

# 研究終了報告書

## 『観測の価値』を最大化するデータ同化・予測手法の開発

研究期間：2019年10月～2022年3月

研究者：小槻 峻司

### 1. 研究のねらい

データ同化は、プロセス駆動型の数理モデルと観測データを最適に繋ぐ、統計数理や力学系理論に基づいた学際的科学である。特に、数値天気予報においては根本的な役割を果たし、データ同化技術は高度に発展してきた。近年、気候変動の影響と見られる激しい気象変化が世界中で問題となり、安全な人類生存環境の保全にはデータ同化技術の進展による天気予報精度改善が必須となっている。

現在の天気予報システムは6時間毎に $10^6\sim 10^7$ 個もの観測データを同化して予測初期値を更新する。データ同化は今日のビッグデータ利用の最前線を切り拓いてきた。また、リモートセンシング技術の発展に伴い、地球環境観測衛星など人類が地球大気を計測する技術・観測データは多岐にわたる。本来、同化する観測データが増えるほど予測初期値と天気予報の精度改善が期待される。しかし以下に挙げる限界問題のため、観測ビッグデータの価値を最大限に利用できない状況に直面している。

#### (1) 情報抽出限界

観測データの予報改善への貢献度を定量化する統計手法(観測インパクト推定)では、同化した観測のうち46%は予報を改悪させている事が判明している。また、データ同化の際に同化する観測をあえて少なくすることで、逆に天気予報の精度が改善することが複数の数値予報センターから報告されている。これらは現状のデータ同化手法では観測データ情報を十分に抽出できない情報抽出限界として認識されている。

#### (2) 多種多様な物理量を計測するリモートセンシングデータの活用限界

地球環境の多種多様な物理量が観測可能である一方、計測データには固有の特性があり、新しい観測データを同化する手法はその都度開発が必要となっている。地球環境分野では、増大する膨大な観測データを有効に活用するデータ同化手法の開発が遅れ、十分に活かされていない状況である。観測物理量に依存しない、より普遍的なデータ同化手法の開発が必要とされている。

これらの限界問題は Data Rich な時代にこそ直面し、分野に限らず、現代の一般的な課題である。本研究では、数値天気予報で直面している観測 Big Data 利用限界を解決すべく、下記3つの面から研究に取り組んだ。

- 処方箋1: 情報利用限界の数理説明と新しいデータ同化手法の開発
- 処方箋2: 「観測の価値」を上げるためのセンサ位置最適化研究
- 処方箋3: 観測ビッグデータを情報圧縮して利用する手法の開発

### 2. 研究成果

## (1) 概要

本研究は、『観測の価値を最大化するデータ同化・予測手法開拓』を目標に定め、(a) 情報利用限界の解明と新手法提案、(b) 「観測の価値」を高めるセンサ位置最適化、(c) 観測ビッグデータを情報圧縮して利用する手法、の3つの面から研究に取り組んだ(図1)。

(a) 情報利用限界の解明と新手法提案では、新しいアンサンブル同化手法・ハイブリッドデータ同化を開発した。課題推進の中でメルボルン大学の Craig Bishop 教授とハイブリッドデータ同化について共同研究を進めるアイデアが生まれ、国際強化支援も受けて研究推進した。また、非ガウスなデータ同化手法として局所粒子フィルタ研究に取り組み、全球大気モデル SPEEDY を用いた実験で、既存のアンサンブルデータ同化手法を上回る解析精度を示した。

(b) 「観測の価値」を高めるセンサ位置最適化では、センサ位置最適化手法のスパースセンサ位置最適化の高度化に取り組んだ。センサ位置の選定や、復元方法にデータ同化や局所化を適用することで、既存手法を上回る状態場の推定を可能とした。北海道の降水量を対象とした実験で、観測地点を最適配置することで、効果的に降水分布を復元可能であることを示した。全球大気モデル SPEEDY に適用し、動的な観測位置決定の問題に対しても、従来のアンサンブルスプレッドに基づく観測位置決定よりも有効な位置決定が可能である事を示した。

