

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287112

研究課題名(和文) 氷期気候変動を駆動した海洋深層変動に関するモデリング研究

研究課題名(英文) Modeling the deep ocean circulation which controls the glacial abrupt climate changes

研究代表者

岡 顕(Oka, Akira)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：70396943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：数十～数千年の長期気候変動の鍵となる海洋深層の変動メカニズムとその気候への影響の理解を目指し、大気大循環モデル、海洋大循環モデル、簡易気候結合モデル、海洋炭素・物質循環モデルなど、さまざまな数値モデル群を用いて氷期気候変動に関する数値シミュレーションを実施した。氷期において提唱されている海洋深層循環の3つの形態(モード)に注目し、それらを適切に再現でき、かつ長期時間積分が可能な気候シミュレーション手法の確立を試みるとともに、D0イベントとして知られる氷期における急激な気候変動を理解するためのさまざまな数値シミュレーションを実施した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand long-term (decadal to millennia) ocean variability, this study conducted numerical simulations focusing on glacial climate by using various models such as atmosphere, ocean, and ocean carbon/biogeochemical models. The three modes of the glacial Atlantic deep circulation are especially focused: we tried to establish the method for performing the long-term simulation with appropriately reproducing these three modes, and conducted various sensitivity simulations for understanding the glacial abrupt climate changes known as D0 events.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋深層循環 海洋炭素循環 氷期気候変動

## 1. 研究開始当初の背景

2013年に公開されたIPCC第5次報告書での新見解として、地球温暖化のシグナルが海洋深層でも観測されるようになったことが指摘された。海洋深層との熱のやりとりは、今後の地球温暖化の進行とも深く関わってくる問題であり、実際に西暦2000年以降の地球温暖化の停滞との関連を指摘する研究もある。海洋深層は、数十～数千年の長期気候変動を考える上で最も重要な要素であるが、海洋の深層はこれまでに観測が困難であったことから、その変動の全容については、いまだ不明な点が多い。一方、そのような海洋深層の変動については、古気候・古海洋分野からの地質データにより、近年になって次々と新しい知見が集まってきている。

## 2. 研究の目的

本研究では、とくに近年のデータの蓄積が目覚ましい氷期気候変動に着目し、数十～数千年の長期気候変動の鍵となる海洋深層の変動メカニズムとその気候への影響の理解を目指した研究を行う。そのために、大気大循環モデル、海洋大循環モデル、簡易気候結合モデル、海洋炭素・物質循環モデルなど、さまざまな数値モデル群を用いた研究を展開する。本研究では、氷期において提唱されている海洋深層循環の3つの形態(モード)を適切に再現でき、かつ長期時間積分が可能な気候シミュレーション手法を確立し、それにより「退氷期における温暖化イベント(B/A期)や寒冷イベント(YD事件)」および「DOイベントとして知られる氷期における急激な気候変動」をターゲットとした数値シミュレーションを実施する。それらの結果から、氷期気候変動における海洋深層変動の役割を明らかにし、将来の長期気候変動についての知見を深めることを目指す。

## 3. 研究の方法

研究のターゲットとなる課題を次のように設定して研究を遂行する。

- ・課題1：現在と最終氷期最大期(LGM)における平均的な気候状態の再現シミュレーション
- ・課題2：LGMから現在にかけての遷移過程(退氷期)の再現シミュレーション
- ・課題3：氷期における急激な気候変動(DOイベント)に着目した感度実験による仮説の検証

課題1では、氷期において提唱されている大西洋深層循環の3つの形態(モード)をモデルで適切に再現する際に鍵となる、LGM気候状態についての再現シミュレーションを実施する。3つのモードのうち「亜間氷期モード」は現在の平均気候状態、「亜氷期モード」がLGMの平均気候状態に対応し、さらに、氷

床からの大量の淡水流入によって生じる「オフモード」とで、氷期における大西洋深層循環の3つのモードが形成されると考えられている。研究代表者は「亜間氷期モード」と「亜氷期モード」の違いは、熱塩循環の熱的な閾値によって生じていると考えているが、その閾値がどのようにコントロールされているかなど、詳細なメカニズムを検証する必要がある。本課題では、IPCC第5次報告書における主要モデルのひとつであるMIROC5の大気モデルを利用したLGM再現実験についても実施し、LGMにおける大西洋深層循環の弱化がモデルで適切に再現できるかを検証する。また、応募者が開発を進めてきた海洋炭素循環・物質循環モデルを併用して利用し、海洋炭素循環についてのシミュレーションを実施し、氷期における大気二酸化炭素濃度変動への海洋炭素循環の役割を評価するための研究を遂行する。

