

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^{*1}, 小長谷 貴志^{*2}, 齋藤 冬樹^{*2}, シェリフ多田野 サム^{*3}, 樋口 太郎^{*1}, 國吉 優太^{*4}, 小玉 貴則^{*5}, 渡辺 泰士^{*6}, 鄭 方舟^{*4}, 中川祥緒^{*4}^{*1} 東京大学大気海洋研究所, ^{*2} 海洋研究開発機構, ^{*3} 琉球大学理学部 ^{*4} 東京大学理学系研究科, ^{*5} 東京工業大学地球生命研究所, ^{*6} 気象庁気象研究所

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. 氷期中の数千年スケール気候変動における大気水循環変化の役割

氷期の間には大西洋子午面循環 (AMOC) が数千年スケールで変動し、全球規模の気候変動が発生したと考えられている。近年の大気海洋結合モデル研究より、氷床融解水や放射強制力の変化を伴わずに AMOC が自励的に振動することが示され、振動要因の一説には大気水循環の変動による駆動が提案された。しかし、この仮説は大気海洋結合の自励振動の解析のみに基づいており詳しく検証されていない。本研究は、水循環変動が AMOC の振動に与える影響を評価するために、大気海洋結合モデル MIROC4m を一部改良して感度実験を実施した。モデル改良では、MIROC4m のカップラーにおいて結合計算ステップごとに大気モデルから海洋モデルに受け渡される水フラックス (降水-蒸発+河川流出) を気候値に差し替えられるようにした。そのモデルを使用して、氷期の一定の境界条件の下で、北大西洋の中高緯度と低緯度の水フラックスを月別気候値に固定する部分非結合実験を実施し、同一境界条件の大気海洋完全結合実験[1]と比較した。その結果、水フラックスを固定しても完全結合実験と同様に AMOC の数千年周期の振動がシミュレートされた (図 1)。ただし、AMOC のモード遷移のタイミングは実験間で異なる。本研

(a) P-E+R anomaly (Full-coupled)

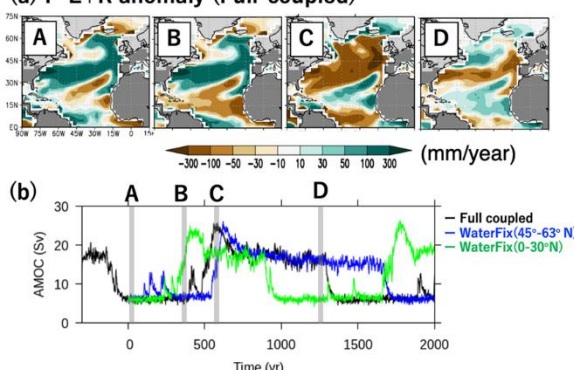


図1: (a) 大気海洋完全結合実験におけるAMOCの弱い時期(初期A, 末期B)とAMOCの強い時期(初期C, 末期D)に見られる水フラックス (=降水-蒸発+河川流出) 偏差。AMOC 振動1周期平均を基準とした。(b) 完全結合実験(黒線)と水フラックス固定実験 (フラックス固定領域が北大西洋 45° N-63° N: 青線、北大西洋 0° -30° N: 緑線)の AMOC 強度の時間変化。

究より、水循環の変動は AMOC の数千年スケールの振動の駆動の主要因から除外されて、AMOC の振動周期を変調させる副次的要素であることが分かった。

2. 最終退氷期の大気中二酸化炭素濃度増加に対する海洋炭素循環の影響

大気中の二酸化炭素濃度は、最終氷期極大期から完新世初期にかけて約 80 ppm 増加したことが知られている。最終退氷期における海洋循環と地球化学的特性の変化が大気二酸化炭素濃度にどのように影響したかを理解するため、大気海洋結合モデル MIROC 4m 気候モデルの3次元海洋場を使用して、最終氷期から完新世初期まで (2万1千年前~1万1千年前) の1万年間の海洋炭素循環の時間変化を計算した。計算された大気二酸化炭素濃度の変動は、最終退氷期の二酸化炭素濃度が増加する時期と減少する時期の両方のパターンを再現することに成功した。このような二酸化炭素濃度の増加と減少する時期が生じるのは、深層循環の急激な変化によって生じる各海盆の海洋温度・塩分・溶存無機炭素・アルカリ度の変化に対応することがわかった (図 2)。ただし、モデルは大気二酸化炭素濃度の変動幅は過小評価しており、特に南大洋の海洋変化の応答を過小に表現する傾向があるため、南極海の生物地球化学のプロセスのモデル表現を向上することが課題である。

