

「AICS 国際データ同化ワークショップ」開催報告

三好 建正^{*1}・大塚 成徳^{*2}・小守 信正^{*3}
露木 義^{*4}・榎本 剛^{*5}

1. はじめに

データ同化は、数値モデルと実際の観測データとを融合し相乗効果をもたらす学際統合的な科学であり、気象学における主要な分野の一つとなっている。我が国でも気象研究所や海洋研究開発機構 (JAMSTEC) を始めとしてデータ同化の最先端の研究が進められており、気象学会の大会でもデータ同化に関する研究発表は常に一定数を集めている。2013年度春季大会では、「台風のデータ同化研究」という専門分科会も開催され、会場いっぱいの参加者を集め、注目が高い分野でもある。データ同化は統計数理に基づいた一般的アプローチであり、応用範囲は広い。このため、データ同化をキーワードとして幅広い応用研究を行う研究者を一堂に会する専門家会合は、重要である。

このような背景から、2013年2月26日、27日の二日間、兵庫県神戸市の理化学研究所・計算科学研究機構 (AICS) にて、データ同化をキーワードとして幅広い研究者を対象とした「AICS 国際データ同化ワークショップ」を開催した。アンサンブルデータ同化の分野の世界的権威である Eugenia Kalnay 教授 (メリーランド大学, 米国) を基調講演に招き、米国、ドイツ、台湾、韓国、アルゼンチンの各国・地域から参加

を得て、国際色豊かなワークショップとなった (第1図)。正味48名が参加し、データ同化手法に関する深い議論や、メソスケール気象、エアロゾル、炭素循環、海洋、大気海洋結合、衛星データ同化といった幅広いデータ同化に関する講演が集まったほか、8件あったポスター発表では、生物学や津波にデータ同化の考え方を適用する新たな取組みに関する発表も含まれた。開催後、参加者から好評をいただき、気象集誌に今回のワークショップを冠した特集号を編集するアイデアも出て、実際に編集を始めている。

本稿では、各セッションの講演について紹介し、ワークショップの様子を会員諸氏にお伝えしたい。

2. 各セッションの概要

2.1 オープニングセッション

初日の午前中は、オープニングセッションとして、まずは平尾公彦 AICS 機構長より開会の言葉を頂いた。AICS では、2012年10月のデータ同化研究チームの発足以来、データ同化に関する研究に取り組み始めるなど、本ワークショップの開催に至った経緯などが紹介された。これに引き続き、Kalnay 教授による基調講演があり、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を用いた最新の研究動向について紹介した。Running in Place 法 (RIP) によってモデルの非線形性に起因する誤差を軽減できることや、数日以上の子報改善につなげる新しい降水量データ同化のアプローチ、アンサンブル予報を使って観測のインパクトを推定する観測感度解析法、を主に紹介した。次に、露木義 (気象研) が決定論的予測可能性と変分法データ同化の定式化について発表した。力学系がトレース条件を満たさない場合、決定論的予報が確率密度関数の最尤値から乖離することを示し、トレース条件が満たさ

^{*1} (連絡責任著者) Takemasa MIYOSHI, 理化学研究所計算科学研究機構, takemasa.miyoshi@riken.jp

^{*2} Shigenori OTSUKA, 理化学研究所計算科学研究機構。

^{*3} Nobumasa KOMORI, 海洋研究開発機構地球シミュレータセンター。

^{*4} Tadashi TSUYUKI, 気象研究所。

^{*5} Takeshi ENOMOTO, 京都大学防災研究所。



第1図 参加者の集合写真。理化学研究所・計算科学研究機構の入口にて。

れる場合には、4次元変分法で流れに依存する背景誤差共分散を用いるのが良いことを論じた。オープニングセッション最後の講演として、榎本 剛（京大防災研）がアンサンブルによる感度解析について報告した。手法の理論的背景を説明した後、気象庁の実際の週間アンサンブル予報データやアンサンブル再解析ALERA (Miyoshi *et al.* 2007) データを使った感度解析の例を複数示して、リーズナブルな感度解析が得られることを示した。（三好建正）

