

## 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<sup>\*1,5</sup>, 吉森 正和<sup>\*1,3</sup>, Wing-Le Chan<sup>\*1</sup>, 山本 彬友<sup>\*2</sup>, 大石 龍太<sup>\*1</sup>, 大垣内 るみ<sup>\*2</sup>, 小長谷 貴志<sup>\*1</sup>, シェリフ多田野 サム<sup>\*1</sup>, 木野 佳音<sup>\*1</sup>, 渡辺 泰士<sup>\*4</sup>, 齋藤 冬樹<sup>\*5</sup>, 小玉 貴則<sup>\*1</sup>

\*1 東京大学大気海洋研究所, \*2 海洋研究開発機構機構モデル高度化研究プロジェクトチーム, \*3 北海道大学環境科学院, \*4 東京大学理学系研究科, \*5 海洋研究開発機構統合的気候変動予測研究分野

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) 鮮新世の温暖

気候を再現するために、MIROC4m を用いて国際モデル比較プロジェクト第2期(PlioMIP2)のプロトコルに基づいた実験を行った。その結果、第1期と比較して海水温の再現性が向上した。また、ベーリン

グ海峡が閉じることで大西洋子午面循環(AMOC)の弱体化が抑制されることが分かった。(2) MIROC4m を用いて、最終氷期から間氷期に生じた急激な気候変化を再現した。その結果、温室効果ガスの増加が主として1.5万年前の AMOC 強化に寄与するが、地軸傾斜の増大も AMOC 強化に寄与していることが示唆された。(3) MIROC4m の大気部分と動的全球植生モデルの結合モデル(MIROC-LPJ)を用い、地軸の傾きと離心率の組み合わせを系統的に変化させる感度実験を行った。その結果、植生-雪-アルベド フィードバックにより軌道要素由来の春先の気温変化が増幅されることが分かった。(4) 海洋物質循環モデルを用いて、海水への溶解度が高い氷河性ダストが生物生産の活性化を通して最終氷期最盛期(LGM)の CO<sub>2</sub>と溶存酸素に与える影響を調べた。その結果、氷河性ダストを考慮することで生物ポンプが強化され、海洋深層の溶存酸素減少が再現された。

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. 大気海洋結合モデルを用いた鮮新世の気候の再現実験

MIROC4m を用いて、およそ300万年前の鮮新世後期 (CO<sub>2</sub>濃度が現在と同程度のおよそ400ppmの時代)の気候を調べている。鮮新世を対象とした気候モデル比較プロジェクト第2期(PlioMIP2)[1]のプロトコルに基づいた境界条件をMIROC4mに取り入れ、海面水温(SST)を地質記録と比較した(図1)。第1期のプロジェクト(PlioMIP1)の設定と比べると、グリーンランド氷床が小さくなっている点、北アメリカ大陸の標高が高くなっている点、ベーリング海峡が閉じている点が重要である。PlioMIP1と同様に、地質記録から示されているグリーンランド海-ノルウェー海の高いSSTは過少である一方、熱帯のSST上昇は過大だった。それでも、熱帯域のSSTの再現性が改善されたことで、SST全球平均値は地質記録に近づいた。鮮新世の気候条件では大西洋子午面循環(AMOC)が弱くなるが、ベーリング海峡が閉じることがAMOCを強化する働きを持つことが示された。

### 2. 最終氷期から間氷期に生じた急激な気候変化に関する研究

MIROC4m を用いて、最終氷期から間氷期に生じた急激な気候変化を再現した。境界条件[2]の相対的役割に着目するため、軌道要素と温室効果ガス(GHG)の一方を氷期(1.8万年前)に固定する実験を行った。その結果、標準実験では1.5万年前に大西洋子午面循環(AMOC)が

