

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^{*1}, 齋藤 冬樹^{*2}, シェリフ多田野 サム^{*3}, 樋口 太郎^{*4}, 國吉 優太^{*4}, 小玉 貴則^{*5}, 渡辺 泰士^{*6}, 有馬希^{*4}, 鄭方舟^{*4}, 中川祥緒^{*4}, 清水美香^{*1}, 鈴木真理^{*1}^{*1} 東京大学大気海洋研究所, ^{*2} 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, ^{*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

1.4 万年と 10 万年周期の氷期サイクル形成

約 160-120 万年前の氷期・間氷期サイクルは 4 万年周期であり、現在の 10 万年周期と大きく異なっていたことが知られている。しかし、4 万年周期であった更新世前期の氷期・間氷期サイクルと天文学的外力との間の関係は定量的に明らかにされていなかった。

本研究では気候・氷床モデル IeIES-MIROC を使って約 160-120 万年前の時代の氷期・間氷期サイクルを計算した。その結果、4 万年周期の氷期・間氷期サイクルをよく再現することに成功した。北米にある氷床がわずか 1 万年ほどで現在のカナダの大部分を覆うほどの面積に達するためである (図 1)。シミュレーション結果の分析から、氷期の開始のタイミングは自転軸の傾きと公転軌道上の夏至の位置の変化の前後関係が決め、一方で氷期の終了のタイミングは公転軌道上の夏至の位置により決まることが判明した。氷期・間氷期サイクルの周期が 4 万年になるか 10 万年になるかは天文学的要因のわずかな違い、つまり地球の自転軸の傾きと公転軌道の楕円の程度の変動幅の違いが決める可能性が示唆された。(Watanabe et al., 2023)

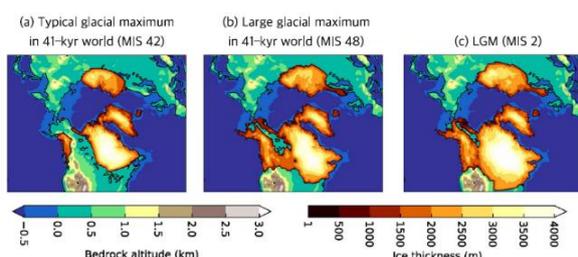


図 1: IeIES-MIROC でシミュレートされた氷床分布。(a, b) 4 万年周期時代の小規模・大規模な氷期, (c) 10 万年周期時代。4 万年周期時代の氷期でもカナダの大部分を覆うほど氷床が拡大する。

2. PMIP 気候モデルが深く強い AMOC を最終氷期最盛期にシミュレートする要因について

最終氷期最盛期(LGM)においては、大西洋子午面循環 (AMOC) が現代よりも浅く弱いことが古環境復元から示唆されており、当時の気候や海洋物質循環に影響を与えていた。古気候モデル比較プロジェクト(PMIP)では、IPCC

報告書に貢献する CMIP の一環として大気海洋結合モデルを用い、LGM における AMOC の再現を試みてきている。しかしながら、ほとんどの大気海洋結合モデルが現代よりも強く深い AMOC をシミュレートしており、古環境復元とモデルの間に不一致が存在している。

本研究では、PMIP マルチモデル解析と大気海洋結合モデル MIROC4m を用いた感度実験を通し、南大洋での雲の表現が当時の海洋循環のシミュレーションに与える影響を調査した。まずマルチモデル解析から、現代気候における南大洋の水温の再現性が LGM の AMOC 再現性に重要な影響を与えることを明らかにした。現代気候でシミュレートされる水温が観測よりも暖かい場合、LGM において AMOC が強く深くなっていた。MIROC4m を用い、衛星観測データをもとに現代の雲の再現性を向上させる実験を行なった。その結果、現代での寒冷な南極海の再現性が向上した。また、LGM においても南大洋水温の強い寒冷化を再現した。これにより、LGM において現代よりも弱く浅い AMOC が大気海洋モデルで再現された (図 2)。この結果は、現代気候での南大洋周辺での雲の表現性向上が古気候シミュレーションの再現性の向上をもたらすことを示唆する。(Sherriff-Tadano et al., 2023)