(c) 観測ビッグデータを情報圧縮して利用する手法開発では、気象庁・気象研究所との共同研究を実施し、機械学習技術の深層畳み込み学習 (DCNN) を用いて、人工衛星ひまわり8号の時空間的に密な輝度温度からの情報特徴量抽出研究を行った。また、気象予測情報を深層学習により圧縮し、深層学習を用いた洪水氾濫モデルのエミュレータを開発した。

その他、新型コロナウイルス感染数理モデル・データ同化システム構築や、脳科学分野との連携を進めた。特に後者では、研究会を契機にカオスや制御数学の専門家と議論する場を得て、科研費・基盤研究 A、ムーンショット目標 8 課題等への研究発展を成功させた。

### 研究課題名 「観測の価値」を最大化するデータ同化・予測手法の開発

研究者氏名 小槻 峻司 (千葉大学・国際高等研究基幹 教授)

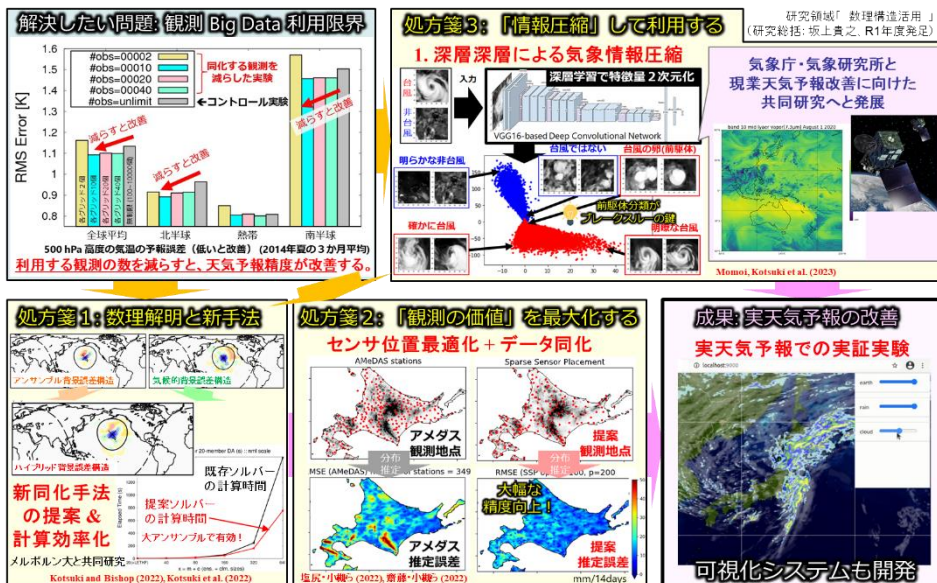


図-1 研究成果の全体像

## (2) 詳細

(a) 情報利用限界の解明と新手法提案

数値気象予測によく用いられる局所変換アンサンブルカルマンフィルタ(LETKF)の高度化手法に取り組み(以下、ハイブリッドデータ同化手法)、LETKF にハイブリッド背景誤差共分散を導入した。これは予測アンサンブル摂動(予測項)に、気候的摂動(気候項)を追加することでハイブリッド背景誤差共分散を考慮する手法である (Kretschmer et al. 2015)。また、一般にLETKF で行われる観測誤差分散の膨張に基づく局所化ではなく、新たに観測空間のアンサンブル摂動を減衰させる局所化手法を導入し、この減衰局所化により予測項と気候項に異なる局所化スケールを適用可能であることを示した。全球大気モデル SPEEDY を用いた実験の結果、このハイブリッド背景誤差共分散により、特に観測が疎な地域で改善傾向がみられることが示された (図-2)。更に LETKF において、局所的な観測数とアンサンブル数に応じて異なる固有値分解を行う新しい解法を導入し、大アンサンブル実験においてLETKFの計算量を大きく削減可能であることを示した。以上の成果を米国気象学会・Monthly Weather Review 誌等に論文発表した[Carrío et al. 2021; Kotsuki and Bishop 2022]。本テーマは2021年度国際強化支援も受け、メルボルン大学の Craig Bishop 教授との研究として実施した。

