

# アンサンブル・カルマンフィルタによる実験的再解析

三好建正（気象庁数値予報）・山根省三（千葉科学大/FRGCG）・榎本剛（ESC）

## 1. はじめに

アンサンブル・カルマンフィルタ（Ensemble Kalman Filter: EnKF）は、近年盛んに研究されている高度なデータ同化及びアンサンブル摂動生成の手法である。EnKF が従来のデータ同化手法と大きく異なるのは、解析場の誤差分布を最適に解析することである。これにより、「解析誤差場」という新しいプロダクトを生成する。解析誤差場は、解析値の品質指標として使えるばかりでなく、解析誤差の日々の変動に着目することで、大気現象の理解のための新しい情報を提供しうる。解析誤差場の有用性等については、今後の研究に期待される。

EnKF は Evensen(1994)により提唱されたカルマンフィルタ（Kalman Filter: KF, Kalman 1960）を近似するデータ同化アルゴリズムである。1990年代後半から、モデル誤差がない完全モデルの仮定を置いた理想実験により様々な EnKF の実装法が提唱されてきた（例えば、Houtekamer and Mitchell 1998; 2001; Anderson 2001; Whitaker and Hamill 2002; Ott et al. 2002; 2005）。現実の観測の同化に成功したのはごく最近であり、Houtekamer et al. (2005)の EnKF システムは 2005年2月よりカナダの現業アンサンブル予報システムとして採用されている。KF は線形理論に基づくため、非線形力学系に適用すると、長期間の安定動作が保証されない（例えば、Pham 2001）。長期間の安定性は重要であり、実証する必要がある。

本研究では、EnKF の一手法である局所

アンサンブル変換カルマンフィルタ（Local Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF, Hunt 2005; Hunt et al. 2006）を地球シミュレータの全球モデル AFES（AGCM for the Earth Simulator, Ohfuchi et al. 2004）に適用した AFES-LETKF システム（Miyoshi and Yamane 2006）を使って、約1年半にわたって現実の観測データを同化する。これにより、長期間の安定動作を確認する。同時に、実際の大気の解析場が1年半にわたって得られるため、季節変動を含む解析が可能となる。このような目的で使うのに十分な精度があるかどうか、簡単に精度検証も行う。なお、この解析プロダクトを、ALERA（AFES-LETKF Experimental Re-Analysis）と呼んでいる。

## 2. 実験設定

LETKF のソースコードは、Miyoshi (2005)が開発した LEKF (Local Ensemble Kalman Filter, Ott et al. 2002; 2005) を MPI/OpenMP を併用して地球シミュレータ上で並列化し、中核部分を LETKF にアップデートしたものである。LETKF のパラメータとして、アンサンブルサイズは 40 とし、局所化パラメータは 21x21x13 の局所パッチに水平 6 グリッド（約 480km）、鉛直 3 グリッドのガウス関数によるスムーズな局所化を適用した。共分散膨張パラメータとして、10%のスプレッド膨張（21%の共分散膨張）を採用した。AFES は Version 2.2 (Enomoto et al. 2006) を用い

た。データ同化期間は、2005年5月1日から2006年10月23日までの約1年半である。サイクル始めの初期アンサンブルは、AFESの長期積分から5月頃のをランダムに選んだ。これにより、初期のアンサンブル平均は気候的平均場を模倣したものとなる。したがって、最初の解析場は、実際の気象状態とは無関係で、誤差が大きい。

同化した観測データは、衛星輝度温度を除いて、気象庁全球サイクル解析で利用した観測データ (USE フラグが1のもの) とした。具体的には、表面気圧 (地上観測、船、ブイなど)、ラジオゾンデ、ウィンドプロファイラ、航空機、AMV (衛星雲追跡風)、QuikSCAT 海上風を含む。気象庁全球サイクル解析と同様、6時間毎に1時間スロットで同化した。つまり、すべての観測は正時にあるものとし、非正時の観測は最も近い正時のものと見なす。

