

水の蒸発散能力が持つ都市熱環境緩和・抑制効果の 定量的評価に関する研究

中央大学理工学部

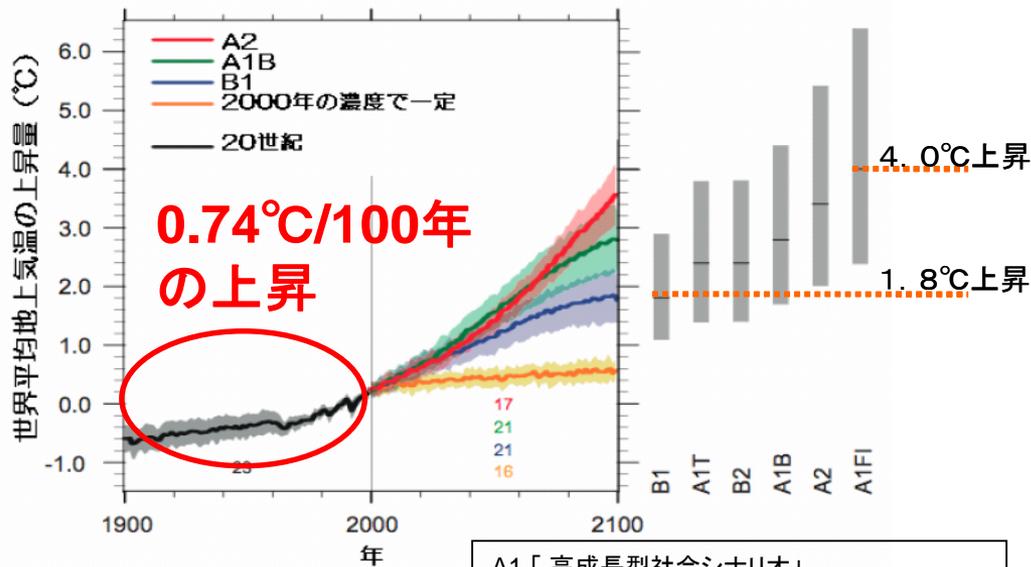
加藤拓磨

第1章

序論

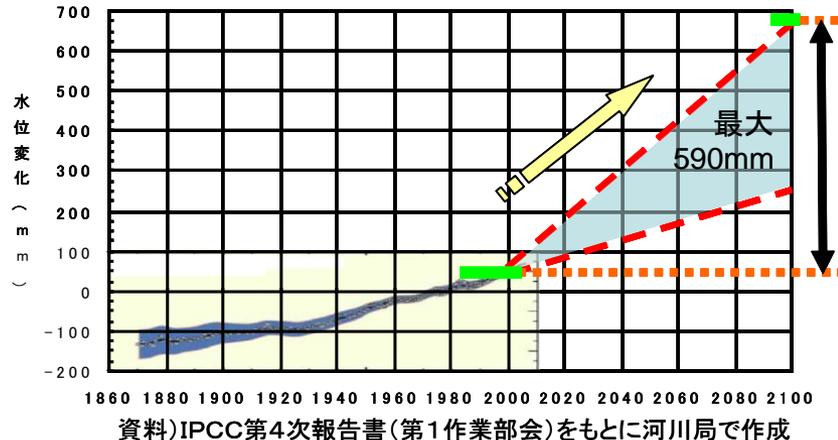
- ・今後20年間に10年あたり約0.2°Cの割合で気温が上昇することが予測されている
- ・100年後には、地球の平均気温は1.8~4.0°Cの上昇が予測される
- ・100年後には、地球の平均海面水位は18~59cmの上昇が予測される
- ・温室効果ガスの排出が抑制されたとしても、温暖化や海面上昇は数世紀にわたって続く

・平均気温



A1.「高成長型社会シナリオ」
 A1FI: 化石エネルギー源を重視
 A1T : 非化石エネルギー源を重視
 A1B : 各エネルギー源のバランスを重視
 A2.「多元化社会シナリオ」
 B1.「持続的発展型社会シナリオ」
 B2.「地域共存型地域シナリオ」

・平均海面水位



・21世紀末の平均気温上昇と平均海面水位上昇

	環境の保全と経済の発展が地球規模で両立する社会	化石エネルギー源を重視しつつ高い経済成長を実現する社会
気温上昇	約1.8°C (1.1°C~2.9°C)	約4.0°C (2.4°C~6.4°C)
海面上昇	18~38cm	26~59cm

資料)IPCC第4次報告書(第1作業部会)より

出典:国土交通省河川局河川計画課資料

海面水位上昇に伴う高潮・海岸侵食

降雨パターンの時空間の偏在化による洪水・渇水の増大

(出典)IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約(気象庁)

- ・実線は、各シナリオにおける複数モデルによる地球平均地上気温の昇温を示す
- ・陰影部は、個々のモデルの年平均値の標準偏差の範囲

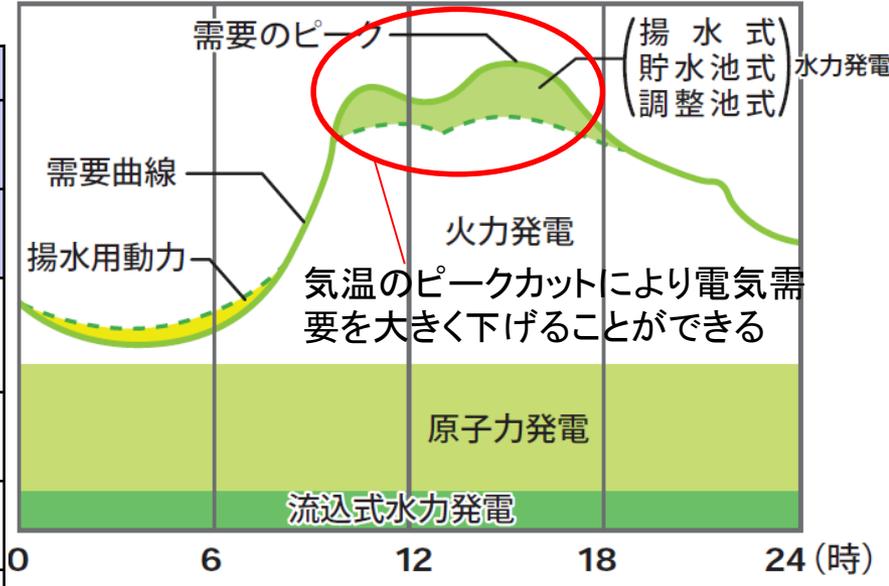
ヒートアイランド現象

関東地方における100年あたりの気温上昇量

都市	統計期間	100年当たりの上昇量(°C/100年)				
		平均気温			日最高気温	日最低気温
		(年)	(1月)	(8月)	(年平均)	(年平均)
宇都宮	1901~2005年	1.66	1.88	1.26	0.60	2.30
前橋	1901~2005年	1.78	1.49	1.88	1.43	1.83
水戸	1901~2005年	1.13	1.29	1.03	0.36	1.30
熊谷	1901~2005年	1.92	2.02	1.77	1.43	2.14
東京	1901~2005年	3.00	3.80	2.41	1.80	3.87
千葉	1967~2005年	—	—	—	—	—
横浜	1901~2005年	1.74	2.41	1.22	1.67	2.12
中小都市平均	1901~2005年	1.11	1.01	0.88	0.74	1.49

出典「気象庁ホームページ」を加筆

気温3°Cの上昇で約500万kW(原発5基相当)の電力需要増加

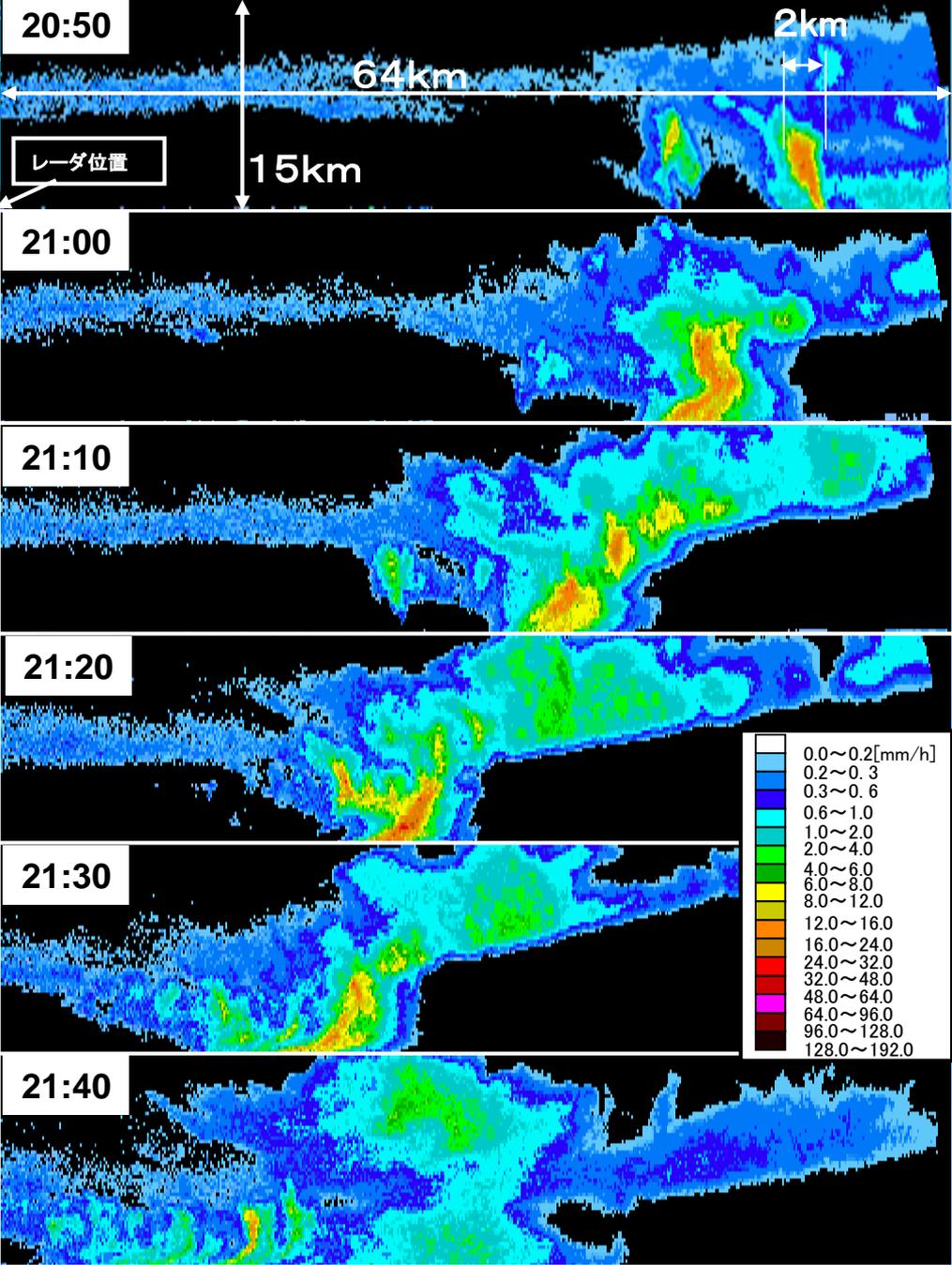
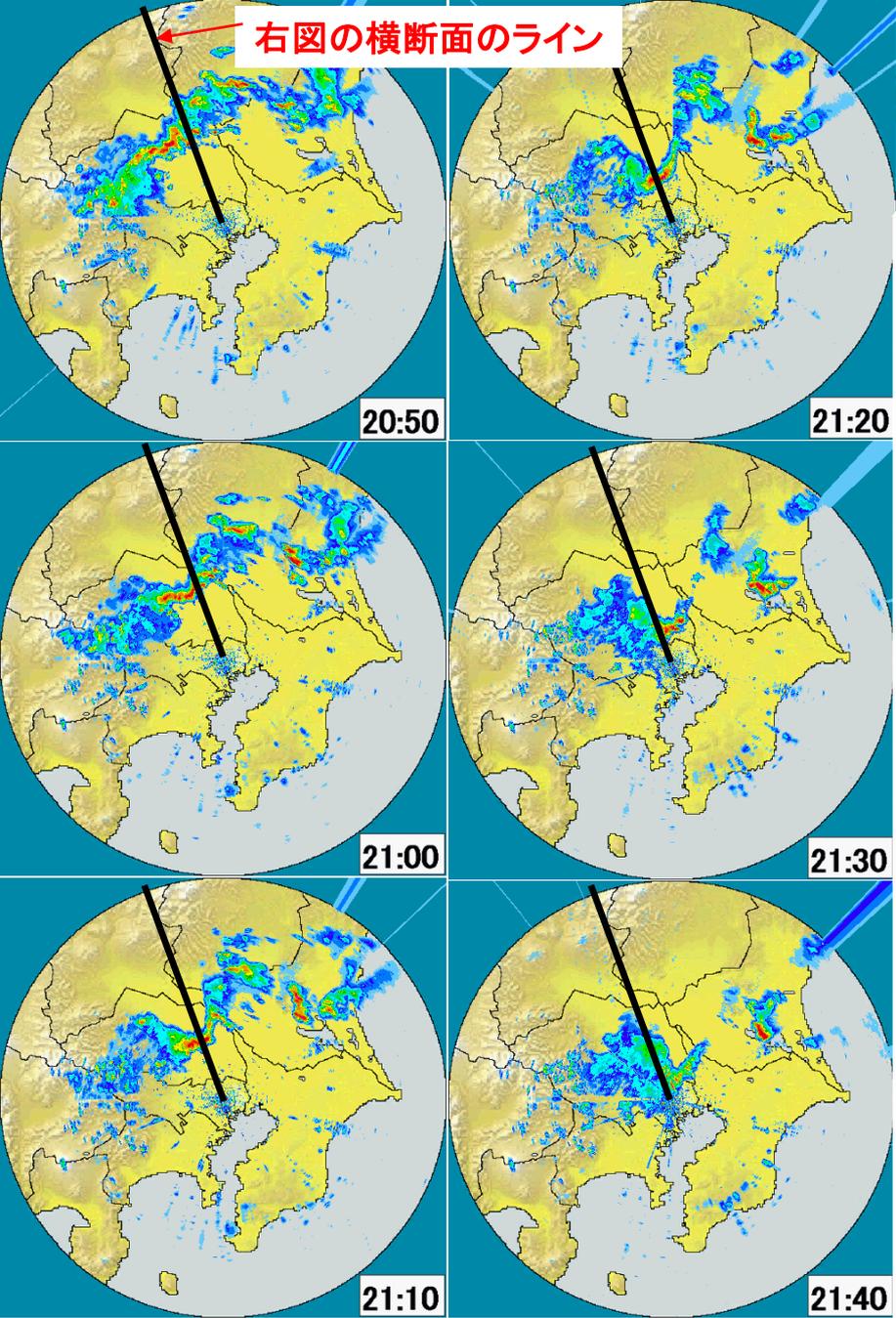


出典:資源エネルギー庁「原子力2005」

○夏場に東京の気温が1度上昇すると、約170万kWの電力需要増加

○東京電力の原子力発電所の1基の標準的な出力は110万kW(東京電力試算)

→ヒートアイランド現象緩和で気温を下げることは電気使用量を削減するだけでなく二酸化炭素排出の抑制につながり、またそれは地球温暖化現象の緩和にもつながる。



2002.8.1 20:50~21:40 前線組織 北部山地発生南下東進型

20:50~21:40 上の図から10間隔 方位340度高さ15km 幅64km 左がレーダ位置

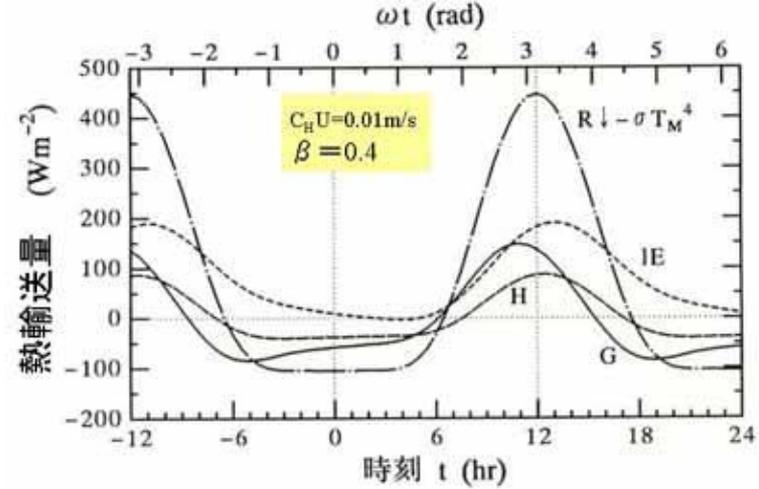
熱収支

$$R \downarrow = (1 - \text{ref}) S \downarrow + L \downarrow$$

日射 長波放射

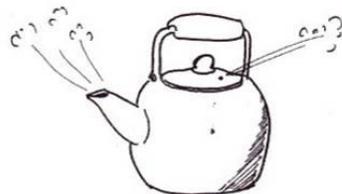
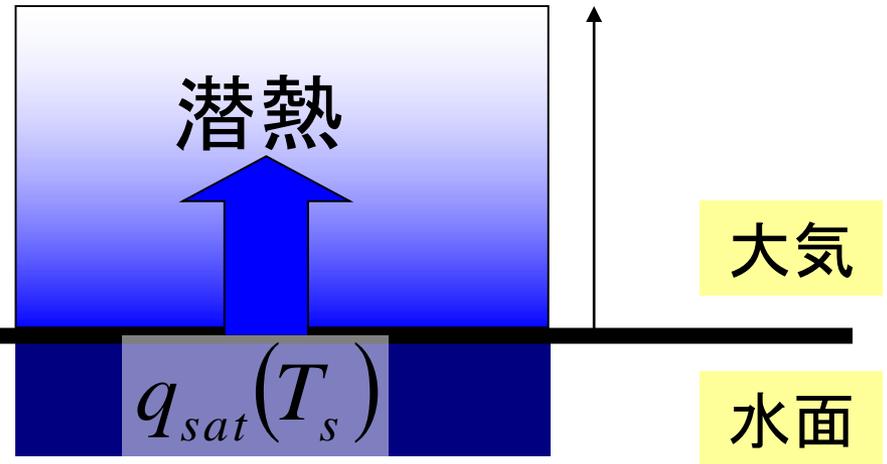
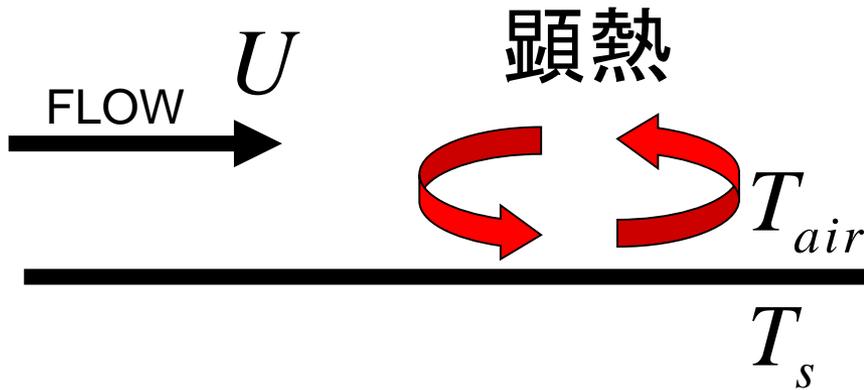
$$R \downarrow = \sigma T_s^4 + H + lE + G$$

入力放射 長波放射 顕熱FLUX 潜熱FLUX 貯熱

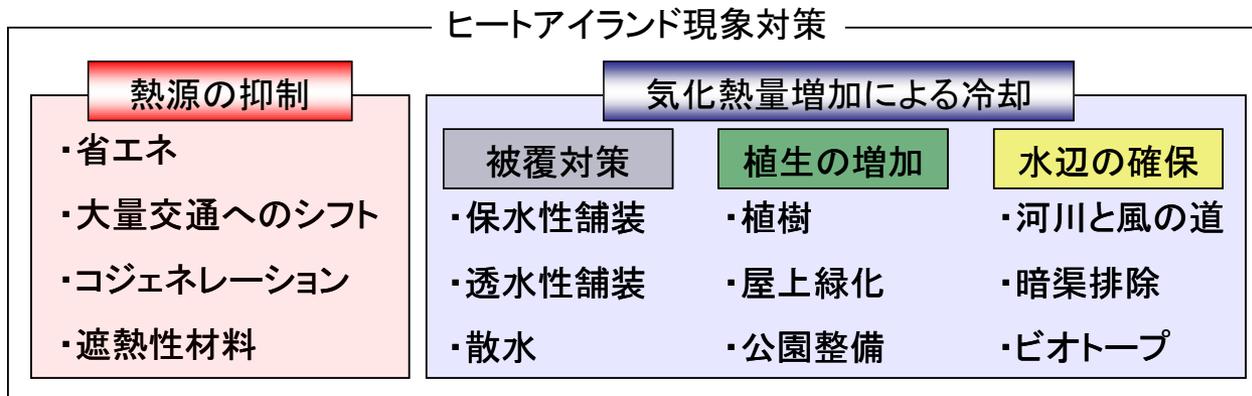
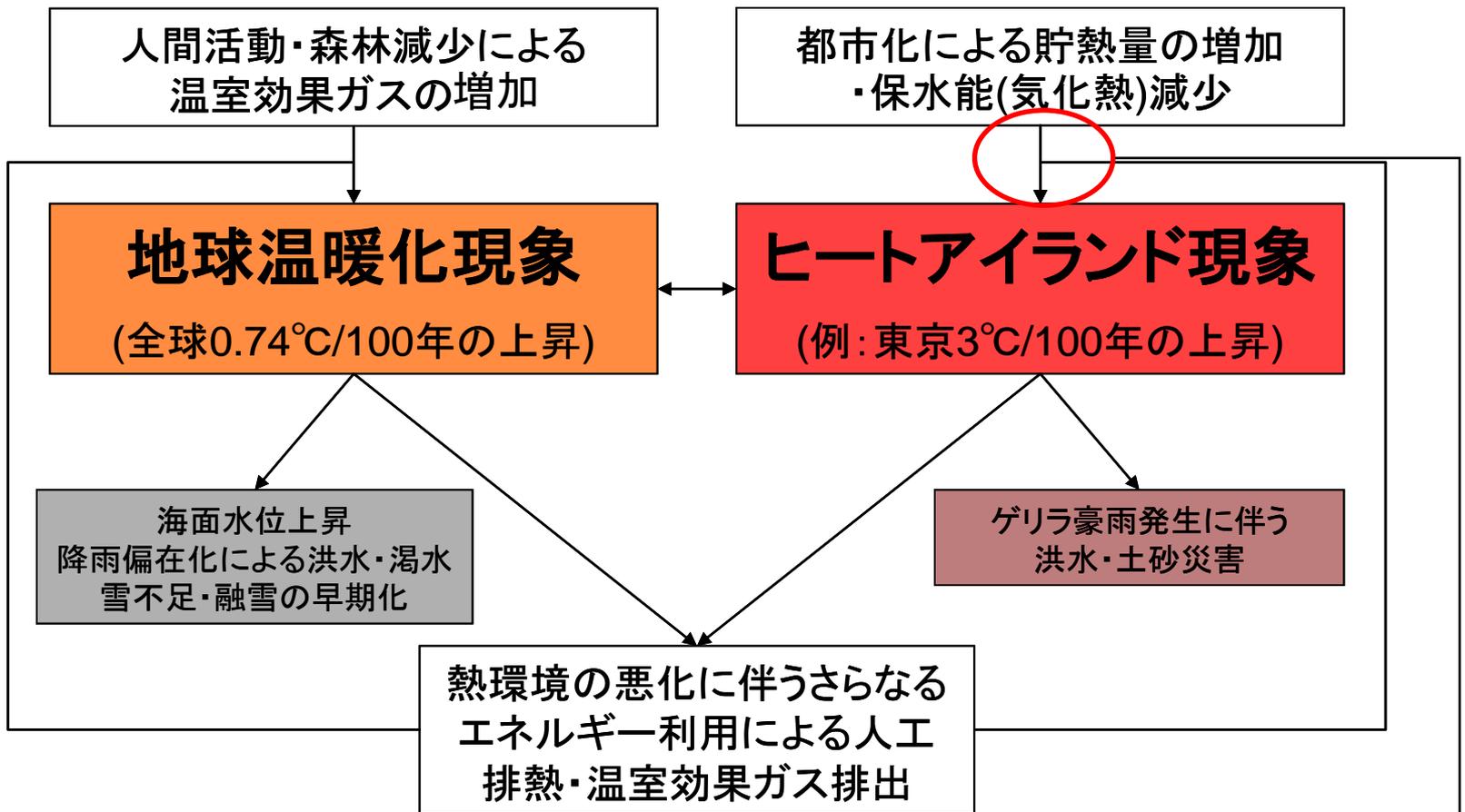


$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_{air})$$

$$lE = l \rho C_E U [q_{SAT}(T_s) - q_{air}]$$

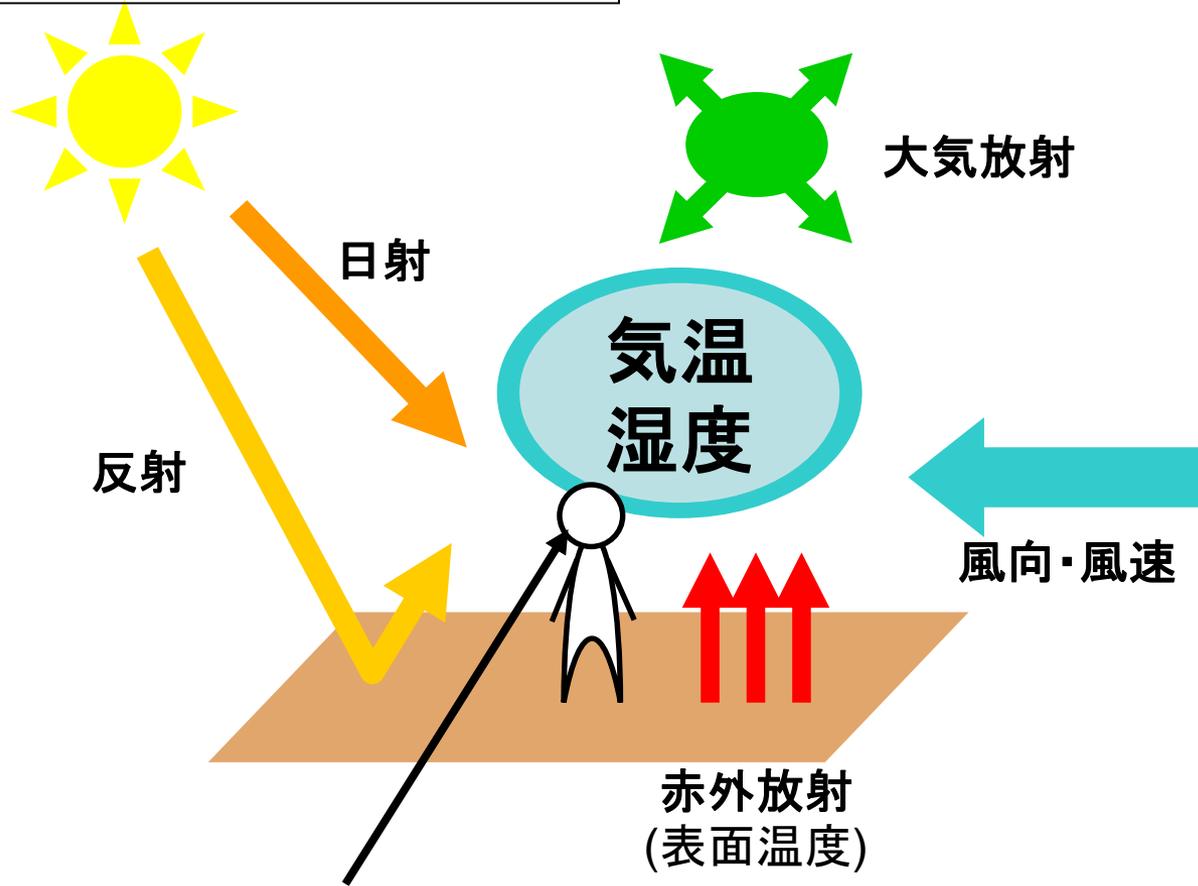


- ・水を0から100°Cまで上昇させるのに必要な熱量
4.2J/g·K × 100K = 420J/g
- ・水を蒸発させるのに必要な熱量
2250J/g



定量的な評価が不足・・・何故か？

人間を囲む熱に関する環境



人間が行える熱に関わる体感調節

生理的反応(発汗、呼吸、血圧・心拍数の変化)

衣服の着用、運動・体操、快適な場所への移動、空調設備の使用

冷温な物の飲食、視聴覚的効果(水辺・風鈴・焚き火)

気温・湿度の測定



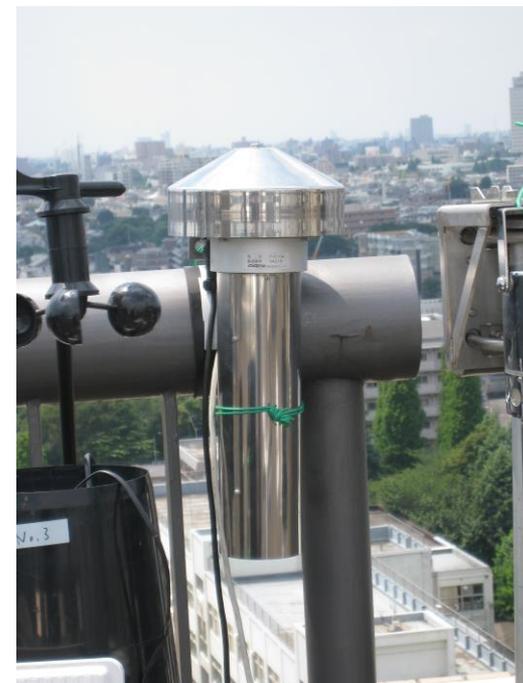
熱電対式温湿度計

およそ1万円
携帯電話ほどのサイズ
重さは100g程度



サーミスタ式温湿度計

およそ1.5万円
小型でどこにでもつけられる
重さは500g程度



通風式温度計

大規模な電源が必要になる
反応が遅いが正確な値を示す

他の観測機材に比べ比較的細かい計測間隔で記録可能
小型で都市内をくまなく観測できる

風向・風速の測定



3杯式風速計
矢羽式風向計

およそ15万円

設置場所が柱のある場所に限られる
サイズ(占有面積)はおよそ30立方cm
地上に置いたとき悪戯の対象になりやすい



プロペラ式
風向風速計

およそ50万円



3次元超音波
風向風速計

およそ80万円

設置場所が柱のある場所に
限られる
大規模な電源を必要になる

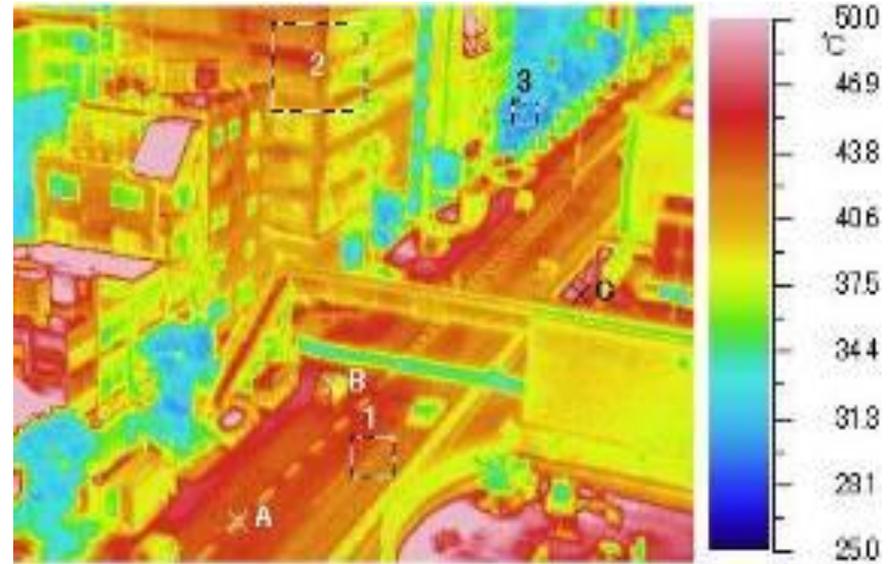
都市内の地上における風向風速は構造物などの影響を受けるため
一つの観測機材が取ったデータはその地域の代表値に適さない

大気放射・日射量の測定



全天日射計

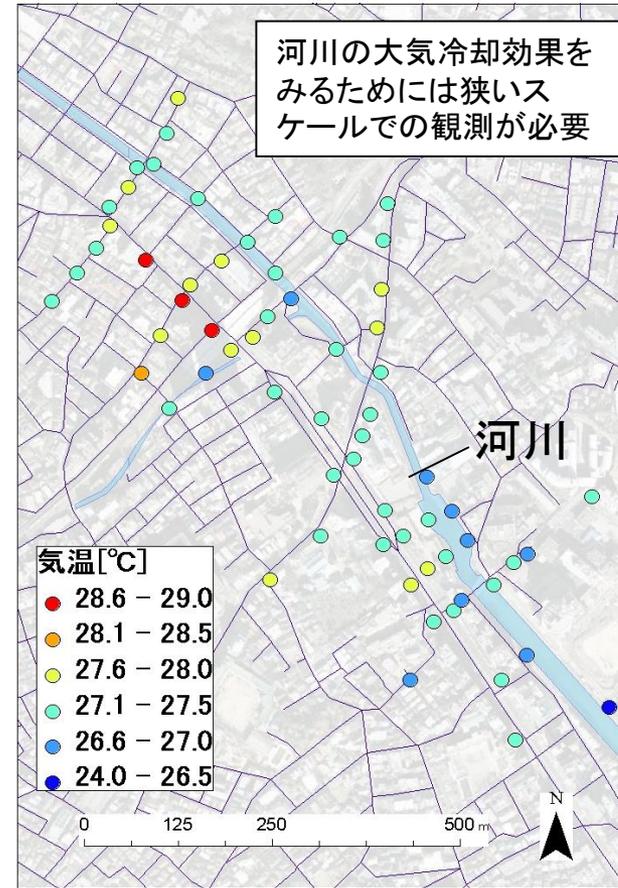
日陰がある場合はその地点での日射量の代表値とは言えない
1日中日光の当たるところを選ばなければならない



大気放射(表面温度)

サーモグラフィを用いて観測を行う
およそ500万円
地表面材質の違いによる温度変化が大きい

観測スケールと観測分解能

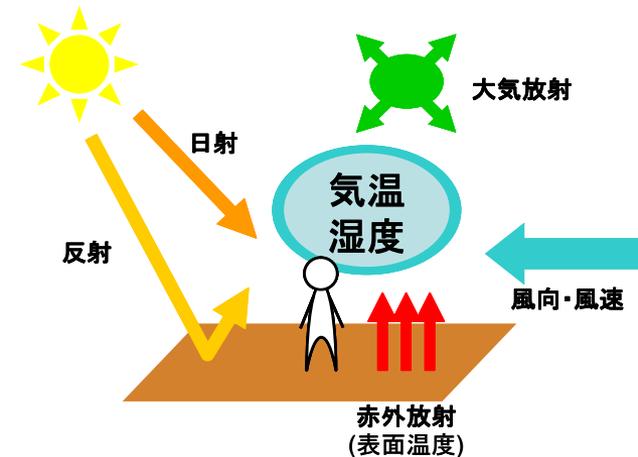


観測データを観測地点ごとに比較するにはそのデータが持つエリア代表性を考慮しなければ定量的な評価はできない。AMeDASにおいては観測機器の真下の地面には30m²以上の芝生を設置し、地面から輻射熱、雨粒の跳ね返りを少なくするなどしてエリアの代表値となるようにしている。著者の観測では輻射熱、人工廃熱が周辺にないことを確認した上でその場所に設置するように心がけた。

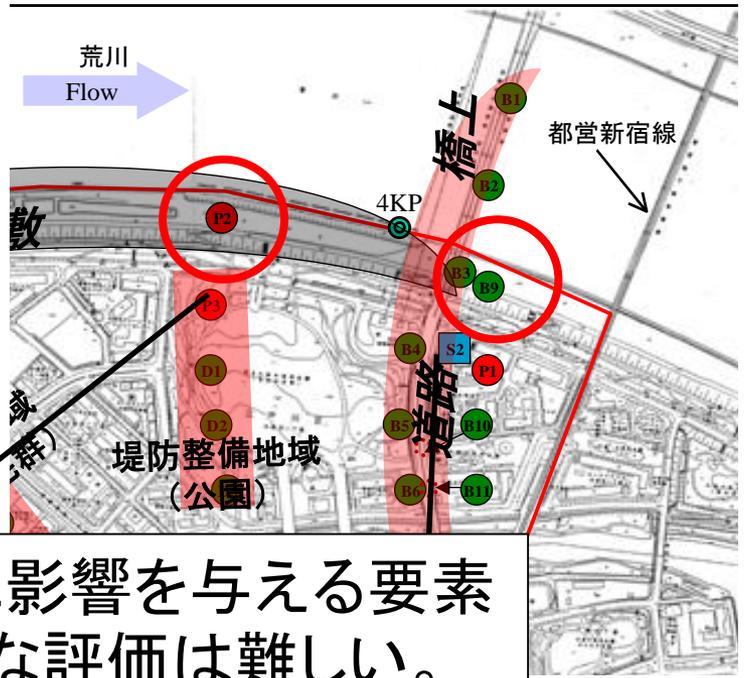
気象因子	機器価格	機器の設置場所		データのエリア代表性			備考
		地上	屋上	マイクロ β 0.02~0.2km 地上	マイクロ α 0.2~2km 屋上・地上	メソ γ 2~20km 屋上・地上	
気温	◎	◎	◎	○	○	◎	すべてにおいて 万能指標
湿度	◎	◎	◎	○	○	◎	マイクロスケールに おける変化はなし
風向風速	△	△	◎	×	△	△	場所による変化が 大きい
日射量	○	×	◎	×	△	○	日陰を考慮すると 代表性は保てない
大気放射 表面温度	×	△	△	×	△	○	地表面材質による 変化が大きい

観測機器には電源が必要なものも多くある。しかし地上での観測では電源の確保が難しいという問題点もある。

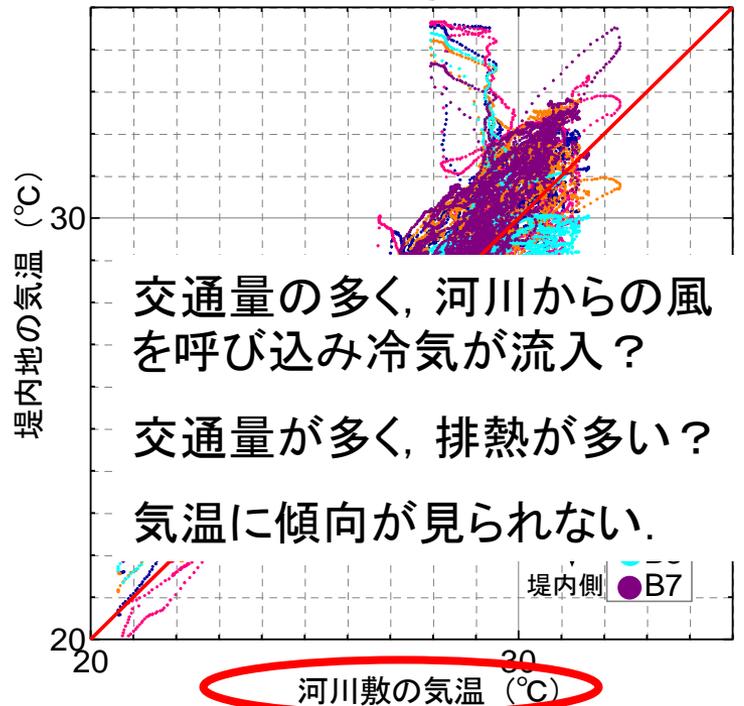
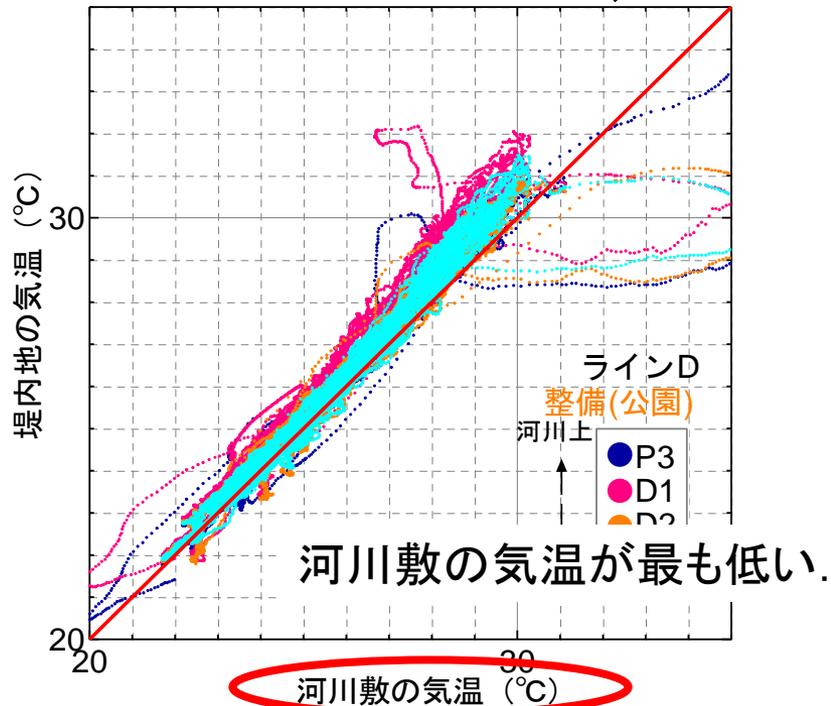
多くの観測経験を踏み、上記の表を作成した。マイクロスケールにおいてエリア代表性を示せる指標でなければ対象物の熱環境緩和作用を評価することはできない。



定量的評価はそんなに難しいことなのか？



都市部では熱環境に影響を与える要素が多いため定量的な評価は難しい。



本論文の構成

第1章 序論

実験

第2章 水の蒸発メカニズムに関する基礎的実験

・都市域で多い小スケールの蒸発メカニズムの解明

観測

第3章 打ち水による熱環境緩和効果

・人為的活動による冷却効果

第4章 大河川・都市中小河川の大気冷却効果

・河川の持つ都市冷却効果

第5章 都市内緑地とその周辺気象因子の空間構造

・クールスポットとしての存在する森林公園のもつ熱環境緩和作用

数値計算

第6章 河川・森林の微気象モデルの構築と再現計算

・森林内の気象因子の挙動, 河川のもつ冷気の拡散能力

第7章 結論

第2章

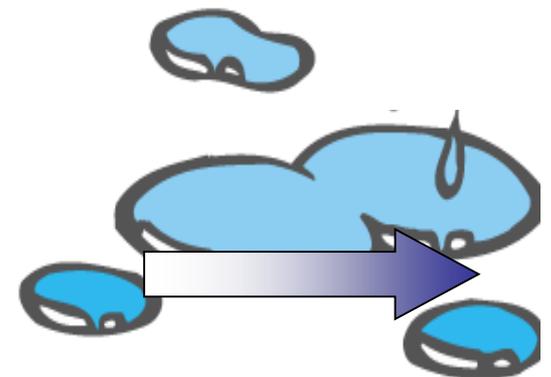
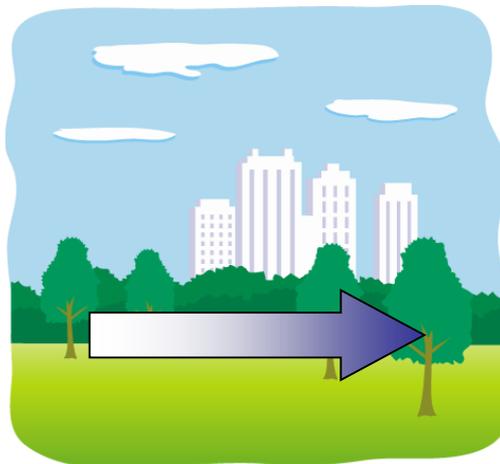
水の蒸発メカニズムに関する基礎的実験

研究背景

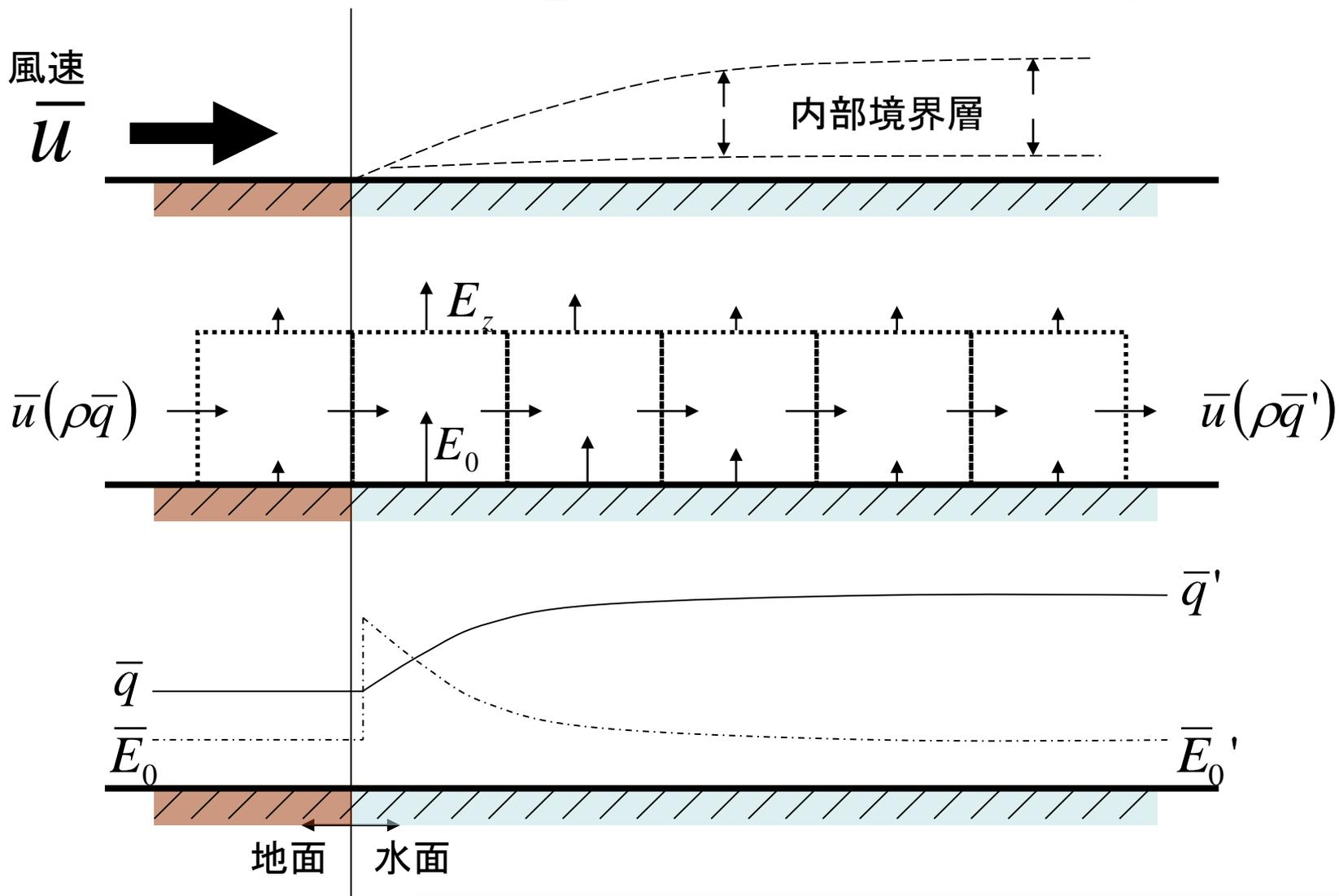
本研究は都市部で多く起こっているであろう局所移流現象における蒸発メカニズムを基礎的な実験から求めるものである。

小スケールでの蒸発：

中小河川，ビオトープ，森林(個葉)，池，打ち水(水溜り) etc



局地移流：隣接する表面を通過してきた空気が性状の異なる地表面を通過するときが発生する移流



都市は地形、熱源・冷源や、上記の現象が複雑に絡み合った場所であり、蒸発の空間分布を捉えることは困難。

蒸発量の測定方法

水収支法

土壌水分減少法

ライシメータ法

計量型ライシメータ法

〔ウェイイング,
フローティング〕

非計量型ライシメータ法

〔排水収支型,
地下水位一定型〕

微気象法

熱収支法

空気力学的な方法

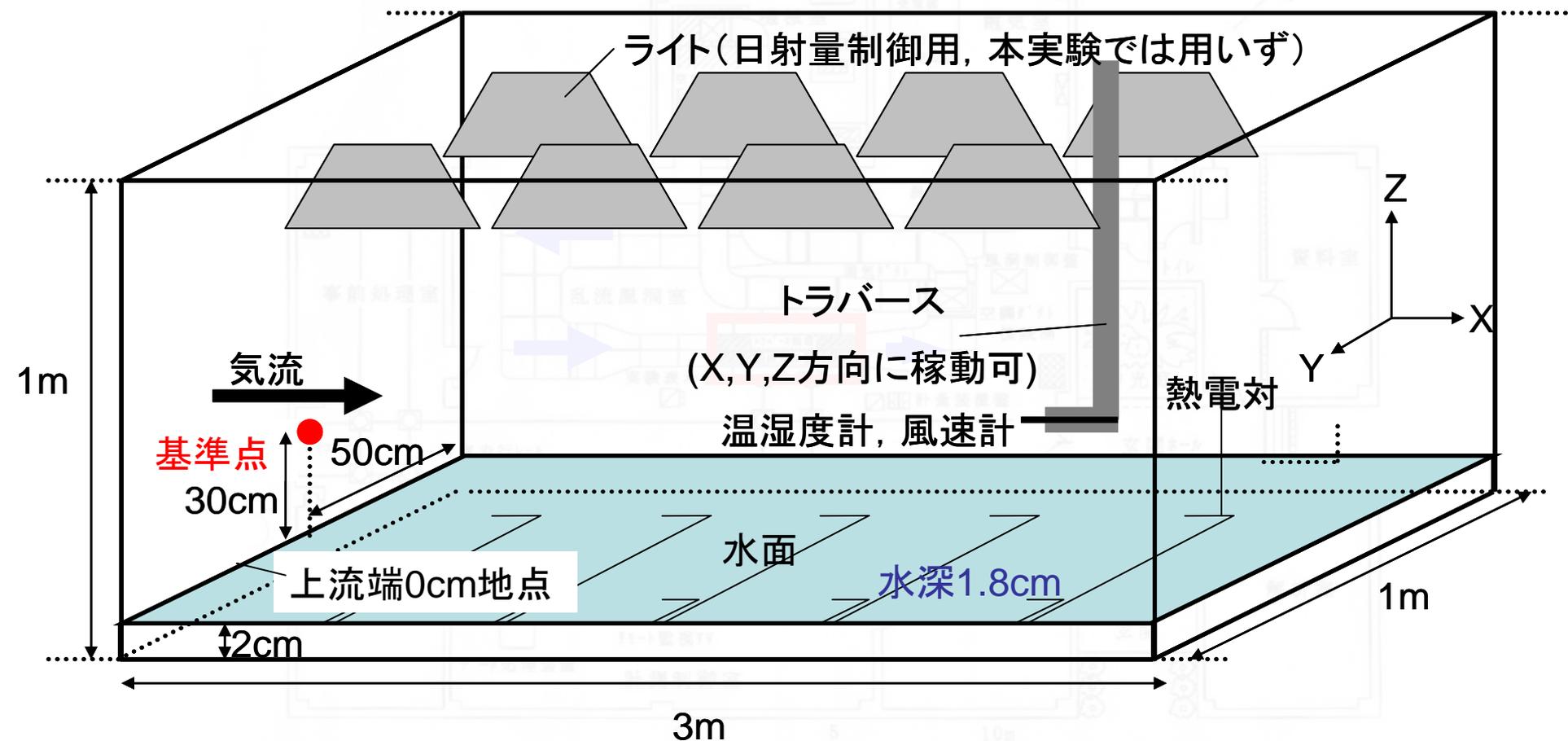
組合せ法

渦相関法

蒸発散量を測定できる時間間隔, 測定精度, 測定の難易度, 装置の価格がそれぞれ異なり, 場合に応じた最適な方法を選択する必要がある.

都市部で起きている局地移流を再現するため小スケールの蒸発実験を行った.

