

グリーンレーザ(ALB)を用いた河川測量の試み

ATTEMPT OF RIVER SURVEY USING AIRBORNE LASER BATHYMETRY (ALB)

山本 一浩¹・中村 圭吾¹・福岡 浩史²・戸村 健太郎³・金田 真一⁴
Kazuhiro YAMAMOTO, Keigo NAKAMURA, Hirofumi FUKUOKA
Kentaro TOMURA and Shinichi KANETA

¹正会員 博(工) 国土交通省 近畿地方整備局 福井河川国道事務所 (〒918-8015 福井市花堂南2-14-7)

²非会員 国土交通省 近畿地方整備局 福井河川国道事務所 (同上)

³正会員 修(工) アジア航測株式会社 防災地質部 (〒215-0004 川崎市麻生区万福寺1-2-2)

⁴非会員 修(工) アジア航測株式会社 空間情報事業部 (同上)

In the rivers throughout the country, periodic transverse surveying by actual measurement is being carried out for the purpose of planning river management and river improvement. However, surveying under the water has caused danger in working especially in a rapid river, and it takes a great deal of time to measure one survey line. To solve this problem, river survey was carried out by using ALB which is a recently-developed technique and can measure under the water surface. In this study, in order to create a cross section from point cloud data by using ALB which can perform underwater measurement in recent years, the accuracy verification with the actual measurement was carried out and the transverse map drawing was made in surveying under the water surface. We also considered the application to river management that makes full use of the characteristics of aviation laser measurement.

Key Words : *Airborne Laser Bathymetry, river management, river surveying, accuracy verification*

1. はじめに

全国の一級河川では河川管理や河川改修計画のため、実測による定期横断測量が実施されている。しかし、河川定期横断測量は、縦断方向に200m毎に一測線程度の情報量であり、護岸前面の局所的な洗掘や、瀬・淵の詳細な地形など、河川管理が求める情報が十分得られないという課題がある。また、河川測量における水部の計測手法は、主に音響測深機による計測が行われているが、船舶により河道内で作業を行うため、急流河川においては作業に危険が伴うとともに、計測器が測線上に位置しているかを絶えず確認しながらの慎重な作業となり、一測線の計測に大幅な時間を要するといった課題もある。

前述のような課題に対し、陸部の河川測量においては航空レーザ計測で取得された点群データを利用した、横断面図作成の事例研究が行われ、精度検証や横断面図作成までの手順等が作成され実用化に向けた動きが見られる¹⁾²⁾。

一方、水部においては、近年の計測技術として、水中を透過するグリーンレーザを用いた航空レーザ測深(以

下:ALB)が開発され、ALBによる河川測量への適用の研究が実施されている³⁾が、精度検証の報告が少なく点群データからの横断面図作成の手順等がない現状である。

以上のことを踏まえ、本研究では深淺測量において、近年、水部の計測が行えるALBを用いた点群データからの横断面図作成を目的に、実測との精度検証を行った。また、航空レーザ計測の特性を生かした河川管理への応用を考察した。

2. ALBの特徴

本計測で用いるALB機器は、水部用と陸部用の2つのレーザを搭載し同時に運用するタイプである。このうち水部用のレーザは、可視域のレーザ光(緑色)を用いることで、河床の地形も計測が可能となる。なお測深性能は、透明度や水質に大きく依存するが、Chiroptera IIのカタログによると透明度の1.5倍とされ、最大15mまで測深でき、その精度は $\pm 0.15\text{m}$ である。計測イメージを図-1に、仕様を表-1に示す。

3. 河川測量の方法

(1) 九頭竜川の特徴

ALBの計測対象区間は、扇状地に位置しており、河床勾配は1/280～1/1,500と変化に富んでいる。水質は、日野川合流点の上流でA類型を満足するなど、比較的きれいな河川である。河川環境は、河道内に木本類や草本類の繁茂が顕著になり、砂州河原が減少していることから、礫河原の再生事業などが行われている。特に魚類では、サクラマスやアユ等が生息し、九頭竜川中流域はカマキリ(アラレガコ)の生息地として国の天然記念物に地域指定されている。

