

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和6年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 令和6年2月21日付 第18-2号

研究開発項目 : (⑥)「港湾、空港におけるカーボンニュートラルに資する技術に関する研究」に関するもの

瀬戸内海全域を対象とした流動環境
予測技術の高精度化に関する研究

令和7年4月30日

神戸大学 工学研究科
内山 雄介

瀬戸内海全域を対象とした流動環境予測技術の高精度化に関する研究

目次

1. はじめに	1
2. 瀬戸内海流動モデルと 3 次元変分データ同化の組み込み	1
2.1 開発の背景	1
2.2 瀬戸内海3次元数値流動予報モデルの概要.....	3
2.3 3次元変分データ同化.....	3
2.4 観測システムシミュレーション実験 (OSSE)	5
(1) OSSE の概要.....	5
(2) NR-OSSE による評価結果.....	6
2.5 同化実験.....	7
2.6 3次元変分データ同化法開発のまとめ.....	10
3. アンサンブルカルマンフィルタ法によるデータ同化技術開発	11
3.1 アンサンブルカルマンフィルタ法の背景.....	11
3.2 研究方法.....	12
(1) 瀬戸内海 Compact-ROMS モデル.....	12
(2) EnKF データ同化システム.....	12
(3) 観測システムシミュレーション実験 (OSSE)	13
3.3 表面水温 (SST) 同化実験.....	13
3.4 鉛直観測データ追加実験.....	16
(1) 豊後水道海域への仮想鉛直水温観測ブイの導入.....	16
(2) 仮想サーミスターチェーンの導入効果.....	16
3.5 EnKF データ同化モデル開発のまとめ.....	17
4. おわりに	18
参考文献.....	19

1. はじめに

本研究で開発した流動環境予測技術のコアとなる要素技術は、世界標準の3次元領域海洋モデル ROMS (および助成研究者によって沿岸域に対応するように拡張開発された ROMS-WEC モデル: Uchiyama ら, 2010), 特性曲線法+緩和法を組み合わせた高精度開境界スキームによる多段ネスティング技術 (プロトタイプは Uchiyama, Zhang ら, 2018 を参照) に組み込むための3次元変分法およびアンサンブルカルマンフィルタ法によるデータ同化 (DA) モジュールである。外洋を含む海域の3次元情報を精緻に反映し、かつ大領域・超高解像度解析を可能とするため、JAMSTEC にて開発・運用されている JCOPE2 データと、気象庁 GPV-MSM 気象解析データを境界条件・初期条件とした合計 4~5 段階のネスティングによるダウンスケーリング (例えば, Uchiyama, Kanki ら, 2018) を行い、瀬戸内海全域としては水平解像度 600m, 特定の海域 (例えば神戸市垂水沖や徳島県鳴門沖など) では水平解像度 20m の超高解像度 3次元流動モデルを構築する。このシステムにより、世界最高水準の3次元環境流動解析システムが構築される。

本報告書では、全体を大きく2つのパートに分け、(1) 3次元変分法を用いたデータ同化瀬戸内海流動モデルの開発と、(2) アンサンブルカルマンフィルタ法を用いたデータ同化 (コンパクト) 瀬戸内海流動モデルの開発について、その背景、システム構成、適用結果と考察、および各技術開発に関するまとめをそれぞれ述べ、最後に結論および今後のデータ同化流動モデルの方向性について論じる。全体の構成としては、本章: はじめにに続き、2章において DA 技術 (1)、3章では DA 技術 (2) について説明し、4章に全体のまとめを述べる。

2. 瀬戸内海流動モデルと3次元変分データ同化の組み込み

2.1 開発の背景

沿岸域における正確な海況予報は、港湾管理・海洋建設・漂流物回収・漁場予測・航路選択・海洋環境モニタリングなど、様々な分野から期待されている。しかしながら、瀬戸内海のような内湾における流動や水質は、局地気象、河川からの淡水流入、黒潮流路変動に代表される外洋流動などの影響を強く受けて複雑に形成されるため、ごく単純な潮流などを除くと十分な再現性が得られないことが少なくない。正確な海況予報を行うための手法として、観測データと予報モデルを融合して海洋の尤もらしい状態を推定するデータ同化 (以下DAと呼称) は非常に有効である¹⁾。DAの導入に伴い、これまでの海洋モデルでは予測できなかった海洋状態の推定や重大な発見が多くなされ、工学や科学の発展にも大きく貢献してきた²⁾。一般的な海洋DAでは、衛星海面高度・表層水温、Argoフロート、各種現地観測データ等が使用されるが、半閉鎖性内湾域や沿岸域では、陸面ノイズに伴う衛星データの精度劣化やArgoの欠測が深刻なボトルネックになり、外洋域や陸棚海域と比較してDAの導入が立ち遅れていた。

一方、特に我が国の三大湾においては、海上交通、水産、環境アセスメント等のために様々な観測データが取得されている。本研究で対象とする瀬戸内海においても、国土交通省近畿地方整備局が海洋環境整備事業の一環として行なっている観測データ、大阪湾水質定点自動観測システムにより取得される多点の流速・水温・塩分の鉛直分布データ、海洋短波レーダーによる表面流速等が存在する。大阪湾における試行

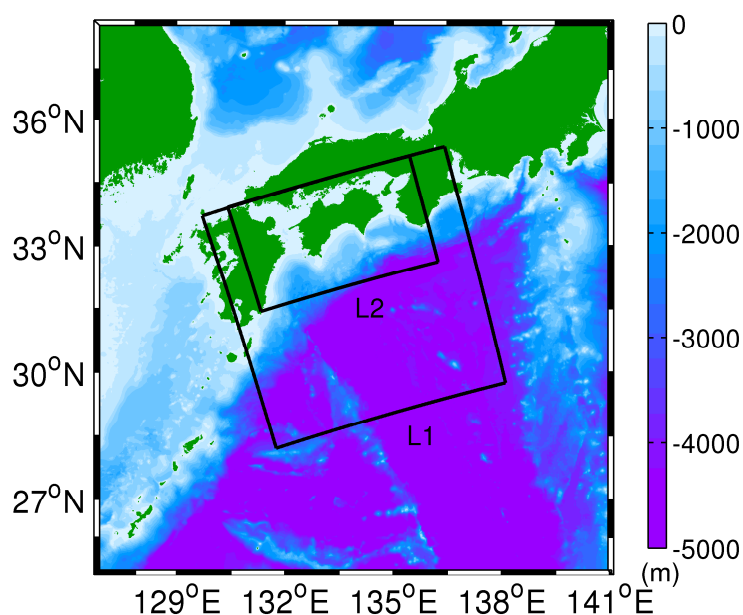


図-1 2 段ネスト高解像度瀬戸内海流動モデル (ROM-L2) 領域. 外枠は親グリッド (ROMS-L1) 領域, カラーは水深 (m).

表-1 ROMS-L2 領域計算条件

計算期間	2007 年 1 月 1 日～2015 年 5 月 1 日
格子数	802 × 482 × 鉛直 32 層
水平空間解像度	600 m
初期・開境界条件	ROMS-L1 (水平解像度 2 km)
外力 (海上風)	JMA GPV-MSM (1 時間値)
海面フラックス	NOAA-COADS (月平均気候値)
潮汐	TPXO7.0 全球調和定数 (10 分潮)
一級河川流量	日本河川協会雨量・流量データベース (27 本, 月平均気候値)

的なDA実験によって, 表層流や密度場の推定精度が向上する可能性も指摘されている^{3), 4)}.

DAを行う際には, 適用する解析領域や観測データ, 使用する計算資源などを考慮し, 適切な手法を選択する必要がある. アンサンブルカルマンフィルタや4次元変分法のような高度なDAでは, 誤差の時間発展を考慮するために数値予報モデルを繰り返し実行する必要がある, その計算量は極めて膨大である. 簡易な手法であるナッジング法や最適内挿法では, 力学的なバランスを考慮せずにモデル変数を機械的に観測値に近づけようとするため, 支配方程式が満たされなくなって非現実的な循環流が生成されるなど, かえって再現性を損なう場合がある. 変分法にもとづくDAでは, モデル予報値と観測値の間のバランスを統計的に評価し, 最適な解析値を求めることがエッセンスである. このとき, 予報値と観測値との差を評価関数として繰り返し計算に

より最適な解析値を求めることになる．3次元変分法（以下3DVAR）では海洋状態の時間変化は考慮せず，様々な観測が解析時刻に得られたと仮定するため，同化の際に数値予報モデルを実行せず，4次元変分法と比べると計算量が圧倒的に少なく済むという大きな利点がある．そのため，現在運用されている海洋再解析・予報システムでは，3DVARによるDAが実装されている^{1),2)}．

以上の背景を踏まえ，本章では，瀬戸内海における内部流動や密度場の予報精度向上を目的として，領域海洋循環モデルROMS⁵⁾に適合する3DVARベースのDA技術開発を行う．また，このDAシステムを用いて，現地観測ネットワーク配置や，観測の時間分解能が予報精度へ与える影響を定量的に評価し，高精度予報を行うための理想的な観測システムについての検討を行う．さらに，実際に瀬戸内海で行われた現地観測による水温塩分データを同化し，予報精度の向上を定量的に評価する．

