

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^{*2}, Wing-Le Chan^{*1}, 山本 彬友^{*1}, 大石 龍太^{*3},
高橋 邦生^{*4}, 大垣内 るみ^{*5}, 小長谷 貴志^{*1}, シェリフ多田野 サム^{*1},
植原 啓太^{*1}

*1 東京大学 大気海洋研究所, *2 北海道大学 大学院地球環境科学研究院, *3 情報・システム研究機構 国立極地研究所, *4 アドバンスソフト株式会社, *5 海洋研究開発機構 気候変動リスク情報創生プロジェクトチーム

本研究では、大気海洋大循環モデル (AOGCM) MIROC4m を用いてさまざまな実験を行い、気候システムに対する知見を多角的に検証した。本年度は以下の4つについて研究を行った。(1) 氷期中の頃において数多く起こった数千年スケールの急激な気候変動の原因をしらべるために、間氷期の気候状態からそれぞれ大気二酸化炭素濃度、北半球氷床のみを氷期中の中間のものに差し替えた実験を行なった。その結果、二酸化炭素濃度の低下により全球的に寒冷化することで深層循環が弱体化しやすくなったことが急激な気候変動の頻発に重要であることが示唆された。(2) 氷期氷床の存在が氷期の頻繁な気候変動に与える影響を調べるため、氷床の大きさを変えた実験を行った結果、氷期氷床は寒冷な気候の持続期間を短くすることで気候変動を頻発に起こりやすくしたことが示唆された。(3) 復元に基づいた地球の軌道要素・温室効果ガス・氷床融解水の北大西洋への流入をモデルに与えて、最終氷期から現在の間氷期までの大気海洋場の遷移を連続的に計算した。その結果、氷床復元と整合する氷床融解水の流入のもとでも気候復元から示されている急激な気候変化が生じうることを示した。(4) 国際モデル比較プロジェクト AMOCMIP で策定されたグリーンランド氷床からの融解水流入を与えて温暖化シナリオ実験を行なった結果、融解水流入の大西洋子午面循環 (AMOC) への影響は温暖化の影響に比べて小さいことが示された。一方で RCP4.5 では、融解水流入が AMOC の回復を妨げるため、AMOC の弱体化によって融解水流入の効果は無視出来ないことが明らかになった。

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, 温暖期

1. 氷期における急激な気候変動の理解

最終氷期には数千年スケールの急激な気候変動が数多く起きていたことが分かっており、特に中間的な気温を示す時期（以下、中氷期）に多いことが最新のアイスコアデータから明らかになった。本研究では大気海洋結合モデル MIROC4m をもちいて、間氷期、中氷期、最終氷期の気候状態を再現した後に、それぞれ 0.05 スベルドラップの淡水を北大西洋北部に 500 年間与える実験を行なった。その結果、中氷期において淡水流入に対する深層循環の弱体化や気温の変化が最も大きくなり（図 1a-c）、アイスコアデータと整合的であった。中氷期において淡水流入に対する応答が大きい原因を調べる為に、間氷期の気候条件から大気二酸化炭素濃度または北半球氷床のみを中氷期のものに差し替えた実験を実施した。その結果、二酸化炭素濃度の減少により南極域を含む地球全体が寒冷化し、深層循環が弱体化しやすくなったことが重要であることが示唆された（図 1d, e）。これまで、気候の不安定性の要因は北半球の大陸氷床の存在とその不安定性にあると考えられていたが、今回の実験によって二酸化炭素が気候の平均状態だけでなく長期的な気候の安定性を決定する重要な要素であることが明らかになった。これらの結果は Science Advances に出版された [1]。

2. 北半球氷床が海洋循環に与える影響

氷期には温暖な状態と寒冷な状態の間を気候が頻繁に変動した。先行研究では二酸化炭素濃度の変化が頻繁な気候シフトに影響を与えることが報告されている [1]。北半球上の氷期氷床は海洋深層循環への影響を通して気候に影響を及ぼすことが知られている [2]。そのため氷期氷床の存在も頻繁な気候シフトに影響を与えていることが示唆されているが、その影響はわかっていない。本研究では、氷期氷床が寒冷な気候の持続期間に与える影響について調べるために、大気海洋結合モデル MIROC4m を用い、大きな氷床と小さな氷床下 [3] で北大西洋に氷床融解水を模した淡水を流入させる実験を行った。その結果、氷床が大きい程、寒冷な気候の持続期間が短くなることがわかった（図 2）。この要因を調べるため、MIROC4m を用い、海面に与えられる風や淡水等を取り替える部分非結合実験を行ったところ、氷床が地表風の変化を通して極域への海洋塩分輸送を強化することが重要であることがわかった。一方で氷床の拡大は海面冷却を強化し、海水を増やすことで、寒冷な気候を持続させる効果も持っていたが、この効果は風の効果に比べると小さかった。これらの結果から、二酸化炭素濃度だけでなく氷期氷床も氷期における頻繁な気候変動に寄与していることが明らかになった。

