過去64万年間の日本海における深海性放散虫の変遷

板木拓也

釜山大学・地球環境システム学科

Historical changes of deep-sea radiolarians in the Japan Sea during the last 640 kyrs

Takuya Itaki

BK 21 Coastal Environmental System School, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea (t-itaki@pusan.ac.kr)

Abstract. The assemblage of the recent deep-dwelling radiolarians in the Japan Sea is characterized by the lack of primary deep-water species, which typically occur in the great depths of the world ocean, and by predominance of the secondary deep-water species *Actinomma boreale* group and *Cycladophora davisiana*, which usually live in the subsurface or intermediate depths in the high latitude oceans. Such peculiar assemblage was formed with the beginning of active deep-convection in the Japan Sea during the deglacial period. In contrast to this assemblage, during the last glacial maximum, a modern intermediate-water species, *Ceratospyris borealis*, dominated the radiolarian assemblages and probably had a habitat between low salinity surface water and anoxic deep water. The secondary deep-water species *C. davisiana* significantly varied in abundance since 640 ka. During the MIS-5 to -3 characterized by millennial scale climatic changes known as the Dansgaad-Oeschegar Cycles, *C. davisiana* increased frequently at transition periods from interstadial to stadial conditions. Such high abundance of this species might be related to well oxygenated deep waters which were associated with active deep-convection and to a supply of higher organic matter, considering the correlation between the high abundances of the species and the dark laminated layers observed in the studied cores.

Key words: Radiolaria, deep dweller, Japan Sea, Pleistocene, Holocene, biotic response

はじめに

浮遊性の原生生物であるポリキスティナ放散虫(以降, 単に放散虫とする)は、主に水塊の性質によってその群 集組成が決定され、日本海のように著しい環境変化を被っ た海域においては、その群集変化もまた激しいものであっ た.このような変化は、堆積物中に記録された放散虫の化 石群集から読み取ることができる.二酸化珪素の硬骨格 を持つ放散虫は、炭酸塩補償深度(Calcite Compensation Depth: CCD)が著しく浅い日本海の堆積物(Ichikura and Ujiié, 1976)においても良く保存されており、連続的 な化石記録を取得することが期待できる.彼らは、地質時 代の環境変化に対して海洋生物が如何にして適応してい たのか、あるいは適応できなかったのか、それを物語る証 人に他ならない.そして、そこから得られる様々な事実は、 これから引き起こされるであろう環境変化に対する警鐘 となるかもしれない.

古生物学会2006年年会(島根)のシンポジウム「日本 海の生物相の変遷と環境変動〜過去,現在そして未来へ向 けて」では,板木が現在から中期更新世,上栗・本山が 中期更新世から中新世における放散虫群集の変遷につい て紹介した.上栗・本山は,深海掘削コア DSDP 302 地 点の試料を検討し,現在のような日本海の特異な群集が 最初に形成されたのは後期鮮新世であることを指摘した (上栗・本山,2007本特集号).これは北半球に氷床が発 達して氷期・間氷期の周期的なサイクルが開始した時期と 一致する.また,日本海の地形的隔離が顕著になった時期 でもある.つまり,現在の群集の特異性は,このような気 候変動や地形の変化によって形成されたことが示唆される. 板木は,その後の振幅の大きい周期的な気候変動に対して 放散虫群集がどのように応答してきたかについて言及した.

小論では、主に板木(2001), Itaki (2003), Itaki and Ikehara (2003), Itaki et al. (2004, 2007) により得られた成 果と今回新たに示す幾つかのデータに基づいて、日本海 における現在の放散虫群集の特性と過去64万年間の放散 虫群集変化について総括してみたい.ここでは、以下の3 つの期間に区分して章立てしている.最初は、現在の海洋 環境と放散虫群集との間にどのような対応関係があるの かを見てみる.ここでは、とくに日本海の深海群集の特異 性と海洋循環との関係に注目したい.続いて、そのような



図1. 日本海の海底地形と試料の採取地点. 黒矢印は暖流, 白矢 印は寒流を示す. なお, 図中の略語は以下の通り; TSS. 対馬 海峡, TGS. 津軽海峡, SS. 宗谷海峡, TS. タタール海峡.

深海群集が最終氷期以降の環境変動によってどのように 影響されたかについて考察する.これによって,現在の群 集が最終的に形成された時期やその原因について言及す る.そして最後に,より以前の氷期・間氷期変動に対して 放散虫群集がどのように応答したかについて見てみたい. なお,ここで扱った研究の試料採取地点を図1に示す.

