

jh240011

流動生態系シミュレーションシステムによる 水環境評価のための標準化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）

沿岸域の水環境への影響評価には数値シミュレーションが不可欠だが、モデルの統一性や計算環境に課題がある。応募者らは、生態系や腐食連鎖も再現可能な高度なモデル EcoPARI を開発し、データ同化や遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ調整手法を導入した。本研究では、EcoPARI の計算資源の制約を克服し、DX を達成するため、国研・大学・民間企業の連携により、大型計算機の活用や Web ブラウザ上での操作が可能なシミュレーション・解析基盤の構築を目指す。伊勢湾を中心にアサリ資源や藻場、底泥環境を対象とした数値モデルの構築の検討、リアルタイム浮遊ゴミ位置予測、東京湾・大阪湾における環境評価への応用を実施した。また、大型計算機を活用した高精度なパラメータ同化・チューニング技術の構築を進め、実務・学術の両面で広範な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

アムヌガマ マンガラ シミュレーション、データ同化

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、データ同化

ハフィーズ ムハメド アリ シミュレーション

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

西村規宏 シミュレーション

北山千鶴 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

竹内一浩 シミュレーション

畑恭子 シミュレーション

小山悠人 シミュレーション

阿部真己 シミュレーション

持田史佳 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

柴田和樹 システム開発

寛雅行 データ同化

坂本大樹 データ同化

(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

渡邊康生（学生） シミュレーション

阿部泰夏（学生） シミュレーション

早川貴洋（学生） シミュレーション

田中理彩（学生） シミュレーション

白木喜章 シミュレーション

小林諒也 データ同化
 荒木和博 データ同化
 内藤大輔 システム開発、データ同化
 古賀すみれ システム開発、データ同化
 堀江敬太 システム開発、データ同化
 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
 村田壱学 システム開発
 遠藤匠 システム開発
 Plewe Till 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
 比嘉紘士 シミュレーション、データ同化
 大倉結衣 (学生) シミュレーション
 高山夏姫 (学生) シミュレーション
 篠原優太 (学生) シミュレーション、データ同化
 有井瑞稀 (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

2. 研究の目的と意義

背景 沿岸域では様々な開発行為が行われているため、数値シミュレーションによる水環境への影響の評価が非常に重要となっている。しかし、水環境数値シミュレーションモデルはまだ研究開発段階にあり、環境影響評価を行うための統一的なモデルが存在しない。そのような状況ではモデルの構成やシミュレーション実施者の力量によって結果が大きく異なる可能性がある。即ち、実現象を数値シミュレーションで適切に再現できない可能性があり、事業実施後に地域住民や漁業者の反感を招きかねない。

そこで、応募者らが開発した水環境の再現や予測を行うことの可能な水環境数値シミュレーションモデルとプリ・ポスト処理システム、パラメータ調整システムやデータ同化システム等が含まれるシステムである、流動生態系シミュレーションシステム：Ecological hydrodynamics simulation system of the Port and Airport

Research Institute、通称「EcoPARI (エコパリ)」の活用が期待される。EcoPARI は、これまで一般的にモデル化されてきた植物プランクトン→動物プランクトンという低次食物連鎖だけでなく、動物プランクトン→魚といった高次食物連鎖や、デトリタス→細菌といった腐食連鎖もモデル化しており、他の水環境数値シミュレーションモデルにはない特徴を持つ。また、EcoPARI は国土交通省を中心に委員会等で使用される等、行政から信頼性の高いモデルとして評価されている。

課題 1 EcoPARI は高度な数値モデルであるが故、民間建設コンサルタントが使用している水環境数値シミュレーションモデルよりも 10 倍程度の計算機能力を必要とする。大規模な開発事業を行う際に必要となる環境影響評価を実施するのは国・自治体から委託される建設コンサルタントである。建設コンサルタントの多くは大型計算機を所有していないため、EcoPARI による検討が困難な場合が多い。

課題 2 水環境をシミュレーションするための生態系モデルは、多くの設定すべきパラメータがあり、それらを客観的に決定する手法がないため、ともすると誤った条件設定になりかねない恐れがある。よって、応募者はデータ同化と遺伝的アルゴリズムという手法で、パラメータを客観的に決定するためのシステムを EcoPARI に組み込んでいる。しかしながら、パラメータ調整システムは大規模アンサンブル計算 (データ同化)、あるいは大量の繰り返し計算 (遺伝的アルゴリズム) が必要であり、効率的に研究を進めるためには大型計算機を活用したパラメータ調整システムの構築が必要である。

