

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540459
 研究課題名 (和文) 最終退氷期における北西太平洋・中深層循環の高精度復元研究
 研究課題名 (英文) High-resolution study of the mid-depth water circulation in the Northwest Pacific during the last deglaciation.

研究代表者

阿波根 直一 (AHAGON NAOKAZU)
 北海道大学・大学院理学研究院・准教授
 研究者番号：30359161

研究成果の概要：青森県下北半島沖ならびに北海道知床半島沖より採取した深海堆積物を用いて、最終氷期以降の北西太平洋／オホーツク海の中深層循環の変遷について高時間分解能で解析した。その結果、研究海域において最終氷期から退氷期にかけて急激に中深層循環が変化した証拠が確認された。そのタイミングはグリーンランド氷床コアに認められる気候イベントと一致し、北半球規模の大気モードの変化を通じて北太平洋中層水の再編が生じた事を示唆している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	1,400,000	0	1,400,000
19年度	1,100,000	330,000	1,430,000
20年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,100,000	510,000	3,610,000

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：古海洋・古気候・微化石・北太平洋中層水

1. 研究開始当初の背景

これまでに氷床コアや深海底コアの研究から、南北半球における突然かつ急激な気候変動およびその位相差と海洋循環を結びつけるメカニズムとしてシーソー仮説 (Broecker, 1998) が提唱されてきた。また、過去の大気中の放射性炭素濃度の変遷が明らかにされるに従って、地球磁場強度の変動以外に、海洋大循環のモード変化による放射性炭素濃度変動が指摘されている。特に、新ドリラス (YD) 期やベーリング／アレレード (B/A) 期、ハイニンリッヒ事件は、海洋大循環の停滞と同時に大気中の放射性炭素濃度の変化をもたらしたと考えられている (例えば Hughen et al., 2004)。

現在のグリーンランド沖で形成される北大西洋深層水が停滞すると、南大洋起源の深層水がより勢力を増すというのがシーソー仮説であるが、北太平洋域においても同時期中層水形成が活発化した可能性がある。

Ahagon et al. (2003) や Ahagon & Uchida (2004) では、浮遊性および底生有孔虫の放射性炭素年代に大気中の放射性炭素濃度の変遷を考慮にいれた深層水年齢決定法 (投影年代法) を用いて、これまで連続的な記録が欠如していた北西太平洋中層域における退氷期中深層水変動を復元し、北西太平洋の中深層水が千年スケールで北大西洋深層水の強弱と逆位相で変動している事を指摘した。

また、その変動パターンからアジアモンスーンの盛衰と北太平洋中層水 (NPIW) の形成との関連性を推察した。

しかしながら、放射性炭素による深層水復元法のみでは限界がある。それは、大気-海洋間における放射性炭素の交換平衡時間が長く (〜10 年オーダー)、かつ海域・海洋環境によってリザーバー年齢が異なる為に見かけの深層水年齢のみでは水塊の性質・起源が特定できない事である。これは有孔虫殻の炭素安定同位体を用いた場合も同様である。例えば、Keigwin (1998) は最終氷期に北太平洋で中深層水が形成されたと解釈しているが、Matsumoto et al. (2002) では最終氷期極相期 (LGM) の太平洋広域の炭素安定同位体比分布から LGM における北太平洋中深層水の起源を不定とした。このような炭素同位体の手法上の限界により、Ahagon et al. (2003) ではどのような性質の中深層水が研究海域に存在していたかを詳細に論じることが出来なかった。この欠点を克服し、中深層水の起源を特定するためには、大気-海洋間の気体交換に影響されない古環境指標と組合わせて解釈する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では特に海洋環境の変化が著しい退氷期に焦点をあて、堆積物コアの解析から北西太平洋域における中深層循環の変動を高時間解像度で明らかにする。現在の NPIW は、オホーツク海やアラスカ湾沖にその起源域があるとされるが、退氷期や LGM においても同様であったとする証拠は得られていない。北西太平洋海域における有孔虫殻の放射性炭素/安定炭素同位体比、微量元素組成、微化石群集組成ならびに海洋基礎生産の変遷を組合わせたデータを取得することにより、研究海域における退氷期中深層循環の変動を詳細に把握し、アジアモンスーンを介した北大西洋域 (現在の熱塩循環の起源域) の環境変動とのテレコネクションの実態を把握することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、微古生物学的手法および地球化学的手法を用いて、当該海域における古海洋環境の復元を行った。なお、下北半島沖やオホーツク海では、申請者らにより複数のピストンコア試料が得られており、有孔虫殻の酸素炭素安定同位体比による層序、放射性炭素による年代

