

気象庁非静力学モデルを使った4次元アンサンブル・カルマンフィルタ

*三好建正、荒波恒平（気象庁数値予報課）

1 はじめに

アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）を全球モデルに適用した例は多く知られており、いずれも良好な結果を報告している。一方、メソモデルに適用した例はZhang et al. (2004)の先駆的な仕事など、非常に限られている。そこで我々は、気象庁非静力学モデル（NHM）に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）を適用した（Miyoshi and Aranami 2006）。適用したLETKFは、Miyoshi and Yamane (2006)により地球シミュレータで全球モデルAFES用に開発されたものに、境界や変数の違いによる修正を加えたものである。このLETKFのバージョンは、Miyoshi and Yamane (2006)による実データ同化実験に用いられた4次元化された後のもので、非定時の観測をその時刻のものとして適切に扱うことができる。

本稿では、NHMにLETKFを適用した実験として、Miyoshi and Aranami (2006)に示された完全モデル実験と、その後行った2004年7月の実データ同化実験について紹介する。

2 完全モデル実験（Miyoshi and Aranami 2006）

NHMに適用したLETKFが動作することを確かめるため、完全モデルの仮定でデータ同化実験を行った。使ったNHMは2006年6月時点の最新の開発バージョンであり、格子間隔は5km、計算領域は東京を中心とする約300km四方の領域とした。領域の大きさを除いて、現業運用版とほぼ同じである。2005年8月15日06Zの気象庁現業メソ解析場を初期値とする15時間予報を行い、このうち最初の2時間をスピニングとみなし、08Z以降を真の状態と仮定した。観測網は、2x2x2格子点ごとに1点、風(1.0 m/s)、気温(1.0 K)、湿度(10%)、地表面気圧(1.0 hPa)を10分毎に観測するものとした（括弧内の値は観測誤差標準偏差）。このほか、降水レーダーを想定して、モデルで計算された10分降水積算量が全格子点で観測されるものとし、この観測誤差標準偏差は1.0 mm/hrとした。LETKFは1時間同化サイクルとし、10分毎の観測を適切に扱うため、10分スロットの4次元同化を行った。境界値はモデルの一部と見なし、すべてのアンサンブルメンバーの予報について、真の状態を作ったものと同じに固定した。本実験で用いたアンサンブルサイズは10である。

図1は、気温場の平方根平均2乗誤差とアンサンブルスプレッドを示す。境界の影響により、データ同化しない場合でも誤差が小さくなっていく。しかし、データ同化した場合はこれより常に小さな誤差を持ち、データ同化がよく動作していることが分かる。図2には、11Zの降水分布を示す。データ同化なしの場合と比べると、データ同化をした場合は、降水同化の有無に関わらず、風の方が明らかに改善している。2つの円で囲んだ領域は、データ同化なしでは降水の気配もない

が、同化した場合は大なり小なり降水がある。降水の同化を行うことで、右上の円で囲んだ降水はよく再現される。一方、左下の楕円で囲んだ降水は弱くなっており、常に降水の同化が改善をもたらすとは限らない。この弱くなった場所を見ると発散場であり、降水を同化した場合は衰弱が早く、タイミングがずれている。一般に、降水を同化すると力学場は悪化する傾向が見られた。

