

# 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分 : 革新型研究開発（若手枠）

研究実施期間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 1RF-2201

体系的番号 : JPMEEERF20221R01

研究課題名 : 閉鎖性水域における水環境デジタルツインの実現:生態系モデルのデータ同化手法の確立と水質長期再解析データベースの開発

Project Title : Realization of a digital twin of water environment in closed water: Establishment of data assimilation method for ecosystem model and development of long-term water quality reanalysis database

研究代表者 : 松崎 義孝

研究代表機関 : 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

研究分担機関 : 電力中央研究所

キーワード : 流動生態系モデル、データ同化、伊勢湾、東京湾

注: 研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



環境研究総合推進費  
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人  
環境再生保全機構  
Environmental Restoration and Conservation Agency

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 .....	1
研究課題情報 .....	3
<基本情報> .....	3
<研究体制> .....	3
<研究経費の実績> .....	3
<研究の全体概要図> .....	4
1. 研究成果 .....	5
1. 1. 研究背景 .....	5
1. 2. 研究目的 .....	5
1. 3. 研究目標 .....	5
1. 4. 研究内容・研究結果 .....	6
1. 4. 1. 研究内容 .....	6
1. 4. 1. 1 データ同化システムの構築及び試計算 .....	6
(1) アンサンブルカルマンフィルタによる誤差共分散行列の算出、データ同化試計算 .....	6
(2) 4次元アンサンブル変分法によるデータ同化システムの構築 .....	7
1. 4. 1. 2. 現地調査による観測誤差の算定 .....	9
1. 4. 1. 3. データ同化による12年間の再解析データセットの作成 .....	10
(1) 伊勢湾（成果4） .....	10
(2) 東京湾 .....	14
1. 4. 2. 研究結果及び考察 .....	14
1. 4. 2. 1. データ同化システムの構築及び試計算 .....	14
(1) アンサンブルカルマンフィルタによる誤差共分散行列の算出、データ同化試計算 .....	14
(2) 4次元アンサンブル変分法によるデータ同化システムの構築 .....	15
1. 4. 2. 2. 現地調査による観測誤差の算定 .....	18
1. 4. 2. 3. データ同化による12年間の再解析データセットの作成 .....	22
(1) 伊勢湾（成果4） .....	22
(2) 東京湾 .....	25
1. 4. 3 本研究以外の参考文献 .....	26
1. 5. 研究成果及び自己評価 .....	27
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献 .....	27
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価 .....	28
1. 6. 研究成果発表状況の概要 .....	28
1. 6. 1. 研究成果発表の件数 .....	28
1. 6. 2. 主要な研究成果発表 .....	29
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動 .....	29
1. 7. 国際共同研究等の状況 .....	30
1. 8. 研究者略歴 .....	30
2. 研究成果発表の一覧 .....	32
(1) 産業財産権 .....	32
(2) 論文 .....	32
(3) 著書 .....	32
(4) 口頭発表・ポスター発表 .....	33
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施 .....	34
(6) マスメディア等への公表・報道等 .....	34
(7) 研究成果による受賞 .....	34
(8) その他の成果発表 .....	34
権利表示・義務記載 .....	35

Abstract

## 研究課題情報

&lt;基本情報&gt;

研究区分 :	革新型研究開発（若手枠）
研究実施期間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研究領域 :	統合領域
重点課題 :	【重点課題4】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用 【重点課題16】大気・水・土壤等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究
行政ニーズ :	（5-13）水環境改善に向けた底層溶存酸素量の効果的な運用に関する基礎研究
課題番号 :	1RF-2201
体系的番号 :	JPMEERF20221R01
研究課題名 :	閉鎖性水域における水環境デジタルツインの実現：生態系モデルのデータ同化手法の確立と水質長期再解析データベースの開発
研究代表者 :	松崎 義孝
研究代表機関 :	海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
研究分担機関 :	電力中央研究所
研究協力機関 :	

注：研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1 「閉鎖性水域における水環境デジタルツインの実現：生態系モデルのデータ同化手法の確立と水質長期再解析データベースの開発」

&lt;サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者&gt;

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	港湾空港技術研究所	海洋汚染防除研究グループ	グループ長	松崎義孝	
分担者	電力中央研究所	サステナブルシステム研究本部	主任研究員	岡田輝久	

注：研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

## &lt;研究経費の実績&gt;

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2022	4599000	1379000	5978000	

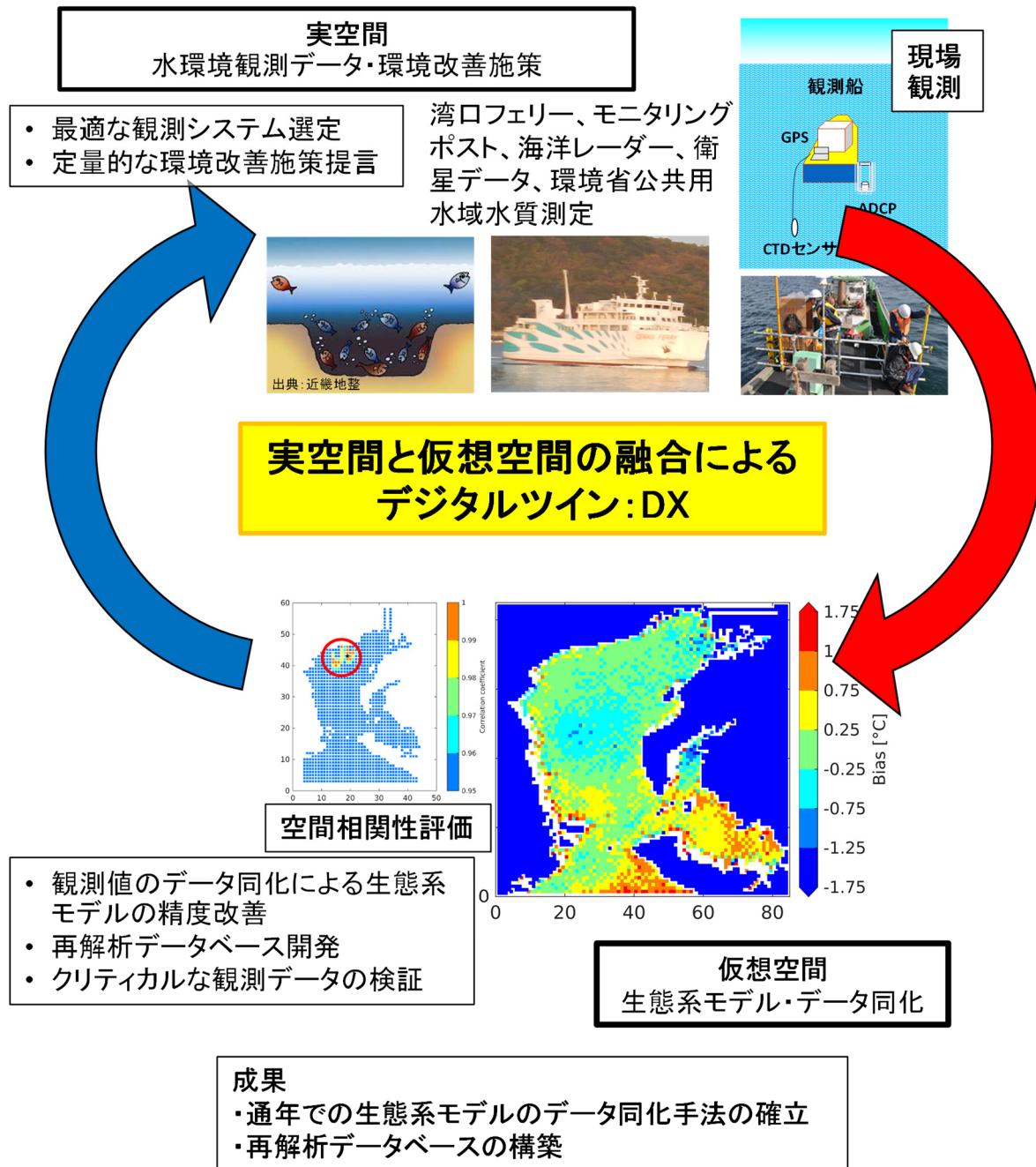
2023	4563000	1368000	5931000	
2024	4602000	1380000	5982000	
全期間	13764000	4127000	17891000	

注：環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

### ＜研究の全体概要図＞

研究課題名 閉鎖性水域における水環境デジタルツインの実現：生態系モデルのデータ同化手法の確立と  
水質長期再解析データベースの開発  
研究機関 港湾空港技術研究所、電力中央研究所

**目的：閉鎖性水域の水環境データ：実空間とシミュレーションモデル：仮想空間の  
融合によるデジタルツインの実現**



## 1. 研究成果

### 1. 1. 研究背景

高度経済成長に伴い閉鎖性内湾では赤潮や貧酸素水塊（青潮）などが発生し、漁業生産や生物の生息、水質、景観などの海域環境に大きな障害を及ぼしており(大島ら, 2005)、下水処理場の高度処理等の対策も進んだが十分な水質改善が見られず、水質汚濁の原因が不明なままである(国土交通省中部地方整備局, 2017)。健全で豊かな水環境の維持・回復は環境省の重点戦略に掲げられており(環境省, 2018)、水環境のモニタリング、あるいは数値シミュレーションモデル（以下、水圏生態系モデル）の開発による閉鎖性水域の水質汚染の原因や対策の検討が求められている。

しかしながら、水環境のモニタリングのみでは閉鎖性水域の時空間情報を網羅することができない。また、水圏生態系モデルのみによる閉鎖性水域の水質の正確な理解は、水圏生態系モデルの与条件を正確に与えられないため、困難である。これらの状況から飛躍的に研究を進めるには、DX（デジタルトランスフォーメーション）による閉鎖性水域の水環境の理解の革新が不可欠である。我々は水圏生態系モデルの精度をさらに改善するため、観測値を水圏生態系モデルに融合するデータ同化という手法を用いた研究を進めている(岡田ら, 2015)。また、我々は水圏生態系モデルのベースとなる水温や塩分といった物理量の数値シミュレーションモデル（物理モデル）のデータ同化研究についても進め(Matsuzaki and Inoue, 2022)、閉鎖性水域でデータ同化を実施する際の知見を得ている。そこで、データ同化を利用し、「水環境データ：実空間と水圏生態系モデル：仮想空間の融合」によるデジタルツインを実現させることを着想した。

ただし、閉鎖性水域の水環境データ同化研究が十分に進んでいないことから、データ同化を閉鎖性水域の水圏生態系モデルに適用するための定量的知見が不足している。特に、閉鎖性水域のデータ同化の与条件のうち、データ同化において最も重要な背景誤差共分散に着目する。背景誤差共分散とは、数値シミュレーションの各モデル定義点における誤差と、モデル定義点間の相関関係を表すものであり、数値シミュレーションのモデル定義点に比較してデータ数の少ない観測値を数値シミュレーションモデル全体にどのように取り込むかを決めるものである。

### 1. 2. 研究目的

本研究では、学術的に不明である水圏生態系モデルにおける閉鎖性水域の背景誤差共分散の適切な導出方法について検討し、水圏生態系モデルのデータ同化手法の確立を目指す。また、閉鎖性水域の解析を行うためのデータベースを作成し、デジタルツインを実現する。

### 1. 3. 研究目標

#### <全体の研究目標>

研究課題名	閉鎖性水域における水環境デジタルツインの実現：生態系モデルのデータ同化手法の確立と水質長期再解析データベースの開発
全体目標	伊勢湾と東京湾の水質汚染の原因や対策を検討することのできる、従来無かった12年間の湾全体の水質解析データ(再解析データベース)の作成を行う。データ同化を使用することで数値モデルのみでは成しえなかった精度（例えばRMSEで3割の改善）を目標とする。

#### <サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	閉鎖性水域における水環境デジタルツインの実現：生態系モデルのデータ同化手法の確立と水質長期再解析データベースの開発
サブテーマ1 実施機関	港湾空港技術研究所、電力中央研究所
サブテーマ1目標	伊勢湾と東京湾の水質汚染の原因や対策を検討することのできる、従来無かった12年間の湾全体の水質解析データ(再解析データベース)の作成を行う。データ同化を使用することで数値モデルのみでは成しえなかった精度（例えばRMSEで3割の改善）を目標とする。

## 1. 4. 研究内容・研究結果

## 1. 4. 1. 研究内容

大きく3つの研究内容を実施した。

- データ同化システムの構築及び試計算
- 現地調査による観測誤差の算定
- データ同化による12年間の再解析データセットの作成

それぞれの研究内容は以下の通りである。

## 1. 4. 1. 1 データ同化システムの構築及び試計算

本研究は2つのモデルで検討を進める。一つは港湾空港技術研究所で開発された流動生態系シミュレーションシステム、通称EcoPARI(Tanaka et al., 2011; Tanaka and Suzuki, 2010)と、それに実装したデータ同化モデルであるアンサンブルカルマンフィルタ(Evensen, 2003; Matsuzaki and Inoue, 2022)を用いて検討を行う。もう一つは世界的コミュニティモデルであるRegional Ocean Modeling System (Shchepetkin and McWilliams, 2005)と、それに我々が実装したデータ同化モデルである4次元アンサンブル変分法(Yokota et al., 2016; Zupanski, 2005)を用いる。

## (1) アンサンブルカルマンフィルタによる誤差共分散行列の算出、データ同化試計算

本研究では港湾空港技術研究所で開発してきたEcoPARIの物理モデルのデータ同化プログラムを改良し、アンサンブルカルマンフィルタという手法による水圏生態系モデルのデータ同化システムを新たに構築した。構築したデータ同化システムの動作確認を行うために、双子実験と呼ばれる数値実験を行った。数値実験は境界条件等が一部異なる2つの計算結果（双子）を用意し、一方のシミュレーション結果、もう一方を真値とする。真値から抽出した値を観測値としてシミュレーション結果に同化し、同化結果が真値に近づくかを確認することを双子実験という。本研究では図1の伊勢湾モデル地形において、表1の計算条件で数値実験を実施した。同化する観測値は図1に示す6つの観測点の水温とした。

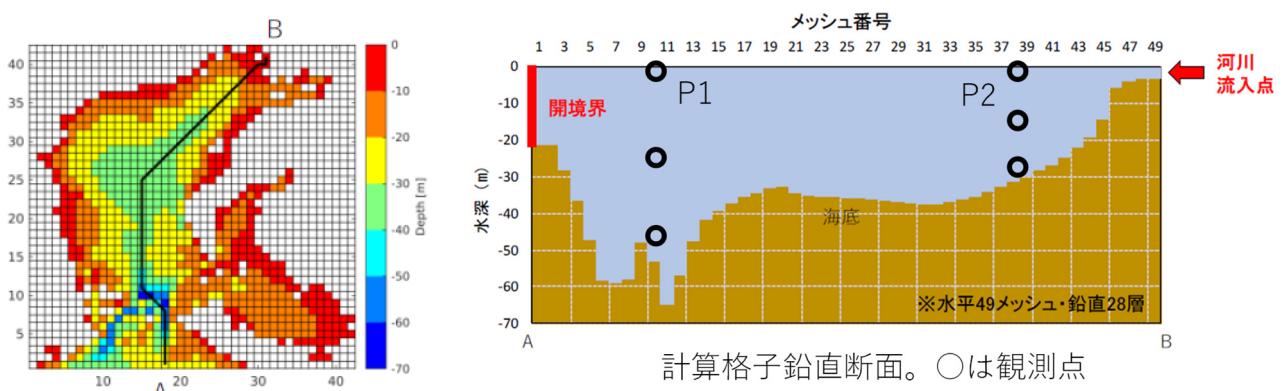


図1 左：伊勢湾の地形。色は水深を示し、寒色になるほど深い。右：伊勢湾湾口（図1左のA）と伊勢湾に注ぐ主要河川である木曽川の河口（図1左のB）の最も水深の深い位置をつないで（図1左のA—B線）作成した伊勢湾モデル地形。

