

令和 元年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0151

研究課題名（和文）気候システムにおける氷床変動の役割の解明（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Understanding ice sheets dynamics and climate changes(Fostering Joint International Research)

研究代表者

横山 祐典（Yokoyama, Yusuke）

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：10359648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,900,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：全球の気候変動に大きな影響を与えていると考えられる極域氷床の変動について研究をお行った。全球的な氷床量変動と南極氷床について、全球の海水準低下量の詳細な復元に成功するとともに環境変動を復元した。さらに変化率を詳細に明らかにした。結果はこれまでの概念を覆し、内容はNature誌に報告した。氷期の終焉と海水準変動と沿岸環境の応答、さらにサンゴ礁の環境への適応性についてもNature Geoscience 誌に公表した。将来の安定性が危惧されている西南極氷床ロス海的数据について、地形地質データと地球化学的な分析結果から、氷床の急激な崩壊イベントを発見し、PNAS誌に論文を公表するなどした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在進行中の地球温暖化の気候状態でもっとも危惧されているのは、グリーンランドや南極氷床の挙動である。部分的な崩壊や融解の加速などにより、海水準上昇を通して世界の沿岸域に影響を与えるためである。今回の研究により、南極で最大のロス棚氷が気候変動によりもたらされた大気循環の変化を通して大規模な崩壊を起こしたことを初めて明らかにするとともに、氷床の成長についてもこれまで考えられていた規模の10倍の速さで成長が可能であることを明らかにした。これらの知見は今後、気候モデルの動作特性の理解などに用いることが可能となり、将来の気候変動に伴う氷床の挙動についてより詳細に評価することができるようになる。

研究成果の概要（英文）：Understanding the past change of polar ice sheets are critical to better understand the stability of future ice sheets in particular Antarctic ice sheets. In this study we have conducted sea level studies using samples obtained from the sites located far away from former ice sheets region as is representing more direct measure of polar ice volume changes due to smaller influences from loading and unloading effects of polar ice sheets. The results showed that the global sea level drop during the peak period of the last ice age was -120 to -130m of sea level. The important findings were their rapid rate of changes both waxing and waning. Studying marine sectors of Antarctic ice sheets also suggested that oceanic processes are key to produce the stability/instability of Antarctic ice sheets.

研究分野：古気候学

キーワード：古気候 南極

様式 F - 19 - 2

1. 研究開始当初の背景

グローバルな気候変動について、氷床を含めた雪氷圏の果たしている役割は大きい。特に南極氷床はそれ自体が全球の海面変動を60m以上上昇させる規模の淡水を貯蔵していることから、その変動がもたらすグローバルな影響は小さくない。また、氷床モデルの制約のためにも、過去の氷床成長および融解の速度を高精度で復元する重要性が指摘されていた。プロジェクトでは、氷床の成長と融解についての過去の知見について理解を広げるため、アメリカ及びオーストラリアの、当該分野で最先端の研究を行っている研究室との共同研究を遂行した。特に現在の氷床量復元にも大きく影響を与える、最終氷期の最大氷床成長のタイミングと規模の復元や海洋との相互作用における氷棚および氷床量減少のメカニズムの解明に資するデータの取得などを行うことが急務であるという状況があった。

2. 研究の目的

研究では、オーストラリア沖で採取された海洋試料を用いて、多くの年代測定を実施し、高精度での過去の海水準変動復元を行うことで、グローバルな氷床量変動についての知見を得ることを目的とした。また、南極最大の棚氷が存在し、海底に着底した巨大な氷床が存在する西南極氷床のロス海周辺の変化について海洋堆積物と地形を使った研究を実施する。

3. 研究の方法

固体地球の変形の効果が少なく、氷床量の変動をより正確に反映していると考えられる現在の氷床域および旧氷床域から遠い、オーストラリアのグレートバリアリーフ沖で採取した試料について、多くの年代測定値を得ることで、精度の高い相対的な海水準変動曲線の作成を行った。また得られたデータに対して固体地球の変形の効果をモデリングによって補正した氷床量相当の海水準変動値を得ることで、グローバルな氷床量変動の高精度時系列変化についての情報を得た。年代測定値については、日本国内での分析が難しいウラン系列核種についての分析を、オーストラリア国立大学地球科学研究所で実施した。放射性炭素年代測定値については、東京大学大気海洋研究所の加速器質量分析装置を用いて行った。

