

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1367** February 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

松崎 義孝  
井上 徹教

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. 序論 .....	4
1.1 背景 .....	4
1.2 既往の研究 .....	4
1.3 本論文の目的と構成 .....	5
2. データ同化モデルの開発 .....	5
2.1 データ同化モデルの概要と意義 .....	5
2.2 伊勢湾シミュレーターのデータ同化モデル .....	7
2.3 アンサンブルカルマンフィルターの特徴 .....	8
3. 数値実験による閉鎖性水域におけるデータ同化の計算条件の検討 .....	9
3.1 数値実験方法 .....	9
3.2 数値実験結果 .....	11
3.3 数値実験の考察 .....	14
4. 伊勢湾を対象としたデータ同化 .....	15
4.1 計算方法 .....	15
4.2 計算結果 .....	17
4.3 考察 .....	17
5. 結論 .....	18
参考文献 .....	20
記号表 .....	21
付録A. アンサンブルカルマンフィルターの高速化と関連する注意点 .....	21
付録B. 伊勢湾における環境観測と観測値の品質管理手法 .....	24

# A Study of Calculation Conditions of Data Assimilation for Flow Analysis of Closed Waters by Ensemble Kalman Filter

Yoshitaka MATSUZAKI\*

Tetsunori INOUE\*\*

## Synopsis

The Port and Airport Research Institute has developed a real-time water quality prediction system to predict the occurrence of blue tide, red tide, and hypoxia in Ise Bay and Tokyo Bay, Japan. To improve accuracy, a data assimilation model that integrates observations with numerical models for the prediction system has been developed. However, the optimal method for setting calculation conditions during assimilation for the flow analysis of closed waters is currently unclear. Specifically, it is important to elucidate how adding system noise creates ensembles for calculating the error covariance matrix considering the spatial correlations between each physical quantity. In previous studies, it was common to create an ensemble of initial conditions by randomly adding system noise to the results of a numerical model. However, in a simulation of a closed water area, the error of the boundary condition was considered to have a large effect. In the current study, the calculation conditions of an ensemble Kalman filter were examined for the analysis of water temperature, salinity, and current velocity, for closed water. In addition, we proposed a new method to create an ensemble of initial conditions using spin-np and the addition of noise to the boundary condition. Two studies were conducted to test this method. First, numerical experiments were conducted using a rectangular simulation tank focusing on the method for adding system noise. The numerical study of the method for adding system noise indicated that data assimilation was feasible using the proposed method. In addition, the data assimilation results were different when the position of adding system noise was changed, indicating the importance of the position at which the system noise was added. Next, data assimilation was conducted using actual observation values for Ise Bay, and the applicability of the knowledge of the calculation conditions obtained by the numerical experiments to the actual sea area was verified. The root mean square error between the data assimilation results and the observation value of water temperature was improved by 1.09 °C compared with the results without data assimilation. Therefore, in this calculation condition, data assimilation using actual observed temperature data indicated the effectiveness of the method for creating ensembles of initial conditions using spin-np while adding system noise to the open boundary condition of water temperature and the boundary condition of river water temperature.

**Key Words:** Data Assimilation, Ensemble Kalman Filter, Ise Bay Simulator, Twin Experiment, Ise Bay, Water Temperature

---

\* Senior Researcher, Marine Environmental Information Group, Marine Information and Tsunami Department

\*\* Head, Marine Environmental Information Group, Marine Information and Tsunami Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5107 Fax : +81-46-841-1274 e-mail: matsuzaki-y@p.mpat.go.jp

# 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

松崎 義孝\*・井上 徹教\*\*

## 要 旨

港湾空港技術研究所では青潮、赤潮、貧酸素の発生予測等を行うために、伊勢湾や東京湾を対象としたリアルタイム流動水質予測システムを開発している。その計算精度を向上させるため、観測値を数値モデルに融合するデータ同化の開発に取り組んできた。しかしながら、閉鎖性水域の流動のデータ同化を行う際の適切な計算条件が明らかでない。特に、各物理量間の空間相関を考慮した誤差共分散行列を計算するためのアンサンブルを作成する際のシステムノイズの与え方が重要である。従来は数値モデルの結果にランダムなノイズを加えて初期条件のアンサンブルを作成することが一般的であった。閉鎖性水域のシミュレーションでは境界条件の持つ誤差による影響が大きいと考えられた。そこで本研究では、データ同化手法の一つである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を行った。その際、新たに境界条件にノイズを与えて助走計算を行い初期条件のアンサンブルを作成する方法を試みた。検討は2つ行った。まず、システムノイズの与え方に着目した矩形のモデル海域による数値実験を実施した。その結果、提案したシステムノイズの与え方によりデータ同化が実施可能であることを確認した。また、システムノイズを与える位置でデータ同化結果が変わるため、どこにシステムノイズを与えるかが重要であった。最後に、矩形のモデル海域を対象とした数値実験により得られた計算条件の知見が実海域に適用できるかを検証するため、伊勢湾を対象とした実観測値を用いたデータ同化を実施した。その結果、データ同化後の解析値と観測値の水温のRMSEは、データ同化前と比較して1.09°C改善した。したがって、本計算条件において、開境界水温と河川水温の境界条件にシステムノイズを与えて助走計算を行い初期条件のアンサンブルを作成する方法が有用であることが実観測値を用いたデータ同化においても示された。

**キーワード：**データ同化、アンサンブルカルマンフィルター、伊勢湾シミュレーター、双子実験、伊勢湾、水温

---

\* 海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ主任研究官

\*\* 海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5107 Fax：046-841-1274 e-mail: matsuzaki-y@p.mpat.go.jp

## 1. 序論

### 1.1 背景

現在多くの流動水質モデルが提案されており（例えば，Blumberg and Mellor, 1987; Shchepetkin and McWilliams, 2005; Kishi et al., 2007; 田中・鈴木, 2010; 田中ら, 2011），このような数値モデルを用いて閉鎖性水域の青潮，赤潮，貧酸素水塊等の発生予測をリアルタイムで行うことが期待されている．そこで，港湾空港技術研究所では伊勢湾と東京湾を対象としたリアルタイム流動水質予測システムを構築している．これは1日に1回，最長で10日後までの伊勢湾及び東京湾の流動及び水質をシミュレーションするシステムである．得られた流動及び水質情報は港湾管理，漁業資源管理，レクリエーション等に資する．

しかしながら，現状では閉鎖性水域のリアルタイム流動水質予測システムの計算精度は十分ではなく，計算精度は数値モデルの初期条件，境界条件等が原因で低下する（表-1）．閉鎖性水域のリアルタイム流動水質予測システムの精度向上のために，これらの誤差要因のうち，初期条件の誤差に着目する．リアルタイム流動水質予測システムの初期条件は数値モデルを用いた助走計算を行うことで作成される．この際に，助走計算に水温，塩分，流速といった観測値は用いられていない．初期条件の作成にリアルタイムの観測値を活用できると，初期条件の精度を向上できる可能性がある．

観測値を数値モデルに活用する方法のひとつとして，データ同化が挙げられる．データ同化とは「観測値と数値モデルの双方から情報を取り出して，統計的あるいは力学的に組み合わせ，最適な場や条件を求める手法」（淡路ら, 2009）である．データ同化を用いることで，データ同化を行わない数値モデルよりも精度の高い初期条件が作成できると考えられる．

### 1.2 既往の研究

データ同化は気象学や海洋学の分野を中心に研究が進められてきた．例えば，天気予報は最も身近なデータ同化の適用事例である．天気予報を行う際は気圧，気温，風，湿度，降水量の観測値を数値モデル結果に同化する（気象庁予報部, 2015）ことで，データ同化を行わない数値モデルよりも精度の高い初期値，予報値を作成している．

閉鎖性水域を対象とした流動水質モデルへのデータ同化の適用については，いくつかの検討事例がある．例えば，川西ら（1996）は変分法を用いた数値実験による鉛直動粘性係数の見積を行っている．田中ら（2005）はアンサンブ

表-1 数値モデルの誤差要因

数値モデルの誤差要因	例
初期条件の設定	計算開始時の湾内の水温，塩分等の情報
開境界条件の設定	湾口での時々刻々の水位，及び水温，塩分の鉛直断面情報
大気境界条件の設定	気温・日射・降水といった気象情報
河川境界条件の設定	流入河川の流量・水温情報
パラメーター	乱流モデルのパラメーター，摩擦係数等
モデル化の誤差	乱流モデル，日射／気温による熱フラックス等
地形，格子	現実地形と数値モデルの地形の違いにより生じる流れ場の変化等

ルカルマンフィルターによる大阪湾の流動予測を行っている．入江ら（2012）は四次元変分法による大阪湾の水温，塩分の計算を行っている．また，リアルタイム予測へのデータ同化の活用も行われている．例えば，石井ら（2011）はナッジング法というデータ同化手法による東京湾の底層 D0 分布の短期予測システムを開発している．また，入江ら（2016）も同じくナッジング法による大阪湾の底層 D0 分布の短期予測システムを開発している．

しかしながら課題もある．まず，データ同化には第 2 章以降で述べる設定すべき計算条件が多々あるけれども，閉鎖性水域でデータ同化を行う際の計算条件に関する定量的指標がない．特に重要な計算条件は，各物理量間の空間相関を考慮した誤差共分散行列である．本研究で用いるデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルターではシステムノイズという数値モデルの誤差を与えて誤差共分散行列を求める（具体的な方法は 2.2.3 で述べる）．閉鎖性水域を対象としたアンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化に関して，田中ら（2005）は各物理量に対し正規乱数によりシステムノイズを発生させたとしているが，具体的にどの物理量にシステムノイズを与えることが閉鎖性水域のデータ同化に重要か示されていない．海洋を対象としたアンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化では，システムノイズの与え方として 2 つの方法が多く用いられている．一つは数値モデルの結果にノイズを与えて代表的な時間スケールを数回シミュレーションしてばらつきを持った初期条件のアンサンブルを作成する方法（例えば，Shu et al., 2011），もう一つは大気境界条件にシステムノイズを与える方法（例えば，Sakov et al., 2012）である．しかしながら，閉鎖性水域の流動を対象としたデータ同化を実施する場合，海

洋と同様の方法でシステムノイズを与えてよいか不明である。したがって、閉鎖性水域の流動のデータ同化を行う際に、システムノイズをどのように与えて計算するとデータ同化がうまくいく、あるいはうまくいかないという知見がない。

樋口(2011)によると、原理的にはシステムノイズはどこに与えてもよく、用いる数値モデル内のモデル化の根拠のあいまいな部分等、不確実性を想定することが妥当とみなせる部分に与えることが望ましい。閉鎖性水域の流動は外海との水塊交換、河川流入、及び天候等が支配的要因であるけれども、それら境界条件は正確に与えることが困難であり、誤差が多く含まれるものと考えられる。そこで、閉鎖性水域の流動計算を行う際のシステムノイズの要因(表-1)のうち、境界条件にシステムノイズを与えて誤差共分散行列を計算することの有用性を検討する必要がある。特に、海洋でのデータ同化では行われていない開境界条件や河川境界条件にシステムノイズを与えて助走計算を行い初期条件のアンサンブルを作成する方法は従来行われておらず新規性がある。

また、アンサンブルカルマンフィルターでは複数のメンバーから予報誤差共分散行列を算出するけれども、メンバー数をどの程度にすればよいかを検討する必要がある。基本的にはメンバー数が多いほど正確に予報誤差共分散行列が求められるが、メンバー数に比例して計算負荷が大きくなるため、適切にメンバー数を設定する必要がある。

次に、既往の検討で提案されている沿岸域のリアルタイム短期水質予測システムで用いられているデータ同化手法はナッジング法という比較的簡易なデータ同化手法である。そのため、第2章で説明する空間方向や物理量間の誤差相関の情報が使われておらず、観測値による物理量の修正は観測点付近の同じ物理量に限定される。

### 1.3 本論文の目的と構成

以上のような背景と既往の研究を踏まえて、本論文ではデータ同化による閉鎖性水域の流動解析に向けた計算条件の検討を行う。まず、データ同化モデルのひとつである、アンサンブルカルマンフィルターを伊勢湾シミュレーター(田中・鈴木, 2010)に実装する。次に、数値実験によるデータ同化の計算条件の検討を行う。最後に、数値実験で得られた知見を基に、実海域を対象とした実観測値を用いたデータ同化を実施し、今回得られたデータ同化の計算条件の知見が適切かを検討する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、データ同化モデルの説明をする。まず、データ同化モデルの概要

と意義を説明する。次に、伊勢湾シミュレーターに実装したアンサンブルカルマンフィルターの説明をする。最後に、アンサンブルカルマンフィルターの特徴を説明する。

第3章では、数値実験によるデータ同化に必要な条件設定の検討を行う。まず、数値実験の実施方法について説明する。数値実験は既往の研究とは異なり、境界条件にシステムノイズを与えて助走計算を行うことで初期条件のアンサンブルを作成した場合のデータ同化結果に着目する。また、メンバー数と計算精度の関係の検討を行う。最後に、数値実験結果を説明し、閉鎖性水域のデータ同化に関して得られた知見とデータ同化を行う上で注意すべき点を整理する。

第4章では、伊勢湾を対象とした実観測値を用いたデータ同化実験を行い、システムノイズを開境界水温と河川水温に与えて助走計算を行うことで初期条件のアンサンブルを作成することの妥当性について検討する。まず、実験方法について説明する。次に、計算結果を示し、データ同化の有無による精度の違いを示し、数値実験で得られた知見の実海域への適用性を検討し、改善すべき点を考察する。

第5章では、本論文で得られた研究成果を総括し、今後の課題を整理する。

付録A.では、導入したアンサンブルカルマンフィルターの高速化に関する説明と、その際に生じる誤差について述べる。

付録B.では、伊勢湾におけるリアルタイム観測システムを示し、観測値の品質管理方法について述べる。

## 2. データ同化モデルの開発

### 2.1 データ同化モデルの概要と意義

伊勢湾や東京湾といった閉鎖性水域の環境を理解するために、研究機関や行政等により数値モデルによるシミュレーションや観測が行われてきた。閉鎖性水域の環境を知るうえで、数値モデルと観測はそれぞれ長所と短所があり、それぞれ表-2のとおりまとめられる。

数値モデルは対象海域を格子に区切り、その格子点での水温や流速といった物理量が時々刻々計算できる。よって数値モデルを用いることで必要な地点の必要な時刻の物理量を得ることができる。また、数値モデルは境界条件を設定すると将来の予測ができるため、例えば明日の伊勢湾の水温はどうなるか、青潮が発生するか否か、といった解析が可能である。一方で、計算条件として表-1の項目を入力する必要がある。これらの条件を正確に与えることは不可能であるため、数値モデルの結果に誤差が生

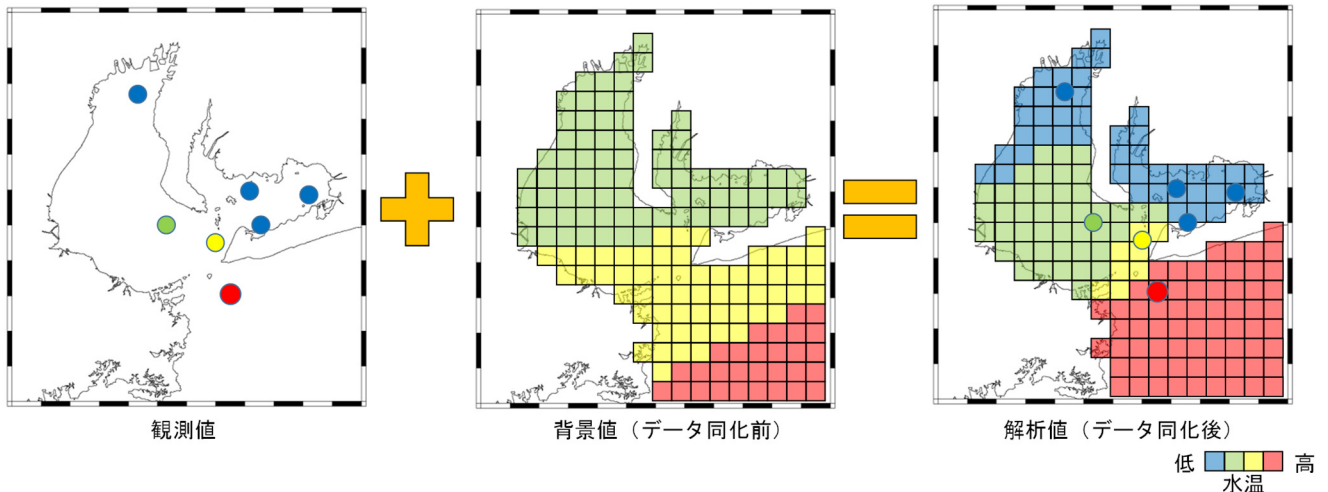


図-1 水温を例にしたデータ同化の説明. 背景値 (データ同化前) は観測値と比較して水温が異なる. 背景値を観測値で修正することでより正確な水温分布が得られる.

表-2 数値モデル, 観測, 及びデータ同化の長所・短所

	長所	短所
数値モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 時空間で多くの情報を得ることが可能</li> <li>● 予測が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 初期条件や境界条件といった計算条件を正確に設定することは不可能</li> <li>● 数値モデル, パラメーターの誤差</li> </ul>
観測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 正確</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 時空間で多くの情報を得ることが困難</li> </ul>
データ同化	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 数値モデルよりも正確</li> <li>● 観測と比較して時空間で多くの情報を得ることが可能</li> <li>● データ同化結果を初期値としたシミュレーションを実施することで短期予測の精度が向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 数値モデルと比較して計算コストが大きい</li> </ul>

じる.

観測値は物理量そのものを測定しているため, 測定誤差を含むものの数値モデルと比較して正確であることが長所である. 一方で, 費用や気象・海象条件等の制約上, 湾全体を時々刻々観測することは困難であり, 観測点及

び観測時刻以外の情報が得られないことが短所である.

データ同化は, 数値モデルの結果を観測値に近づけるように修正する手法である. すなわち, データ同化は数値モデルと観測の融合により, 双方の長所を活かしつつ, 短所を補うことが可能な手法である. 長所の1点目として, データ同化結果である解析値は数値モデルに比較して正確である. 2点目として, 解析値は数値モデルと同じ計算格子点で得られるため, 観測と比較して多くの空間情報が得られる. また, データ同化を逐次実行していくことで時間方向にも情報を得ることが可能である. 3点目として, データ同化を用いることで, より正確な初期条件の作成が可能となる.

以上のデータ同化の長所について, 伊勢湾の水温を例にして図示すると図-1となる. 伊勢湾では7つのモニタリングポストで水温がリアルタイムに収集されており, 各地点では正確な水温を得ることができる. 数値モデルによる結果である背景値 (データ同化前の数値モデルの結果) は時空間で水温を得ることができるが, 正確性に欠ける結果となる可能性がある (例えば, 観測値と比較して, 湾口や湾奥の水温分布が異なる). データ同化結果である解析値は水温分布の不正確さが改善され, 時空間でより正確な水温情報を得ることができる.

ただし, データ同化も短所を有している. 本研究で導入したデータ同化モデルは, 後述する予報誤差共分散行列を計算するために複数回数値シミュレーションを行う必要がある. そのためデータ同化を行わない場合よりも計算時間がかかる. そこで, 伊勢湾シミュレーターのデータ同化モデルは並列化を行い, 計算の高速化を図っている.

