

## 第10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>, 眞木貴史<sup>\*8</sup>  
 土居知将<sup>\*9</sup>, 野村俊一<sup>\*10</sup>, 雨宮新<sup>\*11</sup>, 山崎哲<sup>\*12</sup>  
 露木義<sup>\*13</sup>

### 1. はじめに

「第10回データ同化ワークショップ」を2020年1月30日に海洋研究開発機構横浜研究所にて、データ同化研究連絡会、統計数理研究所が共催した。今回は幅広い話題の6件の招待講演で構成された(第1図)。以下、講演の概要を紹介する。

### 2. 講演概要

眞木貴史(気象研究所)は、トップダウンアプローチを用いた炭素収支解析に関して発表を行った。まず炭素収支解析や二酸化炭素濃度分布の重要性を説明し、炭素収支逆解析においてこれまでよく用いられてきたペイズ統合逆解析に関してその原理と気象研究所/気象庁における適用例(二酸化炭素分布情報)、そ

の問題点として観測地点数が気象観測と比較して非常に疎であることを示した。現在実施中の研究として、この問題点を解消するために近年急速に充実しつつある衛星観測データを取り込む上で不可欠であるバイアス補正法の開発に関する紹介を行い、バイアス補正後の衛星観測データが炭素収支解析に与える影響を示した。最後に、現在開発を進めているより高度なデータ同化手法(LETKF: Local Ensemble Transform Kalman Filter)の導入例を示した。質疑では、二酸化炭素濃度プロファイル解析値の赤外サウンダデータ同化時の先験情報としての利用可能性などが指摘された。

土居知将(海洋研究開発機構)は、“Oceanic iron distribution of the global ocean estimated by data assimilation approach”と題して発表を行った。鉄は、植物プランクトンの成長にとって不可欠な要素であり、海洋溶存鉄の利用可能性が低下すると一次生産速

\*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 Takashi MAKI, 気象研究所。

\*9 Toshimasa DOI, 海洋研究開発機構。

\*10 Shun-ichi NOMURA, 統計数理研究所。

\*11 Arata AMEMIYA, 理化学研究所。

\*12 Akira YAMAZAKI, 海洋研究開発機構。

\*13 Tadashi TSUYUKI, 気象大学校(現:気象研究所)。



第1図 ワークショップの様子

度が制限されることが知られている。近年の海洋観測により、溶存鉄の濃度分布に関する情報が多くの海域で示されるようになってきているが、海洋内部での溶存鉄の濃度や動態のプロセスに関する知見はまだ少ない。そこで、海洋溶存鉄の全球規模での分布と循環を把握するために、移流拡散モデルに簡易的な生物化学プロセスを付加して海洋内部の鉄の動態を表した鉄循環モデルに、GEOTRACES（正式名称：An International Study of the Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes）に代表されるような微量元素の海洋観測データから入手した溶存鉄の観測データを同化して、海洋溶存鉄濃度の3次元格子化データセットを作成した。モデルでは、海洋に降下する大気ダストに含まれる鉄の溶出と大陸棚の堆積物から溶出する鉄のフラックスを、外部から海洋への鉄の入力として設定した。同化手法にはグリーン関数法を使用し、生物化学プロセスのモデルパラメータと海底からの溶出を制御変数として最適化することで、モデルと観測値を統合した。表層付近では大きな変動特性等の不確定性のため、溶存鉄分布の再現には課題を残したが、中深層における最適化結果は、同化の効果を発揮した良好な再現性を示した。得られた3次元データから海盆ごとに鉄循環プロセスを調べた結果、鉄の循環プロセスに大きな違いがあることが示唆されるなど、ここでのデータ同化のアプローチが、海洋内部の鉄循環プロセスを解析するのに有望であることが示された。

