

河道掘削工事におけるALBの活用について

荻野 恭輔¹・田中 克己²

¹近畿地方整備局 和歌山河川国道事務所 河川管理課 (〒640-8227 和歌山市西汀丁16番)

²近畿地方整備局 奈良国道事務所 (〒630-8115 奈良市大宮町3-5-11)

ドローンによる写真測量技術の普及により、陸域の土工事においてはICTを活用した工事件数も急速に増加してきている。これに対し水域を含む河道掘削工事においては、浅域の河床を効率的に面的計測する技術がなく、従来法による工事測量が主流となっていた。これに対し、平成29年度から国内稼働をはじめた航空レーザ測深システム（ALB：Airborne Laser Bathymetry）により、浅域の河床を30cm前後の間隔で計測できるようになった。ここでは、比較的事業規模の大きい「紀の川岩出狭窄部の掘削工事」において、ALBを活用した3次元起工前測量をはじめ、ICT技術を積極的に取り入れた河道掘削工事で、一定の効果を確認できたため事例を報告をするものである。

キーワード i-Construction, 3次元起工前測量, ALB, ICT建設機械

1. はじめに

今回掘削工事の対象となった紀の川本川19k付近の岩出狭窄部（以下、狭窄部と称す）は、紀の川本川に貴志川が合流する地点であり、土砂が堆積しやすい状況にある。記憶に新しいところでは、平成29年10月に襲来した台風21号に伴う出水により、貴志川町丸栖地区で浸水被害が発生するなど治水対策が急がれる状況にある。狭窄部においては、平成28年度から概ね5年を目途に河道掘削や拡張水路が事業化されており、平成28年度の掘削工事においてもドローンによる3次元起工前測量、MC建機による施工¹⁾等が採用されるなど、河川事業においてi-Constructionの推進役を担う工事区となっている。

事業2年目となる今回の掘削工事が前年度と大きく異なる点として、水中掘削を伴う工事となることにある。河道掘削の対象となる箇所は基本的に浅域であることから、マルチビーム等による音響測深では効率的な面的計測が困難と判断し、ALBの適応性を検討のうえ採用に至っている。

本稿では、ALB技術の概要、測量精度を中心に説明するとともに、工事期間中に襲来した台風21号への対応、ICT施工他の工夫についてとりまとめた。

2. ALB技術の概要

ALBとは、従来の陸域を対象とした地形測量で広く利用されてきた航空レーザ計測システムと同様の原理であるが、従来が近赤外のレーザパルスを利用するのに対し、ALBでは緑色のレーザパルスを使用することで水陸一連の地形測量を可能としている(図-1)。

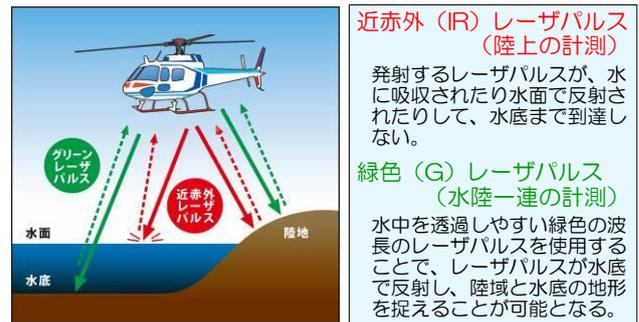


図-1 ALBの概念図

今回は、近赤外・緑色レーザの何れも高密度な照射が可能で、1億画素のデジタルカメラで地表の様子を高解像度の画像として記録できるシステムを適用した(表-1)。

表-1 ALBシステムの性能

項目	性能	
搭載航空機	回転翼機 (AS350B)	
計測システム	SAKURA-GH (RIEGL社 VQ-880-GH)	
データ記録方式	波形記録方式	
測深性能	1.5セッキ※ (標準)	
レーザパルス 発射数	緑色	550,000Hz (最大)
	近赤外	550,000Hz (最大)
垂直カメラ	1億画素 (PhaseOne社 iXU-RS1000)	
付属カメラ	近赤外カメラ・4kビデオ	

