

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}, 大垣内 るみ^{*2}, 小長谷 貴志^{*1}, シェリフ多田野 サム^{*1}, 木野 佳音^{*3}, 渡辺 泰士^{*3}, 齋藤 冬樹^{*2}, 三ツ井 孝仁^{*1}, 千喜良 稔^{*1}, 樋口 太郎^{*3}, 原田 果穂^{*3}, 廣田 和也^{*3}, Tristan Vadsaria^{*1}, 轟木 亮太郎^{*3}, 國吉 優太^{*3}

^{*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

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) 完新世の気候シミュレーションを用いて、北極域の温暖化プロセスを分析した。その結果、夏の海洋熱吸収が秋冬の温暖化に寄与していることが示され、将来の北極温暖化プロセスとの関連性を指摘した。(2) 氷期から間氷期へ連続して変化する境界条件を与えた退氷期実験を行った。その結果、北大西洋への淡水流入が多いときに大西洋の海洋深層循環が弱まることで地質記録が示す南極の温暖化をよく再現した。(3) 衛星データをもとに、気候モデルでの雲の過冷却水を改善することで南大洋の海面水温バイアスの改善を行った。その結果、これまでのシミュレーション結果よりも古環境復元から示唆されているものと整合的な海洋深層循環が再現された。(4) CO₂ 濃度に差をつけた白亜紀の気候シミュレーションを行い、白亜紀温暖期にアジアが乾燥するという地質学的証拠と一致する結果を得た。

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. 完新世と将来の極域温暖化の関連性

測器観測期間の範囲を超える可能性が指摘されている将来の北極域の温暖化の予測には、過去に北極域が温暖であった時代の情報が役に立つと考えられている。本研究では、北極域の温暖化に寄与する物理プロセスを調べ、約6千年前の完新世中期の気候シミュレーションと将来予測の共通性や相違性、モデル間のばらつきの要因特定を行った。図1a, bは、6千年前(主に日射の緯度・季節分布に起因)と21世紀末(主に温室効果ガス濃度に起因)の有効放射強制力を表しているが、両時代では緯度・季節分布が非常に異なる。一方で計算された気温変化は、両時代に共通して北極域では秋から冬にかけて昇温が見られる(図1c, d)。この共通性は、夏に海洋によって余剰に吸収された熱が秋から冬にかけて大気に放出され、加えて雲による温室効果などによって温暖化が増幅されることによってもたらされることがわかった。また、この一連の季節進行に関連するプロセスがモデル間のばらつきにも大きく寄与することがわかった。

2. 2つの退氷期の気候シミュレーションから示唆される最終間氷期の南極温暖化メカニズム

およそ13万年前の最終間氷期は現在より南極域が温暖であった(Capron et al. 2017)が、最終間氷期の定常気候計算からは再現できていなかった。そこで、大気海洋結合モデル MIROC4m を用い、氷期を初期値として地球の軌道要素と温室効果ガス濃度を、気候復元に基づいて間氷期の条件へと連続的に変化させる退氷期実験をおこなった(Obase and Abe-Ouchi 2019)。当時は北半球氷床が融

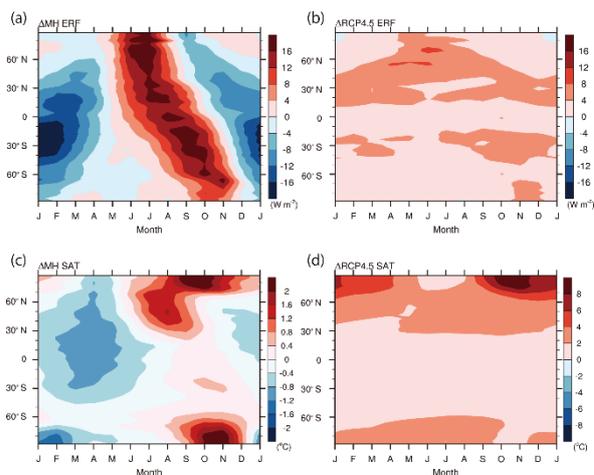


図1: (a) 産業革命前を基準とした完新世中期の有効放射強制力、(b) 20世紀末を基準としたRCP4.5シナリオにおける21世紀末の有効放射強制力、(c) 産業革命前を基準とした完新世中期の地上気温変化、(d) 20世紀末を基準としたRCP4.5シナリオにおける21世紀末の地上気温変化。(a),(b)は地球シミュレータ上で計算、(c),(d)は10個の気候モデルの平均。Yoshimori and Suzuki (2019)のFig. 2を転載。