現在の群集とその特異性

一般に放散虫の多くは表層ないし亜表層に生息してい るが、中には中層や深層のような200m以深の深海に生 息している種も知られている.日本海北部のSt.GH99-N1 (北緯43°、東経137°)から採取されたプランクトン・ネッ ト試料をもとに放散虫の生息水深を調査したItaki (2003)は、 種ごとの主要な生息深度の分布を次の4つのグループに区 分した:(1)水深40~120mの表層、(2)40~300mの 亜表層~中層、(3)200~300mの中層、(4)1000~ 2000mの深層.この深度区分は、鉛直的な水塊構造と も良く一致し、放散虫の生息水深が水塊の性質と深く関 わっていることを示唆している.

このように、放散虫は種によって生息水深が異なるの で、堆積物中に記録された群集はそれよりも浅い水深の水 柱全体で形成された群集が集積した結果であると言える. 言い換えると、表層堆積物に記録された遺骸群集の深度分 布は、水柱におけるそれらの生息水深を反映しているはず である.実際、プランクトン・ネットと表層堆積物から 得られた放散虫群集の深度分布を比較すると両者には幾 つかの共通点が認められる(図2).たとえば、最も優占 する Larcopyle buetschlii Dreyer の幼形と成体の入れ替わ る水深が 200 m付近にある.また、Cycladophora davisiana Ehrenberg が多産する水深は、両者とも 1000 m以深であ る.これらの事実は、堆積物の深度分布を丹念に調べるこ とでも放散虫の生息深度を推定することができることを 意味している.

また, Actinomma boreale Cleve group (ここでは, A. boreale に加え類似した形態を持つ Actinomma leptoderma Jørgensen を本グループに含めている) についても興味深 い結果が得られた.本種は、水深1000~2000 mから得 られたプランクトン・ネット試料に僅かに認められ、表層 堆積物でもこの深度帯で僅かに産出する. ところが,水深 2000 m以深の表層堆積物になるとその頻度が著しく増加し, 最大で40%に達する優占種となる.残念ながら2000m以 深からのプランクトン試料の分析結果は得られていないが, この事実は少なくとも本種の主要な生息水深が 2000 m以深 であることを強く示唆している.一般に深海に生息する放 散虫は、その存在量が少ないために優占種になることは稀 である (Kling and Boltovskov, 1995). 日本海で A. boreale group が 2000 m以深に主に生息し、さらに優占種となる ことは、非常に希有な現象と言えるだろう.おそらく、本 種は日本海の底層水(約2000m以深)のように非常に寒 冷で酸素に富み、かつ餌となる有機物が豊富な環境に適応 しているものと考えられる.

ところで、日本海の 1000 m以深の放散虫群集を占める C. davisiana と A. boreale group は、他の海域では亜表層な いしは中層に生息することが知られている。例えば、日本 海に隣接するオホーツク海での C. davisiana の主要な生息 水深は 200 ~ 500 m である (Nimmergut and Abelmann, 2002; Okazaki et al., 2003). また、北極海やノルウェーの フィヨルドでは A. boreale group は主に亜表層 (50 ~ 300 m) に生息している (Bjørklund, 1974; Itaki et al., 2003). こ のように比較的に浅い水深に生息する種がより深い水深 に移入して生息しているものを二次的深海種と呼ぶ. 一 方、世界の大洋の数百 m 以深で普通に認められる典型的 な一次的深海種(例えば、Cornutella profunda Ehrenberg など)は日本海では全く認められない. このように、一次 的深海種が欠如し、その代わりに二的次深海種が優占する というのが日本海の放散虫群集の特異な点と言える.

何故,日本海の深海に生息している放散虫は,他の海 域よりも深い生息水深を示すのか,二次的深海種である *C. davisiana* を例にとって考察してみよう.

*C. davisiana*は、オホーツク海の優占種(最大 40 %を超 える)でもあり、本種が好んで生息する水深 200 ~ 500 m



図2. プランクトン・ネット(左)および表層堆積物(右)から得られた放散虫群集の深度分布. 図中の略語 JSBW は, Japan Sea Proper Water (日本海固有水)を示す.

