

jh250012

標準的な水環境評価に向けた流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI のプラットフォーム構築

松崎義孝（国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所）

概要

本研究では、流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI を中核として、標準的な水環境評価を実施可能とする実運用レベルの統合プラットフォームを構築した。Web ブラウザ上でプリ・ポスト処理から大規模数値計算までを一体的に実行可能な EcoPARI-Web GUI を開発し、利用者の専門性や計算機環境に依存しない高度な解析環境を実現した。さらに、遺伝的アルゴリズムを用いた大規模自動パラメータ調整手法と、観測値を取り込むデータ同化リアルタイムシミュレーションを統合し、大型計算機を活用した効率的かつ客観的なモデル高度化を実現した。これらの手法を伊勢湾および三河湾へ適用し、水温・塩分・溶存酸素などの再現性や短期変動解析において高い有効性を実証した。本成果により、水環境数値シミュレーションの再現性・信頼性・即時性が大きく向上し、環境影響評価や沿岸域管理の高度化に貢献するとともに、データ同化や自動パラメータ調整を組み込んだ次世代水環境評価基盤として、実務・学術の両面での幅広い利活用が期待される。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター

大阪大学 D3 センター

mdx I

フローレスエリザベルデミゲルサラザー（学生）シミュレーション

河野ひなた（学生）シミュレーション

大倉結衣（学生）シミュレーション

山下虎太郎（学生）シミュレーション

後藤陸（学生）シミュレーション

山田葉月（学生）シミュレーション

今津広大（学生）シミュレーション

村岡泰輝（学生）シミュレーション

古米弘明 シミュレーション

Chomphunut Poopipattana シミュレーション

白木喜章 シミュレーション

アムヌガマ マンガラ クマーリ シミュレーション

ムチェブエ エドウィン シミュレーション

水口隼人 シミュレーション

ハフイーズ ムハメドアリ シミュレーション

西村規宏 シミュレーション

北山千鶴 シミュレーション

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

松崎義孝 課題代表、研究統括

井上徹教 副代表、パラメータチューニング

松本大輝 シミュレーション

久保田雅也 シミュレーション

安藤さゆり シミュレーション

中村恭志 シミュレーション

田中理彩（学生）シミュレーション

渡邊康生（学生）シミュレーション

比嘉紘士 シミュレーション

佐藤誠浩 シミュレーション
 岩中祐一 シミュレーション
 堀田正資 シミュレーション
 大塚大輔 シミュレーション
 岩田悠里 シミュレーション
 竹内一浩 シミュレーション
 畑恭子 シミュレーション
 阿部真己 シミュレーション
 高橋巧 シミュレーション
 小林真二 シミュレーション
 中島広貴 シミュレーション
 坂本光 システム開発
 巖駿 システム開発
 内藤大輔 システム開発
 堀江敬太 システム開発
 内田洋平 システム開発
 西内勇貴 システム開発
 上野優 システム開発
 遠藤匠 システム開発
 Till Plewe システム開発
 中津留高広 システム開発
 堀江大輔 システム開発

2. 研究の目的と意義

沿岸域では港湾施設等の開発が進んでおり、水環境への影響を評価する数値シミュレーションの重要性が高まっている。しかし、水環境数値モデルはモデル構成や実施者の力量によって結果が大きく異なる恐れがある。このため、実現象を適切に再現できない可能性がある。この課題に対応するため、応募者らが開発した流動生態系シミュレーションシステム「EcoPARI」を標準モデルとして使用できる環境を整えることを計画した。

しかしながら、EcoPARI は高精度であるが故、高い計算機能力を必要とする。また、生態系モデルには多くのパラメータ設定が必要であり、客観的な決定手法が確立されていない。データ同化や遺伝的アルゴリズムによる機械的なパラメータ調整手法を EcoPARI に導入し、大規模

な計算資源を用いた効率的なシステムの構築が不可欠である。さらに、応募者らはこれまで「海の天気予報」を目的としたリアルタイム水環境シミュレーションを構築してきた。近年は観測データの充実により、データ同化を用いた高精度即時予測が可能となりつつあり、その実現には大型計算機およびデータ集約基盤の活用が求められる。

