

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}, 尾崎 和海^{*1},
大石 龍太^{*3}, 新田 友子^{*1}, 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}, Alexandre Laine^{*3}, 濱野 勇臣^{*2}, 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所

*3 情報・システム研究機構 国立極地研究所

*4 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野

*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。最終氷期極大期 (LGM) の AOGCM 実験と大気大循環モデル (AGCM) を用いた感度実験の比較によって、北大西洋の海面風速が氷期 - 間氷期サイクルにおける大西洋子午面循環 (AMOC) の強弱に強く影響していることが明らかになった。大気 CO₂ 倍増実験の結果を用いて 3 次元氷床モデルを実行した結果、南極氷床の棚水底面が海洋から受ける熱によって起きる融解の重要性が示された。同じく CO₂ 倍増実験の結果を用いて海洋生物化学モデルを用いた海洋温暖化実験を行い、初期の 500 年は海洋の成層化によって対流が停止するが、続く 500 年で海洋中層の温暖化によって再び対流が起きることがわかった。極域増幅により地球温暖化に先立って極域での温暖化が顕著になると考えられており、先に温暖化した極域から低緯度への影響を与える可能性がある。そこで、人為的に極域での温暖化を弱めた理想化実験を行った結果、南北熱輸送と大気循環の変化を通じて熱帯の降水量に影響が有意にある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, 極域増幅, 南極氷床, 温暖期

はじめに

本研究では、過去と将来を同一の大気海洋大循環モデルプラットフォームで行い、様々な時空間スケールに気候モデルを適用して多角的に検証研究することを通じて、氷期サイクルや温暖期の過去から現在、将来に至る気候変動の統合的な理解を目指す。研究内容と研究手法を以下の4つにわけて記す。(1) 数万から十万年スケールの氷期と間氷期の大気海洋循環の再現を目標として、境界条件である氷床サイズと二酸化炭素などの温室効果ガス濃度、軌道要素 (離心率、近日点の位置、自転軸の傾き) を何通りにも変えた大気海洋大循環モデルによる数値実験を行う。(2) 温暖期の南極では、氷床の融解が過小評価されていた可能性が指摘されており、将来予測における不確実性が注目されているため、南極氷床の安定性における氷床 - 海洋相互作用を検討し過去と将来の南極気候変動を調べる。(3) 鮮新世などの地球史上の温暖期については、大気海洋結合モデル実験や氷床モデルを用いて古気候データの解釈を行なって将来予測に示唆を与える。(4) 時代を問わず温度変化が他地域よりも顕著に大きくなる北半球中・高緯度の変化について、いかに大気循環、特にハドレー循環の変化を通して南半球低緯度の降水分布にまで影響を与えるのかを調べる。シミュレーション結果のエネルギー収支解析から示唆されてきた地球規模

の子午面テレコネクションを数値実験によって検証しそのメカニズムに迫る。

1. 氷期間氷期サイクルに関する研究

大西洋子午面循環 (AMOC) は南北熱輸送を通じて気候形成に重要な役割を果たしており、過去にはその強度が現在と異なっていたことが地質学的証拠から示されている [1]。特に、北半球に氷床が存在する場合の AMOC 形成メカニズム解明は、氷期間氷期サイクルにおける AMOC 変動の理解に重要である。本研究では、大気大循環モデルを用いて行った感度実験の結果を用いて大気海洋大循環モデルで行った最終氷期実験の解釈を行った。その結果、氷期に氷床が拡大した際の表層風の強化には氷床地形によって励起された大気循環変化と海洋の相互作用が重要であることがわかった (図 1)。氷床地形によって励起された大気循環変化は海洋から大気に受け渡される熱フラックスを強化し、この熱フラックスの強化がさらに大気表層風を強化する様に働いていた (図 1c)。この地表風の強化は AMOC を強化するように働いており [2]、強い海洋熱フラックスを維持するように働く。従って、氷床の拡大は北大西洋での地表風 - 海洋熱フラックス - AMOC の結びつきを強化することが示唆された。