## 2.2 伊勢湾シミュレーターのデータ同化モデル

伊勢湾シミュレーターにはアンサンブルカルマンフィルターというデータ同化モデルを導入した。ここでは、データ同化モデルの一つであるカルマンフィルターについて説明し、次に、その拡張であるアンサンブルカルマンフィルターについて説明する。

### 2.2.1 カルマンフィルター

カルマンフィルターは、シミュレーションに用いる数値モデルが線形モデルであり、かつ数値モデルの誤差であるシステムノイズと観測ノイズがともに正規分布に従う場合に適用できるデータ同化手法である。ある時刻  $t$  におけるデータ同化後の解析値  $\mathbf{x}^a$  (analyzed estimates) は式(1)のように数値モデルから得られた結果である背景値  $\mathbf{x}^f$  (forecasted estimates) と観測値  $\mathbf{y}$  の最適な加重平均で求められる。

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

ここで、 $\mathbf{x}$  は状態ベクトルと呼ばれ、数値モデルの各メッシュでの水温、塩分、流速等の物理量を要素としたベクトルである(図-2)。 $\mathbf{y}$  は観測ベクトルと呼ばれ、水温、塩分、流速等の観測値を要素としたベクトルである。 $\mathbf{H}$  は観測行列と呼ばれ、数値モデルの結果(状態ベクトル)から観測地点に対応するメッシュの物理量を抽出する演算子である。 $\mathbf{K}$  は観測値をどの程度同化するかを決める重み行列(カルマンゲイン)であり、式(2)のように求める。

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

ここで、 $\mathbf{P}$  は予報誤差共分散行列、 $\mathbf{R}$  は観測誤差共分散行列である。

### 2.2.3 アンサンブルカルマンフィルター

カルマンフィルターは数値モデルが線形のとときに成り立つ。これに対し、アンサンブルカルマンフィルターはカルマンゲインの計算に用いる  $\mathbf{P}$  と  $\mathbf{R}$  を乱数を用いたモンテカルロ法により近似的に求めるため、より一般の非線形、非正規分布の数値モデルの場合でも適用可能である。

アンサンブルカルマンフィルターでは、まず数値モデル自体にノイズを与えて計算を行い、互いに計算条件が少しずつ異なるいくつかの計算値を作成する。これらの計算値の集合はアンサンブルと呼ばれ、各計算値はアンサンブルメンバーと呼ばれる。ノイズとは例えば開境界水質濃度や拡散係数など、モデル内の不確実な入力条件

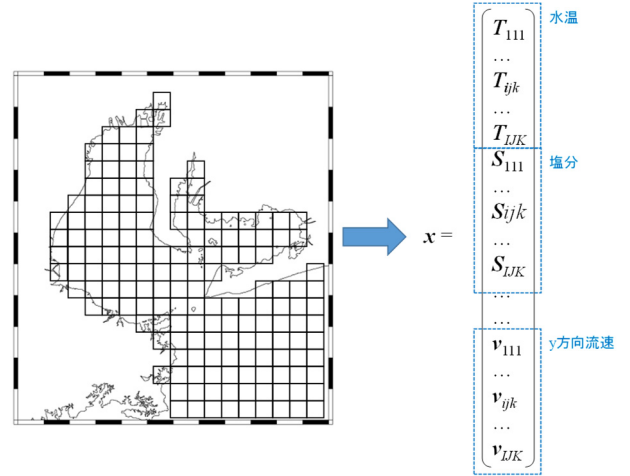


図-2 状態ベクトルの概念図。状態ベクトルとは数値モデルの全メッシュの全物理量の値を要素としたベクトルである。 $ijk$  はメッシュ番号を表し、 $LJK$  はメッシュ数を表す。

やパラメーター等に与える摂動である。このため、アンサンブルメンバー間の分散と共分散を計算すれば、非線形モデル・非正規分布の場合でも予報誤差共分散行列を近似的に推定することが可能である。これと同様に、アンサンブルカルマンフィルターでは観測データに対しても乱数による摂動を与え、観測誤差共分散行列を近似的に推定する。

アンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化の手順を以下に示す。なお、アンサンブルの平均値と共分散行列はオーバーバーをつけて表している。

- 1) 数値モデルを用いて計算値のアンサンブルメンバーを  $L$  個作成する。
- 2)  $L$  個の計算値からアンサンブルの予報誤差共分散行列  $\bar{\mathbf{P}}$  を推定する。

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

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

- 3) 同様に観測誤差共分散行列  $\bar{\mathbf{R}}$  を算定する。

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

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

ここで、 $\mathbf{r}$  は観測ノイズであり、観測機器の特性や測定環境等に応じて生じる測定誤差と、数値モデルが表現し切



れない現象によって生じる計算誤差（表現誤差）の合計値である。

- 4) 観測値の同化の重みを決定するカルマンゲイン  $\bar{K}$  を算定する。

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

- 5)  $L$  個のアンサンブルメンバーの解析値を算定する。

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

- 6) 各アンサンブルメンバーの解析値の平均値  $\bar{\mathbf{x}}_t^a$  がデータ同化による解析値である。

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

### 2.3 アンサンブルカルマンフィルターの特徴

カルマンフィルターとアンサンブルカルマンフィルターの性質を理解するため、数値モデルの計算格子と観測位置が同じであり、対象とする物理量が 1 つだけの場合を考える。その場合、カルマンゲイン  $K$ 、予報誤差共分散行列  $P$  及び観測誤差共分散行列  $R$  はスカラー量となり、観測行列  $H=1$  となる。すると式(2)は次式のようになる。

$$K = \frac{1}{R/P + 1} \quad (10)$$

式(10)を図示すると図-3 となる。カルマンゲイン  $K$  は予報誤差  $P$  が観測誤差  $R$  に対して大きい場合、すなわち  $R/P$  が小さい場合、 $K$  は 1 に近づくため、計算値を大きく修正し観測値に近づけようとする。逆に  $P$  が  $R$  に対して小さい場合は  $K$  がゼロに近づくため、修正量が小さくなる。したがって、観測値と計算値の相対的な誤差の割合（信頼度）に応じてカルマンゲインが決定され修正の度合いが調整されることとなる。

次に、比較的簡易なデータ同化手法であるナッジング法との違いを説明する。ナッジング法はある物理量  $\phi$  の予測式に対して、観測値  $\phi_{obs}$  との差にナッジング係数  $\alpha$  をかけた項を付加した式(11)によって予測を行う手法である。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = f(\phi) + \alpha(\phi_{obs} - \phi) \quad (11)$$

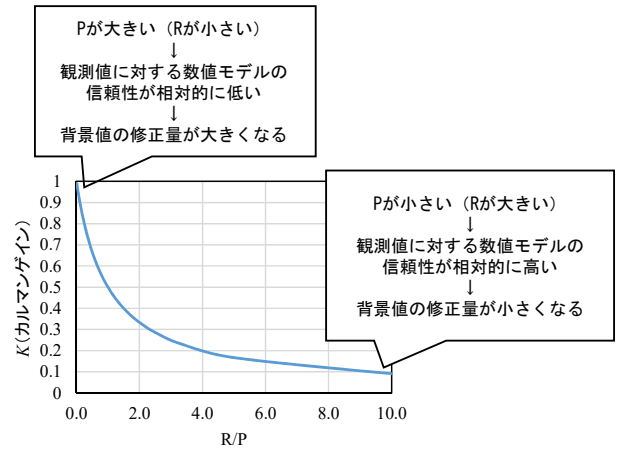


図-3 カルマンゲイン  $K$ 、予報誤差  $P$ 、観測誤差  $R$  の関係

ここで、関数  $f$  は  $\phi$  の時間増分を表す関数である。ナッジング係数  $\alpha$  は  $s^{-1}$  の単位をもち、この大きさを観測値をどの程度数値モデルに取り込むかが決定される。この係数をどのように設定するかでナッジング法を用いたデータ同化の結果が変わってくる。

ナッジング法はナッジング係数  $\alpha$  を空間方向にも設定することで、観測点以外の計算格子の物理量を修正することが可能である。しかしながら、この空間方向の係数の大きさが主観的に決定される点に問題がある。アンサンブルカルマンフィルターでは空間方向の係数を式(7)で解析的に逐次計算する点に客観的な優位性がある。

また、ナッジング法は例えば水温の観測値を同化する場合、水温のみ修正する手法である。しかしながら、例えば湾奥において河川流入の影響で水温が変化した場合、淡水が流入しているため塩分は下がることが想定される。アンサンブルカルマンフィルターでは異なる物理量間の相関関係も式(7)を計算することで求めることができるため、観測値と異なる物理量の修正が可能となる。閉鎖性水域のモニタリングは当然ながら水域全体・全物理量を網羅しているものではないため（付録 B. 参照）、空間方向や物理量間の相関関係を利用して修正するアンサンブルカルマンフィルターは閉鎖性水域全体の流動及び水質を把握するのに適した手法であると考えられる。

最後に、データ同化手法としてアンサンブルカルマンフィルターを選択した理由を説明する。アンサンブルカルマンフィルターと同様に空間方向、物理量間の相関関係を用いて同化を行う手法として 4 次元変分法がある。本研究で 4 次元変分法ではなくアンサンブルカルマンフィルターを選択した理由は 2 つある。一つは導入の容易さである。4 次元変分法では、評価関数という解析値が背景値および観測値とどの程度離れているかを評価する関

数が最小となる値を検索する。その際に、評価関数の値と勾配を求めて反復的な計算を行う。この反復的な計算を行うために伊勢湾シミュレーターに即した勾配計算を行うプログラムを開発する必要がある。この勾配計算を行うプログラム開発には多大なコストがかかる(露木・川畑, 2008) ため、容易には導入できない。一方、付録 A. で紹介するアンサンブルカルマンフィルターのプログラムは四次元変分法のプログラムと比較して開発が容易である。二つ目の選択理由として、アンサンブルカルマンフィルターは誤差共分散行列を逐次計算して修正するため、時刻毎の流動に依存した誤差共分散行列の作成が可能である。4次元変分法では基本的には誤差共分散行列の時間発展は考えない。閉鎖性水域の時刻毎の誤差共分散行列の解析を行い、最適な誤差共分散行列を検討するためアンサンブルカルマンフィルターを採用した。

### 3. 数値実験による閉鎖性水域におけるデータ同化の計算条件の検討

#### 3.1 数値実験方法

数値実験は双子実験により行った。双子実験とは、真値(正解)が分かった状況でデータ同化を行う数値上の実験である。したがって、双子実験は真値のわからない実海域と実観測値を用いた検証と比較して、データ同化の効果判断するのに適している。

双子実験は以下の手順で実施した(図-4 参照)。

- 1) 伊勢湾シミュレーターの計算条件(初期条件、パラメーター等)が全く同じで、一部の境界条件のみを変えて計算した結果を2つ用意し、その一つを真値、もう一つを背景値とした。
- 2) 真値からサンプリングされたデータに測定誤差を模擬した誤差を加えて擬似的な観測値を作成した。
- 3) 背景値に観測値を同化した解析値がどの程度真値と一致するかを確認した。

双子実験は、図-5に示す矩形で水深が一様に30mのモデル海域で実施した。真値及び背景値で同一の計算条件は表-3とした。境界条件は伊勢湾の2014年7月から8月を想定した開境界条件、大気境界条件、及び河川境界条件を設定した。真値と背景値で計算条件が異なる項目は表-4の通り、3つの境界条件とした。すなわち、真値に対して背景値は開境界水温が1°C高く、開境界塩分が0.5低く、海上風がx方向に0.8倍、y方向に1.1倍になるように設定した。双子実験に決まった方法はなく、本検討は真値と背景値との間にこのような差がある場合にデータ同化結果はどうなるか、というケーススタディの位置づけとなる。

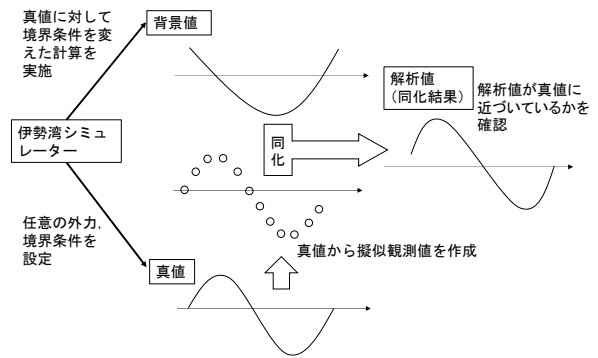


図-4 双子実験の手順(淡路ら, 2009 を基に作成)

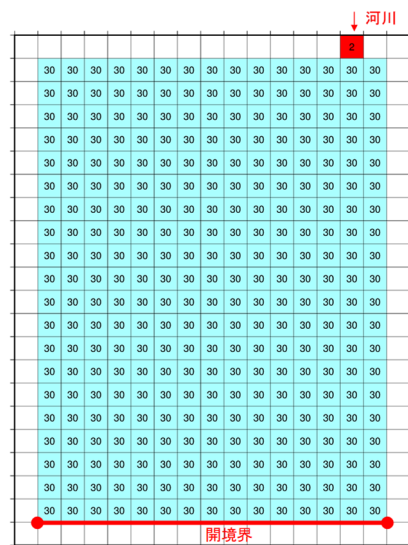


図-5 双子実験に使用する計算地形。数値は水深[m].

観測値の作成方法を表-5に示す。また、真値からサンプリングした観測値の位置を図-6に示す。伊勢湾で実施されている観測を模擬して水温、塩分、及び流速をサンプリングした。測定誤差は正規分布を仮定し乱数で与えた。正規分布の平均はゼロとし、標準偏差は観測方法を考慮して、水温はモニタリングブイと伊勢湾フェリーのほうが衛星観測よりも精度が高いと仮定した。また、流速は伊勢湾フェリーのほうが海洋短波レーダーよりも精度が高いと仮定した。観測ノイズも正規分布を仮定し、各観測値の標準偏差は表-5の測定誤差と同じ値を用いた。

開境界付近でデータ同化による修正を行うと数値モデルによる計算が不安定になる。データ同化の安定性を図るため、開境界に隣接する1メッシュを同化計算の対象から除外したところ、データ同化が安定的に実施できた。そこで、本計算条件では開境界に隣接する1メッシュを同化計算の対象から除外した。具体的には、除外対象メッシュのシステムノイズを0とすることで、同化計算前後で数値が変化しないようにした。

表-3 真値及び背景値で同一の計算条件

計算条件	設定
水平格子数	15×21
水平格子サイズ	4800 m
鉛直格子	32 層
鉛直格子サイズ	1 m
計算期間	助走期間を 60 日間とし、最後の 24 時間を解析に使用
タイムステップ	120 s
開境界水位	鳥羽港 M2 分調の調和定数から作成した天文潮位
大気境界条件	以下の値を時空間で一様に設定
	短波放射: 183.78 W m <sup>-2</sup>
	長波放射: 431.56 W m <sup>-2</sup>
	気圧: 1009.41 hPa
	気温: 26.36°C
河川境界条件	以下の値を一様に設定
	河川流量: 465 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
	河川水温: 23.7°C
コリオリ力	以下の値でコリオリ力を考慮した 代表緯度: 34.75 角速度: 7.292×10 <sup>-5</sup> rad s <sup>-1</sup>

表-4 真値と背景値で計算条件が異なる項目

条件	位置	真値	背景値
開境界	水深 0.25m	24.442	25.442
水温 [°C]	水深 10m	22.690	23.690
	水深 20m	20.398	21.398
	水深 30m	18.587	19.587
(真値+1°C)			
開境界	水深 0.25m	33.915	33.415
塩分 [-]	水深 10m	34.128	33.628
	水深 20m	34.258	33.758
	水深 30m	34.400	33.900
(真値-0.5)			
大気境界条件	x 成分:	0.60	0.48
	y 成分:	1.75	1.93
海上風 [m/s]		(x 成分の 0.8 倍, y 成分の 1.1 倍)	

同化計算の時間間隔は実運用を想定して 1 時間毎とした。すなわち、計算は 24 時間行ったため、合計 24 回の同化を実施した。今回は双子実験であり、異常値とみなされる観測値は用いていないため、観測値の品質管理（内的 QC 及び外的 QC）は行っていない（QC については付録 B. を参照）。

数値実験におけるデータ同化の条件は表-6の通りとした。本数値実験で行う2つの検討のうち、システムノイズの与え方の検討については、Case1—4の通りノイズを与える場所を変更し、以下の項目毎に結果を整理した。

表-5 観測値の作成方法

物理量	模擬した観測方法	観測水深	測定誤差—正規乱数の標準偏差
水温	モニタリングブイ 伊勢湾フェリー 衛星	鉛直各層 1m 間隔	0.25°C
		水深 3m	0.25°C
		水面 (0m)	0.5°C
塩分	モニタリングブイ 伊勢湾フェリー	鉛直各層 1m 間隔	0.25
		水深 3m	0.25
流速	伊勢湾フェリー 海洋短波レーダー	水深 12m 以深を 4m 間隔	0.01 m/s
		水深 0.5m	0.02 m/s

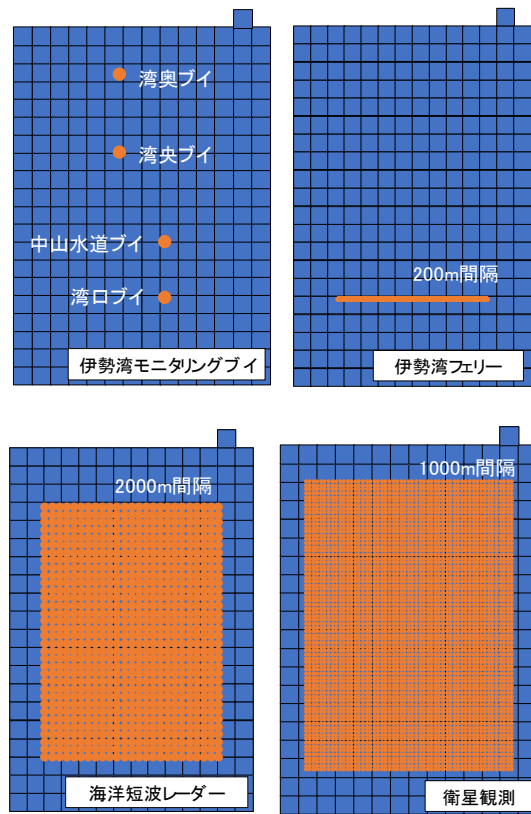


図-6 真値からサンプリングした観測値の位置

- 1) 開境界水温にシステムノイズを与えた場合の水温の再現性(case1)
- 2) 開境界塩分にシステムノイズを与えた場合の塩分の再現性(case2)
- 3) 海上風にシステムノイズを与えた場合と、開境界水温及び塩分にシステムノイズを与えた場合の流速の再現性(case3, 4)

表-6 数値実験におけるデータ同化の条件.

ケース	メンバー数	システムノイズの設定	システムノイズの大きさ—正規乱数の標準偏差
Case1	16	開境界水温	2°C
Case2	16	開境界塩分	1
Case3	16	海上風	風速x, y成分を1+a倍するものとし, aを標準偏差0.5の正規乱数で与える
Case4	16	開境界水温, 開境界塩分	Case1, 2と同じ
Case5	16	開境界水温, 開境界塩分, 海上風	Case1—3と同じ
Case6	32	同上	同上
Case7	64	同上	同上
Case8	128	同上	同上

メンバー数と計算精度の関係の検討については以下の物理量に着目し, Case5—8を比較した.

- 1) 水温
- 2) 塩分
- 3) 流速

データ同化結果の評価は, システムノイズの与え方の検討については, 代表点として湾央ブイ地点 (図-6) の時系列図で観測値と背景値, 及び解析値を比較した. また, 水深0 m, 10 m, 20 m, 及び30 mの各水深と全層平均において背景値と真値の差, 及び解析値と真値の差のRMSE (二乗平均平方根誤差: Root Mean Square Error) で精度を評価した. メンバー数と計算精度の関係の検討についてはRMSEで精度を評価した.

### 3.2 数値実験結果

#### 3.2.1 システムノイズの与え方の検討

- 1) 開境界水温にシステムノイズを与えた場合の水温の再現性(case1)

図-7は湾央ブイの位置, 水深0.5 mにおける水温の真値, 背景値, 及び解析値 (Case1) の時系列比較を示している. 背景値は真値よりも開境界水温が1°C高いため (表-4), 湾央ブイ地点においても背景値は真値よりも水温が高かった. 一方で, データ同化を行った結果, 解析値の水温は真値に近づくように修正された.

