

ダム・河川向け水中地形および堆砂状況の 自動計測技術について

前田 文孝・今坂 尚志

古野電気株式会社 技術研究所 第1研究部 知能制御研究室 (〒662-8580兵庫県西宮市芦原町9-52)

長期間の運用が必要となるダム・河川では、近年増加しつつある激甚災害等に伴い、堆砂量などの定期的かつ正確な3次元状況の把握の必要性が高まってきているが、これを安価かつ高精度に実現するという手法がこれまで実現されてこなかった。本稿では低動揺艇体・最適航法制御アルゴリズムを搭載した自律航行無人艇と低価格マルチビーム計測システムを用いた堆砂状況の安価高精度3次元把握手法について提案する。著者らは奈良県川上村の大滝ダムにおいて提案技術を用いた3次元堆砂状況調査を行い、結果として提案手法による機材費用や測量時間が低減でき、河川地形の3次元形状の把握や定量化が一定の精度で可能であることを示した。

キーワード 安価高精度, 堆砂状況計測, マルチビーム, 自律航行, 省力化, 省人化,

1. はじめに

ダム・河川では、流水等によって生じた河床の経年変化を定期的に深淺測量にて把握を行い、堆砂量を評価しながら堆砂浚渫工事の計画を行っている。測量方法は、河川を一定の距離間隔で横断面の深淺測量を行い、平均断面法を用いて堆砂量を算出している。

特にダムにおいては、ダム計画時において計画堆砂量が検討されていることから、堆砂の進行状況を把握するために毎年正確な状況把握が必要である。しかしながら、現在用いている平均断面法では測線上の横断測量は実施されているが測線間の状況は正確には把握しきれていないのが実態であることから、より正確な地形把握（堆砂状況の把握）が求められている。

正確な水面下地形を把握する手法としては、港湾の土木工事などで利用されるマルチビーム深淺測量²⁾がある。この手法は船舶に艀装したマルチビームソナーやGNSS測位装置を用いる事で3次元の測深位置が把握できる。このため測線上の位置と水深の2次元断面しか計測しない従来のシングルビーム音響測深に対し正確な貯水量管理が可能になる事が期待できる。

しかし現在国内で販売されるマルチビーム測深システムは1式3000～5000万円と非常に高額で、船の動揺が大きいと艀装設備のたわみや動揺そのものにより測深精度が従来技術より悪化する³⁾。更に、測深機のオペレーションには従来よりも多くの人数を必要とし、シングルビーム測深よりも計測データが多くなる。このため内外業務に要するマンパワーも従来技術の数倍の時間を必要とし、3次元計測に対するニーズは高いとされつつも港湾ほど積

極的に導入されているケースが少ない。

これを少しでも低コスト化するために、測深点数の少ない安価なマルチビームソナーを用いる手法や、省人化のために無人ボートにマルチビームソナーを搭載させたものなどがこれまでに提案されてきているが、従来技術と同等程度のコストで3次元計測が実現できるものは存在しない。

筆者らは、自社で長年研究してきた小型船向けオートパイロット技術を応用した、蛇行や動揺の少ない操船制御技術を搭載させた自律航行無人艇と、安価マルチビームを用いて、一定の測量精度を維持しつつ、省力化と省人化を実現し、作業時間を短くする事で3次元地形計測を従来技術と同等のコストで実現する測量システムについて提案する。

2. 提案する新技術の概要

筆者らの提案する技術を搭載した計測システムを図-1に示す。本技術は自社で長年研究してきたプレジャーボート向けのオートパイロット技術を応用したものである。具体的には、測線に対して航走する際に、横流れから復帰する際に生じる蛇行や、操船によって生じる動揺を最小にするための操船制御アルゴリズムが搭載されている。

これによって、蛇行による未測をなくすることができるだけでなく、動揺による精度悪化を最小限に抑え、測深点の精度指標としてIHO⁴⁾で規定されるTPU⁵⁾を従来技術と同等に保った3次元測深データが多数得られる。