解していたことを想定して、北大西洋高緯度域への淡水流入量を変えた実験を比較した。その結果、北大西洋高緯度域への淡水流入量が多いと海洋深層循環が弱く維持され、得られた極域の気温変化や海洋深層循環の時系列は

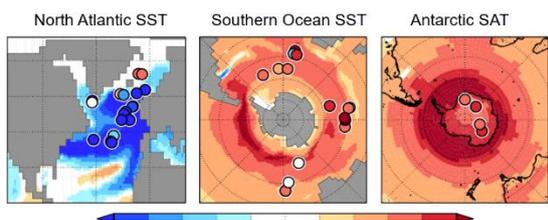


図 2：モデルで計算された最終間氷期初期の時刻に相当する時期 (13.0 万年前) の、現在の間氷期に対する海面水温、地表気温を地質記録(Capron et al. 2017)と比較した図。

地質記録をよく再現した。北大西洋域と南極域の海面水温・地表気温の特徴をよく再現し、南極は現在より2程度温暖という結果になった(図2)。この結果は、最終間氷期初期の温暖期は間氷期そのものの条件だけではなく、その前の氷期以降の気候変化が、北大西洋の弱い海洋深層循環が南極を温暖にするメカニズムを通して生じたことを示唆する。

3. MIROC4m の南大洋モデルバイアス改善と古気候実験への影響

世界中の多くの大気海洋大循環モデルには、南大洋の海面水温が観測よりも暖かい「高水温バイアス」があるが、このバイアスの存在が過去や将来の気候予測に与える影響が懸念されている。本研究では、衛星データをもとに、気候モデルでの雲の過冷却水を改善した。その結果、過冷却水の増加に伴う雲アルベドの増加により、海面への短波入射の過大評価が改善され、南大洋の高水温バイアスも改善された(図3)。次に改良モデルを用いて最終氷期最盛期実験を行った結果、これまでのシミュレーション結果よりも古環境復元から示唆されているものと整合的な海洋深層循環が再現された。これは、南大洋高温バイアスの改善によって、氷期での海氷生成と南極底層水の形成がよく計算されるようになったためである。また、海洋パラメータを修正した感度実験においても、南大洋バイアスが解消し、同様に古気候実験での改善が見られた

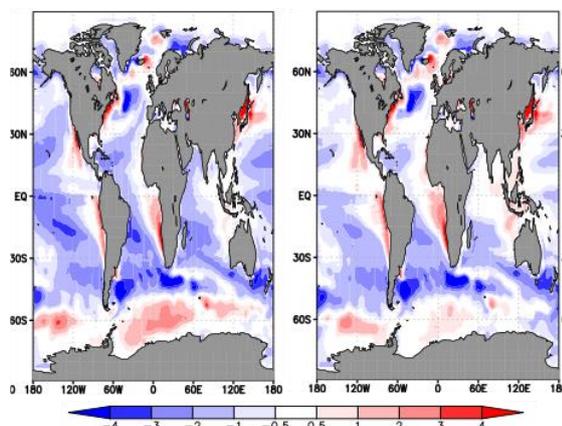


図 3：MIROC4m の年平均海面水温バイアス(色, K). (左) 従来のモデル. (右) 改善されたモデル.

(Sherriff-Tadano and Abe-Ouchi 2020)。これらの結果は、南大洋の高水温バイアスが過去と将来の気候計算に多大な影響を与えることを示す。

4. 白亜紀の温暖化に伴うアジアの水循環応答の数値実験

将来の温暖化においてアジア地域の降水量が増加し湿潤化することが予測されている一方で (Stocker et al. 2013)、白亜紀中の特に温暖な時代においてアジア地域がその前後の時期と比較して乾燥化したことが地質学的な証拠から示されている (Hasegawa et al. 2012)。本研究では将来予測や鮮新世温暖期の再現(Chan and Abe-Ouchi 2020)に用いられた大気海洋結合モデル MIROC4m を用いて、白亜紀の気候シミュレーションを CO₂ の高低が異なる条件で行い、白亜紀に温暖な時代ほどアジアで乾燥化するという地質学証拠と整合的な結果を得ることに成功した(図4)。一方でMIROCによる将来の温暖化シナリオ実験ではアジアは湿潤化するという逆符号の変化がみられる。そこで、なぜアジアの温暖化に伴う水循環変化が現在と白亜紀で異なっているのかを調べたところ、夏の気候循環の応答の違いに起因していることが分かった。さらに、

