

# インターフェロメトリ音響測深機搭載の AUV を鳳来湖（宇連ダム）の堆砂状況調査 に導入した場合の有効性について

大本 茂之<sup>1</sup>・赤澤 俊樹<sup>2</sup>・和田 裕之<sup>3</sup>・大川 博史<sup>4</sup>・  
木村 一朗<sup>5</sup>・野中 貴博<sup>6</sup>・武田 実<sup>7</sup>

<sup>1</sup>株式会社エイト日本技術開発 岡山本店（〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町 3-1-21）  
E-mail: oomoto-shi@ej-hds.co.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>株式会社エイト日本技術開発 岡山本店（〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町 3-1-21）  
E-mail: akazawa-to@ej-hds.co.jp

<sup>3</sup>株式会社エイト日本技術開発 関西支社（〒532-0034 大阪府大阪市淀川区野中北一丁目 12-39）  
E-mail: wada-hi@ej-hds.co.jp

<sup>4</sup>正会員 株式会社エイト日本技術開発 東京本社（〒164-8601 東京都中野区本町五丁目 33-11）  
E-mail: ookawa-hi@ej-hds.co.jp

<sup>5</sup>正会員 株式会社エイト日本技術開発 東京本社（〒164-8601 東京都中野区本町五丁目 33-11）  
E-mail: kimura-i@ej-hds.co.jp

<sup>6</sup>正会員 （独）水資源機構 豊川用水総合事業部水源管理所（〒441-1601 愛知県新城市川合大嶋 26）  
E-mail: takahiro\_nonaka@water.go.jp

<sup>7</sup>正会員 （独）水資源機構 豊川用水総合事業部水源管理所（〒441-1601 愛知県新城市川合大嶋 26）  
E-mail: minoru\_takeda@water.go.jp

水中の調査を無人で実行する AUV は、水中における生産性向上技術の 1 つとして注目されている。本研究では、インターフェロメトリ音響測深機（PMBS）搭載の AUV を鳳来湖（宇連ダム）の堆砂状況調査に導入し、その有効性について精度・危険回避・コストの 3 つの観点から検証した。平均化処理した地盤高データでは PMBS とマルチビーム音響測深機（MBES）で明瞭な差が認められなかったことから、PMBS は MBES と同レベルの測深精度を有していると評価された。PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、調査員の水中落下等の危険性を回避できるとともに、MBES を使用した堆砂状況調査の半数の調査員で対応可能であったため、艀装テストや測深に係る労力を 50%程度軽減でき、その人件費も 60%程度低減できると評価された。

**Key Words:** *autonomous underwater vehicle, phase measuring bathymetric sonar, reservoir, automation and autonomy in sedimentation condition survey, labor costs reduction*

## 1. はじめに

ダムは、流入してくる水に加えて土砂も貯留する。堆砂は、ダムの治水機能や利水機能等の低下を引き起こす場合がある。このため、ダム管理者は河川法施行令（昭和 40 年政令第 14 号）に従い、ダム貯水池の堆砂状況を継続的に調査している。しかしながら、ダム貯水池は広大な面積を有することが多いため、調査に係る過大なコストや労力が問題視されており、効率的な調査手法の確

立が喫緊の課題となっている<sup>1)</sup>。

一方、建設産業では 2016 年度以降、産官学が連携して i-Construction の取組みが進められている。トッパーナー施策の 1 つである ICT の全面的な活用（ICT 土工）では、大幅な生産性の向上が見込まれる UAV 等の測量技術、ICT 建機やロボット技術の全面導入等が推奨されている<sup>2)</sup>。こうした陸上における生産性向上技術の開発はメディアにも取り上げられ、着実な進展が見られる。

近年、国内の海洋環境調査や海底調査に利用され成果

を上げている探査機に自律型無人潜水機（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）がある<sup>3,4)</sup>。AUVは、コンピュータと各種センサー類を搭載した水中ロボットである。調査仕様を予め入力し、その仕様に従って水中の調査を無人で実行するため、水中における生産性向上技術の1つとして注目されている。内閣府総合海洋政策本部参与会議では、AUV戦略プロジェクトチームを2023年に設置し、AUVの社会実装に向けた戦略（AUV戦略）を策定するための検討を集中的に行っている。

本研究の対象フィールドである鳳来湖（宇連ダム）では、1968年から年1回の頻度で堆砂状況調査が継続的に実施されている。2003年以降の堆砂状況調査では2020年（マルチビーム音響測深機で実施）を除き、シングルビーム音響測深機（SBES：Single Beam Echo Sounder）を艀装した船舶で所定の定期横断測線を航行して測深し、平均断面法で堆砂量を算出している。SBESは指向角内の最短距離の湖底を水深として測定すること<sup>5)</sup>、所定の定期横断測線から外れることなく船舶を航行させることは不可能であることから、平均断面法で算出した堆砂量は年によって大きく変動し、また過大に評価されている可能性がある。このため、効率よく高精度な水深データを取得可能なスワス音響測深機の導入が検討されている。

そこで、本研究では、インターフェロメトリ音響測深機（PMBS：Phase Measuring Bathymetric Sonar）搭載のAUVを鳳来湖（宇連ダム）の堆砂状況調査に導入し、その有効性について精度・危険回避・コストの3つの観点から検証した。ここで、インターフェロメトリ音響測深機はスワス音響測深機の一つで、湖底からの音波を4個以上の受波器で受信し、受波器間の音波の位相差から音波の到来方向角を求め、直線距離との組み合わせで水深値を算出する機器である<sup>5)</sup>。マルチビーム音響測深機（MBES：Multi Beam Echo Sounder）と同様に面的測量が可能なソナーであり、「ダム貯水池土砂管理の手引き

（案）<sup>6)</sup>」において貯水池堆砂測量手法の1つに挙げられている。

## 2. 使用機器と方法

### (1) 研究対象フィールド

先に述べたように堆砂状況調査は、愛知県新城市に位置する鳳来湖（宇連ダム）で実施した。鳳来湖の位置図を図-1に示す。独立行政法人水資源機構が管理する宇連ダムは、鳳来町川合地内（現：新城市川合地区）の宇連川を堰き止めて1958年に建設された貯水量約2,800万 $m^3$ の施設である。

### (2) PMBSによる堆砂状況調査

非計測領域が可能な限り発生しないように、鳳来湖の本川部には横断方向（40m前後の間隔）と湖岸沿いに、沢部には縦断方向にそれぞれ測線を設定した（合計124本；図-2）。2022年12月16・17・19～21日（合計5日間）に、測線の水面上を速度1m/sでAUV（図-3、表-1）に自律航行させ、搭載したPMBS（周波数540kHz、発振回数60Hz；図-3、表-1）のスワス幅を100mに設定して等角度モード（0.25°間隔）で水深を測定した。ここで、AUVの航行中の位置は慣性航法装置（INS：Inertial Navigation System；表-1）で測位した。なお、INSのキャリブレーションは測深作業の開始前に陸上で実施した。

