

水中調査の新技术である AUV（小型自律式無人潜水機）を用いた宇連ダムにおける堆砂測量

○佐藤 友孝¹・武田 実²・福田 暁³

概要：豊川用水の主水源である宇連ダムにおいては、適正な水源運用を行う必要性及び河川管理者への報告のために、継続的に年1回の頻度で堆砂状況調査を行っている。堆砂測量の手法としては、シングルビーム音響測深機（SBES：Single Beam Echo Sounder）を艀装（搭載）した船舶で所定の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、所定の横断測線から外れることなく船舶を航行させることは困難であることから、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る傾向にある。

一方、最近普及が進んでいるマルチビーム音響測深機（MBES：Multi Beam Echo Sounder）を使用する堆砂測量（宇連ダムでは2020年実施）は、直接3次元データが得られることから計測精度は高いものの、3次元解析に多くの費用がかかることから、毎年の実施には経費的な課題がある。そこで、新技术であるインターフェロメトリ音響測深機（PMBS：Phase Measuring Bathymetric Sonar）搭載のAUV（小型自律式無人潜水機）及びSBESによる堆砂測量を行い、SBES、MBES及びPMBSの計測精度・労力・コストを比較検討し、PMBSの有効性・優位性を確認した。

キーワード 堆砂測量、AUV（小型自律式無人潜水機）、新技术、精度向上、省力化、コスト縮減

1. はじめに

ダムなどで堆砂測量の手法として用いられることが多いシングルビーム音響測深機（SBES：Single Beam Echo Sounder）による計測は比較的lowコストであるが、その計測精度において課題がある。一方、最近普及が進んでいるマルチビーム音響測深機（MBES：Multi Beam Echo Sounder）を使用した計測は、直接3次元データが得られることから計測精度は高いが、コスト的な課題がある。そこで、新技术であるインターフェロメトリ音響測深機（PMBS：Phase Measuring Bathymetric Sonar）搭載のAUV（小型自律式無人潜水機）及びSBESによる堆砂測量を行い、SBES、MBES及びPMBSの計測精度・労力・コストを比較検討することとした。SBESとMBESの違いを図1に示す。照射角度の違いにより、SBESは線的に、MBESは面的に測深し、その計測範囲が大きく異なる。

2. SBESによる計測

宇連ダムでは、経年的に堆砂測量を実施することから、予め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1-2）。2022年12月1,2日に、定期横断測線NO.1～12・17・18・22・23（16本）の水面上を、SBES（PDR1200、千本電機）を艀装（搭載）した船舶で航行して水深を測定した。ここで、航行する船舶の位置は衛星測位システムDGNSS（Trimble R12、ニコン・トリンプル）で測位した。なお、定期横断測線NO.1～12・17・18・22・23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（TS15、Leica）で測定した。

宇連ダムの諸元

- 位置：愛知県新城市川合
- 型式：重力式コンクリートダム
- 堤高：65.0 m ○湛水面積：1.23 km²
- 常時満水位：EL.229.15 m
- 総貯水容量：29,110,000 m³
- 有効貯水容量：28,420,000 m³
- 計画堆砂容量：690,000 m³

