

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}, 渡辺 泰士^{*3}, 齋藤 冬樹^{*2}, 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)前年度の最終退氷期実験と同じ手法を用いて、さらに 1 つ前の退氷期の再現実験を行った。その結果、氷床の融解水流入に起因する大西洋子午面循環 (AMOC) の働きが退氷期後半で重要であった。(2)前年度の最終退氷期実験では固定されていた北半球氷床を現実的な退氷シナリオで与えた再現実験を行った。その結果、北半球氷床に起因する風の影響と熱的な影響が AMOC に対して相反する働きをすることが分かった。(3)鮮新世中期の温暖期の再現実験と感度実験を行い、国際的なモデル比較プロジェクトに貢献した。(4)MIROC の大気モデルを用いて温暖化時の熱帯雲フィードバックを調べ、新たな解釈を提案した。

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. 1 つ前の退氷期のシミュレーション

大気海洋結合モデル MIROC4m を用いた最終退氷期のシミュレーションの手法 (Obase and Abe-Ouchi 2019, OA2019) を用いて、最終間氷期の前に相当する、1 つ前の退氷期 (14~12.7 万年前) のシミュレーションを行った。地球の軌道要素と温室効果ガス濃度の時系列は復元値を用い (図 1a-c, Menviel et al. 2019)、AMOC に重要な北大西洋の淡水流入量は、海水準復元に基づいて、退氷期の前半は最終退氷期と同水準、後半は多い時系列を使用した (図 1d)。その結果、(1)AMOC は退氷期の早い段階で強い状態に変化するという結果が得られ、これは高い地軸傾斜と CO₂ によって生じるとみられること、(2)AMOC は退氷期の後半に再び弱くなり、南極の気温の極大は最終退氷期よりも高くなるという点で古環境データと共通する結果が得られた。以上の結果は、1 つ前の退氷期とその後の間氷期に南極の気温が現在よりも高かった要因について、特に退氷期の後半期における北半球氷床の融解による淡水流入の重要性を示唆するものである。

2. 北半球氷床後退シナリオを用いた最終退氷期のシミュレーション

本研究では、氷床を氷期に固定していた OA2019 の退氷期実験を拡張して、古環境データに基づく北半球氷床後退シナリオ (ICE-6G) を与えた最終退氷期実験を行った。地球の軌道要素と温室効果ガスは OA2019 と同様に時系列を与えた。2.1 万年前 (最終氷期最盛期, LGM) を初期値として 8000 年の連続実験を行った結果、(1) Bolling-Allerod 期に対応する急激な温暖化イベントが、グリーンランドのアイスコアによる復元に基づく温暖化量 (+10°C) を整合的に再現した (図 2)。(2) その一方で AMOC の強い

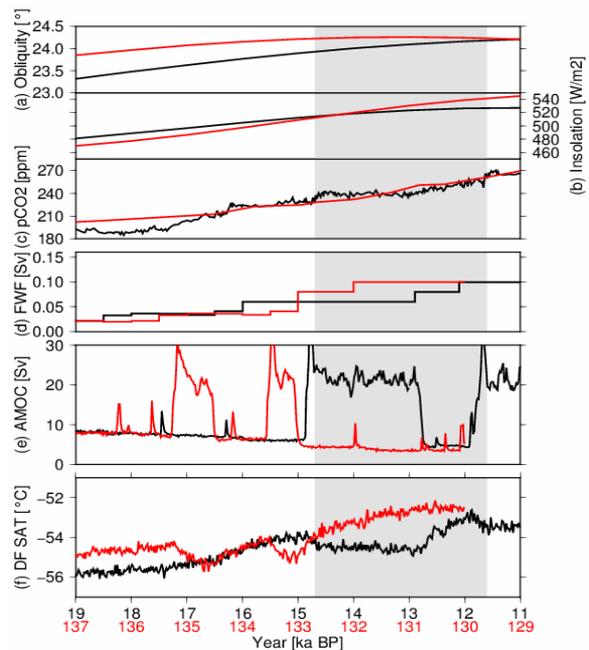


図 1：最終退氷期 (黒) と 1 つ前の退氷期 (赤) の実験結果の比較。(a-d) 実験設定に使用した地球軌道要素、大気中 CO₂、淡水強制、(e-f) 実験結果の AMOC 流量、南極地表気温。灰色は最終退氷期の BA 期 (1.47-1.16 万年前) に対応。MIROC4m の年平均海面水温バイアス (色, K)。(左) 従来のモデル。