2.2 瀬戸内海3次元数値流動予報モデルの概要

本章では，水平解像度約10 kmのJCOPE2¹⁾ 海洋再解析値を最外側境界条件および初期条件として与え，領域海洋循環モデルROMSを用いた2段階の1-way offlineネスティングにより，ROMS-L1（水平解像度2 km）→L2（同600 m）へと順次ダウンスケーリングした高解像度瀬戸内海東部流動モデル^{6),7)}を用いる（図-1）．ROMS-L1モデル領域は東西640 km×南北640 km（格子数320 × 320 × 鉛直32層），L2領域は，東西480 km × 南北288 km（同800 × 480 × 鉛直32層）である．領域内に流入する一級河川（L1：29本，L2：27本）を考慮し，流量には日本河川協会の雨量・流量データベースから求めた10年間の月平均気候値を与えた．その他流動モデルの計算条件については表-1に示すとおりである．なお，DA計算の際に用いる流動モデル再解析値は，特記しない限りはROMS-L2モデルの結果を使用している．

2.3 3次元変分データ同化

本章では，三好らによって開発された全球気象モデルSPEEDY-3DVAR⁸⁾を独自にROMSに実装した．以下では，実装した3DVARの概要について説明する．

DAの一つである3DVARは，最尤推定法を基礎とする同化手法である．評価関数の最小値を繰り返し計算によって数値的に探索し，得られた最小値を解析値とする．つまり3DVARでは，以下のように定義される評価関数 J の値を最小にする $\mathbf{x}$ の値を求めることになる．

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}_o)^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}_o) \quad (1)$$

ここに， $\mathbf{x}$ ：解析対象の状態変数， $\mathbf{x}_b$ ：状態変数の第一推定値（モデル予報値）， $\mathbf{B}$ ：背景誤差共分散行列， $\mathbf{H}$ ：モデル空間から観測空間への変換行列である観測演算子， $\mathbf{y}_o$ ：観測値からなるベクトル， $\mathbf{R}$ ：観測誤差共分散行列である． $\mathbf{H}\mathbf{x}$ はモデル空間から観測空間に変換された状態変数を表す． $\mathbf{B}$ と $\mathbf{R}$ の対角成分は誤差分散に等しく，誤差共分散を表す非対角成分は誤差相関に比例する．すなわち， $\mathbf{B}$ は第一推定値の制御変数に含まれる誤差，つまりモデル内での予測のばらつきの範囲を示す．また， $\mathbf{R}$ の非対角成分は，観測誤差の空間的な相関を表す．本研究では，背景誤差共分散行列 $\mathbf{B}$ の推定にはNMC法⁹⁾を用いる．NMC法とは過去のある期間の予報モデルの誤差を蓄積し，初期時刻の異なる2つの予報について同じ対象時刻での予報値の差を予報誤差とみなす方

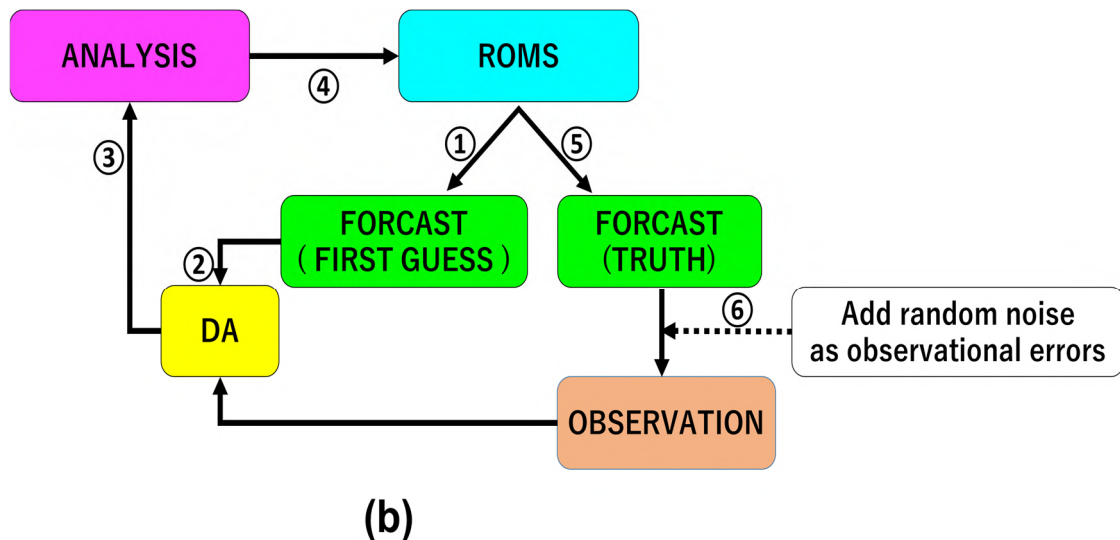
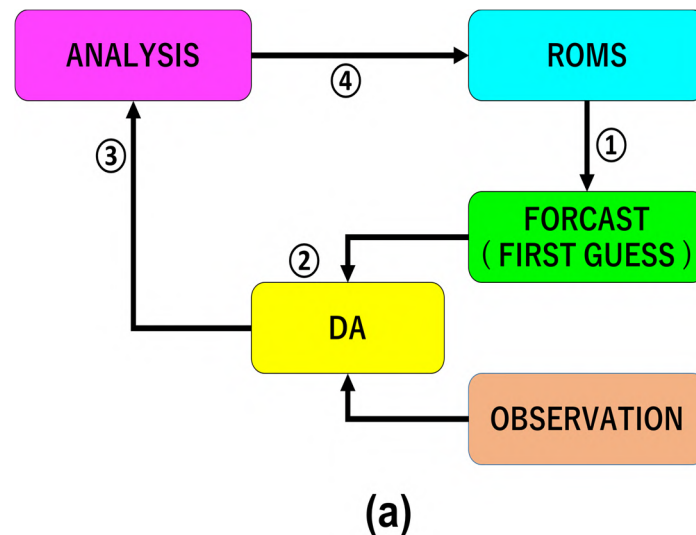


図-2 ROMS を数値予報モデルとした 3DVAR データ同化サイクルの模式図. (a) 通常の同化計算の流れ, (b) OSSE の同化計算の流れを示す. 「DA」はデータ同化システムを指す.

法である. つまり, モデル予報値の誤差の情報を含む多数の事例を統計サンプルとみなすため, 推定される $\mathbf{B}$ は使用する数値予報モデルにおける背景誤差の特性を表すことになる. 本研究では, 2013年5月1日~5月31日の31日間62例について, 24時間予報値と48時間予報値の予報誤差を推定し, その共分散行列を求めることにより, 背景誤差共分散行列を統計的に推定した.

図-2(a)に模式的に示すように, 実際にROMSを数値予報モデルとする3DVAR計算では, 以下の①から④の手順を反復実行する. ① 初期条件, 境界条件, モデルパラメーターなどを設定し, ROMSを用いて予報を行う. ② 計算された予報値をデータ同化を行うための第一推定値とみなし, 第一推定値と観測データを3DVARで同化する. ③ 同化後の結果として解析値を出力する. ④ ③で計算された解析値を次の同化サ

表-2 OSSE 解析で行った DA あり全 5 ケースの諸条件.

	観測点の水平分布	観測点の鉛直分布	同化サイクル
CASE 1	(a)	表層から 10 層	1 日ごと
CASE 2	(b)	表層から 10 層	1 日ごと
CASE 3	(c)	表層から 10 層	1 日ごと
CASE 4	(d)	観測に準ずる	観測に準ずる
CASE 5	(d)	表層から 10 層	1 日ごと

イクルの初期値として①に戻り，次の同化サイクルの計算を行う．

2.4 観測システムシミュレーション実験（OSSE）

(1) OSSEの概要

本章で開発したROMS-3DVARシステムを瀬戸内海海況予測へ適用し，その精度向上に対する有効性を評価するとともに，瀬戸内海における現地観測点の配置が予報精度に及ぼす影響について検討する．ここでは，観測システムシミュレーション実験（Observing System Simulation Experiment. 以下OSSEと呼称）を行い，定量的な評価を行う．OSSEとは，実在しない観測システム（仮想観測システム）を計算機上に構築し，DAの振る舞いを評価する手法である．DAによる解析値を観測値と直接比較する場合に比べ，OSSEでは観測値が含む誤差を一切排除してDAの効果を計測することも可能である．あるいは，例えば将来的に配置する予定である観測システムが数値予報に与える影響や，その費用対効果を調べ，観測システムの評価を行う際にも使われる．また，既存の観測システムにおいて，観測回数や観測地点を現状よりも増減させ，その観測データを同化した際の予報精度への影響を評価することで，理想的な観測システムについての考察や提言を行う場合などにも有用である．

ここでは，NR-OSSE（図-2(b)）と呼ばれる手法を用いて開発したROMS-3DVARの効果を計測する．NR-OSSEでは，図-2(b)の手順⑤に示すように，3DVARサイクルの①で設定する計算条件とは異なる設定でモデル計算を行う．この結果は仮想的な真の海洋状態，ネイチャーラン（Nature Run. 以下NRと呼称）と呼ばれる．次に，手順⑥において観測演算子（例えば疎らな観測網を再現するためのsubsamplingなど）をNRに作用させ，観測値に相当する物理量を算出し，その値に観測誤差を付加することで，NRと整合する観測データを疑似的に作成する．つまりNR-OSSEでは，NRが真値である仮想世界を構築して同化精度を評価するための手法であると解釈される．真値が既知であるため，同化に必要な統計パラメーターの設定や同化結果の精度の評価が現実の問題を取り扱う場合に比べてはるかに容易に行える．

本研究では，DAに伴う予報値と真値のずれをRMSE（自乗平均誤差平方根）によって評価する．

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_N (y_i - H_i(x))^2}{N}} \quad (2)$$

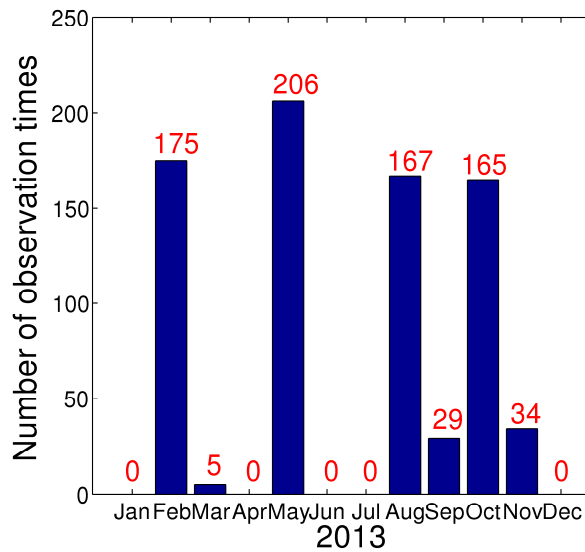


図-5 瀬戸内総合水質調査（2013 年実施分）による月ごとの観測地点数.