### 3. プロダクトと精度検証

ALERA は、1回の解析で全アンサンブルメンバーを解析する。このため、通常の解析よりも桁違いに多くの情報を提供する。今の場合、6時間毎に40個の解析場を出力するから、通常の解析と比べて40倍の情報量を含むことになる。スプレッドとして抽出すれば、その場所における解析誤差の分散が分かる。これ以外にも、共分散成分まで解析されているので、サンプリングエラーを適切に除けば (遠くの点同士の共分散を無視すれば)、誤差に関する情報量は多い。図1に示すのは、あるスナップショット (2005年7月1日12Z) の500hPa高度場のスパゲッティ図である。極付近ではばらつきが大きく、中緯度では小さいことがわかる。また、擾乱がある場所ではばらつき

が大きい傾向がある。このような図が、6時間毎、全変数、全高度について書けるほどの情報量といえば、その情報の多さのイメージがわくだろうか。

次に、解析場の精度について調べる。NCEP/NCAR 再解析 (Kalnay et al. 1996) は定評のある解析場であり、現実の大気をよく再現していることは疑いがない。図2に、ALERA 解析場と NCEP/NCAR 再解析を並べて示す。二つの解析場を見比べると分かるように、ぱっと見てほとんど同一である。間違い探しのように違いを探すと、極周りや高い山の上あたりで違いがあることが分かる。実際、二つの解析場の差を見ると、全体的には1hPa未満の小さな違いしかないが、ところどころ5hPaを超えるような大きな違いがあることが分かる。極付近はもともとデータが少なく解析場の信頼性が少なく、解析アンサンブルスプレッドも大きい。山の上では高度補正による誤差など、海上や低地にはない誤差ソースが存在する。これらを考慮すると、全体的にALERA は NCEP/NCAR 再解析と非常によく似た精度があると言えそうである。

