

気象庁でのLETKF開発の近況

*三好建正（気象庁数値予報課）

1 はじめに

LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter; 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ, Hunt et al. 2007) は、アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) の手法の一種であり、並列計算効率に特にすぐれた実用的な手法である。EnKFは、アンサンブル手法とデータ同化手法とを融合したもので、日々変動する誤差構造を考慮した高度なデータ同化を行うとともに、解析誤差を適切に反映したアンサンブル初期摂動を生成する。変分法と比べて格段に簡便なEnKFは、データ同化研究の敷居を下げ、観測的研究と数値モデル研究との橋渡しとして期待されている。また、アンサンブル手法としてもすぐれていることから、広く予測可能性研究にも有効である。

さて、非静力学モデルに関しては、Miyoshi and Aranami (2006)が、LETKFを気象庁非静力学モデルに適用し、動作確認した。本発表は、直接非静力学モデルを用いたLETKF研究の進展を述べるものではないが、気象庁における全球モデルを用いた最近の開発から、非静力学モデルを使った研究にも有用な情報を提供しようとするものである。特に本発表では、次の二つに焦点を絞る。

☆ ALERAデータの利用

気象庁で開発中のLETKFを用いて、気象庁予報部、海洋研究開発機構、千葉科学大学が共同して作成したアンサンブル再解析データセットALERA (Miyoshi et al. 2007) は、研究目的では無償で入手可能となっており、非静力学モデルを使ったアンサンブル予報実験の初期値・境界値として有用である。

☆ LETKFによる衛星放射輝度観測データ同化

気象庁全球モデル (GSM) を使ったLETKF (Miyoshi and Sato 2007) では、衛星放射輝度観測データの適応型バイアス補正法を新たに考案し、その同化に成功している。このようなLETKFの知見は、非静力学モデルを用いて行うEnKF研究にも直接役立つに違いない。最近では全球を覆う非静力学モデルの研究も盛んとなっており、実際の衛星観測データなどを同化するなど進んだ研究を行う場合にも、有用だろう。

2 ALERAデータ

Miyoshi and Yamane (2007)は、地球シミュレータを使って、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LETKFを適用し、良好な結果を得た。このシステムを使って、2005年5月から2007年2月までの約1年半に渡る実際の観測データを同化し、再解析を行ったのがALERA (AFES-LETKF Experimental Ensemble Reanalysis)であ

る。ALERAデータは、<http://www3.es.jamstec.go.jp/>から研究目的に限り無償で入手し使用することができる。この際、登録等は不要である。

ALERAは、40メンバーのLETKFにより作成された再解析データである。インターネットから入手できるのは、6時間毎の気圧面解析値のアンサンブル平均、スプレッド、これらの5日平均、月平均などである。24時間毎に全40メンバーの気圧面解析値も入手できる。要素は、東西・南北風成分、気温、湿数、高度、海面更正気圧で、モデルの初期値を与えるには十分である。40メンバーのEnKF解析場を初期値とした予報実験を行うなど、予測可能性研究に適している。

ALERAは、実際の大気をよく再現している。例えば、図1に2005年12月から2006年2月までの3ヶ月平均の東西平均東西風を示す。気象庁現業システムの精度には及ばないものの、解析場をばっと目で見ると、区別がつかない程度の精度はある。計算したモデル解像度はT159/L48、公開している気圧面データは1.25度の等緯度経度座標、鉛直は1000hPaから10hPaまで17層である。狭い領域の詳細なメソモデルの初期値・境界値には粗すぎるかもしれないが、ある程度広い領域を取って低解像度の境界値が内部に強く影響し続ければ、非静力学モデルの初期値・境界値としても有効だろう。ただし、低解像度の初期値は環境場を与えるだけなので、非静力学モデルの中で高波数成分がスピニアップすることを考慮する必要があるだろう。このほか、各メンバーからアンサンブル平均を引けば、摂動成分が得られる。高解像度の初期値は別に用意し、アンサンブル予報のために摂動のみを使うといった使い方もできるだろう。

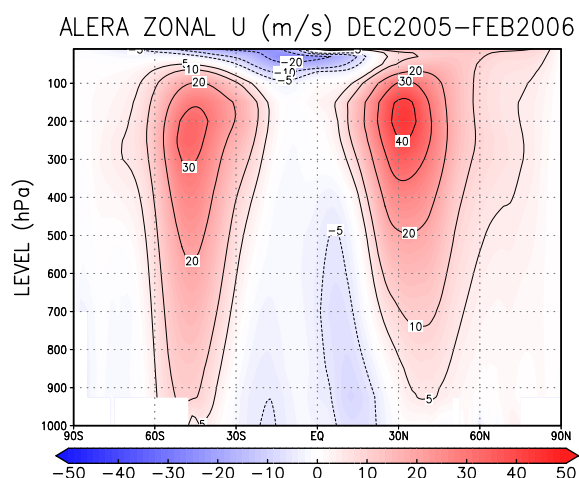


図1 ALERAによる2005年12月から2006年2月までの3ヶ月平均の東西平均東西風 (m/s)。

3 衛星放射輝度観測データの同化

衛星観測は、現在の数値天気予報には欠かせない重要なデータである。全球を広く均質に観測するのは衛星だけである。また、衛星観測データは、無償でインターネットから入手できるものも多く、様々な研究に使いやすい。そこで、自前の非静力学モデルに実際の衛星観測データを同化する研究も可能となってくるだろう。その際注意すべきなのが、衛星放射輝度観測データのバイアスである。これにより、観測データをそのまま同化すると、全球に広く均質にバイアスを乗せてしまい、予報精度は悪化する。