ただし、 N ：比較対象とするデータ数、 x ：モデル予報値、 y_i ： i 地点における比較対象値（NR-OSSEではNRによる仮想真値，あるいは観測値）、 H_i ：観測演算子である．したがって、 $H_i(x)$ は i 地点における観測空間に内挿されたモデル予報値となる．

(2) NR-OSSEによる評価結果

瀬戸内海内部における現地観測ネットワーク構造がROMS-3DVARシステムの解析精度に及ぼす影響を評価するために、図-3に示すように疑似観測網を瀬戸内海内部に設定した．図-3(a)ではROMS-L2の全格子点に対し、陸地を避けて水平方向に10グリッドごとに1点ずつ抽出した計582地点、図-3(b)では14グリッドごとの計311地点、図-3(c)では30グリッドごとの計69地点の観測網が仮想的に存在することを仮定している．また、図-3(d)に関しては、2013年の瀬戸内総合水質調査（詳細は次章）による全観測地点（229点）に対応している．

OSSE解析期間は2013年1月1日から2013年12月31日までの1年間とし、表-2に示した5ケースのDA計算と、DAを行わないケースの計6通りの計算を行う．ケース1～5はそれぞれ図-3(a)～(d)の疑似観測点で同化させ、ケース4以外は、表層から鉛直下方向10層分までの鉛直分布を同化に用いるとともに、同化サイクルは1日とする．ケース4は実際の運用を想定したDAシステムの精度評価を目指しており、実際に行われた現地観測と同一座標、同一時刻（日単位）において随時同化を行う．

図-4は予報値の真値に対する塩分と水温のRMSEの経時変化を示したものである．いずれのケースもDAなしの場合（黒線）よりもRMSEが低下しており、DAによって予報精度が向上したことが分かる．RMSEは観測点の数に反比例して低下しており、最も多くの点で同化したケース1（マゼンダ）が最も誤差が小さい．実際の現地観測は時空間的に著しく疎らであるため、ケース4は原理的に他のDAありのケースよりもDAの効果が得られにくく、精度向上幅も小さいが、DAによるRMSE低下は明白である．また、ケース4と5を比較すると、現行の観測を使用する場合においても、観測頻

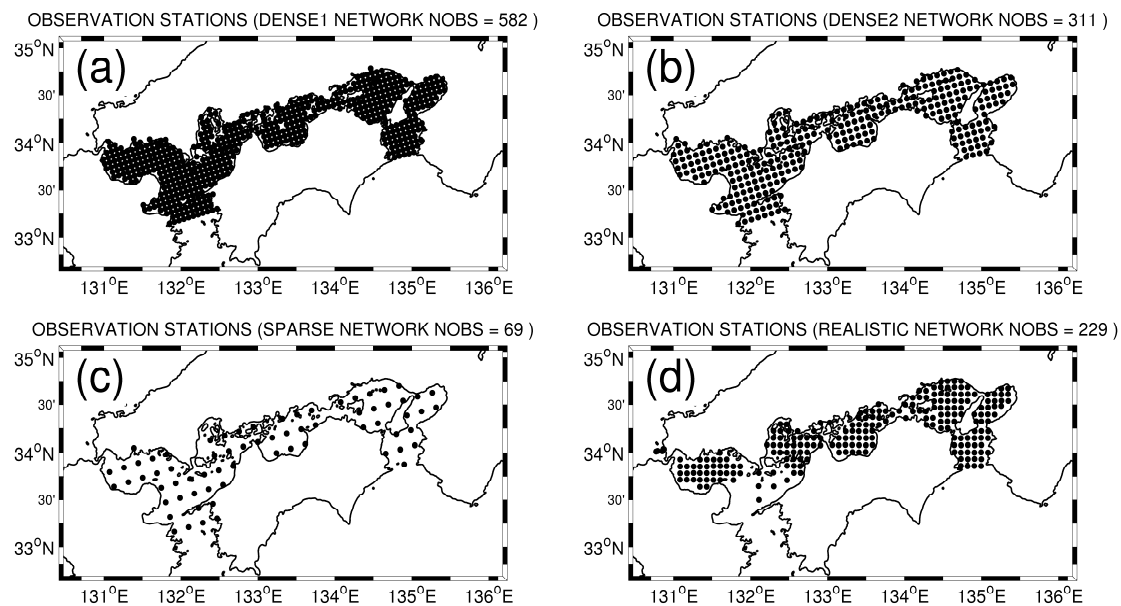


図-3 OSSE 解析で同化に用いた疑似観測点の水平分布. (a) L2 を 10 点ごとにサブサンプルしたもの (ケース 1), (b) 14 点ごと (ケース 2), (c) 30 点ごと (ケース 3), (d) 2013 年瀬戸内総合水質調査における観測点 (ケース 4, 5)

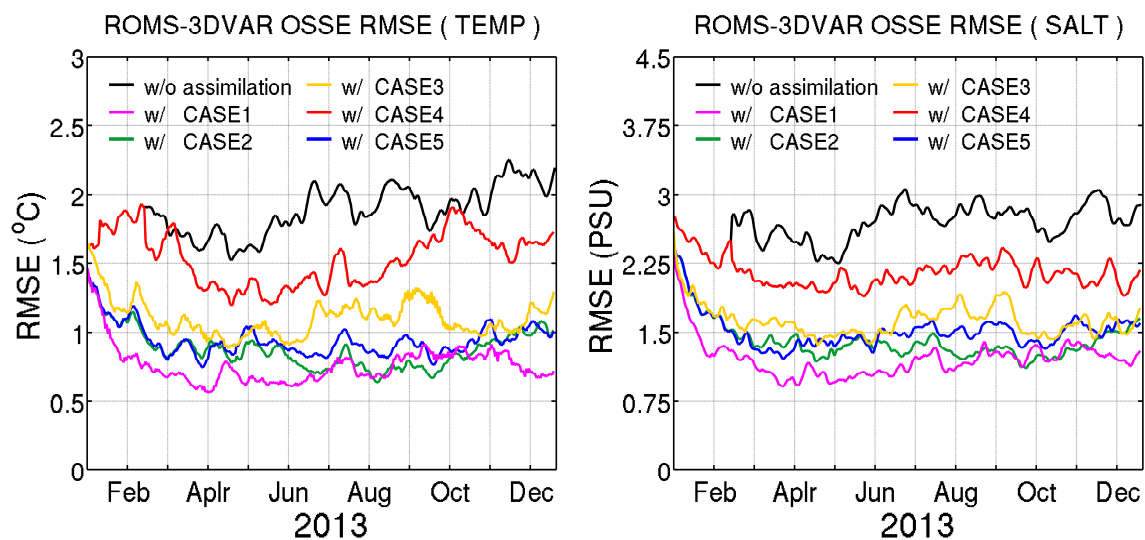


図-4 OSSE 解析結果. 予報値の真値に対する RMSE の 1 日ごとの経時変化. 黒線は同化なし計算を示す.

度を上げることで顕著な予報精度向上が見込まれることが分かる. 以上の結果から, 開発した瀬戸内海ROMS-3DVARシステムはDAによって再現精度が向上しており, 期待通りにDAが機能していることが確認された.