野村俊一（統計数理研究所）は、“Inversion of spatio-temporal variation in interplate slip rate from repeating earthquakes”と題する発表を行った。繰り返し地震の確率的発生過程を表す点過程モデルであるBrownian Passage Time (BPT) 分布更新過程を非定常な時空間モデルへと拡張し、繰り返し地震活動からすべり速度の時空間変動を推定する統計的手法を紹介した。プレート沈み込み帯における準静的滑り速度の変化を3次元B-スプライン関数で表現することにより、米国San Andreas断層におけるスロースリップの伝播の様子を時空間的に捉えた結果を示した(Nomura *et al.* 2014)。さらに、B-スプライン関数の節点配置に局所的な不連続性と集中性を取り入れることにより、東日本太平洋沖における大地震に関連した滑りの時空間変化を示し、大地震との関連について議論した(Nomura *et al.* 2017)。

雨宮 新（理化学研究所）は、“Application of

machine learning methods to model bias correction: Lorenz-96 model experiments”と題し、データ同化を通じた系統的なモデルバイアス補正への機械学習手法の応用に関する研究の報告を行った。モデルバイアス補正の手法としては、補正項の関数形を予め定めておいて係数を推定するのが一般的であった。一方でRecurrent Neural Network (RNN) などを用いてデータのみから時系列予測を行う手法が近年注目を集めており、大自由度のカオス力学系の予測においても、バイアスを含む不完全な基礎方程式に基づくモデルと組み合わせた応用が研究されている。機械学習の文脈ではそのような研究は「真の」時系列を仮定し学習に用いることが多いが、本研究では、観測とモデルの誤差の両方を考慮するデータ同化の観点からこの問題に取り組む。LETKFに動的なバイアス補正を組み合わせ、複スケールのLorenz-96モデルを用いた理想実験にて挙動を調べた。まずは単純な線形回帰による補正によって共分散膨張の値を小さく抑えられ解析値の精度が改善することを示した。RNNによる補正については現時点では開発中であるが、実装の一例として、内部状態を保持し長期的な時系列への依存性を表現するのに適したRNNの一種であるLong Short-term memoryを用いた方法を紹介した。補正された力学場の整合性や、補正項の不確かさの考慮、過去の時刻への依存性がどの程度必要かなど、議論すべき点が多く残っており、今後実験を重ねて考察を深める予定である。

山崎 哲（海洋研究開発機構）は、ALEDAS (Atmospheric general circulation model for the Earth Simulator-LETKF Ensemble Data Assimilation System) に実装されたEFSO (Ensemble Forecast Sensitivity to Observations) による観測インパクトの推定が、観測システム実験 (OSE: Observing System Experiments) で得られる実際の観測インパクトをどの程度定量化できるのかを検証した。EFSOとは、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 (FSO: Forecast Sensitivity to Observations) をアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) 用に拡張したもので (榎本ほか 2015)、OSEを行わずに (別のデータ同化サイクルを回さずに) 個々の観測インパクトを診断できる。これまで、(E)FSOと、特定の観測種やある特定の領域 (例えば北極域全体など) での観測を取り除いたOSEで得られる観測インパクトとの比較はいくつか行われてきたが、(1) 船舶など

による観測キャンペーンでの少数の観測点での観測インパクトに対する(E)FSOは、影響の伝播を加味しなければならないため、あまり行われていない、(2)(E)FSOは一般に24時間以下の短期の予報値に対する改善を診断しており、1週間に及ぶような中期の予報での観測インパクトをどの程度診断できているかは自明ではない。この2点に注目して、観測キャンペーンを模した少数のラジオゾンデ観測点のセットを北半球および熱帯から12箇所を選び、それぞれの観測セットを全球観測システムから取り除いたOSEを行い、EFSO値と6時間～7日予報での実際の観測インパクト(標準実験とOSEとの差)を評価した。12箇所の観測セットを熱帯・中緯度・北極域から4箇所ずつ選ぶことで、観測される緯度帯ごとの違いを調査した。2015年12月～2016年2月の期間を対象として予報実験を行った。ここでのEFSO値は予報対象時刻を6時間としている。

