

UAV グリーンレーザ計測の建設工事への適用性検証報告

澤 城 光二郎

UAV 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計測することが可能な計測技術である。現在は航空レーザ測深（ALB；Airborne LiDAR Bathymetry）による河川測量などにおいて特に活用が進んでいるが、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。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、河川工事現場を対象に、起工測量や出来形計測に関する計測精度を明らかにする精度検証を行ったので、本稿にて報告する。

キーワード：UAV グリーンレーザ，i-Construction，3次元計測，水域計測，点群データ

1. はじめに

近年、建設現場における3次元計測は一般的なものとなっており、地上レーザ（TLS；Terrestrial Laser Scanner）やUAVレーザ（ULS；UAV Laser Scanning）、モバイルマッピングシステム（MMS；Mobile Mapping System）などレーザスキャナ（LS）を使用した現場の出来形管理手法が要領¹⁾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活用が進んでいる。しかし、これらのLSは近赤外線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ため、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淺測量を併用することが多い。

そこで筆者らは、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UAVグリーンレーザ計測に着目した。グリーンレーザスキャナ計測は図-1に示すように水中を透過する緑色の波長帯を持つレーザ光を使用することにより、上記のような水域を計測することが可能な計測技術であり²⁾、UAVに搭載したグリーンレーザで広範囲を一度に計測することで、作業が効率化できると期待されている。

しかし、グリーンレーザ計測は調査測量分野における航空レーザ測深（ALB；Airborne LiDAR Bathymetry）で活用が進んでいるものの³⁾、建設分野における導入事例がほとんどなく、工事現場の起工測量や出来形測

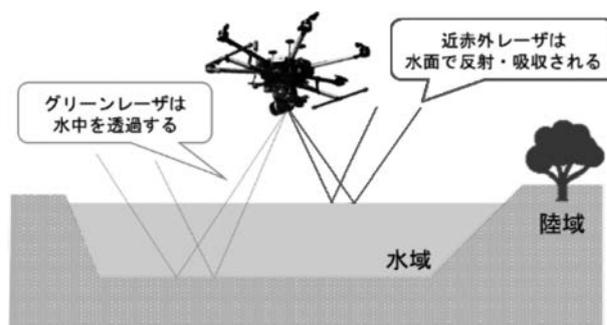


図-1 グリーンレーザ計測の概略

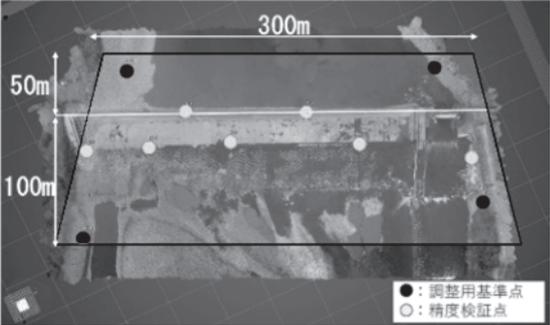
量に適用できる計測条件や精度の評価が十分に行われていないのが現状であった。そこで本稿では、UAVグリーンレーザ計測の適用工種として河川工事を選定し、実際の現場で実施した実証実験の結果を報告する。

2. UAV グリーンレーザの概要と課題

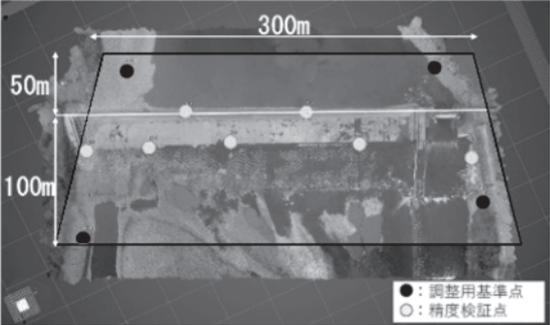
グリーンレーザは上述のように、水中を透過する特性を持った緑色の波長帯を持ったレーザ光を使用することで、一部は水面で反射するものの、多くは水面を通過し、その下にある水底の地形データを取得できる。UAVグリーンレーザ計測ではGNSS（Global Navigation Satellite System）やIMU（Inertial Measurement Unit）から推定した自己位置と姿勢をもとに、空気中から水中に入射する際の境界面で生じるレーザ光の屈折の影響も考慮した解析を行い、3次元データを生成する⁴⁾。グリーンレーザを工事現場で活用するための課題とし

て、①計測可能な深さ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現場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。

3. 実験概要

本検証では河川工事の実現場を対象として、—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、VRS-GNSSによる多点計測を合わせて行った。

(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写真—1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検証点を7点、—2に示すように配置した。各点の配置はi-Constructionの管理基準¹⁾に準拠し、調整用基準点と検証点はともにエリア面積に対して必要数以上を設けた。

