

第5回 WMO データ同化シンポジウム参加報告

榎本 剛^{*1}・茂木 耕作^{*2}・伊藤 耕介^{*3}

第5回 WMO データ同化国際シンポジウム (WMOA5) は、2009年10月4～9日、豪州メルボルンで開催された。前回までは気象学・海洋学の観測データ同化に関する国際シンポジウム (WMO International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography) の名称で過去に1990年、1995年、1999年、2005年と開催されてきた。4年ぶりとなる今回は、国際科学組織委員会が近年のデータ同化分野の広がりやを考慮し、より一般的な WMOA という名称に変えての開催となった。各国現業機関を中心に全体で約200人の参加があり、日本からは、気象庁、気象研究所、海洋研究開発機構、統計数理研究所、京都大学、九州大学、東北大学から18名の参加があった。この報告では、アンサンブル法と変分法という2つの観点から見た印象をそれぞれまとめる。発表された内容として紹介するものには一部重複もあるが、光の当て方で異なる側面が多分にあり、両者の融合が進みつつあることを感じて頂ければ幸いである。

1. アンサンブル法の観点から

茂木と榎本 (JAMSTEC) は、前の月に行われた第3回 THORPEX 国際科学シンポジウムに参加したので、WMOA5への参加には、申し込み当初やや消極的であった。しかし本シンポジウムの国際科学組織委員会のメンバーである三好 (メリーランド大学) が

「雑誌で言えば Nature のようにインパクトを与えるレベルが違う」と半ば強引に勧めてきたため、気がつくとすっかりその気にさせられてメルボルンへやって来ていた。WMOA に参加したのは今回が初めてであるが、海外在住者も含めると思ったよりも日本人研究者の数が多く驚いた。データ同化分野において日本の存在感が随所で強く感じられ、初参加にも拘わらず終始心強い気持ちで会議を楽しむことができたように思う。

WMOA は4～6年に1度の大きな会議なので、各回で花形となっていた手法を眺めていくと、時代の流れが俯瞰できる。19年前に遡る初回では、4次元変分法 (4D-Var) が計算コストの高さから考えると夢の話だった。それが前々回 (1999年) あたりから ECMWF でいち早く現業利用されたこともあり花盛りとなった。その頃ぼつぼつと出始めたアンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) は、当時懐疑的な見方が多かったそうであるが、前回 (2005年) でようやく半分くらいの発表件数になった。そして今回は、その EnKF が発表件数から見ても花形となっていた。無論、4D-Var は現業利用によってより洗練されたデータ同化手法として、海洋・大気の両分野で依然重要視されている。しかしながら、やや守勢に立ち始めているように感じられたことも確かである。C. Snyder (NCAR) や P. J. Van Leeuwen (レディング大学) は、さらに一歩進んでモデルの非線型性及び誤差分布の非ガウス性を考慮する粒子フィルタに関する発表をしていたが、次々回くらいには EnKF が守勢に立たされる番かも知れない。M. Zupanski (コロラド州立大学) が雲物理過程の同化のために WRF に適用した最尤アンサンブル・フィルタも、観測演算子の非線型性を考慮できるので、今後の発展が期待される手法である。

*1 海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター。
eno@jamstec.go.jp

*2 海洋研究開発機構地球環境変動領域。
moteki@jamstec.go.jp

*3 京都大学理学研究科。itokosk@kugi.kyoto-u.ac.jp

© 2010 日本気象学会

大気化学のように変数が多いためにアジョイント作成コストが極端に高かったり、アジョイント作成そのものが困難であったりするものについてはEnKFの利点が強く認識されつつある。実際、大気大循環モデルCAMや領域大気モデルWRFに適用したA. Arellano (NCAR)の講演ほか、ポスター発表が多数(出牛, 気象研; 関山, 気象研; 宮崎, JAMSTEC等)あった。

