

戦略的創造研究推進事業 AIP 加速課題  
研究課題「ビッグデータ同化と AI による  
リアルタイム気象予測の新展開」

## 研究終了報告書

研究期間 2019年4月～2022年3月

研究代表者：三好 建正  
（理化学研究所  
計算科学研究センター、  
チームリーダー）

## § 1 研究実施の概要

### (1)実施概要

気象は、生活や社会経済活動に影響する。本研究は、2013 年度から 2018 年度に取り組んだ CREST 研究成果に基づき、サイバー世界と現実世界を双方向に結んだ「高度天気予報活用社会」に向けて取り組んだ。これまで開発してきた「ビッグデータ同化」(BDA)技術を実用化するための技術的課題に取り組むとともに、AI-シミュレーション連携により気象予測の新たな方向性を打ち出し、新しい AI 研究の方向性を探った。これにより革新的な天気予報を実現し、QoL 向上や社会経済活動の高度化に向けて加速した。

各グループの密な連携の下、これまで CREST 研究課題で開発してきた BDA システムに基づき、当初計画の 2020 年夏季の実証実験に向けて、リアルタイム実行のための課題解決に取り組んだ。システムをスーパーコンピュータ「京」から東京大学・筑波大学のスーパーコンピュータ Oakforest-PACS に移植し、6 時間毎に更新する 18 km メッシュの広い領域から、4 重にネストして、さいたまに設置されたマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ(MP-PAWR)のデータを使って 30 秒毎に更新する 250 m メッシュの 30 分予報を行うリアルタイムワークフローを構築した。2019 年度には過去データを用いたシミュレーション実験でリアルタイム計算を達成した。2020 年度には BDA システムのリアルタイム実証実験に初めて成功した。2020 年 8 月 24 日～9 月 7 日の期間、スーパーコンピュータ Oakforest-PACS の 1200 ノードを占有し、30 秒毎に更新する 500m メッシュ 30 分予報をウェブサイト及びスマートフォンアプリで公開した。

2021 年度には供用開始したスーパーコンピュータ「富岳」にシステムを移植した。延期された東京オリンピック・パラリンピックの時期に合わせて、2021 年 7 月 23 日～8 月 8 日、8 月 24 日～9 月 5 日に富岳の 11,520～13,824 ノードを占有してリアルタイム実証実験を実施した。その際、富岳の計算能力を生かして、アンサンブル数を 50 から 1000 に、30 分予報を単一予報から 10 アンサンブル予報に、それぞれ一桁以上大きな計算を行い、大規模計算におけるノウハウの獲得と予報精度向上のための研究を実施した。ウェブサイト及びスマートフォンアプリで予報を公開し、特に、実験的な試みとして強い降水が起こる確率の情報を配信した。

本システムの開発に当たり、三好グループは BDA システムの開発と全体設計を行った。富田グループは予報モデルの精度向上に向けた開発や最適化を行った。石川グループはプロセス間通信や McKernel といったシステムソフトウェア開発及び MP-PAWR データを富岳に即時転送するソフトウェア JIT-DT の開発を行った。佐藤グループは MP-PAWR データ品質管理手法の開発及び MP-PAWR の運用を行った。牛尾グループは MP-PAWR データの品質向上開発を進めた。小池グループは予報をスマートフォンアプリで配信し、ユーザフィードバック調査を行った。

その他、データ同化を用いて予測モデルのパラメータを自動最適化する手法を開発した。また、データ同化で用いた個々の観測データの予報改善への貢献度を定量化する手法を開発した。さらに、雷観測や船舶搭載 GNSS 観測等の新たな観測の活用など予測精度向上の研究を進めた。

BDA と AI の協奏に関して、新たに参加した上田グループの知見を生かし、気象庁の天気予報に資する統合型ガイダンス、気象観測データの品質評価法、および台風の激化予測の研究開発を行った。また、ナウキャストシステムに深層学習による AI 技術の一種である ConvLSTM を適用し、良好な結果を得た。その他、AI 技術を用いて非線形なモデルバイアスを補正する手法や、低解像度モデルの出力を用いて機械学習により高解像度予測を出力する手法を研究した。

このほか、実際の社会的課題の解決に向けて、前川グループは BDA システムの知見を水力発電ダムの運用に活用するための検討を行った。

国際連携に関して、IMT-Atlantique と理化学研究所が 2019 年 3 月に締結した MOU を生かし、2020 年 2 月に The Second IMT-Atlantique & RIKEN Joint Workshop をフランス・ブレストの IMT-Atlantique において開催した。AI とデータ同化の融合研究をテーマに、AI 技術を活用したナウキャストシステムの高度化や、数値天気予報と AI の融合に向けて議論を深めた。2021 年 2 月～4 月には 5 回の IMT-Atlantique & RIKEN Online Seminar Series を開催し、AI とデータ同化の融合研究をテーマに議論を深めた。2021 年 11 月より IMT-Atlantique の学生を理化学研究所で受け入れ、同様のテーマに関する具体的な連携研究に取り組んだ。

## (2) 顕著な成果

### < 優れた基礎研究としての成果 >

1. Kotsuki, S, Pensoneault, A, Okazaki, A, Miyoshi, T. 2020: Weight structure of the Local Ensemble Transform Kalman Filter: A case with an intermediate atmospheric general circulation model. Q J R Meteorol Soc., 146, 3399-3415.

