

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^{*1,2,3}, 吉森 正和^{*4}, 山本 彬友^{*5}, Wing-Le Chan^{*1}, 大石 龍太^{*1}, 高橋 邦生^{*6}, 大垣内 るみ^{*5}, 小長谷 貴志^{*1}, シェリフ多田野 サム^{*1}, 西村 照幸^{*2}, 木野 佳音^{*1}, 渡辺 泰士^{*7}, 鈴木 まりな^{*8}, 齋藤 冬樹^{*2}, 小玉 貴則^{*1}

*1 東京大学 大気海洋研究所, *2 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野, *3 国立極地研究所, *4 北海道大学 大学院地球環境科学研究院, *5 海洋研究開発機構 気候モデル高度化研究プロジェクトチーム, *6 アドバンスソフト株式会社, *7 東京大学 理学部地球惑星環境学科, *8 北海道大学 大学院環境科学院

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) 現実的な将来予測シナリオにおいて、中・高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布へ遠隔的に影響するしくみを数値実験により調べた。具体的には大気海洋大循環モデルを中・高緯度のみ将来予測実験の状態に近づけて遠隔影響のみを取り出し、背後にあるメカニズムを明らかにした。(2) 氷床が海洋循環を通じて気候に与える影響とそのプロセスを数値実験により調べた。具体的には、大気海洋結合モデルを用い、部分非結合実験を行うことで、氷床の形の変化が、風、大気水循環、熱の変化を通して大西洋子午面循環に与える影響を明らかにした。(3) 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再現する数値実験を行った。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) 21世紀後半まで続くことが予測されている温暖化と同程度の温暖化が、直近の地球史上では鮮新世後期(約300万年前)に起きていた。PlioMIP2の最新の境界条件を用いてこの時代の気候再現を試みた。

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. 中・高緯度の温暖化が低緯度の降水へ及ぼす遠隔的影響

地球温暖化は、北極域で現在特に急速に進行しているが、南大洋での温暖化の程度は小さく、南北で非対称な応答が特徴的である。この南北非対称性は、約100年後の将来においても予測されている。本研究では、このような中・高緯度の南北非対称な温暖化が熱帯の降雨分布に与える遠隔影響について調べた。大気海洋大循環モデル(MIROC4m)、海洋大循環モデルを混合層モデルに差し替えたもの、海洋の状態を外部から与えた大気大循環モデルを階層的に用いることで、大気役割、海洋の役割をそれぞれ明らかにした。最も中心的なMIROC4mを用いた数値実験では、海水温と塩分を将来予測実験で得られた値に中・高緯度のみ緩和しながら、産業革命前から21世紀末までの時間積分を実施した。この中・高緯度温暖化強制実験では、将来予測で見られた南緯10度を境にした熱帯降雨の南北変化量差の約半分が再現された。図1は、海洋の力学過程を含む場合と含まない場合について、20世紀末と21世紀末の熱帯の降雨分布の差を表している。10-1月平均で、どちらも降雨分布が南から北へ移動するが、海洋の力学フィードバックによって、その移動の程度が抑えられることがわかる。背景にある一連のメカニズムの詳細をまとめて、論文(Yoshimori et al., 2018)に発表した。

