

マルチビームソナーによる海底粗さの 再現性の検証と粗度係数の評価

大川 創¹・村上 智一²・朝倉 一哉³・中村 雅子⁴・
下川 信也²・佐々木 智弘⁵

¹ (株) ハイドロシステム開発 (〒132-0025 江戸川区松江 6-7-22)

E-mail: h-ookawa@hydro-sys.com (Corresponding Author)

² 正会員 国立研究開発法人防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

³ 平沢マリンセンター (〒410-0234 沼津市西浦平沢 25-8 らららサンビーチ内)

⁴ 東海大学 海洋学部 水産学科 (〒424-0902 静岡市清水区折戸 3 丁目 20-1)

⁵ (株) ハイドロシステム開発 (〒132-0025 江戸川区松江 6-7-22)

高潮の計算精度には海底粗度が大きく影響することが知られているが、現場計測が困難であるため、多くの数値計算において特定の粗度係数を計算領域内で一様に与えてきた。マルチビームソナー（以下 MBES）は高い調査効率で海底の3次元構造を点群化するが、粗度計測における有用性は検討されていない。そこでオルソ画像と MBES の点群を転石ごとに比較したところ、水平、鉛直方向に各 0.2 m, 0.05 m 以上の大きさの起伏が検出可能であることが認められ、MBES の精度は粗度計測に十分であると判断された。次に底質が泥、砂、転石である区画から点群を抽出し、粗度係数を算出したところ、先行研究で経験的に与えられた値と類似していたことから、MBES による粗度係数の評価は実用的であり、高潮の計算に活用できることが明らかになった。

Key Words : multi-beam echo sounder, field survey, bottom roughness, ortho image

1. はじめに

高潮の主因となる吹き寄せ効果は、風応力に加えて、海底粗度が関係している底面応力が影響を与えることが知られている^{1) 2)}。また、非定常状態の高潮シミュレーションにおいても、海底粗度が計算結果に影響を与えることが報告されている^{3) 4)}。海底粗度は、主に海底の底質によって決定されるが、特に沿岸域の海底は、岩、礫、土、泥、シルト、粘土、藻場、サンゴ場などと変化が大きい。しかしながら、これまでの高潮計算では、このような海底の状況の評価するのが難しいために、特定の粗度係数を計算領域内で一様に与えてきた^{4) 8)}。今後、高潮の計算精度を向上させるためには、海底の状況を正しく評価し、それに応じた粗度係数を与える必要がある。

この要求に対して、海底の3次元的な構造を点群化することができる音響測深器のマルチビームソナー（以下 MBES）の活用が期待される。MBES は、海底を扇状のビームで計測することから探査効率が高く、環境や計測設定によるもの、おおむね水深の3倍の探査幅を持つ。使用する測位データおよび測深精度が非常に高いことから^{9) 10)}、水路測量を含む多くの深浅測量や水中探査など

にも活用されている¹¹⁾。その一方で、MBES による微小な海底の粗度の再現性について検証を行った例は少ない。その主な理由として、潜水調査やカメラ調査では、スケールなどを用いて海底の微小な起伏の高さや幅を直接的に計測できるため、海底の形状の計測精度は MBES よりも高く、検証データとして十分なものであると考えられるが、これらの計測手法は、海底に接近する必要があるため、位置精度が低いことが挙げられる。陸上の計測では、衛星から電波を受信し、測位を行う GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いることによって、高い精度での測位が可能であるが、水中では電波が減衰してしまうため GNSS は使用できない。LBL (Long base line) 方式や SBL (Short base line) 方式など、船上と水中の計測点の間で音響通信を行い、音波の往復時間から三点測位方式で測位する方法も存在するが、測位精度は高くなく、数 m 程度の誤差を含んでいる¹²⁾。MBES による数 cm 程度の粗度の再現性を検証するためには、粗度の計測精度が高く位置精度が低い検証用のデータと、位置精度が高い MBES の点群を対応づける必要がある。そこで本研究では、オルソ画像を用いることで位置精度向上を試みた。オルソ画像は幾何学的な補正により正射投影された画像

である。複数枚の画像から生成され、1枚の画像よりも広い範囲をカバーすることができる。オルソ画像から海底の特徴点を抽出し、MBESのデータとのマッチングを行うことで、高い精度でオルソ画像とMBESの点群を紐づけることができると考えた。

本研究では、このオルソ画像を検証データに用いることで、MBESによる海底の粗度の再現性を検証し、粗度の計測精度を評価した。次いで、高潮予測精度の向上に資するために、MBESで得られたデータによって粗度係数を評価し、これについて検討を行なった。

2. 現場計測とデータ処理

本研究では、MBESの精度検証に用いるオルソ画像生成のために、Structure from motion (以下 SfM) の手法を用いた。この手法は、画像を基にした3次元測量手法であり、計測対象物を様々な方向から撮影して複数の写真(マルチイメージ)を取得し、その視差を利用して撮影したカメラの位置、撮影方向、撮影対象物の3次元形状を推定するものである。