(2) 計測諸元

ALBの計測延長は、距離標18.0k～29.0kの約10.8km、計測幅は約500m、計測面積は5.32 km²（陸部4.42 km²、水部0.92 km²）を対象とした(図-2)。

使用する機体は、回転翼とし飛行速度を遅くすること

表-1 使用する機器の仕様

項目	機器仕様
水部用レーザ	35kHz(波長515nm)、波形記録方式
陸部用レーザ	最大500kHz(波長1064nm)、波形記録方式
運用対地高度	水部：500m、陸部：～1,600m
スキャン方式	楕円方式（オブリークスキャン）
計測密度 (対地500m)	水部：約1点/m ² 陸部：約10点/m ²
水部の測深精度	0.15m (2σ：95%)
測深性能	～15m程度（～1.5×セッキ水深）
デジタルカメラ	撮影バンド数 4バンド（RGB-近赤外）同時取得 （機械式FMC装備）
	画素数 8000万（10,320×7,752）

表-2 計測諸元

項目	計測諸元	
	水部	陸部
使用機器	回転翼	
飛行速度	72km/時（20m/秒）	
対地高度	483m～596m	
飛行高度	600m	
レーザ発射頻度	35,000発/秒	430,000発/秒
レーザスキャン角	前/後 ±14度、左/右 ±20度	
レーザスキャン頻度	約24回転/秒	約70回転/秒
サイドラップ率	50%	
計測密度	約3点/m ²	約44点/m ²
デジタル地上解像度	6cm/pixel程度	
コース数	10コース	