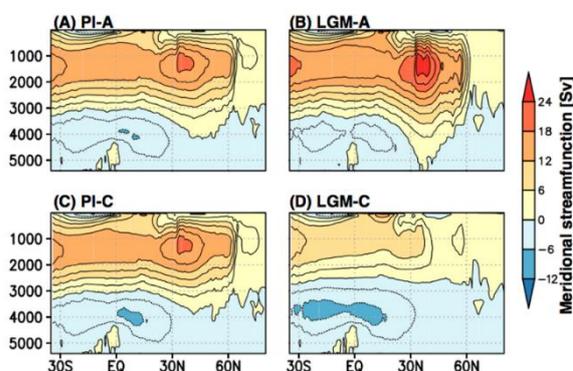


図 2: MIROC4m でシミュレートされた大西洋子午面循環結果。(左)現代気候(piControl)、(右)最終氷期最盛期(LGM)。上段は南大洋の雲の再現性改善前、下段は再現性を向上させたモデルバージョンの結果を示している。

3.過去 200 万年南極氷床モデリング

過去の気候状態を保存する最古の氷(～150 万年前)は、南極大陸内陸部の標高の高い地点の底面付近にあると考えられる。本研究では日本の南極観測事業地域であるドームふじを想定して、氷床モデルを用いた数値実験から、最古の氷が存在する条件を調べた。年代移流の数値計算に RCIP スキームを入れた IcIES を使い、氷床表面から底面までの温度・年代プロファイルの過去 200 万年の時間発展を計算した。氷期間氷期サイクルの気温・降雪量変化が氷の厚さを変えることから、あらかじめ IcIES の南極 3 次元モデルによる過去 200 万年間のシミュレーションから氷の厚さ変化の履歴を求めた。南極氷床の気温は 8°C、降水量は 50%程度変化し、氷期には氷厚さが 200m 程度薄くなる結果が得られた(図 3)。これらを境界条件として氷年代・温度の鉛直分布を 1 次元モデルで計算した結果、観測の氷年代・温度分布を再現することができた。氷の厚さ変化は氷の圧力融解点を通して氷の底面融解量に影響することが分かった(Obase et al., 2023)。

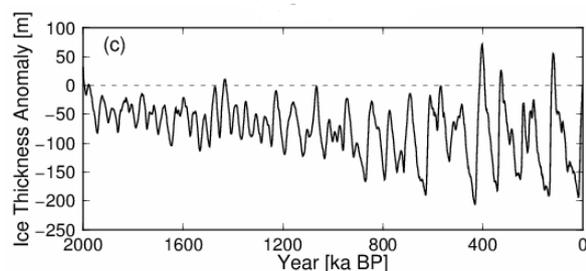


図 3: IcIES でシミュレートされた、過去 200 万年間の南極ドームふじ地点の氷厚さ変化。

4. 気候長期将来実験を用いた南極氷床将来予測

気候と氷床の変化は海水準を通して社会に大きな影響を与えるため将来予測の不確実性を減らすことが重要な課題である。CMIP6 氷床モデル相互比較プロジェクト(ISMIP6)での予測年数は西暦 2100 年までにとどまっていた。本研究では、大気海洋結合モデル MIROC4m で行われた気候長期実験を利用して西暦 2300 年までの氷床予測を行った。まず MIROC4m の歴史実験(historical)の西暦 2005 年を初期値として、RCP4.5 と RCP8.5 の温室効果ガス排出シナリオを境界値として西暦 2300 年までの気候変化を求めた。図 4 は南極域の大気と海洋の変化を示したグラフである。RCP2.6 では西暦 2100 年より後は温室効果ガス濃度の低下により大気温度は低下するが、海洋は大きな熱慣性のために昇温が継続している。RCP8.5 では西暦 2100 年以降も温室効果ガスが増加するために、23 世紀末の気候変化量は 21 世紀末の 3 倍程度になる。

この気候シナリオを氷床モデル SICOPOLIS の境界値として実験した結果、温暖化経路 RCP8.5 の場合、14 実験平均で約 1.5 m、最大で 3.3m の海水準変化が生じた。これは 2100 年以降も 21 世紀末の気候が持続すると仮定した以前の研究より 2 倍程度大きく、氷床の長期予測には大気海洋の気候変化を精度良く計算することが重要であることを示している(Greve et al., 2023)。

