

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「科学的発見・社会的課題解決に向けた
各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代
アプリケーション技術の創出・高度化」
研究課題「「ビッグデータ同化」の技術革新の創出
によるゲリラ豪雨予測の実証」

研究終了報告書

研究期間 2013年10月～2019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

データ同化は、シミュレーションと実測データをつなぐ学際的科学であり、気象シミュレーションでは天気予報の精度を左右する重要な役割を果たす。シミュレーションは大規模化し、センサ技術は進化し続ける。本研究では、シミュレーション、センサ双方からの大容量かつ高速なビッグデータに対応した「ビッグデータ同化」の技術革新を創出し、ゲリラ豪雨予測に応用して、「30 秒毎に更新する 30 分予測」という革命的な天気予報を世界に先駆けて実証する。具体的には、気象庁非静力学モデル NHM、及び、理化学研究所で開発している渦解像 LES (Large Eddy Simulation) 気象モデル SCALE に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter) を適用して、フェーズドアレイ気象レーダ (PAWR)、新しい静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号といった新しい観測ビッグデータを、スーパーコンピュータ「京」を使ってリアルタイムに同化する「ビッグデータ同化」システムを構築する。単独の積雲対流のライフサイクルは 30 分程度であること、PAWR は 30 秒毎に観測を行うことから、「30 秒毎に更新する 30 分予測」という画期的な数値天気予報システムを目指す。ここから得られる膨大な高頻度予測結果を自動的に素早く解析し、注意情報等意思決定につながるような高レベルな情報を自動抽出するビッグデータ解析技術の創出も目指す。これにより、観測、予測、結果解析までトータルに実証する。

これまで NHM-LETKF システムを用いて、2013 年 7 月 13 日に京都で災害をもたらした豪雨事例及び 2014 年 9 月 11 日に神戸市で急発生した孤立積乱雲の事例に取り組み、PAWR のビッグデータ同化により良好な結果を得たほか、新規開発した SCALE-LETKF システムでも 2013 年 7 月 13 日の事例について良好な結果を得た。平成 28 年度には、これらの結果の解析を進め、3 次元可視化を高度化するとともに、本プロジェクトの 3 年間の成果としてアメリカ気象学会のフラッグシップ誌 BAMS 及び IEEE のフラッグシップ誌 Proceedings of the IEEE に論文発表し、2016 年 8 月 9 日にプレスリリース「「京」と最新鋭気象レーダを生かしたゲリラ豪雨予測」を行った (http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809_1/)。その後さらに他の事例での検証を進めると共に、リアルタイム実行に向けた開発を進めた。このほか、ひまわり 8 号によるビッグデータとして、雲域も含めた 10 分毎の高頻度赤外輝度温度データを直接同化する手法を新たに開発し、2015 年で最も発達した台風 Soudelor や、2015 年 9 月に鬼怒川が氾濫した関東・東北豪雨などの事例で良好な結果を得た。これらの成果を論文として出版し、2018 年 1 月 18 日付けでプレスリリース「10 分ごとに更新する気象予測」を行った (http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180118_1/)。関東・東北豪雨事例については、密な地上観測のデータ同化に取り組み、降水の再現性を改善する結果を得た。また、早期の社会実装に向け、PAWR のビッグデータを生かして、少ない計算量で短時間の降水予測を行う「3D 降水ナウキャスト手法」を開発した。「30 秒ごとに更新する 10 分予測」のリアルタイム計算を開始し、2017 年 7 月 4 日付けでプレスリリース「30 秒更新 10 分後までの超高速降水予測を開始」を行った (http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170704_1/)。このシステムの効果的な実証のため、株式会社エムティーアイが保有するスマホアプリ「3D 雨雲ウォッチ」を通じて配信する共同研究を開始し、実証実験を続けている。SCALE-LETKF については、18km メッシュで日本周辺域の 5 日後までの天気予報を「京」を使って準リアルタイムで 2015 年 5 月より継続的に行っており、平成 27 年関東・東北豪雨や平成 30 年 7 月豪雨などの顕著事例も含め、予測可能性に関する研究を進めている。これらのリアルタイム計算の経験に基づき、SCALE-LETKF による PAWR の 30 秒毎の高頻度ビッグデータ同化のリアルタイム実行に向けた計算速度向上を進め、当初は「京」を用いて 1 時間以上かかっていた 100m メッシュの SCALE-LETKF の計算時間を約 90 倍高速化し、1 分以内とすることに成功した。250m メッシュに少し解像度を下げることで優に 30 秒以内の計算時間を達成し、当初目標として掲げた「30 秒毎に更新する 30 分後までのゲリラ豪雨予測」のリアルタイム実行が理論上可能となった。各研究グループは、それぞれの専門領域である高解像度気象モデル、PAWR やひまわりの品