本研究では、EcoPARI 開発を担う国研、環境分野に強みを持つ建設コンサルタント、高速化技術を有する大学・ソフトウェア開発会社による学際的連携により、EcoPARI を用いた水環境数値シミュレーションを統一的に実施可能なマルチプラットフォームの構築を目的とする。

本プラットフォームは官民の技術者・研究者による利活用が可能となり、将来的には「海の天気予報」を研究者や行政のみならず国民への情報提供へと発展させることが期待されるため、実務面で重要である。また、沿岸域水環境シミュレーションにデータ同化や遺伝的アルゴリズムを本格的に適用した事例は少なく、本研究によるパラメータ調整システムの構築は、正確な水環境数値シミュレーション実現に向けた重要なブレイクスルーとなるため、学術的にも重要である。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

研究開発には、国研、建設コンサルタント、大学、ソフトウェア開発会社の学際的共同が不可欠であり、異なる組織が連携して研究開発を進めるにはネットワークを介して使用できる計算機基盤が必要である。また、データ同化及び遺伝的アルゴリズムを使用したパラメータ調整や観測値をネットワーク経由で取り込むリアルタイムシミュレーションは大規模計算/ネットワーク環境での実施が必須となる。構築された EcoPARI による標準的な水環境評価に向けたプラットフォームは広く利用希望者に共有されることを想定しており、本研究はソフトウェアおよびデータ活用推進に資する取り

組みである。その際に、mdx と SQUID 及び Wisteria/BDEC-01 を連携させて検討を行う。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

昨年度は、流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI を用いた水環境数値シミュレーションの高度化に取り組んだ。伊勢湾を中心に、アサリ資源、藻場、底泥環境を対象としたモデル構築や、東京湾・大阪湾での環境評価への応用を実施した。また、大型計算機を活用し、データ同化および遺伝的アルゴリズムによるパラメータ調整システムを構築し、堆積物中物質分布の高精度再現を確認した。さらに、12 年間の長期データ同化解析データベースを構築し、水温・塩分予測精度の向上を実証するとともに、伊勢湾におけるリアルタイム水環境予測システムの試験運用を開始した。

5. 今年度の研究成果の詳細

SQUID、Wisteria/BDEC-01、mdx を活用して、(1) Web ブラウザによるプリポスト処理機能・シミュレーションシステムの構築、(2) パラメータ調整システムの構築、(3) データ同化によるリアルタイムシミュレーションシステムの構築を行った。(1)～(3)の研究結果の概要と、その中から特に進展のあった三河湾における貧酸素水塊解消現象の数値解析(Matsuzaki et al., 2025)に関する内容を以下に記す。

5.1 Web ブラウザによるプリポスト処理機能・シミュレーションシステムの構築

初学者でも流動生態系モデルの実行可能な Web アプリケーション「EcoPARI-Web GUI」を開発した(図 1)。Web アプリケーションは大きく 3 つに分かれており、(a)EcoPARI-Web GUI Pre においては、シミュレーションに必要なデータ(例えば東京湾の境界条件(大気、河川、開境界、潮位)と初期条件)一式を格納してあり、パラメータやモデルを GUI 上で操作しながら、計算者が計算したいモデルのファイル一式が作成可能で

ある。(b)EcoPARI-Web GUI Solver においては(a)で作成したファイルを使って SQUID、Wisteria/BDEC-01、mdx において演算が可能である。Web ブラウザ上で演算に使う CPU 数を設定して、演算のジョブを投入可能である。(c)EcoPARI-Web GUI Post では(b)で演算した結果と別途保存した観測値を用いて、計算結果の可視化(2次元断面図、3次元図、流速ベクトル図、時系列図、イソプレット図)と観測値との比較が可能である。また、観測値と比較した平均誤差や RMSE 等の統計値を算出する機能を備えている。