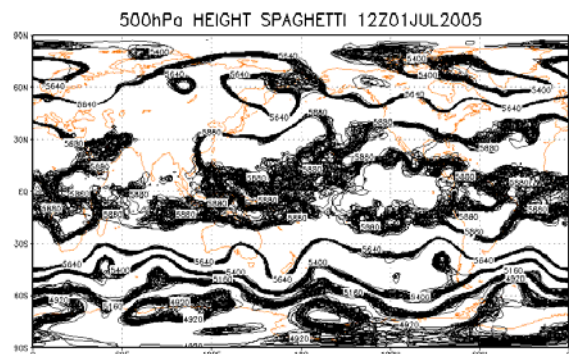


図1 2005年7月1日12Zの500hPa高度場のスパゲッティ図。各等値線に付した数字は高度をメートルで示す。

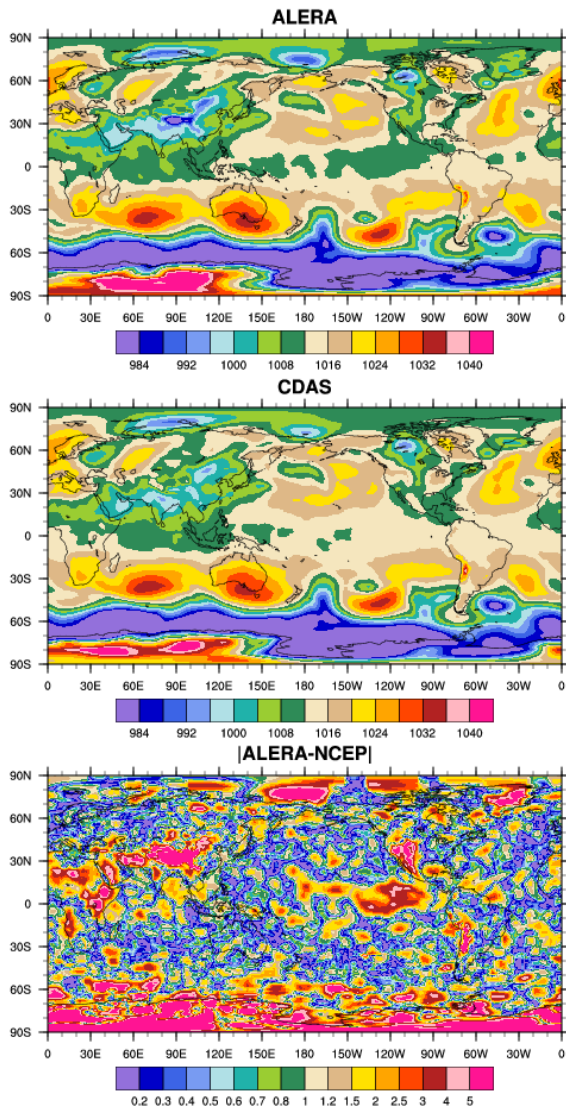


図 2 2006 年 6 月 5 日 12Z における ALERA 解析場 (上) と NCEP/NCAR 再解析場 (中) の海面更正気圧 (hPa) と、その差 (下)。

本研究の主要な目的として掲げた長期間の安定性については、NCEP/NCAR 再解析との差の水平平均を時系列にすることで調べた。図 3 に、実験期間全体にわたる 500hPa 高度場の差の 2 乗平均平方根の時系列を示す。すぐに分かるように、ALERA は NCEP/NCAR 再解析に対して全実験期間ほぼ一定の誤差で推移している。つまり、ALERA の精度は約 1 年半にわた

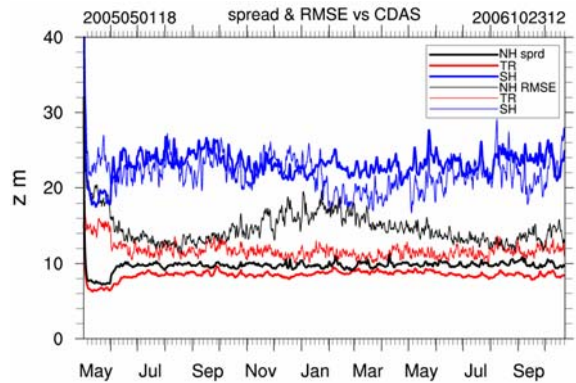


図 3 500hPa 高度場について、ALERA と NCEP/NCAR 再解析の差の 2 乗平均平方根 (細線) と ALERA の解析アンサンブルスプレッド (太線) の 2005 年 5 月 1 日から 2006 年 10 月 23 日までの時系列。黒、赤、青は、北半球 (20N~90N)、熱帯 (20S~20N)、南半球 (20S~90S) をそれぞれ示す。

って安定している。ただし、冬に差が大きく、夏に差が小さい傾向が見られるが、アンサンブルスプレッドにはそのような季節変動は見られない。北半球と熱帯では、アンサンブルスプレッドは差の 2 乗平均平方根よりも小さい。このことは、ALERA と NCEP/NCAR 再解析の差には真の大気状態に対して ALERA の誤差と NCEP/NCAR 再解析の誤差の両方が含まれるのに対し、アンサンブルスプレッドは ALERA の誤差のみを表そうとしている点から、妥当なものといえる。ただし、ALERA の誤差と NCEP/NCAR 再解析の誤差の間には相関が小さいことを仮定しているが、Miyoshi (2005)によると、完全モデルでは妥当な仮定となる。南半球では、差とスプレッドが似た大きさになっており、スプレッドが過大とも考えられる。このことは、全球一様な共分散膨張が適当でない可能性を示唆しており、領域ごとに異なる

