

計算機解析と実験および計測による 河川防災技術の実用化に関する研究

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域 准教授 赤穂良輔

岡山大学 特命教授 (研究) 渡辺雅二

概要:

気候変動の進行にともない今後益々活発となることが想定される水循環に対し陸水域および沿岸水域に関する的確な情報による防災対策が要求される。本研究では、河川の流れと水底地形の変動に関する計算機解析に実測データを導入した信頼性の高い解析手法の開発と実用化および応用に取り組み、河川氾濫時の堤防の安全性評価に資することを目標とする。本研究では防災の観点から実験と計測および計算機シミュレーションによる河川の流れと水面下の地形変動に着目し、信頼性の高い実験と計測手法および解析システムの開発と実用化および応用を目的とする。すなわち実測データを計算機シミュレーションに導入した解析システムの構築を目標とし、河川災害に対する防災・減災に資することを目標とする。

計算機解析, 衛星測位システム, 音響測深機

1. 研究方法

(1) 計算機解析方法

本研究では、児島湖における流動特性および細粒浮遊土砂 (ウォッシュロード) の堆積分布の把握を目的として、二次元浅水流に基づく数値解析モデルを構築し、検討を行った。流況解析には、双曲型方程式に適した Godunov 型スキームを基礎とする有限体積法を採用し、三角形非構造格子上で計算を行った。計算処理には GPGPU による高速並列化を導入し、広域な解析領域に対応可能な計算環境を整備した。

計算領域は児島湖全体を含むほか、上流側に笹ヶ瀬川および倉敷川、下流側に児島湾の一部を含む構成とし、すべての領域を二次元格子で離散化した (図-1)。格子サイズは水理的な特性や解析の重点に応じて調整されており、湖内および河川域では約 20~30m とした。地盤高データには、過去の浚渫後深浅図や定期測量データを用い、対象地域の詳細な地形を反映したモデルを構築している。

境界条件については、上流端に各河川の水位観測地点を、下流端には児島湾側の潮位変動を設定した。また、締切堤防に設けられた水門の開閉操作を再現するため、水位差に基づく操作タイミングの条件化と、格子単位での壁条件・自由流出条件の切り替えによるゲート挙動のモデル化を実施した。

上流からの流入量の推定に関しては、各河川が感潮

域に位置することから、一般的な h-Q 式を用いた直接的な流量推定が困難であった。そこで本研究では、児島湖の水位変化と湖面積から流入総量を逆算し、さらに計画高水流量比に基づいて笹ヶ瀬川および倉敷川への分配を行う方法を採用した。この手法により、ゲート閉鎖期間中の湖への流入流量を概算し、これを上流境界条件として与えた。

また、児島湖における代表的な流入イベントを把握するため、年間の水位データを用いてゲート操作の発生頻度と流量特性を分類した。得られた流入条件に基づき、複数ケースの流況解析を実施し、湖内における流速・水深分布を取得した。

この流況データをもとに、児島湖におけるウォッシュロードの堆積ポテンシャルを評価した。粒径は既往研究に基づき代表的な 3 区分を設定し、それぞれに対して沈降速度や摩擦速度を推定した上で、流速や水深と照らし合わせることで堆積可能な領域を判断した。格子ごとに粒子の移動時間と沈降時間の比から堆積ポテンシャルを定量化し、空間的な堆積傾向の把握を試みた。

