

北太平洋中緯度における 640 万年間の放散虫群集変動 (ODP Leg 198, Site 1210, シャツキーライズ)

曾野 明洋¹⁾・鈴木 紀毅¹⁾・吉村 悦子¹⁾・鹿納 晴尚¹⁾・武田 浩太郎¹⁾

Radiolarian faunal changes in the mid-latitude North Pacific over the past 6.4 m.y. (ODP Leg 198 Site 1210, Shatsky Rise)

SONO Akihiro¹⁾, SUZUKI Noritoshi¹⁾, YOSHIMURA Etsuko¹⁾, KANO Harumasa¹⁾ and TAKEDA Kotaro¹⁾

1) Institute of Geology and Paleontology, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, JAPAN
Corresponding author: Suzuki, N. (norinori@ m.tains.tohoku.ac.jp)

(2007 年 3 月 14 日受付, 2007 年 6 月 6 日第一回査読終了, 2007 年 9 月 28 日受理)

Abstract

Late Miocene to Late Pleistocene polycystine radiolarians in the mid-latitude area in the North Pacific consist of common occurrences of *Thecosphaera*, *Lithelius*, *Phortidium* and *Tetrapyle*; rare but consistent occurrences of cold water species like *Cycladophora cornuta*, *Cycladophora davisiana*, *Spongodiscus osculosa* and *Spongotrochus glacialis*; and sporadic occurrences of tropical – subtropical species like artiscin Spumellaria, *Spongaster tetras tetras*, *Spongaster tetras irregularis* and *Tetrapyle octacantha*. These mixed-fauna formed under weak influence of the warm subtropical gyre and cold subarctic gyre waters over the past 6.4 m.y. These oceanographic conditions prevented us from correlating with standard radiolarian biostratigraphic zones in the subarctic and tropical – subtropical faunas. Instead, three synchronous radiolarian events in the North Pacific were recognized in FO *C. davisiana* (2.84 Ma), LO *Theocorythium vetulum* (1.55 Ma) and LO *Axoprunum angelinum* (0.44 Ma) with the maximum error of less than 0.05 m.y. This fauna was absent or nearly absent in *Bathropyramis quadrata* and *Cyrtolagena cuspidata*, suggesting deep dwellers below a 2,500 m water depth.

Significant faunal transition of radiolarians from Site 1210 was recognized at 4.35, 3.90, 3.64, 3.08, 2.78, 2.24, 1.72, 1.42 and 0.44 Ma, respectively, based on the Q-mode cluster analyses of radiolarian accumulation rate and relative abundance. Stratigraphic changes in relative abundance and radiolarian accumulation rates of the selected 35 taxon were divided into 23 groups by the R-mode cluster analyses of radiolarian accumulation rate and relative abundance. Of these, 13 groups were considered to contribute to the radiolarian faunal change at Site 1210. Changes of the 13 groups showed three major faunal characteristics: (1) the low radiolarian productivity in 6.41–4.35 Ma with a high productivity and increase in primary productivity between 4.35 – 3.90 Ma, (2) a Mid-latitude North Pacific Radiolarian Buildup event (MNPRB) in 2.78 – 2.24 Ma that the productivity of radiolarians and diatom highly increased on the Shatsky Rise in regardless of North Pacific Opal Breakdown (NPOB) in the high latitude in the North Pacific, (3) abrupt reduce of radiolarian productivity at 1.72 Ma, which is synchronous event with the extinction of a long-ranged (since Cretaceous) nannofossil species, *Braarudosphaera bigelowii* large type, and (4) acceleration of radiolarian productivity since 0.44 Ma. Complex changes in radiolarian productivity suggest many unknown oceanographic parameters.

Key words: Mid-latitude North Pacific Radiolarian Buildup, North Pacific, Radiolaria, Miocene, Pliocene, Pleistocene.

はじめに

広大な北太平洋にはさまざまな水塊があり、その違いに応じて生物群集が棲み分けをおこなっている (Casey et al., 1979). 北西太平洋に限ってみても、表層水は寒冷で栄養塩に富む亜寒帯系 (親潮系) 水塊 (Subarctic water [Oyashio water]) (Kawabe and Taira, 1998), 熱を北に移動させる役割をもつ黒潮と黒潮続流を含む亜熱帯系 (黒潮系) 水塊 (Subtropical water [Kuroshio water]), 両者の混合領域である黒潮・親潮遷移帯 (Transitional zone between Kuroshio and Oyashio waters), 表層から中層にかけては夏に生じた鉛直渦流起源の水塊を起源とし、季節躍層 (seasonal thermocline) と永年躍層 (permanent thermocline) の間に形成される北太平洋亜熱帯モード水 (NPSTMW: North Pacific Subtropical Mode Water) (Hanawa and Suga, 1995), 中層にはオホーツク海起源の北太平洋中層水 (NPIW: North Pacific Intermediate Water) (Lalli and Parsons, 1993), 太平洋亜北極中層水 (PSIW: Pacific Subarctic Intermediate Water) (Hasunuma, 1978), 深層には赤道側から北上する太平洋深層水 (PDW: Pacific Deep Water) (角皆・垂木, 1983) と高緯度から南下する太平洋底層水 (PBW: Pacific Bottom Water) (Bolin et al., 1983) が区別されている (Fig. 1). NPIW は、発見当初は黒潮系水塊の中層水に見られる塩分逆

転層をさしていた (Sverdrup et al., 1942) が、現在はオホーツク海を起源とする低塩分・寒冷水塊と黒潮系水塊が中層で混合して形成されていると考えられるようになり (Hasunuma, 1978; Yasuda et al., 1996), 現在は北西太平洋の中層に広がる、密度 26.8kg/m^3 以上、 $34.2 \sim 34.4\text{psu}$ の塩分以下の中層水として識別される (Hasunuma, 1978; Yasuda et al., 1996). PSIW は、北太平洋北緯 25 度以北で NPIW の下に分布する中層水 (Lalli and Parson, 1993) で、低塩分・低酸素濃度で特徴づけられ、PSIW の上限は NPIW の下限で定義され、PSIW の下限はポテンシャル温度 2°C で境される (Reid, 1965). リン・シリカ・窒素などに富む水塊の分布と一致する. PDW は上限を 2°C のポテンシャル温度等水温面で、下限を 1.2°C の等水温面で定義される水塊で (角皆・垂木, 1983) で、 $34.585 \sim 34.65\text{psu}$ の低塩分で特徴づけられる. PDW は南流するのにたいし、PBW は北流するため両者は別水塊とされる. PBW は水温 1.2°C 以下の水塊で海底まで達する底層水で定義される (Bolin et al., 1983). これら水塊構造は環境変動で大きく変わる場合が知られ、北太平洋でも過去においては寒暖の変動など周期的な環境変化と、ベーリング海峡開裂に代表される不可逆的な変化の影響を受け、これらの水塊の位置や海域の水塊立体構造は多かれ少なかれ変動してきた (e.g. Ohkushi et al., 2003). とくに黒潮・親潮遷移帯となっている北緯 $30\text{--}40$ 度は、多種多様な水塊の影響下にあるため、

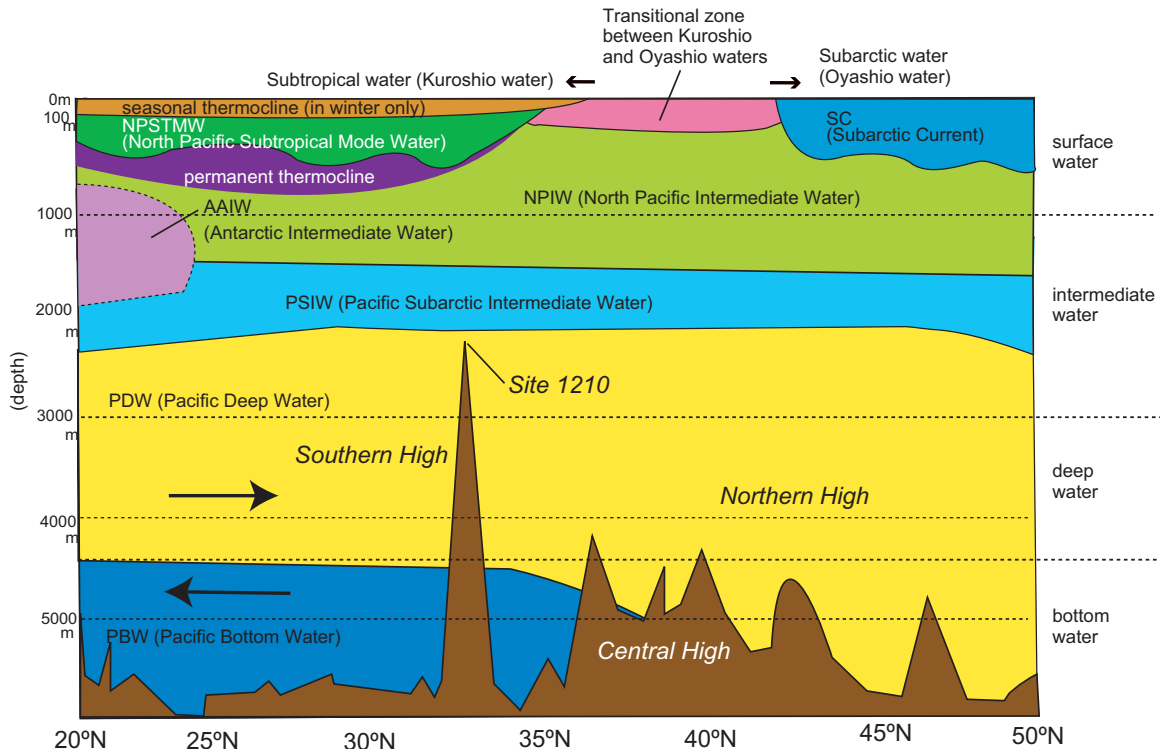


Fig. 1. Schematic oceanographic profile at 165°E , North Pacific.

環境変化の影響が海洋生物群に現れやすい。

北西太平洋中緯度でどのような変動が起きていたのかを明らかにする試みは数多く行われている (e.g. Kamikuri et al., in press). 彼らの研究では、深海底のコアから得られた放散虫群集のみを使って議論している。北西太平洋中緯度には平均水深が 4000m 以深に達する北西太平洋海盆が広がっており、石灰質微化石の保存は一般に不良である。石灰質ナノ化石や浮遊性有孔虫なども用いた複合的な検討が可能な地点は、シャツキーライズやヘスライズなど海膨や海山の CCD 以浅に限られている。とくに中層下部以深についての記録を化石から読み取るには放散虫に限られる。

放散虫は、極域から赤道まで広く分布しているとともに表層から深層まで生息している。すなわち、放散虫は海水温や塩分、栄養塩濃度などの海洋パラメータの違いによって複合的に棲み分けしている可能性があり、したがって過去の海洋環境を把握するポテンシャルが高いといえる。しかし、多くの研究では温暖・寒冷など水温に重点をおいた解釈がなされるが、水温変化に鋭敏に反応するのは表層にすむタクサだけであり、温度勾配が小さい表層下部～底層までのタクサについては、水温以外の海洋パラメータにตอบสนองしていると可能性もあわせて考えるべきである。しかし、実際には現生種の研究においても水温以外の海洋パラメータとの応答関係はあまり分かっておらず、ましてや化石種となれば古環境を読み取ることができない。化石種から古環境を読み取る一つの手法は、環境との応答関係が知られている現生放散虫が化石種と共産する場合、同じ変動をするタクサ群はおなじ海洋パラメータと応答していると仮定する方法である。現在までに1つの地点で過去 640 万年間に遡って放散虫の生産量や相対産出頻度がどのように変化してきたかを示した例は少なく、基礎的情報の集積が必要な段階である。

本研究では、北太平洋の黒潮・親潮混合域に位置するシャツキーライズ上で掘削された ODP (Ocean Drilling Program) Leg 198, Site 1210 コアの上部中新統～更新統の放散虫群集について、生産量と相対産出頻度の特徴を明らかにする。この地点は、磁気極性層序によって堆積年代が決定されているため年代決定精度が高く、また浮遊性有孔虫など他の微化石群が共産するので、放散虫群集の変動を解釈するのに必要な情報を得るのに適している。そこで、放散虫が産出する層準である 6.41 Ma 以降を検討対象とし、各タクサの相対産出頻度と生産量について求め、種間相関と層位変化についてクラスター解析による区分を行った。

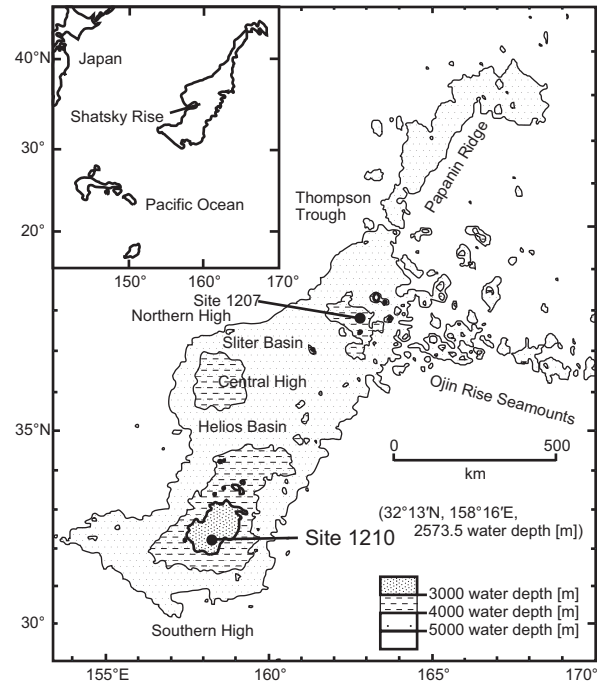


Fig. 2. Bathymetric map around the Shatsky Rise, showing the location of Site 1210 and other related sites (based on Bown, 2005).

地質概説と試料

ODP Site 1210 (32° 13' N, 158° 16' E, 水深 2573.5 m) が掘削されたシャツキーライズは、黒潮・親潮遷移帯の下に位置する南北に長い海台である。この海台には、3個所の地形的高まりがあり、それぞれ Northern High, Central High, Southern High と呼ばれている (Fig. 2)。この海台は 10 Ma には現在よりも約 5° 南に位置していたので (Bralower et al., 2006), 検討する過去 641 万年に掘削地点は北緯 29 ~ 32 度に位置したことになる。Site 1210 の岩相は、Unit I (0 ~ 128.80 mcd, mcd = meter in composite depth), Unit II (128.80 ~ 244.33 mcd), Unit III (244.33 ~ 265.62 mcd) の 3 ユニットに区分される (Shipboard Scientific Party, 2002)。

Unit I はさらに Subunit IA ~ IC に細分され、検討した層準は放散虫化石が連続的に産出する Subunit IA から Subunit 1B の最上部にあたる (Fig. 3)。Subunit IA (0 ~ 91.66 mcd) は緑灰色～灰色石灰質ナノ化石軟泥よりなる。約 10 cm 間隔で色調に明暗が見られ、暗色部は粘土に富み、明色部は生物源粒子が多い。生物擾乱は稀～中程度である。Subunit IB (91.66 ~ 124.52 mcd) は淡橙色～灰橙色の石灰質ナノ化石軟泥よりなる。上部で約 10 cm 間

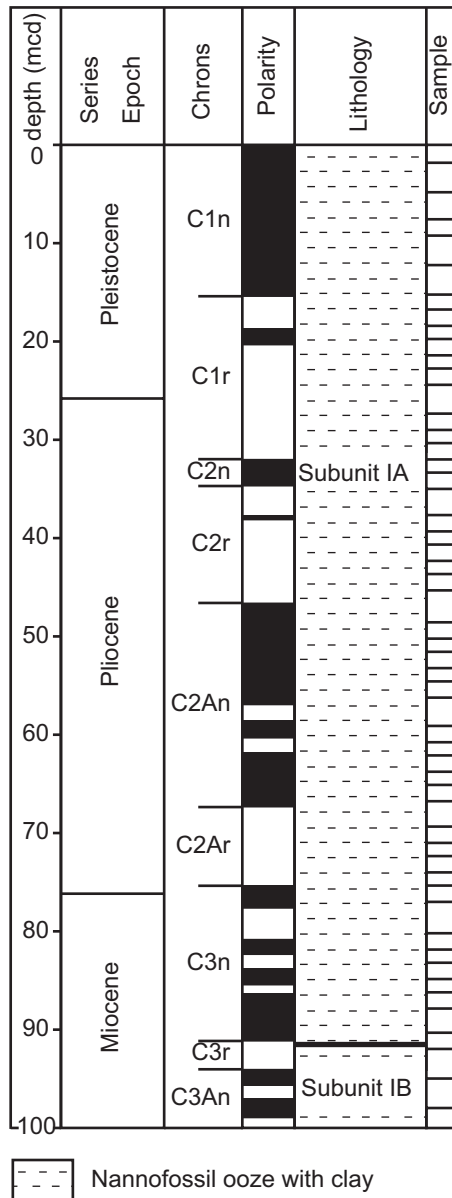


Fig. 3. Lithostratigraphy of the examiend intervals with sampling horizon, lithology, magnetostratigraphy and geologic time (magnetostratigraphy from Evans et al., 2005 and Cande and Kent, 1995).

隔で、下部では約 1 m 間隔で明暗の繰り返しが見られる。Subunit 1A と異なり黄鉄鉱はまれで、生物擾乱は稀～中程度である。

検討試料の堆積年代は Evans et al. (2005) により報告された古地磁気極性層序に基づき決定した。検討した層準においては、25 の地磁気反転イベントが確認され、それらを Cande and Kent (1995) の年代モデルに当てはめ、堆積年代曲線を作成した (Fig. 4)。なお、本論で引用する論文の数値年代は、すべて Sanfilippo and Nigrini (1998) の補正式をもちいて、Cande and Kent (1995) の数値年代に補正している。

検討した試料は、層厚約 1.5 m ごとに採取した 1H2W

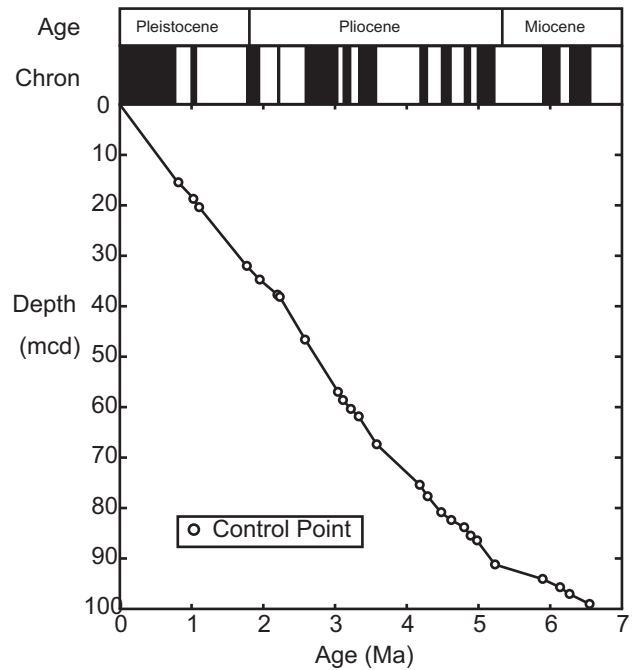


Fig. 4. The age-depth model for Site 1210 with age-control points of chron/subchron boundaries from Evans et al. (2005).

(1.5 mcd) から 10H6W (97.7 mcd) までの 59 試料を用いた。ただし 1H1W (0 ~ 1.5 mcd), 1H3W (3.0 ~ 4.5 mcd), 2H1W (7.4 ~ 8.9 mcd), 2H3W (10.4 ~ 11.9 mcd), 2H5W (13.4 ~ 14.9 mcd), 4H1W (27.2 ~ 28.9 mcd) の 6 層準は試料がなかったため除外している。Figure 3 の堆積速度曲線によれば検討試料の年代間隔は約 10 万年となる。

試料処理と解析方法

1. 試料処理

試料処理は、主に高柳 (1978) に従った。自然状態で未乾燥試料を約 5 g を 60°C で乾燥させた後、重量を測り Shipboard Scientific Party (2002) の乾燥密度の値を利用して単位体積あたりの個体数を求めた。Site 1210 の堆積物の密度は検討した層準でほぼ一定であり、堆積速度曲線に極端な変化がないことから、単位体積を用いて良いと判断した。次に、個体抽出のためビーカにサンプルを入れ、濃度 3% の塩酸を加えて反応しなくなるまで放置して石灰質を除去した。水洗したのち、3% の過酸化水素水と水質軟化剤の Calgon© を加えて有機物と粘土分を除去した。残渣を回収するのに一般的に用いられる開口目 63µm では微小な放散虫個体が篩い落とされるので、開口目 38µm の篩を併用して残渣を回収した。残渣の等分割を繰り返し、スライド上の散布のパラツキの影響が十分に小

さくなるよう、放散虫個体が 600 個体以上 (鈴木・木田, 2004) になるようにし、高柳 (1978) にしたがってエンテランニューを用いてスライドガラスに封入した。検鏡は光学顕微鏡下で行い、明らかな幼形個体を除いてすべて同定した。

2. 解析方法

タクサ毎の個体数を数え上げたのち、相対産出頻度と生産量を求めた。両者が記録している変動の性質が異なり、それぞれに見られる減少・一定・増加の3種類の変動傾向を組み合わせると9種類の性質を識別できる (Table 1)。相対産出頻度は試料毎に各タクサが全個体数に占める割合で求め、生産量については、Takahashi (1994, 1995) による放散虫沈積量 (Radiolarian Accumulation Rate: RAR) を用いた。放散虫沈積量とは単位面積、単位時間における放散虫の沈積した個体数を示し、以下の式で求められる。

$$\text{RAR [No. shells/(cm}^2 \times \text{kyr)]} = N/W \times D \times R \quad (1)$$

N はそのスライドに含まれる放散虫の個体数、 W は堆積物の乾燥重量 [g]、 D は密度 (dry bulk density) [$\text{g} \times \text{cm}^{-3}$]、 R は堆積速度 [$\text{cm} \times \text{kyr}^{-1}$] である。放散虫沈積量は、本論では放散虫の総生産量とみなす。また、 N に各タクサ毎の個体数を代入することで、タクサ毎の生産量が求まる。

得られた各タクサの相対産出頻度と生産量の変動やサンプル間で類似した群集を識別するため、Microsoft Windows 用古生物データ解析ソフト PAST (PAlaeontological STatistics. <http://folk.uio.no/ohammer/past/>) を使用し、Q モードクラスター解析と R モードクラスター解析をそれぞれ行った。クラスター解析では類似度としてユークリッド距離の符号を反転して用いた。ユークリッド距離で類似度を表す場合、変動パターンの相関性よりも絶対的な生産量の増減が強く表れる傾向がある。本研究では次に示す Kano (2007MS) で用いられている規格化を利用

し、類似した変動を示すタクサが同じクラスターに分類されるようにした。

$$n_i/S \quad (2)$$

ただし、 n_i はその1試料中の各タクサの個体数、 S は全層準を通しての各タクサの産出数の合計であり、添え字の i は、任意の種 i である。化石種は年代指標としての区別を目的としている側面があり、*Didymocyrtis* 属や *Diartus* 属のように単系統で分岐をしないで形態変化した一群を進化的種として区別しているものがある。このような場合は、属で一括した (Table 2)。

結果

1. 産出状況

放散虫化石は検鏡した 59 試料から連続的に産出した。一部の放散虫化石遺骸には溶解や破損の形跡が認められるものの、群集解析には支障のない保存であった。本研究では 59 属 100 種の放散虫を同定し、そのうち連続的に産出が認められ、生息条件が明らかになっている、または分類が安定している 37 属 58 種について生産量、相対産出頻度の変動を明らかにした (Table 3)。本コアでは *Thecosphaera* 属や *Lithelius* 属、*Phorticium* 属、そして *Tetrapyle* 属などが多産したが、これらの属は分類体系が不安定なために本研究では同定のみとした。

Site 1210 から得られた放散虫群集の種構成が近傍海域のそれとどの程度類似しているのか評価するため、三陸沖で掘削された Hole 438A における全群集解析 (Motoyama, 1996) の結果と比較した。我々の検討では 38 μm 径以上の、Motoyama (1996) では 63 μm 径以上の放散虫を対象とするという処理方法に違いがあるが、我々の予察

Table 1. Schematic interpretation of relative abundance and accumulation rate of a given taxon.

		Productivity		
		Increase	Unchanged	Decrease
Relative abundance	Increase	Rapid increase in the target group than others	Reproduction rate in other groups decreases	Slower decrease in reproduction rate in the target group
	Unchanged	Reproduction rate similarly increases with other groups	No changes appear in any groups	Reproduction rate similarly decreases with others
	Decrease	Slower increase in the target group than others	Reproduction rate in other groups increases	Rapid decrease in reproduction rate in the target group

Table 2. List of several species counted as a single ecological group for quantitative analyses.

group name	species
Phormostichoartus group	<i>Phormostichoartus corbula</i> (Harting)
	<i>Phormostichoartus fistula</i> Nigrini
Lamprocyrtis group	<i>Lamprocyrtis hannai</i> (Campbell et Clark)
	<i>Lamprocyrtis heteroporos</i> (Hays)
	<i>Lamprocyrtis nigrinae</i> (Caulet)
Anthocyrtidium group	<i>Anthocyrtidium ophirens</i> (Ehrenberg)
	<i>Anthocyrtidium zanguebaricum</i> (Ehrenberg)
	<i>Anthocyrtidium jenghisi</i> Steeter
	<i>Anthocyrtidium ehrenbergi</i> (Stöhr)
	<i>Anthocyrtidium angulare</i> Nigrini
Theocorythium group	<i>Theocorythium trachelium diana</i> Haeckel
	<i>Theocorythium vetulum</i> Nigrini
Artiscinae	<i>Didymocyrtis tetrathalamus</i> (Haeckel)
	<i>Didymocyrtis avita</i> (Riedel)
	<i>Didymocyrtis penultima</i> (Riedel)

では 38 μ m ~ 63 μ m 径の篩で分離された種は, 例外なく 63 μ m 径以上の残渣にも見つかるので, 種数の比較では問題ならない. 比較の結果, Motoyama (1996) でリストアップした放散虫 60 種のうち, 26 種が Site 1210 の群集と共通し, やや共通性に乏しい. また, Site 1210 における群集の全体的傾向を生産量と相対産出頻度の両方で比較すると, *Cycladophora cornuta* (Bailey), *Cycladophora davisiana* Ehrenberg, *Spongodiscus osculosa* (Dreyer), *Spongostrochus glacialis* Popofsky など寒冷海域で産するタクサ (Itaki, 2003; Lombardi and Boden, 1985; Okazaki et al., 2004; Romine, 1985) は Site 1210 において連続産出するものの, 生産量と相対産出頻度はともに低かった. 相対産出頻度については Hole 438A においても同様の傾向が報告されている. 一方, 亜熱帯~熱帯域に多産する傾向のある Artiscinae 亜科, *Spongaster tetras tetras* Ehrenberg, *Spongaster tetras irregularis* Nigrini, *Tetrapyle octacantha* Müller (Lombardi and Boden, 1985; Motoyama and Nishimura, 2005; Yamashita et al., 2002) のうち, Site 1210 では Artiscinae 亜科や *T. octacantha* などは連続的に産出する. しかし, Artiscinae 亜科は平均 0.5% と少ない. *S. t. tetras* や *S. t. irregularis* は散点的に産出するにすぎず, この傾向は Hole 438A についても同様である.

さらに, Site 1210 では9層準に生層序事変を認定できた (Table 4). これらのうち, *Phormostichoartus fistula* Nigrini の最終出現 (Last Occurrence = LO), *C. davisiana* の初連続産出出現 (First Continuous Occurrence = FCO), *Axoprunum angelinum* (Campbell et Clark) の LO が北太平洋で知られているバイオイベントと共通する (e.g. Kamikuri et al., 2004; 本山, 1999; 本山・丸山, 1998).

その年代値は既知論文ではそれぞれ 4.1 Ma (本山・丸山, 1998), 2.6–2.7 Ma (Kamikuri et al., 2004), 0.42–0.50 Ma (本山, 1999) とされているのに対し, Site 1210 ではそれぞれ 0.96 \pm 0.66 Ma, 2.84 \pm 0.04 Ma, 0.44 \pm 0.04 Ma であり, *P. fistula* を除いて年代推定値の同時性は高い (ただし, 誤差は最大・最小値幅). 一方, 熱帯域で知られるバイオイベントと共通するものは, *P. fistula* の LO (Haslett, 2004), *Lamprocyrtis heteroporos* Hays の初出現 (First Occurrence = FO) (Haslett, 2004), *C. davisiana* の FO (Haslett, 2004), *Theocorythium vetulum* Nigrini の LO (Haslett, 2004) である. それぞれの示されている年代値は, 3.47 \pm 0.16 Ma, 3.29 \pm 0.15 Ma, 2.715 \pm 0.225 Ma, 1.58 \pm 0.42 Ma となっており, それに対し Site 1210 ではそれぞれ 0.96 \pm 0.03 Ma, 4.02 \pm 0.06 Ma, 2.84 \pm 0.04 Ma, 1.55 \pm 0.05 Ma となった. これらのうち, *C. davisiana* の FO と *T. vetulum* の LO の年代値がほぼ一致した.

放散虫は水深数千メートルの深海にも生息する. Site 1210 の掘削開始水深は 2573.5 m である. Site 1210 では, 北太平洋で深層種とされる *Cornutella profunda* Ehrenberg (e.g. Kling, 1979) は最大で相対産出頻度が 5% に達するが, 同様に深層種とされる *Bathropyramis quadrata* Haeckel は一桁相対産出頻度が小さく, 最大で 0.45% である. 同様に深層種と言われる *Cyrtolagena cuspidata* (Bailey) は, 数個体得られたのみである. これは近傍海域で水深がさらに 500m 深い地点 Site 1207 で回収されたコアの群集で *C. profunda* と *B. quadrata* ともに比較的多産 (吉村, 2007MS) し, *C. cuspidata* も産出する (吉村, 2007MS) のとは対照的である.

Table 3. Taxonomic list encountered in Site 1210. Asterisks for quantitative analyses.

<i>Actinomma boreale</i> (Cleve)	* <i>Lamprocyrtis nigrinae</i> (Caulet)
<i>Actinomma medianum</i> Nigrini	<i>Larcopyle buetschlii</i> Dreyer
<i>Amphirhopalum ypsilon</i> Haeckel	<i>Larcopyle decens</i> (Kozlova)
* <i>Anthocyrtidium angulare</i> Nigrini	<i>Larcospira quadrangula</i> Haeckel
* <i>Anthocyrtidium ehrenbergi</i> Stöhr	<i>Litharacnium tentorium</i> Haeckel
* <i>Anthocyrtidium jenghisi</i> Streeter	* <i>Lithocampe heptacola</i>
* <i>Anthocyrtidium ophirensense</i> (Ehrenberg)	<i>Lithocampe teuscheri</i> (Haeckel)
* <i>Anthocyrtidium zanguebaricum</i> (Ehrenberg)	* <i>Lithomelissa setosa</i>
* <i>Artostrobos annulatus</i>	* <i>Lithomelissa thoracites</i>
<i>Artostrobos jorgenseni</i> Petrushevskaya	* <i>Lithopera</i>
* <i>Axoprunum angelinum</i>	<i>Lithostrobos cuspidatus</i> (Bailey)
* <i>Bathropyramis quadrata</i>	<i>Lophophaena hispida</i> (Ehrenberg)
* <i>Botryocampe inflata</i>	* <i>Spongurus cylindricus</i>
<i>Botryocyrtis scutum</i> (Harting)	<i>Phormostichoartus corbula</i> (Harting)
<i>Lithobotrys cribrosa</i>	* <i>Phormostichoartus doliolum</i> (Riedel et Sanfilippo)
* <i>Botryostrobos aquilonaris</i>	* <i>Phormostichoartus fistula</i> Nigrini
* <i>Botryostrobos auritus/australis</i>	<i>Phorticium pylonium</i> Haeckel
<i>Botryostrobos seriata</i> Jørgensen	* <i>Pseudodictyophimus gracilipes</i>
* <i>Carpocanium</i>	<i>Sartunalis circularis</i> (Haeckel)
<i>Cenosphaera</i> sp.A	* <i>Siphocampe lineata</i>
<i>Cenosphaera</i> sp.B	<i>Sphaeropyle langii</i> Dreyer
<i>Cenosphaera</i> sp.C	<i>Spongaster pentas</i> Riedel et Sanfilippo
<i>Circodiscus microporus</i> (Stöhr)	<i>Spongaster tetras irregularis</i> Nigrini
* <i>Cornutella profunda</i>	<i>Spongaster tetras tetras</i> Ehrenberg
<i>Corocalyptra elisabethae</i> (Haeckel)	<i>Spongodiscus resurgens</i> Ehrenberg
* <i>Cycladophora cornuta</i>	* <i>Spongodiscus osculosa</i> (Dreyer)
* <i>Cycladophora pliocenica</i>	<i>Spongoplegma</i>
* <i>Cycladophora davisiana</i>	* <i>Spongotrochus glacialis</i>
<i>Dictyocoryne truncatum</i> Ehrenberg	<i>Stichocorys delmontensis</i> (Campbell et Clark)
* <i>Didymocyrtis</i>	* <i>Stichocorys peregrina</i>
<i>Druppactructus</i> spp.	<i>Stichopilium bicornis</i> Haeckel
* <i>Eucyrtidium acuminatum</i>	<i>Stylocantarium acquilonium</i> (Hays)
<i>Eucyrtidium calvertense</i>	<i>Stylocantarium bispiculum</i> (Popofsky)
<i>Eucyrtidium hexagonatum</i> (Haeckel)	<i>Stylocantarium</i> spp.
* <i>Flustrella</i>	<i>Stylatractus</i> spp.
<i>Gondwanaria campanulaeformis</i> (Campbell et Clark)	* <i>Stylochlamydidium</i>
* <i>Heliodiscus asteriscus</i>	* <i>Stylodictya</i>
<i>Hexacantium anaximandri</i> (Haeckel)	<i>Stylosphaera melpomene</i> Haeckel
<i>Hexacantium arachnoidale</i> Hollande et Enjument	<i>Tetrapyle octacantha</i> Müller
<i>Hexacantium axotrias</i> Haeckel	<i>Thecosphaera dedoensis</i> Nakaseko
<i>Hexacantium multiporum</i> Vinassa De Regny	<i>Thecosphaera grecoi</i> Vinassa De Regny
<i>Hexacantium octahedrum</i> Haeckel	<i>Thecosphaera inerme</i> Haeckel
<i>Hexacantium</i> sp.A	<i>Thecosphaera paroniana</i> Carnevale
<i>Hexacantium</i> sp.B	<i>Thecosphaera</i> sp.A
<i>Hexacantium subtile</i> Carnevale	* <i>Theocorys creticum</i>
<i>Hexalonche aristarchi</i> (Haeckel)	* <i>Theocorythium trachelium diana</i> (Haeckel)
<i>Hexalonche</i> sp.A	* <i>Theocorythium vetulum</i> Nigrini
* <i>Lamprocyclas maritimalis</i>	<i>Tholospyrus scaphipes</i> (Haeckel)
* <i>Lamprocyrtis hanaei</i> (Campbell et Clark)	<i>Tholospyrus stabilis</i> Goll
* <i>Lamprocyrtis heteroporos</i> (Hays)	* <i>Tricolocapsa papillosum</i>

2. 総生産量変動

放散虫沈積量で表現される総生産量 (Fig. 5) は, 6.41 ~ 0.44 Ma の期間は全体として $0.3 \sim 0.4 \times 10^5$ [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹] で推移している. 4.35 ~ 3.90 Ma に 0.5×10^5 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹], 2.78 ~ 2.24 Ma に 1.0×10^5 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹], 0.44 Ma 以降に 3.5×10^5 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹] に達する増加時期がそれぞれ認められる. 逆にスパイク的な総生産量の急減は 1.24 Ma, 0.90 Ma に認められる. この総生産量変動が, 構成種の組み合わせや特定種の生産量増加によるものか判断するために, 相対産出頻度・生産量それぞれの Q モードクラスター解析を行った.

3. Q モードクラスター解析

類似度距離 0.4 にもとづき, 生産量の Q モード解析の結果から Q-I から Q-VI の 6 クラスターに, 相対産出頻度についても同様にユークリッド距離 -0.4 で, Q-i から Q-vi の 6 クラスターに分割した (Figs. 6, 7). 放散虫の総生産量の Q モードクラスターに基づき, 下位より区間 A から区間 H に区分した (Fig. 7). 区間 A は 6.41 ~ 3.08 Ma (試料番号 10H6W ~ 7H1W; 深度 97.8 ~ 59.1 mcd), 区間 B は 3.08 ~ 2.78 Ma (6H6W ~ 6H3W; 56.23 ~ 51.57 mcd), 区間 C は 2.78 ~ 2.24 Ma (6H2W ~ 5H2W; 50.23 ~ 39.32 mcd), 区間 D は 2.24 ~ 1.42 Ma (5H1W ~ 3HCC; 37.66 ~ 27.34 mcd), 区間 E は 1.42 ~ 1.12 Ma (3H6W ~ 3H4W; 24.41 ~ 21.41 mcd), 区間 F は 1.12 ~ 0.33 Ma (3H3W ~ 1HCC; 19.75 ~ 7.57 mcd) で, 区間 G は 0.33 ~ 0.18 Ma (1H4W; 12.23 mcd), 区間 H は 0.18 Ma 以降 (1H2W; 1.82 mcd) である. それぞれの期間で卓越する放散虫の総生産量のクラスターは下位から, 順に区間 A は Q-II, 区間 B は Q-III, 区間 C は Q-IV と Q-V が交互に現れ, 区間 D は Q-III, 区間 E は Q-II, 区間 F は Q-II, 区間 G は Q-VI, 区間 H は Q-I である. 同様に相対産出頻度の Q モードクラスターの結果についても下位より区間 a から区間 d と区分した (Fig. 7). 区間 a は 6.41 ~ 3.64 Ma (10H6W ~ 8H1W; 97.98 ~ 69.35 mcd), 区間 b は 3.64 ~ 3.00 Ma (7H6W ~ 6H6W; 66.77 ~ 56.23 mcd), 区間 c は 3.00 ~ 1.72 Ma (6H5W ~ 4H4W; 54.58 ~ 32.00 mcd), 区間 d は 1.72 Ma 以降 (4H3W ~ 1H2W; 30.34 ~ 1.82 mcd) である. 卓越するクラスターは, 区間 a では Q-iv, 区間 b では Q-i, Q-iv, Q-v, Q-vi の 4 クラスターが入れ替わる時期で卓越するクラスターはなく, 区間 c では Q-vi が, 区間 d では Q-iii からなる.

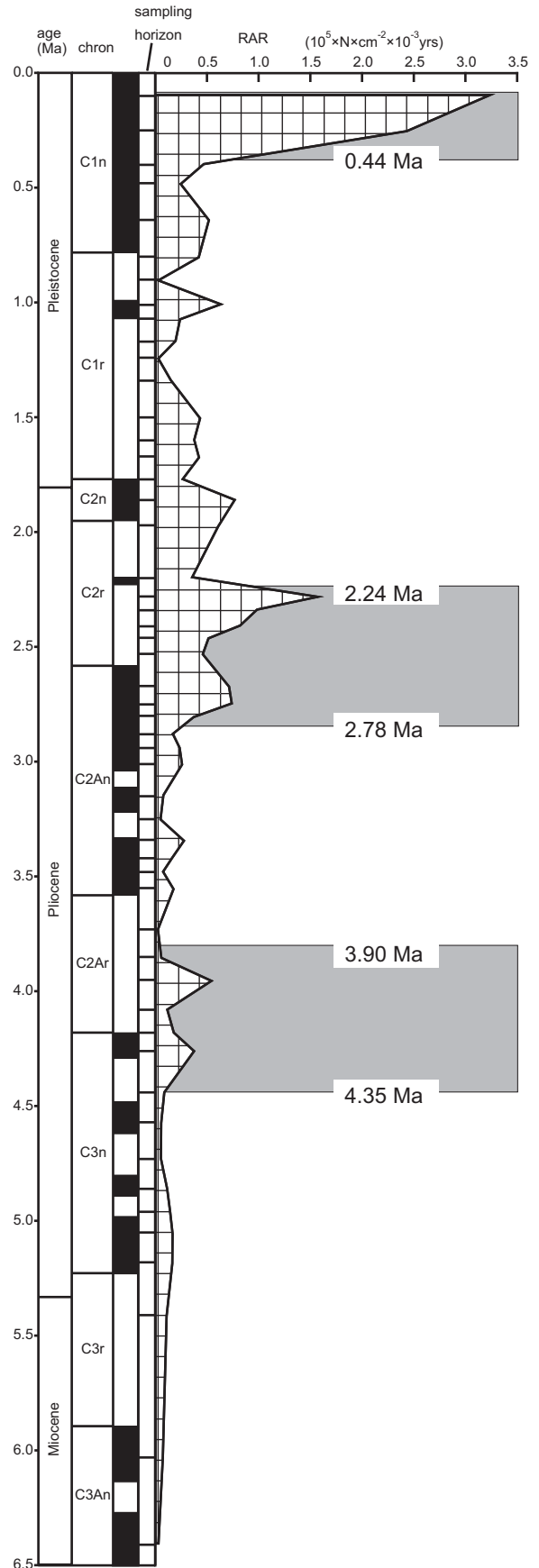


Fig. 5. Stratigraphic distribution of changes in the total of radiolarian accumulation rate (RAR). Gray intervals are characterized by relatively high accumulation rates.

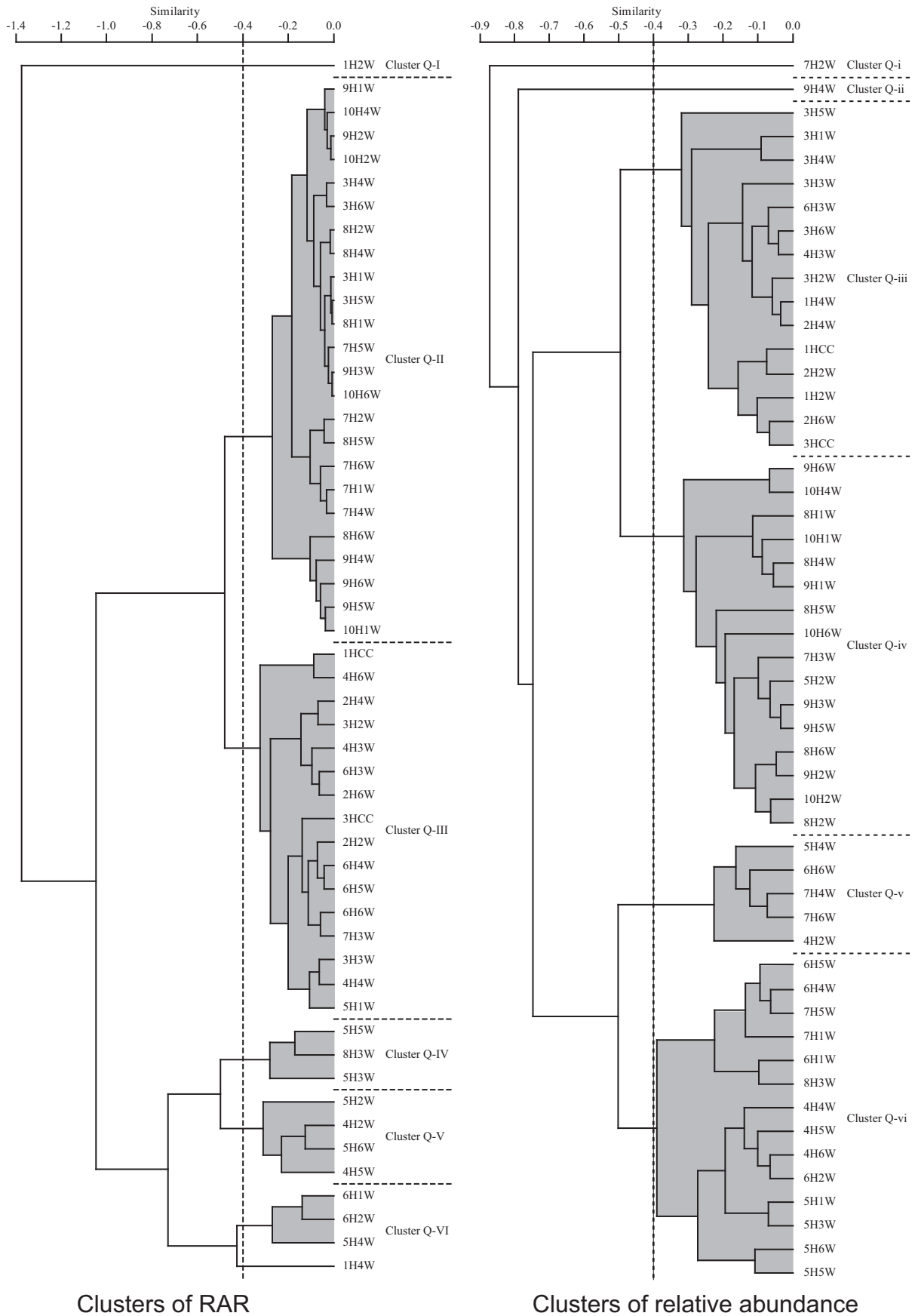


Fig. 6. Dendrogram of Q-mode cluster analyses on radiolarian accumulation rate (RAR) (left column) and relative abundance (right column), using the Ward method.

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

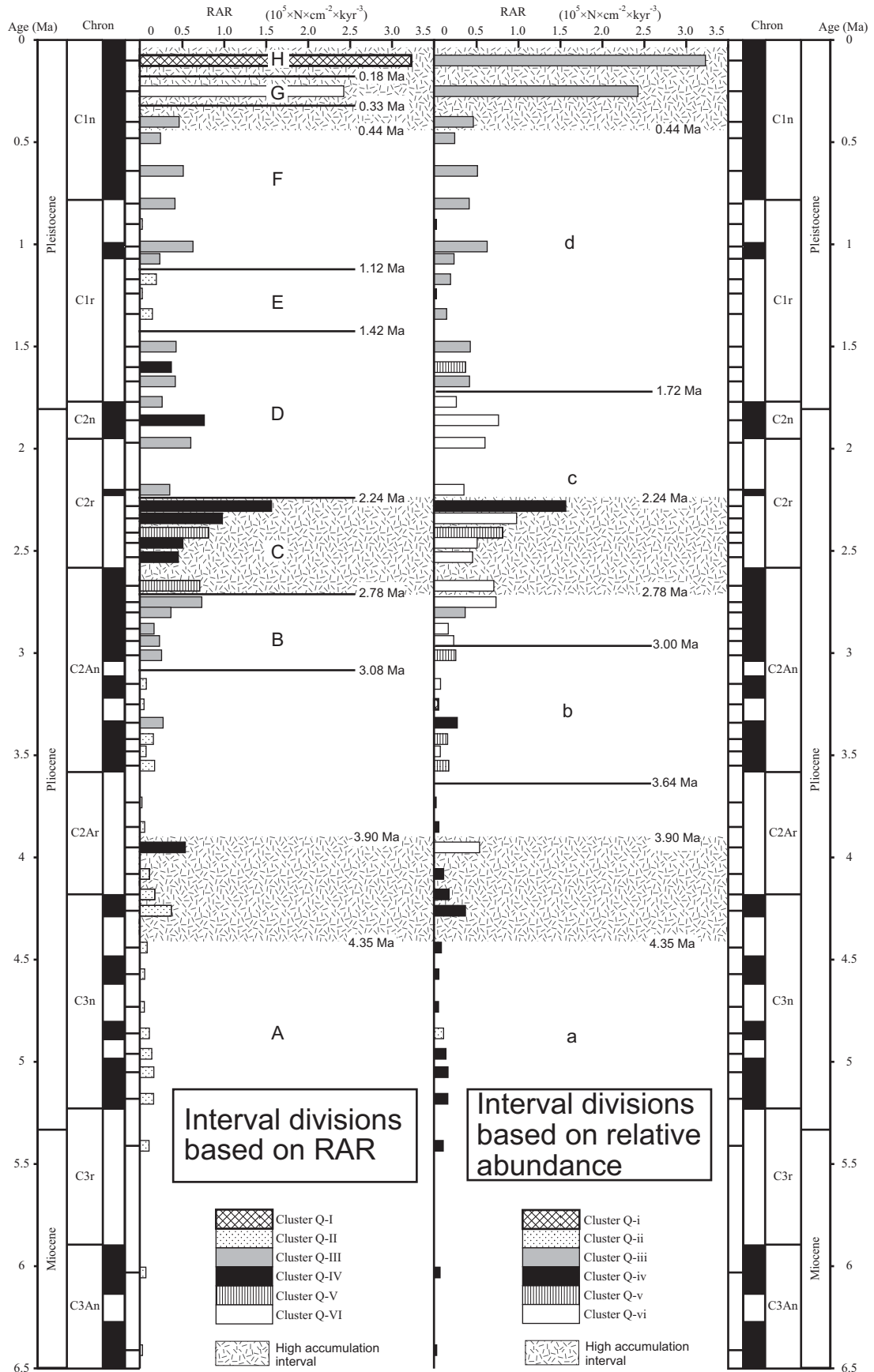


Fig. 7. Interval divisions based on Q-mode cluster groups of radiolarian accumulation rate (RAR) (left column) and relative abundance (right column).

4. Rモードクラスター解析

生産量と相対産出頻度についてRモードクラスター解析を行ない、生産量に対してユークリッド距離の符号を反転させた類似度 0.32 でクラスターを識別し、R-I から R-VII の 8 クラスターを識別した。さらに 1 タクサで独立したクラスターを認めたと、便宜上一括して R-VIII として示した。本来一括すべきではないが、煩雑になるので一つとした。相対産出頻度についてはユークリッド距離 -0.26 でクラスターを識別し、R-i から R-viii の 8 クラスターに区分した。1 タクサで独立したクラスターを形成する 3 タクサも便宜上一括して R-ix とした (Fig. 8)。Table 5 に示すように、RAR と相対産出頻度の Rモードクラスターの両方で共通するタクサを 1 グループと細分し、合計 23 グループを識別した。各グループの変動を Fig. 9 に、各構成種の変動について Fig. 10 にまとめた。この 23 グループのうち、生産量が相対産出頻度のいずれかが著しく少ないものを除いた 13 グループ (Table 5) が、主要な放散虫群集の変動を担う主たる一群と考えられる。それぞれの時系列変化は次のような特徴をもつ。

Group 1 : *Lithomelissa thoracites* Haeckel と *Botryocampe inflata* (Bailey) の 2 タクサからなる。*L. thoracites* は温暖な表層水に生息するとされる (Abelmann and Gowing, 1997; Casey et al., 1979)。一方、*B. inflata* は北太平洋で相対産出頻度が高い海域は年間表層水温平均が 4 ~ 6 度の海域と一致 (Kruglikova, 1999) し、オホーツク海中層の約 250m 以深に生息する (Hays and Morley, 2004)。

このグループは *B. inflata* の生産量が最大で 7.0×10^2 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹]、相対産出頻度が最大で 0.35% であるのに対して *L. thoracites* の生産量が最大で 6.0×10^3 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹]、相対産出頻度の最大値が 2.5% となっている。区間 D 内の 2.44 Ma を境に Group 1 の生産量が減少し相対産出頻度も減少する。1.12 Ma の E/F 区間の境界を境に Group 1 の生産量・相対産出頻度ともに増加する。0.33 Ma の F/G 区間境界を境に Group 1 の生産量が急激に上昇するが、相対産出頻度は 0.9 Ma 頃から 2% を超えたままで推移する。

総生産量のピーク時期には Group 1 にそれぞれ次に示すような変化が認められる。4.35 ~ 3.90 Ma の時期に Group 1 の相対産出頻度が高くなっているが、総生産量はほとんど変化していない。2.78 ~ 2.24 Ma の時期に総生産量は若干上昇しているが、相対産出頻度は 2.78 Ma 以前と変化が認められない。

Group 2 : *Lamprocyclas maritilis* Haeckel の 1 タク

サからなる。北太平洋中緯度では水深約 200m で多産する (Kling, 1979)。Molina-Cruz (1977) は、*L. maritilis* の亜種を "Chile" factor に分類し、寒冷水塊に住むとした。Lombardi and Boden (1985) によると本種は中緯度に分布の中心があるものの、湧昇域に分布が偏る傾向がある。

Group 2 は Group 1 と類似した時系列変動をするが、1.72 Ma ~ 0.44 Ma にかけて Group 1 と比較して生産量が高く、相対産出頻度も 2% に達する点に違いが見られる。Group 2 の相対産出頻度変化のなかで、1.72 Ma の c/d 区間境界の変動と一致して相対産出頻度と生産量が急増する。0.33 Ma の F/G 区間境界で Group 2 の生産量が急増するが、相対産出頻度は著しく低い。放散虫の総生産量と Group 2 の変動で同調しているのは、0.44 Ma 以降の増加だけである。0.44 Ma 以降、Group 2 の総生産量は顕著に増加しているのに対し、相対産出頻度は若干上昇しているに過ぎない。

Group 3 : *Spongurus cylindricus* Haeckel と *Stylodictya* spp. の 2 タクサからなる。北太平洋では、前者は水深 120 ~ 200m (Yamashita et al., 2002)、後者も水深 200 m 程度の中層水に生息する (Kling, 1979; Okazaki et al., 2004, 2005)。Molina-Cruz (1977) は、*Spr. cylindricus* に同定される *Spongurus* sp. を "Peru" factor の一員に含め、湧昇域を示すタクサとして扱っており、Kling and Boltovskoy (1995) もカリフォルニア沖では水深 300m 以浅の湧昇域を特徴付けるとしている。

Group 3 の生産量は Group 1 と類似した変動を示すが、3.1 Ma 付近に相対産出頻度に顕著なピークが見られるのが特徴的である。3.64 ~ 2.78 Ma は Group 3 の相対産出頻度が高いが、生産量は低い状態で推移している。2.78 Ma ~ 2.24 Ma の区間 C で生産量が高い傾向が認められるが、相対産出頻度は 2.78Ma 以前にくらべてむしろ減少しており、Group 3 はこの期間に生産量が増加したものの、増加速度が相対的に遅く、相対産出頻度は減少したと考えられる。総生産量の変動と同調しているのは、0.44 Ma 以降であり、0.1 Ma に向かって単調増加して最大の 4.0×10^3 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹] に達する。また、総生産量がやや低めの時期にあたる 3.90 ~ 2.78 Ma の時期に Group 3 の相対産出頻度はやや高めとなっている。しかし、同時期に Group 3 の生産量には顕著な変動がない。

Group 4 : *Botryostrobus auritus/australis* (Ehrenberg) の 1 タクサからなる。北太平洋では水深 50 - 200m で多い (Kling, 1979; Okazaki et al., 2005)。本種は富栄養域を好み (Pisias, 1986)、湧昇域に分布の中心が認められるが (Lombardi and Boden, 1985)、赤道太平洋域では有機炭素

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

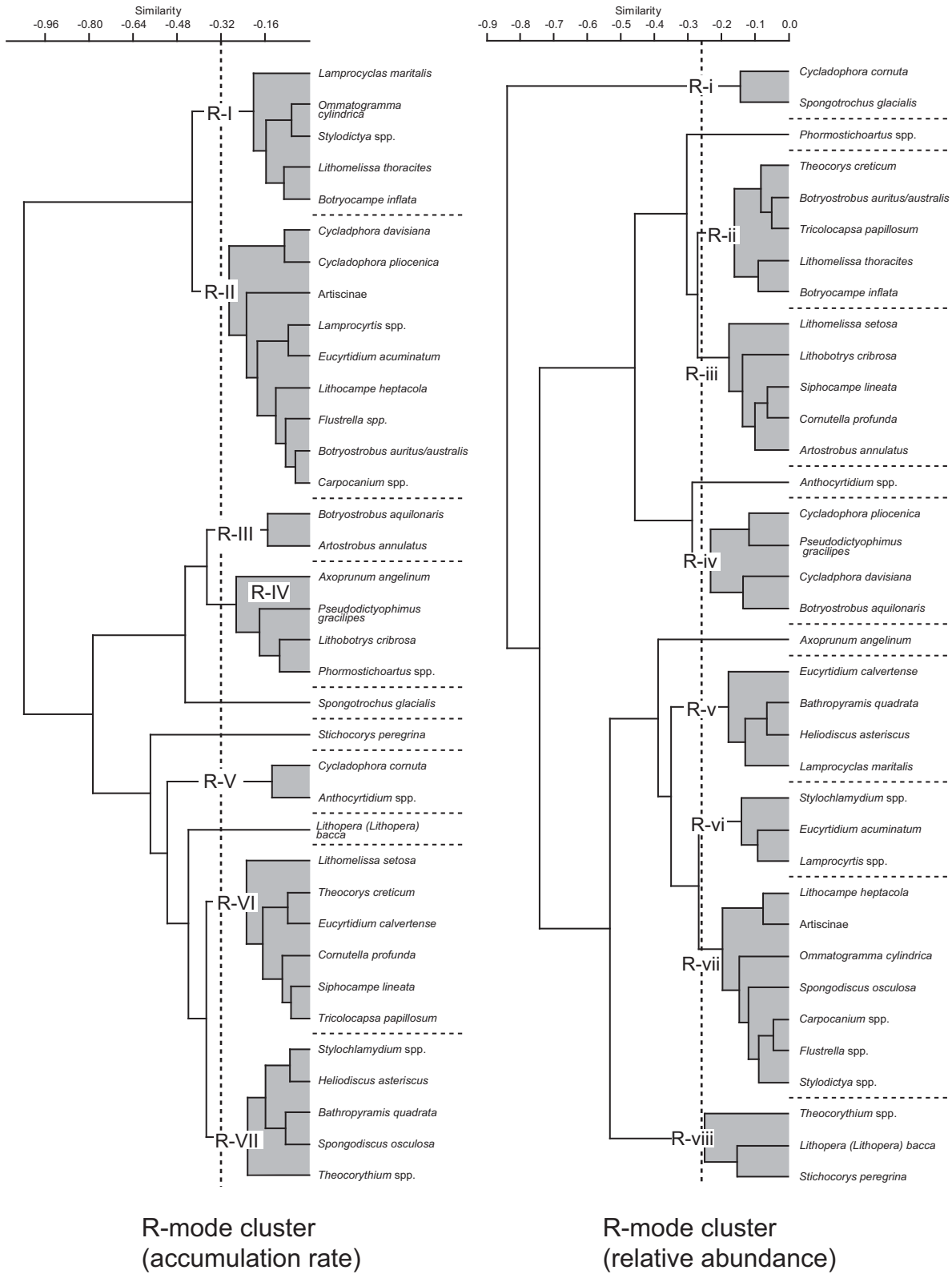


Fig. 8. Dendrogram of R-mode cluster analyses on radiolarian accumulation rate (RAR) (left column) and relative abundance (right column), using the Ward method.

供給量と一致せず (Welling and Pisias, 1998), 本種の生産量と海洋パラメータとの対応についてはさらなる検討の余地が残されている。

本グループは 2.4 Ma 前後に生産量の極大が見られ、0.44 Ma 以降に急激に増加している。相対産出頻度には大きな変動の傾向は見られず、相対産出頻度に関する Q モードクラスターによる区間わけと一致する現象は識別できない。また、2.78 Ma の区間 B/C 境界の直前で増加し、1.42 Ma の区間 D/E 境界で減少する。放散虫の総生産量の変動と比較すると顕著ではないが、総生産量が高くなった 4.35 ~ 3.90 Ma, 2.78 ~ 2.24 Ma, 0.44 Ma 以降に Group 4 の生産量も高めである。相対産出頻度はその変化と同期しない。

Group 5 : *C. davisiana* と *Cycladophora pliocenica* Lombardi et Lazarus の 2 タクサから構成されている。*C. davisiana* は、十分に混合している冷涼な水塊 (Abelmann and Nimmergut, 2005; Itaki, 2003; Itaki and Ikehara, 2004; Nimmergut and Abelmann, 2002) で有機物供給が十分な中層~深層水 (Abelmann and Nimmergut, 2005; Hays and Morley, 2004; Nimmergut and Abelmann, 2002; Okazaki et al., 2003, 2005) を好むとされる。*C. pliocenica* は北太平洋では水深 100 - 300m に多い (Kling, 1979; Okazaki et al., 2005)。

Cycladophora davisiana の生産量は 1.2×10^3 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹], *C. pliocenica* の生産量が 4.5×10^2 [No. shells \times cm² \times kyr⁻¹] であり、生産量については *C. davisiana* の寄与が大きい。Group 5 の生産量と相対産出頻度はともに 2.78 Ma 以降から増加し、1.72 Ma の区間 c/d 境界と一致して減少する。その後、0.33 Ma の区間 F/G 境界と一致して Group 5 の生産量は増加に転じる。放散虫の総生産量の変動と比較すると、Group 5 では 4.35 ~ 3.90 Ma の時期にスパイク的な増加があるのみで、全体の傾向と一致しない。Group 5 の生産量が最大値を示す 2.34 Ma は 2.78 ~ 2.24 Ma の増加時期の末期にあたり、Group 5 は 2.24 ~ 1.72 Ma に生産量の増加時期が認められる。総生産量はこの時期もやや高めなので、Group 5 はこの時期の総生産量増加に貢献していると考えられる。

Group 6 : *Lamprocyrtis* group と *Eucyrtidium acuminatum* (Ehrenberg) の 2 タクサから構成される。*Lamprocyrtis* 属の一部は中層水に生息すると考えられている (Kling, 1979)。*Lamprocyrtis neoheteropora* Kling と (Haslett et al., 1994) その子孫種 *Lamprocyrtis nigriniae* (Caulet) (Nigrini and Caulet, 1992) は湧昇域の富栄養域で多いとされる。*E. acuminatum* は 50 m 以浅に生息 (Okazaki et al., 2005) し、熱帯~亜熱帯の指標とされる

(Kling and Boltovskoy, 1995)。このグループは 2.78 ~ 1.72 Ma と 0.33 Ma 以降において生産量の増加が見られるが、相対産出頻度については顕著な傾向は認められない。

Group 7 : Artiscinae 亜科, *Lithocampe heptacola* Haeckel, *Flustrella* spp., *Carpocanium* spp. の 4 タクサからなる。ここで一括した Artiscinae 亜科に含まれる *Didymocyrtis* 属は共生藻類を持ち、熱帯~亜熱帯に多い (e.g. Anderson et al., 1990)。*Carpocanium* 属の一部の種は、50m 以浅に生息 (Okazaki et al., 2005) し、少なくとも共生藻類をもつものが識別されている (松岡, 1993)。

Group 7 の生産量は区間 a/b 境界の 3.64 Ma 頃から徐々に増加し始め、区間 C (2.78 ~ 2.24 Ma) で比較的高い値を示す。その傾向は区間 E 内の 1.3 Ma 頃まで続く。相対産出頻度は区間 a/b 境界の 3.64 Ma から増加し、区間 B/C 境界の 2.78 Ma で減少傾向に転じ、区間 C/D 境界の 2.24Ma でもっとも小さくなり、区間 c/d 境界の 1.72 Ma で増加し初め、その時期以降は振動を繰り返しながら徐々に増加傾向になる。総生産量が高くなる 0.40 Ma 以降に Group 7 の生産量も高い。

Group 8 : *Botryostrobus aquilonaris* (Bailey) の 1 タクサからなる。本種は、北太平洋やオホーツク海では 300 - 1000m に棲むと考えられている (Kling, 1979; Okazaki et al., 2004, 2005)。

Site 1210 では、本グループの生産量変動と相対産出頻度の変動パターンはおおむね一致する。Group 8 の生産量は、区間 B/C 境界の 2.78 Ma 以降から増加傾向になり、区間 C 末期の 2.28 Ma で最大となり、その直後、区間 D 最前期の 2.20 Ma で急減スパイクとなったあと、Group 8 の生産量は区間 E/F 境界の 1.12 Ma にむけて緩やかに減少する。区間 G (0.33 ~ 0.18 Ma) では Group 8 の生産量は高いが、区間 H (0.18 Ma 以降) では減少する。放散虫の総生産量の増加時期のうち、2.78 ~ 2.24 Ma における Group 8 の生産量が高い。

Group 9 : *Lithomelissa setosa* Jørgensen, *C. profunda*, *Siphocampe lineata* (Ehrenberg) の 3 タクサからなる。*L. setosa* は、赤道湧昇流域では多産する (Yamashita et al., 2002)。*C. profunda* は北太平洋では 300 - 1000 m に生息する (Kling, 1979; Okazaki et al., 2005)。

放散虫の総生産量が高い 3 つの時期、4.35 ~ 3.90 Ma, 2.78 ~ 2.24 Ma, 0.44 Ma 以降の各期間に一致して Group 9 の生産量が高い。この 3 時期に加え、区間 D/E 境界 (2.24 Ma) から区間 D 末期の 1.50 Ma にも Group 9 の生産量が高い時期が認められる。Group 9 の相対産出頻度は、5.5Ma 以降、区間 A/B 境界の 3.08 Ma まで高めに振動し

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

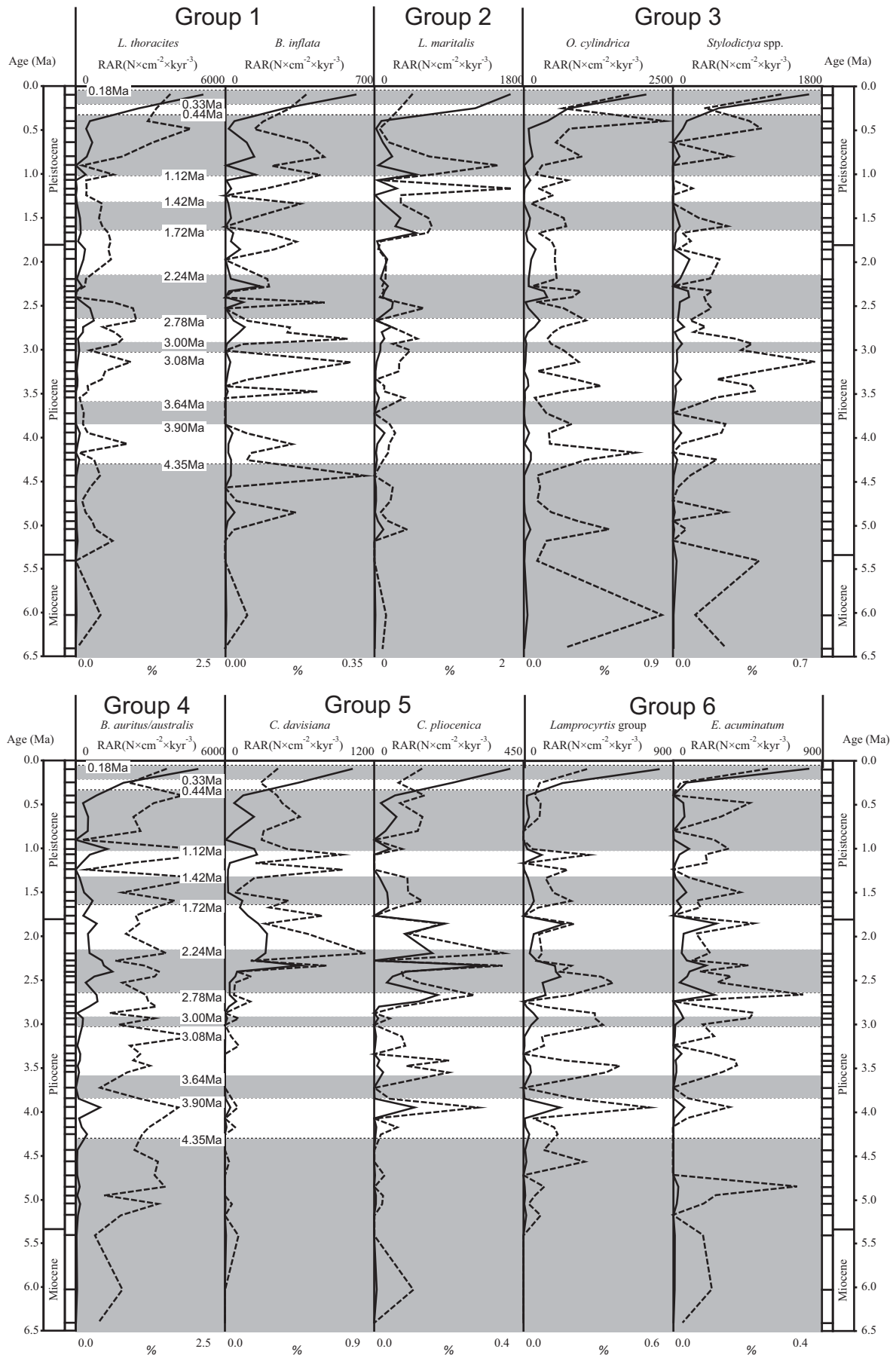


Fig. 9. Radiolarian accumulation rate (RAR) and relative abundance of groups. The category of each group, RAR of each species, and age boundaries labelled with shadow are referred to Table 5, Fig. 10 and Fig. 7. Solid line: RAR, dotted line: relative abundance.

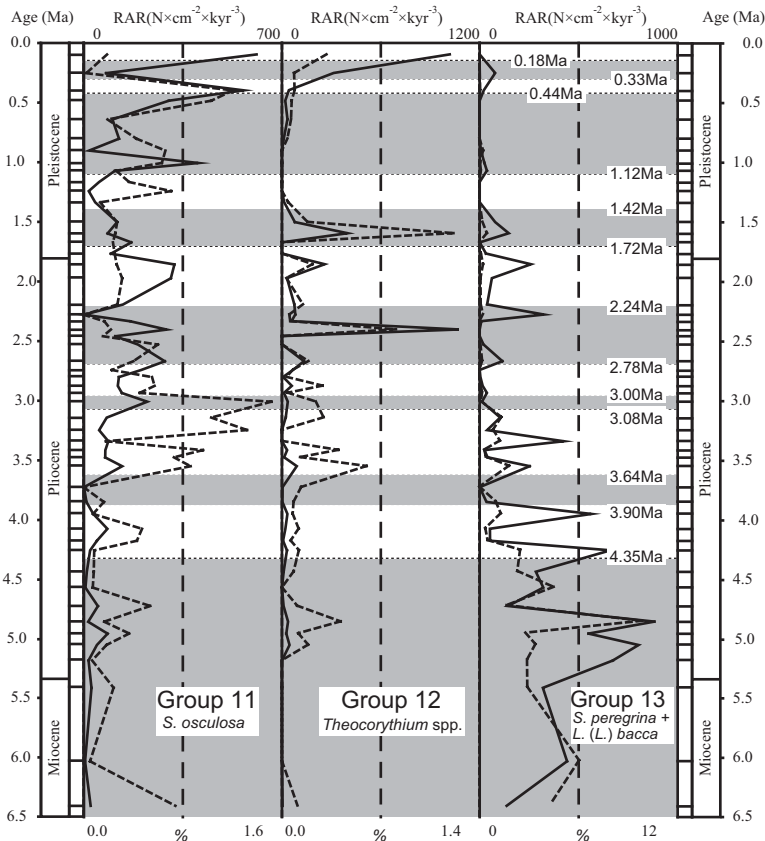


Fig. 9. (Continued)

つつ推移する。区間B (3.08 ~ 2.78 Ma) はこれまでと異なり, Group 9の生産量が上昇している時期に相対産出頻度が減少している。このように Group 9において生産量と相対産出頻度が逆位相の傾向にある時期は, 区間D (2.24 ~ 1.42 Ma)と区間F末期(0.48 Ma)以降に見られる。いっぽう, 区間F/G境界の0.33 Ma以降に Group 9の生産量は増加するにもかかわらずその相対産出頻度は明らかな減少を示す。

Group 10: *Heliodiscus asteriscus* Haeckelと *Bathropyramis quadrata* Haeckelの2タクサからなる。H. asteriscusは北太平洋では表層に多い(Kling, 1979)。本論文ではシノニムとした *Heliodiscus echiniscus* Haeckelは, 暖海種(tropical fauna)として扱われている(山内・山本, 2001)。B. quadrataはこれまでの論文で *Peripyramis* 属の1種として扱われており, 水深300m以深に生息する(Kling, 1979)。

*Bathropyramis quadrata*の生産量が最大で 2.5×10^2 [No. shells \times cm⁻² \times kyr⁻¹], 相対産出頻度が最大で0.5%であるのに対してH. asteriscusの生産量が最大で 7.0×10^2 [No. shells \times cm⁻² \times kyr⁻¹], 相対産出頻度の最大値が1.4%に達する。Group 10の生産量は変化に乏しいが, 区間A/B境界の3.08 Ma以降に若干増加し, 区間c/d境界の1.72 Maになり減少, さらに0.64 Ma頃から上昇傾向が

認められる。Group 10の相対産出頻度と生産量の変動はあまり一致しない。区間a/b境界の3.64 Maから区間A/B境界の3.08 Maの間に相対産出頻度は減少し, 生産量も低い傾向が認められるが顕著ではない。区間B (3.08 ~ 2.78 Ma)は相対産出頻度が高い傾向があるが, Group 10の生産量は若干の増加傾向にある。区間B/C境界の2.78 Ma以降, 0.90 Maのスパイクを除き, 0.4 ~ 0.5%で推移する。3.64 ~ 3.08 MaにかけてはGroup 10の生産量にあまり変化がない。2.78 ~ 1.72 Maは相対産出頻度が減少したものの, 生産量に変化が少ない。1.72 ~ 0.64 Maの期間はGroup 10の生産量は減少し, 相対産出頻度に顕著な減少が認められない。0.64 Ma以降, Group 10の生産量が増加しているにもかかわらず, 相対産出頻度に変化が認められない。放散虫の総生産量がやや高い時期のうち, 4.35 ~ 3.90 MaにはGroup 10の生産量は若干高い傾向がある。

Group 11: *Spongodiscus osculosa* (Dreyer)の1タクサからなる。本種の生息水深は海域によって異なり, カリフォルニア沖では水深300m以浅の冷涼な湧昇域(Kling and Boltovskoy, 1995), オホーツク海では水深300~1000 mの中層, 親潮海域では100m以浅の表層水に生息する(Okazaki et al., 2004)。

本グループでは, 区間a/b境界の3.64 Maから生産量

が増加する。区間 C/D 境界の 2.24 Ma でスパイク的に生産量が下がるものの再び増加し、鮮新世 / 更新世境界近傍の 1.86 ~ 1.76 Ma の間に急減する。区間 E/F 境界の 1.12 Ma 以降に何回かの生産量上昇が認められる。しかし、区間 G (0.33 ~ 0.18 Ma) に生産量は著しく減少し、区間 H (0.18 Ma 以降) に再び上昇する。Group 11 の生産量は層準によって相対産出頻度と同調したりしなかったりする。区間 b (3.64 ~ 3.00 Ma) に Group 11 の相対産出頻度は際だって高い。3.00 Ma 以降、区間 C/D 境界の 2.24 Ma にかけて Group 11 の相対産出頻度は減少傾向になる。区間 D (2.24 ~ 1.42 Ma) には Group 11 の相対産出頻度は低い状態で推移し、区間 D/E 境界 (1.42 Ma) ~ 区間 F/G 境界 (0.33 Ma) にかけては振動を繰り返しつつも全体として区間 D より Group 11 の相対産出頻度はやや高めに推移する。区間 G (0.33 ~ 0.18 Ma) 以降、Group 11 の相対産出頻度はほとんど 0 になる。放散虫の総生産量が高い時期のうち、4.35 ~ 3.90 Ma と 2.78 ~ 2.24 Ma に Group 11 の生産量は若干高いが、顕著ではない。4.35 ~ 3.90 Ma は生産量・相対産出頻度ともに若干ながら増加している。3.64 ~ 3.00 Ma は生産量・相対産出頻度ともに増加している。3.00 Ma ~ 鮮新世 / 更新世境界までの区間は生産量が高く相対産出頻度は減少傾向にある。1.42 Ma 以降は Group 11 の相対産出頻度と生産量の変動は基本的に不一致だが、0.40 Ma に両者が一致して上昇し、0.33 ~ 0.18 Ma に両者が減少する。

Group 12: *Theocorythium* spp. の 1 タクサからなる。*Theocorythium trachelium* (Ehrenberg) は、北太平洋では水深 50m に多い傾向があり (Kling, 1979), 熱帯 ~ 亜熱帯表層水の指標とされる (Kling and Boltovskoy, 1995)。全体として生産量と相対産出頻度は同調している。

放散虫の総生産量大きい 4.35 ~ 3.90 Ma の前後では Group 12 の生産量・相対産出頻度は低い。区間 a/b 境界の 3.64 Ma ~ 区間 B/C 境界の 2.78 Ma では全体として生産量・相対産出頻度は高い傾向が認められる。その後は、2.34 Ma と 1.60 Ma にスパイク的に Group 12 が増加する以外は、生産量・相対産出頻度ともに低い。放散虫の総生産量が増加する 0.44 Ma 以降に Group 12 の生産量は増加するものの、相対産出頻度の増加はやや鈍い。

Group 13: このグループは、生産量と相対産出頻度ともに 1 タクサで孤立したタクサを便宜的にひとつにまとめているので、*Stichocorys peregrina* (Riedel) と *Lithopera* (*Lithopera*) *bacca* Ehrenberg をわけて論じる。

Stichocorys peregrina は絶滅種のため、その環境応答を直接確かめられているわけではないが、第 3 殻室・第 4 殻

室の幅がほとんど等しく、Westberg and Riedel (1978) に示された本種の高緯度型の特徴に一致し、亜寒帯表層域に多かったと考えられている (Casey et al., 1983; Romine, 1985)。*Stichocorys peregrina* の生産量と相対産出頻度は全体として同調して変動するが、本種の連続産出上限時期の 2.91 Ma にむかって全体的に減少傾向が認められる。*S. peregrina* は区間 A 内の 3.90 Ma まで生産量は高い傾向にあるが、放散虫の総生産量が高くなる 4.35 ~ 3.90 Ma は相対産出頻度が急減する。3.90 Ma 以降、2.91 Ma にかけて生産量・相対産出頻度ともに減少している。その後、*S. peregrina* は 2.80, 2.34, 2.20, 1.01 ~ 0.90 Ma に産出が若干あるが、再堆積によるものか残存個体なのか分からない。

Lithopera (*Lithopera*) *bacca* は渦鞭毛藻と共生している (Gowing, 1993) ため、北太平洋では表層に多い (Kling, 1979)。また、山内・山本 (2001) は、本種を暖海種とみなしている。*L. (L.) bacca* は、相対産出頻度・生産量ともに激しく振幅を繰り返すが、両者はあまり対応しない。4.86 Ma に本種は相対産出頻度と生産量がスパイク的なピークとしてあらわれるが、試料採集間隔が粗いので意味のある現象かどうかは分からない。*L. (L.) bacca* の生産量の増減の繰り返しが顕著になるのは、区間 D (2.24 ~ 1.72 Ma) の時期である。その後はほとんど産出しなくなる。

考察

1. Site 1210 の放散虫群集の特徴

Site 1210 の掘削地点近傍の表層の海況は、亜寒帯系と亜熱帯系の境界領域にあり、黒潮統流も勢いを減じて周辺と混合した水塊となっている。そのため、過去において環境変動が生じると卓越する表層の水塊が入れ替わったと考えられる。

Site 1210 で得られた放散虫群集は 59 属 100 種に達するが、熱帯 ~ 亜熱帯海域で相対産出頻度が高いタクサ (e.g. Lombardi and Boden, 1985) は希産であり、その一方で亜寒帯水系の種構成 (e.g. Motoyama, 1996) と共通性が低い。この事実は、熱帯 ~ 亜熱帯の水塊、亜寒帯水系のいずれも卓越することがなかったことを示す。これは、既知の生層準がわずか 9 層準しか識別できないという結果と調和的である。亜寒帯と熱帯・亜熱帯で知られる生層準のうち、年代的同時性が高く放散虫層序の年代対比に適切な生層準は、*Cycladophora davisiana* の FCO (2.84 ± 0.03 Ma), *Theocorythium vetulum* の LO (1.55 ± 0.05 Ma), *Axoprunum angelinum* の LO (0.44 ± 0.04 Ma) の 3 つである。*P. fistula* の LO と *L. heteroporos* の FO は大きくず

Table 5. Common species between R-mode cluster groups based on accumulation rate (left in Fig. 8) and those on relative abundance (right in Fig. 8). The taxon group of the 13 solid line boxes was evaluated in this paper.

		R-mode cluster groups based on radiolarian accumulation rate							
		R-I	R-II	R-III	R-IV	R-V	R-VI	R-VII	Others
R-mode cluster groups based on relative abundance	R-i					<i>C. cornuta</i>			<i>S. glacialis</i>
	R-ii	Group 1 <i>L. thoracites</i> <i>B. inflata</i>	Group 4 <i>B. auritus/australis</i>				<i>T. creticum</i>		
	R-iii			<i>A. annulatus</i>	<i>L. cribrosa</i>		Group 9 <i>L. setosa</i> <i>C. profunda</i> <i>S. lineata</i>		
	R-iv		Group 5 <i>C. davisiana</i> <i>C. pliocenica</i>	Group 8 <i>B. aquilonaris</i>	<i>P. gracilipes</i>				
	R-v	Group 2 <i>L. maritalis</i>					<i>E. calvertense</i>	Group 10 <i>H. asteriscus</i> <i>B. quadrata</i>	
	R-vi		Group 6 <i>Lamprocyrtis</i> spp. <i>E. acuminatum</i>					<i>Stylochlamydidium</i> spp.	
	R-vii	Group 3 <i>Spr. cylindricus</i> <i>Stylodictya</i> spp.	Group 7 Artiscinae <i>L. heptacola</i> <i>Flustrella</i> spp. <i>Carpocanium</i> spp.					Group 11 <i>S. osculosa</i>	
	R-iii							Group 12 <i>Theocorythium</i> spp.	Group 13 <i>S. peregrina</i> <i>L.(L.) bacca</i>
	Others				<i>A. angelinum</i> <i>Phormostichoartus</i> spp.	<i>Anthocrytidium</i> spp.			

れるが、これは両種とも子孫・祖先種と形態が連続的に変化する (Nigrini, 1977; Sanfilippo and Riedel, 1992) ため、真の消滅・出現層準を認定することが困難なことに起因する可能性がある。

Site 1210 では表層種ばかりでなく、深層種についても特徴が認められる。Site 1210 における古水深は、堆積物の回収深度、海水準変動ならびに海洋プレートの熱的沈降などにより決まるため、基盤岩の年代と深度が得られていない現状では正確な古水深は分からない。しかし、過去 640 万年間に水深が 3000m 以深を超えることはないと推測され (Shipboard Scientific Party, 2002)、それ以上に深い水深に生息域をもつタクサは産出しないことが期待される。深層種とされているタクサのうち (e.g. Kling, 1979), Site 1210 では *B. quadrata* が希産であり *C. cuspidatus* は数個体のみ産出した。Site 1210 より現在の水深で 600 m 深く、近傍に位置する Site 1207 (37° 47' N, 162° 45' E, 水深, 3100 m) において両種は比較的多産する (吉村, 2007MS) ことから、シャツキーライズ周辺海域での本種の生息の中心は推定水深 2,500m を超えると解釈される。Site 1210 に記録されている 6.41 Ma 以降の放散虫群集の変動は、総生産量変動と Q モードクラスター解析によって 13 の時代に区分された。これらの時期それぞれでどのよう

な放散虫種群が入れ替わったのかを明らかにするため、R モードクラスター解析を行った。

R モードクラスター解析で構成種は 23 グループに分かれたが、そのうち十分な相対産出頻度ないし生産量があるのは 13 グループとなった (Table 5)。その 13 グループが水深や水温などの単純な海洋パラメータに対応して分かれることを期待していたが、結果は前述のとおり複雑となった。たとえば、Group 1 では現生では温暖表層種の *L. thoracites* と低温・中層以深の水塊を好む *B. inflata* が同じグループに属した。同様に、暖海・表層種とされる *H. asteriscus* と底層種である *B. quadrata* が Group 10 に一括された。この事実は、水温や水深以外の環境要因が本海域では支配的であるという可能性を示唆する。事実、“温暖・表層種”である *L. thoracites*, Artiscinae 亜科, *H. asteriscus*, *Theocorythium* spp., *L. (L.) bacca* は R モードクラスターでそれぞれ異なるグループに分かれたばかりか、Fig. 10 で示したように各々の生産量・相対産出頻度変動に共通性は認められない。そもそも、水深の海洋パラメータの一義的違いは水圧であるが、得られた結果からは水圧に支配された棲み分けではなく、この海域におけるその水深における水圧以外の海洋パラメータに支配されている可能性が強く示唆される。一般にプロティスタ細胞は、細胞膜を通して細胞内圧

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

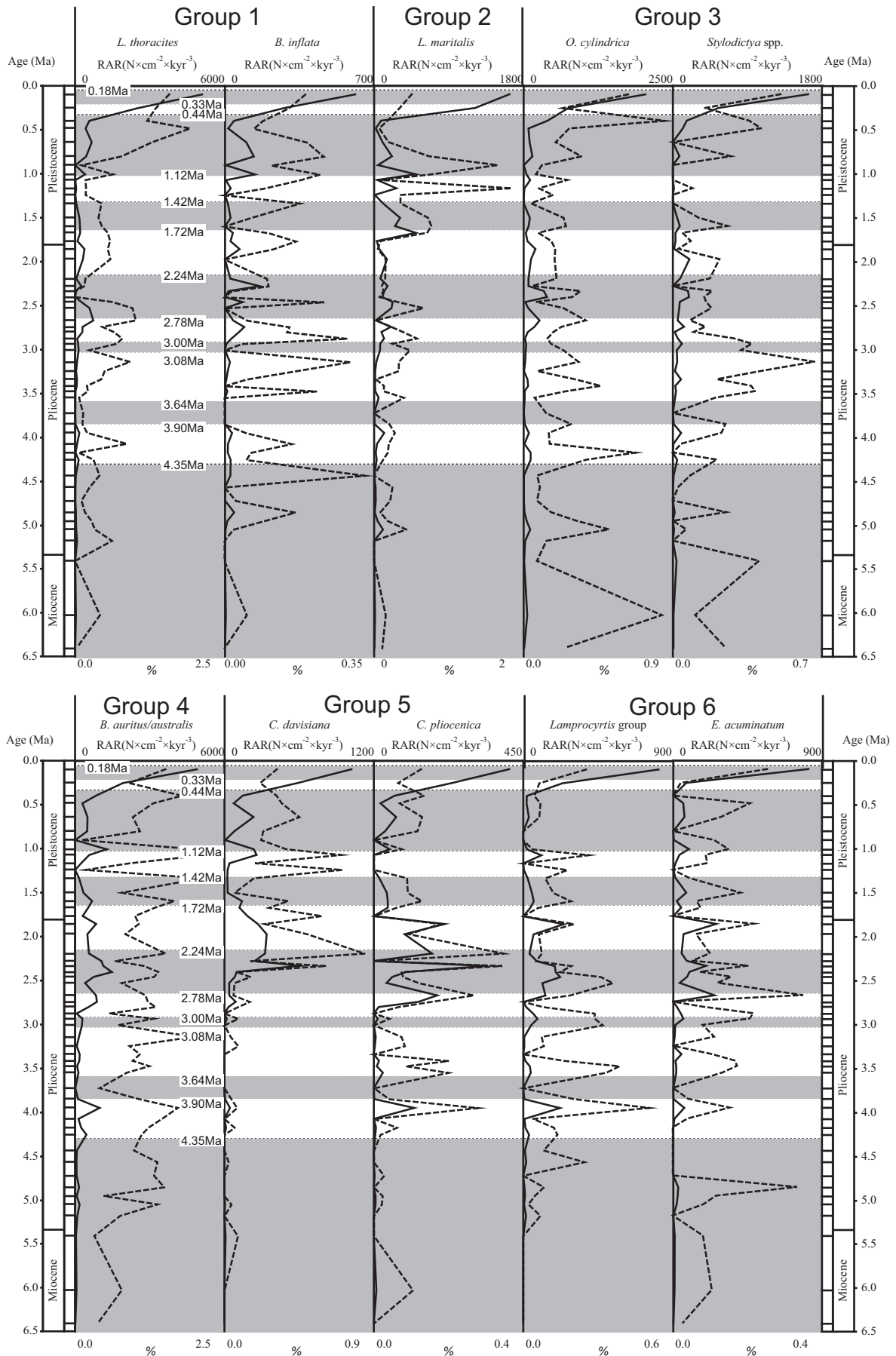


Fig. 10. Radiolarian accumulation rate (RAR) and relative abundance of the selected species. The category of each group and age boundaries labelled with shadow are referred to Table 5 and Fig. 7. Solid line: RAR, dotted line: relative abundance.

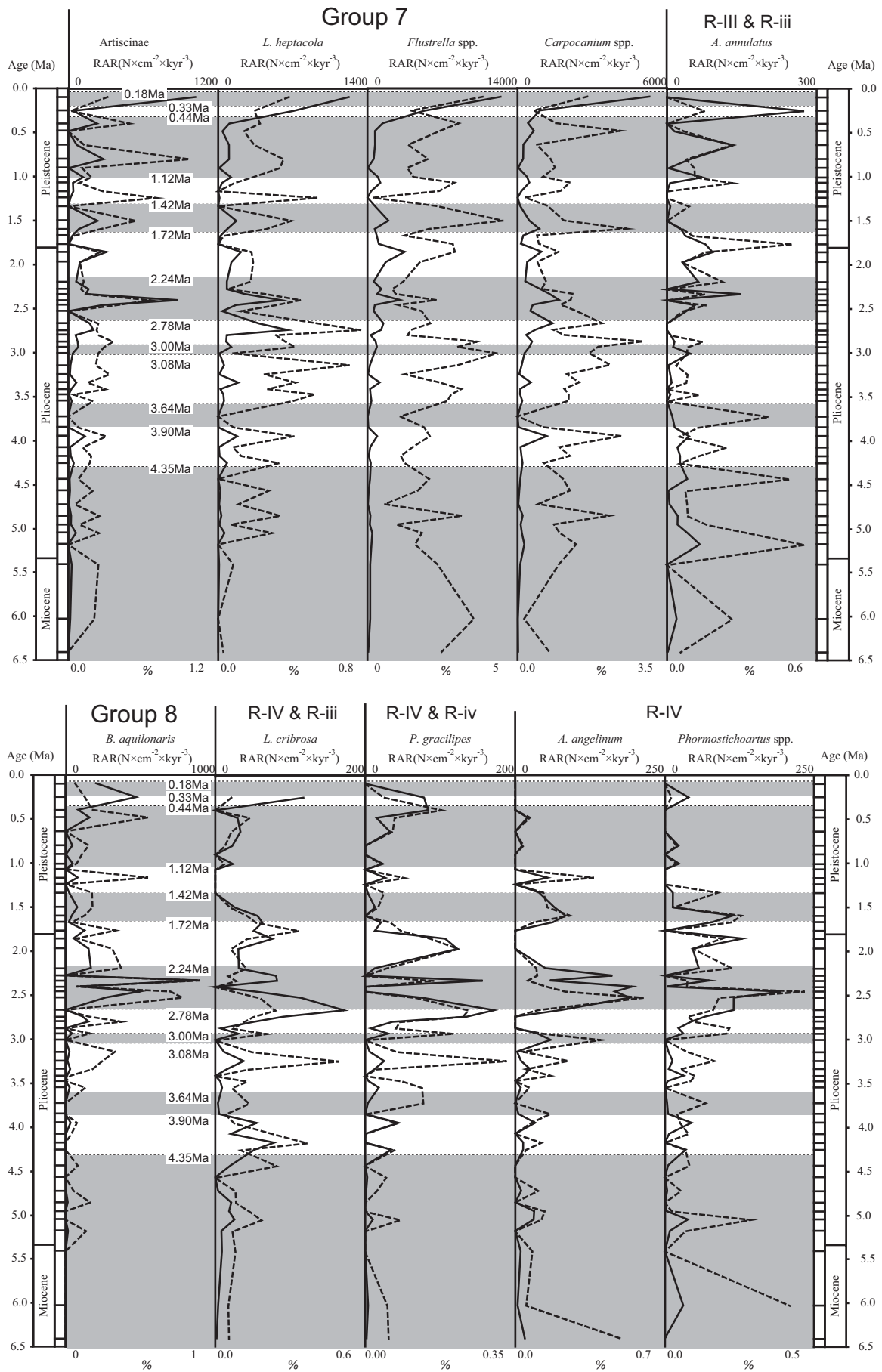


Fig. 10. (Continued)

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

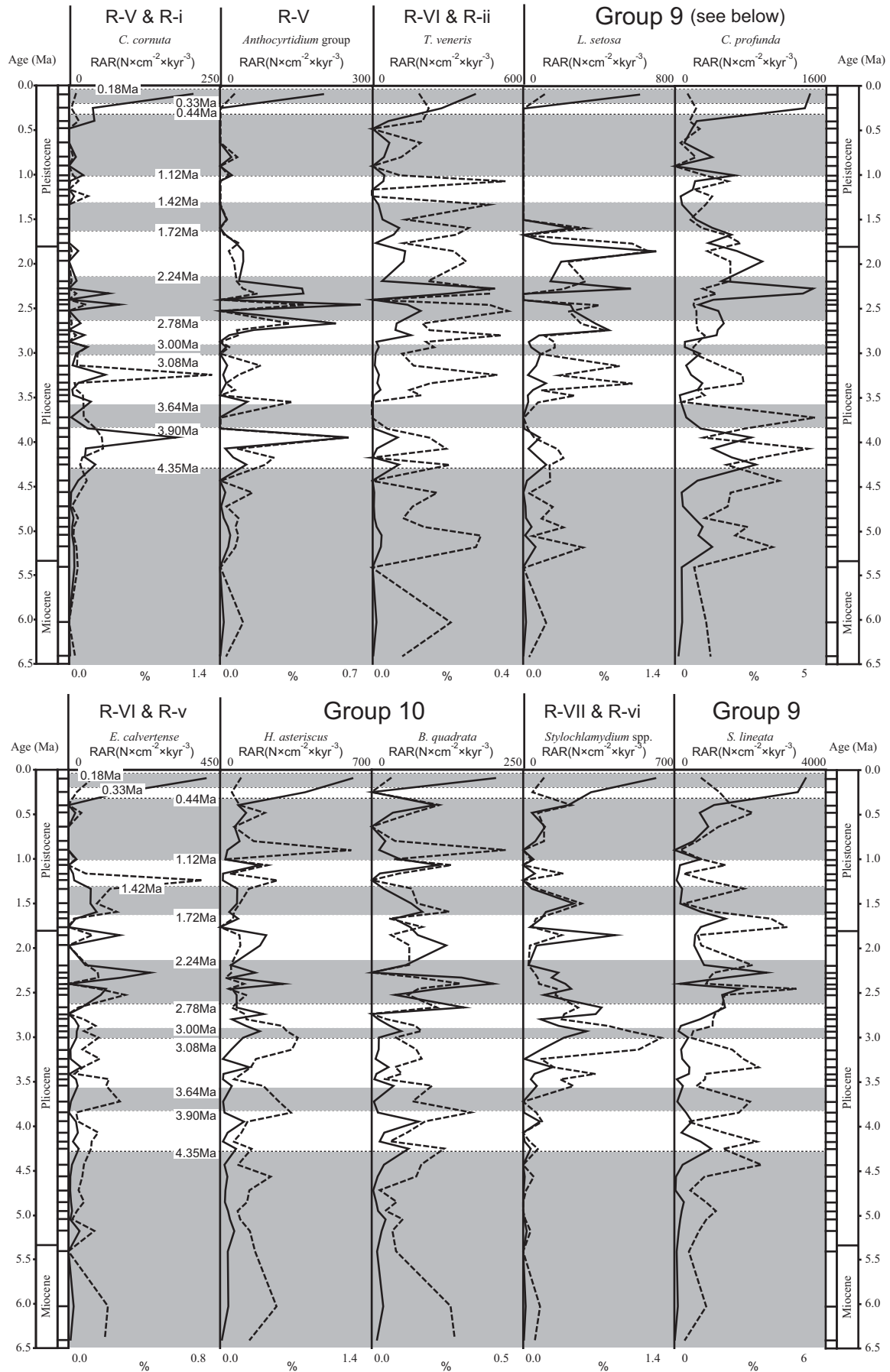


Fig. 10. (Continued)

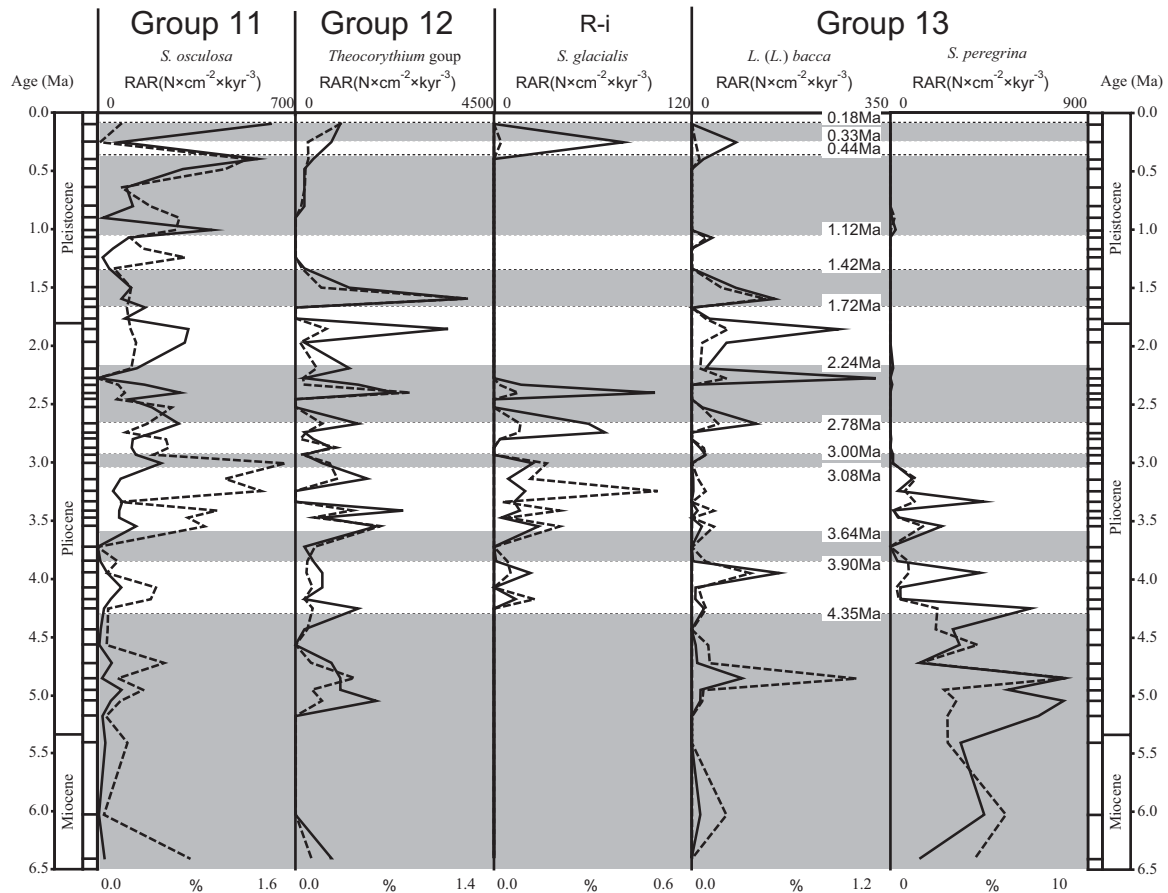


Fig. 10. (Continued)

と水圧のバランスをとるとされ、その機構によって水圧による細胞の破裂や圧砕から免れている。水深が違う種が同じ挙動を示す理由は、水深と相関のない海洋パラメータが影響を与えていると考えざるをえない。本論文で分かれたグループ内で共通する海洋パラメータ変動は情報不足により特定が難しい。しかし、ここで示した事実を足がかりに現生種についての飼育実験、プランクトンやセジメント・トラップから環境応答への理由を明らかにすることにつながるであろう。

2. 放散虫動物群の時系列変動

6.41 ~ 4.35 Ma : Site 1210 の放散虫群集は Q モードクラスター解析の結果から、6.41 ~ 3.69 Ma まで顕著な群集入れ替えは生じていない。しかし、放散虫の総生産量増加が 4.35 ~ 3.90 Ma に識別されているので、環境状況が一定でなかったと考えられる。しかし、それ以上のことは放散虫からは論じるだけの情報は得られなかった。

4.35 ~ 3.90 Ma : 放散虫の総生産量が高めとなるこの期間は、Q モードクラスター解析の結果からいえば、顕著な群集入れ替えは生じていない。しかし、R モードクラスター解析で区別した種群の変動を見ると、少なからず群集に変動が認められる。生産量および相対産出頻度が上昇する一

群は Group 5, 9, 11 であり、生産量は増加するが相対産出頻度に変化が少ない一群として Group 4 が、逆に生産量と相対産出頻度が小さくなる一群に Group 12 が認められる。Group 5 はスパイク的に生産量が増加する。Group 5 は *C. davisiana* と *C. pliocenica* からなり、共通する環境的特徴は分かっていないが、*C. davisiana* の生息条件を重視すると、十分に混合している冷涼な水塊で有機物供給が十分にある中層~深層水が Site 1210 の堆積場にすくなくならず広がったものと考えられる。この有機物供給が十分に生じていたという推測は、Group 9 の生産量が高めとなっていることとも合致する。Group 9 には生息深度が著しく異なる *L. setosa* と *C. profunda* が一括されているが、これは *C. profunda* の栄養摂取対象が *L. setosa* と共通することによると推定される。*L. setosa* の増加要因を重視すれば、珪藻等の基礎生産や栄養供給が多くなり、その影響が *C. profunda* の生息する水深 300 - 1000 m にまで及んだと推定される。Group 11 を構成する *S. osculosa* の生態は明らかではないため、このグループの増加原因については今後の課題である。

生産量は増加するが相対産出頻度の変化は少ない一群にあげた Group 4 は、*B. auritus/australis* の 1 タクサからなる。本種は水深 50-200m で多いとされ、この種にとっての生息

条件が良くなったと考えられるものの、海洋パラメータとの対応は不明であり、また放散虫の総生産量の上昇と同じ速度で本種の生産量が増加したと考えられる。生産量と相対産出頻度が小さくなる Group 12 は、*Theocorythium* spp. からなる。このタクサは水深 50m 以浅の熱帯～亜熱帯表層水に生息するが、他の表層種の生産量と相対産出頻度に顕著な変動がないので、このタクサに特有の何らかの海洋パラメータが存在する可能性を強く示唆する。また、Group 13 の *S. peregrina* の生産量が高いが、4.35～3.90 Ma の間に相対産出頻度が急減するので他の種群の生産量が高くなったと判断される。

この変動をまとめると、珪藻等の基礎生産や栄養供給が多くなり、その影響は *B. auritus/australis* の生息する水深 50m から、*C. profunda* の生息する水深 300–1000 m までに及んだと考えられる。しかし、栄養塩に反応する他のタクサが応答していないことから、なんらかの制約条件を伴う基礎生産・栄養供給であったと考えられる。また、*Theocorythium* spp. が生産量を減じ、*S. osculosa* の生産量が増加しているが、その要因は現時点では不明である。

3.90-3.64Ma : この時期は、Q モードクラスター解析では 6.41 Ma と同様に区間 A かつ区間 a に属するので、生産量が似たような 4.35 Ma 以前と同じような環境に戻ったと考えられる。

3.64-3.08 Ma : Q モードクラスター解析によって 3.64 Ma に相対産出頻度に変化が生じたとの結果が得られている。この変化に応答したのは、Group 3, 7, 10, 11, 12 である。これらのうち、生産量と相対産出頻度が増加したのは Group 11 の *S. osculosa* と Group 12 の *Theocorythium* spp. である。両グループは 4.35～3.90 Ma で逆相関であったが、3.64～3.08 Ma では同調している。これは両グループが異なる未知の海洋パラメータに応答したとか、顕著な競争関係が途中で解消されたなどの要因が考えられる。同様に Group 7 も生産量増加が認められるが、このグループには共生藻類をもち、熱帯～亜熱帯水塊の表層水に多い Artiscinae 亜科と *Carpocanium* 属を含む。このような一群の生産量が増加するのに必要な海洋パラメータは分からない。

Group 3 は生産量に変化がなく、相対産出頻度が増加することで特徴付けられる。このグループを構成する *Spr. cylindricus* は水深 200-300m の湧昇域を特徴づけるとされるが、生産量に変化がないことからこの水深で顕著な変化がなかったことを示す。Group 10 は相対産出頻度と生産量がともに小さくなる。*H. asteriscus* がその変動の主要因であり、このグループに属する *B. quadrata* に顕著な生産量減少は認められないので、*H. asteriscus* に関係する海洋パラ

メータの条件が悪くなったのであろう。

3.08-2.78 Ma : この期間は放散虫の生産量に関して群集が 3.08 Ma に入れ替わり、相対産出頻度で表される群集が 3.00 Ma で入れ替わることが、Q モードクラスター解析から読み取れる。しかし、R モードクラスター解析の結果では、3.00 Ma に顕著な変化がなく、次の大きな群集の入れ替えは、生産量の Q モードクラスター解析によると 2.78 Ma である。3.08 Ma に変化が認められるのは、Group 9 と Group 10 である。両者の生産量は増加するが、相対産出頻度の変動は逆であり、Group 9 では減少し、Group 10 では増加する。Group 9 の構成種である *L. setosa* の増加要因を重視すれば、珪藻等の基礎生産や栄養供給が多くなり、その影響が *C. profunda* の生息する水深 300–1000 m にまで及んだと推定される。似たような生産量増加減少は、4.35～3.90 Ma にも起きているが、3.08 Ma～2.78 Ma に Group 5 と 11 は生産量も相対産出頻度も顕著な変動を示さないことから、4.35～3.90 Ma とは異なる要因を考えざるをえない。また、Group 10 の増加は *H. asteriscus* と *B. quadrata* の両方が応答している。*B. quadrata* の生息主要深度は 3000m 以深であるのに対し、*H. asteriscus* は表層と考えられている。この両タクサが同時に増加する環境要因は明らかではない。

2.78-2.24 Ma : この期間は放散虫の総生産量をもっとも高く、生産量の Q モードクラスター解析の結果で区別され、R モードクラスター解析の結果でも様々なグループがこの 2.78 Ma から顕著な変動を起こす。それに先立つ変化は、Group 4 の構成種である *B. auritus/australis* が 2.78 Ma の直前から生産量が増加しているものだけが識別される。ほとんどのグループで総生産量は増加するが、目立った応答がないのが Group 2, 13、生産量が変化しないのは Group 10 と 11 である。生産量を減ずるグループはない。

生産量も相対産出頻度も増加するグループは、Group 5, 8, 9, 12 である。これらのグループに共通する特徴は、生息水深が 300m 前後でオーバーラップするタクサが多いことである。これには Group 5 の *C. davisiana* と *C. pliocenica*、Group 8 の *B. aquilonaris*、Group 9 の *C. profunda* があてはまる。この水深と異なるタクサは表層に生息する *L. setosa* と *Theocorythium* spp. である。*C. davisiana* の生産の好適条件は、十分に混合している冷涼な水塊で有機物供給が十分にある中層～深層水であり（たとえば、Nimmergut and Abelmann, 2002）、*L. setosa* の増加要因を重視すれば赤道湧昇域のような（Yamashita et al., 2002）栄養供給が多いことが指摘されている。*B. aquilonaris*、*C. pliocenica* と *C. profunda* の好適条件は定かではない。*Theocorythium* spp. は水深 50 m 以浅の熱帯～亜熱帯表層水に生息するので、

表層にそのような水塊の影響があったと判断される。

生産量が増加するが相対産出頻度に変化がないのは、Group 1, 4, 6 である。これらに含まれる種は、*B. inflata*, *B. auritus/australis*, *E. acuminatum*, *Lamprocyrtis* group, *L. thoracites* である。これらのタクサの生産量が 2.78 ~ 2.24 Ma の時期に増加していることから、これらの種にとって好適環境が進展したと考えられるものの、その増加の速度は放散虫の総生産量と同じ程度の増加速度であったことになる。これらのタクサと海洋パラメータとの対応は不明である。

この 2.78 ~ 2.24 Ma の期間は放散虫の総生産量が著しく上昇するので、生産量が増加しても相対産出頻度はむしろ減少してしまう種群もあり、Group 3 と Group 7 が該当する。Group 3 を構成するタクサは *Spr. cylindricus* と *Stylodictya* spp. であり、前者 (Yamashita et al., 2002) と後者 (例えば Kling, 1979) はともに水深 200 m 程度の中層水に見られる。Group 7 は Artiscinae 亜科, *Carpocanium* spp., *Flustrella* spp. と *Lithocampe heptacola* からなり、これらのうち Artiscinae 亜科と *Carpocanium* spp. を含む一部の *Carpocanium* 属が共生藻類をもち熱帯~亜熱帯に多いことが知られている (たとえば、松岡, 1993)。Group 3 の生産量が上がっている事実は、水深 200 m 程度のなんらかの海洋パラメータの条件が好適になったことを意味する。また、Group 7 の生産量が上がった事実は、表層水に熱帯~亜熱帯の水塊があり、その水塊の海洋パラメータが好適になったことを意味する。

2.24-1.72 Ma : 放散虫の総生産量は、2.24 Ma を境に急減するが、コア全体としてみた場合には比較的高い状態にある。Q モードクラスター解析の結果によれば、2.24 Ma では放散虫の生産量にもとづくサンプル間の類似度に違いが認められ、1.72 Ma では放散虫の相対産出頻度に基づくサンプル間の類似度によって分けられている。2.24 ~ 1.72 Ma の時期における放散虫群集は、2.78 Ma 以降引き続いて生産量が多いグループもある (たとえば、Group 7) が、生産量が減少するグループが多い。そのグループは Group 1, 5, 8, 9, 13 である。これらのグループには生息水深が 300m 前後でオーバーラップする *C. davisiana*, *C. pliocenica*, *B. aquilonaris*, *C. profunda* が含まれることから、2.78 ~ 2.24 Ma に発達した中層の条件が衰退したことを示唆する。なお、2.20 Ma に Group 8 を構成する *B. aquilonaris* の急減スパイクがあるが、その要因は不明である。2.24 ~ 1.72 Ma の期間の海洋パラメータ変動が単純でないのは、Group 11 や 13 の変動にも認められる。Group 11 を構成する *S. osculosa* は、2.24 Ma にスパイク的に生産量が著しく減少し、その直後に再び 2.24 Ma 以前の生産

量まで回復する。しかし、鮮新世 / 更新世境界 (1.81 Ma) 近傍で生産量が急減する。また、Group 13 のうち *L. (L.) bacca* は生産量の増減を顕著に繰り返す。これは、本種が生息する表層の暖海水の影響が強い強弱を繰り返した可能性を示唆するが、同じ水深に生息する *Theocorythium* spp. とは異なる変動であり、注意を要する。Group 1 における生産量の減少は *L. thoracites* に顕著に見られる。この事実は、Group 1 全体の生産量に影響を与える海洋パラメータよりも、この種に特に関係する海洋パラメータに変化があったことを意味する。このようにいくつかの海洋パラメータに変化があったと考えられるが、具体的な要素は分からない。

1.72-1.42 Ma : 1.72 Ma に放散虫の総生産量が急減し、1.42 Ma にさらに若干放散虫の総生産量が小さくなる。Q モードクラスター解析の結果から、1.72 Ma の変化は相対産出頻度であり、1.42 Ma の変化は生産量によって区別されている。1.72 Ma における放散虫の総生産量の減少は、Group 5 と Group 12 に特に顕著である。Group 5 は *C. davisiana* と *C. pliocenica* からなるので、2.78 ~ 2.24 Ma に極大になった好適環境が 2.24 ~ 1.72 Ma に衰退し、1.72 ~ 1.42 Ma にも引き続いたと解釈される。Group 10 の生産量の減少傾向は主に *H. asteriscus* によるものである。本種は表層に住むとされるが生態は不明である。逆に生産量を増しているのは、Group 2 である。このグループは *Lamprocyclus maritilis* だけで構成され、本種は中緯度・寒冷水塊・水深 200m に多いとされている。同じ水深に住む *Spr. cylindricus* などが属する Group 3 にはとくに生産量に変化が認められないので、この水深で *L. maritilis* の生産量を変化させる海洋パラメータに変動があったと考えられる。

2.78 ~ 2.24 Ma では Group 9 の生産量増加が Group 5 や Group 12 と同調して増加していたが、1.72 ~ 1.42 Ma の期間では挙動が異なる。とくに、Group 9 の生産量は 1.50 Ma に減少する。このグループの構成種である *L. setosa* の増加要因を重視すれば、珪藻等の基礎生産や栄養供給が 1.50 Ma に乏しくなり、その影響が *C. profunda* の生息する水深 300 - 1000 m にまで及んだと推定される。

1.12-0.44 Ma : この時期は放散虫の総生産量が低い期間である。そのなかで、Group 1 の生産量と相対産出頻度はともに増加する。Group 1 は *L. thoracites* と *B. inflata* からなるが、両種に共通して影響を与える海洋パラメータは未知である。

0.44 Ma 以降 : 0.44 Ma 以降、0.33 Ma と 0.18 Ma に生産量を担う種群が入れ替わっていることが Q モードクラスター解析の結果から読み取れる。ほぼすべてのグループの生産量が増加するが、Group 8 は 0.18 Ma 以降に減少し、Group 11 は 0.33-0.18 Ma に減少がみられ、Group 13

の生産量はほとんど反応していない。この3つのグループの挙動が残りのグループと異なることでクラスターが分かれたと考えられる。Group 8は *B. aquilonaris*, Group 11は *S. osculosa*, Group 13は *L. (L.) bacca* からなる。これら3種以外のすべてのグループの生産量を上昇させる環境というのは分からない。

3. 放散虫群集の変動とグローバル変動との関係

7 ~ 4.5 Ma に赤道東太平洋を中心に珪藻や放散虫の生産量が増加していた Late Miocene – Early Pliocene biogenic bloom event が あ っ た (Cortese et al., 2004; Farrell et al., 1995) が, 6.41 ~ 4.35 Ma において Site 1210 では放散虫生産量は低い時期にあたり, この時期にこの bloom event はシャツキーライズ上まで到達していなかったことが示唆される。また, 6.26 ~ 5.50 Ma に寒暖サイクルがあるとされるが, この期間における本研究の解析間隔は粗いため, 影響の有無は判断できない。中新世末期には, 5.96 ~ 5.33 Ma のメッシニアン塩分危機 (Duggen et al., 2003) や 5.5 ~ 5.4 Ma にベーリング海峡の開裂 (Gladenkov, 2006) など汎世界的に影響を与えた事変が知られているが, 本研究の試料間隔が粗いため, これらの事変との同時性は分からない。この海域の近傍となるベーリング海峡が開裂すると北極から淡水が流入すると物理モデル計算があり (de Boer and Nof, 2004), その影響などが想定されるが, 現時点では具体的に議論できない。

Zheng et al. (2004) によれば, 西太平洋沿岸域では風成堆積物の供給が 5.0 ~ 3.6 Ma に減少している。風成堆積物は珪藻などの一次生産者への栄養の一部となっているので, 二次生産者を含む放散虫の生産量が減少する可能性がある。しかし, Site 1210 では, 4.35 ~ 3.90 Ma に生産量が増加し, 群集解析によると珪藻等の基礎生産や栄養供給の増加が示唆されているものと考えられる。3.90 ~ 3.64 Ma の期間では再び放散虫の総生産量が減じている。このように, Zheng et al. (2004) が指摘している風成堆積物の供給が減少した事変はシャツキーライズ近傍海域では無関係であり, むしろこの海域特有の何らかの理由で 4.35 ~ 3.64 Ma に放散虫の総生産量が増加したと考える方が妥当である。

3.64 ~ 3.08 Ma では Q モードクラスター解析では Q-i, Q-iv, Q-v, Q-vi の4クラスターが入れ替わる変動の激しい時期である。3.15 ~ 2.80 Ma には中期鮮新世の温暖化 (Ravelo and Wara, 2004) が知られている。この温暖化によって全球で平均海水温が約3度上昇したとされ, その影響は高緯度でとくに顕著に現れたと言われる (Chandler et al., 1994; Dowsett et al., 1996; Haywood et al., 2000; Sloan

et al., 1996)。Group 7 は熱帯~亜熱帯の表層種を多く含むので, 温暖化と連動して Group 7 の Artiscinae 亜科や *Carpocanium* 属の生産量が増加したのかもしれないが, これらは共生藻類から少なからず栄養を得ている可能性があり, むしろ暖流強化による貧栄養の指標となる可能性も考えられる。3.08 Ma にも群集の入れ替わりが識別されたが, 中期鮮新世の温暖化との関係性を考えた場合, 3.08 Ma に生じた変化はどれくらい広域の影響を記録した放散虫群集の変化なのか, さらに検討を要する。

Site 1210 の海域でもっとも顕著な群集変動があったのは, 2.78 Ma である。2.8 Ma から 2.4 Ma にかけて, 様々な古環境イベントが知られている。列記すると, 2.75 Ma 以降に北半球に永久氷が発達 (Barron, 1998; Cane and Molnar, 2001; Kameo and Sato, 2000), 2.71 Ma に North Pacific Opal Breakdown (NPOB) (Cortese et al., 2004; Haug et al., 1999; Maslin et al., 1996; Ravelo et al., 2004; Rea et al., 1995; Reynolds et al., 2006; Sigman et al., 2004), 2.5 Ma に高緯度の湧昇域におけるオパール堆積の増加と氷期・間氷期の卓越周期が4万年から10万年にシフト (Cortese et al., 2004), 2.5 ~ 2.4 Ma に起きた炭酸塩補償深度の1km深化 (McCarthy et al., 2004) などである。これから期待される放散虫群集変動は, 寒冷種が増加し, 放散虫の総生産量が減少することである。実際, 亜寒帯系の北太平洋放散虫群集は 2.7 Ma に顕著な変化があったとされる (Kamikuri et al., 2007)。顕著な変化は, 生息水深が 300m 前後で共通する *C. davisiana*, *C. pliocenica*, *B. aquilonaris*, *C. profunda* の生産量が増加し, 水深 200m 程度に生息する *Spr. cylindricus* と *Stylodictya* spp. の生産量も増加していることである。この水深では水温が低いので, 水温という側面だけで考えるならば“寒冷種”が増加していることになるので, これらのタクサが増加しても表層水が寒冷化したとはいえない。なお, この時期, NPOB とは逆に, 本地点では放散虫の総生産量は顕著に増加している。これは, NPOB は亜寒帯域の現象であり, Site 1210 は中緯度であるという地域差に起因する可能性がある。放散虫の総生産量の増加要因を放散虫の生態から判断すると, 珪藻などの一次生産が増加するとともに, 十分に混合し冷涼で有機物の供給に富む水塊が中~深層水に発達した可能性がある。この増加現象は北太平洋中緯度で初めて確認され, 北太平洋中緯度放散虫増加事変 (MNPRB : Mid-latitude North Pacific Radiolarian Buildup) と新たに名付ける。

MNPRB については, $\delta^{30}\text{Si}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を証拠として珪藻に共生するジアゾ栄養生物 (diazotroph) が減少するこ

とで窒素固定がうまくいかなくなり珪藻の生産量が減少した (Reynolds et al., 2006), あるいは, 北大西洋深層水 (NADW; North Atlantic Deep Water) が弱体化し, 北太平洋まで栄養塩がもたらされなくなった (Rea et al., 1995) などの考えが提案されている。しかし, これまでに北太平洋の深層にすむ放散虫が NADW の弱体化に伴うなんらかの現象を捉えたことがなく, Site 1210 では深層種の生産量に変化が認められなかった。そもそも北太平洋の深海放散虫群集が, 北大西洋を起源とする深層水の影響を受けるには, よほどの変化が無い限り難しいだろう。このことを踏まえると, MNPRB が NADW の弱体化に関係した変化とは考えがたい。Site 1210 では 2.7 Ma 頃から珪藻の生産量は増加しており (丸山・塩原, 2006), Reynolds et al. (2006) が考えたような, 珪藻の共生生物に異変を想定するより, 珪藻の生産場所が南下したと考えるべきである。表層に生息する *L. (L.) bacca* は共生藻類をもち, *H. asteriscus* も共生藻類がいる可能性がある (Haecker, 1908)。これらの2種は 2.78 ~ 2.24 Ma の間にとくに変化がないが, これは共生藻類による栄養供給のため, 環境変化の影響があらわれにくいのであろう。中層水に生息する *L. maritalis* や *S. osculosa* の生産量に顕著な変動はないが, その理由は分からない。

放散虫の総生産量が高い状態は, 2.24 ~ 1.72 Ma にも続く。Site 1210 における珪藻の生産量から, 温暖な気候が広がった時期にあたる (丸山・塩原, 2006)。1.8Ma 頃は地球規模で氷床の拡大があったとされる (Harwood, 1987) が, 珪藻には少なくとも影響が現れていない。珪藻から読み取れるのは表層水の透光帯において, 珪藻がブルーミングする春の現象である。一方でその水深に生息する *L. (L.) bacca* の生産量は増減を繰り返す。*L. (L.) bacca* は初夏に増加することが記録されており, Site 1210 において, 初夏の環境は *L. (L.) bacca* にとっては不安定であったようである。2.24 ~ 1.72 Ma の放散虫の変動は複雑に挙動しているが, それを説明するような環境変動があったのかどうかは未解明である。

放散虫群集は, 1.72 Ma に総生産量が急減する。とくに, *C. davisiana*, *C. pliocenica*, *L. setosa*, *C. profunda*, *S. lineata* の現象が認められる。この時の広域にわたる環境変動については知られていないが, それを示唆する情報は知られている。たとえば, 黒潮との関連が指摘される対馬暖流は, 1.71 Ma 以降, 間氷期に必ず日本海に流入するようになったとされている (Kitamura and Kimoto, 2006)。また, 円石藻の1種, *Braarudosphaera bigelowii* の大きなタイプが 1.73 Ma に絶滅している (萩野・岡田, 2007)。これらの現象の発生時期は 1.71 ~ 1.73 Ma であり, 試料採集間

隔の誤差を考えると同時のイベントである可能性がある。また, 先述の 1.8 Ma 頃の地球規模の氷床拡大は, 1.71 ~ 1.73 Ma の現象と 0.09 ~ 0.07 m.y. のずれがあるが, 関連については明らかでない。

1.12 ~ 0.44 Ma は本地点の放散虫の総生産量が低かった。この時期は 1.2 ~ 0.6 Ma の Mid-Pleistocene Climate Transition に相当する。この事変では北太平洋深層水が形成されることで底層環境に変化が生じ, 世界規模で底生有孔虫のある一群に一斉絶滅が起きている (Kawagata et al., 2005; in press)。この絶滅事変は南極からの深層水形成に関係すると述べている。この時期, Site 1210 付近のシャツキーライズは放散虫の生息に適さない環境になったと考えられるが, 底生有孔虫の絶滅事変と同時期におきたこの現象が偶然一致したのか, 深い因果関係にあるのかさらなる検討が必要である。

1.12 ~ 0.44 Ma は放散虫の生産量が一斉に下がっている。その一方で, 0.44 Ma 以降には放散虫の生産量が増加している。この原因は分からないが, *B. aquilonaris*, *S. osculosa*, *L. (L.) bacca* が異なる挙動を示すので, この3種の環境応答が要因を解き明かすことにつながるかもしれない。

まとめ

ODP Leg 198 Site 1210 の堆積物に記録される, 中新世後期, 640 万年以降の北太平洋において, 相対産出頻度と生産量をもとに放散虫群集変動を明らかにした。59 属 100 種が識別され, 亜寒帯と熱帯~亜熱帯の種を含むが, 連続産出することではなく, 特定の氷塊が定期的存在したことはない。同時性の高い生層準は3面識別された。それぞれ, *Cycladophora davisiana* の FCO (2.84 ± 0.03 Ma), *Theocorythium vetulum* の LO (1.55 ± 0.05 Ma), *Axopronum angelinum* の LO (0.44 ± 0.04 Ma) である。近傍の Site 1207 の群集との比較から, *Bathropyramis quadrata* と *Cyrtolagena cuspidata* の生息の中心は, 2500 m 以深と結論づけた。

放散虫の総生産量変動には, 4.35 ~ 3.90 Ma, 2.78 ~ 2.24 Ma, 0.44 Ma 以降の時期に特に増加する現象があることを明らかにした。放散虫群集の時系列変化は, 生産量と相対産出頻度の両面から, 6.41 ~ 4.35 Ma, 4.35 ~ 3.90 Ma, 3.90 ~ 3.64 Ma, 3.64 ~ 3.08 Ma, 3.08 ~ 2.78 Ma, 2.78 ~ 2.24 Ma, 2.24 ~ 1.72 Ma, 1.72 ~ 1.42 Ma, 1.12 ~ 0.44 Ma, 0.44 Ma 以降の 10 期に分けられることを示した。6.41 ~ 4.35 Ma は赤道では Late Miocene – Early Pliocene

biogenic bloom event により珪質殻生物の生産量が高かったのに対し, シャツキーライズ上の放散虫の総生産量は低い状態にあった。5.96 Ma から 5.33 Ma にかけておきたメツシニアン塩分危機やベーリング海峡の開裂と時期を同じくして生じた環境変動は世界規模で知られるが, シャツキーライズ上では 5.41 ~ 5.18 Ma の間にいくつかの放散虫タクサの総生産量が増加し, 若干だが影響が現れていた。4.35 ~ 3.90 Ma には基礎生産や栄養供給が増えてその影響は水深 300-1000 m まで及ぶが, その原因は分からない。3.90 Ma 以降 3.64 Ma までは再び生産量が減少し, 3.64 ~ 3.08 Ma は群集構成が不安定になるが, 3.15 ~ 2.80 Ma の中期鮮新世の温暖化と連動して共生藻をもつ Artiscinae 亜科などの生産量が増え, ほかの種群も同様に生産量が増加した。シャツキーライズ上の放散虫群集は 2.78 Ma に大きく変化し, 亜寒帯域では North Pacific Opal Breakdown によって珪藻・放散虫の総生産量が減少するが, シャツキーライズ上では熱帯・亜熱帯の表層にすむ放散虫タクサの生産量が増加するうえ, 水深 200 ~ 300 m 前後の“寒冷種”の生産量が著しく増加する。これは珪藻の生産量が増加とともに, 冷涼で有機物の供給に富む水塊が中層~深層に発達した事による。この現象は初めての発見であり, 北太平洋中緯度放散虫増加事変 (MNPRB: Mid-latitude North Pacific Radiolarian Buildup) と新たに名付けた。2.24 ~ 1.72 Ma も引き続き放散虫の総生産量が高く推移するが, 未知の海洋パラメータが複雑に挙動したことによる。1.72 Ma に放散虫の総生産量が急減したが, これは円石藻の *Braarudosphaera bigelowii* の大型タイプの絶滅などと一致した変化であり, 1.8 Ma の氷床の拡大と関連があるのかもしれない。1.2 ~ 0.6 Ma の Mid-Pleistocene Climate Transition の頃, 1.12 ~ 0.44 Ma にかけて放散虫の総生産量は表層から深層全体で減少した。因果関係が共通するか不明だが, 同時期に深海底生有孔虫が世界規模で絶滅している。0.44 Ma からは放散虫の総生産量が急増するが, 具体的な理由は分からない。

放散虫の R モードクラスターが 13 グループに分かれた事実は, 放散虫群集の変動要因となる海洋パラメータが, 水温だけで考えるのは不十分であることを示す。現生種の成長について, 光量, 塩分, シリカ供給量, 窒素など栄養塩, 酸素濃度などが多かれ少なかれ影響することが知られ, さらに繁殖時期における海洋環境によって生産量も変動する。これらの海洋パラメータが複合的に絡み合っ各タクサの生産量変動が定まると考えられる。また, クラスターがしばしば生息深度に関わりなくクラスタリングされる事実は, 生息深度の制約は水圧ではなく, その水深の複合的海洋パラメー

タ条件が好適となっていることが重要であると考えられる。近傍海域では水深指標として見なすことができるかもしれないが, 離れた海域の水深分布を機械的に当てはめて解釈することは危険である。ここで述べた結論を多角的に検証する研究が進展することを期待する。

謝辞

本論文の改善に当たり, 匿名の査読者2名には懇切丁寧なご指摘をいただいた。本研究に使用した試料を提供くださった Ocean Drilling Program に感謝する。須賀利雄博士 (東北大) には北太平洋の海洋物理的特徴についてご教示いただいた。本研究には 21 世紀 COE・東北大学「先端地球科学による地球の未来像創出」と科学研究補助金・基盤 (A) (no. 17204043. 代表: 尾田太良) からの支援を受けた。

引用文献

- Abelmann, A. and Gowing, M.M., 1997, Spatial distribution pattern of living polycystine radiolarian taxa - baseline study for paleoenvironment reconstructions in the Southern Ocean. *Marine Micropaleontology*, **30**, 3-28.
- Abelmann, A. and Nimmergut, A., 2005, Radiolarians in the Sea of Okhotsk and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions. *Deep-Sea Research II*, **52**, 2302-2331.
- Anderson, O.R., Bryan, M. and Bennett, P., 1990, Experimental and observational studies of radiolarian physiological ecology: 4. Factors determining the distribution and survival of *Didymocystis tetrathalamus tetrathalamus* with implication for paleoecological interpretations. *Marine Micropaleontology*, **16**, 155-167.
- Barron, J.A., 1998, Late Neogene changes in diatom sedimentation in the North Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences*, **16**, 85-95.
- Bolin, B., Björkström, A. and Holmén, K., 1983, The simultaneous use of tracers for ocean circulation studies. *Tellus*, **35B**, 206-236.
- Bown, P.R., 2005, Cenozoic Calcareous Nannofossil Biostratigraphy, ODP Leg 198 Site 1208 (Shatsky Rise, Northwest Pacific Ocean). In Bralower, T.J., Premoli Silva, I., Malone, M.J. eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **198**, 1-44. [doi:10.2973/odp.proc.sr.198.104.2005]
- Bralower, T.J., Premoli Silva, I. and Malone, M.J., 2006, Leg 198 synthesis: A Remarkable 120-m.y. recorded of climate and oceanography from Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean. In Bralower, T.J., Premoli Silva, I. and Malone, M.J. eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **198**, 1-47 [doi:10.2973/odp.proc.sr.198.101.2006].
- Cande, S.C. and Kent, D.V., 1995, Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 6093-6095.
- Cane, M.A. and Molnar, M., 2001, Closing of the Indonesian seaway as a precursor to east African aridification around 3 - 4 million years ago. *Nature*, **411**, 157-162.

- Casey, R.E., Spaw, J.M., Kunze, F.R., Reynolds, R., Duis, T., McMillen, K., Pratt, D. and Anderson, V., 1979, Radiolarian ecology and the development of the radiolarian component in Holocene sediments, Gulf of Mexico and adjacent seas with potential paleontological applications. *Transactions of Gulf Coast Association of Geological Societies*, **29**, 228-237.
- Casey, R.E., Wigley, C.R. and Perez-Guzman, A.M., 1983, Biogeographic and ecologic perspective on Polycystine radiolarian evolution. *Paleobiology*, **9**, 363-376.
- Chandler, M., Rind, D. and Thompson, R., 1994, Joint investigations in the middle Pliocene climate: II. GISS GCM Northern Hemisphere results. *Global Planetary Change*, **9**, 197-219.
- Cortese, G., Gersonde, R., Hillenbrand, C.D. and Kuhn, G., 2004, Opal sedimentation shifts in the World Ocean over the last 15 Myr. *Earth and Planetary Science Letter*, **224**, 509-527.
- de Boer, A.M. and Nof, D., 2004, The Bering Strait's grip on the northern hemisphere climate. *Deep-Sea Research I*, **51**, 1347-1366.
- Dowsett, H., Barron, J. and Poore, R.Z., 1996, Middle Pliocene sea surface temperatures: A global reconstruction. *Marine Micropaleontology*, **27**, 13-25.
- Duggen, S., Hoernle, K., Bogaard, P. van den, Rüpke, L. and Morgan, J.P., 2003, Deep roots of the Messinian salinity crisis. *Nature*, **422**, 602-606.
- Evans, H.F., Channell, J.E.T. and Sager, W.W., 2005, Late Miocene-Holocene magnetic polarity stratigraphy and astrochronology, ODP Leg 198, Shatsky Rise. In Bralower, T.J., Premoli Silva, I., Malone, M.J. eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **198**, 1-39. [doi:10.2973/odp.proc.sr.198.118.2005]
- Farrell, J.W., Raffi, I., Janecek, T.R., Murray, D.W., Levitan, M., Dadey, K.A., Emeis, K.C., Lyle, M., Flores, J.A. and Hovan, S., 1995, Late Neogene sedimentation patterns in the eastern equatorial Pacific. In Pisias, N.G., Mayer, L.A., Janecek, T.R., Palmer-Julson, A. and van Andel T.H. eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **145**, 717-756.
- Gladenkov, A.Y., 2006, The Cenozoic diatom zonation and its significance for stratigraphic correlations in the North Pacific. *Paleontological Journal*, **40**, 571-583.
- Gowing, M.M., 1993, Seasonal radiolarian flux at the VERTREX North Pacific time-series site. *Deep-Sea Research I*, **40**, 517-545.
- Haecker, V., 1908, Allgemeiner Teil. Form und Formbildung bei den Radiolarien. *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Tiefsee-Expedition auf dem Dampfer „Valdiva“ 1898-1899*, **14**, 477-706.
- 萩野 恭子・岡田尚武, 2007, 北西太平洋における, 新生代 *Braarudosphaera bigelowii* の形態およびサイズの変化. MRC 研究発表会講演要旨, 北海道大学, 16.
- Hanawa, K. and Suga, T., 1995, A review on the subtropical mode water of the North Pacific (NPSTMW). In Sakai, H. and Nozaki, Y. eds., *Biological Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*. Terra Publication, Tokyo, 613-627.
- Harwood, D. M., 1987, Cenozoic Antarctic temperature, ice-volume and bottom water events, a comparison of Sirius Formation microfossil data to eustatic and oxygen isotope data. *Geological Society of America, Abstracts with Program*, **19**, 695.
- Haslett, S.K., 2004, Late Neogene-Quaternary radiolarian biostratigraphy: a brief review. *Journal of Micropaleontology*, **23**, 39-47.
- Haslett, S.K., Funnell, B.M. and Dunn, C.L., 1994, Calcite preservation, palaeoproductivity and the radiolarian *Lamprocyrtis neoheteroporos* Kling in Plio-Pleistocene sediments from the eastern equatorial Pacific. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatschrift*, **1994**, 82-94.
- Hasunuma, K., 1978, Formation of the intermediate salinity minimum in the northwestern Pacific Ocean. *Bulletin of Ocean Research Institute*, **9**, 1-47.
- Haug, G.H., Sigman, D.M., Tiedemann, R., Pedersen, T.F. and Sarnstein, M., 1999, Onset of permanent stratification in the subarctic Pacific Ocean. *Nature*, **401**, 779-782.
- Hays, J.D. and Morley, J.J., 2004, The Sea of Okhotsk: A Window on the Ice Age Ocean. *Deep-Sea Research, Part I*, **51**, 593-618.
- Haywood, A.M., Valdes, P.J. and Sellwood, B.W., 2000, Global scale palaeoclimate reconstruction of the middle Pliocene climate using the UKMO GCM: Initial results. *Global Planetary Change*, **25**, 239-256.
- Itaki, T., 2003, Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea. *Marine Micropaleontology*, **47**, 253-270.
- Itaki, T. and Ikehara, K., 2004, Middle to late Holocene changes of the Okhotsk Sea Intermediate Water and their relation to atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters*, **31**, L24309, 1-4.
- Kameo, K. and Sato, T., 2000, Biogeography of Neogene calcareous nannofossils in the Caribbean and the eastern equatorial Pacific – floral response to the emergence of the Isthmus of Panama. *Marine Micropaleontology*, **39**, 201-218.
- Kamikuri, S., Nishi, H., Motoyama, I. and Saito, S., 2004, Middle Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the Northwest Pacific Ocean, ODP Leg 186. *The Island Arc*, **13**, 191-226.
- Kamikuri, S., Nishi, H. and Motoyama, I., 2007, Effect of late Neogene climatic cooling on North Pacific radiolarian assemblages and oceanographic conditions. *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoclimatology*, **249**, 370-392.
- Kano, H., 2007MS, Aptian-Albian Radiolarian Faunal Transition and Productivity in the Equatorial Pacific Ocean: Implications for Paleoenvironmental Changes. *Doctoral Dissertation of Tohoku University*.
- Kawabe, M. and Taira, K., 1998, Water masses and properties at 165°E in the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 12941-12958.
- Kawagata, S., Hayward, B.W., Grenfell, H.R. and Sabaa, A.T., 2005, Mid-Pleistocene extinction of deep-sea foraminifera in the North Atlantic Gateway (ODP Sites 980 and 982). *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoclimatology*, **221**, 267-291.
- Kawagata, S., Hayward, B.W. and Kuhnt, W., in press, Extinction of deep-sea foraminifera as a result of Pliocene-Pleistocene deep-sea circulation changes in the South China Sea (ODP Sites 1143 and 1146). *Quaternary Science Review*.
- Kitamura, A. and Kimoto, K., 2006, History of the inflow of the warm Tsushima Current into the Sea of Japan between 3.5 and 0.8 Ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **236**, 355-366.
- Kling, S.A., 1979, Vertical distribution of polycystine radiolarians in the central North Pacific. *Marine Micropaleontology*, **4**, 295-318.
- Kling, S.A. and Boltovskoy, D., 1995, Radiolarian vertical distribution patterns across the southern California Current. *Deep-Sea Research II*, **42**, 191-231.
- Kruglikova, S.B., 1999, Distribution of polycystine radiolarians from the recent and Pleistocene sediments. *Berichte zur Polarforschung*, 120-133.
- Lalli, C.M. and Parsons, T.R., 1993, *Biological Oceanography: An Introduction*. Pergamon Press, Oxford, 301pp.
- Lombardi, G. and Boden, G., 1985, Modern radiolarian global distributions. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication*, **16A**, 1-125.
- 丸山俊明・塩原 愛, 2006, 北太平洋シャツキーライズの Hole 1207A と Hole 1210A における珪藻化石による水塊前線の復元. 基盤研究 C, 珪藻化石による北太平洋東西境界流海域の古海洋復元図の作成 研究成果報告書, 189-246.
- Maslin, M.A., Haug, G.H., Sarnstein, M., Tiedemann, T., 1996, The progressive intensification of northern hemisphere glaciation as seen from the North Pacific. *Geologische Rundschau*, **85**, 452-465.

- 松岡 篤, 1993, 沖縄県瀬底島周辺海域の現生放散虫. 化石, no. 54, 1-9.
- McCarthy, F.M.G., Findlay, D.J. and Little, M.L., 2004, The micropaleontological character of anomalous calcareous sediments of late Pliocene through early Pleistocene age below the CCD in the northwestern North Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **215**, 1-15.
- Molina-Cruz, A., 1977, Radiolarian assemblages and their relationship to the oceanography of the subtropical southeastern Pacific. *Marine Micropaleontology*, **2**, 315-352.
- Motoyama, I., 1996, Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 221-262.
- 本山 功, 1999, 本邦含油新第三系をめぐる放散虫化石層序の進歩—化石帯区分の進歩. 石油技術協会誌, **64**, 28-39.
- 本山 功・丸山俊明, 1998, 中・高緯度北西太平洋地域における新第三紀珪藻・放散虫化石年代尺度: 地磁気極性年代尺度 CK92 および CK95 への適合. 地質学雑誌, **104**, 171-183.
- Motoyama, I. and Nishimura, A., 2005, Distribution of radiolarians in North Pacific surface sediments along the 175°E meridian. *Paleontological Research*, **9**, 95-117.
- Nimmergut, A. and Abelman, A., 2002, Spatial and seasonal changes of radiolarian standing stocks in the Sea of Okhotsk. *Deep Sea Research I*, **49**, 463-493.
- Nigrini, C.A., 1977, Tropical Cenozoic Artostrobidae (Radiolaria). *Micropaleontology*, **23**, 241-269.
- Nigrini, C.A. and Caulet, J.P., 1992, Late Neogene radiolarian assemblages characteristic of Indo-Pacific areas of upwelling. *Micropaleontology*, **38**, 139-164.
- Ohkushi, K., Itaki, T. and Nemoto, N., 2003, Last glacial-Holocene change in intermediate-water ventilation in the Northwestern Pacific. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1477-1484.
- Okazaki Y, Takahashi K, Itaki T. and Kawasaki, Y, 2004, Comparison of radiolarian vertical distributions in the Okhotsk Sea near the Kuril Islands and in the northwestern North Pacific off Hokkaido Island. *Marine Micropaleontology*, **51**, 257-284.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Onodera, J. and Honda, M.C., 2005, Temporal and spatial flux changes of radiolarians in the northwestern Pacific Ocean during 1997-2000. *Deep-Sea Research II*, **52**, 2240-2274.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Yoshitani, H., Nakatsuka, T., Ikehara, M. and Wakatsuchi, M., 2003, Radiolarians under the seasonally sea-ice covered conditions in the Okhotsk Sea: fluxes and their implications for paleoceanography. *Marine Micropaleontology*, **49**, 195-230.
- Pisias, N.G., 1986, Vertical water mass circulation and the distribution of Radiolaria in surface sediments of the Gulf of California. *Marine Micropaleontology*, **10**, 189-205.
- Ravelo, A.C. and Wara, M.W., 2004, The role of the tropical oceans on global climate during a warm period and a major climate transition. *Oceanography*, **17**, 32-41.
- Ravelo, A.C., Andreasen, D.H., Lyle, M., Lyle, A.O. and Wara, M.W., 2004, Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch. *Nature*, **429**, 263-267.
- Rea, D.K., Basov, I.A. and Kriesek, L.A., 1995, Scientific results of drilling the North Pacific transect. In Rea, D.K., Basov, I.A., Scholl, D.W. and Allan, J.F. eds., *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **145**, 577-596.
- Reid, J. L., 1965, Intermediate waters of the Pacific Ocean. *Johns Hopkins Oceanographic Studies, Supplement*, no. 5, 1-96.
- Reynolds, B.C., Jaccard, S.L. and Haliday, A.N., 2006, Abrupt cessation of North Pacific upwelling with Northern Hemisphere Glaciation recorded by silicon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, **70**, 530.
- Romine, K., 1985, Radiolarian biogeography and paleoceanography of the North Pacific at 8 Ma. *Geological Society of America Memoirs*, **163**, 237-272.
- Sanfilippo, A. and Nigrini, C., 1998, Code numbers for Cenozoic low latitude radiolarian biostratigraphic zones and GPTS conversion tables. *Marine Micropaleontology*, **33**, 109-156.
- Sanfilippo, A. and Riedel, W.R., 1992, The origin and evolution of Pterocorythidae (Radiolaria): A Cenozoic phylogenetic study. *Micropaleontology*, **38**, 1-36.
- Shipboard Scientific Party, 2002, Site 1210. In Bralower, T.J., Premoli Silva, K., Malone, M.J. et al. eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, **145**, 1-89 (http://www-odp.tamu.edu/publications/198_IR/VOLUME/CHAPTERS/IR198_06.PDF).
- Sigman, D.M., Jaccard, S.L. and Haug, G.H., 2004, Polar ocean stratification in a cold climate. *Nature*, **428**, 59-63.
- Sloan, L.C., Crowley, T.J. and Pollard, D., 1996, Modeling of middle Pliocene climate with the NCAR GENESIS general circulation model. *Marine Micropaleontology*, **27**, 251-261.
- 鈴木紀毅・木田真太郎, 2004, 相対産出頻度から推定母集団値を得る方法と必要な観察個体数について. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no. 13, 221-227.
- Sverdrup, H.U., Johnson, M.W. and Fkeming, R.H., 1942, *The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1087pp.
- Takahashi, K., 1987, Radiolarian flux and seasonality climatic and El Nino response in the subarctic Pacific. 1982-1984. *Global Biochemical Cycles*, **1**, 213-231.
- Takahashi, K., 1994, From modern flux to paleoflux: assessment from sinking assemblages to thanatocoenosis. In Zahn, R. et al., eds., *Carbon Cycling in the Glacial Ocean; Constrains on the Ocean's Role in Global Change. NATO ASI Series*, **117**, 413-424.
- Takahashi, K., 1995, Opal particle flux in the subarctic Pacific and Bering Sea and sidocoenosis preservation hypothesis. In Tsunogai, S. et al., (Eds.), *Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal Sea-Ocean-Atmosphere System*, Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP Symposium, M & J. International, Yokohama, Japan, 458-466.
- 高柳洋吉編, 1978, 微化石研究マニユアル. 朝倉書店, 62-70.
- 角皆静男・垂木新一郎, 1983, 海洋化学—化学で海を解く. 286 p. 産業図書.
- Welling, L.A. and Pisias, N.G., 1998, Radiolarian fluxes, stocks, and population residence times in surface waters of the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Research Part I*, **45**, 639-671.
- Westberg, M.J. and Riedel, W.R., 1978, Accuracy of radiolarian correlations in the Pacific Miocene. *Micropaleontology*, **24**, 1-23.
- Yamashita H, Takahashi K. and Fujitani, N, 2002, Zonal and vertical distribution of radiolarians in the western and central Equatorial Pacific in January 1999. *Deep-Sea Research II*, **49**, 2823-2862.
- 山内守明・山本浩文, 2001, 「みらい」MR99-04 ビストンコア中の放散虫遺骸群集に基づく過去2万年間の黒潮・親潮水塊の変遷. 海洋科学技術センター試験研究報告, no. 43, 73-82.
- Yasuda, I., Okuda, K. and Shimizu, Y., 1996, Distribution and modification of the North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio - Oyashio Interfrontal zone. *Journal of Physiological Oceanography*, **26**, 448-465.
- 吉村悦子, 2007MS, 北西太平洋シャツキーライズにおける中期中新世以降の放散虫変動と環境への応答. 東北大学大学院理学研究科地学専攻 2006 年度修士論文, 135 p.
- Zheng, H., Powell, C.M., Rea, D.K., Wang, J. and Wang P., 2004, Late Miocene and mid-Pliocene enhancement of the East Asian monsoon as viewed from the land and sea. *Global and Planetary Change*, **41**, 147-155.

Appendix 1. Occurrence chart of the selected radiolarians from Site 1210.

Sample ID	Age [Ma]	Sedimentation rate [cm/kyr]	Depth [mbsf]	Depth [mcd]	Dry density [g/cc]	Dry weight [g]	Total of counted radiolarians	RAR	<i>Anthocyrtidium angulare</i>	<i>Anthocyrtidium jenghisi</i>	<i>Anthocyrtidium ophirens</i>	<i>Anthocyrtidium zanguebaricum</i>	<i>Arctostrobilus annulatus</i>	<i>Arctostrobilus joergenseni</i>
001H02W32-36	0.10	1.91	1.82	1.82	1.833	2.20	1589	323673.4	0	0	1	0	0	1
001H04W32-36	0.25	1.91	4.82	4.82	1.694	2.64	4664	243195.0	0	0	0	0	7	0
001H-CC	0.40	1.91	6.06	7.57	1.686	2.46	2237	46853.5	0	0	0	0	0	0
002H02W32-36	0.48	1.91	7.72	9.23	1.724	3.54	1454	24679.6	0	0	0	0	1	0
002H04W32-36	0.64	1.91	10.72	12.23	1.743	1.61	1554	51833.5	0	0	0	0	4	0
002H06W32-36	0.80	1.51	13.72	15.23	1.708	1.83	2581	42009.4	0	0	2	0	2	1
003H01W16-20	0.90	1.51	15.56	16.75	1.730	2.47	908	2937.9	0	0	0	0	1	0
003H02W32-36	1.01	2.05	17.22	18.41	1.751	2.45	2691	63397.8	0	0	1	0	3	1
003H03W16-20	1.07	1.76	18.56	19.75	1.691	2.61	1140	23918.7	0	0	0	0	3	0
003H04W32-36	1.17	1.76	20.22	21.41	1.702	3.57	1089	19694.9	0	0	0	0	0	0
003H05W16-20	1.24	1.76	21.56	22.75	1.710	2.85	566	2973.7	0	0	0	0	0	0
003H06W32-36	1.34	1.76	23.22	24.41	1.661	1.77	2265	15042.9	0	0	0	0	2	1
003H-CC	1.50	1.76	25.06	27.34	1.695	1.83	3322	43323.2	0	0	1	0	0	0
004H02W32-36	1.60	1.76	26.72	29.00	1.711	2.30	1566	37659.2	0	0	0	0	1	0
004H03W16-20	1.67	1.76	28.06	30.34	1.740	2.34	6755	42365.8	0	0	0	1	7	3
004H04W32-36	1.77	1.76	29.72	32.00	1.629	1.47	1196	26594.3	0	0	0	1	6	0
004H05W16-20	1.86	1.48	31.06	33.34	1.751	2.72	7868	76883.1	0	0	0	3	12	0
004H06W32-36	1.97	1.21	32.72	35.00	1.720	4.33	3212	60769.1	0	0	0	2	2	0
005H01W16-20	2.20	1.21	34.56	37.66	1.734	2.68	4035	35752.0	0	0	0	3	9	1
005H02W32-36	2.28	2.39	36.22	39.32	1.782	1.68	1937	157165.5	0	0	0	2	0	0
005H03W16-20	2.34	2.39	37.56	40.66	1.751	2.03	11940	98458.3	1	0	5	14	18	4
005H04W32-36	2.41	2.39	39.22	42.32	1.742	2.73	1364	82072.0	0	0	0	0	0	0
005H05W16-20	2.46	2.39	40.56	43.66	1.699	2.34	1286	51420.5	0	0	2	3	2	0
005H06W32-36	2.53	2.39	42.22	45.32	1.794	3.59	1667	45958.0	0	0	0	0	1	0
006H01W15.0-20	2.67	2.26	44.05	48.57	1.721	3.26	3738	71356.1	0	0	12	0	0	0
006H02W31.0-36	2.75	2.26	45.71	50.23	1.829	1.97	1316	73966.3	0	0	0	1	0	0
006H03W15.0-20	2.80	2.26	47.05	51.57	1.777	4.42	6154	37194.5	0	1	2	2	1	4
006H04W31.0-36	2.88	2.26	48.71	53.23	1.847	2.23	1396	17086.2	0	0	0	0	2	0
006H05W16-21.0	2.94	2.26	50.06	54.58	1.837	2.72	2433	23566.5	0	0	1	0	2	2
006H06W31.0-35.0	3.01	2.26	51.71	56.23	1.782	2.82	1253	26000.4	0	0	0	0	1	0
007H01W16-20	3.15	1.68	53.56	59.11	1.735	2.03	2717	7802.5	0	2	2	1	1	0
007H02W32-36	3.25	1.31	55.22	60.77	1.781	2.96	1211	5123.4	0	0	0	1	1	2
007H03W16-20	3.34	2.22	56.56	62.11	1.757	2.53	3873	27793.2	0	0	1	0	3	0
007H04W32-36	3.42	2.22	58.22	63.77	1.841	3.13	3010	16269.1	0	0	1	1	0	0
007H05W16-20	3.48	2.22	59.56	65.11	1.878	3.76	2332	7581.7	0	0	0	0	3	1
007H06W32-36	3.55	2.22	61.22	66.77	1.806	3.55	1504	17740.0	1	1	0	3	0	0
008H01W16-20	3.73	1.34	63.06	69.35	1.716	2.61	736	2584.0	0	0	0	0	3	0
008H02W32-36	3.85	1.34	64.72	71.01	1.763	3.68	2442	5832.8	0	0	0	0	3	0
008H03W16-20	3.95	1.34	66.06	72.35	1.770	3.42	3955	54334.0	0	2	17	4	2	1
008H04W32-36	4.08	1.34	67.72	74.01	2.106	3.25	2544	11626.7	0	0	0	2	6	1
008H05W16-21.0	4.18	1.34	69.06	75.35	1.826	2.98	1628	17931.1	0	0	2	2	2	2
008H06W32-36	4.26	2.05	70.72	77.01	1.824	3.44	5840	37605.0	0	0	7	5	3	1
009H01W15.0-20	4.44	1.73	72.55	80.20	1.654	4.52	1220	8786.8	0	0	0	0	6	0
009H02W31.0-36	4.57	1.03	74.21	81.86	1.776	2.06	4068	5819.1	0	0	0	6	3	0
009H03W15.0-20	4.73	0.80	75.55	83.20	1.753	2.28	3713	5506.3	0	0	0	1	3	2
009H04W31.0-36	4.86	1.82	77.21	84.86	1.749	2.39	1206	11496.3	0	0	0	1	1	0
009H05W16-21.0	4.96	1.14	78.56	86.21	1.832	3.19	4343	14353.6	0	0	0	3	7	1
009H06W31.0-36	5.05	1.89	80.21	87.86	1.855	2.75	4861	16762.4	0	0	0	4	16	2
010H01W16-20	5.18	1.89	82.06	90.32	1.737	3.20	1456	16544.9	0	0	0	1	8	0
010H02W31.0-35.0	5.41	0.43	83.71	91.97	1.713	2.66	1241	10996.8	0	0	0	0	0	0
010H04W32-36	6.03	0.67	86.72	94.98	1.803	2.54	1920	7305.1	0	0	0	2	5	2
010H06W32-36	6.41	0.70	89.72	97.98	1.799	2.88	3642	3185.0	0	0	0	1	2	0
Total							144638	2180781.0	2	6	57	70	165	33

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

Appendix 1 (Continued)

Sample ID	Age [Ma]	<i>Artostrobus seriata</i>	<i>Axoprunum angelinum</i>	<i>Bahropyrarnis quadrata</i>	<i>Botryocampe inflata</i>	<i>Botryocytis scutum</i>	<i>Botryopyle cribrosa</i>	<i>Botryostrobilus aquilonaris</i>	<i>Botryostrobilus auritus / australis</i>	<i>Carpocanium</i> spp.	<i>Cornutella profunda</i>	<i>Cycladophora cornuta</i>	<i>Cycladophora pliocenica</i>	<i>Cycladophora sakaii</i>	<i>Cycladophora davisiiana</i>	<i>Didymocytis</i> spp.	<i>Eucyrtidium acuminatum</i>	<i>Eucyrtidium calvertense</i>
001H02W32-36	0.10	0	0	1	3	0	0	1	24	26	7	1	2	0	5	5	4	2
001H04W32-36	0.25	1	0	0	7	0	3	6	42	18	33	1	3	0	10	1	1	2
001H-CC	0.40	0	0	5	2	1	0	4	40	20	11	2	3	0	7	11	0	0
002H02W32-36	0.48	0	1	2	1	0	2	8	19	35	12	0	1	0	5	0	3	1
002H04W32-36	0.64	0	0	0	3	1	1	0	15	7	3	0	2	0	7	2	2	0
002H06W32-36	0.80	0	1	2	6	1	1	4	28	20	18	1	3	0	6	25	0	0
003H01W16-20	0.90	0	0	4	1	0	0	1	1	8	0	0	0	0	2	1	1	0
003H02W32-36	1.01	0	0	2	6	0	1	2	54	16	27	1	2	0	10	5	4	1
003H03W16-20	1.07	0	0	3	2	0	0	0	25	14	20	1	0	0	8	1	1	0
003H04W32-36	1.17	0	4	1	1	0	0	6	10	11	7	0	0	0	2	3	1	1
003H05W16-20	1.24	1	0	0	0	0	0	0	1	1	7	1	0	0	4	4	0	4
003H06W32-36	1.34	0	3	3	4	1	0	4	48	16	23	0	2	0	4	0	1	5
003H-CC	1.50	2	5	5	2	0	2	6	26	36	17	0	3	0	2	18	6	5
004H02W32-36	1.60	0	4	4	0	0	2	2	26	40	14	0	2	0	6	4	1	4
004H03W16-20	1.67	0	6	4	7	1	11	3	90	31	113	0	4	0	18	3	5	2
004H04W32-36	1.77	0	0	2	2	0	4	4	12	6	26	0	0	0	7	0	0	0
004H05W16-20	1.86	1	0	5	9	0	10	6	84	76	85	2	14	0	19	20	17	10
004H06W32-36	1.97	0	0	4	0	0	2	10	27	15	59	0	3	0	16	3	2	0
005H01W16-20	2.20	0	4	5	4	0	5	15	61	27	74	1	14	0	34	5	4	4
005H02W32-36	2.28	0	2	0	2	0	1	0	13	11	18	0	0	0	3	2	1	3
005H03W16-20	2.34	9	7	18	2	3	10	107	137	154	164	8	41	0	73	17	24	19
005H04W32-36	2.41	0	2	4	0	0	0	1	19	17	9	0	1	0	1	9	1	0
005H05W16-20	2.46	0	3	2	3	0	1	9	17	13	8	2	1	0	2	5	2	2
005H06W32-36	2.53	0	10	2	0	0	3	13	13	23	12	0	2	0	1	0	2	5
006H01W15.0-20	2.67	5	4	8	2	0	9	0	44	74	27	1	10	0	2	9	13	2
006H02W31.0-36	2.75	0	0	0	2	0	2	2	16	11	10	0	2	0	2	3	0	0
006H03W15.0-20	2.80	0	0	3	9	2	7	23	83	67	61	4	4	0	5	15	5	5
006H04W31.0-36	2.88	0	0	2	4	1	1	0	8	41	11	0	0	0	0	5	3	2
006H05W16-21.0	2.94	0	3	4	1	1	5	4	32	46	15	4	1	0	2	7	5	2
006H06W31.0-35.0	3.01	0	5	1	0	0	0	0	9	21	8	1	0	0	0	3	1	2
007H01W16-20	3.15	1	1	4	8	3	4	9	54	59	41	2	2	0	1	6	3	2
007H02W32-36	3.25	0	3	2	2	0	6	3	11	14	27	16	1	0	1	4	0	2
007H03W16-20	3.34	0	2	3	2	0	5	7	42	56	88	2	0	0	0	6	4	3
007H04W32-36	3.42	0	5	3	0	0	0	1	29	33	23	2	6	0	0	9	5	1
007H05W16-20	3.48	0	0	1	5	0	3	0	29	28	23	3	2	0	0	1	4	5
007H06W32-36	3.55	0	1	3	0	0	1	2	13	18	4	2	3	0	0	3	2	3
008H01W16-20	3.73	0	0	1	0	0	1	0	3	0	34	1	0	0	0	0	0	2
008H02W32-36	3.85	0	4	8	0	0	1	0	26	15	56	6	1	0	1	2	1	1
008H03W16-20	3.95	2	3	7	2	0	3	3	68	96	38	12	11	0	3	12	6	2
008H04W32-36	4.08	0	0	3	4	2	6	1	37	25	112	8	0	0	0	3	1	4
008H05W16-21.0	4.18	1	2	1	1	0	6	0	20	20	46	2	1	0	1	3	0	2
008H06W32-36	4.26	0	3	14	3	0	6	0	65	36	100	6	1	0	0	10	0	7
009H01W15.0-20	4.44	0	0	2	4	0	3	1	12	13	42	2	0	0	0	1	0	1
009H02W31.0-36	4.57	0	0	6	0	0	0	0	56	50	75	4	0	0	1	8	0	3
009H03W15.0-20	4.73	0	4	1	1	0	3	2	49	18	65	1	1	0	0	2	0	2
009H04W31.0-36	4.86	0	0	1	2	0	1	2	18	26	12	1	0	0	0	3	4	1
009H05W16-21.0	4.96	0	6	2	4	0	6	0	21	37	104	2	1	0	0	4	5	2
009H06W31.0-36	5.05	1	6	5	1	0	9	0	67	48	97	2	1	0	2	12	4	1
010H01W16-20	5.18	0	0	1	0	0	1	2	11	20	47	1	0	0	0	0	0	2
010H02W31.0-35.0	5.41	0	1	1	0	0	1	0	4	12	8	1	0	0	1	3	1	0
010H04W32-36	6.03	0	1	5	1	0	1	0	15	3	20	0	2	0	0	4	2	4
010H06W32-36	6.41	0	18	10	0	0	2	0	14	27	43	2	0	0	0	0	1	7
Total		24	124	180	125	17	152	274	1688	1555	2004	109	153	0	274	282	153	140

Appendix 1 (Continued)

Sample ID	Age [Ma]	<i>Eucyrtidium hexagonatum</i>	<i>Eucyrtidium teuscheri</i>	<i>Flustrella</i> spp.	<i>Heliodiscus asteriscus</i>	<i>Lamprocyclus maritialis</i>	<i>Lamprocyrtis hannai</i>	<i>Lamprocyrtis heteroporos</i>	<i>Lamprocyrtis neoheteroporos</i>	<i>Lamprocyrtis nigriniae</i>	<i>Larospira quadrangula</i>	<i>Litharacium tentorium</i>	<i>Lithocampe heptacola</i>	<i>Lithomelissa setosa</i>	<i>Lithomelissa thoracites</i>	<i>Lithomitra lineata</i>	<i>Lithopera (Lithopera) bacca</i>	<i>Spongurus cylindricus</i>	<i>Phormositochartus fistula</i>
001H02W32-36	0.10	1	2	61	3	8	1	1	0	2	4	1	6	3	25	17	0	10	0
001H04W32-36	0.25	0	2	68	5	16	2	0	0	1	1	0	9	0	63	83	1	11	0
001H-CC	0.40	0	3	68	4	4	0	0	0	1	0	0	5	0	27	50	1	19	0
002H02W32-36	0.48	1	0	35	6	1	1	0	0	0	0	0	2	0	28	45	0	4	0
002H04W32-36	0.64	1	0	21	2	3	0	1	0	0	0	0	3	0	20	27	0	3	0
002H06W32-36	0.80	5	0	52	8	19	0	0	0	0	1	1	9	0	20	23	0	9	0
003H01W16-20	0.90	0	2	12	11	15	0	0	0	0	0	0	3	0	1	2	0	1	0
003H02W32-36	1.01	1	1	41	1	21	1	0	0	0	0	0	5	0	17	29	0	2	1
003H03W16-20	1.07	0	1	33	5	1	2	1	0	0	0	0	1	0	2	23	1	3	0
003H04W32-36	1.17	0	0	26	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	1	0
003H05W16-20	1.24	0	0	1	3	2	1	0	0	0	0	0	3	0	1	7	0	1	0
003H06W32-36	1.34	1	2	52	6	8	2	0	0	0	0	1	0	0	10	62	0	1	1
003H-CC	1.50	4	2	150	6	24	2	2	0	0	0	0	13	0	13	12	6	8	1
004H02W32-36	1.60	4	0	32	2	12	0	3	0	0	0	0	4	9	7	25	7	4	0
004H03W16-20	1.67	1	1	83	8	48	0	4	0	0	0	2	2	0	37	258	0	6	0
004H04W32-36	1.77	0	1	34	0	1	0	0	0	0	0	1	0	12	7	53	1	2	0
004H05W16-20	1.86	8	0	229	14	4	2	13	0	1	2	3	14	91	43	72	17	15	2
004H06W32-36	1.97	1	4	56	6	5	0	2	0	0	0	0	6	13	19	34	2	6	0
005H01W16-20	2.20	1	7	48	4	6	1	2	0	0	0	0	7	23	7	124	2	8	5
005H02W32-36	2.28	0	0	16	2	2	0	0	0	1	0	1	1	7	3	30	4	1	0
005H03W16-20	2.34	19	19	111	6	15	13	10	0	0	0	6	30	0	2	165	0	41	5
005H04W32-36	2.41	2	1	31	3	1	1	1	0	0	0	0	6	0	0	17	0	4	0
005H05W16-20	2.46	1	0	13	1	4	1	3	0	0	0	0	4	9	8	62	0	1	2
005H06W32-36	2.53	3	3	30	4	11	1	5	0	0	0	1	2	7	16	33	1	4	3
006H01W15.0-20	2.67	2	7	78	4	1	0	7	0	0	3	2	20	20	38	70	6	14	2
006H02W31.0-36	2.75	0	1	19	3	3	0	0	0	0	0	0	10	10	6	21	0	3	1
006H03W15.0-20	2.80	3	2	82	15	24	3	2	0	0	4	1	19	12	40	93	0	11	3
006H04W31.0-36	2.88	1	2	51	8	8	2	2	0	0	1	0	5	4	11	21	1	2	2
006H05W16-21.0	2.94	6	1	73	15	6	5	2	0	0	6	1	10	7	17	18	2	4	4
006H06W31.0-35.0	3.01	3	1	54	9	6	2	2	0	0	0	0	1	2	3	8	0	3	0
007H01W16-20	3.15	6	0	82	18	9	1	1	0	0	0	0	19	24	25	62	1	9	1
007H02W32-36	3.25	1	0	15	4	4	1	0	0	0	0	0	3	4	6	33	1	1	2
007H03W16-20	3.34	1	4	93	11	1	0	0	0	0	0	1	16	39	17	129	0	12	0
007H04W32-36	3.42	5	5	94	6	4	5	0	0	0	1	2	8	5	6	37	4	14	3
007H05W16-20	3.48	3	0	65	3	3	5	4	0	0	0	0	12	11	5	28	0	6	0
007H06W32-36	3.55	0	4	40	6	6	5	0	0	0	0	0	6	2	1	13	2	1	0
008H01W16-20	3.73	1	0	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	0	1	1
008H02W32-36	3.85	0	0	46	16	5	5	0	0	0	0	0	2	1	3	62	2	7	0
008H03W16-20	3.95	2	3	82	10	11	17	3	0	0	1	0	16	4	8	21	14	6	0
008H04W32-36	4.08	0	2	38	5	5	1	0	0	0	0	4	2	8	22	50	1	4	1
008H05W16-21.0	4.18	0	1	18	2	3	2	0	0	0	1	2	2	6	1	53	1	11	0
008H06W32-36	4.26	1	1	72	17	7	8	0	0	0	0	1	19	14	18	112	5	22	2
009H01W15.0-20	4.44	0	1	25	2	0	1	0	0	0	0	0	0	3	5	42	0	1	1
009H02W31.0-36	4.57	0	0	68	19	10	10	0	0	0	0	1	11	2	10	48	4	4	0
009H03W15.0-20	4.73	0	0	21	10	8	0	0	0	0	0	0	4	10	4	23	4	3	1
009H04W31.0-36	4.86	0	1	38	3	1	1	0	0	0	0	0	4	2	2	15	12	2	0
009H05W16-21.0	4.96	1	1	42	7	8	2	0	0	0	0	0	3	16	12	71	3	14	1
009H06W31.0-36	5.05	1	5	88	9	21	1	0	0	0	2	0	14	4	16	61	3	25	9
010H01W16-20	5.18	0	3	23	4	0	1	0	0	0	0	0	0	8	9	14	0	2	1
010H02W31.0-35.0	5.41	0	1	29	4	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	7	0	1	0
010H04W32-36	6.03	0	1	68	10	3	0	0	0	0	3	1	0	4	8	24	4	16	6
010H06W32-36	6.41	1	3	90	10	4	0	0	0	0	0	1	1	2	1	15	0	9	0
Total		92	101	2805	345	412	109	71	0	6	31	35	343	398	673	2430	113	373	61

シャツ キーライズ, 後期新生代の放散虫群集

Appendix 1 (Continued)

Sample ID	Age [Ma]	<i>Phormostichoartus corbula</i>	<i>Phormostichoartus doliolium</i>	<i>Pseudodictyophimus gracilitipes</i>	<i>Saturnalis circularis</i>	<i>Spongaster pentas</i>	<i>Spongaster tetras irregularis</i>	<i>Spongaster tetras tetras</i>	<i>Spongopyle osculosa</i>	<i>Spongotrochus glacialis</i>	<i>Stichocorys peregrina</i>	<i>Stichopilium bicornae</i>	<i>Syloclamydium</i> spp.	<i>Sylocliticya</i> spp.	<i>Theocorys creticum</i>	<i>Theocorythium dianae</i>	<i>Theocorythium vetulum</i>	<i>Tricolocapsa papillosum</i>
001H02W32-36	0.10	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	3	8	2	5	0	2
001H04W32-36	0.25	1	0	2	0	0	2	0	1	1	0	0	4	7	7	4	0	7
001H-CC	0.40	0	0	4	0	0	3	0	27	0	0	1	10	8	3	2	0	9
002H02W32-36	0.48	0	0	1	1	0	1	0	15	0	0	0	2	6	0	1	0	4
002H04W32-36	0.64	0	0	1	0	0	0	1	3	0	0	0	3	0	2	1	0	4
002H06W32-36	0.80	1	0	0	0	0	0	1	11	0	0	0	5	7	2	1	0	14
003H01W16-20	0.90	0	0	0	0	0	0	0	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0
003H02W32-36	1.01	0	0	1	0	0	4	4	17	0	1	1	2	0	2	0	0	4
003H03W16-20	1.07	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	4	0	0	3
003H04W32-36	1.17	0	0	1	0	0	0	1	4	0	0	0	4	1	0	0	0	2
003H05W16-20	1.24	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1
003H06W32-36	1.34	3	0	1	0	0	1	0	3	0	0	0	3	0	7	1	0	10
003H-CC	1.50	0	0	1	0	0	3	0	9	0	0	0	18	4	3	6	0	8
004H02W32-36	1.60	4	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	5	4	4	17	2	5
004H03W16-20	1.67	15	0	4	0	1	0	0	16	0	0	0	8	3	15	0	0	41
004H04W32-36	1.77	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	1	1	1	0	0	3
004H05W16-20	1.86	13	0	12	3	0	0	0	21	0	0	4	28	2	17	16	1	22
004H06W32-36	1.97	3	0	7	1	0	0	0	10	0	0	0	2	7	8	1	0	7
005H01W16-20	2.20	4	0	2	0	0	0	0	11	0	1	0	2	7	6	5	1	20
005H02W32-36	2.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	6	0	1	3
005H03W16-20	2.34	4	0	19	3	0	0	1	20	2	1	1	16	22	37	6	1	40
005H04W32-36	2.41	1	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	2	2	0	6	5	1
005H05W16-20	2.46	4	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	4	2	4	0	0	7
005H06W32-36	2.53	0	0	2	0	0	0	0	10	0	0	1	5	3	6	0	0	9
006H01W15.0-20	2.67	4	0	9	0	0	0	0	15	3	0	2	19	3	5	3	4	12
006H02W31.0-36	2.75	0	0	3	0	0	0	0	3	1	0	1	5	2	2	0	1	5
006H03W15.0-20	2.80	3	0	5	2	0	0	0	34	1	1	0	22	6	21	2	0	20
006H04W31.0-36	2.88	1	0	1	0	0	0	0	8	0	0	0	11	4	2	3	1	1
006H05W16-21.0	2.94	1	0	5	0	0	0	0	11	0	2	0	24	9	4	1	0	11
006H06W31.0-35.0	3.01	0	0	0	0	0	0	0	19	2	1	0	16	4	1	0	3	2
007H01W16-20	3.15	1	0	2	0	0	0	0	28	3	35	0	29	18	3	2	6	12
007H02W32-36	3.25	0	0	4	0	0	1	0	16	6	9	1	2	5	4	0	0	5
007H03W16-20	3.34	2	0	1	2	0	0	0	7	1	48	0	11	8	6	0	0	32
007H04W32-36	3.42	0	0	0	0	0	0	0	29	6	5	0	20	11	3	0	12	13
007H05W16-20	3.48	2	0	2	1	0	0	0	17	1	9	0	8	9	3	0	3	5
007H06W32-36	3.55	0	0	2	2	0	0	0	13	3	25	0	7	3	0	0	9	0
008H01W16-20	3.73	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
008H02W32-36	3.85	1	0	0	1	0	0	0	4	1	22	0	3	6	1	0	2	6
008H03W16-20	3.95	2	0	3	3	0	0	0	3	2	37	0	7	9	6	0	3	6
008H04W32-36	4.08	1	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	1	5	0	3	12
008H05W16-21.0	4.18	0	0	0	0	0	0	0	7	2	7	0	1	0	0	1	0	8
008H06W32-36	4.26	2	0	4	0	0	0	0	5	0	139	0	8	12	12	0	7	5
009H01W15.0-20	4.44	0	0	0	0	0	0	0	1	0	28	0	0	1	0	1	0	5
009H02W31.0-36	4.57	0	0	2	0	0	0	0	3	0	179	0	4	1	7	0	0	20
009H03W15.0-20	4.73	1	0	1	0	0	0	0	20	0	57	0	1	0	4	1	3	7
009H04W31.0-36	4.86	0	0	0	1	0	0	0	2	0	107	0	0	3	1	1	4	1
009H05W16-21.0	4.96	0	0	0	0	0	0	0	16	0	118	0	0	0	6	0	5	11
009H06W31.0-36	5.05	4	1	4	0	0	0	0	9	0	162	0	1	3	14	0	9	14
010H01W16-20	5.18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	42	0	1	0	4	0	0	6
010H02W31.0-35.0	5.41	0	0	0	0	0	0	0	3	0	36	0	0	5	0	0	0	0
010H04W32-36	6.03	2	0	1	0	0	0	0	1	0	112	0	3	2	4	0	0	3
010H06W32-36	6.41	0	0	2	2	0	0	0	27	0	156	0	4	9	3	0	4	6
Total		80	1	111	22	1	16	8	520	36	1350	13	336	228	257	87	91	454

Explanation of plates

Plate 1

1. *Actinomma boreale* Cleve
(Sample 1210A-02H-06W)
2. *Actinomma medianum* Nigrini
(1210A-02H-06W)
- 3–5. *Sphaeropyle langii* Dreyer
(3: 1210A-04H-05W, 4: 1210A-03H-CC, 5: 1210A-07H-06W)
6. *Thecosphaera inerme* Haeckel
(1210A-06H-CC)
7. *Thecosphaera dedoensis* Nakaseko
(1210A-03H-CC)
8. *Thecosphaera* sp. A
(1210A-01H-02W)
- 9–12. *Didymocyrtis tetrathalamus* (Haeckel)
(9: 1210A-06H-CC, 10: 1210A-06H-01W, 11: 1210A-01H-04W, 12: 1210A-03H-CC)
13. *Heliodiscus asteriscus* Haeckel
(1210A-04H-03W)
- 14–15. *Larcospira quadrangula* Haeckel
(14: 1210A-01H-02W, 15: 1210A-06H-01W)
16. *Tetrapyle octacantha* Müller
(1210A-06H-CC)
- 17–19. *Larcopyle buetschlii* Dreyer
(17: 1210A-04H-03W, 18: 1210A-01H-02W, 19: 1210A-03H-CC)
20. *Larcopyle decens* (Kozlova)
(1210A-06H-CC)
- 21a, b. *Pylospyra* sp.
(1210A-06H-CC)
22. *Circodiscus microporus* (Stöhr)
(1210A-06H-CC)
23. *Phorticium pylonium* Haeckel
(1210A-06H-CC)

Plate 2

1. *Spongotrochus glacialis* Popofsky
(1210A-06H-01W)
2. *Amphirhopalum ypsilon* Haeckel
(1210A-06H-C)

3. *Dictyocoryne truncatum* Ehrenberg
(1210A-01H-02W)
- 4–6. *Spongodiscus osculosa* (Dreyer)
(4: 1210A-03H-CC, 5: 1210A-04H-03W, 6: 1210A-07H-06W)
7. *Spongaster pentas* Riedel et Sanfilippo
(1210A-04H-03W)
8. *Spongaster tetras irregularis* Nigrini
(1210A-01H-04W)
9. *Spongaster tetras tetras* Ehrenberg
(1210A-07H-06W)
- 10, 11. *Spongurus cylindricus* Haeckel
(10: 1210A-01H-02W, 11: Sample 1210A-04H-03W)
- 12, 13. *Axoprunum angelinum* (Campbell et Clark)
(12: 1210A-04H-03W, 13: 1210A-02H-06W)
- 14, 16. *Stylocontarium bispiculum* (Popofsky)
(14: Sample 1210A-04H-03W, 16: 1210A-06H-CC)
15. *Stylocontarium acquilonium* (Hays)
(1210A-04H-03W)
17. *Hexacontium arachnoidale* Holland et Enjumet
(1210A-06H-CC)
18. *Sartunalis circularis* (Haeckel)
(1210A-08H-03W)
19. *Hexacontium multiporum* Vinassa
(1210A-01H-02W)

Plate 3

- 1, 2. *Lithomelissa setosa* Jørgensen
(1210A-04H-05W)
3. *Lithomelissa thoracites* (Haeckel)
(1210A-04H-05W)
4. *Lophophaena hispida* (Ehrenberg)
(1210A-04H-05W)
- 5–7. *Pseudodictyophimus gracilipes* (Bailey)
(1210A-04H-05W)
8. *Botryocampe inflata* (Bailey)
(1210A-04H-05W)
- 9, 10. *Lithobotrys cribrosa* Ehrenberg group
(9: 1210A-04H-05W, 10: 1210A-04H-03W)
11. *Gondowanaria campanulaeformis* (Campbell et Clark)
(1210A-07H-06W)

- 12, 13. *Eucyrtidium acuminatum* (Ehrenberg)
(12: 1210A-03H-CC, 13: 1210A-08H-03W)
14. *Eucyrtidium hexagonatum* (Haeckel)
(1210A-08H-03W)
15. *Eucyrtidium calvertense* Martin
(1210A-03H-CC)
- 16, 17. *Lithopera (Lithopera) bacca* Ehrenberg
(16: 1210A-03H-CC, 17: 1210A-08H03W)
- 18, 19 *Stichocorys peregrina* (Riedel) forma “cold”
(18: 1210A-08H-03W, 19: 1210A-06H-CC)
20. *Stichocorys peregrina* (Riedel) forma “tropical”
(1210A-06H-CC)
- 21, 22. *Lithocampe heptacola* Haeckel
(21: 1210A-06H-01W, 22: 1210A-03H-CC)
- 23, 24. *Theocorys creticum* (Ehrenberg)
(23: 1210A-04H-03W, 24: 1210A-04H-05W)
25. *Cyrtolagena cuspidatus* (Bailey)
(1210A-04H-05W)
- 26, 27. *Cornutella profunda* Ehrenberg
(26: 1210A-01H-04W, 27: 1210A-04H-05W)
- 28, 29. *Cycladophora cornuta* (Bailey)
(28: 1210A-04H-03W, 29: 1210A-06H-CC)
- 30–32. *Cycladophora davisiana* Ehrenberg
(30. 1210A-04H-05W, 31:1210A-04H-03W, 32: Sample
1210A-04H-05W)
- 33–35. *Cycladophora pliocenica* Lombardi et Lazarus
(33: 1210A-04H-03W, 34 and 35: 1210A-04H-05W)
- 36–37. *Cycladophora pliocenica* Lombardi et Lazarus (?)
(1210A-08H-03W)
38. *Stichopilium bicorne* Haeckel
(1210A-04H-05W)
39. *Litharacnium tentorium* Haeckel
(1210A-04H-05W)

Plate 4

- 1–4. *Bathropyramis quadrata* Haeckel
(1: 1210A-04H-03W, 2: 1210A-04H-03W, 3: 1210A-06H-
CC, 4: 1210A-08H-03W)
5. *Botryostrobos aquilonaris* (Bailey)
(1210A-01H-04W)

- 6–9. *Botryostrobos auritus/australis* (Ehrenberg)
(6: 1210A-01H-02W, 7: 1210A-04H-05W, 8: 1210A-04H-
03W, 9: 1210A-03H-CC)
10. *Phormostichoartus corbula* (Harting)
(1210A-04H-05W)
- 11, 12. *Artostrobos annulatus* (Bailey)
(1210A-04H-05W)
13. *Artostrobos joergensei* Petrushevskaya
(1210A-09H-06W)
14. *Siphocampe lineata* (Ehrenberg)
(1210A-04H-05W)
15. *Tricolocapsa papillosum* (Ehrenberg)
(1210A-04H-03W)
- 16, 20. *Botryostrobos seriatus* (Jørgensen)
(16: 1210A-06H-01W, 20: 1210A-04H-05W)
17. *Carpocanium solitarium* Ehrenberg
(1210A-06H-CC)
- 18, 19. *Carpocanium diadema* Haeckel
(18: 1210A-08H-03W, 19: Sample 1210A-01H-02W)
- 21, 24. *Theocorythium diana* Haeckel
(21: 1210A-03H-CC, 24: 1210A-04H-05W)
- 22, 27. *Theocorythium vetulum* Nigrini
(22: 1210A-04H-03W, 27: 1210A-08H-03W)
- 23, 25, 26. *Lamprocyclus maritalis* Haeckel
(23: 1210A-01H-02W, 25: 1210A-01H-04W, 26: 1210A-04H-
03W)

Plate 5

- 1, 2. *Anthocyrtidium ophirensense* (Ehrenberg)
(1: 1210A-06H-01W, 2: 1210A-02H-06W)
3. *Anthocyrtidium zanguebaricum* (Ehrenberg)
(1210A-04H-05W)
4. *Lamprocyrtis hannai* (Campbell et Clark)
(1210A-08H-03W)
- 5–7. *Lamprocyrtis heteroporos* (Hays)
(5: 1210A-03H-CC, 6: 1210A-04H-03W, 7: 1210A-04H-03W)
8. *Lamprocyrtis nigrinia* (Caulet)
(1210A-01H-CC)

Plate 1

