

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^{*1,2}, 吉森 正和^{*1}, Wing-Le Chan^{*1}, 山本 彬友^{*2}, 大石 龍太^{*1}, 小長谷 貴志^{*1}, シェリフ多田野 サム^{*1}, 齋藤 冬樹^{*2}, 千喜良 稔^{*1}, 樋口 太郎^{*3}, 廣田 和也^{*3}, Tristan Vadsaria^{*1}, 轟木 亮太郎^{*3}, 國吉 優太^{*3}, 小玉 貴則^{*4}, 志村 蓮^{*3}, 渡辺 泰士^{*3}, 広瀬 凜^{*3}, 有馬 希^{*3}, 鄭 方舟^{*3}, 中川 祥緒^{*3}, 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} 東京大学理学系研究科, ^{*4} 東京大学総合文化研究科, ⁵ 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. MIROC4m で再現された氷期中の急激な気候変動

地質記録から、過去 12 万年の最終氷期の間には北半球の急激な温度上昇を伴う気候変動が数千年間隔で 25 回以上起きたことが示されており、この変動は大西洋子午面循環の変動と密接な関係があると示唆されてきた。この海洋循環の変動には氷床融解に伴う淡水の海洋への供給が重要と当初考えられてきたが、近年の研究では淡水供給以外の北大西洋表層塩分の変化や、海水と対流が関係した熱的プロセスなど様々な大気-海洋内部要因の重要性が提唱されており、気候研究の大きなテーマの 1 つとなっている。そこで、本研究課題では大気海洋結合モデル MIROC4m を用いて氷期の氷床条件で数値実験を行い、氷期気候変動のプロセスを調べた(Kuniyoshi et al., 2022)。実験の結果、大気-海水-海洋系が結合して約 1,500 年周期で自励振動する様子を再現し、地質記録に見られる北半球の急激な気温変化の特徴を非常によく捉えた(図 1a-c)。振動 1 周期の解析から、振動の駆動に対して、北大西洋の海水分布と亜表層水温と鉛直対流が結合した熱的なプロセスが重要な役割を果たすことを示した(図 1c-e)。本研究結果は、氷期中の急激な気候変動の解明に貢献し、地球気候システムの大気-海水-海洋の相互作用の理解深化につながる成果である。

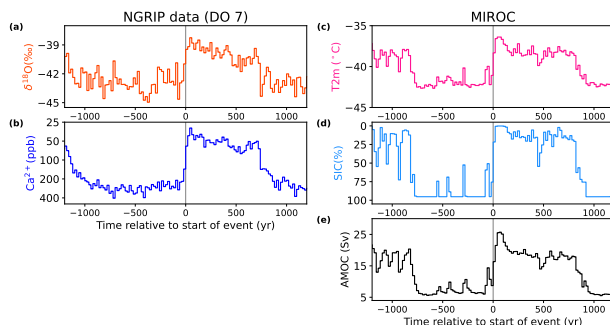


図 1: 氷期中の気候変動を記録しているグリーンランドアイスコア(NGRIP)の $\delta^{18}\text{O}$ と Ca^{2+} の 20 年ごとのデータ(Rasmussen et al., 2014) (a,b)と MIROC4m におけるグリーンランドの年平均地表気温(c)、北大西洋高緯度の 3 月の海水氷床度(d)、AMOC 流量(e)の時系列。地質データは DO 7 温暖化イベントのタイミング (35.43 ka before present) をゼロ年として、20 年平均値。モデル結果は、急激な温暖化の開始をゼロ年として、太線は 20 年平均値。

2. 現代と過去の温暖期の水循環や大気循環の違いにおける地理条件の役割

地質学的な証拠から、白亜紀のような大気 CO_2 濃度が高い過去の温暖期と現代では全球～地域的な水循環が大きく異なっていたことが示唆されている。一方で、大気 CO_2 濃度のみならず、過去の温暖期と現代では大陸配置や山岳地形といった地理条件も異なっており、この違いは気候に大きな影響を及ぼす。そこで、本研究課題では大気海洋結合モデル MIROC4m を用いた気候数値シミュレーションを行い、現代と白亜紀の水循環の違いにおいて地理条件の違いがどのような役割を果たしているのかを明らかにした。結果、特にアジア地域において現代と白亜紀の地理条件の違いが、二つの時代の水循環の違いに重要であることが分かった (Higuchi et al., 2021)。