図-8は水深毎及び全層における水温の背景値 (Base) と解析値 (Case1) のRMSEの比較である. 各水深及び全層において, 解析値は背景値よりもRMSEが低い.

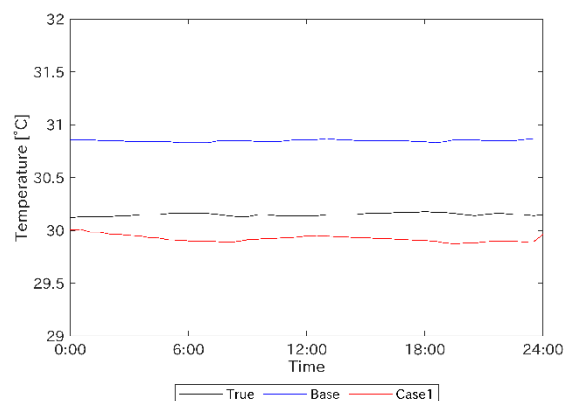


図-7 湾央ブイの位置, 水深 0.5m における水温の真値 (True), 背景値 (Base), 及び解析値 (Case1) の時系列比較.

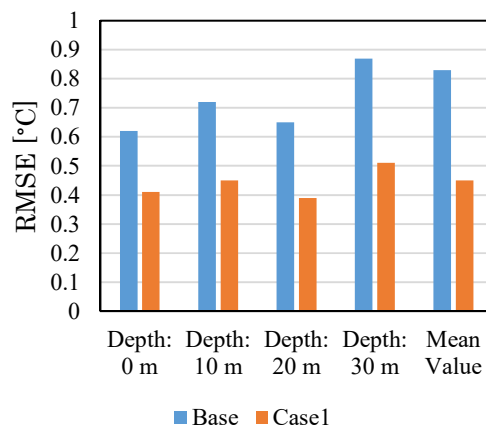


図-8 水深毎及び全層における水温の背景値 (Base) と解析値 (Case1) の RMSE

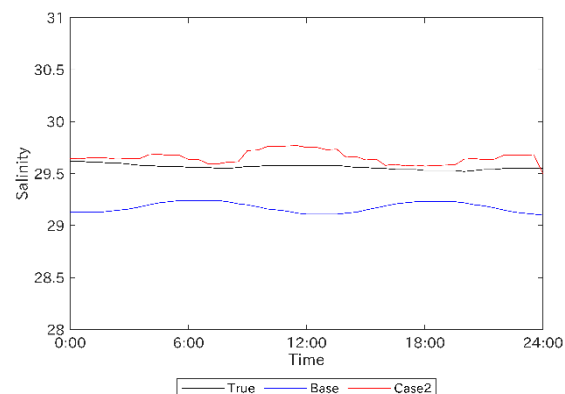


図-9 湾央ブイの位置, 水深 0.5m における塩分の真値 (True), 背景値 (Base), 及び解析値 (Case2) の時系列比較.

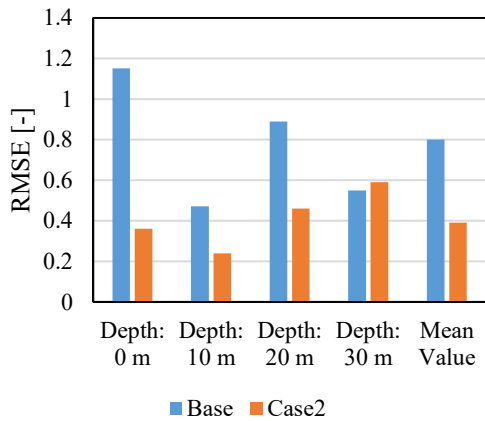


図-10 水深毎及び全層における塩分の背景値 (Base) と解析値 (Case2) の RMSE

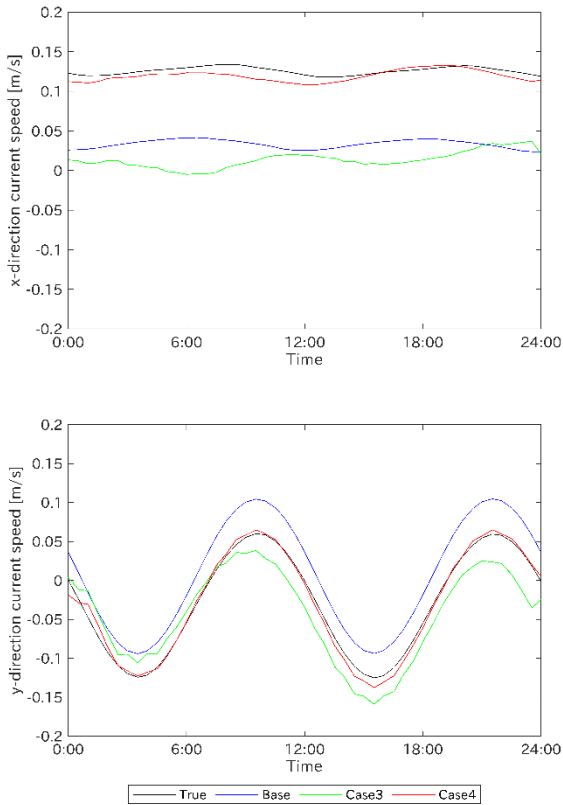


図-11 湾央ブイの位置、水深 0.5m における流速の真値 (True), 背景値 (Base), 及び解析値 (Case3, 4) の時系列比較. 上図 : x 方向, 下図 : y 方向.

2) 開境界塩分にシステムノイズを与えた場合の塩分の再現性(case2)

図-9は湾央ブイの位置、水深0.5 mにおける塩分の真値、背景値、及び解析値の時系列比較を示している。背景値は

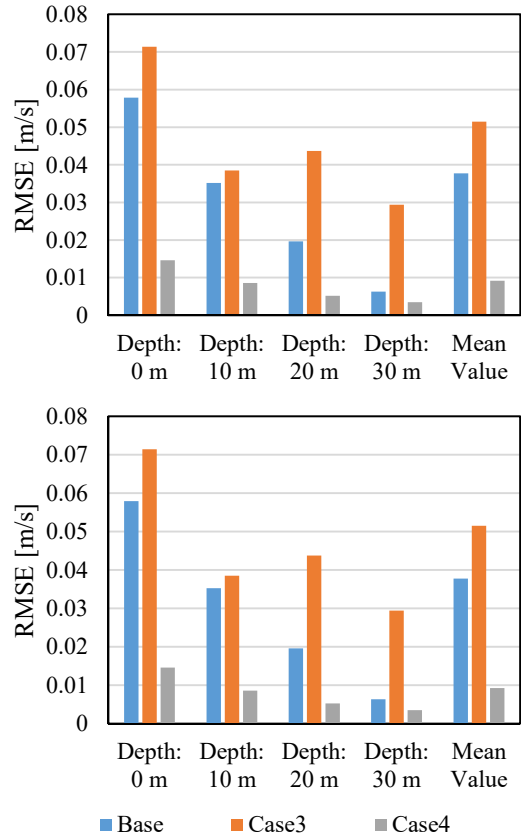


図-12 水深毎及び全層における流速の背景値 (Base) と解析値 (Case3, 4) の RMSE. 上図 : x 方向, 下図 : y 方向.

真値よりも開境界塩分が0.5低い(表-4)、湾央ブイ地点においても背景値は真値よりも塩分が低い。一方で、データ同化を行った結果、解析値の塩分は真値に近づくように修正された。

図-10は水深毎及び全層における塩分の背景値と解析値のRMSEの比較である。水深30 mを除き、各水深及び全層において、解析値は背景値よりもRMSEが低い。

3) 海上風にシステムノイズを与えた場合と、開境界水温、塩分にシステムノイズを与えた場合の流速の再現性(case3, 4)

図-11は湾央ブイの位置、水深0.5 mにおける流速の真値、背景値、及び解析値の時系列比較を示している。背景値は真値に対してx方向はマイナス方向、y方向はプラス方向に偏りがある。

また、海上風にシステムノイズを与えた解析値Case3は、データ同化後も真値に近づいていない。一方で、開境界水温と塩分にシステムノイズを与えた解析値Case4は、真値に近づいていることがわかる。

図-12は水深毎及び全層における流速の背景値 (Base)

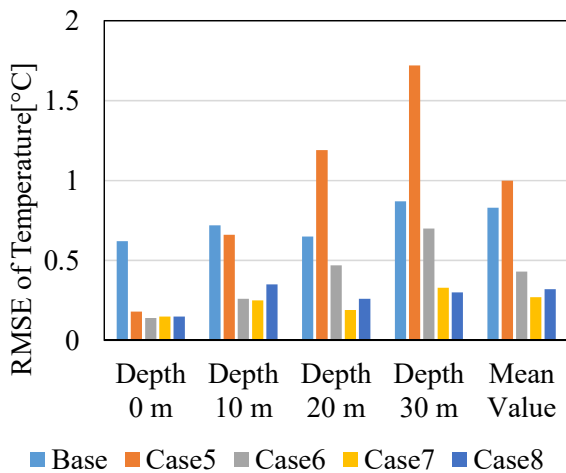


図-13 水深毎及び全層における水温の背景値 (Base) 及び解析値 (Case5—8) の RMSE

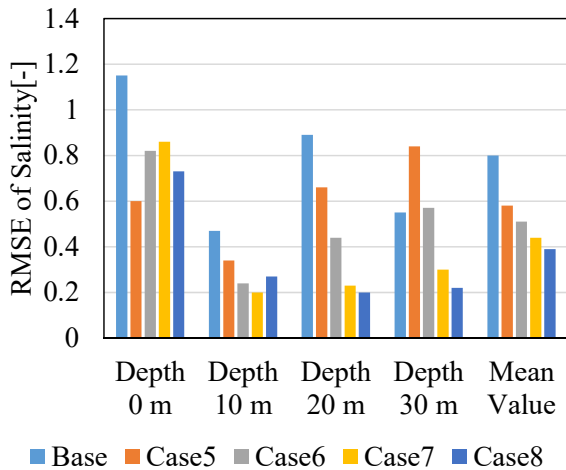


図-14 水深毎及び全層における塩分の背景値 (Base) 及び解析値 (Case5—8) の RMSE

と解析値 (Case3, 4) の RMSE の比較を示している。Case3 は背景値よりも RMSE が高く、精度が悪化している。一方で、Case4 は背景値よりも RMSE が低く、精度が改善されている。

### 3.2.2 メンバー数と再現精度の関係の検討

#### 1) 水温

図-13 は水深毎及び全層における水温の背景値及び解析値 (Case5—8) の RMSE を示している。全層平均値では、メンバー数が増えると RMSE が減少する傾向がみられたが、メンバー数が 64 から 128 と増えたときに (Case7, Case8) RMSE が増加していた。水深毎に比較すると、水深 0 m ではどのメンバー数でも同程度の RMSE であった。また、水

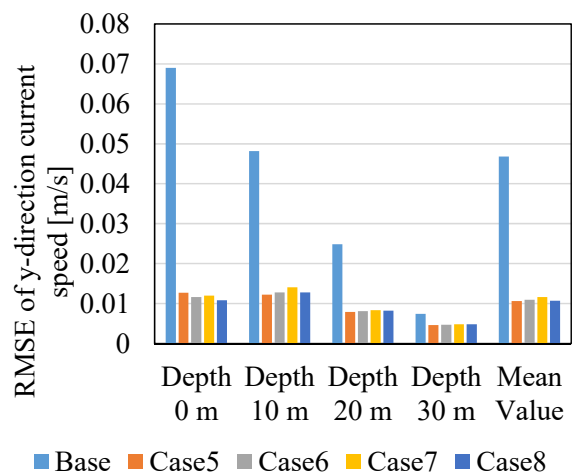
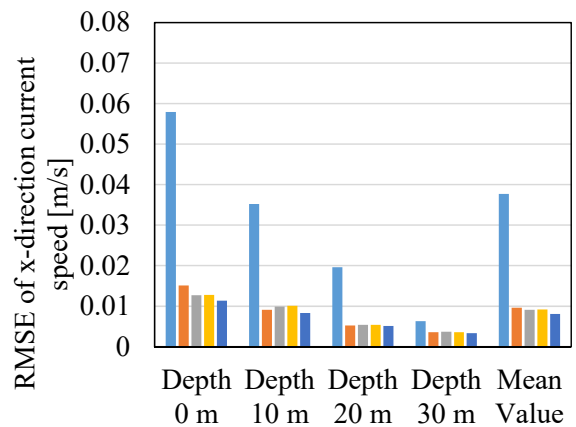


図-15 水深毎及び全層における流速の背景値 (Base) 及び解析値 (Case5—8) の RMSE。上図が x 方向、下図が y 方向。

深 0 m の RMSE は他の水深と比較して RMSE が低い傾向にあった。水深が深くなるとメンバー数が多いほど RMSE が減少している傾向にあった。

#### 2) 塩分

図-14 は水深毎及び全層における塩分の背景値及び解析値 (Case5—8) の RMSE を示している。全層平均値をみると、メンバー数が増えると RMSE が減少する傾向がみられた。水深毎に比較すると、水温 (図-13 参照) のように水深 0 m でデータ同化の効果が高い傾向はみられなかった。

#### 3) 流速

図-15 は水深毎及び全層における流速の背景値及び解析値 (Case5—8) の RMSE を示している。全層平均値をみると、x 方向についてはメンバー数が増えると RMSE が減

少する傾向がみられたが、その違いは小さく、y方向についてはメンバー数が16の結果 (Case5) が最もRMSEが小さかった。水深毎で比較しても、メンバー数が多くなるほどRMSEが小さくなるという傾向はみられなかった。

### 3.3 考察

#### 3.3.1 システムノイズの与え方の検討

1) 開境界水温にシステムノイズを与えた場合の水温の再現性(case1)

開境界水温にシステムノイズを与えることで数値モデルの誤差が増加し (式(3))、観測ノイズが相対的に小さくなる (式(5)) ことでカルマンゲインが大きくなる (式(7))。そのため、観測値が取り込まれ、データ同化で真値に近づいた (図-7, 図-8)。したがって、本計算条件においては、誤差発生源である開境界水温にシステムノイズを与えて初期条件のアンサンブルを作成することが有効であった。

今回の検討は双子実験であり、システムノイズの要因が明確である。しかし、実海域の計算を行う場合はシステムノイズの要因として表-1 が考えられ、どのノイズ発生源が閉鎖性水域のデータ同化を行う上で重要かは計算海域や条件によって異なる。そのため、計算条件ごとにシステムノイズの与え方を検討する必要がある。

2) 開境界塩分にシステムノイズを与えた場合の塩分の再現性(case2)

開境界塩分にシステムノイズを与えてデータ同化を行うことで、解析値の塩分のRMSEは背景値よりも小さくなった (図-10)。これより、本計算条件においては、誤差発生源である開境界塩分にシステムノイズを与えて初期条件のアンサンブルを作成することが有効であった。

ただし、水深30 mにおいては背景値よりも解析値のRMSEが高かった。今回の双子実験の条件から、水深30mで背景値よりも解析値のRMSEが高かった原因として、以下の3点の可能性が考えられる。

1点目に、システムノイズ及び観測ノイズは数値上平均ゼロ、標準偏差が $\sigma$ の分布に従う正規乱数になるように与えている (Box and Muller, 1958) が、本検討のように少ないメンバー数の場合は平均値がゼロにならない。システムノイズ及び観測ノイズにバイアスがあるとデータ同化結果も偏りが生じるため、バイアスを持つ場合は解析値のRMSEが背景値よりも大きくなることが考えられる。したがって、今後データ同化を行う際はノイズを与えたことでバイアスが生じないようにバイアス補正をする等、システムノイズの与え方を調整する必要がある。

2点目に、本データ同化モデルは計算の高速化のために

システムノイズと観測ノイズが互いに無相関であると仮定していた (Evensen, 2003)。ただし、この仮定はメンバー数が少ないときの誤差が大きい。そのため、今後は仮定を行わない方法でも計算ができるようコーディングの修正が必要である。なお、付録A.2ではシステムノイズと観測ノイズが互いに無相関であると仮定した場合の誤差について具体例を挙げて示している。

3点目に、本双子実験では真値から取り出して作成した塩分に測定誤差を加えている。1点目や2点目の原因で解析値のRMSEの改善が大きくない場合に、3点目の原因が重なり、解析値のRMSEが背景値よりも大きくなった可能性がある。

1点目と2点目の誤差要因は実海域に適用した時も起こるものであるため、アンサンブルカルマンフィルタでデータ同化を行う際は注意する必要がある。また、3点目の誤差要因である測定誤差について、双子実験では擬似的に与えているが、実際の観測値は常に測定誤差を含んでいる。その際に、大きな測定誤差を含む観測値をデータ同化で取り込んだ場合は、現実とは異なる解析値を得る可能性がある。そのため、観測値は付録B.に示す品質管理等を行い、大きな測定誤差を含む観測値は取り除いてデータ同化を行うことが重要である。

3点目の測定誤差を付加した双子実験は、測定誤差の許容範囲の検討に用いると有効であり、以下に例を示す。伊勢湾において数値モデルでシミュレーションを行う際に、誤差の発生要因が開境界の塩分のみである条件を考える (それ以外の表-1のシステムノイズの要因は全くない条件とする)。1か月に1回開境界において調査船で塩分を観測しており、観測の間は時間方向に線形で補間して数値モデルの開境界条件に用いる。1か月の観測間の変動は正規分布で表現できるとする。また、湾内では定点水質観測により塩分を連続的に観測しており、データ同化に使用できるとする。このとき、定点水質観測による塩分観測値の測定誤差がいくらまでであればデータ同化の結果が数値モデルの結果よりも改善する、ということが双子実験から検討できる。

3) 海上風にシステムノイズを与えた場合と、開境界水温、塩分にシステムノイズを与えた場合の流速の再現性 (case3, 4)

海上風のみシステムノイズを与えた場合、解析値の流速のRMSEは背景値よりも悪くなった (図-12)。これは風速にシステムノイズを与えて表現した誤差共分散が実際の (真の) 誤差共分散と異なり、誤ったデータ同化結果が得られたことを示している。一方、開境界水温と塩分

にシステムノイズを与えた場合、解析値の流速の RMSE が減少している。これは開境界水温と塩分にシステムノイズを与えて表現した誤差共分散が適切であり、データ同化が流速の精度改善に寄与したことを示している。

本計算条件においては、開境界水温と塩分にシステムノイズを与えた際に流速の精度が改善していることから、背景値の誤差要因として密度流が卓越していると考えられる。このような条件においては、風にシステムノイズを与えても適切な誤差共分散が表現されないためデータ同化で修正されない。したがって、境界条件にシステムノイズを与えて初期条件のアンサンブルを作成する際は、どの境界条件にシステムノイズを与えるかが重要であった。

### 3.3.2 メンバー数と計算精度の関係の検討

#### 1)水温

メンバー数を増やすとカルマンゲインが精緻に計算できるため、基本的にメンバー数が多いほどデータ同化の精度は向上する。一方で、メンバー数を64から128に増やした場合の全層平均値のRMSEは増加した(図-13)。理由として、3.3.1の2)で挙げた3点の問題(バイアス補正、高速化のための仮定による誤差、測定誤差)の可能性が考えられる。

水深0mにおいて、アンサンブルメンバー数が異なってもRMSEは同程度であり、水深0mのRMSEは他の水深と比較して低い傾向にあった。これは水温の観測値を水面付近に多く配置していたため(図-6)、水面付近の修正の効果が大きかった可能性がある。

#### 2)塩分

メンバー数が増えるとRMSEが減少する傾向があり(図-14)、基本的なアンサンブルカルマンフィルターの特性がみられた。

#### 3)流速

メンバー数による流速の解析値の違いがみられなかった。解析値のRMSEは0.01 m/s程度であり、与えている測定誤差(表-5)の標準偏差よりも小さく、データ同化による改善効果はメンバー数が16でも最大限に出ていると考えられる。本計算条件では水位を除く開境界条件、風、及び河川境界条件に時空間変動がなく一定のため、流れ場が単純であり、少ないメンバー数でも流れ場の相関関係を表現できていた可能性が考えられる。