課題2では、長期時間積分が可能な簡易気候モデルMIROC-liteを利用する。MIROC-liteについては、課題1で得られた結果を参考にし、氷期において提唱されている海洋深層循環の3つのモードを適切に再現できるようモデルの改良を試みる。そのうえで、LGMから現在にかけての遷移過程である退氷期の気候シミュレーションを実施することを目指す。

課題3では、DOイベントに着目したさまざまな感度実験を行い、大西洋深層循環の熱的な閾値がDOイベントに関連した可能性を検討する。課題1で得られたLGMの平均状態が熱的な閾値を超えるにはどのような条件が必要かを、海洋大循環モデルを用いて風応力や熱的な境界条件をさまざまに変えた感度実験を行うことで検証する。

## 4. 研究成果

「課題1」について、MIROC5の大気大循環モデルを用いた現在およびLGMについての再現シミュレーションを実施した。さらに、現在およびLGMについてのこれらの再現シミュレーションの結果から、それぞれの海面境界条件を作成し、その境界条件のもと、海洋大循環モデルによる現在および氷期における大西洋深層循環の再現シミュレーションを実施した。その結果、古海洋データの記録に反し、「亜氷期モード」に対応する弱化は再現されず、氷期において大西洋深層循環が強化する結果となった。この結果は、以前のMIROC3における結果と同様なものとなり、MIROC5を用いた場合でも、古海洋データから示される氷期における大西洋深層循環の弱化を再現することは容易ではなかった。そのため、弱化をうまく再現するための改良が進んでいる。MIROC3の結果を中心として研究を遂行した。LGMにおける海洋炭素循環の再現シミュレーションについては、MIROC3の結果を海面境界

条件とし、海洋大循環モデルおよび海洋物質循環モデルを用いることで実施した。氷期における南大洋の成層の変化が大気二酸化炭素濃度と与えた影響を評価した研究結果は、国際誌へ掲載された。さらに、海洋堆積モデルの開発を進めた結果、最終年度において概ね完成し、海洋大循環モデルへの組み込みも完了した。それにより、これまでの海洋大循環モデルによる氷期炭素循環の再現において陽に考慮されることが少なかった炭酸塩補償過程を直接考慮した実験が可能となった。今後、海洋炭素循環の果たす役割をより定量的に評価するためのツールとして利用できることが期待される。

「課題2」に関連して、簡易気候モデルMIROC-liteをMIROC3の結果に基づき短波放射の扱いなどについての改良を行った。近年の海洋熱吸収変化とその全球気温変化への影響について着目し、MIROC-liteに赤道の風応力偏差を与えて全球平均気温への影響をシミュレートしたところ、MIROC5と同様な再現ができることを確認した。この結果についての解析は国際誌に投稿し受理された。このモデルを用いた退氷期のシミュレーションについては、研究期間内では予備的な実験を実施するとどまったが、古気候研究のみならず近年の海洋変動についてのプロセス研究にもMIROC-liteを有効に利用できることが示された。

「課題3」について、MIROC3の結果から作成した海面境界条件を利用し、海洋大循環モデルによる感度実験を実施した。南大洋における海面熱条件変化が、大西洋深層循環の急激な強化を引き起こす可能性を示唆する結果を得るなど、長期気候変動についての理解を深める新しい知見を得ることができた。

#### 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 7 件)

A. Oka and M. Watanabe (2017), The post-2002 global surface warming slowdown caused by the subtropical Southern Ocean heating acceleration, *Geophysical Research Letters*, 44, pp.3319–3327, doi:10.1002/2016GL072184, 査読有

Dome Fuji Ice Core Project Members [A. Oka listed in 37th author] (2017), State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science advances*, Vol.3, no.2, e1600446, pp.1–13, doi:10.1126/sciadv.1600446, 査読有

M. Yoshimori, M. Watanabe, H. Shiogama, A. Oka, A. Abe-Ouchi, R.

Ohgaito, and Y. Kamae (2016), A review of progress towards understanding the transient global-mean surface temperature response to radiative perturbation, *Progress in Earth and Planetary Science*, 3 :21, pp.1–14, doi: 10.1186/s40645-016-0096-3, 査読有

M. Shigemitsu, N. Gruber, A. Oka, and Y. Yamanaka (2016), Potential use of the N<sub>2</sub>/Ar ratio as a constraint on the oceanic fixed nitrogen loss, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.30, Issue 4, pp.576-594, doi: 10.1002/2015GB005297, 査読有