### (3) SBESによる堆砂状況調査

鳳来湖では、平均断面法で堆砂量を算出するために26本（No.1～26）の定期横断測線が設定されている（図-4）。2022年12月1・2日に、定期横断測線No.1～13・17～20（17本）の水面上を、SBES（表-1）を艀装した船舶で航行して水深を測定した。ここで、航行する船舶の

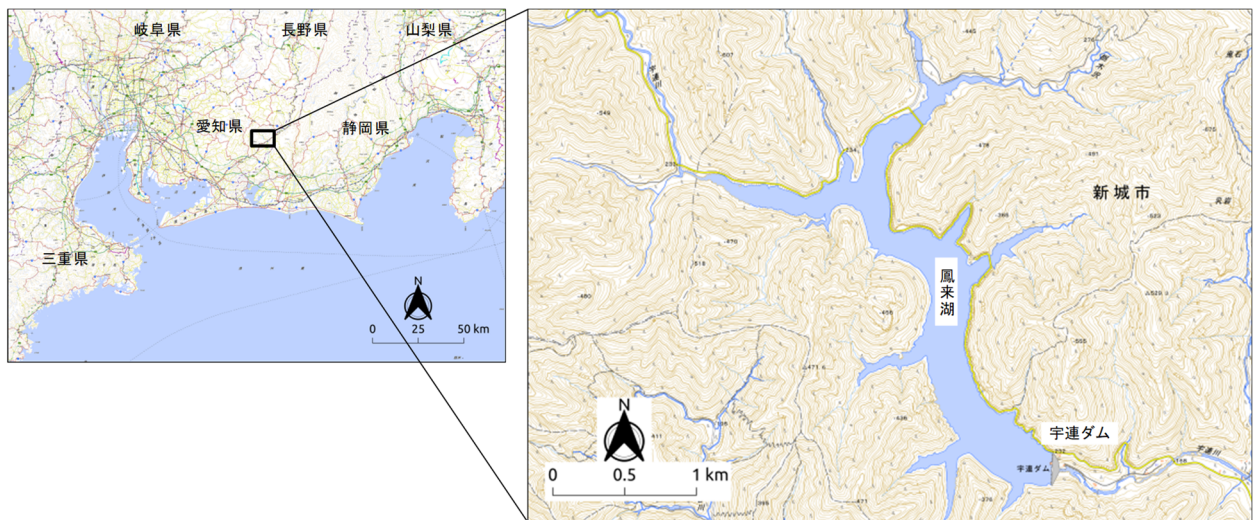


図-1 研究対象フィールドの鳳来湖の位置図

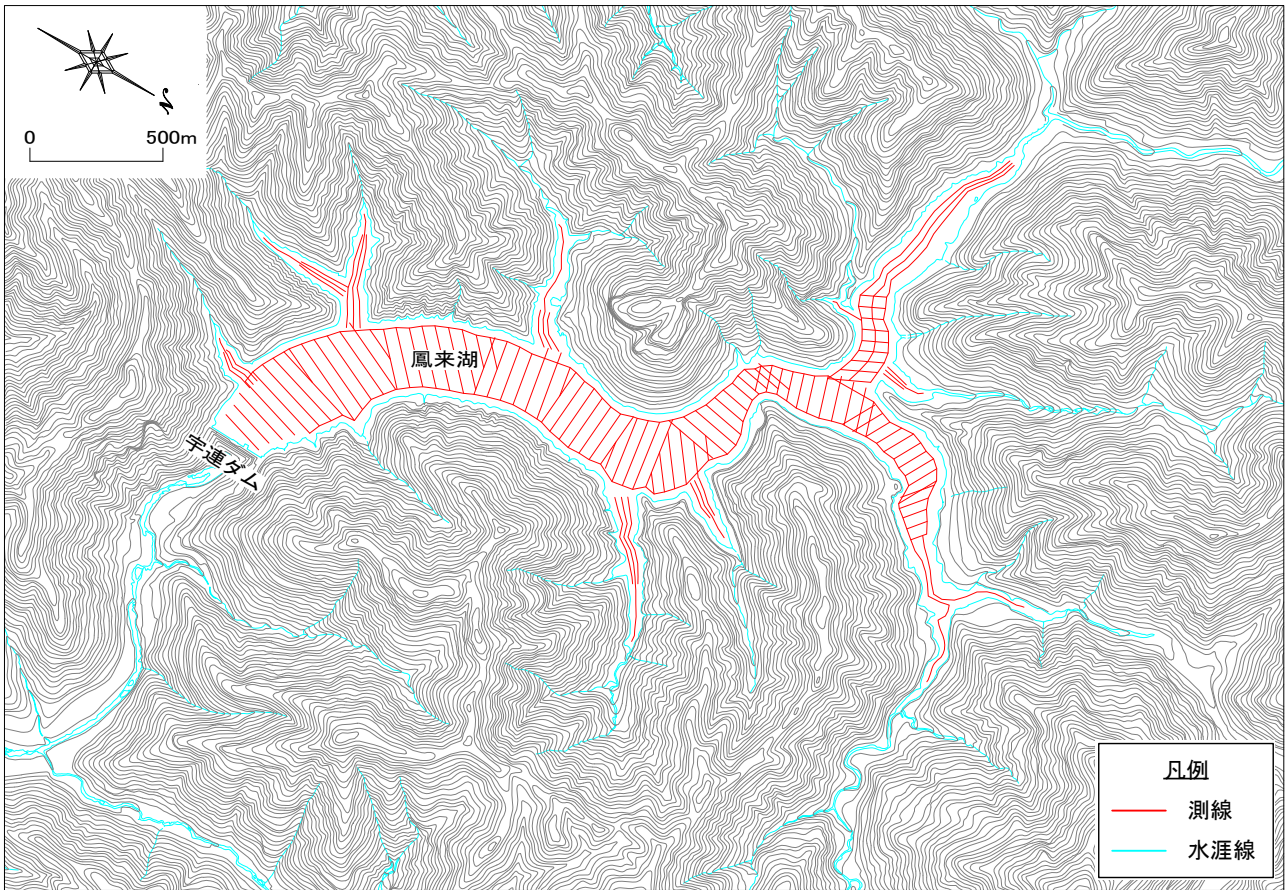


図-2 PMBSによる堆砂状況調査のために鳳来湖内に設定した測線

位置は RTK-GNSS (表-1) で測位した。なお、定期横断測線 No.1~13・17~20 における陸上部 (端部の既設基準点~水深 1m 未満までの区間) の地盤高は、2022 年 12 月 11~14 日にトータルステーション (表-1) で測定した。

表-1 使用機器一覧

機器名	型式	メーカー
AUV	i3XO EcoMapper AUV	YSI
PMBS	2205 Sonar System	EdgeTech
INS	Phins C3	iXblue
SBES	PDR1200	千本電機
RTK-GNSS	Trimble R12	ニコン・トリンプル
トータルステーション	TS15	Leica
音速度計	CastAway CTD	YSI

