

未来を分かつ転換点を捉える数学基盤を確立

いつ、どこで介入すべきかの手がかりに

概要

京都大学高等研究院ヒト生物学高等研究拠点の井元佑介特定准教授および埼玉大学大学院理工学研究科の横山知郎教授(マクマスター大学 visiting professor、フィールズ研究所 visiting scholar) の研究グループは、時間とともに変化するデータの中から、将来の結果が変わりやすい「転換点」を見つける新しい数学基盤を確立しました。

気象のような複雑な現象では、わずかな違いが将来の大きな変化につながることがあります。しかし、観測データやシミュレーションから、そのような転換点を見つけることは容易ではありませんでした。

本研究では、時間発展するデータを力学系として捉え、将来の振る舞いが変わりやすい状態を転換点として抽出する理論的枠組みを構築しました。これにより、少しの変化がその後の経路を大きく変える場所を明らかにできるようになりました。

この成果は、将来的に気象制御を考える上で、いつ介入すれば将来に大きな影響を与えられるか、また望ましい結果へ導くにはどの程度の影響が必要かを検討する手がかりとなる可能性があります。特に、台風・豪雨・熱波などの極端気象に対する理論的な評価基盤として役立つことが期待されます。

本研究成果は、2026 年 5 月 28 日 9 時 (米国東部時間) に、AIP Publishing が発行する国際学術雑誌 *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* に掲載されます。

なお、本論文は、当該分野を代表する注目論文として編集者が選定する Editor's Pick に選出されています。また、本論文は、AIP 誌全体から注目すべき成果を紹介・解説する広報メディア Scilight にも取り上げられます。



本研究のイメージ図。手前は現在の状態、赤と青の渦は将来分岐しうる異なる状態、中央はその分岐を左右する転換点を表している。本研究では、時系列データから未来を左右する転換点を見いだすための数学基盤を確立した。本イラスト作成には ChatGPT 5.5 を使用した (作成者: 井元佑介)。

1. 背景

台風や豪雨などの極端な気象現象は、社会に大きな被害をもたらします。こうした現象では、進路や発達の間がある時点を境に大きく変わることがあり、その「転換点」を早い段階で見つければ、防災や減災に役立つと期待されています。そのため、将来の結果が大きく変わりうる時点や状態を、観測データや予測データの中から見つけ出すことは、気象学だけでなく、防災科学やデータ科学においても重要な課題となっています。

これまで、気象予測の分野では、予報シミュレーションのばらつき大きさや、リアプノフ指数のような誤差の増幅を調べる方法が使われてきました。しかし、それらの方法だけでは、「予測がどのくらい不安定か」は分かっても、それが最終的にどのような結果につながるのか、たとえば比較的望ましい気象状態になるのか、あるいは被害の大きい気象状態になるのかを直接読み取るのは簡単ではありませんでした。すなわち、従来手法は予測の広がりや不安定性を捉えることには優れている一方で、「結果の違い」に基づいて転換点を捉えることには限界がありました。

一方、数学の分野では、複雑に変化するデータの形や構造を調べる理論が発展してきました。特に、力学系理論やトポロジカルデータ解析は、時間とともに変化する複雑な現象を理解するための有力な枠組みとして注目されています。本研究は、こうした数学的研究の流れの中で、従来の気象予測や感度解析では十分に扱えていなかった「将来の結果の違い」に着目し、転換点を見いだす新しい理論基盤を与えるものです。この点で、本研究は、気象予測の課題に対して数学的基盤から新しい視点を与える研究として位置づけられます。

本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業（目標8）および CREST における研究プロジェクトの一環として進められました。プロジェクト全体では、複雑な生命・環境・社会システムを数理的に理解し、将来的な予測や介入可能性を探ることを目指しています。本プロジェクトは、力学系やトポロジーの理論を、実際の時系列データ解析や気象予測に結びつけたいという問題意識から立ち上げられました。特に、将来の結果を「良い」「悪い」といった価値の違いとして捉え、それがどの時点・どの状態で分岐するのかを明らかにしたいという目的が、本研究開発の出発点となりました。こうした背景のもと、本研究では、数学の理論と気象データ解析を融合させることで、未来を左右する転換点を見つける新しい方法の構築を目指しました。

2. 研究手法・成果

京都大学高等研究院ヒト生物学高等研究拠点（ASHBi）と埼玉大学の研究グループは、時間とともに変化するデータの中から、将来の結果が変わりやすい「転換点」を見つける新しい数学基盤である ϵ -attracting basin（注1）を確立しました。 ϵ -attracting basin に基づくデータ解析手法は、将来の結果を「良い結果」と「悪い結果」のように分けて考え、どのくらい小さな違いでその結果が変わりうるかを調べるものです。これにより、単に予報がばらついているかどうかだけでなく、そのばらつきが最終的にどのような結果につながるかを可視化できるようになりました。

さらに、この手法を2020年9月の台風 Dolphin のアンサンブル気象予測データ（注2）に適用しました。その結果、進路が東寄りになる予測と、北寄りになって日本に近づく予測という2つの将来シナリオの間で、どの時点・どの場所が特に敏感だったのかを明らかにしました。従来の指標が予報の広がりや不安定さそのものを見るのに対し、本手法は将来の結果の違いに基づいて感度を調べられるため、気象災害の発生のような社会的に重要な結果により近い形で状況を理解できる可能性があります。

3. 波及効果、今後の予定

今回の研究で開発した手法は、台風などの極端気象において、「いつまでなら将来の結果が変わりうるのか」「どこが特に敏感なのか」を調べる新しい方法として活用できる可能性があります。こうした情報は、予測のどこに注目すべきかを考える上で役立つと期待されます。

また、この方法は台風の進路だけでなく、温度、湿度、気圧、風速などを含むより大きな気象データにも広げられる可能性があります。今後は、豪雨や線状降水帯など、さまざまな極端気象への応用も視野に入れていきます。

さらに、現時点では大規模な極端気象そのものを直接変える技術は十分に確立されていません。しかし、将来そのような技術や、より高度なシミュレーション技術が発展した場合には、本研究の手法が「どの時点までなら望ましい気象状態に改変できる可能性があるか」や「どの程度の影響が必要か」を考える上で役立つ可能性があります。今後は、観測誤差や予測の不確かさも取り入れながら、より現実に近い形で使える方法へと発展させていく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

JST ムーンショット型研究開発事業（目標8）「海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来」（代表：小槻 峻司） 課題番号 JPMJMS2389

JST CREST 「1細胞データ科学を介した融合数理の革新」（代表：井元 佑介） 課題番号 JPMJCR24Q1

<用語解説>

注1) ε -attracting basin

各時刻で大きさ ε 以下の小さな介入を加えたときに、目標となる状態へ到達できる状態の範囲。本研究では、将来の結果を変えやすい「転換点」を見つけるための数学的概念として用いる。

注2) アンサンブル気象予測データ

初期値や条件を少しずつ変えて行った複数の気象シミュレーション結果をまとめたデータ。予測のばらつきや、極端気象が起こる可能性を評価するために用いられる。

<研究者のコメント>

実際の気象予測データに数学の理論を結びつけることで、未来を左右する転換点を可視化できた点に大きな意義を感じています。この考え方は気象予測だけでなく、生命科学をはじめ、複雑な時系列データを扱う幅広い分野に応用できる可能性を秘めています。（井元佑介）

気象のように複雑に変化する現象に対して、『いつまでなら将来を変えられる可能性があるのか』『そのためにどの程度の介入や制御が必要なのか』を数学的に見える形で示せたことに大きな手応えを感じています。今後は理論をさらに深め、防災や予測の現場につながる形へ発展させたいと考えています。（横山知郎）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Filtrations Indexed by Attracting Levels and their Applications (吸引レベルに基づくフィルトレーションとその応用)

著者：Yusuke Imoto and Tomoo Yokoyama

掲載誌：Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science

DOI： <https://doi.org/10.1063/5.0305367>

<参考図表>

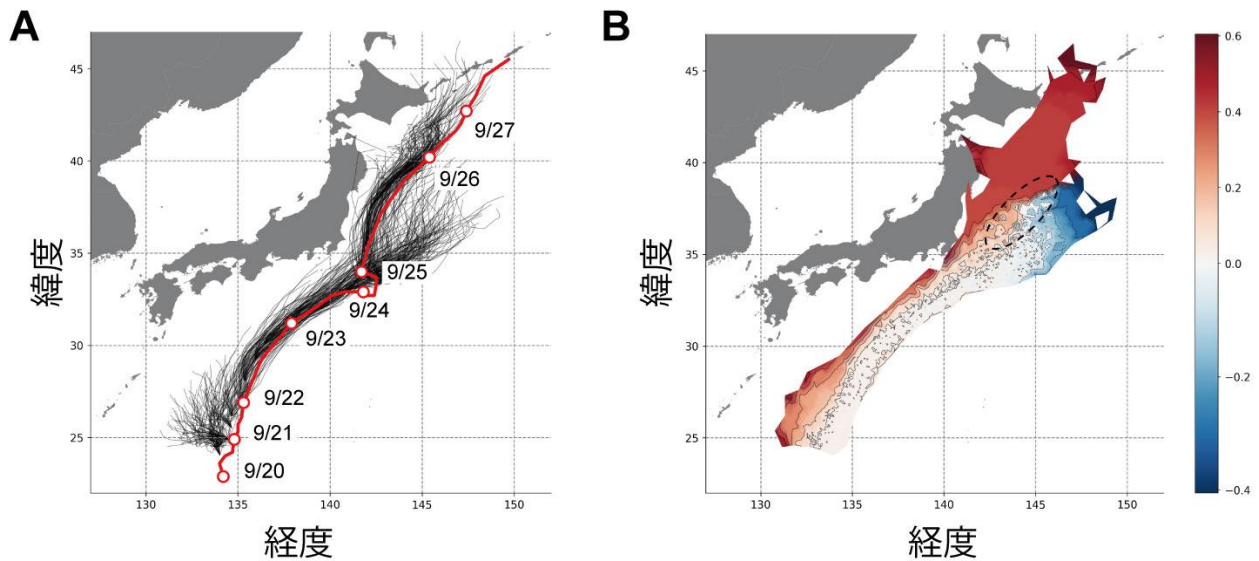


図1 2020年9月の台風 Dolphin のアンサンブル気象予測データへの応用。

A. 台風の中心位置に関するアンサンブル気象予測データ（黒線）と実際の台風の進路（赤線）。

B. ε -attracting basin による解析結果。望ましい経路、すなわち日本列島から東側に離れる経路へ状態が確定していくほど値は低くなり（青色）、望ましくない経路、すなわち日本列島に近づく西側の経路へ状態が確定していくほど値は高くなる（赤色）。0に近い値は、将来どちらの経路を取るかがまだ定まっていない不確実な状態を表す（白色）。濃い赤色と濃い青色が接する境界付近（点線円内）は、将来の経路が大きく変わりやすい転換点を表す。