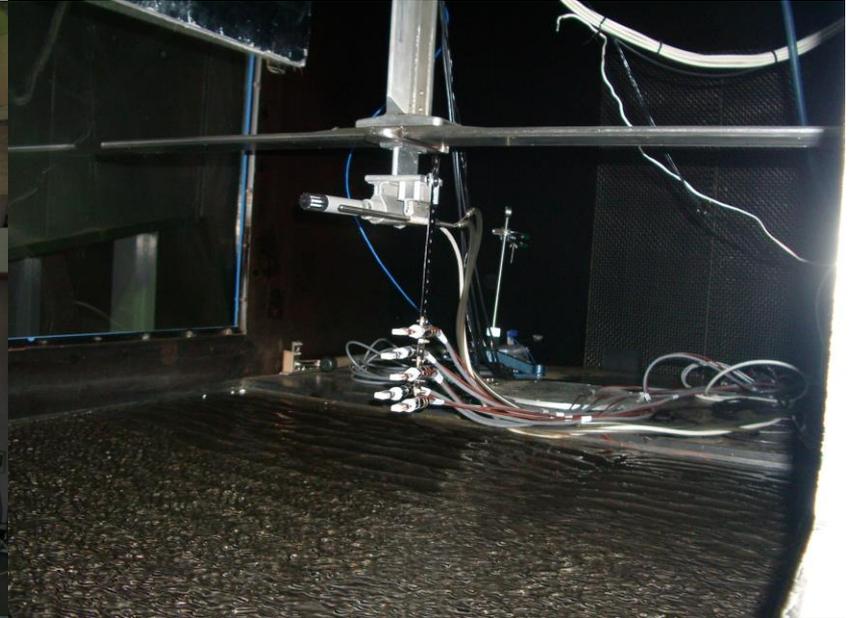
実験施設概略図



乱流実験施設概略図

(防災科学技術研究所 乱流実験施設)

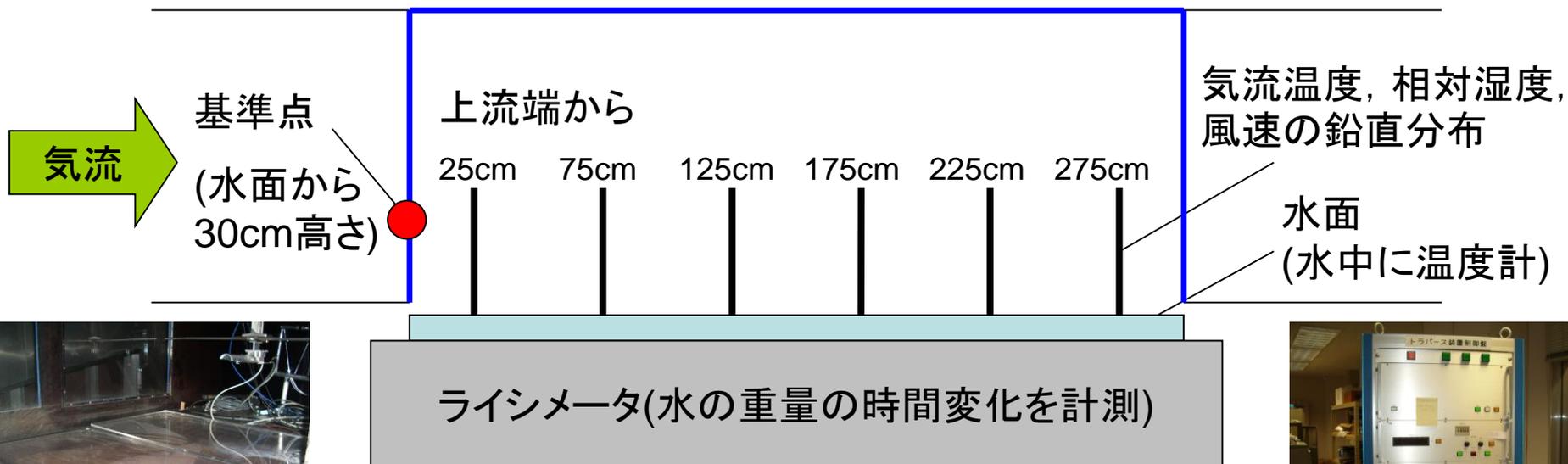
実験の様子



実験概要

観測項目

観測項目	観測機器	場所
気流温度	サーミスタ式温度計	6鉛直ライン(トラバースで移動)
湿度	静電容量式湿度計	6鉛直ライン(トラバースで移動)
風速	ピトー式風速計	6鉛直ライン(トラバースで移動)
大気圧	静電容量式気圧計	風洞外定点
水温	熱伝対	水中8地点
蒸発量	ライシメータ(電子秤)	水槽全体



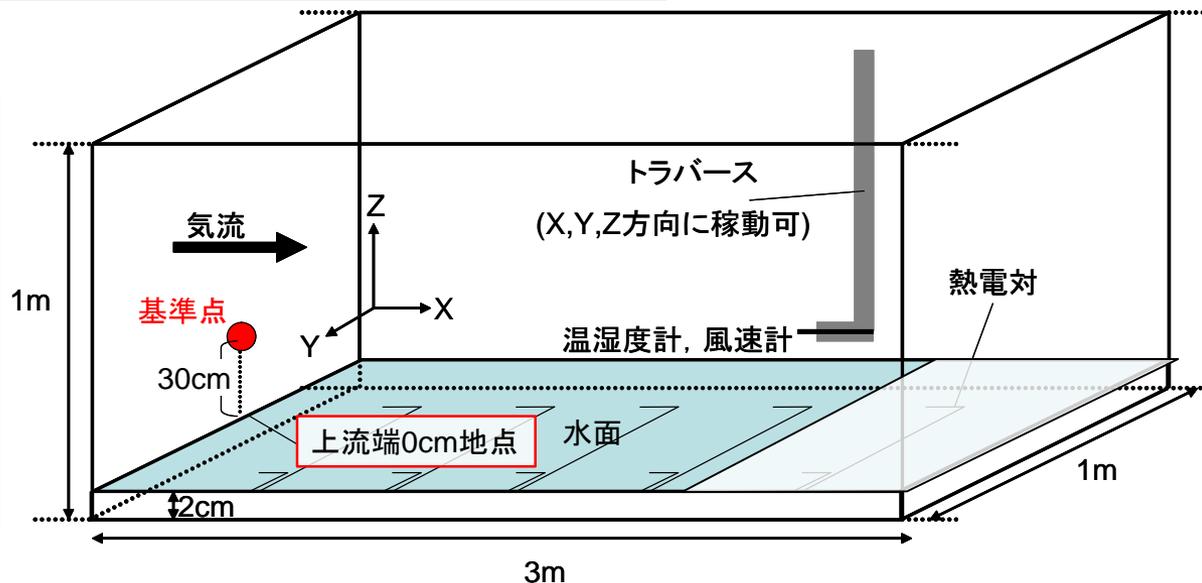
実験概要

	計測項目	条件制御項目			
		気流温度[°C]	湿度[g/kg]	風速[m/s]	水面の長さ[cm]
定常実験	気象因子の空間分布	20(一定)	8(一定)	3(一定)	300(一定)
	蒸発量 (温度の変化)	16・18・20・22 ・24・26・28・30	8(一定)	3(一定)	300(一定)
	蒸発量 (湿度の変化)	20(一定)	6・7・8・9・10・11	3(一定)	300(一定)
	蒸発量 (風速の変化)	20(一定)	8(一定)	3・4・5・6・7・8	300(一定)
	蒸発量 (水面面積の変化)	20(一定)	8(一定)	3(一定)	0・30・60・90・120 ・150・180・210・ 240・270・300
非定常実験	蒸発量 (温度・湿度の変化)	ランダム	ランダム	3(一定)	300(一定)



2時間以上の
定常状態

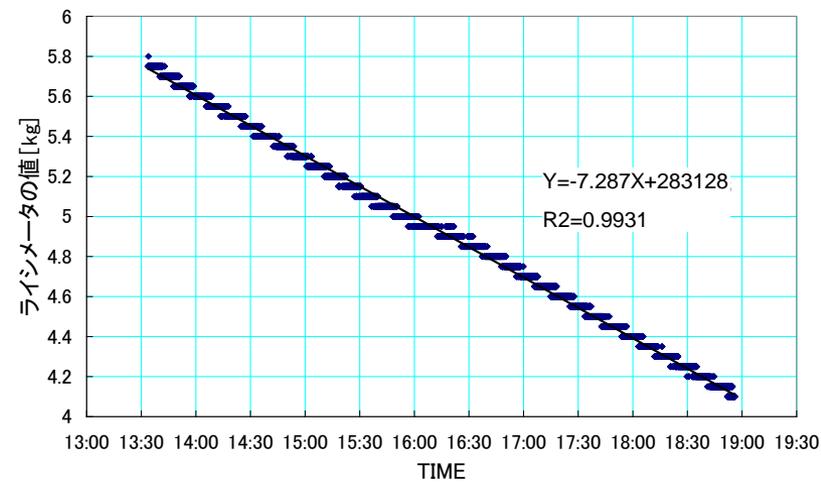
設定条件として流入部からの距離0cm地点、高度30cmの地点の値を用いた。気流温度を変化させる場合、比湿を8g/kg、風速を3m/sの一定とし、気流温度を16°Cから30°Cまで制御した。



解析概要

実験蒸発量

風洞水槽(奥行き1m×横3m)下にあるライシメータ(電子秤)の分解能は0.05[kg].



定常実験: 水槽の重さの時間変化の傾きを単位時間の蒸発量として算定

非定常実験: 水槽の重さの時間変化の前15分間移動平均を単位時間の蒸発量として算定

算出蒸発量(バルク式)

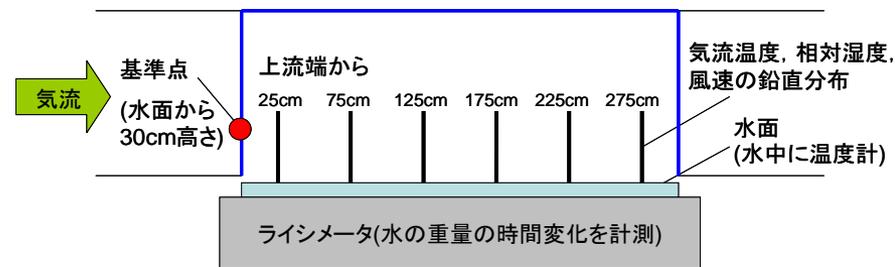
$$E = \rho C_E U \left[\overbrace{q_{SAT}(T_s)}^{\text{水温}} - \underbrace{q_{air}}_{\text{乾燥度}} \right]$$

風速

ここで ρ : 空気密度 (1.2 kg/m^3), C_E : バルク交換係数 (一様水面で 0.011),
 U : 風速, q_{SAT} : 飽和比湿, T_s : 水表面温度, q_{air} : 比湿である.

本実験では **水表面温度を水温(水中の温度)**として使用した.

風洞の性質



- ◆ 上流端からの距離25cm ■ 上流端からの距離75cm ▲ 上流端からの距離125cm
- × 上流端からの距離175cm * 上流端からの距離225cm ● 上流端からの距離275cm

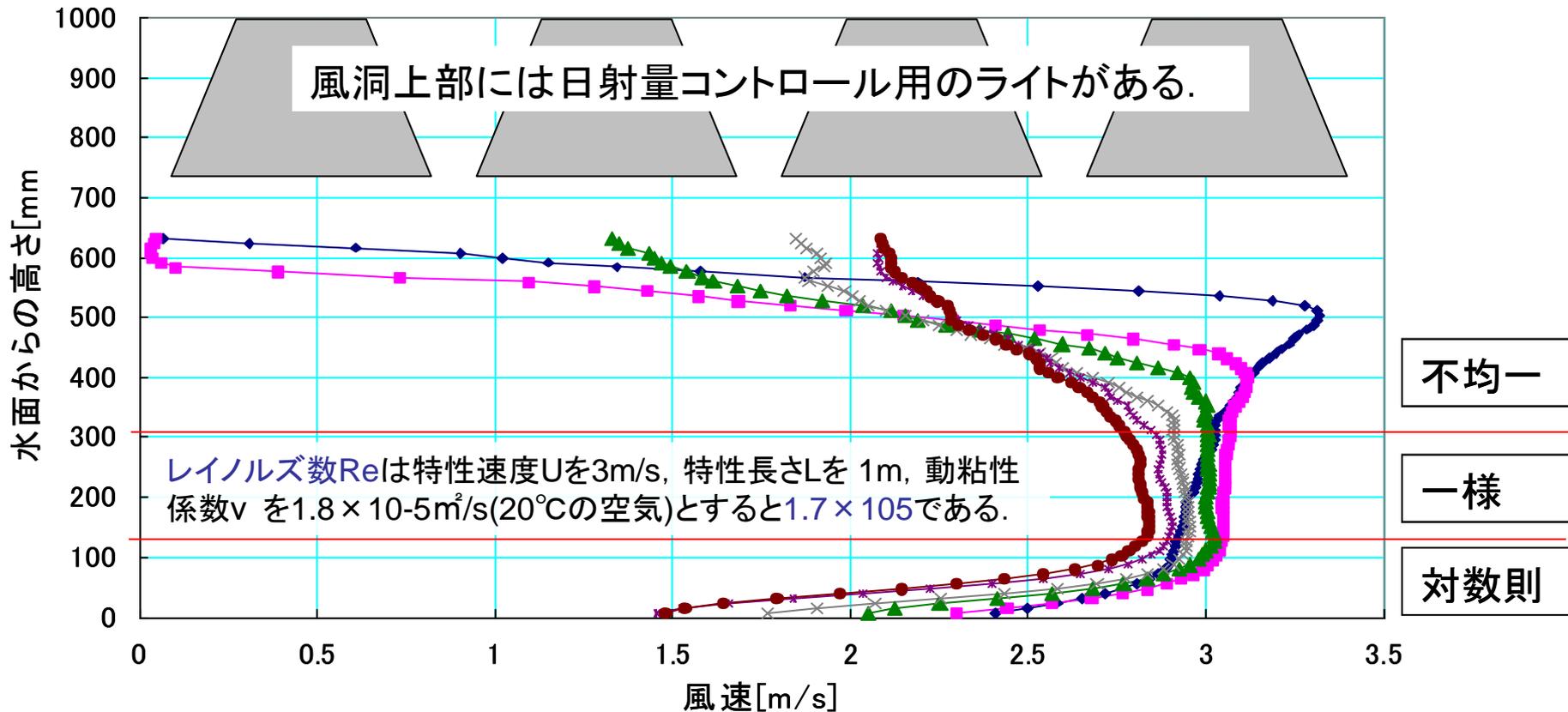


図-2 風洞内の風速分布

0-100cm以下は対数分布, 100-250cm以上は一様の分布である. それ以上での乱れは風洞内天井にライトがついているためである. このことから計測データは300mm付近までを使用することとする.

風洞の性質

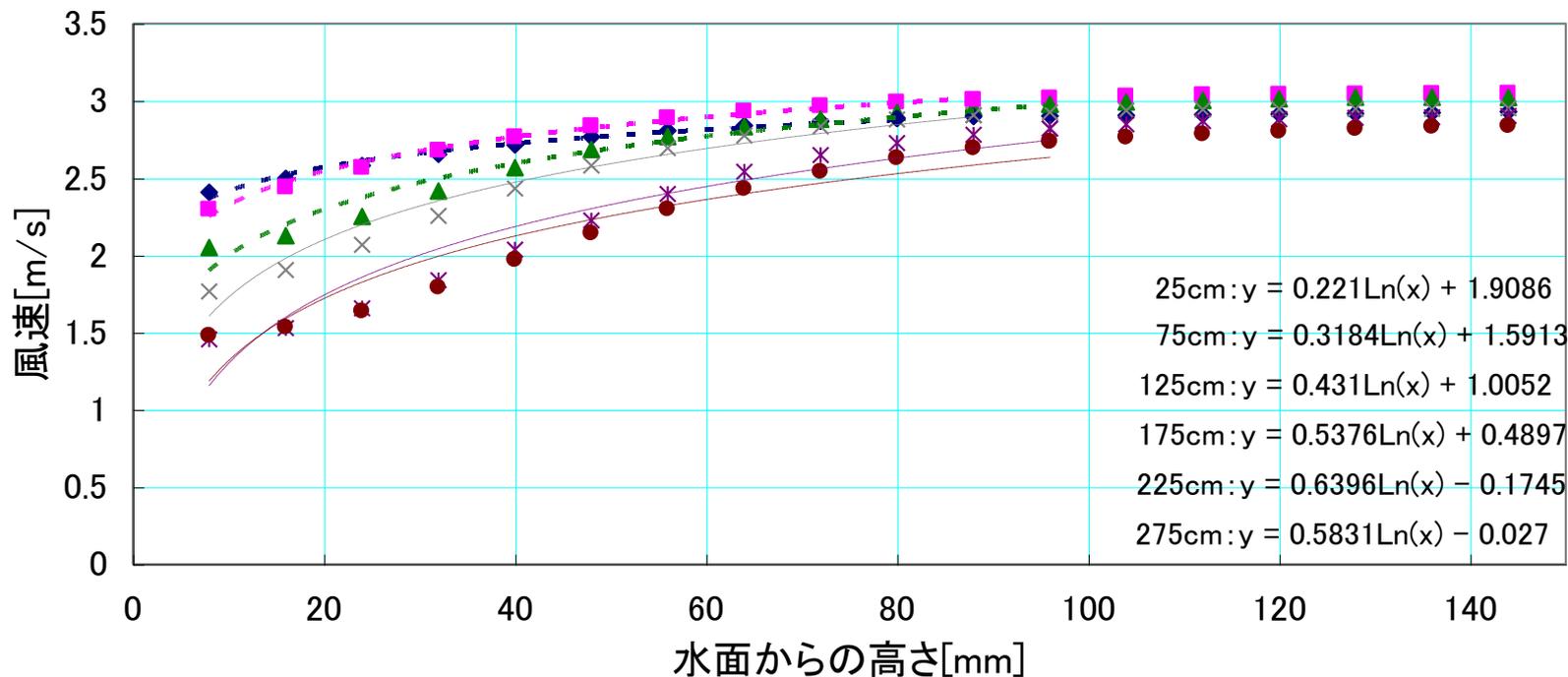
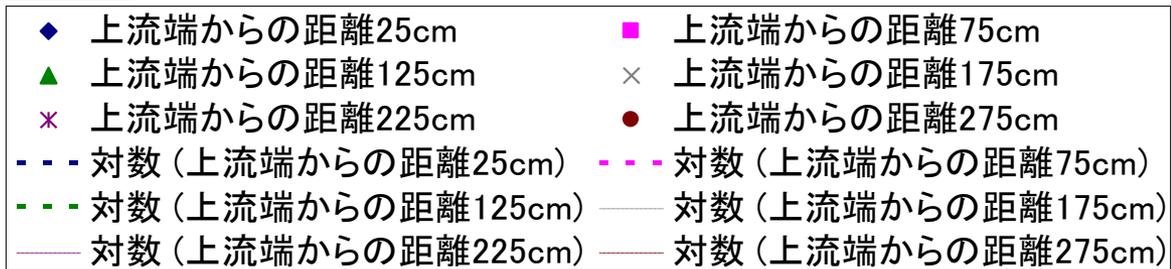
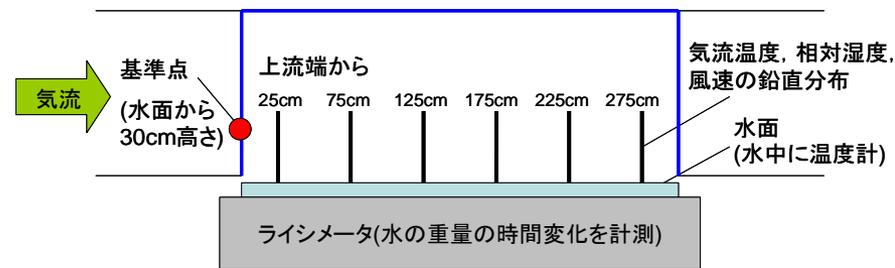


図-3 各上流端からの距離の風速分布とその対数近似曲線

上流端からの距離が125cmほどまでは風速が対数則にのっているが、下流側では対数側から外れる。
これは境界層外縁に近づいたことで後流則成分が加わったためと考えられる。

風洞の性質



- ◆ 上流端からの距離25cm ■ 上流端からの距離75cm ▲ 上流端からの距離125cm
- × 上流端からの距離175cm ✖ 上流端からの距離225cm ● 上流端からの距離275cm
- 境界層厚さ

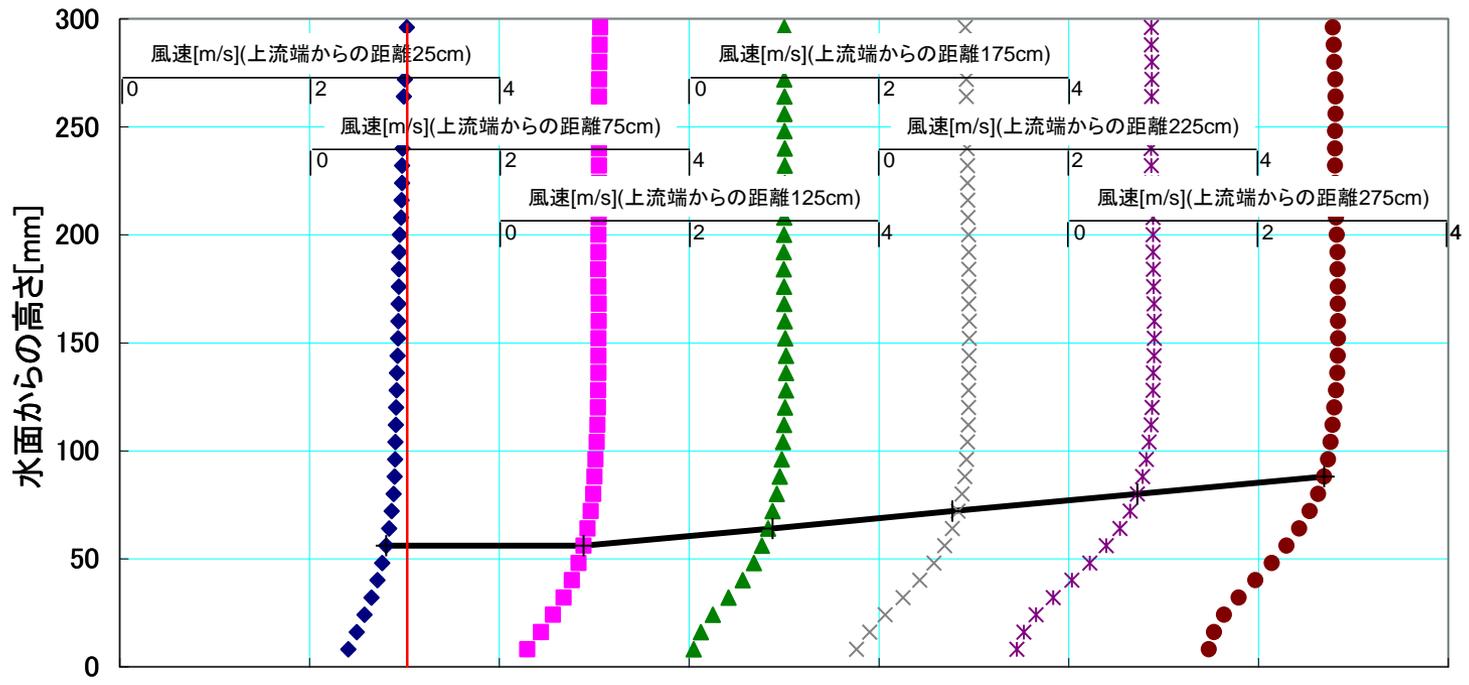


図-4 各上流端からの距離の風速分布と境界層厚さ

風速が主流 U_∞ (本実験では高さ30cm付近の風速3.0m/s)の95%に達する位置で境界層厚さ $\delta(X)$ を定義しプロットした風速分布を示す。Xとともに境界層厚さが高くなっており、十分に発達した流れになるまでの助走区間であることがわかる。

気象因子の空間分布

気流温度・比湿の空間分布

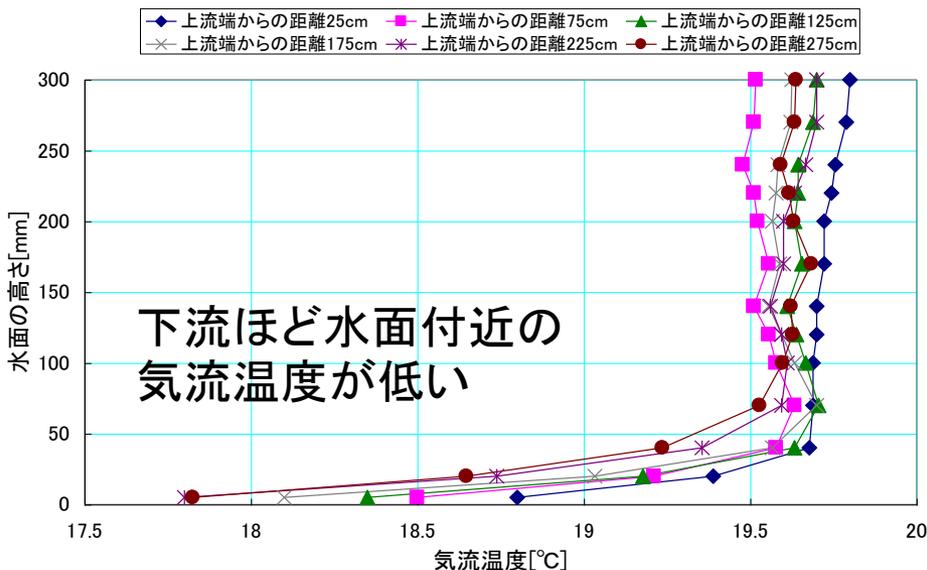
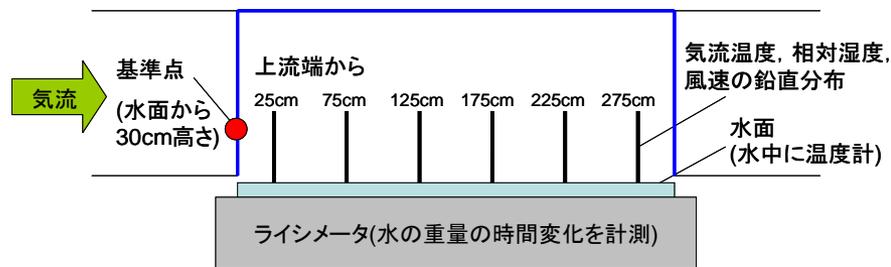


図-5 気流温度の鉛直分布

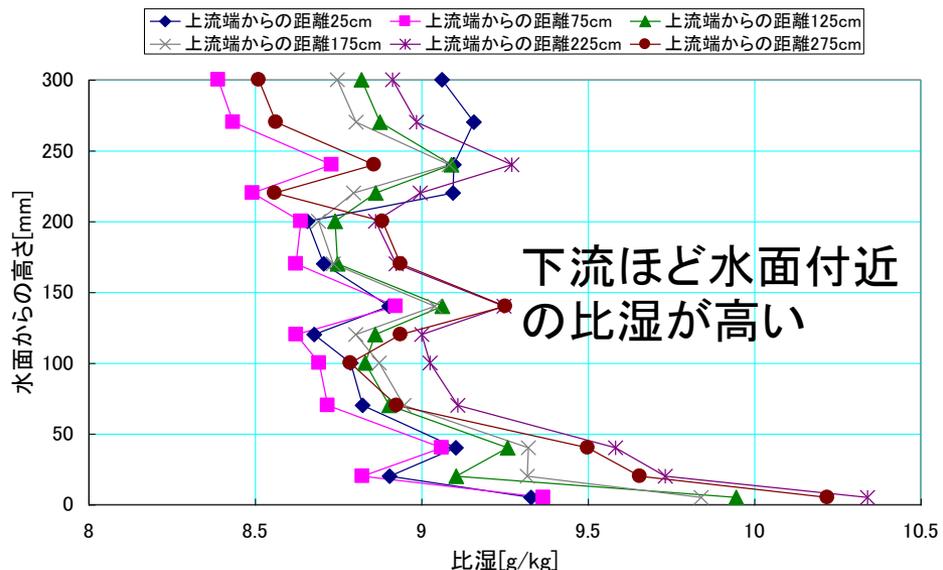


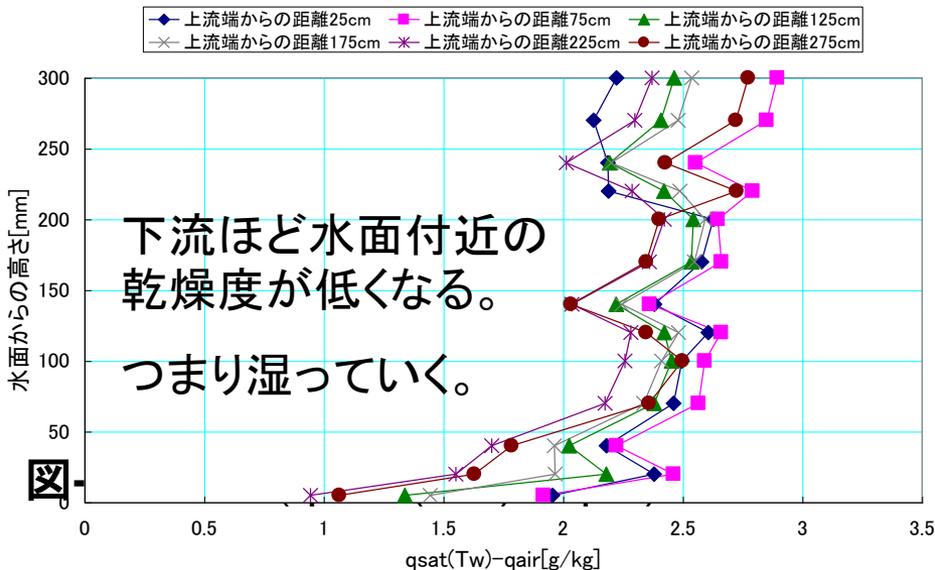
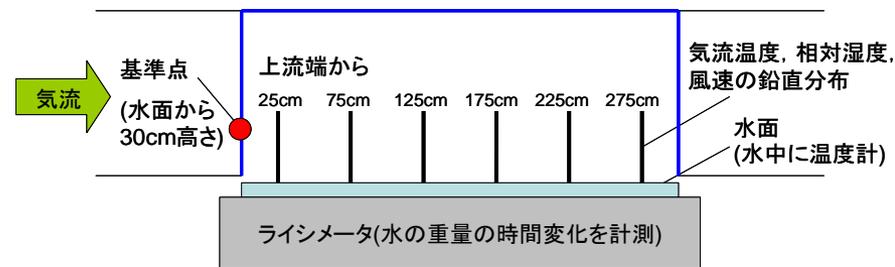
図-6 比湿の鉛直分布

気流温度の鉛直分布をみると、上流端からの距離によらず50mm以上の高度で温度が一様になっており、それ以下の高度では流入部からの距離に応じて温度が低くなっている。

比湿の鉛直分布をみると、どの地点においても水面付近の比湿が最も高く、全体的にみれば上流端からの距離が短い地点は比湿の値が低く、下流に向かうほど値が大きい。

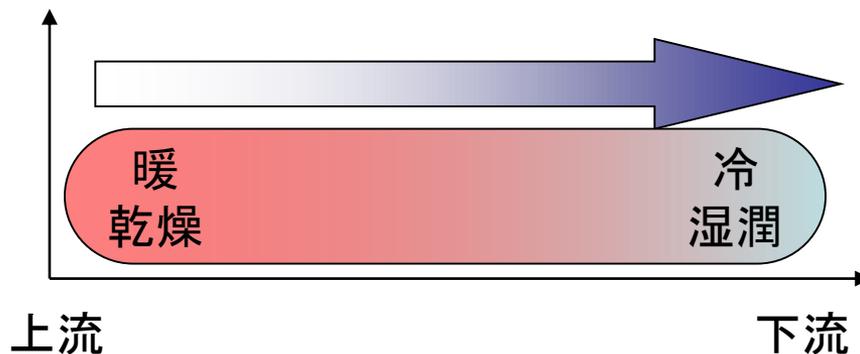
気象因子の空間分布

乾燥度の空間分布



$$E = \underbrace{\rho C_E U}_{\text{風速}} \underbrace{[q_{SAT}(T_s) - q_{air}]}_{\text{乾燥度}}$$

水温



水面付近の乾燥度は上流で高く、下流で低い。これらのことから流入部からの気流が水面で潜熱放出を促し、蒸発するとともに水表面温度を低下させ、蒸発は比湿を増加、乾燥度を低下させ、低下した水表面温度は気流温度を低下させていると考える。

定常状態における気象条件の違いによる蒸発フラックス・水温の変化

蒸発フラックス(バルク式)

$$E = \rho C_E U [q_{SAT}(T_s) - q_{air}]$$

0.011(一様水面)

蒸発フラックス(実験)

定常実験における蒸発量

実験結果は線形的でバルク式と同傾向

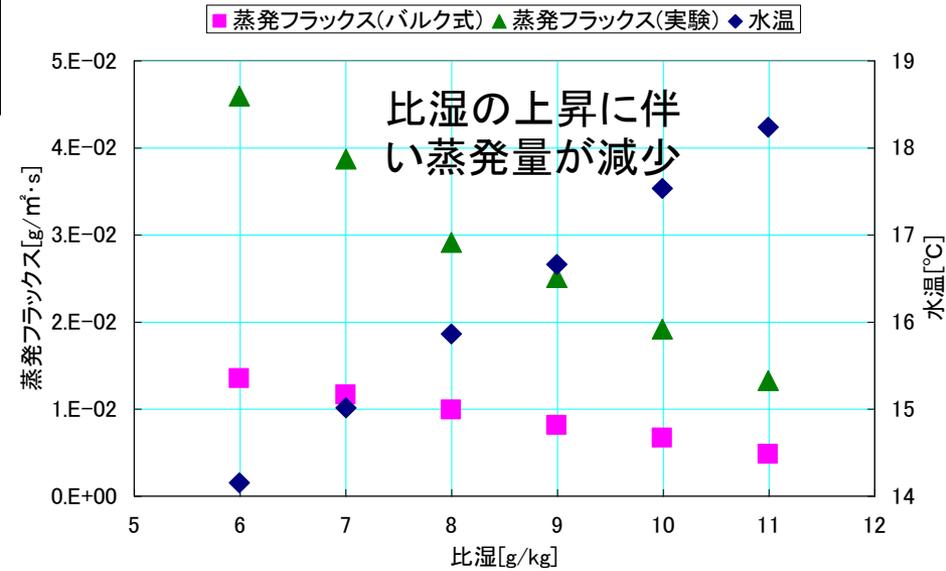


図-9 比湿制御による蒸発速度・水温変化

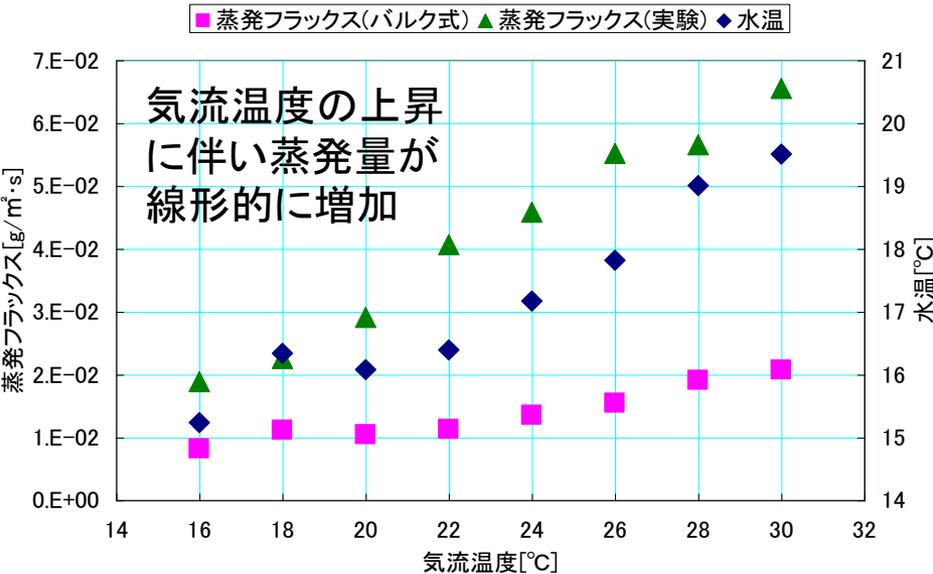


図-8 気流温度制御による蒸発速度・水温変化

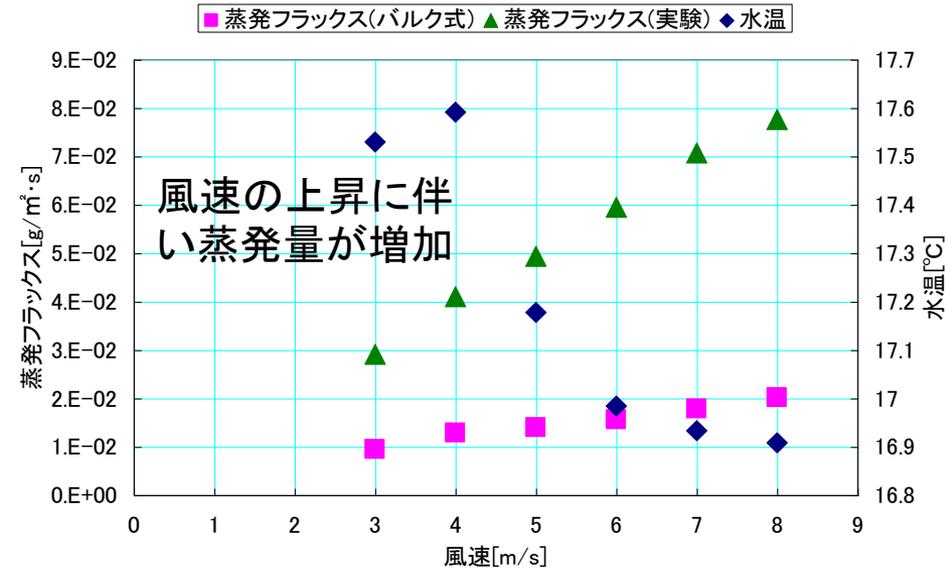
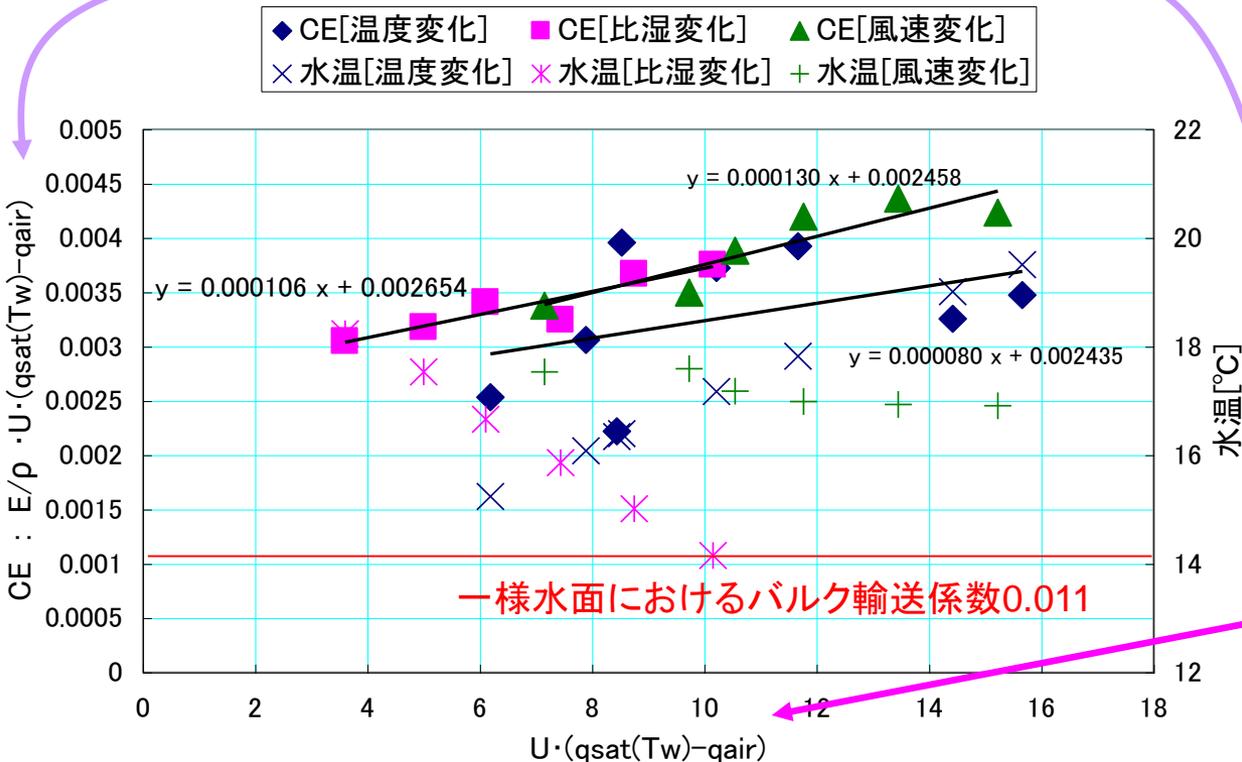


図-10 風速制御による蒸発フラックス・水温変化

定常状態におけるバルク交換係数の変化



$$E = \rho C_E U [q_{SAT}(T_s) - q_{air}]$$

$$C_E = \frac{E \text{ 実験値}}{\underbrace{\rho U [q_{SAT}(T_s) - q_{air}]}_{\text{風速 乾燥度}}}$$

図-11 $U \cdot (q_{SAT}(T_s) - q_{air})$ とバルク交換係数 $C_E \cdot$ 水温の関係

バルク交換係数 C_E は本実験における小スケールの蒸発がバルク理論に則ると仮定し、実験蒸発フラックス E とバルク式から算出したものである。風速 U と乾燥度 $(q_{SAT}(T_s) - q_{air})$ を乗じたものが増加する、つまり蒸発フラックスが増加しやすい条件になるとバルク交換係数 C_E が増加する。このことから本実験のような小スケールで境界層が発達中の蒸発はバルク交換係数 C_E が風速と乾燥度に依存することがわかる。つまり大気安定度に依存すると考えられる。

定常状態における水面の長さの違いによる蒸発フラックスの変化

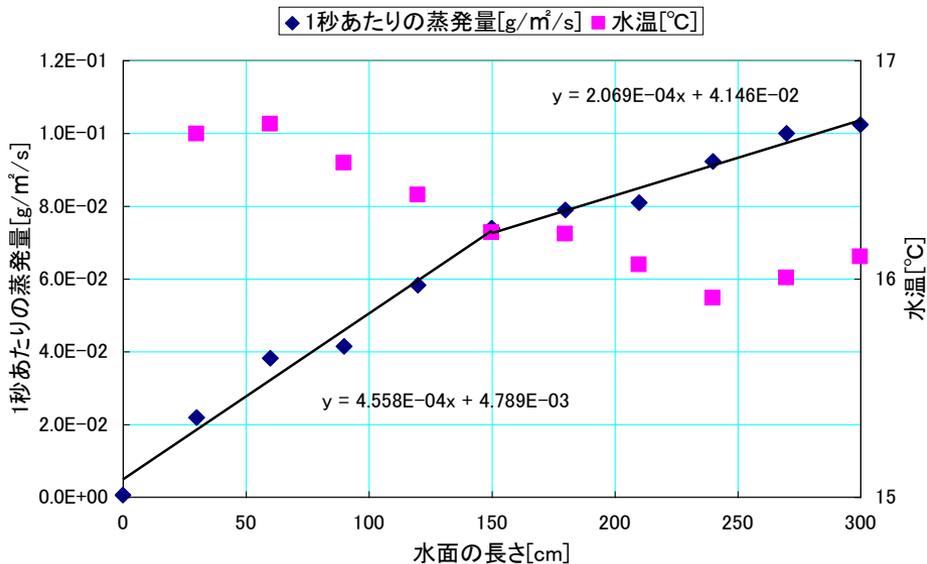


図-12 流入部からの水面の長さとの蒸発フラックスの関係

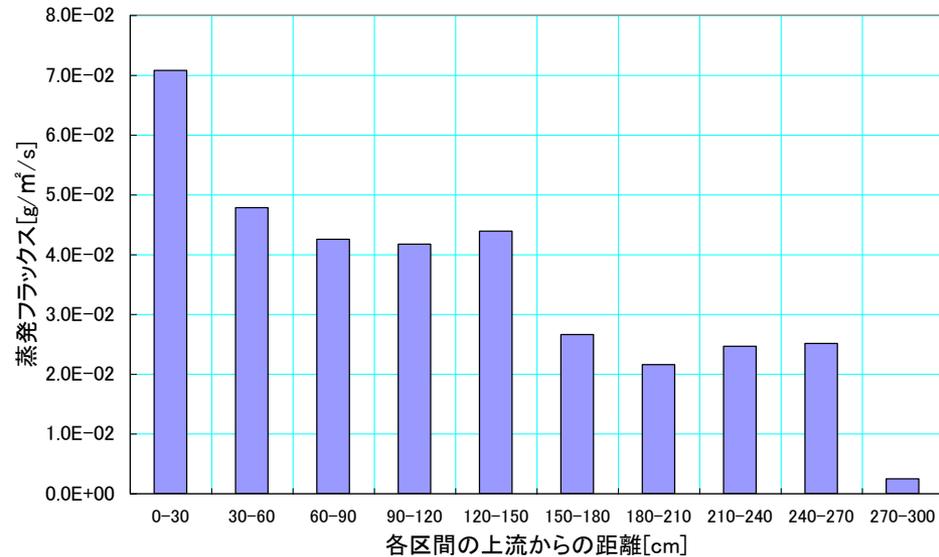
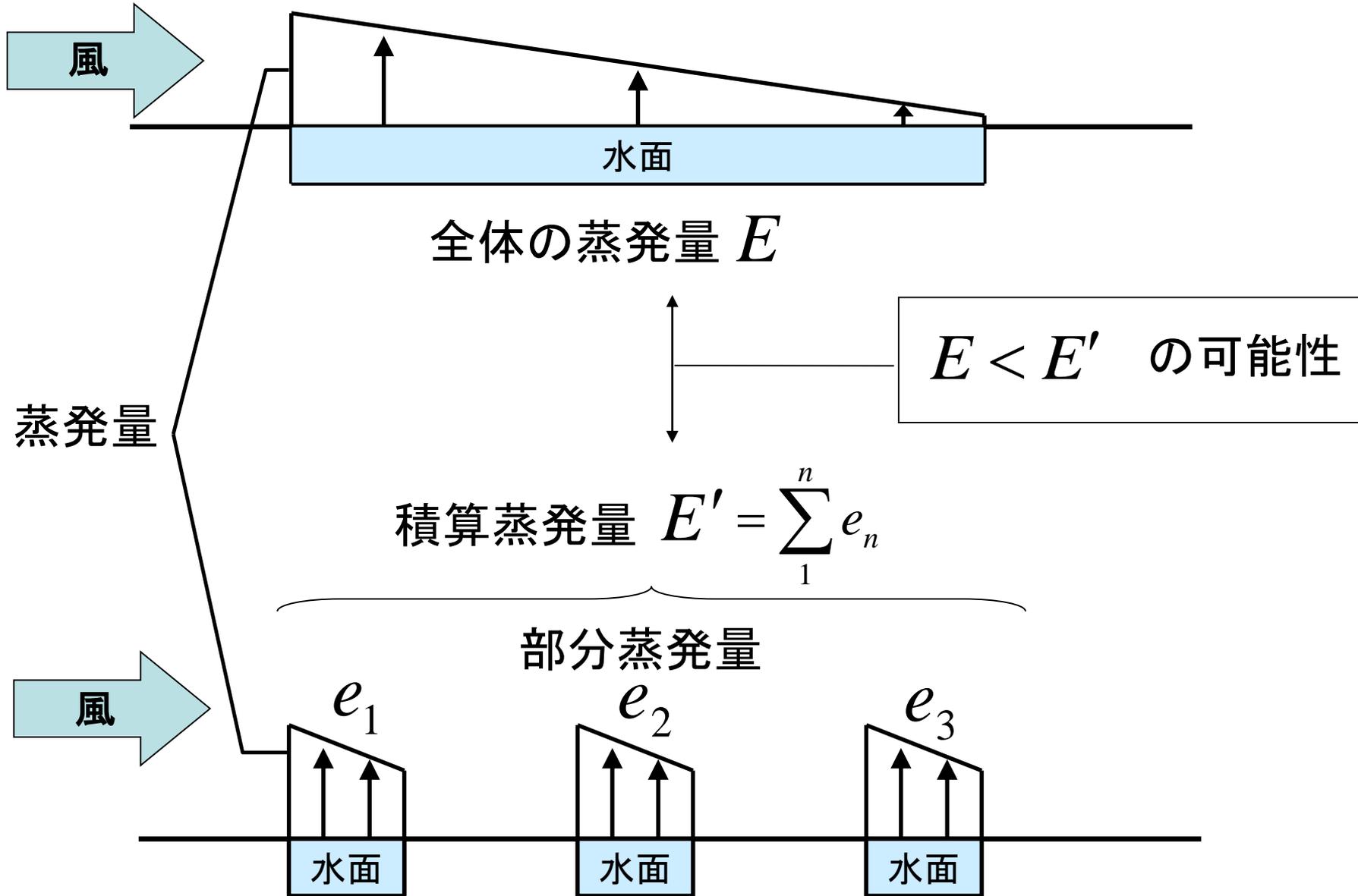


図-13 水面区間と蒸発フラックスの関係 (図-12の移動平均から算出)

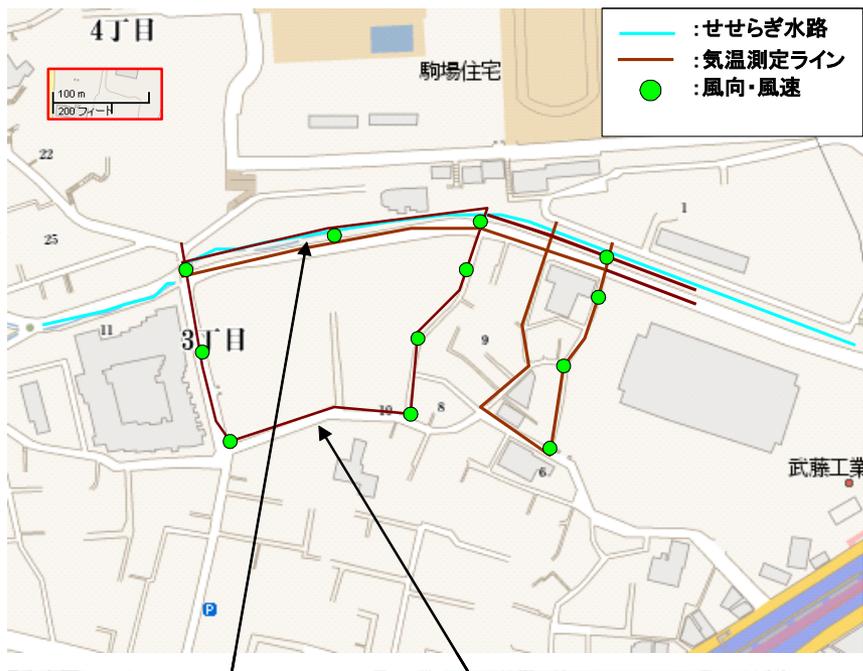
図-12: 流入部からの水面の距離を30cmずつ拡大して蒸発面が長くなることで1秒あたりの蒸発量が上昇する。

図-13: ここで各区間の蒸発フラックスは図-12の蒸発フラックスの差分から求めた。各水面区間の単位面積あたりの蒸発フラックスをみると上流から下流方向に蒸発フラックスが減少している。気流が下流に行くに従い、乾燥度が低くなっていることからleading-edge効果の現象が起こっていると考えられる。

小スケールの蒸発現象における可能性



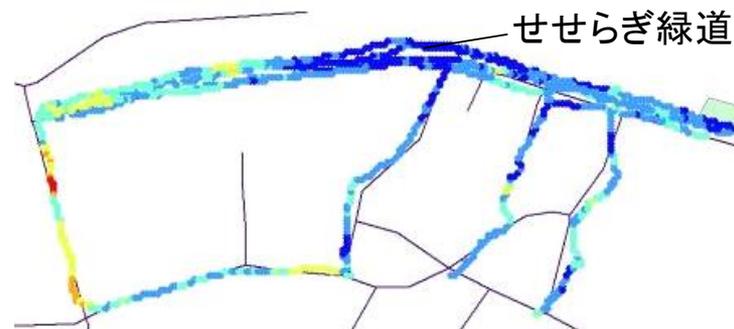
小スケールの蒸発～せせらぎ緑道を例に～



平成20年8月7日9時30分

気温

- 31.11 - 32.00
- 32.01 - 33.00
- 33.01 - 34.00
- 34.01 - 35.00
- 35.01 - 36.00
- 36.01 - 37.00



せせらぎ緑道の気温が観測エリア全体の中で気温が低く、周辺に比べて気温が最大で約 2°C 低かった。

せせらぎ緑道の幅は1mくらいの幅であり、決して大きな水面ではないが大きな効果を生み出している。



目黒川上流のせせらぎ緑道

(世田谷区内、上流側より目黒区側を望む)



市街地内の区画道路

第3章

打ち水による熱環境緩和効果

「打ち水」の熱環境緩和作用

**「世界の水問題を解決する一つの重要な要素として、
近隣社会の取り組みが大事である」**

(第3回世界水フォーラム(2003.03)閣僚宣言より)

第3回水フォーラム事務局が「ヒートアイランド現象の緩和」を目的として、風呂の残り水や雨水や再生水の二次利用、再利用を促進させる。



打ち水大作戦2007

実施日:2003年8月20日

2004年8月18日～25日

2005年8月1日～31日

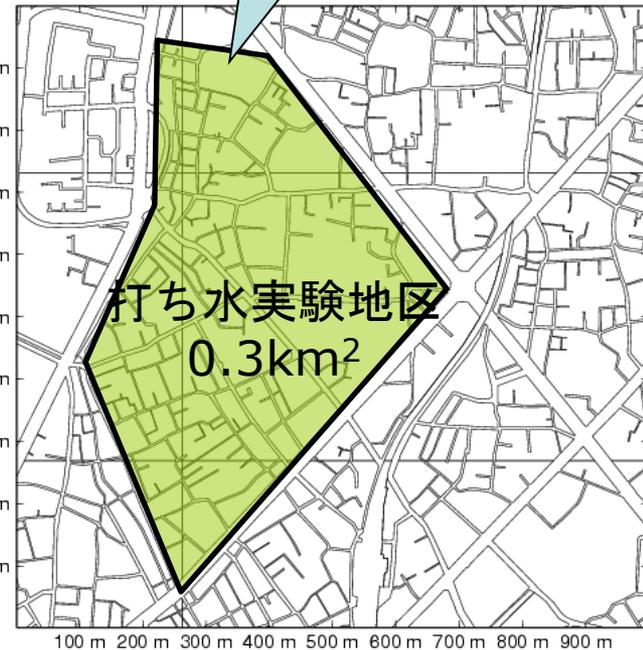
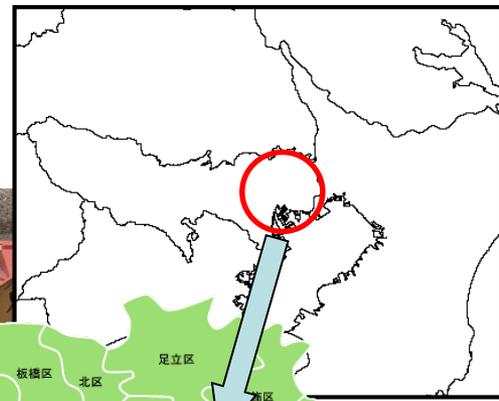
2006年7月23日～8月23日

2007年7月23日～8月23日

(5年間行われ規模は拡大)



打ち水実験概要



- 実験期間: 2004年8月18～25日
- 対象地域: 東京都墨田区東向島1～3丁目
- 打ち水実験地区面積: 0.3km²

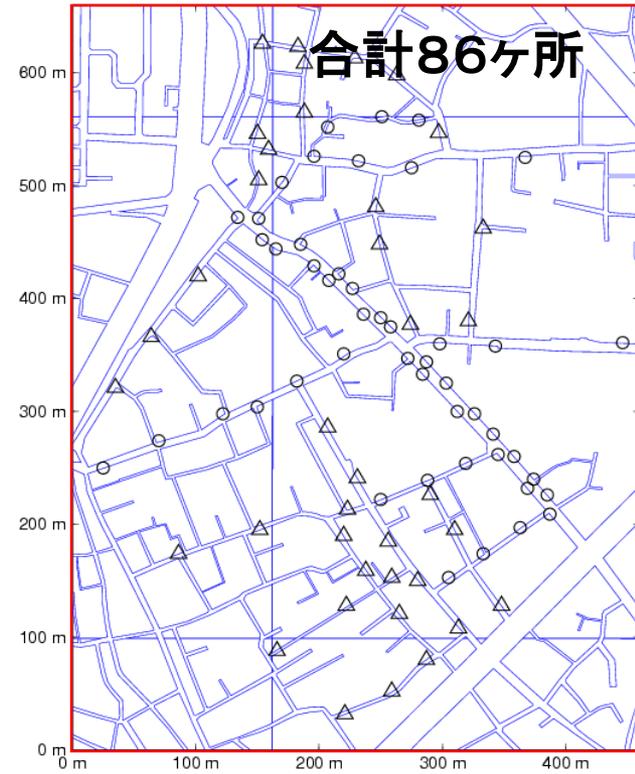
打ち水タイムテーブル

	2004年8月								
	18日	19日	20日	21日	22日	23日	24日	25日	
午前(9:00)		○			○	○*			
昼間(12:00)	○			○	○			○	
午後(16:00)			○	○		○			

