

中部北太平洋のセジメント・トラップ試料にみられる 放散虫沈降群集の季節変化と緯度変化

中戸章友¹・本山 功²・川幡穂高³

Akitomo Nakato, Isao Motoyama and Hodaka Kawahata (2005) Seasonal and latitudinal changes of radiolarian sinking population in sediment trap samples from the central North Pacific. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 56(5/6), p.225 - 236, 5 figs., 2 tables.

Abstract: Fluxes of polycystine Radiolaria were examined to clarify temporal and regional variations in production and percentage assemblages in relation to hydrographic conditions. Three time-series sediment traps were deployed in the central North Pacific along 175°E for about one year, beginning in June 1993. The trap sites were located in the subarctic, the transitional, and the subtropical water masses.

Temporal fluxes of polycystines showed large variations during the experiment. In the subarctic water mass, high polycystine fluxes were observed during summer to fall, while in the transitional and subtropical regions any relationship was not seen between the polycystine fluxes and sea surface temperature. High polycystine fluxes observed from the subarctic and transition zones can probably be ascribed to high food availability. The polycystine annual mean flux through the experiment was highest at the subarctic site, while that of the transition site was lower than that of the subtropical site. This pattern does not parallel the latitudinal variation in the total mass, opal or organic matter fluxes recorded from the same experiments.

The relative abundance of most of the families did not vary much during the experiment at each site; i.e., polycystine faunal composition remains fairly stable in each oceanic climatic zone. This is likely to be because most polycystine radiolarians are produced in the depths where there is little seasonal environmental change. Latitudinal changes of total polycystine assemblages of the three sites are clear. Plagiacanthidae dominate the assemblage from the subarctic site, and Actinommidae become abundant in the assemblage from the transitional zone. No single family dominates the total assemblage from the subtropical region. These faunal differences between the climatic zones probably relate to differences in temperature of the water at depths of 50-200 m where most polycystines live. Consequently, the percentage abundance of sinking polycystine radiolarians retain a great deal of environmental information on the water masses below the seasonal thermocline in each climatic zone, but possibly do not record much information about seasonal oceanographic changes in the surface layer above the seasonal thermocline.

Keywords: faunal composition, flux, North Pacific, planktic foraminifera, Radiolaria, sediment trap

要 旨

北太平洋中緯度域の3つの海洋気候区、亜北極域、漸移帯域、亜熱帯域において同時に実施された3地点のセジメント・トラップのPolycystina目放散虫フラックスについて検討した。亜北極域では夏期に生産性が高まる。漸移帯域と亜熱帯域では表層水温の季節変化と生産性の間に特定の関連性は見られなかった。Polycystinaの年間フラックスを海洋気候区間で比較すると、亜北極域で最も高く、亜熱帯よりも漸移帯の方

で低い値を示す。この大小の順序は、全粒子、オパール、有機物のフラックスの地点間の大小関係と一致していない。個々の水域内においては科レベルの群集組成に顕著な季節変化はみられず、年間を通じてむしろ安定している。各々の気候区内では季節変化に乏しいということは、放散虫がおもに季節的水温変化の影響を受けない水深に生息していることによると考えられる。水域間では年間の科レベルの群集組成に顕著な違いが認められた。亜北極域ではPlagiacanthidae科が卓越し、漸移帯域ではActinommidae科の割合が多い。亜

¹(株)日興建設コンサルタント(Nikko Kensetsu Consultant, Ltd., 3-44-3, Iso, Urasoe, Okinawa 901-2132, Japan)

²筑波大学大学院生命環境科学研究科 (Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan) / 地質情報研究部門 客員研究員 (Institute of Geology and Geoinformation, GSI)

³東京大学海洋研究所 (Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 1-15-1, Minamidai, Nakanoku, Tokyo 164-8639, Japan) / 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, GSI)

熱帯域では特に優勢になる科はみられない。このような海洋気候区間での群集の顕著な違いはおそらく水温の違いが一義的に効いているためであろう。ただし、放散虫群集組成がおもに反映しているのは、季節温度躍層以深の水塊の違いであって、季節温度躍層以浅の表層水の季節変動ではないものと考えられる。

1. はじめに

有殻原生動物である放散虫は極海域から熱帯海域まで幅広く分布し、生息深度も表層から数1,000 mにまで及び、様々な種が様々な環境に適応していることから広く古環境解析に用いられている（例えば、Sancetta, 1978; Hays *et al.*, 1989; Pisias *et al.*, 1997）。こうした古環境解析の基礎となるのは今日の海洋における生態学的な情報であることから、著者らは主に種レベルから群集レベルの生態、地理的变化と季節変化について理解を深めようとしているところであり、本論ではセジメント・トラップ観測に基づく研究成果について報告する。

セジメント・トラップは、海洋中を沈降してくる粒子（セジメント）を捕集（トラップ）して、その沈降量や時間変動を明らかにするための海中係留装置であり、1970年代に開発されて以降改良が進められ、1年ほどの係留期間中に13～25分画した試料（25分画で1試料が約2週間分）を連続して収集することが可能である（海洋調査技術学会, 1993）。海水中を沈降してきてセジメント・トラップに捕集される物質は、有機物や骨格などの海洋生物による生物起源物質から黄砂などの風成塵や降下火山灰まで様々である。このうち放散虫に関しては、生産量、繁殖期、季節変化、エルニーニョなどの異常気象との関連、殻の沈降速度や溶解過程など多くの生態学的な情報が明らかにされている（例えばTakahashi, 1983, 1987, 1991, 1997; Takahashi and Honjo, 1983）。