## 4. 伊勢湾を対象としたデータ同化

本章では第3章の数値実験で得られたデータ同化の計算条件に関する知見を基に実観測値を用いたデータ同化を実施し、数値実験で得られた知見の有用性を確認するためのテスト計算を実施した。対象とする物理量は観測数が多くデータ同化の効果が表れやすいと考えられる水温とした。

### 4.1 計算方法

伊勢湾シミュレーターの計算条件は表-7の通りとし、計算格子は図-16の通りに設定した。計算格子サイズは計算精度の観点から細かいことが望ましいが、データ同化を行う上での計算効率を優先して1600mとした。開境界水温と塩分は愛知県水産試験場が実施している沿岸定線調査結果を用いた。観測頻度が月1回、鉛直方向に10m毎に観測されたデータであり、水平方向に一樣、時間方向と鉛直方向に線形で内挿し設定した。

データ同化の設定は表-8の通りとした。第3章のデータ同化後の結果である解析値とデータ同化前の結果である背景値の水温の関係(図-13)をみると、メンバー数が16のとき解析値のRMSEが背景値よりも高く、メンバー数が32のとき低かった。そのため、ここではメンバー数を32とした。同化計算の時間間隔は計算コストの観点から1時間毎とした。開境界付近でデータ同化による修正を行うと数値モデルによる計算が不安定になる。データ同化の安定性を図るため、開境界に隣接する2メッシュを同化計算の対象から除外したところ、データ同化が安定的に実施できた。そこで、本計算条件では開境界に隣接する2メッシュを同化計算の対象から除外した。第3章の検討から、システムノイズは数値モデルの結果に与える影響が大きい誤差発生源に与えると良いことがわかっている。そこで、水温に関する数値モデルの誤差要因として大きいと考えられる、開境界水温と河川水温の境界条件にシステムノイズを与えた。システムノイズの大きさとその設定方法は以下のように決定した。伊勢湾シミュレーターの冬季(2012年から2015年の1月から3月)の計算値と湾口の水質定点観測の観測値の差の絶対値の累積度数分布を作成し、試行的に累積度数が99%となる値を求めたところ、4.9°Cであった。また、第3章の検討の結果、各メンバーのノイズの平均値がゼロでないこと誤ったデータ同化結果をもたらすことがわかっている。そこで、各メンバーのノイズの平均値がゼロとなるように、各メンバーの開境界水温に $\pm 4.9^\circ\text{C}$ の範囲で等間隔にノイズを与えた。同様に、伊勢湾シミュレーターの冬季の計算値と湾奥の水質定点観測の観測値の差の累積度数分布を作成し、試行的に累積度数が99%となる値を求めたところ、



表-7 伊勢湾シミュレーターの計算条件

計算条件	設定
水平格子数	45×59
水平格子サイズ	1600 m
鉛直格子数	28
鉛直格子サイズ	水深 5 m から 1 m (全 1 層) : 4 m 水深 1 m から -5 m (全 6 層) : 1 m 水深 -5 m から -41 m (全 18 層) : 2 m 水深 -41 m から -50 m (全 1 層) : 9 m 水深 -50 m から -70 m (全 1 層) : 20 m 水深 -70 m から -100 m (全 1 層) : 30 m
計算期間	2014 年 2 月 5 日 - 24 日 (計 20 日)
タイムステップ	120 s
初期値の作成方法	同化計算を開始する 1 か月前から助走計算を行い作成した。
開境界水位	赤羽根の観測水位を基に作成した。
開境界水温・塩分	愛知県水産試験場の実施した観測結果 (観測点番号 A10, 緯度 34.37325, 経度 137.21583) を用いた。
大気境界条件	観測値を基に設定。日射, 大気圧, 水蒸気圧は名古屋の観測値, 気温, 風向風速, 降水量はセントレアの観測値を空間で一様に設定した。大気放射量は二宮ら(1996)の方法で算出し設定した。
河川流入条件	一級, 二級河川を対象とし, 流量観測値もしくは水位から H-Q 曲線によりに設定した。観測値がない河川については隣接する河川の流量を参照し, 流域面積比及び年平均降水量の比から算定した。
コリオリ力	以下の値でコリオリ力を考慮した。 代表緯度: 34.75 角速度: $7.292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$
流動モデルの設定	非静水圧モデル
乱流モデル: 水平方向	SGS モデル
乱流モデル: 鉛直方向	中村ら(1989)のモデル
開境界モデル	日野・仲座 (1988)のモデル
状態方程式の種類	Kundsen 式

2.5°C であった。そこで、各メンバーの河川水温の境界条件に±2.5°C の範囲で等間隔にノイズを与えた。観測値の品質管理方法について、内的 QC は行わず、外的 QC のみ行った (QC については付録 B. を参照)。本計算条件では外的 QC によって疑わしい観測値は除外できていると判断し、内的 QC は行わなかった。

使用した観測値と計算条件は表-9 の通りとした。伊勢

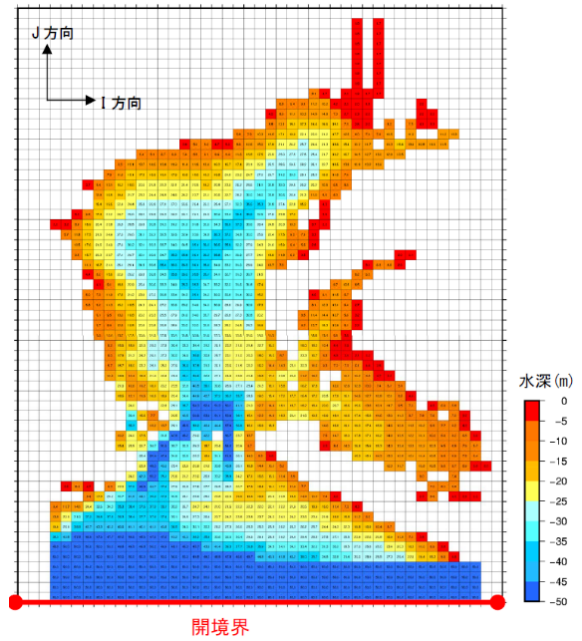


図-16 計算地形

表-8 データ同化の計算条件

計算条件	設定
同化計算のメンバー数	32
同化計算の時間間隔	1 時間毎に観測値を同化
データ同化を行わないメッシュ	開境界から 2 メッシュ分
システムノイズ	開境界水温・河川水温を各メンバーで以下の通りに設定。 開境界水温: ±4.9°C の範囲で等間隔に設定 河川水温: ±2.5°C の範囲で等間隔に設定
内的 QC	行わない SUSPECT 閾値: $T_{sus} = 2^\circ\text{C}$ , $S_{sus} = 4$ , $UV_{sus} = 0.2 \text{ m/s}$
外的 QC	REJECT 閾値: $T_{rej} = 3^\circ\text{C}$ , $S_{rej} = 6$ , $UV_{rej} = 0.3 \text{ m/s}$ 空間整合性の範囲: $Range = 3200\text{m}$ (2 メッシュ分)

湾で観測されているデータ (付録 B. を参照) のうち、水質定点観測で観測されている水温と塩分、衛星で観測されている水温、及び伊勢湾フェリーで観測されている流速を用いた。なお、水質定点観測のうち、中山水道はデータ同化期間において欠測であったため、湾奥、湾央、湾口の 3 地点の観測値を用いた。観測ノイズの標準偏差はその値を変更していくつかの試行計算を行い、計算が異常終了しなかった値を用いた。

表-9 データ同化に使用した観測値と計算条件

データ名	観測項目	観測頻度	観測ノイズの標準偏差
水質定点観測 (伊勢湾湾奥, 湾央, 湾口)	水温 塩分	1時間に1回	水温: 0.5°C 塩分: 1.0
衛星観測 Terra, Aqua	水温	1日数回程	1.0°C
伊勢湾フェリー	流速	1日8便 (平日), 9便 (休日)	0.2 m/s

計算結果は水質定点観測の観測点における水温について、観測値、背景値、及び解析値を時系列で比較した。また背景値と観測値、及び解析値と観測値の差のRMSEを計算した。さらに、衛星観測と背景値及び解析値を比較し、水温の水平分布を考察した。

#### 4.2 計算結果

図-17は湾奥の水質定点観測における水温の時系列図を示している。背景値は観測値の水温の変動を捉えておらず、全体的に水温が高い。解析値は完全ではないものの観測値の水温の変動を捉えており、全体的に高かった水温の傾向も低く修正された。

図-18及び図-19はそれぞれ湾央及び湾口の水質定点観測における水温の時系列図を示している。図-17の湾奥観測点と同様に、解析値は背景値よりも観測値の水温の傾向を捉えており、全体的に高かった水温の傾向も低く修正された。

表-10は背景値及び解析値と観測値の差のRMSEを示している。各観測点において背景値と比較して解析値のRMSEは低い。また、全地点の平均値のRMSEは背景値が1.46°C、解析値が0.37°Cであり、データ同化によりRMSEは1.09°C改善した。

図-20は表層水温の平面分布を示している。観測値は外洋側が温かく、内湾側が冷たい状況であり、その傾向は背景値も計算できていた。しかし、観測値は外洋側と内湾側の水温勾配が急で、湾口付近に強いフロントが形成されていたが、背景値は外洋側の水が内湾側に入りすぎており、水温勾配が緩かった。解析値は外洋側が温かく、内湾側が冷たい状況が表現されていた。また、フロントの形成も表現できていた。ただし、湾口西側について、観測値は水温が高かったが、解析値は水温が低かった。

#### 4.3 考察

図-17—図-19より、データ同化を行うことで観測値の水温の変動が解析でき、また、表-10より、解析値と観測

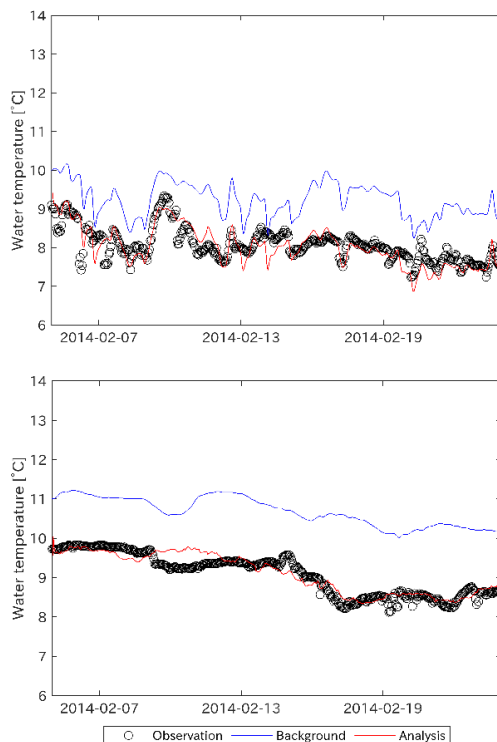


図-17 湾奥の水質定点観測における水温の時系列図。黒丸が観測(observation)、青線が背景値(Background)、赤線が解析値(Analysis)を示す。上は観測水深が-1.0 m、下は-24.0 m。

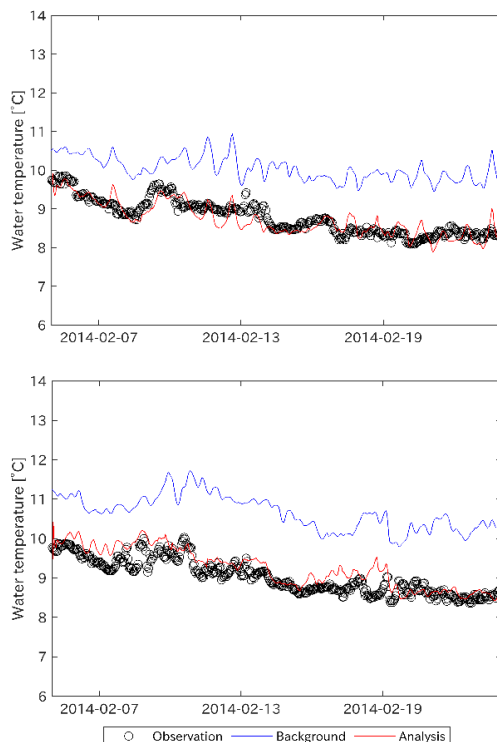


図-18 湾央の水質定点観測における水温の時系列図。上は観測水深が-1.0 m、下は-24.0 m。

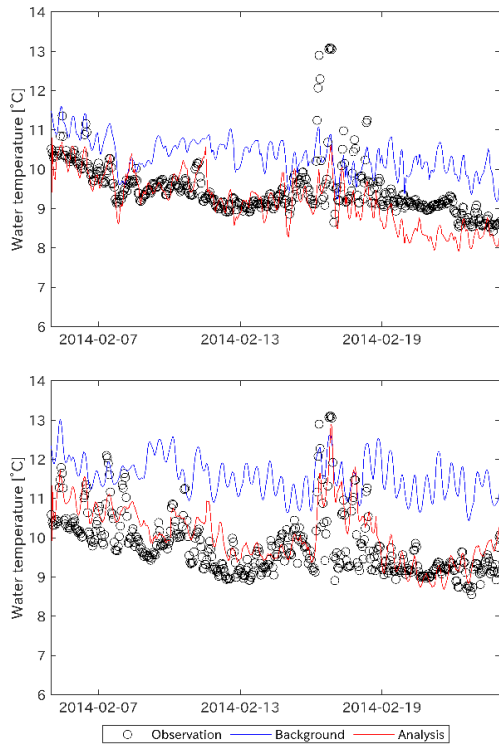


図-19 湾口の水質定点観測における水温の時系列図. 上は観測水深が-1.0 m, 下は-23.2 m.

表-10 背景値及び解析値と観測値の RMSE

	水深[m]	RMSE [°C]	
		背景値	解析値
湾奥	-1.0	1.20	0.28
	-24.0	1.63	0.21
湾央	-1.0	1.31	0.24
	-24.0	1.66	0.31
湾口	-1.0	1.04	0.58
	-23.2	1.95	0.64
平均値		1.46	0.37

値の差の RMSE は背景値と観測値の差の RMSE よりも小さくなることが示された. これにより, 本計算条件においては第 3 章の数値実験で得られた知見である, 境界条件にシステムノイズを与えて初期条件のアンサンブルを作成することの有用性が示された. ただし, これらの比較はデータ同化を行った観測値との比較であるため, 今後はデータ同化に用いていない観測値と比較し, 精度の検証を行う必要がある.

一方で, 以下の課題も残されている. 本計算条件では, 開境界水温と河川水温の境界条件にシステムノイズを与えているが, これが最適なシステムノイズの与え方とは限らない. 水温をデータ同化で解析する際のシステムノイズの位置と大きさは季節や海域等の違いにより変わる

ことが考えられるため, 季節別, 海域別のシステムノイズの与え方の検討を行う必要がある.

また, 本計算条件ではメンバー数を 32 としているが, 伊勢湾の流動水質のパターンは第 3 章で検討した矩形湾のように単純でないことが考えられる. そのため, 32 個のメンバーでは予報誤差共分散の表現が不十分であった可能性がある. したがって, 適切なメンバー数について, 季節別, 海域別に解析したい現象を踏まえて検討を行う必要がある.

図-19 より, 湾口の上層及び下層において 2 月 16 日に 2 回 13°C 程度まで水温の上昇が観測されている. これは, 潮流に伴い温かい外洋水が湾口まで移流していることが原因である (図-21 参照). このような現象はデータ同化でも表現できなかった. また, 図-20 より, 湾口西側の温かい水の分布をデータ同化で表現できなかった. 観測値として水質定点観測及び衛星観測のデータを同化しているのにもかかわらず修正されていないため, その原因を明らかにする必要がある.

## 5. 結論

本論文ではデータ同化による閉鎖性水域の流動解析に向けた計算条件の検討を行った. まず, データ同化モデルのひとつである, アンサンブルカルマンフィルターを伊勢湾シミュレーター(田中・鈴木, 2010)に実装した. 次に, 数値実験によるデータ同化に必要な計算条件である, システムノイズの与え方とメンバー数に関する検討を行った. 最後に, 数値実験で得られた知見を基に, 伊勢湾を対象とした実観測値を用いたデータ同化を実施し, モデル海域を対象とした数値実験により得られた計算条件の知見の有用性を検証した. 本論文の結果は以下の通りである.

双子実験によるシステムノイズの与え方の検討の結果, 従来検討されていなかった数値モデルの境界条件にシステムノイズを与えて助走計算を行い初期条件のアンサンブルを作成する方法で, データ同化前の背景値よりもデータ同化後の解析値の精度が高まることが示された. その際に, システムノイズを与える位置でデータ同化結果が変わるため, どこにシステムノイズを与えるかが重要であった. 次に, アンサンブルカルマンフィルターでデータ同化を行う際はシステムノイズのバイアス補正, Evensen (2003) で提案されている高速化のための仮定による誤差, 双子実験における測定誤差の取り扱いに注意を払う必要があることを指摘した.

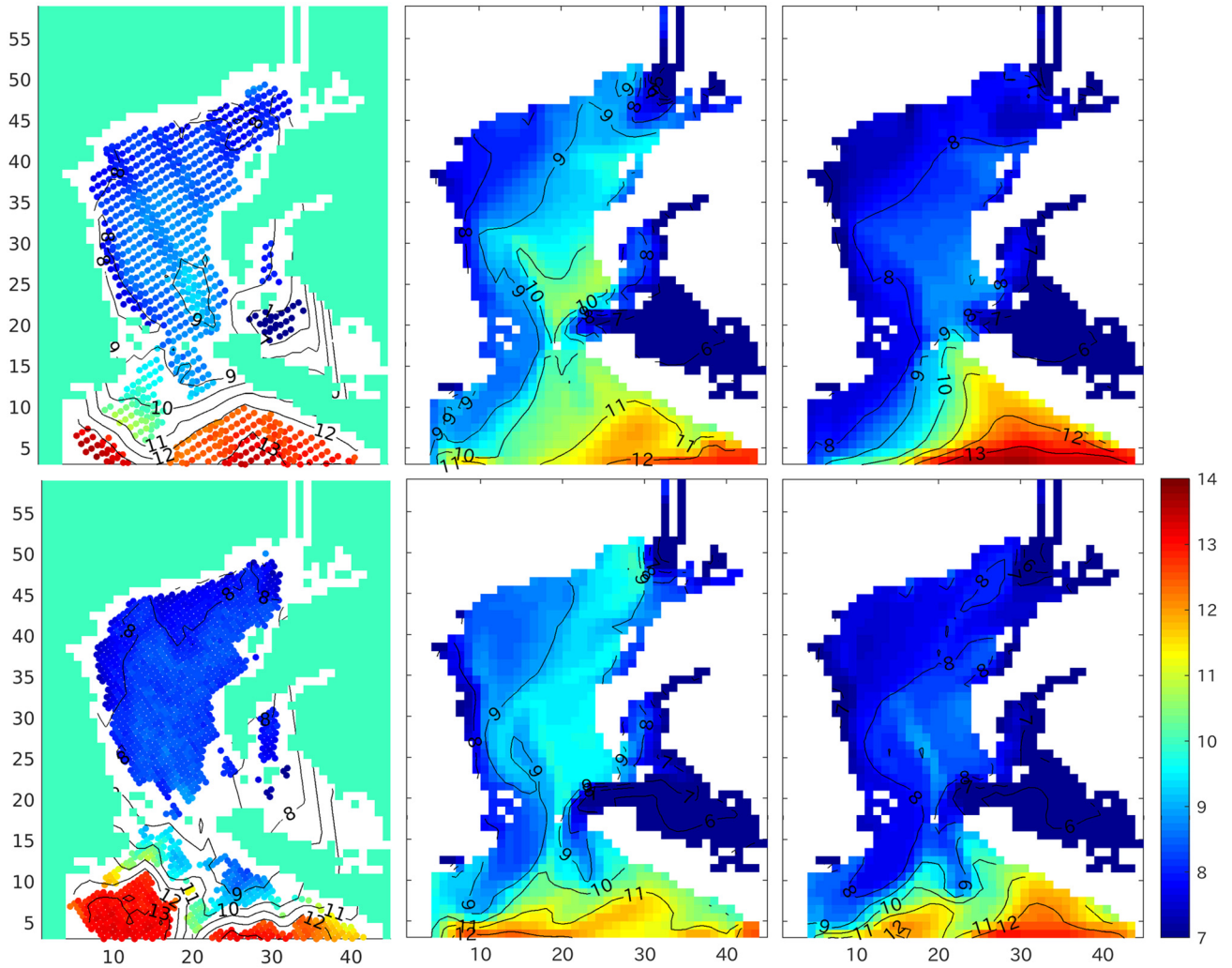


図-20 表層水温の平面分布. 左: 衛星観測値, 中央: 背景値, 右: 解析値.