観測概要

- 総合気象観測 point-A,B,C,D,E
(風向、風速、日射量、降雨量、大気圧、温湿度)
- 温湿度観測(定点観測48ヶ所(○)、追加観測38ヶ所(△))
- ヒアリング調査(散水量、散水場所、散水温度)

総合気象観測 観測項目						
	日射量	降雨量	風向・風速	大気圧	温湿度	
Point-A	○	○	○	○	○	→ 通風式・乾湿球計
Point-B			○	○		百葉箱内・外で → 温湿度観測 (白金抵抗、静電容量式)
Point-C			○	○	○	
Point-D			○	○	○	
Point-E			○	○	○	



※温湿度観測

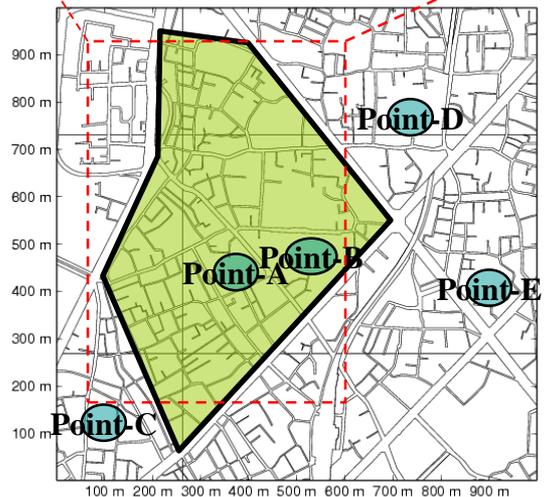
定点観測 観測期間中連続観測

(Onset社製 白金抵抗、静電容量式)

追加観測 18、23、25日

打ち水開始時刻前後1時間30分 計3時間

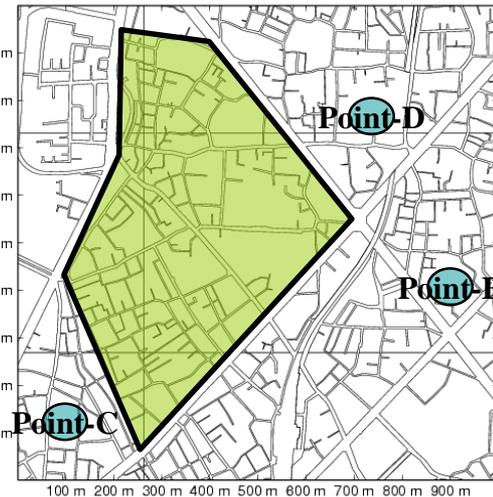
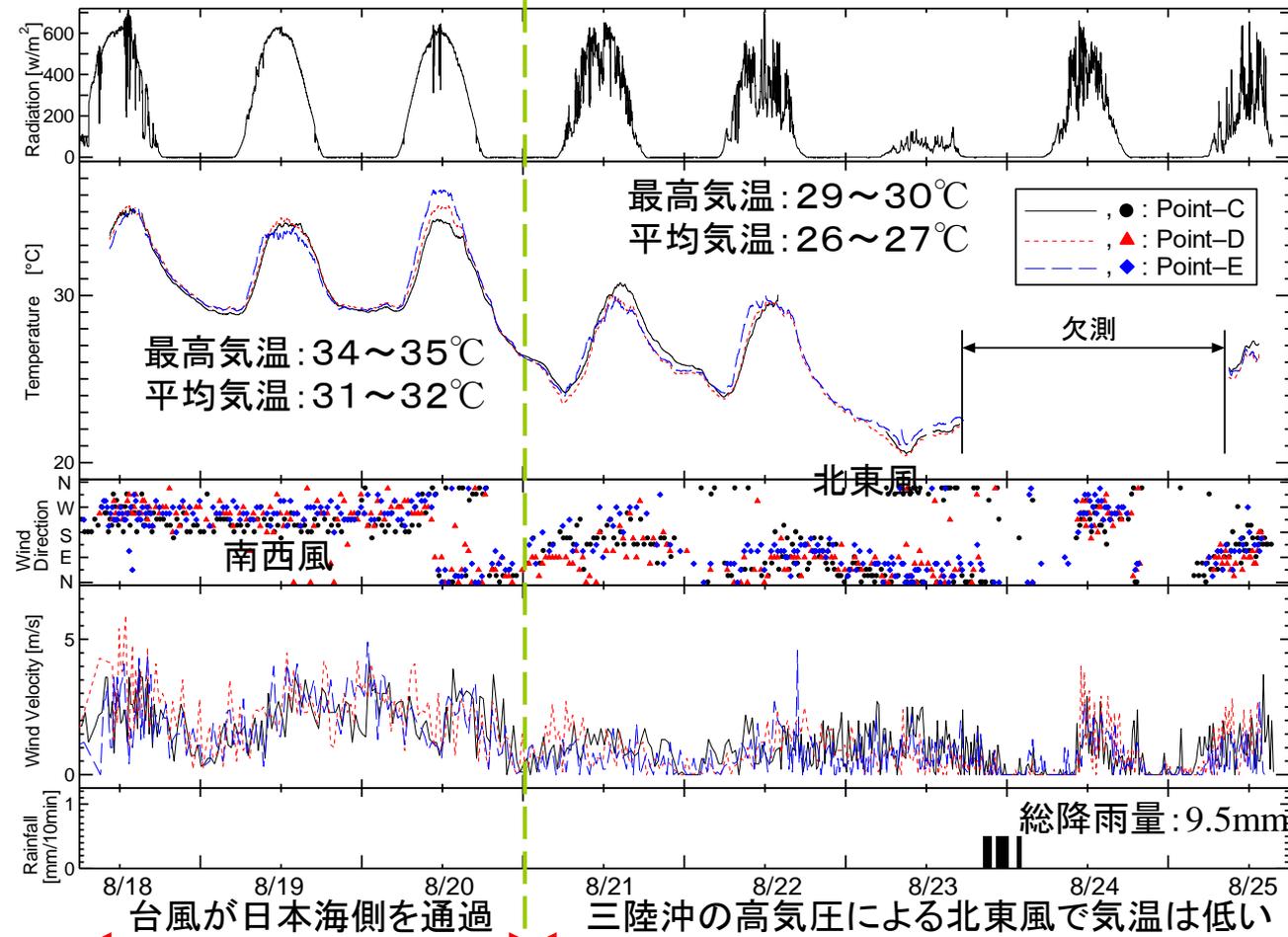
(Visala社製 白金抵抗、静電容量式)



観測結果 - 天気概要 -

晴天, 日射量の変動は小

雲が多く日射量の変動が大



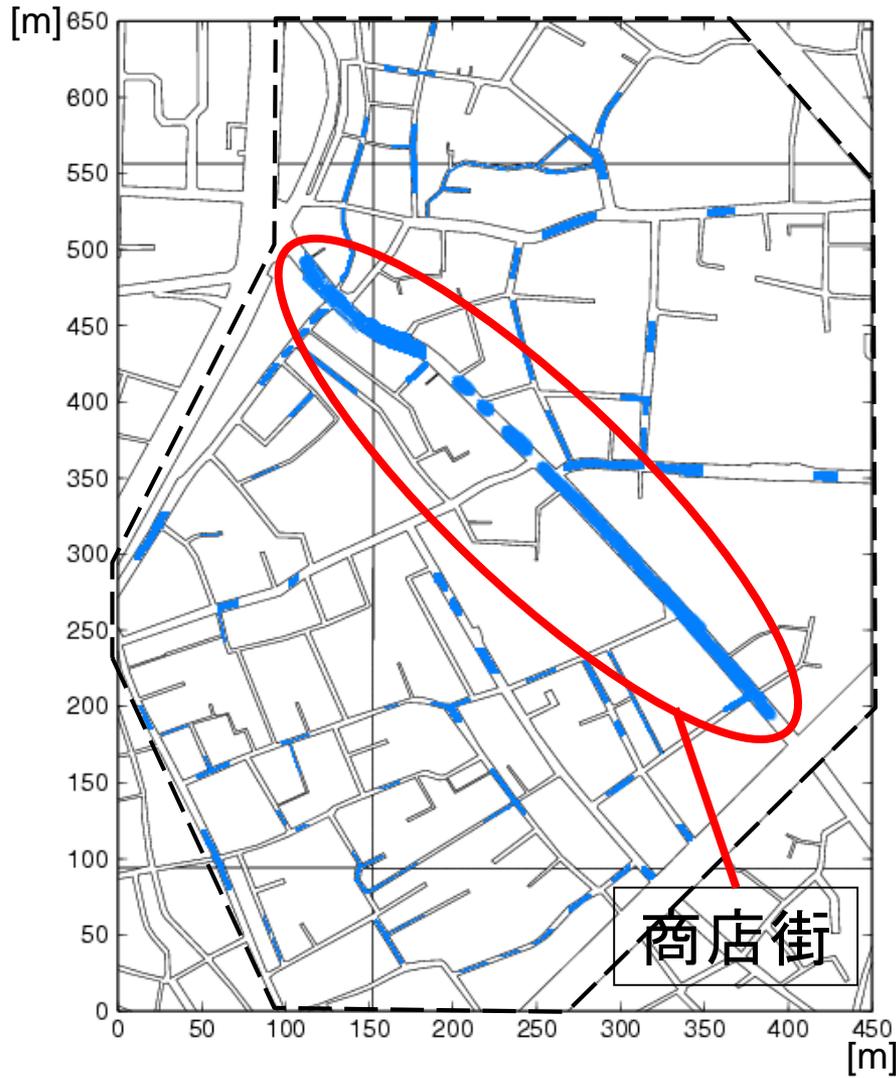
- 打ち水時間帯の日射量変動が小さい日, 夏日が観測された日を解析対象とする
→8月18日 12:00に行われた打ち水実験を中心に。



打ち水



観測結果 — 打ち水がなされた面積 —



実験地域内面積	: 約299000m ²
散水量	: 約6.29[m ³]
平均散水温度	: 約30.0[°C]
散水面積	: 約8504[m ²]
散水面積/実験地域内面積	: 約3%
散水面積/実験地域内道路面積	: 約11%

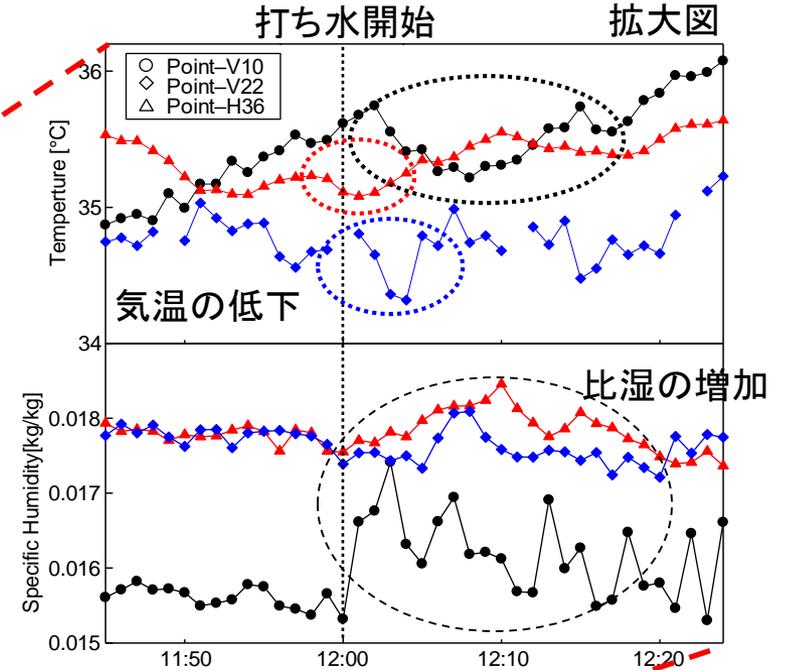
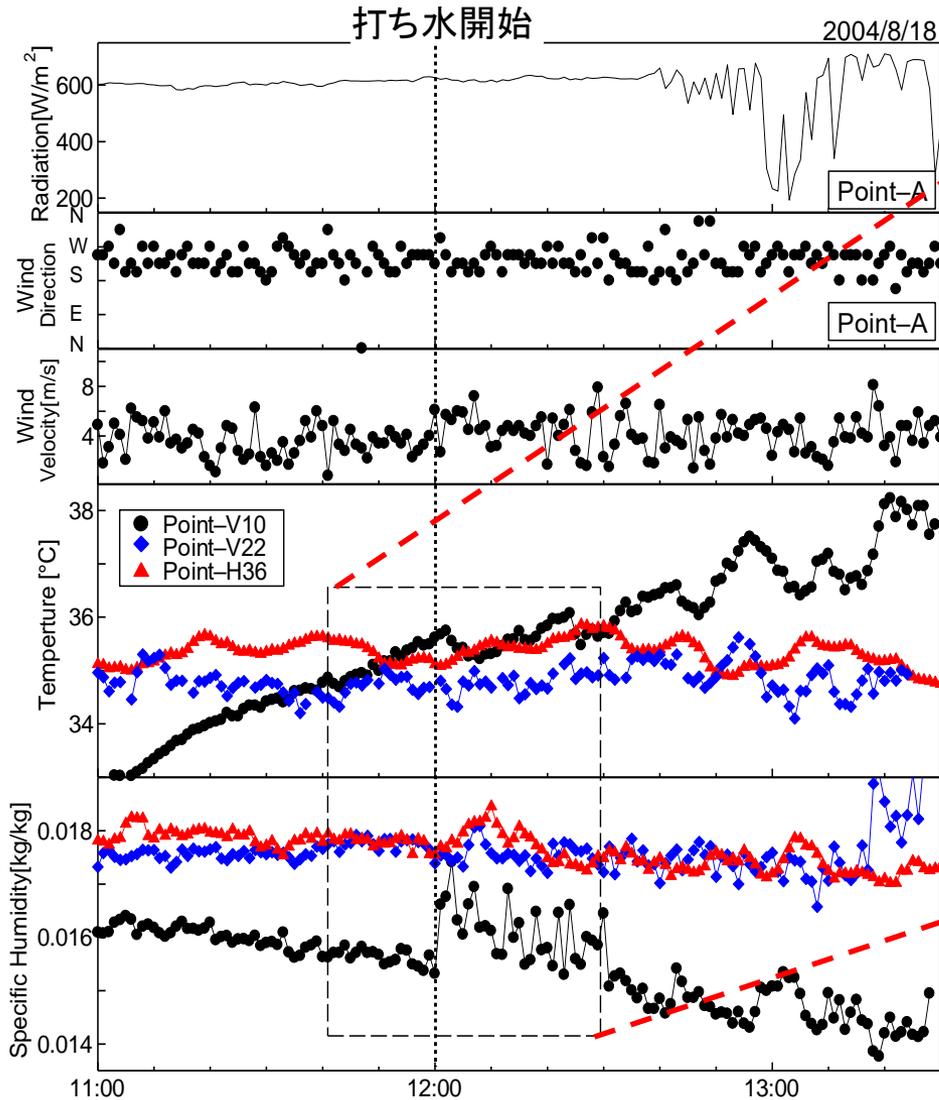
チラシや張り紙、放送で呼びかけるなどして地元商店街、住民に協力していただいたが昼時であったため商店街以外における散水は少なく、全体では3%であった。
2次利用水の使用を促したが水道水を使用される方が大勢いた。イベントに対して興味を持たれている方はいるが2次利用水を溜め込むことに対しては難色を示している方が多かった。



図-3 ヒアリング調査による打ち水散水箇所
(2004年8月18日12:00, 破線は打ち水エリア境界線)

観測結果

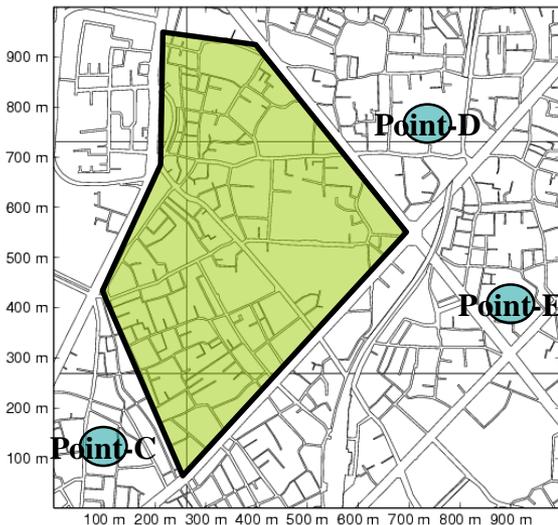
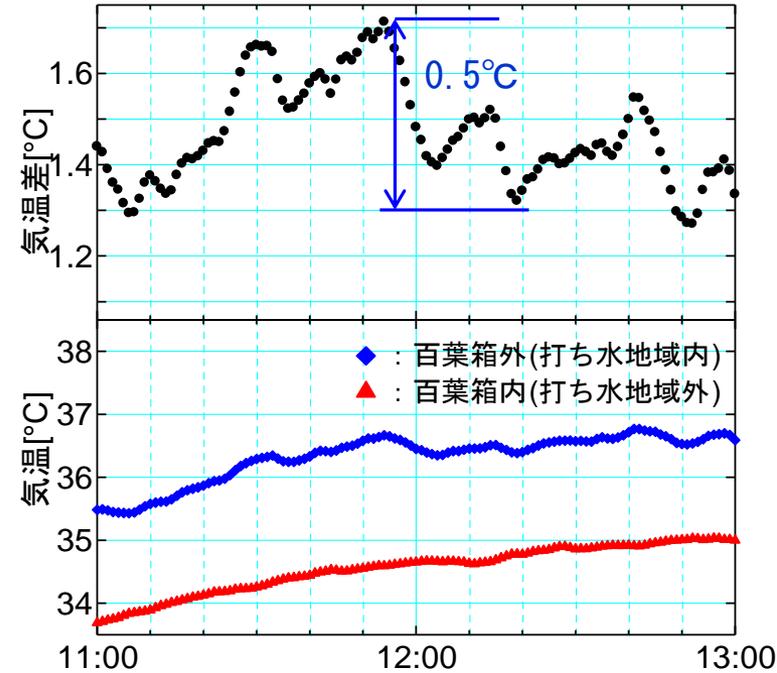
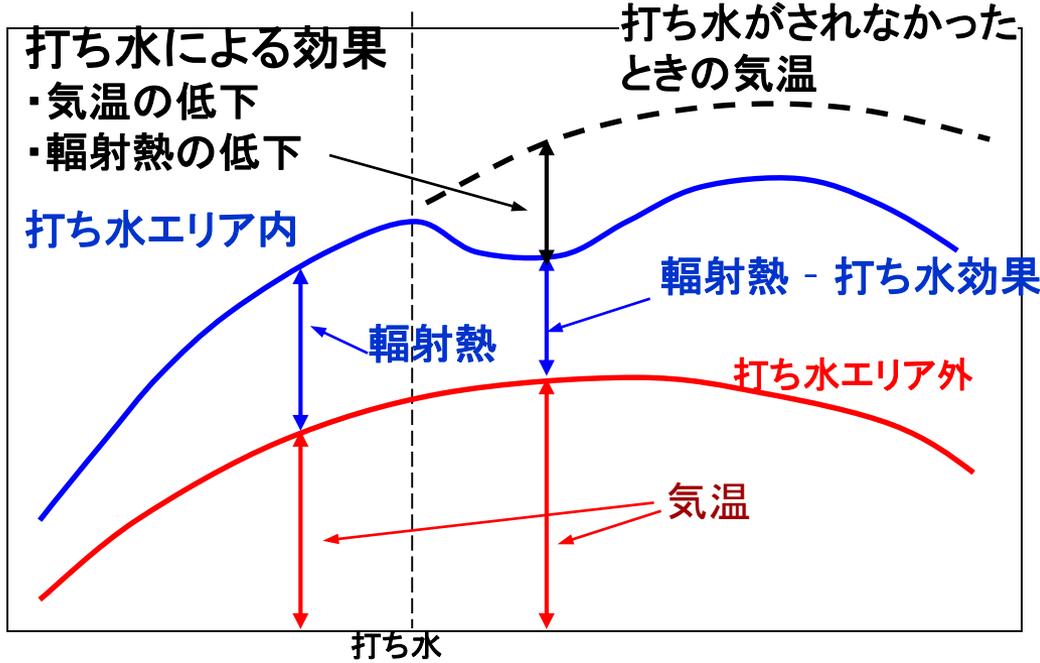
- 打ち水による気温変化 -



日射量: ほぼ一定, 風向: 南西風, 風速: 約4m/s
各地点で挙動は大きく異なり地点V22のように、打ち水開始直後から気温の低下が始まり5~15分間程で気温低下開始時の気温に戻る地点、地点H36のように打ち水箇所から離れた場所では打ち水による有意な温度変化が見られない地点もある。この他の温湿度観測地点でも、気温の低下量、気温低下の継続時間に差があるが、打ち水開始直後に気温の低下がみられた。また、打ち水開始後に比湿の増加が見られ0.005~0.015 kg/kg増加した。

図-4 打ち水前後の日射, 風向・風速, 気温, 比湿の時系列
(2004年8月18日 11:00~13:30, 代表的な3点)

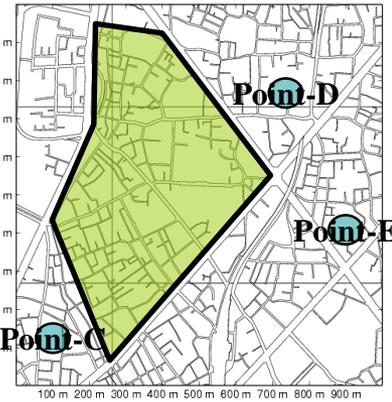
観測結果 - 打ち水による気温低下作用 -



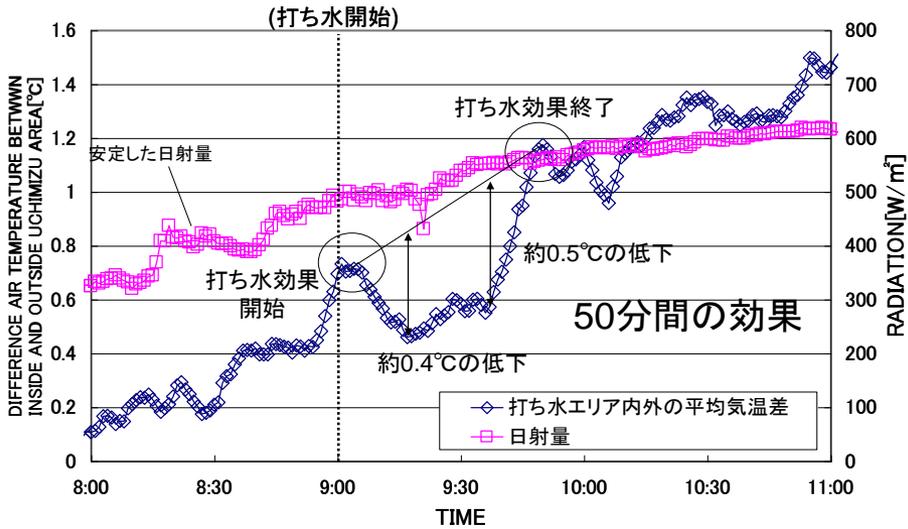
打ち水エリア外と打ち水エリア内の気温差より打ち水直後に気温が0.5°C低下したことがわかる。

観測結果

一時間帯による違い

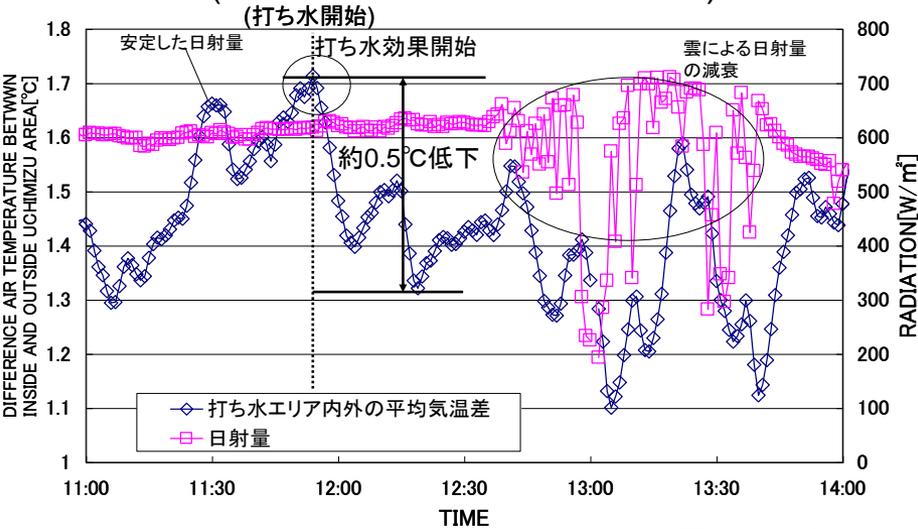


打ち水の効果
 0.5°C程度
 1時間以内の効果

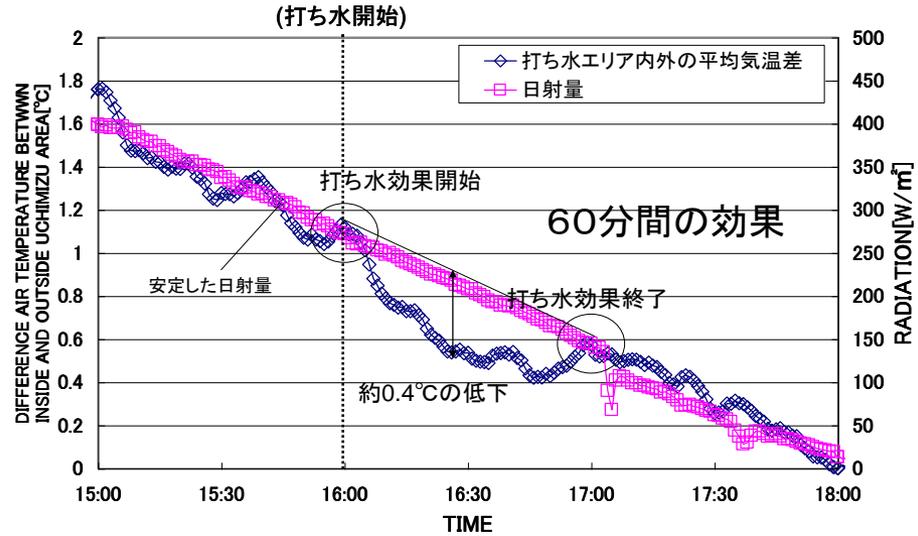


打ち水エリア内外の平均気温差と日射量の時系列
 (2004年8月19日 8:00~11:00)

いずれの時間帯に打ち水をしても気温低下効果はあり、その冷却効果を得た大気は移流・拡散によりその場からなくなるため一時的である。観測された晴天時のデータから約1時間の効果があるものと考えられる。どの時間に散水を行っても打ち水効果期間がかわらないと仮定すれば、気温のピークを抑える日中に打ち水をすると効率が良い。



打ち水エリア内外の平均気温差と日射量の時系列
 (2004年8月18日 11:00~14:00)



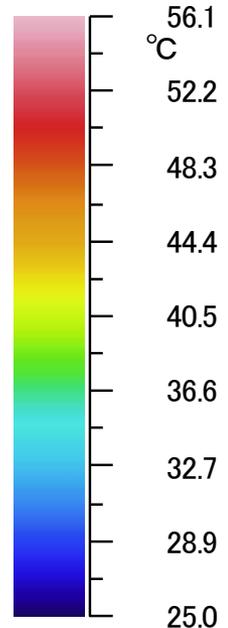
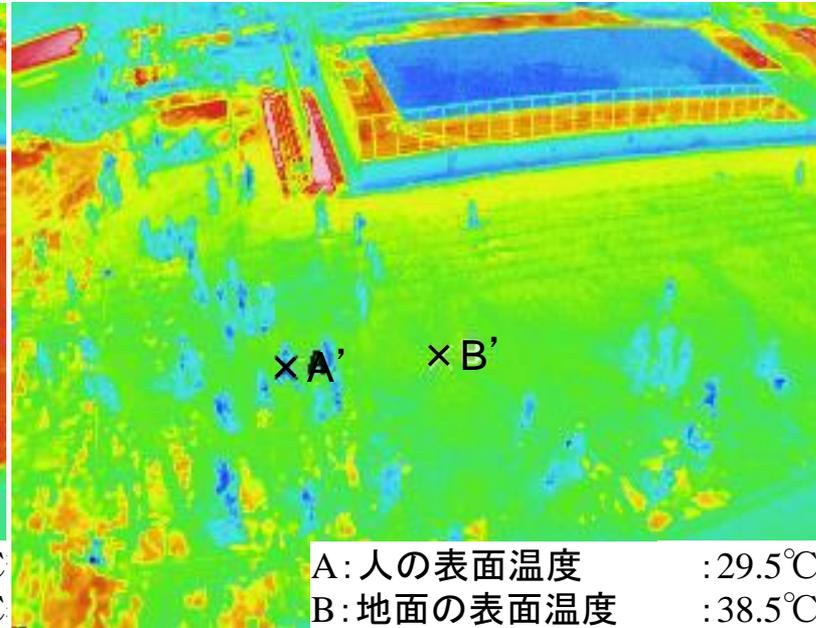
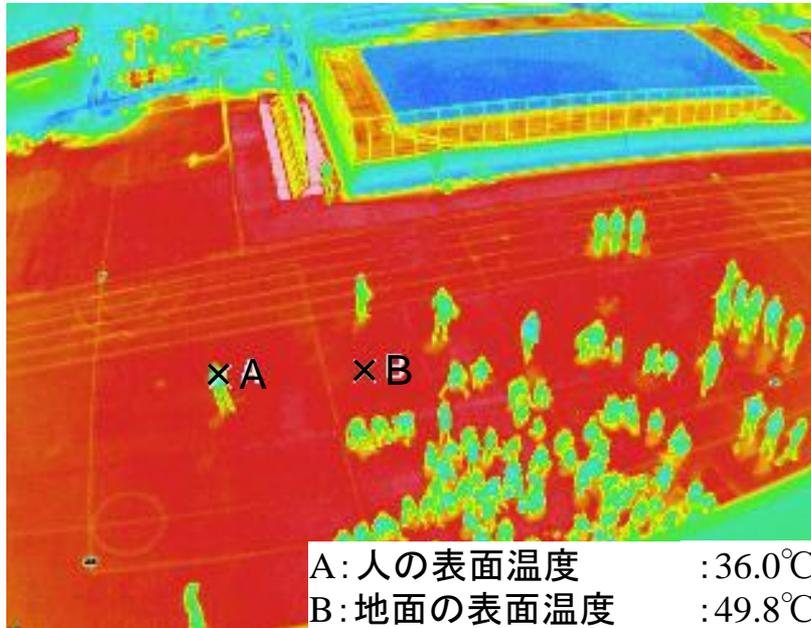
打ち水エリア内外の平均気温差と日射量の時系列
 (2004年8月20日 15:00~18:00)

観測結果 - 打ち水による輻射抑制効果 -

打ち水5分前の表面温度

11:55 打ち水20分後の表面温度

12:20



※打ち水後、地表面温度が低下し、人の温度も低下している

地面からの長波放射量を σT_g^4 と仮定すると

打ち水前の地面からの長波放射量 ($T_g=49.8^\circ\text{C}$) 約620W/m²

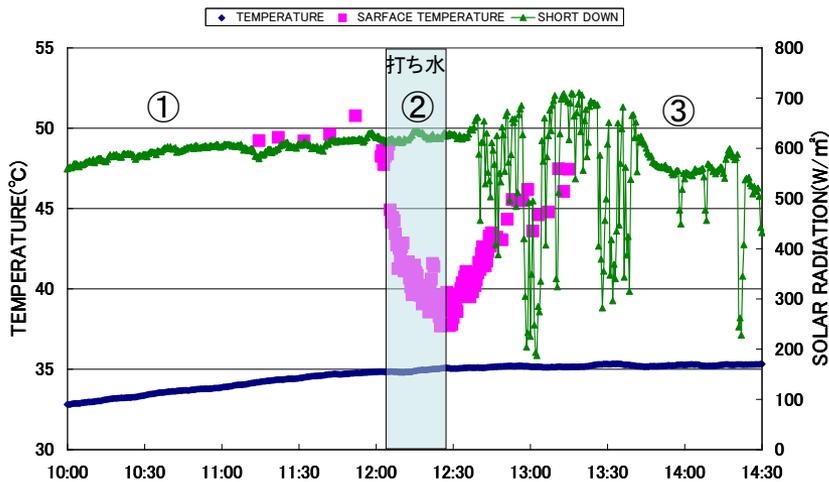
打ち水後の地面からの長波放射量 ($T_g=38.5^\circ\text{C}$) 約510W/m²

110W/m²の低下

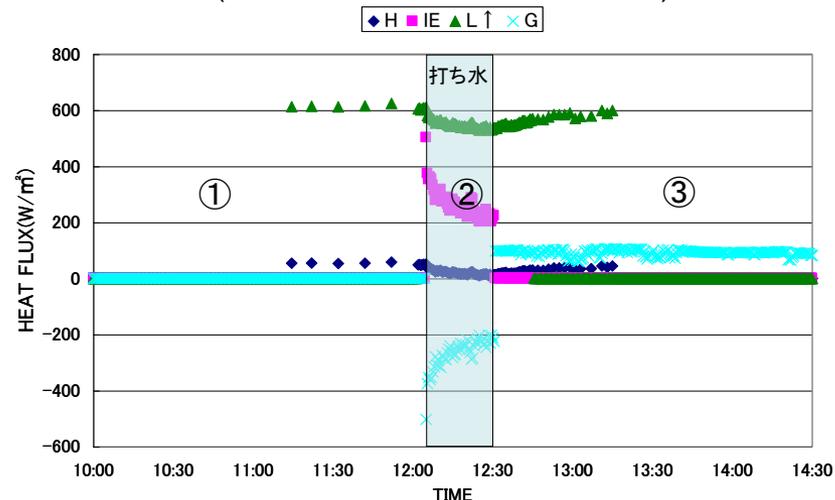
人の表面温度の変化 36.0°C → 29.5°C 6.5°C低下

観測結果

— 打ち水時の熱収支 —



打ち水前後の気温(打ち水エリア内),
地表面温度, 日射量の時系列
(2004年8月18日 10:00~14:30)



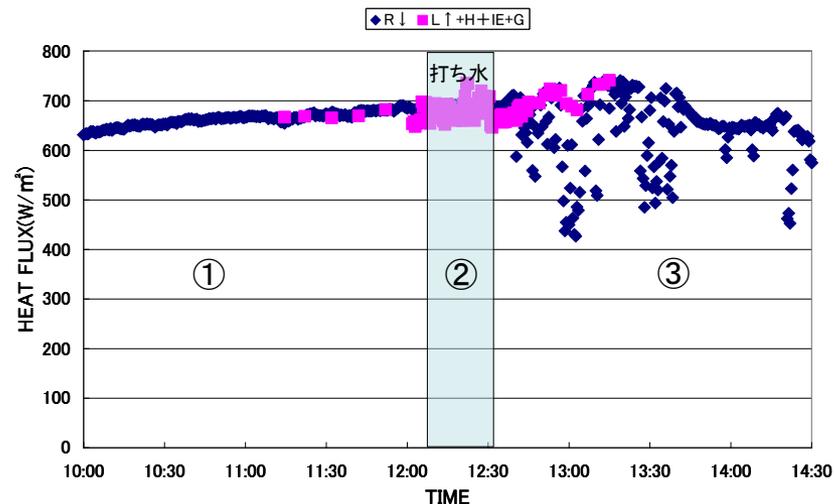
打ち水前後における顕熱・潜熱輸送量,
地面放射量, 地中伝導熱の時系列
(2004年8月18日 10:00~14:30)

①打ち水前, ②打ち水の効果がある期間, ③打ち水後の3パターンに分ける.

①においては熱収支を簡単にするため潜熱輸送量 IE と地中伝導熱 G を0として与える.

②では打ち水により地面を冷やすとともに G (マイナス, 貯熱ではなく放熱)を抑えることから $IE=G$ とおく. 時間の経過とともに打ち水の効果はなくなるため G の値は IE よりも徐々に減少させる.

③では打ち水によりなくなった G を溜め込む作用に働く. この方法により打ち水は地面の貯熱を放出し, 地面の表面温度を冷やす熱収支のバランスの整合性が取れた.



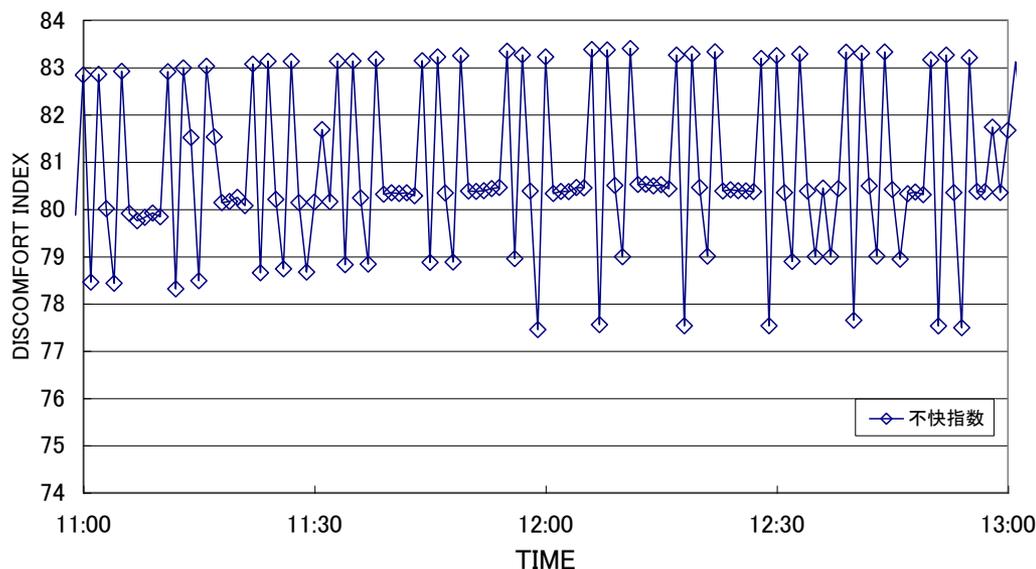
打ち水前後の入射放射量と顕熱・潜熱輸送量,
地面放射量, 地中伝導熱の合計の時系列
(2004年8月18日 10:00~14:30)

観測結果

— 打ち水による不快指数の変化 —

$$\text{不快指数: } DI = 0.81T_a + \frac{H}{100} (0.99T_a - 14.3) + 46.3$$

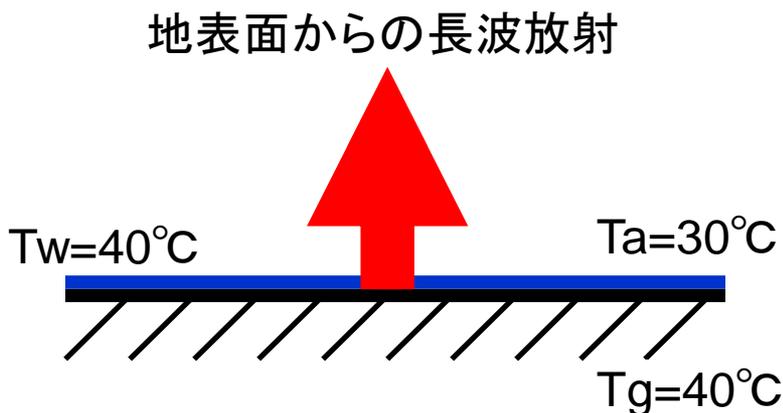
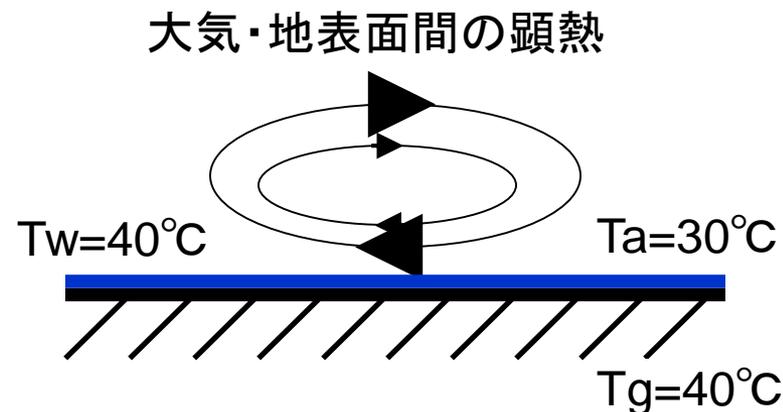
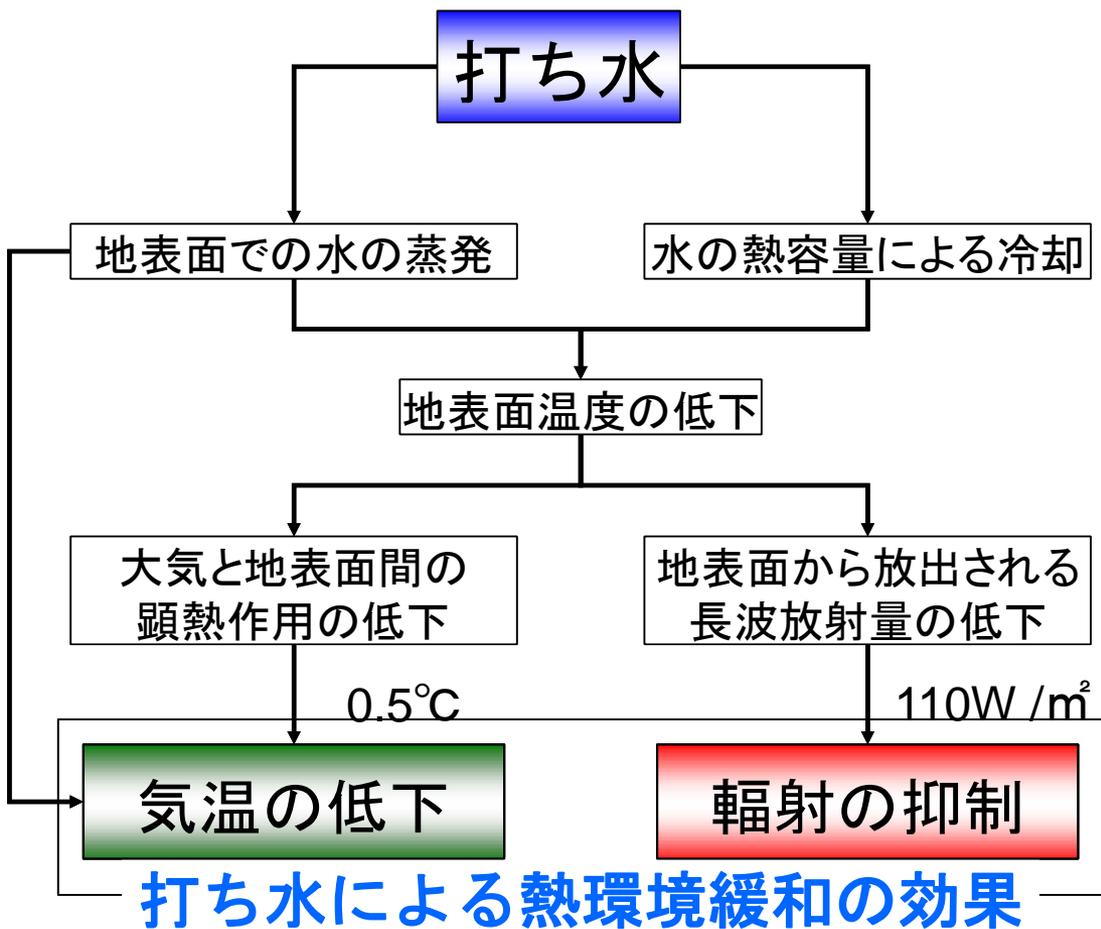
Ta: 気温 H: 相対湿度



不快指数の時系列変化
(2004年8月18日11:00 ~13:00)

潜熱により気温が下がると同時に水蒸気が増えるため相対湿度があがり不快指数が上がるとも考えられるが、気温、相対湿度どちらとも微小な変化であるとともに、気温の低下と相対湿度の増加による効果が相殺して不快指数が変化する傾向は見られなかった。

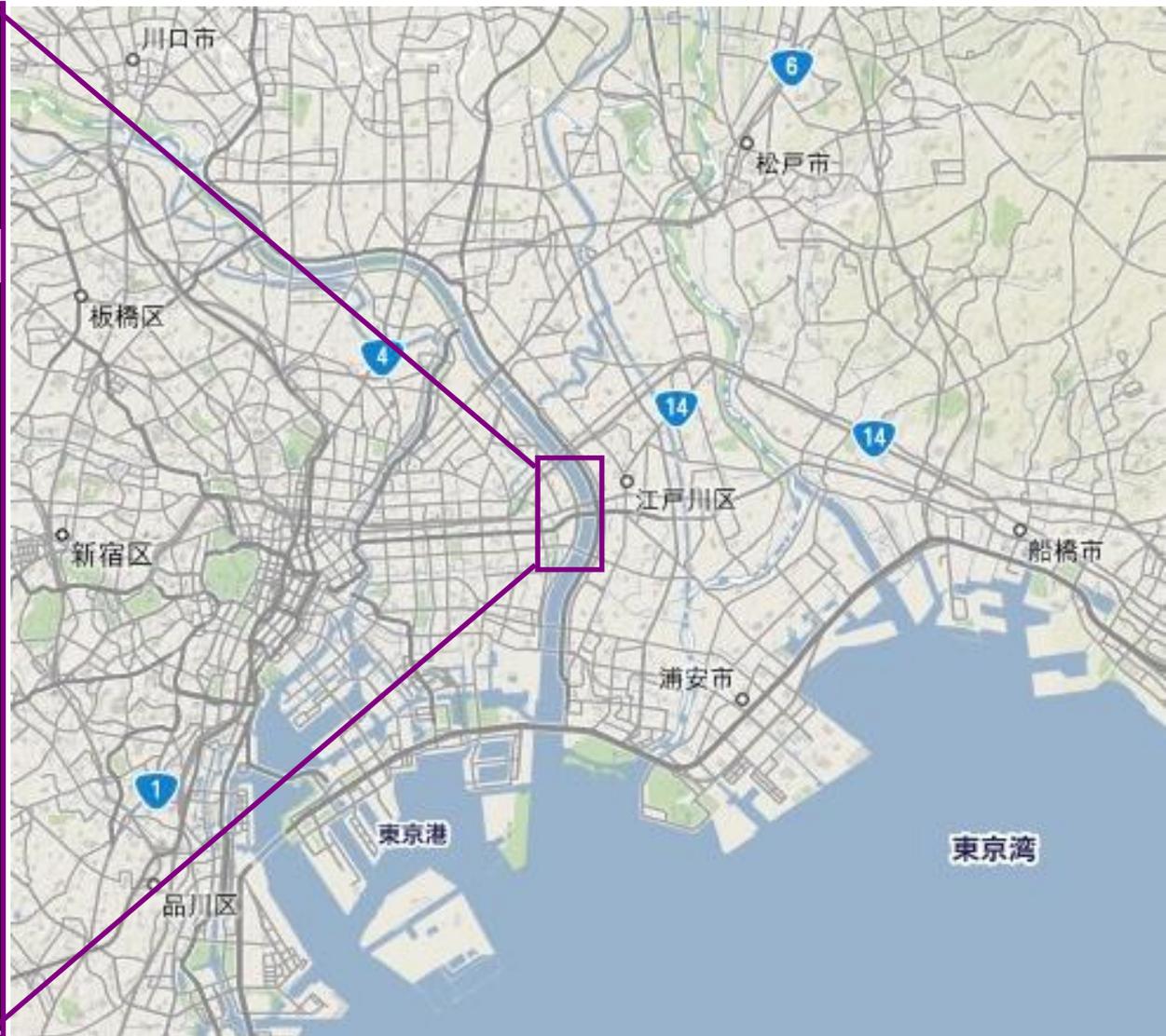
打ち水による気温低下・輻射抑制メカニズム



第4章

大河川・都市中小河川の大気冷却効果

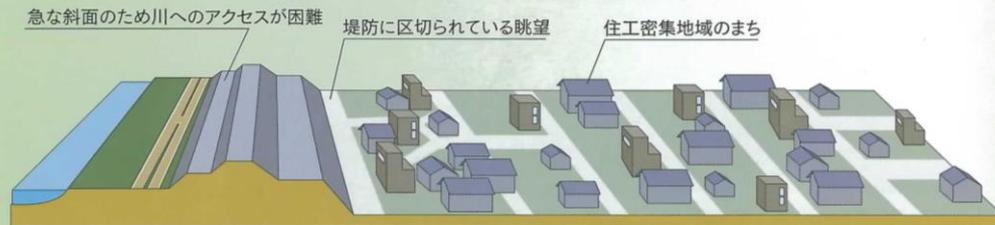
観測サイトの概要



観測サイト: 荒川右岸の河口から6kmから8km地点付近の2km²

高規格堤防(スーパー堤防)とは

現在の堤防



スーパー堤防整備後

④川へのアクセスが容易になります。

緊急用河川敷道路

堤防の緩傾斜化

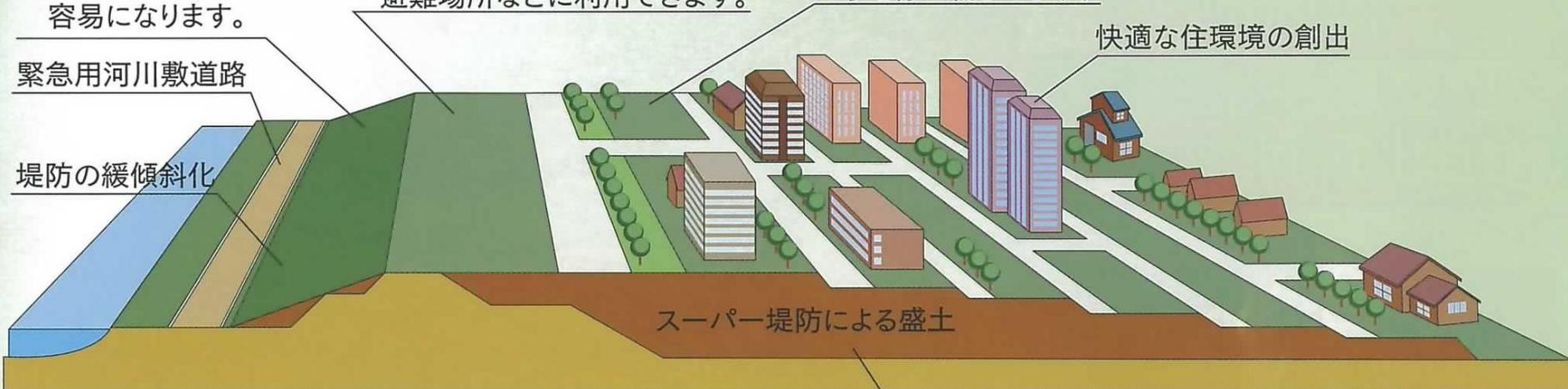
③オープンスペースとして、避難場所などに利用できます。

②眺望が開け川の
水と緑に親しめます。

快適な住環境の創出

スーパー堤防による盛土

①地震や洪水に強い地盤になります。



高規格堤防整備前後

整備前

高規格堤防整備前の土地利用

・低層住宅地域

→ 風の移流をさえぎる家が乱雑に立ち並んでいる



高規格堤防整備後の土地利用

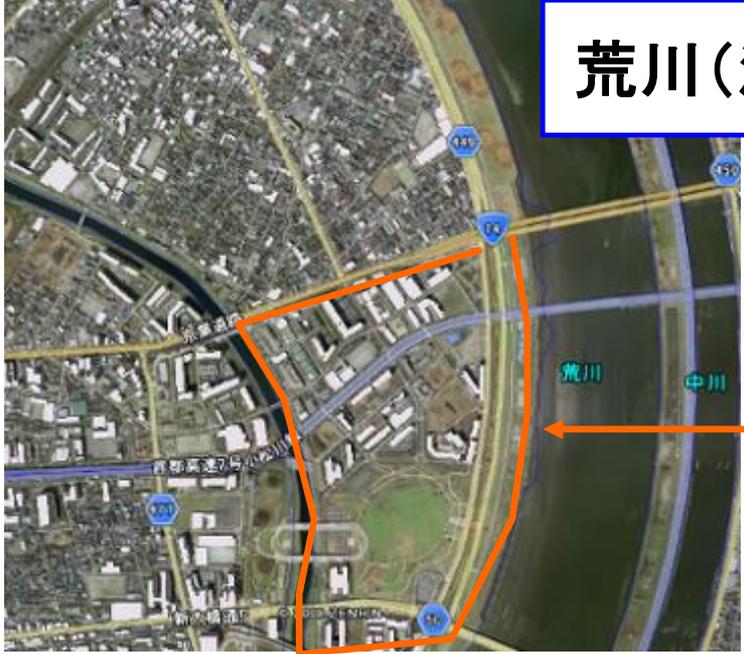
・公園、高層住宅地域

→ 構造物は高層マンションのみで風が移流しやすい

整備後



荒川(江戸川区平井地区)



観測風景



ラジエーションシールド



温湿度計 (HOBO)