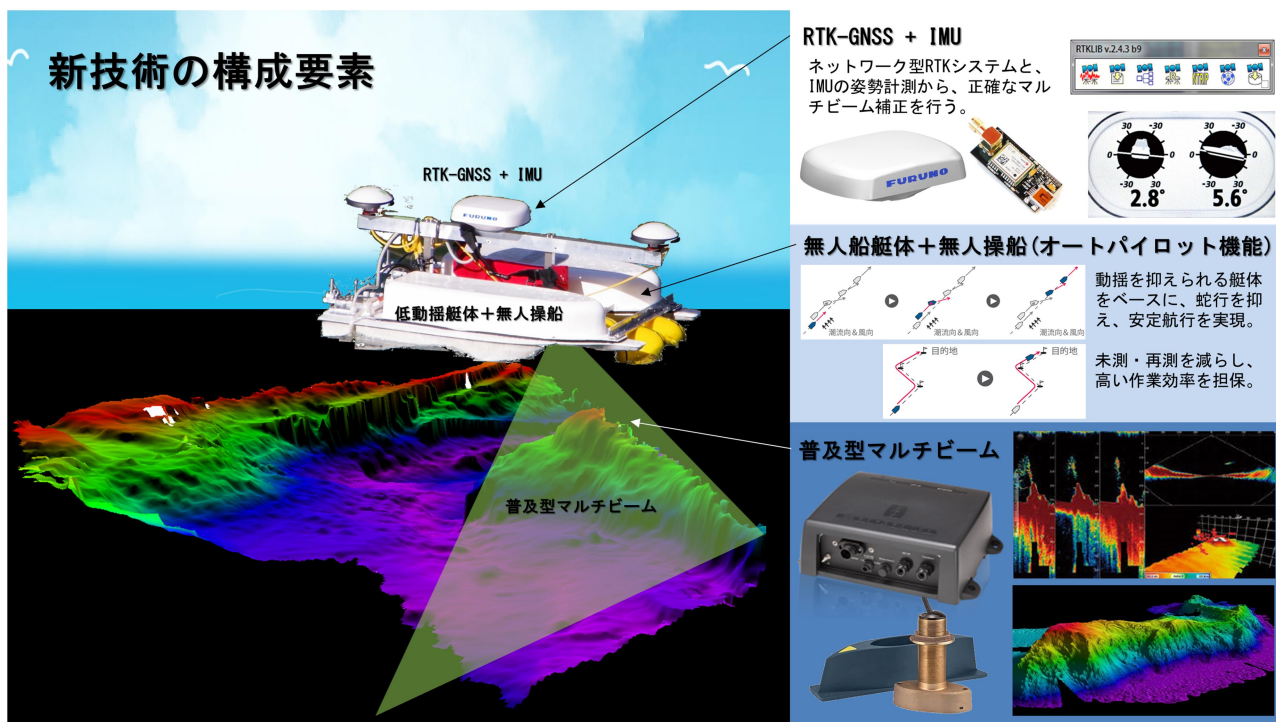


図-1 新技術のシステム構成。RTK-GNSS/IMU、無人船艇体と無人操船(オートパイロット操船)制御、そして普及型(安価)マルチビーム技術で構成される。

図-1に示すそれぞれの要素について、下に説明する。

- RTK-GNSS+IMU**
 サテライトコンパス(GNSS-IMU)技術を応用し、ネットワーク型 RTK 測位信号処理を付加することで従来製品よりも高精度の測位・動揺計測を実現した。
- オートパイロット機能**
 自律航行無人艇が受ける波風の中で、定点保持や安定ルート航走が可能になるように、最適航行制御アルゴリズムを実装した。
- 普及型マルチビーム**
 魚群探知機として開発され、最大 64 点の測深点が得られるマルチビーム測深機で、従来技術であるシングルビーム測深機と同等の精度を持つ。

