

極端現象予測の観点から見たデータ同化手法比較

伊藤耕介 (琉球大学), 国井勝・川畑拓矢・斉藤和雄 (気象研究所), Le duc (海洋研究開発機構)

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 B —実用上はその平方根行列 $B^{1/2}$ —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 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 B を適用する NMC 法が使われる (本研究では, 従来型の NMC 法のみに基づく 4D-Var システムを 4D-Var-Bnmc と呼ぶ). しかし, こうして得られる B_{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ー (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 B_{ens} を構成し, それを 4DVar に与えるという Hybrid EnKF-4DVar によって, 4D-Var-Bnmc や EnKF 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, Hybrid 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, 局所化を適用した Hybrid 化と Neighboring ensemble approach を適用した Hybrid 化を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 $x'_i (i = 1, 2, \dots, m)$ と表し,

$$X = [x'_1, x'_2, \dots, x'_m]^T, \quad (1)$$

とする. EnKF の結果に基づき背景誤差共分散行列 B_{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, $B_{ens} = XX^T$ であるから, $B_{ens}^{1/2} = X$ となる. 一方で, 局所化を施す場合には, $B_{ens} = (XX^T) \circ S$ (S は局所化を表す行列; \circ はシュア積) であり, 以下の $B_{ens}^{1/2}$ を使うことができる (Wang et al., 2007).

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

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

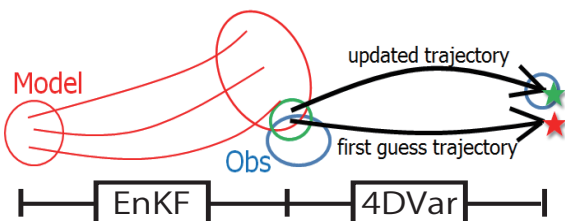


図 1 Hybrid EnKF-4DVar の概念図.

的な負荷も大きくなる.

また, $B = \alpha B_{NMC} + (1 - \alpha) B_{ens}$ (α は 1 より小さな定数) のように, B_{NMC} と B_{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 δx は,

$$\delta x = \sqrt{\alpha} \delta x_{NMC} + (1 - \sqrt{\alpha}) \delta x_{ens}, \quad (3)$$

のように, B_{NMC} に基づく寄与分と B_{ens} に基づく寄与分に分配される.

本研究では, B_{ens} として, 局所化を適用したものと Neighboring ensemble approach を適用したものを, 両方を構築している. 次節以降で示す 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 B_{ens} である (Kunii, 2013). 本研究では, 局所化を用いた Hybrid システム, 3×3 の Neighboring ensemble approach において構成された背景誤差共分散行列をそれぞれ B_{ensL} と B_{ensN} と呼び, これらの背景誤差共分散を用いて解析インクリメントを生成する Hybrid システムをそれぞれ 4D-Var-BenkfL, 4D-Var-BenkfN と呼ぶことにする. また, 比較のため, 1 点観測同化実験においては局所化も Neighboring ensemble approach も適用しない 4D-Var (4D-Var-BenkfO と呼ぶ) についても示す. 本研究では, Hybrid システムにおける NMC 法との混合を重み $\alpha = 0.2$ として実施している.

3. 1 点観測実験

JNoVA への実装のテストとして, 2011 年台風第 15 号の海面中心気圧を 1hPa 高める疑似観測同化実験を実施した. 図 2 に同化ウィンドウの初期時刻から 3 時間後における観測値を同化した場合に得られた同化ウィンドウ初期時刻における 500hPa 面の温位の第一推定値とインクリメントを示す. 図 2a は第一推定値を示しており, 暖気核はおおよそ半径 200km 程度のサイズを持っていることが分かる. ところが, 図 2d で示すように 4D-Var-Bnmc では, 台風サイズよりもはるかに大きなスケールで修正がかけられていることが分かる. 4D-Var-BenkfO では, 台風の中心付近の暖気核の修正に対応した温位のインクリメントが取り出されているものの, 観測地点から離れた地点における修正も目立

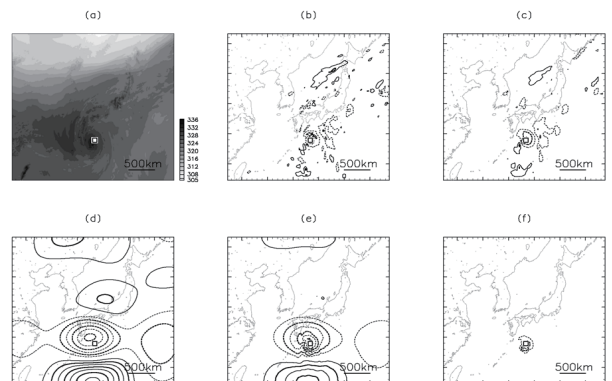


図 2 2011 年台風第 15 号の海面中心気圧を 1hPa 高める疑似観測を与えた場合の 500hPa 面温位の (a) 第一推定値, 及び (b-f) 解析インクリメント. (b)4D-Var-BenkfO, (c)4D-Var-BenkfN, (d)4D-Var-Bnmc, (e)4D-Var-BenkfL, (f)(e)のうち B_{ensL} に関する部分のみ.

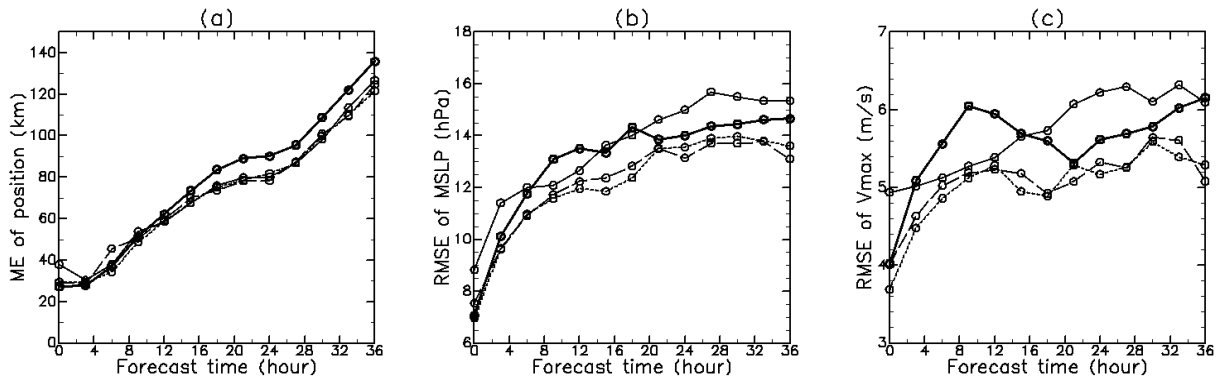


図3 台風予報誤差の比較。(a) 進路予報誤差 (b) 中心気圧予報誤差 (c) 最大風速予報誤差。横軸は予報時間 (hour) を表している。太実線は 4D-Var-Bnmc を初期値とするもの、実線は LETKF を初期値とするもの、破線は 4D-Var-BenkfL を初期値とするもの、点線は 4D-Var-BenkfN を初期値とするものである。

つ(図2b)。これらの修正の一部は、アンサンブルメンバー数が少ないことによって生じたノイズであると考えられる。4D-Var-BenkfN においては、このような観測地点から離れた修正が抑制されているが、依然として台風中心から離れたところでも修正がかかっている(図2c)。4D-Var-BenkfL における温位のインクリメントは、一見すると、4D-Var-Bnmc のインクリメントに似ているが(図2e)、 B_{ens} の寄与分は、台風中心の近傍で暖気核に対応したスケールとなっており、観測点から十分離れた地点では修正がかかっていない(図2f)。

同化ウィンドウの最終時刻(3時間後)においては、これらの結果は互いに似たものとなるが、4D-Var-Bnmc を用いた解析インクリメントは相対的に広いスケールを持っていたほか、台風の中心から少し離れた地点に、非バランスに伴うとみられる重力波が生じていた(図は省略)。また、LETKF に基づく解析インクリメントも比較したところ、鉛直方向への局所化適用のため、解析時刻において対流圏上層での修正はかかっていなかった。

4. 実データ同化実験

4つのデータ同化システム 4D-Var-Bnmc, LETKF, 4D-Var-BenkfL, 4D-Var-BenkfN により生成された結果をもとに、これらを初期値とする 36 時間予測を行った。対象は、2011-2012 年に日本に接近・上陸した台風のうち強いものから順に 4 つ (Roke(2011), Bolaven(2012), Samba(2012), Jelawat(2012)) であり、合計 62 回の予測実験結果を得た。ここでは、RSMC Tokyo のベストトラックを真値として、そこからの差を誤差とみなしている。

比較の結果、4D-Var-BenmfL と 4D-Var-BenmfN を初期値の生成に用いた場合、台風の進路予報・強度予報誤差とも、4D-Var-Bnmc に比べて小さくなっていた。LETKF を初期値の生成に用いた場合、台風の進路予報に関しては 4D-Var-Bnmc よりも誤差が小さかったが、強度予報に関しては、改善が見られなかった。対応のある 2 群比較によって、4D-Var-Bnmc に対する改善を統計的に検証したところ、一般的に、4D-Var-Bnmc 以外の手法によって進路予報の誤差が小さくなること、及び、4D-Var-BenmfL と 4D-Var-BenmfN において強度予報誤差が小さくなることは有意水準 90% で統計的に有意であった。

進路予報に関して、台風を中心とする $600\text{km} \times 600\text{km}$ の矩形領域で $850\text{-}300\text{hPa}$ の平均風を台風の指向流として定義し、計算したところ、LETKF, 4D-Var-BenmfL, 4D-Var-

BenmfN の三者を初期値とする予報結果ではこれらの指向流が類似していることが分かった。一方で、LETKF によって生成された解析時刻の台風はサイズが大きく強度が弱くなっていたほか、4D-Var-Bnmc では計算開始後に台風のサイズが大きくなり、台風強度に負バイアスが生じていることが分かった。LETKF によって台風が大きく・弱く再現されるのは、異なる中心位置をもつ台風のアンサンブル平均を解析値の生成に利用しているためであり、4D-Var-Bnmc で台風サイズが大きいのは、より空間スケールの広いモードを抽出しているためであると考えられる。

このほか、新潟・福島豪雨(2011)、九州北部豪雨(2012)、近畿豪雨(2012)に対しても、これらの4つの同化システムを適用し、予報実験を行ったが、それぞれの実験ごとに良し悪しがあるものの、総じてみると、LETKF による弱い雨の予報精度が若干悪いほかは、手法間での優位性は特に見られないという結果になった。

5. まとめ

先端的なデータ同化手法である 4 つのデータ同化システム 4D-Var-Bnmc, LETKF, 4D-Var-BenkfL, 4D-Var-BenkfN を比較し、その特徴を調べるとともに、顕著現象の決定論的予測精度という観点から比較を行った。4D-Var-Bnmc は概して大規模スケールの特徴を図る傾向にあり、他の手法に比べて台風の進路・強度予報の精度はあまり良くなかった。また、LETKF は台風の進路予報に関しては精度が hybrid 法と同等程度に良かったものの、アンサンブル平均を解析値として利用するため、非常に強い台風の強度を再現できず、台風のサイズも大きくなりがちであった。

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] Kunii, 2013: *WAF*, **29**, 1093–1105.
- [3] Wang et al., 2007: *MWR*, **135**, 222–227.