※直径30cmの白色盤を沈め目視できる水深を1セッキと呼ぶ。

3. ALB適用に関する事前検討

ALBを河道掘削工事に適用した前例がないため、事前に想定される課題を抽出し、施工業者と協議のうえ実

施の可否を判断した。抽出した課題と対応を下記に示す。

(1)各工程における測量方法

工事測量は、起工前・竣工時の出来形の2種となる。掘削工事は締切りをしたうえで壺堀りとなり、掘削開始後は濁りが強いためALBの適用は起工前測量に限定し、出来形測量についてはRTK-GNSSにて対応とした（出来高については、7(3)を参照）。

(2)計測実施のタイミング

掘削工事は非出水期に行うため、岩出頭首工のゲート解放（10月上旬以降）を待っての着手となる。加えて、狭窄部全体の工事遅延リスクや、小規模な出水で河床形状が変化する懸念もあった。これら条件から、計測はゲートが解放された後、極力掘削開始日に近いタイミングに実施することとした。

(3)適用範囲

当初予定の単独工区（3ha）のみでは、ALBによるスケールメリットを得られないと判断し狭窄部全体（63ha）を対象とした測量を条件とした（図-2）。



図-2 岩出狭窄部の事業範囲

(4) 精度管理基準

i-Construction関連では、15の規程が公開されており工種に応じて適宜適用するが、水中の河道掘削を対象とした規程は未整備の状況であった。そのため、国土交通省港湾局が平成29年3月に施行した「マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工法編）（案）」（以下、港湾局マニュアル(案)と称す）の精度管理方法を一部踏襲することとした。

(5) 起工前測量手法の総合比較

上記の条件を踏まえ、各測量手法の特徴を表-2に整理した。従来の平均断面法を基準にメッシュ法に対応した手法と比較すると、ドローン（陸部）とマルチビーム（水部）を併用したものは、作業期間、費用の両側面でメリットはない。一方、ALBを利用した場合の水部測量精度は、従来法の管理基準とALB性能を加味して、±15cmに決定した。比較の結果より、従来法と同等の費用で、作業期間を大幅に短縮できることが確認できたため、ALBの採用を決定した。

表-2 起工前測量手法に関する比較

項目	従来法(平均断面法)		併用法(メッシュ法)		ALB(メッシュ法)
	陸部	水部	陸部	水部	水陸部
作業イメージ					
取得間隔	横断測量 40mピッチ※1)	横断測量 40mピッチ※1)	0.5m×0.5m に1点以上※2)	0.5m×0.5m に3点以上※3)	0.5m×0.5m に3点以上※3)
目標精度	±5cm※1)	±20cm※1)	±10cm※2)	±10cm※3)	陸±10cm 水±15cm
作業期間	約1.5ヶ月		約2.0ヶ月		約3週間
費用	約600万円		約1,500万円		約600万円

※1)【国】近畿 土木工事共通仕様書(施工管理編)
 ※2)【国】空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)
 ※3)【国】港湾局 3次元データを用いた出来形管理要領(浚渫工編)(案)

4. 3次元起工前測量

ALBによる3次元起工前測量は図-3に示す手順で作業を実施した。

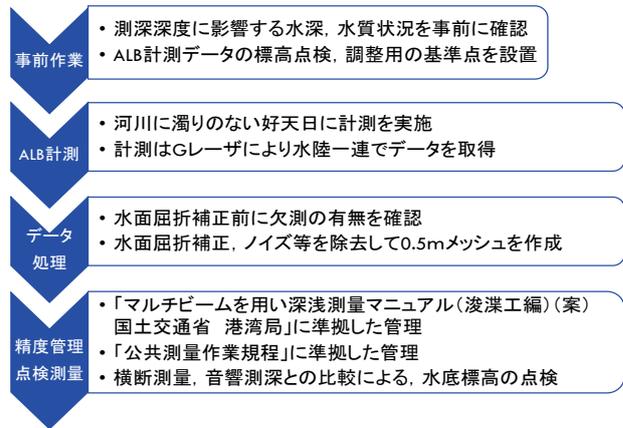


図-3 作業フロー

(1) 水質調査

計測当日朝の透明度調査では、水深4mまでセッキ盤が視認できたため、1.5セッキに相当する水深6.0mまでの測深が可能と推測した。参考として濁度計による調査も行い、濁度は1以下の値を示し濁りの影響は少ないと判断し計測実施を決定した（図-4）。