上段: 2014年2月13日 2:00 時点, 下段: 2019年2月17日 2:00 時点

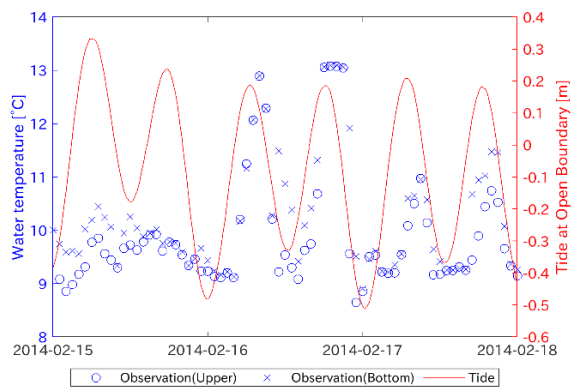


図-21 湾口観測点における上層(○印)と下層(×印)の水温(左軸)と湾口開境界の水位(Tide, 右軸)の比較. 湾口開境界の水位の上昇と共に湾口の上層及び下層で水温が上昇している.

次に, 双子実験によるメンバー数と計算精度の関係の検討の結果, 本計算条件では, 水温と塩分については基本的にはメンバー数が増えるとRMSEが改善した. 流速についてはメンバー数を増やしてもRMSEは改善しなかった. RMSEが改善しなかった原因として, 少ないメンバー数でも十分に誤差共分散行列を表現していた可能性がある.

最後に, 数値実験で得られた知見を基に伊勢湾を対象とした実観測値を用いたデータ同化を実施した. 背景値及び解析値と観測値の水温を比較した結果, データ同化を行うことでRMSEが $1.09^{\circ}\text{C}$ 改善した. したがって, 本計算条件において, 数値モデルの開境界水温と河川水温の境界条件にシステムノイズを与えて助走計算を行い初期条件のアンサンブルを作成する方法が有用であることが実観測値を用いたデータ同化においても示された. ただし, 外洋水の流入や湾口西側の水温が改善されていない

等の問題が残っている。

今後の課題は以下の通りである。まず、データ同化の計算条件の定量的評価が挙げられる。今回行った伊勢湾の検討では、2014年2月を対象として、開境界水温と河川水温の境界条件にシステムノイズを与えてデータ同化を実施し、水温の精度が高まることを確認した。しかし、今回の方法が水温のデータ同化に最適な方法であるかは示されていない。また、他の季節や海域においても同様の方法でデータ同化が適切に実施できるかを検討する必要がある。さらに、実観測値を用いたデータ同化で塩分及び流速の精度を向上させるには、どのようにシステムノイズを与えればよいか十分に明らかにされていない。

今後の課題の検討方針は以下の通りである。

(1) 伊勢湾、東京湾を対象として、数値モデルに与える開境界条件、大気境界条件、河川境界条件の誤差がそれぞれの程度かを季節別に見積もる。

(2) 水温を対象とした数値実験を実施し、(1)で求めた境界条件の誤差の範囲でシステムノイズを与えて誤差共分散を計算し、季節別にどのような誤差共分散が表現されるかを整理する。

(3) 実観測値を用いた水温を対象としたデータ同化を実施し、季節別に最適なシステムノイズの与え方を検討する。

(4) 塩分、流速についても水温と同様の検討を行う。

(2019年11月7日受付)

## 謝辞

本論文で使用した伊勢湾の環境観測値は国土交通省中部地方整備局及び愛知県水産試験場によって得られたものを使用させていただいた。衛星観測水温はNASAによって解析されたデータを使用させていただいた。フェリーのデータは伊勢湾フェリー株式会社の協力により得られたものである。本論文の成果は、国土交通省関東地方整備局及び中部地方整備局からの受託研究成果の一部である。本論文をまとめるにあたり、細川真也主任研究官から貴重なご意見をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

## 参考文献

淡路敏之, 蒲地政文, 池田元美, 石川洋一, 2009: データ同化: 観測・実験とモデルを融合するイノベーション. 京都大学学術出版会.

石井光廣, 古川恵太, 佐々木淳, 柿野純, 増田修一, 小森明裕, 桃井幹夫, 麻生晃也, 2011: 東京湾底層DO分布の短期予測システムの水産分野への活用に向けた

実証的研究. 土木学会論文集B2(海岸工学), 67, I\_1236-I\_1240.

入江政安, 西田修三, 辻陽平, 岡田輝久, 2012: 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), 68, I\_446-I\_450.

入江政安, 日下部包, 太田智也, 岡田輝久, 西田修三, 2016: 大阪湾リアルタイム水質再現予測システムの開発. 土木学会論文集B2(海岸工学), 72, I\_1261-I\_1266.

川西澄, 藤野智亮, 余越正一郎, 1996: 変分法を用いた潮流観測データの同化. 海岸工学論文集, 43, 351-355.

気象庁予報部, 2015: 観測データ利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊.

田中昌宏, G. E. Scrafy, H. Gerritsen, 安達貴浩, 2005: アンサンブルカルマンフィルターを用いたリアルタイム流況予測モデルの開発. 海岸工学論文集, 52, 321-325.

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, 3-25.

田中陽二, 中村由行, 鈴木高二朗, 井上徹教, 西村洋子, 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, 3-68.

露木義, 川畑拓矢(編集), 2008: 気象学におけるデータ同化. 日本気象学会気象研究ノート, 217.

中村由行, 西田克司, 早川典生, 西村肇, 1989: 沿岸海域における鉛直拡散係数の推定法に関する研究. 海岸工学論文集, 36, 809-813.

二宮秀典, 赤坂裕, 松尾陽, 1996: AMcDASのデータを用いた時刻別大気放射量の推定法. 空気調和・衛生工学会論文集, 60, 133-144.

樋口知之, 2011: データ同化入門 一次世代のシミュレーション技術. 朝倉書店.

日野幹雄, 仲座栄三, 1988: 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面二次元問題への適用. 海岸工学講演会論文集, 35, 262-266.

Blumberg, A. F., and Mellor, G. L., 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps, N. S., Ed., Coastal and Estuarine Sciences, Book 4, American Geophysical Union, 1-16.

Box, G. E. P., and Muller, M. E., 1958: A note on the generation of random normal deviates. The Annals of Mathematical Statistics, 29, 610-611.

Evensen, G., 2003: The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. Ocean

Dynamics, 53, 343–367.

- Kishi, M.J., Kashiwai, M., Ware, D.M., Megrey, B.A., Eslinger, D.L., Werner, F.E., Noguchi-Aita, M., Azumaya, T., Fujii, M., Hashimoto, S., Huang, D., Iizumi, H., Ishida, Y., Kang, S., Kantakov, G.A., Kim, H., Komatsu, K., Navrotsky, V.V., Smith, S.L., Tadokoro, K., Tsuda, A., Yamamura, O., Yamanaka, Y., Yokouchi, K., Yoshie, N., Zhang, J., Zuenko, Y.I., and Zvalinsky, V.I., 2007: NEMURO—a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecological Modelling*, 202, 12–25.
- Sakov, P., Counillon, F., Bertino, L., Lisæter, K. A., Oke, P. R., and Korabely, A., 2012: TOPAZ4: an ocean-sea ice data assimilation system for the North Atlantic and Arctic. *Ocean Science*, 8, 633–656.
- 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, 347–404.
- Shu, Y., Zhu, J., Wang, D., and Xiao, X., 2011: Assimilating remote sensing and in situ observations into a coastal model of northern South China Sea using ensemble Kalman filter. *Continental Shelf Research*, 31, S24–S36.

## 記号表

<b><i>H</i></b>	観測行列
<i>i, j, k</i>	数値モデルの座標のメッシュ番号
<i>I, J, K</i>	メッシュ数
<b><i>K</i></b>	カルマンゲイン
<i>L</i>	アンサンブルメンバー数
<b><i>P</i></b>	予報誤差共分散行列
<b><i>R</i></b>	観測誤差共分散行列
<i>t</i>	時間
<b><i>r</i></b>	観測ノイズ
<i>x, y, z</i>	座標系
<b><i>x</i></b>	状態ベクトル
<b><i>y</i></b>	観測ベクトル
<i>α</i>	ナッジング係数 [s <sup>-1</sup> ]
<b><i>φ</i></b>	ある物理量
<b><i>φ<sub>obs</sub></i></b>	ある観測値
— : オーバー	アンサンブルの平均値, 共分散行列
—バ	メンバー

## 付録A. アンサンブルカルマンフィルターの高速化と関連する注意点

### A.1 アンサンブルカルマンフィルターの高速化

本文で示したアンサンブルカルマンフィルターの計算手順は、状態ベクトルや観測ベクトルの次元数が低い場

合には問題がないが、伊勢湾シミュレーターのように高次元のベクトル演算を要する計算では、カルマンゲイン **K** の算定時に逆行列を安定的に求めることができない等の問題が生じるため、実用的ではない場合がある。このため、既往の研究では高次元のベクトル演算に耐えうるアンサンブルカルマンフィルターの効率的な計算方法が考案されている。本研究では Evensen(2003)のアルゴリズムを採用した。

#### A.1.1 式展開

Evensen(2003)のアルゴリズムの概要は以下に示すとおりである。なお、以降では状態ベクトル **x** の次元数を *n*、観測ベクトル **y** の次元数を *m* とする。

まず、各メンバーの状態ベクトル **x** を要素とする  $n \times L$  の行列 **A** を以下のように定義する。

$$\mathbf{A} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_L) \quad (\text{A-1})$$

**A** の平均値  $\bar{\mathbf{A}}$  と偏差 **A'** を以下のように定義する。

$$\bar{\mathbf{A}} = (\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}, \dots, \bar{\mathbf{x}}) \quad (\text{A-2})$$

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - \bar{\mathbf{A}} \quad (\text{A-3})$$

ここで、 $\bar{\mathbf{x}}$  は各メンバーの平均値である。**A'** を用いると、各メンバーの予報誤差共分散行列 **P** ( $n \times n$  行列) は下式のように書ける。

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{A}' \mathbf{A}'^T}{L-1} \quad (\text{A-4})$$

同様に、観測ベクトルのアンサンブル **y** をと各メンバーの観測ノイズ **r** を要素とする行列 **D** ( $m \times L$  行列) を以下のように定義する。

$$\mathbf{D} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_L) \quad (\text{A-5})$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{y} + \mathbf{r}_i \quad (\text{A-6})$$

また、観測ノイズを要素とする行列 **γ** ( $m \times L$  行列) を以下のように定義する。

$$\boldsymbol{\gamma} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L) \quad (\text{A-7})$$

**γ** を用いると、観測ベクトルの誤差共分散行列 **R** ( $m \times m$  行列) は以下のように書ける。

$$R = \frac{\gamma\gamma^T}{L-1} \quad (\text{A-8})$$

さらに、 $D$  と  $HA$  の差  $D'$  を以下のように定義する。

$$D' = D - HA \quad (\text{A-9})$$

以上の行列を用いて式(8)を書き換えるとアンサンブルメンバーの解析値  $A^a$  は以下の通りとなる。

$$A^a = A + A'A^T H^T (HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T)^{-1} D' \quad (\text{A-10})$$

### A.1.2 計算方法

式(A-10)の計算を行う際には、 $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  の特異値分解を行い、後述する手順で行列計算を行うことで計算コストを削減することができる。ここで、特異値分解を行う方法は2つある。一つは  $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  を直接特異値分解する方法、もう一つは数値モデルによる計算値の誤差と観測値の誤差が互いに無相関であるという仮定をおき、計算量を減らす方法である。

まず、 $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  を直接特異値分解する方法については次式を用いる。

$$HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T = ZAZ^T \quad (\text{A-11})$$

次に、数値モデルによる計算値の誤差と観測値の誤差が互いに無相関であるという仮定をおき、計算量を減らす方法を説明する。式(A-10)のうち、 $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  は  $m \times m$  行列であり、観測ベクトルの次元数  $m$  が大きい場合には逆行列の算定に多大な計算コストがかかる。そこで、本アルゴリズムでは特異値分解を用いて行列の次元数を削減し、効率的に計算を実施する。

まず、 $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  を以下のように変形する。

$$HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T = (HA + \gamma)(HA + \gamma)^T \quad (\text{A-12})$$

ただし、式変形にあたっては、

$$HA'\gamma^T = 0 \quad (\text{A-13})$$

と仮定した。この仮定は数値モデルによる計算値の誤差と観測値の誤差が互いに無相関であることを示している。

次に、式(A-12)のうち、 $HA + \gamma$  を以下のように特異値分解する。

$$HA + \gamma = U\Sigma V^T \quad (\text{A-14})$$

ここで、 $U, V$  はともに直交行列であり、 $\Sigma$  は  $HA + \gamma$  の特異値を対角成分に持つ行列である。これより、式(A-12)は、

$$\begin{aligned} HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T &= U\Sigma V^T V\Sigma^T U^T \\ &= U\Sigma\Sigma^T U^T \end{aligned} \quad (\text{A-15})$$

と変形することができる。ここで、式変形にあたっては直交行列の性質である  $V^T V = I$  を利用した。

以上より、式(A-11)及び式(A-15)の  $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  の逆行列は、

$$\begin{aligned} (HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T)^{-1} &= (U\Sigma U^T)^{-1} \\ &= U\Sigma^{-1} U^T \end{aligned} \quad (\text{A-16})$$

と書ける。なお、式(A-16)は式(A-11)及び式(A-15)を統一して記載するため、 $Z = U, \Sigma\Sigma^T = A$  とした。最終的な式の形は同じであるが、式(A-15)で得られる結果は式(A-11)と一致しない。そのことについては A.2 において具体例を用いて説明する。

したがって、 $HA'A^T H^T + \gamma\gamma^T$  の逆行列を求めるには  $A$  の逆行列を算定する必要があるが、 $A$  は対角行列であるため、逆行列  $A^{-1}$  を求めるには単に  $A$  の対角成分の逆数をとるだけでよい。加えて、 $m > L$  の場合には  $A$  を  $L \times L$  行列とすることで、観測ベクトルの次元数  $m$  が大きい場合に逆行列の計算コストが大幅に削減される。

式(A-16)を式(A-10)に代入すると、解析値のアンサンブルは以下の式により求められる。

$$A^a = A + A'(HA')^T U\Sigma^{-1} U^T D' \quad (\text{A-17})$$

一般に、状態ベクトルの次元数  $n$  は観測ベクトルの次元数  $m$  やメンバー数  $L$  よりも大きく、予報誤差共分散行列  $P_{t+1}$  ( $n \times n$  行列) や観測行列  $H$  ( $n \times m$  行列) は巨大行列となる。本アルゴリズムを使用すると、用意する行列が各メンバーの状態ベクトルを要素とする行列  $A$  ( $L \times n$  行列) や、その偏差  $A'$  から観測値に対応する値を抜き出した  $HA'$  ( $L \times m$  行列) 等であるため、第2章で説明した通常の計算方法よりも計算コストが大幅に削減される。

Evensen(2003)のアルゴリズムを用いた場合の計算手順を以下に示す。

- 1) 数値モデルを用いて計算値のアンサンブルメンバーを  $L$  個作成する。

- 2) 1)で得られた状態ベクトル  $\mathbf{x}$  を要素とする行列  $\mathbf{A}$  を作成する.
- 3)  $\mathbf{A}$  の各要素から観測位置に対応した値を抽出し, 行列  $\mathbf{HA}$  を作成する.
- 4)  $\mathbf{HA}$  の平均値から偏差  $\mathbf{HA}'$  を求める.
- 5) 観測ノイズ  $\mathbf{r}$  のアンサンブルを  $L$  個作成し, これを要素とする行列  $\boldsymbol{\gamma}$  を作成する.
- 6) 観測ベクトル  $\mathbf{y}$  と観測ノイズ  $\boldsymbol{\gamma}$  を要素とする行列  $\mathbf{D}$  を作成する.
- 7) 3)と6)で求めた  $\mathbf{HA}$  と  $\mathbf{D}$  からイノベーション  $\mathbf{D}'$  を求める.
- 8) 式(A-11)を用いて特異値分解を行う. 式(A-13)の仮定を用いる場合は行列  $\mathbf{HA}' + \boldsymbol{\gamma}$  を式(A-14)の通り特異値分解し,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$ , 及び  $\boldsymbol{\Sigma}$  を求め, (A-16)の  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{A}^{-1}$ , 及び  $\mathbf{U}^T$  を求める.
- 9) 式(A-17)より以下の順で計算を行い, 解析値  $\mathbf{A}_a$  を求める. 行列計算の効率化を図るため, ベクトルの大きさを行列計算の順番を変更している.

$2mnL \geq (m+n)L^2$  のとき

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{U}^T \quad (\text{A-18})$$

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1\mathbf{D}' \quad (\text{A-19})$$

$$\mathbf{X}_3 = \mathbf{U}\mathbf{X}_2 \quad (\text{A-20})$$

$$\mathbf{X}_4 = (\mathbf{HA}')^T \mathbf{X}_3 \quad (\text{A-21})$$

$$\mathbf{A}_a = \mathbf{A} + \mathbf{A}'\mathbf{X}_4 \quad (\text{A-22})$$

$2mnL < (m+n)L^2$  のとき

$$\mathbf{X}_4 = \mathbf{A}'(\mathbf{HA}')^T \quad (\text{A-23})$$

$$\mathbf{A}_a = \mathbf{A} + \mathbf{X}_4\mathbf{X}_3 \quad (\text{A-24})$$

## A.2 高速化における注意点

数値モデルによる計算値の誤差と観測値の誤差が互いに無相関である仮定 (式(A-13)) によって生じる誤差について具体例を用いて説明する.

### A.2.1 計算条件

数値モデルでの時間発展を考慮せず, データ同化の効果だけを確認することを目的とし, 水平方向に  $1 \times 1$  メッシュ, 鉛直方向に 1 メッシュの計算領域を設定する. 同化の対象は水温とする. メンバー数は 8 とする. 各メンバーで平均値を  $23^\circ\text{C}$  とし,  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  の範囲で等間隔にばらつきを持った値が得られたとする. また, 観測値について, 計算格子の中心位置で水温  $22^\circ\text{C}$  の観測データを与える. 観測ノイズは平均が 0, 分散が 0.25 に従う正規乱数とする.

この場合, 式(3)及び式(5)の行列は背景値及び観測ノイズの標本分散をとり, それぞれ  $\sigma_{\text{model}}^2$ ,  $\sigma_{\text{obs}}^2$  とする.