5.2 パラメータ調整システムの構築

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:GA)によるパラメータ調整システムを mdxI と SQUID に実装することに成功した(図 2)。構築したシステムでは、実数値遺伝的アルゴリズムを採用し、交叉手法として AREX (Adaptive Real-coded Ensemble Xover)、世代交代モデルとして JGG (Just Generation Gap) を用いることで、探索効率の向上と初期収束の回避を図った。複数の計算コアを用いた並列処理により、大量の数値シミュレーションを同時に実行可能な構成とし、植物プランクトンの増殖・損失、栄養塩循環過程、沈降・再懸濁過程、底泥の酸素消費過程など、生態系モデルに含まれる約 100 項目のパラメータを同時に最適化対象とした。対象海域は伊勢湾とした。

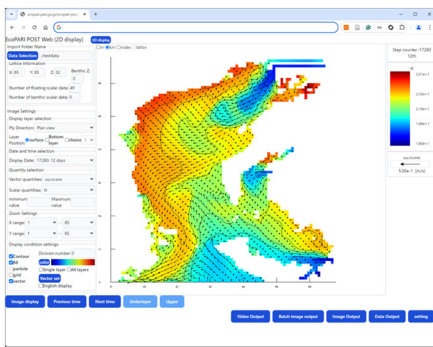
評価関数には、水温、塩分、クロロフィル a、溶存酸素、栄養塩および有機物成分に関する観測値と計算値との差(RMSE)を用い、時間方向(約 3000 時刻)、空間方向(約 260 格子・層の組合せ)および複数水質項目を同時に考慮することで、特定の地点や期間に依存しない総合的な再現性評価を行った。最適化計算は 600 世代にわたり実施され、多くのパラメータは世代進行とともに探索範囲が収束する傾向を示した。一方で、一部のパラメータでは探索範囲の上限または下限付近に集中する挙動が確認され、探索



シミュレーションの条件の設定
プリシステム
(a) EcoPARI-Web GUI Pre



シミュレーション実施
ソルバー
(b) EcoPARI-Web GUI Solver



シミュレーション結果の可視化
ポストシステム
(c) EcoPARI-Web GUI Post

図 1 開発した EcoPARI-Web GUI のフロー

範囲の再設定を行うことで追加計算を実施した。特に底層 DO に直接影響を及ぼす底泥酸素消費に関するパラメータについては、GA により推定された定常的酸素消費係数が既往研究で報告されている値と整合的な範囲に収束した。また、温度依存性係数は比較的小さい値を示し、底泥に

おける基礎的な酸素消費が水温変化に対して比較的安定した成分として作用している可能性が示唆された。

一方で、GA による最適化結果は、モデル全体としての統計的整合性を確保する点では有効であるものの、赤潮発生期や夏季貧酸素期における底層溶存酸素濃度の極値や短期イベントの再現性については必ずしも十分ではないことが明らかとなった。これは、多数のパラメータ間に相互依存性や冗長性が存在し、相関係数や RMSE を目的関数とした最適化では、特定現象に対する感度が限定されるためであると考えられる。

これらの結果を踏まえ、本研究では、GA による大域的探索により有望なパラメータ領域を抽出した上で、物理・生態学的解釈に基づく手動調整を組み合わせる段階的な最適化手法が有効であると結論づけた (図 3)。本手法により、モデル全体の整合性を維持しつつ、底層溶存酸素といった特定現象の再現性を高めることが可能となる。以上の検討は、伊勢湾における水質予測精度向上に資するのみならず、沿岸域生態系モデルの効率的な高度化に向けた基礎的知見を提供するものである。

