

— 論文 —

北西太平洋西部亜寒帯循環内 Station K2 における レディオラリア (放散虫類)・フラックスの季節変動*

池上 隆仁†・高橋 孝三†・石谷 佳之†・田中 聖二‡

要 旨

北西太平洋西部亜寒帯循環内の時系列観測点 Station K2 において 2005 年 3 月から 2006 年 5 月に設置されたセディメント・トラップの沈降粒子の試料をもとにレディオラリア (放散虫類)・フラックスの季節変化を調べた。その結果, Station K2 の海域はオホーツク海からの陸棚起源の鉄や栄養塩に富んだ水塊及び千島列島沿岸, カムチャッカ半島東岸からの沿岸水の影響を強く受ける環境にあることが示唆された。また, レディオラリアの生息深度ごとにフラックスの季節変化を考察することで西部亜寒帯循環内の様々な深度ごとの水塊環境との関わりが明らかになった。

キーワード: レディオラリア (放散虫類), セディメント・トラップ, 西部亜寒帯循環, Station K2, 北西太平洋

1. はじめに

レディオラリア (放散虫類) は汎世界的に外洋域や半外洋域の海洋に生息し, 表層から深層まで鉛直方向にも幅広く多様な種がみられる浮遊性原生動物である。その群集組成やそれぞれの種の現存量は, 海水温, 栄養塩, 餌, 塩分などの物理, 化学, 生物学的な要因に支配されており, 海洋環境指標として有用である (Takahashi, 1991; 高橋, 1994)。レディオラリアは分類学上ポリキスティナ綱 (Polycystina) とフェオダリア綱 (Phaeodaria) の 2 綱に分類され, 前者はさらにナセラリア亜

目 (Nassellaria) とスプメラリア亜目 (Spumellaria) に分類される (高橋・Anderson, 1997)。ポリキスティナ綱に属するレディオラリアの多くは珪酸塩 ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) の骨格を有し, 堆積物中に保存されやすいため, その群集解析により古環境の復元に貢献してきた (e.g., Piasias *et al.*, 1997)。一方, フェオダリア綱に属するレディオラリアは骨格が多孔質であるため, 溶解の影響を受けやすく, 堆積物中にはほとんど保存されない (Takahashi *et al.*, 1983; 高橋・Anderson, 1997)。この為, その骨格は水柱で沈降中に溶解し, 再び海中の深層に溶存態珪素を供給していると考えられ, 海洋における珪酸塩の循環を考える上で重要である (Takahashi *et al.*, 1983)。

本研究では北西太平洋西部亜寒帯循環域に設置されたセディメント・トラップの試料をもとにレディオラリア・フラックスの時系列変化を調査した。セディメント・トラップは, 海中の沈降粒子を時系列で捕集することがで

* 2009 年 4 月 20 日受領; 2010 年 5 月 7 日受理

著作権: 日本海洋学会, 2010

†九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

‡北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門

〒041-8611 函館市港町 3-1-1

き、それらの沈降粒子を分析することで海洋環境の変化を読み取ることができる。特に沈降粒子中のレディオラリアに関して、生産量やその季節変化などの生態学的情報、エルニーニョ現象との関連性、あるいは水柱における殻の沈降速度や溶解過程などが明らかにされている (e.g., Takahashi, 1983, 1987, 1991, 1997; Takahashi and Honjo, 1983)。しかしながら、捕集される沈降粒子は、海洋表層からセディメント・トラップの設置深度までの各深度からの鉛直的な情報を含んでいる。したがって、各水深での現在の海洋環境とレディオラリア群集との関係を明らかにするにはレディオラリアの各種の生息深度ごとに分けたフラックスを考慮する必要がある。北西太平洋においてレディオラリア・フラックスの変動を深度分布の情報を交えて示した研究では、Okazaki *et al.* (2005) などの研究があり、レディオラリア群集が各水塊の特性や季節変動をどのように反映しているかについて明らかにしている。しかしながら、種ごとのフラックスの季節変動の違いと海洋環境との対応についてその詳細は明らかではない。各水深での現在の海洋環境とレディオラリア群集との関係を検討することはレディオラリア化石から古海洋環境を復元する上で非常に重要である。本研究では北西太平洋西部亜寒帯における現生のレディオラリア・フラックスの季節変動を調査し、周辺海域および各水深での海洋環境変動との関係を明らかにすることを目的として考察を行った。

2. 試料と方法

本研究対象試料は2005年3月から2006年5月にかけて西部亜寒帯循環内 Station K2 (47°N, 160°E, 海底水深 5280 m) の水深 4810 m において設置されたセディメント・トラップ (McLane Mark7G-21 型) により捕集された沈降粒子である (Fig. 1)。リボルバー状に内蔵された 21 本のサンプル瓶が 14–21 日間隔でローテーションするように設定し、サンプルを一定期間ずつ捕集することで、沈降粒子の長期にわたる時系列観測を行った。セディメント・トラップの設置、回収は海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の海洋地球研究船「みらい」によって行われた。なお、トラップが回収され、再設置が行われるまでの 2005 年 9 月 18 日から 10 月 1 日の期間

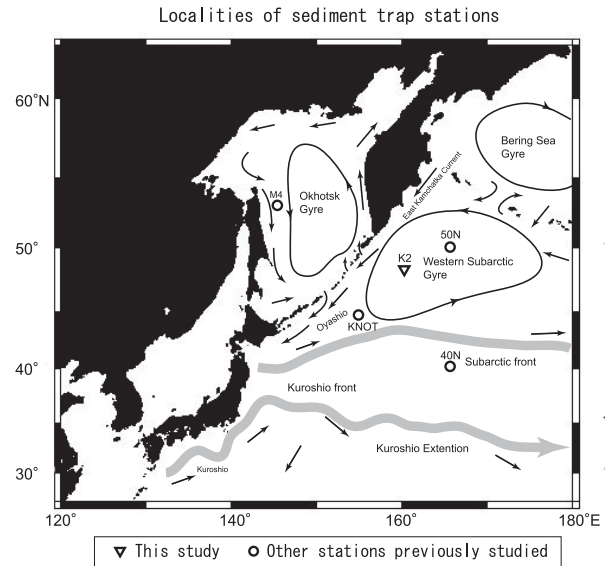


Fig. 1. Map showing the locations of the sediment trap stations in the northwestern Pacific and the Okhotsk Sea. General surface water circulation patterns are also shown. Map was drawn by Online Map Creation (Weinelt, 1996).

の捕集試料は存在しない。

回収した試料は 1 mm 目合いのふるいを用いて大型動物プランクトンが除去された。試料は 1 mm 以下のサイズのレディオラリアの個体数が 200 個体程度となる濃度 (1/20–1/100) にまで分割され、63 μm のふるいを用いて >63 μm と <63 μm とに分けた後、それぞれの粒子サイズをメンブレンフィルター (直径 47 mm, 孔径 0.45 μm , ゲルマン社製) でろ過することで脱塩処理された。ろ過したフィルターは 50 °C に設定された乾燥器内で 24 時間乾燥させた後、カナダバルサムを用いてプレパラートに封入された。

レディオラリアの計数および観察はプレパラート全面を 100 倍から 400 倍で光学生物顕微鏡 (BH-2, オリンパス社製) を用いて行われた。ナセラリア亜目, スプレラリア亜目, フェオダリア綱について種レベルの同定を行い、殻の 3 分の 2 以上が残っているものを 1 個体として計測した。過去の北西太平洋でのプランクトンネットを用いたレディオラリアの研究は >63 μm を対象としており (Kling, 1979; Kling and Boltovskoy, 1995; Nimmergut and Abelman, 2002; Yamashita *et al.*, 2002; Itaki, 2003; Okazaki *et al.*, 2004; Abelman and

Nimmergut, 2005; Tanaka, 2008; Tanaka and Takahashi, 2008), それらのデータとの比較を行うため $>63 \mu\text{m}$ の試料についてのみ計数を行った。

計数したレディオラリア個体数はフラックス (沈降粒子束) と呼ばれる単位時間に単位面積を通過する粒子数もしくは粒子束に換算された。本研究では 1 日に 1m^2 あたりに沈降通過したレディオラリア殻数に換算した。換算式はセディメント・トラップの捕集期間と開口面積, サンプルの分割率を考慮して, 次式によって算出した。

$$\text{Radiolaria flux (No. shells } \text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}) = (N/S/D) \times V$$

N : 殻カウント数 (No. shells)

S : セディメント・トラップ開口面積 (0.5m^2)

D : サンプル瓶あたりの捕集期間 (14–21 day)

V : サンプル分割率 (20–100)

レディオラリアの多様度 (H) に関しては Shannon-Wiener の式を用い, 種の割合から算出した (Shannon and Weaver, 1949)。

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i$$

H : 種の多様度, p : 種の割合, i : 種の順

レディオラリア・フラックスの季節変動の傾向を分類するために R モードクラスター解析を行った。類似度の定義は相関係数を用い, 群平均法により分類した。解析には教育・データ解析用古生物学統計ソフト PAST (Paleontological Statistics) ver. 1.94 b (Hammer *et al.*, 2001) を用いた。

3. 海洋環境概説

北西太平洋は生物生産が高い海域として知られており, レディオラリアや珪藻といった珪質殻のプランクトンの生産と沈降が生物ポンプに大きな役割を果たしている (Honda *et al.*, 2002)。西部亜寒帯循環は, 北西太平洋のほぼ東経 155 度から 175 度までに存在する反時計周りの循環である (Fig. 1)。この循環は, 東カムチャッカ海流が千島列島沿いを南下し親潮となり, それが北海道・東北沖まで南下し, さらにその流路が北東方向に転じて亜寒帯海流を成すことで形成される。親潮はオホーツク海を起源とする流れと東カムチャッカ海流が合流することで形成される。この混合の結果, 中層においてより溶

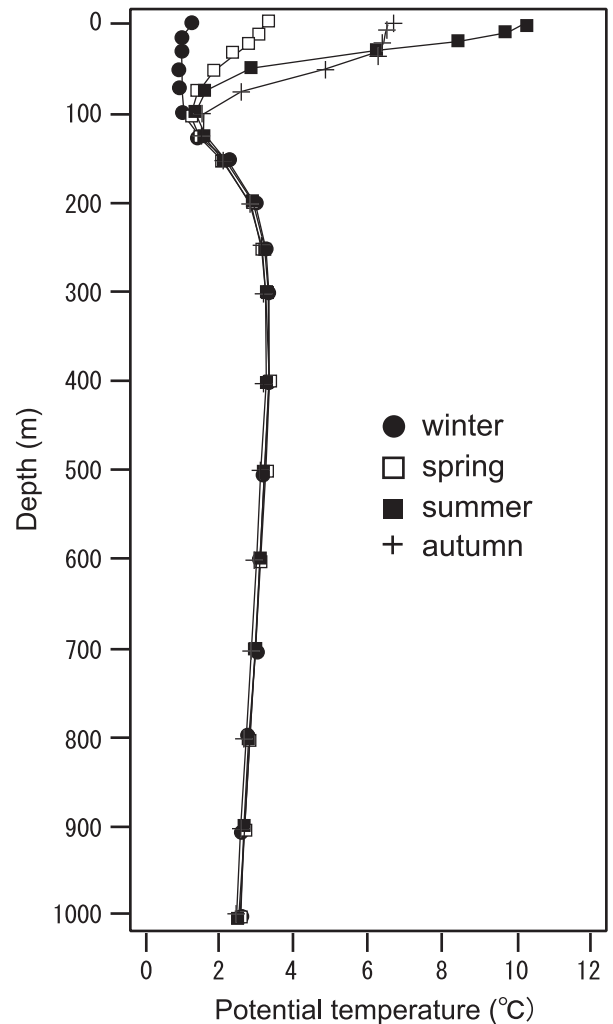


Fig. 2. Seasonal vertical profiles of potential temperature at 46°N , 160°E near Station K2 (Locarnini *et al.*, 2006).

