

jh240060

## 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。昨年度までに開発した不確実性定量化手法を応用し、衛星観測を用いた台風予測の不確実性解析を行い、宇宙からの赤外放射観測を用いて直接は観測できない大気境界層の表現を向上できるなどの非自明な結果を得ることができた。他の応用として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を実現し、計算コストの検討などを通じて現業予測への実装可能性の検討を進めた。またこのような不確実性定量化手法により作った 1000 メンバの大アンサンブル気象予測を河川や海岸のモデルを用いて水害ハザードの情報に変換し、巨大台風が引き起こす複合災害の網羅的な解析を行った。

### 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) 参加研究者一覧と役割分担

・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 Rathnayake ②  
・Le Duc、Islam Md Rezuhanul(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 効率よくバ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。

昨年度までに不確実性定量化の理論研究・アルゴリズム開発は終了している。今年度はソフトウェアとしての高度化をすすめるとともに、実際に台風予測やその他の極端気象予測に応用することで、予測における不確実性の起源を見る。また、これまでの計算結果のデータベース化や、ベトナム水文気象庁との共同研究などを通じた成果の社会応用を進める。

### 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

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ータ及びモデル選択を扱い、両者を統一的に扱う手法を開発した。モデル選択については毎計算時間ステップにおいて複数のパラメタリゼーションの線形結合として時間変化量を求める Blended Parameterization の実装によってモデル選択問題をパラメータ選択問題とすることに成功し、すべての気象シミュレーションの不確実性定量化問題をモデルパラメータの事後確率分布推定問題に帰着させることができた。この事後確率分布推定問題を大規模並列計算機の性能を活かして効率よく解く手法として Hybrid Offline Online Parameter Estimation with Ensemble Kalman Filter (HOOPE-EnKF)を提案し、論文出版した。以上により、気象シミュレーションの不確実性定量化手法の開発は完了した。

#### ②気象シミュレーションの不確実性定量化手法の応用

HOOPE-EnKF は機械学習による代理モデルを活用し、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 Outer loop と、時々刻々と変化する状況に応じて最適な分布を求めるオンライン推定としての inner loop に分けられる。このうち Outer loop を応用して気象予測の不確実性解析を行った。具体的には静止気象衛星ひまわり 8/9 号の観測情報を用いた台風予測の不確実性解析、およびベトナム水文気象庁における現業アンサンブル気象予測におけるモデル選択の不確実性解析を行った。

加えて、このような不確実性解析を行って、シミュレーションの不確実性をサンプリングしたアンサンブル予測の災害における活用に関

する研究も展開した。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。

### 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。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

4 章で述べた通り、不確実性定量化手法の手法開発そのものは前年度までに完了しているため、今年度はこれを応用し、極端気象予測における不確実性の起源を解析する研究を精力的に行った。

### 5-1. 台風への応用研究

HOOPE-EnKF の outer loop を過去日本に接近した代表的な台風 5 個に適用した。静止気象衛星の観測を最大限に活かし、モデルパラメータの事後確率分布の推定とそれに基づく不確実性付きの台風予測計算を行い、パフォーマンスを評価している。海上で発達する台風をとらえるには静止気象衛星が欠かせないが、既往研究においてこのような衛星観測を用いたパラメータ最適化・不確実性定量化は行われておらず、世界初の試みである。

昨年度までは台風予測の不確実性定量化に関する実験では個別の積雲対流を解像することができない空間分解能(水平15km)で計

算を行っていたが、空間分解能を上げるとパラメータ最適化・不確実性定量化の挙動も大きく変化することがわかり、より高空間分解能(水平 5km~2km)での計算も並行して進めた。このような高空間分解能の計算を巨大なアンサンブル(=1000 メンバ)で行い、このデータを解析して不確実性定量化を行うのはやや計算コストが高く、ジョブ当たりの計算時間や同時投入可能ジョブ数などの制約がボトルネックとなった。そのため Wisteria/BDEC-01 において効率よく計算を行うためにワークフローの見直しを行った。今年度利用した計算資源の大半が上記の研究開発に費やされている。