本手法により、湖への流入条件の違いが湖内の流動・滞留特性および堆積分布に与える影響を定量的に評価することが可能となる。

(2) 計測方法

衛星測位システム (GNSS) 受信機と音響測深機を中心

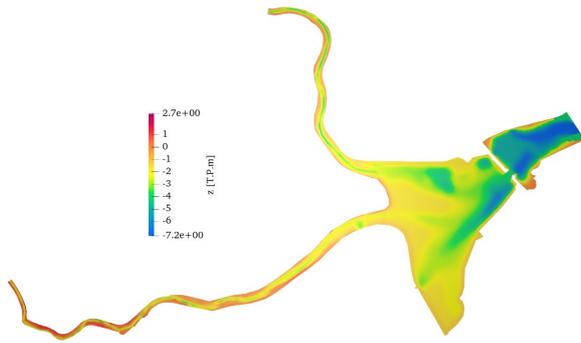


図-1 計算領域および地盤高コンター

とする機器構成による測位・測深を実施した。岡山県の児島湖を対象として計測を実施した。計測には岡山大学所有小型船舶 OKAYAMA 1 を使用した(写真 1, (a))。音響測深機送受波器は水中の支柱下端に取り付けられ(写真 1, (b)), また複数の GNSS 受信機は支柱の上端に取り付けられた。より広範囲に、かつ機動的に計測が行われるように、ウインチの正転・逆転により支柱は舷側に対して垂直方向に振り子運動するように設置された(写真 1, (c), (d))。

衛星測位システムアンテナと音響測深機送受波器が取り付けられた支柱は船体に固定されるため、風や波によって生じる船体の動揺は測位結果に現れる誤差の原因となる。この誤差を補正し、更に、効率の良い測位・測深を実施するために写真 1 (b), (c), (d) に示す機構を提案した。

2. 研究結果

(1) 計算機解析に関する研究結果

a) 流入流量に関する検討

2019 年の観測データを用いて児島湖水位と児島湾水位を比較した結果、水位差の存在する期間を「閉鎖期間」、水位差が認められない期間を「開放期間」と定義した(図-2)。この定義に基づき、年間を通じて抽出されたゲート操作回数は 413 回であった。各閉鎖期間における湖水位の変位量と閉鎖時間の分布を図-3 および図-4 に示し、推定された流入流量の時間変化は図-5 に示されている。

湖水位の最大変化量は 0.8 m, ゲート閉鎖の最大持続時間は 89.6 時間, 最大推定流入流量は $248.12 \text{ m}^3/\text{s}$ に達した。表-1 にはゲート閉鎖時間に基づく分類とその特徴が整理されており、特にクラス 3 およびクラス 4 に分類される潮汐に伴う排水操作が全体の約 75% を占めていた。このことは、児島湖の流入・排出特性において潮汐の影響が支配的であることを示唆している。さらに、各閉鎖期間における日平均流量を算出し、日別の