2.5 同化実験

本章では, 実際に瀬戸内海で計測された現地観測データを同化することにより, 瀬

戸内海モデルの予報精度が向上することを示す。同化実験に用いるデータは、OSSE解析にも用いた瀬戸内総合水質調査観測データセットである (<http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/chiki/suishitu/>)。このデータは、国土交通省による瀬戸内海における海洋環境整備事業の一環として、海面清掃船によって定期的に観測された各種データを取りまとめたものである。ここでは、2013年にCTDで観測された水面下2 mの水温・塩分データを同化対象とし、同化サイクルは1日とする（観測時間の日内のばらつきは無視）。2013年の月ごとの観測地点数は図-5に示すとおりである。

同化したすべての観測値と、それに対応する同化あり（ROMS-3DVAR）および同化なし（ROMS）の予報値の散布図を図-6に示す。水温に関しては、同化なし計算であっても観測値との相関は相関係数0.987と高く、そもそも同化前の瀬戸内海ROMSモデルの再現精度が極めて高く、同化によってさらに精度が向上することが分かる。一方、塩分の相関係数は、同化前は0.533、同化後は0.789であり、著しく精度向上したものの

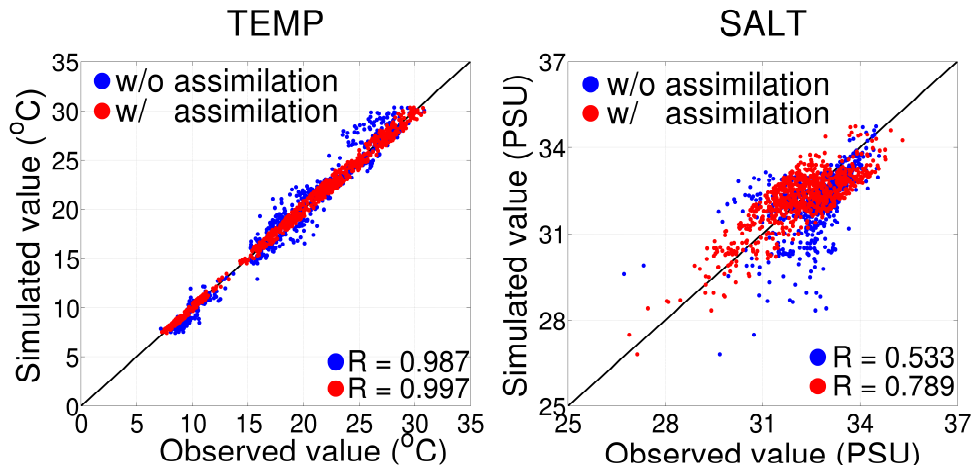


図-6 同化したすべての観測値とそれに対応する予報値の散布図 (左: 水温, 右: 塩分). 青点, 赤点はそれぞれ同化なしおよび同化あり計算の予報値, R は相関係数を示す.

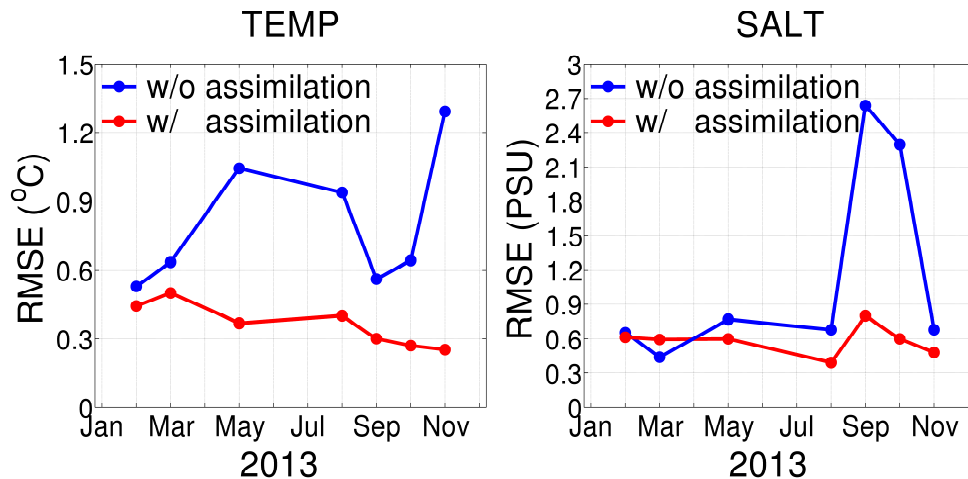


図-7 予報値の観測値に対する RMSE の 1 ヶ月ごとの計時変化 (左: 水温, 右: 塩分). 青線, 赤線はそれぞれ同化なし, 同化あり計算を示す.

の, 同化後の水温の相関係数0.997には及ばない. そこで次に, 同化対象となる観測値が存在するすべての地点における予報値と観測値を用いて1ヶ月ごとのRMSEを求めることで, 再現性能の経時的な評価を行なった (図-7). 同化サイクルが進むにつれて水温, 塩分のRMSEはともに減少していく様子が確認できるが, 塩分に関しては水温ほどのRMSEの改善は見られない. 特に同化なしの場合, 9月と10月の塩分推定精度が低く, この時期に顕著となる降雨出水に伴う河川からの淡水影響が十分に反映できていないことが主たる原因であることが強く示唆される. 本瀬戸内海モデルでは, 陸水影響としては一級河川のみを考慮し, 月平均気候値流量を淡水として流入させているが, 出水イベントや, データ整備が立ち遅れている二級河川・地下水などからの淡水供給の影響が正確に考慮されていないことが最も大きな原因であると考えられる. また, 本研究では境界条件の信頼性は非常に高いものとして観測値との比較を行なっているが, 気象による影響や境界条件に含まれる不確実性に起因する誤差も少なからず

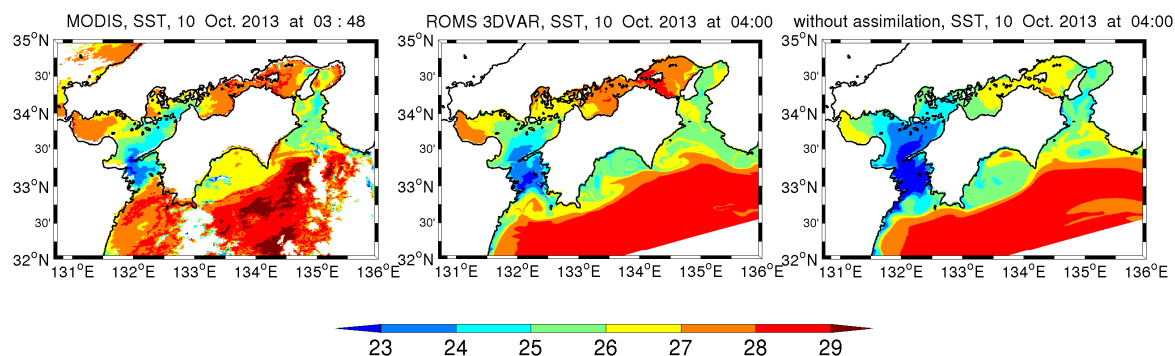


図-8 表層水温分布 (°C). (左) 衛星データ (MODIS/Aqua) 2013 年 10 月 10 日午前 3 時 48 分の瞬間値, (中) ROMS-3DVAR (同化あり), (右) ROMS (同化なし) 計算結果. 計算値は 2013 年 10 月 10 日午前 4 時の瞬間値である.

含まれているとも考えられる.

最後に, 瀬戸内総合水質調査観測データを同化したことによる再現性の向上を別の角度から確認するために, 3DVARに用いていない観測データとの比較を行なう. ここでは, 比較対象としてMODIS/Aquaによる衛星海表面水温 (SST) データを用いる. 図-8は衛星データ, 同化あり, 同化なし計算によるSST分布を示している. DAによって衛星SSTに見られる水温分布が全体的により精緻に再現されていることが見て取れる. 特に, 播磨灘, 広島湾, 周防灘, 豊後水道付近においては, 明らかな再現性の向上が確認される.

2.6 3次元変分データ同化法開発のまとめ

本章では, 3次元変分法 (3DVAR) を2段ネスト瀬戸内海流動モデルのROMS-L2モデルに組み込み, 瀬戸内総合水質調査による水温・塩分データを同化させたROMS-3DVARシステムを開発した. OSSE等によってデータ同化 (DA) による精度向上を定量的に評価し, 瀬戸内海内部における水温・塩分分布の再現性がDAによって飛躍的に向上することを明確に示した. また, 瀬戸内海塩分場の再現性をより向上させるためには, 正確な流入淡水情報 (二級河川や出水イベントを含む詳細な流量データ) が欠かせないことが示唆された. さらに, 境界条件に含まれている不確実性がデータ同化に及ぼす効果についても検討を行うことで, さらなる本ROMS-3DVARシステムの発展につながると考えている.

本 ROMS-3DVAR システムの成功は, 2.4 で検討したように極めて高精度な DA なしモデル (forward モデル) が下敷きになっている. つまり, 高精度な海洋予報のためには単に DA 技術に頼るのではなく, 使用する海洋モデルや海域の特性を深く理解し, 外力・境界条件設定を含めた総合的なモデリング技術の質的向上を同時に進めていくことが本質的に重要であると考えている.

