

(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会
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

助成番号：R6第18-2号

内山雄介（神戸大学工学研究科市民工学専攻）

研究背景

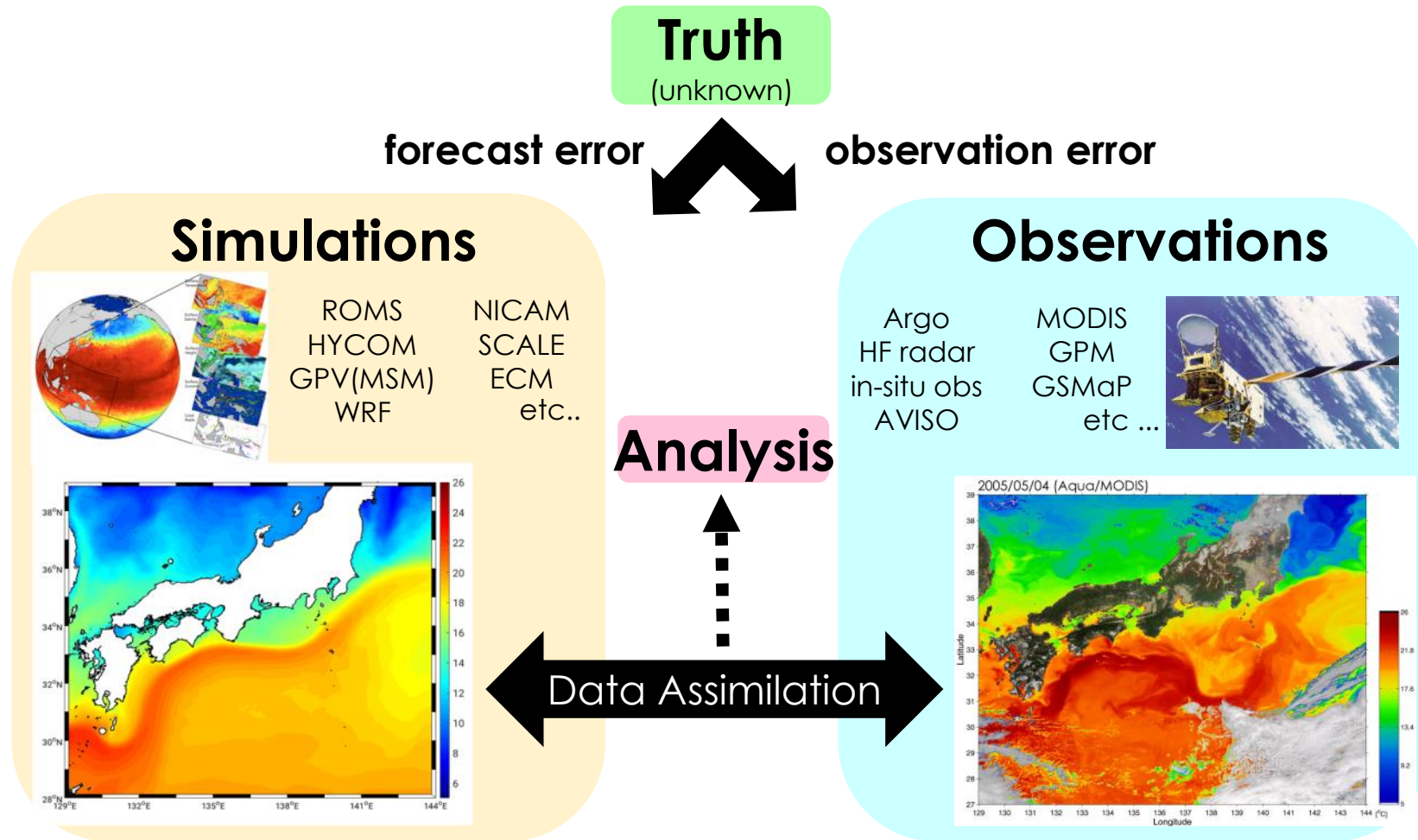
- 瀬戸内海は日本の最大の内海であり、沿岸域の多くの人々の暮らしを支えてきた。そのため、瀬戸内海における高精度な海況予報は、生態系調査・防災・港湾管理など、様々な分野から期待されている。
- 瀬戸内海では、多様な地形条件、河川からの淡水流入、黒潮流路変動に伴う瀬戸内海通過流の変動などの影響を強く受けるため、そこでの流動や水質は極めて複雑である。
- より精緻な内部流動の再現性が求められる状況下では、通常の数値モデルによって3次元流動場を詳細かつ正確に表現することは困難な場合がある（数値モデルの限界）



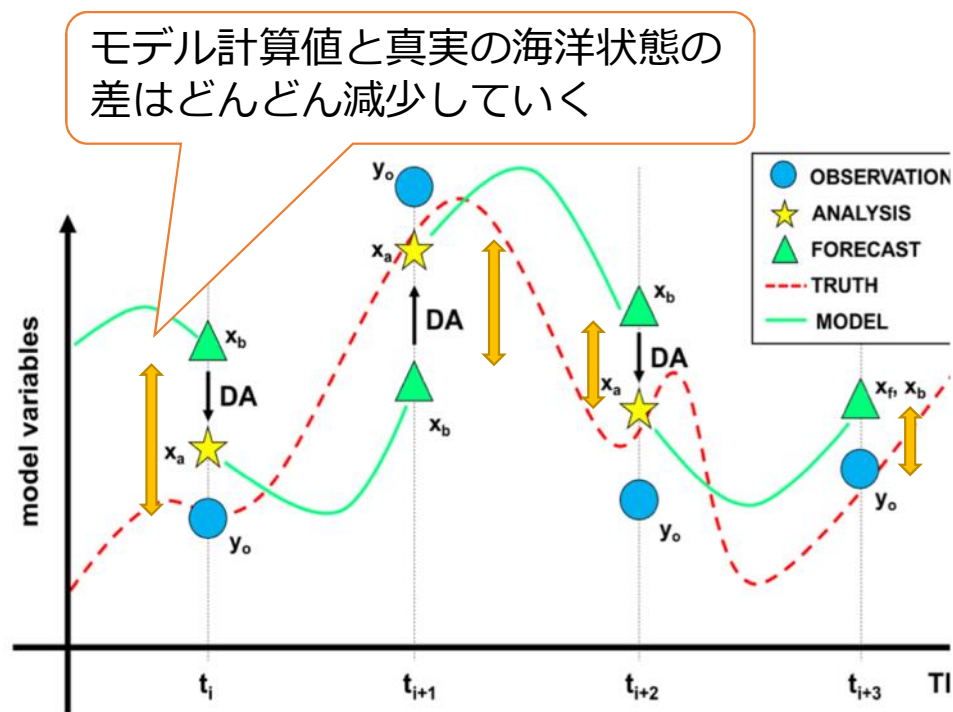
データ同化の導入

- データ同化により数値シミュレーションモデルの再現性を向上させる手法の導入が必要である。
- しかし、半閉鎖性内湾域や沿岸域では、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、データ同化の導入が立ち遅れていた。（同化のためのデータの限界）
- そこで本研究では、①瀬戸内海全域に対するデータ同化流動予測システムを開発し、②2つのデータ同化手法による再現性向上を評価するとともに、③新型衛星データ利用の効果測定および最適な観測計画策定方法の検討を行う