課題 3 これまで応募者らはリアルタイム水環境数値シミュレーション、いわゆる「海の天気予報」のためのシステム構築を行い、現場対応を行う国土交通省等に対する情報提供を行ってきた。近年はモニタリングポストや衛星データといったリアルタイムに収集できる観測値が充実しつつあるため、観測値と数値シミュレーションモデルを融合する手法であるデータ同化による水温、塩

分、溶存酸素、栄養塩などの高精度予測に関する研究開発に取り組んでいる。即時予測を行うためには高速に演算し、観測データの収集・解析を処理できる大型計算機とデータ集約基盤の活用が必要となる。

目的 以上のような背景を踏まえ、本研究では基盤となる EcoPARI を開発してきた国研、環境分野の技術開発を得意とする建設コンサルタント、高速化を得意とする大学・ソフトウェア開発会社を含めた学際的共同により、水環境数値シミュレーションを実施するマルチプラットフォームを構築する。

実務面の意義 公共事業の正確な環境影響評価の実施のためには、客観的な数値シミュレーション結果を得られる EcoPARI の民間企業を含めた幅広い利用と、スパコンや GPU を使った高速化による客観的なパラメータ調整が不可欠である。また、構築したプラットフォームは官民を含む技術者・研究者による使用が可能となるため、幅広い利活用が見込まれる。さらに、開発された「海の天気予報」は研究者や行政担当者のみならず、将来的には広く国民を含めて活用されることを目指している。

学術面の意義 データ同化や遺伝的アルゴリズムといったシステムを沿岸域の水環境数値シミュレーションに適用した事例はほとんどなく、この研究の世界的トップランナーである応募者ら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の実施のためのブレイクスルーとなる。

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といった異なる組織が連携して研究開発を進める学際的共同が不可欠である。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で取り込むリアルタイムシミュレーションを行う。そのためには大規模計算かつ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。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

応募者は伊勢湾再生行動計画に則って EcoPARI の開発に取り組んできた。EcoPARI は、東京湾、相模湾、大阪湾、広島湾、宍道湖・中海、有明海等、幅広い適用実績がある。今回提案するパラメータ調整システムのうち、データ同化モデルは伊勢湾を対象とした実績があり、沿岸域において実観測値を使用した長期間のデータ同化に成功した世界初の事例である。また、それらを高解像度・高精度に実施するために WRF よる海上気象の高解像度シミュレーションの実施と、水環境数値シミュレーションモデルへの適用の実績がある。JHPCN で令和 5 年度中に実施した内容についても順調に成果の公表が進んでいる。

5. 今年度の研究成果の詳細

研究目的を令和 5～7 年度 3 か年で達成するため、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実装、(2) パラメータ調整システムの実用化、(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の構築を行う。

(1)～(3)の実施に向けた令和 6 年度(2 か年目)の研究結果の概要と、その中から特に進展のあったデータ同化研究の詳細を以下に記す。

5. 1 三大湾(伊勢湾、東京湾、大阪湾)を中心とした application 事例

伊勢湾においては、伊勢湾環境再生手法の検討のため、伊勢湾における環境状況を再現・予測できる以下の 3 点の数値モデルの構築に取り組んでいる。

- 1) 個体群モデルによるアサリ資源の近年の急激な減少を再現し、下水処理場の栄養塩管理に加えて、浅場造成によるアサリ生息場の拡大が、どのように資源量増加につながるか、水質環境との相互作用を含めたモデルを構築した。
- 2) 水中一底泥間の物質循環の素過程を詳細に表現したモデル構築を目指し、現在の底泥の状況

を再現するための長期間（100年程度）の時間積分を行い、底泥の各構成要素の移行過程の妥当性について検証した。

3) 基本的な藻場における栄養塩・酸素の循環過程を表現した上で、生物の生息場としての藻場の役割のモデル化に取り組んだ。

また、昨年度実施したゴミ位置の予測システムの検討結果を踏まえ、今年度はリアルタイムで伊勢湾の漂流ゴミの位置を予測するための数値シミュレーションシステムのmdx実装に取り組んだ(図1)。具体的には1時間に1回、10時間後までの伊勢湾の流向流速と潮目位置情報をシミュレーションし、web上で閲覧が可能となるシステムを構築した。