はオホーツク海中層水と呼ばれる低い水温と高い溶存酸 素で特徴付けられる (Nimmergut and Abelmann, 2002; Okazaki et al., 2004). この水塊は、オホーツク海北部陸棚 で海氷の形成に伴って中層に沈降した水(ブライン)を起 源としており、更にこのような水塊の沈み込みにともなう 有機物の中層への輸送も本種の高い産出頻度を左右してい るようだ (Okazaki et al., 2003). 同様の水塊の沈み込みは 日本海にも認められる.日本海北西部のウラジオストッ ク沖では、冬期モンスーンによる海面冷却と海氷形成に ともない表層水が数千mの深海にまで沈降する(例えば、 Talley et al., 2003). その結果,日本海の深層には低温で溶 存酸素に富んだ水塊が供給され、これは日本海固有水と呼 ばれている (例えば, Sudo, 1986). C. davisiana が好んで 生息する水塊は、こうした表層から沈み込んできた低温で 溶存酸素に富んだ中深層水であることが伺える. 日本海で の水塊の沈降が数千mに達するのに対し、オホーツク海で は1000mよりも浅い. この原因は、オホーツク海中層水の 下にはより密度の高い北太平洋深層水が存在し、中層水の 1000m以深への沈降を妨げているためである.日本海では 浅い海峡(130m)が北太平洋の中深層水の進入を妨げて おり、沈み込みが比較的に容易に深海にまで達するのであ る. この水塊の沈み込む深さの違いが日本海とオホーツク 海での C. davisiana の生息深度の違いを引き起こしている主 要な原因と考えられる. 日本海で一次的深海種が欠如する 理由も、このような浅い海峡の存在によって外洋から日本 海への移入が阻まれているためと考えられる.

放散虫に見られる二次的深海種の優占という群集組成

上の特異性は、日本海に生息している他の生物群、たとえ ば底生生物や遊泳生物あるいは他の動物プランクトンに も当てはまる(例えば、西村、1974; Terazaki, 1993).こ れは、この海が浅い海峡によって外海から隔離されている ことと特異な海洋循環が存在することに加え、過去の海洋 環境の変化も密接に関連しているものと考えられている. 次章では、放散虫の化石記録から、深海群集の起源につい て言及してみたい.

最終氷期~完新世の群集変化

海底コアを用いた放散虫の研究からは、これまでにも更 新世から完新世にかけての著しい群集変化が明らかにさ れている(酒井, 1984; Morley and Robinson, 1986; 板木, 2001; Itaki et al., 2004, 2007). そして、最近の年代決定精 度の向上や様々な古海洋指標との比較によって、これら の放散虫の群集変化が地球規模の気候変動とも密接に関 連していることが明らかにされつつある.本章では、多 くのコア試料が存在し、また古環境が比較的によく分かっ ている最終氷期以降の日本海について、放散虫群集の深度 分布がどのように変化したかについて示し、さらにその原 因について考察する.

Itaki et al. (2004) は、日本海の北東部および東部の807 ~ 3613 mの様々な水深で採取された7本のコアを用いて 最終氷期以降の放散虫の深度分布を復元した.本論ではよ り詳細なイメージを得るためにItaki et al. (2004) で得られ た結果に加え、日本海南部の水深283 mから採取されたコ

板木拓也



図3. 様々な水深から採取された9本のコアに記録された放散虫群集の変化. コア GH872-K-B の年代は Domitsu and Oda (2006) を参考に した.

ア GH872-K-B (北緯 36°5', 東経 135°, コア長 304 cm) と Itaki and Ikehara (2003) で報告した日本海北部の水深 838 mから採取されたコア GH98-1232 の結果も合わせて図 示する (図3). なお, コア GH872-K-B のデータは本論 で新たに報告するもので, その処理法は Itaki et al. (2004) に準じている. この図からも明らかなように, 過去 3.5 万 年間に放散虫群集は著しく変化しており, また明瞭な深度 による差異も認められる. 図4は, 最終氷期最寒期および 遷移期をそれぞれ代表する 1.9 万年前と 1.2 万年前におけ る放散虫群集の深度分布の時間断面である. 現在 (完新世) の深度分布を示した図 2 と比較すると, 各時代でそれぞれ 特徴的な群集およびその深度分布が存在したことが分か る.