2024年11月11日および12日に、静岡県沼津市の平沢マリンセンター沖でMBESとカメラの調査を行った。カメラ調査ではオリンパス社TG6を用いた。水深約3m付近の約8m×15mの範囲を対象とし、四隅に1mスケールを設置して海底を動画撮影した。その後、動画から241枚の静止画像を抽出し、これを写真測量ソフトウェアの一つであるMetashapeで処理し、位置情報を持った点群(dense cloud)からメッシュデータ(面データ)およびオルソ画像(中心投影による写真上の物体の歪みを補正した画像)を作成した。このSfMの水中での精度は、サンゴ礁海域において潜水士による直接測量との比較によって、その誤差は最小で0.1cm、最大であっても4.5cmと高精度であることが既に示されている¹³⁾。

MBES調査では水深2mから30m付近の計測を行った。調査・解析で使用した機器・ソフトウェアと計測時の機器設定をそれぞれ表-1および表-2に示す。MBES、測位動揺計、および表層音速度計は専用の金具にて小型船舶に堅牢に艀装し、カメラ調査を行ったエリアを含む約180m×670mの海域を計測した。測位動揺計は角速度と加速度を計測するIMU(Inertial Measurement Unit)とGNSS受信機から構成され、各センサの値をカルマンフィルターによって統合的に処理することで、GNSS受信機単体による測位よりも高い精度で測位を行う。表層音速度計はMBESの受波器近傍の音速度を計測しており、計測値はMBESのビームの計算に使用される。また、取得した測位動揺計のデータは、観測後にQinertiaを用いて、後処理キネマティック処理(PPK処理)を行った。

表-1 MBES調査と解析で使用した機器・ソフトウェア

構成品	機種・ソフトウェア	メーカー
MBES	SeaBat T50	Teledyne RESON 社
測位動揺計	Navsight Apogee	SBG Systems 社
表層音速度計	AML-I RT	AML Oceanographic 社
鉛直音速度計	mini SVP	Valeport 社
集録・解析ソフトウェア	Teledyne PDS v. 4.4.18.4	Teledyne PDS 社
PPKソフトウェア	Qinertia v. 4.1.11559	SBG Systems 社

表-2 MBESの計測設定

ビーム数	512本
発振方式	CW波
周波数	400kHz
直下ビーム幅(進行×直交方向)	1° × 0.5°
出力	210dB
ゲイン	37dB
パルス幅	30μs

これは、船舶に艀装されたGNSS観測データを移動局、陸上の電子基準点を固定局とし、衛星の軌道、時刻情報を併せて、観測中に行われているものよりも高度な処理によってより測位精度を高める技術である。なお、電子基準点とは、国土地理院が管理するGNSS連続観測点である。この技術を用いて、水平方向および鉛直方向の測位誤差が0.02m未満になるまで精度を向上させ、MBESの点群データに反映した。その後、音波の屈折を補正する鉛直音速度補正や魚群などに起因するノイズの除去、MBESとIMUの取付け角度の誤差を補正するパッチテストなど一般的なMBESデータの後処理を行った。処理後の点群から、0.25m角の大きさで点群を格子状に区切り(メッシュ化)、格子内の点群の水深値の平均値および標準偏差を算出した。また、MBESで取得したスニペットから、0.05m角のメッシュで、バックscatterモザイクを生成した。ここで、スニペットとはMBESで取得可能な、反射強度をもとに描画される海底の音響画像であり、バックscatterモザイクは、スニペットを地図に投影したものである。スニペットは、検知した海底近傍からの反射波を用いて描画するため、魚群など水柱の物体からの反射は含まれず、底質判別などに活用される²⁴⁾。また、反射強度は送波出力やゲインなど計測時の設定と海底の傾斜による散乱波の挙動によって変化するため、底質を推定するために、これらを補正する必要がある。本研究ではMBESのNormalized Backscatter機能によって計測時の設定の影響を補正した。また集録・解析ソフトウェア(Teledyne PDS)によって、点群から作成

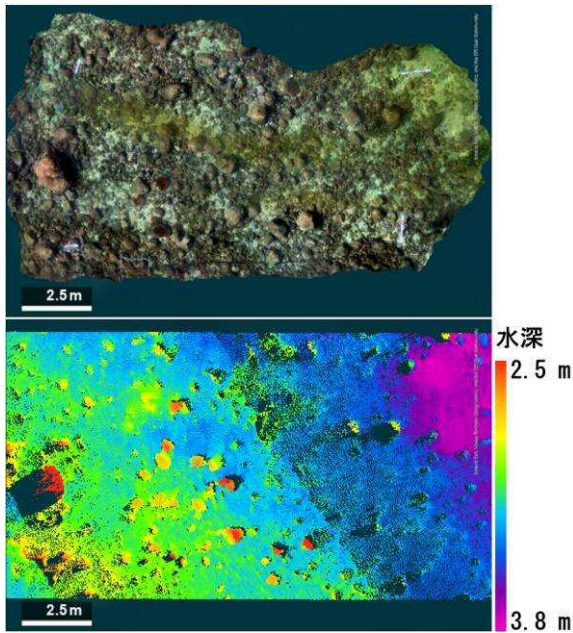


図-1 オルゾ画像と MBES で取得した点群の比較 (全体図)