図-4 水質調査風景

(2) 調整用基準点の設置

取得する点群データの標高点検及び調整に必要な調整用基準点は、計測範囲四隅+工事で使用する距離標近傍に5点設置した(図-5)。

(3) ALB計測

計測作業は、回転翼機により表-3に示す諸元で、図-5

に示すコース（計測5本，検証用2本）を対象とし，10月11日に現地上空30分の飛行でデータ取得を完了した。

表-3 計測諸元

項目		諸元	備考
対地高度		700m	
対地速度		100km/h	
計測コース数		7本	検証用2本含む
コース間重複度		50%	
レーザパルス 発射数	緑色	550,000Hz	37点/m2(単コース)
	近赤外	145,000Hz	4点/m2(単コース)
垂直カメラ地上解像度		7cm/pixl	

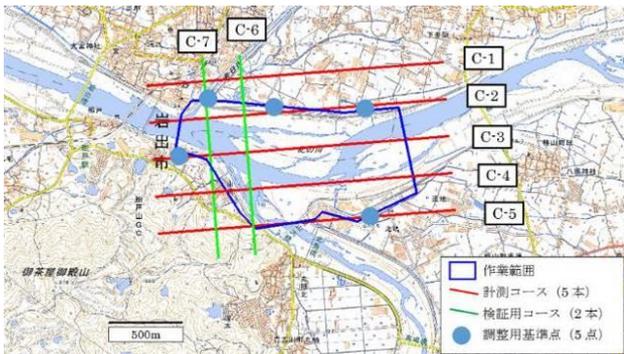


図-5 コース計画図

(4) 欠測部の確認

計測後，速やかにデータの一次処理を行ない取得状況を確認した。その結果，工事対象エリアについては，十分な密度で水部も陸部も地形を捉えていることを確認した。なお，施工範囲外ではあるが支川合流部の深掘箇所では約4mまでの測深に止まり，セッキ盤による事前調査で推測した6mまでの測深ができていないこと，陸部については，つる草の繁茂した箇所の一部地表面にレーザの照射不足が確認された(図-6)。

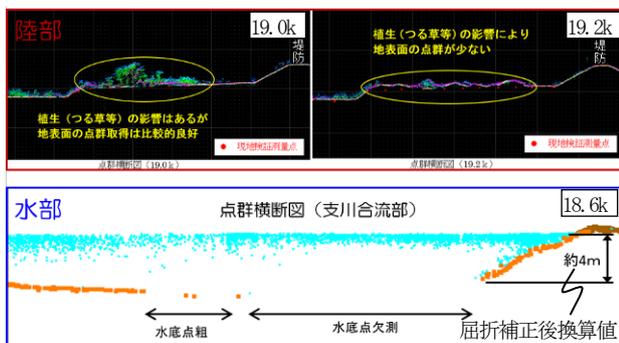


図-6 データの取得状況例

(5) 屈折補正・ノイズ除去

水面を通過して水中に照射したレーザ光は，水中で生じる光の減速に伴う屈折を処理をしなければ正しい位置を再現した点群データを得ることができない(図-7)。

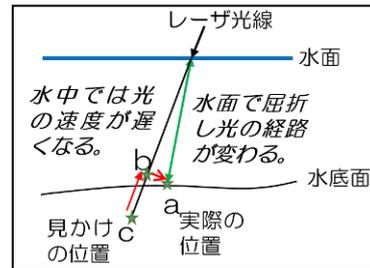


図-7 水面屈折補正の模式図

屈折補正処理には，水面に反射した近赤外レーザ点群から水面3次元モデルを生成し，そのモデルを基準に水中に照射した緑色レーザ点群を1点ずつ変換を実施した。この処理は，水面が常に動いていることから飛行コース毎に補正をすることで河床地形の測量精度を維持することになる。図-8には4コースが重複した箇所でも，補正前にはばらついていて河床の点群が，処理により点群が正しい位置に補正された様子を示している。また，水面と水中に発生した無数のノイズ点群の除去も合わせて行い，水陸一連のグラウンドデータとして整理した。