存酸素に富んだ親潮水が形成される (Talley, 1991; Freeland *et al.*, 1998)。西部亜寒帯循環内の鉛直水塊構造は水深 100 m 程度までおよぶ冬季の鉛直混合と, その下部の顕著な塩分躍層による年間を通して安定した成層の形成, そして夏季の顕著な温度躍層とその結果生じる水深 100 m 前後の中冷層, その下部の中暖層で特徴付けられる (Fig. 2) (例えば永田ら, 1992)。また, 西部亜寒帯循環において中暖層は密度 $26.7\text{--}27.1 \sigma_\theta$ で水深 200–500 m に年間を通して存在し, これは親潮水と黒潮水の混合水域からの高温, 高塩分の海水の流入によって維持されていると考えられている (Ueno and

Yasuda, 2000; Endoh *et al.*, 2004)。

4. 結果

4.1 Station K2 における全レディオラリア・フラックスと群集組成

Station K2 において確認されたレディオラリア種は 131 種に及び、そのうちナセラリア亜目が 66、スプメラリア亜目が 51、フェオダリア綱が 14 種であった (Table 1)。Fig. 3 に全レディオラリアとそれを構成する全ポリキスティナと全フェオダリア、さらにポリキスティナを構成する全ナセラリアと全スプメラリアのフラックスを示す。全レディオラリア・フラックスは 2005 年においては 4 月に小さなピーク、8 月上旬には 5,000 shells $m^{-2} d^{-1}$ を超える最大のピーク、2006 年においては 4 月からの大きな増加がみられた。2005 年 3 月から 2006 年 5 月までのその変動幅は 248–5,729 (shells $m^{-2} d^{-1}$) で、調査期間を通じた平均値は 2,584 (shells $m^{-2} d^{-1}$) であった。Shannon-Wiener の式を用いて多様度を算出したところ、変動幅は 4.0 から 5.6 と北西北太平

洋の他の観測点と比較して高い多様度を示したが (Fig. 4)、明瞭な季節的变化は無く、また全レディオラリア・フラックスとの相関もみられなかった。全レディオラリア・フラックスの内訳を見ると、ポリキスティナが 9 割以上を占め、フェオダリアはわずかであった。全ポリキスティナ・フラックスの内訳は 2005 年初夏のナセラリアとスプメラリアの逆転を除けばほぼ全期間を通してナセラリアが 3 分の 2、スプメラリアが 3 分の 1 程度を占めた。全ポリキスティナ・フラックスの平均値は 2,409 (shells $m^{-2} d^{-1}$)、全ナセラリア・フラックスの平均値は 1,456 (shells $m^{-2} d^{-1}$)、全スプメラリア・フラックスの平均値は 953 (shells $m^{-2} d^{-1}$) であった。全ナセラリア・フラックス、全スプメラリア・フラックスの季節変化を比較するとスプメラリアの夏のピークがやや先行しているが、両者とも 2005 年春の小さなピーク、夏の大きなピーク、そして 2006 年春から著しく増加するような類似した傾向を示した。全フェオダリア・フラックスは夏だけでなく秋にもピークを示した。その平均値は 174 (shells $m^{-2} d^{-1}$) であった。全レディオラリア・フラックスのうち上位 10 種を占めたのは *Stylochlamydidium venustum* (Bailey) (年平均 8.1%)、

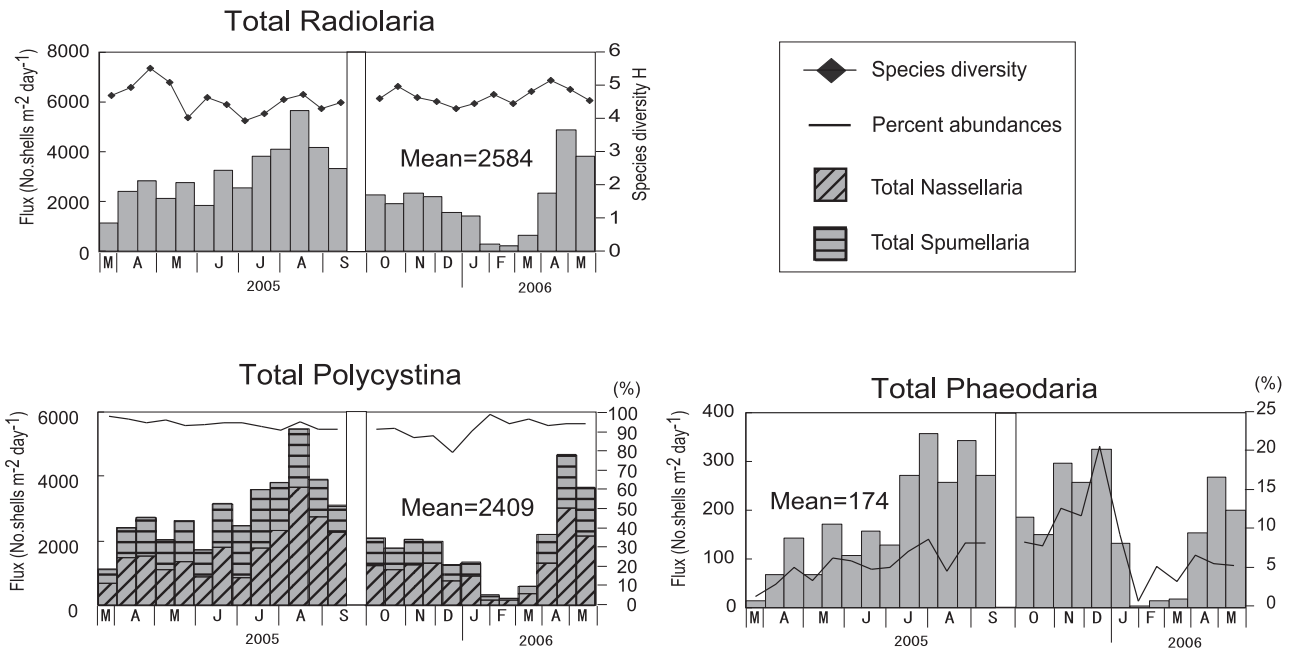


Fig. 3. Seasonal variations of total fluxes of Radiolaria, Polycystina, Phaeodaria, Nassellaria and Spumellaria with their percent abundances and annual mean fluxes at Station K2.

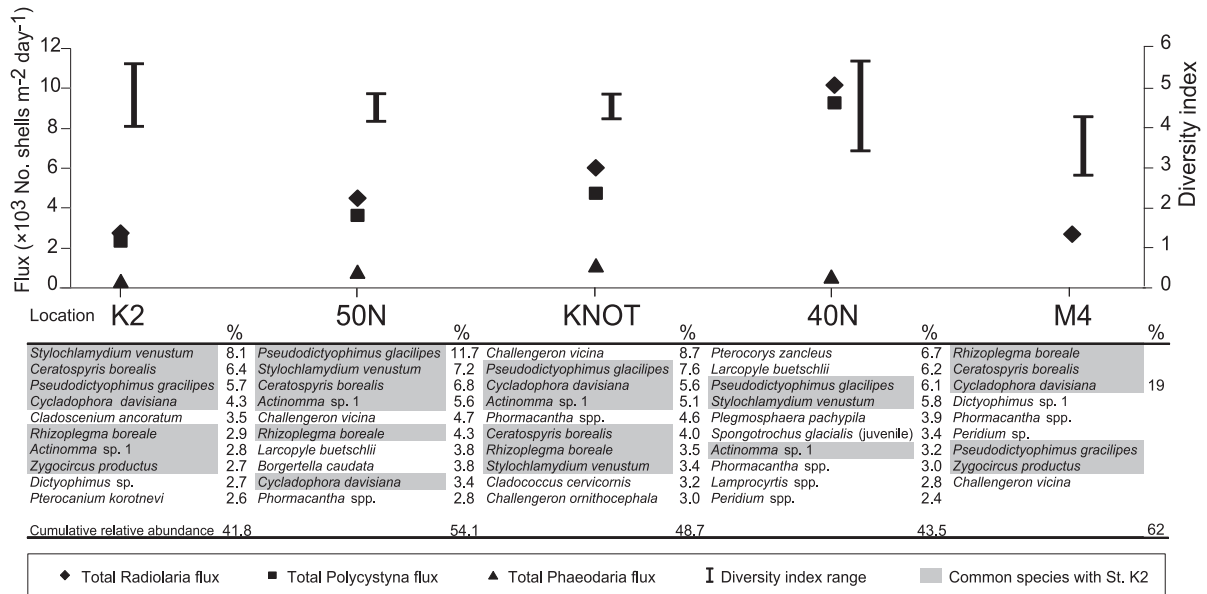


Fig. 4. The annual mean values of daily fluxes of total Radiolaria, Polycystina, Phaeodaria, ranges of diversity index and list of major radiolarian taxa (top ten) with their relative abundances at each station.

Ceratospyris borealis Bailey (6.4%), *Pseudodictyophimus gracilipes* (Bailey) (5.4%), *Cycladophora davisiana* Ehrenberg (4.3%), *Cladoscenum ancoratum* Haeckel (3.5%), *Rhizoplegma boreale* (Cleve) (2.9%), *Actinomma sp. 1* (2.8%), *Zygocircus productus* (Hertwig) (2.7%), *Dictyophimus sp.* (2.7%), *Pterocanium korotnevi* (Dogiel) (2.6%) であった (Fig. 4)。

4.2 クラスタ解析による主要種のフラックス変動の分類

各月でのレディオラリア・フラックスの群集組成を調べ、各月で上位 10 種に挙げた合計 25 種を主要種とした。主要 25 種のフラックス変動について R モードクラスタ解析を行った結果、Cluster A-E の 5 つのグループとこれら 5 つのグループから外れた 4 種に分類された (Fig. 5)。なお、クラスタを決める際の樹形図の切断距離は、各クラスタがフラックス変動の傾向を示すのに適当な 0.5 を選択した。5 つのグループの特徴と構成する種はそれぞれ以下ようになった (Fig. 6)。Cluster A (2005 年の秋から冬に大きなピークが出る) :

Challengeron vicina (Reshetnyak), *Botryostrobos aquilonaris* (Bailey), Cluster B (2005 年夏のピークが他の主要種よりも 1 ヶ月ほど早く出る): *Lophospyris pentagona quadriforis* (Ehrenberg), emend. Goll), *Stylochlamydidium venustum* (Bailey), Cluster C (2006 年 年の春の増加が比較的大きいが季節による増減の差があまりない): *Rhizoplegma boreale* (Cleve), *Cycladophora coronuta* (Bailey), *Larcopyle buetschlii* Dreyer, *Ceratospyris borealis* Bailey, Cluster D (2005 年春の小さなピーク, 夏の大きなピーク, そして 2006 年春からの大きな増加を示す): *Zygocircus productus* (Hertwig), *Pterocanium korotnevi* (Dogiel), *Spongodiscidae spp.*, *Cycladophora davisiana* Ehrenberg, *Actinomma sp. 1*, *Spongurus spindalis* Welling, *Pseudodictyophimus gracilipes* (Bailey), *Artostrobos annulatus* (Bailey), *Peridium sp.*, Cluster E (2005 年夏のピークが他の主要種よりも 1 ヶ月ほど遅れて出て, 秋にも増加が見られる): *Cladoscenum ancoratum* Haeckel, *Phormacantha sp.*, *Dictyophimus sp.*, *Protocystis aduncicuspis* Takahashi. グループから外れた 4 種は *Drupptractus ostracion* Haeckel, *Tholospira cervicornis* Haeckel,

Table 1. List of 131 radiolarian taxa encountered in the sediment trap samples at Station K2.

