

沿岸域における珪藻遺骸群集と化石群 —大村湾におけるセディメント・トラップ実験結果—

加藤めぐみ¹・谷村好洋²・松岡數充³・福澤仁之¹

Diatom flora in sinking particles and coastal marine sediments, examined by sediment trap method in Omura Bay, western Japan

Megumi Kato¹, Yoshihiro Tanimura², Kazumi Matsuoka³ and Hitoshi Fukusawa¹

Abstract : Time-series samples were collected by sediment trap at Nagayo-ura in Omura Bay, western Japan from June 1998 to June 1999. Diatom flora in these trap samples and surface sediments taken beneath the sediment trap were analyzed and compared each other for investigating taphonomic changes of diatom frustules. The diatom flora in the trap samples was mostly composed of marine planktonic taxa, so they were presumed to be autochthonous remains. On the other hand, benthic diatoms with no pigments in their frustules from the sediment samples were considered to be allochthonous remains transported by bottom water currents. Then annual fluxes of marine planktonic diatoms were derived from both of the trap and the sediment. The resulting fluxes in the sediment samples were much smaller than the annual sinking flux calculated from the trap samples. This investigation suggests major decrease of the frustules possibly occurred at boundary zone of seawater and surface sediments. The preservation rate (annual flux from the surface sediment sample/ annual flux from the trap sample) was estimated 2.8% for total marine planktonic diatoms, and varied among each taxon from less than 0.1% to 16.5. So the abundance and composition of the fossilized flora in the sediments are much different from the original one which lived in surface water. Therefore, we should consider taphonomic loss of diatom frustules to quantify past diatom productivity and interpret paleoecological information from diatom records in sediments.

Key words : coastal environments, marine planktonic diatoms, preservation rate, sediment trap, taphonomic process

はじめに

珪藻は水域生態系の一次生産者として淡水から海水にわたるさまざまな水域に生息しており、それぞれの種もしくは分類群が特定の塩分、栄養塩濃度、pH、水流、水温などの水質要素とともに生息するほかの生物群集との競合関係に適応していることが

知られている(巖佐, 1976)。また、シリカよりなる珪藻殻は堆積物中に化石として保存されるため、珪藻は過去の水域環境を示す生物指標のひとつである。この理念にもとづいて堆積物中の珪藻化石群集の層序学的変化から堆積物形成当時の水域環境を推定する研究がさかんに行なわれてきた。

近年の古環境復元研究では、過去の環境要素を定

¹ 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻 Department of Geography, Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University, Hachioji 192-0397, Japan e-mail; megumi@comp.metro-u.ac.jp

² 国立科学博物館 National Science Museum, Shinjuku, Tokyo 169-0073, Japan

³ 長崎大学水産学部 Faculty of Fisheries, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan

量的に示すことやその変化に明確な年代軸を加えたりその変化速度を具体的に示すことが重要視されている(福沢ほか, 1997). 湖沼・内湾堆積物は堆積速度が大きいので高時間分解能でかつ精度よく古環境を復元することが可能で, これらの試料に豊富に含まれる珪藻化石からより具体的で定量的な過去の環境情報を得ることが望まれる. したがって, これからの珪藻化石を用いた古環境復元においては, 個々の珪藻種の分布を規定している塩分, 栄養塩濃度, 水温といった水質を定量的に明らかにすることや, 水域内の物質循環や生態系システムのなかで重要な珪藻生産量を精密に見積ることに取り組むべきであろう. そのための基礎として, 珪藻が沈積・埋没過程で受ける変化をまず明らかにする必要がある. なぜなら, 珪藻化石のもつ環境情報をより正確に評価するためには, 表層水塊中に生息していた珪藻が遺骸となって沈降して堆積物中の化石となるまでに受けるさまざまな変化をあらかじめ見積っておくことが必要不可欠であるからである.

これまで珪藻化石を対象とした研究が数多く行なわれてきた一方で, 珪藻化石の沈積・埋没過程に注目したタフオノミー研究はあまりなされてこなかった(小杉, 1985). とくに, 地球環境変動の解明や人間生活にとって非常に重要な地域の一つである内湾域における珪藻化石のタフオノミー研究はこれまで行われていない. そこで本研究では, セディメント・トラップ試料と表層から欠層なく採取された海底堆積物試料を用いて大村湾長与浦における珪藻の沈積・埋没過程を明らかにすることとした. 両試料に含まれる珪藻個体数を年間沈降殻数もしくは年間堆積殻数(annual flux)に換算して比較した. そして, タフオノミーが表層水塊中における珪藻生産量の定量的復元に貢献する可能性について検討した.