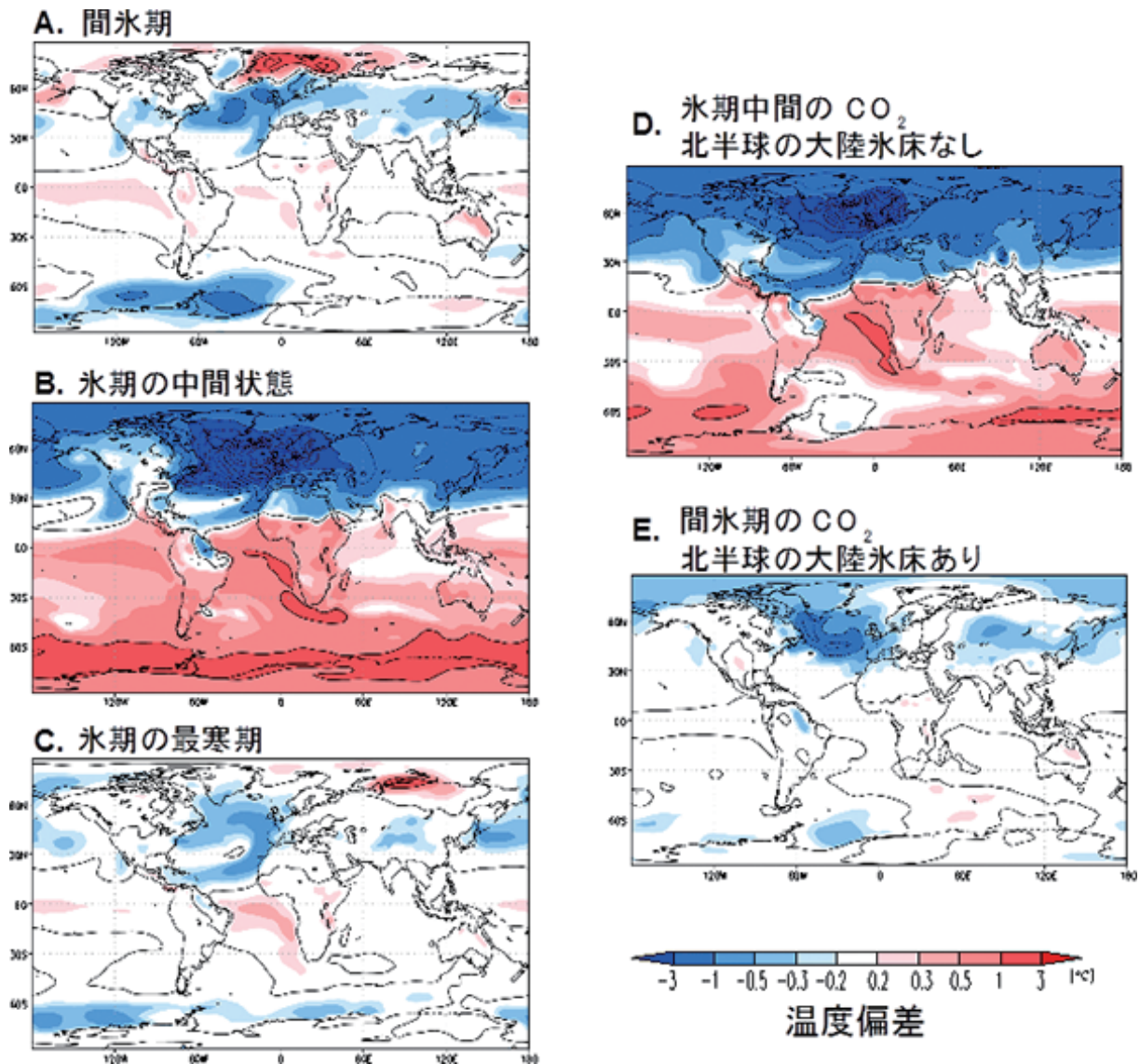


図1 淡水流入に対する気温の変化。(A)間氷期、(B)氷期の中間状態(中氷期)、(C)氷期最盛期において北大西洋北部に0.05スベルドラップの淡水を500年加え続けた後の初期状態からの気温偏差を示す。間氷期の気候条件から(D)大気CO₂濃度のみ、もしくは(E)北半球氷床のみを中氷期状態と同じにして、淡水流入を行なった場合の気温偏差を示す。

