

ふおっしる

放散虫学のスズメ

板木拓也

東京大学大学院理学系研究科, 学振特別研究員

Introduction to radiolarian study

Takuya Itaki

Department of Earth Planetary Science, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 (t-itaki@eps.s.u-tokyo.ac.jp)

はじめに

「放散虫 (ほうさんちゅう)」という言葉は、地学を志向する高校生や大学の学部学生にも聞き慣れないものかもしれない。最近の高校地学の教科書に放散虫が僅かに触れられているものの、国内には地学を履修科目としている高校が圧倒的に少なく放散虫に関する認知度も低いと思われるからだ。

放散虫 (Radiolaria, ラジオラリアまたはレディオラリアとも呼ばれている) とはいっても「虫」ではない。海洋性動物プランクトンのひとつで、珪酸または硫酸ストロンチウムの骨格を持つ単細胞の原生動物のことを指す。その大きさは数十～数百マイクロン (100マイクロンは10分の1ミリメートル) で、骨格が珪酸塩 (非晶質シリカ, ようするにガラス) で出来ているものは堆積物中に化石として保存されやすい。放散虫のように珪酸塩で出来ている微小な化石のことを珪質微化石と呼ぶ。他の珪質微化石には、植物プランクトンの珪藻や珪質鞭毛藻などがある。

顕微鏡で放散虫を見ると、その小さな体からは信じられないような、まるで精巧なシャンデリアか仏塔または曼荼羅 (マンドラ) を思わせる緻密で多様な形をしている (図1)。海の中で5億年以上に渡って脈々と生きてきた彼らは、ただ美しいだけでなく、しばしば我々に地球の雄大な歴史を語りかけてくる。本稿では、放散虫とは何か? その化石が地球科学に果たす役割などについて簡単に紹介したい。

分類

2001年に出版された「Radiolarians in the sedimentary record」(De Wever *et al.*) の序論では、まだ議論の段階にあるとしながらも、放散虫の高次分類は上位より原生生物界, 原生動物亜界, 肉質鞭毛虫門, 肉質虫亜門, 有軸仮足上綱に属し、いわゆる放散虫は有軸仮足上綱のポリキスティナ (Polycystina) 綱とパエオダリア (Phaeodaria) 綱のことを指すとしている (注1)。化石として堆積物中に保

存されるのは主にポリキスティナ綱であり、パエオダリア綱はその多くが海水中で溶解してしまい堆積物中に化石として残るのは稀である。さらにポリキスティナ綱には、スプメラリア (Spumellaria), ナッセラリア (Nassellaria), アルバイレラリア (Albaillellaria), エンタクティナリア (Entactinaria) の4つの主要なグループがある。スプメラリアは古生代から新生代を通して存在するが、ナッセラリアは中生代に出現し、アルバイレラリアとエンタクティナリアは古生代に繁栄していた (図1)。放散虫は、現生種だけでも2000種を超えると考えられており、その系統関係は主に骨格の形態に基づいて構築されたものが主流である。最近では生きている個体の軟体部の特徴や分子生物学的手法を用いて区分する試みも行われるようになっており、より確からしい系統関係が明らかにされつつある。

注1) この分類体系では、「放散虫」は特定の分類区分がある訳ではなく、ポリキスティナ綱とパエオダリア綱をまとめた俗称となっている。また、硫酸ストロンチウムの骨格を持つアカンサリア (Acantharia) も放散虫に含める場合がある (アカンサリアは、骨格が水中で溶解してしまうため化石には残らない)。このような高次分類は、現世生物を扱う系統分類学者と古生物学者の間でも意見が完全に統一されていない。

生態

そもそも放散虫とはどのような生物なのであろうか? 化石に関しては研究が進み比較的によく調べられているが、実は生きている放散虫に関する知見は意外に少ない。その原因は、放散虫の研究が主に地質学のツールとして発展してきたのに対し、生きている放散虫は生物海洋学の分野からはあまり注目されてこなかったためと考えられる。しかし、放散虫化石を用いて生物進化や古環境を研究するためには、古生態情報は必要不可欠であり、そのためには現在の放散虫の生態を詳しく理解することは極めて重要である。