表 1 双子実験の計算条件

計算条件	設定値
シミュレーションモデル	流動モデル+生態系モデル（浮遊系モデル、詳細底生系モデル）
地形	水平方向に 49 メッシュ (1600m 一様) 、 鉛直 28 層の鉛直 2 次元断面 -100.0 -70.0 -50.0 -41.0 -39.0 -37.0 -35.0 -33.0 -31.0 -29.0 -27.0 -25.0 -23.0 -21.0 -19.0 -17.0 -15.0 -13.0 -11.0 -9.0 - 7.0 -5.0 -4.0 -3.0 -2.0 -1.0 0.0 1.0 5.0
開境界潮位	鳥羽の調和定数 (M2 分潮) から推算した毎時潮位
開境界水質	鉛直方向一定 (夏季平均値を参考に設定) 水温 23°C、塩分 30psu 水質は、既往業務のデータを利用
河川条件	1 河川を設定、木曽川を想定 流量 527m <sup>3</sup> /s, 水温 24.9°C (一定) 水質は、既往業務のデータを利用
気象条件	気温 : 25°C, 風速 : 0m/s, 気圧 : 1010hPa 降水量 : 0mm/h, 水蒸気圧 : 24hPa 短波放射 200W/m <sup>2</sup> 、長波放射 410W/m <sup>2</sup>
計算期間	助走期間を 60 日間とし、最後の 24 時間を同化計算に使用

なお、本研究においては、EcoPARI（伊勢湾シミュレータ）への4次元アンサンブル変分法への実装の検討を計画していた。アンサンブルカルマンフィルタの優位点としてデータ同化システムで逐次、誤差共分散行列が算出されることが挙げられる。また、アンサンブルカルマンフィルタでは物理モデルでの通年のデータ同化に成功しており(Matsuzaki and Inoue, 2022)、堅牢性の高さが示されているため、水圏生態系モデルにおいても物理モデルで得られた知見を活かしながら検討を進めることができると期待される。

一方、4次元アンサンブル変分法は時間方向に連続的にデータを同化できるため、従来のデータ同化手法の欠点ともいえる観測値を同化する際の水圏生態系モデルの計算値に不連続が生じないという大きな利点がある。したがって、逐次データ同化の大きなデメリットは、変数の修正により物理化学生物量が保存されない点であり、この点が水圏生態系モデルの研究者からデータ同化が受け入れられにくい理由の一つである。そこで、保存性を確保できる電力中央研究所の開発した4次元アンサンブル変分法を港湾空港技術研究所のモデルであるEcoPARIに導入することを検討した。

## (2) 4次元アンサンブル変分法によるデータ同化システムの構築

本研究では、水質再解析データベースを構築する上で、以下の 4 つの観点に従って水質データ同化手法を開発した。それぞれの観点に沿って説明を加える。

- ・物質保存性の確保
- ・計算安定性の確保
- ・境界条件の非定常成分の推定
- ・水質モデルパラメータの推定

### ①物質保存性の確保

データ同化手法には、物質保存則を満たす解析結果が得られる、4次元アンサンブル変分法 4D-EnVar (Four Dimensional Ensemble Variational method (Yokota et al., 2016) ) を採用した。図 2 に解析アルゴリズムのフロー(岡田・入江, 2023)を示す。ただし、厳密には MLEF (Maximum Likelihood Ensemble Filter (Liu et al., 2008; Zupanski, 2005; Zupanski et al., 2008) ) を用いているが、同様の手法であり、本報告書では 4D-EnVar と呼称する。数式は上記文献を参照いただきたい。

表 2 には本手法の基本的な設定を示す。データ同化において、同化する前の水温や溶存酸素 (DO) などの計算値を背景値 (予測値、第一推定値)、同化後の計算値を解析値と呼び、それぞれの不確実性を背景誤差、解析誤差と呼ぶ。また、アンサンブル近似を用いる本手法では、背景値の誤差分布に従いサンプルリングしたものと背景アンサンブルと呼ぶ。さらに、境界条件や水質モデルパラメータなどを制御変数と呼び、観測データを用いて制御変数を最適なものに修正することで、解析値を得る。

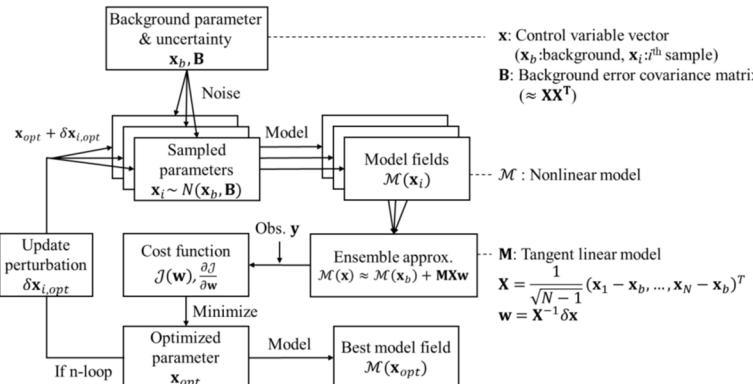


図 2 4次元アンサンブル変分法による解析アルゴリズムフロー (岡田・入江, 2023より引用)

表 2 データ同化手法の設定

項目	内容
制御変数	・側面境界: 水温・塩分・水質 ・河川境界: 流量・水温・水質 ・海面外力: 東西・南北風速 ・水質モデル内部パラメータ (N=23)
背景アンサンブル	・非定常条件: 周波数空間における摂動と実空間における摂動の組み合わせ ・定常条件: 正規分布に従う乱数を乗算
観測データ	国交省のモニタリングポスト ・項目: 水温、塩分、DO、クロロフィル a ・地点: 4 地点×3 層 (計 11 点)
観測誤差	水温: 0.45°C、塩分: 0.31、DO: 0.6 mg/L、Chl.a: 1.0 µg/L
観測データの品質管理	変分 QC (Quality Control)
同化手法	4次元アンサンブル変分法。ただし、厳密には MLEF
メンバー数	16

### ②計算安定性の確保

本手法では制御変数にばらつき（摂動）を与えて生成した背景アンサンブルから、背景誤差の共分散行列を近似し、観測データとの差を評価する評価関数、およびその傾きを計算する。その際、観測データと背景値があまりに離れていると評価関数が以上に大きくなり、計算が安定しないことが知られており、変分 QC (Variational Quality Control (Anderson and Järvinen, 1999)) による計算安定性の確保を導入している。具体的には、観測誤差標準偏差と背景誤差標準偏差を加えた値の 3 倍以上離れた観測データは、同化に用いない設定とした。

### ③境界条件の非定常成分の推定

背景アンサンブルを作成する際、境界条件などの制御変数をサンプリングするが、境界条件が時空間方向に相関する場合、個別かつ詳細に不確実性を見積ることは難しい。そこで、機械的に摂動を加えることで背景アンサンブルを生成することとなるが、時空間方向に対して一定値の加算や乗算では、得られる摂動も同じ一定値となる。一方で、完全にランダムな値では、隣り合わせの相関を表現できない。

そこで、元の時系列  $x_b$  の特徴を残しつつ、時間的に滑らかな変化を与えるため、フーリエ変換した周波数強度  $F(x_b)$  に摂動を与える、逆フーリエ変換  $F^{-1}$  で実空間  $x_b'$  に戻す（図 3）。

$$x_b' = F^{-1}\{F(x_b) \circ \alpha\}, \quad \alpha = \{\dots, \alpha_i, \dots\}, \quad \alpha_i \sim N(1, a)$$

これにより境界条件の非定常成分を含めた推定が可能となる。表 3 に各境界条件の摂動の与え方を示す。開境界の水温を例にすると、フーリエ変換後の周波数強度に対して平均 1、分散 1 の摂動を乗算し（これを「 $\times N(1,1)$ 」と表す）、実空間の値に対して平均 0°C、分散 0.45°C の摂動を加算した（同様に「 $+N(0,0.45)$ 」と表す）。また、空間的には開境界水温・塩分、河川水温、東西・南北風速についても一様とし、河川流量・水質については河川別に摂動を与えた。空間一様に摂動を与えることでも、実空間上では空間的に滑らかな摂動となる。

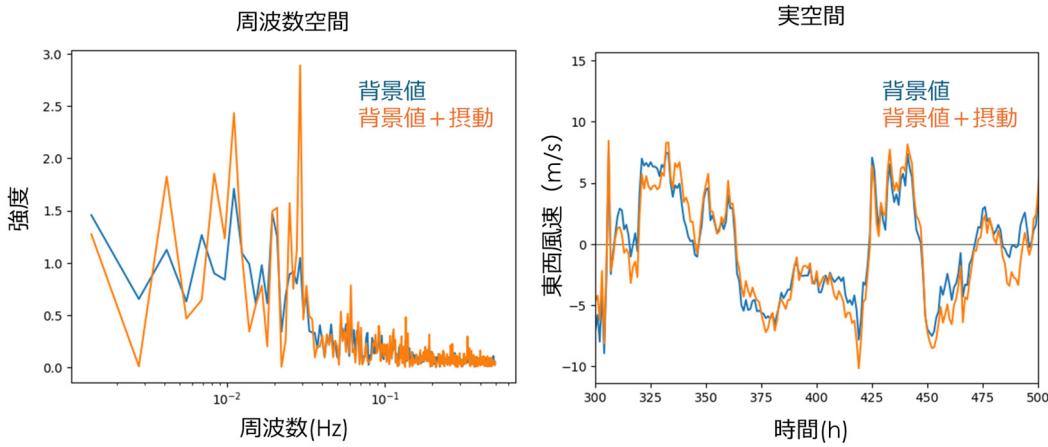


図 3 非定常境界条件に対する周波数空間での摂動の与え方の例

表 3 各境界条件の摂動の与え方

境界条件	周波数強度に対する摂動	周波数空間での摂動の与え方	実空間での摂動
境界水温 (時)	$\times N(1, 1)$	空間一様	$+ N(0, 0.45^\circ\text{C})$
境界塩分 (時)	$\times N(1, 1)$	空間一様	$+ N(0, 0.31)$
境界水質	-	-	$\times N(1, 0.2)$
河川流量 (時)	$\times N(1, 0.3)$	河川別	$\times N(1, 0.2)$
河川水温 (日)	$\times N(1, 1)$	空間一様	$+ N(0, 1.0^\circ\text{C})$
河川水質 (時)	$\times N(1, 0.3)$	河川別	$\times N(1, 0.2)$
東西風速 (時)	$\times N(1, 0.5)$	空間一様	$+ N(0, 1.0 \text{ m/s})$
南北風速 (時)	$\times N(1, 0.5)$	空間一様	$+ N(0, 1.0 \text{ m/s})$

#### ④水質モデルパラメータの推定

4D-EnVar では、制御変数に非定常な境界条件と定常的なモデルパラメータを共存させることができる。ただし、水質モデルパラメータはモデル各格子点で一様に与えられる一方で、境界条件はその影響が全域に広がるには時間がかかる。東京湾では数日に及ぶ赤潮発生が観測されることや、海水交換における 1 ヶ月間かかることなどから、一度の同化に使用する観測データの期間、同化ウィンドウ (Assimilation window) を 1 ヶ月として設定し、境界条件とモデルパラメータを同時に推定することとした。

東京湾を対象に上記手法を適用した。数値モデルには、領域海洋モデル ROMS に窒素・リン・酸素・硫黄循環モデルを結合したモデル(岡田・今村, 2019)を用いた。境界条件に用いたデータセットなどを表 4 に示す。解析対象とする計算期間を 2020 年 4 月 1 日から 30 日とし、その前 3 ヶ月間を助走計算期間とした。

表 4 数値モデルの概要

項目	内容
水平解像度	1°/240 (約 450m)
鉛直座標系	S 座標系 20 層
側面境界	JCOPE2M (水温・塩分・流速) TPX09 (潮位変動) 公共用水域水質調査 (水質)
海面外力	気象庁 MSM-GPV (風, 気温, 相対湿度, 海面気圧, 降水量, 雲量), 気象庁東京 (短波放射)
河川流入	水文水質データベース, HQ 式 + 降水量, LQ 式

#### 1. 4. 1. 2. 現地調査による観測誤差の算定

伊勢・三河湾および東京湾では、国交省が設置した観測塔 (モニタリングポスト) または灯浮標 (ブイ) に取り付けられた自動昇降式水質計により、水温・塩分・クロロフィル a・溶存酸素 (DO) などの定点連続観測が実施されている。本研究では、この連続観測されたデータを同化に用いて長期再解析データベースの作成を試みる。そのためには各観測項目における観測誤差を知る必要があるものの、定量化された誤差情報は公開されていない。そのため、三河湾のモニタリングブイ 3 基を対象に、観測値に含まれる誤差の算定を

行った。

現地調査は三河湾内の10測点（図4、S01～S10）を対象とし、10測点のうち、S06、S08、S03はモニタリングブイ（Buoy-1、2、3）と同じ地点とした。その他の測点は、公共用水域水質調査地点や浅海定線調査地点を参考に設定した。調査時期はクロロフィルaやDOの空間的な変動幅が大きいと考えられる夏季（①2023年6月20日、および②2023年7月25日）に実施した。

調査では多項目水質計（JFE Advantec社製AAQ-RINKO 177、以下AAQ）を調査船より垂下（図5）し、水温・塩分・クロロフィルa・DOの鉛直分布を測定するとともに、深度計付きバンドーン型採水器により採水した海水を実験室に持ち帰り、連続流れ分析法によって全窒素・全リン、全溶存態窒素・全溶存態リン、無機態窒素3態・リン酸態リンを分析した。

