

第11回データ同化ワークショップの報告

川 畑 拓 矢^{*1}・上 野 玄 太^{*2}・中 野 慎 也^{*3}、藤 井 陽 介^{*4}
 三 好 建 正^{*5}・小 守 信 正^{*6}・増 田 周 平^{*7}・伊 藤 耕 介^{*8}
 村 上 大 輔^{*9}・大 石 俊^{*10}・青 木 邦 弘^{*11}・青 梨 和 正^{*12}

1. はじめに

「第11回データ同化ワークショップ」を2021年2月24日に統計数理研究所を幹事機関としてデータ同化研究連絡会主催でオンラインにて開催した(第1図)。今回は幅広い話題の5件の招待講演で構成された。以下、講演の概要を紹介する。

2. 講演概要

伊藤耕介(琉球大学)は「4次元データ同化による解析インクリメントの構造はどう決まるのか?」と題した本講演において、摂動の時間発展の線形性やガウス性など、いくつかの単純化のための仮定を施した場合の4次元データ同化の解の構造について、可観測行列の特異値分解を通じた理解を試みた。可観測行列は、 $R^{-1}HMB^T$ として定義される行列(R は観測誤差共分散行列、 H は観測行列、 M はモデルの接線形演算

子、 B は背景誤差共分散行列)であり、変数の正規化、及び、同化ウィンドウの初期時刻におけるモデル空間の変数を時間発展させて、観測空間と比較できるようにするという役割を担っている。解析インクリメントを、可観測行列の右特異ベクトル方向の成分の重ね合わせに分解すると「可観測行列の左特異ベクトルとイノベーションの空間構造が似ており、特異値が1に比べて十分に小さくない」場合に、対応する右特異ベクトルの方向の成分が、解析インクリメントの構成に寄与することとなる。これは、各特異ベクトルの方向について、解析インクリメントからイノベーションが説明できそうであり、ノイズよりもシグナルが強いと判断されるならば修正がかかることを表している。線形不安定に対応するモードが解析インクリメントの成分として反映されやすいことや、局所化を施さないアン

*1 (連絡責任著者) Takuya KAWABATA, 気象研究所。〒305-0052 茨城県つくば市長峰1番1

*2 Genta UENO, 統計数理研究所。

*3 Shin'ya NAKANO, 統計数理研究所。

*4 Yosuke FUJII, 気象研究所。

*5 Takemasa MIYOSHI, 理化学研究所。

*6 Nobumasa KOMORI, 海洋研究開発機構。

*7 Shuhei MASUDA, 海洋研究開発機構。

*8 Kosuke ITO, 琉球大学。

*9 Daisuke MURAKAMI, 統計数理研究所。

*10 Shun OISHI, 理化学研究所。

*11 Kunihiro AOKI, 海洋研究開発機構。

*12 Kazumasa AONASHI, 宇宙航空研究開発機構。

© 2021 日本気象学会



第1図 ワークショップの様子。

サンプルベースの背景誤差共分散行列を用いる場合に
取り出せるモードの数が高々アンサンプルメンバ
数-1になることなど、解の形から分かることにつ
いても解説した。4次元データ同化システムが観測値・
第一推定値・誤差共分散・観測行列・時間発展演算子
をどのように料理して解析インクリメントができあ
がるのか、ということを理解するのは、原理的に解くこ
とができない問題に無駄な時間を費やすことを避ける
だけでなく、見通しのよいデータ同化システムの開発
や観測システムの設計にも役立つため、多くの参加者
にとって良い情報共有となった(伊藤・藤井 2020)。

村上大輔(統計数理研究所)は、「COVID-19の地理
的要因の解明に向けた時空間加法モデリング」と題す
る発表を行った。発表前半では、幅広い非ガウスデー
タから地理的・時間的要因を柔軟に推定するための手
法開発について紹介した。ここでは Compositionally-
warped Gaussian process (Rios and Tobar 2019) と
加法モデル (Wood 2017) を組み合わせることで手法
を開発した。発表後半では提案手法を COVID-19の陽
性者数の要因分析に応用した。それにより、人口密
度・歩行者密度が一定以下の場合に陽性者数が減少す
ることや、世代毎・都道府県毎に感染・流行パター
ンが異なることなどを実証的に示した。

大石 俊(理化学研究所)は「アンサンプルカルマ
ンフィルタを用いた海洋データ同化システムの力学的
非平衡の改善」という題にて発表を行った。近年の衛
星観測の発展に伴い、高い時空間解像度での観測値が
得られるようになった。それにも関わらず、アンサ
ンプルカルマンフィルタを使用した既存の海洋再解析
データセットのデータ同化の時間間隔はおおよそ1週間
であり、観測値から得られる情報を十分に活かしてい
るとは言えない。そこで、Local Ensemble Trans-
form Kalman Filter (LETKF; Hunt *et al.* 2007; Mi-
yoshi and Yamane 2007) を領域海洋モデルに適用し、
1日間隔という高頻度なデータ同化を行うための最適
な手法を調べた。本研究では、アンサンプル擾乱を増
幅させる複数の共分散膨張法とモデル積分時に解析イ
ンクリメントを徐々に加える Incremental Analysis
Updates (IAU; Bloom *et al.* 1996) 法を組み合わせ
た感度実験を行い、得られた解析値の力学的非平衡の
度合いや精度を比較した。その結果、Relaxation-to-
prior perturbation/spread (RTPP/RTPS; Zhang *et al.*
2004; Whitaker and Hamill 2012; Kotsuki *et al.*
2017) と IAU 法の両方が力学的非平衡と精度を改善さ

せる一方で、乗法的膨張法は改悪させていた。本研究
では RTPP/RTPS と IAU 法を組み合わせることで、
1日という高頻度な時間間隔にて LETKF を実装した
海洋データ同化システムを安定的に運用できることを
実証した。また、本研究の成果は乗法的膨張法を利用
している大気データ同化システムや重力波による影響
があるシステムに対しても応用できる。今後はこの海
洋データ同化システムを再解析データセットの作成や
海洋観測網の精度評価などを行うために発展させてい
く予定である。

青木邦弘(海洋研究開発機構)は、多重平衡性を有
する黒潮を対象に、アンサンプルシミュレーションと
機械学習を組み合わせた「確率予測」手法に関する研
究を紹介した(Aoki *et al.* 2020)。この手法は、機械学
習法の一つであるガウス混合分布モデルを用いてアン
サンプルメンバーの予測値を分類し、複数の黒潮の状
態それぞれについての、アンサンプル平均値、スプレ
ッド、発生確率を推定するというものである。アン
サンプルシミュレーションは現時点で80個のメンバ
ーで構成されている。今回は、2017年に発生した大蛇行
に注目し、その発生前の時期(2月から6月)を対象
に本手法を適用した結果を紹介した。この期間におけ
るアンサンプルシミュレーションでは、初期には全て
のメンバーが直進路(非大蛇行接岸流路)を示すもの
の、その後、大蛇行路と中間路(非大蛇行離岸流路)
に遷移するものへと分かれる。蛇行の程度を表す一般
的な指標の一つである黒潮流軸最南端緯度に対して分
類を行うと、初期時刻からおおよそ3ヶ月後に分岐が生
じ、分岐後は中間路が大蛇行路よりも若干高い確率で
生じるとの推定結果を得た。この確率の推定値は、
2017年に観測された実際の黒潮流路状態の推移と矛盾
しない。本手法ではまた、分類の情報を基に、大蛇行
路と中間路へのそれぞれの遷移過程を調べることがで
きる。今回の解析では、大蛇行路と中間路共に黒潮の
上流に生じた小蛇行が傾圧不安定によって成長したも
のであることが確認された。ただし、大蛇行路に向か
う小蛇行は九州南東沖に生じるのに対して、中間路に
向かう小蛇行は九州東沖に生じるという傾向の違いが
見出された。この研究ではまた、従来の流路判定の
指標に頼らないより客観的な確率予測手法として、2
次元の海面高度場の主要モードを主成分分析によって
抽出(特徴量抽出)することで、黒潮の面的な情報か
ら直接分類する方法を提案している。この方法を適用
すると、上述の大蛇行路と中間路は主要モードで張ら

れる相空間内の第1主成分の軸上で分類できることが示された。この第1主成分は、数学的には、時間発展演算子に従って最大成長する特異ベクトルとみなせる。この結果と上述の黒潮の分岐特性を合わせて考えれば、黒潮の多重平衡性は、直進路を基本状態とする大蛇行路と中間路への相転移現象として解釈できるかも知れない。

青梨和正（宇宙航空研究開発機構）は、「降水の混合対数正規確率密度関数（PDF）と新しい位置ずれ補正法の全天候 MWI TB の EnVar 同化への導入」と題した講演を行った。全天候のマイクロ波イメージャ（Microwave Imager : MWI）による輝度温度（Brightness Temperature : TB）を雲解像モデルの降水物理量へより良く同化するため、Aonashi *et al.* (2016) の2スケール neighboring ensemble 法を使うアンサンブルに基づく変分同化法スキーム（Ensemble variational assimilation scheme : EnVar）に、降水の非ガウスの PDF と、PDF の代用レジームを使った新しい位置ずれ補正法を導入した。それから、多くの事例の降水のアンサンブル予報摂動の既存の非正規 PDF モデルへの適合を、Lien *et al.* (2016) の手法を用いて評価した。その結果を基に、降水強度の PDF として混合対数正規分布を選び、EnVar に2つ（降水なし、降水あり）の PDF レジームを導入した。次に、EnVar で非降水、降水、強雨の代用レジームを導入し、その PDF を対象地点の周囲の PDF の平均で近似する、降水の位置ずれ補正法を開発した。この平均の水平スケールは、アンサンブル予報摂動の相似性に基づいて決めた。上記手法が、MWI の TB の観測値と第一推定値の差のバイアスと正規性を向上させた。最後に、台風1518の事例で全天候 MWI の TB 観測データを同化する実験を行った。その結果、本研究の EnVar は、従来の、降水の単一の正規分布 PDF レジームを使う EnVar に比べて、“衛星全球降水マップ”（Kubota *et al.* 2020）に近い降水解析値を与えた。降水の混合対数正規分布の導入は、台風や前線付近の強雨域で解析降水量を強め、代用レジームの使用は、解析値の降水の位置ずれ誤差を大幅に減らした。本研究の EnVar は、雲解像モデルの12時間予報までの降水予報を改善し、1日以上台風中心位置や中心気圧の予報を改善した。本研究の EnVar の予報解析サイクルは、1時刻の TB 同化よりも、台風周辺の強雨の短期予報と台風に伴った降水帯の12時間以降の予報を改善した。

3. おわりに

本ワークショップへは約60名の方に参加頂いた。同化理論の解釈という基礎的な講演から COVID-19 によるパンデミックに関する時宜を得た解析結果まで幅広い話題が提供された。また今回は非ガウスへの取り組みが3題も提供され、従来の枠組みでは扱えない領域へ踏み出そうとしている点が印象的であった。

本ワークショップは、データ同化技術を横串として様々な分野における応用や基礎理論について情報を交換していく場として機能してきた（川畑ほか 2020など）。今回も大気、海洋、純粋理論、COVID-19と様々な材料を元にした講演でありながら、その手法について様々な立場から多くの議論がなされ、参加者は新たな発見を得たものと思われる。

今後とも継続して開催し、コミュニティの広がり尽力していく予定である。過去のプログラムは、ホームページ (<http://dawe.ism.ac.jp/DAWS/index.html>, 2021年3月15日閲覧) をご参照願いたい。さらに、ワークショップ開催のお知らせなど、データ同化に関する情報交換の一助としてメーリングリストを設けているので、参加を希望する方には、データ同化研究連絡会（本稿筆者1〜7；dawsjimu@mri-jma.go.jp）までご連絡を頂ければ幸いである。

なお今回のワークショップは、統計数理研究所共同研究集会（2020-ISMCRP-5012）「データ同化ワークショップ」として開催させていただいた。誌面を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- Aoki K., Y. Miyazawa, T. Hihara and T. Miyama, 2020: An objective method for probabilistic forecasting of multimodal Kuroshio states using ensemble simulation and machine learning. *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 3189–3204. doi:10.1175/JPO-D-19-0316.1.
- Aonashi, K., K. Okamoto, T. Tashima, T. Kubota and K. Ito, 2016: Sampling error damping method for a cloud-resolving model using a dual-scale neighboring ensemble approach. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 4751–4770. doi:10.1175/MWR-D-15-0410.1.
- Bloom, S. C., L. L. Takacs, A. M. da Silva and D. Ledvina, 1996: Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256–1271. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local

- ensemble transform Kalman filter. *Phys. D: Nonlinear Phenom.*, **230**, 112-126, doi:10.1016/j.physd.2006.11.008.
- 伊藤耕介, 藤井陽介, 2020: 逆問題としての4次元データ同化. *ながれ*, **39**, 167-179.
- 川畑拓矢ほか, 2020: 第10回データ同化ワークショップの報告. *天気*, **67**, 455-458.
- Kotsuki, S., Y. Ota and T. Miyoshi, 2017: Adaptive covariance relaxation methods for ensemble data assimilation: experiments in the real atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2001-2015, doi:10.1002/qj.3060.
- Kubota, T. *et al.*, 2020: Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Products in the GPM Era. *Satellite Precipitation Measurement* (V. Levizzani *et al.*, eds.), Springer, doi:10.1007/978-3-030-24568-9_20.
- Lien, G., T. Miyoshi and E. Kalnay, 2016: Assimilation of TRMM multisatellite precipitation analysis with a low-resolution NCEP global forecast system. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 643-661, doi:10.1175/MWR-D-15-0149.1.
- 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, doi:10.1175/2007MWR1873.1.
- Rios, G. and F. Tobar, 2019: Compositionally-warped Gaussian processes. *Neural Netw.*, **118**, 235-246, doi:10.1016/j.neunet.2019.06.012.
- Whitaker, J. S. and T. M. Hamill, 2012: Evaluating methods to account for system errors in ensemble data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3078-3089, doi:10.1175/MWR-D-11-00276.1.
- Wood, S. N., 2017: *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd ed.). CRC Press, 496pp.
- Zhang, F., C. Snyder and J. Sun, 2004: Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1238-1253, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1238:IOIEAO>2.0.CO;2.
-