(a) OKAYAMA 1, 令和7年3月28日, ラ・コスタマリーナにて



(b) 水中の下端に音響測深機送受波器が取り付けられた支柱, 令和6年12月20日児島湖にて



(c) ウインチによる巻き取り解放時の支柱と (d) ウインチ巻き取り時の支柱と GNSS アンテナ, 令和6年12月20日, 児島湖にて



(d) ウインチ巻き取り時の支柱と GNSS アンテナ, 令和6年12月20日, 児島湖にて

写真 1: OKAYAMA 1 と支柱および GNSS 受信機に接続されたアンテナ

推定流量を図-6, 累積日数に基づく流量規模を表-2 に示した。

b) 流入水塊の動態特性に関する検討

上記の推定流入量を境界条件として数値解析を行

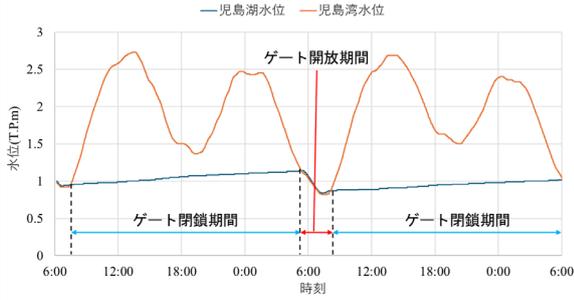


図-2 児島湖水位と児島湾水位およびゲート操作期間

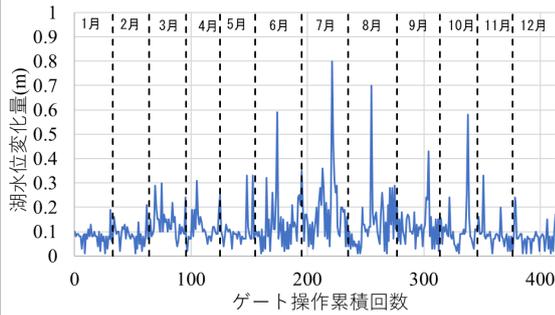


図-3 湖水位変化量

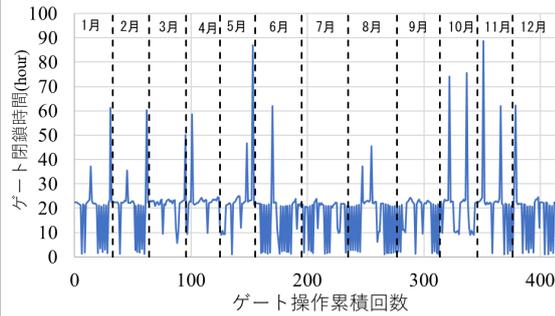


図-4 推定ゲート閉鎖期間

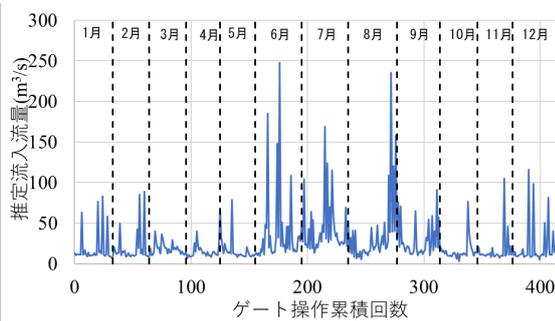


図-5 推定流入流量

い、各クラスにおける児島湖と児島湾の水位変化を図-7に示す。本解析では、1月の大潮期に相当する潮汐条件を使用しており、湾内の平均水位が低く、満干差が大きい時期である。

クラス1では閉鎖期間が約20時間に達し、平均値よ

表-1 年間ゲート操作分析結果

| クラス | ゲート閉鎖区分 | ゲート操作回数(回) | ゲート平均閉鎖時間(hour) | 平均流量(m³/s) |
|-----|---------|------------|-----------------|------------|
| 1 | 0-6時間 | 66 | 3.3 | 64.1 |
| 2 | 6-12時間 | 18 | 10.6 | 22.1 |
| 3 | 12-24時間 | 106 | 20.3 | 20.2 |
| 4 | 24-36時間 | 206 | 24.9 | 15.9 |
| 5 | 36-48時間 | 4 | 40.3 | 20.0 |
| 6 | 48-72時間 | 9 | 58.4 | 12.1 |
| 7 | 72-96時間 | 4 | 82.6 | 10.2 |

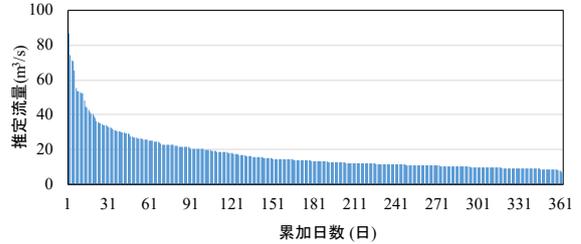


図-6 推定日流量の累加日数

表-2 推定日流量

| | 累加日数 | 流量(m³/s) |
|-------|------|----------|
| 豊水流量 | 95 | 20.4 |
| 平水流量 | 185 | 13.3 |
| 低水流量 | 275 | 10.8 |
| 渇水流量 | 355 | 8.8 |
| 年平均流量 | - | 17.9 |
| 最大流量 | - | 100.3 |

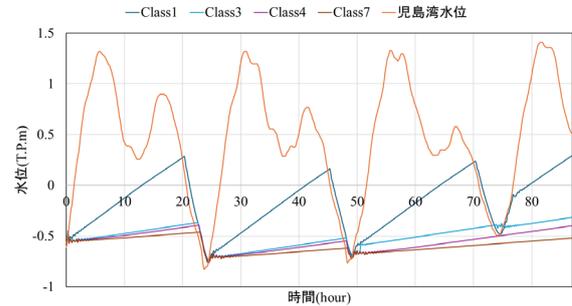


図-7 児島湖水位及び児島湾水位の時間変化

り過大となった。一方、クラス3では実測値と良好に一致し、クラス4以上では24時間を超える操作も表現されていた。これらの結果は、設定した境界条件が長期的な堆積傾向を把握する上で妥当であることを示している。