研究対象地域

本研究で用いた試料は長崎県中央部に位置する大村湾においてピストン・コアリングにて採取された(図1). 大村湾は鮮新世末から更新世に活動した断層によって形成された地溝帯に海水が侵入してできた断層性海湾で(波多江, 1976), 海岸線から沖へ向かって急激に水深が増して水深約20mの平坦な海底がひろがるケトル型(Kettle Type)の海底地形をなしている. 大村湾に流入する河川は大きくないため, 沿岸部をのぞくと大村湾の海底堆積物は中央粒径が 8ϕ 以上の細粒物質からなる(鎌田ほか,

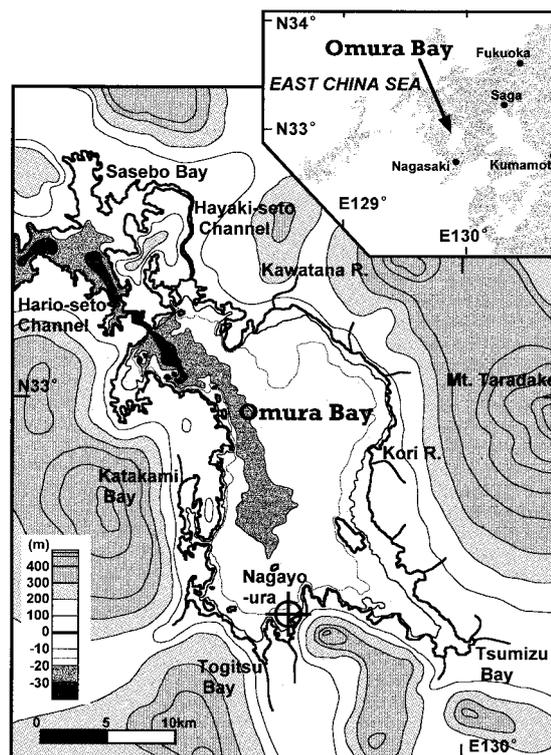


図1 大村湾の海底地形および周辺地形と試料採取地点

Fig.1 Morphological map around Omura Bay, western Japan and the sampling site in Nagayo-ura.

1980). また, 大村湾の地形的特徴としてもっとも注目すべきことに, 典型的な袋状海湾(もしくは閉鎖性海湾; closed sea)であることが挙げられる. 大村湾とその母湾である佐世保湾とは2つの狭い水路(針尾瀬戸と早岐瀬戸)を介してのみつながるため, 大村湾は外洋との海水交換が悪い非常に閉鎖的な内湾で湾内水の成層状態が強まる夏季には湾中央部の底層水の酸素濃度が著しく低下することが知られている. 生態学的な研究としてこの海底無酸素化現象と渦鞭毛藻赤潮発生メカニズムとの関連性が注目されており(岡市, 1987), 金・松岡(1998)は海底堆積物中の渦鞭毛藻シストの群集変化を検討して大村湾の富栄養化現象について論じている.

試料と方法

本研究では, 長崎県大村湾の湾奥部に位置する長与浦(図1)において簡易型セディメント・トラップ(図2)を用いて採取された沈降物試料および海底表層より攪乱なく採取された堆積物コア試料を分析・検討に用いた. セディメント・トラップ試料は

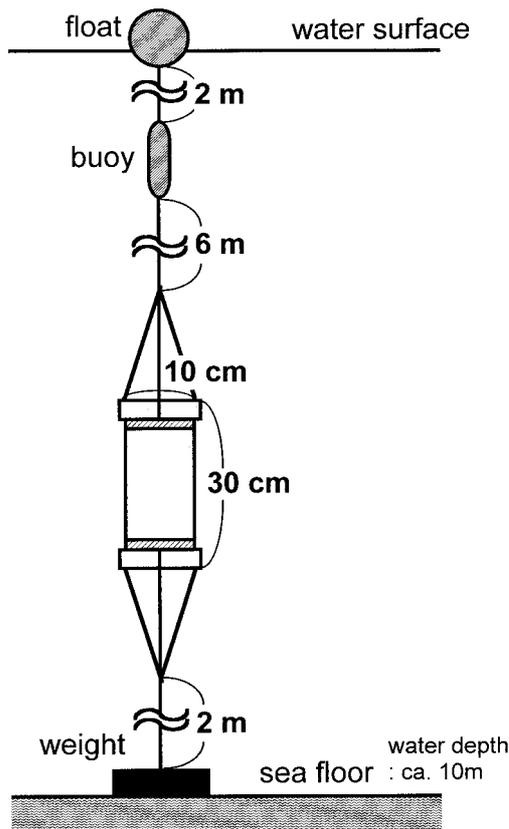


図2 大村湾長与浦に係留されている簡易型セディメント・トラップの構造模式図，丹藤（1999 MS）に一部加筆

Fig.2 Structure of the sediment trap deploying at Nagayo-ura in Omura Bay, described by Tanto (1999 MS)