データ同化 (DA: Data Assimilation) とは



データ同化手法1：3次元変分法（3DVAR）



最尤推定法によりコスト関数を最適化

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

解析値と予測値との差の大きさ

解析値と観測値との差の大きさ

$\mathbf{x}$: 解析値

$\mathbf{y}$: 観測値

$\mathbf{x}^b$: $\mathbf{x}$ の背景値

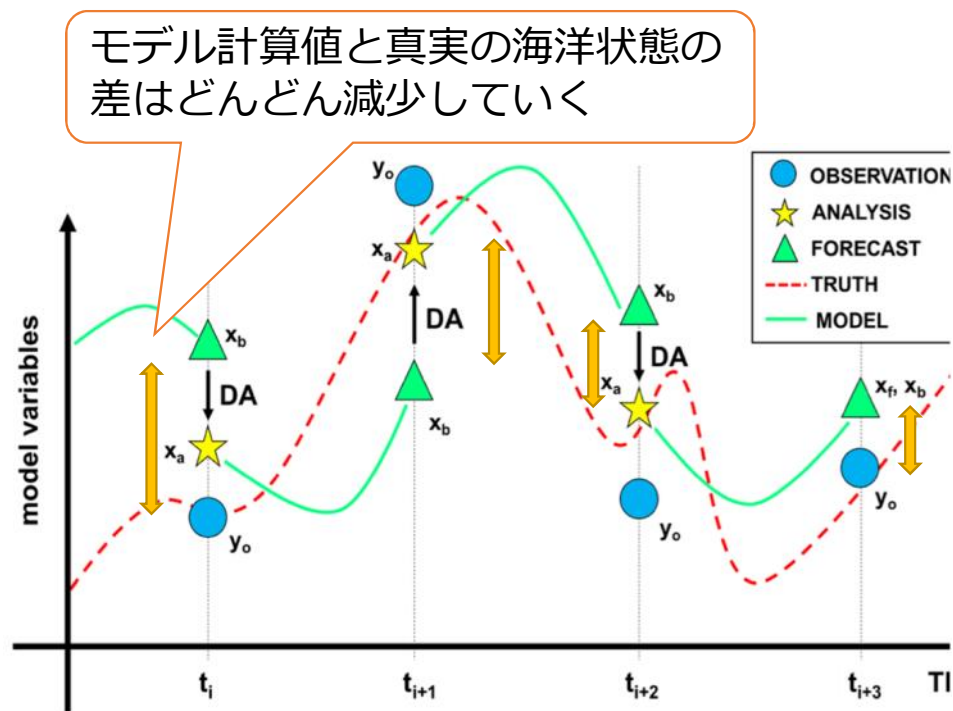
$\mathbf{H}$: 観測演算子

$\mathbf{R}$: 観測誤差分散共分散行列

$\mathbf{B}$: 背景誤差分散共分散行列

➡ $\mathbf{B}$ はNMC法によって算出

データ同化手法2：アンサンブルカルマンフィルター法（ENKF）



解析値 (analysis) 評価手順：

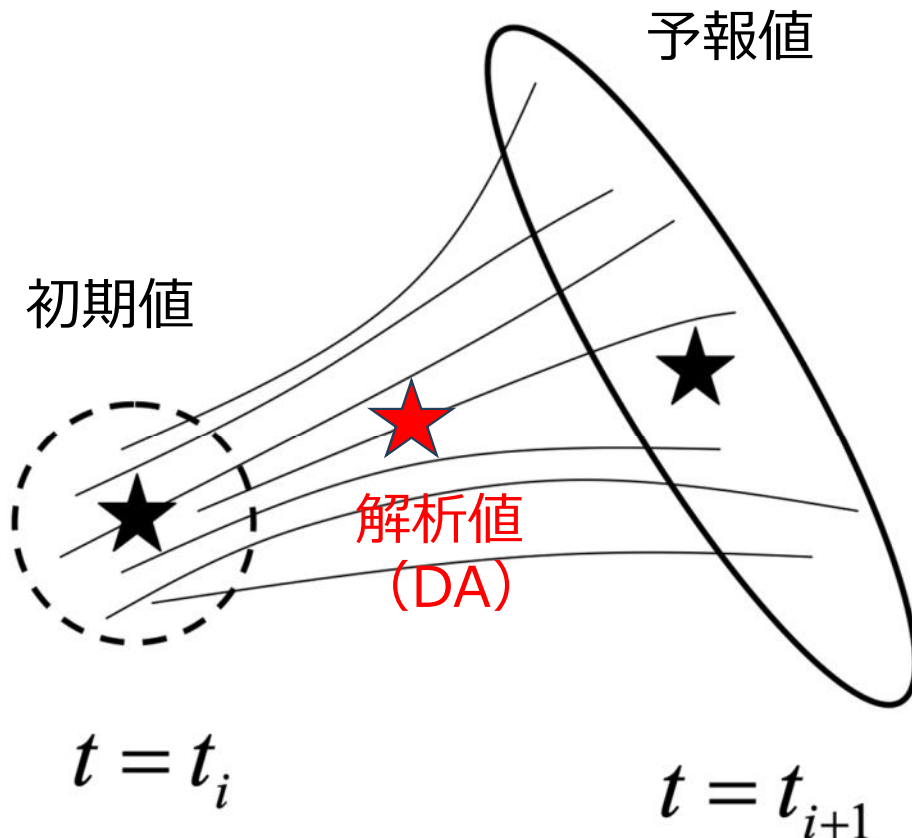
$$x_i^a = x_i^b + K_i (y_i^o - H_i(x_i^b))$$

$$K_i = P_i^b H_i^T (H_i P_i^b H_i^T + R_i)^{-1}$$

$$P_i^f = \frac{1}{m-1} \delta X_i^f (\delta X_i^f)^T$$

ここに, $i = 1, 2 \dots N$ (N は観測データの総数), x_i^a は解析値, x_i^b はモデル予報値(モデル計算結果), y_i^o は観測値, K_i はカルマンゲイン行列, H_i は観測演算子, P_i^b はモデル解析誤差共分散, R_i は観測誤差共分散, δX_i^f は各サンプルとサンプル平均の差に対応した行列, m はサンプル数である.

2つのデータ同化手法の利点・弱点



そもそも観測値にもモデル予報値にも誤差がある.

初期時刻 $t=t_i$ での誤差の広がり（点線）に対し、終端時刻 $t=t_{i+1}$ での誤差の広がり（実線）はより大きく、扁平になることが知られている.

3DVAR (4DVAR : モデルの改造が必要)

1組の観測値・モデル値を用いて1本の経路で修正する → 低コスト・低品質（誤差大きめ）

ENKF

多数の観測値（実測値にランダムな偏差を与える）とモデル値（複数の初期値に対応した予報値）の組を用いて「統計的に（=カルマンフィルタ）」1本の経路を求め、修正する → 高コスト・高品質（誤差小さめ）

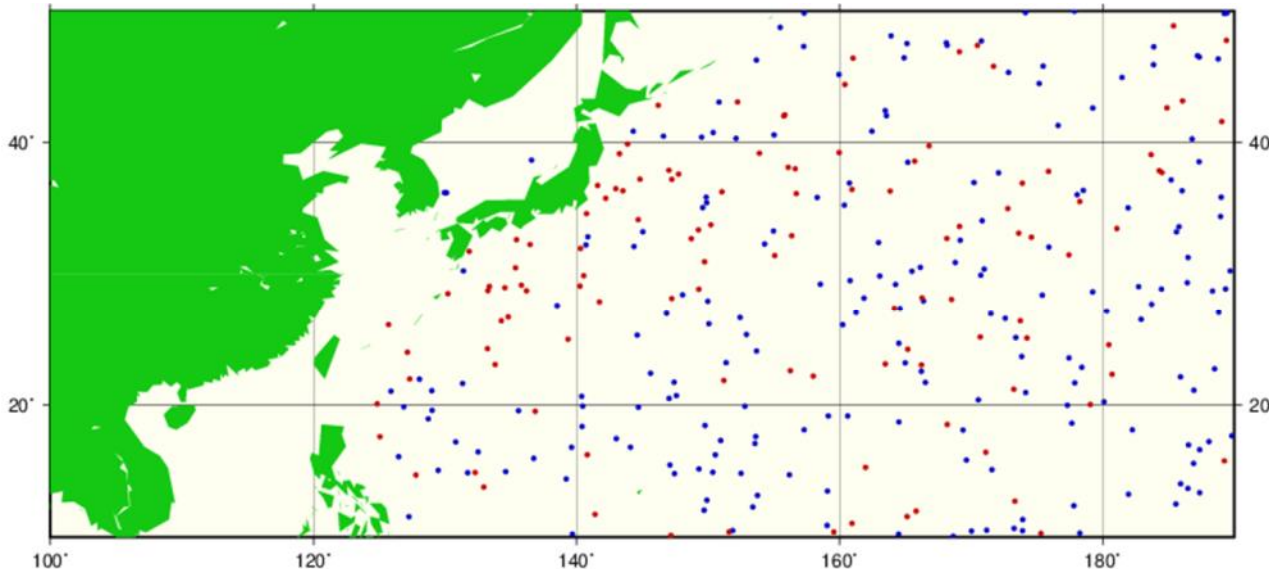
* データ同化には他にも関数あてはめ法、最適内挿法、ナッジング法などがあるが、現業では使われていない

海洋・沿岸流動に対するデータ同化の実例・問題点

【外洋】

- 気象庁 MOVE-JPN → 大領域モデル（空間解像度100kmと10km）では4DVAR, 沿岸域（解像度2km）では3DVAR, 一部ENKFを使用
- JAMSTEC JCOPE2M（解像度10km）, JCOPE-TDA（解像度3km）→ 3DVARを使用

Argoフロートの分布（2025年6月の例）



【沿岸・内湾】

- 大阪大学 ROMS → 大阪湾のみ, 4DVAR使用. データには大阪湾水質定点自動観測システム（入江ら, 2013）, 海洋短波レーダー表面流（入江ら, 2012）
- データの制約: 外洋では衛星データやArgoデータが利用できるが, 沿岸域では観測データの数が圧倒的に少ない. 陸域ノイズ・水面下のデータ?

瀬戸内海全域における3次元的な観測データの利用



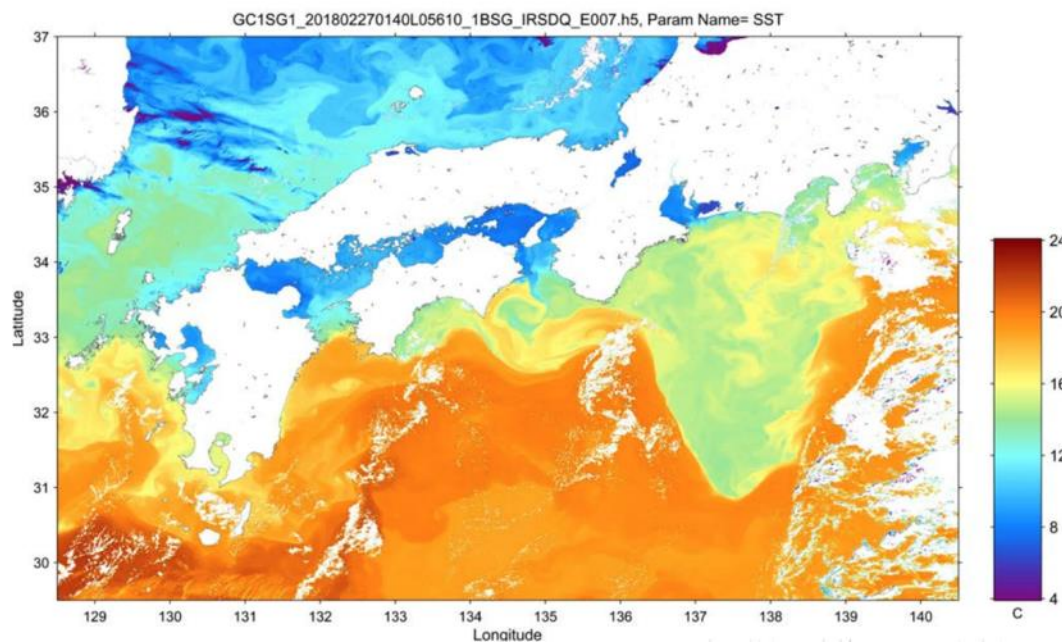
瀬戸内総合水質調査ホームページ

本研究では

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
データを同化に使用する

瀬戸内海全域における衛星観測データの利用可能性評価

- 2018年打ち上げられた観測衛星「しきさい」により、高解像度・高精度な瀬戸内海沿岸域観測データが利用可能となった



「しきさい」人工衛星観測による海面水温（解像度250m）

https://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_c/pdf/20180803_shikisai.pdf

最新の「しきさい」人工衛星観測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

同化効果の評価方法

RMSE（二乗平均誤差平方根）

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}$$

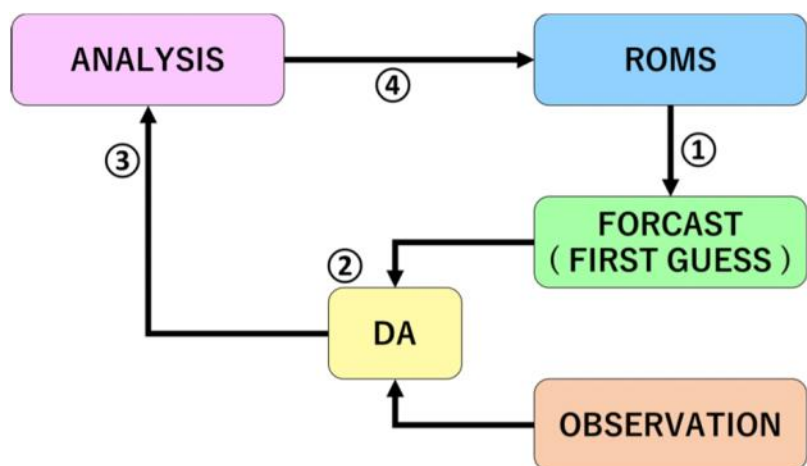
n は比較対象とするデータ数($i = 1, \dots, N$)である.