上記の計算条件より観測行列は  $H=1$  と定義され, カルマンゲインは以下の通りに表される.

$$\bar{K}_t = \frac{\sigma_{\text{model}}^2}{\sigma_{\text{model}}^2 + \sigma_{\text{obs}}^2} \quad (\text{A-25})$$

ここで, 計算条件より  $\sigma_{\text{model}}^2 = 1.102[^\circ\text{C}^2]$ ,  $\sigma_{\text{obs}}^2 = 0.25[^\circ\text{C}^2]$  であるため, カルマンゲインは  $K = 1.102 / (1.102 + 0.25) = 0.815$  と得られる. また, 観測ノイズの平均は 0, 観測値と背景値の差は -1 であるため, データ同化の理論解は式(1)より次の通りとなる.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{x}}_t^a &= 23 + 0.815(22 - 23) \\ &= 22.185 \end{aligned} \quad (\text{A-26})$$

一方, 状態ベクトル及びその偏差の行列は計算条件より式(A-27)及び(A-28)の通りに表される.

$$\mathbf{A} = [21.50 \ 21.93 \ 22.36 \ 22.79 \ 23.21 \ 23.64 \ 24.07 \ 24.50] \quad (\text{A-27})$$

$$\mathbf{A}' = [-1.50 \ -1.07 \ -0.64 \ -0.21 \ 0.21 \ 0.64 \ 1.07 \ 1.50] \quad (\text{A-28})$$

観測ベクトルの行列  $\mathbf{D}$  と観測ベクトルの平均値からの偏差  $\boldsymbol{\gamma}$  は以下の通りに計算される.

$$\mathbf{D} = [23.13 \ 21.51 \ 21.74 \ 22.04 \ 21.79 \ 21.97 \ 22.15 \ 21.68] \quad (\text{A-29})$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [1.13 \ -0.49 \ -0.26 \ 0.04 \ -0.21 \ -0.03 \ 0.15 \ -0.32] \quad (\text{A-30})$$

ここで, 観測ノイズは乱数で与えたため,  $\mathbf{D}$ ,  $\boldsymbol{\gamma}$  は必ずこの値をとるわけではない.

### A.2.2 仮定を用いない同化結果

式(A-10)より解析値は,

$$\mathbf{A}_a = [22.83 \ 21.59 \ 21.85 \ 22.18 \ 22.05 \ 22.28 \ 22.50 \ 22.20] \quad (\text{A-31})$$

となる. この解析値の平均値は  $22.185^\circ\text{C}$  であり, 計算条件から得られるデータ同化の理論解である式(A-26)と一致する.



### A.2.3 仮定を用いた同化結果

式(A-13)のとおり数値モデルによる計算値の誤差と観測値の誤差が互いに無相関であると仮定した場合、式(A-14)は以下の通りとなる。

$$HA' + \gamma = [-0.37 \ -1.56 \ -0.90 \ -0.17 \ 0.00 \ 0.61 \ 1.22 \ 1.18] \quad (A-32)$$

これより、式(A-12)の右辺は、

$$(HA' + \gamma)(HA' + \gamma)^T = 6.6746 \quad (A-33)$$

となり、この逆行列（この条件設定においては逆数）は  $1 / 6.6746 = 0.1498$  となる。よって、式(A-10)で解析値を求めると、

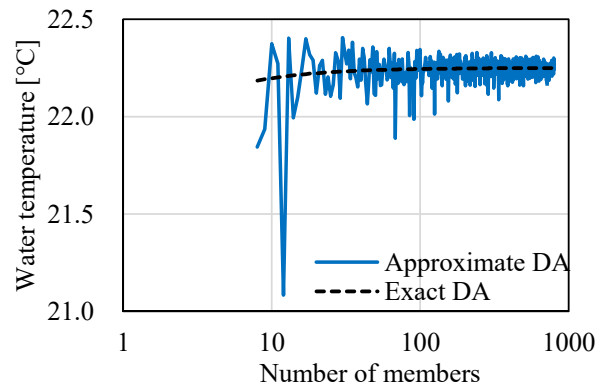
$$A_a = [23.38 \ 21.44 \ 21.64 \ 21.92 \ 21.57 \ 21.71 \ 21.85 \ 21.24] \quad (A-34)$$

となる。この解析値の平均値は  $21.84^\circ\text{C}$  となった。これはデータ同化の理論解と一致しない。

この原因は前述の通り式(A-13)のように仮定したことである。実際に今回のケースで  $HA'\gamma^T$  を算出すると、 $HA'\gamma^T = -1.39$  となり、ゼロではない。そのため、式(A-12)の左辺は  $9.46$  で、右辺の  $6.67$  と乖離があり、近似が成立していない。

一般に、数値モデルによる計算値の誤差と観測値の誤差が無相関となるのはメンバー数が多いときである。図A-1はメンバー数を増やした際のデータ同化において、 $HA'\gamma^T = 0$  の仮定を用いた解析値と仮定を用いない解析値の比較である。このとき、システムノイズはメンバー数に応じて  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  の範囲で等間隔に分割して与えているため、 $\sigma_{\text{model}}^2$  の値はメンバー数が増えるに従い小さくなり、 $0.75$  に漸近する、すなわち、水温の解析値は大きくなり、 $22.25$  に漸近する。図より、メンバー数が少ないときは近似解と厳密解の差が大きく、本事例ではメンバー数が  $12$  のときに両者の差が最大となり、その値は  $1.12^\circ\text{C}$  となった。なお、 $D$ 、 $\gamma$  の計算に乱数を用いているため、今回の結果は本事例に限ったことであり、必ずメンバー数  $12$  の時に結果が悪くなるということではない。

以上のことから、メンバー数が少ないときは式(A-13)の仮定を用いずに計算するほうが良い。また、図よりメンバー数が大きい場合でも仮定を用いた解析解は理論解と完全には一致しないため、データ同化の理論的な検討を行う際などにはこの点に注意が必要である。



図A-1 データ同化において  $HA'\gamma^T = 0$  の仮定を用いた場合の解析値 (Approximate DA) と仮定を用いない場合の解析値 (Exact DA) の比較。横軸がメンバー数、縦軸が水温を示す。

#### 参考文献

Evensen, G., 2003: The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 53, 343–367.

### 付録 B. 伊勢湾における環境観測と観測値の品質管理手法

観測値は観測機器や観測システムの特長上、測定誤差が含まれる。誤差が含まれたデータを同化すると誤った解析値を得る可能性があり、観測値の誤差はデータ同化実施前に可能な限り取り除いておく必要がある。これを品質管理 (QC: Quality Control) といい、観測システムごとにどのような測定誤差が含まれるかを考慮したうえで、観測値の品質管理方法を決定する必要がある。このような、観測値が持つ情報のみを使って行う QC を内的 QC という (気象庁予報部, 2012)。

また、データ同化における QC には観測値のみで比較する方法の他、背景値と観測値を比較し、その乖離が大きいために観測値を棄却する方法がある。これを外的 QC という (気象庁予報部, 2012)。

ここでは、伊勢湾を例に、伊勢湾フェリー、海洋レーダー、水質定点観測、及び衛星観測水温の観測に関する概要と、データ同化に用いる観測値の測定誤差を取り除く内的 QC (B.1からB.5) と外的 QC (B.6) の方法について検討した結果を示す。

## B.1 伊勢湾フェリー（水温・塩分）

### B.1.1 概要

伊勢湾フェリーは、三重県にある鳥羽港と愛知県にある伊良湖港の約20kmを約55分で運行する定期航路（航路は図B-1参照）で、1日8便（平日）、もしくは9便（休日）のダイヤによって運航されている。フェリーには水質測定システムが搭載されており、海面下3.4 mの水温及び塩分が測定されている。

### B.1.2 フェリーによる水温、塩分観測値の特徴

伊勢湾フェリーによる水温、塩分の観測の特徴を整理する。まず、観測時間間隔は1秒が基本である。また、観測値にはスパイクデータが含まれる。次に、フェリーによる移動観測であり、鳥羽港—伊良湖港を直線で結んだ線から航路が大きく外れる観測値が含まれる。さらに、フェリーの運航は基本的に日中の時間帯であり、夜間は観測値がない。また、データ同化を行う時刻は必ずしも運行中ではなく、停泊中や運休中もある。

これらの特徴を踏まえて、伊勢湾フェリーによる水温、塩分観測における品質管理の手法として、以下の4つを適用した。品質管理の作業フローを図B-2に示す。

- ① データ前処理（1分間平均）
- ② フェリー速度によるチェック（停泊時データは使用しない）
- ③ 海陸チェック（標準航路チェックを含む）
- ④ 許容範囲チェック

### B.1.3 品質管理①データ前処理

伊勢湾フェリーによる水温、塩分観測値は1秒間隔に収録されており、データ量が多い。また、データには突発的なスパイクデータが含まれているため、前処理を必要とする。前処理の方法として、1秒間隔に収録された観測値に1分間平均を施し、1分間隔のデータセットを作成する。平均処理の際にはスパイクデータの除去のため、1分毎に統計処理して標準偏差 $\sigma$ を求め、 $\pm\sigma$ の範囲から外れるデータを棄却した後、平均値を求める。図B-3はその実施例である。

### B.1.4 品質管理②フェリー速度によるチェック及び③海陸チェック

伊勢湾フェリーは鳥羽港と伊良湖港を結ぶ定期フェリーであり運航航路が決まっている。図B-4は水温、塩分観測値取得位置とその個数であり、暖色系で示されている箇所ではフェリーが多く通過している。本検討では標準的な航路を含む白枠内において観測された値を定期運航の

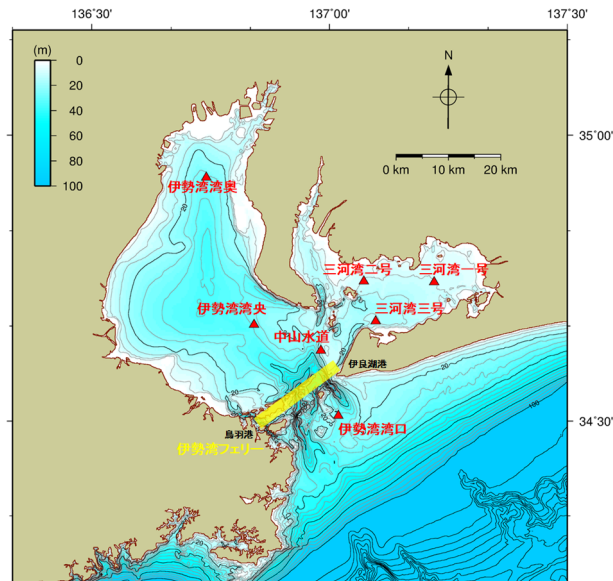


図 B-1 伊勢湾フェリーの航路及び水質定点観測（モニタリングポイント）の観測地点

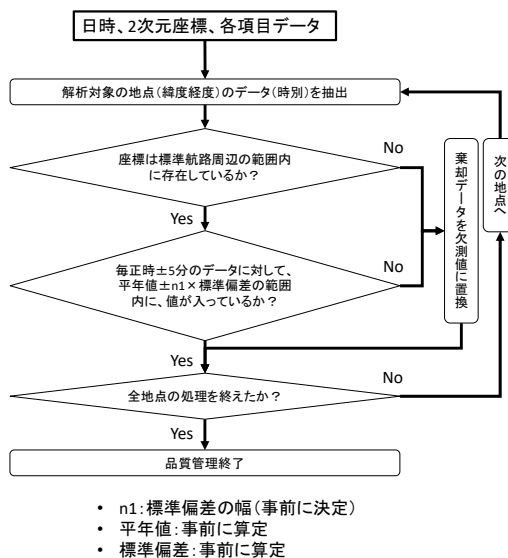


図 B-2 フェリーにより観測された水温、塩分の品質管理の作業フロー

- ・ n1: 標準偏差の幅(事前に決定)
- ・ 平年値: 事前に算定
- ・ 標準偏差: 事前に算定

フェリー観測値として取り扱うこととし、この範囲から外れる観測値は棄却する。また、停泊中のデータは棄却する。運行もしくは停泊の判断はフェリーの速度から行う。また、数値シミュレーションの海域・陸地のメッシュ情報と照合して、陸地に該当する観測値は棄却対象とする。

### B.1.5 品質管理④ 許容範囲チェック

許容範囲チェックは、各観測値の許容範囲を設定し、それから逸脱したデータを棄却するものである。ここでは、測定値は大きな季節変動を伴い、棄却すべき観測値の範

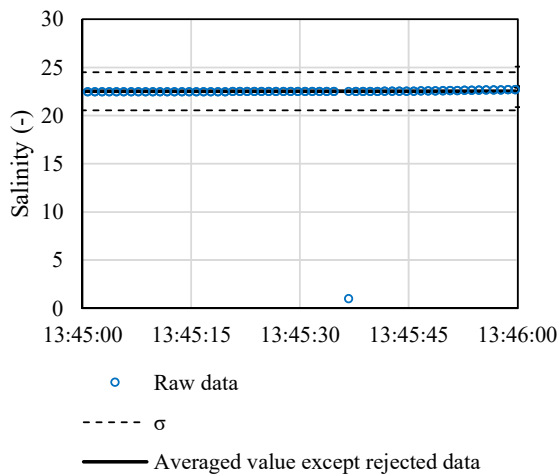


図 B-3 伊勢湾フェリーで観測された塩分のデータ前処理の例。生データ (Raw data) の標準偏差  $\sigma$  を求め、 $\pm\sigma$  の範囲から外れるデータを棄却した後、平均値 (Averaged value except rejected data) を算出する。

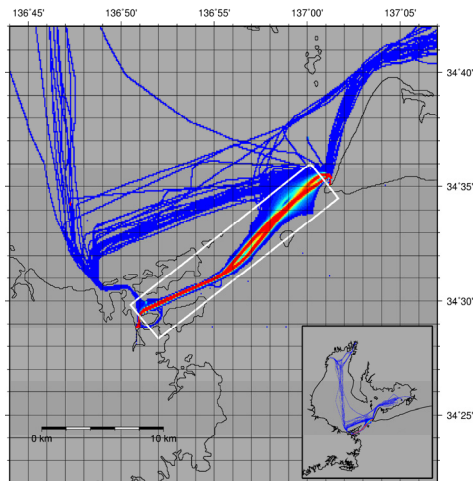
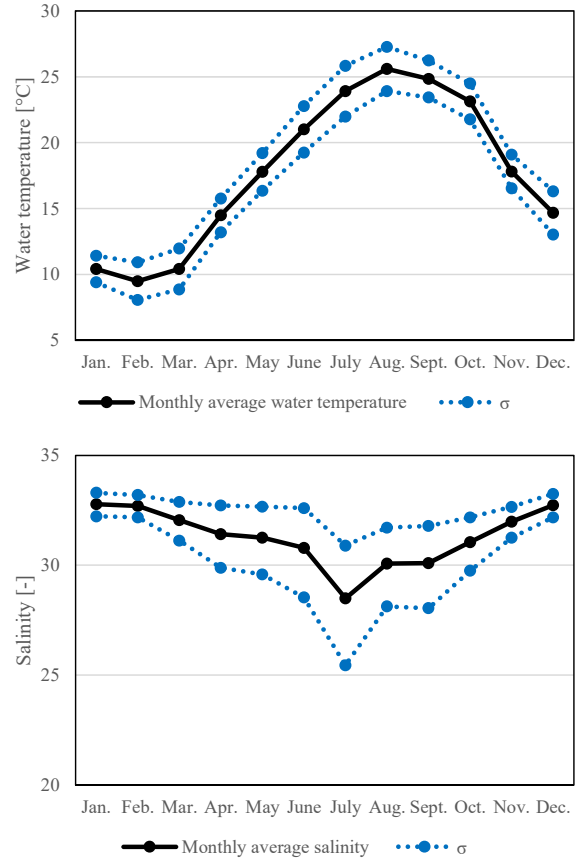


図 B-4 フェリーによる水温、塩分の観測値取得位置とそのデータ数。暖色系のプロットは観測データが多い点であることを示す。

困も季節変動することから、観測値に対して月別の平均値及び標準偏差を算定し許容範囲の時間変化を考慮した。水温、塩分の月別平均値と標準偏差を図 B-5 に示す。ここで塩分の標準偏差は対数をとったうえで正規分布を考慮した。この手法に関する観測値の時系列の例を図 B-6 に示す。水温は $\pm 2\sigma$  の範囲内に概ね収まっており、これを外れる観測値の多くは異常値であると考えられる。また、塩分は $\pm 3\sigma$  の範囲に概ね収まっている。そこで、水温は $\pm 2\sigma$ 、塩分は $\pm 3\sigma$  を外れる観測値については異常値として棄却することとした。



図B-5 水温 (上) 及び塩分 (下) の月別平年値 (Monthly average) と標準偏差 $\sigma$  (統計期間：2012~2015年)

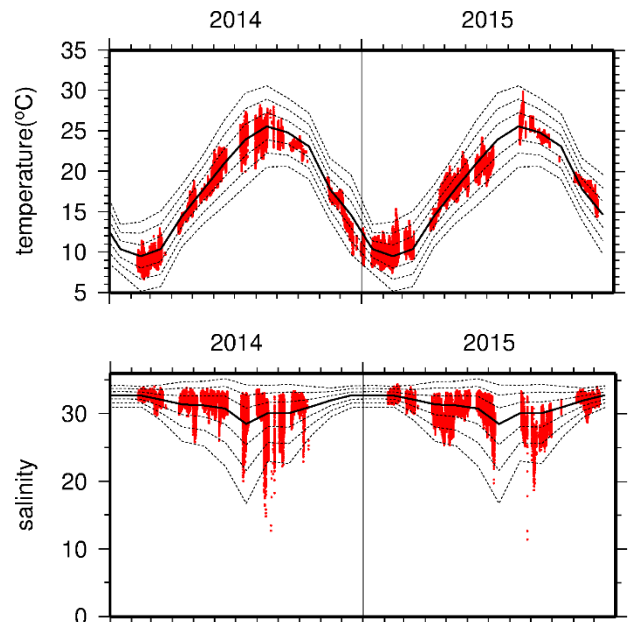


図 B-6 フェリーの水温 (上)、塩分 (下) の観測値と許容範囲チェックで棄却される範囲

ただし、高温または低温傾向の年の場合、観測は正確に行われているにもかかわらず平均値と比較して大きくずれているため棄却される可能性もある。同様に、雨季等において観測地点が低塩分であるにもかかわらず観測値が $-3\sigma$ から外れるため棄却される可能性が高い。そのため、許容範囲チェックは有効な品質管理手法ではあるものの、平均値から大きく外れる観測値も取り入れたい場合はチェック方法を見直す必要がある。

## B.2 伊勢湾フェリー（流向流速）

### B.2.1 概要

フェリーの船底には ADCP（超音波多層流向流速計：Acoustic Doppler Current Profiler、図B-7参照）が搭載されており、鉛直多層の流向・流速が測定されている。ADCPの測定層は、海面下13.1 mから鉛直4 m毎である。

### B.2.2 フェリーによる流速観測値の特徴

船底設置型 ADCP によるフェリーの流速観測値は、船舶で移動しながらの観測であるため、観測値の品質は観測時の気象海象条件等に大きく依存すると考えられる。そのため、本検討では流速観測値の品質管理の方針として、疑わしい観測値は積極的に除去し、正確性の高い観測値のみを用いてモデルに同化することとした。

また、伊勢湾シミュレーターに組み込んであるデータ同化手法（アンサンブルカルマンフィルター）は解析時刻（同化時刻）を細かく設定することが実用上困難である。よって、フェリーによる流速観測値はあらかじめ潮流調和解析を行うことによって調和定数を求めておき、解析時刻の推算潮流に変換し、推算潮流に潮汐残差流を加えた流速観測値を同化データとして設定した。フェリー流速観測値の品質管理の作業フローを図B-8に示す。

