

河川空間を活用したドローン物流を 実現するために必要な空間情報の検討

加藤拓磨¹・國谷岳²・手計太一³・向山公人⁴・近藤建斗⁵

Takuma KATO, Takeshi KUNITANI, Taichi TEBAKARI, Kimihito MUKOUYAMA
and Kento KONDO

¹正会員 博士(工) 中野区議会議員(〒164-8501 東京都中野区中野4丁目8-1)

E-mail: mail@kato-takuma.com

²学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻(〒112-8551 文京区春日一丁目13-27)

E-mail: a19.brft@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 博士(工) 中央大学教授 理工学部都市環境学科(〒112-8551 文京区春日一丁目13-27)

⁴正会員 修士(工) 東京都建設局第三建設事務所(〒164-8501 東京都中野区中野4丁目8-1)

⁵非会員 修士(工) 国際航業(株)先端技術事業開発部(〒169-0074 東京都新宿区北新宿2丁目21-1 14F)

令和4年12月より改正航空法が施行され、都市部でのドローンの目視外飛行、いわゆる「レベル4飛行」が可能となった。しかし第三者の土地の上空を無許可で飛行できず、許可を得た場合にも地域住民の社会受容性が求められるため、都市部でのドローン物流の実現には、リスクが少ない河川空間を活用すべきと考える。一方、ドローン物流を行うには、自動・自律飛行が必須条件となるため、空間情報が必要となる。本稿では実証実験においてドローンで撮影した画像から生成された3次元点群データと、河川に関する各種空間情報の比較を行った。3次元点群データは他の空間情報よりも有用であることが示された。

Key Words: drone, drone way, river, disclosing data, distribution

1. はじめに

2022年12月5日、ドローン、ラジコン機、農薬散布用ヘリコプター等を含めた無人航空機の改正航空法が施行された^{注1)}。これにより機体認証、無人航空操縦車技能証明、運航に係るルールが整備され、「有人地帯の目視外飛行」(レベル4)が可能となった。また「無人地帯での目視外飛行」(レベル3)は、必要な認証があれば、個別の許可承認なく飛行できるようになった。

有人地帯とは総務省統計局が定める人口集中地区(DID=Densely Inhabited Districts)としており、原則として人口密度が1km²当たり4,000人以上の基本単位区等が市区町村の境界内で互いに隣接していることなどと定義されている^{注2)}。目視外飛行とは操縦者の視界内にドローンが存在しない状態で操縦、つまりドローン搭載のカメラ映像を見ながら操縦することを意味する。

法律が改正され、無人地帯である海上、山岳部においては様々な試みが積極的に行われているが、第三者の土

地の上空でドローンを飛行させる場合、土地所有者の同意・承諾が必要であるため、ドローンが都市上空を航行することは非常に困難である。

また都心部では様々な電波の放出、ビル風などの障害がある上、ドローンに対する社会受容性が低いため、状況によっては警察に通報される可能性があることなどを前提に実証実験を進める必要がある。

そこで著者らは中野サンプラザ等でドローンを活用した建物点検の実証実験を行った。二村らは同実験で建物の屋上及び地上の2点に強度のあるワイヤラインを張り、そのライン上にドローンを係留する装置を使用した¹⁾。この装置はドローンの逸脱を防止し、離着陸位置上にドローンが墜落するため危険箇所を特定できる特徴があり、極めて安全にドローンを活用した建物の外壁の撮影を可能とした。この手法は建築基準法12条点検に準拠し、2023年1月より「ドローン建築物調査安全飛行技能者コース」として座学、実技の3日間の講習で技術の習得が可能となり、科学技術の社会実装の一端を担った。

