

## 第9回データ同化ワークショップの報告

川畑拓矢<sup>\*1</sup>・上野玄太<sup>\*2</sup>・中野慎也<sup>\*3</sup>・藤井陽介<sup>\*4</sup>  
 三好建正<sup>\*5</sup>・小守信正<sup>\*6</sup>・増田周平<sup>\*7</sup>  
 茂木耕作<sup>\*8</sup>・小槻峻司<sup>\*9</sup>・澤田洋平<sup>\*10</sup>  
 Peter Jan van LEEUWEN<sup>\*11</sup>・長尾大道<sup>\*12</sup>

### 1. はじめに

「第9回データ同化ワークショップ」を2018年10月10日に東京大学本郷キャンパスにて、データ同化研究連絡会、統計数理研究所が共催した。今回は英国のレディング大学より Peter Jan van Leeuwen 教授を招待し、国際ワークショップとして開催した(第1図)。以下、講演の概要を紹介する。

### 2. 講演概要

小守信正(海洋研究開発機構)は“Ensemble-based atmospheric reanalysis using a global coupled atmosphere-ocean GCM”と題して発表を行った。大気大循環モデルにアンサンブル手法を適用した大気データ同化システムでは、大気海洋相互作用が表現されないこともあり、全メンバーで同一の海面境界条件

を使用すると、海面付近のアンサンブルスプレッドが過小評価されやすい。そこで、全球大気海洋結合モデルに局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(Local Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF)を用いて大気観測データを同化し大気場のみを修正する準弱結合データ同化システムを構築した。2ヶ月間の解析・予報サイクルの結果、大気データ同化システムに比べ、海面境界層の気温や比湿のスプレッドが増大するだけでなく、対流圏中層の予報スキルもやや改善した。また、海上の変数には、熱帯太平洋全域に渡る大規模な相関構造が見られた(Komori *et al.* 2018)。今後は、海洋観測データを同化するなど、システムの拡張を進める予定である。

小槻峻司(理化学研究所計算科学研究センター)は、“Weight structure of local ensemble transform Kalman filter: A case with an intermediate AGCM”と題して、LETKFの変換行列の持つ空間構造について講演を行った。LETKFは、数値天気予報分野でよく用いられるデータ同化手法の1つであり、予報アンサンブルを変換行列により線形結合して解析アンサンブル(次の予報の初期アンサンブル)を得る。一般的には、局所化の影響円内の観測を同化しながら、全てのモデル格子点で独立に変換行列は計算される。簡易大気大循環モデル(Simplified Parameterizations, primitivE-Equation Dynamics: SPEEDY, Molteni 2003)を用いたデータ同化システムSPEEDY-LETKFを用いて、局所化半径・アンサンブル数・観測網を変えた感度実験を行い、変換行列の空間構造の変化について報告された。観測分布が疎な領域や局所

<sup>\*1</sup> (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.

<sup>\*2</sup> Genta UENO, 統計数理研究所.

<sup>\*3</sup> Shin'ya NAKANO, 統計数理研究所.

<sup>\*4</sup> Yosuke FUJII, 気象研究所.

<sup>\*5</sup> Takemasa MIYOSHI, 理化学研究所.

<sup>\*6</sup> Nobumasa KOMORI, 海洋研究開発機構.

<sup>\*7</sup> Shuhei MASUDA, 海洋研究開発機構.

<sup>\*8</sup> Qoosaku MOTOKI, 海洋研究開発機構.

<sup>\*9</sup> Shunji KOTSUKI, 理化学研究所.

<sup>\*10</sup> Yohei SAWADA, 気象研究所.

<sup>\*11</sup> Peter Jan VAN LEEUWEN, レディング大学.

<sup>\*12</sup> Hiromichi NAGAO, 東京大学地震研究所.