放散虫が単細胞の動物プランクトンである事は先に述べたが、その生態的位置 (食物連鎖における段階) は一般に二次生産者として認識されている。二次生産者とは植食動物のことで、第一次消費者とも呼ぶ。放散虫の場合、植物

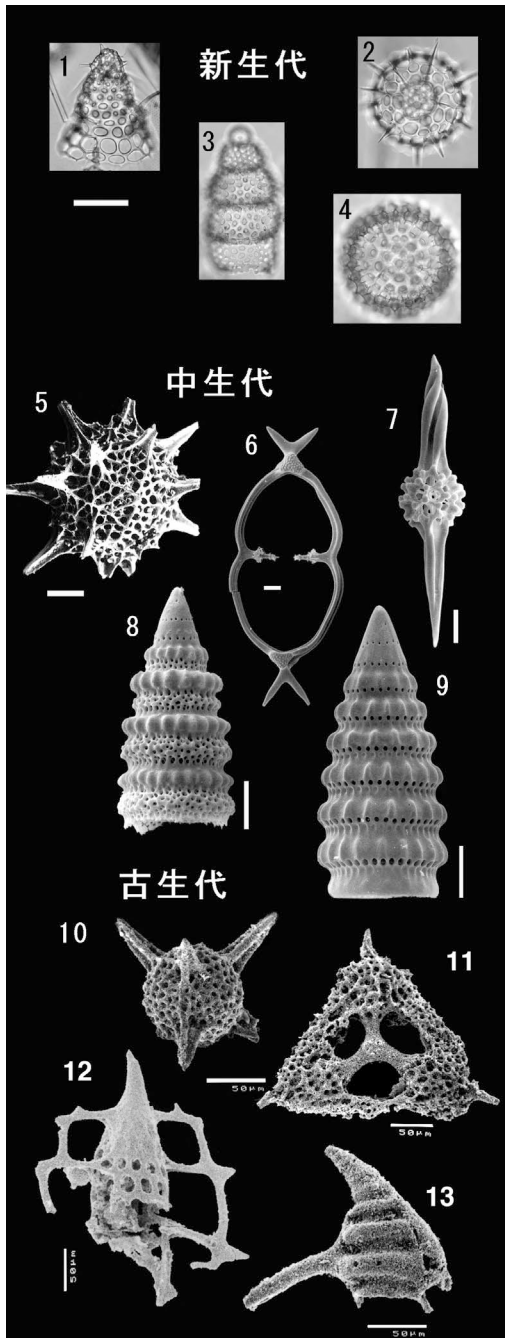


図1. 1, *Cycladophora davisiana* Ehrenberg, 2, *Actinomma boreale* Cleve, 3, *Stichocorys peregrina* Riedel, 4, *Thecosphaera japonica* Nakaseko, 5, *Actinommacea* gen. et sp. indet., 6, *Acanthocircus dicranacanthos* (Ruest), 7, *Pantanellium oligoporus* (Vinassa), 8, *Cinguloturris cylindra* Kemkin and Rudenko, 9, *Loopus* (?) sp. C. 10, *Entactinosphaera? crassispinosa* Sashida and Tonishi, 11, *Foremanhelena circura* Sheng, Caridorit and Wang, 12, *Neobaillella optima* Ishiga, Kito and Imoto, 13, *Albaillella triangularis* Ishiga, Kito and Imoto. 写真1, 3, 6, 8, 9はナッセラリア, 2, 4, 5はスプメラリア, 10はエンタクティナリア, 11はLatentifistularia (古生代型放散虫のひとつ), 12と13はアルバイレリア, なおスケールは全て50ミクロン. 写真提供: 写真6は鈴木紀毅博士(東北大学), 6~9は松岡 篤博士(新潟大学), 10~13は桑原希世子博士(大阪市立大学). 写真1~4は光学顕微鏡写真, その他は電子顕微鏡写真である. 光学顕微鏡写真からは, 放散虫の骨格がガラスできていっている様子が伺える.