### B.2.3 品質管理①標準航路断面への投影

伊勢湾フェリーの航行する鳥羽港と伊良湖港を直線で結び、それを標準航路とする（図B-9）。各航海におけるフェリー航路は図中の標準航路に投影する。

### B.2.4 品質管理②潮流調和解析による調和定数の算定

潮流調和解析を行い、標準航路断面における各年の主要8分潮の調和定数を求める。

### B.2.5 品質管理③潮流調和定数を用いた潮流の推算

標準航路断面における潮流調和定数から必要な時刻の潮流の推定を行う。



図 B-7 伊勢湾フェリーの船底に設置された ADCP

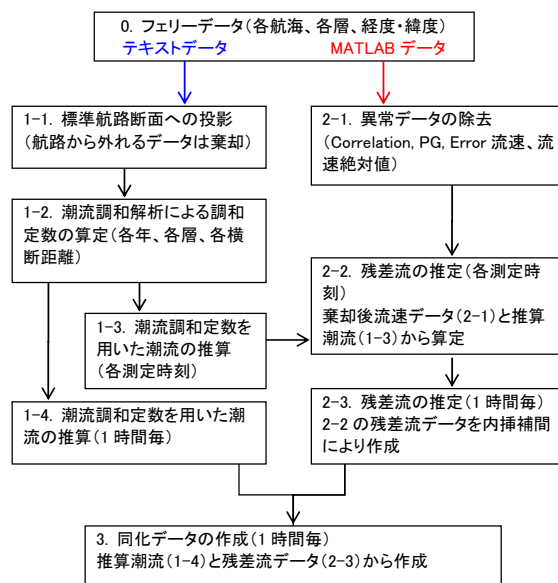


図 B-8 フェリーにより観測された流速の品質管理の作業フロー

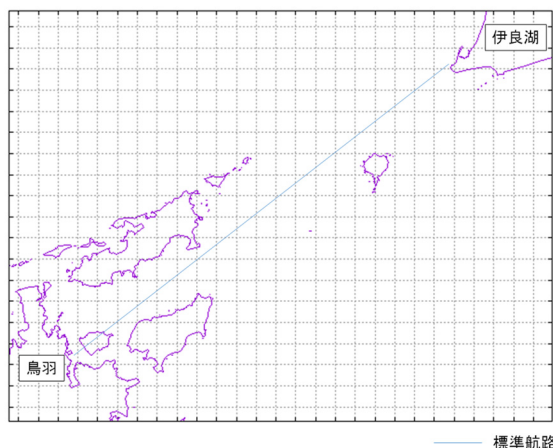


図 B-9 伊勢湾フェリーの流速観測値を調和分解する際の標準航路

表 B-1 フェリーに設置した ADCP の品質管理情報及び観測値の棄却判定

棄却判定情報	説明
Correlation	ADCP は、2 つの短パルスに位相変調をかけてつなげ、2 つ 1 組にしたパルスを送信している。この 2 つ一組のパルスはトランスデューサーから発信された後、水中の散乱体で反射し、トランスデューサーに戻る。この反射波の 1 つ目のパルスと 2 つ目のパルスのドップラーシフトの相関具合を数値化して表しているのが Correlation である。本検討では Correlation が 125 [count] 以上のデータを採用した。
Percent Good	超音波の発信数 (ping 数) と誤差の規定値 (error threshold) をパスした ping 数の割合。 本検討では Percent Good が 100% のデータのみを採用した。
Error Velocity	ADCP は 4 つのトランスデューサーで水平方向、鉛直方向の流速を観測している。対角上の 2 ビームで計算される 2 組の鉛直流速の差の絶対値が Error Velocity である。ADCP は 4 つのビームで計測する範囲では流れ場が一樣であることが前提である。流れ場が不均一である場合、2 組の鉛直流速に差が生じ、Error Velocity が大きくなる。 本検討では、Error Velocity が 0.1 m/s 以下のデータを採用した。
流速絶対値	流速が伊勢湾において非現実的な大きさの場合、その観測値は異常値であるという考え方にに基づき設定する。 本検討では流速 1.10 m/s を超えるとき、異常値であるとして棄却し、それ以下の流速データを採用した。

### B.2.6 品質管理④異常値の除去

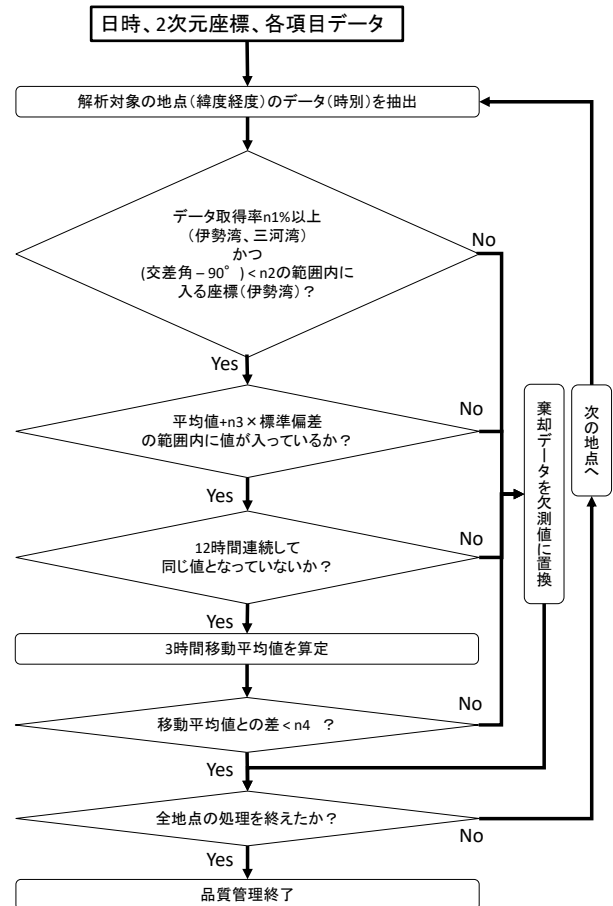
ADCP は流速観測値のほか、観測の状況から観測値の品質管理情報を出力する。この品質管理情報を使った品質管理を実施する。棄却の判定に用いた ADCP の品質管理情報と観測値の棄却判定基準を表 B-1 にまとめた。

### B.2.7 品質管理⑤残差流の推算

異常値除去の処理を行った流速観測値から、潮流調和定数を用いた潮流の推算流速観測値を差し引くことによって残差流（潮流以外の流速）の算出を行う。

### B.2.8 品質管理⑥データ同化用観測値の作成

上述で求めた残差流は観測時刻のものであるため、それを線形補間して 1 時間毎のデータ同化時刻の残差流を



- n1: データ取得率の閾値(事前に決定)
- n2: 交差角が90° から乖離する許容範囲(事前に決定)
- n3: 標準偏差の幅(事前に決定)
- n4: 移動平均との差の許容値(事前に算定)
- 平均値: 事前に各メッシュ毎に算定
- 標準偏差: 事前に各メッシュ毎に算定

図 B-10 海洋レーダー観測値の品質管理のフロー

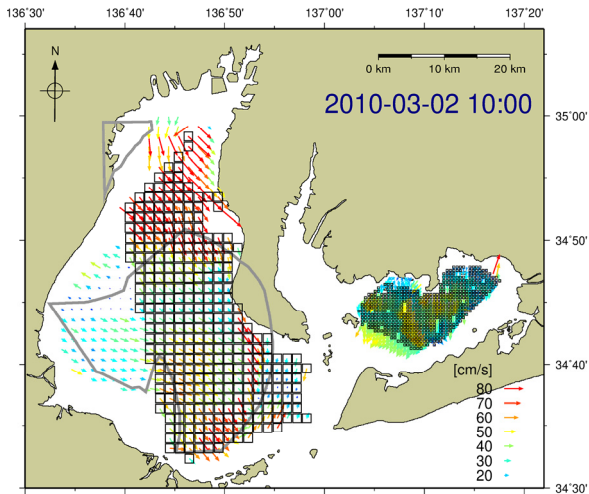
再現する。それに同時刻の推算潮流を加えて毎正時の流速観測値を作成する。

## B.3 海洋レーダー

### B.3.1 海洋レーダーの観測値の特徴

海洋レーダーの観測値の特徴を整理する。観測項目は、東方成分・北方成分流速であり、提供されているデータはメッシュ化されている。観測エリアは、伊勢湾と三河湾であり、レーダー周波数が異なるため、観測水深が異なり、それぞれ海面下 0.5m、0.3m と定義されている。次に、観測時間間隔は 1 時間であり、異常値が含まれる。さらに、場所による特性(異常値がやすい場所)が想定される。

これらの特徴を踏まえて、海洋短波レーダーにおける品質管理の手法として、以下の 5 つを適用することとした。品質管理の作業フローを図 B-10 に示す。



— 交差角  $90 \pm 30^\circ$  範囲    □ データ取得率 60%以上

図 B-11 海洋レーダー観測においてレーダー交差角とデータ取得率によるチェックで観測値として採用する観測メッシュ。伊勢湾側はレーダー交差角の条件を満たす枠内、かつ、データ取得率が60%以上となる観測メッシュの観測値をデータ同化に使用する。

- ①レーダー交差角によるチェック
- ②データ取得率によるチェック
- ③許容範囲チェック
- ④データ固定チェック
- ⑤時間方向のスパイクチェック

### B.3.2 品質管理①レーダー交差角によるチェック及び②データ取得率によるチェック

海洋レーダーは、レーダーの交差角が90度のときに最も測定誤差が小さく、90度からずれるに従って測定誤差が大きくなる。また、基地局からの距離が遠くなるほど流速の誤差が大きくなる。

レーダー交差角による棄却について、本検討では、伊勢湾について、片岡(2017)に示されているレーダー交差角の分布を参考として、流速精度が最も確保される交差角90度を中心として、 $\pm 30$ 度の範囲の観測値のみ採用することとした。三河湾については交差角の情報が得られなかったため、交差角による棄却は行っていない。

データ取得率の棄却について、本検討では伊勢湾及び三河湾においてデータ取得率が60%以下になる観測メッシュの観測値は棄却することとした。この手法によって棄却されるデータ範囲を図B-11に示す。

### B.3.3 品質管理③許容範囲チェック

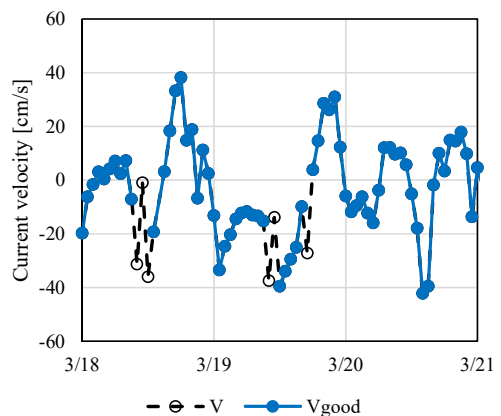
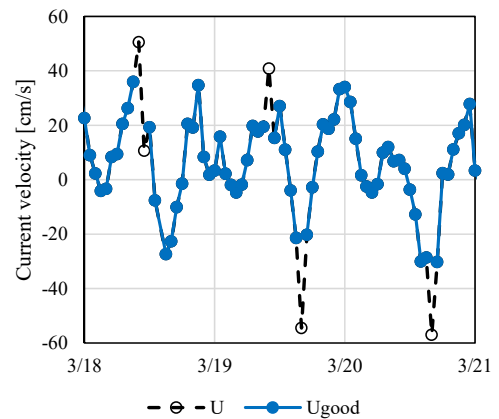


図 B-12 海洋レーダー観測値について、時間方向のスパイクチェックで棄却された観測値の例。ここでは、移動平均値との乖離が $\pm 15$  cm/s以上を棄却した。塗りつぶし無しが生データ ( $U, V$ )、青い塗りつぶしが採用された観測値 ( $U_{good}, V_{good}$ ) を表す。

流速の時間平均値と標準偏差を各観測メッシュで求め、平均値から標準偏差に倍率をかけた値と流速観測値と比較し、それよりも流速観測値が大きい場合は棄却する。

### B.3.4 品質管理④データ固定チェック

1時間間隔で取得された海洋レーダー観測値について、12時間連続で同値が記録された場合、異常値とみなしてその期間の観測値を棄却する。

### B.3.5 品質管理⑤時間方向のスパイクチェック

ここでは、許容範囲チェックでは取り除くことができない突発的な異常値を除去することを目的として、時系列観測値に対して3時間の移動平均を施し、生データと移動平均値の乖離をみて異常値除去を行う。図B-12はスパイクチェックを実施した例である。

## B.4 水質定点観測

### B.4.1 概要

国土交通省中部地方整備局は中山水道、伊勢湾湾奥、伊勢湾湾央及び伊勢湾湾口の4地点（場所は図B-1参照）において水質と海象の観測を実施しており、水質定点観測（モニタリングブイ）という。観測データはテレメータ・インターネット回線を利用して陸上サーバへ転送され、インターネットで公開されている。水質定点観測における測定項目は、鉛直多層の流向・流速、水温、塩分、溶存酸素（DO）及びクロロフィルaであり、そのうち水温と塩分のデータをデータ同化に用いた。

水質定点観測における水温及び塩分の計測機器は、観測地点によって異なっている。湾奥地点と湾央地点では、多項目水質計が自動昇降して鉛直1m間隔にデータが取得されている。湾口地点と中山水道地点では、水温・塩分計を鉛直3層（上・中・下層）に固定して連続測定されている。観測機器の外観と仕様を図B-13から図B-15に示す。

### B.4.2 水質定点観測の観測値の特徴

水質定点観測の観測値の特徴を述べる。湾奥、湾央地点は自動昇降による鉛直多層観測である。また、湾口、中山水道地点は上・中・下層の3層固定点観測である。次に、観測時間間隔は30分または1時間であり、異常値が含まれる。

これらの特徴を踏まえて、水質定点観測における品質管理の手法として、以下の5つを適用することとした。品質管理の作業フローを図B-16に示す。

- ①データ固定チェック
- ②許容範囲チェック
- ③時間方向のスパイクチェック
- ④鉛直方向のスパイクチェック
- ⑤鉛直勾配及び密度逆転チェック

### B.4.3 品質管理①データ固定チェック

30分間隔または1時間間隔で取得された観測値について、12時間連続で同値が記録された場合、異常値とみなしてその期間の観測値を棄却する。この手法によって棄却された観測値の時系列の例を図B-17に示す。これは、14時間連続で22.10℃という値が継続している事例である。ただし、このような水温観測値の変動は正常な観測値である場合も考えられるため、12時間を継続時間とするかは検討を要する。なお、24時間連続で同値が観測されるケースを探したところ、「0.00」や「99.99」といった異

(1) 多項目水質計（深度、水温、電気伝導度、塩分、溶存酸素、濁度、クロロフィル計）



(センサ仕様)		
測定項目	深度	水温
センサタイプ	半導体圧力センサ	サーミスタ
測定範囲	0~50(m)	-5~40(°C)
分解能	0.01(m)	0.01(°C)
精度	±0.15(m)	±0.02(°C)

測定項目	電気伝導度	塩分
センサタイプ	電磁誘導セル	実用塩分式
測定範囲	0~70(mS/cm)	0~40
分解能	0.01(mS/cm)	0.01
精度	±0.05(mS/cm)	±0.05

測定項目	溶存酸素
センサタイプ	カルバニ電極
測定範囲	0~200(%)
分解能	0.01(%)
精度	±2(%)

測定項目	濁度	クロロフィル
センサタイプ	後方散乱光式	蛍光強度式
測定範囲	0~1000(FTU)	0~400(µg/L)
分解能	0.01(FTU)	0.01(µg/L)
精度	±2(%)	±2(%)

図B-13 機器の外観及び仕様（湾奥・湾央）

（出典）[http://www.isewan-db.go.jp/REAL\\_WEB/REAL\\_WEB\\_buoy/manual/伊勢湾湾奥観測機器について.pdf](http://www.isewan-db.go.jp/REAL_WEB/REAL_WEB_buoy/manual/伊勢湾湾奥観測機器について.pdf)、及び  
伊勢湾湾央観測機器について.pdf



(①水温・塩分センサ仕様)		
測定項目	水温	電気伝導度
センサタイプ	サーミスタ	管内7電極式
測定範囲	-4~40(°C)	0~60(mS/cm)
分解能	0.01(°C)	0.01(mS/cm)
精度	±0.05(°C)	±0.05(mS/cm)

(②溶存酸素センサ仕様)	
測定項目	溶存酸素
センサタイプ	カルバニ電池式
測定範囲	0~200(%)
分解能	0.01(%)
精度	±2(%)

(③クロロフィル・濁度センサ仕様)		
測定項目	クロロフィル	濁度
センサタイプ	蛍光測定式	後方散乱光式
測定範囲	0~400(µg/L)	0~1000(FTU)
分解能	0.01(µg/L)	0.01(FTU)
精度	±1(%)	±2(%)

図B-14 機器の外観及び仕様（湾口）

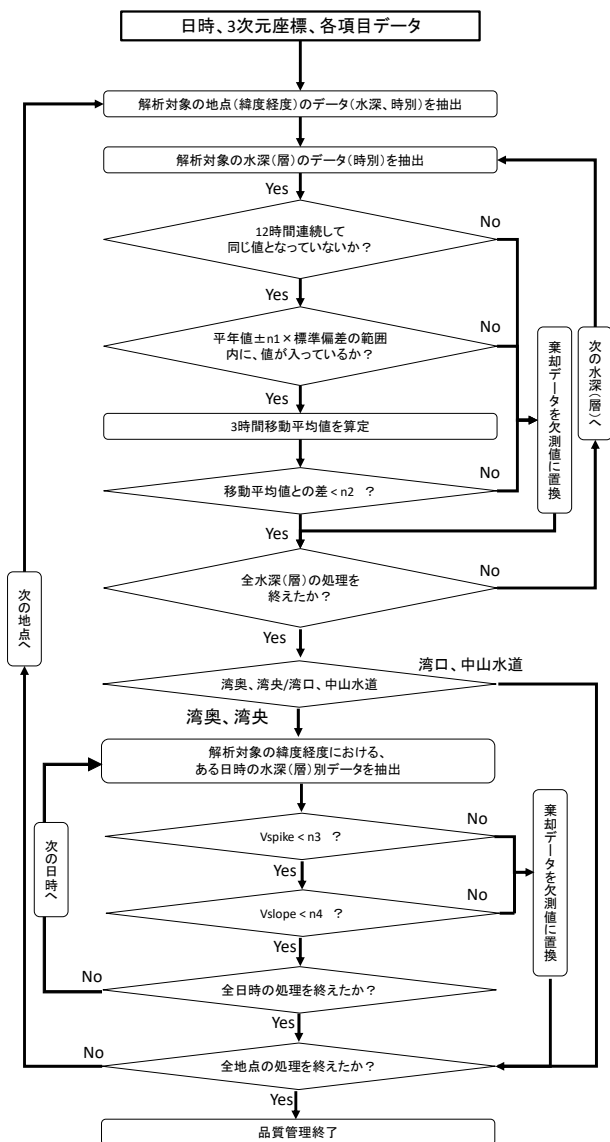
（出典）[http://www.isewan-db.go.jp/REAL\\_WEB/REAL\\_WEB\\_buoy/manual/伊勢湾湾口観測機器について.pdf](http://www.isewan-db.go.jp/REAL_WEB/REAL_WEB_buoy/manual/伊勢湾湾口観測機器について.pdf)



(センサ仕様)		
測定項目	水温	電気伝導度
センサタイプ	サーミスタ	管内7電極方式
測定範囲	-5~40(°C)	0~60(mS/cm)
分解能	0.001(°C)	0.001(mS/cm)
精度	±0.05(°C)	±0.05(mS/cm)

図B-15 機器の外観及び仕様（中山水道）

（出典）[http://www.isewan-db.go.jp/REAL\\_WEB/REAL\\_WEB\\_buoy/manual/nakayama\\_kansokukiki](http://www.isewan-db.go.jp/REAL_WEB/REAL_WEB_buoy/manual/nakayama_kansokukiki)



- n1: 標準偏差の幅(事前に各ブイ・各層毎に決定)
- n2: 移動平均との差の許容値(事前に各ブイ・各層毎に算定)
- n3: Vspikeの許容値(事前に各ブイ・各層毎に算定)
- n4: Vslopeの許容値(事前に各ブイ・各層毎に算定)
- 平均値: 事前に各ブイ・各層毎に算定
- 標準偏差: 事前に各ブイ・各層毎に算定