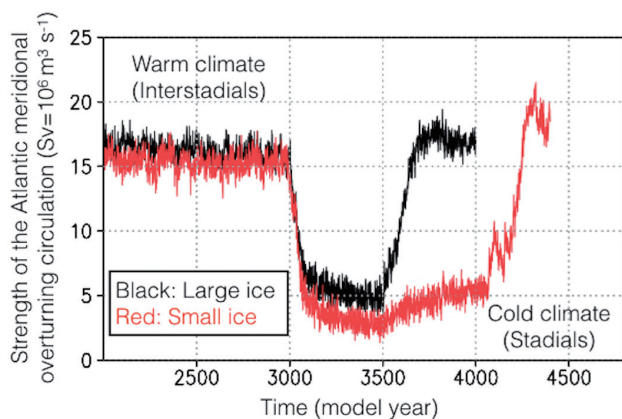


図2 淡水流入に対する気候(大西洋子午面循環)の応答。3000年から3500年まで、淡水を与えている。赤線:氷床の小さな実験、黒線:氷床の大きな実験。氷床の大きな実験では、淡水流入が止まった場合に気候がすぐに寒冷な状態から温暖な状態にシフトすることがわかる。

3. 最終氷期から完新世初期までの連続した気候再現

最終氷期(2万年前)から現在の間氷期に起きた気候遷移において、およそ1万5千年前に、グリーンランドで急激な気温上昇、同時期に南極が寒冷化したことが示されている。これまでの気候モデルを用いた先行研究では、海洋循環の急激な変化がこれらの気候シグナルをよく再現するという結果が示された。しかしながら、先行研究では急激な気候変化の前に北半球の氷床融解水流入を止めており、氷床および海水準の復元記録と整合していなかった[4]。本研究では大気海洋結合モデルMIROC4mを用い、最終氷期から1.4万年前までの大気海洋場の変化を、復元に基づいた地球の軌道要素・温室効果ガス・氷床融解水の北大西洋への流入をモデルに入力して計算した。その結果、氷床復元に基づいた北大西洋への氷床融解水の流入のもとでも、海洋深層循環が急激に強まることによってグリーンランドの急激な温暖化と南極の寒冷化が生じることが初めて示された(図3)。海洋深層循環は現在気候では強いモード、氷期気候では弱いモードが安

定であり、日射と温室効果ガスを連続的に変えると海洋深層循環が強まるしきい値を超えることによって急激な気候変化が生じることが分かった。

昨年度までの研究により、南極の大気と海洋の温暖化の両方が氷床を縮小させる棚氷の融解速度に大きな影響を与えていることが示されている [5]。そのため氷期から間氷期の移行期においても急激な気候変化が氷床の縮小に寄与している可能性が示された。