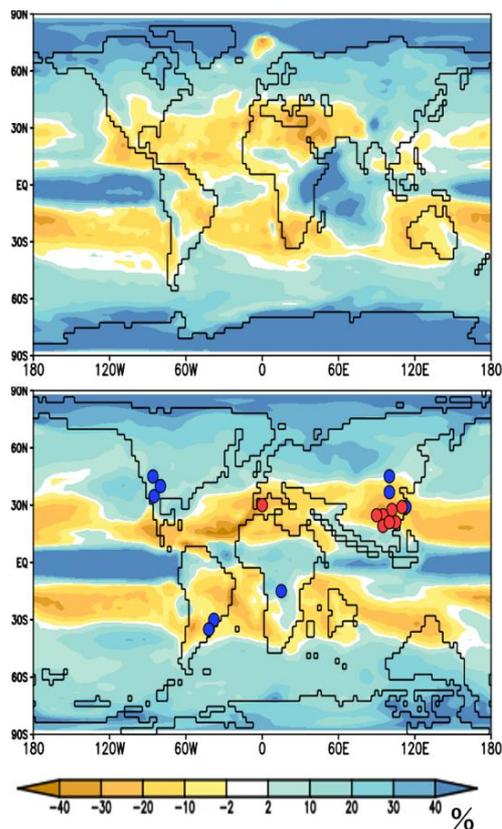


図 4：現在地形(上)と白亜紀(下)で温暖化に伴う降水量の変化(%). 地質学的証拠より白亜紀前期・後期と比較して特に温暖であった白亜紀中期に湿潤化した場所(青丸)、乾燥化した場所(赤丸)を示す。

チベット高原を取り除いた検証実験から、この大気循環の応答の違いはチベット高原の有無による基本場の違いやチベット高原上空での潜熱加熱の強化に関係していることが分かった。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 17H06104、文科省科研費 17H06323 および北極域研究推進プロジェクト(ArCS: 文科省 JPMXD1300000000)のもとで実施された。

文献

- [1] Yoshimori, M. and Suzuki, M.: The relevance of mid-Holocene Arctic warming to the future, *Clim. Past*, 15, 1375–1394, <https://doi.org/10.5194/cp-15-1375-2019>, 2019.
- [2] Capron, E., Govin, A., Feng, R., Otto-Bliesner, B. L., and Wolff, E. W., Critical evaluation of climate syntheses to benchmark CMIP6/PMIP4 127 ka Last Interglacial simulations in the high-latitude regions. *Quaternary Science Reviews*, 168, 137-150. doi:10.1016/j.quascirev.2017.04.019, 2017.
- [3] Obase, T. and A. Abe-Ouchi, Abrupt Bolling-Allerod warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation, *Geophysical Research Letters*, 46, doi:10.1029/2019GL084675, 2019.
- [4] Sherriff-Tadano, S., and Abe-Ouchi, A.: Roles of sea ice–surface wind feedback in maintaining the glacial Atlantic meridional overturning circulation and climate, *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0431.1>, 2020.
- [5] Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... and Midgley, P. M. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 1535, 2013.
- [6] Hasegawa, H., Tada, R., Jiang, X., Suganuma, Y., Imsamut, S., Charusiri, P., ... and Khand, Y. Drastic shrinking of the Hadley circulation during the mid-Cretaceous Supergreenhouse. *Climate of the Past*, 8(4), 1323, 2012.
- [7] Chan, W.-L. and Abe-Ouchi, A. Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2) simulations using the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC4m). *Climate of the Past*, 16, 1523-1545, doi: 10.5194/cp-16-1523-2020, 2020.

