

世界最小の航空レーザ測深機（ALB）による 高密度計測と陸上計測の実験と利活用場面の想定

大鋸 朋生・金田 真一・戸村 健太郎・岡崎 克俊（アジア航測株式会社）

1. はじめに

近年、航空レーザ測深機（ALB：Airborne LiDAR Bathymetry）による面的な水深データ取得への期待が高まっているが、計測密度やシステムを搭載できる航空機などの課題があった。一方、これまで海域で運用されてきたALBを河川で適用するには、水部だけでなく陸部の計測精度も重要となる。そこで本稿では、小型航空機に搭載可能な世界最小の機材を用いた水域・陸域の計測事例の紹介とその計測精度について報告する。

2. 航空レーザ測深機（ALB）の概要

2.1 航空レーザ測深の原理・歴史

航空レーザ測深機（以降「ALB」と表記）の計測原理は、陸域航空レーザ計測と同様に、計測対象までの光（レーザ光）の往復時間から距離を算出する技術を用いている（図1）。

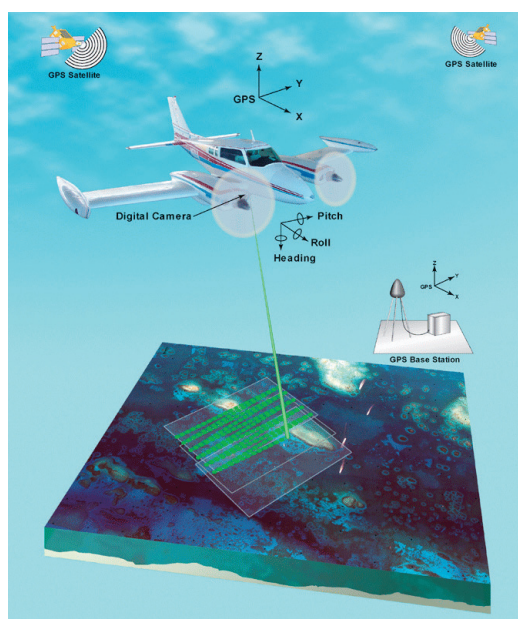


図1 航空レーザ測深の概念図¹⁾

ALBの歴史は、半世紀前の1960年代には研究開発が始まっていたが『水中では光の減衰が大きく、大水深の計測が難しい』という理由から、実業務においては可測深度の大きい音響測深手法が利用されていることが多い。しかしながら、潮流が速い水域、暗礁が多い水域、あるいは台風後で海が荒れた状態が継続している水域など、船舶による調査が困難な水域における安全な調査手法が望まれていた。また、船舶が進入できない極端に水深の浅い沿岸域、河川、湖沼などでは、調査員が自ら水域に立ち入る必要があるため時間的・コスト的に大きな課題があった。

2.2 日本におけるALBの事例

2003年に、海上保安庁がALB（Optech社製 SHOALS-1000）を初導入し、船舶での調査が難しい極浅海域で利用を開始した²⁾。

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震で被災した東日本の太平洋沿岸地域（仙台湾および宮古湾の合計161.3km²）において、海上保安庁が11日間で実施したALBによる海底地形測量の結果が発表され、広く世間に注目されることとなった。このときの測量では、既存の海底地形データ（約150m×約150mの範囲に1計測点）の900倍に達する高密度（5m×5mの範囲に1計測点）で詳細な海底地形を三次元的に把握しており、関係省庁が津波シミュレーションや海岸災害復旧における基礎資料として利用している^{3) 4)}。さらに、海上保安庁は、2014年に測深性能が向上した新型のALB（Teledyne Optech社製 CZMIL）を導入

し、同年10月から航空機2機体制での運用を始めている⁵⁾。

3. 実験に用いたALB機材の性能評価

3.1 ALB機材の比較

2015年8月時点で利用可能なALBの主要諸元ならびに仕様を表1に、また機材サイズをわかりやすく相対的な大きさを図示したものを図2に示した。

機材(A)は、小型化・省電力化・低コスト化に主眼を置いて開発されているため、小出力かつ532nmの単一波長で計測する。一方、他の機材では、大型化・大消費電力化・高コスト化するが、測深性能は向上する。その性能向上と引き換えに単位時間あたりの計測回数(パルスレート)はトレードオフの関係になるが、機材(DとE)では水深測定用のレーザ装置を2種類搭載することで測深能力とパルスレートの向上を両立させている。

なお、ALBの測深性能(計測性能)は、水の清濁度(透明度)を示す指標「セッキ水深」を利用して示す。水域では、その時々気象・水質条件の影響を受けて透明度が異なる。水は、清浄な時には澄んでいるため遠くまで見通すことができる(透明度が高い)が、汚れて濁っている時には遠くまで見通すことはできない(透明度が低い)。このため、光(レーザ光)を利用するALBの計測性能は、計測時の水の透明

表1 主なALBの主要諸元(主要諸元: 測深性能順に表記)

	名称	測深性能 (セッキ水深に対する倍数)	パルスレート (kHz)	重量 (kg)
A	VQ-820-G	～ 1	149	30
B	Chiroptera II	～ 1.5	35	80
C	LADS Mk III	～ 2.5	1.5	230
D	HawkEye III	～ 3	10 (深) 35 (浅)	170
E	CZMIL Nova	～ 4	10 (深) 70 (浅)	300



図2 機材サイズの比較

度によって大きく左右されて、一律に「○○m」と表記することができない。そのため計測性能は、計測対象水域の透明度に対してどの程度まで計測できるかを示すことになり、性能表では「セッキ水深に対する倍数」として表示される。

3.2 ALB機材の選定

このような周辺環境の変化を受け、弊社は水

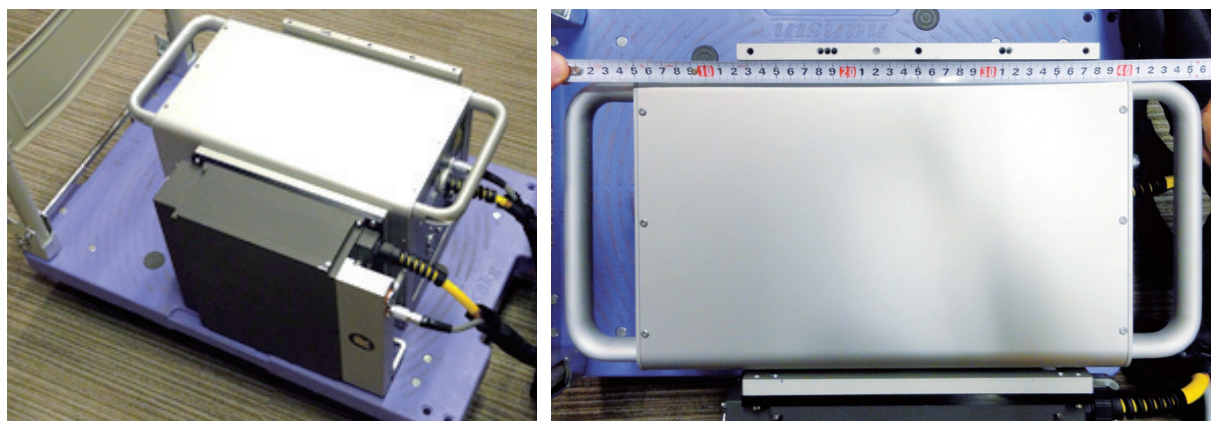


図3 RIEGL LMS社製 VQ-820-G (左図: 外観、右図: 真上からの見た状況)