1. 豊川用水総合事業部 管理課
2. 豊川用水総合事業部 水源管理所長
3. 豊川用水総合事業部 水源管理所

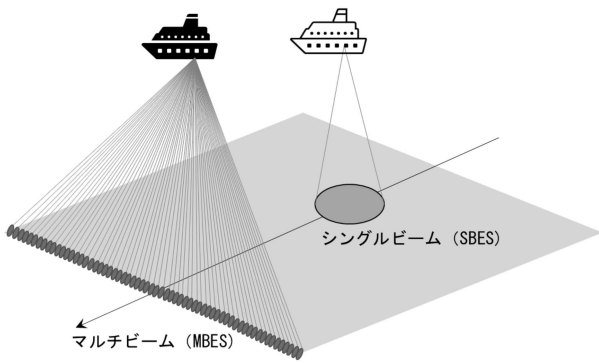


図-1 SBES と MBES のイメージ

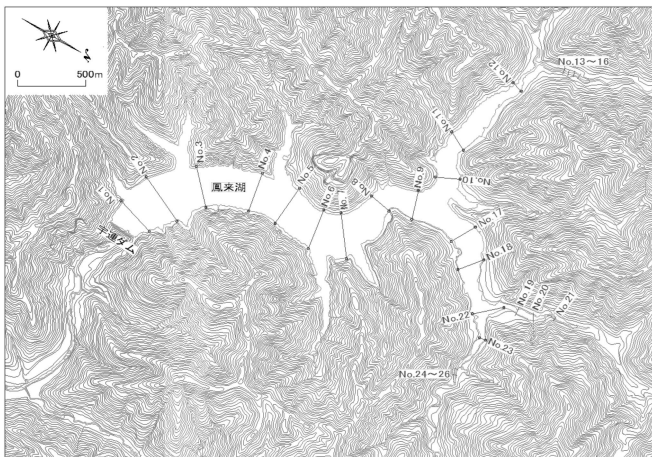


図-2 SBES 定期横断測量線

ある。イメージ的には、図-1のMBESの船がAUVに置き換わったものとなる。

AUVの走行ルートは、未計測領域が可能な限り発生しないように、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、合計124測線をそれぞれ設定した（図-4）。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で自律航行させ、計測幅を100mに設定して水深を測定した。AUVの航行中の位置は慣性航法装置（INS：Inertial Navigation System）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。

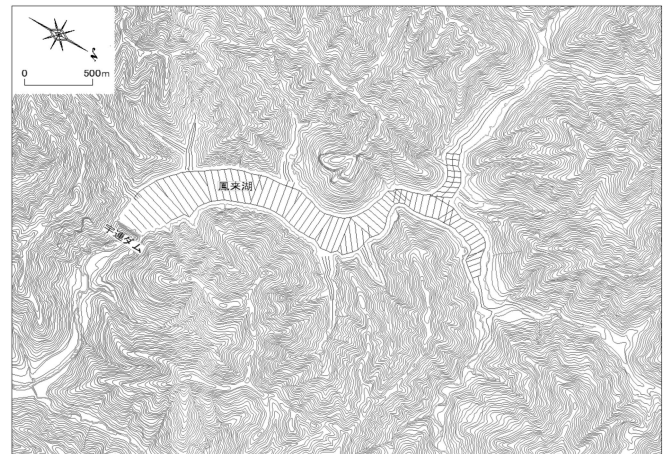


図-4 AUV 走行ルート

3. PMBSによる計測

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おり、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。水中における調査分野では、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。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（図-3）。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。

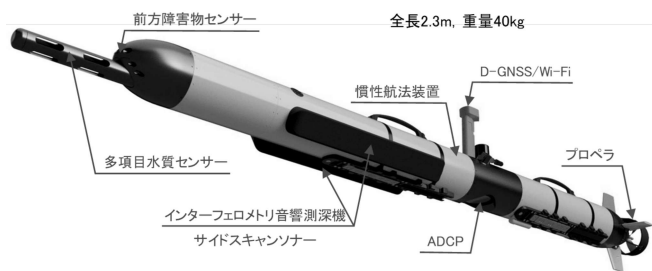


図-3 調査に使用したPMBS搭載のAUV

インターフェロメトリ音響測深機（PMBS：Phase Measuring Bathymetric Sonar）は、MBESと同様に面的測量を可能とするソナーで、スワス音響測深機の一つで

PMBSで得られるものは、湖底の点群データであるため、1m間隔のメッシュデータに変換し作成した湖底地形を図-5に示す。本川部の地盤高は、上流から下流にかけて低くなり、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.170mであった。湖岸付近は急勾配の地形で、それ以外の領域は比較的緩勾配の地形であった。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）が存在している。