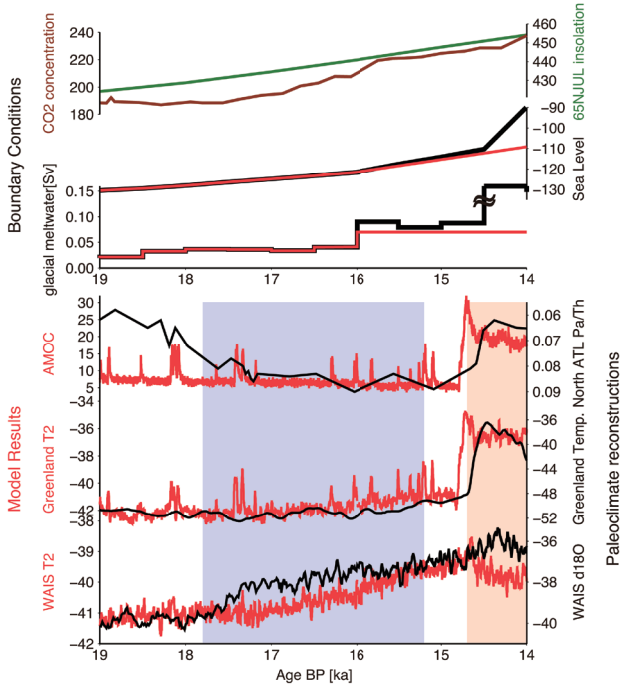


図3 (上) 実験で用いた境界条件の時系列。氷床融解水の時系列は、黒が観測、赤がモデルの実験設定を示す。(下) 最終氷期から氷期の終焉期までの北大西洋子午面循環流量・グリーンランド気温・南極気温の時系列。黒が観測、赤がモデルで計算された結果を示す。

4. 温暖化に伴うグリーンランド氷床の融解が海洋循環に与える影響

将来の温暖化により大西洋子午面循環 (AMOC) が弱化的ることが大気海洋大循環モデルを用いた将来予測から示唆されている [6]。しかしながら、先行研究ではグリーンランド氷床融解水の流入が海洋循環に与える影響につ

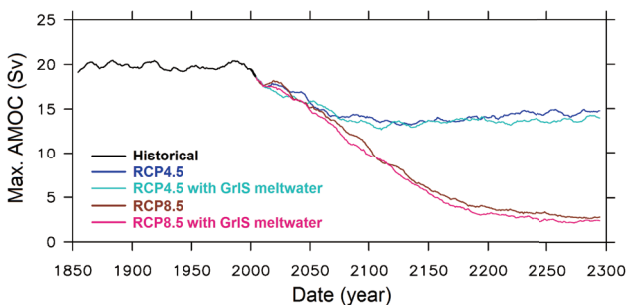


図4 11年平均したAMOCの時系列。融解水流入を考慮しない Historical 実験と温暖化シナリオ実験 (RCP4.5 と RCP8.5) と融解水流入を考慮した温暖化シナリオ実験 (RCP4.5 と RCP8.5)。

いては考慮されていない。国際モデル比較プロジェクト AMOCMIP では RCP4.5 と RCP8.5 に対する融解水の流入量について共通の実験プロトコルを策定した [7]。本研究では策定した融解水流入を MIROC4m を含む GCM に与え、2006年から2300年まで温暖化シナリオ実験を行なった。その結果、各 RCP シナリオにおいて融解水の有無による AMOC の違いは小さかった (図4)。だが RCP4.5 では融解水を考慮することで2150年以降の2Sv程度のAMOCの回復が見られないため、AMOCの弱化にとって無視出来ないことがわかった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25241005 と環境省の環境研究総合推進費 (S-10) の助成を受けたものです。

文献

- [1] Kawamura, K. et al., “State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling”, *Science Advances*, 3, e1600446, 2017.
- [2] Sherriff-Tadano, S., A. Abe-Ouchi, M. Yoshimori, A. Oka and W.-L. Chan, “Influence of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation through surface wind change”, in press.
- [3] Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter, “Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume”, *Nature*, 500, 190-193, doi:10.1038/nature12374.
- [4] Liu, Z. et al., “Transient Simulation of Last Deglaciation with a New Mechanism for Bølling-Allerød Warming”, *Science*, 325, pp310-314, 2009.
- [5] Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kusahara, H. Hasumi, and R. Ohgaito, “Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO2 doubling”, *Journal of Climate*, 30, p3473-3497, doi:10.1175/JCLI-D-15-0908.1, 2017.
- [6] Cheng, W., J.C.H. Chiang and D. Zhang, “Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and Historical Simulations”, *Journal of Climate*, 26, p7187-7197, doi:10.1175/JCLI-D-12-00496.1, 2013.
- [7] Bakker, P. et al., “Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting”, *Geophysical Research Letters*, 43, p1-9, doi:10.1002/2016GL070457, 2016.

