

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03358

研究課題名(和文) 氷期 - 間氷期サイクルの誕生と初期進化：北大西洋深層水の役割に関する新仮説の検証

研究課題名(英文) Onset and evolution of glacial-interglacial cycles: a role of North Atlantic Deep Water

研究代表者

林 辰弥 (HAYASHI, Tatsuya)

九州大学・比較社会文化研究院・助教

研究者番号：80571132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：約270万年前の氷期 - 間氷期サイクルの開始と大西洋子午面循環の関係を明らかにするために、高緯度北大西洋の堆積物のマルチ指標分析を行った。その結果、大西洋子午面循環の上部と下部を構成する北大西洋海流と北大西洋深層水は共に、氷期 - 間氷期サイクルと同時に強化されていたことが分かった。本プロジェクトの成果に基づいて以下の仮説をまとめた。約270万年前に強化された大西洋子午面循環は、その後の各氷期の前半にも活発であり、北大西洋海流を通して水蒸気を大陸へ供給することで氷床の成長を促し、4.1万年周期の氷期サイクルを増幅した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、様々な古環境記録を高解像度で復元することで、初期の氷期 - 間氷期サイクルと海洋循環の関係について多角的に検証することができた。特に、氷床崩壊と深層水強度の記録は解像度が高く、数百年規模の現象を世界で初めて復元することに成功した。また、深層水に関しては、岩石磁気に基づく新しい分析手法を採用し、有効性を証明した。本研究で取り組んだのは現在まで続く氷期 - 間氷期サイクルの初期の現象であるため、本研究の成果は現在や近未来の気候変動問題にも貢献する有益な情報を含むものである。

研究成果の概要(英文)：To reveal relationship between the onset of glacial-interglacial cycles around 2.7 million years ago and the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC), we performed multi-proxy analyses of deep-sea sediments recovered from the high-latitude North Atlantic. As the results, we found the fact that both the North Atlantic Current (upper limb of the AMOC) and North Atlantic Deep Water (lower limb of the AMOC) were enhanced synchronously with the glacial-interglacial cycles. We hypothesized that the AMOC was actively maintained even in early stages of individual glacials after 2.7 million years ago, which facilitated the efficient growth of continental ice sheets and amplified 41-kyr glacial oscillations.

研究分野：古気候・古海洋学

キーワード：氷期 - 間氷期サイクル 北半球の氷床化 大西洋子午面循環 鮮新世後期 更新世初期 北大西洋

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

約 270 万年前から本格的に始まった寒冷化に伴って北半球の高緯度域には大規模な大陸氷床が発達するようになり、現在まで続く気候変動「氷期-間氷期サイクル」が始まった。その原因として、「パナマ陸橋説 (e.g., Keigwin 1982, Haug & Tiedemann 1998)」や「大気 CO<sub>2</sub> 減少説 (e.g., Lunt *et al.* 2008)」が提唱されてきた。

パナマ陸橋が成立するとメキシコ湾流-北大西洋海流が強化されることになる。それらの海流の表層から水分が蒸発すれば、高緯度の海洋の表層では塩分が高くなり、比重が増すことで沈み込み、深層水の形成を促して大西洋子午面循環 (AMOC) を強化した可能性がある。

一方、大気 CO<sub>2</sub> の減少によって寒冷化が進めば、高緯度地域は雪や海水で覆われることになり、アイスアルベド・フィードバック効果によってさらに低温化が進む。その結果、北大西洋の表層水は冷たく、比重が増すことで沈み込み、AMOC を強化した可能性がある。

そのため、パナマ陸橋説と大気 CO<sub>2</sub> 減少説のいずれの仮説に従っても、AMOC は氷期-間氷期サイクルの開始と同じ時期に強化されたことが予想される。しかし、AMOC の深部を構成する北大西洋深層水は、その標準的な指標である底生有孔虫化石の炭素同位体 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 記録に基づくくと、当時はむしろ弱体化していたと解釈される。そのため、氷期-間氷期サイクルの開始に AMOC は関与しなかったと信じられてきた。

### 2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは、海洋大循環や AMOC の駆動力が存在する北大西洋高緯度域に注目して海底堆積物の分析を行い、270 万年前の前後における大陸氷床-海洋循環-気候変動の相互作用を調査することで、氷期-間氷期サイクルが始まった原因とその初期の変動のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

特に、「北大西洋深層水の挙動は、AMOC の変動を通して、初期の氷期-間氷期サイクルのメカニズムとして主要な役割を演じ、270 万年前には同サイクル誕生 (北半球の氷床化) の一因となり、その後には数千年規模の急激な気候変動を引き起こした」と作業仮説を立て、その検証を行った。

### 3. 研究の方法

本研究では、アイスランドの南方沖のガーダドリフト [IODP (国際深海科学掘削計画) Site U1314] で掘削・回収されたコア試料を用いて、以下の高解像度マルチプロキシ分析を行った。

- (1) 大陸氷床の成長記録を明らかにすることを目的として、堆積物試料から底生有孔虫化石を拾い出し、その酸素同位体 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 分析を行った。
- (2) 大陸氷床の崩壊記録を明らかにするために、大陸氷床から分離した冰山によって陸から海へと運ばれて海底に堆積した ice rafted debris (IRD) の含有量を調べ、さらに XRD 解析によって堆積物試料の鉱物組成を明らかにした。
- (3) 海洋の表層水温を明らかにすることを目的として、アルケノン分析と浮遊性有孔虫化石の Mg/Ca 分析に取り組んだ。
- (4) 表層の北大西洋海流の変化を復元するために珪藻化石群集の分析を行った。
- (5) 北大西洋深層水の子午面循環の強度変化を明らかにすることを目的として、堆積物の等温残留磁化・成分分離解析を行い、さらに底生有孔虫化石の炭素同位体 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 分析に取り組んだ。

### 4. 研究成果

上記の研究手法 (1) ~ (5) に対応する分析結果は以下のとおりである。

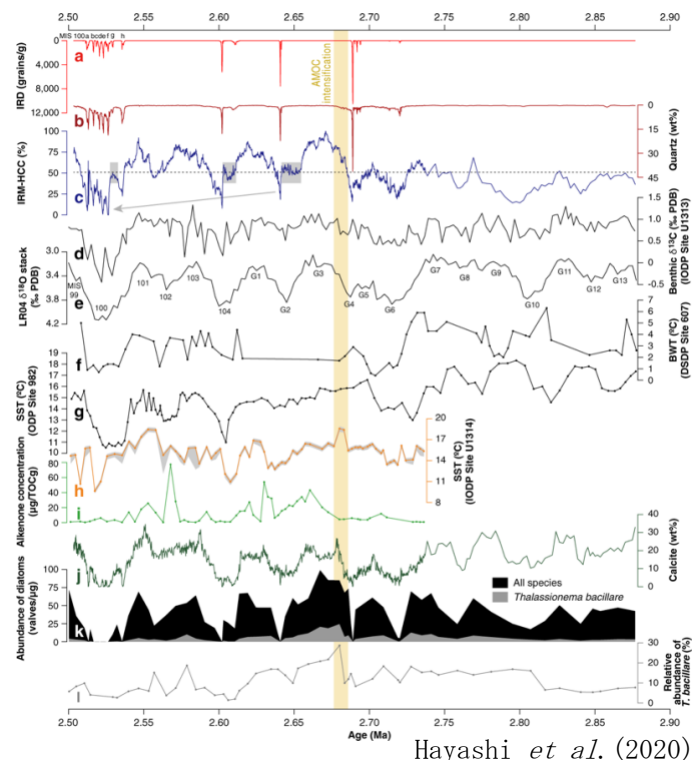
- (1) 本研究試料には  $\delta^{18}\text{O}$  分析に使われる標準的な底生有孔虫種である *Cibicides wuellerstorfi* の化石が非常に少なかったため、*Globocassidulina* 属や *Uvigerina* 属の化石も併せて分析を行った。その結果、4.1 万年周期の寒冷化と氷床サイクルの検出に成功した。