した地形モデルを参照し、散乱波の挙動を補正した。これにより、同じ発振周波数の計測において再現性のある、dB スケールの反射強度値を取得することができた。

3. 海底粗さの再現性の検証

(1) 解析方法

オルゾ画像および MBES の点群データを ArcGIS (v. 3.2.1) に入力した。周辺よりも大きく、特徴的な形状をした転石を点群とオルゾ画像の中からそれぞれマーキングし、両者の位置が一致するようにオルゾ画像の位置、角度および大きさ補正した。その後、オルゾ画像内に写ったスケールのサイズをオルゾ画像上で計測し、縮尺が正しく補正されていることを確認した。そして、オルゾ画像と MBES の点群を比較することで、MBES による海底の粗さの再現性を検証した。

(2) 結果と考察

オルゾ画像の位置補正後にオルゾ画像内のスケールの長さを計測した結果、スケールの 0.30m の目盛りに対し、オルゾ画像上で計測した距離はそれぞれ、0.29 m, 0.29 m, 0.30 m, 0.30 m と計測精度は 0.01 m 未満であった。なお、スケールの全長が 1 m であるのに対し、0.3 m の距離で精度検証を行ったのは、オルゾ画像合成の過程でスケールの端が見切れたためである。オルゾ画像から底質が砂、玉石、転石であることが確認できた (図-1)。玉石および転石の長径は 0.01 m 未満のものから 1.4 m 程であり、サンゴの長径は 0.05 m から 0.7 m であった (図-2a)。また、サンゴ上では枝状の構造が確認でき、枝間の距離は 0.01 m 未満であった。

点群データとオルゾ画像を比較したところ、両者の水平方向の位置関係は非常によく一致し、転石ごとに両者を比較することが可能であった (図-2)。その結果、点群データから検出できた海底の起伏の大きさは鉛直方向に 0.05 m 以上、水平方向に 0.2 m 以上であった。なお、図-1 および図-2 の MBES で取得した点群において、転石やサンゴの横に点群が存在しないエリアが存在するが、これは転石によって音波が遮られ、海底を検出できなかったためであり、別の方向から計測することで本エリアを小さくすることができる。

一般に MBES の測深精度は、ソナーや同時に使用する GNSS 受信機などのセンサの計測精度から評価する不確かさの他、実海域の鉛直音速分布の複雑さや音波の多重反射の影響などの環境要因、および艀装の出来など多数の要因によって決定され、実測した測深値の誤差を予測するプロセスは非常に複雑である。しかしながら本研究の場合、測深ではなく粗度の計測が目的であり、測深精度の評価とは異なる評価軸を定める必要がある。すなわち、転石などの高低差の検出と幅の計測精度について評価する必要がある。

転石などの高低差が MBES で検出可能な高低差の最小値よりも十分に大きい場合、検出が可能である。MBES の

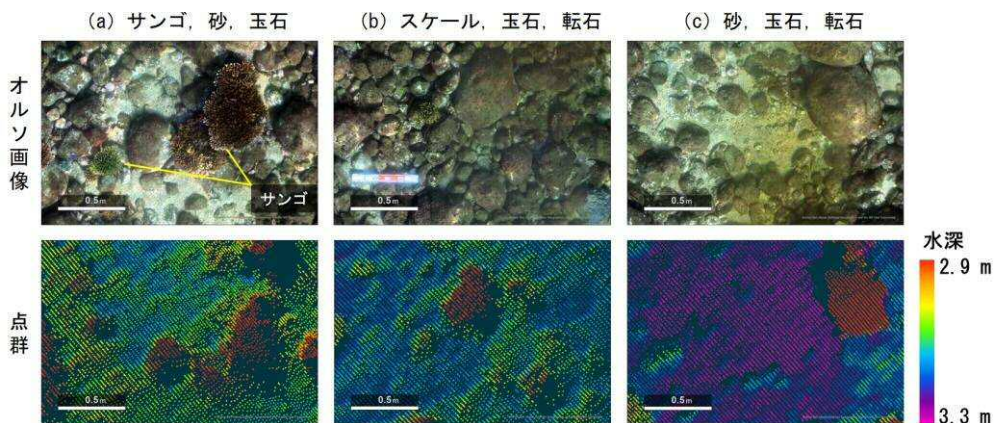


図-2 オルゾ画像と MBES で取得した点群の比較 (代表的な底質の拡大図)

