

jh230003

極端気象現象予測における不確実性の起源の解明

澤田洋平（東京大学）

概要

非線形性の強い極端気象の予測における不確実性がどのようなプロセスで生じるかを明らかにすることで極端気象予測の性能改善を目指す。大規模気象シミュレーションの初期値およびモデルパラメータ、さらにはモデル選択に起因する予測の不確実性を効率よく定量化する統計数理的手法を開発し、これにより低解像度全球大気モデルにおいてこれまでに試みられたことのない多数パラメータの推定に成功した。また、その手法を Wisteria/BDEC-01 上で効率よく動作させるための統合ソフトウェア開発も行った。開発した手法の応用として衛星観測を用いた台風の予測性能向上、ベトナム水文気象庁の現業システムにおけるモデル選択不確実性定量化を通じた豪雨予測の性能向上、巨大台風が引き起こす複合災害の網羅的な解析、等を行った。これらのシミュレーション結果をデータベースとして保存し、再利用・横断解析を行う研究も進めた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター
名古屋大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

- ・澤田洋平（東大工）（代表）①
- ・中島研吾（東大情基セ）（副代表）④
- ・奥川伸一、廣瀬郁希、日浦直紀、日比野研志（東大工）①
- ・南出将志（東大工）、Namal Rathnayake②
- ・Le Duc、Islam Md Rezuani（東大工）、橋本和宗（阪大工）③
- ・住元真司・塙敏博・荒川隆・芝隼人・下川辺

隆史（東大情基セ）、河合直聡（名大情基セ）、

八代尚（国環研）、松葉浩也（日立製作所）④

注：①不確実性定量化、②気象データ作成、
③気象データ機械学習、④統合ソフトウェア

2. 研究の目的と意義

洪水・浸水被害をもたらす極端気象現象の予測には未だ大きな不確実性がある。大規模気象シミュレーションのどこに予測の不確実性をもたらす要因が存在しているのかを網羅的に理解することが重要である。既存の研究では初期値・境界値の不確実性を解析するのにとどまっている。そこで本研究では大規模気象シミュレーションに内在するすべての不確実性を効率よくベイズ推定するソフトウェア基盤の構築を目的とする。また開発したソフトウェアを用いて不確実性情報が付加された大規模な気象データの作成・公開を行い、そのデータ解析から極端気象現象予測の不確実性の起源を解明する。

ゲリラ豪雨・線状降水帯・台風といった災害をもたらす気象現象の予測には非線形な雲・対流プロセスが重要である。本研究は最先端気象シミュレーションにおいてこれらのプロセスの予測の不確実性の起源を解明することを目指すもので、気象学における Grand Challenge に挑む意義ある研究である。

シミュレーションの不確実性定量化は、予測精度の向上、物理プロセスの理解、意思決定への貢献などで重要である。既存研究は多いが、気象計算のような大規模シミュレーションに対しては決定版と呼ぶべき手法がない。「シミュレーション+データ+学習」融合を推し進めこれを実現し、気象計算に限らず JHPCN 各センターで行われている大規模シミュレーションに基づく予測研究全体に貢献できる。

今年度は昨年度から継続しているデータセット整備を加速させると同時に、テスト済みのモデルパラメータやモデル選択を陽に考慮した気象シミュレーションの不確実性定量化ソフトウェアの高度化を進める。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義
 - 本研究課題は、極端気象現象の理解とそのシミュレーションに関する気象学、不確実性定量化に関する統計数理、そして最新鋭の計算機において「シミュレーション+データ+学習」の融合をめざす情報科学が協働する必要があった。この課題の学際性を鑑みて、共同研究として実施することに意義があった。
 - 本研究では、物理プロセスの理解に基づいて作られた気象シミュレーションの超並列実行と、その実行結果の巨大データの機械学習による解析を連携して行う必要がある。従って東京大学情報基盤センターの Wisteria/BDEC01 が有するシミュレーションノード群とデータ・学習ノード群の

双方の資源利用が必要であった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

①気象シミュレーションの不確実性定量化手法の開発

時間変化するパラメータも含んでその最適化と不確実性推定を行うことができる新しいデータ同化手法を開発し、比較的low自由度な系でうまく動作させることに成功した。加えてより大自由度系かつ大規模並列計算に適した手法の開発にも着手した。

②気象シミュレーションの不確実性定量化手法の応用

①で開発しているソフトウェア基盤の応用として台風予測の不確実性解析を行った。多数の台風に対する予測実験を通じてその動作確認をするとともに、静止気象衛星観測ひまわり 8/9 号の観測情報が、気象モデルのパラメータの不確実性をどれだけ減じることができるかを明らかにした。