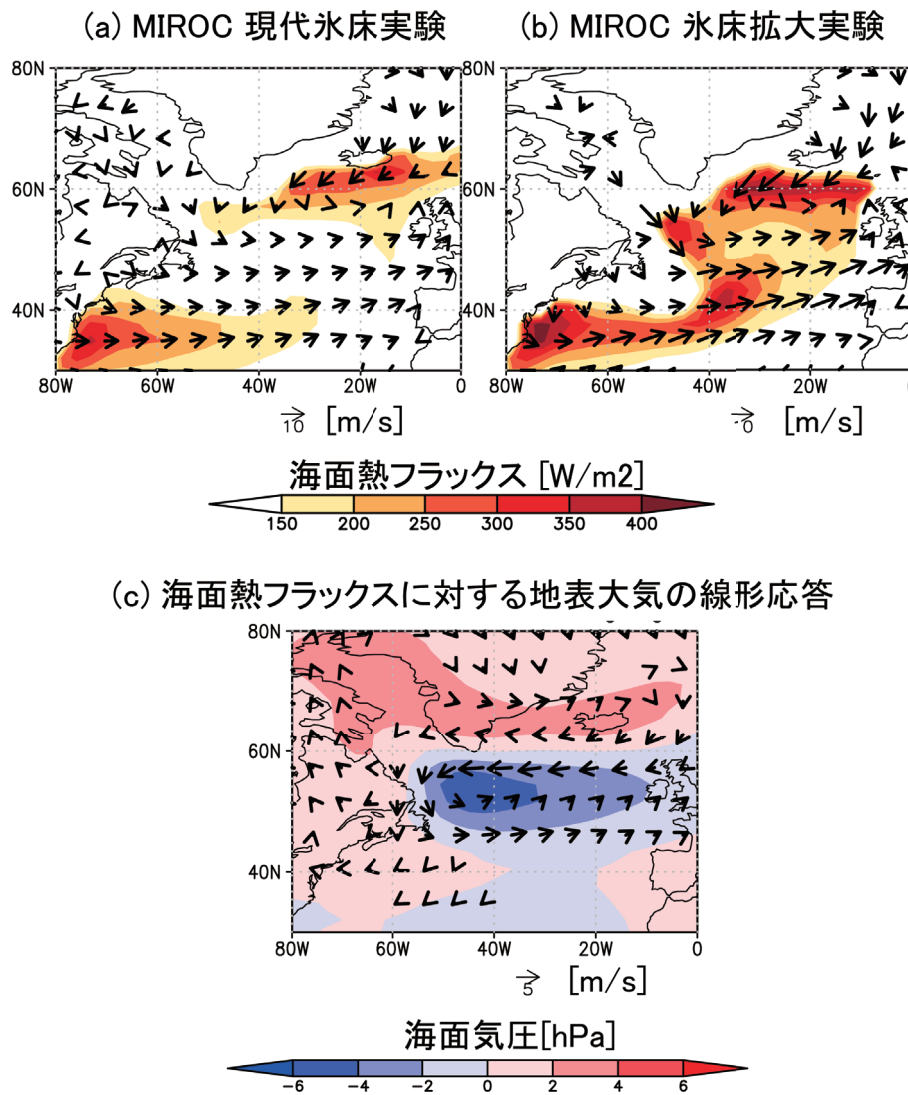


図1 MIROC4m3.2を用いた(a)現代氷床実験、(b)氷床拡大実験での地表風[m/s]と海面熱フラックス[W/m²]、(c)線形傾圧モデルに海面からの熱フラックスに対する加熱を与えた場合の地表風[m/s]と海面気圧[hPa]の応答。

2. 南極氷床に関する研究

将来の温暖化に対する南極氷床の質量変化を考えると、氷床が海水と接する棚氷の底面における融解量の重要性が近年指摘されている[3]。気候モデルでは棚氷の底面融解は考慮されていないため、本研究では棚氷コンポーネントをとりいれた南半球領域海洋モデルとMIROC4mを用いて、現在気候・氷期・CO₂濃度倍増気候下における棚氷底面融解を計算し、気候変化に対する南極棚氷底面融解の変化に寄与しているプロセスを調べた[4]。その結果、温暖気候下では大気的气温上昇によって海水生産が減少し、大陸棚上の海洋の成層が強められることが、南大洋の温暖な海水が棚氷に近づきやすくなって棚氷融解の速度が上がることに對してもっとも重要であることがわかった(図2右)。また、南大洋水温そのものの上昇だけでは棚氷融解速度の上昇が起きないことがわかった(図2左)。