* つまり, RMSE値が小さいほどモデルの計算結果が真実に近いことを意味する.

データ同化評価法：観測システムシミュレーション実験（OSSE）

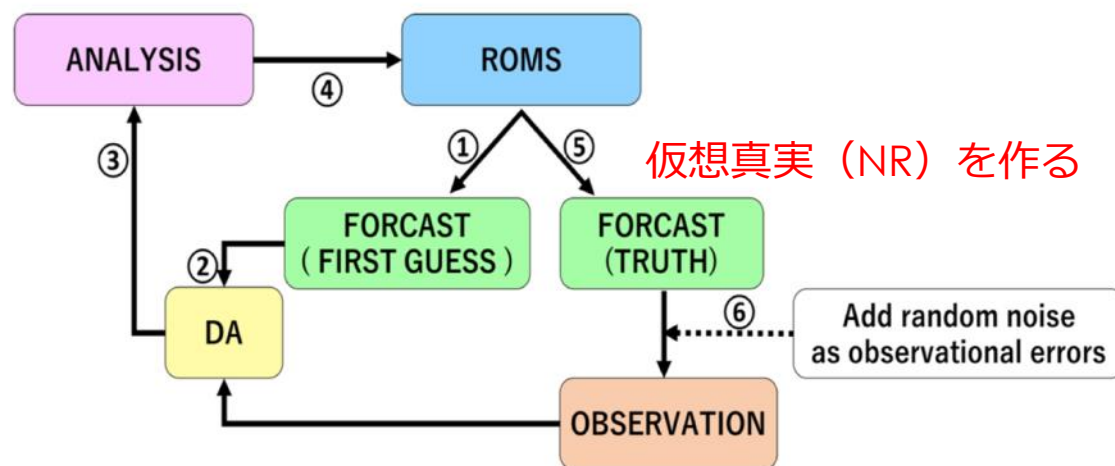
OSSE：実在しない観測システム（仮想観測システム）を計算機に構築し、仮想的な観測データを用いてデータ同化実験を行い、DAと観測システムの振る舞いを評価する手法

通常のデータ同化サイクル



実際の観測データを使う

OSSEによるデータ同化サイクル



仮想観測データを作る

1. 瀬戸内海全域3DVARデータ同化流動予測システムの開発

神戸大で開発され運用中の高解像度3次元瀬戸内海流動モデルへ計算負荷の低い3DVARを実装し、観測データの入力システムと評価システムの開発を行う

3DVAR瀬戸内海モデルとOSSE評価

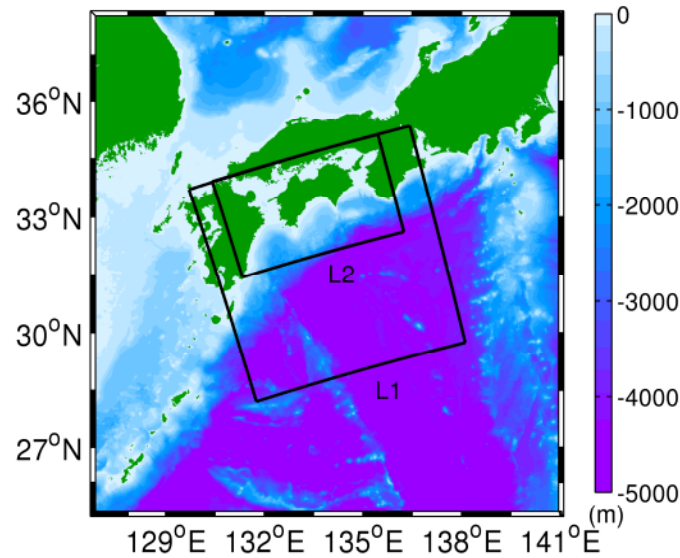
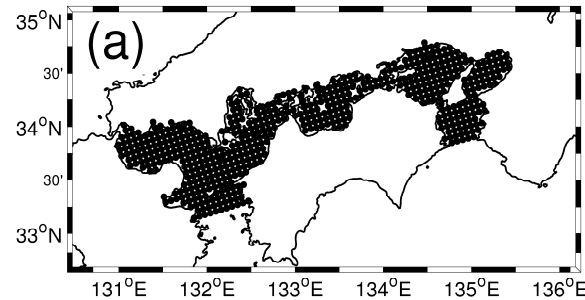


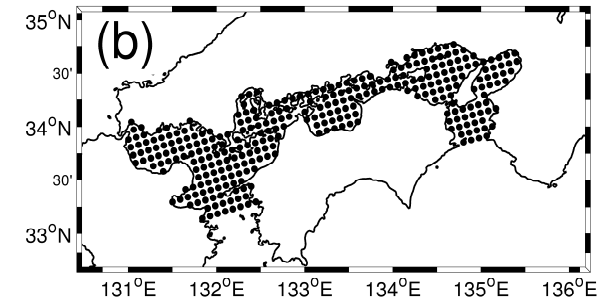
表-1 L2領域計算条件

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	600m
初期・開境界条件	ROMS-L1 (水平解像度2km)
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)

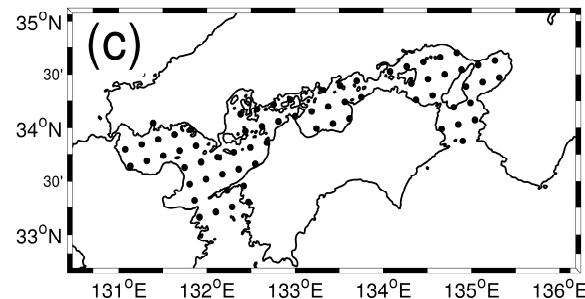
OBSERVATION STATIONS (DENSE1 NETWORK NOBS = 582)



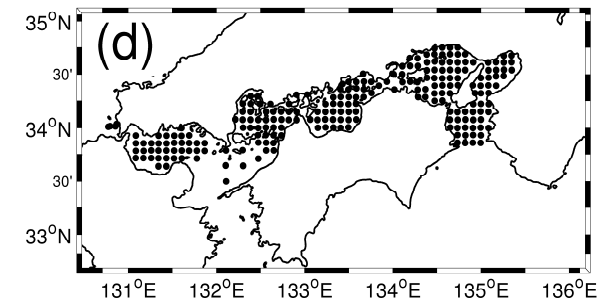
OBSERVATION STATIONS (DENSE2 NETWORK NOBS = 311)



OBSERVATION STATIONS (SPARSE NETWORK NOBS = 69)



OBSERVATION STATIONS (REALISTIC NETWORK NOBS = 229)



(a)10グリッドごとに1点観測点を設定

(b)14グリッドごとに1点観測点を設定

(c)30グリッドごとに1点観測点を設定

(d)2013年瀬戸内総合水質調査における観測点

OSSEによる同化効果の測定

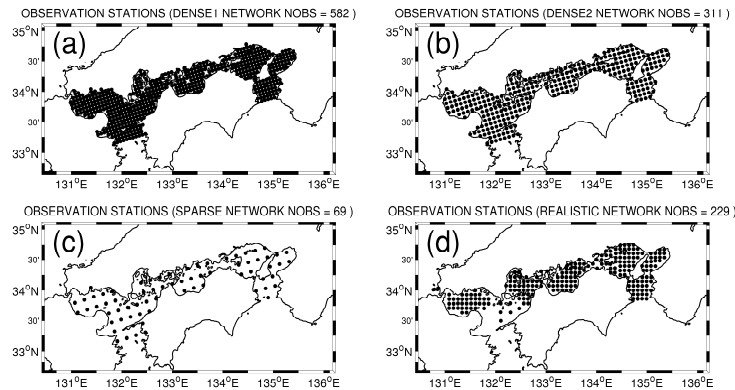
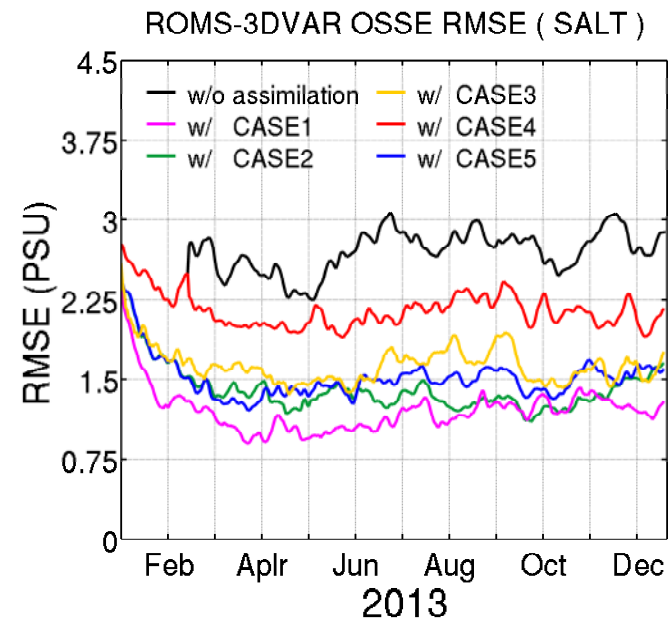
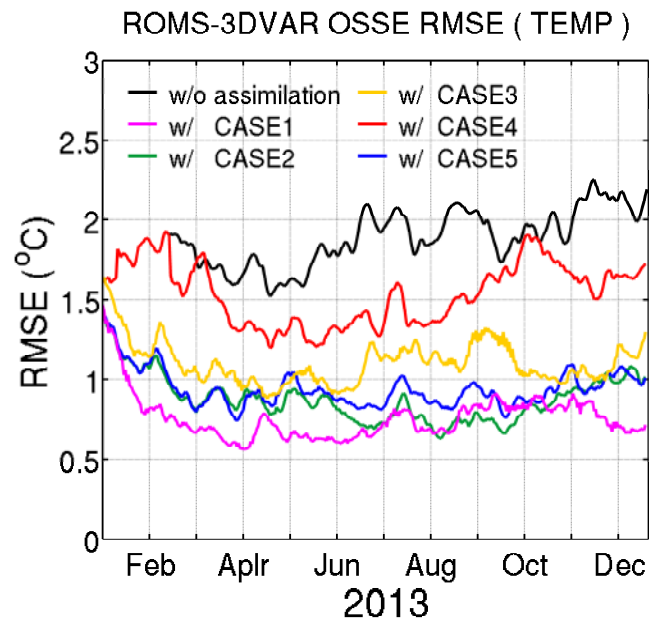


