

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}, 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}

^{*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

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 3 つについて研究を行った。(1)北半球氷床モデル IcIES-MIROC を用いて、最終間氷期とひとつ前の間氷期の退氷に対する公転軌道離心率の影響を調べた。その結果、ひとつ前の退氷期の離心率の効果により、退氷期の後半に氷床の縮小が速くなることが分かった。(2)白亜紀における大気 CO₂ 濃度の増加に伴う温暖化による降水量の応答を調べ、その結果を現代の温暖化実験や白亜紀の地質学的な証拠と比較した。その結果、白亜紀に CO₂ 濃度が増加した東アジアでは降水量の減少がみられ、現在の温暖化に伴う応答と逆符号を示した。(3) MIROC4m を用いて、氷期の境界条件下で、古環境記録と整合的な数千年スケールの大気海洋システムの自励振動を再現した。その結果、振動のプロセスには、北大西洋高緯度の海水と亜表層水温の変化が大きく影響していることが分かった。また、本年度は ES3 から ES4 への移行に伴い MIROC4m の ES4 への移植とチューニングを行った。

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

1. 北半球氷床モデルによる 2 つの退氷期の比較

地質記録から、1 つ前の退氷期 (14~13 万年前) は最終退氷期 (2~1 万年前) に比べて海水準の上昇速度が速かったことを示しており、これは北半球の氷床縮小速度が速かったことを示唆している。従来の氷床モデル研究の結果は整合する結果が得られているがその要因までは示されていなかった。本研究では、軌道要素の違いが氷床の後退速度に与える影響を調べるために、北半球氷床モデル IcIES-MIROC を用いて、軌道要素の中の公転軌道離心率を 1 つ前の退氷期のものに変更する実験を行った (図 1a-b)。その結果、北半球氷床の縮小速度が特に退氷期の後半期に速くなり、標準実験と 1.5 倍程度の差が生じる結果が得られた (図 1c-d)。これは、軌道離心率が大きいと退氷期の後半に北半球夏季の日射量と気温が高くなり、氷床の表面融解が促進されるためである (図 1e)。本研究結果は、気候モデル MIROC による実験結果とともに 2 つの退氷期の気候の違いを論じた論文[1]で出版した。

2. MIROC4m で再現された白亜紀の水循環応答

本研究では、大気海洋結合モデル MIROC4m を用いて白亜紀における大気 CO₂ 濃度の増加に伴う温暖化による降水量の応答を調べ、その結果を現代の温暖化実験や白亜紀の地質学的な証拠と比較した。現代から将来の温暖化に伴う予測では、東アジア地域の降水量が増加して湿潤化することが指摘されている一方で、白亜紀の地質学的な研究から同時代で最も温暖な時期であった白亜紀中期における東アジア地域の乾燥化が示唆されている。本研究では、この白亜紀における水循環応答の再現に成功

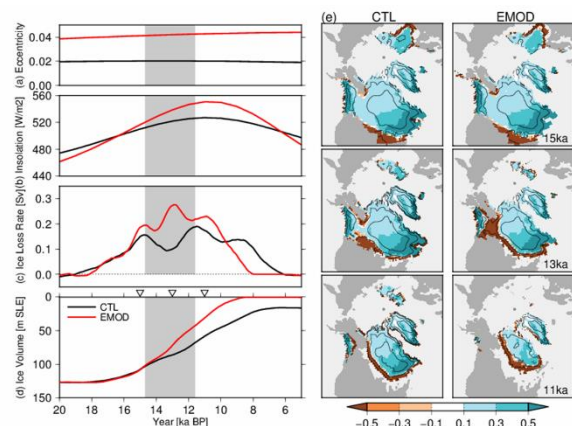


図 1：IcIES-MIROC の実験設定(a-b)と結果(c-e)。軌道離心率を変更した実験[EMOD]は標準実験[CTL]に比べて氷床の後退速度が速く[c]、実験の後半になるにつれて同じ時刻での氷床が小さくなっていることが分かる。[1]の図 4。