更に局所粒子フィルタに関する研究に取り組んだ。気象における数理構造・情報特徴量は、主流なデータ同化手法であるカルマンフィルタや変分法の仮定する誤差の正規分布性を満たさない可能性がある。より仮定の少ないデータ同化手法である粒子フィルタの開発を進め、SPEEDY に実装して実験を行ってきた。予報粒子を用いたデルタ関数の集合で事前分布を表現するのではなく、予報粒子を中心としたガウス分布・カーネルの集合として事前分布を表現する混合ガウス分布・局所粒子フィルタ (LPGFM)への研究を深め、LETKF を上回る予測精度を実現した。以上の成果を欧州地球物理学学会の Geoscientific Model Development 誌に論文として発表した [Kotsuki et al. 2022]。また、局所粒子フィルタのリサンプリングについても検討を行い、既往研究で用いられてきた最適輸送問題ではなく、エントロピー正則・最適輸送問題を解くことで、計算高速化と力学的にバランスした事後粒子の生成を可能とした。

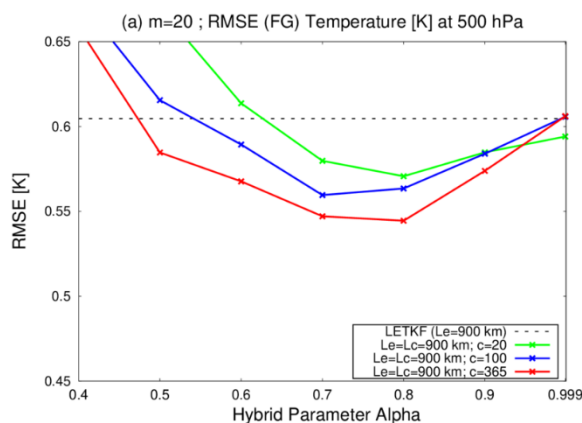


図-2 SPEEDY-LETKFを用いて行ったモデル第4層の気温予測 RMSE。点線はアンサンブル数20のLETKF実験であり、緑線・青線・赤線はそれぞれ、気候項数を20, 100, 365としたときのHybrid LETKF実験を、ハイブリッドパラメータ $\alpha$ の関数として示している。Kotsuki and Bishop (2022)のFigure 7から引用。

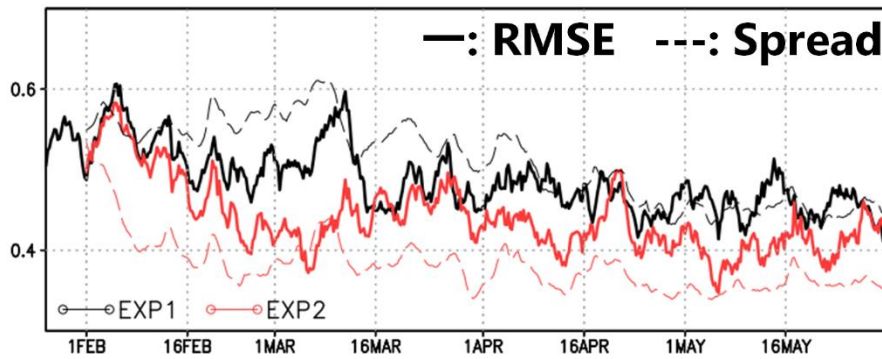


図-3 SPEEDY 用いて行ったモデル第 4 層の気温予測 RMSE (実線) とアンサンブルスプレッド (点線)。アンサンブル 40 の実験であり、黒線・赤線はそれぞれ LETKF・LPFGM の結果を示す。Kotsuki et al. (2022) の Figure 11 を改変。

(b) 「観測の価値」を高めるセンサ位置最適化

「観測の価値」を高める手法として、流体解析分野で発展してきたセンサ位置最適化手法のスパースセンサ位置最適化の高度化に取り組んだ。スパースセンサ位置最適化 (SSP) は、より少ない観測点で全体の場を推定することに着目し、過去のデータから最適なセンサ位置を決定し、場の再構成を実現可能にする (Manohar et al. 2018)。これまで気象分野での前例はなく、センサ位置最適化を大気などの高次元系に適用するための手法を開発し、北海道の雨量計を対象とした実験で SSP の有効性を示した (図-4)。更に、このスパースセンサ位置最適化をアンサンブル予測に適用する手法についても取り組み、SPEEDY を用いた実験で機動的観測についても既存のアンサンブルスプレッドを用いた方法を上回ることが可能である事を示した。研究成果を踏まえ、2023 年度から鉄道総研との実証実験を含む共同研究を開始する。