図 B-16 水質定点観測の品質管理のフロー

常値のみであった。「0.00」や「99.99」といったデータは次に行う許容範囲チェックや、データ同化実施時に行う品質管理で除去可能である。そのため、継続時間は24時間以上とする必要はなく、これ以下の継続時間で、適切な継続時間長さを設定する必要がある。

#### B. 4. 4 品質管理②許容範囲チェック

フェリーの水温、塩分観測値の許容範囲チェックと同様に、観測点毎に月別の平均値と標準偏差を算出して、許容範囲の時間変化を考慮する。図 B-18 は、水質定点観測の各地点における月別の水温、塩分の平均値と標準偏差

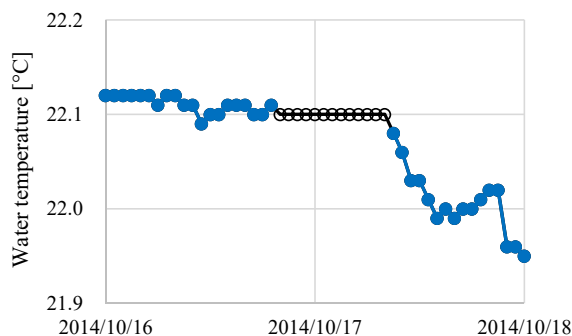


図 B-17 データ固定チェックで棄却された観測値の例。塗りつぶし無しが生データ、塗りつぶしが採用された観測値である。

と、棄却された観測値時系列の例である。ここで塩分の標準偏差は、対数正規分布を考慮した。フェリーの水温、塩分観測値の許容範囲チェックと同様に、具体的にどの程度の許容範囲とするかは今後検討する必要がある。

#### B. 4. 5 品質管理③時間方向のスパイクチェック

機器測定による観測値取得の場合、機器的なエラーや観測環境によって突発的な異常値を記録することがある。ここでは、許容範囲チェックでは取り除くことができない突発的な異常値を除去することを目的として、時系列観測値に対して3時間の移動平均を施し、生データと移動平均値の乖離をみて異常値除去を行った。

#### B. 4. 6 品質管理④鉛直方向のスパイクチェック

前述の時間方向のスパイクチェックの考え方を鉛直方向に適用したのが本手法である。ただし、沿岸域においては密度分布が短時間でダイナミックに変動することが考えられるため、スパイク除去のパラメーターの調整には注意を要する。

#### B. 4. 7 品質管理⑤鉛直勾配及び密度逆転チェック

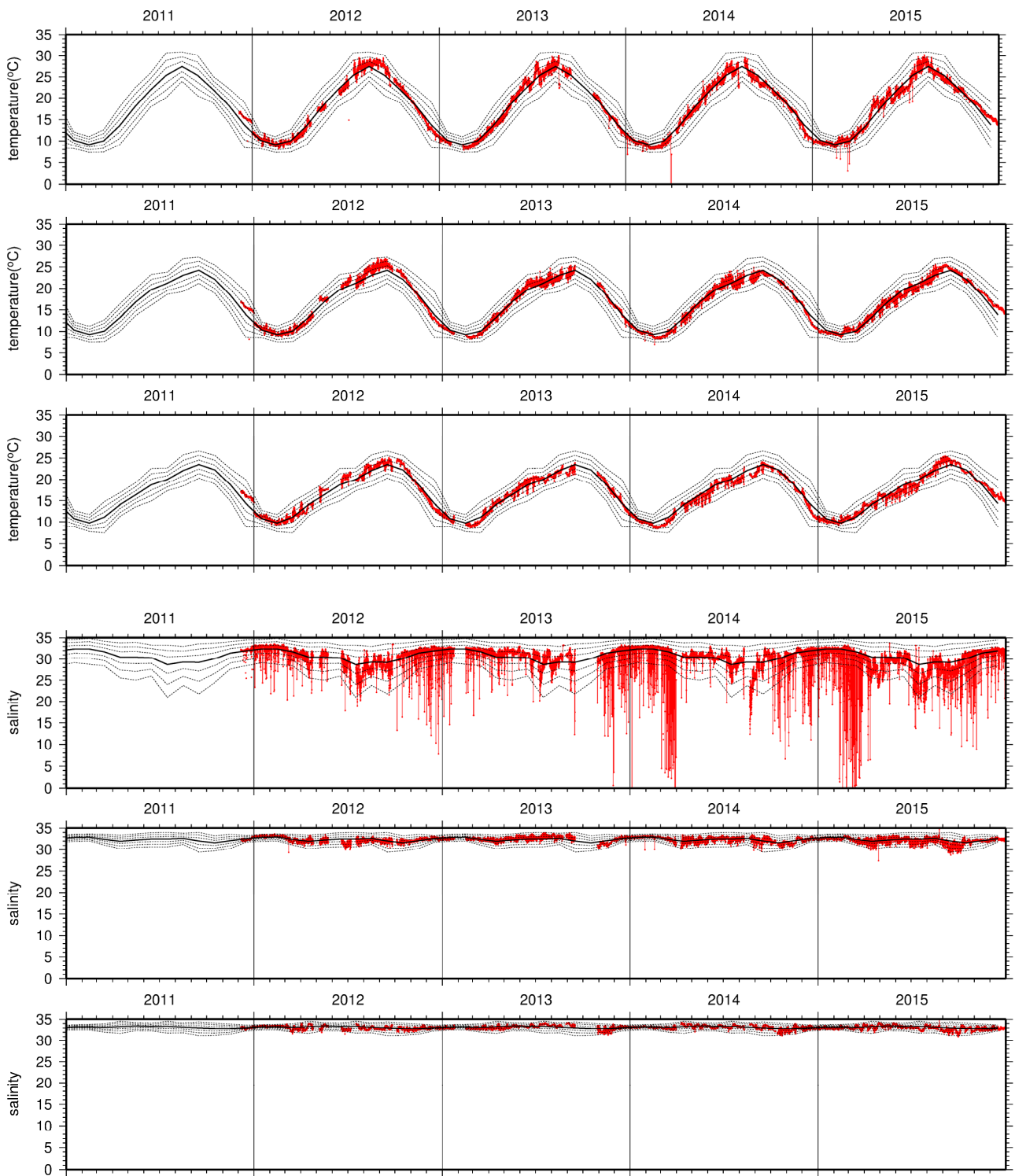
水深が深くなっているにもかかわらず密度が小さくなる場合は、観測値が誤っている可能性がある。よって、水深方向に密度が一定値以上小さくなっている場合は誤差として棄却する。ただし、沿岸域においては密度分布が短時間でダイナミックに変動することが考えられるため、鉛直勾配及び密度逆転チェックのパラメーターの調整には注意を要する。

### B. 5 衛星観測水温

#### B. 5. 1 衛星観測水温の特徴

地球観測衛星によるリモートセンシングの特徴として





凡例： ・実測値 — 平均値 ... 標準偏差 (平均値に近い方から $\pm\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$ ,  $\pm 3\sigma$ )

図 B-18 許容範囲チェックで除外された水温 (上段) 及び塩分 (下段) の例 (湾央地点). 水温, 塩分ともに上から順に水深 1 m, 13 m, 25 m.

広範囲を一度にとらえられることが挙げられ、衛星観測による海面水温（SST：Sea Surface Temperature）はフェリーや定点水質観測でカバーできない広範囲の水温分布を捉えられる利点がある。また、地球観測衛星 Aqua, Terra の放射計（MODIS：MODerate resolution Imaging Spectroradiometer）の観測値を解析して得られた SST は NASA のホームページ（<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>）においてリアルタイムに配信されているため、伊勢湾シミュレーターの予測計算に用いることが可能である。データ同化に衛星観測 SST によって得られた広範囲の観測値を用いることで水温の計算精度が大幅に改善する可能性がある。

Aqua と Terra の MODIS センサーの観測値を解析して得られる衛星観測 SST の特徴として、以下の事項が挙げられる。まず、観測層の定義は海面下 1 mm 程度である。次に、SST の水平解像度は約 1 km である。次に、衛星軌道に依存するため、観測時間間隔は不定期（最小時刻単位 5 分）である。また、生データのフォーマットは HDF フォーマット（バイナリ）である。最後に、ダウンロードデータは発行元で品質管理が行われており、データファイルに品質管理情報が含まれている。

これらの特徴を踏まえて、衛星観測 SST における品質管理の手法として、以下の 3 つを適用することとした。品質管理の作業フローを図 B-19 に示す。

- ①海陸チェック
- ②許容範囲チェック
- ③品質管理情報によるチェック

### B.5.2 品質管理①海陸チェック

数値シミュレーションの海域・陸地のメッシュ情報と照合して、陸地に該当する観測値は棄却対象とした。

### B.5.3 品質管理②許容範囲チェック

衛星観測 SST の許容範囲チェックの考え方は、フェリーや水質定点観測の水温観測値の処理と同様であり、許容範囲の月別変化を考慮した。また、場所について、2010～2015 年の 6 ヶ年における月平均衛星観測 SST の分布（図 B-20）より、特に冬場において伊勢湾内外の差が大きいため、統計は湾内と湾外で分けて行った。月別の水温の平年値と標準偏差を図 B-21 に示す。また、図 B-22 は、水質定点観測の各地点における月別の水温、塩分の平均値と標準偏差と、棄却された観測値時系列の例である。本検討では、月別平均値の $\pm 2\sigma$ に入らない観測値を異常値として棄却することとした。ただし、フェリーや定点水質観測の水温観測値の許容範囲チェックと同様に、

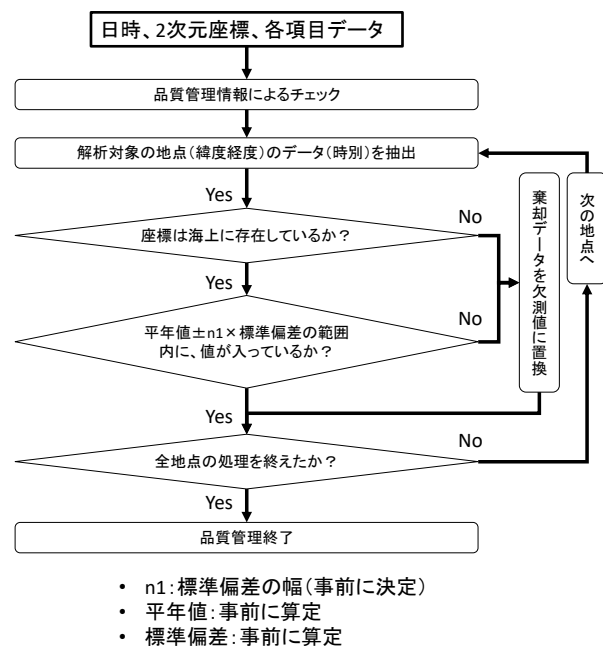


図 B-19 衛星観測 SST の品質管理の作業フロー

具体的にどの程度の許容範囲とするかは今後検討する必要がある。

## B.6 外的 QC

外的 QC は、データ同化を行う際に入力する観測値と背景値の差（以降、D 値；イノベーションと同義）を計算し、D 値の大きさに応じて同化モデルに入力する観測値が妥当であるかどうかを判定する手法である。この手法は背景値からの乖離が大きい観測値を除外することで、同化後の解析値の精度を高めることや、数値モデルで計算できないような極端に高い（低い）観測値が混入することによる同化モデルの数値発散を回避することを目的としている。

外的 QC は気象庁予報部（2012）を参考に、まず、グロスエラーチェックを行い、次に空間整合性チェックを行うという手順で構成した。

グロスエラーチェックは、観測値と背景値の差値である D 値を算定し、その大きさに応じて PASS（通過）、SUSPECT（保留）、REJECT（棄却）の 3 種類のフラグを各観測データに付加した。

空間整合性チェックは、SUSPECT データに対して周辺の D 値の平均値との比較を行い、周辺の D 値の平均値も同程度である場合、観測データは正しいものと判断して SUSPECT → PASS とした。逆に周辺の D 値の平均値から乖離がある場合は SUSPECT → REJECT と変更し、同化計算から除外した。2 種類のチェックの結果、最終的

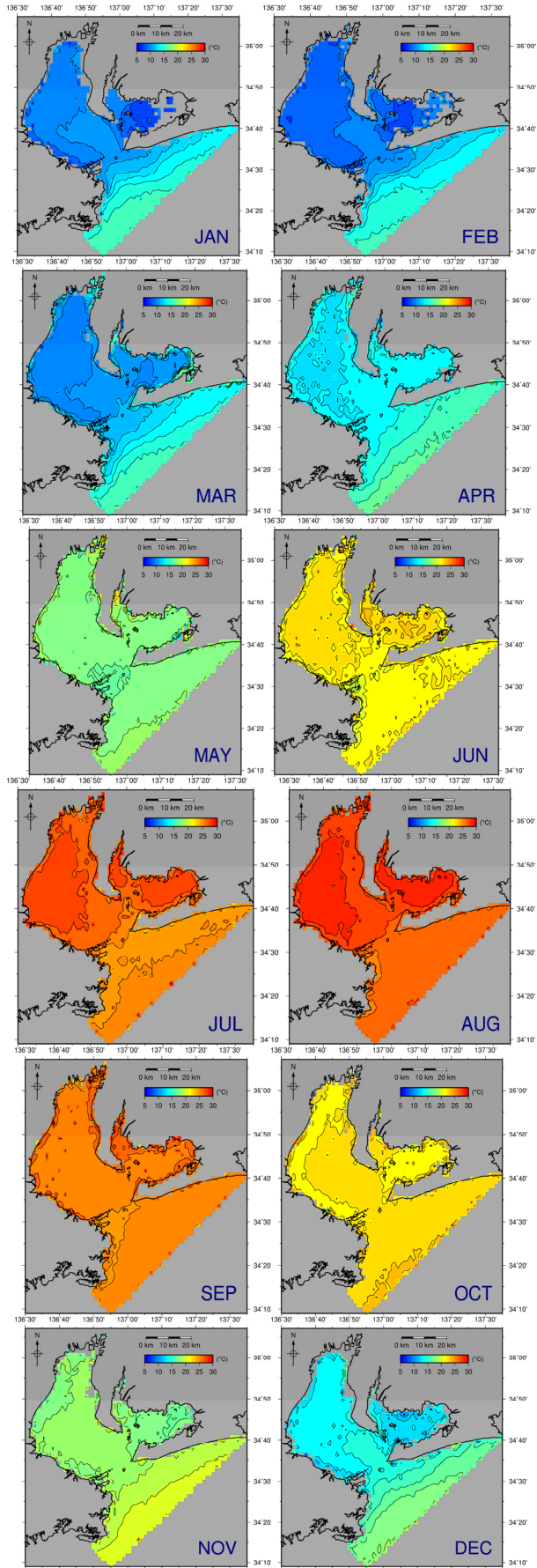


図 B-20 衛星観測 SST の月平均 SST

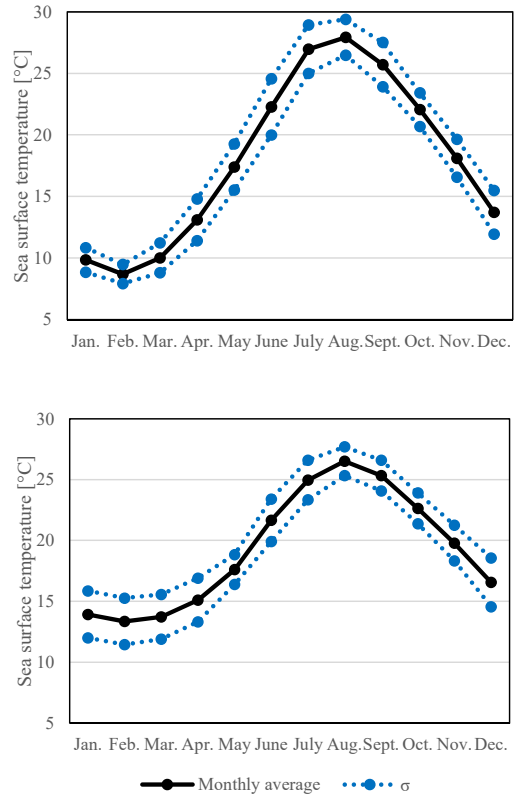
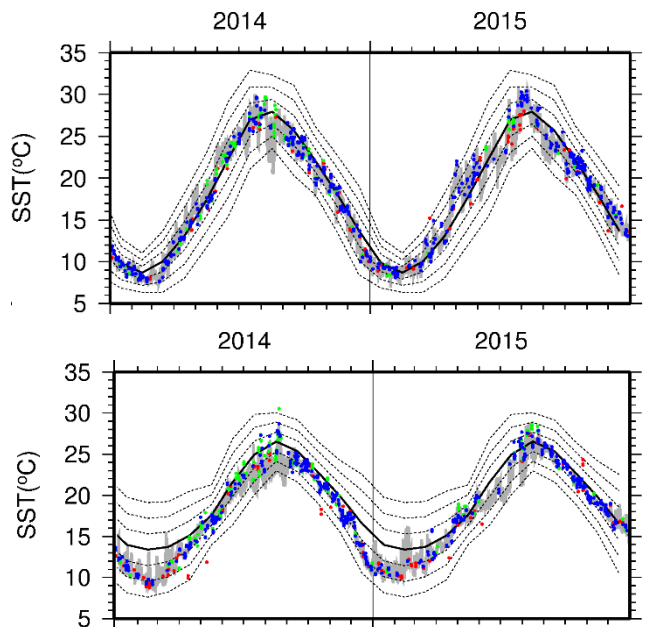


図 B-21 衛星観測 SST の月別平年値 (Monthly average) と標準偏差  $\sigma$  (統計期間: 2010~2015 年). 上: 湾内, 下: 湾外.



凡例: 一定点観測の上層水温 • best • good • questionable  
 — 平年値 ... 標準偏差 (平年値に近い方から  $\pm\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$ ,  $\pm 3\sigma$ )

図 B-22 許容範囲チェックで除外された衛星観測 SST の例. (上): 湾内, (下): 湾外.

表 B-2 外的 QC のパラメーターと条件設定

パラメーター	意味
$T_{rej}$	水温の REJECT 判定の閾値 (°C)
$S_{rej}$	塩分の REJECT 判定の閾値 (-)
$UV_{rej}$	流速の REJECT 判定の閾値 (m/s)
$T_{sus}$	水温の SUSPECT 判定の閾値 (°C)
$S_{sus}$	塩分の SUSPECT 判定の閾値 (-)
$UV_{sus}$	流速の SUSPECT 判定の閾値 (m/s)
Range	空間整合性のチェックを行う際の探査半径. 探査は円形領域で行い, その半径はメッシュ単位で与える. 例えば Range=2 とすると, 半径 2 メッシュの円内にて D 値の平均値を求めることを意味する.

に PASS と判断されたデータを同化計算に使用した.

外的 QC のパラメーターは, 表 B-2 の通りとし, 条件設定は以下の通りに行った.

- ・ 空間整合性チェックでは, 周辺の D 値の平均値が対象とする観測データの D 値の 1/2 以下であれば REJECT とする.
- ・ 空間整合性チェックは水平方向に対してのみ実施する. チェックを行うデータは同じ水深帯にあるデータ同士とする. 同じ水深帯の判定は, 比較するデータ同士の鉛直層番号の差が 0.5 以内 (上下それぞれで半メッシュ以内) であることとした.
- ・ 空間整合性のチェックを行う際の探査半径内に比較対象となるデータが一つもない場合については, SUSPECT → PASS とした.
- ・ 流速は U 成分, V 成分それぞれに対して外的 QC を行い, いずれかの成分が REJECT であれば両成分とも REJECT とした.

#### 参考文献

- 片岡智哉, 2017: 伊勢湾における海洋レーダーに基づく面的波浪観測のための基礎的検討, 九州大学応用力学研究所共同研究集会, 海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用.
- 気象庁予報部, 2012: 平成 24 年度数値予報研修テキスト「数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム」, 数値予報解説資料, 45.

港湾空港技術研究所資料 No.1367

2020.2

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています