

古環境研究および気候将来予測に資する気候数値実験

課題責任者

阿部 彩子 東京大学大気海洋研究所

著者

阿部 彩子^{*1}, 吉森 正和^{*1}, Wing-Le Chan^{*1}, 大石 龍太^{*2}, 小長谷 貴志^{*3},
齋藤 冬樹^{*3}, シェリフ多田野 サム^{*4}, 樋口 太郎^{*5}, 國吉 優太^{*1}, 小玉 貴則^{*5},
渡辺 泰士^{*6}, 中川 祥緒^{*7}, 小幡 利空^{*7}, 佐藤 健^{*7}

^{*1} 東京大学大気海洋研究所, ^{*2} 東京科学大学理学院, ^{*3} 海洋研究開発機構地球環境部門環境変動
予測研究センター, ^{*4} 琉球大学理学部, ^{*5} 東京科学大学地球生命研究所, ^{*6} 国立環境研究所, ^{*7} 東
京大学理学系研究科

キーワード：大気海洋大循環モデル MIROC, 古気候モデリング, 氷期-間氷期サイクル

1. 雲相の温度依存性が最終間氷期における北極域の気候再現に果たす役割

約 12 万 9 千年前から 11 万 6 千年前は、最終間氷期と呼ばれる比較的温暖な時代であり、産業革命前に比べて地球の平均気温が約 0.5~1.5°C 高かったと推定されている[1]。この時期、現在との地球の軌道要素の違いから、北極は特に温暖であり、夏に海氷が消失していた可能性が報告されている。多数のモデルが予測する最終間氷期と CO₂ 増加時の夏の海氷面積の間には正の相関関係があり、最終間氷期の海氷シミュレーションの良し悪しが将来予測の信頼性に係するものが先行研究から示唆されている。本研究では、気候モデルにおいて、雲相、すなわち雲粒子が液体か固体か、の割合を評価する際の温度依存性が、最終間氷期における北極の気候再現にどのように影響を与えるかを調べた。MIROC4mV および MIROC4m を用いて、動態植生フィードバック効果の有無し実験、同じ温度帯で雲粒子の液相割合を変えた数値実験を行った。多数のモデルシミュレーション結果に対する、本研究の実験結果(LIGfS, LIGvS, LIGfL, LIGvL)を図 1 に示す。アルベドフィードバックに関連する植生フィードバックの有無と冬の温室効果に関連する雲相の表現によって結果が大きく異なり、最終間氷期の北極気候再現において両者の重要性が示された。本研究成果は、[2] Arima, et al. (2026) として Climate of the Past 誌から出版された。

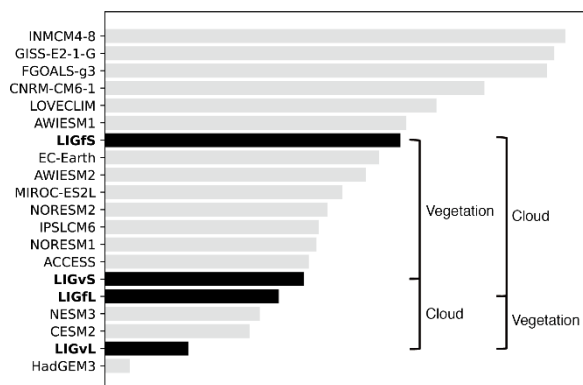


図 1: 多数のモデルによる最終間氷期における夏の北極海表面積の再現。Vegetation: 植生フィードバックの有無の効果と Cloud: 雲相の温度依存性の表現の違いの効果[2]。