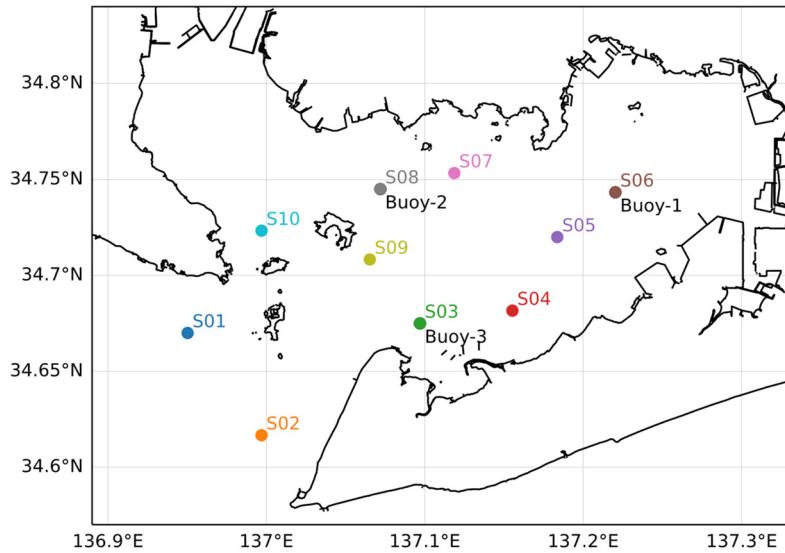


図4 伊勢湾西部三河湾における観測実施地点。

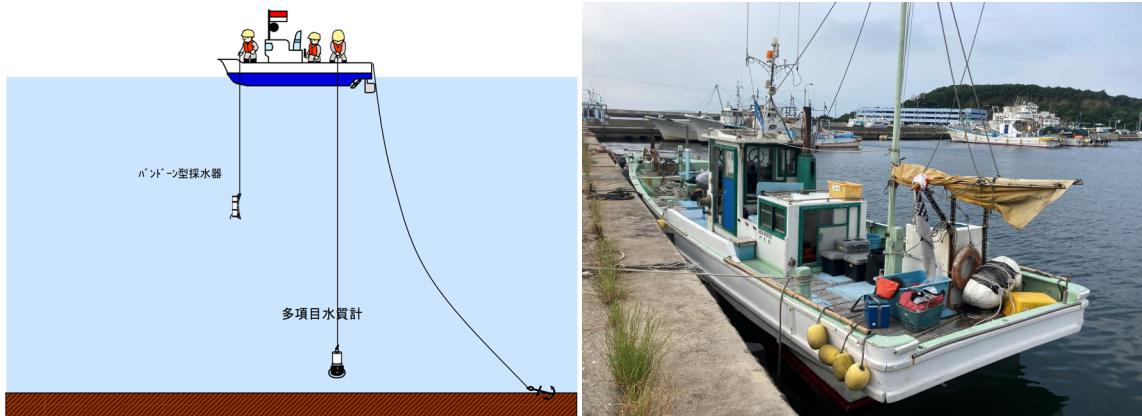


図5 調査方法および使用船舶

#### 1. 4. 1. 3. データ同化による12年間の再解析データセットの作成

##### (1) 伊勢湾（成果4）

著者らの研究グループにおいては流動生態系シミュレーションシステムEcoPARI(Matsuzaki et al., 2024; 田中 et al., 2011; 田中・鈴木, 2010)をベースに、伊勢湾を対象としたデータ同化システムEcoPARI-Data Assimilation(Matsuzaki and Inoue, 2022; 松崎・井上, 2022, 2020)を開発しており、沿岸・河口域における物理量（水温、塩分、流向流速、水位）に関する解析データベースの作成に必要な知見が蓄積されてきた。そこで、本研究では、研究の第1弾として、EcoPARI-Data Assimilationを用いて伊勢湾の解析を行うための物理量の解析データベースを作成する（成果）

##### ① 流動モデル

流動モデルは既往研究(Matsuzaki and Inoue, 2022; Matsuzaki and Kubota, 2024; 松崎・井上, 2022)と同様に設定されている。数値シミュレーションは、非静水圧モデルであるEcoPARI-Simulator(田中・鈴木, 2010)を用いて行われた。流動モデルは伊勢湾の全域（広義の伊勢湾；図-6、表面積：2,342 km<sup>2</sup>、平均深さ：17 m、体

積： $3.94 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ）をカバーするように構成された。湾は緯度・経度方向の両方で約70 kmの長さで、2つに分かれている。西側（狭義の伊勢湾）の表面積は $1,738 \text{ km}^2$ 、平均水深は20 m、体積は $3.39 \times 10^{10} \text{ m}^3$ である。湾の中央の水深は約35 mで、湾口の最大水深は100 mである。東側の三河湾は、表面積、平均水深、体積はそれぞれ $604 \text{ km}^2$ 、9 m、 $5.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ である。最大水深は約35 mであり、ほとんどの水深は20 m未満である（図-6）。側方境界は太平洋に接している。年間河川流量（約 $2.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ）は伊勢湾の体積の約半分である。伊勢湾には、一級水系10河川と、中小河川の91河川が流入している。三大河川である木曽川、長良川、揖斐川が最も流量が多く、これら3つの河川は湾奥から流れ込んでいる（図-6）。伊勢湾の西側に8つの一級河川が流入し、三河湾に2つの一級河川が流入している。したがって、河川数及び淡水流入量は狭義の伊勢湾に偏っている。伊勢湾の特徴的な風のパターンは2種類ある。秋から春にかけては北西からの季節風が卓越し、夏には日中は南東から、夜間は北西からの海陸風が卓越する（Sekine et al., 2002）。水深が比較的浅いため、風によって貧酸素水塊が湧昇する等の問題が生じる。

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-6）。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 $85 \times 85$ 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。水平乱流モデルにはsubgrid-scaleモデル（Smagorinsky, 1963）を使用した。垂直乱流モデルには、Henderson-Sellersモデル（Henderson-Sellers, 1985）から修正されたNakamura and Hayakawaモデル（Nakamura and Hayakawa, 1991）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（Orlanski, 1976）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（A4）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。

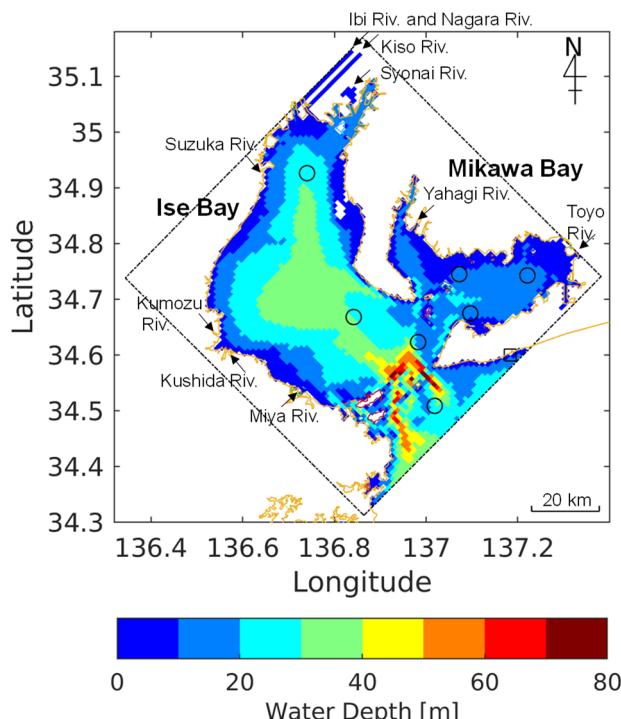


図-6 検討対象である伊勢湾。破線はモデル設定領域を示している。円はデータ同化及び精度検証に用いたモニタリングポスト地点（詳細な地点情報は表-6参照）。四角は側方潮位境界条件に使用した赤羽根観測点。矢印は10の一級河川の流入位置と流入方向を示す。

## ③ データ同化システム

EcoPARI-Data AssimilationはEvensen(Evensen, 2003)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 $x^a$  (data assimilation results) は、ある時間 $t$ で、式(1)に示すように、背景値 $x^f$ と観測値 $y$ の最適な加重平均によって取得される。

$$x_t^a = x_t^f + K_t (y_t - H_t x_t^f) \quad (1)$$

ここで、 $x$ 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、 $y$ 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、 $H$ 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、 $K$ 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。 $K$ は次のように計算される。

$$K_t = P_t^f H_t^T (R_t + H_t P_t^f H_t^T)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 $P$ は背景誤差共分散行列、 $R$ 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 $P$ と $R$ 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 $P$ によって決定されることを示している(水口 et al., 2025)。

背景誤差共分散行列はアンサンブルから推定される。

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

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

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。

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

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

ここで、 $r$ 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。

$$x_t^{a(l)} = x_t^{f(l)} + \bar{K}_t (y_t + r_t^{(l)} - H_t x_t^{f(l)}) \quad (l = 1, \dots, L) \quad (8)$$

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

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

#### ④ 境界条件に摂動を付加する方法

アンサンブル計算の摂動生成方法及びその大きさは既往研究(Matsuzaki and Inoue, 2022)に準じて式(10)あるいは(11)の方法で設定した。

$$F_{mem} = F_{base} + \nu \quad (10)$$

$$F_{mem} = (1 + \nu) F_{base} \quad (11)$$

ここで、 $F_{mem}$ は摂動を伴うデータ同化の境界条件、 $F_{base}$ は数値シミュレーションの境界条件、 $\nu$ は平均がゼロで分散が $\zeta^2$ の正規分布を持つ摂動を示す。本研究の対象とするモデル出力(数値シミュレーション結果及びデータ同化結果と定義)は水温と塩分である。水温と塩分のシミュレーション誤差に大きな影響を与えると考えられる境界条件は、大気境界条件の摂動は気温と風速、側方境界条件の摂動は水温と塩分、河川境界条件の摂動は河川流量と河川水温と仮定した。

アンサンブルを作成するための摂動の大きさ $\zeta$ は境界条件の精度と相關すると考えられるため、境界条件の生成方法を考慮して決定する必要がある。本研究では、計算されたすべての誤差分布が正規分布に従うとし、 $\zeta$ の値を試行ベースで計算した。 $\zeta$ の値は表-5に要約される。境界条件同士の意図しない相関を回避するために、Fisher-Yatesシャッフル(Fisher and Yates, 1948)を使用して10,000回の置換を試行し、相関が最も低い組み合わせを使用して各アンサンブルメンバーに境界条件を設定した。

表-5 境界条件に付加する摂動

境界条件	要素	方法	$\zeta$
大気境界条件	気温	式 (10)	1.54 °C
	風速	式 (11)	0.34
側方境界条件	水温	式 (10)	2.16 °C
	塩分	式 (10)	0.48
河川境界条件	流量	式 (11)	0.36
	水温	式 (10)	2.01 °C

## ⑤ 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<sup>注3)</sup>の水温と塩分の観測値を使用した（表-6）。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葉24時間平均値ではない）。観測誤差の分散は既往研究(Matsuzaki and Inoue, 2022)に基づき水温は(1.0°C)<sup>2</sup>、塩分は(1.0)<sup>2</sup>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(松崎・井上, 2020)）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(Matsuzaki and Inoue, 2022)）を適用した。

表-6 同化した観測地点

No. 地点名	緯度 (°N)	経度 (°E)	観測方式	同化水深
A1 伊勢湾奥	34.926	136.741	昇降式	水表面から 1.0 m毎
A2 伊勢湾央	34.669	136.841	昇降式	水表面から 1.0 m毎
A3 中山水道	34.623	136.982	固定式	L.W.L.から1.4 m, 8.2 m, 12.4 m
A4 伊勢湾口	34.509	137.018	固定式	L.W.L.から1.0 m, 11.8 m, 23.2 m
A5 三河湾1号	34.743	137.220	昇降式	水表面から 1.0 m毎
A6 三河湾2号	34.745	137.072	昇降式	水表面から 1.0 m毎
A7 三河湾3号	34.675	137.097	昇降式	水表面から 1.0 m毎

## ⑥ 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。

## ⑦ 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-6）で観測された水温と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：

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i) \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2} \quad (13)$$

$$CRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o})]^2} \quad (14)$$

$$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2}} \quad (15)$$

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。

本研究の目標としていた「データ同化を使用することで数値モデルのみでは成しえなかった精度（例えばRMSEで3割の改善）」を目標とする。」の達成度を示すために、RMSE改善率[%]を式(16)で算出した。

$$RMSE\text{改善率} = \frac{RMSE_{sim} - RMSE_{DA}}{RMSE_{sim}} \times 100 \quad (16)$$

ここで、 $RMSE_{sim}$ は通常のシミュレーション結果のRMSE、 $RMSE_{DA}$ はデータ同化結果のRMSEを示す。

## (2) 東京湾

表7に本研究で作成した東京湾水質再解析データベースの仕様を示す。本データベースでは貧酸素水塊の形成や赤潮の発生時期に解析期間を絞り、2020年4月から10月に限定して作成を行った。同化ウィンドウは1ヶ月であり、例えば4月末の解析値を引き継いで5月の初期値とした予測を実施することとなる。初期値以外の側面境界、河川境界、海面外力は、もともと用意された背景値そのままであり、各アンサンブルメンバーで前月の結果を引き継ぐのは水質モデルパラメータだけとした。また、計算資源の制限からアンサンブルメンバー数を16とした。

表7 東京湾水質再解析データベースの仕様

項目	仕様
数値モデル	流動：ROMS Ver.3.7、水質：窒素リン酸素硫黄循環モデル（岡田・今村 2019） 水平解像度：約450m (1°/240)、鉛直座標系：s座標系 (20層)
同化手法	4次元アンサンブル変分法（岡田・入江 2023）
制御変数	1. 河川境界（流量・水温・水質） 2. 側面境界（水温・塩分・水質） 3. 海面外力（東西・南北風速）（※初期修正なし） 4. 水質モデル内部パラメータ (N=23)
同化ウィンドウ	1ヶ月
期間	2020年4月～10月
同化する観測データ	・モニタリングポスト4点×3層 (水温・塩分・DO・Chl.a)
アンサンブルメンバー数	16
出力解像度	日平均

### 1.4.2. 研究結果及び考察

#### 1.4.2.1. データ同化システムの構築及び試計算

(1) アンサンブルカルマンフィルタによる誤差共分散行列の算出、データ同化試計算

##### 【結果】

図7上段は底層溶存酸素の数値実験結果であり、数値シミュレーション結果（赤線）は観測値（黒丸）よりも高い値を示しているが、データ同化の結果（青線）、真値に近づいていることが確認できた。また、図7中段と下段はリンと窒素の数値実験結果であり、こちらのデータ同化で精度が改善していることが確認された。

##### 【考察】

観測水温を同化しており、溶存酸素・リン・窒素の観測値を同化していないにもかかわらず、データ同化によって精度が改善したのは、水温と溶存酸素・リン・窒素の相関関係から修正されたことによる。相関関係とはアンサンブルカルマンフィルタで求めた背景誤差共分散のことであり、数値上ではあるものの、データ同化によって適切に修正が可能であることが確認され、今回新たに開発した水圈生態系モデルのデータ同

化システムの妥当性が確認されたと考える。ただし、これは双子実験によるものであり、現実の観測値を使用した現実の伊勢湾のデータ同化を実施し、データ同化システムの妥当性の検証が必要であるため、引き続き検討を進める。

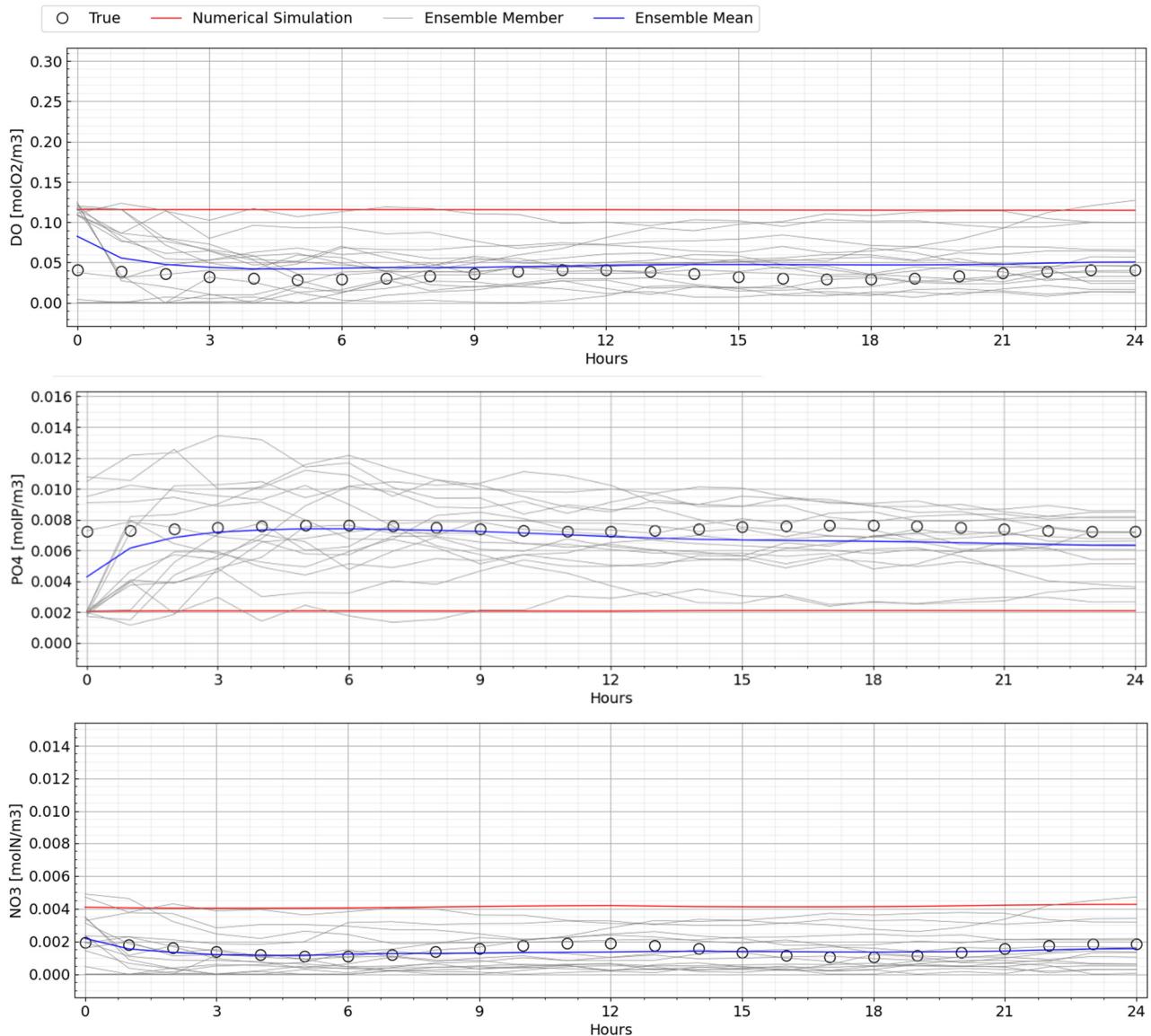


図 7 数値実験（双子実験）における真値（黒丸）、シミュレーション結果（赤線）、データ同化結果（青線）の時系列図。灰色線はアンサンブルメンバー。場所は図 1に示すP2の下層である。上段：溶存酸素、中段：リン、下段：窒素。