2.2 セッション1

初日午後の前半のセッション1では、冒頭、斉藤和雄（気象研/JAMSTEC）による招待講演があり、HPCI戦略分野3の活動の中から、メソ気象モデルによる高解像度解析・予報システムに関する研究の概要が報告された。引き続き他の講演者からは、関連する個別の研究内容について詳細が示された。瀬古 弘（気象研/JAMSTEC）は、水平解像度15 kmと約2 kmのネストしたNHM-LETKFシステムを用いた豪雨事例の同化実験について報告した。2008年の堺市の豪雨事例ではGPS可降水量データの同化によって強雨域の再現に改善が見られ、2012年つくば竜巻事例では解析値からのダウンスケーリング実験によって竜巻に対応する強い渦度の再現に成功した。國井 勝（気象研）はNHM-LETKFに境界摂動を取り入れた実験を行い、良好な成績を得た。また、メンバー数900のLETKF実験を行い、局所化を使わなくても滑らかな誤差共分散行列が得られることを示した。Le

Duc (JAMSTEC) は、NHM-LETKFに変数間局所化を適用し、降水に関する物理量とそれ以外で局所化スケールを変えた実験を行った。この手法を用いることで、2011年新潟・福島豪雨の事例では降水帯の再現精度が向上することを示した。最後に、川畑拓矢（気象研）はNHM-4DVARを用いてドップラーライダーの動径風を同化した結果について報告した。2010年の板橋豪雨事例に適用したところ、豪雨をもたらした降水セルをうまく再現することが可能になった。

（大塚成徳）

2.3 セッション2

初日午後のセッション2の主なテーマは、EnKFを改善する新しい手法や予測可能性であった。標準的なEnKFでは、アンサンブル・スプレッドが誤差共分散を適切に表現し、同化システムがその能力を発揮できるまである程度の同化サイクル（スピニングアップ）が必要であり、これは領域モデルを用いた台風予測などでは大きな問題となる。Shu-Chih Yang（国立中央大学、台湾、招待講演）は、WRF-LETKFを用いた台風予測システムに、フィルタとスムーザを組み合わせることで同一の観測データを複数回同化するRunning-in-Place法（RIP）を適用した研究を報告した。計算結果を真値とみなす実験では、RIPを適用することにより、台風の構造がより短期間で再現できただけでなく進路予測にも大幅な改善が見られた。2008年の台風Sinlakuを対象とした実験でも同様の結果が得られ、また、予報誤差の確率密度分布がより正規分布に近付

くことが示された。RIP を常時適用すると観測値に近付き過ぎるため、適切な閾値を設け、同化サイクルの初期や場の非線形性が強い時にだけ適用することの重要性も強調された。

EnKF では有限サイズのアンサンブルを用いるためサンプリング誤差が生じ、特に遠方の格子点間で非現実的な誤差相関が推定されてしまう。これに対処するため、誤差共分散に空間的な局所化を施し観測データの影響範囲を限定することが広く行われている。Africa Perianez (ドイツ気象局) は、局所化スケールと解析誤差の関係を理論的に考察し、解析誤差の大きさには、背景誤差ならびに局所化スケールが小さいほど減少するサンプリング誤差で決まる上限値が存在することを示した。さらに、局所化スケールを小さくすると観測データの統計的な性質が悪化し実質的な観測誤差が増加することから、解析誤差を最小化する最適な局所化スケールが求まることを示した。

一方、このような局所化は、モデルが高解像度になるほどスケールを小さくする必要があり、観測の情報を十分に反映できない可能性がある。近藤圭一 (筑波大学) はデュアル局所化法を考案し、全球大気モデル SPEEDY を用いた完全モデル実験を行った。この手法は、大小二つの局所化スケールを設定し、小スケールを用いて得られた解析インクリメントと、空間平滑化を行ったアンサンブル偏差から大スケールを用いて得られた解析インクリメントを合成することにより、遠方の観測を取り込みつつ小規模な構造を保持する工夫が成されている。計算コストの面で課題は残るものの、非常に良好な結果を示しており、今後の発展が期待される。

アンサンブル手法に基づいた再解析データの利用例として、吉田 聡 (JAMSTEC) は、実験的アンサンブル再解析 ALERA を用いた日本周辺域における爆弾低気圧の予測可能性について発表した。爆弾低気圧をオホーツク海・日本海で発達したタイプ (以下、OJ 型) と北西太平洋で発達したタイプ (以下、PO 型) に分類し、解析インクリメントに関して合成解析を行った結果、解析値と比較して、OJ 型では低気圧の中心をより北に、PO 型では中心気圧をより高めに予報する傾向が見られた。バイアスの要因を Zwack-Okossi の発展方程式から診断したところ、OJ 型では上空の深すぎるトラフが、PO 型では弱すぎる潜熱放出が関係していることがわかった。また、海面気圧のアンサンブル・スプレッドは、OJ 型では低気圧中心

の南西側に、PO 型では低気圧中心付近に極大が見られ、同様に診断した結果、OJ 型では断熱加熱が、PO 型では潜熱放出が不確定性の主因であることがわかった。このような解析は、予測可能性研究だけでなく、予報モデルの改善にも役立つユニークなものである。

(小守信正)

2.4 セッション 3

2 日目午前のセッション 3 の主なテーマは、エアロゾル・CO₂・雲域輝度温度・降水量など、大気データ同化で通常利用されてきたものとは異なる観測データの同化であった。エアロゾルや温室効果ガスなどの大気微量成分のデータ同化は歴史が新しく、大気汚染の予測や微量成分の地表面フラックスの推定など今後重要性が増していくと考えられる。一方、雲域輝度温度や降水量データは非ガウス性が強いいため、それらを効果的に同化するためには工夫が必要である。

まず、関山 剛 (気象研) の招待講演があり、地球観測衛星 CALIPSO の雲エアロゾルライダーデータを同化することに初めて成功したことが報告された。衛星によるライダー観測は鉛直解像度が極めて高いが、衛星直下しか観測できない。そこで、LETKF によってレベル 1B データ (偏光消度と減衰後方散乱係数) を全球エアロゾル輸送モデルに同化し、ダストと硫酸エアロゾルの 3 次元濃度分布とダストの地表面フラックスを推定した。推定されたダストの地上濃度は独立な観測データとよく一致しており、聴衆の関心が非常に高かった。雲プロファイリングレーダや大気ライダーを搭載する地球観測衛星 EarthCARE が 2015 年に打ち上げられる予定であり、この分野のデータ同化研究の進展に期待したい。

次に、Ji-Sun Kang (韓国大気予測システム研究所) が、LETKF によって地表面の CO₂ フラックスや顕熱・潜熱フラックスを推定する観測システムシミュレーション実験について発表した。観測データは現実の観測網を模しており、例えば CO₂ フラックス推定のための CO₂ 濃度データは、100 地点以上の現地観測とフラスコサンプリング、及び温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による CO₂ 鉛直積算量である。EnKF のサンプリングエラーを減らす工夫を行った結果、通常の大気観測データと CO₂ 濃度データから CO₂ フラックスの真値をよく再現していた。同様の方法による顕熱・潜熱フラックスの推定もうまくいくが、これに風応力の推定も追加するには課題があると

のことだった。これが現実の大気に対してどの程度有効か、興味のあるところである。

数値予報センターでは天気予報のさらなる精度向上のために、赤外イメージャ及びサウンダによる雲域輝度温度データの同化が課題の一つになっている。岡本幸三（気象研）は、静止気象衛星 MTSAT-1R による一様で厚い雲域の赤外イメージャデータを同化する有効性を示すとともに、より一般的な雲域について雲の効果を適切に表現するパラメータを提案した。観測値と第一推定値の差の標準偏差をこのパラメータを使って雲域に応じて変えると、標準偏差で規格化した上記の差の値のヒストグラムがガウス分布でよく近似できるようになることを示した。簡単なデータ同化実験の結果によれば、このパラメータを利用してデータの品質管理や観測誤差の設定を行うことが有望であるとのことだった。課題はまだ多く、引き続き研究開発を進めていく必要がある。

最後に、Guo-Yuan Lien（メリーランド大学）が、全球の降水量データを効果的に同化する方法について発表した。降水量データ同化の困難は、数値モデルの湿潤過程の非線形性が強いことと、降水量データがガウス分布しないことによるとした。前者の対策として、4次元変分法と違って線形近似を必要としない EnKF を採用し、後者の対策として、気候値分布を用いて降水量の確率密度分布関数をガウス分布に変換し、かつ降水がないという観測データも同化する、という方法をとった。結果は観測システムシミュレーション実験によるものではあったが、降水量データの同化によって特に南半球中緯度の中期予報精度がかなり改善するとのことだった。現実の大気における有効性はパラメタリゼーションの精度などに依存するので、さらなる実験が必要であろう。（露木 義）

2.5 セッション4

2日目午後の後半、本ワークショップ最後のセッション4では、海洋に関わる研究が3件報告された。

伊藤耕介（JAMSTEC）は、台風予測に関し進路と比較して改善が伸び悩んでいる強度予測は、大気と海洋との交換係数の不確実性に起因していると指摘し、随伴法に基づくデータ同化手法を用いてパラメータの最適化を試みた。まず、大気部分が非静力学軸対称モデル、海洋部分が1次元混合層モデルからなる簡単な結合モデルを用いた理想実験を行った。仮想的なドロップゾンデ観測を同化することにより、意図的に

真値からずらした交換係数が真値に漸近していくことを確認し、気象場が改善することを示した。さらに、この手法を気象庁現業メソスケールデータ同化システム JNoVA に適用し、2010年台風第14号（Chaba）の事例でも台風の強度、内部コアの構造及び経路が改善することを示した。この手法の利点は、初期値とともに不確実性が高い交換係数の最適値を推定できることにあり、現業の台風予報の改善が直接期待できる成果であると感じた。

宮澤泰正（JAMSTEC）は、並列化されたプリンストン海洋モデル（POM）に LETKF を適用し、黒潮やメキシコ湾流のような西岸境界流の変動について調べた。紀伊水道にできる前線のような局所的な構造は、3次元変分法に比べて LETKF の方がよく再現されていた。その理由として、3次元変分法では、誤差共分散が時間変化せず、等方的であるのに対し、LETKF では流れに依存した誤差共分散が得られるためであると述べた。また、最適内挿法で作成された初期値と、LETKF で作成された初期値を用いて、メキシコ湾のループ・カレントの予測実験を行い、LETKF 初期値からの予測は4週間後でも渦の振幅や位置をよく再現できていることを示した。ループ・カレントは非線形性が強い現象であり、LETKF を用いることによる予測精度の改善には目を見張るものがある。著者（榎本）も大気データの同化においても、LETKF は非線形性が強い現象の再現性が高いとの印象を持っている。観測演算子やシステムの非線形性や解析変数の非ガウス性の取り扱いを工夫することにより、解析や予測がさらに改善していくことが期待される。

小守信正（JAMSTEC）は、地球シミュレータ用大気海洋結合モデル CFES を用いて、全球大気観測データの同化実験を行った。通常のアサンブル大気データ同化では、どのメンバーにも共通した下部境界条件（海面水温及び海水密度）を与える。その結果、海面付近のアサンブル・スプレッドが過小評価されている可能性がある。CFES を用いた大気データの同化実験では、期待どおりに摂動を含む境界条件が作られ、海洋の温度躍層付近にも応答が見られた。全てのメンバーで同じ海面水温から実験を開始した例では、海面水温のアサンブル・スプレッドは、北半球で一度大きく増加してから減少に転じているが、南半球や赤道付近ではゆっくりと増大している。この傾向は、データ同化をせずに、アサンブル大気再解析