Taxa	References
Spumellaria	
<i>Actinomma arcadophorum</i> Haeckel	Nigrini and Moore (1979, p. S29, Pl. 3, Fig. 4)
<i>Actinomma boreale</i> Cleve	Cortese and Bjørklund (1998, p. 151, Pl. 1, Figs. 1–18)
<i>Actinomma delicatulum</i> (Dogiel)	Welling (1996, p. 207, Pl. 2, Figs. 5–7)
<i>Actinomma leptoderma leptoderma</i> (Jørgensen)	Bjørklund et al. (1998, p. 128, Pl. 1, Fig. 11)
<i>Actinomma leptoderma longispina</i> Cortese and Bjørklund	Cortese and Bjørklund (1998, p. 153, Pl. 2, Figs. 15–22)
<i>Actinomma medianum</i> Nigrini	Nigrini and Moore (1979, p. S31, Pl. 3, Figs. 5 and 6)
<i>Actinomma popofskii</i> (Petrushevskaya)	Petrushevskaya (1967, p. 23, fig. 12)
<i>Actinomma sol</i> Cleve	Cleve (1900, S31, pl. 3, figs. 5, 6)
<i>Actinomma</i> sp. 1	Abelmann (1992, p. 378, Pl. 1, Fig. 2)
<i>Actinomma</i> sp. A	
<i>Actinomma</i> sp. B	
<i>Actinomma trinacria</i> (Haeckel)	Cortese and Bjørklund (1998, p. 153, Pl. 3, Figs. 20–22)
<i>Cladococcus cervicornis</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 67, Pl. 10, Figs. 8–10)
<i>Cromyomma villosum</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 199, Pl. 11, Figs. 10 and 11)
<i>Dorydruppa bensoni</i> Takahashi	Takahashi (1991, p. 78, Pl. 15, Figs. 11–14)
<i>Druppatractus hastatus</i> Blueford	Boltovskoy and Riedel (1987, p. 97, pl. 1, fig. 21)
<i>Druppatractus ostracion</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 205, Pl. 14, Figs. 3 and 4)
<i>Hexacantium enthacanthum</i> Jørgensen	Nigrini and Moore (1979, p. S45, Pl. 5, Figs. 1a, b)
<i>Hexacantium pachydermum</i> Jørgensen	Cortese and Bjørklund (1998, p. 166, Pl. 1, Figs. 1–11)
<i>Hexacantium</i> spp.	
<i>Larcopele buetschlii</i> Dreyer	Nigrini and Moore (1979, p. S131, Pl. 17, Figs. 1a, b)
<i>Lithelius minor</i> (Jørgensen)	Nigrini and Moore (1979, p. S135, Pl. 17, Figs. 3 and 4a, b)
<i>Lithelius nautiloides</i> Popofsky	Nigrini and Moore (1979, p. S137, Pl. 17, Fig. 5)
<i>Lonchosphaera</i> sp. C	Petrushevskaya (1971, pl. 17, figs. 11–15)
<i>Lonchosphaera</i> sp.	
<i>Lychnosphaera regina</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 65, Pl. 7, Fig. 10)
<i>Plegmosphaera lepticali</i> Renz	Renz (1976, p. 115, Pl. 1, Fig. 14)
<i>Plegmosphaera pachypila</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 62, Pl. 5, Figs. 7–9)
<i>Rhizoplegma boreale</i> (Cleve)	Bjørklund et al. (1998, p. 128, Pl. 1, Fig. 8)
<i>Schizodiscus spatangus</i> Dogiel	Dogiel and Reschetnjak (1952, fig. 4)
<i>Sphaeropyle langii</i> Dreyer	Welling (1996, p. 207, Pl. 3, Figs. 1 and 2)
<i>Sphaeropyle robusta</i> Kling	Morley (1985, Pl. 5, figs. 5A, 5B)
<i>Spongodiscidae</i> spp.	
<i>Spongopyle osculosa</i> Dreyer	Nigrini and Moore (1979, p. S115, Pl. 15, Fig. 1)
<i>Spongopyle</i> sp.	
<i>Spongotrochus glacialis</i> Popofsky	Nigrini and Moore (1979, p. S115, Pl. 15, Figs. 2a–d)
<i>Spongurus cylindricus</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 85, Pl. 17, Figs. 6–9)
<i>Spongurus pylomaticus</i> Riedel	Nigrini and Moore (1979, p. S65, Pl. 15, Figs. 3a, b)
<i>Spongurus spindalis</i> Welling	Welling (1996, p. 212, Pl. 5, Figs. 4 and 5)
<i>Stylatractus</i> sp. A	
<i>Stylatractus</i> sp. B	
<i>Stylatractus</i> sp. C	
<i>Stylatractus</i> sp. D	
<i>Stylochlamydidium venustum</i> (Bailey)	Ling et al. (1971, p. 711, Pl. 1, Figs. 7 and 8)
<i>Stylodictya aculeata</i> Jørgensen	Nigrini and Moore (1979, p. S101, Pl. 13, Figs. 3 and 4)
<i>Stylodictya</i> sp.	
<i>Stylodictya validispina</i> Jørgensen	Nigrini and Moore (1979, p. S103, Pl. 13, Figs. 5a, b)
<i>Stylosphaera hispida</i> Ehrenberg	Welling (1996, Pl. 4, Figs. 3, 4)
<i>Tetrapyle octacantha</i> Muller	Takahashi (1991, p. 90, Pl. 23, Figs. 9 and 10)
<i>Tholospira cervicornis</i> Haeckel	Takahashi, 1991, p. 221, Pl. 22, Figs. 7–9.
<i>Xiphatractus</i> sp.	
Nassellaria	
<i>Arachnocorys dubius</i> Dogiel	Dogiel and Reschetnjak (1952, pl. 19, fig. 12)
<i>Arachnocorys pentacantha</i> Popofsky	Welling (1996, p. 227, Pl. 14, Figs. 21–23)
<i>Arachnocorys</i> sp.	
<i>Arachnocorys umbellifera</i> Haeckel	Welling (1996, p. 227, Pl. 14, Figs. 24–27)
<i>Artostrobos annulatus</i> (Bailey)	Takahashi (1991, p. 128, Pl. 38, Figs. 9 and 10)
<i>Botryostrobos aquilonaris</i> (Bailey)	Nigrini and Moore (1979, p. N99, Pl. 27, Fig. 1)
<i>Botryostrobos auritus australis</i> (Ehrenberg) group	Nigrini and Moore (1979, p. N101, Pl. 27, Figs. 2a–d)
<i>Callimitra solocicribrata</i> Takahashi	Takahashi (1991, p. 100, Pl. 27, Figs. 10 and 11)
<i>Ceratocyrtis histicosa</i> Jørgensen	Petrushevskaya (1971, Figs. 52, II–IV)
<i>Ceratocyrtis</i> sp.	
<i>Ceratospyrus borealis</i> Bailey	Nigrini and Moore (1979, p. N9, Pl. 19, Figs. 1a–d)
<i>Cladoscenium ancoratum</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 94, Pl. 24, Figs. 9–14)
<i>Conarachnium polyacanthum</i> (Popofsky)	Takahashi (1991, p. 118, Pl. 39, Figs. 1–4)
<i>Cornutella profunda</i> Ehrenberg	Takahashi (1991, p. 113, Pl. 35, Figs. 3–9)
<i>Cycladophora davisiana</i> Ehrenberg	Motoyama (1997, p. 57, Pl. 1, Figs. 4–10)

Taxa	References
Nassellaria	
<i>Cycladophora bicornis</i>	Takahashi (1991, p. 122, Pl. 41, Figs. 4–6, 8–11)
<i>Cycladophora cornuta</i> Kling	Itaki and Bjørklund (2006, p. 456, Pl. 3, Figs. 5–10)
<i>Cytopera languncula</i> Haeckel1	Takahashi (1991, p. 119, Pl. 40, Figs. 3–6)
<i>Dictyophimus crisiæ</i> Ehrenberg group	Welling (1996, p. 234, Pl. 19, Figs. 1–5)
<i>Dictyophimus hirundo</i> (Haeckel) group	Welling (1996, p. 234, Pl. 19, Figs. 1–5)
<i>Dictyophimus histicosus</i> Jørgensen	Benson (1966, pl. 31, fig. 6)
<i>Dictyophimus infabricatus</i> Nigrini	Takahashi (1991, p. 116, Pl. 37, Figs. 3–5)
<i>Dictyophimus</i> sp.	
<i>Dictyophimus</i> spp.	Okazaki et al. (2005, p. 2269, Pl. 13, Fig. 11)
<i>Dimelissa thoracites</i> (Haeckel)	Welling (1996, p. 225, Pl. 14, Figs. 1–8)
<i>Eucyrtidium</i> sp. A	
<i>Eucyrtidium</i> sp. B	
<i>Eucyrtidium</i> sp. C	
<i>Eucyrtidium teuscheri</i> Haeckel	Petrushevskaya (1967, p. 121, fig. 68–1, 2)
<i>Lampromitra spinosiretis</i> Takahashi	Takahashi (1991, p. 245, Pl. 34, Figs. 1,2 and 7)
<i>Lipmanella dictyoceras</i> (Haeckel)	Takahashi (1991, p. 257, Pl. 40, Fig. 17)
<i>Lipmanella</i> sp.	
<i>Litharachnium tentorium</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 114, Pl. 35, Figs. 14–18)
<i>Lithomelissa setosa</i> Jørgensen	Bjørklund et al. (1998, p. 130, Pl. 2, Figs. 12–14)
<i>Lithomelissa thoracites</i> Haeckel	Nishimura and Yamauchi (1984, p. 45, pl. 32, figs. 2a–3)
<i>Lithomelissa stigi</i> Bjørklund	Bjørklund (1976, p. 1125, pi. 15, figs. 12–17)
<i>Lithostrobos</i> sp.	
<i>Lophophaena</i> sp. A	
<i>Lophophaena</i> sp. B	
<i>Lophophaena</i> sp. C	
<i>Lophospyris pentagona quadriforis</i> (Ehrenberg), emend. Goll	Goll (1976, p. 398, Pl. 14, Figs. 1–3, 7, 10, 13)
<i>Peridium longispinum</i> Jørgensen	Bjørklund et al. (1998, p. 130, Pl. 2, Figs. 26 and 27)
<i>Peridium</i> sp.	
<i>Peripyramis circumtexta</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 113, Pl. 35, Figs. 10–13)
<i>Phormacantha</i> sp.	
<i>Phormospyris stabilis stabilis</i> (Goll)	Takahashi (1991, p. 104, Pl. 30, Figs. 2–5)
<i>Phormostichoartus corbula</i> (Harting)	Nigrini and Moore (1979, p. N103, Pl. 27, Fig. 3)
<i>Plectacantha cremastoplegma</i> Nigrini	Nigrini (1968, pl. 1, figs.3a–3c)
<i>Pseudocubus obeliscus</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 95, Pl. 26, Fig. 1)
<i>Pseudodictyophimus bicornis</i> (Ehrenberg)	Welling (1996, p. 223, Pl. 13, Figs. 13 and 14)
<i>Pseudodictyophimus gracilipes</i> (Bailey)	Bjørklund et al. (1998, p. 130, Pl. 2, Fig. 8)
<i>Pseudodictyophimus platycephalus</i> (Haeckel)	Benson (1966, p. 385–386; pl. 25, figs. 7–9)
<i>Pterocanium auritum</i> Nigrini	Benson (1966, p. 401–403; pl. 26, figs. 5–6)
<i>Pterocanium korotnevi</i> (Dogiel and Reshetnyak)	Nigrini and Moore (1979, p. N39, Pl. 23, Figs. 1a, b)
<i>Pterocorys</i> spp.	
<i>Saccospyris conithorax</i> Petrushevskaya	Nigrini (1970, p. 172, Pl. 4, Fig. 12)
<i>Saccospyris præantarctica</i> Petrushevskaya	Takahashi (1991, p. 267, Pl. 45, Fig. 21)
<i>Sethoconus tabulatus</i> (Ehrenberg)	Petrushevskaya (1971, Figs. 92, X–XI)
<i>Siphocampe arachnea</i> (Ehrenberg)	Abelmann (1992, p. 382, Pl. 5, Fig. 15)
<i>Stichopillium bicorne</i> Haeckel	Nigrini and Moore (1979, p. N91, Pl. 26, Figs. 1a, b)
<i>Tetraphormis rotula</i> (Haeckel)	Takahashi (1991, p. 108, Pl. 32, Figs. 1–3)
<i>Tetraplecta corynephorum</i> ? Jørgensen	Takahashi (1991, p. 93, Pl. 24, Fig. 6)
<i>Tetraplecta pinigera</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 93, Pl. 24, Figs. 1–5)
<i>Tripohaenoscentium</i> sp.	
<i>Trisulcus triacanthus</i> Popofsky	Boltovskoy and Riedel (1987, p. 100, pl. IV, fig. 18)
<i>Zygocircus productus</i> (Hertwig) group	Takahashi (1991, p. 101, Pl. 27, Figs. 13 and 14)
Phaeodaria	
<i>Challengeron ornithocephala</i> (Reshetnyak)	Reshetnyak (1966, p. 174, Fig. 108).
<i>Challengeron vicina</i> (Reshetnyak)	Reshetnyak (1966, p. 174, Fig. 112)
<i>Concherium capsula</i> Borgert	Takahashi (1991, p. 157, Pl. 61, Figs. 1–5, 7, 8 and 10)
<i>Euphysetta elegans</i> Borgert	Takahashi (1991, p. 146, Pl. 53, Figs. 1–10)
<i>Euphysetta staurocodon</i> Haeckel	Takahashi (1991, p. 146, Pl. 53, Figs. 11–14)
<i>Haeckeliana porcellana</i> Murray	Takahashi (1991, p. 154, Pl. 59, Figs. 4–13)
<i>Lirella melo</i> (Cleve)	Takahashi (1991, p. 149, Pl. 55, Figs. 12–18)
<i>Porospathis holostoma</i> (Cleve)	Takahashi (1991, p. 150, Pl. 57, Figs. 1–8)
<i>Protocystis aduncispis</i> Takahashi	Takahashi (1991, p. 276, Pl. 50, Figs. 8–10)
<i>Protocystis auriculata</i> Takahashi	Takahashi, 1991, p. 277, Pl. 50, Figs. 4–7.
<i>Protocystis neresi</i> (Murray)	Takahashi (1991, p. 144, Pl. 52, Figs. 6–8)
<i>Protocystis sloggetti</i> (Haeckel)	Takahashi, 1991, p. 277, Pl. 50, Figs. 12–15.
<i>Protocystis thomsoni</i> (Murray)	Takahashi (1991, p. 143, Pl. 51, Fig. 5)
<i>Protocystis xiphodon</i> (Haeckel)	Takahashi (1991, p. 143, Pl. 52, Figs. 1–3)