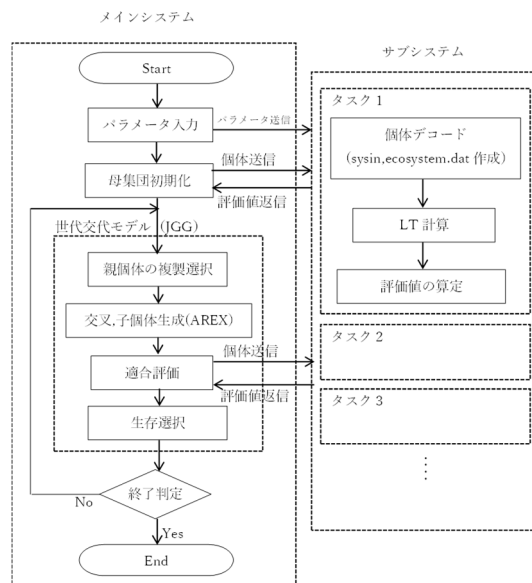


図 2 遺伝的アルゴリズムによるパラメータ調整のフロー

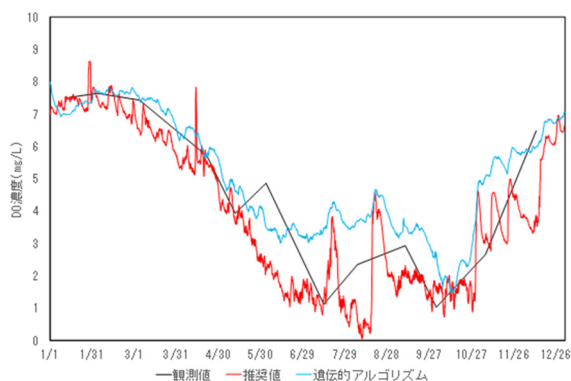


図 3 伊勢湾湾奥底層溶存酸素濃度の再現結果の比較。黒線は GA に使用した底層溶存酸素濃度の観測値、青線は GA によるパラメータ調整後のシミュレーション結果、赤線は GA の結果を踏まえて手動調整後のシミュレーション結果を示す。

まずリアルタイム運用を前提としたシステム要件を整理した。本システムは 1 日 1 回の定期実行を基本とし、過去解析（助走期間）1 日、予測計算 11 日間を一連の処理として実施する構成とした。気象外力には GPV 気象データを用い、予測期間に応じて LFM、MSM、GSM を組み合わせて利用可能な構成とすることで、短期から中長期までの予測精度向上を図った。設定は外部設定ファイルにより柔軟に制御できるよう設計されている。

観測データについては、気温、風速、水温、塩分などを対象とし、外部システムから提供される CSV 形式データを自動受信・処理する方式とした。品質管理として、異常値やスパイクの除去、欠測補間、許容範囲チェック等を実装し、データ同化に適した形式へ変換・蓄積する処理フローを設計した。これにより、リアルタイム運用における観測データの信頼性確保を図っている。

データ同化シーケンスでは、アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）を用いた逐次同化を採用し、アンサンブル数 32 を基本とする構成とした。境界条件に摂動を与えたアンサンブル計算を行い、観測値を用いて解析場を生成した後、アンサンブル平均を初期値として 11 日先までの予測計算を実施する流れを確立した。以上の処理が 3 時間以内に完了することを性能要件とし、運用

面での即時性を確保した。

サーバ構成については、mdxI に構築した Master Server にて境界条件作成・データ同化計算を実施し、Compute Node にて予測計算を行う分散構成とした。アンサンブル数や同化対象に応じたメモリ使用量を事前に見積もり、生態系モデルを含む同化計算にも対応可能な構成とした。また、ディレクトリ構成や設定ファイルを統一し、将来的な拡張や保守が容易となるよう整理している。

これらの設計に基づくプログラム開発を実施した。観測データ処理プログラムとして、データ取得、フォーマット変換、品質管理、同化用ファイル作成までを自動実行するスクリプト群を開発し、cron による定時実行を可能とした。さらに、EcoPARI データ同化システムの統合・試運転を行い、境界条件作成から同化、予測、Web 連携用ファイル出力までの一連の処理が安定して動作することを確認した。現在、運転状況を確認している状況である。

以上により、観測データと数値シミュレーションを高頻度で融合可能なデータ同化リアルタイムシミュレーション基盤が構築され、伊勢湾における水環境の高精度即時予測に資する実運用レベルのシステムが整備された。

なお、昨年度までに mdxI に構築したデータ同化は含まない、伊勢湾の 11 日先までの水温、塩分、溶存酸素濃度、クロロフィル a 濃度をリアルタイムで予測するシステム「伊勢湾海域環境予測システム」（図 5）及び、伊勢湾の流動と潮目位置を予測する「潮目・流況予測システム」（図 6）は今年度 1 年間にわたり安定的に運用がなされた。