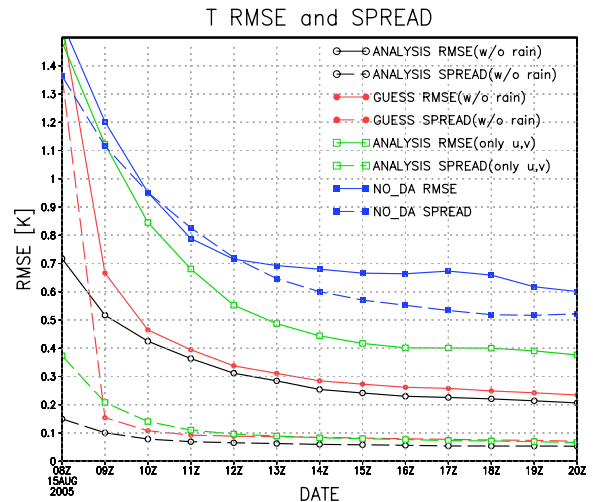


図1 気温場の平方根平均2乗誤差（実線）及びアンサンブルスプレッド（点線）の時系列（Miyoshi and Aranami 2006から抜粋）。誤差が大きな2本の線（■）はデータ同化なしの場合、□で示した線は風のみを同化した場合を示す。○と●で示した線は、雨以外のすべての観測を同化した場合の解析値及び第一推定値を示す。

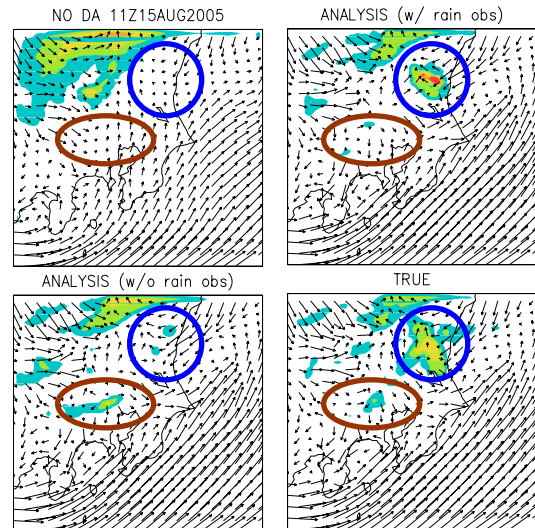


図2 11Zの降水分布（Miyoshi and Aranami 2006から抜粋）。右下が真の状態を示す。左上、左下、右上は、データ同化なし、降水以外の同化あり、降水を含めすべて同化ありをそれぞれ示す。

3 実データ同化実験

前節の完全モデル実験で使ったシステムの設定を変えて動作させた。アンサンブルサイズは 20 とし、計算領域は気象庁の現業 MSM と同じ領域、ただし、解像度を 20 km に落とし、格子数は 181x145x50 とした。同化したデータは、気象庁の現業メソ解析で同化されたデータ（可降水量、降水強度を除く）である。データ同化サイクルは 2004 年 6 月 25 日より開始した。最初のアンサンブルメンバーは、2005 年の 6 月から 9 月の現業メソ解析場からランダムに選んだ。

図 3 に、2004 年 7 月 4 日 06Z の LETKF 及び当時の現業 MSM（解像度 10 km）の 6 時間予報値を示す。LETKF は全体的に気圧が高いものの、低気圧の位置、降水の分布は概ね MSM と似ている。

次に、図 4 に、モデル面第 21 層の風速の解析アンサンブルスプレッドを示す。最初の解析で、日本列島の形が領域中心付近に確認できる。これは、日本列島周辺で観測が多く、解析場の精度が高いことを示す。10 日余りサイクル計算を行ったあと、図 3 に示したのと同じ時刻の解析アンサンブルスプレッドを見ると、境界の約 20 グリッド（緩衝領域）ではアンサンブルスプレッドが非常に小さくなっていることが分かる。しかし、その内側では、7.0 m/s を超えるようなアンサンブルスプレッドが見られ、内部で誤差が大きく成長することを確認した。アンサンブルスプレッドを時間方向に見ると、流れに応じてダイナミックに変化する様子が確認できた。境界を固定しても LETKF サイクルが安定して動作するのは、内部での誤差成長が十分大きいことを裏付けている。

4 まとめ

本研究で、NHM に適用した LETKF が適切に動作することを確認した。LETKF には、様々な観測が容易に扱えるなどの利点がある。今後、様々な研究への応用が期待される。

一方、降水の誤差分布はガウス分布ではないなど、降水の同化については扱いが難しい点があるため、今後の調査研究が必要である。また、実データ同化サイクル実験については、境界が LETKF サイクルを不安定にするほどの影響を持たないことが分かったが、結果の更なる分析を含め、今後の調査が重要である。

また、境界条件のアンサンブル化や、アンサンブル予報としての性能調査など、まだ議論されていない点も多い。今後は、次世代のメソアンサンブル予報への有用性も視野に入れた調査研究が重要だろう。

参考文献

- Miyoshi, T. and K. Aranami, 2006: Applying a four-dimensional local ensemble transform Kalman filter (4D-LETKF) to the JMA nonhydrostatic model (NHM). *SOLA*, **2**, 128-131.
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2006: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, submitted.
- Zhang, F., C. Snyder, and J. Sun, 2004: Impacts of Initial Estimate and Observation Availability with an Ensemble Kalman Filter. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1238-1253.

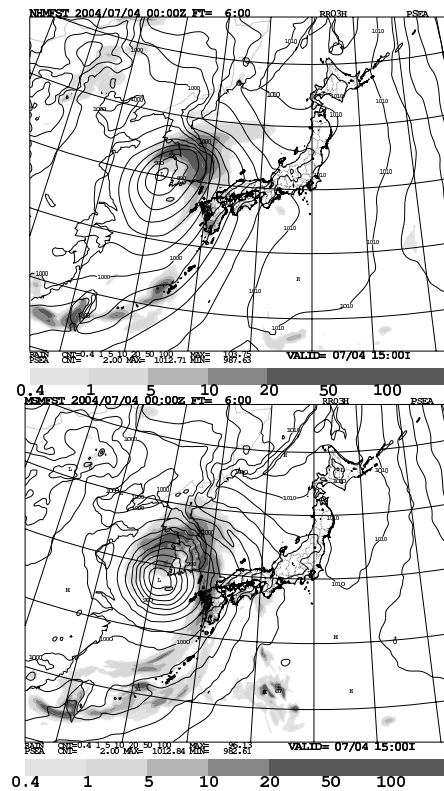


図 3 2004 年 7 月 4 日 06Z における LETKF（上、アンサンブル平均）と当時の現業静力学 MSM（下）の 6 時間予報値の海面更正気圧（等値線）及び 3 時間積算降水量（シェード）。

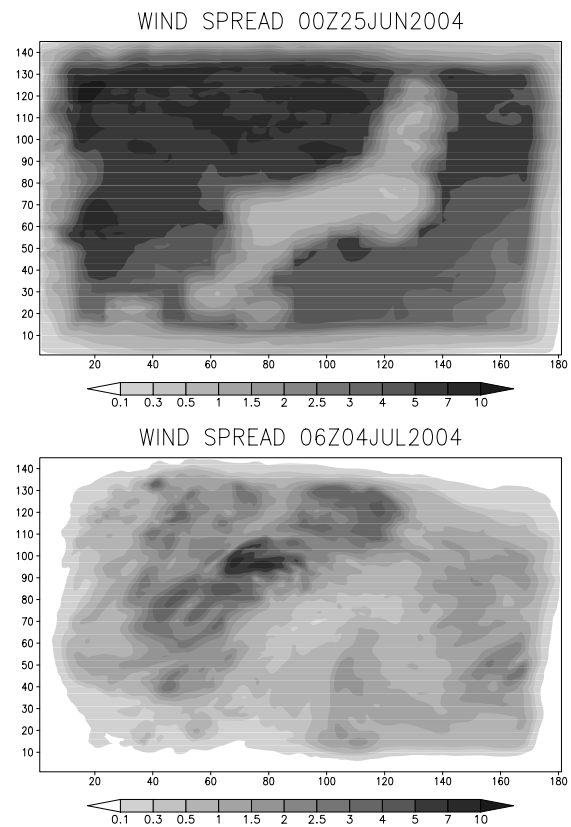


図 4 最初の解析（2004 年 6 月 25 日 00Z、上）及び 2004 年 7 月 4 日 06Z（下）におけるモデル面第 21 層の風速の解析アンサンブルスプレッド。シェードの単位は m/s。