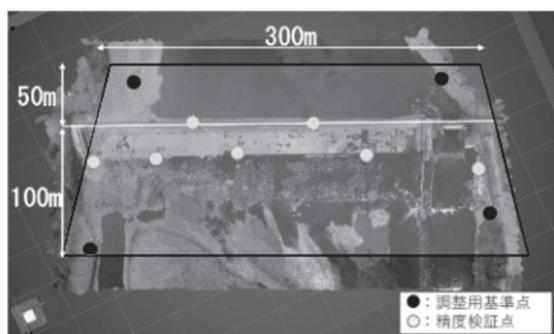


写真—1 UAVグリーンレーザ

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、対象物を計測した際のレーザ径（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は飛行高度を低くし、飛行ライン間隔を狭くする必要がある。そのため本実験での計測時間は近赤外レーザが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

表—2 飛行諸元

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



図—2 実験エリアと調整用基準点・検証点配置

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
近赤外線 レーザスキャナ	Vx-20+	YellowScan	点群計測
グリーン レーザスキャナ	EDGE LiDAR	ASTRALite	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

2.5 倍の時間を要した。この点はグリーンレーザを活用する際に留意する事項である。

(2) 検証項目と検証結果

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ため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) 対象河川の濁度確認

グリーンレーザ計測を行うにあたり、事前に対象河川の濁度評価を実施し、理論上の計測可能深度を評価した⁵⁾。図-3のように濁度の単位の一つである NTU (比濁法濁度単位：Nephelometric Turbidity Unit) を用いた評価を行ったところ、計測値は 0.48 NTU となり、ここから算出される理論上の最大計測可能水深は 10 m という結果を得た。今回の対象範囲は最深部でも 1.0 m 程度であることから、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。

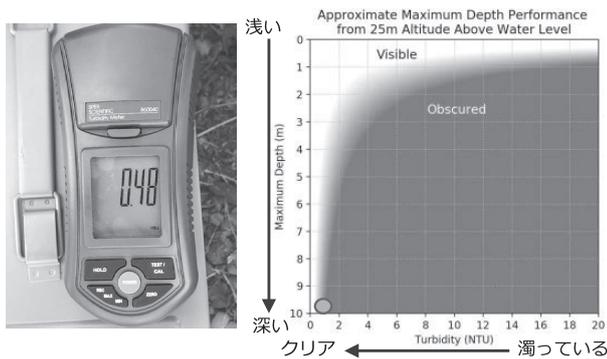


図-3 濁度計による透明度評価

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

GNSS 計測で取得した各検証点の座標値を基準データとし、近赤外レーザ計測とグリーン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-3 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 ± 0.04 m 以内の精度を示した。近赤外レーザと比較すると水平方向は同等の精度であり、鉛直方向は ± 0.02 m ほど大きい結果となった。

表-3 検証点精度の結果

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

② 表面形状の異なる面での標高精度

図-4, 5 に示すように、堰堤上や水の干上がった川岸に長方形の検証面を設定し、5 cm メッシュご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。その結果を表-4 に示す。各メッシュの標高較差の平均値の結果はともに ± 0.05 m 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同等の精度であることが確認できた。

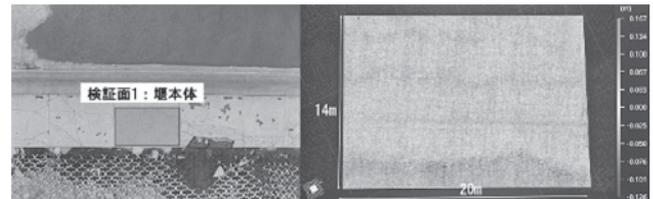


図-4 標高差分の検証面とヒートマップ (堰本体)

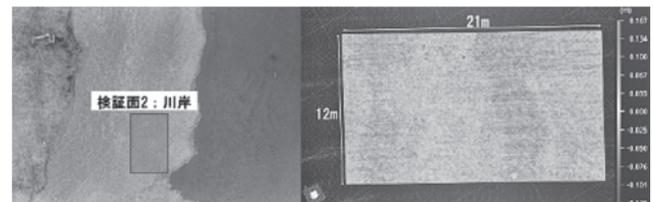


図-5 標高差分の検証面とヒートマップ (川岸)

表-4 陸域任意面の標高精度の結果

(m)	堰本体 1 回目	堰本体 2 回目	堰本体 3 回目
平均	-0.001	0.023	0.047
標準偏差	0.024	0.012	0.015
最大	0.167	0.187	0.113
最小	-0.126	-0.040	-0.019
(m)	川岸 1 回目	川岸 2 回目	川岸 3 回目
平均	0.020	0.008	-0.021
標準偏差	0.014	0.022	0.017
最大	0.078	0.143	0.050
最小	-0.062	-0.088	-0.148