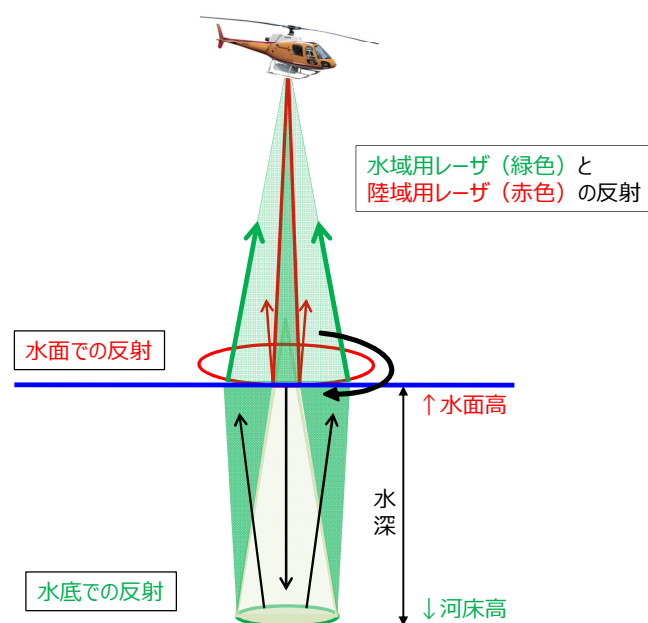


図-1 ALB機材による測深イメージ
で水部での計測密度を約3点/m²確保するように計画した(表-2)。

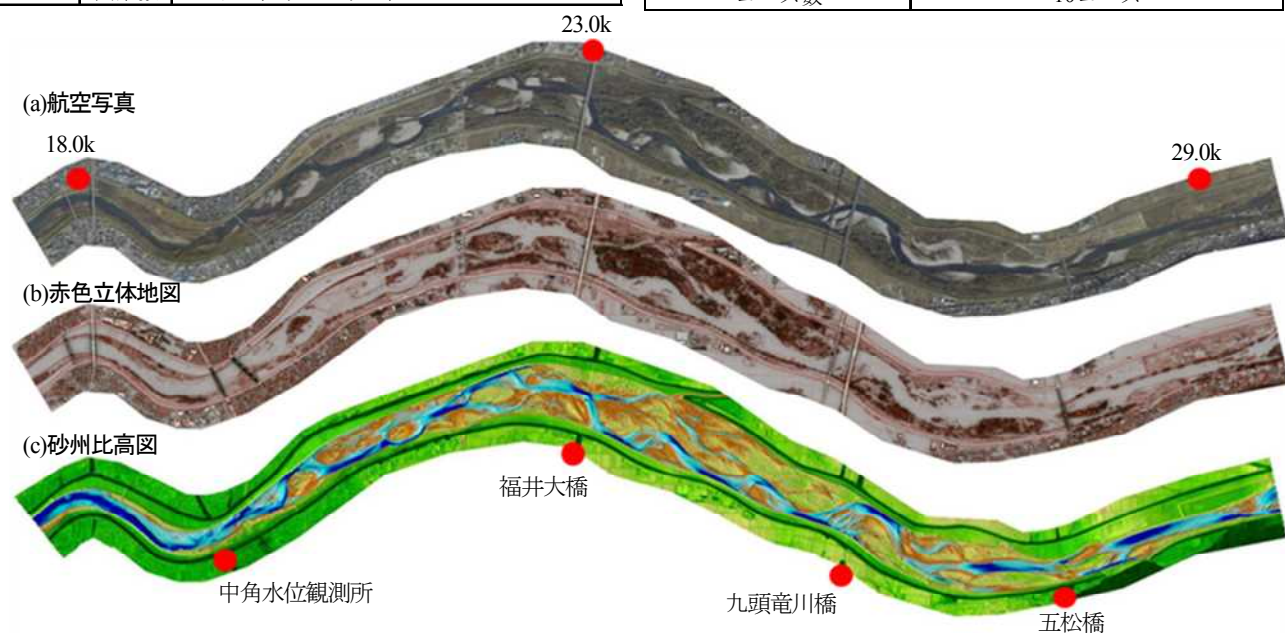


図-2 ALB計測範囲図

(3) 計測実施

計測日は、水部での未測を防止するため、河川の濁りがなく、水位が低いことが必須条件となる。そこで鳴鹿雨量観測所における降雨状況と中角水位観測所における流量状況を確認した。対象期間では大雨はないものの、2～4mm/hr程度の雨が繰り返し観測された。計測日前後の雨量・水位グラフを図-3に示す。こうした中で、ALBの計測は、無降雨の状態が比較的長く続き川の濁りが落ち着いた、平成28年12月4日の午前中に実施し、8:46～10:24の1時間38分で計測を完了した。

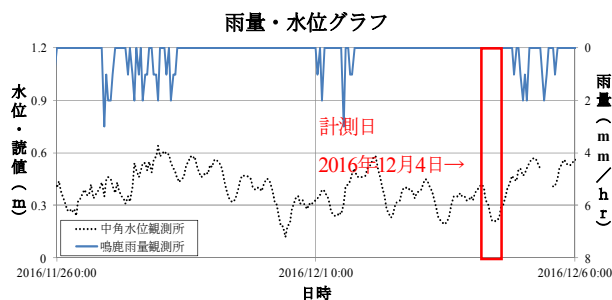


図-3 計測日前後の雨量・水位グラフ

(4) 水質の状況

ALBの測深性能は、水質などの影響を大きく受けるため、計測と同期して4地点を選定し、透視度測定や採水調査（浮遊物質量や濁度）を行った(表-3)。

調査の結果、計測区間の水質は、透視度で100cm以上を確保しており、濁度でも最大で0.8以下、ろ紙によるSSの検出でも2 mg/L以下と、良好な水質状況であることを確認した。なお透視度は、透視度計（100cm）による

表-3 水質調査地点と濁度

調査地点	濁度	SS(大)	SS(小)	透視度
天池橋	0.8	1mg/L	1mg/L未満	100cm以上
福井大橋	0.6	2mg/L	1mg/L未満	100cm以上
五松橋	0.2	1mg/L未満	1mg/L未満	100cm以上
鳴鹿大堰	0.5	1mg/L未満	1mg/L未満	100cm以上

