

13. 河川 DX 実現のための陸上・水中ドローン技術の研究

Research on land and underwater drone technology for realizing river DX

○秋山菜乃香, 西山哲(岡山大学)

照屋市朗, 中原浩実(天野産業株式会社)

富井隆春(株式会社アミューズワンセルフ)

1. はじめに

図-1 は岡山県内の 1 級河川の勾配を日本および世界の河川と比較したものである。この図に示されるように、日本列島は標高 1000~3000m にもなる山脈によって太平洋側と日本海側に分けられており、平野や盆地に流れ込む河川は河口までの距離が短いことから、上流から下流への勾配が急であることが特徴である。そのため降雨時の比流量の時間変化の事例を示した図-2 から分かるように、急に増水し短時間のうちに洪水のピークになる。その一方で、地球規模の環境変化の影響により、時間雨量 50mm を超える短時間強雨や総雨量が数百 mm から数千 mm を超える大雨が多発しており、全国各地で毎年のように甚大な氾濫や堤防決壊による浸水被害が発生している。その他、線状降水帯のような豪雨をもたらす要因が増加する傾向を考慮すれば、膨大な延長距離にわたる堤防の健全性を綿密に点検することが、より一層重要になる。しかしながら現状の河川堤防の健全性は、出水期、台風期および出水後の徒歩による目視点検あるいは 200m ごとの定期縦断および横断測量の結果により判断されているのみである。線状構造物である河川堤防は、1 箇所でも破堤すると甚大な被害が発生する

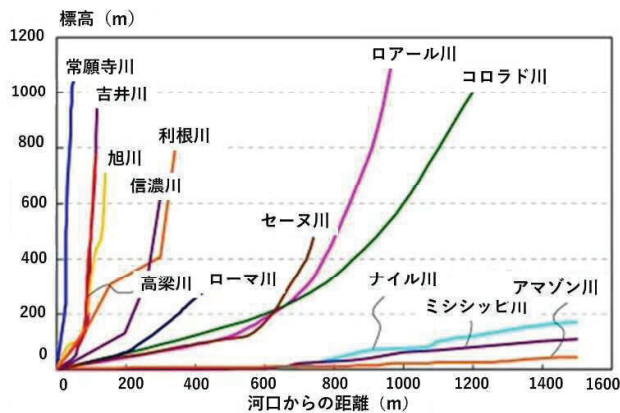


図-1 岡山県 1 級河川の比流量の時間変化の特徴

比流量：流出量を流域面積で除した値 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)

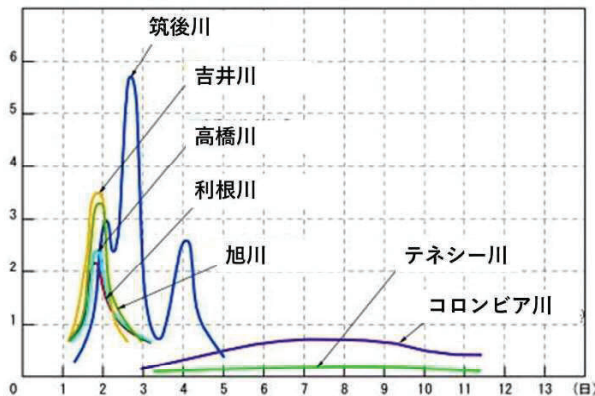


図-2 岡山県 1 級河川の勾配と他の河川の比較

が、技術者と予算の不足は深刻化しており、点検作業の詳細化や回数の増加を図ることは不可能である。さらに河川堤防は形状が一定になるように盛り土を繰り返して築堤されており、地質構造の詳細は分かっていないので、形状の変化で健全性を判断するしかない。また中国地方は急勾配の河川によって真砂土が頻繁に運び込まれるので、植生の繁茂状態を含めて、現況河道の詳細な断面積の照査を詳細に行う必要がある。ところが、主に実施されている目視点検では、経験に基づいた健全性の判断に頼っており、定量的なデータが無いために、必要な箇所を優先的に対策するための客観的な根拠に乏しいのが実情である。そこで近年では、河川の定期縦横断測量の業務などにおいて、航空レーザ測深(Airborne Laser Bathymetry: 以下 ALB と称する)に代表される ICT 機器によって取得される 3 次元レーザ点群の活用が検討されている。レーザ点群で得られる 3 次元

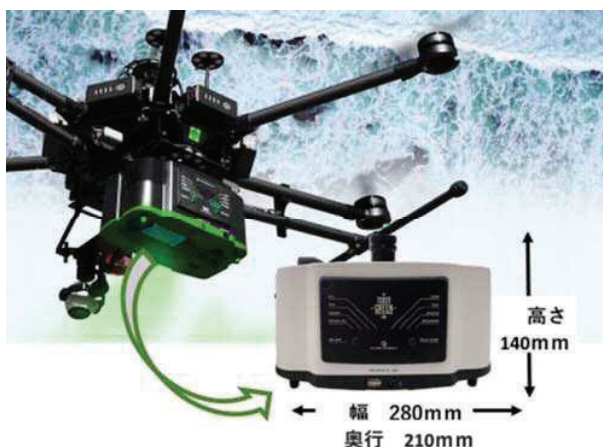


図-3 グリーンレーザドローン測量システムの概要

表-1 グリーンレーザスキャナの仕様

最長測定距離	≥10%	158m	≥60%	300m over
精度	≥10%	±15mm	≥60%	±5mm
レーザーパルスレート	60,000Hz/秒			
エコー切り替え	1st / Last / 1st&Last / 4echo			
スキャン速度	30走査/秒			
レーザー波長	532±1nm			
ビーム拡がり角	0.3mrad			
作動温度範囲	0~+40℃			
寿命	10,000時間			
重量	2.8kg(本体のみ/アンテナ除く)			

界となり、詳細な地形変化を捉えることが困難である。このような背景から、「革新的河川管理プロジェクト(国土交通省水管理・国土保全局)」が提案され、グリーンレーザ搭載の水陸両用ドローン測量システムが開発された。この測量システムは、図-3および表-1に示すように、水中を透過する波長 532nm のグリーンレーザスキャナを搭載し、150m 以下の対地高度から陸上と水中部の地形を 100 点/m² 以上の高密度で計測する。また航空機を用いる手法と異なり、誰でも飛行させることができるので、低コストの計測が可能である。このような特徴は DX を推進するものとして注目されており、局所的に詳細に調査・点検したい箇所への適用が期待されるが、前述の河川管理を効率化・高度化するとして期待されている①、②の項目に対して、次のような検討が必要な内容が残されている。

- 1) 水中下の地形を計測する際に河川の透明度はどの程度影響するのか、さらに陸部である堤防に対する縦断測量の精度はどのくらいなのか定量的に評価されていない。
- 2) 2 時期のレーザ点群から変状箇所を抽出するための手法が構築されていない

本論文は、これらの背景を鑑み、河川分野の DX を実現する手法と期待されているグリーンレーザドローン測量の課題の解決策を明らかにして、特性が発揮できる活用法の研究に取り組んだ成果を取りまとめ、考察した結果を報告する。

2. 河床および堤防の測量精度の検証結果

精度検証実験は岡山市内を流れる 1 級河川である旭川における 14.6-15.8km の約 1.2km 区間を対象として、2020 年 3 月と 2020 年 10 月の 2 時期に実施した。計測時の対地高度は 50m であり、サイドラップを 75%、そして飛行速度は 2.5m/s とした。現場には、データを補正す

データは、地形を連続的な「面」として可視化できるので、詳細な点検・調査が実現する。この利点を含めて、ICT 機器による 3 次元データの活用は、次のような河川管理の効率化・高度化を図ることが出来る。

- ①長大な河川管理延長に対して、縦横断測量の工程を短縮し、費用を低減できる。
- ②2 時期の計測データから、地形や樹木等の面的な変化を把握することができる。

特に前述の ALB では、陸部には近赤外レーザを用い、水中部には水を透過するグリーンレーザを用いることで水面下の地形が計測できるので、従来の定期縦横断の代替となる手法として期待されている。しかしながら、航空機による計測は、300m 以上の対地高度からの計測となり、陸上で約 16 点/m²、水中部で 1 点/m² 程度のレーザ点群密度しか得られない。しかもグリーンレーザのスポット径は 1m 程度になるので、標高の測量精度は 0.2m 程度が限

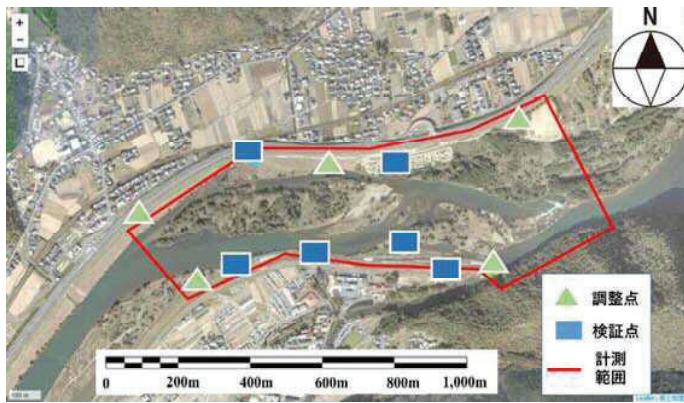


図-4 計測対象範囲及び調整点と検証点の配置

表-2 精度検証結果

単位mm	X	Y	Z
平均	8	-6	8
標準偏差	29	14	29

安定して高精度の測量結果が得るための手法として、図に示す調整点の利用を試行した。表-2に測量精度の検証結果を示す。表おけるXとYは水平方向、Zは標高方向を表す。表の値は、10月に実施した計測結果であり、6点の検証点に対するグリーンレーザ搭載ドローンとTSの座標値の差の平均および標準偏差である。「河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)」において、越水危険箇所抽出のための堤防高の計測には50mmの計測精度が必要とされている。2月に実施した精度も同様であり、グリーンレーザドローン測量の精度は、調整点を用いないと約40mmの系統誤差が含まれるが、任意の調整点を使うことで、所望の精度が確保できることが実証できた。2時期ともにRMSEが、平面で50mm以下、標高で30mm以下であった。このように、グリーンレーザ点群が堤防点検の要求に応えるための計測法を構築することができた。

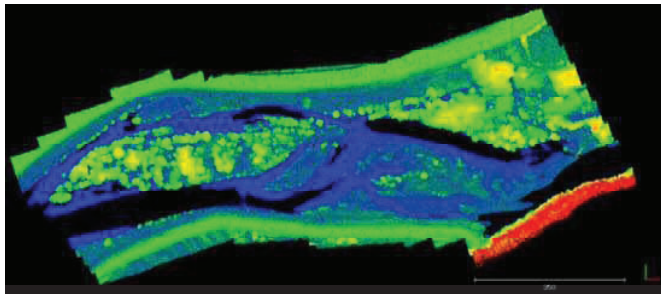


図-5 河道を3次元で再現した結果

るための調整点を5点、さらに測量精度を検証するための検証点を6点設置し、検証点をトータルステーション(TS)によって測量した結果と比較することで精度検証を行った。図-4に実験現場の概況を示す。

図中の赤色の実線はドローンの飛行コースである。ドローンはGNSSで自己位置を求めながら、レーザを照射した地点の3次元座標を求め

る。この自己位置は、電子基準点を用いるRTK-GNSS測位を使うが、そのためにGNSSの配置や設置位置を含めた電波の受信環境に影響される誤差が発生する。そこで、

次に計測範囲を復元した結果を図-5に、河道の横断面図を図-6に示す。図-6には比較のためにALB計測結果も示す。同じ場所に適用したALBのレーザ点群間隔が約0.7mであったが、ドローン測量では約0.1mであり、高密度の点群により、河床の詳細な地形

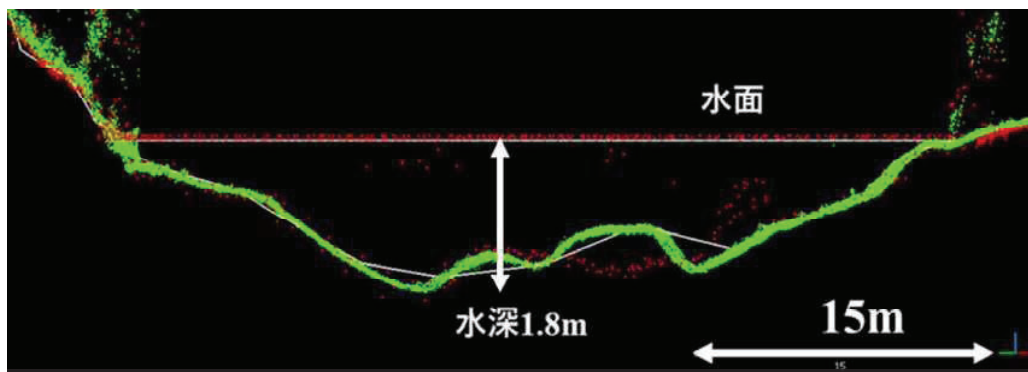


図-6 河道横断面の計測例：実線はグリーンレーザ測量、点線はALB計測の結果

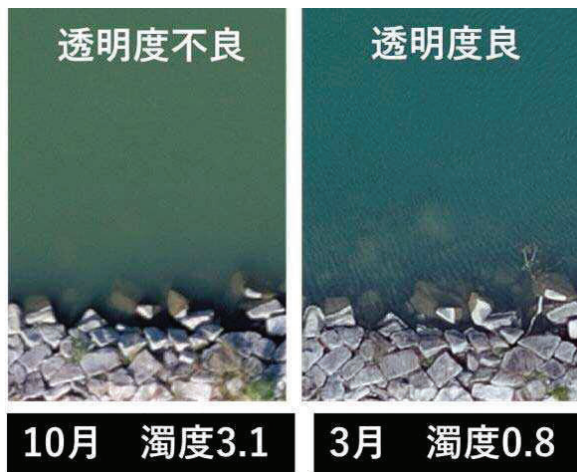


図-7 河川の透明度を濁度で定量化した結果

図-7 河川の透明度を濁度で定量化した結果
1.0 以下となる時期に、水深 2.0m 以下の測量に適用する手法を中心に活用法を考えていく方針をまとめることができた。

3. 2 時期のデータから変状箇所を抽出する技術の開発

ここでは、異なる 2 時期のレーザ計測データから変状発生箇所を抽出する技術を開発した成果を報告する。グリーンレーザドローン測量によって、高密度のレーザ点群で計測対象区間の地形が、図-8 のように詳細に再現される。一方で、ドローン測量データは約 500 点/m² のビッグデータになり、図-8 に示す区間でも約 2500 万点から構成される。延長の長い管理区間では数十万点以上の点群にもなり、その中から、どこに変状が発生しているのかを簡便に検知できるデータ処理技術がなければ、詳細な地形を再現しても計測結果を有効に活用できない。そこで本研究では、自動運転車の分野で物体検知用として利用される ICP(Iterative Closest Points)を応用したレーザ点群解析を開発し、その有用性を検証する。

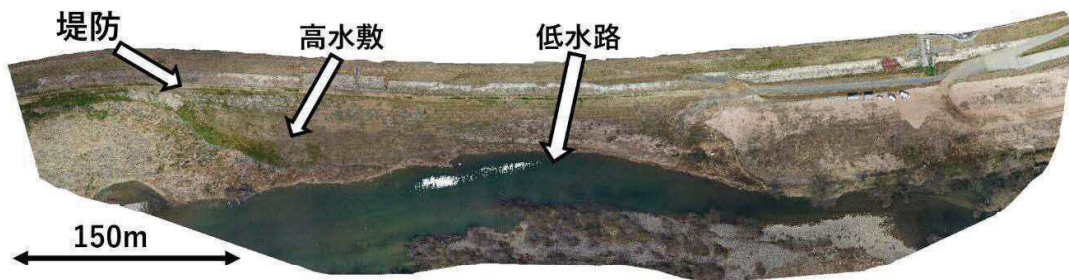


図-8 堤防、高水敷および低水路の詳細な地形を 3 次元で再現した例

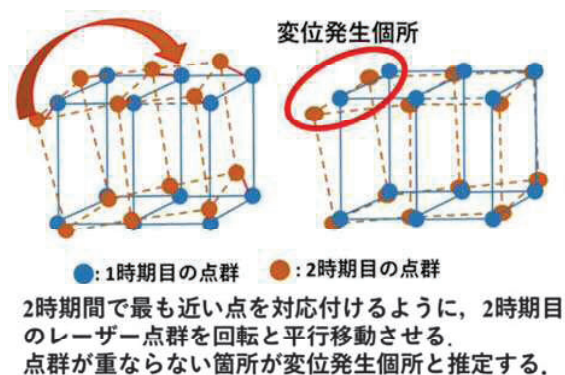


図-9 ICP によるデータ処理の概念

の再現が可能であることが分かる。ただし図-5 において、河道内の黒色部はレーザ点群が取得できなかった処であり、水深が約 2.0m 以上の箇所である。図は 3 月での測量結果であり、現地で計測した透明度は FTU 濁度で 0.8 であった。そこで年間を通して同一箇所を計測することで、河床を可視化することができる状態と河川の透明度の関係を求めた、例えば、図-7 に示す濁度 3.2 の状態では、1.0m 以上の水深の地形測量は困難であった。これらの結果より、FTU 濁度

ICP は図-9 に示すように、1 時期目のレーザ点群からなる図形に、2 時期目のレーザ点群から作った図形を重ね合わせる技術である。最終的に重ね合わせができなかった箇所が存在した場合は、その箇所に変状が発生したことによると推定する。点群データから TIN モデルなどを作成することなく、2 時期のデータを直接重ね合わせる処理なので、リアルタイムの解析が可能である。

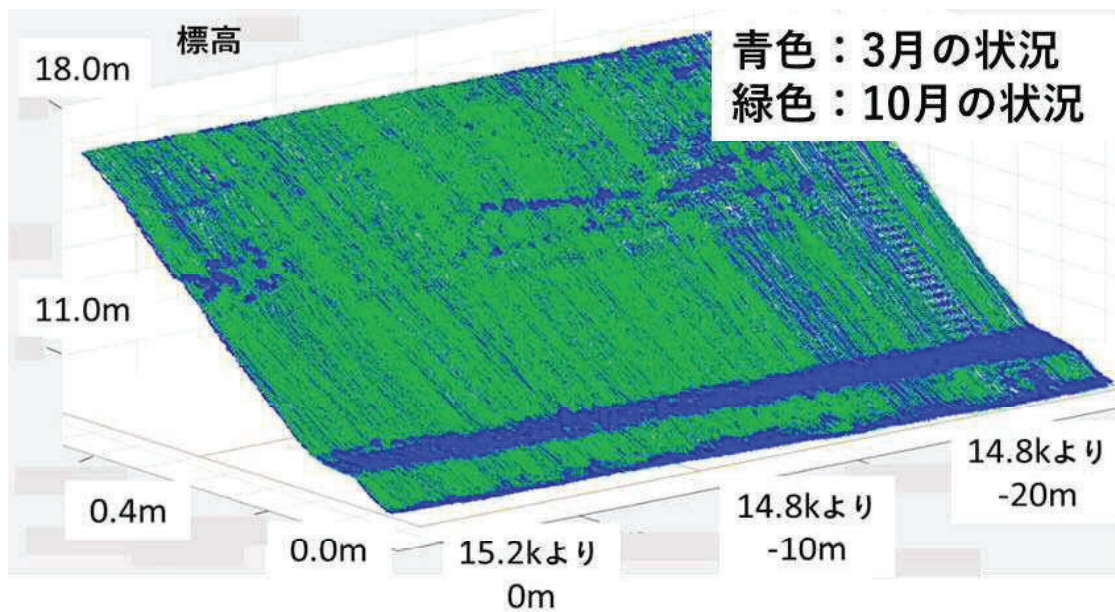


図-10 2 時期の堤防法面計測結果を重ねて表示した例

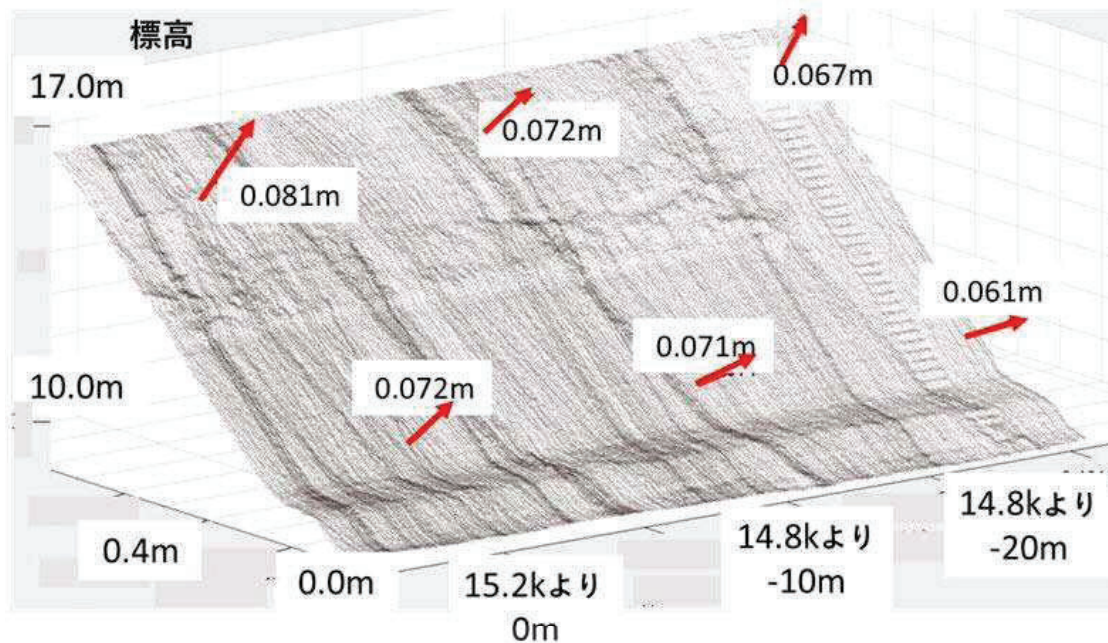


図-11 ICP 解析を応用した手法を使って堤防法面の座標の変化を可視化した結果

図-10 は 2 時期のレーザ点群を、色彩を変えて重ねて可視化したものである。レーザ点群を重ねて表示しても、断面形状を比較しないと点群の座標値が変化したのかどうかの評価ができない。一方、図-11 は ICP 解析を応用したデータ処理の結果の一例である、図は、堤防法面を 10m メッシュに区分けして、各メッシュ内に現れた変状の平均値をベクトルで表したものである。法面には 10m メッシュの平均で約 60~80 mm の変状が現れていた。これは図-12 に示す法面堤防の植生の状況の変化を捉えたものである。3 月に計測したデータを 1 時期目にし、10 月に計測したデータを 2 時期にして重ね合わせたので、植生の丈の変化が検知され、ベクトルとして大きさと同時に変化が現れた方向を表示する。なおフィルタリングで植生を取り除く処理を加えることで、地表面自体の変化を捉えることが可能である。このように微少な座標値の変化も、ビッグデータから人的労力を要することなく抽出する手法が構築でき

