。
6) 東北は東西で影響を及ぼし合うことから山脈で区切られる日本海側と太平洋側へと分割する。また青森を中心とする地域の降雨が少ないことから東北北として分割する。
7) 北陸、中部とも高い山脈によって東西に区切られていることから標高データを参考に分割する。
8) 中部東は太平洋側の降雨量の多い地域と長野盆地を中心とする年間降水量 1800㎜ 以下の地域として分割する。
9) 紀伊南部、四国南部、九州南部をまとめた紀四九南は元の地域分割の適合割合と大差がない。
10) 九州北は元の九州と比較して、高い適合割合となっている。

以上の検定結果等より地域分割を北海道オホーツク海側・北海道日本海側・北海道太平洋側・東北北・東北東・東北西・北陸東・北陸西・関東・長野盆地・中部東・中部西・山陰・瀬戸内・九州北・西南日本の 16 地域に分割することとした（図-Ⅱ.2.1.2.7)。

c) 豪雨量倍率の算定

気候予測モデル予測値を用いて、16 地域別に、3 時点（現在・近未来・将来)、7 種類の降雨継続時間 (1・3・6・12・24・48・72 時間)、上位値・平均値・下位値の豪雨量倍率を算定する (表-Ⅱ.2.1.2.3)。ここで、上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅にあたる。図-Ⅱ.2.1.2.8 にモデルの降雨時間と豪雨量倍率の関係を示す。図では 95%信頼区間の幅も合わせて表示している。9 時間降雨は 6・12 時間降雨の平均値として算出した。4 モデル、降雨時間により、中央値と信頼区間の幅がそれぞれ大きく異なる。RCM5 は高解像度でグリッド数が多いため、GCM20 と比較して信頼区間は小さくなっている。

16 地域別の豪雨量倍率を用いて、直轄 109 水系別の豪雨量倍率を算定する。豪雨量倍率は当該水系の基本方針の降雨継続時間を採用し、2 地域以上をまたぐ水系は面積で按分することで算定する。

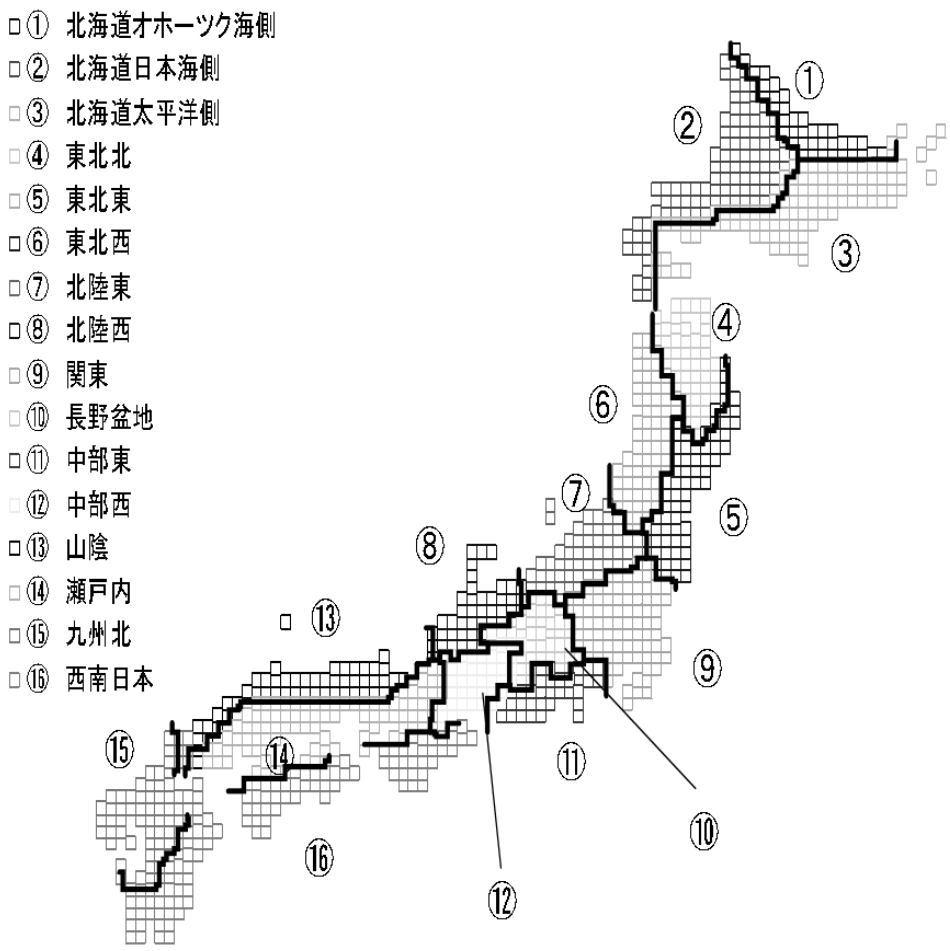


図-Ⅱ.2.1.2.7　日本全国 16 地域分割図

表-Ⅱ.2.1.2.3(1) 16 地域別豪雨量倍率(1 時間)　※上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	1.01	1.06	1.11	1.26	1.33	1.40	1.11	1.17	1.22	1.25	1.30	1.36	1.07	1.09	1.11	1.24	1.26	1.29	1.31	1.33	1.35	1.52	1.54	1.57
北海道日本海側	1.07	1.10	1.14	1.25	1.30	1.34	1.15	1.19	1.23	1.30	1.34	1.39	1.08	1.09	1.10	1.29	1.31	1.32	1.33	1.35	1.37	1.51	1.53	1.56
北海道太平洋側	0.99	1.02	1.06	1.11	1.15	1.19	1.04	1.08	1.10	1.27	1.31	1.34	1.14	1.16	1.17	1.23	1.24	1.26	1.25	1.26	1.28	1.39	1.41	1.43
東北北	0.97	1.03	1.10	1.18	1.25	1.31	0.95	0.99	1.05	1.23	1.28	1.34	0.91	0.92	0.94	1.10	1.12	1.14	1.13	1.15	1.17	1.43	1.45	1.47
東北東	0.93	0.99	1.04	0.96	1.03	1.09	0.91	0.94	0.98	1.10	1.15	1.19	1.04	1.05	1.07	1.17	1.19	1.20	1.15	1.16	1.18	1.44	1.47	1.49
東北西	1.08	1.12	1.17	1.26	1.31	1.36	1.02	1.06	1.10	1.20	1.25	1.30	0.98	0.99	1.00	1.15	1.16	1.18	1.09	1.11	1.13	1.27	1.29	1.30
北陸東	0.99	1.05	1.11	1.09	1.15	1.21	1.07	1.13	1.19	1.10	1.15	1.20	0.92	0.93	0.95	1.22	1.24	1.26	1.19	1.21	1.23	1.28	1.31	1.33
北陸西	1.04	1.10	1.16	1.14	1.22	1.29	1.01	1.07	1.13	1.06	1.11	1.17	0.99	1.01	1.02	1.13	1.15	1.17	1.16	1.18	1.21	1.31	1.34	1.36
関東	0.99	1.04	1.08	1.13	1.19	1.25	1.00	1.04	1.07	1.09	1.13	1.17	1.02	1.03	1.05	1.22	1.24	1.25	1.20	1.22	1.24	1.46	1.49	1.52
長野盆地	0.99	1.09	1.22	1.08	1.18	1.29	0.96	1.02	1.09	1.10	1.19	1.28	0.96	0.98	1.00	1.13	1.15	1.18	1.20	1.22	1.24	1.27	1.29	1.32
中部東	0.96	1.09	1.24	1.13	1.24	1.36	0.98	1.07	1.16	1.14	1.25	1.36	0.96	0.98	1.00	1.32	1.34	1.37	1.31	1.33	1.35	1.43	1.45	1.48
中部西	0.93	1.05	1.19	1.08	1.18	1.29	1.02	1.09	1.18	1.12	1.19	1.28	0.95	0.97	0.99	0.90	0.92	0.93	1.19	1.22	1.24	1.32	1.35	1.38
山陰	1.13	1.18	1.24	1.28	1.33	1.39	0.96	0.99	1.03	1.20	1.25	1.30	1.07	1.08	1.10	1.07	1.08	1.10	1.15	1.17	1.19	1.34	1.37	1.39
瀬戸内	1.05	1.09	1.13	1.21	1.25	1.29	1.05	1.08	1.11	1.19	1.23	1.26	1.04	1.05	1.07	0.97	0.98	0.99	1.14	1.16	1.17	1.26	1.28	1.30
九州北	0.98	1.02	1.06	1.27	1.33	1.39	0.87	0.90	0.93	1.11	1.14	1.18	0.99	1.00	1.02	1.13	1.15	1.16	1.09	1.10	1.12	1.33	1.34	1.36
西南日本	1.02	1.06	1.09	1.23	1.27	1.30	1.00	1.03	1.06	1.18	1.22	1.25	1.05	1.07	1.08	1.02	1.03	1.05	1.12	1.14	1.16	1.29	1.31	1.32

表-Ⅱ.2.1.2.3(2) 16 地域別豪雨量倍率(3 時間) ※上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	0.97	1.01	1.06	1.18	1.24	1.31	1.10	1.15	1.21	1.19	1.24	1.30	1.03	1.04	1.06	1.19	1.22	1.24	1.27	1.29	1.30	1.45	1.47	1.49
北海道日本海側	1.08	1.11	1.14	1.23	1.27	1.31	1.13	1.16	1.20	1.27	1.32	1.36	1.06	1.07	1.08	1.26	1.27	1.29	1.28	1.30	1.31	1.43	1.45	1.46
北海道太平洋側	0.97	1.00	1.04	1.07	1.10	1.14	1.01	1.04	1.07	1.22	1.26	1.30	1.09	1.10	1.11	1.22	1.23	1.25	1.25	1.26	1.27	1.38	1.40	1.41
東北北	1.01	1.06	1.12	1.14	1.20	1.27	0.89	0.94	0.99	1.16	1.22	1.27	0.89	0.91	0.92	1.03	1.05	1.06	1.09	1.11	1.12	1.35	1.37	1.39
東北東	0.92	0.96	1.01	0.97	1.03	1.09	0.92	0.96	0.99	1.11	1.15	1.20	1.02	1.04	1.05	1.17	1.18	1.20	1.13	1.15	1.16	1.37	1.38	1.40
東北西	1.06	1.10	1.14	1.19	1.24	1.28	1.02	1.06	1.10	1.18	1.23	1.27	0.95	0.96	0.98	1.08	1.09	1.11	1.09	1.11	1.12	1.24	1.25	1.27
北陸東	0.93	0.98	1.03	1.01	1.07	1.13	1.06	1.12	1.18	1.08	1.13	1.19	0.91	0.92	0.93	1.17	1.19	1.20	1.17	1.19	1.21	1.22	1.24	1.26
北陸西	1.01	1.07	1.12	1.13	1.19	1.26	0.98	1.04	1.09	1.08	1.14	1.19	0.96	0.98	1.00	1.06	1.08	1.10	1.15	1.17	1.19	1.28	1.30	1.32
関東	0.97	1.01	1.05	1.11	1.16	1.22	1.00	1.04	1.08	1.13	1.17	1.21	0.99	1.00	1.02	1.23	1.25	1.26	1.18	1.20	1.21	1.42	1.44	1.46
長野盆地	1.00	1.08	1.16	1.04	1.11	1.20	0.92	0.99	1.06	1.10	1.18	1.27	0.95	0.97	0.98	1.13	1.15	1.17	1.21	1.23	1.25	1.26	1.28	1.30
中部東	0.99	1.10	1.23	1.11	1.21	1.32	0.97	1.07	1.18	1.13	1.24	1.36	0.91	0.93	0.94	1.26	1.28	1.31	1.34	1.36	1.38	1.43	1.45	1.48
中部西	0.92	1.02	1.14	1.04	1.13	1.22	0.98	1.07	1.18	1.11	1.19	1.29	0.95	0.97	0.99	0.89	0.91	0.93	1.19	1.21	1.24	1.29	1.32	1.34
山陰	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	0.93	0.97	1.01	1.19	1.23	1.28	1.01	1.03	1.04	1.00	1.02	1.03	1.12	1.14	1.15	1.29	1.31	1.33
瀬戸内	0.98	1.01	1.05	1.17	1.20	1.24	1.04	1.07	1.11	1.21	1.24	1.28	0.98	0.99	1.00	0.92	0.93	0.94	1.12	1.14	1.15	1.24	1.25	1.27
九州北	0.97	1.01	1.05	1.22	1.28	1.34	0.86	0.90	0.93	1.11	1.14	1.18	0.96	0.97	0.98	1.11	1.13	1.14	1.06	1.08	1.09	1.31	1.33	1.34
西南日本	1.00	1.03	1.06	1.13	1.17	1.20	1.02	1.05	1.07	1.20	1.24	1.27	1.02	1.04	1.05	1.00	1.01	1.02	1.11	1.13	1.15	1.29	1.30	1.32

表-Ⅱ.2.1.2.3(3) 16 地域別豪雨量倍率(6 時間)　※上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	0.98	1.02	1.06	1.15	1.21	1.27	1.13	1.18	1.24	1.19	1.25	1.31	0.99	1.01	1.03	1.18	1.21	1.23	1.26	1.27	1.28	1.41	1.43	1.45
北海道日本海側	1.11	1.13	1.16	1.20	1.24	1.28	1.13	1.18	1.22	1.27	1.32	1.37	1.03	1.04	1.06	1.21	1.22	1.24	1.25	1.27	1.28	1.38	1.39	1.41
北海道太平洋側	0.98	1.00	1.03	1.05	1.09	1.12	1.02	1.05	1.09	1.19	1.23	1.26	1.07	1.08	1.09	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.39	1.40	1.42
東北北	1.00	1.06	1.11	1.13	1.18	1.23	0.85	0.90	0.95	1.11	1.17	1.22	0.90	0.92	0.93	1.01	1.03	1.05	1.05	1.06	1.07	1.31	1.32	1.34
東北東	0.92	0.96	1.00	0.97	1.02	1.07	0.93	0.97	1.01	1.07	1.11	1.16	1.01	1.03	1.04	1.16	1.17	1.19	1.12	1.14	1.15	1.30	1.31	1.33
東北西	1.04	1.09	1.12	1.13	1.18	1.22	1.03	1.07	1.11	1.16	1.21	1.25	0.94	0.96	0.97	1.05	1.06	1.08	1.06	1.07	1.08	1.22	1.23	1.24
北陸東	0.91	0.96	1.00	0.99	1.05	1.10	1.04	1.10	1.16	1.05	1.09	1.14	0.89	0.91	0.92	1.10	1.12	1.13	1.15	1.16	1.18	1.18	1.20	1.21
北陸西	1.02	1.04	1.09	1.10	1.16	1.22	0.99	1.05	1.10	1.12	1.18	1.24	0.93	0.94	0.96	0.99	1.01	1.03	1.14	1.16	1.18	1.25	1.27	1.28
関東	0.98	1.01	1.04	1.11	1.16	1.20	0.98	1.02	1.07	1.12	1.16	1.21	0.97	0.98	1.00	1.20	1.22	1.23	1.16	1.18	1.19	1.40	1.41	1.43
長野盆地	1.01	1.08	1.16	1.04	1.11	1.18	0.90	0.97	1.05	1.11	1.18	1.26	0.91	0.93	0.94	1.07	1.09	1.11	1.21	1.23	1.25	1.25	1.27	1.29
中部東	0.98	1.07	1.16	1.08	1.16	1.25	0.96	1.07	1.19	1.09	1.21	1.35	0.87	0.89	0.91	1.15	1.17	1.20	1.33	1.35	1.36	1.41	1.43	1.45
中部西	0.95	1.01	1.09	1.04	1.12	1.20	0.98	1.08	1.21	1.09	1.19	1.30	0.92	0.94	0.95	0.88	0.89	0.91	1.16	1.18	1.20	1.25	1.27	1.29
山陰	1.05	1.08	1.12	1.18	1.23	1.28	0.93	0.96	1.00	1.19	1.24	1.29	0.96	0.97	0.99	0.95	0.96	0.98	1.08	1.09	1.11	1.23	1.25	1.26
瀬戸内	0.97	0.99	1.03	1.14	1.18	1.21	1.02	1.05	1.08	1.19	1.22	1.26	0.93	0.94	0.95	0.89	0.90	0.91	1.10	1.12	1.13	1.20	1.22	1.23
九州北	0.95	0.99	1.03	1.19	1.24	1.30	0.85	0.89	0.92	1.10	1.14	1.18	0.93	0.94	0.95	1.09	1.10	1.12	1.04	1.06	1.07	1.29	1.30	1.32
西南日本	0.96	1.00	1.02	1.08	1.11	1.14	1.01	1.04	1.07	1.19	1.22	1.25	0.97	0.98	0.99	0.97	0.98	0.99	1.11	1.12	1.14	1.26	1.27	1.29

表-Ⅱ.2.1.2.3(4) 16 地域別豪雨量倍率(12 時間)　※上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	0.99	1.03	1.07	1.11	1.17	1.22	1.14	1.20	1.26	1.15	1.21	1.27	0.94	0.96	0.98	1.11	1.13	1.16	1.25	1.27	1.28	1.39	1.40	1.42
北海道日本海側	1.12	1.15	1.18	1.21	1.25	1.29	1.12	1.17	1.21	1.21	1.26	1.31	0.98	1.00	1.01	1.14	1.15	1.16	1.26	1.27	1.28	1.33	1.35	1.36
北海道太平洋側	0.98	1.01	1.04	1.06	1.09	1.13	1.06	1.10	1.13	1.15	1.18	1.21	1.04	1.06	1.07	1.22	1.23	1.24	1.27	1.28	1.29	1.39	1.40	1.41
東北北	0.99	1.04	1.08	1.07	1.12	1.17	0.85	0.90	0.96	1.13	1.19	1.24	0.91	0.93	0.95	1.00	1.02	1.04	1.03	1.04	1.05	1.29	1.30	1.32
東北東	0.93	0.97	1.01	0.97	1.02	1.06	0.94	0.98	1.02	1.02	1.06	1.10	1.08	1.09	1.11	1.19	1.21	1.23	1.16	1.17	1.18	1.29	1.30	1.32
東北西	1.04	1.07	1.11	1.11	1.14	1.18	1.05	1.09	1.12	1.17	1.22	1.26	0.97	0.98	0.99	1.06	1.08	1.09	1.07	1.08	1.09	1.19	1.21	1.22
北陸東	0.92	0.96	1.00	0.97	1.01	1.06	1.01	1.07	1.13	1.00	1.05	1.10	0.91	0.92	0.94	1.07	1.08	1.10	1.14	1.15	1.16	1.16	1.17	1.19
北陸西	1.04	1.09	1.14	1.11	1.16	1.22	0.96	1.01	1.07	1.07	1.12	1.18	0.90	0.92	0.93	0.95	0.96	0.98	1.14	1.15	1.17	1.22	1.24	1.26
関東	0.98	1.01	1.04	1.05	1.09	1.12	0.95	1.00	1.04	1.08	1.13	1.17	0.96	0.97	0.98	1.16	1.18	1.19	1.16	1.17	1.18	1.36	1.38	1.39
長野盆地	1.02	1.08	1.14	1.02	1.08	1.14	0.90	0.97	1.05	1.09	1.15	1.22	0.86	0.88	0.90	0.97	0.99	1.01	1.21	1.23	1.24	1.24	1.26	1.27
中部東	0.98	1.06	1.15	1.07	1.15	1.22	0.88	1.02	1.18	0.99	1.13	1.28	0.85	0.87	0.89	1.05	1.07	1.09	1.31	1.33	1.34	1.38	1.40	1.42
中部西	0.96	1.02	1.09	1.04	1.12	1.20	0.97	1.05	1.14	1.03	1.11	1.20	0.87	0.89	0.90	0.85	0.87	0.89	1.13	1.15	1.17	1.20	1.22	1.24
山陰	1.06	1.10	1.15	1.15	1.19	1.24	0.91	0.95	0.99	1.15	1.20	1.24	0.94	0.96	0.97	0.91	0.93	0.94	1.06	1.08	1.09	1.18	1.20	1.21
瀬戸内	0.97	1.00	1.03	1.11	1.15	1.17	0.97	1.00	1.03	1.13	1.16	1.19	0.93	0.94	0.95	0.88	0.89	0.90	1.10	1.11	1.12	1.16	1.17	1.19
九州北	0.94	0.98	1.02	1.14	1.18	1.23	0.84	0.88	0.91	1.08	1.12	1.16	0.91	0.92	0.93	1.05	1.07	1.08	1.03	1.04	1.05	1.26	1.28	1.29
西南日本	0.95	0.97	1.00	1.06	1.09	1.11	0.97	0.99	1.02	1.11	1.14	1.17	0.93	0.94	0.95	0.94	0.95	0.96	1.10	1.11	1.13	1.24	1.25	1.26

表－Ⅱ.2.1.2.3(5) 16 地域別豪雨量倍率(24 時間)　※上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	0.99	1.03	1.08	1.09	1.15	1.20	1.16	1.22	1.28	1.14	1.19	1.26	0.90	0.92	0.94	1.10	1.12	1.15	1.29	1.30	1.32	1.37	1.38	1.40
北海道日本海側	1.11	1.14	1.17	1.17	1.20	1.24	1.15	1.19	1.23	1.20	1.24	1.28	0.99	1.00	1.01	1.18	1.19	1.21	1.32	1.33	1.34	1.33	1.34	1.35
北海道太平洋側	1.01	1.04	1.07	1.07	1.10	1.13	1.11	1.15	1.19	1.14	1.17	1.21	1.05	1.06	1.08	1.25	1.27	1.28	1.31	1.32	1.33	1.38	1.40	1.41
東北北	1.04	1.09	1.15	1.13	1.18	1.23	0.85	0.90	0.96	1.11	1.16	1.22	0.97	0.99	1.01	1.20	1.22	1.25	1.01	1.02	1.03	1.24	1.26	1.27
東北東	0.92	0.96	1.00	0.96	1.01	1.06	0.94	0.98	1.03	0.98	1.03	1.08	1.08	1.09	1.11	1.27	1.29	1.32	1.19	1.21	1.22	1.30	1.31	1.33
東北西	1.01	1.04	1.07	1.07	1.11	1.14	1.06	1.10	1.13	1.16	1.21	1.25	0.97	0.98	1.00	1.26	1.27	1.29	1.08	1.08	1.09	1.20	1.21	1.22
北陸東	0.86	0.90	0.94	0.89	0.93	0.97	1.00	1.06	1.11	1.01	1.05	1.10	0.86	0.87	0.89	1.13	1.15	1.17	1.12	1.13	1.15	1.16	1.17	1.19
北陸西	1.03	1.07	1.12	1.06	1.10	1.15	0.91	0.96	1.02	1.04	1.09	1.14	0.92	0.94	0.96	1.10	1.12	1.14	1.13	1.15	1.16	1.22	1.24	1.25
関東	0.96	1.00	1.03	0.99	1.03	1.07	0.92	0.97	1.02	1.04	1.08	1.13	0.91	0.92	0.94	1.19	1.21	1.23	1.17	1.18	1.19	1.36	1.37	1.38
長野盆地	1.00	1.06	1.13	0.97	1.03	1.09	0.85	0.93	1.01	1.03	1.09	1.17	0.84	0.86	0.88	1.01	1.03	1.05	1.19	1.21	1.22	1.22	1.23	1.25
中部東	0.96	1.05	1.14	1.05	1.12	1.20	0.86	1.02	1.21	0.93	1.11	1.32	0.83	0.85	0.86	1.08	1.10	1.13	1.27	1.29	1.30	1.35	1.37	1.39
中部西	0.99	1.05	1.12	1.04	1.12	1.19	0.91	1.00	1.11	1.00	1.07	1.15	0.94	0.96	0.98	1.03	1.05	1.08	1.12	1.14	1.15	1.16	1.18	1.20
山陰	1.08	1.12	1.16	1.09	1.13	1.17	0.91	0.95	0.99	1.13	1.17	1.22	1.05	1.06	1.08	1.05	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08	1.17	1.18	1.19
瀬戸内	1.02	1.05	1.07	1.09	1.12	1.15	0.94	0.98	1.01	1.09	1.12	1.16	1.00	1.01	1.02	0.98	0.99	1.01	1.09	1.10	1.12	1.15	1.17	1.18
九州北	0.95	0.98	1.02	1.12	1.16	1.21	0.82	0.86	0.89	1.05	1.09	1.14	0.97	0.98	0.99	1.14	1.16	1.17	1.02	1.03	1.04	1.27	1.28	1.29
西南日本	0.97	0.99	1.02	1.06	1.09	1.12	0.94	0.97	1.00	1.06	1.09	1.12	0.98	0.99	1.00	1.05	1.06	1.07	1.12	1.13	1.14	1.24	1.26	1.27

表－Ⅱ.2.1.2.3(6) 16 地域別豪雨量倍率(48 時間)　※上位値と下位値の幅は 95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	1.01	1.06	1.11	1.09	1.14	1.20	1.15	1.21	1.28	1.14	1.20	1.27	0.88	0.90	0.92	1.11	1.14	1.17	1.29	1.31	1.32	1.34	1.35	1.37
北海道日本海側	1.11	1.15	1.18	1.14	1.19	1.23	1.13	1.17	1.22	1.19	1.23	1.28	0.97	0.98	0.99	1.17	1.19	1.20	1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38
北海道太平洋側	0.99	1.02	1.05	1.09	1.12	1.15	1.14	1.18	1.22	1.12	1.16	1.19	0.98	0.99	1.00	1.23	1.24	1.26	1.35	1.36	1.37	1.41	1.42	1.43
東北北	1.10	1.15	1.20	1.18	1.23	1.29	0.88	0.94	0.99	1.09	1.15	1.20	0.97	0.99	1.01	1.17	1.20	1.22	1.04	1.05	1.06	1.21	1.22	1.23
東北東	0.95	1.01	1.06	1.03	1.08	1.14	0.98	1.02	1.07	0.98	1.03	1.07	1.12	1.14	1.16	1.30	1.33	1.35	1.27	1.29	1.30	1.33	1.34	1.36
東北西	1.00	1.03	1.07	1.04	1.07	1.11	1.11	1.15	1.20	1.18	1.22	1.27	0.98	1.00	1.01	1.22	1.24	1.26	1.10	1.11	1.12	1.22	1.23	1.24
北陸東	0.88	0.92	0.97	0.91	0.95	0.99	1.03	1.09	1.14	1.02	1.06	1.11	0.82	0.83	0.85	1.09	1.11	1.14	1.13	1.14	1.15	1.19	1.20	1.21
北陸西	1.00	1.05	1.11	1.04	1.08	1.13	0.90	0.96	1.02	1.01	1.06	1.12	0.93	0.95	0.96	1.07	1.09	1.11	1.16	1.18	1.19	1.25	1.26	1.28
関東	0.99	1.02	1.06	1.02	1.06	1.11	0.93	0.99	1.06	1.07	1.13	1.19	0.93	0.94	0.96	1.15	1.17	1.19	1.21	1.22	1.22	1.39	1.40	1.41
長野盆地	0.96	1.03	1.10	0.93	0.99	1.06	0.87	0.96	1.05	1.01	1.09	1.18	0.84	0.86	0.88	1.02	1.04	1.07	1.22	1.23	1.25	1.22	1.24	1.25
中部東	0.97	1.06	1.15	0.99	1.07	1.16	0.95	1.09	1.26	0.97	1.13	1.33	0.83	0.85	0.87	1.09	1.11	1.14	1.33	1.34	1.36	1.35	1.36	1.38
中部西	0.96	1.03	1.11	0.98	1.05	1.13	0.94	1.04	1.17	0.94	1.03	1.13	0.94	0.96	0.98	1.06	1.08	1.11	1.17	1.19	1.20	1.18	1.19	1.21
山陰	1.06	1.11	1.15	1.07	1.12	1.17	0.93	0.97	1.01	1.11	1.16	1.20	1.04	1.05	1.07	1.01	1.03	1.05	1.06	1.07	1.08	1.16	1.17	1.18
瀬戸内	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	0.95	0.99	1.02	1.07	1.11	1.15	1.05	1.06	1.08	0.99	1.00	1.02	1.10	1.11	1.12	1.16	1.17	1.18
九州北	0.96	1.00	1.04	1.11	1.15	1.19	0.81	0.84	0.87	1.03	1.08	1.12	0.92	0.93	0.94	1.14	1.16	1.17	1.03	1.04	1.05	1.29	1.30	1.32
西南日本	0.99	1.01	1.04	1.08	1.11	1.13	0.96	0.99	1.02	1.05	1.08	1.11	1.02	1.03	1.04	1.11	1.12	1.14	1.18	1.19	1.21	1.28	1.30	1.31

表-Ⅱ.2.1.2.3(7) 16地域別豪雨量倍率(72時間)　※上位値と下位値の幅は95%信頼区間の幅

16地域	前期GCM20						後期GCM20						前期RCM5						後期RCM5					
	近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来			近未来			将来		
	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位	下位	中位	上位
北海道オホーツク海側	0.99	1.04	1.10	1.07	1.13	1.19	1.13	1.19	1.25	1.14	1.19	1.25	0.82	0.84	0.86	1.03	1.05	1.08	1.28	1.29	1.30	1.35	1.36	1.37
北海道日本海側	1.10	1.13	1.17	1.16	1.21	1.25	1.11	1.15	1.19	1.17	1.22	1.27	0.94	0.95	0.97	1.15	1.16	1.18	1.30	1.31	1.32	1.39	1.40	1.41
北海道太平洋側	0.99	1.02	1.05	1.10	1.14	1.17	1.12	1.16	1.20	1.11	1.14	1.18	0.98	0.99	1.01	1.21	1.22	1.24	1.31	1.32	1.33	1.41	1.42	1.44
東北北	1.08	1.13	1.18	1.18	1.23	1.28	0.90	0.96	1.02	1.08	1.14	1.19	0.95	0.97	0.99	1.16	1.19	1.21	1.07	1.08	1.09	1.22	1.23	1.24
東北東	0.95	1.01	1.07	1.03	1.09	1.14	0.98	1.03	1.08	0.98	1.02	1.07	1.11	1.13	1.15	1.25	1.28	1.30	1.31	1.32	1.34	1.35	1.37	1.38
東北西	0.99	1.02	1.06	1.02	1.05	1.08	1.14	1.18	1.23	1.19	1.24	1.28	0.95	0.97	0.98	1.23	1.25	1.27	1.11	1.12	1.13	1.22	1.23	1.24
北陸東	0.88	0.92	0.96	0.91	0.95	0.99	1.05	1.10	1.15	1.03	1.07	1.12	0.79	0.81	0.82	1.05	1.07	1.09	1.14	1.15	1.16	1.20	1.21	1.22
北陸西	0.99	1.04	1.09	0.99	1.04	1.09	0.88	0.94	1.00	0.99	1.05	1.11	0.92	0.94	0.95	1.08	1.11	1.13	1.19	1.21	1.22	1.25	1.27	1.28
関東	0.99	1.03	1.07	1.04	1.08	1.13	0.94	1.01	1.09	1.07	1.13	1.19	0.92	0.94	0.95	1.12	1.14	1.16	1.20	1.21	1.22	1.37	1.39	1.40
長野盆地	0.95	1.01	1.08	0.91	0.97	1.05	0.87	0.96	1.05	0.98	1.07	1.16	0.84	0.86	0.88	1.00	1.03	1.05	1.22	1.23	1.25	1.22	1.24	1.25
中部東	0.97	1.06	1.15	0.96	1.04	1.13	0.99	1.13	1.29	0.98	1.14	1.33	0.83	0.85	0.87	1.05	1.07	1.10	1.37	1.38	1.40	1.35	1.36	1.38
中部西	0.95	1.02	1.09	0.95	1.02	1.10	0.92	1.06	1.22	0.95	1.04	1.14	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.19	1.21	1.22	1.19	1.21	1.22
山陰	1.06	1.11	1.16	1.05	1.10	1.15	0.94	0.98	1.02	1.11	1.16	1.21	1.04	1.05	1.07	1.02	1.03	1.05	1.07	1.08	1.09	1.15	1.16	1.17
瀬戸内	1.06	1.09	1.12	1.13	1.16	1.19	0.94	0.98	1.01	1.03	1.07	1.11	1.08	1.09	1.10	1.00	1.01	1.02	1.10	1.11	1.12	1.14	1.15	1.17
九州北	0.99	1.03	1.08	1.13	1.17	1.21	0.79	0.82	0.85	1.01	1.05	1.10	0.91	0.92	0.94	1.18	1.20	1.22	1.06	1.07	1.08	1.29	1.30	1.32
西南日本	1.00	1.02	1.05	1.10	1.13	1.15	0.97	1.00	1.03	1.04	1.07	1.10	1.03	1.04	1.05	1.14	1.16	1.17	1.23	1.25	1.26	1.31	1.33	1.35

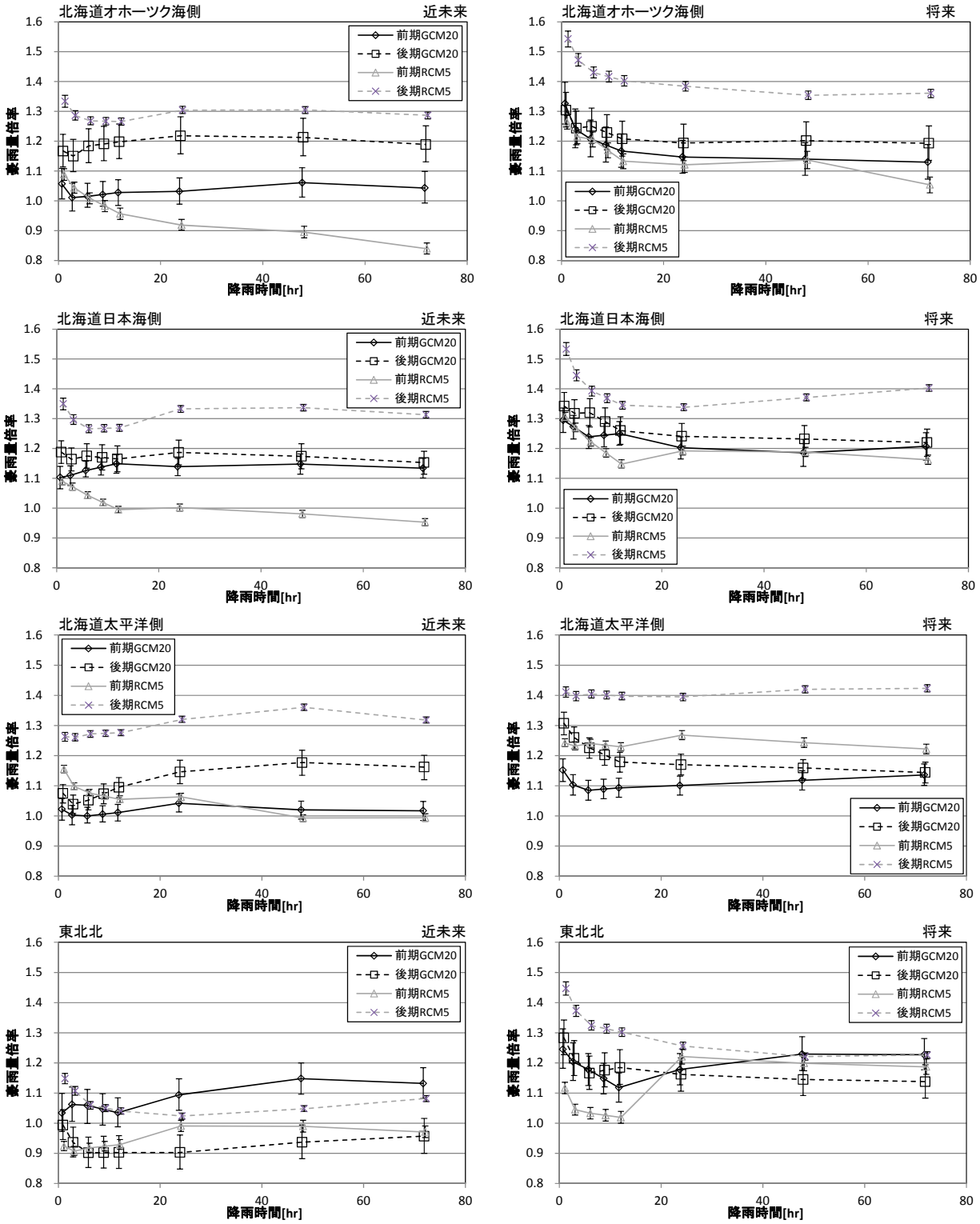


図-Ⅱ.2.1.2.8(1)　16 地域別降雨時間と豪雨量倍率の関係(1)

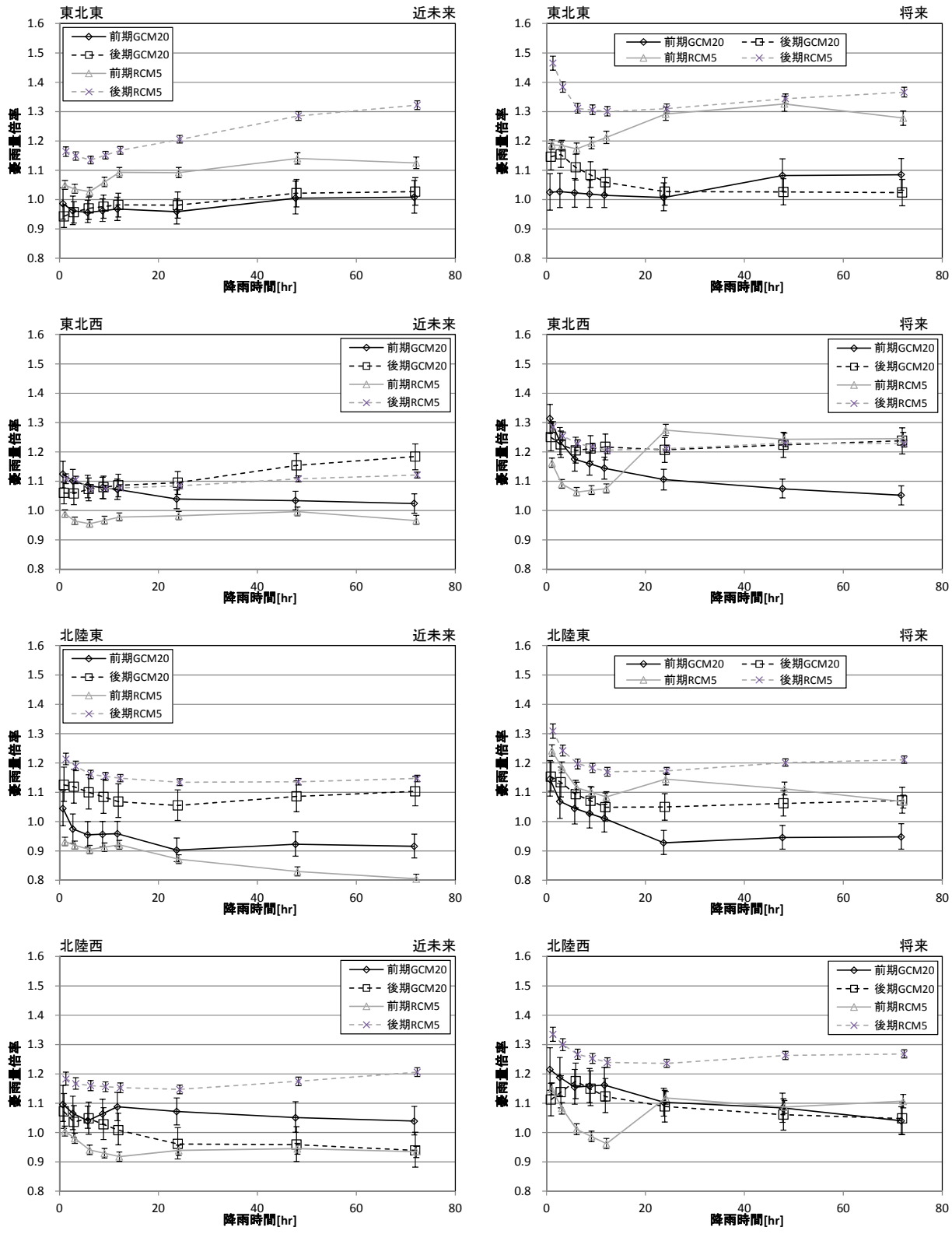


図-Ⅱ.2.1.2.8(2)　16 地域別降雨時間と豪雨量倍率の関係(2)

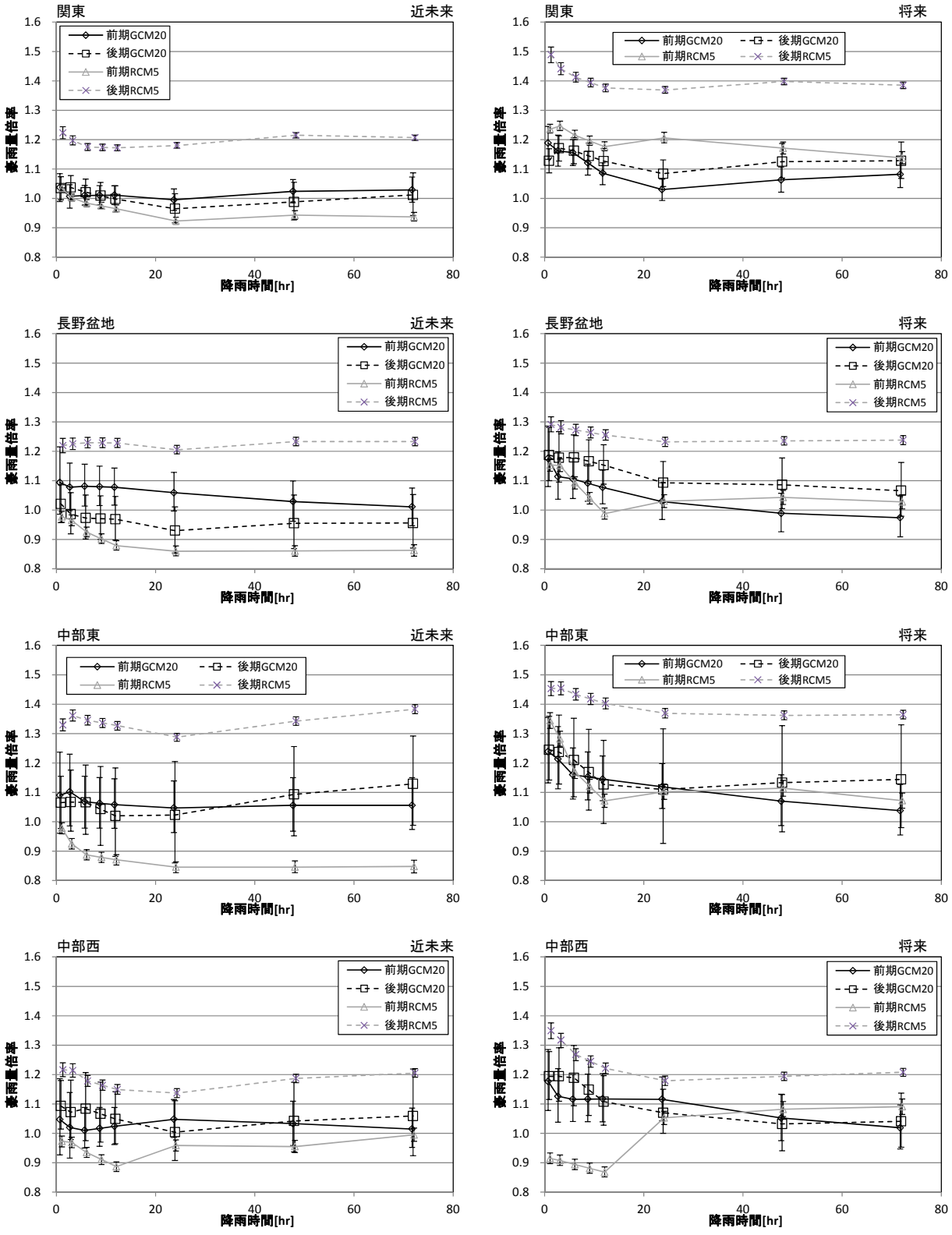


図-Ⅱ.2.1.2.8(3)　16 地域別降雨時間と豪雨量倍率の関係(3)

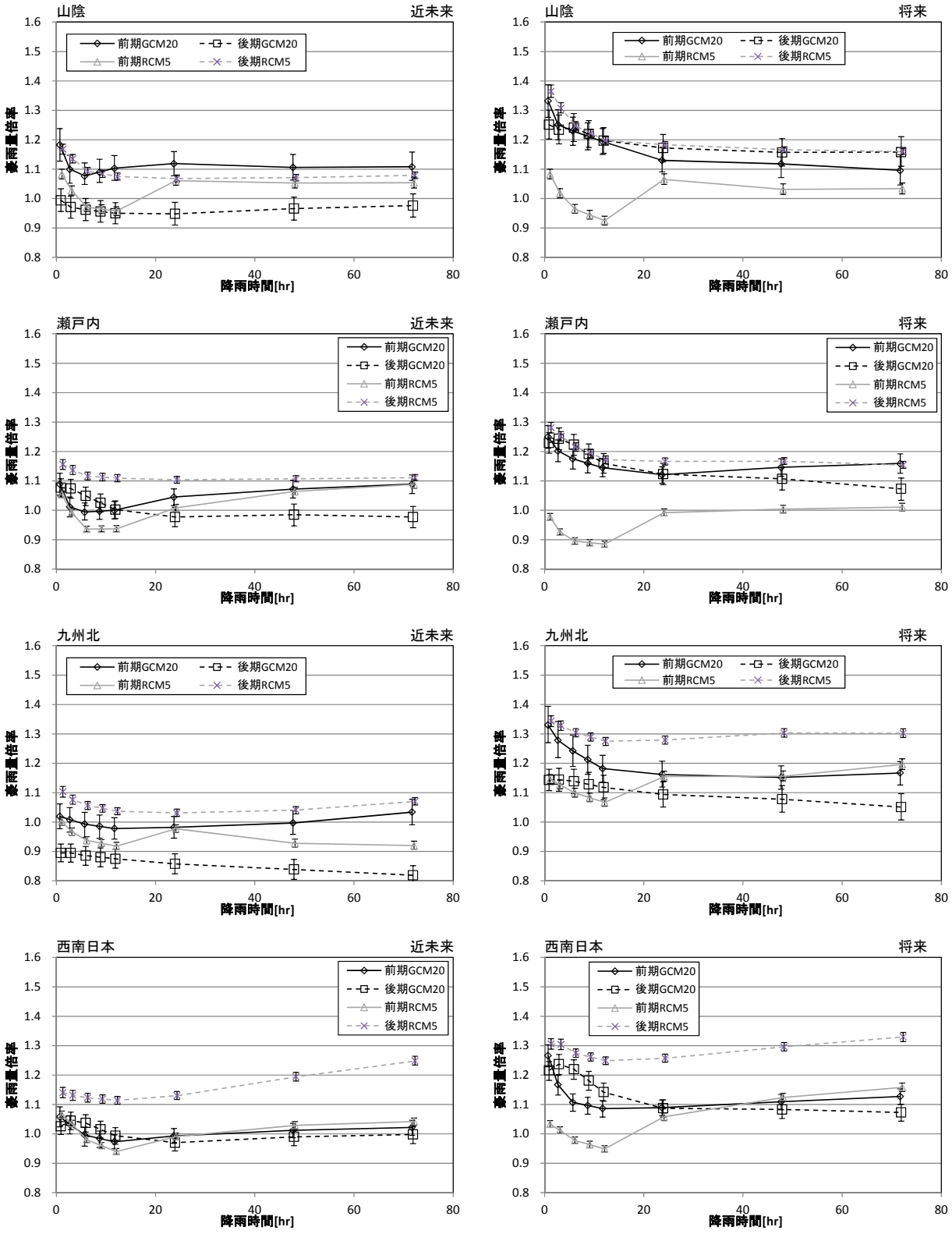


図-Ⅱ.2.1.2.8(4)　16 地域別降雨時間と豪雨量倍率の関係(4)

2.1.3　翻訳結果に基づく流域特性の類型化と特徴

2.1.3.1　直轄 109 水系別の評価指標の算定結果

a)　豪雨量倍率

図Ⅱ.2.1.3.1、Ⅱ.2.1.3.2 に河川整備基本方針における計画降雨継続時間に対応した直轄 109 水系別の豪雨量倍率 α（4 気候モデル、上・中・下位、近未来・将来）を示す。近未来においては、後期 RCM5 の全流域は豪雨量倍率 α が 1 倍を上回り、現在よりも計画降雨量が増加する。しかし、他モデルでは豪雨量倍率 α が 1 倍を下回り、現在よりも降雨量が減少する流域が多く存在する。例えば、中部ではモデルによって 0.9 倍以下と 1.2-1.3 倍の流域が存在し、予測値がモデルによって大きく異なることがわかる。将来においては全モデルを通じて、概ね増加傾向であり、近未来と比較し、将来の方が増加する予測である。北海道、東北地方は全国と比較して、いずれのモデル・時点においても豪雨量倍率 α が大きい。豪雨量倍率 α は近未来・将来とも後期 RCM5 が他モデルよりも高い値を示している。

4 モデルの中位値は全く異なる分布であり、モデルにより予測降雨が大きく異なることを表している。各モデルの上・下位値は予測値の信頼幅を示しており、両 RCM5 では差が小さく、両 GCM20 では大きな差がある。これは気候予測モデルの空間分解能の差から標本数が 10 倍以上異なることに起因する。

b)　流量倍率

図-Ⅱ.2.1.3.3、Ⅱ.2.1.3.4 に流量倍率 β（4 気候モデル、上・中・下位、近未来・将来）を示す。高瀬川に関しては河川整備基本方針の小川原湖の高水位の変化倍率を示している。豪雨倍率 α の増減倍率に対して、増幅した形で流量倍率 β は変化する。例えば、豪雨量倍率 α が 1.1 倍であれば、流量倍率 β は 1.1 倍以上の値を示し、豪雨量倍率 α が 0.9 倍であれば流量倍率 β は 0.9 以下の値を取る。

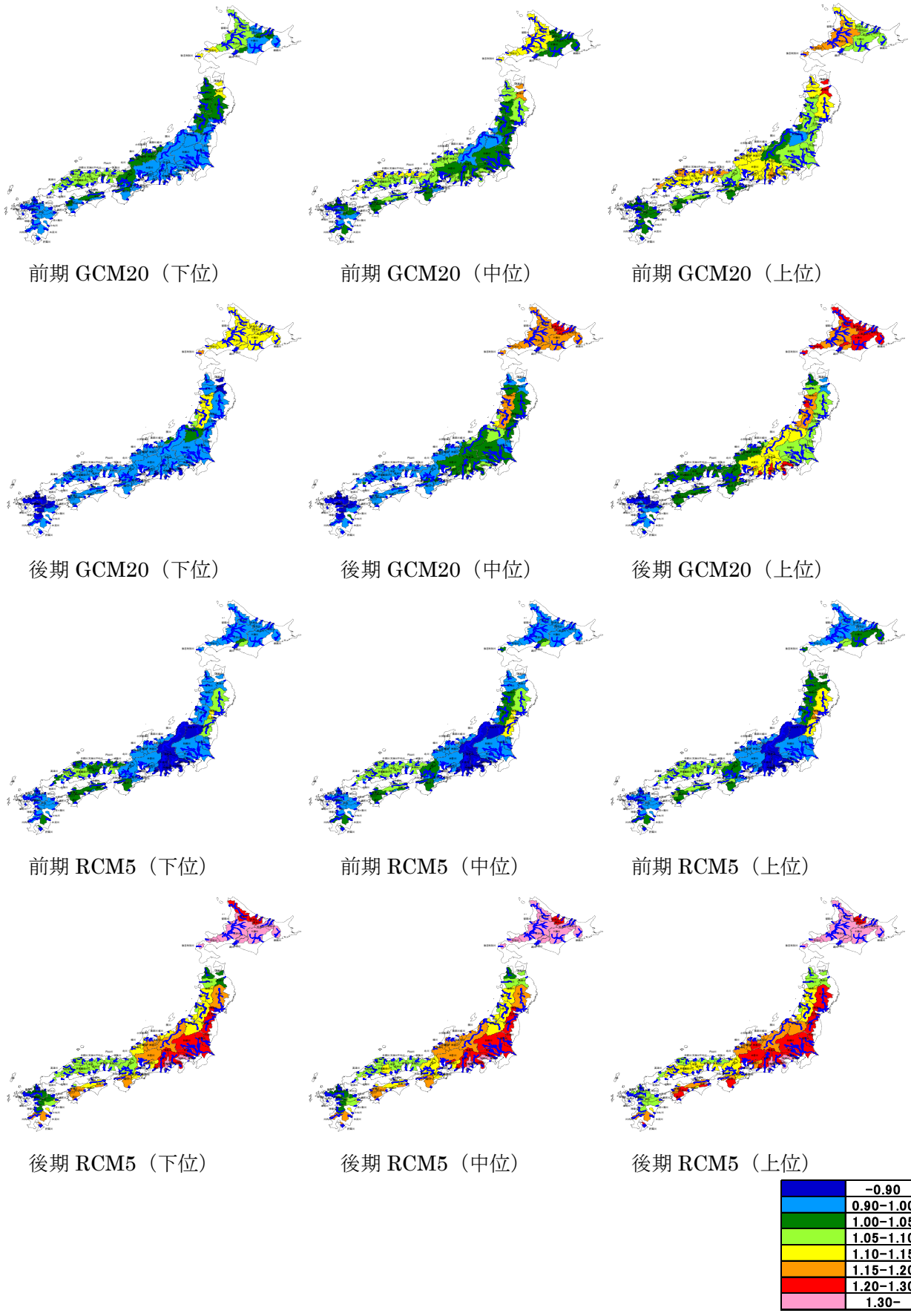
近未来では豪雨量倍率 α の分布同様、1 倍を下回る流域が多く、将来では多くの流域で 1 倍を上回る。特に豪雨量倍率 α が大きい北海道は、将来のすべてのモデルの結果において流量倍率 β が 1.2 倍以上と予測されている。

c)　河川整備労力倍率

図-Ⅱ.2.1.3.5、Ⅱ.2.1.3.6 に河川整備労力倍率 γ（4 気候モデル、上・中・下位、近未来・将来）を示す。河川整備労力倍率 γ はピーク流量 β よりも増幅して変化する。ただし、現況の河川整備の完成が近ければ、現在の河川整備必要量 W_P は小さくなるため、γ が大きな値だとしても将来における河川整備必要量の絶対値が必ずしも大きいとは限らない。逆に河川整備の完成度が低い流域では W_P が大きくなり、γ は小さくなり得る。そのことに関してはⅡ.2.1.3.3 b)に詳細に後述する。

d)　氾濫可能性倍率

図-Ⅱ.2.1.3.7、Ⅱ.2.1.3.8 に氾濫可能性倍率 ε（4 気候モデル、上・中・下位、近未来・将来）を示す。河川整備基本方針で確率別降雨が設定されていない流域においては超過確率を算出できないため、地図は空欄としている。豪雨量倍率 α に対する増幅の度合いについての考察はⅡ.2.1.3.3 c)に詳細に後述する。



図Ⅱ.2.1.3.1　豪雨量倍率α（近未来予測値）の日本全国分布

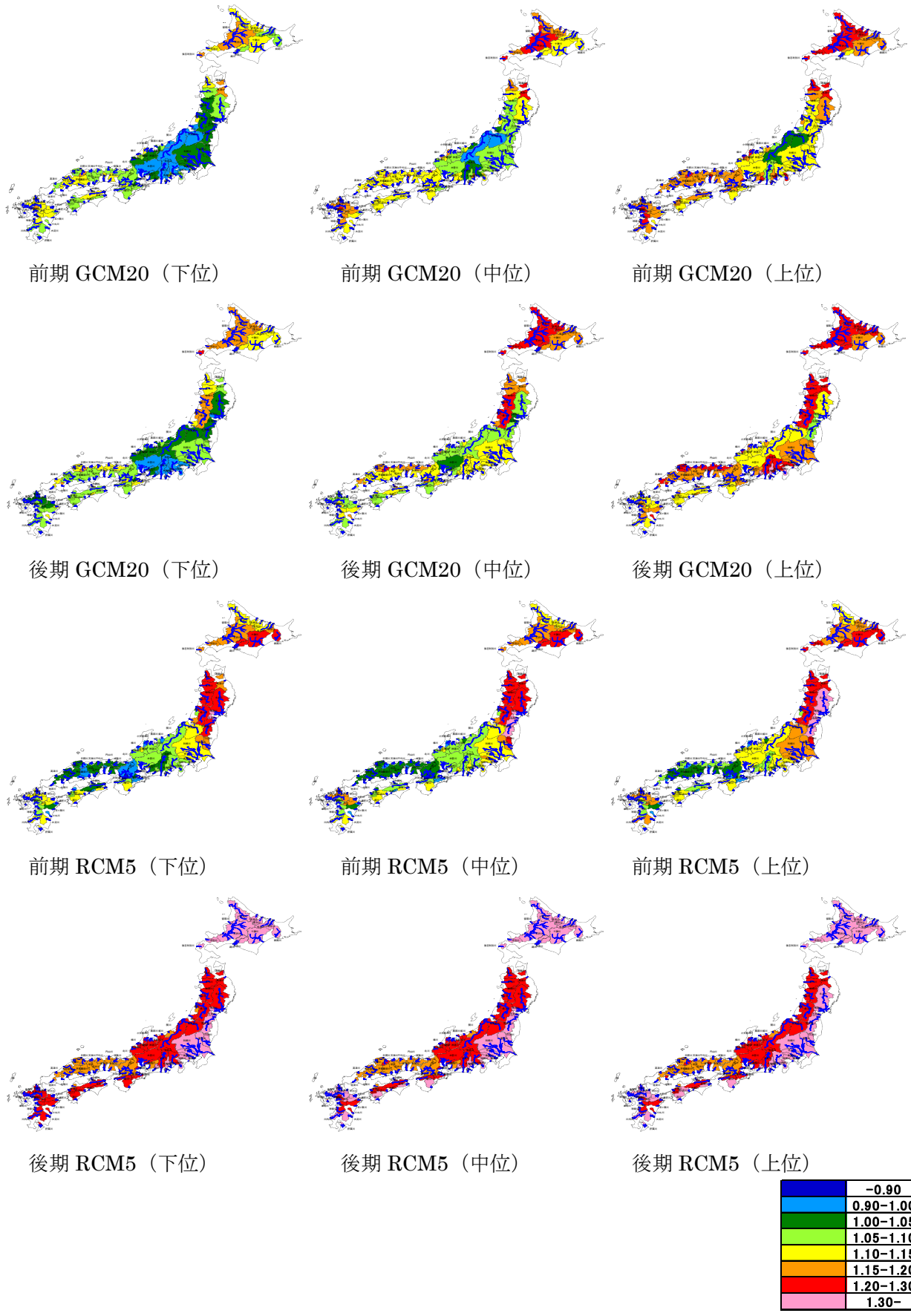
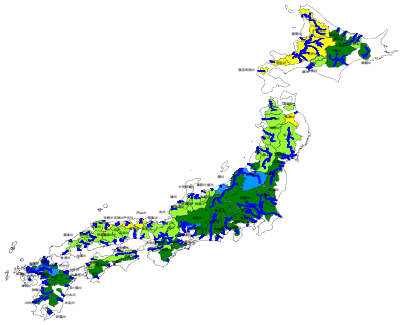
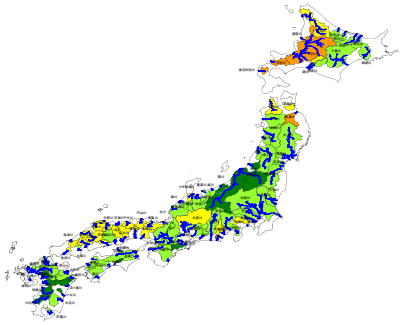


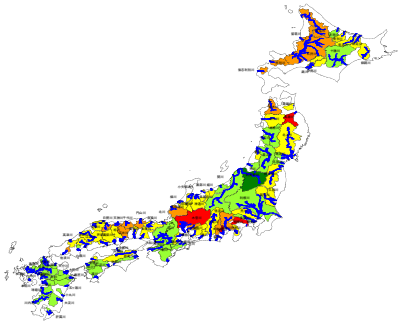
図-Ⅱ.2.1.3.2　豪雨量倍率 α（将来予測値）の日本全国分布



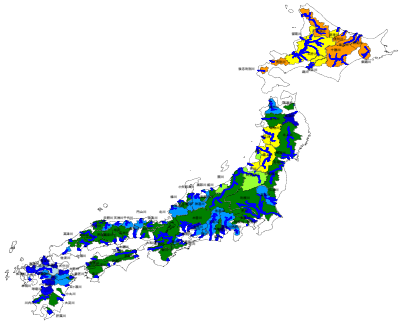
前期 GCM20（下位）



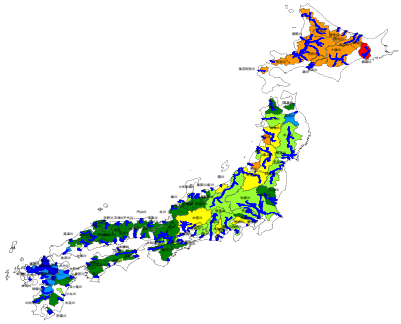
前期 GCM20（中位）



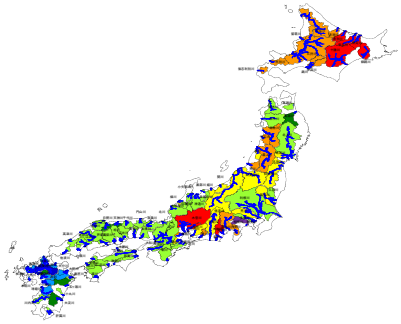
前期 GCM20（上位）



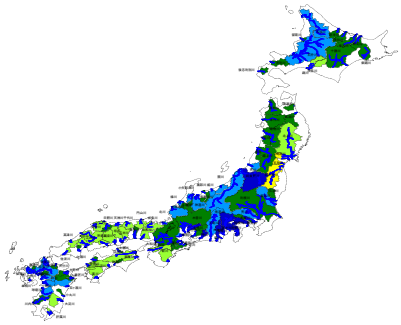
後期 GCM20（下位）



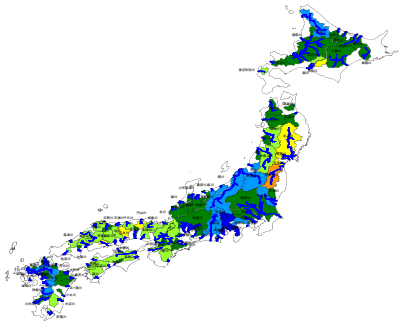
後期 GCM20（中位）



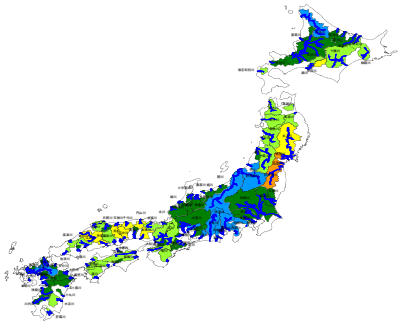
後期 GCM20（上位）



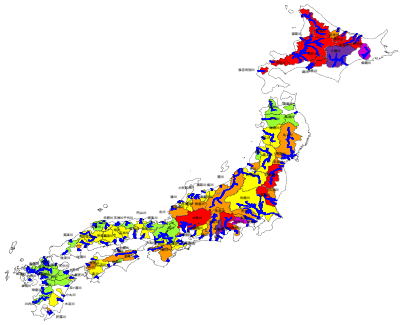
前期 RCM5（下位）



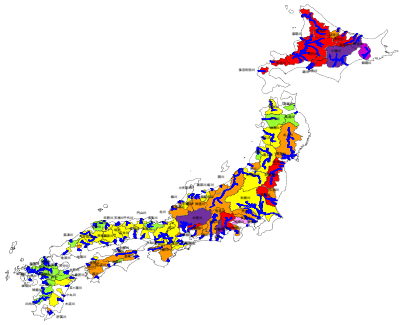
前期 RCM5（中位）



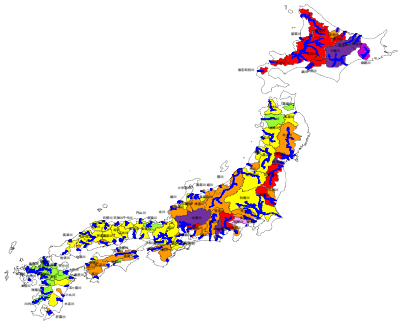
前期 RCM5（上位）



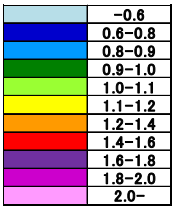
後期 RCM5（下位）



後期 RCM5（中位）

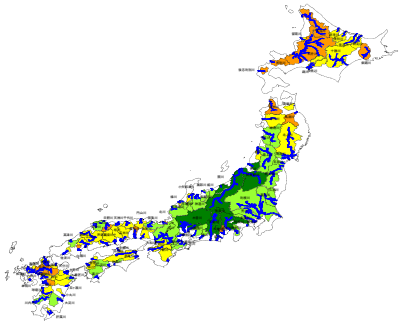


後期 RCM5（上位）

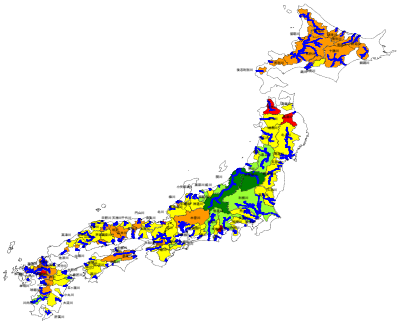


※高瀬川のみ水位の変化倍率を表示

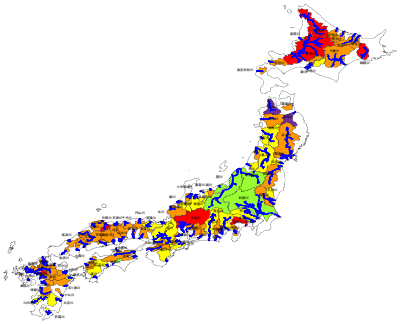
図-Ⅱ.2.1.3.3　流量倍率β（近未来予測値）の日本全国分布



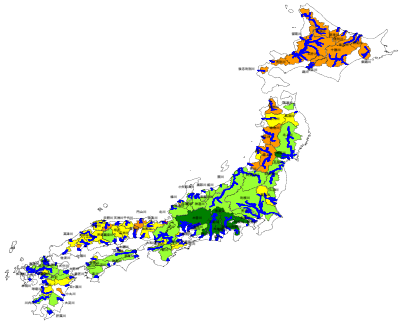
前期 GCM20（下位）



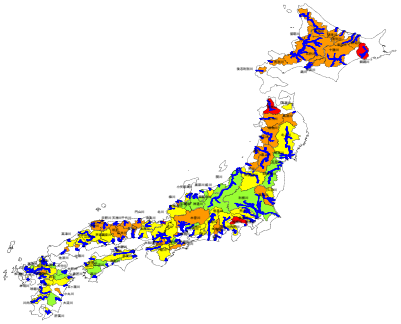
前期 GCM20（中位）



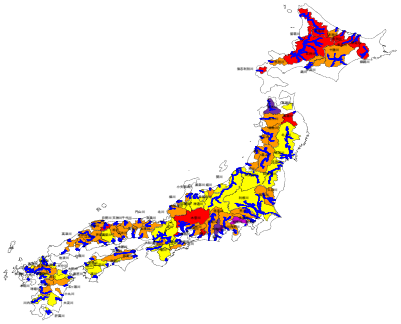
前期 GCM20（上位）



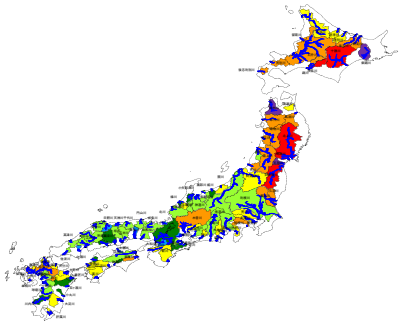
後期 GCM20（下位）



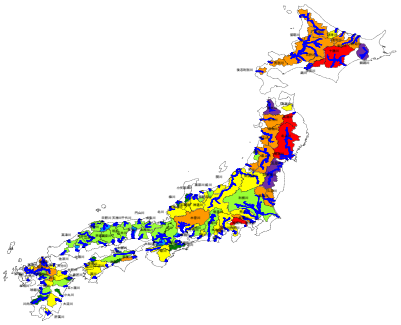
後期 GCM20（中位）



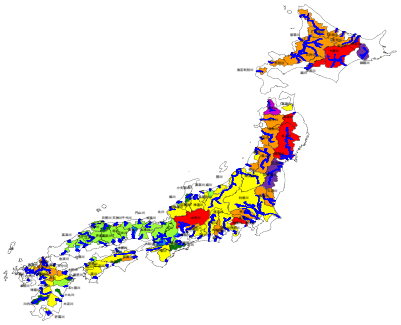
後期 GCM20（上位）



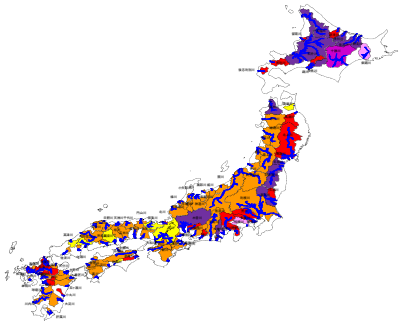
前期 RCM5（下位）



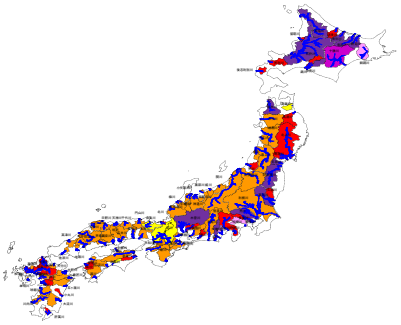
前期 RCM5（中位）



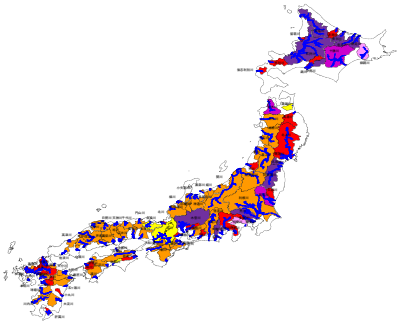
前期 RCM5（上位）



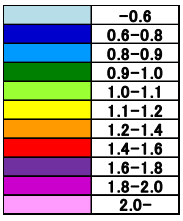
後期 RCM5（下位）



後期 RCM5（中位）

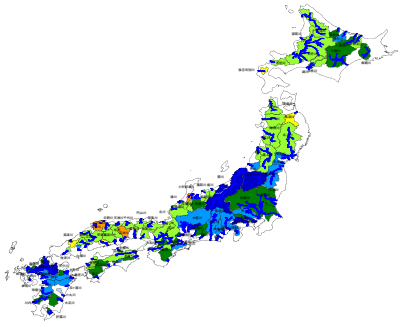


後期 RCM5（上位）

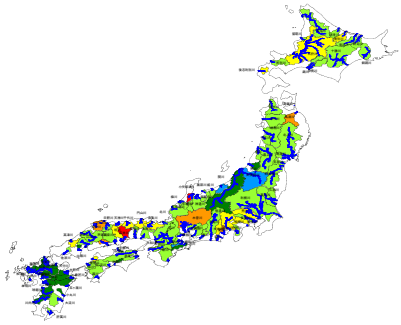


※高瀬川のみ水位の変化倍率を表示

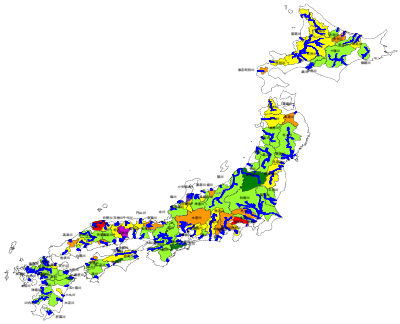
図-Ⅱ.2.1.3.4　流量倍率 β（将来予測値）の日本全国分布



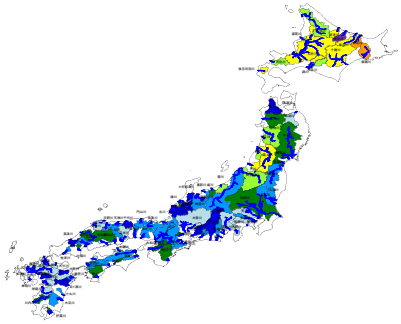
前期 GCM20（下位）



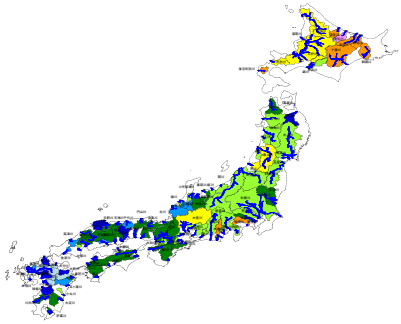
前期 GCM20（中位）



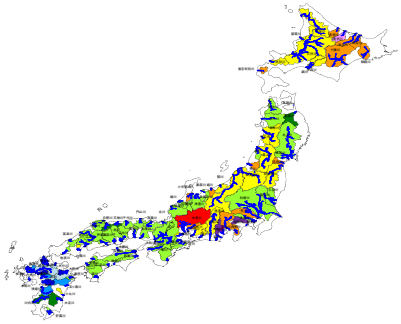
前期 GCM20（上位）



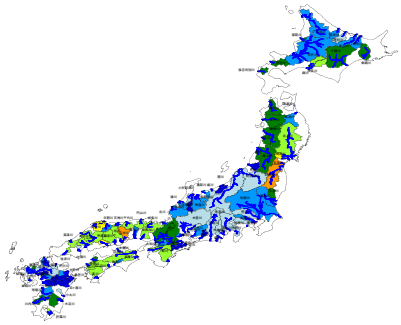
後期 GCM20（下位）



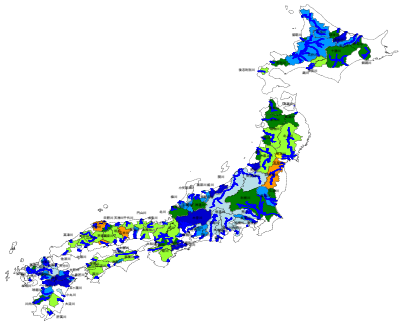
後期 GCM20（中位）



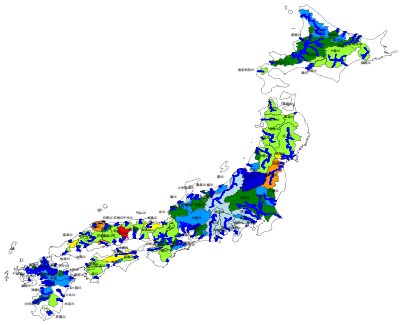
後期 GCM20（上位）



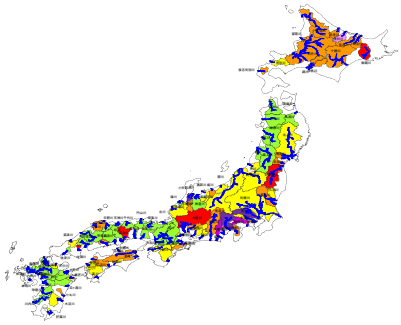
前期 RCM5（下位）



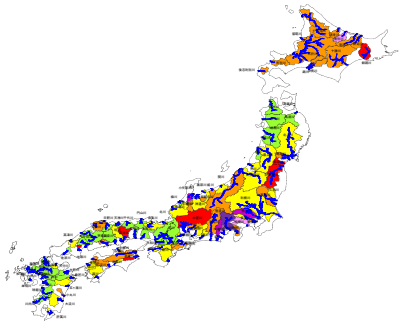
前期 RCM5（中位）



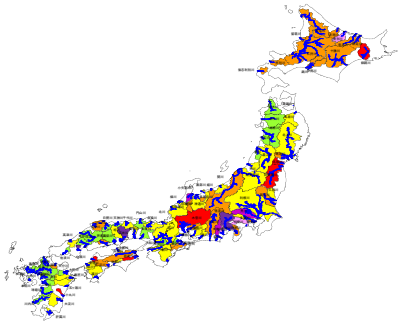
前期 RCM5（上位）



後期 RCM5（下位）



後期 RCM5（中位）



後期 RCM5（上位）

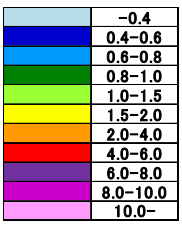
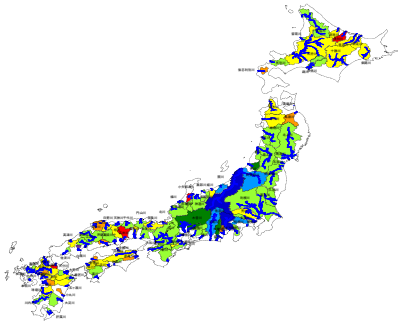
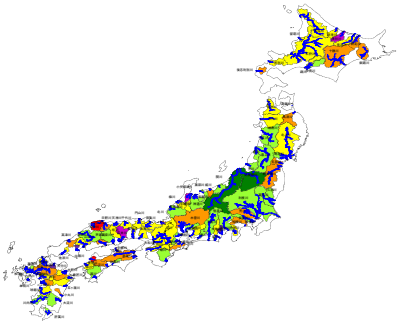


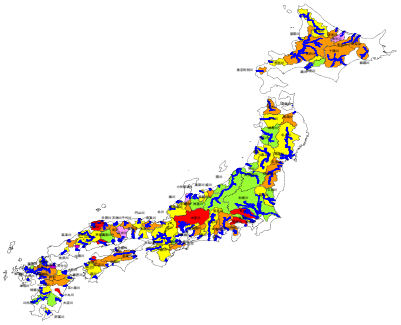
図-Ⅱ.2.1.3.5　河川整備労力倍率 γ（近未来予測値）の日本全国分布



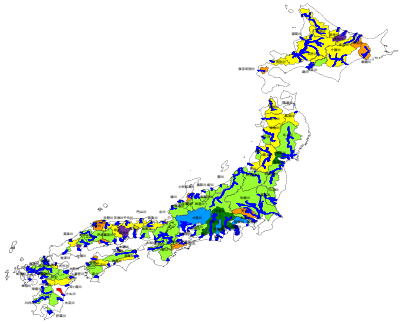
前期 GCM20（下位）



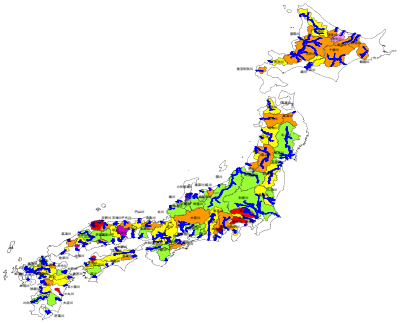
前期 GCM20（中位）



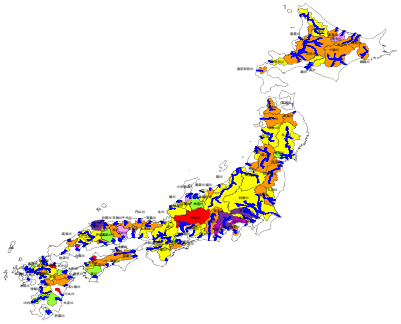
前期 GCM20（上位）



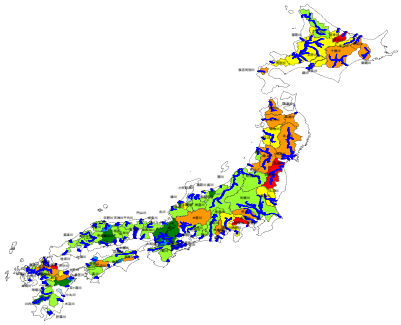
後期 GCM20（下位）



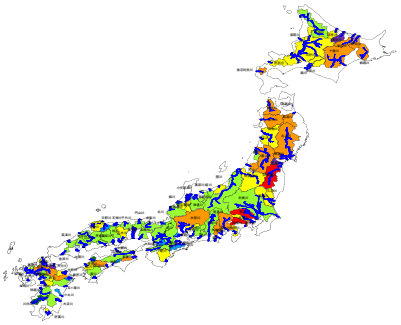
後期 GCM20（中位）



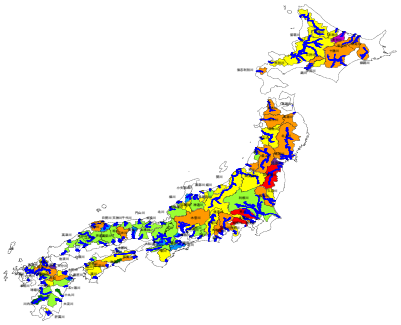
後期 GCM20（上位）



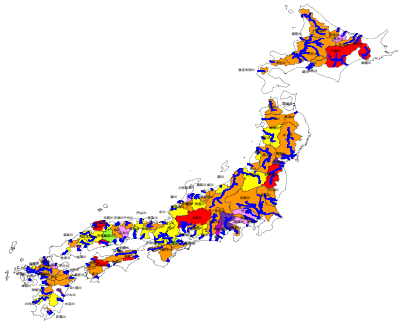
前期 RCM5（下位）



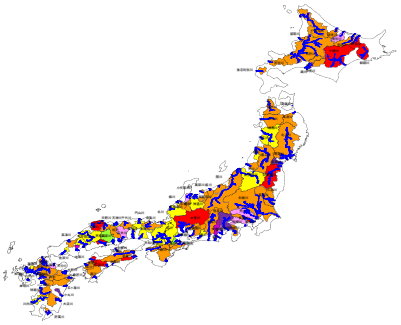
前期 RCM5（中位）



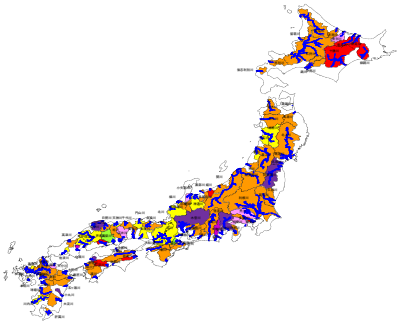
前期 RCM5（上位）



後期 RCM5（下位）



後期 RCM5（中位）



後期 RCM5（上位）

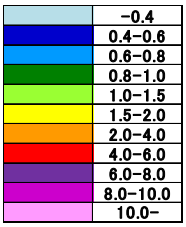
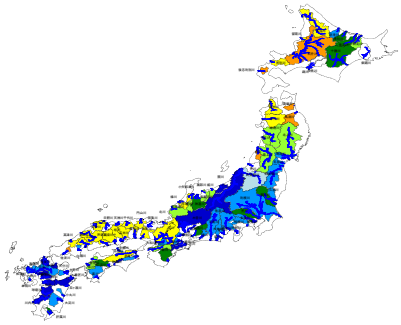
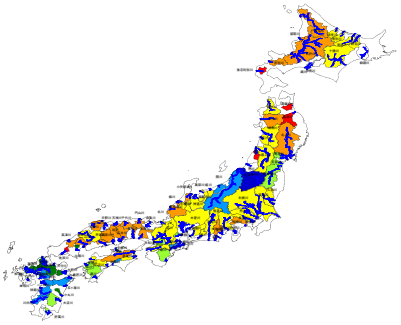


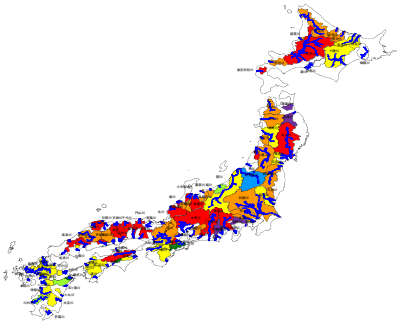
図-Ⅱ.2.1.3.6　河川整備労力倍率 γ（将来予測値）の日本全国分布



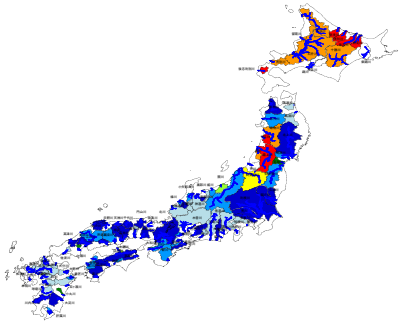
前期 GCM20（下位）



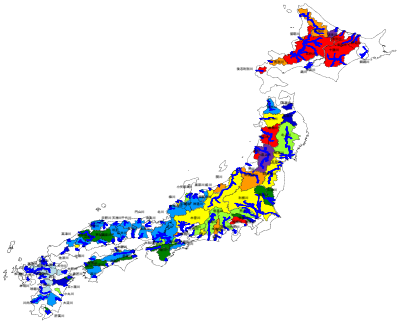
前期 GCM20（中位）



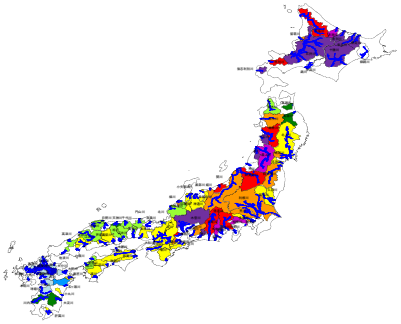
前期 GCM20（上位）



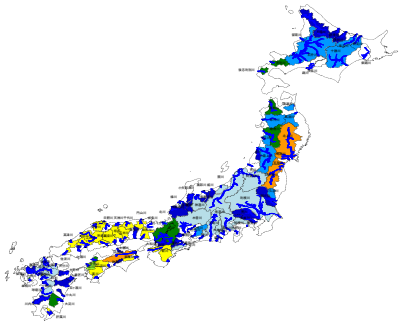
後期 GCM20（下位）



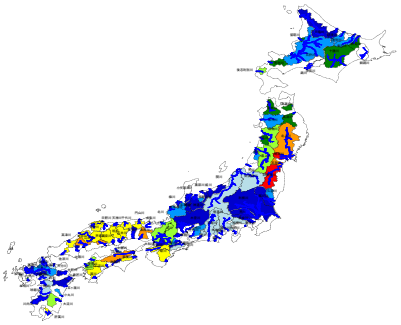
後期 GCM20（中位）



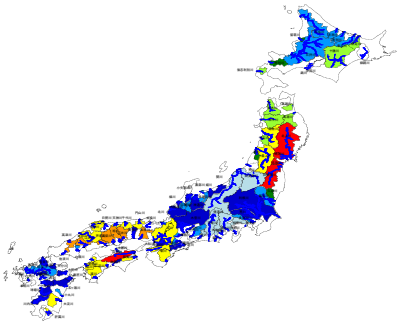
後期 GCM20（上位）



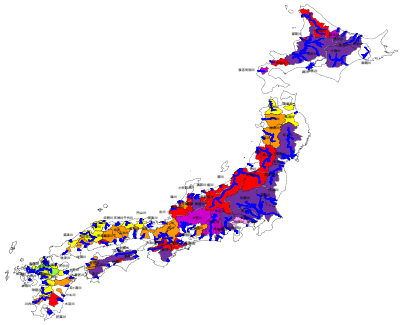
前期 RCM5（下位）



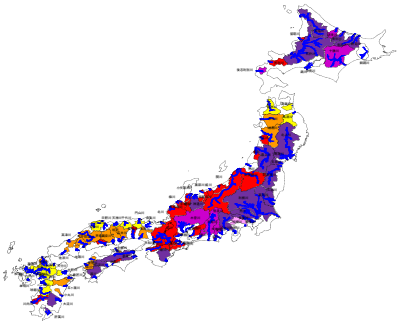
前期 RCM5（中位）



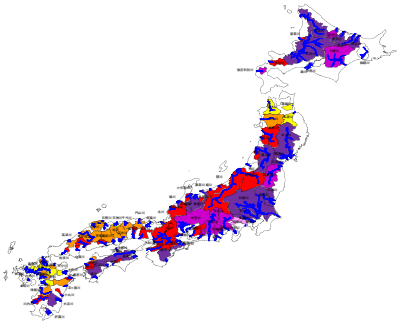
前期 RCM5（上位）



後期 RCM5（下位）



後期 RCM5（中位）



後期 RCM5（上位）

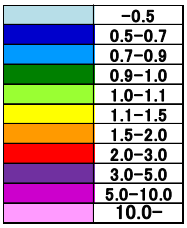
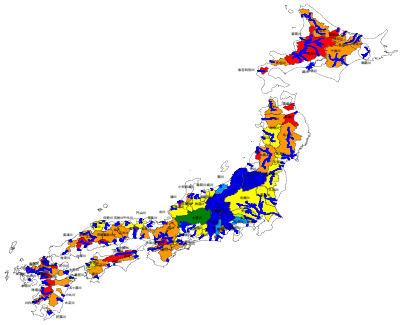
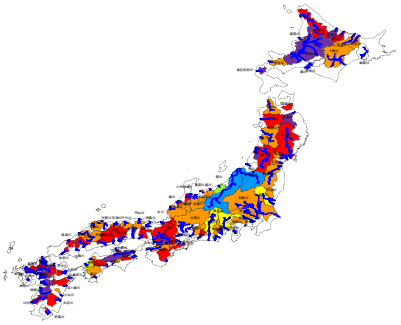