高低差の検出性能の評価は水深値の標準偏差から可能である。水深値の標準偏差はメッシュ内の空間的な地形変化と MBES の計測精度により決定され、空間的な地形変化がないエリアにおける標準偏差は、計測精度を示すと考えられる。水深 30 m 付近には平坦な海底があり (図-3)、このエリアにおける水深値の標準偏差は 0.005 m ~ 0.05 m であった (図-4)。このことから、MBES の高低差の検出精度は 0.05 m 未満であると考えられた。実際の海底は完全に平坦でなく、水深値の標準偏差は地形の影響も含むと考えられ、実際の MBES で検出可能な高低差は 0.05 m よりも小さいと考えられる。また、このエリアは調査エリア内において最も水深が深い。MBES の計測精度は水深が深くなるほど低下することから、より浅い他の調査エリアでは同等か、より小さい高低差が検出可能であると予測できる。実際にオルソ画像を取得した水深 3 m 付近では、0.05 m 以上の高低差が MBES によって検出されていた。なお、MBES の高低差の検出精度検証は、ビームを照射する方向による計測精度の差を加味するため、異なる方向から 2 回以上計測したエリアで行った。

一方、物体の幅の計測精度には、音響的な解像度が影響する。音響的な解像度はパルス長や海底にビームが到達したときのビーム幅などによって決定される。ここでは例としてビーム幅について考える。MBES は一度に複数本のビームを生成し、ビーム毎に測深点を検出する。各ビームは伝播する過程で拡散するため、ビームの幅はビーム角と送受波器から海底までの距離によって変化する。オルソ画像を取得した水深約 3 m の海域において、送受波器の正面に生成されるビームを考えたとき、使用した MBES の進行方向と舷側方向のビーム角はそれぞれ $1^\circ \times 0.5^\circ$ であり、3 m 先におけるビームの広がりはいずれも $0.052 \text{ m} \times 0.026 \text{ m}$ である。ただし、多くの MBES の機種で採用されているフラットアレイの受波器の場合、ビームを生成する方向が受波器の正面から端に向かうにつれ、ビーム角は大きくなる。加えてビームを生成する方向によって海底までの距離が異なる他、海底の傾斜の影響も受けることから、ビーム毎にその広がりを考える必要がある。このように、調査毎に音響的な解像度を予測することは難しい。しかし、本調査ではオルソ画像を用いて検証することで、幅 0.2 m 以上の粗度は確実に検出可能であったことが明らかになった。このことから、少なくともオルソ画像を取得した水深 3 m 付近における水平方向の音響的な解像度は 0.2 m 未満であり、これよりも大きい転石などは検出可能であったと考えられた。

以上のことから、本調査において、MBES は鉛直方向に 0.05 m 以上、水平方向に 0.2 m 以上の大きさの海底の起伏を再現可能であることが確認されるとともに、オルソ画像が粗度の再現性の検証データとして有用であることが示された。

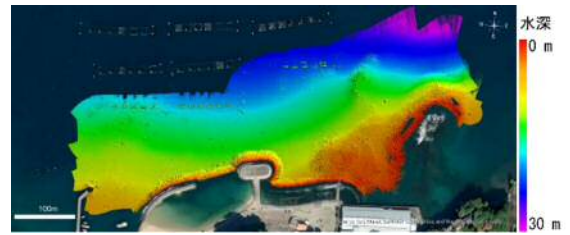


図-3 水深図 (0.25 m 角メッシュ)

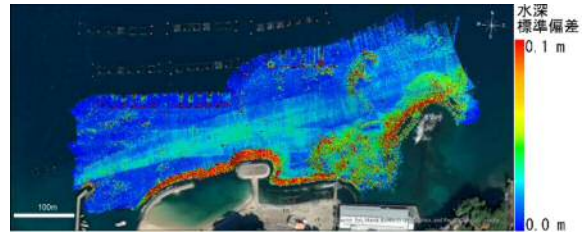


図-4 水深値の標準偏差 (0.25 m 角メッシュ)



図-5 バックスキャッターモザイク (0.03 m 角メッシュ)

図中の赤、黄、水色の線はそれぞれ泥、砂、転石の粗度係数算出のために点群抽出を行った区画

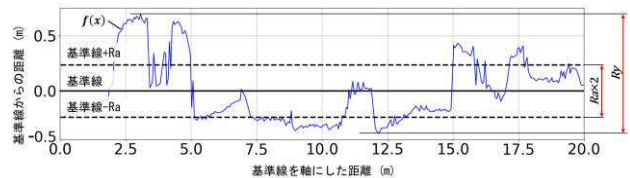


図-6 海底の断面 $f(x)$ と R_a および R_y の関係

4. 粗度係数の評価

(1) 解析方法

バックスキャッターモザイクは、一般に反射強度が強いほど明るく描画され、反射強度と反射のパターンから底質の推測が可能である。例えば転石であれば、反射が強く、不均質な反射パターンを示す。また、泥と砂は均質な反射パターンを示すが、泥のほうが反射強度が弱いいため、暗く描画される。本調査では岸側は主に転石で、沖側の大部分は泥と砂で構成されていると推定された (図-5)。そこで、底質ごとに点群データの一部を抽出し、加藤ほか¹⁴⁾にならい、粗度係数 n の評価を行った。点群は無差別に選定した $0.2 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ の区画から抽出を行っ