Tree diagram

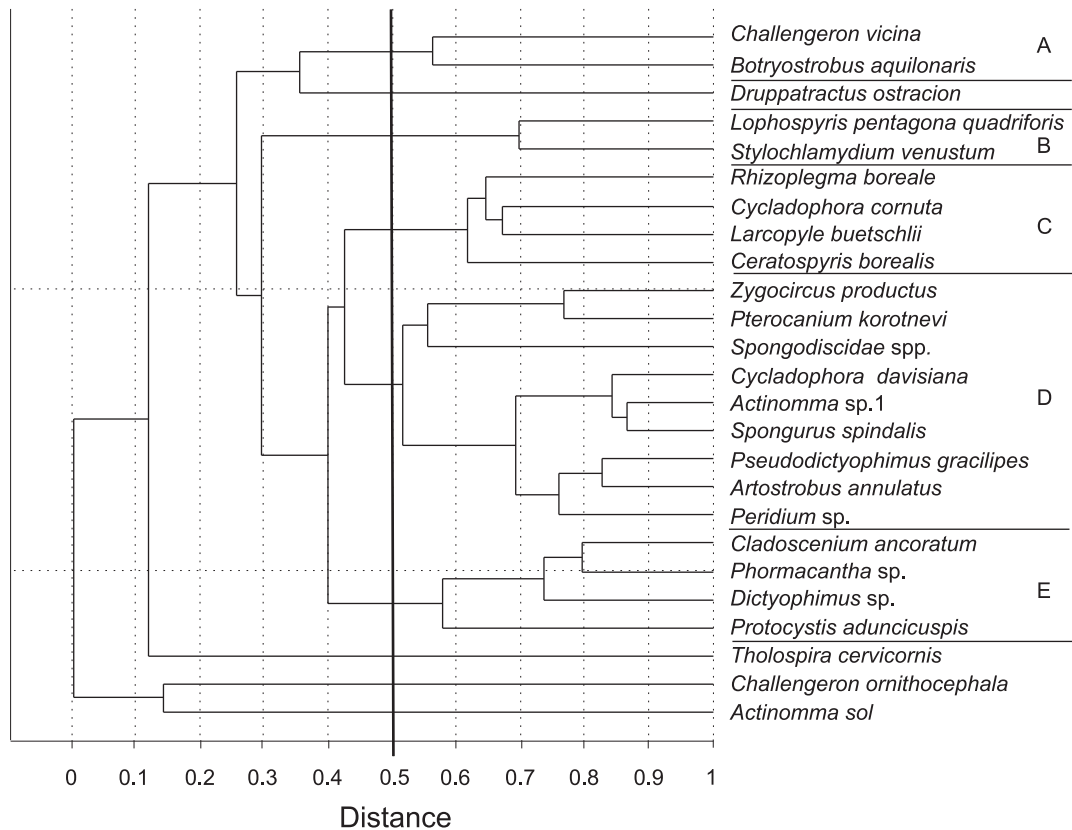


Fig. 5. Dendrogram of R-mode Cluster analysis based on 25 representative species.

Challengeron ornithocephala (Reshetnyak),
Actinomma sol Cleve であった。

5. 考察

5.1 St. K2 の周辺海域におけるレディオラリア・フラックスの群集組成, 多様度, 季節変化の比較

過去に本研究の周辺海域でレディオラリア・フラックスの時系列変動の研究が行われたのは西部亜寒帯循環域においては循環内の Station 50N (50°N, 165°E), 循環の南西縁 Station KNOT (44°N, 155°E), 亜寒帯フロントに位置する Station 40N (40°N, 165°E) の3観測点で, 1997年12月から2000年5月の間水深3000mに設置されたセディメント・トラップにより観測されている

(Okazaki *et al.*, 2005)。また, オホーツク海域においてはセディメント・トラップ Station M4 (53°01'N, 145°30'E) の水深1550mで1998年8月から2000年5月の間に観測されている (Okazaki *et al.*, 2003) (Fig. 1)。これら西部亜寒帯循環域及びオホーツク海域で得られたレディオラリアの群集組成, 多様度, 季節変動を本研究結果と比較した (Fig. 4)。オホーツク海域のセディメント・トラップに関しては, Station M4 の水深300mと Station M6 (49°30'N, 146°28'E) の水深300mと700mにおいても観測が行われたが1500m以深の捕集効率がそれ以浅に比べ非常に良いことが知られていることから (Yu *et al.*, 2001), 1500m以深に設置された St. M4 (1550m) のトラップに関して比較を行った。

St. K2, St. 50N, St. KNOT, St. 40N については平均して群集組成の高かった上位10種を, St. M4 につい

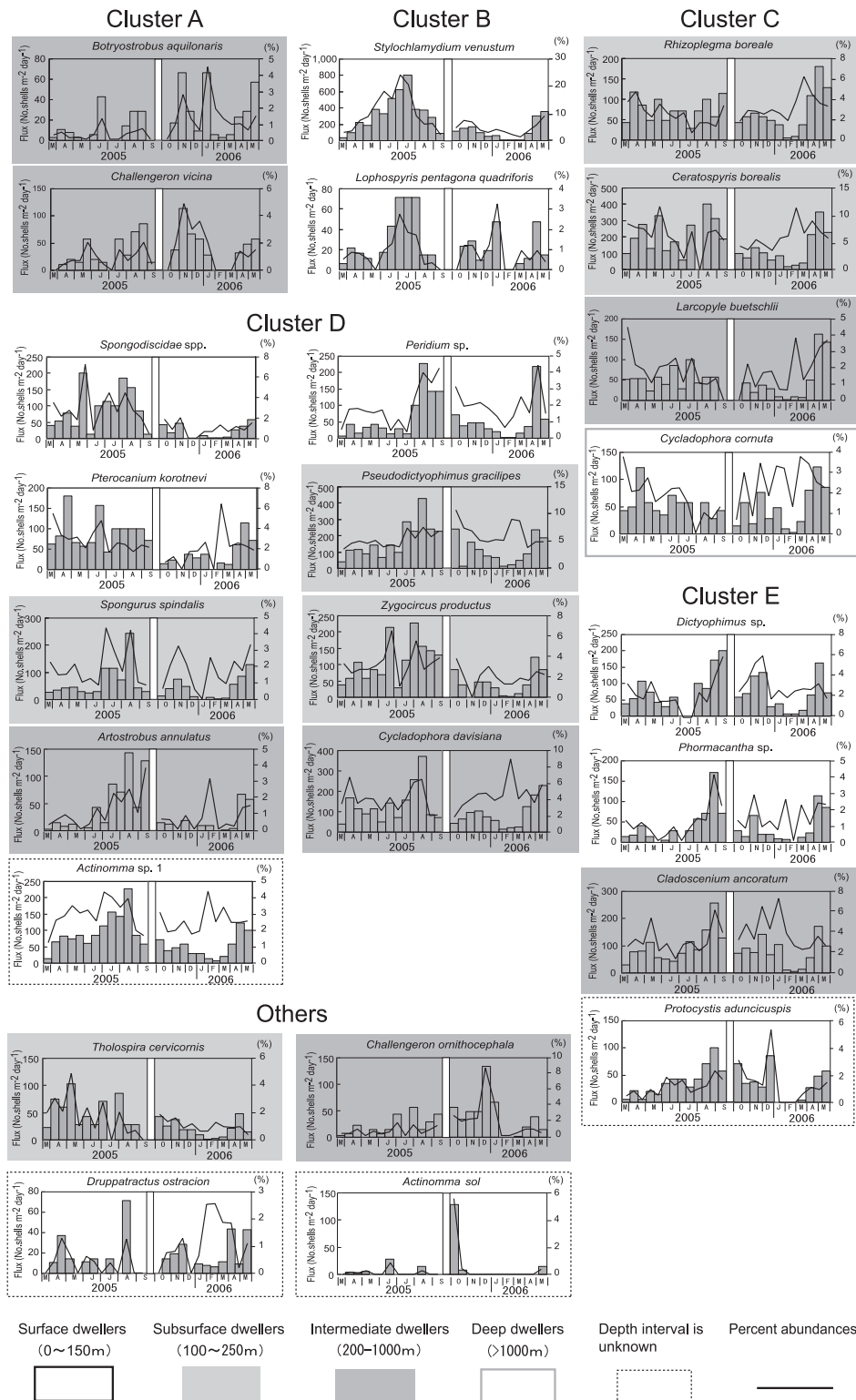


Fig. 6. Seasonal variations of radiolarian species flux for each of the cluster groups. Vertical distribution is based on previous studies using plankton tow samples in the North Pacific. The blank vertical belts represent the sample hiatus.

ては上位9種を挙げて比較を行った (Fig. 4)。St. K2 と他の観測点で共通して含まれていたのは *Stylochlamydidium venustum*, *Ceratospyrus borealis*, *Pseudodictyophimus gracilipes*, *Cycladophora davisiana*, *Rhizoplegama boreale*, *Actinomma* sp. 1, *Zygocircus productus* の7種で, St. 50N, St. KNOT ではこの内 *Z. productus* 以外の6種が, St. M4 では *S. venustum*, *Actinomma* sp. 1 以外の5種が共通した。St. 40N では *Pterocorys zancleus*, *Larcopyle butschlii* といった亜寒帯海域と亜熱帯海域の間の遷移種が上位を占め *P. gracilipes*, *S. venustum*, *Actinomma* sp. 1 の3種のみが共通した。北太平洋の表層堆積物によるレディオラリアの地理分布 (Nigrini, 1970; Moore, 1978; Nigrini and Moore, 1979; Lombardi and Boden, 1985; Kamikuri *et al.*, 2008) によれば7種の内 *S. venustum*, *C. borealis*, *R. boreale* は亜寒帯種であるため, 高緯度ほど高い割合で産出すると推測される。セディメント・トラップによる観測でも *C. borealis*, *R. boreale* は高緯度の観測点ほど高い割合で産出し, オホーツク海で最も高い割合を示した。ところが, *S. venustum* は西部亜寒帯循環域の St. K2, St. 50N, St. KNOT, St. 40N では高緯度ほど多産したが, オホーツク海域の St. M4 ではほとんど産出しなかった。Morley and Hays (1983) によれば表層に生息する種は海水や寒冷な水塊の影響を受ける海域ではその生産が抑制されることが知られている。表層種である *S. venustum* の生産はベーリング海域 (Ling *et al.*, 1971) と西部亜寒帯域 (Kruglikova, 1969) で最も高く, オホーツク海域 (Abelmann and Nimmergut, 2005) においては低い。Abelmann and Nimmergut (2005) によれば, オホーツク海の中でも西部は東部に比べて *S. venustum* の生産が低い。その原因は, カムチャッカ海流により太平洋からの海水の流入のある東部に比べ, アムール川からの淡水の影響を強く受ける西部は, 成層化により餌となる植物プランクトンの生産が制限されるためとしている。一方で, Itaki *et al.* (2008) はオホーツク海南西部の堆積物試料を調査し, 生物源オパールや全有機炭素含有量の低い氷期において *S. venustum* の生産が高いことから, *S. venustum* の生産は植物プランクトンの一次生産よりもむしろ鉛直的な水塊構造によって支配されていた可能性

を示した。したがって, 西部亜寒帯域とオホーツク海域での *S. venustum* の生産の違いはオホーツク海が季節海水域であるという環境の違いと季節による鉛直的な水塊構造の違いが主な要因と考えられる。この種は特に St. K2 において最も高い割合を示し, St. 50N では2番目に高い割合を示した。したがって, 西部亜寒帯循環域を代表する種と言える。また, St. 50N, St. KNOT, St. M4 の3観測点の中でも St. 50N の上位3種と St. K2 の上位3種 *Stylochlamydidium venustum*, *Ceratospyrus borealis*, *Pseudodictyophimus gracilipes* とは一致しており, 構成する種とその割合が St. KNOT, St. M4 に比べてよく類似していた。

St. K2 及び他の観測点での全レディオラリア・フラックス, 全ポリシスチナ・フラックス, 全フェオダリア・フラックスの平均値及び多様度の変動幅を Fig. 4 に示す。Okazaki *et al.* (2005) は西部亜寒帯循環域の St. 50N, St. KNOT, St. 40N を比較してフラックス, 多様度ともに南に位置する観測点ほど高くなるという傾向を示した。St. K2 は同じ西部亜寒帯循環域内の St. 50N と比較して多様度にあまり差は見られないが, 全レディオラリア・フラックスの平均値は St. 50N の6割程度で著しく生産が低かった。同じ西部亜寒帯循環域内でも St. K2 の周辺が生産の低い海域なのか観測年の西部亜寒帯循環域の生産が全体的に低かったのかは明らかではないが, オホーツク海水による低温・低塩分水の影響等何らかの制限要因により St. 50N よりも海洋表層の生産が抑制されていたと考えられる。St. KNOT においては St. K2 よりもオホーツク海水, 親潮といった低温・低塩分水の影響が強まると考えられるが, 同時に黒潮続流といった南方からの暖水の影響も強まるため相殺されたと考えられる。St. K2 を含む西部亜寒帯循環域の4観測点とオホーツク海域の観測点との比較では西部亜寒帯循環域の方が全レディオラリア・フラックス, 多様度ともに高いことが示された。西部亜寒帯循環域では全レディオラリア・フラックスは季節変化をするが多様度はいずれも明確な季節変化を示さなかった。St. 40N のみ1997年-1998年冬に亜寒帯種フラックスの卓越がみられ, その大部分を *S. venustum* が占めたことにより一時的に低い多様度を示したがそれ以外は年間を通して安定した多様度を示していた。このことは全レディオラリア・フラッ

クス、多様度ともに季節により大きな変化を示すオホーツク海域と対照的であった。Okazaki *et al.* (2003) によればオホーツク海域の観測点の全レディオラリア・フラックスおよび多様度は冬から春にかけて低く、夏から秋にかけて高い。これはオホーツク海の海水の形成と消滅に関係しており、観測点を海水が被う 12 月から 5 月の冬から春にかけての時期が全レディオラリア・フラックス、多様度ともに低い時期に対応することが報告されている。西部亜寒帯循環内の観測点で多様度がオホーツク海に比べて高く安定しているのは、季節海水による表層種の生産抑制が無いことや西部亜寒帯循環が親潮や黒潮といった北や南からの性質の異なる海流がもとになって形成され、それらが混合することで常に複雑な海洋環境を形成していることが原因と考えられる。

St. K2 と同じ西部亜寒帯循環域に位置する St. 50N, St. KNOT, St. 40N の 3 観測点とオホーツク海域 St. M4 との季節変化の比較を行った。St. K2 では全ポリキスティナ・フラックスが夏の大きなピークと春の大きなピーク、全フェオダリア・フラックスが夏の大きなピークと秋のピークが主なのに対して St. 50N は秋のピークが主であり、異なる季節変動をしていた。St. KNOT は全ポリキスティナ・フラックスが明確な季節変動を示さず、小刻みに変動し、全フェオダリア・フラックスは秋から冬に主なピークがあるため異なる季節変動をしていた。St. KNOT のような小刻みな変化は親潮や黒潮の海流の季節変動による水塊環境の変化にそれぞれ異なる挙動を示す複数のレディオラリア群集のピークが重なった結果であると考えられる。一方、St. 40N は全ポリキスティナ・フラックス、全フェオダリア・フラックスともに夏に主なピークが見られる点が一致しているが、全フェオダリア・フラックスに秋のピークが見られない点は異なった。オホーツク海域の St. M4 では水が消滅する 6 月から 10 月の夏から秋にかけてピークが報告されており (Okazaki *et al.*, 2003), ピークが夏に見られる点で St. K2 の変化と類似していた。St. K2 のレディオラリア・フラックスの季節変化について以上のことをまとめると St. K2 は黒潮統流域に位置する St. 40 N とオホーツク海域に位置する St. M4 に季節変化が類似していた。St. 40 N の群集組成は *P. zancleus*, *L. buetschlii* といった遷移種で上位 2 種が占められており、南方の黒潮統流

からの暖水塊をやや反映していると考えられる。St. K2 は *S. venustum*, *C. borealis*, *R. boreale* のような亜寒帯種が高い割合を示し、黒潮統流よりも東カムチャッカ海流や千島列島沿岸からのオホーツク海の水塊の方が相対的に海洋環境に影響を及ぼしていると言える。St. 40 N と St. K2 とは群集組成が異なり、それぞれの観測域の水塊の水温等の物理的性質の違いを反映している (Fig. 4)。したがって、季節変化は類似しているが同じような海洋環境を反映しているとは言い難い。一方、St. M4 の 6 月から 10 月の夏から秋にかけてのピークは、St. K2 の夏のピークの時期に類似している。これは海水が消滅する時期のオホーツク海からの陸源物質に富んだ海水や千島列島沿岸、カムチャッカ半島東岸からの沿岸水が St. K2 の西部亜寒帯循環域に陸源物質に富んだ水塊を供給するためと考えた。オホーツク海北西部の陸棚域では、冬季の海水生成に伴って、高密度陸棚水が形成される。そして、この高密度陸棚水は高濁度で大変多くの物質を含み、オホーツク海の中層に潜り込んだ後、千島列島海峡部の潮汐混合を経て親潮域や西部北太平洋亜寒帯へと水平輸送されることが明らかになっている (Nakatsuka *et al.*, 2002, 2004)。また、このようにして輸送される物質の中には植物プランクトンの増殖に不可欠な鉄が粒子態、溶存態で比較的高い濃度で取り込まれており、広く西部北太平洋亜寒帯まで輸送されている (Nishioka *et al.*, 2007)。このような栄養塩や鉄を含む陸源物質に富んだ水塊は海峡部での潮汐混合によって様々な深さへ再分配され、太平洋に出ると冬季鉛直混合によって表層にも供給されることが考えられる。また、海水交換の行われる千島列島周辺域や東カムチャッカ海流域において毎年多くの中規模渦が観測されることが明らかになっており (Stabeno *et al.*, 1994; Rogachev, 2000a, 2000b), 千島列島周辺域やカムチャッカ半島東岸からの富栄養な陸源物質に富んだ水塊を水平または上層に鉛直的に輸送していると考えられる。中規模渦が栄養塩供給や一次生産に深い関わりを持つことはあらゆる海域で観測されている (Shiegel *et al.*, 1999; Mizobata *et al.*, 2002)。しかしながら、これだけではその後の 2006 年春の全レディオラリア・フラックスの大きな増加を説明できない。オホーツク海の 2006 年の海水シーズン (2005 年 12 月 - 2006 年 5 月) の海水域面積を見てみると、1971 年の観

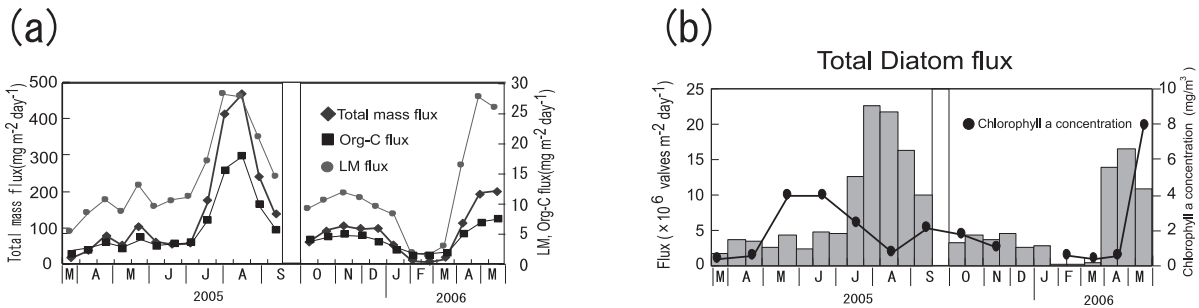


Fig. 7. (a) Total mass, organic carbon, and lithogenic matter flux at Station K2 during March 2005 through May 2006. The blank vertical belts represent the sample hiatus (Honda *et al.*, 2006; Honda and Watanabe, 2010), (b) Total diatom flux with chlorophyll a concentrations at Station K2 (Feldman *et al.*, 2006; Ohashi, pers. comm., 2008).

測を開始以来最小のレベルで経過し、前年12月から5月まで積算した海水域面積は、平年の64%にとどまり過去最小となった(気象庁 地球環境・海洋部 海洋気象情報室, 2006)。また、Fig. 7のようにSt. K2の陸源物質のフラックスが2005年夏と2006年春に大きなピークを示していた(Honda *et al.*, 2006; Honda and Watanabe, 2010)。これらの事実から2006年に海氷の消滅する時期が早まったことでSt. K2において夏ごろに供給されるはずの陸源物質の供給が春に早まり、春の全レディオラリア・フラックスの大きな増加を導いたと言える。

以上をまとめるとSt. K2の全レディオラリア・フラックスの群集組成は同じ西部亜寒帯循環内のSt. 50Nに類似していること、そして、その季節変化はオホーツク海のSt. M4と類似しており、海水の融解に伴うオホーツク海からの陸源物質に富んだ沿岸水の影響を強く受ける環境にあることが分かった。

5.2 レディオラリアの生息深度とフラックスの季節性との関係

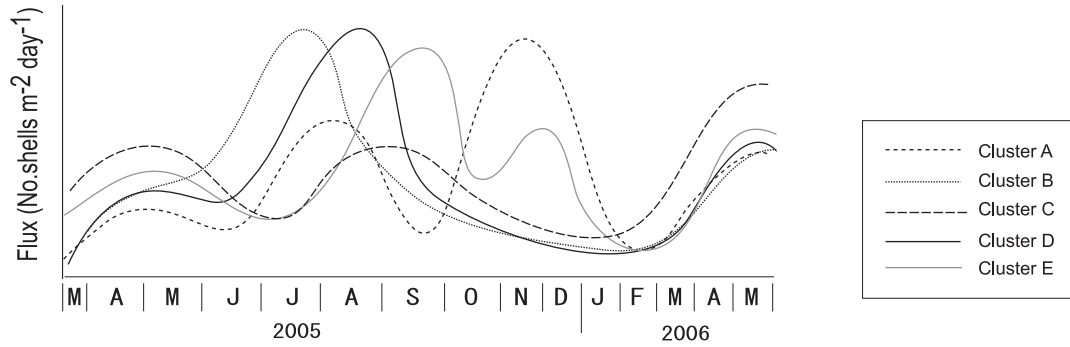
レディオラリアは種によって生息深度が異なることが分かっており、北太平洋各地で行われたプランクトンネットを用いた研究により、レディオラリアの生息深度分布が示されている(Kling, 1979; Kling and Boltovskoy, 1995; Nimmergut and Abelman, 2002; Yamashita *et al.*, 2002; Itaki, 2003; Okazaki *et al.*, 2004; Abelman and Nimmergut, 2005; Tanaka, 2008; Tanaka and

Takahashi, 2008)。レディオラリア・フラックスを構成する生息深度とその季節性を理解するためにこれらのデータを参考にしたところ、セディメント・トラップに捕集されたレディオラリア群集のうちクラスター解析を行った主要種25種の生息深度は各海域でTable 2のようになっていた。Table 2をもとに生息深度を表層(0–150 m)、亜表層(100–250 m)、中層(200–1000 m)、深層(>1000 m)の4つに分け、各深度に属する種を選択し、フラックスと組成比の季節変化を比較した(Fig. 6)。その結果、各クラスターの典型的な変動パターンと各水深での環境変動との対応がまとめられた(Fig. 8)。

Cluster Aは2005年の秋から冬に大きなピークが出るグループで、*Botryostrobos aquilonaris*, *Challengeron vicina*ともに中層種であった。西部亜寒帯域におけるOkazaki *et al.* (2005)の研究によれば、*Challengeron vicina*と*Challengeron ornithocephala*のフラックスは一次生産を示す全粒子フラックスや有機炭素フラックスとの相関の低い秋から冬にかけてのピークが確認されており、一次生産だけでなく中層における捕食圧やバクテリア量などの他の要素によって支配されることが述べられている。本研究において*B. aquilonaris*, *C. vicina*の2種は春や夏に小さなピークを示すが主なピークは秋から冬に見られ、表層での一次生産に近い変動を示す全粒子フラックスや有機炭素フラックス(Honda *et al.*, 2006; Honda and Watanabe, 2010)(Fig. 7)とは異なる傾向を示した。したがって、表層から供給される餌にもある程度依存しているが主に中層

Table 2. List of radiolarian taxa characterized for vertical distributions based on the following previous studies using plankton tow samples in the North Pacific and its marginal seas: #1 Kling, 1979; #2 Kling and Boltovskoy, 1995; #3 Nimmergut and Abelmann, 2002; #4 Yamashita et al., 2002; #5 Itaki, 2003; #6 Okazaki et al., 2004; #7 Abelmann and Nimmergut, 2005; #8 Tanaka, 2008; #9 Tanaka and Takahashi, 2008.