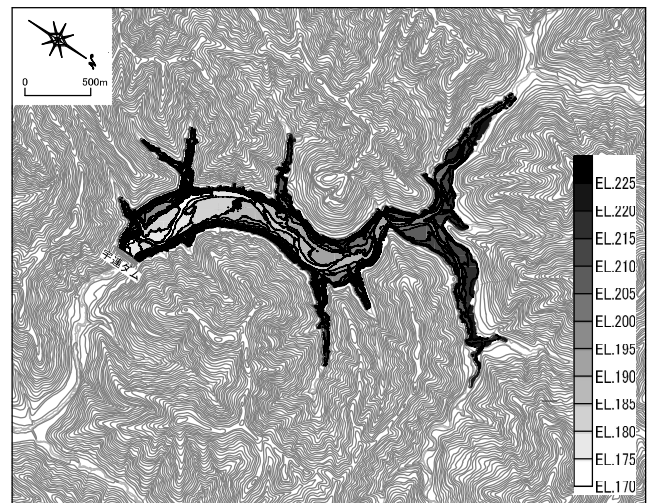


図-5 宇連ダムの湖底地形

4. PMBS と SBES による計測の比較

宇連ダムの堆砂量を PMBS と SBES の測定結果からそれぞれ算出した結果は、PMBS の 448,380 m³ に対して、SBES は 826,521 m³ であり、2 倍程度の値を示した。原因を検証するため、定期横断測線 NO.3 の断面図 (図-6) で比較してみると、PMBS より SBES の地盤高の方が全体的に高い値を示している。これは、小柴ら¹⁾が指摘しているように、SBES で測定した水深が過小評価 (= 堆砂量が過大評価) されていることが主な原因であると考えられる。

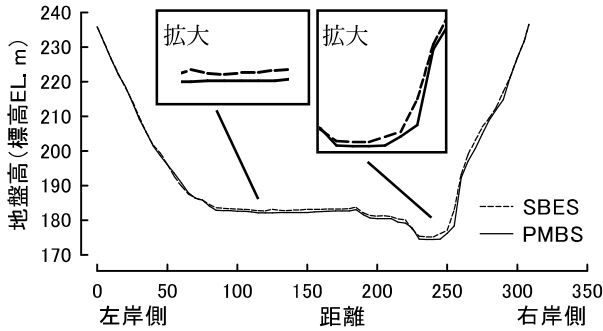


図-6 定期横断測線 NO.3 の断面図 (SBES と PMBS)

次に、SBES の経年的変化を見てみると (図-7)、堆砂量は増加傾向であり、2012 年までは計画堆砂量 (経過年換算したもの) を挟んで大きく上下しているが、2013 年以降は計画堆砂量 (前述) を大きく上回るかたちで上下している。

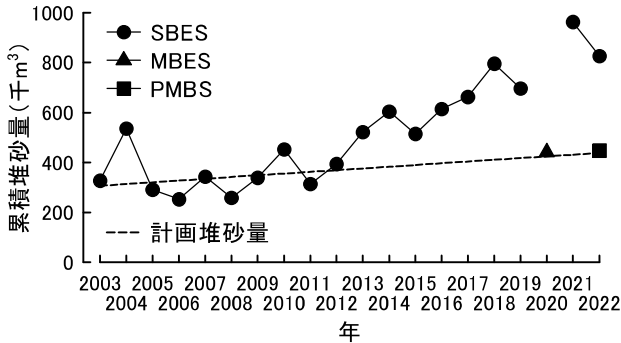


図-7 SBES による堆砂量の経年変化

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、同一の定期横断測線における 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、測深及び堆砂量計算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。小柴ら¹⁾は、音響測深における主な誤差発生要因を表-1 のように整理している。

ダム貯水池における深浅測量では、まず⑨湖底地形、特に斜面の勾配と SBES との組み合わせによる誤差が顕

表-1 音響測深における主な誤差発生要因

誤差発生要因		
計測機器	①	機器固有精度
	②	ビーム角
測深機据付	③	三軸の傾き
	④	据付位置
	⑤	据付の緩み
機器の同期性	⑥	レイテンシー
平面位置 SBES	⑦	測定の位置ズレ
平面位置 MBES	⑧	GNSS 計測精度
湖底地形	⑨	斜面の勾配
移動体の傾き	⑩	船の揺れ
水の密度	⑪	音速度等の変化
基準高	⑫	水位変化