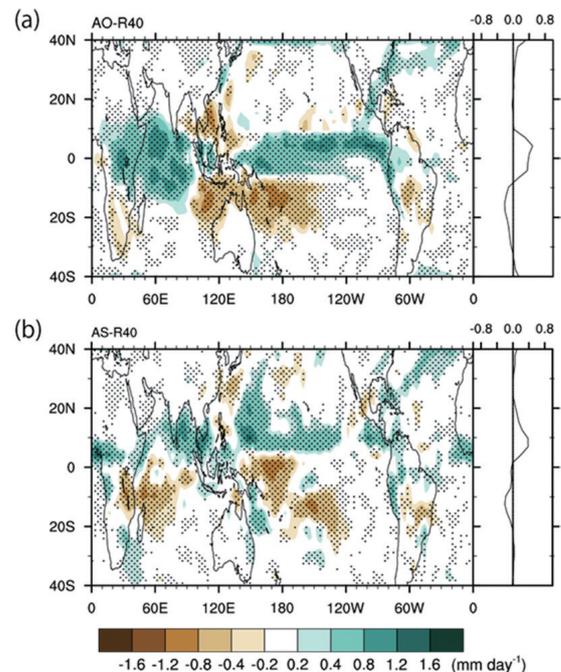


図1 20世紀末と21世紀末の10月–1月平均の降水分布の差 (mm day⁻¹): (a) 大気大循環–海洋大循環モデル、(b) 大気大循環–海洋混合層モデル。いずれも中高緯度の温暖化の影響のみを取り出す数値実験の結果。東西平均値を右に表示。点は差の有意性の高い格子点を示す。Yoshimori et al. (2018) Fig. 3b と 3d より転載 (© Copyright 2018 AMS)。

2. 氷床が海洋循環を通じて気候に与える影響

氷期には気候が温暖な状態と寒冷な状態の間を頻繁に変動した。先行研究では氷床の形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 (Sherriff-Tadano, 2017)。本年度の研究では、氷期氷床が寒冷な気候の持続期間に影響を与えるプロセスを調べた。そのため、大気海洋結合モデル MIROC4m を使い、部分非結合実験を行った。その結果、氷床の拡大に伴う、地表風の強化と北大西洋の強い寒冷化が大西洋子午面循環に多大な影響を与えていることがわかった。地表風の強化は、風成循環を強化することで、極域への海洋塩分輸送を増加し、大西洋子午面循環を強化した (図2, 緑線, Sherriff-Tadano et al. 2018)。一方で、海面冷却の強化は、北大西洋や南大洋の海水を増やすことで、寒冷な気候を持続させる効果を持っていた (図2, 青線)。よって、氷床が大西洋子午面循環に与える影響は、風の効果と熱の効果の強さの兼ね合いで決まることがわかった。大気水循環の効果や、より詳細なメカニズムに関しては、博士論文 (Sherriff-Tadano, 2017) と投稿論文にまとめた (Sherriff-Tadano et al. 2018)。

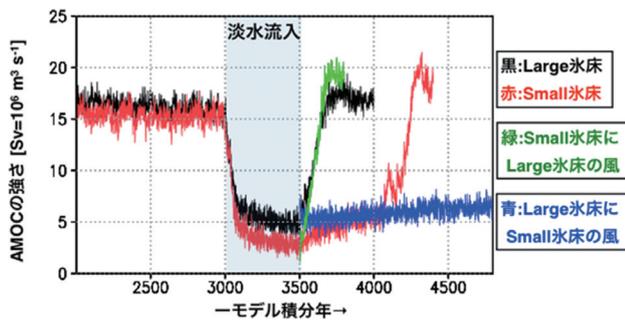


図2 淡水流入に対する気候 (大西洋子午面循環) の応答。3000年から3500年まで、淡水を与えている。赤線: 氷床の小さな実験、黒線: 氷床の大きな実験。氷床の大きな実験では、淡水流入が止まった場合に気候がすぐに寒冷な状態から温暖な状態にシフトすることがわかる。青線と緑線はそれぞれ部分非結合実験の結果を示している。

3. 氷床融解による淡水流入が引き起こす急激な気候変化

およそ2万年前の最終氷期から現在の間氷期にかけては、グリーンランドで急激な気温変化が生じたことがわかっている (図3e)。これまでの気候モデル実験で、大西洋子午面循環の変化によって急激な気候変化が再現されることが示されたが、大西洋への氷床融解水流入を止めていたことが、氷床および海水準の復元記録と整合しない問題があった。大気海洋結合モデル MIROC4m を使い、最終氷期以降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れて計算した (図3c)。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、大西洋子午面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示された。これは、氷床融解水の変動がなくても、氷期以降の北半球夏期日射と温室効果ガスの増加によ