本システム仕様について表-1に示す。新技術として使用した各装置は基本的には市販品または社内生産品をもとにカスタマイズしたものである。

表-1 新技術を搭載した自律航行無人艇の仕様

項目	仕様	
船体仕様	航行方式	自律航行 (FF精密操船)
	寸法・重量	1200×800×500(mm)、35kg
	稼働時間	4時間
	最高船速	4kt(約2.0m/s)
	通信距離	インターネット:特に制限なし
	適用環境	流速2.0m/s、風速5.0m/s、波高15cm未満
マルチビーム	諸元	周波数:165kHz ビーム幅:7°×12°
	測深点数	1ピング(送受信)あたり最大64点
	測深精度	10.0+(水深/100.0)cm以下(水深60m以浅)
	ソフトウェア	水路測量/港湾・ダム・河川向け深淺測量対応マルチビーム処理ソフトウェア
測位・動揺	GNSS	RTK-GNSS、精度:0.01m+1ppm CEP
	IMU	精度:ロール・ピッチ(～0.1°)、方位(0.1°)、ヒープ(5% or 5cm)
運用環境	温度範囲	0～55℃

これに基づき、同事務所が管理する奈良県川上村の大滝ダムにて技術性・経済性などの現場試行実験を実施する許可を頂いて、2021年2月に現場にて実験を実施した。

3. 現場試行実験

筆者らは、本提案手法を近畿地方整備局が主催する2020年度の技術マッチングイベントにて新技術として提案し、紀の川ダム統合管理事務所においてニーズとして募集していた「ダム湖内の堆積土砂の堆砂状況を安価で精度良く確認できる手法」としてマッチングが成立した。

(1) 実験場所

実験場所としては、上流側の河川測量が実施できる、水深30m程度のナメキ地区と、下流側の大滝ダム堤体に近く、過去に大規模な崩落があったとされる迫地区の2か所で実施した。

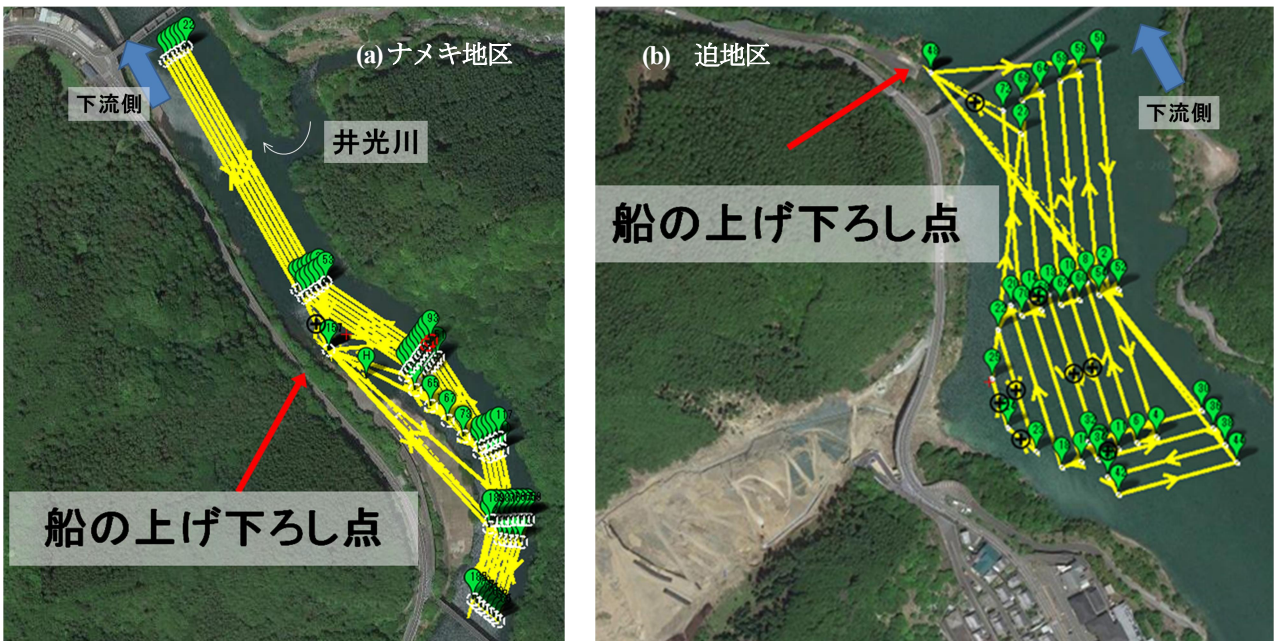


図-2 現場試行時の、新技術による面測量計画測線図。写真は Google Map API から取得。

(2) 実験内容

それぞれの地区では、以下に示す実験を行った。

a) ナメキ地区 :