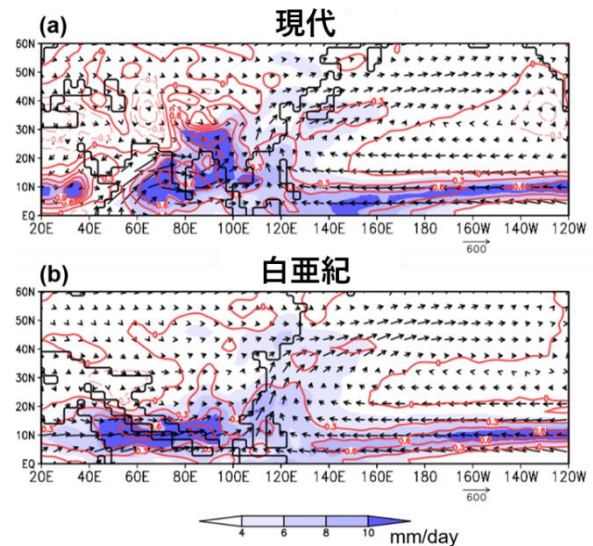


図 2: 現代 (a)、白亜紀 (b)の地形分布を境界条件として使用した場合にシミュレートされたアジア地域での夏季の水循環と大気循環 (Higuchi et al. (2021)の図 S6 より引用、一部改変)。どちらの実験でも大気 CO_2 濃度は産業革命前の値 (285 ppm) を使用している。図中のシェイド、ベクトル、コンターはそれぞれ、降水量 (mm/day)、水蒸気輸送 (kg/m/s)、500hPa での鉛直風 (10^3 hPa/s : 図中の正値が上昇流)を示す。

現代実験では、夏季に強い水蒸気輸送と上昇流が存在するため、アジアの大陸内部で水循環が活発である(図 2a)。一方で、白亜紀実験では、夏季のアジアモンスーンがあまり発達せず、大陸内部での降水量が少なかった(図 2b)。この特徴の違いは、白亜紀の地質学的な証拠から示唆される現代と白亜紀の水循環の違いと整合的である。さらに、使用している現代や白亜紀の地理条件を理想的に変更した実験を行うことで、この水循環や大気循環の違いにおいてチベット高原の有無や大陸配置の違いが重要であることも明らかになった。

3. 氷期の急激な熱帯降水変動における風応力を介した大気海洋相互作用の役割

最終氷期には、大西洋子午面循環 (AMOC) の変動にもなって、南北の極域でほぼ逆位相の気温変動や熱帯降水分布の南北変位が繰り返し起きていたことが知られている。本研究では、熱帯降水分布の変動に注目する。AMOC の弱体化に伴う熱帯降水分布の南向き変位については、大西洋の北向きエネルギー輸送の減少を大気を増加分で補償するようにハドレー循環とそれともなう水蒸気輸送が変化するという解釈が従来よりなされてきた。一方で、このハドレー循環応答は海面風応力を介して北向き海洋熱輸送を増加する。そのため、海面風応力変化の効果 (WSF) のない場合に比べて WSF のある場合には、ハドレー循環が担うエネルギー輸送の北向き増加量は少なくなり、これに呼応するように熱帯降水分布の変位が抑制されることが仮説として考えられた。この仮説を検証するため、MIROC4m 気候モデルを用いて AMOC の弱

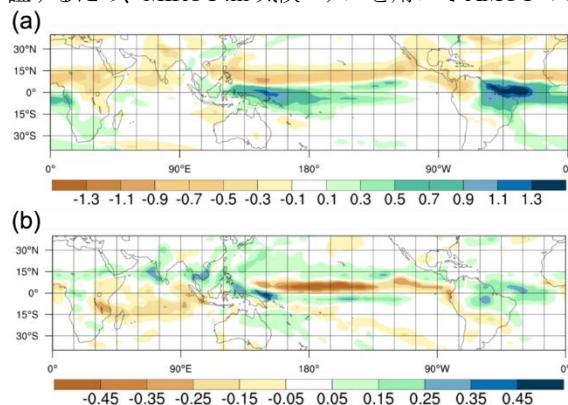


図 3: 年平均降水量の変化 (mm/day)。(a) 大西洋北部への淡水流入の効果、(b) 淡水流入実験における大気海洋相互作用を介した海面風応力変化の効果。いずれも中氷期の気候状態に 0.05 Sv の淡水を 500 年間流入した最後の 100 年。