また、笹が瀬川および倉敷川からの流入水塊の動態を把握するため、無次元濃度を用いた移流拡散解析を行い、それぞれ図-8および図-9に示した。クラス1では流速が高く拡散は抑制されていたが、クラス3以降では流量に応じて水塊の拡散範囲が拡大した。また、倉敷川からの流入水塊は笹が瀬川に比べて拡散範囲が限定的であった。

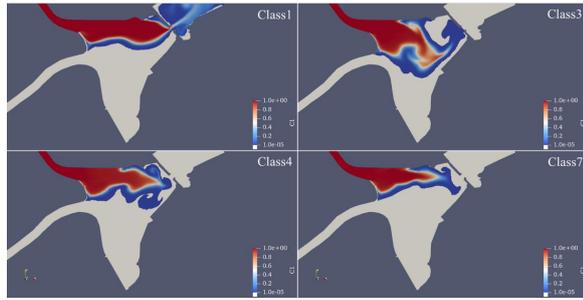


図-8 笹が瀬川から流入した無次元濃度分布

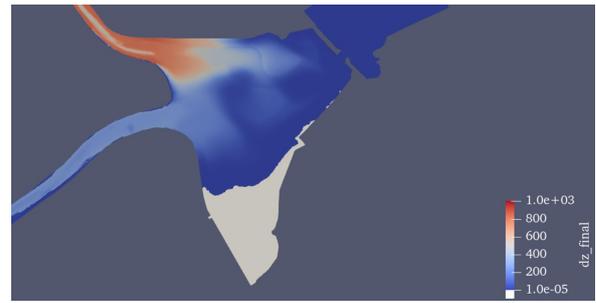


図-12 ウォッシュロード推定年間堆積厚分布

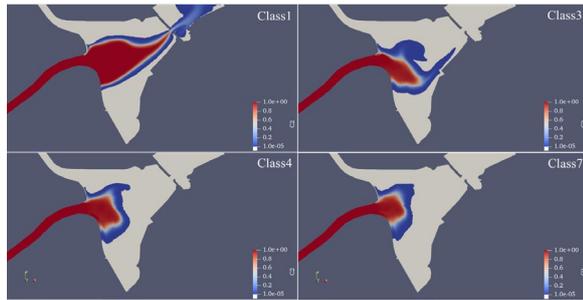


図-9 倉敷川から流入した無次元濃度分布

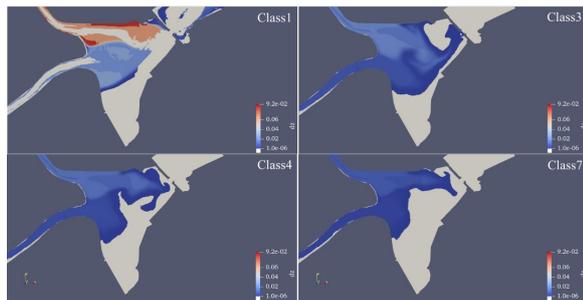


図-10 単位時間あたりのウォッシュロード推定堆積厚分布

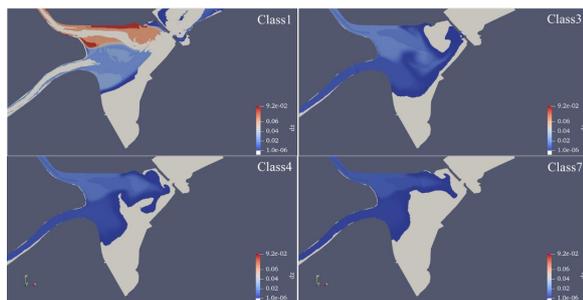


図-11 ウォッシュロード推定総堆積厚分布の比較

c) ウォッシュロード堆積分布の予測に関する考察

各クラスにおける流入水塊の濃度分布時刻に対応する、10 分間あたりのウォッシュロード堆積厚分布を図-10 に示す。本解析では SS 濃度を経験式により推定しており、パラメータ調整を行っていないため、定性的な傾向分析を目的としている。