図- 2(a)に示す計画測線を設けて横断測量・面測量を実施し、新技術で計測したTPUを評価しつつ、従来技術による測量の精度と比較検証した。

b) 迫地区 :

図- 2(b)に示す計画測線を設けて横断測量・面測量を実施し、3D地形の概況評価と、従来技術と新技術を用いた体積計算結果について比較検証した。

なお、現場試行の実施時期の水位は、計画時に使用したGoogle Map APIで表示される水位よりも10mほど低くなっており、浅瀬の事前把握が難しかった。このため、測線計画は安全を見込んで、図- 2に示したように汀線より内側の領域にとどめた。

(3) 施行作業の工程

現場試行作業は、それぞれの地区において、表- 2に示す工程で実施した。今回の試行では、現場で試作機器の動作確認及びパラメータ調整が必要であったため、横断面及び全面計測の前に調整作業を行った。

なお、2月2日と2月26日は強風及び大雨などの悪天候のため、作業を中断した。

表-2 現場試行工程

		2021年				
		2月1日	2月2日	2月3日	2月4日	2月5日
ナメキ地区	動作確認・調整 オフセット確定 (バッチテスト)			横断面計測 (精度検証)		全面計測 (縦断計測)
迫地区					全面計測 (縦断計測)	横断面計測 (比較検証用)

4. 結果と考察

(1) ナメキ地区の計測 :

ナメキ地区での計測は、図- 2(a)、表- 2、及び表- 3に従い、全部で5エリアに分割して実施した。水中音速度プロファイル計測は無人艇の運用中にゴムボートで川の中腹で計測した。川幅は広いところで75mほどしかなく、水深が浅いため測線間隔は短く取る必要があったが、5か所の分割エリアの合計面積約3.3haを、5時間程度で計測できた。

表-3 ナメキ地区作業工程：行方向の数字は時刻

	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
現場到着・機材展開	■									
動作確認・機器調整		■								
計測(エリア1)			■							
計測(エリア2)				■						
バッテリー交換					■			■		
計測(エリア3)						■				
計測(エリア4)							■			
計測(エリア5)									■	
水中音速度計測			▼		▼		▼			
機材回収									■	
掃投										▼

結果の3Dイメージを図- 3(a)に示す。計測の結果、次の状況が確認できた。

- ・左岸側がやや浅く、曲がった流路の内側に堆砂があるか、外側の流れが速いために掘れやすくなり、結果的にやや深くなっている。
- ・右岸側の飛び出た崖の当たりで左岸側に流れが移動している。この流れの衝突のためかぶつかる場所が他の場所よりも若干深く掘れているように見える。
- ・支流（井光川）との合流地点で流れの衝突があると思

われ、流速が相対的に弱まると考えられる付近では土砂の堆積が生じているのではないかと、と思われる。

(2) 迫地区の計測：

迫地区での計測作業は図-2(b)、表-2及び表-4に従い、全部で3エリアに分割して実施した。この地区は最大水深が60m近くに達するエリアで、計測効率はナメキ地区よりも高かった。各エリアの合計面積約9.2haを実質3時間ほどで計測できた。水中音速度プロファイル計測はナメキ地区と同様に無人艇の運用中に計測した。川幅は200mほどあったが、やはり1回の計測あたり10分程で実施でき、実用上の問題はなかった。

結果の3Dイメージを図-3(b)に示す。計測の結果、次の状況が確認できた。

表-4 迫地区作業工程：行方向の数字は時刻

	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
現場到着・機材展開	■									
動作確認・測線計画		■								
パッチテスト			■							
バッテリー交換				■						
計測(エリア1)					■					
計測(エリア2)						■				
計測(エリア3)							■			
水中音速度計測			▼			▼	▼			
機材回収									■	
帰宅										▼

