

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25241005

研究課題名(和文)地球システムモデリングによる急激な気候変動と氷期サイクルとの相互作用の解明

研究課題名(英文)Understanding the interaction between abrupt climate change and glacial cycle using earth system modeling

研究代表者

阿部 彩子 (Abe-Ouchi, Ayako)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：30272537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,500,000円

研究成果の概要(和文)：10万年周期で交代する氷期サイクルの究極的要因を調べる為に最新の氷床-気候モデルを用いたシミュレーションを行なった。その結果、氷期サイクルは日射変化に対して気候システムが応答し、大気-氷床-地殻の相互作用によりもたらされたものであると突き止めた。また、大気中の二酸化炭素は氷期サイクルに伴って変動し、その振幅を増幅させる働きがあるが、主体的に10万年周期を生み出しているわけではないことも分かった。これらの結果は気候変動の理解を深め、地球温暖化予測に用いられる氷床-気候モデルの信頼性を検証する上で重要な意義がある。また、より普遍的に過去の気候変動の原因を解き明かす道筋が出来た。

研究成果の概要(英文)：We conducted numerical simulations with an ice-sheet model in combination with the general circulation model to investigate the physical mechanisms underpinning the 100,000-year glacial cycles. Our results show that insolation and internal feedbacks between the climate, the ice sheets and the lithosphere-asthenosphere system explain the 100,000-year periodicity. Carbon dioxide is involved, but is not determinative, in the evolution of the 100,000-year glacial cycles. These results are important for deepening the understanding of climate change and verifying the reliability of the ice sheet-climate model used for global warming prediction.

研究分野：古気候学、気候力学

キーワード：氷床 デル 氷期間氷期サイクル 気候変化 急激な気候変化 大気大循環 海洋大循環 大気海洋大循環モ

1. 研究開始当初の背景

(1) 約 100 万年前から約 10 万年周期で氷期と間氷期が交代する気候変動(氷期サイクル)が起きていた。氷期サイクルの究極的要因は地球軌道要素の周期的変動であると考えられるが、個々の気候要素の応答や相互作用といった具体的プロセスは未解明である。また氷期やその終焉期には、急激な温暖化や氷床融解を伴った大気・海洋・氷床・CO₂循環にまたがる数千年間隔の変動が観測されており、その氷期サイクルとの関連性や必然性の有無が議論の的になっている。しかし、急激な気候変動のような短時間スケールのプロセスは、従来の研究では解明できておらず、したがってその氷床変動との相互作用の理解も妨げられている。また、地球粘弾性応答モデルを用いた南北の氷床融解史の推定には、未だに現実的な氷床の形状が考慮されていない。これらの課題を克服するために、個々の課題に対して適切なモデルや組み合わせの手法を開発したうえで、氷期や退氷期、間氷期における両半球の氷床変動や、その気候や海水準への影響を定量的に解明することが、次の重要かつ大きなステップとなる。

2. 研究の目的

(1) 大気海洋結合モデル(MIROC)と両半球の氷床モデル、地球粘弾性応答モデルを組み合わせる手法を開発し、急激な温暖化や融解水パルスといった強い非線形要素や、南北半球間の気候・氷床変動の相互作用を、氷期サイクルの数値実験に新たに取り込む。その上で数値実験と古環境データを統合的に用い、氷期・間氷期サイクルの 10 万年周期の氷床変動、氷期終焉における急激な氷床縮退といった諸現象の要因やメカニズムについての理解を推進する。

(2) それらを通じて、過去から将来にわたる地球軌道要素や大気組成などの強制力に対する両半球の気候と氷床、世界各地の海水準の応答を定量的に解明することで、グリーンランドおよび西南極氷床の安定性を理解し、将来予測の高度化にも大きく貢献する。

3. 研究の方法

(1) 過去 40 万年の日射変動と大気二酸化炭素濃度を、氷床-大気間のフィードバック効果を考慮に入れた氷床-気候モデル(IcIES-MIROC)に与え、過去 40 万年にわたって積分した。過去の氷床変動の再現実験を行なった上で、各種気候要因の役割を個別に調べるための感度実験を行なった。

