

金山ダム堆砂測量における UAVの活用について —グリーンレーザによるUAVレーザ測量—

札幌開発建設部 空知川河川事務所 金山ダム管理支所 ○鈴木 匠
中村 文哉
佐々木 晋

ダム堆砂測量とは、ダムに貯留できる水の量を把握するために、経年的にダム貯水池の地形を計測し、地形の変化を確認する測量である。従来、ダム堆砂測量では、水部を作業船舶及び音響測深機にて水深測定を行い、陸部は測量調査員が直接水底を測定してきた。しかし、金山ダムでは、出水期以降の堆砂状況の測量を行うにあたっては、金山ダムは山間部にあることから、出水期終了後から結氷までの短い期間内に現地作業を行う必要があるほか、急峻な崖や立入が難しい箇所での作業、堆砂測量杭の亡失や破損への対応、野生害獣に対する安全対策などを講じるなどの問題が生じていた。それらの問題を解消するため、金山ダム堆砂測量では、陸地及び水深の浅いダム上流域で計測が可能なグリーンレーザスキャナを用いたUAVレーザ測量を実施している。

本稿は、金山ダムの堆砂測量におけるUAVグリーンレーザの活用事例について報告する。

キーワード：ダム堆砂測量、UAV、新技術

1. はじめに

金山ダムは、石狩川の主要支流である空知川上流約102キロ地点に昭和42年9月に洪水調節、農業用水の供給、水力発電、水道用水供給を目的に建設されたダムである。

金山ダムでは適切なダム管理に資するため、昭和42年より堆砂測量を実施しており、本年（令和6年度）で57年目を迎える。

堆砂測量は、ダム地点より上流に33測線で実施している。水深の深いダム地点より上流24測線（No.1～No.24）では深淺測量、これより上流側の河川流入部にあたる9測線（No.25～No.33）では河川定期横断測量が行われていた。現在、深淺測量箇所では、作業船舶によるナローマルチビーム方式により測量が実施されており、河川定期横断測量箇所では、水深が浅い（水深1m以下）の範囲はUAV搭載型グリーンレーザ測量、これより水深が深い範囲はシングルビーム測深が実施されている（図-1）。

2. 測量調査位置

UAV搭載型グリーンレーザの測量調査範囲を図-2に示す。本測線（No.25～No.33）は、水深が浅くマルチビーム測深を行うことが困難な範囲が多く、河川定期横断測量の代替としてUAVレーザ測量を実施している。本測線は、貯水位にもよるが最大水深で6m程度であり、これより陸部の状況はヨシや笹が群生し、水際周辺につ