J. Whitaker (NOAA)は、EnKFの発展を振り返り、今後の課題について議論した。面白いと思った研究は、1930年代の地上気象観測網相当の観測データのみ同化して実施された長期再解析である(Whitaker *et al.* 2009)。この中では、3次元変分法(3D-Var), 4D-Var, EnKFが比較されていた。4D-VarとEnKFとは、精度がほとんど変わらず3D-Varよりも格段に精度がよかった。このことは、これら高度なデータ同化手法を用いれば、観測の少ない領域でも精度の高い解析場が得られることを示している。この知見は、大気に比較して観測の少ない海洋の解析では高度なデータ同化手法がより有効であることを示すものだと感じた。フロートや係留ブイによる鉛直の情報無しにどの程度海洋の内部まで再現できるのか、機会があれば試してみたいと思った。J. Whitakerは、EnKFの課題として、解析場のバランス、メンバー数不足によるサンプリング誤差、モデルの系統的誤差をあげていた。J. Kepert (豪州気象局)はEnKFで風の代わりに流線関数と速度ポテンシャルを制御変数として用いると解析インクリメントの力学的バランスが改善され、ノイズが少なくなることを示した。三好(メリーランド大学)は、40変数のローレンツモデルにEnKFを適用して、通常は対角行列と仮定して扱われる観測誤差共分散行列の非対角成分を考慮することの影響を調べた。O. Talagrand (フランス気象力学研究室)からかなり強い批判らしきコメントが長々と述べられたが、かなり興奮しておられたので(恐らくは会場の多くが)よく聞き取れなかった。後で聞くところによれば、誤差共分散の期待値を求める統計的關係式の導出において用いた仮定に対するそもそも論を述べていたようである。批判ではあったが今回の会議でも強い反響を受けた講演であり、それだけ野心的取り組みであるということは皆が理解したのではない。

J. Whitakerは4D-VarとEnKFが同様な性能であると述べたが、Whitaker *et al.* (2009)の共著者のひ

とりであるJ. Thépaut (ECMWF)は結果の解釈が異なっていた。J. Thépautの発表では、4D-Varがわずかに有利であると主張していた。4D-VarにはECMWFのIFS, EnKFにはIFSより低解像度のNCEPのGFSを用いた比較であり、結果の解釈は単純にはできない。J. Thépautは、4D-Varが高精度であったのは、モデルの解像度が高いためではなく、モデルあるいは同化手法が優秀であるためだと述べた。その根拠として、より高解像度(低解像度ではなく)で4D-Varを動かして大差なかったことをあげた。榎本は「それはおかしい。IFSとGFSの解像度を揃えなければ対等な比較ではない。」と思い、真っ先に手を上げたが、同様の指摘がE. Kalnay (メリーランド大学)から先に出た。

4D-Varが守勢であることを決定的に印象づけたのは、L. Isaksen (ECMWF)のアンサンブルデータ同化に関する発表であった。観測や海面水温に擾乱を与えて4D-Varによる複数の並列したデータ同化を行い、流れに応じたより適切な背景誤差を見積る工夫を紹介した。ECMWFは、EnKFの利点を認識しながらも表立ってそのものを扱うことには、現業4D-Varの手前でなんとなく壁を感じているような雰囲気は随所で受け取れ、聞いていてもどかしい気持ちになった。今後の課題としていたEnKFとの対等な比較結果に注目したい。M. Buehner (カナダ気象局)は、96メンバーのEnKF, 4D-Var, EnKFから得られる背景誤差を使った4D-Var(ハイブリッド法)について、モデル解像度・同化する観測を統一した比較を行い、EnKFと4D-Varの精度は同程度で、ハイブリッド法が最も精度が良いことを示した。フランス気象局ではハイブリッド法を既に現業に取り入れており(L. Berre, フランス気象局), 4D-Varの進化という観点から見ればハイブリッド法の進化はこの会議における大きな目玉の一つであった。

P. R. Oke (CSIRO)の講演は、よく「オキー」と間違っただけで発音される自分の名前の正しい発音「オーク」を覚えてもらうために、コココーラの缶に描かれたCoke(コーク)のロゴからCを消した絵を見せるなど、ユーモアあふれるものであったが、海洋のアンサンブル最適内挿法(EnOI)に関する研究内容も興味深いものであった。EnOIは、既に行った長期シミュレーションからある程度の期間でモデルが取りうる状態のアンサンブル標本を100メンバーほど抽出して、背景誤差の構造を与える。当然これはその期間を