1998年6月～1999年6月にかけて約2週間ごとに回収された(表1)。セディメント・トラップ中から回収された沈降粒子試料をメンブレン・フィルター(Millipore社製, タイプHA: 直径47 mm, 孔径0.45 μm)でろ過して, そのフィルターをトランスパレンシー・オイル(R. P. Cargille Laboratories社製, Transparency Medium 1.506)でスライドグラスに貼りつけて定量スライドを作成した。また, 珪藻殻を詳細に観察して種を同定するためにスチラックス樹脂(シグマ光機社製: 商品名Storax Gum, 屈折率1.62)で封入した光学顕微鏡観察用スライドと走査型電子顕微鏡観察用の試料を別途に用意した。光学顕微鏡観察および珪藻殻の計数には, 東京都立大学地理学教室のオリンパス社製BH-2光学顕微鏡を用い, 走査型電子顕微鏡は国立科学博物館新宿分館の日本電子社製JSM-5310を使用した。

海底表層より欠層なく採取された内径3.9 cm 全長37 cmのピストンコア試料については, まずその

表1 珪藻遺骸の解析に用いられたセディメント・トラップ試料(試料採取地点: 大村湾長与浦 St. 2)

Table 1 Samples for analyzing diatom assemblages taken by sediment trap at Nagayo-ura St. 2 in Omura Bay

sampling date	deploying days
17/Jun/98	14
1/Jul/98	14
18/Jul/98	17
1/Aug/98	14
17/Aug/98	16
31/Aug/98	16
14/Sep/98	14
28/Sep/98	14
13/Oct/98	15
27/Oct/98	14
13/Nov/98	14
24/Nov/98	14
8/Dec/98	14
22/Dec/98	14
18/Jan/99	27
4/Feb/99	17
18/Feb/99	14
5/Mar/99	15
19/Mar/99	14
2/Apr/99	14
16/Apr/99	14
30/Apr/99	14
15/May/99	15
28/May/99	13
10/Jun/99	13

層相(図3)を記載したのち層厚1 cmごとに分割した。分割したそれぞれの試料の含水率を測定してかさ密度を求めた。珪藻殻を検鏡するためのスライドは, セディメント・トラップ試料と同様に, 堆積物試料をそれぞれ蒸留水中に懸濁させてメンブレン・フィルターでろ過して作成した。堆積物の年代は, 同試料採取地点において同様に採取された全長46 cmの堆積物コア試料の深度2～3, 9～10, 19～20, 29～30, 39～40, 45～46 cmの6層準を用いて²¹⁰Pb法によって求められた平均堆積速度の0.29 cm/年にもとづくこととした。なお, ²¹⁰Pb法による測定はアレグニーテクノロジー・ジャパン社に依頼して行なった。

1998年6月～1999年6月に出現した珪藻群集

本研究対象地域において優占して出現した6分類群(dominant taxa)およびそれらに次いで多く出現した16分類群をふつうに出現するもの(common taxa)として表2に示した。優占して出現する6分類群とふつうに出現する16分類群の年間沈降殻数

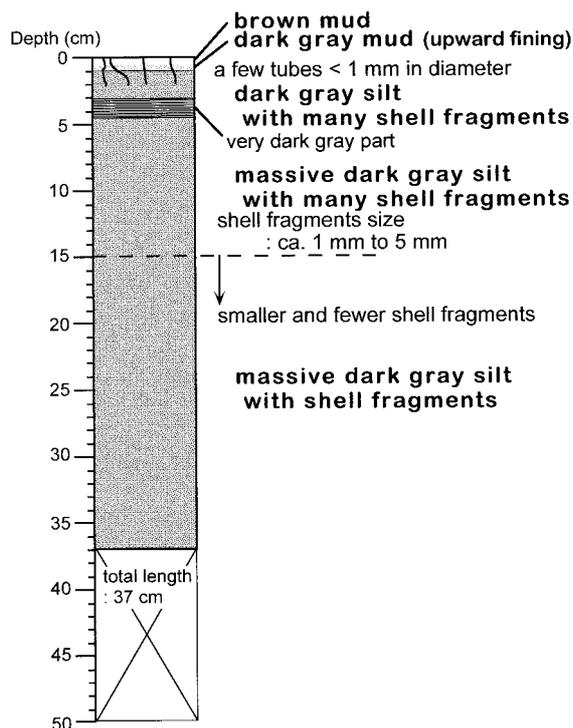


図3 大村湾長与浦 St. 2 地点で採取されたピストンコア試料の層相

Fig.3 Schematic columnar section of the sediment core taken at Nagayo-ura St. 2 in Omura Bay