- ・左岸側の大規模崩落のあったエリアにはなだらかな斜面があり、そこより上流下流は形状が異なっている。
- ・崩落のなかった所では旧道の状況が立体的に可視化で

き、概況の調査としては十分な情報が得られていると考えられる。

- ・上流右岸側に構造物らしき地物が確認できた。1998年度撮影のダム運用前の航空写真を用いて検証した結果、橋脚が乗る土台であったことが分かった(図-4)。

(3) 性能検証

性能検証としては、測深の精度と、測量の成果から得られる解析結果について、従来技術と比較を行った。

a) 測深精度について

従来技術で要求される測深機の測定精度は $\pm(10.0 + \text{水深(m)} / 100.0)\text{cm}$ である。マルチビーム測深精度はシングルビーム測深とは考え方が異なるため、今回は計測システムとして得られた計測結果の評価という観点で、TPUで評価を行った。ナメキ地区においてそれぞれ5m、10mの水深エリアで測深エリアを1mグリッドで分割し、そのグリッド内で最も計測回数の多い(計測点数の多い)エリアを選んでTPUを評価し、次の結果を得た。

- 水深5mエリア $\pm 7.7\text{cm}$
- 水深10mエリア $\pm 12.7\text{cm}$

この結果から、ナメキ地区の水深の範囲では要求精度をクリアできていることがわかり、水深が比較的浅い場所ではシングルビーム測量結果と同等の精度で計測が期待できることが分かった。

