

「 $1 + 1 > 2$ 」

—2008年度山本・正野論文賞受賞記念講演—

三 好 建 正*

1. はじめに

このたび、荣誉ある「山本・正野論文賞」をいただき、大変名誉なことととてもうれしく思います。また同時に、この賞に恥じぬよう気持ちを新たに引き締めているところです。このような賞をいただくことができたのは、多くの方のご支援の賜物であり、感謝の表しようありません。どうもありがとうございます。

本講演のタイトルは少々突飛に見えますが、「 $1 + 1 > 2$ 」としました。当然ながらこれは数式として正しいものではありませんが、「シナジー」ということを視覚的、直感的に表したかったのです。今回の受賞にまつわり、様々な出会いによるシナジーがいろいろな形で垣間見ることができます。本講演を通じて、その意図するところを明らかにできればと思います。

今回の受賞対象となった Miyoshi and Yamane (2007) による論文は、地球シミュレータを使っ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) に関するものです。アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) は高度なデータ同化手法として近年盛んに研究されており、LETKF はいくつか知られている EnKF のアルゴリズムの中の一つです。LETKF は、メリーランド大学の Hunt *et al.* (2007) により考案されました。他の EnKF 手法では、観測を一つ一つ逐次的に同化するので効率的な並列計算は困難です。一方 LETKF では、各格子点毎に独立して、複数の観測を一度に同化します。このため、LETKF は他の EnKF 手法と比べて特に並列計算効率が高いという特

徴があります。現業数値天気予報では並列計算機が使われており、今後も当分の間は並列計算機が主流でしょうから、実用性が高いアルゴリズムといえます。また、超並列スーパーコンピュータである地球シミュレータにも適しています。特に現業数値天気予報では、データ同化の計算時間短縮は非常に重要で、より素早い防災対応に資するほか、予報の計算により多くの計算量を割くなど選択の幅が広がります。本研究の成果により、気象庁の現業数値天気予報モデルに LETKF を適用することが可能となりました。まだ実用化には至っていませんが、現業利用に向けた開発ができるようになったのは、大きな進歩です。また、他にも様々な応用研究へと発展してきています。以下、本論文執筆へ至った経緯および本論文の主な研究内容と、その後の展開について紹介します。

2. EnKF の基礎知識

LETKF は高度なデータ同化手法である EnKF の一手法です。本論文の研究内容を紹介する前に、その前提となる EnKF について簡単に紹介します。より詳しくは、三好 (2005, 2008) による解説などを参照いただければと思います。

まず、数値天気予報の仕組みについて簡単にお話します。数値天気予報では、ある初期値から数値天気予報モデル (以下、単に「モデル」) を動作させ、予報値を得ます。モデルは大気状態を表す状態変数を入力として、出力するのが初期値、出力されるのが予報値です。予報を長く続けければ、予報値が自然の大気状態から離れていってしまいます。これは、長い期間の予報が当たらなくなることに相当します。この原因には、モデルの不完全性と初期値の不完全性の二つが考えられます。モデルの不完全性を減らすため、モデル改善の努力が重ねられています。しかし仮にモ

* 気象庁予報部数値予報課 (現: 米国メリーランド大学
大気海洋科学部). miyoshi@atmos.umd.edu

—2009年2月2日受領—

—2009年3月9日受理—

デルが完全だとしても、数値天気予報では初期値の誤差が成長し、予報が当たらなくなってしまうことが知られています。この事実は、カオス現象発見の父、故ローレンツ博士により「バタフライ効果」と呼ばれています (Lorenz 1993)。このため、より高精度な初期値が予報精度の向上には重要です。

では、より自然の大気状態に近い高精度な初期値はどうやって得られるのでしょうか。自然の大気状態は、観測することによって知ることができます。しかし、現在の観測網はモデルの状態変数を決めるには粗すぎるため、観測をそのまま初期値とすることができないばかりか、観測の隙間を補完することも困難です。また、観測自体にも誤差が含まれます。そこで、ある程度自然の大気状態に近い短時間の予報値（全球大気の場合は通常6時間予報値）と観測値とを組み合わせることで、初期値を作ります。このプロセスをデータ同化といいます。観測データをモデルの状態変数に同化させる、という意味があります。

データ同化の入力は予報値と観測値、出力はモデルの初期値（解析値とも呼ばれる）になります。予報値と観測値とは少なくともある程度は独立した情報を持ちますから、これらを組み合わせることで、より確からしい解析値が得られます。この際、「確からしさ」が重要な役割を果たします。なぜならば、解析値を求めるのに、予報値と観測値の確からしさ（より正確に言えば確率密度）の積をとるからです。このような推定法は、ベイズ推定として知られています。数学的には、解析値の確率密度が、予報値と観測値のそれぞれの確率密度の積に比例するということです。

確率密度関数にガウス分布を仮定すると、二つの独立な情報を組み合わせたときに得られる推定結果がより広がり小さいガウス分布となります。二つのガウス分布関数の積は、その双方よりも標準偏差の小さいガウス分布関数になるということです。気象のデータ同化では、通常、確率密度関数にガウス分布を仮定しており、多くの場合この仮定は十分よい精度で成り立っていると考えられています。

さて、このように重要な役割を果たしている確率密度関数ですが、その自由度はどのくらいでしょうか。たとえば1変数の確率密度関数を考えましょう。一般には1次元に連続的に分布した関数ですが、ガウス分布を仮定すると、平均値と標準偏差が与えられれば一意に決まります。 n 変数の場合は、平均値は n 個ですが、標準偏差に関しては変数間の相関も問題になり

ますから、 $n \times n$ の共分散行列が必要になります。モデルの状態変数の自由度は、通常1000万のオーダーです。ガウス分布を仮定しても、その2乗の自由度を持つことになり、共分散行列を直接扱うこと自体困難です。ましてや、誤差共分散行列の予報や解析を行うことは、現実的ではありません。

そこで、EnKFでは、予報値や解析値のばらつきを、限られた数のサンプル（アンサンブルメンバー）で代表させます。このサンプルを使って共分散を見積もり、ガウス分布を仮定したベイズ推定を行います。

従来のデータ同化手法（3次元変分法や最適内挿法）では、予報値のばらつきの共分散（予報誤差共分散という）を長期間の統計平均から求めます。時間的な平均値を使いますので、日々ダイナミックに変動する大気現象に応じた予報値のばらつきを考慮しません。このため、静的な方法と呼ばれます。一方で、EnKFは、日々予報されるアンサンブルメンバーがばらつきを表現するので、動的な方法であり、高度なデータ同化手法と呼ばれます。煩雑なためここでは解説を省きますが、気象庁を含む世界の現業数値予報センターの多くで運用されている4次元変分法も高度なデータ同化手法の一種です。しかし、予報値のばらつきの時間変動は、1回のデータ同化で扱う観測データの時間幅（データ同化窓と呼ばれる）の長さの予報でしか表現されません（詳細は、たとえば露木 2008を参照）。多くの場合、データ同化窓は6時間程度、長くても高々24時間程度ですから、これを超える時間スケールの現象に対応した予報値のばらつきは考慮されません。この点 EnKF は、アンサンブル予報は過去からずっと続いてきていますから、任意の長さの時間スケールの誤差も表現されます。

EnKFに特徴的なのは、データ同化とアンサンブル予報という現在は独立した二つのシステムを相補的に融合するという点です。EnKFのデータ同化は最適にばらついたアンサンブルメンバーを作り出し、これを使ったアンサンブル予報はよりよい予報値のばらつきを与えます。よりよい予報値のばらつきは、よりよいデータ同化に貢献しますから、データ同化とアンサンブル予報の間で正のフィードバックを実現します (EnKFの「 $1+1>2$ 」)。これにより、すでに現業センターで運用しているアンサンブル予報の有益性が増し、より効率的なシステム運用が可能となります。このように将来性に富んでいることも、近年盛んに研究されている理由のひとつだと言えるでしょう。

3. 本論文に至る経緯

受賞記念講演ということですから、本論文執筆に至った個人的な背景および経緯について簡単にお話ししたいと思います。

私は幸運にも2003年6月にメリーランド大学大学院に留学する機会を得て、そこでEugenia Kalnay教授と出会い、LEKF (Local Ensemble Kalman Filter, LETKFの基となったアルゴリズム, Ott *et al.* 2004)とも出会いました。また、SPEEDYモデル (Molteni 2003) という非常に高速な全球プリミティブ方程式モデルにも出会い、これを使って3次元変分法, Serial EnSRF (Serial Ensemble Square Root Filter: 逐次的アンサンブル平方根フィルタ, EnKFの一種, Whitaker and Hamill 2002), LEKFの三つのデータ同化手法を独自に構築し、お互いの性能や特徴を比較する研究を行いました。この成果に基づいて、2005年6月に博士論文 (Miyoshi 2005) を仕上げることができました。このシステムは、その後もメリーランド大学などで、教育や新しいアイデアを試す際などに簡単に扱えるシステムとして広く使われています。メリーランド大学のデータ同化研究チームは、物理学のEd Ott教授、数学のJim Yorke教授といった各界で著名な教授陣を擁した学際的な研究チーム“Weather-Chaos Group”で、そこで考案されたLEKFおよびLETKFは異分野間の「 $1 + 1 > 2$ 」を具現化したものです。この間、このチームの一員として学際的な研究に関与できたのはとても幸運でした。Kalnay先生との出会い、またSPEEDYモデルとの出会いは、本論文に至る最初の「 $1 + 1 > 2$ 」だったと思います。