(4) MBESによる堆砂状況調査 (過年度調査)

鳳来湖では、2020 年 12 月 8~10 日に MBES による堆砂状況調査が実施されている<sup>7)</sup>。測線を設定せず、鳳来湖の本川部や沢部を MBES (SeaBat T10, Teledyne Reson) を艀装した船舶で網羅的に航行して水深を測定している。航行する船舶の位置は VRS-GNSS (HiPer SR, トプコン) で測位している。なお、MBES の周波数、発振回数及びスワス角等の詳細は不明である。

(5) PMBS の水深データの処理方法

JSF 形式で出力される PMBS の点群データ (水深) の各種補正 (センサーのオフセット補正, ロール・ピッチ・ヘディングの補正, 喫水補正, 動揺補正, 水位補正 [水深を標高に変換], 音速度補正等) はソフトウェア SonarWiz (Chesapeake Technology) を用いてポストプロセスで行った。ここで、水位補正には水源管理所 (宇連ダム) が測定している水位の時系列データ, 音速度補正には音速度計 (表-1) で測定した音速度の鉛直データを使用した。



図-3 堆砂状況調査に導入した PMBS 搭載の AUV

隣接の測線では AUV の進行方向は逆向きとなるような設定であったため、PMBS の点群データ (地盤高) には、隣接測線間の重複領域においてズレが認められた。

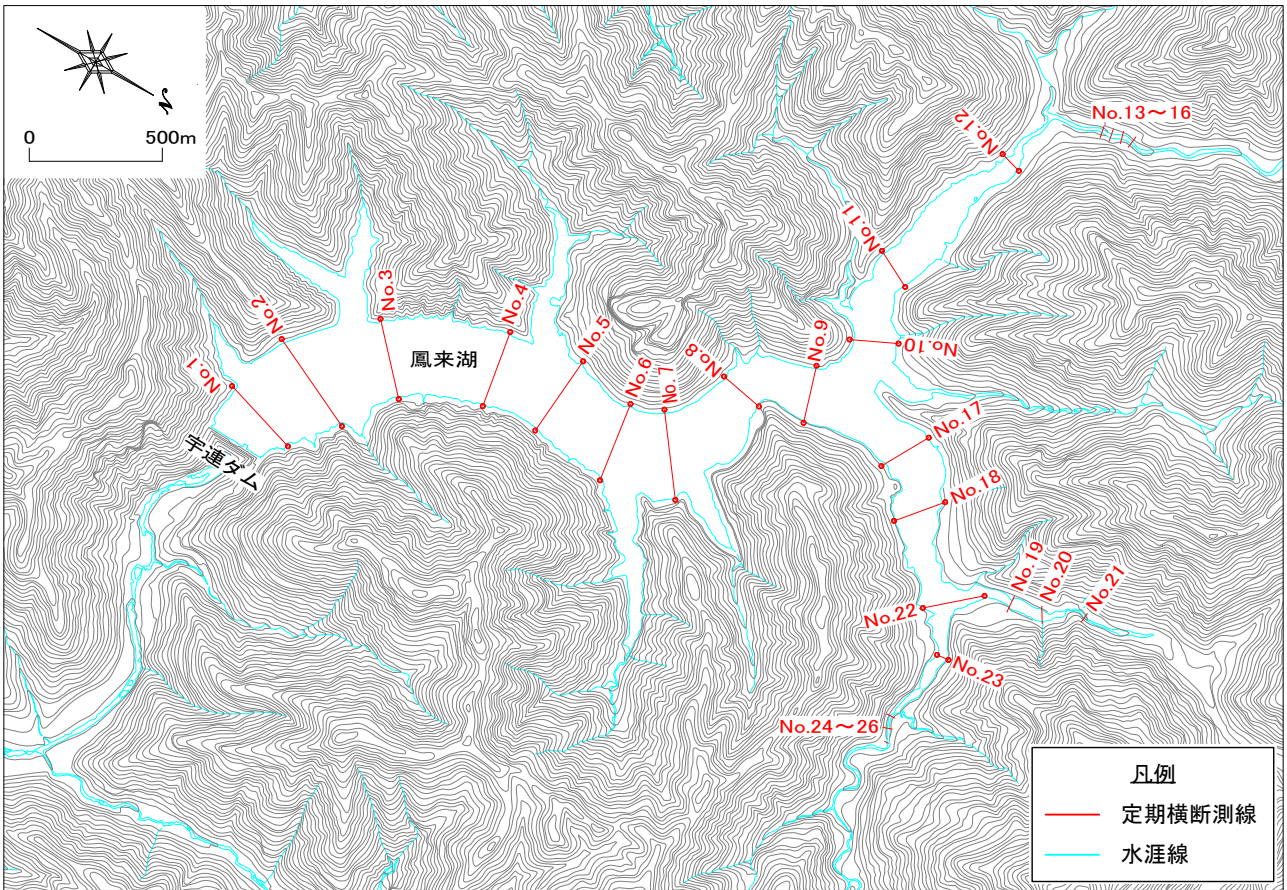


図4 鳳来湖における所定の定期横断測線

このため、ソフトウェア TerraMatch (Terrasolid) を用いて点群データ (地盤高) の位置合わせ (レジストレーション処理) を実施した。ノイズは自動フィルタを使用せず手動ですべて除去した後、点群データ (地盤高) の取得範囲において 1m 間隔のメッシュデータをクリギング法<sup>8)</sup>により作成した。そして、定期横断測線 No.1 ~13・17~20のメッシュデータを抽出し、(3)で取得した陸上部の地盤高データと併せて断面図を作成した。また断面図に基づいて、常時満水位 (標高 EL.229.15m) 以下の断面積をソフトウェア V-nas Clair (川田テクノシステム) で算出した。

(6) SBES の水深データの処理方法

SBES の水深データは、PMBS のそれと同一の方法で水位補正 (水深を標高に変換) と音速度補正を実施した。そして、(3)で取得した陸上部の地盤高データと併せて、定期横断測線 No.1~13・17~20の断面図を作成した。また断面図に基づいて、常時満水位 (標高 EL.229.15m) 以下の断面積をソフトウェア V-nas Clair (川田テクノシステム) で算出した。

(7) MBES の水深データの処理方法 (過年度調査)

使用したソフトウェア等の詳細は不明であるが、

MBES の点群データ (水深) も PMBS のそれと同様な補正・ノイズ処理が実施されている<sup>7)</sup>。

(8) 累積堆砂量の算出方法

鳳来湖における現状 (2022 年) の累積堆砂量は、常時満水位 (標高 EL.229.15m) における現状 (2022 年) の貯水容量を元河床時 (1958 年) の貯水容量から差し引いて算出した。ここで、現状 (2022 年) と元河床時 (1958 年) の貯水容量 SC は式(1)の平均断面法で算出した (図-5)。