#### 概要:

局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)は、各格子点の近傍の観測のみを用いて、アンサンブルの最適な重みを局所的に計算する。本研究では大気モデルを用いてこの局所的な重みの空間構造を調査した。その結果、観測密度に応じた粗い格子で重みを計算し、高解像格子に内挿することで、計算効率化に寄与し、予報精度が向上することが分かった。LETKF の応用範囲は広く、インパクトが大きい基礎的な成果である。

2. Kotsuki, S., Y. Sato, and T. Miyoshi, 2020: Data assimilation for climate research: model parameter estimation of large-scale condensation scheme. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 125, e2019JD031304.

#### 概要:

気象気候シミュレーションにおいて様々なモデルパラメータの最適化が手作業で行われており、客観的に自動推定するアルゴリズムが求められている。本研究では、全球大気データ同化システム NICAM-LETKF を用いた空間分布するモデルパラメータ推定手法を新たに開発した。実験の結果、人工衛星により観測される雲量データを使って、雲粒から雨粒への変換速度を制御するパラメータの空間分布を自動推定し、気候感度の改善に寄与する良好な結果を得た。

3. Ruiz, J., G.-Y. Lien, K. Kondo, S. Otsuka, and T. Miyoshi, 2021: Reduced non-Gaussianity by 30 s rapid update in convective-scale numerical weather prediction. Nonlin. Processes Geophys., 28, 615-626.

#### 概要:

対流性降水は非線形性の強い現象で、予報誤差が非正規分布になりやすく、データ同化に影響する。レーダ観測の同化間隔を変化させて誤差分布の形状を調査したところ、30 秒毎の同化で非正規性が大きく低減する事が分かった。同化間隔 1 分では同化するデータ量が多いと非正規性が減少し、同化間隔 5 分になると 30 秒間隔と同じデータ量でも非正規性が増加した。世界でも例のない 30 秒毎にレーダ観測を同化することの意義を科学的に裏付ける重要な成果である。

### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 30 秒毎に更新する 30 分予報を行うリアルタイム予測システム

#### 概要:

CREST 研究課題で開発してきた「ビッグデータ同化」システムをスーパーコンピュータ「京」から「Oakforest-PACS」に移植し、世界でも例のない 30 秒毎に更新する 500 m メッシュの 30 分予報を行うリアルタイム実証実験を 2020 年夏季に実施した。さらに、2021 年度は「富岳」を用いて 1000 アンサンブルのデータ同化・10 アンサンブルでの 30 分予報と計算規模を一桁大きくし、東京オリンピック・パラリンピック期間中にリアルタイム実証実験を成功させた。観測・予測・伝達を総合した本課題の集大成であり、未来の天気予報システムに波及する。

2. Taylor, J., A. Amemiya, T. Honda, Y. Maejima, and T. Miyoshi, 2021: Predictability of the July 2020 Heavy Rainfall with the SCALE-LETKF, SOLA, 17, 48-56.

概要:

2020年7月豪雨の予測可能性について調査し、熊本で甚大な災害となった豪雨の予測に関する理解を深め、社会的インパクトが大きな予測事例に関する知見を得た。今後の波及が期待できる。

3. Honda, T. and T. Miyoshi, 2021: Predictability of the July 2018 Heavy Rain Event in Japan Associated with Typhoon Prapiroon and Southern Convective Disturbances. SOLA, 17, 113–119. doi:10.2151/sola.2021-018

概要:

実験的な準リアルタイム天気予報システムによる多数の予報結果を用い、平成30年7月豪雨の予測可能性を調査した。その結果、豪雨の数日前に日本へ接近した台風の経路予報の精度が、豪雨の予測に大きく影響していた。また、台風経路予報が高精度な際も、沖縄付近の大気擾乱の発達の違いが豪雨の予測精度を左右していた。豪雨のメカニズム解明を通して、防災減災など社会へのインパクトが期待される。

<代表的な論文>

1. Ruiz, J., G.-Y. Lien, K. Kondo, S. Otsuka, and T. Miyoshi, 2021: Reduced non-Gaussianity by 30 s rapid update in convective-scale numerical weather prediction. Nonlin. Processes Geophys., 28, 615–626.