2. 過去の南極氷床融解による気候フィードバックのモデル研究

本研究では、これまでの南極地域観測隊によって得られた南極大陸上・南極沿岸海洋における地質記録を統合して、最終氷期以降に生じた南極氷床後退の時間情報を高精度で明らかにした。その結果、南極沿岸に暖かい深層水（周極深層水）が流入するという海洋循環のイベントが約 9000 年前に検出され、それと同じくして内陸の氷床高度が低下し、2000 年程度の時間で氷床が縮小したことが明らかにされた。このことは、暖かい海水が南極沿岸に流入したことで棚氷が崩壊し、内陸の氷床縮小を加速させたことを示唆するデータである。そこで、気候モデルで行われた退氷期実験[3]を拡張したシミュレーションを行った。ロス棚氷など他の地域での氷床融解に伴って放出された氷床融解水が南極海に流れ込むと、海洋の成層構造が強化されるために暖かい深層水が南極沿岸に流れ込む結果が得られ、氷床と海洋の相互作用の重要性が示された(図 2)。本研究成果は Nature Geoscience 誌より[4] Suganuma et al.(2026, 著者に阿部・小長谷を含む)として出版されプレスリリースを行った。

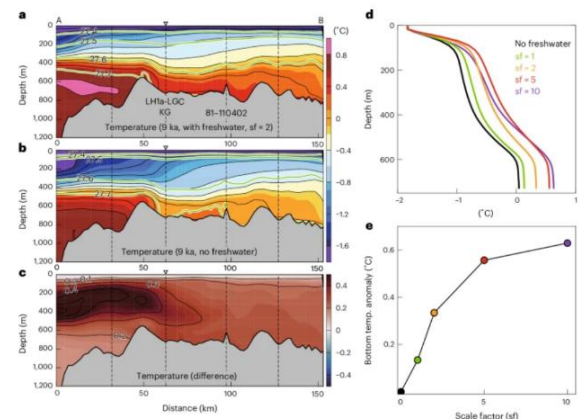


図 2: 気候モデル・海洋モデル実験の結果[4]。(a-c) リュツォ・ホルム湾における水温分布の断面図。氷床融解水ありの実験(a)は、ない実験(b)に比べ、南極沿岸の水温が高くなっている(c)。追加実験によって、海洋成層構造を強くするとより南極沿岸の海水温も高くなる結果が得られた(d-e)。

3. 南極・南大洋域に着目した最終退氷期のモデル比較研究

本研究では、MIROC を含む 6 気候モデルを用いて行われた最終氷期融解の過渡実験を分析し、南半球高緯度の地表温度変化を駆動するプロセスを解明する。二酸化炭素の増加と、北大西洋深層循環 (AMOC) の弱体化が南極域の温暖化傾向がすべてのモデルで検出されたが、退氷期前半の HSI における南極大陸上の温暖化は、氷床コアデータよりも小さかった。AMOC が急激に強化された実験では、南半球高緯度で 2°C の寒冷化が見られ、北大西洋への急速な融解水の流入を伴う実験では温暖化が見られる。AMOC の相対的な寄与を抽出したところ、全ての気候モデルが AMOC の上昇に反応し、数百年程度かけ南極域の寒冷化が生じることが示された。以上の結果は、北大西洋深層循環の変化が南半球高緯度気温変化に大きく影響することを示唆している。本研究結果は 2025 年に *Climate of the Past* 誌より [5]Obase et al. (2025) として出版された。

4. 過去の温暖期から得られる将来予測への示唆

我々のグループも参加した 4 つの国際比較研究について報告する。これらの研究では、過去の温暖気候における熱帯気候変動と大気海洋結合の性質を、数値モデルとプロキシ制約を用いて検討し、将来の温暖化下の気候変動の理解に重要な知見を与えている。対象とする時代は、中期鮮新世温暖期 (MPWP) と始新世であり、ここでは気候平均状態が大きく異なる条件下でのエルニーニョ南方振動 (ENSO)、熱帯循環、モンスーン応答を比較している。

Canal-Solis et al. (2025) [6]は、PlioMIP2 マルチモデル実験を用いて、中期鮮新世における太平洋変動の空間構造と時間特性を解析した。その結果、MPWP では ENSO の振幅が全体として抑制される一方で、太平洋十年規模振動 (PDO) の空間構造と振幅は産業革命前と概ね同等であることが示された。これは、ENSO と PDO の変動要因が異なることを示唆しており、ENSO は熱帯太平洋の平均状態の変化に敏感であるのに対し、PDO は主として古地理条件 (海陸分布、氷床、海峡の開閉) に強く影響されることが示された。また、CO₂濃度のみを上昇した実験では PDO 構造が大きく変化しないことから、MPWP における太平洋変動の非対称性には古地理のような非 CO₂ 要因の重要性が示された。

