

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287129

研究課題名(和文) 大気中二酸化炭素濃度変化に駆動される新生代後期の全球寒冷化メカニズムの解明

研究課題名(英文) Mechanism of the late Miocene global cooling driven by decline of CO₂

研究代表者

関 宰 (Seki, Osamu)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：30374648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：過去1000万年間で地球の気候は温室地球から現在の氷室地球へと移行したことが知られている。この長期的な氷床発達の原因の理解は氷床の長期的な安定性を理解する上で重要であるが、その原因は依然としてよくわかっていない。本研究では世界の各海域の海洋堆積物コアを用いて、過去1000万年間の古海洋変動及び、大気二酸化炭素濃度を復元した。その結果、北半球の著しい氷床発達が開始される時期よりも数百年万年先行して、全球的な寒冷化と大気CO₂濃度の低下が起こっていたことが示され、大気CO₂濃度の低下が過去1000万年間の気候変動に重要な役割を果たしていたことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The Earth has undergone a dramatic climate transition from hothouse to icehouse conditions occurred during the past 10 million years. It is important to understand cause of the long-term glaciation for better understanding of long-term stability of ice sheet yet the causes of the climate transition is still uncertain. In this study we reconstructed pale oceanographic changes and pCO₂ from marine sediment cores collected from different parts of the ocean. We found that a dramatic global cooling (late Miocene global cooling) and marked decline of CO₂ concentration occurred several million years before the intensification of Northern Hemisphere Glaciation (NHG). This suggests that CO₂ played a substantial role in the long-term climate evolution over the past 10 million years.

研究分野：古気候学

キーワード：後期新生代 後期中新世 古気候 古海洋 古気候モデル 全球寒冷化 二酸化炭素

1. 研究開始当初の背景

新生代(過去約 6500 万年間)の気候変動は、現在より温暖で氷床量の少ない“温室地球”から両極に氷床が存在する“氷室”地球へと向かう長期的な寒冷化で特徴づけられる(Zachos et al., 2001, Science)。最初に氷床が発達したのは南極(約 3400 万年前)で、約 300 万年前頃からは北半球のグリーンランドや北米大陸に大規模な氷床が発達し、両極に巨大な氷床が存在する現在の気候状態が確立された。この 300 万年前頃に始まった北半球氷床の発達、それまで続いた温室地球から両極に巨大な氷床が存在する現在の気候状態をもたらした重大な転換イベントであり、地球の気候システムを理解する上で鍵を握る。南極に氷床が発達し、その後北半球に氷床が発達する過程において、海洋ゲートウェイの開閉や海洋循環の変化、山脈隆起などが起こっているが、北半球に大規模氷床を急激に発達させた要因や約 700 万年前から始まっている寒冷化の原因については、まだ結論が得られていない。特に約 300 万年前の北半球における氷床発達の原因については、国内外において活発に議論されており、これまで様々な仮説が提案されている。しかし、全ての仮説について問題点や矛盾点が指摘されているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、北半球の氷床発達を含めた新生代後期の全球寒冷化の背景には、約 700 万年前から起こったパナマ海峡の著しい浅化・南大洋高緯度の寒冷化・大気中 CO₂ 濃度の低下に原因があるとする仮説(新パナマ・ゲートウェイ仮説)を呈示し、この新仮説を新規の南大洋古海洋データとモデルから立証することを目的とした。

3. 研究の方法

太平洋および大西洋の南北両半球から採取された深海掘削堆積物コアを分析し、過去 1000 万年間の時系列海洋環境変化(海水温や海洋水塊構造)と大気 CO₂ 濃度変化を復元する。ODP 保管庫の試料(DSDP296, ODP704, 982, 1123)をリクエストし入手した。過去の環境情報(水温、海洋循環、CO₂ 濃度等)の復元はバイオマーカーや微化石などの同位体地球化学的手法を用いて行った。得られた古海洋データと既存データなどを基に、パナマ海峡の浅化をトリガーとして、南大洋の寒冷化が起こったか、溶解ポンプと海洋成層化が強化されたか、大気 CO₂ 濃度の長期的な低下が起こったかを検証する。また、これらの現象の時間的位相を解析し、北半球氷床形成の原因となったかを検証する。さらに、これらの復元結果を大気海洋結合モデルによる数値実験結果と照らし合わせ、パナマ海峡の浅化を発端とする大気中 CO₂ 濃度の減少と全球寒冷化現象を検証する。

