

第6回 WMO データ同化シンポジウム参加報告

榎本 剛*¹・川畑 拓矢*²・藤田 匡*³・古林 慎哉*⁴
堀田 大介*⁵・山崎 哲*⁶・伊藤 耕介*⁷

第6回 WMO データ同化シンポジウム (WMODA6) は、2013年10月7日～11日に米国メリーランド大学で開催された。計画では、メリーランド大学のキャンパスに移転した米国環境予測センター (NCEP) の新庁舎で開催される予定であった。シンポジウムと相前後して実施された米国政府の閉鎖の影響を受け、直前までシンポジウムの開催自体が懸念されたが、Daryl Kleist 博士 (NCEP, 現・メリーランド大学) と Kayo Ide 准教授 (米国メリーランド大学) から実行委員会の努力の末、大学の建物に会場を変更して開催された。このシンポジウムでは、データ同化手法、全球・領域大気データ同化、再解析、対流スケールデータ同化、海洋・陸面・結合データ同化、衛星・現場・レーダーデータ同化、微量成分同化、データ同化の診断手法に関し、74件の口頭発表と227件のポスター発表があった。セッションのタイトルから分かるように、幅広い分野に関する多数の発表があったため、ここで全てを網羅することはできない。とくに海洋、大気組成、陸面データ同化や衛星データ関連の発表は取り上げることができなかった。会議の概要、発表資料、口頭発表の録画はシンポジウムのウェブサイ

ト (<http://das6.umd.edu> 2014.11.25閲覧) に掲載されているので、興味のある会員諸氏は参照していただきたい。本稿では、著者らが印象に残った講演や全体を通じたデータ同化研究の動向について、所感を交えて報告する。 (榎本 剛)

1. データ同化手法及び全球・領域大気データ同化

アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) をはじめとするアンサンブルデータ同化は、大学など研究機関で広く行われている。このようなデータ同化手法の動向を反映して、シンポジウム全体を通じてアンサンブルデータ同化に関する発表が多く見られた。また、制御変数を拡張することにより、アンサンブル法の特長である誤差共分散の流れ依存性を既存の変分法システムに取り込むことを目的とした、アンサンブル法と変分法とのハイブリッド化に関する研究も多数見られた。また、現業で運用実績のある4次元変分法 (4D-Var) について、今後の高度化に向けた重要な課題となる大規模並列計算への対応の取り組みも見られた。Mike Fisher (ECMWF) は、モデル誤差を考慮した弱拘束4D-Var について、並列化効率を上げるための定式化について報告した。この手法では、計算効率を高めるため、従来は状態変数空間で行っていた評価関数の極小値探索の問題を、拡張した空間での鞍点問題として定式化し、全同化サブウィンドウの前方積分と随伴計算を並列することに成功した。 (藤田 匡)

アンサンブル変分法 (EnVar) は、変分法における評価関数の勾配をアンサンブルで代用するため、アジョイントモデルの開発が不要で、フランス現業モデル、WRF、NCEP-GSI、カナダ現業モデルなど様々なモデル、データ同化システムにおいて開発されてい

*1 (連絡責任著者) Takeshi ENOMOTO, 京都大学防災研究所/海洋研究開発機構アプリケーションラボ, enomoto.takeshi.3n@kyoto-u.ac.jp

*2 Takuya KAWABATA, 気象庁気象研究所,

*3 Tadashi FUJITA, 気象庁数値予報課,

*4 Shinya KOBAYASHI, 気象庁気候情報課,

*5 Daisuke HOTTA, 気象庁数値予報課,

*6 Akira YAMAZAKI, 海洋研究開発機構アプリケーションラボ,

*7 Kosuke ITO, 琉球大学理学部,

る。Chengsi Liu (米国オクラホマ大学) は時間方向の背景誤差を考慮しない場合や統計的な背景誤差とのハイブリッドにした場合などを比較し、その効果や計算コストについて議論した。また Milija Zupanski (米国コロラド州立大学) はヘッセ行列 (ヘシアン) を用いて背景誤差共分散行列の階数 (ランク) を落とす前処理 (プレコンディショニング) を適用した。さらに背景誤差のハイブリッドを用い、スコールラインの再現に成功した。また Marc Bocquet (フランスパリ東大学) は EnVar を 4次元に拡張した場合、通常はアンサンブル・カルマンフィルタの背景誤差共分散から時間方向の相関を求めて時間方向の解析インクリメントを計算するが、時間を逆方向に計算するカルマン smoother を用いるべきであると主張した。また Andrew Lorenc (UKMO) は EnVar, 4D-Var と背景誤差のハイブリッドの組み合わせについてインパクトを調べ、EnVar のハイブリッドシステムが最も良さそうであることを報告した。さらに Jonathon Poterjoy (米国ペンシルベニア州立大学) からは変分法とアンサンブル・カルマンフィルタが複雑に情報をやりとりするシステムの提案があった。EnVar の技術的課題として、局所化の高度化、特に解析場のバランスへの影響やシグナルの移流への対応、気候学的背景誤差成分の扱いが挙げられていた。(川畑拓矢)

私 (伊藤耕介) は、前回のメルボルン大会への参加報告 (榎本ほか 2010) において「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」と記したが、今回の WMODA6 では、まさに両者を融合したハイブリッド法の隆盛を肌で感じるようになった。EnKF, 4D-Var, ハイブリッド法、そして、粒子フィルタ (PF) が 4次元データ同化の「基本的な型」だとすると、その枠を大きく外れる手法は今回の会議では見受けられなかった。個人的な予想だが、今後のデータ同化研究は、これら 4つの手法の高度化を進めながら、力学系の性質と自由度に応じて最適なものを選択していく時代に入ると思われる。例えば、近似的に摂動の線形時間発展が成り立つ大自由度系では、ハイブリッド法が現実的に実行可能でかつ高い性能が期待できる。一方、アジョイント方程式に基づく古典的な 4D-Var は、アンサンブル法が苦手とする成長モードの

ほとんどない系では引き続き使われるかもしれないが、気象学におけるデータ同化に関して言えば徐々に存在感は薄れていくのではないだろうか。また、今後モデルの高解像度化が進み、強非線形性が卓越するシステムをもとにデータ同化を行う場合には、単純なハイブリッド法よりも EnKF の方が優位な可能性も存在する。強非線形性の存在下で EnKF の性能を凌駕する PF の研究についてもいくつか発表があったが、依然として、気象・海洋物理学が想定する大自由度系への適用は困難だと一般には考えられている。ただし、そんな中、Peter Jan van Leeuwen (英国レディング大学) は、位相空間上で粒子 (メンバー) の大多数が観測データから離れないような補正を加えることで、自由度が 65500 の系に対する 32メンバー PF データ同化が成功したことを報告していた。この成果は、いつか強非線形システムのデータ同化に関して EnKF と PF の一騎打ちとなる時代が来ることを予感させた (今回の会議の時点では、この van Leeuwen の研究について、懐疑的な声も多く聞かれたが)。

(伊藤耕介)

2. 対流スケールデータ同化及び衛星・現場観測・レーダーデータ同化

筆者 (川畑拓矢) の専門である対流スケールの同化は「Convective Scale DA」として 1セッションが割り当てられ、このスケールに重要な役割を占めるレーダーデータ同化についても「Atmospheric, Satellite, In Situ, and Radar DA」としていくつかの講演が行われた。Dale M. Barker (UKMO) は UKMO の現業システムを用い、ロンドンオリンピック開催にあわせて実施されたデモンストレーション (Nowcasting Demonstration Project) について紹介した。英国南西部を対象に毎時リアルタイム実行された水平解像度 1.5 km の 4D-Var はレーダー降雨域を外挿する手法に対して 2 時間後には同等の精度になり、その後は上回ることができた。なお 3D-Var では同等の精度になるために 3 時間が必要であった。UKMO では現業化に向けた改良が進められており、高頻度運用可能な高解像度 4D-Var の実例として注目される。レーダーデータ同化では通常減衰補正された観測データを同化するが、Jing Cheng (米国オクラホマ大学) は同化スキーム内で減衰を考慮する手法により、強い対流を再現できるようになるケースがあることを示した。

本シンポジウムで感じられたのは、これまで述べたように EnVar の研究が盛んであること、位置ずれ誤差に対する意識が高いこと、対流スケールの同化が広く行われていること、観測誤差相関について注目が集まりつつあることなどであった。その一方で、非線形性への対応は粒子フィルタが実用化されつつある発表があるくらいであり研究が盛んではないように思われた。本シンポジウムを通じて最新の動向を概観できたことは大変有意義であった。(川畑拓矢)

対流スケールのデータ同化では、気象条件に応じた背景誤差特性の変化など、流れへの依存性の重要性が指摘されていた。國井 勝 (気象研) は、NHM に LETKF を適用し、2012年の日本域での豪雨の事例に対し、同化及び予報実験を行い、予報精度が改善することを示した。この例のように現象の非線形性が強くなることからアンサンブルデータ同化の有効性が期待されるが、高解像度のアンサンブル予報が必要となり、計算コストが大ききこと、サンプリングエラーが大きくなり局所化の高度化が重要となることなどが課題として挙げられていた。サンプリングエラーに関し、青梨和正 (気象研) は予報誤差共分散に対して近接アンサンブル (Neighboring Ensemble) 法と、予報誤差を降水に関する変数とそれ以外の変数との水平スケールを反映した2つの水平スケールに分離する手法とを組み合わせることを提案した。

また、高分解能観測データの利用に関し、Peter Weston (UKMO) は UKMO 全球 4D-Var での D 値 (観測と第一推定値の差) 統計に基づく非対角要素を含む観測誤差共分散行列を用いた IASI や CrIS などのスペクトル高解像度サウンダの同化について報告した。極小値探索の収束を改善するため、観測誤差の統計値に調整を施して運用している。多くのデータ同化手法が様々なスケールの現象に適用され、比較評価が進められていた。対象とする現象のスケール、使用する観測データ、アンサンブルや予報モデルの特性など様々な条件のもとでの各手法の有効性が明らかになってくると考えられ、今後の動向に注目していきたい。(藤田 匡)

今回の会議に参加して、データ同化研究の将来に関し、増え続ける観測データとどのように付き合えばいいのか、ということを考えさせられた。三好建正 (理研, 全球・領域大気データ同化の招待講演) は、次期

衛星やフェーズドアレイレーダー、あるいは、ウェブカメラの撮影した画像などをデータ同化に利用し、局地的豪雨の予測を目指すという研究プロジェクトを紹介したが、この発表に代表されるように、膨大な情報から解析や予報にとって有用な成分を抽出することは、データ同化分野における大きなテーマの一つとなりつつある。というのも、ビッグデータを扱うためには、従来のデータ同化における基本的な仮定が成り立たないという、これまでの枠にとらわれない協力体制が必要となるからだ。例えば、従来のデータ同化においては、離れた地点の観測の誤差には相関がないとすることが普通であった。しかし、この仮定は時空間的に密なデータセットを扱う場合には正しくない。かといって、データを安易に間引いてしまうと、極端現象などを予報することには適さない。データ同化において、観測誤差に相関があることを想定するとすると、既存の手法は大幅な改変を余儀なくされる。さらに、一般的な4次元データ同化手法は、興味の対象となる時空間スケールに沿った情報を取り出すためには、得られた情報の利用について数理科学的に十分に考察しなければならない。これらの点に関しては、まだまだ研究は不足していると感じられた。また、膨大なデータから高速かつ適切に情報を取り込むシステムを構築するには、データ同化の研究者が、観測手法について専門的な知識をもつ研究者や計算機科学・通信科学の研究者などと積極的に連携を図ることがますます重要となってくるだろう。(伊藤耕介)

3. 再解析

本会合では2日目午前のセッションの後半が全球大気再解析に割り当てられ、3件の報告があった。この中で古林慎哉 (気象庁気候情報課) は気象庁55年長期再解析 (JRA-55) についての口頭発表を行った。本発表では、まず、既存の再解析データは総観規模から惑星規模の現象の研究に大きな貢献をしてきながらも、更に長い時間スケールの現象の研究にも利用可能なデータセットとするためには時間均質性を更に向上させることが課題となっていることを述べ、JRA-55では成層圏の気温解析値の品質が向上し、長期変化傾向の表現が改善されていること等、品質の向上したプロダクトが作成されていることを述べた。また、気象庁気象研究所で実施されている従来型観測のみ使用の再解析 (JRA-55C) と AMIP 型 ラン (JRA-55 AMIP) と合わせて “JRA-55ファミリー” としてプ