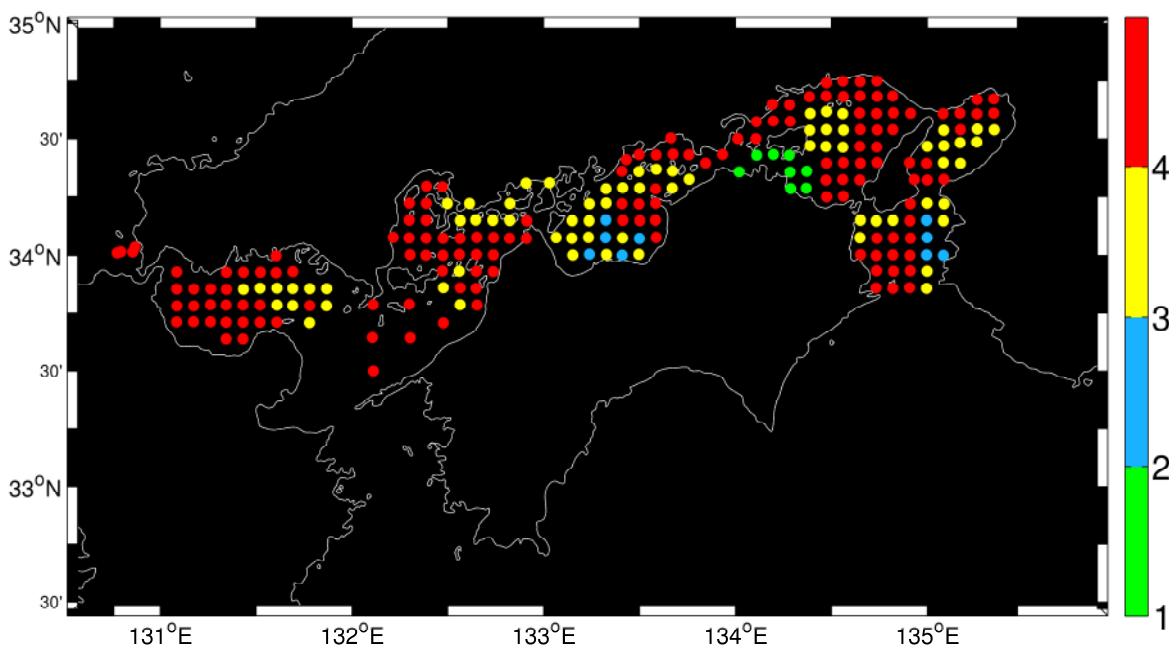
表-2 OSSE解析で行った DA あり全5ケースの諸条件.

	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

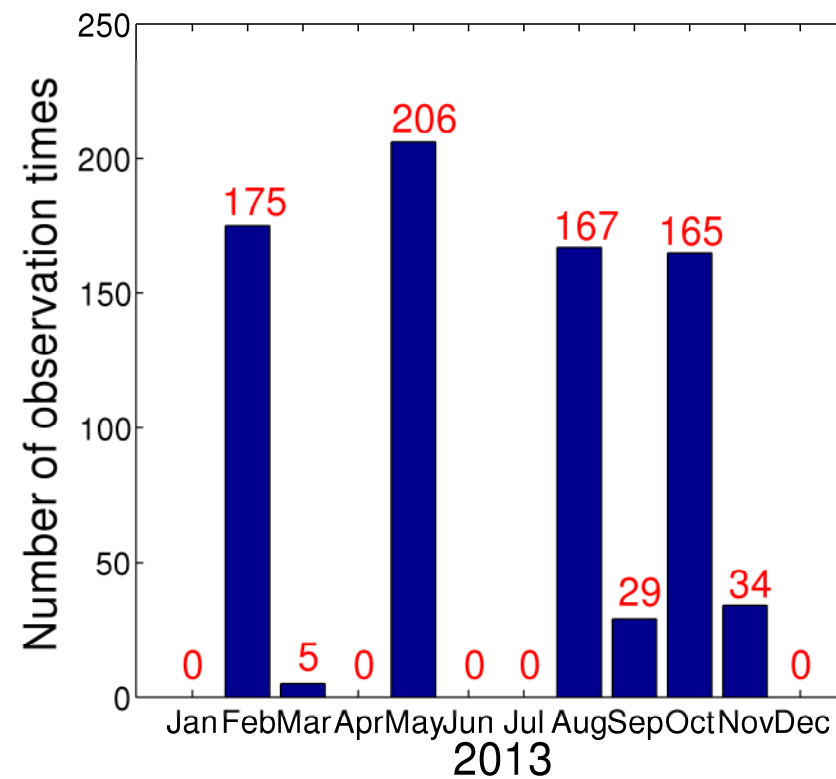


実際の現地観測データを3DVARで同化

瀬戸内総合水質調査 (2013年)



瀬戸内総合水質調査の2013年における観測地点とその回数



実際の現地観測データを3DVARで同化

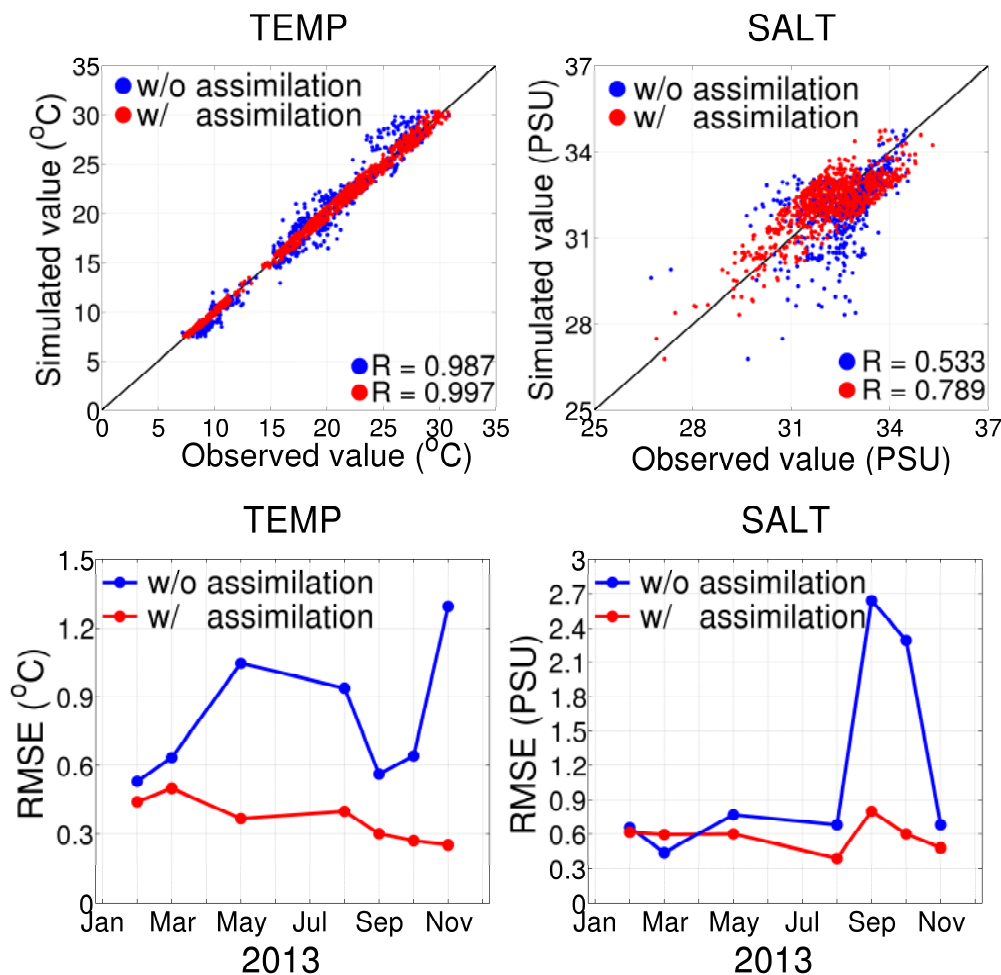


表-1 L2 領域計算条件

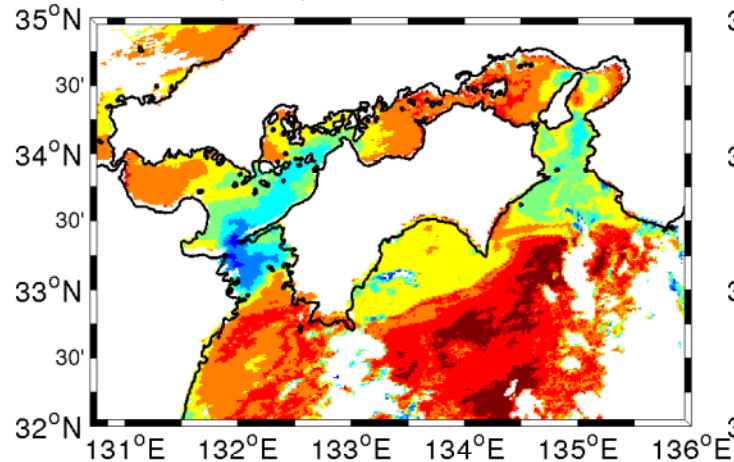
計算期間	2007 年 1 月 1 日～2015 年 5 月 1 日
格子数	802 × 482 × 鉛直 32 層
水平空間解像度	600 m
初期・開境界条件	ROMS-L1 (水平解像度 2km)
外力 (海上風)	JMA GPV-MSM (1 時間値)
海面フラックス	NOAA-COADS (月平均気候値)
潮汐	TPX07.0 全球調和定数 (10 分潮)
一級河川流量	日本河川協会雨量・流量データベース (27 本, 月平均気候値)

瀬戸内海においては、
2級河川や出水イベントの情報が
大事 !!!

同化に使っていない衛星データとの比較：表層水温

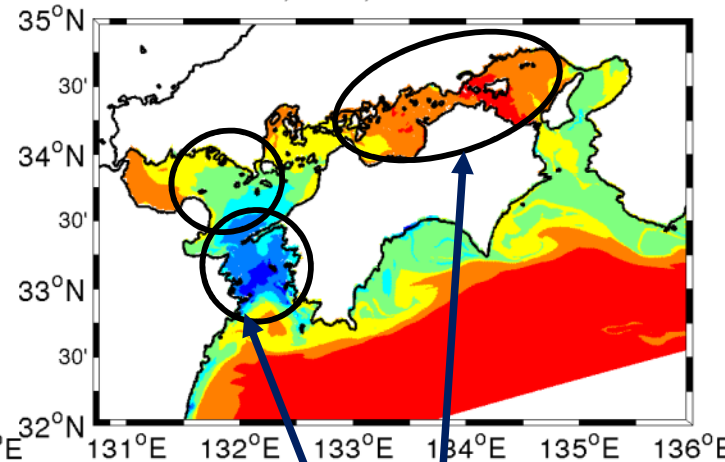
衛星データ
(3DVARには使っていない)

MODIS, SST, 10 Oct. 2013 at 03:48



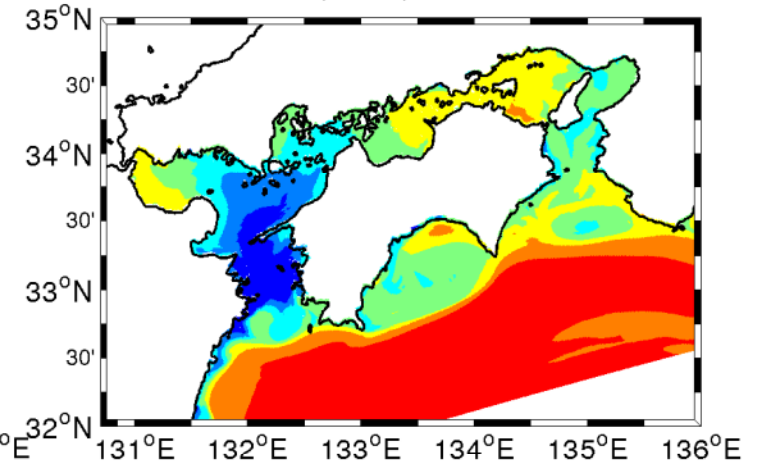
同化あり

ROMS 3DVAR, SST, 10 Oct. 2013 at 04:00



同化なし

without assimilation, SST, 10 Oct. 2013 at 04:00



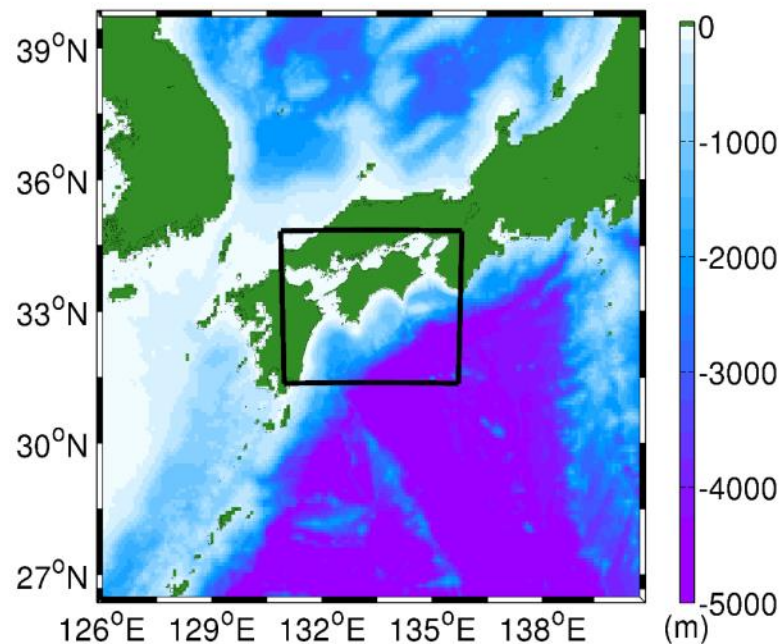
精度向上

2. 瀬戸内海全域アンサンブルカルマンフィルター 同化流動予測システムの開発

沿岸域の海洋流動予報モデルとして初めてアンサンブルカルマンフィルター法を用いたデータ同化を導入．OSSEによる精度評価および最適な観測データ取得方法提言に向けた解析を行う

モデル計算領域と計算条件

本研究では，ENKFの膨大な計算量を考慮し，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（Kurosawaら，2020）を使用する．モデル計算領域と条件は以下に示す．アンサンブルメンバー数は10とする → 小規模なスパコンあるいは高性能なワークステーションで計算可能な負荷に抑える



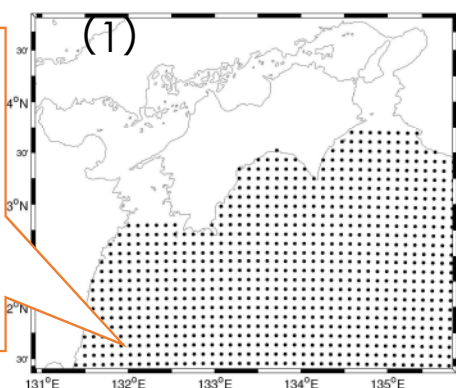
計算期間	2014年4月～2015年3月
格子数	224× 192 × 鉛直20層
時間ステップ	120秒
風応力	GPV-MSM (気象庁)
各種海面 フラックス	COADS
海表面温度	Pathfinder-AVHRR
海底地形	JEGG500 , SRTM30
境界条件	JCOPE2
潮汐	TPXO7.2
水平解像度	2.0km

OSSEによる同化実験の諸条件 (CASE1~3)

開発したENKF-ROMSシステムの性能と「しきさい」衛星観測システムがモデル精度に及ぼす影響を検討するために、OSSE方法を用いて以下の3通りの同化実験を行う。

OSSE	観測点 水平分布	観測点 鉛直分布	同化 サイクル	観測地点数
CASE 1	(1)	表層のみ	6時間	870
CASE 2	(2)	表層のみ	6時間	230
CASE 3	(3)	表層のみ	6時間	1100

従来の衛星による観測データの分布を模する（内湾域データが欠落する）

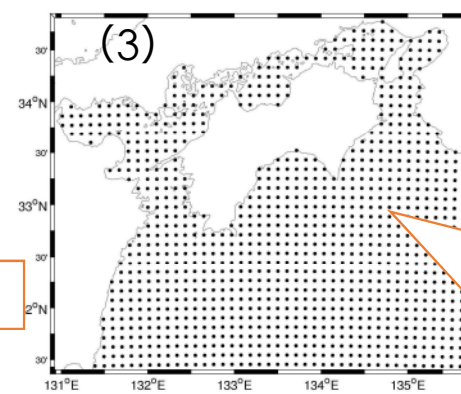


CASE 1 (外洋のみ)



CASE2(内湾のみ)

ケース 1 の対照とする



CASE3(全海域)

最新の「しきさい」衛星による全海域観測データの分布を模する

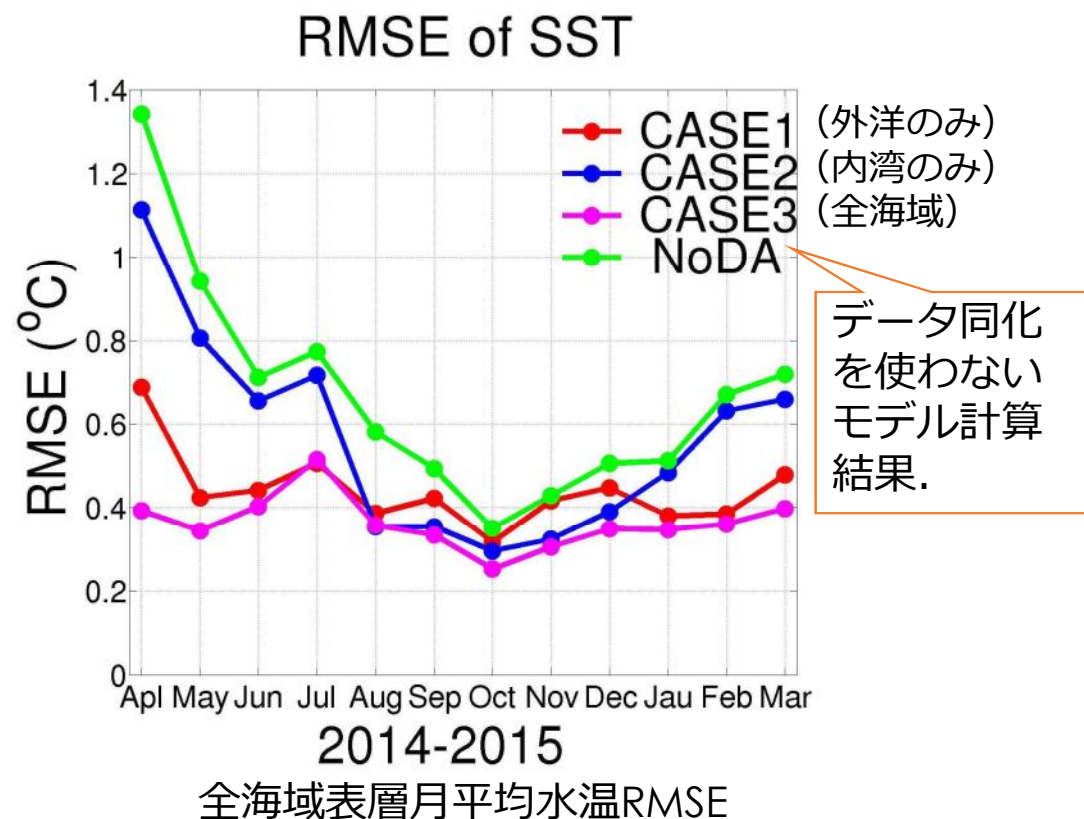
RMSEによる同化効果の評価 (CASE1~3)

RMSE (二乗平均誤差平方根)
とは, 以下のように定義される:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}$$

nは比較対象とするデータ数($i = 1, \dots, N$)である.

つまり, RMSE値が小さいほどモデルの計算結果が真実に近いことを意味する.