域での精度検証と今後の航空レーザ計測の適用分野拡大による需要増加を念頭におき計測実験を行った。機材はパルスレートが高く、かつ小型航空機に搭載可能という理由から、図3に示す機材を採用した。この機材は最も長い一辺が運搬用ハンドルを含めて約45cm、重量は30kg程度であるなど可搬性は高い機材であり、先端測量技術 no.106 で紹介された機材である^{6) 7)}。

3.3 VQ-820-Gの特徴

本計測実験で採用した機材は小型であるがゆえにレーザ光出力は小さく測深性能は最も非力と言えるが、低出力の単波長レーザを採用することでレーザ生成装置にかかる負荷を最小化し、パルスレートを増大させて水域の計測密度を陸上並みに維持可能である(表2)。このようにして実現したパルスレートの高さにより、“浅い水域”では高密度(1点/m²)で水面下の詳細な地形把握を期待できる。高密度計測ができるという特性をさらに生かすため、計測実験では計測密度向上の点で利点となる低速飛行(約100kt)が可能な小型航空機を採用した(図4)。

表2 VQ-820-Gの詳細諸元

項目	内容
レーザ波長	532nm(単一波長)
パルスレート	最大 520kHz(実質 149kHz)
レーザ出力	200mW
レーザビーム径	1mrad 対地高度 600m 時に直径 60cm
レーザクラス	3B
計測対地高度	600m
スキャン頻度	50-200Hz

3.4 精度検証

1) 陸域における精度

①目的

ALBの陸上計測のうち高さの性能を確認するため、陸域用機材のキャリブレーションサイトで精度検証を実施した(図5)。

②検証方法

本稿で述べる精度検証および計測実験は表3に示す計測諸元で実施した。

③結果

標高は14点の検証点で精度検証の結果、平均二乗誤差は0.04m、最大値は0.09mであった(表4)。水平方向は2棟の地物、合計8か所で精度検証を実施した(図6および表5)。これら



図4 小型航空機(C206)への搭載状況

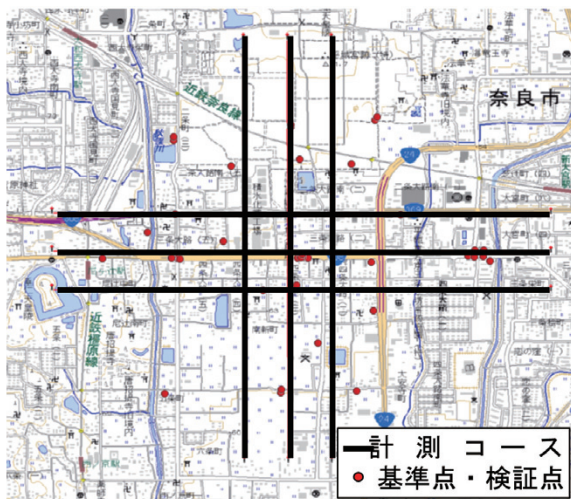


図5 キャリブレーションサイト

の精度検証結果から、選定機材は陸上用レーザシステムと同等の精度を達成していることを確認した。

2) 水域における精度 (高さ)

①目的

ALBの水域計測性能を確認するための精度

表3 計測諸元

対地高度	600m
照射密度	3点/㎡
サイドラップ	30%
パルスレート	149kHz
スキャン角度	42度

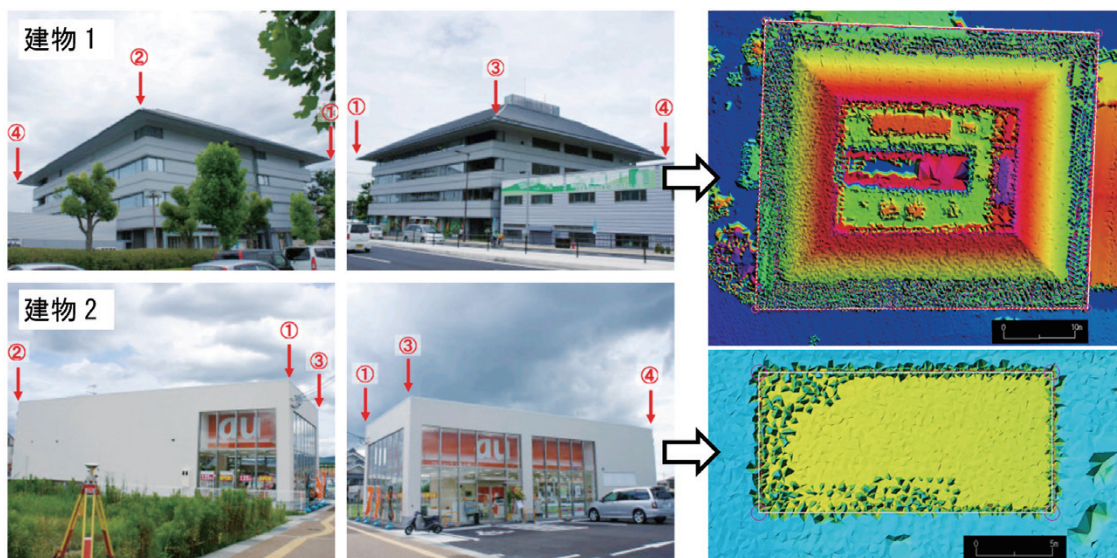


図6 キャリブレーションサイト (建物) と計測値との比較状況

表4 精度検証結果 (標高)

GCP	E (m)	N (m)	Elevation (m)		Difference (m)
			Static GPS	ALB (VQ820G)	
102	-18745.364	-145401.271	66.123	66.11	-0.01
103	-18301.656	-145374.377	63.464	63.46	-0.01
104	-19340.92	-146199.969	65.106	65.19	0.09
105	-18893.247	-146390.375	63.033	63.01	-0.03
106	-18323.124	-146223.702	60.655	60.69	0.03
108	-18797.183	-146984.574	59.352	59.37	0.02
109	-18398.379	-146994.396	58.923	58.95	0.03
122	-18745.381	-145415.018	65.98	65.96	-0.02
123	-18292.199	-145354.976	63.777	63.78	0.01
124	-19329.313	-146201.072	64.978	65.02	0.04
125	-18897.082	-146389.768	62.949	62.95	0.00
126	-18326.037	-146223.742	60.695	60.69	0.00
128	-18801.833	-147003.461	59.569	59.59	0.02
129	-18401.883	-146994.362	58.904	58.95	0.05