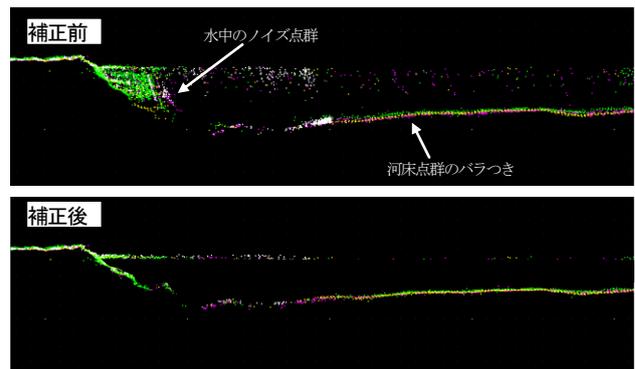


図-8 水面屈折補正前後の点群断面例

(6) メッシュデータの作成

グラウンドデータに基づき，TIN法*による補間処理から0.5mメッシュデータを作成した。メッシュにより河床の微小な凹凸を確認できる(図-9)。

※点群を頂点とした三角形の集合体で地形を表現する方法。

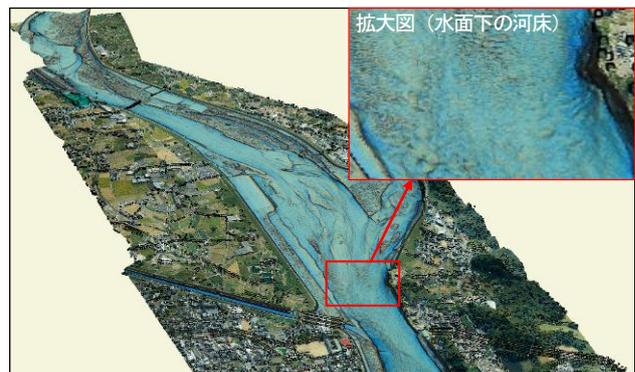


図-9 メッシュデータによる鳥瞰図

5. 精度管理・点検測量

(1)公共測量作業規程に準拠した標高管理

ALBのデータ処理は、水面補正の工程を除いて公共測量作業規程（以下、規程と称す）に示される手順に準じて実施している。規程に準じた精度管理を表-4にとりまとめた。なお規程では陸部のみを対象としており、水面下の規定値は記載されていない。

（精度管理に記載する較差は「平均±標準偏差」を示す）

表-4 精度管理総括表(10月11日計測)

項目		母数	実績値	規程値	備考
コース間 標高較差	陸部	8箇所	5cm	<25cm	相対値 較差管理
	水部	5箇所	2cm	基準なし	
調準点における 標高較差	陸部	5箇所	2cm	<25cm	絶対値 較差管理

(2)港湾局マニュアル(案)に準拠した管理

マルチビーム測深におけるデータの検証方法は井桁測線に沿った測深を実施した上で、井桁内の標高較差を管理することとしている（図-10）。ALBにおいても水面下に陸上同様の調整用基準点（明確に標高を確認できる点）を設置することが困難なため、本手法を適用した。