期間、グリーンランドのアイスコア復元が示すよりも短くなる結果になった。このような結果になる原因は、北半球氷床の後退に起因する、相反する熱的影響と風の影響を気候が受けるからと考えられる。氷床後退による熱的影響は、北大西洋の海洋を暖めて海水を後退させることを通して AMOC を強化する。その一方で、氷床後退に

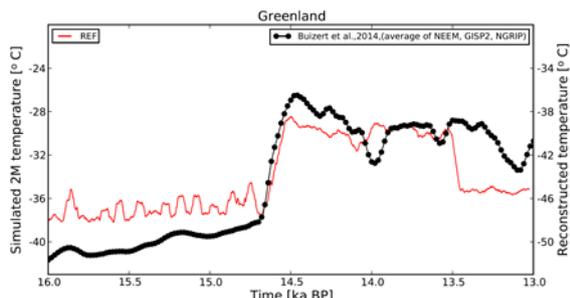


図 2：1.6 から 1.3 万年前までのグリーンランド気温。黒線がアイスコアによる観測値、赤線がモデル結果を示す。147 万年前の Bølling-Allerød に対応する急激な温暖化が再現されている。

よって北大西洋の西風が北上することにより海水が拡大するため、AMOC は弱化する。本研究で見られた実験終盤の AMOC の弱体化は、氷床後退に伴う風の効果の重要性を示していると考えられる。

3. 気候モデルによる鮮新世中期の温暖期の再現

現在から約 300~330 万年前の鮮新世中期の温暖期 (mid-Pliocene Warm Period, mPWP) は、地球史において現在と大気 CO₂ 濃度が同程度に高かった直近の時代であり、この時代を研究することで将来の気候変動に対する知見を得ることができると考えられている。鮮新世中期を対象とした古気候モデル研究と古環境データ研究を統合的に比較することを目的として、鮮新世モデル相互比較プロジェクト (Pliocene Model Intercomparison Project, PlioMIP) が設立された。本研究では、大気海洋大循環モデル MIROC4m を用いて、現在と軌道要素が近い MIS KM5c (320.5 万年前) の間氷期のピークを対象とした PlioMIP2 に基づいた再現実験を行った (Chan and Abe-Ouchi, 2020)。古環境指標による当時の大気 CO₂ 濃度の復元値は不確実性の幅を持つため、本研究では 400ppm の主実験の他に通りかか感度実験を行った。その結果、全球平均した気温・海面水温・降水量の変化は大気 CO₂ 濃度の増加に対してほぼ線形であることが示された。またモデルの境界条件 (海陸配置・標高・植生分布・氷床分布) を当時のものに変化させることによって、CO₂ 濃度に依らず全球平均気温の上昇と降水の増加に寄与する。例として、280ppm では

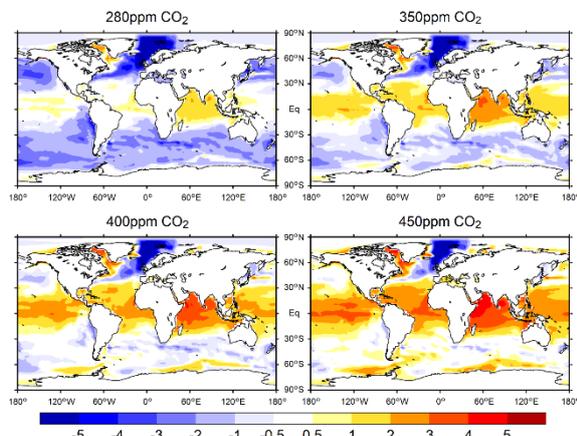


図 3：CO₂ 濃度が異なる場合のモデルで再現された海面水温変化と、観測値 (PRISM3) に基づく海面水温変化の差 (K)

平均気温を 1.1°C 上昇させ、平均海面水温を 0.5°C 上昇させる効果があった。CO₂ 濃度が高い場合でも、古環境指標が大幅な温暖化を示す北大西洋の海面水温変化は比較的小さい。全実験で熱帯の海面水温が温暖化を示したが、古環境指標による復元ではわずかな寒冷化が示されている。この不一致はモデルと比較する際の古環境指標の解釈が難しいことを示しているが、全球海面水温については CO₂ が 350ppm の場合が最も整合的である (図 3)。最近出版された古環境データによる北太平洋の復元値とは、CO₂ 濃度が高い場合に一致度がより高い。