Depth interval	Taxon name	Area	Occurrence (m)	References	Comments
	<i>Dictyophimus</i> sp.	Subarctic Pacific	75-150	#9	
	<i>Lophospyris pentagona quadriforis</i> (Ehrenberg), emend. Goll	Okhotsk and Oyashio region	0-200	#6	
	<i>Peridium</i> sp.	Okhotsk and Oyashio region	0-200	#6	
	<i>Phormacantha</i> sp.	Okhotsk and Oyashio region	0-200	#6	
	<i>Pterocanium korotnevi</i> (Dogiel)	Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
		Subarctic Pacific	75-150	#9	
Surface	<i>Spongodiscidae</i> spp.	Central North Pacific	50-200	#1	<i>Spongodiscus resurgens</i> in the original paper
		Japan Sea	40-120	#5	<i>Spongodiscus resurgens</i> in the original paper
		Okhotsk and Oyashio region	0-200	#6	
	<i>Stylochlamyidium venustum</i> (Bailey)	Okhotsk Sea	0-50	#7	
		Okhotsk Sea	0-50	#3	
		Okhotsk and Oyashio region	50-200	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
		Subarctic Pacific	0-250	#9	
	<i>Ceratospyris borealis</i> Bailey	Japan Sea	160-300	#5	
		Okhotsk Sea	200-500	#3	
		Okhotsk and Oyashio region	0-200	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
		Subarctic Pacific	75-150	#9	
	<i>Pseudodictyophimus gracilipes</i> (Bailey)	Central North Pacific	100-300	#1	
		Southern California Current	100-300	#2	
		Okhotsk and Oyashio region	50-300	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
	<i>Rhizoplegma boreale</i> (Cleve)	Okhotsk Sea	150-200	#7	
		Okhotsk Sea	50-200	#3	
		Okhotsk and Oyashio region	50-300	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
		Subarctic Pacific	75-150	#9	
Subsurface	<i>Spongurus spindalis</i> Welling	Southern California Current	below 300	#2	<i>Spongurus</i> (?) sp. in the original paper
		Okhotsk and Oyashio region	0-200	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	<i>Spongurus</i> sp. in the original paper
	<i>Tholospira cervicornis</i> Haeckel	Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
	<i>Zygocircus productus</i> (Hertwig)	Okhotsk and Oyashio region	200-500	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
		Subarctic Pacific	0-250m	#9	
	<i>Artostrobos annulatus</i> (Bailey)	Southern California Current	below 300	#2	
	<i>Botryostrobos aquilonaris</i> (Bailey)	Central North Pacific	1000-2000	#1	
		Southern California Current	below 300	#2	
		Okhotsk and Oyashio region	300-1000	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	50-250	#8	
		Subarctic Pacific	500-1000	#9	
	<i>Challengeron ornithocephala</i> (Reshetnyak)	Okhotsk and Oyashio region	300-1000	#6	
	<i>Challengeron vicina</i> (Reshetnyak)	Okhotsk and Oyashio region	200-500	#6	
		Subarctic Pacific	150-500	#9	
Intermediate	<i>Cladoscenum ancoratum</i> Haeckel	Central Equatorial Pacific	200-1000	#4	
	<i>Cycladophora davisiana</i> Ehrenberg	Okhotsk Sea	200-500	#7	
		Japan Sea	1000-2000	#5	
		Okhotsk Sea	200-500	#3	
		Okhotsk and Oyashio region	500-1000	#6	
		Bering Sea, Subarctic Pacific	below 1000	#8	
		Subarctic Pacific	2000-3000	#9	
	<i>Larcopyle buetschlii</i> Dreyer	Southern California Current	below 200	#2	
		Japan Sea	40-120	#5	juvenile form
		Japan Sea	40-300	#5	adult form
		Okhotsk and Oyashio region	50-200	#6	
	<i>Cycladophora cornuta</i> (Bailey)	Southern California current	below 200	#2	<i>Cycladophora cornutoides</i> in the original paper
Deep		Bering Sea, Subarctic Pacific	below 1000	#8	<i>Cycladophora cornutoides</i> in the original paper
		Subarctic Pacific	1000-3000	#9	<i>Cycladophora cornutoides</i> in the original paper
Unknown	<i>Actinomma sol</i> Cleve				
	<i>Drupptractus ostracion</i> Haeckel				
	<i>Protocystis aduncicuspis</i> Takahashi				
	<i>Actinomma</i> sp. 1				



Cluster	Taxon	Seasonal flux	Depth interval	Comments
A	<i>Botryostrobus aquilonaris</i>	autumn-winter peak	Intermediate	controlled not only by primary production but also by other factors such as microbial biomass
	<i>Challengeron vicina</i>			
B	<i>Stylochlamydidium venustum</i>	summer peak earlier than Cluster D	Surface	summer peak associated with phytoplankton except diatoms
	<i>Lophospyris pentagona quadriforis</i>			
C	<i>Rhizoplegma boreale</i>	no clear seasonal trend, but relatively high spring peak	Subsurface	controlled by light attenuation or turbidity
	<i>Ceratospys borealis</i>		Intermediate	different feeding behaviour from other intermediate dwellers
	<i>Larcopele buetschlii</i>			
	<i>Cycladophora cornuta</i>		Deep	associate with stable hydrographic condition throughout the year in deep layer
D	<i>Spongodiscidae</i> spp.	spring and summer peak	Surface	flux pattern associated with lithogenic matter and total diatom
	<i>Peridium</i> sp.			
	<i>Pterocanium korotnevi</i>		Subsurface	flux pattern associated with lithogenic matter and total diatom
	<i>Pseudodictyophimus gracilipes</i>			
	<i>Spongurus spindalis</i>			
	<i>Zygocircus productus</i>		Intermediate	similar pattern with surface and subsurface dwellers
	<i>Artostrobos annulatus</i>			
<i>Cycladophora davisiana</i>	Unknown			
<i>Actinomma</i> sp. 1				
E	<i>Dictyophimus</i> sp.	summer peak later than Cluster D and autumn peak	Surface	suppressed by reproduction of other surface dwellers
	<i>Phormacantha</i> sp.		Intermediate	dependence on food supply from euphotic zone to intermediate depth
	<i>Cladocentrum ancoratum</i>			
	<i>Protocystis aduncuspis</i>	Unknown		

Fig. 8. Schematic representation of each of the clusters and summary of seasonal flux pattern.

の海洋環境やバクテリア量等に依存している可能性が示された。中層では年間を通して水温、塩分が安定しており、このグループのフラックスは中層における水温、塩分以外の環境変動に連動していると考えられる。秋から冬にピークを示すのはこの時期に餌としてのバクテリア量の増大あるいはレディオラリアの好む比較的溶存酸素濃度の高い環境等を導く要因が存在すると考えられる。

Cluster B は 2005 年夏のピークが他の主要種よりも 1 ヶ月ほど早く出るグループで、*Stylochlamydidium venustum*、*Lophospyris pentagona quadriforis* ともに表層種であった。これら 2 種のフラックスの夏のピークは同じく St. K2 の同時期の全珪藻フラックスの夏のピークよりもさらに早く出ており (Ohashi, pers. comm., 2008) (Fig. 7), 珪藻ではなく他の植物プランクトンを捕食している可能性が示された。NASA

OceanColor Web Site の SeaWiFS による海表面のクロロフィル a 濃度の月ごとの合成値 (Feldman *et al.*, 2006) (Fig. 7) をプロットしたところ全珪藻フラックスの夏のピークよりも早い 2005 年 5 月から 6 月にクロロフィル a の濃度が高くなっていることが分かった。ただし、12 月と 1 月に関してはカムチャッカ半島沿岸付近の雲や霧のために観測データが欠損していた。全クロロフィル a 量に対する珪藻の寄与率は 10%程度であることが知られており (Booth, 1988; Furuya, 1990), *S. venustum*, *L. pentagona quadriforis* は珪藻以外のクロロフィル a 濃度の増加時に増殖した植物プランクトンを捕食している可能性が示された。このグループのフラックスは表層の中でも海表面近くの環境変化や一次生産の季節変動を示すと考えられる。

Cluster C は 2006 年の春の増加が比較的大きいが季

節による増減の差があまりないグループで、このうち亜表層種は *Rhizoplegma boreale*, *Ceratospyrus borealis*, 中層種は *Larcopele buetschlii*, 深層種は *Cycladophora cornuta* であった。*R. boreale*, *C. borealis* は亜表層に生息し、冬以外どの季節でも大きな減少がなく、他種に比べてレディオラリア・フラックスに占める割合が安定している。これは *R. boreale*, *C. borealis* が表層の植物プランクトン等の一次生産のみに依存していないことを示している。レディオラリアの中には共生藻を持つものがあることが知られており (Anderson, 1983), このことは *R. boreale*, *C. borealis* が共生藻者である可能性を示している。このような共生藻者のフラックスの変動は亜表層における透過光の強度や濁度の季節変動を表しているかもしれない。2005年3月から9月にかけて St. K2 の水深 45 m において水中放射照度に対する水面における光合成有放射 (PAR) の相対強度が観測されており、その結果から濁度は6月下旬から7月上旬にかけてピークがあり、その前後はほとんど変化が無く低い値を示していた (Honda *et al.*, 2006)。*R. boreale*, *C. borealis* のフラックスも6月下旬から7月上旬にその前後よりやや低下しており、濁度の増加によって水中光が減少したことを示している。水深 45 m の濁度の増減の差に比べて2種のフラックスの増減の差が小さいのはより深い亜表層においては透過光の強度の差が表層に比べて小さくなることを示している。中層種の *L. buetschlii* は年間を通してあまりフラックスの季節変動が見られず、表層の環境変化にあまり影響を受けていないと見られる。また、レディオラリアのフラックスが減少する冬季において同時に減少するものの、全体に占める割合としては上がっており、生産が安定している。*L. buetschlii* のフラックスには Cluster A で同じく中層に生息する *B. aquilonaris*, *C. vicina* に見られたような秋から冬にかけてのフラックスのピークが見られない。*L. buetschlii* は中層の中でも上部に生息している種であるため、このことは中層の上部ではバクテリア量にほとんど季節変化が無く、年間を通して安定した餌が存在すること、あるいは *L. buetschlii* と *B. aquilonaris*, *C. vicina* との食性に違いがあることを示していると考えられる。レディオラリアの食性についてはほとんど明らかになっていないが、後に述べる

Cluster D の中層種の季節変動により中層上部において季節的な陸源物質や溶存酸素に富んだ水塊の流入が示唆されることから、餌となるバクテリア量が年間を通して安定しているというよりも *L. buetschlii* の食性が他の種と異なるなど他の中層種とは別の要因によって生産を支配されている可能性が高い。深層種の *C. cornuta* もまたフラックスの特徴的な季節変動は見られず、年間を通して比較的安定したフラックスを示した。1000 m 以下の深層においては中層に比べ低温で、溶存酸素濃度が高いことが一般的に知られているが、各水深で水温、塩分等は年間を通じてほとんど変化はないため、*C. cornuta* のフラックスの変動もまたその様な安定した水塊環境を表していると言える。

Cluster D は 2005 年春の小さなピーク、夏の大きなピーク、そして 2006 年春からの大きな増加を示すグループで St. K2 ではこのタイプの季節変化を示すものが最も多かった。このうち表層種は *Spongodiscidae spp.*, *Peridium sp.*, *Pterocanium korotnevi*, 亜表層種は *Pseudodictyophimus gracilipes*, *Spongurus spindalis*, *Zygocircus productus*, 中層種は *Artostrobos annulatus*, *Cycladophora davisiana* で、*Actinomma sp. 1* については生息深度が明らかになっていない。表層種と亜表層種についてはオホーツク海からの陸棚起源の物質を含む水塊や千島列島沿岸、カムチャッカ半島東岸からの栄養塩や鉄を含む沿岸水の供給による植物プランクトン等の増加に反応して季節変化をしているグループと言える。レディオラリアは一般に、植物性プランクトンやバクテリア等の微生物、デトリタス等の有機物を摂取していることが知られている (Anderson, 1983)。St. K2 の珪藻の計数結果によれば 2005 年の夏と 2006 年の春に全レディオラリア・フラックスよりも 2 週間ほど早く全珪藻フラックスのピークが現れており (Ohashi, pers. comm., 2008) (Fig. 7), 陸源物質のフラックスのピークの時期と重なる。これはレディオラリア種の多くが、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高橋・山下 (2004) の考え方に調和的である。中層や深層に生息する種は表層で生産され沈降してきた有機物あるいは中・深層に生息するバクテリア等を捕食していると考えられる。したがって、表層の生産が中層-深層に反映されるには若干のタイムラグ