5.4 三河湾における貧酸素水塊解消現象の数値解析

半閉鎖性沿岸域では、夏季を中心に底層の溶存酸素（Dissolved Oxygen : DO）濃度が著しく低下する貧酸素水塊が形成されやすく、水生生物の生息環境や漁業活動に深刻な影響を及ぼすこ

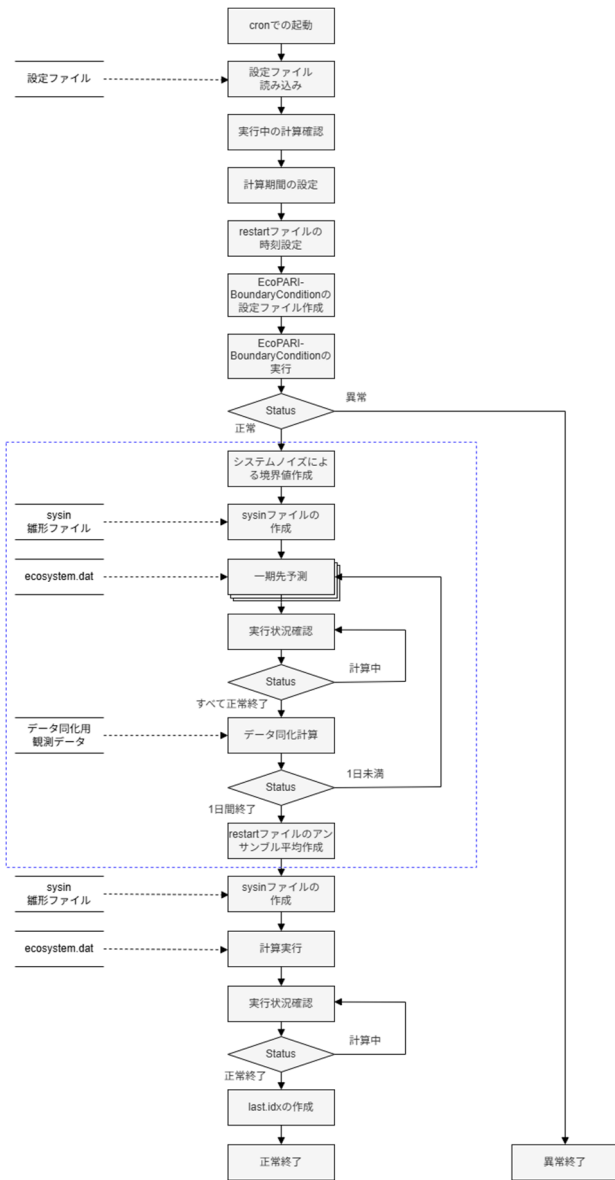


図 4 データ同化リアルタイムシミュレーションシステムの処理フロー

とが知られている。一般に、貧酸素水塊は有機物分解に伴う酸素消費の増大と、成層化による底層への酸素供給低下が同時に生じることで発生する。三河湾は比較的浅い干潟や浅場を有する湾であるが、近年の埋立や地形改変により干潟・浅場が減少し、赤潮の頻発や貧酸素水塊の拡大、さらには青潮発生リスクの増大が懸念されている。2020年8月上旬の観測では、三河湾内に顕著な貧酸素水塊が形成され、底層 DO 濃度がほぼゼロに近い状態に達したことが確認された。しかし、その後8月20日頃には、短期間で貧酸素水塊がほぼ消滅する現象が観測された。観測結果からは、湾口部ある



図 5 伊勢湾海域環境予測システムの試験運用サイト (<https://www.ecopari.pari.go.jp/pmise4e/#/>、閲覧には ID とパスワードが必要)