近年の研究では様々なモデル研究グループ間での鮮新世再現実験結果の比較が注目されている。その結果によると、鮮新世における全球平均した気温の上昇と降水の増加、平衡気候感度、地球システム感度 (Haywood et al, 2020)、海氷面積 (de Nooijer et al, 2020) は MIROC4m の全球平均と大規模スケールの結果で多モデル平均値と非常に近い。MIROC4m で北大西洋の温暖化を過小評価する点については、多モデルのほとんどでも見られる (Zhang et al, 2021)。

4. 地球温暖化と熱帯上層雲のフィードバック

古気候シミュレーションや将来予測の大きな不確定要素の一つに、雲の変化に起因するものがある。すなわち、気候の変化に伴って雲がどのように変化し、それがまた気候の変化にどのように影響するのかという過程である。温暖化時の熱帯上層雲の高度変化については、第 1 次近似として、対流圏の温度上昇に伴って、かなとこ雲の雲頂高度 (より正確にはディトレインメント高度) が温暖化前とあまり変わらない温度の高さまで上昇するという理論 (FAT 理論) がある。本研究では、この理論に従った場合の雲変化がもたらす放射効果について MIROC 気候モデルの大気部分を用いて調べ、主に次の 2 つの結論を得た (Yoshimori et al., 2020)。従来から言われているように FAT 理論に基づく長波領域の雲高度フィードバックは正であることが示されたが、同時にこの正の寄与分は温度フィードバックの中に負の寄与としてカウントされているため、本質的には温暖化の程度 (全フィードバック) には寄与しないことを指摘した。また、温度、水蒸気、FAT 理論に基づく雲高度の 3 つのフィードバックは長波領域にお

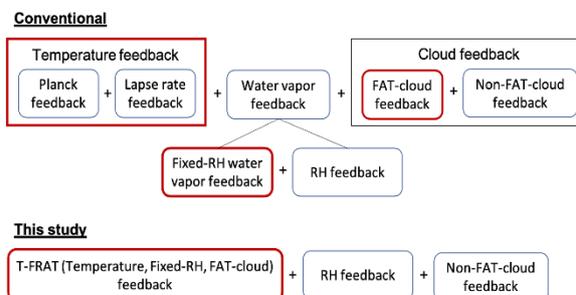


図 4：従来型と本研究で提案された長波放射フィードバックの分解の仕方。RH：相対湿度、FAT：かなとこ雲の雲頂温度一定。詳細については Yoshimori et al. (2020) を参照のこと。従来型で赤枠で囲まれた 3 つのフィードバックを本研究では 1 つのフィードバックとして定義することを提案。

いて密接に関連しているため、これらをまとめた新しいフィードバック (T-FRAT) を提唱し、その利点を示した (図 4)。現在、この関連性について、さらなる実験を行って普遍的な理解に向けて進めているところである。なお、本研究は今より温暖あるいは寒冷な過去の気候変化にも共通する過程を対象としていることから、その関連性は深いと考える。

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(JP19K03968)、科研費(JP17H06104)、科研費(JP17H06323)の助成を受けた。

文献

- [1] Obase and Abe-Ouchi: Abrupt Bolling-Allerod warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2019GL084675, 2019.
- [2] Menviel et al.: The penultimate deglaciation: protocol for Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP) phase 4 transient numerical simulations between 140 and 127 ka, version 1.0, *Climate of the Past*, doi: 10.5194/gmd-12-3649-2019, 2019.
- [3] Chan, W.-L. and Abe-Ouchi, A.: Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2) simulations using the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC4m), 16, 1523-1545, <https://doi.org/10.5194/cp-16-1523-2020>, 2020.
- [4] de Nooijer, W. et al: Evaluation of Arctic warming in mid-Pliocene climate simulations, 16, 2325-2341, <https://doi.org/10.5194/cp-16-2325-2020>, 2020.
- [5] Haywood, A.M. et al: The Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2: large-scale climate features and climate sensitivity, 16, 2095-2123, <https://doi.org/10.5194/cp-16-2095-2020>, 2020.
- [6] Zhang, Z. et al: Mid-Pliocene Atlantic Meridional Overturning Circulation simulated in PlioMIP2, 17, 529-543, <https://doi.org/10.5194/cp-17-529-2021>, 2021.
- [7] Yoshimori, M., F. H. Lambert, M. J. Webb, and T. Andrews: Fixed anvil temperature feedback - positive, zero or negative? *J. Climate*, 33, 2719-2739, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0108.1>, 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}, Yasuto Watanabe^{*3}, Fuyuki Saito^{*2}, 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) We performed a transient penultimate deglaciation experiment. The Atlantic Meridional Ocean Circulation (AMOC) response to freshwater runoff is important in the latter half of deglaciation. (2) We performed a transient last deglaciation experiment using reconstructed changes in ice sheet. The ice sheet change strengthens the AMOC via heat effect, whereas it weakens the AMOC via wind effect. (3) Our contribution to the Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) consisted of a Pliocene simulation and some sensitivity experiments. (4) A new framework of longwave feedback decomposition (T-FRAT) was proposed by analyzing tropical cloud behavior that follows the FAT-theory with the atmospheric component of MIROC.