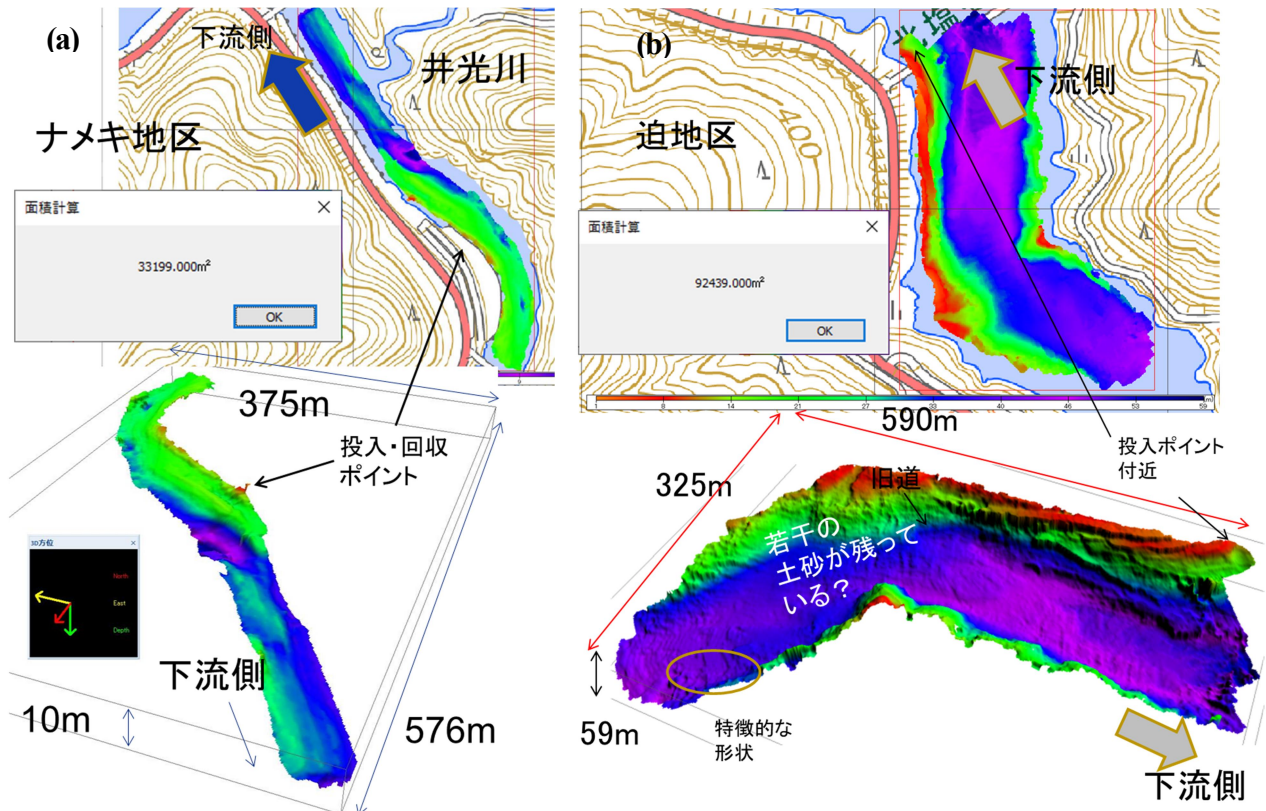


図-3 ナメキ地区(a)及び迫地区(b)の計測結果を示す3Dイメージ。

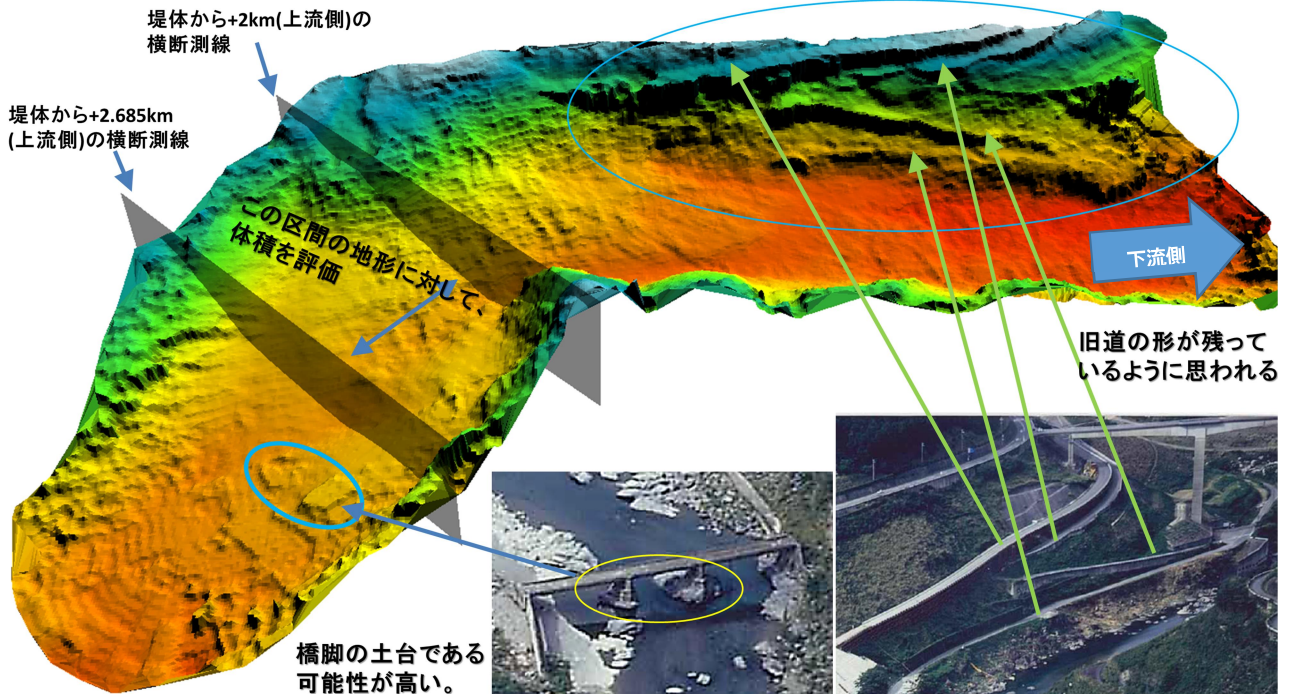


図-4 航空写真との対比により判明した箇所(迫地区)

表-5 各手法による算出体積の評価結果。

計算手法	面積(m ²)		体積評価	
	@2.6km	@2.685km	体積m ³	差分(%)
①	4320.80	5421.70	416491.88	-
②	4361.01	5421.41	418198.46	-0.4
③	-	-	413791.42	+0.6