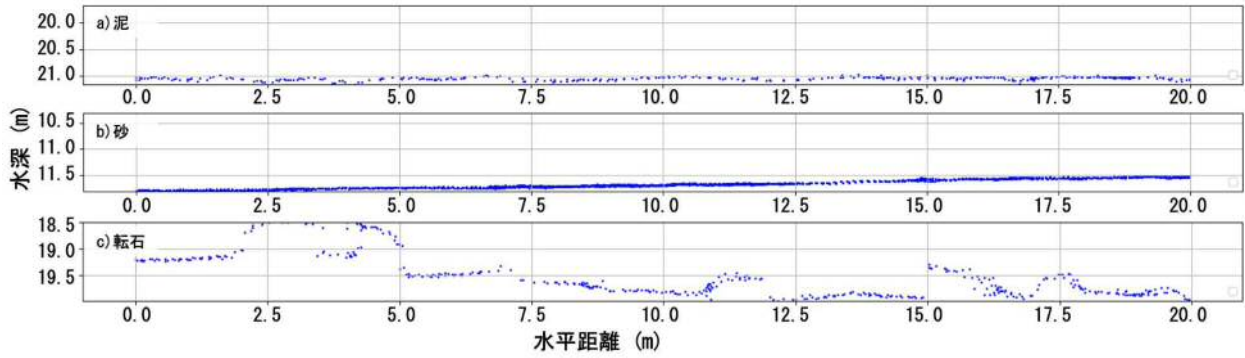


図-7 抽出した点群のプロット

(図-5). 海底の勾配による影響が最小限になるよう、区画の長辺が等深線に沿うように区画を設定した. 次に、長辺方向と鉛直方向の軸に基づいて近似直線を作成した. その後、長辺方向の勾配の影響を除去するため、近似直線の傾きが0になるよう、点群を回転させた. 以降、この傾き0の近似直線を基準線とし、算術平均粗さ R_a を式(1)で算出した.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

ここで l は基準線の長さ、 $f(x)$ は抽出した点群の近似曲線、すなわち海底の断面である. 実際は、抽出した点群の水深値のばらつきは海底の粗度だけでなく MBES の測深精度にも影響される. そこで基準線を軸として 0.05 m ごとに点群を分割し、各メッシュの平均値を代表の水深値として計算した. 次に式(2)の Manning の平均流速公式と式(3)の Manning-Strickler 式から式(4)を得る.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (2)$$

$$V = 7.66 \left(\frac{R}{k} \right)^{1/6} \sqrt{gRI} \quad (3)$$

$$n = \frac{k^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (4)$$

ここで V は平均流速、 R は径深、 I は動水勾配、 k は相当粗度、 g は重力加速度である. なお、本研究での R は基準線から海底までの平均的な距離とした. k は水理実験における一様の粗度をもとにしているが、実海域の海底の粗度、特に転石帯では水理実験ほど様とは言いえない. しかしながら、点群データを確認する限り、転石帯では転石のサイズや形状が類似しており、また砂泥域では明瞭な粗さの変化が確認できないことから、本研究では海底の凹凸を k に読み替えて粗度係数を評価した. 式(4)から、 n と k が比例関係にあり、 k から n が計算可能であ

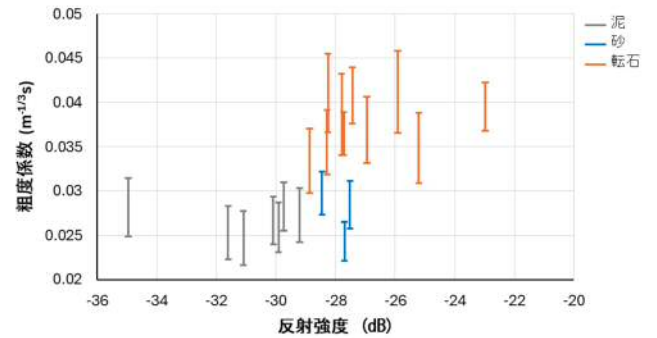


図-8 底質ごとの反射強度と粗度係数

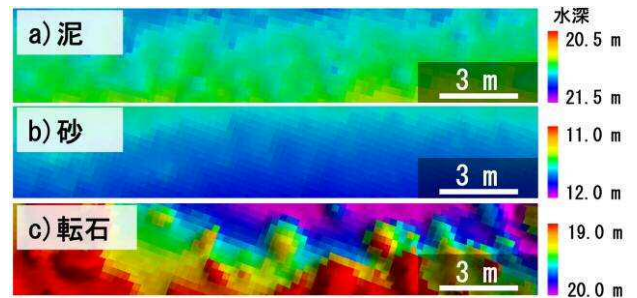


図-9 代表的な点群を抽出した区画の水深値 (0.25 m 角メッシュ)

ることが分かる. また、本研究での R_a は基準線から海底までの平均的な距離を示す. そこで k の値は R_a の 2 倍から最大高さ、つまり基準線から海底までの距離の範囲 R_r の間にあると仮定し (図-6)、粗度係数の評価を行った.

