

気象庁におけるアンサンブル・カルマンフィルタ開発

三好建正（気象庁数値予報）

1. はじめに

気象庁では、アンサンブル・カルマンフィルタ（Ensemble Kalman Filter: EnKF, Evensen 1994）の開発を行っている。EnKFは、4次元変分法（4D-Var）と並ぶ高度なデータ同化手法であると同時に、解析誤差を適切に反映したアンサンブル摂動を生成する優れたアンサンブル手法でもある。EnKFは一般に4D-Varよりもプログラムソースコードが単純で扱いやすく、モデルに依存する部分が少ない。最近は実データを用いた現実的な研究が世界各所で始められており（例えば、Houtekamer et al. 2005; Whitaker et al. 2007）、将来有望な手法として注目を集めている。

EnKFには多くの実装法が知られているが（例えば、Tippett et al. 2004）、気象庁で開発しているのは、メリーランド大学のHunt教授らにより考案された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 et al. 2007）である。LETKFは、並列効率性に優れており、現業利用に適した手法として知られている。

これまでのところ、気象庁で開発中のLETKFは、3つの現実的な大気モデルに適用されている。Miyoshi and Yamane (2007)は、地球シミュレータを用いて、解像度 T159/L48 の AFES (AGCM for the Earth Simulator, Ohfuchi et al. 2004) に適用した。このシステムを使って、Miyoshi et al. (2007)は1年半以上に渡る実験的再解析 ALERA (AFES-LETKF

Experimental Ensemble Reanalysis)を行った。また、Miyoshi and Aranami (2006)は、解像度 5 km の気象庁非静力学モデル (NHM, Saito et al. 2006) に適用し、完全モデルを仮定した理想実験を行った。その後解像度 20 km でより広い領域の NHM に適用し、実観測データ同化も行った (Miyoshi and Aranami 私信)。さらに、Miyoshi and Sato (2007)は、解像度 TL159/L40 の気象庁全球モデル (GSM) に適用した。本稿では、GSM-LETKF に関する最近の進捗を紹介する。

2. GSM-LETKF 開発の最近の進捗

Miyoshi and Sato (2007)は、GSM-LETKF を気象庁の現業用実験システム NAPEX に適用した。これにより、気象庁現業システムと実質的に同等の環境で予報解析サイクル実験が行えるようになった。このシステムを使って、Miyoshi and Sato (2007)は20メンバーのGSM-LETKFによる衛星の放射輝度観測データの直接同化に成功した。図1は、Miyoshi and Sato (2007)が得た高度場のラジオゾンデ観測に対する解析誤差である。放射輝度観測を同化することで、高度の負バイアスが大幅に改善、RMS (Root Mean Square) も大きく減少している。

次に、上のGSM-LETKFに、Miyoshi et al. (2007)が開発したローカルパッチを用いない実装法を適用した。図2は、Miyoshi et al. (2007)が得た1回目の解析後のアンサンブルスプレッドである。ローカルパッチ