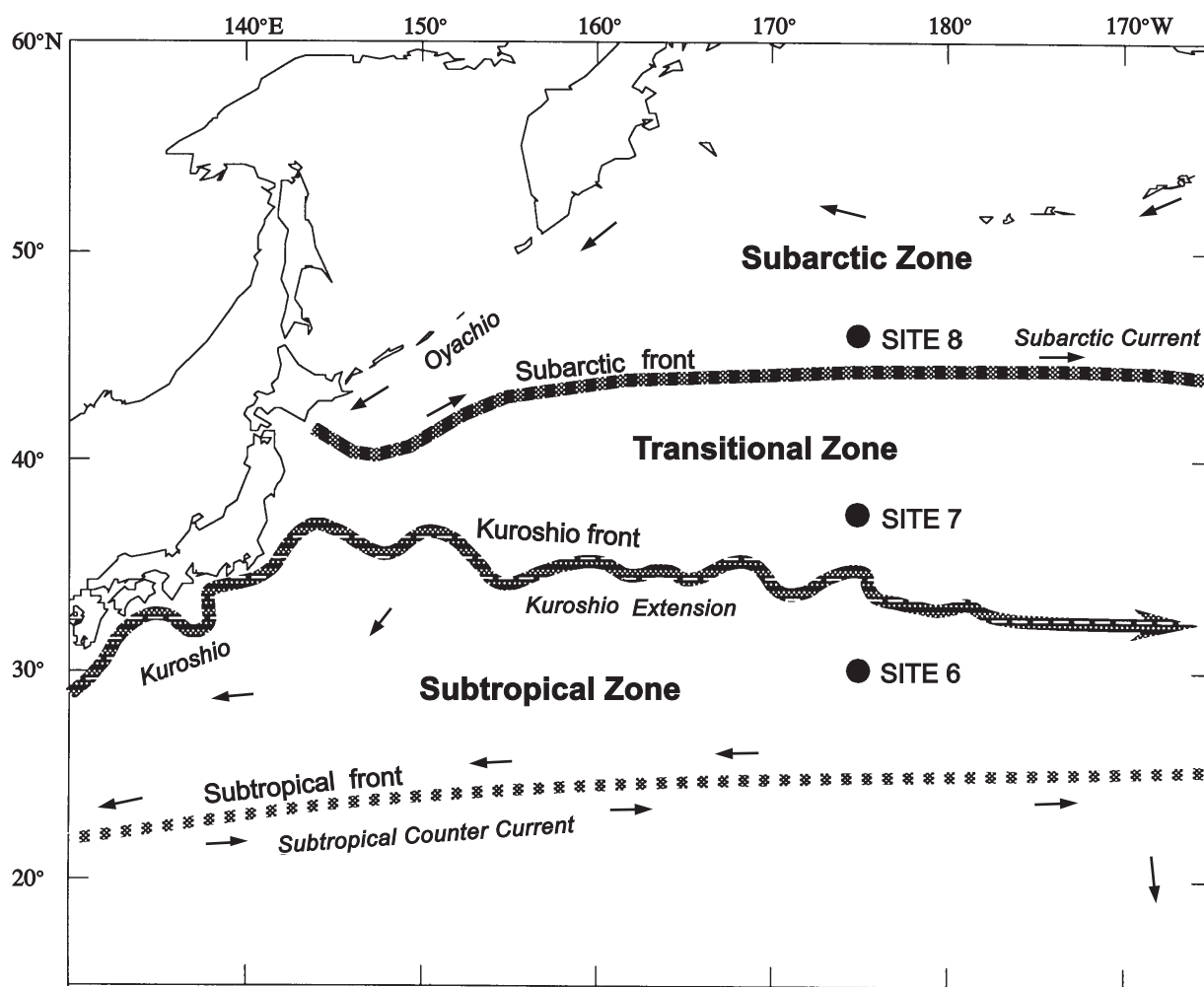
このようにセジメント・トラップによる観測は放散虫の生態学的・堆積学的の研究にとって有効な手法である。本研究では1993～1994年にかけて北太平洋中部の東経175度線上に設置された3地点のセジメント・トラップに捕捉された沈降粒子を用いて、放散虫の生産性と群集組成の季節変動と緯度変化の一端を明らかにする。そして放散虫群集に記録される海洋環境情報について考察を加える。これらのセジメント・トラップは同時に3つの海洋気候区（亜寒帯、漸移帯、亜熱帯）にそれぞれ設置されたものであり、異なる気候区での放散虫の時間的空間的な変化を解明するのに適した条件を備えている。

2. 試料と方法

トラップの設置地点は、北から測点8（46°07'N, 175°01'E, 水深1,412 m）、測点7（37°24'N, 174°56'E, 水深1,482 m）、測点6（30°00'N, 174°59'E, 水深3,873 m）であり（第1図）、係留期間はいずれも1993年6月から約1年間である（第1, 2表）。各トラップカップには、深層水の濾過海水にほう酸ナトリウム（pH > 8）とホルムアルデヒド（3%）を溶かしたものが満たされていた。回収されたサンプルボトルは船上ですぐに約2～4℃で冷蔵保存された。その後、試料は1 mm以上の粒子を除いた後に回転式スプリッターにより16分割され、そのうちのひとつが放散虫分析用とされた。16分の1でも個体数が多すぎる場合には更に分割した。ふるいを用いて63 μm以上の粒子だけを抽出し、これを弱い過酸化水素水と塩酸でクリーニングして洗浄した。洗浄後の試料を吸引濾過装置を用いてメンブレンフィルター（孔径0.45 μm, 直径25 mm）上に定着させ、自然乾燥後にスライドガラス上に置いてバルサムを用いて封入した。同定・計数には光学生物顕微鏡を用いた。ただし、測点8の試料については孔径355 μmのふるいを用いてサイズ分割を行い、63～355 μmの粒度のスライドと355 μm～1 mmの粒度のスライドを分けて作成した（第1表）。

放散虫亜綱のうち本研究では堆積層中に化石として保存されやすいPolycystina目を対象とした。放散虫の中でもPhaeodaria目とAcantharia目はほとんどあるいはまったく化石として残存しないので、一般に放散虫化石といえばPolycystina目のことを指す。Polycystina目はSpumellaria亜目とNassellaria亜目に分けられ、本研究ではそれらを更に科レベルに識別して計数した。

放散虫は種数が多く、現生種数は500種にも及ぶと言われている。例えば、Takahashi (1991)は3地点のセジメント・トラップからPolycystina目約360の分類群とPhaeodaria目約60の分類群の合計420分類群を報告している。したがって、本研究で用いた海洋気候区の異なる3地点のセジメント・トラップからも合計で300～400程度の種・亜種が産出するものと予想された。そのような膨大な種の同定は、よほど熟練した研究者でなければ難しいため、我々はまず、高次分類群について同定を行い、その中で、季節的に顕著な変動を示すグループを見極めて分類群を絞り込んだ後に、低次分類群での検討へ移行しようと考えている。つまり、本研究の課題は「明瞭な季節性を示す高次分類群グループの見極め」と表現できる。そして、次のステップでは「選定された高次分類群グループ内での種レベルの検討」が課題になるものと思われる。ほとんどの（おそらく全ての）放散虫研究では、100を超す種の中



第1図 セジメントトラップ係留地点と海洋表層部の構造。

Fig. 1 Index map showing location of sediment trap sites and hydrography of the upper layer of the North Pacific Ocean.

第1表 測点8のサンプルリスト, 試料分割数, 及び Polycystina 目放散虫の計測個体数とフラックス。

Table 1 Sample list, sample division, number of polycystine shells counted and estimated fluxes of polycystines of Site 8.

Sample	Trap cup		Duration (days)	0.063-0.355 mm size		0.355-1 mm size		Total polycystine flux (shells m ⁻² day ⁻¹)
	Open	Close		Division	Polycystines counted	Division	Polycystines counted	
Site 8								
ET106	16 Jun.93	30 Jun.93	15	64	563	16	41	4892
ET107	1 Jul.93	31 Jul.93	31	256	580	64	47	9773
ET108	1 Aug.93	31 Aug.93	31	256	461	64	110	8068
ET109	1 Sep.93	30 Sep.93	30	256	819	64	213	14886
ET110	1 Oct.93	31 Oct.93	31	256	846	64	43	14150
ET111	1 Nov.93	30 Nov.93	30	256	531	64	193	9886
ET112	1 Dec.93	15 Dec.93	15	64	778	16	434	7565
ET113	16 Dec.93	31 Dec.93	16	32	914	16	231	4118
ET114	1 Jan.94	15 Jan.94	15	32	875	16	86	3917
ET115	16 Jan.94	31 Jan.94	16	16	1367	16	61	2856
ET116	1 Feb.94	15 Feb.94	15	32	857	16	58	3780
ET117	16 Feb.94	28 Feb.94	13	32	629	16	82	3298
ET118	1 Mar.94	15 Mar.94	15	64	403	16	122	3699
ET119	16 Mar.94	31 Mar.94	16	64	174	16	19	1430
ET120	1 Apr.94	15 Apr.94	15	64	286	16	86	2624

第2表 測点7と測点6のサンプルリスト, 試料分割数, 及び Polycystina 目放散虫の計測個体数とフラックス.

Table 2 Sample list, sample division, number of polycystine shells counted and estimated fluxes of polycystines of Sites 7 and 6.