(2) 結果と考察

バックスキャッターモザイクから底質が泥、砂、転石、と推定されたエリアのうち、それぞれ 7, 3, 10 区画から点群を抽出した. 底質ごとに代表的な点群を図-7 に示す. 泥、砂、転石のエリアの算術平均粗さ (平均土標準偏差) はそれぞれ 0.017 ± 0.005 m, 0.026 ± 0.011 m, 0.164 ± 0.069 m であった. また、粗度係数はそれぞれ $0.021 \text{ m}^{-1/3}\text{s} \sim 0.031 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, $0.022 \text{ m}^{-1/3}\text{s} \sim 0.032 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, $0.030 \text{ m}^{-1/3}\text{s} \sim 0.046 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ であった. 正確な底質判別を行うには代表地点で底質サンプリングを行う必要があるが、本研究ではそのサンプリ

ングに至っておらず、今後の課題と考える。そこで、算出した粗度係数とともに、参考として区画内の音波の反射強度の平均値を図-8に示す。底質の粒度が大きいほど反射強度も大きくなる傾向があり¹⁵⁾、反射強度は底質を解釈する指標とすることができる。ただし、反射強度と粗度係数は必ずしも相関があるわけではない。例えば砂れんがある砂地と平坦な岩盤を比較すると、反射強度は後者の方が、粗度は前者の方が大きいと考えられる。一方で、本研究では反射強度と粗度係数には正の相関が見られる。これは、反射強度の弱い砂泥域の一部では、わずかな起伏となっているか、もしくは平坦であり(図-9 aおよびb)、反射強度が強い転石帯では、起伏が大きかった(図-9 c)ためであると考えられる。

算出した粗度係数の正確さを確認するためには現地における流量や高潮の観測が必要となるが、本研究ではこれらの観測には至っていない。しかし、本研究で算出した粗度係数と先行研究で経験的に与えられてきた粗度係数は類似している。例えば津波の遡上計算で相田¹⁶⁾は汀線付近に $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、小谷ら¹⁷⁾は水域に $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を与えている。また、佐藤¹⁸⁾は水深20m前後の海域の流れの計算に $0.026 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を使用している。さらに、国土交通省のガイドライン^{注2)}では河床部の代表粒径と粗度係数の関係を示しており、玉石(0.4m~0.6m)の粗度係数は $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、大きい粗礫(0.05mから0.1m)で $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、小さい粗礫(0.02mから0.05m)で $0.029 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ としている。

水深20~30m付近における平坦なエリアの標準偏差が $0.005 \text{ m} \sim 0.05 \text{ m}$ であったことから、MBESで評価できる粗度係数の下限は $0.019 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ から $0.028 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の間にあると考えられた。実際に抽出した点群から算出した粗度係数の最小値は $0.022 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 未満であった。これらの値は先行研究やガイドラインなどで使用されている値よりも十分に小さいことから、MBESの計測精度は粗度係数の評価において十分な精度をもっており、MBESを用いることによって底質が複雑に変化する海域において適切な粗度係数を評価することが出来ると考えられる。

MBESによる粗度の評価が実用的であることが明らかになった一方で、今後検討すべき課題もある。本研究ではMBESの計測精度が海底粗度の評価に対して十分であるかを検討するため、水深勾配の影響を除去できるよう、 $0.2 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ という狭い区画から点群を抽出し、海底粗度を評価した。しかしながら、MBESは広範囲にわたって計測が可能であるため、本研究の方法ではMBESを十分に活用できていない。今後、高潮予測に使われるメッシュサイズで点群を抽出し、水深勾配の影響を除去し、粗度係数を評価する手法の検討が必要である。

このような課題も残されているものの、MBESは探査効率が高く、現地調査に有用な手法である。また、MBESを用いることで水深や勾配など、高潮予測に必要な要素

を同時に計測できるものと考えられる。このことから、今後、高潮予測に向けたMBESの活用方法について検討する必要があると考えられる。

5. 終わりに

本研究ではMBESにより海底粗度が評価できるかの検討を行なった。検討により得られた主要な成果を以下に記す。

- ① オルソ画像を検証データとして用いることで、より高い位置精度で点群データとカメラ画像の比較が可能となった。
- ② MBESは海底粗度の再現において十分な精度を持っている。
- ③ MBESによる粗度係数の評価が実用的であることが示され、高潮の計算に活用できることが明らかになった。

サンゴ礁海域において台風下の海水流動を計算した既往の研究⁷⁾では、一般的な海域の粗度係数 $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とサンゴ礁海域の粗度係数として提案された $0.25 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ¹⁹⁾で精度検証が行なわれており、ここではサンゴ礁海域の粗度係数を使用したケースの方が流速の精度が良いことが示されている。よって、海域に適した粗度係数を使用することで、高潮に対しても精度が上がるものと期待できる。そして、これを与えることのできる本研究のMBESによる粗度係数の評価は、有用になると推察される。さらにMBESでは、面的に変化した粗度係数を高潮モデルに与えることもできるようになる。そのため、今後は、実際に面的変化を持つ粗度係数を与えた高潮計算と面的に一様な粗度係数を与えた計算を行い、高潮の潮位の計算精度がどの程度改善するのかを、高潮シミュレーションを実施することで明らかにしていく必要がある。特に粗度係数の高潮の潮位への影響は、計算対象の湾の形状と台風の強さや進路の関係、水深などに加えて、高潮計算の空間解像度にどのように粗度を反映させるかなどが関係すると考えられるため、数多くの事例計算を行い、その条件を明らかにすることが、本研究の次の段階であると考えられる。