最終氷期最寒期の放散虫群集は、いずれの水深におい ても*Ceratospyris borealis* Bailey が優占する (図 4b). *C. borealis* は、現在のベーリング海やオホーツク海など

で多産することが知られている寒冷種(Ling et al., 1971; Nimmergut and Abelmann, 2002) で、数は少ないものの 現在の日本海では中層水(200~300m)に主に生息して いる(Itaki, 2003). この種が優占する最終氷期最寒期は, -130 mにも達する世界的な海水準の低下(Yokoyama et al., 2001)に伴い、日本海は現在よりも更に外海から隔離され た状態にあった. この時期, 表層水の著しい低塩分化で成 層構造が発達し、500m以深の海底には堆積物にラミナの 発達するような環元的な環境が形成された(例えば,Oba et al., 1991; Ikehara et al., 1994). このような表層の低塩分 水や深海の貧酸素環境で放散虫が繁殖するという事実は これまで報告されていない. そのため、当時の日本海には 表層と 500 m以深の深海には放散虫は生息していなかっ たであろう. 一方 C. borealis は、これらの不適な水塊に影 響しない中層水に生息していたためにこの時期の日本海 で生存することができたと考えられる.



図4. 遷移期(a)および最終氷期最寒期(b)における放散虫群 集の深度分布の時間断面.

遷移期(最終氷期が終了して海水準が急激に上昇を始め た1.8万年前から完新世に至る1.1万年前までの期間)は, 日本海の 放散虫群集 も 著 し く 変化 する. C. davisiana と A. boreale group が 日本海の 深海放散虫群集の 優占種 に なったのはこの頃である(図4a).この時期には親潮起源 の比較的に塩分が高い水が供給されて深層循環が駆動し, それによって深海に低温で酸素に富んだ水塊が満たされ るようになった (Oba et al., 1991; Tada et al., 1999). その 結果、他の海では寒帯~亜寒帯の亜表層~中層に生息する C. davisiana や A. boreale group の日本海深層への移入が可 能となったものと考えられる.また,他の海では寒帯~ 亜寒帯域の陸棚に生息するような底生有孔虫の Elphidium excavatum (Terquem) clavatum Cushman もこの時期に日 本海の深海に移入していたことが知られており(例えば, 加藤, 1984), 当時の二次的深海種の移入が放散虫だけで はないことを示している. このシナリオは, 動物プランク トンのヤムシ類が二次的深海種として日本海の深海に生 息する理由として、当時の親潮水流入に関連しているとす る Terazaki (1993) の推定を支持するものである.

放散虫は、その後の様々な環境変化(例えば、ヤンガー ドリアス寒冷期や縄文海進温暖期など)の影響も受け、最 終的に *A. boreale* group が 2000 m以深で多産する現在のよ うな群集の深度分布構造が形成されたのは約 5000 年前の ことである(図 3).

中期~後期更新世(過去64万年間)の群集変化

ところで,最終氷期から完新世にかけて認められた優 占種がほとんど入れ替わってしまうような群集の著しい

変化は、それ以前の氷期・間氷期周期(ミランコビッ チ・サイクル)あるいはより短周期の気候変動(ダンス ガード・オシュガー・サイクルなど) でも認められるの であろうか? 2001 年の IMAGES 航海(WEPAMA) で は、日本海の隠岐堆(北緯37°04'、東経134°42'、水 深932 m) と秋田沖(北緯39°34', 東経139°24', 水 深806m)から2本の長尺コアが採取された.隠岐堆 で採取された全長56mのコア(MD01-2407)は過去 64万年間 (Kido et al., 2007), 秋田沖の33 mのコア (MD01-2408) は過去22万年間(Watanabe et al., 2007) を連続的に記録している. このうち MD01-2407 の 16 万 年前以降(上部15m)とMD01-2408の過去22万年間 については、放散虫の群集変化が報告されている(Itaki et al., 2007).本論では、MD01-2407の15~56mについ て 74 層準(平均 6000 年間隔)を Itaki et al. (2007) の手法 に従って追加分析し、過去64万年間の群集変化を明らか にした(図5).日本海においてこの精度の試料間隔で過 去60万年間以上の放散虫群集を明らかにした例はこれま でない.

放散虫は、酸素同位体比ステージ(Marine Isotope Stage, MIS)16の一部を除き、増減しながらも全ての試料 で産出した(図5).産出した放散虫化石の保存状態は概 ね良好で、溶解や物理的破損などによる群集の著しい変質 はないものと思われる.放散虫の産出しなかった MIS-16 でも、同じ珪質微化石の珪藻は良く保存されていたため、放散虫の無産出は殻の溶解によるものではないと考えら れる.