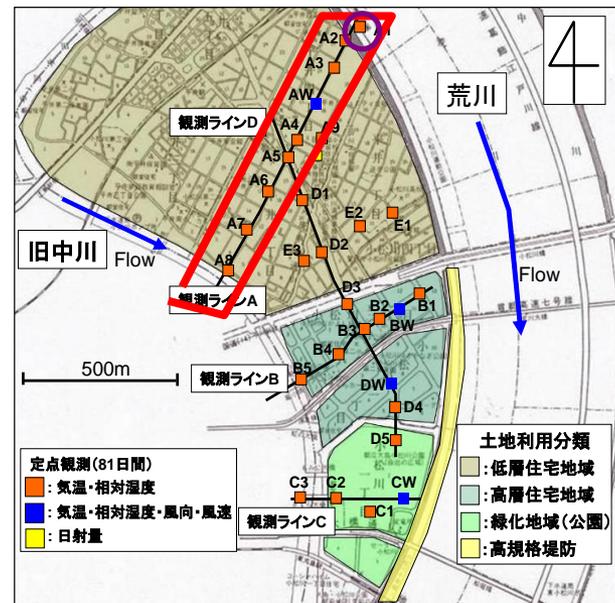
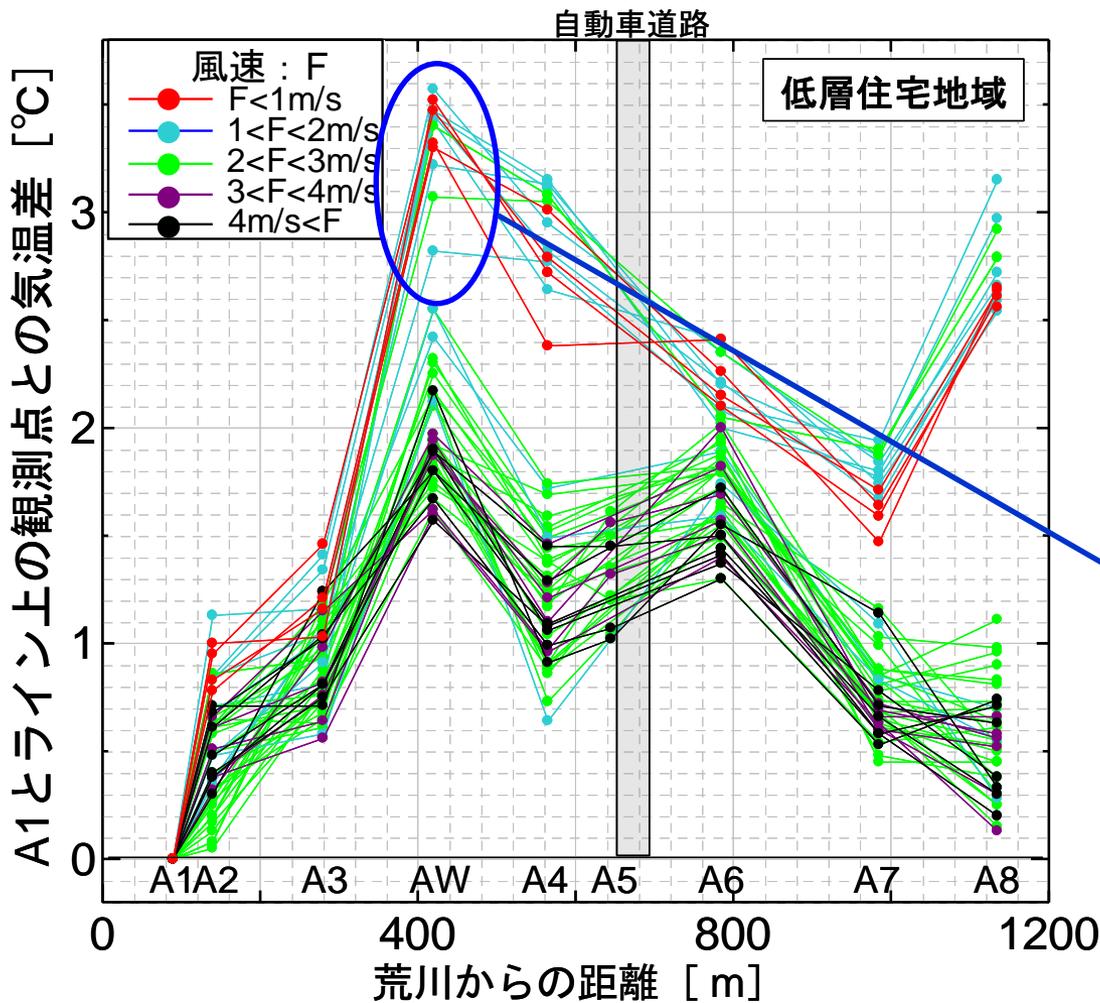
温度計をラジエーションシールドにいれ
日射と輻射の影響をうけないようにした

観測機械名	観測項目	台数
HOBO	温度・湿度	25
ウェザーステーション	気温・風向・風速・気圧・雨量	4
UIZIN	日射量	1

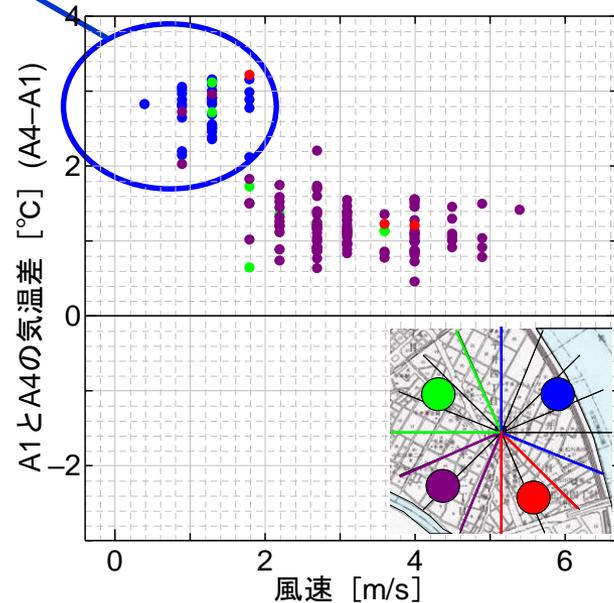
40箇所では気象因子を計測した

観測結果

低層住宅地域における風と気温の関係

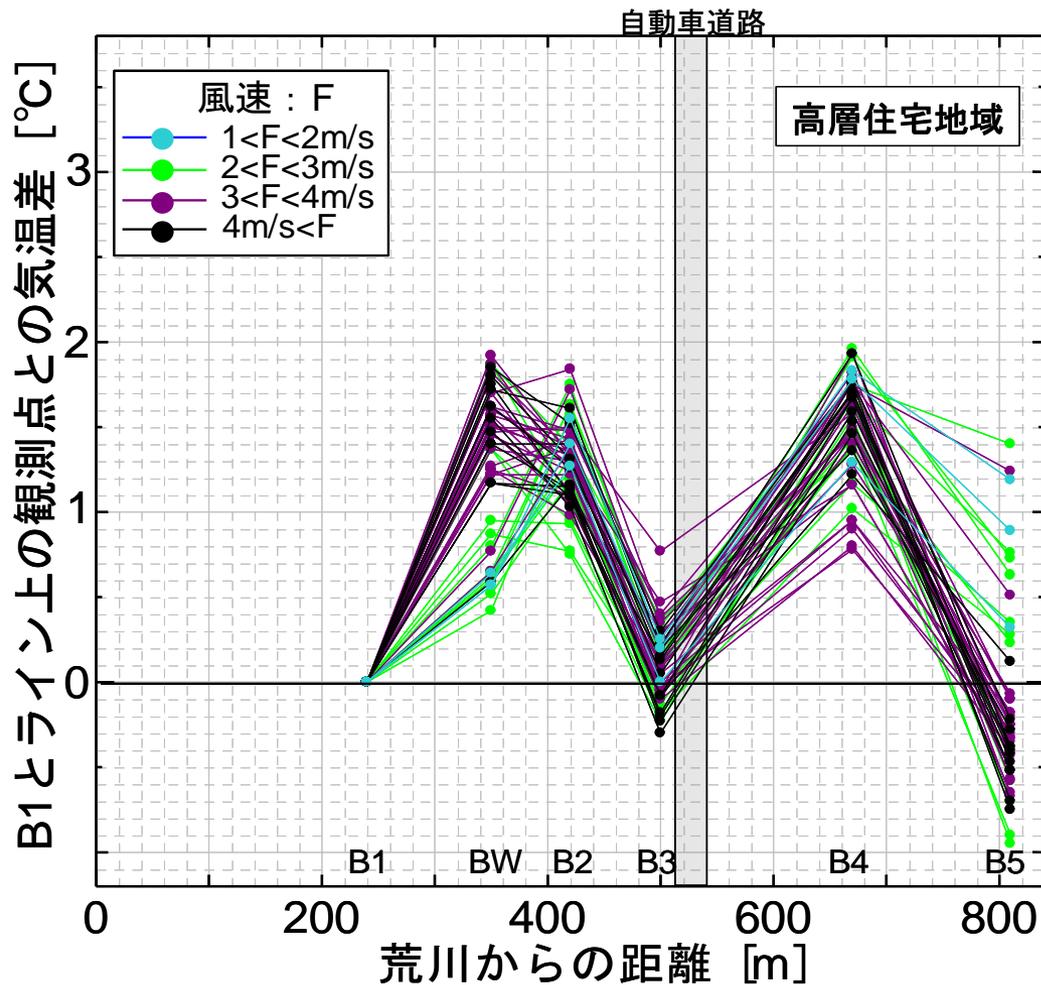


荒川からの風がきたときに河川からの距離が400mの観測点で気温差が2°C以上になる



観測結果

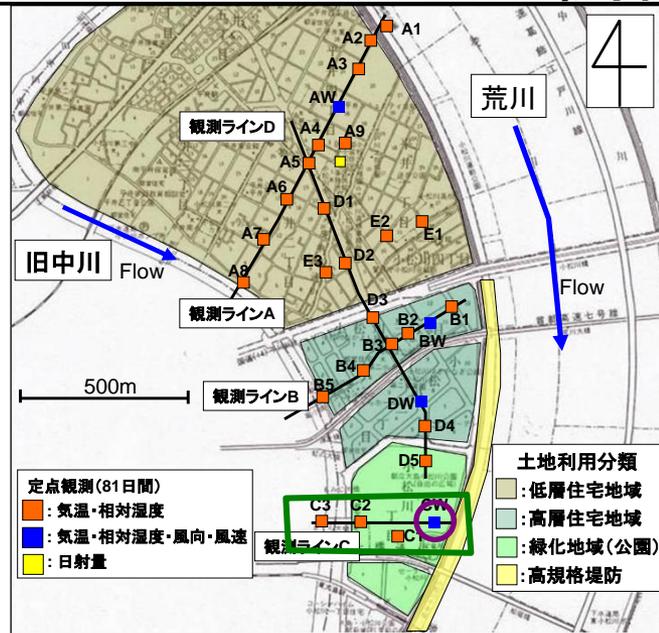
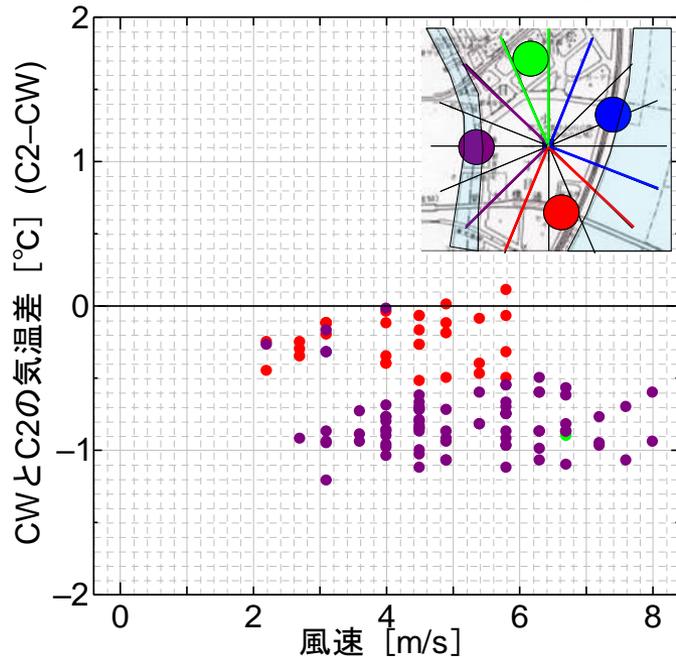
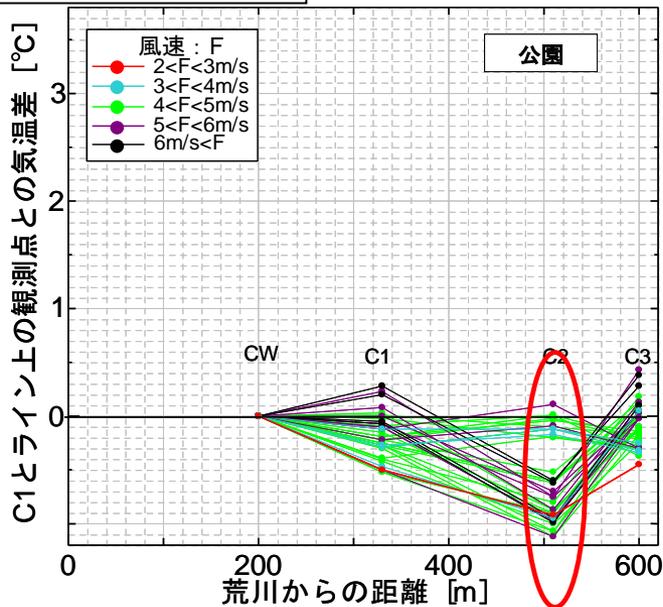
高層住宅地域における風速と気温の関係



高層住宅地域内の気温差は2°C以内である

観測結果

公園地域における風と気温の関係



風向による気温差の傾向はない。

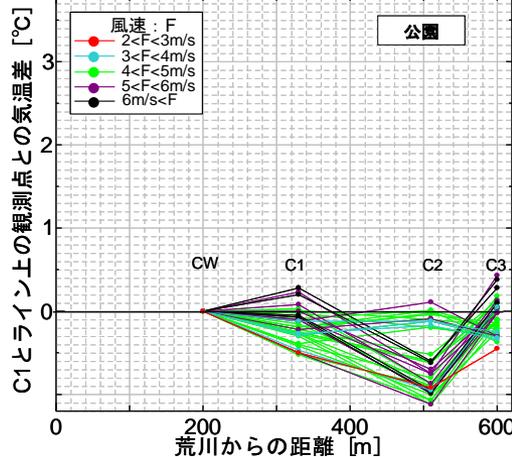
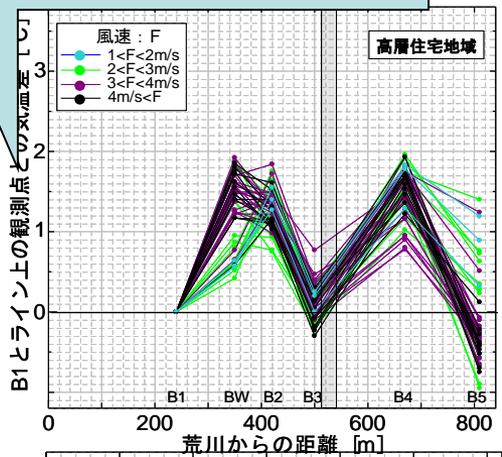
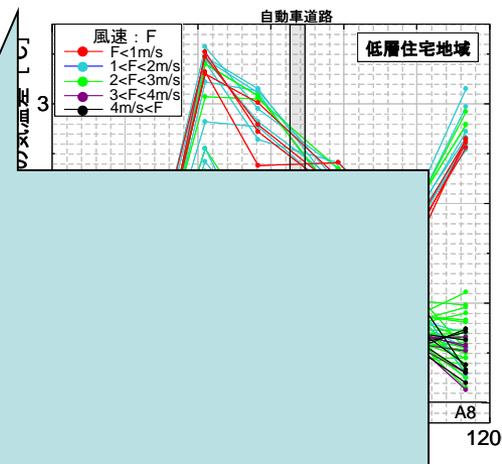
どの方角からの風が来ても公園内の気温差は1.2°C以内である。

荒川からの 風が吹いたとき

大気の冷却効果



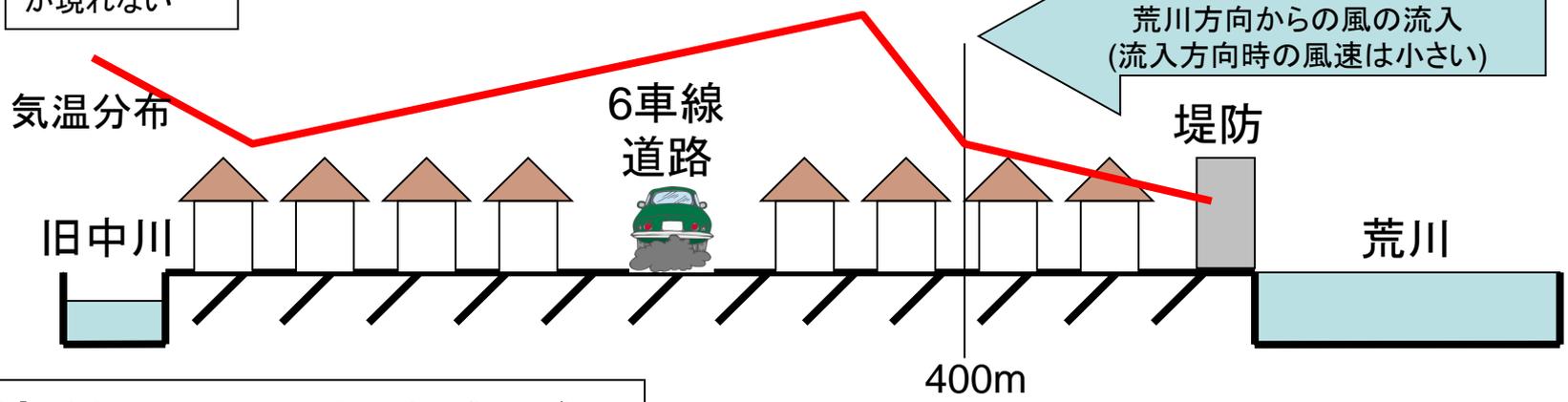
- 土地利用分類**
- 低層住宅地域
 - 高層住宅地域
 - 緑化地域(公園)
 - 高規格堤防



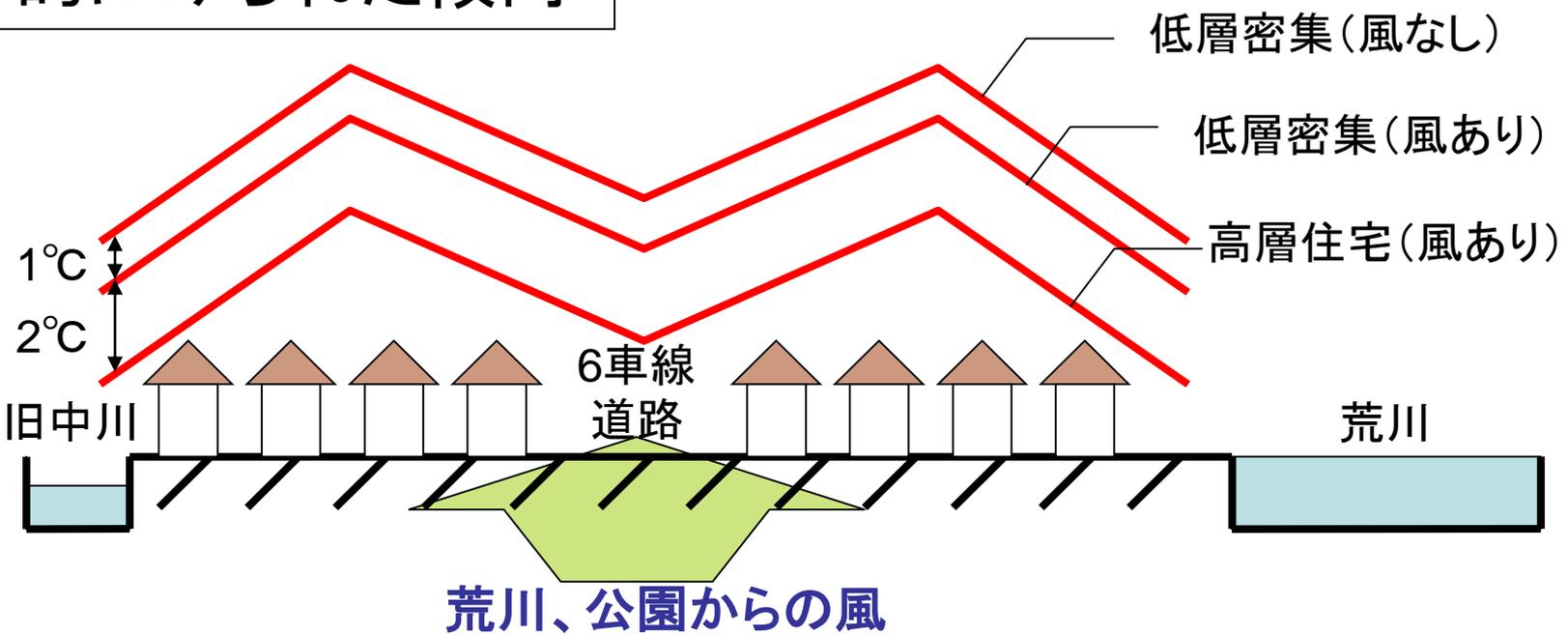
低層密集住宅地域でみられた傾向

風がないため
旧中川の効果が
現れない

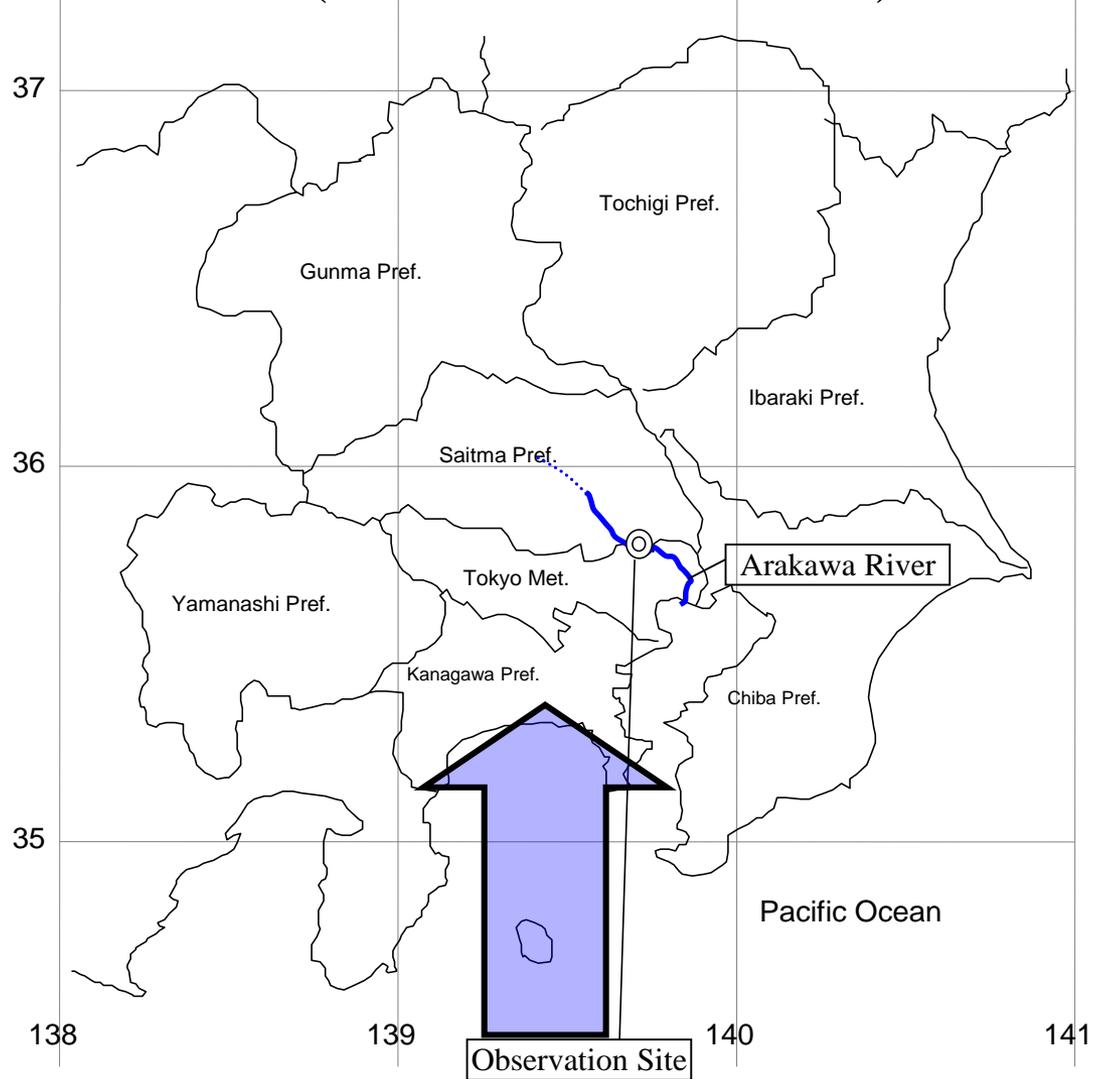
荒川から400m付近まで
冷却効果が現れる



全体的にみられた傾向

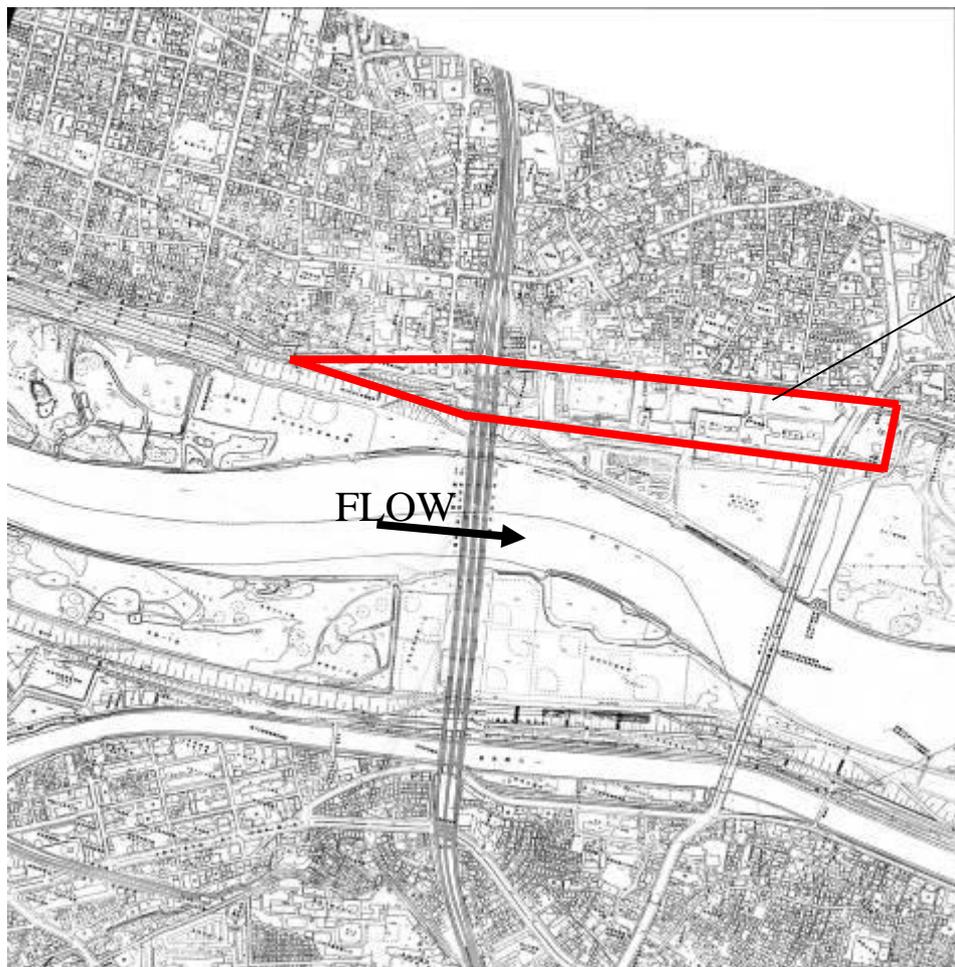


観測対象地域(荒川赤羽・川口地区)の位置図



夏季は日中、南風が卓越する。

「河川」の熱環境緩和作用



高規格堤防区間

荒川河口から約22KPの約1km区間が高規格堤防区間である。

観測地点

観測地点全77地点

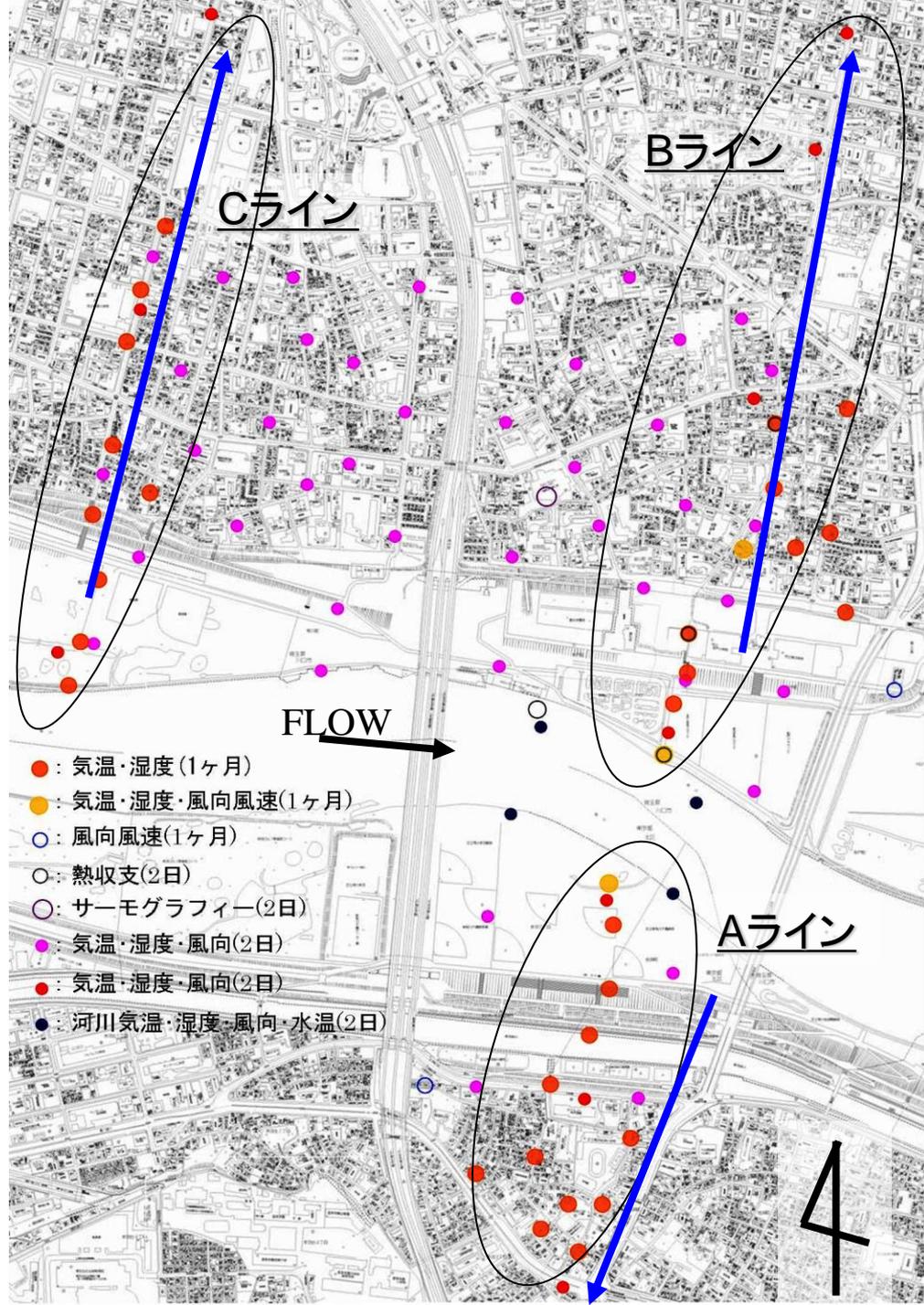
- : 温湿度計(平面観測, 32地点)
- : 温湿度・風速計(鉛直観測, 3地点)
- : 風向・風速計(2地点)
- : 温湿度計(移動観測, 36地点)
- : 河川温湿度・水温(移動観測, 4地点)

定点観測期間

2006/7/12～2006/8/22

移動観測期間

2006/8/4,7 7:00～18:00



観測項目と観測機器

	観測形態	観測項目	観測機器	観測地点数	観測日程
①長期定点観測	平面定点	気温・湿度	(1) 温度・湿度計	28地点	7/14～8/14 (7/27・28に 前半データ 回収)
		風向・風速	(2) プロペラ式風速計	2地点	
		日射量	(3) 日射計	1地点	
	鉛直定点	気温・湿度	(1) 温度・湿度計	3地点×5個	
		風速	(4) 三杯式風速計	3地点×2個	
②平面移動観測	気温・湿度・風向	気温・湿度	(5) 温度・湿度計	12ブロック 及び3測線	8/4、7
		風向	(6) 風向(方位磁針とヒモ)		
	熱収支	気温・湿度	(1) (7) 温度・湿度計	3地点	
		風向・風速	(8) 3次元風向風速計		
		放射量	(9) 放射計		
		黒球温度	(10) 黒球温度計		
表面温度	(11) サーモグラフィ	1地点			
③河川移動観測	河川移動	気温・湿度	(1) 温度・湿度計	河川内	8/4、7
		水温	(12) 温度計		
		風向	(6) 風向(方位磁針とヒモ)		
		風速	(13) 熱線式風速計		

温湿度計

全32箇所

柱などが傷つかないようにゴムロールとゴムカバー付の針金で高さ1.5mに固定. 針金がはがされないように銀のテープで巻く.

また注意を促すため張り紙を張った.



鉛直観測(気温, 湿度, 風速)



温湿度計



風速計



鯉のぼり用の
ポールを使用.

全6地点(高さ1.5, 3, 6, 9, 12, 15m地点)に温湿度計を設置.

全2地点(高さ5, 10m地点)に三杯式風速計を設置.

移動観測(気温・湿度・風向)



全6エリア×6箇所温度・湿度・風向を観測。
温度・湿度計は通風筒の中に入れた。
風向はヒモを用い、1分間での最多風向を観測結果とした。
各地点、温湿度は1時間インターバルで計測した。
センサーを高さ1.5mに固定して計測した。

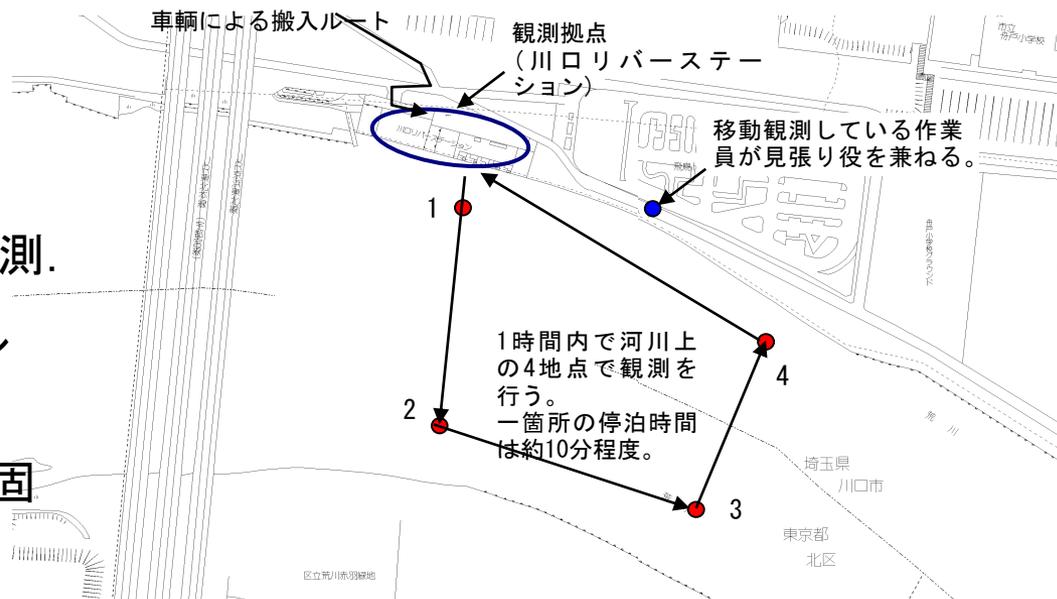


河川移動観測

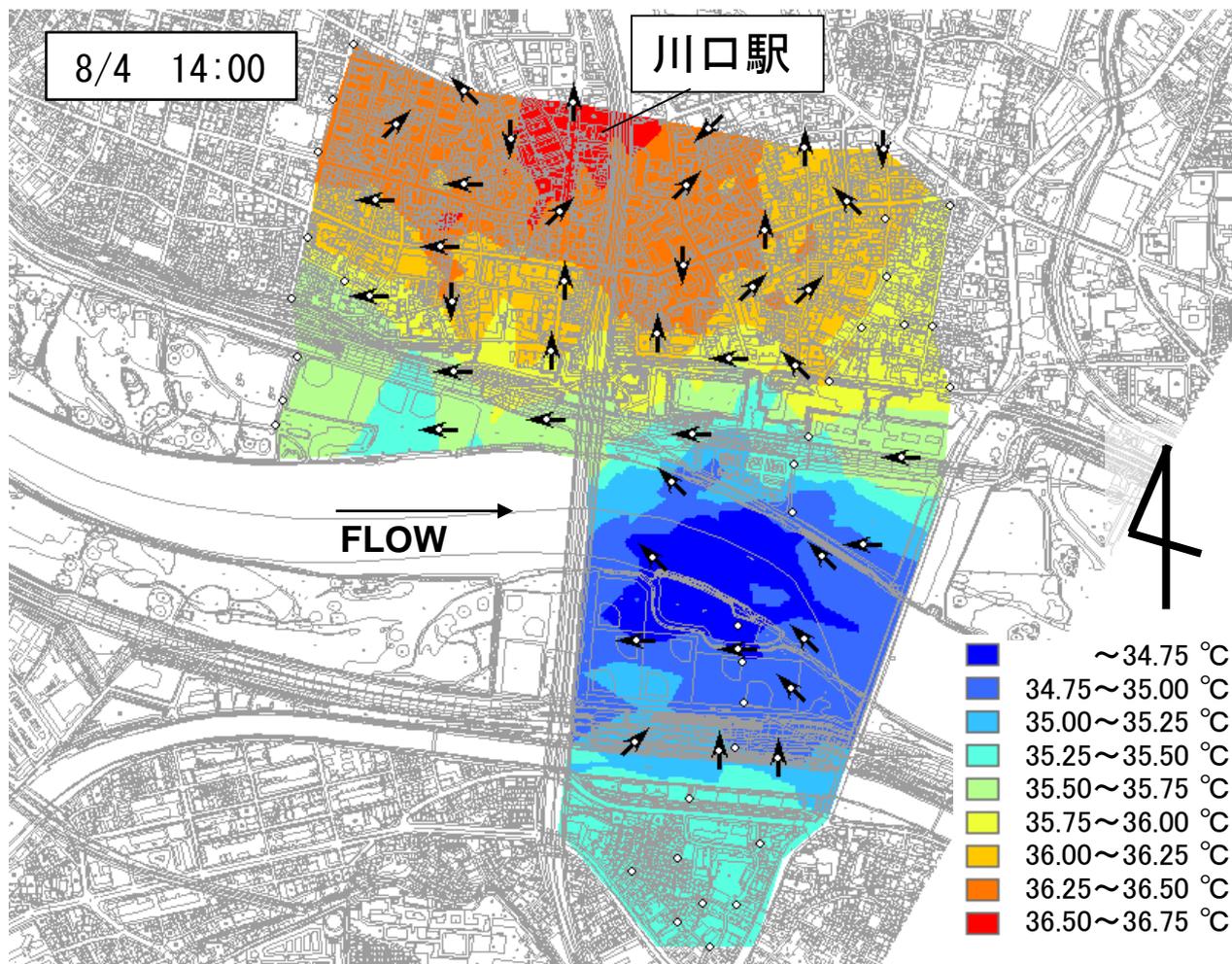
河川上の気温・湿度・風向・水温を観測.

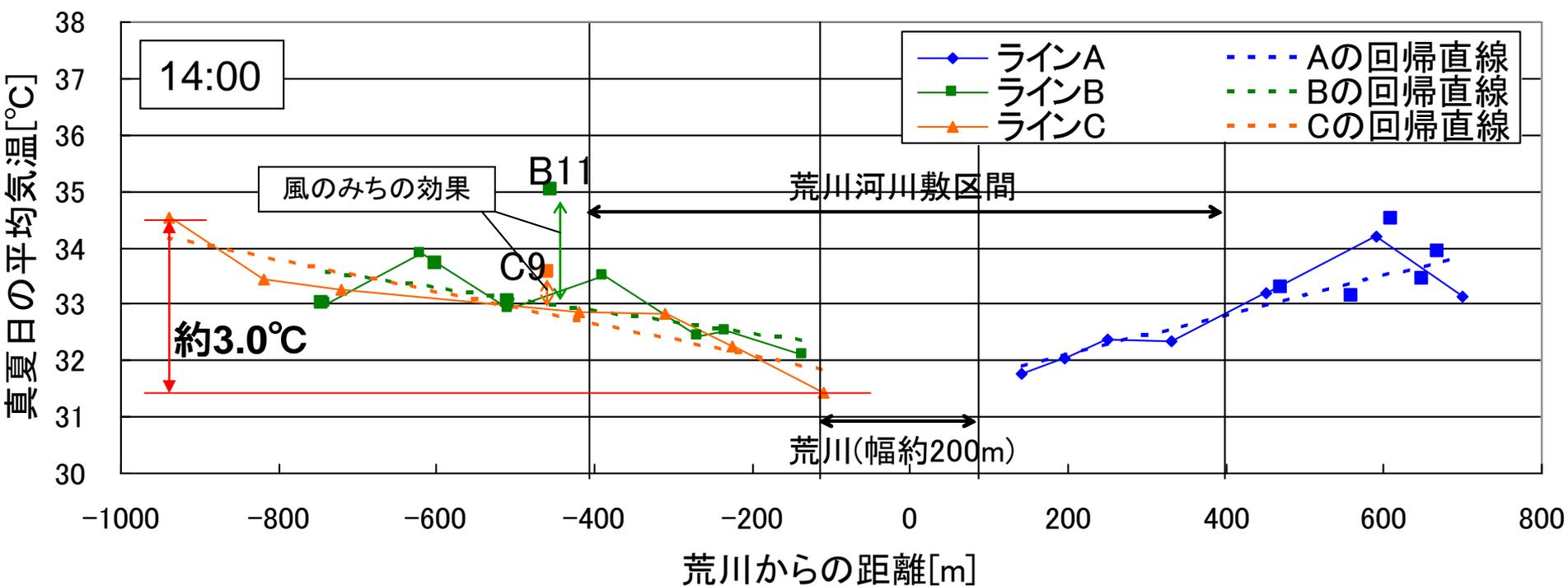
各地点, 温湿度は1時間インターバル
で計測した.

センサーを水面からの高さを1.5mに固
定した.



移動観測日の気温・風向の分布 (8/4 14時の例) 観測高度 1.5m



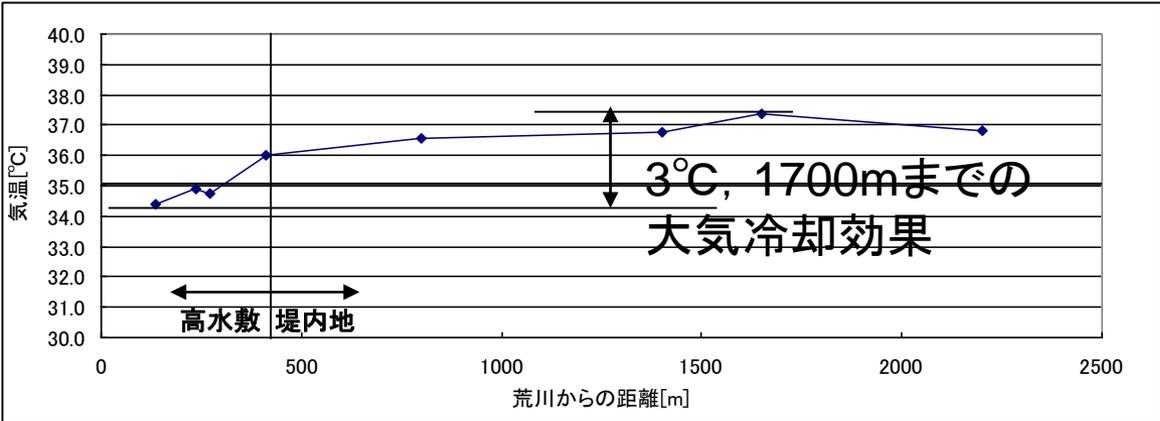


河川に近いほど気温が低い。観測範囲である河川水際～河川中心からの距離900mの堤内地にまで気温勾配がある。このことから河川による大気冷却効果が少なくともこのサイトで800m程度あることがわかる。

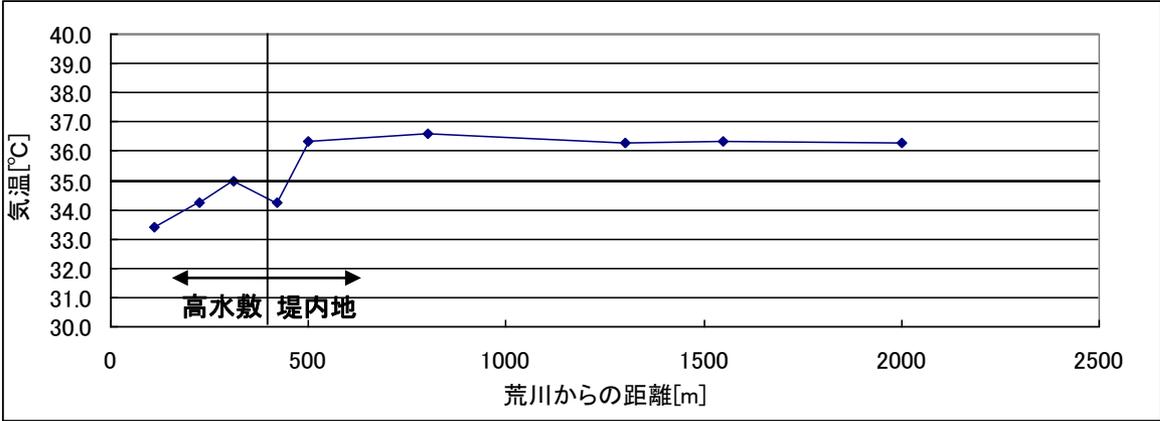
荒川による気温影響範囲

移動観測結果(ラインB、C) : 14時

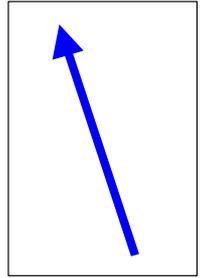
LB



LC



14時の風

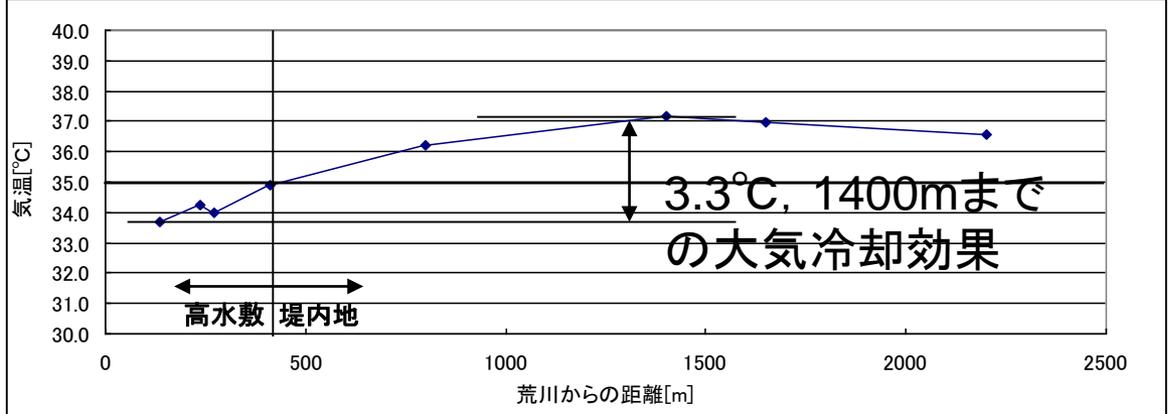


2.8m/s

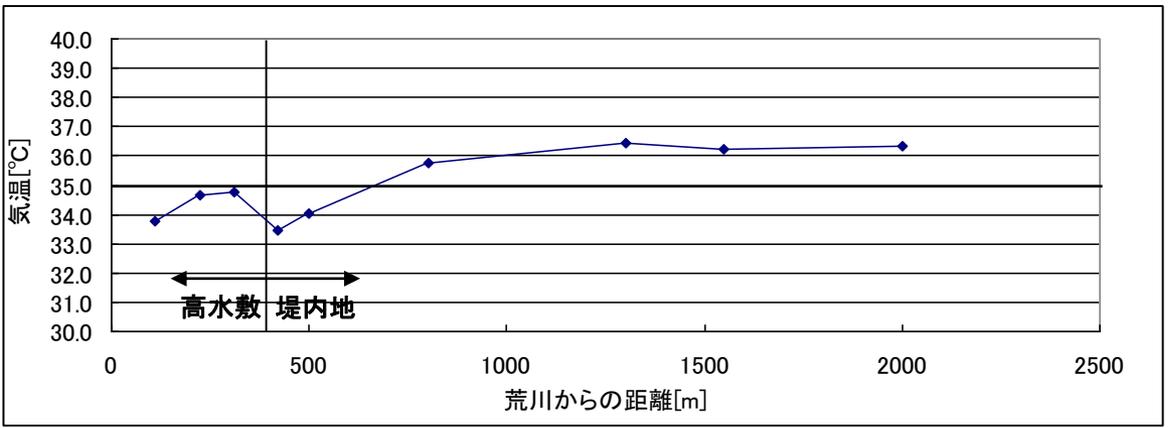
荒川による気温影響範囲

移動観測結果(ラインB、C) : 12時

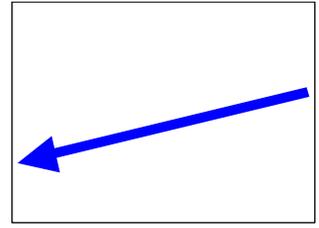
LB



LC

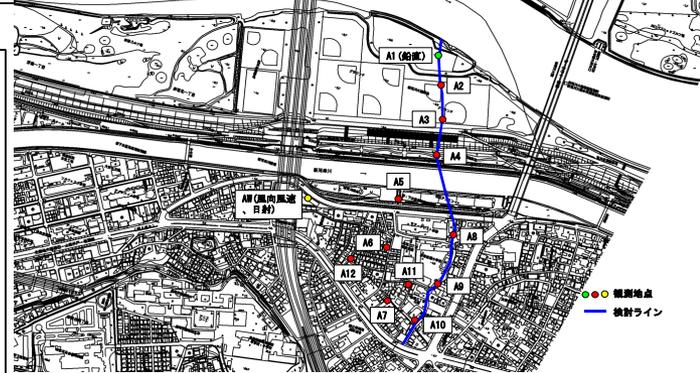
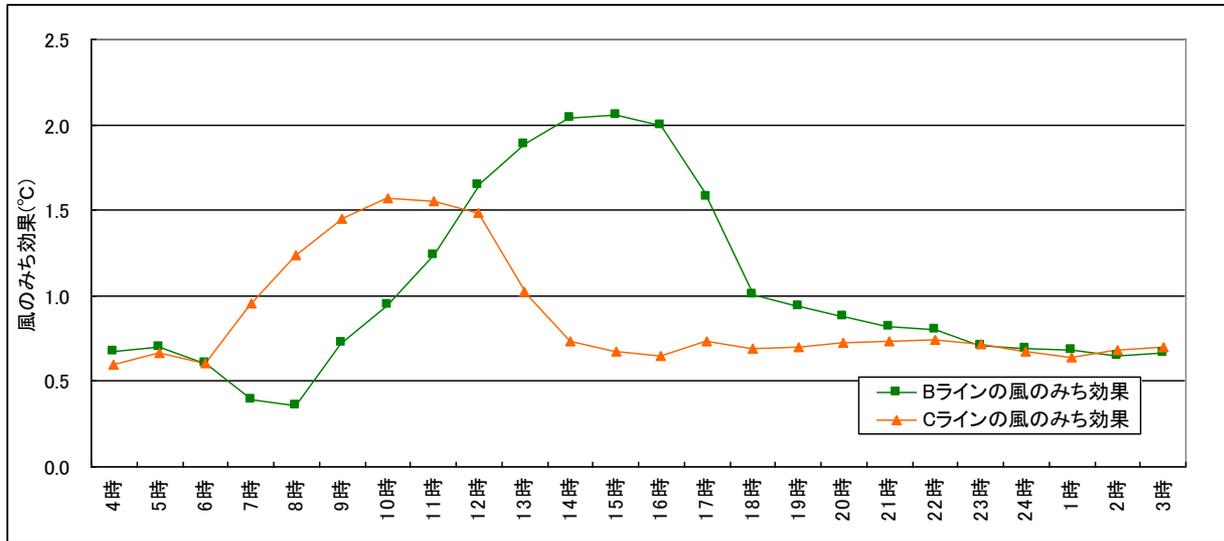
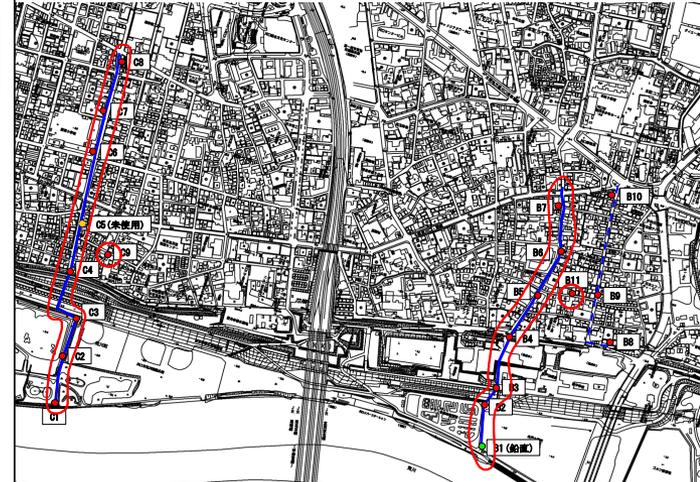
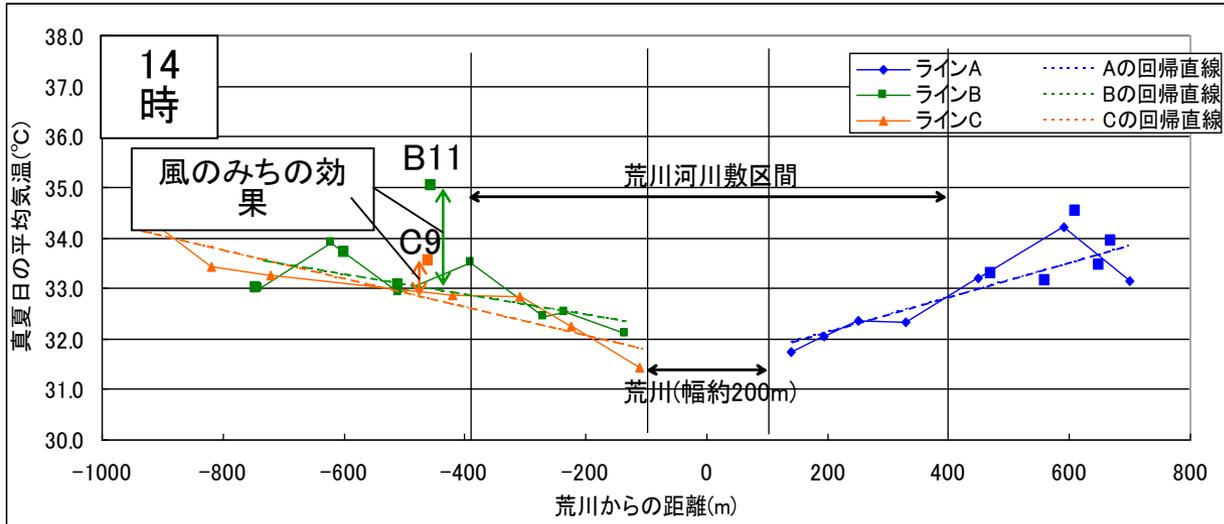


