

特集 2 「海洋気象業務に関する最新の技術的動向 II」

現業化に向けた MOVE-4DVAR の高度化

碓氷 典久*・藤井 陽介*

要 旨

現業化に向けて、MOVE-4DVAR の計算の効率化のための 2 つのスキームを開発した。まず、4DVAR の最適化計算を 3DVAR の解析値を初期値として開始する、3DVAR 併用スキームを開発した。テスト実験から、本スキームにより降下法の繰り返し計算の回数が 3 回程度削減されることが分かった。次に、高並列計算を可能とするため、モデルを 2 次元並列化した。さらに、陸地のみで占められる領域を計算対象から除外する仕組みを取り入れ、計算の効率化を図った。これにより、例えば、512 並列で実行する場合、実行時間、消費メモリともに約 1 割削減することができた。また、これらのスキームを組み込んだ同化実験から、海面水温、海面高度、及び黒潮流路変動について良好な再現性が得られていることが示された。

1. はじめに

気象研究所では、気象庁における沿岸海況の監視・予測情報及び沿岸防災情報の高度化に資するため、日本沿岸海況監視予測システムを開発している。そのプロトタイプシステムとして、解像度約 2km の瀬戸内海モデル（高解像度予測モデル）、及び 4 次元変分法（以下「4DVAR」という）を適用した解像度約 10km の北西太平洋を領域とする解析モデルからなるシステム（MOVE1/MRI.COM²-Seto）を 2014 年度に現業化する予定である。4DVAR は、現行の MOVE-WNP（Usui *et al.*, 2006；石崎ほか, 2009）を 4DVAR に拡張した MOVE-4DVAR により実行される。

碓氷ほか（2014）は、MOVE/MRI.COM-Seto を

用いて、2011 年 9 月に瀬戸内海周辺で発生した異常潮位の再現実験を行い、良好な再現性が得られたことを報告した。また、この事例の再現には、4DVAR の導入による短周期変動の再現性向上が重要であることを指摘している。

一般に 4DVAR の実行には、3 次元変分法（以下「3DVAR」という）と比べて、数十倍の計算機資源を要する。したがって、4DVAR の効率的な実行法は、現業化のための重要な開発課題であると言える。本報告では、MOVE-4DVAR の現業化に向けて、計算の効率化のために開発したスキームについて紹介するとともに、それらを組み込んで実施した基本性能評価実験の結果について報告する。

* 気象研究所海洋・地球化学研究部

¹ Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation（気象研究所海洋データ同化システム）

² Meteorological Research Institute Community Ocean Model（気象研究所共用海洋モデル）

以下、第 2 節で 4DVAR システムの概要について述べ、第 3 節で新たに開発した 2 つのスキームを紹介する。それらを組み込んで実施した同化実験の結果について第 4 節で紹介し、第 5 節で全体をまとめる。

2. MOVE-4DVAR の概要

本システムは、数値海洋モデルとして北西太平洋 (117°E-160°W, 15°-65°N) をモデル領域とする気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM-WNP; Tsujino *et al.*, 2010) のバージョン 2.4 を用いている。MRI.COM は、静水圧近似及びブジネスク近似を施した、自由表面、 σ - z ハイブリッド座標系のプリミティブ方程式モデルである。MRI.COM-WNP の水平解像度は日本近海で東西 1/10° × 南北 1/10°, 50°N 以北で南北 1/6°, 160°E 以東で東西 1/6° であり、鉛直 54 レベルを有している。用いている主な物理スキームとしては、海面混合層モデルとして Noh and Kim (1999), トレーサーの移流スキームとして Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK; Holland *et al.*, 1998), 水平拡散・粘性は、倍調和型の Smagorinsky 粘性 (Griffies and Hallberg, 2000) を用いている。MRI.COM-WNP は、15°S 以北の北太平洋を領域とする水平解像度 1/2° × 1/2° の北太平洋モデル (MRI.COM-NP) に単方向ネスティングにより接続されており、MRI.COM-NP による各種予報変数の値を側面境界値として受け取る。また、主にオホーツク海における海氷過程を表現するために、マルチカテゴリ海氷モデル (Hunke and Lipscomb, 2010) を結合している。なお、計算不安定の回避のため、混合層モデル及び海氷モデルについては、前方モデルのみで計算し、アジョイントモデルでは計算していない。

4DVAR の評価関数は、現行の MOVE-WNP の評価関数 (Fujii and Kamachi, 2003) を時間方向に拡張した以下の形を用いる。

$$J = \frac{1}{2} \sum_l \mathbf{z}_l^T (\mathbf{B}^{-1})_l \mathbf{z}_l + \sum_{t=t_1}^{t_F} \left[\frac{1}{2} (\mathbf{H}\mathbf{x}_t - \mathbf{y}_t^{\text{TS}})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}\mathbf{x}_t - \mathbf{y}_t^{\text{TS}}) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2\sigma_h^2} (\mathbf{H}(\mathbf{x}_t) - \mathbf{y}_t^{\text{SSH}})^T (\mathbf{H}(\mathbf{x}_t) - \mathbf{y}_t^{\text{SSH}}) \right] + J_c \quad (1)$$