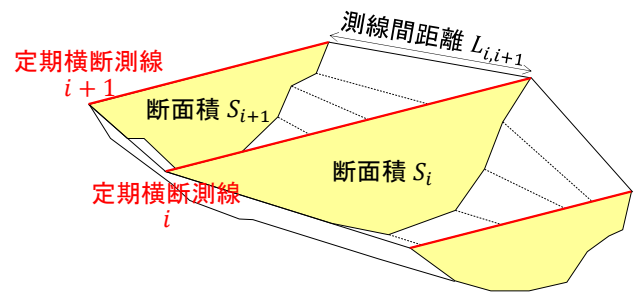


図-5 平均断面法の概念図

$$SC = \sum_i \left( \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) \cdot L_{i,i+1} \quad (1)$$

ここに、 $S_i$ は定期横断測線*i*における常時満水位以下の断面積、 $S_{i+1}$ は定期横断測線*i*+1における常時満水位以下の断面積、 $L_{i,i+1}$ は定期横断測線*i*と定期横断測線*i*+1の測線間距離（左・右岸の平均値）である（図-5）。なお現状（2022年）の累積堆砂量は、PMBSとSBESの測定結果からそれぞれ算出した。

### 3. 結果及び考察

#### (1) AUVの航行ルート

鳳来湖の本川部と沢部に設定した124本の測線に対して、AUVが実際に航行したルートを図-6に示す。AUVは全測線の水面上を正確に航行しており、そのルートは測線とよく一致していた。ここで、AUVの総航行時間は約11.5時間、総航行距離は約42kmであった。

#### (2) 鳳来湖の湖底地形

1m間隔のメッシュデータ（PMBS）から作成した鳳来湖の湖底地形を図-7に示す。本川部の地盤高は、上流から下流にかけて低くなった。湖底の最深部はダム堤体付近で認められ、その地盤高は標高EL.171.5mであった。湖岸付近は急勾配の地形であったが、それ以外の領域は

緩勾配の地形であった。なお、湖岸付近以外の領域では、周囲に比べて地盤高が低い河道状の地形（旧河道）が存在した。

#### (3) 鳳来湖の累積堆砂量

鳳来湖における現状（2022年）の累積堆砂量をPMBSとSBESの測定結果からそれぞれ算出した結果を表-2に示す。PMBSの測定結果から算出した累積堆砂量は448,380m<sup>3</sup>であった。これに対して、SBESの測定結果から算出した累積堆砂量は826,521m<sup>3</sup>であり、PMBSのその2倍程度の値を示した。SBESの測定結果から算出した累積堆砂量がPMBSのそれに比べて著しく大きい値を示したのは、小柴ら<sup>9)</sup>が指摘しているようにSBESで測定した水深が過小評価されていることが主な原因であると考えられる。実際に、PMBSとSBESの測定結果から作成した定期横断測線No.3の断面図（図-8）を見ると、PMBSよりSBESの地盤高の方が全体的に高い値を示した。こうした傾向は他の定期横断測線でも同様であった。