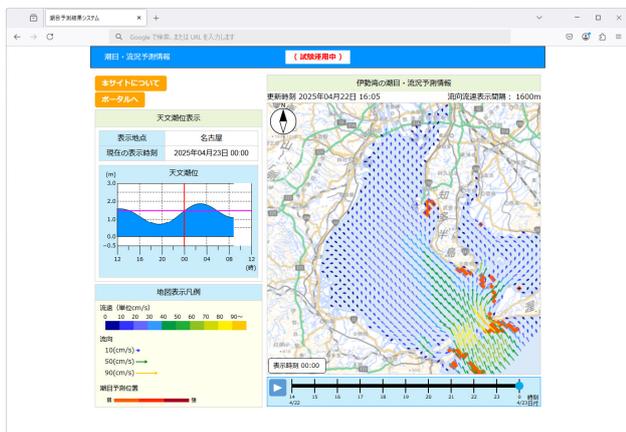


図1 mdx上に構築した流況と潮目位置のリアルタイム予測システムのweb画面の例

<https://www.ecopari.pari.go.jp/currentrip/#>

東京湾においては、河川流量の観測データが少ない中小河川の河川流入が東京湾内の流動に与える影響を検討した。既往研究では瀬戸内海において、観測データがあまり存在していない中小河川の影響を考慮することで塩分の再現性の向上が報告されている。一方東京湾では中小河川の影響を考慮したシミュレーションは少なく、それが流れ場に与える影響について十分に検討されていなかった。そのため、中小河川を考慮した東京湾のシミュレーションと考慮しなかった場合のシミュレーションを実施し、表層塩分の水平分布の差について検討した。東京湾

一斉調査の表層塩分の観測データと比較したところ、中小河川を考慮した場合の方が、千葉側での塩分低下を適切に再現できていた。

大阪湾においては、沿岸地域から砂が浚渫された結果、土取場に水が滞留し、青潮の発生頻度が増加した。これらの土取場を埋め戻すことで、土取場内の水の滞留時間を短縮し、状況を改善することができると考えられる。より適切な埋戻し手順について、数値シミュレーションでシナリオ検討を行った。

5. 2 データ同化と遺伝的アルゴリズムによるモデルのパラメータチューニング

データ同化システムをSQUIDにセットアップし、データ同化による底層溶存酸素濃度の修正およびパラメータチューニングに取り組んでいる。

遺伝的アルゴリズムのシステムについては、SQUIDとWisteriaにインストールし、動作することを確認した。また、mdxにhttpサーバを立ち上げ、実行環境の構築手順について取りまとめた(図2)。

構築したシステムによって、約1か月毎に観測された堆積物中の硫黄、鉄濃度等の鉛直分布を参照し、遺伝的アルゴリズムを用いた、パラメータチューニングを行った。その結果、それらの鉛直分布については、高精度で再現できることが確認された。いくつかのパラメータで、最適化による季節変動がみられた。これらの変動は、物理的にも意味のある挙動であると考えられた。

また、パラメータ最適値の季節変動から、今後のモデル改良の要否の検討が必要であると考えられる。比較対象とした観測値に対して、強い影響を及ぼすと思われるパラメータのチューニングは、効率よく行えたと判断された。一方、今回の手順では収束しないパラメータも存在した。以上の結果から、さらに効率の良い手順を検討する予定である。また、モデル化している物質循環過程の良否についても検討を要する。

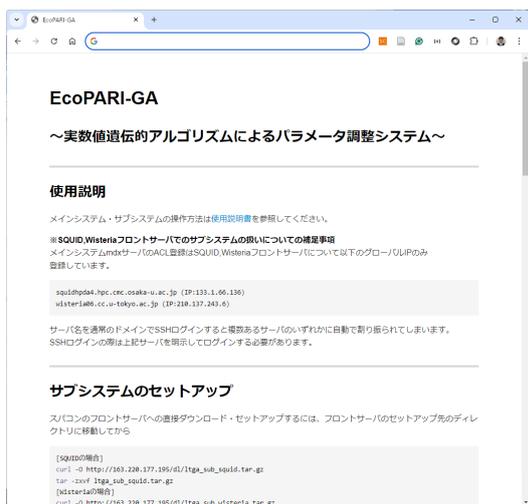


図 2 mdx にインストールした遺伝的アルゴリズムの手順 web ページ

5. 3 海の天気予報の試験運用

mdx 上に http サーバを構築し、1 日に 1 回、11 日後までの伊勢湾の水温、塩分、植物プランクトン濃度、溶存酸素濃度を予測するシステムである、「伊勢湾海域環境予測システム」の試験運用を実施中である (図 3)。水温については 2020 年~2022 年の秋口に水温が 23 度から下がっていく様子について、再現することに成功した。岸から離れたモニタリングポストの観測値のほか、岸に近い三重県沿岸の観測値についても、桑名を除いて精度よく再現することができた。塩分についても変動をよくとらえていると判断された。植物プランクトンと溶存酸素濃度の再現精度が十分ではないと判断されるため、引き続き精度の確認と改善に努めるとともに、閲覧は限定ユーザに限るものとしている。