4. 研究成果

(1) 後期中新世以降の全球的な気候変動

後期中新世以降の気候変動の全体像を把握するため、アルケノン古水温法、Mg/Ca 古水温法、微化石の群種組成法を用いて太平洋及び大西洋の両半球において過去 1000 万年間の表層水温変動の復元を行った。その結果、全ての海域において後期中新世の寒冷化(750-500 万年前)と、北半球の氷床発達開始イベント(NHG: 350-250 万年前)に著しい温度低下が起こっていたことが示された(図 1)。この結果から、後期中新世の寒冷化は全球的なイベントであり、さらに NHG と同等以上の寒冷化であったことが明らかとなった。

また、各海域の水温変動記録を比較すると、海域によって水温低下のタイミングに若干ズレがあるものの、どの海域においても後期中新世の寒冷化において単調な低下傾向を示していることから、我々が全球寒冷化の究極のフォーシングとして提示した作業仮説(新パナマ・ゲートウェイ仮説)を支持する結果は得られなかった。よって、後期中新世の全球的な寒冷化を引き起こしたフォーシングは別にある可能性が高いと考えられる。

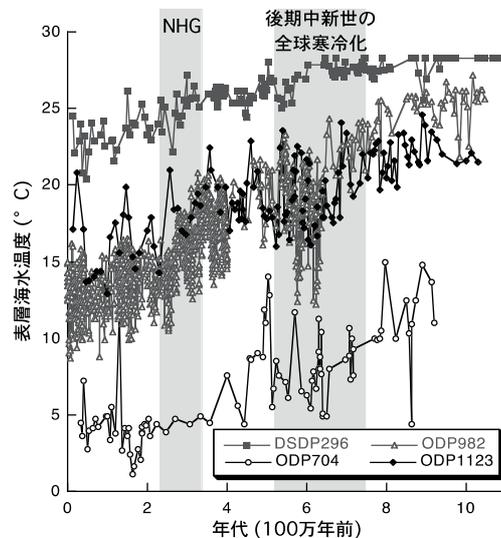


図1 過去1000万年間の表層海水温復元。DSDP296(北太平洋)、ODP982(北大西洋)、ODP1123(南太平洋)、ODP704(南大西洋)。ODP982はLawrence et al. (2016)のデータを含む。

(2) 後期中新世の全球寒冷化の要因

古水温記録の結果を受け、本研究の目的を新パナマ・ゲートウェイ仮説の検証から後期中新世後期の全球寒冷化の要因の解明へと方針を変更した。後期中新世の全球寒冷化の要因として1)アルベドの著しい増大と温室効果の減少の2つが考えられる。このうちアルベド増大については北半球高緯度で海水が発達した証拠は得られているものの、大陸氷床の顕著な発達はなかったとされるので、アイスアルベドフィードバックによる寒冷化の増幅作用に関しては、氷床の発達を伴っている NHG や更新世の氷期ほど大きな効果は見込めそうにない。従って CO₂ のような温室

効果ガス濃度の大幅な低下などの何か別の要因が必要となる。

そこで、アルケノン安定炭素同位体比による大気中 CO₂ 濃度復元法を南大洋の ODP1123 堆積物コアに適用し、過去 1000 万年間の連続的な CO₂ 濃度変動を復元した。復元手法の信頼性を検証するため、得られた結果を信頼性が最も高いとされるアイスコアの CO₂ 濃度記録と比較した。その結果、アルケノン安定炭素同位体比法による CO₂ 濃度データはアイスコアのそれとよく一致し、復元記録の高い信頼性が示された(図2)。

復元された CO₂ 濃度は南大洋の水温記録と高い相関 ($r = 0.91$) を持つことが示され、過去 1000 万年間において気候変動と炭素循環が密接に関連していることが明らかとなった(図2)。また産業革命前よりも全球平均地表気温が約 4.5 高かったとされる 800-1000 万年前の CO₂ 濃度は 300-350ppm と推定された。その後の後期中新世の全球寒冷化イベントでは CO₂ 濃度が 300-250ppm まで低下した。産業革命前よりも全球平均地表気温が約 3-4 高いために将来の地球温暖化した地球の類型とされる鮮新世の温暖期(450-300 万年前)の CO₂ 濃度は 250-330ppm と更新世の間氷期のレベルより若干高い程度となった。