12時の風



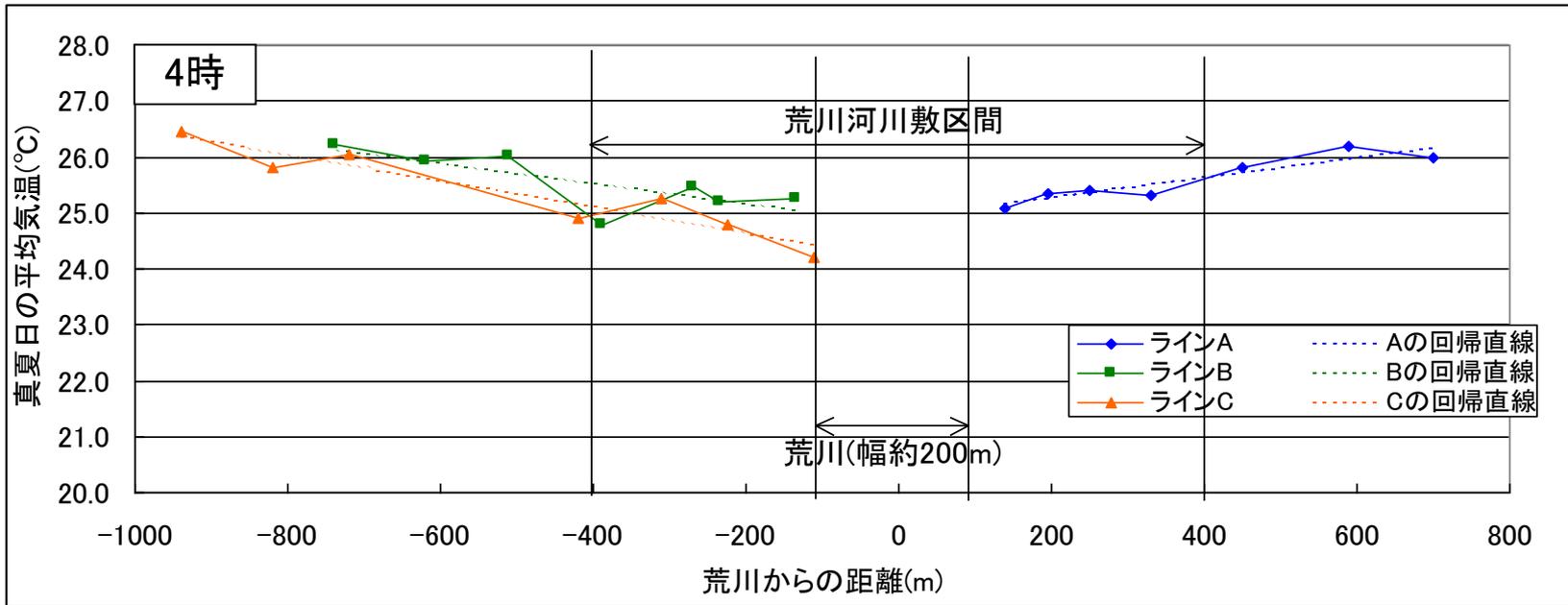
2.9m/s

風のみち効果の検討

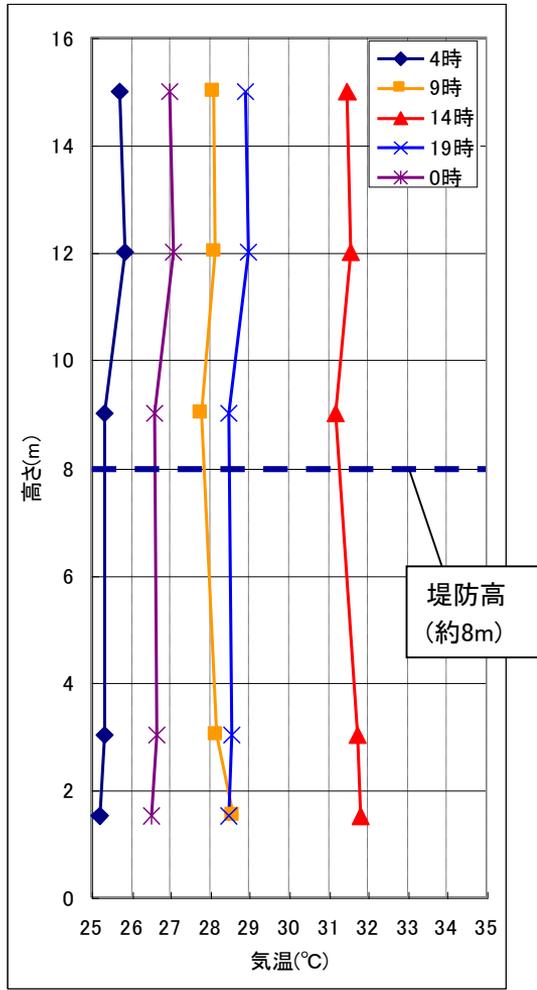


冷気のにじみ出し: 夜間の気温分布

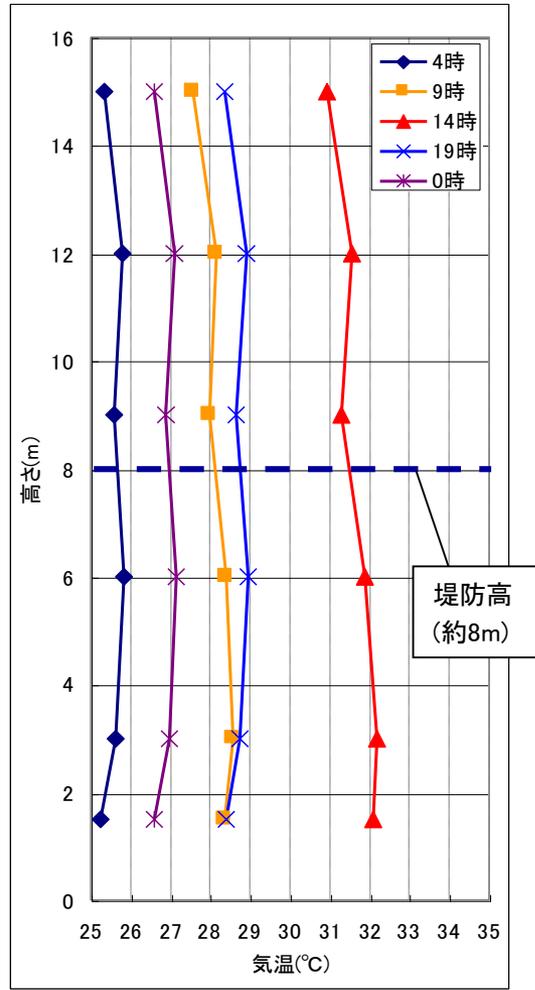
風速が最も小さくなる**午前4時**(13日平均で1.0m/s程度)においても、荒川側が低く、市街地側が高い気温分布になっている



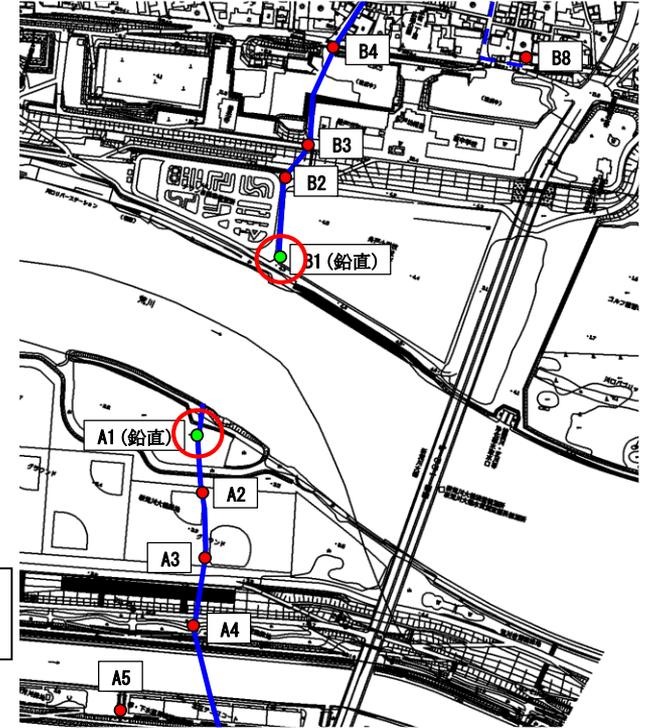
高水敷(水面付近)の気温鉛直分布の比較



A1

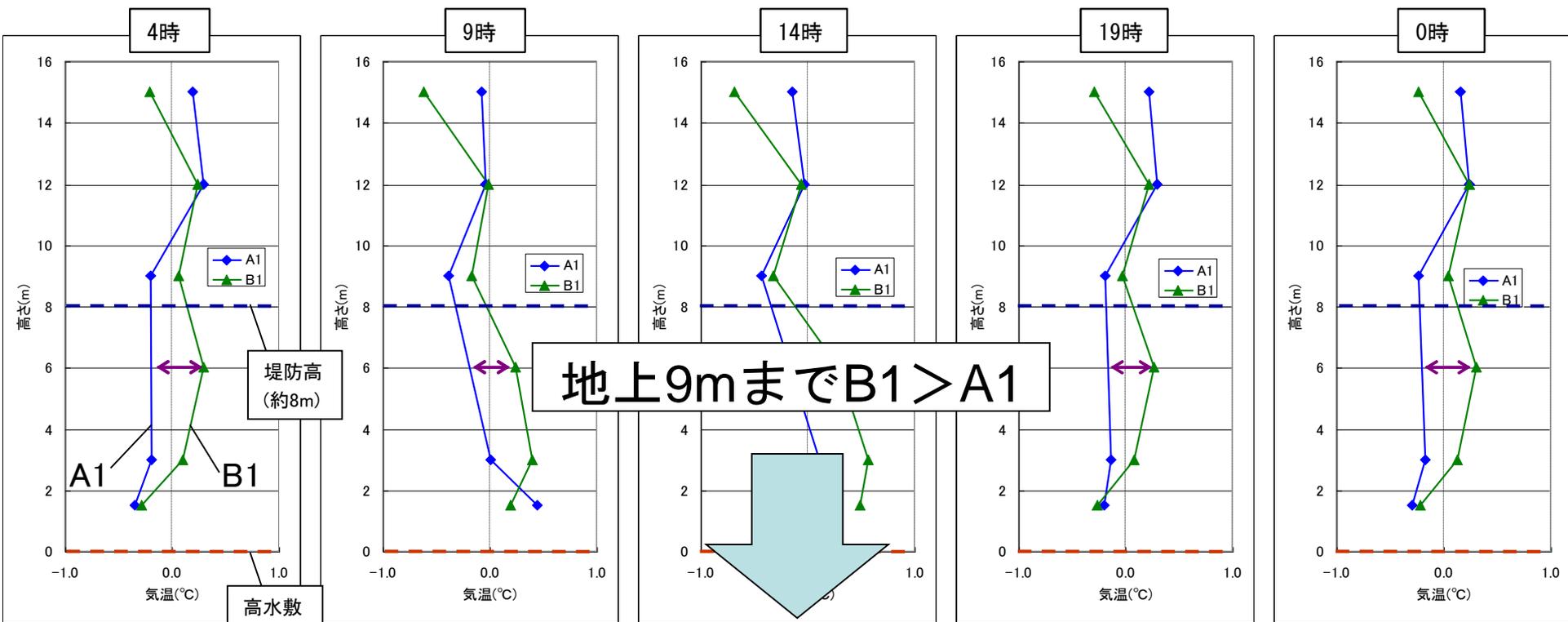


B1



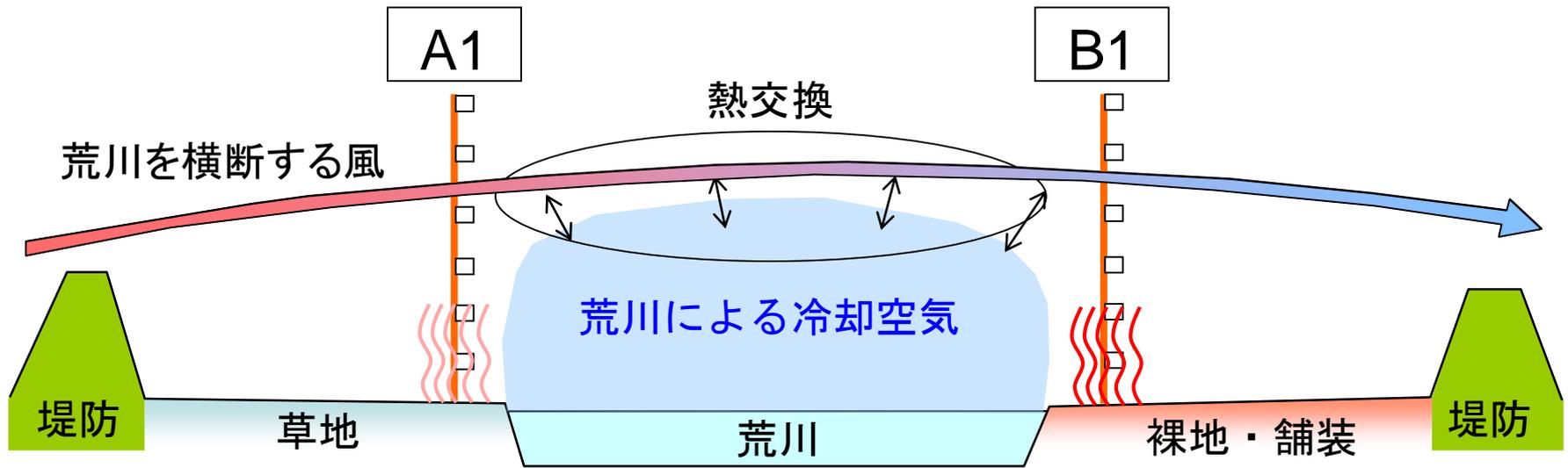
鉛直方向の
気温差をグラフ化

真夏日13日平均データによる 地表付近の温度比較

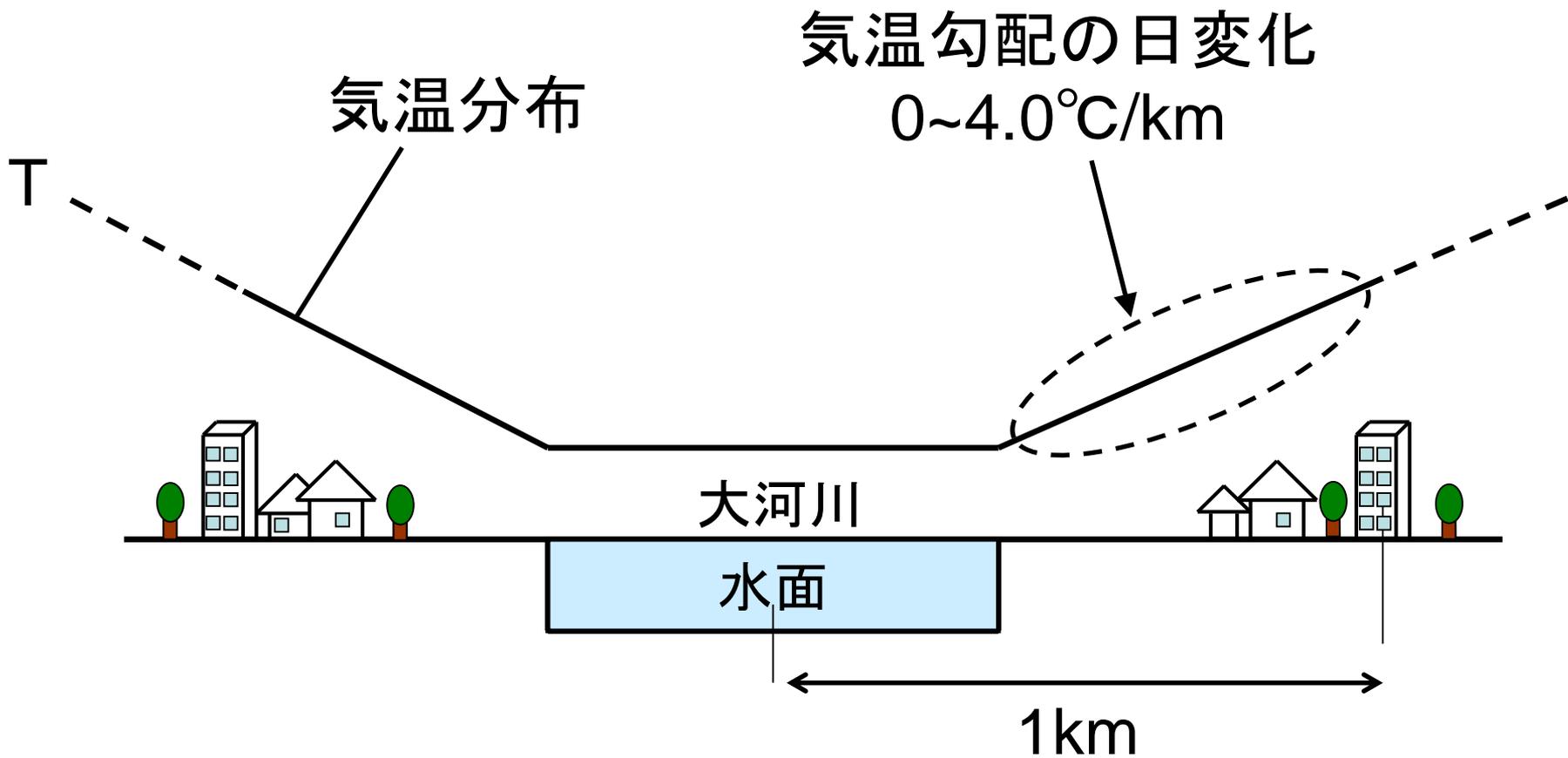


- ・堤防高(約8m)より低い位置は熱がこもり、地表面被覆の違いによりB1 > A1となる
- ・堤防高より高い位置では荒川水面により冷却された風が抜け、B1 < A1となる

想定される冷却効果のイメージ



大河川の大気冷却効果

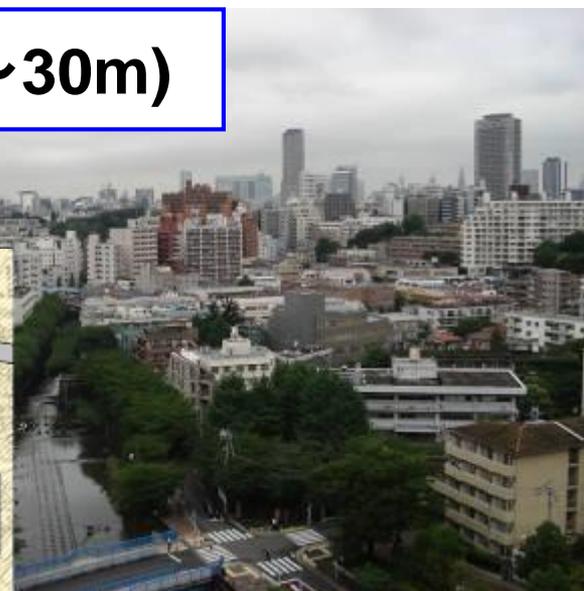
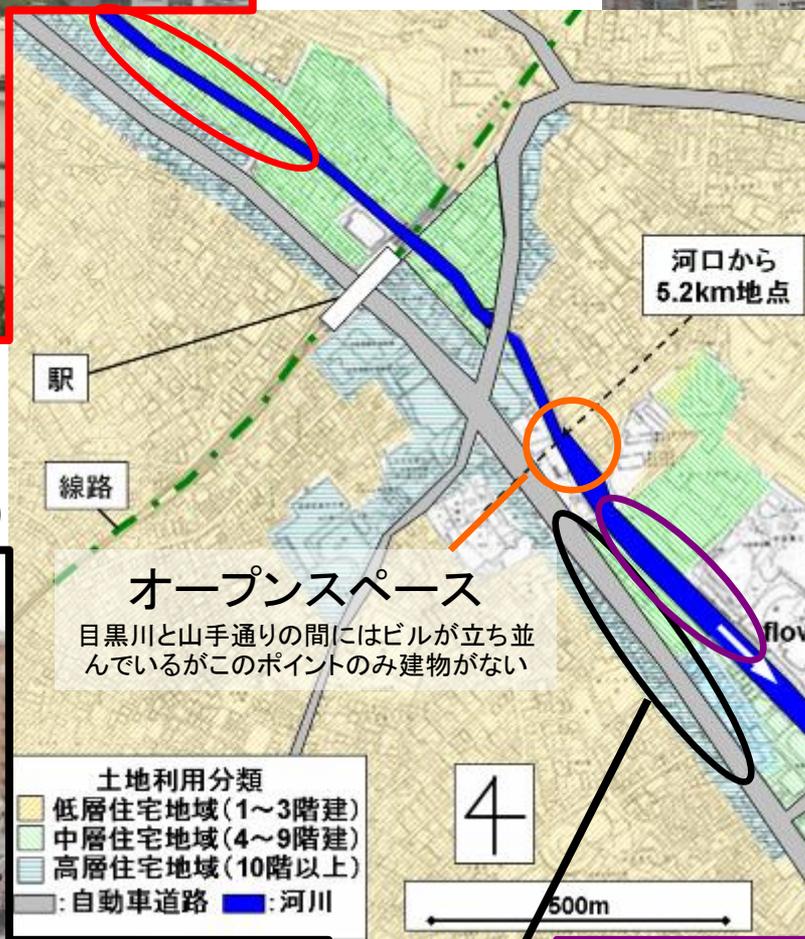


都市中小河川(目黒川:川幅10~30m)



目黒川(川幅10~15m)

自動車道路(片側2車線)



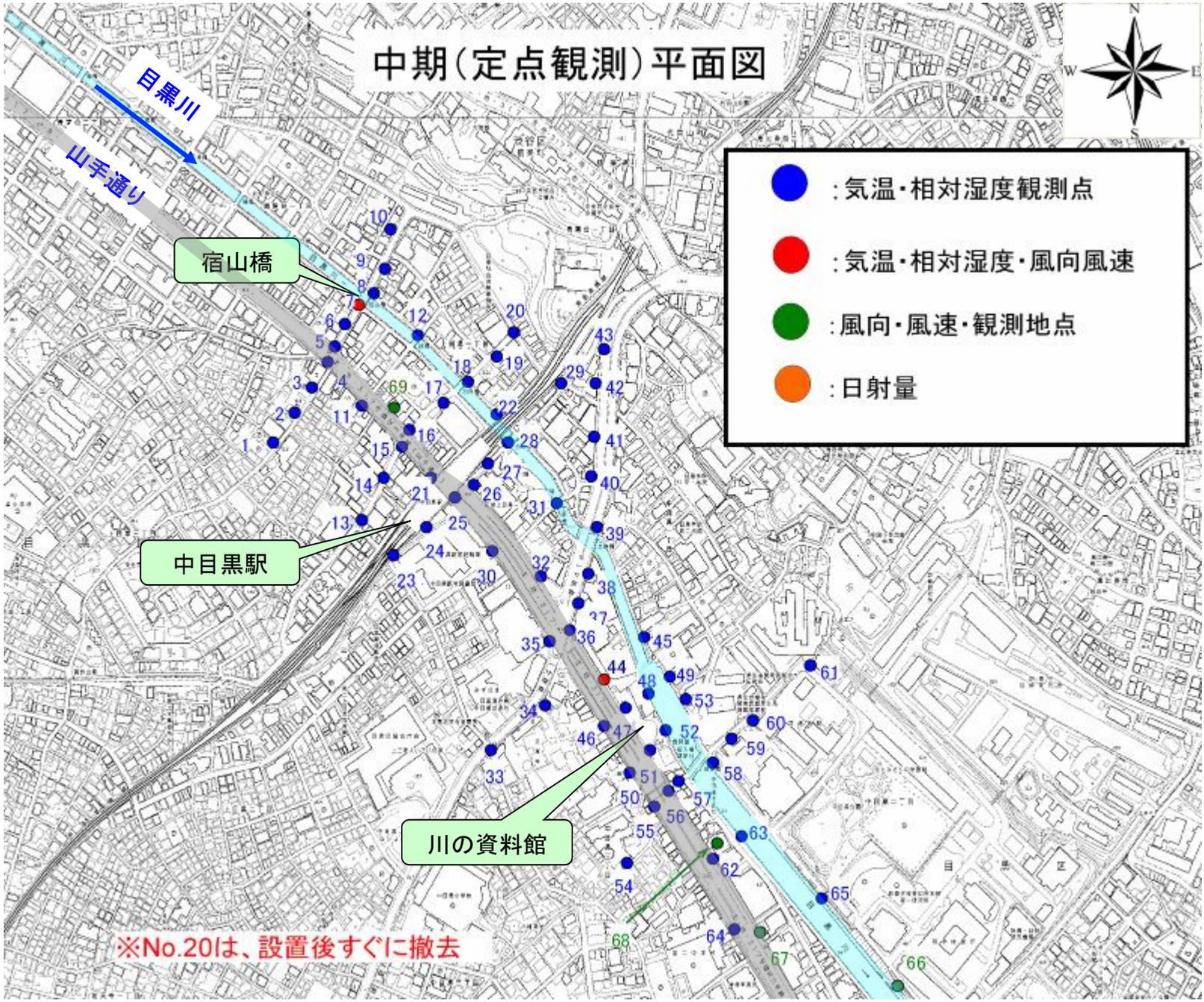
目黒川(川幅25~30m)



中期(定点観測)平面図



- : 気温・相対湿度観測点
- : 気温・相対湿度・風向風速
- : 風向・風速・観測地点
- : 日射量

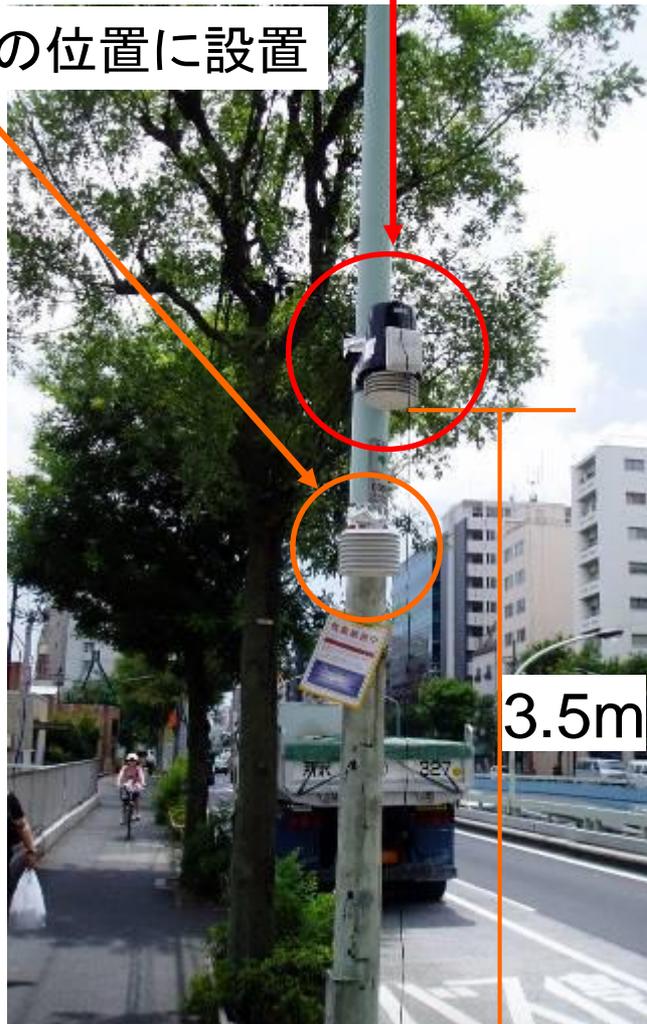


※No.20は、設置後すぐに撤去

観測風景

ウェザーステーション(風向・風速計)・・・地面から3.5mの位置に設置

温湿度計・・・地面から2.5mの位置に設置



風向・風速計(中目黒スクエア)



日射計(中目黒スクエア)

観測概要

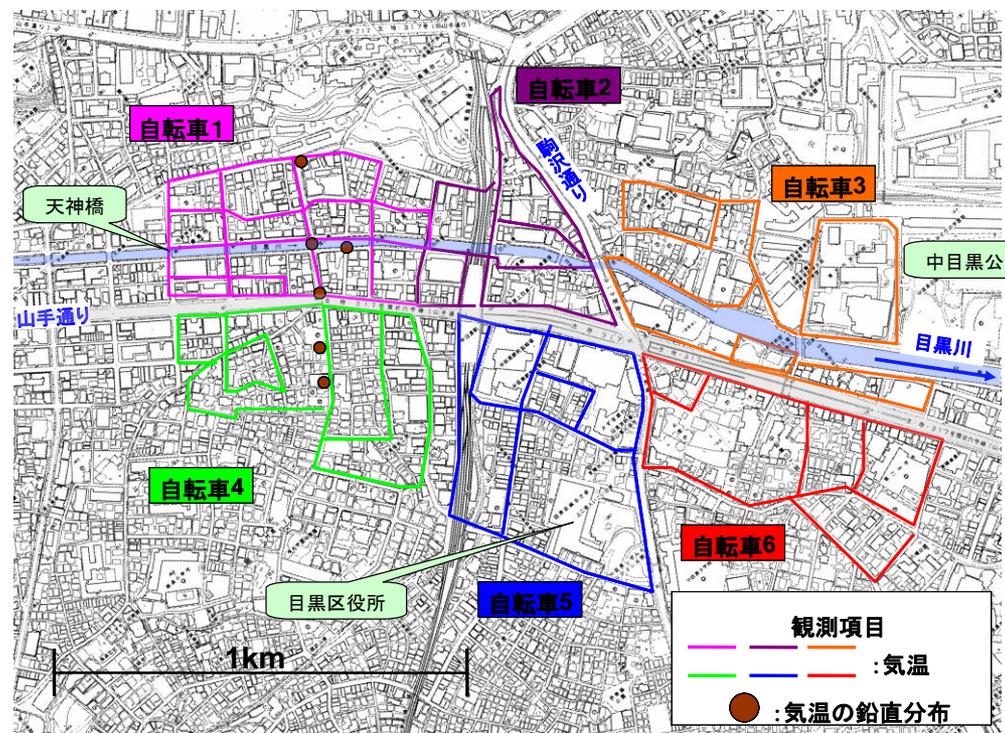
① 気温

【観測ライン数】

6ライン(6班)

【観測方法】

- ・観測時間は、10分以内で実施
- ・観測間隔を1秒に設定した温度計を地上1.5mに設置した自転車で移動して観測を実施
- ・観測位置は、GPSを用いて把握



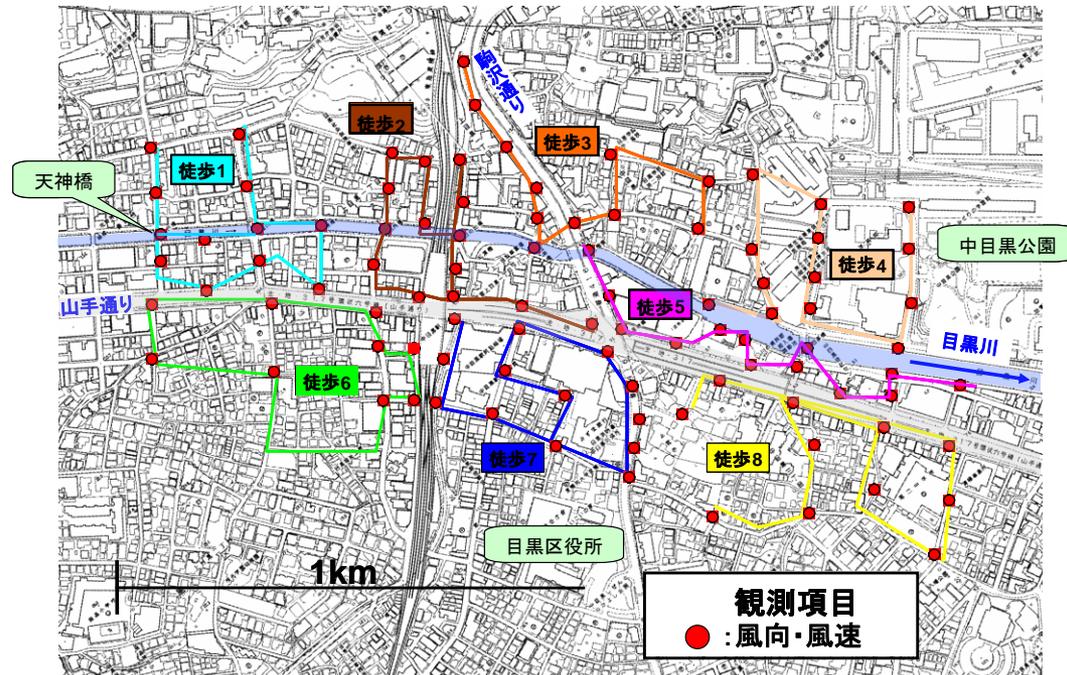
② 風向・風速

【観測地点数】

96箇所(8班)

【観測方法】

- ・観測時間は、20分以内で実施
- ・風速は、熱線風速計で1分間計測し、平均値、最高値、最低値を記録
- ・風向は、すずらんテープを垂らし、一分間計測した中で最も多い方位を記録

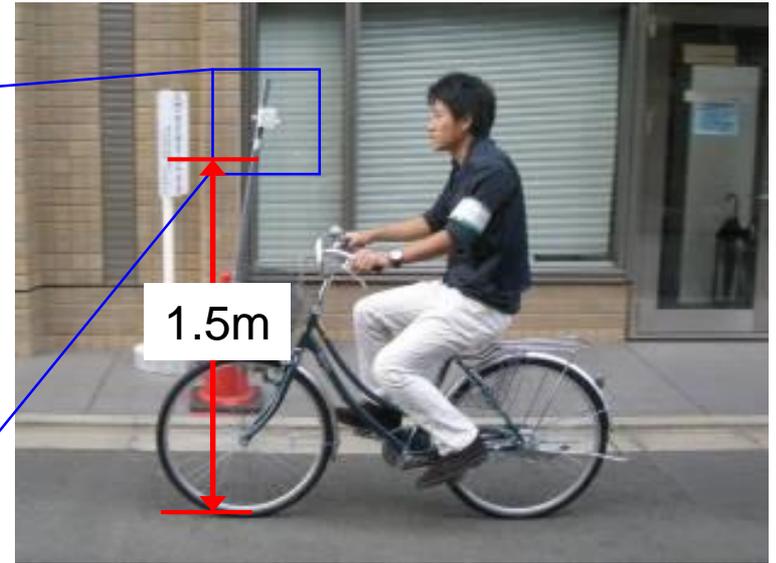


観測状況

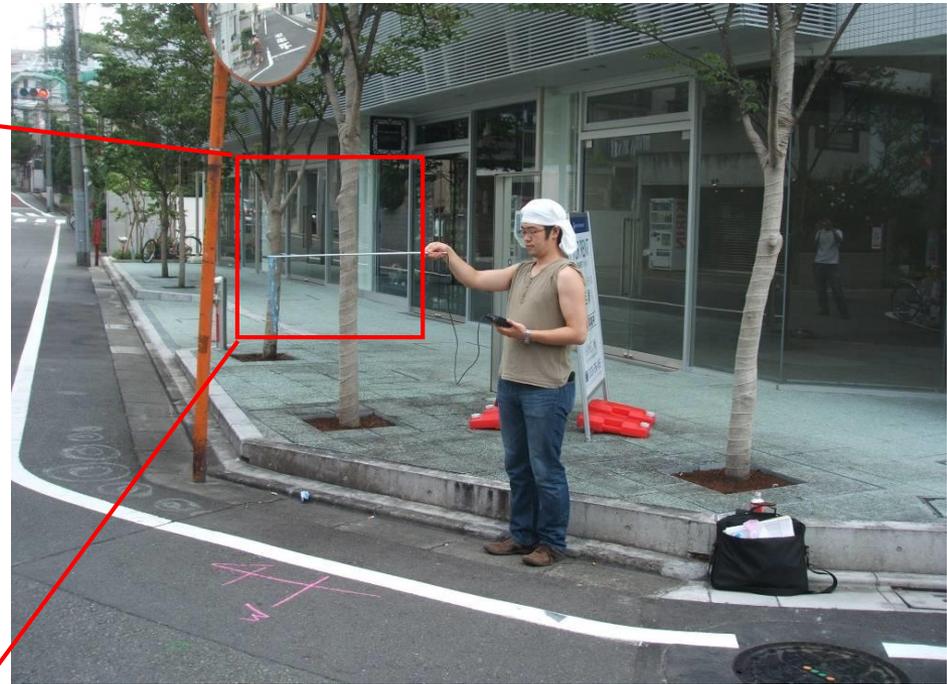
①気温

温度計
本体

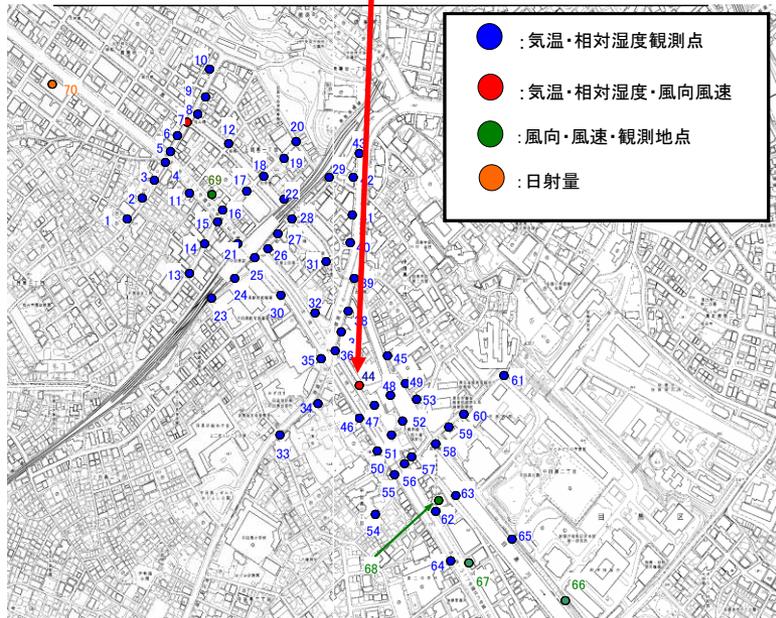
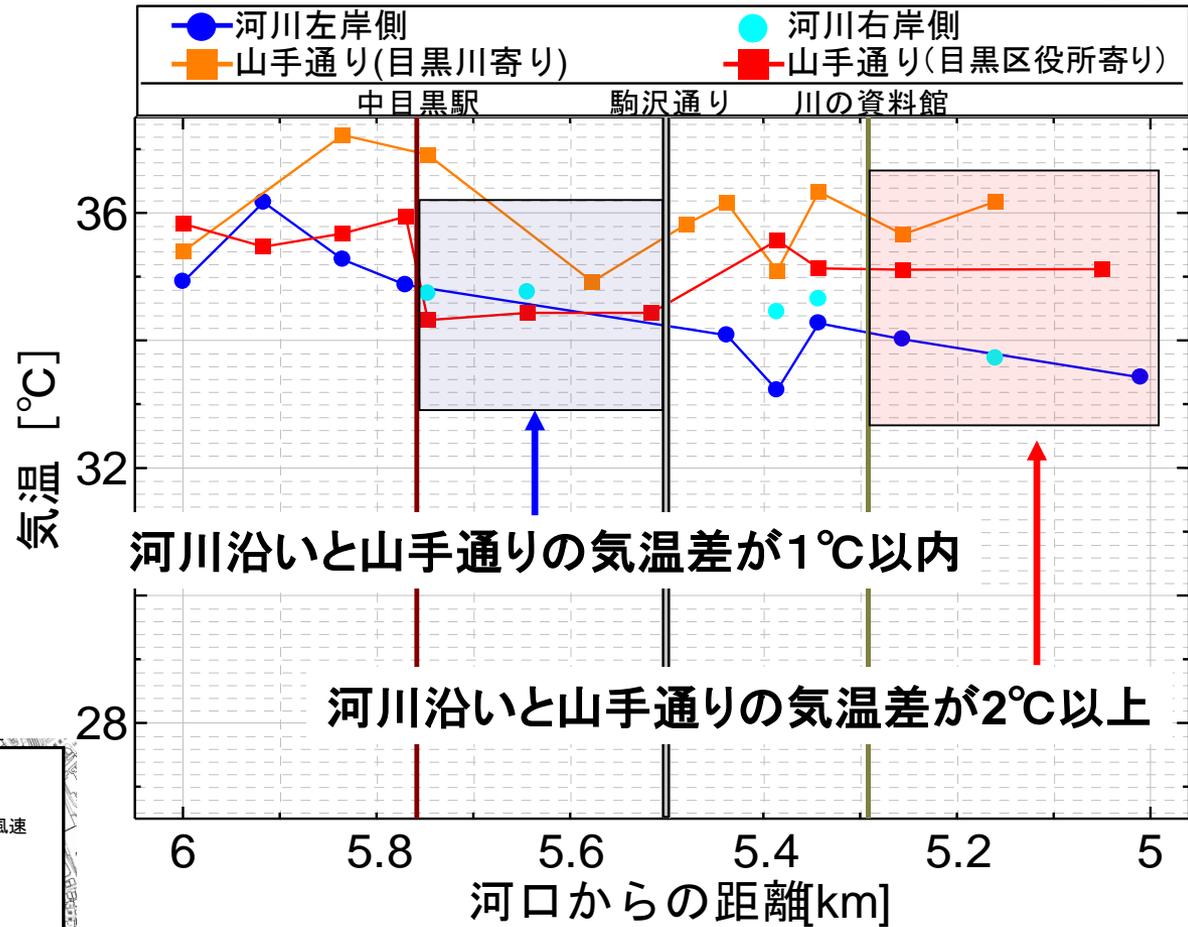
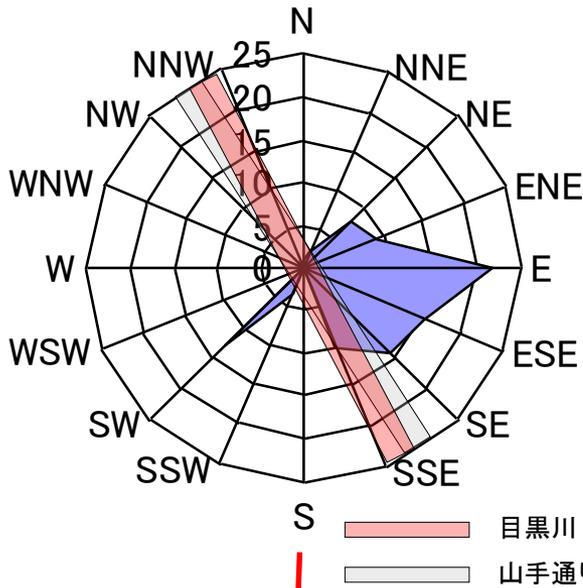
温度計感部



②風向・風速

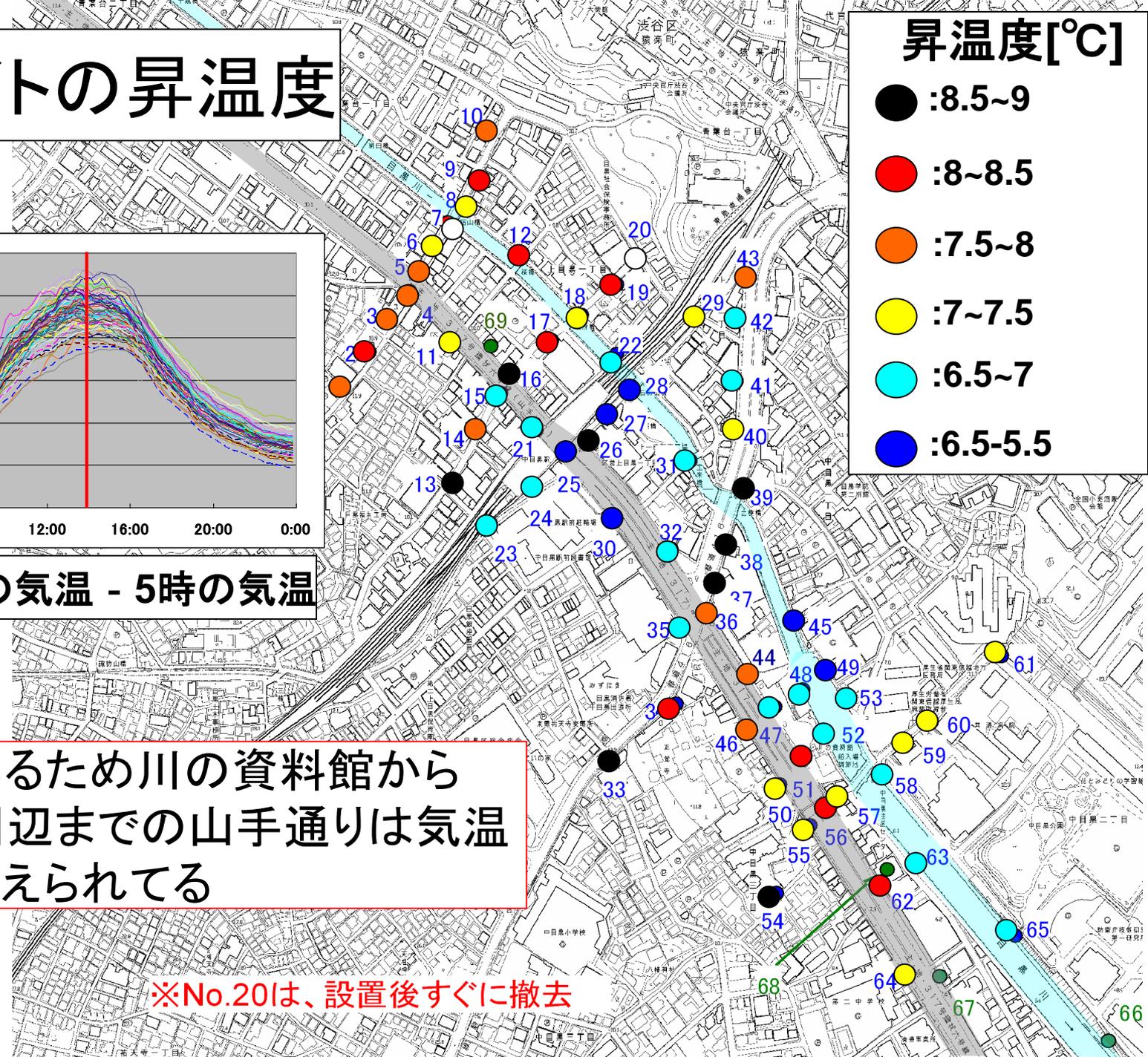
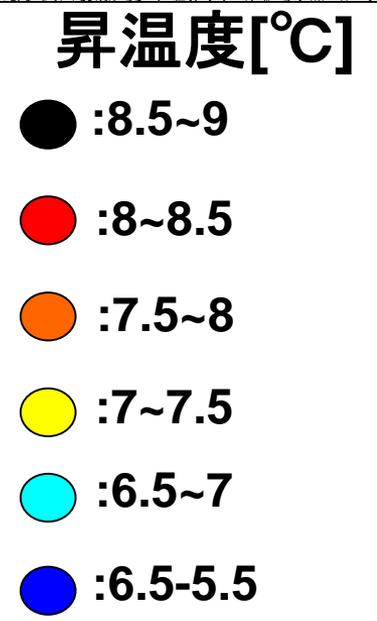
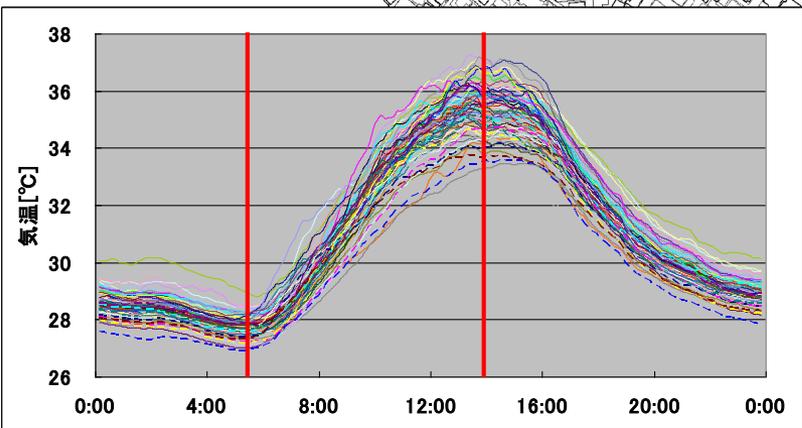


11時～15時の風配図



川の資料館のオープンスペースで山手通りに河川から涼風が流入し、山手通りの気温を冷やしている。

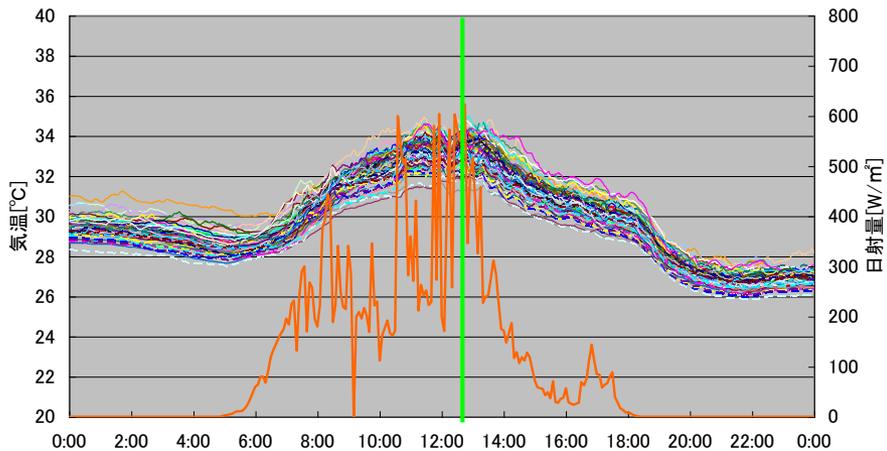
観測サイトの昇温度



風の道があるため川の資料館から
中目黒駅周辺までの山手通りは気温
の上昇を抑えられてる

※No.20は、設置後すぐに撤去

時間帯別の気温分布状況



気温・日射量の時系列

8月9日 12:30

2008 8/9 12:30(移動)

平均風速[m/s]



3.1 -



1.1 - 3.0



0.0 - 1.0

気温[°C]

● 35.6 - 36.0

● 35.1 - 35.5

● 34.6 - 35.0

● 34.1 - 34.5

● 33.6 - 34.0

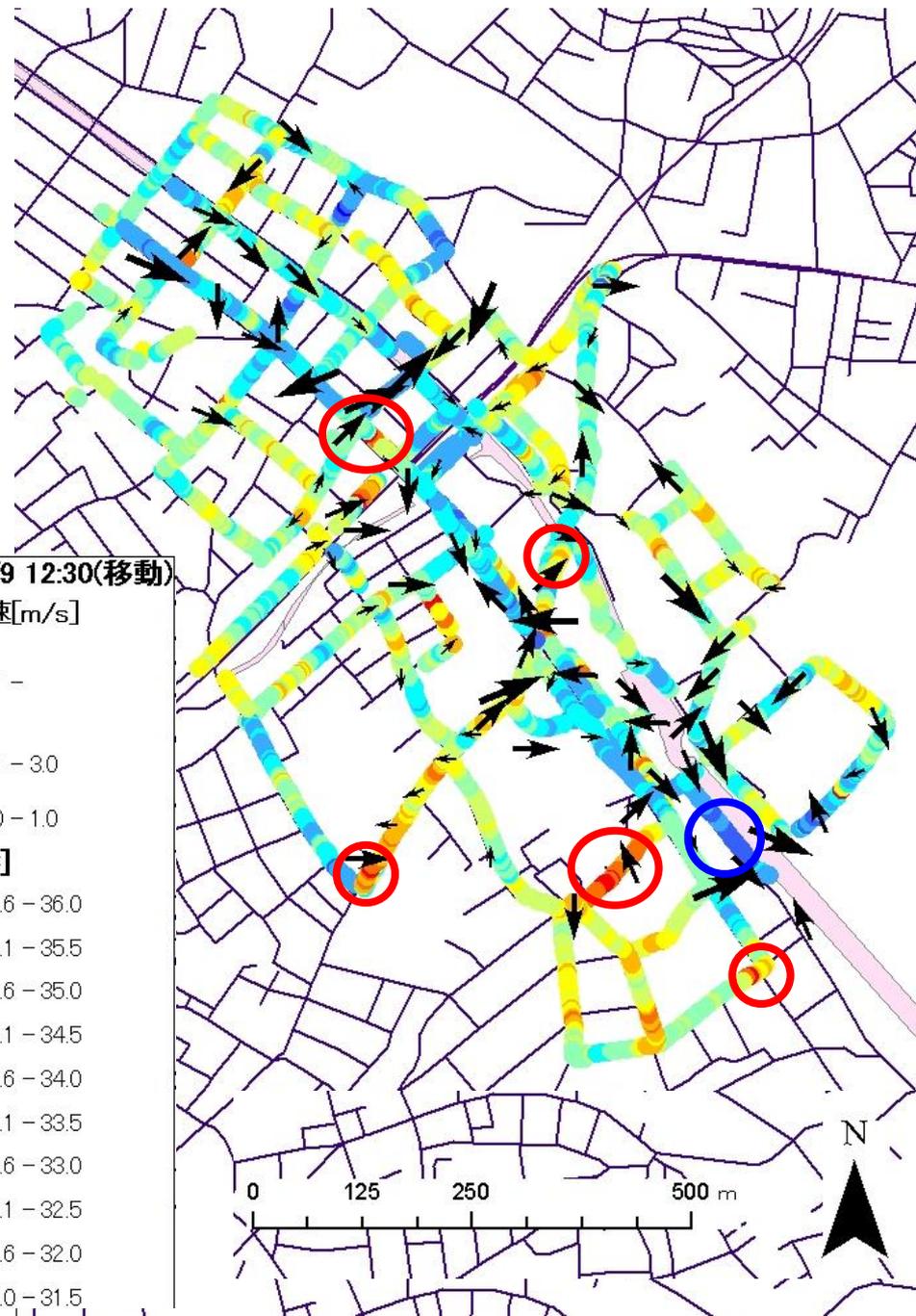
● 33.1 - 33.5

● 32.6 - 33.0

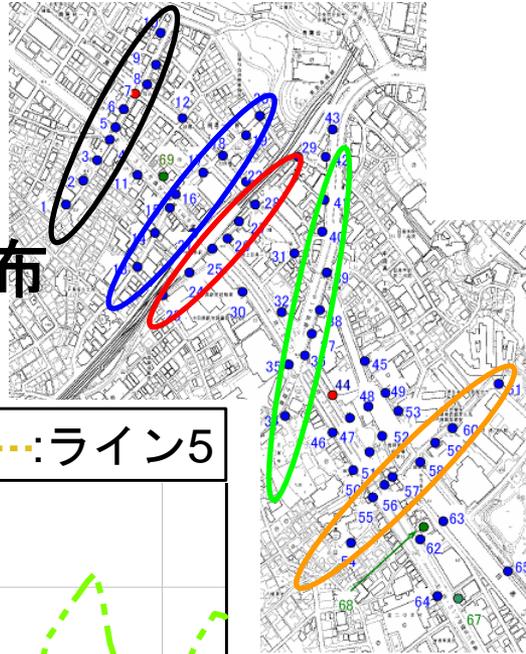
● 32.1 - 32.5

● 31.6 - 32.0

● 31.0 - 31.5

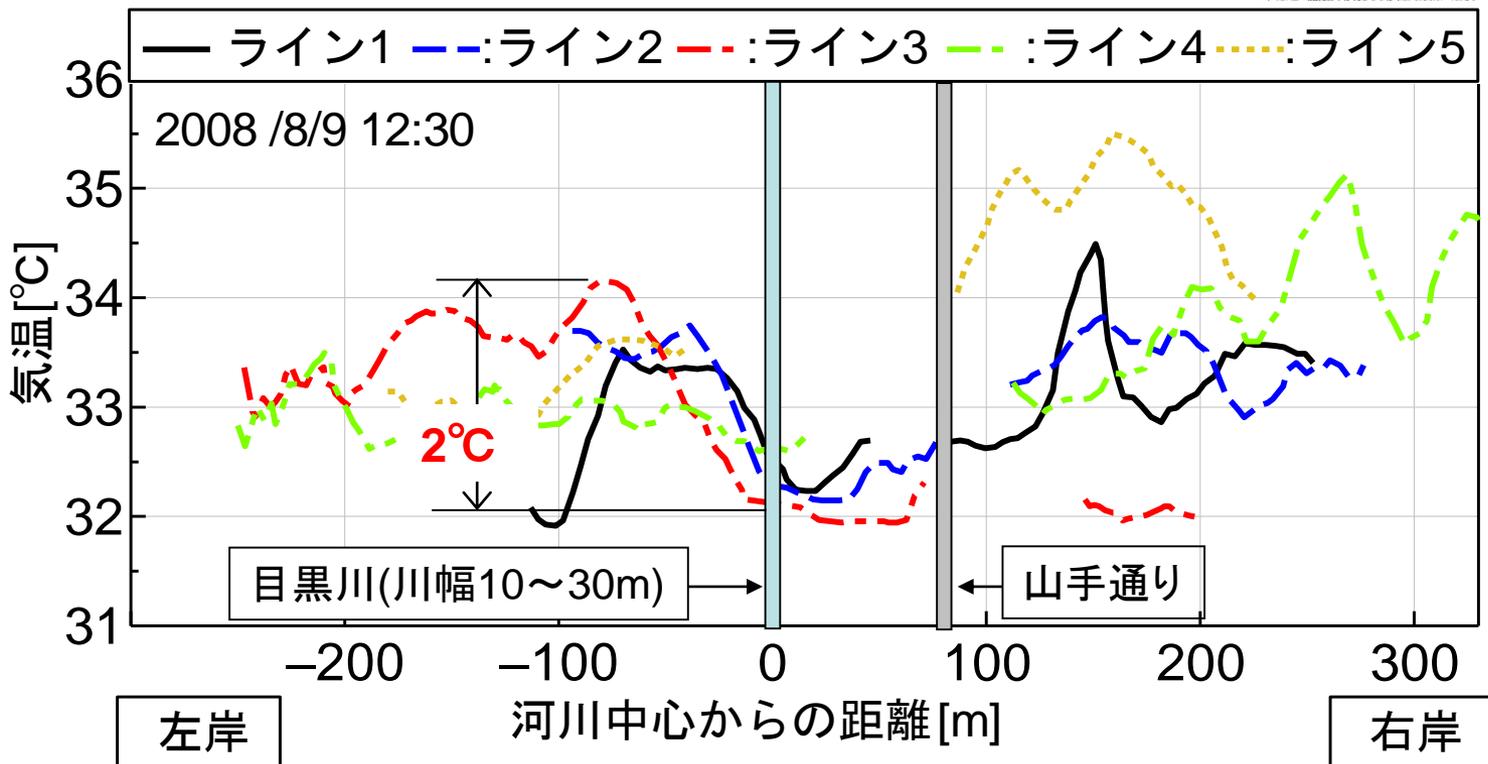


都市中小河川(目黒川)



