

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14397

研究課題名（和文）高精度古気候復元に向けたデータ同化手法開発

研究課題名（英文）Development of a data assimilation method toward high-accuracy paleoclimate reconstruction

研究代表者

岡崎 淳史 (Okazaki, Atsushi)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：10790842

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：過去2000年の気候復元の精度を向上させる手法開発を行なった。これまでの研究では統計的に気候を推定する手法が用いられてきたのに対し、本研究では、気候モデルの予測と古気候観測を動的に融合し気候を推定するオンラインデータ同化手法を提案し、完全モデルを仮定した理想条件下でテストを行なった。その結果、用いる古気候観測の時間解像度に比べて気候が予測可能な範囲が長い場合には、本研究の提案手法を用いることで既往の手法を上回る復元精度を達成できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長期の気候変動を描くことで、気候システムの変動メカニズムに対する理解を深め、深刻な影響が懸念される地球温暖化により良く備えることができると期待できる。一方、測器による観測が入手可能な期間はたかだか150年程度であり、気候システムの全容を捉えるには短すぎる。地学的な手がかりをもとに気候を復元する必要があるが、その手法には大きな不確実性が残されていた。本研究が提案する手法を用いることで、より正確な気候復元の実現が可能になる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a method to reconstruct the last millennium climate with high accuracy compared to previous methods. The method proposed in this study merges climate model simulations and observations recorded in climate proxies with data assimilation. The special character of the proposed method is to estimate the initial conditions of the model and to conduct forecast with it. By doing so, the model simulation is constrained by assimilated observations and become closer to the realistic state.

The method was tested with simplified climate model named SPEEDY under the perfect model scenario. The result showed that the climate reconstruction with the proposed method is better than the previous methods when the length of predictability is longer than the averaging time of the observations. Considering that the typical temporal resolution of the proxies and the predictability in the real world, we can expect that the proposed method improves the skill of paleoclimate reconstruction.

研究分野：水同位体水文気候学、データ同化、数値天気予報

キーワード：データ同化 古気候復元

1. 研究開始当初の背景

データ同化は力学系理論と統計理論に基づきシミュレーションと観測データを融合する。データ同化技術は天気予報とともに発展してきたが、最近では古気候を詳細に復元すべく古気候分野にも応用され始めている(例えば Goosse et al., 2006)。ここで、古気候における観測データとは、気候プロキシと呼ばれる樹木年輪幅やアイスコア・サンゴ骨格・樹木セルロール・石筍中の同位体比等である。これらの気候プロキシは数十万年にわたる気候情報を保持しているが、その時間解像度は粗く、せいぜい季節変化を記録している程度である。加えて空間分布も疎である。このように観測の質・量ともに測器による気象観測とは異なるため、高度に発展した天気予報のための同化システムをそのまま応用することができず、古気候データ同化は天気予報とリンクを保ちながらも独自の発展を遂げている。海外では、2016年から米国ワシントン大学を中心としたグループが「ミレニアム再解析」を目的に掲げ、過去千年の年々変動を復元しようとしており(Hakim et al., 2016)。古気候データ同化は今まさに盛り上がりつつある研究分野である。

しかし、これまでの古気候データ同化は観測情報を十分に活用できているとは言い難い。その理由のひとつはデータ同化手法による制約である。データ同化を用いて古気候を復元する研究の多くは「オフラインデータ同化」と呼ばれるデータ同化アルゴリズムを用いている。このアルゴリズムは、既存のシミュレーション結果を用いてシミュレーション内の統計情報と観測情報に従い結果に修正を施すものである。一方、気象予報等で用いられるオンラインデータ同化の特長は、時間発展モデルを利用し、時間方向に情報を伝えることで、過去の観測の情報を積み重ねていき、高精度の解析値を作り出していくプロセスにある。すなわち、オフラインデータ同化は力学系理論に基づく時間発展という情報を十分に利用していないといえる。情報量が非常に限られる古気候分野では、これを最大限活かすデータ同化手法が求められる。