## (2) 4次元アンサンブル変分法によるデータ同化システムの構築 【結果】

図 8 および図 9 に表層水温および底層 DO の月平均分布の背景値、解析値およびその差分（解析値－背景値）を示す。表層水温（および図には示していないが表層の塩分や PO<sub>4</sub>-P などの栄養塩）は主要河川の河口が集中する東京港での変化が大きい一方で、底層 DO（および図には示していない底層の PO<sub>4</sub>-P などの栄養塩）は湾奥部や沿岸部の広域で変化が現れることがわかる。

各変数のRMSEを算出すると、水温0.44°Cが0.50°Cに、塩分0.88が1.00に、DO 1.58 mg/Lが1.38 mg/Lに、クロロフィルa 9.70 µg/Lが8.07 µg/Lに変化した。物理場に対して水質場の背景誤差が大きいため、水質場の修正効果が主になっており、物理場のスコアが低下している。このことについて以下で考察する。

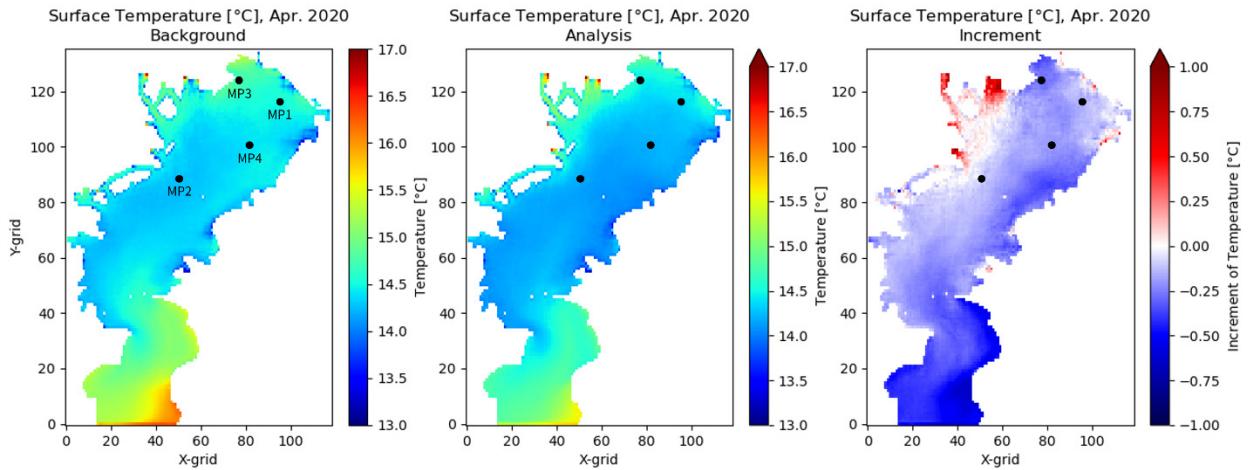


図 8 表層水温[°C]の月平均表層分布、左から背景値、解析値、その差分（解析値—背景値）。

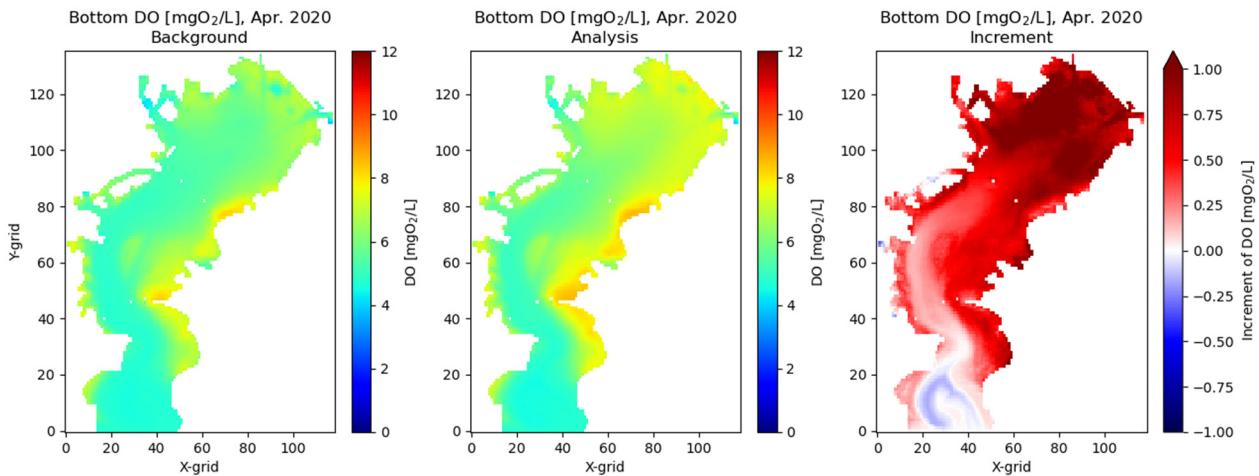


図 9 図 8と同様。ただし、底層DO [mg/L]

### 【考察】

#### ①アンサンブルメンバー数

生成する背景アンサンブルの数をアンサンブルメンバー数  $N_{ens}$  と呼ぶ。 $N_{ens}$  が少ないと、独立を仮定している制御変数にも疑似的な相関が生じてしまう。図 10 には、乱数生成したパラメータ同士の相関係数を 1 万回繰り返し求めた場合における、相関係数の最大値・平均値と  $N_{ens}$  の関係を示す。試計算で行った  $N_{ens}=16$  の場合、最大で相関係数 0.7 の共分散が生じるが、 $N_{ens}=32$  では最大でも 0.5 となる。ただし、相関係数の平均で評価した場合は、 $N_{ens}=16$  でも相関係数 0.2 程度である。将来的には 32 以上の  $N_{ens}$  が望ましいが、本研究では計算コスト等の理由から  $N_{ens}=16$  で再解析データベースを構築することとした。

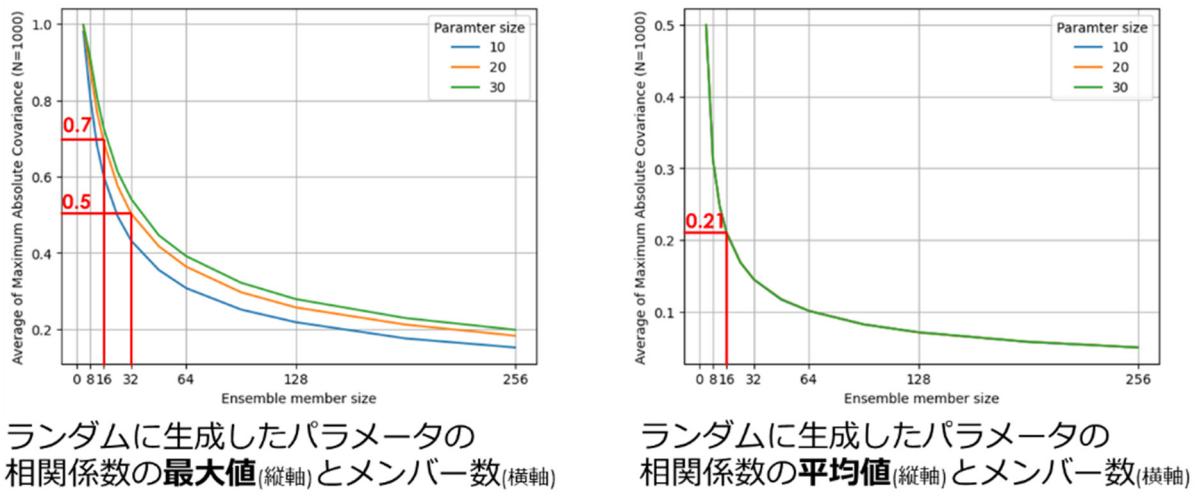


図 10 ランダムに生成したパラメータの相関係数とメンバー数の関係

## ②観測変数の評価関数への寄与度

図 11 に各観測変数の評価関数(観測誤差項)への寄与の内訳を示す。評価関数の観測誤差項とは、観測値への近さを無次元化して表現されたものである。青色で示す背景値のうち、特にクロロフィル a の値が大きかったが、赤色の解析値において小さくなっていることがわかる。クロロフィル a の観測誤差項が相対的に大きいことは、背景値と観測値の差が大きいことを意味する。図 12 には湾奥部のクロロフィル a の時系列データを示す。特に底層の差が大きく、変動も大きいことがわかる。

変分法では評価関数の傾きを利用して、最適化計算を進める性質上、評価関数の値が大きいほど強い修正が起きやすく、相対的に値が小さい場合はほとんど重視されず、場合によっては悪化してしまう。今回のケースでも、クロロフィル a の評価関数を下げる強い修正のために、水温や塩分の RMSE が増加してしまったと考えられる。

この対策として考えられるのは、クロロフィル a の値が大きい際は観測誤差も大きくなるように可変の観測誤差を導入する。あるいは、クロロフィル a を対数変換した変数を同化する。などが考えられ、今後の課題とする。

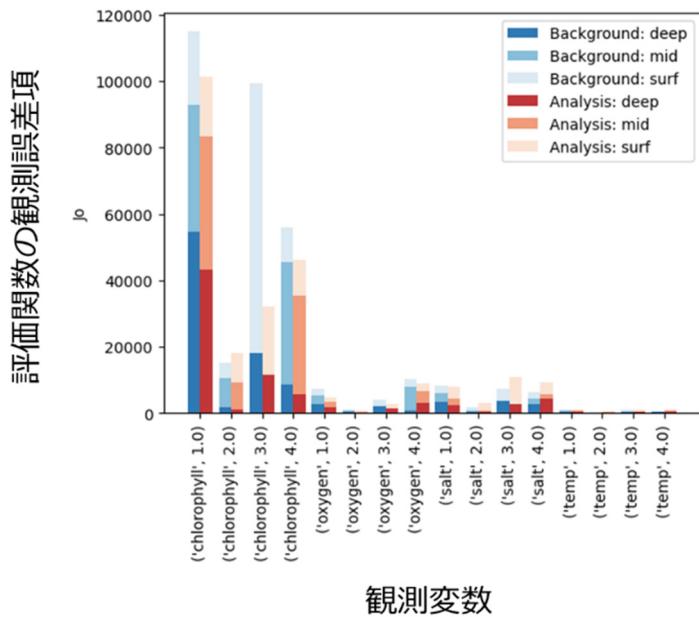


図 11 各観測変数の評価関数への寄与度

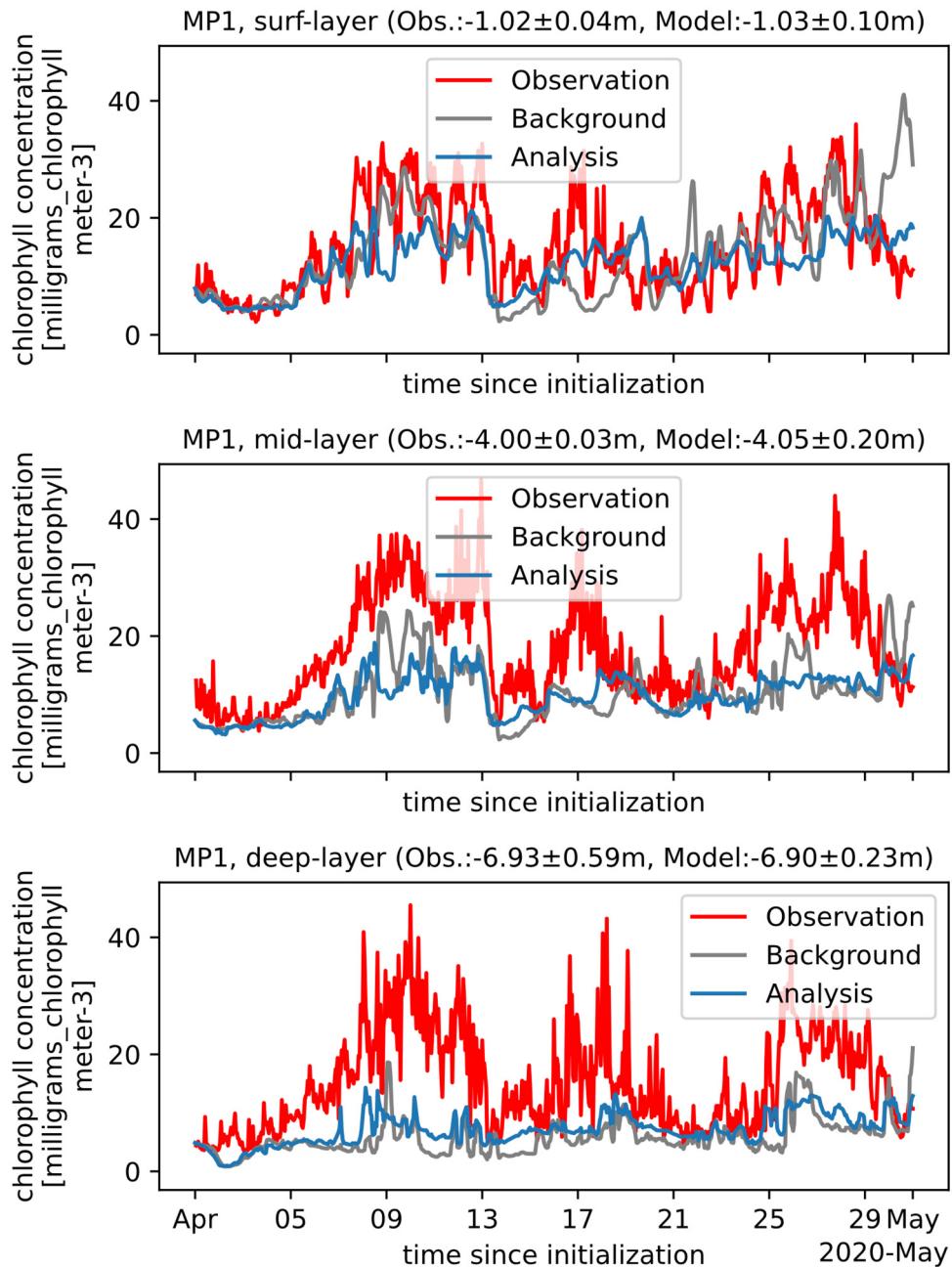


図 12 湾奥部のクロロフィルaの時系列。赤線は観測値、灰線は背景値、青線は解析値。上から表層（水深約1 m）、中層（約4 m）、底層（約7 m）

#### 1. 4. 2. 2. 現地調査による観測誤差の算定

##### 【結果】

図 13 に各調査当日を含む前 2 週間の気象条件および河川流量を示す。前 1 週間はどちらも降水や出水はなかったこと、① 6 月 20 日調査については、6 月 9 日にピーク流量  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  に達する出水があったことが確認できる。