て北大西洋が徐々に温暖になり、あるところで北大西洋の海水が急激に後退して大西洋子午面循環の強化が生じたと考えられる。以上の結果は、大西洋子午面循環の急激な強化とそれに伴う気候変化が生じる時期は氷床融解水の大小に大きく依存するが、氷期以降の大西洋子午面循環と極域の気温復元と氷床融解史の復元は整合的に再現しうることを示唆する。以上の結果は博士論文 (Obase 2018) の一部としてまとめ、査読誌への投稿準備中である。

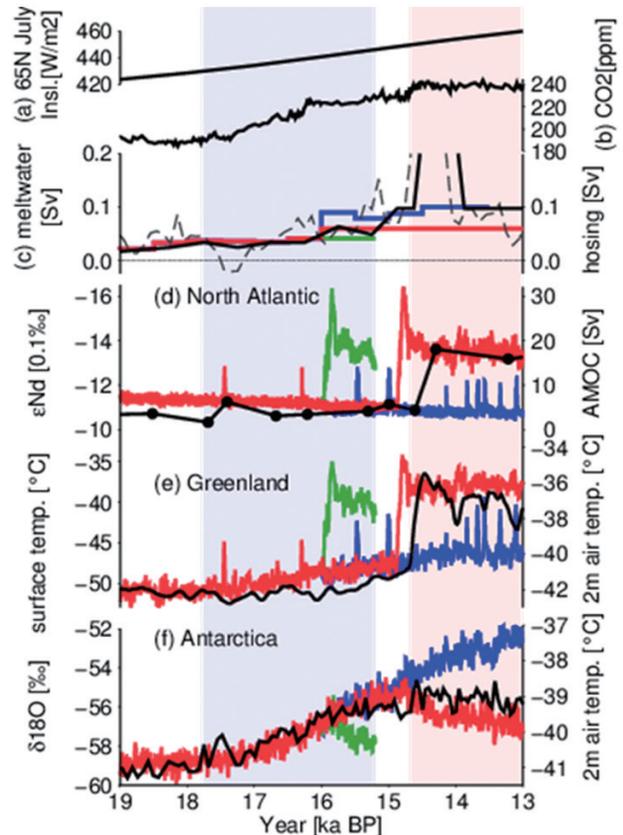


図3 モデルの計算結果 (赤、青、緑線で3つの実験を示す) を古気候復元 (黒線) と比較した図。(a) 北緯65度夏期日射量、(b) 大気中CO₂濃度、(c) 北半球氷床融解速度および氷床融解水流入量、(d) AMOC (大西洋子午面循環) 流量、(e) グリーンランド気温、(f) 南極気温を示す。背景の青 (17.8-15.2 ka BP) と赤 (14.7-13 ka BP) は、気候復元で北半球が寒冷な時期と温暖な時期をそれぞれ示す。

4. 鮮新世後期温暖期の気候再現

古環境指標の充実した過去の温暖期を対象とすることで、気候モデルの極端な強制力下でのふるまいを検証することができる。鮮新世後期に含まれる約300万年前のピアセンジャン中期温暖期は大気二酸化炭素が現在と同じ400ppm程度であった直近の時代であり、本研究では大気海洋大循環モデル MIROC4m を用いて the second phase of the Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2, Haywood et al, 2016) のプロトコルに従って再現実験を行った。図4はPlioMIP2で採用された植生分布と現在との標高偏差である。緯度平均した海面温度を古環境指標化からの復元値とともに示したのが図5である。大気二酸化炭素濃度と植生変化によるアルベド低下が温暖化に大き