3. 温暖期に関する研究

地球温暖化に伴う海洋深層循環の変動は海洋の熱輸送や物質循環に影響を与えるため重要である。昨年度は

MIROC3.2とオフライン海洋物質循環モデルを用い、南大洋における深層水形成の応答が1000年スケールの溶存酸素濃度の変動に対し支配的なメカニズムであることを示した。今年度はMIROC3.2で南大洋の深層循環を主に駆動しているウェッデル海における深層対流の応答メカニズムを調べた。温暖化実験の初期500年では、降水量の増加や海水融解に伴い表層で著しく低塩化が進み、成層化することで深層対流が停止する。この応答メカニズムはCMIP5モデルでも報告されている[5]。一方、中深層の水温が大西洋起源の水塊の移流により徐々に上昇することで成層が不安定化し、500年以降深層対流が再び形成されることが分かった。(図3) 去年度と今年度の結果を合わせた論文がGlobal Biogeochemical Cyclesに出版された[6]。

4. 遠隔影響に関する研究

一般に、北半球と南半球の気温上昇コントラストや半球間の異なる大きさの放射強制力は、大気のエネルギー輸送の過不足を解消するために、ハドレー循環に変化を生じることが知られている[7][8]。地球温暖化においても、中高緯度は低緯度と比べて気温上昇が大きく、シグナルと

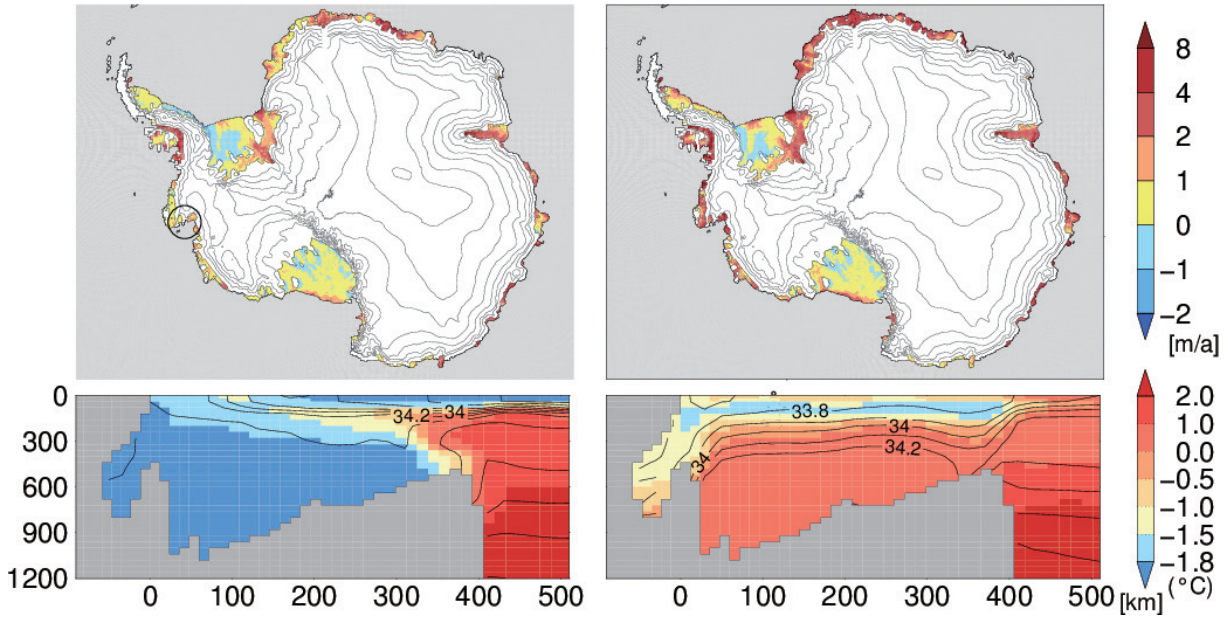


図2 モデルで計算された棚氷底面融解速度の分布（上）と、西南極 Amundsen Sea Sector（上図の○で示される海域）における海洋水温（カラー）・密度（等値線）の断面図（下）。右図がCO₂濃度倍増気候実験で、左図が大気条件だけを現在気候、それ以外の条件をCO₂濃度倍増気候にした実験の結果を示し、大気条件の違いによって、南極から沖合にある温暖な水が大陸棚上に流れ込んで大きな棚氷融解を起こしていることがわかる。

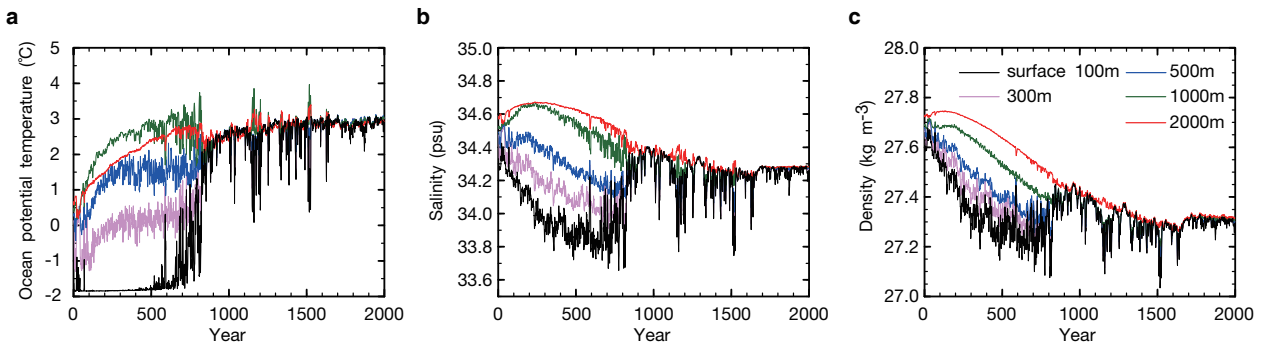


図3 ウェッデル海における深層対流の成層化と対流の回復。4 × CO₂ 実験で1000-2000年において深層対流領域が発達した場所（9月の混合層深度が2000m以上）での(a)水温 (b)塩分 (c)密度の時間発展。各線はそれぞれ異なる深度を示している。表層100m(黒)、水深300m(紫)、水深500m(青)、水深1000m(緑)、水深2000m(赤)。

しても低緯度よりも早期に現れる [9]。そのため、中高緯度の温暖化が低緯度側に遠隔影響を与える可能性が指摘されている [10]。しかし、将来の中高緯度の温暖化の影響を熱帯の温暖化の影響から分離して、明確にこの遠隔影響を示した研究はない。そこで本研究では、中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に与える影響について、ある程度理想化された条件の下で北極の温暖化を抑制または増幅する数値実験を行った。特に冬季において、降雨量が最大になる緯度（熱帯収束帯）の南北移動は1～2度程度であるが、降雨量の変化は緯度にして約20度に渡る範囲で大きく見られた。（図4）この降水分布の変化は、主にハドレー循環の変化によることが定量的に示された。そして、このハドレー循環は南半球低緯度から温暖化の顕著な北半球への熱輸送を減少させる向きに変化していた。

謝辞など

本研究は JSPS 科研費 JP25241005 の助成を受けたものです。

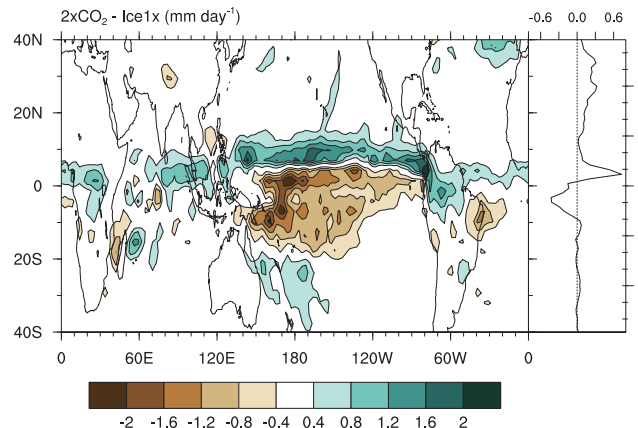


図4 北極温暖化増幅が熱帯の降雨分布に与える遠隔影響の例 (mm/day、12-2月平均)。右図は東西平均。海洋混合層モデルを用いた二酸化炭素倍増実験において、北半球のみ産業革命前標準実験の海水分布を与えた実験。

文献

- [1] E. Böhm, J. Lippold, M. Gutjahr, M. Frank, P. Blaser, B. Antz, J. Fohlmeister, N. Frank, M. B. Andersen and M. Deininger, “Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle.” *Nature*, 517, 73-76, 2015.
- [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 under glacial climate”, in revision.
- [3] “Sea Level Change.” In: *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- [4] Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kusahara, H. Hasumi, and R. Ohgaito, “Response of basal melting in Antarctic ice shelves to climatic forcing under the last glacial maximum and CO₂ doubling climates”, in revision.
- [5] de Lavergne, C., J. Palter, E. Galbraith, R. Bernardello, and I. Marinov, “Cessation of deep convection in the open Southern Ocean under anthropogenic climate change” *Nature Climate Change*, 4, 278-282, 2014.
- [6] Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito, and Y. Yamanaka, “Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming” *Global Biogeochem. Cycles*, 29, 2015.
- [7] Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, “Equilibrium response of an Atmosphere-mixed layer ocean model to different radiative forcing agents: global and zonal mean response.” *Journal of Climate*, 21(17), 4399-4423, 2008.
- [8] Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, “On the link between Hadley circulation changes and radiative feedback processes.” *Geophysical Research Letters*, 48, L20703, 2009.
- [9] Lainé, A., M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi, “Surface Arctic amplification factors in CMIP5 models: land and oceanic surfaces, seasonality.” *Journal of Climate*, 29, 3297-3316, 2016.
- [10] Frierson, D. M. W., and Y. T. Hwang, “Extratropical influence on ITCZ shifts in slab ocean simulations of global warming.” *Journal of Climate*, 25, 720-733, 2012.