図 14 に① 6 月調査、図 15 に② 7 月調査で得られた水温、塩分、クロロフィル a、および DO の鉛直分布を示す。6 月は全域の表層塩分が 7 月に比べて低く、混合層も厚いことがわかる。さらに湾奥の S06、S05 では表層クロロフィル a が高く、表層塩分は他の地点に比べて低い傾向があることから、湾奥部では陸域からの淡水流入の影響が大きいと考えられる。一方、7 月の表層塩分は測点による差が小さい傾向にあり、表層水温が高いところでは約  $30^\circ\text{C}$  に達し、水温躍層が強い傾向であった。

また、6 月の渥美半島側の測点 S03 や S04 では、混合層直下の水深  $4 \sim 6 \text{ m}$  付近でクロロフィル a 濃度が最大となり、表層はより濃度が低い特徴的な鉛直分布が得られた。このとき表層塩分は比較的高く、表層 DIN

は0.05 mg/L以下、PO<sub>4</sub>-Pは0.005 mg/L以下の枯渇状態であった。同様に、7月はすべての測点で表層のクロロフィルa濃度が低く、複数の測点で水面下4m以深の中間層で最大となる鉛直分布が得られ、表層の栄養塩も枯渇状態であった。このことから、淡水供給が少ない場合（6月の湾奥以外や7月の全域）に、表層の栄養塩が枯渇した状態が継続し、混合層直下の中間層に植物プランクトンの増殖に適した層が現れた結果、この特徴的な鉛直分布となったと考えられる。

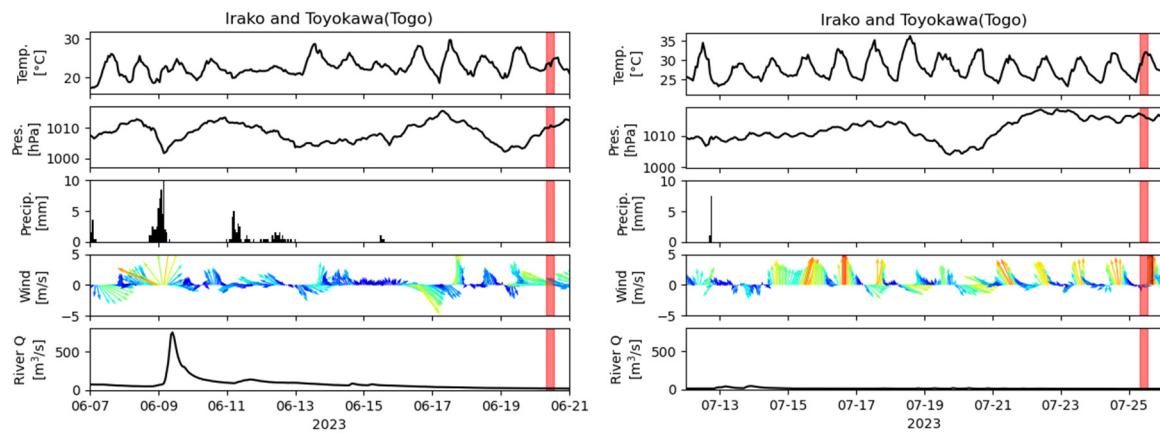


図 13 調査日を含む前2週間の気象条件（伊良湖）および河川流量（豊川）。上から気温 [°C]、気圧 [hPa]、降水量 [mm]、風ベクトル [m/s]、および河川流量 [m<sup>3</sup>/s]。左図は①2023年6月、右図は②2023年7月、赤網掛けは調査期間を表す。

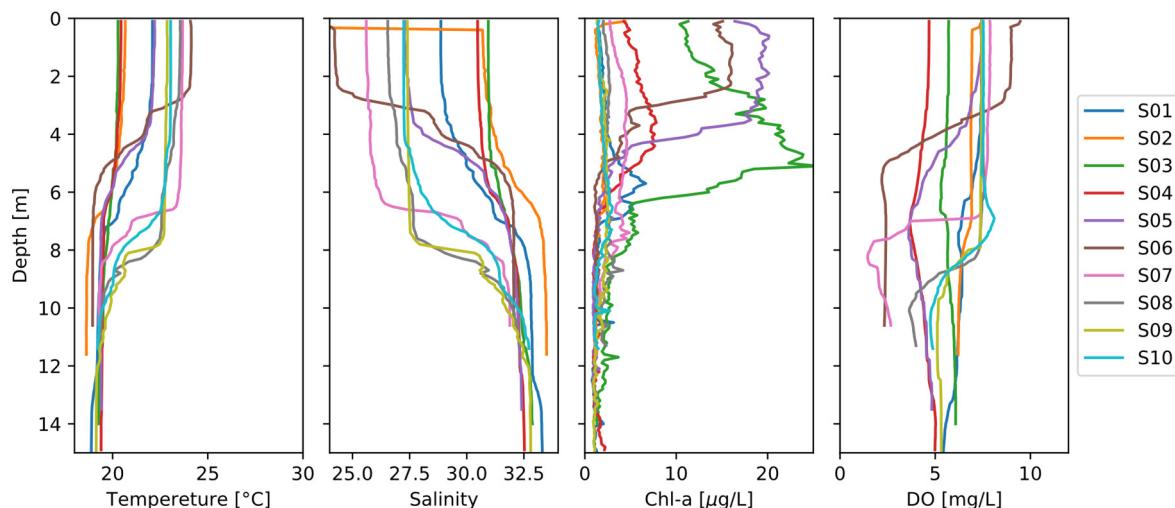


図 14 ①2023年6月の水質鉛直分布。左から、水温 [°C]、塩分、クロロフィルa [µg/L]、DO [mg/L]。

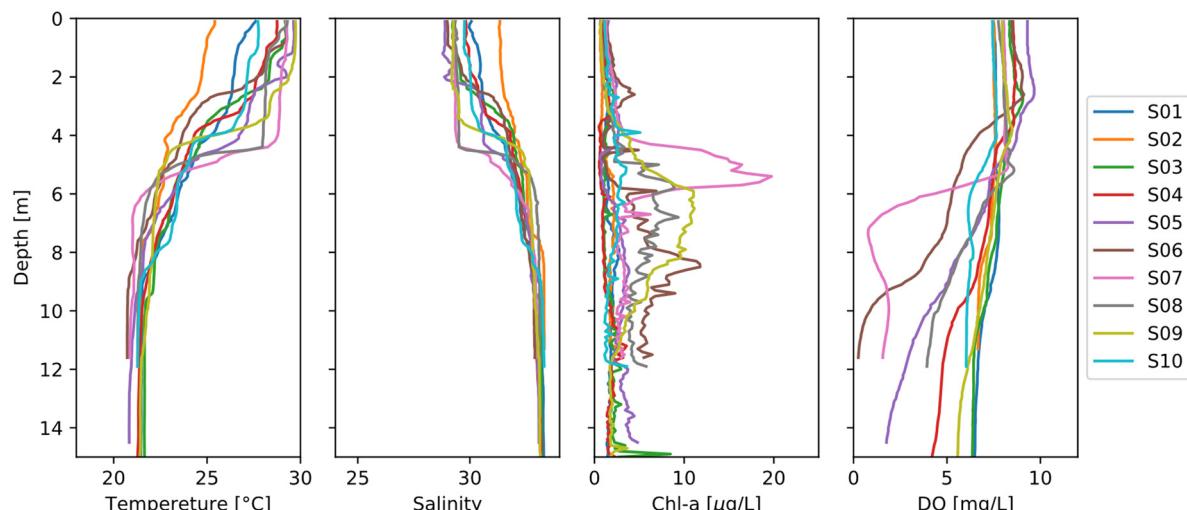


図 15 図 14と同じ。ただし②2023年7月。

観測誤差には、主に偶然誤差、系統誤差、代表性誤差の3つが含まれる。偶然誤差は観測者の違いや測定機器のばらつきなどにより、測定のたびにばらつく誤差で、一般に無相関で平均ゼロのランダムな誤差として扱われる。系統誤差は観測機器の較正ミスや観測の原理・手法に由来する一方向の偏りであり、空間的・時間的に相関を持つことが多いため、補正が必要となる。代表性誤差は観測の空間・時間スケールと、数値モデルの解像度の違いにより生じ、点観測と格子平均の不一致による誤差である。

これらの誤差を適切に理解し、観測誤差共分散行列に反映させることができ、精度の高いデータ同化を行う上で重要である。一般的には、系統誤差は事前に補正し、代表性誤差は高密度な観測の場合に間引くことで、共分散を事前に取り除き、ランダムな偶然誤差のみを仮定する場合が多い。しかし、実際の観測データには系統誤差や代表性誤差も含まれるため、複数回の観測などにより定量化する必要がある。そこで、本観測では2台のAAQによる比較とブイ観測値との比較を実施した。用いた測器は調査委託先所有のAAQ（以下AAQ(Idea)）と著者ら所有のAAQ（以下AAQ(PARI)）である。

各データ間の統計的な比較のために、RMSD（差分の二乗平均平方根）、Bias（系統的な差分、ただしAAQ(PARI)-AAQ(Idea)）およびCC（相関係数）を用いて評価する。表8は2台のAAQによる測定データ間の統計値、表9はAAQによる測定データとブイデータ間の統計値をそれぞれ示す。どの項目も系統的な差分は小さく、相関係数も高いことがわかる。また、各統計値の全体的な傾向として、船上観測とブイデータのRMSD（表9）はAAQの測器間誤差（表8）よりも大きい。2台のAAQはほぼ同時刻・同地点で測定したため、RMSDには主に偶然誤差が現れている一方で、船上観測とブイ観測では測器間の偶然誤差に加え、観測時刻や観測位置のわずかな違いが含まれており、同化に使うブイデータについての現実的な観測誤差により近いものと考えられる。

表8 2台のAAQによる測定データ間の統計値

Variable	RMSD <sup>*1</sup>	Bias <sup>*2</sup>	CC <sup>*3</sup>
Temperature [°C]	0.31	-0.04	0.994
Salinity	0.23	0.08	0.995
Chlorophyll-a [μg/L]	0.64	-0.08	0.986
DO [mg/L]	0.34	-0.15	0.987

\*1 両者の差の二乗平均平方根

\*2 両者の系統差（港湾空港技術研究所所有のAAQ-いであ所有のAAQ）

\*3 両者の相関係数

表9 AAQによる測定データとブイデータ間の統計値

Variable	RMSD		Bias		CC	
	Idea <sup>*1</sup>	PARI <sup>*2</sup>	Idea	PARI	Idea	PARI
Temperature [°C]	0.43	0.45	0.05	-0.02	0.990	0.990
Salinity	0.66	0.31	-0.13	-0.07	0.970	0.993
Chlorophyll-a [μg/L]	1.12	1.00	-0.06	-0.15	0.947	0.962
DO [mg/L]	0.40	0.60	-0.06	-0.15	0.985	0.975

\*1 いであ所有のAAQによる現地観測データを採用した場合

\*2 港湾空港技術研究所所有のAAQによる現地観測データを採用した場合

### 【考察】

船舶観測とブイ観測データの違いから観測誤差を評価し、両データの相関は十分高いことを確認した。一方で、差が大きくなるのは密度躍層付近であると考えられる。1時間ごとに測定されるブイのDOデータに着目すると、躍層位置は1時間で0.5~1m程度変化しており、AAQの測定時刻と近いブイの測定データの方がAAQ測定データに近い。これらは測定時刻の差に起因する潮位変化の影響と、移流により水塊が水平移動している影響が反映されていると考えられ、測定時刻のずれは時間と空間両方の代表性誤差に影響することが分かる。

同様に、船舶とブイの水平方向の違いによる測定値のズレについて確認する。表10に緯度経度情報を元にして算出した船舶調査地点とブイ地点との離隔距離を示す。ただし、船舶調査地点は調査時に測定したGPS情報をもとにした一方で、ブイの緯度経度は公開されている定点情報であり、調査当日のブイの水平移動は考慮できていない。また、図16に各測点における船舶から見たブイの様子を示す。

離隔距離を算出したところ、2点間の距離は470~630m程度離れていた。本研究で用いた東京湾モデルの解像度は450mであり、1メッシュ分程度である。また、ブイの写真から判断すると表10の数字は過大評価

の可能性も十分にあることから、位置ずれの観測誤差に対する寄与は小さいと判断した。

表 10 船舶調査地点とブイ地点との離隔距離[m]

	1号ブイ (S06)	2号ブイ (S08)	3号ブイ (S03)
① 6月20日調査	484	584	633
② 7月25日調査	470	566	630

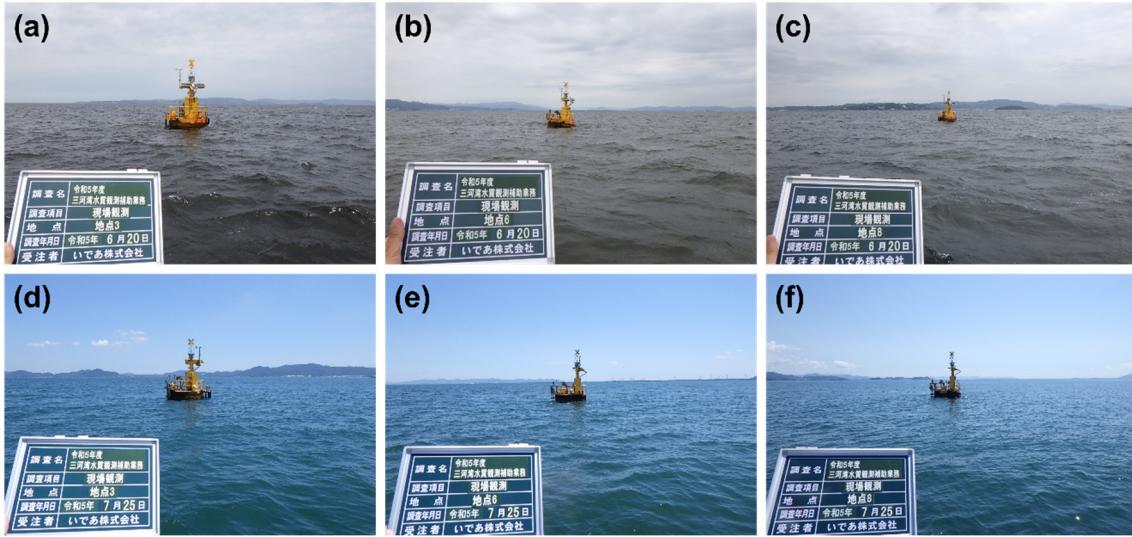


図 16 各測点において船舶から撮影されたブイの写真。(a)～(c) は6月20日、(d)～(f) は7月25日の調査時に撮影されたものである。(a), (d) は3号ブイ、(b), (e) は1号ブイ、(c), (f) は2号ブイをそれぞれ示している。