Abhik et al. (2025) [7]は、始新世の温暖期 (EECO) を対象とした DeepMIP 実験を用い、EECO における ENSO の性質を検討した。始新世では、現在よりも大振幅・長周期の ENSO が出現したが、これは EECO の太平洋海盆が現在よりも広がっていたことにより、大気海洋フィードバックが強化されたことに起因する。一方 CO₂濃度の上昇は、風ストレスフィードバックにより ENSO を弱体化させる働きがあることが示された。

Zhang et al. (2024) [8]は、MPWP における熱帯大気循環 (ハドレー循環およびウォーカー循環) の変化を、

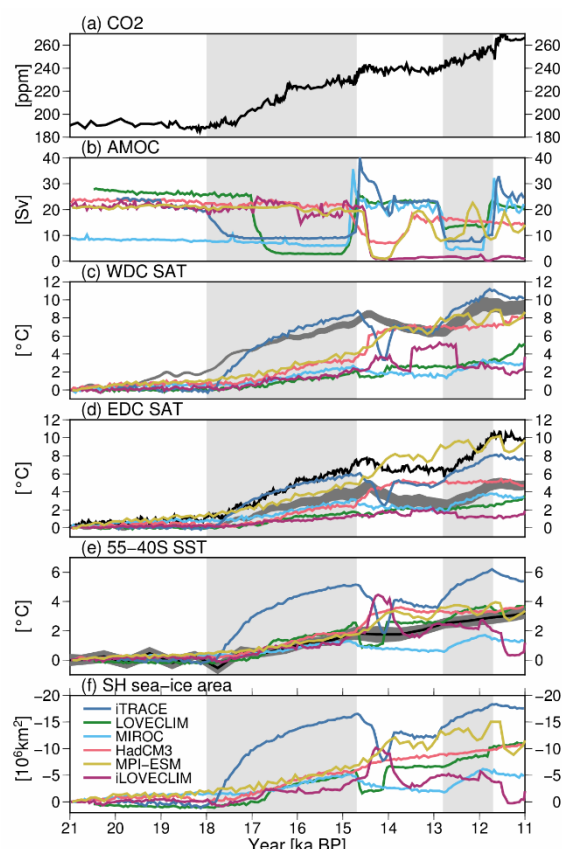


図 3: 気候モデル実験結果の比較 [5]。(a) 実験設定の大気中 CO₂ 濃度、(b) 北大西洋深層循環 (AMOC) 流量、(c) 西南極 WDC 地点気温、(d) 東南極 EDC 地点気温、(e) 南大洋域平均海面水温、(f) 南大洋海氷面積。黒線が地質記録、色線が 6 モデルの結果を示す。

PlioMIP2 マルチモデルを用いて詳細に解析した。その結果、MPWP では大気安定度だけではなく熱帯上昇域での非断熱加熱の強化が循環構造の季節的・空間的な変化と密接に結びついていることが示された。さらに、ハドレー循環の極向きの拡大は、亜熱帯における大気安定度と鉛直風シアの変化とも関連していた。

Sun et al. (2024) [9]は、同じく MPWP を対象に、東アジア夏季モンスーン (EASM) 降水変化をプロキシ記録とモデル結果の両面から検討した。水蒸気収支の分解解析により、EASM 全体の降水増加は主として熱力学的に強化された鉛直水蒸気輸送によって説明されたが、熱帯域では熱力学的効果によるインド洋での水蒸気の鉛直輸送、亜熱帯域では西太平洋亜熱帯高気圧の強化に伴う力学的な水蒸気の水平輸送がそれぞれ支配的となることが示された。

謝辞

本研究は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム (JPMXD0717935715)、科研費 (JP17H06104、JP17H06323、19H05595、20H04327、22H04909、23H03536、24H00256、25K01108) の助成を受けた。