概要:

対流性降水は非線形性の強い現象で、予報誤差が非正規分布になりやすく、データ同化に影響する。レーダ観測の同化間隔を変化させて誤差分布の形状を調査したところ、30秒毎の同化で非正規性が大きく低減する事が分かった。同化間隔1分では同化するデータ量が多いと非正規性が減少し、同化間隔5分になると30秒間隔と同じデータ量でも非正規性が増加した。世界でも例のない30秒毎にレーダ観測を同化することの意義を科学的に裏付ける重要な成果である。

2. Tomizawa, F. and Y. Sawada (2021), Combining ensemble Kalman filter and reservoir computing to predict spatio-temporal chaotic systems from imperfect observations and models, Geoscientific Model Development, 14, 5623–5635, 2021

概要:

近年 Reservoir computing (RC)という機械学習手法が観測データのみからカオス力学系を効率よく予測できるとして注目されている。本研究では、数値天気予報において標準的な予測手法であるデータ同化とRCを融合した「データ同化の結果を学習するRC」を提案した。RCは観測データが少ないと性能が出ない。データ同化はプロセスモデルのバイアスが性能を下げる。提案手法は両者の欠点を補いあうことができた。機械学習とデータ同化の融合により新たな未来予測手法を導く基礎的な成果である。

3. Kotsuki, S, Pensoneault, A, Okazaki, A, Miyoshi, T. 2020: Weight structure of the Local Ensemble Transform Kalman Filter: A case with an intermediate atmospheric general circulation model. Q J R Meteorol Soc., 146, 3399–3415.

概要:

局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)は、各格子点の近傍の観測のみを用いて、アンサンブルの最適な重みを局所的に計算する。本研究では大気モデルを用いてこの局所的な重みの空間構造を調査した。その結果、観測密度に応じた粗い格子で重みを計算し、高解像格子に内挿することで、計算効率化に寄与し、予報精度が向上することが分かった。LETKFの応用範囲は広く、インパクトが大きい基礎的な成果である。

## § 2 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

三好グループ

研究代表者:三好 建正(理化学研究所計算科学研究センター チームリーダー)

研究題目: ビッグデータ同化とAIによるリアルタイム気象予測の新展開

研究項目:

ビッグデータ同化リアルタイムシステムの開発

ビッグデータ同化リアルタイムシステムの実証実験、検証、高度化開発

AI・シミュレーション融合研究

上田グループ

主たる共同研究者:上田 修功(理化学研究所革新知能統合研究センター 副センター長・チームリーダー)

研究題目:気象データ解析のためのAI技術の開発

研究項目

AI技術に基づく数値予報統合型ガイダンスの研究開発

AI技術に基づく気象観測データの品質管理手法の研究開発

富田グループ

主たる共同研究者:富田 浩文(理化学研究所計算科学研究センター チームリーダー)

研究題目: データ科学による気象モデル改善手法の研究

研究項目

パラメータ推定にデータ科学を取り入れた気象モデル改良

石川グループ

主たる共同研究者:石川 裕(国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系 教授)

研究題目: リアルタイム気象予測のための実行環境に関する研究

研究項目

ビッグデータ同化のためのリアルタイム実行環境の研究

佐藤グループ

主たる共同研究者:佐藤 晋介(情報通信研究機構電磁波研究所 統括研究員)

研究題目: フェーズドアレイ気象レーダの品質管理及びデータ解析の研究

研究項目

フェーズドアレイ気象レーダの品質管理及びデータ解析の研究

牛尾グループ

主たる共同研究者:牛尾 知雄(大阪大学大学院工学研究科 教授)

研究題目: フェーズドアレイレーダによる観測

研究項目

フェーズドアレイ気象レーダのデータ提供及び品質向上

小池グループ

主たる共同研究者:小池 佳奈((株)エムティーアイ ライフ・エンターテインメント・スポーツ事業本部 ライフ事業部 気象サービス部 部長)

研究題目: スマートフォン等を活用した高度気象情報の社会実装検討

研究項目

スマートフォン等を活用した社会実装の検討

前川グループ

主たる共同研究者:前川 俊浩(東京電力ホールディングス(株)経営技術戦略研究所 プロジェクトマネージャー)

研究題目: 水力発電所ダム運用高度化への適用検証

研究項目

水力発電所ダム運用高度化への適用検証

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

国際連携に関して、IMT Atlantique と理化学研究所が 2019 年 3 月に締結した MOU を生かし、2020 年 2 月に The Second IMT Atlantique & RIKEN Joint Workshop をフランス・ブレストの IMT Atlantique において開催した。AI とデータ同化の融合研究をテーマに、AI 技術を活用したナウキャストシステムの高度化や、数値天気予報と AI の融合に向けて議論を深めた。2021 年 2 月～4 月に 5 回の IMT Atlantique & RIKEN Online Seminar Series を開催し、AI とデータ同化の融合研究をテーマに議論を深めた。2021 年 11 月より IMT Atlantique の学生を理化学研究所で受け入れ、同様のテーマに関する具体的な連携研究に取り組んだ。