## 1. 4. 2. 3. データ同化による12年間の再解析データセットの作成

## (1) 伊勢湾 (成果4)

## 【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) における水温と塩分 (図-17) 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及び塩分の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-18) 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年を境に表層水温の精度度合が異なる。

12年間の統計値 (表-11) 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と数値シミュレーション結果のRMSE (図-19) 及びbias (図-20) 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が改善していると言える。

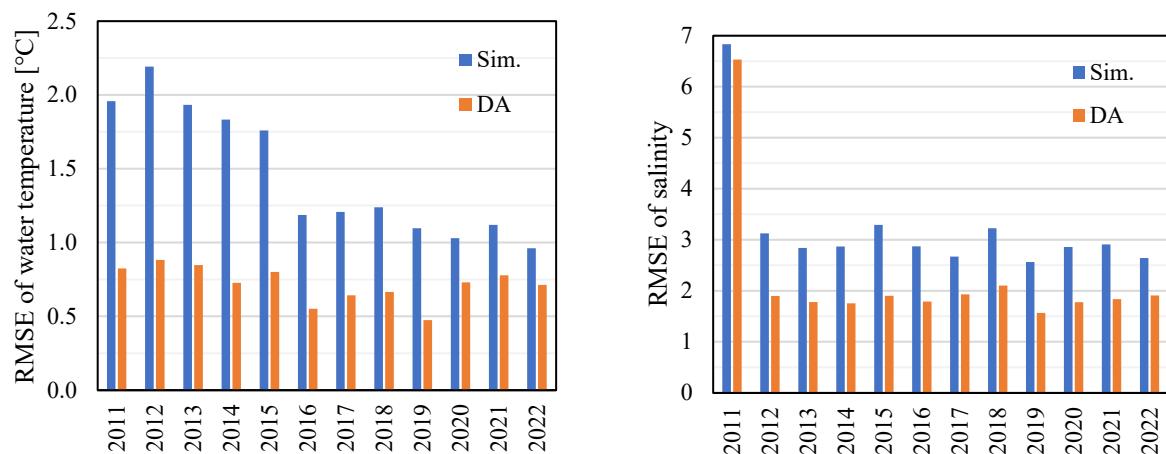


図-17 地点A1における水温 (左側) と塩分 (右側) の数値シミュレーション結果(Sim.)とデータ同化結果(DA) の各年の水深1 m におけるRMSE。

表-11 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、通常シミュレーション結果のRMSE、及びRMSE改善率

	No.	bias	RMSE	CRMSE	CC	RMSE <sub>sim</sub>	RMSE改善率[%]
水温	A1	0.40	0.72	0.58	1.00	1.46	51
	A2	0.25	0.52	0.45	1.00	1.18	56
	A3	0.07	0.59	0.57	0.99	0.95	38
	A4	-0.11	0.67	0.65	0.99	1.04	36
	A5	0.25	0.51	0.43	1.00	1.48	66
	A6	0.14	0.48	0.45	1.00	1.21	60
	A7	0.12	0.51	0.49	1.00	1.41	64
塩分	A1	0.47	2.23	2.17	0.91	3.22	31
	A2	0.32	0.95	0.89	0.93	1.52	38
	A3	0.18	1.12	1.04	0.81	1.34	16
	A4	-0.23	0.60	0.55	0.84	0.85	29
	A5	-0.11	1.02	0.95	0.86	1.41	28
	A6	0.21	0.87	0.77	0.90	1.28	32
	A7	0.21	0.66	0.58	0.85	0.96	31

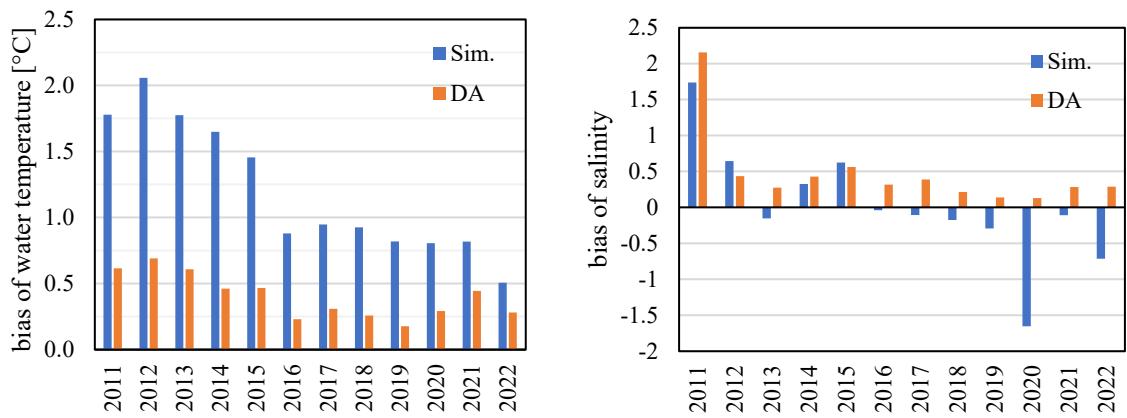


図-18 地点A1における水温（左側）と塩分（右側）の数値シミュレーション結果(Sim.)とデータ同化結果(DA)の各年の水深1 m におけるbias。

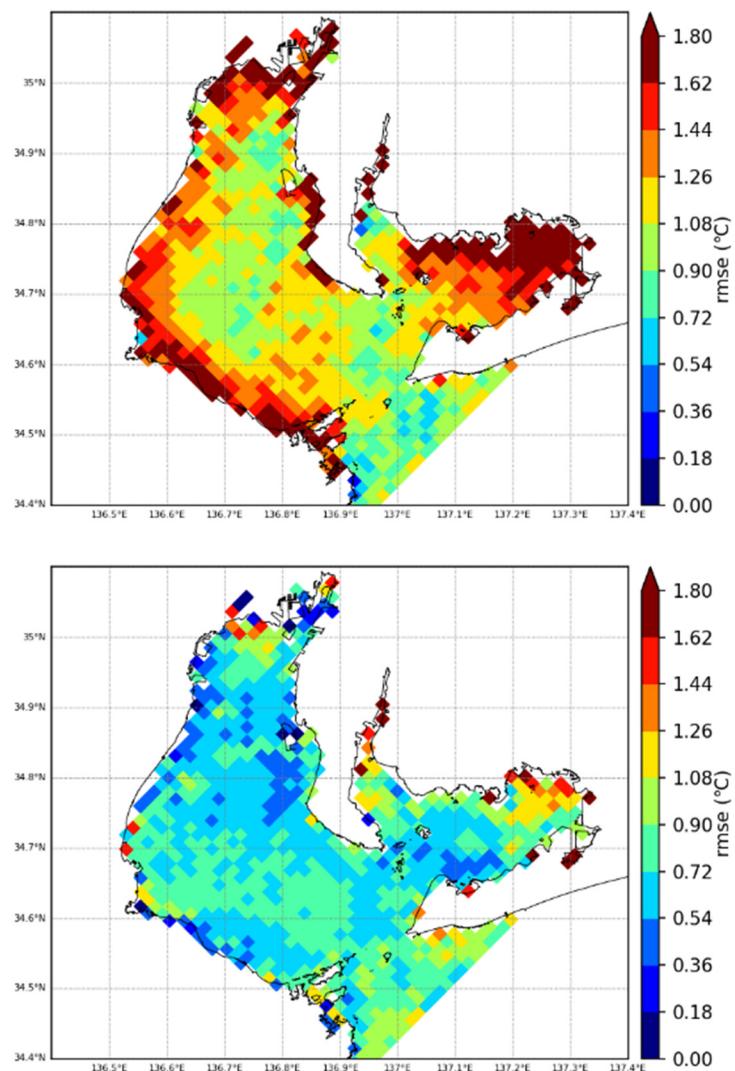


図-19 数値シミュレーション結果（上段）及びデータ同化結果（下段）とMODIS観測値のRMSEの平面分布。

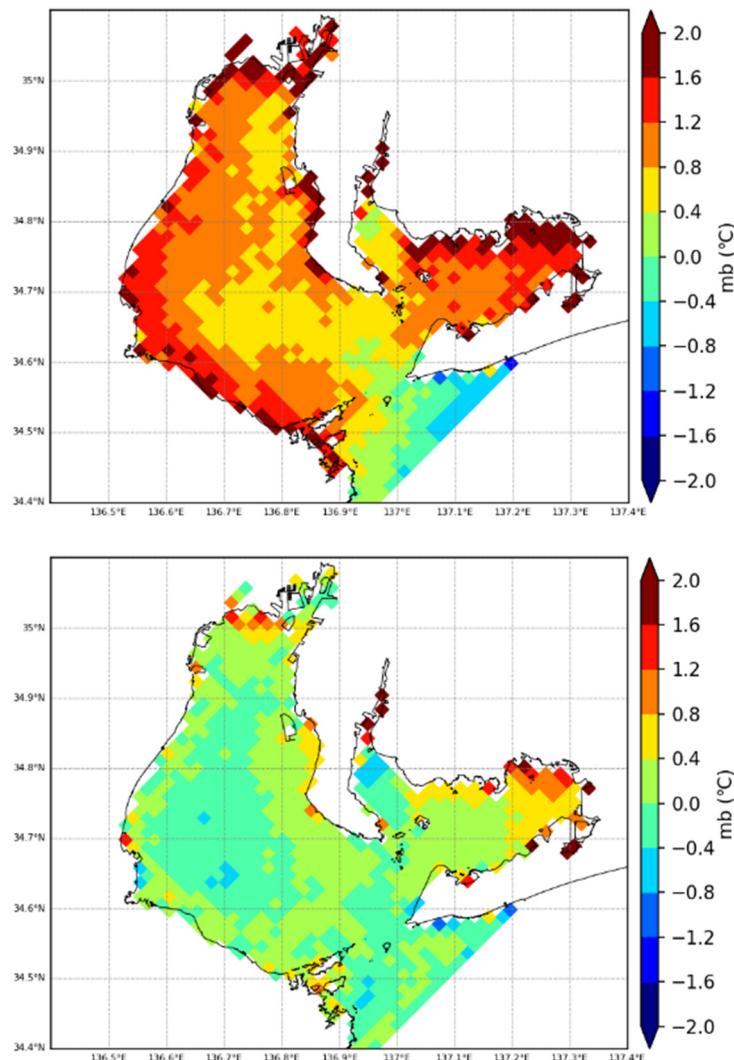


図-20 数値シミュレーション結果（上段）及びデータ同化結果（下段）とMODIS観測値のbiasの平面分布。

### 【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(Matsuaki and Inoue, 2022)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ことが可能である。例えば、伊勢湾・三河湾への外洋水の侵入（図-21、詳細な解析は水口ら(水口 et al., 2025)を参照）や淡水流入（図-22）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。特に、本データ同化手法では2.(4)で説明した通り、境界条件の不確実性に着目している。イベントは境界条件に大きく依存するため、境界条件に摂動を付加する方法は有利であると考えられる。

一方で、今回の同化手法の不得手とする点としては、12年間解析データベースの作成方法が一貫していないことである。本研究では大気境界条件をGPV MSM初期値を基に作成している。GPV MSMは気象庁によってモデル改良がされている。流動モデルの結果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年を境に大きく表層水温の精度が改善している傾向にある。これは大気境界条件の精度の改善によるものと考えられる。長期的な伊勢湾の物理環境の変遷を解析する場合は、解析データベースは長期間、同一の条件で作成されることが望ましい。上記のような理由からGPV MSMの精度が異なるため、今回

の解析データベースは長期的な変遷の解析には適していない。

2011年の伊勢湾湾奥（A1）と2020年の三河湾1号ブイの塩分がほかの年と比較して数値シミュレーション結果データ同化結果とともにRMSEが悪い傾向にある。これは、観測値は品質管理手法によって機械的に品質の悪い観測値を棄却したが、それで取り切れない非現実的な観測値が除外できておらず、それによってRMSEが悪くなっていると判断される。品質管理手法は今後改善したい。

本研究課題で掲げていた数値目標であるRMSE改善率の3割(30%)達成の達成状況としては、水温は7地点中7地点で目標を達成していた。塩分は7地点中4地点で目標を達成しており、半数以上の地点で目標を達成した。達成できなかった地点においても、RMSE改善率はA4（伊勢湾口）で16%、A5（三河湾1号ブイ）で29%、A6（三河湾2号ブイ）で28%達成しており、改悪した地点が無かった。

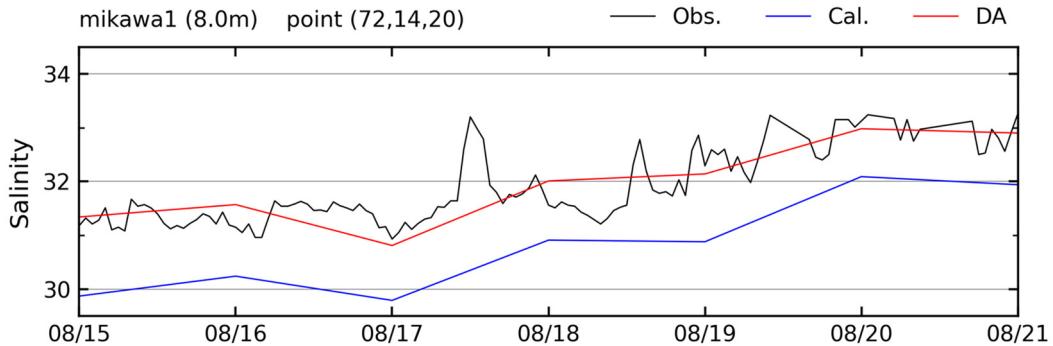


図-21 2020年8月の三河湾1号ブイの底層(8.0m)における塩分の時系列図。高塩分の水塊が侵入する様子について、数値シミュレーションでは定量的な再現が難しかったが、データ同化で塩分濃度が定量的に再現されている。

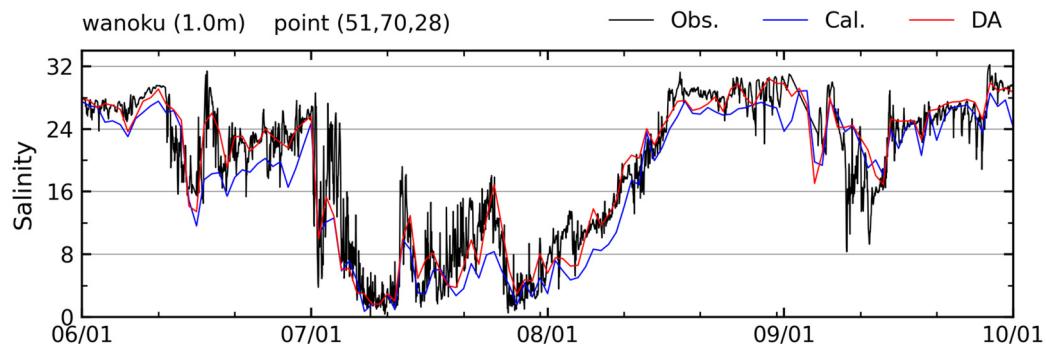


図-22 2020年の伊勢湾湾奥の表層(1.0 m)の塩分の時系列図。塩分濃度が下がる様子が数値シミュレーションでは定量的な再現が難しかったが、データ同化で再現されている。

## (2) 東京湾

### 【結果】

図23に各観測変数の月別RMSEを示す。試計算後の5月以降においても、4月と同様に物理変数のRMSEは必ずしも低下しない一方で、水質変数は基本的に背景値から解析値へのRMSEが低下していることが示された。