著である (図-6 拡大部)。また 2003 年以降の SBES を使用した堆砂測量では、船舶の航行ルート of 誤差 (⑦、⑧)、SBES の機種や据付方法、船舶の動揺状況による誤差 (①~⑤、⑩) が想定される。堆砂量計算には、平均断面法を採用しており、隣接断面との平均断面積に断面間距離 (約 30~400m) をかけて算出しており、誤差が含まれる。

4. PMBS と MBES による計測の比較

今回計測した PMBS のものと、2020 年に行った MBES のものと比較検証する。

図-7 からは、両者は計画堆砂量 (前述) のライン上にあり似通った堆砂量が算出されているが、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てみた。両者を変数とする散布図 (図-8) を見ると、プロットされた点の大部分は回帰直線 (傾き 1, 切片 0) の近傍に分布しており、両者には有意に強い相関関係が認められた (有意確率 5%未満)。

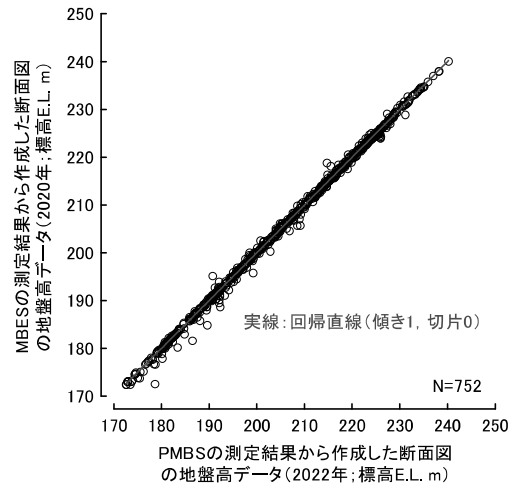


図-8 MBES (2020) と PMBS (2022) の地盤高比較

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-9）。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できる。

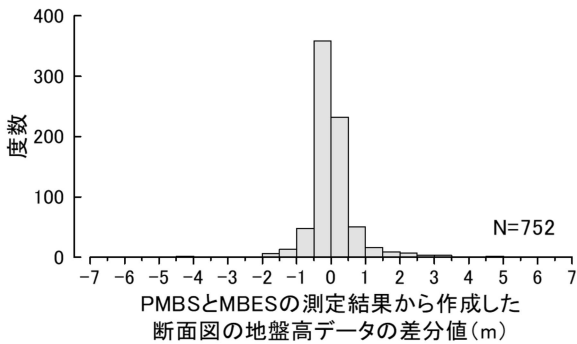


図-9 PMBS と MBES の地盤高データの差分値のヒストグラム

5. PMBS の優位性の検証

PMBS は前節より精度的には MBES と同等であることが評価されたことから、労力及びコストについて検証を行う。

MBES を使用した堆砂調査では、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り、調査員 4 名での実行が想定されている²⁾。これに対して、PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂調査では、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り、入力した調査仕様に従って AUV が自動的・自律的に測深を行うものである。このため、調査員が実施した現場作業は原則としては、INS のキャリブレーションと AUV の投入・回収だけであり、調査員 2 名での対応が可能であった。

以上のことから、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。

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」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。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」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。

以上のことから、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%程度低減できることが分かった。

6. おわりに

本研究では、PMBS 搭載の AUV を宇連ダムの堆砂状況調査に導入し、その有効性及び優位性について精度・労力・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。また今回の PMBS での堆砂測量成果は、河川管理者である国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所からも受理され、堆砂調査手法の選択肢が広まったといえる。
- (2) PMBS 搭載の AUV を導入した堆砂調査では、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。

国土交通省の「インフラ分野の DX アクションプラン 10」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 つに据えており、PMBS 搭載の AUV の導入は、これらの実現を可能にする手法といえる。

豊川用水としても、計測精度・労力・コストの面から優れている PMBS による堆砂測量を今後も継続し、複数年契約などを取り入れるなどして、さらなるコスト削減を図りつつ、より適正な水源運用を目指していきたい。

7. 参考文献

- 1) 小柴孝太・村上桂山・清野泰弘・角哲也. 2022. 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.
- 2) 国土交通省港湾局. 2023. 港湾土木請負工事積算基準 令和 5 年度改訂版.