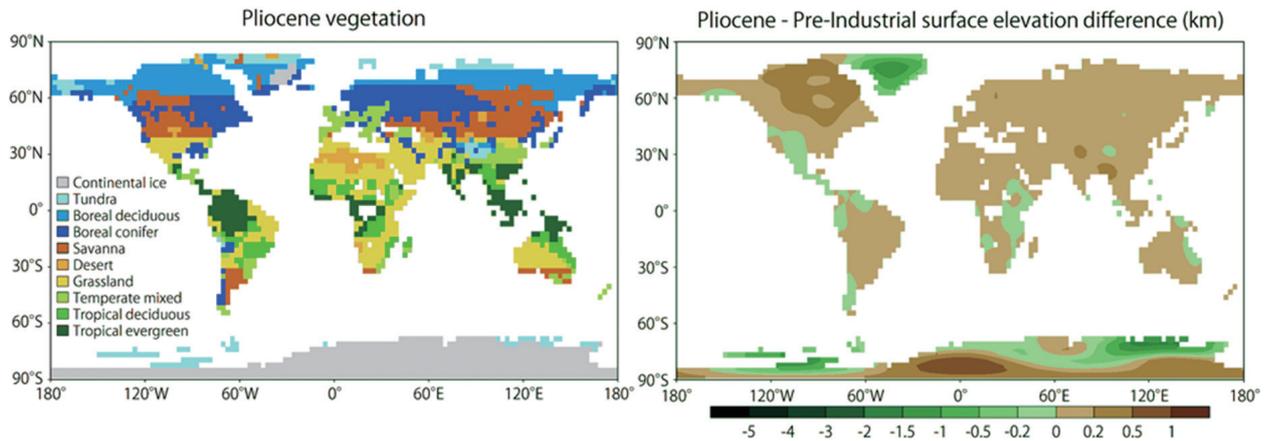


図4 PlioMIP2 データに基づく鮮新世後期の植生分布と現在からの標高偏差

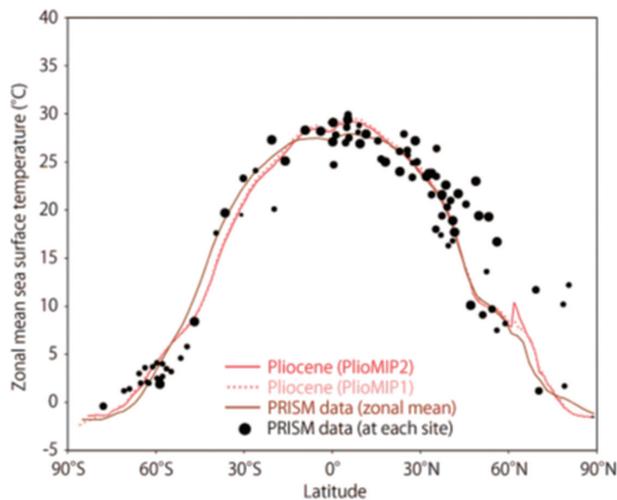


図5 鮮新世後期の緯度平均した海面水温と古環境指標からの復元値

く寄与しているが、北半球高緯度の一部では標高の効果により PlioMIP1 と比べて温暖化幅が減少している。また、雲アルベドの効果で強い寒冷化効果があった。

謝辞など

本研究は JSPS 科研費 JP15J12515, JP15K05280, JP17H06104, JP17H06323 および北極域研究推進プロジェクト (ArCS) の助成を受けたものです。