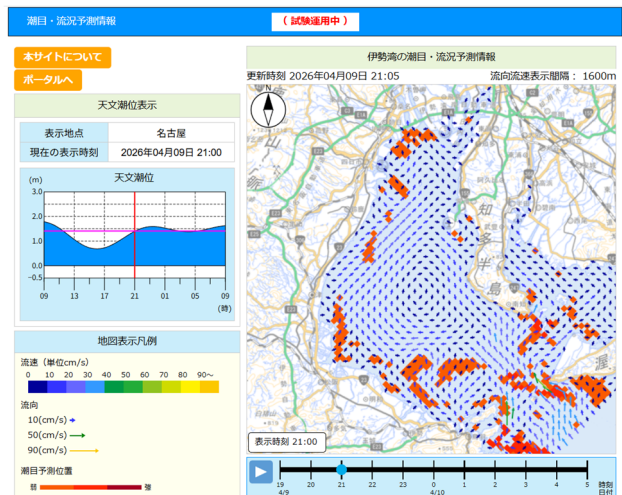


図 6 潮目・流況予測システムの運用サイト (<https://www.ecopari.pari.go.jp/currentrip/#/>、閲覧には ID とパスワードが必要)

いは外洋からの DO 濃度の高い水塊の流入によって貧酸素水塊が解消した可能性が示唆されたものの、どの外力が主に作用したのか、またその物理メカニズムについては十分に解明されていなかった。

従来、流動生態系モデルを用いた貧酸素水塊の解析は多く報告されてきたが、その多くは季節変動や年変動といった長期スケールを対象としており、数日から 1 週間程度の短期変動に着目した研究は極めて限られている。その主な理由として、短期変動を捉えるために必要な高時間解像度の観測データが不足していること、ならびに外洋との水交換を精緻に再現する数値モデル構築の難しさが挙げられる。しかし、短期変動を適切に再現できない数値モデルでは、実際の水環境変化を十分に理解することができず、環境影響評価や対策検討において誤った判断につながる恐れがある。

本検討では、2020 年 8 月に三河湾で観測された貧酸素水塊の短期的な解消現象を対象に、流動生態系シミュレーションモデルを用いた数値解析により、その再現と要因解明を行うことを目的とした。特に、底層 DO 濃度の短期変動に着目し、(1) 湾口部からの高密度水塊流入による密度流、(2) 風による吹送流、(3) 潮汐流の三つの物理過程が貧酸素水塊の解消に果たす役割を、感度解析により定量的に評価することを目指した。

EcoPARI-Simulator を用い、解析領域は三河湾および伊勢湾を含む広域とし、水平解像度 800 m、鉛直 64 層の高解像度モデルを構築した。鉛直方向には水面近傍で特に細かい層厚を設定することで、成層構造や底層の低酸素状態を精緻に表現できるよう配慮した。境界条件としては、太平洋に接続する側方境界において観測された水温・塩分の高頻度データを用い、DO 濃度は飽和状態で流入すると仮定した。大気境界条件には気象庁の局地予報モデル格子点値を用い、風速・風向、気温、放射量などを与えた。河川流量については、一級河川では観測値を使用し、観測のない中小河川については貯留関数法により流量を推定した。十分なスピンアップ期間（約 8 か月）を設けた後、2020 年

1 月から 9 か月間の連続計算を実施した。モデルの再現性評価には、三河湾 1 号ブイにおける底層 DO 濃度の観測値を用い、時系列および鉛直分布の比較を行った。評価指標として、バイアス、二乗平均平方根誤差 (RMSE)、中心化 RMSE、相関係数を用いた。

さらに、要因解析のために感度解析を実施した。基準計算に加え、側方境界の塩分条件を変更したケース、風向・風速を変更したケース、潮汐変動を除去したケースなど、複数のシナリオを設定し、それぞれの条件下で底層 DO 濃度の変化を比較した。

数値計算の結果、湾奥部における底層 DO 濃度の上昇時期は観測と良好に一致（図 7）し、相関係数 0.78、RMSE 1.27 mg/L が得られた。数値的な DO 濃度の絶対値には差異が残ったものの、貧酸素水塊が 8 月 17 日頃から解消へ向かう時間的挙動は適切に再現された。DO および塩分の水平分布解析（図 8、図 9）から、8 月中旬以降、伊勢湾口付近から塩分の高い水塊が湾内へと侵入し、その水塊が三河湾奥へと移流する過程が明瞭に確認された。湾奥部では、DO 濃度の上昇と塩分上昇がほぼ同時に生じており、DO 回復が生物化学過程ではなく、水塊の物理的置換によって引き起こされたことが強く示唆された。