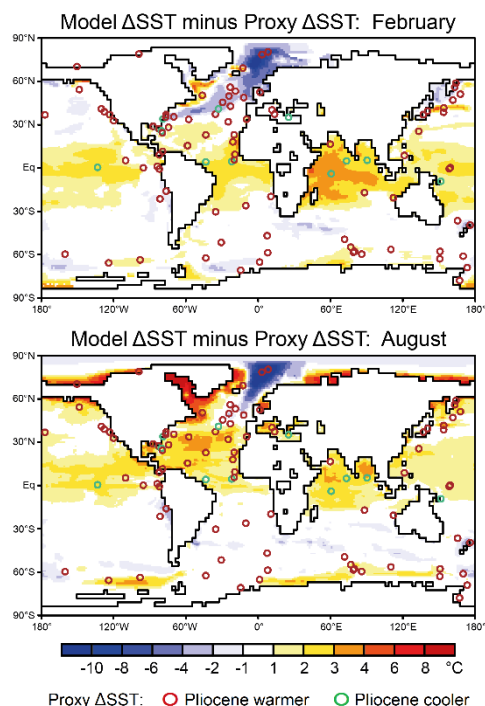


図1：モデルで計算された鮮新世の海面水温（現在気候との差）を、地質記録から示される海面水温と比較した図。丸の色で地質記録が示す海面水温を示している。上段が2月、下段が8月を示す。

回復するが(図 2c 黒線), 軌道要素を固定すると回復時期が 300 年ほど遅くなり(赤線), GHG を固定すると回復しなかった(青線)。この結果から, GHG による温暖化が主として 1.5 万年前の AMOC 強化に寄与するが, 3 万年前の地軸傾斜の極小からの増大も寄与することが示唆された。地軸傾斜の増大は両極域と海洋深層を温暖化させる働きをもち(図 2 右下), 大西洋深層の成層の変化を通して AMOC を強化したと考えられる。

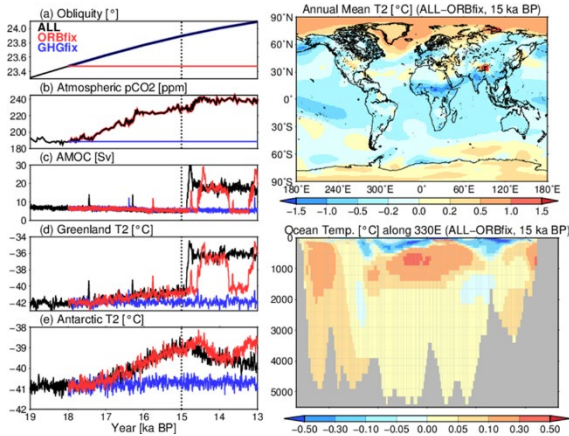


図 2: 実験設定の地軸傾斜(a), 温室効果ガスのうちの CO<sub>2</sub> 濃度(b), モデルで計算された AMOC 流量(c), グリーンランド地表気温(d), 南極地表気温(e), モデルで計算された, 1.5 万年前における標準実験(ALL)と軌道要素固定実験(ORBfix)の地表気温差(右上), 大西洋 330E における海洋水温差の緯度-水深断面図(右下)

### 3. 北半球高緯度陸上の季節応答をもたらす気候フィードバック過程の軌道要素による違い

MIROC4m の大気部分と動的全球植生モデルの結合モデル(MIROC-LPJ)[4]を用い, 様々な組み合わせの軌道要素に基づく日射量変化を境界条件とした感度実験を多数行った。その結果, 高緯度の気温変化の季節性は海陸で大きく異なり, 軌道要素によっても異なった。地軸の傾きが

変化した時の方が, 歳差・離心率が変化した場合より, 北半球高緯度陸上の夏の日射量変化に対する夏の気温変化が大きく, ツンドラ-北方林境界の大幅な北上がみられた。Lu and Cai (2009)の手法[5]で地表面の放射収支を解析したところ, 地軸の傾きの増加をもたらす季節性が植物の成長期にとって有利にはたらき, また春の融雪を促進して植生-雪-アルベドフィードバックを中心とした気候フィードバックの効率的な増幅をもたらすことが明らかとなった。一方, 歳差・離心率が変化した時は, 夏の日射が強くなると同時に春の日射が弱くなることで, 植物の成長期にとって不利にはたらき, また春の融雪の遅延によって気候フィードバックが増幅されにくいことがわかった。