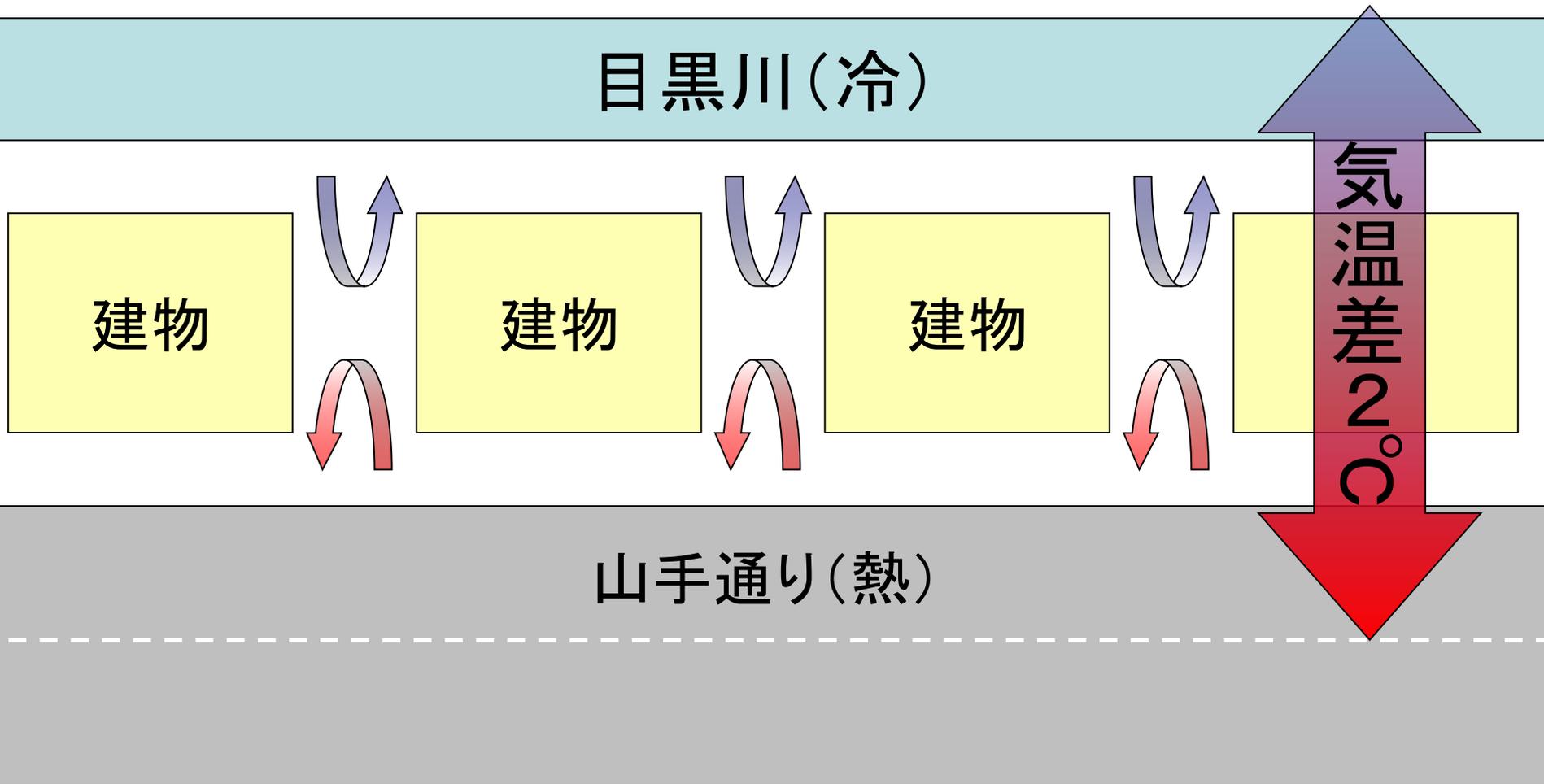
目黒川周辺における各ラインの横断方向の気温分布

目黒川(川幅10~30m)



どのラインも河川付近の気温が低く、都市中小河川においても河川の大気冷却効果が確認できる

都市中小河川における熱環境

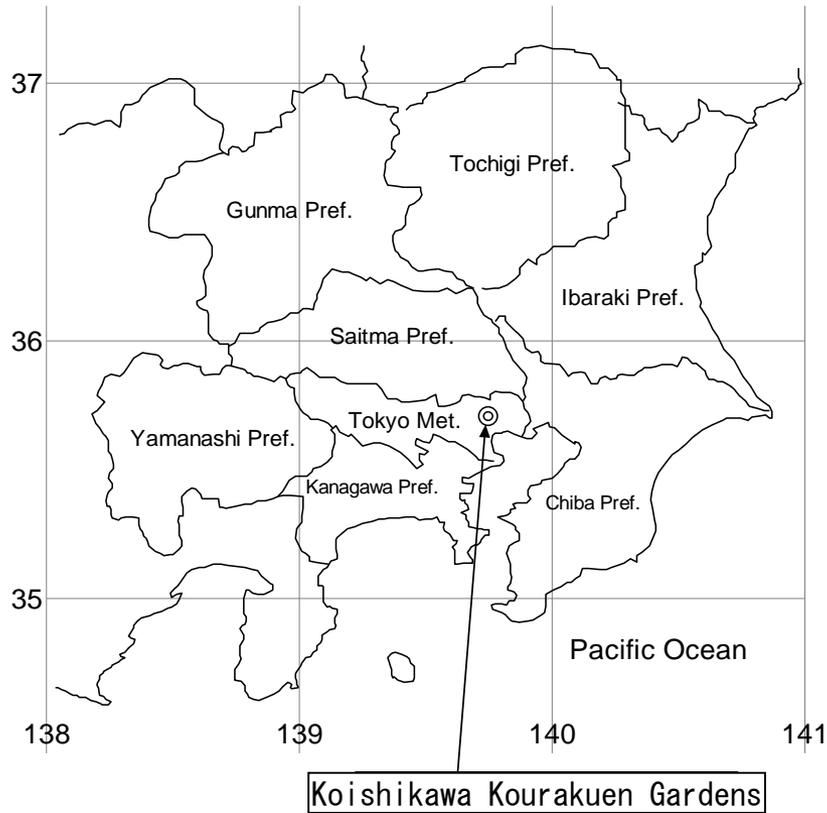


冷源・熱源をつなぐ道路・広場で熱交換されているような挙動を示している。それ以外の箇所での変化は小さいことから熱交換は建物の高さを越えることはない。

第5章

都市内緑地とその周辺の 気象因子の空間構造

観測サイト



小石川後楽園の位置図



小石川後楽園とその周辺

小石川後楽園は、東面に東京ドーム、北面は道路と鉄道、西面は比較的背の低いビル、南面は高いビルに囲まれている。観測した樹木群は落葉樹(ムクノキ, ケヤキ), 常緑広葉樹(シイノキ, クス)などが混在し、どの植物も樹高は15mから16m程度である。

NDVI(正規化植生指標)と表面温度

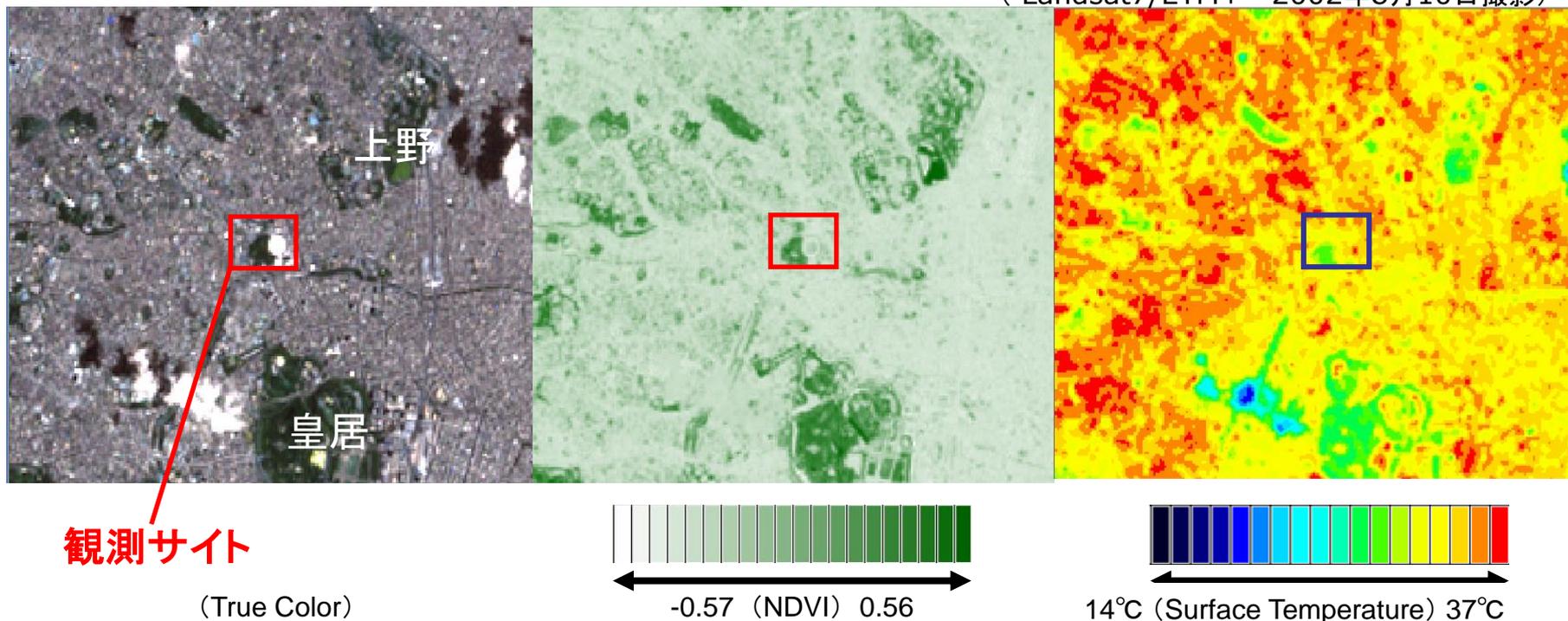
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

$$L = 0.037 DN + 3.199 \quad (2)$$

$$T = \frac{1282.71}{\ln\left(\frac{666.09}{L} - 1\right)} \quad (3)$$

NIR : Band4(近赤外域), RED : Band3(可視域における赤色帯), DN : Landsat Band6(熱赤外域)の画素値, L : 放射輝度

(Landsat7/ETM+ 2002年8月10日撮影)



小石川後楽園内のNDVIは平均約0.22であった。NDVIから小石川後楽園周辺には緑がなく園内からの周辺の冷気の滲み出し効果などを定量的に評価するにはよい観測地点であるといえる。表面温度の図中左下の低温地帯は雲による影響である。小石川後楽園の表面温度は平均約26°Cであり、周辺の建物、道路より表面温度が約5°C低く、小石川後楽園がクールスポットであることがいえる。

観測概要

観測日数と観測項目

これまでの観測期間とその日数

Year	Date	Days
2005	1-31, July	31
2004	27, July-16, August	21
2002	19-30, July	12
2001	19, July-10, August	22
2000	21-28, August	8
1999	6-21, August	16

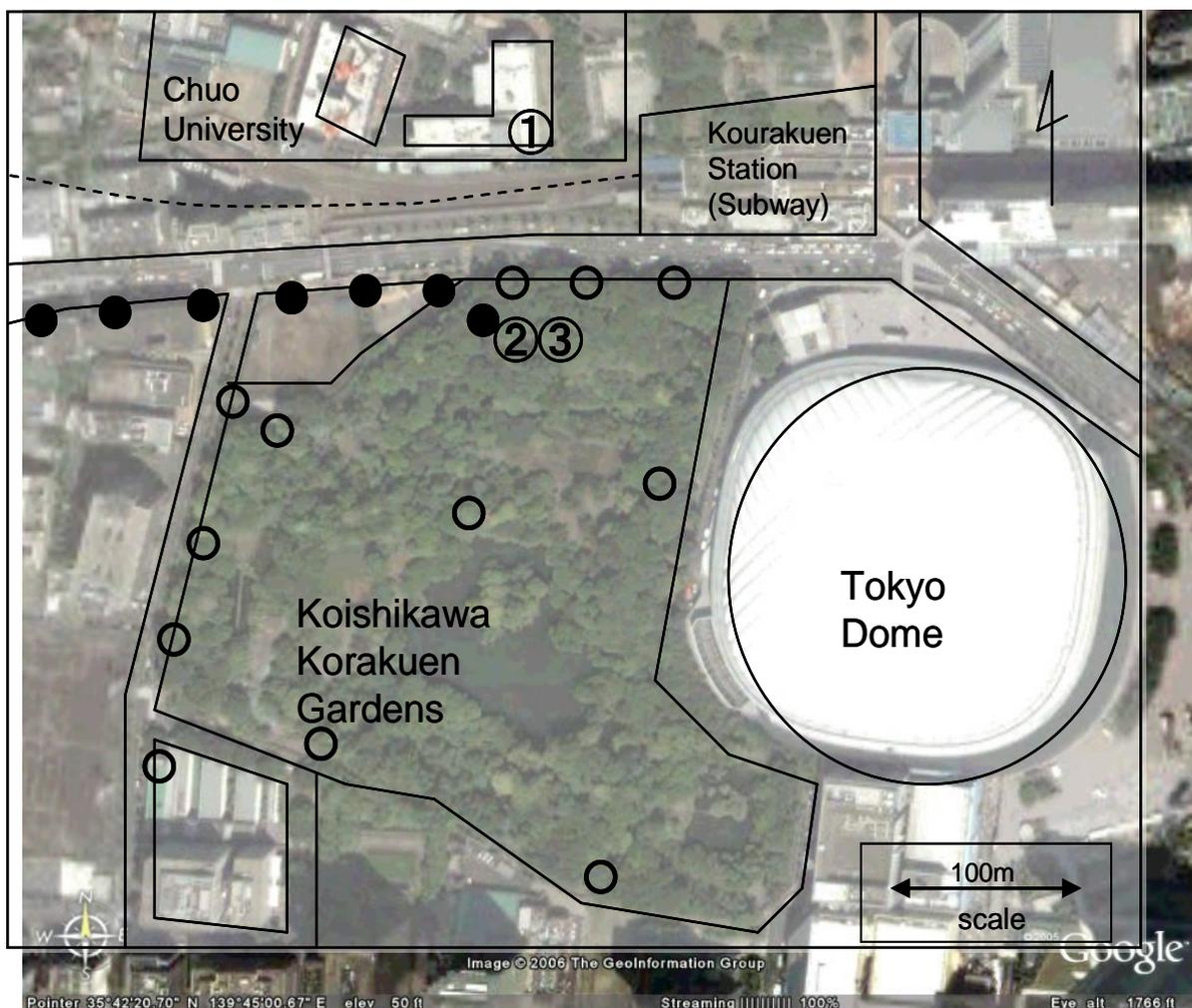
1999年から2005年までの毎夏(2003年を除く), 主に7月から8月にかけて観測を行っている. 連続的に長く測定結果が得られている. 2001年と2005年の観測結果について主として示す.

観測機器と項目の一覧

項目	測定機器	測定間隔・解析手法	設置場所
森林表層温度	赤外放射温度計(NEC三栄株)	30分毎に撮影	①
気温・湿度	通風式乾湿球計(英弘精機)	1分間隔→30分平均	②
全天日射量	日射計(英弘精機)	1分間隔→30分平均	②
気温・湿度	通風式乾湿球計(英弘精機)	1分間隔→30分平均	③(林床)
正味放射量	放射収支計(英弘精機)	1分間隔→30分平均	③(林床)
地中熱流量	熱流計(英弘精機)	1分間隔→30分平均	③(林床)
気温・湿度	サーミスタ式(Onset社)	1分間隔→30分平均	③(樹幹上)
風速	熱線式風速計(芝浦電子)	1分間隔→30分平均	③(樹幹上)
CO ₂	CO ₂ モニタ(ADC社)	1分間隔→30分平均	③(樹幹上)

観測概要

観測機材設置箇所



小石川後楽園とその周辺

①は園外のデータとして観測.

2001年:②に鉛直ポールを設置し鉛直方向の温湿度を計測した.

2005年:○●の高さ1.5mに計器を設置し, 温湿度を平面的に観測をした.

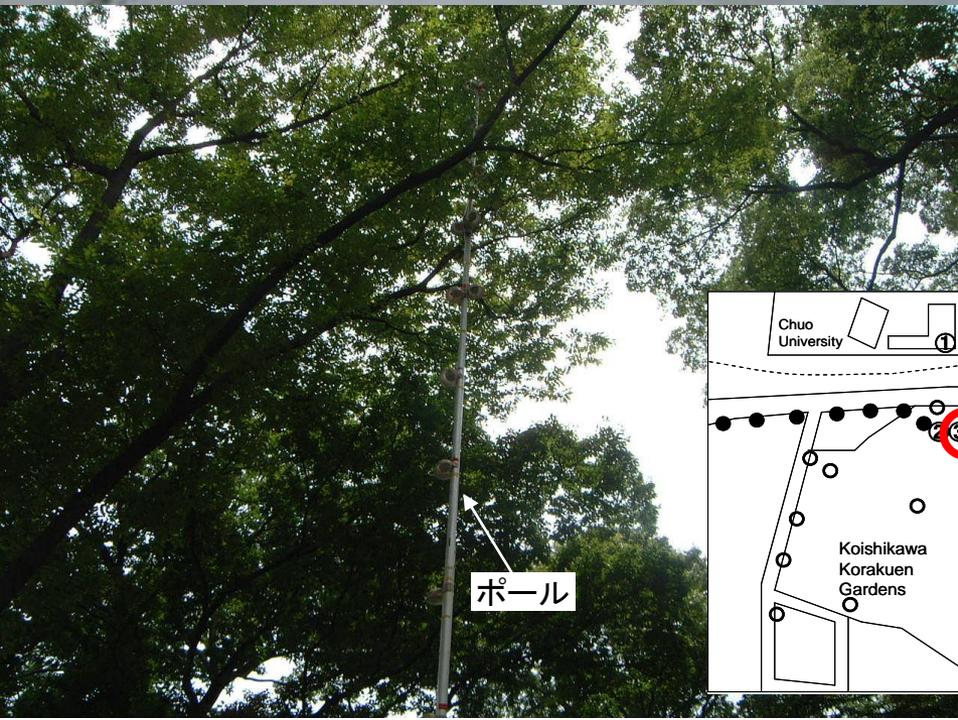
観測概要



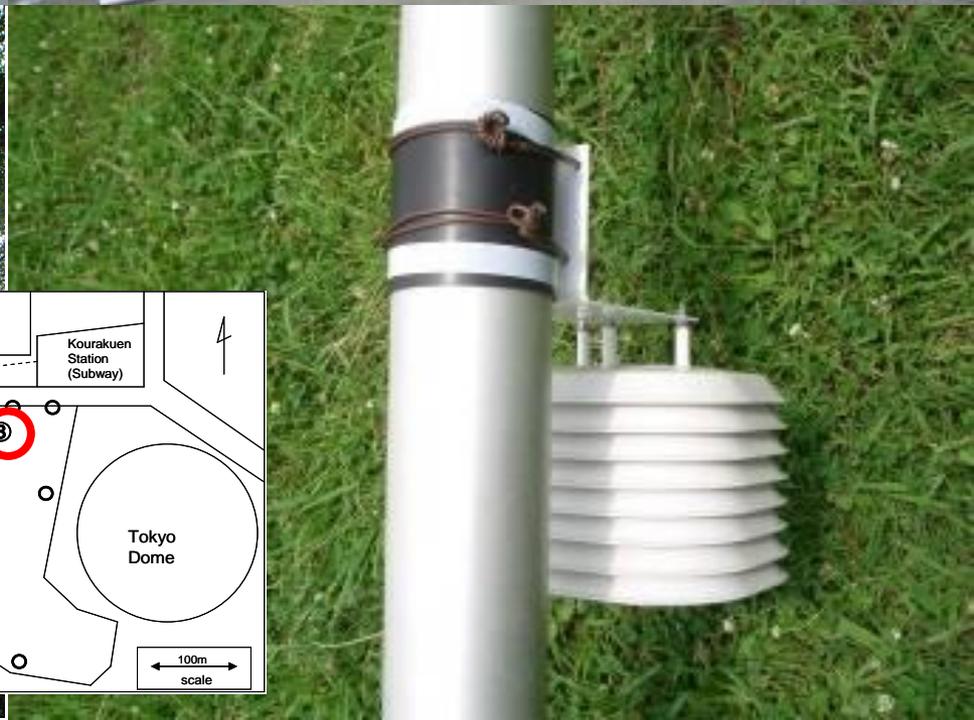
日射計



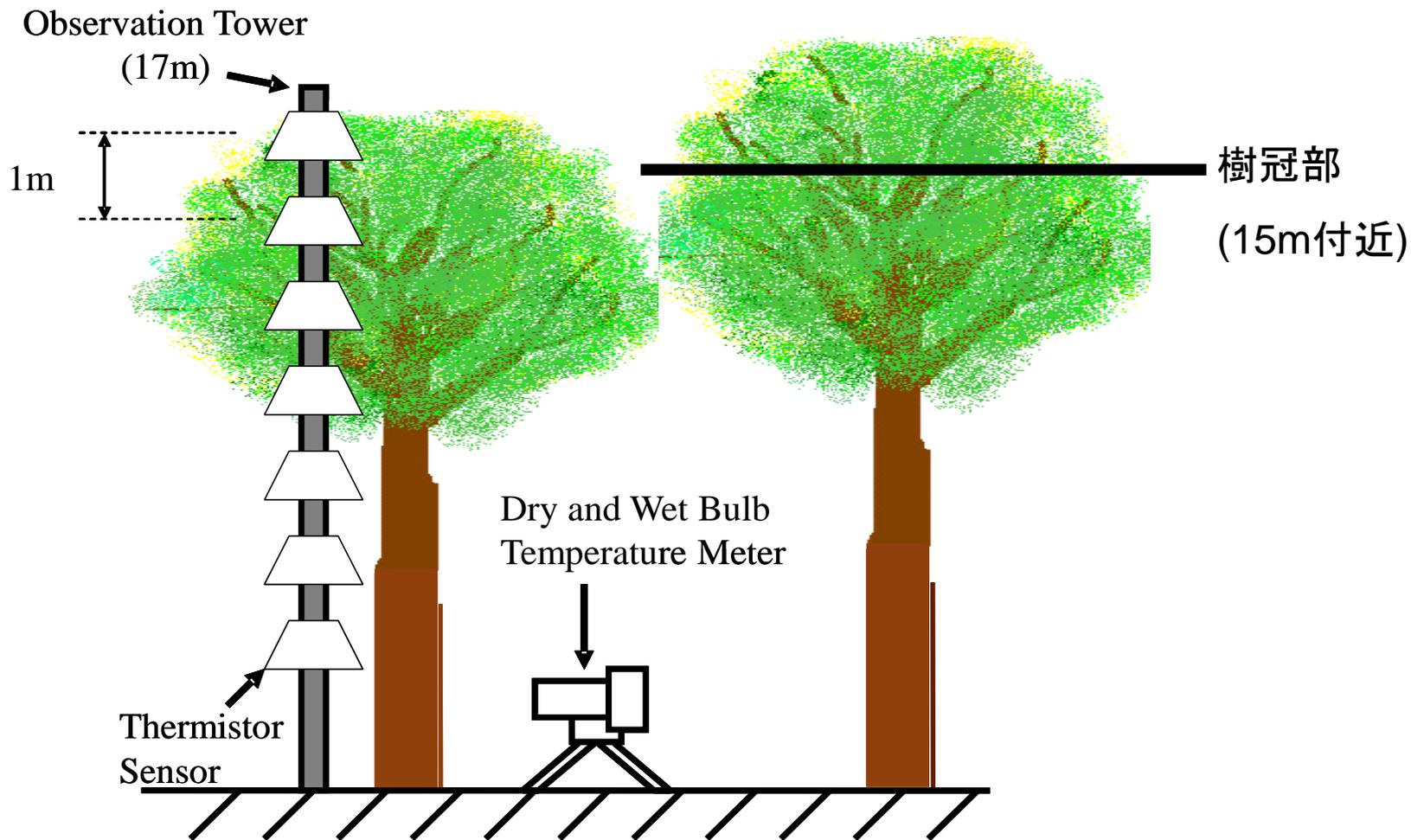
風向・風速計



ポール



観測概要

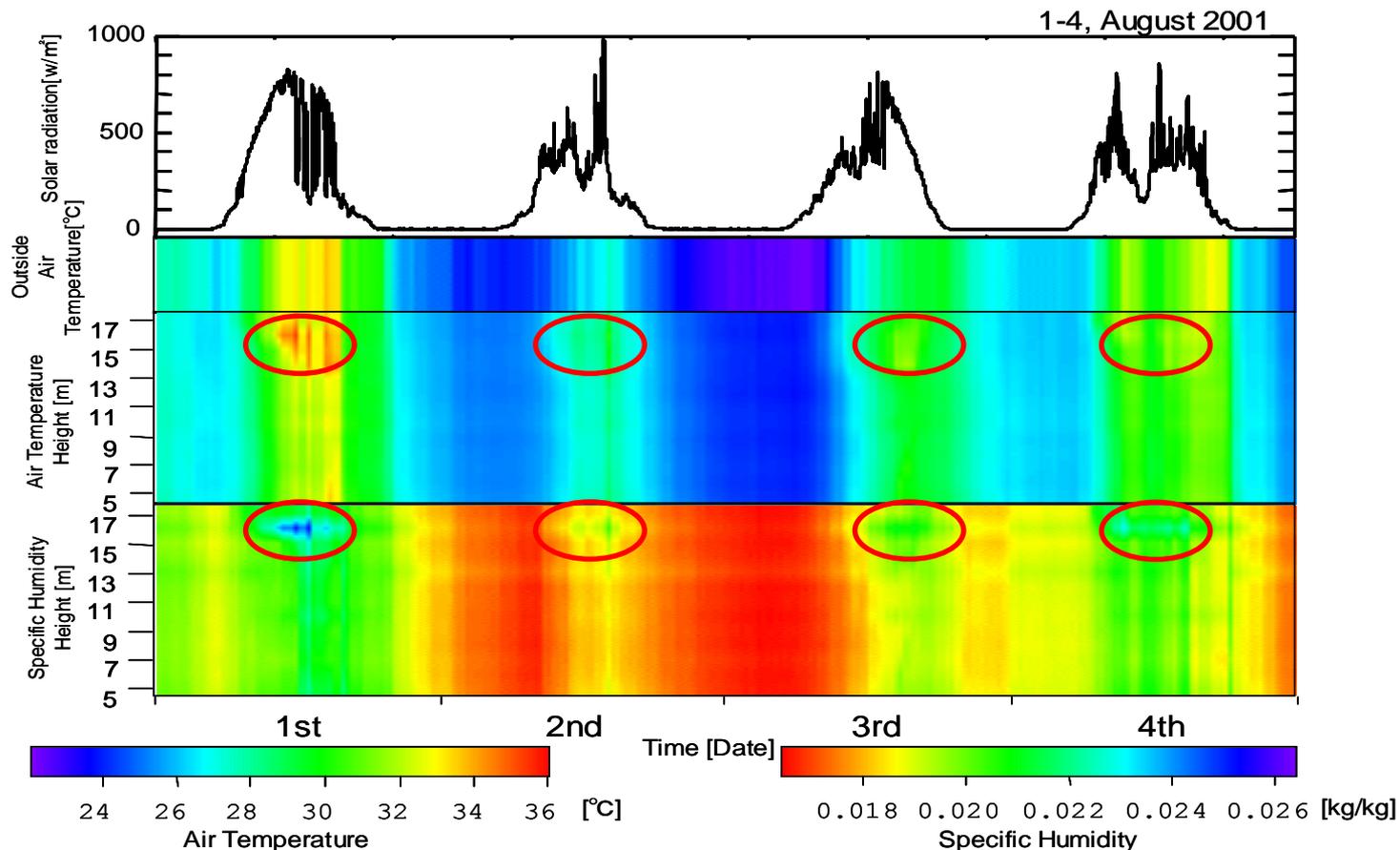


観測の模式図

高さ17mのポールに温湿度計を2m間隔に設置した。
樹冠部は15m付近であった。

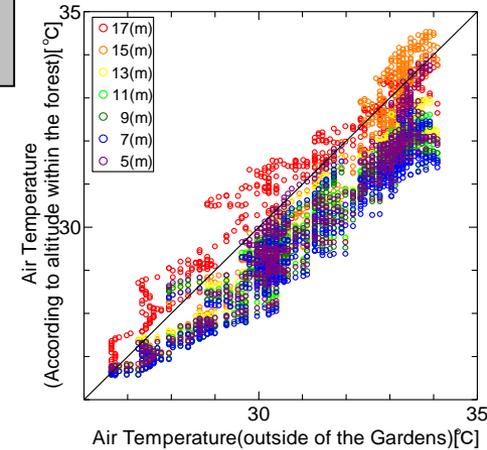
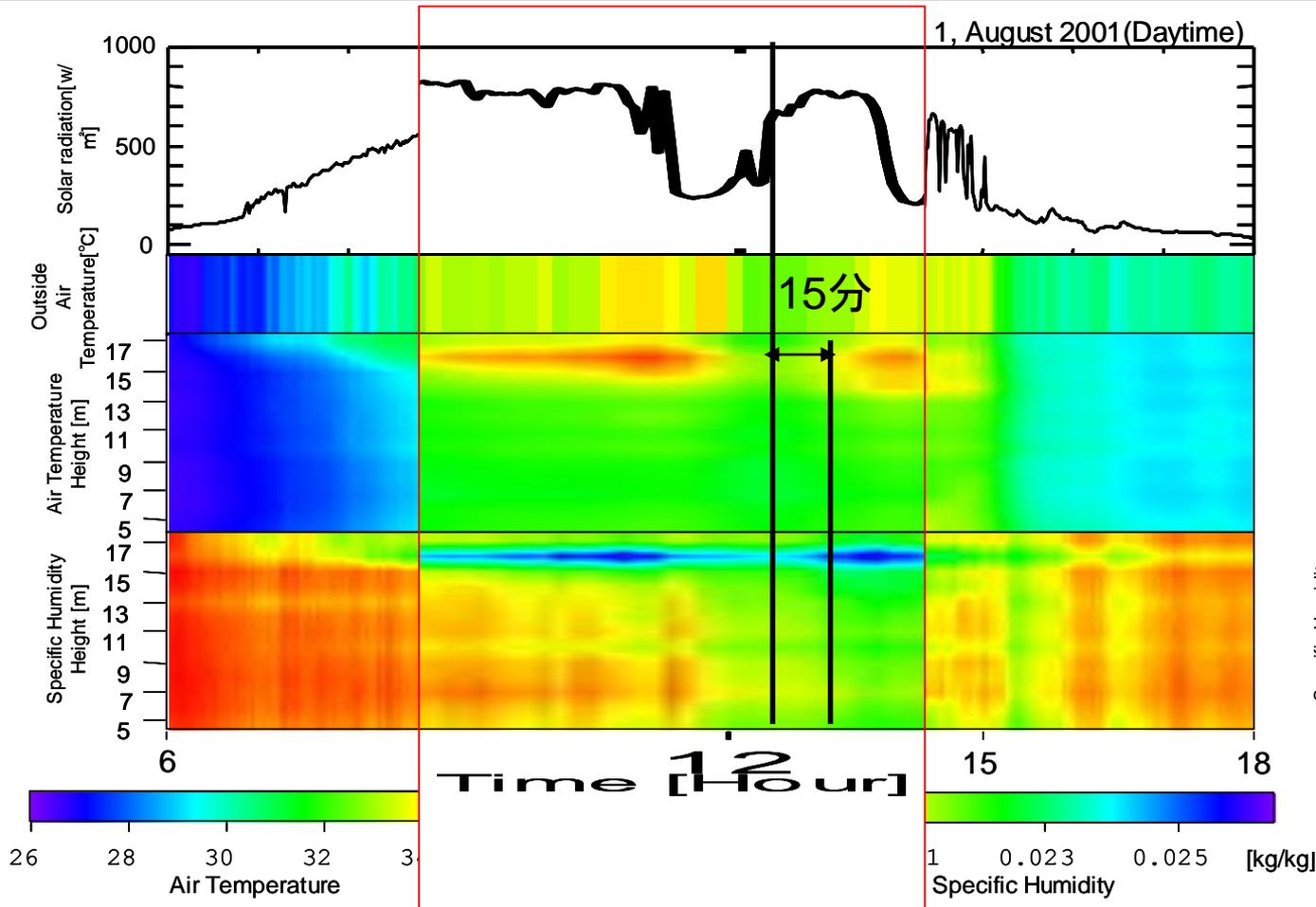
気温・湿度の鉛直分布

日射量, 園外気温, 林内気温・比湿の時系列

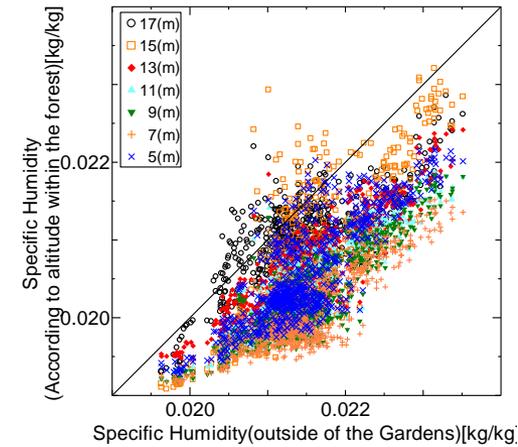


林内の気温, 比湿ともに明瞭な日変化を示している. 林内環境が日射に大きく依存していることがわかる.

日射量, 園外気温, 林内気温・比湿の時系列 (日中)



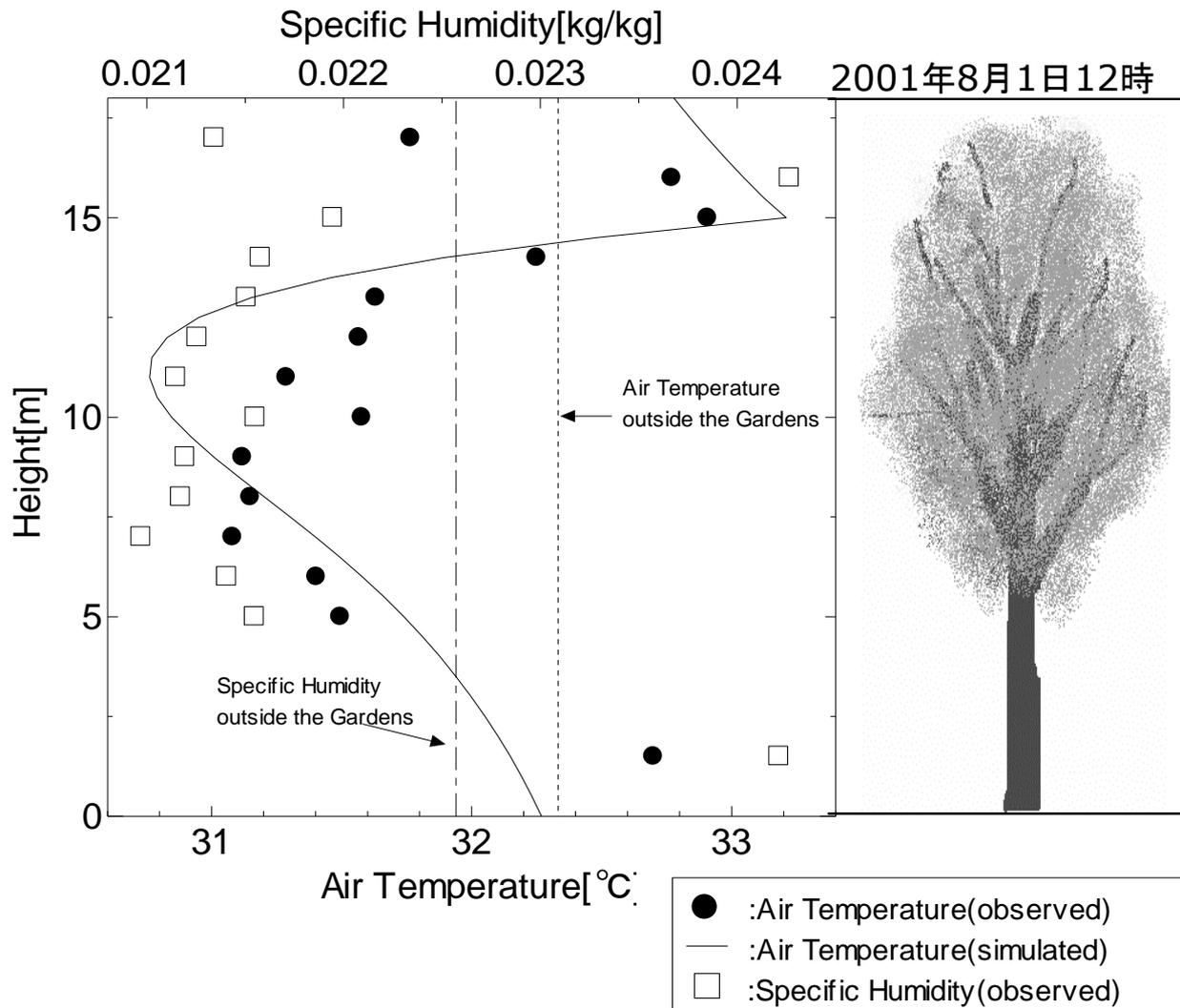
園外気温と各高度の気温の関係



園外比湿と各高度の比湿の関係

群落内の大気層では日中は樹冠部の温度が最も高く、熱フラックスが樹冠部から下へと勾配に従い起こっていると考えられる。比湿についても、正午前において、極めて高い値を示している。林内比湿には高さによる変化がある。すなわち、日の出後まもなく樹冠の表面は乾き、湿度は低下する。そして、時間と共に湿度の増加が順次林床に及んでいく。日中には地表面からの蒸発も相まって、林内全体の湿度が増加し、日射の減衰とともに、林内は乾燥していくと考える。

12時における気温・比湿鉛直プロファイル



基礎式

短波放射

$$\frac{dS \downarrow}{dz} = FaS \downarrow - Far_f S \uparrow$$

$$\frac{dS \uparrow}{dz} = -FaS \uparrow + Far_f S \downarrow$$

長波放射

$$\frac{dL \downarrow}{dz} = FaL \downarrow - Fa\sigma T_{leaf}^4$$

$$\frac{dL \uparrow}{dz} = -FaL \uparrow + Fa\sigma T_{leaf}^4$$

熱収支式

$$R_{leaf} = 2F\sigma T_{leaf}^4 + H + iE$$

$$R_{leaf} = (1 - r_f)F(S \downarrow + S \uparrow) + F(L \downarrow + L \uparrow)$$

顕熱・潜熱fluxのBulk式

$$H = c_p \rho_c U a (T_{leaf} - T_{air})$$

$$iE = i \rho_e U a (q_{SAT}(T_{leaf}) - q_{air})$$

気温・比湿・風速

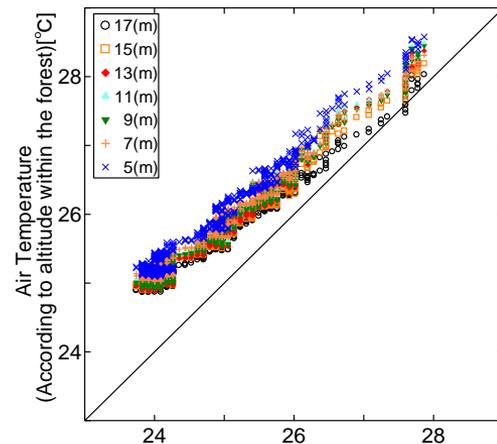
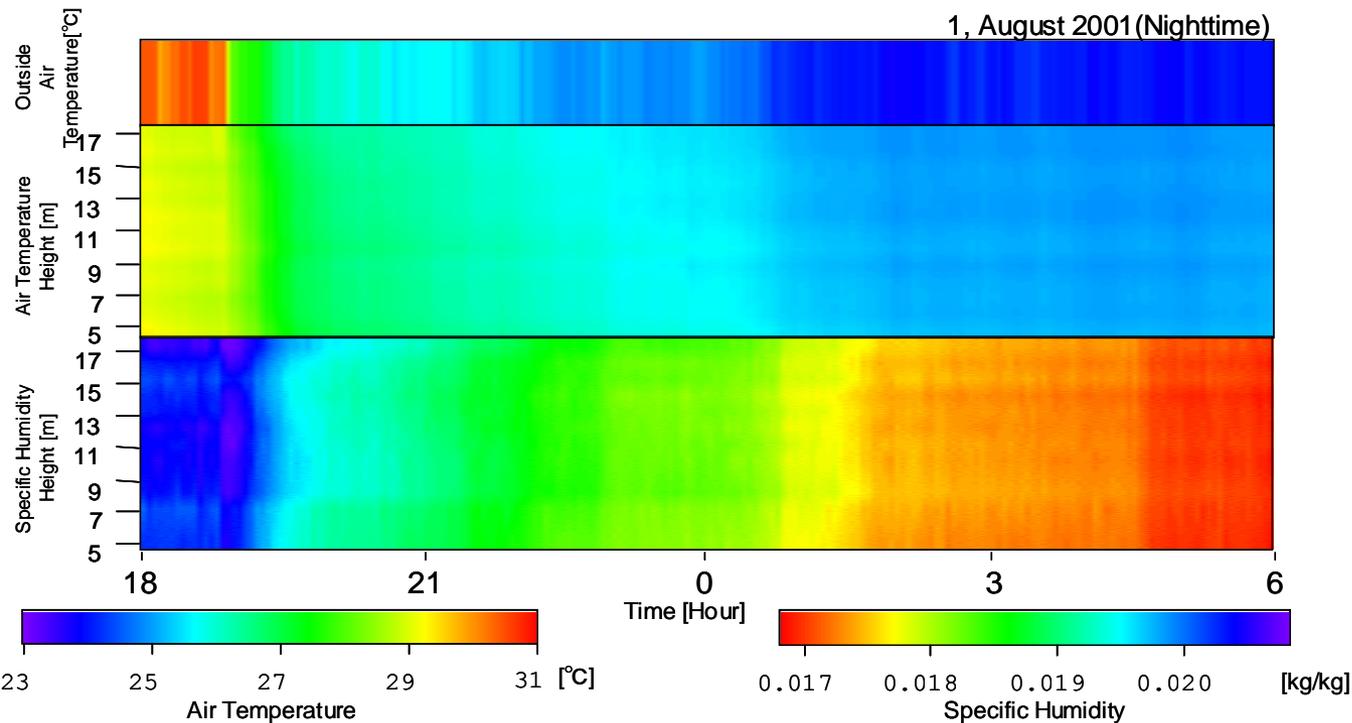
$$K_h \frac{\partial^2 T_{air}}{\partial z^2} - c_h U a (T_{air} - T_{leaf}) = 0$$

$$K_q \frac{\partial^2 q_{air}}{\partial z^2} - c_e U a [q_{air} - q_{SAT}(T_{air})] = 0$$

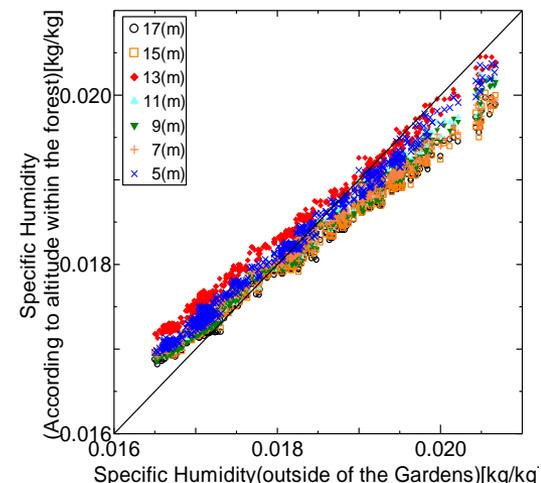
$$K_m \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - c_d a U^2 = 0$$

比湿に着目すると、樹冠部と地表面付近の比湿の値が高い。これは、地表面からの蒸発と樹冠での蒸散の影響に因るものである。比湿と気温は似た傾向を示している。気温の鉛直分布に関して再現計算を行い、定性的によい分布を示した。

園外気温，林内気温・比湿の時系列 (夜間)



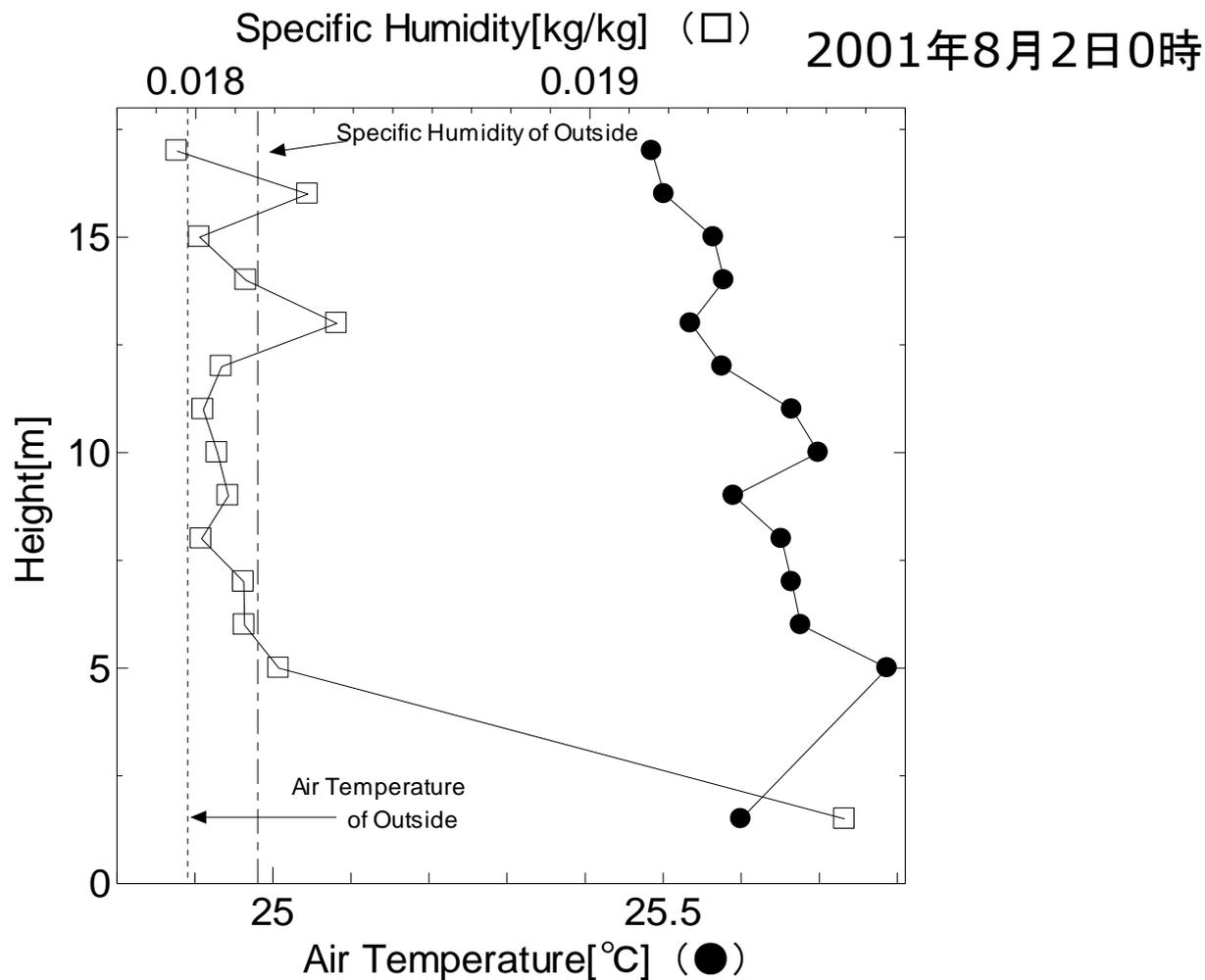
園外気温と各高度の気温の関係



園外比湿と各高度の比湿の関係

夜間においては，時間とともに気温・比湿が減少していく．林内気温，比湿ともに鉛直方向はほぼ一定である．夜間ではどの高度も園外気温より約1°C高い．園内比湿は園外比湿よりも変化が小さい．

0時の気温と比湿の鉛直プロファイル

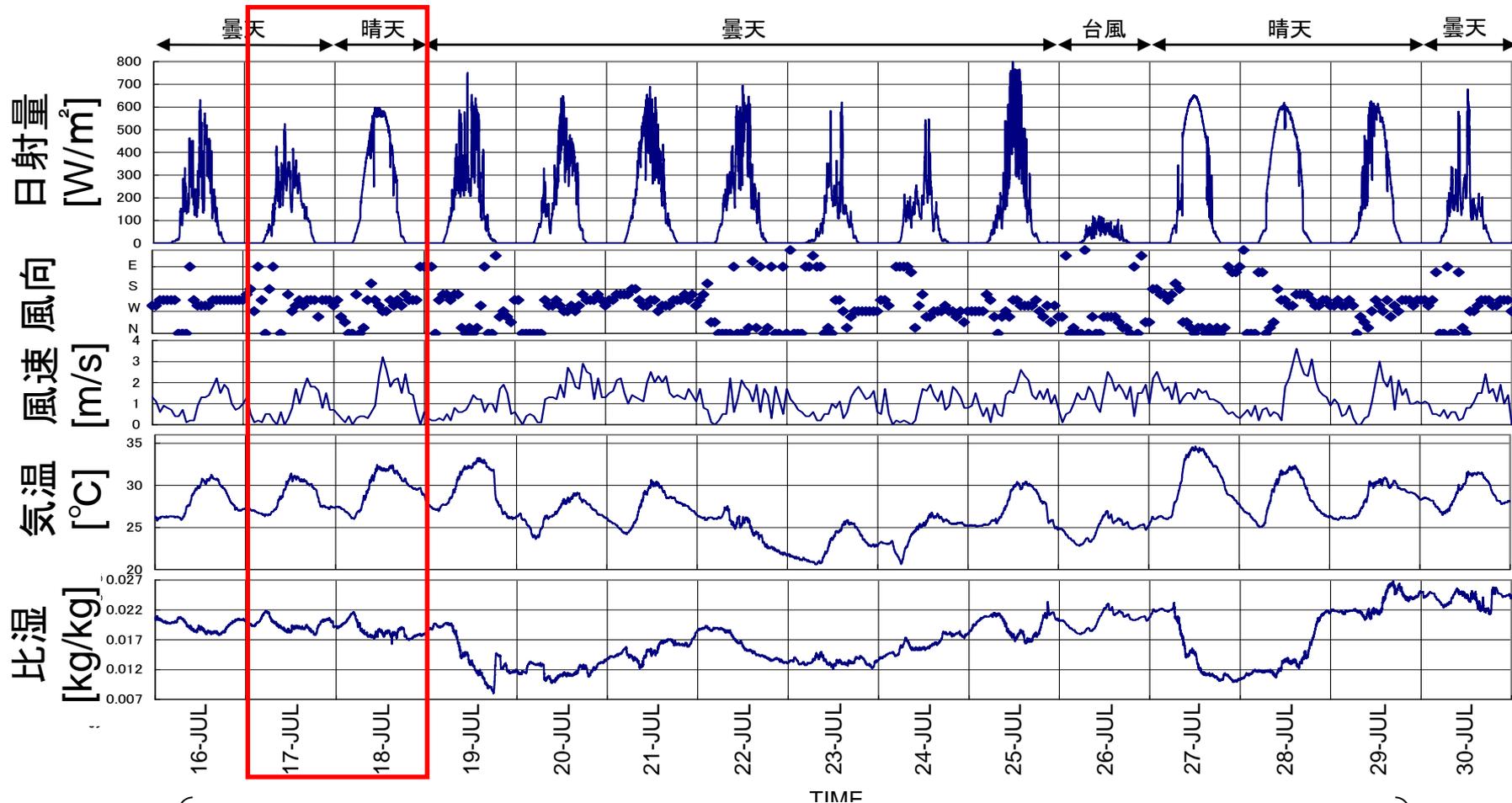


日中、気温・比湿とも鉛直分布に変化があったが夜間では鉛直に一様な分布である。園内気温は林内気温より低い値を示している。

気温・湿度の水平分布

日射量, 風向・風速, 気温, 比湿の時系列

(2005年7月17~30日)

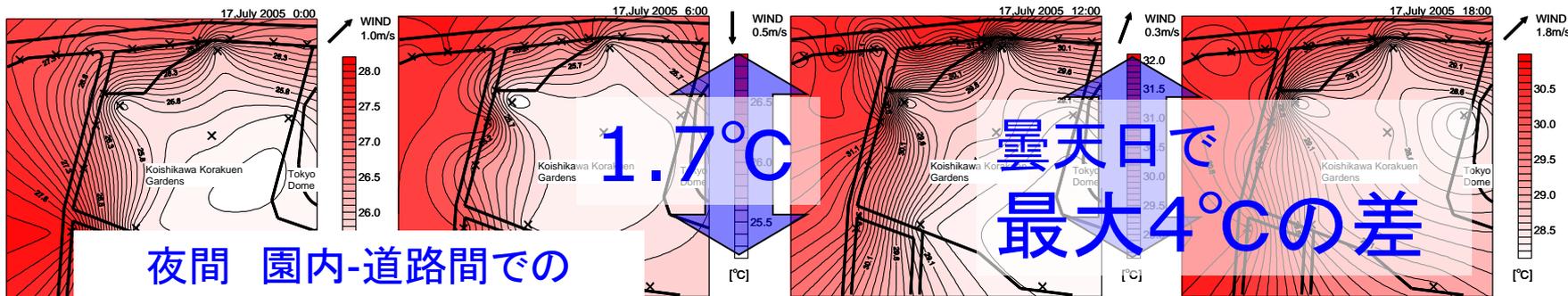


（晴天日と曇天日と比較するため7月17, 18日の解析データを用いる。）

気温コンター(7月17~18日)

それぞれの瞬間値でレンジを調整した.