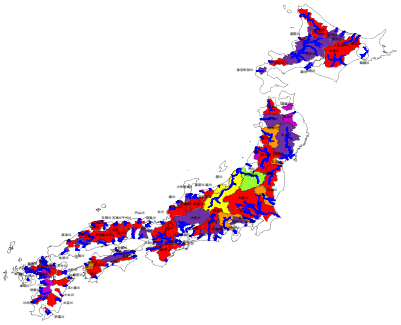
図-Ⅱ.2.1.3.7　氾濫可能性倍率 ε（近未来予測値）の日本全国分布



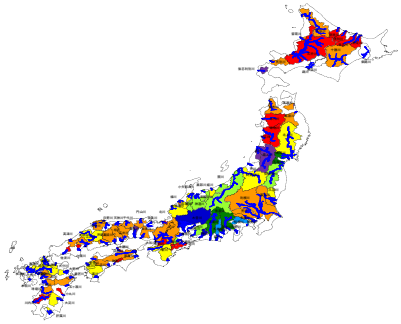
前期 GCM20（下位）



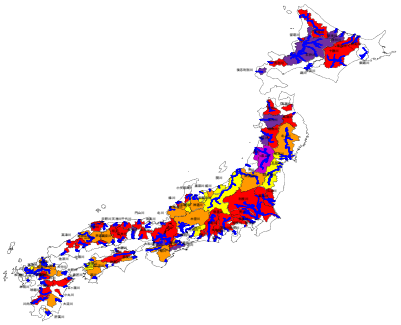
前期 GCM20（中位）



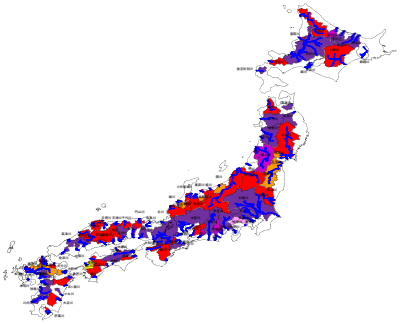
前期 GCM20（上位）



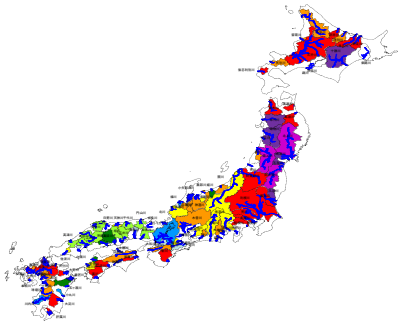
後期 GCM20（下位）



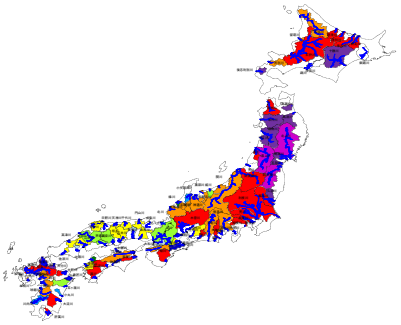
後期 GCM20（中位）



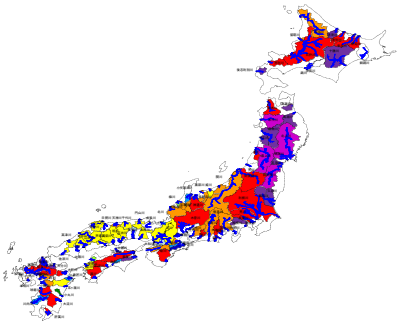
後期 GCM20（上位）



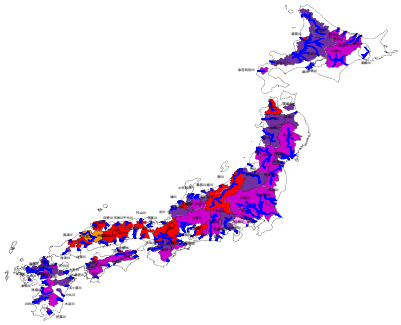
前期 RCM5（下位）



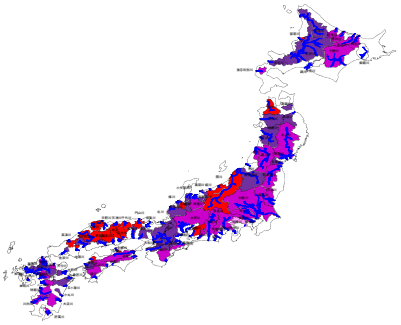
前期 RCM5（中位）



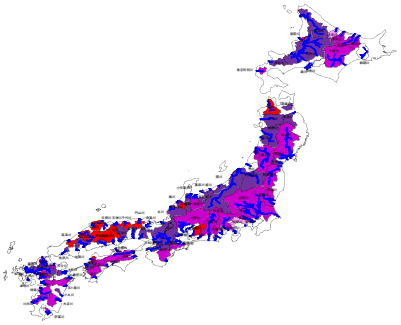
前期 RCM5（上位）



後期 RCM5（下位）



後期 RCM5（中位）



後期 RCM5（上位）

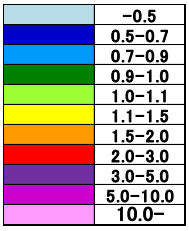


図-Ⅱ.2.1.3.8　氾濫可能性倍率 ε（将来予測値）の日本全国分布

2.1.3.2　評価指標の地域別・全国平均の分析

a)　16 地域別評価

109 水系を気候特性が似通った 16 地域に区分し直し、豪雨量倍率 α、流量倍率 β、河川整備労力倍率 γ、氾濫可能性倍率 ε の上・中・下位値それぞれを単純平均したものを図-Ⅱ.2.1.3.9・Ⅱ.2.1.3.10 に示す．地域分割番号は図-Ⅱ.2.1.2.7 に対応している。

両 RCM は気候予測モデルデータの統計に用いる標本数が両 GCM と比較して 10 倍以上であるため、どの指標においても、上位値と下位値の差は両 GCM よりも小さい。豪雨量倍率 α は全気候予測モデル、全地域を通して 0.8 から 1.4 と幅広い倍率を得た。β, ε は，大局的には α の地域分布に対応して値が変化する傾向が認められる．

b)　全国評価

大まかに現象の理解をするため、４指標 α、β、γ、ε の上・中・下位値それぞれの直轄 109 水系の中央値を算出した。図-Ⅱ.2.1.3.11、Ⅱ.2.1.3.12 に、近未来・将来別、4 気候モデル別、直轄 109 水系の中央値を示す。これらの図から、α の 1 からの増加量が増幅して他の指標へ伝播すること、したがって上・下位値の差は α においては僅かなものであっても β、γ、ε になるとその差が増幅して伝播することがわかる。図-Ⅱ.2.1.3.13～Ⅱ.2.1.3.16 には 4 指標の現在・近未来・将来の 3 時点の変化を示す。全体として、近未来よりも将来の指標値がそれぞれ大きくなる傾向があるが、気候モデル毎のバラツキもかなり大きい。

こうした伝播特性をより明確に把握するために「変化の伝播」つまり、各指標の増加率について着目した。この増加率を α-1、β-1、γ-1、ε-1 で表し、α-1 の増加に対する β-1、γ-1、ε-1 の増加をここでは伝播率と称し、直轄 109 水系別について近未来と将来における豪雨量の変化が流量、河川整備労力、氾濫可能性の伝播率をプロットしたものを図-Ⅱ.2.1.3.17、Ⅱ.2.1.3.18 に示す。伝播率は水系によってかなりばらつくものの、流量、河川整備労力、氾濫可能性の間には明確な差が存在することがわかる。それぞれの伝播率（(γ-1)/(α-1)は 20 以上の値を省いたもの、他伝播率は全水系の単純平均値）は、近未来において、(β-1)/(α-1)は 1.59 倍、(γ-1)/(α-1)は 6.02 倍、(ε-1)/(α-1)は 15.5 倍、将来においては(β-1)/(α-1)は 1.51 倍、(γ-1)/(α-1)は 6.11 倍、(ε-1)/(α-1)は 12.24 倍となった。近未来・将来ともに豪雨量の変化が流量変化 1.5 倍、河川整備労力変化 6 倍、氾濫可能性変化 12～15 倍程度に増幅して現れている。伝播率は α、β、γ、ε の値に因らず、流域の特性から決定するためである。これら原因の分析は 2.1.3.3 に詳述する。

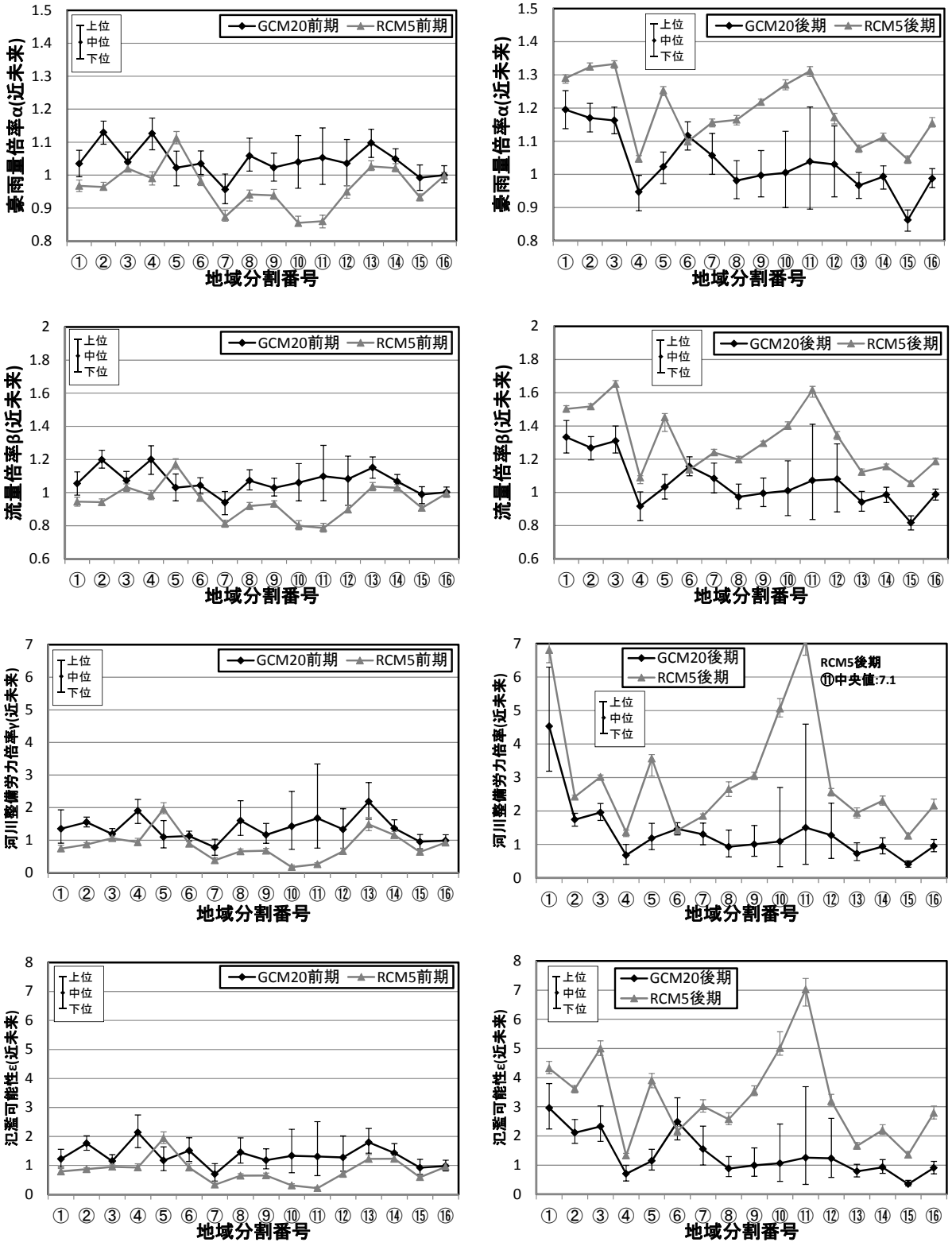


図-Ⅱ.2.1.3.9　地域分割平均の豪雨量・流量・河川整備労力・氾濫可能性倍率（近未来）

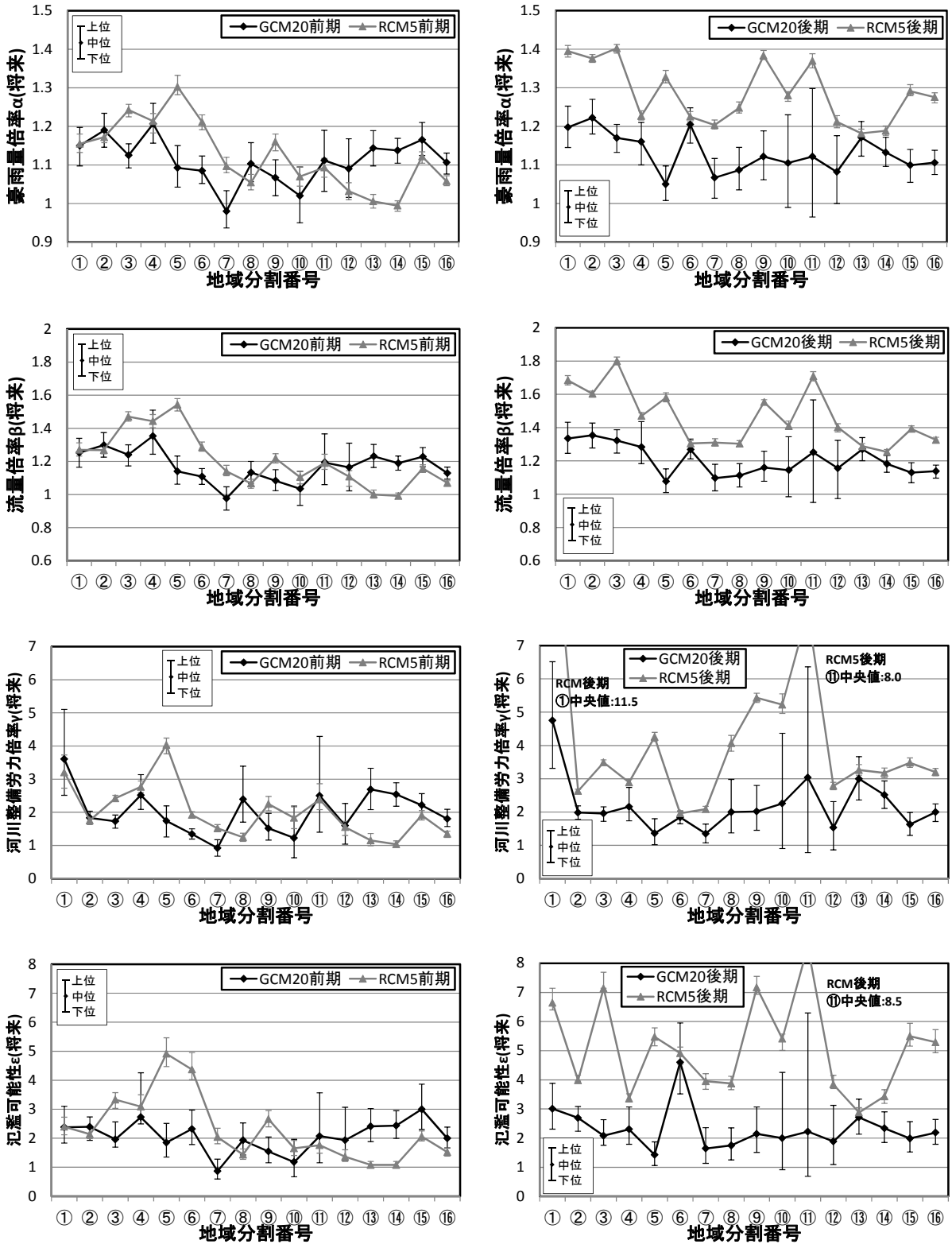
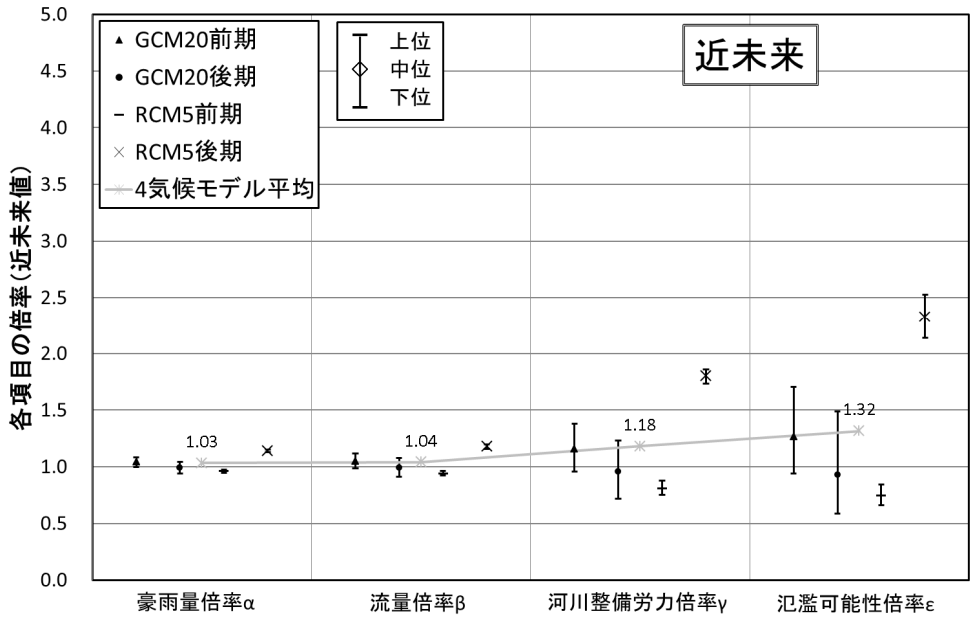
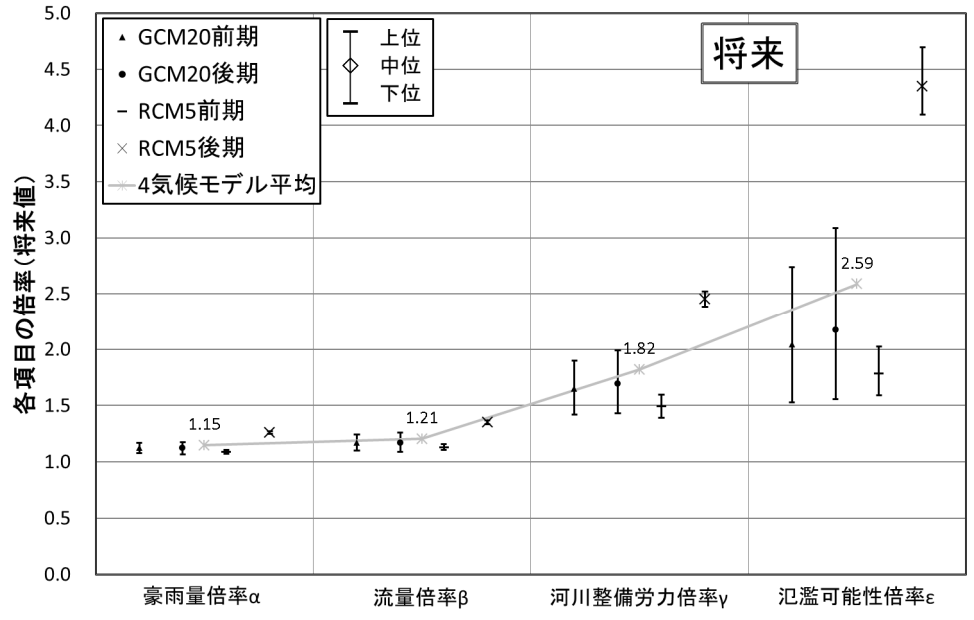


図-Ⅱ.2.1.3.10　地域分割平均の豪雨量・流量・河川整備労力・氾濫可能性倍率（将来）



	豪雨量倍率α				流量倍率β				河川整備労力倍率γ				氾濫可能性倍率ε			
	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後
上限値	1.07	1.02	0.98	1.16	1.12	1.03	0.96	1.20	1.40	1.19	0.86	1.87	1.61	1.20	0.83	2.56
中央値	1.04	0.99	0.96	1.14	1.05	0.99	0.94	1.18	1.16	0.96	0.81	1.80	1.27	0.93	0.75	2.33
下限値	0.99	0.94	0.94	1.13	0.98	0.92	0.93	1.16	0.94	0.70	0.75	1.72	0.91	0.64	0.66	2.17

図-Ⅱ.2.1.3.11　4モデルの豪雨量・流量・河川整備労力・氾濫可能性倍率の比較（全国1級水系の中央値：近未来）



	豪雨量倍率α				流量倍率β				河川整備労力倍率γ				氾濫可能性倍率ε			
	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後
上限値	1.17	1.17	1.11	1.28	1.24	1.25	1.15	1.37	1.88	2.02	1.61	2.52	2.63	2.86	2.00	4.55
中央値	1.12	1.12	1.09	1.26	1.17	1.17	1.13	1.35	1.65	1.70	1.50	2.45	2.04	2.17	1.79	4.35
下限値	1.08	1.08	1.07	1.25	1.12	1.09	1.10	1.33	1.41	1.40	1.39	2.38	1.69	1.67	1.59	4.00

図-Ⅱ.2.1.3.12　4モデルの豪雨量・流量・河川整備労力・氾濫可能性倍率の比較（全国1級水系の中央値：将来）

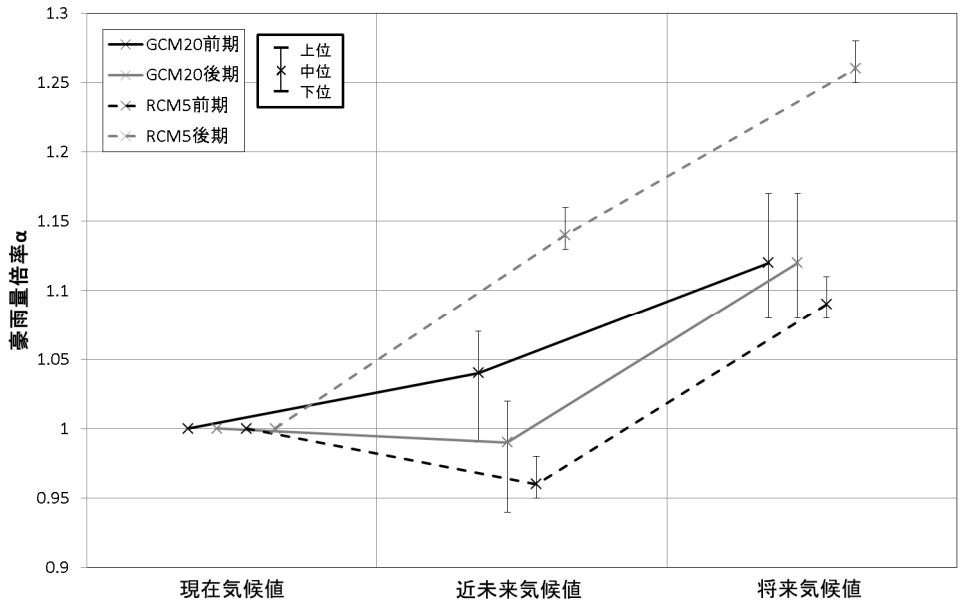


図-Ⅱ.2.1.3.13　4モデルの豪雨量倍率αの時点変化（全国1級水系の中央値）

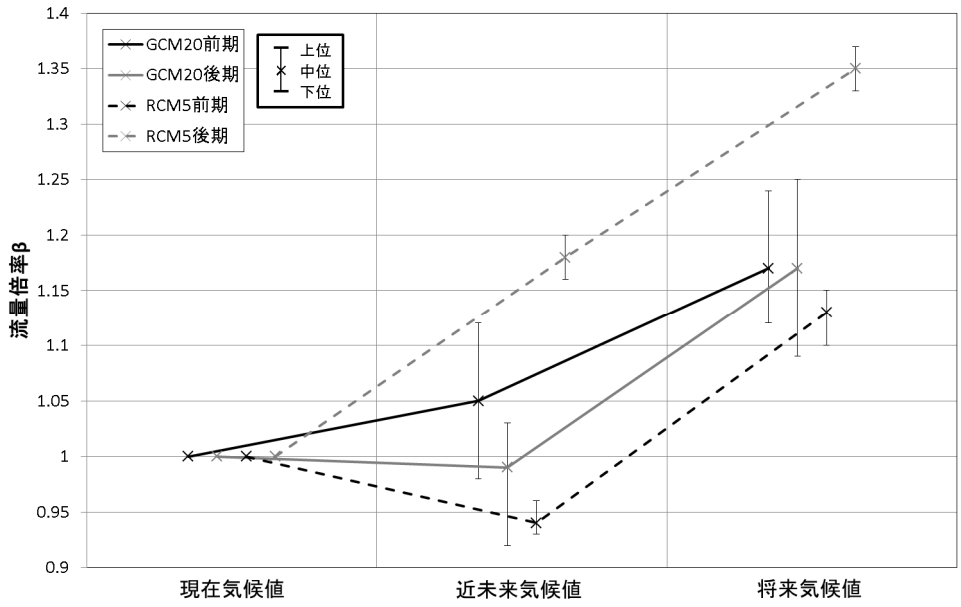


図-Ⅱ.2.1.3.14　4モデルの流量倍率βの時点変化（全国1級水系の中央値）

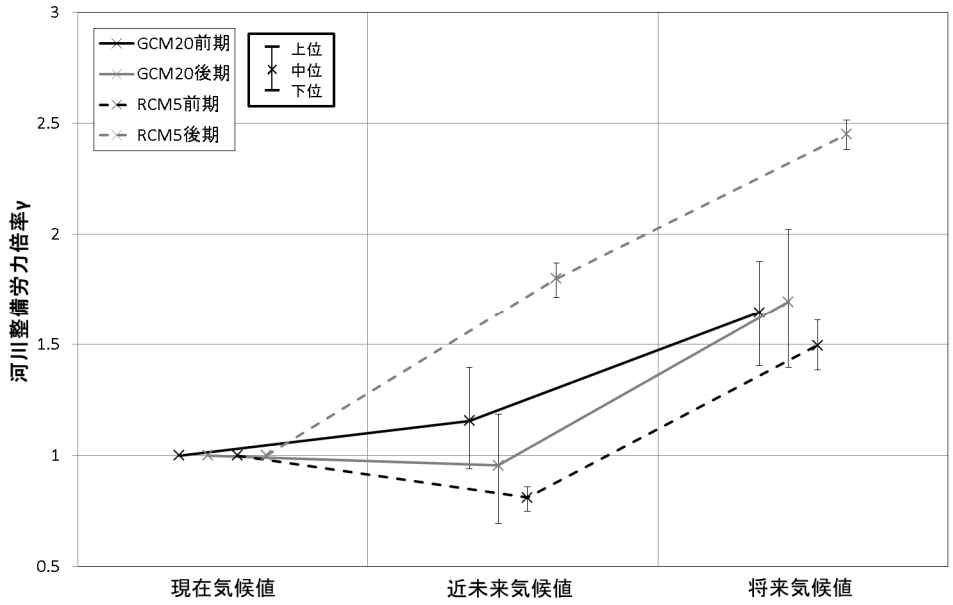


図-Ⅱ.2.1.3.15　4モデルの河川整備労力倍率γの時点変化（全国1級水系の中央値）

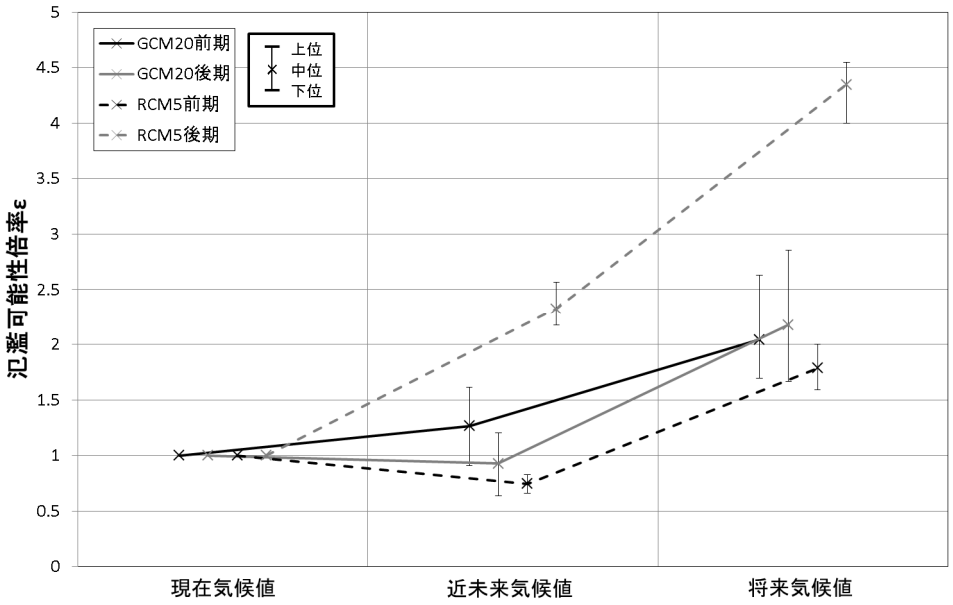


図-Ⅱ.2.1.3.16　4モデルの氾濫可能性倍率εの時点変化（全国1級水系の中央値）

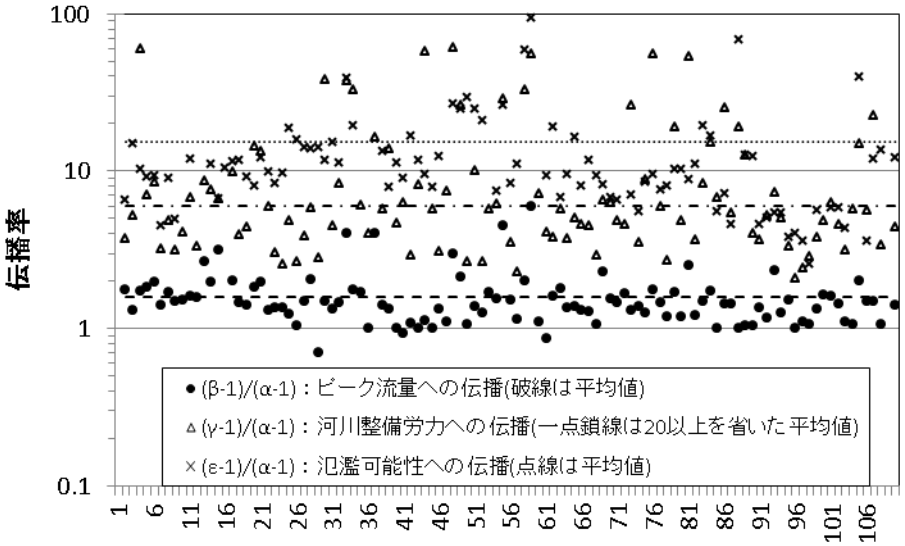


図-Ⅱ.2.1.3.17　豪雨量倍率変化が流量・河川整備労力・氾濫可能性の変化へ与える影響（近未来）
（各水系についての 4 気候モデル中位値の平均値から算出）

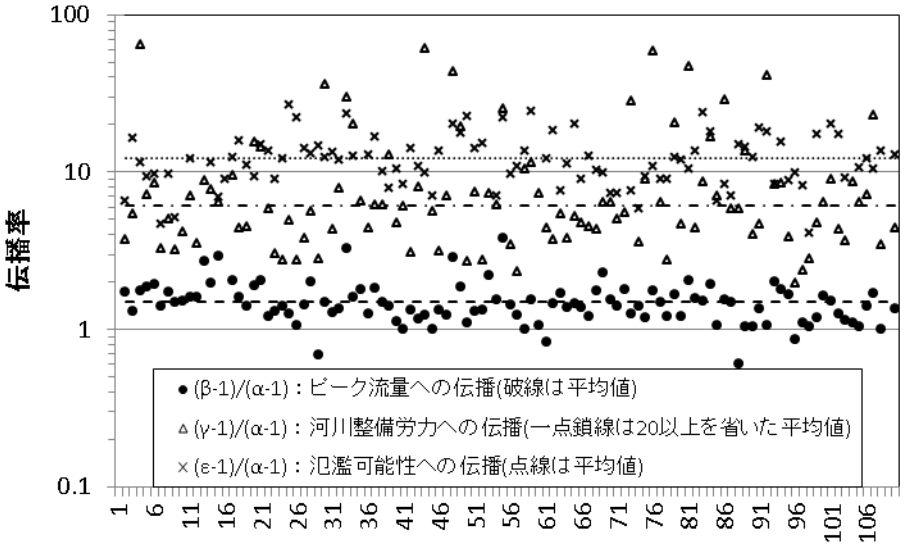


図-Ⅱ.2.1.3.18　豪雨量倍率変化が流量・河川整備労力・氾濫可能性の変化へ与える影響（将来）
（各水系についての 4 気候モデルの中位値の平均値から算出）

2.1.3.3　評価指標を用いた 109 水系の類型化

a)　評価指標の相互関係

図-Ⅱ.2.1.3.19～Ⅱ.2.1.3.23 は、5 つの水系を取り上げて、2.1.3.1 で算出された 109 水系の 4 気候予測モデル、近未来・将来、上・中・下位値、24 種類の計算結果すべてを $\alpha-\beta$、$\alpha-\gamma$、$\alpha-\varepsilon$、$\beta-\gamma$、$\beta-\varepsilon$ に関する散布図としてまとめたものである。古くから降雨量と河川流量は線形関係（$\alpha-\beta$ の傾きが 1）にないと一般的にいわれており（例えば山田 2003)、本検討の豪雨量とピーク流量の関係も非線形な流出形態を示し、図-Ⅱ.2.1.3.19 のように $\alpha-\beta$ の関係として整理すると、α の増大に対する β 増加の傾きが 1 以上となる水系がほとんどである。ここで示した $\alpha-\beta$ 関係は概ね直線上に乗るのに対し、図-Ⅱ.2.1.3.20～Ⅱ.2.1.3.23 の $\alpha-\gamma$、$\alpha-\varepsilon$、$\beta-\gamma$、$\beta-\varepsilon$ の関係の中には指数関数的曲線に乗るものが混ざっている。

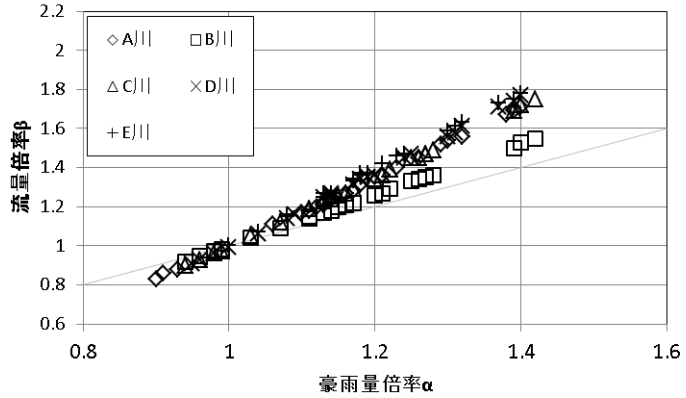


図-Ⅱ.2.1.3.19　豪雨量倍率 α と流量倍率 β の関係（一例）

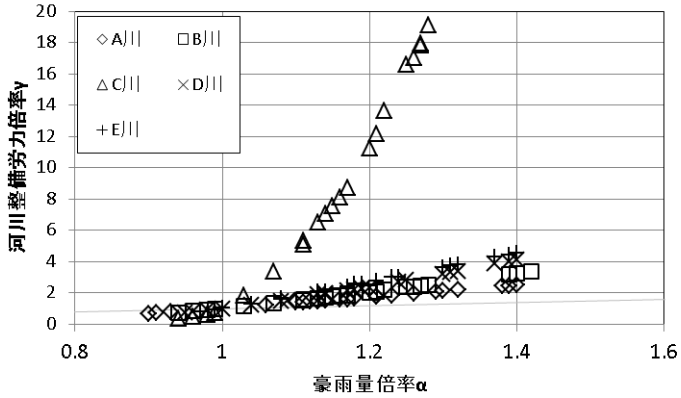


図-Ⅱ.2.1.3.20　豪雨量倍率 α と河川整備労力倍率 γ の関係（一例）

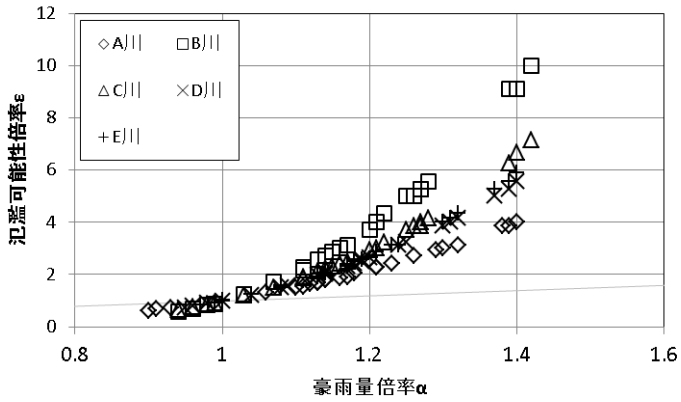


図-Ⅱ.2.1.3.21　豪雨量倍率αと氾濫可能性倍率εの関係（一例）

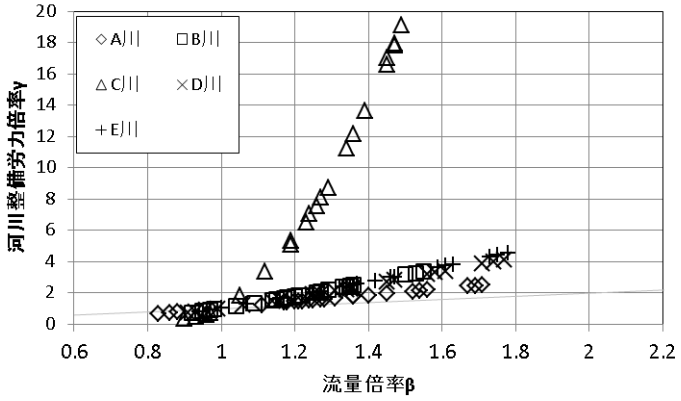


図-Ⅱ.2.1.3.22　流量倍率βと河川整備労力倍率γの関係（一例）

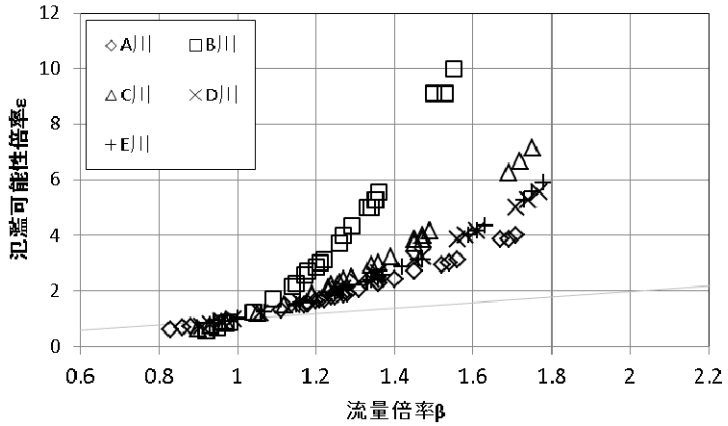


図-Ⅱ.2.1.3.23　流量倍率βと氾濫可能性倍率εの関係（一例）

b)　豪雨量倍率の変化に対する流量・河川整備労力倍率の応答

藤田（2010）、藤田ほか(2011）に倣い、気候変動に伴う降雨現象の変化が河川整備労力γに与える影響を本質的な意味合いが失われない程度に簡略化し、以下に説明をする。

長さ L、川幅 B、勾配 i の一様幅の広矩形断面を有する河道を想定する。ピーク流量 Q の流下時における水深 h が、次式に示すように等流水深として算定できると単純化する。

$$h=\left(\frac{nQ}{i^{0.5}B}\right)^{\frac{3}{5}}$$ 式- Ⅱ.2.1.3.1

ここで、n はマニングの粗度係数である。

γ の変化率を α で表現する。

$$\gamma-1=\frac{W_F}{W_P}-1=\frac{\Delta h_F BL}{\Delta h_P BL}-1=\frac{h_F-h_{HWL}}{h_P-h_{HWL}}-1=\frac{{Q_F}^{0.6}-{Q_{HWL}}^{0.6}}{{Q_P}^{0.6}-{Q_{HWL}}^{0.6}}-1$$

$$=\frac{\frac{{Q_F}^{0.6}}{{Q_P}^{0.6}}-\frac{{Q_{HWL}}^{0.6}}{{Q_P}^{0.6}}}{1-\frac{{Q_{HWL}}^{0.6}}{{Q_P}^{0.6}}}-1=\frac{\beta^{0.6}-\chi^{0.6}}{1-\chi^{0.6}}-1=\frac{\{p(\alpha-1)+1\}^{0.6}-1}{1-\chi^{0.6}}$$ 式- Ⅱ.2.1.3.2

ここで、χ は治水目標上の流下能力に対する現況流下能力の比である。

また、p は豪雨量変化からピーク流量変化への伝播率として、以下の式とする。

$$p=\frac{\beta-1}{\alpha-1}$$ 式- Ⅱ.2.1.3.3

ここで α、β は豪雨量倍率、流量倍率である。p は 4 モデル×2 時点×上・中・下位値の 24 種類の計算結果より水系別に算定できる。109 水系の α は約 1.08～1.25 で平均値は 1.16、p は約 0.6～3.3 で平均値は 1.49 となった。

式-Ⅱ.2.1.3.2 において、p と α にいくつかの代表値を与え、豪雨量変化から河川整備労力変化への伝播率$(\gamma-1)/(\alpha-1)$を χ との関係で表すと、図-Ⅱ.2.1.3.24 のようになる。α の違いによる差は小さく、河川整備労力変化に関する伝播率は治水整備率に対応するパラメータ χ に大きく依存することがわかる。この図から、前述の伝播率$(\gamma-1)/(\alpha-1)$の特性も概ね式-Ⅱ.2.1.3.2 により説明できそうであることがわかる。治水整備が進捗している状況では、治水目標に到達するための残りの整備労力が相対的に小さいので、気候変動による豪雨量増加は γ に増幅して現れる。逆に治水整備がほとんど進んでいない状況では、$\chi=0$ のとき、$(\gamma-1)/(\alpha-1)$がほぼ 1 となっていることからわかるように、豪雨量変化から河川整備労力変化への有意な増幅は見られなくなる。

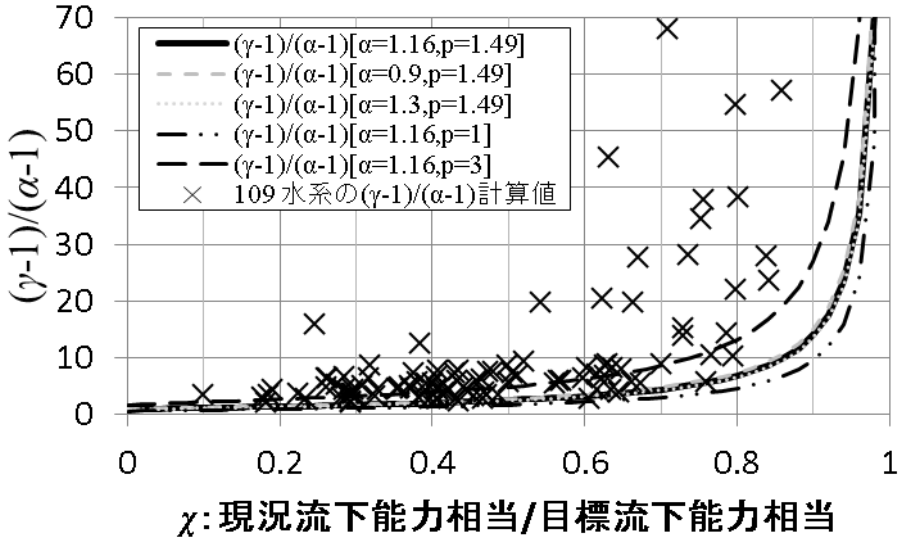


図-Ⅱ.2.1.3.24　目標・現況流下能力比と豪雨量・河川整備労力増加率の伝播率の関係

c)　豪雨量倍率の変化に対する氾濫可能性倍率の応答

豪雨量変化から氾濫可能性変化への伝播率が 10 のオーダーになることについては次のように理解できる。ある継続時間の降雨量 R と超過確率年 T との関係を、式型が単純なフェア式タイプにより次のように表現する。

$$R(T)=\theta\cdot T^{m} \qquad \text{式- Ⅱ.2.1.3.4}$$

ここで θ、m はフェア式のパラメータであり、気候変動が降雨に与える影響が θ のみに現れるとする。現在気候 Q_P、将来気候 Q_F の超過確率年 T が両方とも基本方針の超過確率年 T_B である時、$R_F(T_B)=\alpha R_P(T_B)$であるから、$\theta_F/\theta_P=\alpha$ となる。式-Ⅱ.2.1.3.4 を T の式に変換すると、

$$T=\left(\frac{R(T)}{\theta}\right)^{\frac{1}{m}} \qquad \text{式- Ⅱ.2.1.3.5}$$

であり、氾濫可能性 ε、現在気候 T_P、将来気候 T_F について以下の関係が得られる。

$$\varepsilon=\frac{\frac{1}{T_F}}{\frac{1}{T_P}}=\left(\frac{\theta_F}{\theta_P}\frac{R_P(T_P)}{R_F(T_F)}\right)^{\frac{1}{m}}=\alpha^{\frac{1}{m}}\left(\frac{R_P(T_P)}{R_F(T_F)}\right)^{\frac{1}{m}} \qquad \text{式- Ⅱ.2.1.3.6}$$

気候変動後も変動前と同じ降雨量になるために超過確率年をどれだけ減じる必要があるかは、上式で $R_P(T_P)/R_F(T_F)=1$ と置いた次式の関係から求めることができる（概念図は図-Ⅱ.2.1.2.6 を参照すること）。

$$\varepsilon=\alpha^{\frac{1}{m}} \qquad \text{式- Ⅱ.2.1.3.7}$$

日本の降雨特性に対応した m 値は一般的に 1 を大きく下回り、0.2 前後になることが多い（土木研究所 2001）。109 水系の確率降雨量から m を算出したところ、約 0.1～0.31 の範囲で平均は 0.19 であった。m=0.19、上述の α=1.16 を与えると、ε は 3.08 となり、図-Ⅱ.2.1.3.12 とおおよそ合致する。図-Ⅱ.2.1.3.25 に示す豪雨倍率と氾濫可能性倍率の関係より、式-Ⅱ.2.1.3.7 によって計算結果の傾

向を概ね表現できることがわかる。また図-Ⅱ.2.1.3.26 に示すフェア式定数の m と氾濫可能性変化の伝播率$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$の関係をみると指数関数的な減衰曲線を描いており、$m$ の値が氾濫可能性倍率に大きく寄与することがわかる。

以上のように、式-Ⅱ.2.1.3.4 に代表される降雨量～超過確率年関係において、超過確率年が降雨量変化に敏感に応答する特性をそもそも持つことが、豪雨量変化から氾濫可能性変化への伝播率が上記のように大きな値を持つ基本的な理由である。

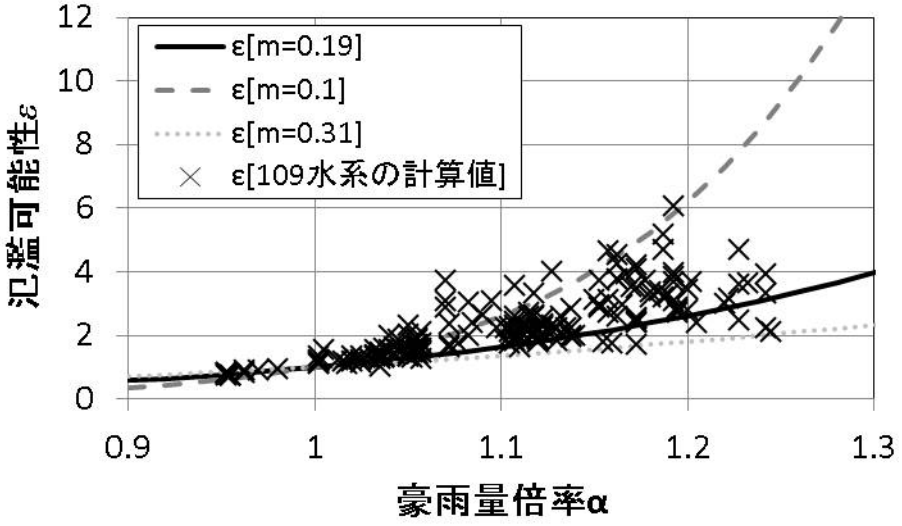


図-Ⅱ.2.1.3.25　豪雨量倍率 α・氾濫可能性倍率 ε の関係

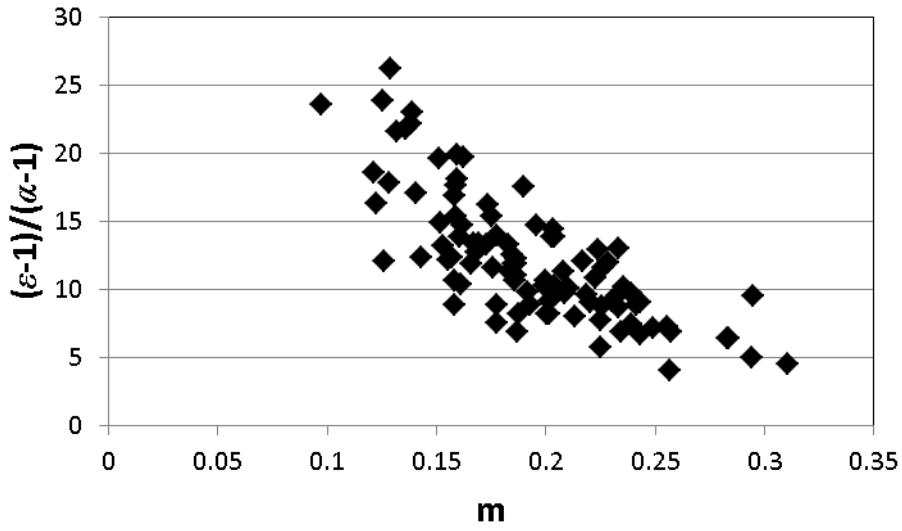


図-Ⅱ.2.1.3.26　フェア式定数 m と豪雨量・氾濫可能性変化の伝播率$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$の関係

d)　河川整備労力変化・氾濫可能性変化の伝播率に着目した類型化

図-Ⅱ.2.1.3.27 に、豪雨量倍率 α の変化が他指標へ伝播する概念図を示す。

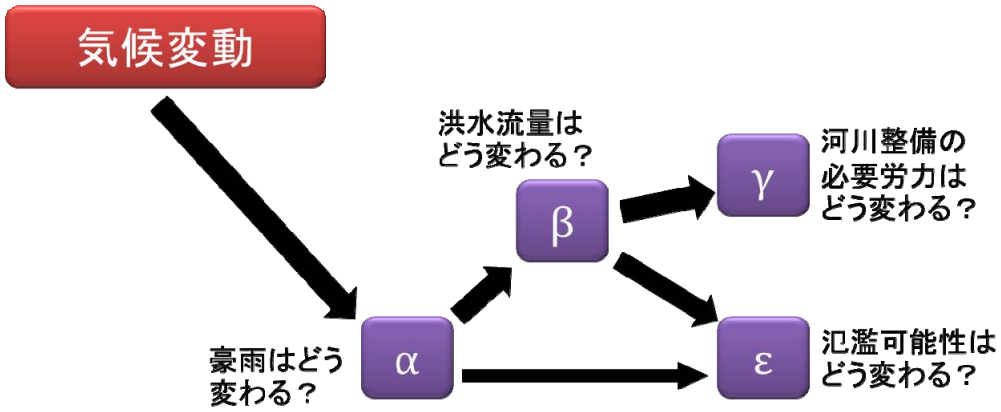


図-Ⅱ.2.1.3.27　気候変動による豪雨量の変化（増大）の治水方策に関する指標への伝播

α の変化による影響度を表すため、河川整備労力変化の伝播率$(\gamma-1)/(\alpha-1)$と氾濫可能性変化の伝播率$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$を算定し、その関係から 109 水系の類型化を試みた（高瀬川と川内川は計算の都合上分類から除した）。全水系の各々の伝播率を上位・下位 50%に分類した（表-Ⅱ.2.1.3.1）。確率規模別の降雨がない水系は ε が算定できないため、$(\gamma-1)/(\alpha-1)$のみの分類である。さらに式-Ⅱ.2.1.3.3 における χ と、式-Ⅱ.2.1.3.9 の m が全水系中で上・下位 50%のグループに分類し、全部で 20 分類とした。$(\gamma-1)/(\alpha-1)$が上位 50%に属している水系は、α の増加に対して、γ が鋭敏に上昇しやすく、$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$が上位 50%に属している水系は、$\alpha$ の増加に対して、ε が高くなりやすいことを示している。両方とも上位 50%である水系は α の増加により、氾濫可能性が高まりやすく、また氾濫を防ぐための河川整備労力も高まりやすい。$(\gamma-1)/(\alpha-1)$ が上位である時、χ が上位の水系数が多く、m もまた同様の傾向である。このことから概算的には χ と m により α の増加に対する γ および ε 増加の鋭敏性を推し量ることができる。χ と m は、各河川流域について概算値であれば比較的容易に得ることができるので、表-Ⅱ.2.1.3.1 で表される類型化手法は、α 値増加という気候変動影響に対する治水状況の「鋭敏性」「脆弱性」を把握することに活用できると期待される。

表-Ⅱ.2.1.3.1　$(\gamma-1)/(\alpha-1)$と$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$の関係（水系の数）

			$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$				
			上位50%		下位50%		確率規模別降雨データなく、不計算
			m：上位50%	m：下位50%	m：上位50%	m：下位50%	
$(\gamma-1)/(\alpha-1)$	上位50%	χ：上位50%	16	4	3	14	2
		χ：下位50%	2	0	1	6	5
	下位50%	χ：上位50%	8	1	2	4	0
		χ：下位50%	14	4	3	15	3

※高瀬川と川内川は計算の都合上分類から除いている。

2.1.3.4　豪雨量変化予測に要求される精度を適応策検討の側から考えるという視点について

議論を単純にするため、上述の伝播率の代表値に基づいて、洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫

可能性それぞれの変化率と豪雨量の変化率との関係を図化したのが図-Ⅱ.2.1.3.28 である。この図を縦軸から横軸の方向に読むことによって、洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性に与える気候変動影響を一定の精度をもって把握しようとする時に、豪雨量変化率に対しどの程度の精度を求めることになるかを考えることができる。たとえば、氾濫可能性および河川整備労力の変化率推定が±0.5 以内のズレでよしとするならば、それでも豪雨量変化率に求められる許容誤差はそれぞれ±0.04 と±0.1 程度以下となり、もしこれを±0.1 以内に抑えようとする場合、それぞれ±0.01 と±0.02 程度以下にしなければならないことになる。後者は、気候変動による豪雨量倍率αの誤差をそれぞれ±1%と±2%程度以下に、前者であっても、それぞれ±4%と±10%程度以下に抑えることに当たる。こうした要求水準は、図-Ⅱ.2.1.3.9～10 に示したα値の状況に照らし、気候変動予測が急速に発達してきている今日においてなお高いハードルと言える。

以上のことは、しかし、豪雨などの極端現象に関する気候変動予測の営為と成果の価値を減じることにはならない。豪雨生起確率の分析について、気候変動予測だけについて厳密に議論することもフェアとは言えない面がある。ここで重要なことは、気候変動による豪雨予測の精度が顕著に向上してきている一方、それを治水の適応策に直接関係する指標に翻訳すると、前述の伝播率がα→β→γ→εに向けて増幅するという特性が一因となって、未だ精度不十分な状況にあると理解することであろう。そしてこのことは、新しい高度なモデルによる気候変動予測結果が出るたびに一喜一憂するのではなく、予測精度の向上の根幹的トレンドを適切に把握し、信頼性のより高い情報とそうではない情報を適切に使い分けるというスタンスにつながる。さらには、気候変動予測の進展を待つだけでなく、適応策を検討するために具体的にどのような情報（精度を含む）が必要となるかを治水方策の実務に近い側から積極的に発信していくというスタンス、加えて、2.1.3.3 で扱ったような気候変動影響に対する応答特性から河川・流域特性を類型化し、当該河川・流域がどのような脆弱性を持っているかをあらかじめ把握した上で、気候変動予測を踏まえた適応策検討をできるようにすることの重要性にも行き着くと考えられる。

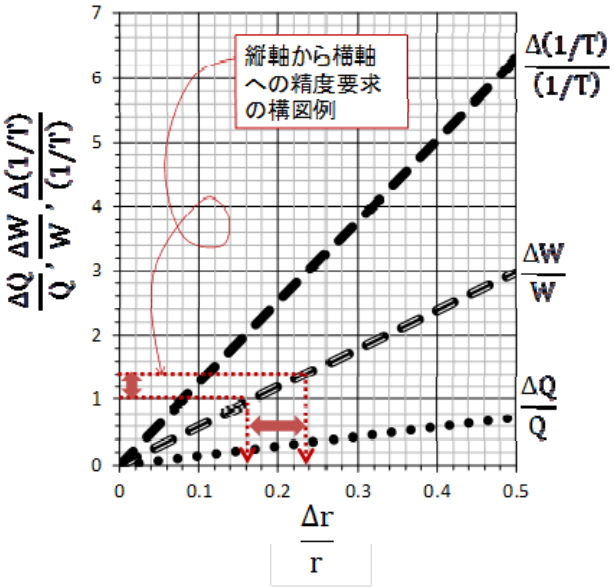


図-Ⅱ.2.1.3.28　洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性それぞれの変化率と豪雨量変化率との関係の代表例示

2.1.3.5　まとめと今後の課題

以上に示してきた内容を踏まえると、治水方策に与える気候変動の影響度が全体としては相当に大きくなる可能性が高いこと、同時に、その影響度の予測に相当に大きな幅がある、すなわち不確実性があることを認識した上で､気候変動に関わる適応策検討を行わなくてはならないと言える｡そして、このことには、p や m などにより表される自然的特性と、χ に代表される人間が積み重ねてきた営為に関わる特性がモザイク的に関係している。そのために、気候変動による豪雨量の変化以上に、河川水系ごとに影響の出方が違ってくる。このことは個々の水系の状況把握の重要性を改めて示すものである。

施策を立案・遂行する立場から見ると、予測の信頼性がさらに向上して α の推定幅が十分小さくなる状況、また、モデル更新の度に各地域の α 値が違ってくる状況から脱却することが好ましい。しかし一方、豪雨量の増加が治水方策に近い指標値になるほど鋭敏に増幅して表れるという特性と、地球温暖化に伴う極端かつ低頻度事象の変化予測の本質的困難さを踏まえると、この先の極端現象変化予測の急速なレベル向上を引き続き期待する一方で、それをただ待つだけではなく、並行して極端現象の変化予測に実務上無視し得ない有意な幅があることを前提とした種々の検討を行うことが大事になってくる。このために、予測の不確実性を前提にした施策の“取り組み方”に関する議論を本格化させることが求められる。そして、気候変動影響に対して、当該河川・流域がそもそもどのような応答特性を持っているか（鋭敏性、安定性、脆弱性など）を把握しておくというアプローチを並行して進めることが必要であろう。

2.1.4　高潮外力に対する気候変動の影響についての検討

2.1.4.1　はじめに

将来予測については、IPCC により地球温暖化効果ガスシナリオが想定され、これに基づき大気海洋結合モデルにより気温と海面の水温の変化が得られる。これを境界条件として、全球の気候予測モデルが降雨、台風、風を計算する。しかし、海岸の外力はこの結果からさらに計算を行う必要がある。不確定性を排除するために確率台風モデルを用いた橋本ら（2005）や河合ら（2009）によりいくつかの研究がなされている。しかし、高潮偏差の値と極値統計値に着目したものがほとんどで全体像として頻度階級の変化を示したものはなかった。また、我々がしばしば確率台風モデルの活用において問われる「本当にそれは実態を表現しているのか」という素朴でかつ本質的な疑問に答える必要がある。本研究では、確率密度分布に立ち返り変化の内容を明らかにする。

本研究を行うにあたり、安田ら（2009 または 2010）により確率台風モデルで作成された現在・将来各 10,000 年分の台風の提供を受けた（以下、確率台風）。安田ら（2009）は、気象研究所が行った超高解像度全球大気循環モデル（GCM20）で得られた現在気候と将来気候の予測計算結果から、台風を抽出した。これらの台風特性の地球温暖化による変化を解析し、既往台風から確率台風モデルにより発生させた 10,000 年分の台風に変化解析結果を適用させ将来気候における 10,000 年分の台風を作成したものである。

本研究では、これらの台風のうち三大湾（東京、伊勢、大阪）に来襲するものについて高潮偏差を推算した。高潮計算の対象とした各湾に来襲した台風の個数を表-Ⅱ.2.1.4.1 に示す。表中の緯度経度の範囲を中心気圧深度が 10hPa 以上で通過した台風を対象に高潮計算した。高潮偏差の値は、来襲した各台風がもたらした図-Ⅱ.2.1.4.1 中の各地点での台風毎の最大値を採用している。

表Ⅱ.2.1.4.1　各湾への来襲台風数の比較（高潮計算対象）

	気候分類	既往台風	現在気候確率台風	将来気候確率台風
	対象期間（再現年数）	1951~2009年（59年間）	仮想1979~2003年（10000年拡張）	仮想2075~2999年（10000年拡張）
対象範囲と計算台風数	大阪湾 E133°30'-136°30' N33°10'-35°00'	52	12343	9103
	伊勢湾 E134°50'-137°50' N33°20'-35°30'	58	13686	8997
	東京湾 E138°10'-141°00' N34°30'-35°00'	49	9230	7009

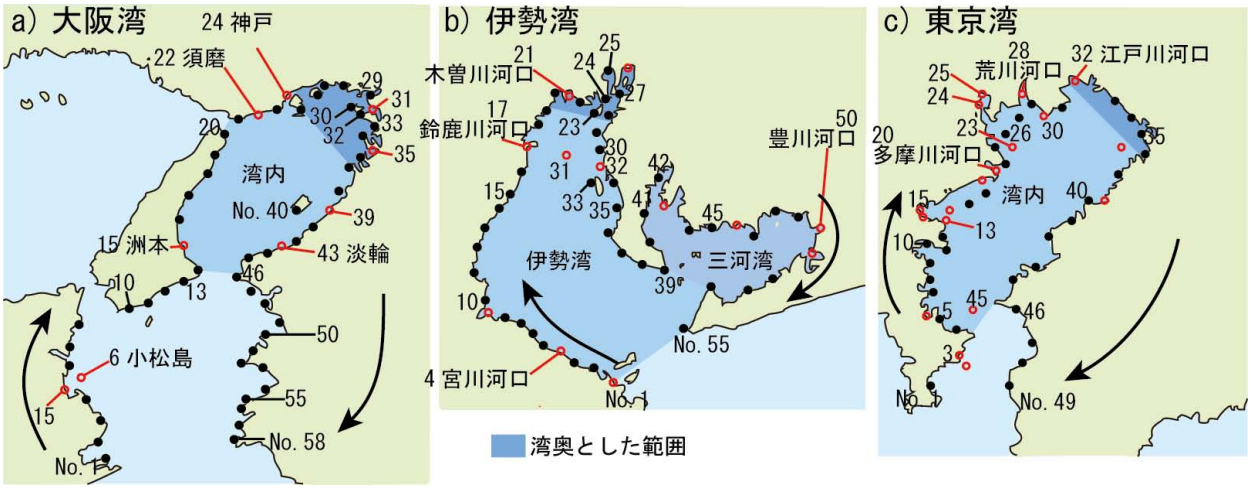


図-Ⅱ.2.1.4.1　解析に用いた沿岸の測定点

2.1.4.2　得られた高潮偏差データセットの妥当性の検討

本研究スキームで用いている気象研究所の気候予測モデルは、気象予報の現業に用いられている実績に裏打ちされた信頼性が相対的に高い物理モデルである。しかし、確率台風モデルは研究・調査では実績が増しているものの、事業等の計画に用いられるまでに至っていない。そのため、確率台風モデルで得られた高潮偏差が妥当であるかを判定する必要がある。これは図-Ⅱ.2.1.4.2 に示すように確率台風は現状の台風情報から大量の台風を仮想し高潮を推算することが出来るが、果たしてそれが既往高潮の拡張となっているかの確認が必要である。

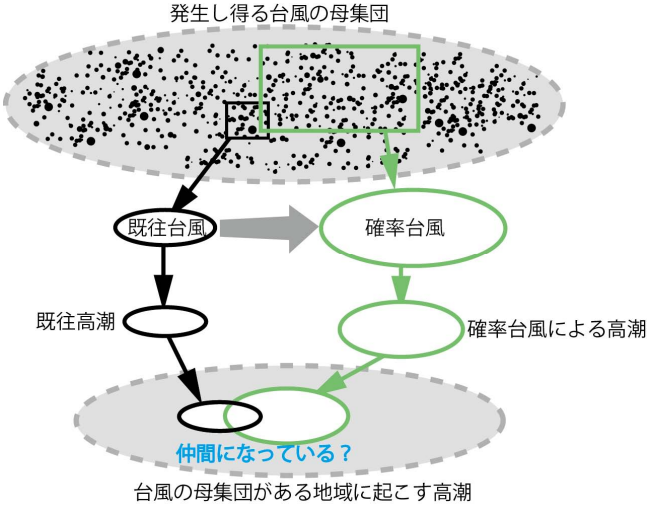


図-Ⅱ.2.1.4.2　確率台風モデルによる高潮推算結果の妥当性検討の必要性

そこで、既往台風で得られた高潮と確率台風現在気候で得られた高潮の同一性を調べることとした。統計における検定手法の多くは、有意差を示すために同一性を帰無仮説として棄却基準と比較するｐ値を算定するものである。ここでは確認したいことは同一性であり、厳密には逆の有意差を帰無仮説とする必要がある。そこで、既往台風で得られた高潮偏差と現在気候確率台風の高潮偏差が同じ母集団である可能性が棄却されなければ十分とした。言い換えると、得られた高潮偏差の結果が現実離れしていないことを示すこととした。なぜならば、確率台風モデルで得た高潮偏差のサンプル数が十分に多いとしても、既往台風による高潮偏差がそこから抽出した集団として選び出された訳ではない。また、確率台風によるものと既往台風によるものは真の母集団の一部を形成する別々の集団といえる。さらに、逆に確率台風モデルの作成から見ても、実現象を物理機構により再現するものではなくストーリー設定が存在することが否ず、得られる集団も一意に決まらない。

既往台風高潮偏差と現在確率台風確率偏差の間の同一性を、Brunner-Munzel 検定（Brunner et al.、2000）により検定した。計算は、統計用言語の R とそのパッケージを用いた（奥村 2011）。帰無仮説を「統計的に優位」とする一般的な閾値（p=0.05）（奥村 2008）で評価すると、図-Ⅱ.2.1.4.3 に示すようにほとんどの地点で 0.05 を上回る結果となった。そこで、p 値が大きいことから、検定は帰無仮説に対して行われるので、「有意差は認められず同一性が否定できない」となる。同一性の主張を補強するために、既往台風高潮偏差のデータセットのみ各地点の隣接両側データをその地点のデータとして追加した集団と現在気候確率台風（以下、現在台風）の高潮偏差を比較検定した。全ての点においてｐ値がほぼ 0 であり帰無仮説が棄却でき、両者に有意差があることが示される。高潮偏差の沿岸分布は隣接点との著しい差が生じ無いと考えられるが、単独では高いｐ値を得たが既往台風高潮偏差に隣接地点のデータを追加したところｐ値が著しく低下し圧倒的に棄却でき、両者が異なる集団であることを示している。類似性が高いと考えられる隣接のデータを追加についても、本検定手法が多少の異質デー

タの混入に対し高い感度で有意差を示すことが分かる。これらより、現在確率台風高潮偏差は、既往台風高潮偏差と同一の母集団である可能性があり、したがって現在気候の特性を示しているとした。

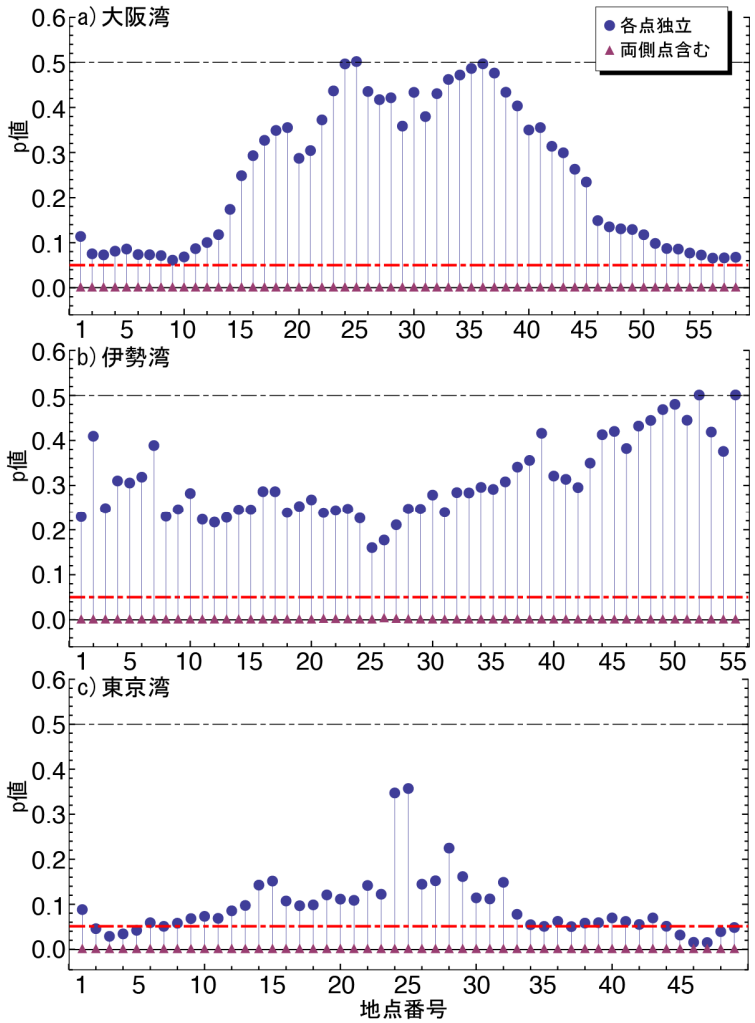


図-Ⅱ.2.1.4.3　各地点の Brunner-Munzel 検定で得られた p 値

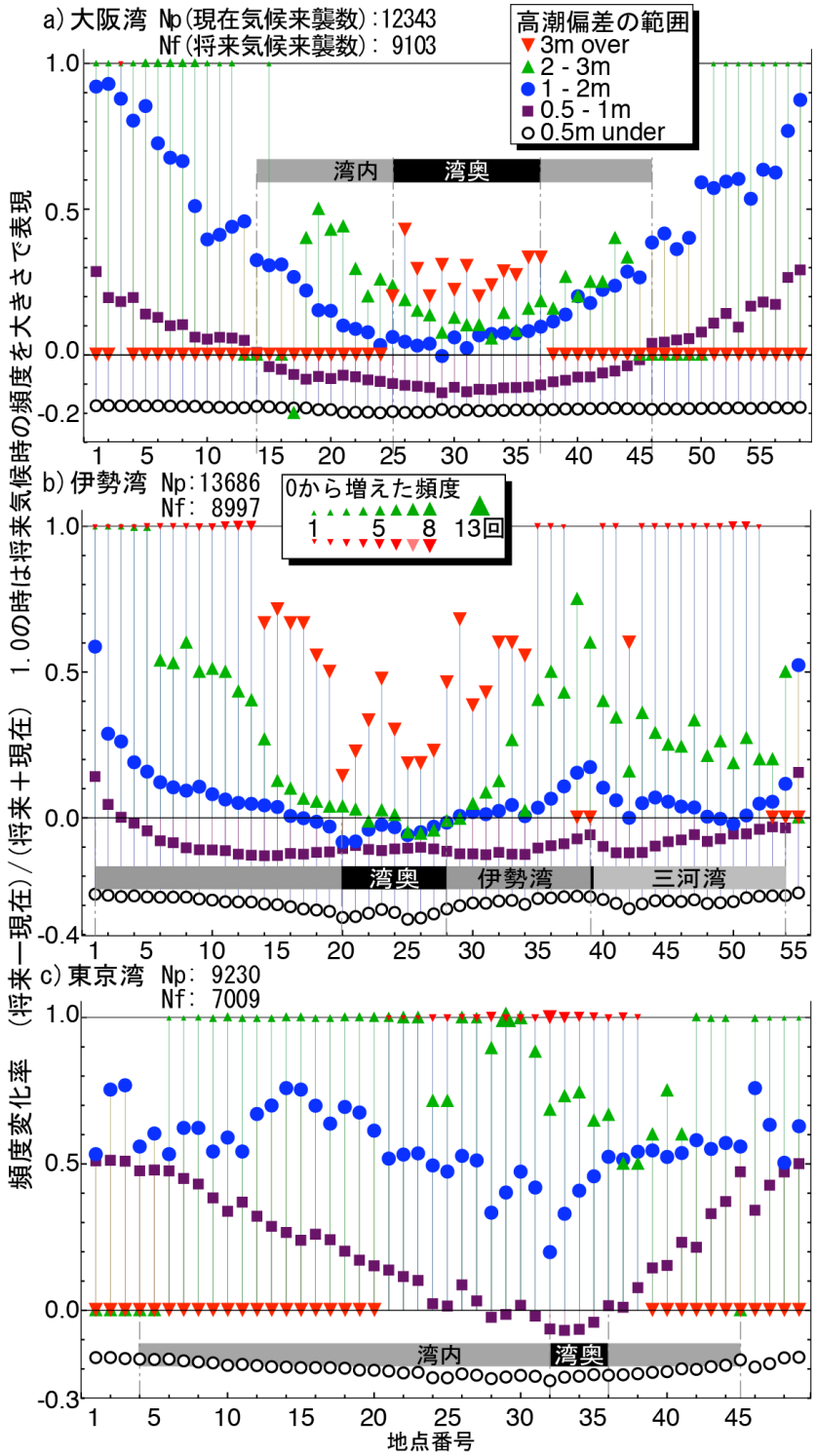
2.1.4.3　高潮偏差の階級別頻度の変化

一般に計画・設計上の視点としては、既往最大値や 30 年再現確率規模等の大きな偏差が着目される。前半に述べた本研究のアプローチでは、値は高いが頻度は低い偏差については信頼性が低下すると考えられる。そこで、現段階では中程度規模から上位にわたる変化を俯瞰することで高潮偏差の特性を把握することとする。

現在気候と将来気候の確率密度の分布を重ね合わせ変化を把握した。ヒストグラムの階級は、各気候と各地点を同様に比較する必要ため、0.05m 刻みに固定した。

各地点のヒストグラムを示す代わりに偏差を大きく区分し、それら区分内の頻度の変化を図-Ⅱ.2.1.4.4 に示した。現在気候から将来気候への頻度の変化を「頻度の変化量」を「現在気候と将来気候の頻度の和」で除したもので表現している。このようにしたのは、「頻度の変化量」のみにした場合に元来頻度が高い地点と低い地点で「頻度の変化量」が同じ場合について、これらを区別したいと考えたからである。したがって「頻度の変化量」ならば、同じ元来頻度が低い場合には高く示されることになる。これにより現在気候では発生せず将来気候では発生した場合は 1 で表現され、逆に現在気候で存在したが将来で発生しない場合には-1 として表現することが可能となる。0.5 は、将来気候の頻度が現

在気候の 3 倍となる。1 となったものについてはマークの大きさにより頻度を示した。この図では、変化を確率密度ではなく頻度の実数により求めている。



図－Ⅱ.2.1.4.4　高潮偏差範囲毎のイベント個数の変化率

高潮偏差が 0.5m までの低い区分では 3 つの湾とも負の値となっており減少している。東京湾では現在気候で出現しない 2m 以上の偏差が将来気候では沿岸のほぼ全体で生じている。このように、現在気候では高潮偏差が大きくない湾口部や来襲頻度が低い東京湾で、将来において中程度以上の高潮偏差

の頻度が上がる可能性を示している。一方、大阪湾および伊勢湾の湾奥部では現在気候でも 3m を越える偏差が発生しており、将来気候では頻度が増す結果となっている。

各湾における変化特性を代表する地点を選んで確率密度分布を示した（図-Ⅱ.2.1.4.5）。この図では変化の状況を確認し易い最頻度付近を含む 1m 前後を中心に示している。大阪湾については、最頻度ランクが最も低下した No.36 を選んだ。この地点は、大阪湾の湾奥に位置しており 1m 以上の高潮偏差の頻度はあまり増加していない。伊勢湾については、大阪湾とは逆に最頻度階級が最も増加した No.30 を選んだ。東京湾については、1m 以上の高潮偏差の頻度の増加が最も少なかった No.33 と 3 つの湾を通じても最も大きくなった No.2 を示した。伊勢湾の No.30 も東京湾の No.33 も同様な変化となっており、高潮偏差が高い側へ潰れた形状と表現できる。東京湾の No.2 は元々1m を上回る頻度が少なかったために大きな変化率となったことが分かる。

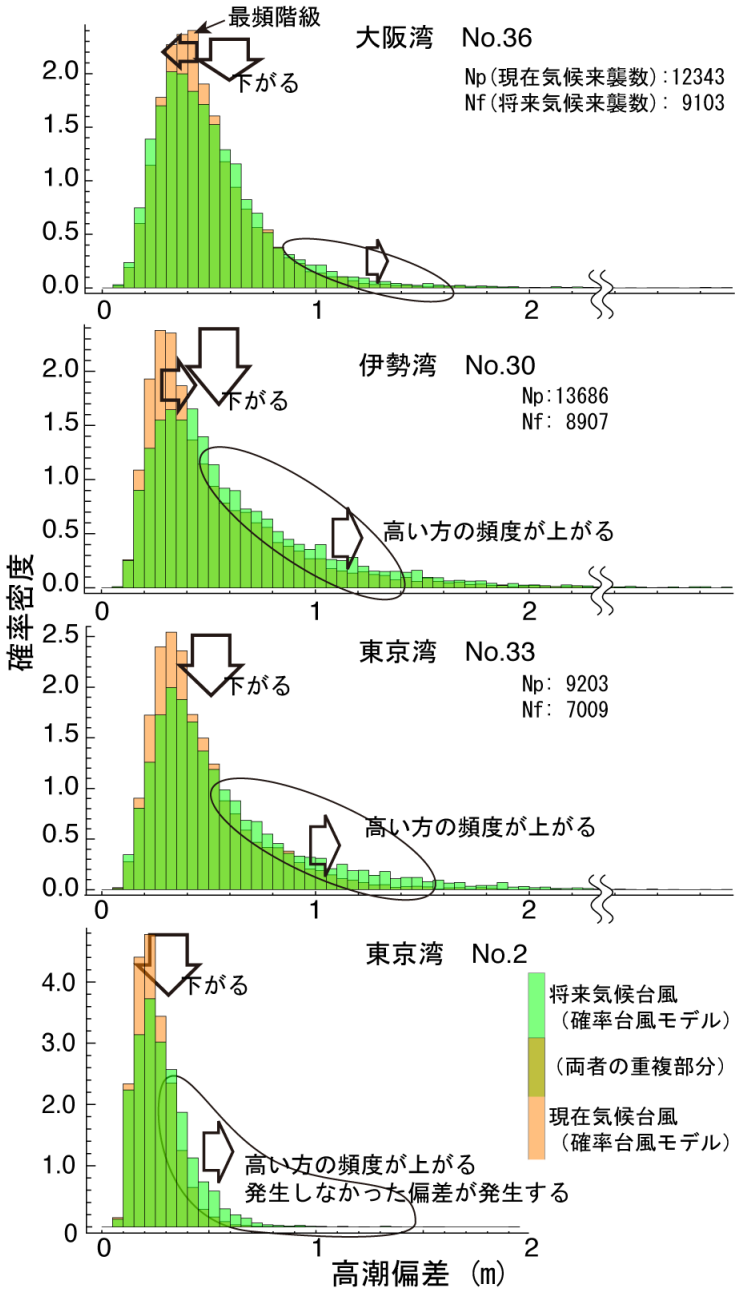


図-Ⅱ.2.1.4.5　各湾の代表的な変化特性

2.1.4.4　極値解析を用いた高潮偏差の変化

高潮偏差の値の変化について調べるため極値解析により偏差を求めてそれを代表値として変化を見た。極値解析は実務的に行われている手法により再現期間を 5 年、10 年、30 年、50 年、100 年とした確率高潮偏差を求め将来気候時の現在気候に対する変化率として示した(図-Ⅱ.2.1.4.6)。モデルの確からしさの点から 50 年、100 年の値は参考である。適合分布の採択は、合田（2008）を参考にした。適合分布形は、Weibull 分布か極値 II 型となった。

大阪湾 No.45 は図-Ⅱ.2.1.4.4 から見て取れるように 1-2m の階級だけ頻度が増したことで将来気候において全体的に高い偏差となる分布形が採用されている。逆に、東京湾 No.33 と No.34 は現在気候において低偏差に合わせ小さめに算出される分布形が採用されている。そのため 3 地点では隣接点と比べ大きめの変化率となった。これらの将来気候の 30 年確率偏差は、大阪湾 No.45 が 1.5m、東京湾 No.33 が 1.8m、No.34 が 1.6m となっている。

極値解析の結果からの偏差の値の変化率が高い地域（大阪湾外岸、伊勢湾西岸）は、図-Ⅱ.2.1.4.6 の高潮偏差の高いランクについても頻度の変化率もしくは新たに生じた偏差（変化率が 1.0）の頻度が周辺に比べ高くなっている。また、東京湾の湾奥部では、頻度も偏差も増加する。

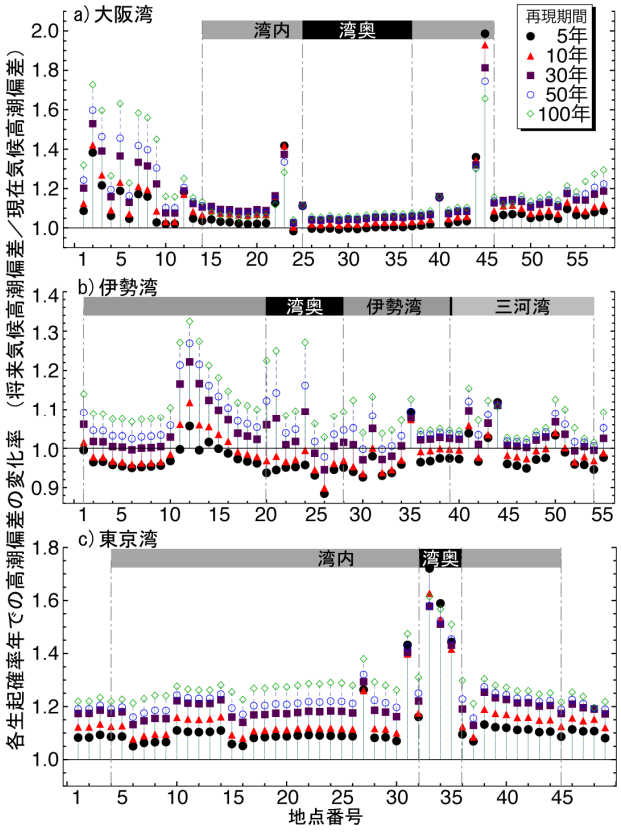


図-Ⅱ.2.1.4.6　再現期間別による高潮偏差変化率の特性

2.1.4.5　まとめ

本研究は次のようにまとめられる。

1)確率台風モデルで得られた現在気候台風は既往台風と同一性が高いことを示した。

2)最頻度階級を中心とした低い偏差では頻度が低下し、偏差が大きい方では頻度が増す。

3)現在では高潮偏差が大きくない場所でも、将来において中程度以上の高潮偏差の頻度が上がる可能性がある。

本研究の結果は、本文中に述べた通り気候予測モデルや研究スキーム、確率台風モデルに依存している。このため、これらや初期条件の違いで異なる結果が得られることを留意する必要がある。

参考文献

奥村晴彦 2008.：Brunner-Munzel 検定、
http://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/stat/brunner-munzel.php、参照 2011-04-29.