(2) 最終氷期には数千年スケールの急激な気候変動が数多く起きていたことが分かっており、特に氷期中頃(以下、中氷期)に多いことが最新のアイスコアデータから明らかになった。本研究では大気海洋結合モデル

MIROC4m をもちいて、間氷期、中氷期、最終氷期の気候状態を再現した後に、それぞれ 0.05 スペルドラップの淡水を北大西洋北部に 500 年間与える実験を行なった。アイスコアデータ等の古気候データの再現性を確認した上で、中氷期において急激な気候変動が起きたメカニズムについて調べるために感度実験を行なった。

(3) 氷期において大西洋子午面循環(AMOC)が大きく変動していたことが古気候データから示唆されている。北半球の氷期氷床の存在が AMOC に与える影響を調べる為に、大気海洋大循環モデルを用いて最終氷期実験を実施した。また、大気大循環モデルを用いて感度実験を行い、AMOC の変動を引き起こすメカニズムについて調べた。

(4) 気候変動に対する南極氷床の後退において、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指摘されているが、従来の気候モデルでは棚氷の底面融解は考慮されていない。棚氷コンポーネントを取り入れた南半球領域海洋モデルと大気海洋結合モデル MIROC4m を用いて、現在気候・最終氷期・大気 CO₂ 濃度倍増気候下における棚氷底面融解量を計算し、気候変化に対する南極棚氷底面融解の変化に寄与するプロセスを調べた。

4. 研究成果

(1) 10 万年周期の氷床変動や氷床拡大期における氷床量や地理的分布の再現に成功した。感度実験の結果からは、日射変化に対して大気-氷床-地殻の非線形的な相互作用が 10 万年周期を生み出していることを突き止めた。また、大気二酸化炭素は氷期-間氷期サイクルの振幅を増幅させる働きがあるが、主体的に 10 万年周期を生み出している訳ではないことも示唆された。

さらに日射強度を一定に保ちながら 20 万年ずつ積分することを繰り返した結果、日射強度に対する氷床の平衡応答解が氷床の初期条件によって 2 通りに分かれ、そのヒステリシス構造が北米とユーラシア大陸で大きく異なり、その差が 10 万年周期出現にとって決定的であることを発見した。

これらの結果は Nature に出版され[19]、早くも 72 回の引用回数を得た。また、成果は出版翌日ネイチャー誌とサイエンス誌の 2 誌に注目度の高い論文として取り上げられた。この論文をステップにして、さらに北半球氷床や気候応答特性の空間分布の理解についての研究を進めた。また、氷期氷床の不確実性と最新の知見に関する論文が Geoscience Model Development に出版された[10]。

(2) 中氷期において淡水流入に対する深層循環の弱化や気温の変化が最も大きくなり、ア

イスコアデータと整合的であった。中氷期において淡水流入に対する応答が大きい原因を調べる為に、間氷期の気候条件から大気二酸化炭素濃度または北半球氷床のみを中氷期のものに差し替えた実験を実施した。その結果、二酸化炭素濃度の減少により南極行きを含む地球全体が寒冷化し、深層循環が弱化しやすくなったことが重要であることが示唆された。これまで、気候の不安定性の要因は北半球の大陸氷床の存在とその不安定性にあると考えられていたが、今回の実験によって二酸化炭素が気候の平均状態だけでなく長期的な機構の安定性を決定する重要な要素であることが明らかになった。これらの結果は Science Advances に出版された[2]。これについてプレスリリースを出した結果、国内新聞等の他に海外 Media にも取り上げられた。

(3) 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示された。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。この地表風の強化は AMOC を強化するように働いており、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。これらの結果は Climate Dynamics に投稿し、修正中である。