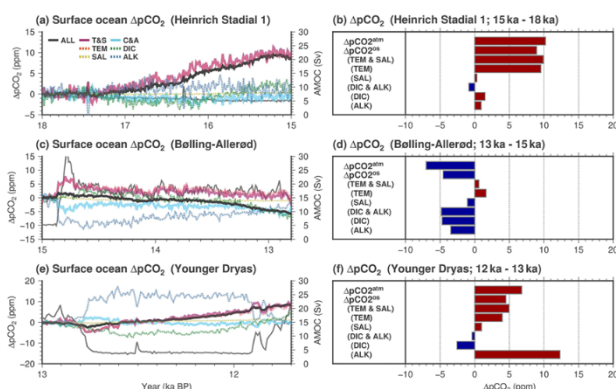


図2: 最終退氷期の3つの時期について、モデルで計算された海洋中 CO2 分圧の変化(左)に対する温度・塩分・無機炭素・アルカリ度の寄与(右)[2]。

3. 中期鮮新世の境界条件と強制力が大西洋子午面循環に与える影響

およそ 300 万年前の中期鮮新世の大西洋子午面循環 (AMOC) は現在よりも強かったことが古環境指標から示されており、Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2 (PlioMIP2) の気候モデル結果からも裏付けられている。本研究では大気海洋結合モデル MIROC4m を使用して、中期鮮新世温暖期 (mPWP) 中の AMOC 強度変化への大気二酸化炭素濃度と地理条件、植生の寄与を分離し定量化する数値実験を実施した[3]。mPWP 実験に使用された全ての強制力を組み合わせると、MIROC4m の実験によって AMOC 強度が 0.8Sv 増加した。この結果は PlioMIP2 マルチモデル平均の 3.1Sv に比べて過小評価である。個別の感度実験では、大気二酸化炭素濃度および氷床の両方が AMOC 強度の減少を引き起こすことが示された。中期鮮新世における AMOC 強化とより北大西洋表層水の塩分濃度増加、および北大西洋の広域における冬季混合層 (MLD) の深化の原因は、地理条件と植生変化の組み合わせであることが判明した (図 3d)。さらにこの要因を分解して見ると、北極海峡の閉鎖が鮮新世の地理条件と植生変化による AMOC 強化の 77%、および冬 MLD の深化の大部分 (図 3e) を占めていることがわかった。特に北極海峡の閉鎖によって、AMOC セルの深化が起きる。

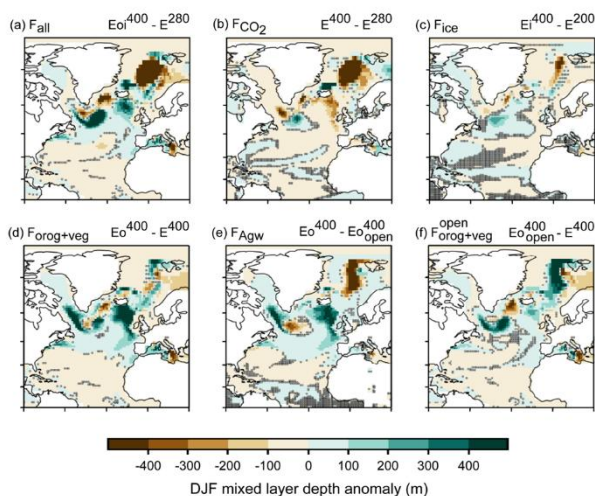


図 3: 12 月から 2 月にかけての混合層深度の変化に対する寄与。(a) 鮮新世の全ての強制、(b) CO₂、(c) 氷床、(d) 海陸分布と高度と植生 (北極海峡が閉鎖されている場合)、(e) 北極海峡が閉鎖されている場合、(f) 海陸分布と高度と植生 (北極海峡が閉鎖されていない場合)。網掛け部分は t 検定 ($p > 0.05$) で有意ではない。