化を目的とした北大西洋淡水流入実験を行い、さらに WSF 効果のみを抽出する実験などを行った。その結果、当初の仮説とは異なるものの、海洋と大気のエネルギー輸送補償を通して WSF が北半球、南半球それぞれに降水量の増加域と減少域を形成することがわかった (図 3)。また、太平洋域における 3 つの領域とアラビア海の降水応答メカニズムについて、海面水温分布に着目して WSF との関係を調べた。その結果、アラビア海の降水指標 (プロキシ) の解釈には風応力フィードバックを考慮する必要性が示唆された。

4. 氷期中盤における氷床の存在が数千年周期の気候変動に与える影響

最終氷期には気候が温暖な状態と寒冷な状態の間を数千年周期で振動していたことがグリーンランドのアイスコアなどから明らかになっている。この気候変動はしばしば大西洋海洋深層循環の変動と関連づけられており、例えば海洋深層循環の弱い時期には赤道からの熱輸送が弱体化することでグリーンランドが寒くなるとされている。本研究課題では、海洋循環の弱い期間を決めている要因について調査するため数値実験を行った。数値的な先行研究では、氷期における大気中の CO_2 の低下が海洋深層循環を弱くすることで、グリーンランドの寒冷な期間を長くすることが報告されている。一方でアイスコア記録では、 CO_2 の相対的に低い氷期中盤の方が、 CO_2 の高い氷期序盤よりもグリーンランドの寒冷な期間の長いことが近年明らかになった。気候モデル MIROC4m を用いた北大西洋淡水流入実験から、氷期中盤における北米上の巨大な氷床の存在が、寒冷期間を短くするように働いていたことを初めて明らかにした (図 4)。氷床の存在は北大西洋上の風を強化し、北向きの海洋塩分輸送を増加することで大西洋海洋深層循環を強化した。これにより低 CO_2 に関わらず、海洋循環の弱い期間とグリーンランドの寒冷な期間が短くなることがわかった。本研究は、氷床変動と数千年周期の気候変動間の相互作用の理解向上に貢献した (Sherriff-Tadano et al. 2021)。

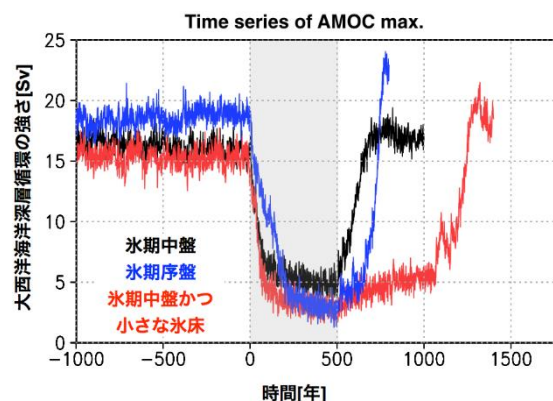


図 4: MIROC4m で行われた解け水実験における大西洋海洋深層循環強度の時系列。0.1Sv の淡水が北大西洋高緯度 50-70°N 帯に 500 年間放出されている。氷期中盤の気候状態では海洋循環がすぐに回復するが (黒)、小さな氷床を与えた場合、回復の遅れることが見られる (赤)。

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)、科研費(JP17H06323)の助成を受けた。

文献

[1] Kuniyoshi, Y., Abe-Ouchi, A., Sherriff-Tadano, S., Chan, W. and Saito, F.: Effect of climatic precession on Dansgaard-Oeschgerlike oscillations. *Geophysical Research Letters*, 49,

e2021GL095695, doi:10.1029/2021GL095695, 2022.

[2] Higuchi, T., Abe-Ouchi, A. and Chan, W.-L.: Differences between present-day and cretaceous hydrological cycle responses to rising CO₂ concentration. *Geophysical Research Letters*, 48(22), e2021GL094341, doi:10.1029/2021GL094341, 2021.

[3] Sherriff-Tadano, S., Abe-Ouchi, A., Oka, A., Mitsui, T., and Saito, F.: Does a difference in ice sheets between Marine Isotope Stages 3 and 5a affect the duration of stadials? Implications from hosing experiments, *Clim. Past*, 17, 1919–1936, <https://doi.org/10.5194/cp-17-1919-2021>, 2021.

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^{*1,2}, Masakazu Yoshimori^{*1}, Wing-Le Chan^{*1}, Akitomo Yamamoto^{*2}, Ryouta O'ishi^{*1}, Takashi Obase^{*1}, Sam Sheriff-Tadano^{*1}, Fuyuki Saito^{*2}, Minoru Chikira^{*1}, Taro Higuchi^{*3}, Kazuya Hirota^{*3}, Tristan Vadsaria^{*1}, Ryotaro Todoroki^{*3} and Yuta Kuniyoshi^{*3}, Takanori Kodama^{*4}, Ren Shimura^{*3}, Yasuto Watanabe^{*5}, Rin Hirose^{*3}, Nozomi Arima^{*3}, Fangzhou Zheng^{*3}, Sachio Nakagawa^{*3}, Mika Shimizu^{*1}, Mari Suzuki^{*1}

^{*1} Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ^{*2} Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*3} Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ^{*4} Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, ^{*5} Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

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

1. Abrupt climate change during the glacial period simulated in MIROC4m

Geological records indicate that climatic changes including abrupt warming in the Northern Hemisphere occurred more than 25 times at intervals of several thousand years during the last glacial period of the past 120,000 years. It has been suggested that these climate changes are closely related to changes in the Atlantic meridional overturning circulation. The supply of freshwater to the ocean due to ice sheet melting was initially thought to be important for changes in the ocean circulation.

However, recent studies have alluded to the importance of various internal atmospheric-oceanic processes without freshwater forcing, such as changes in North Atlantic sea surface salinity and thermal processes related to sea ice and convection. Research focusing on these processes has become one of the major themes in climate research. Therefore, in this study using the coupled atmosphere-ocean model MIROC4m,

numerical experiments were conducted under glacial ice sheet conditions to investigate the processes involved in glacial climate change. The experiment reproduced the self-sustained oscillations of the atmosphere-sea ice-ocean system with a period of about 1,500 years, and captured the characteristics of abrupt warming events in the Northern Hemisphere as seen in the geological record (Figure 1 a-c). Analysis of the oscillations shows that thermal processes coupled with the sea-ice distribution, subsurface ocean temperature and vertical convection in the North Atlantic play important roles in driving the oscillations (Figure 1 c-e). These results contribute to the understanding of abrupt climate change during glacial periods and lead to a deeper understanding of the atmosphere-sea ice-ocean interaction in the global climate system.

2. Role of geographical conditions in differences seen in the hydrological cycle and atmospheric circulation between the present day and past warm periods

Geological evidence suggests that the global and regional hydrological cycles were both significantly different during the present day and past warm periods with high atmospheric CO₂ concentration, such as the Cretaceous. However, besides atmospheric CO₂ concentration, geographical conditions such as continental distribution and topography also differed between the past warm period and the present day, and this difference has a great impact on the climate. Therefore, for this research, we conducted numerical climate simulations using the coupled atmosphere-ocean circulation model MIROC4m to clarify the role of geographical conditions in hydrological changes between the present day and Cretaceous. As a result, it was found that the difference in geographical conditions between the present day and Cretaceous periods, especially in the Asian region, is important for explaining the difference in the hydrological cycle between the two periods (Higuchi et al., 2021). The present-day

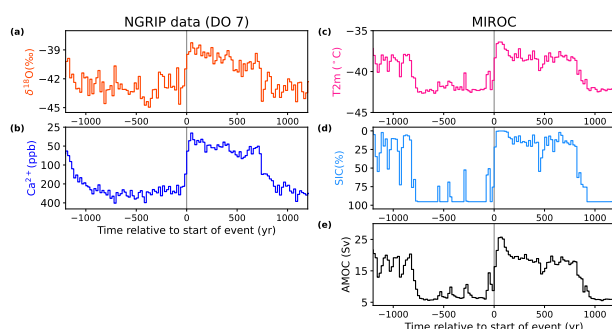


Figure 1: Time series of NGRIP data (left panel) and MIROC4m output (right panel). (a-b) Records of (a) $\delta^{18}\text{O}$ and (b) Ca^{2+} from NGRIP (Rasmussen et al., 2014). The timings are relative to the DO 7 warming event (35.43 ka before present). Each line shows the 20-year average value. (c-e) Model output of (c) surface air temperature at the NGRIP drilling site, (d) sea ice concentration over the North Atlantic (40°W-10°W, 50°N-60°N) in March, and (e) maximum AMOC strength. The thin and thick lines show 1-year and 20-year average values, respectively.