EFSO値と、6時間予報での実際のインパクトとを比較すると、観測される緯度帯に依らず、EFSO値と実際のインパクトが定量的に良く一致した。また、EFSO値で見積もられる各観測セット間の相対差(順位)は、やはり観測された緯度帯に関係なく、2～3日程度の短期予報の期間は維持されることがわかった。このことは、EFSOでの観測インパクトの診断が、短期予報での観測インパクトを見積もるのに有効であることを示している。しかしながら、7日程度の中期予報になると、熱帯と中緯度での観測のインパクトは、EFSO値がそれぞれ異なっているにもかかわらず、ほとんど同じになってしまうこと、北極での観測インパクトの相対順位だけが中期予報においても維持されることがわかった。つまり、中期予報においては、観測キャンペーンが行われる緯度帯によってインパクトが変わりうること、そしてEFSOでの見積もりが北極域での観測では有効になることを示唆している。この理由について、講演者らは二つのメカニズムを考察している。一つは北極域での観測密度が北半球において相対的に低いこと、個々の観測のインパクトが大きくなりそれが予報後半まで残りやすいこと、もう一つは、北極域は、中緯度に対して温帯直接子午面循環やRossby波による波動エネルギー輸送の「力学的上流」に位置している、中期予報から顕著になる中緯度での傾圧不安定などによる観測インパクトの無効化に対して堅牢な観測インパクトを入力できることである。

露木 義(気象大学校)は、“Ensemble Kalman fil-

tering based on potential vorticity for atmospheric multi-scale data assimilation”(Tsuyuki 2019)について発表を行った。大気のマルチスケールデータ同化は、総観規模擾乱などを表す時間スケールの長い状態変数(遅い変数)と、積雲対流や重力波などを表す時間スケールの短い状態変数(速い変数)をともに精度よく推定することを目指す。速い変数の観測データが十分得られない場合にEnKFによるデータ同化を行うと、遅い変数と速い変数の間の予測誤差相関は非常に弱いはずであるが、サンプリングエラーによって偽の誤差相関が計算され、それによって遅い変数の解析精度が低下する。そこで、空間平滑した状態変数から算出した渦位アノマリーにインバージョンを施して、自由大気中の力学変数をバランス成分と非バランス成分に分解し、両者の間の予測誤差相関を無視する方法を提案した。ただし、状態変数の分解によって生じるサンプリングエラーを抑制するために、質量変数の調整が必要になる。また、この方法によればバランス成分と非バランス成分に異なる共分散局所化を適用できるので、局所化における力学バランスの問題に適切に対処することが可能になる。この方法を浅水方程式モデルに適用した結果を紹介し、アンサンブルサイズを増やすよりかなり少ない計算機資源で解析精度を上げられることを示した。高解像度大気モデルに適用する場合には、渦位インバージョンを低解像度モデルで行うことによって計算量をさらに減らせることを指摘した。

### 3. おわりに

本ワークショップへは約40名の方に参加頂き、なかでも後半のセッションにはZupanski夫妻(コロラド州立大学, Spire Global社)も参加され、熱心にメモをとりながら聴講されていた。本ワークショップでは、物質循環、海洋、地震、AI、観測インパクト、新手法の提案と、幅広い話題について発表があり、活発な議論が行われた。さらに三好建正(理化学研究所)と中野慎也(統計数理研究所)はそれぞれ前後半を司会し、参加者とともに議論を盛り上げた。

データ同化は天気予報の基盤技術であるのみならず、幅広い分野での応用技術として活用されていることがうかがえる貴重な機会であった。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2019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>, 2020. 3. 3 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](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（2019-ISMCRP-5005）「データ同化ワークショップ」として支援いただき、また海洋研究開発機構には会場を使用させていただいた。誌面を借りて厚くお礼申し上げたい。

#### 参 考 文 献

榎本 剛, 川畑拓矢, 藤田 匡, 古林慎哉, 堀田大介, 山

- 崎 哲, 伊藤耕介, 2015: 第 6 回 WMO データ同化シンポジウム参加報告. 天気, 62, 283-290.
- 川畑拓矢ほか, 2019: 第 9 回データ同化ワークショップの報告. 天気, 66, 161-164.
- Nomura, S., Y. Ogata and R. M. Nadeau, 2014: Space-time model for repeating earthquakes and analysis of recurrence intervals on the San Andreas Fault near Parkfield, California. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 7092-7122.
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida and M. Matsu'ura, 2017: Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 208, 468-481.
- Tsuyuki, T., 2019: Ensemble Kalman filtering based on potential vorticity for atmospheric multi-scale data assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, 1191-1210.