クラス 1 では最大の堆積厚が観測されたが、主要流路では流速・水深が大きいいため堆積ポテンシャルは 0

となり、流出傾向が示唆された。一方で、倉敷川流域は高い堆積ポテンシャルを示しており、湖底地形の影響が大きいと考えられる。

全体としては、クラス 3 の堆積ポテンシャルの分布が最も広範囲に及んでおり、このクラスが年間操作の約半数を占めることから、堆積傾向の支配的パターンと考えられる。また、児島湖南部では流入の影響が及ばず、変動が小さいことが確認された。

図-11 では各クラスにおける累積堆積厚分布を示し、空間的な堆積傾向や水理条件による違いを明瞭に表現している。クラス 1 およびクラス 3 で堆積が顕著である一方、クラス 4 およびクラス 7 では変動が小さく、特にクラス 7 ではほとんど地形変化が確認されなかった。

最後に、図-12 では各クラスの堆積厚を基に、1 回のゲート操作あたりの平均堆積厚を算出し、年間のゲート操作回数を重み付けして推定された年間堆積厚分布を示している。この手法により、代表的な水理条件に基づくシナリオベースの評価を通じて、年間スケールでの地形変化量を簡便に評価可能であることが示された。

(2) 計測に関する研究結果

GNSS 受信機からの出力結果の緯度経度成分は平面直角座標に変換され [1]、楕円体高とともにアンテナの位置を示す空間座標が得られる。このとき写真 1, (c), (d) にアンテナを示す三つの GNSS 受信機 (GNSS0, GNSS1, GNSS2) からの出力結果から、アンテナと音響測深機送受波器が取り付けられた支柱の上端から下端までのベクトルが得られる。このベクトルから得られる単位方向ベクトルに支柱先端に取り付けられたアンテナから送受波器先端までの距離および音響測深機からの出力結果をかけることによって水底の点を表す三次元データ得られる。

児島湾の一部を締切堤防で閉め切ってきた岡山県の子島湖で令和 7 年 3 月 1 3 日に実施した計測結果を例示する。測位データの緯度一傾度成分は直交座標に変換され [1]、GNSS 受信機に接続されたアンテナの平面上の軌跡 (図-13) と楕円体高 (図-14) が得られた。児

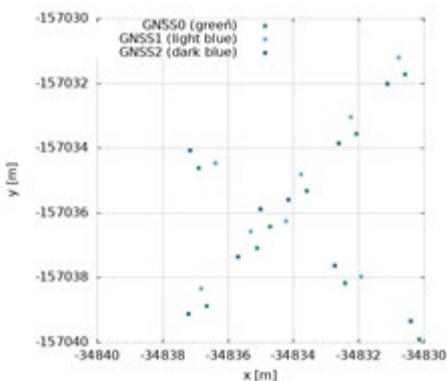
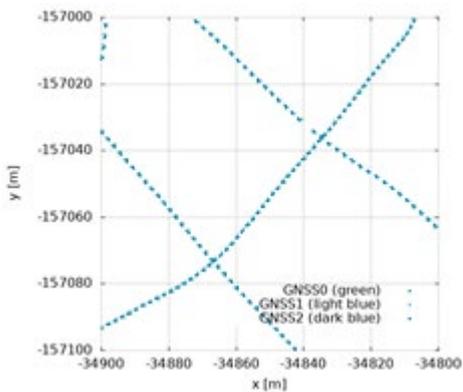
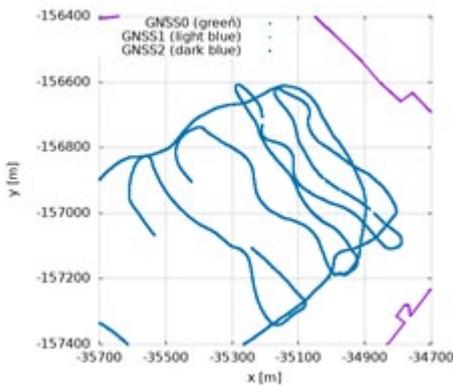
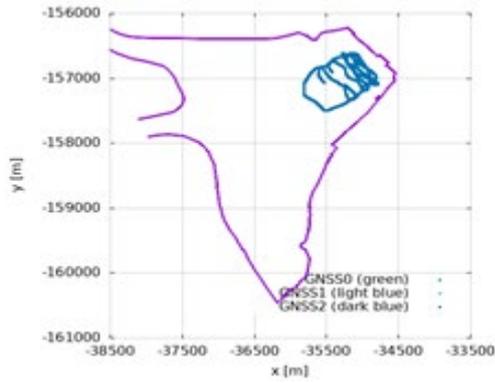