文献

- [1] Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, H. Tatebe, T. Nozawa, and A. Oka (2018): The importance of ocean dynamical feedback for understanding the impact of mid-high-latitude warming on tropical precipitation change. *J. Climate*, 31, 2417-2434. doi:10.1175/JCLI-D-17-0402.1.
- [2] Sherriff-Tadano, S., Abe-Ouchi, A., Yoshimori, M. et al. *Clim Dyn* (2018) 50: 2881. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3780-0>.
- [3] Sherriff-Tadano, S. (2017) Impact of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation and climate, 博士論文, 東京大学理学系研究科 .
- [4] Obase, T (2018) A climate modeling study on the mechanism of Antarctic ice sheet changes in the past and future, 博士論文, 東京大学理学系研究科 .
- [5] Haywood, A.M., H.J. Dowsett, A.M. Dolan, D. Rowley, A. Abe-Ouchi, B. Otto-Bliesner, M.A. Chandler, S.J. Hunter, D.J. Lunt, M. Pound, and U. Salzmann (2016): The Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) Phase 2: scientific objectives and experimental design, *Clim. Past*, 12, 663-675. doi:10.5194/cp-12-663-2016.

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^{*1,2,3}, Masakazu Yoshimori^{*4}, Akitomo Yamamoto^{*5}, Wing-Le Chan^{*1}, Ryouta O'ishi^{*1}, Kunio Takahashi^{*6}, Rumi Ohgaito^{*5}, Takashi Obase^{*1}, Sam Sheriff-Tadano^{*1}, Teruyuki Nishimura^{*2}, Kanon Kino^{*1}, Yasuto Watanabe^{*7}, Marina Suzuki^{*8}, Fuyuki Saito^{*2} and Takanori Kodama^{*1}

*1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, *2 Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *3 National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, *4 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, *5 Project Team for Advanced Climate Modeling, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *6 AdvanceSoft Corporation, *7 Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, *8 Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

The MIROC4m AOGCM is used for several paleoclimate experiments and sensitivity experiments. (1) The impact of mid-high-latitude warming on the tropical rain distribution under a realistic future scenario is investigated by numerical experiments. The core experiments are conducted by restoring the mid-high latitudes to future warming conditions in an atmosphere-ocean general circulation model, and the mechanism behind the 'teleconnection' is elucidated. (2) The impact of glacial ice sheets on the climate and the Atlantic meridional overturning circulation and its mechanism is investigated by numerical experiments. By conducting partial couple experiments, the role of changes in surface wind, atmospheric freshwater transport and the thermal heat flux is elucidated. (3) A transient simulation from the Last Glacial Maximum to the present interglacial was conducted. It is shown that an abrupt climate change could occur under a continuous glacial meltwater that is consistent with ice sheet reconstructions. (4) The Late Pliocene is the most recent time in history with sustained global warming similar to that projected for the end of the 21st century. The climate of that period is investigated using the latest boundary conditions from PlioMIP2.

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

1. Teleconnection between warming in high latitude and precipitation in low latitude

One of key features of the global warming is a rapid warming in the Arctic region and slow changes in the Southern Ocean. This asymmetric response is also projected for the late 21st century. In the current study, the impact of such asymmetric mid-high-latitude warming between the hemispheres on the tropical rain distribution is investigated. A series of numerical experiments using a hierarchy of general circulation models with different complexity of ocean representation reveals the importance of the ocean and the atmosphere in the 'teleconnection'. The atmosphere-ocean general circulation model, MIROC4m, is integrated with the regional nudging technique in which only mid-high-latitude warming is applied as the external forcing from the preindustrial to the late 21st century. In this nudging experiment, about half of the difference in the tropical rain change from the late 20th to the late 21st centuries between the south and the north of 10°S for the full simulation is captured. Figure 1 shows the precipitation

response to the 21st century mid-high latitude warming with and without ocean dynamics. The precipitation tends to increase in the north and decrease in the south for the October-January average in both cases, but the degree of migration is suppressed by the ocean dynamical feedback. The mechanism behind this response was published in Yoshimori et al. (2018).