いては湛水により崖地となっている部分がある。測線No.26、27付近の現地状況を下流側から撮影したものを写真-1に、代表的な断面図を図-3に示す。

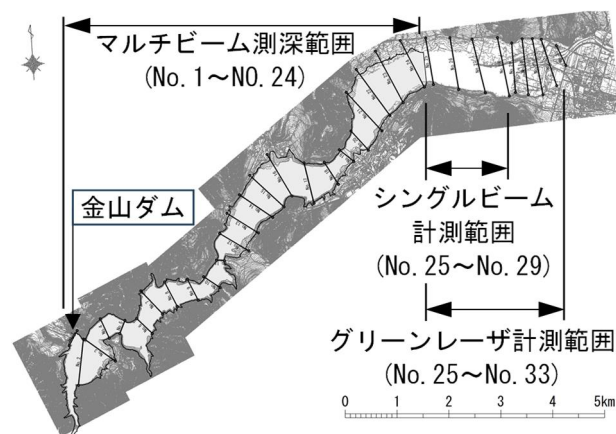


図-1 測量調査位置図



図-2 河川定期横断測量箇所（No.25～No.33）

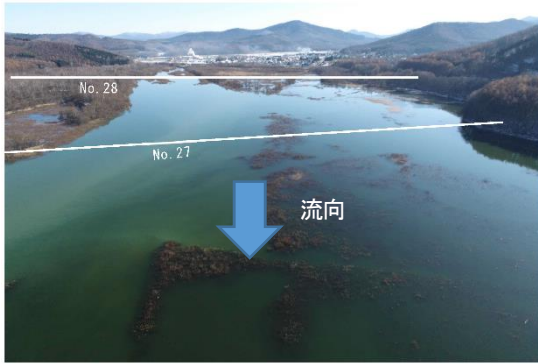


写真-1 河川定期横断測量箇所全景

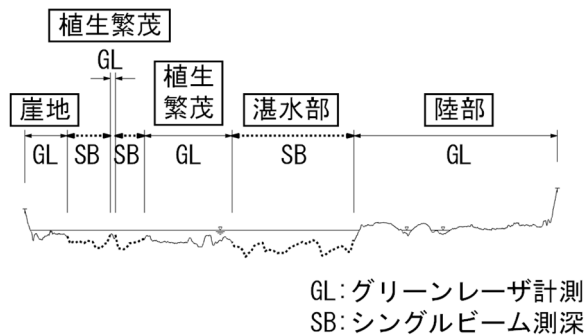


図-3 かなやま湖の断面図

3. 金山ダムにおける堆砂測量の手法の変遷

金山ダムにおける水部と陸上・浅瀬部の堆砂測量の手法の変遷を表-1に示す。従来は、作業船による水深測定と河川定期横断測量による陸上及び浅瀬の直接計測により実施されてきたが、H27年度より貯水池内の水底地形はマルチビームを用いた面計測を採用し、R3年度からは、河川定期横断測量箇所を調査員による直接測定が不要であり、作業時間の短縮や調査員の安全面向上が期待されるグリーンレーザスキャナによるUAVレーザ測量を採用している。

表-1 金山ダムにおける堆砂測量の変遷

	水部	陸上・浅瀬部
従来	深淺測量 (レッド、ロッド、シングルビーム)	河川横断測量
H27	マルチビーム深淺測量	航空レーザ計測・河川横断測量
H28	マルチビーム深淺測量	航空レーザ計測・河川横断測量 シングルビーム深淺測量
H29～R2	マルチビーム深淺測量	河川横断測量・ シングルビーム深淺測量
R3～	マルチビーム深淺測量	シングルビーム深淺測量 UAVレーザ測量

4. UAVグリーンレーザの機器仕様と特徴

(1) UAVグリーンレーザの機器仕様

本測量で使用しているUAVグリーンレーザスキャナは、「ドローン Lidarシステム TDOT」を用いて実施している(写真-2、3)。

以下にIMU(慣性計測装置：レーザ計測時のUAV機体の姿勢状況などを記録し、常時水平の状態で計測した仮定計算のための補正値を算出する装置)、レーザスキャナ(レーザ光を放出し反射光を受光検知してレーザ機器からの距離にて計測する装置)、UAV (GNSSを用いて機体の位置情報などにより遠隔操作にて手動や自動操縦で飛行が可能な無人航空機)機体の機器仕様を示す(表-2)。



写真-2 Matrice 600 PRO



写真-3 TDOT GREEN

表-2 機器仕様一覧表

機器	機器名	細目	仕様
IMU	TDOT PROCESSING	位置精度	5 mm
		ヘディング	0.03°
		ピッチ/ロール	0.006°
		速度	0.01 m/s
レーザ スキャナ	TDOT GREEN	計測精度	±15 mm
		最大計測距離	158 m
		パルスレート	60 kHz
		レーザ照射角	90°
		マルチパルス	4 echo
		スキャン速度	30 走査/s
		レーザ波長	532±1 nm
		レーザ拡散角	1.5 mrad
UAV機体	Matrice 600 PRO	測深能力	1 secchi
		飛行可能時間	10分以上
		自動飛行機能	あり
		最大飛行対地高度	4500 m
		運航可能最大風速	8 m/s

(2) UAVレーザの概要

UAVレーザ測量とは、無人航空機に取り付けたレーザスキャナ装置から地上に向けてレーザ光を発射し、その反射光を受光検知することで連続的に地上の形状を計測する手法である。

崖地や立入が困難な箇所などにおいても上空からの計測が可能であり、植生の繁茂状況にもよるが、調査員による直接測定が不要となることで作業時間を短縮できることが大きな利点である。

(3) グリーンレーザの性質

一般的に使用されている近赤外線レーザは、水面や黒色に吸収されやすく、水たまりや濡れたアスファルトなどの計測は不能であるが、グリーンレーザは、水面や黒色に吸収されにくい性質であり、水質濁度の影響を受けるが水深の浅い水底部の計測が可能である。そのため、陸上も含め水際や浅所部にも対応できるので、従来の河川定期横断測量からの代替が可能となる。