質管理・データ処理、観測手法、計算性能向上のための通信機構やワークフローの研究を進め、すべての研究成果がビッグデータ同化システムの高度化に統合されるよう、目標を統一して実施し、チームとしての成果創出に根本的な貢献を果たした。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 論文:Miyoshi, T., M. Kunii, J. Ruiz, G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Seko, H. Tomita, and Y. Ishikawa, 2016: "Big Data Assimilation" Revolutionizing Severe Weather Prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., in press. doi:10.1175/BAMS-D-15-00144.1. (2016年8月9日プレスリリース:http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809_1/)

概要:

「30秒毎に更新する100mメッシュの30分予測」という天気予報に革命をもたらす「ビッグデータ同化」の先導的・独創的着想と、実際の過去のゲリラ豪雨事例での実証結果を述べた本研究最初の総合論文。国内外の類似研究と比べて桁違いのスピード、解像度の天気予報を過去事例で実証し、気象学の国際コミュニティで高く評価され、今後の科学技術に大きなインパクトを与えるものとして、米国気象学会のフラッグシップ誌の2016年8月号に掲載。

2. 論文:Miyoshi, T., K. Kondo, and T. Imamura, 2014: The 10240-member ensemble Kalman filtering with an intermediate AGCM. Geophys. Res. Lett., 41, 5264-5271, doi:10.1002/2014GL060863. (2014年7月23日プレスリリース:http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140723_2/)

概要:

通常100個以下程度で行われる全球大気のアサンブルデータ同化を、スーパーコンピュータ「京」を使って世界最大規模の10240個まで増やし、理想的なデータ同化実験を行った。大気の誤差構造の非ガウス性を直接確認したほか、1万kmを超える地球規模の誤差共分散を発見。例えば日本から1万km遠方の観測データが、瞬時に日本の大気状態の推定精度を向上する可能性が明らかとなり、天気予報シミュレーションの改善に貢献することが期待。

3. Honda, T., T. Miyoshi, G.-Y. Lien, S. Nishizawa, R. Yoshida, S. A. Adachi, K. Terasaki, K. Okamoto, H. Tomita, and K. Bessho, 2018: Assimilating All-Sky Himawari-8 Satellite Infrared Radiances: A Case of Typhoon Soudelor (2015). Monthly Weather Review, Vol. 146, pp. 213-229. (2018年1月18日プレスリリース:http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180118_1/)

概要:

2015年7月に運用開始された静止気象衛星ひまわり8号は、従来の約50倍のビッグデータを生み出す高性能センサーを搭載し、10分毎に丸い地球全体を撮像する。これまで、静止気象衛星の赤外放射輝度観測データを雲域も含めた全天候で数値天気予報に直接利用することは困難であったが、ひまわり8号の10分毎の放射輝度の直接データ同化に成功した。今後、10分毎に得られる新しい予測データを有効活用する体制を整えることで、災害リスクを早期に捉え、将来の天気予報に革新をもたらすと期待できる。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 論文:Miyoshi, T., G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Tomita, S. Nishizawa, R. Yoshida, S. A. Adachi, J. Liao, B. Geroffi, Y. Ishikawa, M. Kunii, J. Ruiz, Y. Maejima, S. Otsuka, M. Otsuka, K. Okamoto, and H. Seko, 2016: "Big Data Assimilation" toward Post-peta-scale Severe Weather Prediction: An Overview and Progress. Proceedings of the IEEE, 104, 2155-2179.

概要:

本研究の 2 番目の総合論文として、「ビッグデータ同化」構想の紹介、実際の過去の複数事例での実証結果や、計算時間の計測、高速化への課題などリアルタイム実証へ向けた取り組み、ひまわり 8 号の利用も含めた将来展望を紹介。ナウキャストシステムの結果など、科学技術イノベーションに大きく貢献する、実用化に近い成果を含む。IEEE のフラッグシップ誌の 2016 年 9 月号ビッグデータ特集号の招待論文として掲載。

2. 論文:Otsuka, S., G. Tuerhong, R. Kikuchi, Y. Kitano, Y. Taniguchi, J. J. Ruiz, S. Satoh, T. Ushio, and T. Miyoshi, 2016: Precipitation nowcasting with three-dimensional space-time extrapolation of dense and frequent phased-array weather radar observations. *Wea. Forecasting*, 31, 329-340. DOI: 10.1175/WAF-D-15-0063.1. (2017 年 7 月 4 日プレスリリース:http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170704_1/)

