

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01201

研究課題名(和文) 完新世における東南極トッテン氷河の融解と暖水塊流入の影響評価

研究課題名(英文) Assessing the impact of melting of the Totten Glacier in East Antarctica influenced with warm water mass influx during the Holocene

研究代表者

板木 拓也 (Itaki, Takuya)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長

研究者番号：30509724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：東南極トッテン氷河前縁の大陸棚において南極観測船「しらせ」により採取された海底コアのマルチプロキシ分析(堆積相解析、微化石、 $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ 比、バイオマーカー等)を行い、完新世のトッテン氷床後退プロセスについて議論した。その結果、棚氷の後退が大陸棚中央部付近では約11-9千年前、氷河前縁付近では約6-4千年前に起こっていたことが示された。このような中期完新世の終盤まで続いたトッテン氷床後退は、これまでの他地域からの報告と比べても最も若い記録のひとつとなっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、南極では外洋の温暖な深層水が棚氷の下面に入り込むことで棚氷の融解/氷床の海への流出の原因となっていることが示されており、巨大氷冠を有する東南極ではトッテン氷河の融解にともなう海水準上昇が懸念されている。本研究では、トッテン氷河が完新世にかけて2回の後退時期があったことを示し、氷床後退メカニズムの解明には棚氷下への温暖深層水移入と合わせて海底地形も重要な要素として考慮する必要があることを提案した。このメカニズムは、今後の氷床融解を考える上でも重要な示唆となる。

研究成果の概要(英文)：Multi-proxy analysis (sedimentary facies analysis, microfossils, $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ ratios, biomarkers, etc.) of sediment cores from the continental shelf at the frontal margin of the Totten Glacier, East Antarctica, was used to discuss the Holocene Totten Ice Sheet retreat process. The results indicate that the retreat of the ice shelf occurred approximately 11-9 thousand years ago near the central continental shelf and 6-4 thousand years ago near the glacial fore-edge. The Totten ice sheet retreat, which lasted until the end of the Middle Holocene, is one of the youngest records ever reported from other regions.

研究分野：地球科学

キーワード：古海洋環境 氷床 南極

1. 研究開始当初の背景

2019年9月、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の「海洋・雪氷圏特別報告書」が公表され、近年になって南極氷床の融解速度が加速していることが指摘されている。このまま氷の流出が続けば、いずれ後戻りできない段階とされるティッピング・ポイントに到達し、数世紀のうちに数メートルの海面上昇を引き起こすことが懸念されている（DeConto & Pollard, 2016 Nature）。しかし、このような将来予測にはまだ不確実性が残っており、より正確な予測のためには、時空間的な観測の拡充、大気-海洋-氷床の複雑な相互作用の理解の蓄積、さらにモデルによる検証を行っていく必要がある。

南極氷床の急激な融解の原因は、温暖な周極深層水（CDW; Circumpolar Deep Water）の流入に起因する氷床底面の融解と氷床・棚氷の崩壊である。とくに、西南極では大陸氷床の基底の大部分が海水準よりも低く、外洋からCDWが棚氷の下に入り込むことで、氷の底面融解が引き起こされている（Rignot et al., 2019 PNAS）。特にアムンゼン海では、1年間に約0.2 mmの海水準上昇に寄与する氷が消失している（Sutterley et al., 2014 GRL）。また、アムンゼン海パイナアイランド湾で採取された海底コアの解析からは、完新世初期（10,400~7,500年前）に起こった急激な氷床後退のタイミングでCDWの影響が強まったこと、さらに1940年代以降にも同様の現象が起きていることが報告されている（Hillenbrand et al., 2017 Nature）。

一方、現在のところ東南極での氷床流出の加速は西南極に比べると顕著ではない。しかし、氷床体積は西南極の10倍以上もあることから、将来的には海水準上昇に対する影響が圧倒的に大きい。例えば、東南極最大のトッテン氷河流域の場合、全てが融解すると海水準が3~6mも上昇する可能性がある。近年の観測において、このトッテン氷河の下にもCDWの流入が確認され、将来的な東南極氷床の大規模融解が大きな懸念となっている（Rintoul et al., 2016 Science Advances）。ところが、トッテン氷河の前縁部では、これまで海底コアの研究は行われておらず、CDWの流入と氷床融解及びティッピング・ポイントの関係は明らかになってない。この新たに浮上してきた懸念に早急に対応するため、気候変動に伴うCDWと氷床変動との関係を時空間的に明らかにして海水準上昇の予測精度を向上することは極めて重要である。