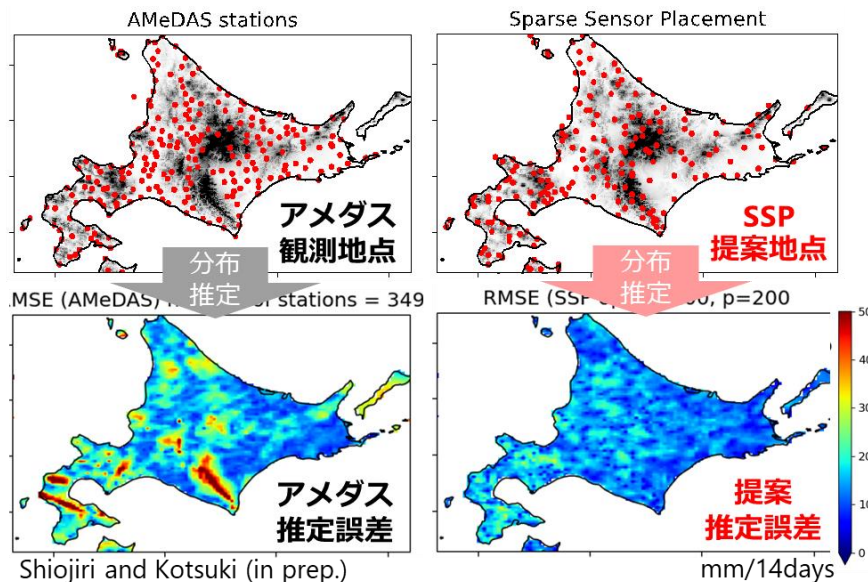


図-4 北海道の 14 日積算降水量(mm)を対象としたスパースセンサ位置最適化 (SSP) 実験。既存のアメダス観測地点と(左上)、SSP の提案する観測地点 (右上) の双方から LETKF を用いて降水量を推定し、レーダー解析雨量と比較した場合の誤差を示す (左下・右下)。SSP の提案する雨量地点配置により高精度な降水分布推定が可能であることを示している。

**(c)観測ビッグデータを情報圧縮して利用する手法開発**

情報から数理構造や情報特徴量を抽出して活用するデータ同化・予測技術開拓のため、機械学習を用いた情報特徴量の抽出研究を進めた。まず人工衛星ひまわり 8 号の提供する時空間的に密な輝度温度からの情報特徴量抽出研究を行った。深層畳み込みニューラル・ネットワーク(DCNN)を用いて、衛星画像からの台風・非台風診断器作成を行い、良好な結果を得ると共に、Grad CAM による DCNN の判断根拠の可視化技術を開発した。この技術を基盤に、気象庁・気象研究所と共同研究契約の元でひまわり画像の情報圧縮研究を進め、畳み込み変分オートエンコーダを用いて固有直交分解よりも高精度な情報圧縮技術を開発した。深層学習を用いた洪水氾濫モデルのエミュレータ(代理モデル)開発も進めた。入力となる降水予測情報や、出力となる浸水深を事前にオートエンコーダで情報圧縮して重要な情報を抽出し、抽出した情報特徴量の間を全結合 NN で学習することで、少ない訓練データで効率的なエミュレータ開発を可能にし、米国気象学会誌の AI ジャーナルで論文を発表した [Momoi, Kotsuki et al. 2023]。気象衛星情報を集約して全球気象予測システム NEXRA のパラメータ推定に活用する研究を進めた [Kotsuki et al. 2020; Kotsuki et al. 2023]。