experiment shows that the hydrological cycle is active within the East Asian continent due to the presence of strong water vapor transport and updrafts in summer (Fig. 2a). On the other hand, in the Cretaceous experiment, the Asian summer monsoon did not develop much, and rainfall in the continental interior was low (Fig. 2b). This feature is consistent with the difference between the modern and Cretaceous hydrological cycles suggested by Cretaceous proxies. Furthermore, by conducting experiments with ideally changed geography, it was clarified that the presence or absence of the Tibetan Plateau and the differences in continental distribution are important in explaining the

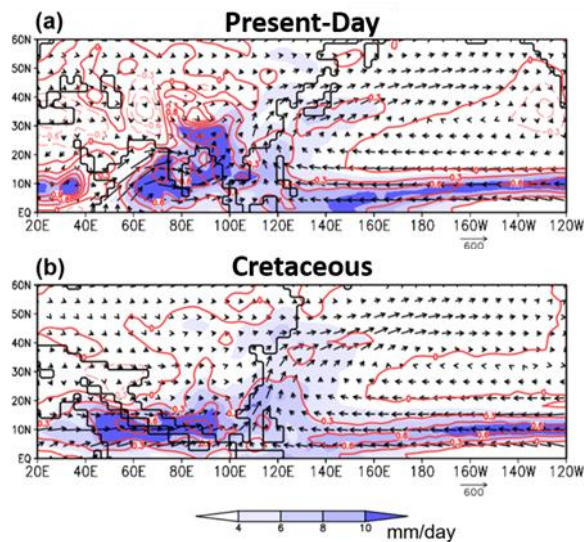


Figure 2: Simulated summer hydrological cycle and atmospheric circulation in the Asian region using (a) present-day and (b) Cretaceous geographical conditions (modified from Figure S6 in Higuchi et al., 2021). Both experiments use atmospheric CO_2 concentration set to the pre-industrial value (285 ppm). The shading, vectors, and contours in the figure indicate, precipitation (mm/day), water vapor transport (kg/m/s), and vertical wind at 500hPa ($\sim 10^3$ hPa/s, positive values indicate updraft), respectively.

differences in the hydrological cycle and atmospheric circulation.

3. The role of air-sea interaction through surface wind stress in abrupt tropical precipitation changes during the glacial period

It is well known that asymmetric temperature changes between the northern and southern hemisphere polar regions and a meridional shift of precipitation distribution in the tropics occurred in association with variations in the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) during the last glacial period. In this study, we focused on changes in the tropical precipitation. The southward displacement of tropical precipitation caused by the AMOC weakening can be understood in terms of energy transport: the Hadley circulation and tropical precipitation distribution are altered so that the reduced northward energy transport in the Atlantic is compensated by the increase in the northward atmospheric energy transport. As the anomalous Hadley circulation itself enhances the northward oceanic energy

transport via sea surface wind stress feedback (WSF), it is hypothesized that the resulting change in oceanic energy transport may weaken the Hadley circulation response. In other words, the change in meridional energy transport by the Hadley circulation in response to the AMOC weakening is smaller with WSF compared to the case without WSF. To examine this hypothesis, freshwater forcing was added to the northern North Atlantic and the effect of WSF is studied by running MIROC4m numerical experiments. Consistent with the moisture transport implied by the anomalous Hadley cells, zonal bands with increased and decreased precipitation appear in each hemisphere separately although this result is different from the initial hypothesis (Figure 3). In addition, three regions with relatively large precipitation response in the Pacific Ocean and the Arabian Sea were analyzed. It is shown that the relative contribution of the WSF to the total precipitation response to the AMOC weakening is dominant in the Arabian Sea. Therefore, it is important to consider the WSF to understand the physical mechanism behind what is recorded in precipitation proxies in this region.