プランクトンのほかにバクテリアや海水中の有機物, 時には他の動物プランクトンを捕食し, また体に共生藻類を持ってその光合成から得られた栄養分で生活するものも存在する. 最近, 新潟大学の松岡 篤博士の研究グループなどによって餌を捕食している放散虫の映像がビデオ撮影されており, その多様な摂餌方法は放散虫の生態を考える上でも興味深い(注2).

1個体当たりの生存期間(つまり寿命)は数週間~数ヶ月程度と考えられている. 繁殖方法としては, 遊走子を出して有性生殖する場合と, 分裂によって増殖する無性生殖の場合があるらしいが, その詳細はまだよくわかっていない.

放散虫は世界中のほとんどの海に生息しているが, 先にも示した通り二次生産者であるから, 基本的には生物の基礎生産が高いところ(例えば, 南極海, インド洋, 赤道太平洋, 北太平洋亜寒帯域)で多い傾向がある. とくに太平洋やインド洋の赤道湧昇流域(注3)ではその高い生産量を反映して海底に放散虫軟泥(放散虫殻に富む遠洋性堆積物)が堆積している. 一方, 多くの場合は沿岸域などの塩分の低い海域には少なく, 淡水域からの報告例は無い. また, 鉛直方向では水深200m以浅の表層~亜表層に最も多く生息し, 水深の増加とともに個体数も種数も減少することが, プランクトン・ネットによる調査から明らかにされている. ただし, これらの地理分布や深度分布の特徴は種によって著しく異なる. 例えば, *Dictyocoryne profunda* Ehrenbergは, 世界で最も水温の高い西赤道太平洋の表層水(30°C)に多く生息している(Lonbari and Boden, 1985; Yamashita *et al.*, 2002). 一方, *Amphimelissa setosa* (Cleve)は, 北極海の水深25~200m付近の世界で最も冷たい水(ほぼ結氷点水温の-1.7°C)を好んで生息している(Itaki *et al.*, 2003). また, *Cornutella profunda* Ehrenbergのように深海に生息するものもある(Casey, 1977). *Cycladophora davisiana* Planeは, オホーツク海では水深200~500mに多い(Okazaki *et al.*, 2004)が日本海では1000~2000mを特徴付ける(Itaki, 2003)など, 海域によって生息する水深が異なる. このような種による棲み分けは, 水温, 塩分, 栄養条件などの環境条件の違いによって行われていると考えられる.

最近, セディメント・トラップ(注4)を用いて, 放散虫量の季節変化や経年変化に関する知見が蓄積されてきた(例えば, Takahashi, 1997). これもまた, 海域や種によってパターンが異なり, 海洋での複雑な生態系の中での放散虫の位置付けを理解する上で重要な情報を提供している.

注2) 新潟大学の松岡 篤博士は, 毎年, 沖縄の瀬底島で現生放散虫を観察するワークショップ, いわゆる“放散虫ツアー”を主催している. 生きた放散虫に興味ある方には参加をお勧めする.

注3) 赤道湧昇流: 深海には栄養に富んだ海水が存在する. この深層水が海洋表層に湧き上がってくる流れの事を湧昇流という. そのため, 湧昇流域では植物プランクトンが大繁殖し, それを餌にする動物も多い. 湧昇流は, 多くの場合, 風によって引き起こされる. すなわち卓越した貿易風や季節風が表層水を押し下げ, それを補うようにして深層水が湧き上がるのである. 湧昇流には,

沿岸湧昇流と赤道湧昇流があり、最近話題のエルニーニョ現象とは、東赤道太平洋の湧昇流が弱まった状態のことを言う。

注4) セディメント・トラップ：海中に設置して、上から降ってくる沈降粒子を捕捉する装置。コンピュータ制御で捕捉期間を制御し、沈降粒子の時系列変化を調査出来るタイプのものがある。

絶滅イベント

化石記録によれば、最初の放散虫はカンブリア紀の初頭（5億数千万年前）には既に出現していたらしい。その後、新たな種の出現、繁栄、絶滅を繰り返す、現在では2000種を超える放散虫が存在すると言われている。化石種も含めると8000種以上は存在するだろう。最近でも毎年のように新種が記載されており、その数は増加する一方である。