ここで、添え字 t は時間ステップを表すインデックス、 t_1 と t_F は同化期間の最初と最後の時間ステップを表す。制御変数は \mathbf{z}_l であり、現行システムと同様に水温・塩分結合経験的直交関数 (TS-EOF) の振幅を表す。TS-EOF モードは、モデル領域を 13 の小領域に分割し、小領域ごとに観測データを基に見積もられる統計量であり、背景誤差の特性を表す。添え字 l は小領域を表すインデックスである。 \mathbf{x}_t , \mathbf{y}_t^{TS} , $\mathbf{y}_t^{\text{SSH}}$ は時間ステップ t における水温・塩分の推定値、水温・塩分の観測、及び衛星海面高度データを表す。 \mathbf{B} は、背景誤差の水平方向の相関を表す正方行列であり、ガウス型の関数で近似している。 \mathbf{R} は水温・塩分観測値の観測誤差共分散行列、 σ_h は衛星海面高度計データの観測誤差である。 \mathbf{H} は水温・塩分観測に対する観測行列でモデル格子点から観測点への線形内挿を表し、 $H(\mathbf{x})$ は海面力学高度を計算する演算子である。さらに、 J_c は拘束条件を表し、解析場の密度逆転 (Fujii *et al.*, 2005) や高緯度域での結氷点を切るような極端な低水温 (Usui *et al.*, 2011) を防止する拘束条件が用いられている。

水温・塩分場の解析インクリメント $\Delta\mathbf{x}$ は、最適化された制御変数 \mathbf{z} を用いて以下の様に表すことができる。

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{S} \sum_l \mathbf{W}_l \mathbf{U}_l \mathbf{\Lambda}_l \mathbf{z}_l \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{S} は水温・塩分の標準誤差を成分とする対角行列、 \mathbf{U} は TS-EOF モードから構成される行列、 $\mathbf{\Lambda}$ はその特異値を成分に持つ対角行列である。また、TS-EOF を与える小領域は、解析値の連続性を保つため、領域間に緩衝領域を設けて、そこでは重み付き平均により解析値が与えられる。行列 \mathbf{W} は、各格子点の持つ重みを対角成分とする対角行列である。

初期の解析インクリメントの空間構造は、ガウス型の関数で近似された背景誤差相関行列で決まるため、4DVAR といえどもモデルの力学を満たしているわけではない。このようなインクリメントを 1 ステップでモデルに与えると、重力波などの高周波ノイズを生じさせる原因となる。そこで、

本システムでは、このような高周波ノイズの抑制を目的として、Incremental Analysis Update (IAU; Bloom *et al.*, 1996) により前方モデルを初期化している (第 1 図)。後方積分時には、IAU のアジョイントであるデジタルフィルターが作用することになり、アジョイント変数に対するノイズフィルターとして機能する (Polavarapu *et al.*, 2004)。MOVE-4DVAR について、より詳しくは Usui *et al.* (2014) を参照されたい。

次節では、現業化に向けて主に計算の効率化に向けて開発された改良手法について紹介する。

3. MOVE-4DVAR の改良

4DVAR の実行のためには、前方モデルの積分とアジョイントモデルの後方積分を繰り返し実行する必要があり、一般に 3DVAR と比べて、数十倍の計算量を要する。現業で利用する場合には、限られた計算機資源で決められた時間内で計算を実行する必要があるため、いかにして効率的に 4DVAR を実行するかは、重要な開発課題である。以下では、現業化に向けて開発した MOVE-4DVAR の改良手法を二つ紹介する。

3.1 3DVAR を併用したスキーム

通常、変分法では、適当な降下法アルゴリズムを用いて、繰り返し計算により評価関数の最小値探索を行い、解析値を求める。必要となる繰り返し計算の回数を決める要素として、初期推定値の精度があげられる。すなわち、初期推定値が観測から大きくかけ離れている場合、一般により多くの繰り返し計算が必要となるが、初期推定値の精度が高い場合は、より少ない繰り返し回数で

最適値に達しやすいと考えられる。そこで、最初に 3DVAR の解析を行い、3DVAR 解析値から 4DVAR を開始するスキームを開発した。このことにより、より少ない繰り返し回数で効率的に評価関数が減少することが期待される。以下にスキームの概要を記す。

まず、評価関数及びその勾配を以下の形で表す。

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{x} + J_{nl} \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{g}_{nl} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{x} は制御変数で初期推定値からの修正量を表し、 \mathbf{B} は背景誤差共分散行列を表す。第 2 項の J_{nl} は、非線形項を表し、観測項や非線形の拘束条件等を含む。 \mathbf{g} , \mathbf{g}_{nl} は J 及び J_{nl} の勾配である。MOVE システムでは、降下法として、前処理付き準ニュートン法に基づく、Preconditioned Optimizing Utility for Large-dimensional analyses (POpULar ; Fujii, 2005) を用いて評価関数の最小化を行う。具体的には以下の作業を繰り返し実行する。

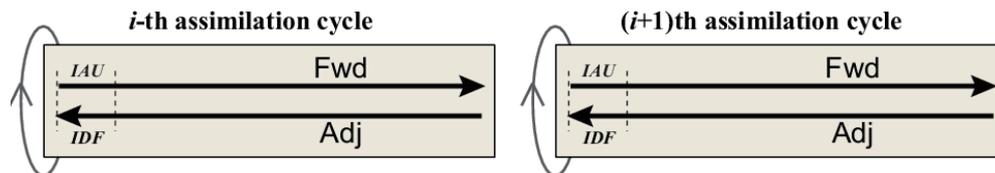
$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \alpha_k \mathbf{d}_{k-1} \quad (5)$$

$$K_k = K_{k-1} + \alpha_k \mathbf{d}_{k-1}^T (\mathbf{c}_{k-1} + \frac{\alpha_k}{2} \mathbf{e}_{k-1}) \quad (6)$$

$$\mathbf{c}_k = \mathbf{c}_{k-1} + \alpha_k \mathbf{e}_{k-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{g}_k = \mathbf{c}_k + \mathbf{g}_{nl}(\mathbf{x}_k) \quad (8)$$

ここで、添え字 k は繰り返し計算の回数を表すインデックスである。また、 K_k , \mathbf{c}_k は評価関数及びその勾配の第 1 項である $\mathbf{x}^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{x} / 2$, $\mathbf{B}^{-1} \mathbf{x}$, に