Tetrapyle octacantha Müller は、対馬海流 によって東シ ナ海から運ばれてくる温暖で栄養塩に富んだ表層水を好 んで生息している(本山,1995; Chang et al., 2003). その ため、T. octacantha の頻度は対馬海流が日本海に流入して いた間氷期に増加するが、氷河性の海水準低下のために対 馬海流の流入量が著しく減少していた氷期にはほとんど 産出しない.氷河性海水準変動と連動している酸素同位体 比の標準カーブと比較すると、日本海では海水準が-60 m よりも高い期間に限ってT. octacantha が産出することが分 かる(図 5).

氷期に増加する種としては*C. borealis* と *Amphimelissa* setosa (Cleve) が挙げられる. *C. borealis* は,前章でも示 したように最終氷期極相期の中層水を特徴づける放散虫 である.本種は,MIS-2以外ではMIS-6とMIS-16の氷 期で多産するものの,他の氷期での頻度はそれほど高くは ない.一方,*A. setosa* は,8.5万年前よりも以前の時代に 限って産出し,氷期に増加して間氷期に減少する明瞭な 変化を示した(図5).本種は,現在の北極海における優 占種として知られている(例えば,Bjørklund *et al.*,1998; Itaki *et al.*,2003). この海域のプランクトン観測からは, *A. setosa* は海水の結氷点に近い低温(-1.7°C)の亜表層 水(50~150 m)に生息し,また生物生産の高い氷縁域 で多産すると考えられている(Itaki *et al.*,2003).後期更



 図5. 隠岐堆で採取されたコア MD01-2407 に記録された堆積物 1g中に含まれる全放散虫の個体数と主要種の相対頻度の変化. 最上段は、酸素同位体比標準カーブ(Bassinot *et al.*, 1994).
MISは、酸素同位体比標準カーブに基づくステージ(Marine Isotope Stage).

新世におけるこの種の消滅は、日本海以外でも北太平洋 亜寒帯域、ベーリング海、オホーツク海で知られている (Kruglikova, 1976; Matul *et al.*, 2002; Okazaki *et al.*, 2005; Tanaka and Takahashi, 2005). Itaki *et al.* (2007) は、彼 らが北太平洋域では消滅して北極海では生き残った理由 として、この時期に一時的に起こった温暖化と関連してい る可能性を指摘している.

このように表層~中層に生息する温暖種や寒冷種の変 化は氷期・間氷期変動に概ね同調しているが、二次的深海 種の*C. davisiana*は、例えば MIS-1,3,5b~5c,7,9~10, 12 で増加するなど、とくに氷期・間氷期周期の変動と同 調しているようにはみえない(図5).その一方で、試料 間隔が密な16万年前以降についてはさらに細かい周期性 が認められる.

更新世の特徴的な現象としてもうひとつ挙げられるの は、ダンスガード・オシュガー・サイクル (DansgaadOeschger Cycles, DOC)と呼ばれる数百~数千年周期の 気候変動である(例えば Taylor *et al.*, 1993). これは, グ リーンランド氷床コアの酸素同位体比記録に認められた 周期的変動であり,日本海(Tada *et al.*, 1999),中国(Wang *et al.*, 2001),北東太平洋(Behl and Kennett, 1996),ア ラビア海(Altabet *et al.*, 2002)など世界中の様々な地域 で見出されている環境変動と関連付けられている.

図6には, DOC が顕著な12万年前~3万年前につい て C. davisiana の相対頻度(全群集に占める%:実線)と 絶対頻度(堆積物の乾燥重量1g当たりの個体数:点線) の変化を示した.また、この図には同じコアから得られた 堆積物の色(L*:明るさの度合い)と炭酸塩含有量(Kido *et al.*, 2007) に加え, グリーンランドの氷床コア(GISP-2) から得られた酸素同位体比記録も並べて示す. L* 値は, 数字が大きいほど堆積物が明るく,小さいほど暗い色調 を呈していることを示している.図6を見ると分かるよ うに、L*値には氷床コアの酸素同位体比カーブに似た周 期変動パターンが認められる.日本海堆積物中の暗色層 は,多くの場合,有機物に富んでいてラミナが発達してお り、堆積当時の表層水の高い生物生産と海底の還元的な環 境を示唆している. このような暗色層が堆積した時期は DOC の中の温暖な時期(interstadial)に対応し、東シナ 海沿岸水からの栄養塩の供給で表層の生物生産が増加し た結果, 有機物が水柱または海底で分解されることで酸素 が欠乏していたと考えられる(Tada et al., 1999).