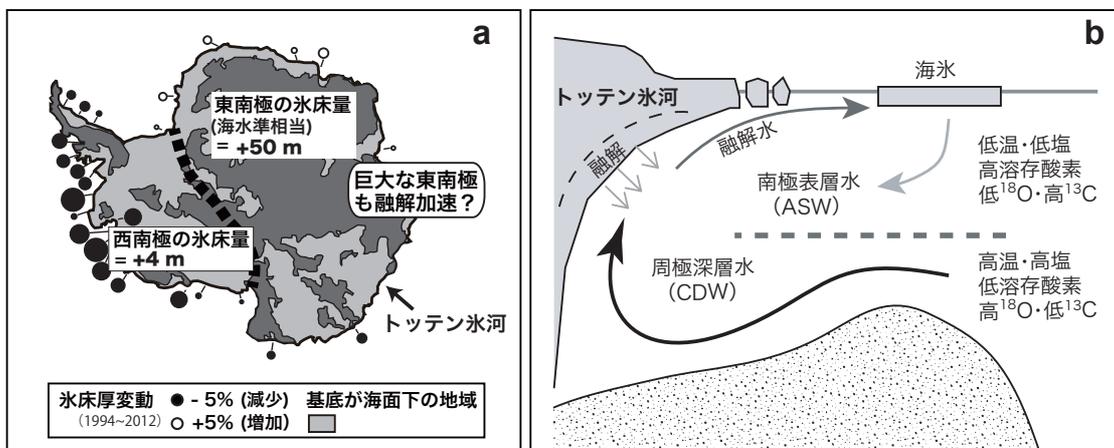


図1. (a) 南極大陸の地理的特徴. 氷床厚の減少規模を黒丸の大きさで示す (Paolo et al., 2015 Science). (b) 深層水による棚氷の底面融解の模式図と物理化学的な特徴.

2. 研究の目的

本研究の目的は、調査の空白域であるトッテン氷河前縁域の古環境研究を行い、最終氷期以降のCDWの挙動、氷河の消長、融解水の影響を明らかにし、更にコンピューターを用いたモデル計算によりメカニズムを解明することである。

トッテン氷河前縁域は、その学術的・社会的な重要性が大きいにも関わらず、厚い海氷に阻まれ、観測船による現場調査が進んでいなかった。これまで、トッテン氷河前縁域で観測を行うことが出来たのは、オーストラリアの砕氷船「オーロラ・オーストラリス」と日本の「しらせ」だけである。第61次日本南極地域観測（夏隊2019年11月~2020年3月）において、「しらせ」はトッテン氷河の前縁域とその周辺海域の観測を行い、この海域では世界初となる本格的な採泥調査を実施した。これによって様々な水深から試料を採取することが出来たことから、当該海域の鉛直的な水塊構造の変化を明らかにすることが可能となった。

既に氷床の融解が顕著な西南極においては、完新世の10,400年前以降におけるCDW流入の記録が議論されているが（Hillenbrand et al., 2017 Nature）、東南極の巨大氷冠を持つトッテン

氷河前縁域を対象とした海底コアを用いた古環境変動の研究としては本研究が最初となる。持ち帰った堆積物試料を様々な手法を用いて分析することで詳細な古環境情報を取得することに加え、「しらせ」による観測で新たに取得された地形や海洋物理データも独自のデータとしてモデル計算に活用する。

そもそも氷床は気候のサブ要素の中で応答時間が遅いので、その挙動に関する本質的な知見を得るには長期的変動を調べる必要がある。一方、近年の観測で示されている CDW の流入が本当に長期的な氷床の融解を駆動する主因なのかどうかを検証することが重要である。本研究では、観測記録では得ることの出来ない過去の変動から長期トレンドを検証することにより、気候変動・海水準変動に関する将来予測の精度向上に貢献を目指す。