ただし、近赤外線レーザと比べて構造が複雑で高価であり、計測飛行時の推奨高度は40m(近赤外線レーザは70mを推奨)と低空になるため、高樹木や構造物などに注意が必要である。

5. UAVレーザ測量の作業方法

(1) 飛行計画（フライトプランの作成）

飛行計画は、現地踏査を行い支障物等を確認の上、対地高度50m、重複率70%、飛行速度3m/sとして計測諸元を決定した。なお、飛行高度については、山間部での飛行となることから、推奨高度40mでは機体の旋回時に計測範囲外の高樹木に接触する可能性があるため50mと設定した。このため、測量精度に影響が無いよう重複率を70%(作業規程では30%標準¹⁾)とした。No. 25～No. 33の各調査測線は「線上計測」にて往復計測を実施した。

作成したフライトプランの一部を以下に示す(図-3)。

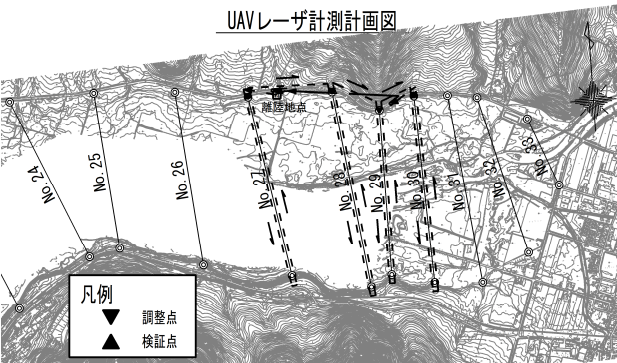


図-3 フライトプラン(No.27 - No.30)

(2) 計測方法

レーザ計測を実施する前に、事前に作成したフライトプランに問題がないかを確認するため、小型機でのテストフライトを実施し、カメラを通じて障害物の確認、高度確認、機体の挙動から上空の状況等確認して、最終の安全確認を行った。

レーザ計測では、IMU(慣性計測装置)校正と計測精度向上のために、計測フライト前後で、アライメント(機器調整)を必ず実施した。計測終了後は、その場でレビューによる計測状態を確認して、追加計測等の検討をした。計測手順概要を以下に示す(図-4)。

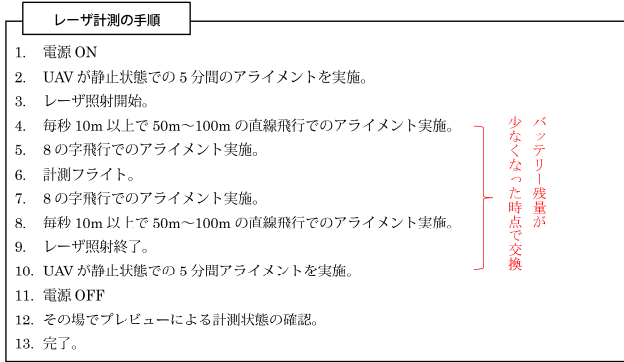


図-4 レーザ計測の手順

6. 測量調査結果

(1) グリーンレーザによる計測水深

UAVグリーンレーザにおける各測線(R3～R5)の計測水深の最大値について表-3に整理した。最大水深は各調査年によりことなり、R3 : 2.71m、R4 : 1.99m、R5 : 2.94mであり、2～3m程度の水深で計測されている。これらの調査結果は、安定して河床データが取得できている水深である。なお、R3年度のNo.25～27の測線は、堆砂測量時期の貯水位が高い時にシングルビームによる深淺測量が行われている。

グリーンレーザによる水部の計測は水質や底質といった水部の状況により測深能力が異なるとされている²⁾が、かなやま湖の水質では、十分な成果を上げることができた。

表-3 計測水深結果

調査測線	最大水深 (m)		
	R3年度	R4年度	R5年度
No. 25	-	0.79	2.65
No. 26	-	0.65	0.96
No. 27	-	1.99	1.85
No. 28	0.70	1.06	1.67
No. 29	0.38	1.54	2.94
No. 30	2.71	1.71	2.91
No. 31	1.44	1.93	0.92
No. 32	1.74	1.00	1.71
No. 33	1.09	0.52	1.04
最大水深	2.71	1.99	2.94