少量の分析試料（小型の有孔虫個体）の同位体計測技術を改善することで数千年規模の変動も検出できる可能性があるが、それは今後の課題である。

- (2) IRD や石英に代表される大陸地殻由来の鉱物の分析結果から、環北大西洋域の大陸氷床は 270 万年前頃には海岸付近にまで拡大し、その後の各氷期の最盛期に大きく崩壊して大量の氷山を分離していたことが分かった。例えば、比較的期間の短い海洋酸素同位体比ステージ (MIS) G4、G3、104、98 氷期には、大陸氷床の崩壊・氷山分離イベントは 1 回ずつしか起きなかったが、一方、期間の長い MIS 100、96 氷期には、同イベントは数千年の間隔で繰り返してきていたことが分かった。
- (3) アルケノン分析によって復元された海洋の表層水温は、間氷期は高く、氷期には低くなる傾向を示した。しかし、その 4.1 万年周期の氷期-間氷期サイクルとは異なる短期的な温暖化イベントも幾つか検出され、特に MIS G4-G3 退氷期に起きた急激な温暖化イベントは、その直後の MIS G3 間氷期の最盛期よりも 3℃ほど温かかったことが分かった。一方、浮遊性有孔虫化石の Mg/Ca 分析は、産出する個体の小ささが原因で分析がうまくゆかなかった。今後はその計測技術の改善に取り組む予定である。
- (4) 珪藻の群集組成は 270 万年前頃に変化し、温暖種[例えば、*Thalassionema nitzschioides* の 3 変種 (*incurvata*, *inflatum*, *parvum*) や *Thalassiosira ferelineata*]から寒冷種 (例えば、*Thalassiosira nordenskiöldii* や *Fragilariopsis oceanica*) が優勢な群集へと徐々に遷移していったことが分かった。中でも、温暖な海域を好む *Thalassionema bacillare* は 280~260 万年前頃の優勢な種の 1 つであったが、特に 268 万年前頃 (MIS G4-G3 退氷期) に個体数を劇的に増加させ、優占種となっていたことが分かった。その MIS G4-G3 退氷期の *T. bacillare* の増加は、AMOC の上部を構成するメキシコ湾流-北大西洋海流が強化されたことを表しており、このことはアルケノン分析により示された MIS G4-G3 退氷期の温暖化イベントとも整合的である。また、現在では南半球の高緯度域にしか出現しない種 (例えば、*Thalassiothrix antarctica*) が、鮮新世-更新世境界頃には北半球の大西洋高緯度域にも出現していたことが判明した (Hayashi & Ohno 2019)。
- (5) 等温残留磁化の成分解析結果から、AMOC 下部の ISOW (北大西洋深層水の上流の支流) は約 270 万年前に強化され、それ以降には、氷期の前半であっても比較的強く (270 万年前よりも前の間氷期と同程度に) 維持されていたことが分かった。一方、270 万年前よりも後の氷期の後半には、ISOW は、(2) の分析により判明した大陸氷床の崩壊・氷山分離イベントに対応して、短期間の間に急激に弱体化していたことが分かった。そのため、初期の氷期においても近年の氷期と同様に、大陸氷床の崩壊イベントは、氷山の溶け水による表層水の塩分低下 (密度減少) の影響を通して ISOW や AMOC の弱体化に関与していたと考えられる。なお、底生有孔虫化石の  $\delta^{13}\text{C}$  分析に関しては、(1) の分析と同様に氷期-間氷期サイクルの影響を検出できたが、分析可能な化石の少なからず数千年規模の現象は検証できなかった。

以上の結果の内、290~250 万年間の分析データを先行研究の結果と比較考察し、以下の独自の仮説を論文にまとめて発表した (Hayashi *et al.* 2020)。

パナマ陸橋の成立に伴うメキシコ湾流-北大西洋海流の強化と、大気  $\text{CO}_2$  の減少による世界的な寒冷化の影響を受けて、約 270 万年前にはノルウェー海において深層水の形成が増加し、AMOC が強化された。その結果、各氷期の前半には比較的活発に維持されていた北大西洋海流によって大量の水蒸気が大陸へ供給され、それを材料として氷床が成長することで、4.1 万年周期の氷期サイクルが増幅された。一方、各氷期の後半には、海岸まで大きく成長した大陸氷床の末端が崩壊することで大量の氷山が北大西洋高緯度域へ供給され、その溶け水の影響で AMOC がイベント的に弱くなった。



<引用文献>

- (1) Keigwin, L. 1982. Isotopic paleoceanography of the Caribbean and east Pacific: Role of Panama uplift in late neogene time. *Science* **217**: 350-353.
- (2) Haug, G.H. & Tiedemann, R. 1998. Effect of the formation of the isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation. *Nature* **393**: 573-676.
- (3) Lunt, D. J., Foster, G. L., Haywood, A. M. & Stone, E. J. 2008. Late Pliocene Greenland glaciation controlled by a decline in atmospheric CO<sub>2</sub> levels. *Nature* **454**: 1102-1105.
- (4) Hayashi, T., Ohno M. 2019. Diatoms in upper Pliocene-lower Pleistocene sediments, subpolar North Atlantic: 1. *Thalassiothrix antarctica*. *Diatom* **35**:18-27
- (5) Hayashi, T., Yamanaka, T., Hikasa, Y., Sato, M., Kuwahara, Y., Ohno M. 2020. Latest Pliocene Northern Hemisphere glaciation amplified by intensified Atlantic meridional overturning circulation. *Communications Earth & Environment* **1**: 1-10. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00023-4>