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^{*1,2}, Masakazu Yoshimori^{*1}, Wing-Le Chan^{*1}, Akitomo Yamamoto^{*2}, Ryouta O'ishi^{*1}, Rumi Ohgaito^{*2}, Takashi Obase^{*1}, Sam Sheriff-Tadano^{*1}, Kanon Kino^{*3}, Yasuto Watanabe^{*3}, Fuyuki Saito^{*2}, Takahito Mitsui^{*1}, Minoru Chikira^{*1}, Taro Higuchi^{*3}, Kaho Harada^{*3}, Kazuya Hirota^{*3}, Tristan Vadsaria^{*1}, Ryotaro Todoroki^{*3} and Yuta Kuniyoshi^{*3}

*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 Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

The MIROC4m AOGCM is used for several paleoclimate experiments and sensitivity experiments. (1) Processes responsible for Arctic warming in the mid-Holocene simulations are analyzed. It is found that anomalous heat uptake by the Arctic Ocean in summer contributes to the warming in autumn-winter, and it is pointed out that this process is relevant to future Arctic warming. (2) A transient deglaciation GCM experiment is run with CO₂ and orbital parameters from the glacial to interglacial. Observed warming in Antarctica is reproduced with weak deep ocean circulation in the Atlantic Ocean due to freshwater runoff. (3) GCM cloud process is improved based on satellite data. SST in the Southern Ocean is reproduced more realistically with this improvement. (4) Hydrological changes more extreme in the mid-Cretaceous than in the early and late Cretaceous are reproduced in a high-CO₂ Cretaceous experiment compared to a low-CO₂ case. This response, opposite to that of future prediction, is caused by the absence of the Tibetan Plateau.

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

1. Relevance of mid-Holocene Arctic warming to the future

It is expected that insight from paleo-Arctic warming is useful for the future projection of Arctic warming beyond the level of instrumentally observed Arctic warming. In this study, we investigated physical processes that contribute to Arctic warming in the mid-Holocene and future-scenario simulations, and identified sources of model spread. Figures 1a and 1b show the effective radiative forcing for both periods, where largely different latitudinal and seasonal patterns are seen. Simulated surface air temperature responses, on the other hand, exhibit a common warming pattern in late autumn to early winter in the Arctic (Figures. 1c and 1d). This result is caused by the common mechanism of excessive absorption of shortwave radiation by the ocean in summer and release of heat from the ocean to the atmosphere in the subsequent seasons. In addition, an increase in the cloud greenhouse effect during the season of weak polar insolation amplifies the warming. It was found that processes involved in this anomalous seasonal evolution are also responsible for the model spread.

2. Transient simulation of the last two deglaciations and implications for Antarctic warmth during the last interglacial

Reconstructions indicate that the Antarctic climate of the last interglacial (about 130,000 years ago) was warmer than the present-day (Capron et al. 2017), but equilibrium experiments

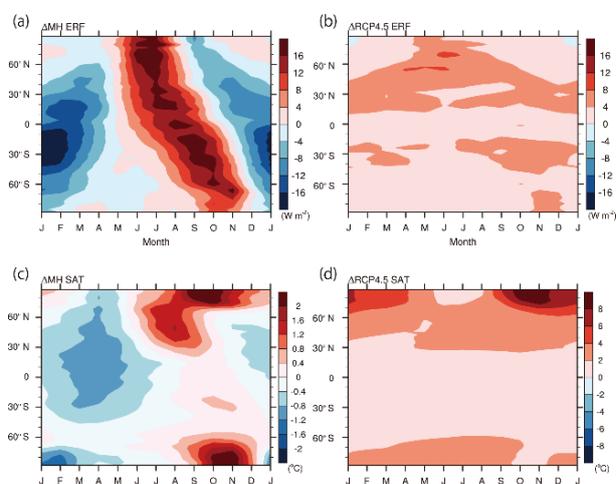


Figure 1: (a) Effective radiative forcing of mid-Holocene with respect to the pre-industrial period, (b) effective radiative forcing of the late 21st century (RCP4.5 scenario) with respect to the late 20th century, (c) surface air temperature response in the mid-Holocene with respect to the pre-industrial period, and (d) surface air temperature response in the late 21st century (RCP4.5 scenario) with respect to the late 20th century. (a) and (b) are computed using the Earth Simulator, and (c) and (d) are averages of 10 climate models. Reproduced from Fig. 2 of Yoshimori and Suzuki (2019).