海域別RMSE評価 (CASE3 : 全領域同化)

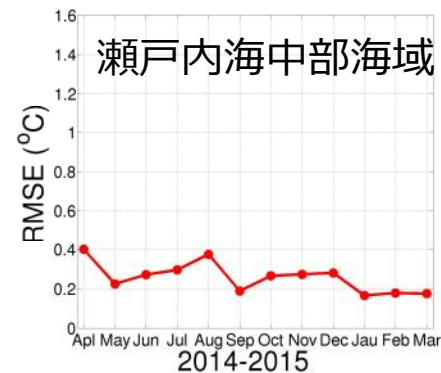


(https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/g2/g2cat10/index.html)

同化精度が最も高いCASE 3 の結果を使用する

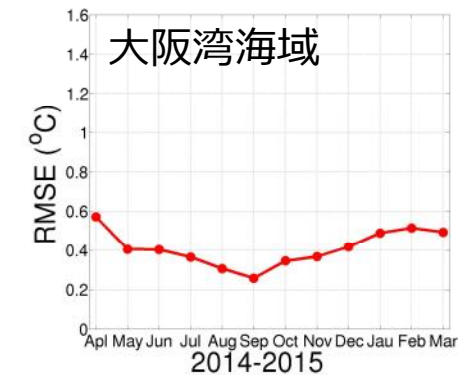
RMSE of SST

瀬戸内海中部海域



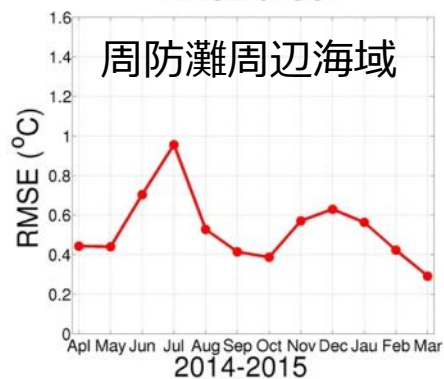
RMSE of SST

大阪湾海域



RMSE of SST

周防灘周辺海域



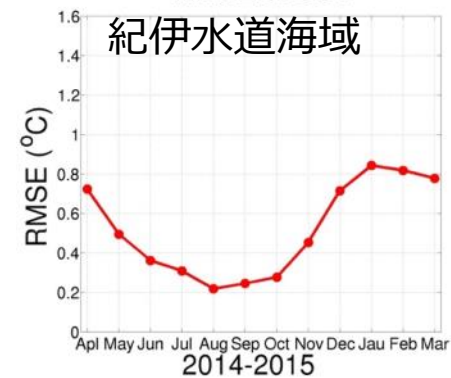
RMSE of SST

豊後水道海域



RMSE of SST

紀伊水道海域

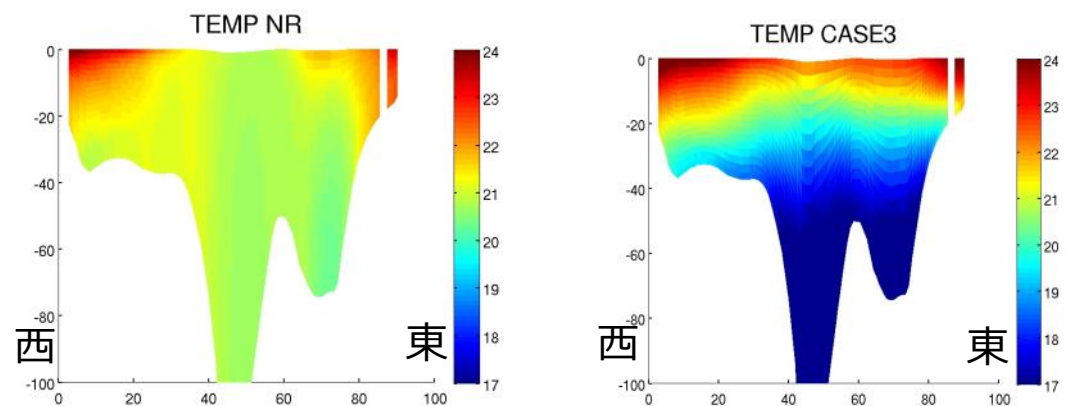


RMSE of SST

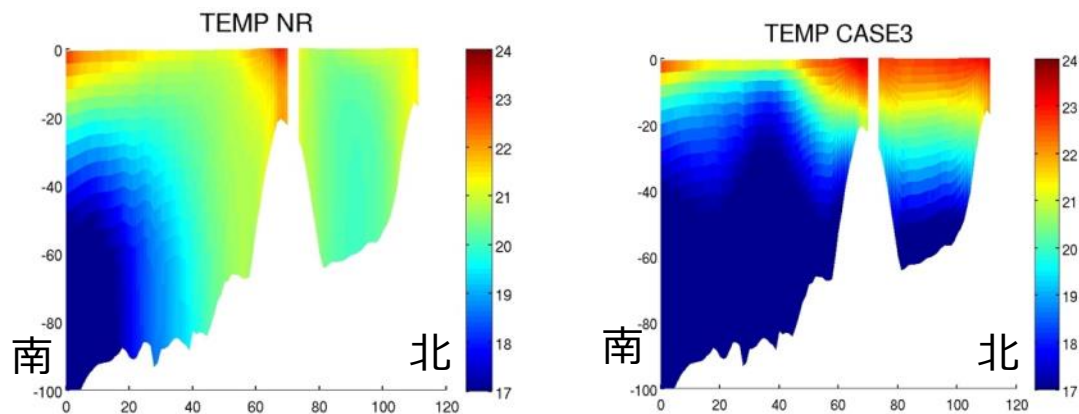
広島海域



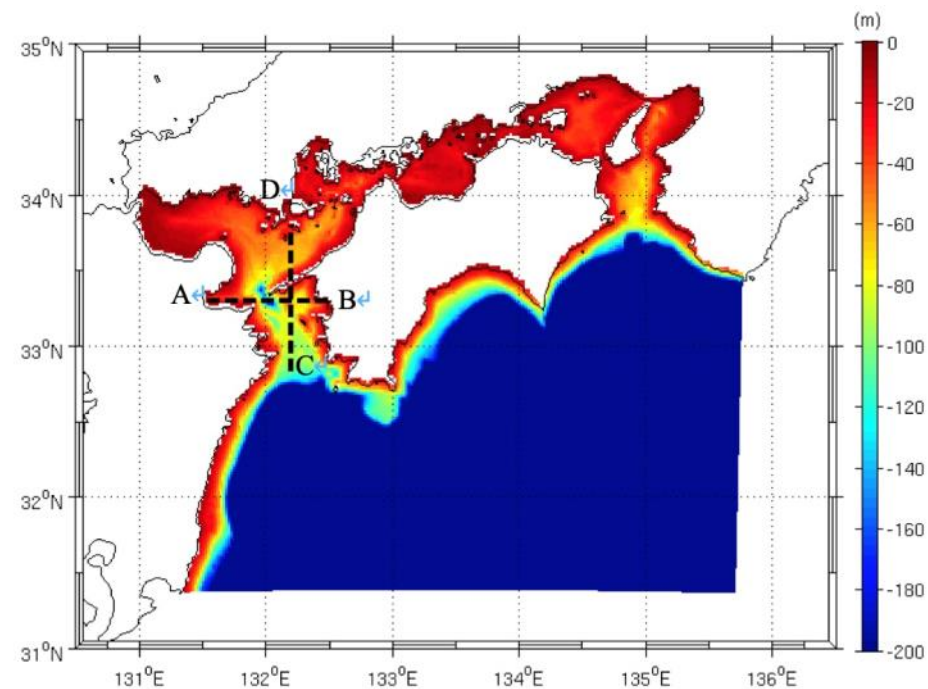
水温鉛直断面構造 (CASE1~3)



線A-Bの間における七月の鉛直水温分布 (豊後水道東西方向)



線C-Dの間における七月の鉛直水温分布 (豊後水道南北方向)

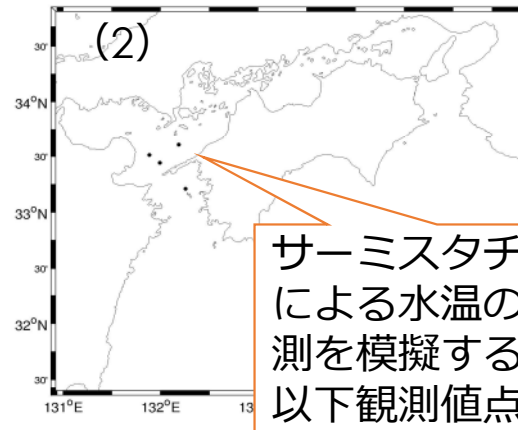
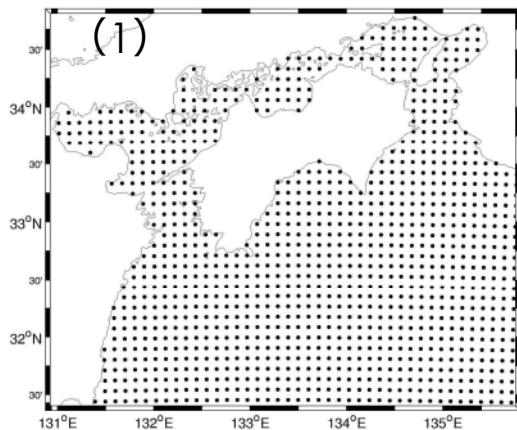


検査線の設置場所

OSSEによる同化実験の諸条件 (CASE4)

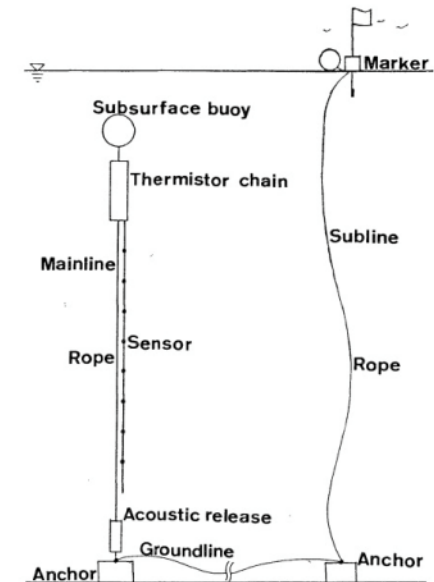
モデルの精度をさらに向上させるために、仮想鉛直観測点を表層以下に追加して新しい同化実験を行う。

OSSE	観測点 水平分布 (表層)	観測点 水平分布 (表層以下)	観測点 鉛直分布	同化 サイクル	観測 地点数
CASE 4	(1)	(2)	全層	6時間ごと	1176