4. 白亜紀中期、始新世前期、現代の気候差の要因

過去の地球には白亜紀中期や始新世前期などの将来の二酸化炭素排出シナリオと同等かそれ以上に大気二酸化炭素濃度が高く温暖な時代があったことが分かっており、現代とは異なる温度場や水循環、大気/海洋循環であったことが地質学的な研究から示唆されている。一方で、白亜紀中期 (約 9000 万年前) や始新世前期 (約 5600 万年前) の大陸配置や山岳地形は現代と大きく異なっていたことが

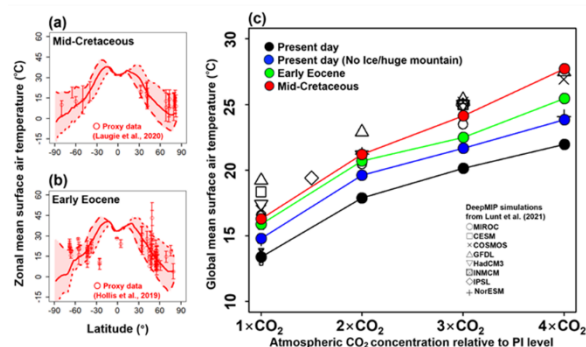


図 4: MIROC4-LPJ を用いた (a) 白亜紀中期および (b) 始新世前期の気候シミュレーション (大気 CO₂ 濃度 1142 ppm) から得られた東西平均地表気温と地質学的な証拠による復元値との比較。図 a, b 中の実線、点線、破線は、それぞれ、年平均、6-8 月平均、12-2 月平均値を示す。(c) 様々な大気 CO₂ 濃度を用いた場合にシミュレートされる各地理条件での全球平均気温とその比較。

分かっており、当時の気候を理解するためにはこれらの地理条件が気候に及ぼす影響とそのメカニズムを調査する必要がある。そこで、本研究では大気海洋植生結合モデル MIROC4m-LPJ を用いて、白亜紀中期、始新世前期、現代の地理条件での気候シミュレーションを行った。当時の大気二酸化炭素濃度、地理条件を使用した白亜紀、始新世前期の気候シミュレーションでは、地質学的な証拠が示す温暖な地球表層環境の再現に成功した (それぞれ、図 4a と図 4b)。さらに、同大気二酸化炭素濃度下で現代地理条件から氷床や大規模山脈を取り除いた実験を行うことにより (図 4c 中の青色のプロット)、高い大気二酸化炭素濃度に加え、大陸配置の違いが現代よりも温暖な白亜紀中期や始新世前期の気候に関係していることが明らかになった (図 4c)。また、本研究から、白亜紀中期と始新世前期の大陸配置の違いが、大気海洋循環に大きな影響を及ぼすことも分かってきた。

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) の助成を受けた。

文献

- [1] Kuniyoshi, Y., Abe-Ouchi, A., Sherrieff-Tadano, S., Chan, W.-L., Saito, F. (2022): Effect of climatic precession on Dansgaard-Oeschger-like oscillations. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095695. doi:10.1029/2021GL095695, 2022.
- [2] Kobayashi, H., Oka, A., Obase, T., and Abe-Ouchi, A.: Assessing transient changes in the ocean carbon cycle during the last deglaciation through carbon isotope modeling. *Clim. Past*, 20, 769–787, doi: 10.5194/cp-20-769-2024, 2024.
- [3] Weiffenbach, J.E., Chan, W.-L., Abe-Ouchi, A. and von der Heydt, A.S.: Impact of mid-Pliocene boundary conditions on the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL113118, doi: 10.1029/2024GL113118, 2025.