前述したように、C. davisiana が高い頻度で産出する条 件として, 中深層に低温・高酸素の水塊が供給されること と、餌として豊富な有機物が存在することが挙げられる. 堆積物の暗色層についても海底に供給される酸素ないし は有機物の量のバランスで形成されるか否かが決定され る. したがって、堆積物の明暗互層と C. davisiana の産出 量の間には密接な関係があるものと考えられる.一見,コ ア MD01-2407 の C. davisiana と L* 値の間には明瞭な共通 点は見えない(図6).しかし、よくみると C. davisiana が 顕著に増加する期間(図6の灰色帯で対比した部分)が 暗色層から明色層への遷移期, すなわち DOC の温暖期か ら寒冷期への遷移期付近に発生する傾向がある.この期間 は、東シナ海沿岸水の流入減少とともに海底に輸送される 有機物量が徐々に減り始め、さらに寒冷化の開始にともな う深層循環の活発化で海底の酸素レベルが上昇していた. 例えば, C. davisiana が増加していた約8万年前, 10万年 前および11.5万年前はいずれもこのような時期に当たる が、同時に炭酸塩の含有量が著しく低下している(図6). このような暗色層中での炭酸塩の減少は、大量の有機物 が酸化分解されることで海底面が酸性になり溶解した結 果と考えられる (Kido et al., 2007). つまり, 海底まで 有機物と酸素の両方が十分に供給されていた証拠であり, C. davisiana が深層水で増加するうえでの条件が揃ってい たものと考えられる. 逆に, C. davisiana が暗色層で少な いのは,水柱の酸素量が減少していたためで,明色層で少



図6. コア MD01-2407 に記録された C. davisiana の相対頻度(全群集に占める%:実線)と絶対頻度(堆積物1g当たりの個体数:点線) を12万年前~3万年前について拡大したもの. 同コアから得られた堆積物の色調(L*:明るさの度合い)と炭酸塩含有量(Kido et al., 2007)およびグリーンランドの氷床コア(GISP-2)から得られた酸素同位体比記録(Taylor et al., 1993)も合わせて示す.

ない場合は、本種の生息深度が水深1000m以深にシフト していたか、もしくは有機物量が少なかったことの何れか が考えられる.

ところで, DSDP 302 地点で上栗・本山(2007 本特集号) が示した中深層種 15 種のうちコア MD01-2407 で産出する のは二次的深海種の C. davisiana と A. boreale group(約40 万年前に僅かに産出するのみ)の他に中層種の C. borealis と L. buetschlii があるのみである.多くの一次的深海種は 後期鮮新世に日本海から消滅しており(上栗・本山,2007 本特集号),堆積物の暗色層が示すような深海の貧・無酸 素環境の形成開始がその原因のひとつと考えられる.その 結果,更新世の日本海の深海群集は,深層の貧・無酸素環 境には影響されない中層種と深層が酸化的になった時期に 限って移入する二次的深海種によって構成されるように なったのであろう.

おわりに

本論では、以上に、日本海における中期更新世〜完新世 の放散虫研究に関して一部に新しいデータを加えて簡単 にまとめてみた.このように温暖化あるいは寒冷化が深 海の群集にも大きな影響を与えてきたことが見受けられ たと思う.紙面の都合上、今回は深海群集にテーマを絞っ たが、実際には日本海の放散虫を扱った論文や研究発表 が他にも多く存在する.また、今回のシンポジウムでは、 上栗・本山の研究発表と合わせることで、日本海における 中新世以降の放散虫記録を概観することが可能になった. 日本海の大部分は CCD よりも深いこともあり,これだけ 連続的な記録が得られる海生原生生物の化石は,日本海で は今のところ放散虫の他には見あたらない.

今後の課題として、過去の放散虫の深度分布について 様々な水深から得られるコアをもとに解明する必要があ る. これに関しては、最終氷期以降についてのみ行われて いるが、例えば、本論で扱った中期更新世の記録について は水深 932 m で採取されたコア MD01-2407 から得られた のみである. また, 上栗・本山(2007本特集号)が中期 更新世~中期中新世の放散虫群集を報告した DSDP 302 地 点の水深は2399mである.とくに二次的深海種は、その 生息深度を大きく変えることがあり、 過去においてどの水 深帯に生息していたのかを確かめるためには, 採取水深が 異なる複数のコアの記録を同じ時間面で比較する必要があ る. そのためには、コアを対比するための年代解像度の向 上,様々な指標で復元される過去の海洋環境との比較など, 放散虫研究以外の分野との連携も必要不可欠である.また, 東シナ海など隣接する海域からも放散虫群集の変化を明ら かにし、各海域間での放散虫の移入経路を検討することも必 要であろう.現在,統合国際深海掘削計画(IODP)に日本 海と東シナ海の掘削提案がなされている(Proposal #605). このような試料が得られれば、上述したような課題を検証 することで放散虫のようなプランクトン群集が日本海でど のような過程を経て形成され、またそれが海洋環境の変化 に対しどのように応答してきたのかについて一層理解を深 めることができるものと期待される.