【ピックアップ研究】データ同化研究の詳細説明
最終年度である 2025 年度には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を構築する予定である。それに向けたデータ同化システムとしては自動的なシーケンスに対応可能な堅牢性の高いシステムであることが求められる。今年度はデータ同化による 12 年間の長期解析データベースの作成を行い、その堅牢性と精度について確認を行った。



図 3 伊勢湾海域環境予測システムの試験運用サイトのトップページ

<https://www.ecopari.pari.go.jp/imeps/pmise/#/>

① 流動モデル

沿岸河口の流動構造をシミュレートするため、水平方向の格子サイズは x, y 方向ともに 800 m のデカルト座標系を使用した (図-4)。座標系は緯度経度から時計回りに 45°回転させて設定し、x 軸と y 軸で 85×85 の計算格子を採用している。垂直層の数は 32 で、水面近くで 0.5 m 間隔、海底近くで 30 m 間隔に設定した。入力水深データは、海上保安庁が作成した海図から水深を読み取って作成した。水平乱流モデルに subgrid-scale モデル (1)、垂直乱流モデルには、Henderson-Sellers モデル (2) から修正されたモデル (3) を使用した。側方境界の透過条件にはゾンマーフェルト放射条件 (4) を適用した。

②境界条件の設定

境界条件データは河川流量、大気、側方を対象として作成した。1級河川の河川流量と河川水温は観測データから得た。シミュレーション期間の観測データがないその他の小河川の河川流量は、次の2つの方法で算出した。過去の流量観測値がある河川については、AMeDAS降水量を空間補間して流域内平均降水量を計算し、貯留関数法を使用して河川流量を算出した。過去の流量観測がない河川については、最も近い河川の河川流量強制力から流域面積比と平均流域降水量比を乗じて河川流量強制力を算出した。河川水温は、回帰直線を使用して大気境界条件の気温から推定した。河川水の塩分は0に設定した。大気境界条件は、GPV MSMの初期値から作成した。塩分と海水温の側方境界条件は、伊勢湾口で観測された観測データから作成された。側方境界付近にある赤羽根観測点（北緯34.605°、東経137.189°）で観測された潮位が側方境界条件として設定された。

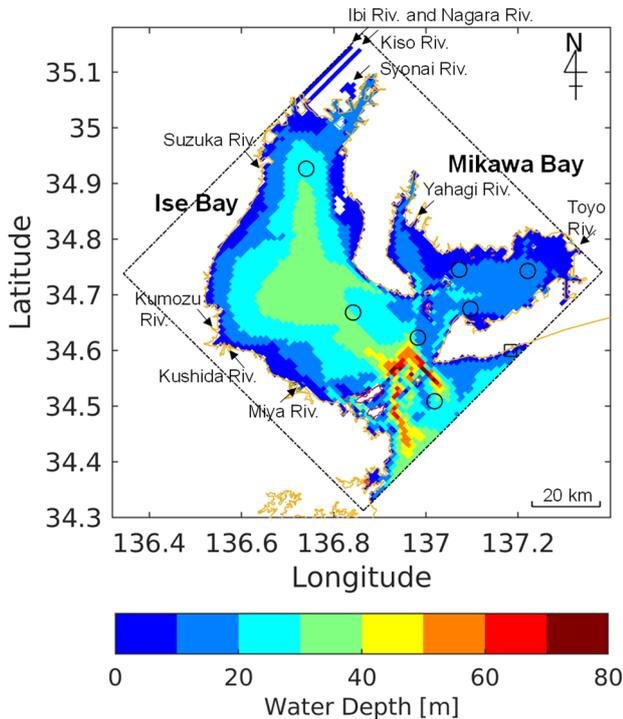


図-4 検討対象である伊勢湾。破線はモデル設定領域を示している。円はデータ同化及び精度検証に用いたモニタリングポスト地点。四角は側方潮位境界条件に使用した赤羽根観測点。矢印は10の1級河川の流入位置と流入方向を示す。