(4) 氷期と CO₂ 濃度倍増気候の 2 つの気候変化の間で南極域の海水温の現在気候からの変化量は同程度にもかかわらず、南極の棚氷底面融解速度の総量の変化量が大きく異なる結果となった。これは単に海水温の上昇により棚氷底面融解速度が上昇するというような線形な関係ではないことを示している。氷期気候と現在気候では、南極沿岸の大陸棚域では海水生産によって低温・高塩分・高密度の水塊が活発に形成されているため、大陸棚沖の暖かい水が棚氷に近づきにくく、棚氷底面融解の速度が小さくなることが分かった。一方で CO₂ 濃度倍増気候では、海水生産の減少に伴い、低温・高塩分・高密度の水塊形成量が減少する。その為、大陸棚沖の暖かい海水が棚氷に近づきやすくなり、棚氷底面融解速度が大きく上昇したことが分かった。これらの結果は Journal of Climate に出版された[1]

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 23 件)

Obase T, Abe-Ouchi A, Kusahara K, Hasumi H, Ohgaito R (2017) Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO₂ doubling. Journal of Climate, in press, 査読有 DOI:10.1175/JCLI-D-15-0908.1

Dome Fuji Ice Core Project Members: Kawamura K, Abe-Ouchi A, Motoyama H, and 61 others (2017) State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modelling. Science Advances Vol.3, no.2, 査読有 DOI:10.1126/sciadv.1600446.

Yoshimori M, Abe-Ouchi A, Laine A (2017) The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium. Climate Dynamics:1-16, 査読有 DOI:10.1007/s00382-017-3523-2

Bakker P, Schmittner A, (阿部 4 番目, 他 12 人) (2016) Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting. Geophysical Research Letters 43:12,252-212,260, 査読有 DOI:10.1002/2016GL070457.

Yoshimori M, Watanabe M, (岡 4 番目, 阿部 5 番目, 他 3 人) (2016) A review of progress towards understanding the transient global mean surface temperature response to radiative perturbation. Progress in Earth and Planetary Science 3:1-14, 査読有 DOI:10.1186/s40645-016-0096-3.

Berger, A. et al (Past Interglacials Working Group of PAGES, 総勢 31 人) (2016) "Interglacials of the last 800,000 years". Reviews of Geophysics 54:162-219, 査読有 DOI:10.1002/2015RG000482.

Saito F, Abe-Ouchi A, (他 2 人) (2016) SeaRISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet. The Cryosphere 10:43-63, 査読有 DOI:10.5194/tc-10-43-2016.

Chikamoto MO, Timmermann A, (吉森 3 番目, 阿部 6 番目, 他 6 人) (2016) Intensification of tropical Pacific

biological productivity due to volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters* 43:1184-1192, 査読有
DOI:10.1002/2015GL067359.

Lainé A, Yoshimori M, Abe-Ouchi A (2016) Surface Arctic Amplification Factors in CMIP5 Models: Land and Oceanic Surfaces, Seasonality. *Journal of Climate*, 29, 9, 3297-3316, 査読有
DOI:10.1175/JCLI-D-15-0497.1.

10. Abe-Ouchi A, Saito F, (他 9 人) (2015) Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments. *Geoscientific Model Development*, 8, 3621-3637, 査読有
DOI:10.5194/gmd-8-3621-2015.

Yamane M, Yokoyama Y, (阿部 3 番目, 齋藤 5 番目, 他 4 人) (2015) Exposure age and ice-sheet model constraints on Pliocene East Antarctic ice sheet dynamics. *Nature Communications* 6, Article number:7016, 査読有
DOI:10.1038/ncomms8016.

Kusahara K, Sato T, Oka A, Obase T, Greve R, Abe-Ouchi A, Hasumi H (2015) Modelling the Antarctic marine cryosphere at the Last Glacial Maximum. *Annals of Glaciology* 56 (69), 425-435., 査読有
DOI: 10.3189/2015AoG69A792.

Yamamoto A, Abe-Ouchi A, (岡 4 番目, 他 5 人) (2015) Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming. *Global Biogeochemical Cycles* 29:1801-1815, 査読有
DOI:10.1002/2015GB005181.

Kobayashi H, Abe-Ouchi A, Oka A (2015) Role of Southern Ocean stratification in glacial atmospheric CO2 reduction evaluated by a three dimensional ocean general circulation model. *Paleoceanography*, 30, 1202-1216, 査読有
DOI:10.1002/2015PA002786.

