

Hybrid EnKF-4DVar データ同化法の JNoVA への実装

伊藤耕介 (海洋研究開発機構), 国井勝・川畑拓矢・斉藤和雄 (気象研究所), 本田有機 (気象庁)

1. はじめに

4次元変分法 (4DVar) を用いたデータ同化では, 背景誤差共分散行列 $\mathbf{B}$ —実用上はその平方根行列 $\mathbf{B}^{1/2}$ —を事前に設定する必要がある. 解析インクリメントは, イノベーションとモデルによる摂動の時間発展だけでなく, 背景誤差共分散行列 $\mathbf{B}$ にも依存するため, この設定は数値予報にとって重要である.

伝統的には, 異なる予報時間の出力の差を複数事例で集め, それを統計処理した $\mathbf{B}$ を適用する手法 (NMC 法) が使われる. しかし, こうして得られる $\mathbf{B}_{\text{NMC}}$ には, 過去事例の気候値的な共分散しか反映させることができない. 近年では, 図 1 に示すように, アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) サイクルを通じて得られた状態変数のアンサンブルをもとに $\mathbf{B}_{\text{ens}}$ を構成し, それを 4DVar に与えるという Hybrid EnKF-4DVar によって, EnKF や NMC 法に基づく 4DVar よりも良い成績が得られることが報告されている (Buehner et al. 2010). とりわけ, 台風や集中豪雨などの顕著現象を扱う場合には, 気候値的な情報しか持たない背景誤差共分散は望ましくないと考えられる. 本発表では, 手法の概要を説明し, 気象庁非静力学モデル (NHM) を時間推進演算子とする気象庁非静力学メソ 4次元変分法 (JNoVA) に実装した結果を紹介する.

2. Hybrid EnKF-4DVar

EnKF におけるメンバー数を m , 状態変数ベクトルのアンサンブル平均からの偏差を $\sqrt{m-1}$ で規格化したものを $\mathbf{x}'_i (i = 1, 2, \dots, m)$ と表し,

$$\mathbf{X} \equiv [\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_m]^T, \quad (1)$$

とする. EnKF の結果に基づき背景誤差共分散行列 $\mathbf{B}_{\text{ens}}$ を構成する場合, 局所化を行うかどうかで定式化が異なるが, もし, 局所化をしないのであれば, $\mathbf{B}_{\text{ens}} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$ であるから, $\mathbf{B}_{\text{ens}}^{1/2} = \mathbf{X}$ となる. 一方で, 局所化を施す場合には, $\mathbf{B}_{\text{ens}} = (\mathbf{X}\mathbf{X}^T) \circ \mathbf{S}$ ($\mathbf{S}$ は局所化を表す行列; $\circ$ はシュア積) であり, 以下の $\mathbf{B}_{\text{ens}}^{1/2}$ を使うことができる (Wang et al., 2007).

$$\mathbf{B}_{\text{ens}}^{1/2} = [\text{diag}(\mathbf{x}'_1) \mathbf{S}^{1/2}, \text{diag}(\mathbf{x}'_2) \mathbf{S}^{1/2}, \dots, \text{diag}(\mathbf{x}'_m) \mathbf{S}^{1/2}]. \quad (2)$$

これにより, 評価関数の最小化問題を解くことができる. 局所化を施す場合には問題のサイズが大きくなるため, 数値的な負荷も大きくなる.

また, $\mathbf{B} = \alpha^2 \mathbf{B}_{\text{NMC}} + (1 - \alpha^2) \mathbf{B}_{\text{ens}}$ (α は 1 より小さな定数) のように, $\mathbf{B}_{\text{NMC}}$ と $\mathbf{B}_{\text{ens}}$ を混合して背景誤差共分散を構成する場合, 解析インクリメント $\delta \mathbf{x}$ は,

$$\delta \mathbf{x} = \alpha \delta \mathbf{x}_{\text{NMC}} + (1 - \alpha) \delta \mathbf{x}_{\text{ens}}, \quad (3)$$

のように, $\mathbf{B}_{\text{NMC}}$ に基づく寄与分と $\mathbf{B}_{\text{ens}}$ に基づく寄与分に分配される.

本研究では, NMC 法との混合が可能な局所化なし・ありの両バージョンを JNoVA に実装する開発を進めている. 次節で示す Hybrid EnKF-4DVar の結果は, NHM ベースの EnKF (51 メンバー) の解析値を基に構成した $\mathbf{B}_{\text{ens}}$ を用い, 局所化なしとし, 3×3 の Neighboring を適用している. また, NMC 法との混合は考慮していない.

3. 2011 年台風第 12 号への適用

JNoVA への実装のテストとして, 2011 年台風第 12 号の中心近傍の高度 1180m に, 東風偏差をもたらし 1 点疑似観測を置くデータ同化実験を行った. 図 2 に同化ウィンドウの初期時刻から 1 時間後における観測値を同化した場合に得られた解析インクリメント (高度 1180m) を示す. $\mathbf{B}_{\text{NMC}}$ を使った場合には, 台風の中心付近に北北東風偏差が得られるが台風の構造には沿っていない. 一方で, $\mathbf{B}_{\text{ens}}$ を使った場合には, 現在の台風中心の北側 (南側) に高気圧性 (低気圧性) 偏差が形成されており, 台風の南偏に対応する修正がかかることになる. また, 前者では風速の偏差場は対流圏下層と対流圏中層で異なる構造を持っていたが, 後者では対流圏下層から中層にわたっていた. 台風の中心付近では正の渦度が深い構造を持つことを考えると, 後者の方がよりもっともらしいといえる. さらに, 対流圏中～上層の温度偏差を見ると, Hybrid EnKF-4DVar では第一推定値の台風の北側 (南側) に低温 (高温) 偏差が見られた. これらのことから, Hybrid EnKF-4DVar は古典的な 4DVar に比べて, より台風の構造に沿った解析インクリメントを生成していると考えられる.

謝辞

本研究の結果の一部は, 理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです (課題番号:hp120282). また, 文部科学省の HPCI 戦略プログラムの助成を受けています.

参考文献

- [1] Buehner et al., 2010: *MWR*, **138**, 1567–1586.
- [2] Wang et al., 2007: *MWR*, **135**, 222–227.

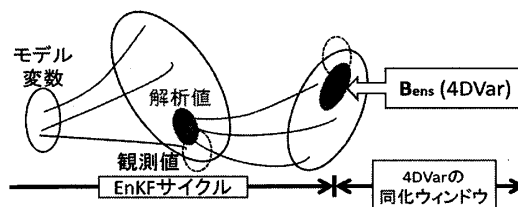


図 1 Hybrid EnKF-4DVar の概念図.

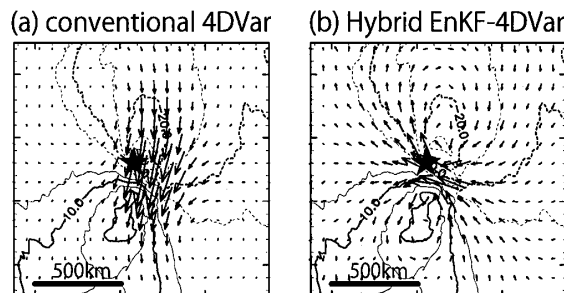


図 2 2011 年台風第 12 号 (Talas) の中心付近に疑似観測を与えた場合の解析インクリメントの水平風 (矢印), コンターは第一推定値の東西風 (正は西風). (a) NMC 法によって $\mathbf{B}$ を構成した場合 (b) EnKF の結果から $\mathbf{B}$ を構成した場合. ★はイノベーションが東風偏差となる疑似観測点を表す.