ログダクトの作成を行っていることを紹介し、観測システムの変遷やモデルバイアスに起因した不確実性の定量的評価に有用なプロダクトとなり得ることを述べた。

固定観測システム再解析への取り組みが拡がりつつある状況を反映し、全球大気再解析に関する3件の口頭発表では、いずれも時代変遷のない観測データを使用したプロダクトが紹介された。Gil Compo (米国コロラド大学) と Paul Poli (ECMWF) がそれぞれ紹介した NOAA/CIRES の20世紀再解析及び ECMWF の ERA-20C は地上及び海上観測のみを同化している。これらに対し、小職 (古林慎也) が発表した、気象庁気象研究所で実施している JRA-55C は、地上及び海上観測に加え、ラジオゾンデによる高層観測など1958年から現在まで存在するデータを同化している。Paul Poli による ERA-20C の発表では、固定観測システムといえども地上気圧観測のデータ量の増加やバイアスの変化が再解析データの時間均質性に影響を及ぼし得ることが示されていて、利用する観測データの質・量に応じた背景誤差共分散の最適化や解析値の不確実性の定量的評価、といった技術開発が再解析では重要と改めて感じさせられた。(古林慎哉)

データ同化の研究に携わりはじめて2.5年目の頃に、この WMODA6 に参加することができた。WMODA6 は、データ同化において最先端・最高峰の会議の一つであるという噂を事前に伺っていたが、その情報に違わず、世界中のデータ同化の先鋭達が最先端の研究内容や現業システムについて報告している、という印象を受けた。初めての参加であることや私の勉強不足もあり発表内容をちゃんと完全にフォローすることはできなかったが、アンサンブル手法が全盛期を迎えているという印象を感じた。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の我々のチームでは、LETKF をベースとしたアンサンブル大気再解析 (ALERA, ALERA2, 榎本がポスター発表) を開発している関係もあり、私 (山崎 哲) はアンサンブルスプレッドを如何に利用するかということに興味を持っている。Enomoto *et al.* (2010) において、ALERA での解析アンサンブルスプレッドが熱帯域での西風バーストや成層圏突然昇温に先行して増加するという先駆現象が発見されたので、私はその現象が中緯度のブロッキングなどでも見られるかについてポスター発表を行った。5年間の ALERA2 のデータから

北大西洋のストームトラックの活動度とブロッキング高気圧との関係を見出したが、発表内容はまだ拙いものであり、今後さらに研究を進展させていく必要があるが、このような発表を Eugenia Kalnay 先生 (米国メリーランド大学) が興味を持って聴いてくださったことは私にとって大きな収穫であった。Kalnay 先生もアンサンブルスプレッドの前駆現象についてずっと興味を持っているとのことで、昔書いた論文をいくつか紹介していただいた。上記のような解析スプレッドと大気現象の関係について言及した論文は少なく、予測可能性研究との関係で非常に重要なポイントとなるはずである。スプレッド情報の利用についてこれから様々な研究がなされると思うので、私もその研究に携われるように頑張りたい。(山崎 哲)

4. 海洋・陸面・結合データ同化

メルボルンで開催された第5回会合では、アンサンブル・カルマンフィルタと 4D-Var との比較に関する発表が多かった。今回は、上述の通り変分法をアンサンブル化するという研究が多数見られ、並列化のしやすさや流れ依存の背景誤差などアンサンブル・カルマンフィルタの利点を取り込んだ一方、局所化などの工夫が必要な点も背負ったようである。少なくなった両者の比較について、Ganesh Gopalakrishnan (米国スクリプス海洋研究所) はメキシコ湾の海洋循環に対して MITgcm を用いて海面高度と海面水温の衛星データを同化した実験を行った。1か月以上では、4D-Var が有利で、1か月未満では EnKF であった。EnKF は局所化スケールが小さいほど、アンサンブル数が多いほど結果が良かったとのことなので、海洋の渦の再現性が影響しており、渦のような乱雑な現象には、モンテカルロ的な EnKF が有利なのかもしれない。