© 2019 日本気象学会



第1図 ワークショップの様子。

化円が大きい場合に、変換行列が空間的に滑らかに広がる構造となることが紹介された。また、Yang *et al.* (2009) が提案した変換行列の内挿手法が、SPEEDY-LETKF でも有効であることが示された。この内挿手法は、変換行列を計算する格子点を間引き、限られた格子点の変換行列からの内挿値で、間引かれた格子点の変換行列を代用する手法である。LETKF をベースにしたデータ同化システムの計算効率を高速化する手法であり、今後、アルゴリズム改良や現実のデータ同化システムの実験など、更に調査が進められる予定である。

澤田洋平（気象研究所）は、“Hydrometeorology as an inversion problem: Can river discharge observations improve the atmosphere by ensemble data assimilation?” と題する発表を行った。通常、水文気象学においては、まず大気モデルを解き、陸面への降水量や放射を求め、それらを入力として陸面・水文モデルを解いて陸域での洪水や干ばつの程度を予測する。本研究ではそのワークフローを反転させ、陸面の観測から逆に大気の状態を求める「逆問題としての水文気象学」を提案する。簡易なタンクモデルを河川モデルとし、LETKF をベースとした河川モデルと大気モデルの強結合データ同化システムを構築した。このシステムを用いて河川流量観測を気象庁非静力学モデル（Japan Meteorological Agency NonHydrostatic Model: JMA-NHM）に同化すると、大気場のシミュレーション精度を改善できることを観測システムシミュレーション実験により示した（Sawada *et al.* 2018）。高解像度浸水・洪水モデル Rainfall-Runoff-Inundation を用いた実観測の同化実験の進捗についても簡単に紹介した。

Peter Jan van Leeuwen（レディング大学）は“Equal-weight particle filters for geoscience appli-

cations” と題する発表を行った。粒子フィルタ（PF: Particle Filter）は完全に非線形なデータ同化手法である。しかし高次元な問題において粒子の重みが退化するという問題があり、地球物理学においては良い印象を持たれていなかった。従来の統計的な手法では、提案確率密度の遷移によって重みの退化を逃れようとしてきたが、完全には解決していない。最大の問題は、これらのほとんどが尤度に基づくサンプリング（importance sampling）を行っていることである。一つの解決策は、事後分布に照らして重みが等しくなるように、あらかじめ粒子を輸送することである。これにより、重点化の弊害が避けられる。さらに事前分布と事後分布の間のカルバック＝ライブラー距離を繰り返し計算によって最小化する輸送手法についても議論した。とくに高次元な地球物理学への応用へ適用可能で、かつバイアスを持たない効果的で非常に有望なフィルタへ発展が見込める輸送マップのカーネル埋め込みについて議論した。

川畑拓矢（気象研究所）は“Non-Gaussian probability density functions on convection initiation with a particle filter” と題する発表を行った。積乱雲が発達するためには、まず積雲が発生する必要がある。さらにはその領域で凝結が起こる必要がある。このプロセスをアンサンブル予報を用いて観察するとき、これらの過程における確率分布が非ガウス分布となっていることが予想される。このような非ガウス分布を観察するために、非静力学気象モデルを用いた粒子フィルタ（NHM-PF）を開発した。そしてこれを用いて観測システムシミュレーション実験（Observation System Simulation Experiment: OSSE）を行った。このOSSEでは、NHM-PFを90分の同化期間に対して10分ごとの同化ステップで実行した。さらに比較として同化を行わないアンサンブル実験（NoDA）を実行した。その結果、NHM-PFによる解析スコアがNoDAと比べて小さく、NHM-PFが良いパフォーマンスを示した。さらにガウス分布と非ガウス分布を客観的に判定するためにバイズ情報量規準を導入した。この基準を用いた判定結果とヒストグラムから、まだ降水の発生しない時間帯では、ほとんどの要素、領域では確率密度はガウス分布を示したが、上昇流にはすでに非ガウス分布が見られた。この非ガウス性は相対湿度、水蒸気混合比へ伝搬し、対流の発達と共にすべての要素、領域へ拡大した。このように積乱雲の発生・発達是非ガウス過程であることが明らかとな