3. 研究の方法

本研究で使用する海底堆積物は、グラビティーカーラーとグラブ採泥器を用いて計 16 点で採取された。前者では、長さが約 2~4m の柱状堆積物「海底コア」が 5 地点（水深 400~840m）で採取された。また、グラブ採泥器では、水深 310~990m の計 11 地点から「表層堆積物」が採取された他、採泥器に設置された CTD-D0（水深-水温-塩分-溶存酸素）プロファイラー、海底カメラ、直上採水器により様々な環境データが同時に取得されている。

表層堆積物からは、堆積物中に記録されたプロキシー（古環境を示す代替指標）と現在の海洋環境を直接比較することで、プロキシーの精度を向上し、さらに新しいプロキシーの開発を行う。海底コアからは、表層堆積物で検証したプロキシーなどを使って最終氷期（約 2 万年前）以降の環境変動を復元する。本研究では、プロキシーとして微化石（放散虫、有孔虫、介形虫、珪藻）、 ^{10}Be 濃度、脂肪酸の水素同位体比 ($\delta^2\text{H}$) を用いた。微化石は、水塊と生物生産の指標として有効である。宇宙線生成核種である ^{10}Be は、氷床下の海底には供給されず、氷床・棚氷の後退とともに堆積物中の濃度が上昇する (White et al., 2019 EPSL)。つまり、トッテン氷河前縁部とその沖合の大陸棚から採取された海底コアの ^{10}Be 濃度から、最終氷期以降の氷河後退のシナリオを明らかにできる。また、脂肪酸の水素同位体比 ($\delta^2\text{H}$) は、氷床融解水の指標となるため (例えば、Ashley et al., 2020 Climate of the Past)、氷河の後退にともなう融解水のシグナルを捉えることが可能となる。得られた古環境データを境界条件としてコンピュータによるモデル計算を行い、それらの変動メカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

計 5 本の海底コア（コア長：1.8~3.9 m）は、トッテン氷河前縁大陸棚の水深 403~842m でグラビティーカーラーを用いて採取された。いずれもコア上部は、生痕の認められる泥質堆積物で構成され、棚氷に覆われていない環境を示す珪藻や放散虫などの珪質微化石が多産している（図 2）。一方、その下位は礫質の砂あるいは泥で特徴付けられ、時にはコア先端の鉄製ビットが固い礫層に当たって大きく変形してしまう事があった。これらは、氷河性の礫質堆積物と考えられ、棚氷下の環境で近傍には氷床の接地線が存在していたことを示唆している。棚氷下から開水面への移行（カービングラインの通過）は、銀河宇宙線により生成された ^{10}Be の増加からも支持され、放射性炭素年代測定の結果によると、そのタイミングが大陸棚中央部付近では約 11~9 千年前、氷河前縁付近では約 6~4 千年前であることが示された。また、約 4.5~4 千年の期間には、棚氷が一時的に前進していた可能性がある。

