

平成 22 年 6 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19340158

研究課題名（和文） 完新世における西南極氷床の崩壊の復元

研究課題名（英文） Reconstruction of West Antarctic Ice Sheet during the Holocene

研究代表者

大河内 直彦 (OHKOUCHI NAHIKO)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・プログラムディレクター

研究者番号：00281832

研究成果の概要（和文）：南極ロス海の堆積物中に含まれる C₁₄, C₁₆, C₁₈ 脂肪酸を単離・精製し、その放射性炭素年代を測定した。その結果は、ロス海に張り出す西南極氷床の氷縁が過去 5000 年間に大きく後退したことを示した。このことは、西南極氷床が完新世に大きく融解してきたことを示唆し、北半球氷床と南半球氷床の融解に大きなタイムラグが存在することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We measured radiocarbon ages of fatty acids extracted and purified from Ross Sea sediments, Antarctica. It indicated that ice edge of West Antarctic Ice Sheet substantially retreated during the last 5000 years. The major deglaciation of WAIS occurred in the Holocene with a large time-lag from Northern Hemisphere ice sheets.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード：西南極氷床、完新世、放射性炭素年代、バイオマーカー、水素同位体比

1. 研究開始当初の背景

西南極氷床が近い将来、融解あるいは崩壊する危険性については、Mercer (1978) が初めて指摘して以来、長らく危惧されてきた。グリーンランドよりもはるかに高緯度に存在する西南極氷床でありながら、その危険性が指摘される根拠は、(1) 地球温暖化が高緯度ほど顕著に気温上昇を引き起こすことと、(2) 西南極氷床の底面の多くが海水準面以下にあり、この氷床が海水中にどっぷり浸か

っているという点にある (Mercer, 1978; Alley and Whillans, 1991; Oppenheimer, 1998)。西南極氷床は、全て融解してアイスタシーによってリバウンドしたとしても、その底面の多くは海水面より下にある典型的な海洋氷床なのである。

2007 年に発表された IPCC の第 4 次報告書によると、人工衛星による氷床の流動観測などから、過去 10 年間にわたって西南極氷床は、毎年約 47Gt のスピードで縮小していると推定されている (Lemke *et al.*, 2007)。これ

は、海面上昇速度に換算すると1年に0.13 mmに相当する。ちなみに、西南極氷床は約 $3.8 \times 10^6 \text{ km}^3$ の体積をもち、全て融解した場合、海面はおよそ5~6 m上昇すると推定されている。この海面上昇の規模は、最終氷期以降の海面上昇に比べると桁違いに小さいものだが、人類社会に与える影響は計り知れないほど大きい。

現在の西南極氷床の底面部が融解していることはよく知られているが、その詳しい実態はほとんどわかっていない (Rignot and Jacobs, 2002)。また西南極氷床は、最終氷期が終わり海面がほとんど上昇し終わった後に融解し始め、現在も融解の途中にあるという断片的な多数の証拠がこれまで報告されてきた (例えば, Conway *et al.*, 1999; Nakada *et al.*, 2000; Stone *et al.*, 2003; Parizek *et al.*, 2003)。間氷期が3万年近くにわたって続いた酸素同位体ステージ 11 では、西南極氷床がほとんど融解したことも指摘されている (Scherer *et al.*, 1998)。これらのことは、西南極氷床が他の氷床と異なり、氷期/間氷期サイクルと時間差をもつダイナミックな動態を示すことを示唆している。

さらに、西南極氷床下には活火山がいくつか存在する点も忘れてはならない (Blankenship *et al.*, 1993; Behrendt *et al.*, 1998)。もし、それらが大規模な火山活動を起こせば、大量の融氷水が生成されることは間違いない。それにとまなう海面上昇は、人類社会にとって脅威となるかもしれない。実際、およそ2,200年前には、西南極氷床の一部で分厚い火山灰が堆積していることがレーダー観測によって明らかにされており、その火山灰の起源は西南極氷床下にある火山であることが指摘された (Corr and Vaughan, 2008)。また、現在の西南極氷床下には、複数の巨大な氷底湖の存在が確認されている (Siebert *et al.*, 2005)。氷底湖は移動することもあり (Gray *et al.*, 2005; Wingham *et al.*, 2006)、その挙動が氷床の流れを規定する重要な要因と考えられている。