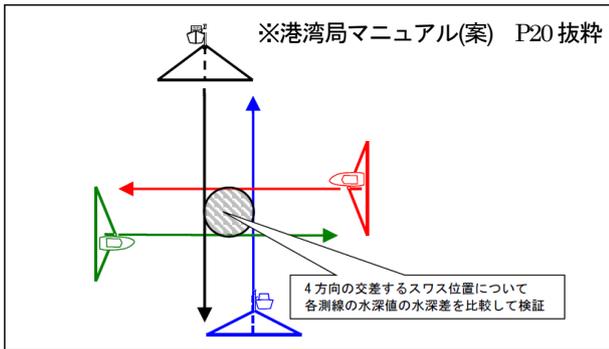


図-10 井桁測線のイメージ

検証エリアは、図-5に示すC2,C3,C6,C7に囲まれた矩形内(280m×260m)とした(図-11)。計算ではエリア内を0.5mメッシュ分割し、メッシュ内の全点群の標高平均値とコース毎の点群の標高平均値の較差を確認した。表-5に示す通り、検証結果では何れのコースも10万点以上の母数に基づき、統計的にも信頼性の高い結果が得られたと考える。表-4にもあるコース間標高較差を含め総合的に、今回の計測では相対的に5cm程度の誤差内で全体計測ができたと判断できる。



図-11 検証エリア

表-5 コース毎の標高較差

コース	母数(全体)	陸部	水部	全体
C2	258,352点	2.0cm	1.7cm	1.9cm
C3	213,555点	2.4cm	2.0cm	2.2cm
C6	156,612点	2.4cm	3.1cm	2.7cm
C7	129,813点	3.5cm	2.6cm	3.1cm

(3)点検測量

得られた結果に対し、従来法によるものとの差異を確認するため、TSによる横断測量と深淺測量(音響測深)を行い、標高較差を点検した(図-12)。横断測量(図-13)では、地形変化点及び概ね5m間隔の観測点に対し、ALBでは細密な点で横断形状を再現していることが確認できる。標高較差については、横断及び深淺測量の何れも、RMSE※は10cm以内となり、従来法と整合性の高い結果であることが確認された(表-6、表-7)。

※従来法観測値を真値とし、ALB観測値の標準偏差(ばらつき)を示す指標。



図-12 点検測量エリア

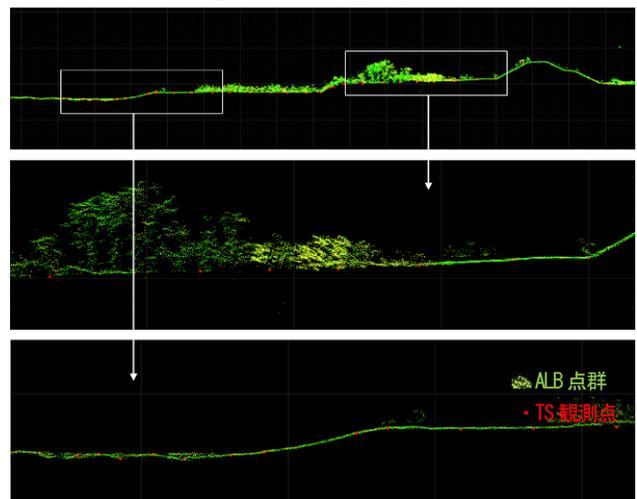


図-13 点検横断面図

表-6 TS横断測量との標高較差集計

(実測点数)	平均	最大	最小	RMSE
202点	4.6cm	51.6cm	-21.3cm	6.6cm

表-7 深淺測量との標高較差集計

(実測点数)	平均	最大	最小	RMSE
6269点	2.4cm	61.3cm	-91.1cm	7.5cm

6. 台風21号に伴う再計測

前述の通り10月11日のALB計測後、掘削工事に直接関係する箇所0.5mメッシュデータが出来上がった段階で、台風21号（10月22日夜に近畿最接近）に伴う出水により河床形状は大きく変化することとなった（図-14）。掘削土量の正確な把握のため、起工前測量のやり直しを急ぎ決定し、水位の低下、濁りの収束を待って、11月16日にALB再計測を行い、その10日後には工事に必要な0.5mメッシュデータを作成した。



図-14 出水時の現場風景

再計測による測深においても水深約4mまでに対応し、精度管理結果は表-8に示す通り、当初計測（表-4）と同等の品質であることを確認した。

表-8 精度管理総括表(11月16日計測)