測定を実施し、最終退氷期の詳細を記録したコアを研究に使用した。Ahagon et al. (2003) および Hoshiba et al. (2006) によって、青森県下北半島沖 MR01-03 PC4/5 (水深 1355m) の年代モデルが構築されており、このコアをリファレンスとして、同海域の酸素極小層よりも深い斜面上に位置する MR04-06 PC3 コア (水深 1725m) を、またオホーツク海試料として知床半島沖の水深 1222m より得られた MR06-04 PC4 コアを使用した。

過去の基礎生産変動の指標として、下北沖 PC3 コアでは CNS 分析計による有機炭素・硫黄含有量の測定ならびにモリブデン青-比色法によるオパール含有量、電量滴定法による炭酸塩含有量の測定を北海道大学にて実施した。また、同時に底生有孔虫化石群集解析を実施し、群集変化に及ぼす基礎生物生産と深層水循環変化の影響を考察した。

有孔虫殻の微量元素については、海洋研究開発機構むつ研究所の高分解能 ICP-MS を用いて下北沖 PC4/5 コアならびに知床沖 PC6 コアについて実施した。なお、環境要因と微量元素組成間の相関をみるために、日本周辺海域の表層堆積物やプランクトン試料も分析対象とした。

4. 研究成果

1) 下北半島沖コアの成果

下北半島沖については、既に深層水見かけ年齢の変遷が Ahagon et al. (2003) によって復元されており、これをさらに詳細に検討するために、近隣の PC3 コアを用いて底生有孔虫化石群集解析と過去の基礎生物生産の復元を実施した。本コアは、完新世の一部を欠如するものの、過去 1〜3 万年前の記録を有している。

底生有孔虫化石群集については、コアより古地磁気用キューブを用いて約 5cm 間隔で計 203 試料を採取・分析し、Pianka の α 指数に基づく試料間類似度をマトリクスに群平均法によるクラスター解析を実施した。この結果、5つのクラスターとその指標種が識別された (図 1)。

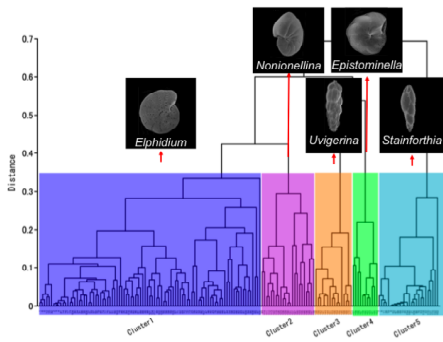


図1. 下北沖 PC6 コアに産出する底生有孔虫群集と指標種

これら5つのクラスターの層序分布を図示したのが図2である。氷期 (20.5~32 ka) には, *Elphidium batialis* が優勢なクラスター1が, 氷期と退氷期の過渡期 (16.5~20.5 ka) には *Nonionellina labradorica* が優勢なクラスター2, 退氷期 (10~16.5 ka) には *Uvigerina akitaensis* が優勢なクラスター3, *Epistominella pacifica* が優勢なクラスター4が認められた。また, 2万年以前に局所的に *Stainforthia* 属が卓越するクラスター5が認められた。

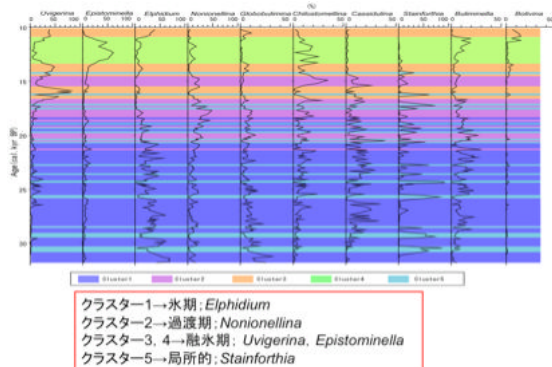


図2. 下北沖 PC3 コアにおける底生有孔虫化石群集の層序分布

底生有孔虫化石群集が中深層水の影響を反映しているのか, 基礎生物生産 (有機炭素フラックス) を反映しているのか検討するために, 炭酸塩含量, オパール含量, 有機炭素含有量, および経験式より推測された過去の基礎生物生産量との比較検討をクロススペクトル解析により実施した。その結果, *N. labradorica* は特にオパール含有量との関連度が高く, また2000~3000年周期の変動特性をもつことが明らかにされた。この周期は, グリーンランド氷床コアで認められているダンスガード・エシュガー振

動の周期帯にあり, 大気循環を経由した北半球規模での気候変動が基礎生産力の変動を促し, それが深層の底生有孔虫群集に伝播している可能性がある。

また, YD 期を中心に認められる *E. pacifica* 群集は, 溶存酸素に富む海底環境を示唆し, Ahagon et al. (2003) が指摘した YD 期における北西太平洋の中深層水の形成強化と一致する。一方, 有機炭素に基づく過去の基礎生物生産の評価は, 氷期に高く (300gC/m²/yr), 退氷期から後氷期に向けて低下する (~100gC/m²/yr) ものであった。B/A 期に環太平洋沿岸域においてラミナの形成が広く認められ, その要因として北西太平洋域において生物生産が過剰に増加したという仮説 (Crusius et al., 2004) があるが, 本研究では B/A 期にそのような著しい生物生産の増加が認められないことから, 中深層水循環の停滞が広範囲に及ぶラミナ形成と結びついているものと考えている。

2) オホーツク海コア PC4 の成果

オホーツク海知床半島沖 PC4 コアについて, 詳細な年代軸を確立するため底生有孔虫 *Uvigerina* spp. を用いて, 酸素・炭素同位体比層序の構築を行った。PC4 コアは, ダークオリーブ色を呈する均質な半遠洋性の珪藻軟泥であり, この堆積物に含まれる底生有孔虫はオホーツク海における中層水変動を記録していると考えられる。

本研究で得られた酸素同位体比と, すでに測定済みの放射性炭素年代の結果によると, 全長19mの本コアは約3万年以降の海洋環境変動を連続的に記録していることが明らかとなった。B/A 期は, コア深度で1,300-1,400 cm 付近とみられ, グリーンランド氷床コアに見られるような急激な酸素同位体比変動は本コアには記録されていない。しかしながら, 炭素安定同位体比の結果は, 酸素同位体ステージ (MIS) 3 の約28~25 ka とハインリッヒ事件 H1 に相当する18.5~16.5ka に, 同位体比が約0.6‰急激に重くなる傾向を示していた。この変化は漸移的に起こるのではなく, 数十年周期の極めて短周期の中層水循環の変動が起こっていたことを強く示唆している。MIS3 や H1 に代表される寒冷な時期に, 比重の大きい海水ができることによって, 重い炭素同位体比をもった海水が沈み込み, 中層に影響を及ぼした可能性がある。

これを確かめるべく, 退氷期における

Uvigerina spp. の Mg/Ca を測定し、中層環境の水温の変遷の復元を試みた。*Uvigerina* spp. の Mg/Ca 比は、0.6–1.3 mmol/mol の範囲で変動していた (図 3)。

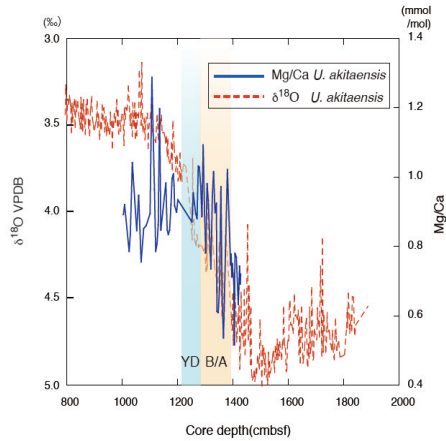


図 3. オホーツク海コア PC4 における底生有孔虫 Mg/Ca の変化

Mg/Ca の値の変動幅は、B/A 期の短い期間で大きく変動し、このことから B/A 期に頻繁に温暖と寒冷な時期を交互に繰り返していた可能性が指摘できる。また B/A 期から YD 期、完新世への Mg/Ca の変動パターンは、底生有孔虫の炭素同位体比の変化と類似した変動を示していた。Mg/Ca 比の変化から推測される水温の変動は、日本海表層堆積物の *U. akitaensis* の水温換算式 (木元ほか, 2008) を適用すると、退氷期から完新世初期の間で 0–4°C の変動幅があることが明らかになった。これらのことから、底生有孔虫の炭素同位体比にみられる急激な変動は、水温指標である Mg/Ca の変化と基本的に同調しており、重い炭素同位体比と低水温が一致していることを示していた。もし、*Uvigerina* spp. の炭素同位体比の結果がオホーツク海を起源とする中層水の形成を反映したものと仮定すると、MIS3 と H1 の時期に活発な中層水が形成されたことになる。これは、下北半島沖から得られた *Uvigerina* spp. の Mg/Ca による水温変化の結果と矛盾しない。すなわち、下北半島沖の H1 の時期の深層水温は最終氷期 (MIS2) よりもむしろ低く、H1 の時期に冷たい海水が到達していたことを示唆している (木元ほか, 2008)。したがって H1 の時期にオホーツク海では中層水が活発に形成されており、その海水が下北半島沖まで到達していた可能性が高い。今後の課題として、

底生有孔虫の Mg/Ca を MIS3 まで測定し、炭素同位体比変動との対比をさらに進める予定である。また浮遊性有孔虫の Mg/Ca および安定同位体比の結果よりオホーツク海の海水の塩分変動を復元し、中層に変動をもたらす海水が表層起源であるかどうかを明らかにしたい。

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 9 件)

① Y. Ujiié, K. Kimoto, and J. Pawlowski, Molecular evidence for an independent origin of modern triserial planktonic foraminifera from benthic ancestors, *Marine Micropaleontology*, 69, 334–340, 2008, 査読有。

② M. Uchida, K. Ohkushi, K. Kimoto, F. Inagaki, T. Ishimura, U. Tsunogai, T. Tuzino, and Y. Shibata, Radiocarbon-based carbon source quantification of anomalous isotopic foraminifera in last glacial sediments in the western North Pacific, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 9, Q04N14, doi:10.1029/2006GC001558, 2008, 査読有。

③ M. Graves, et al. (incl. K. Kimoto), Interlaboratory comparison study of calibration standards for foraminiferal Mg/Ca thermometry, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 9, 2008Q08010, doi:10.1029/2008GC001974, 2008, 査読有。

④ K. Sato, M. Oda, S. Chiyonobu, K. Kimoto, H. Domitsu, J. Ingle, Establishment of the western Pacific warm pool during the Pliocene: evidence from planktonic foraminifera, oxygen isotopes and Mg/Ca ratios, *Paleogeog. Paleoclimatol. Paleocol.*, 256, 140–147, 2008, 査読有。

⑤ 内田昌男, 阿波根直一, 大串健一, 最終退氷期における北西太平洋中深層水循環変動と大気 CO₂ 変動, *月刊地球*, 345, 159–170, 2008, 査読無。

⑥ 木元克典, 阿波根直一, 大串健一, 内田昌男, 底生有孔虫骨格の微量元素による最終氷期以降の北西太平洋の変遷-下北半島沖 MR01-K03 PC4 コアの例-, *月刊地球*, 345, 182–188, 2008, 査読無。

⑦A. Kitamura and K. Kimoto, Eccentricity cycles shown by early Pleistocene planktonic foraminifers of the Omma Formation, Sea of Japan, Global and Planetary Changes, 55, 273-283, 2007, 査読有.

⑧M. Hoshiya, N. Ahagon, K. Ohkushi, M. Uchida, I. Motoyama, A. Nishimura, Foraminiferal oxygen and carbon isotopes during the last 34 kyr off northern Japan, northwestern Pacific, Marine Micropaleontology, 61, 196-208, 2006, 査読有.

⑨N. Harada, N. Ahagon, T. Sakamoto, M. Uchida, M. Ikehara, Y. Shibata, Rapid fluctuation of alkenone temperature in the southwestern Okhotsk Sea during the past 120 kyr, Global and Planetary Changes, 53, 29-46, 2006, 査読有.

[学会発表] (計13件)

①佐藤瑛子, 菅沼香織, 西弘嗣, 阿波根直一, 下北半島沖海底コア(MR04-06 PC-3)からみた過去3万年間の古海洋環境, 古海洋学シンポジウム, 2009/1/8 (東京大学海洋研究所).

②木元克典・中村由里子・原田尚美・岡崎裕典・長島佳菜, MR06-04 航海で得られたオホーツク海のピストンコア試料の安定酸素同位体比層序と試料前処理法の確立. BE シンポジウム (JAMSTEC), 2009/03/12 (立教大学).

③木元克典・長谷川四郎・池原研, 北西太平洋の底層水温の推定にむけた底生有孔虫の Mg/Ca キャリブレーション: *Uvigerina akitaensis* Asano の例, MRC 微化石研究集会, 2008/03/04 (北海道大学).

④木元克典・内田昌男・大串健一・阿波根直一・長谷川四郎・池原研, 過去2万年間における底生有孔虫 Mg/Ca による北西太平洋の中層水温度復元, BE シンポジウム (JAMSTEC), 2008/03/13 (横浜市立大).

⑤木元克典・長谷川四郎・池原研, 深層水温復元のための底生有孔虫による Mg/Ca キャリブレーション, 地球惑星科学連合大会 2008, 2008/05/25 (幕張メッセ).

⑥木元克典, 浮遊性有孔虫骨格の Mg/Ca 比を用いた北西太平洋の高精度古環境復元に向けて, 日本古生物学会, 2008/07/04 (東北大学).

⑦N. Harada, M. Uchida, Y. Shibata, N. Ahagon, W. Miyashita, C. B. Lange, S. Pantoja, Fluctuations in alkenone-derived sea surface temperature, productivity, and ventilation

in the Magellan Strait, Chilean continental margin, over the past 12 kyr, European Geosciences Union, 2007/04/17 (Vienna).

⑧木元克典, 浮遊性有孔虫のかたち, 形の科学会, 2007/06/15 (東京理科大学).

⑨木元克典・A. Y. Sadekov・S. Eggins・P. De Deckker, 飼育された浮遊有孔虫オーブリナ・ユニバーサの Mg/Ca:LA-ICPMS の結果, シンポジウム「バイオミネラリゼーションと石灰化」, 2007/06/21 (東京大学海洋研究所).

⑩K. Kimoto, T. Ishimura, U. Tsunogai, Y. Ujiie, T. Itaki, J. Pawlowski, Living triserial planktonic foraminifera *Gallitellia vivans* (Cushman): Ecology, stable isotopes and phylogeny, 9th International Conference on Paleoceanography, 2007/09/06 (Shanghai).

⑪K. Sato, M. Oda, S. Chiyonobu, K. Kimoto, Development of the western Pacific warm pool during the Pliocene based on planktonic foraminiferal faunal, Mg/Ca, and oxygen isotope records, 9th International Conference on Paleoceanography, 2007/09/06 (Shanghai).

⑫S. Murakami, K. Kimoto, M. Oda, T. Yamada, Comparison of Mg/Ca calibration equations in planktonic foraminifera between the Pacific and Atlantic Oceans, 9th International Conference on Paleoceanography, 2007/09/06 (Shanghai).

⑬菅沼香織・佐藤瑛子・阿波根直一・西弘嗣 (2007), 下北半島沖における過去3万年間の底生有孔虫化石群集変動, 日本地質学会第114年学術大会, 2007/09/11 (北海道大学).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿波根直一 (AHAGON NAOKAZU)

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号 30359161

(2) 研究分担者

木元克典 (KIMOTO KATSUNORI)

海洋研究開発機構・研究員

研究者番号 40359162

(3) 連携研究者

なし

(4) 協力研究者

本研究を実施するにあたり, 以下の方々から有益なご助言・ご協力を頂きました。

鈴木徳行 教授 (北海道大学)

西 弘嗣 准教授 (北海道大学)
長谷川四郎教授 (熊本大学)
大串健一 准教授 (神戸大学)
入野智久 助教 (北海道大学)
原田尚美 研究副主幹 (海洋研究開発機構)
内田昌男 研究員 (国立環境研究所)

また、試料分析に際し、北海道大学の江森良太郎さん・菅沼香織さん・佐藤瑛子さん (当時学生) に協力して頂きました。

以上の方々に感謝いたします。