3. アンサンブルカルマンフィルタ法によるデータ同化技術開発

3.1 アンサンブルカルマンフィルタ法の背景

瀬戸内海における高精度な海況予報は、防災・港湾・海上交通・水環境・水産資源の管理など、様々な分野から期待されている^{13),14)}。瀬戸内海は比較的閉鎖性の強い内海域であり、潮汐変動や局所的な気象擾乱に影響されると同時に、東西に開口する豊後水道・紀伊水道を通じて黒潮流路変動などの外洋からの影響も強く受けている。そのため極めて複雑な海況が形成され、通常の数値モデルによって3次元流動場を詳細かつ正確に表現することには技術的に困難な面がある。これに対して、より精緻な内部流動の再現性が求められる状況下では、現地観測データを同化することにより数値モデルの再現性を高める手法であるデータ同化（以下 DA）が有効である¹⁵⁾。DAは予測・再現精度の向上に資するだけでなく、従来のモデルでは十分に表現できなかった現象を再現し、海洋学や気象学の発展に貢献してきた側面もある¹⁶⁾。

DAを行う際には最適なDA法を選択することが重要である。最適内挿法のような初期のDA法では、モデル予報値と観測値の間の力学的なバランスを考慮しないため、現在の海洋・気象DA研究ではほとんど用いられない。三次元変分法では力学的なバランスを統計的に評価するが、海洋状態の時間変化が考慮されないため、必ずしも時空間的に整合の取れた解析値が得られない欠点がある。これに対してアンサンブルカルマンフィルタ¹⁷⁾（Ensemble Kalman Filter, 以下 EnKF）法は、時々刻々変化する誤差情報を総合的に考慮し得る点などで三次元変分法より優れている。四次元変分法などのより高精度なDA法と比較すると、EnKF法はベースとなる数値モデルを改造することなく、そのまま適用できる利点がある。

一方で、高精度なDAモデリングを行うためには、より高品質・高解像度・高頻度の現地データが欠かせない。瀬戸内海を含む沿岸域における海洋DAでは、従来は陸起源の電磁波ノイズ等による精度劣化問題もあって、十分な範囲・解像度・精度の衛星観測データが得られなかった^{18),19)}。しかしながら、2017年に打ち上げられ運用が始まった新型人工衛星「しきさい（GCOM-C）」などにより、瀬戸内海のような沿岸域や内湾域であっても高解像度・高精度の観測データが利用可能となりつつある。

このような背景の下に、本章では、瀬戸内海における数値海洋モデルの再現性を向上させること、GCOM-Cシステムの観測点配置がモデル再現性に及ぼす影響を検討することを主たる目的として、EnKFデータ同化法を領域海洋循環モデルROMS²⁰⁾に組み込み、ROMS-EnKFシステムを開発する。さらに、観測システムシミュレーション実験（Observing System Simulation Experiment：以下 OSSE）を用いた数通りの同化実験を行い、開発したROMS-EnKFシステムとGCOM-C観測システムについての性能評価および各種の技術的・科学的検討を行う。

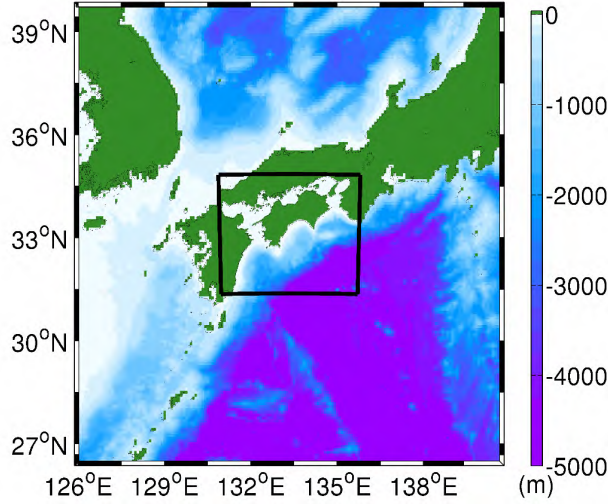


図-9 瀬戸内海 EnKF 同化システム開発のための Compact-ROMS モデル計算領域（黒枠）と水深（カラー，単位：m）

3.2 研究方法

(1) 瀬戸内海Compact-ROMSモデル

本研究は，DAシステム開発とOSSEによる性能評価を効率的に実行することを意図して，多数のアンサンブル計算を要するEnKF法と，瀬戸内海流動を精度良く表現するために必要なモデル解像度とのバランスを考慮し，Kurosawaら²¹⁾によって瀬戸内海用に開発されたCompact-ROMSモデルを用いることとした（図-9）．Compact-ROMSは，水平解像度 1/12 度（約10 km）のDA海洋再解析値JCOPE2に直接ネスティングさせた中解像度の3次元瀬戸内海流動モデルであり，計算領域は瀬戸内海全域および九州東岸・四国南岸沖の黒潮流路を含む東西448 km，南北384 kmである．これを224×192×鉛直20層グリッドで解像し，水平解像度2 kmの計算を実施した．数値モデルの計算条件については表-3に示すとおりである．

(2) EnKFデータ同化システム

本研究では，気象学分野で広く用いられる EnKF 法に基づく DA ルーチンを 3 次元領域海洋循環モデル ROMS に組み込み，ROMS-EnKF システムを開発する．EnKF 法は線形最小分散推定法を基礎とする DA 法であり，アンサンブル予報とデータ同化を組み合わせた同化手法である．EnKF 法による DA では，数値シミュレーションモデルの予報値 x_i^f を第一推定値とし，これを観測値 y_i^o によって適当な重み K_i で修正し，解析値 x_i^a を算出する．

$$x_i^a = x_i^f + K_i \{y_i^o - H_i(x_i^f)\} \quad (3)$$

$$K_i = P_i^f H_i^T (H_i P_i^f H_i^T + R_i)^{-1} \quad (4)$$

ここに， $i=1, 2, \dots, N$ （ N は観測データの総数）， H_i は観測演算子， P_i^f はモデル解析誤差共分散， R_i は観測誤差共分散である．

表-3 瀬戸内海 Compact-ROMS モデル計算条件一覧.

計算期間	2014 年 4 月 1 日～2015 年 3 月 31 日
格子数	224×192×鉛直 20 層
計算時間ステップ	120 秒
風応力	気象庁 GPV-MSM (1 時間ごと)
海面フラックス	COADS (月平均気候値)
海表面温度	Pathfinder-AVHRR (月平均気候値)
海底地形	SRTM30 PLUS + J-EGG 500 ,
境界条件	JCOPE2 再解析値 (日平均値)
潮汐	TPXO 7.2 (主要 10 分潮)
水平解像度	2.0 km

本研究で開発した ROMS-EnKF システムでは、Whitaker ら²²⁾による逐次アンサンブル平方根フィルタ法 (Serial Ensemble Square Root Filter: Serial EnSRF) を用い、アンサンブルを処理して解析誤差共分散を計算する。アンサンブルメンバーの選択方法について、Miyoshi ら²³⁾はモデルによる長期計算からランダムに抽出した時刻の予報場を初期アンサンブルメンバーに選ぶことで、良好な同化結果が得られると報告している。本研究もこれらの先行研究にならい、Compact-ROMS による瀬戸内海流動長期計算 (1 年分) の中からランダムにアンサンブルメンバーを選択する。使用できる計算資源や効率性などを考慮し、本研究ではアンサンブル数を 10 としてデータ同化を行うこととする。モデル誤差を正確に評価するために、本章では誤差共分散局所化 (covariance localization) と共分散膨張 (covariance inflation) を行なっている。

(3) 観測システムシミュレーション実験 (OSSE)

OSSE とは、仮想的な観測システムを計算機に構築し、DA と観測システムの振る舞いを評価する手法である。本章では、GCOM-C による観測データ (海表面温度: SST) を同化させた DA システムの機能評価を行うために、GCOM-C による高精度・高解像度な沿岸域 SST データを ROMS-EnKF システムに使用するという仮想的な条件を仮定し、OSSE 方法の一つである NR-OSSE 法¹²⁾を用いて同化実験を行う。NR-OSSE ではまず、モデルによる長期計算結果を仮想的な「真」の大気・海洋状態 (仮想真値: Nature Run, 以下 NR) とし、NR に観測誤差を付加することで仮想観測データを生成する。この仮想観測データを同化させるための実測データと仮定して DA システムに入力し、同化実験を行う。真値を NR と仮定しているため既知であることから、現実の問題を取り扱う場合に比べて、同化に必要な統計パラメーターの設定や、同化結果の精度評価を容易かつ明確に行える。そのため、NR-OSSE は現業の DA 研究における DA システムのパフォーマンス評価に広く利用されている。

3.3 表面水温 (SST) 同化実験

GCOM-C による SST を同化させた DA システムの機能評価を行うために、計算値の 1 つを真値と仮定した仮想観測データを用いた OSSE を行った (以下同様)。まずは GCOM-C の導入効果を計測するために、3 通りの SST 水平分布を与えて同化計算を行い、

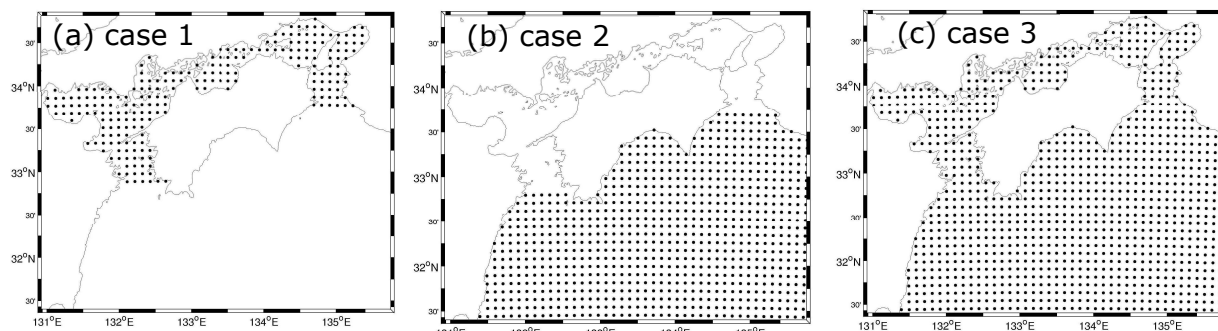


図-10 DA 実験仮想観測網（黒点）．(a) 内湾域のみに仮想観測データを与えたケース 1（ケース 2 の対照ケース），(b) 従来型衛星の観測システムを模したケース 2（内湾域は欠測と仮定），(c) GCOM-C の観測システムを模したケース 3．