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}, Kazumi Ozaki^{*1}, Ryouta O'ishi^{*3}, Tomoko Nitta^{*1}, Kunio Takahashi^{*4}, Rumi Ohgaito^{*5}, Takashi Obase^{*1}, Sam Sherriff Tadano^{*1}, Alexandre Laîné^{*3}, Yujin Hamano^{*2} 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 Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*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. Comparison between Last Glacial Maximum experiments using AOGCM and AGCM indicates that the change in surface wind over the North Atlantic is important for the change in the Atlantic meridional ocean circulation (AMOC) during the glacial-interglacial cycle. The importance of basal melting of the Antarctic ice shelves is revealed in 3-D ice sheet model experiments run with results from a doubled CO₂ AOGCM experiment. By using doubled CO₂ experimental results and an offline biogeochemical model, the response of deep convection in the Weddell Sea is investigated. In the first 500 years, deep convection is prevented by stratification but recovers during the following 500 years due to increasing instability. Initial warming at high latitudes spreading to lower latitudes via teleconnection is thought to be the result of the influence of polar amplification. To investigate this influence in ongoing global warming, we performed a sensitivity experiment in which warming at high latitudes is artificially suppressed. The results show changes in tropical precipitation via changes in the meridional heat transport and atmospheric circulation.

Keywords: AOGCM, paleoclimate modeling, glacial-interglacial cycle, polar amplification, Antarctic ice sheet, warm climate

1. AMOC in glacial-interglacial cycle

The Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) plays an important role in the formation and the maintenance of the climate through its impact on meridional heat transport. Several reconstruction studies have shown that the AMOC underwent several changes over the past glacial-interglacial period [1]. In order to interpret the cause of the variability of the AMOC over the past glacial-interglacial period, it is very important to assess the impact of glacial ice sheet on the AMOC and its mechanism. In this study, we have conducted several sensitivity experiments using an atmospheric general circulation model to interpret the results of last glacial climate simulations performed with the coupled model MIROC. We find that the glacial ice sheet intensifies the surface wind by strengthening the atmosphere-ocean interaction at the North Atlantic mid-high latitudes (Fig. 1). The wind perturbed by the glacial ice sheet topography intensifies the oceanic surface heat flux, and this in turn further intensifies the surface wind (Fig. 1c). The strengthening of the surface wind also intensifies the AMOC [2], which plays an important role in maintaining the strong surface

oceanic heat flux. Therefore, these results suggest that the expansion of the glacial ice sheet strengthens the relationship between surface wind, oceanic heat flux and the AMOC.

2. Response of Antarctic ice sheet to climate change

Basal melting of the Antarctic ice shelves is an important factor in the mass balance and retreat of the Antarctic ice sheet [3]. Basal melting of Antarctic ice shelves in the Last Glacial Maximum, along with equilibrated doubled CO₂ climate are simulated with a circumpolar ocean model capable of resolving Antarctic ice shelf cavities [4]. The ocean model is forced by outputs from MIROC4m (AOGCM) experiments. The results show that under a warmer climate such as that of doubled CO₂ sea ice production along the Antarctic coast decreases as a result of warmer atmospheric conditions. This reduction in sea ice production is essential for the increase in basal melting because cold and dense water above the continental shelf prevents intrusion of warm subsurface water onto continental shelves (Fig. 2, right panel). Warming in the subsurface Southern Ocean alone cannot account for the increase in the basal melt rate (Fig. 2, left panel).