今後、さらに多くの証拠を積み上げて、西南極氷床の過去および現在の動態について注意深く検証していく必要がある。南極縁辺海の堆積物には、こういった特徴をもつ西南極氷床の融解や消長の歴史が様々な物理的、化学的性質として記録されているはずであり、その検証には不可欠な研究対象である。さらに、地球温暖化にとまなう極域の気温と海水温の上昇に対して、西南極氷床がどのように応答するのかについても詳細に検討する必要がある (例えば, Mercer, 1978; Shepherd *et al.*, 2004)。現在の気候変動の推定に用いられている大気-海洋結合モデルでは、棚氷の挙動のパラメタリゼーションが難しい (阿部彩子、私信)。したがって、地質学的な記録

を得ることは、研究の方向性や気候モデルの束縛条件を考えるうえでも非常に重要なことである。このような問題意識が背景にあり、ロス海やウエッデル海の堆積物の解析が行われてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、完新世に起きた西南極氷床の間歇的に起きた崩壊現象を、ロス海の海底堆積物を分析することによって明らかにすることである。特に、化合物レベルの放射性炭素年代測定法と化合物レベルの水素同位体比測定という新しい研究手法を導入することにより、これまでの研究にはない新しい研究の局面を切り開くことを重要な目的としている。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者が開発した南極海堆積物に含まれる脂肪酸の放射性炭素年代を測定し、堆積物の正確な年代を推定する。

(2) バイオマーカー分析や ^{10}Be などを通して、海洋環境の変遷 (西南極氷床の接地線や棚氷縁辺部の通過) を明らかにすることにより、堆積物の正確な年代を求め、西南極氷床の完新世の動態についてさらなる知見をえる。

4. 研究成果

本研究の成果としては実験法の確立と、その応用の2つに分けることができる。ここではそれぞれの研究成果を分けて述べることにする。

(1) 化合物レベル放射性炭素年代のルーチン化

本研究ではまず、化合物レベル放射性炭素年代をルーチンで測定可能にするために、堆積物中に含まれる脂肪酸の単離・精製法のスピードアップを図る新たな分析技術を確立した。

年代測定を行う前には、目的の有機化合物を抽出・分離するとともに、単離・精製する必要がある。これまで発表されたほとんどの研究では、この有機化合物を単離・精製する操作に、キャピラリー分取ガスクロマトグラフィー (Preparative capillary gas chromatography: PCGC) と呼ばれる分析機器を用いている。これは、キャピラリーカラムを用いたガスクロマトグラフィーを、分取コレクター (PFC) と呼ばれる分取用のデバイスに結合したものである。あらかじめ目的化合物の保持時間を調べておき、その保持時間になるとキャリ

アーガスの流路を切り替えて、目的成分を冷媒によって捕集するというものである。ただし、放射性炭素年代測定のために単一成分を必要量精製するためには、1試料につき数十回PCGCに注入する必要がある、少なくとも数日間にわたる長時間の作業が必要である。さらにその間、目的化合物の保持時間と分取時間がずれないように注意深くモニターし続けなければならない。これは、PCGCに一度に注入できる量が限られていることと、ガスクロマトグラフィーの状態を一定に維持することの難しさに由来する短所といえる。

この短所を克服するべく、研究代表者らは、高速液体クロマトグラフィー (High performance liquid chromatography: HPLC) と検出器として ELSD (蒸発光散乱検出器) を用いた脂肪酸を単離する手法を開発した (Ohkouchi et al., in prep.)。

HPLCの条件を簡単にまとめると以下のようなになる。溶媒の流量を 1 ml/min とした状態で、ELSDの設定は Evaporator :35°C, Nebulizer:30°C, Gas Flow: 1.90 SLM (SLM : Standard Liter Per Min, 60 psi, 25°C での流量 1/min) に設定すると脂肪酸に対する感度が最適である。

HPLCのカラムは Develosil C30-UG-5 (内径: 4.6 mm, 逆相: 固定相の極性低く極性の高い化合物から通過, C30: シリカゲルの表面に炭素数 30 の炭化水素基を付加したものを 750 mm につなげたもの) を用いた。溶媒は Acetonitrile 67.5%, Ethyl acetate 22.5% をベースに、Toluene 10% もしくは Methanol 10% をそれぞれ混合したものを用いた。

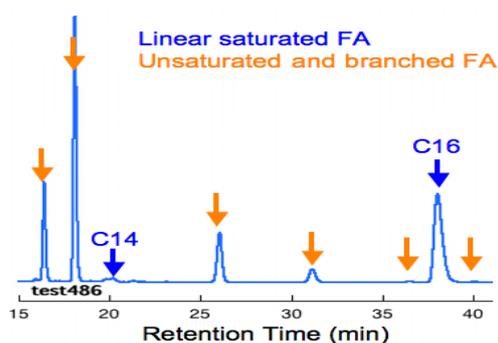


図1. HPLC/ELSDによる脂肪酸の分離例

上記の最適条件のもとでメチルエステル化した直鎖飽和脂肪酸 (炭素数 14,16,18) 等の標準物質を導入し、ELSDでそれらの保持時間を測定した。この保持時間から、フラクションコレクターをセットし、目標とする脂肪酸が通過する時間帯に流れてくる移動相のみをバイアルに分取した。インジェクションした脂肪酸をほぼ 100%回収できることが明らかになった。

HPLCを化合物の分取に用いる長所は、

PCGCを用いた場合に比べ、圧倒的に短い時間と少ない労力で堆積物中から単一化合物を精製できることである。例えば、脂肪酸の単離には2~3時間で可能である。

このようにして精製された脂肪酸は、燃焼して二酸化炭素に変換し、その後還元によりグラファイト化のプロセスを経て、タンデム型加速器分析計 (Accelerator Mass Spectrometry: AMS) にて放射性炭素濃度を測定する。現在、AMSを用いて放射性炭素年代測定を行っているほとんどの施設において、高精度年代測定に必要な炭素量はおよそ 1 mg である。ただし、海底堆積物に含まれる有機化合物の濃度は、多いものでも通常 1g の乾燥堆積物中に数 μg 程度なので、放射性炭素年代測定に必要な炭素量を集めるには 100g 以上という多量の堆積物試料を抽出する必要がある。化合物レベルの放射性炭素年代測定をより一般的な手法にするためには、必然的に微量試料での放射性炭素の測定法の開発が必要になる。この流れのもとで、90年代後半にウッズホール海洋研究所のNOSAMSでは、従来よりも1桁低い 100 μgC で、同じ精度で放射性炭素年代を測定する手法の開発に成功した (Pearson et al., 1998; von Reden et al., 1998)。その後、カリフォルニア大学アーバイン校では、30 μgC という微量炭素量での年代測定法の開発に成功している (Santos et al., 2007)。日本では、国立環境研究所で微量試料量での放射性炭素年代が行われており (Uchida et al., 2001)、東京大学タンデム加速器研究施設 (MALT) においても今回の研究成果により、50 μgC 以下の年代測定が最近可能になりつつある。このような微量分析技術の開発のおかげで、化合物レベルの放射性炭素年代は、より多くの応用に供することが可能となった。本稿で解説する南極縁辺海の年代決定も、この技術開発によってはじめて可能になったといつてよい。



図2 本研究で作成した微量グラファイト精製用ガラスライン

本研究ではさらに、100 μgC という微量で放射性炭素年代測定を可能にするを目的に、微量グラファイト精製用ガラスラインを作成した (図2)。東京大学のMALTにおいて、微量放射性炭素年代測定のための基礎

実験を行い、その手法を確立した (Yokoyama et al., in press)。

(2) 実際の試料への応用と、完新世における西南極氷床の復元

こういった分析的な側面を確立したうえで、フロリダ州立大学で保管されていた米国の研究グループが採取した堆積物を譲り受け、6本の堆積物コアについて、その中に含まれる脂肪酸の放射性炭素年代を測定し、それらの堆積物の正確な年代を決定した。図3には、その結果をまとめ、約5000年前の棚氷の縁辺部の推定位置を示したものである。

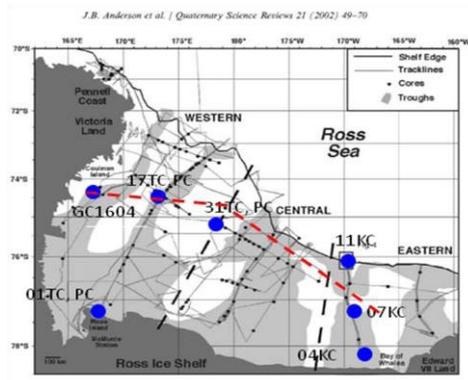


図3. 完新世中期(約5000年前)も棚氷の縁辺部の位置(赤点線)。青丸印は本研究で用いた海底堆積物コアの位置を示す。

完新世中期は、現在の棚氷の縁辺部よりも200km以上北側に位置している。このことは、過去5000年間に西南極氷床が大きく後退したきたこと、すなわち融解してきたことを強く示唆するものである。

この結果は、西南極氷床が現在も融解の途中にあるという、これまで得られてきた断片的な証拠を強く支持するものである。それと同時に、西南極氷床の動態について今後も注意深く観察しておく必要性を裏付ける結果である。

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は下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Yokoyama Y, Koizumi M, Matsuzaki H, Miyairi Y, Ohkouchi N (2010) Developing ultra small-scale radiocarbon sample measurement at University of Tokyo. *Radiocarbon*. in press. 査読有
- ② 大河内直彦 (2009) 化合物レベル放射性炭素年代法の原理と南極縁辺海堆積物への応用. *第四紀研究*, 48, 131-142. 査読有
- ③ Chikaraishi Y, Tanaka R, Tanaka A, Ohkouchi N (2009) Fractionation of hydrogen isotopes during

phytol biosynthesis. *Organic Geochemistry*, 40, 569-573. 査読有

- ④ Shah SR, Mollenhauer G, Ohkouchi N, Eglinton TI, Pearson A (2008) Origins of archaeal tetraether lipids in sediments: Insights from radiocarbon analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 4577-4594. 査読有
- ⑤ Ohkouchi N, Eglinton TI (2008) Compound-specific radiocarbon dating of Ross Sea sediments: A prospect for constructing chronologies in high-latitude oceanic sediments. *Quaternary Geochronology*, 3, 235-243. 査読有
- ⑥ Chikaraishi Y, Matsumoto K, Kitazato H, Ohkouchi N (2007) Sources and transformation processes of pheopigments: Carbon and hydrogen isotopic evidence from Lake Haruna, Japan. *Organic Geochemistry*, 38, 985-1001. 査読有
- ⑦ 能美仁博, 横山祐典, 三浦英樹, 大河内直彦 (2007) 深海底堆積物の解析による最終氷期以降の西南極氷床の消長. *第四紀研究*, 46, 103-117. 査読有

[学会発表] (計10件)

- ① 大河内直彦 (2009) 海洋の生物地球化学的循環の変動. 地球惑星科学連合大会2009, 幕張メッセ, 5月20日.
- ② Koizumi, M., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H., Miyairi, Y., and Ohkouchi, N. (2009) Development of ultra-small scale radiocarbon sample measurement at MALT AMS, Tokyo University. Radiocarbon Conference, Rome. 6月12日
- ③ Ohkouchi, N. (2009) Future directions in probing global biogeochemical cycles. IVENST keynote lecture, Bremen, Sep. 11月23日
- ④ Yokoyama, Y., Yamane, M., Ohkouchi, N. and Matsuzaki, H. (2009) Methods for detecting Holocene sea level signals in Antarctica. Geological Society of America. 11月6日
- ⑤ 大河内直彦, 横山祐典, 三浦英樹, 豊田倫子, 方石嘉人, 小泉真認, Eglinton T. I., 北里洋 (2008) 西南極氷床の完新世における融解. 日本第四紀学会シンポジウム「第四紀後期の気候変動と地球システムの挙動—その原因とメカニズムの解明に向けて—」, 東京大学小柴ホール, 8月25日.
- ⑥ Yokoyama, Y., Suga, H., Esat, T. M., Ohkouchi, N., and Lambeck, K. (2008) Sea-level changes during the time into and out of the Last Glacial Maximum. PAGES/IMAGES Workshop “Empirical Constraints on Future Sea-Level Rise, Bern, Aug 25.
- ⑦ 小泉真認, 横山祐典, Anderson, J., 大河内直彦 (2008) 西南極氷床変動史の復元に向けた化合物レベル放射性炭素年代測定法の開発. 日本地球化学会, 東大. 9月15日
- ⑧ Ohkouchi, N., Koizumi, M., Anderson, J. B., Eglinton, T. I., Miura, H., and Yokoyama, Y.

- (2008) Application of compound-specific radiocarbon dating for Antarctic margin sediments. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, Dec. 17, (Invited speaker).
- ⑨ Koizumi, M., Yokoyama, Y., Anderson, J. B., and Ohkouchi, N. (2008) Development a novel method to isolate fatty acids for compound-specific radiocarbon dating to reconstruct West Antarctic Ice Sheet melting history. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, Dec. 18.
- ⑩ Ohkouchi N., Eglinton TI, Toyoda M, Chikaraishi Y, Koizumi M, Tokuyama H, Miura H, Yokoyama Y (2007) Application of compound-specific radiocarbon dating for studying West Antarctic Ice Sheet during the Late Quaternary. Goldschmidt Conference 2007, Cologne, Aug. 22.

[図書] (計 1 件)

- ① 大河内直彦 (2008) チェンジング・ブルー：気候変動の謎に迫る. 岩波書店, 422 p.

[その他]

ホームページ

<http://www.jamstec.go.jp/biogeos/j/elhrp/biogeoc hem/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大河内 直彦 (OHKOUCI NAOHIKO)
独立行政法人海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・プログラムディレクター
研究者番号：00281832

(2) 研究分担者

横山 祐典 (YOKOYAMA YUSUKE)
東京大学・海洋研究所・准教授
研究者番号：10359648

(3) 連携研究者