また、現在でもそのほとんどの大陸が巨大な氷床に覆われている南極大陸についての氷床拡大縮小の規模とタイミングを知ることも重要である。今後の気候変動の下での氷床の安定性を理解する鍵となるためである。ところが、かつて氷床が存在していた北米および北欧の氷床融解史に比べると圧倒的に情報が少ない。特に氷床が後退して大陸部分が露出している部分が少ないこと、過去の氷床拡大期には大陸棚まで氷床が拡大していたことが考えられることから、海底地形のマッピングと堆積物試料のサンプリングおよびそれらに含まれている微化石や化学分析、そして年代測定を行うことで、過去の氷床変動のタイミングを明らかにする。また、近年その挙動が危惧されている棚氷についても、新しい手法を用いて復元することで、棚氷と海洋変動、そして氷床変動との関係について明らかにする。海洋地質学 地形学を使った南極氷床復元の研究はアメリカライス大学にてデータと試料のサブサンプリングを行い、東京大学で分析を行う。また固体地球の変形モデルについても東京大学にて実施する。

4. 研究成果

現在のグリーンランドや南極氷床変動の融解や拡大を人工衛星などで復元する際には、過去のグローバルな最大氷床量が重要である。現在のところ旧氷床域から離れた地点での海水準の復元研究からは海水準が最も下がった時代には、100m以上のかい水準低下が起こったとされてきた。一方で、北アメリカと北ヨーロッパの氷床量の変化については細かく明らかになっているにも関わらず、合計で100m程度の低下量を説明しうる量としかならない。一方、これまでの海水準の研究からは、120-130mの低下が起こっていたとする研究が多く発表されてきていた。そこで今回のプロジェクトでは地震などの大規模地殻変動の影響が小さいと考えられ、旧氷床域から十分に離れたオーストラリアのグレートバリアリーフの沖合の地点の海底からサンプリングされたかつてのサンゴ礁の試料を用いた。それらについての年代測定を1,000点以上施し、生息深度から当時の相対的海水準を求めた。得られた試料は500km離れた2側線の海域からのデータであり、それらの復元されたデータの再現性を検討した。

するとグレートバリアリーフのサンゴ礁が氷床の融解に伴う海水準変化に伴って、水深を変えながら氷床量変化を復元できることが明らかになった。特に過去30,000年間のデータについて初めて詳細に明らかにすることができた。その中で、特に特筆すべき現象は、17,000年前以降の氷床の急激な融解イベントの他に同様の規模の氷床拡大のイベントがかなり克明に記録されていたことだった。これまで報告がなかったこの氷床量の急拡大は異なる2箇所の観測側線で得られた試料から明らかになり、急拡大のタイミングとその成長速度についても極めて類似したものとなった。これらはオーストラリア国立大学において実施することができた表面電離型質量分析装置を使った高精度のウラン系列核種年代測定法を多数行うことで可能となったと言える。また、この最大海水準低下の規模が妥当なものであるか、オーストラリア北西部の海洋堆積物試料を使って検討した結果、サンゴ試料に比べると誤差は大きくなるものの、同様の氷床拡大の規模が認められることが明らかになった。固体地球の変形に関するモデリングは、オーストラリア国立大学が世界的に当該分野を牽引しているが、東京大学でのモデリン

グ結果等についての議論も行いながら定量性の評価を検討する作業などを実施できた。実際、モデリングに使用する氷床モデルについては、オーストラリア国立大学の研究チームから提供されたものを使用し、今回の新しい氷床モデルの改訂に結びつけることができた。