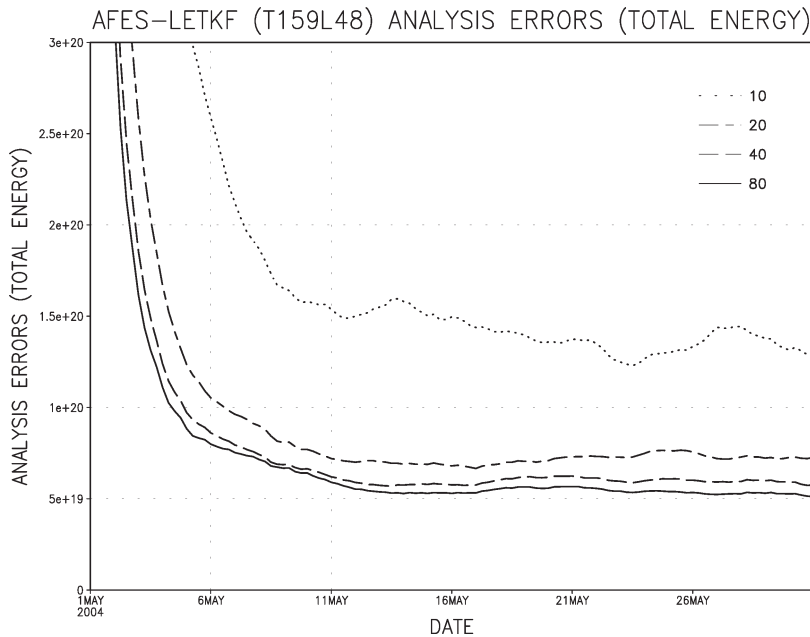
さて、2005年6月末に帰国して7月1日に数値予報課に復帰し、すぐの7月7日七夕の日に、数値予報課コロキウムで留学の成果報告を行いました。その際、本論文の共著者である山根省三さん (当時千葉科学大学講師) にも聴講いただき、コロキウム後に立ち話をして、地球シミュレータを使ったEnKFをやってみてはどうだろうか、という話が始まりました。SPEEDYモデルという現業モデルとは程遠い低解像度のモデルでしか試されていない状態だったので、気象庁で実用化に向けた開発をする前に、高解像度モデルでもちゃんと動くのか、使えるのか、調べる必要がありました。というのも、解像度が増えるとモデル変数の自由度が増えます。自由度が増えると、このばらつきをサンプルするアンサンブルメンバー数が多く必

要になる可能性があります。解像度の増加に伴いあまりに多くのメンバー数が必要となれば、実用的ではありません。この問題については未解決でしたから、高解像度モデルで様々なメンバー数を使った多くの実験をすることが必要でした。また、SPEEDYモデルでは並列計算を行っていませんでしたので、LETKFの並列効率性を実際に確かめることも重要でした。地球シミュレータはこのような問題に取り組むのに適しています。LETKFの実用可能性を探るために地球シミュレータを利用できたことは、私や山根さんにとっても、気象庁にとっても、そして願わくは地球シミュレータにとっても、大変幸運なことでした。山根さんとの出会い、地球シミュレータとの出会い、気象庁+地球シミュレータ、どれをとっても本論文の実現には不可欠な大きな「 $1 + 1 > 2$ 」でした。