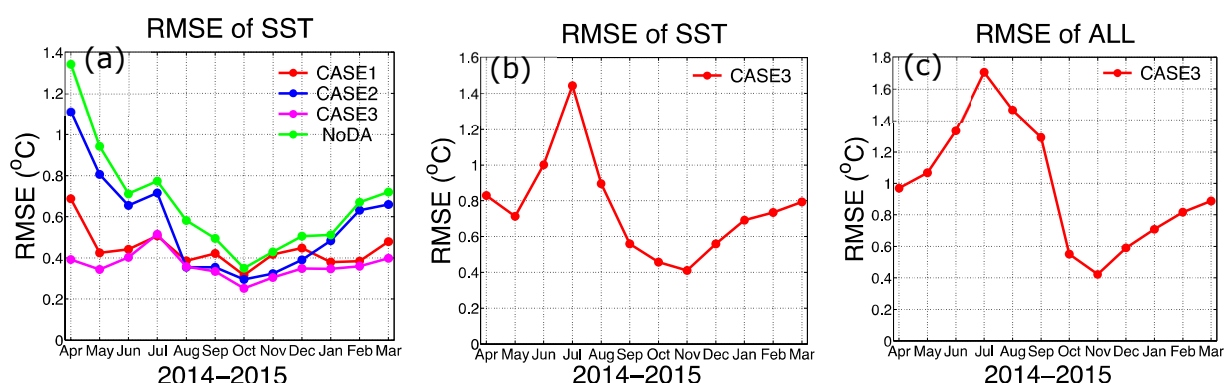


図-11 月平均水温 RMSE（二乗平均誤差）の時系列変化．(a) 計算領域全域における表層水温の RMSE（ケース 1～3）および DA なし（NoDA），(b) 豊後水道海域における表層水温の RMSE（ケース 3），(c) 豊後水道海域における全鉛直層内の水温に対する RMSE（ケース 3）．

計算値と真値の間の二乗平均誤差 RMSE を比較する．ここで，ケース 1（図-10(a)）は内湾域のみに SST を与えたケース 2 の対照ケース，ケース 2（図-10(b)）は従来型衛星を模して内湾域でのデータが欠損した分布を与え，ケース 3（図-10(c)）は GCOM-C を想定して外洋域・内湾域の両方に SST を与えた．ケース 1～3 において与える観測点数はそれぞれ 230，870，1100 点であり，瀬戸内海 Compact-ROMS モデルの最表層の水温に対して同化サイクル 6 時間で同化を行った．

図-11(a) に，3 通りの同化実験による月平均海面水温 (SST) の二乗平均誤差 (RMSE) を示す．なお，各ケースの計算結果は 6 時間平均値として 1 年分出力し，SST もしくは全層 3D 水深に関して仮想真値からの RMSE を各格子点で月ごとに求め，任意の領域について空間平均した値を時系列表示する（以下同様）．また，比較のために表示する「NoDA」は，DA を行わないケースである．ただし NoDA は NR ではなく，ケース 1～3 と同一のランダム初期値からのアンサンブル計算結果であり，初期値誤差の分 NR から乖離していく点に留意されたい．

まず，図-11(a) は，DA ありの 3 ケースはいずれも NoDA よりも RMSE 値が低い（誤

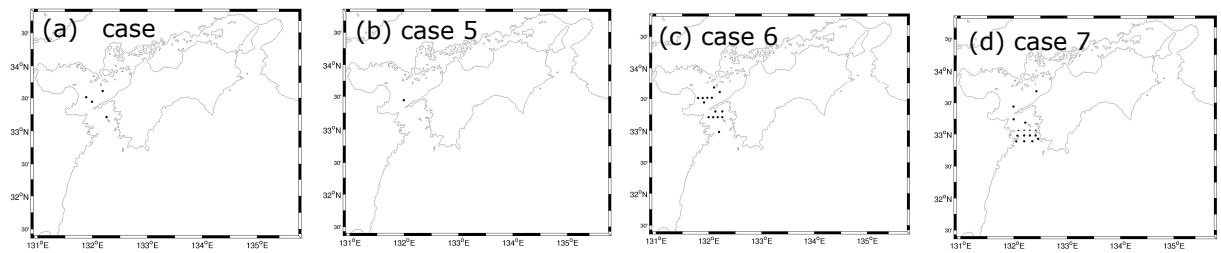


図-12 DA 実験仮想観測網. 左からケース 4~7 の追加観測点のみを表示. 表層観測はケース 3 (図-10c) と同じであり, 各図の黒点の位置 (豊後水道海域) に鉛直水温観測ブイ (仮想サーミスターチェーン) が設置されている状況を想定.

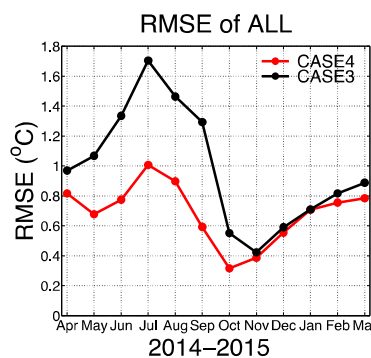
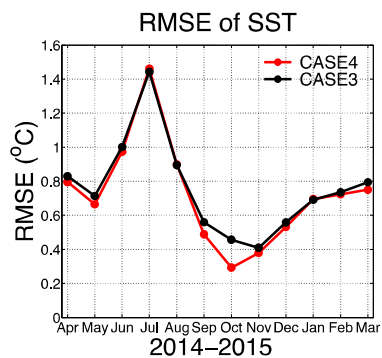


図-13 豊後水道海域における月平均水温の RMSE. ケース 4 (赤) とケース 3 (黒, 図-3 と同じ) の比較. 左: 表層水温 (SST), 右: 全層水温.

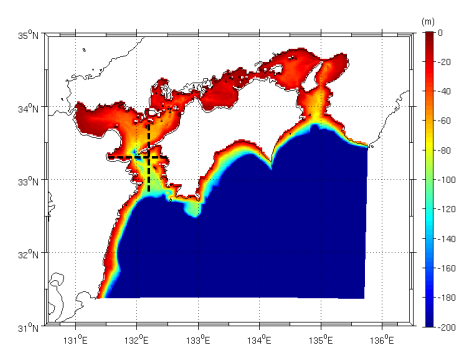


図-14 断面水温図 (図-15) で用いる 2 本の検査線 (南北, 東西ライン) の位置.

差が小さい) ことを明示しており, EnKF による DA によって再現精度が大幅に向上し, DA システムが期待通り良好に機能していることが確認される. ケース 1 とケース 2 の RMSE 値変化を比較すると, 特に計算開始から 4 ヶ月後までの期間において, 観測点が少ないケース 1 の精度は明らかに観測点が多いケース 2 より高い. つまり, 計算期間が数ヶ月の場合に関しても, 瀬戸内海 DA 計算にとって, 沿岸域の SST データの利用は外洋域の SST よりも再現性の向上に資することが分かる. また, 通年の RMSE 変化を総合的に分析すると, ケース 3 は誤差が最も低下するだけでなく, 再現精度の月別差が小さくより一定であり, 他のケースよりも安定して DA が機能していることが分かる. すなわち, 内湾域での SST をも与え得る新しい GCOM-C 衛星データの DA に対する有用性・優位性が実証された.

一方で, 瀬戸内海の各湾・灘域ごとに RMSE を詳細に解析したところ, 他の海域と比較して豊後水道海域でのモデル誤差が明らかに大きいことが分かった (図-11(b)). 表層 RMSE 値は春から秋にかけて大きく増大して最大 1.5 度近くにも達し, これが全域での RMSE の精度劣化 (図-11(a)各ケースにおける 7 月の RMSE ピーク) の主因となっていた. そこでさらに豊後水道の全層 RMSE, すなわち SST だけではなく鉛直 20 層全ての水温に対して RMSE を求めた (図-11(c)). 全層 RMSE 値は最大 1.7 度に達しており, 表層 RMSE の 1.4 度よりもさらに劣化していることが分かる. したがって, 豊後水道海域では他海域よりモデル精度が低く, 特に下層では無視できない程度の精度低下が生じることが確認された.