### 4. 氷河性ダストが氷期の CO<sub>2</sub> 低下と溶存酸素減少に与える影響

本研究では海洋物質循環モデル[6]を用いて, 海水への溶解度が高い氷河性ダストが生物生産の活性化を通して最終氷期最盛期(LGM)の CO<sub>2</sub> と溶存酸素に与える影響を調べた。気候のみを LGM にした実験では約 25ppm の CO<sub>2</sub> 低下を引き起こし, 海洋深層における溶存酸素の低下も過小評価した(図 3a)。氷河性ダストなどの影響[7]も考慮した実験では, 生物ポンプの強化を通して CO<sub>2</sub> 低下は約 60ppm となり, 観測された深層の溶存酸素減少が再現された(図 3b)。これらの結果から, LGM における CO<sub>2</sub> 低下と溶存酸素減少に対する生物ポンプの重要性が示された。一方, 南大洋深層の酸素減少は過小評価されているため, 氷期における南大洋の成層化を再現する必要性が示唆された。

### 謝辞

本研究は, 科研費新学術「南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング」(課題番号 17H06323) および科研費基盤 S「過去の大規模な気候変動における氷床・海洋・大気の相互作用の解明」(課題番号 17H06104)の一部として行った。

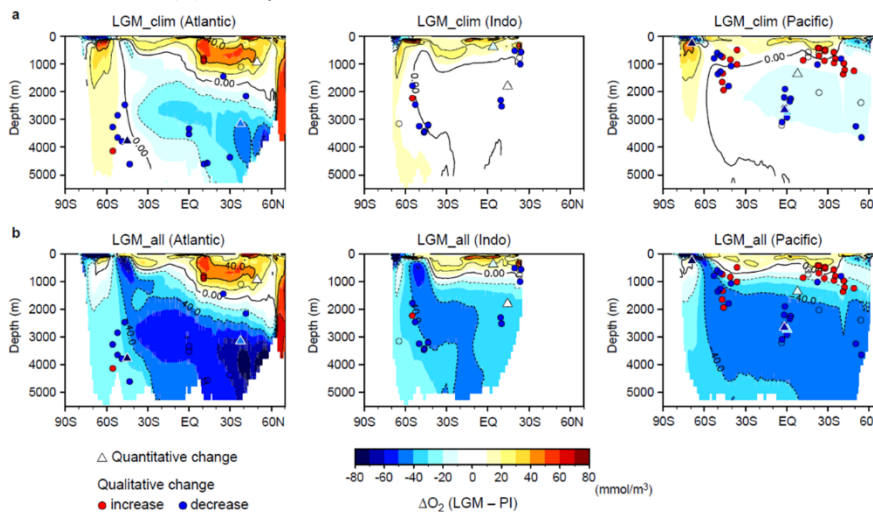


図 3: LGM における現在からの溶存酸素の変化 (a) 気候のみ LGM に変えた場合, (b) ダストも LGM に変えた場合)。左から大西洋, インド洋, 太平洋を示す。丸は定性的なプロキシデータ, 三角は定量的なプロキシデータの値を示す

## 文献

[1] Haywood A. et al. (2016): The Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) Phase 2: scientific objectives and experimental design, *Clim. Past*, 12, 663–675, <https://doi.org/10.5194/cp-12-663-2016>.

[2] Ivanovic, R. F., Gregoire, L. J., Kageyama, M., Roche, D. M., Valdes, P. J., Burke, A., et al. (2016). Transient climate simulations of the deglaciation 21 - 9 thousand years before present (version 1)–PMIP4 core experiment design and boundary conditions. *Geoscientific Model Development*, 9, 2563 - 2587. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2563-2016>.

[3] Liu, W., Liu, Z., Cheng, J., & Hu, H. (2015). On the stability of the Atlantic meridional overturning circulation during the last deglaciation. *Climate Dynamics*, 44(5 - 6), 1257 - 1275. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2153-1>.

[4] Oishi R. and A. Abe-Ouchi (2011): Polar amplification in the mid-holocene derived from dynamical vegetation change in a GCM. *Geophysical Research Letters*, 38, L14072, doi:10.1029/2011GL048001.

[5] Lu, J., and M. Cai, (2009): A new framework for isolating individual feedback processes in coupled general circulation climate models. Part I: Formulation. *Clim. Dyn.*, 32, 873-885.

[6] Yamamoto A, A. Abe-Ouchi, Y. Yamanaka (2018): Long-term response of oceanic carbon uptake to global warming via physical and biological pumps. *Biogeosciences*, doi:10.5194/bg-15-4163-2018.