Numerical Climate Experiments for Paleoenvironmental Research and Future Climate Projections

Project Representative

Ayako Abe-Ouchi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Authors

Ayako Abe-Ouchi*1, Masakazu Yoshimori*1, Wing-Le Chan*1, Ryouta O'ishi*1, Takashi Obase*2, Fuyuki Saito*2, Sam Sherriff-Tadano*3, Taro Higuchi*1, Yuta Kuniyoshi*4, Takanori Kodama*5, Yasuto Watanabe*6, Fangzhou Zheng*4, Sachio Nakagawa*4

*1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, *2 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *3 Faculty of Science, The University of the Ryukyus *4 Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, *5 Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, *6 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Keywords : AOGCM MIROC, paleoclimate modeling, glacial-interglacial cycle

1. Role of hydrological changes in millennial-scale climate variability

During the glacial period, the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) is thought to have fluctuated on a millennial time scale, resulting in global-scale climate change. Recent studies using coupled atmosphere-ocean models including our MIROC4m AOGCM have recently shown millennial-scale self-sustained oscillations with no change in radiative forcings or freshwater from ice sheets [1]. Hydrological changes are proposed as one of the drivers of the oscillations, though this is based solely on analysis of the self-sustained oscillations in coupled model simulations and has not yet been further investigated. In this study, the coupled atmosphere-ocean model MIROC4m was partially modified, and sensitivity experiments were conducted to evaluate the impact of hydrological changes on the AMOC oscillations. We modified the coupler in MIROC4m so that the water flux (precipitation - evaporation + river runoff) passed from the atmospheric model to the ocean

model is replaced with a specified climatology. Using the model, we performed a partially coupled experiment in which the water flux over the North Atlantic was fixed to monthly climatology with glacial boundary conditions and compared the results with those of a fully coupled experiment. As a result, even with the water flux fixed, the millennial oscillations of the AMOC were simulated as in the fully coupled experiment (Figure 1b). The timing of the transition of AMOC modes, however, differs from that of the fully coupled experiment. The result shows that the hydrological change is not the primary factor driving the oscillations of the AMOC, but rather a secondary factor that modulates the periodicity of the AMOC oscillation.

2. Ocean carbon cycle dynamics during the last glacial period: comparative analysis of the MIROC4m model and proxies

It is known that the atmospheric carbon dioxide concentration increased by about 80 ppm from the last glacial maximum to the early Holocene. To understand the impact of ocean circulation and geochemical properties during the last deglaciation on atmospheric carbon dioxide, we calculated the ocean carbon cycle over 10,000 years from the last glacial period to the early Holocene (21,000 to 11,000 years ago) using the 3D ocean field of the atmosphere-ocean coupled climate model MIROC4m. The calculated fluctuations in atmospheric carbon dioxide concentration successfully reproduced both the patterns of periods of increase and decrease in carbon dioxide concentration during the last deglaciation. It was found that the occurrence of such periods of increase and decrease in carbon dioxide concentration corresponds to changes in ocean temperature, salinity, dissolved inorganic carbon, and alkalinity in each ocean basin caused by abrupt changes in the deep ocean circulation (Figure 1). However, the model underestimates the range of fluctuations in atmospheric carbon dioxide concentration. In particular, the model tends to underestimate the response of ocean changes in the Southern Ocean. It is necessary to improve