③統合ソフトウェア開発

複数の並列プログラム間で通信を行い、異種システム間でのジョブ実行をサポートするソフトウェア群を開発した。Wisteria/BDEC-01 上で気象シミュレーションと機械学習を融合したアプリケーションでの評価においてOdyssey上のみで気象シミュレーションと機械学習を実行した結果よりもOdyssey上で気象シミュレーション、GP-GPU を搭載した Aquarius 上で機械学習を実行する異種システム連携の方が 35%高速であることが分かった。

5. 今年度の研究成果の詳細

①気象シミュレーションの不確実性定量化手法の開発

本研究では気象シミュレーションに内在する不確実性のソースとしてモデルパラメ

一タやモデル選択に注目している。これらは時間変化することのない静的なものとして扱われることが多いが、実際にはモデル化における仮定次第では最適なパラメータ値やモデル選択は時間変化するとみなしたほうがよりシミュレーションの不確実性を正しくとらえることができる。

今年度は大自由度系における時間変化するパラメータを大規模並列計算機を生かして効率よく推定する手法として Hybrid Offline Online Parameter Estimation with Ensemble Kalman Filter (HOOPE-EnKF)の開発に成功した。HOOPE-EnKF ではパラメータ推定の問題を、長い時間スケールの平均した状態量場に対して適切なパラメータの事後確率分布を求めるオフライン推定問題 (outer loop) と、時々刻々と変化する状況に対して最適なパラメータの事後確率分布を求めるオンライン推定問題 (inner loop) に分解し、inner loop において outer loop での結果を有効活用することで急激に変化するパラメータを安定的に推定する。

HOOPE-EnKF を低解像度の全球大気モデルで実行し、9216 個の空間分布する時間変化パラメータを安定的に推定することに成功した。少なくとも地球科学分野において、これだけの数の時間変化するパラメータを時間変化するという事実を所与とせずに観測データから推定することを可能にした研究は過去に例がない。成果は 7 (1) の [2] として出版済みである。

HOOPE-EnKF においては outer loop は機械学習による代理モデルを利用するため、GPU での実行が効率的である。長い時間スケールでの変動が存在する地球科学の問題においては、日々の変化への対応を inner loop による時間変化パラメータ推定で行いつつ、時々 outer loop を走らせて背景になる事後確率分布を更新することが望ましい。このような計算では Wisteria/BDEC-01 の CPU/GPU

混成ノードの有効活用が適切であると考えられる。Wisteria/BDEC-01 の性能を生かした HOOPE-EnKF の実装は今後の課題である。

これまでモデルパラメータに注目して研究を行ってきたが、モデル選択についても研究が進んでいる。気象モデルの物理過程のパラメータリゼーションは複数の候補から選択して実行する。これを複数の候補から 1 つに絞るのではなく、複数個毎時間ステップ並列に走らせたうえで、パラメータリゼーションが算出する状態量の時間変化量を重み付け平均し、その重みをモデルパラメータと見なして最適化の対象とする手法を開発した。これによりモデル選択の問題もモデルパラメータ最適化の問題に帰着するため、HOOPE-EnKF の枠内で扱うことができるようになった。

②気象シミュレーションの不確実性定量化手法の応用

①で開発したもののうち、機械学習での代理モデルを活用してパラメータの事後確率分布を推定する手法 (HOOPE-EnKF の outer loop にあたる部分) を活用して台風予測の不確実性解析を行い、データの蓄積が順調に進んでいる。静止気象衛星観測ひまわり 8/9 号の観測情報を用いた気象モデルのパラメータ推定は前年度から進めているところであるが、前年度は疑似観測データでの実験が中心であったところ、今年度は実際のひまわり衛星観測を使用した数値実験を進めた。2019 年東日本台風を筆頭に、4 事例での台風解析を進め、一定の性能を確認することができた。

①で示したモデル選択最適化についても実際の豪雨事例を用いた解析を進めた。ベトナム水文気象庁と協力し、現地で実運用されているアンサンブル予測システムを拡張した。従来システムは 5 種のスキームに対してそれぞれ 2 つずつのモデルを用意した 32 個 (2 の 5 乗) のアンサンブルシステムになっ