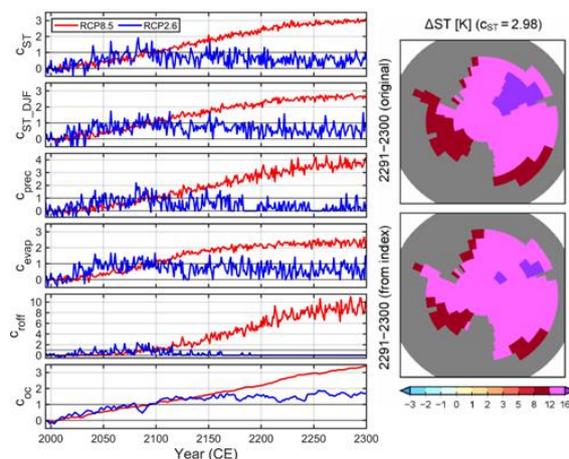


図 4: 気候モデル MIROC4m で計算された西暦 2300 年までの南極域の気候変化を、温室効果ガス濃度が高く推移する RCP8.5 と低く推移する RCP2.6 で比較した図。この図ではいずれも西暦 2000 年ころを 0、西暦 2100 年ころを 1 として規格化していることに注意。上から、年平均気温、夏季(12～2月)気温、年降水量・蒸発量・融雪量、海水温。右図: 23 世紀末の気温変化(°C)。

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)の助成を受けた。

文献

- [1] Watanabe, Y., Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kino, K., O'ishi, R., Ito, T., Kawamura, K., Chan, W.-L. "Astronomical forcing shaped the timing of early Pleistocene glacial cycles" (vol 4, 113). Communications Earth & Environment, 4, 239. (2023)
- [2] Sherriff-Tadano, S., Abe-Ouchi, A., Yoshimori, M., Ohgaito, R., Vadsaria, T., Chan, W.-L., Hotta, H., Kikuchi, M., Kodama, T., Oka, A., Suzuki, K., "Southern Ocean surface temperatures and cloud biases in climate models connected to the representation of glacial deep ocean circulation" Journal of Climate, 36, 3849-3866, (2023)
- [3] Obase, T., A. Abe-Ouchi, Saito, F., S. Tsutaki, S. Fujita, K. Kawamura and H. Motoyama "A one-dimensional temperature and age modeling study for selecting the drill site of the oldest ice core near Dome Fuji, Antarctica." The Cryosphere, 17, 2543-2562, (2023)
- [4] Greve, R., Chambers, C. R. S., Obase, T., Saito, F., C. Wing-Le., and Abe-Ouchi, A. "Future projections for the Antarctic ice sheet until the year 2300 with a climate-index method", Journal of Glaciology, pp1-11, (2023)

Numerical Climate Experiments for Paleoenvironmental Research and Future Climate Projections

Project Representative

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

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

*1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, *2 Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, 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. Astronomical forcing shaped the timing of early Pleistocene glacial cycles

The glacial-interglacial cycle approximately 1.6 to 1.2 million years ago was a 40,000-year cycle, which was significantly different from the current 100,000-year cycle. However, the relationship between external astronomical forcing and the 40,000-year glacial-interglacial cycle of the early Pleistocene period had not been quantitatively clarified.

In this study, we used the climate and ice sheet model “IcIES-MIROC” to calculate glacial/interglacial cycle of 1.6 to 1.2 million years ago. We successfully reproduce the 40,000-year glacial/interglacial cycle, as the North American ice sheet extends to most of Canada in just 10,000 years. The timing of the start of the glacial period is determined by the relationship between the axial tilt of the Earth and the summer solstice, while the timing of the end of the glacial period is determined by the summer solstice. Our results suggest that the prominent period of the glacial/interglacial cycle (40,000 or 100,000 years) is due to slight differences in astronomical forcing.