2. 研究の目的

これまでの古気候復元研究は、我々が手にしうる情報を十分に活用しているとは言い難く、過去の気候変動の全容は未だ描き切れていない。本研究は、これまでにない精度で古気候を復元するための基盤的な気候プロキシデータ同化手法の開発を目指した。

3. 研究の方法

情報が限られる古気候のなかで情報を最大限活かすため、力学系理論による時間発展情報と統計理論の双方に基づいて同化する手法を開発した。これらの開発は、計算的負荷の小さい簡易モデル SPEEDY にスラブ海洋モデルを結合した SPEEDY-SOM で行った。実験は全て完全モデルを仮定した理想化実験とした。また、同化実験で用いる観測は、SPEEDY-SOM を用いた真値実験の出力を用い、PAGES2k (2013)の観測分布を模して作成した。観測変数は地表気温のみとし、観測誤差は各地点における時間標準偏差と同等とした。また同化結果から、同化するデータの時間解像度と再現される現象の関係性を解析することで、気候予測可能性についても調査した。

4. 研究成果

古気候復元精度向上に向け、繰り返し同化(RIP; Running-In-Place)およびオンラインデータ同化の二つを用いて研究を行なった。以下、それぞれについて研究成果を示す。

● 繰り返し同化(実施期間: 2018年4月~2019年4月)

繰り返し同化(RIP)は、数値天気予報において、データ同化サイクルを開始してから誤差が十分に小さくなるまでのスピニングアップ時間を短くするために提案された手法である。通常のデータ同化では同じ観測は一度しか同化しないが、RIPは複数回同化する。予報アンサンブルが十分に観測に拘束されていない場合に有効な手法であり、海面水温のみで大気を拘束する AMIP 型ランで構成されたアンサンブルを用いるオフラインデータ同化には有効であると期待できる。2018年度は、大気モデルには簡易気候モデルである SPEEDY を用いて年平均気温を同化し、RIPの効果を評価した。どうか手法にはアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF; Ensemble Kalman Filter)を用いた。なお、観測は PAGES2k (2013)の観測分布を模した地表気温の年平均値である。

RIPを用いた結果、地表気温について、二乗平均平方根誤差(RMSE)が約4%減少し、空間パターンのアノマリ相関(ACC)が0.55から0.63に改善した(図1)。また、RMSE/ACCが最小/最大になるのに要する繰り返し同化回数は7回/6回であった。観測誤差に対する感度、および

EnKF が想定する「観測誤差の誤差」に対する感度を調査したところ、得られる改善率や必要な繰り返し同化回数は変化するものの、改善傾向は共通して見られた。RIP は、オフラインデータ同化の精度をロバストに改善する手法であると言えるだろう。一方、モデルにバイアスがある場合、RIP により ACC の悪化が観察されたため、モデルバイアス補正は必須であることも示唆された。

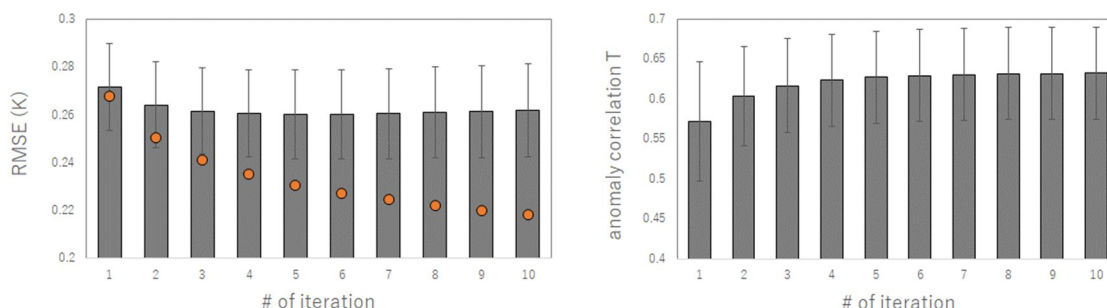


図 1 繰り返し同化回数と地表気温の全球平均 RMSE (左図)、ACC (右図)。左図の橙丸は、全球平均アンサンブルブレッドを示す。

● オンラインデータ同化 (実施期間：2017 年 4 月～2019 年 4 月、2021 年 4 月～2022 年 3 月)
 既存の古気候データ同化手法 (オフラインデータ同化) は統計的復元の枠を出なかったが、本研究では力学系理論と統計理論の双方に基づいた同化手法 (オンラインデータ同化) の開発を目指す。