するとともに、二つの時代の水循環の応答の違いが温暖化による東アジア地域の降水量の応答が現代と白亜紀で真逆であったため生じていたことを明らかにしました(図 2a,b)。また、この真逆の降水量の応答は、チベット高原の有無による気候場とその温暖化に伴う応答の違いに起因していることを明らかにした(図 2c)。この結果は、“温暖化に伴う地域的な水循環の応答は地理条件に大きく依存する”という、過去の地質時代の気候変動と将来の温暖化予測を対応づける上で重要な示唆を与えるものである。本研究結果は、2021 年 11 月に Geophysical Research Letters に受理され、掲載されている[2]。

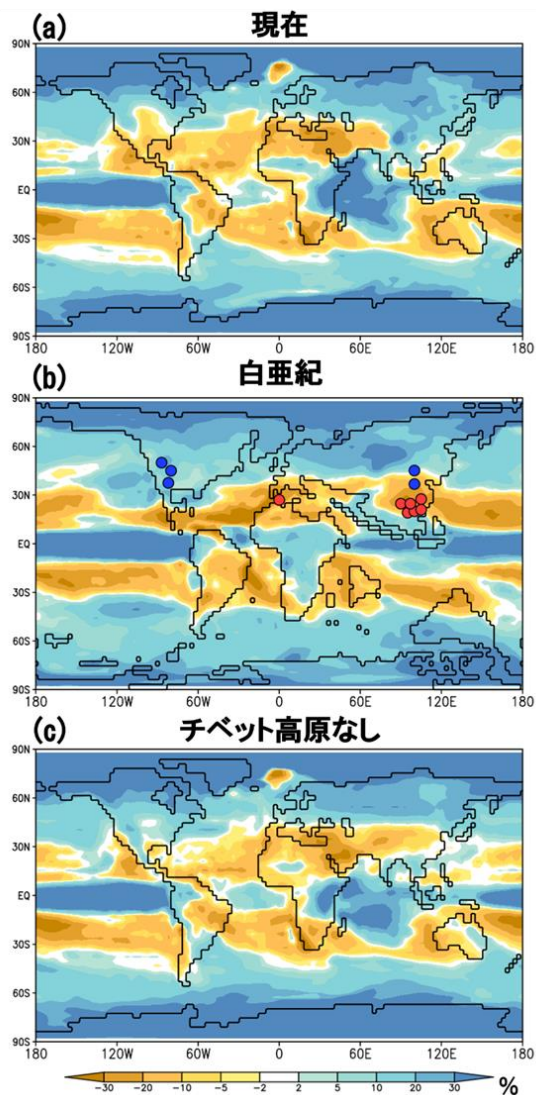


図2：(a)現代、(b)白亜紀、(c)現代の地理条件からチベット高原のみを取り除いた実験で得られた大気 CO₂ 濃度を 2 倍にした時の年平均降水量の変化率(%)。図 b 中には、地質学的な証拠から示される、相対的に寒冷であった前期や後期と比較した時の、特に大気 CO₂ 濃度が高く温暖な白亜紀中期の水循環変化を示している。前期や後期に比べ、白亜紀中期の方が乾燥(乾燥)な環境であった場所を赤(青)の丸で示す。[2]の図 1 より抜粋

3. MIROC4mにおける大気海洋の数千年周期振動

過去およそ 100 万年間の氷期の時代に数千年スケールの全球規模の気候変動が発生していたことが古環境記録から示されている[3,4,5]。本研究は、大気海洋結合モデル MIROC4m を用いて、氷期の境界条件下で、古環境記録と整合的な数千年スケールの大気海洋システムの自励振動をシミュレートした。実験結果の解析から、振動のプロセスには、北大西洋高緯度の海水と亜表層水温の変化が大きく影響していることが分かった(図 3)。さらに、地球が公転軌道上の近日点を通過する時期が冬至の場合と夏至の場合を比較する気候歳差の実験から、後者の場合に、北半球の季節性が強い影響により、大気海洋システムの振動の周期が短くなることを示した。この結果は、