都市部におけるドローンの活動範囲の拡大が適うとすれば、運送事業としての物流を実現できる。そこで、著者らは都市部におけるドローン飛行の空路のさらなる拡大を目的に、ドローン飛行における様々なリスクを低減できる河川空間の活用を検討している。国土交通省においても 2022 年度に河川上空を飛行ルートとして活用する際のルールづくりの必要性や支援策等の検討に向けて「河川上空を活用したドローン物流の更なる活性化に向けた実証実験」を実施した。全国 18 箇所、22 団体が参加し、現地実証、意見交換会が実施され、国土交通省においてマニュアル作成・支援策等へ反映がなされている^{注3)}。著者らも中央大学・東京都・中野区・国際航業株式会社で TOKYO ドローンウェイ研究会を発足し、同実証実験に参画した。同研究会ではドローンに対する社会受容性の低さを鑑みて、ドローンの飛行は現状として河道内、橋桁より下をルートとする検証を進めている。

数多くの団体がドローン物流の実現に向けて実証実験を行っている。国土交通省は 2023 年 3 月にドローンを活用した荷物等配送に関するガイドライン Ver.4.0 を公表し、国内事例を整理している^{注4)}。イベントとしての事業、過疎地における実験、災害時における運用などが行われているが、都市部における運送事業をターゲットとした事例は見当たらない。

また兵頭らは、加古川・揖保川をモデルケースとして、河川 CIM を活用した河道変化や樹木群等の河道の状態の把握及び分析・評価手法の検討などを示している²⁾。河川管理を意図したものではあるが、ドローンの飛行が安全に行えるか定期的に植生の変化、不法投棄、工事などの状態把握する考え方は重要である。

堺らは、ドローンを用いた河道の計測における点密度に着目し、対地高度 400 m 以上である ALB（航空レーザ）で点密度は数点/m²、対地高度 40m としたグリーンレーザ搭載の UAV で点密度 200 点/m²以上の点群が得られ、高度と点密度の関係を示した³⁾。狭小部が多く存在する都市河川における低高度でのドローン飛行の実現のためには、河道形状の精緻な空間情報を必要としている。

ドローンによる物流の実現に向けては多くの課題があるため、本稿では河川空間、特に都市河川における飛行ルート確立のために必要な諸条件を整理し、検証した。

2. 河川におけるドローン物流に資する情報

(1) ドローン物流に関する空間情報

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が行ったドローン運航のビジネスの検証では、前提として自動・自律飛行するドローンを使用し、一人のオペレーターが 5 台のドローンの運行管理をする

こととし、オペレーターの時給 2000 円、配送サービス単価 700 円と設定することでサービスを持続的に継続できる収支構造との試算である^{注5)}。ドローン物流で利益を生むには自動・自律飛行が必須条件となり、そのためには空間情報を整備する必要がある。

ドローン用地理空間情報に関する国際規格に関しては、2021 年 9 月、ゼンリン、日本気象協会、三菱総合研究所が提案を進めていたドローン用地理空間情報に関する国際規格「ISO 23629-7:2021 UAS traffic management (UTM) - Part7:Data model for spatial data」が、国際標準化機構（ISO）より発行された。これは地理空間情報データモデルを (1)地形や離着陸エリアなどを示す「地図情報」、(2)ドローン飛行において障害物となる建物や鉄塔などの「障害物情報」、(3)飛行禁止エリアやドローンの飛行ルートなどを示す「仮想データ」、(4)気象情報や他の航空機の位置など時間的に変化する「動的データ」の 4 階層で構成するものである^{注6)}。

ドローンの運用コンセプト（ConOps：Concept of Operation）づくりの国際的な取り組みとして、米国の FAA（Federal Aviation Administration）が発行する UTM（Unmanned Aircraft System Traffic Management System）、欧州の CORUS プロジェクト（Concept of Operations for European UTM Systems）が発行する U-space がある^{注7)}。それぞれルールが異なるものの、双方とも空域を高さ方向、時間を含めセグメント化した 4 次元ブロックを作成し、オペレーションが重複する可能性を減少させることを検討しており、3次元の空間情報は必要不可欠である。