(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、VRS-GNSS 計測を実施した。既設堰堤の上流部・下流部それぞれで写真-2のように河床にポールを立てて、図-6に示す2つのエリアにおいて計88点の座標値を基準データとして取得した。このGNSS計測点の中心から直径15cmの領域内に存在するグリーンレーザ点群の標高の平均値とGNSS計測値との較差を算出し標高精度を評価した。

その結果を表-5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、最小値を整理したところ、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。

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-7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することによる標高計測精度の変化については、図中に示すように相関関係はみられない結果となった。

4. おわりに

本実験で実施した陸域および水域でのグリーンレーザの精度検証結果を以下にまとめる。

(1) 陸域におけるグリーンレーザ計測精度

写真-3に示す陸域・水域が混在した現場におい



写真-2 VRS-GNSS 計測状況

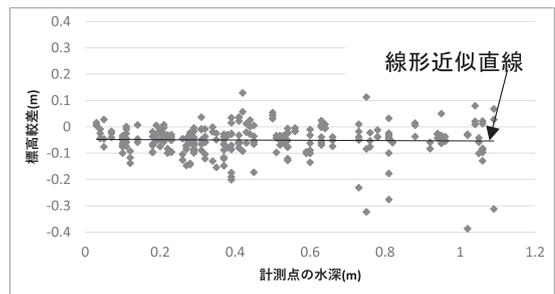


図-7 水域の標高精度と水深の関係

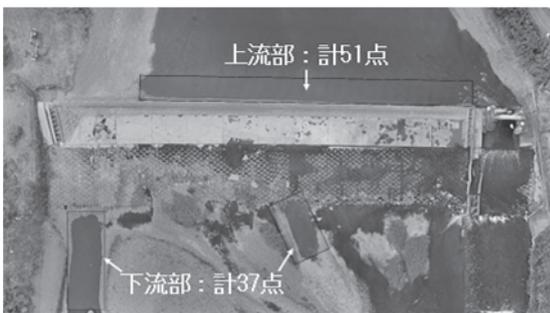


図-6 水域の標高精度検証位置



写真-3 水域・陸域が混在した現場状況

表-5 水域の標高精度の結果

(m)	グリーンレーザ 1 回目		グリーンレーザ 2 回目		グリーンレーザ 3 回目	
	上流部	下流部	上流部	下流部	上流部	下流部
平均	-0.049	-0.038	-0.069	-0.068	-0.024	-0.054
標準偏差	0.038	0.043	0.053	0.072	0.030	0.097
最大	0.031	0.057	0.043	0.113	0.054	0.129
最小	-0.121	-0.174	-0.231	-0.312	-0.095	-0.387

て、検証点の平面座標精度と任意面の標高精度ともに ± 0.05 m 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近赤外レーザと同等の精度で計測可能であったことから、グリーンレーザ計測による点群データは土工事などの地形データとして利用できることがわかった。

(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 1 m 程度の透明度の高い河川において、取得した河床点群データの標高精度は ± 0.1 m 以内の精度を示した。また、水深 1 m 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。

以上の結果から UAV グリーンレーザ計測で取得した陸域と水域が連続している点群データは、工事現場の起工測量に適用可能な精度を十分有することを確認した。

なお、標高精度の ± 0.1 m とは、i-Construction の施工管理基準¹⁾では起工測量の管理基準値である。さらに精度の高い管理基準値 ± 0.05 m である現場地形の出来形測量への適用に向けてさらに現場検証を進めていく予定である。

今後は上記のことも含めて、UAV グリーンレーザ

計測の施工現場への適用性向上に向け、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さらなる追加検証を行うとともに、河川工事やダム工事などでの現場施工管理手法として積極的にアピールしていきたい。

JICMA

《参考文献》

- 1) 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
- 2) 国土交通省報道発表資料、「陸上・水中レーザドローン」現場実装へ：<https://www.mlit.go.jp/common/001271580.pdf>, 2019.2
- 3) 中村圭吾, 福岡浩史, 小川善史, 山本一浩：グリーンレーザ（ALB）による河川測量とその活用, RIVER FRONT Vol.84, pp.16-19, 2017.3
- 4) 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, 2021.11
- 5) ㈱ビジュアル・システムズ HP：<https://visual-systems.jp/sensing/astraliteedgelidar.html> (Accessed 2022.3.28)

【筆者紹介】

澤城 光二郎（さわき こうじろう）
 ㈱安藤・間 技術研究所
 フロンティア研究部
 ICT・ロボティクスグループ