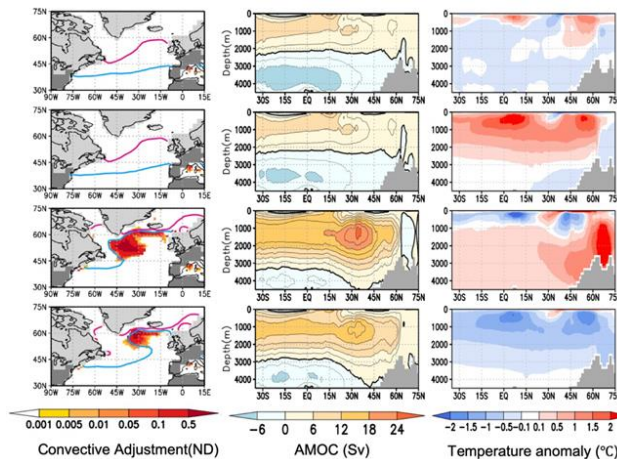


図 3：MIROC4m で計算された数千年スケールの気候振動の一連のプロセス。左から順に 3 月・9 月の海氷縁と年平均対流調節頻度、大西洋子午面流線関数、大西洋東西平均水温の 1 周年平均からの差。[6]の図 2 より抜粋。

数千年スケールの気候変動に影響する 1 要素として地球の軌道要素が重要な役割を果たしており、気候システムにおける季節内の変動がより長期の気候変動を考える上でも重要であることを示唆する。なお本研究成果は、2022 年 3 月に学術誌 Geophysical Research Letters に受理され、掲載されている[6]。

4. MIROC4m の ES4 への移植とチューニング

本年度は、ES3 で気候の過去と将来計算に使用した大気海洋結合モデル MIROC4m を ES4 に移植する作業を行った。MIROC4m は全球の大気海洋循環をプリミティブ方程式に基づいて計算するモデルで、モデルの規模は Fortran15 万行で、問題サイズは大気の格子数 128x64x20、海洋の格子数 256x192x44 である。

移植当初は ES3 よりも計算速度が遅かったが、ftrace を使って計算性能を測定し、コンパイラ指示行などプログラムの変更を行った結果、最終的に ES3 時代と比較して 30%程度少ない時間で計算を行うことが可能になった。

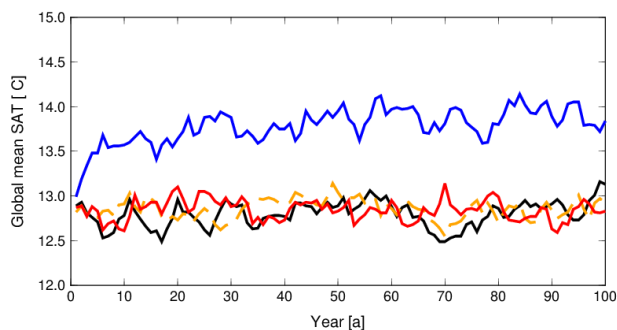


図 4：大気海洋結合 MIROC4m の 100 年間積分で得られた全球平均気温の時系列(産業革命前条件での定常実験)。黒：ES3 での計算結果。青：ES4 での計算結果(初期設定)。橙破線：コンパイル時 save オプションでの計算結果。赤線：コンパイル時 minit-stack=zero オプション、実行時 VE_INIT_HEAP=ZERO オプションでの計算結果。ES4 の橙破線と赤線の結果は ES3 時代の結果を同等に再現しているといえ、中でもより資源を効率的に使うことができる赤線の設定を採用した。

また、当初の設定では、モデルで計算される全球平均気温が ES3 に比べて 1 度程度高くなることがわかった (図 4 青)。これは、本モデルで解くべき問題に必要な精度に対し十分大きい差である。そのため、コンパイラおよび実行時オプションが結果に与える影響を調査した。その結果、局所変数の初期化に関わる箇所を適切に設定することで、ES3 と同等の実験結果を再現できることが分かった (図 4 赤)。このため、本研究課題で対象とする研究を本年度および次年度以降にも実施することが可能になった。

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] Obase, T., Abe-Ouchi, A. and Saito, F.: Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation, *Scientific Reports*, 11, 22359, doi:10.1038/s41598-021-01651-2, 2021.
- [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] Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., and Bond, G.: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364(6434). doi:10.1038/364218a0, 1993.
- [4] Menviel, L.C., Skinner, L.C., Tarasov, L. and Tzedakis, P.C.: An ice-climate oscillatory framework for Dansgaard-Oeschger cycles. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 677–693, doi:10.1038/s43017-020-00106-y, 2020.
- [5] Barker, S. and Knorr, G.: Millennial scale feedbacks determine the shape and rapidity of glacial termination. *Nature Communications* 12, 2273. doi:10.1038/s41467-021-22388-6, 2021.
- [6] 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.