経済産業省では空間情報の管理と空間定義に関する統一的な基準、システム・データを繋ぐ汎用的な連携基盤が存在しないことが現状の課題と認識しており、人・機械が認識可能な 3次元グリッドを整備し、様々な地理空間情報やベースレジストリを仮想空間上に付与された一意の識別子（ID）と紐付け、相互に参照可能とするシステムの整備を検討している^{注8)}。河川に関する空間情報は標高と河川のラインデータを検討するに留まっている。全国を網羅する標高データとしては国土地理院の数値標高モデル 5mDEM が最高の解像度であり、ラインデータは河川基盤地図、数値地図、河川管内図等から判読される 1/25000 レベルの河川データ等から取得された国土数値情報河川データが想定され、それら河川基盤地図等の原典資料と比較し、水平位置 17.5m を超える誤差をエラーとしている。河川の規模、特に都市河川においては許容できない誤差を含んでいる^{注9)}。

(2) ドローンの位置情報に関する技術

ドローンの位置を測定する代表的な方法として、GPS（Global Positioning System）方式、RTK（Real Time Kinematic）方式が挙げられる。一般的に GPS の水平誤差は最

表-1 各データの仕様

データ名	整備主体	整備範囲	解像度	許容誤差	空間的な連続性	上空の横断構造物の考慮
基盤地図情報 DEM5A	国土地理院	全国の都市域 河川流域等	約5m四方	(標高) 0.3m以内 ※航空レーザ測量の計測点 の水平位置: 標準偏差1.0m 以内	△	△
国土数値情報 河川ライン	国土交通省	河川法における河川	~100m程度の間隔の ポイントデータ	(水平位置) 17.5m以内	△	×
定期横断測量 データ	国土交通省 各自治体	一級河川の国直轄区間 都道府県直轄区間の一部等	標準200m間隔の測線	(標高) 平地: $2\text{cm} + 5\text{cm}\sqrt{L/100}$ 山地: $2\text{cm} + 5\text{cm}\sqrt{L/100}$ 水部: ±15cm	×	×
3次元点群 データ	各事業者 河川管理者	非公開データを含む、 一部の範囲	任意の解像度	高精度 (成果物による)	○	○
航空写真 ※オルソ画像	国土地理院	全国の都市域ほか	地上画素寸法20cm	(水平位置) 1.0m以内	—	—

大 10m程度, RTK は数cmといわれている. 本研究で使用したドローンはGPS搭載機であるが, 2か所の発着場所において RTK にて補正を行うことで, 分析時の誤差を低減させることができる.

3. 研究の方法

著者らは河川空間でドローンの飛行が可能な河道を「ドローンウェイ」と定義し, 荒川水系の神田川と日本橋川, 鶴見川水系の鶴見川と早淵川, 神通川水系の神通川を対象河川とし, 国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル 5mDEM および横断測量データ等のデータから対象箇所がドローンウェイであるか否かを簡便に判定する手法の検討を行ってきた⁴⁾. 本稿では都市河川である神田川(中野区弥生町付近, 杉並区久我山付近)を主な対象とした. 本稿で使用するデータを表-1 に示す. 上記のデータに加え, 国土数値情報河川データ, ドローン空撮により生成された河川3次元データ活用, 航空写真を比較することで, 各データがドローンウェイの空間情報として, 利用が可能であるか検証をする.

(1) 使用するデータ

a) 国土地理院 基盤地図情報 DEM5A

国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル 5mDEM を入力値とし, 河川ドローンウェイを推定するアルゴリズムを作成した. 方法としては, 標高データから河川堤防の天端, もしくは河川沿いの道路を検出し, 河川形状を推定し, 河道断面幅と河道深さを算定する. 水平位置がメッシュの規格で指定されているため, 座標値に誤差はない. ただし, 基となる航空レーザ測量で得られる計測点の水平位置精度は, 標準偏差で 1.0m 以内であり, また標高精度においても 0.3m であり, 本研究で取り扱う



図-1 3次元空間解析クラウドサービス「KKC-3D」取得データイメージ

データとして最も誤差が小さい.