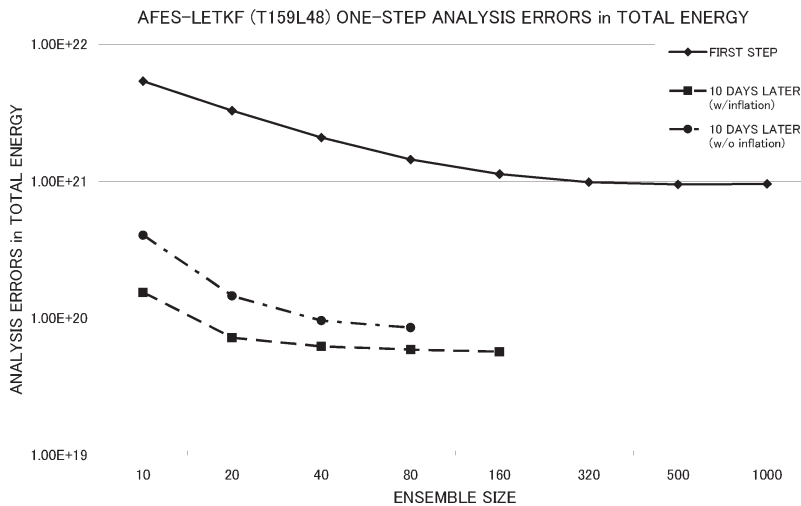
4. 本論文の主な成果

ここで、本論文で得られた主な成果について紹介します。本論文では、LETKF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システムを使って、様々な実験を行いました。AFESの解像度はT159/L48としました。格子点数にすると $480 \times 240 \times 48$ で水平解像度約80 km、当時現業センサーが実際に運用していたアンサンブルシステムに匹敵する解像度です。

まず実用化に向けて一番の課題であった、解像度の高いモデルに適用した場合に必要なアンサンブルメンバー数に関してです。メンバー数を10, 20, 40, 80と変化させてデータ同化実験を行うと、第1図に示すような誤差の時系列が得られました。この際、観測数は100格子点につき1点をモデル格子空間の中で一様に配置しました。全格子点の1%を観測していることとなります。観測値は、AFESの長期積分で得られた格子点値に、設定した観測誤差標準偏差の正規分布乱数を足して作りました。こうすることでモデルに系統的な誤差がないこととなり、完全モデル実験と呼ばれます。第1図を見てまず驚いたのは、10メンバーでも誤差が小さく減少し、正常に動作していることです。Miyoshi (2005) によるSPEEDYモデルの実験でも、10メンバーでやっと動くかどうかという状況でしたから、ずっと高解像度なAFESでも10メンバーで動いたことは期待を持たせます。メンバー数を20に増やすと、誤差は大きく減少しますが、40, 80と増や



第1図 アンサンブルメンバー数を10, 20, 40, 80 (凡例参照)としたときの平方根平均自乗誤差 (トータルエネルギーノルム) の時系列. Miyoshi and Yamane (2007) の Fig.2を転載.



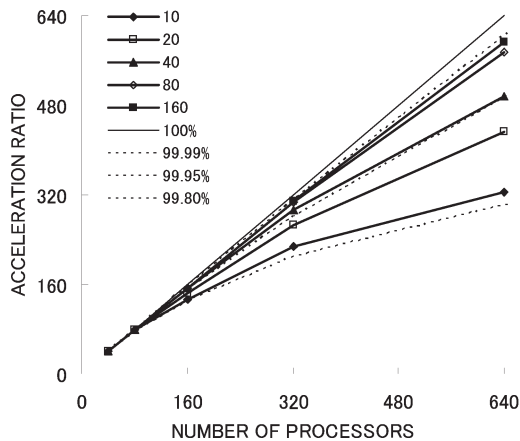
第2図 解析誤差の平方根平均自乗誤差 (縦軸, トータルエネルギーノルム) のアンサンブルメンバー数 (横軸) への依存性. 実線は最初の同化後の誤差, 破線 (2種類) は10日間の予報解析サイクル後の誤差を示す. 1点破線 (●記号) および破線 (■記号) は, それぞれ共分散膨張なし, ありの場合を示す. Miyoshi and Yamane (2007) の Fig.3を転載.

してもそれほど大きく誤差は減少しません。地球シミュレータという大規模計算機の特長を生かし、1000メンバーという大アンサンブルの LETKF の計算も行いました。この結果、第2図のように、解析誤差のメンバー数依存性が得られました。縦軸は対数スケールですから、最初の同化の直後では、80メンバーあたりまではほぼ指数的に誤差が減少していることが分かりますが、これを超えると誤差の減少がゆっくりとし始め、320メンバーを超えてから、ほとんど誤差が減少していません。予報解析サイクルを10日間行った後では、メンバー数を増やすことによる誤差の減少がもっとゆっくりしています。結論として、高々40メンバー程度で良好に動作し、それよりメンバー数を増やしてもコストに見合った効果は期待できないと言えます。現在気象庁が現業運用するアンサンブル予報システムのメンバー数は51ですから、現在のアンサンブル予報システムでも LETKF が良好に運用できると期待できます。メンバー数依存性以外にも、局所化スケールといった他の LETKF のパラメータ依存性も調べましたが、ここでは省略します。

次に重要なのが、計算時間です。アンサンブルメンバー数と同じ数のノード数を使うと、大体200秒程度

第1表 各ノード数およびアンサンブルメンバー数における計算時間 (秒)。

Ensemble size	5 nodes	10 nodes	20 nodes	40 nodes	80 nodes	160 nodes	200 nodes	240 nodes
10	382	195	115	67	47			
20	714	360	197	107	66			
40	1389	708	360	189	112			
80		1583	824	413	220			
160				1205	626	336		
320						1139		
500							2270	1924
1000							10595	