最大氷床量拡大期のグローバルな海水準の低下量が120-130mにも及んだことが再確認されたため、当時現在よりも大規模に拡大していた南極氷床についての変化を明らかにするために、西南極氷床最大の棚氷を持つロス海をターゲットにして研究を進めた。アメリカの極域観測船パルマー号の2015年の航海で得られた高精度な海底地形データと、海底から得られた堆積物サンプルの堆積学的な検討、そして化学分析を行った。特に氷床の融解速度を規定していると考えられ、その安定性に重要な役割を果たしていると考えられてきている棚氷の変動のタイミングと規模を明らかにした。ここで問題になるのは、年代測定の難しさである。一般に海洋堆積物の年代決定を行うには、動物プランクトンの炭酸カルシウムの殻を使った放射性炭素年代測定が行われる。しかし南極の周辺の南大洋ではこれらの微化石が堆積物から産出されないこと、また氷床の流動に伴う陸上の堆積物の海洋への供給による希釈効果などの問題が存在していた。そこで本研究では、これまで広く使われてきた、堆積物全てを使った年代測定法（バルク法）の代わりに、新しく開発した特定有機化合物放射性炭素年代測定法を適用して年代決定を行った。その結果、バルク法で得られた年代結果に比べて全てが8,000-10,000年若い年代を示すことが明らかとなった。

また、棚氷の変動についての情報を得るために、微化石分析を行うとともに宇宙線によって大気中に生成される核種の一つである ^{10}Be を用いることで、堆積物が取られた海底の直上の海域のロス海から棚氷が後退したタイミングを復元する方法を考案した。その結果、 ^{10}Be の急激な上昇は堆積物中に残された珪藻の急激な上昇と同調していることがわかった。珪藻は植物プランクトンであるために、その増加は棚氷の解放に伴う太陽光の増加を示唆することから、珪藻の変化と同調した ^{10}Be 増加は大気上層で生成された ^{10}Be がエアロゾルなどとともに降下し、海底に着底したことを意味する。自然界の ^{10}Be の存在度は10兆分の1から100兆分の1ほどであるため、加速器質量分析装置を用いる必要があるが、東京大学にて開発した前処理法などを用いることで、分析を高精度で行うことができるようになった。このことから ^{10}Be の堆積物中の増加は、棚氷の後退プロセスを詳細に記録しているということがわかった。また、興味深いことに、バルク法と特定有機化合物放射性炭素年代測定法で求めた年代値の差が大きいところでは ^{10}Be が低いことがわかり、これらの堆積物が南極の内陸部からもたらされていることを示唆している。 ^{10}Be も半減期がおよそ130万年の放射性核種であることから、その ^{10}Be が堆積物にほとんど含まれていないような層準というのは、堆積物が内陸部から氷床のプロセスによってもたらされたことを意味している。つまり、 ^{10}Be の棚氷の指標としての有用性を示すとともに、決して外洋から移流によってもたらされた懸濁物質起源の粒子に吸着していたものではないことを示すことがわかった。

棚氷の後退のタイミングは、ニュージーランドの研究グループによって発表された、ロス海周辺の氷床高度の急激な低下（つまり融解）時期と一致しており、海洋に面した棚氷の不安定性によって、より上流の氷床が影響を受けることが明らかになった。得られたデータについて、東京大学の海洋物理モデルを使って海流の流入等についてのシミュレーションを行ったところ、海底地形の形状と氷床着底のラインによってより沖合の南大洋からもたらされた比較的温暖な海水の流入が、ロス海周辺の氷床の底面融解を引き起こし、氷床量の低下をもたらしたことが明らかになった。また、フランスほどの大きさの面積を持つ棚氷の急激な後退は、およそ4,000-5,000年前に起こっていたことがわかった。

これまでの南極氷床の融解に関する知見は、北アメリカや北ヨーロッパに存在していた大規模氷床が、地球の公転軌道要素の変化に伴う北半球の夏の日射量変動によって融解し、海水準を上昇させることで、引き起こされたり、大気中の二酸化炭素の変化に伴う現象であると考えられてきた。しかし、今回得られた棚氷の融解とそれに伴う氷床高度の低下イベントは、そのどちらにも関連しておらず、大気海洋の相互作用に伴って沖合の海水の流入が引き起こされることで、起こったと考えられた。南極氷床沿岸部の大気循環の変化によって、中層や深層の海水の湧昇が引き起こされることで沿岸への海水流入が引き起こされることは、近年のモデルによっても再現され始めているが、今回の結果によって得られた内容はこのことを裏付ける貴重なデータとなった。