3.4 鉛直観測データ追加実験

(1) 豊後水道海域への仮想鉛直水温観測ブイの導入

前節の結果より、DAシステムの精度向上に対しては豊後水道海域における表層以下の水温再現がポイントになることが示唆された。そこでDAモデルの再現性をさらに向上させるために、ブイによるサーミスタチェーン鉛直水温観測を模した仮想観測網を追加した同化実験を行う。追加ケース4～7では表層SSTはいずれもケース3の仮想観測網（図-10(c)）を使用し、豊後水道海域の表層以下の全層に鉛直観測点を追加した。仮想ブイの位置は図-12に示す通りである。まず、ケース4では佐田岬（豊予海峡）北部に3点、南部に1点の計4点の仮想ブイを設定する（図-12(a)）。数値計算上は、図-12(a)の黒点位置の各グリッドにおいて表層から底層までの鉛直20層のそれぞれを仮想観測点とし、NRを用いてDAを行う（以下同様）。当然ながら同化のための仮想ブイの数は多ければ多いほど精度向上に資することが予想されるが、実務上はあまりに多数の定点ブイを常設することは非現実的であると考え、ケース4の4点設置をベースラインケースとした。さらに仮想ブイの数や設置位置に関して知見を得るため、対比ケースを3ケース設定した。ケース5は観測ブイ数を減らして佐田岬北部に1点のみとした（図-12(b)）。ケース6と7は観測数を増やして豊後水道域に16点設置した。ただし、ケース6では佐田岬を中心にほぼ対称に設置（図-12(c)）したのに対し、ケース7は黒潮の影響を想定して南部海域により多くのブイを設置した（図-12(d)）。

(2) 仮想サーミスタチェーンの導入効果

図-13から、表層水温の再現精度は、当然ながら同化データ数を増やしたケース4のほうが向上するが、その程度は小さく、精度劣化が最も著しい7月のRMSEは概ね同程度の値である。ところが、全層水温のRMSEには鉛直観測点の効果が明瞭に現れており、大きな改善が見られる。ケース4のRMSE値は通年で1.0度以下に低減しており、特に成層期である4月から10月の精度向上が目覚ましい。そこで次に、豊後水道を縦断する南北断面（図-14参照）における水温の鉛直構造からモデル精度の向上効果を確認する（図-15）。仮想真値（NR）と比較すると、ケース3では水深20～30 m程度の垂表層に極めて強い水温躍層が形成され、下層水温は17度以下でNRより4度以上低い。一方、ケース4の水温構造は、NRよりも成層構造が残るものの劇的な改善が見られ、水温誤差は約1度にまで低下している。つまり、高々4点の仮想水温鉛直観測点の追加によって、豊後水道断面を中心に飛躍的に水温再現精度が著しく向上したことが分かる。

鉛直観測網設計指針を得るために実施した追加DA実験ケース5～7の結果を図-16に示す。なお、ケース5～7は計算時間軽減のため、RMSEが最大となる7月を中心に6月から8月までの3ヶ月間のみ計算を行った。表層水温RMSE値を見ると、ケース5のRMSE値がやや大きいものの、3つのケースの差はかなり小さく、鉛直観測ブイの設置方法を変更してもSST推定精度にはあまり影響がないことが再確認できる。一方、全層水温RMSEには有意な差が見られる。鉛直観測点を一点のみ追加するケース5のRMSEが最も大きく、7月には1.2度近くまで上昇している。鉛直観測点を16点にしたケース6と7はケース5よりも全層RMSEが大幅に低下しており、7月はいずれも0.9度以下になっている。また、佐田岬南部により多数のブイを配したケース7よりも均等に配置したケース6のほうが若干RMSEが低い点も特徴的である。

以上の結果に加え、計算方法が異なるため厳密な比較はできないが、4点追加したケース4の7月の全層RMSEが1.0度弱であったことを加味すると、豊後水道海域に鉛直観

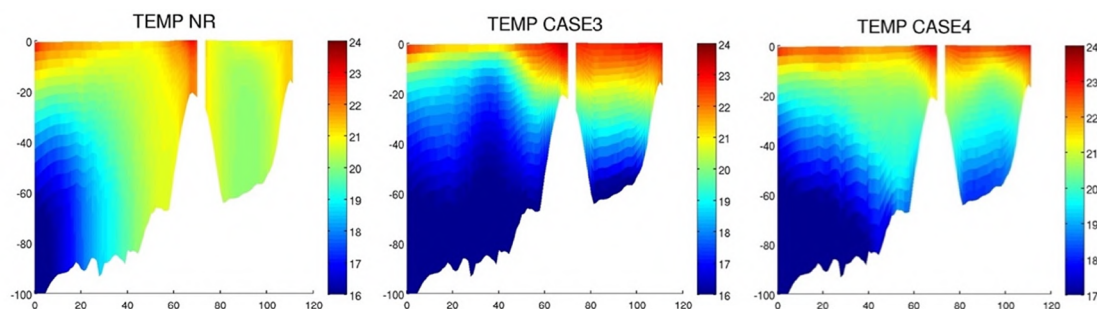


図-15 南北ライン（豊後水道入口から伊予灘北岸へ向かって北向きにとった検査線，図-14 参照）に沿った鉛直断面内における 7 月の月平均水温分布．縦軸：水深（m），横軸：北方向距離（km），カラー：水温（℃）．左から Nature Run（NR，仮想真値），ケース 3（SST のみ同化），ケース 4（SST+鉛直ブイ 4 点同化）に対する結果．

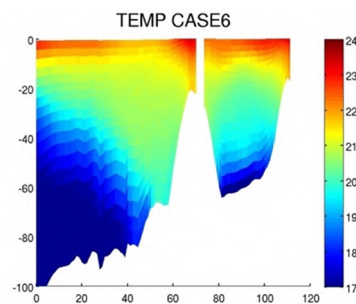
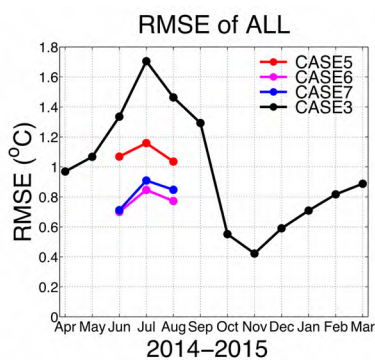
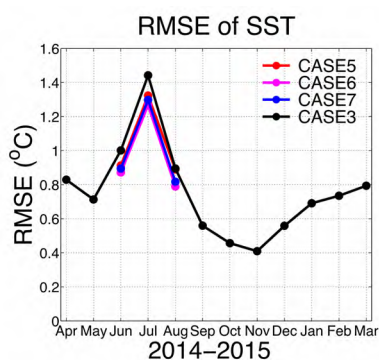


図-16 豊後水道海域における月平均水温の RMSE. ケース 5～6 およびケース 3（黒，図-11 と同じ）の比較．左：表層水温（SST），右：全層水温．

図-17 図-15 と同じ．ただしケース 6（佐田岬南北に均等に 16 点のブイを設置）の結果．

測点を設置し，さらにその数を増やすことによって亜表層以下の水温の再現性が向上し，全体的な DA の性能が良好となることが確認された．しかしながら，最も成績が良かったケース 6 の水温鉛直断面分布（図-17）とケース 4（図-15）との差は明白ではなく，観測点の設置にかかる時間や費用を考えると，豊後水道海域での鉛直観測点数は実用上は 4 点程度で十分であると言えよう．

3.5 EnKF データ同化モデル開発のまとめ

本章では，EnKF 法データ同化（DA）を領域海洋循環モデル ROMS に組み込み，ROMS-EnKF システムを開発した．これを用いて瀬戸内海全域に対する OSSE を行い，DA により水温の再現精度が格段に向上し，本システムが良好に機能することを示した．また，内湾での SST も与えることの可能な新型の GCOM-C（しきさい）衛星データを同化することの有用性・優位性を実証した．

一方，瀬戸内海の各湾・灘域ごとに解析したところ，豊後水道海域において春夏期の水温再現精度低下が顕在化していた．SST に加えて，サーミスターチェーン鉛直水

温データを導入することによって、全層で水温の精度が大幅に向上することが分かった。さらに最適な鉛直観測点配置について検討し、豊後水道中部を中心により多くのブイを設置することで再現性が向上するものの、実用性や経済性を考えると、4点程度の鉛直観測点でも十分な精度向上が得られることなどを示した。

豊後水道では、海面加熱と黒潮側からの水平的な移流効果により上層に暖水層が形成され、下層には陸棚斜面に起源をもつ冷水が侵入することにより冷水層が形成される²⁵⁾。この冷水侵入現象は毎年繰り返し発生し、底入り潮 (bottom Intrusion) と呼ばれる。また、豊予海峡・佐田岬周辺において夏場に発達する厚い混合層は、外洋系水塊の侵入を強く阻害すると言われている²⁶⁾。つまり、SST 同化モデルでは豊後水道海域における春夏成層期の鉛直混合層が過小評価され、底入り潮の侵入が過度に表現されてモデル精度が低下したと考察される。今回は豊後水道において水温の鉛直分布を追加することで冷水侵入がある程度抑制され、それが精度向上につながったと解釈される。しかし、成層期の表層混合や底入り潮をより精緻に表現するためには、温度風平衡を通じて力学バランスに寄与する密度 (特に塩分) や、あるいは直接的に ADCP 流速などが同化できると、豊後水道での流況再現が飛躍的に向上すると考えられる。この精度向上はひいては、豊後水道を起点とし、瀬戸内海をゆっくりと時計回りに東進する瀬戸内海通過流の再現性向上を通じて、瀬戸内海全域の流況精度向上に資する可能性が高い。

4. おわりに

本研究では、港湾行政の各施策に科学的・工学的に資するために、瀬戸内海全域を対象とした3次元流動モデルに適用可能な2種類のデータ同化 (DA) 法を組み込み、精度向上の確認および技術的な優位性ならびに調整ポイントなどを総合的に精査した。