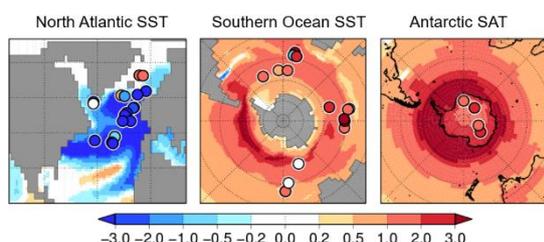


Figure 2: Simulated sea surface and air temperature anomaly of the early Last Interglacial (130,000 years ago) relative to the present interglacial is compared to reconstructions (Capron et al. 2017)

using climate forcing of the Last Interglacial cannot reproduce those warm climates. Here we use an atmosphere-ocean coupled model, MIROC4m, and conduct transient simulations from the glacial to interglacial (deglaciation) using reconstructed orbital parameters and atmospheric greenhouse gas concentrations (Obase and Abe-Ouchi 2019). We conduct several experiments applying different freshwater fluxes in the North Atlantic as the northern continental ice sheet was melting during those times. The results show that greater amounts of North Atlantic freshwater tend to weaken the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC). The time series of temperature changes over the polar regions roughly reproduce the reconstructed temperature trends, and the magnitude of warming over the Antarctic region is about 2 degrees (Figure 2). The results suggest that the warm Antarctic climate of the early Last Interglacial was driven by the continuously weak AMOC during the deglaciation before the Last Interglacial, which tends to warm Antarctica.

3. Improvements in modern biases over the Southern Ocean and its impact on past climate simulation with MIROC4m AOGCM

In order to test the ability of comprehensive climate models used for future climate projection, simulations of the Last Glacial Maximum (LGM) have been conducted. However, most models have simulated a deeper AMOC in the LGM, which contradicts paleodata showing a shallower AMOC. Here, we show that this paleodata-model discrepancy is caused by model biases in the modern Southern Ocean, which is also an issue for future climate projection. In particular, improvements in cloud and surface temperatures over the modern Southern Ocean based on satellite observations lead to the reproduction of a colder LGM climate and increased bottom water formation over the Southern Ocean, which causes a drastic shoaling of the AMOC (Figure 3). Similar results were also obtained when we corrected a mixing parameter in the ocean, which has a large impact on the Southern Ocean sea surface temperature (Sherriff-Tadano and Abe-Ouchi 2020). Results show the importance of the Southern Ocean in understanding future and past climates.

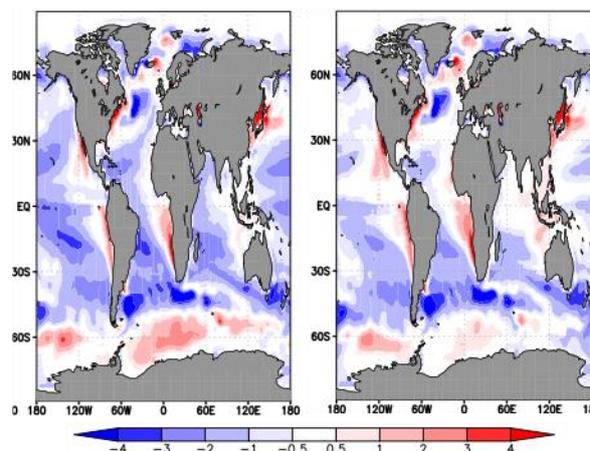


Figure 3: Annual mean sea surface temperature bias in MIROC4m (color, K). (Left) Original model version. (Right) Improved model version.

4. Numerical simulation of the water cycle response in Asia to global warming in the Cretaceous.

Future global warming predictions suggest that, in Asia, the annual and summer mean precipitation increase due to increasing atmospheric CO_2 , leading to more humid conditions (stocker et al. 2013). On the other hand, Cretaceous proxy data show that aridification in the low latitudes of Asia preceded the mid-Cretaceous which was the warmest time during the Cretaceous Period, with an especially high CO_2 concentration, compared to the relatively cold Early and Late Cretaceous (Hasegawa et al. 2012). We simulate the Late Cretaceous climate with different CO_2 levels using the atmosphere-ocean general circulation model MIROC 4m, which was used also for future climate change as well as past period such as Pliocene (Chan and Abe-Ouchi 2020), and successfully reproduce the aridification in Asia in response to global warming, consistent with geological evidence (figure 4). This change in the water cycle is different from that of a present-day warming experiment using the same model. Therefore, we investigate why the responses of the water cycle in Asia to increased CO_2 differ during present day and the Cretaceous, and demonstrate that the difference in the water cycle changes is attributed to the different summer atmospheric circulation responses in Asia. Additionally, ‘No-Tibet’ experiments, eliminating the Tibetan plateau, indicate that this is related to the difference in the basic climate fields due to the presence or absence of the Tibetan plateau and an increase in latent heat over the Tibetan plateau.