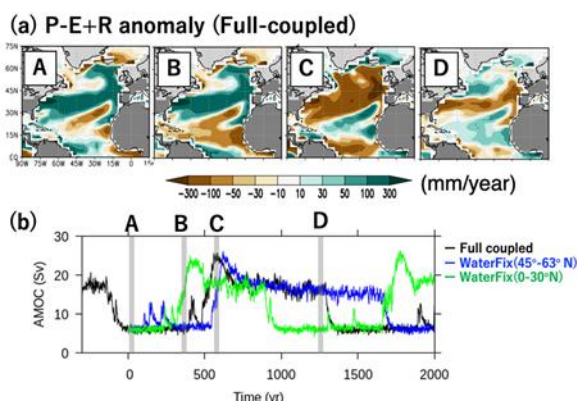


Figure 1: (a) Precipitation-Evaporation-River runoff (P-E+R) anomaly for four stages within one cycle of the AMOC oscillation in the fully coupled experiment. The anomaly is calculated with respect to the average in the cycle A-D. (b) Time series of the AMOC strength in the fully coupled experiment (black) and in the water flux-fixed experiments. Flux-fixed region is 45°-63°N in the North Atlantic (blue) and 0°-30°N in the North Atlantic (green).

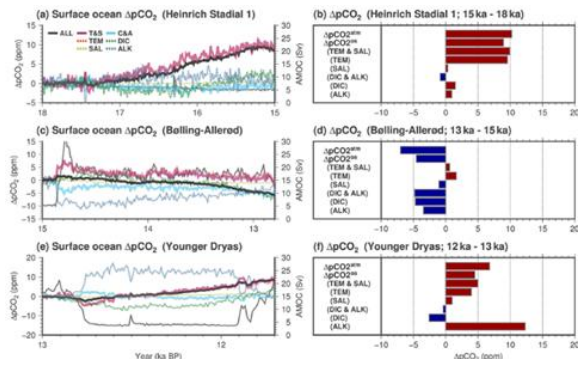


Figure 2: Ocean CO₂ concentration predicted by models (left) and contribution from temperature, salinity, inorganic carbon and alkalinity (right)[2].

the model representation of biogeochemical processes in the Antarctic Ocean.

3. Impact of mid-Pliocene boundary conditions and forcings on the Atlantic Meridional Overturning Circulation

The Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) during the mid-Pliocene (approximately 3 million years ago) was thought to have been stronger than at present day, as suggested by proxy data. This is supported by climate model results from the Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2 (PlioMIP2). The MIROC4m AOGCM is used to perform numerical experiments in order to quantify the individual contributions of CO₂, orography (combined with vegetation) to the change in the AMOC strength during the mid-Pliocene Warm Period (mPWP) [3]. Combining all the forcings used for the mPWP experiment, MIROC4m shows an increase in AMOC strength of, 0.8Sv, small compared to the PlioMIP2 multi-model mean of 3.1Sv. Sensitivity experiments show that both CO₂ and ice sheets result

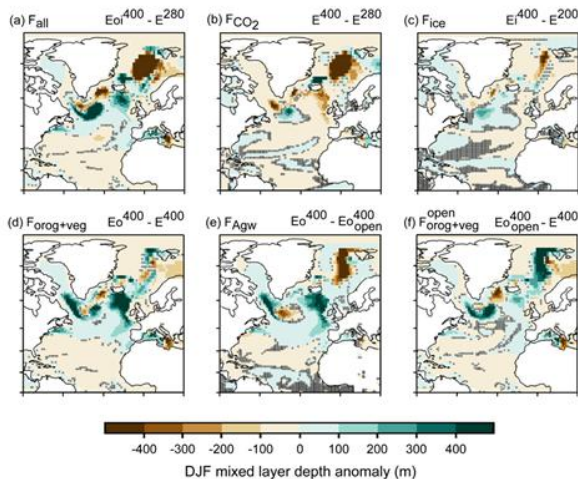


Figure3: Contribution to the change in mixed layer depth during December-January-February from (a) all Pliocene forcings, (b) CO₂, (c) ice sheets, (d) orography and vegetation, with closed Arctic gateways, (e) closed Arctic gateways and (f) orography and vegetation, without closed Arctic gateways. Stippling indicates that anomalies are not significant according to a student's t-test ($p > 0.05$).

in a decrease in AMOC strength. It is the combined orography and vegetation which is responsible for the stronger AMOC and a more saline North Atlantic sea surface in the mPWP, and a deepening of the winter mixed depth layer (MLD) in much of the North Atlantic (figure 3d). Breaking down this factor further, it is found that the closure of Arctic gateways accounts for 77% of the strengthening of the AMOC due to Pliocene orography and vegetation and much of the deepening of the winter MLD (figure 3e). The closure of Arctic gateways accompanies a deepening of the AMOC cell, in contrast to the other Pliocene forcing factors.