b) 国土数値情報 河川ライン

上述の原典資料(河川基盤地図, 数値地図, 河川管内図等)から判読される 1/25000 レベルの河川データで, 河川中心線の「流路」の接続状況を明示的に示す端点について, 位置(点), 標高値等を整備したものである. 水平誤差は最大 17.5m である.

c) 河川事務所管理 定期横断測量データ

東京都が作成・管理する横断測量データを用いた. 同データは断面形状と河口からの距離のみであり, 河道空間の端を示す点の水平方向の正確な座標は有していない. 流出解析が目的であるため, このようなデータ仕様になっていると考えられる.

d) 3次元点群データ

本研究では, 実施区間内の護岸, 橋などの施設を対象にドローンによる空中写真撮影を 2022 年 10 月 6 日, 東京都中野区弥生町 5 丁目(中野富士見町駅付近)神田川にて実施した. ドローンを河川中央, 河床から約 5m の高度を水平に飛行し, 得た空撮写真を国際航業株式会社の 3 次元空間解析クラウドサービス「KKC-3D」および 3 次元点群モデルビューアツールを用いて視覚化した(図-1). 空撮には米 Skydio 合同会社製のドローン

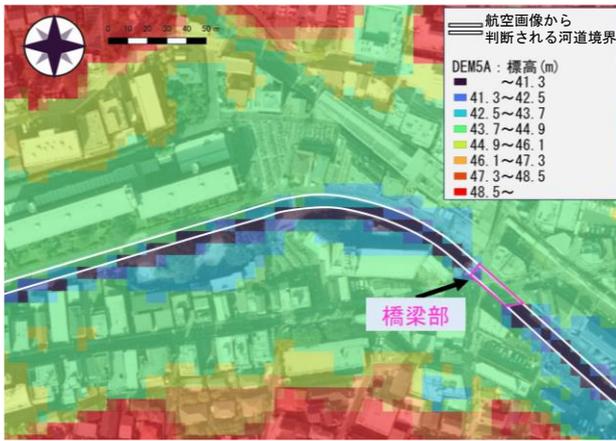


図-2 数値標高データと航空写真

「Skydio2」、3次元化は Structure from Motion (SfM) を使用した。点群データを整理し、平面図、河道断面データを生成した。水平誤差は RTK 補正により、他データよりも非常に小さいものと仮定する。

e) 航空写真データ

国土地理院の全国最新写真（シームレス）^{注10}を利用した。このデータは電子国土基本図（オルソ画像）^{注11}と米国航空宇宙局（NASA）/米国地質調査所（USGS）の地球観測衛星 Landsat-8、林野庁などのオルソ画像を組み合わせて地理空間情報として表示するものである。本研究の対象地域では地上画素寸法 20 cm の空中写真から作製されたオルソ画像が利用可能であり、その水平位置精度は 1.0m 以内である。

(2) データの比較

水平の精度は国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル 5mDEM が最も精度が高いため、これを基準として、データの比較を行う。河道断面形状においては、東京都の定期横断測量データが基準となる。ただし同データは断面形状と河口からの距離のみのデータであり、水平方向に対する精度は評価することはできない。

4. 各空間情報の水平誤差に関する検証

(1) 数値標高データ・航空写真の比較

図-2 は東京都杉並区久我山の神田川付近の数値標高データと航空写真を重ね合わせたものである。白い線は航空データから目視にて、河道部を示したものである。標高が低い部分と河道部が重なっていることから、航空写真の水平精度が一定程度担保されていることがわかる。

一方、図-2 における橋梁部の標高は他の河道部の標高よりも 3m 前後高い値を示しており、数値標高データからは、河道部すべてを捉えられないことが確認できる。また 1 メッシュサイズが 5m のデータでは、中小河川に

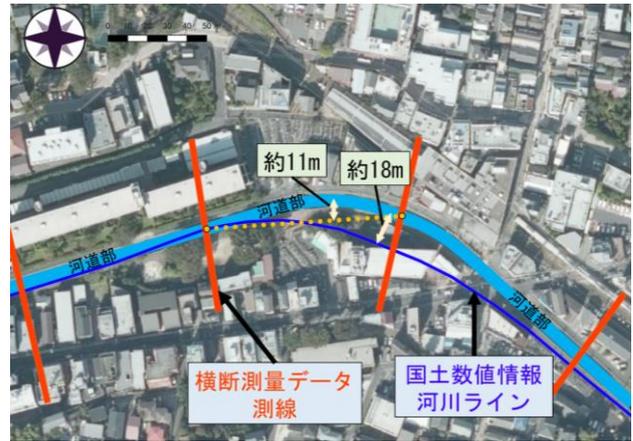


図-3 国土数値情報河川ラインと横断測量データ測線と航空写真



図-4 東京都江東区木場付近の国土数値情報河川ライン

対しては相対的に水平距離が大きいため、ラスタからベクタに変換する手法の構築は困難であると考えられる。

(2) 国土数値情報河川ライン・横断測量データ・航空写真の比較

図-3 は図-2 と同サイトの国土数値情報河川ラインと横断測量データ測線と航空写真を重ねたものである。図-2 で水平精度が高いことが示されている航空写真と国土数値情報河川ラインを比較すると最大で約 18m の差がみられ、国土数値情報河川ラインの精度の低さがわかる。また、オレンジの破線は河川を中心線と横断測量データ測線が交差する点をつないだものであるが、同線は河道部から最大 11m 程度の差があり、横断面データから 3次元の河道形状の再現が困難であることがわかる。また、参考として図-4 に東京都江東区木場付近の国土数値情報河川ラインを示す。実際は河道である箇所が河川ラインとして掲載されていない、また逆に河道ではない場所が河道ラインとして掲載されている箇所が確認される。これらより、ドローンウェイの推定に国土数値情報の河川ラインは本検証の結果からみられる範囲では不適切なデータであるといえる。

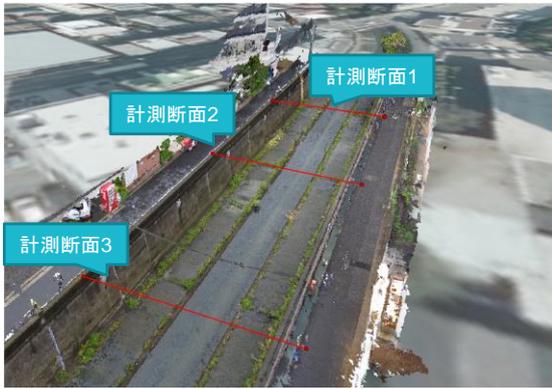


図-5 3次元点群データから生成した画像



図-6 3次元点群データと航空写真

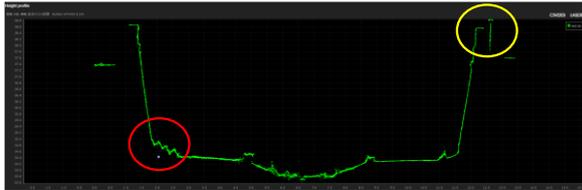


図-7 3次元点群データから生成した河道横断データ



写真-1 河道内に繁茂する植物



写真-2 河道の一部として認識される欄干

5. 河川断面データの比較

(1) 3次元点群データから生成した河道横断データ

図-5は3次元点群データから生成した、3次元ビューア画像である。画像上部の下流側から、3つの計測断面を設定した。

図-6は3次元点群データと航空写真を重ね合わせたものである。航空写真の水平精度は神田川においては比較的高いと考えられ、両データが重なることから3次元点群データの水平精度も高いと考えられる。

図-7は3次元点群データから作成した図-5における計測断面2の河道横断データである。ここで図-7左下の赤丸で囲んだ部分が不連続である理由は写真-1に示した植物が繁茂している影響である。図-7右上の黄丸で囲んだ部分のデータ欠損は写真-2に示すように欄干があり、ドローンの空撮では撮影できない角度が存在するためである。しかし河川形状、状況などを把握するために有効な手段であるといえる。

(2) 3次元点群データと定期横断測量データ

図-8は3次元点群データから生成した河道横断データと東京都の定期横断測量データを重ね合わせたものである。ただし定期横断測量データは形状データとしては真値といえるが、水平方向の座標を有しておらず、単純に重ね合わせることができないため、両データとも堤防を基準に中心を揃え、プロットを重ね合わせた。図-7で示す通り、3次元点群データでは植物形状を捉え、また任意高度における川幅の差は約0.2mであり、3次元点群データは空間情報として、十分に利用ができると考えられる。上述のように、定期横断測量データをそのまま3

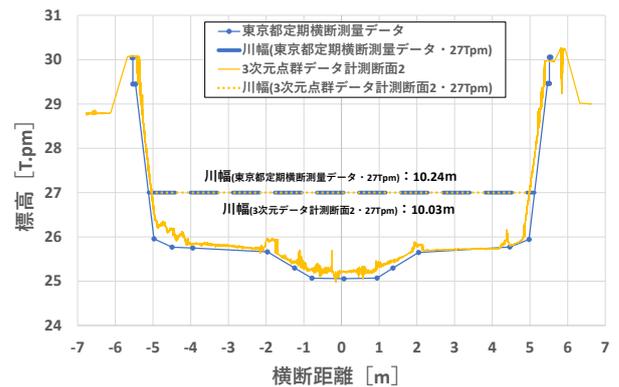


図-8 河川横断データの比較
(3次元データ・定期横断測量データ)

次元データに拡張することは困難であり、その他データと組み合わせる手法の検討が必要である。以上より、河道の形状を詳細に一度のフライトで計測できるドローン空撮写真を活用した3次元点群データは、他データと比較して有用であるといえる。

6. まとめ

都市部におけるドローン物流の実装のため、飛行ルートとしてリスクが少ない河川空間の活用が期待される。しかしドローン物流をビジネス的に成立させるためには、自動・自律飛行が必須条件となる。そこで自動・自律飛行の実現に必要な河川の空間情報について検証を行った。前掲の表-1 に検証結果をまとめた。基盤地図情報は水平誤差が小さいが、5m メッシュサイズであることから中小河川においては河川を表現しきれない。国土数値情報は著者が整理したところ、誤差が18m 程度生じる箇所があり、ドローン物流の空間情報として使用に適さないことがわかった。定期横断データは無論、断面データとしては有用であるが、平面的なデータ補完が困難である。3次元点群データの精度はドローンウェイの空間情報として有用であるが、計測するには多大な費用がかかる。しかし安全性の担保が取れれば、定期横断測量の費用よりも低コストにできる可能性があり、新たな河川管理方法としても期待ができる。

謝辞：本研究の実施にあたり、東京都から河川横断測量データを提供、中野区からはドローン空撮の許可を頂いた。ここに記して謝意を表する。

NOTES

- 注1) 国土交通省：「航空法等の一部を改正する法律の施行期日を定める政令」等を閣議決定、https://www.mlit.go.jp/report/press/kouku10_hh_000220.html (2023年5月30日閲覧)
- 注2) 総務省統計局：人口集中地区とは、<https://www.stat.go.jp/data/chiri/1-1.html> (2023年7月30日閲覧)。
- 注3) 国土交通省：全国18箇所河川上空を活用したドローン物流の実証実験を行います！、https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo04_hh_000193.html (2023年7月30日閲覧)
- 注4) 国土交通省：「ドローンを活用した荷物等配送に関するガイドライン Ver.4.0」を公表、https://www.mlit.go.jp/report/press/tokatsu01_hh_000675.html (2023年7月30日閲覧)
- 注5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究：運航管理システムを使ったドローン運航ビジネスの姿、ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト報告書, 2022.
- 注6) 経済産業省：ドローン用の地理空間情報に関する国際標準が発行されました、<https://www.meti.go.jp/press/2021/09/20210930001/20210930001.html> (2023年7月30日閲覧)
- 注7) 独立行政法人情報処理推進機構：ドローンの運用コンセプト (ConOps) に関する調査報告、https://www.ipa.go.jp/digital/architecture/project/autonomousmobilerobot/202211_1.html (2023年7月30日閲覧)