また、オーストラリア国立大学で行った実験によって、同大学がこれまで世界を牽引してきたウラン系列核種についての知見について、年代測定を行う中で明らかとなってきた。すなわちウランの同位体および放射性炭素の挙動で海洋循環を明らかにすることが可能であるが、サンゴ試料はそれらを行うことができる唯一の海洋からのサンプルである。ウラン系列核種で年代を測定し、放射性炭素で海洋循環を復元する方法やウランの同位体の初生値を復元することで、海洋循環のパターンと気候変動および氷床変動についての過去の変化を明らかにすることが可能だが、このプロジェクトの中でも、氷床変動と同調して同位体比変化つまり海洋循環の変化が起こったことを明らかにすることができた。

今回の研究プロジェクトによって、氷床量の融解のみならず拡大についてもこれまで知られていなかったスピードで起こりうることを初めて明らかにすることができた。将来の氷床変動の予測は気候モデルや氷床モデルを用いて行うことが重要であるが、現状、この規模の変化を再現できるモデルは存在していない。今後の予測精度を向上させる上でも今回のデータ

をうまく取り込んで改良を加えていくことで、動作特性の理解を深めて予測精度の向上につな
げられるようになればと考える。

5 . 主な発表論文等
(研究代表者は下線)

〔 雑誌論文 〕 (計 10 件)

1. Ishiwa, T, Yokoyama, Y, Miyairi, Y, Obrochta, S, Sasaki, T, Kitamura, A, Suzuki, A, Ikehara, M, Ikehara, K, Kimoto, K, Bourget, J & Matsuzaki, H 2016, 'Reappraisal of sea-level lowstand during the Last Glacial Maximum observed in the Bonaparte Gulf sediments, northwestern Australia', Quaternary International, 査読有、vol. 397, pp. 373-379, doi:10.1016/j.quaint.2015.03.032
2. Minzoni, RT, Majewski, W, Anderson, JB, Yokoyama, Y, Fernandez, R & Jakobsson, M 2017, 'Oceanographic influences on the stability of the Cosgrove Ice Shelf, Antarctica', Holocene, 査読有、vol. 27, no. 11, pp. 1645-1658, doi:10.1177/0959683617702226
3. Nakada, M, Okuno, J & Yokoyama, Y 2016, 'Total meltwater volume since the Last Glacial Maximum and viscosity structure of Earth's mantle inferred from relative sea level changes at Barbados and Bonaparte Gulf and GIA-induced J2, Geophysical Journal International, 査読有、vol. 204, no. 2, pp. 1237-1253, doi:10.1093/gji/ggv520
4. Rohling, EJ, Hibbert, FD, Williams, FH, Grant, KM, Marino, G, Foster, GL, Hennekam, R, de Lange, GJ, Roberts, AP, Yu, J, Webster, JM & Yokoyama, Y 2017, 'Differences between the last two glacial maxima and implications for ice-sheet, 180, and sea-level reconstructions', Quaternary Science Reviews, 査読有、vol. 176, pp. 1-28, doi:10.1016/j.quascirev.2017.09.009
5. Sanborn, KL, Webster, JM, Yokoyama, Y, Dutton, A, Braga, JC, Clague, DA, Paduan, JB, Wagner, D, Rooney, JJ & Hansen, JR 2017, 'New evidence of Hawaiian coral reef drowning in response to meltwater pulse-1A', Quaternary Science Reviews, 査読有、vol. 175, pp. 60-72, doi:10.1016/j.quascirev.2017.08.022
6. Webster, JM, Braga, JC, Humblet, M, Potts, DC, Iryu, Y, Yokoyama, Y, Fujita, K, Bourillot, R, Esat, TM, Fallon, S, Thompson, WG, Thomas, AL, Kan, H, McGregor, HV, Hinestrosa, G, Obrochta, SP & Lougheed, BC 2018, 'Response of the Great Barrier Reef to sea-level and environmental changes over the past 30,000 years', Nature Geoscience, 査読有、vol. 11, no. 6, pp. 426-432, doi:10.1038/s41561-018-0127-3
7. Yokoyama, Y & Esat, TM 2016, 'Deep-sea corals feel the flow', Science, 査読有、vol. 354, no. 6312, pp. 550-551, doi:10.1126/science.aak9817
8. Yokoyama, Y, Anderson, JB, Yamane, M, Simkins, LM, Miyairi, Y, Yamazaki, T, Koizumi, M, Suga, H, Kushara, K, Prothro, L, Hasumi, H, Southon, JR & Ohkouchi, N 2016, 'Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene', Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 査読有、vol. 113, no. 9, pp. 2354-2359, doi:10.1073/pnas.1516908113
9. Yokoyama, Y, Esat, TM, Thompson, WG, Thomas, AL, Webster, JM, Miyairi, Y, Sawada, C, Aze, T, Matsuzaki, H, Okuno, J, Fallon, S, Braga, JC, Humblet, M, Iryu, Y, Potts,