Nitta T, Yoshimura K, (阿部 8 番目, 他 7 人) (2014) Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation. *Journal of Climate*., 査読有
DOI:10.1175/JCLI-D-13-00310.1.

Yoshimori M, Watanabe M, Abe-Ouchi A, (他 2 人) (2014) Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Climate Dynamics* 42:1613-1630., 査読有
DOI:10.1007/s00382-013-1875-9.

Yoshimori M, Abe-Ouchi A, (他 3 人) (2014) Robust Seasonality of Arctic Warming Processes in Two Different Versions of the MIROC GCM. *Journal of Climate* 27:6358-6375., 査読有
DOI:10.1175/jcli-d-14-00086.1.

Yamamoto A, Yamanaka Y, Oka A, Abe-Ouchi A (2014) Ocean oxygen depletion due to decomposition of submarine methane hydrate. *Geophysical Research Letters* 41:5075-5083., 査読有
DOI:10.1002/2014gl060483.

Abe-Ouchi A, Saito F, Kawamura K, (他 4 人) (2013) Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume. *Nature*, 500, 190-193, 査読有
DOI:10.1038/nature12374.

Lunt DJ, Abe-Ouchi A, (総勢 28 人 ABC 順) (2013) A multi-model assessment of last interglacial temperatures. *Climate of the Past* 9:699-717, 査読有
DOI:10.5194/cp-9-699-2013.

21 Sueyoshi T, Ohgaito R, (吉森 7 番目, 齋藤 10 番目, 阿部 13 番目, 他 11 人) (2013) Set-up of the PMIP3 paleoclimate experiments conducted using an Earth system model, MIROC-ESM. *Geoscientific Model Development*, 6, 3, 819-836, 査読有
DOI:10.5194/gmd-6-819-2013.

22 O'ishi R and Abe-Ouchi, A. (2013) Influence of dynamic vegetation on climate change and terrestrial carbon storage in the Last Glacial Maximum. *Climate of the Past*, 9, 1571-1587, 査読有
DOI:10.5194/cp-9-1571-2013.

23 Ohgaito R, Sueyoshi T, Abe-Ouchi A, (他 5 人) (2013) Can an Earth System Model simulate better climate change at mid-Holocene than an AOGCM? A comparison study of MIROC-ESM and MIROC3. *Climate of the Past*, 9, 1519-1542, 査読有

DOI:10.5194/cp-9-1519-2013.

〔図書〕(計3件)

日本気象学会 地球環境問題委員会編,
朝倉書店, 地球温暖化-そのメカニズム
と不確実性-, 2014, 168pp, 第10章分
担執筆 p132-149 (阿部)

阿部彩子(共著), 丸善出版, 2014, 地
球温暖化の事典, 2014, 435pp

阿部彩子(共同編集), 朝倉書店, 図説
地球環境の事典, 2013, 378pp

〔その他〕

ホームページ等

<http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~abeouchi/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

阿部 彩子 (ABE-OUCHI, Ayako)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号: 30272537

(2)研究分担者

川村 賢二 (KAWAMURA, Kenji)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号: 90431478

齋藤 冬樹 (SAITO, Fuyuki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・統合
的気候変動予測研究分野・技術研究員
研究者番号: 60396942

Greve Ralf (GREVE, Ralf)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 90374644

吉森 正和 (YOSHIMORI, Masakazu)
北海道大学・地球環境科学研究所・准教授
研究者番号: 20466874

(3)連携研究者

羽角 博康 (HASUMI, Hiroyasu)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号: 40311641

芳村 圭 (YOSHIMURA, Kei)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号: 50376638

大河内 直彦 (OHKOUCHI, Naohiko)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・基幹
研究領域生物地球化学研究分野・分野長/
上席研究員
研究者番号: 00281832

岡 顕 (OKA, Akira)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号: 70396943

奥野 淳一 (OKUNO, Jun'ichi)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号: 00376542