4. A study on the factors contributing to the differences in mid-Cretaceous, early Eocene, and modern climates

Geological studies have suggested that the Earth in the past experienced warmer periods, such as the mid-Cretaceous (~90Ma) and early Eocene (~56Ma), with atmospheric CO₂ concentrations higher than or comparable with future CO₂ emission scenarios. The surface temperature, hydrological cycle, and atmospheric/oceanic circulation of these periods were different from those of the present day. On the other hand, the continental distribution and topography during the mid-Cretaceous and early Eocene were also known to have differed significantly from those of the present day. Therefore, it is necessary to investigate the impacts of these geographical conditions on the climate and their mechanism in order to understand the climates of those periods. In this study, an atmosphere-ocean-vegetation model MIROC4m-LPJ was used to simulate the climates under the geographical conditions of the mid-Cretaceous, early Eocene, and present day. Mid-Cretaceous and early Eocene simulations using the atmospheric CO₂ concentration and geographical conditions of those periods successfully reproduced the warm surface environment as indicated by geological evidence (Figures 1a and 1b). Furthermore, the experiments conducted with the same CO₂

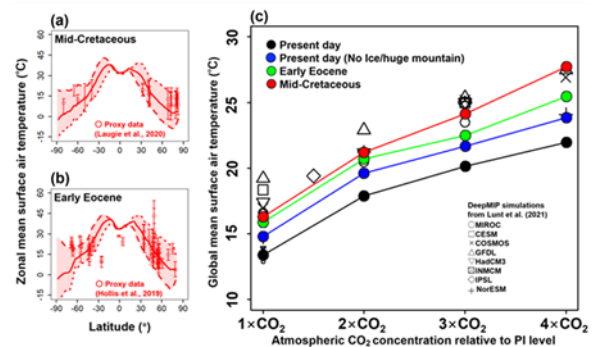


Figure 4: Comparison of simulated zonal mean surface air temperatures from (a) mid-Cretaceous and (b) early Eocene experiments using MIROC4-LPJ (atmospheric CO₂ level used is 1142 ppm) with reconstructions based on geological evidence. The solid, dotted, and dashed lines in Figures (a) and (b) represent the annual, June-August, and December-February mean values, respectively. (c) Comparison of global mean surface air temperatures for each geographic condition, simulated with various atmospheric CO₂ concentrations.

concentration but with ice sheets and large mountains removed from present day revealed that, in addition to high atmospheric CO₂ concentrations, differences in continental distribution led to climates more akin to the warmer mid-Cretaceous and early Eocene than to present day (Figure 1c). Additionally, this study also reveals that differences between the continental distributions of the mid-Cretaceous and early Eocene have a significant impact on atmospheric and oceanic circulation.

Acknowledgement

This work is partly supported by the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU programme; Grant Number JPMXD0717935715; MEXT), KAKENHI Grant Number JP17H06104, JP17H06323, 19H05595, 20H04327, 22H04909, 23H03536 and 24H00256.

References

- [1] Kuniyoshi, Y., Abe-Ouchi, A., Sheriff-Tadano, S., Chan, W.-L., Saito, F. (2022): Effect of climatic precession on Dansgaard-Oeschger-like oscillations. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095695. doi:10.1029/2021GL095695, 2022.
- [2] Kobayashi, H., Oka, A., Obase, T., and Abe-Ouchi, A.: Assessing transient changes in the ocean carbon cycle during the last deglaciation through carbon isotope modeling, *Clim. Past*, 20, 769–787, <https://doi.org/10.5194/cp-20-769-2024>, 2024.
- [3] Weiffenbach, J.E., Chan, W.-L., Abe-Ouchi, A. and von der Heydt, A.S.: Impact of mid-Pliocene boundary conditions on the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL113118, doi: 10.1029/2024GL113118, 2025 .