Numerical Climate Experiments for Past and Future Environmental Change

Project Representative

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

Authors

Ayako Abe-Ouchi^{*1}, Masakazu Yoshimori^{*2}, Wing-Le Chan^{*1}, Akitomo Yamamoto^{*1}, Ryouta O'ishi^{*3}, Kunio Takahashi^{*4}, Rumi Ohgaito^{*5}, Takashi Obase^{*1}, Sam Sherriff Tadano^{*1} and Keita Uehara^{*1}

*1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, *2 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, *3 National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, *4 AdvanceSoft Corporation, *5 Project Team for Risk Information on Climate Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The MIROC4m AOGCM is used for several paleoclimate experiments and sensitivity experiments. Numerical experiments using MIROC4m with freshwater hosing in the northern North Atlantic showed that climate becomes most unstable in intermediate glacial conditions associated with large changes in the Atlantic Meridional Overturning Circulation. Numerical simulations were performed with a coupled model MIROC4m to assess the impact of the glacial ice sheets on the rapid changes in climate which occurred frequently during the glacial period. Results showed that the glacial ice sheets contribute to these frequent changes by shortening the duration of the cold climate. A transient simulation from the Last Glacial Maximum to the present interglacial was conducted using MIROC4m. It is shown that an abrupt climate change that is inferred from reconstructions could occur under a continuous glacial meltwater that is consistent with ice sheet reconstructions. The MIROC4m AOGCM is run for RCP4.5 and RCP8.5 global warming scenarios with an additional GrIS meltwater forcing, as prescribed in AMOCMIP. Although the impact of the GrIS freshwater runoff is small, relative to the effects of increasing atmospheric CO₂, it is not negligible and contributes to the weakening of the Atlantic meridional overturning circulation.

Keywords: AOGCM, paleoclimate modeling, glacial-interglacial cycle, warm climate

1. Climatic instability during glacial periods

Recent studies using ice cores from Antarctica suggest millennial-scale climatic variability to be at its greatest in intermediate climate during glacial periods, but their mechanisms remain unclear. We examined the dependence of climatic variability upon the background climatic state using MIROC4m. We conducted freshwater hosing experiments under interglacial, midglacial, and full-glacial conditions in which freshwater flux (0.05sverdrup) was added to the North Atlantic to examine climate stability. Our results show that climate becomes most unstable in intermediate glacial conditions associated with large changes in sea ice and the Atlantic Meridional Overturning Circulation, which is consistent with ice-core data (Fig. 1a-c). Model sensitivity experiments suggest that the prerequisite for the most frequent climate instability is associated with reduced atmospheric CO₂ concentration via global cooling and sea ice formation in the North Atlantic, in addition to extended Northern Hemisphere ice sheets (Fig. 1d, e). These results have been published in Science Advances [1].

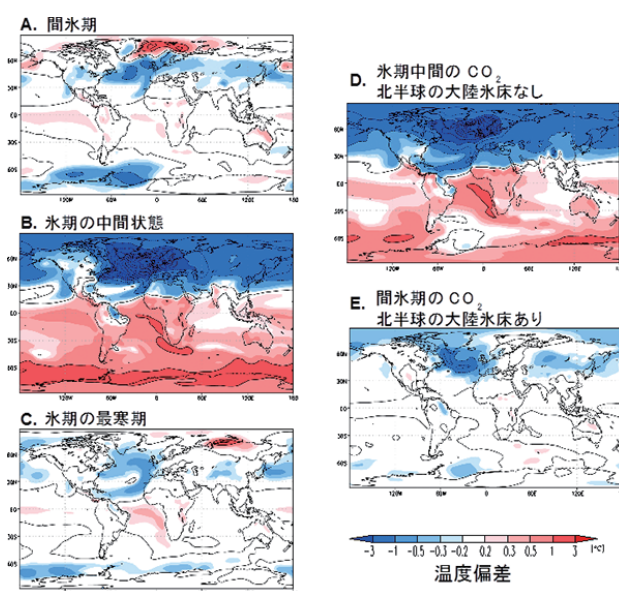


Fig. 1 Results of freshwater hosing simulations for temperature. Map of atmospheric temperature difference between hosing and control experiments for (A) interglacial climate, (B) midglacial climate and (C) full-glacial climate. Sensitivity experiments of (D) midglacial climate without ice sheet and (E) interglacial climate with ice sheet.