表-2 PMBSとSBESの測定結果から算出した鳳来湖における現状（2022年）の累積堆砂量

項目	PMBS	SBES
現状（2022年）の累積堆砂量	448,380m <sup>3</sup>	826,521m <sup>3</sup>

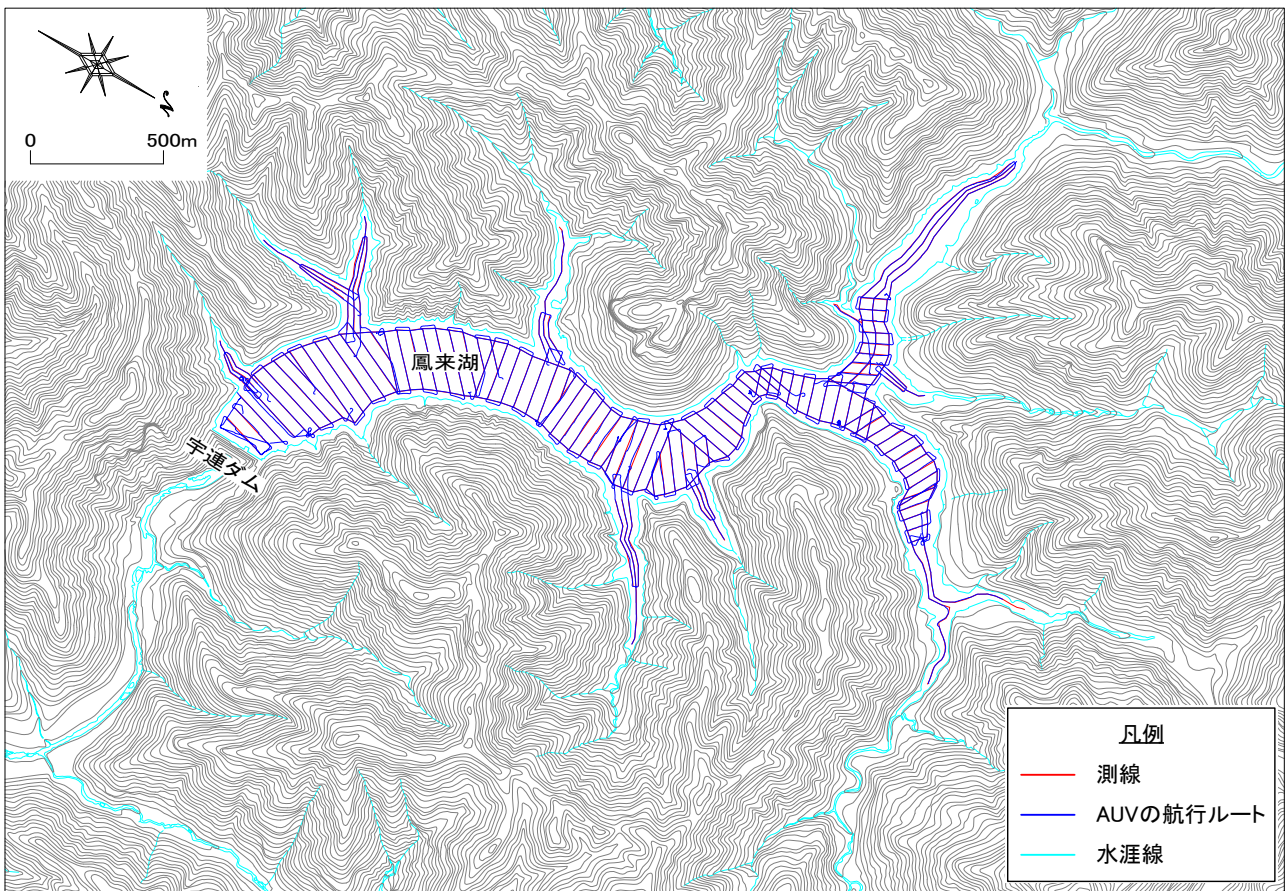


図-6 AUVの航行ルート

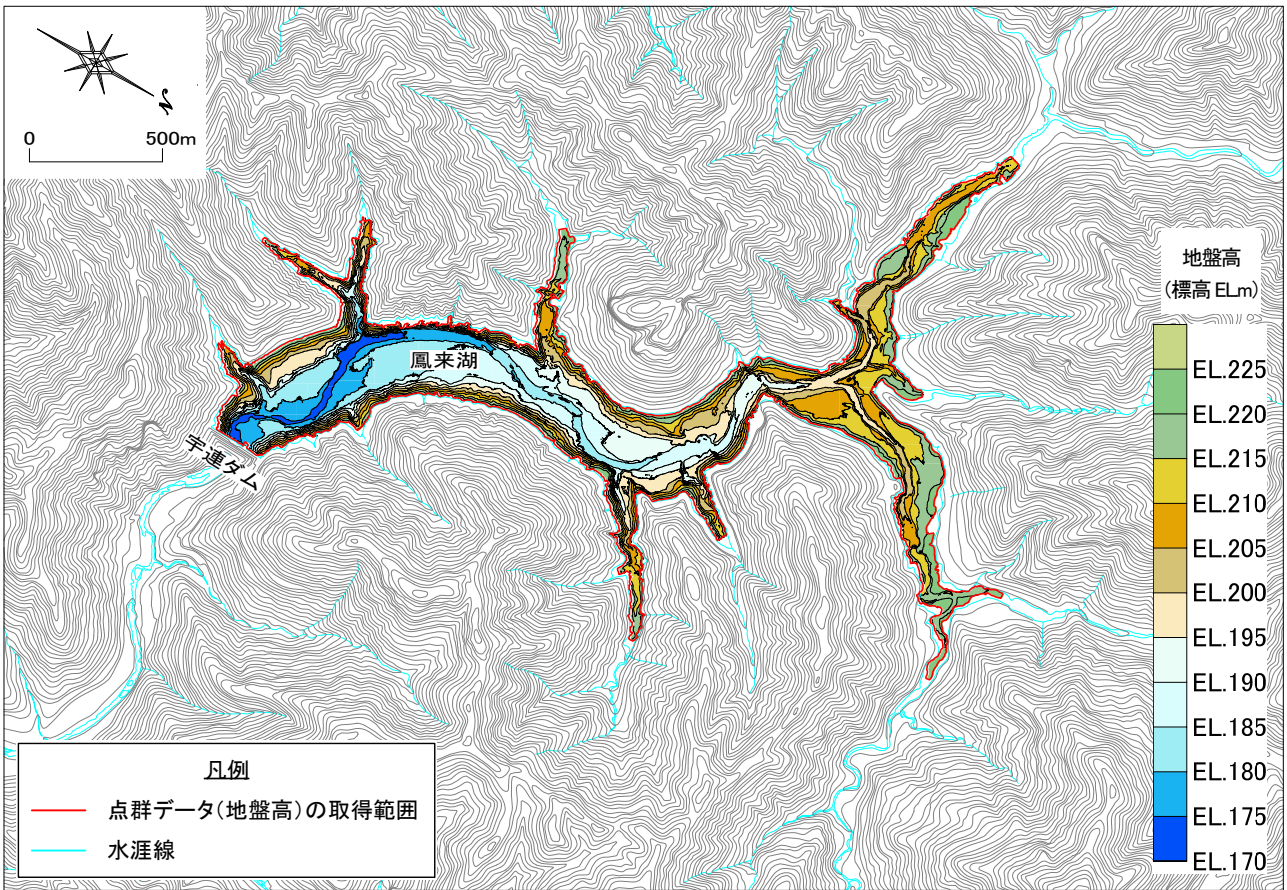


図-7 1m間隔のメッシュデータ (PMBS) から作成した鳳来湖の湖底地形

また、SBES の測定結果から算出した 2003 年以降の累積堆砂量には、経年的に単調増加する傾向も見られたが、累積堆砂量が前年比を下回る、つまり累積堆砂量が前年より減少する年 (2005・2006・2008・2011・2015・2019・2022 年) が散見された (図-9)。ダム貯水池では、上流から輸送されてきた土砂は掃流力の低下に伴って湖底に堆積するのが一般的である。このため、大規模な排砂や浚渫が実施されない限り、同一の定期横断測線において SBES の測定結果から算出した累積堆砂量は前年に比べて増加するのが普通である。このことから、累積堆砂量が前年より減少するという結果は自然現象ではなく、測深過程において何らかの誤差が発生したために現出し

ていると考えられる。

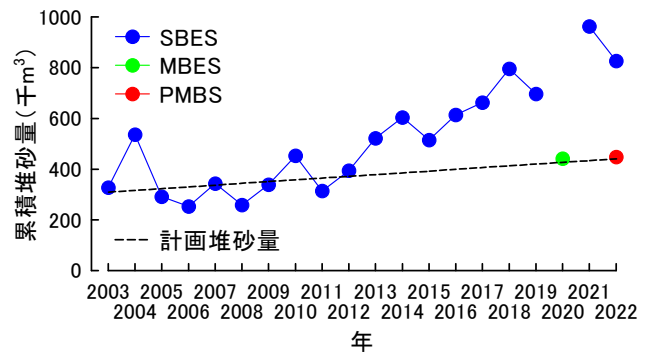


図-9 SBES の測定結果から算出した累積堆砂量の経年変化

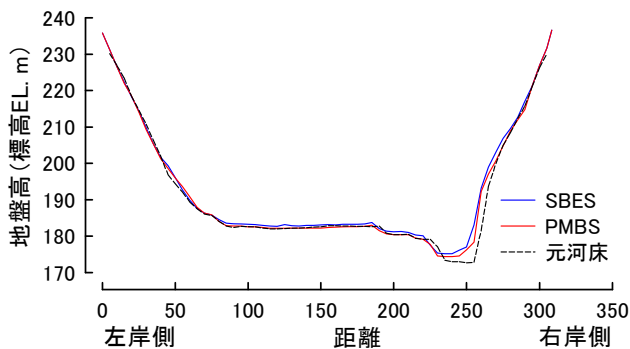


図-8 PMBS と SBES の測定結果から作成した定期横断測線 No.3 の断面図

小柴ら<sup>9)</sup>は、音響測深における主な誤差発生要因を表-3のように整理している。2003 年以降の SBES を使用した堆砂状況調査では、所定の定期横断測線から外れることなく船舶を航行させることは不可能であったと想定されることから、(G)測点の位置ズレによる誤差の発生がまず考えられる。また、SBES の機種や据付方法、船舶の動揺状況は年によって異なっていたと想定されることから、(A)機器固有精度、(B)ビーム角、(C)三軸の傾き、(D)据付位置、(E)据付の緩み、(J)船の揺れによる誤差の

発生も考えられる。こうした誤差の発生が原因で、SBES の測定結果から算出した累積堆砂量が前年比を下回るという結果が現出しているのは間違いないと推察されるが、各誤差の影響割合については定かではない。