DC, Fujita, K, Suzuki, A & Kan, H 2018, 'Rapid glaciation and a two-step sea level plunge into the Last Glacial Maximum', Nature, 査読有、vol. 559, no. 7715, pp. 603-607, doi:10.1038/s41586-018-0335-4

10. Yokoyama, Y., Yamane, M, Nakamura, A, Miyairi, Y, Horiuchi, K, Aze, T, Matsuzaki, H, Shirahama, Y & Ando, Y 2019, 'In-situ and meteoric 10Be and 26Al measurements: Improved preparation and application at the University of Tokyo', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 査読有、doi:10.1016/j.nimb.2019.01.026

〔学会発表〕（計 5件）

11. Yokoyama, Y., Holocene Sea level change and Antarctic Ice Shelf retreats, 2017 5th PALSEA2 meeting (Xcarat, Mexico, 2017.11.9 Thu) 招待講演
12. 横山祐典, 宮入陽介, 阿瀬貴博, 平林頌子, シングルステージ加速器質量分析装置を用いた放射性炭素分析とその応用, 日本質量分析学会・日本プロテオーム学会 2018 年合同大会 (吹田, 大阪, 2018.5.15-18 Tue-Fri) 招待講演
13. Yokoyama, Y. and Webster, J.W. The last 30,000 years of sea level and paleoenvironment changes recorded in submerged coral reef terraces in the Great Barrier Reef, 2018 American Geophysical Union Fall Meeting (Washington, USA, 2018.12.11 Tue) 招待講演
14. Yokoyama, Y., Anderson, J.B., Yamane, M., Simkins, L.M., Miyairi, Y., Yamazaki, Y., Koizumi, M., Kusahara, K., Suga, H., Prothro, L.O., Hasumi, H., Southon, J.R., Ohkouchi, N., Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene reconstructed from compound specific C-14 and meteoric Be-10 (Invited), 2016 AGU Fall Meeting (San Francisco, USA, 2016.12.12 Mon) 招待講演
15. Yokoyama, Y., Anderson, J.B., Yamane, M., Simkins, L., Miyairi, Y., Yamazaki, T., Koizumi, M., Suga, H., Kusahara, K., Prothro, L., Hasumi, H., Southon, J., Ohkouchi, N., Meteoric 10Be and Compound Specific 14C Revealed Timing of Colossal Antarctic Ice-Shelf Collapse, Goldschmidt 2016 (Yokohama, Japan, 2016.6.29 Wed)
- 16.

〔図書〕（計 2件）

1. Yokoyama, Y. & Esat, TM 2015, 'Coral reefs', Handbook of Sea-Level Research, pp. 104-124, doi:10.1002/9781118452547.ch7
2. 横山祐典(2018) 地球 46 億年気候大変動-炭素循環で読み解く、地球気候の過去・現在・未来. 講談社ブルーバックス, 334p.

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://aces.aori.u-tokyo.ac.jp/yokoyama>

6. 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：エサット、テザー博士

ローマ字氏名：Dr Tezer Esat

所属研究機関名：オーストラリア国立大学

部局名：地球科学研究所

職名：研究員

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：アンダーソン、ジョン教授

ローマ字氏名：John B. Anderson

アメリカ ライス大学

研究協力者氏名：ダンバー、ロバート教授

ローマ字氏名：Robert Dunbar

アメリカ スタンフォード大学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。