謝辞

筑波大学の本山 功博士と東北大学の鈴木紀毅博士に 本論文の原稿を丁寧に査読して頂き,多くの有益な助言を 承った.筆者がノルウェーに滞在中,オスロ大学のK.R. Bjørklund 博士には本研究に関して議論して頂き,また I. A. Yurippe 女史には IMAGES コア試料のスライド作 成を手伝って頂いた.以上の方々に,この場を借りてお 礼申し上げる.なお,本研究の一部は,国際プロジェク ト IGCP 476 (代表:多田隆治)の成果である.また,本 研究では,学術振興会特別研究員研究奨励金および富山 県「日本海学」研究助成金(平成 16~18 年度)の一部を 用いた.

文献

- Altabet, M. A., Higginson, M., J. and Murray, D. W., 2002. The effect of millennial-scale changes in Arabian Sea denitrification on atmospheric CO₂. *Nature*, **415**, 15-162.
- Bassinot, F. C., Labeyrie, L. D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackeleton, N. J. and Lancelot, Y., 1994. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth and Planetary Science Letters*, **126**, 91-108.
- Behl, R. J. and Kennett, J. P., 1996. Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific, during the past 60 kyr. *Nature*, 379, 243-246.
- Bjørklund, K. R., 1974. The seasonal occurrence and depth zonation of radiolarians in Korsfjorden, western Norway. *Sarsia*, 56, 13-42.
- Bjørklund, K. R., Cortese, G., Swanberg, N. and Schrader, H. J., 1998. Radiolarian faunal provinces in surface sediments of the Greenland, Iceland and Norwegian (GIN) Seas. *Marine Micropaleontology*, **35**, 105-140.
- Chang, F., Zhuang, L., Li, T., Yan, J., Gao, Q. and Cang, S., 2003. Radiolarian fauna in surface sediments of the northeastern East China Sea. *Marine Micropaleontology*, **48**, 169-204.
- Domitsu, H. and Oda, M., 2006. Linkages between surface and deep circulations in the southern Japan Sea during the last 27,000 years: Evidence from planktic foraminiferal assemblages and stable isotope records. *Marine Micropaleontology*, **61**, 155-170.
- Ichikura, M. and Ujiié, H., 1976. Lithology and planktonic foraminifera of the Sea of Japan piston cores. Bulletin of Natural Science Museum, Series C (Geology), 2, 151-178.
- Ikehara, K., Kikkawa, K., Katayama, H. and Seto, K., 1994. Late Quaternary paleoenvironments of the Japan Sea: A tephrochronological and sedimentological study. *Proceedings of* 29th International Geological Congress, Part B, 229-235.
- 板木拓也,2001.日本海東縁部における過去3万年間の放散虫群集 変遷.大阪微化石研究会誌,特別号,(12),359-374.
- 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., 2003. Radiolarian biozonation for the upper Quaternary in the Japan Sea. *Journal of Geological Society of Japan*, **109**, 96-105.
- 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.
- 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 I*, **50**, 1507-1522.