第 1 図 MOVE-4DVAR の同化サイクル

前方モデル (Fwd) は IAU スキームを用いて初期化が行われ、アジョイントモデル (Adj) に対しては、IAU のアジョイントであるデジタルフィルター (IDF) が機能する。Fwd 及び Adj の計算を繰り返すことにより最適な解析値を得る。最後の Fwd 計算の結果が次のサイクルの初期値へと受け渡される。

対応し、 \mathbf{e}_k は $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{d}_k$ に対応する変数である。いずれの変数も \mathbf{B}^{-1} に関係しているが、式 (6), (7) の様に漸化式で表すことにより \mathbf{B}^{-1} を陽に計算する必要はない。

式 (5) は、次元探索による \mathbf{x} の更新を表し、 α がステップ幅、 \mathbf{d} が探索方向を表す。次元探索で必要となる評価関数とその勾配は、式 (6) ~ (8) により与えられる。さらに、準ニュートン法のアルゴリズムに従い探索方向 \mathbf{d} とそれに付随する \mathbf{e} を更新し (詳細省略)、収束条件を満たすまで同じ手順を繰り返す。

通常の 4DVAR では、 \mathbf{x} , \mathbf{K} , \mathbf{c} は全て 0 から繰り返し計算が開始されるが、本スキームでは、以下のように事前に実施する 3DVAR の結果を与える。

$$\mathbf{x}_0 = \tilde{\mathbf{x}} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_0 = \tilde{\mathbf{K}} \quad (10)$$

$$\mathbf{c}_0 = \tilde{\mathbf{c}} \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_0 = \mathbf{K}_0 + \mathbf{J}_{nl}(\mathbf{x}_0) \quad (12)$$

$$\mathbf{g}_0 = \mathbf{c}_0 + \mathbf{g}_{nl}(\mathbf{x}_0) \quad (13)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{x}}$ は 3DVAR の解析値、 $\tilde{\mathbf{K}}$, $\tilde{\mathbf{c}}$ は 3DVAR 解析時の POpULar の履歴出力から得ることができる。評価関数とその勾配については、これらを基にして計算する。ここで、本スキームでは、3DVAR の解析値から降下法をスタートさせているだけで、3DVAR 解析値を背景値としたわけではないことに注意されたい。すなわち、評価関数の形は、本スキームとオリジナルの 4DVAR で何ら変わらない。

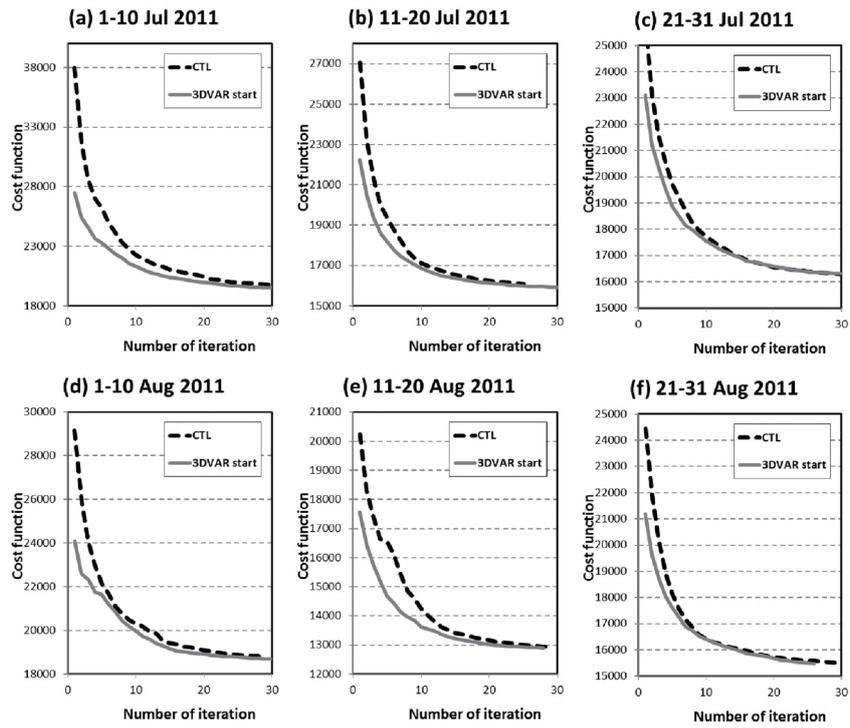
以下に本スキームの動作確認のためのテストランの結果を示す。同化ウィンドウは旬ごととし、2011 年 7 月と 8 月の計 6 サイクルについて、通常の 4DVAR 実験 (CTL) と本スキームを用いた実験 (START3DVAR) の 2 ケースを行った。両ケースで評価関数の振る舞いを比較するために、最初に CTL 実験を行い、START3DVAR 実験では、各同化サイクルの初期値 (リスタートファイル) は前サイクルの結果を引き継がず、CTL 実

験で得られた初期値を用いた。3DVAR は各サイクルの初期値を初期推定値として、同化ウィンドウ内の全データを用いて、解析を行った。また、3DVAR の繰り返し計算の回数は 10 回のみとした。観測データとしては、気象庁海洋気象情報室で収集している水温と塩分の現場観測データ、全球日別海面水温解析 (MGDSST; 栗原ほか, 2006)、及び Jason-2 の軌道沿い海面高度偏差を用いた。大気フォーシングには、気象庁気候データ同化システム (JCDAS: JMA Climate Data Assimilation System) の日別値を用いた。