Num. of Data	RMSE (m)
14	0.04

※実施日：2013年5月3日

表 5 精度検証結果 (水平)

		Static GPS		ALB(VQ-820-G)		Absolute distance (m)
		X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
建物 1	①	-17781.304	-146191.651	-17781.280	-146191.770	0.12
	②	-17779.871	-146151.050	-17779.762	-146151.238	0.22
	③	-17734.550	-146191.568	-17734.736	-146191.462	0.21
	④	-17733.027	-146152.809	-17733.175	-146153.022	0.26
建物 2	①	-18695.068	-146195.620	-18695.140	-146195.484	0.15
	②	-18695.154	-146176.396	-18695.254	-146176.261	0.17
	③	-18685.836	-146195.581	-18685.805	-146195.429	0.16
	④	-18685.920	-146176.344	-18685.919	-146176.206	0.14

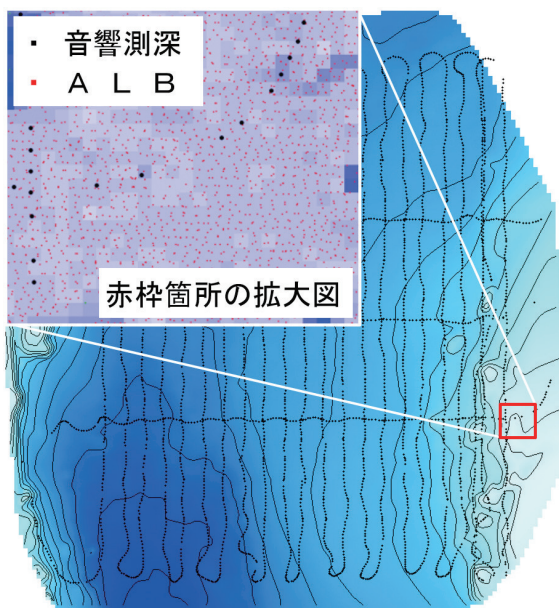


図 7 音響測深との検証

検証を実施した。

②検証方法

水域における選定機材の精度検証を、シングルビーム音響測深機(千本電気社製 PDR-2200)の計測成果と比較して実施した(図7)。ALBの計測水深から作成した水底地形(解像

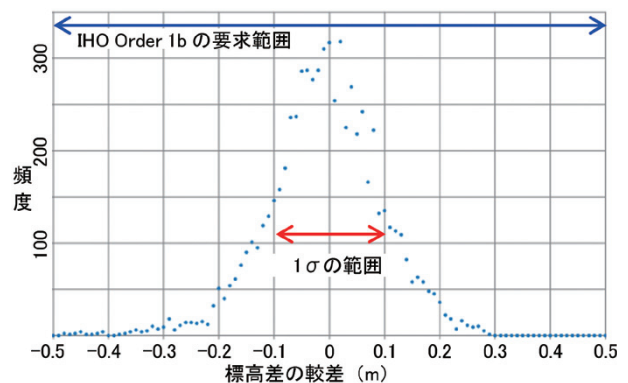


図 8 ALBと音響測深の較差分布

度は1m)と24測線(南北21測線、東西3測線)で実施した音響測深成果の標高差を算出した。

③結果

この結果、ALBの測定標高(水深)は、音響測深に対して標準偏差で0.1m程度の性能を有しており(図8)、国際水路機関の定めるIHO Order 1b規格(±0.5m)⁸⁾を十分に満たすことを確認した。

3) 水域における精度(測深性能)

①目的

ALBの測深性能を確認するため、和歌山県の

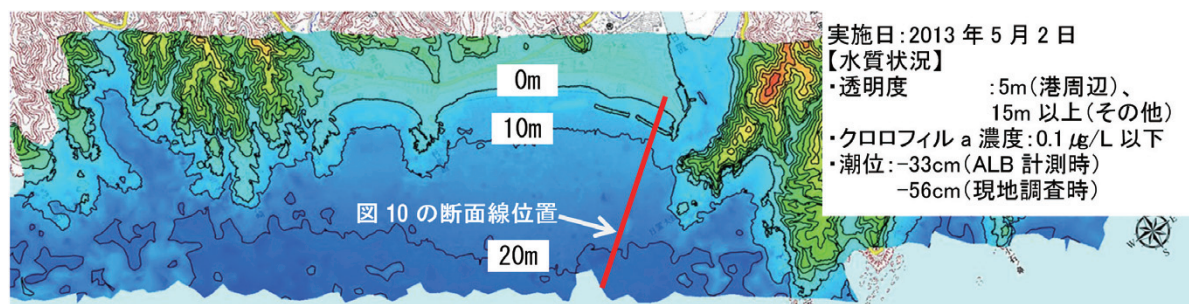


図 9 計測結果(等深線と段彩図を重ね合わせ)

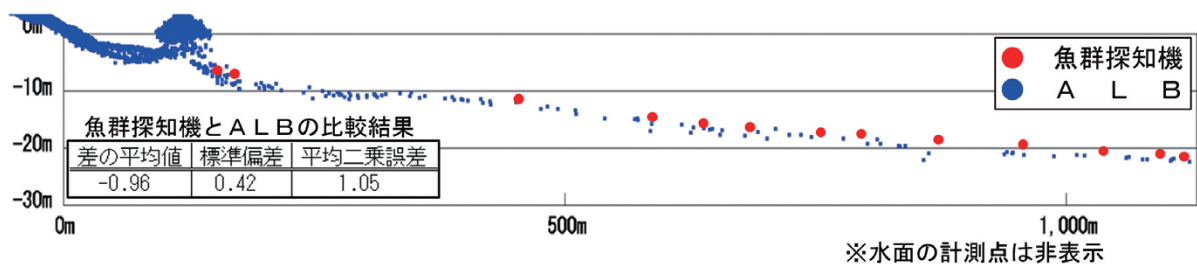


図 10 現地調査結果との比較

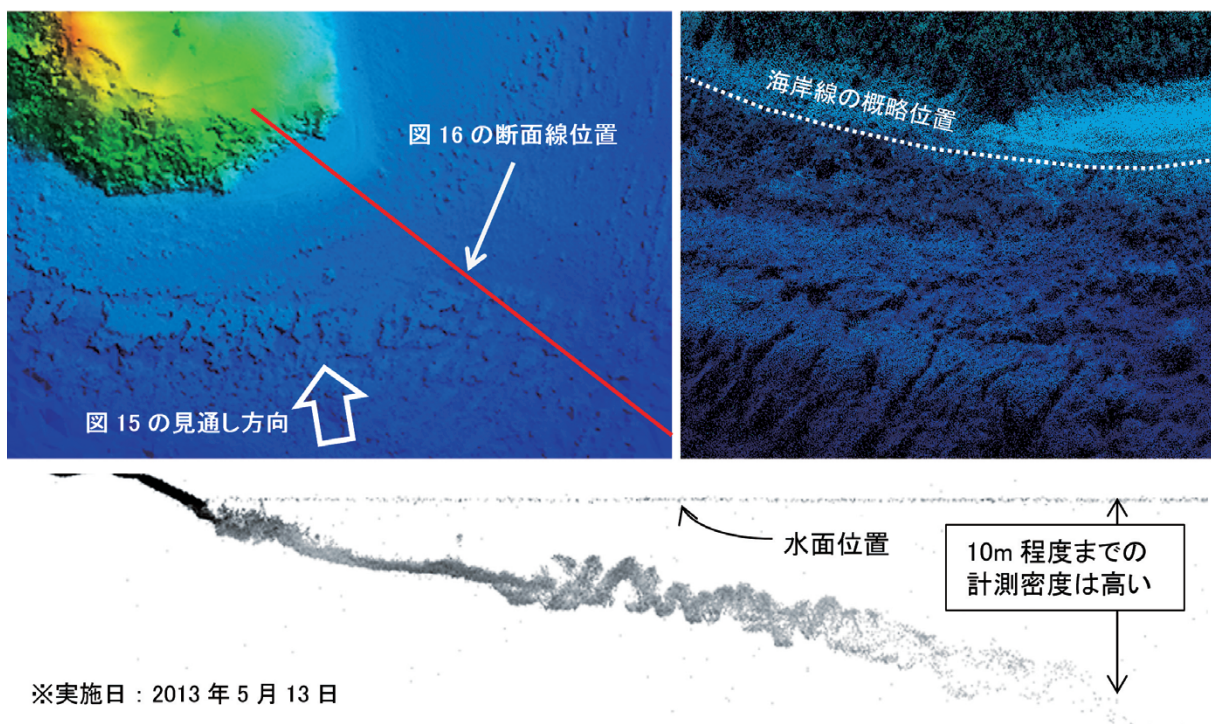


図 11 段彩図 (左上)、鳥瞰図 (右上)、断面図 (下)

南紀白浜付近で測深性能の評価を行った(図9)。

②検証方法

この海域ではALBによるレーザ計測と魚群探知機による簡易的な音響測深を同日に実施し、ALBの測深性能を評価した。

③結果

比較結果は、標準偏差で 0.42m (平均二乗誤差は 1.05m) であり(図 10)、ALBは一定の精度を保持していると判断した。

4) 水域における精度 (計測密度)

①目的

奄美大島南部海域で、沿岸域に発達する珊瑚礁の複雑な地形を利用して計測密度の実験を行った。

②検証方法

計測地点別の計測密度を、実際の計測データから算出する方法で確認した。なお、計測当日のセッキ水深は、航空機上から海面を目視観察して海底地形が視認できた箇所の水深値を海底地形図で特定し、その値をセッキ水深とする暫定的な方法で決定した。

③結果

計測結果を図 11 に示す。この水域では珊瑚礁による複雑な海底地形が水深 10m 程度まで詳細に把握でき、浅い水域の地形データは陸上計測時と同等の性能で計測できることを確認した(図 12)。なおセッキ水深の測定結果は 20m 程度である。

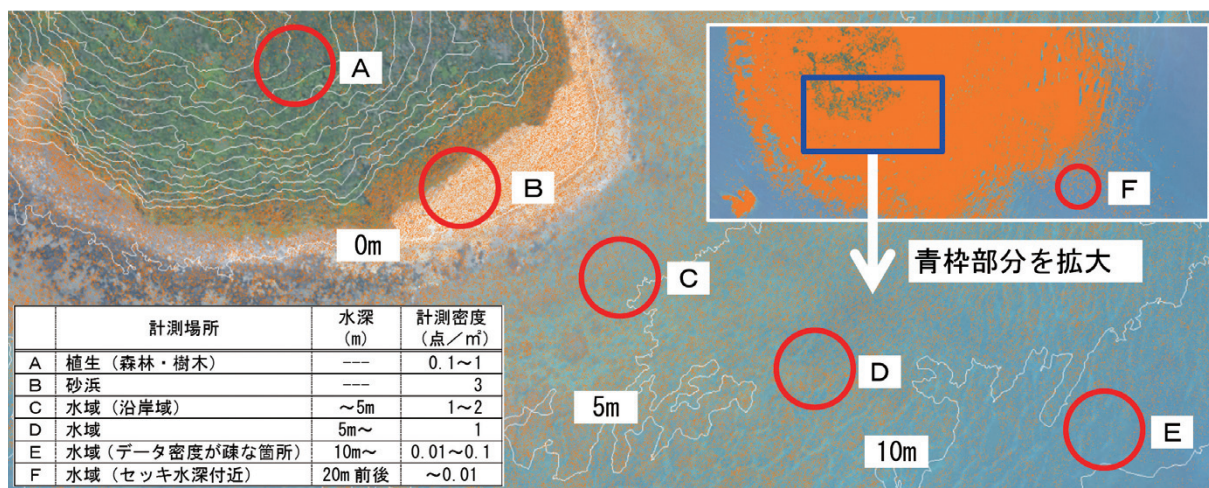
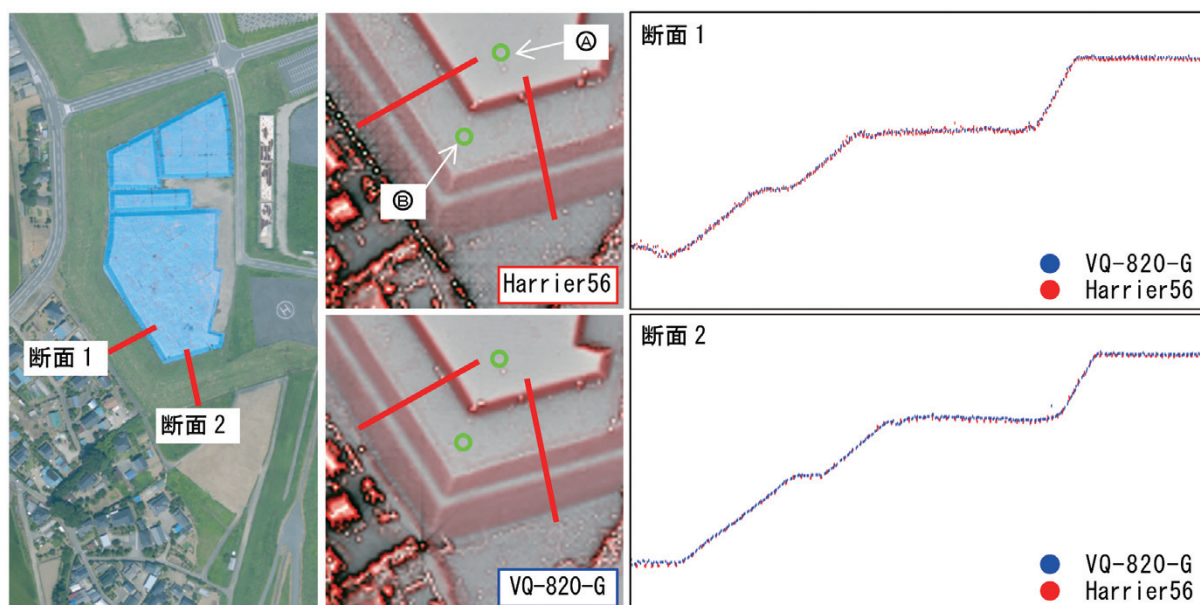


図 12 計測密度と水深について



※左：簡易オルソフォト、中：赤色立体地図、右：比較断面図（2014年8月1~2日）

図 13 陸域用システムとの比較

4. ALB機材を用いた実験

4.1 陸域における計測精度

①目的

ALBのフットプリントは、通常の陸域計測用のレーザと比較して2倍程度大きくなる特性を有しているため、陸域で計測した場合の影響について確認することを目的とした。

②実験方法

茨城県猿島郡五霞町付近の盛土箇所に於いて、陸域用レーザ機材 (Trimble 社製 Harrier56) との比較計測を実施した (図 13)。

計測密度は機材仕様が異なるため同一値ではない。計測密度は陸域用レーザ機材が 5.7 点/m²であるのに対して、ALBは 4.5 点/m²であった。計測対地高度はともに 600mである。検証方法は、盛土箇所の平坦面において直径4mの検証円①、② (図 13 の盛土平坦面に表示された緑色の円) を設定し、円内に存在するレーザ計測点の点数、平均標高、機材間の平均標高差を確認した。また、ALBのビーム径 (フットプリント) が大きくなることにより、盛土部の勾配変化点が把握しにくくなることや、形状が

表 6 平坦面における計測標高

		Harrier56	VQ-820-G
平坦面①	円内の計測点数(点)	57	30
	平均標高(m)	19.04	19.10
	平均標高の差(m)	0.06	
平坦面②	円内の計測点数(点)	39	35
	平均標高(m)	16.45	16.53
	平均標高の差(m)	0.08	

表 7 断面上の標高

断面 1 (距離 49.833m)	算出した標高点数(点)	51
	平均二乗誤差(m)	0.05
断面 2 (距離 52.76m)	算出した標高点数(点)	54
	平均二乗誤差(m)	0.07

膨らむ等の影響が懸念されたため、盛土箇所
で横断線1、2を設定し、重ね合わせ図により
検証を行った。

なお、本計測実験では対地高度 600m で計
測飛行を行っており、フットプリントはそれぞれ
約 30cm(陸域用機材)、約 60cm(A L B) である。

③結果

平坦面における標高の違いは、平坦面①と
②それぞれで 0.06m と 0.08m であり、問題な
い精度で計測できていることを確認した(表6)。
横断図の重ね合わせでは、概ね良好に盛土形
状を再現できた。その精度を平均二乗誤差にて
算出したところ、それぞれ 0.05m、0.07m であり、
高い計測精度を達成した(表7)。

4.2 計測可能な対地高度

ここまでの検証において、A L B による陸域
計測は、公共測量が要求する精度水準を達成
できることを確認した。標準的な A L B の計測
対地高度は 400 ～ 600m であり、これは回転
翼航空機による陸域航空レーザ計測の運用高
度に相当するが、計測可能高度の幅が広がれ
ば陸域用レーザ機材に置き換えた運用機会
は増加する。この計測高度と使用されているレー
ザ光の波長帯は、密接に関係する。A L B で

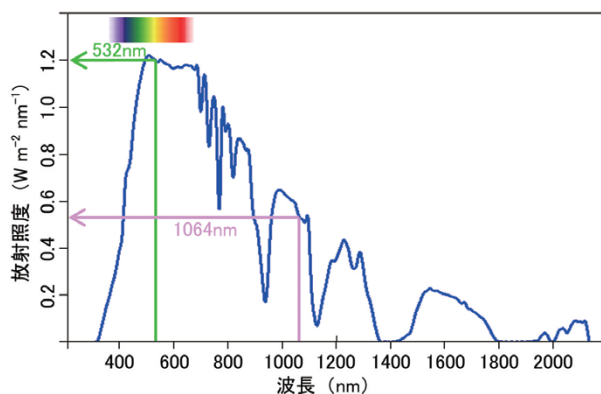


図 14 太陽光の分光放射照度

利用されている可視光帯域のレーザ光は、太陽
光の影響を受けることが知られている。太陽光
が含む分光放射照度を図 14 に示す。この図は、
太陽光では波長 532nm の光が波長 1064nm
の光に対して 2 倍以上含まれることを示す。つ
まり、A L B が利用する 532nm のレーザ光は
太陽光の干渉を大きく受け、1064nm の近赤外
波長で計測する陸域用機材と同等の対地高度
では運用できないことを示唆している。

①目的

陸上用レーザ計測機を実運用する場合には、
高度を上げて計測する機会も想定されるため、
計測可能な対地高度について検証実験を行っ
た。

②実験方法

陸域用レーザ機材で実験対象地域の計測を
実施したのち、A L B が同一地域を 3 種類の高
度(600m、1200m、1800m)で計測した(表
8 の上側の図)。

③結果

対地高度が 600m と 1200m の計測では計測
密度は計画値の 50% 程度に減衰している。対
地高度が 1800m の計測では計測密度は大きく
落ち込み、計画値の 1/4 程度に低下していた。
なお、陸上用レーザ機材の計測結果が計画値
を上回っているのは、回転翼航空機の飛行時
に発生した動揺(飛行ムラ)が影響を与えたも
のと判断している。

表 8 飛行高度の違いによる計測密度の違い

Harrier56		VQ-820-G			
対地飛行高度	600m	600m	1200m	1800m	
計画計測密度	5.7	4.5	2.3	1.6	
①密集植生	4.4 (77%)	2.5 (56%)	1.3 (57%)	0.3 (19%)	
②住宅地	6.7 (118%)	2.5 (56%)	0.9 (39%)	0.5 (31%)	
③河川堤防	4.7 (82%)	2.4 (53%)	1.1 (48%)	0.7 (44%)	
④粗な植生	6.1 (107%)	2.3 (51%)	1.1 (48%)	0.4 (25%)	

※計測密度の単位は点/m²、括弧内の%は計画値に対する比率 (2014年8月1~7日)