文献

- [1] Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., Schuckmann, K. v., and Vose, R. S.: Changing State of the Climate System. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.*, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, and J.B.R. Matthews, T. K. M., T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- [2] Arima, N., Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., O'ishi, R., Chan, W.-L., Sherriff-Tadano, S., and Ogura, T.: Impact of the temperature-cloud phase relationship on the simulated Arctic warming during the last interglacial, *Clim. Past*, 22, 891–913, <https://doi.org/10.5194/cp-22-891-2026>, 2026.
- [3] Obase, T. and Abe-Ouchi, A.: Abrupt Bølling-Allerød warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 11397–11405, <https://doi.org/10.1029/2019GL084675>, 2019.
- [4] Suganuma, Y., Itaki, T., Haneda, Y. *et al.* Antarctic ice-shelf collapse in Holocene driven by meltwater release feedbacks. *Nat. Geosci.* 18, 1216–1223, <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01829-7>, 2025.
- [5] Obase, T., Menviel, L., Abe-Ouchi, A., Vadsaria, T., Ivanovic, R., Snoll, B., Sherriff-Tadano, S., Valdes, P. J., Gregoire, L., Kapsch, M.-L., Mikolajewicz, U., Bouttes, N., Roche, D., Lhardy, F., He, C., Otto-Bliesner, B., Liu, Z., and Chan, W.-L.: Multi-model assessment of the deglacial climatic evolution at high southern latitudes, *Clim. Past*, 21, 1443–1463, <https://doi.org/10.5194/cp-21-1443-2025>, 2025.
- [6] Canal-Solis, K.V., Tindall, J.C., Oldeman, A.M., Haywood, A.M., Abe-Ouchi, A., Baatsen, M.L.J., Chan, W.-L., Feng, R., Hunter, S.J., Li, X., Stepanek, C. and Zhang, Z.: Asymmetric Pacific variability in the Pliocene: An unchanged PDO relative to a suppressed ENSO. *Global and Planetary Change*, 253, 104932. doi:10.1016/j.gloplacha.2025.104932, 2025.
- [7] Abhik, S., Domménget, D., McGregor, S., Hutchinson, D.K., Steinig, S., Zhu, J., Capitanio, F.A., Lunt, D.J., Niezgodzki, I., Knorr, G., Chan, W. and Abe-Ouchi, A.: Stronger and prolonged El Niño–Southern Oscillation in the Early Eocene warmth. *Nature Communications*, 16, 4053. doi:10.1038/s41467-025-59263-7, 2025.
- [8] Zhang, K., Yong Sun, Zhongshi Zhang, Christian Stepanek, Ran Feng, Daniel Hill, Gerrit Lohmann, Aisling Dolan, Alan Haywood, Ayako Abe-Ouchi, Bette Otto-Bliesner, Camille Contoux, Deepak Chandan, Gilles Ramstein, Harry Dowsett, Julia Tindall, Michiel Baatsen, Ning Tan, William Richard Peltier, Qiang Li, Wing-Le Chan, Xin Wang, Xu Zhang: Revisiting the physical processes controlling the tropical atmospheric circulation changes during the Mid-Piacenzian Warm Period, *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2024.01.001, 2024.
- [9] Sun, Y., Wu, H., Ding, L., Chen, L., Stepanek, C., Zhao, Y., Tan, N., Su, B., Yuan, X., Zhang, W., Liu, B., Hunter, S., Haywood, A., Abe-Ouchi, A., Otto-Bliesner, B., Contoux, C., Lunt, D.J., Dolan, A., Chandan, D., Lohmann, G., Dowsett, H., Tindall, J., Baatsen, M., Peltier, W.R., Li, Q., Feng, R., Salzmann, U., Chan, W.-L., Zhang, Z., Williams, C.J.R. and Ramstein, G.: Decomposition of physical processes controlling EASM precipitation changes during the mid-Piacenzian: new insights into data-model integration. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 120. doi:10.1038/s41612-024-00668-4, 2024.