第 2 図に各同化サイクルにおける両実験の評価関数の値を比較する。いずれのサイクルにおいても繰り返し計算初期に評価関数の値に大きな差が見られ、3DVAR 解析値を用いることの効果が見て取れる。その後、両ケースの差は減少し、ほぼ同じ値へと収束して行くが、おおむね 20 回程度まで有意な差が継続している。現業で計算する際は、CPU 時間に制限があるため、特定の回数で繰り返し計算を打ち切る必要性が生じるが、本スキームを用いることで、同じ繰り返し回数でもより高精度な解析値を得ることが可能となる。また、ある評価関数の値に達するまでの繰り返し計算の回数を比較すると、本スキームにより 3 回程度、回数が削減されることが分かった、このことは、初回の 3DVAR の計算を考慮しても全体の 1 割弱の計算時間の削減を意味する。

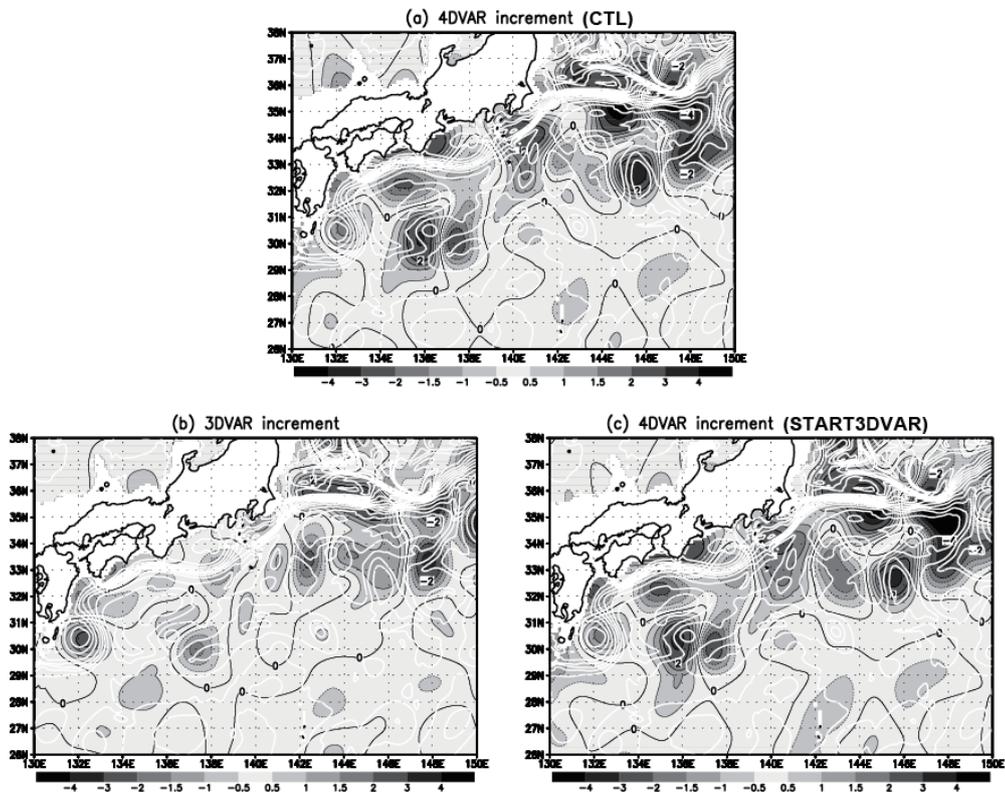
次に、実際の解析結果を比較する。第 3 図に 8 月 11 日 ~ 20 日の同化サイクルにおける 400m 深水温の同化修正量を両ケースで比較する。繰り返し計算は、CTL が 29 回、START3DVAR が 28 回実行し、評価関数の最終値は、12951 と 12901 である。第 3 図 a と c の比較から、同化修正量として、ほぼ同様の分布が得られていることが分かる。また、第 3 図 b の 3DVAR の修正量分布を見ると、中規模渦や黒潮の蛇行に対応したような修正量については、おおむね 4DVAR と整合した分布を示している。

一般に降下法では、繰り返し計算の初期に大きなスケールの場合が修正され、その後、小スケールの場合が修正されていく。大きなスケールの場合、変動の時間スケールも長いので、現象の時



第2図 各同化サイクルにおける評価関数の値の変化

CTL (黒破線) と START3DVAR (灰色実線) で比較する. 実験は, 2011年7~8月の6サイクル実施した. 各サイクルごとの結果を (a) ~ (f) に示す.



第3図 (a) CTL と (c) START3DVAR 実験における 400m 深水温の修正量の比較

START3DVAR 実験における 3DVAR による修正量を (b) に示す. いずれも 8月11日の第一推定値に対する修正量を表す. 修正量を陰影及び黒の等値線で, 第一推定値の水温場を白の等値線 (1°C間隔) で示す.

間変動を考慮しない 3DVAR と時間変動を考慮する 4DVAR で解析精度に大きな違いは生じないと考えられる。したがって、本スキームは、繰り返し計算初期の大規模場の解析を計算負荷の軽い 3DVAR で代用している、と解釈することが出来る。

3.2 モデルの 2 次元並列化と陸地除去

4DVAR では、アジョイントモデルの後方積分時に基本場である前方モデルの結果を参照する必要があるため、通常、全ステップ分の結果をメモリに保持しておく。メモリ量が足りない場合は、一部の期間のみを保存しておき、必要に応じて前方モデルを再計算することも可能であるが、その場合は、より多くの計算時間を要する。高解像度モデルを用いる場合、必要となるメモリ量も膨大となるため、MPI 並列数を多くして、プロセス当たりの計算格子数を減らしておくことが 4DVAR の実行のためには不可欠となる。