の合計で海生浮遊性珪藻全体の 80% 以上が占められており、これらの珪藻種群が調査水域全体の珪藻生産量のなかで重要な意味をもつと思われる。

長崎県大村湾における珪藻の沈積・埋没過程

【海底に沈降する珪藻遺骸の運搬】

堆積物中の生物化石には、そこに生息場所で化石化した現地性 (autochthonous) の化石と、ほかの場所で生息していた生物遺骸が運ばれてきて化石化した異地性 (allochthonous) の化石とが混在している (Martin, 1999)。堆積物中の生物化石から現地の古環境を精度よく復元するためには、化石群集のなかから両者を識別したうえで現地性化石からの生態学的情報を抽出する必要がある (小杉, 1985)。

大村湾のセディメント・トラップ試料に含まれる珪藻群集は、海生浮遊性種から構成されていた (表 2)。本研究対象地域の水深は 10 m と浅く表層海水中に生息していた珪藻が遺骸となってすみやかに沈降してきたと考えられるため、セディメント・トラップ試料中に認められた海生珪藻・珪質鞭毛藻群集をその上方の有光層 (euphotic zone) 中で生産さ

表 2 1998 年 6 月～1999 年 6 月に大村湾のセディメント・トラップ試料中に多く出現した珪藻分類群

Table 2 Dominant and common diatom taxa in sediment trap samples from Omura Bay during June 1998 to June 1999

taxon	annual flux ($\times 10^6$ valves $\text{cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	relative abundance (%/marine planktonic diatoms)	accumulated relative abundance (%/marine planktonic diatoms)	d: dominant, c: common
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Husted complex	7.41	16.15	16.15	d
<i>Neodelphineis pelagica</i> Takano	5.34	11.63	27.78	d
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve + <i>Skeletonema tropicum</i> Cleve	4.98	10.84	38.62	d
<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundstrom	4.34	9.46	48.08	d
<i>Thalassionema frauenfeldii</i> (Grunow) Hallegraeff	4.10	8.93	57.02	d
<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	3.15	6.86	63.88	d
<i>Cyclotella litoralis</i> Lange & Syvertsen + <i>Cyclotella striata</i> (Kützing) Grunow	1.14	2.48	66.36	c
<i>Thalassiosira decipiens</i> (Grunow) Jörgensen	0.98	2.14	68.50	c
<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	0.81	1.77	70.27	c
<i>Thalassiosira eccentrica</i> (Ehrenberg) Cleve	0.63	1.37	71.65	c
<i>Chaetoceros lancinosus</i> Schütt	0.59	1.30	72.94	c
<i>Chaetoceros didymus</i> Ehrenberg	0.53	1.16	74.10	c
<i>Bacteriastrium delicatulum</i> Cleve ?	0.52	1.14	75.24	c
<i>Cymatotheca weissflogii</i> (Grunow) Hende	0.43	0.94	76.18	c
<i>Thalassiosira oestrupii</i> (Ostenfeld) Hasle var. <i>venrickae</i> Fryxell & Hasle	0.35	0.77	76.95	c
<i>Thalassionema bacillare</i> (Heiden) Kolbe	0.35	0.76	77.71	c
<i>Rhizosolenia imbricata</i> Brightwell + <i>Rhizosolenia fallax</i> Sundström + <i>Rhizosolenia decipiens</i> Sundström	0.33	0.73	78.43	c
<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell	0.33	0.72	79.15	c
<i>Thalassiosira tenera</i> Proschkina-Lavrenko type-1	0.32	0.70	79.85	c
<i>Actinocyclus sagittulus</i> Villareal	0.32	0.70	80.54	c
<i>Chaetoceros danicus</i> Cleve	0.29	0.64	81.18	c
<i>Thalassiosira lundiana</i> Fryxell	0.25	0.54	81.73	c