チにより、高緯度で不連続な四角い構造が見られたのが解消され、より自然な構造となっていることが分かる。

さらに、更なる計算高速化のため、Miyoshi and Yamane (2007)による並列実

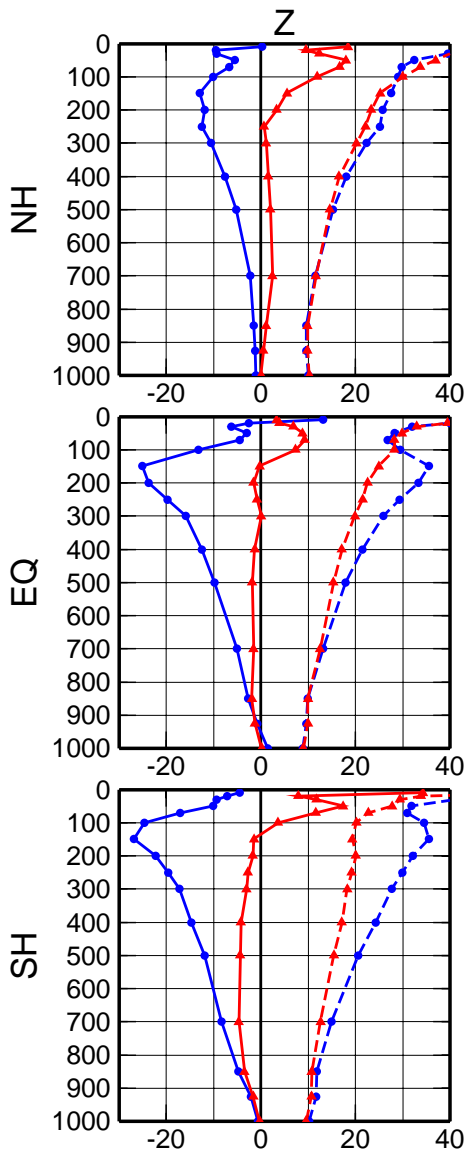


図 1 ラジオゾンデ観測に対する等圧面高度場の解析誤差(m)の鉛直プロファイル。縦軸は高度 (hPa)、実線はバイアス、点線は RMS を示す。青線は衛星放射輝度観測を同化しない場合、赤線は同化した場合を示す。(Miyoshi and Sato 2007 より転載)

装法を大幅に変更した。図 3 (a)に示すように、Miyoshi and Yamane (2007)は、物理的な地域ごとにノード分割した。しかし、観測データの分布は領域に大きく依存し、図 3 (a)の場合だと、ノード番号 1 とノード番号 7 とで含まれる観測数が大きく異なり、ノード間の計算量に大きな差 (load imbalance) が生じていた。これを、図 3 (b)のように逐次的にノード分割することで、ノード間の観測数のばらつきを抑え、load imbalance の解消を図った。結果として、load imbalance はほぼ完全に解消し、約 3 倍程度の計算速度向上を実現した。

このように改良を重ねて予報解析サイクル実験を行ったところ、下層の予報の低温

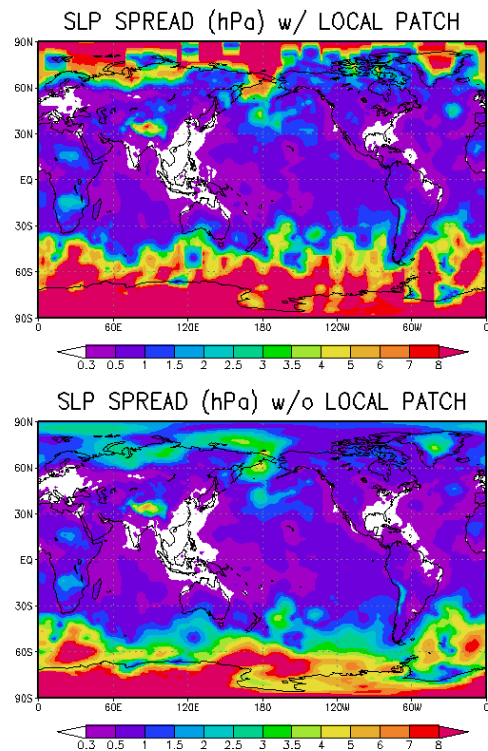


図 2 1 回目の解析後の海面更正気圧のアンサンブルスプレッド (hPa)。上段はローカルパッチを用いた従来の実装法、下段はローカルパッチを用いない実装法による。(Miyoshi et al. 2007 より転載)

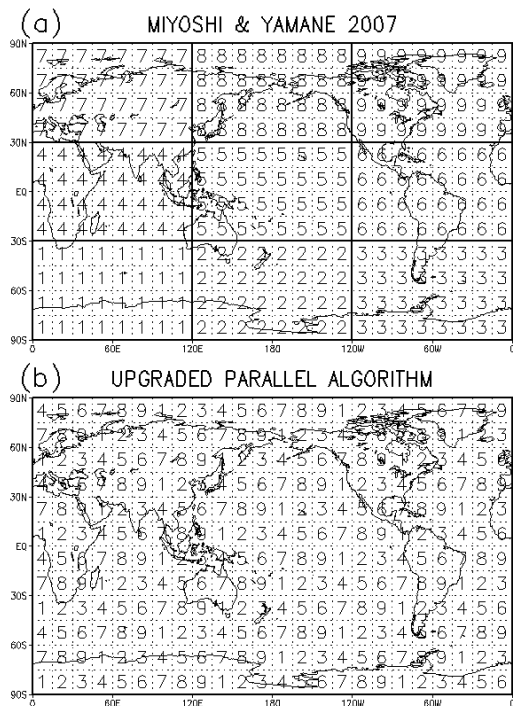


図 3 各格子点のノード分割法の模式図:
 (a) Miyoshi and Yamane (2007)のノード分割法、(b) 新しく実装したノード分割法。点線によって分割された小領域は各格子点を表し、数字はその格子点が割り振られるノード番号を示す。この図の場合、1 から 9 の数字があり、9 つのノードに分割された場合を示している。