結合データ同化に関する口頭発表は、6件と全体からすると多くない。Dick Dee (ECMWF) は、結合データ同化について招待講演を行った。結合データ同化を「弱い結合」と「強い結合」に分類した。「弱い結合」では大気や海洋など構成要素毎に解析し、「強い結合」では解析を結合して行う。大気海洋モデルを用いた再解析として既に CFSR があるが、解析は大気と海洋とで別々に行われているので、CFSR は「弱い結合」ということになる。「弱い結合」は速い過程を最適に利用することを妨げてしまうと指摘した。結合モデルを用いた全球データ同化に関する口頭発表

は、Eric de Boisseson (ECMWF), Isabelle Miro-
uze (UKMO), Abhishek Chatterjee (NCAR), 小
守信正 (JAMSTEC) が行ったが、いずれも「弱い
結合」から手探りで試している状況である。大気海洋
結合モデルを用いれば、CFSR が実現したように現実
的な大気海洋相互作用を取り込むことが可能となる
が、アンサンブル手法を用いる場合は、小守が示した
ように、地表面付近のアンサンブルスプレッドの過小
評価を低減する効果もある。小山博司 (JAM-
STEC, 現気象研) は、MIROC に LETKF を適用し
た大気海洋結合データ同化システムによる、地表気圧
及び海面水温のみを用いた同化実験の結果を紹介し、
大気の変数と海洋の変数との相関を考慮することによ
り、局所的ながらも長周期変動の誤差の低減が実現す
ると述べ、「強い結合」の有効性を示唆した。

Dick Dee の招待講演に話を戻して、再解析につい
ても少し述べる。前回会合では、衛星データ等観測の
変遷の影響から再解析を気候変動研究の参照データと
することには注意を要すると述べていたが、今回の講
演では気候変動の再現性に自信が感じられた。将来の
ERA は結合データ同化の技術を取り込み、気候変動
の参照データを目指していることが感じ取れた。これ
対して、今後の気象庁の再解析はどのように発展する
のだろうか。JRA-55には最終日の要約において
「JRA-55の完了おめでとう！ Go go JMA」との声
援が送られたので、各国からの注目が集まることと思
う。(榎本 剛)

データ同化研究に残されたフロンティアとしては、
マルチモデルアンサンブルへのデータ同化の応用、結
合系データ同化システムの開発、モデルパラメータな
どの最適化、データ同化という概念が存在しない分野
への参入などが考えられる。私 (伊藤) のポスター発
表は大気海洋結合システムの話とハイブリッド法の話
の2つであったが、意外なことに、ハイブリッド法に
関してはあまり質問を受けず、大気海洋結合系に関し
て聞かれることが非常に多かった。これは、多くの研
究者が早くも「次のネタ探し」を始めていることを意
味しているように思われた。(伊藤耕介)

5. データ同化の診断

ここでは「診断ツール」(Diagnostic tools) の口頭
およびポスターセッションについて報告する。

数値予報を支える両輪は予報モデルとデータ同化シ

ステムである。近年、予報モデルについては、そのプ
ロダクト (予報値) から誤差の原因を探る診断的手法
の研究が活発となりつつある (堀田 2011)。これに呼
応するように、データ同化研究においても診断的手法
の研究は盛んになりつつある。今回のシンポジウムで
も「診断ツール」に特化したセッションが口頭・ポス
ターともに設けられた。本シンポジウムでの発表を俯
瞰すると、データ同化における診断的研究の趨勢は大
きく次の2つに分類できそうである。ひとつは個々の
観測を同化することにより予報がどれだけ改善され
たかを推測する手法 (観測に対する予報感度; FSO)
に関するもの、もう一方は観測・予報・解析間の残差
等、データ同化システムの標準的な出力のみを用い、
それらが「最適」(optimal) な条件下で満たすべき
統計的関係を利用する、いわゆる「事後診断」(a
posteriori diagnostics) である。

まず前者 (FSO) に関連する発表について報告す
る。FSO においては通常、予報誤差をあるスカラー
関数 (以下、目的関数と呼ぶ) によって表現し、観測
の同化の有無による目的関数の変化により観測のイン
パクトを評価するが、目的関数をどのように選ぶべき
かは自明ではない。Carla Cardinali (ECMWF) は、
変分法における観測項のように、目的関数を予報と観
測の観測空間における差の二次形式として定量化する
ことを提案した。ECMWF の現業システムにおける
結果を示し、新しく提案された目的関数を用いた場合
と一般的によく用いられる目的関数 (24時間予報と解
析の差の全エネルギーノルム) を用いた場合とでは、
FSO に大きな差があることを報告した。