概要:

30 秒毎という高頻度で 60km 遠方までの雨粒を隙間なくスキャンする最新鋭のフェーズドアレイ気象レーダのビッグデータを降水予報に生かすため、観測された雨粒の立体的な動きを捉え、将来もそのまま動き続けるという仮定の下で予測する「3D 降水ナウキャスト手法」を開発した。大阪大学に設置されたフェーズドアレイ気象レーダのデータを用いて、リアルタイムに予測を実行するシステムを構築し、世界初となる 30 秒更新 10 分後までの降水予報のリアルタイム実証を開始した。

3. 論文:Miyoshi, T., K. Kondo, and K. Terasaki, 2015: Big Ensemble Data Assimilation in Numerical Weather Prediction. *Computer*, 48, 15-21. doi:10.1109/MC.2015.332 (2015 年 11 月 10 日プレスリリース: http://www.riken.jp/pr/press/2015/20151110_2/)

概要: (200 字程度)

全球大気のアサンブルデータ同化は通常 100 個程度で行われているが、スーパーコンピュータ「京」を使って世界最大規模の 10240 個まで増やし、現実大気の観測データと解像度 112km の全球大気モデルを使ったデータ同化実験に成功した。実際の天気予報シミュレーションにおいて数千 km に及ぶ遠方の観測データを活用できる可能性があることを発見し、観測データをより効果的に活用して天気予報シミュレーションの改善に貢献することが期待。

< 代表的な論文 >

Takemasa Miyoshi, Masaru Kunii, Juan Ruiz, Guo-Yuan Lien, Shinsuke Satoh, Tomoo Ushio, Kotaro Bessho, Hiromu Seko, Hirofumi Tomita, and Yutaka Ishikawa, ““Big Data Assimilation” Revolutionizing Severe Weather Prediction”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 8, pp. 1347-1354, 2016
(doi:10.1175/BAMS-D-15-00144.1)

Takemasa Miyoshi, Guo-Yuan Lien, Shinsuke Satoh, Tomoo Ushio, Kotaro Bessho, Hirofumi Tomita, Seiya Nishizawa, Ryuji Yoshida, Sachiko A. Adachi, Jianwei Liao, Balazs Gerofi, Yutaka Ishikawa, Masaru Kunii, Juan Ruiz, Yasumitsu Maejima, Shigenori Otsuka, Michiko Otsuka, Kozo Okamoto, and Hiromu Seko ““Big Data Assimilation” toward Post-peta-scale Severe Weather Prediction: An Overview and Progress”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 11, pp. 2155-2179, 2016
(doi: 10.1109/JPROC.2016.2602560)

Honda, T., S. Kotsuki, G.-Y. Lien, Y. Maejima, K. Okamoto, and T. Miyoshi, 2018: Assimilation of Himawari-8 all-sky radiances every 10 minutes: Impact on precipitation and flood risk prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 965-976.

§ 3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「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機構データ同化研究チーム チームリーダー)

研究項目

- ・ビッグデータ同化によるゲリラ豪雨予測の実証的研究

②「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機構複合系気候科学研究チーム チームリーダー)

研究項目

- ・超高解像度渦解像気象モデルによるゲリラ豪雨現象の再現可能性に関する研究

③「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 研究マネージャー)

研究項目

- ・フェーズドアレイ気象レーダーおよびドップラーライダー観測データのリアルタイム高速品質管理・データ処理技術の研究

④「牛尾」グループ

主たる共同研究者: 牛尾 知雄 (首都大学東京システムデザイン研究科航空宇宙システム工学域 教授)

研究項目

- ・フェーズドアレイ気象レーダーを用いた観測手法の最適化に関する研究

⑤「石川」グループ

主たる共同研究者: 石川 裕 (理化学研究所計算科学研究機構フラッグシップ 2020 プロジェクト プロジェクトリーダー)