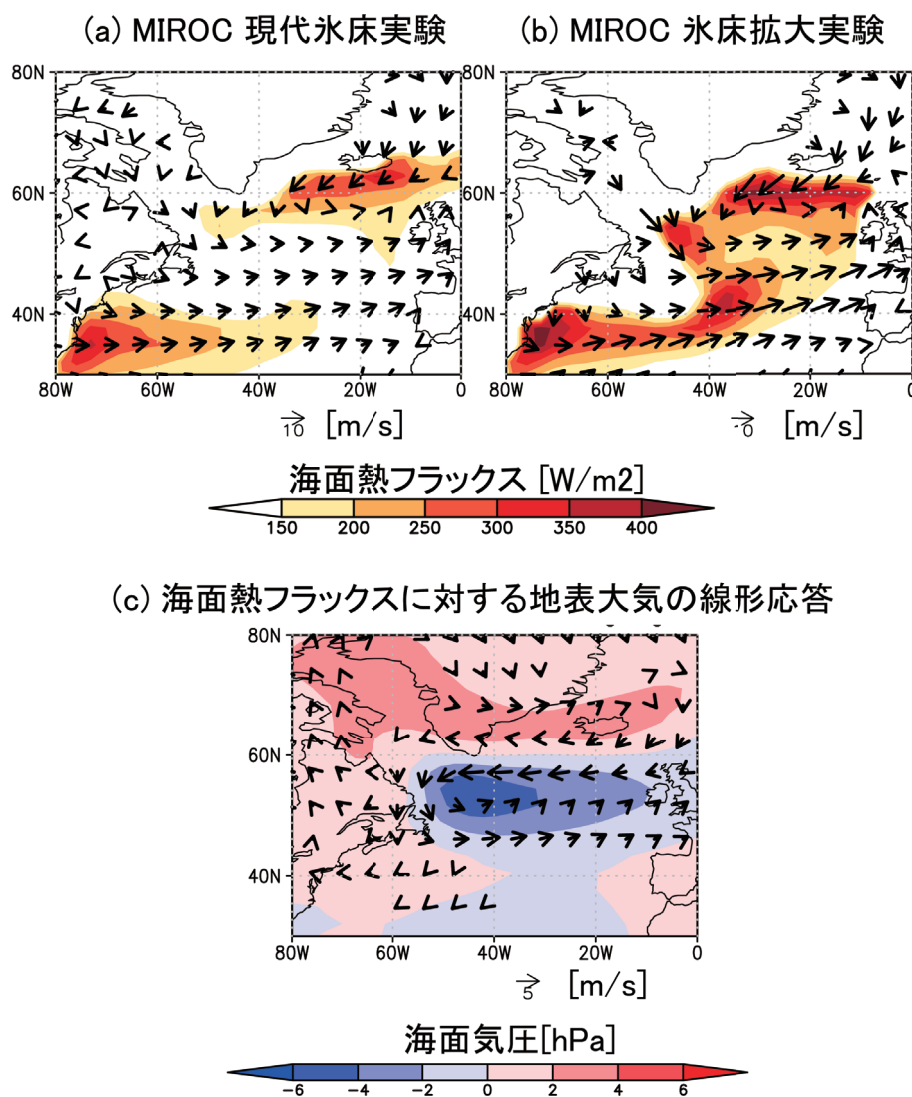


Fig. 1 Surface wind [m/s] and oceanic surface heat flux [W/m²] simulated in the coupled model MIROC. (a) Modern ice sheet experiment and (b) glacial ice sheet experiment. (c) Response of surface atmospheric wind (arrows, m/s) and sea level pressure (colour, hPa) to shallow heat forcing simulated in a linear baroclinic model.

3. Ocean convection in a warm climate

Changes in deep ocean circulation due to global warming have a large influence on oceanic heat transport and ocean biogeochemical cycles. In the previous fiscal year, we demonstrated that the change in Antarctic Bottom Water (AABW) could be the dominant mechanism behind changes in millennial-scale oxygen concentration, using MIROC3.2 and an offline biogeochemical model. In this fiscal year, we investigate the response of deep convection in the Weddell Sea, which is the main mechanism of AABW formation in the model. During the first 500 years, enhanced freshwater input resulting from increases in precipitation and sea ice melt decreases salinity more rapidly near the surface than in the deep ocean, and the resulting enhanced stratification prevents deep convection. This response is also reported in CMIP5 models [5]. After 500 years, instability in the stratification due to deep ocean warming leads to a resumption in deep convection (Fig. 3). These results have been published in *Global Biogeochemical Cycles* [6].