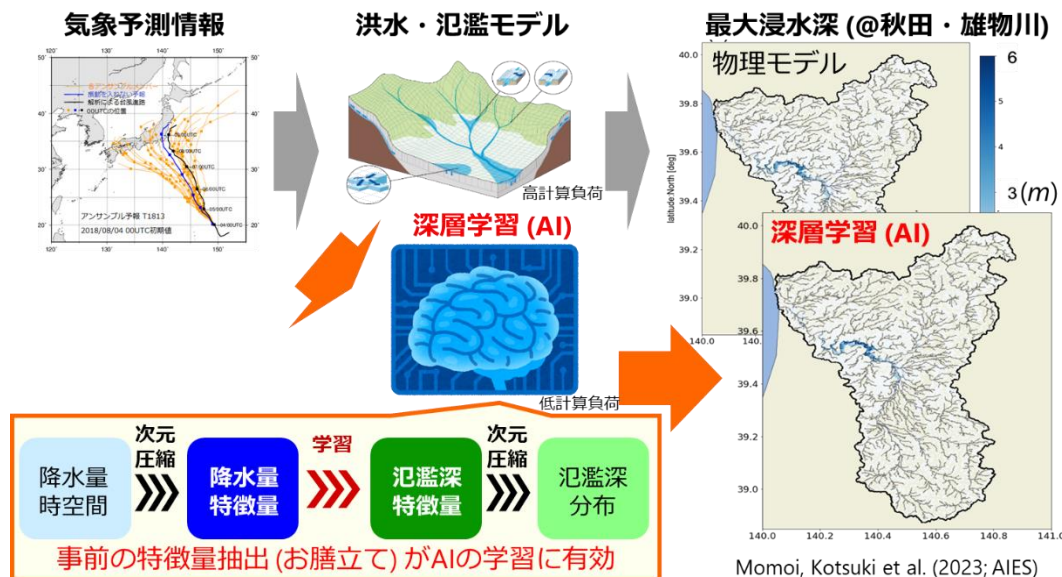


図-5 深層学習による情報特徴量抽出を活用した洪水氾濫モデル・エミュレータの模式図。

**新分野開拓と発展**

- 新型コロナウイルス感染に関する追加支援: 感染数理モデル・データ同化システムを構築し、各国の統計データから社会的感染力を推定可能なシステムを開発した。
- 共同研究フイービリティスタディ(FS)支援: 東京大学・小林亮太氏と、データ同化技術の他分野、特に脳科学分野への活用について研究を進めた。時系列データ解析技術や深層学習を災害予測に活用する研究に繋がり、科研費基盤 A の獲得に繋がった。
- 数理・情報技術による気象情報の情報圧縮・数理構造活用というアイデアを基盤に、小林亮太氏・薄良彦氏・井元佑介氏との、ムーンショット型研究・目標 8 の採択に繋がった。

- 船富卓哉氏の進める幾何変換技術とデータ同化技術を活用し、JAXA の全球降水マップ GSMaP の非観測域を補完する研究を開始した。

### 3. 今後の展開

#### (a) 情報利用限界の解明と新手法提案

- 局所粒子フィルタ: 混合ガウスによる事前分布推定で既存の LETKF を上回る解析精度を示す事が出来たことは大きな成果である。次の 3 年間で現実大気モデルを用いた様々な実験を行っていく。また、エントロピー正則・最適輸送問題を解くことで、物理的に整合的な解析粒子を生成するリサンプリングは、局所粒子フィルタを実際の大気モデルに適用していく際のスタンダードになると期待できる。局所粒子フィルタは、事前分布の非ガウス性を近似するために大アンサンブルが必要になるが、計算負荷の高い数値モデルの大アンサンブル実験は困難である。そのため、エミュレータ・代理モデルを活用して数値モデルをエミュレーティングし、アンサンブルを強化した粒子フィルタ研究を開発していく方針である。

#### (b) 「観測の価値」を高めるセンサ位置最適化観測の価値

- センサ位置最適化: 理想化実験が可能な一方で、「現実世界に測器を置いて手法の有効性を検証する」実証実験が困難な研究である。さきがけ研究成果の発表の中から、公益財団法人・鉄道総合技術研究所との議論が生まれ、2023 年度から共同研究費を受託して、実際の雨量観測点の最適配置問題を開始する。鉄道総合技術研究所による実際の雨量計配置などの実証実験を行う計画で、開発してきた数理手法を検証する研究となる。
- センサ位置の最適化: 現業数値予測でも重要であり、ラジオゾンデなどの静的な観測網や、航空機・船舶による機動的観測の価値を向上させることが出来る。これらを解決する数理手法は、気象庁や気象研究所内でも必要性が議論されている。費用対効果だけではなく、予算や人員整理も関係する政治的な議論も含むため社会実装までの時間を予測することは困難であるが、科学者としては数理手法の改善を継続し、有効性を示していきたい。