図-13 GNSS 受信機に接続されたアンテナの軌跡

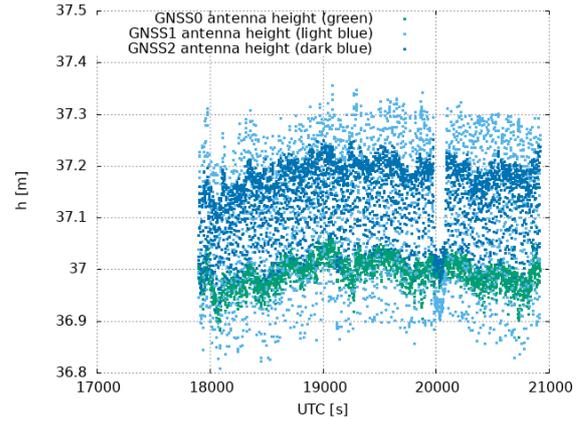


図-14 GNSS 受信機に接続されたアンテナの楕円体高

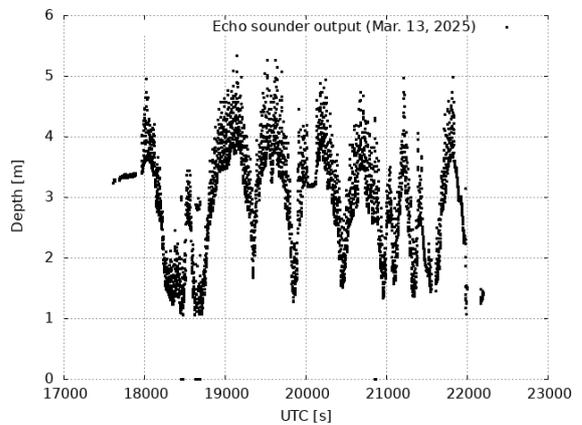


図-15 音響測深機の実出力結果

島湖の外郭はオンラインソフトウェア[2]の出力結果を用いて作成された。音響測深機の実出力結果を図-15に示す。水底の点を表す三次元データを図-16に示す。水域の地形は三角形メッシュ上の区分線形関数で近似的に表される。初期メッシュ M_0 から始め、三角形メッシュ M_{j-1} の各要素を四分割し三角形メッシュ M_j を求めることにより、三角形メッシュ列 M_0, M_1, M_2, \dots が生成された (図-17)。

三角形メッシュの各要素に定義された一次関数を、 xy 成分が 要素内に存在する水底地形データに対する最小二乗近似によって求める方法[3]によって三角形メッシュ M_i に対し得られた地形を表す区分線形関数の例を示す (図-18)。

3. まとめ

数値解析に関する検討では、児島湖における代表的な流況クラスごとに堆積厚分布を解析し、年間のゲート操作回数をもとに加重平均することで、年間堆積厚分布の推定を行った。その結果、湖内の堆積傾向には空