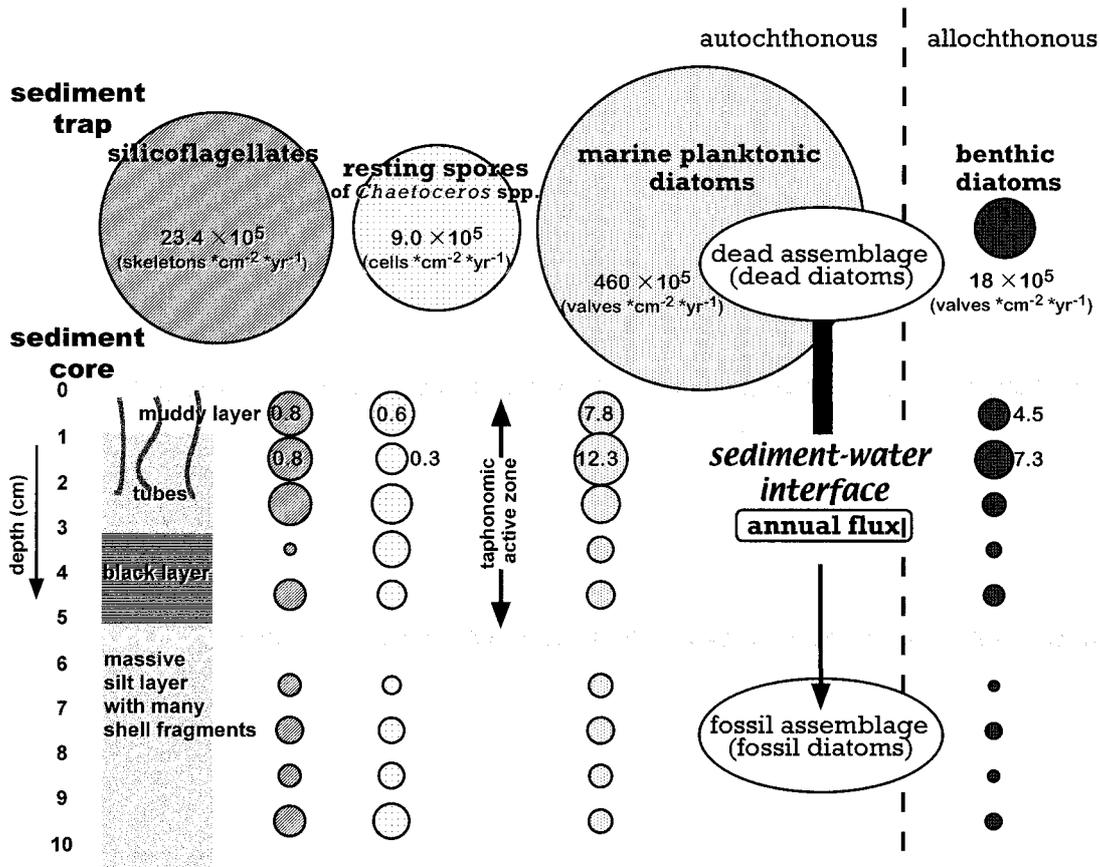


図4 珪藻殻数、*Chaetoceros* 属の休眠孢子数および珪質鞭毛藻骨格数のタフオノミー過程における変化
Fig.4 Diagram showing quantitative taphonomic changes of diatom, resting spores of *Chaetoceros* spp. and silicoflagellates in Nagayo-ura, Omura Bay

れたものの遺骸，すなわち現地性遺骸であると考えることができる。これに対し，堆積物コア試料中には，海生浮遊性珪藻・珪質鞭毛藻群集に加えて，セディメント・トラップ試料にはほとんど含まれなかった底生・付着生珪藻種が相対的に多く認められた(図4)。これらの底生・付着生の珪藻群集はどれも原形質を内包していなかったことから，堆積物表層で生育し遺骸となった現地性遺骸群集ではなく潮流などによって堆積物採取地点の外部から混入した異地性の遺骸群集であると判断された。また，過去約130年間に相当する表層～深度37cmの堆積物コアの層相には大きな変化が認められない(図3)。このことから，過去約130年間にわたって試料採取地点の水深や環境に大きな変化はなかったと推定される。したがって，本研究対象地域の古水域環境を推定するためには，まず現地性の化石群集を構成する海生浮遊性珪藻・珪質鞭毛藻群集を解析することが重要である。

【海底表層における珪藻遺骸の化石化過程】

そこで次に，現地性遺骸・化石群集である海生浮遊性珪藻種についてセディメント・トラップ試料と堆積物コア試料に含まれる珪藻殻数をそれぞれ定量的に比較して，珪藻化石から珪藻殻の年間沈降殻数(annual flux)を推定する方法について検討した。1年あたりの沈降殻数と堆積殻数を求めて比較した結果，現地性であると判断された海生浮遊性珪藻群集の場合，海底へ沈降してきた珪藻殻のうち堆積物中に化石として残されるものは多くの珪藻分類群で1%未満～10数%であった(図4)。ここで示された海底に沈降してきた珪藻殻のうち化石として堆積物中に残される珪藻殻の割合はこれまで外洋域において概算的に推定された値(Schrader,1971)におおむね矛盾しない。しかしながら，外洋域と水深の浅い内湾域では珪藻遺骸の沈降過程が異なると推定される。これまでの研究で，外洋域で珪藻遺骸が糞粒