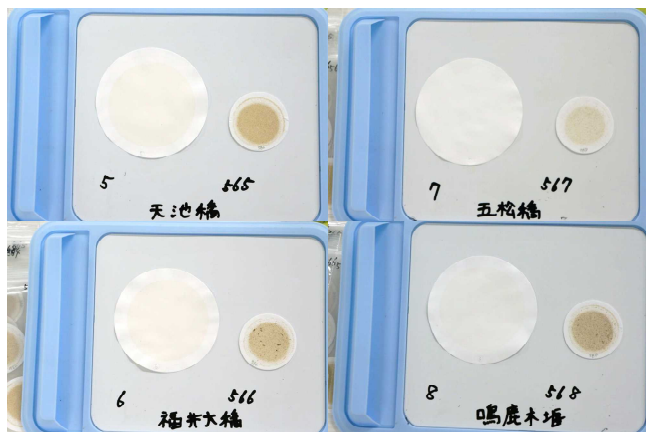


図-4 ろ過によるSSの検出

目視観測を、懸濁物質SSの検出は、粒径 $1\mu\text{m}$ ～ $0.45\mu\text{m}$ （小）と粒径 2mm ～ $1\mu\text{m}$ （大）の2種類のろ紙を用いて、ろ過した時に分離される物質の乾燥重量を計測した(図-4)。

ALBで用いる水域用レーザが懸濁物質によって散乱する過程（ミー散乱⁴⁾）を考えた場合、ALBのレーザ（波長 $0.515\mu\text{m}$ ）とほぼ同程度の粒径であるSS(小)の寄与が高いと考えられるが、今回の計測では、定量下限値以下であった。

(5) 欠測箇所の処理方法

ALBによる測深性能を確認するため、欠測状況を確認した。欠測率は、水部を対象に2mメッシュの格子を設定し、メッシュごとの計測点の密度を調査した。

この結果、橋梁下や工事実施箇所、白波が広がっている箇所の一部で欠測が認められたものの、ほぼ欠測は見られなかった。なお欠測箇所においてはTIN法により内挿補完した(図-5)。

(6) データ処理

ALB計測では、樹木、建物、地盤、水面、河床、その他ノイズデータが得られる。そこでフィルタリング作業によりそれぞれのデータを分類した(図-6)。またフィルタリング作業において、自動処理だけでは、植生の残存や水面・水中のノイズデータをうまく分離することができないため、手動による作業も加えてデータ処理した。

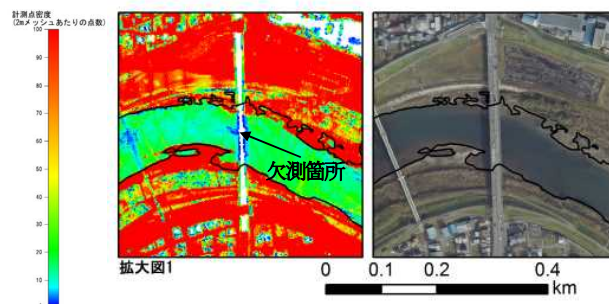


図-5 欠測箇所の確認（橋脚下の例）

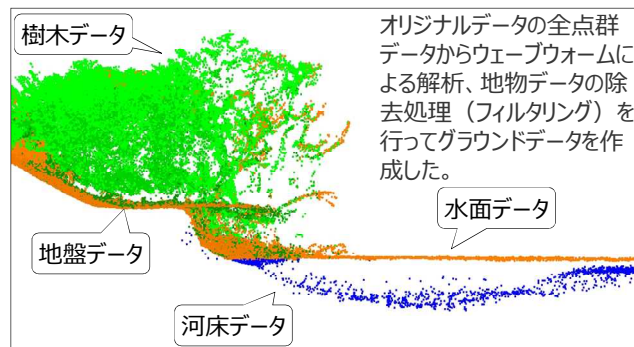


図-6 フィルタリングによる分類イメージ

4. 実測値との精度検証及び精度向上の検討

(1) 検証断面の設定

検証断面は、様々な水深で評価できるよう、断面を選定したほか、陸部での地表面の被覆状況の違いによる地盤高到達率なども考慮して選定した。対象断面の選定理由は表-4の通りである。