バイアスが現業 4D-Var システムと比べて拡大していることが判明した。実際のところ、LETKF による解析場に高温バイアスがあり、予報は低温バイアスなので、対解析の予報負バイアスが拡大していることが分かった。この高温バイアスは、解析システムに組み込まれた放射伝達モデル RTTOV のバージョンの違いに起因することが分かった。LETKF に実装した RTTOV-8 では、現業システムで使われている RTTOV-7 の表面射出率モデル FASTEM-2 に含まれていたバグが修正されている。RTTOV-7 では、このバグによ

り、海面からの射出率が過大に見積もられる。このため、LETKF では、海面射出率が RTTOV-7 に比べて少ない。この埋め合わせとして気温を上昇させ、衛星の放射輝度観測量とつじつまを合わせていた。本来 RTTOV-7 の射出率はバグにより実際より過大なはずだが、これを考慮して観測量のバイアス補正がなされている。これにより、LETKF では、バイアスを含んだ観測を同化していたのである。LETKF で正しく扱うには、RTTOV-8 に適したバイアス補正を行わなければならない。

そこで、現在気象庁現業システムで採用されている変分法バイアス補正と同等の機能を LETKF に実装した。これを適応型バイアス補正と呼んでいる。Fertig et al. (2007)による先行研究では、アンサンブルを用いたパラメータ推定法を適用しているが、これにはいくつか不利な点がある。まず、推定するバイアス補正パラメータが時間発展しないため、低次元のアトラクタを持たない。したがって、初期アンサンブルの構造が延々と保持される。これを防ぐには乱数による忘却効果が必要となるが、それではサンプリングエラーを混入させてしまう。そこで我々は、アンサンブルを使わず、直接計算する新手法を考案した。計算に用いるのは、変分法バイアス補正の評価関数から導かれるバイアス補正係数のアップデート式で、これを直接解く。通常、推定量の次元が大きく、これを直接解くのが困難なので、変分法によって解いたり、アンサンブルを使って低次元化して解いたりする。しかし、今見積もろうとするバイアス補正係数は、一つのセンサー当たり高々 10 個以下であり、センサー間で独立であるという尤もらしい仮定を置くことで、アッ

プデータ式は高々10x10行列程度を扱うだけとなり、直接解けるのである。

この方法を適用してバイアス補正係数を動的に見積ると、図4のように、初期に大きな変動が起こった。初期の値は、現業システムで使われているバイアス補正係数である。図4は、表面射出率に敏感なAMSU-Aの4チャンネルの場合を示しており、RTTOV-7とRTTOV-8の特性の違いにより、大きくずれていくことを示している。表面射出率に敏感でない他のチャンネル

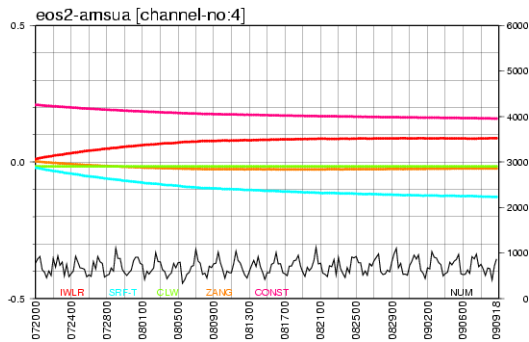


図4 衛星搭載マイクロ波センサーAMSU-Aの4チャンネルについて、適応型バイアス補正法によって見積もられたバイアス補正係数の時系列。

	PseaSurf	T850	Z500	Wspd850	Wspd250
Global	-9.00	-10.45	-10.64	2.38	0.13
N. Hem.	-4.47	-2.95	-1.72	3.74	0.66
Tropics	0.48	-11.66	-17.60	11.69	9.88
S. Hem.	-10.90	-14.51	-13.00	-1.52	-3.81

	PseaSurf	T850	Z500	Wspd850	Wspd250
Global	-6.19	-4.36	-5.71	3.66	1.32
N. Hem.	-4.18	1.12	0.91	3.98	0.57
Tropics	6.86	3.39	3.09	14.07	10.21
S. Hem.	-7.60	-8.91	-7.91	-0.08	-1.62

図5 適応型バイアス補正の適用前（上）と後（下）のLETKFシステムの対初期値予報スコアの現業4次元変分法システムに対する改善率（%）。改善率は、24時間から216時間予報まで24時間毎のアノマリー相関スコアの改善率の平均。