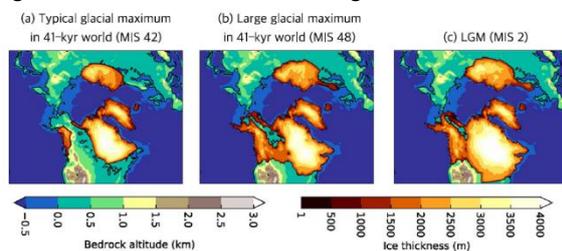


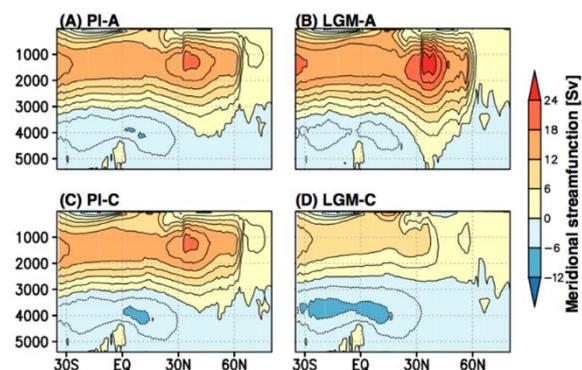
Figure 1: Ice sheet distribution simulated by IcIES-MIROC. (a, b) Small and large ice sheets during glacials of the 40,000-year period, (c) and of the 100,000-year period.

2. Southern Ocean bias and deep and strong AMOC during the last glacial maximum

Paleoenvironmental reconstructions suggest that the Atlantic

Meridional Overturning Circulation (AMOC) was shallower and weaker during the Last Glacial Maximum (LGM). The Paleoclimate Model Comparison Project (PMIP) has been attempting to reproduce the AMOC in the LGM using coupled atmosphere-ocean models. However, most coupled atmosphere-ocean models simulate a stronger and deeper AMOC than the modern one, and thus a mismatch between reconstructions and models exists.

We investigated the influence of cloud representation in the Southern Ocean on the AMOC through PMIP multi-model analysis. A multi-model analysis revealed that the bias in the sea surface temperature of Southern Ocean has a significant influence on the LGM AMOC: A warmer modern sea surface temperature leads to a stronger and deeper LGM AMOC. Next, we conducted experiments using an atmosphere-ocean coupled climate model MIROC4m with improvements in the representation of the clouds based on satellite observations. We found an improvement in the modern Southern Ocean climate simulation, reproducing the strong cooling of the Southern Ocean in the LGM as in reconstructions. As a result, the climate model reproduced a weaker and shallower AMOC in the LGM than in modern times. This result suggests that improving the representation of clouds in the Southern Ocean in modern



climates improves paleoclimate simulations.

Fig. 2: Atlantic meridional overturning circulations simulated with MIROC4m. (Left) Modern climate (piControl), (Right) Last Glacial Maximum (LGM). The top and bottom panels show the model results for a version without and with improvements, respectively, in clouds over the Southern Ocean.

3. Ice sheet modeling for the past 2 million years

The “oldest ice” (~1.5 million years ago) that preserves past climate conditions exists near the bottom of high-altitude regions in the interior of Antarctica. In this study, we investigated the conditions under which the oldest ice exists through numerical experiments using an ice sheet model, around Dome Fuji, Antarctica, which is a Japanese Antarctic research project area.

We used IcIES and calculated the temporal evolution of the temperature and age profile over the past 2 million years. The ice thickness can evolve in time due to changes in temperature and snowfall during the glacial cycle, so we first calculated the history of ice thickness changes from simulations over the past 2 million years using the IcIES Antarctic 3-D configuration. The temperature on the Antarctic ice sheet varies by 8 degrees, the precipitation changes by about 50%. As a result, the ice thickness decreases by about 200 m during the ice age. Next, we calculated the vertical distribution of ice age and temperature using a one-dimensional model using these boundary conditions, and reproduced the observed ice age and temperature distribution. We find that the history of the ice thickness affects the basal ice melting and the age of the ice through the pressure melting point of the ice near the bottom.

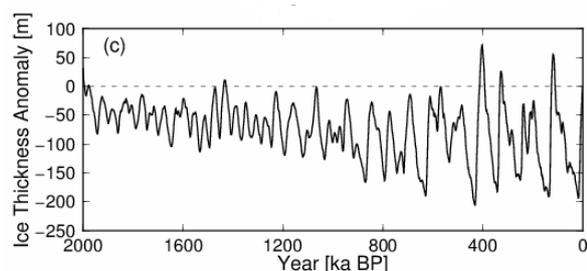


Fig. 3: Simulated time series of ice thickness (relative to present-day) at Dome Fuji, Antarctica

4. Antarctic ice sheet simulations in the long-term future

Changes in climate and ice sheets have a major impact on society through sea levels, and so reducing uncertainty in future predictions is an important issue. The CMIP6 Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) estimated ice sheet changes with multi-models forced by global warming from six climate models, but the projection lasted only to 2100 AD.