表-4 断面の選定箇所

距離標	最大水深	選定理由
18.0 k	3.0m	下流側別業務成果との比較
18.8 k	1.5m	河道内の被覆状況がグラウンド
23.4 k	3.5m	河道内の被覆状況が樹林
26.6 k	2.0m	河道内の被覆状況が草地
29.0 k	1.0m	上流側別業務成果との比較

(2) 精度検証（較差による比較）

ALBによる計測結果の精度を検証するため、実測による横断成果との標高較差を確認した。

ALBによる横断は、フィルタリング処理したALBの点群データを基に、TIN法により内挿補完した0.5mメッシュサイズのDEMデータを作成した上で、横断図を切り出した。ALBの標高は、実測点の水平位置を基準に垂線を延ばし、ALB横断図との交点標高を読み取った。この時の実測点とALBとの標高の差を較差とし、横断図を構成する全ての実測点について求めた。九頭竜川26.6 kにおける重ね合わせ横断図を図-7に示すが、横断形状で大きな差異は見られなかった。

次に、各断面における較差を、水部と陸部に区分したのちに平均値と標準偏差で整理した。この結果、水部では平均値と標準偏差で10cm以下となり、河川定期縦横断の実施要領⁵⁾などの基準（±15cm）を満たしていた（表-5）。一方、陸部では基準の±15cmを超える箇所があったが、これは堤脚水路部の側溝等でALBデータによる地形の再現が難しい箇所や、護岸やブロック積等の勾配が急な箇所を中心に、局所的に較差が大きくなった。

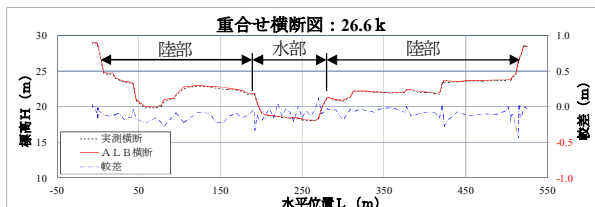


図-7 重ね合わせ横断図による断面形状の確認

表-5 各断面における較差の整理（単位：m）

	水部			陸部		
	平均	標準偏差	点数	平均	標準偏差	点数
18.0k	0.10	0.04	14	0.01	0.68	134
18.8k	-0.01	0.07	23	-0.03	0.12	103
23.4k	0.00	0.09	10	-0.07	0.17	156
26.6k	-0.08	0.09	15	-0.11	0.08	88
29.0k	-0.06	0.07	22	0.00	0.39	115

めと考えられる。したがって、横断図調製段階では過年度成果を基に修正することが望ましい。

(3) 精度検証（河積断面による比較）

ALBによる計測結果を客観的に評価するため、河積を確認した。河積は、計画高水位（H.W.L.）より低い箇所を対象として断面積を計測した。この結果、ALBから作成した河積は実測値と比較して98%以上を確保しており、差異は僅かであった（図-8）（表-6）。

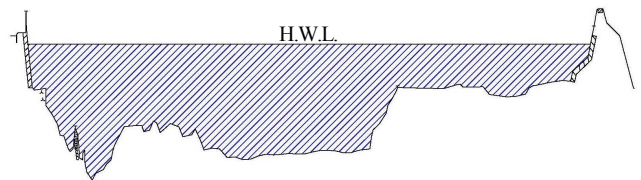


図-8 河積面積の算定イメージ

表-6 河積による面積比較（単位：㎡）

距離標	実測値	ALB	比率
18.0k	1,895	1,895	100%
18.8k	2,095	2,084	99%
23.4k	3,478	3,427	99%
26.6k	2,280	2,224	98%
29.0k	1,776	1,744	98%

(4) 対地高度による測深性能の違い

ALBの測深性能を高めるための方法として、対地高度を下げて、単位面積当たりのレーザパワーを高める方法が考えられる。例えば、対地高度600mのレーザパワーが0.9W/㎡であるとき、対地高度300mでは、3.5W/㎡と約4倍の強度でレーザを発射できることになる（表-7）。

九頭竜川の26.0 k付近で実施したテストコースでの結果を図-9に示す。今回の計測結果では、どのコースでも

表-7 対地高度別のALB諸元（水部：固定翼）

対地高度 (m)	計測幅 (m)	コース数	ビーム半径 (m)	レーザパワー (W/㎡)	照射密度 (点/㎡)	取得密度 (点/㎡)
300	218	17	0.7	3.5	6.1	5.6
400	291	13	0.9	2.0	4.5	4.5
500	364	10	1.1	1.3	3.6	3.3
600	436	9	1.4	0.9	3.0	2.9

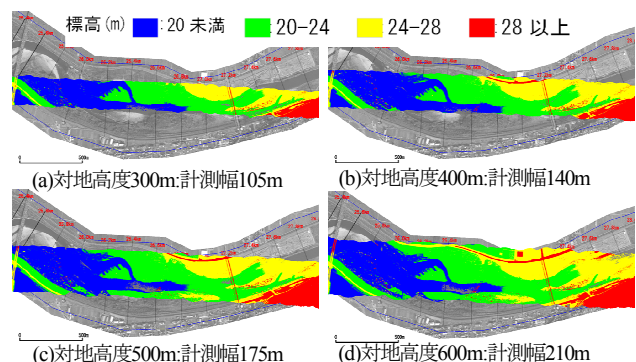


図-9 対地高度別の標高段彩図(26.0k付近)

欠測がなく計測できている。また測深状況も段彩図の色調から遜色ない結果が得られた。

しかし計測幅に着目すると、対地高度600mでは計測幅が210mであるのに対して、対地高度300mでは半分の105mと非常に狭くなる。仮に今回の対象範囲である18.0k～29.0kまでの区間全域を、対地高度300mで計測した場合には、17コース必要となり、コース数も計測時間も2倍必要となる。

そこで本計測では、作業の効率性や測深性能を踏まえて対地高度500mを選定して計測を行った。

5. 河川管理への適用の考察

本計測では、河川測量を目的に計測しているが、ALBは面的に計測できることで、今後の河川管理への応用が期待できる。ここでは、いくつかの事例について考察及び試行を行ったので以下に報告する。

(1) 河川管理施設点検への適用

河川管理においては、堤防等の施設の健全性を把握するため、日常的な河川巡視や出水期前の点検を行い、変状の状況によりランク付けを行っている⁶⁾。堤防および樋門等の目視できる変状においては、変状規模や施設に与える影響について定量的に計測できるが、根固め工の洗掘や河岸の浸食については、水部内の状況が確認できないことから、目視できる範囲でランク付けを行っているのが現状である。このような水部の変状の状況について、ALBを利用した変状把握を試みた。

九頭竜川右岸の27.2km+100m付近は、河岸が洗掘され根固めブロックが流されており、要監視段階⁶⁾と評価している箇所である。ALB計測と同時に撮影した高解像度の画像でも根固めブロックが流されている状況が確認で

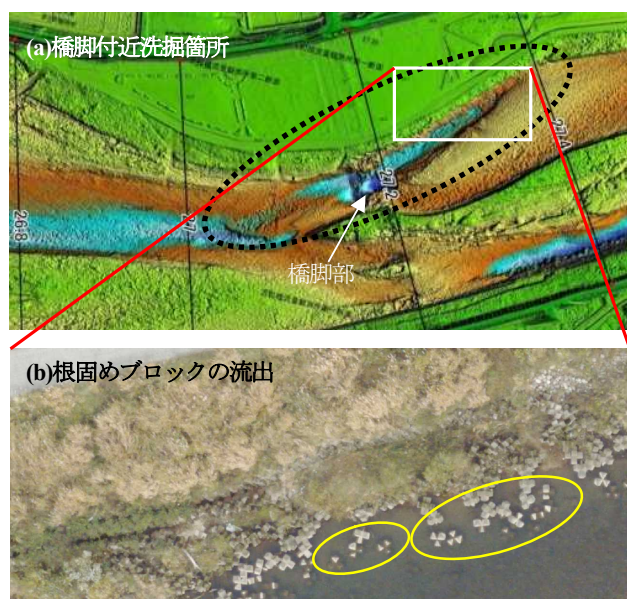


図-10 面的な洗掘形状の把握

きる。しかし、現地調査や写真等ではその原因までは推測できない。そこで、ALBによる比高図を基に推測を行った(図-10)。

比高図では橋脚部が最も洗掘し、その上流に向かって河床洗掘が生じていることが分かる。このことから、橋脚部の洗掘が原因で高速流が発生し、根固めブロックが流されたとの推測ができる。これまでは河床の状況が面で捉えることができなかったが、ALBにより河床形状が分かることで上記のような推測を行うことができる。この推測に基づく流況解析により、原因の究明と対策工の検討により速やかな対策が期待される。

(2) 河道内の樹木評価の試行

河川管理において流下能力を適切に評価することは、治水安全上重要である。なかでも樹木群を考慮した死水域の設定については、これまで航空写真の判読などを基に検討していたが、ALB成果を用いることにより、面的かつ定量的に樹木群を把握することが期待できる。

樹木の高さや密度等を評価する手法としては、林業の分野で用いられているスギやヒノキといった人工林の管理手法がある⁷⁾。この手法では高密度点群を用いた樹高計測や単木単位での抽出を行っている。樹高計測は原則としてDEMとDSMの差を用い、単木抽出は樹冠の凹凸をDSMから求めた(図-11)。

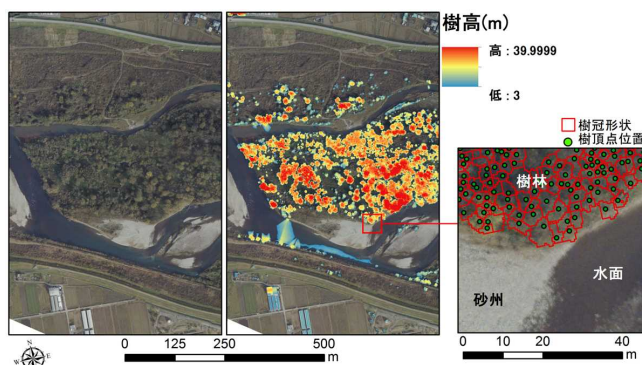


図-11 レーザ点群データを用いた樹高と樹冠形状の把握

試行の結果、樹高と樹冠形状を概ね把握することができた。この手法により、死水域の設定範囲を定量的に抽出できるため、水理計算の精度向上が期待される。なお河道内では広葉樹が多く樹冠形状が複雑なため、単木抽出の精度確保については今後の課題である。

(3) 橋脚部の洗掘状況の把握

河川構造物の点検のうち、橋脚部の洗掘状況の確認は、基礎がむき出しとなり、場合によっては根入れ長が不足し橋梁本体に影響を及ぼすこともあるため重要である。しかし定期縦横断の測線にかからない場合には、洗掘の

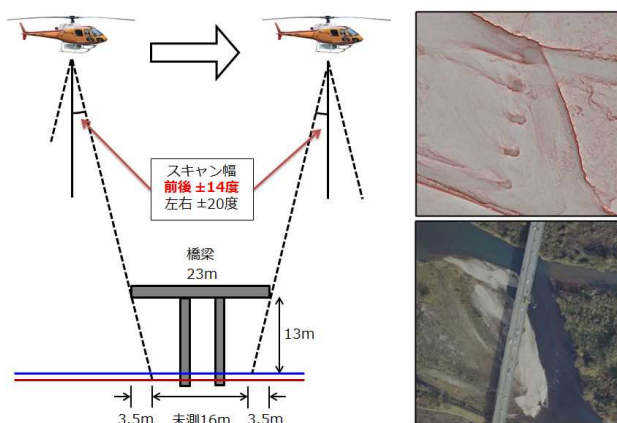


図-12 福井大橋(国道8号)直下における測深イメージ

状況を把握することはできず、見逃す可能性も高い。

今回用いるALB機器では、水部の地形が計測できることや、レーザを楕円状に発射できる特性を生かして、橋梁下の地形もある程度計測できるため、橋梁部における洗掘状況を確認した。ALBの計測結果から、橋脚周辺の洗掘状況が明瞭に把握することができた。橋梁直下については、橋梁が影となるため一定区間の欠測が生じているものと思われるが、橋梁前後で取得した地形データから内挿することにより、良好に補完できている(図-12)。

6. おわりに

本研究では、一級河川九頭竜川の直轄管理区間のうち18.0～29.0Kを対象としてALB計測を行い、その点群データから横断面図を作成して精度検証することを目的とした。

計測に際しては、前後の降雨や水位の状況を考慮して実施日を決めたほか、当日の水質状況を調査した。調査項目は、透視度や浮遊物質量・濁度等とし、それぞれ良好な水質であることを確認した。計測の結果、橋梁下や白波が広がっている箇所の一部欠測がみられたものの、ほぼ全域において、大きな欠測なく作業を完了した。

水部の精度検証は、5断面を選定した上で、実測点との標高較差からその精度を評価した。その結果、①重ね合わせ横断面図による形状比較では、大きな差異がみられなかったこと、②水部では、標高較差の平均値や標準偏差が10cm以下と河川測量の基準値を満足していたこと、③H.W.L.以下の河積計測では、実測値と比較して98%以上確保されていたことなどから、ALB成果を横断面図作成に適用することが有効であることを確認した。さらにALBの測深性能を比較するため、テストコースを設定し、対地高度を変えて計測した。その結果、いずれの高度においても遜色ない測深結果が得られた。この結果を受けて、作業の効率性や測深性能の面から対地高度500mが

妥当であることを確認した。

最後にALB機器を用いて面的に河道内のデータを取得できることで、今後の河川管理への応用について考察した。

河川管理施設点検への応用では、比高図を作成することで、橋梁部が最も洗掘していることを確認したほか、その上流に向かって河床洗掘が進行している状況を明らかにし、根固めブロック流出との関係を推測する手がかりを導いた。

また河道内樹林評価では、樹木の高さや樹冠形状を定量的に評価する手法を用いることで、水理計算の死水域設定などに活用できる可能性を示した。

さらに橋梁部の洗掘状況の把握では、ALBが楕円状にレーザを発射する特性を生かして、橋脚周辺の洗掘状況も確認できることを確認した。

本研究では、水質状況が非常によく、また最大深度が5m程度と比較的浅い河道特性により、欠測なくALB計測を完了することができた。しかし、上下流や他河川への適用を考えた場合、水質条件と最大深度についての関係を整理した上で、適用限界を明らかにしていく必要がある。また横断面図作成においても、陸部では植生の影響や構造物の形状が良好に取れない箇所があるため、過年度成果を活用しながら調製する必要がある、今後の課題である。

今後、様々な河川でALBでの実績を増やし、面的なデータを経年的に整備していくことで、効率的かつ効果的な河川管理に役立てていくことが期待される。

参考文献

- 1) 田中成典ら：LPデータと過年度の河川定期横断測量成果を用いた横断面図生成手法に関する研究，土木学会論文集F3（土木情報学），Vol.70，No.2，pp.1_283-1_292，2014。
- 2) 今井龍一ら：河川定期横断測量へのレーザプロファイラの適用可能性と今後の展望，土木技術資料，57-7，pp.26-29，2015。
- 3) 岡部貴之ら：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。
- 4) H. C. van de Hulst：Light Scattering by Small Particles，Dover Publications，1957。
- 5) (財)日本建設情報総合センター：河川定期縦横断測量業務実施要領・同解説，1997。
- 6) 国土交通省：堤防等河川管理施設の点検結果評価要領（案），2016。
- 7) 大野勝正ら：Detection of individual trees and estimation of LAI using airborne LiDAR，日本森林学会他，Silvilaser2006（国際森林シンポジウム），pp.16-20，2006。
- 8) 中村圭吾ら：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。

(2017. 4. 3受付)