

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03734

研究課題名(和文) 大気ブロッキング発生の力学と予測可能性

研究課題名(英文) Dynamics and predictability of atmospheric blocking occurrence

研究代表者

稲津 将 (Masaru, Inatsu)

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では中高緯度において異常天候をあらわす不規則な変動を確率過程によって解釈することで、その予測可能性を診断する手法を開発した。その中で典型的な天気図を機械学習により分類することが有効だった。また、その診断法を過去の天候に対する再予報データやに当てはめた。その結果、中高緯度における典型的な天気図の予測は2～3週間に及ぶことが分かった。その中でもジェット気流の分流が起こるときの予測限界は短く、分流していないときの予測限界は長かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義はこれまで気象学に本格的に取り入れられなかった確率過程論や機械学習を用いた予測診断法を開発した点にある。社会的意義は、本研究によってさまざまな気象の確率分布を予測するモデルを構築する基礎が確立される点にある。異常気象を引き起こす大気ブロッキングが、大気状態として予測可能性が低いことが示された点は特筆する社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：This study developed the diagnosis of extratropical atmosphere predictability by interpreting it as the probabilistic processes that led to its chaotic variations. It was effective in the diagnosis to classify the atmosphere into several typical weather patterns by machine learning. This study applied it to reforecasts for past weathers. As a result, it was found that the weather patterns had a prediction limit of a couple of weeks. The prediction limit is short under the split jet stream regime, whereas it is long under the straight jet stream regime.

研究分野：気象学

キーワード：長期予報 確率過程

## 1. 研究開始当初の背景

大気ブロッキングとは中高緯度において10日程度持続する循環偏差であり、各地に異常高・低温を招く。この現象は中緯度大気に内在する非線形性によっていると考えられ、これまでその発生や維持に関し、数多くの理論が提唱されてきた(たとえば Shutts 1983; Mullen 1987; Yamazaki and Itoh 2013)。また、総観擾乱や低周波ロスビー波は大気ブロッキングの形成に作用することが統計解析により示されている(Nakamura and Wallace 1983)。このように大気ブロッキングは統計解析に基づく理論的整備が進んだ分野であるが、1週間以上のリードタイムをもって大気ブロッキングを予測することはいまだに難しい。さらに、現業予測データを使った大気ブロッキングの予測可能性は系統立って議論されていない。

そこで、本研究の核心をなす学術的「問い」は、大気ブロッキングの予測可能期間はその力学とどのような関係になっているのか、である。この問いに答えるとき、ヒントとなるのは Takemura and Mukougawa (2010)の事例解析である。これによれば、大気ブロッキングの予測可能期間はその発生機構に影響されることが示唆されている。また、この問いに独自のアプローチを与えるのは、低次元系における確率微分方程式を援用した新たな予測可能期間の評価手法(Inatsu et al. 2013)である。これによれば、蛇行が大きい循環場における季節内変動の予測可能期間は低いことが示されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、大気ブロッキングの予測可能期間に関わる力学を大量の予測データの解析と確率過程論を用いた評価法によって明らかにすることである。近年、季節内予測比較プロジェクト S2S により世界各現業期間における再予報データが整備された。この大量の予測データに対し、力学解析を施すことで、大気ブロッキングの予測可能期間と発生機構の関係を明らかにできることが期待できる。また、大気ブロッキングをよく再現する大気大循環モデル(AGCM)の超長期積分データを作成することで、低次元相空間内での確率過程論を用いた評価法を施すことも実現できる。

本研究の学術的独自性は、S2S 再予報データを利用した過去事例におけるアンサンブル実験の解析を行うことである。S2S 再予報データ(Vitart et al. 2017)は公開されているが、初期日の不統一などで予測可能期間を比較解析するには、工夫と経験が必要である。本研究とは別にマッデンジュリアン振動の予測可能性研究で S2S 再予報データを利用しており(Ichikawa and Inatsu 2017)、本研究にはそのときの工夫と経験を活かすことができる。

本研究の学術的創造性は、低次元相空間における確率過程論を用いた評価法を大気ブロッキングという具体的な現象に対し施すことである。これまでの予測可能性は完全モデルの仮定のもと、決定論的アンサンブル予報の散らばりによって評価してきた。大気ブロッキングを含む低次元相空間に大量サンプルデータを射影することで、類似事例の広がりに関する統計量の信頼性が増す(Branstator et al. 2012)。そのように予測可能期間を評価する方法は極めて独創的といえる。

## 3. 研究の方法

本研究では、大気ブロッキングの予測可能期間と力学の関係を、S2S 再予報データに対する従来型の決定論的評価法と、AGCM 超長期積分データに基づく独自の確率過程論的評価法の両面から、明らかにする。以下では、年次計画として、前者と後者にわけて説明する。

まず、気象庁、米国大気研究センター、欧州中長期予報センターなどの S2S 再予報データを入手する。Ichikawa and Inatsu (2017)の研究で熱帯気象にかかる変数は入手済なので、これを中高緯度に適した変数に広げる。入手後は、アンサンブル間の散らばりなど、予報に関する基本的な量を予測期間ごとに整理する。予測可能期間の長さやブロッキングが起こった地域ごとに、Nakamura and Wallace (1993)の渦度収支解析を適用し、予測に影響を及ぼす力学因子を同定する。過去の事例解析の結果からは、非線形性が寄与する低周波ロスビー波の作用が予測可能期間を短くすると、予想される。

次に、低次元解析を成功させるためには均質な大量サンプルを解析する必要がある。10,000年超の積分結果に基づき、Inatsu et al. (2013)の低次元解析を利用して、予測可能期間を評価する。2次元射影の世界では、蛇行場における予測可能期間の悪化が示されているが、本研究ではブロッキング場を正確に表現するため、十分な次元をもつ相空間に拡張する予定である。

## 4. 研究成果

### 4 - 1. S2S 再予報データによる予測可能性解析

S2S データとして利用したものは、BOM, ISAC, ECMWF, METFR, HMCR, CMA, KMA, NCEP, ECCC, UKMO の再予報データと現業予報データである。Ichikawa and Inatsu (2017)での研究からさらに近年のデータ分もダウンロードしてデータを拡充した。用いた変数は Inatsu et al. (2013)などで相空間を張った 500hPa ジオポテンシャル高度であり、これを気象庁再解析データ JRA55

の 100 個の主成分によって、季節ごとに射影した。たとえば、冬季の第 1 主成分は北大西洋振動、第 2 主成分は北米・太平洋パターンである。このまま 2 次元相空間で議論すると 98 次元分を捨象することになり、一方で 100 次元そのまま利用するとフォッカープランク方程式の推定変数量が非現実的な量となる。そこで、100 次元相空間内の典型的な状態を機械学習の一種である自己組織化写像によって 2 次元の潜在空間へと縮約した。一般に、自己組織化写像は初期ノード設定によって、学習データが同じであっても得られるノードが異なっている。本研究では幾つかのランダムからの学習によって得られるノードが、相互にアフィン不変となりやすいことを突き止めた。そこで、本研究では主成分 2 次元に対し齊一に並べられた初期ノードから出発した自己組織化写像の結果を基準として利用した。S2S モデル予測を潜在空間のノードに射影したところ、2~3 週間の延長予報が可能であることが示唆された。自己組織化写像のノードをクラスタ分析によって分類したところ、S2S モデルによらず、ジェット気流が分流しているときを初期値とする予報の予測限界が短いことがわかった。この結論は Inatsu et al. (2013) が示した予測可能性の結果に近い。以上より、季節内予測の予測可能性に関する新しい解析法を提示し、それを用いて予測限界を議論した。

次に、気候値海水温を強制とした 10,000 年超の数値積分を実施した。また、大気循環の回転成分を表現する渦度の方程式から、ブロッキング現象を含む大気の(統計的には時間空間的に直交する)主成分を基底とした分解を行い、モード方程式を導出した。この方程式に基づいて再解析データから得られたブロッキングに関する解析を実施した。これは変数を空間方向に分解するのではなく、時間方向に分解することで、元来、回帰係数として扱ってきたものを、直交展開として扱うことができるようになり、きわめて広範な研究への応用が見込まれる成果となっている。これは Inatsu et al. (2013)における低次元空間解析を発展させた考え方でもある。というのは、これまで渦度方程式の直交分解には、Majda らのように準地衡の縛りを設けて流線関数の展開によって実施するか、あるいは統計データから係数を推定するかしかなかった。この新手法によって、左様の困難は払しょくし、仮にデータ量が多くなっても、時間関数から直交展開を施すことによって、非線形項の効果を含む予測可能性を診断が可能となった。たとえば、太平洋ブロッキングと大西洋ブロッキングで異なる非線形効果が重要であることはすでに知られているが、本手法を用いることで時間フィルターを用いなくても、そのことを診断できるようになった。このモード方程式を実際のデータに当てはめて、太平洋や大西洋のブロッキングの発達時と消滅時にどのような非線形効果かはたらくかを診断した。その結果、太平洋ブロッキングには高次モードの渦フラックス収束による効果が卓越し、大西洋ブロッキングには低次モードの渦フラックス収束による効果が卓越することが示された。この結果はモード展開によって、極めて合理的に示されたものである。たとえば、これまで研究で明らかにされた大気ブロッキングの発達過程も本研究で開発された手法で系統的に診断された。

さらに、低次元確率微分方程式の構築をサーベイし、Inatsu et al. (2013)や平成 30 年度に開発した方法の他、Kravtsov et al. (2016)の方法を実装した。この方法は乗法的ノイズを含む多段回帰モデルであり、すでに現実的な統計を再現できる高性能のモデルであることが確かめられている。これを用いて、8 年のデータを学習した統計モデルで 100 年のデータを出力し、気圧から降水へと変換する手法を開発した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inatsu, M., R. Yoshida, S. Karino, S. Takeuchi, and S. Kobayashi	4. 巻 29
2. 論文標題 A high-resolution prediction system for birch pollen in Sapporo.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2020.108229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Katsuyama, Y., and M. Inatsu	4. 巻 17
2. 論文標題 Advantage of volume scanning video disdrometer in solid-precipitation observation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Online Letters on the Atmosphere	6. 最初と最後の頁 35-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2021-006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sugawara, K., M. Inatsu, S. Shimoda, K. Murakami, and T. Hirota	4. 巻 17
2. 論文標題 Risk assessment and possible adaptation of potato production in Hokkaido to climate change using a large number ensemble climate dataset d4PDF	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Online Letters on the Atmosphere	6. 最初と最後の頁 24-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2021-004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawazoe, S., M. Inatsu, T. J. Yamada, and T. Hoshino	4. 巻 16
2. 論文標題 Climate change impacts on heavy snowfall in Sapporo with 5-km mesh large ensemble simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Online Letters on the Atmosphere	6. 最初と最後の頁 233-239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2020-039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inatsu, M., S. Tanji, and Y. Sato	4. 巻 177
2. 論文標題 Toward predicting expressway closures due to blowing snow events	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cold Region Science and Technology	6. 最初と最後の頁 103-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coldregions.2020.103123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuyama, Y., and M. Inatsu	4. 巻 37
2. 論文標題 Fitting precipitation particle size-velocity data to mixed joint probability density function with the expectation maximization algorithm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Atmosphere and Ocean Technology	6. 最初と最後の頁 911-925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JTECH-D-19-0150.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuyama, Y., M. Inatsu, and T	4. 巻 66
2. 論文標題 Response of snowpack to +2C global warming in Hokkaido, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 83-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2019.85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuyama, Y., M. Inatsu, and T. Shirakawa	4. 巻 66
2. 論文標題 Possible hydrological effect of rainfall duration bias in dynamical downscaling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 83-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2019.85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inatsu, M., T. Suenatsu, Y. Tamaki, N. Nakano, K. Mizushima, and M. Shinohara	4. 巻 58
2. 論文標題 Development of pressure-precipitation transmitter.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Meteorology and Climatology	6. 最初と最後の頁 2453-2468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAMC-D-19-0070.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aikawa, T., M. Inatsu, N. Nakano, and T. Iwano	4. 巻 76
2. 論文標題 Mode-decomposed equation diagnosis for atmospheric blocking development.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 3151-3167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-18-0362.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Morita, H., M. Inatsu, and H. Kokubu	4. 巻 18
2. 論文標題 Topological computation analysis of meteorological time-series data.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Society for Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 1200-1212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 菅原 邦泰、稲津 将、下田 星児、村上 貴一、広田 知良
2. 発表標題 大規模アンサンブル気象データを用いた北海道のパレイシヨへの気候変動影響の確率的評価
3. 学会等名 日本気象学会北海道支部第2回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川添 祥、稲津 將、山田 朋人、星野 剛
2. 発表標題 札幌において豪雪をもたらす大気場と将来変化検証
3. 学会等名 日本気象学会北海道支部第2回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹治 星河、稲津 將、大風 翼
2. 発表標題 格子ボルツマン法を用いた吹きだまりモデルの開発
3. 学会等名 雪氷研究大会(2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝山 祐太、稲津 將、丹治 星河、川島 正行
2. 発表標題 ディストロメーターの測定方式による降雪粒子観測の違い
3. 学会等名 雪氷研究大会(2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Inatsu
2. 発表標題 Climate change adaptation to disaster in urban areas
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅原 邦泰, 稲津 將
2. 発表標題 気象庁 1 か月アンサンブル予報を用いた夏季北海道における低温偏差の予測可能性.
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Inatsu, T. Aikawa, and N. Nakano
2. 発表標題 Mode-Decomposed Equation Diagnosis for Atmospheric Blocking Development.
3. 学会等名 Annual Meeting of American Meteorological Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Inatsu, M., and Y. Ichikawa
2. 発表標題 An alternative estimate of potential predictability on the Madden-Julian Oscillation phase space using S2S models.
3. 学会等名 International Conference on Subseasonal to Decadal Prediction (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Inatsu, M., N. Nakano, H. Mukougawa, and S. Kusuoka
2. 発表標題 Predictability of wintertime stratospheric circulation examined by non-stationary fluctuation dissipation relation.
3. 学会等名 International Conference on Subseasonal to Decadal Prediction (国際学会)
4. 発表年 2018年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	向川 均  (Hitoshi Mukougawa)  (20261349)	京都大学・大学院理学研究科・教授    (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------