(2) グリーンレーザによる計測範囲

河川定期横断測量の範囲では、陸部からダム湖内についてグリーンレーザにより計測し、水深が深く計測できない範囲については、船舶による深淺測量(シングルビーム又はマルチビーム)により実施している。計測範囲のイメージを図-5に示す。また、各調査年及び測線におけるグリーンレーザ及び深淺測量の計測範囲について表-4～6にとりまとめた。

調査結果を見ると全横断幅に対するグリーンレーザで計測できたカバー率(左右岸合計)は、R3 : 60%、R4 :

59%、R5：77%であり、60～70%の範囲をグリーンレーザにより計測できた。

また、各調査年との最大水深の関係を見るとR3：2.71m(60%)、R4：2.94m(59%)、R5:1.99m(77%)であり、水位が低いほどグリーンレーザによる計測範囲が広がっている。

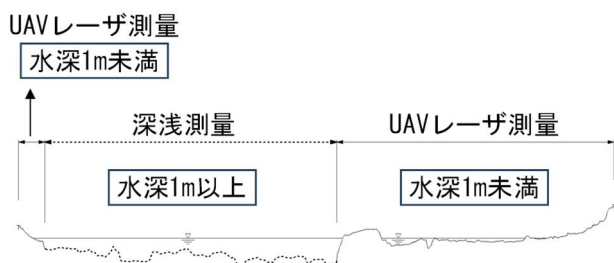


図-5 計測範囲イメージ図

表-4 R3_定期横断測量幅

測点	UAV ^① レーン	UAV ^② レーン	深浅測量	UAV ^③ レーン	備考
	最大水深	右岸側	中央	左岸側	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
No.25	0.00	24.33	629.64	175.92	
No.26	0.00	12.86	764.54	220.62	
No.27	0.00	6.50	963.50	79.02	
No.28	0.70	50.00	560.00	523.89	
No.29	0.38	75.00	505.00	360.52	
No.30	2.71	534.99	0.00	534.99	全横断幅 UAV ^④ レーン
No.31	1.44	541.86	0.00	541.86	
No.32	1.74	465.67	0.00	465.67	
No.33	1.09	210.31	0.00	210.31	
最大	2.71	541.86	963.50	541.86	
平均	0.90	213.50	380.30	345.87	
合計	-	1921.52	3422.68	3112.80	
カバー率	-	23%	40%	37%	

表-5 R4_定期横断測量幅

測点	UAV ^① レーン	UAV ^② レーン	深浅測量	UAV ^③ レーン	備考
	最大水深	右岸側	中央	左岸側	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
No.25	2.65	32.00	654.00	209.92	
No.26	0.96	20.00	846.00	132.02	
No.27	1.85	20.00	890.00	139.02	
No.28	1.67	50.00	556.00	527.89	
No.29	2.94	239.00	342.00	359.52	
No.30	2.91	523.00	148.00	398.98	
No.31	0.92	630.00	79.00	374.72	
No.32	1.71	465.67	0.00	465.67	全横断幅 UAV ^④ レーン
No.33	1.04	210.31	0.00	210.31	
最大	2.94	630.00	890.00	527.89	
平均	1.85	243.33	390.56	313.12	
合計	-	2189.98	3515.00	2818.05	
カバー率	-	26%	41%	33%	

表-6 R5_定期横断測量幅

測点	UAV ^① レーン	UAV ^② レーン	深浅測量	UAV ^③ レーン	備考
	最大水深	右岸側	中央	左岸側	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
No.25	0.79	44.00	609.00	242.92	
No.26	0.65	26.00	737.00	235.02	
No.27	1.99	216.00	336.00	497.02	
No.28	1.06	345.00	261.00	527.89	
No.29	1.54	470.52	0.00	470.26	全横断幅 UAV ^④ レーン
No.30	1.71	534.99	0.00	534.99	
No.31	1.93	541.86	0.00	541.86	
No.32	1.00	465.67	0.00	465.67	
No.33	0.52	210.31	0.00	210.31	
最大	1.99	541.86	737.00	541.86	
平均	1.24	317.15	215.89	413.99	
合計	-	2854.35	1943.00	3725.94	
カバー率	-	33%	23%	44%	

(3) 安全面について

金山ダムの上流域は、湛水域内にヤナギなどが群生しており、見通しが悪く、船が進入するには伐開が必要となる箇所がある(写真-4)。また、山林地帯も広がっていることから、現地測定時に野生害獣と遭遇する確率も高くなる(写真-5)。このため、グリーンレーザを使用することで湛水部の植生を縫って水底部の計測ができ、陸上においては調査員が直接立ち入らないため、野生害獣との遭遇を低減させでき安全面の向上が図れた。

