

南大洋におけるアルケノン古水温の変動

池原 実¹・河村 公隆²・大河内 直彦²・木元 克典¹・村山 雅史³・
中村 俊夫⁴・大場 忠道³・平 朝彦¹

¹ 東京大学海洋研究所 〒164 東京都中野区南台1-15-1

² 北海道大学低温科学研究所 〒060 札幌市北区北19条西8丁目

³ 北海道大学大学院地球環境科学研究科 〒060 札幌市北区北10条西5丁目

⁴ 名古屋大学年代測定試料研究センター 〒464-01 名古屋市千種区不老町

1. はじめに

南大洋は太平洋，インド洋，大西洋の各大洋とつながっているだけでなく，いくつかのユニークな特徴を持っている．例えば，南大洋は高栄養塩－低生産量（high-nutrient, low chlorophyll: HNLC）海域の一つであるとともに（例えば，Martin, 1990, Coale et al., 1996），南極大陸周辺に同心円状に前線構造が存在し，また，南極中層水（AAIW）・南極深層水（AABW）の形成場でもある．後期更新世における南大洋の表層水温変動を復元することは，これら極域前線構造の南北シフトなどに代表される過去の海洋環境の変化とそれらの気候システムへ影響などを理解する上で非常に重要である．1980年代にはCLIMAPプロジェクトによって，数多くの深海堆積物を使って，それらに含まれる浮遊性微化石から最終氷期最寒期（LGM）と最終間氷期（Eemian）のグローバルな表層水温が復元された（CLIMAP Project Members, 1981, 1984）．それらの結果は，中・低緯度海洋の最終氷期の表層水温は現在と比べてほとんど変化していなかったことを示した．また，北部北大西洋や北西太平洋などの一部を除く高緯度海域においても，氷期・間氷期の水温変動はそれほど大きく変化していたわけではない．さらに，CLIMAP Project Members（1984）は最終間氷期の表層水温もまた，現在とほとんど同様であったと結論している．しかし，南大洋の表層水温の復元については，利用可能な深海堆積物が限られていたことや，それらの分布がインド洋や大西洋に偏っていたことなどから，多くの問題点を含んでいると考えられる．

Uk37'というインデックスで表されるアルケノン古水温計は，ある種のハプト藻が生合成する（Marlow et al., 1990）長鎖アルケノン（C37）に基づくもので，このインデックスはアルケノン生合成時の周囲の水温と正の相関をもつことが知られている（Prahl and Wakeham, 1987）．また，このUk37'は食物連鎖や堆積後の続成作用によって変化しないことが実験的に確認されている（Prahl et al., 1989, 1993）．このような特徴を生かし，現在では各海域から得られた数多くの深海堆積物を用いて，過去の表層水温の復元が行われている（例えば，Prahl et al., 1989; Ohkouchi et al., 1994など）．

本研究では、南大洋から得られた深海堆積物について、過去2回の氷期から間氷期への移行期（氷床融解期）に焦点を絞り、酸素同位体比分析及びアルケノン分析を行い、南大洋における氷期・間氷期の表層水温変動について考察した。

2. 試料と方法

本研究に用いた試料は、東京大学海洋研究所の白鳳丸によるKH94-4次航海において、南大洋・タスマン海台から採取されたピストンコア（TSP-2PC；48°08'S, 146°53'E, 水深2321m）とマルチプルコア（TSP-2MC；48°08'S, 146°54'E, 水深2283m）である（Ikehara et al., 1996；図1）。各コアはいずれも白色から淡黄色・淡灰色を呈する有孔虫-ナンノ化石軟泥であり、そのほとんどは炭酸カルシウム殻の生物遺骸からなる。酸素同位体比分析には、殻サイズが250-300 μ mである浮游性有孔虫*Globigerina bulloides* (d'Orbigny)を用いた。それらの有孔虫殻を真空下で60°Cの100%リン酸と反応させ、発生したCO₂ガスを精製した後、Finnigan MAT 251質量分析計で同位体比を測定した。コアの年代は、得られた酸素同位体比カーブを標準的な酸素同位体比（SPECMAP）カーブ（Imbrie et al., 1984）と対比することによって推定した。また、3層準において測定したAMS-14C年代を合わせて用いた。¹⁴C年代測定用試料には*G. bulloides*のみを用い、水素還元法（Kitagawa et al., 1993）によりターゲットを作成し、名古屋大学年代測定試料研究センターの加速器質量分析計を用いて測定した。得られた¹⁴C年代値は炭素同位体分別及びリザーバー効果（400年；Bard, 1988）の補正を行った。

Uk37'値は以下の方法を用いて得た。まず、凍結コア試料を2cm間隔で分割し、各試料から約20gの湿潤堆積物を分取した。それらの堆積物からメタノール/ジクロロメタン（3:1）、ジクロロメタン/メタノール（10:1）を用いて脂質有機化合物を超音波抽出した。抽出液をけん化した後、ジクロロメタン/*n*-ヘキサンを用いて、中性成分と酸性成分に分離した。中性成分については、さらにカラムクロマトグラフィーによって4画分に分離し、長鎖アルケノンを含む画分について、ガスクロマトグラフ（Carlo Erba 5160）を用いて化合物の同定、定量を行った。キャピラリーカラムはHP-5（30 m x 0.32 mm i.d.; 0.25 μ m）を使用した。

Uk37' 値は以下の式（Prahl et al., 1988）により求めた。

$$Uk37' = [C37:2] / ([C37:2] + [C37:3])$$

同一試料を用いて、3回抽出した結果得られたUk37' 値の分析誤差は ± 0.001 （i.e. ± 0.03 °C）であった。

3. 結果と考察

3. 1. 表層堆積物のアルケノン古水温

表層堆積物 (TSP-2MC, 0-1cm) を分析した結果, 炭素数37-39の長鎖アルケノンが検出され, そのUk37'値は0.448であった. このUk37'値を使って, 3つの異なる水温換算式から得られたそれぞれの水温と, コア採取地点付近における現在の月平均表層水温 (Levitus, 1982) とを比較した (図2). その結果, Prahl et al. (1988) によって提案された水温換算式による算出水温が夏の表層水温にほぼ相当することが明らかとなった. 従って, 過去の表層水温を復元するために以下の式を用いた.

$$T (^{\circ}\text{C}) = (\text{Uk37}' - 0.039) / 0.034$$

3. 2. 氷期-間氷期のアルケノン表層水温の変動

最終氷期以降 (0-30ka) のUk37'値は0.281~0.465の間で変化し, 1つ前の氷期・間氷期サイクル (110-145ka) ではUk37'値は0.385~0.563である (Ikehara et al., in press). 図3にアルケノン古水温と酸素同位体比の分析結果を示す. 最終氷期から完新世への表層水温変化は8.1°Cから12.5°Cで (図3 b), 酸素同位体ステージ (MIS) 6からMIS-5eの水温変化は10.2°Cから15.4°Cである (図3 c). 氷期・間氷期の水温変動幅は前者が4.4°Cで, 後者が5.2°Cである. 従って, 南大洋・タスマン海台域における氷期・間氷期の表層水温変動は約4~5°Cであったと推測される. これらの結果は, CLIMAPによって報告された同海域における水温変動幅 (CLIMAP Project Members, 1981) のおよそ2倍に達する. 氷期・間氷期の気候変動に対応するこのような大きな水温変動は, 南大洋インド洋域から得られた深海堆積物の珪藻群集解析から推定されている水温変動幅 (Pichon et al., 1992) とほぼ一致する. Pichon et al. (1992) は, 氷期・間氷期間で5-6°Cの水温変動が生じていたと結論している. このような氷期の南大洋における水温低下は, 南大洋に顕著に発達している前線構造が氷期・間氷期の気候変動に伴って, 従来考えられてきた以上に南北に大きく移動していた可能性を示唆している. TSP-2PC採取地点は現在の亜熱帯収束線 (STC) と南極極前線 (APF) の間に位置している (図1). 表層水塊の変動を反映していると考えられる浮游性有孔虫の群集組成は, 氷期・間氷期を通して亜寒帯種が卓越し, 気候温暖期においても亜熱帯種はほとんど産出しない. 従って, 亜熱帯収束線は完新世及び最終間氷期最暖期においても, コア地点まで南下していなかったと判断される. よって, 氷期・間氷期の水温変動はAPFの南北移動に強く支配されていると判断される. 従って, 現在の表層水温の南北分布に基づくと, 氷期には南極前線が5-6°程度北上していたと推定される.

3. 3. Eemianの水温変動

Eemianという時代は最終間氷期に相当するが、この期間における最も高いアルケノン水温（15.4℃）は12万2千年前に生じている。しかし、Eemianの中期（約12万年前）に水温は急激に低下している（図3c）。堆積物の粒度や組成にはこの間大きな変化が認められないことから、これらの時代において堆積プロセスが大きく変化したとは考えにくい。そこで、Eemianの間の堆積速度を一定と仮定すると、水温が15℃以上を示すEemianの最暖期は約3千年間しか持続しておらず、約12万年前に急激に水温が低下したと推測される。最終間氷期（Eemian）の気候は完新世の気候とほぼ同様に安定していたと考えられてきた（例えば、CLIMAP Project Members, 1984）。しかしながら、我々が得たアルケノン古水温のデータは、南大洋の表層水温がEemianの間を通じて安定しているわけではなく、約12万年前に急激な水温低化が生じていたことを示している。

浮游性有孔虫の酸素同位体比変動カーブは主として氷床量の変動、つまり、グローバルな氷期・間氷期サイクルを反映している。上述のEemianにおける急激な水温低下は、酸素同位体比の変化とは同調しておらず、両者の間には明瞭なタイムラグが存在する（図3c）。これらの結果は、南大洋の水温低下がグローバルな寒冷化を示す氷床量の増大する時期より2-3千年間先行していることを示唆している。つまり、南大洋の寒冷化がグローバルな寒冷化（氷期の始まり）を引き起こしたトリガーとなっていた可能性を指摘することができる。

4. まとめ

南大洋・タスマン海台から採取した深海底堆積物を用いて、過去2回の氷期から間氷期への移行期（氷床融解期）における表層水温を復元するために長鎖アルケノンの分析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

（1）南大洋・タスマン海台における氷期・間氷期における表層水温の変動は4～5℃であり、これらの水温変動幅はCLIMAPプロジェクトによって推定された水温変動の約2倍である。

（2）南大洋ではEemianの最暖期は約3000年間しか持続せず、その後（約12万年前に）急激な水温低下が生じている。この水温低下は、グローバルな気候変動を反映している氷床量が増加し始める時期より数千年間先行している。従って、南大洋の水温低下がグローバルな気候の寒冷化を引き起こしたトリガーとなっていた可能性がある。

謝辞

白鳳丸KH94-4次航海の主席研究員の川口弘一教授（東京大学海洋研究所）をはじめ

め乗船研究者の方々，乗組員の方々には試料の採取に協力していただいた。本研究には文部省科学研究費補助金（特別研究員奨励費2057）の一部を使用した。記して謝意を表します。

引用文献

- Bard, E., Correction of accelerator mass spectrometry ^{14}C ages measured in planktonic foraminifera: paleoceanographic implications, *Paleoceanogr.*, 3, 635-645, 1988.
- Brassell, S. C., Applications of biomarkers for delineating marine paleoclimatic fluctuations during the Pleistocene, in *Organic Geochemistry*, edited by M. H. Engel and S. A. Macko, Plenum Press, New York, pp. 699-738, 1993.
- CLIMAP Project Members, Seasonal reconstructions of the Earth's surface at the Last Glacial Maximum, *Geol. Soc. Am. Map Chert*, MC-36, 1-18, 1981.
- CLIMAP Project Members, The last interglacial ocean, *Quat. Res.*, 21, 123-224, 1984.
- Coale, K. H., K. S. Johnson, S. E. Fitzwater, R. M. Gordon, S. Tanner, F. P. Chavez, L. Ferioli, C. Sakamoto, P. Rogers, F. Millero, P. Steinberg, P. Nightingale, D. Cooper, W. P. Cochlan, M. R. Landry, J. Constantinou, G. Rollwagen, A. Trasvina, and R. Kudela, A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean, *Nature*, 383, 495-501, 1996.
- Ikehara, M., N. Ahagon, M. Murayama, H. Matsuoka, T. Niwai, Y. Shirayama, M. Shimanaga, C. Tamura and C. Igarashi, Description of piston core samples in the Southern Ocean, *Preliminary Report of the R/V Hakuho Maru Cruise KH94-4*, pp.69-71, Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1996.
- Ikehara, M., K. Kawamura, N. Ohkouchi, K. Kimoto, M. Murayama, T. Nakamura, T. Oba, and A. Taira, Alkenone sea surface temperature in the Southern Ocean for the last two deglaciations, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- Imbrie, J., J. D. Hays, D. G. Martinson, A. McIntyre, A. C. Mix, J. J. Morley, N. G. Pisias, W. L. Prell, and N. J. Shackleton, The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record, in *Milankovitch and Climate, Part 1*, edited by A. L. Berger et al., pp. 269-305, 1984.
- Kitagawa, H., T. Masuzawa, T. Nakamura, and E. Matsumoto, A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS ^{14}C measurements, *Radiocarbon*, 35, 295-300, 1993.
- Levitus, S., Climatological atlas of the world ocean, NOAA Prof. Pap. 13, 173pp., U.S. Govt. Print. Office, Washington, D. C., 1982.
- Marlowe, I. T., S. C. Brassell, G. Eglinton, and J. C. Green, Long-chain alkenone and alkyl alkenoates and the fossil coccolith record of marine sediments, *Chem. Geol.*, 88, 349-375,

- 1990.
- Martin, J. H., Glacial-interglacial CO₂ change : The iron hypothesis, *Paleoceanogr.*, 5, 1-13, 1990.
- Ohkouchi, N., K. Kawamura, T. Nakamura, and A. Taira, Small changes in the sea surface temperature during the last 20,000 years: Molecular evidence from the western tropical Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2207-2210, 1994.
- Pichon, J. -J., L. D. Labeyrie, G. Bareille, M. Lagracherie, J. Duprat, and J. Jouzel, Surface water temperature changes in the high latitudes of the southern hemisphere over the last glacial-interglacial cycle, *Paleoceanogr.*, 7, 289-318, 1992.
- Prahl, F. G., and S. G. Wakeham, Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for paleotemperature assessment, *Nature*, 330, 367-369, 1987.
- Prahl, F. G., L. A. Muehlhausen, and D. L. Zahnle, Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2303-2310, 1988.
- Prahl, F. G., G. J. De Lange, M. Lyle, and M. A. Sparrow, Post-depositional stability of long-chain alkenones under contrasting redox conditions, *Nature*, 341, 434-437, 1989.
- Prahl, F. G., G. R. B. Collier, J. Dymond, M. Lyle, and M. A. Sparrow, A biomarker perspective on prymnesiophyte productivity in the northeast Pacific, *Deep-Sea Res.*, 40, 2061-2076, 1993.

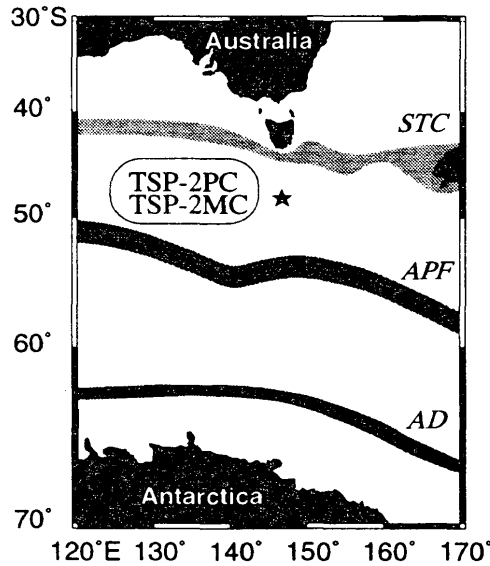


図1. 南大洋・タスマン海台から採取されたTSP-2PCとTSP-2MCコアの採取地点と表層水塊分布. STC: 亜熱帯収束線, APF: 南極極前線, AD: 南極発散域. STCとAPFの間の亜南極表層水は相対的に温かく高塩分な水で特徴づけられる. APFとADの間の南極表層水は冷たく低塩分の水で特徴づけられる.

Figure 1. Location map of the deep sea cores TSP-2PC and TSP-2MC collected from the Tasman Plateau in the Southern Ocean and hydrographic conditions. STC: Subtropical Convergence zone. APF: Antarctic Polar Front zone. AD: Antarctic Divergence zone. Subantarctic Water properties between STC and APF are characterized by relatively warm and saline waters. In contrast, Antarctic Surface Water between APF and AD are characterized by cool and less saline waters.

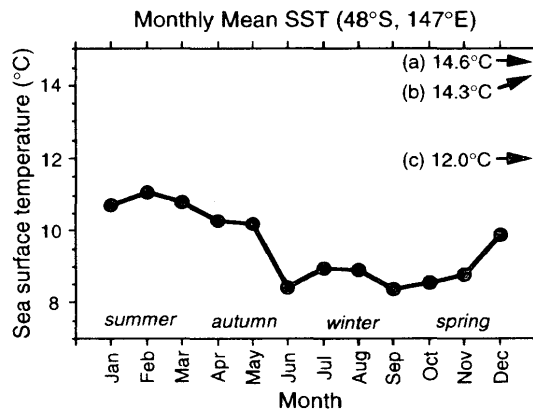


図2. TSP-2PCとTSP-2MCコア採取地点付近 (48°S, 147°E) における月平均表層水温の変化 (Levitus, 1982). 3つの異なる水温換算式を用いて、表層堆積物 (TSP-2MC, 0-1cm) から得られたアルケノン表層水温を図の右側にプロットした. (a) Sikes and Volkman (1993) による南大洋のフィールドデータに基づく水温換算式 ($Uk37' = 0.0414T - 0.156$). (b) Brassell (1993) による各海洋のフィールドデータを基にした水温換算式 ($Uk37' = 0.037T - 0.083$). (c) Prahl et al. (1988) による *Emiliania huxleyi* の培養実験に基づく水温換算式 ($Uk37' = 0.034T + 0.039$).

Figure 2. Annual surface temperature cycle of a location (48°S, 147°E) close to TSP-2PC and TSP-2MC [Levitus, 1982]. Alkenone SST for the surface sediments (TSP-2MC, 0-1cm) calculated by three calibrations are shown, as follows; (a) the linear field data calibration of Sikes and Volkman [1993] in the Southern Ocean ($Uk37' = 0.0414T - 0.156$), (b) the calibration of Brassell [1993] based on global combined field data ($Uk37' = 0.037T - 0.083$), and (c) the calibration of Prahl et al. [1988] based on cultures of *Emiliania huxleyi* ($Uk37' = 0.034T + 0.039$).

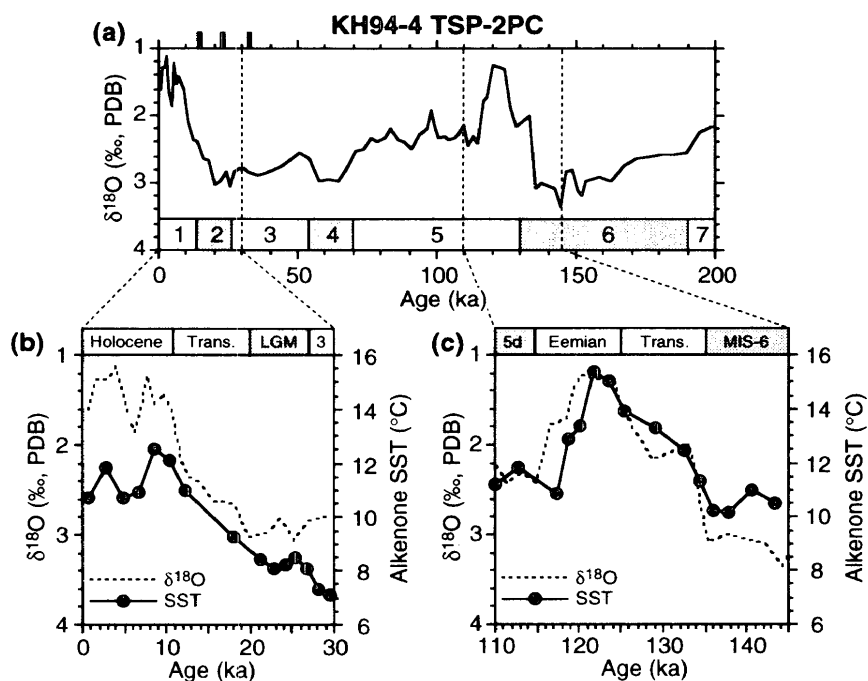


図3. (a) 南大洋・タスマン海台から採取されたTSP-2PCコアにおける浮遊性有孔虫の $\delta^{18}\text{O}$ の変動。奇数は間氷期を示し、偶数は氷期を示す。AMS- ^{14}C 年代が求められている層準を図の上部に太線で示した。(b) 最終氷期から完新世(0-30ka)における浮遊性有孔虫の $\delta^{18}\text{O}$ とUk37'インデックスから求めた表層水温(SST)の変動。(c) 1つ前の氷期・間氷期サイクル(MIS-6からMIS-5d: 110-145ka)における $\delta^{18}\text{O}$ と表層水温の変動。

Figure 3. (a) Changes of the planktonic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ in the sediment core (TSP-2PC) collected from the Tasman Plateau in the Southern Ocean. Odd numbers mean interglacial periods and shaded even numbers indicate glacial periods. AMS- ^{14}C age levels are shown by bold marks on the top of the figure. (b) Changes in the planktonic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ and sea surface temperature (SST) reconstructed from the Uk37' index during the last deglaciation (MIS-3 to Holocene; 0-30 ka). (c) Same as (b) but for penultimate deglaciation (MIS-6 to MIS 5d; 110-145 ka).

Alkenone sea surface temperatures in the Southern Ocean

M. Ikehara¹, K. Kawamura², N. Ohkouchi², K. Kimoto¹,
M. Murayama³, T. Nakamura⁴, T. Oba³, and A. Taira¹

¹ Ocean Research Institute, University of Tokyo

² Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

³ Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University

⁴ Dating and Material Research Institute, Nagoya University

Abstract. A piston core taken from the Tasman Plateau in the Southern Ocean has been studied for organic compounds to reconstruct the late Pleistocene marine environments. Here we report paleo sea surface temperature (SST) for the last two deglaciations using the unsaturation degree of alkenones ($U^{k_{37}}$) preserved in the marine sediments. The $U^{k_{37}}$ record indicates that the SST was at least 4 °C lower than the present SST at the last glacial maximum (LGM), and the amplitude of paleo-SST is at most 5.2 °C from the penultimate glacial (MIS-6) to the last interglacial warm period (the Eemian). These results indicate that the amplitude of Southern Ocean SST fluctuation was twice greater than that reported by the CLIMAP projects. This larger amplitude of glacial/interglacial SST change agrees with the SST changes reconstructed from diatom assemblages in the sediments from the Indian sector Southern Ocean, which showed 5-6 °C difference for the glacial/interglacial periods [Pichon *et al.*, 1992]. The SST decrease in the glacial Southern Ocean may be caused by northward shift of the Antarctic Polar Front (APF) at that time.

Our results also demonstrate that the Eemian warm period in the Southern Ocean lasted only 3,000 years followed by a sharp cooling at around 120 kyr BP. The sharp cooling in the Southern Ocean seemed to occur a few millennia (2-3 kyrs) before the beginning of continental ice-sheet growth.

口頭発表

- 1) 池原実・河村公隆・大河内直彦・木元克典・平朝彦（1997）， Eemianの南大洋－表層水温，生産量，大気輸送－. 古海洋学シンポジウム：東京大学海洋研究所，1997年2月6-7日

学会誌等

- 1) Ikehara, M., K. Kawamura, N. Ohkouchi, K. Kimoto, M. Murayama, T. Nakamura, T. Oba, and A. Taira (in press), Alkenone sea surface temperature in the Southern Ocean for the last two deglaciations, *Geophys. Res. Lett.*.
- 2) 池原実・木元克典・平朝彦（印刷中），有機地球化学的解析に基づく南大洋の古海洋変動. 海洋研究船による地球温暖化に関わる温室効果気体の海洋における収支の観測研究，中間報告書（IV），東京大学海洋研究所.

博士課程後期修了論文（1997）

池原実（東京大学理学系研究科地質学専攻）

Late Pleistocene Southern Ocean Paleoceanography based on Organic and Isotope Geochemistry