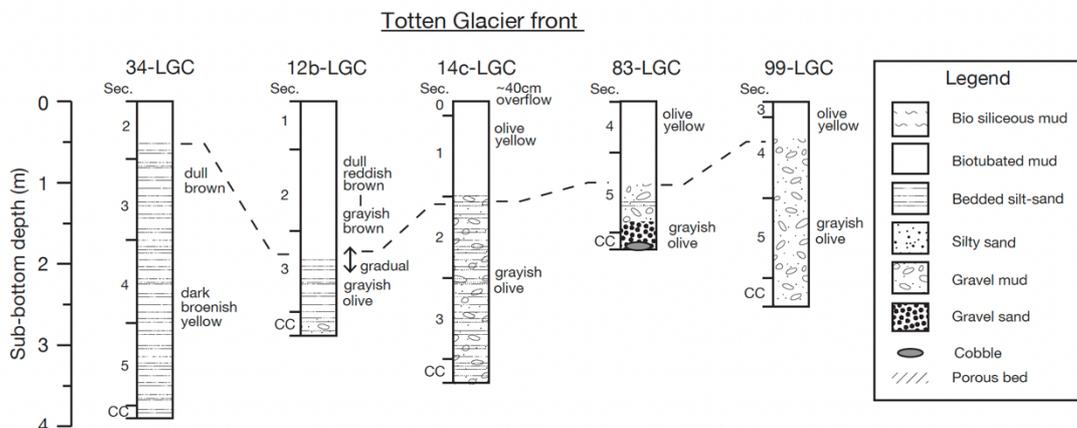


図 2. トッテン氷河沖において JARE-61 で採取された海底コアの柱状図（板木ほか，印刷中，南極資料）。

最終氷期に南極周辺の大陸棚を広く覆っていた氷床は、前期～中期完新世で急速に後退し、それと共に氷床高度が低下したことが知られている。前期完新世におけるトッテン氷床の後退は、他地域のタイミングともほぼ一致しており、最終氷期から完新世にかけての海水準上昇と棚氷下への温暖深層水移入が関連していたと考えられる。一方、中期完新世の終盤まで続いたトッテン氷床後退は、これまでの他地域からの報告と比べても最も若い記録のひとつとなっている（但し、産業革命以降を除く）。

何故、トッテン氷床の後退が約4千年前まで続いたのかは、現段階で海底コアの解析やモデル実験のみから読み取ることは出来ない。一方、過去の氷床接地線が地形的な高まりによって制約されていたと考えられ、起伏に富んでいる現在のトッテン氷河前縁域も過去に氷床が接地していた痕跡が残されている。すなわち、中期完新世の終盤まで接地していた氷床が地形的制約から解放されて現在の位置にまで後退していった可能性があり、氷床後退メカニズムの解明には棚氷下への温暖深層水移入と合わせて海底地形も重要な要素として考慮する必要がある。このメカニズムは、今後の氷床融解を考える上でも重要な示唆となる。

また、トッテン氷河前縁の大陸棚を含む東南極周辺海域から得られた表層堆積物とプランクトンネット試料から放散虫群集の分布を調査し、CDW に特徴的な群集を捉えることに成功した（Iizuka et al., 2024, *J. Micropal.*）。今後、海底コアに記録された放散虫群集から過去のCDWの変動に関する情報を得られることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 飯塚 睦、関 宰、デビット・J・ウィルソン、菅沼悠介、堀川恵司、ティナ・ファンデフリアート、池原 実、板木拓也、入野智久、山本正伸、平林幹啓、松崎浩之、杉崎彩子	4. 巻 14
2. 論文標題 Multiple episodes of ice loss from the Wilkes Subglacial Basin during the Last Interglacial	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-37325-y	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 Sasaki Satoshi, Irizuki Toshiaki, Itaki Takuya, Tokuda Yuki, Ishiwa Takeshige, Suganuma Yusuke	4. 巻 27
2. 論文標題 Relationship between Modern Deep-Sea Ostracods and Water Mass Structure in East Antarctica	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 211-230
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2517/PR210033	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 Iizuka Mutsumi, Itaki Takuya, Seki Osamu, Makabe Ryosuke, Ojima Motoha, Aoki Shigeru	4. 巻 43
2. 論文標題 Radiolarian assemblages related to the ocean-ice interaction around the East Antarctic coast	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Micropalaeontology	6. 最初と最後の頁 37～53
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/jm-43-37-2024	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 板木拓也、菅沼悠介、関 宰、山本正伸、大森貴之、天野敦子、石輪健樹、清家弘治、尾張聡子、羽田裕貴、池原 実、青木 茂
2. 発表標題 完新世における東南極トッテン氷河沖の棚氷後退
3. 学会等名 地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 板木拓也・中山佳洋・菅沼悠介	4. 発行年 2023年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 754
3. 書名 古生物学の百科事典、コラム：縮小する南極氷床	

〔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	関 宰 (Osamu Seki) (30374648)	北海道大学・低温科学研究所・准教授 (10101)	
研究分担者	中山 佳洋 (Yoshihiro Nakayama) (30840201)	北海道大学・低温科学研究所・助教 (10101)	
研究分担者	井尻 暁 (Akira Ijiri) (70374212)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	菅沼 悠介 (Yusuke Suganuma) (70431898)	国立極地研究所・先端研究推進系・准教授 (62611)	
研究分担者	池原 実 (Minoru Ikehara) (90335919)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授 (16401)	

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
---------	---------