(fecal pellet) としてではなく単独で沈降する場合には、珪藻殻のほとんどが海水中で溶解してしまうことが指摘されている (Schrader, 1971). 一方, 本研究でセディメント・トラップで回収された水柱 (water column) を沈降してきた珪藻遺骸の多くは単独もしくは珪藻のコロニー (群体) として認められた. この観察結果は水深が 10 m と浅い本研究対象地域では沈降途中における珪藻殻の溶解量が大きくないことを示している. そして, 珪藻殻の沈積・埋没過程における減少は, おもに堆積物表層に沈積した後の埋積過程および化石化過程において起こったと考えられる. このことから, 珪藻のタフオノミーにおいて海底堆積物最表層部の堆積物と海水が混じりあうセディメント・ウォーター・インターフェイス (sediment water interface) における珪藻遺骸の破碎・溶解作用の影響が重要であるという考え (Takahashi, 1989) が内湾域においても支持される. Martin (1999) によれば, 海底表層部において生物遺骸には物理・化学・生物学的な作用が活発に働くために生物遺骸の破碎・溶解 (分解) が起こる. 陸域に近接する内湾域では, 潮流, 沿岸流および波浪によって異地性遺骸の移入および現地性遺骸の再堆積 (物理学的作用) が生じ, 珪藻殻の溶解作用に強い影響を及ぼす海水および間隙水の化学性変化 (pH, Eh の変化を含む) や有機物分解 (化学的作用) が珪藻遺骸の埋積過程に関わっている. さらに, 底生動物による捕食や分解 (生物学的作用) は, 物理学的・化学的作用をもととなって海底に沈積した珪藻殻の破碎・溶解に大きな影響を及ぼしていると考えられる. 海底に沈積した珪藻殻のうち化石化する割合が外洋域と内湾域で同程度であることは, 海底表層部で両地域に共通して及ぼされる作用が沈積・埋没過程における珪藻殻数減少の主要因である可能性を示唆している.

【珪藻生産量の復元方法とこれからの課題】

珪藻殻の構造が分類群によって異なるために, 脆弱な殻をもつ珪藻分類群ほど溶解される選択的溶解作用 (differential dissolution) が生ずる (Mikkelsen, 1977). 堆積物中の珪藻化石群集から過去において実際に存在した珪藻群集の種構成を推定してそれらの生産量を精度よく見積るためには, この選択的溶解作用の影響を定量的に明らかにする必要がある. 本研究ではセディメント・トラップ試料から算出された年間沈降珪藻殻数に対する表層堆積物中に含まれる珪藻殻の 1 年あたりの堆積数を堆積物固定率

表 3 大村湾長与浦において多く認められた海生浮遊性珪藻および珪質鞭毛藻の堆積物固定率
Table 3 Preservation rate of dominant or common marine planktonic diatoms, resting spores of *Chaetoceros* spp. and silicoflagellates in Nagayaura, Omura Bay

taxon	preservation rate (%)
total valves of marine planktonic diatoms	2.8
total cells of resting spores	3.1
total skeletons of silicoflagellates	3.5
<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell	16.5
<i>Cyclotella litoralis</i> Lange & Syvertsen + <i>Cyclotella striata</i> (Kützing) Grunow	7.2
<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundström	5.4
<i>Thalassiosira oestrupii</i> (Ostenfeld) Hasle var. <i>venrickae</i> Fryxell & Hasle	5.1
<i>Thalassionema frauenfeldii</i> (Grunow) Hallegraeff	3.8
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Hustedt complex	2.5
<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	1.1
<i>Neodelphineis pelagica</i> Takano	0.9
<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	0.6
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve + <i>Skeletonema tropicum</i> Cleve	0.4