ルやセンサーについては、ほとんど変動は見られない。つまり、RTTOV-7とRTTOV-8で特性が変わらないため、現業システムで使っている初期の値から動かないのである。

これを適用することで、下層気温の予報の負バイアスが改善し、予報スコアの改善を得た。図5に4D-Varに対する改善率を示している。ここに示すすべての変数で、予報スコアが改善していることが分かる。ただし、南半球の各変数と、熱帯を除く海面更正気圧の予報スコアが4D-Varよりも悪い。

さらに、アンサンブル予報実験も行い、確率予報の検証を行った。図6に示すのは、850 hPa 気温が気候値より2度以上高いという事象に対する確率予報のブライアスキルスコア (Brier Skill Score: BSS) である。1に近いほど良いことを示す。特に予報前半で、LETKF が優れている。これは、LETKF による摂動が解析誤差を適切に表していることによるものと理解できる。

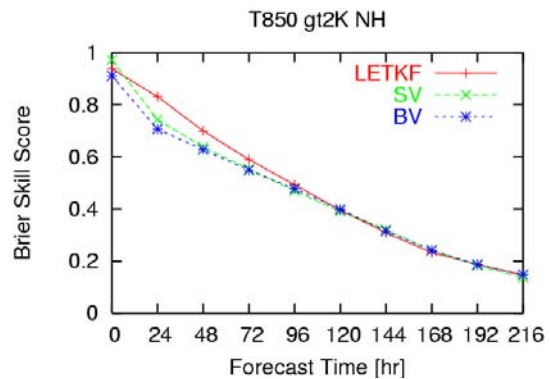


図6 850 hPa 気温が気候値より2度以上高いという事象に対する確率予報のブライアスキルスコア。LETKF、SV、BVは、それぞれLETKF、気象庁現業特異ベクトル法、前現業システムのBreeding法によるアンサンブル予報を表す。

3. まとめと今後

気象庁では、LETKF を気象庁全球モデル GSM に適用して、開発を進めている。本稿では、最近の進捗として、衛星放射輝度観測の直接同化、ローカルパッチを用いない実装、並列実装法の改良、衛星放射輝度観測の適応型バイアス補正について紹介した。また、現在現業運用されている 4D-Var と対等に比較できる性能が得られていることも示した。また、ここでは示さなかったが、計算時間も 4D-Var と比べて遜色なく、実用に耐えうる事が分かっている。

ごく最近、RTTOV-8 と RTTOV-7 で、AMSU-A の表面射出率の扱いが異なることが判明した。これにより、LETKF での RTTOV-8 の扱い方に誤りがあり、表面射出率が過小となっていることが分かった。もともと RTTOV-7 は表面射出率が過大であり、その上 LETKF で表面射出率が過小であったとなると、問題は大きい。この誤りを修正した実験を行ったところ、解析場の 850 hPa 気温の高温バイアスは軽減され、更なる予報スコアの改善が見られた。しかし、基本的な傾向は変わらず、依然として下層の高温バイアスがある。

今後は、海面更正気圧や下層気温の性能向上を目指して、更なる問題発見及び改良に努めるつもりである。

謝辞

衛星用放射伝達モデル RTTOV-8 は EUMETSAT から提供されています。佐藤芳昭氏に気象庁現業実験システムへの組み込みを行っていただきました。また、酒井亮太氏に確率予報スコアを計算していただきました。さらに、計盛正博氏に RTTOV-7

と RTTOV-8 の違いについて様々な助言をいただきました。開発全般にわたって、門脇隆志氏との議論が随所で役立っています。これらの援助等に感謝します。

参考文献

- 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
- Fertig, E. and Co-authors, 2007: Observation Bias Correction with an Ensemble Kalman Filter. submitted.
- 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., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- 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 Y. Sato, 2007: Assimilating Satellite Radiances

- with a Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) Applied to the JMA Global Model (GSM). *SOLA*, **3**, 37-40.
- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2007: The AFES-LETKF Experimental Ensemble Reanalysis: ALERA. *SOLA*, **3**, 45-48.
- 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.
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2007: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841-3861.
- 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.
- Saito, K. and Co-authors, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- Tippett, M. K., J. L. Anderson, C. H. Bishop, T. M. Hamill and J. S. Whitaker, 2003: Ensemble Square Root Filters. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1485-1490.
- Whitaker, J. S., T. M. Hamill, X. Wei, Y. Song and Z. Toth, 2007: Ensemble Data Assimilation with the NCEP Global Forecast System. *Mon. Wea. Rev.*, in press.