4. Teleconnection from high latitudes

Warming at mid and high latitudes is greater and occurs earlier compared to low latitudes in ongoing global warming. It is suggested that mid and high latitude warming affects the low latitude via a teleconnection mechanism [7,8,9,10]. In our current study, the effect of mid-high latitude warming on the tropical precipitation is investigated by conducting numerical experiments under slightly idealized conditions: the Arctic warming is artificially suppressed or amplified and the response of the tropical precipitation belt to those changes is isolated. The results show that the meridional migration of the intertropical convergence zone, the latitude of the maximum rain belt in the tropics, is only about 1 to 2 degrees. Large changes in the precipitation are, however, simulated across a latitudinal zone as wide as 20 degrees (Fig. 4). It was quantitatively shown that this precipitation change is due to the change in the Hadley circulation in such a way that meridional heat transport from the Southern Hemisphere low latitudes to the Northern Hemisphere, where the large warming occurs, is reduced.

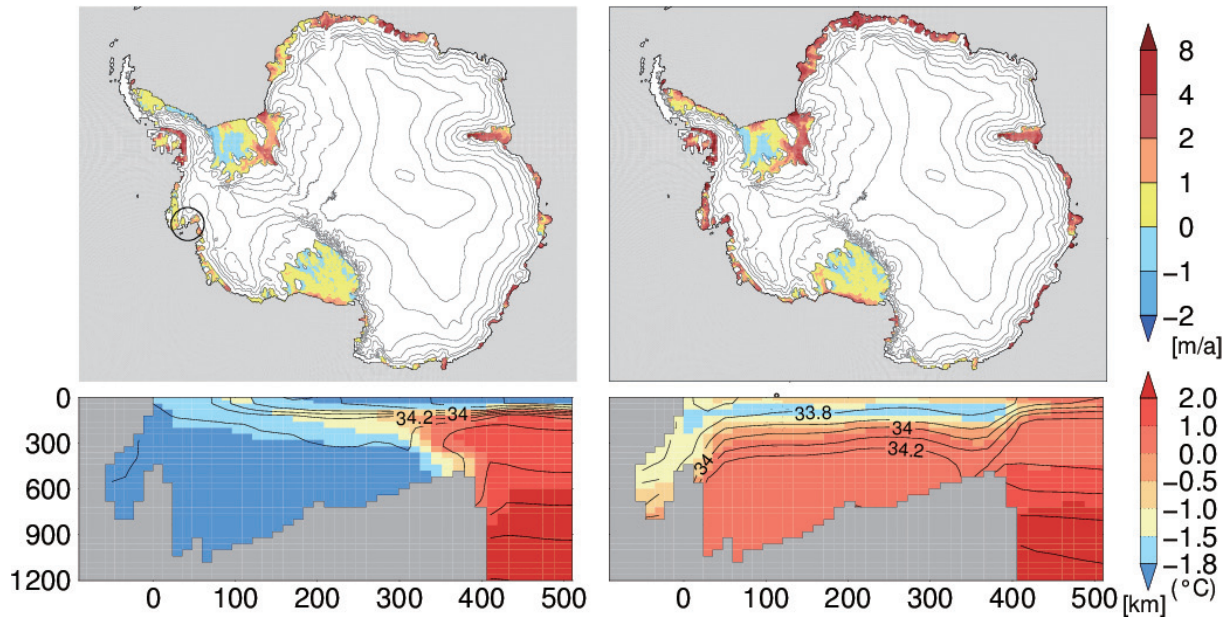


Fig. 2 Spatial distribution of the basal melt rate of ice shelves (top panel) and ocean temperature (color) and density (contour) transect of the Amundsen Sea Sector (bottom panel) are displayed in this figure. The left panel shows the result of $2\times\text{CO}_2$ sensitivity experiment with present-day atmospheric conditions, and the right panel shows the result of the $2\times\text{CO}_2$ experiment. Differences in the atmospheric conditions enable warm deep water off the continental shelf break to flow onto the Antarctic continental shelves.