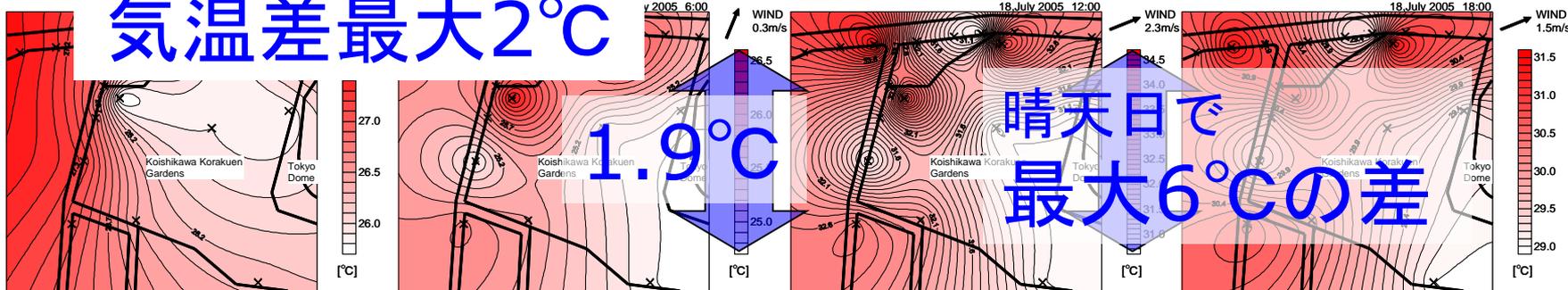
7/17
(曇天)



夜間 園内-道路間での
気温差最大2°C

曇天日で
最大4°Cの差

7/18
(晴天)



0:00

6:00

12:00

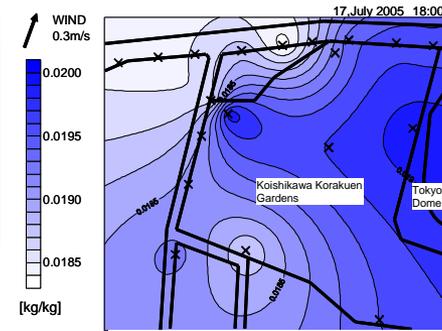
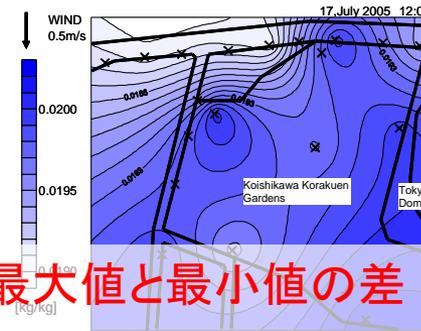
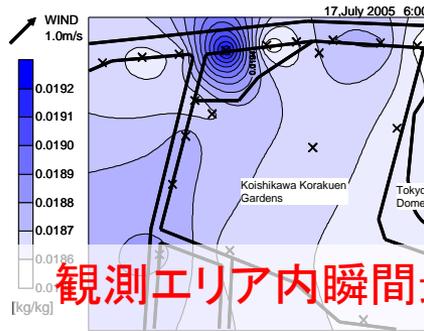
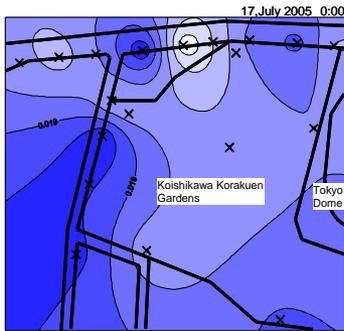
18:00

夜間において小石川後楽園内は園外より気温は低く観測地点内で最大約2°Cの差がある. 日中においてはその傾向は顕著になり観測地点内での気温差は最大で約6°Cとなった. 17日(曇天日)は園内外での気温分布は小石川後楽園と道路の境界で明瞭に分かれている. 18日(晴天日)の日中においては園内においても高温になる地点があり, 園外からの熱気の流入があると考えられる.



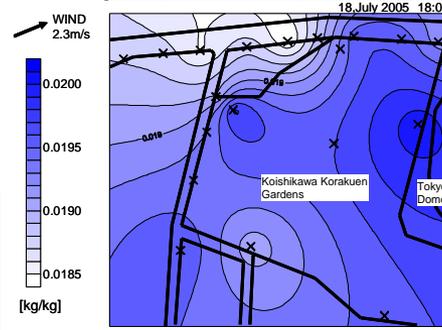
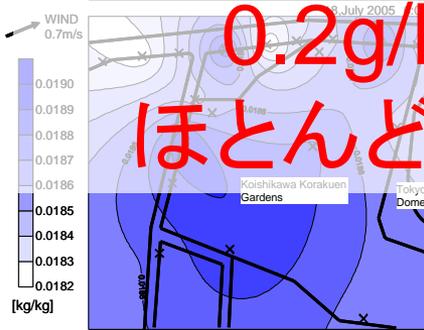
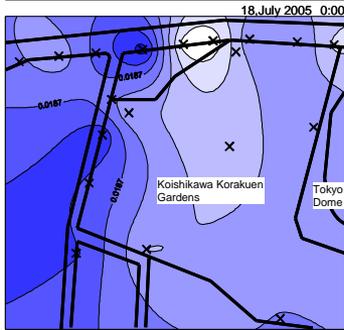
比湿コンター(7月17~18日)

7/17
(曇天)



観測エリア内瞬間最大値と最小値の差

7/18
(晴天)



0.2g/kg以下
ほとんど差がない

0:00

6:00

12:00

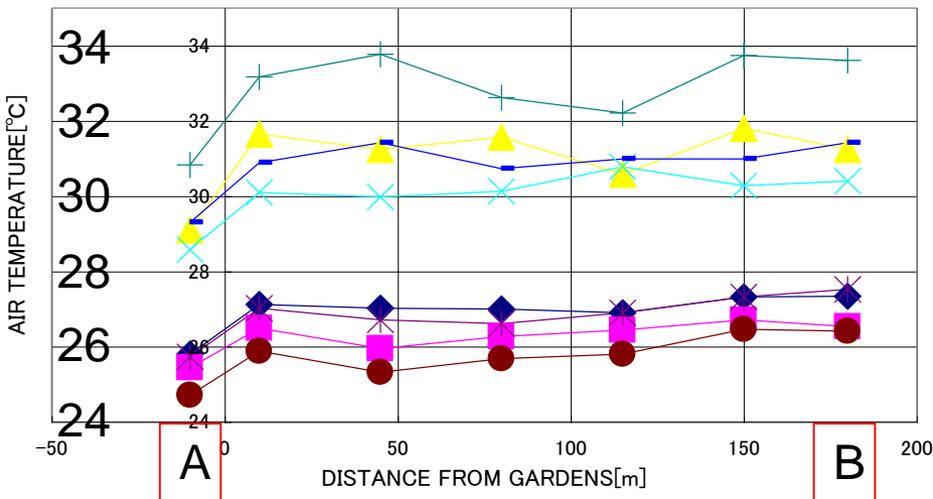
18:00

観測エリア全体で日中、日射により蒸発散を促し、夜間よりも比湿は高い値を示すが気温のような顕著な水平分布は見られない。比湿の鉛直分布から樹冠部で蒸発散が活発であることを明らかにしたがその現象が林床の比湿を局所的に大きく変化させることはないことが示された。都市部ではエアコンなどの人間活動、街路樹などの様々な要因の発生源が局所的に混在しているためであると考えられる。

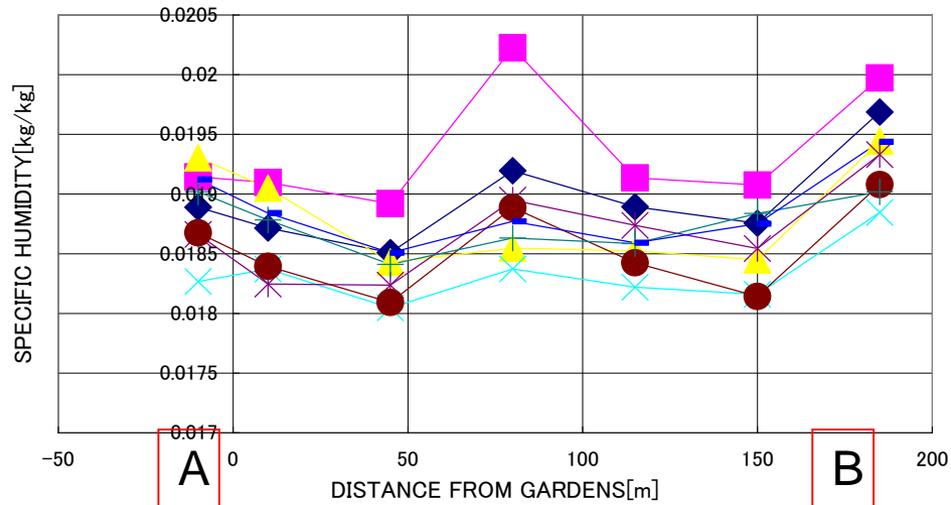
園からの距離と気温・比湿の関係

◆ 2005/7/17 0:00 ■ 2005/7/17 6:00 ▲ 2005/7/17 12:00 ✕ 2005/7/17 18:00
 * 2005/7/18 0:00 ● 2005/7/18 6:00 + 2005/7/18 12:00 - 2005/7/18 18:00

◆ 2005/7/17 0:00 ■ 2005/7/17 6:00 ▲ 2005/7/17 12:00 ✕ 2005/7/17 18:00
 * 2005/7/18 0:00 ● 2005/7/18 6:00 + 2005/7/18 12:00 - 2005/7/18 18:00

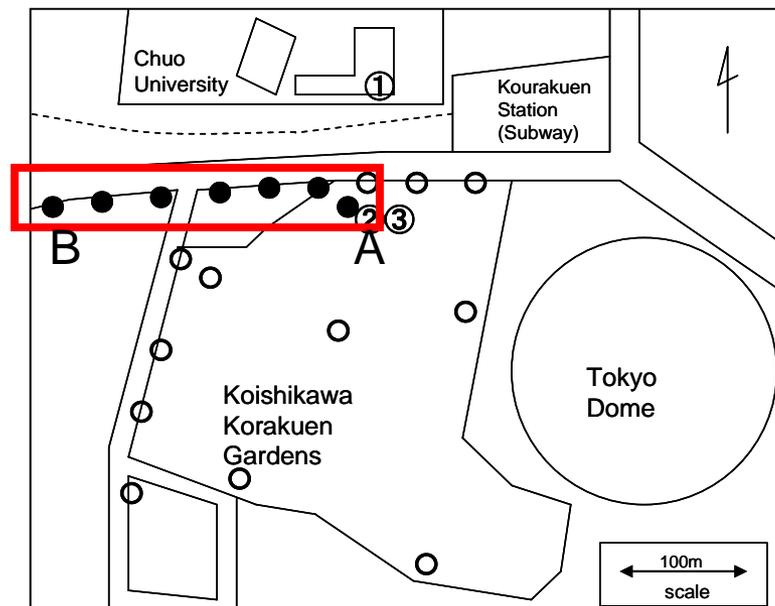


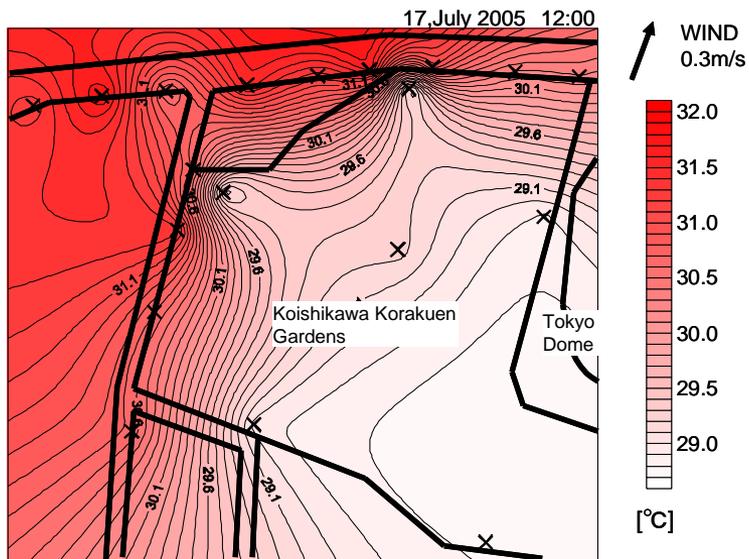
園からの距離と気温の関係



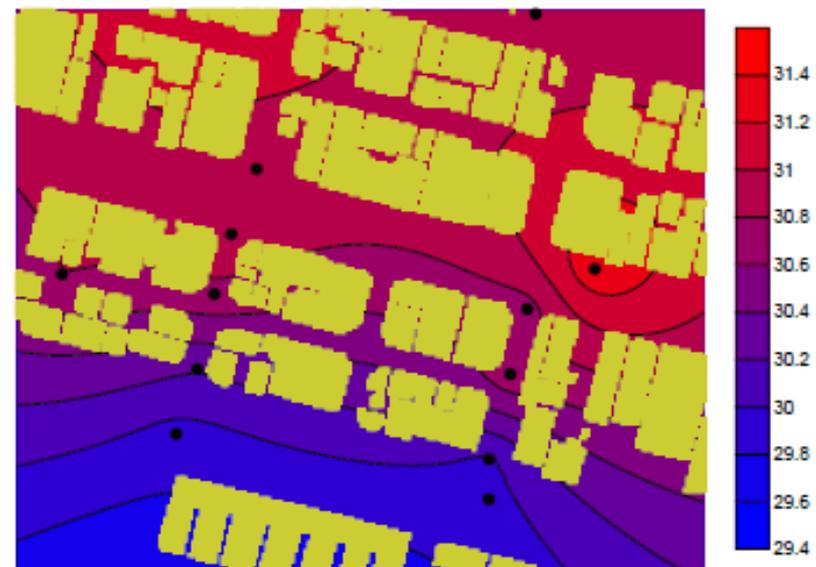
園からの距離と比湿の関係

日中、気温は小石川後樂園内で低く、道路では一様となっていた。夜間においては距離に応じて気温が高くなることから冷気の滲み出し効果があるといえる。比湿も同様な挙動を示す。





小石川後樂園の気温の平面分布

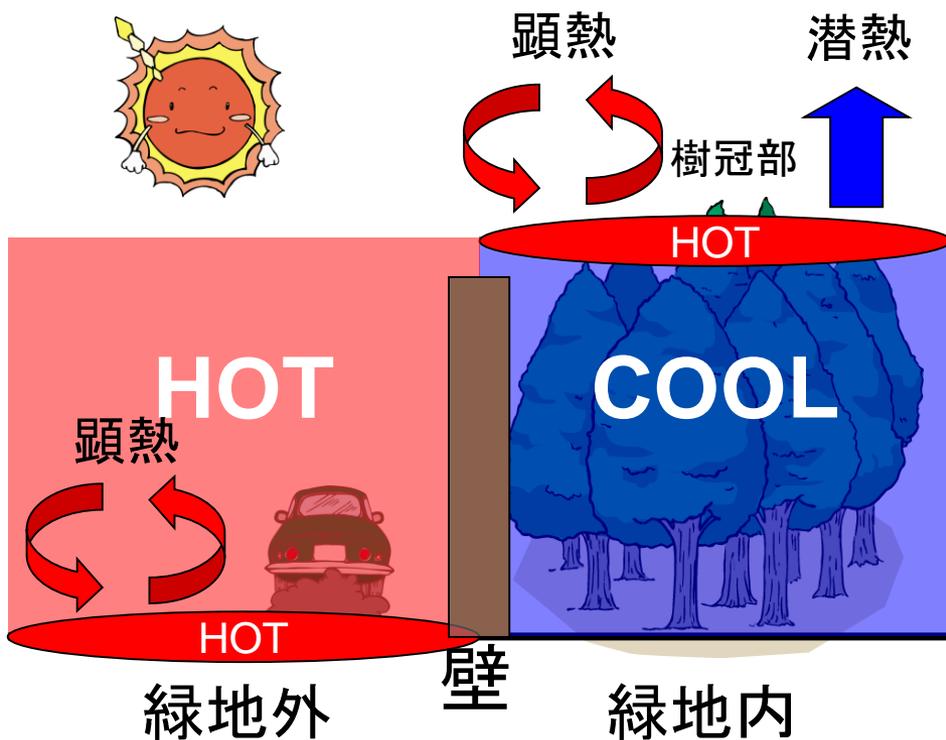


新宿御苑の気温の平面分布
(平成17年度都市緑地を活用した地域の熱環境改善構想の検討調査報告書, 環境省)

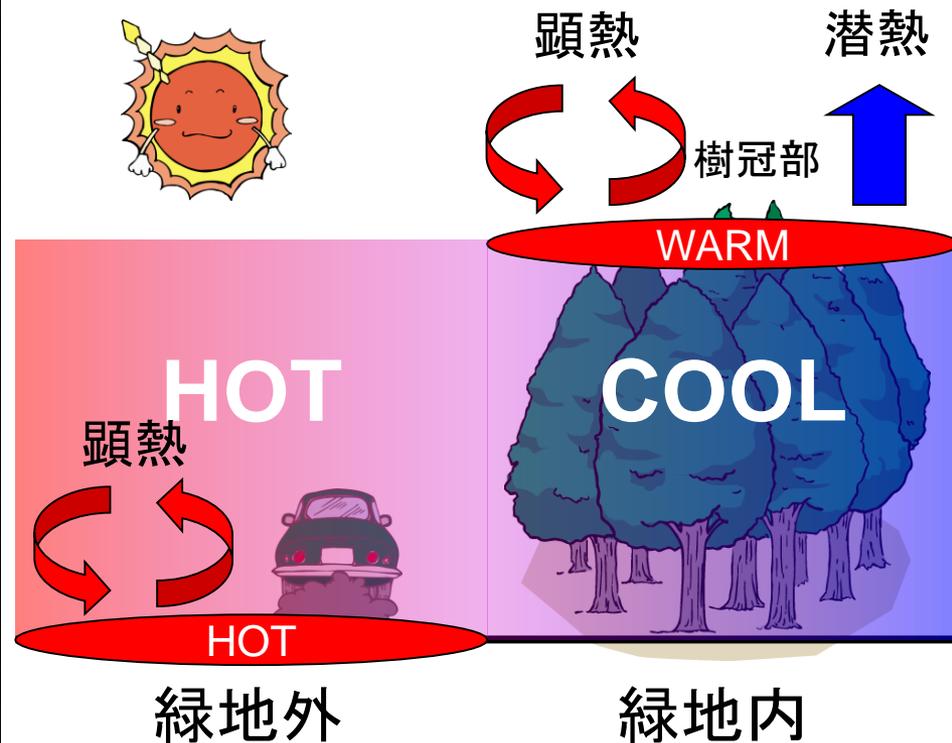


森林周辺の熱環境

気温差最大5°C



小石川後樂園
緑地内に冷気が閉じ込められるタイプ



新宿御苑
緑地周辺に冷気がにじみ出すタイプ

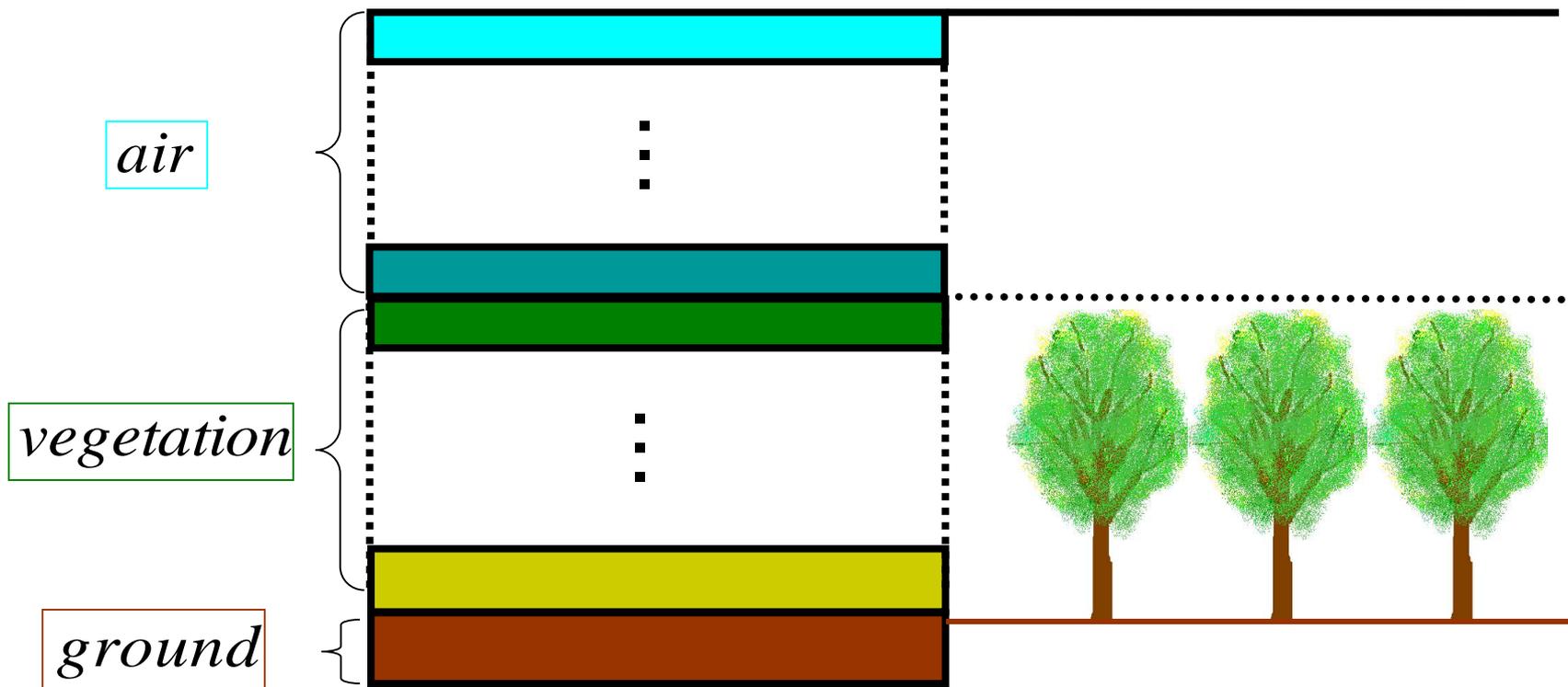
第6章

河川・森林の微気象モデルの構築と再現計算

計算概要

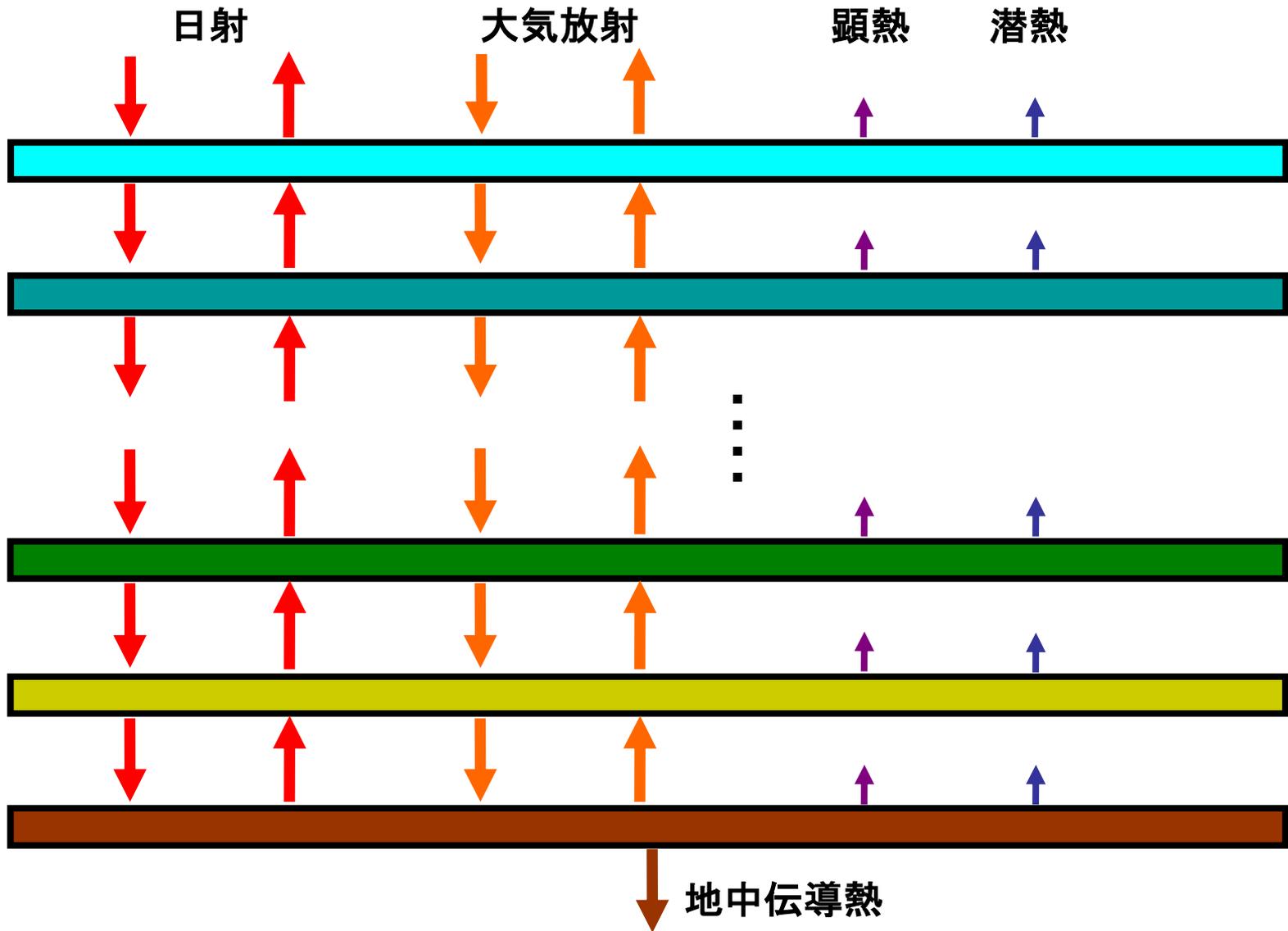
植生の枝葉の形状, 気象条件変化による林内環境の挙動の説明をできるモデルの構築を行った.

The calculating area



大気・植生層を複数の層, 土壌層を1層と区切った.

計算概要



各層で熱収支を考える。

基礎式

短波放射

$$\frac{dS \downarrow}{dz} = FaS \downarrow - Far_f S \uparrow$$

$$\frac{dS \uparrow}{dz} = -FaS \uparrow + Far_f S \downarrow$$

長波放射

$$\frac{dL \downarrow}{dz} = FaL \downarrow - Fa\sigma T_{leaf}^4$$

$$\frac{dL \uparrow}{dz} = -FaL \uparrow + Fa\sigma T_{leaf}^4$$

熱収支式

$$R_{leaf} = 2F\sigma T_{leaf}^4 + H + iE$$

$$R_{leaf} = (1 - r_f)F(S \downarrow + S \uparrow) + F(L \downarrow + L \uparrow)$$

顕熱・潜熱fluxのBulk式

$$H = c_p \rho c_h Ua(T_{leaf} - T_{air})$$

$$iE = i\rho c_e Ua(q_{SAT}(T_{leaf}) - q_{air})$$

気温・比湿・風速

$$K_h \frac{\partial^2 T_{air}}{\partial z^2} - c_h Ua(T_{air} - T_{leaf}) = 0$$

$$K_q \frac{\partial^2 q_{air}}{\partial z^2} - c_e Ua[q_{air} - q_{SAT}(T_{air})] = 0$$

$$K_m \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - c_d a U^2 = 0$$

基礎式の展開

5つの未知数 ($T_{ground}, T_{leaf}, T_{air}, q_{air}, U$) と $T_{ground}^4, T_{leaf}^4, q_{sat}$ を

$$T_{ground-new} = T_{ground-old} + \Delta T_{ground} \quad T_{leaf-new}(L) = T_{leaf-old}(L) + \Delta T_{leaf}(L)$$

$$T_{air-new}(L) = T_{air-old}(L) + \Delta T_{air}(L) \quad q_{air-new}(L) = q_{air-old}(L) + \Delta q_{air}(L)$$

$$U_{new}(L) = U_{old}(L) + \Delta U(L)$$

$$T_{leaf-new}^4(L) = T_{leaf-old}^4(L) + 4T_{leaf-old}^3(L)\Delta T_{leaf}(L)$$

$$T_{ground-new}^4(L) = T_{ground-old}^4(L) + 4T_{ground-old}^3(L)\Delta T_{ground}(L)$$

$$q_{sat}(T_{leaf} + \Delta T_{leaf}) \doteq q_{sat}(T_{leaf}) + \frac{dq_{sat}(T_{leaf})}{dT_{leaf}} \Delta T_{leaf}$$

とおき、基礎式を展開する。

基礎式の展開

短波放射

$$\begin{aligned} -S \downarrow(L) + (1 - Fad_z)S \downarrow(L+1) + r_f Fad_z S \uparrow(L-1) &= 0 \\ -r_f Fad_z S \downarrow(L+1) + (1 - Fad_z)S \uparrow(L-1) + S \uparrow(L) &= 0 \end{aligned}$$

長波放射

$$\begin{aligned} -L \downarrow(L) + (1 - Fad_z)L \downarrow(L+1) + 4Fad_z \sigma T_{leaf-new}^3(L) \Delta T_{leaf} &= -Fad_z \sigma T_{leaf-old}^4(L) \\ -(1 - Fad_z)L \uparrow(L-1) + L \uparrow(L) - 4Fad_z \sigma T_{leaf-new}^3(L) \Delta T_{leaf} &= Fad_z \sigma T_{leaf-old}^4(L) \end{aligned}$$

熱収支式

$$\begin{aligned} (4 \times 2F \sigma T_{leaf-new}^3(L) + c_p \rho_c U a) \Delta T_{leaf}(L) - c_p \rho_c U \Delta T_{air}(L) - i \rho_c U \Delta q_{air}(L) \\ = R_{leaf-old}(L) - 2F \sigma T_{leaf-old}^4(L) - H(L) - iE(L) \end{aligned}$$

気温 (比湿・風速も同様)

$$\begin{aligned} c_p \rho_c U a (dz^2) \Delta T_{leaf}(L) + \frac{K_h(L-1) + K_h(L)}{2} \Delta T_{air}(L-1) \\ + \left\{ -\frac{K_h(L-1) + 2K_h(L) + K_h(L+1)}{2} - c_p \rho_c U a (dz^2) \right\} \Delta T_{air}(L) + \frac{K_h(L) + K_h(L+1)}{2} \Delta T_{air}(L+1) \\ = -c_p \rho_c U a (dz^2) (T_{leaf-old}(L) - T_{air-old}(L)) \\ - \frac{K_h(L-1) + K_h(L)}{2} T_{air-old}(L-1) + \frac{K_h(L-1) + 2K_h(L) + K_h(L+1)}{2} T_{air-old}(L) - \frac{K_h(L) + K_h(L+1)}{2} T_{air-old}(L+1) \end{aligned}$$

計算方法 (一般化したNewton-Raphson法)

$$\begin{bmatrix} A_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \downarrow(L) \\ S \uparrow(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_S \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} A_U \end{bmatrix} [\Delta U(L)] = \begin{bmatrix} B_U \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{ground} \\ L \downarrow(L) \\ L \uparrow(L) \\ \Delta T_{leaf}(L) \\ \Delta T_{air}(L) \\ \Delta q_{air}(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}$$

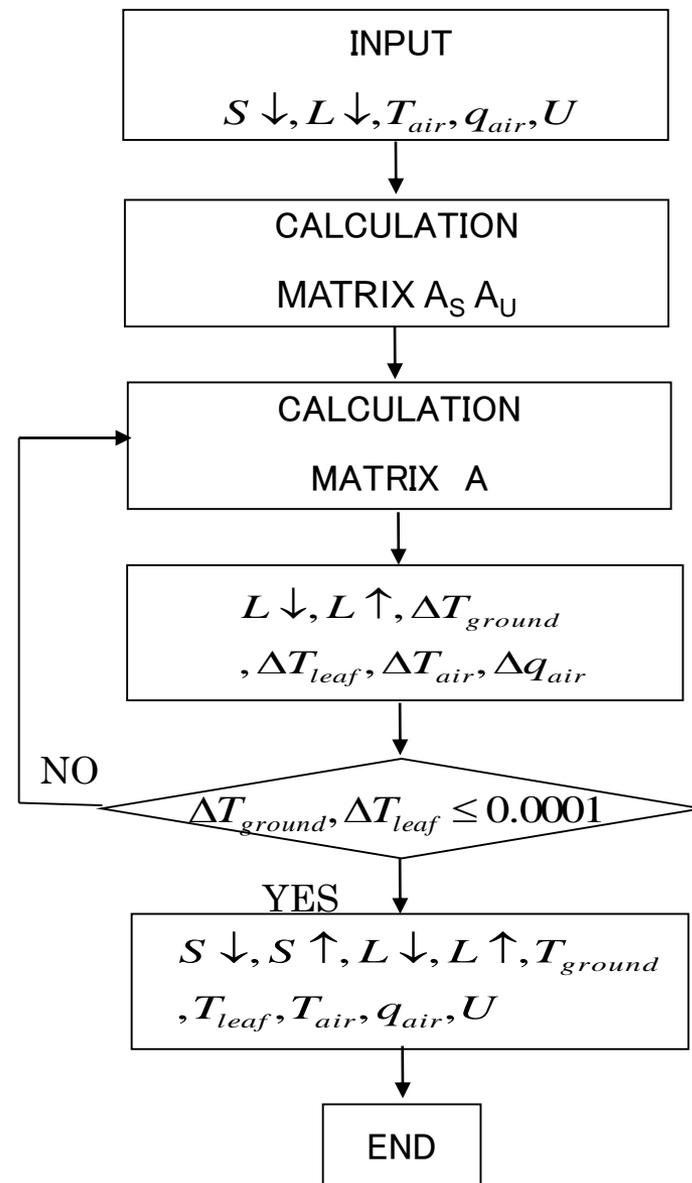
Aは(層数 × 5 + 1)²のMATRIX

始めにS↓, S↑, Uを算出する. この3つの未知数は他の未知数に関連性がないため独立して求める. 3つの変数を算出するためTaylor展開した式の未知数をMATRIX[A], 既知数をMATRIX[B]に代入して行列の解を求める.

残りの変数(ΔTground, L↓, L↑, ΔTleaf, ΔTair, Δqair,)も同様にMATRIX[A], [B]に代入し解を求める. この解は1回では収束しないため, その解を新たに代入しMATRIX[A], [B]を算出し, ΔTgroundとΔTleafが0に収束するまで計算を繰り返す.

本研究の手法によりモデルを構築し,
計算時間を高速に行うことが可能になった.

フローチャート



LAD(葉面積密度)鉛直分布変化 による林内環境

モデルの1層の高さを0.5m, 大気層・植生層をそれぞれ20層に区切り, 土壌1層と合わせて41層とし, 森林における一般的なパラメータをモデルに用いた.

LADの分布はその積算値であるLAI(葉面積指数)を3.0に固定したまま変化させたものである. LAD分布は

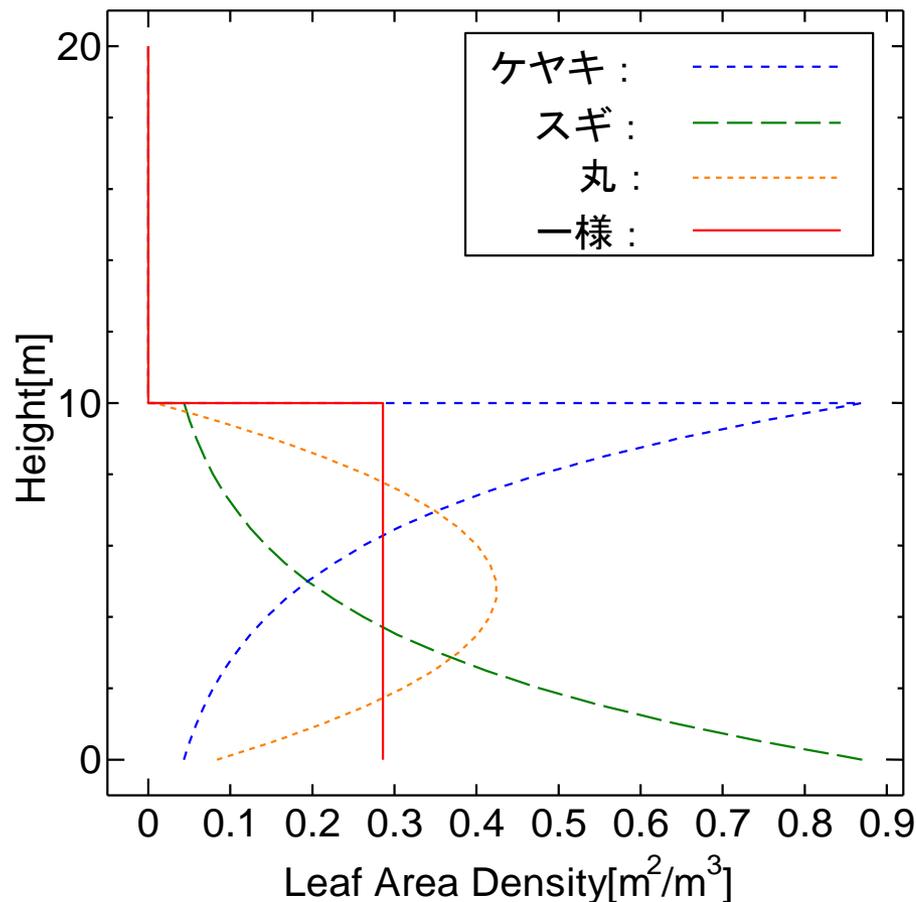
(緑): スギ型

(青): ケヤキ型

(黄): 丸型

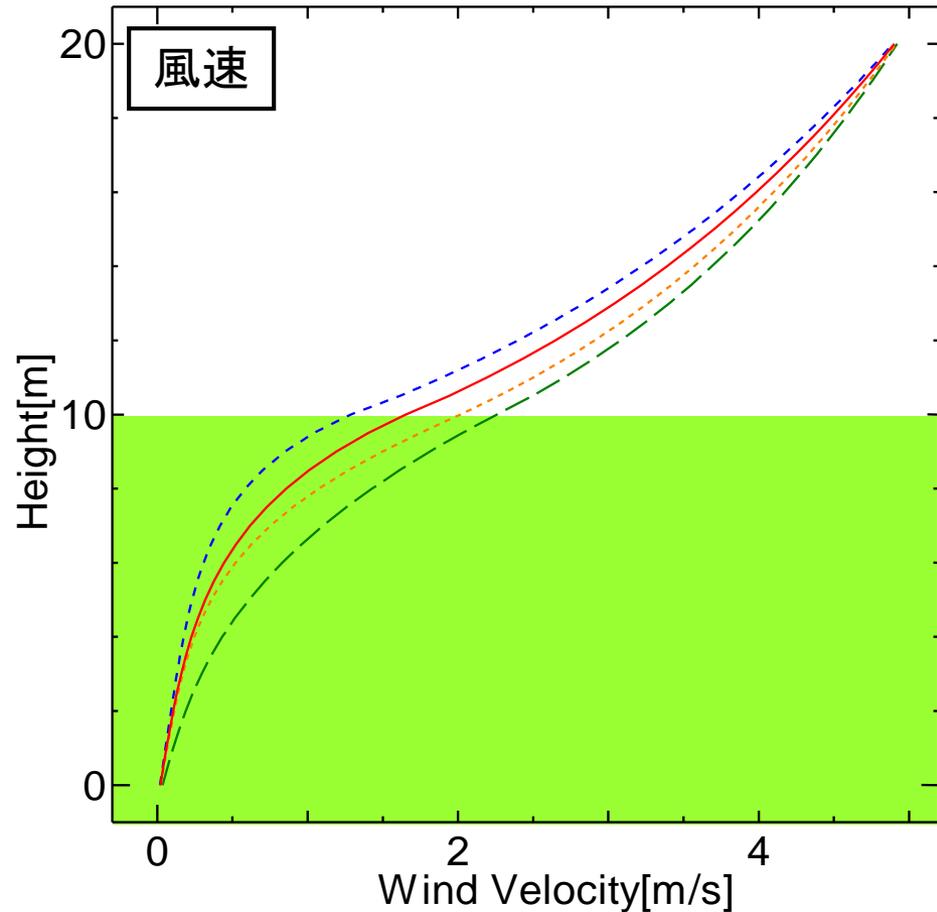
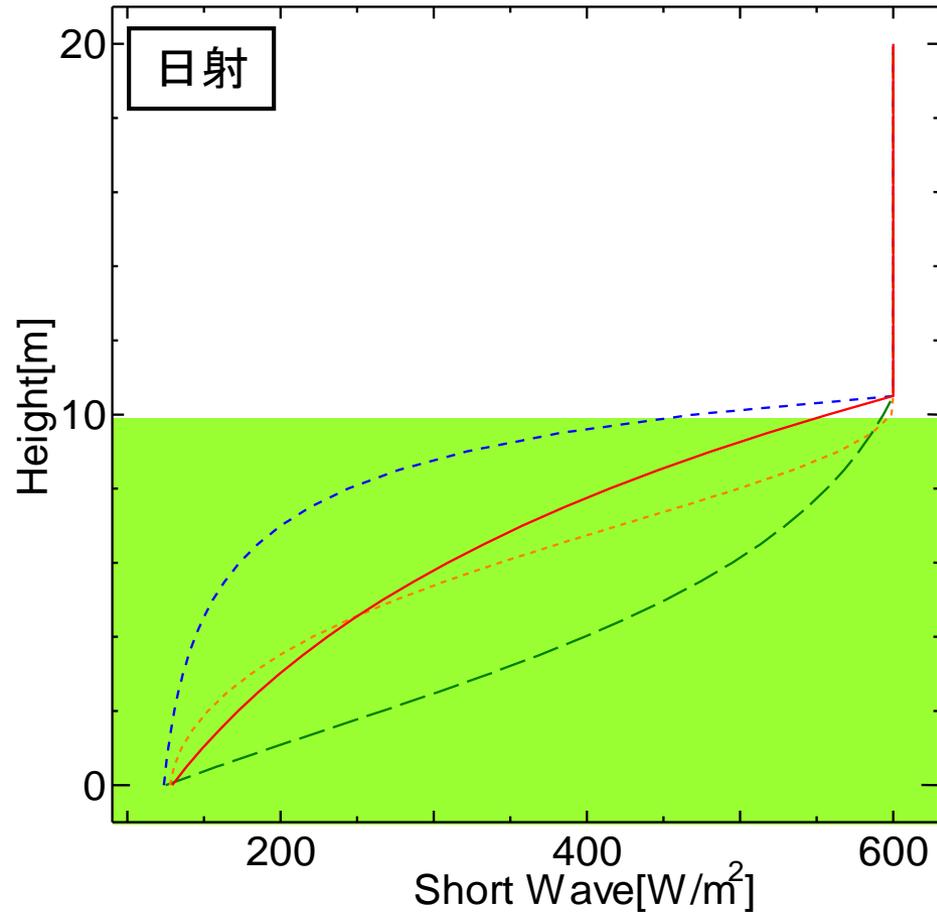
(赤): 一様

になるように分布させた.

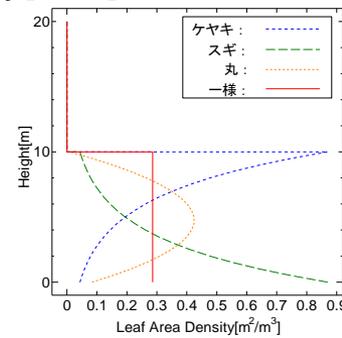


葉面積密度の分布は葉がどのようになっているかを示すものである.

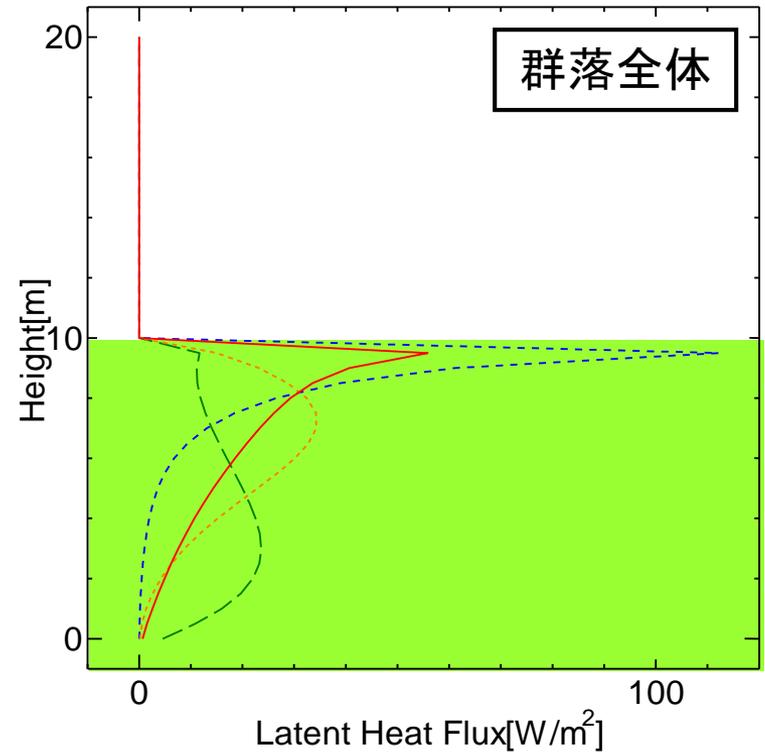
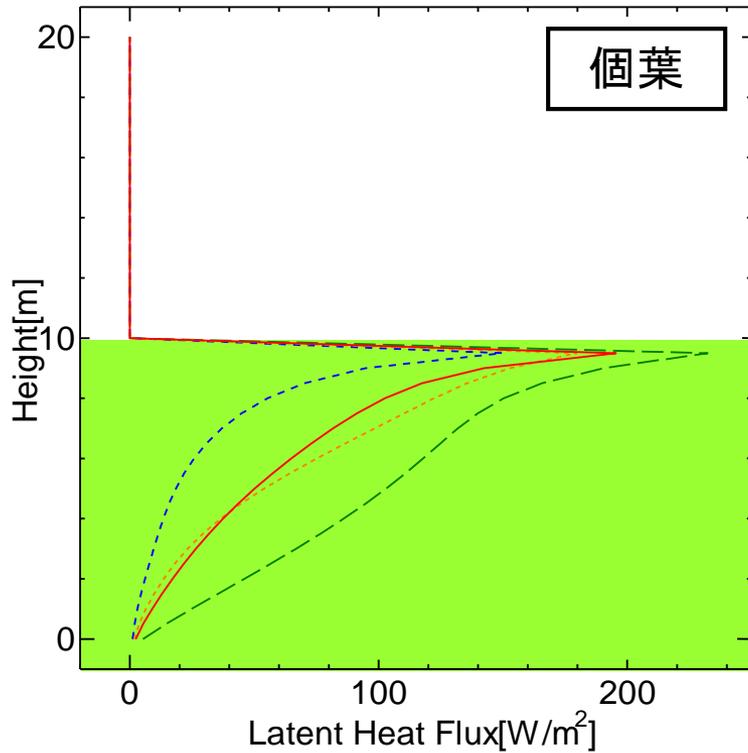
日射・風速の鉛直分布



LADの鉛直分布によって日射量・風速の減衰の傾向が異なるが、地面にかかる日射量はほぼ同じである。
ケヤキ型は日射量・風速ともに上層で大きく減衰している。



個葉・群落全体の潜熱flux鉛直分布

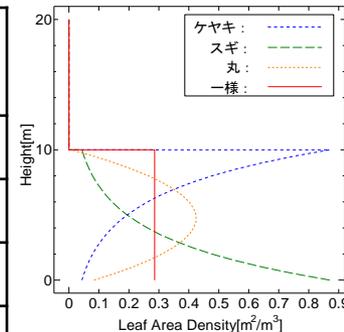


樹冠は顕熱fluxが大きいいため潜熱fluxは全く放出されないがその直下の層では顕熱fluxが負になっているため潜熱fluxが多く放出される。

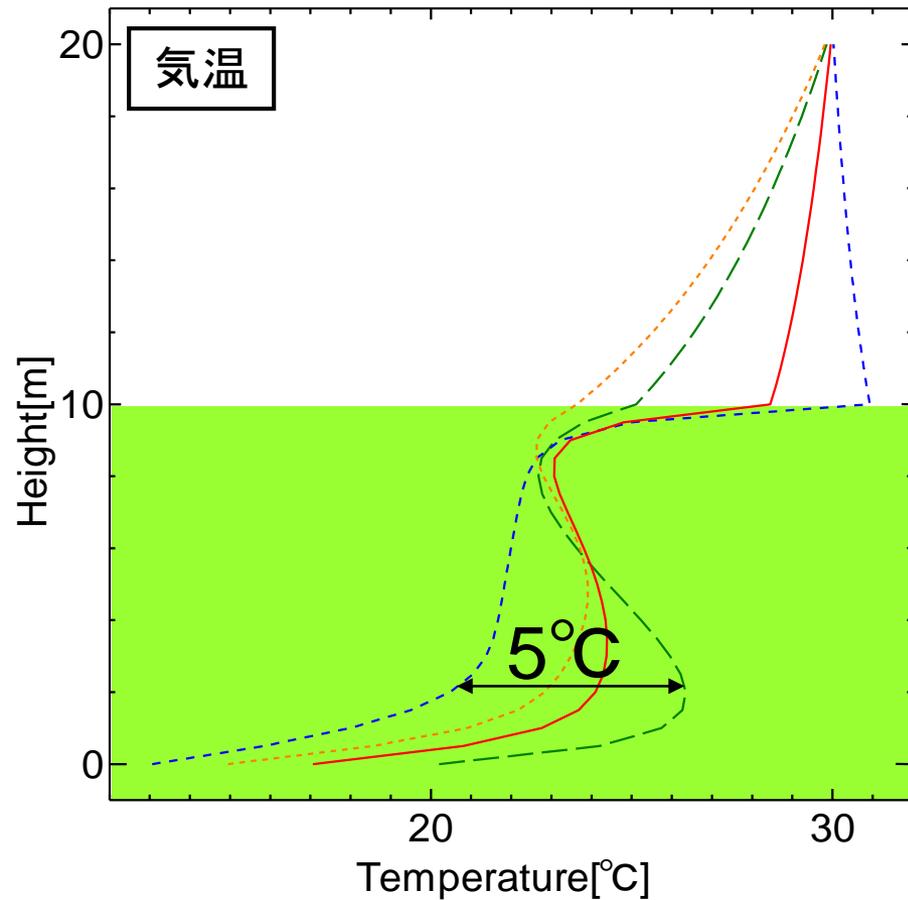
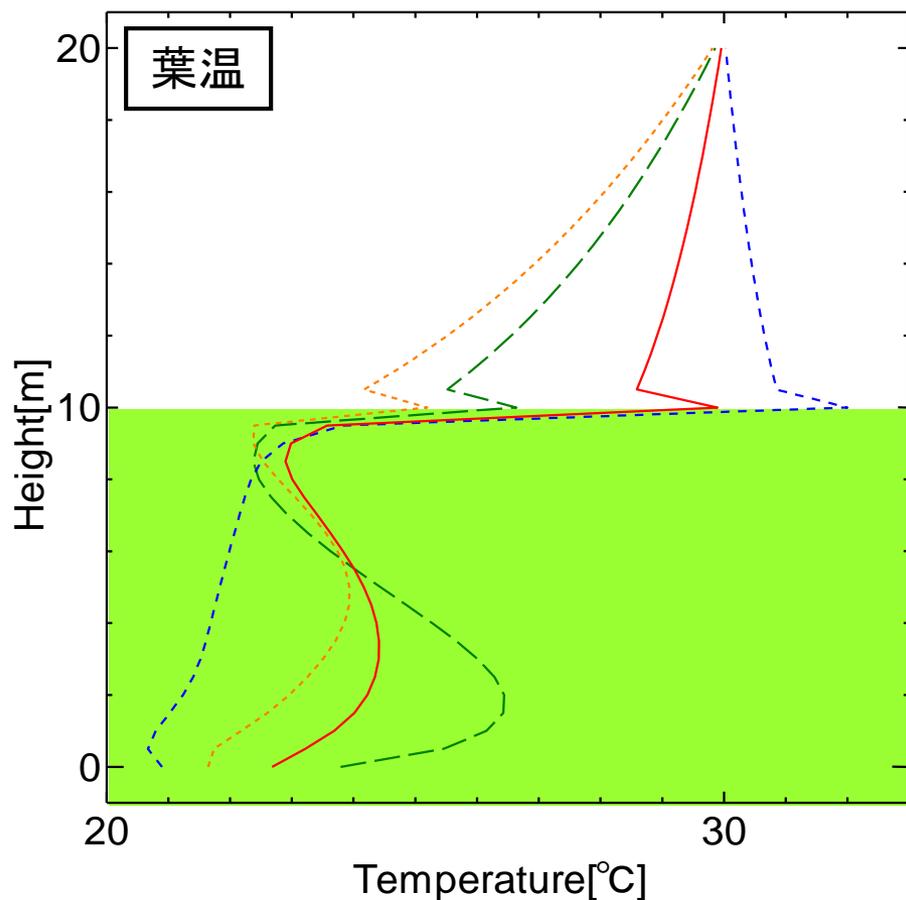
群落全体では丸型のLAD分布が潜熱fluxの積算の最大値をとる