河合弘泰、橋本典明、山城賢、安田誠宏 2009.：確率台風シミュレーションの風場モデルと将来の台風出現特性による確率高潮偏差の変化、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.1256-1260.

建設省河川局監修 1997：改定新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説－設計編Ⅰ－、山海堂、pp.152

合田良實 2008.：耐波工学–港湾・海岸構造物の耐波設計、鹿島出版会、430p.

国土交通省河川局 2008.：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について、
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf、参照 2011-04-29.

国土交通省国土技術政策総合研究所 2008：気候変動による豪雨時の降雨量変化予測－GCM20による評価を中心に－、国土技術政策総合研究所資料、No.462

国土交通省 2010：洪水に関する気候変化の適応策検討ガイドライン
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/english/pdf/guigelines_jpn.pdf

国土交通省水管理・国土保全局水資源部 2012：気候変動による水資源への影響検討会、第1回、資料2（http://www.mlit.go.jp/common/000217691.pdf）

社会資本整備審議会河川分科会 2008：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf、

辻本哲郎 2010：気候・社会条件変化への対応を含む流域総合目標の達成に向けた河川整備手法について、河川技術論文集、第16巻、pp.11-16

土木研究所 2001：アメダス確率降雨量解析プログラム
（http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm）

野口賢二、福濱方哉、竹内一浩、山本亨 2008.：天気図から抽出した擾乱データセットを用いた近年の海岸災害と気象の関係、海岸工学論文集、第 55 巻、pp.1336-1340.

野口賢二、諏訪義雄、五味久昭、松藤絵理子 2010.：気候変動適応に向けたわが国沿岸の既海面上昇基準量の設定にむけて、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.66、No.1、pp.1256-1260.

橋本典明、河合弘泰、松浦邦明 2005.：地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入、海工論文集、第 52 巻、pp.1221-1225.

藤田光一 2010：気候変動に伴う河道計画への影響、21世紀気候変動予測革新プログラム 超解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究、平成21年度研究成果報告書、pp.144-150

藤田光一、服部敦、菊森佳幹、野口賢二、土屋修一 2011：気候変動に伴う河川管理等への影響評価、21世紀気候変動予測革新プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（課題代表者：鬼頭昭雄）、平成22年度研究成果報告書、pp.76-88

文部科学省研究開発局 2012：21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究、平成23年度研究報告書

安田誠宏、安藤圭、森信人、間瀬肇 2009.：地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.1281-1285.

安田誠宏、林祐太、森信人、間瀬肇 2010.：地球温暖化による高潮・高波推算に対応可能な確率台風モデル、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.66、No.1、pp.1241-1245.

山田正 2003：山地流出の非線形性に関する研究、土木学会水工学論文集、第47巻、pp.259-264

Bavarian Environment Agency 2007: *Flood Protection and Climate Change–The Bavarian Adaptation Strategy*、

the Federal State of Bavaria、 Germany
Brunner、 E. and Munzel、 U. 2000.、 The Nonparametric Behrens-Fisher Problem: Asymptotic Theory and a Small-Sample Approximation. Biometrical Journal、 Vol.42、pp.17-25.
Department for Environment、 Food and Rural Affairs (Defra) 2006: Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts、 U.K.
IPCC AR4 (2007): IPCC fourth assessment report (AR4)、http://www.ipcc.ch/.
Japan、 Netherlands、 United Kingdom and United States 2011: Flood Risk Management Approaches –as being practiced in Japan、 Netherlands、 United Kingdom and United States -、 IWR Report、 No.2011-R-08. http://www.iwr.usace.army.mil/Portals/70/docs/iwrreports/2011-R-08.pdf
Netherlands Environment Assessment Agency 2005: The effects of climate change in the Netherlands.

発表論文

野口賢二、諏訪義雄 2011.：気候予測モデルの結果を用いて算出した三大湾の将来高潮偏差の変化特性、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、第 67 巻、pp.1186-1190.

2.2 諸外国の適応策の分析

2.2.1 情報収集の方法

諸外国の技術政策動向の把握、我が国の技術政策のまとめ・情報発信と途上国の技術政策立案支援（防災パッケージの一部）が国総研の役割であるとの認識の下に、河川研究部では国際水技術政策タスク・フォース（吉谷流域管理研究官、板垣主任研究官）を 2011 年秋以降設置し、2012 年 4 月よりの郡司非常勤職員からの事務的支援と合わせ、下記 5 つの情報収集を継続的に実施する体制を取っている。

① 国内施策を推進するための海外実態調査（例：諸外国の気候変動適応策実施事例、堤防信頼性評価手法、経済評価手法の調査）
② 国内技術のベンチマーキング（日本の技術の先進度確認、遅れている部分の特定）
③ 情報戦に備えての事実確認（例：海外の災害における構造物の効果や方針転換報道の背景確認）
④ 技術政策推進の観点からの国際貢献、国際技術政策対話のニーズ発掘
⑤ 災害調査

上記の一環として実施している諸外国の気候変動適応策に係る情報収集については、これまでに蓄積された情報及び調査の効率性を踏まえ、下記のとおり国別に重点的に情報収集する機関を選定し、当該機関のホームページ（web）を定期的に確認することにより情報を収集している。

○国別重点的情報収集対象機関

米国：陸軍工兵隊（U.S. Army Corps of Engineers、USACE）、連邦危機管理庁（FEMA）
英国：環境・食料・農村地域省（Department for Environment Food and Rural Affairs）、環境庁（Environment Agency）（環境・食料・農村地域省の下部機関で、洪水対策等の実施機関）
オランダ：社会基盤・環境省（Ministry of Infrastructure and the Environment）、公共事業庁（Rijkswaterstaat）

また、「気候変動を踏まえた各国の流水管理の動向に関する調査分析」（平成 21～23 年度河川総合開発事業調査費）、「水災害・水資源管理に係る海外の気候変動適応策・技術基準調査分析」（平成 24 年度～同）等として委託業務を活用した海外調査を実施し、米英蘭等の技術基準・指針の収集等を行っている。後述の各国の事例では、上記委託業務の 1 つである水災害・水資源管理に係る海外の気候変動適応策・治水施設機能評価手法調査業務（実施期間：平成 24 年 7 月～平成 25 年 2 月）として財団法人国土技術研究センター、株式会社建設技術研究所から得た情報を一部活用している。

さらに、上記情報収集・委託では目的とする詳細・具体的情報収集を行いがたい場合等に、下記のとおり上記機関等を訪問し、技術者等からの聞き取り調査、意見交換を行っている。

・日米英蘭 4 カ国共同研究「Flood Risk Management Approaches　As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States」（2009～2011 年）
・米国現地調査（カリフォルニア大学デイビス校、カリフォルニア州政府水資源局（Department of Water Resources, State of California）、陸軍工兵隊水文工学センター（Hydrologic Engineering Center）、同サクラメント地区（Sacramento District）事務所）（2012 年）

上記現地調査は、各機関のホームページ・委託調査では難しい情報の収集・確認・理解に有益と考えられ、諸外国の政策モニタリング、政策研究に貢献するところ大であるため、今後とも継続的に実施すべきである。

2.2.2 共通的流れ

気候変動については、気候変動の緩和策の検討・実施が先行していたが、緩和策を実施したとしてもある程度の気候変動の影響は避けられないとの認識の下、適応策の検討・実施が近年進められてきている。このような考え方は、例えば、2006 年に発表された英国の「スターン・レビュー：気候変動の経済（Stern Review: The Economics of Climate Change）」（Sir Stern, N., et al.　2006）に詳しい。

同レビューは英国の大蔵大臣からの委託に基づきニコラス＝スターン卿（Sir Nicholas Stern）とレビュー・チーム（チームリーダー：シボーン・ピータース（Siobhan Peters））により実施され首相と大蔵大臣に提出されたものであり、気候変化に係る経済に関する徴候の評価、理解の確立に資するものである。

同レビューでは、前半で気候変化自体による経済的影響に係る徴候について吟味し大気中の温室効果ガスの安定に係る経済について論評し、後半で低炭素経済への移行管理並びに最早避けることができない気候変化の影響への社会の適応の確保に係る複雑な政策課題について論評している。

同レビューの主な結論は次のとおりである。

(1)今強力な行動を起こせば、気候変化による最悪の影響を避けるための時間はまだある。

強力な早期の行動による便益は、行動しない場合の経済損失を大きく上回る。本レビューによる見積りによれば、行動しない場合の気候変化に係る損失及びリスクは毎年の全世界の GDP の少なくとも 5%に匹敵する（広範囲のリスクと影響を考慮すると GDP の 20%以上になりうる）。一方気候変化による最悪の影響を避けるための温室効果ガス排出削減行動の費用は毎年の世界の GDP の 1%程度に過ぎない。

(2)気候変化は成長と発展に深刻な影響を与える。

極端気象現象による損失（洪水、渇水、嵐を含む）は豊かな国を含め既に増加している。

(3)気候の安定化費用は大きいが、処理可能である。遅れは危険と費用の増大につながる。

大気中の温室効果ガス濃度を二酸化炭素相当 450～550ppm で安定させることができれば気候変化の最悪の影響を大きく減少させることが可能である。なお、現在の同濃度は 430ppm であり、毎年 2ppm を超えて増加している。

(4)気候変化に係る行動は全ての国において必要であり、当該行動は豊かな国・貧しい国の成長意欲を妨げるものではない。

気候変化を無視することは徐々に経済成長を損なう。気候変化に対処することは長期的に成長に資する戦略である。

(5)排出削減のための様々な選択肢があり、当該選択肢の採用を促す強力で慎重な政策実施が必要。

世界の効果的な対応には、次の 3 つの政策要素が必要。それらは、「炭素価格の設定（pricing of carbon）」「低炭素技術の開発・採用の支援政策」「エネルギー効率化の障壁除去、気候変化に対し何ができるかについての個々人への情報提供、教育、説得」である。

(6)気候変化について長期目標の理解の共有と行動の枠組みに関する合意に基づく国際的な取組みが必要。

将来の国際的枠組みの基本要素には、排出量取引（Emissions trading）、技術協力（Technology cooperation）、森林破壊の防止行動（Action to reduce deforestation）、適応（Adaptation）が含まれるべき。

スターン・レビューのうち、特に印象的な事項は下記のとおりである。なお、詳細については後述の※補足説明を参照されたい。

(1)気候変化の結果を完全に確かに予測することはできないが、リスクを理解するのに十分な知識は有している。

(2)徴候によれば、気候変化を無視することは徐々に経済成長を損なう。今後数十年間の我々の行動はその後の今世紀及び次世紀の経済・社会活動における主要な混乱リスクにつながりうる。そして当該混乱の規模は、20 世紀前半の世界大戦と経済恐慌の規模に匹敵する。

(3)現在の適応行動がより少なければ、将来の適応継続の困難さはより大きくなる。

※補足説明　スターン・レビューによる主な論評

(1)気候変化に対する強力な早期の行動による便益は費用を上回る。

(2)科学的徴候は、従来どおり（business-as-usual）の排出推移から生じる気候変化の深刻かつ不可逆的な影響によるリスクの増大を示している。

(3)気候変化は世界中の人々の生活の基本要素（水利用、食料生産、健康、土地・環境利用）を脅かす。（海面上昇により東京等巨大沿岸都市等に深刻なリスクが生じる。ある見積りでは今世紀中頃までに海面上昇、よりひどい洪水、より強い渇水のため 2 億人に移住の必要が生じるかもしれない）

(4)世界が温暖化するにつれて気候変化による被害は加速する。

(5)気候変化の影響は均等には分布しない。最も貧しい国・人々が最初に、最大の損害を被る。損害が生じた時では引き返すには遅すぎる。このため、我々は長期の将来をにらむ必要がある。

(6)当初気候変化はいくつかの先進国において小さな良い影響をもたらすかもしれない。しかし、従来どおりの排出シナリオにおいて今世紀の中頃・後半に予想される大きな気温上昇は大きな被害をもたらしそうだ。（英国では現在 GDP の 0.1%である年洪水被害が、全球平均気温が 3～4℃上昇した場合には同 0.2～0.4%に増加しうる）

(7)統合評価モデルを用いた経済への全影響の評価結果は、これまで連想されてきた影響よりも大きな影響が生じそうであることを示している。

(8)過去も現在も排出は経済成長に影響されてきたが、継続的成長下における大気中の温室効果ガス濃度の安定化は実現可能である。

(9)大幅な排出削減には費用が掛るであろうが、二酸化炭素相当濃度を 500～550ppm に安定させるための年間費用は 2050 年までの GDP の約 1%であり、大きいが処理可能なレベルである。

(10)資源費用見積り手法によれば、二酸化炭素相当濃度 550ppm での安定化につながる排出削減に係る年費用の予測上限値は 2050 年までの GDP の約 1%になりそうである。

(11)広範囲のマクロ経済モデルにより上記見積りは確認された。

(12)低炭素経済への移行は競争力の課題をもたらすであろうが、成長の機会ももたらすであろう。

(13)気候変化により予想される悪影響を減らすことは、大変望ましいとともに実現可能である。

(14)排出削減政策は 3 つの必須要素（炭素価格の設定（carbon pricing）、技術政策（technology policy）、行動変化に係る障壁の除去（removal of barriers to behavioral change））に基づくべきである。

(15)課税、取引、規制による炭素価格の確立は、気候変化政策の必要不可欠な基礎である。

(16)低炭素・高効率技術の開発を支援する政策が今すぐ必要。

(17)行動変化に係る障壁の除去は 3 番目の必須要素。これは特に、エネルギーの効率化のための機会採用の奨励において重要。

(18)気候変化による避けられない影響に対処するには適応政策が極めて重要であるが、多くの国ではこれが十分には強調されてきていない。

(19)気候変化への効果的な対処は、国際的協調行動に資する状況の創造に依存する。

(20)広域かつ同様な炭素価格の世界への発信と、炭素融資（carbon finance）の活用による発展途上国における行動の加速は、国際協力における緊急的優先事項である。

(21)欧州連合域内排出量取引制度（EU ETS）の第 3 フェイズについての決定は、同仕組みが将来の世界の炭素市場に影響し、また、中核となる機会を与える。

(22)排出削減のための効果的な政策・計画を支援する炭素融資（carbon finance）の発展途上国での拡大は、低炭素経済への移行を加速する。

(23)技術革新と普及を加速する国際協力の拡大は、緩和策の費用を低減させる。

(24)森林の減少防止は温室効果ガス排出削減における非常に費用効果の高い対策である。

(25)発展途上国における適応努力は、国際開発支援を含め、加速され支援されなくてはならない。
(26)共同行動を確立し、維持することが現在の緊急の課題である。
(27)今強力な共同行動を開始すれば、気候変化による最悪の影響を避けるための時間はまだある。

その後、2007 年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 4 次評価報告書が発表された。この中で、大気や海洋の世界平均温度の上昇、世界平均海面水位の上昇などが観測されていることから気候システムの温暖化は明白であるとされるとともに、過去 200 年間の線形の昇温傾向は 100 年当たり 0.74℃であること、海面水位の上昇は温暖化と整合性があることなどが示された。

同報告書によると、21 世紀末の世界平均地上気温の上昇は高成長型シナリオで化石エネルギー源を重視した場合（A1Fl シナリオ）4℃（2.4～6.4℃）と予測し、海面水位上昇量については温室効果ガス排出シナリオ別に下表のとおり予測している。なお、後者については海面上昇を引き起こすいくつかの重要な影響の理解が極めて限られているため、生起する可能性、最も確かな予測値、予測上限値は示されていない。これらの予測には気候-炭素循環フィードバック（気温上昇による大気中の二酸化炭素の陸域・海洋への取込み量の減少等）の不確実性及び氷河の流れの変化の全影響は含まれていないため、同表の大きい方の値を海面上昇量の上限値ととらえてはいけない。また、氷河の流速が全球平均気温に一次比例する場合には下表の値はさらに 0.1～0.2m 増大する。

表-Ⅱ.2.2.2.1　2090～2099 年の全球平均海面上昇量予測（1980～1999 年比）

ケース	海面上昇量 m
B1シナリオ	0.18-0.38
A1Tシナリオ	0.20-0.45
B2シナリオ	0.20-0.43
A1Bシナリオ	0.21-0.48
A2シナリオ	0.23-0.51
A1Flシナリオ	0.26-0.59

※（IPCC　2007）45 頁の Table3.1 より作成
※※各シナリオの 2100 年時点の大気中の温室効果ガスの二酸化炭素相当濃度は B1、A1T、B2、A1B、A2、A1Fl について概略で各 600、700、800、850、1,250、1,550ppm である。（IPCC　2007）

極端な大雨の頻度は引き続き増加し、熱帯低気圧の強度が増大する可能性が高く、極端な気象現象の強度と頻度の変化及び海面水位上昇は自然システム及び人間システムに悪影響を及ぼすと予想している。アジアでは淡水利用可能性が 2050 年までに中央・南・東・東南アジア、特に大規模河川流域で減少すると予想し、沿岸域、特に人口が集中する南・東・東南アジアのメガデルタ地帯において海からのあるいは川からの浸水リスクが高まる等としている。（IPCC　2007）

同報告書で用いられた将来の排出シナリオ等に基づき各国で影響予測、適応策の検討が進められている（後述 2.2.3 参照）。

2012 年 3 月には IPCC が「気候変動適応向上のための極端事象・災害に係るリスク管理に関する特別報告書」（Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation）を発表し、気候変化と極端気象・気候事象との関係からこれらの事象の社会・持続的開発への影響までの範囲について既存研究に基づき分析している。

2012 年 11 月には世界銀行が「Turn Down the Heat: Why a 4℃ Warmer World Must be Avoided」を発表し、気候変化緩和のための現行の全ての約束・公約が実行されたとしても、2100 年までに 4℃を超える気温上昇（産業革命前比）（以下「+4℃」）が生じる可能性が概略 20%あるとし、同約束・公約が実行されない場合には 2060 年代にも+4℃が生じうるとしている。同報告書は科学の現状と+4℃の世界における開発（開発途上国の（特に貧困削減））への潜在的影響の理解を助けるためのものとされ、+4℃の世界では、沿岸都市の浸水、食料生産に係るリスク増大・栄養不足の拡大、多くの乾燥地域の更なる乾燥、同湿潤地域の一層の湿潤化、前例のない熱波の多くの地域（特に熱帯地方）への襲来、多くの地域の水不足の深刻化、強いサイクロンのより頻繁な発生、珊瑚礁を含む生物多様性の不可逆的な喪失、が予測されている。+4℃の世界は現在の世界とは大きく異なり、大きな不確実性と新たなリスクを伴っているため、我々が将来の適応策の必要性について予測・計画する能力を脅かすとし、上記の解決策は、気候金融（climate finance）や気候プロジェクト（climate projects）にのみあるのではなく、効果的なリスク管理と、我々の全ての行為・思考における+4℃の世界の考慮にあるとしている。

同月には国連環境計画（UNEP）が「地球温暖化ガス排出ギャップ 2012 年報告書（The Emissions Gap Report 2012）」を発表した。同報告書は 2100 年時点の世界平均気温の上昇を 2℃に抑える温室効果ガス排出量と、現在の各国の排出削減に係る約束が実行された場合に見込まれる同排出量の 2020 年時点の差（ギャップ）に関する 3 回目の報告書（初回は 2010 年発表）であり、主な内容は次のとおりである。

・世界の温室効果ガス排出見込みの更新。
・現行の約束・公約に基づく各国の現況（2010 年）、予測（2020 年）排出レベルの概観。
・2100 年時点 2℃の気温上昇の目標に応じた 2020、2030、2050 年時点の全球排出レベルの見積り。
・2020 年時点の排出ギャップの見積りの更新。
・大幅な排出削減に既に成功した世界の事例のレビュー。

現在の世界の温室効果ガス排出量は、2100 年時点で 2℃の気温上昇の目標に対応した排出レベル（2020 年時点）を既に大幅に上回っており、更に増加しつつあるとし、前報告書（2011 年発表）では 2020 年時点の排出ギャップ（66%を超える確率で 2100 年時点の温度上昇を 2℃に抑える温室効果ガス排出量と見込まれる同排出量との差）は 6～11GtCO$_2$（ギガトン・二酸化炭素相当量）であったが、本報告書では同 8～13GtCO$_2$ に拡大している。（理由：予想を上回る経済成長と、排出量相殺の二重計上考慮）

一方我が国では IPCC 第 4 次評価報告書を踏まえ、2008 年 6 月に社会資本整備審議会（河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会）より「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」が答申され、2009 年 5 月に土木学会地球温暖化対策特別委員会より「地球温暖化に挑む土木工学」が発表され、同 10 月には文部科学省・気象庁・環境省より「日本の気候変動とその影響（温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート）」が発表され、2011 年 9 月には日本学術会議土木工学・建築学委員会地球環境の変化に伴う水害・土砂災害への対応分科会より「気候変動下における水・土砂災害適応策の深化に向けて」が提言されている。

政府では、関係府省との連携により地球温暖化影響への適応策に関する取組みの一層の推進を図ることを目的として 2008 年より「地球温暖化影響への適応策に関する関係府省連絡会議」を設置し、2012 年 3 月の第 6 回連絡会議では、関係府省は政府全体の総合的、計画的な適応に係る取組みを取りまとめる「適応計画」を 2014 年度末に策定することに合意した。

また、2012 年 4 月に閣議決定された第 4 次環境基本計画において、地球温暖化に関する重点的取組事項の一つとして、「短期的影響を応急的に防止・軽減するための適応策の推進と中長期的に生じうる影響の防止・軽減に資する適応能力の向上を図るための検討」が挙げられている。

気候変動影響に関する研究としては、H14～18 年度の「人・自然・地球共生プロジェクト」（温暖化予測、水循環変動予測等に係る高分解能化を実施）、H19～23 年度の「21 世紀気候変動予測革新プログラム」（地球シミュレータによる気候変動予測の高分解能化、不確実性の定量化を実施）、H24～28 年度に実施中の「気候変動情報創生プログラム」（リスクマネジメントに必要な情報の創出等）、H22～26 年度に実施中の「環境省環境研究総合推進費 S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（食料、水資源、災害、自然生態系、人の健康などを対象）、H22～26 年度に実施中の「気候変動適応研究推進プログラム（RECCA）」（気候変動予測の成果を都道府県あるいは市区町村などの地域規模で行われる気候変動適応策立案に科学的知見として提供するために必要となる研究開発を推進）がある。

今後 IPCC より第 5 次評価報告書の公表が予定（2013～2014 年）されており、これを受けて我が国においては環境省により 2015 年半ば目途（2013 年 7 月 2 日現在）で政府全体の「適応計画」の策定が進められている（IPCC 第 5 次評価報告書に係る作業の遅れによってはずれこむ可能性あり）。

2.2.3 各国の気候変動適応に係る取組み

これまでに調査した各国の気候変動適応に係る事例について以下に紹介する。なお、米英蘭の 3 カ国については、国総研気候変動適応研究本部 web 上に掲載している（板垣・吉谷　2012a）ので合せて参照されたい。

2.2.3.1 英国

英国は水災害分野の気候変動適応策の取り組みが最も進んでいる国の一つであると考えられる。

英国を含む EU（欧州連合）各国では EU 水枠組み指令（2000 年）、同共通実施戦略（2001 年）、同指針第 24 号 : 気候変動下の河川流域管理（2009 年）に基づき、水に係る圧迫・影響の評価、観測計画、対策の評価において気候変動影響予測をどのように考慮したか明示することを求められている。また、EU 洪水指令（2007 年）により洪水発生について生じうる気候変動影響を考慮することを求められ、EU 白書「気候変動適応：行動のための欧州の枠組みに向けて」（2009 年）により異なる分野・管理レベル横断の気候変動適応のためのより戦略的な方法を求められている。

英国では「Making space for Water」（2004 年）により洪水・海岸浸食リスク管理のための政府戦略更新に向けた同リスクに係る見通しと目標を公表し、気候変動法（2008 年）により 2050 年までに英国が達成すべき温室効果ガス（GHG）排出削減のための長期目標及び気候変動影響適応のためにとるべき手順を規定し、「Future Water」（2008 年）により 2030 年に向けた人々、産業、自然のための良好な水の確保のための政府計画を発表している。また、2007 年の洪水被害を受けてピット卿が「2007 年洪水から学ぶこと」（2008 年）を発表し、2007 年洪水による甚大な被害を受け政府に洪水リスク対策の推進等を要請し、これに対して政府は洪水及び水管理法（2010 年）によりピット卿より示された提言等のいくつかを実現した。

具体的な気候変動適応策としては、「TE2100 プロジェクト」（2002 年～）により気候変動等を考慮した首都ロンドン及びテムズ川河口部の高潮洪水対策（年洪水確率 1/1,000 の安全の確保）のための政府の長期計画を推進しており、今世紀末までの短期・中期・長期別に政府等が行う必要のある行動を推奨している。

2006 年 10 月に環境・食料・農村地域省が「洪水・海岸防御評価指針　気候変動影響　担当部局による経済評価の補足文書」（Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts）を発出し、将来（2115 年まで）の海面上昇、河川洪水流量の変化等について不確定性の程度に応じた考慮手法を定量的に提示し、公的資金が投入される事業においては原則全て同手法を適用するものとした。

同年 12 月には洪水リスクの高低に応じた土地開発誘導手法をコミュニティ・地方自治省

（Department for Communities and Local Government）が「計画政策書第 25 号 : 開発と洪水リスク」（Planning Policy Statement 25: Development and Flood Risk）により規定（2010 年 3 月改定）し、洪水確率に応じて下記 3 つの洪水区域を指定し土地開発目的に応じて洪水リスクのより低い区域への開発誘導を図る具体的手順を提示した。

○区域 1：年洪水確率 1/1,000 未満

○区域 2：河川洪水の年確率 1/100～1/1,000、高潮洪水同 1/200～1/1,000

○区域 3：河川洪水同 1/100 以上、高潮洪水同 1/200 以上）

2011 年 9 月には環境庁が「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」（Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities）を発出し、河川流域別の将来（2099 年まで）の洪水流量変化等の考慮手法を定量的に提示し、公的資金が投入される事業において適用するものとしている。同助言は 2006 年 10 月発出の上記補足文書の改訂であるが、主な変更点は次のとおりである。（同助言の概要は後述※補足説明参照）

(1) 気候変動因数（予測中央値等）、予測上下限値及び更に厳しい気候変動予測値（H++シナリオ）を提示。（改訂前は考慮すべき相対的平均海面上昇速度、及び将来の洪水流量等に係る感度分析に用いるための増加率を提示）

(2)河川洪水、極端降雨に係る予測時期の区分数が改訂前の 4 区分（1990～2025、2025～2055、2055～2085、2085～2115 年）から 3 区分（2010～2039、2040～2069、2070～2115）へ減少。

(3)河川洪水について流域地区・時期別の流量増加率を提示。（改訂前は時期ごとに全国一律の増加率を提示）

(4)上記増加率は、流域地区によっては改訂前の値よりも大きくなっている。

(5)極端降雨の増加率が拡大（改訂前 5～30%増→改訂後 10～40%増（予測上限値））。

(6)1990～2100 年の各年の地点別相対的平均海面上昇量を web 上で提供。なお、3 つの分割地域から各選定した 3 地点（London、Cardiff、Edinburgh）で改訂前後の同上昇量を筆者が比較したところ、気候変動因数については改訂前の設定値（allowances）よりも 2025 年頃まで大きい上昇量、その後は小さい上昇量となっている。予測上限値については地点により改訂前の設定値より大きい場合と小さい場合とがある。H++シナリオについては改訂前の設定値よりも大きい上昇量となっている。予測下限値については改訂前の設定値より小さい上昇量となっている。

(7)高潮時潮位について予測値を提示（改訂前の同値は提示の対象外であった）。

(8)風速の予測値について追って提示予定とのこと（改訂前同値は提示されていた）。

※補足説明　「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」の概要

(1)位置づけ：環境食料農村地域省が 2006 年 10 月に発出した「Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts」に置き換わるもの。同省発出の「洪水・海岸浸食リスク管理の評価」（Appraisal of Flood and Coastal Erosion Risk Management）（2009 年）及び環境庁発出の「洪水・海岸浸食リスク管理評価指針」（Flood and Coastal Erosion Risk Management Appraisal Guidance）（2010 年）の補足情報を提供するとともに、「洪水・海岸浸食リスク管理　イングランドの全国戦略」（Flood and Coastal Erosion Risk Management　National Strategy for England）（2011 年）を支援するもの。

(2)適用範囲：イングランド（England）で実施される洪水防御に係る中央政府の補助金を申請するプロジェクト・戦略のうち、2011 年 8 月以降評価を開始するもの、又は 2012 年 1 月以降の承認に向け申請するもの全てに適用。

(3)対象外力：河川洪水、極端降雨、相対的平均海面上昇、高潮。

(4)対象年代：2015～2115 年。（2020、2050、2080 年頃の 3 時期）

(5)気候変動因数：1961～1990 年比の潜在的変化を定量化するもの（増加率等）。

(6)予測上下限値：洪水・海岸浸食リスク管理に係る、排出シナリオ・気候の不確実性を反映するために設定された値。

(7)上記因数の使用手法：洪水防御施設等が機能を発揮すべき期間（年数）に応じた同因数（洪水流量の増加率等）に基づく選択肢（洪水対策の代替案等）の作成を推奨。同因数に基づくだけでなく、上下限値等に基づく感度分析により選択肢を洗練可能。

(8)上記因数等の根拠：2009 年英国気候予測（UKCP09）又は同データを用いた研究。

(9)極端シナリオ：極端な将来シナリオとして「H++シナリオ」を提示。（より厳しい気候変動に応じた選択肢見極めのため）

流域地区・時期別洪水流量に係る気候変動因数等は下表のとおり（1961～1990 年比）。同表の値は 1/50 年確率の洪水流量に対応した値であるが、再現期間がより長い洪水流量についても同一の値でよしとしている。

表-Ⅱ.2.2.3.1　流域地区・時期別洪水流量の潜在的増加率（1961～1990 年比）

	Total potential change anticipated for the 2020s	Total potential change anticipated for the 2050s	Total potential change anticipated for the 2080s
Northumbria			
Upper end estimate	25%	30%	50%
Change factor	10%	15%	20%
Lower end estimate	0%	0%	5%
Humber			
Upper end estimate	25%	30%	50%
Change factor	10%	15%	20%
Lower end estimate	-5%	0%	5%
Anglian			
Upper end estimate	30%	40%	70%
Change factor	10%	15%	25%
Lower end estimate	-15%	-10%	-5%
Thames			
Upper end estimate	30%	40%	70%
Change factor	10%	15%	25%
Lower end estimate	-15%	-10%	-5%

	Total potential change anticipated for the 2020s	Total potential change anticipated for the 2050s	Total potential change anticipated for the 2080s
SE England			
Upper end estimate	30%	55%	100%
Change factor	10%	20%	30%
Lower end estimate	-15%	-5%	0%
SW England			
Upper end estimate	30%	40%	75%
Change factor	15%	20%	30%
Lower end estimate	-5%	0%	5%
Severn			
Upper end estimate	25%	40%	70%
Change factor	10%	20%	25%
Lower end estimate	-10%	-5%	0%
Dee			
Upper end estimate	20%	30%	45%
Change factor	10%	15%	20%
Lower end estimate	0%	0%	5%
NW England			
Upper end estimate	25%	35%	65%
Change factor	15%	20%	30%
Lower end estimate	5%	10%	10%
Solway			
Upper end estimate	25%	35%	65%
Change factor	15%	20%	25%
Lower end estimate	5%	15%	10%
Tweed			
Upper end estimate	25%	35%	35%
Change factor	15%	20%	30%
Lower end estimate	0%	5%	15%

©Environment Agency and database right

※（Environment Agency　2011）11～12 頁より。

※※Upper end estimate：予測上限値　Change factor：気候変動因数（予測中央値）Lower end estimate：予測下限値

流域地区別の極端（H++）シナリオによる洪水流量増加率は下表のとおり。稀な大洪水による被害が特に甚大と考えられる場合には、洪水対策の決定に当たり下表の増加率について感度分析して良い。

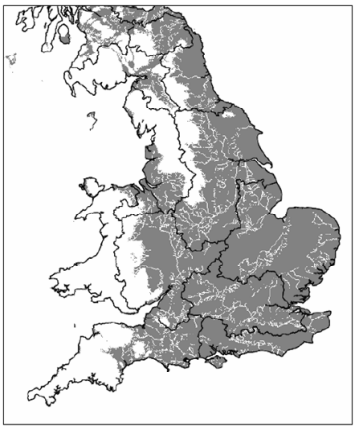
なお、下図の灰色部分以外の領域では上記感度分析は不要。（極端な流量増加率予測結果とはならなかったため）

表－Ⅱ.2.2.3.2　H++シナリオでの流域地区・時期別洪水流量の潜在的増加率（1961～1990 年比）

	Total potential change anticipated for the 2020s	Total potential change anticipated for the 2050s	Total potential change anticipated for the 2080s
Northumbria	35%	45%	75%
Humber	35%	45%	75%
Anglian	35%	55%	90%
Thames	40%	55%	90%
SE England	40%	70%	125%
SW England	40%	60%	110%
Severn	40%	55%	100%
Dee	30%	45%	70%
NW England	40%	60%	105%
Solway	40%	55%	105%
Tweed	35%	50%	65%

©Environment Agency and database right

※（Environment Agency　2011）12 頁より。



©Environment Agency and database right

図－Ⅱ.2.2.3.1　極端な増加率が生ずる可能性のある領域（灰色部分）

※（Environment Agency　2011）13 頁より。

極端降雨のうち、再現期間 5 年以下の降雨については UKCP09 の情報を用いるものとしている。5 年を超える再現期間の降雨については下表に基づくこと。同表は気候モデルによる予測結果のうち最大日雨量のみ考慮しており、時間単位の降雨の将来予測指針は提供不可能とのこと。なお、H++シナリオは提供されていない。

表－Ⅱ.2.2.3.3　極端降雨強度の潜在的増加率（1961～1990 年比・全イングランド共通）

	2020年頃	2050年頃	2080年頃
予測上限値	10%	20%	40%
気候変動因数	5%	10%	20%
予測下限値	0	5%	10%

※（Environment Agency　2011）14 頁より作成。

※※小流域及び都市・地区排水に適用。河川流域（例えば 5km² 超）については洪水流量に係る値（既出）を適用。

相対的平均海面上昇量については UKCP09 の値を適用。UKCP09 では、1990 年に対する 2100 年ま

での相対的海面上昇量予測の中央値及び上下限値を排出シナリオ（3 つ。2.2.5.1(5)参照）及び地域別に提供（2.2.5.1(6)参照）。なお、上記予測値は IPCC 第 4 次報告書に基づいているが、同報告書は今世紀中の海面上昇量を過小評価しているとの指摘があるため、気候変動因数については予測中央値を用いずに、中排出シナリオの 95 パーセンタイル上限値を用いることを推奨している（下表参照）。

表－Ⅱ.2.2.3.4　期間別潜在的海面上昇に係る気候変動因数等（単位：mm/年）

	2025年まで	2026～2050年	2051～2080年	2081～2115年
H++シナリオ	6	12.5	24	33
予測上限値	4	7	11	15
気候変動因数	UKCP09のデータで対象地点について利用可能な中排出シナリオの95%予測値を用いること。			
予測下限値	UKCP09のデータで対象地点について利用可能な低排出シナリオの50%予測値を用いること。			

※（Environment Agency　2011）16 頁より作成。

高潮時潮位については UKCP09 の値に基づき下表のとおり提示。既述の相対的平均海面上昇量に加算する。なお、下表の予測上限値は UKCP09 の H++シナリオに基づくものである。（高潮時潮位については相対的平均海面上昇よりも H++シナリオの予測上限値が生起する確率が大きいとし、H++シナリオによる値を予測上限値としている）

表－Ⅱ.2.2.3.5　期間別高潮時潮位の潜在的変化に係る気候変動因数等（2008 年比）

	2020年頃	2050年頃	2080年頃
予測上限値	20cm	35cm	70cm
気候変動因数	現況の極端な高潮位に関する厳しめの評価結果に基づくこと。		
予測下限値	なし	なし	なし

※（Environment Agency　2011）17 頁より作成。

※※「予測上限値」欄の値は感度分析のために気候変動因数に更に加える高さである（平均海面高さに加える高さではない）。

一方、環境庁の地方出先機関では 2002 年以降流域別に流域洪水管理計画（Flood Management Plan）を発表しており、気候変動・土地開発の影響を考慮し今後 50～100 年を対象に洪水（高潮を除く）リスク管理の方針を発表している（気候変動による洪水流量 20%増を明記している流域あり）。

これらの事例に関して特筆すべきは、将来の洪水等の不確定性に応じた適応策を提示していることであり、「まだ確実ではないから行動しない」よりは「現在の知見に基づきよりましと考えられる行動を起す」を政府として選択していることである。これは、上記 2006 年発出の指針における洪水流量増加率を 5 年後の 2011 年に見直している（一律 20%の洪水流量増加率（2006 年指針）では過小評価となる流域が見いだされたため 2011 年の助言では一部増加率を大きくした）ことからも明らかである。

2.2.3.2 オランダ

オランダは国土面積約 37,000km²（2010 年時点）、人口 16,665 千人（2011 年時点）の国であり、面積では農地が約 68%、森林が約 10%、都市が約 15%を占めており、国土の約 60%が海面以下とされている。

伝統的にオランダにとって洪水は避けがたい現実であったため、家屋や農場を守るために中世初期よ

り堤防が築かれ始めた。また、干拓やその他の方法によって体系的に景観を形成し始めたのもこの頃である。

1916 年の高潮の後、1932 年までに水系に大規模な改変がなされた。洪水から守るために設計されたアイセルダムの完成によりアイセル湖が形成され、土地開拓の機会を創出した。1953 年の洪水災害の後、新たな基準が設定されデルタプランの下一連のダム及び高潮防御施設が建設された。その結果、オランダの海岸線は 700 キロ短縮しオランダ南西部は大幅に変化した。

1990 年代度々河川の水位が危険なほど高くなり Limburg の一部が氾濫した。1995 年には堤防破壊の恐れのため 25 万人の人々が避難を余儀なくされた。1976 年及び 2003 年の夏は経済的損害を被るほどの渇水により繰り返し水不足に見舞われた。（Ministry of Transport, Public Works and Water Management, et al. 2010）

オランダも英国同様に水災害分野の気候変動適応策の取り組みが最も進んでいる国の一つと考えられる。

オランダでは洪水防御法により洪水防御施設による防御レベル（1950 年代にデルタ委員会により設定）が輪中ごとに定められている。同防御レベルには次の種類がある。

基準水位の年超過確率 1/250：マース川の非感潮区間
同 1/1,250：上流河川地方
同 1/2,000：（河川と海岸の）遷移地域
同 1/4,000：大都市域を除く海岸
同 1/10,000：大都市域（通称 Randstad）の海岸

※注 1　運輸・公共事業・水管理省の構造物設計の指針によれば、堤防の天端高さは基準水位よりも少なくとも 0.5m 高くしなくてはならない。

なお、上記基準は基準水位の超過確率であることから、越水・越波による破壊のみを対象としており、その他の破壊メカニズムは確率評価されていない（しかし、設計や安全評価ではその他の破壊メカニズムも考慮されている）。また、上記確率は数百から数千 m の長さの堤防区間の超過確率であり、輪中全体の洪水確率ではない。

また、同法には 5 年ごとに運輸・公共事業・水管理省が基準水位の（気候変動等による）変化有無について検査しなくてはならない旨規定されている。また、同省が 10 年ごとに安全基準の有効性について報告しなくてはならない旨規定されている。（Floris 2005）

なお、上記英国と同様欧州連合の諸規定を背景として、オランダ王立気象研究所が 2006 年に、2050 年までの 4 つの気候シナリオ及び 2100 年までの海面上昇・洪水流量増加予測を下記のとおり発表している。

・2100 年までに 1990 年比最大 85cm 海面上昇（地盤沈下除き）
・ライン川ロビス地点の 1/1,250 洪水流量が 2100 年までに 17,000～22,000m^3/s に増加（現況 16,000m^3/s）

また、（第 2）デルタ委員会が 2008 年に 2050 年、2100 年までの海面上昇予測等を発表している（2050 年までに 1990 年比 0.2～0.4m、2100 年までに 0.65～1.3m 海面上昇（地盤沈下含み））。

ここで、上記（第 2）デルタ委員会とは、2007 年にオランダ内閣により設立されたものであり、同委員会は、1,835 人の死者を出した 1953 年の劇的な高潮の後に設立された有名なデルタ委員会の後継として名づけられた。

前農業大臣 Cees Veerman が議長を努めた同委員会は、長期にわたる洪水防御及び淡水管理のための戦略に関する助言をとりまとめ、「水と共に生きる：将来のための生活国土の建設」（Working together with water; A living land builds for its future）として 2008 年に発表した。

同委員会の主な提案は、オランダ政府が水安全と淡水利用の維持・改善に向けた（第 2 次）デルタプログラムを準備及び実施すること、同プログラムの遂行に必要な資源を提供するデルタ基金を設立すること、同プログラムの遂行を監督するデルタ委員長を任命することであった。

1916 年の海洪水の後の Zuiderzee の閉鎖、1953 年の劇的な高潮の後に起草された（第 1 次）デルタプログラム、1993 年と 1995 年のライン川とマース川洪水の後に発表された新しい Room for the River 政策とは異なり、（第 2 次）デルタプログラムは災害後の助言ではないことに注目することが重要である。

上記提案を踏まえ、2010 年に（第 2 次）デルタプログラムが開始された。同プログラムは、今後数十年間にオランダが直面する主要な水の課題に関して、洪水に対する持続可能な安全及び同淡水供給の達成を目的としている。

オランダのデルタ地帯の将来のために必要な決定の準備がデルタプログラムの中心である。デルタ委員長は、今世紀中の洪水リスク管理と淡水供給に関する指針となるデルタ決定（Delta Decisions）を 2014 年に内閣に提出し、同決定は次期国家水計画（National Water Plan）（2015 年）に反映される。

デルタ決定は下記 5 項目を対象とする。

(1)主要洪水防御システムの安全基準の更新

(2)オランダの十分な長期的水供給を保証する淡水戦略

(3)オランダの水供給と地域の安全に焦点を合わせたアイセル湖（Ijsselmeer）の長期的な水位管理

(4)ライン-マースデルタ（Rhine-Meuse Delta）の防護

(5)市街地（再）開発のための全国政策枠組み

また､長期的に必要となるものについて下記 9 つのサブ･プログラムによりレビューが行われている。

・安全：洪水防御基準の更新（デルタ堤防（後述※注 2 参照）の推奨を含む）
・淡水：将来のオランダの淡水供給・需要に係る対策
・新市街地開発・再開発：市街地開発に係る全国政策枠組み
・西南デルタ：引き続き安全で、粘り強くかつ重要な西南デルタの長期的な戦略の開発
・ライン河口-ドレヒト都市群：ライン-マースデルタの洪水リスク管理と淡水供給に係る解決戦略の選択
・河川：ライン川及びマース川周辺地域の安全を維持するための長期計画の策定（同計画は Room for the River（後述※注 3 参照）とマース・プロジェクト（同注 4）の拡張となる）
・アイセル湖地方：アイセル湖の長期的な水位管理戦略の考案（淡水供給・需要の長期的変更及び主要洪水防御システムの標準化に応じた改良はアイセル湖地方において必要不可欠であり、水位管理は重要な役割を有する）
・海岸：海岸の安全のための持続可能な戦略の策定、海岸の拡張の可能性・望ましさの研究の確立
・ワッデン地方：ワッデン地方の長期的安全の保証、特別自然保護区域のモニタリング計画の策定

※注 2　デルタ堤防：通常の堤防よりも高い、幅広又は強い堤防。突然の制御不能な破堤を実質上なくす。都市の再開発等と機能を共有できる。（Central government, Netherlands　2009）

©Central government, Netherlands (2009)

図－Ⅱ.2.2.3.2　デルタ堤防

※（Central government, Netherlands　2009）72 頁より

※注 3　Room for the River：2006 年開始、2015 年完了予定の総予算 23 億ユーロ（120 円/ユーロとして約 2,760 億円）のプロジェクト。Ijssel、Rhine、Lek、Waal 川の 30 以上の地点において河川空間の拡張（堤防の再配置、高水敷掘削等による）が行われる。より安全（2015 年にライン川（Lobith 地点）で 16,000m³/s（実施前 15,000m³/s）を安全に流す）、より魅力的な（河川空間の拡張は河川周辺の空間の質を向上させる）河川周辺地域の実現が目標。（ruimte voor de rivier　2012、Ministry of Transport, Public Works and Water Management, et al. 2010）

※注 4　マースプロジェクト（Maasroute）：1993 年と 1995 年のマース渓谷における洪水を受けて開始。Zandmaas 及び Grensmaas 地域の 52 の事業より構成される。洪水防御、自然に係る目的の達成、鉱物の採取、舟運の改善が目的。マースプロジェクトが完了しても、マース渓谷地方全体で合意された安全レベルを確保するには更なる対策事業が必要であり、マース渓谷の長期的対策についてはデルタプログラムの枠組みの中で明確にされる予定。（Ministry of Transport, Public Works and Water Management, et al.　2010）

なお、デルタ委員会の委員長は、毎年デルタプログラム報告書を社会基盤・環境大臣に提出することとなっている（2010 年発表の 2011 年デルタプログラム報告書が最初）。また、2012 年 1 月にデルタ法が発効し、デルタプログラムの法的位置づけ等が規定されている。

上記報告書の最新版である 2013 年デルタプログラム報告書の中から主な点を以下に挙げる。（Ministry of Infrastructure and the Environment, et al.　2012）

(1)重点報告事項

前報告書（デルタプログラム 2012）では洪水リスク管理と淡水供給の課題に焦点を合わせたが、本報告書ではこれらの可能な解決策に焦点を合わせ、可能な戦略の概要（目標、方策、及び展開）を述べている。

(2)主な内容

①洪水リスク管理と空間の適応

第 3 次主要洪水防御システム評価の結果によれば、検査された総延長 3,767km の洪水防御システムのうち 1,225km は現在法定基準を満たしていない。これら基準を満たしていないシステムの約半分は新たな課題に属する理由による。残りについては、既に対策が実施されつつある。多くの洪水リスク管理基準は 20 世紀中頃のものであり、それ以降堤防背後の人口は大きく増加し、同経済成長と投下資本のかなりの増大が見られる。

2011 年末に公表された堤防防御システムに関する社会的費用・便益分析結果によると、（第 2 次）デルタ委員会提案の「安全基準の 10 倍強化」のオランダ全土での必要性は認められなかったものの、

一部の地域、特に主要河川周辺、ライン川河口-Drechtsteden（Drecht 都市群）地方の一部及び Almere 周辺では安全基準の強化が必要と認められた。

以下、テーマ別記載事項を例示する。

○多層的安全（multi-layer safety）

・一般に、災害の予防・防止が洪水リスク低減のための最も費用効果の高い方法とされる。デルタプログラムでは多層的安全の概念にも焦点を当てる。これは、災害の予防・防止に加え、より効果的な空間計画・災害管理により、洪水の結果として生じる被害を低減するものである。

○主要河川周辺、ライン川河口- Drechtsteden、南西デルタ（ライン-マースデルタ）

・原則として洪水対策は、地区開発と連携した堤防の改良と河川の拡張との組合せにより長期的に実現可能である。Room for the river プロジェクト及びマースプロジェクトから良い知見が得られている。

・ライン-マースデルタでは戦略的適地において堤防の多機能的利用を含む革新的（デルタ）堤防（既出）が試みられる。

・Alblasserwaard、Krimpenerwaard 及び Lek 川沿いを含む地域の要求される水準での防御には、大規模な対策が必要かもしれない。例えば、ライン川支川の流量配分の見直し、新しい開閉式洪水防御システムの建設が考えられる。

○都市部

・高密度に建てこみ、舗装比率の高いオランダの都市域は、河川洪水及び熱による被害リスクを抱えている。

・洪水発生時の被害を低減する空間計画及び洪水リスク管理、並びに都市内の河川洪水、渇水及び熱による影響の低減に資する気候耐性都市（Climate-proof city）のための系統的空間対策が重要課題である。

○アイセル湖地方

・アイセル湖からワッデン海への自然排水がいつまで可能であるかが懸念事項。海面上昇の影響により、いずれポンプにより排水する必要が生じる。

○海岸沿い及びワッデン海地方

・基本原則は「可能であればソフト対策を、必要であればハード対策を」である。長期的海岸保全には十分な砂の補給が引き続き必要不可欠である。2013 年発表予定の国家沿岸構想（National Coastal Vision）に対策の提案が含まれる予定。

②淡水供給

○全般

・淡水供給に関する問題としては、低水期間の河川水の不足、地下水の塩水化、地下水位の低下による砂質微高地における水不足等がある。水不足による被害額は数千万ユーロ（120 円/ユーロとして数十億円）の規模となる。

○アイセル湖

・アイセル湖は重要な水源である。以前提案された「アイセル湖の水位 1.5m 上昇案」は取り止められた。夏期の柔軟な水位管理と組み合わせることにより、より少ない水位上昇量で淡水供給量のかなりの増加を実現できる。

また、デルタプログラム 2013 年報告書によれば、デルタプログラムの洪水対策分野を構成する第 2 洪水防御プログラム、Room for the River、マースプロジェクト等関連プロジェクトの進捗状況は下表のとおりである。

表-Ⅱ.2.2.3.6　デルタプログラム進捗状況（単位　百万ユーロ）

	全体予算額	2012年時点残額
第2洪水防御プログラム	3,151	2,527
Room for the River	2,180	1,495
マースプロジェクト	543	295
河川地方の更なる対策	188	62
東・西スケルト川の石張り堤防の改良・補修	904	345

※（Ministry of Infrastructure and the Environment ,and the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation　2012）18、21～24 頁より作成。

また、デルタプログラムの実施事例であるマース川 Overdiep 地点における川の拡張の概要は次のとおりである。

2011 年よりマース川の Overdiep 地点（一面の農地）において引堤、盛土上への輪中内農家の移転、旧堤の切り下げによる旧堤内地の遊水地化工事が行われている（Brabantse Delta 水組合が施工管理）。2015 年予定の同工事完了後、遊水地は約 25 年に 1 度冠水し、同地点でマース川水位を約 27cm 低下させるとともに、同地点上流のマース川水位を低下させるとしている。

デルタプログラムの実施事例ではないが、主要洪水防御施設について将来の海面上昇を考慮した事例としてマエスラント高潮堰（Maeslantkering）の事例を以下に簡潔に述べる。

マエスラント高潮堰はオランダ南部を北海から守る上で重要な高潮堰である。現行のデルタプログラム開始前のデルタ・ワークス（Deltawerken：1950 年に最初の締切が行われた高潮災害対策プロジェクト）により 1997 年に完成した。5m の高さの高潮から防御できるとされ、2007 年 11 月に初めて高潮防御のために閉鎖した。なお、計画どおり閉鎖できる確率（操作システムが計画どおり作動する確率）は 99%。閉鎖操作は堰上流の水位（ロッテルダム地点）が 3m を上回ると予測される場合に行われる。（Rijkswaterstaat　2012）

本堰に係る高潮によるロッテルダムの年浸水確率は現在 1/7,000 とされている。（※著者注　ロッテルダムを含む Randstad 地域の法定安全率（年浸水確率）は 1/10,000 であることから、設計当初の本堰の超過確率は 1/10,000 以下であったが、海面上昇により同確率は 1/7,000 に増大したと推察される。）

2050 年までの本堰の高潮による閉鎖頻度は平均 10 年に 1 回。2050 年以降は、予測される海面上昇量によるが、5 年に 1 回程度まで増加する見込みである。（H_2OLLAND　2012）

2.2.3.3 ドイツ

ドイツも英国・オランダ同様に EU の諸規定に対応して気候変動適応策の実施が進められているが、ドイツでは洪水対策等は地方（州）が主体であり、気候変動適応策は地方により異なり、統一されていない。いくつかの地方では気候変動適応策に係る決定に直結する文書を発出済みである一方、いくつかの地方ではより効果的に政策決定するために重要な地域での調査を実施しているに過ぎない。

IPCC の A1B 排出シナリオに基づく気候予測によれば、基準期間 1961～1990 年に比べ下記のとおりとしている。（Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany　2009）

①年平均気温は 2021～2050 年に 0.5～2.5℃上昇、2071～2100 年に 1.5～4.5℃上昇。

②冬期雨量は 2071～2100 年に 0～40%増加の可能性（中央高地地方で 70%増加の可能性）

③夏期雨量は 2071～2100 年に最大 40%減少の可能性（南西部で特に減少の可能性）

ドイツ全体（連邦政府）では、2008 年 12 月に「ドイツ適応戦略」（German Strategy for Adaptation to Climate Change: DAS）を公表し、2011 年 8 月には「ドイツ適応戦略行動計画」（Adaptation Action Plan of the German Strategy for Adaptation to Climate Change）を公表している。

州政府では、バーデン=ビュルテンベルク、バイエルン、ラインラント・プファルツの各州で、新しい洪水防御施設計画時に 2050 年までの気候変動の影響を気候変動因数として設計流量算定時に考慮（従来の設計流量に気候変動因数を掛ける）している。同因数は地域・洪水規模別に設定している（下表参照）。なお、上記各州では一般に 100 年確率洪水流量を対象に洪水防御施設を計画している。実際の堤防整備時には従来の設計流量に対応する高さの堤防を整備するとともに隣接地を確保し、必要な時に容易に堤防のかさ上げ・拡幅を可能としている。橋梁については、当初から気候変動因数を考慮した設計流量に対応して計画し、擁壁については、将来かさ上げが必要になっても困難が生じないよう設計している。（KLIWA※注　2009）

※注　KLIWA:水資源管理に係る気候変動と同影響に対応するためのドイツのバーデン=ビュルテンベルク、バイエルン、ラインラント・プファルツの各州とドイツ気象庁を含む協同プロジェクト。

表-Ⅱ.2.2.3.7　ドイツの地域・確率年別気候変動因数例

地域	確率年	気候変動因数
ネッカー	100	1.15
ドナウ上流	100	1.25
ドナウ上流	5	1.67
ババリア	100	1.15
ライン上流	5	1.45
スウェイビア上流	5	1.24
コンスタンス湖	5	1.24

※（KLIWA　2009）18～19 頁より作成。

2.2.3.4 フランス

フランスも欧州連合の 1 国として上述同様 EU の諸規定に応じた取り組みを進めている。これまでの調査によると、気候変動適応策の具体化が上述の英蘭独各国よりもゆっくりしているように見えるが、我が国よりは具体化が進んでいるように見える。

IPCC の B2 及び A2 排出シナリオに基づくフランスの将来（2070～2099 年）予測（フランス気象庁等による）は下表のとおり（1960～1989 年比）。冬期の平均降水量が増加する一方夏期の平均降水量が減少すると予測。（Cochran, Ian　2009）

表-Ⅱ.2.2.3.8　フランスの気候変動予測（フランス気象庁とラプラス環境科学研究所による）

排出シナリオ	年平均気温	冬期平均気温	夏期平均気温	年平均降水量	冬期平均降水量	夏期平均降水量
B2	2～2.5℃上昇	1.5～2℃上昇	2.5～3.5℃上昇	0～5%減少	0～10%増加	5～25%減少
A2	3～3.5℃上昇	2.5～3℃上昇	4～5℃上昇	0～10%減少	5～20%増加	20～35%減少

※（Cochran, Ian　2009）10、15 頁より作成。

フランスでは気候変動適応行動を計画し、不適当な適応を避け、適応に係る公的政策の一貫性を確保することを目的として、2011 年 10 月に全国気候変動影響適応計画（対象期間：2011～2015 年）が策定された。

同計画の背景となる水災害・水資源管理に係る主な将来予測は次のとおりである。（Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing　2011）

(1)楽観的シナリオ（IPCC 第 4 次報告書(2007 年）の B2 シナリオ)、悲観的シナリオ（同 A2）の 2 つのシナリオにより 2100 年までの将来予測結果を提示。
(2)春・夏（乾期）は両シナリオとも降水量は低減傾向。
(3)悲観的シナリオでは夏の降水量が 2050 年頃約 10%、2090 年頃同 30%減少。（南西部で最も減少）
(4)夏期の渇水期間が長くなる傾向が全地域で明確。
(5)全土の河川で夏・秋に平均流量が急減 。
(6)冬（雨期）にはアルプス及び南東部で河川流量が増加。
(7)セーヌ川流域についての研究によると、使用した全モデルにおいて現況に比べ 21 世紀末の流量が 20～40%減少。
(8)河川の極端な高水位についてはあまり変化しない。

また、水災害・水資源管理に係る気候変動適応策として例えば下記方策が挙げられている。
(a)たとえ気候変動が生じなくても便益の生じる対策（後悔しない「No regrets」対策)。
(b)既存貯水施設の最適化、必要に応じた貯水施設新設。
(c)海面高さの変動の観測体制の確立。
(d)海岸のリスク低減計画における海面上昇予測の考慮。

フランスの主要河川の堤防は 1/100 （都市域は最大 1/500）年確率洪水を対象に設計されているが未完成区間が少なくない。

1995 年にバルニエ基金が設立され、洪水危険区域にある資産を洪水から防御する費用が当該資産の価値を上回る場合には当該資産を買い取ることができるようになっている。

フランスには 28 万 km の河川等があるが、国家が保有するのは 1.4 万 km のみである。3 万 6 千の地方自治体が洪水リスク及び秩序・安全の維持の第一責任者である。国家は洪水予報と警報システムについて責任を持つ。

フランスは洪水危険度に応じた法的強制力を持つ地区設定の長い伝統（1935 年以来）がある。1982 年には洪水保険制度とともに洪水危険区域図（PER）が導入された。PER では高洪水危険区域（赤色区域）での建築は禁止され、中洪水危険区域（青色区域：パリの例では 1/100 年確率洪水に相当する 1910 年洪水の浸水区域）では建築規制（イトン川の例では基準浸水位より 20cm 上に建築する必要あり）に従うものとされている。

1995 年には PER を「予想される自然リスク防止計画」（PPR）に強化し、全地方自治体に PPR の作成を義務づけた。PER とは異なり PPR は知事の承認が必要である。（RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment　2004）

2.2.3.5 米国

米国では2008年に環境保護庁（Environmental Protection Agency）が「国家水プログラム戦略：気候変動への対応」（National Water Program Strategy: Response to Climate Change）により水資源等に係る気候変動の潜在的影響を概観し（Environmental Protection Agency　2008)、2009年には気候

変動科学プログラム（Climate Change Science Program（CCSP））が「統合・評価成果4.1：海水面上昇に係る沿岸部の敏感さ：中部大西洋地区を対象として」（Synthesis and Assessment Product 4.1（SAP 4.1）Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region）を発表し、海水面変化が沿岸・河口部に様々な影響（海岸浸食、沿岸低地の浸水、洪水被害の変化等）を与えうると指摘した。（USACE　2011）

これらを受けて、気候変動適応に係る連邦政府横断タスク・フォース（The Interagency Climate Change Adaptation Task Force）が 2009 年に設置され、連邦政府諸機関の政策・プログラム・計画検討が米国の気候変動への準備により貢献する方策の大統領への提言が行われている。（2010、2011 年に進捗報告書を発表）（Interagency Climate Change Adaptation Task Force　2011）

連邦政府による具体的な気候変動適応策は海面上昇に係る事例に限られている。陸軍工兵隊は 2009 年に「土木事業プログラムにおける海水面変化の考慮」（Water Resource Policies and Authorities Incorporating Sea-Level Change Considerations in Civil Works Programs）（技術回覧 EC1165-2-211）を発出し、2011 年には改訂版となる同（Sea-Level Chance Considerations for Civil Works Programs）（同 EC1165-2-212）を発出し次の事項を規定している。

- 感潮区間を含む沿岸部の活動において海水面変化を考慮すること。（必要に応じ洪水調査等における出発水位で考慮）
- 将来の海水面変化予測を計画、設計、工事、管理プロジェクトで考慮すること。計画・工学的検討・設計において次の事項がいかに気候変動及びその他地球規模の変化に対して敏感・適応可能か考慮しなくてはならない。
  ①自然・改変エコシステム　　②人間社会
- 計画調査及び設計は、将来可能性のある海水面変化の全範囲を対象として作成・評価された代替案を考慮すべきである。各代替案は「低」「中」「高」の将来の海水面変化速度についてプロジェクトを実施する場合としない場合とについて評価されること。

なお、2012 年春に陸軍工兵隊の水文工学センター等で聞き取り調査を行った限り、海面上昇以外の（例えば洪水流量に係る）気候変動適応策についてはまだ議論中（気候変化はありそうだとの点ではおおむね合意できているが、どの程度の影響が予測されるかについて合意できていない）であり指針はまだ示されていないとのことであった。

州政府の気候変動適応策では、メリーランド州気候変動委員会が 2008 年に「メリーランドの気候変動影響の包括評価」（Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts in Maryland）によりメリーランド州の農業、森林資源、漁業資源、淡水供給、水陸のエコシステム及び人々の健康に全球気候の変動が及ぼしうる影響を評価（Maryland Commission on Climate Change　2008）し、同委員会は 2011 年に「メリーランドの気候変動に対する脆弱性低減のための包括戦略」（Comprehensive Strategy for Reducing Maryland's Vulnerability to Climate Change）により、メリーランド州の人々の健康、農業、森林・陸域のエコシステム、湾及び水域のエコシステム、水資源、人口増加及び社会資本を対象として、気候変動に対する脆弱性を低減するための短・中期の適応策の概要を示した。（Maryland Commission on Climate Change　2011）

カリフォルニア州では、2009 年に同州水資源局が「カリフォルニア水計画 2009」（California Water Plan 2009）（1957 年より定期的に更新（前回更新は 2005 年））を公表し、カリフォルニア州の水資源の現況、気候変動影響等について整理するとともに、2050 年までの 3 つの将来シナリオ、水資源管理戦略、地域別戦略を提示している。（Department of Water Resources, CA　2009）

2.2.3.6 イタリア

気候変動の影響を考慮した事例であるイタリア北東部に位置するベネチアのモーゼ計画の概要は次のとおりである。

ベネチアは外敵の侵略から逃れるため干潟内の島等に建設された都市であるが、近年「高潮被害」「海岸浸食」「干潟環境の悪化」に直面している。ベネチアはアドリア海の北端にあり、シロッコと呼ばれる初冬の季節風が吹きつける場所のため高潮が押し寄せやすい特性がある。これに加え、世界的な海面上昇、地下水の汲みあげによる地盤沈下によって浸水頻度が増加している。((長倉敏郎　2006）における現在水位は 1900 年初頭と比べ 23cm 上昇）

伝統的にベネチアの Punta Salute 地点（大運河内）の潮位が 80cm 以上で「高潮（High tide)」とされ、町の低地部分（市の中心であるサン・マルコ広場）の交通・歩行に支障が生じる。同 100cm 以上でより広範囲の歩行・車の運転に支障が生じる（公共空間の 5%が浸水)。同 110cm で市域の約 12%が浸水に影響され、同 140cm で市域の 59%が浸水する。(Institution Centro Previsioni e Segnalazioni Maree　2012）

高潮対策として干潟と外海（アドリア湾）とを結ぶ 3 つの水路に可動堰を設置するモーゼ計画に 2003 年に着工しているが、同計画はベネチア事業連合（略称 CVN、民間建設会社で構成）が基本計画を策定し、公共事業交通省等で構成される委員会が同計画を決定し、CVN が工事を実施している。110cm を超える高潮が予測されるとフラップゲートが起き上がる。陸側と海側の水位差について最大 2m まで（潮位 3.1m まで）対応する計画となっている（長倉敏郎　2006)。(2012 年 9 月時点工事進捗率 75%（Ministry for Infrastructure and Transport　2012))

同計画では地球温暖化による海面上昇を見込んでおり、60cm までの海面上昇（IPCC 第 4 次報告書による 100 年後の上昇予測 18～59cm を上回る）に対応している。(Ministry for Infrastructure and Transport　2012）

2.2.3.7 ベルギー

ベルギーは 3 つの地域（フランダース、ワロン、ブリュッセル）から成る連邦国家であり、水管理と空間計画は各地域の責務である。許可制の自然災害（洪水を含む）保険制度の導入について検討中である（2004 年時点)。

堤防等の設計対象洪水規模については引き続き調査中であるが、100、350 年確率の事例がある。フランダース地方のシグマ計画（第 2 次）完成時には 1 万年確率洪水に対応とのことである。

ベルギーの 2071～2100 年の気温・降水量予測（高中低の 3 気候シナリオを用いて予測）は下表のとおりである（1961～1990 年比)（National Climate Commission　2010)。洪水リスクの将来予測（1998 年）によれば、2100 年までに 4～28%流量が増加し、調査対象全流域で洪水リスクが増加する結果となっている。(RIZA　2004）

気候変動適応策としては、適応策の選択肢の評価・優先順位付けのためのリスクに基づく手法（拡張した費用便益分析）の提案が行われている。(Giron, E., et al.　2010）

表-Ⅱ.2.2.3.9　ベルギーの気候変動予測（2071～2100 年時点　1961～1990 年比）

冬期気温	夏期気温	冬期降水量	夏期降水量
1.5～4.4℃上昇	2.4～7.2℃上昇	最大60%増加	最大70%減少

※（National Climate Commission　2010）14～15 頁より作成。

2.2.3.8 スウェーデン

スウェーデンは洪水問題が少ない国である。このため洪水防御施設の建設は割高と考えられ、仮設堤防・避難、氾濫流制御を考慮した道路等の設計、発電用ダムの操作による洪水被害最小化などが行われている（RIZA　2004）。スウェーデンにおいて洪水リスク評価、土地利用計画、危機管理計画は地方自治体の責務である（Van Alphen, J., et al.　2007、Ministry of Environment　2009）。土地利用計画に活用可能な洪水浸水地図をスウェーデン気象水文研究所が作成しているが、一般に洪水危険区域における建築規制はない。中央政府のスウェーデン救援事業庁（SRSA）は、地方自治体による土地利用計画策定に地域の救援事業者が参画することを奨励している。（RIZA　2004）

一般に、気候変動適応策実施の責務は地方自治体にある。具体的な気候変動適応策は主に最近極端な気象現象の影響を受けた地方自治体で始められている。多くの地方自治体で建築時の最低高さの引き上げ、洪水防御壁・ポンプ排水システムの整備が行われている。いくつかの地方自治体は豪雨時に問題が生じないよう、水路・下水道システムにおける対策を始めている。（Ministry of Environment　2009）

将来の極端な日平均気温については、スウェーデンのほぼ全土で 1961～1990 年に 20 年に 1 度の年最高値が 2071～2100 年には 2～4 年に 1 度に増加し、同 20 年に 1 度の年最低値はほぼなくなると予測。同極端な日降水量については、1961～1990 年に 20 年に 1 度の夏期最大日降水量が、地域により異なるが、2071～2100 年には 6～12 年に 1 度に増加し、1961～1990 年に 20 年に 1 度の冬期最大日降水量は 2071～2100 年にはほぼ全土で 4～6 年に 1 度に増加すると予測。（MISTRA SWECIA　2012）

表-Ⅱ.2.2.3.10　スウェーデンの 1961～1990 年における再現期間 20 年の気象事象の 2071～2100 年における再現期間予測

年最高気温	年最低気温	夏期最大日降水量	冬期最大日降水量
2～4年	ー	6～12年	4～6年

※（MISTRA SWECIA　2012）10～11 頁より作成。

将来（2071～2100 年）の 100 年確率洪水流量の地域別変化率（1961～1990 年に対する）の予測結果によると、イェータランド西部、スヴェアランド南西部及びノールランド北西部では全てのシミュレーションにおいて同流量が増加している。上記地方では洪水の再現期間が短くなることにより、より頻繁に洪水が発生する見込み。山岳地帯の 100 年確率洪水流量の増加は、管理河道のドミノ効果（上流の土砂の洗掘・流下による下流の流量増加のことか（筆者注））のリスクを有する。（Swedish Commission on Climate and Vulnerability　2007）

2.2.3.9 中国

中国の気候変動の影響評価・適応策の概要について気候変動枠組み条約に係る第 2 次国別報告書（2012 年）に基づき以下に述べる。

中国では 1990 年に気候変動に係る全国調整グループ（National Coordination Group on Climate Change）を設置し、同グループは 1998 年に「気候変動対応戦略に係る全国調整グループ」（National Coordination Group on Climate Change Response Strategies）に改編された。

2007 年には「気候変動に係る国家先導グループ」（National Leading Group on Climate Change。代表：国家主席　事務局：国家開発・改革委員会（National Development and Reform Commission）が設置された。同グループは現在関係省庁・組織の代表から構成され、気候変動に係る主要戦略・指針・政策の開発、気候変動への対応に係る活動、国際協力・調整のための対応計画のレビュー、気候変動への対応に係る主要課題に関する調整・検討を責務としている。同グループは 2008 年に 18 部から 20 部

へ拡充され、国家開発・改革委員会の下に気候変動部（Department of Climate Change）が設置された。

中国国家気候変動プログラム（China's National Climate Change Programme）（2007 年）に示されているように、ほぼ全ての省政府は「気候変動先導グループ」（Leading Group on Climate Change。代表：省の指導者　関連する地方機関より構成）を設置し、同グループは地方レベルでの気候変動対応行動を責務としている。また、気候変動に対応するための実施機関が省の開発改革委員会の下に設置されている。

気候変動に関して科学に基づく国家の決断を支援するため「気候変動に係る全国専門家パネル」（National Panel on Experts on Climate Change）が設置され、科学的助言並びに気候変動に対応するための戦略・指針・政策・法令・規制・対策に関する政策提案を行っている。

中国本土では特に 1990 年代より夏期の降雨量が増加傾向にあり、一方、春秋の降雨量はかなり減少し、気象上の渇水がより頻繁に広範囲で生じている。多くの全球温室効果ガス排出シナリオによれば、中国本土の年間降水量は増加しそうであり、A1B シナリオにおいては 2040 年には 2～4%降水量が増加する見込みである。

気候変動の影響によるより頻繁な洪水・渇水等のため、小麦とトウモロコシの生産量が過去 30 年間に 5%減少した。渇水の影響を受けた地域の面積は 1950 年代の 3.8 百万ヘクタールから 2000～2008 年の 14.5 百万ヘクタールへ 4 倍近く増加している。洪水の影響を受けた農地面積は 1950～2000 年の年平均で 9.37 百万ヘクタールであり、同期間に洪水のために減少した収穫量は全収穫量の 3%に当たる。過去 10 年間に渇水の影響を受けた地域の割合の平均及び渇水による被害率の平均は各 16.95%、10.05%に達し、1950 年代の同割合の各 2.3 倍、4.3 倍であった。

気候変動により中国北部の水資源が減少し、同南部で増加した。過去 30 年間に中国南部の河川流量及び全水資源量は約 4%増加し、同北部では河川流量が 17%減少し、全水資源量が 12%減少した。

過去 30 年間平均で中国沿岸部の海面は年平均 2.6mm 上昇した（全球平均年 1.7mm より大きい）。また、高潮被害及び沿岸浸食が激しくなっている。平均海面上昇量予測は下表のとおりである。

表-Ⅱ.2.2.3.11　中国沿岸の海域別海面上昇量予測（2040 年まで、単位 ㎜、2010 年比）

海域	2040年までの予測値　mm
渤海	74-122
黄海	81-128
東シナ海	83-132
南シナ海	78-130
海域全体	80-130

※（China　2012）94 頁より作成。

海面上昇による珠江（Pearl River、南部のベトナムとの国境近くの川）の三角州地帯への影響が予測されており、2050 年までの海面上昇を考慮すると現況の海岸防御壁では観測史上最大の高潮又は 100 年に 1 度の高潮により人口の 2.2%、地域 GDP の 2.1%が失われる可能性があるとしている。

中国の気候変動適応に係る主な政策・行動として下記が挙げられている。

(1)農業構造の適合化、高効率灌漑・天水栽培における節水技術の展開。

(2)洪水・土砂・渇水災害軽減、水資源開発・保全プロジェクトの拡充、洪水・渇水管理システム制度の強化。

(3)森林保全、砂塵発生防止のための主要建設プロジェクトの強化。

(4)海岸防御施設のかさ上げ・強化による海面上昇に適応した沿岸部・地域の社会資本の能力強化。
(5)伝染病の流行・公衆衛生における緊急事態の直通報告システムの設置。（China　2012）

2.2.3.10 韓国

韓国における気候変動の影響としては洪水被害の増大（10 年ごとに 3.2 倍に増大してきた）等が挙げられており、2010 年に関係 13 機関（省庁レベル）による全国気候変動適応マスタープラン（2011～2015 年）（National Climate Change Adaptation Master Plan (2011～2015)）が策定されている。同プランには 10 の分野について 87 の主要課題が位置づけられている。

極端気象事象については、これまでに日降水量が 80mm を超える日数が 1970 年代に比べて倍以上に増加しているとしている。

将来の気候予測については、MM5 地域気候モデルにより水平方向解像度 27km で A1B シナリオに基づき実施している。同予測によると、21 世紀末には降水量が 17%増加（1971～2000 年比）するとされるとともに、時空間的変動性の増大に伴う渇水や豪雨の増加が地域によっては予測されている。

気候変動の影響により大規模地滑りが Mt. Jiri 国立公園にて生じているとし、夏期の頻繁な豪雨が年間 1 千ヘクタールの地滑りに影響しているとしている。

2000～2009 年の 10 年間の洪水頻度は以前の平均に比べ 70%増加しているとしている。また、渇水が将来悪化するとしている。

気候変動適応策については、2011 年 6 月に政府の適応策に関する新しい展望と計画が発表された。同適応策は 7 つの分野（公衆衛生、災害、農業、森林、海洋・漁業、水管理、生態系）に分類され、実施結果については 3 年目、5 年目に総合評価報告書として発表される。

災害分野の適応策としては、災害防止施設の整備（同整備に資する脆弱性評価システムの導入）、洪水等に係る保険の強化（2006 年以降実施中）、災害危険地域の維持管理、情報技術による局地豪雨警報システムの整備（2011 年以降実施中）、都市計画における気候変動に係る脆弱性評価手法の確立（2011 年以降実施中）が挙げられている。（The Republic of Korea　2011）

2.2.3.11 インド

インドは国土の 12%が洪水氾濫域にあり、また、国土の 16%で渇水の可能性があるとされている。同国には流域面積 2 万 km² 以上の主要河川流域が 12、同 2 千～2 万 km² の中規模河川流域が 46 あり、両者を合わせると国土の約 81%を占めている。

インド政府による第 2 次国別報告書（2012 年）に係る将来の気候予測については、ハドレイ・センター（Hadley Centre）の地域気候モデルの第 2 世代（HadRM2、PRECIS、水平方向解像度 50km）を用いて A1B シナリオにより実施されている。同分析は 2011 年から 2098 年までについて 3 時期（2020、2050、2080 年代）に分けて実施されている。同分析によるとインド亜大陸南部の一部地域を除き、モンスーン（雨季）の降雨量の大きな減少はなさそうとのことであり、21 世紀末のモンスーンの降雨量は 10%前後の増加が予測されている。

降雨日数は現在よりも減ることが予測されており、多くの地域、特に中央部で、降雨強度がより大きくなることが予測されている。

サイクロンについては襲来頻度が低下すると予測されているが、強度はより大きくなるかもしれないとされ、また、サイクロンの進路は現在と変わらないと予測されている。

水資源・洪水に関しては総流出量等を A1B シナリオにより短期（2021～2050 年）及び長期（2071～2098 年）について予測・分析し、長期的には多くの流域で降水量が増加し、蒸発散量については流域・期別に増加・減少（多くの流域で蒸発散量が 40%以上増加）すると予測しているが、これらの

予測値は流域平均値であるため、流域内の地域差に留意が必要とし、流域平均では総流出量が増加しているがいくつかの小流域では総流出量が減少している例を挙げている。また、流域の降水量が増加しているにもかかわらず総流出量が減少している河川が挙げられており、気温上昇に伴う蒸発散量の増加が原因とされている。

渇水については農業関係について土壌湿潤指標（Soil Moisture Index）により予測し、長期的には中程度までの渇水はほぼ全ての流域において軽減されるが、中程度から極端な渇水は、降水量の増加にもかかわらずさほど改善されないとしている。

洪水については小流域ごとの日流出量シミュレーション結果から年最大流量を求め、現況（1961～1990 年）の 99 パーセンタイルの洪水流量からの変化率を算出し地図上に色分けして示している。

海面上昇については地域の精密な将来予測が利用可能となるまでは全球予測結果を使うものとし、平均 4mm/年の上昇としている。(Ministry of Environment & Forests Government of India　2012)

また、同国政府（気候変動に係る首相審議会（Prime Minister's Council on Climate Change)）は 2008 年に気候変動に係る国家行動計画(National Action Plan on Climate Change)を発表しており、国家の 8 つの使命として「太陽エネルギー利用」「エネルギー効率の向上」「持続可能な居住」「統合水資源管理」「ヒマラヤ生態系の維持」「炭素貯蔵等に係る自然機能の向上」「持続可能な農業」「気候変化に係る戦略的研究」を挙げている。(Prime Minister's Council on Climate Change　2008)

上記使命に関する目的・戦略・行動計画・予定表、モニタリング・評価基準について詳細に述べた包括的使命文書（Comprehensive Mission documents）が 2011 年に発表されている。「統合水資源管理」に関しては、5 つの目標（「包括的公開水データベースの整備と水資源への気候変化の影響の評価」「水の保護・増大に向けた国民・国家の行動の促進」「過剰取水地域を含む脆弱な地域への配慮」「水利用効率の 20%向上」「流域レベルの統合水資源管理の促進」）が挙げられ、目標ごとに実施年が明示されている（例　「包括的公開水データベースの整備と水資源への気候変化の影響の評価」について「全てのデータと全体の情報（慎重さを要するデータ及び機密に属するデータを除く）の 2012 年までの公開」）(Government of India　2011)

2.2.3.12 インドネシア

インドネシアは 17,500 以上の島からなる 81,000km の海岸線を持つ国であり、国民の大部分が海岸近くで生活している。

同国ではこれまで地域により異なる降雨の変化傾向が観測されている。14 の全球循環モデルによる将来予測が A2 及び B1 シナリオを用いて 2025、2050、2080 年について行われている。雨季の降水量は地域により増加・減少傾向が予測され、乾季の降水量は年代により増加・減少傾向が予測されている。また、雨季の開始時期が遅れ（2050 年には現況より 30 日開始時期が遅れる頻度が高まる可能性が高い)、雨季が短くなる傾向が予測されている。

水資源関係ではジャワと東部諸島では多くの年に既に水資源不足になっているが、気候変動により更に多くの地域での水不足が見込まれている（供給量を月降水量と森林比率から求めるとともに需要量を人口予測等から推定し試算)。このため貯水施設の設置と流域間導水が選択肢として挙げられている。

海面上昇については 2050 年に約 25cm、2100 年に同 50cm の上昇を予測し、地盤沈下と相まって沿岸部の都市の多くの部分が浸水するとしている。(Ministry of Environment Republic of Indonesia 2010)

同政府は 2007 年に「気候変動に係る国家行動計画」(National Action Plan Addressing Climate Change）を策定し、同行動計画は同国の長期開発行動計画 2005-2025 年（Long Term Development

Action Plan 2005-2025）及び中期開発行動計画（Medium Term Development Action Plan）に含まれるものとされている。

同行動計画には緩和策と適応策について記述されており、適応策については気候変動に対し脆弱とされる水資源、農業、漁業、沿岸・海洋、社会資本・集落、健康、森林の分野別に、時期（2007-2009、2009-2012、2012-2025、2025-2050 年の 4 期間）及び責任機関（省庁部局名）を明示して記述されている。例えば水資源分野については気候変動により渇水がより悪化し、海水面の上昇による地下水への塩水浸入により飲用水及び農業用水の質が低下するとし、適応策として貯水池開発プログラム（ジャワ、スマトラ、スラウェシ、マルク、バリ等）などを挙げている。（Republic of Indonesia　2007）

2.2.3.13 フィリピン

フィリピンは 7,107 の島嶼から構成され、うち 1,000 が居住に適している。地形の特徴は大部分を占める山地と狭い沿岸平野と内陸の谷・平地である。1998 年 4 月時点の県の数は 78、市は 85、町村は 1,525 である。同国には 12 の水資源地方（水文的・自然地理的境界、気候により分割）があり、343 の独立した主な河川流域（各流域面積 40km² 以上）があり、これらの合計は国土の 66.5%を占める。これらのうち 20 の主要河川流域は各流域面積が 990km² 以上である。海岸線の延長は約 32,400km であり、県の 80%、市町村の 65%が海に面している。（Philippines　1999）

フィリピンでは 1951 年から 2010 年までに年平均気温が 0.64℃上昇するとともに、サイクロンの通過数の増加が観測されている。

また、中程度の排出シナリオに基づくフィリピン大気地球物理天文機構（Phillippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration）による 2020～2050 年の気候予測結果によると、夏期には国土の大部分で降水量が減少するが、6～8 月の南西モンスーン期にはルソン島の大部分等で降水量が増加しそうである。12～2 月の北東モンスーン期の降水量は増加しそうであるが、一部減少傾向が予測されている。（Climate Change Commission　2011）

2009 年には気候変動を政府の政策において主流化し、気候変動に係る枠組み戦略及びプログラムを策定するとともに気候変動委員会を設置する「2009 年気候変動法」（Republic Act No. 9729, Climate Change Act of 2009）を制定している。同法では気候変動委員会の構成・権能・職務、気候変動枠組み戦略・計画、国家気候変動行動計画、地方気候変動行動計画、気候変動に係る予算、合同監督委員会、年報等について規定している。（The LAWPHiL Project　2013）

2010 年には気候変動国家枠組み戦略（National Framework Strategy on Climate Change）が採択され、枠組み戦略はリスクに基づくこと、適応策を中心とすることなどの指針が定められている。

2011 年には国家気候変動行動計画（National Climate Change Action Plan 2011-2028）を大統領が承認し、2011～2028 年のフィリピンの適応策及び緩和策の概略の予定表が公表された。同計画では優先分野として「食料」「利水」「自然生態系・環境」「人間の安全」「気候に応じた産業・利用」「持続可能なエネルギー」「知識・能力開発」を挙げている。

上記のうち「利水」分野の目標は「水資源の持続的管理と平等な利用の確保」とし、焦点となる 3 つの短期的成果（他に中期的・長期的成果も記載されている）として「気候に適応し、水分野の性差別撤廃に向けた水管理の再構築」「水供給と安全で手頃な水利用の確保」「気候変化に適応するための水分野の知識・能力の向上」を挙げている。そして各指標・関連組織を明示し、2011～2016 年、2017～2022 年、2023～2028 年の 3 期間に分けて行動と期待される成果を示している。例えば期待される 3 つの直接的成果の 1 つ目の「気候に適応し、水分野の性差別撤廃に向けた水管理の再構築」については指標として「既存の水資源管理法令がレビューされ調和させられる」等 3 つを挙げ、関連組織として「環境・自然資源部」（Department of Environment and Natural Resources）等を挙げ、行動と

して「既存の水資源管理制度・政策のレビュー・合理化」を 2011～2016 年に実施するなどとし、同行動により期待される成果として「調和した合理的な水資源管理制度・政策が策定・確立される」等を挙げている。

また、同「人間の安全」分野の目標は「男女及び脆弱な集団（子供、老人、障害者等）の気候及び災害によるリスクの低減」とし、焦点となる 3 つの短期的成果として「全国及び地方レベルでの気候変化適応策及び災害リスク低減策の全領域での実施」「健康及び社会の保護システムの気候変化リスクへの対応」「気候変化に適応した居住及び利用の開発・促進・採用」を挙げ、指標として「脆弱性及びリスク評価が全ての県で実施される」等を挙げ、関連組織として「気候変化委員会」（Climate Change Commission）等を挙げ、行動として「県レベルの気候・地質上のリスクの明確化」を 2011～2016 年に実施するなどとし、同行動により期待される成果として「県レベルのリスク情報・地図」等を挙げている。（Climate Change Commission　2011）

2.2.4 各国の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法

気候変動による影響に限らず、整備水準を上回る規模の洪水等が発生した場合に防災施設がシステムとしてどのように挙動するか事前に予測・評価しておくことは危機管理対策の検討等において重要と考えられる。諸外国では、例えば米英蘭において防災施設の機能発揮に係る確率分布（幅）について定量的な考慮手法の研究・実施が進められてきており、以下に主な事例について述べる。

※注　「不確実性」と「不確定性」: 以下本節では「不確実性」を「確率分布を仮定せずに分析する場合」に用い、「不確定性」を「確率分布を仮定して分析する場合」に用いる。

2.2.4.1 米国陸軍工兵隊の事例

米国の河川堤防の機能発揮に係る技術基準等の概要は次のとおりである。

なお、米国陸軍工兵隊では 1996 年以降不確定性を定量的に考慮したリスク分析手法を導入しており（板垣、吉谷　2012b）、同年前後で手法が異なることに留意されたい。

・堤防の設計基準

土堤の設計・建設において用いる基本原則は陸軍工兵隊の「堤防の設計・施工」（Design and Construction of Levees）（技術マニュアル EM1110-2-1913）（2000 年）に示されている。

・堤防のフラジリティカーブ

堤防のフラジリティカーブ（堤防等施設に作用しうる外力（一般に洪水位）範囲について、外力に応じた破壊確率を表した曲線）は洪水被害低減プロジェクトの事業便益評価時に使用されている。陸軍工兵隊の基準を満たす堤防は堤防天端未満の水位における破堤確率は 0。（注意 : 堤防天端水位まで洪水を安全に流せる意味ではない。堤防の余裕高の考え方欄参照）堤防天端の水位で破堤確率 0.85。古い、劣化した可能性のある堤防については、技術者の判断により PFP（Probable Failure Point : 85%破壊する確率の水位）及び PNP（Probable Non-failure Point : 15%の確率で破壊する水位）を設定し、両者の間を一般に直線で結ぶか、堤体を構成する土質特性等を踏まえ FOSM（First-Order Second-Moment）、PEM（Point Estimation Method）などによりフラジリティカーブを導出する。陸軍工兵隊の基準を満たす堤防は天端水位で破堤確率 0.85。同基準を満たさない堤防についてはフラジリティカーブによる。既存堤防の改良プロジェクト等の事業便益評価時にはフラジリティカーブを用いたモンテカルロシミュレーションを行う（陸軍工兵隊水文工学センター（Hydrologic Engineering Center、HEC）が開発した HEC-FDA（Flood Damage Reduction Analysis）等のソフトウェアが使われている）。フラジリティカーブは過去の洪水時の機能発揮状況（パフォーマンス）を重視しつつ、解析結果、技術者判断を踏まえ導出する。対外説明、合意形成には解析手法が望ましい。現在のフラジリティカーブには堤防の長