③ データ同化システム

EcoPARI-Data Assimilation は Evensen(5)に基づく Ensemble Kalman Filter (以下 EnKF) である。EnKF の基礎となるカルマンフィルターと、EnKF の基本的な分析手順は次の通りである。解析値 \mathbf{x}^a (data assimilation results) は、ある時間 t で、式 (1) に示すように、背景値 \mathbf{x}^f と観測値 \mathbf{y} の最適な加重平均によって取得される。

$$\mathbf{x}_t^a = \mathbf{x}_t^f + \mathbf{K}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t\mathbf{x}_t^f) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} は流動モデルの各メッシュの水温、塩分、流速などの物理量を要素とする状態ベクトル、 \mathbf{y} は、水温、塩分、流速などの観測値を要素とする観測ベクトル、 \mathbf{H} は観測行列であり、流動モデルの結果 (状態ベクトル) から観測点に対応するメッシュの物理量を抽出する演算子、 \mathbf{K} は観測値が同化される程度を決定する重み行列 (カルマンゲイン) である。 \mathbf{K} は次のように計算される。

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^f \mathbf{H}_t^T (\mathbf{R}_t + \mathbf{H}_t \mathbf{P}_t^f \mathbf{H}_t^T)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{P} は背景誤差共分散行列、 \mathbf{R} は観測誤差共分散行列である。上付き文字 T は転置を意味する。式 (2) は、観測値の同化率が \mathbf{P} と \mathbf{R} の関係によって決定され、観測値による空間方向の修正が \mathbf{P} によって決定されることを示している(6)。

背景誤差共分散行列はアンサンブルから推定される。

$$\bar{\mathbf{P}}_t^f = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (\mathbf{x}_t^{f(l)} - \bar{\mathbf{x}}_t^f) (\mathbf{x}_t^{f(l)} - \bar{\mathbf{x}}_t^f)^T \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_t^f = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_t^{f(l)} \quad (4)$$

ここで、 L はアンサンブルメンバー数 ($L=128$)、オーバーバーはアンサンブルから求まる平均値と共分散行列を表す。

観測誤差共分散行列は、アンサンブルから推定される。

$$\bar{\mathbf{R}}_t = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (\mathbf{r}_t^{(l)} - \bar{\mathbf{r}}_t) (\mathbf{r}_t^{(l)} - \bar{\mathbf{r}}_t)^T \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{r}}_t = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{r}_t^{(l)} \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{r} は観測誤差であり、観測機器や測定環境の特性によって発生する測定誤差と、流動モデルでは表現できない現象による表現誤差の値の和を

表す。

カルマンゲインは次のように推定される。

$$\bar{K}_t = \bar{P}_t^f H_t^T (\bar{R}_t + H_t \bar{P}_t^f H_t^T)^{-1} \quad (7)$$

アンサンブルメンバーの解析値は式(8)で計算される。

$$\mathbf{x}_t^{a(l)} = \mathbf{x}_t^{f(l)} + \bar{K}_t (\mathbf{y}_t + \mathbf{r}_t^{(l)} - H_t \mathbf{x}_t^{f(l)}) \quad (l = 1, \dots, L) \quad (8)$$

各アンサンブルメンバーの解析値の平均値である $\bar{\mathbf{x}}_t^a$ がデータ同化の結果である。

$$\bar{\mathbf{x}}_t^a = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_t^{a(l)} \quad (9)$$

④ 同化した観測値

データ同化には、伊勢湾モニタリングポスト 7 地点の水温と塩分の観測値を使用した。観測値の同化は 1 日に 1 回 00:00 とした（観測データは 1 時間毎に収集されているが、同化は 24 時間毎に行った。また、同化に用いた観測値は 24 時間平均値ではない）。観測誤差の分散は既往研究(7)に基づき水温は $(1.0^\circ\text{C})^2$ 、塩分は $(1.0)^2$ に設定した。観測値の品質管理方法は、観測値間の相関等から行う方法（内的 quality control(8)）と、観測値と数値シミュレーション結果の差の大きさから品質管理を行う方法（外的 quality control(7)）を適用した。

⑤ 解析データベース作成期間

解析データベースの作成期間は、境界条件データと観測値の用意が可能であった 2011 年 1 月 1 日から 2023 年 1 月 1 日までの 12 年間とした。2011 年 1 月 1 日の同化実験の初期アンサンブルは、2010 年 4 月 1 日から 8 か月の Spin up を行うことで作成した。Spin up 期間では、アンサンブルメンバーは、摂動を含む境界条件を用いて計算した。

⑥ 精度検証方法

モデル出力の水温と塩分データをモニタリングポスト（表-1）で観測された水温和塩分のデータと比較した。したがって、比較は 24 時間毎に行った。モデル出力の水温和塩分データは、モニタリングポストの他に、衛星 Terra, Aqua の MODIS によって観測された SST と比較して、空間方向の水温和塩分の同化結果を評価した。MODIS SST データは、22:

00 から 02:00 の間に観測されたすべてのデータが 00:00 に観測されたと仮定して使用した。

モデル出力の精度は、指標としてバイアス（bias : 平均誤差, 式(12)）、平方根平均二乗誤差（root mean square error: RMSE, 式(13)）、バイアスが除去された RMSE（Centered RMSE: CRMSE, 式(14)）と相関係数（correlation coefficient: CC, 式(15)）を使用して評価した：

$$\text{bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i) \quad (10)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2} \quad (11)$$

$$\text{CRMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o})]^2} \quad (12)$$

$$\text{CC} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2}} \quad (13)$$

ここで、 m_i と o_i はそれぞれモデル出力と観測値であり、 N はモデル出力と観測値の数、 \bar{m} と \bar{o} はそれぞれモデル出力と観測値の平均値である。

⑦ 結果

膨大な解析データベースの全ての結果を示せないため、代表地点の統計値を示す。データ同化結果の伊勢湾奥（A1）における水温和塩分（図-5）の RMSE は、数値シミュレーションの結果と比較していずれの年も改善していることがわかる。2011 年の塩分を除くデータ同化結果の水温和塩分の RMSE は概ね一定の値を取っており、データ同化によって一定の精度・品質の解析結果が得られた。ただし、bias の結果（図-6）は古い年よりも新しい年の精度が良い傾向にあり、特に、2015 年と 2016 年を境に表層水温和塩分の精度の傾向が異なる。

12 年間の統計値（表-2）も良好な値であると判断される。データ同化には使用されていない衛星で観測された水温和塩分と数値シミュレーション結果の RMSE（図-7）及び bias（図-8）はいずれも湾全体で改善している。すなわち、空間的に疎であるモニタリングポストのデータから湾全体で水温和塩分が改善していると言える。

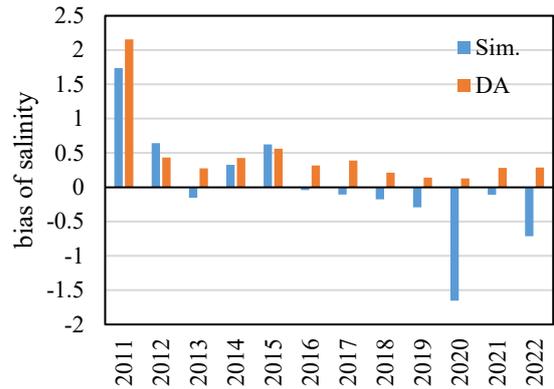
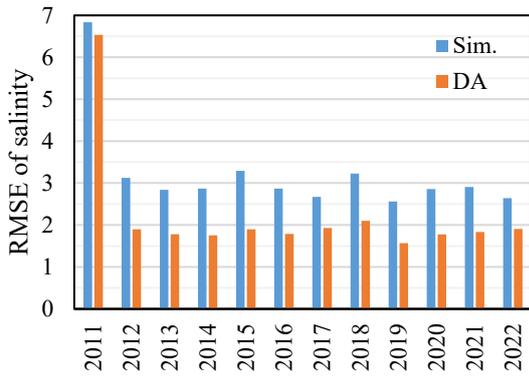
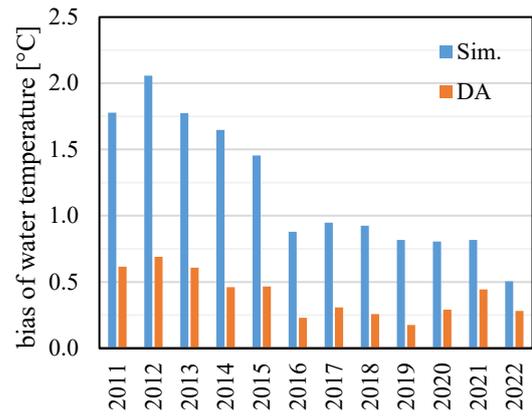
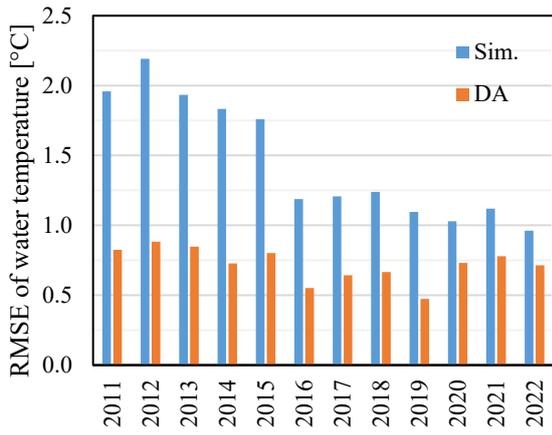


図-5 地点 A1 における水温（上段）と塩分（下段）の数値シミュレーション結果(Sim.)とデータ同化結果(DA)の各年の水深 1 m における RMSE.

図-6 地点 A1 における水温（上段）と塩分（下段）の数値シミュレーション結果(Sim.)とデータ同化結果(DA)の各年の水深 1 m における bias.

表-1 12 年間のモニタリングポスト表層の観測値と比較した水温のデータ同化結果の統計値

	No.	bias	RMSE	CRMSE	CC
水 温	A1	0.40	0.72	0.58	1.00
	A2	0.25	0.52	0.45	1.00
	A3	0.07	0.59	0.57	0.99
	A4	-0.11	0.67	0.65	0.99
	A5	0.25	0.51	0.43	1.00
	A6	0.14	0.48	0.45	1.00
	A7	0.12	0.51	0.49	1.00
塩 分	A1	0.47	2.23	2.17	0.91
	A2	0.32	0.95	0.89	0.93
	A3	0.18	1.12	1.04	0.81
	A4	-0.23	0.60	0.55	0.84
	A5	-0.11	1.02	0.95	0.86
	A6	0.21	0.87	0.77	0.90
	A7	0.21	0.66	0.58	0.85

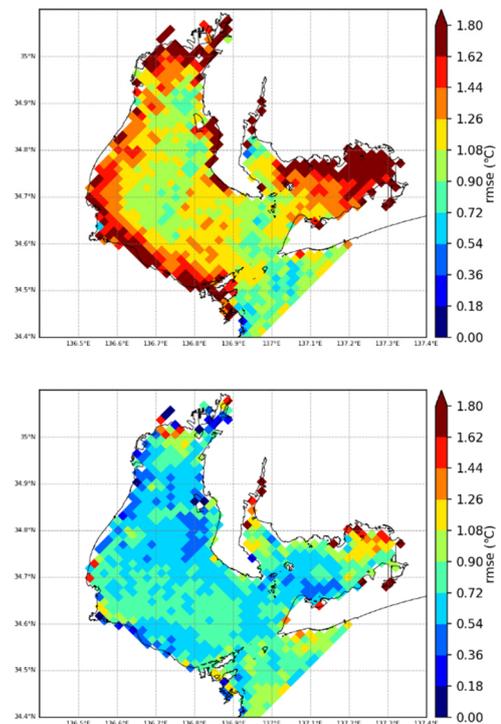
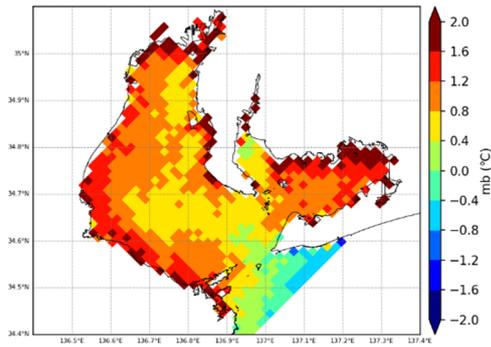
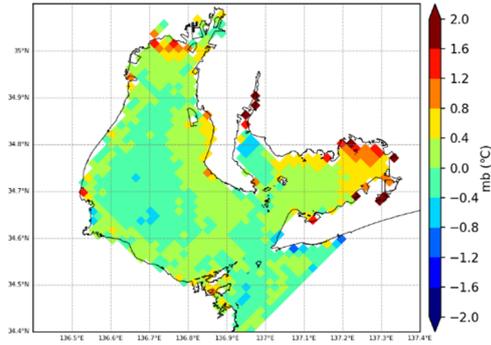


図-7 数値シミュレーション結果（上段）、データ同化結果（下段）とMODIS観測値のRMSE平面分布.



(a) 数値シミュレーション結果



(b) データ同化結果

図-8 数値シミュレーション結果（上段）、データ同化結果（下段）とMODIS観測値のbias平面分布.

⑧ 考察

本研究の成果により、2011年から2022年の物理量の解析データベースが開発された。その精度についてはモニタリングポストのデータおよび衛星観測データと定量的に比較された。紙面の都合上、限られた地点及び水深のみの結果の掲載であるが、全モニタリングポストのデータと表層から底層まで比較しており、その精度については定量的に求められている。

今回の同化手法の特徴としては、手法の有効性・堅牢性とイベント解析があげられる。既往報告(7)において、1年間のデータ同化が実施され、著者らが提案する領域沿岸データ同化手法が安定的なデータ同化結果を算出する堅牢な手法であることを示した。本検討では同様の方法で12年間のデータ同化の実施に成功しており、データ同化システムの非常に高い有用性・堅牢性が示されたと考えており、他のモデルへの応用が期待される。

このデータベースを活用して、過去のとある時

点における伊勢湾の物理場がどのような状況であったかを調べる事が可能である。例えば、伊勢湾・三河湾への外洋水の侵入（図-9、詳細な解析は水口ら(6)を参照）や淡水流入（図-10）等のイベント解析が可能となる。したがって、このような解析データベースは貴重な研究材料として活用が期待される。

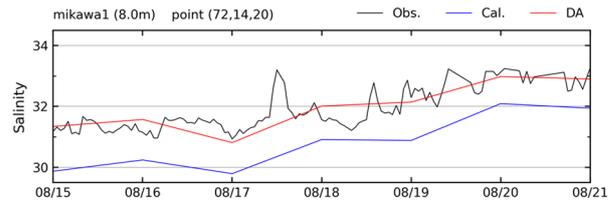


図-9 2020年8月の三河湾1号ブイの底層(8.0m)における塩分の時系列図。高塩分の水塊が侵入する様子について、数値シミュレーションでは定量的な再現が難しかったが、データ同化で塩分濃度が定量的に再現されている。

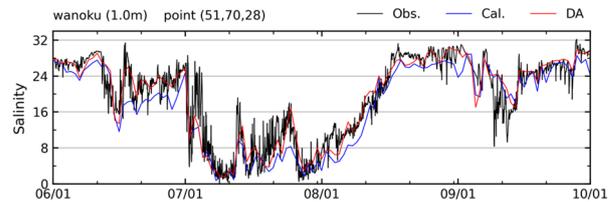


図-10 2020年の伊勢湾湾奥の表層(1.0 m)の塩分の時系列図。塩分濃度が下がる様子が数値シミュレーションでは定量的な再現が難しかったが、データ同化で再現されている。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

(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実装

自己評価：三大湾を中心に EcoPARI のアプリケーションを積み重ねており、モデル構築に必要なノウハウが蓄積・共有されつつある。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。プリポスト機能は 2023 年度に実装され、2024 年度は m d x 上にシミュレーションシステムの実装に取り組んだ。2025 年度は試験運用が開始される

見込みであり、十分に計画を遂行できる見込みである。

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。

(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の試験的な運用が始まり、堆積物中の硫黄、鉄濃度等の鉛直分布の再現性を高めるパラメータ調整ができるようになった。したがって、目標は達成できたと考えている。
今後の展望：2025 年度はケース数を増やすことで実績を積み重ね、どのようにシステムを活用すればよいかの検討が必要である。

(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。またリアルタイムではないが、データ同化システムを使って 12 年間の長期解析データベースが作成されており、リアルタイムで自動的な運用にも耐えうると考えられる堅牢性の高いデータ同化手法が開発された。

したがって、ノウハウが蓄積されており、これに観測値を取り込んだデータ同化システムをインストールすることで、十分に目標が達成できる見込みである。

今後の展望：データ同化を取り込んだ場合の精度の確認を行うとともに、公開に向けた関係者との協議が必要である。

※7. 研究業績はウェブ入力です

参考文献

1. Smagorinsky J. GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE EQUATIONS: I. THE BASIC EXPERIMENT*. Monthly Weather Review.

1963 Mar;91(3):99-164.

2. Henderson-Sellers B. New formulation of eddy diffusion thermocline models. Applied Mathematical Modelling. 1985 Dec;9(6):441-6.
3. Nakamura Y, Hayakawa N. Modelling of thermal stratification in lakes and coastal seas. In 1991. p. 227-36.
4. Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. Journal of Computational Physics. 1976;21(3):251-69.
5. Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation. Ocean Dynamics. 2003 Nov 1;53(4):343-67.
6. 水口隼人, 松崎義孝, 井上徹教. 領域沿岸データ同化手法による 2020 年 8 月の三河湾への外洋水進入の再現精度の向上に関する検討. 土木学会論文集特集号(海岸工学). 2025;81(17).
7. Matsuzaki Y, Inoue T. Perturbation of Boundary Conditions to Create Appropriate Ensembles for Regional Data Assimilation in Coastal Estuary Modeling. JGR Oceans [Internet]. 2022 Mar 24 [cited 2022 Mar 27];127(4). Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JC017911>
8. 松崎義孝, 井上徹教. アンサンブルカルマンフィルタによる閉鎖性水域の流動解析に向けたデータ同化の計算条件の検討. 港湾空港技術研究所資料. 2020;(1367):35.