型	潜熱flux (W/m ²)
スギ	331
ケヤキ	304
丸	350
一様	338

群落全体の潜熱flux合計

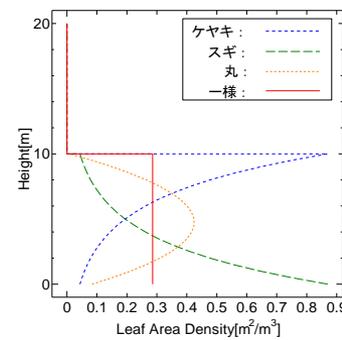


葉温・気温鉛直分布

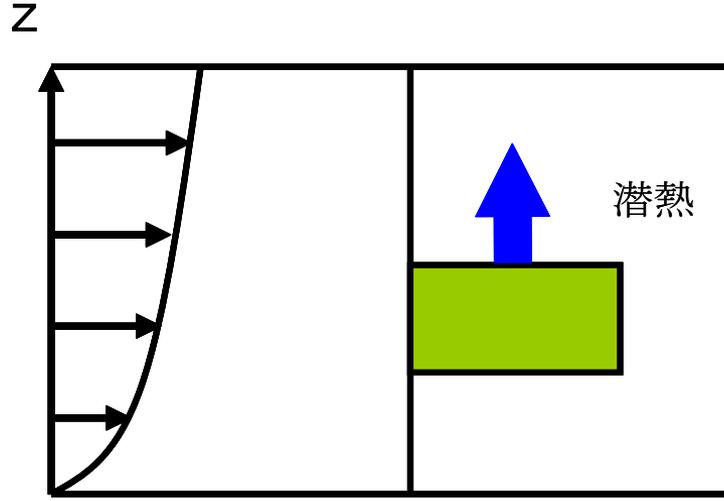
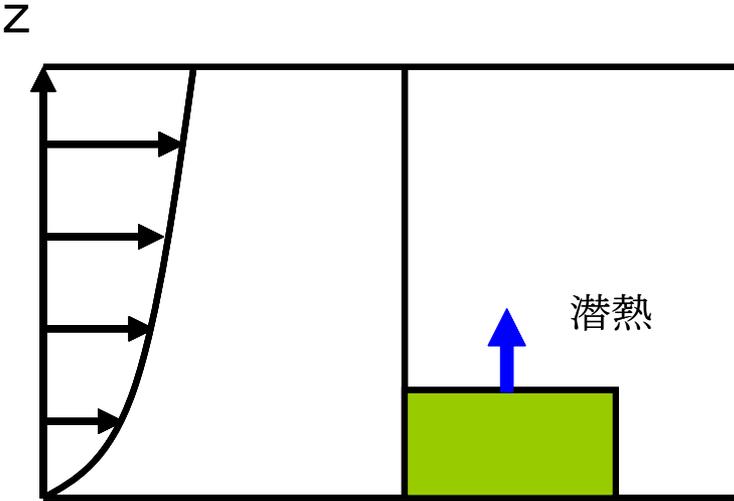


日射の影響で樹冠では葉温が気温よりも大きな値をとる。
ケヤキ型では群落内の葉温・気温ともに最も低下する。

同じ葉の量でも枝葉のつき方によって林内環境はまるっきり異なる。



植生モデルによるシミュレーション結果

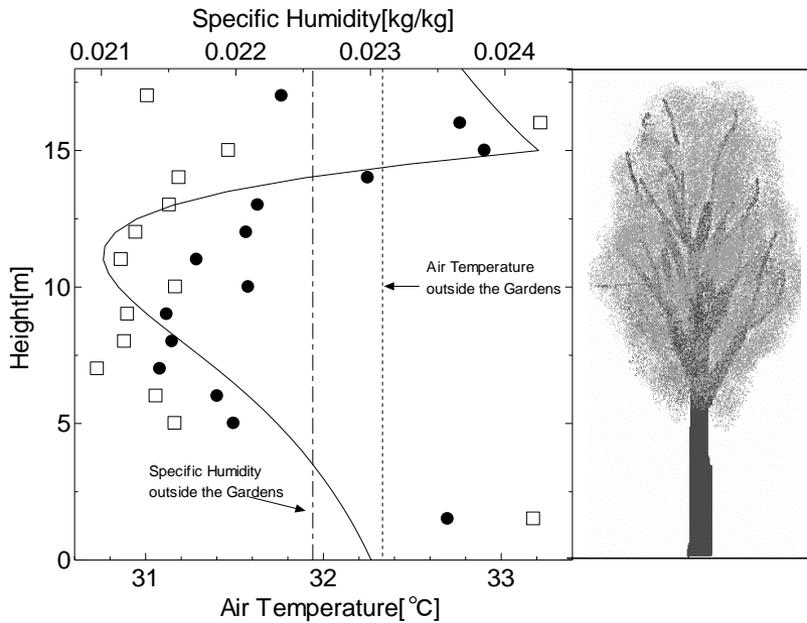


wind speed

leaf area density

wind speed

leaf area density



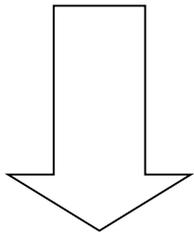
- ・下層の葉面積密度が大きいとしても風速が小さいため顕熱・潜熱fluxの放出量は小さい。
- ・群落上層の葉面積密度が大きいと風速が強いことと合わせて潜熱fluxの放出量は大きくなる。
- ・植生モデルの構築により観測で得られた森林内の気温分布を再現することができた。再現をする際にはLAD分布, 地面貯熱量の同定が困難であった。

河川上の冷涼大気の拡散シミュレーション

大気が河川上を通過し、顕熱・潜熱により冷却され、その大気がどのように拡散するのかをシンプルに検証するため、定常状態で直線河川のみが存在することを想定する。

運動方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$



- ・ 定常条件
- ・ x方向のみの一様の風である ($u(t, x, y, z) = u_0$, $v = 0$, $w = 0$)
- ・ x方向の移流効果が大きいいためx方向の拡散は無視できるほど小さい。
- ・ 移流効果が大きいため拡散による境界層厚さの変化は小さいとする。

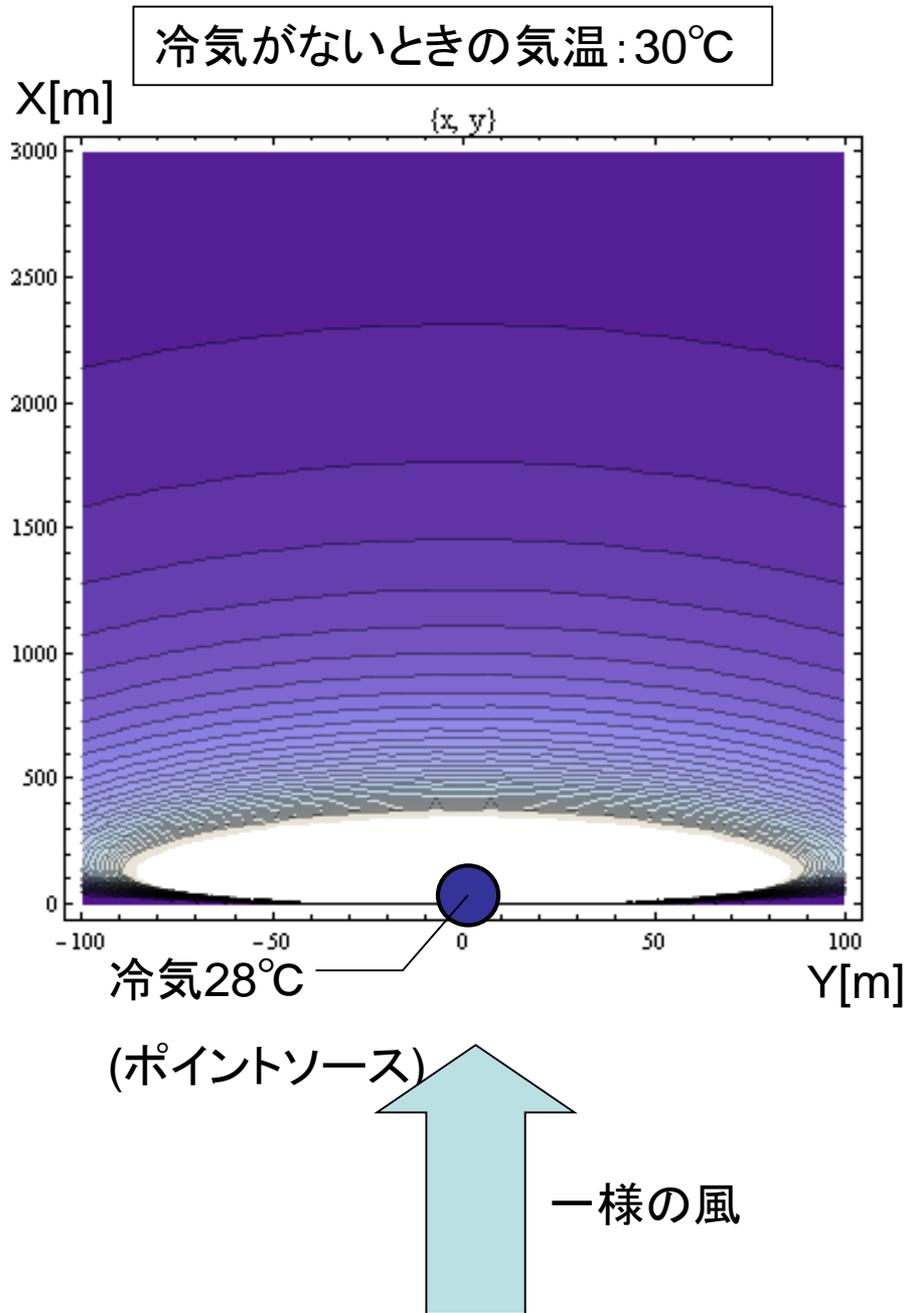
$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

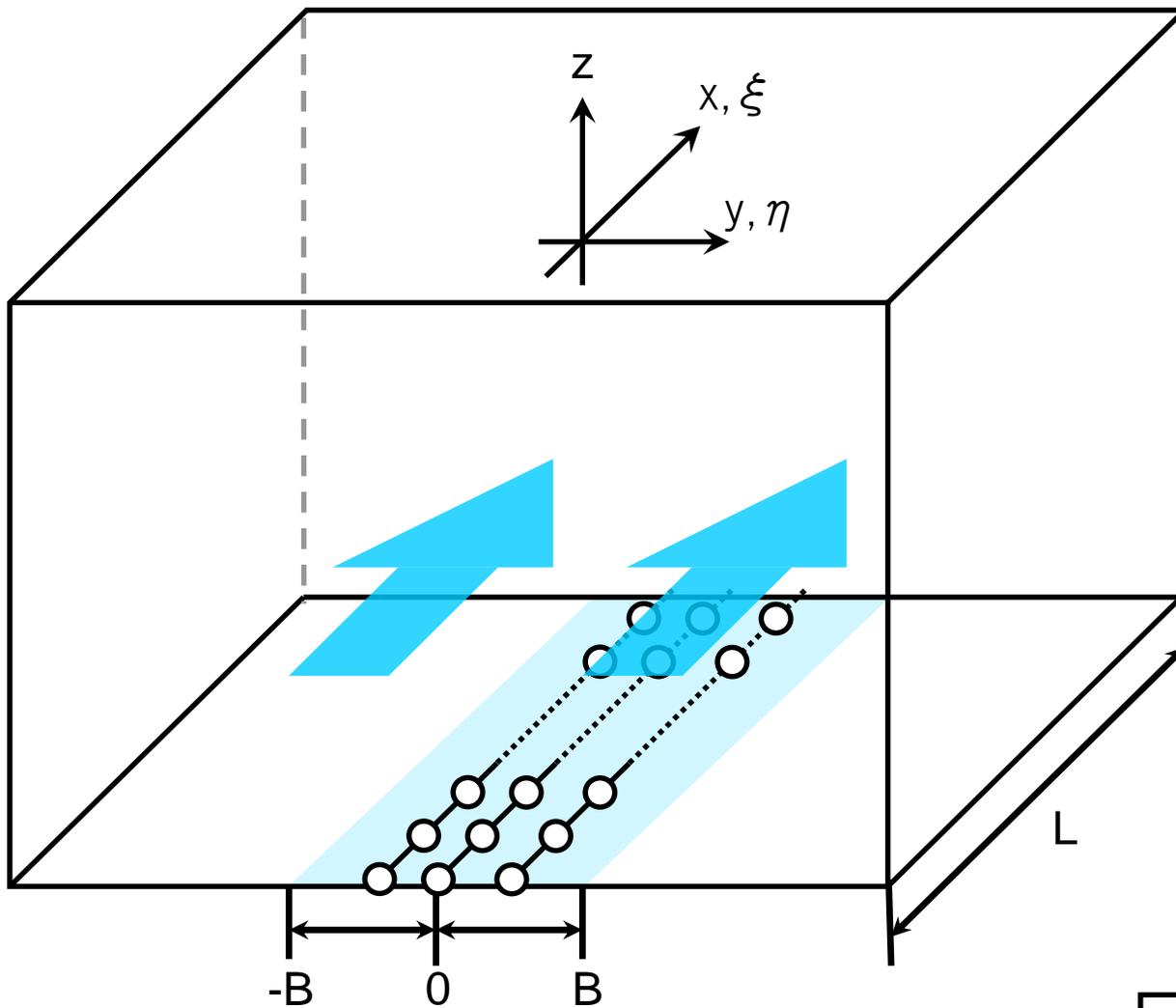
(ここで K_{yy} を $C \times u_0$, K_{zz} を $K \times z$ と仮定する。)

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

一般解 $T_1(x, z) = \frac{Q}{Kx} e^{-\frac{u_0 z}{k_1 x}} \quad (4)$

$$T_{green}(x, y, z) = T_1(x, z) \frac{1}{2\sqrt{\pi cx}} \exp\left(-\frac{y^2}{4cx}\right) \quad (5)$$





河川を冷源とした
長方形空間を想定する

x方向(河川縦断方向)には
一様な風速を与える

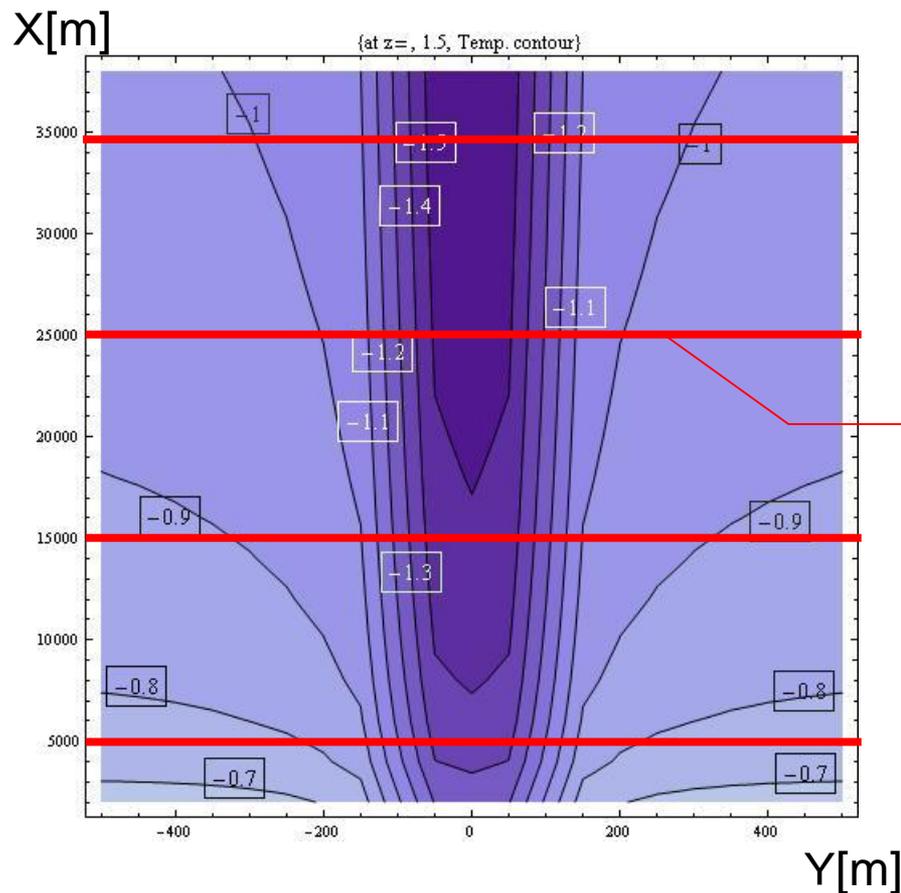
河川上で冷源を
ポイントソースとして与える

ポイントソースを河川全体で
想定し、鉛直方向・水平方向の
拡散、輸送をシュミレーションする

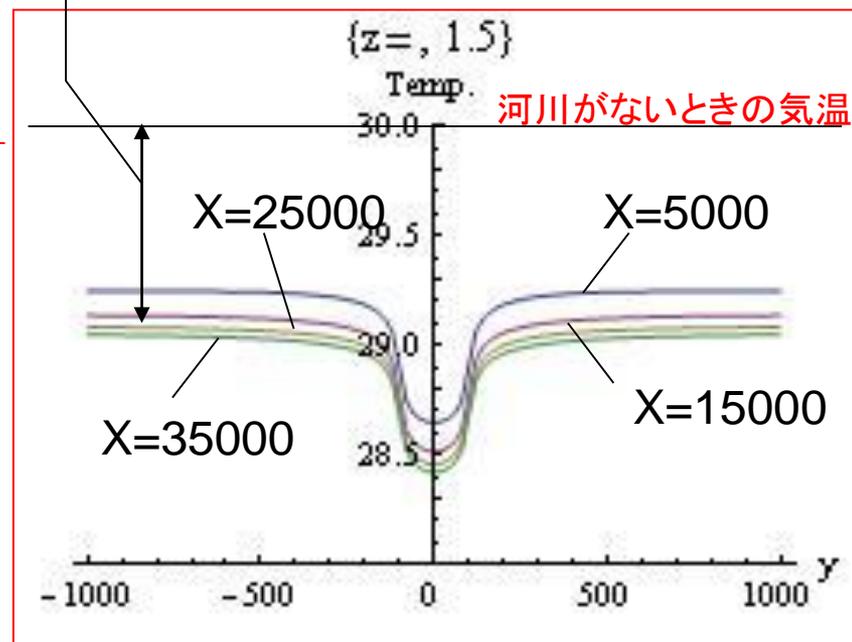
川幅が $-B \sim B$ で $2B$, 川の延長が l の河川である。
この領域をGreen関数を用いることで

$$T(x, y, z) = \int_0^l \int_{-B}^B f(x - \xi, y - \eta) T_{green}(\xi, \eta, z) d\xi d\eta \quad (6)$$

冷源の拡散シミュレーション解析結果



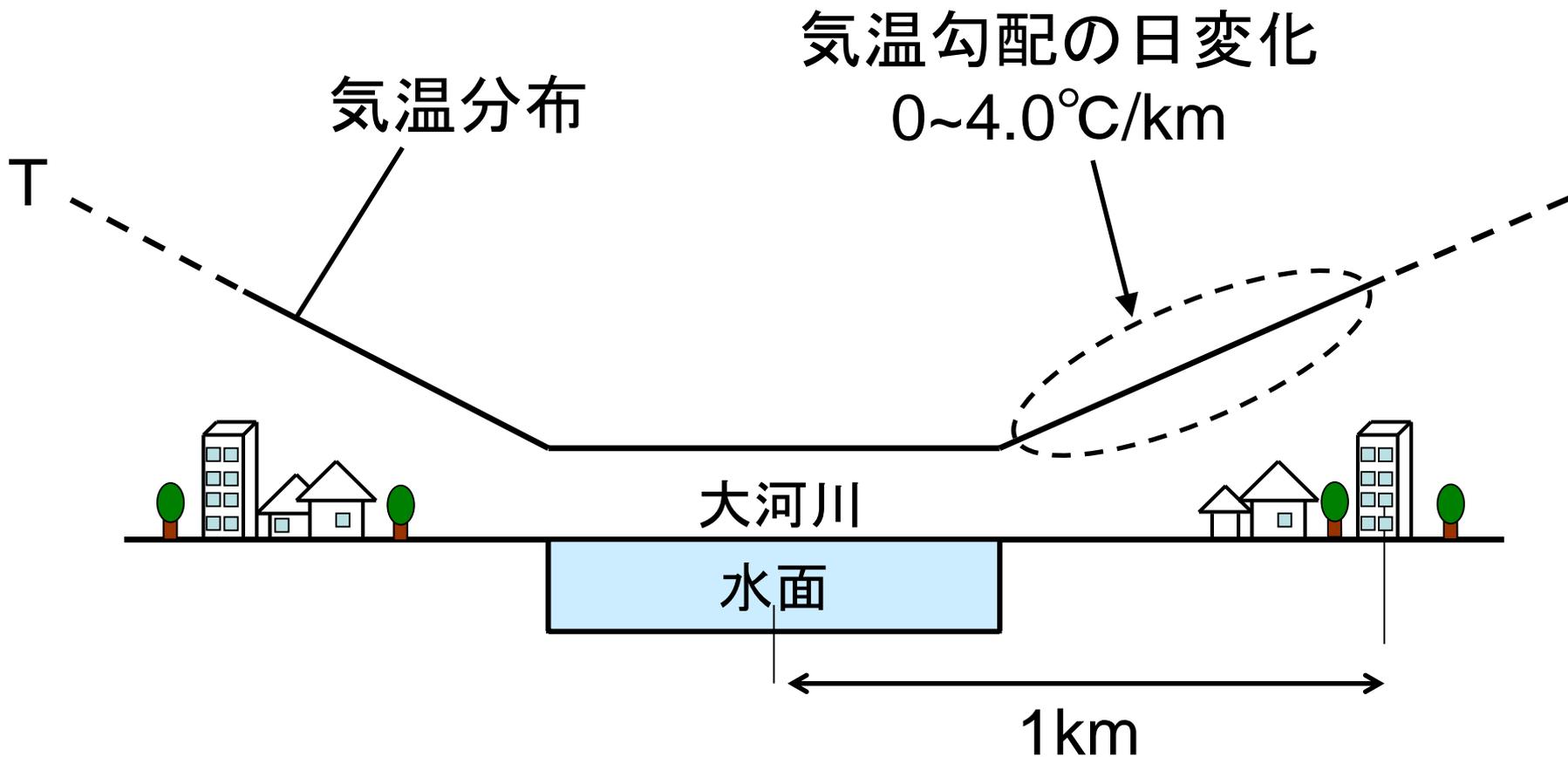
河川(x軸)から冷気がy方向への拡散することで周辺大気を冷却している. 定常状態では大気全体の初期条件である気温30℃にならない. 河川からは常に冷気が滲み出していることがわかる.



定常条件であれば河川から常に冷気のにじみだしがあり、この冷源を有効活用することが今後の都市計画において重要であると考えられる。これはポイントソースの冷源に関してもいえる。

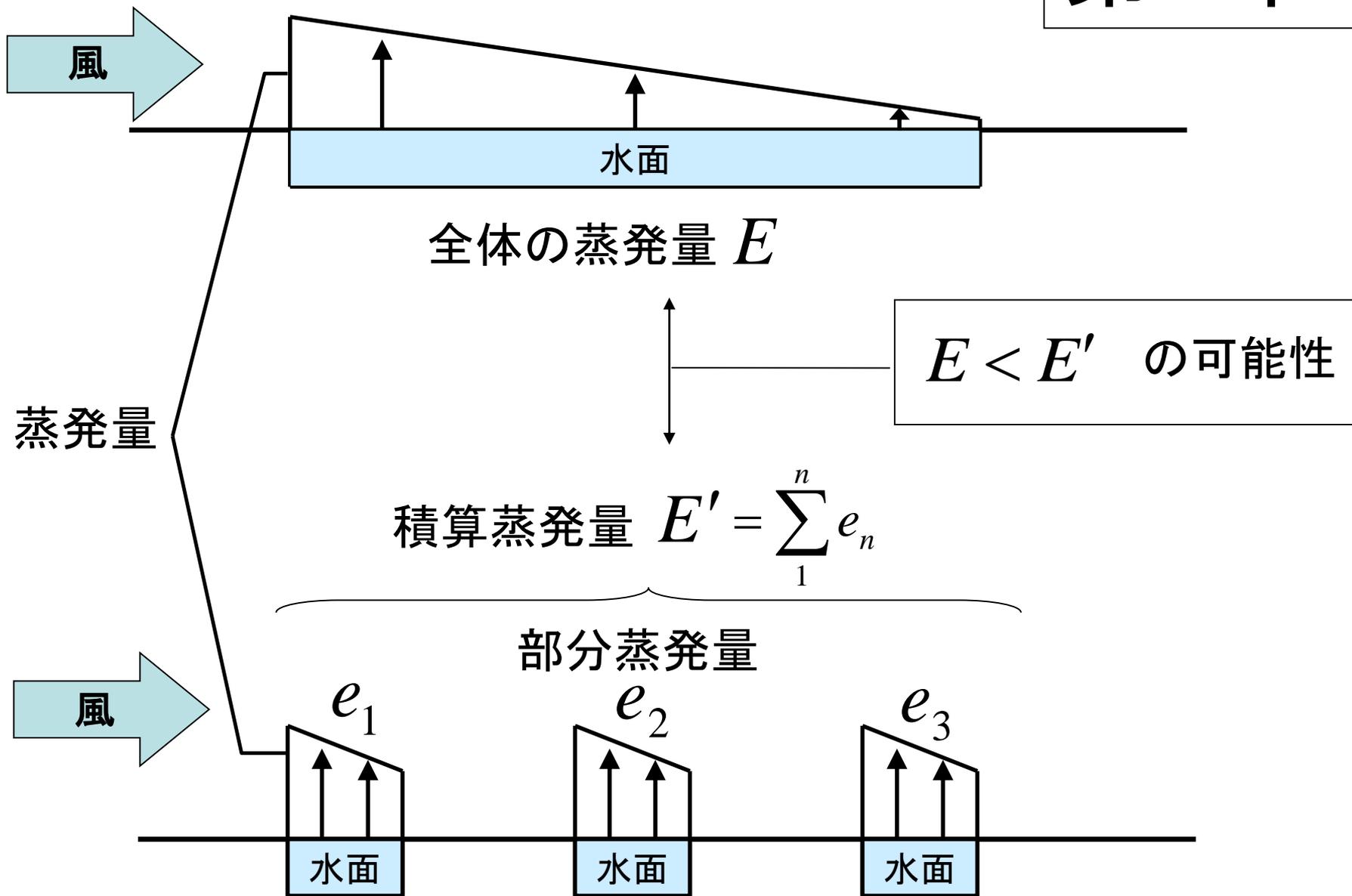
大河川の大気冷却効果

河川がないときの気温



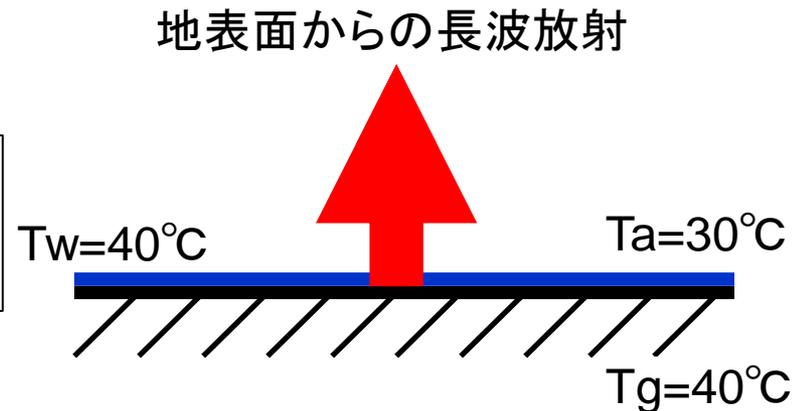
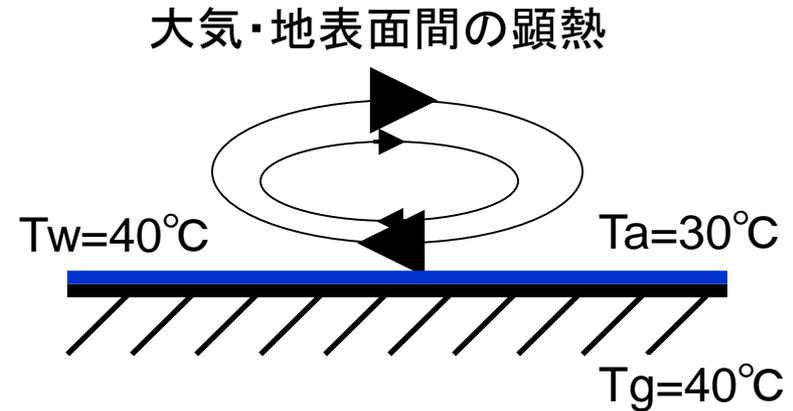
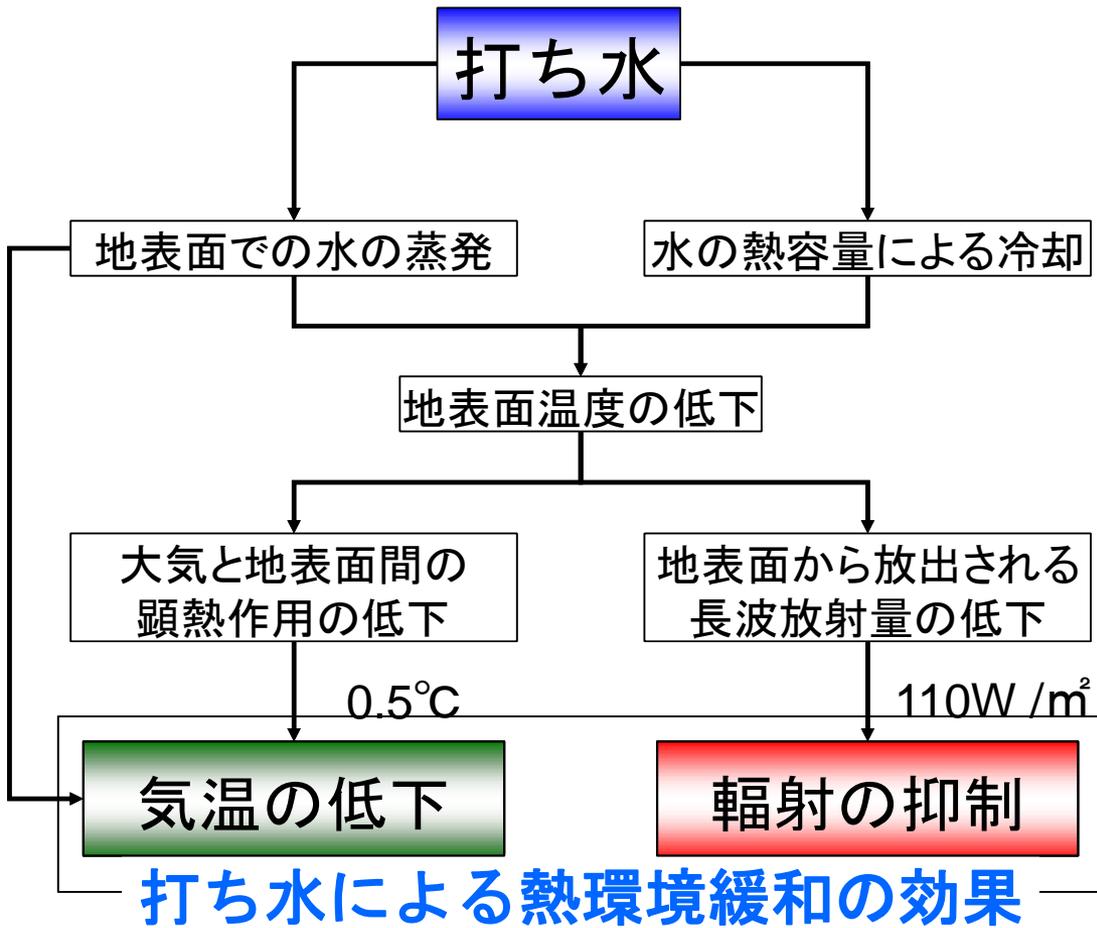
第7章

結論



打ち水メカニズム

第3章



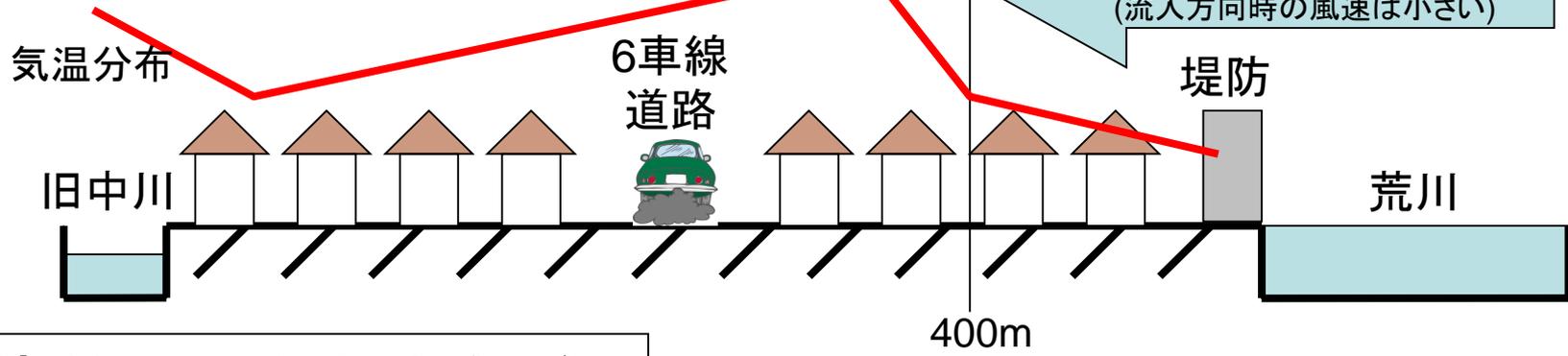
第4章

低層密集住宅地域でみられた傾向

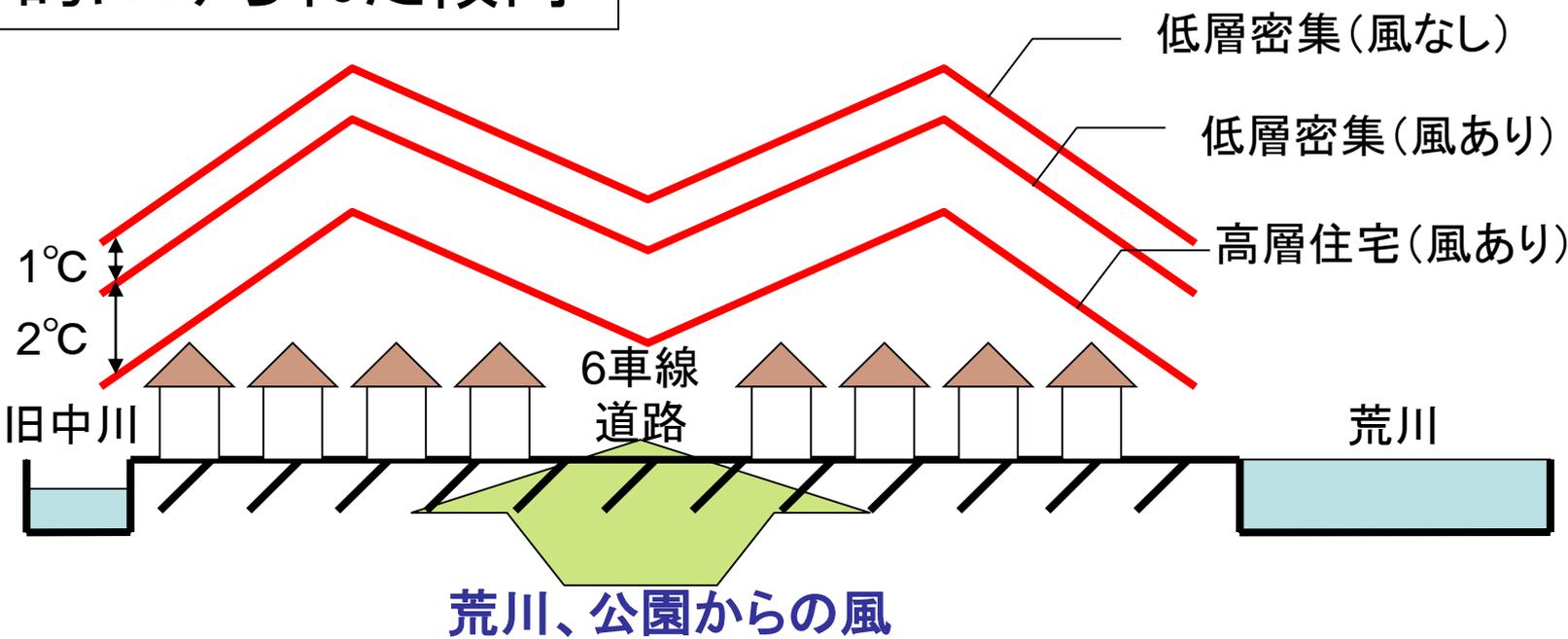
風がないため
旧中川の効果が
が現れない

荒川から400m付近まで
冷却効果が現れる

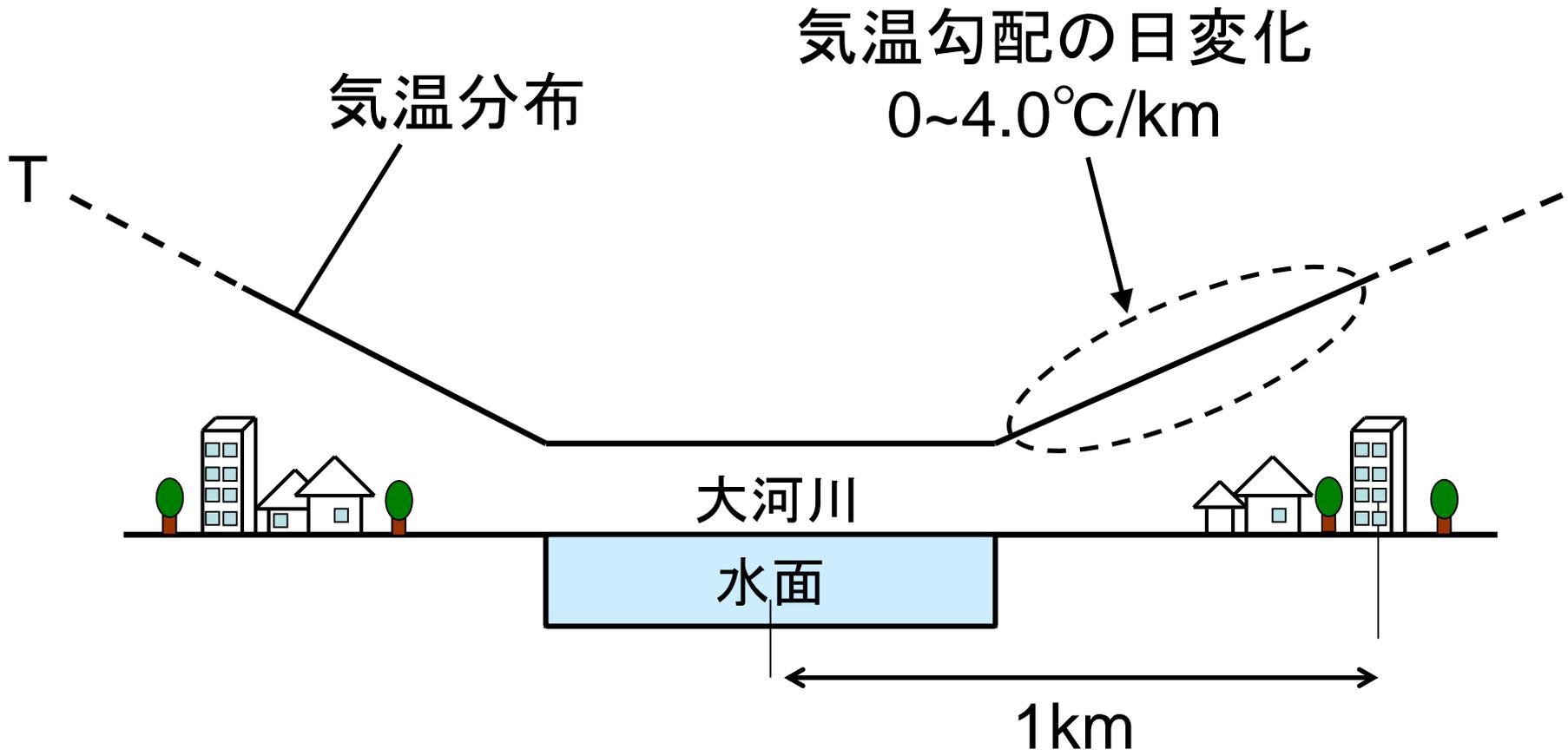
荒川方向からの風の流入
(流入方向時の風速は小さい)

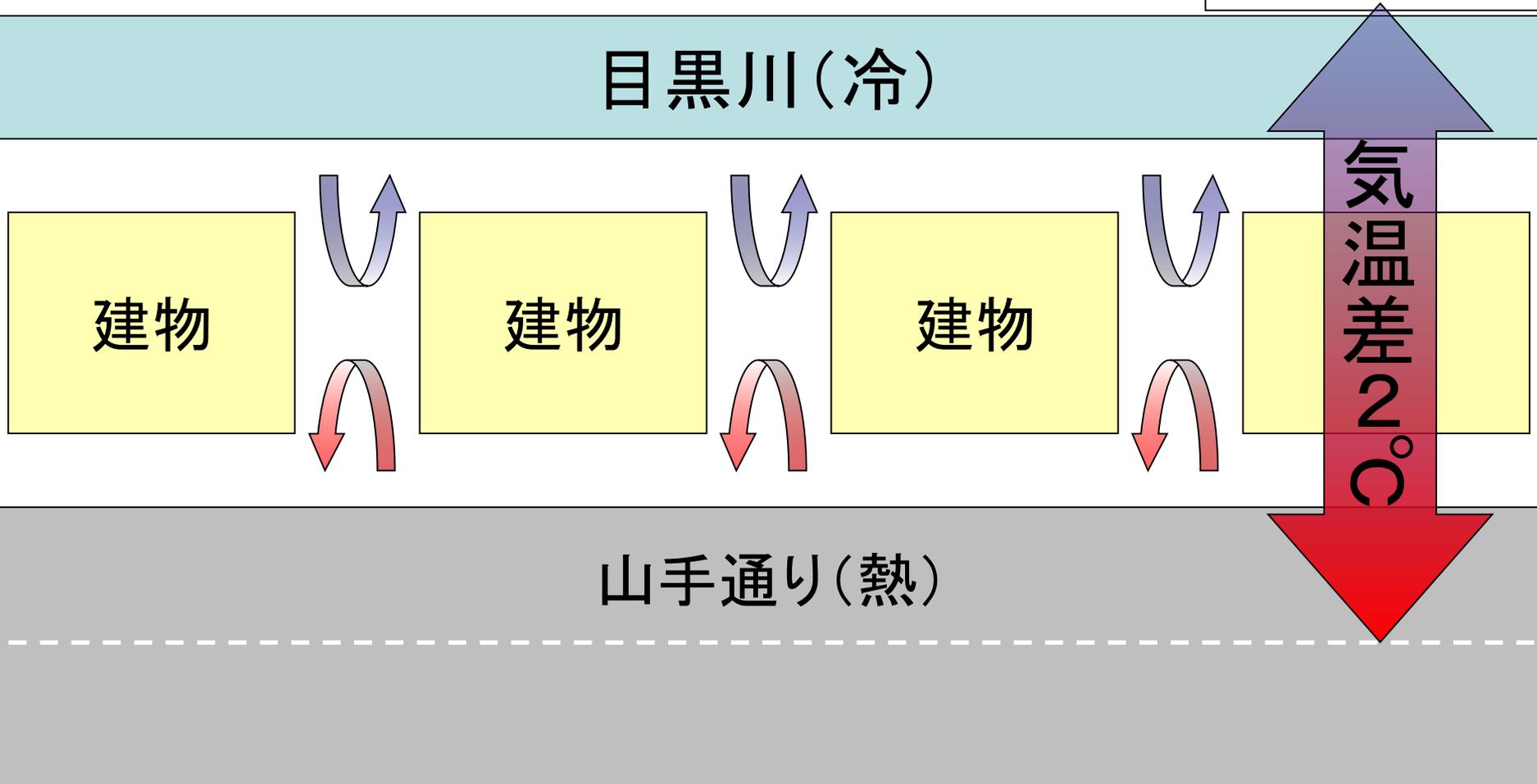


全体的にみられた傾向



第4章



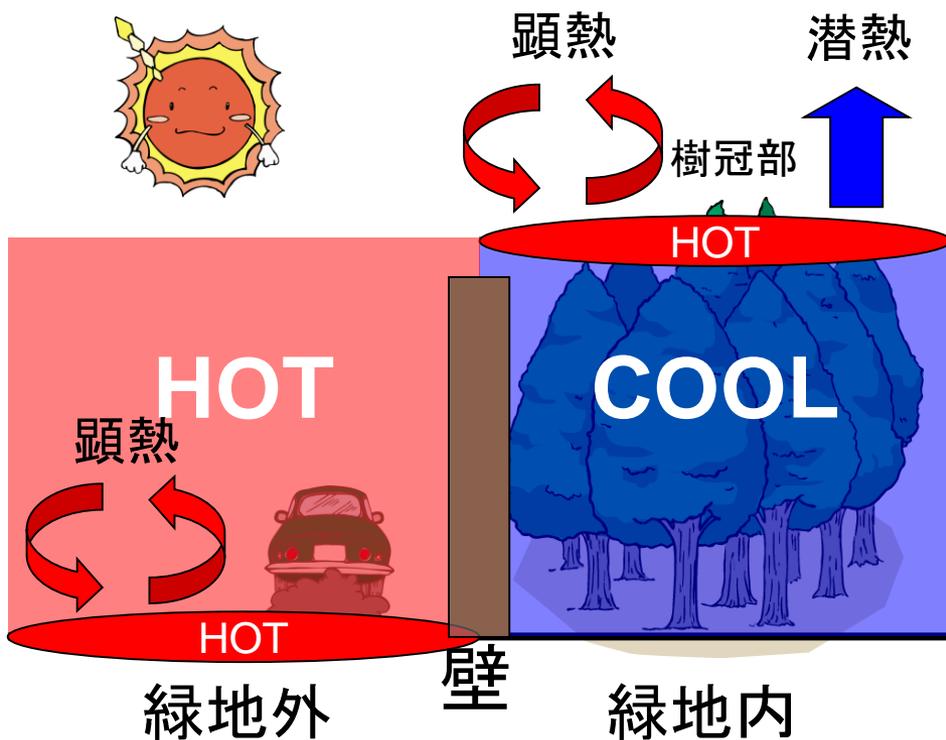


冷源・熱源をつなぐ道路・広場で熱交換されているような挙動を示している。それ以外の箇所での変化は小さいことから熱交換は建物の高さを越えることはない。

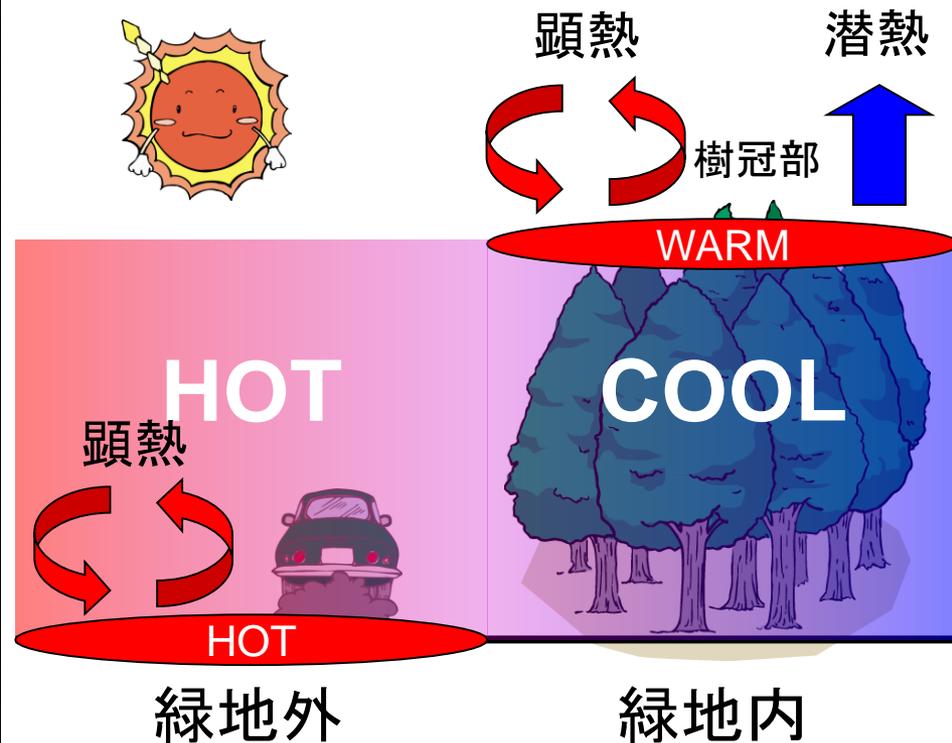
結論

第5章

気温差最大5°C

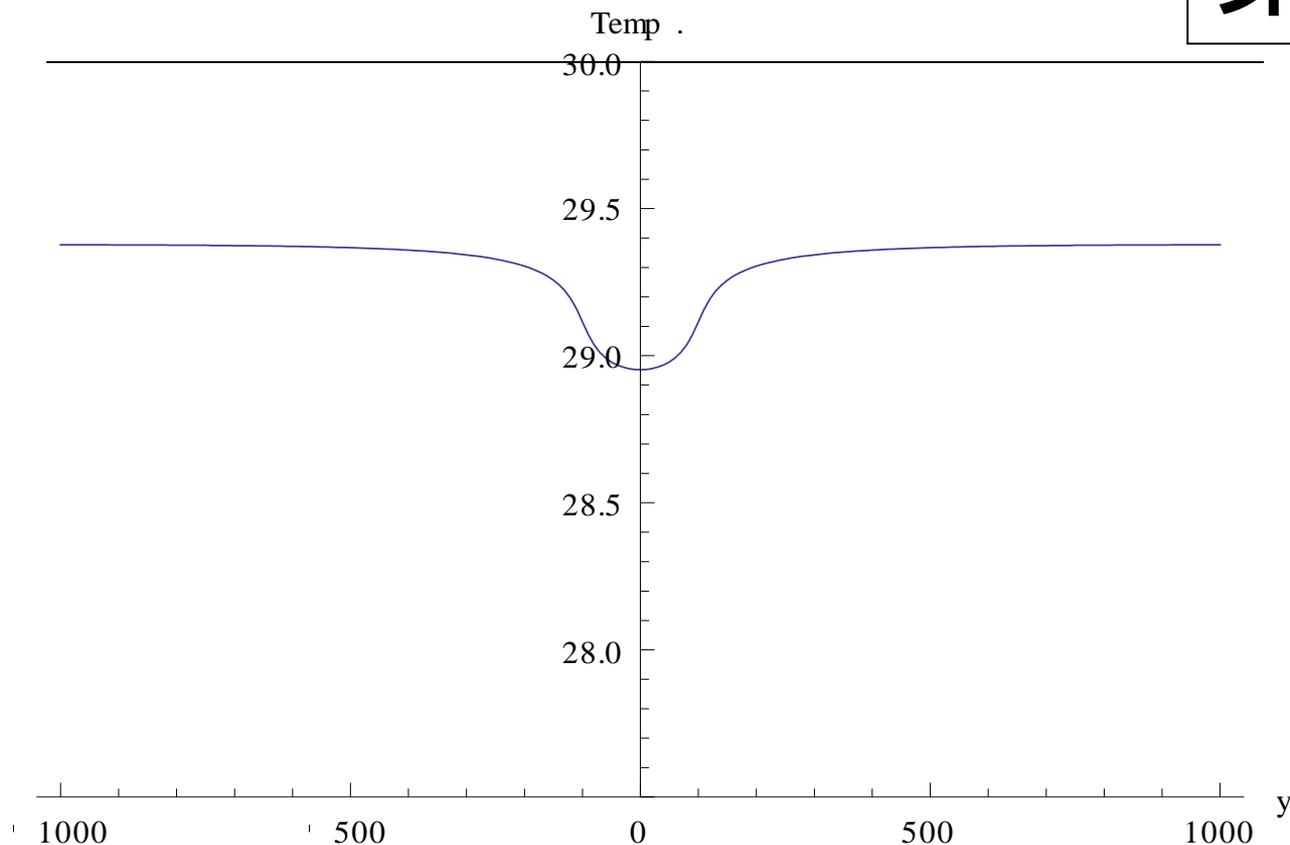


小石川後樂園
緑地内に冷気が閉じ込められるタイプ



新宿御苑
緑地周辺に冷気がにじみ出すタイプ

at x' , 41 000, Temp.



河川(x軸)から冷気がy方向への拡散することで周辺大気を冷却している. 定常状態では大気全体の初期条件である気温30°Cにならない. 河川からは常に冷気が滲み出していることがわかる. この冷源を有効活用することが今後の都市計画において重要であると考えられる. これはポイントソースの冷源に関してもいえる.

【都市計画への提案】

- (1) 蒸発実験, 打ち水実験より水辺の確保による熱環境緩和作用を示した. しかしその水辺は決して大きいものではなく, 小スケールの蒸発面であればよいので数多く点在させることで効果が現れる.
- (2) 荒川の観測, 数値計算より大・小関わらず河川・水辺があることで冷気を周辺へ移流・拡散する傾向を捉えた. 蒸発面が大きく, 無限大に冷却効果があるような荒川からの冷気の移流・拡散を促進するため, 風の道と呼び込む都市計画が必要である.
- (3) 目黒川・小石川後楽園の観測より建物や壁(小石川後楽園は3m程度)が存在することで冷気の移動をコントロールすることが可能であることを示した. 冷源を周辺にばら撒くより一箇所に集中させるべきであれば有効な手段である. (例えばグリーンロードの形成に有効)