さは考慮されていない。同解析に用いる土質定数の標準偏差には滑り面の面積等は考慮されていない。

・事業便益評価における既存堤防破堤水位

堤防の構造上の完全性に疑念のある場合（越水前に破堤する恐れがある場合。特に既存の非連邦堤防又は古い堤防で劣化が進み当初意図していた水位まで耐えうると仮定できない場合）には常に、外水位に応じた堤防の土質工学的破壊確率を土質工学に基づく分析により設定し、便益評価時に使用する。この場合、いかなる堤防も天端水位まで耐えられるものとすべきでない。（既存堤防の便益評価時の破堤水位の検討時に）適当と認められる場合、過去の洪水時の挙動はテンプレート手法（template method）（筆者注　日本のスライドダウン手法に類似。後述※注参照）に取ってかわる。一般に PNP は、一貫して堤防に異常が生じていない過去の経験水位より低くすべきでない（当該水位経験時に比べ現在堤防の信頼性が低下していると信じうる理由がある場合を除く）。

※注　Template 手法：天端幅を粘土では 10 フィート（約 3m）、砂では 12 フィート（約 3.6m）、法勾配を 1:3（粘土）から 1:4（砂）とした仮想断面で既存堤防等の中に含まれるものの中で最も高い天端高さ等を PNP（被害がほぼ発生しない高さ）、同天端幅を 6 フィート（約 1.8m）、法勾配を法滑りの安全率が 1 となるよう設定した仮想断面の最も高い天端高さを PFP（これを超えると被害がほぼ発生する高さ）とする手法。（USACE　1993）

・1996 年以前の事業評価時の破堤（被害発生）水位

陸軍工兵隊の基準を満たす堤防については、堤防の高さと等しい水位まで被害は発生せず、同水位を超えると被害が発生しはじめる。事業便益計算上の堤防高さに freeboard は含めない。既存堤で原則 3 フィートの freeboard を確保できない水位では防御効果を見込まない。信頼性の不確かな既存堤防等については過去の経験水位・Template 手法等により被害発生水位を設定。

・堤防の freeboard の考え方

リスク評価手法への移行前、freeboard は design flood stage（設計対象洪水の水位）に加える高さであり、design flood stage の不確定性に対応するとともに、他の工学上の不確定性に対する緩衝となるものであった（最低 3 フィート（約 90cm））。1996 年のリスク評価手法への移行により、固定した minimum freeboard criteria（最低 freeboard 基準）は定量的な条件付非超過確率（assurance）へ移行した。当該 assurance は base flood（全米洪水保険制度において基準となる洪水）を最低 90%防御しうる（堤防天端高さの洪水位の非超過確率が 90%以上（ただし同 95%を上回る必要はない））ものとしている。

一方、連邦緊急事態管理庁（Federal Emergency Management Agency、FEMA）は全米洪水保険制度の堤防認証基準において原則 3 フィートの freeboard の確保を求めている。原則最低 3 フィートだが、不確定性に関する分析結果から 3 フィート未満としても良い。ただし、2 フィート未満は認めない。また、一連の堤防区間の上流端で 0.5 フィート（約 15cm）、下流に向けて徐々に減少し同下流端で 0 以上となる高さを最低限の freeboard に加えるものとしている。

なお、2012 年春のカリフォルニア州サクラメントでの聞き取り調査によれば、工兵隊の技術文書 ETL1110-2-299 に基づく余裕高を縦断的に変えて越水開始地点を限定する手法（USACE　1986）は、現在全てに適用されているわけではないとのことであり、適用されない理由として越水開始地点周辺への家屋の立地が挙げられていた。

・事業評価制度における B/C の位置づけ

連邦機関は Principles and Guidelines (WRC 1983)（以下 P&G）に基づき治水事業選択肢からの選定等を行うが、P&G では一般に治水事業は国家経済開発（national economic development）に貢献する（便益がコストを上回る）ことが求められる。しかし、他の考慮事項により、最大の国家経済開発便益（national economic development benefits）を与える事業以外を選定することがある。例えば、FEMA

の全米洪水保険制度で基準となる洪水（base flood）に対応した堤防等の選択肢がしばしば優先される。（経済評価に基づく事業規模から全米洪水保険制度に対応した事業規模までの費用増分については地元が全て負担することになる）

工兵隊では、プロジェクトの便益がコストを上回るだけでなく、プロジェクトの各要素についてもコストを上回る便益を生じさせなくてはならない。

・B/C 計算手法（工兵隊による河川洪水被害低減事業の場合）

(1)計算を容易にするため対象流域を reach へ分割。

(2)各 reach における洪水頻度及び被災可能性のある資産を定量化するためのデータの収集。

(3)洪水流量の生起確率、流量・水位関係、水位・被害関係式の導出。

(4)堤防、洪水防御壁、移転、避難、ダム、放水路などの代替案（選択肢）を作成し、各コストを算出するとともに、上述(3)の各関係式が代替案ごとにどのように変化するか明らかにする。

(5)導出された各関係式を統合し、代替案ごとの想定被害、被害軽減及び便益を算定。

(6)代替案ごとに、①事業コスト、被害軽減及び便益　②残留洪水リスク（特に施設完成後の年平均超過確率、長期リスク）を算出し、事業を実施しない場合と比較。

代替案ごとの便益等を算出するためのモンテカルロシミュレーションは HEC-FDA ソフト（既出）等により実施している。

・同一氾濫ブロック内複数点破堤の有無

各 reach で最も弱い地点又は最大被害を生じさせる地点 1 箇所を想定氾濫地点とする。

・被害額の計上方法

年平均被害額、年平均被害軽減期待額、施設能力の年超過確率の中央値、施設能力の年超過確率、長期間（10、25、50 年間）の施設能力超過確率、条件付施設能力非超過確率（超過確率 0.02、0.01 又は 0.004 の洪水が発生した場合の施設能力非超過確率）を示している。

・波及被害の計上方法

地域外への影響の「Rest of Nation」部門への計上、支払意志額（willingness-to-pay）の活用、社会の安全（public safety）への影響（残留リスク、自然災害の頻度又は強さ、リスク管理施策の信頼性、危険にさらされている人々の数、災害による潜在的な犠牲者数、影響される人々の避難又は死傷を避ける力と手段、必要不可欠な公共サービス喪失等への影響）を明記している。例えば、人的被害の評価ソフトとして HEC-FIA（Flood Impact Analysis）が用いられている。

・洪水対策計画立案の考え方

計画立案過程は、リスク評価手法導入後も従来と同様（関連する地域コミュニティ、利害関係者、他の連邦、州、地域機関、関連する公的・非政府組織と工兵隊による民主主義的なプロセスによる）。リスクに基づく（risk based）政策決定と呼ぶよりはリスクを踏まえた（risk informed）政策決定と呼ぶべきである。連邦政府による計画立案では P&G に基づき、様々な関連事項を考慮しつつ国家経済開発（national economic development）を最大化する選択肢等を立案する。地域コミュニティは事業目的のより良い設定と潜在的な解決策の提案を担う。議会の決定が絶対。

・洪水対策に係るリスク評価の基本方針

(1)洪水の発生確率と結果について正確で公平な評価を行い、同評価結果を公表・共有し、事業担当者と対象地域住民による慎重な検討において活用する。

(2)事業に係る不確定性を認識、定量化、公表、共有し、慎重な検討における重要な要素とする。（特に流量の生起確率、水位・流量関係、土質・構造特性、事業の運営・管理、事業のコスト・便益に係る不確定性を対象とする）

(3)残留リスク（計画対象外力を上回ることによる公共の安全、ライフライン、地域・地方経済への影

響）分析による同リスクの強調、同公表、共有による事業の慎重な検討。（Davis, D., et al.　2008）

・洪水流量の発生確率に係る不確定性の考慮方法

解析的に求める場合には信頼区間（confidence band）を「洪水流量頻度決定指針（告示 B17）」（Guidelines for Determining Flood Flow Frequency（Bulletin 17B））（Interagency Advisory Committee on Water Data　1982）に基づき設定。非解析的に求める場合には工兵隊の技術文書 ETL1110-2-537（USACE　1997）に基づく順位統計量による（Davis, D., et al.　2008）。流量～超過確率関係に対数ピアソンⅢ型分布を適用できる場合には、不確定性として非心 t 分布を採用（告示 B17 に基づく手法）。

・洪水流量と水位との関係における不確定性の考慮方法

歴史的な洪水、洪水痕跡、水理的パラメタの感度分析、水位観測データの分析、公表値に基づき考慮。（詳細は工兵隊の技術マニュアル EM1110-2-1619（USACE　1996）の 5-1～5-7 頁参照）

・水位・被害関係における不確定性の考慮方法

建物の 1 階の床高さ、建物の価値、被害発生曲線（damage fragility curve）についてモンテカルロシュミレーションを行い分布式及び分散を求めて考慮。（詳細は工兵隊の技術マニュアル EM1110-2-1619 の 6-1～6-7 頁参照）

・氾濫計算

堤防越水時の堤内水位については詳細な分析が必要としているが、内外水位が同じと仮定している事例が紹介されている。必要に応じ二次元不定流計算等を実施。

米国陸軍工兵隊の洪水対策事業の便益評価に係るリスク分析手法の特徴は次のとおりである。詳細は（板垣・吉谷　2012b）参照。

① ソフトウェア（HEC-FDA 等）を活用し効率的なリスク分析を図っている。
② 流量－超過確率関係、流量－水位関係、水位－被害関係ごとに不確定性を定量的に算入し、モンテカルロシミュレーションにより各関係を合成し、被害－超過確率関係を算定している。
③ 年平均被害軽減期待額だけでなく、残余リスク、一定期間（30 年間等）に施設能力を超過する回数等を算定している。

2.2.4.2 英国環境・食料・農村地域省及び環境庁の事例

英国の洪水リスク管理のためのリスク評価手法は「戦略的計画のためのリスク評価（RASP※注 1）プロジェクト」（2001～2004 年）（※注 1　RASP=Risk Assessment for Strategic Planning, 英国環境庁と環境・食料・農村地域省が委託した研究開発プロジェクト）により開発され、2004 年全国洪水リスク評価（NaFRA※注 2　2004）（※注 2　NaFRA=National Flood Risk Assessment）にて実際に適用された。同評価は全国堤防データベース（NFCDD=National Flood and Coastal Defence Database）に基づき実施している。リスク評価は、原因（source）－経路（pathway 又は barrier）－受容者（receptor）－結果（consequence）モデルに基づいている。

原因：水理的負荷（水位、波等）
経路：堤防の越流・破堤等
受容者：氾濫原内の人々・資産・社会資本・環境等
結果：被害等

洪水防御施設を線状の施設（堤防等）と点の施設（ポンプ、水門等）に分類して評価している。

洪水防御施設種類ごとの主要破壊モードが下表のとおり示されている。これらの破壊モードは主に詳細な（後述）信頼性評価において重要とされている。

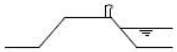
表－Ⅱ.2.2.4.1　洪水防御施設の種類ごとの主要破壊モード

Flood and coastal defence type		Key Failure Modes
Embankment / sloping seawall		• Erosion of crest and inside face leading to breach following overtopping (possibly induced by settlement) • Piping, excessive seepage, breach or collapse following deterioration due to vermin infestation • Breach following failure of foreign objects or weak spots caused by their presence
Slope protection against erosion		• Structural failure following vandalism • Toe erosion/foundation failure • Slip failure due to instability or foundation failure • Failure of slope drainage • Damage by boats and barges • Structural failure of inflexibility of rigid revetments placed on dynamic watercourses/coastlines
Vertical wall structures		• Overtopping • Toe erosion • Failure of structural members (e.g. tie-rod or anchorage system) • Structural failure due to wash out of fill following joint failure • Structural failure following abrasion or corrosion
Beaches	Sand / Shingle Beach	Beach roll-back and erosion are natural cyclic processes rather than failure Beaches fail when they do not perform their primary function (e.g. overtopping/ tidal flooding/erosion protection), although they may recover with time. Key processes resulting in failure: • Overtopping due to erosion/gullying/reduced energy dissipation following beach lowering • Failure of control structures
	Beach control / wave attenuation structures (ancillary coastal structures)	Failure is a failure of the system the structure directly or indirectly protects Key failure modes: • Progressive failure of timber groyne system following deterioration by rotting, abrasion, vandalism • Ship impact

©Crown copyright (Defra); (2007)
※（Defra　2007a）92 頁より。

また、線状の防災施設（堤防等）の経年劣化に係る指標が例えば下表のとおり示されている。

表－Ⅱ.2.2.4.2　堤防・海岸傾斜壁の劣化指標等の例

Flood and coastal defence type	Failure modes	Indicators of Failure	Deterioration	Indicators of Deterioration
Embankment / sloping seawall (defence could include crest wall to embankment, particularly for coastal areas) 	Non-structural failure: • Overtopping • Seepage • Outflanking Structural failure: • Erosion of crest and inside face following overtopping Erosion of outside face • Global slope instability (rotational or translational) • Shallow slope instability • Damage/failure of revetment • Bearing capacity failure • Sliding • Piping • Toe or retaining structure failure • Failure due to presence	Non-structural: • Saturated ground along inner face of defence • Erosion and low points at end of defence Structural • Obvious cutting into slope • Obvious erosion and damage to crest and slope following overtopping • Movement of embankment / wall • Settlement of crest • Obvious damage to, or local movement or abrasion of revetment • Downward movement of embankment/ wall • Lateral displacement of embankment/ wall • Saturated or wet ground along inner face or close to inner toe of defence	• Loss of beach or berm in front of defence • Settlement • Loss of fine material • Long term erosion (e.g. foreshore erosion, gradual slope erosion) • Animal infestation • Cracking/micro-fissuring • Seepage and softening • Vandalism • Crest and slope erosion due to	• Reduction in beach/berm level • Reduction in crest level • Reduction in foreshore level, gradual loss of slope material • Noticeable washout of fine material • Noticeable presence of burrowing animals, holes within embankment • Noticeable cracking (may only be apparent during dry weather) • Soft/saturated areas of defence or ground nearby during high water levels • Obvious vandalism damage to defence • Heavy use by vehicles/ pedestrians/ animals, tyre ruts, vegetation and bank

©Crown copyright (Defra); (2007)
※（Defra 2007a）26 頁より。

多くの洪水防御システムにおいて最も重要であることが多く、また、フラジリティカーブ導出上最も複雑な問題を生じさせるポンプと防潮水門について下記のとおり顕著な機能喪失モードが示されている。

(1)ポンプ

①機械的機能喪失

閉塞又は部品の故障による。

②電気的機能喪失

電気ケーブルの破断、電気系統の故障による操作の遮断による。

③施設的機能喪失

ポンプの施設全体の破壊による（原因：越流、越水、パイピング・滑り・転倒・強度不足による施設の不安定化)。

(2)防潮水門

①閉鎖できない

人的失敗、機械的故障、電気的故障。

②施設の破壊

越流、越水、パイピング、滑り、転倒。

③湾内貯留水量の超過

流入量が「貯留可能量＋流出量」を超える場合。

RASP による堤防の信頼性評価手法として下記 3 レベルの階層的リスク評価手法が開発されている。

・概略レベル手法（HLM ：High level Method）又は同改良型（HLM+：High level Plus）：NaFRA（既出）2004 で使用。空間解像度 1km×1km。
・中間レベル手法（ILM：Intermediate Level Method）：施設種別・複合外力考慮。空間解像度 100m×100m。
・詳細レベル手法（DLM：Detailed Level Method）：破壊モード間の依存性考慮。空間解像度 20m×20m。

上記 3 レベルのリスク評価において下記限界状態関数を設定。

Z=R-S

ここで、R:構造物の強さ　S:構造物に作用する力　Z:限界状態関数（Z≧0 で破壊せず)。

RASP の概略レベル手法改良型（HLM+）による河川堤防のフラジリティカーブ導出手法の概要は次のとおりである。

河川の土堤については指標とする破壊モードとして越流による堤体浸食、パイピングを選定。各破壊モードの限界状態関数に基づきモンテカルロシミュレーションにより各生起確率を算定し、各破壊モードが独立していると仮定し、それらの単純和を破堤確率とする。

越流による浸食について、限界越流水深 Δh_c は下記式-Ⅱ.2.2.4.1 により算出する。

$$\Delta hc=\left[\frac{2.78\cdot q_c^{\,2}}{g}\right]^{1/3} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{式-Ⅱ.2.2.4.1}$$

ここで、q_c は下記式-Ⅱ.2.2.4.2 により算出する。

$$q_c = \left[\frac{3.8 \cdot c_g^{2/3}}{(6 \cdot 10^5)^{2/3} \cdot [1+0.8 \cdot \log_{10}(P_t \cdot t_s \cdot \frac{c_g \cdot d_w}{c_g \cdot d_w + 0.4 \cdot c_{RK} \cdot L_{k,inside}})]} \right]^{5/2} \cdot \frac{k^{1/4}}{125 \cdot (\tan\alpha_i)^{3/4}} \quad \cdots式-Ⅱ.2.2.4.2$$

ここで、

c_g[m・s]=植生の耐浸食性係数（値の範囲：10^6（良）～3.3×10^5（悪））

P_t=越水（流）の生じる時間のパーセント（越流の場合 1）

t_s[hours]=嵐の時間長さ

d_w[m]=植生の根の深さ（値の範囲：0.05～0.07m。維持管理、植生の位置・種類に影響される）

C_{RK}[m・s]=表面の粘性土層の耐浸食性係数（値の範囲：7×10^3（悪）～54×10^3（良）、砂の場合 0）

$L_{k,inside}$[m]=堤内側の表層粘土層の厚さ

k[s^6/m^2]=堤内側法面の Strickler の粗さ因数

α_i [degrees]=堤内側法面の傾斜角

また、パイピングによる河川の土堤の破堤の限界水頭差：dh_c は下記式-Ⅱ.2.2.4.3 により算出する。

$$dh_c = \frac{t+1/3 \cdot L}{C_w} \quad \cdots\cdots式-Ⅱ.2.2.4.3$$

ここで、

t=堤防の下の不透水層の厚さ

L=水平方向の浸透路長

C_w=クリープ比（土質により異なる）

なお、上記計算に係る各パラメタの確率分布を下記のとおり提示している。

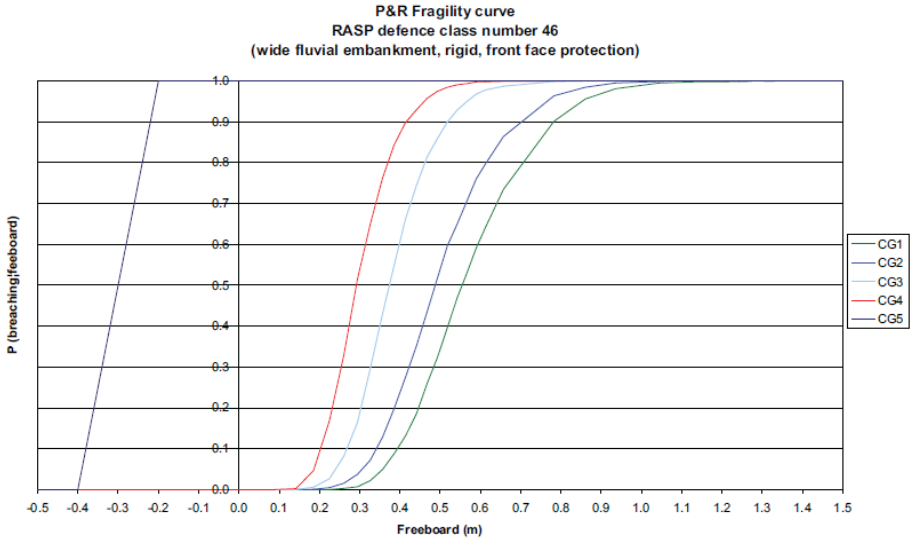
表-Ⅱ.2.2.4.3　英国の RASP 手法（概略レベル手法改良型）における各パラメタの確率分布

		Distribution function	Standard deviation (σ) or variation coefficient (ν)	Mean
Width L_K	Narrow (m)	lognormal	σ = 0.2	7.5
	Wide (m)			20.0
Tan α_i (angle inside slope)	Steep (tan)	normal	ν = 0.05	0.5
	Shallow (tan)			0.25
Erosion strength c_g		lognormal	ν = 0.30	See table below
Grass root depth d_w		lognormal	ν = 0.20	0.1
Roughness inside slope k		lognormal	ν = 0.25	0.015
Erosion strength core embankment c_{RK}		lognormal	ν = 0.30	23,000
t, thickness impervious layers		normal	σ = 2.5	0
C_w creep ratio		normal	σ = 0.2	
Seepage length L (m)	Condition 1	normal	σ = 0.2	60
	Condition 2			60
	Condition 3			60
	Condition 4			10
	Condition 5			6

©Crown copyright (Defra); (2007)

※（Defra　2007b）11 頁より。

河川堤防のフラジリティカーブの例は下図のとおり。



©Crown copyright (Defra); (2007)

図-Ⅱ.2.2.4.1　概略レベル手法改良型による河川堤防のフラジリティカーブ例

※（Defra　2007b）12 頁より。

※※横軸：堤防天端との相対水位、縦軸：破堤確率。凡例の CG は堤防の状態等級で CG1 が良好、CG5 が劣悪。

また、RASP の中間レベル手法（ILM）による河川堤防のフラジリティカーブ導出手法の概要は次のとおり。

限界状態関数等は HLM+と同様である。ILM では堤防に係るより多くのデータが利用可能なことから HLM+より不確定性が小さいとし下表のとおり HLM+より小さい（半分の）標準偏差を使用する。

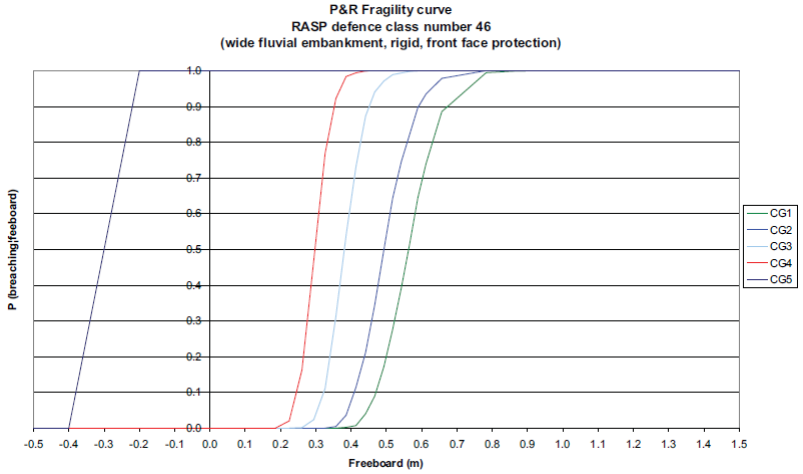
表-Ⅱ.2.2.4.4　中間レベル手法における各パラメタの標準偏差等

		Distribution function	Standard deviation (σ) or variation coefficient (ν)	Mean
Width L_K	Narrow (m)	lognormal	σ = 0.1	7.5
	Wide (m)			20.0
Tan α_i (angle inside slope)	Steep (tan)	normal	ν = 0.025	0.5
	Shallow (tan)			0.25
Erosion strength c_g		lognormal	ν = 0.15	See table below
Grass root depth d_w		lognormal	ν = 0.10	0.1
Roughness inside slope k		lognormal	ν = 0.125	0.015
Erosion strength core embankment c_{RK}		lognormal	ν = 0.15	23,000
t, thickness impervious layers		normal	σ = 1.25	0
C_w creep ratio		normal	σ = 0.1	
Seepage length L (m)	Condition 1	normal	σ = 0.1	60
	Condition 2			60
	Condition 3			60
	Condition 4			10
	Condition 5			6

©Crown copyright (Defra); (2007)

※（Defra　2007b）17 頁より。

中間レベル手法（ILM）によるフラジリティカーブ例（下図）は同一施設の概略レベル手法改良型（HLM+）によるフラジリティカーブ（既出）より勾配が急になっている（不確定性が減少している）。（CG5（劣悪な状態）のものを除く）



©Crown copyright (Defra); (2007)

図-Ⅱ.2.2.4.2　中間レベル手法（ILM）によるフラジリティカーブ例

※（Defra　2007b）18 頁より。

中間レベル手法（ILM）では下記洪水防御施設ごとにフラジリティカーブ導出手法が紹介されている。

(1)海岸堤防
(2)河川堤防
(3)アンカー付矢板
(4)片持梁式擁壁（アンカーのない壁）
(5)石積・コンクリート・蛇篭擁壁
(6)小石の浜・丘
(7)砂丘

既存堤防の状態調査手法については、PAMS[※注3]プロジェクト（※注 3　PAMS=Performance-based Asset Management System）により開発。（同プロジェクトの成果である状態評価マニュアル（CAM2）は内部資料のため web 非公開である（2013 年 1 月現在））

PAMS では下記 3 レベルの状態評価手法を開発。

・概略（Superficial　例　状態等級（Conditional grade）1=良好（excellent）～5=劣悪（very poor）への分類）
・中間（Intermediate　例　ボーリング調査（Window Sampling））
・詳細（Detailed　例　コーン貫入試験（CPT test））

堤防等施設の状態等級（Conditional grade）への分類は状態等級点数（最悪機能特性点数）を計算することによる。（Environment Agency　2009）

2.2.4.3 オランダの事例

オランダでは、下記のとおり従来の水位超過頻度に基づく洪水（高潮を含む。以下同様）対策からリスクに基づく洪水対策へ移行するための調査・研究を進めている。

(1)1960 年のデルタ委員会諮問報告書における「安全対策は洪水リスク評価に基づくことが望ましい」との考えを踏まえ、1992 年に水防御技術諮問委員会（TAW）が研究プログラム「洪水リスク：確率と重大さの研究」を開始し、2000 年に報告書「超過頻度から洪水確率へ」を完成。

(2)水防御法（1996 年）による輪中ごとの最低防御レベル（水位超過確率。経済価値と洪水種類により設定）の規定 。（上記デルタ委員会報告書では「リスクに基づく設計哲学」を導入したが、洪水確率を定量化することが難しかったため、水位超過確率を定義した）

(3)2000 年の運輸・公共事業・水管理省の政策文書「水と共に生きる、21 世紀の水管理政策」（Living with water, water management policy for the 21st century）（気候変動と背後地人口増を予想）におけるリスクのより良い理解の主唱。

(4)上記 TAW による研究の Floris 1 プロジェクト（2001～2005 年、蘭語で VNK1）、同 Floris 2（2006 年～、同 VNK2）への継続。これらで研究されている手法と従来（現行）の手法との違いは下記の 3 つである。

①個別堤防から輪中堤全体へ。

②輪中堤の様々な破壊メカニズムの考慮。（現行では越水・越流を破堤の主原因としている）

③決定論から確率論へ。（洪水確率計算時に系統的かつ確認可能な手法により不確実性を前もって考慮。現行手法では不確実性の大部分は最後の段階で追加的安全マージンを付加することにより対応）（Floris　2005、Jongejan, R. B., et al　2011）

(5)水組合・公共事業省による堤防の維持管理における義務である 5 年ごとの堤防安全性評価では、多くの場合決定論的データが収集されており、確率的データは収集されていない（同評価は決定論的データのみを必要とするため）。（Hazenoot, E.C., et al.　2008）

(6)気候変動と経済成長を考慮した 2050 年時点の輪中ごとの最適洪水防御レベルの実現について 2011 年 3 月に分析を完了し、輪中ごとの経済的に最適な洪水防御レベルと、これを 2050 年に実現するために必要な（堤防の補強に要する）総投資額を明らかにした。

(7)水法規定の洪水に対する安全率を 2017 年に改定の見込み。（Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism et al.　2011）

上記のうち、特に参考となるのはフロリス（Floris＝Flood Risks and Safety in the Netherlands）プロジェクトであり、同プロジェクトにはこれまでに 1 期（Floris 1）と 2 期（Floris 2）とがある。各概要は次のとおりである。

○Floris1（蘭語 VNK1）プロジェクト（2001～2005 年）：運輸・公共事業・水管理大臣からの要請に基づきオランダ公共事業庁（Rijkswaterstaat）の道路・水理工学研究所が水組合・県との密接な協力の下に実施。オランダにおける洪水の影響の重大さと可能性についての理解を得ることを目的とする。代表的な 16 の輪中の洪水確率について各計算（輪中堤内で比較的弱い部分を見つけるのに利用可能（レベル 1））するとともに、3 つの輪中で人的・経済被害について詳細な計算を実施（他の輪中との比較に利用可能（レベル 2））。ただし、いずれの計算結果も相対値に過ぎず、更に研究を進めより堅固な計算結果を与えるレベル 3 に進む必要がある。多くの輪中堤においてパイピングが最も大きな脅威であるとした（1950 年代のデルタ委員会では極端に高い水位が洪水における最も大きな脅威としていた）。なお、パイピングの大きな可能性には恐らく水防御施設基礎下の地盤の不確実性の影響が一部ある。更なる現地調査により実際に比較的弱い箇所があるのかどうか明らかになりうる。更なる調査により不確実性が小さくなる場合があり、同調査後、洪水確率は初めて堅固なものになる（Floris 2 で調査予定）。また、パイピングを防ぐ水防活動の効果は確率計算上考慮されていない。

○Floris 2（蘭語 VNK2）プロジェクト（2006 年～）：公共事業省、水組合、県の 3 者の代表を含む管理グループがプロジェクトを管理し水管理センターがプロジェクトを実施（Floris 1 よりも水組合・

県の役割が増加)。全輪中の洪水生起確率と洪水の影響の重大さの定量化を目的とする（2015 年末までに全輪中の詳細なリスク評価を実施予定)。同評価結果はリスク低減の選択肢の評価、新しい安全基準に係る政治論議への情報提供、対策の優先順位付け、不確実性の重要な原因の縮小に向けた調査・研究の方向づけに利用できる。Floris 2 プロジェクトの第 1 フェイズは 2007 年に終了したが、同フェイズでは下記開発等が完了した。

・PC-Ring（後述）のセントラルサーバー方式による利用しやすいインターフェイスの開発。
・パイピングメカニズムに関する PC-Ring モデルの改良。
・水工構造物の挙動を表現する破壊メカニズムの開発。
・洪水生起確率から洪水リスクへの段階的計算ツールの開発。（Hazenoot, E.C., et al.　2008）

上記フロリスプロジェクトにより開発された洪水リスク評価手法の概要は次のとおりである。

Ⅰ．洪水防御システムの信頼性評価手法

(1)洪水生起確率の算定手順

①洪水防御施設に係るデータの収集、堤防のモデル化。（Floris チームの監督の下地域の水組合・県が実施）：いくつかの破壊メカニズムに係る詳細データの収集・破壊確率計算には大きな労力が掛るため、洪水生起確率の計算を行わない堤防の部分（section。後述(3)参照)、破壊メカニズムの全ては考慮しない同部分がある。

②技術コンサルティング企業による PC-Ring を用いた洪水生起確率の計算。

③洪水防御施設管理者からの情報の収集・上記計算結果の向上（水組合、同アドバイザー、県、Floris チーム、TAW の専門家によるワークショップでの上記計算結果についての議論)。

※注　直観的に大きな破堤確率が計算された箇所のレビューが 2004 年に行われた。不確定性が主に堤防の強度に関連する場合、実際よりも大きな破堤確率が計算される場合が多かった。計算された高い破堤確率に洪水防御施設管理者が同意しない場合には当該計算結果は洪水確率の計算時に除外された。（Floris　2005）

(2)洪水防御施設の分類

主要洪水防御施設（primary water defence）とは、輪中堤地区を（恐らく高い土地と共に）囲むシステムの一部であるか、又は、輪中堤地区の前面に設置された、洪水から防御するための施設（例防潮堰）であり、下記 4 つに分類される。

a.　輪中堤地区を（恐らく高い土地と共に）囲む、直接外水から守る主要洪水防御施設。（Floris プロジェクトの対象）

b.　輪中堤地区の前面に設置され、外部からの水に対抗する主要洪水防御施設（閘門等)。（原則として Floris プロジェクトの対象外（理由：上記 a.よりも厳しい安全基準が課されており、洪水生起確率への影響が小さいと考えられるため（ただし、マエスラント防潮堰のように背後地への影響が大きい施設は Floris の対象))

c.　直接には外部からの水に対抗しない主要洪水防御施設（二つの輪中堤の間の堤防等)。（Floris プロジェクトの対象外（理由：上記 a.の施設が破壊した場合のみ水荷重が作用するが当該荷重データが不足しているため)

d.　上記 a.から c.のいずれかに該当するが、国境の外にあるもの。(Floris プロジェクトの対象外(理由：データ不足のため))（Floris　2005）

(3)システムの信頼性評価に当たっては、まず、輪中堤を統計上一様な部分（section。延長は主に 200～1,000m。水門等は別扱い）に分割する。

(4)下記主要破壊メカニズムを対象とし、他のメカニズムは定性的に考慮する。

①堤防：越水、越流、パイピング、法面不安定、護岸破壊、浸食
②水工構造物：越水、越流、非閉鎖、パイピング、構造的破壊（崩壊）
③砂丘：浸食

(5)ある破壊メカニズムに係る耐力を上回る荷重が高潮・極端洪水等により生じると当該部分は破壊する。（耐力・荷重は一般に不確定扱い）

(6)下記 3 つの不確実性について考慮。（Floris 2 プロジェクトでの分析によれば、モデルの不確実性は土質特性、水理境界条件の不確実性に比べ重要性が小さいことが多い。なお、Floris 2 では難透水性被覆層の存在、数世紀前の水工構造物の基礎の質等の不確実性は考慮できない（感度分析で対応））
①自然変動（時間的・空間的）
②モデルの不確実性
③統計的不確実性

(7)Floris 2 プロジェクトにおける施設破壊確率の計算は PC-Ring（下記(8)参照）のバージョン 5.3.2 以上により実施（法面の安定計算については MProStab による）。（Jongejan, R. B., et al. 2011）

(8)PC-Ring とは、水防御技術諮問委員会（TAW）（2005 年 7 月 1 日以降は水防御専門技術ネットワーク（ENW））による 1992 年以降の研究により開発された新しい安全性評価手法に基づき、TNO Building and Construction Research が公共事業庁、大学、その他専門技術センターの専門家の協力の下、専門コンサルティング企業とともに開発した、水防御システムの信頼性を解析するソフトウェアである。（Floris 2005）

(9)PC-Ring では多様な確率手法（FORM（First Order Reliability Method）、SORM（Second Order Reliability Method）、指向的サンプリング、モンテカルロシミュレーション、数値積分）を使用可能である。比較的効率的な FORM 手法が一般に満足すべき結果を与える。

(10)水組合から決定論的データを収集し PC-Ring に必要な確率的データを作成するシステムを Floris 2 プロジェクトで構築した。

(11)破壊確率の合成

PC-Ring における区間・破壊メカニズムの合成は下記式-Ⅱ.2.2.4.4 のとおり組合せの考え方に基づき行われる。

$$P_{12}=P(Z_1<0 \cup Z_1<0)=P(Z_1<0)+P(Z_2<0)-P(Z_1<0 \cap Z_2<0) \quad \cdots\cdots\text{式-Ⅱ.2.2.4.4}$$

ここで相関がある場合には $P(Z_1<0 \cap Z_2<0)$ は $P(Z_1<0)\cdot P(Z_2<0)$ ではなく、相関を考慮することになる。同相関は下記式-Ⅱ.2.2.4.5 のとおり Hohenbichler-Rackwitz の手法により考慮される。

$$Z_i=\beta_i+\sum_{k=1}^{\text{全てのk}}\alpha_{ik}u_{ik} \quad \cdots\cdots\text{式-Ⅱ.2.2.4.5}$$

ここで、β_i は信頼性指数、α_{ik} は影響係数、Z_i は限界関数、u_{ik} は標準正規分布変数である。（詳細は（Jongejan, R.B., et al. 2011）の 3～4 頁参照）

(12)全国パイピング関連土質データベースの設置

パイピングの確率計算に必要な土質工学データの入手を容易にするため、Floris 2 プロジェクトで全国データベース「DINO」を設置。（オランダ調査研究所（TNO）に設置）

(13)水防活動

堤防・砂丘の破壊確率算定上水防活動は考慮されていない。特に河川沿いのパイピングについて水防活動が行われているため、Floris プロジェクトにより算定された破壊確率は過大評価である可能性

がある。

(14)同時破堤の影響考慮

他セグメントの破堤による荷重軽減効果について場合分けにより考慮する。

(15)洪水防御施設のデータが不十分な場合

区間が「堅固」と分類されたが十分なデータがない区間については破堤確率を 0 と仮定している。十分なデータがなく強さが不明の区間については、不足データが少ない場合には専門家の判断により例えば近傍の区間と同一と仮定し、同不足データが多い場合には当該区間を無視し、リスク計算結果を表示する際に注釈を付けた。

Ⅱ．堤防の信頼性評価手法

(1)堤防の破壊メカニズム

堤防破壊確率の算定時に下記 4 つの破壊メカニズムを考慮している。

①越流又は越波

基準により堤防天端は設計水位より 0.5m 高く（波による越水を制限するためしばしば 0.5m より更に高く）されているため、本メカニズムが輪中の全浸水確率に与える影響は一般にかなり小さい。限界越水流量 q_c（確率分布）により耐力を設定し破壊確率を算定。同耐力設定時に植生考慮。

②パイピング

被覆層の持ち上げとパイピングの 2 つが生じると破堤と判定。Sellmeijer 公式を適用。必要浸透路長と実際の浸透路長との比較はクリープ係数を用いたブライ（Bligh）の手法による（Floris 1 プロジェクト)。Floris 1 プロジェクトで算定されたパイピング生起確率が直観よりも大きかったため、Floris 2 プロジェクトで改良が図られた。同改良では、①基礎地盤への第 2 層の追加、②人工神経ネットワークによるパイピング計算システム（Mpiping）の開発、③全国土質工学データベース（DINO）の開発、が行われた。

③護岸の破損と堤体の浸食

護岸については次の 3 種類を対象とし、下記のとおり破堤を各判定。

・植生：嵐の継続時間により破堤を判定。
・石護岸：石張の比重と厚さ、表法面の傾き、波の強さ（以上石張の破損について)、浸食係数、堤体の構造（以上石張破損後の残留強度について）より破堤を判定。
・アスファルト護岸：アスファルトの重さ・厚さ、護岸位置、裏法面の傾き（以上圧力超過による破壊について)、アスファルト厚さ・傾き、有義波高、護岸下の土質（以上衝撃による破壊について)、アスファルト破損後の残留強度より破堤を判定。

④堤内側法面の滑り・ふくれ

下記 2 つの破壊メカニズムがある。

・裏法面の浅い滑り（計算ソフト MProstab による計算結果を PC-Ring では利用）
・堤内側被覆層の盤ぶくれによる滑り（同 MProlift）

(2)長さの影響（length effect）の考慮

長さ 0 の堤防（モデル横断面）の破壊確率に対して、長さの影響を考慮した堤防区間の破壊確率は作用外力が支配的な破壊メカニズム（例　越水）では約 2～10 倍、耐力が支配的な破壊メカニズム（例パイピング）ではおよそ 100 倍になるとしている。（Vrijling, J.K., et al.　2011）

長さＬの堤防の破壊確率を算定する際には、下記式-Ⅱ.2.2.4.6 に示すΔＬの長さを相互に独立扱いの堤防要素の長さとし、各堤防要素の破壊確率を統合することにより堤防区間の破壊確率を算定している。なお、ΔＬの長さの堤防要素内では各変数の相関係数 ρ は 1 と考える。（Vrouwenvelder,

A.C.W.M., et al.　2003）

$$\Delta L = (d_{xi}\sqrt{\pi})/\beta$$ ……式-Ⅱ.2.2.4.6

ここで、 d_{xi} ：相関距離

β ：信頼性指標

※筆者考察　上記ΔLを求める際に当該破壊メカニズムに関係する変数が複数あり、各変数の相関距離 d_{xi} が互いに異なる場合にはどのようにすべきか。最も短い相関距離に基づくΔLを採用すると他の変数の相関係数も1となるが、隣接堤防要素との相関係数が一部の変数についてゼロとは言えなくなり、堤防要素が相互に独立との仮定が成立しなくなる。一方、最も長い相関距離に基づくΔLを採用すると一部の変数の相関係数が堤防要素内で1とはならないが、隣接堤防要素と相互に独立との仮定は成立する。破堤確率計算結果をにらみながら妥当なΔLを設定しているのではないかと推察される。

(3)堤防部分（section）の中の空間的変動の影響の考慮

同影響を効率的に考慮するため、破壊確率は最初に有効幅（effective width。破壊事象が生じる幅のイメージ）について算出され、その後当該部分（section）全体へ拡張される。同拡張時には空間相関の影響を下記式-Ⅱ.2.2.4.7により考慮する。（時間相関については Ferry-Borges & Castanheta モデルにより考慮）（Jongejan, R.B., et al.　2011）

$$\rho_k(\Delta x) = \rho_{x,k} + (1-\rho_{x,k})e^{-\Delta x^2/d_{x,k}^2}$$ ……式-Ⅱ.2.2.4.7

ここで、$\rho_k(\Delta x)$：一次元の相関関数

Δx：2つの断面間の距離

$\rho_{x,k}$ ：定数（ $\rho_k(\Delta x)$の下限値）

$d_{x,k}$：相関距離

Ⅲ．その他施設の信頼性評価手法

(1)砂丘

Jarkus（=毎年の沿岸測量結果（Annual Coastal Measurement））断面に基づき、高潮継続時間、波高、水位等（以上、荷重について）、砂丘断面の向き、粒径（以上、耐力について）を考慮して砂丘浸食による破壊確率を算定する。

(2)水工構造物

「越波」「非閉鎖」「構造的破壊」の3要素を合成し水工構造物が寄与する洪水確率を算定する。（「ポンプ場」「切り通し」「閘門」「トンネル」「パイプライン」「長大施設」の評価手法が作成されている（後3者については Floris プロジェクトでは考慮せず（理由：データ不足のため））。なお、取水カルバートの非閉鎖についてはポンプ場で対処可能な流入量であるとともに流速が構造物の不安定化につながらない場合には輪中堤地区の洪水確率算定上考慮していない。

高水時の水工構造物の破壊メカニズムは一般に次の3つに分類される。

・高さ不足

・非閉鎖

・強度不足（閉鎖装置の破損、施設の浸食、パイピング）

Floris 1プロジェクトでは水位超過頻度のみに基づき破壊確率を決定した（その他要素（強度、基礎地盤パラメタ等）は決定論的な値とした）。Floris 2プロジェクトでは Z 関数（限界状態関数。耐力・作用力パラメタを各確率値により表現）により表される破壊メカニズムを PC-Ring に追加した。

多くの場合水工構造物に関する良質なデータを入手可能であるが、歴史的水工構造物についてはし

ばしばデータが不十分である。この場合、「過去に確認された強度」（proven strength）を考慮し、専門家の判断により洪水生起確率を見積っている。（Hazenoot, E.C., et al.　2008）

Ⅳ．洪水の影響評価手法

(1) 洪水の影響を計算するには浸水の水力学面を理解する必要があるが、これを洪水シナリオにより示す。洪水シナリオとは洪水防御施設が破壊した場合（複数箇所を含む）の一連の結果のことである。代表的洪水シナリオ設定のため、輪中堤を区間（1 つ又は複数の部分（section）から成る）に分割する。区間内では厳密な破堤位置と洪水の態様とは無関係とする（オランダでは堤防背後地が比較的低くかつ平らであることから仮定可能。なお、シナリオごとに代表破堤箇所を仮定し、水理荷重条件、破堤進行速度を決定論的に設定（Jonkman, S.N., et al.　2008））。シミュレーション回数低減のため一区間破堤するシナリオのみについてシミュレーションを実施し、複数区間同時破堤については一区間破堤シナリオから概略推定（重複を差引く）。計算時間削減のため、他セグメントの破堤が水理荷重軽減につながらない場合には、生起確率の高い方から 50 の氾濫シナリオについてのみ（例外を除く）計算。同 50 以外の氾濫シナリオについては最悪のケース（後述(2)の概略手法参照）を想定。ある事例では同 50 シナリオの生起確率の合計は 99%超であった。（Jongejan, R.B., et al.　2011）（ただし期待値への影響は小さいが稀な甚大な被害ケースも詳細に評価すべき（Jonkman, S.N., et al.　2008））

(2) シナリオ設定手法には次の「概略手法」と「詳細手法」の 2 つがある。

○概略手法（global approach）：最悪のケースを単一の被害額により決定する。重要な水力学パラメタ（例　浸水位上昇速度）が不明のため人的被害については確実な値を決定することはできない。本手法では破堤地点を示す必要はないが輪中内を全て浸水させるのに十分な水が流入し、輪中内は堤防等で細分割されておらず、浸水位は各輪中堤の最も低い高さと同じ（傾斜地の浸水深は 1m）、傾斜地（例　河川沿いの土地）では輪中堤の最上流端から洪水が発生する、と仮定する。

○詳細手法（detailed approach）：水力学モデル（SOBEK 1D-2D（二次元流計算モデル、WLlDelft Hydraulics が開発））により洪水態様を計算する。破堤地点及び水理荷重は破壊確率計算結果（PC-Ring による）に基づく。当該破壊確率計算により堤防・砂丘の部分（section）、水工構造物の各破壊確率を決定できる。当該計算結果に基づき「ScenarioKans」プログラムを用いて破堤箇所の選定が行われる。複数同時破堤の生起可（生起しうるか吟味する）。

(3)被害算定には「HIS※注 1 Damage and Victim Module」を用いる（※注 1　HIS=High water Information System）。被害額算定は下記の 3 つのカテゴリーについて実施（浸水深と洪水流速に基づく被害関数を設定）。

①直接被害（物質的）：土地・建物の修繕費用等

②直接被害（事業の中断）：事業の中断による損害。

③間接被害：事業に係る供給・消費に係る浸水区域外への悪影響等。

人的被害算定は下記 2 段階で実施。

・避難分析。

・地区残存者における人的被害の算定。

(4)自然的特徴に係る被害については、次の 4 つの観点から別の HIS モデュール（HIS-LNC モジュール）により被害を算定する。（Floris　2005）

①背の高い植生

②植生

③淡水生態系

④歴史的建築物

2.2.4.4 上記各国の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法に関する考察

上述の各国の事例より特に印象的な事項を挙げると下記のとおりである。

(1)米国の事例（2.2.4.1 参照）で選択肢の比較・検討時に施設完成後の残留リスクを算出している。気候変動等により当面の整備水準を上回る外力の発生が懸念される現状において重要な観点と考えられる。

(2)英国の RASP の事例（2.2.4.2 参照）では、3 つのレベルの階層的リスク評価手法が開発されている。不確定性を考慮することが特に有益であると考えられる分野（例　大規模水害時の危機管理対策検討）及び土質データ等の蓄積状況から当面実施可能な分析レベルに基づき、段階的にリスク評価手法の調査・研究を進めていくことが現実的であることを示していると考えられる。

(3)オランダの事例（2.2.4.3 参照）で「堤防の土質強度の不確定性が大きいと、計算される破堤確率は大きくなるが、現地調査により土質強度の不確定性が小さくなれば、計算される破堤確率は小さくなる場合がある」とされている。これは、堤防等に係る信頼性評価の特徴を表していると考えられ、信頼性評価手法の適用範囲（限界）について正しく認識することが重要であることを示していると考えられる。

(4)同事例で「破堤確率の計算結果について堤防管理者が同意しない場合には、当該計算結果を洪水リスク計算時に除外する」との記述がある。これは、現在の土質データ蓄積状況等を踏まえた信頼性評価手法の特性・限界を如実に示していると考えられる。

(5)同事例で堤防を長さ ΔL の堤防要素に区分し、各堤防要素の破壊確率から一連の堤防区間の破堤確率を算定しているが、これは堤防の区間長が長いほどどこかで破堤する確率が高まることを定量的に評価する有効な手法の 1 つと考えられる。ただし、上述のとおり同事例においても堤防の信頼性評価結果は現在のところ相対的なものに過ぎず、また、同評価結果に現場技術者が同意しない場合には当該評価結果を不採用とする程度のものであることから、堤防の長さを定量的かつ適切に反映しうる評価手法の確立にはまだ時間が掛りそうである。

(6)同事例における「期待値への影響は小さいが稀な甚大な被害ケースも詳細に評価すべき」との指摘は我が国においても重要と考えられる。

2.2.5 適応策研究のレビュー

各国の適応策に係る事例の中で特に興味深くかつ我が国の河川行政上参考になると考えられる英国の気候変動因数（2.2.3.1 参照）の基となっている UKCP09（2.2.5.1 参照）及び UKCP09 のデータを用いた研究のうち、河川の洪水流量の変化予測に係るものについて以下に述べる。

2.2.5.1 英国の UKCP09

最初に、UKCP09 の概要を以下に示す。

(1)UKCP09 の位置づけ：英国政府による 21 世紀中の英国の気候変化予測。UKCIP（UK Climate Impacts Programme。1997 年英国政府設置。これまでに 1998 年及び 2002 年に予測結果を発表）による気候予測の 1 つ。

(2)とりまとめ機関：気象庁ハドレーセンター（Met Office Hadley Center）

(3)予測対象期間：21 世紀（7 つの期間（重複する 30 年間）ごとの平均値を予測）

(4)平面分解能：25km

(5)排出シナリオ：IPCC の排出シナリオから下記 3 つを選定。

・高排出シナリオ（IPCC の A1Fl シナリオ）

・中排出シナリオ（同 A1B）

・低排出シナリオ（同 B1）

(6)その他

①予測結果については、報告書とは別に User Interface により web 上で提供（下表に例示（表中の各地点の位置は下図参照））。

②炭素循環（carbon cycle）に係る影響を初めて明示的に含んでいる。

③不確実性について初めて定量的に示している。（確率的予測は IPCC では第 4 次報告書で初めて採用）

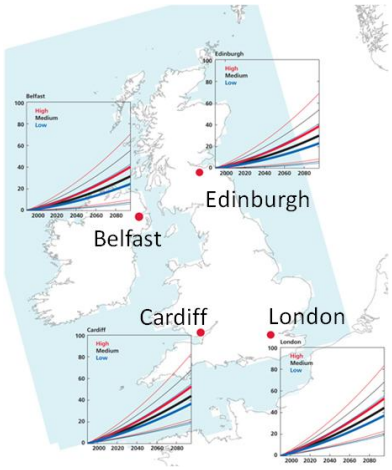
④予測結果は平面的には 25km 格子、16 行政地域、23 河川流域、海岸地域平均で、時間的には月、季節、年平均で提供。

表-Ⅱ.2.2.5.1　10 年ごとの地点別相対的海面上昇予測中央値（1990 年比　単位：cm）

	London			Cardiff			Edinburgh			Belfast		
	High	Med	Low	High	Med	Low	High	Med	Low	High	Med	Low
2000	3.5	3.0	2.5	3.5	2.9	2.5	2.2	1.6	1.2	2.3	1.7	1.3
2010	7.3	6.2	5.3	7.3	6.2	5.3	4.7	3.5	2.6	4.9	3.8	2.8
2020	11.5	9.7	8.2	11.5	9.7	8.2	7.5	5.7	4.3	7.8	6.0	4.6
2030	16.0	13.5	11.4	15.9	13.4	11.4	10.7	8.2	6.1	11.1	8.6	6.6
2040	20.8	17.5	14.8	20.8	17.5	14.8	14.2	10.9	8.2	14.7	11.4	8.7
2050	25.8	21.8	18.4	25.9	21.8	18.4	18.0	13.9	10.5	18.6	14.5	11.1
2060	31.4	26.3	22.2	31.4	26.3	22.2	22.1	17.1	13.0	22.9	17.8	13.7
2070	37.2	31.2	26.3	37.1	31.1	26.3	26.6	20.6	15.7	27.4	21.4	16.5
2080	43.3	36.3	30.5	43.3	36.2	30.5	31.4	24.4	18.6	32.3	25.3	19.6
2090	49.7	41.6	35.0	49.7	41.6	35.0	36.5	28.4	21.8	37.6	29.4	22.8
2095	53.1	44.4	37.3	53.1	44.4	37.3	39.2	30.5	23.4	40.3	31.6	24.5

©UKCIP; (2010)

※（UKCIP　2010）6 頁より。



©UKCIP; (2010)

図-Ⅱ.2.2.5.1　各代表地点の位置及び海面上昇予測

※（UKCIP　2010）5 頁の Figure 1.3 の地点名を拡大。

2.2.5.2 英国の河川洪水に係る気候変動因数に関する研究

UKCP09 による降雨及び気温予測結果に基づき今世紀中の河川の洪水流量が予測され、予測中央値から気候変動因数が設定されている。当該洪水流量予測は環境・食料・農村地域省（Department for

Environment Food and Rural Affairs（Defra)）と環境庁（Environment Agency（EA)）との共同研究プロジェクト「気候変動による洪水への地域別影響」（Regionalised impacts of climate change on flood flows（FD2020)）(以下「FD2020」) により実施されており（Environment Agency　2011)、同研究プロジェクト報告書（Joint Defra/EA　2009）に基づき以下に概要を述べる。

上記共同研究プロジェクトの主な目的は気候変動に係る 2006 年の指針（「洪水・海岸防御評価指針　気候変動影響　担当部局による経済評価の補足文書」（2.2.3.1 参照)）の適合性を評価することであり、研究の実施者は生態・水文センター（Center for Ecology and Hydrology）であった。

FD2020 によると、これまで行われている気候変動影響分析の大部分は 1 つ又は複数の全球気候モデル（Global Climate Model= GCM）又は地域気候モデル（Regional Climate Model=RCM）によるシミュレーション結果を用いた「シナリオに基づく」（scenario-led）分析であるが、この分析手法には主に 2 つの弱点がある。第 1 の弱点は気候変動、流域特性、洪水変化の相互関係の完全なる理解を得ることができないこと、第 2 の弱点は気候モデルによる予測シナリオとは異なる事態が生じた場合に何が起こるかについての知見を得られないことである。このため、新しい予測シナリオが発表されるたびに新たな影響分析を実施する必要が生じる（シナリオに基づく政策は期間限定である)。

上記弱点を乗りこえるため、FD2020 では広範囲の感度分析に基づくとともに、1 つのシナリオに依存しない「シナリオ中立」（scenario-neutral）な検討手法を採用した。本手法では全ブリテン（Britain）の流域に同じ気候変化を与えた場合の各流域の反応について詳細に調べ、当該反応が似ている流域をグループ化（又は洪水に係る反応型に基づき細分化）した。本検討結果を確かなものにするとともに本検討結果に基づく政策が長期間有効であるように、本検討で設定した気候変化の枠組みには IPCC 第 4 次評価報告書で用いられた GCM 及び UKCP09 の成果を導出するのに用いられた RCM で得られた将来の気候変化に関する現在の知見が含まれている。

なお、本共同研究プロジェクトにおけるモデル化の対象外の流域を含め、本検討手法により明らかとなった流域ごとの洪水反応型（flood response type）に基づき、気候変化に対する流域ごとの脆弱性が評価可能となっている。

FD2020 により得られた多くの知見のうち特に強調されているのは次の 2 点である。

a. 流域別分析結果より、上記 2006 年指針（洪水ピーク流量の一律 20%増）は大部分の流域の洪水の将来変化について安全側であるとは言えない。
b. 気候変化に対する洪水ピーク流量の観点からの流域の反応は流域特性に影響される。

FD2020 では洪水ピーク流量を予測するために下記水文（流出）モデルを開発している。

(1)融雪を考慮（洪水に係る気候変動の影響評価上極めて重要と認識)。
※注　英国では冬の洪水の影響がより大きい。
(2)全ブリテン（Britain）の 154 流域をモデル化。うち 120 流域は集中型モデル（PDM：lumped conceptual hydrological model)、35 流域（一般に大流域）は準分布型モデル（CLASSIC：semi-distributed hydrological model）でモデル化された（1 流域は両モデルを用いてモデル化された)。
(3)実測流量に基づき上記水文モデルはキャリブレーションされた。
(4)上記水文モデルは時系列の日平均流量を算出するものである。なお、対象流域の大部分において日平均流量の観測値の頻度曲線とシミュレーション値による同曲線とは良く似ていたとのことである。
(5)開発された水文モデルを用いて気候変動に対する流域の反応を詳細に調べるための感度分析を

行うため、気温・潜在的蒸発量の時間分布を変化させるとともに、観測降雨の時間分布に広範囲かつ一定の変化を与える機能を有している。

FD2020 における将来シナリオ及び感度分析の枠組みは次のとおり設定された。

a.3 つの排出シナリオ（2.2.5.1(5)参照）に基づく 17 の GCM（IPCC の第 4 次評価報告書より）による予測結果から月ごとの気候変動因数（現在を基準とした気候変動による月ごとの雨量等の変化（増加）率）を算出した。月ごとの気候変動因数の季節分布型は、「年平均値の変化」「月ごとの増加率の最大値」及び「月ごとの増加率の最大値の発生月」から成る一次元の調和関数により表すことが可能であることが判明した。月ごとの降雨量の増加率のピークはおおむねいつも冬に生じ、気温の増加率については年中いつでもピークが生じえた。

b.月ごとの降雨量の増加率の最大値の発生月は 1 月に固定された。これにより、感度分析の枠組みは年平均降雨量の変化率（年 40%減少から年 60%増加まで）と降雨の季節分布型の変化率（0%から 120%まで。同変化率が 0%の場合には冬夏の変化率に大差はなく、降雨の季節分布型に変化はない。同値が大きいほど冬期の増加率は夏期の増加率よりも大きくなる（季節性が増加しより湿潤な冬とより乾燥した夏となる））の 2 軸に簡略化された。上述の調和関数を用いて、全ブリテン（Britain）の現在利用可能な将来気候予測全てを含みうる月平均降雨シナリオを 525 設定（年平均降雨量及び季節分布型の各 5%増を考慮）した。気温については 8 シナリオが選定され、対応する潜在的蒸発量シナリオについて分析された（降雨、気温、潜在的蒸発散量に関する 4,200 パターンの変化シナリオを対象として感度分析が行われた）。

上述の枠組みにより、下記のとおり洪水に関する流域別の気候変動に対する脆弱性が分析された。

(1)再現期間 2、10、20 及び 50 年の洪水ピーク流量の変化率（%）を洪水の変化に関する指標として選定した。

(2)上記洪水ピーク流量の流域ごとの変化率は、気候変動に対する流域ごとの反応を代表するものと考えられ、洪水に関する気候変動に対する脆弱性を表すものと考えられた。

(3)上記指標に基づく分析により、気候変動に係る洪水に関する 154 流域ごとの反応特性を 9 つに分類した（(4)、(5)参照）。

(4)上述の 9 分類は下記 5 つの主要グループ及びこれらの細区分（(5)参照）から成る。

- 中立的な（Neutral）流域：洪水ピーク流量の増加率が月別降雨量の増加率の最大値に類似している流域。
- 抑制的な（Damping）流域：降雨の小さな増加率に対する洪水流量の増加率が比較的小さい（比較的粘り強い）流域。
- 増幅しがちな（Enhancing）流域：降雨の小さな増加率に対する洪水流量の増加率が比較的大きい（比較的脆弱な）流域。
- 混合（Mixed）的な流域：降雨量の増加率の大きさと降雨の季節分布型により洪水流量の増加率が比較的小さかったり（粘り強かったり）、同比較的大きかったり（脆弱だったり）する流域。
- 敏感な（Sensitive）流域：降雨のほとんど全ての増加率に対して洪水流量の増加率が比較的大きい（特に脆弱な）流域。

(5)上述(3)の 9 分類は、(4)の 5 主要グループのうち抑制的な流域及び増幅しがちな流域を各 3 つに細分したものである。（例　抑制的な→「わずかに抑制的な」（Damped L, Slightly damped）、「非常に抑制的な」（Damped H, Very damped）、「極端に抑制的な」（Damped E, Extremely

damped)）

2.2.5.3 英国の事例から示唆されること

上述 2.2.5.2 の英国の事例が示唆すると考えられる事項は次のとおりである。まず、同事例における洪水流量の将来変化に係る分析は 17 の気候モデル（GCM）による予測結果に基づいている。我が国の河川の洪水に係る気候変動適応策の検討においても、多くの気候モデルが示す気候変動予測の幅とパターンを踏まえた感度分析レンジの設定というアプローチは参考になる。また同事例では、洪水流量の将来予測において融雪の影響が大きいとし、短期間の豪雨だけでなく気温を含む年間の気象変化パターンに着目し、また比較的大きな流域において準分布型流出モデルを利用している。これは、我が国においても、気候変動の影響・流域特性によっては、また、洪水の、しかもピーク流量が主たるターゲットになる場合ではなく、比較的長期間の流量変動が重要になる場合には、参考になるアプローチと言えそうである。

その上で、2.2.5.2 で指摘されている「気候変動、流域特性、洪水変化の相互関係の完全なる理解を得ること」の重要性、「気候モデルによる予測シナリオとは異なる事態が生じた場合に何が起こるかについての知見を得られないこと」の克服を意識し、流域ごとの洪水反応型（flood response type）に基づき気候変化に対する流域ごとの脆弱性を評価可能とするという考え方、そして、1 つのシナリオに依存しない「シナリオ中立」（scenario-neutral）な検討手法をとるという考え方は、2.1.3 で説明した検討内容、その中でも 2.1.3.3 で説明した 109 水系の類型化の検討（図-Ⅱ.2.1.3.27、表-Ⅱ.2.1.3.1）と共通するところがあって、興味深い。

2.2.6 諸外国の適応策検討及び実践から見えてくるポイントと日本の施策との関係についての考察

これまでに調査した諸外国の適応策の事例から見えてくるポイントと我が国の施策との関係については次のとおり。

(1)気候変動による影響についての定性的議論から脱し、定量的議論を行うための材料を提供するための各国の数々の試みは、我が国にとっても重要であり、見習うべき点が多々ある。

(2)気候変動による影響については不確実性が避けられないため、当該不確実性を踏まえた適応策を検討・実施することとなるが、例えば英国の「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」（2.2.3.1 参照）に示された将来のピーク洪水流量等に係る複数の変化率の提示（破堤が生じた場合の被害・影響を踏まえて変化率を選択する）は、不確実性を踏まえた治水計画等の検討において我が国も考慮すべき手法と考えられ、我が国における調査・研究が急がれる。

(3)水災害対策における土地利用計画の重要性が指摘されて久しいが、例えば英国の「計画政策書第 25 号：開発と洪水リスク」（(板垣、吉谷　2012a）参照）は、洪水リスクを土地利用計画に反映する具体的枠組みの一つを示しているものと考えられ、我が国においても同様の枠組みについて検討が必要と考えられる。

(4)気候変動による海岸周辺の災害への影響の考慮手法については、例えば米国の「土木事業プログラムに係る海面変化の考慮」（(板垣、吉谷　2012a）参照）に示された平均海水面の上昇予測の考慮手法、英国の「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」（既出）に示された上昇量の考慮手法があり、我が国においても同様の調査・研究を進める必要がある。

(5)気候変動による河川の洪水流量増加については、オランダ政府が 2006 年に「河川空間拡張方針に関する主要国土計画決定」（(板垣、吉谷　2012a）参照）によりライン川支川の安全度をロビス地点の計画流量 16,000m^3/s に対応するよう 2015 年までに向上させることを明らかにするとともに、着実な洪水対策の推進を図っており、我が国も参考とすべきである。

(6)気候変動による水資源への影響については、例えば米国の「気候変動に対するメリーランドの脆弱

性低減のための包括戦略　フェイズⅡ：社会・経済・生態系回復力の強化」（(板垣、吉谷　2012a）参照）に、1 カ月の無降雨発生頻度など定量的予測・比較のための具体的手法が記述されており、同様の手法により気候変動の我が国の水資源への影響について調査・研究することが考えられる。

(7)米英蘭の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法（2.2.4 参照）は、整備水準を上回る規模の洪水が生起した場合の堤防システムの挙動について予測・分析する際に参考となる手法と考えられる。

2.2.7 今後の諸外国の政策モニタリングのあり方について

今後の諸外国の政策モニタリングにおいて留意すべきと考えられる事項は下記のとおりである。

(1)気候変動適応策に係る調査・研究、政策の検討・実施は次々に変化しており、数年前の情報はその当時の情報に過ぎない。このため、継続的に最新情報を収集・整理・分析しつづけることが重要である。

(2)インターネットを用いた情報収集は、限られた予算・時間の中で広く薄く海外の状況を概観するには適している（やむを得ない）面があるが、具体的な検討手法の理解等には限界がある。委託業務による海外の情報収集は、特定の目的（例　堤防等の機能発揮に係る確率分布の考慮手法に係る技術基準の収集）に絞った情報収集では最適と考えられる場合があるが、より詳細・具体的な情報を確認するには不十分な場合がある。国総研職員による現地聞き取り調査は、現地での協力が得られるとともに、当該分野における国内の調査・研究経験を積んだ職員が実施すれば効果的であるが、旅費・職員数に限りがある。各調査手法の長所・短所を踏まえ、効果的・効率的な政策モニタリングを進めることが重要である。

(3)全般的に、各国の関連する事例の原典等を web 上で閲覧することが容易であるように感じられた。我が国においても関連資料の英訳・web 上での提供を進め、海外への情報発信力を高めていく必要がある。我が国の情報を十分に発信しなくては、海外の技術者・研究者と効果的な議論・情報交換を行うことが難しいのではないだろうか。

参考文献

板垣修、吉谷純一　2012a：米英蘭の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策に関する事例調査, http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/info/research-results/itagaki-kikouhendou.pdf

板垣修、吉谷純一　2012b：米国陸軍工兵隊による洪水被害のリスク分析手法, 土木技術資料, 54-11, pp. 28 - 31

長倉敏郎　2006：ベネチア・モーゼ計画とラグーンで実施されている対策事業, http://www.wave.or.jp/outline/doc/vene_j.pdf, （2012 年 11 月 2 日閲覧）, pp. 3 - 4, 10, 20, 25, 27

Central Government, Netherlands　2009：2009 – 2015 National Water Plan, pp. 72

China　2012：Second National Communication on Climate Change of The People's Republic of China, pp. 11 – 14, 46 – 47, 83, 85 – 86, 94 – 95

Climate Change Commission, Republic of the Phillippines　2011：National Climate Change Action Plan 2011 – 2028, pp. 2, 4 – 5,11 – 14, 16 -19, 69 – 77, 85 – 90

Cochran, Ian　2009：Climate Change Vulnerabilities and Adaptation Possibilities for Transport Infrastructures in France, pp.10,15

Davis, D., Beth A. Faber and Jery R. Stedinger　2008：Experience in Implementing Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects, pp. 5 - 6

Defra　2007a：Performance and Reliability of Flood and Coastal Defences, FD2318/TR1, pp.92

Defra　2007b：Performance and Reliability of Flood and Coastal Defences, FD2318/TR2, pp.11

Department of Water Resources, CA　2009：California Water Plan Highlights, pp. 12, 14 – 15

Environment Agency　2009：delivering benefits through evidence, pp.vii

Environment Agency　2011：Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities, pp.10 - 11

Environmental Protection Agency　2008：National Water Program Strategy: Response to Climate Change, pp. i

Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany　2009　：Combating Climate Change the German Adaptation Strategy, pp. 16 - 17

Floris　2005：Floris study – Full report, pp. 7 - 11, 15, 18, 25 - 26, 29 - 33, 49 - 53, 85

Giron, E., et al.　2010：Science for a Sustainable Development, "Towards an Integrated Decision Tool for Adaptation Measures – Case Study: Floods "Adapt", pp.8, 56

Government of India　2011：National Water Mission under National Action Plan on Climate Change, pp. iii - iv

Hazenoot, E.C., et al.　2008：The Floris-2 Project, 4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, pp. 8-3 – 8-7

H_2OLLAND　2012：Maeslantkering, Hook of Holland, 1991-1995, http://www.h2olland.nl/project.asp?id=259, viewed on 5 Nov. 2012

Institution Centro Previsioni e Segnalazioni Maree　2012：The tide, http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/EN/IDPagina/1753, viewed on 2 Nov. 2012

Interagency Advisory Committee on Water Data　1982：Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Bulletin # 17B

Interagency Climate Change Adaptation Task Force　2011：Federal Actions for a Climate Resilient Nation, pp. iv, 1, 2

IPCC　2007：Climate Change 2007: Synthesis Report, pp. 38, 45

Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Netherlands' Rijkswaterstaat, United Kingdom Environment Agency, and United States Army Corps of Engineers　2011：Flood Risk Management Approaches As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States, IWR Report No. 2011-R-08, pp. 6, 9 - 10

Joint Defra/EA　2009：Regionalised Impacts of Climate Change on Flood Flows, R&D Technical Report FD2020/TR, pp. ii - iii, 9, 25 - 26, 37, 41

Jongejan, R.B., et al.　2011：The VNK2 Project: Detailed, Large-scale Quantitative Flood Risk Analysis for the Netherlands, 5th International Conference on Flood Management (ICFM5), pp. 1 - 5, 9, 11

Jonkman, S.N., et al.　2008：Flood Risk Assessment in the Netherlands: A Case Study for Dike Ring South Holland, Risk Analysis, Vol. 28, No.5, pp. 1358, 1361, 1366

KLIWA　2009：Climate Change in Southern Germany Extent -Consequences – Strategies, pp.18-19

Maryland Commission on Climate Change　2008：Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts in Maryland, pp. 1

Maryland Commission on Climate Change　2011：Comprehensive Strategy for Reducing Maryland's Vulnerability to Climate Change, pp. 2

Ministry for Infrastructure and Transport, Venice Water Authority, CVN　2012：SAL.VE activities for the safeguarding of Venice and its lagoon,
http://www.salve.it/uk/domande/f-domande.htm, viewed on 10th Oct. 2012

Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing　2011：French National Climate Change Impact Adaptation Plan 2011-2015, pp. 30, ANNEXE II pp. 28

Ministry of Environment & Forests, Government of India　2012：Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change, pp. i - XVI,95 – 110, 141, 152

Ministry of Environment, Republic of Indonesia　2010：Indonesia Second National Communication Under The United Nations Framework Convention on Climate Change, pp. ix - x viii, iv－1 - iv－9, iv－19 - iv-30

Ministry of Environment, Sweden　2009：Sweden's Fifth National Communication on Climate Change, pp.80-81

Ministry of Infrastructure and the Environment ,and the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation　2012：Delta Programme 2013, pp. 11 - 13, 18, 21-24, 46, 50, 52

Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment　2010：The 2011 Delta Programme　Working on the delta, pp. 26, 55

MISTRA SWECIA　2012：Annual report 2011, pp.10-11

National Climate Commission　2010：Belgian National Climate Change Adaptation Strategy, pp.14-15

Philippines　1999：The Philippines' Initial National Communication on Climate Change, pp. x i - x iv, 44 – 45, 71 - 72

Prime Minister's Council on Climate Change, Government of India　2008：National Action Plan on Climate Change, pp. 2 - 6

Republic of Indonesia　2007：National Action Plan Addressing Climate Change, pp. iii - iv, 59 – 63, 93
Rijkswaterstaat　2012：Maeslantkering, http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten_en_cijfers/dijken_en_keringen/europoortkering/maeslantkering/index.aspx, viewed on 1 Nov. 2012
RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Netherlands　2004：A quick scan of spatial measures and instruments for flood risk reduction in selected EU countries, pp. 32- 33, 38, 47, 49, 53, 55, 57, 60, 104 – 106
ruimte voor de rivier　2012：Safety for four million people in the Dutch delta　Room for the River, pp. 2
Sir Stern, N., et al.　2006：Stern Review: The Economics of Climate Change, pp. i - ii, vi - ix,
Sir Stern, N., et al.　2006：Stern Review: The Economics of Climate Change Executive Summary, pp. i – x iv, x vi - x x vii
Swedish Commission on Climate and Vulnerability　2007：Sweden facing climate change, pp. 144
The LAWPhiL Project　2013：Republic Act No.9729, http://www.lawphil.net/statutes/repacts/ra2009/ra_9729_2009.html, viewed on 31 Jan. 2013
The Republic of Korea　2011：Korea's Third National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change, pp. 99 - 120
UKCIP　2010：UKCP09 sea level change estimates, pp. 3, 6
USACE　1986：Engineering and Design Overtopping of Flood Control Levees and Floodwalls, ETL1110-2-299
USACE　1993：Reliability Assessment of Existing Levees for Benefit Determination, ETL1110-2-328, pp. 3
USACE　1996：Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies, EM1110-2-1619
USACE　2011：Sea-Level Change Considerations for Civil Works Programs, EC 1165-2-212, pp. 2
Van Alphen, J., Ron Passchier and Victor Jetten, RWS-RIKZ National Institute for Coastal and Marine Management, Netherlands　2007：Atlas of Flood Maps, pp. 4 - 100
Vrijling, J.K., et al.　2011：Safety Standards of Flood Defenses, Keynote, International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, pp. 15
Vrouwenvelder, A.C.W.M., et al.　2003：Theoriehandleiding PC-RING Deel C: Rekentechnieken, pp. 7, 30

2.3　日本における気候変動適応策検討のポイント

2.3.1　概観

2.3.1.1　我が国の治水に関わる基本的状況

第Ⅱ部 2 章 3 節に入るに当たって、最初に、我が国の治水に関わる基本的状況を踏まえ、日本における気候変動適応策を検討する上での論点を整理し、2.3.2 以降に続く内容の位置づけを明らかにしておく。

まず、図-Ⅱ.2.3.1.1 を用いて、治水に関して我が国が置かれた状況を概観してみる。日本においては、先進諸国の中でも有数の激しい洪水外力を受ける自然地理的状況に置かれる中、高度な土地利用がなされている氾濫原の治水安全度を必要なレベルで確保するため精力的に河川整備がなされ、苛烈な洪水外力と高度に整備されつつある治水施設がせめぎ合う構図の下、一定の治水安全度を確保するに至っている。しかし、近年も激しい水害に見舞われることに現れているように、目標とする治水安全度に対して（それは先進諸国の中で決して高いものではないが）、実際の安全度は未だ十分とは言えないレベルにとどまっている。そのため、下図において河川整備［既実施］に対し河川整備［計画］が有意な割合で残り、その完遂に向けての取り組みが続けられてきているところである。

ところが、第Ⅱ部 2.1.2、2.1.3 で述べたように、気候変動によりたとえば豪雨量が現在気候に対してα倍になり、それにしたがって洪水ピーク流量がβ倍になることで、気候変動影響がなくても今後まだ投じる必要のある河川整備の労力 W_p が、$W_f = \gamma W_p$ に増大してしまう。これは、いわば、河川整備という営為に関する“逃げ水”的状況の出現と言えよう。そして、増大率が、$\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ になるにつれ増幅する特性があること、さらに、氾濫可能性に関する倍率 ε の増大率はγのそれよりさらに増幅される特性があることは、やはり第Ⅱ部 2.1 ですでに述べたとおりである。

加えて、そもそも洪水外力は自然の極端現象であって、その上限が河川整備に関わる治水安全度目標（たとえば超過確率年 200 年など）にとどまるという合理的理由はなく、気候変動影響の度合いに関わらず、低頻度ではあるが起こりうる大規模洪水に対する治水方策を考えることの重要性は今日ますます高まっていると言える。

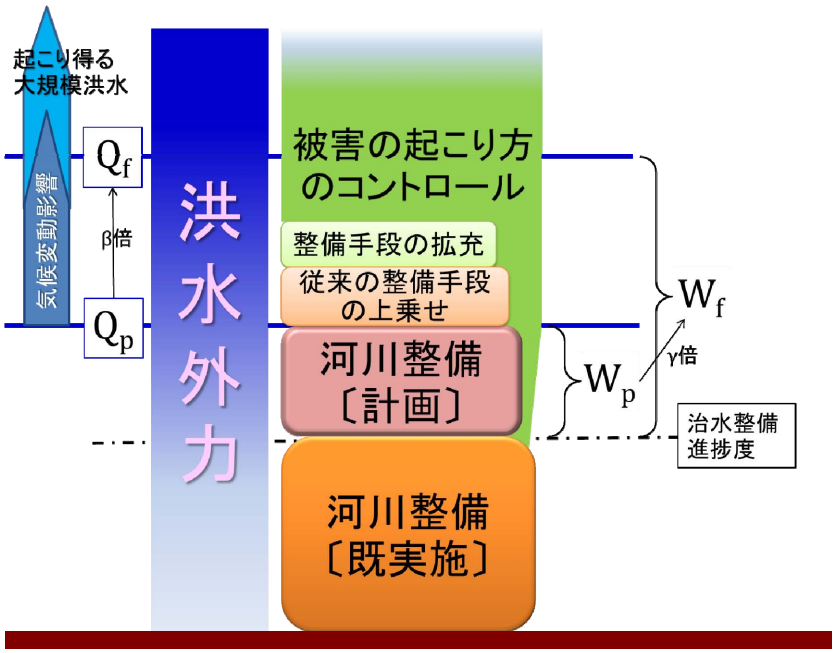


図-Ⅱ.2.3.1.1　治水に関して日本が置かれた概況の説明

以上を模式的に表現した図-Ⅱ.2.3.1.1 において、気候変動適応を含む治水方策について議論してみる。気候変動により豪雨したがって洪水外力が大きくなったのであるから、それに応じて従来の手段による河川整備を上乗せしていこうという考えがまず出てこよう。しかし、これから行うべき河川整備を量的に拡大することは種々の制約条件から必ずしも容易ではない。この点について代表的例示をするなら、2-4 割のピーク流量増を吸収するために、現在の計画よりも河道の流下能力をさらに増大させること、あるいは洪水ピーク流量の低減をさらにはかることが必要となり、これは実効可能性という点で高いハードルである。流下能力の増大というと、大規模な引堤等に頼らなくて済むという観点から、また、しばしば数字上は流下能力増が説明できてしまうことから、河道の掘削という手段に傾きがちであるが、流下能力の 2-4 割増に見合う河道掘削を現計画からさらに行うことが広い意味の河川技術として本当に妥当であるのか・どこまで可能であるのか、という技術的問いにしっかり答えることが必要となる。

従来の手段による河川整備を上乗せするという選択肢については、気候変動の予測に伴う不確実性の取り扱いも関係してくる。河川整備の着手から治水効果発現までに多くの場合長時間を要することを踏まえ、不確実性を持つ情報に基づく適応策（治水）のための先行投資をどのような考えに基づき実施するか？という課題は、いわゆる“後悔しない施策”の具体的あり方を見定めることと相まって重要なポイントとなる。α の増加率に対して γ や ε の増加率が増幅して伝搬するという上述の特性は、α に関する少しの予測の幅が、実施すべ施策量や治水安全度への影響度を大きく変えることを意味することから（2.1.3.4 参照）、施策実施の判断に関わる不確実性が豪雨に関する気候変動影響予測の持つ不確実性よりも大きくなることに留意する必要がある。いずれにしても、従来の手段による河川整備の上乗せという方策は検討すべきことの１つではあるが、それだけを考えておけば事足りるわけではないことを、ここで改めて確認しておきたい。

となると、次の展開として、治水安全度を向上させるための河川整備の手段を技術開発等によって拡充（革新というニュアンスも場合によっては含めて）するという方向が出てこよう。たとえば、XRAIN の配備や短時間気象予測の進展など、少し前までは実務上存在しない技術的道具が技術開発により手に入るようになってきた状況において、それらを活用することにより従来の枠組みを超えて治水手段を拡充する方策を追求することは、今後重要となる。河道設計の考え方を新たに構築する取り組み、河道管理の合理化をはかる技術的枠組みの検討などを含め、先端技術を突破口にするものから、確立されたと思われていた技術体系のリノベーションを目指すもの、さらには従来技術の地道な改良の積み重ねまで、様々な切り口からの技術展開が期待される。ただし、こうした方策は、技術開発の成否と一体不可分であり、その追求の重要性は論を俟たないものの、やはり、それに全面的に依存するというスタンスは適切でなかろう。また、「従来の枠組みを超える」という点において、既往の治水施策との整合性を確保するのに新たな検討を要する状況も場合によっては想定でき、その難易にも留意しておく必要がある。

以上から、「従来の整備手段の上乗せ」「整備手段の拡充」を追求することもそれぞれ重要であるが、その上で、「被害の起こり方のコントロール」という方策に改めて力を入れていくことの重要性に行き当たる。そして、これら３つは、いずれかを選択するということではなく、当該河川・流域等の状況や技術開発の進捗を見据えて適切なバランスで並行的に実施していくという考え方を基本にすることが肝要であろう。その中でも「被害の起こり方のコントロール」は、洪水外力の規模や河川整備の進捗段階によらず、すべての局面で考慮すべき方策に位置づけられるものと考えられる。そのことを意識して、図-Ⅱ.2.3.1.1 は、「被害の起こり方のコントロール」がカバーする範囲を広く描いている。ただし、「被害の起こり方のコントロール」の具体的中身や実質的な有効性を見定めるにはまだ議論・整理が必要と考えられる。そこで、次項では、このための題材を提供してみる。

2.3.1.2　被害の起こり方のコントロールについての議論

a)　被害の起こり方のコントロールに関する包括的表現

「被害の起こり方のコントロール」を包括的に表現する１つの方法を図-Ⅱ.2.3.1.2 に例示する。ここで横軸は豪雨規模（超過確率年)、縦軸は被害（想定）を表す。この図に示される【被害～豪雨規模（超過確率年）関係】を“制御”することが「被害の起こり方のコントロール」であると表現することができよう。この場合、この関係線が立ち上がるところの横軸の値、すなわち無被害で済む可能性（確率）を増大させることも包含して表現される。さらに言うならば、「被害の起こり方のコントロール」とは、【被害～豪雨規模（超過確率年）関係の制御】と【無被害で済む可能性（確率）の拡大】の“合わせ技”と位置づけることができる。

ここで縦軸の値については、河川区間ごとでなく、まずは、当該水系で生起する全被害の推計に基づき検討することを想定している。さらには、同一の豪雨イベントによる洪水被害エリアが複数の水系からの氾濫に関係するならば、水系単位にこだわることなく複数の水系の洪水被害を集計することもありうる。その上で、被害の種別を１つに絞って縦軸を表現することにこだわる必要はなく、むしろ、重要な複数の被害種別で縦軸を表現し、それぞれごとに被害～豪雨規模関係を把握することが重要と考えられる。この場合、人的被害と金額換算できる被害がまずは代表的な軸としてあげられる。なお、被害の起こり方のコントロールが主眼であるから、この図から豪雨規模について積分して包括被害期待値に一本化して検討することは、本旨から外れることになる（あくまで“関係の制御”に力点を置くもの)。なお、ここで「河川区間ごとでなく、まずは、当該水系で生起する全被害の推計に基づき検討」としたが、上記関係が作られている要因の分析や、どこに施策を展開するとどのように関係が変わり、どこにどのように起こりうる被害が軽減されるか？などの応答関係を具体的に検討することは当然必要となり、具体の施策検討は積み上げにより行うことになろう。

横軸の豪雨規模（超過確率年）の検討範囲については、たとえば次のような値を考慮しつつ、河川整備についての治水安全度目標を内数に含む幅広い外力範囲を設定することが必要であり、その標準的決め方がポイントとなろう；イ)既往最大、ロ)整備計画目標、ハ)整備方針目標、ニ)著名豪雨（地理的類似性を持つ他流域での豪雨も場合によっては含める)、ホ)歴史上の大洪水を引き起こした豪雨、ヘ)可能最大豪雨（手法の違いによる数値の違いの意味を踏まえることも重要になると考えられる)。この中でもニ）ホ）ヘ）は、考慮すべき最大クラスの豪雨の設定に密接に関係してくる。

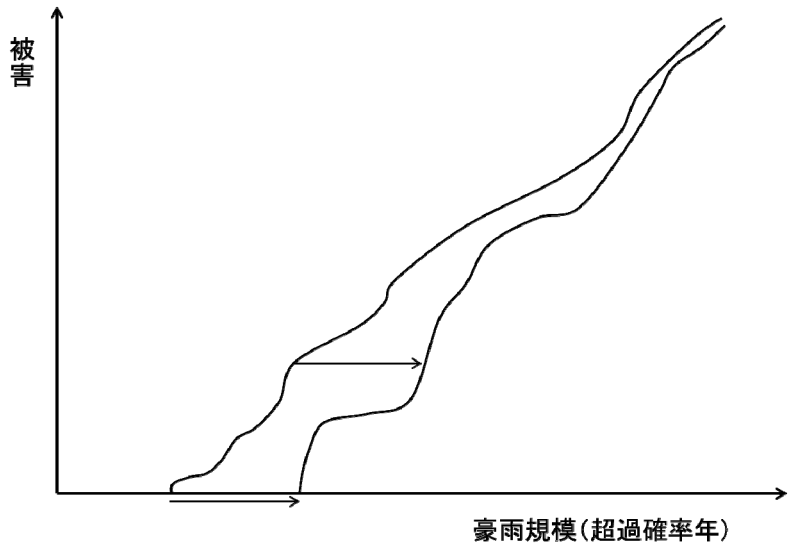


図-Ⅱ.2.3.1.2　被害～豪雨規模関係による「被害の起こり方のコントロール」の包括的表現

b) 被害～豪雨規模関係の制御に関する目標設定について

仮に、図-Ⅱ.2.3.1.2 に示した関係を制御しようとする場合、その目標設定が必要となる。先に述べたように、無被害で済む可能性（確率）は、この関係制御においても引き続き重要な目標となるが、それに加えて、関係全体を制御する際の目標設定も必要となってくる。これについては、さらに議論や検討を積み重ねる必要があるが、そうした作業を行いやすくするための仮説的案として、とりあえず次のようなものが考えられよう。

- 整備段階を上げる際に、被害～豪雨規模（超過確率年）関係のいかなる場所でも、整備後の被害想定が整備前を上回らない。
- 被害～豪雨規模（超過確率年）関係の傾き（豪雨規模の増加に伴う被害増大の度合い）が A_{CR} 以下
- Tipping point（ある外力を超えると被害の様相が急激に深刻な方向に変化するような特性を持つ閾値）が存在しない。
- 豪雨規模（超過確率年）毎に定められた許容最大被害値を上回らない。

上記には、A_{CR} や Tipping point、許容最大被害値など、新たな規準としての意味を持ちうるものを含み、その妥当性、実効性などについて様々な観点からの検討が必要となり、すぐに実現につながるものではないが、このような具体的な考え方を材料に目標設定の考え方を検討していくことは、技術政策検討の手法として必要と考えられる。

c) 各種方策を組み合わせた被害～豪雨規模関係制御のイメージ

ここではまず、被害軽減方策を表-Ⅱ.2.3.1.1 のように類型化してみる。ここにある各類型に属する施策の適用により図-Ⅱ.2.3.1.2 に示した関係がどう変わるかを調べることが、被害～豪雨規模関係制御に向けての技術検討を行う手順になると考えられる。すなわち、当該水系について、各類型の施策を組み合わせて適用することにより被害～豪雨規模関係がどのように改善されるかを、種々の施策群（組み合わせ）代替案について算定、比較し、合わせて技術面、コスト面、制度面、要する時間、社会的側面などから実行可能性や不確実性を吟味するという手順のイメージである。こうした検討に用いる基盤図としての活用を意図して、各類型の施策の組み合わせ効果を総合的に表現する図を図-Ⅱ.2.3.1.3 に模式的に示す。