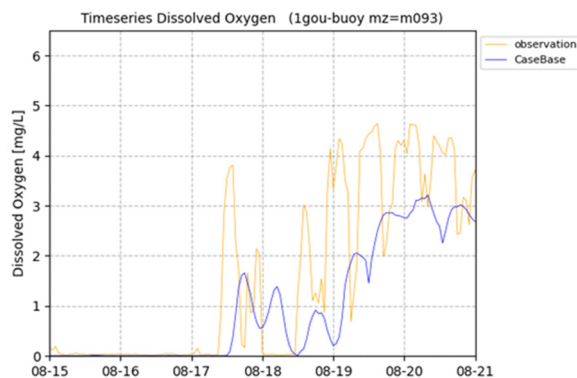
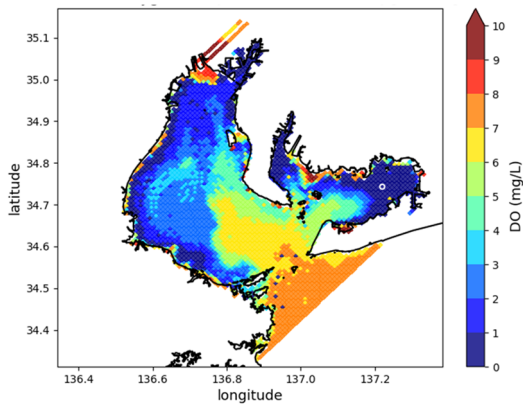
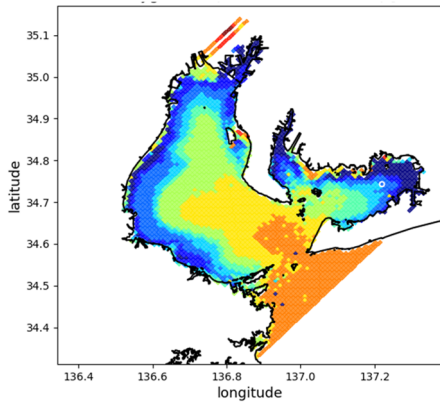


図 7 地点 A1 における DO 濃度の観測値およびシミュレーション結果 (CaseBase) の時系列. 平均水位からの水深は 9.3 m である.



(a) 8月15日

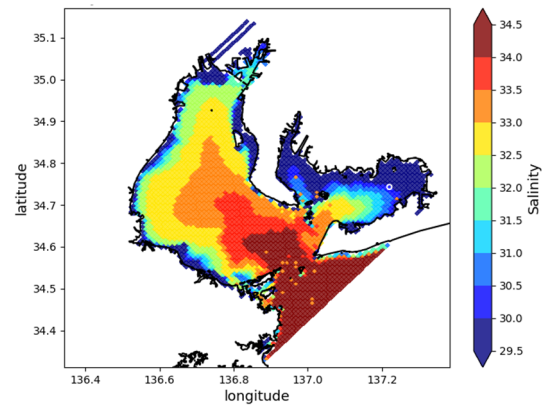


(b) 8月20日

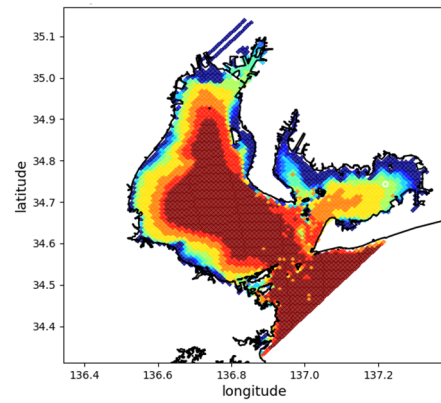
図 8 底層 DO 濃度の平面分布. 白い円は湾奥部地点 (図 7) を示す.