この結果は気候モデルシミュレーションによる将来予測をする上で重要なパラメータである気候感度の制約において重要な意味をもつ。数百万年前を想定した CO₂ 濃度変化(400ppm)を与えた分担者阿部の MIROC4m による古気候再現実験の結果は、高緯度の古気候データの変化は過小評価しているものの、従来のモデル(イギリスの HadCM3)より古気候データにより近くなることがわかった。従来の研究で使われていた HadCM3 の気候感度が 3 だったのに比較して、MIROC4m の気候感度は 4 程度であることから、従来考えられていたより気候感度は高めである可能性が示唆された。

(3)CO₂濃度低下の要因

後期中新世における長期的な CO₂ 濃度の低下を招いた原因としては、化学的風化の促進や火山活動の低下による大気中 CO₂ 濃度の低下が考えられる。しかし、後期中新世においてそれらに著しい変化があった証拠は得られていない。他に考えられるメカニズムとしては生物ポンプや溶解ポンプなどによる大気中 CO₂ の海洋への移動である。このメカニズムは氷期-間氷期サイクルが発達した後期更新世の炭素循環を駆動する有力なメカニズムと考えられている。特に、鉄制限海域である南大洋はダストの供給によって生物生産が促進されるので、最も重要な海域であると考えられている。

そこでバイオマーカーからダストと海洋生産量の変動を復元した。その結果、ダストと生物生産量が北大西洋と南太平洋の両半球で後期中新世に著しく増大していること

が示された(図2)。このことは後期中新世の大気中 CO₂ 濃度の低下には更新世と同様に生物ポンプが重要な役割を果たしていた可能性を示唆する。

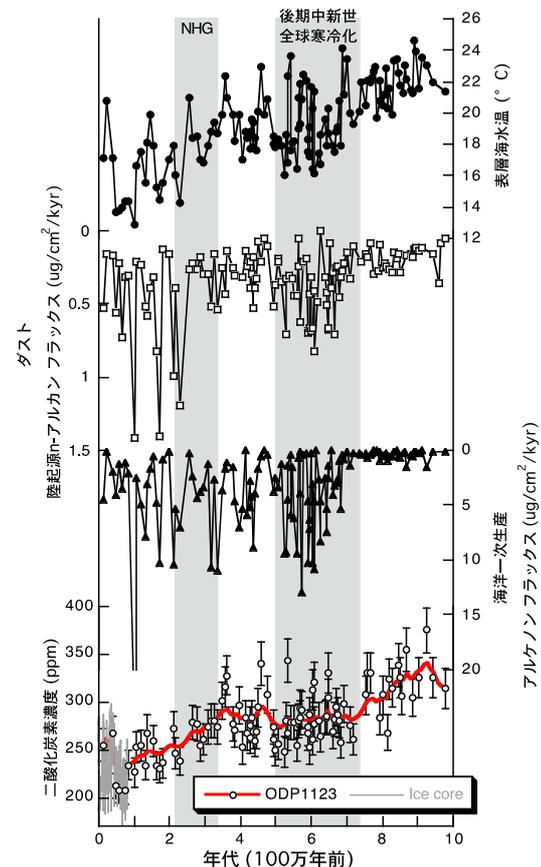


図2. ODP1123から得られた過去1000万年間の表層水温、ダスト、海洋一次生産、二酸化炭素濃度の変動。アイスコアデータ (Luthi et al., 2008)。

(4)まとめと今後の課題

本研究で世界各地の水温を復元することにより、過去 1000 万年間の気候変動の全体像を明らかにすることができた。また、過去 1000 万年間の連続的で信頼性の高い CO₂ 濃度の復元に成功し、気候と炭素循環が長期にわたって密接に関連していることを示した。さらに古気候モデルとの比較により気候感度や高緯度気温増幅が高めの可能性が示唆された。炭素循環を駆動するプロセスとして、大気と海洋間の炭素循環が重要であることが示された。しかし後期更新世の全球寒冷化を駆動した究極的なフォーシングは依然として謎のままであり、その説明が今後の課題といえる。

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2件)

Daniela N. Schmidt, A.G.M. Caromel, Osamu Seki, J.W.B. Rae and S. Renaud, Morphological response of

planktic foraminifers to habitat modifications associated with the emergence of the Isthmus of Panama, Marine Micropaleontology, 査読有, 128, 2016, 28-38.

