
総 説

東赤道太平洋深海帯における漸新世の環境変遷

高田裕行 *・野村律夫 **・瀬戸浩二 *

* 島根大学汽水域研究センター・** 島根大学教育学部

Review of paleoceanographic transition during the Oligocene in the eastern equatorial Pacific Ocean

Hiroyuki Takata*, Ritsuo Nomura** and Koji Seto*

*Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan (yuu@soc.shimane-u.ac.jp, seto@soc.shimane-u.ac.jp); **Faculty of Education, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan (nomura@edu.shimane-u.ac.jp)

Abstract. Paleocceanographic condition in the deep-sea ocean during the Eocene-Oligocene transition is affected by change in ice volume in the Antarctic region and deep-water formation in the Southern Ocean. ODP Leg 199 in the eastern equatorial Pacific Ocean recovered continuous sections containing well-preserved microfossils during the Eocene-Oligocene interval, and provides an opportunity to study this transition. In this paper, we review recent results of the Oligocene paleoceanography and outlines of faunal change in benthic foraminifers in the eastern equatorial Pacific Ocean.

Sedimentary records from ODP Leg 199 represent a deepening of calcite compensation depth (CCD) more than 1 km near the Eocene/Oligocene boundary in the eastern equatorial Pacific Ocean. Around the interval of CCD change, two-step positive shifts of oxygen isotope occurred in benthic foraminifers within ~ 300 kyrs. The glaciation events marked by the $\delta^{18}O$ isotope event coincide with the intervals of low eccentricity and low obliquity amplitude variations, due to absence of warm summer. Other three glacial events of 29.16, 27.91 and 26.76 Ma during the Oligocene are probably related to low obliquity amplitude variation fluctuating with about a 1200 kyr.-cycle. Abyssal benthic foraminifers show an increase in Antarctic-bottom water fauna (*Nuttallides umbonifer*) around the Early/Late Oligocene boundary in the eastern equatorial Pacific Ocean. The short-term abundance peaks of *Nuttallides umbonifer* are correlative with the Oi event, suggesting that this species could be useful as a proxy of the Antarctic ice-sheet expansions.

Keywords: Oligocene, benthic foraminifera, eastern equatorial Pacific

はじめに

漸新世は、新生代の氷室地球の成り立ちを理解する上で、重要な時期である。これまでの研究で、この時期の全球的な寒冷化には、南極氷床の発達と南大洋における深層水の形成が果たした役割が重要であることがわかってきた (Kennett, 1977; Zachos *et al.*, 1993)。その成果は、Lawver and Gahagan(2003) や舟川 (2003) などに総括されている。この漸新世における深海の底生有孔虫群集の変遷に関しては、大西洋・インド洋で異なる深度における検討が行われ、漸新世の深層水の形成との関係についての知見が多く蓄積されている (たとえば, Nomura, 1995; 野村ほか, 1997; Katz *et al.*, 2003)。

一方、太平洋では研究事例が少なく、特に深海帯(水

深 2000 m 以深)の研究は限られている(たとえば, Thomas, 1985; Boltovskoy and Watanabe, 1994)。しかし、2001 年にハワイ沖の東赤道太平洋で行われた海洋掘削計画第 199 次航海 (Ocean Drilling Program Leg 199: 以後 Leg 199 と表現) では、微化石の保存が良好な柱状試料が連続的に採取され、東赤道太平洋における古第三紀の古海洋学的な知見が、飛躍的に向上しつつある。本論では、この Leg 199 の研究成果を中心に、漸新世の氷室地球の成立に際して、東太平洋の深層環境がどのように推移し、また底生有孔虫群が変遷したかを論じる。