(preservation rate) と定義した. この堆積物固定率とは, 個々の珪藻殻の破碎・溶解状態の差異に関わらずその数の減少量だけに注目した珪藻殻の堆積物への固定率を示している (表 3). さらに, 本研究で用いたセディメント・トラップの係留水深は約 8 m と浅いため, セディメント・トラップ中に捕集された珪藻遺骸群集はその直上有光層中に生息していた生体群集に質・量ともに極めて近いものと推定される. また, これまでの海洋学研究によれば珪藻遺骸はすみやかに海底へ沈積することが知られており, セディメント・トラップで回収された沈降粒子中の珪藻遺骸を用いて珪藻生産量の変化が推定されることも一般的である (Takahashi, 1989; Tanimura, 1999 など). したがって, この珪藻遺骸の堆積物固定率を用いて, 堆積物中に含まれる珪藻化石数から海底での破碎・溶解作用によって珪藻殻が減少する前の珪藻沈積量すなわち過去の珪藻生産量を定量的に見積る方法が提案される (図 5). この方法にもとづいて過去 130 年間における珪藻群集全体の生産量の変化および 1998 年~1999 年にかけて本研究対象地域において優占して認められた珪藻種それぞれ生産量

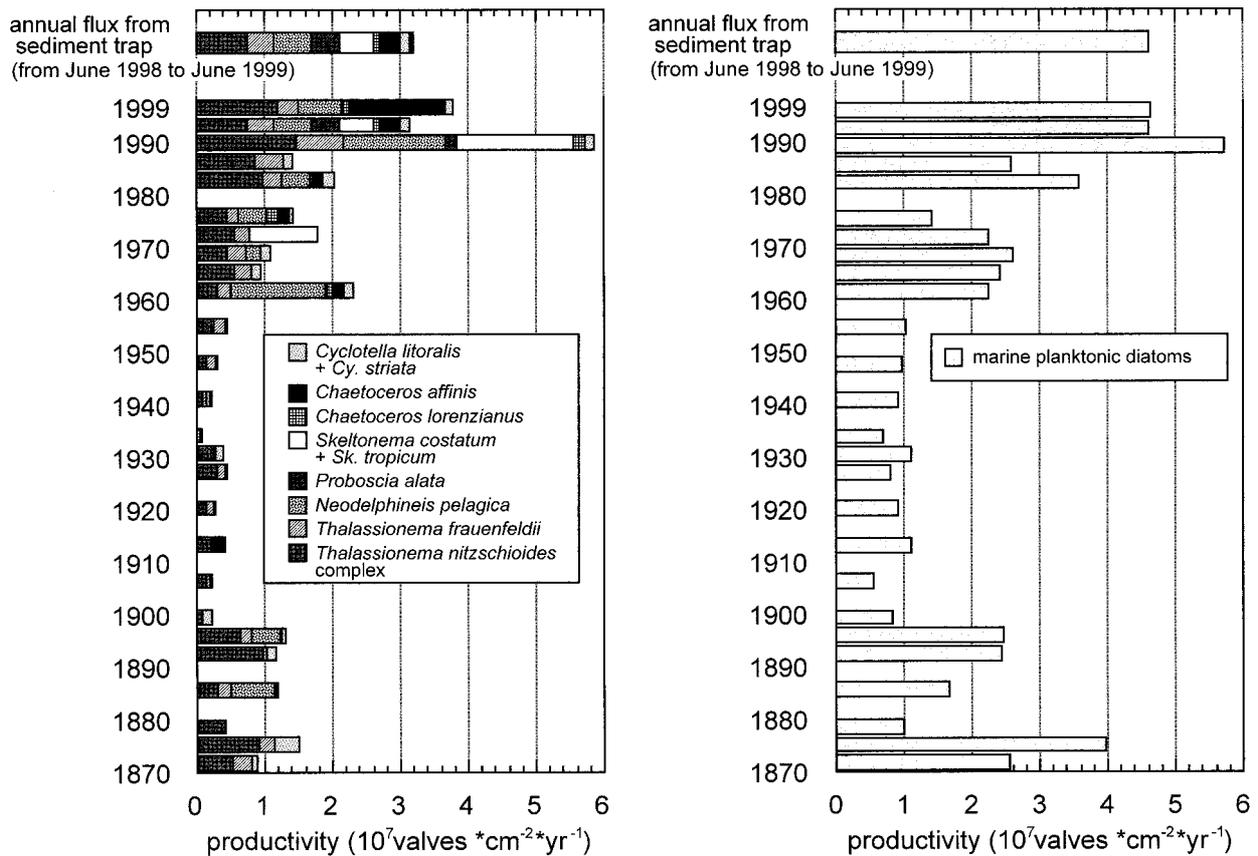


図5 堆積物固定率を用いて復元された優占種の生産量の変化 海生浮遊性珪藻全体の合計を堆積物固定率2.8%を用いて算出(右), 現生において優占する6分類群と *Cyclotella litoralis* + *Cy. striata*, *Chaetoceros lorenzianus* の生産量ををそれぞれの堆積物固定率から算出(左)