Keiji Horikawa, Ellen E. Martin, Chandranath Basak, Jonaotaro Onodera, Osamu Seki, Tatsuhiko Sakamoto, Minoru Ikehara, Saburo Sakai, and Kimitaka Kawamura, Pliocene cooling enhanced by flow of low salinity Bering Sea water to the Arctic Ocean, Nature Communications, 査読有, 6, 2015, doi:10.1038/ncomms8587.

〔学会発表〕(計 12 件)

K. Horikawa, R. Kawanishi, O. Seki, Y. Okazaki, J. Onodera, Cooling of deep Southern Ocean in the late Miocene, The 26th Goldschmidt Conference, 2016 年 6 月 26 日 -7 月 1 日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

小野寺 丈尚太郎, 関 宰, 堀川 恵司, 珪質鞭毛藻化石群集に基づく過去 650 万年間の南大西洋 ODP704 地点の表層水温変動, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 22-26 日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)

関 宰, 後期中新世から更新世における南大洋の気候とダスト、生物生産のカップリング, 2016 年大会, 2016 年 5 月 22-26 日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)

関 宰, 堀川 恵司, 小野寺 丈尚太郎, 岡崎 裕典, 阿部 彩子, 新生代後期(過去 1000 万年間)の長期的な全球寒冷化における南大洋の役割, 2016 年日本海洋学会春季大会, 2016 年 3 月 14-18 日, 東京大学(東京都文京区)

Osamu Seki, Daniela Schmidt, Andreas Mackensen, Kimitaka Kawamura, Richard Pancost, Evidence for coupling of climate and CO₂ during the late Neogene cooling, The 25th Goldschmidt Conference, 2015 年 8 月 16-21 日(チェコ共和国, プラハ)

小野寺 丈尚太郎, 関 宰, 過去 1000 万年間の南大西洋 ODP704 地点における珪質鞭毛藻化石と表層水塊変動, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24-28 日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)

関 宰, 新第三紀後期の北半球寒冷化における高緯度の海洋ゲートウェイ・フィードバック, 研究集会「北極における過去の気候・環境変動」, 2015 年 3 月 25-26 日, 国立極地研究所(東京都立川市)

関 宰, 鮮新世温暖期の気候状態: 熱帯暖水プール水温と大気 pCO₂ 問題, 古海洋・古気候に関するシンポジウム, 2015 年 1 月 6-7 日, 東京大学大気海洋研究所(千葉県柏市)

岡崎 裕典, IODP プロポーザル 869-Pre 太平洋子午面循環と西太平洋ジャイア進化, 古気候に関するシンポジウム, 2015 年 1 月 6-7 日, 東京大学大気海洋研究所(千葉県柏市)

Osamu Seki, Jonaotaro Onodera, Akira Oka, Minoru Ikehara, Role of Arctic and Antarctic regions in the late Neogene climate evolutions, The Fifth Symposium on Polar Science, 2014 年 12 月 2-5 日, 国立極地研究所(東京都立川市)

Yusuke Okazaki, Miocene to Pleistocene change in deepwater circulation in the western North Pacific, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, 2014 年 7 月 28- 8 月 1 日, ロイトン札幌ホテル(北海道札幌市)

岡崎 裕典, 山本窓香, 河瀧俊吾, 池原実, 中新世以降の北西太平洋深層水塊特性変化: DSDP296 サイトより, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 28-5 月 2 日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

〔図書〕(計 1 件)

岡崎 裕典, 関 宰, 近本 めぐみ, 原田尚美, 朝倉書店出版, 海の温暖化- 6 章古気候・古海洋環境変動, 2017 年 1 月出版予定

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/taikika_nkyo/seki/seki_project.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関 宰 (SEKI, Osamu)

北海道大学・低温科学研究所・准教授
研究者番号: 30374648

(2) 研究分担者

阿部 彩子 (ABE, Ayako)

東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号: 30272537

堀川 恵司 (HORIKAWA, Keiji)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・准教授
研究者番号: 40467858

小野寺 丈尚太郎 (ONODERA, Jonaotaro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員
研究者番号: 50467859

岡崎 裕典 (OKAZAKI, Yusuke)

九州大学・高等研究院・准教授
研究者番号: 80426288