東赤道太平洋の海洋環境と ODP Leg 199 の概要

太平洋赤道域は、貿易風によってもたらされる赤道収束

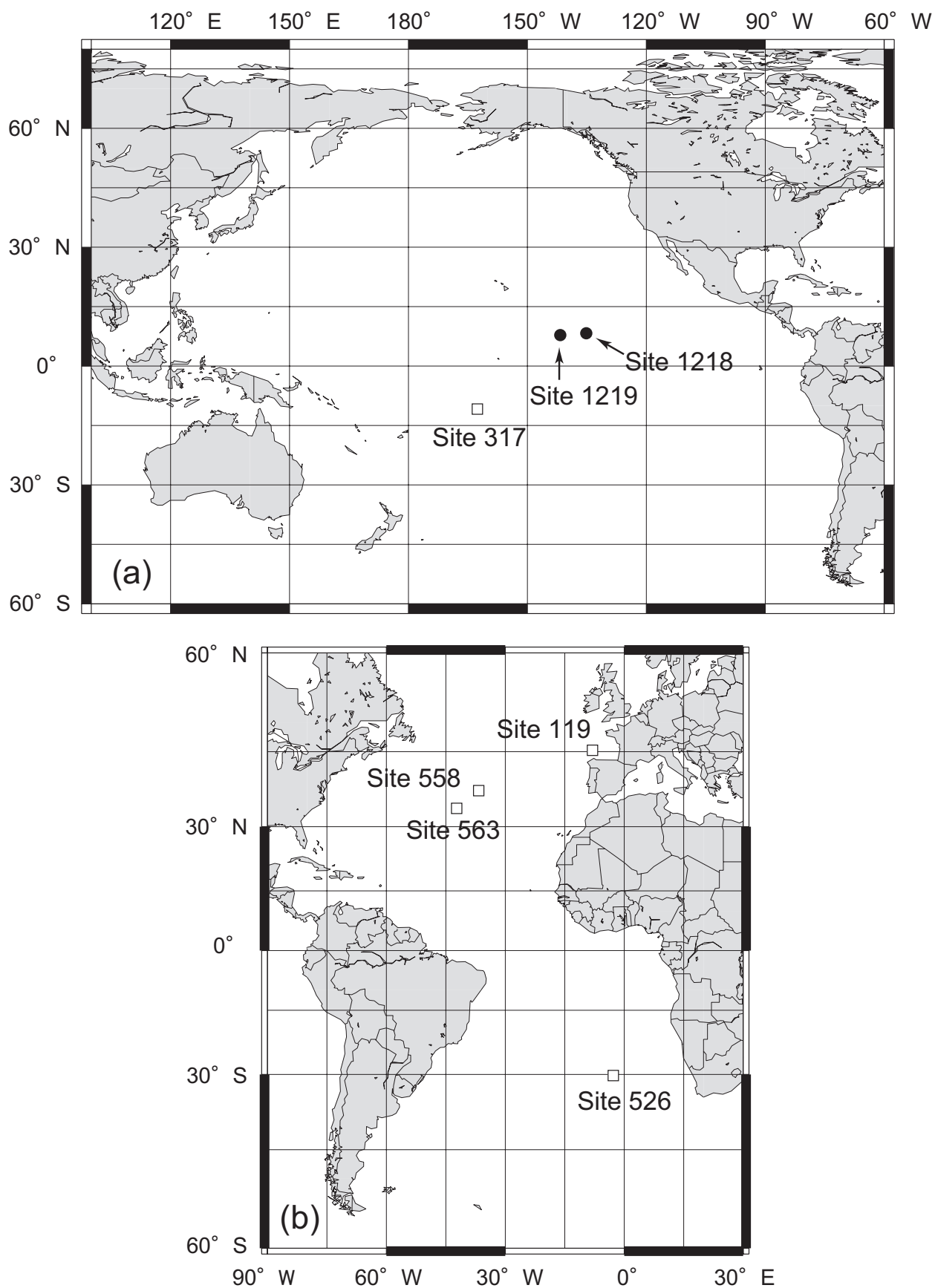


図1. 本論文で取り上げた(a)太平洋と(b)大西洋の深海掘削計画 (Deep-sea Drilling Project: DSDP) および海洋掘削計画 (Ocean Drilling Project: ODP) の掘削地点 (太平洋: DSDP Leg 33 の317地点, ODP Leg 199 の1218と1219地点; 大西洋: DSDP Leg 12 の119地点, Leg 74 の526地点, Leg 82 の558と563地点).

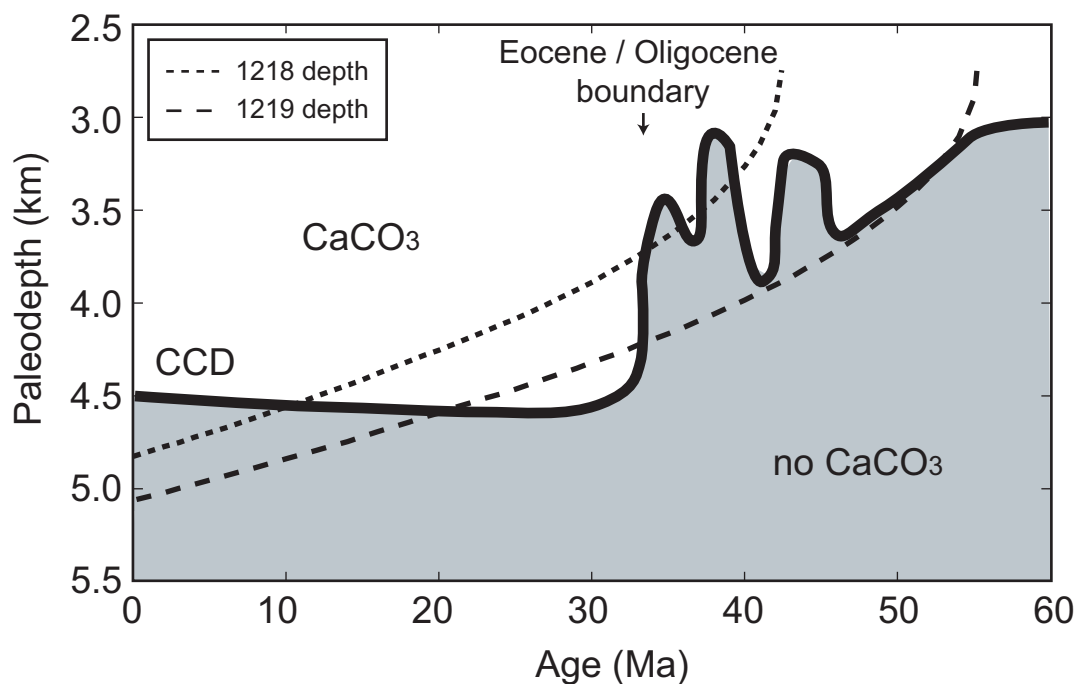


図2. van Andel *et al.* (1975) にもとづく東赤道太平洋の炭酸塩補償深度 (CCD) と ODP 1218 と 1219 地点の堆積水深の時系列変化 (Shipboard Scientific Party, 2002 を改変)。

帯 (Inter-Tropical Convergence Zone: ITCZ) が発達するため、湧昇が活発であり、海洋表層での基礎生産が高い。それを反映して、この海域では生物源の石灰質・珪質堆積物が厚く堆積している (van Andel *et al.*, 1975)。一方、太平洋の多くの深海掘削計画 (Deep-Sea Drilling Project: DSDP) によって明らかにされた石灰質堆積物の層位分布の研究から、炭酸塩補償深度 (CCD) が始新世/漸新世境界付近で約 1000 m にわたって深くなったことが指摘された (van Andel *et al.*, 1975)。

Leg 199 では、東赤道太平洋の 8 つの地点で掘削が行われ、このうち保存の良い石灰質微化石を連続的に産出する 1218 地点 (水深 4286 m) と 1219 地点 (水深 5063 m) (図 1) を主な対象として、始新世から漸新世における古海洋学的研究が行われている。主に本論で取り上げる 1218 地点は漸新世を通して北緯 3 ~ 4° の赤道域にあったと考えられ、また、その当時の堆積水深はおおよそ 3300 ~ 4400 m の範囲にあったと推定されている (図 2)。

漸新世における深海帯の環境と底生有孔虫化石群の変遷

野村ほか (1997)、舟川 (2003) で総括されているように、古第三紀後期は深層水の形成される場所や沈み込みの機構が変化した時期である。始新世以降、低緯度域の海洋表層における活発な蒸発作用に由来する高塩分水の形成が弱まった。また、後期始新世以降、高緯度域での海

洋表層の冷却に伴って形成された低温な深層水の影響が顕著になったとされる。それを引き起こした要因として、南極氷床の発達と南大洋の寒冷化が考えられており、南極大陸とオーストラリア大陸の間のタスマニア海路の拡大が、この寒冷化に大きく関与したとされている (たとえば、Kennett, 1977; 舟川, 2003; Lawver and Gahagan, 2003)。

南大洋で形成される南半球起源の深層水については、底生有孔虫の群集組成から、その変遷が論じられてきた。例えば、*Nuttallides umbonifer* は、南極底層水 (AABW) の影響下にある深度に普遍的に産出する現生種である。本種は炭酸塩に不飽和な深層水で多産することが知られており、南大洋で沈み込んだ深層水の挙動を捉える指標とされている (Nomura, 1995)。南大洋では、Maud Rise における ODP 689 地点や Kerguelen Plateau における ODP 747 地点で、漸新世を通して本種が卓越することが知られている (Thomas, 1992; Nomura, 1995)。このような本種の産出傾向をもとに、南半球起源の深層水の動きが、各海洋で検討されている。

大西洋の群集変化

大西洋の漸深海帯～深海帯では、漸新世に DSDP 119 地点 (水深 4447 m) で *N. umbonifer* が比較的多産するのに対して (Miller, 1983)、より浅かったと考えられる DSDP 558 地点 (水深 3754 m)、DSDP 563 地点 (水深 3796 m) では本種は少ないという、深度による産出状況の違いが知られていた (Miller and Katz, 1987)。また、Boersma (1985)

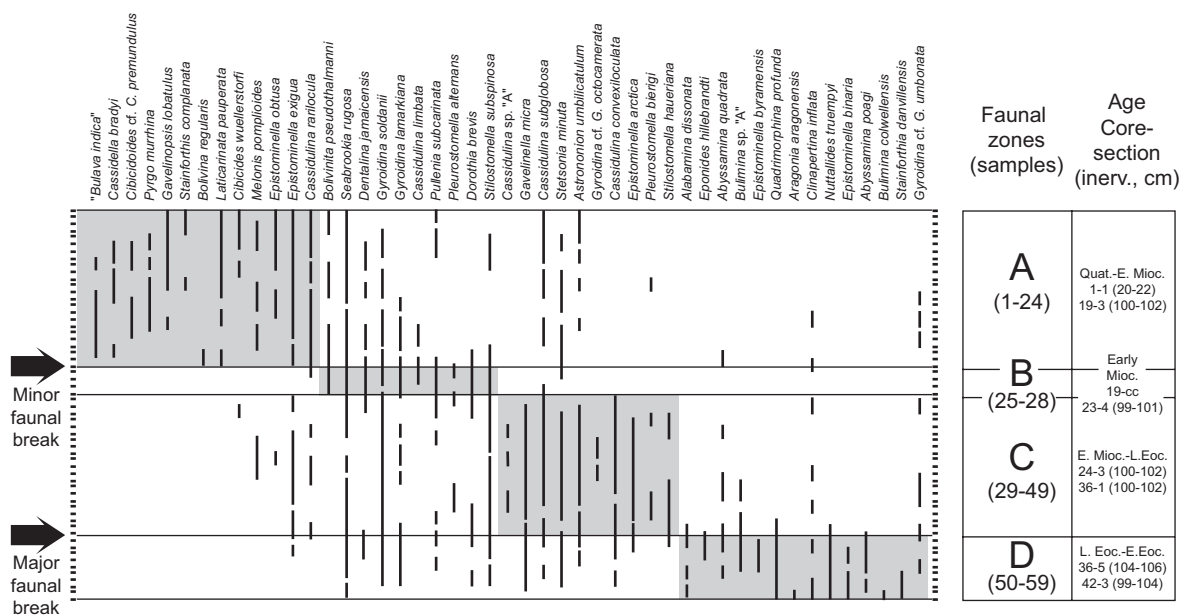


図3. DSDP 317 地点 (Manihiki Plateau, 南太平洋) における底生有孔虫化石の群集変化の層位分布 (Boltovskoy and Watanabe, 1994 を改変)。

は、南北大西洋の複数の DSDP の掘削地点で *N. umbonifer* の産出状況を検討した。その結果、本種は漸新世を通して、古水深が水深 2000 m 以深の深海帯で産出する一方、浮遊性有孔虫化石帯 P20 になると、より浅い地点 (DSDP 526 地点; 水深 1054 m) でも産出したことが示された。さらに、より多くの DSDP / ODP の掘削地点について研究結果を総括した Katz *et al.* (2003) は、本種が漸新世を通して、大西洋の深海帯で普遍的であり、約 32 ~ 29 Ma には下部漸深海帯においても、本種が多産したことを示した。

これらのことは、大西洋において、南半球起源の深層水の影響が、漸新世を通して深海帯に及んでおり、また漸新世の中頃には漸深海帯までその影響が及んだことを示唆する。また、この漸新世の中頃に、*Cassidulina havanensis*, *Cibicidoides encaenus* などの 9 つのタクサで深度分布が変化した (Katz *et al.*, 2003)。この時期には、シーケンス境界 (TB1.1 の基底; Haq *et al.*, 1987) の存在から海水準の低下が起こったことも明らかになっており、底生有孔虫の変化が南極氷床の発達と関連した現象とみなしてもよいと思われる (Katz *et al.*, 2003)。

また、北大西洋では、深海成堆積物に認められるハイエタスの存在も、漸新世に北半球起源の深層水の形成があったことを示す。特に、西北大西洋では海底侵食面と考えられる複数の音響反射面があることが知られており、Horizon A^u と呼ばれる後期始新世～漸新世に形成されたと考えられるハイエタスが広く発達している (Miller and Tucholke, 1983)。加えて、Davies *et al.* (2001) は、北大西洋の Faeroe-Shetland 海盆の Southern Faeroes ドリフト堆積物の解析から、約 35 Ma に北半球起源の深層水の形成が開始されたことを指摘した。野村ほか (1997) は、

北半球高緯度域で形成される深層水が、南極域で南半球起源の深層水よりも温度が高いために、湧昇して降雪をもたらすことで、前期漸新世の南極氷床の発達に重要な意味を持っていた可能性を論じている。

太平洋の群集変化

太平洋に関しては、これまでに Boltovskoy and Watanabe (1994) によって、赤道太平洋の Manihiki Plateau における DSDP 317 地点 (水深 2598 m) で、底生有孔虫化石群が検討され、後期始新世に大きな底生有孔虫生物相の変遷があったことが示された (図3)。始新世の群集では、*Nuttallides truempyi*, *Quadrimorphina profunda* が卓越するのに対して、後期始新世以降、それらの始新世を特徴づける種群が絶滅するか、ほとんど産出しなくなる。この群集変化の原因として、水温の低下、底層流の活動などの底層環境の変化があげられている。後期始新世末期の *N. truempyi* の絶滅は、インド洋からも報告されており、Nomura (1995) は本種の絶滅が南極底層水の発達によると考えている。DSDP 317 地点における後期始新世の群集変化は、氷室地球の成立を反映したものと予想されるが、それについて十分な議論は行なわれていない。このように太平洋の深海帯では、大西洋の研究と比べて漸新世の底生有孔虫の変遷と深層水との関係についての知見に乏しいのが現状である。

東赤道太平洋で Oi event に起きた海洋深層の環境変動と地球軌道要素の変動との関係

Oi event と環境変動

漸新世における有孔虫殻の安定同位体比の記録には、南

極氷床の発達を示す複数（6 回程度）の酸素同位体比イベント（Oi event）が認められている（Miller *et al.*, 1991）. Oi event とは、深海の底生有孔虫殻の酸素同位体比において、0.5 ‰以上（時に 2.0 ‰以上）の正のシフトがあり、さらに浮遊性有孔虫殻にも同様なシフトがあることで特徴づけられるイベントである（Miller *et al.*, 1991）. Oi event は、研究者間で名称や対象とするイベントなど、定義・用法に違いがあるが、本論では特に断らない限り、Miller *et al.* (1991), Pekar *et al.* (2002) に従う。

Oi event は氷床拡大のイベントともみなされることから、海水準変動やシーケンス層序との関係も着目され（Pekar and Miller, 1996）、浅海成層の解析で見積もられた堆積水深の変動幅と深海の底生有孔虫の酸素同位体比にみられる変動幅を比較することも行われている（Pekar *et al.*, 2002; Wade and Pälike, 2004）。例えば、Pekar *et al.* (2002) は、漸新世の Oi event について、アメリカ東岸のニュージャージー付近の掘削試料で見積もられた海水準変動の規模（34 ～ 54 m）と、各海域（赤道大西洋・太平洋、南大西洋中緯度域、南大洋）における DSDP / ODP の掘削地点から産出する底生有孔虫殻の酸素安定同位体比の変動幅を比較し、両者の間に比較的良好な正の相関関係が得られることを示した。これらの研究で見積もられた各 Oi event における海水準変動の幅は、数 10 m のオーダーで、その規模は第四紀の氷河性海水準変動に準ずる。したがって、Oi event での海洋環境の変遷を検討することは、冷室期における海水準変動や環境変動を理解する上で、重要な意味を持つ。

Leg199 における成果

1. 始新世／漸新世境界付近における環境変化

Leg 199 では層序の連続性のよい始新統～漸新統の堆積物が得られたことから、こうした Oi event に関して様々な研究、特に地球軌道要素との関係に着目した研究が行われている。この Oi event の中でも最初のイベントである Oi1 は始新世／漸新世境界付近で認識され、最も顕著な酸素同位体比の正のシフト（約 1.5 ‰; Coxall *et al.*, 2005）を示す。また、前述のように、太平洋ではこの時期に CCD が急激に深くなったことが示されてきた（van Andel *et al.*, 1975）。しかし、CCD が深くなった要因と Oi1 における南極氷床の発達との関係については、不明な点が多かった。

こうした問題をふまえ、Coxall *et al.* (2005) は、東赤道太平洋でこの始新世／漸新世境界で起きた CCD の深化と南極氷床の発達の関係について研究した。この研究では、底生有孔虫殻の酸素同位体比、炭素同位体比および堆積物中の炭酸塩含有量の層位変化が、約 2000 年レベルという詳細な時間分解能で検討された（図 4）。これらの 3 つの指標は、いずれも始新世／漸新世境界付近（約 34 Ma）の約 30 万年間に大きく変動し、いずれの指標も 2 回の急激に上昇した時期（各々、約 4 万年間）があり、その間に

比較的安定した時期（約 20 万年間）を伴うという 2 段階の変化からなる。

これらの指標の変化と地球軌道要素の変動パターンを対比すると最初の正の同位体比の変動が起きた時期（約 34 Ma）は、約 240 万年周期で離心率が最も小さく、約 120 万年周期で地軸の傾きの振幅も最小になる時期に相当することが明らかとなった（図 4）。このことから、この地球軌道要素の変動における振幅の極小化が、気候の季節変化を小さくし、それに伴って冷涼な夏がもたらされたと考えた。そして、この冷涼な夏が存在が氷床の氷を維持することにつながり、南極氷床が大規模に発達する引き金になった（Coxall *et al.*, 2005）。

Oi1 における酸素同位体比の変動幅（ 1.5 ± 0.1 ‰）は、DeConto and Pollard (2003) のモデル（Global climate model）による計算結果（約 0.5 ‰）よりも大きい。底層水温と CCD の変化に伴う pH / $[\text{CO}_3^{2-}]$ の変動がなく、氷床の酸素同位体比を現在と同じく -50 ‰と仮定すると、この変動幅から見積もられる氷床の規模と海水準の低下は、現在の南極氷床とシーケンス層序学から見積もられた海水準低下（Pekar *et al.*, 2002）に対して 1.6 倍の変動を生じなければならないという解が導かれる（Coxall *et al.*, 2005）。さらに、氷床の酸素同位体比を -30 ‰と仮定すると、さらに大きな氷床と海水準低下を想定せねばならず、この場合は北半球高緯度域の氷床の形成（Davies *et al.*, 2001）など、別の要素を考えなければならなくなる（Coxall *et al.*, 2005）。こうした相違を生じている原因として、酸素同位体比の変動が氷床の影響だけでなく、深層水の水温の低下（Lear *et al.*, 2004）などの影響も受けている可能性が指摘されている。

一方、この時期に起こった急激な CCD の深化は、どのような要因で起こったのだろうか。1218 地点では、CCD の変動を反映する炭酸塩含有量の変化と底生有孔虫殻の酸素・炭素同位体比の変動がいずれも同時期に起きている（Coxall *et al.*, 2005）。この南極氷床の発達と赤道太平洋の CCD の深化を結びつけるテレコネクションとして、Coxall *et al.* (2005) は炭酸塩の堆積が陸棚から深海底へと汎世界的に移行したことを挙げている。すなわち、南極氷床の大規模な発達に伴う海水準の低下が、陸棚域と浅海成炭酸塩堆積物の生産域の減少と深海域における $[\text{CO}_3^{2-}]$ の増加を引き起こし、CCD の深化と深海での炭酸塩の堆積を促進した。さらに、海水準の低下は、大陸縁辺の上部白亜系と古第三系の炭酸塩堆積物を露出させると考えられ、河川から海洋への溶存無機炭素の流入を増加させ、 $[\text{CO}_3^{2-}]$ の増加、CCD の深化、海水の炭素同位体比の正のシフトをもたらしただけの可能性も挙げられている（Coxall *et al.*, 2005）。

2. 漸新世中頃の環境変動

前期漸新世と後期漸新世をまたぐ 26.4 ～ 30.0 Ma について、Wade and Pälike (2004) は、底生・浮遊性有孔虫殻の詳細な酸素・炭素安定同位体比を、約 6000 年レベルで詳細に研究し、それらの結果を地球軌道要素の変動と比

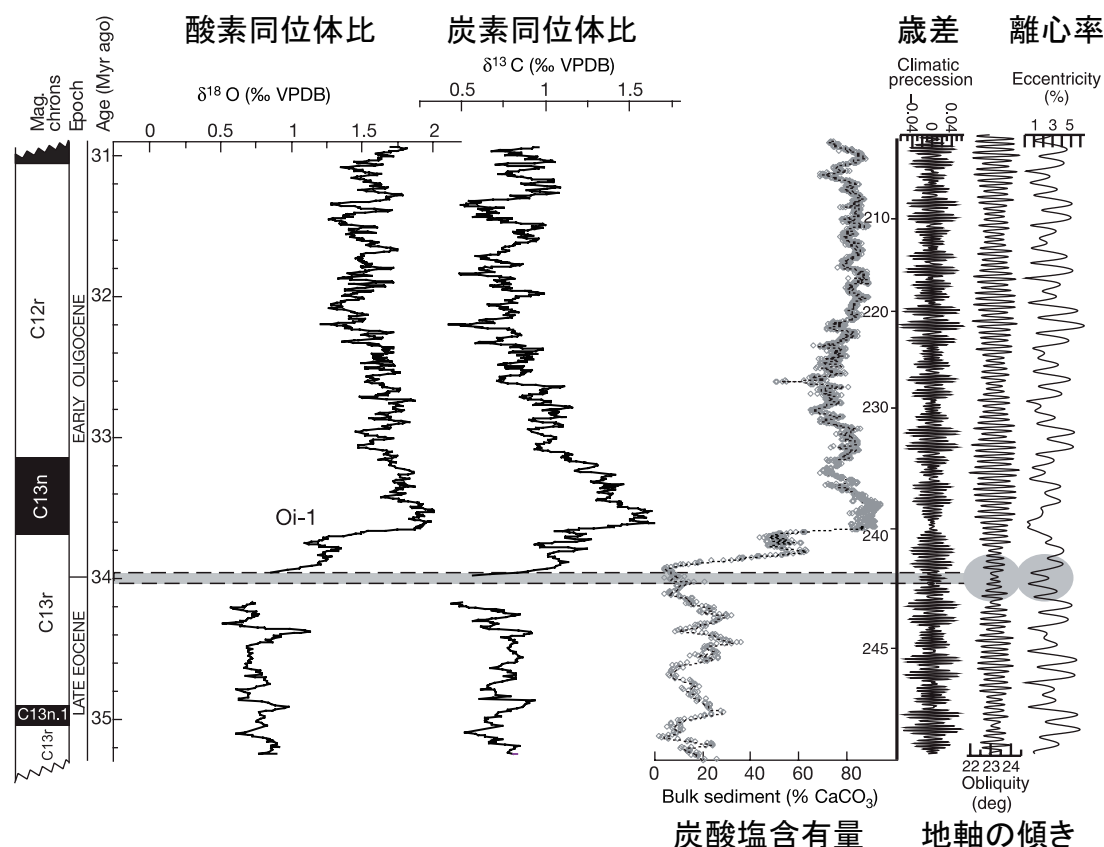


図4. ODP 1218 地点の後期始新世～前期漸新世における底生有孔虫殻の酸素 ($\delta^{18}\text{O}$) 同位体比, 炭素 ($\delta^{13}\text{C}$) 同位体比, 炭酸塩含有量 (Bulk sediment) と地球軌道要素の変動の層位変化 (Coxall *et al.*, 2005 を改変).

較した. その結果, 彼女らの年代モデルで約 26.5 ~ 26.9 Ma, 27.6 ~ 28.0 Ma, 28.8 ~ 29.2 Ma の 3 つの時期に酸素同位体比が重い傾向がみられ, それらを Oi event とした. この研究では, Oi event の用法に研究者間で不一致があるため, 地球軌道要素と古地磁気層序を組み合わせた新たな用法を提唱し, 今回の 3 つの Oi event を, $73_{\text{OI-C10m}}$ (約 29.16 Ma), $70_{\text{OI-C10m}}$ (約 27.91 Ma), $67_{\text{OI-C9}}$ (約 26.76 Ma) と名づけた (図 6). この 3 つのイベントは Miller *et al.* (1991) や Pekar and Miller (1996) の Oi event のうち, unnamed, Oi2a, Oi2b にそれぞれ対比される (Wade and Pälike, 2004). 酸素同位体比の 0.11 ‰ の増加が 10 m の海水準低下に相当すると仮定すると, これらの Oi event に起きた相対的海水準変動のスケールは 50 ~ 65 m となり, Pekar *et al.* (2002) による Oi2b (= 67_{OI}) での見積り (45 ~ 75 m) と, ほぼ調和的である.

さらに, Wade and Pälike (2004) は底生・浮遊性有孔虫殻の酸素・炭素安定同位体比の 360 万年間の記録についてクロススペクトル解析を行ない, 周期性を検討した. その結果, これら 4 つの同位体比の変化に長い離心率の周期 (約 40.5 万年周期) が明瞭に認められることを明らかにした. また, 底生有孔虫殻の酸素・炭素同位体比と浮遊性有孔虫殻の炭素同位体比に短い離心率に相当する約 10 万年

周期を, 底生有孔虫殻の炭素同位体比に地軸の傾きに相当する約 4 万年周期も認めた. また, 地軸の傾き (約 4 万年周期) の振幅に約 120 万年の周期の変動がみられ, その振幅の極小期に glacial event, すなわち Oi event が起きているとした. しかし, この現象は, Zachos *et al.* (2001) が指摘したように, 鮮新世～更新世では地軸の傾きにおける振幅の変動が約 120 万年周期で極大になる時期に氷河作用が顕著になる, というものとは逆の関係となる. すなわち, 漸新世の氷河作用は, 基本的に離心率の変動に支配されつつも, 地軸の傾きの振幅の周期的変動が小さくなる時期にむしろ強化されている (Wade and Pälike, 2004). そして, Coxall *et al.* (2005) と同様に, 気候の季節変動幅が小さくなることで起きる冷涼な夏の存在が, Oi event で南極氷床の発達を促したと判断される.

底生有孔虫殻と浮遊性有孔虫殻の炭素同位体比の差は, この 3 つの時期 (29.1, 27.9, 26.8 Ma) に, 海洋表層と深層でその勾配が大きくなっている (Wade and Pälike, 2004). また, 浮遊性有孔虫殻の炭素同位体比の上昇は, 炭酸塩含有量の増加で代表される岩相変化とほぼ同調している. これらのことから, 海洋表層での生物生産の強化と海底における有機炭素の埋積が, Oi event の時期の炭素同位体比の大きな変動の原因であると解釈される. そし

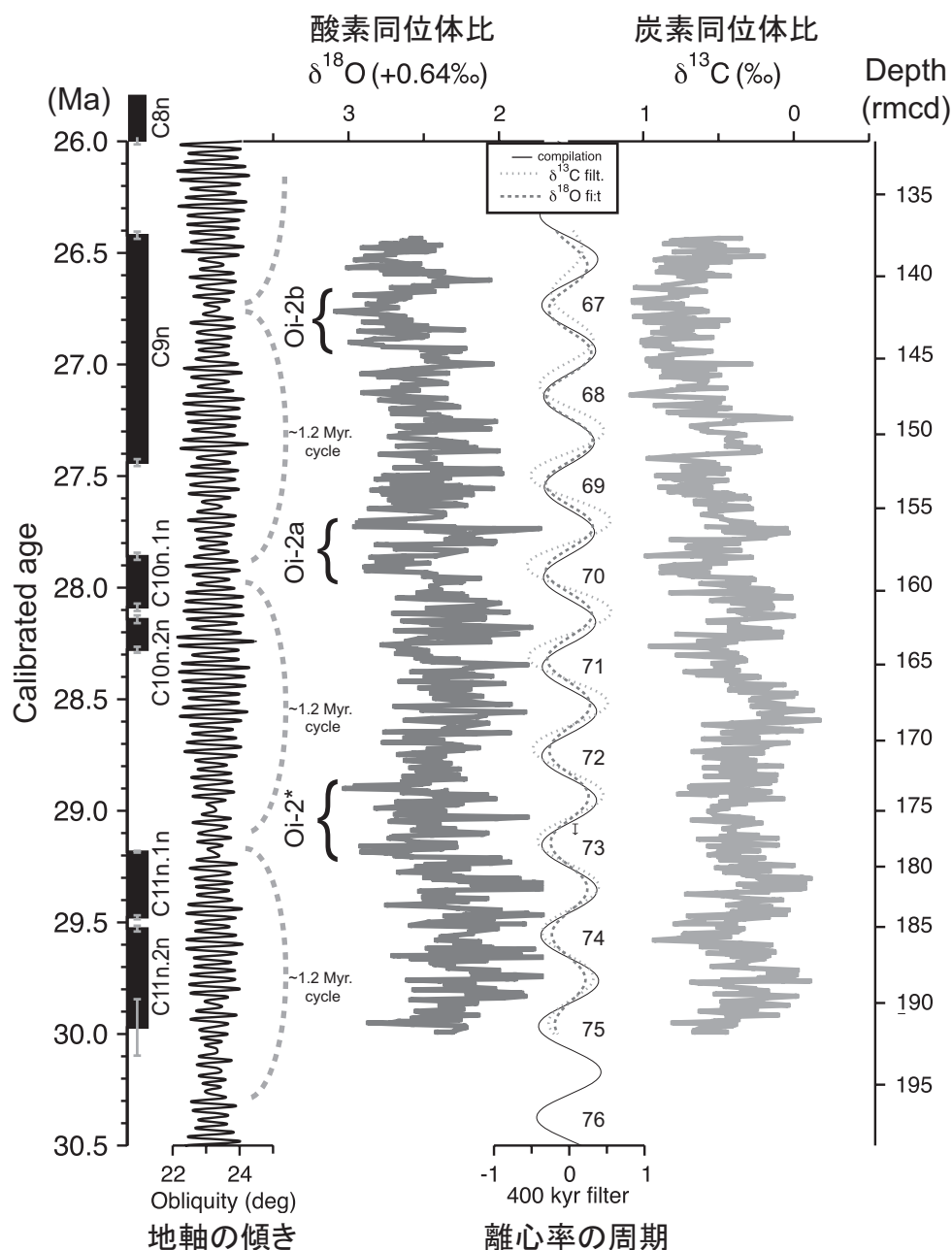


図5. ODP 1218 地点の漸新世中頃における底生有孔虫殻の酸素・炭素同位体比と地球軌道要素の変動の層位変化 (Wade and Pälike, 2004 を改変). 柱状試料の堆積物深度に関しては, Revised composite depth scale を用いた (Pälike *et al.*, 2005). 図中左の Obliquity は地軸の傾きによる日射量の変化を示し, 約 120 万年間のやや長い周期性がある. 一方, 同位体比の変化には 40 万年の周期が見出され, 各周期に対して 67 ~ 73 までの番号が付された. このうち, 73, 70, 67 の番号が付けられた周期に見られる層準は, 下位より Oi-2*, Oi-2a, Oi-2b のイベントにそれぞれ一致し, 約 120 万年周期の最小値とも一致していることがわかる.

て, 彼女らは Oi event で起きた海水準の低下が, 風化作用の促進と海洋への栄養塩の供給をもたらしたと推定している.

以上のように, 層序の連続性と年代モデルが十分に確立された試料を高分解能で解析した結果は, Oi event が漸新世の地球軌道要素の変動と関連して起きていた可能性を支持している. また, 高分解能の記録である点を生かし,

第四紀の気候変動の解析と同様にイベントの同時性に着目することで, 南極氷床の発達氷河性海水準変動を介して, 東赤道太平洋の深海環境の変動と結びついていたという見解も示されつつある. 漸新世における海洋環境の変動は, 南大洋における海路の発達とそれに伴う深層循環の変動と関連づけて論じられることが多い (たとえば, 野村ほか, 1997; 舟川, 2003). 地球軌道要素の変動とそれに伴う

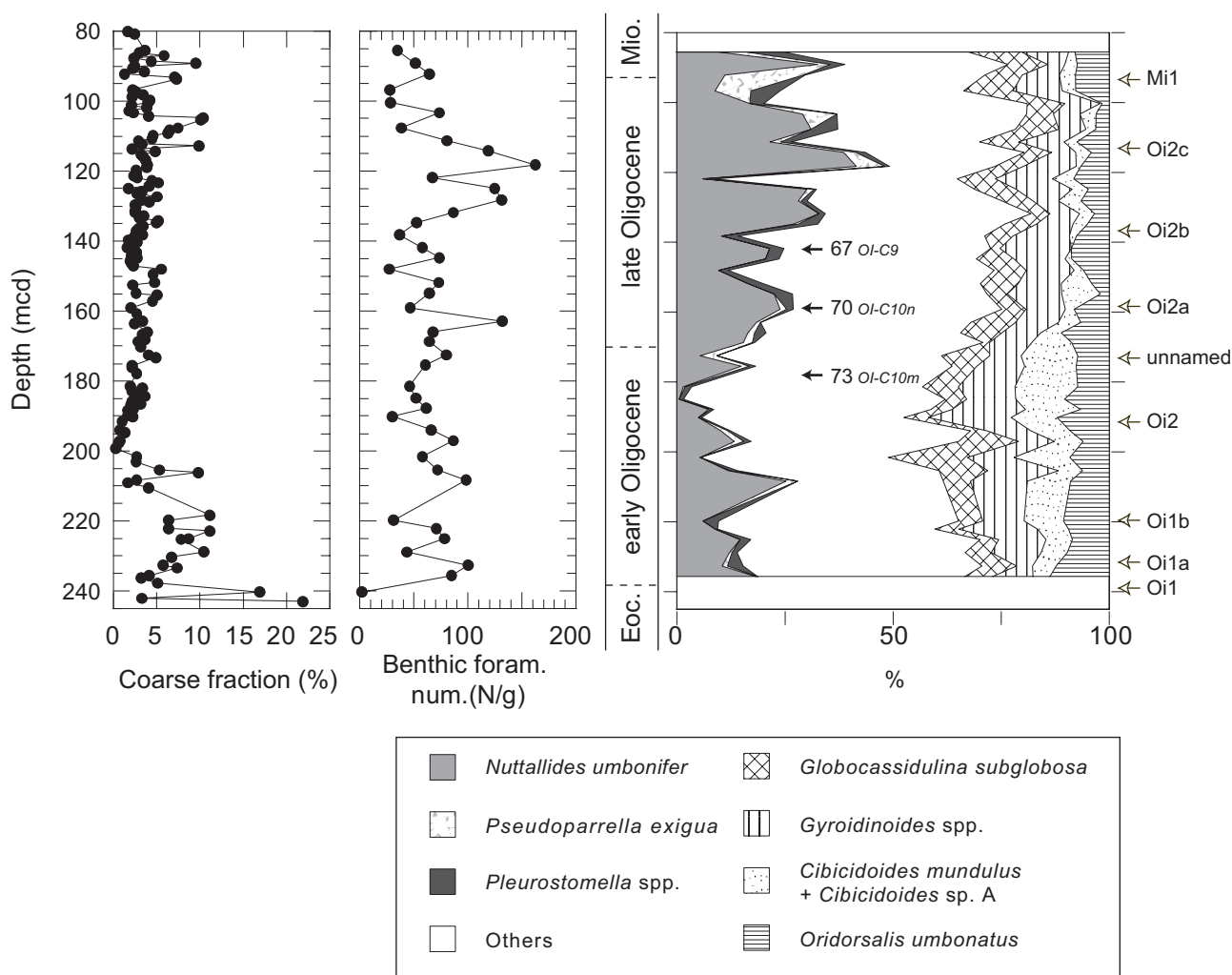


図6. ODP 1218 地点の漸新世における粗粒粒子 ($>63 \mu\text{m}$) の含有量, 底生有孔虫化石の堆積物単位重量あたりの産出個体数と主要種の産出頻度の層位変化 (データは Takata and Nomura, 2005 に基づく). 図の白矢印は Miller *et al.* (1991), Pekar *et al.* (2002) の Oi event を, 黒矢印は Wade and Pälike (2004) の Oi event を示す

氷河性海水準変動が, 漸新世の海洋環境の変動に, どの程度寄与したかを検証することは, 今後の課題といえる.

東赤道太平洋深海帯における漸新世中頃の底生有孔虫化石群の変遷

Leg 199 の始新統～漸新統については, 安定同位体比の検討に加えて, 種々の微化石の古生物学的検討が進んでいる. 浮遊性微化石では, 放散虫化石の詳細な検討が行われており, 群集の変遷と古海洋イベント (Oi event や生物源シリカの生産性の変動) の対応関係について, 様々な知見が得られている (Kamikuri *et al.*, 2005; Funakawa *et al.*, 2006).

また, 著者らは, これまで研究事例の乏しかった漸新世における太平洋の深海帯の底生有孔虫化石について, 群集組成の変遷や Oi event に対する応答に着目して, 検討を行った (Takata and Nomura, 2005). 1218 地点では,

始新統の底生有孔虫化石の産出は乏しいのに対して, 漸新統では石灰質殻を持つ底生有孔虫化石が多産し, 漸新世を通して *Nuttallides umbonifer*, *Oridorsalis umbonatus*, *Cibicidoides mundulus*, *Cibicidoides sp. A*, *Globocassidulina subglobosa*, *Gyroidinoides spp.*, *Pseudoparrella exigua* などが普遍的に産出する (図6). 前期/後期漸新世境界付近では, それまで貧栄養海域の漸深海帯～深海帯で普遍的な *O. umbonatus*, *Cibicidoides spp.* などが比較的多い群集から, 炭酸塩に不飽和な南極底層水の特徴づける *N. umbonifer* が多産する群集へと移行する (図6).

大西洋の底生有孔虫の群集 (図3: Boltovskoy and Watanabe, 1994) と比べると, 1218 地点では, 始新世/漸新世境界で石灰質有孔虫の産出個体数の変化が著しい. しかし, これは CCD の深化 (van Andel *et al.*, 1975) を反映したものと考えられる. また, 1218 地点と 1219 地点の群集は前述のように前期/後期漸新世境界付近で *N. umbonifer* が多産する群集へと移行することで特徴づけられる.

しかし、大西洋でも前期／後期漸新世境界付近に *N. umbonifer* の漸深海帯への一時的な進出が観察されており (Katz *et al.*, 2003), 太平洋 (1218 および 1219 地点) における *N. umbonifer* の増加と関係しているかもしれない。

また、1218 地点での *N. umbonifer* の産出頻度は、より短い周期の変動を示し (図 6), その一部は Oi event 付近で増加し、特に、Oi2a と Oi2b に相当する層準では顕著である。これに対して、下位の Oi1b, Oi2 付近の層準では、*O. umbonatus* や *Cibicidoides* spp. が比較的多い。このように、1218 地点における *N. umbonifer* の産状と Oi event との間に関連があり、また前期／後期漸新世境界付近を境に Oi event に対して変化する深海帯の底生有孔虫群も変わったことも示している。一方、Wade and Pälike (2004) が約 120 万年周期で起きるとした Oi event でも、*N. umbonifer* が比較的多く産出するようになる。

以上のように、漸新世の東赤道太平洋深海帯に生息していた底生有孔虫化石にも、有孔虫殻の安定同位体比の研究で認められたような、glacial event に対応した変動が起きていた可能性がある。このことは、氷室地球における深海域の底生有孔虫化石群の変遷を理解するのに加えて、南極氷床の状態と赤道太平洋の深海の環境を結びつけるテレコネクションを考える上で、有用な視点を提供できるかもしれない。著者らは、これらの点を明らかにするために、今後分解能を高めた底生有孔虫化石群の検討を行う予定である。

おわりに

漸新世の古海洋学的検討については、Leg 199 を含む ODP 末期に行われた複数の研究航海に加えて、2007 年にニュージャージー沖での IODP による掘削が予定されている。この航海では、シーケンス層序学との関係という視点で、漸新世の海洋環境についてさらなる知見が得られると期待される。また、本論で取り上げていないが、Leg 199 では暁新世／始新世境界 (P/E 境界) の研究でも、大きな成果が上げられている。それについては、野村・西 (2002, 2003), 野村ほか (2003) が詳しいので、そちらを参照されたい。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、北海道大学大学院理学研究の西 弘嗣助教授には、執筆の機会を与えていただき、さらに多くの有益なご助言をいただいた。熊本大学大学院自然科学研究科の長谷川四郎教授には、丁寧な査読をしていただいた。島根大学汽水域研究センターの香月興太博士には、粗稿をまとめるにあたり、有益なご助言をいただいた。以上の方々に心よりあつくお礼申し上げる。

文献

- Boersma, A., 1985. Oligocene benthic foraminifers from North Atlantic sites: benthic foraminifers as water-mass indexes in the North and South Atlantic. In Bougault, H., Cande, S. C., *et al.*, eds., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **82**, 611-627.
- Boltovskoy, E. and Watanabe, S., 1994. Biostratigraphy of Tertiary and Quaternary benthic bathyal foraminifers of DSDP Site 317 (Tropical Pacific). *Marine Micropaleontology*, **23**, 101-120.
- Coxall, H. K., Wilson, P. A., Pälike, H., Lear, C. H. and Backman, J., 2005. Rapid stepwise onset of Antractic glaciation and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*, **433**, 53-57.
- Davies, R., Cartwright, J., Pike, J. and Line, C., 2001. Early Oligocene initiation of North Atlantic Deep Water formation. *Nature*, **410**, 917-920.
- De Conto, R. M. and Pollard, D., 2003. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica included by declining atmosphere CO₂. *Nature*, **421**, 245-249.
- 舟川 哲, 2003. 始新世 / 漸新世境界付近における南大洋の古海洋学. 化石, (73), 20-37.
- Funakawa, S., Nishi, H., Moore, T. and Nigrini, C. A., 2006. Radiolarian faunal turnover and paleoceanographic change around Eocene/Oligocene boundary in the central equatorial Pacific, ODP Leg 199, Holes 1218A, 1219A, and 1220A. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **230**, 183-203.
- Haq, B. U., Hardenbol, J. and Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, **235**, 1156-1167.
- Kamikuri, S., Nishi, H., Moore, T. C., Nigrini, C. A. and Motoyama, I., 2005. Radiolarian faunal turnover across the Oligocene/Miocene boundary in the equatorial Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology*, **57**, 74-96.
- Katz, M. E., Tjalsma, R. C., and Miller, K. G., 2003. Oligocene bathyal to abyssal benthic foraminifera of the Atlantic Ocean. *Micropaleontology*, **49**, supplement (2), 1-45.
- Kennett, J. P., 1977. Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography. *Journal of Geophysical Research*, **82**, 3843-3860.
- Lawver, L. A. and Gahagan, L. M., 2003. Evolution of Cenozoic seaways in the circum-Antarctic region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **198**, 11-37.
- Lear, C. H., Rosenthal, Y., Coxall, H. K. and Wilson, P. A., 2004. Late Eocene to early Miocene ice-sheet dynamics and the global carbon cycle. *Paleoceanography*, **19**, doi: 10.1029 / 2004PA001039.
- Lyle, M. W., Wilson, P. A., Janecek, T. R., *et al.*, 2002. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, **199** [CD-ROM]. Available from: Ocean Drilling Program, Texas A&M University, College Station TX77845-9547, USA.
- Miller, K. G., 1983. Eocene-Oligocene paleoceanography in the deep Bay of Biscay. *Marine Micropaleontology*, **8**, 403-440.
- Miller, K. G. and Katz, M., 1987. Oligocene to Miocene benthic foraminiferal and abyssal circulation changes in the North Atlantic. *Micropaleontology*, **33**, 97-149.
- Miller, K. G. and Tucholke, B. E., 1983. Development of Cenozoic abyssal circulation south of the Greenland-Scotland Ridge. In Bott, M. H. P. *et al.* eds., *Structure and development of the Greenland-Scotland Ridge, NATO Conference Series*, 549-589, New York (Premium Press).
- Miller, K. G., Wright, J. D. and Fairbanks, R. G., 1991. Unlocking the Ice House: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6829-6848.
- Nomura, R., 1995. Paleogene to Neogene deep-sea paleoceanography in the eastern Indian Ocean: benthic foraminifera from ODP Sites 747, 757 and 758, *Micropaleontology*, **45**, 251-290.
- 野村律夫・西 弘嗣, 2002. Leg 199: 古第三紀の赤道トランセクト. ODP ニュースレター, **19**, 23-26.

- 野村律夫・西 弘嗣, 2003. Leg 199: 古第三紀のビックイベントの飛躍的解明にむけて. 月刊地球 号外, **40**, 165-171.
- 野村律夫・西 弘嗣・ODP Leg 199 乗船研究者一同, 2003. 東赤道太平洋 ODP Leg 199 で得られた暁新世-始新世の境界イベントと岩相変化, 地質学雑誌, **108**, xvii-xviii.
- 野村律夫・瀬戸浩二・西 弘嗣・竹村厚司・岩井雅夫・本山功・丸山俊明, 1997. インド洋の新生代古環境-モンスーン発達以前の古海洋の変遷-. 地質学雑誌, **103**, 280-303.
- Palike, H., Moore, T., Backman, J., Raffi, I., Lanci, L., Par s, J.M., and Janecek, T., 2005. Integrated stratigraphic correlation and improved composite depth scales for ODP Sites 1218 and 1219. In Wilson, P.A., Lyle, M., and Firth, J.V. eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **199**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1-41. doi:10.2973/odp.proc.sr.199.213.2005.
- Pekar, S. F., Christie-Blick, N., Kominz, M. A. and Miller, K. G., 2002. Calibration between eustatic estimates from backstripping and oxygen isotopic records for the Oligocene. *Geology*, **30**, 903-906.
- Pekar, S. and Miller, K. G., 1996. New Jersey Oligocene "Icenhouse" sequences (ODP Leg 150X) correlated with global $\delta^{18}\text{O}$ and Exxon eustatic record. *Geology*, **24**, 567-570.
- Shipboard Scientific Party, 2002. Site 1218. In Lyle, M. W., Wilson, P. A., Janecek, T. R., et al. eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, **199**, 1-125 (Available at http://www-odp.tamu.edu/publications/199_IR/199toc.htm.)
- Takata, H. and Nomura, R., 2005. Data report: Oligocene benthic foraminifers from the East Equatorial Pacific, Sites 1218 and 1219, ODP Leg 199. In Wilson, P.A., Lyle, M., and Firth, J.V. eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **199**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1-26. doi:10.2973/odp.proc.sr.199.224.2005.
- Thomas, E., 1985. Late Eocene to recent deep-sea benthic foraminifers from the central Equatorial Pacific Ocean. In Mayer, L., Theyer, F. et al. eds., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **85**, 655-694.
- Thomas, E., 1992. Middle Eocene-late Oligocene bathyal benthic foraminifera (Weddell Sea): Faunal changes and implications for ocean circulation. In Prothero, D. A. and Berggren, W. A., eds., *Eocene-Oligocene Climate and Biotic Evolution*, 245-271, Princeton University Press.
- Van Andel, T. H., Heath, G. R., and Moore, T. C., Jr., 1975. Cenozoic history and paleoenvironment of the central equatorial Pacific Ocean: a regional synthesis of Deep Sea Drilling Project data. *Memoir Geological Society of America*, **143**, 1-134.
- Wade, B. S. and Palike, H., 2004. Oligocene climate dynamics. *Paleoceanography*, **19**, PA4019, doi: 10.1029/2004PA001042.
- Zachos, J. C., Lohmann, K. C., Walker, J. C. G., and Wise, S. W., Jr., 1993. Abrupt climate changes and transient climates during the Paleogene: a marine perspective. *Journal of Geology*, **101**, 191-203.
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K., 2001. Trend, rhythms, and aberrations in global climate 65Ma to present. *Science*, **292**, 686-693.