[7] Ohgaito, R., A. Abe-Ouchi, R. Oishi, T. Takemura, A. Ito, T. Hajima, S. Watanabe and M. Kawamiya, (2018): Effect of high dust amount on surface temperature during the Last Glacial Maximum: a modelling study using MIROC-ESM. *Climate of the Past* 14:1565-1581. doi: 10.5194/cp-14-1565-2018.

# 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<sup>\*1,5</sup>, Masakazu Yoshimori<sup>\*1,3</sup>, Wing-Le Chan<sup>\*1</sup>, Akitomo Yamamoto<sup>\*2</sup>, Ryouta O'ishi<sup>\*1</sup>, Rumi Ohgaito<sup>\*2</sup>, Takashi Obase<sup>\*1</sup>, Sam Sheriff-Tadano<sup>\*1</sup>, Kanon Kino<sup>\*1</sup>, Yasuto Watanabe<sup>\*4</sup>, Fuyuki Saito<sup>\*5</sup> and Takanori Kodama<sup>\*1</sup>

\*1 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, \*2 Project Team for Advanced Climate Modeling, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*3 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, \*4 Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, \*5 Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The MIROC4m AOGCM is used for several paleoclimate experiments and sensitivity experiments. (1) To reproduce the past warm climate in the Pliocene, we used MIROC4m with boundary conditions provided by Pliocene Model Intercomparison Project Phase2 (PlioMIP2). The reproductivity of the sea surface temperature is improved from PlioMIP Phase1. (2) The abrupt climate change between the Last Glacial maximum (LGM) and the Interglacial is predicted by MIROC4m. (3) A vegetation coupled MIROC, MIROC-LPJ, is forced by systematically changed earth's orbital obliquity and precession. (4) The effect of glaciogenic dust upon atmospheric CO<sub>2</sub> level and dissolved oxygen in the ocean is investigated by an ocean biogeochemical model.

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

### 1. Prediction of Pliocene climate by an AOGCM

The late Pliocene climate is investigated by using MIROC4m with boundary conditions derived from PlioMIP2 [1]. An important point about the boundary conditions is how they differ from those of PlioMIP1, namely, the smaller extent of the Greenland ice sheet, the lower altitude of North America and closure of the Bering Strait. The predicted SST is compared with proxy data in Figure 1. As in PlioMIP1, the large increase in SST in the Greenland-Iceland-Norwegian Seas inferred from proxy data is underestimated and the warm tropical SST is overestimated. However, the globally averaged SST has become much closer to the value derived from proxy data due to an improvement in the reproducibility of tropical SST in PlioMIP2. It is also found that closure of the Bering Strait strengthens the model AMOC so that the Pliocene AMOC is now stronger than the Pre-Industrial AMOC, contrary to what was found in PlioMIP1.

### 2. Abrupt climate change between the Last Glacial and Interglacial

We reproduced the abrupt climate change between the LGM and the interglacial by using MIROC4m. To focus on the role of boundary conditions [2] on the abrupt climate change, we performed two sensitivity experiments which are forced by fixed orbital parameters and greenhouse gases (GHGs) at 18,000 B.P. The resultant control experiment shows a recovery of the AMOC (black line in Figure 2), which is delayed by about 300 years with fixed orbital parameters (red in Figure 2). The AMOC does not recover with fixed GHGs (blue in Figure 2).