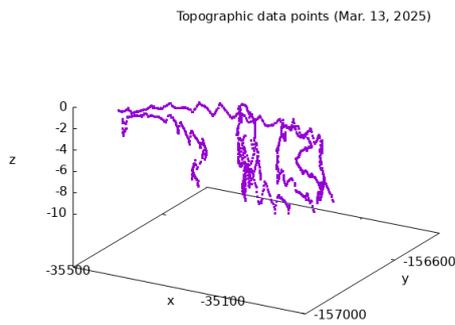


図-16 水底の点を表す三次元データ

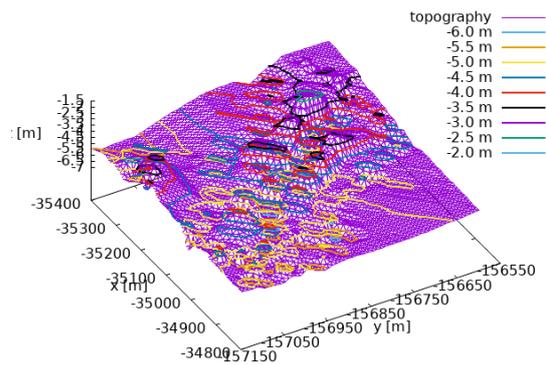
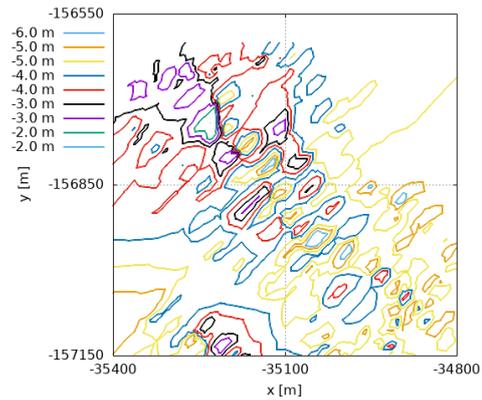


図-18 xy 平面上の等深線と水底地形を表す区分線形関数

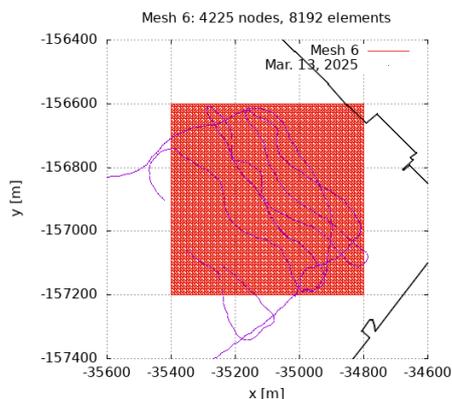
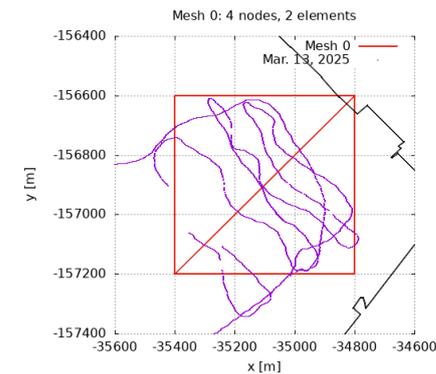


図-17 メッシュ列の一部 (M_0 , M_6)

間的な偏りがあり、特定の区域では堆積が顕著に生じることが確認された。今回の手法は、簡易的ではあるが年間を通じた堆積傾向の把握に有効であり、今後、現地計測データとの比較やパラメータの調整を行うことで、地形変化の中長期的な予測への展開が期待される。

計測に関する検討では、複数のGNSS受信機を用いて音響測深機送受波器が指す方向を求め、更に、送受波器の指す方向を船舶の進行方向に対し直角の方向に変化させることによってより広範囲の計測を可能とする計測方法について考察を行った。GNSS受信機から得られる位置データと音響測深機から得られる水深データを同期させるときに生じる誤差を極力小さくすることが

当面の課題である。今後はこの手法を含めた一連の手法の妥当性の検証し、また定期的な計測による地形変化の考察を行うことを目標とする。

4. 謝辞

本研究は、令和2年度および令和3年度（公財）ウエスコ学術振興財団研究活動費助成事業と（公財）八雲環境科学振興財団令和4年度環境研究助成および（一財）日本国土開発未来研究財団2022年度、2023年度学術研究助成と（一財）国土技術研究センター2023年度（第25回）研究開発助成事業による支援を受けた。これらの支援に対し深く感謝する。

参考文献

- 1) 平面直角座標への換算, 国土地理院
<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2xyf.html>
- 2) 緯度経度地図, <https://fukuno.jig.jp/app/map/latlng/>
- 3) 岩上 聡, 爲賀 雅彦, 真田 将英, 毛利 道明, 岩上 義隆, 岡本 尚己, 光井 英規, 神保 秀司, 渡辺 雅二, 水面下の地形の形状推定に伴う問題点と計測結果の解析手法の提案, インダストリアルマテリアルズ, 応用数理, 第33巻・第1号, 32 - 39, 2023年3月 (依頼執筆)