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

1. Transient simulation of the penultimate deglaciation

Following a method for a transient simulation of the last deglaciation using the atmosphere-ocean coupled climate model MIROC4m (Obase and Abe-Ouchi 2019, OA2019), we conduct a transient simulation of the penultimate deglaciation (about 140 to 127 ka before present) using actual orbital and greenhouse gas forcings (Fig. 1a-c, Menviel et al. 2019). A freshwater flux, which is critical for the AMOC, was kept at the same level in the early part but increased in the later part based on sea level reconstructions (Fig. 1d). The main results of the penultimate deglaciation experiment are (1) The AMOC switches to a strong mode in the early part of the deglaciation (Fig. 1e, red lines) probably due to slightly larger obliquity and CO₂, and (2) The AMOC switches to a weak mode in the later part of the deglaciation and the peak in the Antarctic temperature is significantly higher than in the last deglaciation (Fig. 1f) as in reconstruction. These results indicate the state of the AMOC during the latter half of the deglaciation, affected by meltwater derived from Northern continental ice sheets, is critical for the observed Antarctic temperature during the penultimate deglaciation and the last interglacial.

2. Transient simulation of the last deglaciation using time-evolving ice sheet reconstruction

This work constitutes the next step following the study of OA2019. Here the goal was to use the same setup as OA2019 by incorporating transient evolution of the ice sheet shape (in

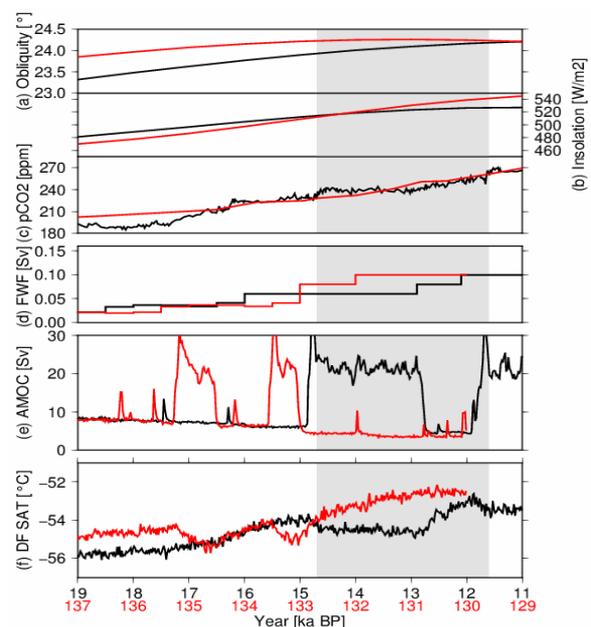


Figure 1: Results of the last deglaciation (black lines) and the penultimate deglaciation experiments (red lines). (a-d) orbital, atmospheric CO₂ and freshwater forcing as the experimental design, (e-f) model results in terms of the AMOC streamfunction and Antarctic surface temperature. The shading corresponds to the period between the onset of Bølling-Allerød and Holocene (14.7 to 11.6 ka BP)

addition to orbital parameters and greenhouse gas concentration), using the most recent reconstruction (PELTIER ICE-6G), while it was fixed to its 21ka shape in OA2019. After running 8000