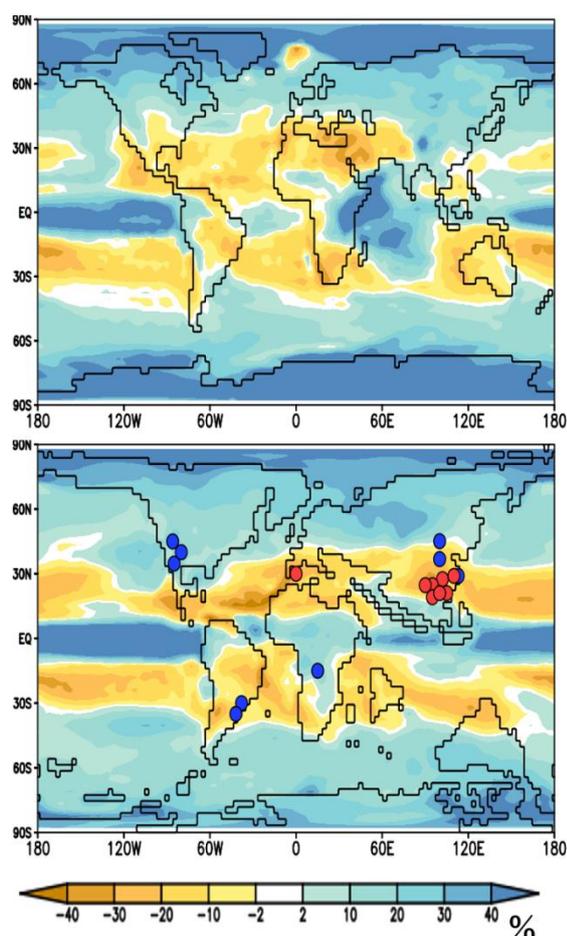


Figure 4: Precipitation change (%) in warming experiment with present-day topography (upper) and Cretaceous (lower). Red (blue) circles show the location where aridification (humidification) preceded the mid-Cretaceous which was the warmest time during the Cretaceous Period, compared to the relatively cold Early and Late Cretaceous.

Acknowledgement

The authors acknowledge funding from JSPS KAKENHI grant 17H06104, MEXT KAKENHI grant 17H06323 and Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project (JPMXD1300000000, MEXT)

References

- [1] Yoshimori, M. and Suzuki, M.: The relevance of mid-Holocene Arctic warming to the future, *Clim. Past*, 15, 1375–1394, <https://doi.org/10.5194/cp-15-1375-2019>, 2019.
- [2] Capron, E., Govin, A., Feng, R., Otto-Bliesner, B. L., and Wolff, E. W., Critical evaluation of climate syntheses to benchmark CMIP6/PMIP4 127 ka Last Interglacial simulations in the high-latitude regions. *Quaternary Science Reviews*, 168, 137-150. doi:10.1016/j.quascirev.2017.04.019, 2017.
- [3] Obase, T. and A. Abe-Ouchi, Abrupt Bolling-Allerod

warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation, *Geophysical Research Letters*, 46, doi:10.1029/2019GL084675, 2019.

[4] Sherriff-Tadano, S., and Abe-Ouchi, A.: Roles of sea ice–surface wind feedback in maintaining the glacial Atlantic meridional overturning circulation and climate, *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0431.1>, 2020.

[5] Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... and Midgley, P. M. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 1535, 2013.

[6] Hasegawa, H., Tada, R., Jiang, X., Suganuma, Y., Imsamut, S., Charusiri, P., ... and Khand, Y. Drastic shrinking of the Hadley circulation during the mid-Cretaceous Supergreenhouse. *Climate of the Past*, 8(4), 1323, 2012.

[7] Chan, W.-L. and Abe-Ouchi, A. Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2) simulations using the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC4m). *Climate of the Past*, 16, 1523-1545, doi: 10.5194/cp-16-1523-2020, 2020.