2. The impact of the glacial ice sheets over the Northern Hemisphere on the ocean circulation

During the glacial period, climate shifted frequently between warm interstadials and cold stadials. Previous studies have pointed out the role of the CO_2 in causing the frequent climate shifts [1]. The existence of the glacial ice sheets over the Northern Hemisphere affects the climate through the changes in ocean circulation [2]. Therefore, glacial ice sheets have also been suggested to play a role, though the impact of the glacial ice sheets on the frequent climate changes remained elusive. In this study, we explored the impact of the glacial ice sheets on the duration of the stadials. For this purpose, we performed a hosing experiment under small and large ice sheet configurations [3] with a coupled model MIROC4m. As a result, we found that the expansion of the glacial ice sheets shortened the duration of the stadials (Fig. 2). Sensitivity experiments showed that differences in surface winds played a crucial role in modifying the duration of the stadials by enhancing the wind-driven ocean circulation. On the other hand, stronger surface cooling under the large ice sheets had the effect of increasing the duration of the stadials by increasing the amount of sea ice, though this effect was minor compared to the effect of the winds. These results show that the glacial ice sheets also contributed to the frequent climate shift during the glacial period.

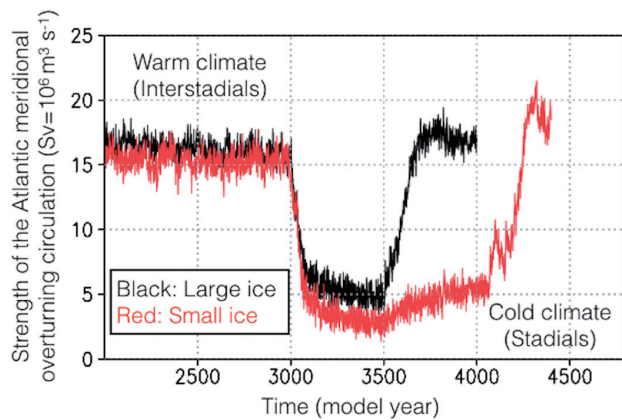


Fig. 2 Responses of climate (Atlantic meridional overturning circulation, AMOC) to the freshwater hosing. Freshwater hosing was applied during model years 3000–3500. The red line and black line show results of small ice and large ice experiments, respectively. The experiment with the large ice sheet recovers quickly compared to that with the small ice sheet.

3. Response of Antarctic ice sheet to climate change

Climate reconstructions indicate that there was an abrupt climate change characterized by abrupt Greenland warming and subsequent Antarctic cooling at around 15,000 years ago, during the climate transition from the Last Glacial Maximum and the present interglacial. A previous climate modeling study reproduced these climate signals by an abrupt deep ocean circulation change. However, glacial meltwater flux has to be reduced prior to the abrupt climate change, contradicting ice sheet reconstructions [4]. In the present study, using an

atmosphere-ocean coupled climate model MIROC4m, a transient simulation from the Last Glacial Maximum to the present interglacial was conducted by changing insolation, greenhouse gases and glacial meltwater flux based on ice sheet reconstructions. It is shown that the abrupt deep ocean circulation change, abrupt Greenland warming and subsequent Antarctic cooling could occur under a continuous glacial meltwater (Fig. 3). This abrupt deep ocean circulation change comes from the fact that the stability of deep ocean circulation depends on background climate: strong and weak deep ocean circulation are stable during the interglacial and the glacial respectively. The threshold for deep ocean circulation recovery is exceeded some time during the last deglaciation through changes in the insolation and greenhouse gases.

Research up to last year shows that warming of both atmosphere and ocean has a great influence on the melting rate of the ice shelves which, in turn, reduces the ice sheet [5]. Therefore, the rapid climate change may contribute to the shrinkage of the ice sheet during the transition from the glacial period to the interglacial period.