ている。このシステムにおいて離散的にモデル選択をするのではなくて、二つとも走らせたうえで重み付け平均を行い、その重みをパラメータとして降水予測の再現性が高まるようにパラメータの事後確率分布を最適化し、そこから 32 個のパラメータの組をサンプリングすることで 32 個のアンサンブルを構成するようにした。ベトナムにおいて互いに無関係の 5 つの豪雨事例に対して最適化の数値実験を行った。ある豪雨事例に対して最適化したパラメータは他の豪雨事例に対しても十分な汎化性能を示し、特定の事例に過学習するのではなくて気象モデルに存在する系統的なバイアスを取り除けていることが示唆された。現在運用されているシステムと比較したときの新しいアンサンブル予測システムの計算コストは 2 倍程度であり、ベトナム水文気象庁で現在運用されている計算機リソースが世界最先端のものではないことを加味すれば、将来的に本研究で開発したものが実運用されることは十分期待できる。

これらの解析結果はデータとして蓄積しているため今後再利用することで極端気象予測における不確実性の起源について理解を深めることができる。実際データの一部は東京大学大気海洋研究所の研究者に提供され、現在解析が進んでいる。本研究チーム独自の試みとしては不確実性を加味した予測結果を用いて地域で起こる多様な災害ハザードを網羅的に解析する研究が進んでいる。経済学のパレート最適化の考え方を借用し、多数のアンサンブル予測において最悪シナリオを抽出する研究を行っている (7. (1) の業績 [3])。

③統合ソフトウェア開発

異機種間通信ソフトウェア WaitIO については、Wisteria/BDEC-01 上での異種システム間カップリング性能の更なる高速化を目指

しユーザレベル通信+RDMA への対応を進めた。新たな通信ライブラリとして WaitIO-Tofu と WaitIO-Verbs の開発を実施した。また、カップリングソフトウェア h3-Open-UTIL/MP については Odyssey-Aquarius 間の連成において 2 コンポーネント間の通信のみに対応していたプログラムを拡張し 3 コンポーネント以上の複数コンポーネント間で異機種間連成計算を可能とした。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

①気象シミュレーションの不確実性定量化手法の開発に関しては、3 年計画の 2 年目までに既に理論的な研究は完遂し、これまで解かれたことの無いようなパラメータ数を対象とした気象シミュレーションの不確実性定量化問題を解くことができるようになった。理論研究としては当初計画を上回る成果であると考えている。

一方で、計算科学的な面の実績は今後の課題である。Wisteria/BDEC-01 において開発した HOOPE-EnKF を効率よく動作させるには Outer loop の代理モデルによる最適化を GPU ベースの Aquarius で行い、inner loop の逐次的なシミュレーションとデータ同化によるパラメータ調整を CPU ベースの odyssey で行えばよい。このような構想はまとまっているものの、実際の実装には至っていない。**③統合ソフトウェア開発**で進む知見の統合が次年度の課題である。

②気象シミュレーションの不確実性定量化の応用に関しては、静止気象衛星ひまわり 8/9 号を用いた不確実性定量化を通じた台風予測の改善、およびベトナム水文気象庁の現業運用アンサンブル予測システムにおけるモデル選択不確実性定量化を通じた豪雨予測の両面で成果が出ている。これらのシミュレーション結果をデータベースとして蓄積し、再利用したり横断的に解析したりするこ

とで新しい科学的知見を見出すような研究も始まりつつある。総じて当初計画と同等ないしそれ以上の成果が出ている。次年度は成果の論文化を進めていくと同時に、シミュレーション結果のデータベース化や成果の社会応用に重きを置いて活動していく予定である。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

- [1] Miwa, N. and Y. Sawada (2024), Strongly vs. weakly coupled data assimilation in coupled systems with various inter-compartment interactions, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, e2022MS003113
- [2] Sawada, Y. and L. Duc (2024), An efficient and robust estimation of spatio-temporally distributed parameters in dynamic models by an ensemble Kalman filter, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, e2023MS003821
- [3] Islam, R., L. Duc, and Y. Sawada (2023), Assessing Storm Surge Multi-Scenarios based on Ensemble Tropical Cyclone Forecasting, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 128, e2023JD038903

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

- [1] Shinji Sumimoto, Toshihiro Hanawa, Kengo Nakajima, MPI-Adapter2: An Automatic ABI Translation Library Builder for MPI Application Binary Portability, ACM Proceedings of IXPUG Workshop in conjunction with HPCAsia'24, 63-68, 2024, doi:10.1145/3636480.3637219

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- [1] Sawada, Y., Impact-based ensemble forecasting of tropical cyclones, ESCAP/WMO TC Committee

the 18th Integrated Workshop (18th IWS) in conjunction with the 4th Training and Research Coordination Group (TRCG) Forum, 18-19 November 2023, Bangkok, Thailand (Oral)