NASA/GSFC では、解析・予報間の相関を減らす
ため、リードタイムを48時間に延長することを計画し
ているが、リードタイムを長くすると接線形仮定の妥
当性が問題となるため、線形モデルそのものの精度を
高める必要がある。Daniel Holdaway (NASA/
GSFC) は線形モデル (接線形及びアジョイント) に
湿潤過程を導入することにより、解析値を初期値とす
る予報と第一推定値を初期値とする予報の目的関数の
差 (すなわち観測の同化によるインパクト) のうち
FSO で説明可能な割合が改善されることを報告した。
一方 Rahul Mahajan (NASA/GSFC) は、アジョイ
ントモデルの基本場の選び方を改善することで FSO
の精度を高められることを報告した。本研究では、ガ
ウスの求積法から要請される係数を用いて解析値と第
一推定値の重み付き平均をとり、これを初期値とした

予報場を基本場とすることで先行研究の一次精度よりも近似精度の次数を高め、FSOのパフォーマンスを改善できることを報告した。

Eugenia Kalnay (メリーランド大学) はモデル空間での予報アンサンブルと観測空間での解析アンサンブルのみから計算可能な、個別のEnKFの実装に依存しないFSOの定式化を示し、これをNCEPの準現業的な逐次的アンサンブル平方根フィルタ (serial EnSRF) に適用した太田洋一郎 (気象庁) の成果を紹介した。最後に、太田が緯度経度方向に30度ずつ程度の小さな領域を対象としてFSOを実行することで予報を大きく悪化させるMODIS衛星風を検出できたことを紹介し、「予見的品質管理」(Proactive QC) という新しいQC手法を提案した。この手法ではまず6時間程度の短いリードタイムで局所的なFSOを実行し、予報を大きく悪化させる「悪い」観測を検出する。「悪い」観測が検出された場合、これを排除してデータ同化を実行し直すことで予報の改善を図る。

観測による情報は現実の系では予報時間が伸びるにつれて拡散しながら下流へ伝播していくが、アンサンブルによるFSOの定式化では局所化 (localization) のためにこの伝播・拡散を捉えることが出来ないという問題がある。Kalnayらはアンサンブル平均予報の水平風により局所化関数を移流させるという簡便な方法によりこの問題が軽減できることを示しているが、Nicholas Gasperoni (オクラホマ大学) はJeff Anderson (NCAR) によるグループ・フィルタの考え方を応用し局所化関数を予報アンサンブルから経験的に求めることでこの問題をさらに軽減できることを2次元の浅水方程式系を用いた実験により示した。

KalnayらによるアンサンブルによるFSOの定式化は2012年に発表されたばかりであるが、Lucio Torrisi (イタリア気象局) は早くもこれをイタリアの現業領域アンサンブルシステム (COSMO-LETKF) に実装し、その結果を報告した。ただし、彼らの結果は目的関数 (全エネルギー) を評価する際の鉛直方向の重み付けに敏感に依存してしまうとのことで、結果の解釈については慎重な吟味が必要と考えているとのことである。

次に、いわゆる「事後的診断」に関する発表について報告する。事後的診断と呼ばれているものには様々な手法があるが、それらに共通していることは、 D 値 (観測と第一推定値の差) や解析残差 (観測と解析の差)、解析インクリメント (解析と第一推定値の差)

など、データ同化システムの標準的な出力のみを用いることと、アジョイントモデルの積分や同化の再実行などの重い計算を必要とせず、統計操作のみにより診断を行うこと、の2点である。これらの手法は特にフランス気象局で活発に開発されている。