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C) 22K03743, (C) 23K05938, (C) 23K03497, および沼津市内浦漁業協同組合と平沢マリンセンターの皆様のご協力による成果である。ここに併せて謝意を表す。

NOTES

注1) SeaBat T20-R and T50-R high-resolution multibeam sonar system operator's manual, version1 6.3.3,

Snippets backscatter. Teledyne RESON, pp. 48-50, 2016.
 注2) 美しい山河を守る災害普及基本方針, 国土交通省 水管理・国土保全局 防災課 2018 (平成 30 年) 6 月, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/sai-gai/measures-saigai/pdf/10.pdf (2025 年 3 月 25 日アクセス)

REFERENCES

- 1) 和達清夫: 津波・高潮・海洋災害, p.282, 共立出版, 1970. [Wadachi, K.: *Tsunami, high tide, and marine disasters*, p. 282, Kyoritsu Shuppan, 1970.]
- 2) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, p.244, 東海大学出版会, 1993. [Unoki, S.: *Coastal ocean physics*, p. 244, Tokai University Press, 1993.]
- 3) 柴木秀之, 鈴木勝之, 江崎竜夫: 越流と越波を考慮した高潮浸水の数値計算, 海洋開発論文集, 24 巻, pp. 459-464, 2008. [Shibaki, H., Suzuyama, K., and Ezaki, T.: Numerical simulation of storm surge inundation incorporating overflow and overtopping, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol. 24, pp. 459-464, 2008.]
- 4) 中條壯大, 金洙列, 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇, 山田文彦: 確率台風モデルと観測台風資料を組み合わせた高潮イベントアトリビューション—八代海を対象とした最悪台風経路の基礎的検討—, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69 巻, 2 号, pp. I_366-I_370, 2013. [Nakajo, S., Kim, S. Y., Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., and Yamada, F.: Event attribution of storm surge by using stochastic tropical cyclone model and observation data -basic study of worst-case scenario of tropical cyclone for Yatsushiro Sea-, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 69, Issue 2, pp. I_366-I_370, 2013.]
- 5) 金洙列, 熊谷健蔵, 間瀬肇: 海面および底面応力に高潮・波浪の相互作用を考慮した台風 Haiyan による高潮氾濫推算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73 巻, 2 号, pp. I_181-I_186, 2017. [Kim, S., Kumagai, K., and Mase, H.: Inundation modeling of typhoon Haiyan using sea surface and bottom drags induced by wave and current interaction, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 73, Issue 2, pp. I_181-I_186, 2017.]
- 6) 小園裕司, 桜庭雅明, 野島和也: 最大規模の高潮経路を抽出する簡易推定法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74 巻, 2 号, pp. I_577-I_582, 2018. [Kozono, Y., Sakuraba, M., and Nojima, K.: A proposal of a method for simplified estimation a typhoon track causing largest storm surge, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 74, Issue 2, pp. I_577-I_582, 2018.]
- 7) 二村昌樹, 山本剛士, 村上智一, 下川信也, 川崎浩司: 西表島網取湾における台風来襲時の流速鉛直分布の再現解析, 土木学会論文集, 79 巻, 17 号, 2023. [Nimura, M., Yamamoto, T., Murakami, T., Shimokawa, S., and Kawasaki, K.: Reproduction of vertical velocity distribution during typhoon attack in Amitori Bay, Iriomote Island, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 79, Issue 17, 2023.]
- 8) 白井知輝, 大前勇人, 石渡雄大, 有川太郎: 効率的な高潮リスク評価手法の構築に向けた基礎的検討, 土木学会論文集, 79 巻, 17 号, 2023. [Shirai, T., Omae, H., Ishiwata, T., and Arikawa, T.: Fundamental study for the developmental of an efficient storm surge risk assessment methodology, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 79, Issue 17, 2023.]
- 9) Mohammadloo, T. H., Snellen, M., and G. Simons, D. G.: Assessing the performance of the multi-beam echo-sounder bathymetric uncertainty prediction model, *Applied Sciences*, Vol. 10, Issue 13, 2020.
- 10) 住吉昌直, 長澤亮佑, 小川遥, 吉澤信, 秋山裕平, 長野勝行, 橋本崇史, 堀之内龍一, 堀内幸二, 斎藤康仁, 川上友希, 吉田善吾, 横田裕輔: マルチビーム測深機の精度検証実験手法と初期結果, 海洋音響学会誌, 49 巻, 4 号, pp. 127-137, 2022. [Sumiyoshi, M., Nagasawa, R., Ogawa, H., Yoshizawa, M., Akiyama, Y., Nagano, K., Hashimoto, T., Horinouchi, R., Horiuchi, K., Saito, K., Kawakami T., Yoshida, Z., and Yokota, Y.: Multibeam-echosounder accuracy verification experimental method and initial results, *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, Vol. 49, Issue 4, pp. 127-137, 2022.]
- 11) 住吉昌直, 佐伯達也, 大久保匡騎, 森雄基, 森弘和, 吉澤信, 長野勝行, 栗田洋和, 鐘尾誠, 安原徹, 長澤亮佑: 水路測量における技術の進歩と近年の取り組み, 海洋情報部研究報, 海洋情報部研究報告編集委員会 編, 59 号, pp. 1-20, 2021. [Sumiyoshi, M., Saiki, T., Okubo, M., Mori, Y., Mori H., Yoshizawa M., Nagano K., Kurita H., Kaneo M., Yasuhara, T., and Nagasawa R.: Technological progress and recent efforts in hydrographic survey, *Report of Hydrographic And Oceanographic Researches*, Vol. 59, pp. 1-20, 2021.]
- 12) 蜂谷弘之: 海洋音響の基礎と応用第 4 版, 19 章水中の位置と速度の計測, pp.236-245, 海洋音響学会編, 成山堂書店, 2017. [Hachiya, H.: *Fundamentals and applications of ocean acoustics, 4th Edition* chapter 19 underwater positioning and velocity measurement, pp. 236-245, Marine Acoust. Soc. Jpn. Edited, Seizando Shoten, 2017.]
- 13) 村上智一, 小花和宏之, 河野裕美, 下川信也, 田林雄, 水谷晃: サンゴ礁海域を対象とした SfM による水中 3 次元計測の可能性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 72 巻, 2 号, pp. I_766-I_771, 2016. [Murakami, T., Obanawa, H., Kohno, H., Shimokawa, S., Tabayashi, Y., and Mizutani, A.: Applicability of underwater 3D measurements by SfM for coral reef waters, *Journal of Japan Society of Civil Engineers. Ser. B3, Ocean engineering*, Vol. 72, Issue 2, pp. I_766-I_771, 2016.]
- 14) 加藤敬, 本間新哉, 北村浩二, 今泉眞之: 開水路における壁面の凹凸からの水路の粗度係数を求める試み, 農村工学