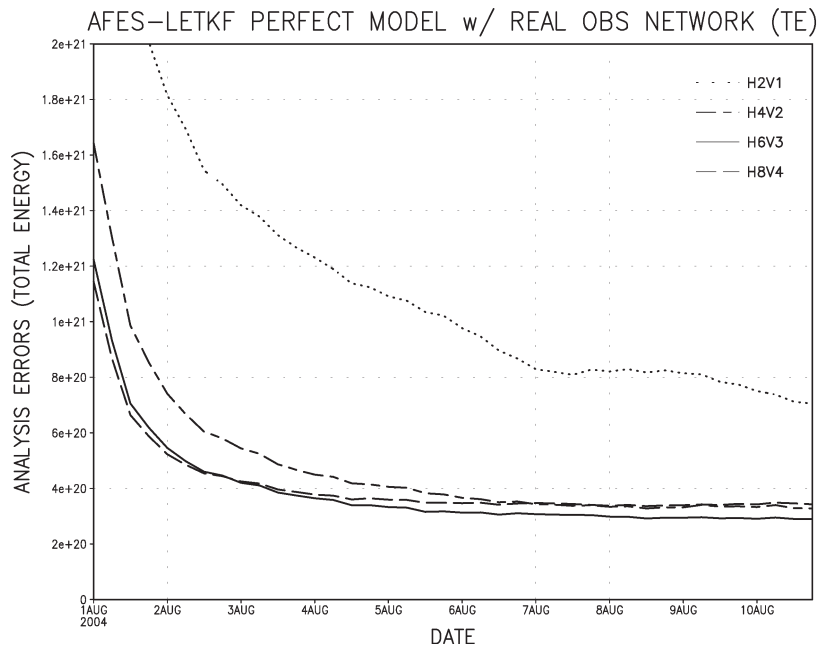
第3図 計算機のプロセッサ数（横軸）に対する1プロセッサ利用時の計算時間に対する高速化率（縦軸）。太実線は凡例に示すメンバー数に対応した実測値、細線は各並列化率に対応した理論値をそれぞれ示す。Miyoshi and Yamane (2007) の Fig.10を転載。

で計算できることが分かりました（第1表）。並列化率も高く、第3図に示すように、40メンバーではおよそ99.95%、160メンバーでは99.99%の並列化率を実測しました。このように、計算時間の面でも実用可能であることを確認するとともに、実際に優れた並列計算性能を持つことを示しました。

以上の結果は実用化に向けて非常に重要な発見でしたが、観測網が全球に限らず分布しているのは現実的ではありません。そこで、現実の観測網を適用した実験を行いました。実際の観測値を使うとモデルに誤差が混入し、問題が一気に難しくなります。そこでまずは完全モデルを仮定したまま、実際に気象庁の現業数

値予報システムで同化された観測網を適用しました。現実の観測地点および観測誤差を使って、AFESの長期積分から擬似的な観測値を生成し、これを同化しました。ただし、衛星による放射輝度観測の同化は取り扱いが難しいため、本研究では除外しました。先の実験で40メンバーで良好な動作を確認しましたから、以下の実験ではメンバー数を40に固定し、LETKFの重要なパラメータである局所化スケールを変えて実験しました。その結果、現実の空間非一様な観測網でも良好に動作することを確認しました（第4図）。また、あまり小さすぎる局所化スケールでは、性能が著しく悪化することが分かりました。いくつか試した結果、局所化スケールのパラメータを水平6格子、鉛直3格子に設定した場合に最もよい性能を与えることが分かりましたので、以下ではこのパラメータを選ぶことにしました。

最後に、現実の観測値を使った実験を行いました。いよいよ本研究も最終段階、現実大気の日データ同化実験です。2004年8月1日からデータ同化を始め、2004年8月16日00 UTCの海面更正気圧をプロットすると、LETKF解析値は当時の気象庁現業解析値と非常によく似ていることが確認できました（第5図上段）。差をとると、南極では大きな差がありますが、他は概ね0.5 hPa以内（海面更正気圧）となっています（第5図右下）。解析値のばらつきは、LETKFのアンサンブルによって定量的に表現されます。アンサンブルの標準偏差に相当するアンサンブルスプレッドを見ると、やはり南極で大きくっており、実際の誤差をよく表していることが分かります（第5図左下）。LETKF解析値、気象庁現業解析値、およびNCEP/NCAR再解析値（Kalnay *et al.* 1996）を初期値としてAFESモデルを走らせ、それぞれの解析値に対す