古生代カンブリア紀に現れた放散虫は、次第にその多様性を増加させたが、ペルム紀末の約2.5億年前にはアルバイレリアなどの古生代型放散虫のほとんどが絶滅した（例えば、八尾・桑原, 1997；指田ほか, 1998；桑原・八尾, 2001）。また、すべての海生生物の実に90%以上がこの時期に絶滅したとされている。放散虫のような低次生産プランクトン（二次生産者）の場合、海洋生物の食物連鎖に重要な役割を果たしていた可能性があるため、彼らの絶滅は生態系にも大きなインパクトを与えたかもしれない。最近では、海洋全体が無酸素状態になるような海洋環境の劇的な変化が、この大規模な大量絶滅と関係していたのではないかという考えもある（磯崎, 1999）。中生代トリアス紀に入ってしばらくして、ペルム紀末の大量絶滅を生き残った僅かな放散虫からナッセラリアなどの新しいグループが出現しはじめた。そして、トリアス紀中頃になると種数と産出量がともに増加し（例えば、指田ほか, 1998）、放散虫ワールドの復活を遂げた。

中生代白亜紀の中頃（約1.2億年前～9千万年前頃）にも、海洋の無酸素状態（海洋無酸素事変 Oceanic Anoxic Event; OAE と呼ぶ）が数回にわたって繰り返され、その幾つかでは海洋生物の絶滅イベントがあったとされている。放散虫についてもこれらのOAEを境界として複数の種が絶滅または新たに出現するなどの現象が認められている（Erbacher and Thurow, 1997）。たとえば、イタリアでの調査によれば、約9,400万年前に起こった無酸素事変（OAE-2）の時期に29種群の放散虫が絶滅し、20種群が新たに出現した。これらの絶滅は、海進に伴う酸素極小層（注5）の発達によって引き起こされたと解釈されている。すなわち、海水準の上昇に伴って陸から海へ大量の栄養塩類が運ばれ、海洋表層の生物生産が高くなった。それによって深層に運ばれる有機物が増加して深層の酸素が消費された。放散虫は酸素の多い環境を好むので、この時期に深い水深に生息していた放散虫が絶滅したが、浅海性の放散虫は生き延びたらしい。ただし、深海の無酸素状態は、有機物の寄与だけでなく、海洋循環そのものの停滞による場合も考えられるため、今の段階で放散虫の絶滅がどちらの影響を受けた結果なのかはわからない（注6）。ちなみに、白亜紀末期

（約6,500年前）に巨大隕石が落下してきて恐竜などが大量絶滅したことは有名だが、この時期に放散虫が大量絶滅した証拠は無い。

注5) 酸素極小層：酸素は海洋表層から海水に溶込むため、浅い水深では酸素濃度は高い。一方、深い水深になると生物の呼吸や有機物の分解などに酸素が使われるため、酸素濃度が低くなる。その際、中深層水に発達する最も酸素濃度の低い水深の事を酸素極小層と呼ぶ。

注6) 海水は、水温が低いほどまたは塩分が高いほど密度が大きい。表層に低密度の海水が覆った場合、密度成層（軽い表層水と重い深層水の重なりによって上下の混合が起こらなくなった状態）が発達し、表層から深層への酸素輸送が滞る。この場合も深層の無酸素状態を引き起こす原因となり得る。先にErbacher and Thurow (1997) は、「白亜紀のOAEでは、有機物が寄与した無酸素化で放散虫の絶滅が引き起こされた」としたが、その論文の筆頭著者Erbacher本人が、後の論文（Erbacher *et al.*, 2001）で「OAE 1b（約1億2000万年前）は、表層に暖かいまたは塩分の低い水（軽い水）が覆う事によって深層へ酸素を供給する循環がストップしたかもしれない」との考えを示している。

生層序

放散虫に限らず、あらゆる生物の種の出現や絶滅は地質時代を通して頻繁に起こっていた。時代によって産出する化石が異なるのはそのためである。そこで、産出する化石の違いから遠く離れた地域の地層との対比が可能となる。このように、地層の対比に有効な化石の事を示準化石と言う。放散虫も種によって存在期間が異なるため示準化石として有効である。

様々な種の出現や絶滅、特徴的な群集変化などのバイオ・イベント（化石記録に認められる生物の特徴的な出来事）を地層中から見出し、それらの順序とその年代を示したものを生層序区分と言う。これは、地層の時代を知るためのメジャーの目盛のようなものである。堆積した時代が不明な地層から特定のバイオ・イベントが発見されると、先に構築された生層序区分との対比によってその地層の年代が分かる（このように推定された地質年代を生層序年代と言う）。最近では、熱帯域や高緯度域など、地域ごとの生層序区分が提案されており、地域による古環境の違いなども考慮したものとなっている。

この生層序区分を作るためには、保存の良い化石試料が連続的に採取できる場所があると都合が良い。陸上の露頭などでは、仮に広い範囲で露出があったとしても、褶曲や断層によって連続性が損なわれたり、圧力や熱、地下水などによる変質の影響で化石の保存状態が良くない場合が多い。一方、海洋底の堆積物は一般に化石の保存が良く、海底掘削などで比較的連続的な試料の採取が期待出来るため生層序研究に適している。ただし、海洋底の堆積物はジュラ紀以降のものに限られ（注7）、それ以前の地質時代に関しては陸上で良好な場所を探す必要がある。海洋底から試料を採取するのは容易な事ではないが、1960年代後半から始まった海洋底掘削の国際計画（注8）によって、

世界中の深海底から長尺の海洋コア（ボーリングによって採取された柱状の堆積物試料）が採取されるようになった。それによって、放散虫も他の微化石と同様に世界中の海洋から詳細な生層序が確立されるに至った。

放散虫の生層序は、珪質泥岩やチャートなどの堆積岩の年代を知るために極めて有効で、これまでも地質構造発達史の構築や石油などの資源探査に大きく貢献してきた。その精度は、最近益々向上しており、より詳細な年代の議論が可能となっている。日本列島にも多くの珪質泥岩やチャートが分布し、これらのあらゆる地層から年代が見積もられ、詳細な日本列島形成史も明らかにされようとしている。列島形成史の構築に放散虫化石がどのように貢献してきたかは、平朝彦著「日本列島の誕生」（岩波新書、1990年）に詳しいので一読をお勧めする。

注7) ジュラ紀以前の堆積物は、プレートテクトニクスによって陸地に付加されたり大陸地殻の下に押し込まれてしまったため、海洋底には存在しない。最も古い海洋底の堆積物は、西太平洋にあるジュラ紀中期のものである。この年代も放散虫化石から確かめられた（松岡、1992）。

注8) 海洋底掘削の国際計画には、Deep Sea Drilling Project (DSDP, 1968~1983年)、Ocean Drilling Program (ODP, 1983~2003年)、Integrated Ocean Drilling Program (IODP, 2003年~) がある。

古海洋

現在の海洋環境を調べるには、実際に海に赴いて（または人工衛星などから）観測することで確かな情報を得ることが可能だが、過去の海洋についてはタイムマシンが発明されない限りそういう訳にはいかない。そこで、古海洋環境の情報を得るために、海に堆積した地層から“過去の海洋環境の痕跡”を探し出す作業をしなければならない。“痕跡”とは、例えば、産出する化石の種類、堆積物や化石の化学成分やその同位体組成、堆積物の堆積構造など様々である。これらの“痕跡”を単独あるいは組み合わせることによって過去の水深、水温、塩分、栄養塩量などを推定することが出来る。このように過去の海洋環境を知るための代表的な指標のことを代替指標（プロキシ）と呼ぶ。

放散虫化石も古海洋学では重要なプロキシのひとつである。放散虫は生息する環境によって群集組成が異なり、地層中の群集を調べることで過去の海洋環境を推定することが出来る。例えば、海洋表層付近に生息している放散虫は緯度によって構成している種組成が異なる。このような生物地理分布は、主に表層水温に依存したものと考えられている。ある海域から採取された海洋コアに含まれる表層～亜表層性の放散虫を観察すると、層準によって群集組成が大きく異なることがある。これは過去のある時期において表層付近の環境が現在とは異なっていたことを反映している。そこで、現在の生物地理分布と表層水温との関係を比較することで当時の表層水温がどのくらいだったかを推定することが出来る。図2は、堆積物中の放散虫群集から数学的な手法（多変量解析）を駆使して推定された過

去34万年間におよぶ南大洋の表層水温変化である（Brathauer and Abelmann, 1999）。ほぼ10万年毎に温暖な間氷期と寒冷な氷期が繰り返し訪れていることがわかる。また、これらの表層水温の変化は、南極の氷床コアから得られている古気候データともよく一致している。

表層水温のプロキシには、他にも例えば浮遊性有孔虫の群集組成、浮遊性有孔虫殻の酸素同位体比やマグネシウムとカルシウムの比、有機物のアルケノンなどがある。ここで放散虫群集が古水温プロキシとして重要なのは、放散虫の骨格が珪酸塩で出来ているために海水中での溶解には比較的強く、南大洋や北太平洋などの炭酸塩微化石が産出しにくい海域でも利用可能であることにある。

さらに放散虫は種によって生息水深が異なるため、表層のみではなく、中層や深層域における海洋環境の指標にもなり得る。深海域の古海洋プロキシとして頻繁に用いられているのは底性有孔虫である。底性有孔虫群集は、それらが生息した海底面の環境を指標しているのに対し、放散虫はプランクトンなので水柱（water column）の環境を反映していると考えられる。今のところ放散虫を深層水のプロキシとした古海洋研究の例は少ないが、日本海では過去3万年間の深層循環の変化が復元されている（Itaki *et al.*, 2004）。

これまでの放散虫を用いた古海洋研究は、第四紀を対象にしたものが多かったように思う。しかし、放散虫は第四紀だけでなく、第三紀や中生代、あるいは古生代における海洋環境の指標としても十分に発展し得る。絶滅種の多いこれらの時代で第四紀のような精度の古海洋研究は簡単ではない。しかし、最近放散虫の古生物地理分布が徐々に明らかにされつつあり、たとえば白亜紀末（高橋・石井、1993）、ジュラ紀末（松岡、2000）、古生代・中生代境界（指田ほか、1998）などについては古海洋環境との関連性が指摘されている。近い将来、放散虫化石から中古生代における詳細な海洋像が復元されるかもしれない。

おわりに

放散虫は、20世紀中頃になると、分類学や生物学的な研究に加え、年代層序や古環境指標として応用されるようになり、それに伴って研究者人口が急増した。そんな中、1978年から放散虫研究の国際会議（INTERRAD）がほぼ3年毎に世界各地で開催されている（発足当初はEURORADと呼ばれていた）。前回は、2003年9月にスイスのローザンヌで第10回目の会議（INTERRAD-X）が行われ、14名の日本人研究者が参加した。いつもの会議よりも日本人の数は少なかったとはいえ、それでも全参加者の20%を占めた。これは参加国の中では最多である。これほどにも日本の放散虫研究が活発になった原因の一つとして、諸先輩たちの努力によって日本の地質学の発展に放散虫が大きな役割を果たした事が挙げられる。

現在の日本の放散虫研究は、これまでと同様に陸上地質

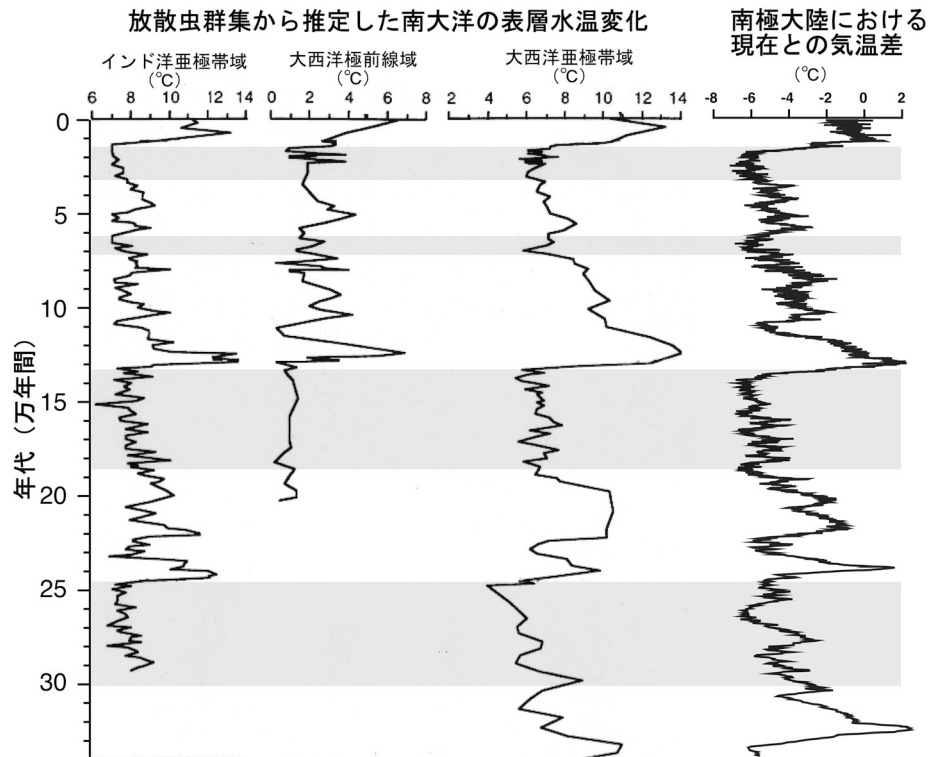


図2. 放散虫群集から推定された南大洋の表層水温変化. Brathauer and Abelmann (1999) の図をもとに作成した. 南極の気温変化は, Vostok 氷床コアの δD と $\delta 18O$ の値から推定されたもの (Petit, *et al.*, 1999) を示す. 灰色で示した帯は氷期に対応する.

を対象とした調査研究も盛んに行われているが、それに加えて海洋コアの研究も増えてきた。また、最近ではプランクトン・ネットやセディメント・トラップを用いた海洋観測、飼育実験、DNA分析など現生放散虫の研究も増え、研究の手法や内容がより多様化しつつある。さらに、IODP (統合国際深海掘削計画) のような国際的にも大きなプロジェクトが日本主導で動き出しており、このようなプロジェクトにおいても放散虫化石は年代指標あるいは古環境研究の重要なツールであり続けることは確かである。このように、最近の国内の放散虫研究は、益々活発になってきており、今後も新たな発展が期待できるだろう。同時にこれは、今後より多くの人材が必要になることを暗示している。私は、読者の皆さんに放散虫の事をより良く知ってもらい、また出来ればこれを研究する立場になってもらって一緒に切磋琢磨できればと願っている。

追記) 本稿では、地学を志向する高校生や若い学部学生にも放散虫のことを理解してもらえよう、極力簡単な説明を心掛けた。しかし、著者の筆バタから放散虫研究の本当の面白さと重要性が十分に伝わっていないかもしれない。これを補うひとつの方法として、インターネットの活用が挙げられる。「放散虫」や「radiolaria」または「radiolarians」などの語を検索すると、多くの項目がヒットする。中には非常に凝ったホームページ (HP) が多数ある。中でも放散虫学のために私がよく使っているHPを幾つか紹介したい。

「radiolaria. org」

(<http://www.radiolaria.org/>) : ノルウェーのオスロ大学が運営・管理しているHPである。ここには、世界各地から採取された放散虫の写真や解説 (現在のところ第四紀と現世のものを中心) の他、19世紀の古典論文のPDFや放散虫のアートも紹介されており、リンクも充実している。

「RadWorld」

(<http://www.mnhn.fr/mnhn/geo/radworldsite/radsearch.html>) : アメリカとフランスの研究者が運営・管理している。とくに新生代の中低緯度域における生層序に有効な放散虫の分類と写真が充実している。

「日本の放散虫研究文献データベース」

(<http://gisws.media.osaka-cu.ac.jp/radio/jindex.php>) : 大阪市立大学で運営・管理されている。日本人が書いた論文と日本人ないし日本で新種記載された放散虫が検索出来る。毎年データが更新されており、1907年以降の論文数の推移や論文で扱っている時代の内訳などがわかる。

謝辞

東北大学の鈴木紀毅博士には、放散虫の写真を提供してもらったことにも有益な助言を頂いた。新潟大学の松岡篤博士、大阪市立大学の桑原希世子博士、東北大学の畠田健太

朗氏には放散虫の写真を提供して頂いた。以上の方々にお礼申し上げます。

文献

- Brathauer, U. and Abelmann, A., 1999. Late Quaternary variations in sea surface temperatures and their relationship to orbital forcing recorded in the Southern Ocean (Atlantic sector). *Paleoceanography*, **14**, 135-148.
- Casey, R. E., 1977. The ecology and distribution of recent radiolarial. In Ramsay A.T.S., ed, *Oceanic micro paleontology*, vol.2, 809-845, Academic Press, London, UK.
- De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J. P., Nigrini, C. and Caridroit, M., 2001. *Radiolarians in the sedimentary record*. Breach Science Publishers, the Netherland.
- Erbacher, J. and Thurow, J., 1997. Influence of oceanic anoxic events on the evolution of mid-Cretaceous radiolaria in the North Atlantic and western Tethys. *Marine Micropaleontology*, **30**, 139-158.
- Erbacher, J., Huber, B. T., Norris, R. D. and Markey, M., 2001. Increased thermohaline stratification as a possible cause for an ocean anoxic event in the Cretaceous period. *Nature*, **409**, 325-327.
- 磯崎行雄, 1999. 大量絶滅, ニュートン6月号, 32-69.
- 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., Ito, M., Narita, H., Ahagon N. and Sakai, H., 2003. Depth distribution of radiolarians from the Chukchi and Beaufort Seas, western Arctic. *Deep-Sea Research Part I*, **50**, 1507-1522.
- Itaki, T., Ikehara, K., Motoyama, I., and Hasegawa, S., 2004. Abrupt ventilation changes in a marginal sea of the NW Pacific over the last 30 kyr: Evidence from deep-dwelling Radiolaria in the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **208**, 263-278.
- 桑原希世子・八尾 昭, 2001. 美濃帯層状チャートにみられるペルム紀新世の放散虫群集の変遷. 大阪微化石研究会誌特別号, 第12号, 33-49.
- Lombardi, G. and Boden, G., 1985. Modern radiolarian global distributions. In Culver, S.J., ed., *Cushman Found. Foraminiferal Res., Spec. Publ. No.16A*.
- 松岡 篤, 1992. 西太平洋のジュラ紀海洋地核. 月刊海洋, 号外(6), 258-263.
- 松岡 篤, 1996. Vallupus テリトリー (ジュラ紀放散虫地理区) と東アジアの中生代テクトニクス. 月刊地球, **18**, 754-758.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Itaki, T., and Kawasaki, Y., 2004. Comparison of radiolarian vertical distributions in the Okhotsk Sea near Kuril Islands and the northwestern North Pacific off Hokkaido Island. *Marine Micropaleontology*, **51**, 257-284.
- Petit J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, Z., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399**, 429-436.
- 指田勝男・Sardsud, A., 猪郷久義・Nakomsri, N., 安達修子, 上野勝美, 1998. タイ国半島部の Phatthalung 地域から産する Dienerian (下部三畳系) 放散虫とペルム紀-三畳紀 (P/T) 境界付近の放散虫生層序. 大阪微化石研究会誌特別号, (11), 59-70.
- 平 朝彦, 1990. 日本列島の誕生, 226p. 岩波新書.
- Takahashi, K., 1997. Time-series fluxes of Radiolaria in the eastern subarctic Pacific Ocean. NOM, Spec. Vol., (10), 299-309.
- 高橋 修・石井 醇, 1993. 最上部白亜系 *Amphipyndax tylotus* Zone の放散虫化石似よる古海洋環境の推定. 大阪微化石研究会誌特別号, (9), 261-270.
- Yamashita, H., Takahashi, K. and Fujitani, N., 2002. Zonal and distribution of radiolarians in the western and central Equatorial Pacific in January 1999. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 2823-2862.
- 八尾 昭・桑原希世子, 1997. ペルム紀新世から三畳紀中世にかけての放散虫群集の変遷. 大阪微化石研究会誌特別号, (10), 87-96.