- 研究所技報, 207号, pp.183-193, 2008. [Kato, T., Honma, S., Kitamura, K., and Imaizumi, M.: Deterioration of irrigation canals and change in roughness coefficient, *Tech. Rep. Natl. Inst. Rural Eng. Japan*, Issue 207, pp. 183-193, 2008.]
- 15) Innangi, S., Barra, M., Di Martino, G., Parnum, I. M., Tonielli, R., and Mazzola, S.: Reson SeaBat 8125 backscatter data as a tool for seabed characterization (Central Mediterranean, Southern Italy): results from different processing approaches, *Applied Acoustics*, Vol. 87, pp. 109-122, 2015.
- 16) 相田勇: 陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—, *地震研究所彙報*, 第52号, pp.441-460, 1977. [Aida, I.: Numerical experiments for inundation of tsunamis: Susaki and Usa, in Kochi Prefecture, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Issue 52, pp. 441-460, 1977.]
- 17) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, *海岸工学論文集*, 45巻, pp. 356-360, 1998. [Kotani, M., Imamura, F., and Shuto, N.: Tsunami runup calculations and damage estimation method using GIS, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol. 45, pp. 356-360, 1998.]
- 18) 佐藤慎司: 日本海沿岸で観測された流れの特性, *土木学会論文集*, 521巻, pp.113-122, 1995. [Sato, S.: Characteristics of currents observed along the coast of the Sea of Japan, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 521, pp. 113-122, 1995.]
- 19) Cialone, M. A., Brown, M. E., Smith, J. M., and Hathaway, K. K.: Southeast Oahu coastal hydrodynamic modeling with ADCIRC and STWAVE, *Coastal and Hydraulics Laboratory, U. S. Army Corps of Engineer*, 2008.

(Received February 4, 2025)

(Accepted May 15, 2025)

VERIFICATION IN REPRODUCIBILITY OF SEAFLOOR ROUGHNESS AND EVALUATION OF ROUGHNESS COEFFICIENT USING MULTI-BEAM ECHO SOUNDER

Hajime OKAWA, Tomokazu MURAKAMI, Kazuya ASAKURA, Masako NAKAMURA, Shinya SIMOKAWA, and Tomohiro SASAKI

It is known that seafloor roughness significantly affects the accuracy of storm surge calculations. Because of the difficulty of roughness measurement on the field, a specific roughness coefficient has been uniformly applied within the calculation domain. Multi-beam echo sounder (MBES) is an acoustic approach that efficiently measures the three-dimensional structure of the seafloor and generates point clouds. The usefulness in measuring roughness has not been investigated. We therefore overlaid the orthoimages and point clouds from MBES and compared them for each boulder, and then found possibility to detect undulations of 0.2 m and 0.05 m or more significant in the horizontal and vertical directions, respectively. This demonstrated that MBES's accuracy was sufficient for measuring roughness. Next, the roughness coefficients were calculated from point clouds extracted from sections with bottom sediments of mud, sand, and boulders. The results were very similar to those empirically given in previous studies. This indicated that the evaluation of roughness coefficients using MBES is practical and can be used to calculate storm surge accurately.