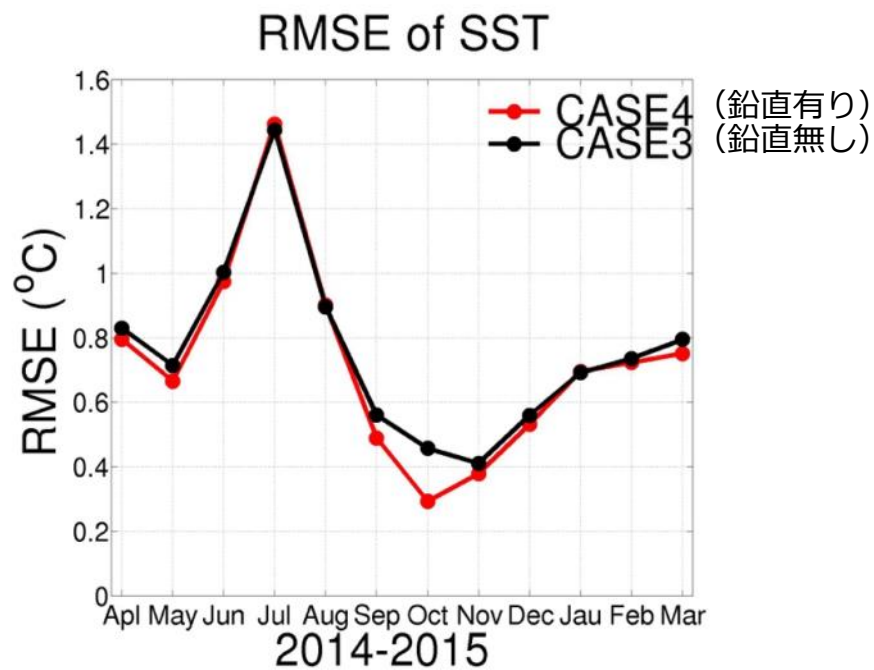
サーミスタチェーンによる水温の鉛直観測を模擬する。表層以下観測値点数総計 $4 \times 19 = 76$ 個

- 鉛直観測点の設置方法は、サーミスタチェーンによる水温の鉛直観測を模擬し、鉛直20層(全層)に1層ごとに仮想観測点を設置する。

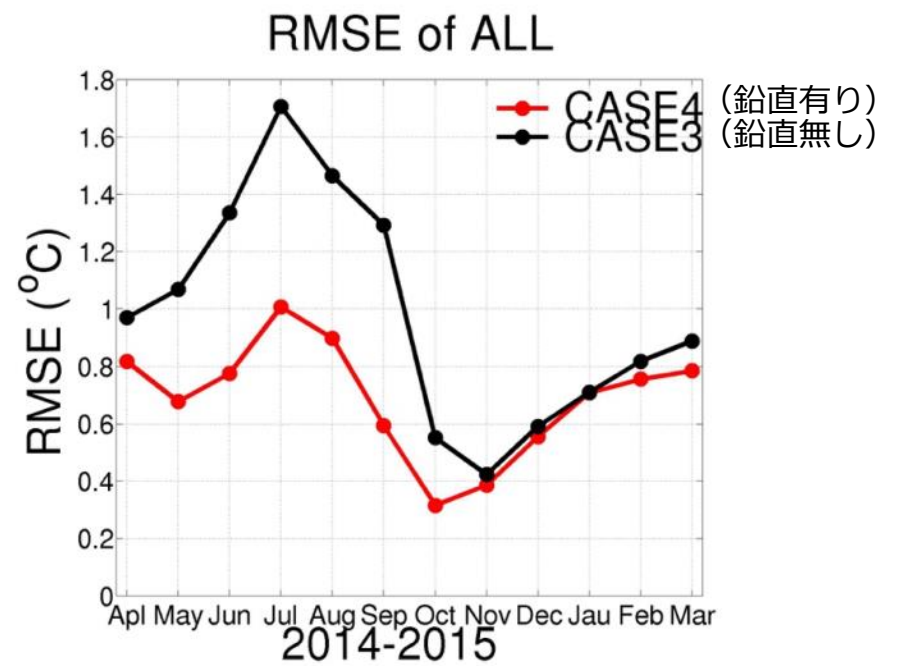


サーミスタチェーン観測

RMSE評価 (CASE4)

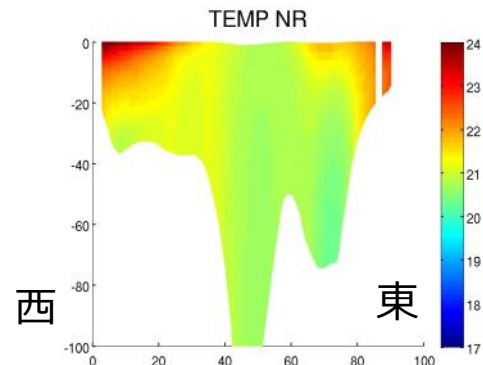


豊後水道海域の表層月平均水温RMSE

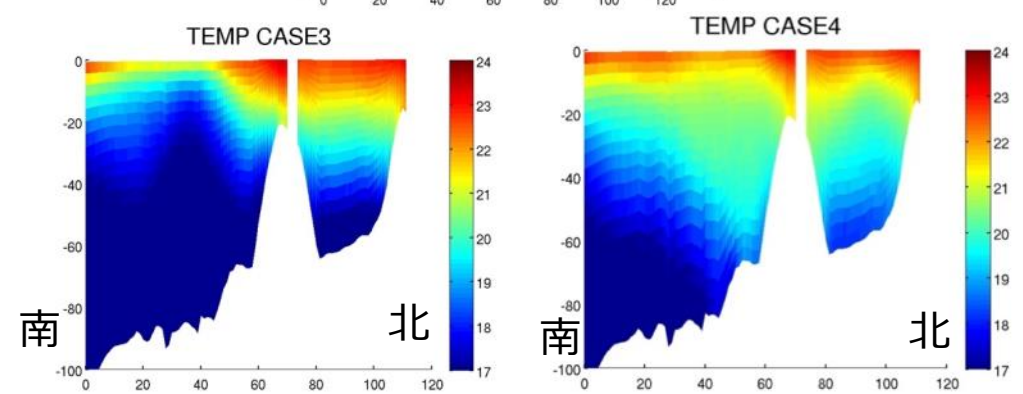
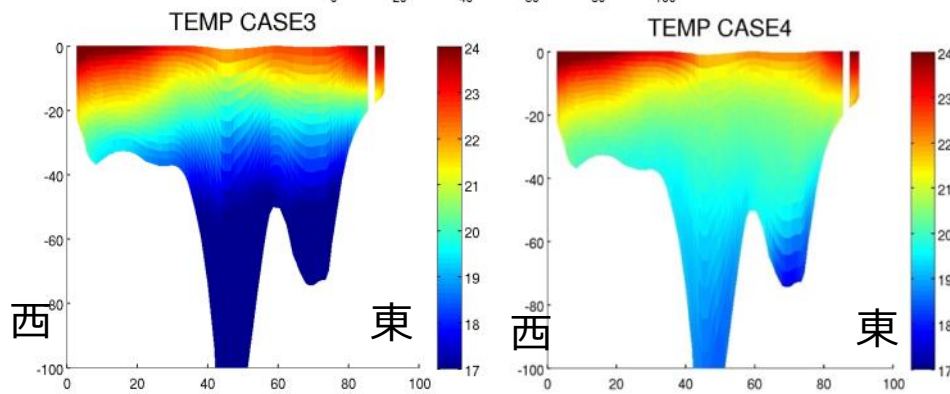
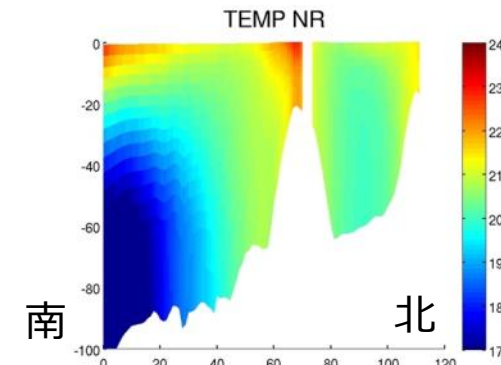


豊後水道海域の全層月平均水温RMSE

水温鉛直断面構造 (CASE4)



検査線は前の設置
と同じ.



線A-Bの間における七月の鉛直水温分布 (豊後水道東西方向)

線C-Dの間における七月の鉛直水温分布 (豊後水道南北方向)

豊後水道での精度低下についての考察

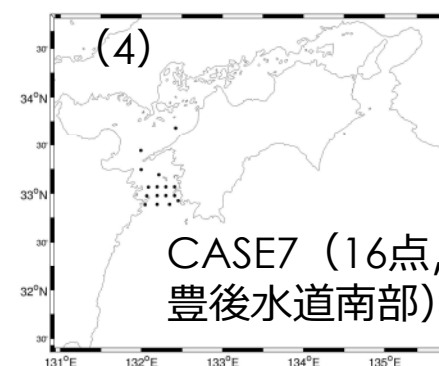
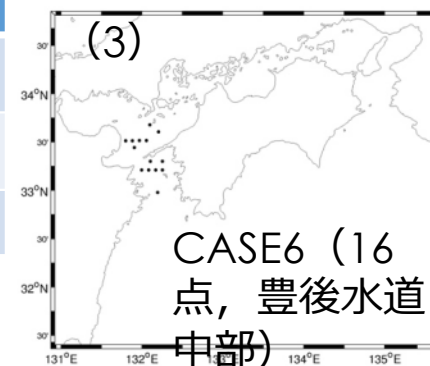
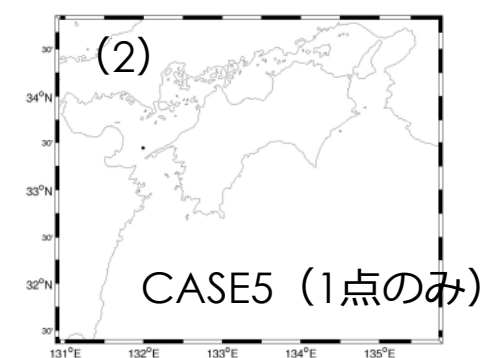
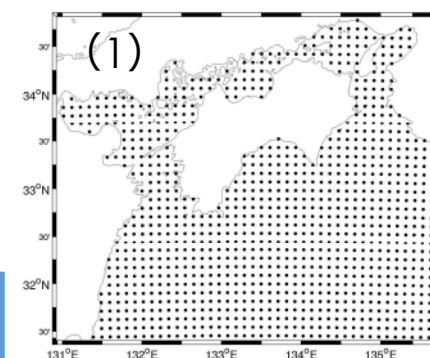
- 豊後水道南部の下層には、陸棚斜面に起源をもつ冷水が侵入する現象によって冷水層が形成される。この冷水侵入現象は底入り潮（Bottom Intrusion）と呼び、毎年の初夏から晩秋まで繰り返し発生する（Kanedaら, 2002）。
- 本研究では、表層観測のみを同化するCASE 1～3の場合、底入り潮を正確に再現されていなく、底入り潮の過度な侵入によって下層水温がかなり低くなり、モデル精度が低下する。CASE 4で鉛直観測点の導入により、底入り潮の再現性を改善し、モデル精度が飛躍的に向上した。
- つまり、底入り潮を正確に再現されることが、モデルの精度に対して非常に重要であると考えられる。