この図から、施策群の適用によって無被害で済む可能性がどの程度拡大するかを把握でき、さらに、各規模の豪雨外力に対して、どの施策によりどのようなレベルの防災・減災がなされ、なお残る被害がどのようなものかを一括して把握することができる。表-Ⅱ.2.3.1.1 中のベストエフォート的施策の記述にあるように、施策の類型によって効果発揮の確実性が異なっており、そうした違いを表現することができるようになれば、さらに多面的な施策群吟味が可能となろう。また、図-Ⅱ.2.3.1.3 を基にすれば、ある豪雨規模に対して起こりうる被害について、施策群遂行に伴う時間的変化を表現することも可能であり、これは、被害制御に時間軸の観点を取り込む際に有用となるはずである。

気候変動影響による豪雨増は、被害～豪雨規模関係図における各類型の施策効果総合表現図において、たとえば図-Ⅱ.2.3.1.4 のように、関係線を左方にシフトさせることで表現できる。影響予測の不確実性については、この図中の上下にあるように、シフト量に幅を設けることで最低限の考慮ができる。この図から、気候変動影響によって防御状態がどのように退行するか、影響の出やすい局面と比較的出にくい局面がどのようになっているか、などを読み取ることができる。当然のこととして、被害～豪雨規模関係が“寝ている”と影響は出にくく、立っていると影響が出やすい。気候変動により、場合によっては、類型Ⅰの施策による防災効果が全て失われ、さらに後退する（現状よりも被害が大きくなる）ことも起こりえるが、そうした時に類型Ⅰ以外の施策群が組み合わされていると、気候変動影響が相当程度緩和される可能性があることも、こうした図から把握できる（図-Ⅱ.2.3.1.5 参照）。

表-Ⅱ.2.3.1.1　治水に関する被害軽減方策の類型化例
－被害～豪雨規模関係制御の具体像を議論するために－

類型[欄外注1)]	内容説明
Ⅰ	河川での施策；既存手段による河川整備→河道改修、放水路、洪水調節施設（ダム、遊水池、防災調節地など）
Ⅰ＋	河川での施策；たとえば、積極的河道管理により河川の流過能力を極力高く保つ、あるいはその縦断変化を適切なものにする方策を付加的に講じるなど。「整備手段の拡充」の範疇。
Ⅰ++	河川での施策；河川の施設を対象としたベストエフォート的手法[欄外注2)]の適用（施設への粘り強さの付与、気象予測に基づくダム操作など）。「整備手段の拡充」の範疇。
Ⅰ+++	河川での施策；危機管理措置。たとえば、各種水防、破堤箇所の緊急締め切りや破堤口拡大の緊急抑制工、氾濫水排除のためのポンプ稼働、氾濫流緊急制御工法など。
Ⅱ	流域（降雨から洪水への流出エリア）での施策で、洪水流出の低減につながるもの（ベストエフォート的[欄外注2)]側面を持つものを含む）
Ⅲ	氾濫エリアでの施策（施設や土地条件の整備、状態制御が主）；たとえば、二線堤による氾濫制御、深刻な氾濫が生じる場所の土地利用を被害が大きくなりにくい、あるいは被害から回復しやすいものに制御する方策、氾濫時にそこに居ても深刻な被害を受けないような建築構造・諸元にする方策、氾濫時に近場に緊急避難ができる地物を配置する方策、ライフラインや重要な公共サービスに支障が出ない、あるいは復旧しやすいようにする方策など。いずれも、氾濫エリアの物理的、施設的、施設管理面での条件を整えることに属するもの。
Ⅲ+	氾濫エリアでの施策（主に人間の行動が対象）；たとえば、情報の提供を受け適切な避難を行うなど、人的被害の回避や軽減につながる人間の行動が生じるようにする方策。

注１）各類型は互いに独立しているわけではなく、相互に補完する関係になることもありうる。

注２）「ベストエフォート的」の意味：所定の機能の確実な発揮を前提とする類型Ⅰの方策と異なり、有意な効果の発揮を期待できるが、場合によっては効果発揮が減退するなど、状況によって発揮される効果が変わってくるという特徴を持ち、大きい効果を発揮する場合があることに期待して講ずるという性格を持つもの。こうした方策を適用することの可否や位置づけについての議論も必要。

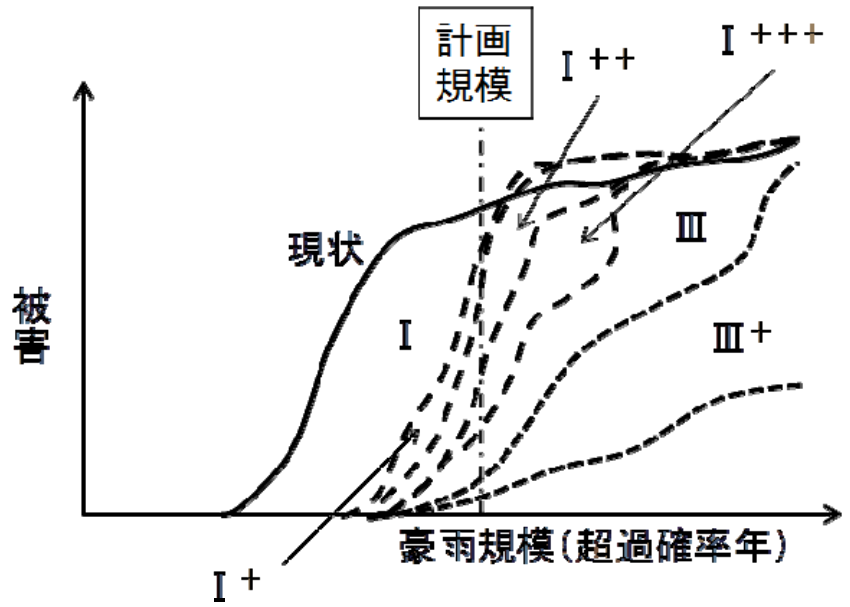


図-Ⅱ.2.3.1.3　被害～豪雨規模関係図における各類型の施策効果の総合表現（模式的例示）

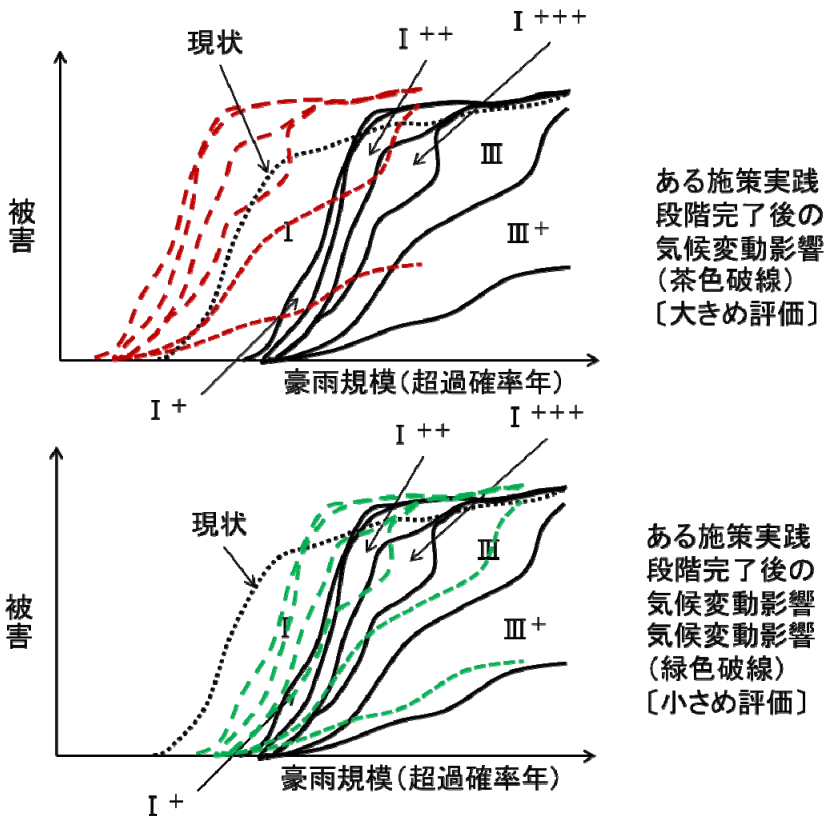


図-Ⅱ.2.3.1.4　各類型の施策効果の総合表現図における気候変動影響の表現

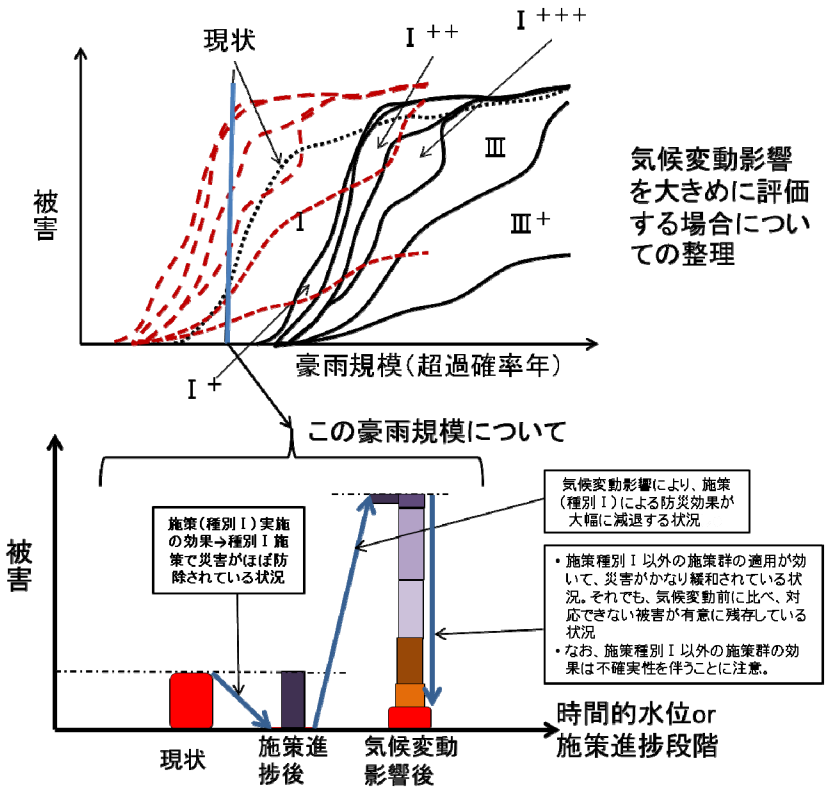


図-Ⅱ.2.3.1.5　ある豪雨規模に着目した被害対応状況と気候変動影響の表現

2.3.1.3　論点の整理

2.3.1.2 において模式的に示した検討を、技術的裏付けをもって個々のケースで具体的に行えるようになれば、今まで取り組んできた治水施策を包含し、気候変動影響や超過洪水の対応を見据えた治水施策の広範な検討が可能になると期待できる。そこで、2.3.1.2 の技術検討の内容を実践する上で何が今足りないか？という観点から、課題および論点を整理し、2.3.2 以降の内容につなげることとする。

●河川整備の手段の拡充の展望

手段拡充は表-Ⅱ.2.3.1.1 においてはⅠ+、Ⅰ++、Ⅰ+++にあたり、その可能性と限界の把握は、逆に手段拡充の必要性を具体的に認識させることにつながり、気候変動適応のための新たな技術展開につながっていく。この後の 2.3.2 では、河道設計・管理とダムからのアプローチについて、技術検討の現状と展望を述べることとする。

●設計以上の外力を受けた治水施設（群）の（システムとしての）機能発揮・喪失状況に対する理解増進と必要な対応策の検討

従来よりも大きな外力が治水施設に作用し、ある場合には設計上の外力を上回ってしまうことが気候変動によって現気候下以上に起こりやすくなる状況を考えざるを得ない。したがって、適応策を考えるに際して、施設の「壊れ方」と「機能維持→喪失の過程」を理解し、それを表現する技術が求められる。ここでは、防災・減災施設群のシステムとしての総体的な機能発揮・喪失に関わる挙動を分析することも大事な課題になる。そして、このような検討は、「被害の起こり方のコントロール」の施策積み上げのために必須である。この後の 2.3.3 では、河川水系において堤防からの氾濫（破堤氾濫を含む）に着目し、堤防のシステムとしての氾濫防止機能の喪失状況を踏まえた氾濫と被害の起こり方のシナリオ設定法について検討した内容を述べる。また、ダムの洪水調節についても、設計以上の外力を受けた場合の挙動についての検討の要点を述べる。

●被害の起こり方のコントロール（緩和、靭性の付与）というアプローチの実践法

2.3.1.2 の主題であった「被害の起こり方のコントロール」については、概念レベルの重要性については論を俟たないものの、それをどのように実践するかについては、まだ多くの検討が必要である。本課題は、気候変動影響にかかわらず本質的に重要なものであるが、気候変動がもたらす外力増が否応なしにこのアプローチの強化を促進させる明確な因子になっており、また、このアプローチが適応策検討全般に関わってくる。この後の 2.3.4 では、氾濫のさせ方をコントロールするというアプローチを実践する上での要件と論点の整理を行い、さらに 2.3.5 では、それも包含して、超過洪水を伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題について述べる。

●不確実性への対応

外力増やその治水施策への影響度が少なからず不確実性を伴うことは、気候変動適応の特質を代表するものと言える。このことが適応策検討にもたらす意味は複雑であるが、後悔が生じる構図の単純な説明例を持ち出し、議論の若干の整理を試みたい。

図-Ⅱ.2.3.1.6 は、図-Ⅱ.2.1.3.28 のうち、河川整備労力の変化率だけを抜き出して、豪雨変化率との関係を模式的に表示したものである。豪雨変化率の予測には幅が設定されている。ここで、豪雨予測幅の中央値を選んで、それに対応する整備労力の増分を加えるという適応策を実施したとする（図中の○印）。その後、気候変動が起こり、実際の豪雨量変化率が大きい側に振れたとすると、○の右側の赤点線のゾーンで示される「もっとやっておくべきだったと悟る」後悔や、同じく○の右側の黄二重線のゾーンで示される「ちょっとした労力増をケチったことのツケの大きさを悟る」後悔が生じ得る。逆に、実際の豪雨量変化率が小さい側に振れたとすると、○の左側の緑二重線で示される「やりすぎて無駄だったと悟る」後悔が生じ得る。前二者の後悔を避けようとすると、○の設定位置を予測幅の右方にずら

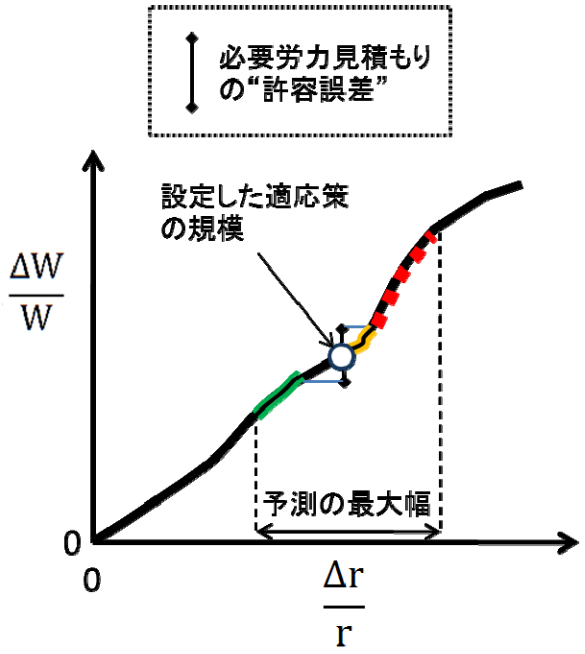


図-Ⅱ.2.3.1.6　予測の幅により“後悔”が生じる構図の説明例

すことになるが、その場合、三番目の後悔が生じる可能性が増大してしまう。

不確実性への対処法として、・気候変動の出方がはっきりした時点で適応策を講じる、・適応策を将来時点で実施することが種々の点で高コストを伴う、あるいは時間を要しすぎて適応に間に合わないことが考えられる場合については、そうしたことが生じにくくする事前措置を予め施しておく、というアプローチが当然有力となる。たとえば、2.2.3.3 で紹介したドイツにおける適応策の考え方がこれに当たる。このような方針が実効的となるためには、事前措置のコストを（適応策本体に比較して）小さくできること、気候変動を探知してからのアクションで間に合うことの担保、気候変動を的確に探知できること、が要件となる。このうち３番目については、日本の治水目標水準のようにある程度大きな豪雨（したがって低頻度）が対象になっている場合に、たとえば、観測されたデータから低頻度事象の生起の変化を適応策が間に合うタイミングで探知できるのか？という技術課題に突き当たる。ここが、同じ気候変動でも平均的パターンの変化を扱う場合との本質的な違いと言える。

以上に述べたような不確実性への対応に関する論点と課題を、この後の 2.3.6 でさらに整理する。

2.3.2　河川整備手段の拡充の展望

2.3.2.1　河道設計・管理からのアプローチ

河道流過能力の積極的な拡大を、環境機能の向上、河道維持管理の軽減を考慮しつつ図っていく河道設計・管理の方法を検討する際には、基本的に以下のことが重要になると考えられる。

- 河道の形状・変化の仕方を司る「仕組み」を踏まえた河道設計法。
- 目先の河道応答、それを包含する、より巨視的な現象を見据えた河道設計法。
- 実現すべき「河道形状」を具体的に示せる河道設計法。
- その先の河道管理を考慮した河道設計法。
- いわゆる「二極化した河道」を再度平坦化する設計で行けるのか？　河積拡大を行う際の拡幅と掘り下げの依存度比をどう決めるか？　など、実際的な技術判断を直截に下せる河道設計法。

これらに関係する論点を、図-Ⅱ.2.3.2.1に示す3つの側面から以下に整理する。

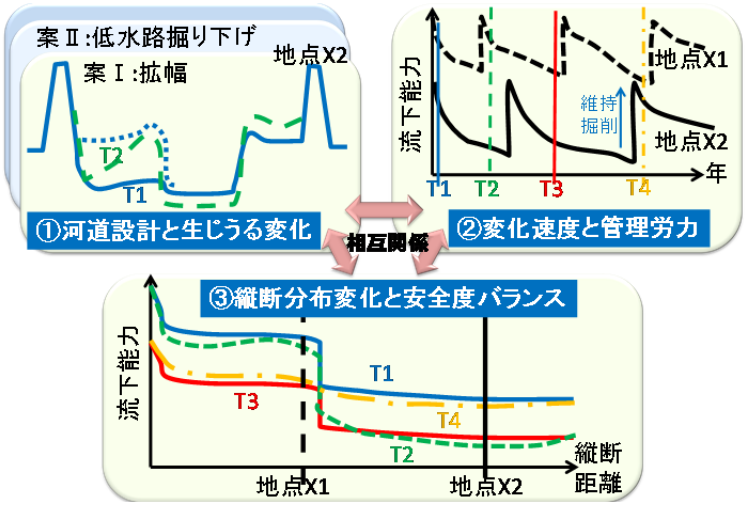


図-Ⅱ.2.3.2.1　河道設計・管理手法の向上に関わる３つの側面

a) 論点①：河道設計と（それにしたがって整備された河道に）生じうる変化

- 「安定河道」の工学的な意味：そのコンセプトは河道設計にどのように役立つか？
  - そもそもの定義は？　自然河川が自己形成する河道？　変化が小さい河道？　形状改変してもまた元に戻る河道？
  - 治水で重視される計画規模の大出水時における「安全」と同義なのか？
  - それだけでないとすれば、他に意味があるのか？　例えば、それを基準形状（テンプレート）として、現況や設計した河道との差異（ズレの大きさと場所）を調べることで、生じうる地形変化パターンとその進行速度が定式化できる、など。
- 「河道形成流量」：平均年最大流量など代表水理量で河道は設計できるのか？
  - 川幅、砂州形態、局所洗掘深、河道の安定性（改修前後の摩擦速度の変化）などの観点からそれぞれ考えるべき流量があるのか？
- 「土砂供給量」を明示的に河道設計に組み込む必要はないのか？
  - 河道縦断勾配と河床粒径がその代替指標として役立っていた？
  - しかし、縦断形状と河床材料が有意に変化する状況も生じており、その場合、代替指標の有効性は薄れる？
- 「河道横断形状」を保ったまま掘り下げれば、その河道も安定か？

- 河道構成材料（地表と地下）が、鉛直方向に一様かどうかがキーポイント。
- 河道横断図に、横断形状を表す「線」だけでなく、その地質構成を表す「色分け」も示すことが重要。
- ただし、それを河道設計に生かす技術が未熟。特に、未固結、軟岩が露出する場合。
- 掘り下げることで、大出水時にこれまで経験のない大きい水深（流速）が作用するが、その場合にも「安定」かの技術判断が必要となる可能性。

b）論点②：変化速度と管理労力

- どこまで河積を大きくできるか？　それを決める条件の一つとして「河積を維持」できるかが重要
  - マクロには、「再堆積の速度 vs 維持管理に費やせる労力」のバランスが主要な判断要素。
  - 論点①と関連：堆積速度を小さくできる（「安定」した）河道設計が重要な所以がここにある。
  - 大洪水時（洪水中）に生じうる堆積で河積が不足しないことも大事な要件。
- 現実的な点検・判断・対策のスキームで管理できる河道を設計すること
  - 再堆積量(河積減)がごく軽微と見なせるほど頻繁に維持掘削するのは、実務的には必ずしも容易ではない。
  - 次の維持掘削実施までの期間内に堆積しうる分だけ、あらかじめ河積を大きめに確保しておくという「河積マージン確保」の考え方が必要になるのではないか？
  - この「量」を河床変動計算で推計し、維持管理の実行可能性判断と、河道形状の設定に反映することを、河道設計項目として取りこむべきではないか？
- 樹木繁茂など粗度管理も上記の河積の議論と同様に設計に取り込むこと
  - 伐採後の樹木繁茂の進行速度（樹高、群落面積などの増加速度）が直接的に設計に関わるパラメータ。
  - これらが河道形状、洪水による攪乱、伐採時の工夫（例えば抜根）によってどの程度変わりうるか？の知見を蓄えて設計に反映することが重要。
- 掘削・伐採の頻度・範囲を決める際には、環境への影響（正負の両面で）を評価すること。
  - 保全箇所を直接改変せざるを得ない影響と、反面、洪水の代替として攪乱を生じさせる好影響の両面から評価することが大事。
- 上記のような、より精密に管理を考慮する河積増が、結果的に所定の流下能力の確実な保持だけでなく、＋α の結果を持ち得、これが良い側面だけとは限らない場合もあることへの配慮（論点③につづく）。

c）論点③：縦断分布変化と安全度バランス

- 流下能力の縦断分布（上下流バランス）をどのように設定すれば、現況の実力（HWL 以下で流せる洪水の規模）や計画規模を超える洪水時の氾濫被害を低減できるか？
  - 氾濫生起特性を組み込んだ河道計画のあり方を検討する場合、主テーマの１つになっていく可能性。
- その上で、論点②の河道変化速度を織り込んだ、より精密な河道設計・管理の下で、さらに、水系全体として氾濫被害リスクを大きくしない賢い管理手法を設定しておくことが重要となるかもしれないが、このような「複雑な」管理が実務として実施可能か？
  - 変化速度大かつ維持管理実施頻度小だと、管理のための河積マージンを大きく設定する必要がある。この場合、結果として、河道管理実施と洪水生起のタイミングによっては、上下流のバランスに大きなズレをもたらす可能性が出てくる。
  - となれば、変化速度を小さくし、適度な管理頻度にすることが、上下流バランスの取りやす

さを確保する上で重要ということになる。

- この観点で、追求すべき管理法が論点①の河道設計とも結びついてくる可能性が出てくる。

- 河床変動計算・樹木繁茂推計を、上記のような氾濫生起特性を組み込んだ河道設計において反映させる方法
  - この目的での各計算の精度・確度を見極めた上で、どのような検討手順とするか？　バランスのズレ方をどのように推計するか？
- 計画・設計→維持管理への受け渡し
  - どこに詰め切れなかったことがあるか？を明確にし、その改善のためにすべきことを管理に受け渡す。その結果を改めて計画・設計に返す。
  - このサイクル（PDCA 型管理）で改善していく仕組みを本格化させる。

2.3.2.2 予測雨量を活用したダムによる洪水調節操作手法の高度化

今後気候変動に伴って豪雨の規模が増大すると、ダムの治水施設としての役割・重要性はますます高まると考えられる。しかし、既存ダムにおいて豪雨の規模が増大化すると、現状の容量配分や規則に基づいて操作を行う限り、各ダムの計画で想定している規模以上の豪雨が発生するとダムはある段階から流入量=放流量のただし書き操作を行うことになり、治水効果が見込んでいたものから減じる。そこでダムによる治水機能の向上を考えようとした時に、新規ダムを建設することは選択肢ではあるが、ダムサイトとして適切な場所が徐々に減っていることおよび財政的制約を抱えているため、容易ではない。そうすると、既存のダムにおいて洪水調節能力を高めることも考えていく必要がある。既存ダムの洪水調節能力を向上させる手段は、「洪水調節操作方法の高度化」および「既設ダムの再開発」の大きく二つに分類される。さらに近年の「洪水調節操作方法の高度化」に関する検討は予測雨量の活用したものが主となっていることから、ここでは「予測雨量を活用したダムによる洪水調節操作手法の高度化」および「既設ダムの再開発」について述べる。

なお、このうち前者については、1.1.5においてアンサンブル予測雨量を用いる方法の研究成果を詳述した。ここでは、それも含め、他の研究・調査等の情報もレビューしながら、この技術の展望と課題を述べることに重点を置く。

ダムにおける出水時の操作を一般的な実施過程に従って段階的に分類すると、図-Ⅱ.2.3.2.2に示すように1) すりつけ操作、2) 水位維持操作、3) 洪水調節操作、4) 異常洪水時操作（ただし書き操作）、5) 後期放流操作、6) 予備放流・事前放流操作に分類される。各操作におけるポイントや課題などはダム技術センターおよび鳥居の文献を参考にしていただきたい（（財）ダム技術センター2005a、鳥居2012）。現在までに行われている予測雨量を活用したダム洪水調節に関する代表的な研究・取り組みとして、5)後期放流操作における利用と6)予備放流・事前放流操作における利用があり、ここでは、1.1.5に示した国総研の研究にも触れながら、検討状況を全体的に整理しつつ今後の課題について述べる。

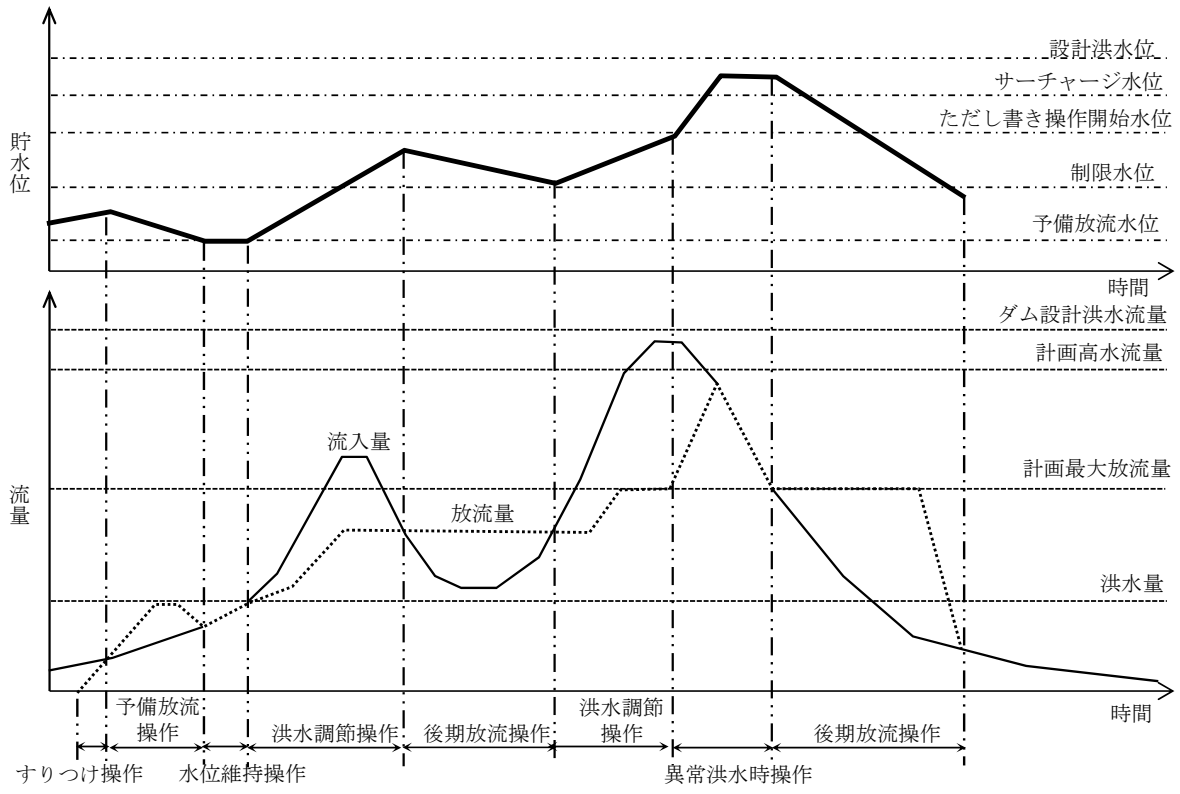


図-Ⅱ.2.3.2.2　出水時のダム操作の流れ（予備放流方式の場合）（（財）ダム技術センター2005a）

a) 事前放流における予測雨量活用に関する研究事例

最初に、予測雨量を活用した事前放流に関する研究事例について紹介する。事前放流におけるポイントは、これから迎える洪水に対して可能な限り容量を開けるために現時点で貯留されている利水容量を洪水前に放流し、放流した利水容量は洪水によって確実に回復させなければいけないことである。利水容量を放流したが、洪水の規模が小さいまたは洪水が実際には発生しなかったために利水容量が回復しない場合、利水の共同事業者に対して支障を与えることとなり、このような事態は避けなければならない。このように、事前放流操作は確実に回復するが見込まれる利水容量を放流することが基本であるが、現状の予測雨量の精度が事前放流を実施するための満足な精度には至っていないため、現在までに行われている事前放流は回数や規模の面において限定的である。そのような背景の中、秋葉ら、戸谷ら、下坂ら、腰塚らは流入量特性を活用した事前放流量決定手法を提案している（秋葉ら2004、戸谷ら2006、下坂ら2009、腰塚ら2006）。その手法では、過去の洪水データから低減開始時の流入量（または累積降雨量）とそれ以降の総流入量を把握し、実際に洪水が発生した時にその時点の流入量を基にしてその後の総流入量を推定し、その分の利水容量を事前放流するものである。これにより、利水側に支障を来すことなくダムの洪水調節容量を洪水時に一時的に増加させることができるようになる。上記手法は当初は予測雨量を利用しないで、実測雨量および実測流量からその後の総流入量を推定していたが、北田らはその手法に予測雨量として気象庁の降水短時間予報（30分間隔で発表される、6時間先までの1時間雨量）を組み合わせた事前放流量のシミュレーションを実施している（北田ら2010）。そこでは、予測雨量を組み合わせた事前放流シミュレーションの事例として草木ダムの2007年9月台風9号を対象にシミュレーションを実施している。その結果、現行操作規則ではただし書き操作に入ってしまうのに対し、予測雨量を組み合わせた流入量特性を活用した事前放流操作を行う手法では、ダム貯水池への流入がピークを迎える前に十分な事前放流を行い、空き容量を大幅に増大させて洪水を迎えることでただし書き操作を回避することができた（図-Ⅱ.2.3.2.3）。また、洪水終了後には利水容量も回復している。今後、事例数を増やすこと操作規則との整合等を検討することが望まれる。

b) 後期放流操作における予測雨量の活用事例

上述の流入量特性を活用した事前放流操作手法はまだ研究段階である一方で、5)後期放流操作においては実際に予測雨量を活用してダムの操作を実施した実績が出始めている。ダムにおいて後期放流操作に入る段階であっても、流域の雨の偏在性によっては下流の流量は支流域からの流出の影響を受けて安全性が低い場合が考えられる。このような場合、後期放流操作時に放流量を規定されている流量よりも少ない放流量とすることで下流の安全性を高めることができると考えられる。そのためには洪水後期において、今後ダムに流入すると考えられる流入量が現在のダム空き容量と比較して小さいことを把握して操作を行う必要がある。この操作を行うために予測雨量に求められる精度は、洪水後期における降り終わりの雨量やタイミングに関する精度となる。鳥居(2012)は、気象庁の予測雨量として2007年11月まで運用されていたRSMや現在運用されているMSMについてダム流域について予測精度の検証を行った結果について、MSMの精度がRSMと比較して高いことや、降雨の降り終わりにおいて降り終わりのタイミングや降雨波形について精度が高いことをいくつかの出水事例について紹介している。この「降雨の降り終わりについて精度が高い。」という特性を利用してダムの後期放流操作において規則操作よりもより効果的な洪水調節を実施している事例が既に存在するのでそれを紹介する。

中国地方整備局の平成22年7月13日から14日にかけて発生した洪水では、八田原ダム流域において約180mmの雨量が観測され、「適応操作」を実施した（国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所2010）。「適応操作」とは、下流河川の状況及び今後の洪水の見通し並びにダムの貯留状況等を条件として、下流河川の洪水被害を軽減するため更にダムに貯留する水量を多くする操作であり、この「今後の洪水の

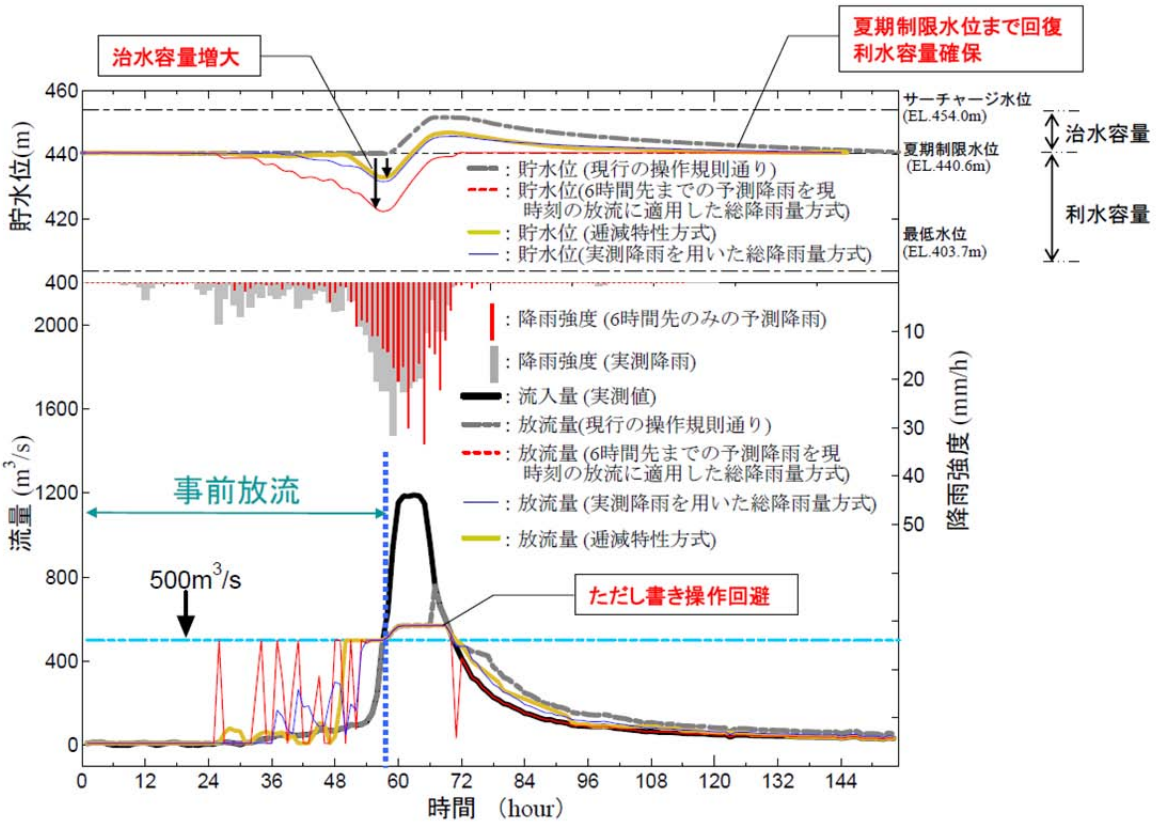


図-Ⅱ.2.3.2.3　6時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列（北田ら2010）

見通し」という部分において予測雨量が活用されており、予測雨量を用いて以降のダム流入量を予測し、放流量を決定している。この洪水では、ピーク以降においてはダムの空き容量と比較して予測される雨量が小さいため、規則操作よりも放流量を小さくする（オーバーカット）ことにより、ダムからの放流量を最大約138m³/s低減させることに成功した。この操作によって流入量と放流量の差は約282m³/sとなり、下流の目崎地点において約55cmの水位低下に成功した（図-Ⅱ.2.3.2.4）。

また、東北地方整備局の三春ダムにおいてもほぼ同様の操作が平成23年9月の台風15号に伴う洪水において実施された。この時、三春ダム下流の阿久津地点で計画高水位を上回り、破堤等の重大な被害が想定されたため、降雨予測およびダムの空き容量を勘案し、全量カットによる洪水調節が実施された。三春ダムの洪水調節によって阿久津地点で約0.5mの水位を低減させる効果があったと考えられ、この時通常の規則操作に従って操作した場合は約0.35mの水位低減効果があったと考えられる。すなわち、全量カットによる効果は約0.15mの水位低減効果であったと考えられる（図-Ⅱ.2.3.2.5）（国土交通省東北地方整備局2011）。

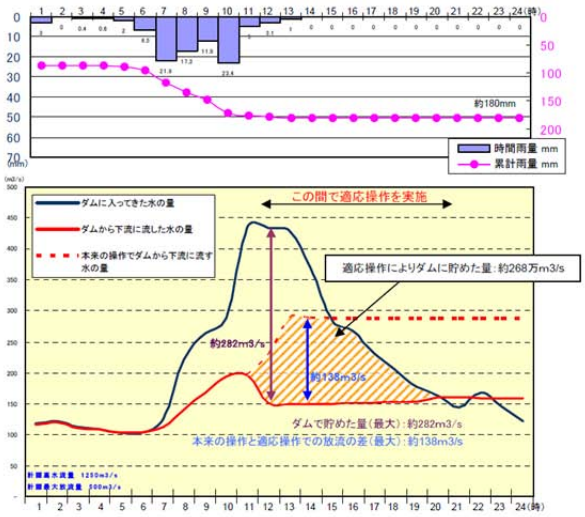


図-Ⅱ.2.3.2.4八田原ダムにおける洪水調節による治水効果（H22.7洪水）（国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所2010）

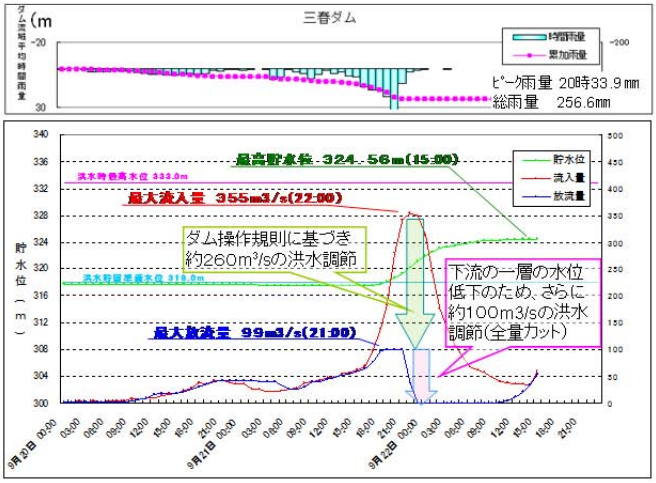


図-Ⅱ.2.3.2.5　三春ダムにおける洪水調節による治水効果（H23.9洪水）（国土交通省東北地方整備局2011）

c）予測雨量の不確実性を考慮したダム洪水調節操作

先述した流出量特性を活用した事前放流量は、基本的には予測雨量への依存性を極力低下させつつも治水に効果的かつ利水に支障をきたさないことを指向した手法である。また、洪水後期のオーバーカットについては、予測雨量への依存性自体は低くはないが、予測雨量の精度が十分に高い降り終わりに的を絞って予測雨量を活用する方法である。流入量特性を活用した事前放流操作においては、事前放流を実施することで洪水調節容量を一時的に増やすことができるものの流入量が洪水調節開始流量を超えた後は規則操作に従うため、ダムにとって大規模な出水に対して効果を発揮するが、流域で大きな出水ではあるが、ダムにとってはそれほど大規模ではない洪水などに対しては規則操作と比較して放流量を下げることができず、下流の安全性を高めることはできない。また、洪水後期のオーバーカットにおいても基本的にはダム地点におけるピークが過ぎた後の操作であるため、下流の安全性を高めるという点でその効果はまだ限定的である。ここでは、「下流の安全性を高めるための操作」という観点に立ち、ダム地点において効果的な洪水調節を行うための予測雨量活用方法について考える。

規則操作よりも効果的にダム地点において洪水調節を行い下流の安全性を高めるためには、洪水の全体規模が把握した上で洪水終了時に洪水調節容量を100%使い切れるような最適放流量を決定することが求められる。そのためには洪水の全体規模をおおよそ把握することができる予測雨量の精度が要求される。現在気象庁から提供されているダム洪水調節に使える予測雨量情報は、GSM84時間予測またはMSM33時間予測である。GSM84時間については、予測先行時間は長いものの空間解像度20kmメッシュと荒いため、特に強い降雨に対して精度が十分ではない。またMSM33時間予測は解像度が5kmメッシュとGSMと比べて細かいものの、先行時間が33時間でありダムの洪水調節において洪水の全体が見通せるほどの先行時間ではない。

また予測先行時間とは別に予測精度の問題がある。ダム管理者は予測雨量の精度が気象予測技術の進歩により日々改善されるのを目の当たりにして、「いつかは予測の誤差がゼロになるのではないか」という期待を抱くものと考えられる。しかし、洪水毎に誤差の傾向が異なっており、予測誤差がゼロになるのは困難であると考えられる。1.1.5においても記したとおり、今後とも予測の精度は向上するものの誤差はゼロにはならないと考え、その立場に立って予測雨量の誤差を想定した洪水調節操作方法を考

えるべきである。そのための手法としてアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節方法について1.1.5においてその事例を紹介した。そこでは蓮ダムの平成23年台風6号、12号、15号の洪水調節計算事例を紹介し、アンサンブル予測雨量を活用することで、その時の予測の幅に応じて下流のピーク流量を最小にすると予想される最適放流量を機械的に求めることができることを示した。併せてGSM84時間予測を境界値として計算されたアンサンブル予測雨量（WRFを利用）は、84時間先においても一定の精度を有していることがわかり、ダム洪水調節にとって有益な情報を提供しうることを示した。台風6号および15号については規則操作よりも効果的な洪水調節が行えることを示したが、12号についてはGSM84時間予測において洪水の二山目を完全に見逃してしまうため、アンサンブル予測雨量に基づく操作では規則操作よりも下流のピーク流量を増加させてしまう結果となった。これはGSM84時間予測において、台風の進路速度を過大に予測していたため、それを境界値として計算したアンサンブル予測においても実際よりも早く雨が降り止むと予測していたことに起因する。このように、アンサンブル予測雨量の精度は境界値の予測精度に大きく影響を受けるため、実用化に向けては検討事例数を増やすことで課題を整理することが必要である。また、現状ではアンサンブル予測計算に時間がかかるためリアルタイムでの運用に向けた課題整理も行う必要がある。

2.3.2.3 既設ダムの再編や再開発の効果

a）ダム再開発の必要性

近代的な設計理論に基づくダム建設の歴史を振り返ってみると、明治から大正時代にかけては発電のみのダムが中心であり、さらに第二次大戦の戦前及び戦後の十数年間は、洪水調節と発電を目的としたダムが多い。その後、昭和30年代後半から現在に至るまでは洪水調節、水道用水、工業用水の供給を目的とするダムが数多く建設された。

これらのダムは、いずれも各時代の社会的要請に基づき建設されたものであり、ダム計画にあたっては、目的に合った構造及び形式を選択し、地形・地質及び社会的条件から最も開発効率の高いダムが建設されている。

しかし、ダム竣工後において、その後の社会的要請の変化に伴い、洪水調節機能の増強や、水道用水や工業用水の供給量の増加及び発電機能の増大などの要請が生じ、これらの要請に対応するため貯水池容量を増大し、流水を有効に利用するためにダムの再開発が必要とされた例も多々ある。

また、ダム建設の進展とともに、地形・地質の条件に恵まれたダムサイトは減少してきている。一方、ダム技術の進展は目覚ましく、例えば、ダム建設当時には不可能であった基盤地盤改良が、最近の土木技術によると可能となり、既設ダムのダム高さより十分高いダムの建設が可能となる場合もあり得る。このような場合、新しいダムサイトに新規にダムを建設するよりも、既設ダムを改築する方がより開発効率が高くなることがある。

さらに、我が国は、近年急速な高齢化が進行しており社会資本への投資余力が減少してきていることや近年の自然環境保全に対する社会的要望の高まりから、新規にダムを建設することが困難になってきている。このため、将来の治水・利水の需要に対応するため、貴重な社会資本ストックである既設ダムを効率的に利用することが求められる状況が生じている。気候変動に伴う豪雨の激甚化に備え、既存ダムの洪水調節機能を向上させることを考えると、2.3.2.2で述べたような予測雨量の利用を含めたダムの高度化だけでなく、ダムの再開発による機能向上も選択肢の一つとなる。

以上述べたように、社会的な状況の変化及びダムの設計・施工技術の進展が相まってダム再開発の要望が高まってきている。ここでは、現在実施中のダム再開発事例について、特に治水面に焦点を絞って紹介する。

b) **ダム再開発の種類および現在実施中のダム再開発事例**

既設ダムの再開発は、基本的には2つの通りがある。

1) 貯水池容量を増大させる方法（ダム技術センター2005b）

2) 現行の貯水池の運用を変更する方法

1)の具体的な方法としては、①ダムの嵩上げ、②貯水池の掘削、③取水設備、放流設備の改良、④容量の再配分がある。2)については、取水設備、放流設備の新設あるいは改造による貯水池運用を変更する方法、あるいは貯水池容量の再配分による貯水池の運用を変更する方法が挙げられる。ここで運用とは、2.3.2.2で述べたような操作の高度化は含まないものとする。上記①～④の内容についてはダム技術センター（2005b）を参考にしていただき、ここでは現在進行中の治水機能向上に関わるダム再開発の事例として、①津軽ダム、②鹿野川ダムおよび③鶴田ダムの事例を紹介する。

① **津軽ダム（ダム嵩上げ）**

津軽ダムの建設が予定されている岩木川は、青森・秋田両県境に位置する世界自然遺産白神山地の雁森岳（標高987m）に源を発し、流域面積2,540km²、流路延長102kmの一級河川である。大正7年に直轄事業となり暫時下流部から河川改修工事が実施されてきたが、その後度重なる水害に見舞われ1次、2次と改修計画は変遷し、昭和35年には目屋ダムが完成した。目屋ダムが完成していたものの、度重なる計画規模を上回る洪水の発生を受けた。完成から48年の間に、目屋ダムの計画高水流量500m³/sを上回る洪水が21回発生し、たびたび洪水被害が発生した（図-Ⅱ.2.3.2.6）。

このような状況の中で津軽ダムは、当初昭和48年3月の岩木川水系工事実施基本計画の第1次改定における目屋ダムの洪水調節ルールの変更（ゲート改造等）によるものと位置づけられていたものである。その後、旧建設省及び青森県において、ゲート改造、ダム嵩上げ、上流ダムとのシリーズ化等、第1次改定に基づいた検討を行った結果、既設ダムを再開発することが、治水・利水計画上の必要容量を確保でき、地形地質上からも基礎地盤が良好で特に問題がなく建設可能であり、技術的・社会的・経済的にも有利であると判断されたことから、現目屋ダム地点に新たに建設される計画となった。津軽ダムは、高さ97.2m、堤頂長342mの規模で築造され、総貯水容量140,900,000m³

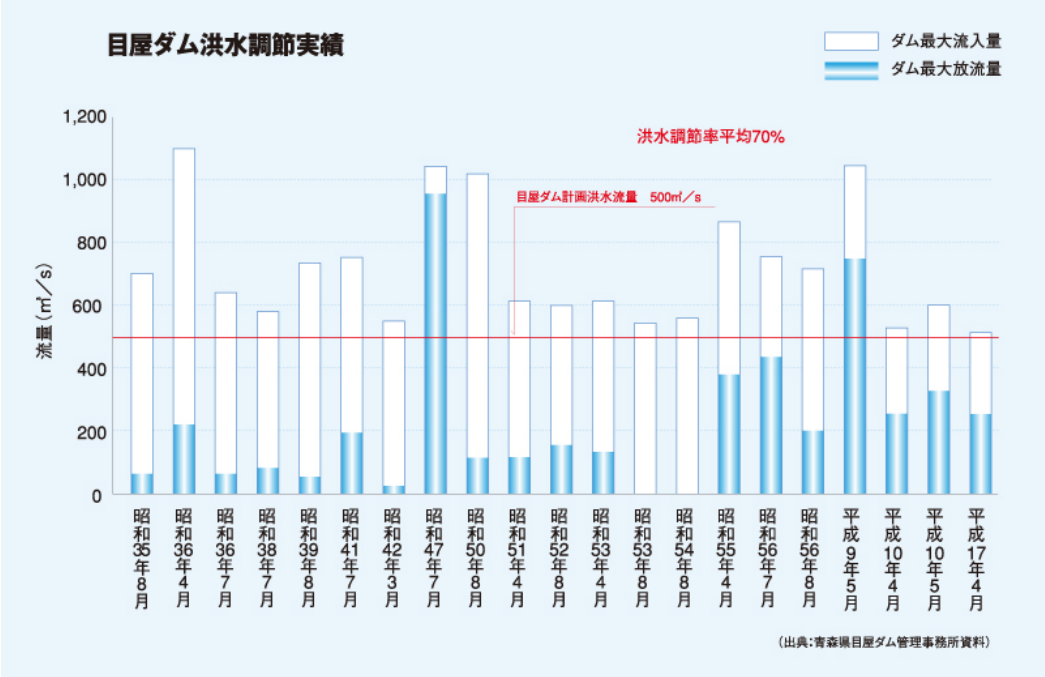


図-Ⅱ.2.3.2.6 目屋ダムの洪水調節実績（国土交通省津軽ダム工事事務所）

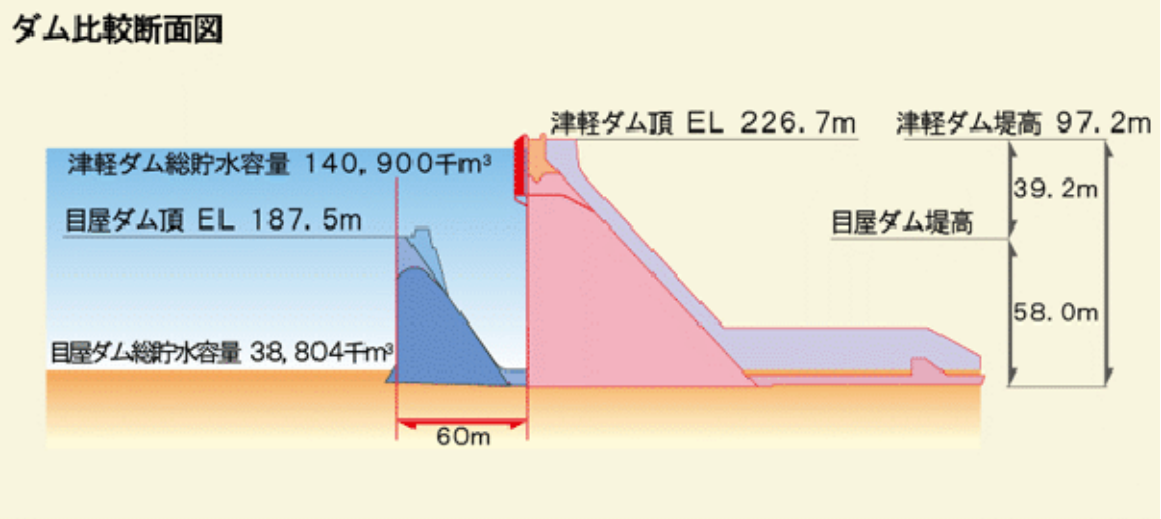


図-Ⅱ.2.3.2.7　目屋ダムと津軽ダムの比較（国土交通省津軽ダム工事事務所）

表-Ⅱ.2.3.2.1　目屋ダムと津軽ダムの比較（国土交通省津軽ダム工事事務所）

	目屋ダム	津軽ダム	比較
型式	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	
目的	洪水調節、かんがい、発電	洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道、工業用水道、発電	
堤高	58.0 m	97.2 m	1.7倍
堤頂長	170.0 m	342.0 m	2.0倍
堤体積	118,050 m^3	717,000 m^3	6.0倍
総貯水容量	38,804,000 m^3	140,900,000 m^3	3.6倍
有効貯水容量	33,000,000 m^3	127,200,000 m^3	3.9倍
集水面積	172.0 km^2	172.0 km^2	
湛水面積	2.1 km^2	5.1 km^2	2.4倍
完成年月	昭和35年3月	平成28年度（予定）	

（うち、洪水調節容量50,000,000m^3）の貯水池を設けた多目的ダムであり、洪水調節についてはダム地点の計画高水流量3,100m^3/sのうち、2,940m^3/sの洪水調節を行い岩木川沿岸の洪水被害の低減を図ることとなっている。図-Ⅱ.2.3.2.7および表-Ⅱ.2.3.2.1より、津軽ダムの洪水調節機能は目屋ダムよりも大幅に増強されていることが分かる。

② **鹿野川ダム（容量再配分、および放流設備の改良）**

鹿野川ダムは、肱川水系肱川の愛媛県大洲市肱川町山鳥坂地先に、洪水調節、発電を目的に高さ61m、総貯水容量48,200,000m^3、有効貯水容量36,200,000m^3の重力式コンクリートダムとして昭和34年に建設された。しかしながら、肱川流域では近年において激特事業が採択された平成7年7月洪水をはじめ、平成16年8月、平成23年9月などに甚大な被害が発生した。特に平成16年の戦後2番目の規模となる台風16号の大洪水では、浸水家屋914戸、氾濫面積853haの被害が発生し、地域住民からの早急な治水対策が強く望まれている。このような背景から鹿野川ダムは平成16年に策定された肱川水系河川整備計画に基づき、ダムの治水機能の増強、流水の正常な機能の維持、ならびに貯水池および放流水の水質改善を目的とした改造事業を行っている。特に治水について

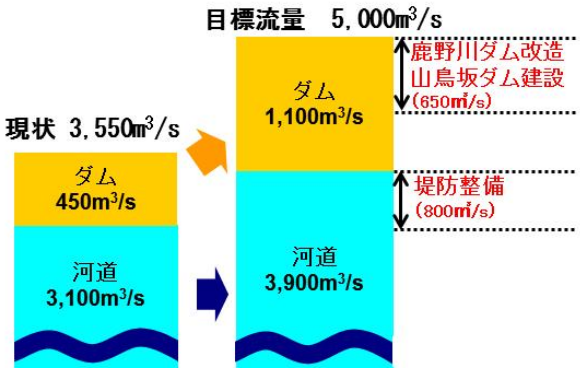


図-Ⅱ.2.3.2.8 河川整備計画における目標流量への対策イメージ（吉岡2013）

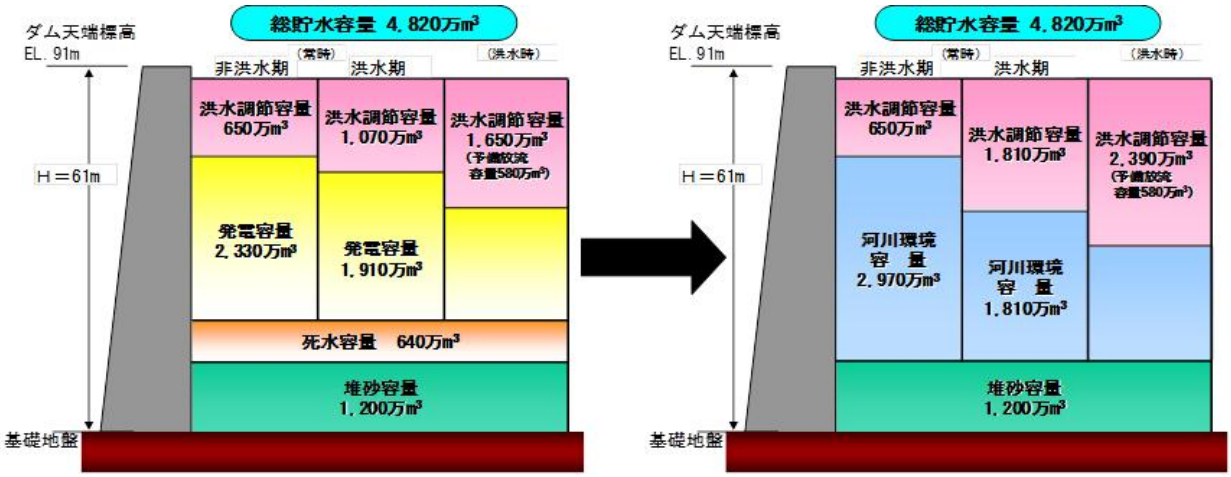


図-Ⅱ.2.3.2.9 鹿野川ダム容量変更配分図（吉岡2013）

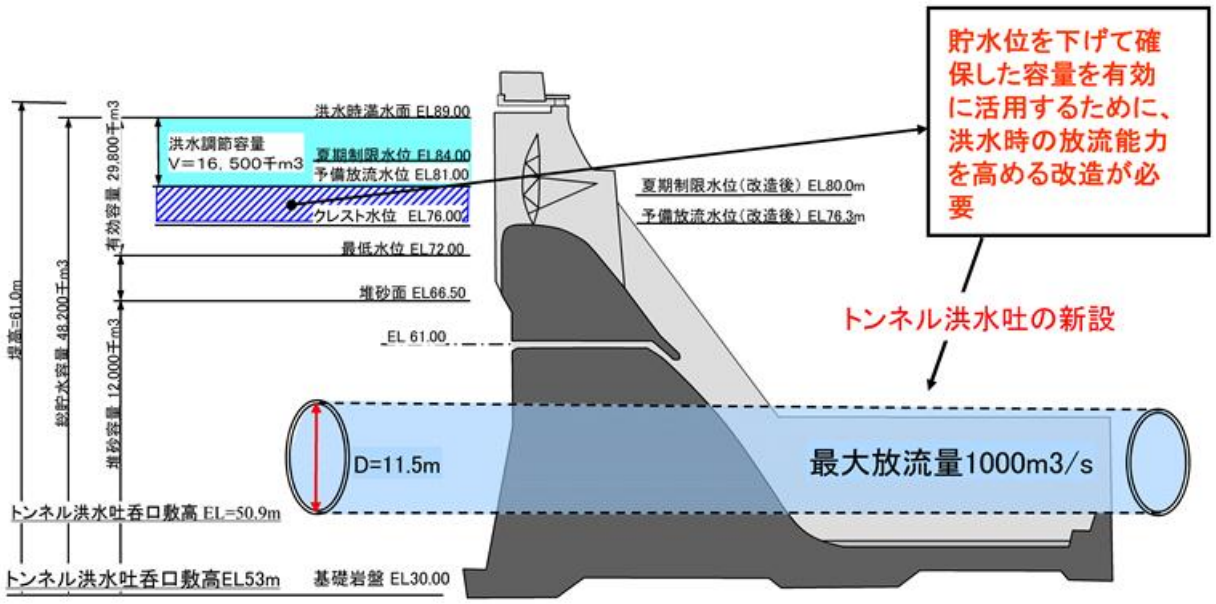


図-Ⅱ.2.3.2.10 トンネル洪水吐き配置図（イメージ）（吉岡2013）

は大洲地点における戦後最大洪水5,000m³/sに対して既設ダム及び鹿野川ダム改造、山鳥坂ダムの建設で、1,100m³/sの調節を行い、肱川下流全川に渡り洪水位の低下を図ることとなっている（図

－Ⅱ.2.3.2.8）。

鹿野川ダムの治水機能を増強するためダムの貯水容量を再編し、発電容量、死水容量を廃止し一部を洪水調節容量に振り替え、併せて洪水調節の開始水位を下げることにより洪水調節容量を現在の約1.4倍に増強することとしている（図－Ⅱ.2.3.2.9）。しかし、鹿野川ダム天端に設置されている既設の洪水用ゲート（クレストゲート）では、洪水調節を開始する水位まで下げても現在の放流設備では放流能力が小さいため、洪水調節容量増強の効果を発揮できない。そこで、トンネル洪水吐きを新設することにより放流能力を上げ、洪水調節容量の効果的な活用を図っている（図－Ⅱ.2.3.2.10）。トンネル洪水吐きは、トンネル部の延長約457m、トンネル内径11.5m（標準部）、放流能力約1,000m³/s（最大）の規模である。

③ 鶴田ダム（容量の再配分、および放流設備改良）

川内川は熊本、宮崎、鹿児島の 3 県を貫流して薩摩灘へ注ぐ幹線流路延長 137km、流域面積 1,600km² の一級河川であり、鶴田ダムは川内川のほぼ中央、河口から約 51km に位置する昭和 41 年に完成した洪水調節と発電を目的としたダムである。この川内川流域では、平成 18 年 7 月 19 日から 23 日にかけて記録的な豪雨に見舞われ、特に宮崎県えびの市の西ノ野雨量観測所では、この 5 日間だけで全国平均の年間総雨量の 70%、鹿児島市の年間総雨量の 50%に相当する 1,165mm という雨量が観測された。河口から約 38km に位置する鹿児島県さつま町の宮之城水位観測所では、計画高水位を 2.92m も超過し、11.66m に達した。この既往最大の洪水により川内川流域全体の 3 市 2 町において浸水家屋 2,347 戸におよぶ甚大な被害が発生した。鶴田ダムは、この洪水において東京ドーム約 60 個分に相当する 7,500 万 m³ の洪水を貯留し、下流の河川に流れる水の量を少なくして洪水被害を軽減させた。具体的には、上述の宮之城水位観測所で洪水調節を行わなかった場合と比較して、最高水位を 1.3m 低下させ、最高水位に達する時間を約 4 時間遅らせる効果を発揮した。水害直後は鶴田ダムに対する批判的な意見もあったが、最終的には地元から「鶴田ダムの洪水調節容量を増やして、治水機能を強化してほしい」という要望が出され、平成 19 年度より鶴田ダム再開発事業に着手した。

今回の再開発事業は、洪水期の発電容量（250 万 m³）と死水容量（2,050 万 m³）の合計 2,300 万 m³ を洪水調節容量に振り替えることにより洪水期の洪水調節容量を最大 7,500 万 m³ から最大 9,800 万 m³ に増量する（図－Ⅱ.2.3.2.11）。そのためには洪水期の貯水位を大幅に低下させる必要があり、最低水位を現在の標高 130m から標高 115.6m へ 14.4m 低下させる。最低水位の低下に伴い現在の放流施設では洪水調節のための放流能力が不足するので、現在の放流施設より低い位置の右岸側に放流施設（コンジットゲート 3 門）を増設して放流能力の増強を図る。また、これに伴い減勢工を増設する（図－Ⅱ.2.3.2.12）。

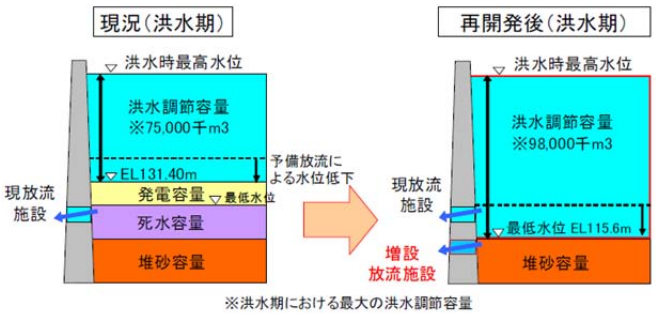


図-Ⅱ.2.3.2.11　再開発事業による容量と放流施設の変更イメージ（国土交通省川内川河川事務所）

図-Ⅱ.2.3.2.12　再開発事業の全体イメージ図（国土交通省川内川河川事務所）

2.3.3　設計以上の外力を受けた治水施設（群）の機能発揮・喪失に関する検討

2.3.3.1 有堤河川の氾濫事象に着目した検討

ここでは、まず 2.3.3.1～2.3.3.5 までで、標記のように、堤防を持つ河川において、HWL を越える超過外力に対応する大規模洪水が生起し、河川外への氾濫を防ぐという堤防の基幹的機能が喪失していく状況を対象にした検討を行う。なお、2.3.3.6 において、ダムの洪水調節に関しての整理も行う。

有堤河川の氾濫事象を取り上げることがなぜ重要か？については、以下の事項を上げることができる。

- 氾濫リスク低減（適応策）には、2.3.1.2 で述べ、また図-Ⅱ.2.3.1.3 に例示したような視点がある。
- これを具体化していく上で、河道、堤防等の所定の対応能力を超える洪水を受けた際（超過外力）に起こりうる氾濫被害を推算できるようにしておくことが不可欠である。
- 同一の洪水に対しても、技術的観点から生じうる複数の氾濫生起シナリオを想定でき、結果として被害状況が異なること、そのような被害を変えうる要因を「洪水防御システム」の特性として理解することが重要である。

これらを踏まえ、以降 2.3.3.5 まで、堤防を対象に超過外力による機能喪失の表現（フラジリティ・カーブ的な考え方の導入；後ほど説明）とそれに基づく氾濫生起シナリオ設定を中心課題に据えて、実際の河川流域に適用して被害推算を試み、その有効性を検討する。さらに「洪水防御システム」の特性を把握するための見方（着眼点）についても検討していく。

2.3.3.2 氾濫リスクの試算手法

a）試算手順

本研究で用いた試算手順は図-Ⅱ.2.3.3.1 に示すとおりである。

①任意の確率雨量に対する流出解析から流量を得る。
②それを対象河川区域の上流端や合流支川に与えて河川水位を一次元不定流により算定。
③所定の条件に達した箇所を氾濫発生の候補地点とし、その組み合わせが異なる複数の氾濫発生シナリオを設定。
④それぞれについて氾濫解析・被害推計を行う。

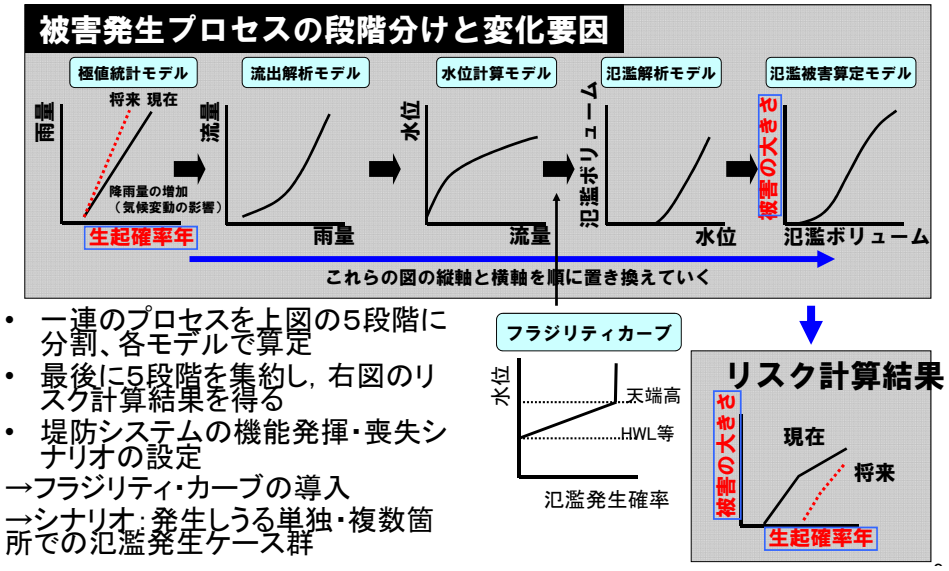


図-Ⅱ.2.3.3.1　氾濫リスク試算の全体フレーム

b) 氾濫発生の候補地点の選定

氾濫発生条件は、下記の考え方に基づいて設定した。

- 越水の発生またはそれに至る前に破堤する可能性があると考えられる地点を候補地点とする
- 越水については、土堤は越水に対して構造的にそもそも弱く、そのため越水させないことによって機能確保するのを堤防構造の基本としていること、またこれまでの実績でも越水区間において破堤する事例が多いことから、越水が生じた時点で破堤すると設定する。
- 越水に至る前の破堤の発生条件は、本研究では以下の考え方に基づいて設定する。
  - 堤防に関する技術基準類等に基づいて、現時点の堤防で機能が十全と判断できる「最高水位」を設定。これを超えた箇所から氾濫発生の候補地点を選定する。
  - 機能が十全とは判定できない水位状況下となっても、即破堤に直結するものばかりではなく、変状が発生しながらもなんとか破堤を免れた場合などがある。
  - 現時点の技術水準のもとで十全と判定するために含ませる安全性の付加分（安全率）を持たせいるが、それが結果的に上記のような氾濫を防ぐ方向に働いたとも考えられる。しかし、裏返せば所定の安全性を担保できない状態であって、現状の技術ではどこで破堤してもおかしくない条件であったと考えられる。
  - 現状の技術では、十全の安全性を欠いた状態にある堤防区間で破堤する箇所やタイミングを言い当てることは、まず不可能である。ただしそうした技術的検討や実績から、水位が高くその継続時間が長いほど、破堤に至る可能性が高まると考えてよいであろう。
  - これらの特性を踏まえて、本検討では図-Ⅱ.2.3.3.2 中の左上に示すように水位との関係として破堤発生確率を与えることとする。これはフラジリティ・カーブの考え方を試行的に導入したことに当たる。
  - 越水が生じるとまず確実に破堤が生じうること（破堤確率は１と見なせる）、また所定の安全性を満たす水位以下ではまず破堤が生じないこと（破堤確率は０と見なせる）という２点を押さえた上で、この二点間をどのような曲線形状（関係式）とするかという問題に帰着する。
  - これについては、個々の堤防の地質構造や補強等を反映して設定することが好ましく、そのため土質・地盤工学的な技術に基づいた算定を試みているところである。また、こうした演繹的なアプローチに加え、実洪水時の実績データ（変状の有無と外力条件）の統計処理から推定するアプローチも試みている。これらはまだ途上であり、今回の中間報告では反映するに至っていない。
  - そこで、本件検討ではまず２点間を直線で結ぶ線形式で与えることとして、フラジリティ・カーブ導入による氾濫発生シナリオ設定の有用性と限界について検討することとした。カーブの与え方による氾濫リスク算定結果への影響については、今後の検討課題とする。
- 同一の氾濫ブロックに氾濫することとなる一連の堤防区間ごとに代表１カ所を選定し、その箇所で図-Ⅱ.2.3.3.2 中の左上に示すフラジリティ・カーブを設定した。氾濫発生の候補地点はこれら代表箇所から選択する方式を採用した。

ここで提示している手法は、見かけ上は、信頼性解析の道具となっているフラジリティ・カーブを用いているが、本質的には「氾濫生起シナリオをもれなく捕捉し、そのことで、ある豪雨規模において起こり得る最悪の氾濫被害の想定をカバーできるようにする」ためのものであり、その意味から「氾濫生起シナリオ設定手法」と位置づけている。したがって現時点では、すぐ後に説明する方法を組み合わせて導かれる「氾濫・被害発生の確率分布」に相当する情報に工学的に精緻な意味があるわけではなく、それを仔細に分析・活用することよりも、減災方策の検討にとって重要な特徴を大きく捉えることが適切と考えている。

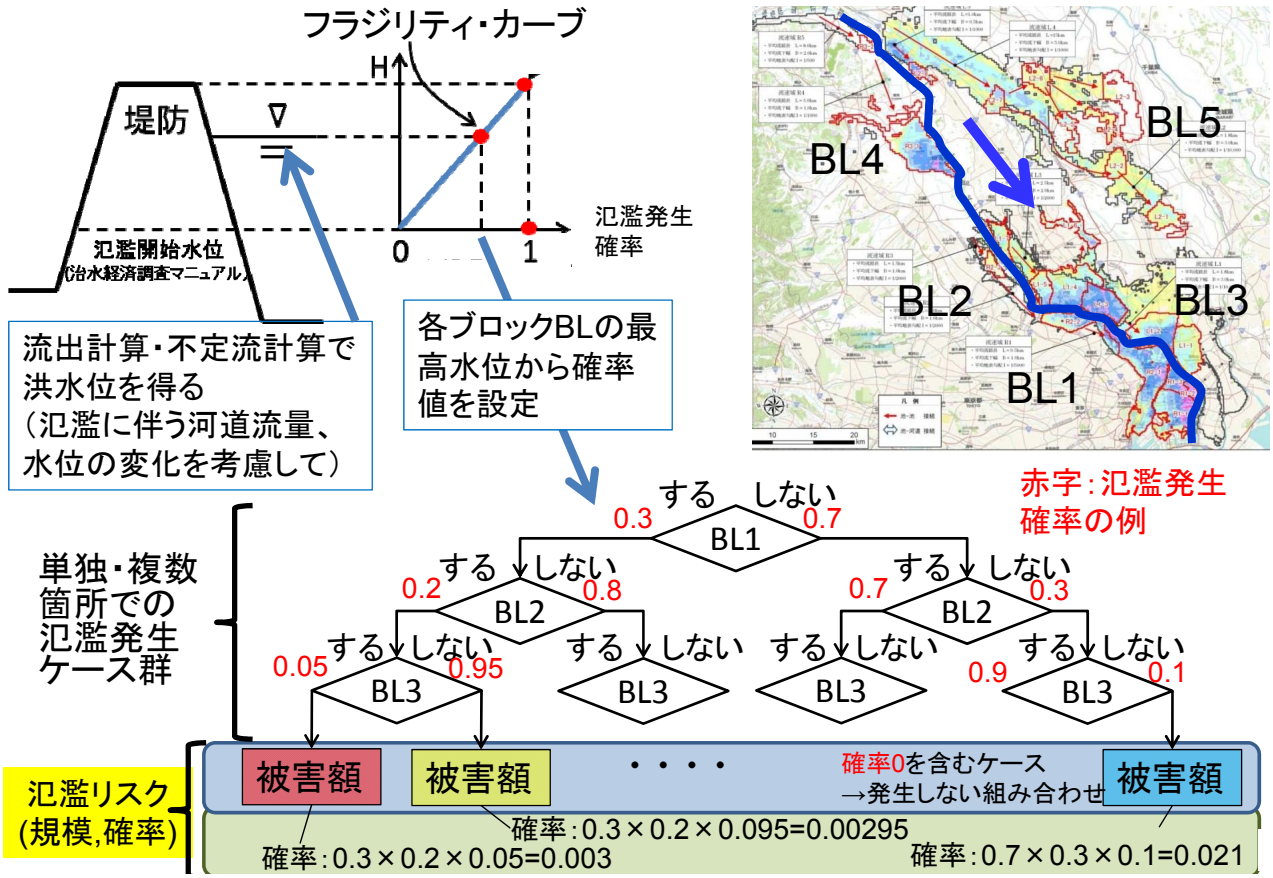


図-Ⅱ.2.3.3.2　試算における氾濫生起事象の表現法

c) 氾濫発生シナリオの設定

- b)に示した手法では、氾濫発生の候補地点をあらかじめ選定した代表箇所のみに限定する単純化がなされているものの、単独または複数の氾濫ブロックでの破堤氾濫するケースが、水位に応じて発生しうるか判定され、被害推計の対象ケースとして機械的に選定できる特長がある。
- すなわち、図-Ⅱ.2.3.3.2 に示すように各ケースの発生確率は各ブロックの破堤確率の積として算定でき、その値が 0 の場合は生じ得ないケースとして算定対象から除くことになる。
- 氾濫発生シナリオは、発生確率が 0 より大きい全ケースとして設定される。また確率値から、それらケースの相対的な発生しやすさを知ることができる。
- ある同一の確率規模の降水量に対して、すべてのケースで氾濫被害を算定することで、生じうる被害額の範囲とその発生確率が計算でき、例えば、そのうち相対的に被害が大きいケース群とそれらに共通する氾濫ブロックを知ることができる。ある程度の単純化を導入したが、こうした実態に肉薄できる検討が可能であることが、このアプローチの強みである。

d) 氾濫量、被害額、人的被害の算定方法

図-Ⅱ.2.3.3.1 に示した各手順の計算は、以下の方法・条件のもとで実施した。

①確率年と降水量の関係

各水系の河川計画で用いられている降雨継続時間の年最大値を統計処理して年発生確率との関係を得た。超過確率分布としては、極値分布であるグンベル分布、平方根指数型最大値分布および一般化局地分布を用いることとし、SLSC値により適合度を評価し、最も高い適合性を示した分布を採用した。また、降雨量の時空間分布は、既往観測の分布を降水量に応じて引き延ばし・縮めて与えることとした。今回は、河川整備方針に示された計画高水流量に最も近い流量値となる分布を採用した。

②流量の算定

河川計画検討の実務で用いられてきた流出計算手法とパラメータ等を使用した。ダムなど洪水調節施設は、現況で供用されているものを対象として、運用規則に則った洪水調整をモデル化している。

③河道内・氾濫ブロック内の水位などの算定

現況河道を対象として、河川水位を一次元不定流計算により算定している。その際、破堤地点では、本間の堰公式によって河川水位と堤内水位によって河川からの流入出流量を算定している。堤内水位は、各氾濫ブロックを「池」として扱うポンドモデルを適用しており、氾濫ブロックの地形測量結果から、水平湛水を仮定して水位と湛水量との関係を得て、先の流入出流量に応じて湛水位を算定した。したがって、破堤地点と湛水域が離れている場合、その間の氾濫流の流下する区間の水深等の算定を行っていない。これは被害推算を行う上で必要な湛水状況に関する情報が不足することとなる。そこで次の④で説明するように、流下区間の被害推算には破堤地点での最大流入量を用いる簡略化を行った。

氾濫解析にはポンドモデルを用いる簡略化を行ったが、氾濫に伴う河道内流量の増減、また破堤地点での水位低下による水位縦断分布の変化は不定流計算に反映されている。そのため、ある地点での破堤発生に伴う水位変化の結果として、他地点で破堤確率（フラジリティ・カーブによる）や氾濫水量（本間の積公式による）が変わる効果については、計算に取り込むことができている。

④氾濫被害の推算

本研究では、氾濫被害として浸水による直接的な経済被害額と死者数を取り上げることとした。経済被害については最大湛水深とその場での資産額に応じて算定する治水経済要綱の手法を用いている。死者数は、最大湛水深とその場の人口に応じて算定する手法を適用している。基本的に氾濫ブロックの各地点の最大湛水深を算定するには、非定常平面流解析を行う必要がある。しかし、今回は非常に多くの氾濫ケースの計算を行う必要があり、すべて非定常平面流解析を行うことは本研究に投入できる経済的・人的資源をもっては不可能であった。そこで、目的とする精度を確保しつつ、より計算負荷の小さい現実的な手法としてポンドモデルを採用した。そこで、被害推算では下記のような手法を採用した。

- まず、各氾濫ブロックの 1 カ所のみで破堤する条件で、非定常平面二次元の氾濫流解析を実施し、上記の手法で被害額と死者数を算定する。
- 氾濫ブロック内を湛水域と流下域に区分し、湛水域内の総氾濫被害は最大浸水深との関係として、また流下域内については破堤地点における最大流入流量との関係として整理するという方法を採用する。
- 上記の関係を用いて、③のポンドモデルによる浸水深と流入流量から各領域の被害額を得て、その総和として各ブロックの被害推計を行なう。

表-Ⅱ.2.3.3.1
対象とした 20 水系

河川 No.	計画降雨	
	時間	降雨量
01	48	325
02	48	252
03	48	228
04	12	165
05	72	548
06	48	499
07	48	405
08	48	498
09	48	368
10	24	323
11	12	383
12	24	376
13	12	381
14	48	269
15	48	442
16	48	256
17	48	217
18	48	363
19	12	357
20	48	615

2.3.3.3 被害状況の試算結果

a) 対象水系

2.3.3.2 に示した手順・手法の計算を実施するのに必要なデータ一式が揃っている国管理水系から、下記の要件を考慮して表-Ⅱ.2.3.3.1 に示す 20 水系を選定した。

- 対象河道区間の上流での氾濫に起因する対象区間への流量低減が限定的と考えられる水系（具体には、V 字谷や狭い谷底平野を流下する河道など地形的な性状から選定）。
- 人口集積地が対象河道区間の中の上流または下流側に位置するかが水系によって異なるが、そのどちらか一方に偏らないように配慮。

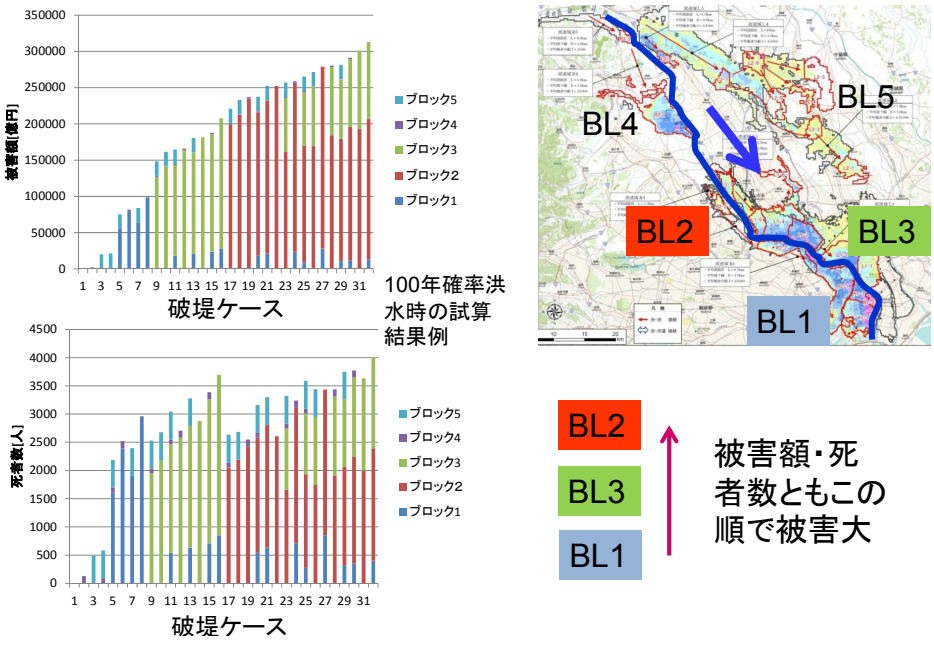


図-Ⅱ.2.3.3.3　得られる情報の説明（基本事項）

b) リスク分析結果として得られる情報

- 図-Ⅱ.2.3.3.3 に一例を示すように、任意の確率年について、氾濫発生シナリオに含まれる総ケース数だけの氾濫被害額、死者数が算定される。
- 併せて各ケースの発生確率も算定されるので、これと被害額・死者数を組み合わせることで、図-Ⅱ.2.3.3.4 に一例を示すように、各被害の超過確率分布図を作成することができる。
- 図-Ⅱ.2.3.3.4 から、各確率年での被害の最大値、期待値、最小値が得られるので、これらを確率年との関係として整理することで図-Ⅱ.2.3.3.5 が作成できる。
- 図-Ⅱ.2.3.3.5 には、フラジリティ・カーブに換えて、河川水位が氾濫開始水位に達した時点で氾濫するとして算定した被害額を併記した。この氾濫発生条件ではケースは一つに定まるが、そのケースは必ずしも被害が最大となるケースと一致しない。つまり、個々の氾濫ブロックごとで見ると氾濫被害が最も生じやすい条件であっても、複数の氾濫ブロックの被害総和の観点では最大値を必ず押さえられる条件とは限らない。
- フラジリティ・カーブを用いるアプローチは、多様な破堤ケースを計算対象とするという煩雑さがある反面、氾濫被害が最大となるケースを機械的に抽出できるところに特長がある。
- 20 河川について算定した被害額（期待値）と確率年の関係を図-Ⅱ.2.3.3.6 に示す。この結果から対象水系は①～③に区分できる。①は大都市部を貫流する河川である。
    - ① 確率年 100 年で 10,000 億円オーダー以上となる河川
    - ② 確率年 100 年で 10,000 億円オーダー以下となる河川
    - ③ 被害額が確率規模によらず概ね一定している河川