2. Ice sheet effect on climate through ocean circulation

During the glacial period, climate shifted frequently between warm interstadials and cold stadials. Previous studies have pointed out the importance of the glacial ice sheets in causing the frequent climate shifts (Sheriff-Tadano, 2017). In this study, we explored the processes by which the glacial ice sheets modify the climate and the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC). For this purpose, we performed partial coupled experiments with an atmosphere-ocean coupled general circulation model MIROC4m. As a result, we found that the expansion of the glacial ice sheets modified the climate and

the AMOC mainly through strengthening the surface winds and the surface cooling. With respect to the wind effect, the strengthening of the surface winds intensified the AMOC by enhancing the salt transport to the deepwater formation region via the wind-driven ocean circulation. On the other hand, we find that the stronger surface cooling weakened the AMOC through increasing the sea ice over the northern North Atlantic and Southern Ocean. Hence, we found that the total impact of glacial ice sheets on the AMOC is determined by the relative

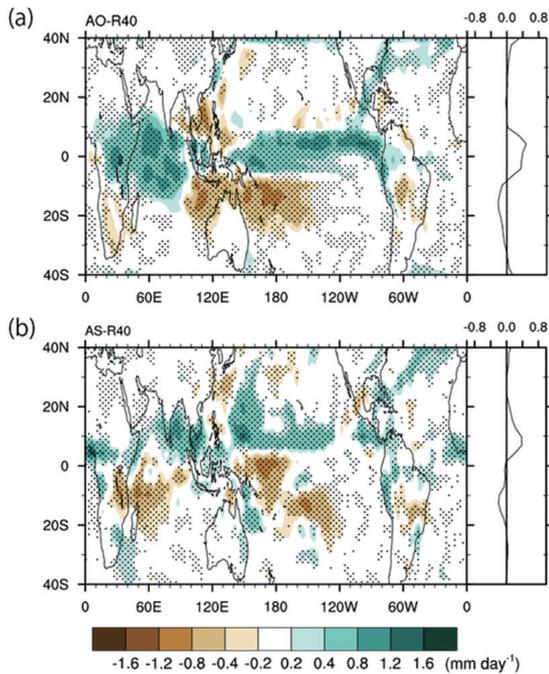


Fig. 1 The difference in precipitation for October-December-January between the late 20th century and the late 21st century (mm day^{-1}): (a) atmosphere-ocean general circulation model; (b) atmosphere general circulation model with a mixed-layer ocean model. Both show the effect of mid-high-latitude warming. The zonal average is also shown on the right panel. The dots indicate the grids with high significance. Redrawn from Figs. 3b and 3d in Yoshimori et al. (2018) (© Copyright 2018 AMS).

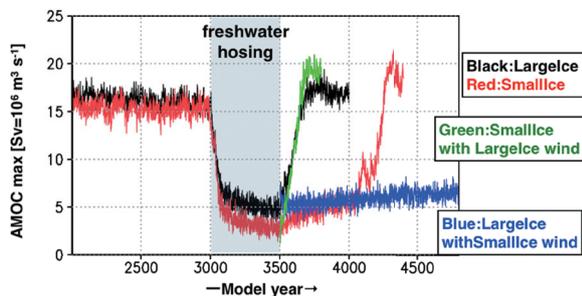


Fig. 2 Responses of the AMOC to glacial ice sheets and freshwater hosing. Freshwater hosing is applied over the northern North Atlantic during year 3000 to 3500. Black and red lines show the response of the AMOC under large and small glacial ice sheets. Results of partial couple experiments are shown in green and blue lines. Blue: the surface wind of Small ice sheet experiment (red line) is applied to the Large ice experiment (black line). Green: the surface wind of Small ice sheet experiment (black line) is applied to the Large ice experiment (red line).

strength of the wind effect and the cooling effect. Further information on the detailed mechanism is published in Sherriff-Tadano (2017, PhD thesis) and Sherriff-Tadano et al. (2018).