が存在する。ところが中層種の *A. annulatus* と *C. davisiana* のフラックスの 2005 年の夏と 2006 年の春の増加は表層種に比べて遅れず、さらに同じような季節変動を示した。これは *A. annulatus* と *C. davisiana* の繁殖が表層での生産に依存しているのではなく、中層において表層と同時期に起きた何らかの環境変化を反映しているものと考えた。要因の一つとして考えられるのが融氷・融雪の時期に伴うオホーツク海や千島列島沿岸、カムチャッカ半島東岸からの栄養塩や鉄を含む陸源物質、溶存酸素に富んだ水塊の供給が表層から中層の上部までおよんだ場合である。*C. davisiana* については低温で溶存酸素に富んだ水塊に好んで生息すること (Itaki, 2003; Abelman and Nimmergut, 2005; Tanaka and Takahashi, 2008) やオホーツク海における *C. davisiana* のフラックスの変動が陸源物質のフラックスの変動に類似しており、融雪に伴う大陸棚からの栄養塩供給を反映して高い生産を示すことなどが報告されている。したがって、陸源物質や溶存酸素に富んだ水塊の供給は親潮水と黒潮水の水塊の流入のある水深 200–500 m の中暖層まで及んでいる可能性がある。

Cluster E は 2005 年夏のピークが他の主要種よりも 1 ヶ月ほど遅れて出て、秋にも増加が見られるグループでこのうち表層種は *Dictyophimus* sp., *Phormacantha* sp., 中層種は *Cladoscenum ancoratum* で、*Protocystis aduncispis* については生息深度が明らかになっていない。*Dictyophimus* sp. と *Phormacantha* sp. は Cluster D と Cluster B の夏の主なピークが過ぎて減少し始めるころと秋の少ない時期にピークがあった。これら 2 種は西部亜寒帯循環内の表層において Cluster D と Cluster B の群集が少ない時期を好んで繁殖する種であると考えられる。中層種の *C. ancoratum* は全粒子フラックスや有機炭素のフラックス (Honda *et al.*, 2006; Honda and Watanabe, 2010) (Fig. 7) にやや遅れて増減している。従って表層で生産され沈降してきた有機物を捕食していると考えられ、中層における餌の供給の季節変動を比較的好く反映する種であると言える。*P. aduncispis* については生息深度が明らかではないが *Dictyophimus* sp. や *Phormacantha* sp. のように繁殖の機会を待つグループか *C. ancoratum* のように表層からの餌の供給を待つグループのどちらかに属すると

考えられる。

グループから外れた 4 種のうち亜表層種は *Tholospira cervicornis*, 中層種は *Challengeron ornithocephala* で、*Drupptractus ostracion*, *Actinomma sol* については生息深度が明らかになっていない。*T. cervicornis* は他の亜表層の種に比べ年間を通してのフラックスが低く、季節変動も明確でない。したがって、この種のフラックスの変動は表層の一次生産よりも他者からの捕食圧の影響を強く受けている可能性や Cluster C の亜表層種のように共生藻者である可能性が考えられる。中層種の *C. ornithocephala* は Cluster A のグループに比べて 1 ヶ月ほど遅れるが秋から冬に大きなピークが見られた。したがって、この種も主に中層のバクテリア量や溶存酸素濃度等の季節変動に応じていると考えられる。*D. ostracion*, *A. sol* については生息深度が明らかでなく一時的な大きなフラックス以外にはほとんど産出しなかったため日和見的な変化を示すグループと言えよう。

以上の考察を踏まえて西部亜寒帯循環内の各水深における海洋環境の季節変動の概略的な図を Fig. 9 に示す。表層および亜表層では季節的な海面温度の変化による春の植物プランクトンの増加とそれに応じたレディオラリア・フラックスの増加が見られた。しかしながら、主に表層および亜表層の生産を支配したのは 5 月から 12 月の融氷に伴うオホーツク海からの鉄などの陸棚起源の物質や溶存酸素に富んだ水塊、そして中規模渦による千島列島沿岸やカムチャッカ半島東岸からの沿岸水の流入であろう。オホーツク海から潮汐混合を経て太平洋に出た水塊や融氷に伴う沿岸水が中規模渦や東カムチャッカ海流によって西部亜寒帯循環内に流入することで表層および亜表層は栄養塩に富んだ環境となり、夏は海水温も高く大きな生産が生じた。表層と亜表層では季節変動にあまり違いは見られないが、5 月から 8 月の春から夏にかけての時期には表層種の *S. venustum* が優占し、それ以外の時期は亜表層種の *R. boreale*, *C. borealis*, *P. gracilipes* が優占した。中層 (200–1000 m) では水温、塩分等は年間を通してあまり変動が無く、安定しているが、*A. annulatus*, *C. davisiana* のように表層や亜表層と類似した変動をする種がいることから中暖層 (200–500 m) ではオホーツク海からの陸棚起源の物質や溶存

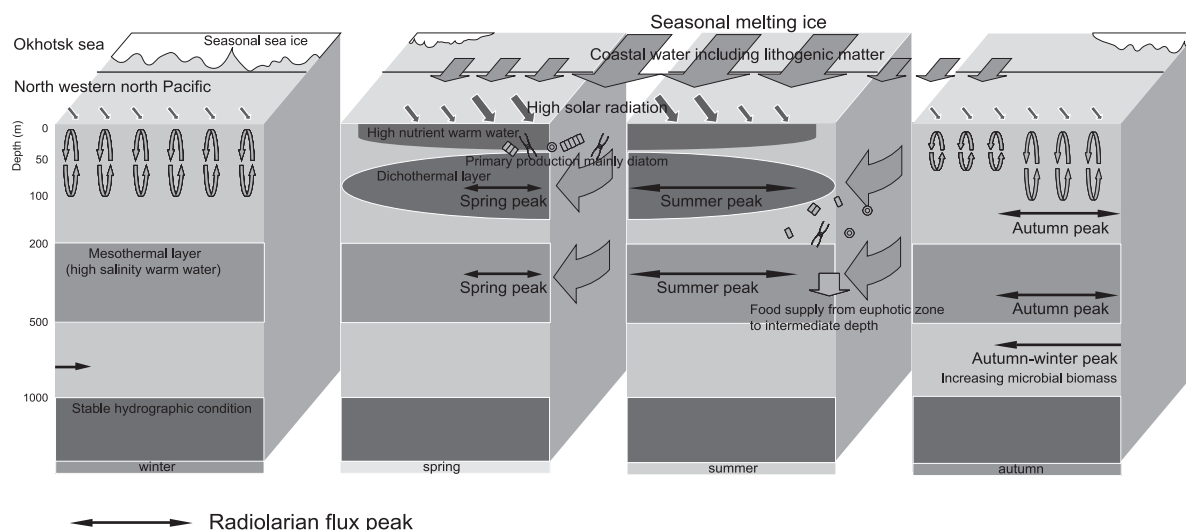


Fig. 9. Schematic diagram showing relationship between seasonal variations of radiolarian flux maxima and environmental conditions around Station K2.

酸素に富んだ水塊の流入が夏から秋にかけて存在する可能性が示された。また、*B. aquilonaris*, *C. vicina*, *C. ornithocephala* のように表層や亜表層の変動と異なる秋から冬に最も大きなピークを示す種がいることから中層下部 (500–1000 m) では秋から冬にバクテリアの生産の高い時期があると予想される。したがって、同じ中層に生息する種でも生息水深、食性や捕食圧の影響等によって季節変動に違いが見られることが示された。中層種のレディオラリア・フラックス全体に占める割合は表層および亜表層の生産が減少する 12 月から 1 月にかけて増大し、12 月には *C. ornithocephala* が最も高い割合を占め、1 月には *C. ancoratum* が最も高い割合を示した。深層 (1000 m 以深) では *C. cornuta* のフラックスがあまり季節変動を示さないことから年間を通して大きな環境の変動は無かったと考えられる。

6. 結論

○St. K2 の全レディオラリア・フラックスの特徴は群集組成が同じ西部亜寒帯循環内の St. 50N や St. KNOT に類似しており、オホーツク海からの水塊や千島列島、カムチャッカ半島東岸からの沿岸水の影響を強く受ける環境にあることが分かった。

○レディオラリアの生息深度ごとにフラックスの季節

変化を考察することで西部亜寒帯循環内の各深度の水塊環境の変化を見ることができた。

○中層に生息するレディオラリアの生産が海洋表層の一次生産だけでなく中層における栄養塩や溶存酸素、捕食圧や餌となるバクテリア量などの他の要素によっても支配されていることが分かった。

謝辞

JAMSTEC の本多牧生氏にはセディメント・トラップ試料を提供して頂いた。また、本研究の経費の一部として、松本達郎名誉教授のご寄付による平成 19 年度高千穂奨学資金 (池上隆仁) を使わせて頂いた。ここに深く感謝の意を表します。本研究は、日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) 1731009 (高橋孝三) の助成を受けた。

References

- Abelmann, A. (1992): Radiolarian taxa from Southern Ocean sediment traps (Atlantic sector). *Polar Biology*, **12**, 373–385.
- Abelmann, A. and A. Nimmergut (2005): Radiolarians in the Sea of Okhotsk and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2302–2331.
- Anderson, O.R. (1983): *Radiolaria*. Springer, New York 355pp.

- Benson, R.N. (1966): Recent Radiolaria from the Gulf of California. Ph.D. thesis, University of Minnesota, 577 pp.
- Bjørklund, K.R. (1976): Radiolaria from the Norwegian Sea, Leg 38 of the Deep Sea Drilling Project. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, **38**, 1101–1168.
- Bjørklund, K.R., Cortese, G., Swanberg, N., and H.J. Schrader (1998): Radiolarian faunal provinces in surface sediments of the Greenland, Iceland and Norwegian (GIN) Seas. *Marine. Micropal.*, **35**, 105–140.
- Boltovskoy, D. and W.R. Riedel (1987): Polycystine Radiolaria of the California Current region: seasonal and geographic patterns. *Marine. Micropal.*, **12**, 65–104.
- Booth, B. C. (1988): Size classes and major taxonomic groups of phytoplankton at two locations in the subarctic Pacific Ocean in May and August 1984. *Mar. Biology.*, **97**: 275–286
- Cleve, P.T. (1900): Notes on some Atlantic plankton-organisms. K. Sven. Vetensk. Akad. Handl., **34** (1), 1–22.
- Cortese, G. and K.R. Bjørklund (1998): The taxonomy of boreal Atlantic Ocean Actinomma (Radiolaria). *Micropaleontology*, **44**, 149–160.
- Cortese, G. and K.R. Bjørklund (1998): Morphometry and taxonomy of *Hexacantium* species from western Norwegian fjords, *Micropaleontology*, **44**, pp. 161–172.
- Dogiel, V.A. and V.V. Reschetnjak (1952): Material on Radiolarians of the northwestern part of the Pacific Ocean. *Issledovaniya Dalnevostochnykh Morei*, **3**, 5–36.
- Endoh T., Mitsudera, H., Xie, S. P., and B. Qiu (2004): Thermohaline structure in the subarctic North Pacific in a general circulation model. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 360–371.
- Feldman, G. C. and C. R. McClain (2006): Ocean Color Web, SeaWIFS, NASA Goddard Space Flight Center. Eds. Kuring, N. and S. W. Bailey. www page: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
- Freeland, H. J., Bychkov, A. S., Whitney, F., Taylor, C., Wong, C. S. and G. I. Yurasov (1998): WOCE section P1W in the Sea of Okhotsk 1. Oceanographic data description. *J. Geophys. Res.*, **103**, 15,613–15,623.
- Furuya, K. (1990): Subsurface chlorophyll maximum in the tropical and subtropical western Pacific Ocean: Vertical profiles of phytoplankton biomass and its relationship with chlorophylla and particulate organic carbon. *Marine Biology*, **107** (3)
- Goll, R.M. (1976): Morphological intergradation between modern populations of *Lophospyris* and *Phormospyris* (Trissocyclidae Radiolaria). *Micropaleontology*, **22**, 379–418.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., and P. D. Ryan (2001): PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* **4** (1): 9pp. www page: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- Honda, M. C., and S. Watanabe (2010): Importance of biogenic opal as ballast ballast-associated and residual POC in the Western Pacific Subarctic Gyre, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02605.
- Honda, M. C., Imai, K., Nojiri, Y., Hoshi, F., Sugawara, T., and M., Kusakabe (2002): The biological pump in the northwestern North Pacific based on fluxes and major components of particulate matter obtained by sediment-trap experiments (1997–2000). *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5595–5625.
- Honda, M. C., Kawakami, H., Sasaoka, K., Watanabe, S., and T., Dickey (2006): Quick transport of primary produced organic carbon to the ocean interior. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 16.
- Itaki, T. (2003): Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea. *Marine. Micropal.*, **47**, pp. 253–270.
- Itaki, T. and K.R., Bjørklund (2006): Bailey's (1856) radiolarian types from the Bering Sea re-examined. *Micropaleontology* **52**, 449–463.
- Itaki, T., Khim, B.K., and K., Ikehara (2008): Last glacial-Holocene water structures in the southwestern Okhotsk Sea inferred from radiolarian assemblages. *Marine. Micropal.*, **67**, 191–215.
- Kamikuri, S., Motoyama, I., and A., Nishimura (2008): Radiolarian assemblages in surface sediments along 175 E in the Pacific Ocean, *Marine. Micropal.*, **69**, pp. 151–172.
- 気象庁 地球環境・海洋部 海洋気象情報室 (2006): 海洋の健康診断表・臨時診断表 2005/2006年のオホーツク海の海水について. www page: http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/rinji/2006_no1/seai200606.html.
- Kling, S. A. (1979): Vertical distribution of polycystine radiolarians in the central North Pacific. *Marine. Micropal.*, **4**, 295–318
- Kling, S.A. and D., Boltovskoy (1995): Radiolarian vertical distribution patterns across the southern California Current. *Deep-Sea Res. I*, **42**, 191–231.
- Kruglikova, S.B. (1969): Radiolarians in the surface layer of the sediments of the northern half of the Pacific Ocean, p. 48–72 In *The Pacific Ocean, Microflora and Microfauna in the Recent of Pacific Ocean*, edited by Kort, P.P., Nauka, Moscow, (in Russian).
- Ling, H.Y., Stadum, C.J., and M.L., Welch (1971): Polycystine Radiolaria from Bering Sea surface sediments. In *Proceedings of the Second Planktonic Conference, Roma, 1970*, Tecnoscienza, Roma, 705–729.
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Boyer, T. P. and H. E. Garcia (2006): World Ocean Atlas 2005, Vol. 1: Temperature, edited by Levitus, S., NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp. www page: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html.
- Lombardi, G. and G., Boden (1985): Modern radiolarian global distributions. *Cushman Found. Foram. Res. Special Publication No. 16A*, 125.
- Mizobata, K., Saitoh, S.I., Shimoto, A., Miyamura, T., Shiga, N., Imai, K., Toratani, M., Kajiwara, Y., K., Sasaoka (2002): Bering Sea cyclonic and anticyclonic eddies observed during summer 2000 and 2001. *Prog. Oceanogr.*, **55** (1–2), 65–75.
- Moore Jr., T.C. (1978): The distribution of radiolarian assemblages in the modern and ice-age Pacific. *Marine. Micropal.*, **3**, 229–266.
- Morley, J.J. and J.D. Hays (1983): Oceanographic conditions associated with high abundances of the radiolarian *Cycladophora davisiana*, *Earth and Planetary Science Letters*, **66**, 63–72.
- Morley, J. J. (1985): Radiolarians from the Northwest Pacific, Deep Sea Drilling Project Leg 86. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Vol. **86**, edited by Heath, G. R., Burckle, L. H., et al., Washington, D.C.: U. S. Government Printing Office, 399–422.
- Motoyama, I. (1997): Origin and evolution of *Cycladophora davisiana* Ehrenberg (Radiolaria) in DSDP Site 192, Northwest Pacific. *Marine. Micropal.*, **30**, 45–63.
- Nakatsuka, T., Yoshikawa, C., Toda, M., Kawamura, K., and M. Wakatsuchi (2002): An extremely turbid intermediate water in