- 注8) 経済産業省、デジタルアーキテクチャ・デザインセンター：3次元空間情報基盤アーキテクチャ中間報告書、3次元空間情報基盤プロジェクト報告書, 2022.
- 注9) 国土交通省：国土数値情報、河川データ、<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W05.html> (2023年7月30日閲覧)。
- 注10) 国土地理院：地理院タイル、全国最新写真 (シームレス) <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2023年7月30日閲覧)。
- 注11) 国土地理院：デジタルオルソ作成の公共測量作業マニュアル、国土地理院技術資料 A・1-No.289.

REFERENCES

- 1) 兵藤誠, 高田彩乃, 高地敏幸, 渡邊健介: 河道の状態の分析・評価及び対策検討における3次元データの活用による効率化・高度化の提案, 河川技術論文集, 第28巻, pp.223-228, 2022. [HYODO, M., TAKATA, A., TAKACHI, T. and WATANABE, K.: Proposing an efficient and effective approach to analysis and evaluation of riverbed management by integrating 3-D data, *Advances in River Engineering*, JSCE, Vol.28, pp.223-228, 2022.]
- 2) 堺浩一, 間野耕司, 橘菊生, 西山哲: UAV グリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討, 河川技術論文集, 第27巻, pp.51-56, 2021. [SAKAI, K., MANO, K., TACHIBANA, K. and NISHIYAMA, S.: Investigation on river structure inspection by UAV green LiDAR, *Advances in River Engineering*, JSCE, Vol.27, pp.51-56, 2021.]
- 3) 二村 憲太郎, 宮内博之, 井戸田和也: ドローンを活用した高層建物の安全点検調査技術の開発~実建物近傍におけるドローンの挙動の観察と考察~, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1031-1032, 2020. [NIMURA, K., MIYAUCHI, H. and ITODA, K.: Development of safety inspection technology for high-rise buildings using drone -Observation and consideration of the behavior of unmanned aerial vehicles near buildings-, Summaries of technical papers of annual meeting, *Architectural Institute of Japan*, Materials and construction, pp.1031-1032, 2020]
- 4) 國谷岳, 手計太一, 加藤拓磨, 向山公人: オープンデータを利用した河川ドローンウェイデータの試作, 河川技術論文集, 第29巻, pp.19-24, 2023. [KUNITANI, T., TEBAKARI, T., KATO, T. and MUKOUYAMA, K.: Prototype of river drone way data using public disclosing data, *Advances in River Engineering*, JSCE, Vol.29, pp.19-24, 2023.]

(Received May 31, 2023)

(Accepted September 12, 2023)

EXAMINATION OF VARIOUS NECESSARY SPATIAL DATA FOR REALIZING DRONE LOGISTICS USING RIVER SPACE

Takuma KATO, Takeshi KUNITANI, Taichi TEBAKARI, Kimihito MUKOUYAMA
and Kento KONDO

In December 2022, the revised Civil Aeronautics Law came into effect, allowing so-called "Level 4 flights," which are flights that take place outside the visual line of sight of drones in urban areas. However, because unauthorized flights over third-party land are not permitted and social acceptance by residents is required even when permission is obtained, we believe that river space with minimal risk should be used to realize drone logistics in urban areas. On the other hand, since automatic and autonomous flight is a prerequisite for drone logistics, spatial information is necessary. This paper compares 3D point cloud data generated from images taken by drones in a demonstration experiment with various types of spatial information on rivers, and shows that 3D point cloud data is more useful than other types of spatial information.