代表する標本であって、EnKF で扱うような非線型モデルで時間発展させた日々ダイナミックに変動する力学場を反映する (Flow-dependent) アンサンブル標本ではない。それでも陸地分布と季節性を反映した誤差構造が考慮される。また、EnOI の計算コストは非常に低い (コストのかかるアンサンブル予測が不要) ので、その分モデルの高解像度化に計算コストを割り振れることが大きな利点である。実際には、水平解像度 $1/10^\circ$ 、水深200m までは10m の鉛直解像度での結果を示しており、沿岸流付近の渦構造など高解像度が求められる海洋のデータ同化には有効な選択肢であると主張した。JAMSTEC でも OFES を用いた50年を超える長期ランを持っているので、これを活用した手法を検討してみる価値はあると思った。

D. Dee (ECMWF) の再解析に関するレビューは大変勉強になった。どの解析データセットがどんな手法を用いて作られているかということは、意外と知らずに使っているものである。講演中にも指摘があったが、再解析≒観測と思って再解析は使われている。榎本は、10年ほど前の学生時代に ERA-15 を初期値として積分をしようとしたが、ノイズが多く出てうまくいかなかった。ERA-15再解析は、力学的にバランスしていないのだということを思い知らされた。ERA-15 の同化手法はOIなので、重力波のコントロールは別にしなければならないことも納得できる。ECMWF では、ERA-40終了2002年以降の再解析 ERA-Interim で既に4D-Var を適用しているが、それでも期間によっては必ずしも最高の精度が保たれているわけではなく、長期再解析の難しさを示していた。

古林 (気象庁) は、TL319L60解像度での4D-Var による1958-2012年の再解析 JRA-55 (日本語読みと英語をうまくミックスしたジェイラ・Go! Go! という愛称は会場を沸かせていた。第1図参照) の計画を紹介した。セミ・ラグランジュ法、変分バイアス補正、衛星ごとにチューニングしなおした誤差共分散などの適用により、JRA-25よりもさらに大幅に精度が上がるが見込まれている。2010年に計算を開始し、2013年の早い時期でのデータ公開を目指している (ECMWF では、2013年計算開始で TL511解像度での4D-Var による1938-2012年の再解析 ERA-75が計画段階にある)。

榎本 (JAMSTEC) は、アンサンブル再解析 ALERA を分析し、解析のアンサンブル・スプレッドに見られた顕著現象の前兆について、台風発生、西風



第1図 語り口は飄々としながらもユーモアを交えて聴衆を沸かせた古林 (気象庁)。

バースト、モンスーンのオンセット、成層圏突然昇温等例を挙げながら紹介した。EnKF の第一人者である E. Kalnay 先生は、一番前でひとつひとつうなずきながら聞いて下さり、成長モード育成法により作られた擾乱と共通している点を指摘して下さい。現象に応じて時間発展する解析誤差場という EnKF による新たな付加価値を紹介できたのではないと思う。セッション終了後には、三好と C. Snyder を交えて解析誤差が現象の発生を示唆することには一般性があるようだが、どのように説明できるのかという点について議論を楽しむことができた。擾乱の線型理論の範囲内では、誤差の成長は不安定性を示すことは自明であるが、個別の現象にはそれぞれ物理的なメカニズムがあると考えられ、さらに詳しく調べる必要がある。

L. Cucurull (NOAA) は、GPS 掩蔽法により取得された屈折率データの同化について報告した。屈折率は、電離圏や散乱の効果を見れば、気温、気圧、水蒸気圧の予報値から簡単に計算できる。屈折率は屈折角の鉛直に積分 (Abel 変換) したりトリーバル量なので、直接同化ではないが効率的かつ高精度に