OSSEによる同化実験の諸条件 (CASE5~7)

さらに、モデル再現性の向上に最適な鉛直観測点数や場所を検討するために、鉛直観測点の設置場所と観測点数のパターンを変更することで、新しい3通りの同化実験を行う。

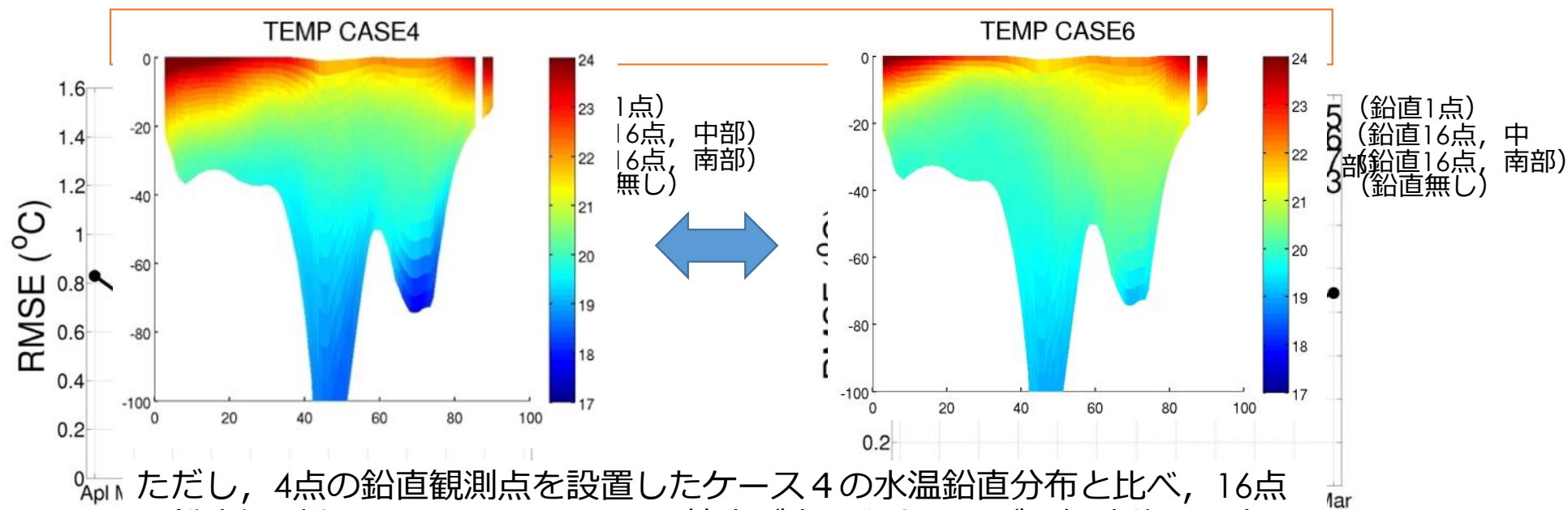
なお、計算時間の短縮のために、同化計算期間は2014年6月~2014年8月である。

OSSE	観測点 水平分布 (表層)	観測点 水平分布 (表層以下)	観測点 鉛直分布	同化 サイクル	観測 地点数
CASE5	(1)	(2)	全層	6時間ごと	1119
CASE6	(1)	(3)	全層	6時間ごと	1404
CASE7	(1)	(4)	全層	6時間ごと	1404



RMSE評価 (CASE5~7)

ケース5～ケース7の計算条件はケース3と完全に一致していないので、異なる初期値と計算期間に影響されてモデル精度が変化する可能性がある。そのため、ケース3のRMSE値は参考として参照されたい。



ただし、4点の鉛直観測点を設置したケース4の水温鉛直分布と比べ、16点の鉛直観測点を設置したケース6の精度が少し向上したが、経済的かつ実用的な観点から考えると、瀬戸内海DAに対する4点の鉛直観測点を追加することは十分である。

まとめ

ROMS-3DVAR

- 3次元変分法にもとづくROMS-3DVARデータ同化システムを開発した.
- OSSEによって定量的に評価し, 瀬戸内海内部におけるSST, SSS分布の再現性が飛躍的に向上することを確認
- 瀬戸内海総合水質データを同化させた実験を行い, 再現性の飛躍的な向上を確認するとともに, 瀬戸内海内部の塩分場の再現性をより向上させるためには, **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を示した

ROMS-ENKF

- アンサンブルカルマンフィルタ (ENKF) 法にもとづくROMS-ENKFシステムを開発し, OSSEにより再現精度の向上を確認した.
- 表層観測データ**: 「しきさい」衛星観測を模したOSSEを行い, 全体的な再現性の大幅な向上を確認した. しかし, 豊後水道海域での水温精度が他海域より低いことが示された.
- 鉛直観測追加 (サーミスタチェーン)**: サーミスタチェーン鉛直観測を模したOSSEにより, 豊後水道の下層水温精度が飛躍的に向上した. 鉛直観測点の設置場所は豊後水道中部が最適であること, 観測点数では多いほど精度向上すること, 実用的には4点程度の鉛直観測点の設置でも十分であることを示した.

沿岸・内湾を対象とした実用的なDAシステムが開発され, 今後の幅広い活用が期待される.



参考資料：NMC法とは

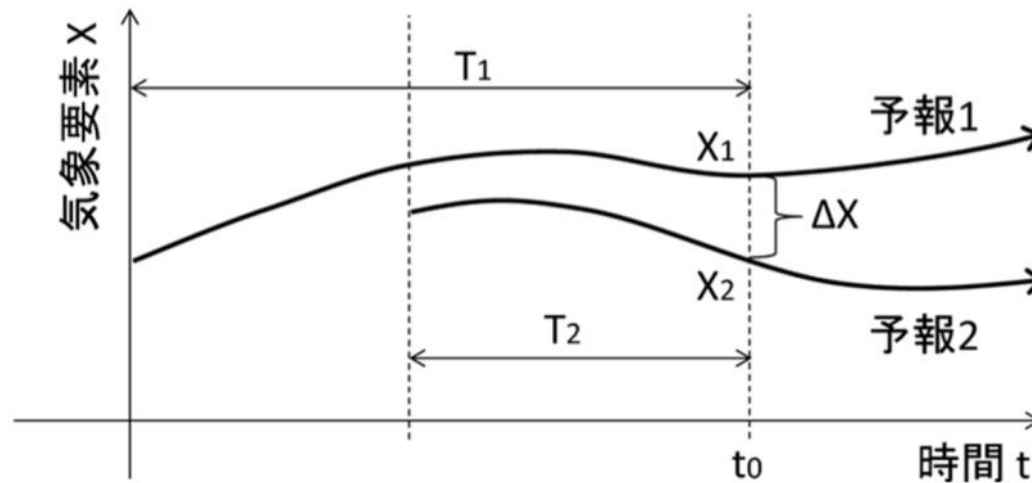


図 2.2.1 NMC 法における予報差の統計サンプルの模式図。
初期時刻の異なる予報 1、予報 2 による、対象時刻 t_0 における気象要素 X の予報値 X_1, X_2 （それぞれの予報時間は T_1, T_2 ）の差 ΔX を予報誤差の情報を含むサンプルとみなす。

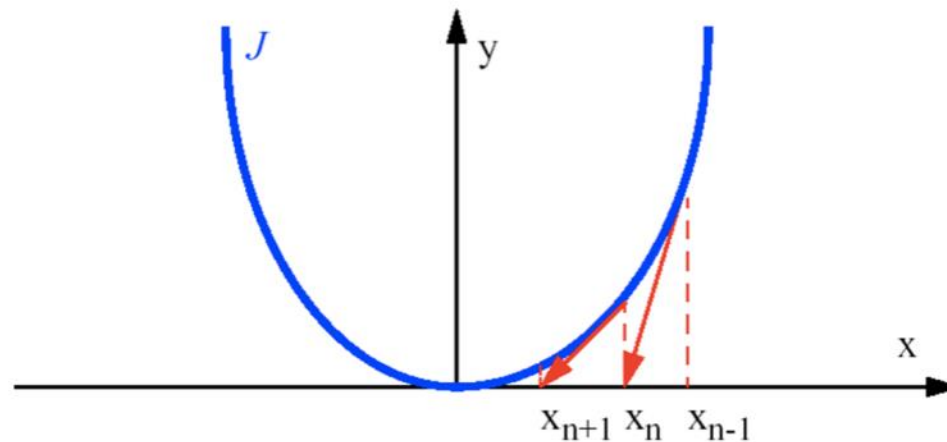
NMC法は、状態変数のすべての要素について誤差が推定できるという点で優れており、2メンバーのアンサンブル予報による誤差の推定と見なせる。多数のメンバーを用いたアンサンブル予報による誤差推定法（解析アンサンブル法）もあるが、NMC法は簡便であるため、よく使われている。

3次元変分法 (3D-VAR)

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x^b) + H^T R^{-1}(H(x) - y)$$

- ・評価関数の最小値は通常、繰り返し計算により数値的に探索する.
- ・この最小値の探索法のことを降下法と呼ぶ.
- ・一般に降下法では、評価関数の値とその勾配ベクトルの値を手掛かりとして最小値探索を行う.

3DVAR minimization: An illustration of gradient descent



ENKFの設定

- アンサンブルの処理方法について、本ROMS-ENKFシステムでは、逐次アンサンブル平方根フィルタ法¹⁴⁾ (Serial Ensemble Square Root Filter: Serial EnSRF) を用いた。
- Miyoshiらにより、モデルの長期ランからランダムな時刻の予報場を初期アンサンブルメンバーに選んで良好な結果を得ている。また、本研究では現実の問題を取り扱うではなく、精度検証を目的として同化実験を行うので、瀬戸内海ROMSモデルの長期ランの中に、アンサンブルメンバーをランダムに選択した。
- 使用できる計算資源などを考慮し、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。アンサンブルメンバー数の不足によるサンプリングエラーを除去するために、本研究では、誤差共分散局所化(covariance localization)を行った。局所化を行ったデータ同化実験の結果により、設定した10個のアンサンブルは十分であることが確認された。
- 予報誤差が過小評価されないために、解析誤差共分散 P_i^f に共分散膨張(covariance inflation)を以下の式のように行なっている。

$$P_i^f = P_i^f (1 + \delta)$$

ここに、 δ は共分散膨張係数。本研究では $\delta=0.4$ を使っている。