第4図 現実の観測網を用いた実験での解析誤差の平方根平均自乗誤差（トータルエネルギーノルム）。各線は異なる局所化パラメータの設定に対応し、たとえばH2V1は水平2格子、鉛直1格子の局所化スケールであることを示す。Miyoshi and Yamane (2007) のFig.12を転載。

る誤差を検証したところ、衛星による放射輝度観測を同化していないにも関わらず、LETKF 解析値は精度の高い予報を実現することが分かりました（第6図）。これにより、実際の観測データを同化しても、LETKF は良好に動作し、さらに NCEP/NCAR 再解析といった現業システムによる解析値に少なくとも匹敵する性能が得られるという結果が得られたのです。

5. 本論文以降の展開

本論文により、現業数値天気予報システムに匹敵する解像度のモデルでも高々40メンバー程度で良好に動作することが分かり、さらに現実の観測データの同化にも成功しました。現業システムを考える場合、システムの動作安定性が非常に重要です。EnKF では、アンサンブルのばらつきが予報誤差を表現しており、これが予報解析サイクルによって最適に保たれている必要があります。しかし、長期間運用した経験はありませんので、本論文で行ったような1ヶ月程度のサイクルでは良好に動作することが確かめられていても、1年後にも最適なアンサンブルが保たれているかどうか、保証はありません。そこで、Miyoshi *et al.*

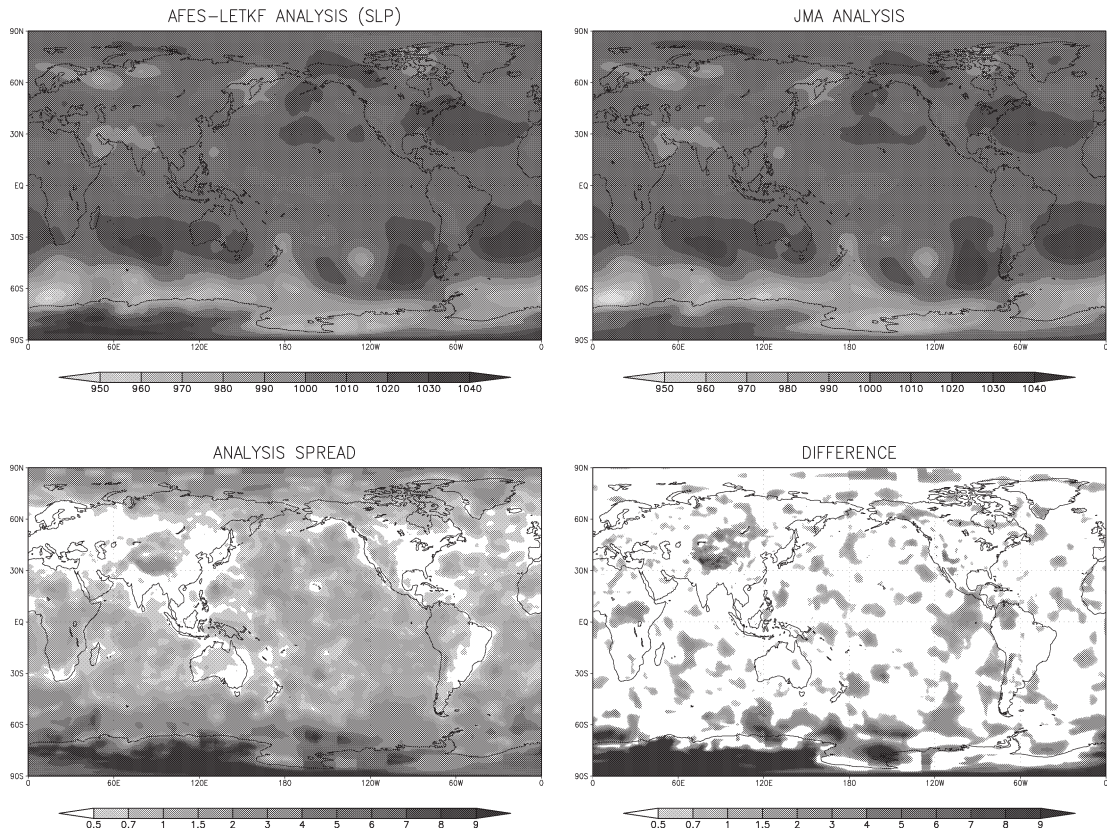
(2007 a) は、本論文の実験システムをそのまま使って、2005年夏から1年以上に渡って現実の観測データを同化することを試みました。これによって得られた解析場を NCEP/NCAR 再解析と比べてみると、全期間に渡って同程度の差が保たれていることが確認されました。つまり、1年以上の安定動作を確認したのです。

また、本論文では、LEKF から引き継いだ局所化パッチを用いた LETKF を使っていました。局所化パッチの大きさは格子点座標で一樣な矩形となっており、格子点間の経度方向の物理的な距離が小さくなる高緯度では問題がありました。これについ

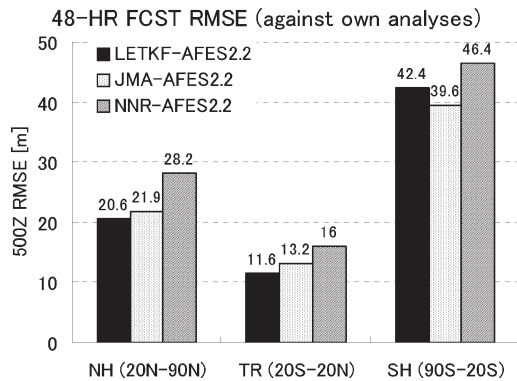
ても、Miyoshi *et al.* (2007 b) が物理的距離のみによる局所化を行う新しい LETKF の実装法を開発し、解決しました。

以上の地球シミュレータで行った研究成果により、気象庁で実際の現業モデルに対して適用する準備が整いました。2006年6月には気象庁非静力学メソモデルに適用し (Miyoshi and Aranami 2006)、その後気象庁全球モデルにも適用して、気象庁の現業実験システムに組み込みました。Miyoshi and Sato (2007) によって衛星放射輝度観測データの同化も可能となり、現業システムと同じだけの観測データを使えるようになりました。これにより、現業システムとの直接比較が可能となりました。その後も更なる改良を重ねながら、実用化に向けた研究が進められています。

このような気象庁での現業利用を視野に入れた研究とは別に、地球シミュレータを使った研究も同時に進められてきました。その中でも重要なのは、Miyoshi *et al.* (2007 a) によって1年以上の現実の観測データを同化して得られたアンサンブル解析データを、実験的アンサンブル再解析 ALERA (AFES-LETKF Experimental Ensemble Reanalysis) と名づけて広



第5図 実際の観測データを同化した場合の2004年8月16日00 UTCの海面更正気圧解析値（左上）およびそのアンサンブルスプレッド（左下）と、気象庁の現業システムによる海面更正気圧解析値（右上）および本実験との差（右下）。Miyoshi and Yamane (2007) の Fig.15を転載。



第6図 AFESを使ったLETKF解析値、気象庁の現業解析値、および、NCEP/NCAR再解析値をそれぞれ初期値とした場合の500 hPaの48時間予報の平方根平均自乗誤差の2004年8月の1ヶ月間平均値。Miyoshi and Yamane (2007) の Fig.16を転載。

く公開したことです。この再解析データは、アンサンブルである点がこれまでのものと違います。つまり、解析誤差を反映したアンサンブルのばらつきが得られます。これまでの再解析データは、主に現業数値予報センターの変分法データ同化システムによって作られてきたため、解析値のみが得られます。得られた解析値がどの程度の誤差を持っているか、定量的な情報は得られません。ALERAでは、解析値だけでなくその解析誤差の定量的な評価であるアンサンブルスプレッドという新たなプロダクトも提供されています。アンサンブルスプレッドの時系列を解析するなど、新たな観点での研究も始められており、今後の成果に期待したいと思います。

このほか、本論文が基となつて、観測研究とモデル研究の橋渡しとなるような研究も始まってきています。特別観測を実施した研究者から観測データを提供いただき、この観測データのインパクトを調べる実験

も行いました (Moteiki *et al.* 2007). このほか、北極海のブイは海水上に設置されており、地球温暖化で北極海の水水面積が減ると、著しい観測網の減少が予想されます. Inoue *et al.* (2009) は、AFES-LETKF 実験システムを使って北極海のブイ観測データのインパクトを調べました. これらの観測データのインパクト調査では、これまで観測データを排除した実験 (data denial test) を行ってきました. しかし最近、Liu and Kalnay (2008) は、単にアンサンブル予報を使って観測データの予報へのインパクトを調べる手法を開発しました. data denial test を必要とせず効率のため、より簡単に観測データのインパクト調査ができるようになります. 本論文で構築したシステムを使って、この手法をより現実的な場合で試すことも可能です. 今後も更なる研究の広がりを期待します.

6. おわりに

気象学では、観測およびモデルという大きな二つの方法論が主流となっています. データ同化は、この二つを結びつける橋のようなものだと考えています. 観測研究とモデル研究の「1 + 1 > 2」を生み出す可能性を秘めているといえるでしょう. また、データ同化は統計数理的手法ですから、数学や物理学、計算機科学といった気象学の枠を超えた結びつきも重要です.

本論文では、実際の天気予報の改善を最終目標として、EnKF の実用化に向けた重要な課題に取り組みました. これを実現するには、いくつかの貴重な出会いが中心的な役割を果たしました. 「1 + 1 > 2」となるような良い出会いがあって初めて成しえたものだと思います.

本論文の成果がきっかけとなって新しい出会いを生み、これが次の研究へとつながり、その成果がさらに新しい出会いを生む. このような良い出会いを繰り返し、データ同化という異分野間を結ぶ橋をより強固なものにしながら、より多くの「1 + 1 > 2」を、人と人との間でも、研究分野間でも、生み出していきたい. そのような研究を続けられるよう、今後も努力したいと思っています.

最後になりますが、本論文の研究を成し遂げるには、様々な方々のご支援等が欠かせませんでした. すべてのお名前を挙げることはここでは適いせんが、本研究にとって特に重要だった方々のお名前を挙げさせていただきます. メリーランド大学の Eugenia Kalnay 教授には、大学院時代にご指導いただき、ま

たその後も折々意見や情報を交換させていただけたのは、研究を進める上で大いに役立ちました. 佐藤信夫 気象研究所長には、メリーランド大学への留学を薦めていただき、これが Kalnay 先生との出会いのきっかけとなりました. 共著者の山根省三准教授 (同志社大学) とは密に連絡をとりながら、本論文の研究に関して一緒に仕事をさせていただきました. 本研究のバックグラウンドとなった地球シミュレータ共同プロジェクトのリーダー、大淵 済主任研究員をはじめ、プロジェクトメンバーの皆様方、特に榎本 剛研究員 (地球シミュレータセンター) には大変お世話になりました. このほか、気象庁数値予報課の皆様を含め、気象庁でお世話になった皆様には、様々な面でご支援等いただきました. これらどれもが、今回の研究には不可欠なものでした. この場を借りて、深く感謝し、お礼申し上げます. どうもありがとうございました.

謝 辞

本受賞対象論文は、気象庁、海洋研究開発機構、千葉科学大学の共同研究の成果である. また、数値実験は、海洋研究開発機構の支援により、地球シミュレータを使って行われた.

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.
- Inoue, J., T. Enomoto, T. Miyoshi and S. Yamane, 2009 : Impact of observations from Arctic drifting buoys on the reanalysis of surface fields. *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne and D. Joseph, 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Liu, J. and E. Kalnay, 2008 : Estimating observation impact without adjoint model in an ensemble Kalman filter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1327-1335.
- Lorenz, E. N., 1993 : The Essence of Chaos. University of Washington Press, 240 pp.
- 三好建正, 2005 : アンサンブル・カルマンフィルターデータ同化とアンサンブル予報の接点一. *天気*, **52**, 93-

- 104.
- Miyoshi, T., 2005 : Ensemble Kalman filter experiments with a primitive-equation global model. Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, 197 pp.
- 三好建正, 2008 : カルマンフィルタ. 気象学におけるデータ同化. 気象研究ノート, (217), 69–95.
- 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., **135**, 3841–3861.
- Miyoshi, T., S. Yamane and T. Enomoto, 2007 a : The AFES-LETKF Experimental Ensemble Reanalysis : ALERA. SOLA, 3, 45–48.
- Miyoshi, T., S. Yamane and T. Enomoto, 2007 b : Localizing the error covariance by physical distances within a local ensemble transform Kalman filter (LETKF). SOLA, 3, 89–92.
- 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.
- Moteki, Q., R. Shiroyoka, K. Yoneyama, B. Geng, M. Katsumata, T. Ushiyama, H. Yamada, K. Yasunaga, N. Sato, H. Kubota, K. K. Reddy, H. Tokinaga, A. Seiki, M. Fujita, Y. N. Takayabu, M. Yoshizaki, H. Uyeda and T. Chuda, 2007 : The impact of the assimilation of dropsonde observations during PALAU2005 in ALERA. SOLA, 3, 97–100.
- 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, 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.
- 露木 義, 2008 : 変分法. 気象学におけるデータ同化. 気象研究ノート, (217), 33–68.
- Whitaker, J. S. and T. M. Hamill, 2002 : Ensemble data assimilation without perturbed observations. Mon. Wea. Rev., **130**, 1913–1924.

“ $1 + 1 > 2$ ”

Takemasa MIYOSHI*

* *Numerical Prediction Division, Forecast Department, Japan Meteorological Agency, 1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan (Present affiliation : Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA)*

(Received 2 February 2009 ; Accepted 9 March 2009)