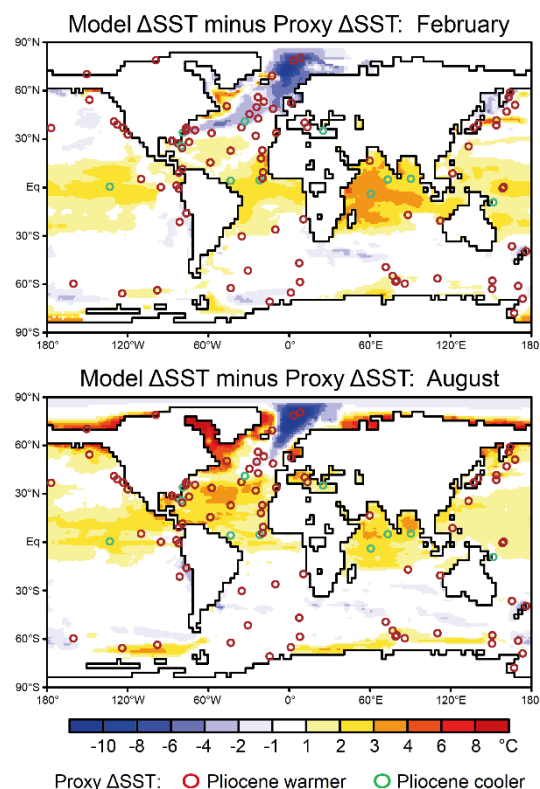


Figure 1: Modeled Pliocene minus Pre-Industrial SST anomaly is compared with that from marine proxy evidence. The color of the circles indicates the sign of change in proxy data. February (upper) and August (lower).



This result suggests that warming due to GHGs mostly contributes to AMOC strengthening at 15,000 B.P., with additional contribution from an increase in obliquity. The strengthening of the AMOC is thought to arise from the change in stratification in the deep Atlantic Ocean due to a warming effect of the obliquity on the polar and deep oceans.

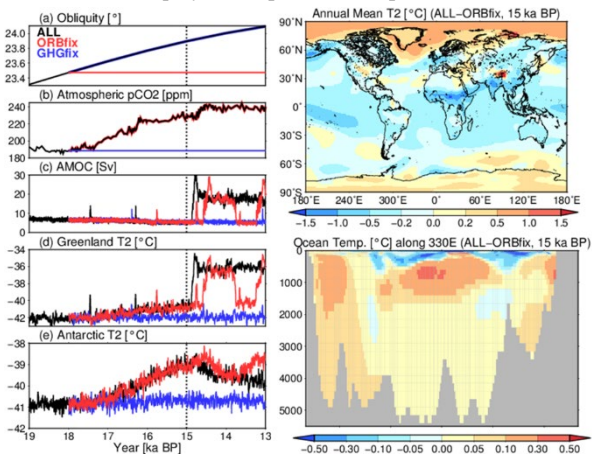


Figure 2: (a) obliquity (boundary condition), (b) atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, used to represent GHGs (boundary condition), (c) AMOC (model result), (d) Greenland temperature (model result) and (e) Antarctic temperature (model result), (top right) difference in surface atmospheric temperature at 15,000 B.P. between the control experiment (ALL) and fixed orbit experiment (ORBfix), (bottom right) as in the top right, but for the ocean temperature difference along a cross-section of the Atlantic Ocean at 330°E.

### 3. Effect of Earth's orbit on seasonal feedback response over northern hemisphere land surface

MIROC-LPJ, a vegetation coupled AGCM with a slab-ocean [4], is used for sensitivity experiments with different solar irradiances induced by systematically modifying the earth's orbital parameters. Two representative results are shown in Figure 3a. The seasonality of the temperature change over high latitude land surfaces differ to that over the ocean. The

temperature response also depends on the orbital parameters. The tundra-forest boundary shows a larger northward shift due to higher temperatures induced by a greater summer solar irradiance caused by the obliquity rather than precession/eccentricity. By introducing a surface radiation balance analysis method (Lu and Cai 2009) [5], the seasonal shortwave anomaly pattern due to increased obliquity amplifies the vegetation-snow albedo feedback in spring through greater vegetation abundance caused by spring and summer warming. On the other hand, the spring shortwave reduction due to the precession/eccentricity effect reduces vegetation growth, delays snow melt in the spring and suppresses vegetation-snow albedo feedback.

### 4. Reduction of atmospheric CO<sub>2</sub> and dissolved oxygen due to glaciogenic dust

We applied an ocean biogeophysical model [6] to estimate the effect of soluble glaciogenic dust on the atmospheric CO<sub>2</sub> level and ocean dissolved oxygen in the LGM, focusing on the change in biological activity. The climate effect of the LGM reduces atmospheric CO<sub>2</sub> by 25ppm and underestimates the reduction of the dissolved oxygen in the deep ocean (Figure 3a). The total effect including LGM glaciogenic dust [7] reduces atmospheric CO<sub>2</sub> by approximately 60ppm and a reduction in the observed dissolved oxygen in the deep ocean is predicted through the enhanced biological pumping effect (Figure 3b). This result indicates the importance of biological pumping in the LGM on the reduction of atmospheric CO<sub>2</sub> and dissolved oxygen in deep ocean. However, underestimation of the reduction of dissolved oxygen in the Southern Ocean suggests that stratification in the Southern Ocean is important.

### Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP17H06104 and JP17H06323.

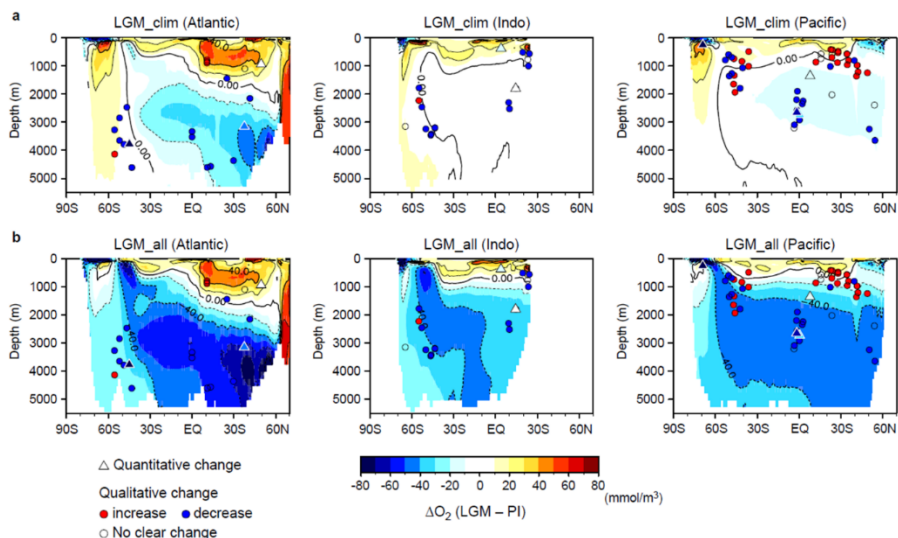


Figure 3: The dissolved oxygen change in the LGM from present-day (a) with LGM climate only, and (b) with LGM climate and dust. The cross-sections refer to the Atlantic Ocean (left), Indian Ocean (center) and Pacific Ocean (right). Circles and triangles indicate qualitative and quantitative proxy data, respectively.

## References

[1] Haywood A. et al. (2016): The Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) Phase 2: scientific objectives and experimental design, *Clim. Past*, 12, 663–675, <https://doi.org/10.5194/cp-12-663-2016>.

[2] Ivanovic, R. F., Gregoire, L. J., Kageyama, M., Roche, D. M., Valdes, P. J., Burke, A., et al. (2016). Transient climate simulations of the deglaciation 21 - 9 thousand years before present (version 1)–PMIP4 core experiment design and boundary conditions. *Geoscientific Model Development*, 9, 2563 - 2587. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2563-2016>.

[3] Liu, W., Liu, Z., Cheng, J., & Hu, H. (2015). On the stability of the Atlantic meridional overturning circulation during the last deglaciation. *Climate Dynamics*, 44(5 - 6), 1257 - 1275. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2153-1>.

[4] Oishi R. and A. Abe-Ouchi (2011): Polar amplification in the mid-holocene derived from dynamical vegetation change in a GCM. *Geophysical Research Letters*, 38, L14072, doi:10.1029/2011GL048001.

[5] Lu, J., and M. Cai, (2009): A new framework for isolating individual feedback processes in coupled general circulation climate models. Part I: Formulation. *Clim. Dyn.*, 32, 873-885.

[6] Yamamoto A, A. Abe-Ouchi, Y. Yamanaka (2018): Long-term response of oceanic carbon uptake to global warming via physical and biological pumps. *Biogeosciences*, doi:10.5194/bg-15-4163-2018.

[7] Ohgaito, R., A. Abe-Ouchi, R. Oishi, T. Takemura, A. Ito, T. Hajima, S. Watanabe and M. Kawamiya, (2018): Effect of high dust amount on surface temperature during the Last Glacial Maximum: a modelling study using MIROC-ESM. *Climate of the Past* 14:1565-1581. doi: 10.5194/cp-14-1565-2018.