- Itaki, T., Komatsu, N. and Motoyama, I., 2007. Orbital- and millennial-scale changes of radiolarian assemblages during the last 220 kyrs in the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 115-130.
- 上栗伸一・本山 功,2007.日本海における後期中新世以降の放散 虫群集と海洋環境.化石,(82),36-43.
- 加藤道雄, 1984. 最終氷期以降の日本海 有孔虫 KH-79-3, C-3 コ アの解析を中心にして. 月刊地球, (6), 529-537.
- Kido, Y., Minami, I., Tada, R., Fujine, K., Irino, T., Ikehara, K. and Chun, J. H., 2007. Orbital-scale stratigraphy and highresolution analysis of biogenic components and deep-water oxygenation conditions in the Japan Sea during the last 640 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 32-49.
- Kling, S. A. and Boltovskoy, D., 1995. Radiolarian vertical distribution patterns across the southern California Current. *Deep-Sea Research*, 42, 191-231.
- Kruglikova, S. B., 1976. Radiolarians in the upper Pleistocene sediments of the boreal and northern subtropical zones of the Pacific Ocean. *Oceanology*, **16**, 61-64.
- Ling, H. Y., Stadum, C. J. and Welch, M. L., 1971. Polycystine Radiolaria from Bering Sea surface sediments. *In* Farinacci, A., *ed.*, *Proceedings of the 2nd Planktonic Conference, Roma 1970*, **2**, 705-729, Edizioni Tecnoscienza, Roma.
- Matul, A., Abelmann, A., Tiedemann, R., Kaiser, A., and Nürmberg, D., 2002. Late Quaternary polycystine radiolarian datum events in the Sea of Okhotsk. *Geo-Marine Letters*, 22, 25-32.
- Morley, J. J. and Robinson, S. W., 1986. Improved method for correlating late Pleistocene/Holocene records from the Bering Sea: application of a biosiliceous/geochemical stratigraphy. *Deep-Sea Research*, 33, 1203-1211.
- 本山 功,1995.日本海東部および南部における表層堆積物中の放 散虫遺骸群集(予察).北海道西方海域の環境変動に関する総合 研究,平成6年度研究概要報告書-北海道西方海域-,地質調査 所,167-176.
- Nimmergut, A. and Abelmann, A., 2002. Spatial and seasonal changes of radiolarian standing stocks in the Sea of Okhotsk. *Deep-Sea Research I*, **49**, 463-493.
- 西村三郎, 1974. 日本海の成立-生物地理学からのアプローチ-. 230p, 築地書館,東京.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T., 1991. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during last 85,000 years. *Paleoceanography*, 6, 499-518.
- 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.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Katsuki, K., Ono, A., Hori, J., Sakamoto, T., Uchida, M., Shibata, Y., Ikehara, M. and Aoki, K., 2005, Late Quaternary paleoceanographic changes in the southwestern Okhotsk Sea: Evidence from geochemical, radiolarian, and diatom records. *Dee-Sea Research II*, 52, 2332-2350.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Nakatsuka, T. and Honda, M. C., 2003. The production scheme of *Cycladophora davisiana* (Radiolaria) in the Okhotsk Sea and the northwestern North Pacific: implication for the paleoceanographic conditions during the glacials in the high latitude oceans. *Geophysical Research Letters*, **30**, doi:10.1029/ 2003GL018070.
- 酒井豊三郎, 1984. 最終氷期以降の日本海-放散虫-KH-79-3, C-3 コアの解析を中心にして.月刊地球, (6), 543-546.
- Sudo, H., 1986. A note on the Japan Sea Proper Water. Progress in Oceanography, 17, 313-336.
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I., 1999. Land-ocean linkages over

orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, **14**, 236-247.

- Talley, L. D., Lobanov, V., Ponomarev, V., Salyuk, A., Tishchenko, P., Zhabin, I. and Riser, S., 2003. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, **30**, doi:10.1029/2002GL016451.
- Tanaka, S. and Takahashi, K., 2005. Late Quaternary paleoceanographic changes in the Bering Sea and the western subarctic Pacific based on radiolarian assemblage. *Deep-Sea Research II*, **52**, 2131-2149.
- Taylor, K. C., Lamorey, G. W., Doyle, R. B., Alley, R. B., Grootes, P. M., Mayewski, P. A., White, J. W. C. and Barlow, L. K., 1993. The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change. *Nature*, **361**, 432-436.

Terazaki, M., 1993. Deep-sea adaptation of the epipelagic

chaetognath Sagitta elegans in the Japan Sea. Marine Ecology Progress Series, 98, 79-88.

- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z. S., Wu, J. Y., Shen, C.-C. and Dorale, J. A., 2001. A High-resolution absolutedated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345 – 2348.
- Watanabe, S., Tada, R., Ikehara, K., Fujine, K. and Kido, Y., 2007. Sediment fabrics, oxygenation history, and circulation modes of the Japan Sea during the Late Quaternary. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 247, 50-64.
- Yokoyama, Y., De Deckker, P., Lambeck, K., Johnston, P. and Fifield, L. K., 2001. Sea-level at the Last Glacial Maximum: evidence from northwestern Australia to constrain ice volumes for oxygen isotope stage 2. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 165, 281-297.

