

UAVグリーンレーザ計測の河川工事への適用性検証報告

澤城光二郎^{*1}・黒台昌弘^{*1}

グリーンレーザ計測は、水中を透過する緑色の波長帯のレーザ光を用いることで、河川湖沼などの水域と地表部の陸域を同時に効率よく点群計測することが可能な計測技術である。現在はALBによる河川測量などにおいて特に活用が進んでいる。一方で、建設工事の現場における導入事例が少なく、本技術が効果的に活用できる工種の選定や現場での計測ノウハウの蓄積が十分ではない。本稿ではUAVグリーンレーザで計測した水域と陸域の統合データを建設工事の現場で利用していくために、それぞれの領域において、起工測量や出来形計測に関する計測可能条件や計測精度を明らかにする精度検証を行い、建設工事の起工測量についての適用性を確認した。

キーワード：UAVグリーンレーザ、i-Construction、水域計測、点群データ

1. はじめに

近年、我が国では異常気象の影響などにより集中豪雨による災害が多数発生している¹⁾。このような災害を軽減するためには、災害時や定期計測時に河川の状態を効率的かつ迅速に計測し、河川管理の高度化を図る必要がある。

国土交通省が進めているi-Constructionの取り組みでは、3次元計測技術による高精度で高効率な施工管理の実現を目的に、地上レーザスキャナ(TLS; Terrestrial Laser Scanner)やモバイルマッピングシステム(MMS; Mobile Mapping System)、UAVレーザ(UVS; UAV Laser Scanning)が出来形管理要領²⁾として公開され、土工事の起工測量や出来形計測など多くの工事測量での活用が進められている。

しかし、これらのレーザスキャナは近赤外線のレーザ光を使用している特性上、水中の地形を計測することができない。その結果、河川・湖沼など水域に近接する工事での地形測量には対応ができず、水際部でのトータルステーション(TS; Total Station)測量や人が立ち入れない水深では深浅測量を併用することが多い。この手間を解消するために、1台の計測機器で水域と陸域の双方に対応できる計測技術が求められている。

そこで筆者らは、水中を透過する緑色の波長帯のレーザ光を使用し、土砂やコンクリートなどで被覆される陸域と河床や水溜まりといった水域を連続的かつ面的に計測できるグリーンレーザ計測に着目した。

このグリーンレーザ計測については、公共測量分野において、ヘリコプターや航空機にグリーンレーザを搭載する航空レーザ測深(ALB; Airborne LiDAR Bathymetry)の作業規定が「航空レーザ測深機を用いた公共測量マニュアル

(案)」³⁾により定められている。国土交通省では河道の状態把握のために、複数の河川において定期的な河川定期縦横断測量にALBを活用している⁴⁾。一方で、ALBは工事測量に適用するには計測精度が不十分であることや、狭い範囲の計測には適さないといった課題が存在する⁵⁾。

UAVを用いたグリーンレーザ計測(UAVグリーンレーザ計測)は、上記のような課題を解決し、限定された範囲内を高精度かつ効率的に計測できるものと期待されている。しかし、近年発展してきた技術であるために、作業規定が定まっておらず、既往の実績も十分でないのが現状である。

これらのことから、本稿ではALBおよびUAVグリーンレーザ計測の概要を整理し、工事測量におけるUAVグリーンレーザ計測の適用性を検証するために実施した実現場における精度検証実験について報告する。

2. グリーンレーザ計測の概説

前章で述べた各グリーンレーザ計測の利点と課題について整理する。

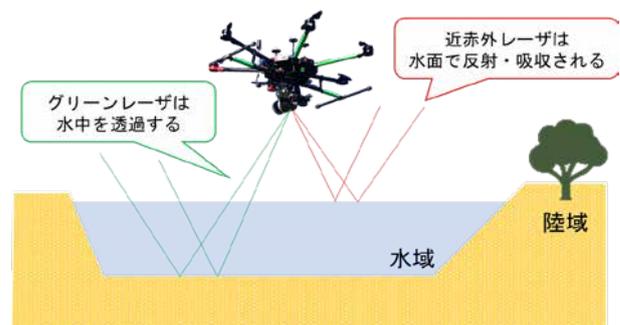


図-1 グリーンレーザ計測の概説

*1 先端・環境研究部

グリーンレーザ計測の原理は、図-1に示すように水中を透過する波長(532nm)である緑色のレーザ光を照射することで、河道や水溜まりなど水域の計測を可能とするものである。この際、GNSS(全球測位衛星システム; Global Navigation Satellite System)やIMU(慣性計測装置; Inertial Measurement Unit)から推定した機体の自己位置と姿勢をもとに、空気中から水中に入射する際の境界面で生じるレーザ光の屈折の影響も考慮した解析を行い、3次元座標を持った点群データを生成する⁶⁾。

ALBは対地高度400m~600m、速度およそ100km/hで計測することから、広範囲(1日当たり1km²~50km²)を短時間で計測できる利点がある反面、取得する点群データの密度が1m³当たり数点と非常に小さくなる。この点密度は、公共測量における河川定期縦横断測量を主目的とした地形測量の要求点密度は満たしている³⁾が、i-Constructionでの管理基準²⁾である起工測量(1点以上/0.25m²)や出来形計測(1点以上/0.01m²)を満足するのに十分ではない。

UAVグリーンレーザ計測は高度30m~150mを速度10km/h~20km/hで飛行して計測する。一般的なUAVレーザの航続可能時間は10分~20分程度であり、1日で計測可能な面積は0.5km²程度である。そのため、局所的な地形計測への適用が効果的であり、小回りがきくことから山間など複雑な地形の計測にも対応が可能である。また、ALBと比較すると1m²当たり100点以上の高密度な点群を取得できるため、i-Construction工事への適用はALBよりもUAVグリーンレーザ計測の方が適当であると言える。

UAVグリーンレーザ計測を工事現場で活用するための課題として、①計測可能な水深が水の濁りや水面の状態に依存すること、②建設現場での適用事例が少なく精度検証が不十分なことが挙げられる。このように、水域を計測できるという大きな特徴を持つ反面、計測をする上での課題や留意点があることから、グリーンレーザ計測を工事測量で運用するためには適切な計測条件の評価が不可欠であるといえる。

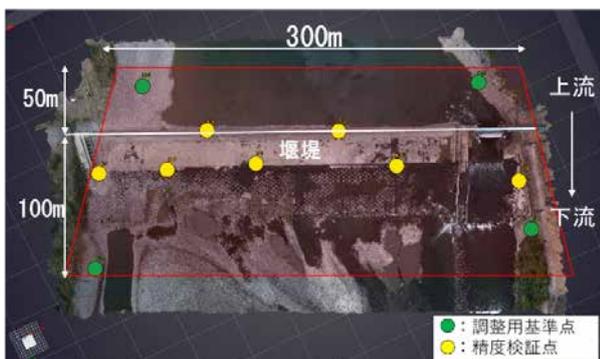


図-2 実験エリアと調整用基準点・検証点配置

3. 実験内容と使用機器

本検証では河川工事の現場を対象として、図-2に示す堰堤から上流側に50m、下流側に100mのエリアを検証範囲として設定した。このエリア内でUAVグリーンレーザ計測を3回実施するとともに、比較検証としてUAV近赤外レーザ計測を1回とVRS-GNSS(仮想基準点方式; Virtual Reference Station)による多点計測を合わせて行った。

3.1 使用機械と飛行諸元

本実験で使用した機材の一覧を表-1に示し、UAVグリーンレーザの外観を図-3に示す。また、UAVレーザで取得した3次元点群を現場の座標と整合させるための調整用基準点を4点、計測精度を確認するための精度検証点の7点を図-2に示すように配置した。各点の配置はi-Constructionの管理基準²⁾に準拠し、調整用基準点と精度検証点はともに対象面積に対して必要数以上を設けた。

それぞれのレーザスキャナでのUAVの飛行条件と、搭載されたGNSS、IMU、LSの諸元を表-2に示す。

近赤外レーザに比べてグリーンレーザは、フットプリントが大きく有効計測角が小さい性質があるため、同等の点密度のデータを取得するために飛行高度を低くし、計測ライン間隔を狭くした。そのため、本実験での計測時間は近

表-1 使用機器

使用機器			
機器	型式	メーカー	用途
UAV	MATRICE 600PRO	DJI	エリア飛行
グリーンレーザスキャナ	EDGE LiDAR	ASTRALite	点群計測
近赤外線レーザスキャナ	Vx-20+	YellowScan	点群計測
VRS-GNSS	HiperHR	トプコン	精度検証データ
	HX-CHX600A	Harxon	精度検証データ



図-3 UAVグリーンレーザ

表-2 飛行諸元

飛行諸元	グリーンレーザ	近赤外レーザ
飛行対地高度(m)	30	60
飛行速度(km/h)	15	11
サイドラップ(%)	30	30
コース間隔(m)	11	119
有効計測角(度)	15×2=30	55×2=110
有効計測幅(m)	16	171
計測点密度(cm) (進行方向/横断方向)	6.0/35.3	10.2/7.2
GNSS諸元		
GPS	L1、L2、L5、L-Band	L1、L2、L5、L-Band
Glonass	L1、L2、L3	L1、L2、L3
IMUの精度		
ロール角(度)	0.025	0.015
ピッチ角(度)	0.025	0.015
ヘディング角(度)	0.080	0.035
LS諸元		
レーザクラス	Class3R	Class1
LS拡散角	2.5mrad	1.6×0.5mrad
センサ	1 channels	1 channels
分解能(度)	0.03/0.03	0.001
スキャン回転数 (回転/秒)	70	30
レーザクラス発光回数 (点/秒)	40,000	200,000

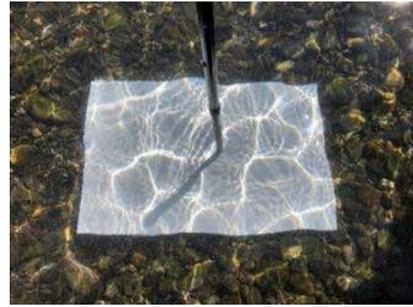


図-4 セッキ水深計測の状況

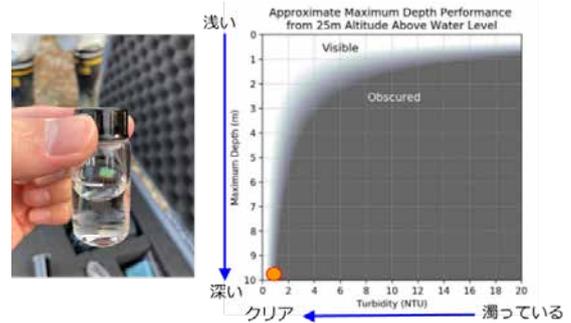


図-5 濁度計による透明度計測状況(左)と評価シート(右)

赤外レーザが18分でエリア全域を計測できたのに対してグリーンレーザでは45分と約2.5倍の時間を要した。このことはグリーンレーザを活用する際の留意事項である。

3.2 検証項目と実験結果

前章で挙げた、UAVグリーンレーザ計測を工事現場で運用する上での課題を解決するために、下記の項目を設定し検証を行った。

(1) 水域の点群データ取得状況の確認

a) 対象河川の透明度確認

UAVグリーンレーザ計測は、計測可能な水深や計測精度が水の透明度に大きく依存するため、事前に対象河川の透明度計測を実施し、計測可能水深を算出した。

計測方法は白色板を用いたセッキ水深と、濁度計を用いた濁度の単位の一つであるNTU(比濁法濁度単位; Nephelometric Turbidity Unit)による評価の2種類とした。

セッキ水深は白色板を水に沈めていき、目視で識別できる限界の深さをメートルであらわした水の濁りの程度を表す指標である。今回の検証で使用したグリーンレーザは、カタログ上ではセッキ水深の1.5倍の水深まで計測可能となっている。

今回の計測では20cm×30cmの白色板を用いて水深0.9mの箇所まで評価を行い、図-4のように目視で外形がはっきりと判別できたことから、少なくともその1.5倍である1.35mまでは計測可能であると判断した。

濁度計による評価⁷⁾では、図-5の左側のように対象河川で採水したサンプルを濁度計にセットしてNTUの数

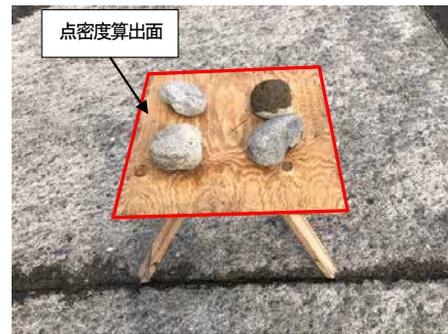


図-6 密度確認に使用した対空標識

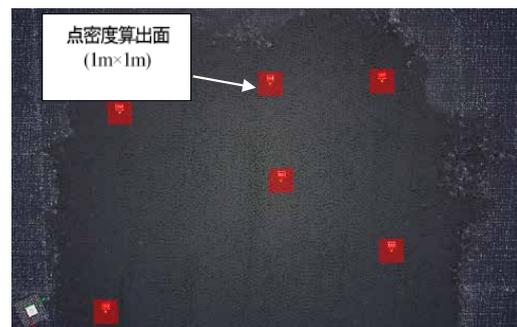


図-7 水域の点密度算出範囲例

値を計測した結果、0.48という値となった。図-5の右側のグラフは濁度(NTU)と計測可能水深の関係を示しており、このグラフからNTUが0.48の時の理論上の最大計測可能水深は10mという結果を得た。

以上の結果から、今回の検証範囲の水深が最深部でも1.0m程度であることを考慮すると、対象河川がグリーンレーザ計測を行う上で、十分な透明度であることを確

認した。

b) 取得点群の点密度確認

UAV グリーンレーザ計測で取得した点群データの陸域と水域での密度を確認した。

陸域では、図-6に示す調整用基準点と精度検証点として地上に設置した対空標識(全11点)の上面の密度を3回の計測それぞれで算出し、1m²当たりの点密度を求めた。水域点群では、図-7に示すようなVRS-GNSSによる河床計測点(全168点)を中心とした1m²の範囲内の点数を算出し、点密度を求めた。

陸域と水域それぞれで、検証箇所(point cloud)の点密度を平均した結果を計測回ごとに整理したものを表-3に示す。陸域での点密度は3回計測の平均で598点/m²、水域の点密度の平均は266点/m²であったことから、本検証の飛行条件下でのUAV グリーンレーザ計測では、陸域に対して約45%の点密度で水域の地形データを取得できることがわかった。なお、i-Constructionにおける出来形計測の点密度の管理基準は1m²当たり100点とされており²⁾、この基準を満足していることが確認できた。

c) 水面の状態と取得点群の対比

計測当時の現場の空撮画像と同箇所(point cloud)の点群データを図-8に示す。図中の四角枠で示した箇所は堰の取水口であり、流れが急であるため水面に白波が立っている。このように水面が乱れている場合には、UAV グリーンレーザ計測では、図中の丸枠箇所のように点群データが欠落するため注意が必要である。

(2) 陸域・水域が混在した点群データの精度検証

陸域と水域を連続的に計測して取得した点群を一つの地形データとして工事に利用するためには、それぞれの

表-3 陸域と水域の点密度結果

	1回目	2回目	3回目	平均
陸域(点/m ²)	652	583	560	598
水域(点/m ²)	299	249	251	266

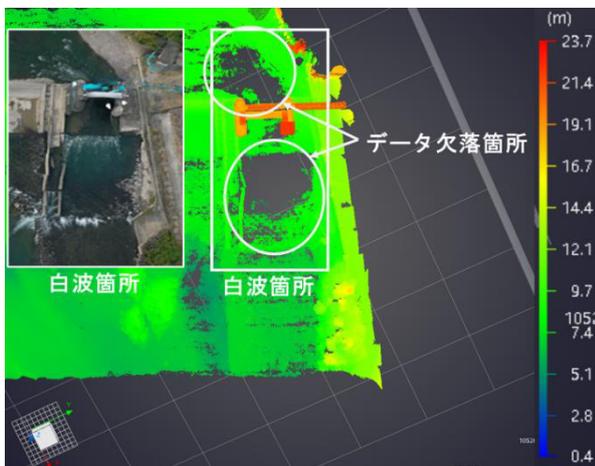


図-8 白波箇所の画像と点群データ

領域での計測精度を明らかにしておく必要がある。

a) 陸域におけるグリーンレーザ計測精度

①検証点の座標精度

VRS-GNSS計測で取得した各検証点の座標値を基準データとし、グリーンレーザ計測と近赤外レーザ計測それぞれの3次元点群から算出した検証点座標との較差からXYZの座標精度を算出した。その結果を表-4に示す。各検証点でのグリーンレーザの座標精度の平均値は水平方向と鉛直方向でともに±0.04m以内の精度を示した。

なお、近赤外レーザの結果と比較して、グリーンレーザの座標精度は、特に鉛直方向で±0.02mほど大きい較差を示す結果となった。

②表面被覆の異なる面での標高精度

コンクリートで被覆された堰堤上や水の干上がった河岸の砂利上に長方形の検証面を設定し、5cmメッシュご

表-4 検証点精度の結果

	グリーンレーザ1回目			グリーンレーザ2回目		
	X	Y	Z	X	Y	Z
平均(m)	0.011	0.007	0.032	0.015	0.031	0.010
標準偏差(m)	0.010	0.005	0.019	0.011	0.017	0.011
	グリーンレーザ3回目			近赤外レーザ		
	X	Y	Z	X	Y	Z
平均(m)	0.010	0.014	0.032	0.018	0.007	0.013
標準偏差(m)	0.009	0.010	0.011	0.014	0.007	0.012

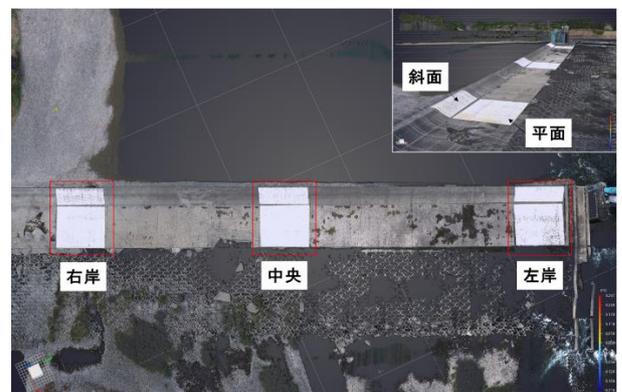


図-9 堰堤上の標高精度検証面

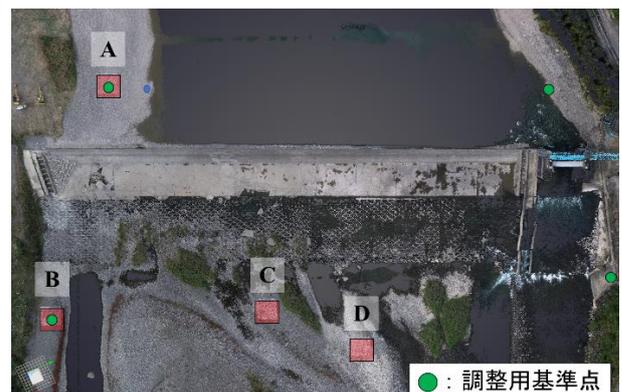


図-10 砂利上の標高精度検証面

とに近赤外レーザに対するグリーンレーザの標高較差を算出した。堰堤上では図-9に示すように、右岸と左岸の両側と中央部分にそれぞれ平面と斜面の検証面を設け、砂利上では図-10に示すA～Dの4箇所に10m四方の検証面を設けた。AとBの検証面は調整用基準点を中心に設定し、CとDは調整用基準点から距離を離れた位置に設定した。

上記の検証は、地面の被覆状況や勾配、調整用基準点からの距離が標高精度に与える影響を検証するものである。その結果を図-11、図-12、図-13に示す。

コンクリートで被覆された堰堤上の検証面（図-11、図-12）では、平面と斜面ともに標高較差の平均値は±0.04m以内となり、地面の勾配による精度への影響は見られなかった。

砂利上の検証面（図-13）では、4箇所の標高較差の平均値は一部を除いて±0.04m以内となった。

各検証面の標高較差の平均値の結果は±0.05m以内の精度を示しており、堰本体のようなコンクリートで被覆された面と、川岸の砂利で不陸がある面のいずれもほぼ同等の精度で計測可能であることが確認できた。

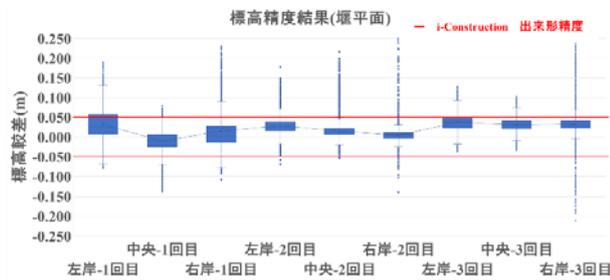


図-11 検証面の標高精度結果（堰堤平面）

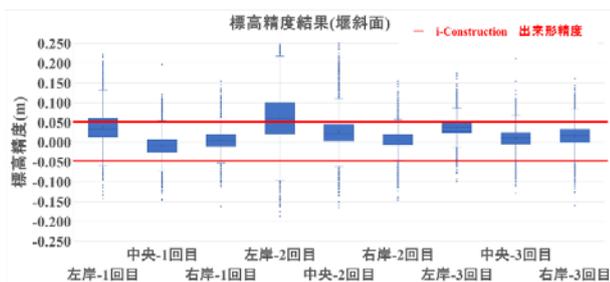


図-12 検証面の標高精度結果（堰堤斜面）

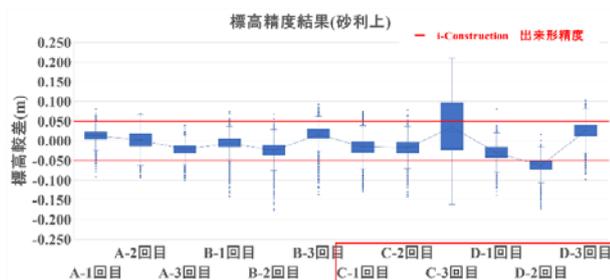


図-13 検証面の標高精度結果（砂利上）

また、調整用基準点上の検証面A・Bと距離の離れた検証面C・Dの結果を比較すると、検証面C・D（図-13の四角枠部分）は較差が大きくなっている部分があり、点群の位置合わせに使われる調整用基準点上からの距離が大きくなると標高精度が低下する可能性があることがわかる。

b) 水域におけるグリーンレーザ計測精度

①グリーンレーザ点群の標高精度

UAVグリーンレーザ計測は計3回実施し、各データについて検証を行った。合わせて、河床におけるグリーンレーザ点群の標高精度検証の基準用データとして、図-14に示す上流側の堰堤近傍と右岸、下流側の護床ブロック部と水溜まり部の4つの範囲において全168箇所のVRS-GNSS計測を実施した。計測は図-15のように

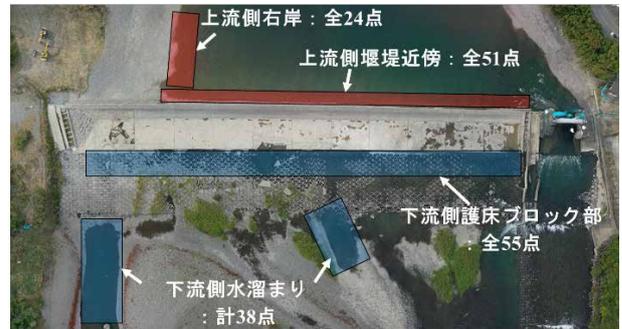


図-14 水域の標高精度検証箇所



図-15 VRS-GNSS計測状況



図-16 水域精度の検証円

河床にポールを立てて実施し、この VRS-GNSS 計測点の中心から図-16に示すような検証円内に存在するグリーンレーザ点群の標高の平均値と VRS-GNSS 計測値との較差を算出し標高精度を評価した。なお、検証円の直径は、その範囲内にグリーンレーザ点群を最低1点以上含むという条件で、最小の大きさである 15cm を設定した。

その結果を上流側と下流側に分けて図-17、図-18に示す。計測回ごとの上流部、下流部それぞれの計測点におけるグリーンレーザ点群と GNSS 計測の標高較差の平均値、標準偏差、最大値、最小値を箱ひげ図で示したところ、上流部、下流部ともに標高較差の平均値は、±0.1m 以内の結果となった。なお、図-17、図-18の標高精度がともに、計測箇所によってプラス側とマイナス側に較差が偏っている結果となった。これは計測作業を2台のGNSSアンテナを用いて分担して実施したことによる器械の個体差であると考えられる。現場内の同じ座標既知点における精度確認の結果、標高較差がともに±30mm以内であることを確認しており、i-ConstructionのGNSS精度確認基準²⁾を満足していることから、検証結果として問題ないものと考えている。

今回の検証では、直径15cmの円内に存在する点の標高値を平均した値を UAV グリーンレーザの標高値としたが、全168箇所の円内に存在する点群数は最小1点から最大45点とばらつきがあった。そこで、円内の点数と標高較差の関係をまとめたものを図-19に示す。円内の点数が1点から12点の箇所が全体の98%を占めているが、その範囲内において、点数と標高精度との間に相関関係は見られなかった。

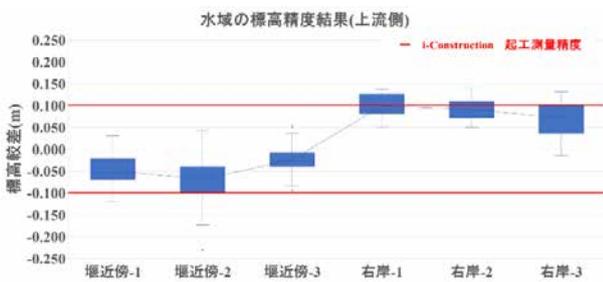


図-17 水域の標高精度結果（上流側）

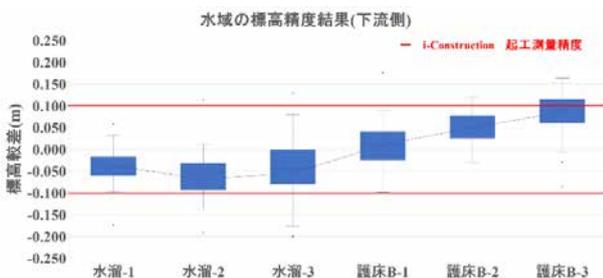


図-18 水域の標高精度結果（下流側）

②標高精度と水深の相関関係

GNSS 計測時に同地点を棒スケールで計測した水深の実測値と、①の検証で算出した標高精度の関係をプロットし、水深によってグリーンレーザ点群の精度に影響があるか検証を行った。計3回の計測で取得した標高較差の全計測点データとその水深の関係を図-20に示す。全計測点の中で最大水深は1.1m、最小水深は0.03mであった。この範囲内において水深が増加標高計測精度の変化は、図中に示すように相関関係はみられない結果となった。すなわち、水深1m程度までならば、深さによらず一定の精度で計測ができることがわかった。

4. 実験のまとめと考察

本実験で実施した UAV グリーンレーザ計測を河川工事現場の地形データ取得に活用するために実施した検証の結果を以下にまとめる。

4.1 水域の点群データ取得状況の確認

UAV グリーンレーザ計測で取得した水域の点密度は陸域に対して約45%になることがわかった。平均して266点/m²という点密度は河川工事の起工測量や出来形計測にも適用可能な水準であるといえる²⁾。

また、今回の対象河川は非常に高い透明度であったが、水面に白波が立った河床では有意な点群データを取得することができなかった。このように、UAV グリーンレーザ計測を行う際は河川の透明度だけでなく当日の水面の状態をよく確認することが重要である。

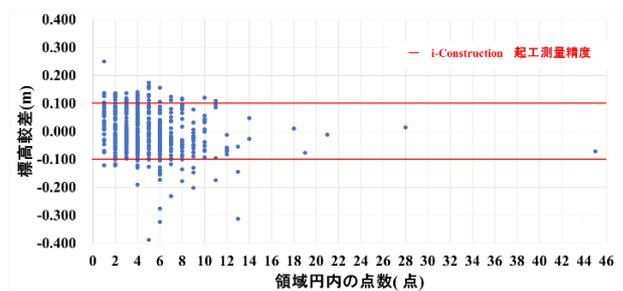


図-19 水域の標高精度と点数の関係

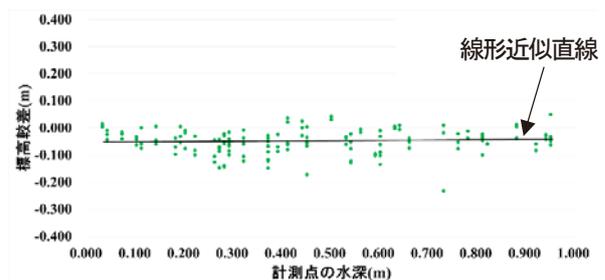


図-20 水域の標高精度と水深の関係



図－21 水域・陸域が混在した現場状況

4.2 陸域・水域が混在した点群データの精度検証

(1) 陸域におけるグリーンレーザ計測精度

図－21のような陸域・水域が混在した現場において、陸域部の検証点の平面座標精度と任意面の標高精度ともに±0.05m以内の精度を有することを確認した。また、砂利のような不陸のある場所であってもi-Constructionの出来形計測精度で計測可能であることがわかった。一方で、基準点からの距離が大きくなると計測精度が低下したことから、広範囲の計測を行う際は、対象範囲の四隅に加えてその中央にも基準点を置くなどの対策が必要不可欠である。

(2) 水域におけるグリーンレーザ計測精度

今回のような水深1m程度の透明度の高い河川において、河床点群データの標高精度の平均値は±0.1m以内であった。

本検証で設定した直径15cm円に含まれる点数と標高較差に相関関係は見られなかったが、円内に1点以上の点があれば起工測量の要求精度内のデータを取得できることがわかった。直径15cm円に1点存在するという状態は、i-Constructionの起工測量基準²⁾(0.25m²当たり1点以上)にしたがって換算すると0.25m²当たり14点となる状態であり基準を満足している。すなわち、飛行時間を減じるために飛行高度を高くすると点密度は粗くなるが、i-Constructionの起工測量基準を満足できる範囲で飛行高度を調整できる余地があることがわかった。この基準を満たす限界の高度については別途検証が必要であると考えられる。

また、水深1mの範囲内であれば、標高精度に対する水深の影響を考慮する必要がないことも確認できた。

一方で、透明度の低い水質や水深の深い河川など、より厳しい条件下での適用性を確認するためには、さらなる検証を行い、計測限界を把握する必要がある。

5. おわりに

国土交通省水管理・国土保全局河川環境課 河川保全

企画室が主管でまとめている、河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)⁴⁾によれば、3次元データを河川管理に用いることのメリットとして、次の3点を挙げている。

- ① データ取得の効率化(延長が長くなるほどメリットが大きい)
- ② 高密度データによる面的な地形状況の把握が可能
- ③ 現地測量を最小限とすることができ、安全性が高い

このように発注者からの3次元データの活用ニーズは高いことから、河川の維持管理ばかりではなく河川工事中の施工管理においても、今後さらなる3次元計測技術の利用が促進されるものと推察される。

本稿では、こういった背景を受けて、河川工事におけるUAVグリーンレーザ計測の特徴を整理し、陸域と水域が混在しているエリアを対象に、UAVグリーンレーザの計測精度を取りまとめたものである。このような環境下で取得した点群データは、比較的水深の浅い護床ブロック工などの起工測量に適用可能な精度(標高精度で±0.1m²⁾)を有することを確認できたばかりではなく、現地地形や完成した河川構造物の出来形管理に必要な精度(±0.05m)²⁾についても確認できた。

今後は、今回の実証実験結果を踏まえて、河川工事やダム工事などでの現場施工管理手法として検証を深めていきたい。

参考文献

- 1) 内閣府HP：令和2年度防災白書 特集 激甚化・頻発化する豪雨災害 <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r02/honbun/0b_1s_00_00.html>
- 2) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案) 2021.3
- 3) 国土地理院：航空レーザ測深機を用いた公共測量マニュアル(案) 2019.4
- 4) 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
- 5) 塚 浩一：UAVグリーンレーザ計測による河川管理の適用検討，岡山大学大学院環境生命科学研究科博士論文，2022.3
- 6) 塚浩一，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.
- 7) (株) ビジュアル・システムズHP：
<https://visualsystems.jp/sensing/astraliteedgelidar.html>
(Accessed 2022.3.28)
- 8) 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，公益社団法人日本測量協会応用測量論文集，No31p99-110，2020.
- 9) 黒台昌弘，澤城 光二郎，荻山直将，小松良光：UAVグリーンレーザの陸域部における計測精度検証，令和4年度土木

学会全国大会第 77 回年次学術講演会, VI-919, 2022

- 10) 澤城 光二郎, 黒台昌弘, 荏山直将, 小松良光: 河川工事の水域部における UAV グリーンレーザ計測の精度検証, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, VI-920, 2022

Applicability verification of UAV green laser measurement to river construction

Kojiro SAWAKI, Masahiro KURODAI

Green laser measurement is a measurement technology that enables simultaneous and efficient point cloud measurement of water areas such as rivers and lakes and land areas on the ground by using a laser beam in the green wavelength band that passes through water.

While it is currently being used in areas such as river surveys using ALB, there are few examples of its introduction at construction sites. Therefore, it is not enough to select the type of work that can effectively utilize this technology and to accumulate measurement expertise on site.

In this paper, for the purpose of using integrated data of water and land areas measured by the UAV green laser at construction sites, we conducted accuracy verification of the ground survey and finished shape measurement in each area. As a result, the applicability of the ground survey for construction work was confirmed.