Sample	Trap cup		Duration (days)	0.063-1 mm size		Total polycystine flux (shells m ⁻² day ⁻¹)
	Open	Close		Division	Polycystines counted	
Site 7						
ET64	1 Jun.93	15 Jun.93	15	64	804	6861
ET65	16 Jun.93	30 Jun.93	15	64	717	6118
ET66	1 Jul.93	15 Jul.93	15	32	1005	4288
ET67	16 Jul.93	31 Jul.93	16	32	781	3124
ET68	1 Aug.93	15 Aug.93	15	32	754	3217
ET69	16 Aug.93	31 Aug.93	16	64	889	7112
ET70	1 Sep.93	15 Sep.93	15	32	998	4258
ET71	16 Sep.93	30 Sep.93	15	16	1581	3373
ET72	1 Oct.93	15 Oct.93	15	16	276	589
ET73	16 Oct.93	31 Oct.93	16	32	1113	4452
ET74	1 Nov.93	15 Nov.93	15	32	1921	8196
ET75	16 Nov.93	30 Nov.93	15	32	1581	6746
ET76	1 Dec.93	15 Dec.93	15	32	1523	6498
ET77	16 Dec.93	31 Dec.93	16	32	857	3428
ET78	1 Jan.94	15 Jan.94	15	16	595	1269
ET79	16 Jan.94	31 Jan.94	16	16	1022	2044
ET80	1 Feb.94	15 Feb.94	15	16	1428	3046
ET81	16 Feb.94	28 Feb.94	13	16	1370	3372
ET82	1 Mar.94	15 Mar.94	15	32	767	3273
ET83	16 Mar.94	31 Mar.94	16	64	962	7696
ET84	1 Apr.94	9 Apr.94	9	32	435	3093
Site 6						
ET43	16 Jun.93	30 Jun.93	15	8	3519	3754
ET44	1 Jul.93	31 Jul.93	31	32	2735	5646
ET45	1 Aug.93	31 Aug.93	31	32	2570	5306
ET46	1 Sep.93	30 Sep.93	30	32	2226	4749
ET47	1 Oct.93	31 Oct.93	31	32	1460	3014
ET48	1 Nov.93	30 Nov.93	30	32	2066	4407
ET49	1 Dec.93	15 Dec.93	15	32	1350	5760
ET50	16 Dec.93	31 Dec.93	16	32	2756	11024
ET51	1 Jan.94	15 Jan.94	15	32	1451	6191
ET52	16 Jan.94	31 Jan.94	16	16	4936	9872
ET53	1 Feb.94	15 Feb.94	15	32	1409	6012
ET54	16 Feb.94	28 Feb.94	13	32	1531	7537
ET55	1 Mar.94	15 Mar.94	15	32	1543	6583
ET56	16 Mar.94	31 Mar.94	16	16	2057	4114
ET57	1 Apr.94	15 Apr.94	15	16	2398	5116
ET58	16 Apr.94	30 Apr.94	15	16	2446	5218
ET59	1 May.94	15 May.94	15	16	663	1414
ET60	16 May.94	31 May.94	16	16	463	926

で限られた種のデータしか示されていない。そして、それらの研究では、「限られた種」を選ぶ基準は、「よく知られた種」であったり「同定しやすい種」であったり「産出頻度が高い種」であったり様々であり、「選ばれなかった分類群」については何のデータも示されない（同定不能だったのか、種ごとの産出量が少なかったためなのかも分からない）のが通例である。我々も同様に、変動パターンを効率よく抽出するために、なんらかの基準を設けて、同定する種を選別する

必要性に迫られている。本研究では「同定すべき種の選別」の基準を、上述のように「明瞭な季節性を示す高次分類群(科レベル)」とした。このような選別法は、「選ばれなかった分類群」についても精度は粗いが群集構造の完全なデータセットを提供するとともに、選ばれなかった理由を説明できるといった長所があると思われる。蛇足になるが、放散虫の属の分類の多くは、極めて人為的な性格が強く、自然の系統関係を十分に反映しているとは言い難いため、属レベルでの同定を導

入することは困難であった。

科レベルの分類は基本的に Riedel and Sanfilippo (1977)に従ったが, Actinommidae科とCoccodiscidae科はSanfilippo and Riedel (1980)の定義に, Plagiacanthidae科はPetrushevskaya (1971a)の定義に準じた。ただし, 同定時の混同により, Phacodiscidae, Spongodiscidae, Pyloniidae, Litheliidae, Tholoniidaeの5科は適切に区別できなかったため other Spumellariaに一括し, 同様にCarpocaniidae, Artostrobiidae, Cannobotrythidaeの3科は other Nassellariaに一括した。結果的に, これらの科の占める割合は高くはなかったため, 考察や結論の大勢に影響はないものと判断した。放散虫のフラックス(単位時間内に単位面積を通過する量: shells $m^{-2} day^{-1}$)は, スライド中の計測個体数, 試料分割数, 捕集装置の開口径(0.5 m^2)と分画日数を考慮して算出した。

3. 海洋学的背景

中緯度北太平洋表層水は, 等温線が緯度線にほぼ平行に分布し, 亜北極前線(亜寒帯前線)と黒潮前線によって3つの大きな水域(亜北極域, 漸移帯域, 亜熱帯域)に区分される(第1図)。亜北極前線は北緯41~44度付近に, 黒潮前線は北緯31度付近に位置する。本州南岸沿いには黒潮が流れ, その房総半島沖への延長部は黒潮続流と呼ばれる。黒潮前線はこの黒潮続流の北側に接して黒潮続流と平行にのびる。

本論文では表層水温(SST)として船舶・衛星資料をもとにした週平均, 緯度経度 1×1 度の海面水温データを用いる(Reynolds and Smith, 1994)。また, Levitus and Boyer (1994)の表層0 mから300 mまでの水温分布図を引用した。測点8は亜北極域に位置し, 係留期間の表層水温は3.6 $^{\circ}C$ から11.8 $^{\circ}C$ まで変化し(第2A-c図), 8月に最大となり1~4月には低温状態が続いた。測点7は漸移帯域に位置し, 係留期間の表層水温は12.1~23.4 $^{\circ}C$ であった(第2B-c図)。表層水温は8月に最大で, 2月から4月までは12~13 $^{\circ}C$ の状態が続いた。測点6は亜熱帯域に位置し, 係留期間の表層水温は17.9~27.1 $^{\circ}C$ で(第2C-c図), 7月から9月にかけて26 $^{\circ}C$ 前後と高く, 1~4月は18~20 $^{\circ}C$ と安定していた。表層300 mに関しては, いずれの測点においても7~11月の期間に, 水深30~60 m付近に季節水温躍層が現れ, 冬季には消失する(第2A-d, 2B-d, 2C-d図)。

本研究ではこれらの表層水温の変動に基づいて, 海洋の「四季」を以下のように区分した。すなわち, 春季は4月後半から7月前半までの昇温期, 夏季は7月後半から10月前半までの高温期, 秋季は10月後半から1月前半までの減温期, 冬季は1月後半から4月前半までの低温期である。

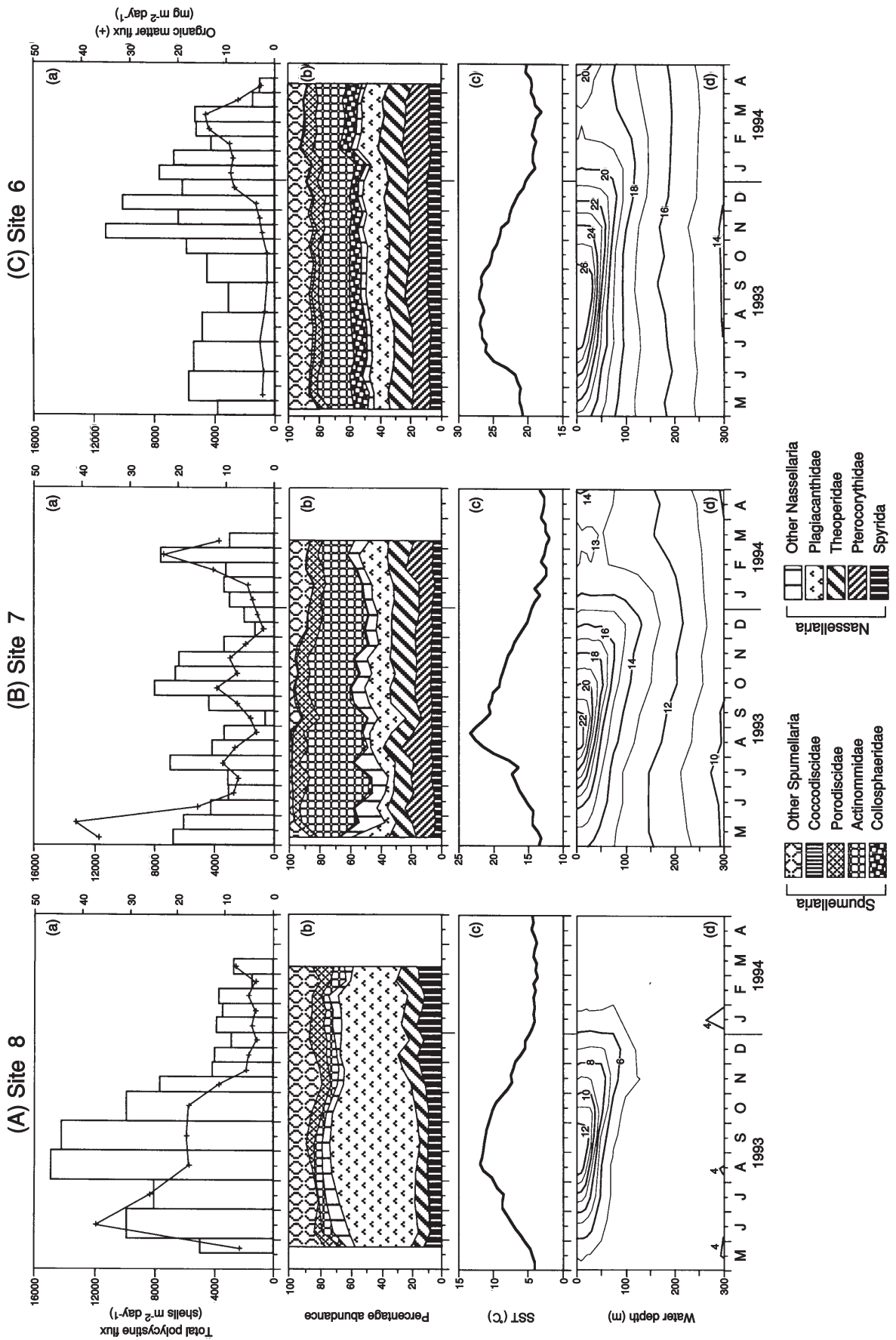
4. 結果

捕集された放散虫殻の保存状態は3つの測点のいずれの試料においても良好であった。第2図にはそれぞれの測点におけるPolycystina目フラックスの季節変動をヒストグラムで示した。Polycystina目放散虫の大部分の個体は水深0~300 mに生息している(Petrushevskaya, 1971b; Kling, 1979)。そこで, 水深0~300 mにおける放散虫の生息時期とトラップに捕集される時期との間には, 沈降時間分の時間的なずれが発生する。放散虫の沈降速度についてはTakahashi (1997)により175~200 $m day^{-1}$ とされる。この沈降速度を用いると放散虫はその死後, 水深1,400 mにまで到達するのに7~8日, 水深3,800 mまででは19~22日必要と考えられる。また, Takahashi (1983)をもとに放散虫の平均的な寿命を2~6週間とした。これらを考慮した上で生産時期と採集時期の時間差を測点8(水深1,412 m)と測点7(水深1,482 m)では1か月, 測点6(水深3,873 m)では1か月半と推定した。第2図では, これらの沈降時間を考慮して, 1か月または1か月半のずれを戻して表示してある。以下, まず各測点ごとにフラックスと百分率群集組成の季節変化について述べる。

測点8: Polycystina目フラックスは8月に最大値14,886 shells $m^{-2} day^{-1}$ を, 2月後半に最低値1,430 shells $m^{-2} day^{-1}$ を示し, 6月から11月前半にかけて高い値を示した(第1表, 第2A-a図)。年間を通じてSpumellaria亜目に比べて相対的にNassellaria亜目が多く, どの時期にもNassellaria亜目がPolycystina目全体の約70%を占める(第2A-b図)。その中では特にPlagiacanthidae科が多く, それだけでNassellaria亜目の約70%を占める。Porodiscidae科が7月に減少するのを除けば, 科レベルの群集組成にはあまり明瞭な季節変化が認められない。

測点7: Polycystinaフラックスの高い期間は5月前半, 7月後半, 10月前半~11月前半, 2月後半に認められ, 最大値8,196 shells $m^{-2} day^{-1}$ は10月前半に現れた(第2表, 第2B-a図)。9月前半に最低値589 shells $m^{-2} day^{-1}$ を示した。Spumellaria亜目とNassellaria亜目の比率は年間を通じてあまり変化せず, Nassellaria亜目の方が高くPolycystina目の50~60%を占めている(第2B-b図)。群集組成では, other Spumellariaが6~8月に少なく12~3月に多くなる傾向をもつほかは, 科レベルで顕著な季節変化は認められない。

測点6: Polycystina目フラックスは4月前半に最低値926 shells $m^{-2} day^{-1}$ を示し, 11月~1月に高い値をもち, 11月前半に最大値11,024 shells $m^{-2} day^{-1}$ を示した(第2表, 第2C-a図)。Nassellaria亜目とSpumellaria亜目の割合はほぼ同じであり, 年間を通じて安定している(第2C-b図)。科レベルの頻度組成も年間を通じ



てほぼ一定である。

5. 考察

以上により, Polycystina 目フラックスは3つのどの測点においても季節的に変化するが, 極大値や極小値の大きさやそれらが現れる時期は測点によって互いに異なることが分かる。また, Polycystina 目の科レベルの群集組成はどの測点においてもあまり季節的に変化しないこと, しかし測点間では明瞭に異なることが読み取れる。以下の考察ではこのようなフラックスと群集組成の時間空間変動パターンとその要因について考察する。

5.1 フラックス

フラックスの季節変動: 亜北極域内の測点 8 では, Polycystina 目フラックスは高温期の夏季に高く低温期の冬季に低い値を示し, 表層水温の変化に良く同調しているように見える(第 2A-a 図)。中緯度の海洋表層における動物プランクトンの増大期は, 春の植物プランクトンのブルームの後, 夏に現れることが知られている(Bogorov, 1958)。一般的な海洋生態学モデルによれば, まず冬の間に海洋表層に供給された無機栄養塩を利用して日射の増大する春に植物プランクトンのブルームが起こり, 次にそれにより生産された有機物が海洋中に溶解し, その溶存有機物(または溶存有機物を利用するバクテリアのどちらかまたは両方)を利用して動物プランクトンが増殖する, という連鎖が成立していると言われている(テイト, 1990)。測点 8 の有機物フラックスは 6~7 月に増大し(第 2A-a 図; Eguchi *et al.*, 1999), Polycystina 目フラックスは 8~9 月にピークを持つので, これらの観測データは海洋生態学モデルからの予測によく符合していると言える。この場合には, 測点 8 における Polycystina 目の夏季の生産性の向上は, 表層水温の上昇の直接的な影響ではなくて, 食物供給量の増加の影響であると考えられる。

漸移帯域の測点 7 では表層水温の季節変化と生産性の間には一定の関連性はみられなかった(第 2B-a 図)。この地点では 5 月前半, 7 月後半, 10 月前半~11 月前

半, 2 月後半の 4 回, Polycystina 目フラックス値の極大期が認められる。すなわち, 約 3 か月に 1 度の割合で極大が現れ, その合間に極小が現れている。Eguchi *et al.* (1999) によれば測点 7 の有機物フラックスは 5 月後半, 7 月後半, 10 月前半, 2 月後半に極大値をもつ(第 2B-a 図)。これと比べてみると, Polycystina 目フラックスの 4 回のピークは有機物フラックスとほぼ同時期に現れている。したがって, 一次生産の増大に同調して放散虫も増殖しているものと考えられる。

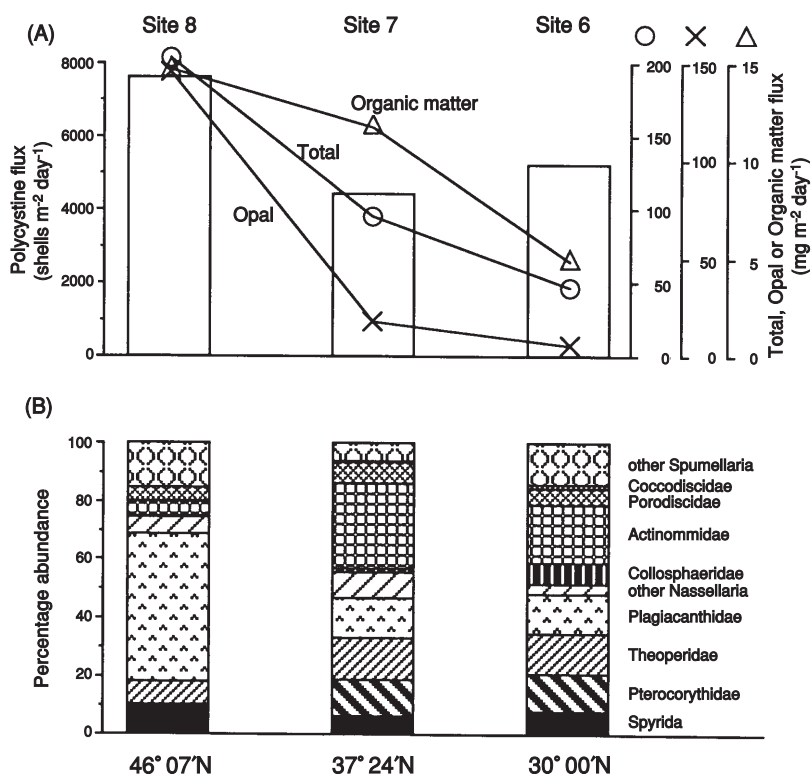
測点 6 では, Polycystina 目のフラックスは, あまり明瞭ではないが昇温期の春季(6 月)と減温期の秋季(10 月後半~12 月)に極大があり, 最高水温期(9 月)と低温期(3 月後半~4 月)に極小が現れているように見える。しかしながら, 6 月の極大は顕著とはいえないし, 1~3 月の低水温期にフラックスが特に低いともいえない。Eguchi *et al.* (1999) によれば測点 6 の有機物フラックスと浮遊性有孔虫フラックスの増大期は季節水温躍層が消失する 1~3 月に認められている(第 2C-a 図)。Polycystina 目フラックスの増大期(10 月後半~12 月)はこれに先行して現れており, 季節水温躍層の消失や一次生産の増大と直接結びつけることはできない。むしろ, 4 月の極小を除いて年間を通じて比較的安定した生産を保っているとみるべきかもしれない。

以上のように, 測点 8 では, 有機物フラックスと放散虫フラックスとの間の関係は, 海洋生態モデルで説明できる。しかし, 測点 7 と測点 6 のパターンを海洋生態モデルにより説明することは難しく, それに代わるモデルにも心当たりがない。

フラックスの緯度変化: 調査期間の Polycystina 目フラックスの通年の値は, 測点 8 で最も高く, 測点 6 がそれに続き, 測点 7 で最も低かった(第 3A 図)。本研究と同じトラップ試料(同一測点, 同一水深, 同一期間)を用いた Kawahata *et al.* (1998), Eguchi *et al.* (1999) 及び Kawahata (2002) の研究によると, 年平均の有機物フラックス, オパールフラックス及び浮遊性有孔虫フラックスはいずれも測点 8 で最も高く, 測点 7 で中間の値, 測点 6 で最も低い値となっている。この傾向は亜北極域は富栄養で生物生産性が高く, 亜熱帯域は貧栄養で生物生産性が低いという一般的な海洋学的性質

←
第 2 図 Polycystina フラックス(ヒストグラム)と有機物フラックス(Eguchi *et al.*, 1999) (a), 百分率群集頻度組成(b), 表層 0 m 水温(c) (Reynolds and Smith, 1994), 表層 0~300 m 水温(d) (Levitus and Boyer, 1994) の季節変化。

Fig. 2 Seasonal variations in (a) the total polycystine flux (histogram) and the organic matter flux (Eguchi *et al.*, 1999), (b) family composition of Polycystine radiolarians, (c) sea surface temperature (Reynolds and Smith, 1994), and (d) thermal structure of the upper 300 m of the ocean (Levitus and Boyer, 1994). Note that a one and half-month (Site 6) or a one-month correction (Sites 7 and 8) has been implemented to minimize the time lag between specimens' production and deposition. Temporal fluxes of polycystines show large variations during the experiment. In the subarctic water mass (Site 8), high polycystine fluxes were observed during summer to fall. This is consistent with general knowledge of marine ecology (Tait, 1990): zooplankton achieve a maximum in summer in the subpolar oceans that coincides with an increase of dissolved organic matter in the upper layer of the ocean. In the transitional zone (Site 7), polycystine fluxes show four maxima that closely correlate to the maxima of organic matter fluxes (Eguchi *et al.*, 1999). In the subtropical region (Site 6), polycystine fluxes show little correlation with either sea surface temperature or organic matter fluxes. Percentage abundance does not show seasonal changes.



第3図 Polycystina目年間平均フラックス (A) と群集頻度組成の緯度変化 (B). Kawahata (2002) による全沈降粒子フラックス, オパールフラックス及び有機物フラックスも示す (A).

Fig. 3 Comparison of annual polycystine fluxes (histogram in A) and percentage faunal composition (B) of the three sites. Total mass, opal and organic matter fluxes (from Kawahata, 2002) are also shown. The polycystine flux is higher at Site 6 than at Site 7 and therefore the latitudinal variation of the polycystine flux does not parallel those of the other fluxes shown. The lower Figure shows apparent latitudinal changes in polycystine assemblages. The total assemblage from the subarctic site is dominated by Plagiacanthidae, with very few Collosphaeridae, Coccodiscidae or Pterocorythidae. Actinommiidae are abundant in the assemblage from the transitional zone. No single family dominates the assemblage from the subtropical region.

に符合するものといえる。ところが, Polycystina目フラックスは測点7 (漸移帯域) よりも測点6 (亜熱帯域) の方でやや高くなっている (第3A図)。これは Polycystina目の生産が亜熱帯貧栄養海域においても漸移帯域と同程度かそれ以上に活発であることを示唆している。このことは, 異なる海域間において, Polycystina目フラックスの大小は生物生産性の大小と必ずしも同調するわけではないこと, それゆえ堆積物中の化石放散虫の産出量の解釈には一定の注意を要することを意味している。

5.2 群集組成

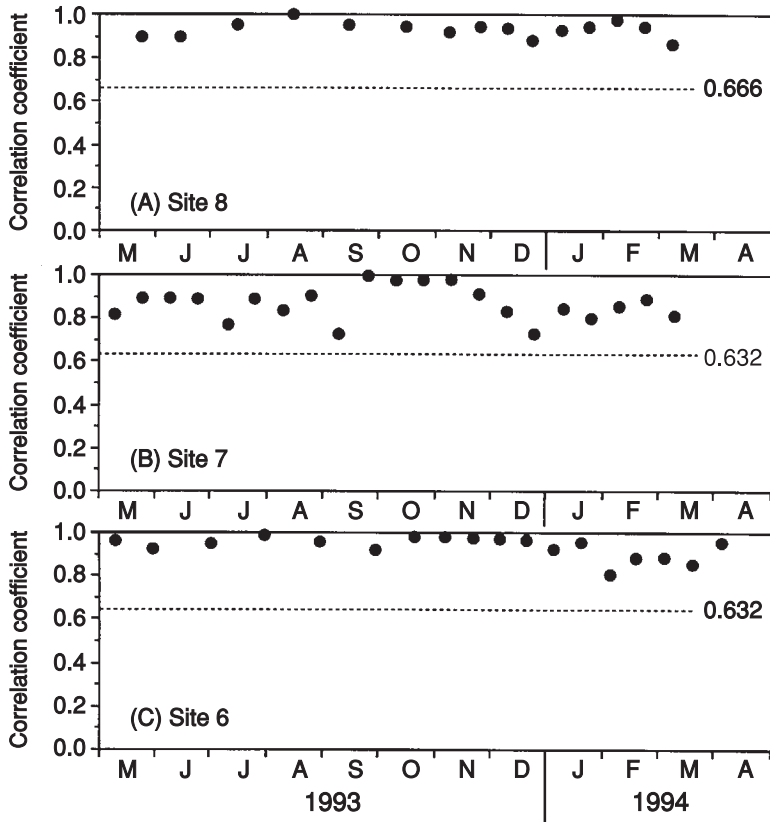
群集組成の季節変動: 3つの測点のいずれにおいても, 季節によって優勢な分類群 (科) が入れ替わるような現象はみられず, 年間を通じて百分率群集組成はむしろ安定している (第2図)。この安定性は測点6で最も顕著である。3つのいずれの測点においても, 表層0mの季節的水温変化が群集組成に大きな影響を及ぼしているようにはみえない。ただし, 分類群を個別に見ると, 測点7の other Spumellariaのように多少季節的に変動するように見える分類群もある。

そこで, 群集の季節変動が有意であるかどうかを検証するために, スピアマンの順位相関係数を用いてノンパラメトリック検定を行った。各試料の組成を実測値とし, 後述する各測点の年間の群集組成 (第3B図) を期待値と仮定して有意水準0.05で両者の有意差を見積もった。科の相対頻度の大小の順位が両者の間で類

似している場合に相関係数が高くなる。検定の結果, 3測点のすべての試料で臨界値よりも高い値が得られた (第4図)。すなわち, 実測値と期待値は互いに独立であるという帰無仮説は棄却され, 両者の間には通年でかなりの類似性が存在するとみなせる。少し言い方を変えると, 測点7の other Spumellariaのように多少季節性を持つように見える分類群もあるが, 全体としては科レベルの群集組成は季節的にほとんど変動しないとみなすことができる。

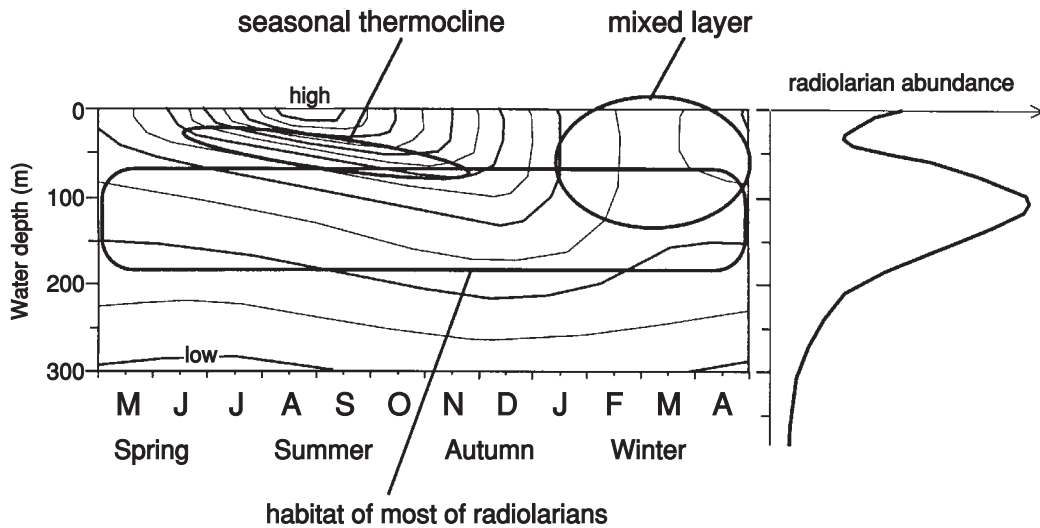
科レベルで見た場合の群集組成が季節変化に乏しい理由としては, まずそもそも種などの低次分類群で見ても放散虫は季節変化に乏しいことが考えられる。一般に, 放散虫 (Polycystina目) は海洋の水深100m付近 (50~150m) に垂直生息分布のピークを持っている (Petrushevskaya, 1971b; Kling, 1979)。この水深は季節水温躍層の下側にあたり, 水温が年間を通じて測点8では4~5℃, 測点7では12~14℃, 測点6では16~18℃で安定している。すなわち, 多くの放散虫種はこのように水温の季節変動が乏しい水深に生息している。このことが, 群集組成に季節変化が生じにくい原因の1つと考えられる (第5図)。

科レベルの群集組成の安定性の原因としては, もうひとつ, 種レベルの季節変動がおのおのの科ごとに相殺されている可能性が考えられる。低次分類群の組成の変動は科レベルで相殺されるという生態学的な一般則は存在しないので, もしこれが事実なら, 放散虫群集の独特な性質を表すことになるかもしれない。



第4図 スピアマンの順位相関を用いたノンパラメトリック検定。有意水準5%で、各測点の全てのサンプルにおいて臨界値よりも相関係数が高いので、各サンプルの群集組成と年間群集組成は無相関であるという帰無仮説は棄却される。

Fig. 4 Results of a non-parametric test using Spearman's rank correlation coefficient. The null hypothesis is that the faunal structure of each sample is independent of that of the annual assemblage (Fig. 3B) at each site. Because all points are within the critical regions with a 5 percent significant level, the null hypothesis should be rejected.



第5図 年間を通じた放散虫の生息深度と水温の関係を表すモデル。右側の深度分布図はPetrushevskaya (1971b)とKling (1979)をもとに一般化したものである。

Fig. 5 Schematic model of annual productivity of polycystine radiolarians in the oceanic middle latitudes. Depth profile (right) is generalized after Petrushevskaya (1971b) and Kling (1979). Most radiolarians are produced in the subsurface layer below the seasonal thermocline. The subsurface layer has a relatively constant temperature within a range of 2-3 °C through the year. This model suggests that the annual radiolarian sinking population consists largely of radiolarians that have lived in the subsurface layer, and thus radiolarian sedimentary records can act as proxies for the temperature of the subsurface layer. It should be noted that the subsurface temperature is close to the winter sea surface temperature.

本研究と同じ3地点のセジメント・トラップ観測による同一試料に基づく浮遊性有孔虫の研究(Eguchi et al., 2003)によると、浮遊性有孔虫群集はいずれの地点においても明瞭な季節性を示し、各々の種のフラックスの増大期には相対的な割合も高くなることが知られている。例えば測点7では*Globigerinoides ruber*は夏季に60%以上を占めるが冬季にはほぼ0%にまで低下する。測点6でも*Truncorotalia truncatulinoides*と*Globigerinita glutinata*は5%~30%の幅で増減する。1つの種が占める割合は当然それが属する科の割合よりも小さいはずであるから、このように種ごとに数10%もの変動幅をもつ季節性は、今回の放散虫群集には期待できないようにみえる。1つの種が数10%もの幅の季節変動を持つ可能性が残っているのは、わずかに測点8のPlagiacanthidae科と測点7のActinommidae科だけである。このように、他の動物プランクトンに比べたときにも、群集組成の季節的安定性は放散虫特有の生態学的な性質であると指摘しておくことができる。

群集組成の緯度変化: 調査期間のPolycystina目フラックスを合計して求めた約1年分の科レベルの群集組成は、測点間(水域間)で顕著な違いをみせている(第3B図)。測点8ではPlagiacanthidae科が卓越し、Collosphaeridae科、Coccolithoidae科、Pterocorythidae科がほとんど現れない。これに比べて測点7ではPlagiacanthidae科の割合が激減し、Actinommidae科とPterocorythidae科の割合が増加する。またother Spumellariaの割合が低い傾向がある。測点6では特に優勢になる科はみられない。測点6では測点7に比べてCollosphaeridae科とother Spumellariaの割合が多くなり、Actinommidae科の割合が低下している。このように科レベルの群集組成は、測点間で互いに明瞭な違いを示す。一般に表層堆積物中の放散虫遺骸群集の地理的变化は表層水塊や海洋気候区に対応していることが知られている(例えばNigrini, 1970; Molina-Cruz, 1977)。したがって、測点8、測点7、測点6の間に認められた沈降群集組成の違いも、それぞれの水域を代表する亜北極水塊、漸移帯水塊、亜熱帯水塊の違いに応じた群集の違いであると考えられる。これはまた、生息水深(100 m付近)における水温の違い(測点8では4~5℃、測点7では12~14℃、測点6では16~18℃)が主要因となっているものと推察される。

群集組成の季節変動と緯度変化: 以上をまとめると、科レベルの放散虫群集組成は、どの測点もわずかな変動を除いてほとんど季節的变化を示さず安定し、表層の水温変化と相関しない。しかし、測点間で比べると、組成は緯度によって異なっている。このような現象は、放散虫が主に生息する水深の温度が季節を通して一定であること、つまり生息環境が安定しているために、

群集組成が季節的に一定になり、また、生息水深の温度や環境が緯度により異なるために、組成に緯度による違いが生じるものと考えることによって説明できると思われる。

5.3 群集組成変化とフラックス変化の関係

前述のように、科レベルでの群集組成に季節変動がほとんど認められなかったのに対して、放散虫フラックスは各測点で季節的に変動しており、それは特に測点8で著しかった。どの測点でもフラックスの変動幅が最小値と最大値で10倍を超える差があるにもかかわらず、このように群集組成が顕著な季節変化を示さず、むしろ安定していることは奇妙に思える。

これと似た現象、つまり放散虫のフラックス(生産性)に季節変化があるにもかかわらず群集組成に季節変化が乏しいという現象は、赤道太平洋や(高橋・山下, 2004)、亜北極太平洋(板木・高橋, 1995, figs. 4, 5)においても認められている。これらの研究は種レベルの解析に基づいているので、少なくとも低次分類群レベルでの群集組成に季節変化が乏しい場合があることを示している。海域も観測時期も異なるので、これをそのまま本研究に重ね合わせることはできないものの、高橋・山下(2004)による、放散虫の多くの分類群は、食物供給の変動に対して同じように個体数を増減させるという考え方は、本研究の観測結果に一定の説明を与えてくれる。

科レベルでの群集組成に季節変動がほとんどないのに対して、放散虫フラックスは季節的に変動している。この奇妙な現象の真の原因は現状ではよく分からない。ただし、科レベルで見て、放散虫は食物供給の変動に対する増殖速度が分類群間でほとんど差がないために、食物供給の増減に対応して個体数が増減しても、それぞれの分類群が同じ割合で増減するので、最終的に群集組成は全体としてほとんど変化しないのかもしれない。

5.4 放散虫群集がもつ古環境情報

一般に、どの微化石グループであっても、生体群集から遺骸群集を経て化石群集となる間には、溶解や続成作用により個体数が順次減少してゆくので、化石群集をもとにして堆積時のフラックス(堆積率: 単位面積単位時間あたりの沈積個体数)を復元することは難しくなる。そこで、古環境指標としては、分類群の絶対量の変化ではなくて百分率による群集組成が用いられることが多い(例えばImbric and Kipp, 1971; CLIMAP, 1976; Moore and Lombardi, 1981)。上述したように、本研究では、放散虫沈降群集組成は、低次分類群であっても、表層0 m水温の季節変動とは関連が乏しく年間を通じて一定であり、一方、地理的な水塊(おそらくは水深100 m付近の水温)の違いに対し

ては敏感である。もしこれが正しければ、放散虫の遺骸群集や化石群集の群集組成から読みとることのできる主要な環境情報は、水塊の性質(特に水深100 m付近の水温)であって(第5図)、群集組成から表層0 m水温の季節変動や年較差についての情報を得ることは難しいものと考えられる。このことは、古環境指標としての放散虫の活用法について重要な問題を投げかけていると思われるので、近い将来、種レベルの分析により検証されることが望まれる。

第2図の水温の鉛直構造によれば、3つの測点のいずれにおいても冬季(2~3月)に水温躍層が消失して、表層0 mから100 m程度までの水温がほぼ一様になる。放散虫群集組成が水深100 mの水温を代表するのであれば、すなわち、それはほぼ冬季の表層0 m水温を代替していることになる(第5図)。この意味で、放散虫群集組成は冬季の表層0 m水温の指標として有効であると判断される。一方、測点7のother Spumellariaのように季節変化を持つように見える分類群も存在するので、そういった分類群の生態学的情報を元にして過去の季節変動や年較差を解釈することは可能かもしれない。当然のことながら、沈降群集の属レベルや種レベルでの解析の中からさまざまな古環境解析に役立つ新しい生態学的情報がみつかる可能性も残されている。これらの問題については今後の研究を通して検討してゆきたいと考えている。

6. まとめ

本研究では、北太平洋の亜北極域・漸移帯域・亜熱帯域の3測点のセジメント・トラップ試料を用いて、Polycystina目放散虫のフラックスと科レベルの群集組成について調査した。その結果として、Polycystina目フラックスはどの測点でも季節変化を示すことや、年間のフラックスは、3測点間で比べると、亜北極域で最も高く、漸移帯域で最も低かったこと、科レベルの群集組成は3測点間で明瞭に異なるのに対して、どの測点でも有意な季節変動を示さなかったことなどを示した。しかし、有機物と放散虫の季節的生産パターンについては、満足のゆく海洋生態学的な意味付けはできなかった。群集組成の季節的安定性は、これまで報告例も少なく注目に値する結果であり、その原因は、放散虫の主な生息水深が季節的水温変化の乏しい100 m付近にあるため、及び放散虫は食物供給の変動に対する増殖速度が分類群間であまり差がないためではないかと考えられた。本研究で得られた情報は、Polycystina目放散虫の古環境指標としての特性を考える上で示唆に富んでおり、今後、種レベルでの検討が望まれる。

なお、本研究の当初の目的は「明瞭な季節性を示す

高次分類群グループの見極め」であったが、わずかに1測点(測点7)のother Spumellariaに多少の季節性が認められた以外には、有望な分類群は認められなかった。

謝辞: 本研究は工業技術院地質調査所特別研究「海洋環境変遷の研究」の成果の一部である。本研究に用いた試料は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の事業「海洋中の炭素循環メカニズムの調査研究」の調査航海により得られた。産業技術総合研究所の西村 昭博士と田中裕一郎博士には研究全般にわたり御指導いただいた。日本海洋科学技術センター(現海洋研究開発機構)の江口暢久博士には御助言をいただいた。産業技術総合研究所の柳沢幸夫博士には原稿の査読を通じて有益なコメントをいただいた。本研究をまとめるにあたり、以上の方々に厚く御礼申し上げる。また、本研究に文部科学省科学研究費補助金(No. 15540446)の一部を使用した。

文 献

- Bogorov, B. G. (1958) Perspectives in the study of seasonal changes of plankton and of the number of generations at different latitudes. In Buzzati-Traverso, A. A. ed., *Perspectives in Marine Biology*, University of California Press, 145-158.
- CLIMAP (1976) The surface of the ice-age Earth. *Science*, **191**, 1131-1137.
- Eguchi, N., Kawahata, H. and Taira, A. (1999) Seasonal response of planktonic foraminifera to surface ocean condition: sediment trap results from the central North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **55**, 681-691.
- Eguchi, N. O., Ujiie H., Kawahata, H. and Taira, A. (2003) Seasonal variations in planktonic foraminifera at three sediment traps in the subarctic, transition and subtropical zones of the central North Pacific Ocean. *Marine Micropaleontol.*, **48**, 149-163.
- Hays, P. E., Pisias, N. G. and Roelofs, A. K. (1989) Paleoceanography of the eastern equatorial Pacific during the Pliocene: A high-resolution radiolarian study. *Paleoceanography*, **4**, 57-73.
- Imbrie, J. and Kipp, N. G. (1971) A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: application to a late Pleistocene Caribbean core. In Turekian, K. K. ed., *The Late Cenozoic Glacial Ages*, Yale University Press, 71-181.
- 板木拓也・高橋孝三 (1995) 北部北太平洋およびベーリ

- ング海におけるレディオラリア・フラックスの季節変化 (予報). 北海道東海大学紀要理工学部系, no. 8, 37-47.
- 海洋調査技術学会 (1993) 海洋調査フロンティア海を計測する. 海洋調査技術学会, 東京, 304p.
- Kawahata, H. (2002) Suspended and settling particles in the Pacific. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5647-5664.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ohta, H. (1998) Sinking particles between the equatorial and subarctic regions (0°N-46°N) in the central Pacific. *Geochem. J.*, **32**, 125-133.
- Kling, S. A. (1979) Vertical distribution of polycystine radiolarians in the central North Pacific. *Marine Micropaleontol.*, **4**, 295-318.
- Levitus, S. and Boyer, T. (1994) World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C. <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94/>
- Molina-Cruz, A. (1977) Radiolarian assemblages and their relationship to the oceanography of the subtropical southeastern Pacific. *Marine Micropaleontol.*, **2**, 315-352.
- Moore, T. C., Jr. and Lombardi, G. (1981) Sea-surface temperature changes in the North Pacific during the Late Miocene. *Marine Micropaleontol.*, **6**, 581-597.
- Nigrini, C. (1970) Radiolarian assemblages in the North Pacific and their application to a study of Quaternary sediments in Core V20-130. *Geol. Soc. America, Memoir*, no. 126, 139-183.
- Petrushevskaya, M. G. (1971a) On the natural system of Polycystine Radiolaria (Class Sarcodina). In Farinacci, A. ed., *Proc. 2nd Planktonic Conference, Roma 1970*, **2**, Edizioni Tecnoscienza, Roma, 981-992.
- Petrushevskaya, M. G. (1971b) Spumellarian and Nassellarian Radiolaria in the plankton and bottom sediments of the central Pacific. In Funnell, B. M. and Riedel, W. R. eds., *The Micropaleontology of Oceans*, Cambridge University Press, Cambridge, 309-317.
- Pisias, N. G., Roelofs, A. and Weber, M. (1997) Radiolarian-based transfer functions for estimating mean surface ocean temperatures and seasonal range. *Paleoceanography*, **12**, 365-379.
- Reynolds, R. W. and Smith, T. M. (1994) Improved global sea surface temperature analyses. *J. Climate*, **7**, 929-948. <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.weekly/>
- Riedel, W. R. and Sanfilippo, A. (1977) Cainozoic Radiolaria. In Ramsay, A. T. S. ed., *Oceanic Micropaleontology*, **2**, Academic Press, London, 847-912.
- Sancetta, C. (1978) Neogene Pacific microfossils and paleoceanography. *Marine Micropaleontol.*, **3**, 347-376.
- Sanfilippo, A. and Riedel, W. R. (1980) A revised generic and suprageneric classification of the Artiscins (Radiolaria). *J. Paleontol.*, **54**, 1008-1011.
- テイト, R. V. (1990) 海洋生態学入門, 原著第3版. 九州大学出版会, 福岡, 430p. (三栖 寛訳)
- Takahashi, K. (1983) Radiolaria: sinking population, standing stock, and production rate. *Marine Micropaleontol.*, **8**, 171-181.
- Takahashi, K. (1987) Radiolarian flux and seasonality: climatic and El Nino response in the subarctic Pacific, 1982-1984. *Global Biogeochem. Cycles*, **1**, 213-231.
- Takahashi, K. (1991) Radiolaria: Flux, ecology, and taxonomy in the Pacific and Atlantic. Honjo, S. ed., *Ocean Biocoenosis Series No. 3*, Woods Hole Oceanographic Institution, 303p.
- Takahashi, K. (1997) Time-series fluxes of Radiolaria in the eastern subarctic Pacific Ocean. *News of Osaka Micropaleontologists, Special Volume*, no. 10, 299-309.
- Takahashi, K. and S. Honjo (1983) Radiolarian skeletons; size, weight, sinking, and residence time in tropical pelagic oceans. *Deep-Sea Res.*, **30**, 543-568.
- 高橋孝三・山下仁司 (2004) ラニーニャ時のレディオラリアフラックス: 1999年太平洋赤道域西部・中部における時系列変動と海洋環境. 地質雑, **110**, 463-479.

(受付: 2005年4月22日; 受理: 2005年6月16日)