表-3 音響測深における主な誤差発生要因<sup>9)</sup>

誤差発生要因	
計測機器	(A) 機器固有精度
	(B) ビーム角
測深機据付	(C) 三軸の傾き
	(D) 据付位置
	(E) 据付の緩み
機器の同期生	(F) レイテンシー
平面位置 SBES	(G) 測定の位置ズレ
平面位置 MBES	(H) GNSS 計測精度
湖底地形	(I) 斜面の勾配
移動体の傾き	(J) 船の揺れ
水の密度	(K) 音速度等の変化
基準高	(L) 水位変化

以上のことから、SBES を使用した堆砂状況調査では、水深を過小評価して累積堆砂量を過大評価する、測深過程で発生する誤差により累積堆砂量が前年より減少する可能性があると考えられる。また、SBES の測定結果から算出した 2013 年以降の累積堆砂量は計画堆砂量（経過年で換算したもの）を上回っており、その差は年々拡大している（図-9）。一方、MBES の測定結果から算出した 2020 年の累積堆砂量と、PMBS の測定結果から算出した 2022 年の累積堆砂量は両者とも計画堆砂量とほぼ一致している（図-9）。したがって、鳳来湖における今後の堆砂状況調査は、MBES や PMBS といったスワスイ音響測深機を使用して実施するのが望ましいと結論付けられる。

#### 4. PMBS 搭載の AUV の有効性検証

ここでは、PMBS 搭載の AUV を鳳来湖の堆砂状況調査に導入した場合の有効性について、精度・危険回避・コストの3つの観点から検証した。

##### (1) 精度

PMBS の測定結果から作成した断面図の地盤高データ（2022年）をMBESのそれ（2020年）と同一地点間で比較した。両者を変数とする散布図（図-10）を見ると、プロットされた点の大部分は45度線（傾き1、切片0）の近傍に分布していた。また、両者には有意な比例関係が認められた（ $p < 0.05$ ）。さらに、両者の差分値（PMBS の測定結果から作成した断面図の地盤高データ〔2022年〕－MBES の測定結果から作成した断面図の地盤高データ〔2020年〕）の大部分（78.5%）は-0.5～0.5m

の範囲内であり、その平均も 0.04m とゼロに近い値を示した（図-11）。以上のように、平均化処理した地盤高データ（1m間隔のメッシュデータ）ではPMBSとMBESで明瞭な差が認められなかった。

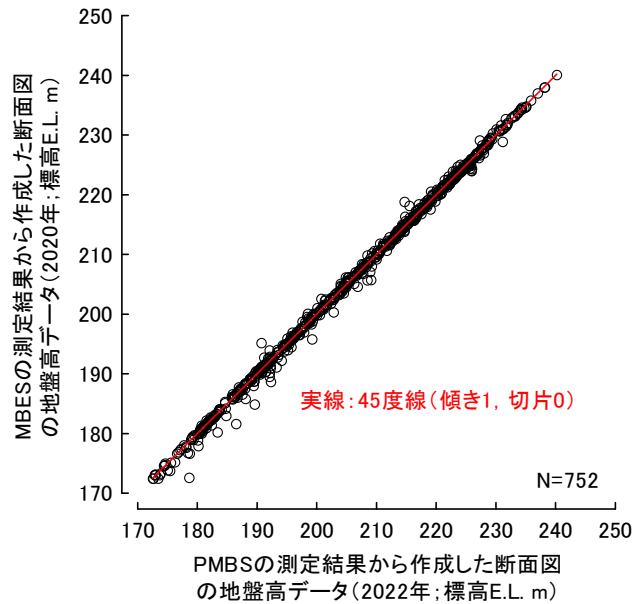


図-10 PMBS の測定結果から作成した地盤高データ（2022年）とMBESのそれ（2020年）の同一地点比較

累積堆積量は、2020～2022年の期間に 7,544m<sup>3</sup> 増加した（図-9）。また図-10の散布図では、MBESよりPMBSの地盤高の方が高いことを示すプロットが標高 E.L.170～190mの範囲で多く見られた。以上のことから、2020～2022年の期間には、標高 E.L.170～190mの領域に土砂の多くが堆積し、これ以外の標高の領域では土砂の堆積量が少なく、また湖底の地盤高も大きく増加していないことが予想される。この想定が正しければ、平均化処理した地盤高データにおいてPMBSとMBESで明瞭な差が見られなかったことは、PMBSがMBESと同レベルの測深精度を有していることを意味していると評価される。ただしPMBSの測定水深のバラツキは、松本<sup>10)</sup>が指摘しているようにMBESのそれに比べて大きくなるのが一般

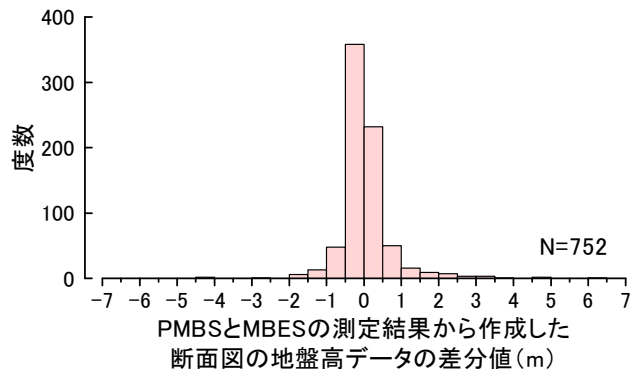


図-11 PMBS と MBES の測定結果から作成した断面図の地盤高データの差分値のヒストグラム

的である。このため、平均化処理した地盤高データだけでは、PMBS の測深精度を評価しにくいことには留意する必要がある。

**(2) 危険回避**

船舶を使用した測深作業では、機器や器具の船舶への艀装中に調査員がバランスを失って水中へ落下する、地盤高が急激に変化する湖岸付近で船舶が座礁する、川幅の狭い沢部で船舶が湖岸に衝突するといった危険性が存在する。

しかしながら、AUV を使用した測深作業では、PMBS 等の各種センサー類と AUV 本体が一体化しているため艀装作業がほぼ必要ないこと、AUV は水深 0.2m 程度でも航行可能であること、AUV は川幅 3m 程度の沢部でも進入可能であることから、前述の危険性をほぼ回避することが可能である。

**(3) コスト**

最近普及が進んでいる MBES を使用した堆砂状況調査では、船舶への艀装、測定中の船舶の誘導やシステム・オペレーション等の作業が必要となる。そのため、調査員 4 名での実行が想定されている（例えば、「港湾土木請負工事積算基準令和 5 年度改定版<sup>11)</sup>」）。これに対して、PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、PMBS 等の各種センサー類が AUV 本体と一体化しているため、艀装に伴う労力がほぼゼロであったこと、入力した調査仕様に従って AUV が自動的・自律的に測深を行ったことから、調査員が実施した現場作業は原則として、INS のキャリブレーションと AUV の投入・回収だけであった。このため、調査員 2 名での対応が可能であった。したがって、PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、MBES を使用した堆砂状況調査の半数の調査員で対応可能であったため、艀装テストや測深に係る労力を 50%程度軽減できると評価される。