Fig.5 Diagram showing estimated diatom productivities of 6 dominant taxa based on each preservation rate right : calculated by data of total marine diatoms (preservation rate : 2.8%), left : estimated productivities of present 6 dominant taxa with *Cyclotella litoralis* + *Cy. striata* and *Chaetoceros lorenzianus*

の変化を推定して, その結果を比較して図5に示した。

しかしながら, 現段階において次の2つの大きな問題点の解決が待たれる。第一には堆積物中で全く失われてしまう珪藻分類群については堆積物固定率を適用できず, 出現数が少ない分類群についても誤差が非常に大きくなることである。そして第二の問題として, 現在生じている沈積・埋没過程が過去において必ずしも成立していたとはかぎらないことが挙げられる。これらの問題解決のためには, 珪藻殻を破碎・溶解させる主要な要因とそれらに対する珪藻殻の構造の耐性とを明らかにして, 珪藻殻の溶解量を客観的に評価する方法を確立する必要がある。また, 過去の化石化過程を支配する堆積環境の諸要因の変化に左右されない, より適応範囲の広い珪藻生産量復元法の確立が望まれる。具体的には, 化石

化過程を左右する堆積環境そのものの変化だけを分離する方法や, 個々の珪藻の形態変化など化石化過程での珪藻群集組成の変化やその絶対量の変化とは独立した指標で珪藻生産量を推定する方法を確立することが必要となる。

以上のような問題点の解決と新たな方法論の確立のために現生試料を用いた検証が欠かせない。そして, 珪藻生産量の復元だけにとどまらず珪藻化石から過去の水質を定量的に明らかにしていくためにも, 現世環境における珪藻の生態と環境との関連性を探究していく必要がある。このような研究のなかで, セディメント・トラップ実験は観察・実験により検証可能な現世珪藻のもつ環境情報と堆積物中の珪藻化石記録とをつなぐ重要な役割を果たしていくはずである。セディメント・トラップ実験および現世環境における検証にもとづいた古環境復元研究の

さらなる発展が期待される。

謝辞

東京都立大学の岩田修二教授，塚本すみ子博士には，本研究を進めるにあたりご指導・ご助言をいただいた。試料採取においては，長崎大学水産学部の趙賢珍氏，林正夫氏，丹藤直樹氏（当時）に長きにわたってご協力いただいた。以上の方々に心からお礼申し上げます。なお，本研究の経費の一部として，文部省科学研究費補助金基盤研究 A（課題番号：113040，代表者：福澤仁之）を使用した。記してお礼申し上げます。

引用文献

福澤仁之・藤原 治・大井圭一・山田和芳・加藤めぐみ・小野有五・伊勢明広・米田茂夫（1997）湖沼・内湾・レス堆積物によるアジアモンスーン変動の高精度復元。月刊地球，19：463-468。
波多江信広（1976）大村湾を中心とする地域の地質構造発達史。鹿児島大学理学部紀要（地学・生物学），9：21-40。
巖佐耕三（1976）「珪藻の生物学」東京大学出版会，東京，147 p。
鎌田泰彦・近藤 寛・堤 由美子（1980）九州北西

部伊万里湾・大村湾の底質と CHN 組成。長崎大学教育学部自然科学研究報告，31：63-82。
金 亨信・松岡數充（1998）渦鞭毛藻シスト群集組成から見た大村湾における富栄養化の過程。日本プランクトン学会報，45：133-147。
小杉正人（1985）染色像による珪藻の生体・遺骸の識別法とその意義。第四紀研究，24：139-147。
Martin, R. E. (1999) *Taphonomy: A Process Approach*. pp.1-26, Cambridge University Press, Cambridge.
Mikkelsen, N. (1977) On the origin of *Ethmodiscus* ooze. *Marine Micropaleontology*, 2: 35-46.
岡市友利（1997）赤潮現象。岡市友利編「赤潮の科学（第二版）」pp. 5-42, 恒星社厚生閣，東京。
Schrader, H.-J. (1971) Fecal pellets: role in sedimentation of pelagic diatoms. *Science*, 174: 55-57.
Takahashi, K. (1989) Silicoflagellates as productivity indicators: evidence from long temporal and spatial flux variability responding to hydrography in the northeastern Pacific. *Global Biochemical Cycles*, 3: 43-61.
Tanimura, Y. (1999) Varieties of a single cosmopolitan diatom species associated with surface water masses in the North Pacific. *Marine Micropaleontology*, 37: 199-218.