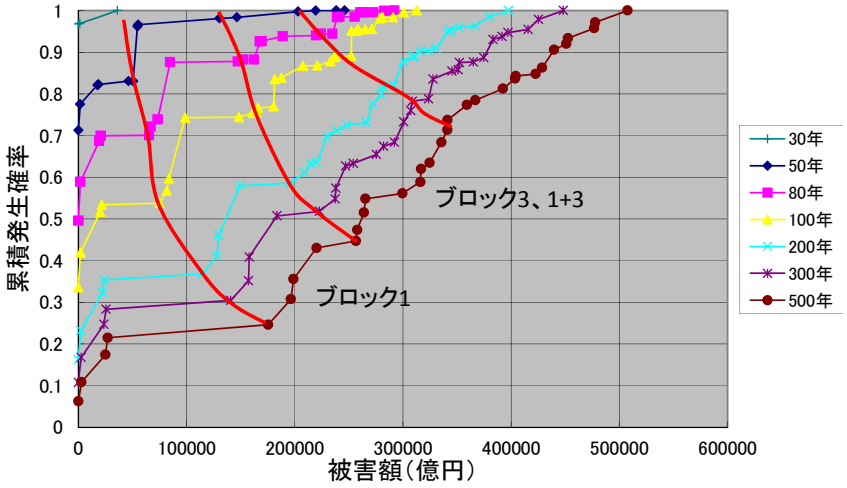


図-Ⅱ.2.3.3.4　得られる情報の説明（ある豪雨により発生する被害についての超過確率分布図）

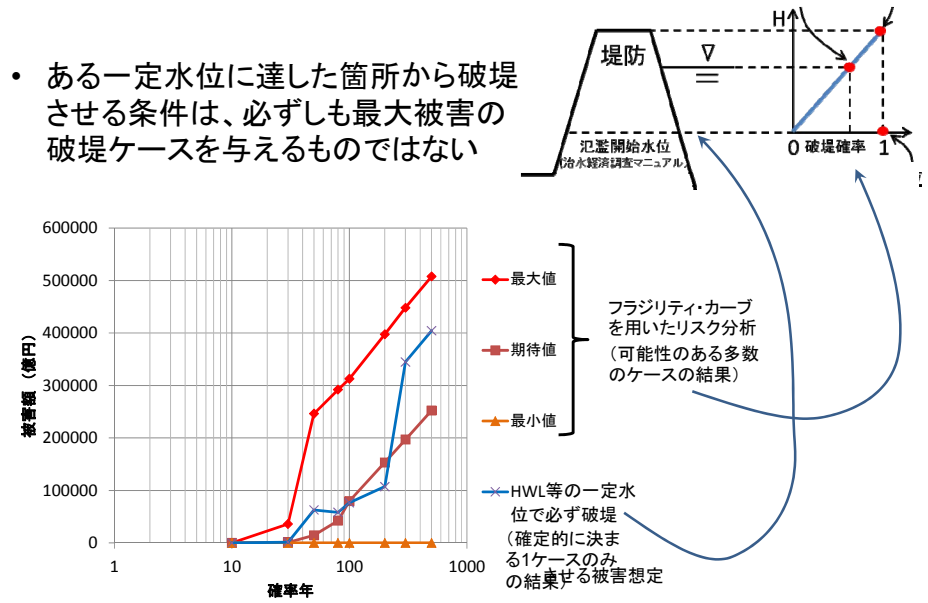


図-3.3.3.5　得られる情報の説明（被害の最大値、期待値、最小値と豪雨確率年との関係）

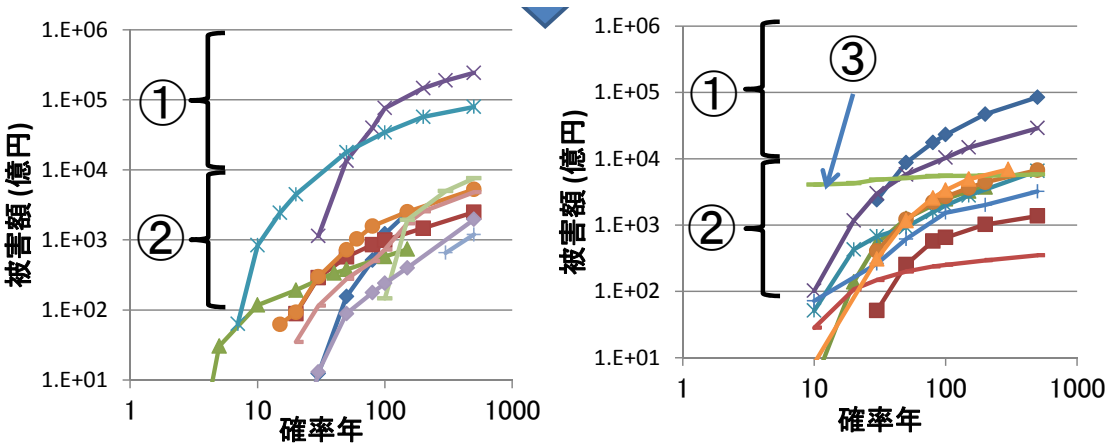


図-Ⅱ.2.3.3.6　対象とした 20 水系についての被害額期待値と豪雨確率年との関係

c）気候変動に伴う氾濫被害の増加倍率の試算

後期 GCM20 での降雨倍率α（＝【将来気候下の降水量】／【現在気候下での降水量】）を用いて、各河川の整備方針で目標とした確率規模の出水による被害を推算した結果を図-Ⅱ.2.3.3.7 に示す（河道条件は現況）。被害倍率δは【将来気候下の被害額・死者数】／【現在気候下での被害額・死者数】として算定している。被害額・死者数としては、上記 b)で示したうちの期待値を用いた。降雨倍率 1.12 倍に対し、全水系平均で約 2 倍程度の被害となる結果を得た。

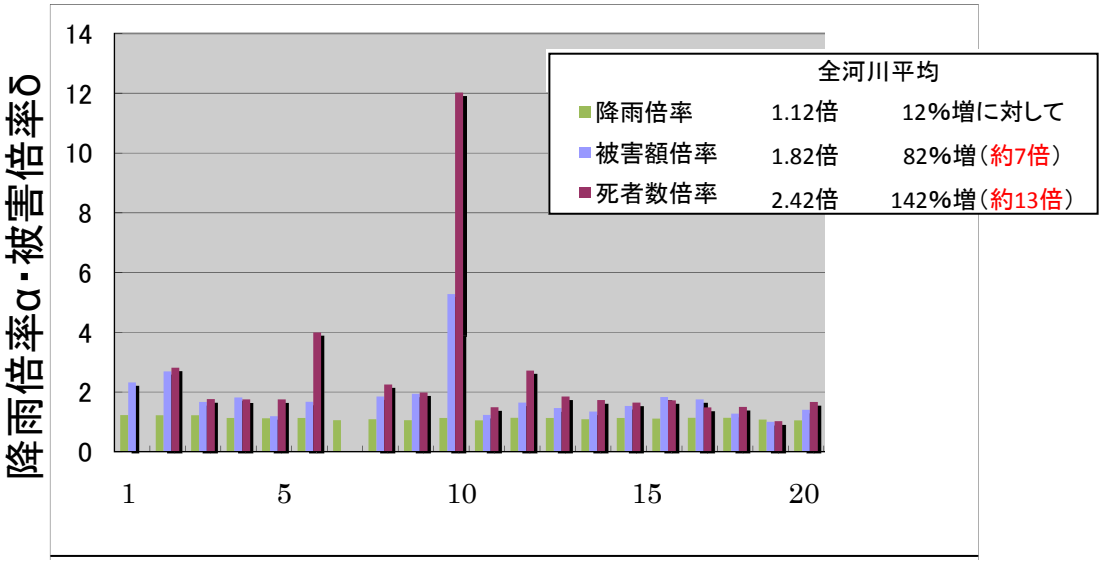


図-Ⅱ.2.3.3.7　気候変動に伴う被害増加状況の試算

2.3.3.4 洪水流・堤防システムの挙動および被害状況

「洪水防御システム」の挙動と被害状況の関連性を把握するための着眼点として、本中間報告段階の議論という位置づけで、下記ⅰ）～ⅴ）を提示してみる。

ⅰ）豪雨確率規模 T と被害期待値・最大最・最小値の関係（図-Ⅱ.2.3.3.8 参照）

洪水規模の増加に伴う被害の増え方に着目すると、4 パターンに分類できそうである。

パターン A：logT に概ね比例して被害最大値・期待値が増加。

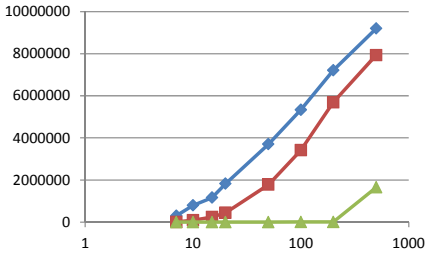
パターン A‘：被害最大値が不連続的に急増する箇所がある。

パターン B：被害最小値も logT に概ね比例して増加する。そのため最大と最小の差の開きが少ない、または狭まる。

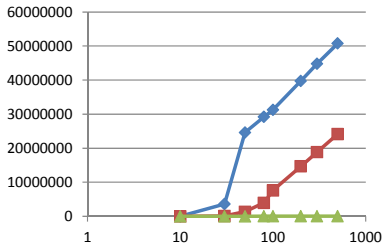
パターン C：T によらず概ね被害が同程度と見なせる（例えば 10 年確率出水でも 100 年確率出水と同程度の期待値、最大・最小値となる）。

ⅱ）被害規模と氾濫ブロックの対応関係（図-Ⅱ.2.3.3.9 参照）

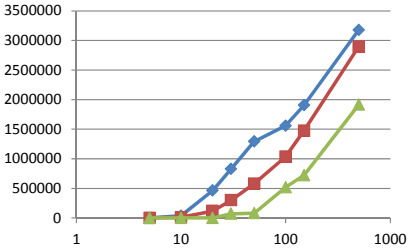
任意の確率年の出水ごとに、被害規模が最大または相対的に大きいケース群に共通している氾濫ブロックを把握する。これにより、被害の大きさを左右する氾濫ブロックを特定でき、また、そのブロックでの氾濫発生の確率（確率年を任意に特定した場合の条件付き確率）を把握することができる。



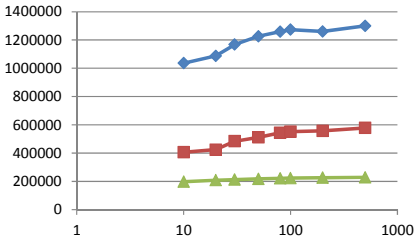
パターンA：logTに概ね比例して被害最大・期待値が増加



パターンA‘：被害最大値が不連続的に急増する箇所がある

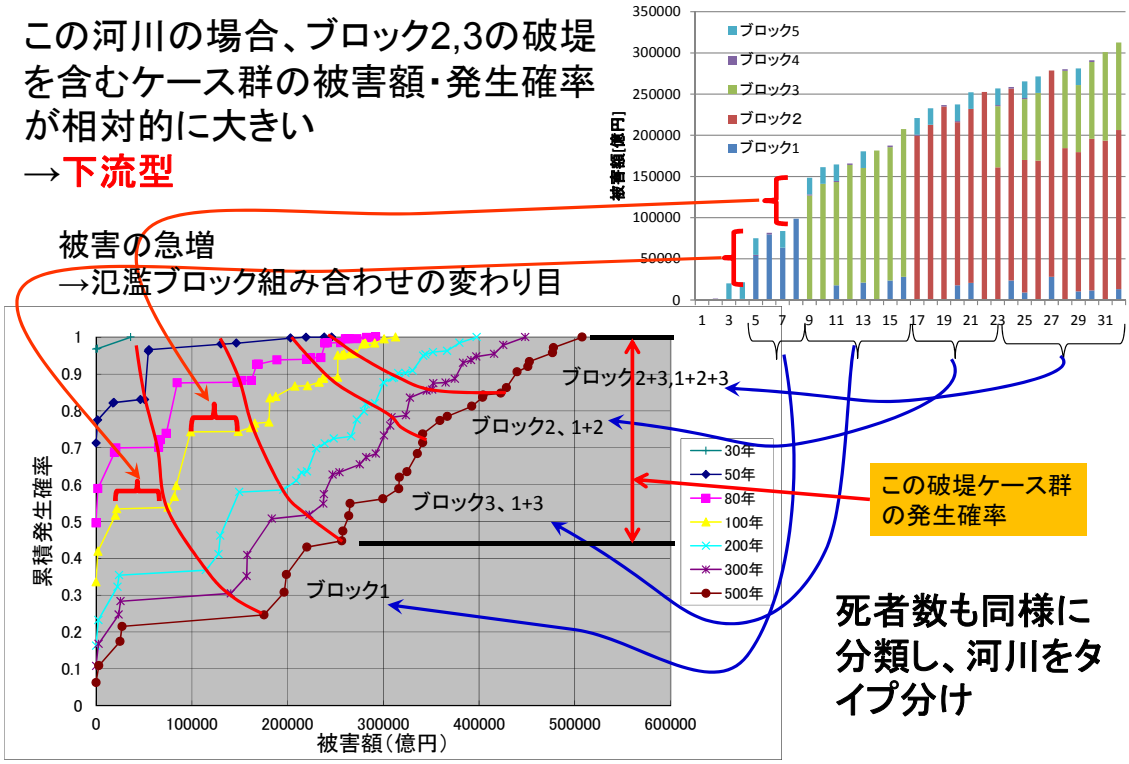


パターンB：被害最小値もlogTに概ね比例して増加。そのため最大と最小の差の開きが少ない、または狭まる。



パターンC：Tによらず概ね被害が同程度と見なせる（例えば10年確率出水でも100年確率出水と同程度の期待値、最大・最小値となる）

図－Ⅱ．2．3．3．8　氾濫被害の特徴をつかむ着眼点１：豪雨確率規模と被害期待値・最大値・最小値との関係



図－Ⅱ．2．3．3．9　氾濫被害の特徴をつかむ着眼点２：被害規模と氾濫ブロックの対応関係

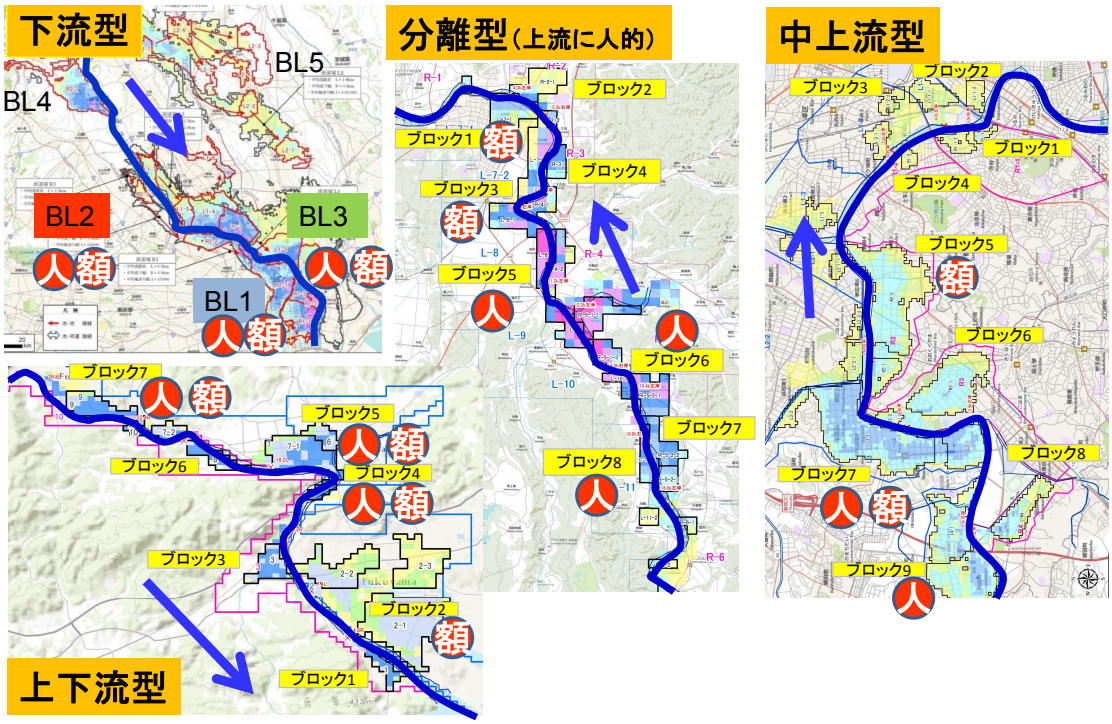


図-Ⅱ.2.3.3.10　氾濫被害の特徴をつかむ着眼点３：全体の被害規模を左右する氾濫ブロックの配置

iii）被害規模を左右する氾濫ブロックの分布型（図-Ⅱ.2.3.3.10 参照）

上記ⅱ）においてブロックが特定できた場合、そのブロックが対象河道区間の上下流のどこに位置するかに着目し、次の 5 つの分布型に分類する：下流型、中上流型、上下流型、分離型（上流に人的、下流に経済的被害が大きなブロックが位置する型）。ここでのポイントは、洪水により影響を受ける資産・人口の空間分布特性を把握することである。

iv）上下流ブロックでの氾濫発生時の相互作用（図-Ⅱ.2.3.3.11）

上記iii）の分布型に即して上下流に河道区間を 2 分し、上流側のブロック群での氾濫発生によって、下流側のブロック群における氾濫被害が低減するか否か、さらにその結果として流域全体の総被害が減じるか否かに着目して、以下の 5 タイプに分類する。

タイプ１：下流ブロックの被害減が上流ブロックでの被害増を上回るため、総額としては減となるタイプ

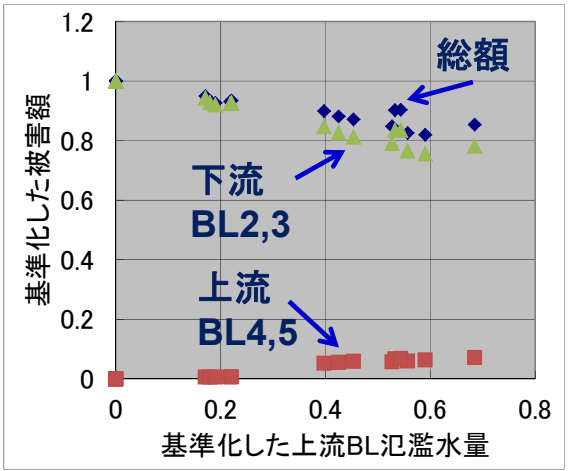
タイプ２：総額ほぼ変化なし（上下流ブロック群の被害分担が変化するのみ）

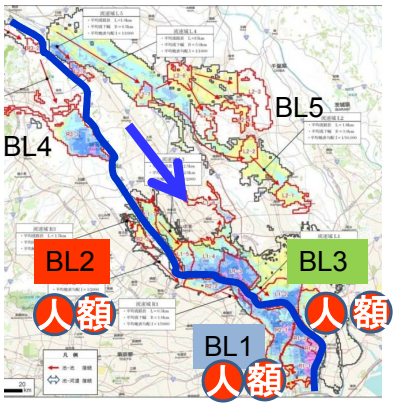
タイプ３：上流ブロックでの被害減より下流ブロックの被害増が上回るため総額増となるタイプ

タイプ４：上流ブロックでの氾濫に関わらず下流ブロックの被害は減少せず概ね一定であり、上流ブロックでの氾濫被害増のみが生じるため、総額が増となるタイプ

タイプ５：上流ブロック群での氾濫の生じ方で、総額が増減どちらにもなり得るタイプ

ここでのポイントは、上下流双方のブロックで氾濫が生じるような過酷な状況となる超過出水時において、ブロック間の被害分担による総被害の増減の仕方を把握することである。



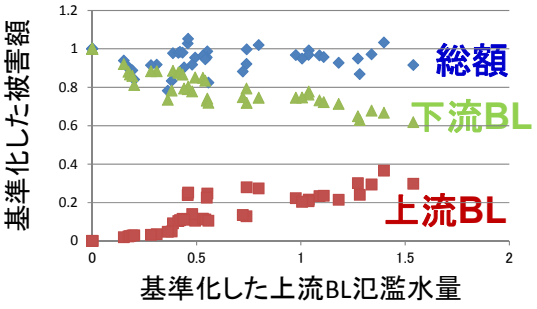


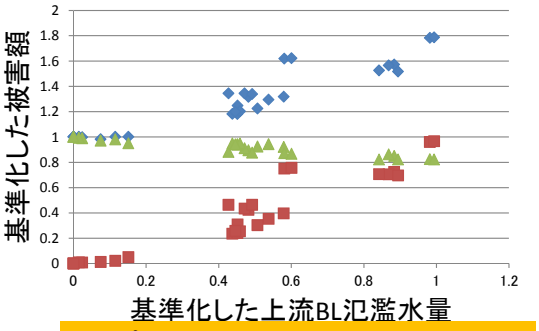
上流BL4,5が氾濫なしの条件での被害額を1とした場合、4,5で氾濫水量の増加に伴う各BLの被害額の増減を調べる

縦軸＝（各ブロック被害額）／（総被害額BL4,5氾濫なしのケース）

横軸＝（BL4,5の氾濫水量）／（総氾濫水量BL4,5氾濫なしのケース）

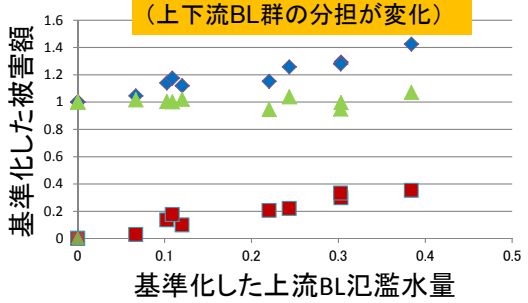
上図の例：上流BL4,54,5で氾濫→下流BLの被害減が上流BLの被害増を上回るため、総額としては減になるタイプ（タイプ１

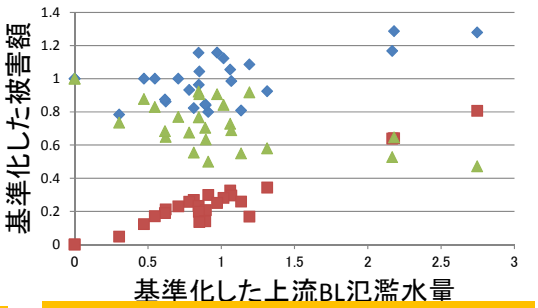




タイプ３：上流減＞下流増のため総額増

タイプ２：総額ほぼ変化なし
（上下流BL群の分担が変化）





タイプ４：下流変化なしで上流増のため総額増
（上流氾濫被害の分、総額も増になる）

タイプ５：上流BLの氾濫の仕方で総額が増減どちらにもなり得る

図-Ⅱ.2.3.3.11　氾濫被害の特徴をつかむ着眼点４：上下流ブロックでの氾濫発生時の相互作用
（上；タイプ１、下；タイプ２～５）

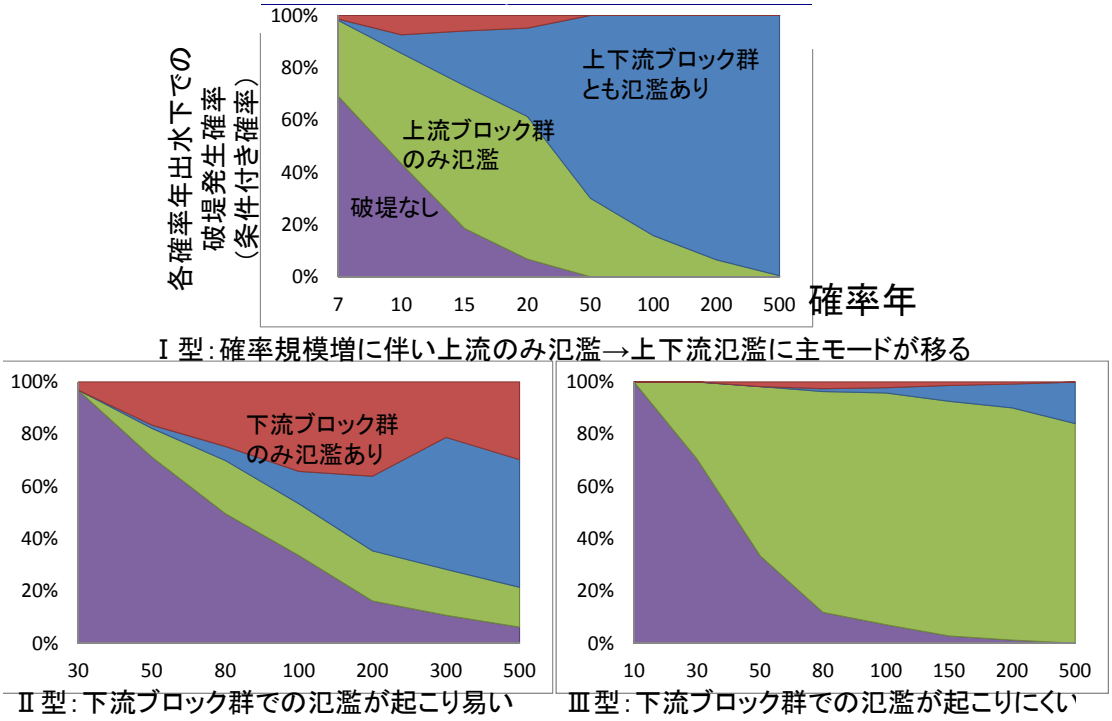


図-Ⅱ.2.3.3.12　氾濫被害の特徴をつかむ着眼点５：上下流ブロックの組み合わせ別の氾濫発生確率

ⅴ）上下流ブロックの組み合わせ別の氾濫発生確率（図-Ⅱ.2.3.3.12 参照）

上記ⅳ）と同様に河道を上下流に 2 区分し、氾濫の有無の 4 通りの組み合わせ（上流のみ氾濫、下流のみ氾濫、上下流両方とも氾濫、氾濫なし）について発生確率を算定し、相対的にどの組み合わせが発生しやすいか（確率年を任意に特定した場合の条件付き確率）により以下の 3 つの型に分類

Ⅰ型：確率規模増に伴い上流のみ氾濫→上下流氾濫に主モードが移る

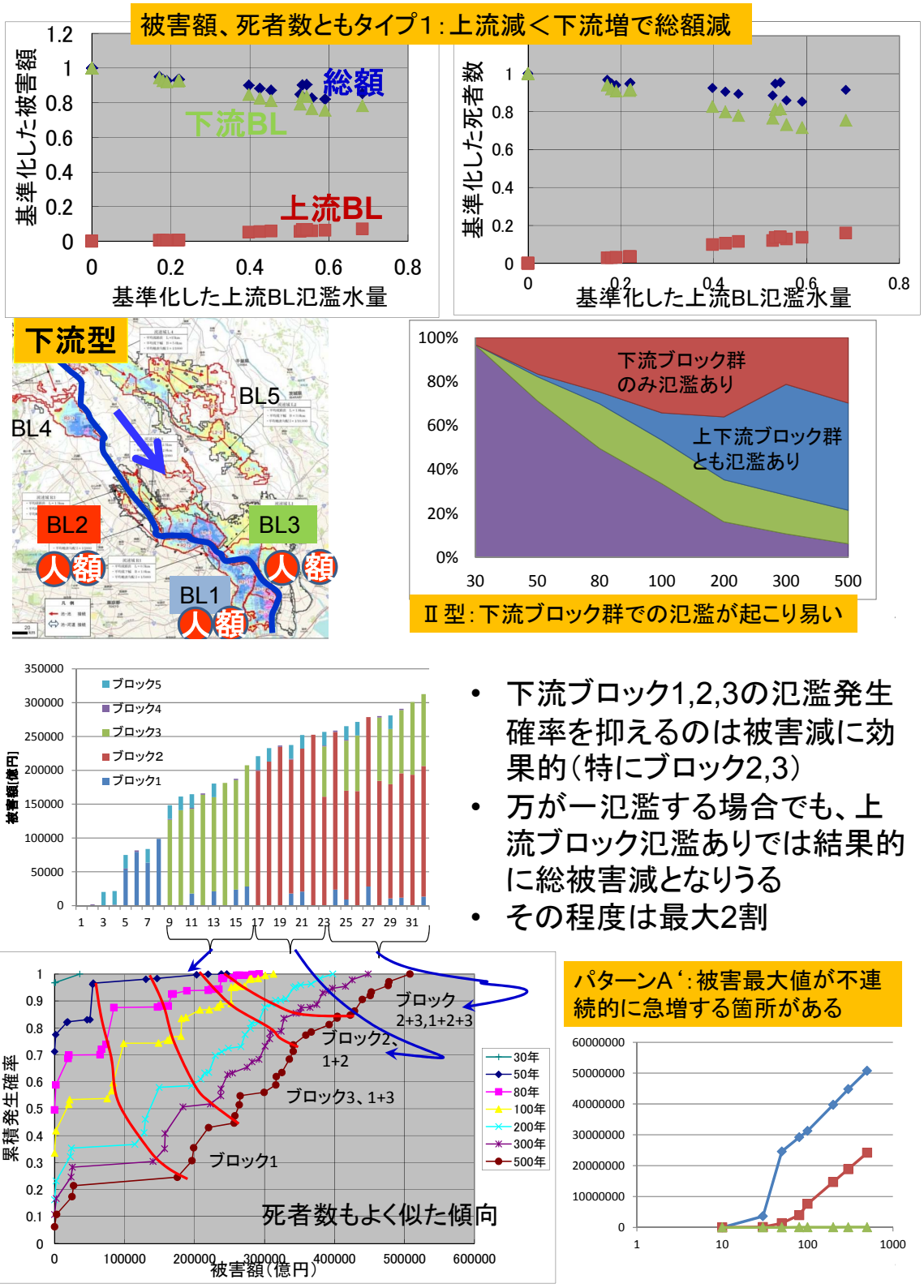
Ⅱ型：下流ブロック群での「氾濫が起こりやすい」

Ⅲ型：下流ブロック群での「氾濫が起こりにくい」

ここでのポイントは、ⅲ）で述べた分布型と照らし合わせることで、被害が相対的に大きいブロックへの氾濫が発生する可能性を把握できることである（例えば、下流型であり、かつⅡ型に分類された流域は、ある確率規模の出水に対する全氾濫発生ケースのうち、下流に位置する被害の大きなブロックへの氾濫が生じるケースの割合が多い→この意味で「氾濫による被害が大きくなりやすい」）。

2.3.3.5 ５つの着眼点を応用した検討事例

以上に示した５つの着眼点を組み合わせて行った氾濫被害発生の特徴分析の事例を、3 水系について示す（図-Ⅱ.2.3.3.13～Ⅱ.2.3.3.15 参照）。



- 下流ブロック1,2,3の氾濫発生確率を抑えるのは被害減に効果的（特にブロック2,3）
- 万が一氾濫する場合でも、上流ブロック氾濫ありでは結果的に総被害減となりうる
- その程度は最大2割

図－Ⅱ.2.3.3.13　氾濫被害発生の特徴分析：事例１－下流型Ａ

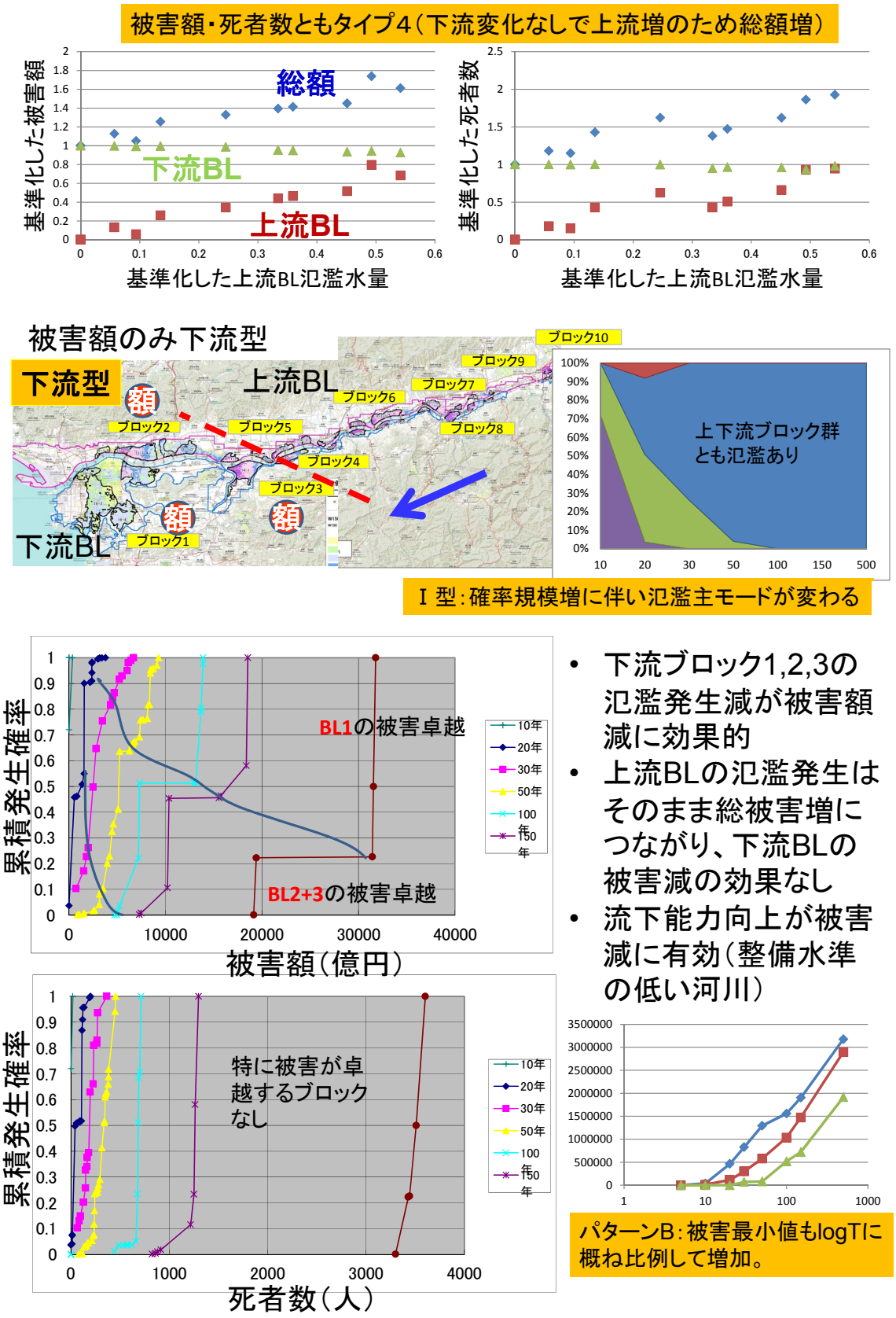
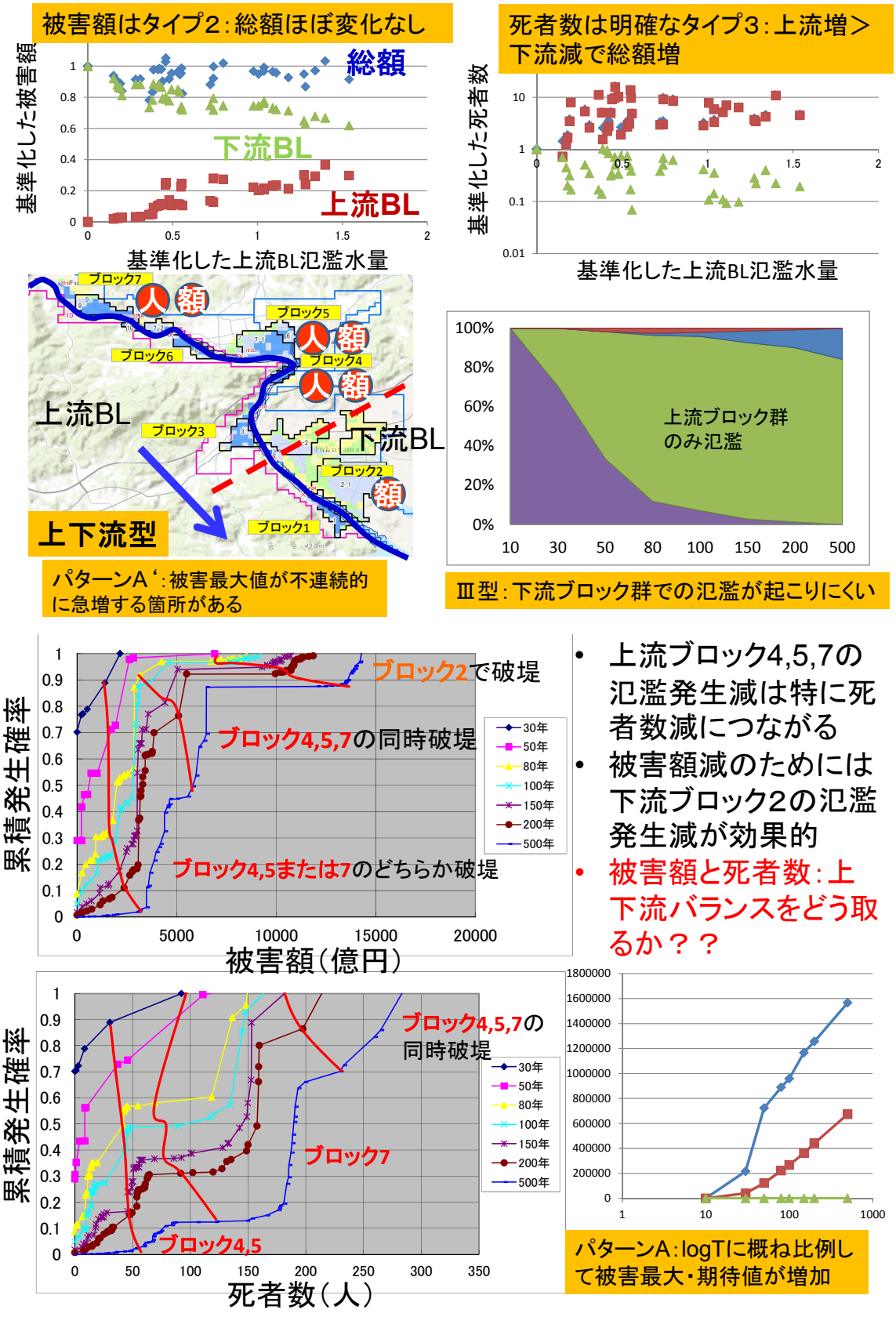


図-Ⅱ.2.3.3.14　氾濫被害発生の特徴分析：事例２-下流型Ｂ



図－Ⅱ．2．3．3．15　氾濫被害発生の特徴分析：事例３－上下流型

2.3.3.6 ダムの洪水調節

気候変動に伴って世界的に豪雨が強大化する可能性については、現在までに IPCC レポートやその他の研究において多く指摘されている（例えば IPCC2007）。日本国内に対象とし、将来において豪雨の規模が増大する可能性を示唆する既往研究もある（和田ら 2005、柏井ら 2008）。このように豪雨の降り方が変化するとダムの洪水調節操作にも影響を与える可能性がある。例えば佐山らは、今後の地球温暖化を考慮した場合の淀川流域における洪水流量の増加、ダム操作への影響について、気象庁の地域気候モデル RCM20 のデータを用いて分布型流出モデルにより検討を行っており、例えば日吉ダムにおいては計画規模を越えるような超過洪水頻度が多くなる将来気候においてただし書き操作回数が現在気候と比較して増加することを示している（佐山ら 2008）。同様の検討結果は森らの研究からも得られている（森ら 2008）。このように洪水の規模やただし書き操作回数が増加することは、下流の安全性低下に関わる。

また、洪水時の流量増加に伴いダムの構造に影響を及ぼす可能性がある。ダムはサーチャージ水位の決定の対象となった洪水以上の洪水に対しても、ダム自身が破壊に至らないような安全な対策を講じて、著しい付加的な被害を付近に与えないように設置しなくてはならない。この場合に対象となる洪水は、フィルダムの堤体のように、ダムの堤体からの越流が堤体の致命的な破壊につながるという見地からすれば、ダム地点で工学上発生すると考えられる最大の規模の洪水を考えなくてはならない。河川管理施設等構造令では、このダムの保安上対象とする洪水の流量を、「ダム設計洪水流量」と定義し、ダムの洪水吐きはこの流量を安全に流下させる放流能力を持つように設計される。((財）国土技術研究センター1978)。ここでは、現在までに行われている気候変動とダム設計洪水流量の関係に関する既往検討について紹介する。

河川管理施設等構造令において、コンクリートダムのダム設計洪水流量は、

① 200年に1回の割合で発生するものと予想される流量
② 当該地点において発生した最大の洪水流量
③ 当該ダムに係わる流域と水象もしくは気象が類似する流域のそれぞれにおいて発生した最大の洪水に係わる水象もしくは気象の観測の結果に照らして当該地点に発生するおそれがあると認められる洪水の流量

のうち、いずれか最大の流量を採用することと規定されている。また、堤体構造が越流に弱いフィルダムにあっては、コンクリートダムのダム設計洪水流量の 1.2 倍の流量をもって、フィルダムのダム設計洪水流量としている。ここで、①は生起確率に基づくもの、②は生起実績、③は周辺地域の観測値からの推定に基づくものであり、特に③に記載されている「当該地点に発生するおそれがあると認められる洪水の流量」の表現は、可能最大洪水流量の概念に対応し、実際の算定には地域別比流量図（クリーガー曲線）が用いられる（土木研究所 1976）。実際のダム設計洪水流量は、地域別比流量曲線により決定されるものが多い（柏井 2010）。

地球温暖化により洪水が大規模化した場合、洪水流量が増えることとなる。極端現象予測チームでは、気象研究所の MRI-AGCM の出力結果を用いて将来における 200 年確率流量の変化を計算した（極端現象予測チーム 2012）。結果の一例として、21 世紀末において中日本地域では 200 年確率流量が現在の 1.19 倍になると試算しており（図-Ⅱ.2.3.3.16）、構造物の設計基準に用いられている河川流量が変化する可能性があるとしている。

このように、気候変動により豪雨の規模が大きくなると、ダム設計洪水流量についても大きくなる可能性が指摘されており、その場合には洪水吐き放流能力の増強等の検討が必要となってこよう。今後とも大規模洪水時の洪水流量の変化について注意深く経過観察する必要がある。

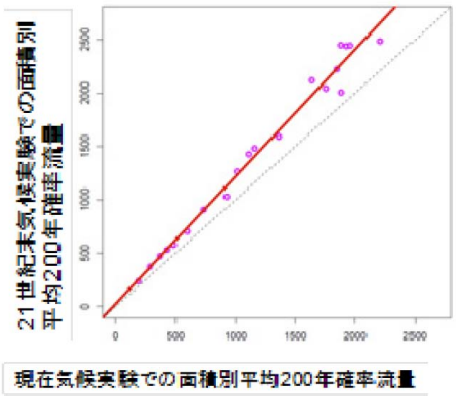


図-Ⅱ.2.3.3.16　面積別の年最大 200 年確率流量の現在気候と将来気候の比較
（極端現象予測チーム 2012）

2.3.4　災害の起こり方のコントロールというアプローチの強化－氾濫を考慮した治水施策について

2.3.4.1 背景・目的

従来、河道改修、洪水調節施設の整備などの治水対策を整備してきたが、依然として整備率は低く、また治水対策への投資も減少し続ける状況にあるとともに、将来は気候変動による外力の増加とそれに伴う治水安全度の低下が想定されている。

こうした状況を踏まえ、これまでの計画において目標としてきた流量に対し、河道改修や洪水調節施設の整備等を基本とする「河川で安全を確保する治水施策」で対処することに加え、増加する外力に対し「流域における対策で安全を確保する治水施策」を重層的に行うべきであるとの提言（水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方）が、平成20年に社会資本整備審議会にてなされている。

流域全体の被害を最小化することは、治水施策の重要な目標の１つであるが、それに加えて、遊水機能の維持・確保などの氾濫を考慮した流域治水施策の場合、氾濫によって損失を受ける者（地域）と氾濫によって被害軽減便益を受ける者（地域）との衡平をどのように調整し、合意形成を図っていくかということが極めて重要となる。

そこで、流域全体の被害最小化と合意形成が両立した、氾濫を考慮した治水施策手法の確立に向け、1.1.1で示した既存事例の調査結果やモデル河川における遊水機能の分析・評価結果を元に、施策実施に必要な条件の整理と今後に向けた論点の整理を行った。

2.3.4.2 施策実施条件の整理

本施策を実施する上での条件を抽出するため、期待される治水効果や地域の認識等の観点から、1.1.1で示した各事例の特徴を整理すると、表-Ⅱ.2.3.4.1のとおりとなる。この表を踏まえ、本施策実施のための条件を以下のとおり整理した。

①他に比べ有意に氾濫しやすい場所を特定できること。

②その場所が氾濫すると、下流域または流域全体の被害が相当程度減少すること。

③氾濫を考慮する地域の理解が相当程度得られること。

④施策の総合性・実効性が保たれること。

①②については、氾濫を許容する地域を特定し、その場所における遊水機能を分析し、下流及び流域全体における被害軽減効果を分析・評価するために必要な基本的条件として位置づけられる。現状としては、①については地形や堤防の整備状況や過去の浸水実績状況から明らかに越水（溢水）氾濫しやすい場所か否か、②については再度災害防止等の観点から、外力条件や氾濫許容条件を設定し、それに基づく被害額の計算（又は概略的な見積り）を実施し、施策による被害軽減効果を評価している例が多い。

③については、流域全体の合意形成を図るために必要な基本的条件として位置づけられる。本条件における「相当程度」とは、施策の実施・維持に著しい支障が生じないレベルとして本稿では設定する。現状としては、予算の制約（暫定的な対応）、被害頻度の相対比較（現状よりは悪くならない）、地域内の利害衡平（農地は浸水させるが宅地は浸水させない）などを理由として、相当程度の理解を得ている例が多い。

④については、河川管理者と河川管理者以外の関係部局（自治体の都市計画部局、建築部局、農政部局等）と継続的かつ実効的な連携・協力・調整を行っていくために必要な基本的条件として位置づけられる。現状としては、各個別法令に基づく調整等に留まっている事例が主流ではあるが、一部では、施策実施主体間の連携等を図る体制整備（連絡会の設置）や、規制内容を条例化することにより施策実施主体の具体的な役割・責任分担の明確化を図っている事例もある。

表-Ⅱ.2.3.4.1　各事例の特徴整理

事例	対象地域の概要	期待される治水効果	地域の認識	関係部局との調整等
桜川 （北太田・君島地区）	● 浸水常襲地区 ● 無堤区間を存置 ● 市街化調整区域、農振農用地区域	● 下流（土浦市街地）に対する被害軽減効果 ● 流域全体の被害軽減効果	● 暫定的な対応という理解 ● 宅地浸水は輪中堤で防御	● 計画策定時に関係部局を含めた連絡会を設置 ● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
桜川 （岩瀬地区）	● 浸水常襲地区 ● 水田を防災調整池とみなす ● 市街化調整区域、農振農用地区域	● 防災調節池整備と同等の被害軽減効果	● 現状より水田の収穫量が減収にならない	● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
天野川 （岩脇・西円寺地区）	● 浸水常襲地区 ● 越流堤を存置 ● 市街化調整区域、農振農用地区域	● 越流堤下流の岩脇地区に対する被害軽減効果	● 水田を浸水させる代わりに、集落地区の浸水危険性を軽減	● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
小貝川 （藤代地区）	● 浸水常襲地区 ● 主として市街化調整区域	● 地区全体に対する被害軽減効果 ● 避難路の機能強化	● 地域内の現状の浸水リスクバランスを維持	● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
建築物の浸水対策に関する条例 （草津市）	● 浸水想定区域図に基づいて設定	● 建築物の浸水対策強化	● 今後予想される浸水頻度、浸水規模の増加への予防対策	● 河川管理者が浸水想定区域図の関連データを提供 ● 現行法令に対する上乗せ・横出し規制として関係部局が実施
雨水流出抑制施設の設置等に関する条例 （埼玉県）	● 湛水想定図に基づいて設定	● 開発行為などにおける雨水流出抑制施設の設置等の義務づけ	● 突発的・局地的な集中豪雨増加への予防対策	● 河川管理者が湛水想定区域図の関連データを提供 ● 関係部局が行う行政指導の内容を明確化
土砂等による土地の埋立等の規制に関する条例 （沼津市）	● 市街化調整区域に基づいて設定	● 環境保全のための土地埋立・盛土の規制 ● 副次的な効果として、遊水機能保全を期待	● 農地荒廃化、土砂流出による環境悪化への防止策	● 現行法令に対する上乗せ・横出し規制として関係部局が実施

2.3.4.3 今後に向けた論点整理

2.3.4.2において施策実施条件を整理したが、これらの条件についての合致判断を行うための分析・評価手法のレベルアップはもちろんのこと、条件が満たされない場合には、条件を満たすための方法論についても、本施策を進める上では議論を深めていくべきと考える。このような視点も含めて、本研究を進める上で、今後さらに議論すべき論点について以下に整理する。

（1）分析・評価手法に関する論点

- 破堤現象の取扱いについて
  - ✓ 現状では、破堤現象の定量的な評価手法が確立されていないため、「有意に氾濫しやすい場所」の特定については、越水（溢水）氾濫のみによる有意性の評価に留まらざるを得ない。しかし、破堤氾濫も含めた有意性の評価が可能となれば、より適正な場所の選定が可能になる。
  - ✓ したがって、2.3.3の研究成果を活用しつつ、破堤現象も含めた場所特定に関する有意性の評価手法が必要ではないか。
- 外力設定について
  - ✓ 治水施策として望ましいのは、様々な降雨規模・波形の洪水に対して、被害軽減効果を発揮することである。しかし、本施策においては、ダムのような人為的操作を伴わないため、被害軽減効果を発揮する外力条件は限られたものにならざるを得ない。
  - ✓ したがって、超過洪水や気候変動への不確実性などに対しても、本施策が「相当程度」の被害軽減効果を有することが可能かどうか（どの程度の施策柔軟性を有するかどうか）を判断するために、複数の外力条件による評価もあわせて実施することが必要ではないか。

（2）条件を満たすための方法に関する論点

- 条件③について
  - ✓ 水害常襲地域ではない地域を氾濫許容地域とした場合及び現状よりも増加した氾濫リスクを許容する場合、地域において施策実施の理解を得ることは、かなりの困難が想定される。
  - ✓ 一方、増加したリスクに見合う何らかの対応策（リスク増に対する相殺策）により、利害衡平が保たれれば、地域の理解度向上に寄与するものと考えられる。
  - ✓ したがって、条件②による評価結果を活用しつつ、氾濫許容に対する対応策として、例えば、被害補償や水害保険等の影響緩和策の適用性について検討することが必要ではないか。
- 条件④について
  - ✓ 現状では、各個別法のもと、都市部局等の関係部局が主体的な施策実施者となっており、河川管理者は、関係部局との連携調整の場の主催、対象流域の氾濫範囲や湛水深等のデータ提供が主な役割となっている。
  - ✓ 仮に、流域治水に対する十分な合意形成が事前になされたとしても、想定外の氾濫範囲、浸水深になった場合、被害を受けた住民は、何らかの被害者意識を抱くことになり、場合によっては訴訟に発展してしまうことも想定され、その結果、河川管理者・関係部局と住民間の信頼関係の喪失に加え、河川管理者と関係部局の行政責任や連携調整の合理性が問われることになり、本施策の実施が困難な状況になってしまう。
  - ✓ したがって、連携の強化、施策実施のインセンティブを高める観点から、河川管理者と関係部局間の役割分担、責任範囲を明確化する枠組み（法令、条例等）について、検討することが必要ではないか。

以上、氾濫を考慮した治水施策手法の確立に向けて、施策実施条件の整理と今後に向けた論点の整理を行ったが、まだ、概念的かつ定性的な整理に留まっているとともに、各条件の評価結果を最終的にどういう形で総合的な評価（施策評価）に結びつけるかについては、まだ道筋が見えていない。今後も、引き続き事例分析・評価の積み重ね、手法の理論化・実体化に向けた検討が必要である。

2.3.5　超過洪水を伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題

2.3.5.1 防災対策の転換

東日本大震災では大規模な津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸が未曾有の被害を受けた。釜石沖に設置された世界最大規模の防波堤が破壊されたように、各地で堤防等防災施設が倒壊し、自然外力の前には防災施設の機能に限界があることが改めて認識された。

このような状況を踏まえて、社会資本整備審議会（2011）では、「地域ごとの特性を踏まえ、ハード・ソフトの施策を柔軟に組み合わせ、総動員させる「多重防御」の発想による津波防災・減災対策」等を図ることを趣旨とした津波防災まちづくりが緊急提言された。これを契機に、首都直下地震や南海・東南海トラフ沖地震等に直面している我が国の防災のあり方として、あらゆる規模の外力を想定し、防災施設を含む地域の構造や危機管理対策等を総合的に整備することが重要となっている。地域における多重防御の具体的な対策例やその主体は概ね表-Ⅱ.2.3.5.1の通りである。

表-Ⅱ.2.3.5.1　防災の多重化

防災の要素	具体的対策例	主　体
防災施設	河川施設、海岸施設の整備等	行政
地域・都市の構造	都市計画、建築規制、道路整備等	行政・民間
危機管理	避難勧告、避難誘導、災害予測・防災情報等	行政・民間
危機管理（社会システム）	水防活動、自主防災組織、災害弱者の支援、ボランティア等	地域社会
自主防災	危険地域からの移動、住居の耐水化、保険、学習等	個人・企業

これまで我が国では自然災害に対する対策について国等の行政機関が中心となり、施設整備を中心とした対策や危機管理体制の整備が進められてきた。しかし、施設対策については、今日維持管理費の増大や財政の逼迫の中で、全国的な整備水準の向上を図るのは困難となっている。また危機管理対策は「人命の保護」には効果的であるものの、資産や社会・経済への影響を防ぐには限界がある。現在毎年のように大きな水害が発生し、さらに今後気候変動による降雨、潮位等自然外力の増大とそれに伴う洪水、高潮、土砂災害といった災害の激化に、多くの人命や資産・社会機能が直面している状況においては、地域・都市さらには国土全体の構造の変化も含めた多重防御が重要と考えられる。

東日本大震災の被災地のように大きな被害を受けた地域においては、復興段階において地域の構造を大規模に転換することは比較的容易であるが（釜石市 2012）、既成の地域・都市において既存のストックを移転等するためには、個人の自主的な行動が重要となる。また、そのような行動が総体として災害に強い地域構造に向う仕組みを整備することにより、徐々に国土の強靭化を図らざるを得ないと考えられる。なお、我が国は水害だけでなく地震・土砂災害等様々な自然災害に見舞われる条件下にあり、本来あらゆる災害形態を考慮する必要があるが、ここでは、気候変動により激化が予想される水害を対象に中長期的観点から流域内の適応策について論述する。

2.3.5.2　気候変動に対する適応策

上記を踏まえ、気候変動に対しては以下の適応策が考えられる。

a)個人の安全な立地選択、自主対策のインセンティブ形成

・個人責任原則の厳格化

・リスク情報の公表

・災害リスクをベースとした土地利用等制度の強化・包括化

b)防災地域づくり、防災国土づくりの骨格（グランドデザイン）の提示
・多重防御地域の防災力評価手法の開発
・人口減少社会における将来のコミュニティのあり方
・防災と環境保全の一体化
・グランドデザインの実効性確保
c)危機管理能力の向上
・重要地域を守るための地域間のリスク移転
以下，それぞれについて述べていく．

a)個人の安全な立地選択、自主対策のインセンティブ形成

我が国ではこれまで、防災は行政の役割という意識が強く、個々の主体が防災に取り組みためのインセンティブが小さい傾向があった。しかし、防災施設の機能には明らかに限界があり、また地球温暖化による降雨規模の増大や海面上昇等が進行する中では、今後、個人が防災意識を高め危険地域から撤退する等の防災対策を推進するためのインセンティブの形成が重要である。そのためには下記の事項が重要と考えられる。

1)個人責任原則の厳格化

我が国では市民が行政主導の防災対策に依存し自助努力を怠るという体質から抜けきれていないことが指摘されている（日本学術会議社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会 1999)。自主防災を促すためには「自己責任」の原則を明確にする必要がある。社会として「生命・財産を守る」ことにおける自己責任原則を明確化することにより、個人の防災意識や責任感が高まる。ただしその一方で、自己責任として押しつけるだけでなく、災害リスク情報の提供や災害に関する情報の分析等に関する能力の向上を図ること等により、個人の適切な選択を支援する仕組み作りが必要である。

2)リスク情報の公表

個人を取り巻く水害の危険性に関しては、これまで治水安全度やハザードマップという形で情報が提供されてきた。しかし、治水安全度については「安全が確保される確率は分かるが、低頻度の大規模な水害が発生した場合に、どのような事態が生じるのか」ということについて何ら情報を提示していない。またハザードマップも基本的に「計画降雨が発生した場合に起こりえる最大浸水深」を示すもので、最大浸水深が発生する確率はどの程度か、また計画降雨規模以上の大雨が発生した場合にどのような浸水が発生するのか等について情報を提示していない。このため、住民をはじめとする情報の受け手としては危険性を理解し難いため、自主的な防災行動に結びつきにくい側面がある。個々の主体が自己責任の下、適切な防災対策を選択できるためには、各主体の視点からのリスク情報が重要である。リスクとはあらゆる事象について、生じる被害の規模・特性とその発生確率の組み合わせを総合化した指標であり、以下のような特性を有する。

- 同一の災害事象に対して各主体（例えば個人、地域社会、全世界等）の立場からの情報を提示することが可能である。例えば、個人の立場からはその個人や企業が保有するリスクが重要であり、政府の立場からは地域、国等が直面するリスクが重要である。
- 個別事象毎の評価が可能であり、必ずしも金銭換算が必要でないため、幅広い事象の考察が可能である。例えば、死亡リスク、財産損失のリスク、通信停止リスク等の観点からリスクを評価することができ、またこれらを多面的に評価することも可能である。
- 事象の発生確率と同様に、将来の CO_2 排出量、社会構造等の不確実性を取り込むことが可能である。（ただし、不確実性の確率分布の設定が必要）　一方で、リスクの算出過程は事象の発生確率やハザードから被害への因果関係等において必ずしも十分科学的なものではなく、少なからず仮

定やシナリオが入らざるを得ない。社会全体の意識変化を促すためには、このリスク指標に十分な信頼性や説得力が必要と考えられるが、計算に使用したデータ、計算方法、使用した仮定等を明らかにするとともに、評価の過程で住民参加等を図ることにより、一定の信頼性を確保することは可能と考えられる。社会でリスク指標を共有することにより、自分を取り巻くリスクと受忍リスクの比較、対策効果と費用等を比較し、適切な対策を選択・実施が可能になると考えられる（図-Ⅱ.2.3.5.1 参照（Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Netherlands' Rijkswaterstaat, United Kingdom Environment Agency, and United States Army Corps of Engineers 2011））。

図-Ⅱ.2.3.5.1　個人リスクと受忍リスクの比較

3) 災害リスクをベースとした土地利用等制度の包括化

災害リスク情報の提示だけでなく、この情報をベースに土地利用規制や保険料率の設定、自主的な防災対策への助成等一貫した政策を整備することにより、個人の防災に対するインセンティブが一層強まると考えられる。表-Ⅱ.2.3.5.2 は主要先進国の事例であるが、水害対策の体系が災害リスクをベースとして整備・実施されている（国土交通省国土政策研究所 2011）。

我が国の土地利用政策は都市計画法を中心に実施されてきたが、総合治水流域等の特別なケースを除いては都市計画には基本的に浸水リスクが考慮されてきておらず、水害に強い都市づくりを推進するものとはなっていない。建築基準法においては「条例で出水等による危険の著しい地域を災害危険区域として指定し、災害危険区域内における住宅建築規制等を定めることができる」としている（第 39 条）ものの、出水に関しての指定は少ないのが現状である（大塚 2006）。土砂災害に関する指定区域は多いことを考慮すると、水害に対しては堤防の決壊メカニズムが未解明であること等から、特に危険性の高いエリアの特定や危険度の評価が困難であること、治水安全度等従来の指標では影響範囲が広域にわたることが原因の一つと考えられる。近年、津波被災地の復興地域において浸水想定に基づく土地利用・建築規制が導入されるようになっているが、その他の地域においては水害の軽減に対してほとんど寄与してこなかった実態がある。今後水害リスクを指標とした政策の強化が求められる。

災害による財産の喪失や生活の困窮等を軽減するためには、保険によるリスク移転が重要となる。我が国では水害に特化した保険商品は無く、住宅保険に組み込まれ、その水害保険に関わる料率は一定又は明らかでないのが一般的である。これは水害危険地域の住民による逆選択の危険性があるとともに、安全な地域への立地・危険地域からの撤退へのインセンティブ形成にはならない。リスク評価に当たってのコストや全国民の公平性の確保が問題になるのであれば、米国や英国のように政府による一律の基準に基づいたリスク評価を導入することの検討が必要となろう。

表-Ⅱ.2.3.5.2　主要先進国のリスク情報による洪水保険、土地利用政策等の事例

国　名	保険制度	土地利用規制等
米国	・FEMA（連邦危機管理局）が NFIP（全米洪水保険）を所管。 ・自治体が洪水危険度調査、洪水リスクマップの作成、氾濫源管理を FEMA の基準で行うことが NFIP 参加条件となる。 ・リスクに応じた保険料率の設定。 ・新規開発には実効料率、既存住宅には補助料率を適用。 ・洪水軽減策に応じた割引料率（CRS）制度。 ・災害義援金の受け取りについて、NFIP 参加が資格となる。	・最下階の床面高さ規制。 ・リスクマップ上の SFHA での開発を規制。 ・SFHA（特別洪水危険地帯）での開発に対する政府資金援助、銀行貸付等は NFIP 加入が条件となる。
英国	・EA（環境政策執行機関）が NaFRA（全国洪水リスク調査）を実施、 作成された洪水マップをもとに、保険会社各社が保険料率を設定。	・EA が作成した洪水マップをもとに、政府の都市・地域計画 PPS25 が作成され、RSS（地域空間方針）,LDF（地域開発フレームワーク）に反映。 ・LPA（地方計画庁）が EA の指導のもと SFRA（EA の洪水マップに詳細な堤防地形等考慮）、SFRA の結果が LDF,LDD（地域開発文書）に反映され、これにより開発許認可が行われる。
フランス	・民間保険会社に自然災害保険が義務づけ。 ・PPR（土地利用計画）に従わないものは保険解除。 ・PPR を策定し、リスク軽減策を行っていない地域に対しては、住宅保険の免責金額がスライド的に増加。 ・自然災害に関わる保険料率は政府が一律に設定、また政府からの無制限の損失補償が有る。	・知事が PPR（土地利用計画）を作成。３段階のリスク度、インフラ・都市化の状況から指定地域と規制を定める。 ・土地利用規制に伴う居住地移転に対する財政補償制度。

また、これらの対策は個々に機能するだけでなく、同一のリスク指標をベースに整合性を確保し、「被災者住宅再建支援条例」等被災に対するコミュニティの維持を目的とした義援金制度等（福崎 2005）とも調整・包括化することでより強いインセンティブを形成すると考えられる。

b)防災地域づくり、防災国土づくりの骨格（グランドデザイン）の作成・提示

a)で述べた社会的なインセンティブ形成を、強靭な国土づくりに集約させるためには、土地利用政

策等のベースとなるグランドデザインが必要である。このグランドデザインの作成・実効にあたっては以下の課題がある。

1)多重防御地域の防災力評価手法の開発

地域構造・社会システム等の面から多重防御化された地域について、あらゆる規模・特性を有する自然外力に対しての応答や被害程度を推計し、防災力を評価できる手法の開発が必要である。

2)人口減少社会における将来のコミュニティのあり方

人口減少や少子・高齢化が進む中、各地域ではコミュニティ維持のための努力をしているが、これらは危険地域からの撤退等をはじめとする適応策とは相反する側面を有する。また、厳しい財政下において防災施設やその他インフラ等の整備・更新・維持管理についても「選択と集中」の議論がされている。このように将来の国土のあり方については様々なトレードオフが存在しており、将来の自然災害外力、人口、経済、食料自給率等を総合的に考慮した国家規模での新たなコミュニティの枠組みの提示と、これに対する社会的な合意形成が必要と考えられる。

3)防災と環境保全の一体化

湿地や砂浜等の自然地形は多様な生態系を育む一方で、貯留機能や消波機能等の自然のバリアーをなり得る。また貴重な自然環境を保全するためには自然外力の軽減も重要である。また、都市構造としては自然外力の回避と併せて、省エネ・利便性向上等を図るためのコンパクト化が重要であると考えられる。

4)グランドデザインの実効性の確保

計画的な国土構造の転換のためには、国土→圏域→都市・地方の階層で土地利用のあり方を具体化し、それを誘導する規制や助成制度の整備が必要である。

c)危機管理能力の向上

1)重要地域を守るための地域間のリスク移転

危機管理能力の向上は「人命の保護」に高い効果を有する他、比較的短期間で効果を発揮することが可能である。我が国では自治体単位で災害に対する危機管理が進められてきており、現在も地域単位で災害弱者への援護、防災情報の速やかで確実な配信、自主防災組織等地域防災力の強化等が検討されているところである。しかし、気候変動に伴う自然外力の増大等が予想される中、より広域的な観点での危機管理体制の整備が求められる。

また、我が国では政治・経済等の国家中枢機能が都心に一極集中しているとともに、大流域を抱えた河川が首都圏を流下しており、カスリーン台風時に発生したような未曾有の洪水が発生した場合には、最悪のケースとして国家機能の停止という事態が予想される。国家としての視点からはこのような事態はあらゆる規模の災害外力に対して回避すべきである。確実で即効性のある対策としては、首都圏で大雨が発生した際に、首都圏の外縁部で洪水氾濫を誘発させ、都心に甚大な被害が及ばない仕組みを構築することが考えられる。しかし、このような人為的なリスクの転嫁については、「どの程度の補償等措置とセットなら社会的に許容されるか」、「どのような仕組みで意志決定を行うか」等多くの課題を有する。

2.3.6　不確実性への対応

2.3.6.1 不確実性の種類

不確実性あるいは不確かさという言葉は、一般には、はっきりしない、これから起こることが確実ではないという意味で用いられる。不確実性は、統計学などで学術用語としても用いられるが、分野により異なった意味で用いられている。米国科学評議会は、不確実性を以下の通り３つに大別している（NRC, 2013）。

(a) 統計的変動と不均質性（偶然性あるいは外因性の不確実性）

(b) モデルとパラメータの不確実性（認識的な不確実性）

(c) 深い不確実性（deep uncertainty の仮訳）

“統計的変動と不均質性”は、年降水量が年により大きいこともあれば小さいこともあるような自然の変動、土中の地点が異なれば透水係数も大きく異なるような不均質性に起因する不確実性である。この不確実性、即ち、“統計的変動と不均質性”は、システムが本来有する特性であるため、データを多く集めても、減少することはありえないが、多くのデータにより統計値をより正確に知ることができる。分野によっては、これを不確実性には含めず、変動などと呼ぶことがある。

“モデルとパラメータの不確実性”は、対象とするシステムの理解が十分でない場合、理解していても意図的に簡略化あるいは無視した場合、データ不足でパラメータを正確に設定できない場合、データは十分にあってもモデル構造の簡略化やその他の仮定に起因する影響がある場合等である。この種の不確実性は、システムの理解を深める研究で減少させることが可能である。

“深い不確実性”は、当面の研究では減少させることが期待できない不確実性であり、システムが理解できていない場合や、理解されていてもその特徴を記述できる方法がない場合に見られる種類の不確実性である。例えば、医薬品等由来化学物質の中には環境や人体への影響が全く理解されていないものが多数ある。また、洪水流量の把握は、理解されていても記述方法がない例である。流量は平均流速と横断面積の積というシステムは既知である。しかし、洪水中に変動する横断面積は通常の体制では観測不可能のため、観測された洪水流量値にはこの種の不確実性が存在する。

分野によっては不確実性に含めないように、“統計的変動と不均質性”はそれ以外の種類の不確実性と区別して考えるべきである。GCM による将来の極端現象の変化、例えば超過確率 1/100 の日降雨量の将来変化の不確実性には、“統計的変動と不均質性”とそれ以外の不確実性が混在している。GCM による高々２５年間の未来のシミュレーション結果から超過確率 1/100 値を予測することはデータ不足（サンプリング）による不確実性であり、データを増やせばこの種の予測の不確実性は減少する。一方、将来予測結果には GCM の構造やパラメータ設定値が適切でないことによる不確実性も内包している。“統計的変動と不均質性”ではデータを増やせばその統計値をより正確に知ることができるが、モデルとパラメータの不確実性は、モデルランを増やしてその予測結果の平均値を示しても、これは統計的変動とは言えないので平均値が真値に近づいていると限らない。すべてのモデルが系統誤差を持つことも考えられる。複数のモデルによる予測の信頼度の判断はシステムの理解に基づき行われなければならない。

なお、不確実性の英語は uncertainty であるが、不確定性も英語では uncertainty である。不確定は、量子力学のように不確実性と同じ意味で用いられる場合もあれば、複数の可能性があり一つに絞りきれないような多義性という意味で用いられる場合もある。

2.3.6.2 不確実性の取り扱い事例

水工分野では、降雨量や水位等の外力は大きな自然変動を示すため、古くから確率に基づく施設設計や計画が行われてきた。施設設計や計画に必要な外力は、所定の安全度または超過確率に相当する外力

を、過去観測されたデータを用いた水文統計解析から求め、設定される。解析に用いることが可能な品質の過去データの期間は、通常、数十年程度であり、超過確率 1/100 のような極値を推定するには期間が非常に短いため、利用可能なデータは最大限利用するのが一般的である。このように短期間の過去データから“統計的変動と不均質性”を分析するのは困難であるため、水文統計解析の研究は“モデルとパラメータの不確実性”の低減に努力が払われてきた。この知見を活かし、所定の超過確率に相当する外力推定値は、“モデルとパラメータの不確実性”としてその幅が示すことができ、計画に関する意思決定の参考としている。計画の意思決定は、利用可能な過去データから推定される頻度分布情報に加え、他の様々な事実や推測を加味し、総合的に行われる（泊 2012)。他の様々な事実や推測とは、例えば、史実、古水文学的推測や過去災害をもたらした台風の進路が少しずれていたときの降雨の推測等である。“統計的変動と不均質性”は、水文統計解析では分析できないので、実務的には総合的判断の中で考慮していると言える。

IPCC 第４次評価報告書では、不確実性を主に「値の不確実性」と「構造の不確実性」の二種類に分類し、評価結果の「確信度」(confidence）を、モデル、解析あるいはある意見の正しさについての、専門家の判断に基づく不確実性の程度としている（IPCC 2007)。

2.3.6.3 不確実性への対処

“統計的変動と不均質性”由来の不確実性は、対象とする事象が生起する確率分布を求めることができるため、対策案の費用便益分析へ広く利用されている。費用便益分析は、対策案による被害低下量の期待値という単一の尺度に集約される。期待値は、起こりうる外力の範囲で積分して求められるため、小さい外力も大きい外力も発生確率に応じて重要視していることに相当する。

無知に由来する深い不確実性、即ち、事象の生起確率が不明な場合、期待値の計算はできないため、起こりうる事象シナリオ別（例えば、予報的中、予報はずれ）の結果を見ながら、目的や必要性に応じた尺度で対処方法を決めることが行われている。不確実な情報下での対策案の選択に関する意思決定は、経営戦略の意思決定論や気象予報の経済価値を研究する分野で研究されている。その代表的な行動基準は、以下の３つである（立平 1999)。

(1) ミニマックス損失
(2) ミニミン損失
(3) ミニマックス・リグレット

ミニマックス損失とは、最大規模の損失が発生する対策案に着目し、それを最小化する対策を選択する考えであり、リスクをできるだけ避けようという防御型の行動基準である。

ミニミン損失とは、事象シナリオの中での最小損失を最小化する対策を選択する考えであり、攻撃的な行動規範である。うまくいけば損失を最小限にできるものの、大きな損失が発生することもある。

ミニマックス・リグレットとは、選択した対策がはずれた場合の後悔（リグレット）の最大値に着目し、それが最小の対策を選択する行動基準である。後悔は、他の対策案を選んでいれば損失はもっと小さかっただろうという感情を、両者の損失額の差として表現する。前の２つの中間的な行動規範である。

どの行動基準が適当かは意思決定者の考え方次第であるが、住宅の火災保険のように、苦労して購入した住宅は失いたくないという意識が働く場合はミニマックス行動規範をとることが多い等の傾向はある程度把握されている。

起こりうる事象シナリオは、予報的中かはずれといったあるなしの２シナリオに限らず、工場生産計画における景気シナリオで回復、現状維持、悪化といった３シナリオを設定するように、複数設定することもある。国や銀行の経営健全性、電気製品部品の耐久性、IT システムの堅牢性等を試験する健全性試験（ストレス・テスト）において、外力シナリオの範囲の設定が重要になる。ストレスは、定格ある

いは通常時の外力以上であり、発生の可能性があり、設計で想定した環境と異なる環境とすることが基本であるが、合否の判断に使うストレスをどこまで大きく設定するかは課題となっている場合が多い。

生起確率が分かる場合は期待値の利用という１種類の方法が一般的であるのに対し、生起確率が不明な場合、防御型（リスク回避的)、攻撃型（リスク選好的)、あるいはその中間という方針を選択し、それに応じた行動基準が示されている。生起確率が分かる場合の意思決定においても、「最も適切」とか「もっとも好ましい」とする基準は必ずしも期待値で判断されない。そのため、結果の好ましさの尺度である効用という概念が導入される場合がある。治水経済調査におけるリスクプレミアムは効用の例である（国土交通省河川局 2005)。しかし、社会全体で効用を定量的に把握するのは簡単ではないため、意思決定に反映されるには至っていない。

2.3.6.4 総合減災システム

あらゆる自然災害における防災施設や減災システムの計画は、総合減災システムと呼ばれる概念の下で個々に計画されるべきとされている（河田 2001)。特に、限られた資源の制約下で、構造物と非構造物による対策を組み合わせて被害軽減を真に実現させようとするとき重要となる概念である。総合減災システムは、図-Ⅱ.2.3.6.1 に示すように、受容リスクに相当する外力までは構造物で被害を防ぎ、それを超える外力（超過外力）に対しては構造物と非構造物によりできるだけ被害を抑制する考えである。無被害に抑えるための施設設計は、受容リスクに相当し、対策が可能となる上限の外力は受忍リスクに相当する。

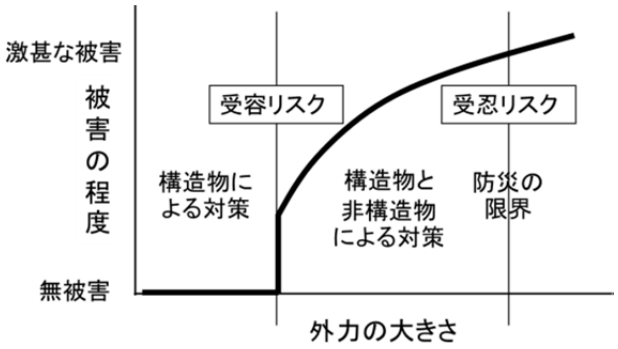


図-Ⅱ.2.3.6.1 総合減災システムの概念（河田(2001)を元に修正）

治水対策での総合減災システムにおける被害曲線の不確実性の考え方を平成２４年度国土技術政策総合研究所講演会（藤田 2012）より抜粋する。当該適応策が目標とした外力の実際の出現が予測からずれたときに（特に大きい方に)、どのような被害が生じるかという視点で議論されている。たとえば、気候変動影響は、想定被害～豪雨生起の超過確率年の関係を表す曲線が ΔT 分左にずれることを意味する（図-Ⅱ.2.3.6.2 参照)。ここで、この曲線の立ち上がりが急であれば（図中のⅠ)、気候変動影響による被害増大の程度，河川整備に関わる適応策の投入量が結果として過小だったことによる被害増大の程度のどちらも大きくなる。このよう場合には、少々無駄になる可能性があっても、予測幅の中でより安全側の外力増想定が選択される方向が考えられる。以上のことは、また、想定被害～豪雨生起の超過確率年の曲線の立ち上がりが緩いことが（図中のⅡ)，換言すれば、施設群の設計外力を超えても被害が徐々にしか増えない構造あるいはシステムを具備していることが、不確実性への対処にも有利となることを示しており、重要なポイントである。

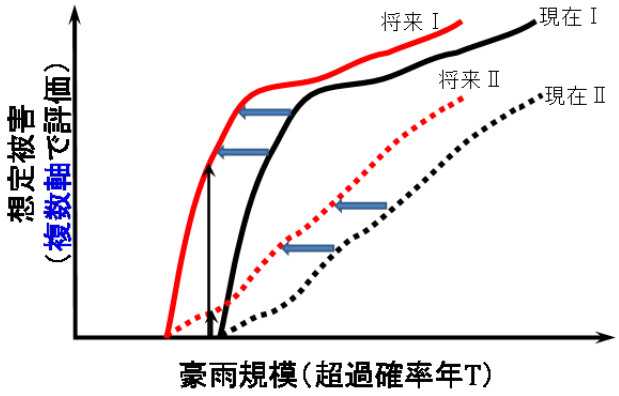


図-Ⅱ.2.3.6.2　被害～豪雨規模関係における気候変動影響（藤田(2012)より引用）
※関係を表す曲線の立ち上がり方の違いが何をもたらすかの説明．上向き矢印は被害の代表比較．

2.3.6.5 順応的管理

順応的管理とは、生態系の保全や自然再生において始められた不確実性を伴う対象を取り扱うためのマネジメント手法であり、アダプティブ・マネジメントまたは適応的管理と呼ばれることもある。例えば、野生生物保護管理の対象は、(1) 基本的な情報が得られない不確実な系であり、(2) 絶えず変動し得る非定常系であり、(3) 境界がはっきりしない解放系である。そのため、当初の予測がはずれる事態が起こり得ることを、あらかじめ管理システムに組み込み、継続的にモニタリングを行いながらその結果に合わせて対応を変えるフィードバック管理（順応性）が必須となる（EIC ネット）。

水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）（社整審 2008）では、「気候変化の予測等に不確実性がある中で適応策を検討するため、今後の観測データや知見の蓄積に応じてロードマップを修正していく順応的なアプローチを採用する。」としている。

このように、深い不確実性への順応的対応となる野生生物保護では、モニタリングが即フィードバックされるマネジメントとなるが、水災害分野ではモニタリングにより当初行った予測を修正し、ロードマップ（実行計画）に反映させるマネジメントとなる。

2.3.6.6 水文モニタリングのあり方

a) モニタリングの方法

気象現象のモニタリングは気象観測結果を用いて、気候変動監視レポートやIPCC報告書として定期的にまとめられている。

水文と関連する環境のモニタリングは、気候変動と人為的な影響の検知の目的で、古くからおこなわれている。ユネスコのあるプロジェクト報告書が推奨するモニタリング手法は、(1)ビジル・ネットワーク、(2)水文ベンチマーク、(3)リモートセンシング、(4)砂漠化モニタリング、(5)古水文学手法の５つの大別されている（Hardley 1985）。ビジル・ネットワークと水文ベンチマークは共に、人間の寿命を超える長期間でのモニタリングを前提として、前者は流域環境の変化を定期的に測量し、流量等のモニタリングを行うもので、後者はその参照としてできるだけ流域環境が変化しない場所での流量等のモニタリングを行うものである。気候変化の影響のモニタリングは、水文ベンチマークの目的と一致する。米国地質調査所は水文ベンチマークに対し、以下の要件を満たすことを求めている(Cobb and Biesecker 1971)。

１．現在、人工貯留、調節、分派施設が現在なく、将来もない。

２．地下水がポンプ取水により影響を受けない。
３．流量・水質や降雨の様々パターンの観測に適した条件を満たす。
４．家畜、野生生物や山火事等の特別な自然変化の可能性が小さい。

リモートセンシングと砂漠化モニタリングは、土地被覆変化の継続的監視である。古水文学手法観測開始以前の洪水等を堆積物や年輪の痕跡から推定する方法であり、谷底平野等で過去数百年前までに発生した大洪水の水位が推測できる場合があり、稀にしか発生しない極値の推定に寄与する場合がある。

日本における水文モニタリングは、主に計画と管理目的で設置された既存の観測所データを分析して行っている。その基本方針は、水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）（社整審 2008）が、「気候変化による影響のモニタリングの強化」において「各流域や沿岸域において調査・観測してきた雨量、水位、流量、潮位、波高、水質、流出土砂量、河道形状、生物、被災状況等のデータを活かして、関係機関と連携のもとに気候変化に伴う外力の変化をモニタリングすべきである。」としている。これを受けて，水文変化を分析する統一的手法「水災害分野における気候変化のモニタリングデータ整理等に係る要綱（案)」を定め，各地方整備局等がモニター結果を分析している。また、平成２４年度版河川砂防技術基準調査編は、第 2 章水文観測　8.3 気候変化による水理・水文条件の検知・把握のための観測にて、モニター専用目的の観測所を設置する必要はないこと、（既存観測所から）継続性・連続性の確保，人為的影響のない場所での観測を選定することを述べている。

b）変化検知の分析上の課題

過去の水文観測データから気候変化の影響を検知するとき、以下の点に留意する必要がある。

- 観測誤差や自然の変動より大きい変化でないと検知できない。これは統計学の検定で評価できる。
- 人為的影響度をモデルで推定し除去することが可能だが、推定誤差が大きく気候変化の影響を検知できない場合がある。貯水池操作のように流量そのもののデータがある場合、推定誤差は一般的に小さいと考えられるが、土地被覆変化等の流域環境変化の影響予測は一般的に大きな誤差を伴う。
- 地点データだと観測精度は比較的良いが、変動が大きく気候変化の影響を検知しづらくなり、代表性の問題もある一方で，流域平均値を用いると変動が小さくなり気候変化の影響を検知しやすくなるが流域平均の際の誤差が加わり精度が低下する。

また、過去の水文観測データから稀にしか発生しない極値の生起確率変化を検知するときの留意点は以下のようである。

- 短い観測期間データから稀な極値生起確率を予測するときの不確実性
- 地球温暖化ではない自然の変化の影響

例えば、５０年間の極値データから、リターンピリオド１００年の水文量を予測するのは外挿予測であり、外挿範囲が大きいほど予測値は大きな不確実性を伴う。この種の不確実性を減らすためには、データ量（観測期間）を増やすか、極値が発生する統計的なシステムをより良く理解し予測をより正確に行う方法の２つしかない。データ量を増やすには、流量観測解析以前の気象情報である再解析データと大気モデルと流出モデルを用いて流量の極値を再現する、あるいは古水文学的手法で過去数百年から数千年前からの極値を推定する等であるが、いずれもごく限られた条件でしか利用できない実用レベルにはない技術である。

仮に、長期間の過去データが利用できる場合、極値の変化を検知するには有利であるが、長期間であるがゆえに数十年から数百年？のオーダでの自然の気候変化が観測データセットに含まれるこ

とになる。水文統計解析の適用は、扱うデータが定常であること、即ち、時系列データが時間と共に変化しないことが前提となるが、長期間では必ず自然の変化が顕著になり定常性が成り立たなくなる。そのため、たとえ古水文学的手法で長期間の過去データが得られたとしても、極値の生起確率推定の不確実性は減ることはないとの主張がある（Klemes 1993）。

将来の気候変化により定常性が“死に”（Stationarity is dead.）、これまで計画手法で用いてきた水文統計手法が使えなくなるので気候変化に適応した手法開発が必要という意見がある。その一方で、気候が定常であったことはなく、それを承知で統計手法を大きな問題なしに利用できてきたのだから、新たな手法がないと今後の計画ができないということはないという意見もある（Olsen ら 2010、 竹内 2010）。

参考文献

秋葉雅章、腰塚雄太、宮本守、戸谷英雄、佐藤直良、山田正 2004：流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第10巻、pp.89-94

大塚路子 2006：最近の水害の状況と対策－中小河川の破堤水害と都市水害を中心に－、調査と情報第 544 号、2006 年 6 月

柏井条介、土屋修一、石神孝之 2008：気候変動による豪雨時の降雨量変化予測－GCM20 による評価を中心に－、国土技術政策総合研究所資料、第 462 号

柏井条介 2010：ダムの水理設計(3)－必要な基礎知識と水理設計条件(3)－、ダム技術、No.285、pp.14-25

釜石市 2012：釜石市災害危険区域建築条例（素案）、2012 年 4 月

河田惠昭 2001.：巨大災害の様相とその対応対策の考え方、地学雑誌、110(6), 924-930.

気候変動に関する政府間パネル（IPCC） 2007.： 気候変動に関する政府間パネル第 1 作業部会により受諾された報告書、
http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_ts_Jpn.pdf

北田悠星、菊地慶、岡部真人、山田正 2010：気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案、水工学論文集、第 54 巻、pp.523-528

極端現象予測チーム 2012：文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム平成 23 年度成果報告書、pp.202-203

建設省土木研究所河川部都市河川研究室 1997：氾濫許容型治水について、土木研究所資料、第 3521 号

（財）国土技術研究センター 1978：改定 解説・河川管理施設等構造令、pp.13

国土交通省河川局 2005.： 治水経済調査マニュアル（案）、
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf

国土交通省国土交通政策研究所 2011：水害に備えた社会システムに関する研究、国土交通政策研究第 98 号、2011 年 3 月

国土交通省社会資本整備審議会（社整審） 2008.：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申），平成２０年６月.

国土交通省川内川河川事務所：鶴田ダム再開発事業の概要、
http://www.qsr.mlit.go.jp/sendai/tsuruta-damu/pdf/gaiyou.pdf

国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所 2010：平成 22 年 7 月 14 日～14 日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について、平成 22 年 7 月 15 日

国土交通省津軽ダム工事事務所：http://www.thr.mlit.go.jp/tugaru/dam/dam_baton_03.html

国土交通省東北地方整備局 2011：台風 15 号による阿武隈川上流等の出水速報について、平成 23 年 9 月 23 日

腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田正 2006：確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会

佐山敬洋、立川康人、寶馨、増田亜美加、鈴木琢也 2008：地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、第 21 巻、4 号、pp.296-313

下坂将史、呉修一、山田正、吉川秀夫 2009：既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案、土木学会論文集 B、Vol.66 No.2、pp.106-122

社会資本整備審議会・交通政策審議会交通体系分科会計画部会 2011：津波防災まちづくりの考え方、2011 年 7 月

竹内邦良 2010.：連邦水関係機関共催「非定常性、水文頻度解析、水マネジメント」ワークショップ参加報告, 河川 2010-2 月号, 90-96.
立平良三 1999: 気象予報による意思決定, 東京堂出版.
（財）ダム技術センター 2005a：多目的ダムの建設、第 7 巻管理編、pp.78-83
（財）ダム技術センター 2005b：多目的ダムの建設、第 5 巻設計 II 編、pp.230-231
土木研究所 1976：全国ダム地点地域別比流量図、土木研究所資料、第 1247 号
泊宏 2012.：河川計画立案手法の現状と今後の展望, 2012 年度（第 48 回）水工学に関する夏期研修会, 土木学会,平成 24 年 8 月 27 日.
戸谷英雄、秋葉雅章、宮本守、山田正、吉川秀夫 2006：ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案　土木学会論文集 B Vol.62 No.1、pp.27-40
鳥居謙一 2012：ダム管理の高度化に向けて、土木学会水工学に関する夏期研修会講義集
日本学術会議社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会 1999：災害に強い社会をつくるために、社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会報告、1999 年 4 月
福崎博孝 2005：自然災害の被災者救済とわが国の法制度～被災者生活再建支援法の成立ちを中心として～、2005 予防時報
藤田光一 2012.：水災害分野における現場からの気候変動適応～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～、平成２４年度　国土技術政策総合研究所講演会講演集、国総研資料第 699 号、77-94.
森英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治 2008：ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会、pp.II-59
吉岡修一 2013：鹿野川ダム改造事業「トンネル洪水吐き」、四国技報、第 12 巻 24 号、pp.28-31
和田一範、村瀬勝彦、冨澤洋介 2005：地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集 No.796、II-72、pp.23-37
Cobb, Ernest D.; Biesecker, J. E. 1971: The national hydrologic bench-mark network, USGS Circular: 460-D.
EIC ネット[環境用語集], http://www.eic.or.jp/ecoterm/
Hadley, R.F.　1985.: Long-term monitoring of natural and man-made changes in the hydrological regime and related ecological environments, Technical Documents in Hydrology, IHP-ll Project A.3.1, UNESCO.
IPCC 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Netherlands' Rijkswaterstaat, United Kingdom Environment Agency, and United States Army Corps of Engineers　2011：Flood Risk Management Approaches As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States, IWR Report No. 2011-R-08
Klemes, V. 1993: Probability of hydrometeorological events – a different approach, Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts (proceedings of the Yokohama Symposium), July 1993, IAHS Publ. No.213.
National Research Council (NRC) 2013: *Environmental Decisions in the Face of Uncertainty.* Washington D.C., National Academy Press.
Olsen, J. Rolf, Julie Kiang and Reagan Waskom, (editors). 2010.: Workshop on Nonstationarity,

Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management. Colorado Water Institute Information Series No. 109. www.cwi.colostate.edu

第Ⅲ部

気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ開催報告

1. ワークショップの概要

■名　称　気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ
■主　催　国土技術政策総合研究所
■日　時　2013年3月12日（火）13:30～18:00
■会　場　TKP東京駅八重洲カンファレンスセンター　ホール５B
■ワークショップの趣旨

地球温暖化に伴う気候変動の影響予測研究は、近年、着実に進展し続け、将来の豪雨の増大は以前よりはるかに詳細に予測できるようになってきている。この状況を踏まえ、国土交通省社会整備審議会は、平成20年6月の「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）」において、適応策の考え方を示した。国土技術政策総合研究所（国総研）は、この考えに沿って、実務面での適応策の計画を可能とする諸施策の研究を継続してきた。本ワークショップでは、気候変動に伴う豪雨増大への適応に焦点を絞り、気候変動適応策を気候変動予測の範疇にとどめず、河川技術のレベル（河川・流域の現場での技術）につなげることの重要性の認識を共有し、河川技術の研究者・技術者がどのように活躍しなければならないか、蓄積されてきた治水とその技術に立脚して展開されるべきものであることの認識を共有し、現場で展開されてきた施策の実績と課題を踏まえた技術政策議論をどう展開するか、多方面で進んでいる研究を踏まえ、政策に資する適応策を生み出す研究が進む全体状況にどう貢献できるかについて議論する。

■プログラム

13:30-13:35 開会あいさつ　上総周平（国総研・所長）
13:35-13:45 進め方の説明　藤田光一（国総研・河川研究部長）
【基調講演】
13:45-14:15 気候変動災害に対する適応策の考え方　福岡捷二（中央大学研究開発機構・教授）
14:15-14:45 気候変動影響評価研究の進展　中北英一（京都大学防災研究所・教授）
【国総研気候変動適応研究からの題材提供】
14:45-14:55 取り組みの全体状況　吉谷純一（流域管理研究官）
14:55-15:05 治水対策検討のための気候変動予測結果の翻訳　服部敦（河川研究室長）
15:05-15:15 治水対策手法の拡充の展望１：河道設計からのアプローチ　服部敦（河川研究室長）
15:15-15:25 治水対策手法の拡充の展望２：ダムの洪水調節の高度化からのアプローチ
川崎将生（水資源研究室長）
15:25-15:40 超過外力を受けた堤防システムの機能発揮・喪失シナリオ設定の技術化
服部敦（河川研究室長）
15:40-15:55 災害の起こり方のコントロールについての現状と課題 飯野光則（水害研究室主任研究官）
15:55-16:00 不確実性への対応についての視点　吉谷純一（流域管理研究官）
【休憩】16:15-16:25
【全体討論】16:25-17:55　登壇者：福岡捷二（中央大学研究開発機構・教授）
中北英一（京都大学防災研究所・教授）
渡邊康玄（北見工業大学・教授）
角哲也（京都大学防災研究所・教授）
二瓶泰雄（東京理科大学・准教授）
藤田光一（国総研・河川研究部長、司会・進行役）
17:55-18:00 閉会あいさつ　藤田光一（国総研・河川研究部長）
■参加人数：約120名

2. 議事概要

2.1 基調講演

2.1.1 基調講演１

題目：気候変動災害に対する適応技術の考え方　－特に治水施設による適応技術について－

講演者：福岡捷二（中央大学研究開発機構・教授）

講演内容：

○適応策の基本的方向

平成 20 年 6 月　社会資本整備審議会河川分科会　気候変動に適応した治水対策検討小委員会「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」（答申）に基づき、「適応策の基本的方向」について説明。

適応策の基本的方針というのは、適応策と緩和策の適切な組み合わせにより、「水災害に適応した強靭な社会」（水災害適応型社会）を構築していこうというものである。具体的な適応策として、「施設による適応策」、「地域づくりと一体となった適応策」、「危機管理対応を中心とした適応策」や、渇水リスクや河川環境の変化への適応策が挙げられる。また、不確実性のある気候変化への適応策を講ずるに当たっての主要な課題ということで４つほど（外力は増大すること、災害リスクの評価、流域等での安全確保の考え方、河川生態系や水・物質循環系への影響予測と評価）挙げている。これらのことが今後の主要な課題になるということを５年前の答申の中で述べており、そのとおりになっている。

○適応策調査研究の現状

「答申」は、平成 24 年に始まった社会資本整備重点計画へ反映され、気候変化への適応策と緩和策が国土交通省の重要な政策となっている。社会資本整備審議会河川分科会においては、今後の河川管理の在り方について制度や技術等の面から幅広く議論されている。しかし、これらは実効性というよりも政策としてどう考えるかということに留まり、具体的な適応技術をどうするかというレベルには至っていない。これは、本省主導の委員会では従来のものとのつながりが気になって十分成し得ないことであり、国総研が中心となって自由な立場で検討するべきことである。超過洪水への適応技術と現在行われている治水計画とのつながりどうするのか、まず河道のなか、施設での対応についてどう考えるのかについて議論する。

○国総研の「気候変動適応策に関する研究」に期待すること

国総研の役割は、社会資本整備の中の大きな政策課題を、特に技術面で牽引することである。したがって、国総研には以下のようなことが期待される。

(1) 個々の技術開発に止まらず、それらの開発技術が統合化されると重要な技術政策となるような大きな枠組みで進めること。

(2) 技術開発の成果が、技術政策となるように、制度や指針の形をとることを常に考えるべきである。

(3) 新しい課題に対応できない既存の河川技術は英断を盛って捨て、新しい考えに基づく技術を開発するように努めるべきである。優れた総合化技術は、構成するパーツ技術もまた優れたものでなければならない。

○優先度を持って進めなければならない技術開発

「答申」にあるように、現在の整備レベルが不十分なため、超過外力が頻繁に発生し、計画レベルの安全性を確保できていない河川については、優先的に治水施設による適応技術の検討がなされなければならない。ここでは、「施設による適応策」について述べる。

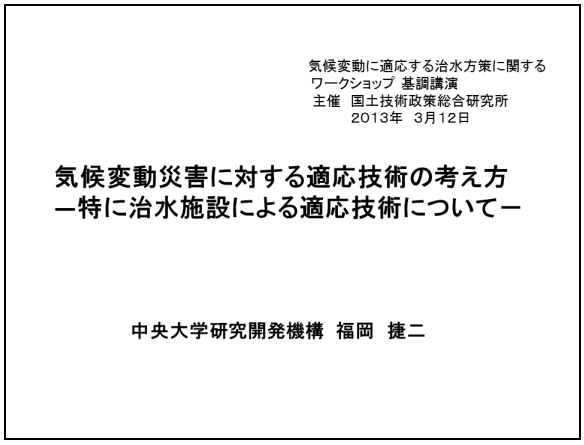
(1) 異なるスケールから構成される河道の水理現象を総合化する河川技術の必要性がある。河川の水理現象のスケールは広範囲で重層構造から成っている。現在の河川技術の中心は、河道をシステムで見るよりもパーツを説明しようとする技術である。今後は、解析精度を高めるためにも、多様なスケールの現象を取り込み河道全体の水理現象を総合的に解明できる解析法（準三次元一般底面解析法）を用いることが望ましい。この解析法は、超過洪水を考慮する場合には、特に必要と考えられる。

(2) 利根川では、これまで幾多の大洪水を受けて治水計画を改定し、拡幅、浚渫、築堤等の河川改修が行われてきた。気候変動により外力が大きくなった場合について、河道を掘って大丈夫か、広げて大丈夫かを検討もせずに、ただ河道の流下能力を増やせばよいというのでは問題がある。今までやってきた河川改修がどんな意味を持っているのかを考えて、今後の河道改修を行わなければならない。

(3) 利根川の例では、河川改修の結果、平成 19 年 9 月の洪水では、摩擦速度の縦断分布が一様勾配の分布になり、土砂がかなり一様に移動するようになった。しかし、整備計画、基本方針の流量になるとそうはいかない。流量が増えれば、流下能力だけを確保すればよいということにはならない。

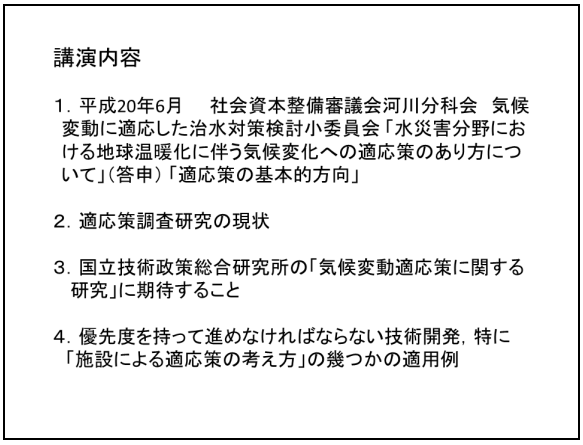
(4) 谷底平野を流れる河川の大洪水時の流水幅から極値流量、比流量の推算。気候変動モデルに基づく降雨量等の極値の算定だけでなく、地形や地質等の痕跡から極値を推算することも考えられてよい。

○発表資料


気候変動に適応する治水方策に関する
ワークショップ 基調講演
主催 国土技術政策総合研究所
2013年 3月12日

気候変動災害に対する適応技術の考え方
ー特に治水施設による適応技術についてー

中央大学研究開発機構 福岡 捷二

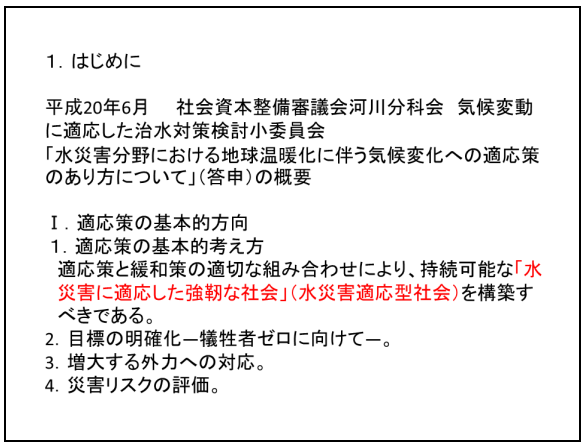

講演内容

1. 平成20年6月　社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」(答申)「適応策の基本的方向」

2. 適応策調査研究の現状

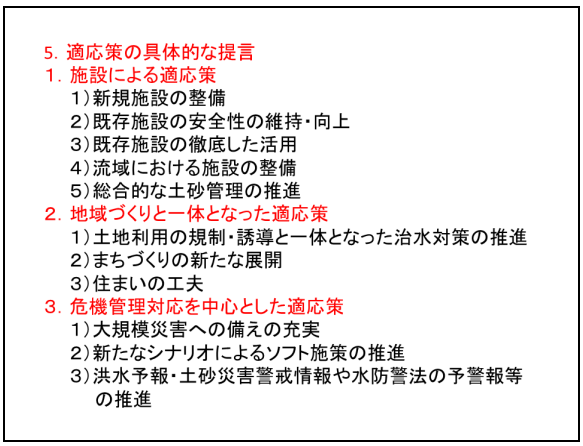
3. 国立技術政策総合研究所の「気候変動適応策に関する研究」に期待すること

4. 優先度を持って進めなければならない技術開発，特に「施設による適応策の考え方」の幾つかの適用例


1. はじめに

平成20年6月　社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会
「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」(答申)の概要

Ⅰ. 適応策の基本的方向
1. 適応策の基本的考え方
適応策と緩和策の適切な組み合わせにより、持続可能な「水災害に適応した強靭な社会」(水災害適応型社会)を構築すべきである。
2. 目標の明確化ー犠牲者ゼロに向けてー。
3. 増大する外力への対応。
4. 災害リスクの評価。


5. 適応策の具体的な提言
1. 施設による適応策
1)新規施設の整備
2)既存施設の安全性の維持・向上
3)既存施設の徹底した活用
4)流域における施設の整備
5)総合的な土砂管理の推進
2. 地域づくりと一体となった適応策
1)土地利用の規制・誘導と一体となった治水対策の推進
2)まちづくりの新たな展開
3)住まいの工夫
3. 危機管理対応を中心とした適応策
1)大規模災害への備えの充実
2)新たなシナリオによるソフト施策の推進
3)洪水予報・土砂災害警戒情報や水防警法の予警報等の推進

（5）. 渇水リスクの回避に向けた適応策
　需要マネジメントによる節水型社会の構築
　緊急的な水資源の確保
　水資源供給施設の徹底活用・長寿命化等
（6）. 河川環境の変化への適応策
　気候変化による影響のモニタリングの強化
6. 不確実性のある気候変化の適応策を講ずるにあたっての主要な課題
・気候変化による外力の変化の把握（予測、調査、観測、分析等）
・災害リスクの評価方法及び評価結果の公表
・流域等での安全確保の考え方と進め方
・河川生態系や水・物質循環系への影響予測と評価の方法.

Ⅱ. 適応策調査研究の現状

「答申」は、平成24年に始まった社会資本整備重点計画へ反映され、気候変化への適応策と緩和策が国土交通省の重要な政策となっている。

社会資本整備審議会河川分科会においては、現在「安全を持続的に確保するための今後の河川管理の在り方」の中で制度、技術のあり方、超過洪水対策のあり方等を含め幅広く議論されているところである。

しかし、実効性のある技術政策とするための適応技術への展開が大幅に遅れている。特に、現在の計画内での治水技術と超過洪水への適応技術のつながりをどうすべきかについては十分な考え方が示されていず、早急な検討がなされなければならないところである。

Ⅲ. 国総研の気候変動適応策研究に期待すること。

国総研による適応策研究をベースにワークショップが開かれ、適応技術の方向性について議論されることは大きな意味を持つ。国総研の役割は、社会資本整備の中の大きな政策課題を、特に技術面で牽引することにあり、今回の検討成果が期待される。

1. 個々の技術開発を行うことは重要であるが、それらの開発技術が統合化されると重要な技術政策となるような大きな枠組みで進めること。
2. 技術開発の成果が、技術政策となるように，法律、制度、技術指針の形をとることを常に考えるべきである。
3. 新しい課題に対応できない既存の河川技術は英断を持って捨て、新しい考えに基づく技術を開発するように努めるべきである。優れた総合化技術は、構成するパーツ技術もまた優れたものでなければならない。

Ⅳ. 優先度を持って進めなければならない技術開発について

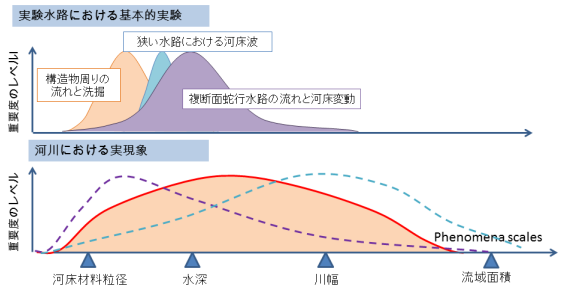
ここでは、平成20年の社会資本整備整審議会答申「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」の中で、I.5 「治水適応策の具体的な提言」で示された「施設による適応策」を中心に議論する。

現在の整備レベルが十分でないために超過する洪水外力が頻繁に発生したり、計画レベルの安全性を確保できていない河川については、優先的に治水施設による適応技術の検討がなされなければならない。

1. 異なるスケールから構成される河道の水理現象を総合化する河川技術の必要性

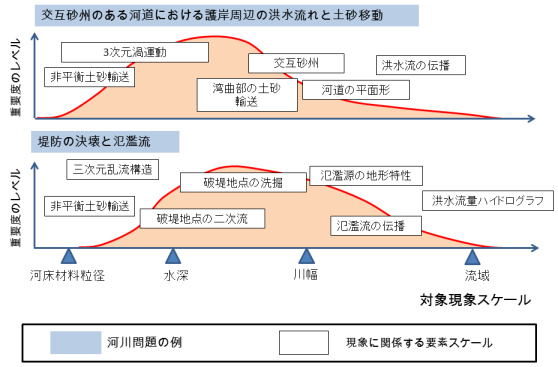
河川は、山地域から海岸域まで長大で地形変化が大きく、そのため洪水流と土砂移動現象を支配するスケールが異なっている。現在の河川技術は、パーツを説明しようとする技術であり、河道全体を総合化する河川技術となり得ていない。大小異なるスケールから構成されている河道という施設の中で，スケールが異なることによって起こる種々の水理現象を説明し，さらに総合的に解明できる解析技術、計画技術、設計技術でなければならない。
大洪水のような大きな外力が作用するときの河道全体の概括的な水理現象の解析には一次元，二次元解析法が用いられるが，河道の湾曲部や，堤防・護岸，堰等，構造物の周辺等特に危険性が高いと考えられる区間の流れや河床変動の解析等にはこれでは不十分であり，結果として河道全体としての解析精度が低くなる.

大小スケールで構成される流れ場の統合シミュレーション技術

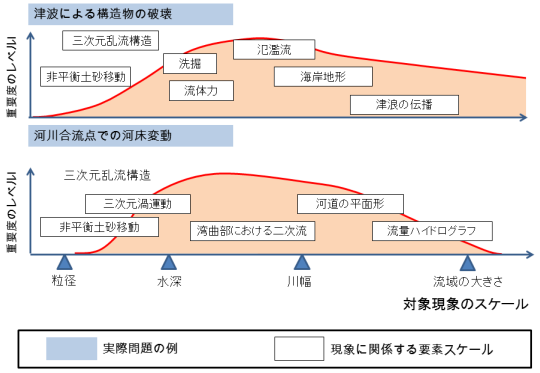


- 大小スケールの統合化シミュレーション技術の発展のために，種々の要素スケール現象のシミュレーション法が確かめなければならない。
- それぞれの要素スケールへのシミュレーションの適合性が基本実験で調べられている。現地実験、現地観測が種々の要素スケールの相互作用を明らかにするために必要とされる。

河道で起こる大小スケールの水理現象 [1]



河道で起こる大小スケールの水理現象[2]

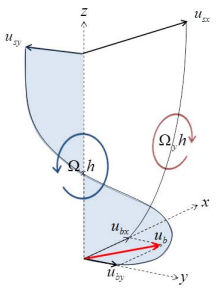


今後採用すべき解析法は，危険が予想される区間について精度の高い解析を可能にし，かつ，河川の広い領域から狭い領域まで，大きな外力から小さな外力までを含む解析が可能な解析法（準三次元一般底面解析法）が望ましい．

この解析方法には，河道の空間スケールの違いによるすべての必要な解析要素がほぼ含まれ、検討できるようになっている。そのため，一次元，二次元的な流れの河道区間は，そのような解析が行われ，三次元的な解析が必要な流れと土砂移動の区間では，そのような解析が実行されるように，洪水流と河床変動が河道全体で広がりを持って，連続的に計算されることになる．

この解析法は，超過洪水を計画に取り入れる場合には，特に必要であると考えられる．

底面流速解析法の概要



•渦度の定義式

$$\int_{zb}^{zs}\omega_x dz=\int_{zb}^{zs}\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right)dz$$

$$\int_{zb}^{zs}\omega_y dz=\int_{zb}^{zs}\left(\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}\right)dz$$

↓ 渦度の水深積分

$$u_{bx}=u_{sx}-\Omega_y h-\frac{\partial Wh}{\partial x}+w_s\frac{\partial z_s}{\partial x}-w_b\frac{\partial z_b}{\partial x}$$

$$u_{by}=u_{sy}+\Omega_x h-\frac{\partial Wh}{\partial y}+w_s\frac{\partial z_s}{\partial y}-w_b\frac{\partial z_b}{\partial y}$$

$\Omega_i h$:水深積分渦度，u_{si}:水表面流速，u_{bi}:底面流速，w_s, w_b:水面，底面の鉛直方向流速，Wh:水深積分鉛直方向流速

広域の流れ+局所流れ+土砂移動
■水深積分モデルの枠組みで三次元性を考慮

基礎方程式

1. 水深積分連続式：h
2. 水深積分運動方程式：U_i
3. 水深積分渦度方程式：Ω_i
4. 水表面流速の運動方程式：u_{si}
5. 水深積分鉛直方向流速の時間変化量のポアソン方程式：W
6. 底面圧力の方程式：dp_b
7. 乱れエネルギーkの輸送方程式：ν_t

1. 水深積分連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial U_j h}{\partial x_j}=0$$

2. 水深積分運動方程式

$$\rho\left(\frac{\partial U_i h}{\partial t}+\frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j}\right)=-\rho g h\frac{\partial z_s}{\partial x_i}-\frac{\partial h dp_b}{\partial x_i}-dp_b\frac{\partial z_b}{\partial x_i}-\tau_{bi}+\frac{\partial h\tau_{ij}}{\partial x_j}$$

3. 水深積分渦度方程式

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t}=R_{ei}+\frac{\partial h D_{eiy}}{\partial x_j}+P_{ei}$$

$$R_{ei}=u_{sj}\omega_{sz}-u_{si}\omega_{sz}$$

$$D_{eiy}=-U_j\Omega_i+U_i\Omega_j+\overline{\omega_j' u_i'}-\overline{\omega_i' u_j'}+\frac{\nu_t}{\sigma_\rho}\frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j}$$

$$P_{ei}=C_{p\omega}\nu_b(\omega_{sei}-\omega_{si})/h$$

4. 水表面流速の運動方程式

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t}+u_{sj}\frac{\partial u_{si}}{\partial x_j}=-\left\{g-\left(\frac{\partial dp}{\partial z}\right)_{z=z_s}\right\}\frac{\partial z_s}{\partial x_i}+P_{si}$$

$$P_{si}=\frac{2\nu_t}{h^2}\left\{12(u_{sei}-u_{si})-(3\Delta u_i-6\Delta u_i)\right\}$$

5. 水深積分鉛直方向流速の時間変化量のポアソン方程式

$$k_1\frac{\partial}{\partial x_i}\left(h^2\frac{\partial\phi}{\partial x_i}\right)+\phi^p-\phi=0$$

$$k_1=1/20,\quad \phi=(Wh)^{n+1}-(Wh)^n,\quad \phi^p=(Wh)^p-(Wh)^n$$

6. 底面圧力の方程式

$$\frac{\partial hWU_j}{\partial x_j}=\frac{dp_b}{\rho}-\tau_{bi}\frac{\partial z_b}{\partial x_j}$$

7. 乱れエネルギーkの輸送方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_t h}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+P_k-\varepsilon$$

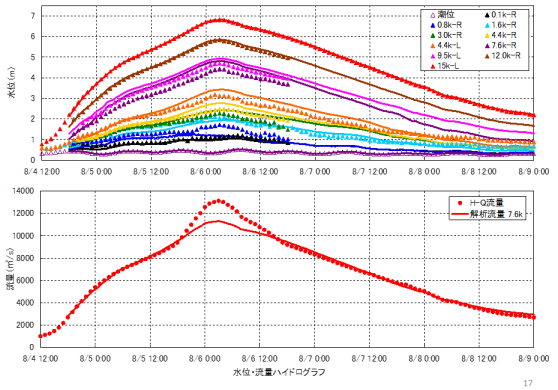
$$\nu_t=0.09k^2/\varepsilon,\quad \varepsilon=1.7k^{3/2}/h$$

底面流速の定義式

$$u_{bi}=u_{si}\pm\Omega_j h-\left(\frac{\partial Wh}{\partial x_i}-w_s\frac{\partial z_s}{\partial x_i}+w_b\frac{\partial z_b}{\partial x_i}\right)$$

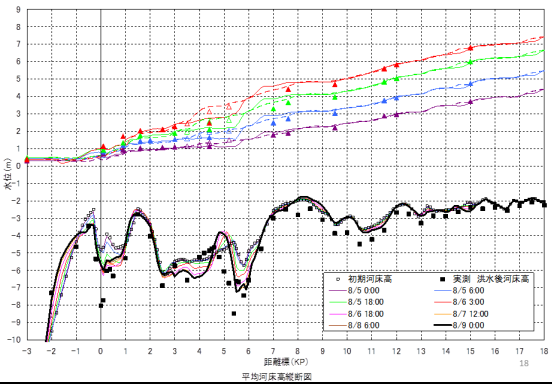
石狩川河口部における洪水時水面形変化および河床変動

解析結果　水位・流量ハイドログラフ



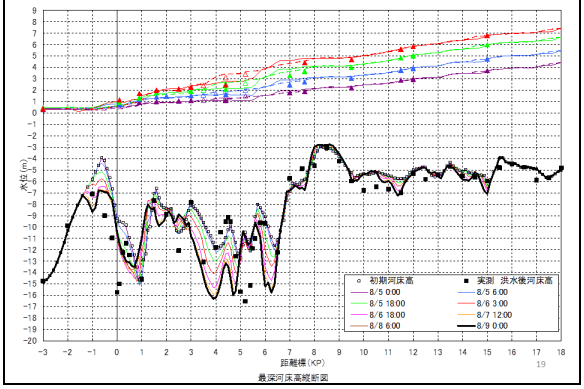
解析結果　低水路平均河床高縦断図

➢5.0km付近湾曲部等の一部を除いて、全体的に河床変動傾向を再現できている。

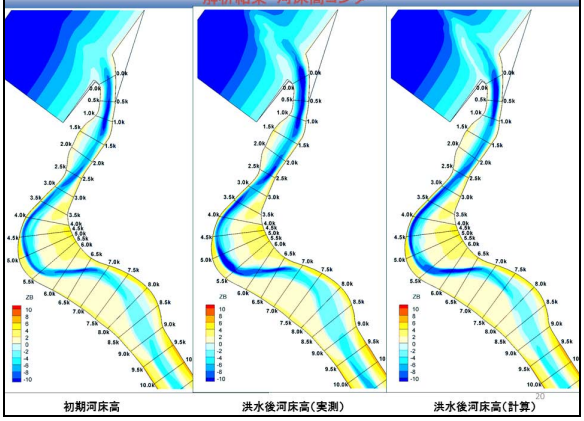


解析結果　最深河床高縦断図

➢4.0km～6.0km付近低水路蛇行部での洗掘位置と洗掘量の再現性に課題がある。



解析結果　河床高コンター



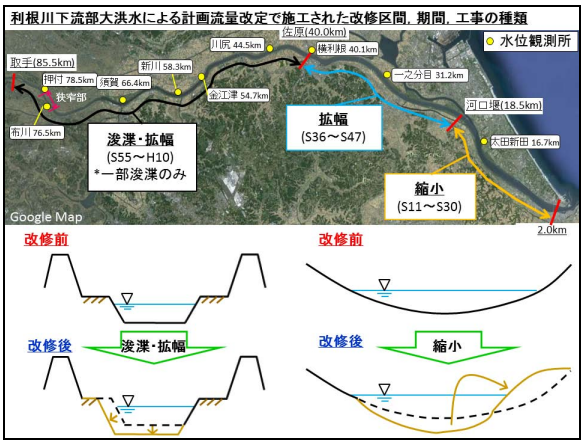
2. 現在までの河道改修の経緯と改修の効果について、各年代の改修の契機となった洪水流に対する河道改修をデータに基づいて調べ、今後起こるべき洪水に対する改修の在り方の検討に活かす。

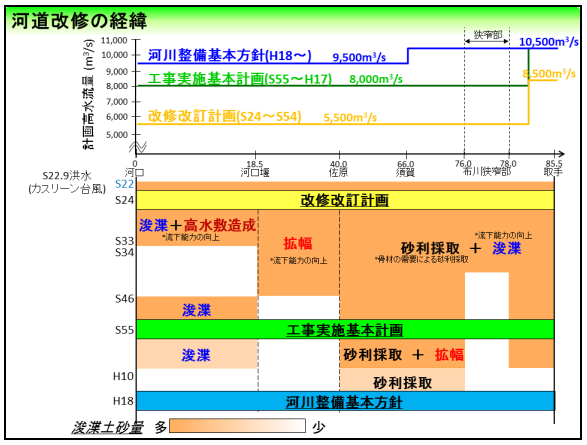
利根川下流河道（河口～取手85．5km）の治水計画，改修工事の変遷を例に示す．

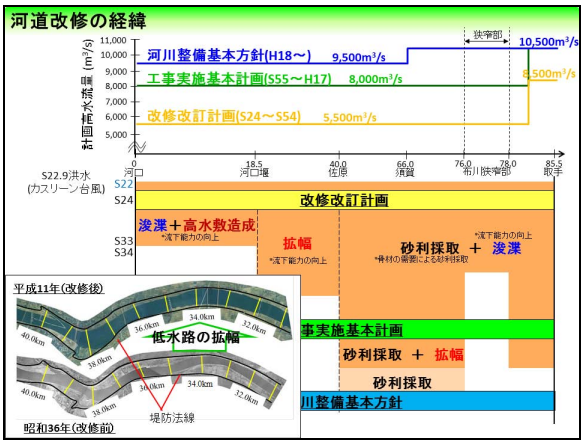
・利根川は．これまで幾多の大洪水を受けて治水計画を改定し，膨大な改修費を投入し拡幅，浚渫，築堤等の河道改修工事が行なわれてきた．

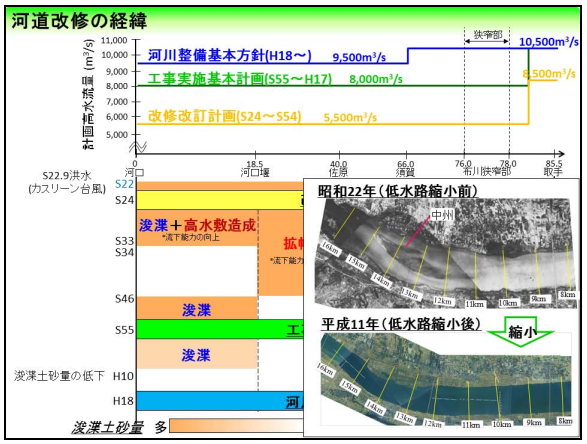
過去の改修工事（1947年～2006年）がどのような経緯で，どのような手段で行われてきたかを，経年的に集められた洪水流と改修データに基づき検討した．

利根川下流対象区間









3. 現況河道、計画河道について、対象流量規模に対する横断面形、川幅について検討し、超過洪水に対する河道施設としての望ましい断面形等の検討に資する。

ここでは、利根川下流における昭和36年から平成19年までの対象洪水流量に対する望ましい河道の横断面形、川幅について検討し、これまでの改修の効果を示す。

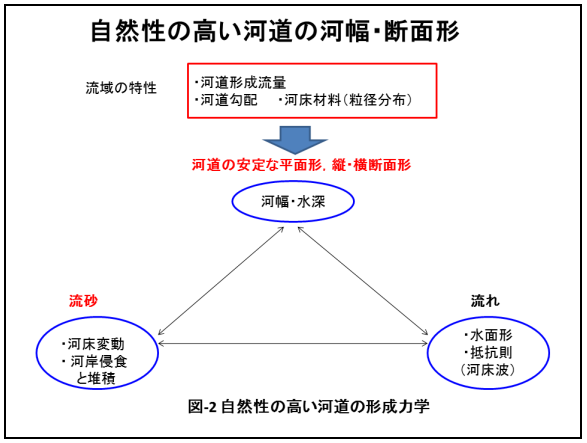
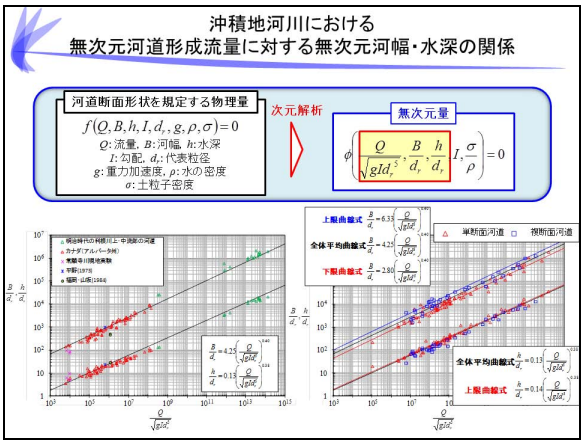
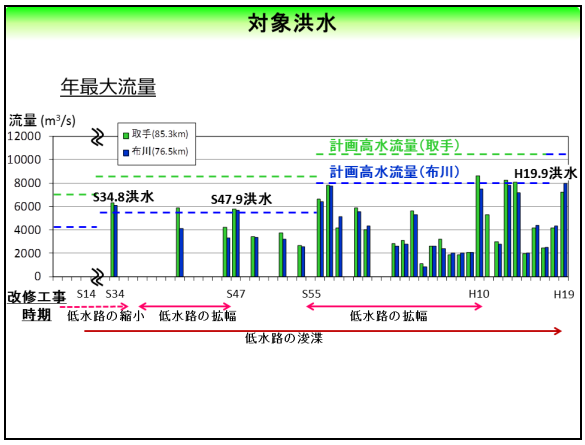
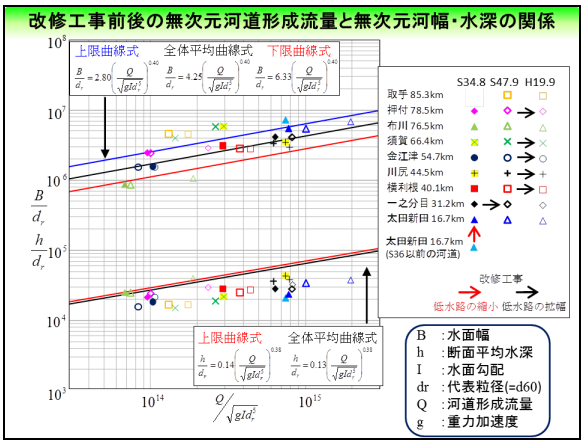
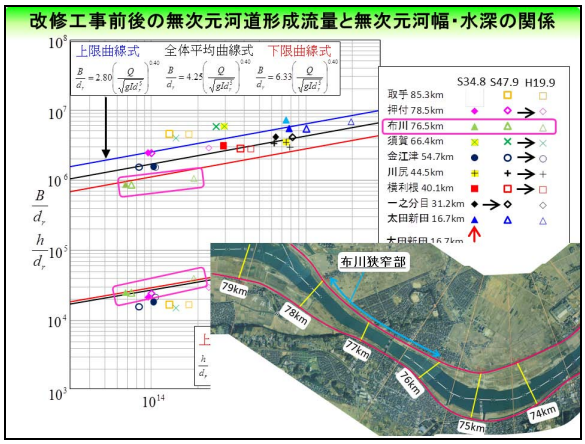


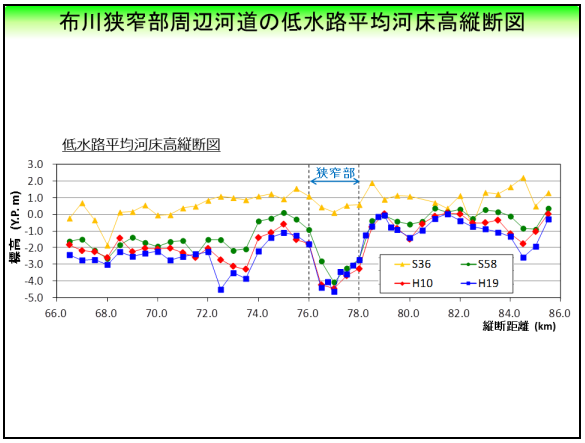
図-2 自然性の高い河道の形成力学

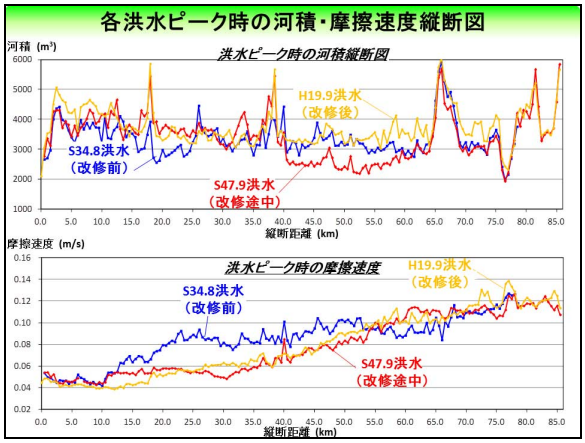

沖積地河川における
無次元河道形成流量に対する無次元河幅・水深の関係
河道断面形状を規定する物理量
$f(Q,B,h,I,d_r,g,\rho,\sigma)=0$
Q:流量, B:河幅, h:水深
I:勾配, d_r:代表粒径
g:重力加速度, ρ:水の密度
σ:土粒子密度
次元解析
無次元量
$\phi\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^2}},\frac{B}{d_r},\frac{h}{d_r},I,\frac{\sigma}{\rho}\right)=0$
上限曲線式
全体平均曲線式
下限曲線式
単断面河道
複断面河道


対象洪水
年最大流量
流量 (m³/s)
取手(85.3km)
布川(76.5km)
計画高水流量(取手)
計画高水流量(布川)
H19.9洪水
S34.8洪水
S47.9洪水
改修工事時期
S14
S34
S47
S55
H10
H19
低水路の縮小
低水路の拡幅
低水路の拡幅
低水路の浚渫


改修工事前後の無次元河道形成流量と無次元河幅・水深の関係
上限曲線式
全体平均曲線式
下限曲線式
S34.8 S47.9 H19.9
取手 85.3km
押付 78.5km
布川 76.5km
須賀 66.4km
金江津 54.7km
川尻 44.5km
横利根 40.1km
一之分目 31.2km
太田新田 16.7km
太田新田 16.7km
(S36以前の河道)
改修工事
低水路の縮小
低水路の拡幅
B :水面幅
h :断面平均水深
I :水面勾配
dr :代表粒径(=d60)
Q :河道形成流量
g :重力加速度


改修工事前後の無次元河道形成流量と無次元河幅・水深の関係
上限曲線式
全体平均曲線式
下限曲線式
S34.8 S47.9 H19.9
取手 85.3km
押付 78.5km
布川 76.5km
須賀 66.4km
金江津 54.7km
川尻 44.5km
横利根 40.1km
一之分目 31.2km
太田新田 16.7km
布川狭窄部
79km
78km
77km
76km
75km
74km


布川狭窄部周辺河道の低水路平均河床高縦断図
低水路平均河床高縦断図
狭窄部
S36
S58
H10
H19
縦断距離 (km)

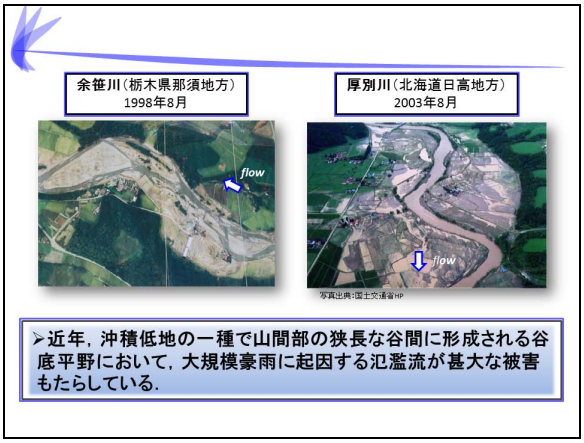

各洪水ピーク時の河積・摩擦速度縦断図
河積 (m³)
洪水ピーク時の河積縦断図
H19.9洪水
(改修後)
S34.8洪水
(改修前)
S47.9洪水
(改修途中)
縦断距離 (km)
摩擦速度 (m/s)
洪水ピーク時の摩擦速度
H19.9洪水
(改修後)
S34.8洪水
(改修前)
S47.9洪水
(改修途中)
縦断距離 (km)

4．谷底平野を流れる河川の大洪水時の流水幅から極値流量，比流量の推算

降雨や流量の極値を推算することは，地球温暖化に伴う気候変化への適応策を検討するうえで極めて重要である．RCM,GCM等に基づく将来の降雨量算定は，適応策の検討のために期待の大きいところである．

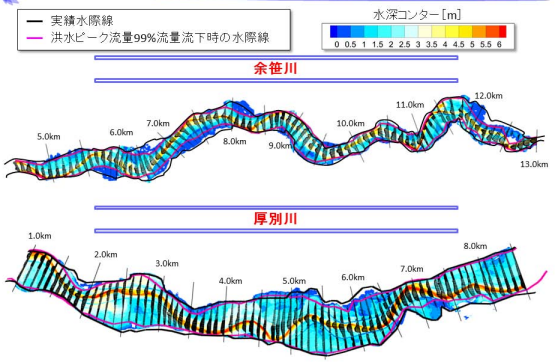
歴史上発生した大津波の規模の推定手法と同様に，歴史年代的に地上に刻まれた地形，地質等の痕跡を調査し，極値流量等を推算することも考えられてよい．

ここでは，近年，谷底平野で起こった洪水水害を検証し，それらの考察から現在の谷底平野の谷幅を創った流量を推算し，谷底平野流域を流れた極値流量，比流量を求める．

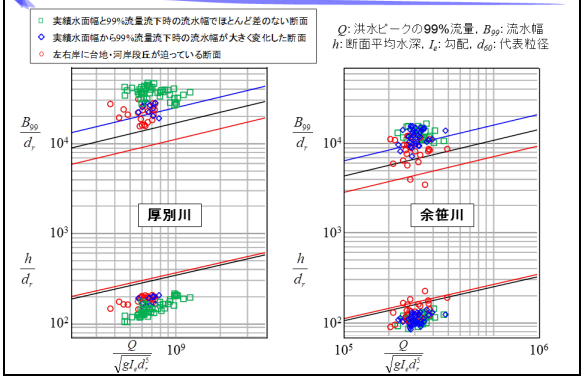


➢近年，沖積低地の一種で山間部の狭長な谷間に形成される谷底平野において，大規模豪雨に起因する氾濫流が甚大な被害もたらしている．

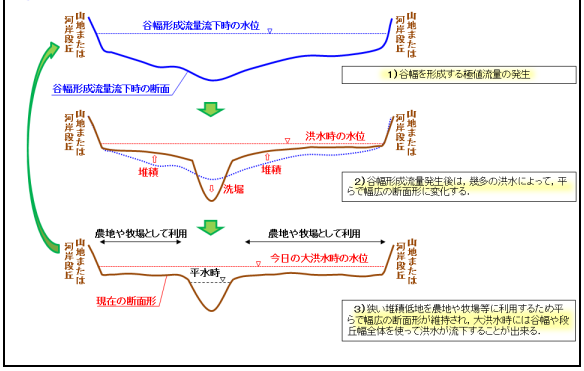
余笹川，厚別川における洪水時の流水幅



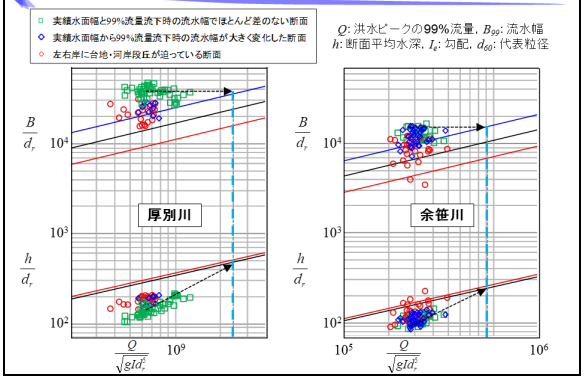
谷底平野河川の無次元流量と無次元流水幅・水深の関係

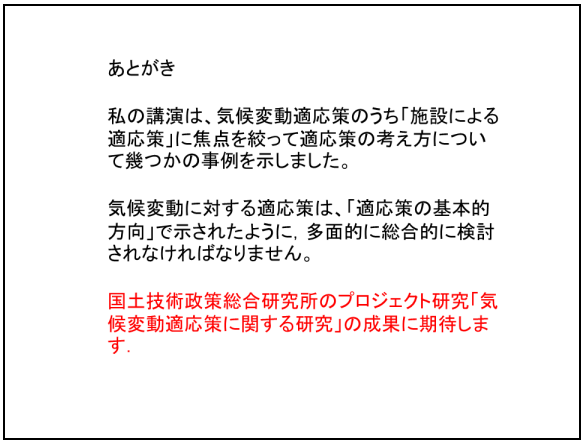


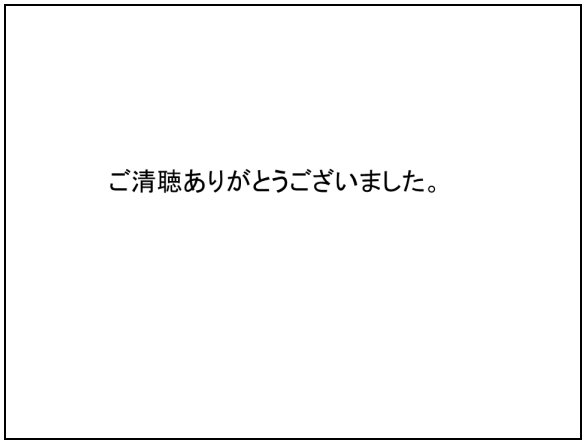
現在の谷底平野形成過程の模式図



谷幅を形成する極値流量の推算







2.1.2 基調講演２

題目：気候変動影響評価研究の進展

講演者：中北英一（京都大学防災研究所・教授）

講演内容：

○適応への考え方

不確定だからといって適応を遅らせていると将来の適応が不可能あるいは困難になる危険性がある。将来の気候変動に対して適応するためには、「はっきりとはわからないけど進める」というスタンスが必要。

○気候モデルによる出力とは

（社会経済の違いにより）CO2 排出シナリオが複数存在し、それをもとに将来予測がなされる。将来予測を行う全球気候モデルは 20～30 個程あり、モデルにより将来の気候変化予測にも幅がある。これまで、共生プログラム、革新プログラム、創生プログラムという文部省主導のプログラムで、地球全体の将来の気候の予測精度を高めるための取り組みを行なってきた。革新プログラムで初めて自然災害の影響評価が含まれるようになった。現在気候 25 年間、近未来 25 年間、21 世紀末 25 年間の全球 20 キロメッシュの 1 時間ごとの出力値が得られるようになり、河川流量も含めて影響評価ができるようになった。

気候予測と天気予報は異なり、将来の気候値（例えば、100 年確率の降雨強度や台風の到来回数）がどれくらいになるかを予測すること、天気予報は、そのときの気温とか降水量を当てようとするもの。

革新プログラムで、台風を表現できるモデルで時間雨量が出力できるようになって、極端現象の災害評価が可能となった。また、気候モデルから出力されるようになって初めて、現実的な河川流量や水位の算定が可能となった。

モデルの解像度に関して、60 キロのモデルでは台風の経路は表現できても、20 キロのモデルでないと中心気圧や最大風速の極端な値は表現できない。そのかわり、60 キロのような粗いモデルだと、標本数を増やして、確率情報の精度を向上させることができる。

○水災害に関係する気候モデル出力の特徴

気候予測モデルと観測値では、トレンドは一致している。水災害に関連する大雨の回数はどちらも増加している。台風に関しては、発生頻度は減少するが、強い台風が発生する可能性が増加する傾向が見られる。

○水災害に関連する諸量の将来変化

集中豪雨、深層・表層崩壊、実効降水量、洪水流量、渇水流量や高潮など様々な観点から水災害リスクについて、気候予測モデルを用いて検討した。例えば、梅雨期の集中豪雨の回数は増加するという分析結果が出ている。

○不確定性について

気候変動モデルによる将来予測では、おおよそ将来危険になることは大体言えるが、外力の設計値として設定するためにはどれくらいのレベルになるかということに関しては、不確定性がある。気候予測モデルの不確定性の他にも、CO2 シナリオの不確実性、偶然の不確実性（たまたま予測範囲で極端な災害が生じなかった）がある。たかだか 25 年間の出力では、再現期間 10 年間程度の農業の水利用という観点では確度の高いことが言えるが、100 年確率ぐらいの再現期間に対応する洪水流量等の極端現象は高い不確定性を有しているため、設計値としては使えない。

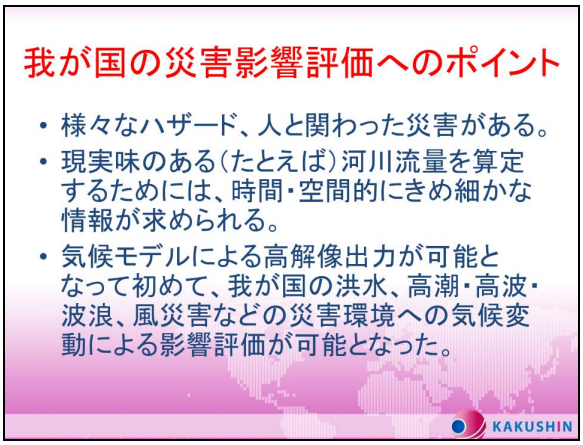
○最悪シナリオについて

気候変動に影響評価に関して、同じ頻度に対してデザイン値は上昇することは確からしいが、どこまで上昇するかについてはかなりの幅をもっている。その広い幅の上にさらに最悪なものがあるという最悪シナリオを考える必要がある。最悪シナリオについてはある程度コンピュータによって、シミュレーションできるようになってきている。例えば、台風の進路を最悪コースを通らせるようにする等。台風のコースをずらして大雨や河川流量を算定すると、現在の治水目標の２倍の流量が算定される場合もあり、確率評価（安全度評価)だけでなく、最悪シナリオベースの評価を行い、最悪の場合の適応というものを考えていく必要があると考えられる。

○創生プログラムへ向けて

創生プログラムにおいて、より精度の高いモデルの構築、適応策創出の哲学・考え方（確率ベースで基本計画をやっていくのか、最悪シナリオといものを外からかぶせていくのか等）の構築を行なっていくことを目指す。

○発表資料



適応への考え方

- 不確定だからといって適応を遅らせていると将来の適応が不可能あるいは困難になる危険性がある。
- 実践を通しての適応：「はっきりとはわからないけど進める」
  - 専門家はまずこの認識を持つことが大事。
  - 「現在の進行も適応になる」以上の認識が必要。
  - この認識を、他省庁とも共同して、国民に理解してもらうように努める。
  - 温暖化の影響らしきものを国民に発信してゆく
  - 「具体的な実行があって助かった」を蓄積してゆく。
- 基本計画としての適応
  - 設計値（年確率値）にのみこだわるならまだまだ不確定性は高い。
  - だからこそ、最悪シナリオ（極端シナリオ）をどう計画に組み込んでいくか、という適応が重要。（設計値にという意味ではない）

KAKUSHIN

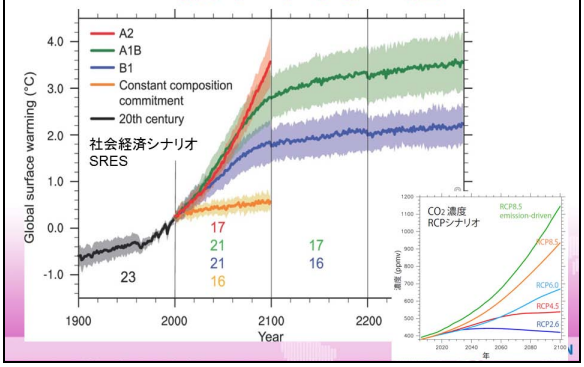
内　容

- ●気候モデルによる出力とは
- ●水災害に関係する気候モデル出力の特徴
- ●水災害に関連する諸量の将来変化
- ●不確定性について
- ●最悪シナリオについて
- ●創生プログラムの向けて

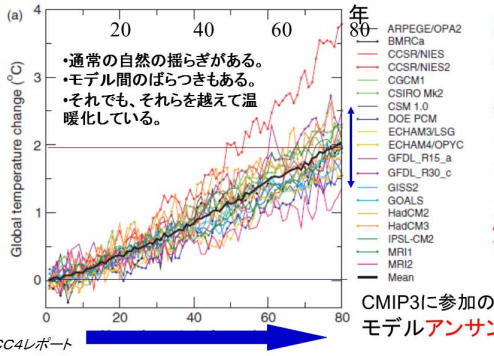
SOUSEI

KAKUSHIN

CO2排出シナリオの違い



CO2増加(1%/年)により、どの最新（最良の）気候モデルも、全球気温の上昇（平均1.5~2.5℃/100年）を予測

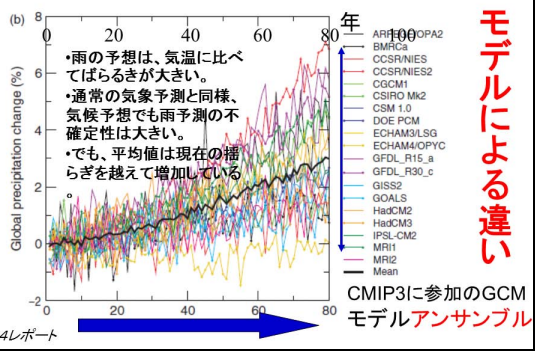


モデルによる違い

CMIP3に参加のGCMモデルアンサンブル

IPCC4レポート

CO2増加(1%/年)により、どの最新（最良の）気候モデルも、全球降水量の増加（平均2~3%/100年）を予測



モデルによる違い

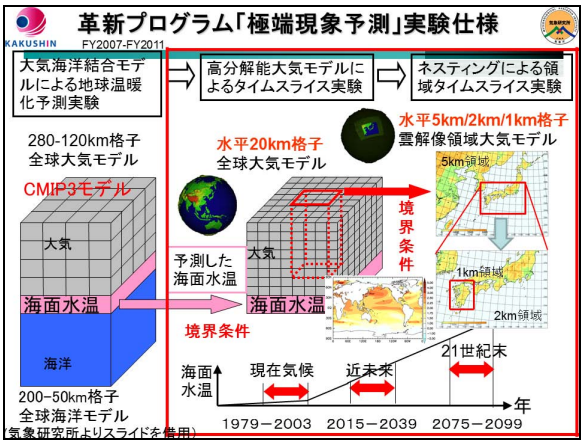
CMIP3に参加のGCMモデルアンサンブル

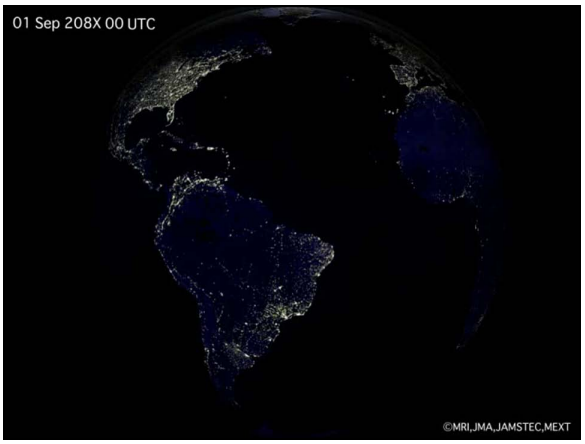
IPCC4レポート

共生、革新から創生プログラムへ

- **Kyousei(共生)Program:2002-2006**
  - **20kmRCM**（領域気候モデル）**(日雨量)**
- **Kakushin(革新)Program:2007-2011**
  - **20kmGCM**（全球気候モデル、時間雨量）
  - **5,2,1kmRCM (時間雨量、30分雨量、10分雨量)**
  - 自然災害への影響評価
- **Sousei(創生)Program:2012-2016**
  - アンサンブル情報を用いた影響評価（ハザード＋社会経済的）
  - 適応策への哲学、考え方の構築
  - 自然災害，水資源，生物生態系・生態サービス

KAKUSHIN



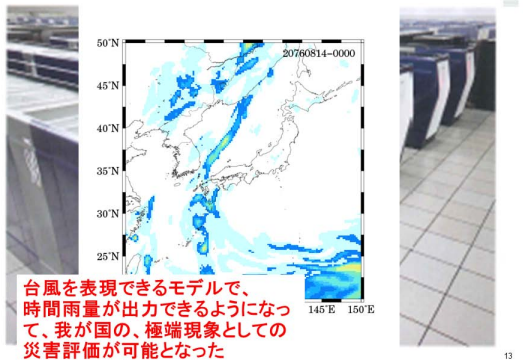


気象予測と気候予測との違い

（気象研究所よりスライドを借用）

■ 天気(気象)予報	■ 気候予測
• 大気の瞬間値を予測 たとえば、 2013年 3月5日15時の 気温 降水量	• 平均値など統計を予測 たとえば 2071年-2100年の30年平均 の 3月の 月平均気温 月平均降水量 日平均気温の発生頻度 日降水量の発生頻度

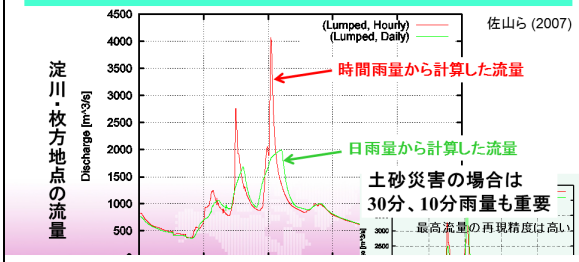
地球シミュレーターが推測する2076年8月後半



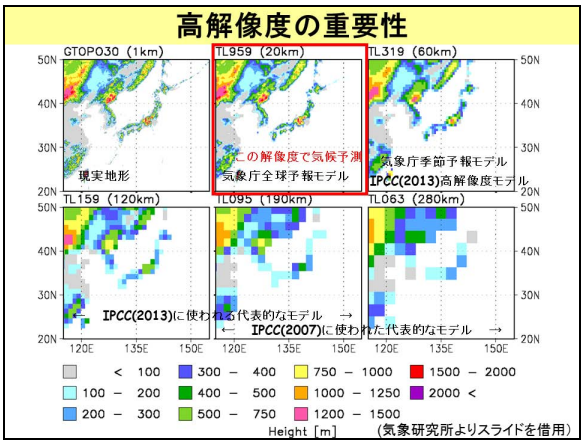
台風を表現できるモデルで、時間雨量が出力できるようになって、我が国の、極端現象としての災害評価が可能となった

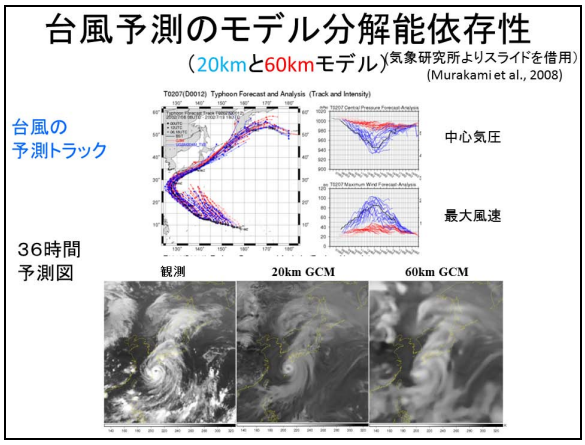
我国の災害評価における時間雨量の重要性

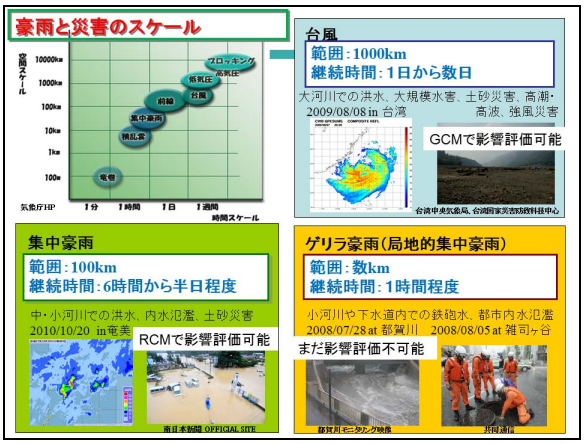
日雨量データの利用だけではピーク流量を半分に算定してしまう。

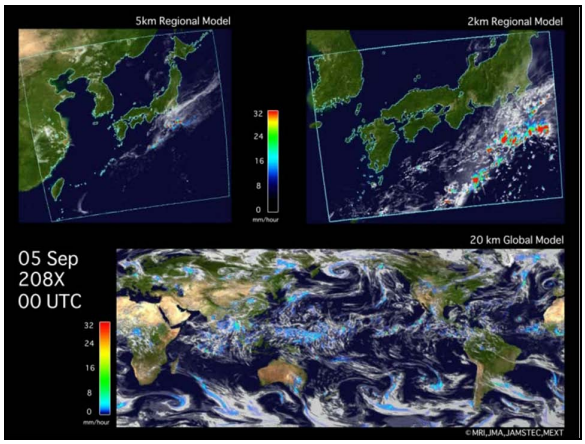


利根川や淀川といった大河川ですら毎時毎時の雨量情報が気候モデルから出力されるようになって初めて、現実味のある河川流量や水位の算定が可能になりました。





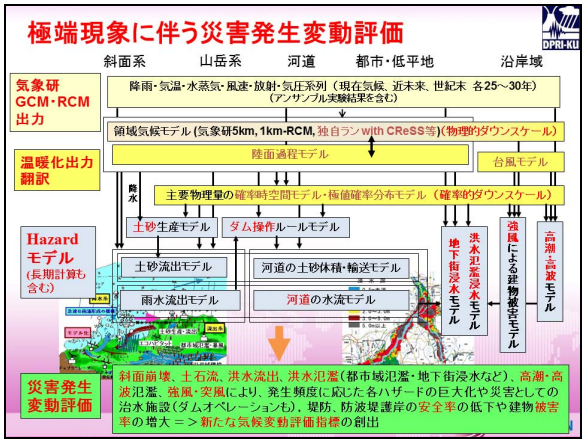




気象予測と気候予測との違い

（気象研究所よりスライドを借用）

■ 天気(気象)予報	■ 気候予測
• 大気の瞬間値を予測 たとえば、 2013年 3月5日15時の 気温 降水量	• 平均値など統計を予測 たとえば 2071年-2100年の30年平均 の 3月の 月平均気温 月平均降水量 日平均気温の発生頻度 日降水量の発生頻度

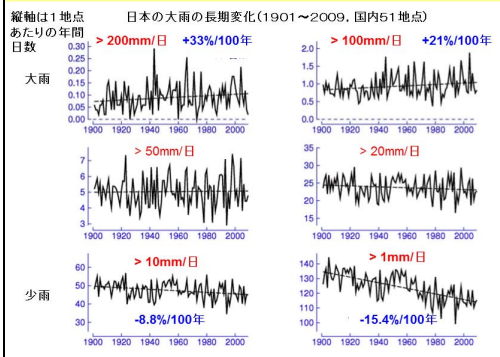


内　容

- 気候モデルによる出力とは
- **水災害に関係する気候モデル出力の特徴**
- 水災害に関連する諸量の将来変化
- 不確定性について
- 最悪シナリオについて
- 創生プログラムの向けて

SOUSEI　KAKUSHIN

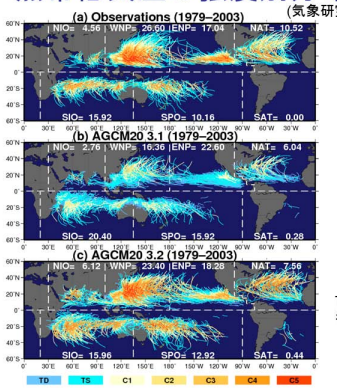
観測のトレンドと傾向は一致



（気象研究所よりスライドを借用）　藤部2011

熱帯低気圧の強度別分布図

（気象研究所よりスライドを借用）



観測

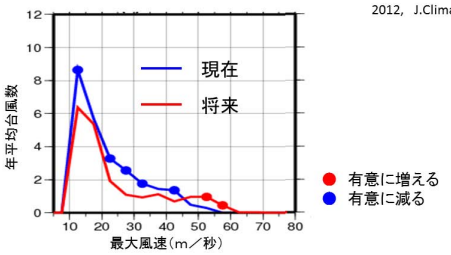
TL959L60
前期モデル

TL959L64
後期モデル

Murakami et al., 2012, J.Climate

強い台風が増加（前期モデル）

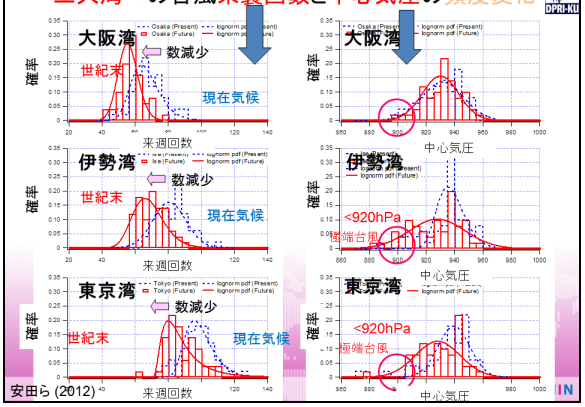
（気象研究所よりスライドを借用）



Murakami et al., 2012, J.Climate

台風の発生数は減るが、いったん発生すると、発達に必要な水蒸気が（気温が高いと）多いため、最大発達可能強度は強くなる

三大湾への台風来襲回数と中心気圧の頻度変化

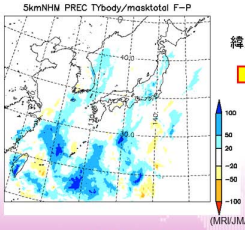


安田ら（2012）

台風によってもたらされる日本付近の降水の特性と将来予測

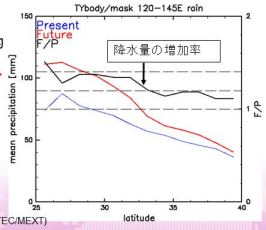
（気象研究所よりスライドを借用）

台風1個あたりの降水量の変化



緯度平均

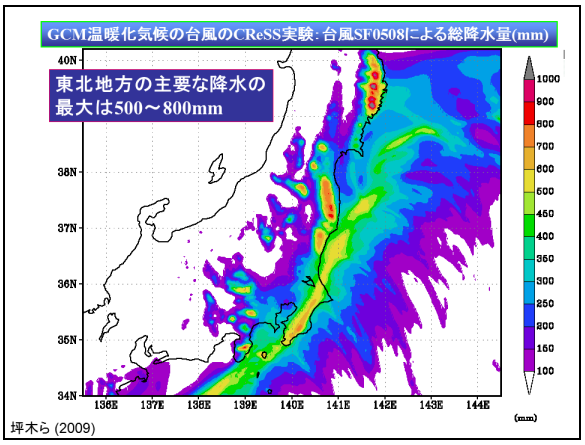
台風1個あたりの降水量の変化（緯度平均）



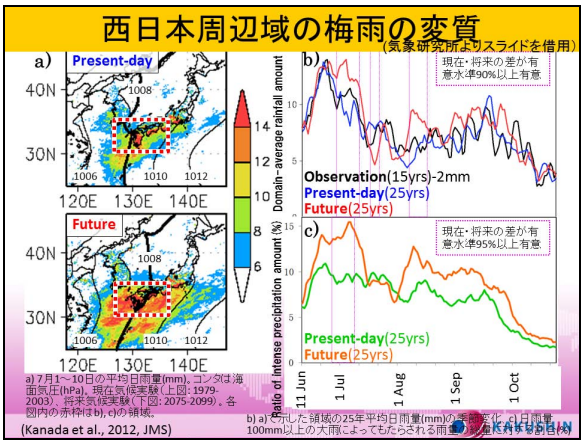
(MRI/JMA/JAMSTEC/MEXT)

21世紀末には台風一個あたりの降水量が増加
日本付近での降水量増加は約20～40%
ただしサンプル数が少ない→擬似温暖化実験

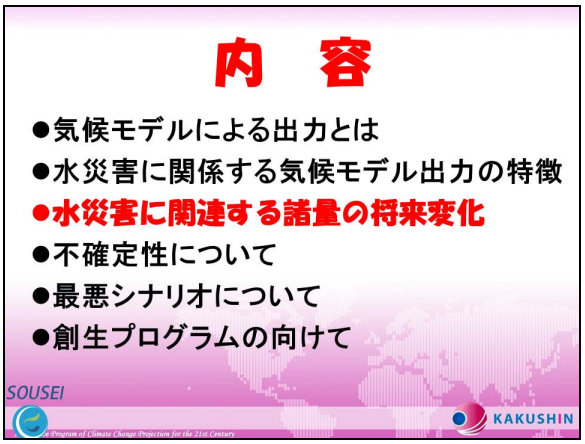
KAKUSHIN

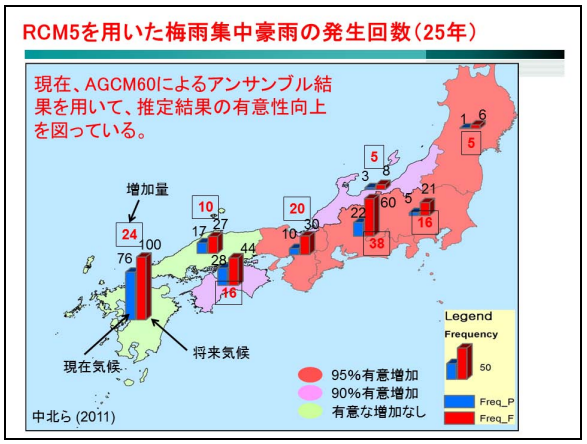


坪木ら (2009)

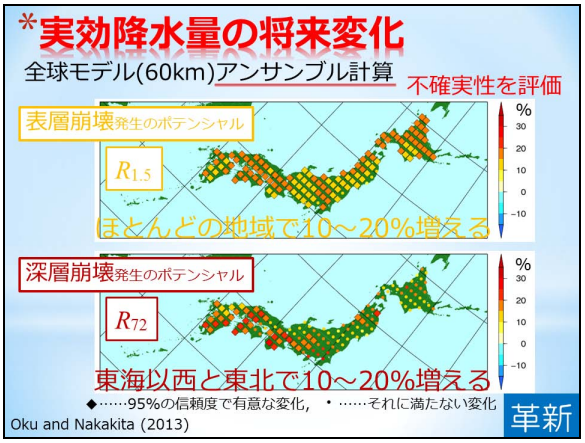


(Kanada et al., 2012, JMS)

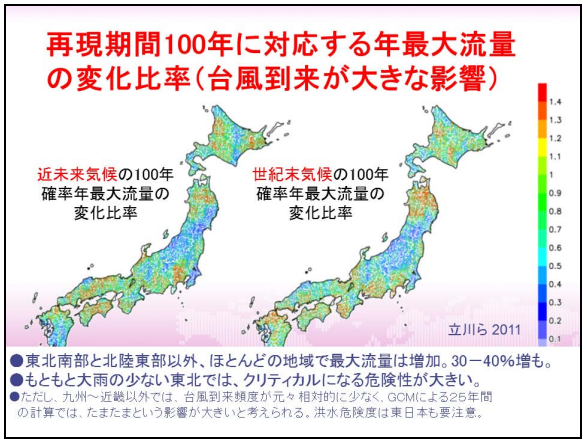




中北ら (2011)



Oku and Nakakita (2013)



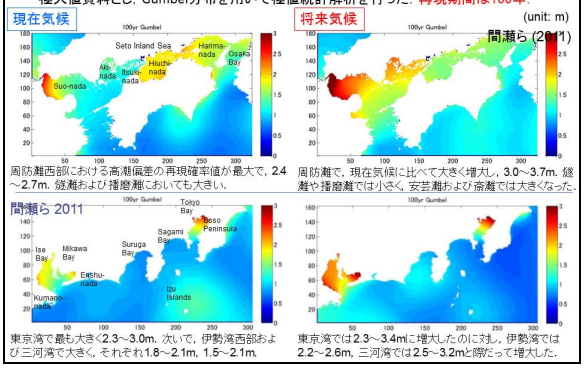
再現期間10年に対応する渇水流量の変化比率（台風が来ない事が大きな影響）

渇水流量：1年で約10番目に少ない、河川の一日の流量

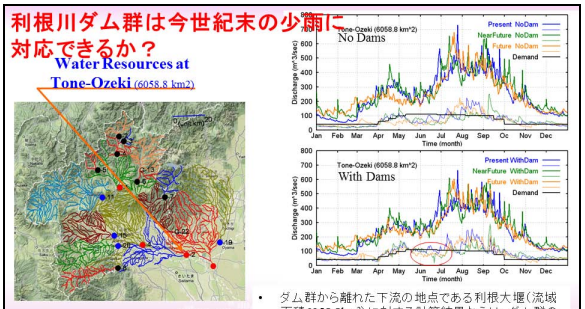
●北日本と中部山地以外では、渇水時の流量減少。渇水が深刻に。
●西日本では、洪水危険も増すし、渇水危険度も増す。
●ただし、九州～近畿以外では、台風到来頻度が元々相対的に少なく、GCMによる25年間の計算では、たまたまという影響が大きいと考えられる。

気候変動予測実験出力を直接用いた高潮リスクの評価

GCMデータを駆動力として高潮シミュレーションを実施．台風ごとの最大高潮偏差を極大値資料とし，Gumbel分布を用いて極値統計解析を行った．再現期間は100年．



利根川ダム群は今世紀末の少雨に対応できるか？



Water Demand
- Living water: 37.43 m^3/s
- Industrial water: 2.08 m^3/s
- Agricultural water:
  Apr~May 39.51 ~ 60.99 m^3/s
  May~Sep 111.62~186.71 m^3/s

Kimら, 2010

- ダム群から離れた下流の地点である利根大堰（流域面積6058.8km^2）に対する計算結果からは、ダム群の操作影響が少なくなることがわかる。
- 利根大堰地点では、ダム群操作にもかかわらず年最小流量が必要な水利用量に対して満足できない時期が現れる。そのため、新たな操作ルールの開発が必要とされる。

内　容

●気候モデルによる出力とは
●水災害に関係する気候モデル出力の特徴
●水災害に関連する諸量の将来変化
●**不確定性について**
●最悪シナリオについて
●創生プログラムの向けて

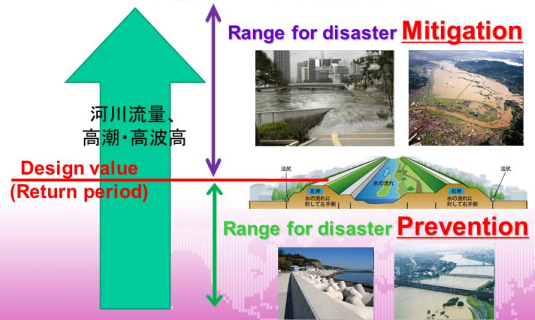
SOUSEI
KAKUSHIN

不確定性がまだまだある（1）

- 以上の気候変動影響評価としての計算結果は概算値である。特に、まれな（極端な）ハザードほど不確定性は高い。（もちろん、概算値とその精度が出るだけでも、飛躍的な進歩である）
- なぜなら、気候モデルによる世紀末までの出力の中には特定の河川や湾に対する最悪の台風がたまたま含まれない場合も想定されるから。

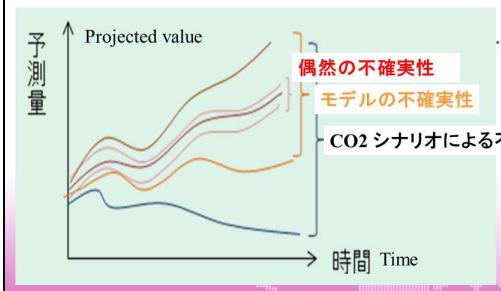
KAKUSHIN

Design value（確率値）



KAKUSHIN

GCM予測に潜む不確実性

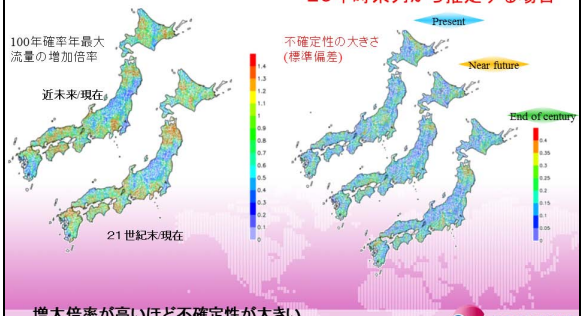


KAKUSHIN

年最大河川流量の増大推測の不確実性

100年確率値の不確実性(Jackknife 法による)

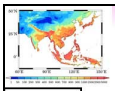
25年時系列から推定する場合



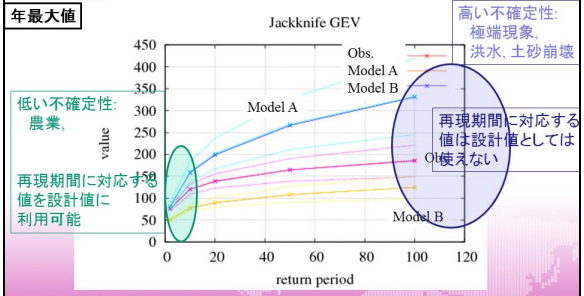
増大倍率が高いほど不確定性が大きい

KAKUSHIN

再現期間に対応する推定値の不確実性



年最大値



25年の時系列から算定

Konoshima and Nakakita (2010)

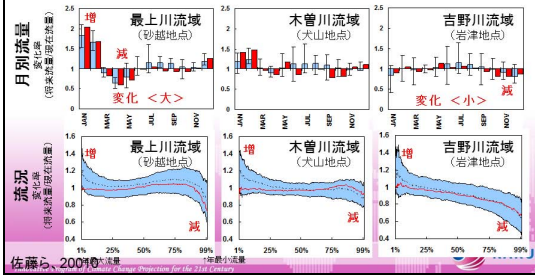
KAKUSHIN

河川流域の将来流況変化(マルチモデルによる評価)

赤色:AGCM20 (MRI-AGCM3.1S)
水色:CMIP3 (AOGCM-8model)

Present	Future
1981-2000	2081-2100

Model	MRI-AGCM20	INGV-SXG	MIROC3.2 (hires)	CSIRO-Mk3.0	CSIRO-Mk3.5	ECHAM5 MPI-OM	CNRM-CM3	UKMO HadCM3	CGCM3.1 (T47)
Horizontal Resolution	20km	125km	125km	208km	208km	208km	313km	274km	417km



佐藤ら、2009

KAKUSHIN

内　容

- ●気候モデルによる出力とは
- ●水災害に関係する気候モデル出力の特徴
- ●水災害に関連する諸量の将来変化
- ●不確定性について
- ●最悪シナリオについて
- ●創生プログラムの向けて

SOUSEI

KAKUSHIN

不確定性がまだまだある(2)

- そこで、最悪シナリオも影響評価の対象としておきたい。
- たとえば、できるだけ気象学的に根拠のある形で台風のコースをずらして大雨や河川流量を算定するとどうなるだろうか？

KAKUSHIN

適応に向けて

最悪シナリオ

サバイバビリティ・クリティカル（生存の淵、土俵際）から、しなやかにより戻せる足（社会システム）が、より重要となる

減災の対象となる範囲
＝大規模災害の場合もふくむ

世紀末のデザイン値

気候変動による影響評価では
＝同じ頻度に対応するデザイン値は上昇する。
＝でも、どこまで上昇するかにはあいまいさがある。

将来気候下での推測デザイン値には不確定性がある

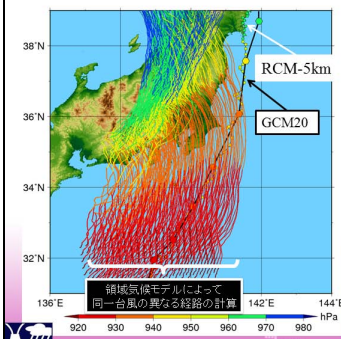
現気候下でのデザイン値

河川の流量
高潮の水位

防災の対象となる範囲
＝堤防から水は溢れさせない。
防波堤から水は越えさせない。

KAKUSHIN

極端台風の進路を操作して最悪シナリオを



台風の渦を保存させて中心位置を移動させる。
（コマを移動させる）

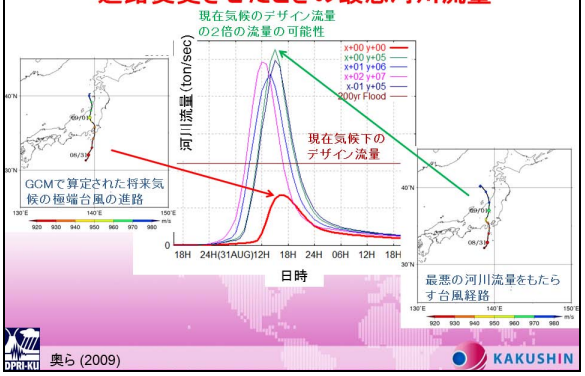
領域気象モデルで移動後の数値シミュレーションを実施。
（コマを再び放して勝手に移動させる）

影響評価
- 陸：強風・河川流量・浸水
- 海：波浪・高潮

石川ら（2009）

KAKUSHIN

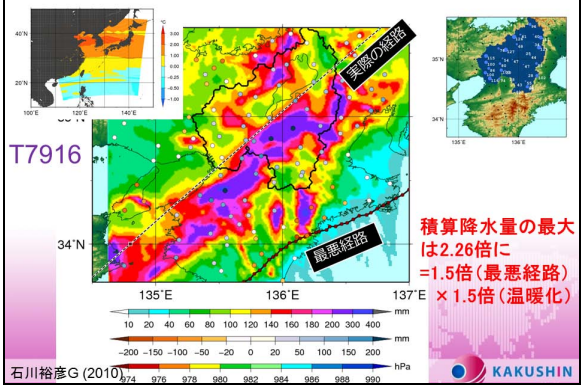
GCMで算定された将来気候極端台風を進路変更させたときの最悪河川流量



奥ら（2009）

KAKUSHIN

海面水温上昇を仮定した「最悪経路」積算降水量

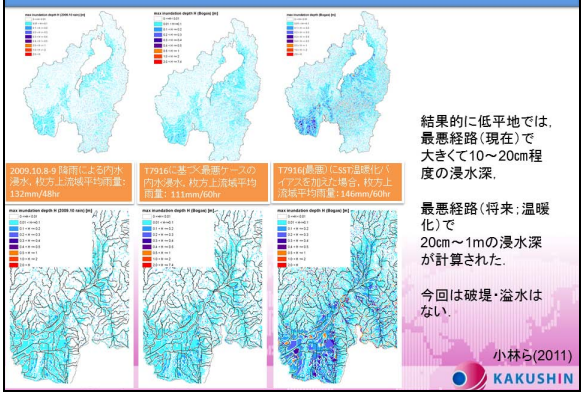


積算降水量の最大は2.26倍に
=1.5倍（最悪経路）
×1.5倍（温暖化）

石川裕彦G（2010）

KAKUSHIN

浸水深計算結果（T7916ベース）



結果的に低平地では，最悪経路（現在）で大きくて10～20cm程度の浸水深．

最悪経路（将来；温暖化）で20cm～1mの浸水深が計算された．

今回は破堤・溢水はない．

小林ら(2011)

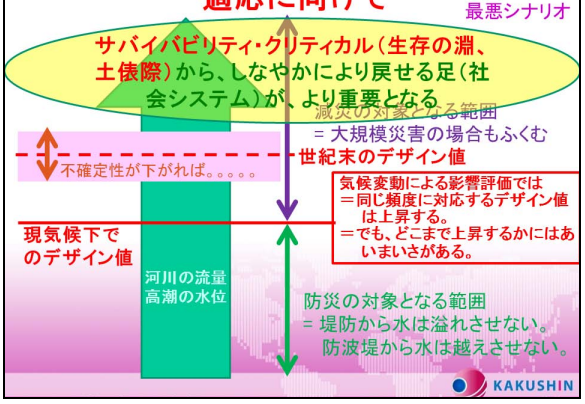
KAKUSHIN

適応策に向けて

- できるだけ気象学的に根拠のある形で台風のコースをずらして大雨や河川流量を算定すると現在の治水目標値の2倍の流量が算定される場合がありました。
- 将来の適応のためにこの算定値は考慮に入れるべきでしょうか？
- たとえどれくらいの頻度で到来するかは推定できなくとも、また災害を完全に防ぐことができないものであっても、少なくとも「生起してしまった場合にどうすべきか？」という被害軽減策を考えておく必要があると思っています。

KAKUSHIN

適応に向けて



KAKUSHIN

気候変動影響評価・適応策を考えるにあたって

- 革新プロジェクトで初めて我が国の災害への影響評価が可能になった
- 気候変化が語れる空間分解能と計算分解能等は同じではない：
  - 20km以下の細かさで予想されるからといって、100年先の影響の神戸と大阪で違いは議論できない。
- 安全度評価（デザイン値の将来推定）には不確定性がある：
  - 現在の防災計画は、200年確率など、再現確率をデザイン値にしている。しかし、100年先の状態について正確に「生起確率を評価することはできない危険性がある」。（気候モデルの不確実性やアンサンブル計算数の少なさによる）
- 最悪シナリオ、サバイバル・クリティカルの重要性：
  - 気候変動適応策には増大するデザイン値の確率評価（安全度評価）だけでなく、最悪シナリオベースの評価も極めて大切である。スーパー台風が物理的根拠を持った計算上生起することが見込まれるならば、生起確率が不明であっても最悪シナリオの一つとして採用し、適応策を考える哲学を構築する。そんな考え方の構築が必要があるが、サバイバビリティ・クリティカル（生存の淵、土俵際）から、しなやかにより戻せる足（社会システム）が、より重要となる。

KAKUSHIN

内　容

- ●気候モデルによる出力とは
- ●水災害に関係する気候モデル出力の特徴
- ●水災害に関連する諸量の将来変化
- ●不確定性について
- ●最悪シナリオについて
- ●創生プログラムの向けて

SOUSEI

KAKUSHIN

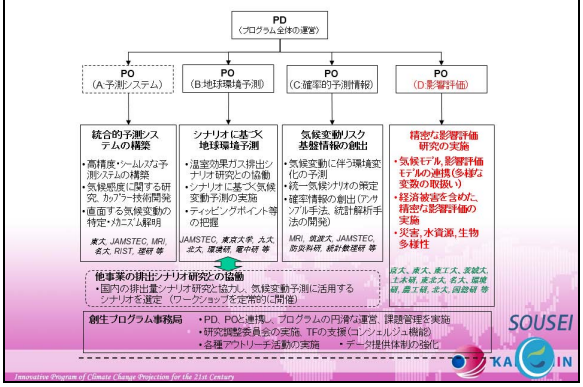
共生、革新から創生プログラムへ

- Kyousei(共生)Program:2002-2006
  - 20kmRCM（領域気候モデル）(日雨量)
- Kakushin(革新)Program:2007-2011
  - 20kmGCM（全球気候モデル、時間雨量）
  - 5,2,1kmRCM (時間雨量、30分雨量、10分雨量)
  - 自然災害への影響評価
- Sousei(創生)Program:2012-2016
  - アンサンブル情報を用いた影響評価（ハザード＋社会経済的）
  - 適応策への哲学、考え方の構築
  - 自然災害，水資源，生物生態系・生態サービス

SOUSEI

KAKUSHIN

【創生プログラムの運営体制・研究機関】



SOUSEI

KAKUSHIN

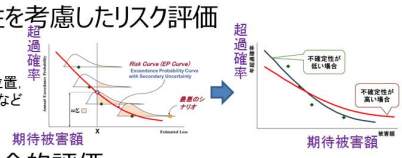
適応策の費用便益評価方法の構築

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

DPRI-KU

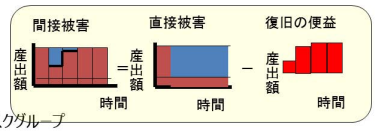
- 不確定性を考慮したリスク評価

不確定性：
台風の発生位置，
破堤シナリオなど



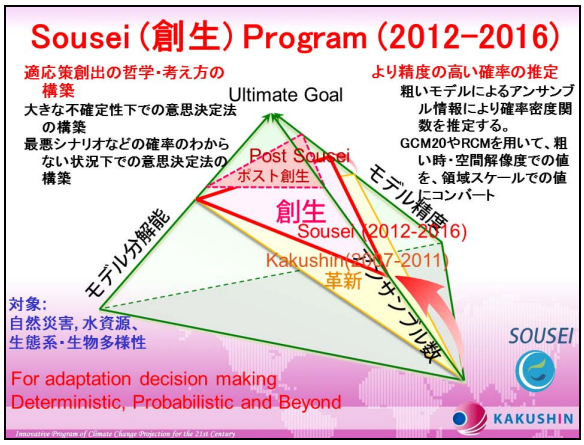
- 被害の整合的評価

総被害額　＝ 直接被害額－復旧の純便益
　　＝ 間接被害額＋復旧費用



創生京大リスクグループ

SOUSEI



適応への考え方

- 不確定だからといって適応を遅らせていると将来の適応が不可能あるいは困難になる危険性がある。
- 実践を通しての適応:「はっきりとはわからないけど進める」
  - 専門家はまずこの認識を持つことが大事。
  - 「現在の進行も適応になる」以上の認識が必要。
  - この認識を、他省庁とも共同して、国民に理解してもらうように努める。
  - 温暖化の影響らしきものを国民に発信してゆく
  - 「具体的な実行があって助かった」を蓄積してゆく。
- 基本計画としての適応
  - 設計値(年確率値)にのみこだわるならまだまだ不確定性は高い。
  - だからこそ、最悪シナリオ(極端シナリオ)をどう計画に組み込んでいくか、という適応が重要。(設計値にという意味ではない)

KAKUSHIN

2.2 国総研気候変動適応研究中間報告からの題材提供

2.2.1 題材１

題目：取組の全体状況

講演者：吉谷純一（流域管理研究官）

発表資料：

【国総研適応研究中間報告からの題材提供】

取組の全体状況

「気候変動適応策に関する研究」
中間報告書（草稿） 目次

第1章　研究の概要
第2章　個別の研究成果
2.1　治水への影響と適応に関する研究
- 河道の氾濫リスク、・・・
- 海岸保全施設の外力設定、都市雨水排水影響評価

2.2　水利用への影響と適応に関する研究
- 渇水リスク評価
- 下水処理水活用

2.3　河川環境への影響に関する研究
- 流量・水温変化と河川環境など

第3章　治水への影響と適応に関する研究

降雨増について横断的に整理

（赤字は本日取り上げる部分）

第3章　治水への影響と適応に関する研究

3.1　気候変動予測のめざましい進展
A・治水対策検討のための気候変動予測結果の翻訳・・・・　服部

3.2　諸外国の適応策の分析
- 英国、オランダ、ドイツ、フランス、イタリア、ベルギー、スウェーデン、中国、韓国、インド、インドネシア、フィリピンの適応策
- 米国陸軍工兵隊等の不確実性を考慮した洪水被害のリスク分析手法

3.3　日本における気候変動適応策検討におけるポイント

（赤字は本日取り上げる部分）

第3章　治水への影響と適応に関する研究
3.3　日本における気候変動適応策検討におけるポイント

■ 治水対策手法の拡充の展望
B　1：河道設計からのアプローチ　・・・・・・　服部
C　2：ダムの洪水調節の高度化からのアプローチ　・・・・・・　川崎
D■ 超過外力を受けた堤防システムの機能発揮・喪失シナリオ設定の技術化　・・・・・・　服部
E■ 災害の起こり方のコントロールについての現状と課題　・・・・・・　飯野
F■ 不確実性への対応についての論点　・・・・・・　吉谷

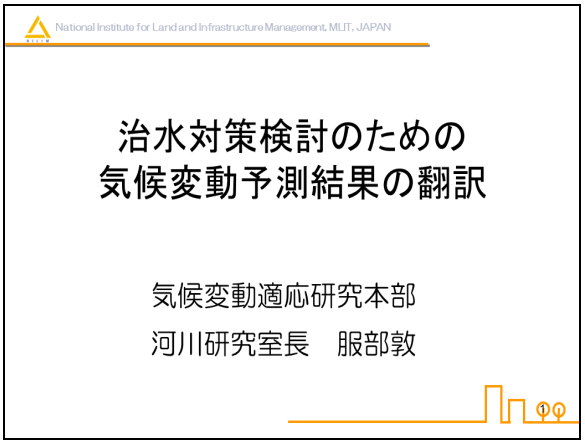
（赤字は本日取り上げる部分）

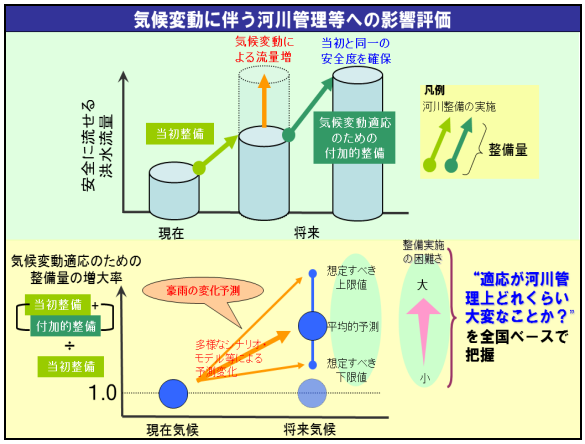
2.2.2 題材２

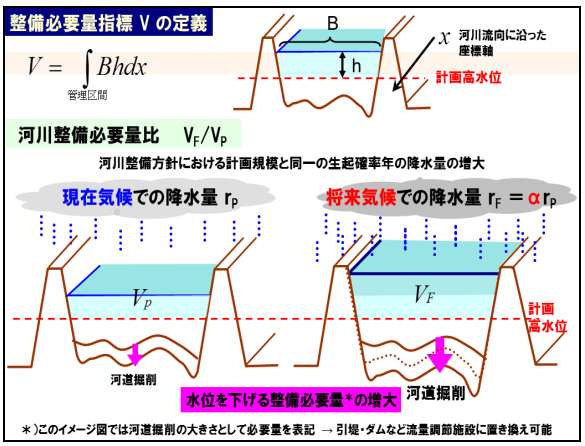
題目：治水対策検討のための気候変動予測結果の翻訳

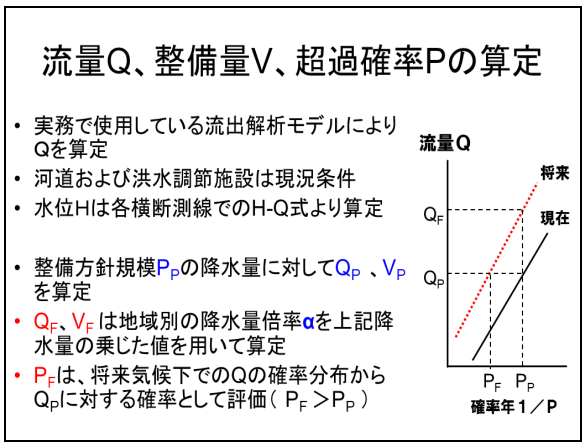
講演者：服部敦（河川研究室長）

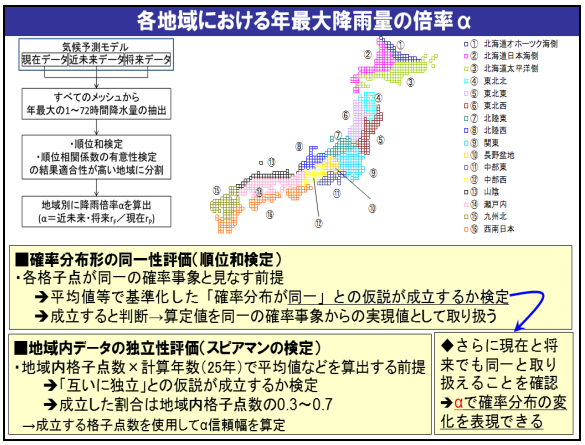
発表資料：

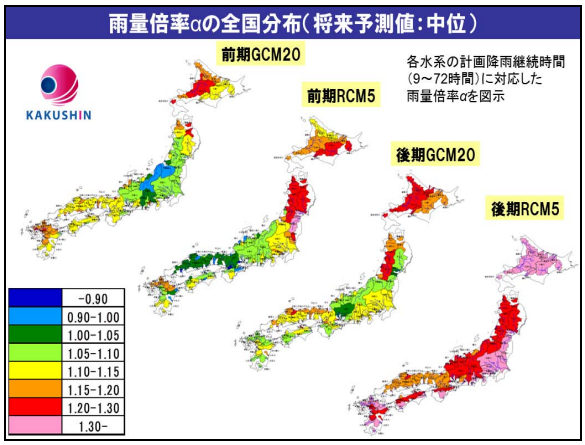


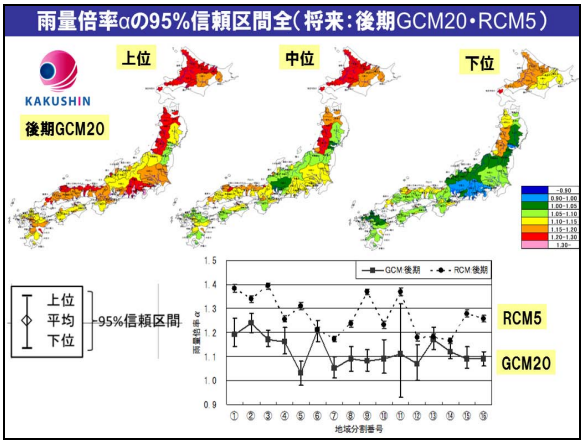


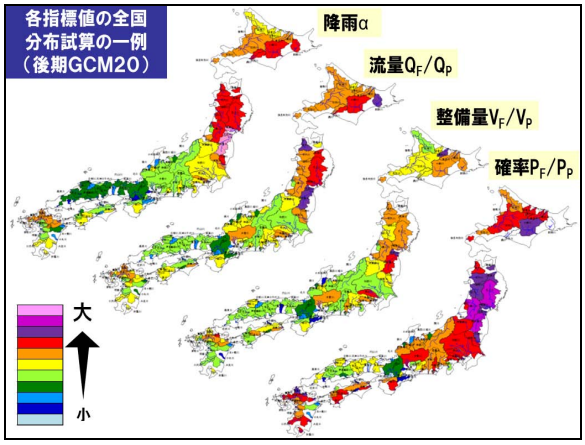


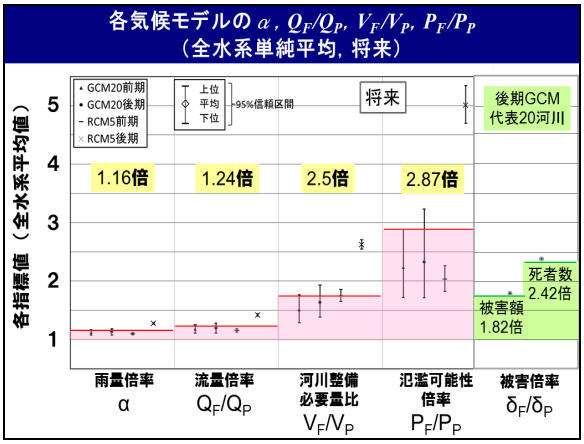


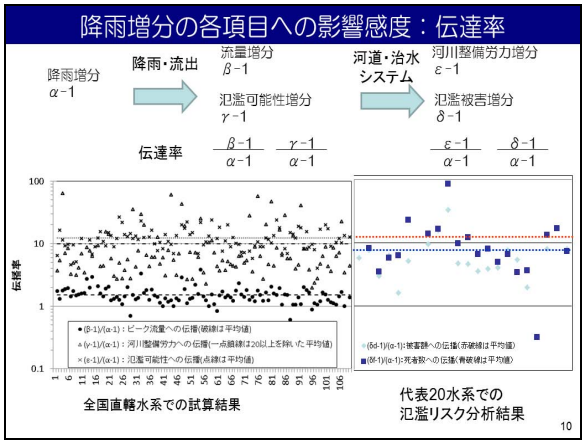










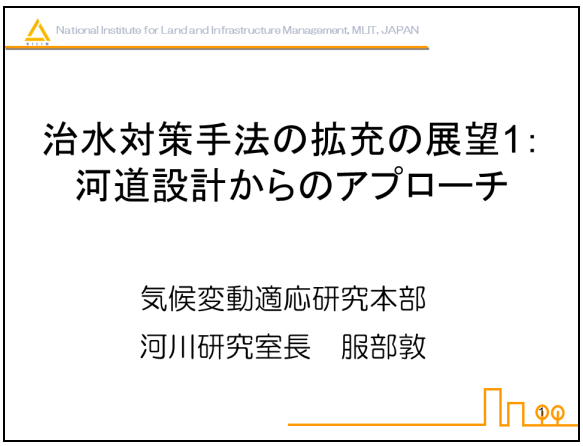


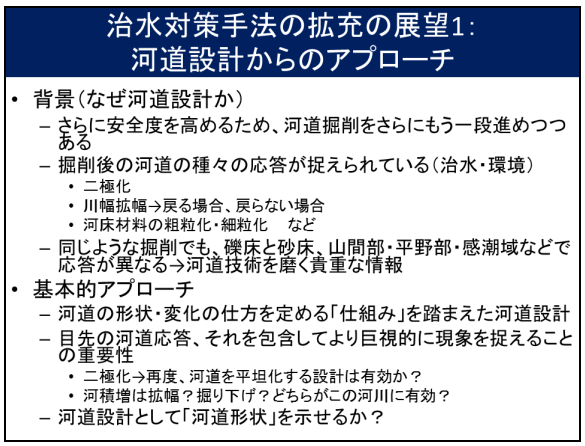
2.2.3 題材３

題目：治水対策手法の拡充の展望１：河道設計からのアプローチ

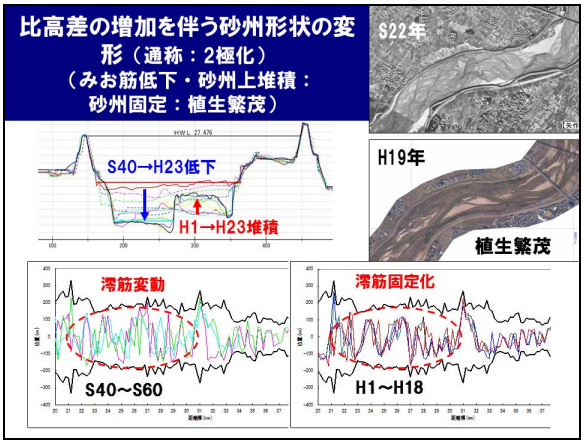
講演者：服部敦（河川研究室長）

発表資料：

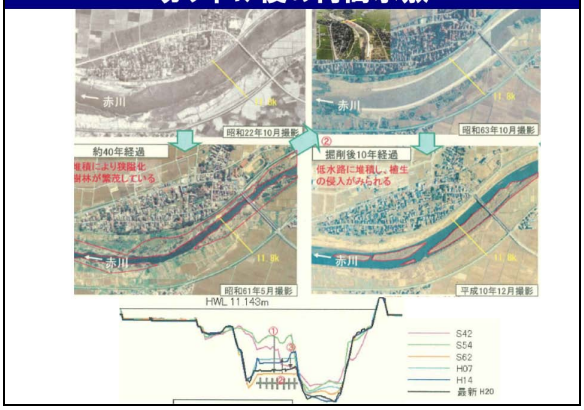




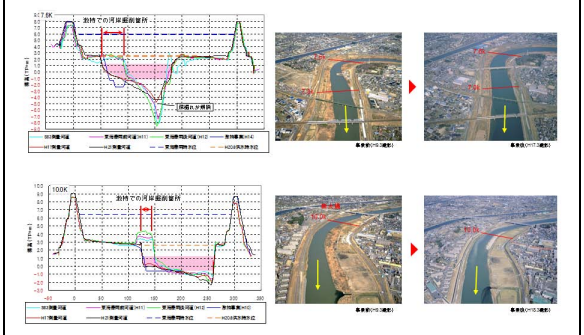
比高差の増加を伴う砂州形状の変形（通称：2極化）（みお筋低下・砂州上堆積：砂州固定：植生繁茂）



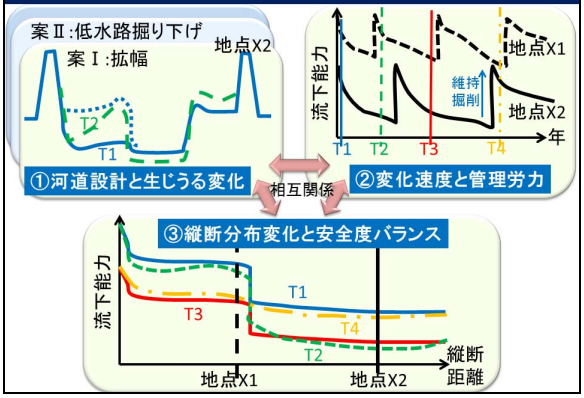
切り下げ後の再高水敷



拡幅した川幅が保たれている



河道設計の3つの側面



論点①：河道設計と生じうる変化

- 「安定河道」の工学的な意味：河道改修にどのように役立つか？
  - そもそもの定義は？自然河川が自己形成する河道？、変化が小さい河道？、形状改変してもまた元に戻る河道？
  - 治水で重視される計画規模の大出水時における「安全」と同義なのか？
  - そうでないとすれば、他に意味があるのか？例えば、それを基準形状（テンプレート）として、現況や設計した河道との差異（ズレの大きさと場所）を調べることで、生じうる地形変化パターンとその進行速度が定式化できる、など
- 「河道形成流量」：平均年最大流量など代表水理量で河道は設計できるのか？
  - 川幅、砂州形態、局所洗掘深、河道の安定性（改修前後の摩擦速度の変化）
- 「土砂供給量」を明示的に河道設計に組み込む必要はないのか？
  - 河道縦断勾配と河床粒径がその代替指標として役立っていた？
  - しかし、縦断形状と河床材料が有意に変化する状況が生じている。
- 「河道横断形状」を保ったまま掘り下げれば、その河道も安定か？
  - 河道構成材料（地表と地下）が、鉛直方向に一様かどうかがキーポイント
  - 河道横断図に、横断形状を表す「線」だけでなく、その地質構成を表す「色分け」も示すことが重要
  - ただし、それを河道設計に生かす技術が未熟。特に、未固結、軟岩が露出する場合
  - 掘り下げることで、大出水時にこれまで経験のない大きい水深（流速）が作用するが、その場合にも「安定」か？

論点②：変化速度と管理労力

- どこまで河積を大きくできるか、それを決める条件の一つとして「河積維持」できるかが重要
  - マクロには、「再堆積の速度vs維持管理に費やせる労力」のバランス
  - 論点①と関連：堆積速度を小さくできる（「安定」した）河道設計が重要な所以
  - 大洪水時（洪水中）に生じうる堆積で河積が不足しないことも大事な要件
- 現実的な点検・判断・対策のスキームで管理できる河道を設計する
  - 再堆積量（河積減）がごく軽微と見なせるほど頻繁に維持掘削するのは、実務的には必ずしも容易ではない
  - 次の維持掘削実施までの期間内に堆積しうる分だけ、あらかじめ河積を大きめに確保しておく必要あり
  - この「量」を河床変動計算で推計し、維持管理の実行可能性と、河道形状の設定に反映することが河道設計項目として取りこむべきではないか？
- 樹木繁茂など粗度管理も上記の河積の議論と同様に設計に取り込む
  - 伐採後の樹木繁茂の進行速度（樹高、群落面積などの増加速度）が直接的に設計に関わるパラメータ。
  - これらが河道形状、洪水による攪乱、伐採時の工夫（例えば抜根）によってどの程度変わりうるか、知見を蓄えて設計に反映することが重要
- 掘削・伐採の頻度・範囲→環境への影響（正負の両面で）を評価
  - 保全箇所を直接改変せざるを得ない影響と、反面、洪水の代替として攪乱を生じさせる好影響。両面から評価することが大事
- 管理のための河積増が結果的に流下能力＋αとなることへの配慮→論点③

論点③：縦断分布変化と安全度バランス

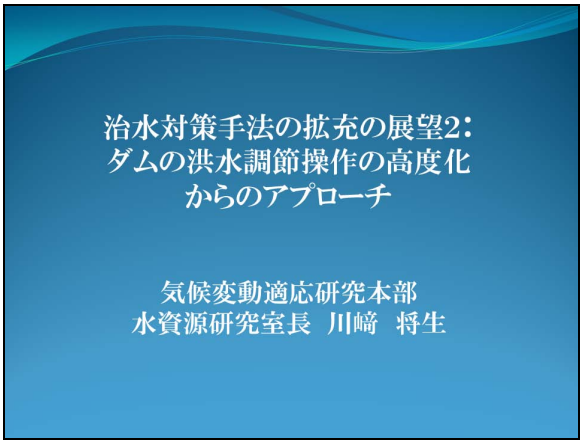
- 流下能力の縦断分布（上下流バランス）をどのように設定すれば、現況の実力や計画規模を超える洪水時の氾濫リスクを低減できるか？
  - 氾濫リスク分析を主軸に据えた河道計画の主テーマ
- その上で、論点②の河道変化速度・管理によって計画したバランスからズレることをあらかじめ見込んで、リスクを大きくしない賢い管理手法を設定しておくことが重要（このような「複雑な」管理が実務として実施可能か？）
  - 変化速度大かつ維持管理実施頻度小だと、管理のための河積を大きく設定する必要あり。この場合、結果として、バランスに大きなズレをもたらす。
  - ズレが大きいと、上下流のバランスが大きく崩れる局面が生じる可能性が高くなる。
  - 変化速度を小さくし、適度な管理頻度にすることが、バランスの取りやすさを確保する上で重要。
  - この観点で、バランスをとれる管理が論点①の河道設計とも結びついてくる
- 河床変動計算・樹木繁茂推計を上記のようなリスク分析型河道設計への組み込み方
  - この目的での各計算の精度・確度を見極めた上で、どのような検討手順とするか（バランスのズレ方をどのように推計するか？）
- 計画・設計→維持管理への受け渡し
  - どこに詰め切れなかったことがあるか、その改善のためにすべきことを管理に受け渡す。その結果を改めて計画・設計に返す。
  - このサイクル（PDCA型管理）で改善していく仕組みを本格化させる

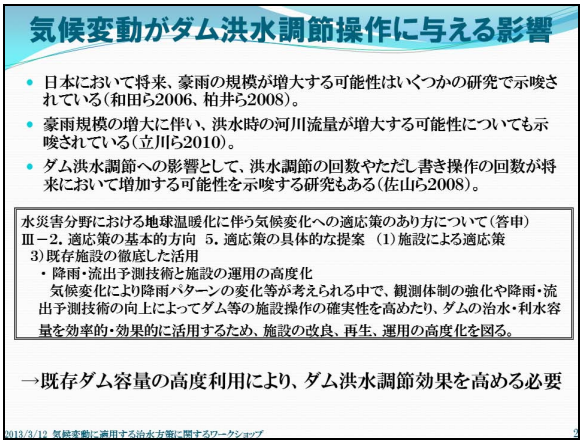
2.2.4 題材４

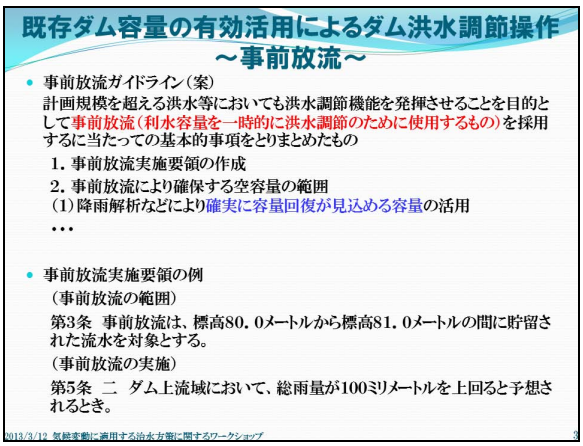
題目：治水対策手法の拡充の展望２：ダムの洪水調節操作の高度化からのアプローチ

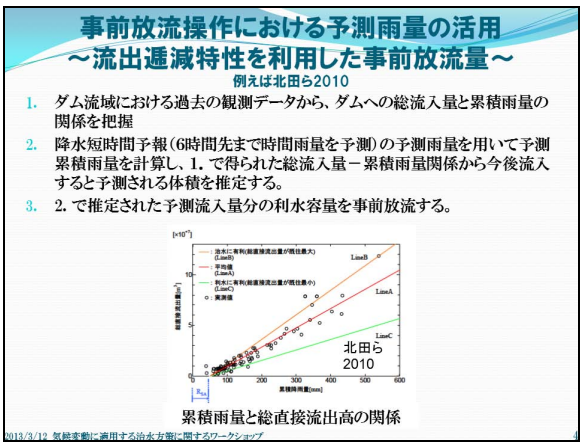
講演者：川崎将生（水資源研究室長）

発表資料：





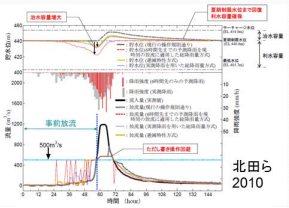




事前放流操作における予測雨量の活用 ～流出逓減特性を利用した事前放流量～

例えば北田ら2010

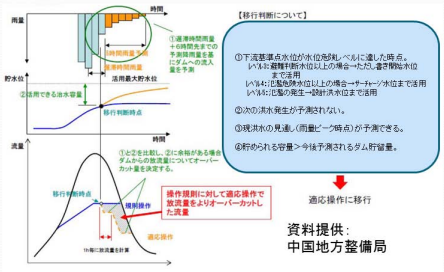
- 北田ら2010は草木ダムの2007年9月洪水（ピーク流入量：1,190m³/s、既往2番目の規模）に対して手法を適用
- 規則操作ではただし書き操作に入る規模の洪水であるが、提案した事前放流操作を行うことで洪水調節開始前に十分な治水容量を確保することができ、ただし書き操作実施に至らないため規則操作と比べて放流量を下げることができる。



草木ダム 2007年9月洪水への適用

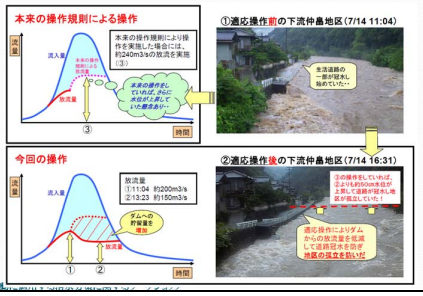
既存ダム容量の有効活用によるダム洪水調節操作 ～下流の水位状況に応じた放流操作～

- 「適応操作」とは、操作規則により洪水調節を実施している際、洪水状況（下流の水位状況、気象状況、残治水容量の状況）により治水容量を有効に活用し下流への効果をより発揮するための洪水調節を行う一連の操作



既存ダム容量の有効活用によるダム洪水調節操作 ～下流の水位状況に応じた放流操作～

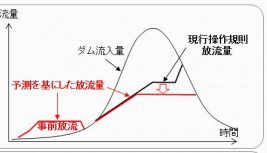
- 平成22年7月13-14日にかけて発生した洪水に対し、中国地方整備局八田原ダムにおいて適応操作を実施し、下流の目崎地点において水位を約0．5m低下させた。



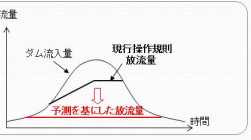
予測降雨を用いたダム洪水調節の将来像

降雨予測を活用して、

治水容量に不足が生じると判断できれば、事前放流により治水容量を臨機に確保し、容量を最大限活用して下流被害を最小化



治水容量に余裕があると判断できれば、積極的に洪水を貯めることにより、下流被害を最小化

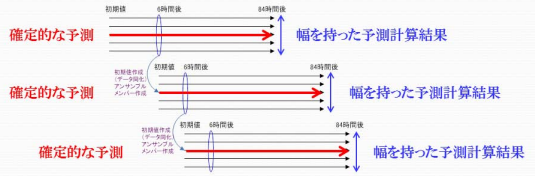


- 降雨の始まりから終わりまでを見通すことができる長い予測先行時間と精度の高さが要求される。→現状の予測雨量の精度や予測先行時間では不十分
- 予測精度については、「予測誤差＝0」になるのは非常に困難と考えられる。

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作

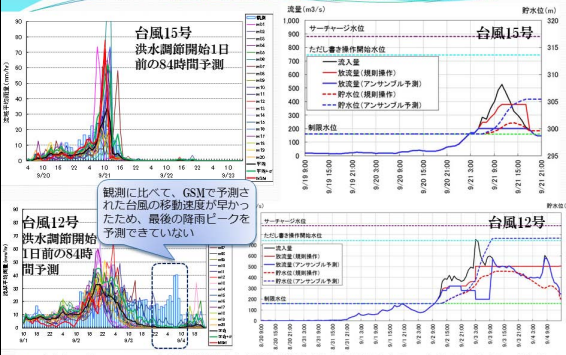
- 「予測雨量は誤差を持つもの」と認識し、その予測不確実性を考慮してダム放流量を決定する手法→予測雨量の予測幅を評価するツールとしてアンサンブル予測雨量を使用し、ダム洪水調節に応用
- 従来の予測計算は一つの初期値から予測計算を行っていたが、それでは時間的推移を正確に予測することが困難であるため、初期値にわずかなバラツキを与えて複数例（アンサンブル）の予測計算を実施するくおとで、起こりうる幅を評価することができる。
- アンサンブル予測雨量から得られる予測の幅を基に、下流のピーク流量を最小にすると予測される放流量を求める。

アンサンブル気象予測計算（幅を持った予測）

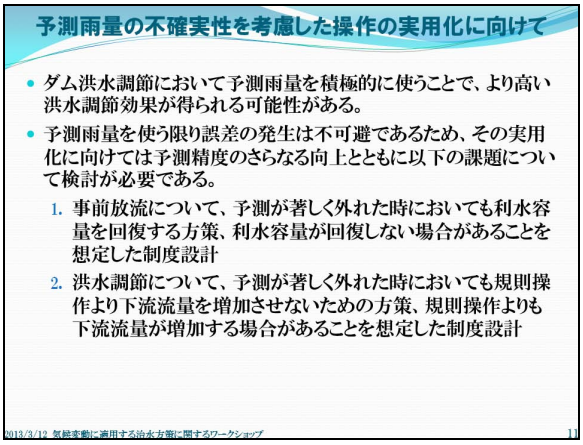


平成23年 台風12、15号のシミュレーション結果

※アンサンブル予測雨量はGSM84時間予測を境界値としてWRFで計算



- 台風15号については規則操作よりも効果的な洪水調節が実施できたが、台風12号は予測が二山目を完全に見逃すため、規則操作よりも放流量を増加させてしまった。

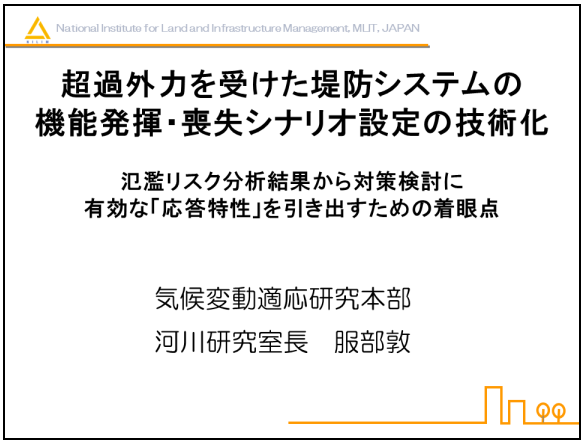


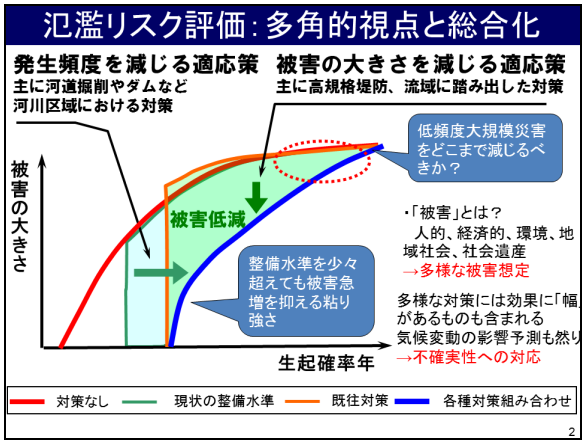
2.2.5 題材５

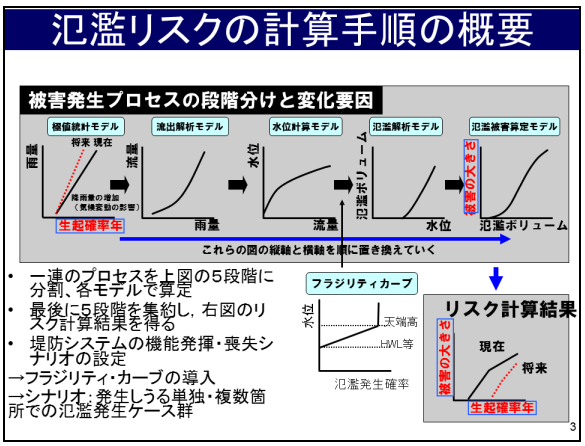
題目：超過外力を受けた堤防システムの機能発揮・喪失シナリオ設定の技術化

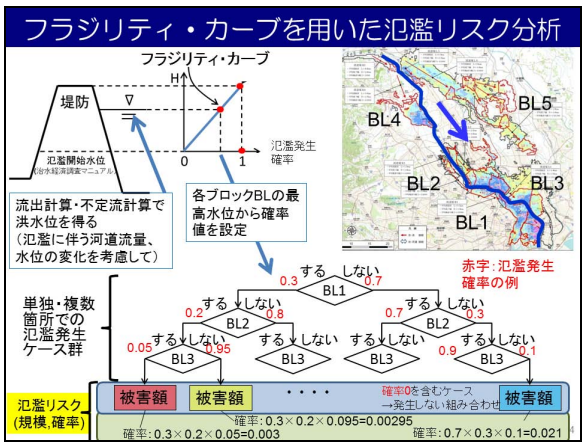
講演者：服部敦（河川研究室長）

発表資料：



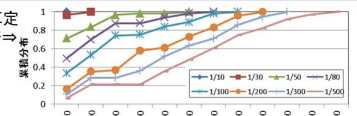




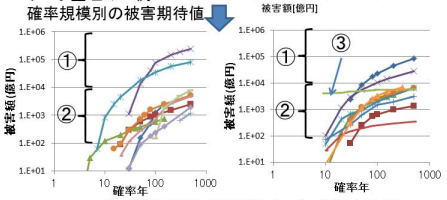


対象河川と試算結果（被害額の期待値）

氾濫リスク算定結果イメージ⇒



データ整理の一例
確率規模別の被害期待値



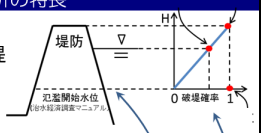
① 確率年100年で1,000億円オーダー以下となる河川
② 確率年100年で10,000億円オーダー以上となる河川
③ 被害額が確率規模によらず概ね一定している河川

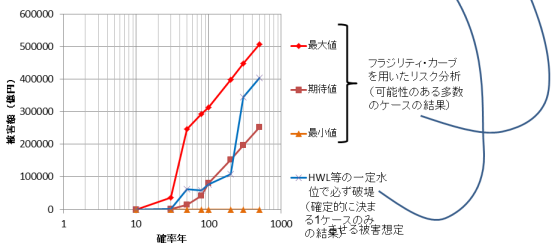
河川No.	計画降雨 時間	降雨量
01	48	325
02	48	252
03	48	228
04	12	165
05	72	548
06	48	499
07	48	405
08	48	498
09	48	368
10	24	323
11	12	383
12	24	376
13	12	381
14	48	269
15	48	442
16	48	256
17	48	217
18	48	363
19	12	357
20	48	615

5

従来手法とフラジリティ・カーブを用いた手法の比較
氾濫リスク分析の特長

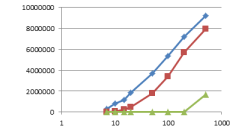
- ある一定水位に達した箇所から破堤させる条件は、必ずしも最大被害の破堤ケースを与えるものではない



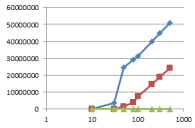


6

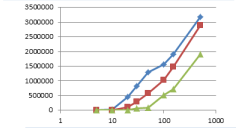
氾濫被害の特徴（着眼点１）
確率規模と被害期待値・最大最・最小値の関係



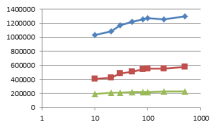
パターンA：logTに概ね比例して被害最大・期待値が増加



パターンA‘：被害最大値が不連続的に急増する箇所がある



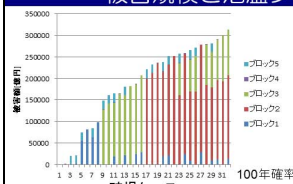
パターンB：被害最小値もlogTに概ね比例して増加。そのため最大と最小の差の開きが少ない、または狭まる。



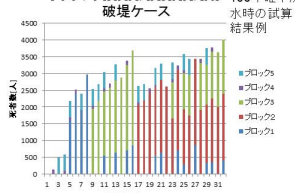
パターンC：Tによらず概ね被害が同程度と見なせる（例えば10年確率出水でも100年確率出水と同程度の期待値、最大・最小値となる）

7

氾濫被害の特徴（着眼点２）
被害規模と氾濫ブロックの対応関係



100年確率洪水時の試算結果例



BL2
BL3
BL1

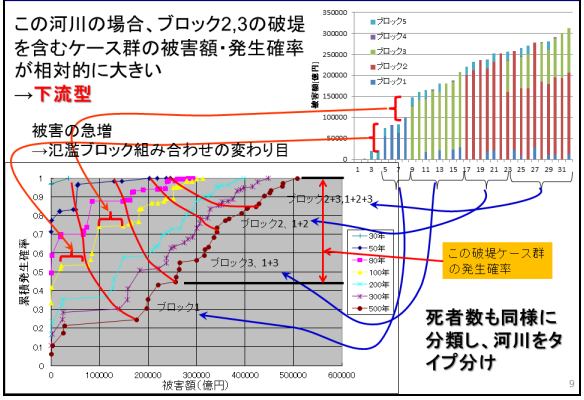
被害額・死者数ともこの順で被害大

8

着眼点２：被害規模と氾濫ブロックの対応関係

この河川の場合、ブロック2,3の破堤を含むケース群の被害額・発生確率が相対的に大きい
→**下流型**

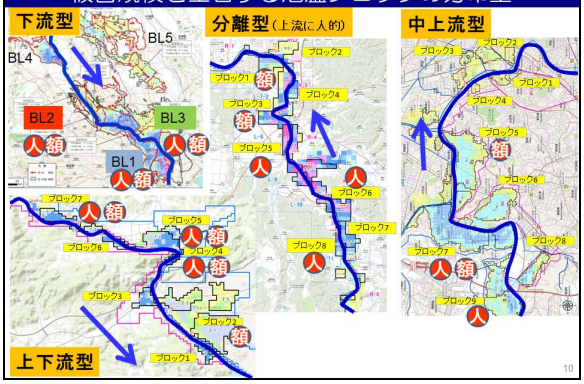
被害の急増
→氾濫ブロック組み合わせの変わり目



死者数も同様に分類し、河川をタイプ分け

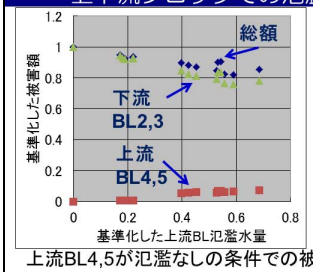
9

氾濫被害の特徴（着眼点３）
被害規模を左右する氾濫ブロックの分布型



10

氾濫被害の特徴（着眼点４）
上下流ブロックでの氾濫発生時の相互作用



上流BL4,5が氾濫なしの条件での被害額を1とした場合、4,5で氾濫水量の増加に伴う各BLの被害額の増減を調べる

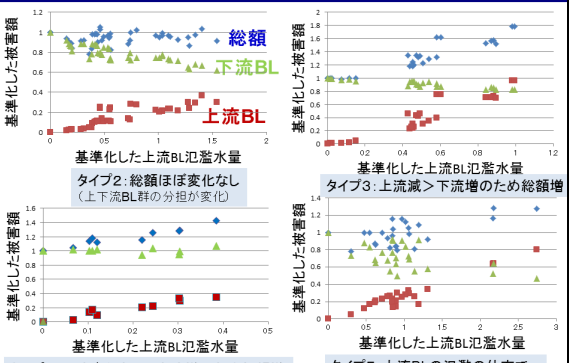
縦軸＝（各ブロック被害額）／（総被害額BL4,5氾濫なしのケース）

横軸＝（BL4,5の氾濫水量）／（総氾濫水量BL4,5氾濫なしのケース）

上図の例：上流BL4,54,5で氾濫→下流BLの被害減が上流BLの被害増を上回るため、総額としては減になるタイプ　タイプ1

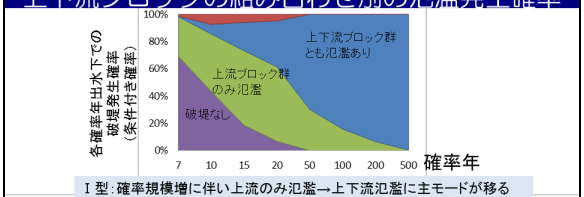
11

着眼点４：上下流ブロックでの氾濫発生時の相互作用

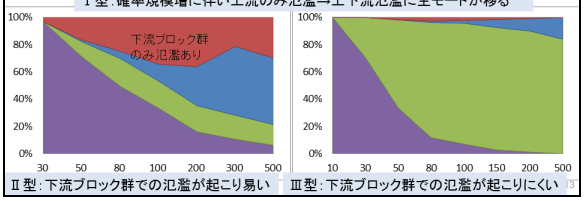


12

氾濫被害の特徴（着眼点５）
上下流ブロックの組み合わせ別の氾濫発生確率



Ⅰ型：確率規模増に伴い上流のみ氾濫→上下流氾濫に主モードが移る

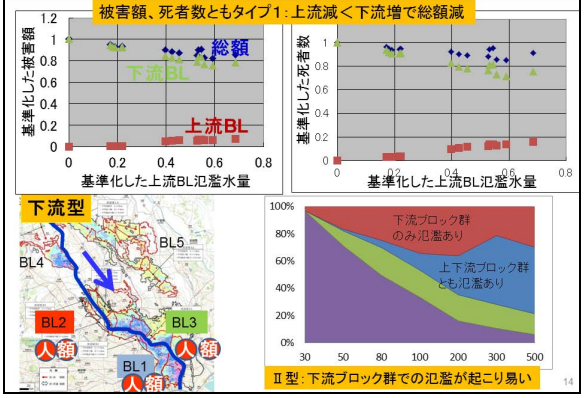


Ⅱ型：下流ブロック群での氾濫が起こり易い　Ⅲ型：下流ブロック群での氾濫が起こりにくい

13

5つの着眼点から見た流域の特徴（事例１：下流型Ａ）

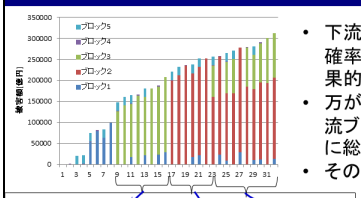
被害額、死者数ともタイプ1：上流減＜下流増で総額減

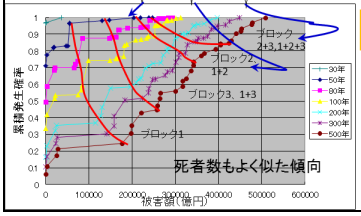


Ⅱ型：下流ブロック群での氾濫が起こり易い

14

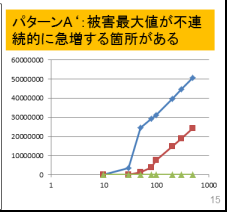
5つの着眼点から見た流域の特徴（事例１：下流型Ａ）





- 下流ブロック1,2,3の氾濫発生確率を抑えるのは被害減に効果的（特にブロック2,3）
- 万が一氾濫する場合でも、上流ブロック氾濫ありでは結果的に総被害減となりうる
- その程度は最大2割

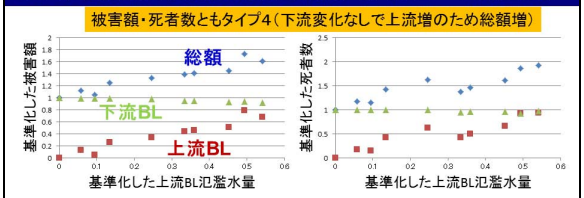
パターンA‘：被害最大値が不連続的に急増する箇所がある



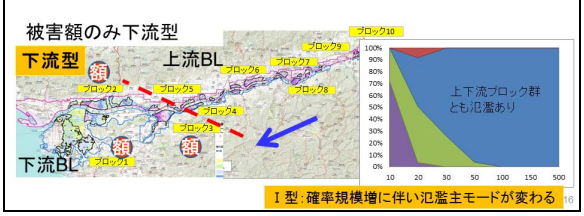
15

5つの着眼点から見た流域の特徴（事例２：下流型Ｂ）

被害額・死者数ともタイプ4（下流変化なしで上流増のため総額増）

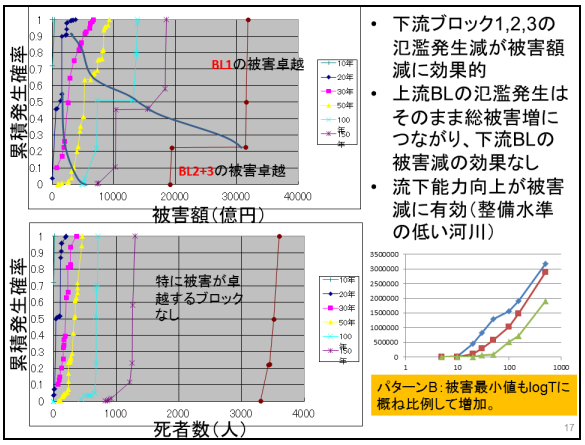


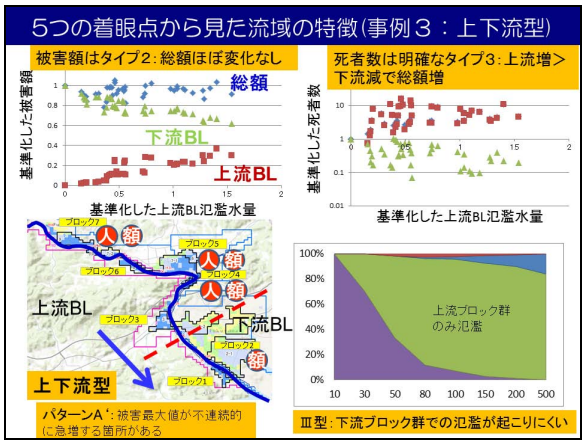
被害額のみ下流型

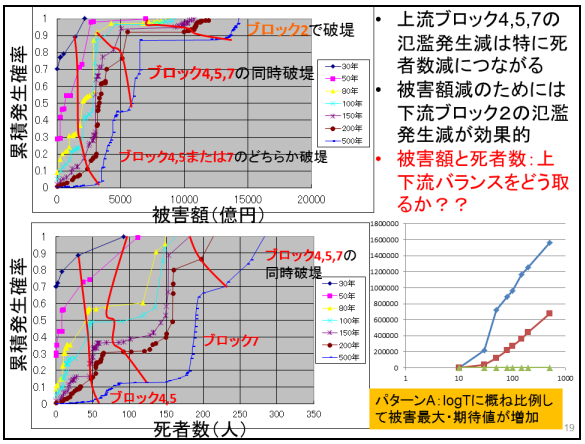


Ⅰ型：確率規模増に伴い氾濫主モードが変わる

16





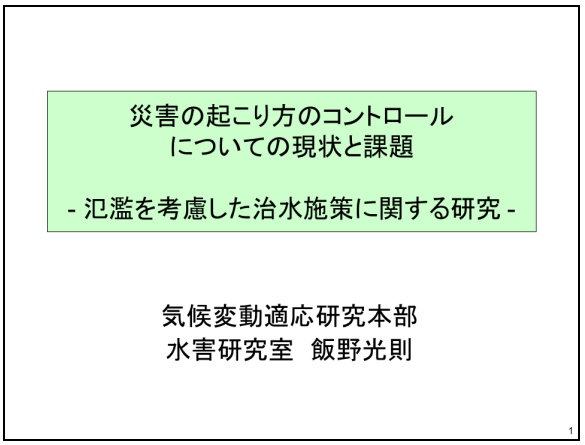


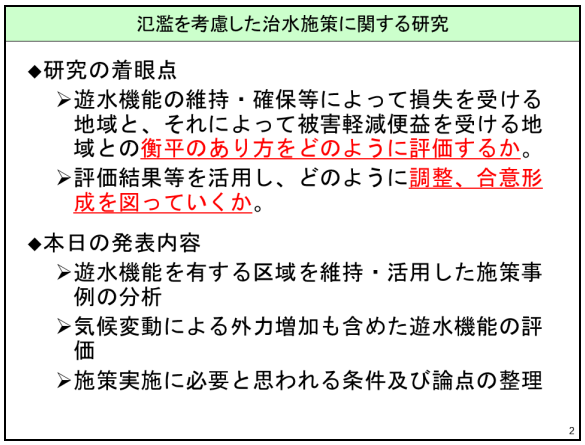
2.2.6 題材６

題目：災害の起こり方のコントロールについての現状と課題

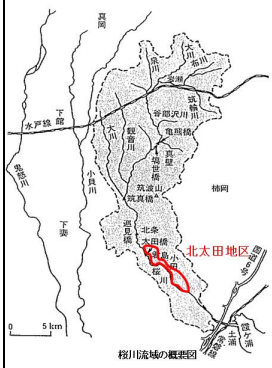
講演者：飯野光則（水害研究室・主任研究官）

発表資料：





桜川（利根川水系、茨城県管理）の概要



◆流域面積349km²、流路延長64km

◆上流部：無堤区間、田畑

◆中流部：暫定的な有堤区間、小集落が散在

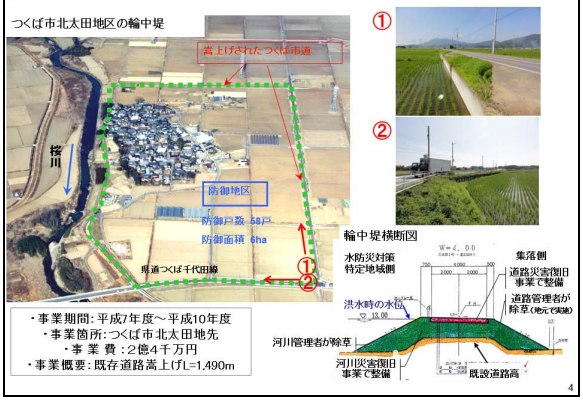
◆下流部：有堤区間，市街地（土浦市、人口約14万人）

◆昭和61年8月台風10号により、床上床下あわせて約1,500棟の大規模な浸水被害が発生

◆**中流部の北太田地区の遊水機能に着目**

3

北太田地区の概要



・事業期間：平成7年度～平成10年度
・事業箇所：つくば市北太田地先
・事 業 費：2億4千万円
・事業概要：既存道路嵩上げL=1,490m

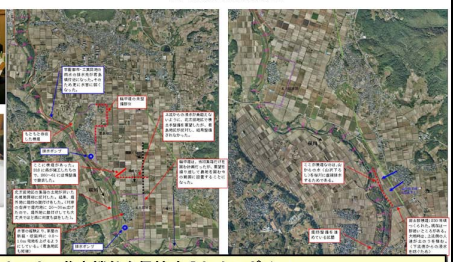
4

流域治水に関する歴史的経緯や住民意識の調査

◆ 中流部左岸の「水防災対策特定地域」に隣接するつくば市北太田地区、君島地区の自治会長及び区長経験者等計8名を対象に、ヒアリングを実施。

ヒアリング時の様子

ヒアリング結果の取りまとめ



ヒアリング結果からみた、遊水機能を保持するためのポイント
◆ 浸水危険性が十分に認識され、自衛手段もある程度取られている地域
◆ 現状の被災条件・治水バランスを維持・活用し、特に地先レベルでの上下流バランスを変化させない

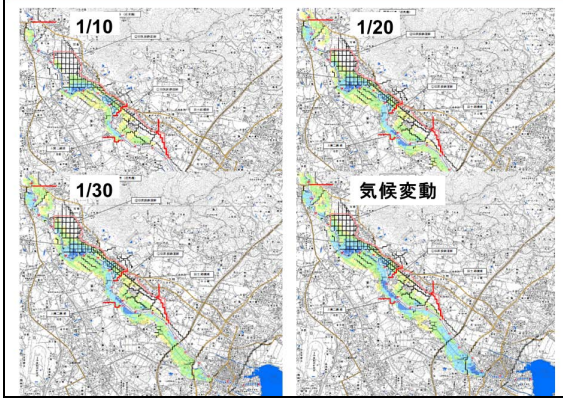
遊水機能評価のための検討ケース設定

➢越水による一般資産被害額をベースに分析

◆ケースA：**現況**
◆ケースB：北太田地区を現計画堤防高による**連続堤で整備**（遊水機能を制限）
◆ケースC：河道隣接地域に対して、「宅地の被害を皆無にするとともに、田畑の被害リスクを最低限に抑える」ことを目標
✓**輪中堤を嵩上げ**
✓土地改良事業計画設計基準に基づき、**「浸水深30cm以上が24時間以内」の浸水許容条件**を満たすように排水路や樋門等を設定

6

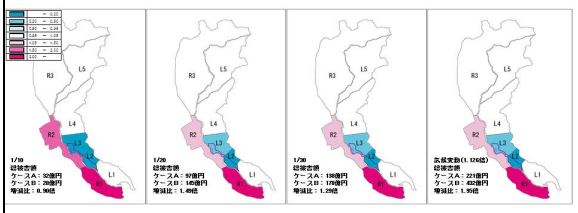
ケースA（現況）の最大浸水深



7

現況における遊水機能の評価

降雨確率規模別の氾濫ブロック別被害額増減比
ケースB（連続堤整備）／ケースA（現況）



✓L2、L3のリスクが、R1、R2へ
✓R1の被害額増減が、流域全体の被害額増減に対して支配的

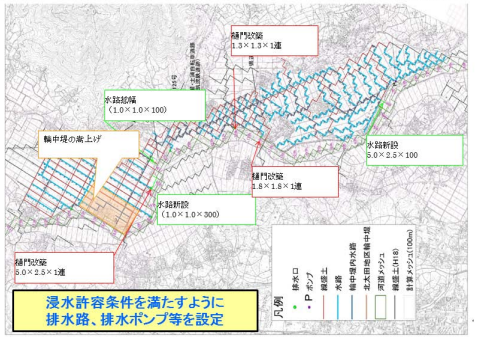
連続堤整備が有効

遊水機能保全が有効
特に、気候変動規模では、連続堤整備に比べ、遊水機能の保全により、流域の総被害額が約1/2に減少

8

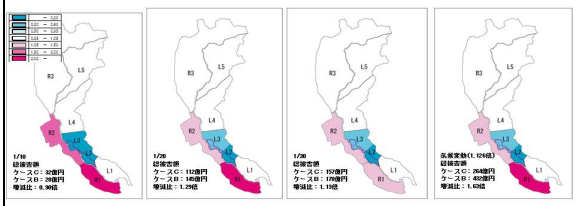
ケースCにおける浸水許容条件の設定

ケースC（浸水許容条件）における排水路等の設定例（気候変動規模）



浸水許容条件設定における遊水機能の評価

降雨確率規模別の氾濫ブロック別被害額増減比
ケースB（連続堤整備）／ケースC（浸水許容条件）



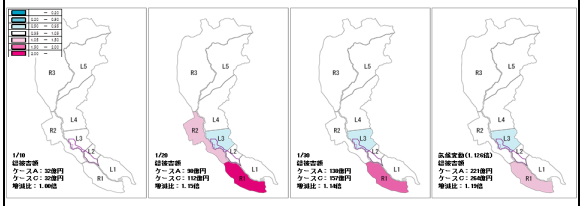
✓L2、L3のリスクが、R1、R2へ
✓R1の被害額増減が、流域全体の被害額増減に対して支配的

連続堤整備が有効

遊水機能保全が有効
浸水許容条件を設定しても、気候変動規模では、連続堤整備に比べ、遊水機能の保全により、流域の総被害額が約2/3に減少

浸水許容条件設定における遊水機能の評価

降雨確率規模別の氾濫ブロック別被害額増減比
ケースC（浸水許容条件）／ケースA（現況）



✓L3のリスクが、R1、R2へ

同程度の被害額

浸水許容条件を設定しないケースが有効

設定した排水路等が、結果として、河道のピーク流量を軽減するバイパス的な機能を果たした

浸水許容条件を設定した場合でも、流域の総被害額の増加は約1.2倍程度

施策実施に必要と思われる条件及び論点の整理

事例	対象地域の概要	期待される治水効果	地域の認識	関係部局との調整等
桜川（北太田・岩島地区）	● 浸水常襲地区 ● 無堤区間を存置 ● 市街化調整区域、農振農用地区域	● 下流（土浦市街地）に対する被害軽減効果 ● 流域全体の被害軽減効果	● 暫定的な対応という理解 ● 宅地浸水は輪中堤で防御	● 計画策定時に関係部局を含めた連絡会を設置 ● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
桜川（岩瀬地区）	● 浸水常襲地区 ● 水田を防災調整池とみなす ● 市街化調整区域、農振農用地区域	● 防災調節池整備と同等の被害軽減効果	● 現状より水田の収穫量が減収にならない	● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
天野川（岩脇・西円寺地区）	● 浸水常襲地区 ● 越流堤を存置 ● 市街化調整区域、農振農用地区域	● 越流堤下流の岩脇地区に対する被害軽減効果	● 水田を浸水させる代わりに、集落地区の浸水危険性を軽減	● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
小目川（藤代地区）	● 浸水常襲地区 ● 主として市街化調整区域	● 地区全体に対する被害軽減効果 ● 避難路の機能強化	● 地域内の現状の浸水リスクバランスを維持	● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める
建築物の浸水対策に関する条例（牛津市）	● 浸水想定区域図に基づいて設定	● 建築物の浸水対策強化	● 今後予想される浸水頻度、浸水規模の増加への予防対策	● 河川管理者が浸水想定区域図の関連データを提供 ● 現行法令に対する上乗せ・横出し規制として関係部局の実施
雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（埼玉県）	● 浸水想定図に基づいて設定	● 開発行為などにおける雨水流出抑制施設の設置等の義務づけ	● 突発的・局地的な集中豪雨増加への予防対策	● 河川管理者が浸水想定区域図の関連データを提供 ● 関係部局が行う行政指導の内容を明確化
土砂等による土地の埋立等の規制に関する条例（沼津市）	● 市街化調整区域に基づいて設定	● 環境保全のための土地埋立・盛土の規制 ● 副次的な効果として、遊水機能保全を期待	● 農地荒廃化、土砂流出による環境悪化への防止策	● 現行法令に対する上乗せ・横出し規制として関係部局が実施

施策実施に必要と思われる条件及び論点の整理

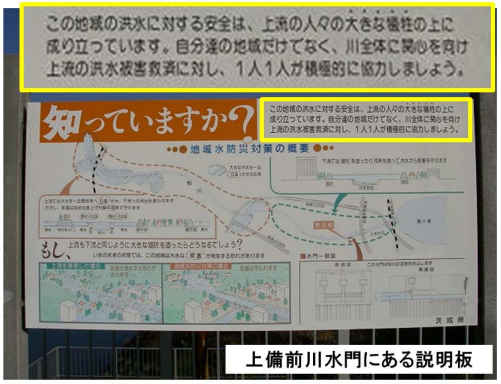
①他に比べ有意に氾濫しやすい場所を特定できること
現状：堤防の整備状況や過去の浸水実績状況から、明らかに越水（溢水）氾濫しやすい場所
論点：破堤現象も含めた有意性の評価

②その場所が氾濫すると下流域または流域全体の被害が相当程度減少すること
現状：既存治水計画の踏襲、再度災害防止の観点から、外力条件を設定している場合が多い
論点：超過洪水や気候変動の不確実性など複数の外力条件による評価

③氾濫を考慮する地域の理解が相当程度得られること
現状：予算の制約（暫定的な対応）、被害程度の相対比較（現状よりは悪くならない）、地域内の利害衡平（農地は浸水させるが宅地は浸水させない）などの観点から必要最低限の合意形成
論点：被害補償や水害保険等の影響緩和策

④施策の総合性・実効性が保たれること
現状：各個別法のもと都市部局等の関係部局が主体的な施策実施者
河川管理者は連携調整の場の主催、データ提供が主な役割
論点：河川管理者と関係部局間の役割分担、責任範囲を明確化する枠組み（法令、条例等）

ご静聴ありがとうございました



2.2.7 題材７

題目：不確実性への対応についての論点

講演者：吉谷純一（流域管理研究官）

発表資料：

不確実性への対応についての論点

気候変動研究適応本部
流域管理研究官　吉谷純一

不確実性の種類

偶然性の不確実性
- 統計的変動と不均質性による
- 不確実性に含めない場合もある
- 観測により確率分布を知ることができる

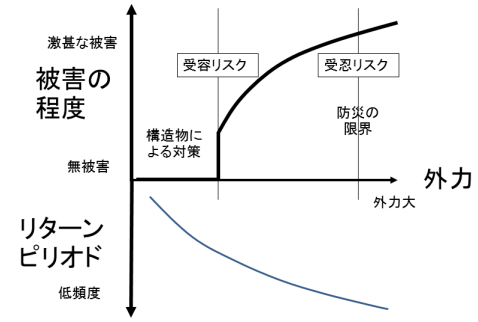
モデルとパラメータの不確実性（認識的な不確実性）
- モデル構造が不十分な場合
- データ不足でパラメータを正確に設定できない場合

深い不確実性（deep uncertaintyの仮訳）
- システムが理解できない場合
- 観測が事実上不可能な場合
- 確率分布は不明

出典：National Research Council (NRC) 2013: *Environmental Decisions in the Face of Uncertainty.* Washington D.C., National Academy press.

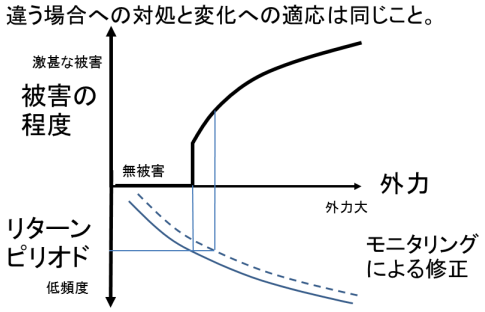
偶然性の不確実性

- 評価技術あり



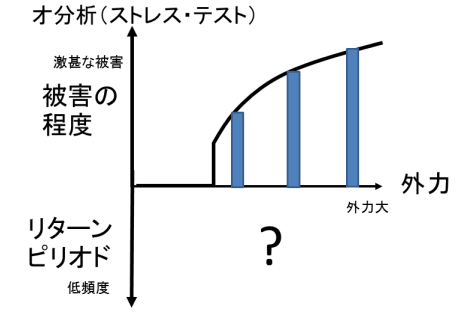
モデルとパラメータの不確実性

- 外力・ﾘﾀｰﾝﾋﾟﾘｵﾄﾞの関係は予測できるが、違うかもしれない。
- 違う場合への対処と変化への適応は同じこと。



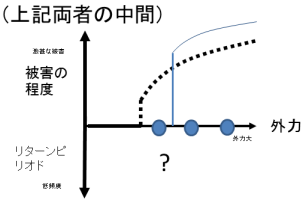
深い不確実性

- 生起確率が不明な場合
- 外力発生のシナリオ設定し、被害を予測するシナリオ分析（ストレス・テスト）

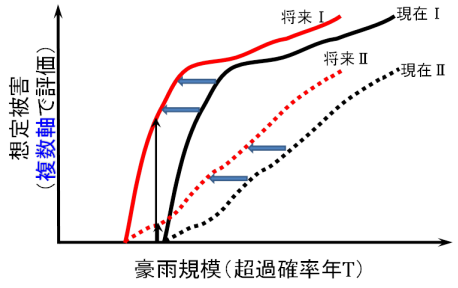


生起確率がわかないときの行動基準

- 経営戦略の意思決定論、気象予報の経済価値分析での知見
- 複数の対策案から選択する行動基準
  - ミニマックス損失（リスク回避型）
  - ミニミン損失（リスク選好型）
  - ミニマックス・リグレット（上記両者の中間）
- 総合的に判断



気候変動（不確実性）の影響が小さい外力・被害関係は点線



被害～豪雨規模関係における気候変動影響
※関係を表す曲線の立ち上がり方の違いが何をもたらすかの説明．上向き矢印は被害の代表比較．

出典：藤田光一、水災害分野における現場からの気候変動適応～現象の可視化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～、平成24年度 国土技術政策総合研究所講演会講演集、国総研資料 第699号

7

論点まとめ

- ■ 適応はリスクマネジメントと同じ
  - ✓ 降雨増の適応策はすべてno-regrets*
- ■ 適応策は基本的に流域・場所限定
  - ✓ 適応策は被害・外力・リターンピリオドの関係次第
  - ✓ 万能の適応策はない
- ■ 生起確率が不確かな外力への対処として
  - ✓ 感度分析->違っても被害が急増しない（被害曲線をねかせる方が有利）
  - ✓ モニタリング->フィードバック
- ■ 生起確率がわからないときの感度の考慮などの総合的な意思決定を参考
  - ✓ 期待値だけでない

* Adapting to the Impacts of Climate Change, America's Climate Choices: Panel on Adapting to the Impacts of Climate Change; National Research Council

8

2.3 全体討論

まず、第Ⅱ部気候変動中間報告書第２章「気候変動に適応する治水方策の関する研究」について以下にとおりＡからＥのような題材に対して論点（朱文字）を設定して、議論を進めることとした。

全体整理

気候変動適応研究に関するＡからＥという題材の整理・捉え方について
国総研の気候変動適応研究全般について

A

2.1 気候変動予測のめざましい進展

→気候変動予測結果の受け止め方：特に、実務への反映という観点からの基本スタンスと持つべき認識

→適応策検討にとって望ましい気候変動予測精度・信頼性とは？　現状とのギャップの度合い

→気候変動予測の翻訳から見えてくる、治水に関わる適応策を考える上でのポイント

- 現在は河道の整備水準が低い段階であり、整備水準を超える出水による災害が結構起きている。そのような出水の経験を踏まえた現場レベルの教訓を極値現象に応用できないか（渡邊）
- 過去の降雨の引き延ばしによる気候変動の予測技術の確実度を上げていくことも必要だが、隣接地域等の局地的な事象（前線や台風性の降雨等）をどう取り込んでいくかが重要（角）。
- 津波対策ではすでに議論されているような破堤状況に対して、河川ではどのようなことができるのか検討を進める必要がある（二瓶）。
- 今まで河川整備をやってきた経緯の本格的なレビュー、現在までやってきたことの評価・反省をまず行うべき（福岡）。
- 適応策については、不確実だからと遅らせず、実践できるところから進めるべき。国総研の研究については、現場が見える形の適応策についても焦点を当てていることについては評価できる（中北）
- 頭の中のみで考えたり、コンピュータで機械的に検討したりすることではなくて、気候変動下において何が起こるかについてのシナリオを現地で起きていることを介して想像力を働かせて検討すべき（福岡）

B

2.3.1 治水対策手法の拡充の展望：河道設計からのアプローチ

→河道設計：河道容積を大きくするという技法展開の再位置付け、治水・環境・管理を統合的にとらえた“新たな”川づくり技術への転換

- 極端現象のみによって河道形状が形成されるわけではなく、平常時の流量によっても河道が形成される。そのため、極端現象が起こったときに安全に流せる河道形状とともに、普段の維持管理が容易な河道にするという２通りの考え方で河道設計を考えていくべきである。そういう意味では、極値流量だけでなく、流量の時系列がどうなるかを考えていく必要がある（渡邊）。
- 気候変動下においても、川幅（堤間幅）と断面形状が今のままでいいのかについては、よく考えないといけない。自然の流量に応じて水深が決まって、それなりに川が維持でき、大流量も

流せるような川の設計を、国総研は考えていかなければならない（福岡）。

- 温暖化による流況変化（大流量増、低流量減少）について河川工学河にとって大事な外力として考慮すべき（中北）。

C

2.3.2 治水対策手法の拡充の展望：ダムからのアプローチ

降雨予測を利用したダム洪水調節の検討から→技術と社会的受容、制度設計のバランス
→どこまで積み上がるか？　限界は？　見込みは？　その上での論点は？

- ダムの有効利用の他に、設計洪水流量の将来変化が海外（国際大ダム会議等）では重要なテーマとなっている（角）。
- 事前放流については、単独ダムの運用による対応では、限界があり、リスクも大きくなるので、ダム群として対策を検討すべき（角）。
- アンサンブル予測の活用は、一つの方向性として有効である。ダムの運用を検討する場合は、降雨波形よりも総雨量の方が重要であり、台風の速度が効いてくる（角）。
- アンサンブル予測では、次の予測が出るまでの間隔がもう少し短くなると、アダプティブにダム操作ができると考えられる（中北）。
- 治水の核はダムであるという意識でやってほしい。ダムのある川は、治水、利水、環境の面で弾力性がある。ダムに入ってくる流量ハイドログラフ等が高精度でわかるようになれば、これを用いて降雨-流出系のシステムがわかるようになり、河道計画の精度がかなり上がる（福岡）。
- 気候変動下における超過外力への対応や、治水ダムと一体となった管理のなかで生かしていくためには、利水ダムの情報の把握が必要である。（角）。

D

2.3.3 設計以上の外力を受けた治水施設（群）機能発揮・喪失に関する検討

→超過外力を受けた防災システムの機能発揮・喪失シナリオ設定の技術化
→設定技術はどうあるべきか？
→結果の利用方法

E

2.3.4 氾濫のさせ方をコントロールするというアプローチの検討

→超過洪水に伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題
→氾濫コントロールが効果を持ち、また実施可能となるための条件とは？

- 氾濫の人的被害について考えるためには、破堤や氾濫の拡大の仕方を具体化するために、実際の氾濫等の解析を進めていく必要がある（渡邊）
- 国総研の河川グループとしては、街づくり等都市や道路サイドの部局とも連携して、研究成果を今後の街づくりにつなげる視点が必要である（福岡）。
- 住民避難には人々の温暖化に関する認識を醸成させることが重要（オランダでは住民と一体の取り組みを進めている）（中北）。

- 津波を踏まえ、大河川氾濫時の危機管理対策について検討する必要がある（二瓶）。
- 二線堤（旧堤防）に加え、自然堤防（地形）や道路（盛土）の活用方策について調査・研究すべき（福岡）。

F

2.3.6 不確実性への対応

→どのような基本スタンスで行くか？

→総合減災システムへの反映

→“順応的管理”の有効性と限界

→水文モニタリングのあり方

- 不確実性があることから、最悪シナリオ群を考慮すべき（中北）。
- 今対策（投資）しないと、将来大きな費用が必要となることを世の中に訴えていくという、アセットマネジメントの視点があり得る。不確実性が伴う中でどのように必要性を説明するかが課題となる（角）。
- 過去の事例は住民にとって理解しやすい（渡邊）。
- 超過洪水に対応するための川の技術を議論するときに、不確実と言い過ぎないようにすべき。国総研としては、不確実性の意味を整理し、不確実なものについての対応の考え方を打ち出していくべき（福岡）。
- IPCC や海外のレポートのように、河川事業にとって気候変動により良い影響がある部分も整理しておくべき（中北）。

3. 参考資料

ワークショップの参加登録及び会場で配布したアンケートから得られたデータを掲載する。

3.1 聴講者数・所属組織

事前申し込み：　　131 名（キャンセル 3 名を含む）
事前申し込み参加者：100 名
当日申し込み参加者：　16 名
参加者（合計）：　　116 名

表-Ⅲ.3.1 参加者の所属組織の内訳

	民間企業（建設業）	民間企業（コンサルタント）	民間企業（その他）	特殊法人・特殊会社	財団・社団法人	独立行政法人	地方公共団体	大学等教育関係	学生	国の機関（国土交通省）	国の機関（国土交通省以外）	その他	計
事前申込み	7	50	11	1	5	7	1	15	0	30	2	2	131
事前申込み参加者数	7	35	10	1	4	6	1	12	0	20	2	2	100
当日申込み参加者数	1	7	1	0	1	0	0	0	0	6	0	0	16
参加者数(計)	8	42	11	1	5	6	1	12	0	26	2	2	116

3.2 聴講者の属性（職業、性別、年齢）

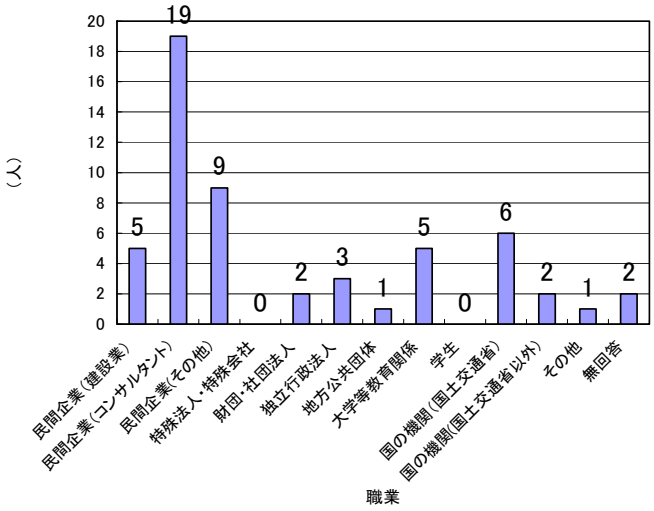


図-Ⅲ.3.2 職業

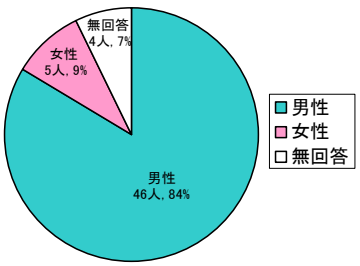


図-Ⅲ.3.3 性別

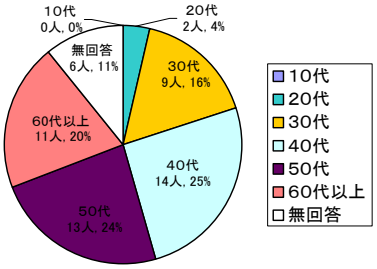


図-Ⅲ.3.3 年齢

3.3 アンケート

問１：今後の我が国の水災害分野での適応策を推進する上で、どのような研究が必要とお考えでしょうか。ご自由にご記入下さい。

- 東日本大震災をふまえ想定外の外力への対応の考え方、計画論（建設業、男性、50 代）
- 技術制約のもと施設老朽化の中で維持管理・基本哲学（建設業、男性、50 代）
- ダム再活性化技術（建設業、男性、50 代）
- 本日の報告等をお聞きして、気象予測データを基に河川施設の操作か予測を行っている事を知り技術の進捗を実感する事ができました。早く完全な 3 次元での河川シミュレーション実現が簡単に出来るようになると良いと思いました。（国土交通省、50 代）
- 気象予測精度の向上、不確実性のある予測の適切な利用手法の開発（財団・社団法人、男性、60 代以上）
- 「不確実だからと言って遅らせるな」国が動かないと地方は動けない。不十分かもしれない事業を続けている現実。「気候変動予測結果の翻訳」を早急に利用可能な形にまとめて欲しい。（大学等教育関係、男性、50 代）
- 河道やダムでの適応幅は限られるため氾濫原対策を含めた研究が必要ではないでしょうか？（コンサルタント、男性、40 代）
- 全面的に河道から溢れるような洪水が来た場合､私達は事前にどこに住めばいいのでしょうか？（コンサルタント、男性、40 代）
- 積雪の変化と融雪出水や極地豪雨による土砂災害への影響（国土交通省、男性、50 代）
- 研究対象ではないかもしれないが、一般に不確実性を持つ適応（策）を理解してもらうことのむずかしさを如何に対応するか。（建設業、男性、50 代）
- 既存積み上げに対する「こだわり」を感じる。（国の機関、男性、50 代）
- 気候変化による外力の変化（予測、調査、観測、分析）の把握（民間企業、男性、40 代）
- 流域等での安全確保の考え方（民間企業、男性、40 代）
- 都市に特化した治水方策のあり方について研究を推進して欲しい。例えば河川と下水道の関係、極値的な集中豪雨への対策といった事項に関心があります。（地方公共団体、男性、40 代）
- 具体策として、まず 1 つ 2 つで良いので実施すべき事、実施できる事を（国土交通省、男性、50 代）
- 他分野との総合政策としての調整、在野技術者の教育に役立つ施策を（国土交通省、男性、50 代）
- 人口減少・高齢化が進んだときの洪水管理（樋門等の操作、避難速度など）（国土交通省、男性、40 代）
- 敢えて氾濫させるときの制度設計（片岸を犠牲にする際の意思決定者、補償など）（国土交通省、男性、40 代）
- 人口が減り厳しい財政の中で治水にどれだけ投資できるのか（国土交通省、男性、40 代）
- 我々の目指す流域の姿はどのような流域か、継続可能か（国土交通省、男性、40 代）
- 極値的な豪雨が起こった際の適応策（主に小河川や内水氾濫か）が必要では（国土交通省、男性、40 代）
- 海外への戦略的な技術協力が必要か、大事な国（タイなど）あるのか（国土交通省、男性、40 代）
- 温暖化で植生が変わり、河道内の自然環境の変化もあり人々の暮らしに影響を与えるのか（農作物の変化や河川の魚種の変化など）（国土交通省、男性、40 代）
- 確実性をあげるための研究もしくは証明するための観測（国土交通省、男性、40 代）
- 気候変動と地震（震災）が W で起こった場合の水災害対策をどのように考えているか（建設業、男

性、60 代以上）
- 想定外の外力をも考えての対策も必要であろう（建設業、男性、60 代以上）
- 河川の堤防が整備されていても地震が起きて破壊されてしまって堤防の機能を果たさなくなった時にいかに対処していくかを考えておいてはいかがか（建設業、男性、60 代以上）
- ダムの異常出水適応、諸外国（特に欧米、韓国）では洪水吐増強やフィルダムの越流保護等、整備的なものを含め日本より積極的かつ柔軟な対応が始まっている。これらの新技術を日本にも導入できるよう国が先鞭をつけていただけるとよいと思います。（民間企業、男性、50 代）
- 河川にとってのレベルの考え方とその対応策（コンサルタント、男性、40 代）
- 河川管理者が流域をマネジメントするための法的検討も含む統合流域管理の概念の取り入れ（コンサルタント、男性、40 代）
- パネルディスカッションでもありましたが、河川だけの議論では不十分であり周辺住民、街造りと一体となった議論とそれを元にした技術的検討が必要だと思います（建設業、男性、50 代）
- 二瓶先生の指摘にあった津波防策で提案されている L1、L2 の考え方に氾濫を前提にした対応等を河川でも検討すべきであると思います。（建設業、男性、50 代）
- 河川管理者が保有するデータ手法の一般への公開（データベースの共有、モデル、手法、パラメータ、施設操作規則、諸元、水権利、雨量、流量、水質、取水実績等）（大学教育関係、男性、30 代）
- 将来予測だけでなく過去の雨量、気温、流量データを統計解析し、その中に温暖化（気候変化）の影響と思われる現象を抽出する研究（大学教育関係、男性、30 代）
- 研究成果報告、ワークショップ、共同研究を積極的に実施する（情報、問題、課題の共有）（大学教育関係、男性、30 代）
- 治水だけでなく人口分布の変化も重要なファクタであるとのコメントがあり、まさにその通りだと思います。そうは言っても実務におとしこむ際には、今の技術と予算では可能なことからひとつずつ片付けていくことになろうかと思います。今後は関連データの整備、解析ツールの作成と公開、解析結果の GIS データとしての公開方法など具体的な情報処理の研究にも取組んで頂ければと思います。（民間企業、男性、30 代）
- 確率論やリスク分析による投資のあり方と具体のハザードを防ぐ話が同時に評価されていて先が見えない。両者を分けて全体的にどう進めていくか研究の統合的管理が望まれる。（コンサルタント、男性、50 代）
- リスク分担については過去の合意形成を更に詳細に分析し、心理学をも含めて方向性を見出して欲しい。（コンサルタント、男性、50 代）
- 流域毎、地域毎の適切な影響評価手法、バイアス補正、ダウンスケールの対応、目的（頻度、極端現象）に応じた適切な手法（コンサルタント、男性、50 代）
- 外力増（変化）を適切に評価する流出・氾濫解析手法の開発（コンサルタント、男性、50 代）
- 外力増を適切に評価する施設安全度の評価手法（コンサルタント、男性、50 代）
- 複合的対策による最適な適応等組み合わせの考え方（コンサルタント、男性、50 代）
- 河川サイドの研究のみでなく（実施されているかもしれませんが）都市サイドと協動して適応策をする必要があるのではとも思いました。例えば上・中・下流でのブロック別の氾濫被害を研究されていますが、これは現状の話で都市サイドでは高齢化、人口減少、価値観変化などによるコンパクトシティなど住む場所を変えていく事も考えられており協動して都市流域としての対策を研究する。（困難でしょうが）福岡先生が発言された事と全く同感で感じていました。（コンサルタント、男性、50 代）
- 昔の低地住民が水塚（局部的に土盛りし蔵を建てた避難場所）を作って自衛したように、小さい面

積毎への避難場所または建物の整備方策（NPO,男性、60 代以上）
- 流域内の人口減少、産業構造、配置の大変動を受けて住民的に河川改修計画のあり方、合理性を追求する研究を（コンサルタント、男性、60 代以上）
- 流域全体の地表水、地下水を総合的にとらえながら、例えば河道の詳細検討については準三次元一般底面解析法を適用するというような使い方ができないものか
- 地域連携を考えた場合、ステークフォルダーの方が知りたいと思う情報を、可視化できるような仕組みができないかと思いました。例えば、森を守りたい人には、森の質の変化が洪水や渇水にどのような影響となって現れるのか、河川整備により瀬や淵がどのように変化し生態系にどのような影響となって現れるのかなどをシミュレーションにより可視化し、様々な疑問を皆で考えることができるツールがあれば、合意形成に役立つのではと思っています。

問２：気候変動適応策に関する研究 中間報告書（草稿）への意見がございましたら、ご自由にご記入ください。

- 河川分野と民間分野の役割分担（民間分野への計画提案）－住民の立場に立って水災を失くすための研究を（河川の立場からの研究でなく河川計画の研究は含むとして）（コンサルタント、男性、60 代以上）
- 利根川水系の全体の非定常流量による解析をして安全、非安全区間の抽出を（特に江戸川分派点、鬼怒川合流点、思川合流点、河道内貯水池効果などに留意（コンサルタント、男性、60 代以上）
- 超過洪水の対策としての江戸川からの左右岸の堤防構造が異なることをどう評価、合理化するのか。他の河川への適応性はいかがか（重点投資の極限治水形態の一つとして）（コンサルタント、男性、60 代以上）
- ダムの操作については、「ダムのただし書き操作の指針」づくり、およびそのための各種センサー、レーダ雨量、水位計の配置のあり方の研究を（このことが新たな操作の方法に繋がることになるように考えます）（コンサルタント、男性、60 代以上）
- できるだけ早く公表して頂きたい。（コンサルタント、男性、60 代以上）
- 河川計画論、河道計画論の根本的な見直しの可能性にふれるトライを。（建設業、男性、50 代）
- 積み残しは何か、それに対する方針はどう考えるかという章を付け加えるべき（見出しが全て読めない為、相当する節があれば無視して下さい）（国の機関、男性、50 代）
- 「不確実性を内蔵したリスクマネジメント」であると考えれば、観点を変えればこれまでやってきた河川計画と何ら変わらない。これまでの計画が不十分であったとは思うが、より広く、より多くの事象を考えねばならないことになると思う。（国土交通省、男性、50 代）
- 総合政策の問題なのかも（国土交通省、男性、50 代）
- 広報としては、もっと活用すべきと思う。（国土交通省、男性、50 代）
- 「何が起こるか想像力を働かせよ」に同感。（国土交通省、男性、50 代）
- 新ダムできないから既設ダムの活用を考えることになるが制度の検討やダムが対応すべき外力の持ち分の検討、合意が必要。（国土交通省、男性、50 代）
- 事前に読んでからワークショップに参加できらたら、より議論ができたと思います。（建設業、男性、50 代）
- 最新の知見、解析手法、データ等のレビューが必要（大学教育関係、男性、30 代）
- 適応策のメリット、デメリットの整理が必要（ケーススタディでは不十分）（大学教育関係、男性、

30 代）

- 報告の内容が適応策の検討になっていない。（大学教育関係、男性、30 代）
- 海外ですでに実施されている適応策のレビューと日本独自に必要な適応策の分析が不十分（遅れている印象を受ける）（大学教育関係、男性、30 代）
- 適応策の提案内容が期待外れ（もっとさまざまな対策、大胆な対策・検討）（大学教育関係、男性、30 代）
- 将来のシナリオがばらばら（標準、最良、最悪くらいは統一すべき）（大学教育関係、男性、30 代）
- 渇水の議論が少ない（大学教育関係、男性、30 代）
- 2.1.3（流域と一体となった浸水被害軽減方策お関する研究）が大変実際的で解りやすいと思いました。この研究はおそらく人類が正解を知りえないことに本質があると思いますので、いかに社会的合意を得るかが重要だと思います。そのためには研究成果の公表に加え、データや手法を公開し第三者の再利用を促進するとともに水災リスク情報の公報に関する社会実験があれば尚よいと感じました。（民間企業、男性、30 代）

国土技術政策総合研究所資料
Technical Note of NILIM
No.749 August 2013

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地
企画部研究評価・推進課 TEL029-864-2675