今シンポジウムの発表を眺めると、事後的診断の用途は概ね (1) 観測誤差共分散行列の推定とチューニング、(2) 各観測の解析誤差の縮減への貢献度の診断、の2つに集約できるようである。(1) は、背景誤差と観測誤差が正しく設定された理想的なデータ同化システムでは観測誤差共分散行列 (\mathbf{R}) が D 値と解析残差の共分散 (外積の期待値) と一致すべきであるという Desroziers *et al.* (2005) の結果に基づく。期待値は期間平均により推定することもできるし、EnKFや、観測に摂動を与えて生成される変分法のアンサンブルを運用するシステム (フランス気象局やECMWFなど) ではメンバー間の標本統計を用いることもできる。この手法に関連する発表としては上述のPeter Weston (UKMO) の発表や、EnKFではメンバー間の標本共分散をとることで \mathbf{R} の即時的な推定が可能となることを利用し \mathbf{R} をサイクルごとに逐次更新することを提案した Joanne Waller (英国レディング大学) の発表などがあつた。また Yann Michel (フランス気象局) は変分法データ同化システムにおいてコスト関数の最小化後の値 (J_{\min}) が最適な条件下で満たすべき統計的性質と、実際のシステムでのそれとのズレを利用し、背景誤差共分散 (\mathbf{B}) と \mathbf{R} をチューニングするいわゆる「 J_{\min} 診断」について、単一の変分法データ同化システムだけでなく観測に摂動を与えた変分法のアンサンブルも運用することで、従前から用いられてきた J_{\min} の期待値に加え、新たにその分散も診断に利用できるようになり、チューニングの精度を高められることを報告した。(2) の例としては Pierre Brousseau (フランス気象局) がある。観測が状態の推定をどれだけ改善したかは背景誤差と解析誤差の分散 (共分散行列の対角和) の差として定量化できる。変分法による通常のデータ同化では解析誤差共分散を知ることはできないが、変分法のアンサンブルがあれば解析の標本分散としてこれを推定することができ、さらに標本分散をとる際に局所化の演算を適用することで任意の観測のサブセットからの寄与を個別に評価することが可能となる。Brousseauはこの手法をAROME 3D-Var (フランス気象局の領域アンサンブル 3D-Varシステム) に

適用し、航空機とレーダーの観測が解析誤差の軽減に最も大きく寄与していることなどを報告した。

FSO と事後の診断の双方を融合する試みもある。FSO の定式化に小さな修正を加えることで予報誤差の誤差共分散への感度を診断することができる (Daescu and Todling 2010)。この診断を用いれば \mathbf{R} にどの方向に変分を与えれば最も予報誤差を小さくできるかを知ることができるが、与えるべき変分の大きさに関する情報は得られない。一方、事後の診断による \mathbf{R} の推定では、データ同化システムの最適性を満たすために \mathbf{R} に与えるべき変分を知ることができるが、これが実際に予報を改善するかどうかは分からない。Dacian Daescu (米国ポートランド州立大学) は双方の手法を併用することでよりよい \mathbf{R} のチューニングが可能となると提案した。

上述のように、これまでに多くの診断手法が提案されてきているが、診断結果の意味することろは必ずしも自明ではなく、慎重を要する場合もある。この点について注意を喚起する発表もあった。Cristina Lupu (ECMWF) は、IASI の観測誤差のチャンネル間相関に注目し、ECMWF の現業システムを用いて FSO、 \mathbf{R} の事後診断、Daescu and Todling (2010) による予報誤差の \mathbf{R} への感度の診断と一部のデータを排除した OSE (観測システム実験) を行い、それぞれの結果が相互に矛盾する場合があることを示し、どのように解釈すべきかを議論した。明確な結論は得られていないようであるが、一つの診断を過信することへの警告として示唆深いと感じた。

最後に個人的な所感を簡単に述べたい。データ同化システムの診断手法というニッチなテーマにこれだけ多くの研究があり、また世界中の多くの現業センターで既に現業運用されていることに驚いた。診断的手法の多くはアジョイント法を用いた感度解析の枠組みで提案されてきたこともあってか、変分法同化システムに対するものが成熟しつつある一方、アンサンブルに対するものはまだ発展の途上にあるとの印象を受けた。さらに、今後主流になると思われるハイブリッド法については、ほとんど手つかずに近いようである。診断手法の研究は新たな知見の発見が期待できる、魅力的なテーマであるとの確信を、本シンポジウムで得ることができた。診断手法の背後にある「データ同化システムの (通常顧みられることのない) 副次的な出力から工夫をこらして最大限に情報を拾い集め、システムの改良に還元する」という思想は、日本人の持つ

