

NICAM-LETKF システムの開発と現状

寺崎 康児（理化学研究所 計算科学研究機構）

沢田 雅洋（東京大学 大気海洋研究所 現：気象研究所）

三好 建正（理化学研究所 計算科学研究機構）

1. はじめに

正二十面体格子を採用した非静力大気大循環モデル NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) の開発が東京大学および海洋開発研究機構で始まり、10 年余りが経過し、現在も開発が活発に進んでいる (Sato et al. 2014)。NICAM を使って、台風やマッデンジュリアン振動 (MJO) などの研究においても多くの研究成果を上げている。

一方で NICAM を気象予測モデルとして活用するためにはデータ同化システムの開発が必要である。Kondo et al. (2009) は、NICAM に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF: Local Ensemble Transform Kalman Filter; Hunt et al. 2007) を導入した。完全モデルの仮定に基づいた理想実験を行い良好な結果を報告したが、現実の観測データを同化するための観測演算子は導入されていなかった。そこで本研究では、Miyoshi et al. (2005) 及びその後の一連のアップグレードにより開発された LETKF システムをベースに現実の観測データを同化するための観測演算子を含んだ NICAM-LETKF システムを開発する。実際の観測データを同化し再解析データと比較して、動作確認を行う。

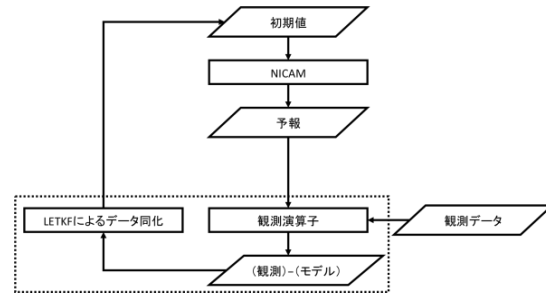


図1：NICAM-LETKF のフローチャート

2. NICAM-LETKF システムの構築

図1はNICAM-LETKFのフローチャートを模式的に表したものである。初期アンサンブルを用意し、NICAMで6時間予報を実行、その6時間予報値を第一推定値として、観測演算子を用いて観測空間に変換する。第一推定値とその観測相当量、及び実際の観測量を入力としてLETKFによるデータ同化を行い、次の予報サイクルのための解析値を得る。

Miyoshi (2005) 及びその後の一連のアップグレードにより開発された LETKF コードは FORTRAN90 及び Message Passing Interface (MPI) を用いて等緯度経度格子用に書かれている。しかし NICAM は正二十面体格子を採用しているため、コードの書き換えが必要である。LETKF の計算は格子毎に行われるもので格子系に依存しないので、既存のコードをそのまま使用することができる。本研究では、NICAM-LETKF システムの構築するために以下の3つを開発した。

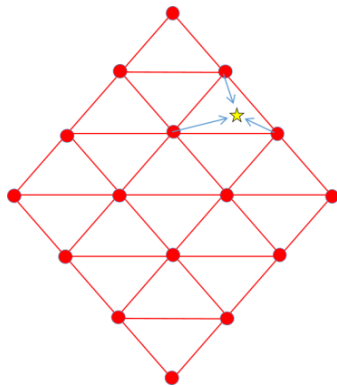


図 2：正二十面体格子における水平内挿の模式図。星印は観測データを表し、丸印は正二十面体格子におけるグリッドを表す。

32	32	32	32	32	32	32	32	33	33
21	28	28	27	28	28	28	30	32	32
16	17	18	19	19	19	19	20	21	21
14	14	14	14	14	14	14	15	16	16
10	11	11	11	11	11	11	13	14	14
3	4	4	4	5	5	5	6	7	9
0	0	0	0	2	3	3	3	3	3

図 3：観測データの並び替えの模式図。菱形は各観測データを表す。(Miyoshi et al. 2007 から引用)

- ・観測演算子の開発
 - ・正二十面体格子データを直接入出力できるように LETKF のコードを書き換える
 - ・観測サーチアルゴリズムの検討
- 観測演算子とは、モデル変数を観測変数に変換するものである。NICAM は正二十面体格子系での水平風を 3 成分に分けて表現している。しかし、観測される水平風は東西、南北の 2 成分であるため、その変換が必要で

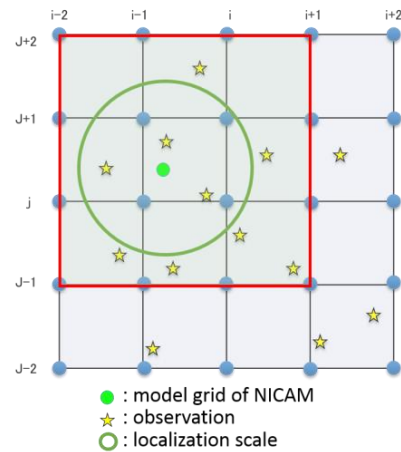


図 4：NICAM-LETKF における観測サーチアルゴリズムの模式図。赤い四角は局所化半径を超えない最小の四角形で定義される。

ある。NICAM のソースコード群に正二十面体格子上での 3 成分風速から東西、南北風へ変換するモジュールが提供されているため、本研究ではそれを用いた。また、正二十面体格子から観測点への内挿（図 2）についても本ソースコード群に含まれているものを利用した。

既存の LETKF コードは等緯度経度格子に基づくため、NICAM の正二十面体格子データを直接読み書きできるように書き換える必要がある。等緯度経度格子では、東西、南北の 2 次元配列として読み書きを行う。NICAM では、全球を 10 個の菱形に分割（region level 0）している。この 1 つの菱形を 4 つに分割を繰り返すことで並列性を上げることを可能にしている。また、大気の状態変数はこの領域毎に入出力される。そして、菱形内の格子点は水平方向に 1 次元的に格納されている。本研究では、既存の LETKF コードを東西、南北の格子の入出力から、上記のような領域及び領域内の 1 次元的な配

列を読み書きできるようにコードの開発を行った。

次に観測サーチアルゴリズムの開発を行った。局所化半径内に収まる観測データを探すために、ある格子点と全観測データとの距離を計算することは非効率である。そこで Miyoshi et al. (2007)は、図 2 のように等緯度経度格子の南西から北東に向かって、観測データを 2 次元的に並び替えた。各 box に含まれる観測数の累積し配列に格納することで、ある box の観測データを使用するときにポインターの役割を果たすため計算が容易である。

NICAM は正二十面体格子であるが、仮想的に等緯度経度格子を構築することで、既存のコードを有効に活用することが可能となった。LETKF によるデータ同化プロセスは格子点毎に計算するため、格子系に依存しない。図 4 に示す通り、ある格子点での観測サーチについて考える。局所化半径内に含まれる観測を直接的に見つけることは困難であるので、局所化半径を超えない最小の範囲（図 4 の赤い四角）に含まれる観測データについてその格子点との距離を計算する。そして、局所化半径内に収まる観測データのみを同化計算に使用する。上記の 3 つの開発を行うことで NICAM-LETKF の構築が完了した。

3. 実験設定

本研究では、新たに開発した NICAM-LETKF システムを用いて 1 ヶ月サイクルの実験を行った。水平解像度は約

112km で、鉛直総数は 38 としモデルトップは 40km（約 3 hPa）とした。アンサンブルメンバー数は 20 で、初期アンサンブルは 1992 年から 2001 年の各年の 10 月 30 日 00Z のデータを 2 日間スピニングしたものを用いた。ラジオゾンデや飛行機観測、地上観測、ウィンドプロファイラーなどの従来型観測と呼ばれるデータを 6 時間毎に同化した（NCEP PREPBUFR）。局所化はガウス関数を用いて、水平方向には $\sigma=400\text{km}$ 、鉛直方向には $\sigma=0.2\text{hPa}$ として適用した。ただし、 $2\sqrt{10/3}\sigma$ を超える範囲のところでは 0 とすることで遠くの観測データを同化しないようにした。

4. 結果

図 5 は気温と高度場の ERA-Interim に対する平方根平均二乗誤差 (RMSD) の時系列である。両変数ともに同化開始から数日で RMSD は急激に小さくなっている。しかし、期間後半において若干 RMSD が大きくなる傾向が見られる。これは本実験に用いた観測データのうち、地上観測データがモデルの解像度に対して多く同化されており、間引き方法に原因があると見られる。また成層圏の観測データは対流圏と比べてかなり疎であるが、観測誤差と比べてかなり大きな誤差が見られる。本実験での NICAM のモデルトップは約 3hPa に設定されているが、ERA-Interim のモデルトップは 0.1hPa である。

5. 結論

本研究では、初めて NICAM に現実的な観

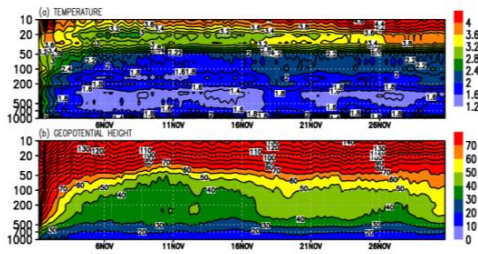


図 5 : ERA-Interim に対する平方根平均二乗誤差 (RMSD) の時系列。(a)気温、(b)高度場。

測データを同化するための LETKF システムの構築を行い、その動作確認を行った。ERA-Interim との比較結果から、動作は概ね良好で 1 ヶ月間安定して動作することを確認した。本研究では、従来型観測と呼ばれる NCEP PREPBUFR のみを同化した。今後は、更なる精度改善を目指し、衛星観測データや降水量などを同化するシステムを構築する予定である。

6. 参考文献

- Hunt, E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112–126.
- Kondo, K., and H., L., Tanaka, 2009: Applying the Local Ensemble Transform Kalman Filter to the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). *SOLA*, **5**, 121–124, doi/10.2151/sola.2009-031.
- Miyoshi, T., 2005: Ensemble Kalman filter experiments with a primitive-equation

global model. Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, 197pp.

- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2007: Localizing the error covariance by physical distances within a local ensemble transform Kalman filter (LETKF). *SOLA*, **3**, 89–92. doi:10.2151/sola.2007-023.

- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, T., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H., 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**, 18.

doi:10.1186/s40645-014-0018-1

- Terasaki, K., M., Sawada, and T., Miyoshi, 2014: Local ensemble transform Kalman filter experiments with the nonhydrostatic icosahedral atmospheric model NICAM, *SOLA*, revised.