Yamamoto, A., A. Abe-Ouchi, M. Shigemitsu, A. Oka, K. Takahashi, R. Ohgaito, Y. Yamanaka (2015), Global deep ocean oxygenation by enhanced ventilation in the Southern Ocean under long-term global warming, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.29, Issue 10, pp.1801-1815, doi: 10.1002/2015GB005181, 査読有

Kobayashi, H., A. Abe-Ouchi, and A. Oka (2015), Role of Southern Ocean stratification in glacial atmospheric CO<sub>2</sub> reduction evaluated by a three-dimensional ocean general circulation model, *Paleoceanography*, 30, pp.1202–1216, doi:10.1002/2015PA002786, 査読有

Kusahara, K., T. Sato, A. Oka, T. Obase, R. Greve, A. Abe-Ouchi, and H. Hasumi (2015), Modelling Antarctic marine cryosphere at the Last Glacial Maximum, *Annals of Glaciology*, Vol.56, No.69, pp.425–435, 査読有

<http://www.ingentaconnect.com/content/igsoc/agl/2015/00000056/00000069/art00045>,

[学会発表](計 18 件)

A. Oka and M. Watanabe, The post-2002 global warming hiatus caused by the subtropical Southern Ocean heating acceleration, CLIVAR Open Science Conference, Sep 21, 2016, Qingdao (China)

Akira Oka, Ayako Abe-Ouchi, Yusuke Yokoyama, Kenji Kawamura, and Hiroyasu Hasumi, The role of thermal threshold of the Atlantic meridional overturning circulation in glacial abrupt climate changes, 12th International Conference on Paleoceanography, Aug 30, 2016, Utrecht (The Netherlands)

H. Kobayashi and A. Oka, Modeling of glacial ocean carbon cycle by focusing on

the role of the Southern Ocean and carbonate compensation process, 12th International Conference on Paleoceanography, Aug 30, 2016, Utrecht (The Netherlands)

H. Kobayashi and A. Oka, Role of Southern Ocean in glacial atmospheric CO2 reduction, Goldschmidt 2016, 2016年6月27日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

岡 顕、渡部 雅浩、近年の地球温暖化の停滞における南大洋の役割、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016 年 5 月 24 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

小林 英貴、岡 顕、阿部 彩子、氷期の大気中二酸化炭素濃度変動に果たす南大洋の役割、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016 年 5 月 24 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

A. Oka, Ocean carbon pumps in CMIP5 earth system models diagnosed by a vector diagram、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016 年 5 月 23 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

岡 顕、赤道太平洋上の風応力により駆動される海洋熱吸収の変化とその全球平均気温への影響、2016 年度日本海洋学会春季大会、2016 年 3 月 17 日、東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

岡 顕、近年の地球温暖化の停滞における海洋熱吸収の役割、2015 年度日本海洋学会秋季大会、2015 年 9 月 27 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

小林 英貴、岡 顕、長期炭素循環変動の理解に向けた海洋堆積過程のモデリング、2015 年度日本海洋学会秋季大会、2015 年 9 月 27 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

A. Oka, A. Abe-Ouchi, Y. Yokoyama, K. Kawamura, and H. Hasumi, A thermal threshold of the Atlantic meridional overturning circulation that triggers glacial abrupt climate changes, The 26th IUGG General Assembly 2015, Jun 28, 2015, Prague (Czech Republic)

H. Kobayashi and A. Oka, Role of Southern Ocean stratification in glacial atmospheric CO2 reduction, The 26th IUGG General Assembly 2015, Jun 28, 2015, Prague (Czech Republic)

小林 英貴、岡 顕、南大洋成層化が氷期の大気中二酸化炭素濃度変動に及ぼす影響の評価、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 28 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

岡 顕、阿部 彩子、横山 祐典、川村 賢二、羽角 博康、氷期の急激な気候変動と大西洋深層循環の熱的閾値、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 26 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

岡 顕、気候値データおよび CMIP5 実験結果を用いた海洋炭素ポンプの診断、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 24 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

H. Kobayashi and A. Oka, Role of Southern Ocean stratification in glacial atmospheric CO2 reduction, 2014 AGU Fall Meeting, Dec 16, 2014, San Francisco (USA)

岡 顕、阿部 彩子、横山 祐典、川村 賢二、羽角 博康、氷期の急激な気候変動における大西洋深層循環の熱的閾値の役割、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 29 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

小林 英貴、岡 顕、氷期における南大洋成層化が海洋炭素循環に及ぼす影響の評価、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 29 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

〔図書〕(計 1 件)

岡 顕 他、朝倉書店、地球温暖化 そのメカニズムと不確実性、2014、135-143

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡 顕 (OKA AKIRA)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：70396943