### 【考察】

今後のデータベースの改良方針としては、アンサンブル数の変更、解析期間の延長、およびパラメータ修正に関しても改良が必要である。特に本解析結果では、前月の解析値を次月の背景値として引き継がせたことにより、事前に設定した水質モデルパラメータの背景誤差(20%)よりも大きな変化をしてしまう点や、そもそも背景誤差を各パラメータで一定値に設定していることで、同化を続けるに従い、解析値から予測した結果のRMSEが悪化している場合がある点である。これらの解決には、同化ウィンドウをまたいだ解析値の引き継がせ方の検討、および各パラメータで想定される不確実性について詳細な文献調査を実施し、設定を変更することが必要である。

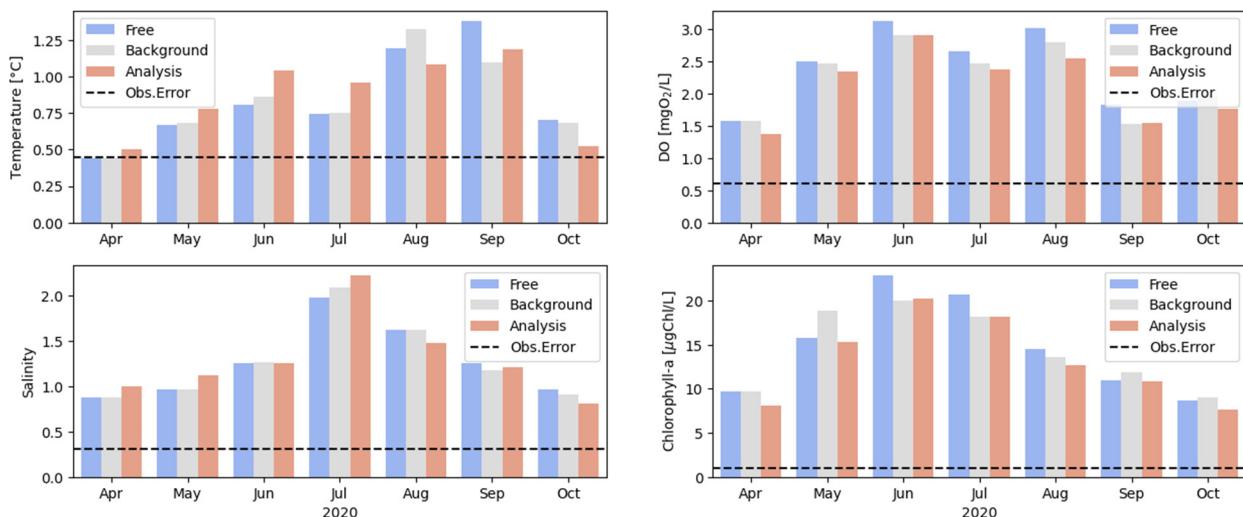


図 23 各観測変数の月別RMSE。青色は同化をしない背景値、灰色は前月の解析値を用いた背景値、赤色は解析値

#### 1. 4. 3 本研究以外の参考文献

- Anderson, E. and Järvinen, H. (1999) "Variational quality control," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(554), pp. 697–722. Available at: <https://doi.org/10.1002/qj.49712555416>.
- Evensen, G. (2003) "The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation," *Ocean Dynamics*, 53(4), pp. 343–367. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9>.
- Fisher, R.A. and Yates, Frank. (1948) *Statistical tables for biological, agricultural and medical research*. London: Oliver and Boyd.
- Henderson-Sellers, B. (1985) "New formulation of eddy diffusion thermocline models," *Applied Mathematical Modelling*, 9(6), pp. 441–446. Available at: [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(85\)90110-6](https://doi.org/10.1016/0307-904X(85)90110-6).
- Kalman, R.E. (1960) "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Journal of Basic Engineering*, 82(1), pp. 35–45. Available at: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
- Liu, C., Xiao, Q. and Wang, B. (2008) "An Ensemble-Based Four-Dimensional Variational Data Assimilation Scheme. Part I: Technical Formulation and Preliminary Test," *Monthly Weather Review*, 136(9), pp. 3363–3373. Available at: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2312.1>.
- Matsuzaki, Y. et al. (2024) "Web application of an integrated simulation for aquatic environment assessment in coastal and estuarine areas," *Environmental Modelling & Software*, p. 106184. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106184>.
- Matsuzaki, Y. and Inoue, T. (2022) "Perturbation of Boundary Conditions to Create Appropriate Ensembles for Regional Data Assimilation in Coastal Estuary Modeling," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(4). Available at: <https://doi.org/10.1029/2021JC017911>.
- Matsuzaki, Y. and Kubota, M. (2024) "Uncertainty in river discharge forcings and error range on nowcasting numerical simulation of salinity and seawater temperature in Ise Bay, Japan," *Marine Pollution Bulletin*, 207, p. 116734. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116734>.
- Nakamura, Y. and Hayakawa, N. (1991) "Modelling of thermal stratification in lakes and coastal seas," in. *IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences)*, pp. 227–236.
- Orlanski, I. (1976) "A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows," *Journal of Computational Physics*, 21(3), pp. 251–269. Available at: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(76\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(76)90023-1).
- Sekine, Y., Nakamura, S. and Wang, Y.W. (2002) "Variation in Wind in the Region around Ise Bay," *The bulletin of the Faculty of Bioresources. Mie University*, 28, pp. 1–9.
- Shchepetkin, A.F. and McWilliams, J.C. (2005) "The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model," *Ocean Modelling*, 9(4), pp. 347–404. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>.
- Smagorinsky, J. (1963) "GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE EQUATIONS: I. THE BASIC EXPERIMENT\*," *Monthly Weather Review*, 91(3), pp. 99–164. Available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%253C0099:GCEWTP%253E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%253C0099:GCEWTP%253E2.3.CO;2).
- Tanaka, Y. et al. (2011) "Development on the Pelagic Ecosystem Model Considering the Microbial Loop for Estuary and Coastal Areas," *Report of the Port and Airport Research Institute*, 50(2), pp. 3–68.
- Tanaka, Y. and Suzuki, K. (2010) "Development of Non-hydrostatic Numerical Model for Stratified Flow and Upwelling in Estuary and Coastal Areas," *Report of the Port and Airport Research Institute*, 49(1), pp. 3–26.
- Yokota, S. et al. (2016) "Comparison between Four-Dimensional LETKF and Ensemble-Based Variational Data Assimilation with Observation Localization," *SOLA*, 12, pp. 80–85. Available at:

- https://doi.org/10.2151/sola.2016-019.
- Zupanski, M. (2005) "Maximum likelihood ensemble filter: Theoretical aspects," *Monthly Weather Review*, 133(6), pp. 1710–1726. Available at: https://doi.org/10.1175/MWR2946.1.
- Zupanski, M., Navon, I.M. and Zupanski, D. (2008) "The Maximum Likelihood Ensemble Filter as a non-differentiable minimization algorithm," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(633), pp. 1039–1050. Available at: https://doi.org/10.1002/qj.251.
- 国土交通省中部地方整備局 (2017) "伊勢湾再生行動計画（第二期）." Available at: https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/sai\_ise/koudou\_keikaku/data/koudou\_keikaku\_04/koudoukeikaku\_H29.6.pdf.
- 大島巖 *et al.* (2005) "伊勢湾・三河湾における貧酸素水塊の長期間の挙動とその要因," 海岸工学論文集, 52, pp. 901–905. Available at: https://doi.org/10.2208/proce1989.52.901.
- 岡田輝久 *et al.* (2015) "4次元変分法による内湾のクロロフィル鉛直分布のデータ同化に関する検討," 土木学会論文集B2(海岸工学), 71(2), p. I\_1297-I\_1302. Available at: https://doi.org/10.2208/kaigan.71.I\_1297.
- 岡田輝久, 今村正裕 (2019) "中層高濁度および青潮に関する再現計算," 土木学会論文集B2(海岸工学), 75(2), p. I\_997-I\_1002. Available at: https://doi.org/10.2208/kaigan.75.I\_997.
- 岡田輝久, 入江政安 (2023) "沿岸海域における物質循環解析のための4次元アンサンブル変分法の実装と評価," 土木学会論文集, 79(17). Available at: https://doi.org/10.2208/jsciej.23-17144.
- 松崎義孝, 井上徹教 (2020) "アンサンブルカルマンフィルター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, (1367), p. 35.
- 松崎義孝, 井上徹教 (2022) "伊勢湾シミュレータに実装した領域沿岸データ同化法による通年のデータ同化実験: 沿岸・河口域における適切なアンサンブルを作成するための境界条件の摂動," 港湾空港技術研究所報告, 61(1), pp. 1–37.
- 水口隼人, 松崎義孝, 井上徹教 (2025) "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), 81(17).
- 環境省 (2018) "第五次環境基本計画." Available at: https://www.env.go.jp/content/900511404.pdf.
- 田中陽二 *et al.* (2011) "微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築," 港湾空港技術研究所報告, 50(2), pp. 3–68.
- 田中陽二, 鈴木高二朗 (2010) "密度流湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について," 港湾空港技術研究所報告, 49(1), pp. 3–25.

## 1. 5. 研究成果及び自己評価

### 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

#### ＜得られた研究成果の学術的意義＞

データ同化の研究はKalman Filter(Kalman, 1960)に代表されるように、非常に古くから気象科学分野を中心に進められている研究分野である。そのデータ同化の概念を沿岸河口域の流動・生態系のモデルに適用するのが今回の研究である。データ同化はモデルの得手不得手を理解し、如何にして尤もらしい解が得られるか、をよく理解したうえで流動・生態系モデルに適用する必要がある。

本研究は、沿岸河口域の流動・生態系モデルを理解した若手研究者の協同により、データ同化の適用に取り組んだ点に革新性と独創的がある。特に、データ同化によってモデルの不確実な部分に摂動を付加してアンサンブルを作成する必要があるけれども、その設定については流動・生態系モデルを熟知している必要がある。本研究では摂動を付加する位置を調整しながら（表4）アンサンブルを作成し、流動生態系モデルのデータ同化に成功し、流動の長期再解析データセットと、生態系モデルの再解析データセットの開発に成功した。また、長期再解析データセットの作成に道筋をつけた。

沿岸河口域の流動・生態系モデルの再解析データセットの作成はこれまでにない取り組みであり、先導性が高い。再解析データセットが開発されると、それを使用した水環境の変化や、出水、貧酸素解消といったイベント解析が可能となるため、発展性が高い。

#### ＜環境政策等へ既に貢献した研究成果＞

革新型研究開発（若手枠）であるため環境政策等への貢献の道筋を以下に示す。

水圈の流動・生態系モデルの再解析データセットが開発されると、以下の点で環境政策への貢献できる可能性がある。

##### ・過去の環境状態の把握と要因分析

再解析データセットは、実際の観測と数値モデルを組み合わせて、過去の水温・塩分・流況・栄養塩・プランクトン分布などの空間・時間変化を高解像度で再現できる。これにより、赤潮・貧酸素水塊・異常繁茂・

水質劣化などの現象と、それに寄与した物理・生物・気象条件の関連性を定量的に評価できる。例として、三河湾の貧酸素の原因が外洋水の侵入であることを特定することが可能である（図-21）。

・環境目標のモニタリングと達成度評価

水質総量規制などの環境政策では、栄養塩やCODの長期変化をモニタリングし、政策効果の定量評価が必要である。再解析データセットにより、単なる表層観測だけでは得られない水柱全体や広域の視点から、環境目標への進捗を確認できる。例として、政策導入後の水域におけるプランクトンバイオマスや底層溶存酸素の改善傾向を再解析で確認が可能となる。

・科学的根拠（EBPM）に基づく政策立案支援

再解析データは、Evidence-Based Policy Makingを実現する上での「定量的・時空間的根拠」として機能する。モデルとデータ同化を通じた定量評価は、利害関係者への説明責任を果たす材料にもなる。

＜環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果＞

貢献の見通しについては、事業に伴う環境影響評価を行う際に、環境省が示す底層溶存酸素量に係る水質環境基準（環境省2021年12月28日報道資料、東京湾における湾奥の類型は2mg/L）に対して、シミュレーション単体では水質環境基準をクリアする結果が得られるが、実際は水質環境基準を満たしておらず、データ同化であれば適切な環境影響評価が可能である、といった結果が想定される。例として、最終報告書の図-7は伊勢湾モデル地形を対象とした底層溶存酸素の数値実験結果であり、数値シミュレーション結果（赤線）は観測値（黒丸）よりも高い値を示しているが、データ同化の結果（青線）、真値に近づいていることが確認できた。このような数値シミュレーションモデル単体の使用による環境影響評価はシミュレーション結果と事業実施後の将来環境の乖離が大きくなる可能性があり、事業実施後の地域住民等の反感を招きかねない。シミュレーションによる事業後の将来予測結果が適切であると、事業に対する理解や満足感が得られやすいと考えられるため、精緻な水圏数値シミュレーション手法の開発は今後ますます重要となると考えられる。

本研究において、伊勢湾においては過去12年間の物理場を、東京湾においては特定年の物理・水質場を再現した再解析データベースを作成し、一部に課題はあるものの、数値シミュレーション単体に比べて再現性が高いことが示された。公共用水域水質測定を代表とする、沿岸海域の観測データは月に1回から3ヶ月に1回程度に限られ、測定点も限られていることから、長期的なトレンド把握などに用いることはできるものの、出水影響や窪地埋め戻しなどの詳細な分析は難しいのが現実である。再解析データベースであれば、3次元の詳細な流れや水質の分布がわかるため、これらの分析が可能である。この結果は将来的に、気候変動などの自然要因が沿岸水質に及ぼす影響分析に加え、過去の環境政策の効果を分析することが可能となる点から、環境政策の取捨選択や新たな環境政策の立案に貢献できると考えられる。

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

＜全体達成状況の自己評価＞ · · · · ·

[3. 目標どおりの成果をあげた](#)

＜サブテーマ1 達成状況の自己評価＞ · · · · ·

[3. 目標どおりの成果をあげた](#)

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	7
査読無し論文	0

著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	6
口頭発表・ポスター発表	16
マスコミ等への公表・報道等	3
成果による受賞	1
その他の成果発表	1

### 1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」から10件まで抜粋)
1	Uncertainty in river discharge forcings and error range on nowcasting numerical simulation of salinity and seawater temperature in Ise Bay, Japan, Yoshitaka Matsuzaki, Masaya Kubota, Marine Pollution Bulletin 207 116734-116734 2024年10月
4	領域沿岸データ同化手法による伊勢湾を対象とした物理量解析データベースの開発, 松崎義孝・井上徹教・内藤大輔・水口隼人、土木学会論文集, Vol. 81, No. 17, 特集号(海岸工学)、2025年11月
6	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、水口隼人、松崎義孝、井上徹教、Vol. 81, No. 17, 特集号(海岸工学)、2025年11月
7	Ecological hydrodynamic modeling and factor analysis of hypoxia dissipation in the semi-enclosed Mikawa Bay, Japan, in August 2020, Yoshitaka Matsuzaki, Masaya Kubota, Tetsunori Inoue, and Hayato Mizuguchi, Marine Pollution Bulletin, 218, 118190, 2025

注: この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

### 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動は、合計で6件行った。

そのうち、特に重要なものは2つあり、1つは港湾空港技術研究所のある神奈川県横須賀市の市民を対象とした、横須賀市の主催する市民講座において、これまでのデータ同化研究の取り組み、本研究の狙いや将来的な展望を紹介した(成果番号25)。多くの質問があり、その中で、「データ同化システムで東京湾や伊勢湾の水質長期再解析データベースの開発を行った場合にどのような利点や進展があるのか」という質問があった。研究代表者は「水質長期再解析データベースを使うことで東京湾、伊勢湾の水質悪化の原因や水質改善の手がかりが発見できるかもしれない、洪水や外洋水侵入等のイベントで東京湾・伊勢湾の水質が短期的にどう変動するのか」という解析が可能」という回答をした。この活動により、多少なりとも横須賀市民の研究活動の難しさや重要性に関する理解が進み、環境省をはじめとする国策への理解に貢献したと判断される。

もう一つは、港湾空港技術研究所のある神奈川県横須賀市にある神奈川県立横須賀高校の1年生を対象とした、本研究の内容を含む研究紹介を行った(成果番号26)。生徒からは活発な意見交換があり、市内にある身近な研究所において世界的な研究開発を行っていることが理解されたと考えられる。この研究成果普及活動には続きがあり、SSH(スーパーサイエンスハイスクール)指定校である横須賀高校の授業の一環で、通年で研究活動を行う科目が設けられている。上述の研究紹介(成果番号26)を聞いた生徒のうち2名が2年間、1名が1年間、研究代表者の指導のもと、研究活動を行った。その2年間の研究成果は(公財)国際エマックスセンターが主催する「高校生海洋環境保全研究発表会」で発表され、そのうちの1名が最優秀賞を受賞するに至った(図24)。生徒が行った研究はデータ同化に関するものではなかったものの、入り口としてデータ同化の研究に触れ、研究の面白みに目覚め、興味のままに研究した成果を存分に発揮できた賜物であると判断され、本研究はその一端を担っていた、と判断される。

**TOPICS**

**港空研の指導生徒が「高校生海洋環境保全研究発表会」で最優秀賞を受賞しました**

海洋汚染防除研究グループの松崎義孝グループ長が、2023年度と2024年度の2年間、横須賀高等学校のSSH（スーパーサイエンスハイスクール）（※1）活動の一環である「探求活動」で生徒に研究の指導を行い、その成果が、（公財）国際エメックスセンターが主催する「高校生海洋環境保全研究発表会」において最優秀賞を受賞しました。

「高校生海洋環境保全研究発表会」は、高校生が行っている沿岸域や流域の環境に関する調査・研究、保全活動などについて専門家から直接助言・指導を受け、その成果を発表する機会を創出することで、次世代の海洋環境保全を担う人材育成をより一層推進することを目的として開催されています。指導会（11月開催）と発表会（1月開催）の2部制となっており、2025年1月25日に行われた発表会には、全国の高校から8グループが参加しました。松崎グループ長が指導を行った生徒2名と発表内容は以下のとおりです。

■横須賀高校2年 横山心大さん

「瀬戸内海における養殖産業により生じたプラスチックゴミの漂流及び漂着に関する検討」

OILPARI（※2）を用いて、養殖施設から生じるプラスチックパイプなどの漂流ゴミがどこに漂着するかを可視化するとともに、季節的な漂流特性等について考察を行った。

■横須賀高校2年 手嶋夏生さん

「東京湾で油流出した場合の油の挙動」

OILPARIを用いて、東京湾外で油流出が生じた際に湾内に流出油が流れ込んで航路を閉塞する可能性があるかを検討し、その可能性があることを示すとともに、季節的な漂流特性について考察を行った。

専門家からの鋭い質問に対しても自分なりの考えを答えるなど、2名とも素晴らしい研究発表を行い、横山心大さんが「最優秀賞」を受賞しました。

港空研では、次世代を担う研究者・技術者の人材育成に貢献するため、今後もこうした学生指導に積極的に協力していきます。



松崎グループ長による指導の様子



発表会の様子（横山心大さん）



発表会の様子（手嶋夏生さん）

※1 文部科学省が科学技術や理科・数学教育を重点的に行う高校を指定する制度。先進的な科学技術、理科・数学教育を通じて、生徒の科学的な探究能力等を培うことで、将来社会を牽引する科学技術人材を育成するための取組。

※2 海上の油回収船による油回収作業を支援するため、海上流出油の移流および拡散をシミュレーションするモデル。

図 24 神奈川県立横須賀高校の生徒の研究活動を港湾空港技術研究所が支援することをアピールする状況  
(港湾空港技術研究所広報誌「PARI」vol.59（2025年4月号）から転載  
<https://www.pari.go.jp/PDF/PARIVOL.59.pdf>)

### 1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

国際共同研究を実施していない。

### 1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
松崎義孝	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 2014年に岩手大学大学院で博士（工学）を取得 港湾空港技術研究所にて流出油予測や海洋環境の数値シミュレーションに従事 現在同研究所・海洋汚染防除研究Gグループ長 土木学会環境工学委員会委員 2024年に土木学会技術開発賞受賞

	専門は水工学、研究テーマは海洋環境予測・データ同化・油濁対策 <a href="https://researchmap.jp/yoshitakamatsuzaki">https://researchmap.jp/yoshitakamatsuzaki</a>
岡田輝久	2017年3月に大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）を取得 2017年4月より電力中央研究所にて環境影響評価（温排水拡散予測）、付着海塩量予測、再エネ発電量予測、洋上風力研究開発などに従事 現在同研究所 サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門・主任研究員 専門は環境水理学、研究テーマは沿岸水質予測、データ同化 <a href="https://researchmap.jp/okadate">https://researchmap.jp/okadate</a>

## 2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

### (1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない。				

### (2) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2024	Uncertainty in river discharge forcings and error range on nowcasting numerical simulation of salinity and seawater temperature in Ise Bay, Japan, Yoshitaka Matsuzaki, Masaya Kubota, Marine Pollution Bulletin 207 116734-116734 2024年10月	1	有
2	2024	Web application of an integrated simulation for aquatic environment assessment in coastal and estuarine areas, Yoshitaka Matsuzaki, Tetsunori Inoue, Masaya Kubota, Hiroki Matsumoto, Tomoyuki Sato, Hikari Sakamoto, Daisuke Naito, Environmental Modelling & Software 106184-106184 2024年8月	1	有
3	2024	流動生態系シミュレーションシステムEcoPARIのプリ・ポストプロセスに関するWebアプリケーションの開発, 松崎 義孝, 井上 徹教, 久保田 雅也, 松本 大輝, 佐藤 朋之, 坂本 光, 内藤 大輔, 港湾空港技術研究所 資料 ( <a href="https://www.pari.go.jp/2024/12/TECHNICALNOTE1420.html">https://www.pari.go.jp/2024/12/TECHNICALNOTE1420.html</a> ) (1420) 2024年12月	1	有
4	2025	領域沿岸データ同化手法による伊勢湾を対象とした物理量解析データベースの開発, 松崎義孝・井上徹教・内藤大輔・水口隼人、土木学会論文集, Vol. 81, No. 17, 特集号(海岸工学)、2025年11月	1	有
5	2025	伊勢湾における流域雨量指數を用いた流動シミュレーションの感度解析、安藤 さゆり・松崎義孝・久保田 雅也・松本大輝・井上徹教、Vol. 81, No. 17, 特集号(海岸工学)、2025年11月	1	有
6	2025	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、水口隼人、松崎義孝、井上徹教、Vol. 81, No. 17, 特集号(海岸工学)、2025年11月	1	有
7	2025	Ecological hydrodynamic modeling and factor analysis of hypoxia dissipation in the semi-enclosed Mikawa Bay, Japan, in August 2020, Yoshitaka Matsuzaki, Masaya Kubota, Tetsunori Inoue, and Hayato Mizuguchi, Marine Pollution Bulletin, 218, 118190, 2025	1	有

### (3) 著書

<著書>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
	特に記載する事項はない。		

## (4) 口頭発表・ポスター発表

## &lt;口頭発表・ポスター発表&gt;

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
8	2023	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に向けたJHPCNの活動、松崎義孝、スーパーコンピューティングジャパン2024 2024年3月12日（招待講演）	1	無
9	2023	アンサンブルカルマンフィルタによる水圏生態系モデルのデータ同化システムの開発、第60回環境工学研究フォーラム 2023年11月29日	1	無
10	2023	水環境総合評価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、JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第15回 シンポジウム 2023年7月6日	1	無
11	2024	伊勢湾シミュレーターによる流動と生態系のシミュレーション：モデルの概要と適用事例、松崎義孝、港湾空港技術特別講演会 in 中部 2024、2025年1月27日	1	無
12	2024	流動生態系シミュレーションシステム「EcoPARI」の開発：水環境の影響評価の標準化に向けたプリーポストプロセスの統合システム、松崎義孝、海岸工学講演会、2024年11月	1	無
13	2024	水環境評価のための流動生態系シミュレーションシステムの開発、松崎義孝、環境工学研究フォーラム 2024年11月	1	無
14	2024	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（口頭発表）、松崎義孝、JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第16回 シンポジウム 2024年7月11日	1	無
15	2024	水環境総合評価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（ポスター発表）、JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第16回 シンポジウム 2024年7月11日	1	無
16	2024	Web application of an integrated simulation system for standardized aquatic environment assessment、Yoshitaka Matsuzaki, Tetsunori Inoue, Masaya Kubota, Hiroki Matsumoto, Tomoyuki Sato, Hikari Sakamoto, Daisuke Naito、12th International Congress on Environmental Modelling and Software( <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.14285085">https://doi.org/10.5281/zenodo.14285085</a> )	1	無
17	2024	GUIを用いた流動生態系シミュレーション実行ツールEcoPARIの開発、Tetsunori Inoue, Yoshitaka Matsuzaki, Masaya Kubota, Hiroki Matsumoto, Tomoyuki Sato、Japan Geoscience Union Meeting 2024 2024年5月	1	無
18	2024	岡田輝久、野田晃平、宮崎奈穂、比嘉紘士、今村正裕：水中カメラによる東京湾の中層白濁層の実態調査、第59回日本水環境学会年会、2025年3月	1	無
19	2024	野田晃平、岡田輝久、宮崎奈穂、比嘉紘士、今村正裕：東京湾の貧酸素水塊と水質特性に関する通年調査（2023-2024）、第59回日本水環境学会年会、2025年3月	1	無
20	2024	岡田輝久、「モニタリングを活かすデータ同化の考え方」、第59回水工学に関する夏期研修会、大阪、2024年8月	1	無

21	2025	水環境総合評価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（口頭発表）、JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第16回 シンポジウム 2024年7月11日	1	無
22	2025	領域沿岸データ同化手法による伊勢湾を対象とした物理量解析データベースの開発、松崎義孝・井上徹教・内藤大輔・水口隼人、第72回海岸工学講演会、2025年11月	1	無
23	2025	岡田輝久：4次元アンサンブル変分法による内湾の非定常境界条件の推定、第72回海岸工学講演会、2025年11月	1	無
24		領域沿岸データ同化手法による物理量解析データセットの作成と展望、松崎義孝・井上徹教・内藤大輔・水口隼人、第62回環境工学研究フォーラム		

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
25	2022	海洋シミュレーションとその応用、第46回横須賀市市民大学「世界に誇れる日本の港湾・空港の技術」2022年7月14日	1
26	2022	神奈川県立横須賀高校での出張授業	1
27	2023	港湾空港技術研究所一般公開における研究説明	1
28	2024	港湾空港技術研究所一般公開における研究説明	1
29	2024	比嘉絢土、宮崎奈穂、岡田輝久、遠藤雅実、「2024年度 実習艇「ひよどり」による東京湾合同水質調査」、第24回東京湾シンポジウム、2024年10月。（ポスター発表）	1
30	2024	伊勢湾シミュレーターによる流動と生態系のシミュレーション：モデルの概要と適用事例、港湾空港技術特別講演会 in 中部、2024 2025年1月27日、港湾空港技術研究所主催	1

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
31	2024	中部地整ら 港湾空港技術講演会=気候変動適応策実装など、港湾空港タイムス、2025年2月24日、	1
32	2024	第17回港湾空港技術講演会in中部2024、港湾新聞 2025年2月5日	1
33	2024	港空研「EcoPARI」を開発 簡単操作で沿岸域の水環境把握、港湾空港タイムス 2024年9月16日	1

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
34	2024	令和6年度 港湾空港技術研究所 優良研究者表彰	1

## (8) その他の成果発表

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
35	2024	水環境シミュレーションを簡単操作で実現 東京大学情報基盤センターによる取材 <a href="https://mdx.jp/use-case/case7/">https://mdx.jp/use-case/case7/</a>	1

## 権利表示・義務記載

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。

この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。

独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

本研究の成果の一部は、国土交通省中部地方整備局の委託研究の内容である。

本研究は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN、課題番号jh230015およびjh240011）、日本学術振興会（JSPS）科研費(21K14255, 24K07694)のサポートを受けた。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に代表者又は分担者として参画した研究者にあります。

この研究成果報告書の著作権は、引用部分及び独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）のロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。

ERCAは、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

**Abstract****[Project Information]**

Project Title :	Realization of a digital twin of water environment in closed water: Establishment of data assimilation method for ecosystem model and development of long-term water quality reanalysis database
Project Number :	JPMEERF20221R01
Project Period (FY) :	2022-2024
Principal Investigator :	Yoshitaka Matsuzaki
(PI ORCID) :	ORCID 0000-0003-1040-0916
Principal Institution :	Port and Airport Research Institute Yokosuka City, Kanagawa, JAPAN Tel: +81-46-844-5064 E-mail: <a href="mailto:matsuzaki-y@p.mpat.go.jp">matsuzaki-y@p.mpat.go.jp</a>
Cooperated by :	Central Research Institute of Electric Power Industry
Keywords :	Ecological Hydrodynamics Model, Data Assimilation, Reanalysis Database, Ise Bay, Tokyo Bay

**[Abstract]**

This research project aimed to establish data assimilation techniques for aquatic ecosystem models and develop long-term reanalysis datasets for enclosed coastal waters, with a focus on Ise Bay and Tokyo Bay. Despite significant improvements in regard to wastewater treatment technologies, issues such as red tides and bottomwater hypoxia persist in these regions. To address these challenges, this project has promoted the concept of a “digital twin” of the aquatic environment by integrating observations and ecosystem models using data assimilation methods. Two main data assimilation frameworks were employed. The first utilized the Ensemble Kalman Filter (EnKF) with the in-house ecosystem model EcoPARI applied to Ise Bay. The second framework applied a Four-Dimensional Ensemble Variational method (4D-EnVar) to the Regional Ocean Modeling System (ROMS) of Tokyo Bay. A 12-year physical quantity reanalysis dataset covering 2011–2023 was successfully created for Ise Bay. The EnKF system assimilated observations (temperature and salinity), resulting in significant improvements in the simulation accuracy. In particular, the root mean square error (RMSE) for temperature and salinity was reduced by more than 30% compared to runs without assimilation. For Tokyo Bay, a 7-month reanalysis experiment was conducted from April to October 2020 using 16 ensemble members in the 4D-EnVar system. The results showed an improved accuracy in the simulation of biogeochemical variables, especially for chlorophyll-a and dissolved oxygen, although slight tradeoffs were observed in regard to the physical variable accuracy. Sensitivity experiments revealed the need to balance variable weights in order to avoid the overcorrection of specific parameters. Field campaigns were also conducted in Mikawa Bay to estimate the observation error characteristics. These analyses confirmed that most measurement errors were random and within acceptable ranges, although the vertical and horizontal variabilities due to stratification and freshwater input were notable. This project has demonstrated the feasibility of creating high-resolution, long-term reanalysis datasets using data assimilation in aquatic ecosystem models. The developed methodologies are expected to support coastal environmental policies and management by

providing scientific insights into the spatiotemporal dynamics of water quality and ecosystem processes.

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20221R01) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.