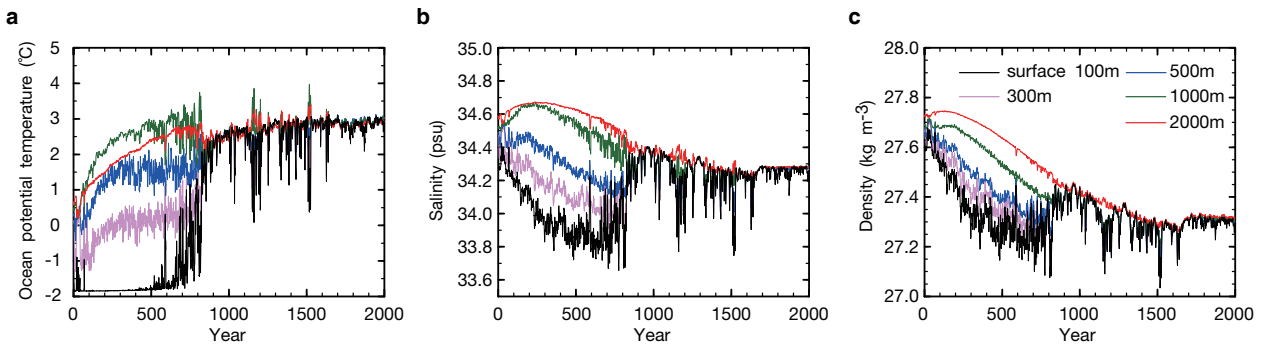


Fig. 3 Stratification and recovery of deep convection in the Weddell Sea. Time series of September (a) potential temperature, (b) salinity, and (c) density for the surface 100 m (black), 300 m depth (purple), 500 m depth (blue), 1000 m depth (green), and 2000 m depth (red) in the convection area where the September mixed layer depth is more than 2000 m in the last 1000 years of the $4\times\text{CO}_2$ experiment.

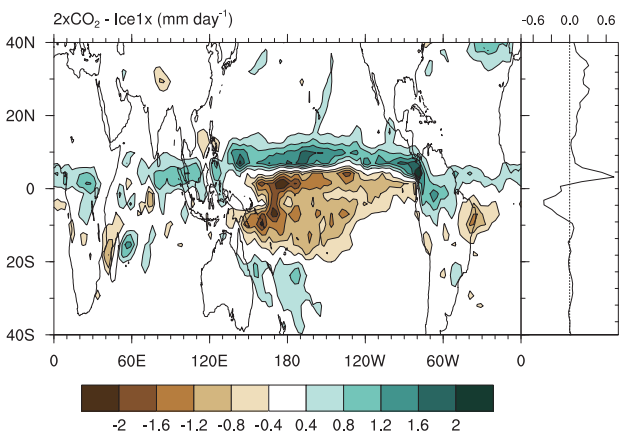


Fig. 4 An example showing the effect of Arctic warming amplification on the tropical precipitation via teleconnection (mm/day, December-January-February average). The panel on the right indicates the zonal average. In this sensitivity experiment, doubled atmospheric CO_2 concentration is applied but Northern Hemisphere sea ice distribution from the preindustrial control simulation is prescribed.

Acknowledgement

This work was funded by the Grants-in-Aid for Scientific Research of Japan Society for the Promotion of Science (No. 25241005).

References

- [1] E. Böhm, J. Lippold, M. Gutjahr, M. Frank, P. Blaser, B. Antz, J. Fohlmeister, N. Frank, M. B. Andersen and M. Deininger, “Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle.” *Nature*, 517, 73-76, 2015.
- [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 under glacial climate”, in revision.
- [3] “Sea Level Change.” In: *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*

Panel on Climate Change.

- [4] Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kusahara, H. Hasumi, and R. Ohgaito, "Response of basal melting in Antarctic ice shelves to climatic forcing under the last glacial maximum and CO₂ doubling climates", in revision.
- [5] de Lavergne, C., J. Palter, E. Galbraith, R. Bernardello, and I. Marinov, "Cessation of deep convection in the open Southern Ocean under anthropogenic climate change" *Nature Climate Change*, 4, 278-282, 2014.
- [6] Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito, and Y. Yamanaka, "Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming." *Global Biogeochem. Cycles*, 29, 2015.
- [7] Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, "Equilibrium response of an Atmosphere-mixed layer ocean model to different radiative forcing agents: global and zonal mean response." *Journal of Climate*, 21(17), 4399-4423, 2008.
- [8] Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, "On the link between Hadley circulation changes and radiative feedback processes." *Geophysical Research Letters*, 48, L20703, 2009.
- [9] Laîné, A., M. Yoshimori, and A. Abe-Ouchi, "Surface Arctic amplification factors in CMIP5 models: land and oceanic surfaces, seasonality." *Journal of Climate*, 29, 3297-3316, 2016.
- [10] Frierson, D. M. W., and Y. T. Hwang, "Extratropical influence on ITCZ shifts in slab ocean simulations of global warming." *Journal of Climate*, 25, 720-733, 2012.