10240 メンバーを用いたアンサンブルデータ同化実験

近藤圭一,三好建正 (理研,計算科学,JST・CREST)

1. はじめに

データ同化は,数値モデルと観測を高度に融 合させることで、より精緻な初期値・解析値を 得る手法であり,数値予報モデルの予報精度に 大きく影響を与える。大気の流れを考慮した高 度なデータ同化手法にアンサンブルカルマン フィルタ (EnKF; Evensen 1994) があり, さま ざまな研究が行われている。なかでも局所アン サンブル変換カルマンフィルタ (LETKF; Hunt et al. 2007) は、LEKF (Ott et al. 2004) に ETKF (Bishop et al. 2001) のアルゴリズムを適用し, 並列計算効率が高く,様々な数値予報モデルに 適用されている。大気モデルを用いた EnKF で は,100 メンバー以下程度のアンサンブルを用 いるのが一般的である。少ないアンサンブルメ ンバー数に起因するサンプリング誤差が共分 散行列に混入し悪影響を抑えるため, 観測の影 響範囲を格子点近傍に限定する局所化 (Houtekamer and Mitchell 1998) が必要となる。 Miyoshi and Kondo (2013) 及び Kondo et al. (2013)は、マルチスケールを考慮したアンサ ンブルデータ同化手法を新たに考案し、大きな 局所化スケールを用いることで、より遠くの観 測を同化し解析精度が大幅に改善することを 確認した。Miyoshi et al. (2014) は, 従来までの 計算機資源の制約上極めて困難であった 10240 ものアンサンブルメンバーを用いて LETKF による実験を, 京コンピュータ及び高 性能固有値分解ソルバーEigenExa (Imamura et al. 2011) を用いることにより実現し、大気が本 来持つ誤差共分散の構造を明らかにした。本研 究では, Miyoshi et al. (2014)をさらに発展させ,

大気モデルを用いながら局所化を適用しない アンサンブルデータ同化実験を行い,はるか遠 方の観測を同化する影響について調査した。

なお、本要旨は現在執筆中の論文 Kondo and Miyoshi (2015)を日本語訳したものである。

2. 局所化

Miyoshi et al. (2014) では, 10240 メンバーを 用いたものの, 2000 km の局所化スケールを用 いていた。しかしながら,それ以上に局所化ス ケールを大きくすることは,計算機資源,特に メモリ使用量がシステム上限を上回るため,実 験不可能であった。そこで,本研究では鉛直方 向の局所化をなくすことにより,計算量及びメ モリ使用量を大幅に削減することに成功した。 これにより,水平方向の局所化も除去した実験 が実施可能となった。

3. 実験設定

本研究では、低解像度の全球大気モデル SPEEDY (T30L7, Molteni 2003) にLETKF を適 用した SPEEDY-LETKF システム (Miyoshi 2005) を用いた。主な実験設定は以下の通りで ある。なお、10240 メンバーの場合は鉛直の局 所化を適用しない。ラジオゾンデ観測網 (Miyoshi 2005)を模した観測を6時間毎に同化 し、1月1日00 UTC を初期値とする1ヶ月間 の実験を行った。

実験名	メンバー数	局所化スケール
M20 L700	20	700 km
M80 L1400	80	1400 km
M10240 L2000	10240	2000 km
M10240 L∞	10240	∞

実験 M10240L2000 については,計算機資源 節約のため,実験 M10240L∞の1月24日00時 の第一推定値を初期値とする1週間の実験を 行った。

4. 結果

実験 M10240 L∞は, 10240 メンバーによりサ ンプリング誤差を小さく抑えることに成功し, 局所化なしにもかかわらず 1 ヶ月間正常に動 作することを確認した。

図1は、1月24日00時における(a) 実験 M10240L2000の解析インクリメント、(b)実験 M10240L∞の解析インクリメント、(c) 実験 M10240L2000の解析誤差、(d)解析インクリメ ントの差(a)-(b)である。M10240L2000の解析誤 差をさらに修正するように M10240L∞のイン クリメントが計算されていることがわかる。

図2は、1月24日00時の実験 M10240L2000 と実験 M10240L∞の第一推定値の誤差自己相 関を示しており、変数U、V、T、Psには、お よそ4000 km 程度の空間スケールが見られる。 Q には大陸規模に伝播する波列のような空間 構造が見られる。自己相関は観測の影響と対応 するため、観測の影響範囲は局所化スケール 2000 km よりはるかに大きく、はるか遠方の観 測を同化可能であることを示している。

図 3 は各実験における解析 Root Mean Square Error (RMSE)及び Spread を表している。10240 メンバーを用いることで,解析 RMSE は観測 誤差の 1/10 にまで小さくなっている。さらに 実験 M10240L2000 と実験 M10240L∞を比較す ると,同じ 10240 メンバーであるにもかかわら ず,M10240L2000 の解析誤差は増大傾向にあ



図1 1月24日00時における(a) 実験 M10240L2000の解析インクリメント, (b)実験 M10240L∞の解析 インクリメント, (c) 実験 M10240L2000の解析誤差, (d)解析インクリメントの差(a)-(b)である。 変数はモデ ル最下層の V(南北風)。 Kondo and Miyoshi (2015)より引用。



図 2 実験 M10240 L2000(左列)及び実験 M10240 L∞(右列)の1月24日00時におけるモデル4層目(~ 500 hPa) 及び地上気圧の黄色い星を基準とした自己相関の水平分布。Kondo and Miyoshi (2015)より引用。

る。これはまさに遠方の観測を同化しなかった 結果であり、これまで考慮されていなかった遠 方の観測が同化に与える影響は大きいもので あることを示している。

5. まとめ

本研究では、サンプリング誤差の影響を可能 な限り抑えるため、10240 メンバーからなる巨 大アンサンブルデータ同化実験を局所化なし で行い、その影響を調査した。その結果 LETKF は局所化なしでも正常に安定動作することが 確認された。大気の持つ誤差相関スケールは大 陸間規模であることが確認されていたが、本研 究ではその誤差総観スケールをそのまま同化 に活用することにより,はるか遠方の観測が解 析に大きな影響を与えることを示した。その影 響は観測の少ない海洋上で特に大きい(図略)。

今後は、より現実的なモデル及び実際の観測 を用いて、現実大気の流れに依存した確率密度 関数を調査する。また、誤差共分散の構造を加 味した最適な局所化アルゴリズムについて検 討を進める。

supercomputer system. Progress in



図 3 各実験の解析 RMSE(太線)及び Spread(細線)の時系列。(a)モデル 4 層目(~500 hPa)の U(m s⁻¹), (b)モデル 2 層目(~850 hPa)の T (K), (c)モデル最下層の Q (g/kg), (d)地上気圧(hPa)。Kondo and Miyoshi (2015)より引用。

References

- Bishop, C. H., B. J. Etherton, and S. J. Majumdar, 2001: Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects, *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 420-436.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. J. Geophys. Res., 99C5, 10143-10162.
- Hunt, B. R., E. Kostelich, and I. Syzunogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, F230, 112-126.
- Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 1998: Data assimilation using an ensemble Kalman filter Technique. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 796–811.
- Imamura, T., S. Yamada, and M. Machida, 2011: Development of a high performance eigensolver on the peta-scale next generation

NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, **2**, 643-650.

- Ott, E., and Coauthors, 2004: A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Tellus*, **56A**, 415–428.
- Kondo, K., T. Miyoshi and H. L. Tanaka: Parameter sensitivities of the dual-localization approach in the local ensemble transform Kalman filter. SOLA, 9, 174–178.
- Miyoshi, T. and K. Kondo, 2013: A multi-scale localization approach to an ensemble Kalman filter, *SOLA*, **9**, 170-173.
- Miyoshi, T., K. Kondo, and T. Imamura, 2014: 10240-member ensemble Kalman filtering with an intermediate AGCM. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 5264–5271.
- Molteni, F., 2003: Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I: model climatology and variability in multi-decadal experiments.

Clim. Dyn., 20, 175-191.