沿岸域における正確な海況予報は、港湾管理・海洋建設・漂流物回収・漁場予測・航路選択・海洋環境モニタリングなど、様々な分野から期待されている。しかしながら、瀬戸内海のような内湾における流動や水質は、局地気象、河川からの淡水流入、黒潮流路変動に代表される外洋流動などの影響を強く受けて複雑に形成されるため、ごく単純な潮流などを除くと十分な再現性が得られないことが少なくない。正確な海況予報を行うための手法として、観測データと予報モデルを融合して海洋の尤もらしい状態を推定するデータ同化が非常に有効であることは広く認知されつつある。データ同化の導入に伴い、これまでの海洋モデルでは予測できなかった海洋状態の推定や重大な発見が多くなされ、工学や科学の発展にも大きく貢献してきた。一般的な (主に外洋を対象とした) 海洋データ同化では、衛星海面高度・表層水温、Argoフロート、各種現地観測データ等が使用されるが、半閉鎖性内湾域や沿岸域では、陸面ノイズに伴う衛星データの精度劣化やArgoの欠測が深刻なボトルネックになり、外洋域や陸棚海域と比較してデータ同化の導入が立ち遅れていた。

これに対して、特に我が国の三大湾においては、海上交通、水産、環境アセスメント等のために様々な観測データが取得されている。本研究で対象とした瀬戸内海においても、国土交通省近畿地方整備局が海洋環境整備事業の一環として行なっている観測データ、大阪湾水質定点自動観測システムにより取得される多点の流速・水温・塩分の鉛直分布データ、海洋短波レーダーによる表面流速等が存在する。本研究ではこれらの観測データを有効活用し、これらを用いた適切なデータ同化手法を3次元流動モデルに組み込むことで、瀬戸内海を対象とした流動場・密度場の再現性の向上をは

かるための技術開発を行ったものである。

具体的には、まず、3次元変分法(3DVAR)を2段ネスト瀬戸内海流動モデルのROMS-L2モデルに組み込み、瀬戸内総合水質調査による水温・塩分データを同化させたROMS-3DVARシステムを開発した。観測システムシミュレーション実験(OSSE)等によってDAによる精度向上を定量的に評価し、瀬戸内海内部における水温・塩分分布の再現性がDAによって飛躍的に向上することを明確に示した。また、瀬戸内海塩分場の再現性をより向上させるためには、正確な流入淡水情報(二級河川や出水イベントを含む詳細な流量データ)が欠かせないことが示唆された。さらに、境界条件に含まれている不確実性がデータ同化に及ぼす効果についても検討を行うことで、本ROMS-3DVARシステムの発展につながる可能性が示された。本ROMS-3DVARシステムの成功は、2.4で検討したように、極めて高精度なDAなしモデル(forwardモデル)が下敷きになっている。つまり、高精度な海洋予報のためには単にDA技術だけに頼るのではなく、使用する海洋モデルや海域の特性を深く理解し、外力・境界条件設定を含めた総合的なモデリング技術の質的向上を同時に進めていくことが本質的に重要であると考察された。

ついで、アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)法DAを領域海洋循環モデルROMSに組み込み、ROMS-EnKFデータ同化システムを開発した。これを用いて瀬戸内海全域に対するOSSEを行い、EnKF DAにより水温の再現精度が格段に向上し、本システムが良好に機能することを示した。また、内湾でのSSTも与えることの可能な新型のGCOM-C(しきさい)衛星データを同化することの有用性・優位性を実証した。一方、瀬戸内海の各湾・灘域ごとの再現性を解析したところ、豊後水道海域において春夏期の水温再現精度低下が顕在化しており、SSTに加えて、サーミスターチェーン鉛直水温データを導入することによって、全層で水温の精度が大幅に向上することが分かった。さらに最適な鉛直観測点配置について検討し、豊後水道中部を中心に多くのブイを設置することで再現性が向上するものの、実用性や経済性を考えると、4点程度の鉛直観測点でも十分な精度向上が得られることなどが示された。

以上のように、3次元流動モデルにデータ同化を組み込むことでさらに飛躍的な精度向上が達成されることが明示されたが、このような高解像度・高精度なモデルは、現地データをより高密度で組み込むことにより、極めて精緻な瀬戸内海デジタルツインへと昇華していくことが期待される。瀬戸内海デジタルツインの応用可能性は広く、最適な港湾構造物配置、航路選定、浚渫工事計画、浮遊ゴミ・汚染物質回収、海洋生態系ネットワーク解析による適正な計画など多岐にわたることが期待される。

参 考 文 献

- 1) Usui, N. and coauthors: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system : Some early results, *Advances in Space Research*, 37, 806-822, 2006.
- 2) Miyazawa, Y. and coauthors: Water mass variability in the Western North Pacific detected in 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-756, 2009.
- 3) 入江政安, 藤井裕司, 岡田輝久, 西田修三: 海洋レーダーによって観測される表面流速の4次元変分法を用いたデータ同化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, pp.I_501-I_505, 2013.

- 4) 入江政安, 西田修三, 辻陽平, 岡田輝久: 4次元変分データ同化法を用いた密度分布と水質の再現性向上, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No.2, pp.I_446-I_450, 2012.
- 5) Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C.: The Regional Oceanic Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography-following- coordinate oceanic model, *Ocean Modell.*, Vol.9, pp. 347-404, 2005.
- 6) 内山雄介, 小碓大地, 西井達也, 御手洗哲司: コネ クティビティを用いた瀬戸内海全域における海洋生態系ネットワーク構造の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_1076-I_1080, 2014.
- 7) 小碓大地, 内山雄介, 御手洗哲司: 黒潮流路変動が 瀬戸内海全域の幼稚仔分散過程に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1231-I_1236, 2015.
- 8) Miyoshi, T.: *Ensemble Kalman Filter Experiments with a Primitive-equation global model*, Ph. D. dissertation, University of Maryland, College Park, MD, 2005.
- 9) Parrish, D. F. and Derber, J. C. : The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system, *Mon. Weather Rev.*, Vol. 120, pp. 1747-1763, 1992.
- 10) Uchiyama, Y., McWilliams, J.C. and Shchepetkin, A.F. (2010): Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex force formalism: Application to the surf zone, *Ocean Modelling*, Vol. 34:1-2, pp.16-35.
- 11) Uchiyama, Y., Kanki, R., Takano, A., Yamazaki, H. and Miyazawa, Y. (2018): Mesoscale reproducibility in regional ocean modeling with a 3-D stratification estimate based on Aviso-Argo data, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 56, No. 4, pp. 212-229.
- 12) Uchiyama, Y., Zhang, X., Suzue, Y., Kosako, T., Miyazawa, Y. and Nakayama, A. (2018): Residual effects of treated effluent diversion on a seaweed farm in a tidal strait using a multi-nested high-resolution 3-D circulation-dispersal model, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 130, pp.40-54.
- 13) 安田誠宏, 山口達也, 金珠列, 島田広昭, 石垣泰輔, 間瀬肇: 潮汐・高潮・波浪結合モデルとメソ気象モデル WRF を用いた瀬戸内海における高潮再現計算に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 55, pp. 331-335, 2008.
- 14) 中山哲厳, 八木宏ほか: 瀬戸内海全域を対象とした流動・低次生産モデルの開発及びマコガレイ幼稚仔分散過程への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 1126-1130, 2009.
- 15) Usui, N., Ishizaki, S., Fujii, Y., Tsujino, H. & Yasuda, T.: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in Space Research*, Vol. 37, No. 4, pp. 806-822, 2006.
- 16) Miyazawa, Y. *et al.*: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *Journal of Oceanography*, Vol. 65, No. 6, pp. 737-756, 2009.
- 17) Evensen, G.: The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, Vol. 53, No. 4, pp. 343-367, 2003.
- 18) 碓氷典久, 坂本圭, 小川浩司, 藤井陽介, 辻野博之, 山中吾郎, 倉賀野連, 蒲地政文: 日本沿岸海況監視予測システムによる 2011 年瀬戸内海異常潮位の再現実験, 測候時報, Vol. 81, 特別号, pp. S53-S62, 2014.
- 19) 黒澤賢太, 内山雄介, 三好建正: 3次元変分法を用いた瀬戸内海流動再解析・予報モデルの高精度化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_1663-I_1668, 2017.
- 20) Shchepetkin, A.F. & J.C. McWilliams: The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean*

- Modelling*, Vol. 9, pp.347-404, 2005.
- 21) Kurosawa, K., Uchiyama, Y. & Kosako, T.: Development of a numerical marine weather routing system for coastal and marginal seas using regional oceanic and atmospheric simulations. *Ocean Engineering*, Vol. 195, 106706, 2020.
 - 22) Whitaker, J. S. & Hamill, T. M.: Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, No. 7, pp. 1913-1924, 2002.
 - 23) Miyoshi, T., Yamane, S. & Enomoto, T.: Localizing the error covariance by physical distances within a local ensemble transform Kalman filter (LETKF), *SOLA*, Vol. 3, pp. 89-92, 2007.
 - 24) Masutani, M., J. S. Woollen, S. J. Lord, G. D., T. J. Kleespies, S. A. Wood, S. Greco, H. Sun, J. Terry, V. Kapoor, R. Treadon & K. A. Campana: Observing system simulation experiments at the National Centers for Environmental Prediction. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, D07101, 2010.
 - 25) Kaneda, A., Takeoka, H., Nagaura, E. & Koizumi, Y.: Periodic intrusion of cold water from the Pacific Ocean into the bottom layer of the Bungo Channel in Japan. *Journal of Oceanography*, Vol. 58, No. 4, pp. 547-556, 2002.
 - 26) Nagai, T. & Hibiya, T.: Numerical simulation of tidally induced eddies in the Bungo Channel: A possible role for sporadic Kuroshio-water intrusion. *Journal of Oceanography*, Vol. 68, No. 5, pp. 797-806, 2012.