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}, 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}

*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, *4 Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

The MIROC4m AOGCM is used for several paleoclimate experiments and sensitivity experiments. (1) We conducted deglaciation experiment using an ice sheet model IcIES-MIROC to investigate the effect of different orbital elements on the ice sheet retreat rate. A larger orbital eccentricity causes fast retreat of ice sheet in the latter half of deglaciation period. (2) We conducted simulations of the Cretaceous climates with different CO₂ levels using MIROC4m to investigate the hydrological cycle changes as CO₂ is increased. The response of water cycle to elevated CO₂ in the Cretaceous shows opposite to that in the present-day, as indicated in proxy data. (3) A self-sustained oscillations of millennial-scale periodicity in the atmosphere-ocean system, which are consistent with paleoclimate reconstructions. This oscillatory process is significantly affected by changes in sea ice and subsurface ocean temperatures in the high latitudes of the North Atlantic. In this physical year, we also ported and tuned MIROC4m on newly introduced ES4.

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

1. Comparison of two deglaciations using Northern Hemisphere ice sheet model

Geological records indicate that sea level rose faster during the previous deglaciation (140,000 to 130,000 years ago) than during the last deglaciation (20,000 to 10,000 years ago), suggesting a faster disintegration of Northern Hemisphere ice sheets. In this study, in order to investigate the effect of different orbital elements on the ice sheet retreat rate, we conducted an experiment using IcIES-MIROC, in which the orbital eccentricity in the orbital elements was changed to that of one

previous deglaciation period (Figure 1a-b). The results show that the Northern Hemisphere ice sheet disintegrated at a faster rate, especially during the late deglacial period, and that it differs from the standard experiment by a factor of about 1.5 (Fig. 1c-d). This is due to a larger orbital eccentricity causes higher Northern Hemisphere summer insolation and temperatures during the latter half of the deglaciation period, which accelerates the surface melting of the ice sheet (Fig. 1e). The results of this study were published in a paper discussing the climatic differences between the two deglacial periods, together with the experimental results from the deglaciation experiments with climate model MIROC [1].

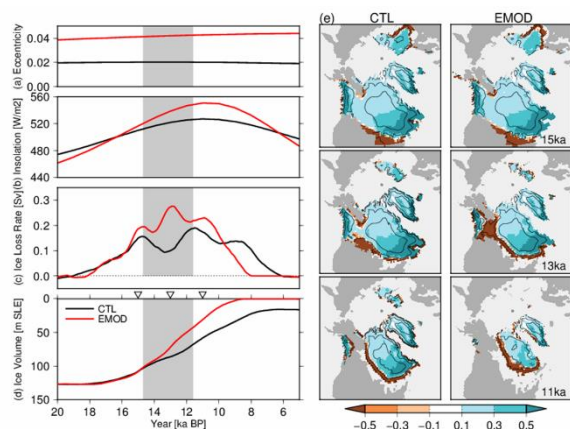


Figure 1: IcIES-MIROC experimental setup (a-b) and results (c-e). The experiment with modified orbital eccentricity [EMOD] has a faster ice sheet recession rate than the standard experiment [CTL] [c], and the ice sheet at the same time becomes smaller later in the experiment. Figure 4 in reference [1].

2. Response of hydrological cycle in the Cretaceous MIROC4m experiment.

This study conducted simulations of the Cretaceous climates with different CO₂ levels using an atmosphere-ocean general circulation model MIROC4m, to investigate the hydrological cycle changes as CO₂ is increased, and compared the warming experiment in the present-day condition and Cretaceous proxy data. Global warming prediction have suggested that, in East Asia, the mean precipitation increases with global warming, leading to more humid conditions. In contrast, Cretaceous proxy data show an aridification in the low latitudes of East Asia during the mid-Cretaceous when CO₂ levels were highest and the climate was warmest. In this study, we succeeded in reproducing