前述の調査員数を考慮し、堆砂状況調査の艀装テストと測深に係る人件費について「港湾土木請負工事積算基準令和 5 年度改定版<sup>11)</sup>」を参考に積算してみた。PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、調査員 2 名で対応可能であったため、艀装テスト (INS のキャリブレーションのみ; 1 式当り) の歩掛は主任技師と技師が各 0.5 人、測深 (1 日当り) の歩掛は主任技師と技師が各 1 人と設定でき、それらの人件費は 142,500 円と積算された (表-4)。一方、MBES を使用した堆砂状況調査では、「港湾土木請負工事積算基準令和 5 年度改定版<sup>11)</sup>」の標準歩掛を採用すると、艀装テスト (1 式当り) の歩掛は主任技師と助手が各 1 人及び技師と技師補が各 1.5 人、測深 (1 日当り) の歩掛は主任技師、技師及び技師補が各 1 人と助手 0.5 人と設定でき、それらの人件費は

346,050 円と積算された (表-4)。したがって、PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、MBES を使用した堆砂状況調査に比べて艀装テストや測深に係る人件費を 60%程度低減できると評価される。ただし測深に係る人件費は、標準測深速度やスワ幅、水深データの重複率等で決定される 1 日当りの測深面積によって変動することには留意する必要がある。

表-4 PMBS 搭載の AUV と MBES における堆砂状況調査の艀装テストと測深に係る人件費

[PMBS 搭載の AUV における堆砂状況調査]

名称	形状寸法	単位	数量	単価	費用
艀装テスト(A)		式	1		47,500
主任技師	測量	人	0.5	51,000	25,500
技師	測量	人	0.5	44,000	22,000
技師補	測量	人		34,300	
助手	測量	人		32,200	
測深(B)		日	1		95,000
主任技師	測量	人	1	51,000	51,000
技師	測量	人	1	44,000	44,000
技師補	測量	人		34,300	
助手	測量	人		32,200	
合計(A)+(B)					142,500

※1 表中の単価には、「令和 5 年 3 月から適用する設計業務委託等技術者単価<sup>13)</sup>」を使用した。

[MBES における堆砂状況調査]

名称	形状寸法	単位	数量	単価	費用
艀装テスト(A)		式	1		200,650
主任技師	測量	人	1	51,000	51,000
技師	測量	人	1.5	44,000	66,000
技師補	測量	人	1.5	34,300	51,450
助手	測量	人	1	32,200	32,200
測深(B)		日	1		145,400
主任技師	測量	人	1	51,000	51,000
技師	測量	人	1	44,000	44,000
技師補	測量	人	1	34,300	34,300
助手	測量	人	0.5	32,200	16,100
合計(A)+(B)					346,050

※1 艀装テストと測深の歩掛には、「港湾土木請負工事積算基準令和 5 年度改定版<sup>11)</sup>」の標準歩掛を使用した。

※2 表中の単価には、「令和 5 年 3 月から適用する設計業務委託等技術者単価<sup>13)</sup>」を使用した。

なお、堆砂状況調査のコストを PMBS 搭載の AUV と MBES で厳密に比較したい場合には、機器の損料や水深データの処理に係る人件費等も加味する必要がある。しかしながら、前述のコスト比較では、機器の損料や水深データの処理に係る人件費を考慮せず、艀装テストや測深に係る人件費のみを対象とした。その理由は以下のとおりである。

- 1) PMBS 搭載の AUV や MBES の供用日当り損料は、



省人化以外の要因の影響を強く受けて変動すると考えられるため。

- PMBS 搭載の AUV や MBES の供用日当り損料は、取得価格や使用年数、供用日数等によって変動する。参考までに、「船舶および機械器具等の損料算定基準令和4年度改訂版<sup>12)</sup>」では、MBES の供用日当り損料は 205,000 円と算定されている。
  - PMBS 搭載の AUV や MBES が海外製品である場合には、その日本国内での取得価格は為替レートの影響を受けて変動する。
- 2) 水深データの処理に係る人件費は、PMBS と MBES でさほど大きく変わらないと考えられるため。
- 水深データの補正・ノイズ処理の内容は PMBS, MBES に関係なく、ほぼ同様である。
  - PMBS と MBES の最小測定可能水深は両者とも 1m 程度（著者ら自身の体験）であることから、測定時の水位が同一の場合には、PMBS と MBES の点群データ（地盤高）の取得範囲にはほとんど差が生じない。

## 5. おわりに

本研究では、PMBS 搭載の AUV を鳳来湖の堆砂状況調査に導入し、その有効性について精度・危険回避・コストの3つの観点から検証した。主な結論を以下に示す。

- 1) 平均化処理した地盤高データ（1m 間隔のメッシュデータ）では PMBS と MBES で明瞭な差が認められなかったことから、PMBS は MBES と同レベルの測深精度を有していると評価される。
- 2) AUV を使用した測深作業では、機器や器具の船舶への艀装中に調査員がバランスを失って水中へ落下する、地盤高が急激に変化する湖岸付近で船舶が座礁する、川幅の狭い沢部で船舶が湖岸に衝突するといった危険性をほぼ回避することが可能である。
- 3) PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、MBES を使用した堆砂状況調査の半数の調査員で対応可能であったため、艀装テストや測深に係る労力を 50%程度軽減でき、それに係る人件費も 60%程度低減できると評価される。

国土交通省の「インフラ分野の DX アクションプラン<sup>14)</sup>」では、建設従事者の肉体的・精神的な負担軽減、省人化・従事時間の短縮を図るために、現場作業の遠隔化・自動化・自律化を3つの柱のうちの1つに据えている。

PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂状況調査では、測深作業を AUV が自動的・自律的に実行する。鳳来湖以

外のダム貯水池の堆砂状況調査でも PMBS 搭載の AUV を積極的に活用し、測深作業の自動化・自律化に今後も継続して取り組むつもりである。

ただし、その実現には、AUV の安全な航行を確保することが必要不可欠であり、航行ルート上に存在する障害物等を自動的に認識・回避するシステムの開発が今後の課題として挙げられる。

**謝辞：**本論文は、令和4年度宇連ダム堆砂測量業務の成果の一部である。(株)エイト日本技術開発の加藤智雄 博士、西川泰夫 氏及び藤原哲男 氏には、本論文の作成に際して様々なご助言を頂いた。また、(株)エイト日本技術開発の板野誠司 氏、坪倉 巧 氏及び川孝久 氏、協力業者の平田昌浩 氏には、極寒の現地作業にご協力を頂いた。さらに、匿名の査読者の皆様には、緻密なる査読と貴重な意見を頂いた。この場を借りて深く感謝の意を表する。