GPS データを利用できると述べた。対流圏下層にあったバイアスの問題は解決されたとのことである。

ここまで口頭発表からいくつか取り上げて紹介したが、ポスター発表からもいくつか目を引いたものを紹介したい。L. Torrisi (イタリア気象局) は、LETKF によるヨーロッパ領域解析の現業化へ向けた取り組みを紹介した。LETKF は、対ゾンデ検証のスコアでは好成績をすでに示しているが、中層でモデル誤差に起因するやや大きなバイアスが残っていることが課題とのことである。この他、3D-Var で計画の中層大気を対象とする衛星観測の効果を調べる実験 (OSSE) を行った Y. Nezlin (トロント大学) や 4D-Var のアジョイントを利用して衛星のチャンネルごとに同化することの利益を定量化した R. Todling (NASA) は、コアタイムやコーヒープレイクの間、常に数人の研究者に囲まれ、活発に議論していた。この2人にポスターの位置が挟まれた茂木は、聴衆の獲得に非常に苦勞する羽目になった。

茂木 (JAMSTEC) は、観測の感度を調べる従来の観測システム実験に対する警告として、スプレッドを用いた有意検定によってモデルが生じさせるノイズ的な偽インパクトを除去する必要性を主張した。具体的には、対象とする観測の解析精度に対する貢献度の指標として、ALERA における観測の同化・非同化によるスプレッド差のうち95%有意な差のみを抽出して定義することを提案した。熱帯インド洋上で得られた実際のラジオゾンデについて評価すると、解析精度が

向上する領域は松野・Gill パターンと似た形状を持ち、力学現象と対応付けて説明可能な指標であることを示した。両隣の人気研究者のポスターに挟まれて苦戦しながらも、興味を持ってくれた15人に対しての手応えは上々であった (第2図)。中でも、開会の挨拶を述べていた N. Lomarda (WMO) から将来の観測システム設計に生かせるよう頑張るよう論文化して欲しいと激励を受けたことには、非常に勇気づけられた。

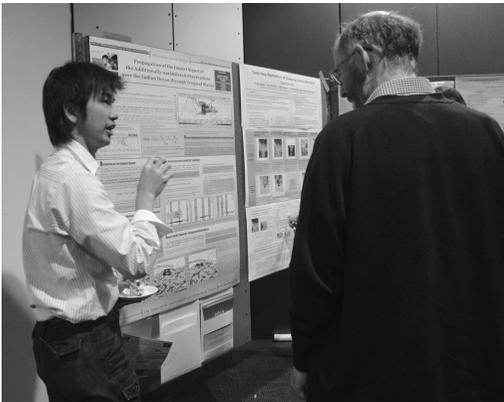
1週間にわたって朝から晩まで B と H (同化の式で共通して用いられる背景誤差共分散と観測演算子の記号) を見続けることは、もうしばらくないであろうが (いや日々格闘しなくてはならないかもしれない)、終わってみれば非常に充実感を感じられた会議であった。三好の当初強引に感じられた勧誘にも、今では感謝している。

この会議中に榎本・三好・茂木を発起人としたデータ同化に関する情報共有のための Google グループ (メーリングリストのようなものだがファイル共有やページ作成が可能) enkf を立ち上げた。興味のある会員諸氏は、著者にコンタクトをとってグループに参加して頂ければ幸いである。(榎本 剛・茂木耕作)

2. 変分法の観点から

伊藤 (京都大学) は、普段、変分法を用いた大気海洋相互作用に関する同化実験を行っている。毎年むつ市で夏に開催される「データ同化夏の学校」には過去3回参加したことがあったのだが、データ同化の国際会議に参加するのは今回が初めてで、世界のデータ同化業界の空気を感じ取る意味で今回の会議は非常に待ち遠しいものであった。実際、会議のレベルは非常に高く、自分の不勉強を強く思い知らされた。と同時に、普段論文の中でしかお会いしない大先生方がそこかしこを (当たり前だが) 闊歩されているのを見て、恥ずかしながら心が弾んでしまった。

会議に参加して率直に思ったことは、変分法に関する研究は、ますます多方面へと発展を見せているということである。多数の発表があったが、その一部を紹介することにする。X.-Y. Huang (NCAR) は、WRF にオプションで使用できるデータ同化システム WRFDA について紹介した。WRF バージョン3.1からは WRF 用の4D-Var システムが追加されており、Web 上 (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/>) にはマニュアルやチュートリアルなども整備されている。これまで4D-Var は、現業機関や一部



第2図 両隣の人気ポスターに聴衆を奪われて苦戦しながらも A. Lorenc (英国気象局) に必死のアピールをかける茂木 (JAMSTEC)。

の同化を専門とするグループ以外の研究者から見ると敷居が高いと思われがちであった。しかし、WRFのようにユーザーの多いコミュニティベースなモデルで、誰にでも気軽に試すことができるようになったことは特筆に値する。澤田（気象庁）からは、アジョイントモデルに湿潤過程を考慮した現業データ同化システム JNoVA について紹介があった。この他にも4D-Var は、ROMS を用いた領域海洋解析（G. Broquet, パリエスト大学）、大気化学データの同化（H. Elbern, ケルン大学）や海洋生態系モデル駆動のための海洋再解析（石川, 京都大学）に広がりを見せている。

4D-Var における新展開としては、弱拘束（weak constraint）の現業化及びアンサンブルランの活用が挙げられる。モデルが線形でかつパーフェクトであることを仮定する場合には、同化ウィンドウを長くすることで4D-Var の性能が向上することが知られている。しかし、パーフェクトモデルの仮定は一般には正しくないため、モデルの持つバイアスを制御変数として考慮する弱拘束によって、解析値の精度向上が期待されている（M. Fisher, ECMWF）。これまででは、計算負荷などの都合からほとんど現実的なシステムには導入されていなかったのだが、ECMWF ではいよいよ弱拘束が現業化の運びとなり、その成果も上々のことである（Y. Trémolet, ECMWF）。EnKF においてもモデルバイアスを考慮する研究は進んでいるようであるが、現業化に到達したという意味では一步4D-Var の方が先んじているといえるだろう。

もう一つの大きな流れはアンサンブルランの活用である。といっても、どのように活用するのかは発表者によりまちまちであった。C. Liu（中国気象局）ほか何人かの講演者は、アンサンブルランの結果から評価関数の勾配を計算する手法、すなわちアジョイント方程式を使わない4D-Var について発表した。よく誤解されるが、広義の「4D-Var」は4次元の時空間でモデル予報値と観測値のミスフィットを定量化した評価関数の最小値を探索する手法であり、必ずしもアジョイント方程式を用いた同化システムであるとは限らない。アンサンブルランを用いたこの手法は、アジョイントコードを作成する必要がなく、通常のアジョイント方程式が耐えられないようなモデルの強非線形性にも耐えうるため、今後の発展が期待される。L. Berre（フランス気象局）は、観測誤差や背景誤差に擾乱を与え、アジョイント法による同化を並列的に行う方法

について紹介していた。この手法によって、4D-Var でも背景誤差共分散を陽に計算でき、次に続く同化サイクルに誤差分散の情報を伝達することができることになる。このような手法は、今回のシンポジウムの大きな目玉の一つであった。さらに、このシステムは、フランス気象局で2008年から現業化されているとのことであり、筆者は驚きを禁じえなかった。ただし、使われているメンバー数はごく少数（6メンバー）であり、かつ、同化に用いる分解能も落としているとのことであった（次の段落で紹介するカナダ気象局の M. Buehner が行ったハイブリッド法は、一つの同化サイクル内でアジョイント法による同化を並列的に走らせるのではなく、アジョイント法に必要な背景誤差共分散を計算するために EnKF を使うという手法である）。

伊藤の心に一番残ったのは、最終日の“Inter-comparisons & Hybrid Data Assimilation”のトピックである。EnKF の大家である E. Kalnay（メリーランド大学）は、4D-Var と EnKF は、予測に関して同等程度の能力を持っていることを述べた上で、4D-Var の業界で発展してきた技法を EnKF に取り入れていくことでさらなる精度向上が望めるとして、情報を過去にも伝播させる“no-cost” EnKF スムーザーを用いた結果を一例として紹介した。ただし、通常の固定区間スムーザーと異なり、後方に情報を伝えるときに改めて観測値を投入していた点について、数学的に問題があるのではないかとの疑義が出されていた。M. Buehner（カナダ気象局）は全球数値予報を対象として、EnKF、NMC 法（旧 NCEP である National Meteorological Center で開発され、24 時間予報値と48時間予報値の差から背景誤差構造を推定する手法）で計算された背景誤差共分散を用いる4D-Var アジョイント法、前の段落で触れたアンサンブルベースの4D-Var、そしてハイブリッド法（4D-Var の背景誤差共分散を EnKF によって評価する）などの同化手法を系統的に比較した。その結果、EnKF とアンサンブルベースの4D-Var は結果がほぼ一致したほか、NMC 法で計算された背景誤差共分散を用いる4D-Var アジョイント法と EnKF を比較すると、地域によってやや差があるものの総合的には同等程度の性能があることが示された。一方、ハイブリッド法で得られた結果は、ほかの手法に比べて格段に良くなっており、特に南半球ではその効果が顕著であることが示された。

4D-Var と EnKF は、これまでも切磋琢磨しあうデータ同化の二大巨頭であったが、お互いの特性を理解することで、新しい手法が次々と生まれつつある。個人的には、強く「融和」の必要性を感じると同時に、いろいろな手法に触れながら自分にも何か斬新なことをひねり出せないかしらと、思わず考えさせられてしまう会議であった。(伊藤耕介)

謝 辞

本報告執筆にあたり、本シンポジウム参加者であるメリーランド大学の三好建正氏、気象研究所の川畑拓矢および藤井陽介両氏、気象庁の古林慎哉氏から助言を頂きました。また、本報告の執筆は、メルボルンから帰国する際に経由地のシドニー空港で気象研究所の青梨和正氏から執筆のアイデアを頂いたことに端を発するものです。

略語一覧

3D-Var : Three-Dimensional Variational assimilation
3次元変分法
4D-Var : Four-Dimensional Variational assimilation
4次元変分法
AFES : Atmospheric general circulation model for the Earth Simulator 地球シミュレータ用大気大循環モデル
ALERA : AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis AFES-LETKF 実験的アンサンブル再解析
CAM : Community Atmosphere Model (大気大循環モデルのひとつ)
CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation 豪州連邦科学産業研究機構
EnKF : Ensemble Kalman Filter アンサンブル・カルマンフィルタ
EnOI : Ensemble Optimal Interpolation アンサンブル最適内挿法
ECMWF : European Centre for Medium-range Weather Forecasts 欧州中期予報センター
ERA : ECMWF Re-Analysis ECMWF 再解析
GFS : Global Forecast System NCEP の現業全球予報

システム

GPS : Global Positioning System 全地球測位システム
IFS : Integrated Forecast System ECMWF の現業予報システム
JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 独立行政法人海洋研究開発機構
JNoVA : Japan Meteorological Agency Nonhydrostatic Model based Variational Data Assimilation System 気象庁非静力学メソ4次元変分法システム
JRA : Japanese Re-Analysis 日本における長期再解析プロジェクト
LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
NASA : National Aeronautics and Space Administration アメリカ航空宇宙局
NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国立大気研究センター
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気局
OFES : Ocean general circulation model for the Earth Simulator 地球シミュレータ用海洋大循環モデル
OI : Optimal Interpolation 最適内挿法
OSSE : Observing System(s) Simulation Experiment 観測システム・シミュレーション実験
ROMS : Regional Ocean Modeling System (領域海洋モデルのひとつ)
THORPEX : THE Observing system Research and Predictability Experiment 観測システム研究・予測可能性実験, WMO/WWRP の国際研究計画
WRF : Weather Research and Forecasting Model (領域大気モデルのひとつ)
WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
WMODA : WMO symposium on Data Assimilation WMO データ同化シンポジウム

参 考 文 献

Whitaker, J. S., G. P. Compo and J.-N. Thépaut, 2009 : A comparison of variational and ensemble-based data assimilation systems for reanalysis of sparse observations. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 1991-1999.