5 つの台風に対して、ロバストに予報精度を改善できるパラメータの事後確率分布を得ることができた。気象モデルのパラメータ 22 個に対する解析から静止気象衛星観測に感度のあるパラメータは雲に関するもの 2 つと大気境界層に関するもの 1 つであることが分かった。静止気象衛星は赤外領域の電磁波をとらえており、大気上層の雲や水蒸気に感度のある観測である。そのため、雲に関するパラメータに対して感度があることは自然であるが、海と大気の境界におけるパラメータにも感度があることは必ずしも自明でない。台風は大気下層において台風中心に吹き込んでいく風が水と潜熱を運ぶため、境界層プロセスは台風全体のダイナミクスに大きな影響を果たすが、今回の成果で宇宙からの赤外衛星観測でそれが“観える”ことを明らかにできた。台風予測に大きな不確実性をもたらす、かつ現地での直接観測が非常に難しい境界層プロセスを、衛星観測で拘束できる可能性を見出したことは大きな成果であると考えている。報告書執筆時点において論文執筆中である。

加えてこれまでの台風の計算結果をデータベースとして保存し、これらを横断的に解析する研究も進めている。台風の内部でおこる多数の湿潤対流の予測が台風の急激な発達の

予測性能と関係があるとされている。本研究で作った台風のアンサンブルシミュレーションのデータベースを用いて台風内部の湿潤対流の発生を機械学習で予測する研究をおこなった。系の時間発展に線形性を仮定するアンサンブル感度解析の枠組みでは対流発生より 10 分前程度までのリードタイムでしか予測ができないと考えられていたが、ニューラルネットワークの利用で 30 分程度のリードタイムが得られることが分かった。

### 5-2. ベトナム水文気象庁現業予報への応用

ベトナム水文気象庁との共同研究で、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する研究を行った。従来システムは 5 種のパラメタリゼーションに対してそれぞれ 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 Blended parameterization を適用し、離散的にモデル選択をするのではなく、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 HOOPE-EnKF の outer loop を用いて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。

ベトナムにおける 5 つの豪雨事例を用いた交差検証により、一見すると発生メカニズムが大きく異なるようなイベントであっても、大きな重みが載るモデルにはあまり違いがなく、複数事例を跨いで有効なモデルが存在することを確認することができた。もちろん例外もあり、事例ごとに最適なモデルは必ずしも一致しない。このような場合にはモデル選択を時々刻々とシームレスに変えるような手法が求められ、これは今後の課題である。

豪雨を事例としているため、直接雨につながるような雲や対流のモデル選択に大きな感度

があり、雨のデータでうまく不確実性を低減できることが分かった。一方でそれ以外のパラメタリゼーション(放射や境界層)などのモデル選択にも非自明な感度があることが分かった。対象とする現象に直接関連するパラメタリゼーションのみ注目するのではなく、気象モデル全体にわたって不確実性を評価することが重要であることが分かる。

ベトナム水文気象庁への現業システムに実装することを念頭に、計算コストの見積もりも行っている。一つのパラメタリゼーションにおいて二つのモデルを呼ぶため、パラメタリゼーションを解く時間は大まかに 2 倍になり、気象モデル全体の計算時間としては 1.5 倍強程度になる。一方で二つのモデルを解いて重み付けを行う過程は並列化が可能であるため、並列化のために十分な計算資源があれば計算時間の増加は少ない。ベトナム水文気象庁が現有するあるいは将来保有予定の計算機を考慮して、現業システムに組み込み可能であるかを現在検討中である。いずれにしても二つのモデルを並列化したコードを用いれば研究用途としては Wisteria/BDEC-01 のようなスーパーコンピュータで大きな負荷なく様々な解析を行うことができる。

以上の成果を論文にまとめ、学術誌に投稿済みである。報告書執筆時点において Major revision のコメントに応え、再投稿を済ませている。

### 5-3. impact-based forecasting への応用

正確に不確実性の定量化がなされたアンサンブル極端気象予測を利用して、防災・減災に資する適切なシナリオ分析を行うツールを提供する研究を昨年度から引き続き行っている。天気に関する予測情報を別の水文モデルなどに入れることで災害のハザードそのものを発信し、人々の適切な行動を促すことを志向する気象予報を impact-based

forecasting と呼ぶが、そのような予報の実用化・高度化に向けて、複雑な不確実性情報が反映されたアンサンブル予測を如何に後処理して配信するかという点に関して研究を行っている。

起こり得る災害に関するシナリオに関して現場からの需要が高いのは「最尤シナリオ」と「最悪シナリオ」である。本プロジェクトでは最悪シナリオに関して、経済学のパレート最適化問題として最悪シナリオを抽出する研究を行ってきた。今年度は次世代のアンサンブル impact-based forecasting の在り方を示すことを目標に、海岸での災害ハザードの計算に高潮パラメトリックモデル SSHPI を、河川での洪水氾濫ハザードの計算に気象庁の流域雨量指数および東京大学生産技術研究所の全球水動態モデル CaMa-Flood を、暴風ハザードの計算に気象庁のパラメトリックモデルを用いて、台風がもたらす多様なハザードを計算し、1000 アンサンブルメンバのパレートフロンティアとして最悪シナリオを抽出した。