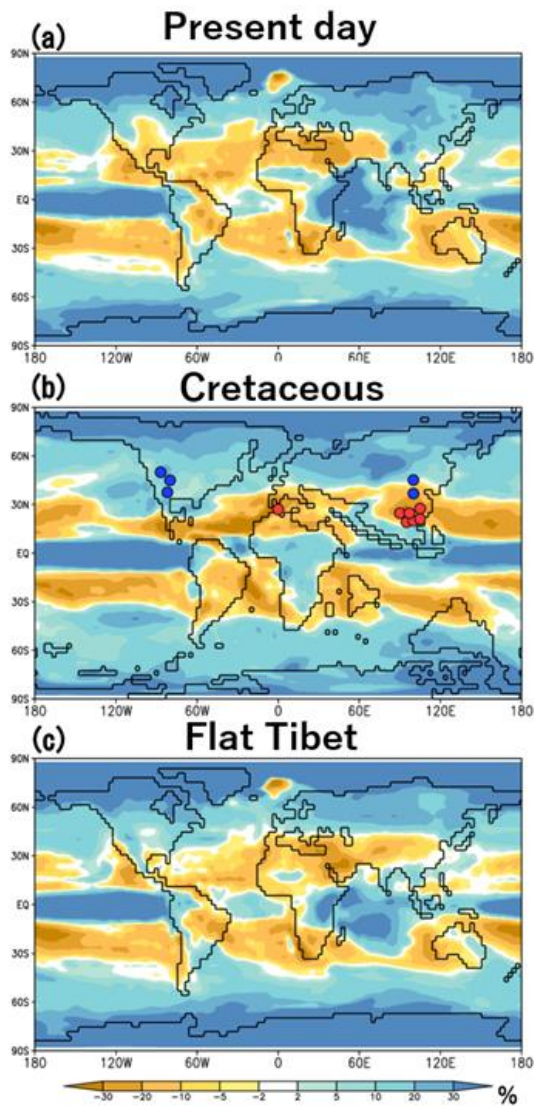


Figure 2: Rate of change in average annual precipitation (%) when doubling the atmospheric CO₂ concentration obtained in (a) Modern, (b) Cretaceous, and (c) Tibet Flat experiment in which only the Tibetan Plateau was removed from modern geographical conditions. Additionally, Figure b shows the changes in the water cycle in the warm mid-Cretaceous, especially when the atmospheric CO₂ concentration is high, when compared to the relatively cold early and late stages, as shown by geological evidence. The red (blue) circles indicate places where the environment was drier in the mid-Cretaceous than in the early and late Cretaceous. Modified from Figure 1 in reference [2].

the water cycle response in the Cretaceous, and clarified the difference in the water cycle response between the present day and Cretaceous arises because the response of precipitation in the East Asia due to warming was the opposite (Figure 2a, 2b). Moreover, it was elucidated that this opposite response is attributed in the difference in the response due to the climate field and its response depending on the presence or absence of the Tibetan Plateau (Figure 2c). This result provides an important suggestion in linking past climate change with future global warming prediction that the regional water cycle response to global warming is highly dependent on geographic conditions.

This research result was accepted and published in Geophysical Research Letters in November 2021 [2].

3. A millennial-scale oscillations of atmosphere-ocean system simulated in MIROC4m

Paleoclimate reconstructions indicate the existence of millennial-scale climate fluctuations with global-scale impacts during the glacial periods over past 1 million years [3,4,5]. Using an atmosphere-ocean general circulation model MIROC4m, we simulated self-sustained oscillations of millennial-scale periodicity in the atmosphere-ocean system, which are consistent with paleoclimate reconstructions. We showed that the oscillatory process is significantly affected by changes in sea ice and subsurface ocean temperatures in the high latitudes of the North Atlantic (Figure 3). Furthermore, we compared the two cases of extreme climatic precession, where the earth passes through the perihelion on its orbit at the winter solstice or at the summer solstice. In the latter case, the effect of stronger boreal seasonality results in a shorter period of oscillations in the atmosphere-ocean system. This result suggests that the Earth's orbital forcings is one of the important factors affecting millennial-scale climate fluctuations, and that intra-seasonal variability in the climate system is important in considering long-term climate variability. This research result was accepted and published in Geophysical Research Letters in March 2022 [6].