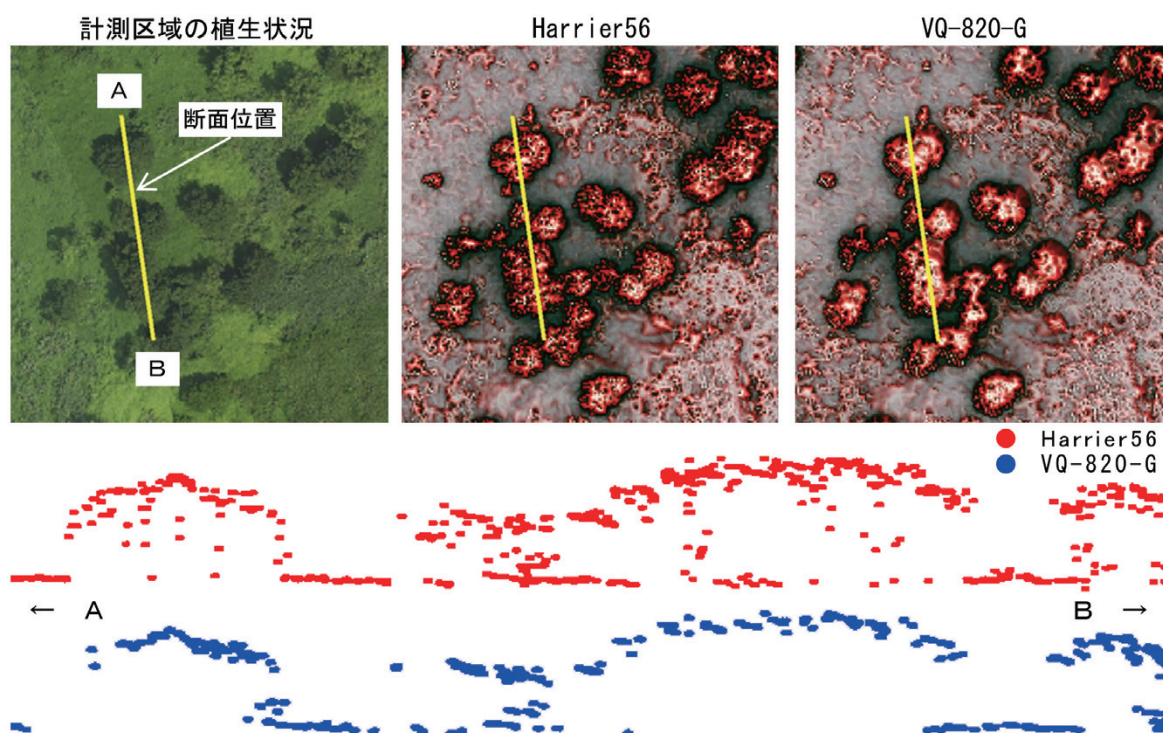


図 15 植生下の計測状況

4.3 植生下における計測状況

①目的

A L Bのフットプリントは、通常の陸域計測用のレーザと比較して2倍程度大きくなる特性を有している。この特徴を踏まえて、樹木下におけるデータの取得状況について確認した。

②実験方法

密集植生箇所において、陸域計測システムとA L Bとの比較・検証を行った。

③結果

計測結果の断面図を図15に示す。A L Bでは樹木下におけるデータの取得率が著しく低下

表 9 グラウンドデータ採用率

	Harrier56	VQ-820-G
フィルタリング前の点数	70,071	35,984
グラウンドデータ点数	16,295	4,569
グラウンドデータ採用率 (%)	23.3	12.7

しており、陸域用レーザ機材に比べて植生下の計測能力は1/2程度に低下していた(表9)。

なおレーザ光が植生下の地表面を検出できない理由として、反射パルスのS/N比が劣化して受信機が信号を検出できないこと等が要因として考えられる。

5. ALBの利活用場面の想定

5.1 計測事例1(水域と陸域のシームレスな計測の実現)

ALBはいくつかの制限・課題があるものの、

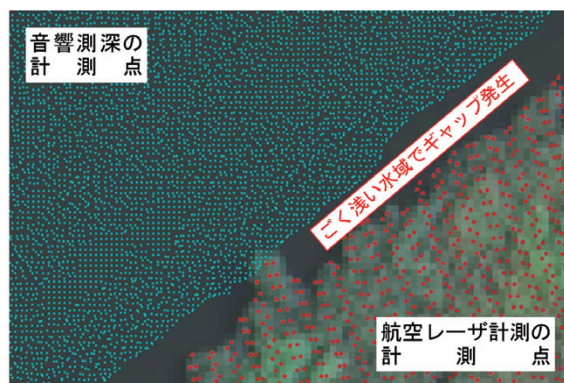
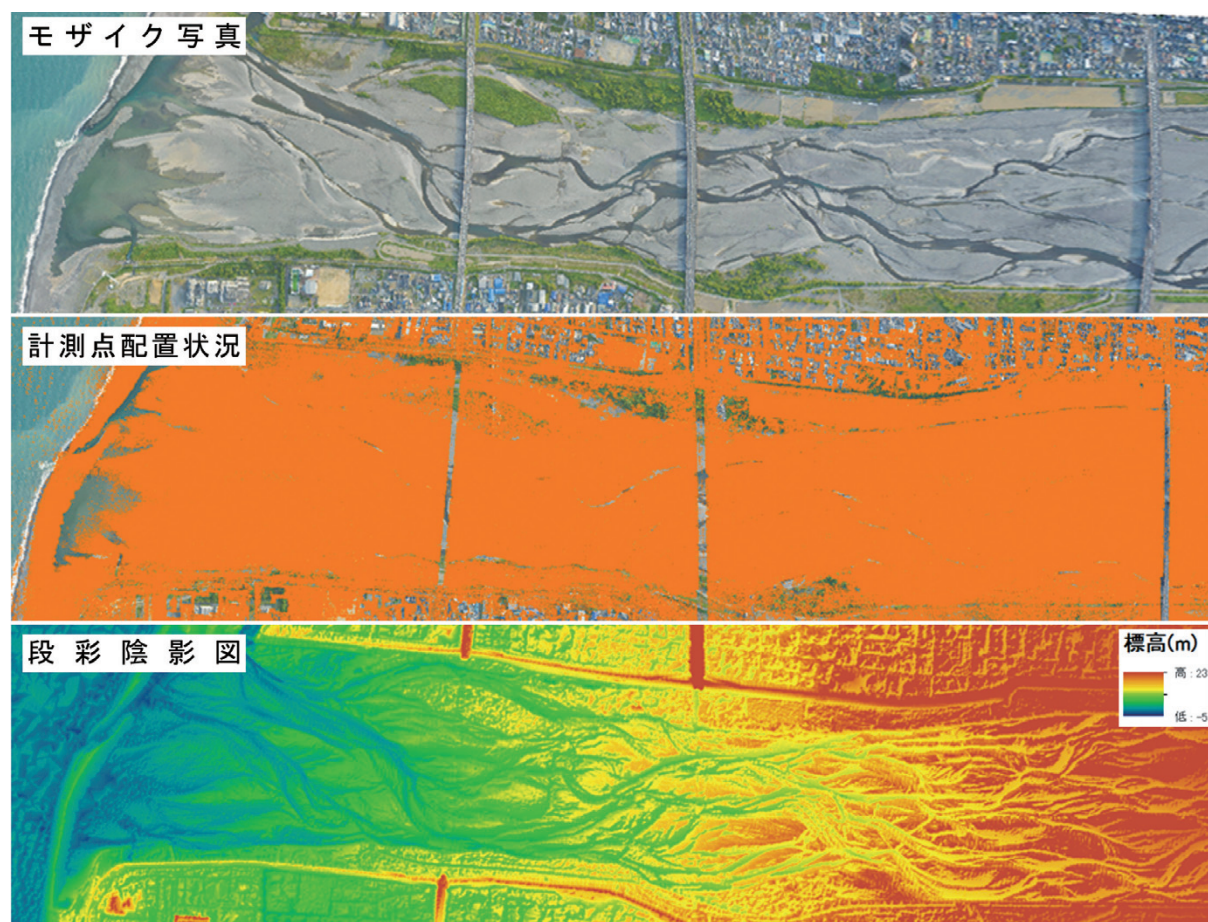


図 16 水涯線付近で発生するギャップ (模式図)

一度の飛行で水域と陸域の同時計測を実現可能なことを確認した。

さて現在、図 16 に示すような水涯線付近の計測を実施する場合、水域は船舶で音響測深を実施し、陸域は航空レーザ測量を行うことが一般的である。しかし、この模式図に示すとおり、陸域航空レーザ計測ではレーザ光の物理



※実施日：2013年5月23日。モザイク写真はゆがみを含む

図 17 安倍川下流部の計測結果

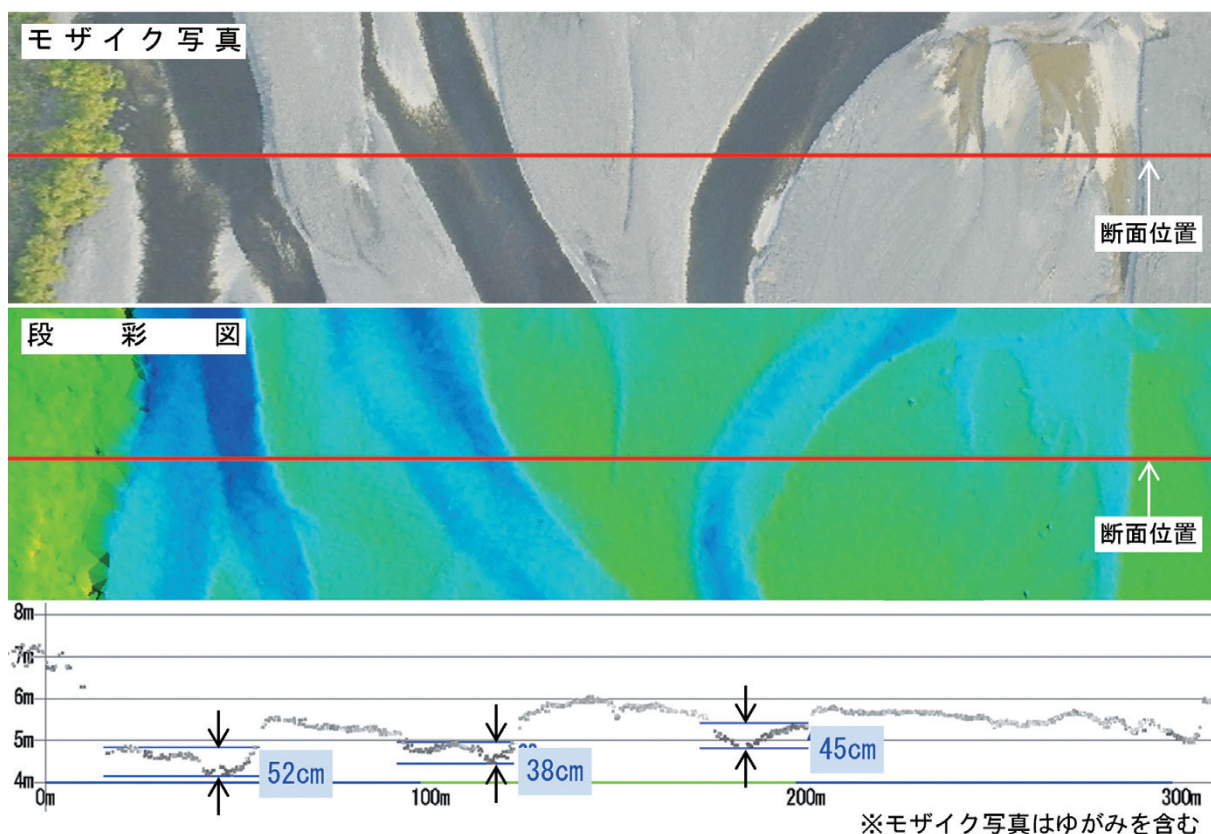


図 18 きわめて浅い河川の計測事例 (横断面図)

的制限で水底の計測はできない。また、船舶は水深が浅いために水涯線に近づけない。

その結果、水涯線付近は「ギャップ領域」として音響測深機の測定範囲外に取り残される。この「ギャップ領域」の水深データを得るためには、調査員が水部に立ち入って GNSS による単点観測を実施することになる。潮汐が存在する水域であれば、満潮時にゴムボートや水上バイクなどを利用して音響測深を実施し、さらに干潮時に陸域航空レーザ計測を実施して汀潮線付近のデータを取得したのちにデータ接合処理を行うため多くの手間を要する。このような状況下で ALB を利用し、一度の飛行で水域と陸域をシームレスに統合した事例を紹介する。

静岡市を流れる安倍川の下流部において、網状河川の地形を面的把握した事例を示す (図 17)。安倍川下流部は洪水時に河床や流路が大きく変化する網状河川であり、水深のきわめて浅い箇所が多く ALB による計測が有効と考え

る。計測時の潮位は 65cm、河口部の一部は濁りのため計測不能 (図 17：中段) であった。グラウンドデータの平均密度は、約 1.5 点/㎡である。水底の計測密度は、モザイク写真で視認できる程度に透明度が良くない海域では極端に低下していた。

次に、パルスレートの高さ (149kHz) が貢献して陸域同等のきめ細かさで水底地形の計測を実現した事例を示す。図 17 のさらに上流側の地点において、3つの流路 (水深は図の左側から、それぞれ 52cm、38cm、45cm) で計測を行った (図 18)。極めて浅い水域は船舶による計測は現実的ではないため、ALB の活躍が期待できるシーンといえる。

5.2 計測事例2 (河川横断測量への適用可能性)

現在、河川定期横断測量に航空レーザ測量を適用する試みが行われており、関係機関・業界団体が協議検討・精度検証等を進めている。

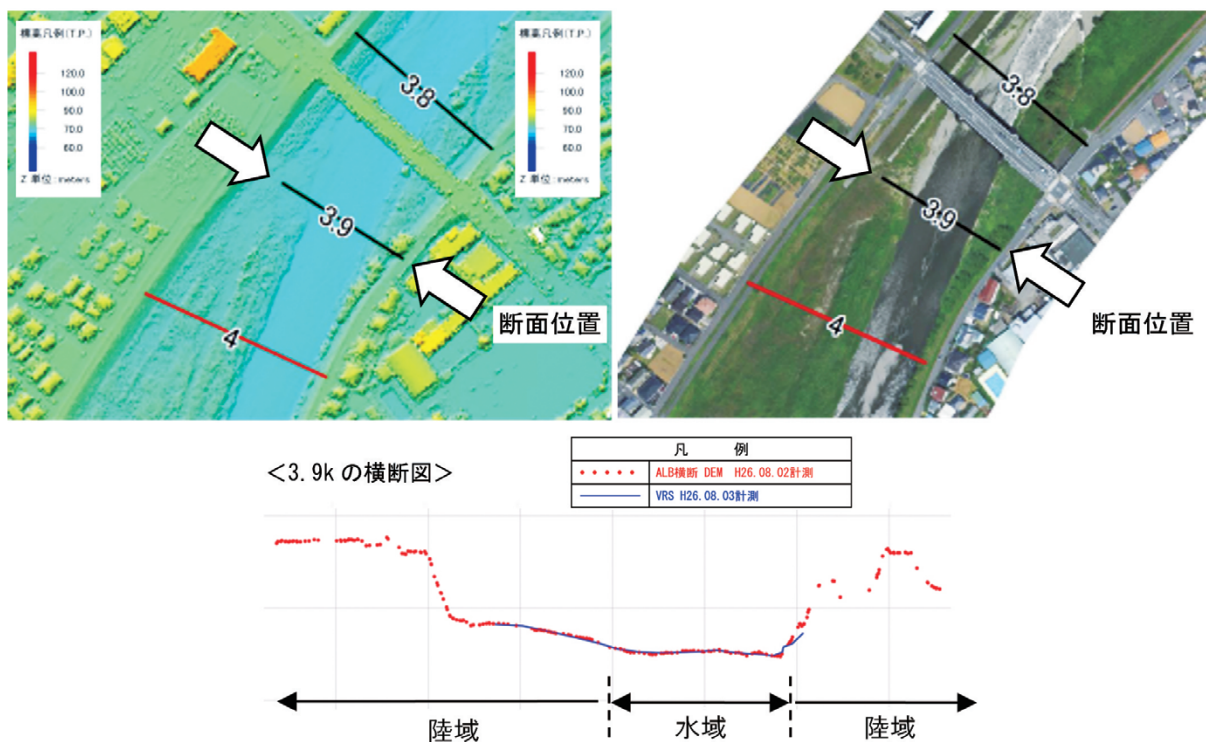


図 19 横断面図による検証

水部へのALB適用可能性を考慮し、都内の一級河川でVRSによる横断測量とALB計測を比較した(図19、表10)。ALBは、陸上部では植生等の影響を受けて十分に計測できていない場合があるが、水部ではVRS測量成果と同等の計測精度である。水部では、透明度などの影響で計測できない箇所も存在するが、ALBは短時間のうちに水底地形の面的な把握が実現できる。

6. まとめ

6.1 まとめと課題

本稿では、航空レーザ測深機(ALB)の水域・陸域での計測能力を検証した。本計測実験に用いたALBは単独使用も可能だが、既存の「陸域航空レーザ測量システム」と組み合わせることで効果を発揮する。

本計測実験では「透明度」の良好な浅い水域において微細地形の計測を実現し、水域・陸域の双方で良好な計測性能を発揮した。しかし水域では、計測時の「透明度」が計測阻

表 10 標高差の較差

最大値	0.14
最小値	-0.18
平均値	0.00
平均二乗誤差	0.06

害要因となることも判明した。台風や低気圧の通過に伴う時化の後や降雨後・出水後など、透明度が悪化すると極端に計測性能が落ちた。計測実験期間中に日本へ接近した台風(2014年11号、12号)の通過後数日間は、水面高しか計測できなかった。

陸域航空レーザ計測では、コース間ラップを通常以上に高めてさまざまな角度からレーザ光を照射し、地形や植生の影響を低減させる等の対策を行うが、「透明度」が常に変動する水域では同一箇所を複数回計測する等、「透明度」の良好なタイミングを逃さない対策が必要となる。

このほか「透明度」以外の諸条件として、水中の懸濁度や水色、水底の砂・泥などの底質の色、天候、日照等も計測の成否を大きく左右

するため、これらに関する研究と経験の蓄積も必要である。この点については、小澤ほか⁷⁾が精力的に取り組んでいる。

6.2 今後の展望

ALBの技術開発は現在も継続しているが、現時点では取り扱い難度が高くユーザ自身が研究・実験・検証のPDCAサイクルを通して経験を蓄積する必要があるが、水底計測を実現する技術への期待度は高い。

なお、日本国内は地形変化に富む山間地が多く占めるため、河川への適用に際してはALBが持つ弱点(対地飛行高度を大きく取れない、パルスレートが陸上用機材に比べて低い)を補う低高度・低速度で運用可能な回転翼航空機の採用が効果的である。

2015年8月時点では、本計測実験の準備を進めていた2012年には存在しなかった機材が開発されている。二波長(532nmと1064nm)で陸域と水域の同時計測を実現する機材(Leica Geosystems社のChiroptera II)や、リモートセンシング的用途も視野に入れた三波長(532nm、1064nm、1550nm)のマルチスペクトル機材(Teledyne Optech社のTITAN)などであり、機材の選択肢は増えている。

最後に、航空レーザ測量が今まで実現できなかった水域の詳細地形を把握できるという付加価値を付けた形で、ALBが今後さらに発展することを期待する。

7. 謝辞

本計測実験に際しては、社内外、各社・機関のみなさまに多大なご支援・ご協力を頂いた。ここに記して御礼申し上げます。

8. 参考文献

- 1) http://gulfsci.usgs.gov/tampabay/data/1_bathymetry_lidar/
- 2) 航空レーザ測深機のテスト飛行について、海洋情報部技報、vol. 22、2004
- 3) 海上保安庁・国土交通省水管理・国土保全局連携による東北地方太平洋沖地震による津波後の海底地形測量の実施結果について、国土交通省水管理・国土保全局および海上保安庁、平成23年7月21日
- 4) 被災地における航空レーザ測量、海洋情報部研究報告、no. 49、2012
- 5) 新たに導入した航空レーザ測深機「CZMIL」の紹介、海洋情報部研究報告no. 52、2015
- 6) 宇野女ほか、航空機搭載型グリーンレーザ計測の実施報告と精度検証、先端測量技術、no.106、2014
- 7) 小澤ほか、ALB(航空レーザ測深)の河川測量への適用、先端測量技術、no.106、2014
- 8) IHO STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS, 5th Edition, February 2008

■執筆者

大鋸 朋生(おおが ともお)

アジア航測株式会社



(共著者) 所属は筆頭著者に同じ

金田 真一(かねだ しんいち)

戸村 健太郎(とむら けんたろう)

岡崎 克俊(おかざき かつとし)