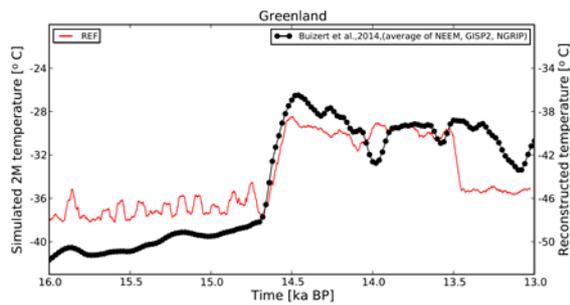


Figure 2: Greenland temperature from 16 to 13 ka: simulation (red, left axis) and reconstruction (black, right axis). The abrupt warmth at about the 14.7 represent the onset of the Bølling-Allerød warm event.

years with a different setup (Last Glacial Maximum to 13ka), our main findings are 1) that an abrupt event still occurs at a timing which is very close to the onset of the Bølling-Allerød (about 14.7 ka, figure 2) with a similar magnitude in Greenland warmth (+10°C) and 2) that the AMOC strong mode cannot be maintained due to the gradual retreat of the Northern Hemisphere ice sheet. Indeed, the principle reason is that the retreat is accompanied by surface warming of the North Atlantic which should favor convection in that region due to lower Arctic sea-ice coverage. On the other hand, the shrinking of the Northern Hemisphere ice sheet induces a northward shift of the westerlies in the northern North Atlantic which favors the expansion of the Arctic sea-ice and inhibits intermediate and deep-convection. It is the latter mechanism which is more important for the AMOC instability in our simulations

3. Climate model simulations of the mid-Pliocene Warm Period

It is thought that the mid-Pliocene Warm Period (mPWP, ~3.3-3.0 Ma) was the most recent time in Earth's history when atmospheric CO₂ concentration was as high as that of present day. Thus, studies of the mPWP climate may provide an insight into how future climate can change. The Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) was established to allow such a study by systematic comparisons of model simulations and reconstructed data. Given the wide range of uncertainty in CO₂ values as suggested by numerous proxy data, we carried out a core Pliocene experiment with 400ppm CO₂ and a series of CO₂ sensitivity experiments (Chan and Abe-Ouchi, 2020) with the MIROC4m AOGCM, following the protocols of the second phase of PlioMIP which focused on the interglacial peak, MIS KM5c (3.205 Ma) as it has near-modern orbital forcing.

These Pliocene simulations show that, globally, surface air and ocean temperatures, as well as precipitation, increases near-linearly with CO₂ concentration. At all CO₂ concentrations, Pliocene boundary conditions alone (i.e. land mask, altitude, vegetation and ice sheet) are responsible for an increase in global temperatures and precipitation. For example, the boundary conditions contribute about 1.1°C and 0.5°C warming to surface

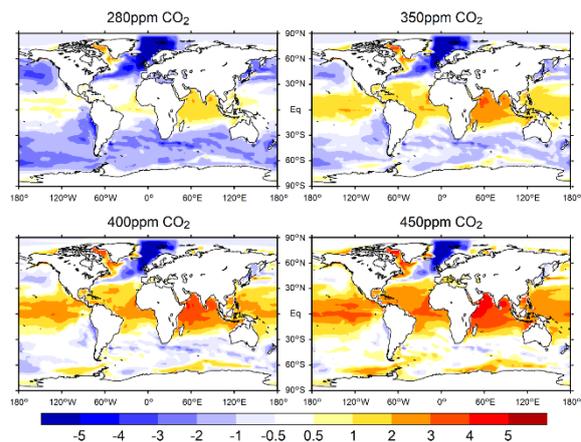


Figure 3: The difference between model SST anomaly and PRISM3-based proxy SST anomaly for Pliocene simulations with different CO₂ concentrations (K).

air temperatures and sea surface temperatures (SST), respectively. Even at higher concentrations of CO₂, model SST anomalies are relatively small in the northern North Atlantic where large warming at the sea surface is suggested by proxy-based reconstructions. Warming is simulated in the tropics for all the experiments whereas proxy-based reconstruction shows slight cooling. The mismatches in these two regions demonstrate the difficulty in reconciling model data with proxy data, but in terms of global SST, 350ppm CO₂ gives the best overall fit (Fig. 3). Better agreement with more recent proxy reconstruction for the Pacific Ocean is seen for higher values of CO₂ concentration (Chan and Abe-Ouchi, 2020).