初年度には、様々なデータ同化手法を用いてオンラインデータ同化実験およびオフラインデータ同化実験を行い、それらの比較を行った。ここで、データ同化手法とは、解析値を求める手法を指すことに注意されたい。比較に用いたデータ同化手法は、EnKF と、時間平均値を解析する TAU (Time-Averaged Update)、IAU (Incremental Analysis Update) である。同化する観測の時間解像度は年平均である。この結果、オンラインデータ同化手法の中では IAU が最も高い精度を示したが、一方でこれらの精度はオフラインデータ同化と同等または劣るものであった。観測の時間分解能に比べて対象とするシステムの予測可能性が十分に長い場合、オンライン同化は初期条件の情報を活用することでオフライン同化を上回る性能を発揮すると期待されるため、この結果は SPEEDY-SOM の地表気温の予測可能性が 1 年よりも短いことを示唆する。

続いて、どの程度の時間解像度であればオンラインデータ同化が優れているか、様々な時間解像度の観測値を同化することで調査した。同時に、SPEEDY-SOM の予測可能性も調査した。この結果、大気については、同化する観測の時間解像度が 10 日よりも短い場合、オンラインデータ同化が優れていて、1 か月平均ではオフラインデータ同化とほぼ同等の精度になることが分かった。一方、海洋については、同化する観測の時間解像度が 6 ヶ月よりも短い場合、オンラインデータ同化が優れていた (図 2)。

一方、SPEEDY-SOM において大気と海洋の予測可能性を調査したところ、それぞれ、10 日と 6 ヶ月程度であり、オンラインデータ同化がオフラインデータ同化のスキルを上回る期間と整合した。これは、「観測の時間分解能に比べて対象とするシステムの予測可能性が十分に長い場合、オンライン同化は初期条件の情報を活用することでオフライン同化を上回る性能を示す」という仮説をサポートする。さらに、結果をロバストなものにするため、SPEEDY-SOM の一部であるスラブ海洋モデルのパラメタを変更し、熱容量を増やして (予測可能性を長くして) 再度実験を行なった所、オンラインデータ同化とオフラインデータ同化の精度差は拡大した。このことは、仮説をサポートするとともに、予測可能な時間が長いほど、オンラインデータ同化による気候復元の精度がオフラインデータ同化を用いたものを大きく上回ることを示す。

上記は比較的簡素な結合モデルを用いた理想化実験の結果であり、この解釈を現実問題に適用するには注意が必要であるが、古気候観測の時間分解能は一年程度であり、また海洋の予測可能性は十年以上に及ぶ場合もあることを考慮すると、オンラインデータ同化を用いることで既往研究を上回る精度で古気候復元が実現できる可能性が示された。