最悪シナリオの予測の中には大洪水が起こるが強風災害は起こらないもの、逆に洪水の規模は軽微だが、海岸でのハザードや強風災害のハザードが大きいものなど、極めて多様なシナリオがあった。観測データを説明できる同様に確からしい予測の中からも極めて多様なシナリオが出てくることが分かった。各シナリオが予測する気象場を精査すると、台風の経路、移動速度、強度などのわずかな違いが異なるセクターへの災害ハザードを生むことが分かり、一見すると小さいように見える不確実性も社会へのインパクトという観点からは無視できないことが分かった。このように極端気象という自然現象のみならず、社会へのインパクト予測においてもどこに予測の不確実性の起源があるのかを理解することができるようになった。報告書執筆時点において、この研究の成果は(CaMa-Flood の計算結

果を除き)学術誌に投稿、審査中である。

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

今年度は 3 年計画の最終年度である。3 年間を通じて、洪水氾濫などの甚大な災害をもたらす極端気象の予測における不確実性の起源を探ることを目的に研究を進めた。特に既往研究において十分でなかった気象シミュレーションに内在する不確実性、具体的には計算格子が解像できないプロセスを扱うパラメータリゼーションにおけるモデル選択とパラメータ選択の不確実性を定量化すること、さらに観測データを用いてその不確実性を最小化することを具体的な達成目標としていた。

今年度の成果から、概ねこの当初からの目的は達成できたと自己評価する。HOOPE-EnKF を軸とした手法開発は昨年度までに概ね完了していたが、今年度は具体的に複数の事例や異なる問題設定でこの手法を適用し、様々な成果を得た。成果の中には宇宙から赤外放射輝度を観測する静止気象衛星を用いて、台風における(直接は見えていないはずの)大気境界層プロセスの再現性を改善できるといった科学的に価値の高い結果から、現業気象機関において実運用されているアンサンブル予測システムを改善するという実践的なものまでが含まれ、多角的な成果を上げることができた。1000 メンバを超える大規模アンサンブルの結果は保存されており、将来再利用することが可能になっている。Impact-based forecasting の研究に関してはこれを利用する実務者のみならず、複雑な予測情報をどのように人が受け取り、意思決定につなげているのかといった観点から社会科学分野の研究者との連携も進みつつあり、学際的な広がりを見せている。

しかし、やり残した課題もある。HOOPE-EnKF は本来 Wisteria/BDEC-01 での実行に適したアルゴリズムとなっており、気象モデルの大アンサンブル実行に CPU、その他の

データ駆動型のプロセスに GPU を利用することでその性能を引き出すことができる。両方このような CPU と GPU 両クラスタを行き来するワークフローを効率よく実行するソフトウェアの開発もすすめたが、HOOPE-EnKF に直接利用するには至らなかった。しかし、既に HOOPE-EnKF のデータ駆動部分のコードは GPU 対応ができており、今後本研究で行ったものよりも大規模な計算で実行することを志向して、統合ソフトウェアと HOOPE-EnKF の結合を行いたい。また、気象モデルが GPU 化されれば東京大学と筑波大学が共同運用する Miyabi での高速実行も視野に入ってくる。最新鋭の GPU クラスタを有効活用して、さらに超高分解能、かつ多パラメータの大規模気象シミュレーションの不確実性定量化を目指したい。

また、4②で述べた通り、HOOPE-EnKF には多数の事例に対して当てはまりの良いパラメータの事後確率分布を推定する outer loop と、時々刻々と得られる観測データでパラメータをオンライン推定する inner loop に分けられるが、本研究での現実の台風・豪雨へのアプリケーションは outer loop に限られている。Inner loop を用いれば、時々刻々と現象が変化するなかで、その場その場で当てはまりの良いモデルを動的に推定することが可能である。気象学者(人)が構築したプロセス理解に基づく気象モデルを用いつつも、観測に基づいてデータ駆動(機械)的にモデルを修正していく「人機一体モデリング」と呼ぶべき新しいモデリングの在り方を今後追求していきたい。JHPCN の新規課題「人機一体モデリングで拓く次世代メソアンサンブル気象予測」ではそのような課題に挑む。

※7. 研究業績はウェブ入力です