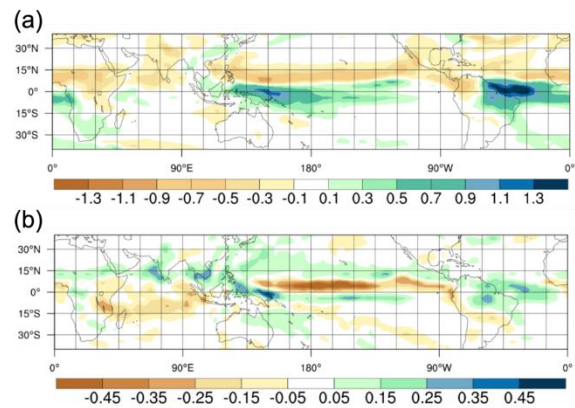


Figure 3: Changes in annual mean precipitation (mm/day): (a) the effect of freshwater forcing in the northern North Atlantic; (b) the effect of wind stress feedback induced by the freshwater forcing experiment. Freshwater of 0.05 Sv was applied to the mid-glacial conditions for 500 years, and the last 100 years were analyzed.

4. Effect of mid-glacial ice sheets on the millennial scale climate variability

Glacial periods undergo frequent climate shifts between warm interstadials and cold stadials on a millennial timescale. Recent studies show that the duration of these climate modes varies with the background climate; a colder background climate and lower CO_2 generally result in a shorter interstadial and a longer stadial through its impact on the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). However, the duration of stadials is shorter during Marine Isotope Stage 3 (MIS3) than during MIS5, despite the colder climate in MIS3, suggesting other climate factors as a potential control on the duration of stadials. In this study, we investigate the role of glacial ice sheets. For this purpose, freshwater hosing experiments are conducted with an atmosphere-ocean general circulation model under

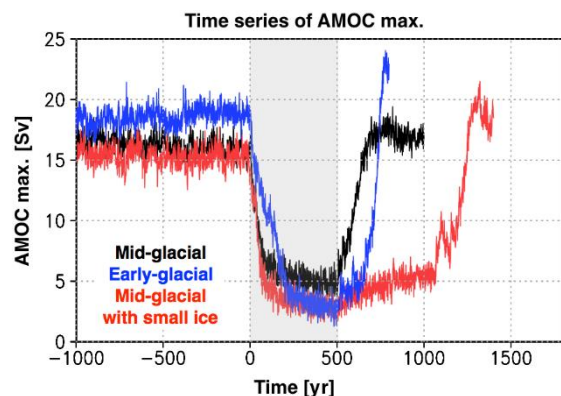


Figure 4: Time series of the strength of the AMOC under freshwater hosing with MIROC4m. Freshwater of 0.1 Sv was released to 50-70°N in the North Atlantic for 500 years from year 1 (gray-shaded period).

MIS5a and MIS3 boundary conditions, as well as MIS3 boundary conditions with MIS5a ice sheets. The impact of ice sheet difference on the duration of the stadials is evaluated by comparing recovery times of the AMOC after the freshwater forcing is stopped. These experiments show a slightly shorter recovery time of the AMOC during MIS3 compared with MIS5a, which is consistent with ice core data. We find that larger glacial ice sheets in MIS3 shorten the recovery time. Sensitivity experiments show that stronger surface winds over the North Atlantic shorten the recovery time by increasing the surface salinity and decreasing the sea ice amount in the deepwater formation region, which sets favorable conditions for oceanic convection. In contrast, we also find that surface cooling by larger ice sheets tends to increase the recovery time of the AMOC by increasing the sea ice thickness over the deepwater formation region. Thus, this study suggests that the larger ice sheet during MIS3 compared with MIS5a could have contributed to the shortening of stadials in MIS3, despite the climate being colder than that of MIS5a, because surface wind plays a larger role.

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] Kuniyoshi, Y., Abe-Ouchi, A., Sherriff-Tadano, S., Chan, W. and Saito, F.: Effect of climatic precession on Dansgaard-Oeschgerlike oscillations. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095695, doi:10.1029/2021GL095695, 2022.
- [2] Higuchi, T., Abe-Ouchi, A. and Chan, W.-L.: Differences between present-day and cretaceous hydrological cycle responses to rising CO₂ concentration. *Geophysical Research Letters*, 48(22), e2021GL094341, doi:10.1029/2021GL094341,

2021.

- [3] Sherriff-Tadano, S., Abe-Ouchi, A., Oka, A., Mitsui, T., and Saito, F.: Does a difference in ice sheets between Marine Isotope Stages 3 and 5a affect the duration of stadials? Implications from hosing experiments, *Clim. Past*, 17, 1919–1936, <https://doi.org/10.5194/cp-17-1919-2021>, 2021.