り、そのソースは上昇流であると結論づけた。

長尾大道（東京大学地震研究所）は、伊藤伸一（東京大学地震研究所）他との共同研究である“Model selection of material structure based on empirical Bayes method”について発表を行った。鉄鋼材料内部に形成される粒構造の時間発展は Phased Field Model (PFM) で記述されるが、PFM は観測不可能な現象論的パラメータを多く含む大自由度モデルであるため、限られた観測データからパラメータや初期状態を推定することは容易ではない。また、通常得られる計測データは時間発展途上の粒構造の静止画像であるため、パラメータや初期状態の推定を効率的に行うためのデータ設計が必要となる。本研究では、PFM に基づくデータ同化により、時系列でない粒構造写真からパラメータや初期状態を推定するための方法論を提案する。具体的には、異なる条件下の実験によって得られた複数の静止画像から粒構造の特徴量を時系列として構築し、PFM から得られる理論値との比較を通じてパラメータの事後分布を構成する。その事後分布を経験ベイズ法に基づいて評価することにより、あらかじめ与えた粒構造の候補の中から、現実的な計算時間内で最適な初期粒構造の選択を可能にした。

中野慎也（統計数理研究所）は“On marginal likelihood estimation methods in ensemble-based data assimilation”と題する発表を行った。シミュレーションや観測モデルに含まれる未知パラメータを推定する方法として、周辺尤度を計算するという方法がある。周辺尤度の計算は、粒子フィルタにおいてはモンテカルロ近似を用いることが一般的であり、アンサンブルカルマンフィルタにおいてもモンテカルロ近似を応用することは可能だが、アンサンブルカルマンフィルタではガウス近似を用いても簡単に周辺尤度を計算できる。しかし、一般にモンテカルロ近似とガウス近似の結果は一致しない。そこで、Lorenz and Emanuel (1998) のモデルを用いてモンテカルロ近似とガウス近似の挙動を比較したところ、モンテカルロ近似では、メンバー数が少ない場合に周辺尤度の値が小さくなること、観測ノイズを過大評価する傾向があるという結果が得られた。このことは、2つの方法で計算された周辺尤度を比較することにより、各近似の特性を評価できる可能性を示唆する。

### 3. おわりに

本ワークショップへは約40名の方に参加頂いた。今

回はレディング大学の van Leeuwen 教授にご参加頂き、特に非線形なデータ同化について深く議論が行われた。本ワークショップでは、理論的研究から気象・海洋分野での応用、物質材料への応用など極めて幅広い話題について発表があった。基本的に英語で議論が行われたが活発な議論が行われたことを講演者および参加者には深く感謝したい。

データ同化は天気予報の基盤技術であると共に、地球物理の各分野のみならず幅広い分野での基盤技術として活用されている。本ワークショップは、データ同化技術を横軸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 2018など）、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://daweb.ism.ac.jp/DAWS/index.html>, 2018年11月8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1～8；[dawsjimu@mri-jma.go.jp](mailto: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（30-共研-5001）「データ同化ワークショップ」として支援いただき、van Leeuwen 教授の参加も同研究所のご厚意による。さらに東京大学理学部の三浦裕亮准教授には会場提供の労を執って頂いた。誌面を借りて厚くお礼申し上げたい。

### 参考文献

- 川畑拓矢ほか, 2018: 第8回データ同化ワークショップの報告. 天気, 65, 330-333.
- Komori, N., T. Enomoto, T. Miyoshi, A. Yamazaki, A. Kuwano-Yoshida and B. Taguchi, 2018: Ensemble-based atmospheric reanalysis using a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 3311-3323.
- Lorenz, E. N. and K. A. Emanuel, 1998: Optimal sites for supplementary weather observations: Simulation with a small model. *J. Atmos. Sci.*, 55, 399-414.
- 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.
- Sawada, Y., T. Nakaegawa and T. Miyoshi, 2018:

Hydrometeorology as an inversion problem: Can river discharge observations improve the atmosphere by ensemble data assimilation? *J. Geophys. Res.*, **123**, 848-860.

Yang, S.-C., E. Kalnay, B. Hunt and N. E. Bowler, 2009: Weight interpolation for efficient data assimilation with the Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 251-262.

---