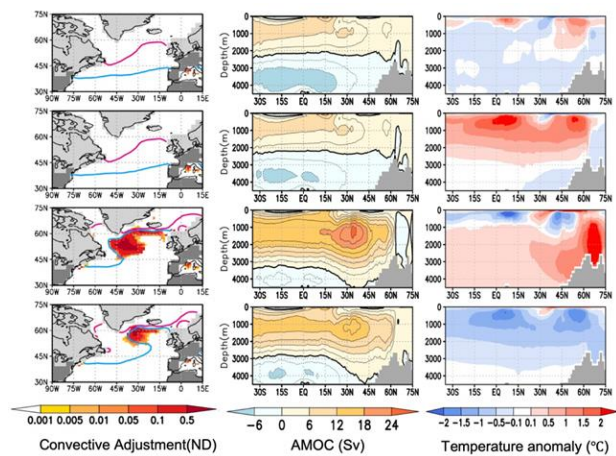


Figure3: Changes in Atlantic Ocean for four stages within one cycle. (Left) Annual mean frequency of convective adjustment (ND: non-dimensional) at 900 m (color shading) and 15% sea ice concentration in March (blue) and September (magenta). (Center) Atlantic meridional overturning circulation stream function. (Right) Atlantic zonal mean potential temperature anomaly with respect to the averages in the cycle. Modified from Figure 2 in reference [6]

4. Porting and tuning of the coupled atmosphere-ocean model MIROC4m on ES4

This year, we have ported the coupled atmosphere-ocean model MIROC4m to ES4. MIROC4m was extensively used in ES3 for past and future climate simulations. MIROC4m is a global atmosphere-ocean circulation model based on primitive equations. The model size is 150,000 lines of Fortran, and the

problem size is 128x64x20 for the atmosphere and 256x192x44 for the oceans. Although the computation speed was slower than that of ES3 at the beginning, we measured the computation performance using `ftrace` and changed the compiler directive lines and other program changes. We finally achieved a computation time of 30% less than that of ES3. In addition, the global mean temperature calculated by the model was about 1 degree higher than that of ES3 in the original setting (Fig. 4 blue). This difference is large enough for the accuracy required for the climate studies, therefore, we investigated the compiler and runtime options. We found the model can reproduce the equivalent results to those of ES3 by appropriately setting the options related to the initialization of local variables (Fig. 4, red).

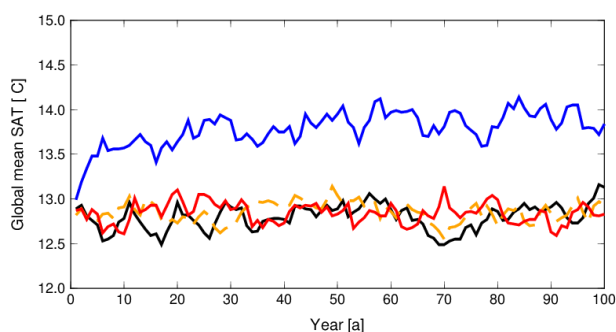


Figure 4: Time series of global mean air temperature obtained from the 100-year integration of the coupled atmosphere-ocean MIROC4m (steady-state experiment under pre-industrial conditions). Black: results from ES3. Blue: results with ES4 (default settings). Orange dashed lines: results computed with the compile-time-save option. Red: compiled with `-minit-stack=zero` option and with `VE_INIT_HEAP=ZERO` run-time option. The red line is the most efficient use of computational resources.

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] Obase, T., Abe-Ouchi, A. and Saito, F.: Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation, *Scientific Reports*, 11, 22359, doi:10.1038/s41598-021-01651-2, 2021.
- [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] Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., and Bond, G.: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364(6434). doi:10.1038/364218a0,

1993.

[4] Menviel, L.C., Skinner, L.C., Tarasov, L. and Tzedakis, P.C.: An ice–climate oscillatory framework for Dansgaard–Oeschger cycles. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 677–693, doi:10.1038/s43017-020-00106-y, 2020.

[5] Barker, S. and Knorr, G.: Millennial scale feedbacks determine the shape and rapidity of glacial termination. *Nature Communications* 12, 2273. doi:10.1038/s41467-021-22388-6, 2021.

[6] 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.