Recent studies have also focused on comparisons of the core Pliocene experiments by various modelling groups. These show that the MIROC4m simulation exhibits global and large-scale features which are very close to the multi-model mean, for example, global surface air temperature and precipitation increase in the mPWP, equilibrium climate sensitivity, Earth system sensitivity (Haywood et al, 2020) and Arctic sea ice extent (de Nooijer et al, 2020). The underestimate of the northern North Atlantic surface warming in MIROC4m is also seen in most other models (Zhang et al, 2021).

4. Global warming and tropical high-cloud feedback

Cloud change is one important source of uncertainty in paleoclimate simulations and future climate projections. As for the tropical high-cloud response to global warming, there is a first-order theory (FAT theory) which predicts that anvil cloud top altitude (more precisely, detrainment level of anvil cloud) increases so that it maintains nearly the same temperature after global warming. In the current study, we investigated the radiative effect of this cloud change using the atmospheric component of the MIROC climate model, and obtained the following two main conclusions (Yoshimori et al., 2020). As in previous studies, it was shown that FAT-induced longwave cloud altitude feedback is positive, but that the contribution to the radiative impact is included as a negative feedback in the

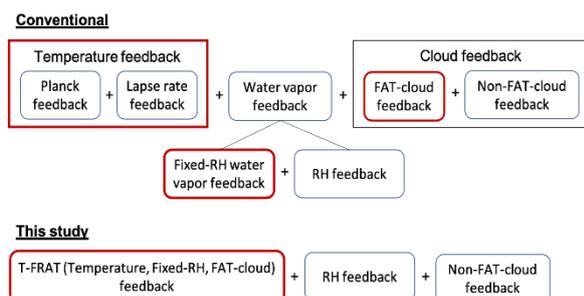


Figure 4: Longwave radiative feedback decompositions in the conventional and new framework proposed in the current study. RH: relative humidity; FAT: fixed anvil temperature. Please see Yoshimori et al. (2020) for the detail. Three terms indicated by red boxes in the conventional decomposition are unified as a single term in the new decomposition.

temperature feedback. Therefore, the net effect does not contribute to the degree of simulated warming (or total feedback). In addition, we proposed a new feedback decomposition (T-FRAT) framework because the three feedbacks of temperature, water vapor, and FAT-induced cloud altitude are co-dependent, and demonstrated its usefulness (Fig. 4). Currently, we are extending the study by conducting further experiments, and aim to reach a more universal understanding of the co-dependency of longwave feedbacks. It is worth noting that this study is also relevant to simulations of paleoclimates warmer or colder than today.

Acknowledgement

This work is partly supported by the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU programme; Grant Number JPMXD0717935715; MEXT), KAKENHI (Grant JP19K03968; JSPS), KAKENHI (Grant 17H06104; JSPS) and KAKENHI (Grant 17H06323; MEXT).

References

- [1] Obase and Abe-Ouchi: Abrupt Bolling-Allerod warming simulated under gradual forcing of the last deglaciation, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2019GL084675, 2019.
- [2] Menviel et al.: The penultimate deglaciation: protocol for Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP) phase 4 transient numerical simulations between 140 and 127 ka, version 1.0, *Climate of the Past*, doi: 10.5194/gmd-12-3649-2019, 2019.
- [3] Chan, W.-L. and Abe-Ouchi, A.: Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP2) simulations using the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC4m), 16, 1523-1545, <https://doi.org/10.5194/cp-16-1523-2020>, 2020.
- [4] de Nooijer, W. et al: Evaluation of Arctic warming in mid-Pliocene climate simulations, 16, 2325-2341, <https://doi.org/10.5194/cp-16-2325-2020>, 2020.
- [5] Haywood, A.M. et al: The Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2: large-scale climate features and climate sensitivity, 16, 2095-2123, [https://doi.org/10.5194/cp-16-2095-](https://doi.org/10.5194/cp-16-2095-2020)

2020, 2020.

[6] Zhang, Z. et al: Mid-Pliocene Atlantic Meridional Overturning Circulation simulated in PlioMIP2, 17, 529-543, <https://doi.org/10.5194/cp-17-529-2021>, 2021.

[7] Yoshimori, M., F. H. Lambert, M. J. Webb, and T. Andrews: Fixed anvil temperature feedback - positive, zero or negative? *J. Climate*, 33, 2719-2739. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0108.1>, 2020.