We used long-term climate experiments conducted by the coupled atmosphere-ocean model MIROC4m to predict ice

sheets up to 2300 AD. First, we calculated the climate change under RCP4.5 and RCP8.5 greenhouse gas emission scenarios, initialized with a MIROC4m historical experiment at 2005 AD. Figure 4 shows changes in the atmosphere and ocean in the Antarctic region. According to RCP2.6, after 2100 AD, the atmospheric temperature decreases due to a decline in greenhouse gas concentrations, but the ocean continues to warm up due to the large thermal inertia of the ocean. Under RCP8.5, greenhouse gases continue to increase after 2100 AD, and so the climate change at the end of the 23rd century will be about three times that at the end of the 21st century.

Next, this climate scenario was used as the boundary conditions for the ice sheet model SICOPOLIS. In the case of RCP8.5, a sea level change of about 1.5 m occurred on average for 14 experiments with a maximum of 3.3 m. This is about twice as large as that from previous research that assumed that the climate of the end of the 21st century would persist beyond 2100 AD, indicating that long-term predictions of ice sheets require accurate climate projections in the atmosphere and ocean.

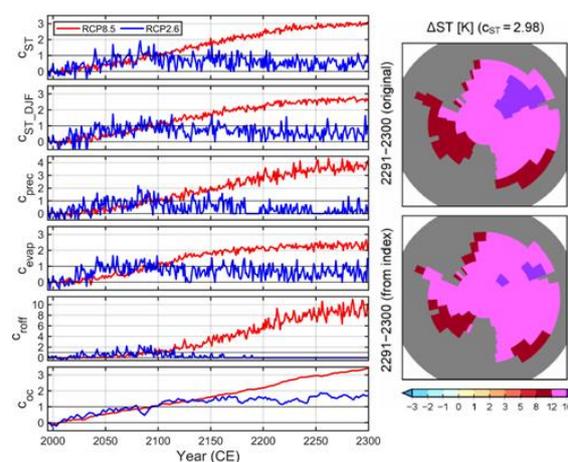


Fig. 4: Climate changes up to 2300 AD from climate model MIROC4m (RCP8.5 and RCP2.6). Note that the values are normalized as 0 and 1 around 2000 and 2100 AD. From top to bottom: annual mean temperature, summer (December to February) temperature, annual precipitation, annual evaporation, snowmelt, and seawater temperature. Right: surface temperature changes at the end of the 23rd century.

Acknowledgement

This work is partly supported by the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU programme; Grant Number JPMXD0717935715; MEXT), KAKENHI (Grant JP17H06104; JSPS) and KAKENHI (Grant JP17H06323; MEXT).

References

[1] Watanabe, Y., Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kino, K. Oishi, R., Ito, T., Kawamura, K., Chan, W.-L. “Astronomical forcing shaped the timing of early Pleistocene glacial cycles” (vol 4,

- 113). *Communications Earth & Environment*, 4, 239. (2023)
- [2] Sherriff-Tadano, S., Abe-Ouchi, A., Yoshimori, M., Ohgaito, R., Vadsaria, T., Chan, W-L., Hotta, H., Kikuchi, M., Kodama, T., Oka, A., Suzuki, K., (2023) “Southern Ocean surface temperatures and cloud biases in climate models connected to the representation of glacial deep ocean circulation” *Journal of Climate*, 36, 3849-3866, (2023)
- [3] Obase, T., A. Abe-Ouchi, Saito, F., S. Tsutaki, S. Fujita, K. Kawamura and H. Motoyama “A one-dimensional temperature and age modeling study for selecting the drill site of the oldest ice core near Dome Fuji, Antarctica.” *The Cryosphere*, 17, 2543–2562, (2023)
- [4] Greve, R., Chambers, C. R. S., Obase, T., Saito, F., C. Wing-Le., and Abe-Ouchi, A. “Future projections for the Antarctic ice sheet until the year 2300 with a climate-index method”, *Journal of Glaciology*, pp1-11, (2023)