3. Abrupt climate change induced by glacial melt water flux

Climate reconstructions indicate that there were abrupt climate changes characterized by abrupt warming and cooling in Greenland during the last deglaciation (20000 years ago). Previous climate modeling studies reproduced these climate signals by an abrupt deep ocean circulation change. However, the glacial meltwater fluxes were reduced prior to the abrupt climate change in their experiments, which contradicted ice sheet reconstructions. In the present study, using an atmosphere-ocean coupled climate model MIROC 4m, 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. The results indicate that abrupt

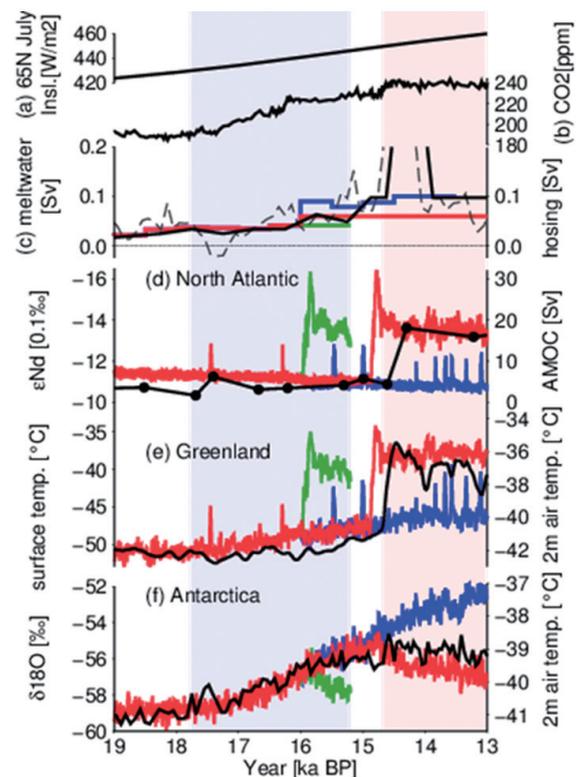


Fig. 3 The model experimental designs and results (red, blue, green lines represents three different experiments) were compared with climate reconstructions (black lines). (a) summer insolation at 65N, (b) atmospheric CO_2 concentration, (c) meltwater flux due to melting of Northern Hemisphere ice sheets, (d) volume transport of Atlantic Meridional Overturning Circulation, (e) Greenland surface temperature, (f) Antarctic surface temperature. The blue and red shades (17.8-15.2 ka BP and 14.7-13 ka BP) represent the periods characterized by colder and warmer climates in the Northern Hemisphere.

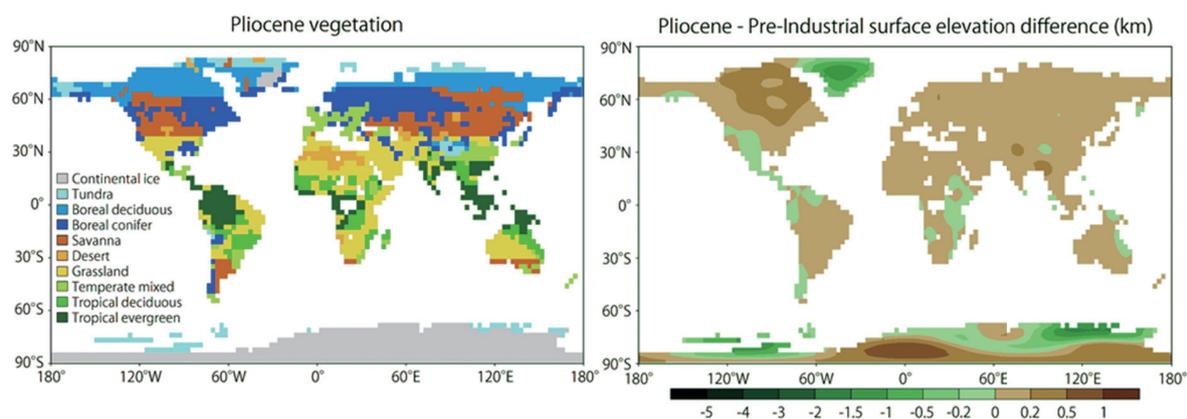


Fig. 4 Late Pliocene vegetation and surface elevation difference based on PlioMIP2 data.