#### (c) 観測ビッグデータを情報圧縮して利用する手法開発

- 機械学習による情報圧縮: 数理構造の抽出を機械学習による情報圧縮で行うというアイデアは、気象庁・気象研究所との「静止衛星ひまわりの衛星データ・情報圧縮共同研究契約」につながり、更なる技術開発を進め、次年度以降に実証実験へと発展させていく。
- 物理モデルエミュレータ: 深層学習により気象情報を情報圧縮して活用する物理モデルのエミュレータは、計算負荷の高い予測を可能とするものであり、災害予測分野で注目されている。エミュレータの開発は単純な予測計算のみならず、ハイブリッドデータ同化や粒子フィルタのアンサンブル boosting に活用できる。その際に、ハイブリッドデータ同化で flow-dependent なアンサンブル摂動と、static なアンサンブル摂動に異なる重みを与えたのと同様に、数値モデルの出力するアンサンブル摂動と、エミュレータの出力するアンサンブル摂動に異なる重みを与える事が重要と予測される。ハイブリッドデータ同化と代理モデルを融合し、低計算負荷かつ高精度なデータ同化手法を、次の 3 年間で発展させる。
- 数理・情報技術による気象情報の情報圧縮・数理構造活用: さきがけ領域内の連携を基盤に、小林亮太氏・薄良彦氏・井元佑介氏との、ムーンショット型研究・目標 8 の採択に繋がった。

目標 8 の中では、数理研究に軸足を置いた研究として差別化を図っている。2050 年の社会実装を目標に掲げる息の長い研究であるが、さきがけ研究で培った経験・実績・繋がりを、本研究の成功に発展させていきたい。

#### 4. 自己評価

##### 研究目的の達成状況

- 情報利用限界の解明と新手法提案: ハイブリッドデータ同化の開発と局所粒子フィルタの研究を推進し、複数の論文を掲載・投稿しており、十分に目標を達成している [Kotsuki and Bishop 2022 MWR; Kotsuki et al. 2022 GMD; Oishi and Kotsuki (in revision for SOLA)]
- 「観測の価値」を高めるセンサ位置最適化: 流体解析分野で発展してきたセンサ位置最適化手法を地球科学の問題に適用する方法を開拓した。単純な手法の適用ではなく、局所化や L2 正則化などの既存のデータ同化技術を組み合わせることで、大次元系でも有効な手法として発展させており、十分に目標を達成している。
- 観測ビッグデータを情報圧縮して利用する手法開発: 深層学習を用いた情報圧縮研究を進め、物理モデルエミュレータ開発に繋げた。気象庁・気象研究所との共同研究推進や、国際誌論文出版 [Momoi, Kotsuki et al. 2023 AIES]など、十分に成果を挙げている。
- 現実気象予測の改善: 膨大な衛星データからの情報を集約して、パラメータ推定を介して数値モデルに取り込む方法を開拓した。全球大気データ同化システム NICAM-LETKF を用いて、可降水量や全球レーダー観測を活用したパラメータ推定・数値気象予測の改善に繋げ、目的を達成している [Kotsuki et al. 2020 JGR; Kotsuki et al. 2023 JGR]。

##### 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

- 代表者と、技術補佐員 2~3 名、学生 2~3 名の体制で研究を推進した。
- JST の追加支援(国際強化支援、共同研究フイージビリティスタディ(FS))も受け、研究を推進した。これらの追加支援を元に、メルボルン大学やメーランド大学との国際共同研究や、領域内連携などの活動が進み、代表者の想定以上の研究発展を得ることができた。
- 新型コロナウイルス感染症の影響により、2022 年度の前半までは、国内・国際出張が殆ど実施できない状況が続いた。そのため、JST の費目間流用の規定内で予算計画を変更し、計算機資源の拡充や、技術補佐員の雇用による研究成果加速を行った。

##### 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

- 局所粒子フィルタは、近年世界的にも注目されている。今回の成果は、変換行列型の局所粒子フィルタを現実大気モデルに適用していく際の基盤となる技術であり、学術的価値は非常に高いと自負している。数値天気予報の改善は社会・経済へも影響し、波及効果が高い。
- スパースセンサ位置最適化は、これまで「既にあるデータをどう活用するか」という研究が主であった数値気象予測業界において、「如何に費用対効果の高い観測を実現するか」を検討する基盤となる手法であり、学会発表の感触などから、非常に価値が高い研究成果と自負している。鉄道総合技術研究所との共同研究に発展するなど、実社会においても費用対効果の高い観測を実現する技術として、非常に価値の高い研究と考える。