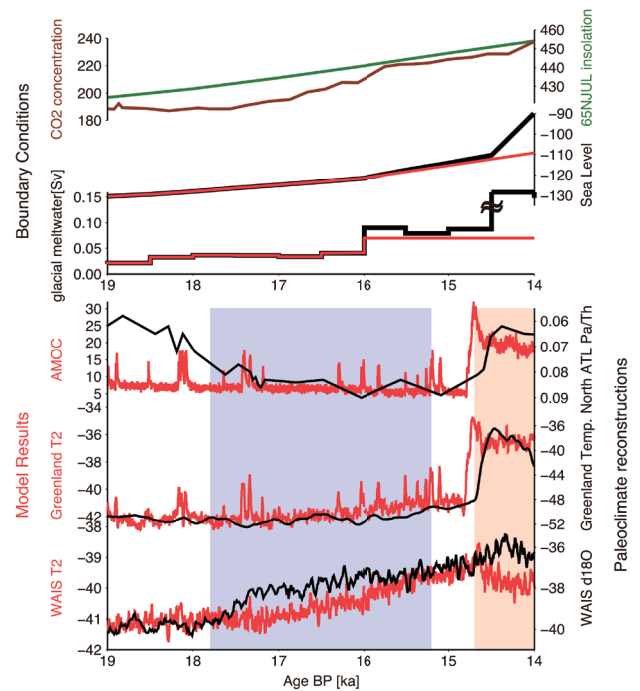


Fig. 3 (top) Time series of boundary conditions applied to the climate model. The black line denotes an ice sheet reconstruction (Ice-6g) and the red line denotes the model forcing for glacial meltwater flux. (bottom panels) Time series of reconstructed (black lines) and simulated (red lines) volume flux of the Atlantic meridional overturning circulation, Greenland and Antarctic temperature.

4. The impact of Greenland melting on the AMOC

General circulation models (GCMs) have predicted a weakening in the AMOC during the 21st century [6]. However, these have largely ignored the freshwater runoff resulting from the melting of the Greenland ice sheet (GrIS). While coupling to a dynamic ice sheet model would allow the inclusion of

the effects of GrIS meltwater discharge, a simpler approach would be to prescribe a freshwater flux. In AMOCMIP, GrIS meltwater forcing which varies both spatially and temporally are constructed for RCP4.5 and RCP8.5 warming scenarios [7]. These forcings are applied to GCMs including MIROC4m, with which we ran experiments for years 2006-2300.

The global mean air surface temperature shows little difference between the cases with and without GrIS meltwater forcing. The RCP4.5 forcing gives rise to more extreme differences in temperature spatially – there is warming over the GIN Seas, cooling over the northern North Atlantic and a weaker AMOC (compare the dark blue line with the light blue line in Fig. 4. The AMOC is weaker with the forcing because, unlike the conventional RCP4.5 run (dark blue line), there is no partial recovery of about 2Sv after year 2150. Although the impact of the GrIS freshwater runoff is small, relative to the effects of increasing atmospheric CO₂, it is not negligible and contributes to a weaker AMOC. However, if future CO₂ levels are kept far below those projected by the RCP8.5 scenario, then results suggest that melting from the GrIS is not likely to result in a total collapse of the AMOC.

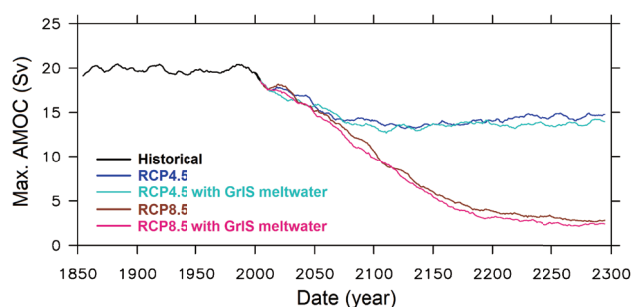


Fig. 4 Time series of the maximum value of the AMOC for all experiments, including those without GrIS meltwater flux (Historical, RCP4.5 and RCP8.5). An 11-year running mean is applied to the annual mean values.

Acknowledgement

This work was funded by the Grants-in-Aid for Scientific Research of Japan Society for the Promotion of Science (No.25241005) and the Environment Research and Technology Development Fund (S-10) of the Ministry of Environment, Japan.

References

- [1] Kawamura, K. et al., “State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling”, *Science Advances*, 3, e1600446, 2017.
- [2] Sherriff-Tadano, S., A. Abe-Ouchi, M. Yoshimori, A. Oka and W.-L. Chan, “Influence of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation through surface wind change”, in press.
- [3] Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter, “Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume”, *Nature*, 500, 190-193, doi:10.1038/nature12374.
- [4] Liu, Z. et al., “Transient Simulation of Last Deglaciation with a New Mechanism for Bølling-Allerød Warming”, *Science*, 325, pp310-314, 2009.
- [5] Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kusahara, H. Hasumi, and R. Ohgaito, “Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO₂ doubling”, *Journal of Climate*, 30, p3473-3497, doi:10.1175/JCLI-D-15-0908.1, 2017.
- [6] Cheng, W., J.C.H. Chiang and D. Zhang, “Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and Historical Simulations”, *Journal of Climate*, 26, p7187-7197, doi:10.1175/JCLI-D-12-00496.1, 2013.
- [7] Bakker, P. et al., “Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting”, *Geophysical Research Letters*, 43, p1-9, doi:10.1002/2016GL070457, 2016.