【Invited Talk】

- [2] Islam, M. R., Le Duc and Y. Sawada, Reflecting Multi-Hazard Multi Scenarios: Leveraging Ensemble Tropical Cyclone Forecasts, AGU Fall Meeting, 11-15 December, 2023 (Oral)
- [3] Sawada, Y., Le Duc, An efficient estimation of spatio-temporally distributed parameters in dynamic models by ensemble Kalman filter, International Symposium of Data Assimilation (ISDA), 16-20 October, Bologna, Italy, 2023 (Poster)
- [4] Islam, M. R., Le Duc and Y. Sawada, A Novel Way of Assessing Storm Surge Multi-scenarios Based on Ensemble Tropical Cyclone Forecast, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 20th Annual Meeting, 30 July-4 Aug, 2023 (Oral)
- [5] Sawada, Y., Le Duc, An efficient estimation of time-varying parameters of dynamic models by combining offline batch optimization and online data assimilation, International Symposium of Data Assimilation (ISDA) Online, 2 June, 2023 (Oral)
- [6] Sawada, Y., Le Duc, F. Tomizawa, M. Hung, Y. Hirose, K. Saito, Uncertainty quantification of sub-grid scale parameterizations in atmospheric models toward robust theory of weather controllability, Japan Geoscience Union (JpGU) annual meeting, 21-26 May, 2023, Chiba, Japan (Oral)
- [7] Sawada, Y., An efficient estimation of time-varying parameters of dynamic models by combining offline batch optimization and online data assimilation, Japan Geoscience Union (JpGU) annual meeting, 21-26 May, 2023, Chiba, Japan (Oral)
- [8] Nakajima, K., Furumura, T., Tsuruoka, H., Yashiro,

- H., Sumimoto, S., Arakawa, T., Integration of 3D simulation of long-period strong ground motion and real-time data assimilation on the Wisteria/BDEC-01 system with h3-Open-BDEC, HPC Workshop for Nuclear Explosion Monitoring 2023, CTBTO (Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization), Vienna, Austria, 2023 **【Keynote Talk】**
- [9] Nakajima, K., Innovative Supercomputing by Integration of Simulation/Data/Learning at the Information Technology Center, The University of Tokyo, The 6th International Workshop on Nonhydrostatic Models (NHM-WS 2023), Sapporo, 2023 **【Invited Talk】**
- [10] Nakajima, K., Long but “Straight” Road towards Integrations of Simulations/Data/Learning on Oakforest-PACS II, Open Accelerated Computing Summit 2023 (OACS), 2023 **【Keynote Talk】**
- [11] Nakajima, K., Innovative Supercomputing by Integrations of Simulations/Data/Learning on Oakforest-PACS II, 14th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Heterogeneous Systems (ScalAH23) in conjunction with SC23, Denver, CO, USA, November 13, 2023 **【Invited Talk】**
- [12] Nakajima, K., Supercomputing in the Exascale Era by Integrations of Simulations/Data/Learning, Northeast Asia Symposium 2023 (The International Conference of New Generation Databases and Data-Empowering Technologies), Guangzhou, China, 2023 **【Invited Talk】**
- [13] Nakajima, K., Integration of 3D Earthquake Simulation & Real-time Data Assimilation, SEU-ASEAN High-Performance Computing (HPC) School 2023 **【Invited Talk】**
- [14] Kengo Nakajima, Integration of Simulation/Data/Learning and Beyond, 14th ADAC Symposium in conjunction with SCAisa 2024, Sydney, Australia, **【Invited Talk】**
- [15] Kengo Nakajima, Integration of Simulation/Data/Learning and Beyond, 2024 Conference on Advanced Topics & Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing (ATAT in HPSC 2024), 2024 **【Invited Talk】**
- (4) 国内会議発表（査読なし）
- [1] 澤田洋平, シミュレーションと AI の融合で拓く水害予測の未来, Supercomputing Japan!, 3/13 2024, 東京 (Oral) **【招待講演】**
- [2] Islam Rezuani, Le Duc, 澤田洋平, 巨大アンサンブル気象予測を活用した広域高潮流リスクマネジメント, 日本気象学会春季大会, 5/16-18, 2023, オンライン (Oral)
- [3] 中島研吾, 「計算・データ・学習」融合が切り拓く革新的スーパーコンピューティング, 日本地球惑星連合 2023 年大会, 千葉, 2023 **【招待講演】**
- [4] 中島研吾, いまさら聞けないスパコンの常識, 構想設計コンソーシアム, 産業技術総合研究所, 2023 **【招待講演】**
- (5) 公開したライブラリなど
- (6) その他（特許, プレスリリース, 著書等）