## REFERENCES

- 1) 独立行政法人 水資源機構 総合技術センター：ダム貯水池の堆積性状のモニタリング技術開発，[https://www.water.go.jp/honsya/honsya/gijutsuan-nai/pdf/2024dobokusekoujigenkou\\_02.pdf](https://www.water.go.jp/honsya/honsya/gijutsuan-nai/pdf/2024dobokusekoujigenkou_02.pdf) [Japan Water Agency : *Damu chosuichi no taiseki seijo no monitaringu gijutsu kaihatu*, [https://www.water.go.jp/honsya/honsya/gijutsu-annai/pdf/2024dobokusekoujigenkou\\_02.pdf](https://www.water.go.jp/honsya/honsya/gijutsu-annai/pdf/2024dobokusekoujigenkou_02.pdf)]
- 2) i-Construction 委員会：i-Construction～建設現場の生産性革命～，pp. 11-13, 2016. [i-Construction Committee: *i-Construction ~Kensetsu gamba no seisensei kakumei~*, pp. 11-13, 2016.]
- 3) 芦 寿一郎，森田澄人，清川昌一，月岡 哲：泥火山の微細構造と発達過程—深海巡航探査機「うらしま」による熊野トラフ海底調査—，第 114 年日本地質学会学術大会講演要旨，pp. 99, 2007. [Ashi, J., Morita, S., Kiyokawa, S. and Tsukioka, S.: Fine structures and growth processes of mud volcanoes—AUV “Urashima” survey in the Kumano trough—, *Abstract, The 114th Annual Meeting of the Geological Society of Japan*, pp. 99, 2007.]
- 4) 笠谷貴史，月岡 哲，山本富士夫，百留忠洋，澤 隆雄，吉田 弘，石橋正二郎，田原淳一郎，木下正高，青木太郎：深海巡航 AUV 「うらしま」によって得られた相模湾初島沖の海底地すべり音響イメージ，海洋調査技術，Vol. 19, No. 2, pp. 11-17, 2007. [Kasaya, T., Tsukioka, S., Yamamoto, F., Hyakudome, T., Sawa, T., Yoshida, H., Ishibashi, S., Tahara, J., Kinoshita, M. and Aoki, T.: Acoustic images of submarine landslide in western Sagami bay obtained by deep sea AUV “URASHIMA” in Sagami bay, *Journal of the Japan Society for Marine Surveys and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 11-17, 2007.]
- 5) 一般社団法人 海洋調査協会：海洋調査技術マニュアル—深浅測量—，pp. 1-161, 2015. [Japan Marine Surveys Association: *Kaiyo chosa gijutsu manyuaru—Shinsen sokuryo—*, pp. 1-161, 2015.]
- 6) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム貯水池土砂管理の手引き（案），pp. 9, 2018.

- [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Damu chosuichi dosha kanri no tebiki (An)*, pp. 9, 2018.]
- 7) 株式会社 共栄テック : 宇連ダム外堆砂測量業務 業務報告書, pp. 1-23, 2021. [Kyouei Tec Co., Ltd.: *Ure damu gaitaisa sokuryo gyomu Gyomu hokokusho*, pp. 1-23, 2021.]
  - 8) 小林知勝 : クリギング法を用いた歪場の推定の試み, 北海道大学地球物理学研究報告, No. 72, pp. 257-268, 2009. [Kobayashi, T.: Experiment in estimate of strain field using a kriging method, *Geophysical Bulletin of Hokkaido University*, No. 72, pp. 257-268, 2009.]
  - 9) 小柴孝太, 村上桂山, 清野泰弘, 角 哲也 : ダムのメンテナンスに資する堆砂測量で負の堆砂量が計測される問題, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 241-250, 2022. [Koshiba, T., Murakami, K., Kiyono, Y. and Sumi, T.: Issue of negative sediment accumulation measurement in dam maintenance, *Collection of Research Papers on Infrastructure Maintenance Practices*, Vol. 1, No. 1, pp. 241-250, 2022.]
  - 10) 松本良浩 : インターフェロメトリ音響測深機の水深精度と異物検出能力の比較検証, 海洋情報部研究報告, No. 52, pp. 11-26, 2015. [Matsumoto, Y.: Evaluation and comparison of depth uncertainty and feature detecting capability of phase measuring bathymetric sonars, *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches*, No. 52, pp. 11-26, 2015.]
  - 11) 一般財団法人 港湾空港総合技術センター : 港湾土木請負工事積算基準 令和5年度改定版, pp. 2-1-(5)-2-1-(6), 公益社団法人 日本港湾協会, 2023. [Specialists Center of Port and Airport Engineering: *Kowan doboku ukeoi koji sekisan kijun Reiwa gonendo kaiteiban*, pp. 2-1-(5)-2-1-(6), Japan Port and Harbor Association, 2023.]
  - 12) 一般財団法人 港湾空港総合技術センター : 船舶および機械器具等の損料算定基準 令和4年度改定版, pp. 船 17-18, 公益社団法人 日本港湾協会, 2021. [Specialists Center of Port and Airport Engineering: *Sempaku oyobi kikaikiguto no sonryo santei kijun Reiwa yonnendo kaiteiban*, pp. Fune 17-18, Japan Port and Harbor Association, 2021.]
  - 13) 国土交通省 : 令和5年3月から適用する設計業務委託等技術者単価について, pp. 5, 2023. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Reiwa gonon sangatsu kara tekiyo suru sekkei gyomu itaku to gijutsusha tanka nitsuite*, pp. 5, 2023.]
  - 14) 国土交通省 : インフラ分野のDXアクションプラン, pp. 10, 2022. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Infura bunya no DX Action Plan*, pp. 10, 2022.]

(Received January 15, 2024)

(Accepted December 23, 2024)

## ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF AN AUV EQUIPPED WITH A PHASE MEASURING BATHYMETRIC SONAR FOR SEDIMENTATION CONDITION SURVEY IN LAKE HOURAI (URE DAM)

Shigeyuki OMOTO, Toshiki AKAZAWA, Hiroyuki WADA, Hiroshi OKAWA,  
Ichiro KIMURA, Takahiro NONAKA and Minoru TAKEDA

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs), capable of conducting unmanned underwater surveys, have been recognized as a promising technology for enhancing productivity in underwater environments. In this study, we introduced an AUV equipped with a Phase Measuring Bathymetric Sonar (PMBS) for investigating the sedimentation conditions in Lake Horai (Ure Dam), and evaluated its effectiveness from three aspects: Accuracy, Risk Avoidance, and Cost. The comparison of the averaged ground elevation data (mesh data with 1-meter interval) processed by the PMBS, and the Multibeam Echo Sounder (MBES) revealed no significant difference, indicating that the PMBS provides depth measurement accuracy comparable to the MBES. Furthermore, the sedimentation condition survey conducted using the AUV with PMBS not only facilitated the avoidance of inherent risks, such as researchers submerging into water, but also required half the number of survey personnel compared to the MBES survey. This resulted in approximately 50% reduction in labor related to equipment testing and depth measurement, as well as an estimated 60% reduction in associated labor costs.