本システムで用いている海洋モデル (MRI.COM バージョン 2.4) では、緯度方向の並列化のみにしか対応しておらず、4DVAR を実行するための十分な並列数を確保できないという問題があった。今回、この問題を解決するために、モデルを 2 次元 (緯度・経度方向) 並列が可能となるような改良を加えた。

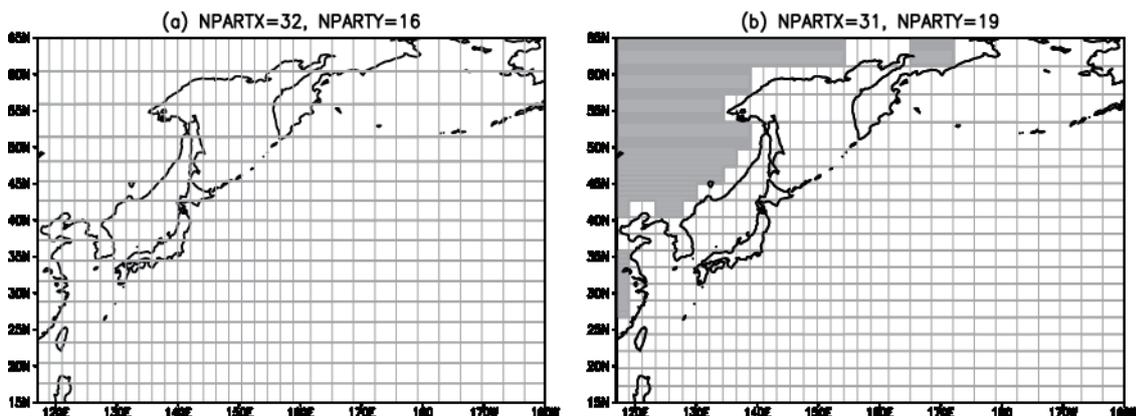
また、モデル領域を 2 次元分割した場合、陸

地のみで占められる領域が出現する可能性がある。例えば、第 4 図 a に示すように、東西分割数 (NPARTX) 32、南北分割数 (NPARTY) 16 の総分割数 (NPARTA) 512 とした場合、ユーラシア大陸上に陸のみの領域が多く存在することが分かる。これらの領域では、計算の必要がないので、このままでは計算に多くの無駄が生じる。そこで、この無駄をできる限り除外するために、陸地のみの領域を除去する仕組みも組み込んだ。

この陸地除去を用いると、第 4 図 b に示すように、NPARTX=31、NPARTY=19 として (NPARTX*NPARTY=589)、大陸上の 77 の領域を計算から除外することにより、512 並列で実行が可能となる。

上記の陸地除去あり／なしの場合について 1 サイクルの同化計算を実行した結果を第 1 表にまとめる。計算は、2011 年 8 月 1 日から 10 日までの 10 日ウィンドウの 1 サイクルについて、30 回繰り返し計算を実行した。3DVAR 併用スキームは用いず、観測データや大気外力等の計算条件は、第 3.1 節と同じである。計算は、SR16000 モデル L2 の 16 ノードを使用した。

第 4 図の比較から分かるように、陸地除去を適用することにより、より多くの東西、南北分割数を確保することが可能となり、1 プロセス当たりの担当領域は狭まる。その結果、プロセス当たりの計算量、使用メモリも減少する (第 1 表)。



第 4 図 2 次元並列による領域分割の例

灰色の縦 (横) 線が経度 (緯度) 方向の分割を表す。MPI 並列数を 512 とし、(a) 陸地除去を適用しない場合、(b) 適用した場合。NPARTX、NPARTY は東西、南北方向の分割数を表す。(b) では、灰色で示した 77 の陸地領域が除去されている。

CPU 時間としては、約 1 割削減された。これは、1 ケースのみの結果であり、計算機の使用状況等によりこの値は若干の変動があると考えられるが、実質の並列数の比 (512:589) を考慮するとおおむね妥当な値と言える。

4. MOVE-4DVAR の基本パフォーマンス

前節で紹介したスキームを組み込んで、本システムの基本パフォーマンスを検証するために同化実験を実施した。本節では、実験設定と結果の概要を示す。

4.1 同化実験の設定

同化実験の設定を第 2 表にまとめる。実験は、2010 年 1 月 1 日から 2012 年 12 月 31 日までの 3 年間実施した。同化ウィンドウは旬ごととし、4DVAR とともに併用している IAU の期間は 3 日とした。大気フォーシングには、GSM の 6 時間ごとのデータを用いた。また、気象庁海洋気象情報室で収集している水温及び塩分の現場観測データ、MGDSST 並びに Jason-2 の軌道沿い海面高度偏差を同化に用いた。

MPI 並列数の設定は、第 2.2 節の陸地除去を適用したケースと同じで、NPARTX=31, NPART=19 とし、陸地の 77 領域を除いた 512 並列とした。3DVAR 併用スキームの適用にあたっては、

3DVAR 解析の繰り返し計算の回数は 10 回に限定した。また、その後の 4DVAR の計算については、繰り返し回数は最大 30 回とし、評価関数の勾配のノルムが初期の 10% 以下を評価関数の収束条件とした。繰り返し計算の回数は、おおむね 20 回前後で収束に達していた。

4.2 結果

第 5 図に海面水温の平均場と標準偏差を示す。比較に示した MGDSST の値も、実験を行った 2010 ~ 2012 年の 3 年分の SST から見積もっている。標準偏差は、季節変動の大きな浅海域と水温フロントが形成されている混合域や日本海の極前線周辺で比較的大きな値を示している。MOVE-4DVAR から得られた分布は、MGDSST のそれと良い一致を見せている。

海面水温の平均場についても、MGDSST の特徴を良く捉えている。実際、第 6 図に示すように、両者の差をとると、顕著な違いは変動の大きなフロント域周辺のみ限定される。また、東シナ海から日本南岸にかけて、黒潮に沿った高温バイアスが確認される。これは、渦解像の力学モデルを用いている MOVE-4DVAR と統計的内挿処理により作られている MGDSST の黒潮の表現能力の違いに起因すると考えられる。

次に、海面高度の平均場と標準偏差について、

第 1 表 陸地除去あり／なし実験の概要
両実験とも MPI 並列数は 512 である。

	領域分割数		陸地除去数	CPU時間 (分)	最大使用メモリ (GB/プロセス)
	東西×南北 (NPARTX*NPARTY)	合計			
陸地除去なし	32×16	512	0	275	2.5
陸地除去あり	31×19	589	77	246	2.3

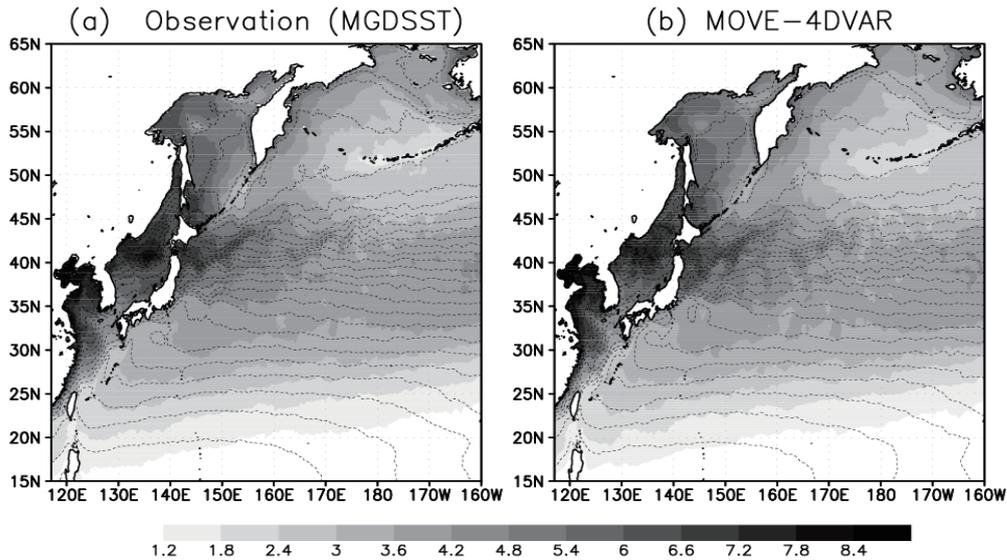
第 2 表 同化実験の設定

期間	2010年1月1日～2012年12月31日
同化ウィンドウ	旬ごと
IAU期間	3日
大気フォーシング	GSM, 6時間間隔
同化観測データ	現場水温・塩分, MGDSST, Jason-2軌道沿い海面高度偏差

観測（軌動沿いデータから最適内挿法により作成された AVISO 格子点プロダクト）との比較を第7図に示す。海面高度平均場の比較から、観測に見られる基本的な循環パターンは良く再現されていると言える。ただし、詳しく見ると、例えば、日本南岸の高気圧性の黒潮再循環（四国・紀伊半島沖の閉じた等値線）の構造やオホーツク海での

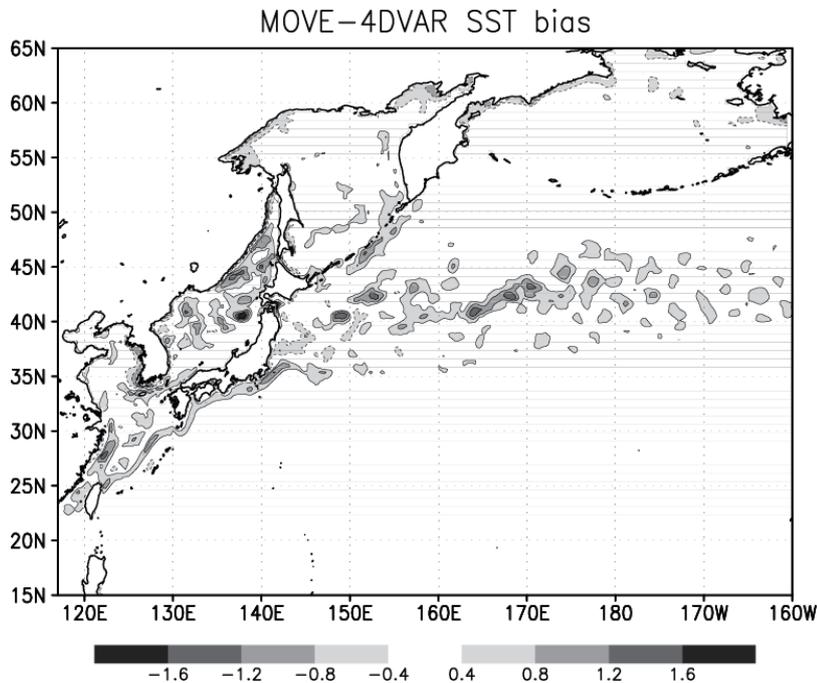
パターンに違いが確認される。これらについては、今後詳しく調べる必要があるが、AVISO 海面高度格子点プロダクトに用いている平均場と MOVE-4DVAR で用いている平均海面力学高度の違いが上記の差を生む一つの要因と考えられる。

標準偏差の分布についても同化結果は、観測の特徴を良く捉えている。海面高度変動は、中規模



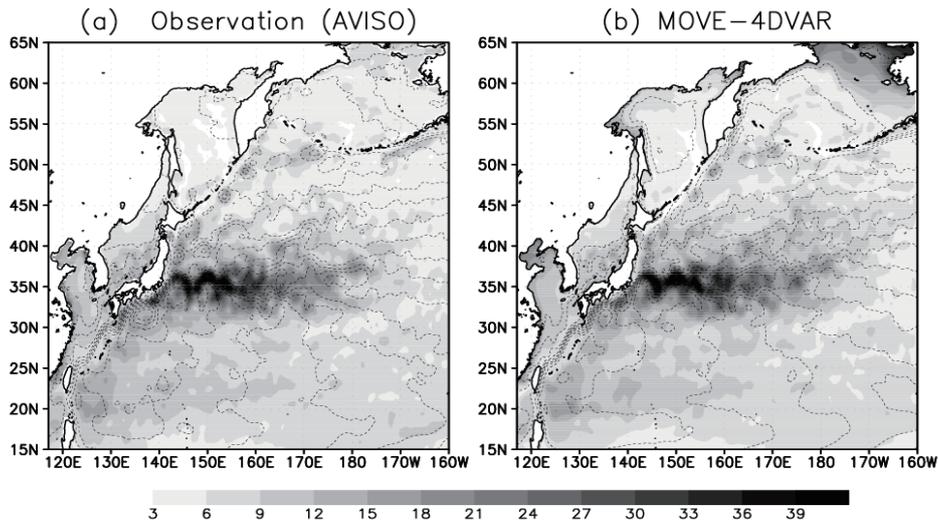
第5図 海面水温の標準偏差（陰影，単位 $^{\circ}\text{C}$ ）と平均値（等値線， 1°C 間隔）

(a) MGDSST, (b) MOVE-4DVAR. 両図とも2010～2012年の3年間の時系列から計算された値を示す。



第6図 MOVE-4DVAR の SST バイアス（単位 $^{\circ}\text{C}$ ）

ここでは、MOVE-4DVAR と MGDSST それぞれの2010～2012年の期間の3年平均値の差としてバイアスを定義している。実線（点線）の等値線が正（負）のバイアスを表す。

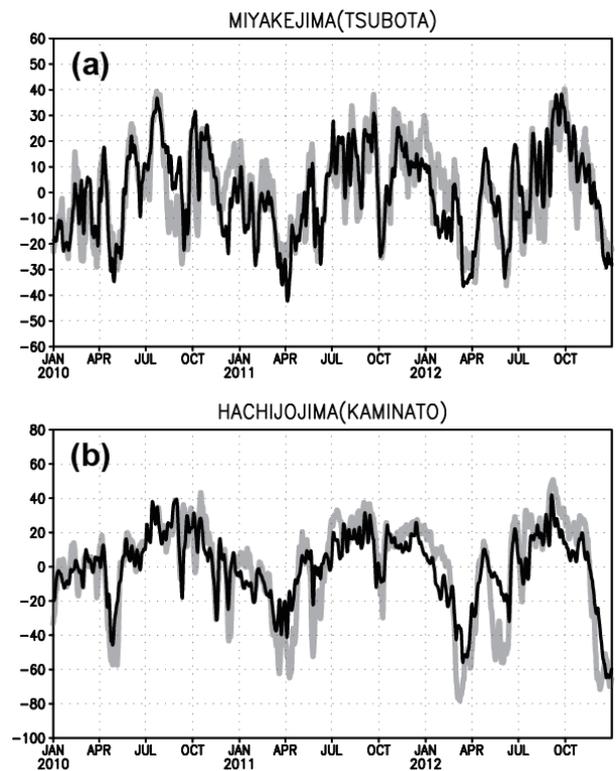


第7図 海面高度の標準偏差（陰影，単位℃）と平均場（等値線，10cm 間隔）

(a)観測(AVISO 格子点値), (b)MOVE-4DVAR. 実験期間の2010～2012年の3年間について計算された結果を示す。

渦の卓越する、黒潮・黒潮続流域と亜熱帯反流域で大きく、定量的にも観測と良く一致している。また、黒潮続流域では、黒潮の蛇行の形状を反映した標準偏差のパターンを示しているが、この特徴についても同化結果は観測と良い一致を見せている。親潮域では、千島列島沿いに低温・低塩分なオホーツク水を内部に含む高気圧性渦 (Kuril eddy; Yasuda *et al.*, 2000) による変動の大きな場所が見られるが、この特徴についても良く再現されている。なお、ベーリング海において観測に比べて大きな海面高度変動が見られるが、これは、モデル地形の設定に起因すると考えられる。モデルの北端 (65°N) では壁となっているため、モデル内では、ベーリング海の北側は閉鎖されているが、実際は、ベーリング海峡を通じて北極海と通じている。そのため、現実よりも大きな海面高度変動が表現されていると考えられる。

最後に黒潮流路の再現性を見るために三宅島 (坪田) と八丈島 (神湊) における水位変動と観測とを比較する (第8図)。観測の水位には、48時間タイドカラーフィルター (花輪・三寺, 1985) により潮汐成分を除去し、直近のアメダスデータを用いて海面気圧補正を施した。なお、潮位データは同化に用いていないので、MOVE-4DVARの結果とは独立なデータである。



第8図 (a) 三宅島及び (b) 八丈島における水位変動 (単位 cm)

灰実線が各検潮所における観測値、黒実線がMOVE-4DVARの結果を表す。検潮データに対しては、48時間タイドカラーフィルター (花輪・三寺, 1985) 及び直近のアメダスデータを用いた気圧補正を施している。観測、モデルともに、期間内の平均が0となるように平均値を調節している。両図で縦軸のスケールが異なることに注意されたい。

この期間、日本南岸の黒潮は、おおむね直進路の傾向を示していた。1 か月程度の時間スケールの短期的な変動は、一時的な蛇行路の出現に伴う水位変化を表している。両地点ともに、同化結果は、観測された水位変動を良く追従している。第3表に示すように、二乗平均平方根誤差（相関係数）は、三宅島で 11.23cm (0.79)、八丈島で 15.28cm (0.86) といずれも良好な結果が得られた。

5. まとめ

MOVE-4DVAR の現業化に向け、計算の効率化を目的とした新たな二つのスキームの開発を行った。まず、3DVAR の解析値から 4DVAR の最適化計算を開始する、3DVAR 併用スキームを開発した。評価関数の振舞いを通常スキームと比較すると、繰り返し計算が 3 回程度節約されることが分かった。このことは、降下法の繰り返し計算の回数に制約のある現業計算に有効な手法と言える。次に、4DVAR の実行に不可欠である、高並列計算を実現するために、モデルの 2 次元並列化が可能となるように改良を加えた。さらに、計算効率のさらなる向上のために、陸地のみで占められる領域を計算対象から除外する仕組みを取り入れた。このことにより、例えば 512 並列で実行する場合、589 並列で領域分割し、陸地のみ 77 領域を除外して実行することが可能となる。この場合、CPU 時間、使用メモリとも陸地除去なしの場合に比べて約 1 割削減することができた。

これらの改良を組み込んで、2010 年～2012 年の 3 年間の同化実験を行った。海面水温、海面高度場の平均場及び標準偏差を衛星データの格子点プロダクトとの比較から、平均的な循環場及び変動場ともに良好な再現性が得られていることが確認された。さらに、三宅島と八丈島の潮位データとの比較から、日本南岸の黒潮流路についても高い再現性が確認された。

今回開発した二つのスキームの導入により、MOVE-4DVAR の計算負荷を軽量化することが出来た。しかしながら、例えば、並列 I/O の導入や計算負荷の高い背景誤差の計算ルーチンを改良することでさらなる軽量化が可能であると考えられる。したがって、この様な計算の効率化は、今後

第3表 三宅島、八丈島における水位変動の再現性
二乗平均平方根誤差（単位 cm）と相関係数を示す。

場所	二乗平均平方根誤差	相関係数
三宅島（坪田）	11.23	0.79
八丈島（神湊）	15.28	0.86

も継続すべき開発課題と言える。

参 考 文 献

- Bloom, S. C., L. L. Takacs, A. M. daSilva and D. Ledvina (1996) : Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256-1271.
- Fujii, Y. and M. Kamachi (2003) : Three-dimensional analysis of temperature and salinity in the equatorial Pacific using a variational method with vertical coupled temperature-salinity empirical orthogonal function modes, *J. Geophys. Res.*, **108** (C9), 3297, doi:10.1029/2002JC001745.
- Fujii, Y. (2005) : Preconditioned Optimizing Utility for Large-dimensional Analyses (POpULar), *J. Oceanogr.*, **61**, 167-181.
- Fujii, Y., S. Ishizaki, and M. Kamachi (2005) : Application of nonlinear constraints in a three-dimensional variational ocean analysis, *J. Oceanogr.*, **61**, 655-662.
- Griffies, S.M. and R.W. Hallberg (2000) : Biharmonic friction with a Smagorinsky-like viscosity for use in large-scale eddy-permitting ocean models. *Mon. Weather Rev.*, **128**, 2935-2946.
- 花輪公雄・三寺史夫 (1985) : 海洋資料における平均値の作成について - 日平均値を扱う留意点 -, 沿岸海洋研究ノート, **23**, 79-87.
- Holland, W. R., J. C. Chow, and F. O. Bryan (1998) , Application of a thirdorder upwind scheme in the NCAR ocean model, *J. Clim.*, **11**, 1487-1493.
- Hunke, E. C., and W. H. Lipscomb (2010) , CICE : the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 4.1, LA-CC-06-012, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 76 pp.
- 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文 (2009) : MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築.

- 測候時報, **76**, 特別号, S1-S15.
- 栗原幸雄・桜井敏之・倉賀野連 (2006) : 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, 特別号, S1-S18.
- Noh, Y. and H. J. Kim (1999) : Simulation of temperature and turbulence structure of the oceanic boundary layer with the improved near-surface process. *J. Geophys. Res.*, **104**, 15621-15634.
- Polavarapu, S., S. Ren, A.M. Clayton, D. Sankey, and Y. Rochon (2004) : On the Relationship between Incremental Analysis Updating and Incremental Digital Filtering. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2495- 2502.
- Tsujino, H., T. Motoi, I. Ishikawa, M. Hirabara, H., H. Nakano, G. Yamanaka, T. Yasuda, and H. Ishizaki (2010) : Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) version 3. Technical reports of the Meteorological Research Institute, **59**, Meteorological Research Institute, Japan.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi (2006) : Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results, *Adv. Space Res.*, **37**, 806-822.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, and M. Kamachi (2011) : Improving strategies with constraints regarding non-Gaussian statistics in a three-dimensional variational assimilation method, *J. Oceanogr.*, **67**, 253-262.
- 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 (2014) : 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, **81**, 特別号, S53-S62.
- Usui, N., Y. Fujii, K. Sakamoto, and M. Kamachi (2014) : Development of a four-dimensional variational assimilation system toward coastal data assimilation around Japan, *Mon. Wea. Rev.* (submitted) .
- Yasuda, I., S-I. Ito, Y. Shimizu, K. Ichikawa, K-I. Ueda, T. Honma, M. Uchiyama, K. Watanabe, N. Sunou, K. Tanaka, and K. Koizumi (2000) : Cold-Core Anticyclonic Eddies South of the Bussol' Strait in the Northwestern Subarctic Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1137-1157.