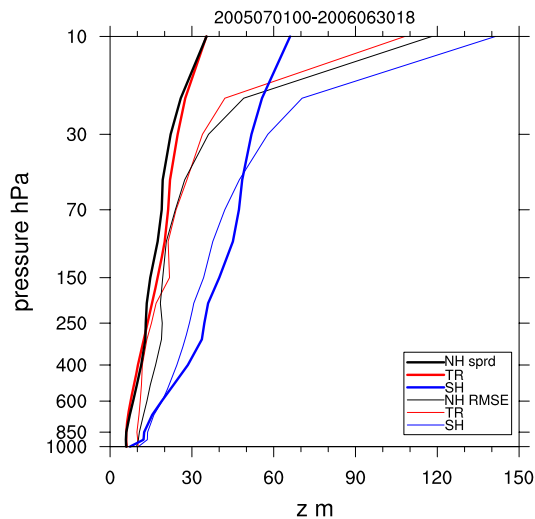


図4 ALERAとNCEP/NCAR再解析の各気圧面高度場の差の2乗平均平方根の時間平均。時間平均は、2005年7月1日から2006年6月31日までの1年間平均。

共分散膨張により解決できるかも知れない。

以上で見たのは、500hPa 高度場についてだが、他の変数、他の気圧面について調べる。図4~6に、ALERAとNCEP/NCAR再解析の差の2乗平均平方根を1年間時間平均し、鉛直プロファイルにして示す。500hPa 高度場について言えたことは、基本的に他の気圧面や変数でも成り立つ。アンサンブルスプレッドと差の関係を見ると、どの変数も30hPaあたりまでは似たような傾向で推移するが、30hPaより上層になるとスプレッドが過小評価となる。これは、実際の誤差の大きさがアンサンブルにより正当に評価できていない可能性を示している。大まかに見て、等圧面高度場の誤差は、地上から離れるほど大きくなる。気温については、30hPa以下で、北半球で約1.5K、南半球で約2.0Kの差がある。東西風は、約3~4m/sの違いである。300hPa付近と100hPa付近に差が大きくスプレッドも大きくなるピークが見える。概ねスプレッド

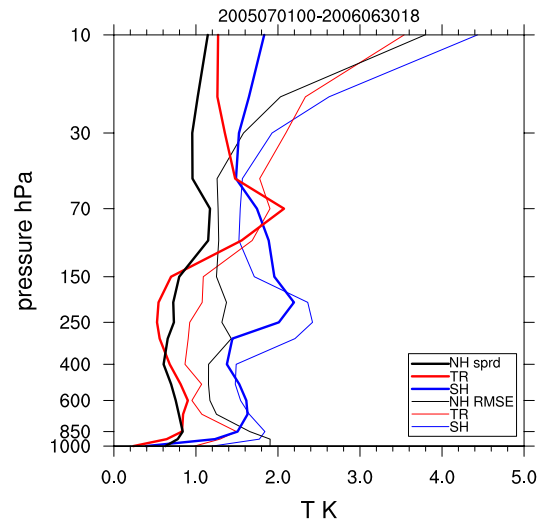


図5 図4と同じ。ただし、気温場。

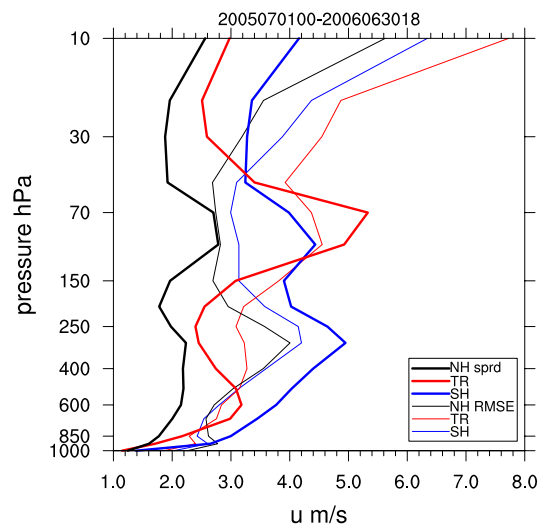


図6 図4、5と同じ。ただし、東西風場。

は差の傾向を捕らえているように見え、30hPa以下では誤差情報の信頼性も高いものと推測できる。

#### 4. まとめと考察

AFES-LETKFシステムを使って約1年半にわたる実観測データ同化サイクルを行い、実験的再解析ALERA (AFES-LETKF Experimental ReAnalysis) を作成した。定評のあるNCEP/NCAR再解析と似た精度の解析場を全解析期間にわたり維持して

おり、LETKF が長期間安定して動作することを確認した。また、30hPa 以下ではアンサンブルスプレッドが解析誤差をよく反映していることを確認したが、30hPa より上ではアンサンブルスプレッドが過小となっており、LETKF 解析の信頼度が低いことが示唆された。

現業の解析場と比べて、衛星輝度温度データを使っていないため、衛星輝度温度データが重要な主に南半球や成層圏では、ALERA の精度が劣ることはやむを得ない。しかし、南半球で誤差が大きいことは、アンサンブルスプレッドにより表現されており、利用可能性はある。しかし、30hPa 以上でアンサンブルスプレッドが過小になっていることは、利用する際に注意する必要がある。

今後は、局所パッチを取り去った新しい LETKF (主に極域で有利, Miyoshi et al. 2006) や新しいバージョンの AFES を適用したより高精度の ALERA を検討している。また、大気海洋結合モデル CFES (Komori et al. 2006) を使った CLERA についても検討を始めており、アンサンブル解析プロダクトによる異常気象現象やその予測可能性の解明に向けた今後の研究に期待したい。

## 謝辞

ALERA の計算は、海洋開発研究機構の支援により、地球シミュレータを使って行った。

## 参考文献

Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884-2903.

Enomoto, T., A. Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2006: Description of AFES 2: improvements for high-resolution and coupled simulations. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds.), Springer, New York, in press.

Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99** (C5), 10143-10162

Houtekamer, P. L. and H. L. Mitchell, 1998: Data Assimilation Using an Ensemble Kalman Filter Technique. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 796-811.

Houtekamer, P. L. and H. L. Mitchell, 2001: A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 123-137.

Houtekamer, P. L., H. L. Mitchell, G. Pellerin, M. Buehner, M. Charron, L. Spacek, and B. Hansen, 2005: Atmospheric Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter: Results with Real Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 604-620.

Hunt, B. R., 2005: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. arXiv:physics/0511236v1, 25pp.

- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2006: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, accepted.
- Kalman, R. E., 1960: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *J. Basic Eng., Trans. ASME*, 35-45.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437–471.
- Komori, N., A. Kuwano-Yoshida, T. Enomoto, H. Sasaki, and W. Ohfuchi, 2006: High-resolution simulation of global coupled atmosphere-ocean system: Description and preliminary outcomes of CFES (CGCM for the Earth Simulator). *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds.), Springer, New York, in press.
- Miyoshi, T., 2005: Ensemble Kalman filter experiments with a primitive-equation global model. Ph.D. dissertation, University of Maryland, 197pp.
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2006: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, submitted.
- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2006: Localizing the error covariance by physical distances within a local ensemble transform Kalman filter. submitted.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 8-34.
- Ott, E., B. R. Hunt, I. Szunyogh, M. Corazza, E. Kalnay, D. J. Patil, J. A. Yorke, A. V. Zimin, and E. J. Kostelich, 2002: Exploiting Local Low Dimensionality of the Atmospheric Dynamics for Efficient Ensemble Kalman Filtering. arXiv:physics/0203058v3.
- Ott, E., B. R. Hunt, I. Szunyogh, A. V. Zimin, E. J. Kostelich, M. Corazza, E. Kalnay, D. J. Patil, and J. A. Yorke, 2004: A local ensemble Kalman filter for atmospheric data

- assimilation. *Tellus*, **56A**, 415-428.
- Pham, D. T., 2001: Stochastic methods for sequential data assimilation in strongly nonlinear systems. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1194-1207.
- Whitaker, J. S. and T. M. Hamill, 2002: Ensemble Data Assimilation without Perturbed Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1913-1924.
- Whitaker, J. S., T. M. Hamill, X. Wei, Y. Song and Z. Toth, 2006: Ensemble Data Assimilation with the NCEP Global Forecast System. *Mon. Wea. Rev.*, submitted.