項目	母数	実績値	規程値	備考
コース間 標高較差	陸部	9箇所	4cm	<30cm 相対値
	水部	7箇所	3cm	基準なし 較差管理
調準点における 標高較差	陸部	5箇所	2cm	<25cm 絶対値 較差管理

7. ICT建機による施工等

本工事では、ALBの利用の他にもICT建機の利用をはじめ効率的な作業に努め工事を実施した。

(1) MCバックホウによる掘削

河道掘削工事においては、掘削後の降雨による流水や浮遊砂の沈降に伴い、30cm～40cm程度の堆積が生じる。水面下の掘削は、オペレータによる目視ができない環境において、計画河床高に加えて-500mmの余堀りも見込んで、MCバックホウのオフセット機能により、過不足のない掘削を実施した（図-15）。



図-15 バックホウモニター

(2) RTK-GNSSによる検測

起工前測量では、複数工事を対象にALBによるス

ケールメリットを生かすことができたが、出来形測量では、工事区毎の実施が必要であること、仮締切りによる濁りが継続することからALBの利用は困難となった。対応策として、締切り内の水深が2m程度と比較的浅かったため、RTK-GNSSによる単点計測（ポールで掘削底面を直接おさえる）を採用し、作業工数の軽減を図った（図-16）。



図-16 RTK-GNSSによる出来形測量

(3) 3次元的な出来高進捗管理

工事進捗は、MCバックホウの動作ログデータを3次元管理システムに登録することで、状況を視覚的かつ詳細に把握し、進捗に応じ3次元設計データと起工前のメッシュデータの差分解析から出来高数量を日々管理した（図-17）。

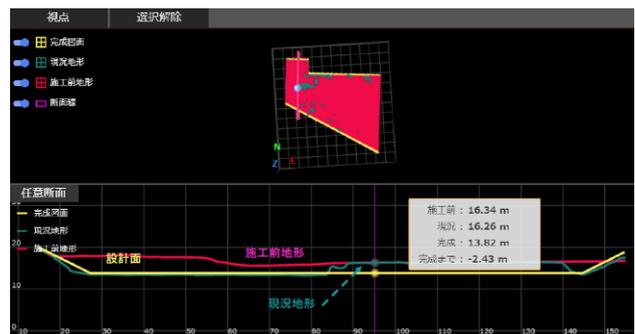


図-17 3次元出来高管理システムの画面

(4) 工事用車両の運行管理

現場から残土処分場までは22km程あり、1日あたり最大で40台のダンプが搬土を行うことになった。ダンプに搭載したGNSSデータをインターネット回線でシステムに転送し、車両位置、速度等をリアルタイムに監視、速度超過時の注意指示等で安全運行に努め、交通事故ゼロで工事を終えた（図-18）。



図-18 運航管理システム画面

8. ICT活用の効果

今年度は狭窄部全体で6件の工事のうち、4件の河道掘削工事についてALBデータを利用している。一例として「右岸中流地区河道掘削工事（その1）[掘削面積：34,515m²]」におけるICT活用の効果を表-9に示すが、何れの作業も時間軽減できたことを確認できる。今回の工事では台風21号による工程遅延の要素もあったが、ICT施工により遅延回避にも寄与したと判断する。

表-9 工程毎の作業時間比較

項目	従来工事（想定）	ICT活用工事（今回）
起工測量	約 136時間	約 88時間 (約 48時間[35%]の短縮)
現場施工	約 448時間 (ハック材)	約 320時間 (約 128時間[28%]の短縮) (3次元MCハック材)
現場測量	丁張の設置数 125本 約 112時間 (2人×2時間×28日)	丁張の設置数 0本 0時間 (約 112時間[100%]の短縮)
出来形測量	約 160時間	約 120時間 (約 40時間[25%]の短縮)
計	約 856時間	約 528時間 (約 328時間[38%]の短縮)