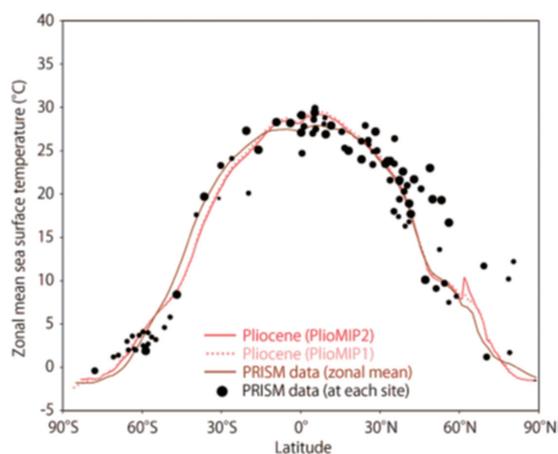


Fig.5 Late Pliocene zonal mean sea surface temperature and proxy data values.

increases in the deep ocean circulation in the North Atlantic can be caused by gradual changes in insolation and greenhouse gas concentrations without changes in meltwater flux. These results suggest that the abrupt climate changes in the deep ocean circulation can be reconciled with ice sheet reconstructions, and the timing of the abrupt climate changes is shown to depend on the flux of meltwater. This study is a portion of the Doctoral Thesis (Obase 2018), and is to be submitted to a refereed journal.

4. Climate simulation of the Late Pliocene warm period

Warm periods of the past provide an ideal opportunity to assess the ability of models to simulate climates under relatively extreme forcings, especially when paleoclimate proxy data are abundant. One such period examined with the mid-resolution MIROC4m AOGCM is the Mid-Piacenzian Warm Period (~3Ma, within the Late Pliocene) which was the most recent time when CO₂ levels were thought to be close to that of today, about 400ppm. Climate simulations are carried out following the protocols set in the second phase of the Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2) (Haywood et al, 2016). Figure 4 shows the vegetation and land elevation changes adopted in PlioMIP2. The zonal mean sea surface temperatures, like previous PlioMIP1 experiments, fall within the range

of proxy data (Fig 5). However, warming over parts of the northern high latitudes is less than that of PlioMIP1, due to the higher elevation across North America. Both changes in CO₂ and surface albedo contribute greatly to warming, especially the latter at high latitudes. However, at these high latitudes, cloud albedo has a strong opposite effect.

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP15J12515, JP15K05280, JP17H06104, JP17H06323 and the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) project.

References

- [1] Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, H. Tatebe, T. Nozawa, and A. Oka (2018): The importance of ocean dynamical feedback for understanding the impact of mid-high-latitude warming on tropical precipitation change. *J. Climate*, 31, 2417-2434. doi:10.1175/JCLI-D-17-0402.1.
- [2] Sherriff-Tadano, S., Abe-Ouchi, A., Yoshimori, M. et al. *Clim Dyn* (2018) 50: 2881. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3780-0>.
- [3] Sherriff-Tadano, S. (2017) Impact of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation and climate, Ph. D. Dissertation, School of science, the University of Tokyo.
- [4] Obase, T. (2018) A climate modeling study on the mechanism of Antarctic ice sheet changes in the past and future, Ph. D. Dissertation, School of science, the University of Tokyo.
- [5] Haywood, A.M., H.J. Dowsett, A.M. Dolan, D. Rowley, A. Abe-Ouchi, B. Otto-Bliesner, M.A. Chandler, S.J. Hunter, D.J. Lunt, M. Pound, and U. Salzmann (2016): The Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) Phase 2: scientific objectives and experimental design, *Clim. Past*, 12, 663-675. doi:10.5194/cp-12-663-2016.