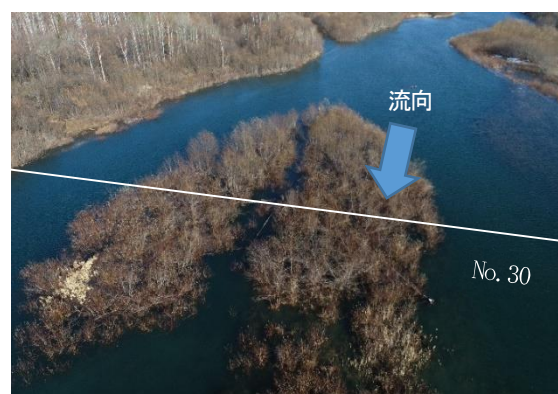


写真-4 浸水域の植生状況 (No. 30)



写真-5 陸上の山林地帯 (No. 30左岸)

(4) 作業日数の短縮

金山ダムの対象測線(9 測線, 延長約 8.5km)の H28～R2 年度までの作業日数は、1 班当たり換算で算出すると平均して 12 日程度(実質 2 班で 6 日)であった。

これに対し、UAV グリーンレーザによる現地作業日数は、R3～R5 実績から計測外の準備作業も含めて平均して 6 日程度で計測作業が完了しており、6 日程度の作業日数の短縮が図られていたと考えられる(表-6)。

表-6 年度別作業日数

測量種別	年度	作業日数	備考
直接計測※	H28	16	1班換算(8日/2班で実施)
	H29	10	1班換算(5日/2班で実施)
	H30	12	1班換算(6日/2班で実施)
	R01	12	1班換算(6日/2班で実施)
	R02	12	1班換算(6日/2班で実施)
	平均	12	1班換算実績
グリーンレーザ計測	R3	8	1班で実施(準備2日、計測6日)
	R4	5	1班で実施(準備2日、計測3日)
	R5	5	1班で実施(準備2日、計測3日)
	平均	6	1班平均実績

※直接測量：深淺測量及び河川横断測量

7. まとめ

以上の結果から、金山ダムにおける UAV グリーンレーザ測量を踏まえ、確認された事項を以下に取りまとめた。

① グリーンレーザにおける計測水深

グリーンレーザを用いて計測できたダム湖の水深は 2～3 m 程度であった。グリーンレーザによる水部の計測は水質や底質といった水部の状況により測深能力が異なるとされている²⁾が、かなやま湖の水質では、十分な成果を上げることができた。

② グリーンレーザによる計測幅

河川定期横断 9 測線(No.25～No.33)において、グリーンレーザにより計測できた横断幅は、全横断延長に対し、59%～77%の範囲について計測ができ、水深が浅いほど、計測範囲は広がる結果が得られている。

③ 安全性の向上

従来の河川横断測量に代替して上空から計測することが可能となったため、作業員の危険を伴う各種の作業が不要となった。また、害獣からの危険も回避することができ、安全性の向上が図れた。

④ 作業効率の向上

グリーンレーザ測量の作業日数は、従来の計測方法(12日)に対し、平均日数で6日間の削減(50%減)が図れた。以上の結果から、UAV グリーンレーザによる河川定期横断測量は、作業性、安全性、作業日数の短縮

が図れるものであり、今後の更なる活用も期待される技術であることと考える。

8. おわりに

本調査の結果、ダム上流域における浅い水深や樹木が繁茂する箇所での堆砂測量において、UAV グリーンレーザを使用した測量手法の有効性が確認できた。この手法は河川定期横断測量の代替案として採用され、短期間での測量を可能にし、安全性の向上も図ることができた。

近年の測量技術の進展により、地形データの三次元化が一般化しつつある中、堆砂測量においても、ダム貯水池を含めた流域全体を三次元で管理することが重要と考えられる。本調査で得られた成果は、今後の堆砂測量のさらなる発展と効率的なダム管理への貢献が期待できる。

参考文献

- 1) 国土地理院: UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案), P56, 2020.
- 2) 岡部貴之, 坂下裕明, 小澤淳真, 下村博之, 蒲恒太郎, 宮作尚宏, 川村 裕, 浅沼市男: ALB の河川縦横断測量への適用性の研究, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp. 55-60, 2014.