- ① : 従来技術(横断面計測+平均断面法)
- ② : 新技術(3D計測→横断面算出+平均断面法)
- ③ : 新技術(3D計測→TINモデル法⁶⁾)

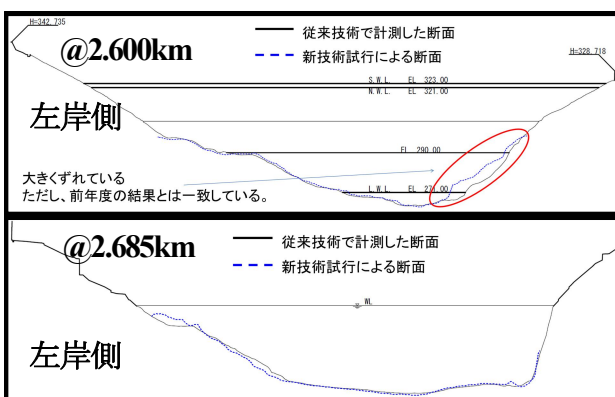


図-5 ダム艇体から2.6km(上)及び2.685km(下)の位置にある測線での断面比較。

b) 断面比較

従来技術の横断面測量と、新技術による3次元データを用いた同じ横断面の切り出し結果を図-5に示す。2.6kmの中心部～右岸よりの断面は、従来技術で得た最新の結果

が前年度の結果と比べて大きく異なっており、新技術の結果は前年度までとほぼ同じ結果となった。それ以外の場所では、いずれも最新の断面測量結果に対して50cm程度のズレしかなく、要求精度は満たしていた。

c) 河川管理視点での地形データについての評価

従来技術では測線ごとに算出した断面面積と水位から貯水量を計算する。マルチビームで3次元計測を行うとTINモデルを用いてより正確な貯水量が得られる。この比較として、表-5に示す3通りの方法で評価を行った。

各種法に対する体積の計算結果を表-5に示す。①②の差分は計測方法の違いを示すもので、体積量のずれは0.4%程度となった。これは計測精度として1%程度(水深50mの場合)が許容される従来技術と比較すればほぼ同等の精度で計測できていると考えてよい。

次に、①と③との違いは平均断面法とTINモデル法の違いが加味される。平均断面法は両断面間の内挿面が相互に滑らかに変化するという仮定で計算するが、TINモデルは断面間の起伏や狭広も正確に積算するため、当然両者の結果には断面感の地形に依存する差が生じる。この結果は正誤というより地形形状に起因する違いが表れていると考えるべきである。

(4) 現場試行の評価

現場試行評価項目について、表-6に示す。提案した新技術に関しては、6項目いずれも従来技術を上回る結果が得られた。今回は社内試作評価機を用いた応募であったため、製品として販売するためにはものづくりとしてクリ