ALERA2により強制された海洋のみのアンサンブル実験にも見られた。大気のばらつきのみで海洋の応答が作り出されているのか、海洋のプロセスによる増幅が重要なのかはこの講演では明らかにはされなかったが、大気海洋相互作用が季節や海域によりどのような強さで生じているのか調べる上で、アンサンブル大気海洋結合実験は有効であると感じた。今後の研究に期待したい。(榎本 剛)

3. 開催後記

2012年10月に AICS にデータ同化研究チームが発足し、AICS におけるデータ同化研究を開始した。新規チームの立ち上げを記念して本ワークショップの開催を発案したところ、本稿共著者の露木、榎本、小守の諸氏にご理解、ご支援いただき、開催にこぎつけ、前節で記述したように、最新のデータ同化研究を広く共有する貴重な会合となった。Kalnay 教授からは、ワークショップ終了後、身に余るお褒めの言葉をいただき、気象集誌での特集号の企画にも至った。AICS は我が国の計算科学を牽引する研究機関であり、この中でデータ同化が幅広いシミュレーション分野に貢献すべき基盤的科学として大いに期待されていることを常々感じている。大規模問題におけるデータ同化は、特に大気海洋科学分野において発展してきた経緯があり、著者(三好)自身、気象学をバックグラウンドにこれまでデータ同化の研究を進めてきた。今後、計算科学というより広い科学の世界でますますデータ同化研究を進めていくにあたって、本ワークショップの開催は、身を引き締める契機となった。これも、科学組織委員として開催を支えてくださった露木、榎本、小守の諸氏に加えて、実際に参加いただいた48名の方々のおかげだと、深く感謝している。

最後に、本ワークショップの開催にあたり、AICS データ同化研究チームのチーム構成員、大塚成徳、近藤圭一、Juan Ruiz、早川友紀子の諸氏には、実施に関わる事務や作業の細部に渡って、真摯かつ献身的にお手伝いいただいた。この他、平尾機構長をはじめ、AICS の関係者の皆様にも大変お世話になった。この場をお借りして、本ワークショップの成功を陰で支えてくださった皆様に、心より感謝したい。

(三好建正)

略語一覧

- 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
- AICS : Advanced Institute for Computational Science 計算科学研究機構
- ALERA : AFES-LETKF Experimental Ensemble Reanalysis AFES-LETKF 実験的アンサンブル再解析
- CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations 雲・エアロゾル観測衛星
- CFES : Coupled Atmosphere-Ocean-Sea Ice model for the Earth Simulator 地球シミュレータ用大気・海洋・海水結合モデル
- EarthCARE Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer 雲・エアロゾル・放射収支観測衛星
- EnKF : Ensemble Kalman Filter アンサンブルカルマンフィルタ
- HPCI : High Performance Computing Infrastructure 革新的ハイ・パフォーマンス・コンピューティング・インフラ
- JNoVA : JMA Nonhydrostatic model-based Variational Data Assimilation System 気象庁非静力学モデルに基づく変分法データ同化システム
- LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
- NHM : NonHydrostatic Model 気象庁非静力学モデル
- POM: Princeton Ocean Model プリンストン海洋モデル
- SPEEDY : Simplified Parameterizations, primitive-Equation DYnamics Molteni (2003) が開発した解像度水平30波数、鉛直7層のプリミティブ方程式全球大気モデル
- WRF : Weather Research and Forecasting model 米国の複数の機関が共同開発した研究及び数値予報のためのオープンソース数値予報システム

参考文献

- Miyoshi, T., S. Yamane and T. Enomoto, 2007: The AFES-LETKF Experimental Ensemble Reanalysis: ALERA. SOLA, 3, 45-48.
- 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.