感度解析の結果、底層 DO 濃度の上昇に最も大きく寄与したのは、湾口部の高塩分水塊に起因する密度流であることが明らかとなった。高塩分条件を与えたケースでは、湾奥部の底層 DO 濃度が顕著に上昇した一方、低塩分条件では貧酸素状態が継続した。風向・風速や潮汐条件を変更したケースでは、DO 分布や鉛直混合の程度に違いは見られたものの、底層 DO 濃度上昇の主因とはならないことが示された。

本研究では、観測と完全に一致する DO 濃度の再現には至らなかったものの、貧酸素水塊の短期的な解消過程およびその主要因を定性的・定量的に明らかにすることができた。再現精度に残る課題として、生物化学過程に関わるパラメータ設定や乱流拡散の扱いが挙げられるが、これらは今後のモデル改良の重要な検討課題である。一方で、本研究は、高時間解像度の観測データを側方境界条



(a) 8月15日



(b) 8月20日

図 9 底層塩分の平面分布. 白い円は湾奥部地点 (図 7) を示す.

件として用いることで、従来困難であった短期的な底層貧酸素水塊の解消現象を再現し、その支配要因が密度流であることを示した点で先駆的である。三河湾における貧酸素水塊は、単なる局所的な生物化学過程の結果ではなく、伊勢湾口および外洋を含む広域的な物理過程の影響を強く受けていることが明らかとなった。本成果は、将来的な貧酸素対策の検討において、外洋・湾口部の水塊構造や密度流の発生条件を考慮する重要性を示唆するものであり、沿岸域水環境の理解および管理高度化に資する知見を提供する。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

6.1 Web ブラウザによるプリポスト処理機能・シミュレーションシステムの構築

自己評価: これまでの3年間の JHPCN の共同研究において、三大湾を中心に EcoPARI のアプリケー

ション事例を積み重ねており、モデル構築に必要なノウハウが蓄積・共有されつつある。また、自ら高性能な計算機をもたない場合でも、スパコンを使うことで誰でも高度な解析ができる状況にこぎつけた。さらにプリプロセス、ソルバー、ポストプロセスに至る Web アプリケーションを開発し、目標としていた開発がすべて達成できた。

今後の展望：m d x 上に構築したシミュレーションシステムの利用ルールの策定を行い、実運用に向けた必要な準備を行う。また、開発者らが保存しているモデル海域のみならず、ユーザーが一から海域を設定してモデル構築が行えるような Web アプリケーションを開発することで、更なる利便性の向上を測りたい。さらに、オフラインのネスティングを web ブラウザ上で行えるようにする計画があり、これにより、港湾工事等において環境影響評価を容易に行える環境が整う。

6.2 パラメータ調整システムの実用化

自己評価：m d x と S Q U I D を連携させて、パラメータ調整を行うシステムが完成し、具体的な検討が進められた。遺伝的アルゴリズムによる自動調整と手動調整を組み合わせることで、効率的なパラメータ調整が実施可能であるという見込みが得られた。

今後の展望：今後はケース数を増やすことで実績を積み重ね、パラメータ調整の具体事例を整理する必要がある。

6.3 観測値を取り込んだデータ同化によるリアルタイムシミュレーションシステム

自己評価：2024年度まではデータ同化を含まない、数値シミュレーションのみでのリアルタイムシステムシミュレーションシステムが構築でき、試験運用が進められている。2025年度はデータ同化によるリアルタイム予測システムが構築され、現在試験運用中である。システムの精度の確認には至っていないが、これまでデータ同化の検討は積み重ねがあるため、データ同化によってリアルタイム予測システムの精度向上が見込まれる。

予測システムについては、令和 8 年日本港湾協会技術賞の受賞が内定しており、外部からの評価や期待が極めて高い。

今後の展望：データ同化精度の確認を行い、公開に向けた関係者との協議が必要である。

参考文献

Matsuzaki, Y., Kubota, M., Inoue, T., Mizuguchi, H., 2025. Ecological hydrodynamic modeling and factor analysis of hypoxia dissipation in the semi-enclosed Mikawa Bay, Japan, in August 2020. Marine Pollution Bulletin 218, 118190. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118190>

※7.研究業績はウェブ入力です