9. ALBデータの他活用

今回取得したALBデータに基づき工事以外の活用例について参考として示す。

①台風前後のメッシュデータを取得したことで、出水に伴う河床変動状況を詳細に捉えた浸食・堆砂図を得ることができた(図-19)。

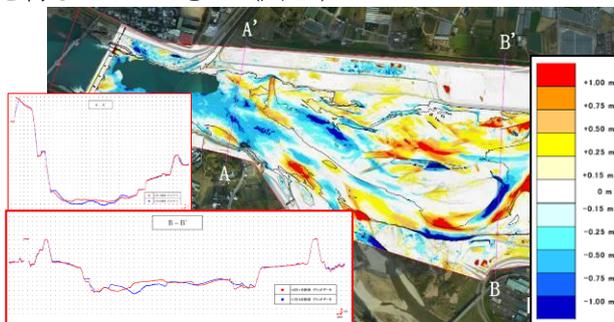


図-19 浸食・堆砂図

②今回は高密度タイプのALBを使用しておりメッシュ化前のオリジナル点群データを可視化することで、水面下の護床ブロックの状態把握ができた(図-20)。

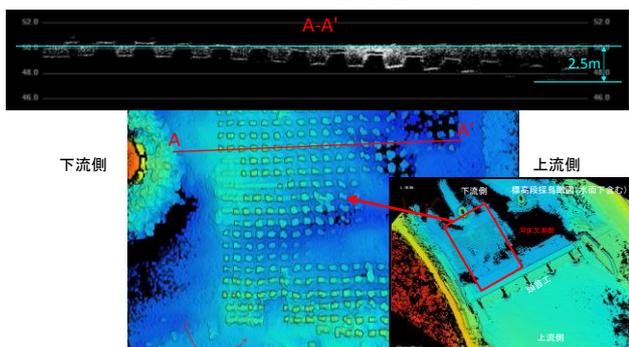


図-20 護床ブロックの可視化図

10. 課題と今後の展開

①現在国内で稼働するALBは機数が少なく、天候・出水等の影響も受け、工事進捗に合わせた調達に難しい場合がある。現在「革新的河川管理プロジェクト」²⁾においてドローン搭載型ALBの開発も進められており、小回りの効いたALB計測に期待したい。

②濁りの影響により、出来形測量でALBを利用することはできなかった。浅域の濁りにおいても、ラジコンボートにマルチビームを搭載した測深システムの運用も始まっている。これら技術を併用し一環した3次元工事用測量の仕組みを検討する必要がある。

③データ処理において、ALBは陸部のレーザ計測と違い膨大なノイズデータが水中に発生する。その処理に必要なPC、オペレータ人工が測量費増の要因となる。水面屈折補正やノイズ除去処理の高速化(自動化)を進め、効率的な内業ができるよう努める必要がある。

④本工事着手時点では、河川工事に関わるICT関連の要領等は未整備であったが、平成30年3月には「河川浚渫工事」に関して、音響測深システムや工事履歴データを活用する要領(案)が施行³⁾された。これらの要領(案)を参考に、ALBによる河川工事用の測量マニュアル等の整備も進める必要がある。

11. おわりに

陸上土工事を中心にICT施工の普及が進むなか、今回のALBを利用した河道掘削工事により、水中(浅域)工事においてもi-Constructionの普及の目途がたつた。小規模工事において、利用のメリットがない等の懸念もあるが、道路土工事においては工事発注前に複数工区の3次元起工前測量をまとめて行い、そのデータを施工業者に提供することをすでに試行している。河道掘削工事にも同様の仕組みを取り入れ、ALB起工前測量を事前に実施し、施工業者にデータを提供する等の発注方式も有効と考える。加えて、3次元計測技術の更なる高度化、活用に企業サイドも積極的に取り組むことで、i-Constructionの劇的な普及に期待したい。

謝辞：本稿の作成に協力頂きました、木下建設株式会社(施工担当)、中日本航空株式会社(起工前測量担当)の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 田中克己：ICT活用工事の事例紹介，日本建設機械施工協会 関西支部広報誌，vol.111，summer2017，pp.4-8
- 2) http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo04_hh_000044.html
- 3) http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html