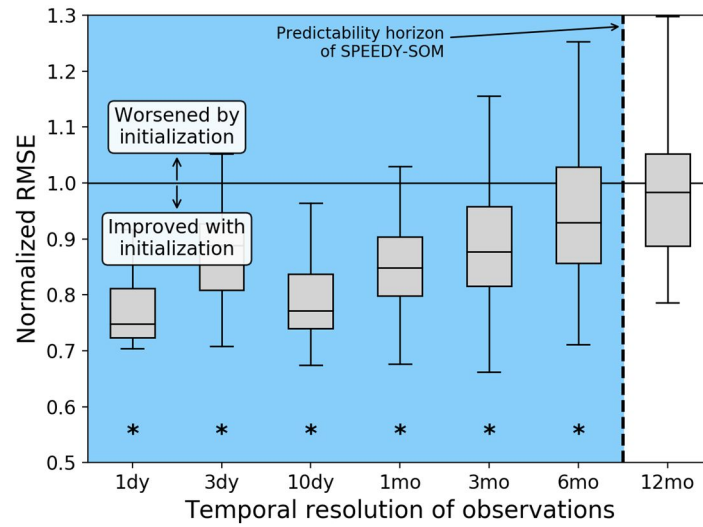


図 2 オンラインデータ同化とオフラインデータ同化の全球 RMSE の比。値が 1 以下の場合、オンラインデータ同化がオフラインデータ同化よりも優れていることを示す。変数は海面水温。横軸は同化した観測の時間解像度を示す。バー下のアスタリスクは、海面水温の予測可能性が横軸の値よりも長いことを示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Okazaki Atsushi、Miyoshi Takemasa、Yoshimura Kei、Greybush Steven J.、Zhang Fuqing	4. 巻 126
2. 論文標題 Revisiting Online and Offline Data Assimilation Comparison for Paleoclimate Reconstruction: An Idealized OSSE Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JD034214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kino Kanon、Okazaki Atsushi、Cauquoin Alexandre、Yoshimura Kei	4. 巻 126
2. 論文標題 Contribution of the Southern Annular Mode to Variations in Water Isotopes of Daily Precipitation at Dome Fuji, East Antarctica	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JD035397	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Okazaki Atsushi、Yoshimura Kei	4. 巻 124
2. 論文標題 Global evaluation of proxy system models for stable water isotopes with realistic atmospheric forcing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JD029463	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 Atsushi Okazaki、Kei Yoshimura	4. 巻 13
2. 論文標題 Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate reconstruction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Climate of the Past	6. 最初と最後の頁 379-393
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/cp-13-379-2017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 2件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Atsushi Okazaki, Kei Yoshimura
2. 発表標題 Evaluation of proxy system models for stable water isotopes and introduction of their application to paleoclimate studies
3. 学会等名 JpGU2021(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木野佳音、岡崎淳史、Alexandre Cauquoin、芳村圭
2. 発表標題 ドームふじ基地の日降水同位体比に大規模大気循環が与える影響: 同位体気候モデルMIROC5-isoを用いた研究
3. 学会等名 JpGU2021(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okazaki, A., Cauquoin, A., Kino, K., Yoshimura, K.
2. 発表標題 Development of MIROC5-iso and its comparison with isotopic climate proxies
3. 学会等名 Water isotopes: From Weather to Climate(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Cauquoin, A., Werner, M., Shoji, S., Okazaki, A., Yoshimura, K., Lohmann, G., Jungclaus, J
2. 発表標題 Transient simulation of the past 2000 years with the isotope-enabled coupled model MPI-ESM-wiso
3. 学会等名 Water isotopes: From Weather to Climate(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kino, K., Okazaki, A., Cauquioin, A., Yoshimura, K.
2. 発表標題 Contribution of the Southern Annular Mode to variations in water isotopes of daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica: A study with an isotope-enabled AGCM MIROC5-iso
3. 学会等名 Water isotopes: From Weather to Climate (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Millennium reanalysis using proxy and data assimilation
3. 学会等名 The 11th International Atmospheric Circulation Reconstructions over the Earth (ACRE) Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Exploring online data assimilation for paleoclimate reconstruction using an idealized OSSE framework
3. 学会等名 The 8th EnKF Data Assimilation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Toward online data assimilation for the millennium reanalysis
3. 学会等名 JpGU 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 An online data assimilation method to assimilate time-averaged observations
3. 学会等名 AGU 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Paleoclimate Reconstruction with Iterative Data Assimilation: An Observing System Simulation Experiment with an Intermediate AGCM
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Data Assimilation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Evaluation of an isotopic proxy data assimilation system
3. 学会等名 Third Annual LMR Workshop: Climate Dynamics with the Last Millennium Reanalysis (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Development and evaluation of isotopic proxy data assimilation system
3. 学会等名 First workshop of the PAGES working group on Paleoclimate Reanalyses, Data Assimilation and Proxy System modelling (DAPS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Atsushi Okazaki
2. 発表標題 Exploring online data assimilation for paleoclimate reconstruction using an idealized OSSE framework
3. 学会等名 Third Symposium on Multi-scale Predictability: Data-model Integration and Uncertainty Quantification for Climate and Earth System Monitoring and Prediction (AMS 98th Annual Meeting) (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

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