

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2014～2017

課題番号：26310201

研究課題名 (和文) 気象学の低次元空間解析と予測

研究課題名 (英文) Meteorological analysis and prediction on the low-dimensional space

研究代表者

稲津 将 (Inatsu, Masaru)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：80422450

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 12,600,000 円

研究成果の概要 (和文) : 気象の長周期変動と予測 : 大気大循環モデルを用いた5,000年超の実験を実施した。対流圏の北半球冬季における4次元確率微分方程式を構築し、相空間内におけるデータの軌道束の多様体との関係を考察した。さらに、初期摂動育成法を大気大循環モデルに実装し、その初期誤差成長と長期積分結果の位相空間解析における多重実現を比較した。

温帯低気圧の形状変化 : パーシステント・ホモロジーによる新たな低気圧追跡プログラムを構築した。スカラー場の極大点と鞍点の情報から併合木で再構成することで、ホモロジークラス間の近縁関係を明らかにした。このアルゴリズムで同定された低気圧はこれまでの気象学的研究と一致した。

研究成果の概要 (英文) : Meteorological low-frequency variability and prediction: A 5,000-yr integration with an AGCM was conducted. We considered the relation between data-orbit manifold and 4-dimensional stochastic differential equation, focusing on the troposphere in boreal winter. After the breeding-growing-mode method was implemented in the AGCM, we compared multiple realisation in the long-term integration on the phase-space analysis with the initial-value growing.

Geometrical change of extratropical cyclones: We developed a brand-new cyclone tracking programme with persistent homology. By reconstructing data with merge-trees based on maxima and saddles of the scalar field, the neighbouring among homology classes were clarified. The cyclone identification with this algorithm is consistent with conventional meteorological analysis.

研究分野：気象学

キーワード：温帯低気圧 数理科学

## 1. 研究開始当初の背景

【本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ】

気象学の中でも長周期変動や低気圧活動は、その予測が国民生活に直結するテーマである。これらのテーマに関する研究では、以下の通り、日本は世界をリードしてきた。

### (1) 気象の長周期変動と予測

Kimoto and Ghil (1993)のように低次元力学系の軌道として解釈する研究が20世紀末に盛んに行われ、気象の長周期変動の理解が飛躍的に深化すると期待されていた。しかし、低次元系の決定論的モデルと実際の気象現象との間の乖離を埋めることが非常に困難であった。そのため、その後、超高次元の気候シミュレーション研究が主流となったのだが、低次元力学系に確率過程を導入した確率微分方程式で長周期変動の力学を理解しようとする試みが各所で行われている(Majda et al. 2003; Branstator and Berner 2005)。

### (2) 温帯低気圧の形状変化

温帯低気圧に関しては、Charney (1949)を嚆矢とする線形傾圧不安定理論によって、その力学的な本質は概ね理解されている。その後、たとえば Nakamura (1992)による若干の修正によって、温帯低気圧の活動の気候学は一定の力学的理解に到達した(Nakamura 2005)。現在、温帯低気圧を動的に追跡する最先端の研究がヨーロッパを中心に展開されている(Neu et al. 2013)。

## 2. 研究の目的

気象現象を低次元空間上での離散データとしてとらえ、さまざまにみられる気象現象の幾何構造の時間発展を数学的に解明することを目的とする。とくに(1)気象の長周期変動とその予測および(2)温帯低気圧の形状変化に着目する。

### (1) 気象の長周期変動と予測

応募者は、気象庁異常気象分析検討会作業部会員としての活動を通じ、気象の長周期変動のさらなる理解と予測精度の向上のためには、確率微分方程式による長周期変動の理解がカギとなると発想した。そこで、数学(math)と気象学(meteorology)の連携研究チーム MaeT を発足させ、応募者と数学者との連携によって、データにより推定した確率微分方程式と、現業における季節予測可能性の間に強い結びつきがあることを発見した(研究業績[02])。しかし、観測データの量的制約のため、確率微分方程式の構築は2次元空間におけるものにすぎなかった。そこで、応募者の研究経験(Inatsu et al., 2012, JMSJ 論文賞受賞)から、気象シミュレーションによって、十分なデータ量を確保し、多次元空間の確率微分方程式を構築することを着想した。これによって、季節予測に耐える方程式になると確信している。

### (2) 温帯低気圧の形状変化

応募者は、長年、温帯低気圧に関する研究で成果をあげてきた(Inatsu and Hoskins 2004 が日本気象学会山本・正野論文賞を受賞)。応募者は、近年、温帯低気圧の追跡に関する斬新な手法を提案・実装した(Inatsu 2009)。このアイデアは国際的に注目され、応募者は国際温帯低気圧追跡プロジェクトに日本から唯一、参画している(Neu et al. 2012; Ulbrich et al. 2012)。応募者が開発したこの手法は、温帯低気圧をある閾値をみたす連結閉領域として同定し、これらが時間的に重なりをもつことで追跡するものである。応募者のこれまでの研究を通じ、温帯低気圧や前線の強度と形状の時間変化が降水分布など社会生活へ影響する気象につながることを知った(Inatsu and Kimoto 2005)。このような経験から、応募者が実装した温帯低気圧追跡法が、温帯低気圧や前線の強度や形状の時間変化も評価できるものと着想した。

## 3. 研究の方法

### 【研究計画・方法の概要】

(1) 気象の長周期変動とその予測を数学的に解明するため、1,000年超の気象シミュレーション標準実験により十分なデータ量をもつ気象データを作り出し、4次元以上の相空間における確率微分方程式を構築する。

(2) 温帯低気圧の形状変化を数学的に解明するため、温帯低気圧追跡プログラムに新たに形状の詳細を把握するコンポーネントを実装し、現実にもみられる温帯低気圧をいくつかの典型的な形状の変化パターンに分類する。

### (1) 気象の長周期変動と予測

季節予測に耐えうる低次元確率微分方程式を構築すべく、1,000年超の気象シミュレーション標準実験を実施する。気象シミュレーションには、IPCC第5次報告書の地球温暖化予測にも実績のあるMIROC4.0-AGCMを用いる。海面水温など気象の外部条件は平年値を毎年同じく与えることで、気象内部の変動のみを取り出す。1,000年超の実験には膨大な計算時間を要することから、実験は並列的に実施し、200年程度の複数の時系列とする。本研究では、過去にも長周期変動の特性が良く調べられている対流圏の北半球冬季に着目して解析する。また、必要に応じて、適宜、計算を延長する。

1,000年超の気候シミュレーション標準実験データに基づき4次元以上の確率微分方程式を構築する。本研究ではとくに対流圏における北半球冬季に着目する。北半球における長周期変動の主成分を4つ以上取り出し、これによって張られた相空間において予測可能性を議論する。とくに、4次元以上の確率微分方程式と相空間内におけるデータの軌道束の多様体との関係を考察する。気象予測データの軌道束は2次元相空間ですら、ある多様体上に集中しているように見える(Inatsu

et al. 2013; 2015)。4次元以上の相空間の場合、当然、その幾何構造は2次元のように単純ではない。形式的なデータ処理をもとに、研究分担者・中野からどのような数学解析方法がもっとも予測可能性の議論に相応しいかを議論する必要がある。また、議論の参考のため、現業予測データとの比較も行う。

#### (2) 温帯低気圧の形状変化

すでに温帯低気圧の追跡は研究業績[26]によって実装済みであり、これを用いて観測される低気圧の連結閉領域の追跡は終了している。この追跡プログラムによる形状の時間変化の結果を研究分担者・荒井と議論し、数学におけるどのような幾何学知見が利用可能かを見極める。とくに、コンマ型など単純な2次曲面ではない形状をどのように定量化するかという、形状の数学的表現に焦点を当てた議論を行い、意外性のある手法であっても積極的に適用可能性を考える。温帯低気圧にみられる典型的な形状の時間発展を、研究分担者・荒井との数学的議論にもとづき、類型化する。とくに、コンマ型の相対渦度分布は、長年の温帯低気圧研究で提唱されており、天気図解析においてもよくみられる。こういった幾何的な特徴を客観的で数学的な基礎が与えられている幾何学的指標に基づいて定量化する。

### 4. 研究成果

#### (1) 気象の長周期変動と予測

5,000年の気候シミュレーション標準実験データに基づき4次元以上の確率微分方程式を構築した。本研究ではとくに対流圏における北半球冬季に着目し、北半球における長周期変動の主成分を4つを取り出し、これによって張られた相空間において予測可能性を議論した。とくに、4次元以上の確率微分方程式と相空間内におけるデータの軌道束の多様体との関係を考察した。気象予測データの軌道束は2次元相空間ですら、ある多様体上に集中しているように見える。4次元相空間の場合、当然、その幾何構造は2次元のように単純ではないが、形式的なデータ処理をもとに、研究分担者とどのような数学解析方法がもっとも予測可能性の議論に相応しいかを議論した。その結果、初期摂動育成法による初期誤差成長と長期積分結果の位相空間解析における multiple realisation を比較することが有用であるとの結論を得た。

そこで、予測可能性研究における初期摂動育成法と確率微分方程式法の比較のために、標準実験データに基づき5次元の確率微分方程式を構築した。対流圏における北半球冬季における長周期変動の主成分を5つ取り出し、これによって張られた相空間において予測可能性を議論した。とくに、5次元確率微分方程式と相空間内におけるデータの軌道束の多様体との関係を考察した。また、初期摂

動育成法に基づく初期誤差成長を考察するため、初期摂動育成法を大気循環モデルに実装した。その結果、両者の間には一定の関係性があることがわかった。

#### (2) 温帯低気圧の追跡

温帯低気圧にみられる典型的な形状の時間発展を、研究分担者らとの数学的議論にもとづき、類型化した。とくに、パーシステント・ホモロジーを利用した低気圧の形状の分類を試みた。その結果、形状分類だけでなく低気圧の追跡にもパーシステント・ホモロジーが有用であることがわかった。そこで、このことをアルゴリズムとして実装した新奇なトラッキングプログラムを構築した。また、そのための位相幾何学と気象学に関する共同成果発表会を開催した。

温帯低気圧の追跡に関し、計算機上で位相幾何学的な特徴量を取り出すパーシステント・ホモロジーを実装し、その結果を公表するに至った。論文執筆に際しては、パーシステント・ホモロジーで解析可能なデータのうち、0次ホモロジー群に着目し、昇順に並べ替えたデータ列に対する上からの探索と併合木によるデータの再構成という工夫を施した。スカラー場の極大点と鞍点の情報に基づき、スカラー場を両点間の差が事前に設定した値を超えるホモロジークラスに分割する新たな手法を開発した。本研究では2013年3月2日12時における北西太平洋上の850hPa相対渦度に着目して、低気圧の同定を行った。極大点と鞍点の差の閾値を $100e-6s^{-1}$ とすると全領域は3つのホモロジークラスに、 $50e-6s^{-1}$ とすると全領域は17個のホモロジークラスに分割された。次に、併合木によるデータの再構成によってホモロジークラス間の近縁関係を明らかにした。その結果、極大点と鞍点の差の閾値を小さくすると多くのホモロジークラスが検出されるが、そのうちの複数によって単一の低気圧であることがわかった。また、本研究で同定された低気圧の極値の気候学的な存在密度は、従来の研究で示された太平洋ストームトラックに一致した。当該論文は、日本気象学会誌SOLAに出版された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

1. Nakano, N., M. Inatsu, S. Kusuoka, and Y. Saiki, Empirical evaluated SDE modelling for dimensionality-reduced systems and its predictability estimates. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 査読有, 2018, 1-37.
2. Inatsu, M., H. Kato, Y. Katsuyama, Y.

- Hiraoka, and I. Obayashi, A cyclone identification algorithm with persistent homology and merge-tree, Scientific Online Letters on the Atmosphere, 査読有, 2017, 13, 214-218.
3. Ichikawa, Y., and M. Inatsu, An alternative estimate of potential predictability on the Madden-Julian Oscillation phase space using S2S models, Atmosphere, 査読有, 2017, 8, 150.
  4. Ichikawa, Y., and M. Inatsu, Methods to evaluate prediction skill in the Madden-Julian Oscillation phase space. Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, 2016, 94, 257-267.
  5. Kajino, M., M. Ishizuka, Y. Igarashi, K. Kita, C. Yoshikawa, and M. Inatsu, Long-term assessment of airborne radiocesium after the Fukushima nuclear accident: Re-suspension from bare soil and forest ecosystems. Atmospheric Chemistry and Physics-Discussion, 査読有, 2016, 16,13,149-13,172.
  6. Katsube, K., and M. Inatsu, Response of tropical cyclone tracks to sea surface temperature in the western North Pacific. Journal of Climate, 査読有, 2016, 29,1955-1975.
  7. Katsuyama, Y., M. Inatsu, K. Nakamura, and S. Matoba, Global warming response of snowpack at a site in northern Japan estimated using multiple dynamically downscaled data. Cold Region Science and Technology, 査読有, 2016, 136, 62-71.
  8. Tamaki, Y., M. Inatsu, R. Kuno, and N. Nakano, Sampling downscaling in summertime precipitation over Hokkaido. Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, 2016, 94A, 17-26.
  9. 稲津 将, 濱田 篤, 2016 : 気象学の色遣い~均等色空間を利用したカラーリング~, 天気, 査読有, 63, 803-809.
  10. Inatsu, M., N. Nakano, S. Kusuoka, and H. Mukougawa, Predictability of wintertime stratospheric circulation examined by non-stationary fluctuation dissipation relation. Journal of the Atmospheric Sciences, 査読有, 2015, 72, 774-786.
- [学会発表](計 28 件)
1. Zin Arai, The Conley index for real and complex dynamical systems, 冬の力学系研究集会, 2017
  2. Naoto Nakano, Masaru Inatsu, Seiichiro Kusuoka and Yoshitaka Saiki, Error analysis of an inverse problem of a stochastic differential equation arising from an empirical modelling for dimensionality-reduced systems, The 10th International Conference on Computational Physics, 2017
  3. 稲津 将, 加藤颯人, 平岡裕章, 大林一平, パーシステント・ホモロジーによる低気圧・前線トラッキング, 日本気象学会春季大会, 2017
  4. 中野直人, Error analysis of an inverse problem of a stochastic differential equation arising from an empirical modelling and its application, 第 17 回北東数学解析研究会(招待講演), 2016
  5. Inatsu, M., and K. Katsube, Response of tropical cyclone tracks to sea surface temperature in western North Pacific, EGU, 2016
  6. Zin Arai, On rigorous verification of the crossed mapping condition, Computation in Dynamics (招待講演), 2016
  7. 稲津 将・勝部 弘太郎, 北太平洋における海面水温が台風経路に及ぼす影響, 日本気象学会 2016 年度春季大会, 2016
  8. Inatsu, M., and K. Katsube, Response of tropical cyclone tracks to sea surface temperature in western North Pacific, EGU, 2016
  9. Ichikawa, Y., and M. Inatsu, 2016: Methods to evaluate prediction skill in the Madden-Julian oscillation phase space, JpGU, 2016
  10. 稲津 将・勝部 弘太郎, 北太平洋における海面水温が台風経路に及ぼす影響, 日本気象学会北海道支部第 1 回研究発表会, 北海道, 2016
  11. Naoto Nakano, Masaru Inatsu, Seiichiro Kusuoka and Yoshitaka Saiki, Empirical evaluated SDE modelling for

- dimensionality-reduced systems and its predictability estimates, SIAM Conference on Mathematical Planet Earth, 2016
12. 荒井 迅, 複素から見た分岐理論, 芝浦数理談話会, 2016
  13. 稲津 將, 北太平洋における海面水温が台風経路に及ぼす影響, 台風研究会, 京都, 2016
  14. 稲津 將, 台風の強度と経路に関する海面水温のみの効果の抽出, 日本農業気象学会北海道支部大会, 2016
  15. Zin Arai, On topological tools for network analysis, 情報セキュリティにおける数学的方法とその実践(招待講演), 2016
  16. Zin Arai, On parameter loci of the Henon family, ACCA-UK/JP Workshop, 2015
  17. 中野直人・稲津將・楠岡誠一郎・齊木吉隆, 確率微分方程式モデルを用いたベクトル時系列データ解析におけるアンサンブル予測可能性評価, 日本数学会 2015 年会, 2015
  18. 稲津 將, 確率微分方程式を用いた成層圏・対流圏の予測可能性の解析, 日本気象学会 2015 年度春季大会, 2015
  19. 中野 直人, 確率微分方程式モデルを用いたベクトル時系列データ解析におけるアンサンブル予測可能性評価, RIMS 研究集会「力学系とその諸分野への応用」, 2015
  20. 中野 直人, 経験的 SDE モデルによる時系列データ解析とアンサンブル予測可能性評価, 統計関連学会連合大会 2015 (招待講演), 2015
  21. 稲津 將・中野直人・楠岡誠一郎・向川均, 確率微分方程式を用いた成層圏・対流圏の予測可能性の解析, 日本応用数理学会, 2015
  22. 森田 英俊・稲津 將・國府 寛司, Application of a topological-computation method to meteorological data, 2015 年日本応用数理学会年会, 2015
  23. N. Nakano, M. Inatsu, S. Kusuoka and Y. Saiki, Time-series analysis and predictability estimates by empirical SDE modelling, The 47th ISCI International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Application, 2015
  24. 中野直人, 確率微分方程式モデルを用いたベクトル時系列データ解析, RIMS 研究集会「偏微分方程式に付随する確率論的問題」, 2014
  25. 稲津 將・中野直人・楠岡誠一郎・向川均, 非定常揺動散逸定理による冬季成層圏循環の予測可能性, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 2014
  26. Hitoshi Mukougawa, Toshihiko Hirooka, Kunihiko Kodera, Yuhji Kuroda, and Shunsuke Noguchi, Predictability of Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling Examined by Ensemble Forecast Datasets. 14th European Meteorological Society Annual Meeting, 2014
  27. Zin Arai, On combinatorial and topological clustering of dynamical behaviors in fluid flows, 流体方程式の構造と特異性に迫る数値解析・数値計算, 2014
  28. 中野直人・稲津將・楠岡誠一郎・齊木吉隆, 確率微分方程式モデルを用いたベクトル時系列データ解析における予測可能性評価, 応用数学合同研究集会, 2014
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔産業財産権〕なし
- 出願状況 (計 0 件)
- 名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：
- 取得状況 (計 0 件)
- 名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

recca-hokkaido.sci.hokudai.ac.jp/~inaz/  
neat/

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲津 将 (Inatsu Masaru)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：80422450

### (2) 研究分担者

中野 直人 (Nakano Naoto)

京都大学・国際高等教育院・特定講師

研究者番号：30612642

荒井 迅 (Arai Zin)

中部大学・創発学術院・教授

研究者番号：80362432

### (3) 連携研究者

向川 均 (Mukougawa Hitoshi)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20261349

### (4) 研究協力者

なし