研究項目

- ・ジョブ間並列通信機構及び観測データ蓄積配布機構に関する研究

(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

三好グループでは、本研究と密接に連携しながら並行して進めている CREST 研究課題「EBD: 次世代の年ヨッタバイト処理に向けたエクストリームビッグデータの基盤技術」(研究代表者: 松岡 聡)において、東京工業大学、筑波大学、国立情報学研究所、University College Dublin と共同して研究を進めている。また、宇宙航空研究開発機構降水観測ミッションによる降水観測データの利用に関して、宇宙航空研究開発機構、東京大学大気海洋研究所と共同して研究を進めている。このほか、ポスト「京」重点課題に関連して、海洋研究開発機構、東京工業大学、京都大学、東北大学、名古屋大学、気象庁、情報通信研究機構、琉球大学、神戸大学と連携、協力し、さらに連携の幅を広げており、全国に渡ったネットワーク形成が進んでいる。特に気象庁とは研究代表者の三好が数値予報モデル開発懇談会の委員となり連携を深めている。海外に関しては、データ同化アルゴリズムに関して米国メリーランド大学、英国レディング大学、仏国 IMT Atlantique と MOU を締

結して密接に連携して取り組んでいるほか、ドイツのミュンヘン大学、アルゼンチンのブエノスアイレス大学、アルゼンチン気象局とは共同研究が進んでいる。また、ドイツ気象局、ミュンヘン大学、英国レディング大学とは国際会合を共催し、仏国 Telecom SudParis と交流するなど、国際的なネットワークの形成にも力を入れている。産業界との連携では、本研究と密接に関連して、(株)エムティーアイの無料のスマホアプリ「3D 雨雲ウォッチ～フェーズドアレイレーダ～」に降水ナウキャストを配信し、関西地域で実証実験を実施している。東京電力とは水力発電の最適化のための共同研究を実施している。明星電気とは気象測器の共同研究を行っている。MODE-S 観測データについては気象研究所と電子航法研究所と共同研究を行っている。

富田グループでは、これまで海洋研究開発機構と共同研究契約を結んで、NICAM 研究チームと連携し、力学過程ならびに物理過程の高度化に関する議論を行ってきた。随時 SCALE への反映をおこなった。特に全球非静力学力学コアを NICAM チームから提供してもらい、先方の合意のもと BSD2 ライセンスでフリーソフトウェア化し(NICAM-DSと呼ばれる)、SCALE へ組み込みがほぼ終わっている。現在は、海洋研究開発機構とポスト京重点課題においてモデル開発と高速化について密接に連携している。また、神戸大学都市安全センターと強く連携している。2016年8月1日をもって、クロスアポイントメント制度を利用して、防災関連研究を推進している。モデル構築だけでなく、実際の集中豪雨防災課題として本 CREST での研究と深く関連するものである。

佐藤および牛尾グループでは、NICT と大阪大学の共同研究「フェーズドアレイ気象レーダーの実用化」に基づいて大阪大学吹田キャンパスに設置したレーダー観測運用とデータ転送・解析処理を行っており、その枠組みの上で本研究を進めている。戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」の研究開発項目②豪雨・竜巻予測技術の研究開発において「マルチパラメータフェーズドアレイレーダ等の開発・活用による豪雨・竜巻予測情報の高度化と利活用に関する研究」を実施しており、NICT、大阪大学、(株)東芝、防災科学技術研究所、日本気象協会、鉄道総合技術研究所、埼玉大学と共同で研究を進めている。

佐藤グループでは、NICT と気象庁気象研究所との共同研究「フェーズドアレイ気象レーダーによる顕著現象の探知に関する基礎研究」においては、日本国内で運用されている4台のフェーズドアレイ気象レーダー(吹田、神戸、沖縄、つくば)を用いた顕著現象の探知に関する研究を進めている。NICT と(株)エムティーアイとの共同研究「フェーズドアレイ気象レーダーによる豪雨予報に関するモバイルコンテンツ開発」では、無料のスマホアプリ「3D 雨雲ウォッチ～フェーズドアレイレーダ～」を開発して、関西地域で実証実験を実施している。

牛尾グループでは、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)の一環で、大阪府と共同で、フェーズドアレイ気象レーダーの河川、下水、道路事業に対する実証実験を実施している。また、大阪市福島区との共同実験も実施中である。

石川グループでは、米国 Northwestern University の Alok Choudary 教授らのチームとファイル I/O ミドルウェア開発の連携を進めている。Alok Choudary 教授らは気象・気候系アプリケーションで利用実績のある pnetCDF と呼ばれるファイル I/O ミドルウェアを米国アルゴンヌ国立研究所とともに開発してきた。石川グループが開発してきた FARB は現在 netCDF と呼ばれるやはり気象・気候系アプリケーションで利用実績のあるファイル I/O ミドルウェアを基にしていた。pnetCDF を使うことにより、より高速なジョブ間データ渡しが可能になると予想しており、pnetCDF を融合する取り組みを進めた。