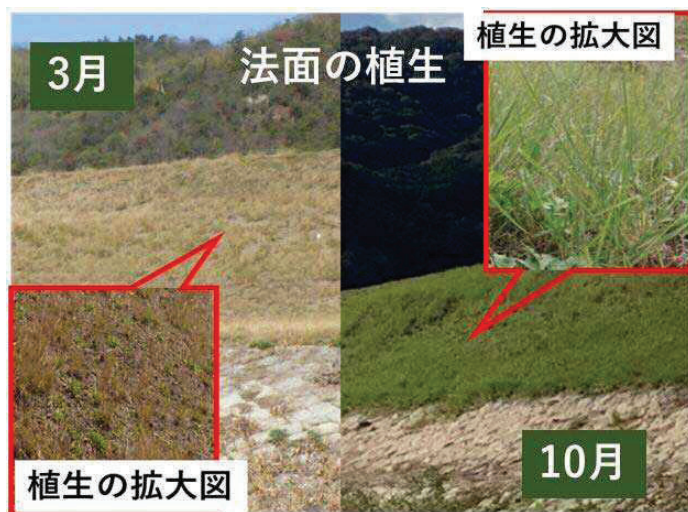


図-12 2 時期の堤防法面の植生の状況

た. なお図-12 は, 計測した時期の実際の植生の状況である. 2 時期の植生の丈の相違は, 約 60~80 mm であり, 図-11 の結果の妥当性を示すものである. 開発したデータ処理の基盤となる ICP は, オープンソースとして公開されていることから入手が容易な汎用アルゴリズムであり, ドローン測量と組み合わせる有用性が本研究により実証された.

4. 結 言

水中を透過するグリーンレーザスキャナを搭載し, 陸上と水中部の地形を高密度で計測するドローン測量を用いることで, 誰でも実施できる高効率かつ高精度の河川堤防と河床の計測が可能である. しかしながら実用化のためには, 次の項目の研究結果が必要であった.

- 1) 水中下の地形を計測する際に河川の透明度はどの程度影響するのか, さらに陸部である堤防に対する縦断測量の精度はどのくらいなのか定量的に評価されていない.
- 2) 2 時期のレーザ点群から変状箇所を抽出するための手法が構築されていない.

本論文は, これらの課題の解決策を明らかにして, 特性が発揮できる活用法の研究に取り組み, 次の成果を得た.

- 1) FTU 濁度により水中透過能力を把握でき, 約 2.0m より浅い箇所の水中の地形の測量に適用するのが有効である. また堤防の越水危険箇所の検出に要求される 50 mm の精度を有する測量は, 調整点の使用により実施できる. このように迅速かつ簡便で低コストな計測法の特徴を活用するための測量ノウハウを蓄積できた.
- 2) グリーンレーザドローン測量のデータは, ビッグデータになるため, 複数の時期の測量データから変状発生箇所を抽出する処理に人的労力を要し, 測量手法の利点が発揮できない課題があったが, 本研究で開発した 2 時期のレーザ点群を重ね合わせる手法は, リアルタイムに変状発生箇所を検知できることが実証された.

以上, 陸上・水中ドローンの使用法および解析手法の研究成果を報告した. 本成果は, ドローン測量を活用する河川管理分野の DX の推進に貢献すると考える.

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保安局 河川環境課:堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領, pp1-5, 2019.
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 河川保全企画室:河川管理用三次元データ活用マニュアル(案), 2020.
- 3) 堺浩一, 間野耕司, 橘菊生, 西山哲:グリーンレーザドローンの計測精度と計測特性の把握に関する研究, 応用測量論文集, Vol.31, pp.99-110, 2020.