「もったいない精神」と相通ずるところがあるように感じる。この分野への日本発の貢献を増やすことが出来るよう微力を尽くしたい、そのような思いを奮起させられる刺激的な会議であった。(堀田大介)

6. おわりに

ここ10年間で基盤整備が十分に進んできたため、データ同化は多くの研究者が気軽に試すことのできるものとなってきた。ただ、同時に、最先端の部分では複雑化・高度化が進んできており、精度の良いデータ同化を目指すために情報収集を決して怠ることができない。WMO は 4～6 年に 1 度しか開催されないデータ同化分野における最大かつ最高峰のシンポジウムである。そのため、各回の内容がデータ同化研究の世界的動向を反映しているといっても過言ではない。WMO は関連する研究者にとって、現状を真剣に分析し吸収し、乗り越えるために最重要視すべき会議である。データ同化に興味をもつ関係者であれば、現業・研究所・大学を問わず、次回の WMO に参加し、大きな衝撃を受けることは間違いなく将来のためになると言えるだろう。その意味では、思い切って WMO を日本に誘致し、1995 年以来 2 度目の黒船襲来によって、日本のデータ同化研究を一度に推進させるというのもよいのではないか、と思われるのであった。(伊藤耕介)

略語一覧

- 4D-Var : Four-dimensional Variational method 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 実験的再解析
- AMIP : Atmospheric Model Intercomparison Project 大気モデル相互比較プロジェクト
- AROME : Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso Echelle メソスケール研究現業応用モデル
- CFSR : Climate Forecast System Reanalysis 気候予測システム再解析
- CIRES : Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences 米国環境科学共同研究機構
- COSMO : Consortium for Small-scale Modeling 欧州各国が共同開発している非静力学領域大気モデル
- CrIS : Cross-track Infrared Sounder 走査型赤外サウンダ

- DA : Data Assimilation データ同化
- ECMWF : The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター
- EnKF : Ensemble Kalman Filter アンサンブル・カルマンフィルタ
- EnSRF : Ensemble Square-Root Filter アンサンブル平方根フィルタ
- EnVar : Ensemble Variational Method アンサンブル変分法
- ERA : ECMWF Reanalysis ECMWF 再解析
- FSO : Forecast Sensitivity to Observations 観測に対する予報感度
- GSFC : The Goddard Space Flight Center NASA ゴダード宇宙飛行センター
- GSI : Gridpoint Statistical Interpolation NCEP の格子点上の3次元変分法同化システム
- IASI : Infrared Atmospheric Sounding Interferometer 赤外大気測定干渉計
- JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 独立行政法人海洋研究開発機構
- JRA-55 : Japanese 55-year Reanalysis 気象庁55年長期再解析
- LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
- MIT : Massachusetts Institute of Technology マサチューセッツ工科大学
- MITgcm : MIT General Circulation Model MIT 大循環モデル
- MODIS : Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer 中分解能撮像分光放射計
- NASA : The National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局
- NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国国立大気研究センター
- NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国環境予報センター
- NHM : Nonhydrostatic Model 気象庁非静力学モデル
- NOAA : The National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
- OSE : Observing-System Experiment 観測システム実験
- PF : Particle Filter 粒子フィルタ
- QC : Quality Control 品質管理
- UKMO : United Kingdom Met Office 英国気象局
- WRF : Weather Research and Forecasting Model 米国のコミュニティ領域大気モデル

参 考 文 献

- Daescu, D. N. and R. Todling, 2010: Adjoint sensitivity of the model forecast to data assimilation system error covariance parameters. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 2000-2012.
- Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385-3396.
- Enomoto, T., M. Hattori, T. Miyoshi and S. Yamane, 2010: Precursory signals in analysis ensemble spread. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L08804, doi:10.1029/2010GL042723.
- 榎本 剛, 茂木耕作, 伊藤耕介, 2010: 第5回WMOデータ同化シンポジウム参加報告. *天気*, **57**, 83-88.
- 堀田大介, 2011: THORPEX-PDF/WGNE 共催「モデル誤差の診断に関するワークショップ」参加報告. *天気*, **58**, 865-875.