領域独自の評価項目: 分野間連携

- 領域の議論から、小林亮太氏・薄良彦氏・井元佑介氏・船富卓哉氏との共同研究に発展している。特に、ムーンショット型研究・目標 8 においては、アンサンブル気象予測の中からの数理構造抽出に取り組んでおり、さきがけ研究により分野間連携が強化された。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 14件

1. **Kotsuki, S.**, and Bishop, H. C.. Implementing hybrid background error covariance into the LETKF with attenuation-based localization: experiments with a simplified AGCM. Mon. Wea. Rev.. 2022, 150, 283-302, doi:10.1175/MWR-D-21-0174.1

数値気象予測に用いられる LETKF にハイブリッド背景誤差共分散を導入する手法を開発した。また局所化手法にアンサンブル摂動を減衰させる新手法を提案した。全球大気モデル SPEEDY の実験では、ハイブリッド LETKF は特に観測が疎な領域での改善傾向が見られた。局所的な観測数とアンサンブル数に応じて異なる固有値分解を行う新しい解法も導入し、大アンサンブル実験時の LETKF の計算量を大きく削減可能であることを示した。

2. **Kotsuki, S.**, Miyoshi, T., Kondo K., and Potthast R.. A Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension Implemented with Minor Modifications to the LETKF. Geosci. Model Dev.. 2022, 15, 8325-8348, doi:10.5194/gmd-2022-69

気象における数理構造・情報特徴量は、主なデータ同化手法であるカルマンフィルタ等が仮定する誤差の正規分布性を満たさない可能性がある。仮定の少ない同化手法である粒子フィルタに着目し、簡易全球大気モデル SPEEDY を使って、局所粒子フィルタ(LPF)と、LPF の事前分布近似ガウス混合分布を用いる LPFGM を実装した。LPFGM は、適切なパラメータの元で LETKF を上回る性能を持つ可能性がある事を示した。

3. Momoi, M., **Kotsuki, S.**, Kikuchi, R., Watanabe, S., Yamada, M., and Abe, S.. Emulating rainfall-runoff-inundation model using deep neural network with dimensionality reduction. Artificial Intelligence for the Earth Systems. 2023, 2, 1-25, doi: 10.1175/AIES-D-22-0036.1

深層学習を用いた洪水氾濫モデルのエミュレータ(代理モデル)を開発した。入力となる降水予測情報や、出力となる浸水深を事前にオートエンコーダで情報圧縮して重要な情報を抽出し、抽出した情報特徴量の間を全結合ニューラルネットワーク (NN) で学習することで、少ない訓練データで効率的なエミュレータ開発を可能にした。固有直交分解に基づく情報圧縮と比較して、畳込み(NN) による情報圧縮が有効である事を示した。

(2) 特許出願

該当無し

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

- **Kotsuki, S.**, Shiojiri, D., Ouyang, M., Muto, Y., and Kanemaru, K.: Improving Global Precipitation Estimates by Hydrological Land Data Assimilation, AMS Annual Meeting,



January 8-12, 2023. (January 11, Colorado Convention Center, Denver/online, Oral, invited)

- 小槻峻司: 「観測の価値」を最大化するデータ同化・予測手法の開発, 異分野融合研究セミナー, July 19, 2022. (July 19, オンライン, Oral, invited)
- Kotsuki, S., Terasaki, K., Satoh, M., and Miyoshi, T.: Ensemble-Based Data Assimilation of GPM DPR Reflectivity into the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM, Japan Geoscience Union Meeting 2021, May 30-June 6, 2021. (June 3, Online, Oral, invited)
- Kotsuki, S., Miyoshi, T., Kondo, K., and Potthast, R.: A Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension: Experiments with an Intermediate AGCM, RIKEN Data Assimilation Seminar, September 11, 2020. (September 11, Online, Oral, invited)

#### 受賞

- 2022.04.20 文部科学省 科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞  
“大規模数値計算と衛星観測データ同化による地球環境予測研究”