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hayashi, T., Yamanaka, T., Hikasa, Y., Sato, M., Kuwahara, Y. & Ohno, M.	4. 巻 1
2. 論文標題 Latest Pliocene Northern Hemisphere glaciation amplified by intensified Atlantic meridional overturning circulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43247-020-00023-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi, T. & Ohno, M.	4. 巻 36
2. 論文標題 Diatoms in upper Pliocene-lower Pleistocene sediments, subpolar North Atlantic: 2. <i>Eupyxidicula atlantica</i> sp. nov.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Diatom	6. 最初と最後の頁 35~45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11464/diatom.36.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi, T. & Ohno, M.	4. 巻 35
2. 論文標題 Diatoms in upper Pliocene-lower Pleistocene sediments, subpolar North Atlantic: 1. <i>Thalassiothrix antarctica</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Diatom	6. 最初と最後の頁 18~27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11464/diatom.35.18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wang Zhennan, Nelson David D., Dettman David L., McManus J. Barry, Quade Jay, Huntington Katharine W., Schauer Andrew J., Sakai Saburo	4. 巻 92
2. 論文標題 Rapid and Precise Analysis of Carbon Dioxide Clumped Isotopic Composition by Tunable Infrared Laser Differential Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 2034~2042
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.analchem.9b04466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayashi, T., Krebs, W.N., Saito-Kato, M. & Tanimura, Y.	4. 巻 13
2. 論文標題 The turnover of continental planktonic diatoms near the middle/late Miocene boundary and their Cenozoic evolution	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0198003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayashi, T.	4. 巻 34
2. 論文標題 Detailed observation of <i>Actinocyclus krebsii</i> sp. nov. from a lower to middle Miocene lacustrine diatomite, Nagasaki, western Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Diatom	6. 最初と最後の頁 57-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11464/diatom.34.57	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jo, J., Yamanaka, T., Kashimura, T., Okunishi, Y., Kuwahara, Y., Kadota, I., Miyoshi, Y., Ishibashi, J. & Chiba, H.	4. 巻 52
2. 論文標題 Mineral nitrogen isotope signature in clay minerals formed under high ammonium environment conditions in sediment associated with ammonium-rich sediment-hosted hydrothermal system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 317-333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.2.0518	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakai, S., Yang, D., Yasuda, T., Akiyama, K., Kuga, T., Kano, A., Shiraishi, F., Amekawa, S., Ohtsuka, S., Nakaguchi, K. & Yamaguchi, S.	4. 巻 4
2. 論文標題 Pulsed terahertz radiation for sensitive quantification of carbonate minerals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 2702-2707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega8b03311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 林辰弥, 山中寿朗, 日笠友暉, 佐藤雅彦, 桑原義博, 大野正夫
2. 発表標題 MIS G4 - G3退水期の大西洋子午面循環の発達
3. 学会等名 第5回地球環境史学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林辰弥
2. 発表標題 U1314の岩石磁気・鈹物・珪藻分析結果（AMOCとiNHGの関係）
3. 学会等名 U1314研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masao Ohno, Tatsuya Hayashi
2. 発表標題 Geomagnetic Excursions between 2.1 and 2.9 Ma at IODP Site U1314 in the North Atlantic
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林辰弥, 佐藤雅彦, 桑原義博, 上原亮, 大野正夫
2. 発表標題 北半球大陸氷床の発達と海洋循環の関係
3. 学会等名 MRC研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林辰弥, 佐藤雅彦, 桑原義博, 上原亮, 槇尾雅人, 大野正夫
2. 発表標題 MIS 95 以前の氷期 - 間氷期サイクル
3. 学会等名 地球環境史学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丁斐, 桑原義博, 酒井治孝, 林辰弥, 藤井理恵, 槇尾雅人
2. 発表標題 ネパールヒマラヤ・カトマンズ盆地堆積物の粘土鉱物分析によるインドモンスーン変動の復元
3. 学会等名 2018年度第62回日本粘土学会粘土科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日笠友暉, 山中寿朗, 千葉仁, 林辰弥, 大野正夫
2. 発表標題 ガーダドリフト堆積物から復元した後期鮮新世-前期更新世の北大西洋 表層海水温変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林辰弥, 大野正夫, 佐藤雅彦, 日笠友暉, 山中寿朗, 槇尾雅人, 桑原義博
2. 発表標題 北大西洋深層水は北半球氷床化に関与したのか?
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大野 正夫 (Ohno Masao)  (00251413)	九州大学・比較社会文化研究院・教授  (17102)	
研究分担者	桑原 義博 (Kawahara Yoshihiro)  (90281196)	九州大学・比較社会文化研究院・教授  (17102)	
研究分担者	佐藤 雅彦 (Sato Masahiko)  (50723277)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教  (12601)	
研究分担者	坂井 三郎 (Sakai Saburo)  (90359175)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋機能利用部門(生物地球化学センター)・主任研究員  (82706)	
研究分担者	佐川 拓也 (Sagawa Takuya)  (40448395)	金沢大学・地球社会基盤学系・助教  (13301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山中 寿朗 (Yamanaka Toshiro)  (60343331)	東京海洋大学・学術研究院・教授  (12614)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------