現業数値予報センターでは、この広く均質なバイアスを見積もり、補正してから、同化している。放射輝度観測データに含まれているバイアス b は、スキャン位置毎に決まった scan バイアス b^{scan} と、大気の状態に応じた air mass バイアス b^{air} がある。 b^{scan} は、様々な大気状態の観測値と背景値（通常は解析値など）との関係から、統計的に求める。 b^{air} は、観測バイアスと線形関係にある説明変数（衛星天頂角、表面気温、定数など）からなる列ベクトル \mathbf{p} を用いて、(1)式のように書かれる。

$$b^{air} = \boldsymbol{\beta}^T \cdot \mathbf{p} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\beta}$ は各説明変数にかかる係数からなる列ベクトルである。 \mathbf{p} はモデル変数から与えられるため、最適な $\boldsymbol{\beta}$ が分かれば、 b^{air} が求まる。 $\boldsymbol{\beta}$ は、多くの観測サンプルから統計的に決めておくことができる。一方、測器自体は経年劣化するため、 $\boldsymbol{\beta}$ をゆっくり時間変動するものと仮定して、毎回の観測値から適切に求めていくこともできる。これは、ちょうど数値予報におけるモデル出力値の統計的バイアス補正と似ている。MOSでは、多くの学習サンプルから予め求めておいた回帰係数を使うのに対し、カルマンフィルタでは、係数を毎回更新する。カルマンフィルタは、サンプリングエラーの影響を受けるため、一般にMOSに劣るが、モデル変更など何らかの要因で回帰係数がゆるやかに変動する場合は都合が良い。気象庁では、学習サンプルから予め求めた固定値の $\boldsymbol{\beta}$ を使っていたが、2006年5月に変分法バイアス補正を現業化し、 $\boldsymbol{\beta}$ をゆっくり変動させるようにした（佐藤 2007）。

LETKFでは、Miyoshi and Sato (2007)が輝度温度観測データの同化に成功している。その際は、気象庁現業の4次元変分法で使っていた $\boldsymbol{\beta}$ を固定値として使った。この $\boldsymbol{\beta}$ は、4次元変分法にとっては適切だが、異なるバイアス特性を持つLETKFにとっては不適切である。LETKFでも変分法バイアス補正と同様の機能を実現するため、始めは $\boldsymbol{\beta}$ を予報変数の一部に組み込み、他の予報変数と同様に、アンサンブルを用いて推定することを試みたが、うまくいかなかった。結局、変分法バイアス補正における評価関数を近似した新

手法を考案し、予報変数とは独立して推定することに成功した（適応型バイアス補正法と呼ぶ）。これにより、図2に示すような各種予報スコアの改善が確認された。

	PseaSurf	T850	Z500	Wspd850	Wspd250
Global	-9.44	-12.78	-11.40	2.08	-0.16
N. Hem.	-5.84	-5.41	-3.21	3.07	0.30
Tropics	3.58	-9.93	-16.84	13.03	9.74
S. Hem.	-11.43	-18.16	-13.70	-2.09	-4.19

適用前

	PseaSurf	T850	Z500	Wspd850	Wspd250
Global	-7.16	-5.23	-6.97	3.30	1.02
N. Hem.	-3.80	1.24	0.82	4.04	0.54
Tropics	5.74	1.50	-0.17	13.89	10.47
S. Hem.	-8.97	-10.12	-9.48	-0.65	-2.21

適用後

図2 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（%）。

4 まとめ

本発表では、以上に述べたように、気象庁における LETKF 開発の近況から、非静力学モデルを使った研究にも有用であろう情報をお知らせする。研究コミュニティによる様々な EnKF 関連研究の成果は、気象庁における開発にもフィードバックし、将来の数値予報システムの向上に寄与することが期待される。現業センターと研究コミュニティのこのような Win-Win の関係は、大変望ましいものと言えよう。非静力学モデルを使った研究で、ALERA データの利用や EnKF 手法の適用など、様々な EnKF 関連研究が活発となることを祈りたい。

謝辞

GSM-LETKF に関して、佐藤芳昭、門脇隆志の各氏、ALERA に関して、山根省三、榎本剛の各氏、その他 EnKF 全般に関して、Eugenia Kalnay、Jeff Whitaker の各氏との有意義な議論等に感謝します。

参考文献

- 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. and S. Yamane, 2007: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- 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.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・別冊, **53**, 171-175.