表-6 技術マッチングイベントにおける現場試行評価結果のまとめ

	従来技術 (シングルビーム+有人計測)	新技術
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・導入価格：一式 350万円(計測用システム) ・シングルビーム測深機 150万円 ・RTK-GNSS 100万円 (1式) ・データ処理ソフトウェア 100万円 (1式) ・維持費： 備船費 300万円 (15日間×2現場 単価10万円/日) 	<ul style="list-style-type: none"> ・導入価格：500万円以下(基本システム販売価格) 構成部品： ①ドローン船本体 ②マルチビームソナー ③RTK-GNSS+IMU ④データ収録/操船制御システム⑤バッテリー⑥携帯通信端末 ・維持費： 3Dデータ処理クラウドシステム・通信費 月額15万円程度 (月額定額利用サービスの場合)
	<ul style="list-style-type: none"> ・直接測量経費：130万円 (ナメキ地区を10mメッシュで3次元グリッド作成) 	<ul style="list-style-type: none"> ・直接測量経費：101万円 (ナメキ地区を1mメッシュで3次元点群を作成)
工程	<ul style="list-style-type: none"> ・設置工程：0.5日/毎日 ・計測工程：荒天時など自然条件に左右される ・延べ日程：27日(外業4人、内業1人) 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置工程：0.3日/毎日(バッテリー交換含む) ・計測工程：日中の時間帯は無人計測可能。 ・延べ工数：16日(外業2人、内業1人)
品質・出来形	<ul style="list-style-type: none"> ・計測精度：規定は 10 + (水深) / 100 (cm)。 ・備船への機器取付精度で結果が変わる (日々の計測時間が長いと精度低下) ・取付位置が変わる/データ処理後に未測発見したら翌日再測が必要などのリスク大 	<ul style="list-style-type: none"> ・計測精度：規定の 10 + (水深) / 100 (cm) はクリア。 ・取付オフセット(機器位置、角度等)計測済み ・全機器が船内フレームに固定→取付精度担保。 ・計測確認しながら未測あれば直に追加計測可能。
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・計測中は操船者、機器操作者、周囲警戒者が常に水上作業。 	<ul style="list-style-type: none"> ・計測中は陸上で自船位置確認と指示、計測状態の確認のみ。
施工性	<ul style="list-style-type: none"> ・機器が雨や波浪で濡れないように注意し操作する必要あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・機器は防水船体内にあるため降雨波浪の心配なし。
環境	<ul style="list-style-type: none"> ・備船は動力船のためガソリン使用による環境への影響がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・船は電気推進で対環境性良好。陸上局で別途電源がある事が望ましい。発電方法により環境配慮が必要(半日程度ならバッテリーで問題ない)。

アすべき課題が残っているが、技術としてニーズを達成できるという見込みを得られた。

(5) 全体の考察と今後の課題

本試行では迫地区でのMBES計測精度の検証は実施していないが、取得したデータから評価は可能である。マルチビーム測深精度はビーム方向(片舷最大45°程度)や水深に依存するため、高い精度を要求する計測も考慮し、対応するセンサーを搭載したシステムも提案可能である。

今回の結果は、過去に3D計測による地形データを得ていない事から、本提案技術ではこれ以上の精度検証は難しい。地形の正確さなどを今後検証していくためには更に高精度の計測評価する必要があり、よりハイエンドのシステムを試作し、正解に近い地形データを得て評価を進める予定である。また更なる測量効率向上のために無人艇の軽量化や運動制御アルゴリズムの洗練により、少人数でスピーディに現場作業が終えられる改良を進める。

5. 結論

ダム河川における管理者のニーズに合う、3次元堆砂状況を安価高精度に計測できる無人航行計測システムを開発し、現場試行実験を行ってその有用性について評価した。従来技術では評価できない断面間の地形などについても詳細なイメージや解析結果が得られ、提案する新技術が従来技術より有用である評価結果が得られた。

今後はシステムの改良と共に現場での詳細な調査実験を行いつつ、その結果を用いて製品化やサービスの開発

を目指す。

謝辞： 今回の研究発表に当たっては、2020年度技術マッチングを主催頂いた国土交通省近畿地方整備局様にお世話になった。また紀の川ダム統合管理事務所様には、ダム運用の観点から計測時期や場所の選定、安全面についてアドバイスを頂いたと共に、計測結果に対し航空写真や過去の断面データ等の検証情報の提供を頂き、検証を進める上で大変お世話になった。

最後に、マッチングイベントの進行に際し、一般社団法人先端建設技術センター様には、官民の仲立ちをして頂き、現場でも当社の技術に興味を持っていただきつつ、成果を出すための有益なアドバイスを頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省編, “令和2年度(4月版)土木工事数量算出要領(案)-第1章共通事項”, 2020年4月,
- 2) 国土交通省 港湾局編集, “マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(浚渫工編)(令和2年4月改定版)”, 2020年3月,
- 3) 末次 忠司ほか, “堆砂測量手法の概要とその得失,” 「ダム貯水池における堆砂測量」第2回, pp.15-17, リザーバー2008年3月
- 4) International Hydrographic Organization “Standards for Hydrographic Surveys,” IHO Publication Number 44, 6th edition, Mar, 2020.
- 5) TPUは Total Propagated Uncertainty(統合伝搬不確定性)の略。
- 6) 国土交通省編, “令和2年度(4月版)土木工事数量算出要領(案)-第1章共通事項”, 2020年4月,