- the Sea of Okhotsk: Implication for the transport of particulate organic matter in a seasonally ice-bound sea, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (16), 1757.
- Nakatsuka, T., Fujimune, T., Yoshikawa, C., Noriki, S., Kawamura, K., Fukamachi, Y., Mizuta, G., and M. Wakatsuchi (2004): Biogenic and lithogenic particle fluxes in the western region of the Sea of Okhotsk: Implications for lateral material transport and biological productivity. *J. Geophys. Res.*, **109**
- 永田豊, 大谷清隆, 柏井誠 (1992): 北太平洋亜寒帯循環. 海の研究, **1** (3), 75–104.
- Nigrini, C. (1968): Radiolaria from eastern tropical Pacific sediments. *Micropaleontology*, **14** (1), 51–63.
- Nigrini, C. (1970): Radiolarian assemblages in the North Pacific and their application to a study of Quaternary sediments in core V20–130. In *Geological Investigations of the North Pacific*, Memoir vol. 126, edited by Hays, J.D., Geological Society of America, 139–183.
- Nigrini, C. and T.C. Moore Jr. (1979): A Guide to Modern Radiolaria. Cushman Found. Foram. Res., Special Publication No.16, 342pp.
- Nimmergut, A. and A. Abelmann (2002): Spatial and seasonal changes of radiolarian standing stocks in the Sea of Okhotsk. *Deep-Sea Res. I*, **49**, 463–493.
- Nishimura, A. and M. Yamauchi (1984): Radiolarians from the Nankai Trough in The Northwest Pacific. *News Osaka Micropaleontol.*, Spec. Vol. 6, 1–148.
- Oceanographical Research Division, 1989. Seasonal mean distribution of sea properties in the Pacific. Techn. Rep. Japanese with English abstract).
- Nishioka, J., Ono, T., Saito, H., Nakatsuka, T., Takeda, S., Yoshimura, T., Suzuki, K., Kuma, K., Nakabayashi, S., and A. Tsuda (2007): Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, **112**
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Yoshitani, H., Nakatsuka, T., Ikehara, M., and M. Wakatsuchi (2003): Radiolarians under the seasonally sea-ice covered conditions in the Okhotsk Sea: flux and their implications for paleoceanography. *Mar. Micropaleontol.*, **49**, 195–230.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Itaki, T., and Y. Kawasaki (2004): Comparison of radiolarian vertical distributions in the Okhotsk Sea near Kuril Islands and the northwestern North Pacific off Hokkaido Island. *Mar. Micropaleontol.*, **51**, 257–284.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Onodera, J., and M.C. Honda (2005): Temporal and spatial flux changes of radiolarians in the northwestern Pacific Ocean during 1997–2000. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2240–2274.
- Petrushevskaya, M.G. (1967): Radiolyarii otryadov Spumellariai Nassellaria Antarkticheskoi oblasti (po materialam Sovetskoi Antarkticheskikh ekspeditsii). In *Rezultaty Biologicheskikh Issledovaniy Sovetskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii 1955–1958*, **3**, Issledovaniya Fauny Morei, **4** (12), 5–186. Zoologicheskii Institut, Akademiya Nauk SSSR, Leningrad. (in Russian)
- Petrushevskaya, M.G. (1971): Radiolarii Nassellarida v planktone Mirovogo okeana. Radiolarii mirovogo okeana po materialam sovetskikh ekspeditsii, *Issled. Fauni Morei Leningrad, Nauka* **9** (17), 5–9294
- Pisias, N. G., Roelofs, A., and M. Weber (1997): Radiolarian-based transfer functions for estimating mean surface ocean temperatures and seasonal range. *Paleoceanography*, **12**, 365–379
- Renz, G.W. (1976): The distribution and ecology of radiolaria in the central Pacific: plankton and surface sediments. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography* **22**, 267pp.
- Reshetnyak, V.V. (1966): Deepwater phaeodarian radiolarians of the northwestern part of the Pacific Ocean. *Fauna of the USSR. Radiolaria. Acad. Nauk SSSR, Zool. Inst.*, **94**, 1–208.
- Rogachev, K.A. (2000a): Recent variability in the Pacific western subarctic boundary currents and Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.* **47**, 299–336.
- Rogachev, K.A. (2000b): Rapid thermohaline transition in the Pacific western subarctic and Oyashio fresh core eddies. *J. Geophys. Res.*, **105**, 8513–8526.
- Shannon, C.E. and W. Weaver (1949): *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana 125pp.
- Siegel, D. A., McGillicuddy Jr., D. J., and E. A. Fields (1999): Mesoscale eddies, satellite altimetry, and new production in the Sargasso Sea, *J. Geophys. Res.*, **104**, 8695–8713.
- Stabeno, P.J., Reed, R.K., and J.E. Overland (1994): Lagrangian measurements in the Kamchatka Current and Oyashio. *Journal of Oceanography*, **50**, 653–662.
- 高橋孝三 (1994): 生物源粒子フラックス: 海洋環境トレーサーとしての意義. オーシャンフラックス・ニュースレター, No.11, 3–9.
- Takahashi, K. (1983): Radiolaria: Sinking population, standing stock and production rate. *Mar. Micropaleontol.*, **8**, 171–181.
- Takahashi, K. (1987): Radiolarian Flux and Seasonality: Climatic and El Nino Response in the Subarctic Pacific, 1982–1984. *Global Biogeochemical Cycles*, **1** (3): 213–231.
- Takahashi, K. (1991): Radiolaria: flux, ecology, and taxonomy in the Pacific and Atlantic. In *Ocean Biocoenosis*, Series No. 3, Ed., Honjo, S., Woods Hole Oceanographic Institution Press, 303 pp.
- Takahashi, K. (1997): Time-series fluxes of Radiolaria in the eastern subarctic Pacific Ocean. *News of Osaka Micropaleontologists*, Special Volume No. **10**, 299–309.
- 高橋孝三, O. R. Anderson (1997): レディオラリア上綱. 日本産海洋プランクトン検索図説, 千原光雄, 村野正昭編, 東海大学出版会, 347–372.
- 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年太平洋赤道海域西部・中部における時系列変動と海洋環境. 地質学雑誌, **110**, 8, 463–479.
- Takahashi, K. and S. Honjo (1983): Radiolarian skeletons: Size, weight, sinking speed and residence time in tropical pelagic oceans. *Deep-Sea Res.*, **30** (5A): 548–568.
- Takahashi, K., Hurd, D. C., and S. Honjo (1983): Phaeodarian skeletons: Their role in silica transport to the deep sea. *Science*, **222** (4624): 616–618.
- Talley, L. D. (1991): An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Res.*, **38**, 171–190.
- Tanaka, S. (2008): Vertical distribution and temporal flux changes of radiolarians corresponding to the environmental factors in the Bering Sea and the central subarctic Pacific. *Ph.D. Thesis, Kyushu University*, 245pp.
- Tanaka, S. and K. Takahashi (2008): Detailed vertical distribution of radiolarian assemblage (0–3000 m, fifteen layers) in the central subarctic Pacific, June 2006. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth and Planet. Sci.*, **32** (1), 49–72.

- Ueno, H. and I. Yasuda (2000): Distribution and formation of the mesothermal structure (temperature inversions) in the North Pacific subarctic region. *J. Geophys. Res.*, **105**, 16,885–16,897.
- Weinelt, M. (1996): Online Map Creation. www page: <http://www.aquarius.geomar.de/omc/>.
- Welling L.A. (1996): Environmental control of radiolarian abundance in the central equatorial Pacific and implications for paleoceanographic reconstructions. Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis, 314pp.
- Yamashita, H., Takahashi, K., and N. Fujitani (2002): Zonal and vertical distribution of radiolarians in the western and central Equatorial Pacific in January 1999. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 2823–2862.
- Yu, E..F., Francois, R., Bacon, M.P., Honjo, S., Flerer, A.P., Manganini, S.J., van der Loeff, M.M.R., and V. Ittekkot (2001): Trapping efficiency of bottom-tethered sediment traps estimated from the intercepted fluxes of Th230 and Pa231. *Deep-Sea Res. I*, **48**, 865–889.

Seasonal flux changes of radiolarians at Station K2 in the Western Subarctic Gyre

Takahito Ikenoue[†] Kozo Takahashi[†], Yoshiyuki Ishitani[†], and Seiji Tanaka[‡]

Abstract

Time-series radiolarian fluxes were observed employing sediment traps at Station K2 (47°N, 160°E, water depth: 5280 m) located in the Western Subarctic Gyre in the northwestern Pacific Ocean during March 2005 through May 2006. It is suggested that the northwestern North Pacific around Station K2 is the area influenced by Okhotsk Sea water masses rich in iron and nutrients, which were originated from the continental shelf and coastal seawater masses from the Kuril Islands and eastern Kamchatka. Based on available plankton tow data with four depth intervals, the flux data at specific water depth intervals were evaluated. We also characterized the relationships between radiolarian seasonal flux changes and seasonal variations of water masses at their dwelling depths.

Key words: Radiolaria, Sediment trap, Western Subarctic Gyre, Station K2, northwestern North Pacific

(Corresponding author's e-mail address: ikenoue@geo.kyushu-u.ac.jp)

(Received 20 April 2009; accepted 7 May 2010)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2010)

[†] Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

[‡] Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1 Minato-cho, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan