

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¹⁾

金 亨信²⁾・松岡 数充³⁾

長崎大学海洋生産科学研究科海洋資源学専攻²⁾・長崎大学水産学部沿岸環境学研究室³⁾
〒852-8521 長崎市文教町1-14

Process of eutrophication estimated by dinoflagellate cyst assemblages in Omura Bay, Kyushu, West Japan

HYEUNG-SIN KIM²⁾ & KAZUMI MATSUOKA³⁾

Graduate School of Marine Science and Engineering, Nagasaki University²⁾ and Laboratory of Coastal Environmental Sciences, Faculty of Fisheries, Nagasaki University³⁾, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan

Abstract: The eutrophication of Omura Bay, Kyushu, during the last ca. 350 years was reconstructed on the basis of sedimentary facies (mainly grain size), and dinoflagellate cyst assemblages in two cores (99 cm and 74 cm in length, respectively) collected at the center of the bay (st. 1) and Tsumizu Inlet (st. 2).

Sedimentation rates were approximately 2.7 mm · year⁻¹ at st. 1 and 2.1 mm · year⁻¹ at st. 2, as determined by the ²¹⁰Pb method. The median diameter of core sediment varied from 8.1 to 10.3φ at St. 1, and from 6.8 to 10.2φ at st. 2.

Dinoflagellate cysts mainly consisted of the Gonyaulacoid *Spiniferites* spp., *Tuberculodinium vancampoae*, the Protoperidinioid *Brigantedinium* spp., *Votadinium carvum* and the Gymnodinioid *Pheopolykrikos hartmannii*. At st. 1, cyst abundance increased at two horizons: around 1800 and 1900 year depths. Around the 1800 year depth, the autotrophic group composed more than 80% in relative frequency. The heterotrophic group began to increase after 1900 and reached a maximum (48%) in the mid-1950s. At st. 2, cyst assemblages of the lower part were similar to those at St. 1, and the heterotrophs also increased around the 1900 year depth and recorded a maximum (ca. 80%) at the 1980 year depth.

These data suggest that before 1900, the water quality of Omura Bay was probably in its natural oligotrophic condition, that eutrophication began about 1900, and that it accelerated during 1960s to 1980s.

Key words: Omura Bay (大村湾), dinoflagellate cyst (渦鞭毛藻シスト), eutrophication (富栄養化), heterotrophic species (従属栄養種), autotrophic species (独立栄養種)

佐世保湾の支湾である大村湾は湾口が非常に狭く、海域の閉鎖度を示す指標の一つである最大湾奥長/湾口長比が110にもおよび、湾収容量に見合う十分な海水交換がない強閉鎖的内湾である (Fig. 1参照)。さらに、湾中央部では海水の停滞性が著しくなって、懸濁物の沈降堆積が起こり、

¹⁾ 1997年11月13日受付, 1998年7月3日受理

夏季には海底の無酸素化現象によって、*Gymnodinium* 赤潮を誘起しやすい環境特性が形成されている(飯塚 1976, 飯塚・田北 1985)。反面この湾では動物プランクトンとして暖流外洋性種や熱帯産のカイアシ類がよく観察されたり(山田 1957)、植物プランクトンとしては五島灘水との直接交流がかなり強いことをあらわすような珪藻類の *Chaetoceros* 属が優占的に出現することなど、浮遊生物群集から見ると外洋の性格を帯びた海湾でもある(飯塚 1973)。

大村湾では1960年代後半になって *Gymnodinium mikimotoi* Oda ex Kominami et Miyake (= *Gymnodinium* '65年型種) を主とする赤潮が発生し、また1970年代になって時津湾や津水湾などの各支湾奥部で、*Ceratium furca* (Ehrenberg) Claparède et Lachmann, *Prorocentrum micans* Ehrenberg, *Gym. mikimotoi*, *Prorocentrum* sp., *Eutreptiella* sp. など、渦鞭毛藻類を中心とした局所的な赤潮が多発するようになった(飯塚 1976)。1970年代に各支湾で局所的赤潮が頻発するようになった主原因は汚濁負荷が増大し、富栄養化が進行したことにあると推察されている(飯塚 1976)。

しかし人為的負荷が増加する以前からどのようにして富栄養化が進行してきたのかをとどめた現場での観測記録はないため、本研究では過去の記録を残している堆積物の時系列分析から、環境変遷過程を明らかにすることを目的とした。Dale (1985) や Matsuoka (1994) は海水温、塩分、栄養塩濃度などの海域の水質と渦鞭毛藻群集に関連が認められることから、海底堆積物中の渦鞭毛藻シスト分析が過去の堆積域の環境推定に適用可能であること、また Anderson & Morel (1979) は赤潮原因種のシストが次期の増殖に際して、赤潮のたね(種)と成りうる可能性も指摘している。さらに日本沿岸に産する渦鞭毛藻シストに関しては小林 (1982)、松岡 (1982)、小林ほか (1986) が水質環境と赤潮発生に関する基礎研究として、あるいは表層堆積物中の渦鞭毛藻シスト分布について報告している。以上のような背景をもとに本研究では過去約350年間の記録を包含している海底堆積物中の渦鞭毛藻シスト群集解析と、堆積物の粒度分析結果から大村湾の環境変遷、とくに富栄養化による水質環境の変遷過程を明らかにすることを試みた。

材料および方法

柱状試料は1994年10月14日にコアサンプラー(チューブ内径約80mm)を用いて、大村湾中央の最深部である st. 1 (32°54'N, 129°50'E, 水深21m) と、湾南東奥部に位置し、海水交換が行われにくく、しかも最近になって湾岸の人口が増加し、汚濁が進行している津水湾の st. 2 (32°50'N, 129°58'E, 水深10m) でダイバーの潜水によって各2本ずつ採取した(Fig. 1)。st. 1では99cmの、st. 2では74cmの柱状試料を採取した。

堆積物の平均堆積速度は放射性鉛 (^{210}Pb) の減衰状態を測定することによって求められる。 ^{210}Pb は半減期が22.2年で、測定しうる年代範囲は数年から百数十年の間となるため、外洋域に比べて堆積物量の多い大村湾底泥の堆積速度測定に適用した。実際の測定は st. 1 では堆積物表面より2-4, 8-10, 14-16, 24-26, 38-40, 58-60cmの深度から、st. 2 では2-4, 8-10, 14-16, 24-26, 44-46, 54-56cmの深度から採取した試料の ^{210}Pb の減衰率測定をテレダイナアイソトープ社に依頼した。

各柱状試料の上部表面から5cm間隔に区分し、それぞれの試料について粒度分析および渦鞭毛藻シスト分析を行った。ただし、赤潮が多発しはじめた1960年代頃から現在までの水質変遷を把握するために、0cm-10cmの範囲は1cm間隔で試料を採取し、その15個の試料については渦鞭毛藻シスト分析のみ行った。

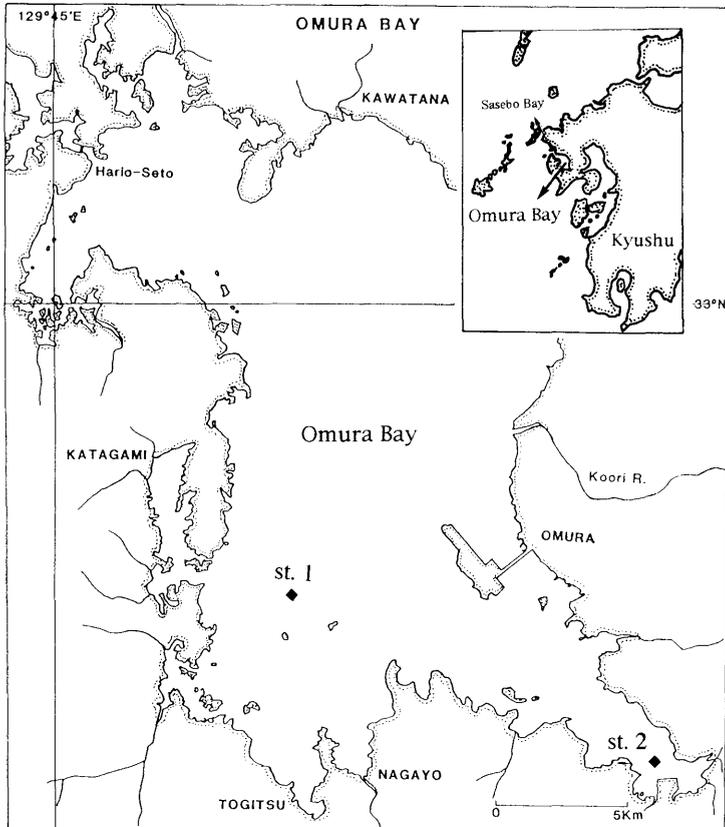


Fig. 1. Sampling stations in Omura Bay.

粒度分析

大村湾の表層堆積物の粒度組成はすでに鎌田ほか（1980）によって明らかにされている。それによると大村湾の底質は全体的に $Md < 8\phi$ の粘土質の細粒堆積物により構成されている。今回採取した柱状試料を肉眼で観察した結果も、最下部まで細粒堆積物であることが判明したので粒度分析には沈降法（ピペット法）(Mcmanus 1988)を採用した。方法は次の通りである。

ビーカーに10–15gの堆積物試料を入れ、さらに蒸留水と20mlの分散剤（二リン酸ナトリウム）を加え1lに定容し、約5分間超音波をかけ堆積物粒子をよく分散させて1lのメスシリンダーに入れる。Stoke式を用いて計算された各温度、媒質条件下での堆積粒子の沈降時間に従って水面下10cmから20mlの試料を採取した後、各試料を乾燥し、重さを計った。メスシリンダーに残った試料は目合 $63\mu\text{m}$ のステンレス製篩にかけて砂を分離し、凝集剤（硫酸アルミニウム）を入れ凝集し、乾燥後重さを計った。また分離した砂は乾燥し目合 $-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\phi$ の篩にかけ、各篩の上に残った砂の重さを計った。

渦鞭毛藻シストの分析と観察

シスト観察用試料の精製は下記のMatsuoka et al. (1989)の方法に従った。

堆積物試料2mlを100mlの耐薬品性の樹脂製ビーカーに入れ、約10%のHClを約30ml加えて炭酸カルシウム粒子を、さらに約20%のHF約20mlを用いて珪酸質粒子を除去し、目合 $125\mu\text{m}$ および $20\mu\text{m}$ のステンレス製の篩にかけ、観察には $20\mu\text{m}$ の篩上に残った試料を用いた。この試料は全体

が10mlになるように蒸留水を加えて濃縮精製試料とした。濃縮試料は十分攪拌した後、1.0mlを界線入計数板に移し、蒸留水を1.0-1.5ml加えて希釈し、倒立型光学顕微鏡 (Olympus IMT-2) や正立型光学顕微鏡 (Nikon AFX-IIA) 下でシストの同定および計数を行った。

結果

1) 堆積速度と堆積物の年代

^{210}Pb 測定によって求めた平均堆積速度はst. 1で $2.7\text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$, st. 2で $2.1\text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ であり、両地点間で少し異なっていた。両地点の分析結果を比較しやすくするため、各グラフ (Fig. 2, 3, 4) の縦軸には柱状試料表面からの深度および平均堆積速度から換算した堆積物の年代を示した。

なお得られた平均堆積速度に基づいて計算すると、st. 1の最下部の試料は約352年前、st. 2の最下部の試料は約358年前となる。

一般に内湾や浅海域の堆積物表層は底生生物による攪拌を受け、また波浪や底層流による物理的混合や底曳網漁業による人為的混合が考えられる。今回採取した両地点の柱状試料の観察からは、表面下約5cm (年代にして約20年間) まで底棲生物によると思われる径2-5mmほどの管状構造が認められたことから、この部分は生物による攪拌を受けている可能性がある。

2) 粒度組成

st. 1の粒度組成は柱状試料全体を通して、粘土が約53-81%、シルトが18-43%占め、砂は5%以下と低かった。中央粒径値 (Median diameter, Md) は8.1-10.3 ϕ で極細粒シルトから粘土であった (Fig. 2)。1864年頃にはシルトが43%、粘土は53%で中央粒径値は8.1 ϕ であったが、表面 (1994年頃) では粘土が81%まで増加し、中央粒径値は10.3 ϕ であった。

st. 2の粒度組成は粘土が12-92%、シルトも6-81%を占め、柱状試料全体を通してその変動幅が大きかった。また、砂の割合も最大約9%にまで達した。中央粒径値は6.8-10.1 ϕ であった (Fig. 2)。1730年頃の粘土の割合は約12%、シルトは約81%で中央粒径値は6.8 ϕ でやや粗かったが、1875年頃には粘土の割合が92%まで増加し、中央粒径値は10.1 ϕ であった。

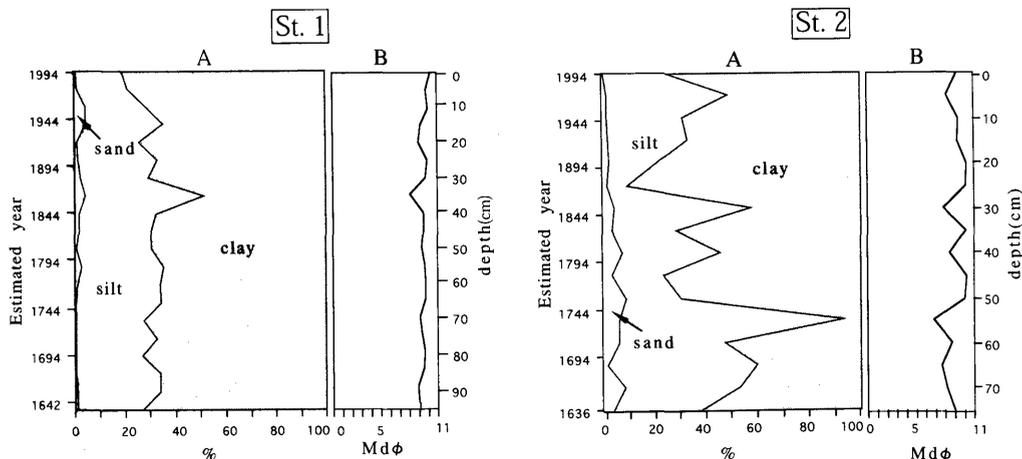


Fig. 2. Grain-size distribution (A) and median diameter (B) at sts. 1 and 2 in Omura Bay.

3) 渦鞭毛藻シスト群集組成

渦鞭毛藻は現生と化石の各々について個別に研究が進められてきた。すなわち、生層位学や古環境解析の分野において、渦鞭毛藻化石が一つの道具として用いられ、化石種にも現生種とは異なった独自の分類体系が確立されている (Reid 1974, 松岡 1981, Dale 1983)。そのため、現生の遊泳期細胞と休眠期細胞 (シスト, 化石種) に与えられた学名が異なり、単一の生物種に異なった二つの学名が存在することになった。本報ではシスト名の表記は古生物学的記載・命名に基づく (例えば松岡 1995) が、遊泳細胞名を用いるときには*印を学名の後につけた。

今回採取した柱状試料は平均堆積速度から計算すると、過去約350年間の堆積物であった。その堆積物から出現した渦鞭毛藻シストを観察した結果、渦鞭毛藻シスト群集組成にいくつかの変化が認められた。即ち年代の経過とともに優占種の変化が見られたり、シスト個体数や種数の増減が見られた (Fig. 4, Tables 1, 2参照)。

出現した渦鞭毛藻シストは独立栄養種群として Gonyaulacoid 類の *Spiniferites* 属, *Protoceratium** 属, *Lingulodinium** 属, *Tuberculodinium* 属, Calciodinoid 類, Gymnodinioid 類の *Pheopolykrikos hartmanni** (Zimmermann) Matsuoka et Fukuyo, *Cochlodinium** 属, *Gymnodinium** 属などが、従属栄養種群として Protoperidinioid 類の *Brigantedinium* 属, *Selenopemphix* 属, *Stelladinium* 属, *Votadinium* 属, *Protoperidinium** 属, *Xandarodinium* 属, Diplopsaloid 類の *Diplopsalis** 属, *Diplopelta** 属, *Dubridinium* 属, Gymnodinioid 類の *Polykrikos** 属などであった (Van Den Hook et al. 1995, 松岡 1995)。

*Protoperidinium** spp. のシストは背腹面が丸みをおびた菱形 (Fig. 5 a, b) と偽横溝の突出が比較的小さい卵形 (Fig. 5 c, d) の二つのタイプが観察された。これらはこれまでに記載がなく、またそれぞれ別種と思われたが、その確認には今後の発芽培養実験に待たねばならない。この二つのタイプのシストは st. 1 では 1900 年頃 (柱状試料表層から -25 cm) から表層部まで、st. 2 では 1920 年頃 (柱状試料表層から -15 cm) から表層部までの試料から観察された。

St. 1 の各層準における渦鞭毛藻のシスト数は $980\text{--}3220\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ の範囲にあり、平均で $1835\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、出現種数は 22–36 種であった。st. 2 でのシスト個体数は $375\text{--}1700\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ で、平均で $1046\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、確認した種数は 20–29 種であった (Fig. 3)。平均シスト数は st. 1 が st. 2 の約 1.7 倍であった。しかし、シストの種構成には大きい違いはなかった。

St. 1 では 1640 年頃から 1700 年代末頃までのシスト個体数は $1980\text{--}2640\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ でほぼ一定であったが、1800 年代はじめ頃には $3060\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ まで増加した。しかし、1840 年頃には $1400\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ まで減少し、再び 1900 年頃から増加傾向を示した (Fig. 3)。このように 1800 年代はじめ頃と 1900 年頃にシスト個体数の増加が見られた。1800 年代はじめ頃には独立栄養種群が総シスト数の約 80% 以上を占め、従属栄養種群の割合は低かった。これとは対照的に 1900 年頃のシスト数増加時には従属栄養種群の割合が増加し、およそ 60% にまで達した (Fig. 4A)。

St. 2 では 1982 年頃のシスト数は柱状試料全体を通して最低の $375\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ で、平均値の $1046\text{ cells}\cdot\text{cm}^{-3}$ を大きく下回った。さらに、1900 年頃からは従属栄養種群の割合が顕著に増加しはじめ、1984 年頃には約 79% に達した (Fig. 4B)。

両地点ともに従属栄養種群は 1600 年代から 1840 年頃までの間、約 5–25% の占有率であったが、1900 年頃から増加しはじめ、st. 1 では 48% まで、特に st. 2 では最高約 79% にまで増加した (Fig. 4)。両地点とも、1950 年代以降シスト数に大幅な増減があるにもかかわらず、従属栄養種群は st. 1 ではその変動幅が 33–48% でほぼ一定であり、st. 2 でも 1984 年頃まで従属栄養種群がやや増加するものの、1989 年頃から 1994 年頃の間ではわずかな減少傾向を見せた。

両地点ともに柱状試料全体を通して、Gonyaulacoid 類の *Spiniferites* 属 (渦鞭毛藻シスト群集中の

Table 1. Numbers (cysts/cm³) and relative abundance of dinoflagellate cysts in the core at st. 1 in Omura Bay

species \ depth	0-1cm	2-3 cm	3-4 cm	4-5 cm	5-6 cm	6-7 cm	7-8 cm	8-9 cm	9-10 cm	10-11 cm	15-16cm	20-21cm	25-26cm	30-31cm	35-36cm	40-41cm	45-46cm	50-51cm	
Autotrophic species																			
Gonyauloid group																			
<i>Spiniferites</i> spp.	2	5	7	5	8	6	5	2	5	5	3	17	14	11	20	13	14	40	
<i>Spiniferites belenus</i>											1			1		2		5	
<i>Spiniferites bentoni</i>	2	1	1	3	1	2	1	2		1	2	3	1	1	1		1	1	
<i>Spiniferites bulloides</i>		4	6	6	1	10	6	3	5	2	8	2	1	1	1	1	1	3	
<i>Spiniferites delicatus</i>					1					3			2	1	7	5	9	13	
<i>Spiniferites cf. delicatus</i>																			
<i>Spiniferites elongatus</i>	2	1	1		5	2		1		6	11	7	11	11	14	16	8	19	
<i>Spiniferites hyperacantus</i>								1		1	1		1	1	1		2	1	
<i>Spiniferites mirabilis</i>	12	6	6	5	7	19	12	14	7	16	12	10	9	10	6	11	9	22	
<i>Spiniferites ramosus</i>	2				11	2				16	7	7	1	2	5	1	3	12	
<i>Impagidium</i> sp.									1					1	1				
<i>Proceratium reticulatum*</i>	4	11	10	10	7	17	12	2	8	5	12	12	8	22	20	20	17	46	
<i>Operculodinium israelianum</i>					1				1										
<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	7	6	2	1	32	5	1	3	1	13	6	2	2	2	1	6	7	22	
Subtotal (%)	31(30.7)	33 (15.6)	33 (15.5)	30 (13.3)	74(23.0)	53 (23.0)	37 (16.9)	28 (14.3)	27 (12.0)	69(22.1)	66(28.6)	61(33.9)	51(37.0)	61(33.9)	77(46.7)	75(51.4)	71(50.7)	184(60.1)	
Tuberculodinioid group																			
<i>Tuberculodinium vancampoeae</i>	14	33	36	30	53	36	34	31	30	39	35	43	56	49	45	38	22	38	
Subtotal (%)	14(13.9)	33 (15.6)	36 (16.9)	30 (13.3)	53(16.5)	36 (3.1)	34 (3.1)	31 (3.2)	30 (2.7)	39(12.5)	35(15.2)	43(23.9)	56(40.6)	49(35.8)	45(27.3)	38(26.0)	22(15.7)	38(12.4)	
Calcioidinioid group																			
<i>Scrippsella trocoidea*</i>	4	18	19	24	3	22	42	34	24	1	3	1	1	1	4	3	2	23	
Subtotal (%)	4(4.0)	18 (8.5)	19 (8.9)	24 (10.6)	3(0.9)	22 (9.6)	42 (19.2)	34 (17.3)	24 (10.7)	1(0.3)	3(1.3)	1(0.6)	1(0.7)	1(0.7)	4(2.4)	3(2.1)	2(1.4)	23(7.5)	
Gymnodinioid group																			
<i>Pheopolykrikos hartmanni*</i>	17	28	24	36	73	30	28	18	35	53	16	16	2	1	11	11	12	11	
<i>Cochlodinium</i> sp.*	1	1	1	2			1		1		1		1	1	1	1	1	1	
<i>Gymnodinium catenatum*</i>																			
Subtotal (%)	18(17.8)	29 (13.7)	25 (11.7)	38 (16.8)	73(22.7)	30 (13.0)	29 (13.2)	18 (9.2)	36 (16.0)	53(17.0)	17(7.4)	16(8.9)	3(2.2)	2(1.5)	12(7.3)	12(8.2)	13(9.3)	12(3.9)	
Heterotrophic species																			
Protoperidinioid group																			
<i>Brigantedinium</i> spp.	7	18	15	15	21	16	12	12	15	29	4	4	3	3	7	3	5	9	
<i>Brigantedinium aurantem</i>																			
<i>Brigantedinium canacoense</i>	3	6	5	3	2	9	8	10	9	8	2	3	3		5	2	3	3	
<i>Brigantedinium grande</i>																			
<i>Brigantedinium majusculum</i>																			
<i>Brigantedinium simplex</i>		1	1	2	2		2	2	3	2	1	1	2				1	1	
<i>Brigantedinium punctulatum</i>																			
<i>Selenopemphix nephroides</i>	1	4	5	2	4	1	4	2	4	5	2	1	2	1		1	2	2	
<i>Selenopemphix quanta</i>	1	6	1	10	9	1	3	4	7	1	2	4	1	5	1	3	1	3	
<i>Stelladinium abei</i>		2					1			1								1	
<i>Stelladinium reidii</i>		4		1	2	2	3	1	2	8	2			2				2	
<i>Trinovantidium capitatum</i>	1	1			1	2				2	1	1						1	
<i>Votadinium carvum</i>	7	16	25	18	17	15	15	8	18	18	42	7			1		2	1	
<i>Votadinium spinosum</i>																		1	
<i>Protoperidinium americanum*</i>			1	1				1					1					1	
<i>Protoperidinium lattisium*</i>					1		1	2	2						1			1	
<i>Protoperidinium leonis*</i>	1	1		3	5	1		1	3	2	4	1						1	
<i>Protoperidinium minutum*</i>																			
<i>Protoperidinium</i> spp.*	5	1	2	2	7		1	3	3	26	4	1	2						
<i>Xandrodinium xanthirum</i>	4	1	2	5	18	6	1	3	2	9	15	16					1	1	
Subtotal (%)	30(29.7)	61 (28.9)	57 (26.8)	62 (27.4)	89(27.6)	54 (23.5)	53 (24.2)	49 (25.0)	68 (30.2)	113(36.2)	80(34.6)	39(21.7)	15(10.9)	12(8.8)	14(8.5)	10(6.9)	19(13.6)	26(8.5)	
Diplopsallid group																			
<i>Diplopsalis lenticula*</i>		4		3		5	1	2	2					2	3		1	4	
<i>Diplopetta parva*</i>		4	4	9	3	4	4	2	2					1	2	2	1	4	
<i>Dubridinium caperatum</i>	1	4	3	4		9	7		9	2	6	4	2	1		2	3	3	
Subtotal (%)	1(1.0)	12 (5.7)	7 (3.3)	16 (7.1)		17 (7.4)	12 (5.5)	6 (3.1)	13 (5.8)	2(0.6)	6(2.6)	4(2.2)	2(1.5)	4(2.9)	5(3.0)	4(2.7)	5(3.6)	11(3.6)	
Gymnodinioid group																			
<i>Polykrikos cf. kofoidii*</i>	2	13	24	18	17	16	8	24	16	25	9	4	2	2	4	1	2	4	
<i>Polykrikos schwartzii</i>	1	12	12	8	13	2	4	5	10	10	15	10	4	3	3	3	6	2	
Subtotal (%)	3(3.0)	25 (11.8)	36 (16.9)	26 (11.5)	30(9.3)	18 (7.8)	12 (5.5)	29 (14.8)	26 (11.6)	35(11.2)	24(10.4)	14(7.8)	6(4.3)	5(3.6)	7(4.2)	4(2.7)	8(5.7)	6(2.0)	
unidentified cysts																			
Subtotal (%)												2	4	3	1			6	
total dinoflagellate cysts	101	211	213	226	322	230	219	196	225	312	231	2(1.1)	4(2.9)	3(2.2)	1(0.6)			6(2.0)	
Number of cysts/1 cm ³	1010	1055	1065	1130	3220	1150	1095	980	1125	3120	2310	180	138	137	165	146	140	306	
Number of cysts/g(dry weight)	4901	2725	3975	4509	13765	9983	4021	4046	9000	13106	4547	7561	2674	4794	3197	3222	2629	12634	

*: theca nomenclature

55-56cm	60-61cm	65-66cm	70-71cm	75-76cm	80-81cm	85-86cm	90-91cm	95-96cm
35	25	11	23	27	17	25	19	25
10	6	8	11	9	7	11	9	6
2	3	1	1	1	1			3
8	4	4	4	8	9	8	5	7
12	9	8	4	2	3	12	3	6
				3				
16	16	16	10	10	14	12	12	10
1				2		1		
22	18	11	10	14	9	9	11	17
10	5	4	6	12	9	9	5	9
1								
34	41	26	26	32	17	16	32	16
14	11	10	8	8	20	7	6	17
165(62.5)	138(57.7)	99(50.0)	102(45.3)	128(52.0)	106(52.5)	110(55.0)	102(44.5)	116(54.0)
62	32	26	33	34	26	18	21	28
62(23.5)	32(13.4)	26(13.1)	33(14.7)	34(13.8)	26(12.9)	18(9.0)	21(9.2)	28(13.0)
9	11	15	12	19	19	23	9	17
9(3.4)	11(4.6)	15(7.6)	12(5.3)	19(7.7)	19(9.4)	23(11.5)	9(3.9)	17(7.9)
13	14	16	13	2	10	6	48	1
2	6	1	1	3		2	1	
			3	6		3	7	
15(5.7)	20(8.4)	17(8.6)	17(7.5)	11(4.4)	10(5.0)	11(5.5)	56(24.4)	1(0.5)
2	3	4	12	7	10	3	10	6
1	3	7	10	6	5	6	9	9
	1	2	1	3		2	1	2
2	1	1	1	1	1	2	8	1
	5	5	7	8		5		5
								1
					3			
1	3		1	3	1			2
	2	4	5	2	1	6	1	7
					2			
6(2.3)	18(7.5)	25(12.6)	40(17.8)	33(13.4)	23(11.4)	24(12.0)	29(12.7)	37(17.2)
1	5	2	7	1	6	1	3	4
3	3	2	4	2	3	1	2	
4(1.5)	8(3.4)	4(2.0)	11(4.9)	14(5.7)	9(4.5)	7(3.5)	8(3.5)	4(1.9)
1	5	6	11	7	5	10	6	12
	1	3		3	1		4	
1(0.4)	6(2.5)	9(4.5)	11(4.8)	10(4.0)	6(3.0)	10(5.0)	10(4.3)	12(5.6)
2	6	3	2	3	3		1	
2(0.8)	6(2.5)	3(1.5)	2(0.9)	3(1.2)	3(1.5)		1(0.4)	
264	239	198	225	246	202	200	229	215
2640	2390	1980	2250	2460	2020	2000	2290	2150
5826	9376	4090	4724	5165	607	4340	4580	4300

Table 2. Numbers (cysts/cm³) and relative abundance of dinoflagellate cysts in the core at st. 2 in Omura Bay

species \ depth	0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm	4-5cm	5-6cm	6-7cm	7-8cm	8-9cm	9-10cm	10-11cm	15-16cm	20-21cm	25-26cm	30-31cm	35-36cm	40-41cm	45-46cm	
Autotrophic species																			
Gonyaulacoid group																			
<i>Spiniferites</i> spp.	1	3	2	3	4	4	4	5	4	2	8	11	10	14	15	12	25	16	
<i>Spiniferites belemus</i>					1	1	3			1	2		1	2	1	3	3	1	
<i>Spiniferites dentori</i>		1		2					3										
<i>Spiniferites bulboides</i>	2	4	4	2	1	6	10	7	9	8	6	4	6	5	11	12	7	10	
<i>Spiniferites delicatus</i>	1					1							1	1	1	1	1	1	
<i>Spiniferites cf. delicatus</i>	1														3	2	2	2	
<i>Spiniferites elongatus</i>	2									1	2	3	5	4	3	3	7	8	
<i>Spiniferites hyperacantus</i>				1				1		1					1		1	1	
<i>Spiniferites mirabilis</i>	2		2	1	1	3	5	4	5	5	9	5	8	15	16	15	8	5	
<i>Spiniferites ramosus</i>	2					1				5	4		3	5	4	4	3	6	
<i>Impagidinium</i> sp.						2	1	3		2	1		2	1	2	3	3	1	
<i>Protoceratium reticulatum</i> *	5	2	1	4	2	7	15	4	15	10	9	14	9	13	12	10	18	14	
<i>Operculodinium israelianum</i>					2														
<i>Lingulodinium machaerophorum</i>		2	2			5	3	4		1	6	7	2	7	4	4	20	4	
Subtotal (%)	20 (15.7)	12 (8.5)	11 (13.6)	13 (17.3)	10 (10.2)	30 (22.4)	41 (25.6)	28 (17.8)	37 (23.6)	28 (24.1)	49 (36.0)	49 (40.5)	45 (45.9)	71 (58.2)	70 (59.3)	73 (59.8)	95 (55.9)	70 (59.3)	
Tuberculodinioid group																			
<i>Tuberculodinium vancaempeae</i>	19	16	3	8	11	11	12	31	28	24	22	29	29	34	21	24	35	20	
Subtotal (%)	19 (15.0)	16 (11.3)	3 (3.7)	8 (10.7)	11 (11.2)	11 (8.2)	12 (7.5)	31 (19.7)	28 (17.8)	24 (20.7)	22 (16.2)	29 (24.0)	29 (29.6)	34 (27.9)	21 (17.8)	24 (19.7)	35 (20.6)	20 (16.9)	
Calciodinioid group																			
<i>Scrippsella trocoidea</i> *	2	11	5	3	9	4	22	22	30	22	7	6	6	3	5	5	7	4	
Subtotal (%)	2 (1.6)	11 (7.8)	5 (6.2)	3 (4.0)	9 (9.2)	4 (3.0)	22 (13.8)	22 (14.0)	30 (19.1)	22 (19.0)	7 (5.1)	6 (5.0)	6 (6.1)	3 (2.5)	5 (4.2)	5 (4.1)	7 (4.1)	4 (3.4)	
Gymnodinioid group																			
<i>Pheopolykrinos hartmannii</i> *	4	9	5	6	4	7		4	3	2	6	2	1	5	5	7	9		
<i>Cochlidinium</i> sp.*	1		1	1	1	4							1	1	2	1		3	
<i>Gymnodinium catenatum</i> *			2	2		1							1	1	1	1	1	1	
Subtotal (%)	5 (3.9)	9 (6.4)	8 (9.8)	9 (12.0)	5 (5.1)	12 (8.9)	0	4 (2.5)	3 (1.9)	2 (1.7)	6 (4.4)	2 (1.7)	3 (3.2)	5 (4.1)	8 (6.7)	9 (7.3)	9 (5.3)	4 (3.3)	
Heterotrophic species																			
Protoperidinioid group																			
<i>Brigantidium</i> spp.	15	29	16	16	13	5	15	19	10	9	5	3	1	1	1		4		
<i>Brigantidium aurantem</i>																			
<i>Brigantidium cariacense</i>	4	5	3	1	3	1	6	4	2	4	3	4			1	1	1	1	
<i>Brigantidium grande</i>																			
<i>Brigantidium majusculum</i>																			
<i>Brigantidium simplex</i>	2	1	5	1	4		2		1		2								
<i>Brigantidium punctulatum</i>																			
<i>Selenopemphix nephroides</i>		1	5	1	2	4	1	4	1			1							
<i>Selenopemphix quanta</i>	4	4	2	6	1	8	7	3	2		1	2			4	2	5	2	
<i>Stelladinium abei</i>																			
<i>Stelladinium reidi</i>	1	1				1	1			1	1		1	1				1	
<i>Tinovantedinium capitatum</i>			1															2	
<i>Votadinium carum</i>	9	12	7	7	12	3	14	5	8	6	2	3	2	2	2		2	1	
<i>Votadinium spinosum</i>					1												1		
<i>Protoperidinium americanum</i> *								2	1										
<i>Protoperidinium lattisimum</i> *	1			2	1	1	1										1		
<i>Protoperidinium leonis</i> *		3	2	1	5	4	4		2	2				2					
<i>Protoperidinium minutum</i> *										2									
<i>Protoperidinium</i> spp.*	3	4				3													
<i>Xandarodinium xanthinum</i>	4	4	4			4	3	2	2	2	10	1	2	1	6	8	15	4	
Subtotal (%)	43 (33.9)	64 (45.4)	45 (55.6)	35 (46.7)	44 (44.9)	34 (25.4)	54 (33.8)	39 (24.8)	31 (19.7)	24 (20.7)	25 (18.4)	15 (12.4)	6 (6.1)	8 (6.6)	6 (5.1)	4 (3.3)	15 (8.8)	11 (9.3)	
Diplopsalid group																			
<i>Diplopsalis lenticula</i> *	10	6		1		10	4	2	1	1	3	3	1		1	2	2	2	
<i>Diplopsalis parva</i> *	4	1	4	1	1	10	3	5	2	3	3	3			1	2	5	3	
<i>Dubrdinium caperatum</i>	2	5	5	3	6	7	2	6	4	4	4	8	2	1	5	1	1	2	
Subtotal (%)	16 (12.6)	12 (8.5)	9 (11.1)	5 (6.7)	7 (7.1)	27 (20.1)	9 (5.6)	13 (8.3)	7 (4.5)	8 (6.9)	6 (4.4)	14 (11.6)	3 (3.1)	1 (0.8)	7 (5.9)	5 (4.1)	8 (4.7)	7 (5.9)	
Gymnodinioid group																			
<i>Polykrinos cf. kofoidii</i> *	10	13	1	2	4	4	13	6	8	1	4	3	1		1	3	1	2	
<i>Polykrinos schwartzii</i> *	12	4	4		8	12	9	14	13	6	16	3	6		1			1	
Subtotal (%)	22 (17.3)	17 (12.1)	5 (6.1)	2 (2.6)	12 (12.2)	16 (11.9)	22 (13.8)	20 (12.7)	21 (13.4)	7 (6.0)	20 (14.7)	6 (5.0)	7 (7.1)	0	2 (1.7)	3 (2.5)	1 (0.6)	3 (2.5)	
unidentified cysts																			
Subtotal (%)						1 (0.7)					1 (0.9)	1 (0.7)							
total dinoflagellate cysts	127	141	81	75	98	134	160	157	157	116	136	121	98	122	118	122	170	118	
Number of cysts/cm ³	1270	705	405	375	490	1340	800	785	785	580	1360	1210	980	1220	1180	1220	1700	1180	
Number of cysts/g(dry weight)	2894	1770	844	911	784	1817	1073	1371	1337	809	1678	1324	885	1151	1583	1220	1821	1229	

* : theca nomenclature

50-51cm	55-56cm	60-61cm	65-66cm	70-71cm	75-76cm
14	15	11	10	15	22
1	4	5	2	2	2
2		1	1	2	2
8	4	6	6	14	7
3		1	3	3	
1	1	1	2	1	
5	6	8	3	6	3
	3		2	1	3
2	6	3	4	12	9
5	3	3	4	3	3
			2		1
22	16	18	7	22	21
	3	6	15	2	4
70 (57.4)	61 (52.1)	63 (52.5)	61 (56.5)	83 (54.2)	77 (58.3)
30	23	20	8	16	20
30 (24.6)	23 (19.7)	20 (16.7)	8 (7.4)	16 (10.5)	20 (15.2)
5	10	11	9	20	23
5 (4.1)	10 (8.5)	11 (9.2)	9 (8.3)	20 (13.1)	23 (17.4)
3	2	2	3	3	
1			1		4
	1				
4 (3.3)	3 (2.5)	2 (1.7)	4 (3.7)	3 (2.0)	4 (3.0)
2	4	5	3	10	1
1	1		1	2	
			1		
3	3	1	2	4	2
1	1				
1	1	1	1		
		3		1	
	1	1			
8 (6.6)	12 (10.3)	12 (10.0)	9 (8.3)	17 (11.1)	4 (3.0)
	2	2		1	
2	1		1	1	1
2 (1.6)	3 (2.6)	4 (3.3)	5 (4.6)	6 (3.9)	3 (2.3)
		2	4	4	2
3	4	8	11	6	1
			1	1	
3 (2.5)	4 (3.4)	8 (6.7)	12 (11.1)	7 (4.6)	1 (0.8)
		2		1	
		2 (1.7)		1 (0.7)	
122	117	120	108	153	132
1220	1170	1200	1080	1530	1320
1082	1373	1789	953	1272	1122

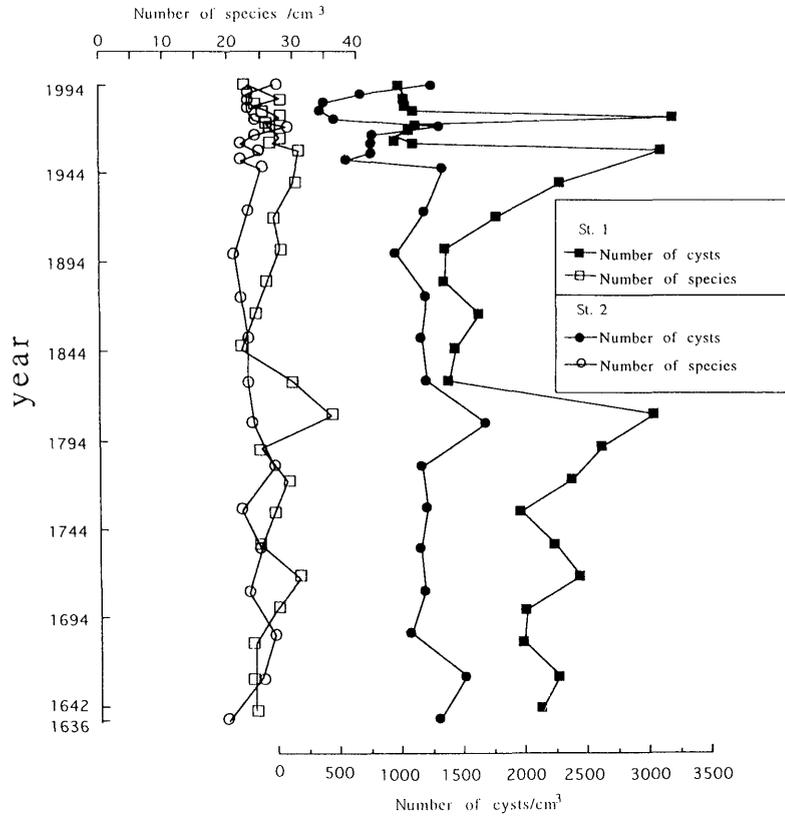


Fig. 3. Vertical distribution of species number and specimens of dinoflagellate cysts at sts. 1 and 2 in Omura Bay.

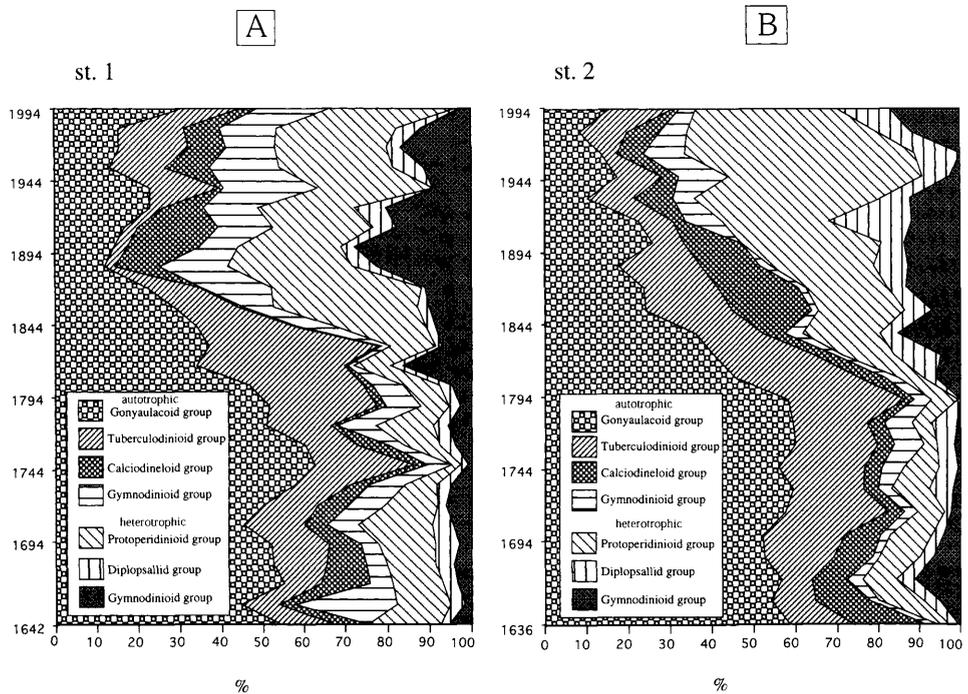


Fig. 4. Vertical distribution of hetrotrophic and autotrophic groups of dinoflagellate cysts at sts. 1 and 2 in Omura Bay.

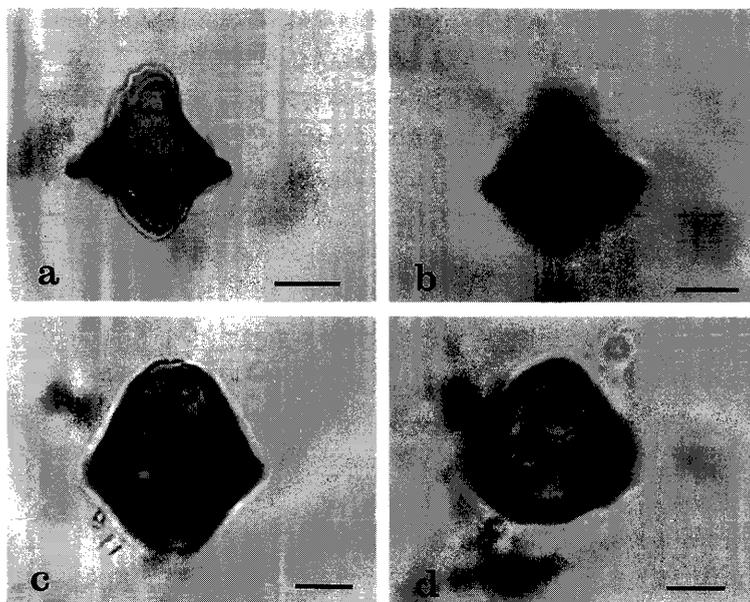


Fig. 5. Cyst of *Protoperidinium* spp. (a,b; *Protoperidinium* sp. A, c,d; *Protoperidinium* sp. B) a; optical cross section of lateral view, showing well developed paracingulum, b; ventral surface, showing parasulcus, c; oblique lateral view, d; oblique apical view, showing archeopyle. scale bar: 10 μ m

占有率で平均約25%), *Tuberculodinium vancampoae* (Rossignol) Wall (約17%), Protoperodinioid類の *Brigantedinium* 属 (約8%) や *Votadinium carvum* Reid (約4%), また Gymnodinioid類の *Pheopolykrikos hartmannii** (約9%) などが多く出現した (Tables 1, 2).

考 察

1) 堆積速度と粒度組成

^{210}Pb 測定によって求めた平均堆積速度は st. 1 で $2.7 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$, st. 2 で $2.1 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$ であった。これらの値は閉鎖系内湾とされる東京湾奥部での $9.7\text{--}11 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$ (松本・横田 1977), 大阪湾での $5.8 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$, 瀬戸内海での $3.7\text{--}3.9 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$ (松本・横田 1980) と比較すると小さい。その理由は大村湾では流入する河川が小規模で、搬入される堆積物の量が少ないこと、また比較的生産性が低いため珪藻殻などの堆積量が少ないことによると考えられる。

st. 1 では粒度分析の結果、1800年以前は砂粒成分の割合が1.0%以下であったが、1840年頃から増加しはじめ1950年頃には最高値の4.4%を占めた。この値の変化は1840年頃から河川から流入される堆積物量が増加したこと、即ち有機物質の流入量が増加したことを反映している可能性がある。これは1840年頃シスト個体数が急激に減少し、従属栄養種群が増加しはじめたことから支持される。

st. 2 では表層部を除いた試料全体で砂粒成分が1.5–8.5%の割合を占め、また粘土成分も12.3–92.3%の間で変化し、st. 1 に比べて変動幅が大きい。さらに、中央粒径値も st. 1 での $8.1\text{--}10.3\phi$ に対し、st. 2 では $6.8\text{--}10.1\phi$ で、st. 1 に比べて st. 2 の方がやや粗い。これは st. 2 のほうが st. 1 より河口 (東大川, 西大川, 喜々津川など) に近いことを反映しているのであろう。

2) 渦鞭毛藻シスト群集

赤潮の原因となるような異常増殖を行う植物プランクトンは2つの群に区分できる。一群は珪藻

類や珪質鞭毛藻類で、他の群は渦鞭毛藻やラフィド藻である。日本のような花崗岩質岩石を主体とする地質環境では一般的に沿岸水にケイ酸塩、リン酸塩、硝酸塩など多量の栄養塩が含まれている(高橋ほか1996a)。多量の栄養塩を含む河川水が多く流入し、かつ海水攪拌の顕著な沿岸海域では先ず、温度、pH、塩分などに広い適応力を有する珪藻類が増殖し、その結果海水中のケイ酸塩が消費される。その欠乏は珪藻増殖の制限要因となる。しかし他の栄養塩が残っていればそれらを利用して第二群である渦鞭毛藻やラフィド藻が増殖することになる。高橋ほか(1996b)によると、珪藻など植物プランクトンの増殖にともなってその細胞から分泌される溶存態有機物が海水中に増加し、その溶存態有機物を利用して従属栄養細菌が増殖する。珪藻や従属栄養細菌は従属栄養型渦鞭毛藻に捕食されることが知られている。すなわちGaines & Taylor (1984) やJacobson & Anderson (1986) は *Protoperdinium** 属、*Oblea** 属、*Zygabikodinium** 属などの従属栄養型渦鞭毛藻が、*Coscinodiscus* 属のような単体性のみならず *Cheatocheres* 属や *Skeletonema* 属などの群体性の珪藻類を捕食することを報告し、Lessard & Swift (1985) は従属栄養性渦鞭毛藻がバクテリアの捕食者であることを明らかにしている。

以上に述べたことから、河川水が多く流入する内湾・沿岸海域の海水中にはケイ酸塩をはじめとする栄養塩が多く含まれており、温度や照度などの物理的環境条件がよければ先ず珪藻類が増殖し、さらに珪藻などの植物プランクトン細胞から分泌される溶存態有機物を利用してバクテリアが増殖し、ついで珪藻類やバクテリアなどを捕食する従属栄養型渦鞭毛藻が増殖する過程が想定される。したがって堆積物中に従属栄養型の渦鞭毛藻シストが増加することは、前段階で従属栄養型渦鞭毛藻の捕食物である珪藻類などの増殖を反映しており、それはその海域での栄養塩類の増加による富栄養化を示唆しているとみなしてよいであろう。

今回分析に用いた大村湾の過去約350年間の柱状試料中に含まれている渦鞭毛藻シストの種類は、これまでMastuoka (1984) や小林ほか (1986) によって報告された長崎湾や大村湾など対馬暖流沿岸域の表層堆積物から出現する種類とほとんど同じであった (Table 1, 2)。しかし、今回st. 1とst. 2の柱状試料からは、*Protoperdinium** spp.と *Gymnodinium catenatum** が検出された。*Protoperdinium** spp.はst. 1では1900年頃から、st. 2では1920年頃から1994年頃に至るまでの試料から観察され、特にst. 1の1955年頃には $260 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ もの多量のシストが存在した。しかしそれ以深の試料からは全く出現していない。*Protoperdinium** spp.が1900年代はじめから出現しはじめ、1955年頃に最高値を占めるようになったことはこの時期に従属栄養種である *Protoperdinium** spp.の遊泳細胞が増殖するのに適切な環境条件になったこと、すなわち前述のように多量の栄養塩類の流入によって *Protoperdinium** spp.遊泳細胞の捕食物となる珪藻類やバクテリアなどが増殖する、いわゆる富栄養化が始まっていたことが考えられる。

*Gym. catenatum** はマヒ性貝毒原因種であり、日本でも山口県仙崎湾では本種による貝毒が発生している (Ikeda et al. 1989)。本種は飯塚 (1974) により大村湾からプランクトンとして発見され、*Gymnodinium* A₅ と仮称されていた。本種のシストが柱状試料下部 (1600年代) から検出されたことは、本種が他海域から人為的に侵入してきた帰化種ではなく在来種であることを強く示唆している。

1800年代はじめ、シスト個体数はst. 2で最高の $1700 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、st. 1では $3060 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ まで増加し、さらにst. 1では種数も最高の36種まで増加した。この時、独立栄養種群はst. 1で83%、st. 2で85%の高い割合を占めた。これは独立栄養種群のシストは海水温や塩分などの比較的安定した海洋環境から多産するというHarland (1988) や松岡 (1992) の指摘から、この年代の大村湾は安定した環境が継続していたものと推察される。

st. 1では1840年頃にシスト個体数が約 $1400 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ まで急激に減少し、その後1900年代頃から1994年頃にかけて増加した。さらにシスト個体数が急激に減少した1840年頃から従属栄養種群は増加しはじめ、1960年頃には最高値の48%まで増加し、それ以降1994年頃の33%に至るまではほぼ一定であった。1840年頃シスト個体数が急激に減少したのは、構成種には大きい変化がないことから堆積物の供給量が増大したことが要因であると考えられる。さらにこの時に、堆積物供給量の増大による有機物の増加など、不安定な環境の出現を反映するように従属栄養種群シストの割合がやや増加していた。

st. 2では全体を通して、st. 1のような目立つシスト個体数の増減はなく、ほぼ一定であったが、1982年頃のシスト個体数は柱状試料全体を通して最低値の $375 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ で、平均値の $1046 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$ を大きく下回った。これは1982年7月の長崎豪雨により、河川から流入した多量の堆積物によってシスト量が希釈された可能性がある。また、従属栄養種群の割合は1875年頃の7%から増加し続け、1994年頃には63%を占めるに至った。大村湾の場合、過去およそ400年間には大規模な沿岸地形の変化や流系の変化は考えられないので、従属栄養種群の増大は珪藻やバクテリアなどの増加によって示される富栄養化を反映していると考えられる。また、1960年頃以降現在（1994年頃）に至るまで従属栄養種群が占める割合がst. 1より大きい。これはst. 2が大村湾の中でも南東の奥部に位置し、海水交換が行われにくく、さらに最近湾岸の人口増加に伴う河川からの流入負荷物質の増加などによる影響をより強く受けて、富栄養化がさらに進行していることの反映であろう。

本研究では大村湾での富栄養化による水質環境汚染の過程を、渦鞭毛藻シスト群集変化から推定することを試みたが、松岡（1995）は横浜港の柱状試料中の渦鞭毛藻シスト群集変化から環境変遷過程を明らかにした。横浜港の場合は1970年代からシスト個体数の減少や従属栄養種群シストの増加などが見られ、経済高度成長期に伴う周辺地域の都市化の進行による沿岸域の環境変化過程が推測されている。

3) 大村湾の水質環境変遷

CODによって示される大村湾の水質は1976年から環境基準をこえ、1986年頃まで悪化傾向を示した後、約5年間はほぼ一定であったが、1993年には最高値の3.4ppmを記録した（香月・松尾1994、長崎県環境白書1994）。長崎県水産試験場事業報告（1948-1995年）によると大村湾での赤潮発生件数は1960年代から増加しはじめ、1980年をピークに減少の傾向を示し、1995年時点では1980年の1/4程度まで減少した。

本研究でst. 1とst. 2ともに1600年代から1840年頃までの間、従属栄養種群シストは約5-25%の割合であった。しかし、1900年頃から従属栄養種群が増加しはじめ、st. 2では最高約79%を、st. 1では約60%を占めるに至った（Fig. 5）。このことから大村湾では1900年頃から富栄養化に伴う水質汚濁が深刻化しはじめ、1960年代から1980年代の間で最も進行したと考えられる。さらに従属栄養種群の割合から見て、st. 1よりst. 2のほうが人口密集域に近くその影響を受けていることも推測できる。これは原ほか（1992）が明らかにした大村湾の従属栄養細菌数が $1.2 \times 10^2 - 7.8 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ で、吉田（1983）の従属栄養細菌数による海域の栄養階級区分にあてはめると、大村湾は富栄養水域から過栄養水域に相当し、特に大村湾の中でも津水湾での従属栄養細菌数が $1.3 \times 10^4 - 7.8 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ で最も高くなったことから支持される。

しかし、st. 1とst. 2ともに1980年代末頃から1994年頃に至るまでの間、従属栄養種群シストは減少傾向を見せた。この間の堆積物は前述のように生物攪拌を受けている可能性があるために詳細に年代を追って考察するには無理があるかもしれないが、あるいはこれは最近海洋環境汚染に関

する感心が高まり、海洋汚染の原因となる負荷物質の規制が反映されていることも考えられる。今後も観察を続けて大村湾の水質変化動向を把握することが必要であろう。

謝 辞

本研究を進めるについて数々の有益なご助言をいただいた長崎大学水産学部夏苺豊教授、長崎大学名誉教授平山和次先生に謹んで感謝致します。東京水産大学石丸隆教授からは植物性プランクトンの生理・生態について有益なコメントをいただいた。本研究の一部は文部省科学研究費一般研究C（課題番号06640600、代表；松岡数充）及び日産科学振興財団研究助成（一般研究、代表；竹村恵二）によった。記して当局へ感謝の意を表します。

引用文献

- Anderson, D. M. & F. M. M. Morel 1979. The seeding of two red tide blooms by the germination of benthic *Gonyaulax tamarensis* Hypnocysts. *Estu. Coast. Mar. Sci.* **8**: 279-293.
- Dale, B. 1983. Dinoflagellate resting cysts: "benthic plankton", pp. 69-136. In *Survival strategies of the algae* (ed. Fryxell, G. A.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Dale, B. 1985. Dinoflagellate cyst analysis of Upper Quaternary sediments in core GIK 15530-4 from the Skagerrak. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **65**: 97-102.
- Gaines, G. & F. J. R. Taylor 1984. Extracellular digestion in marine dinoflagellates. *J. Plankt. Res.*, **6**: 1057-1061.
- 原 健志・宮崎憲明・宮本真秀 1992. 大村湾の従属栄養細菌の測定. 長崎県衛生公害研究所報No. 36: 111-115.
- Harland, R. 1988. Dinoflagellates, their cysts and Quaternary stratigraphy. *New Phytol.* **108**: 111-120.
- 飯塚昭二 1973. 赤潮の生物相. 水産土木**9**: 19-29.
- 飯塚昭二 1974. 九州西岸域における重要赤潮生物写真集. 赤潮分類班資料 No. 1, 28 pp.
- 飯塚昭二 1976. 大村湾における汚染の進行と赤潮プランクトンの変遷. 日本プランクトン学会報**23**: 31-43.
- 飯塚昭二・田北 徹 1985. 大村湾 (I地質, II物理, III化学, IV生物). 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (編): pp. 879-900. 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京.
- Ikeda, T., S. Matsuno, S. Sato, T. Ogata, M. Kodama, Y. Fukuyo & H. Takayama 1989. First report on paralytic shellfish poisoning caused by *Gymnodinium catenatum* Graham (Dinophyceae) in Japan. pp. 411-414. In *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology* (eds. Okaichi, T., D. M. Anderson & T. Nemoto). Elsevier, New York.
- Jacobson, D. M. & D. M. Anderson 1986. Thecate heterotrophic dinoflagellates: Feeding behavior and mechanisms. *J. Phycol.* **22**: 249-258.
- 鎌田泰彦・近藤 寛・提 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No. 31: 63-82.
- 香月幸一郎・松尾征吾 1994. 大村湾調査研究のまとめ. 長崎県衛生公害研究所報No. 40: 36-51.
- 小林 聡 1982. 大村湾表層堆積物中における渦鞭毛藻類のシストに関する研究. 長崎大学大学院水産学研究科修士論文, pp. 94.
- 小林 聡・松岡数充・飯塚昭二 1986. 日本沿岸表層堆積物中の渦鞭毛藻シストの分布—I 大村湾. 日本プランクトン学会報**33**: 81-93.
- Lessard, E. J. & E. Swift 1985. Species-specific grazing rates of heterotrophic dinoflagellates in oceanic waters, measured with a dual-label radioisotope technique. *Mar. Biol.* **87**: 289-296.
- 松本英二・横田節哉 1977. 底泥からみた東京湾の汚染の歴史. 地球化学**11**: 51-57.
- 松本英二・横田節哉 1980. 瀬戸内海における堆積と底質汚染. 海と空**56**: 135-143.

- 松岡數充 1980. 渦鞭毛藻シスト—その分類学上の意義について—, 月刊地球 **2**: 319–326.
- 松岡數充 1982. 大村湾表層堆積物中の渦鞭毛藻シスト, pp. 197–204. 文部省「環境科学」特別研究報告書, 海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究 (代表者, 岡市友利).
- Matsuoka, K. 1984. Organic-walled dinoflagellate cysts from surface sediments of Nagasaki Bay and Senzaki Bay, West Japan. *Bull. Fac. of Liberal Arts, Nagasaki Univ. (Natural Science)* **25**: 21–115.
- Matsuoka, K., Y. Fukuyo & D. M. Anderson 1989. Methods for modern dinoflagellate cyst studies, pp. 461–479. In *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology* (eds. Okaichi, T., D. M. Anderson & T. Nemoto). Elsevier, New York.
- 松岡數充 1992. 海産パリーノモルフ化石群集からみた対馬・三根湾における完新世の沿岸海洋環境の変遷. 第四紀研究 **31**: 147–157.
- Matsuoka, K. 1994. Holocene dinoflagellate cyst assemblages in shallow water sediments of the Tsushima Islands, west Japan. *Rev. Palaeobot. Palynol.* **84**: 155–168.
- 松岡數充 1995. 横浜港 St. 1 底質柱状試料中の渦鞭毛藻シスト群集. 横浜港・生物と環境の変遷, 横浜市環境科学研究所環境研資料 No. 116 : 45–61.
- Mcmanus, J. 1988. Grain size determination and interpretation, pp. 63–85. In *Techniques in sedimentology*, (ed. Tucker, M. E.). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- 長崎県環境白書 1994. 大村湾の水質保全対策. 長崎県, 105 pp.
- Reid, P. C. 1974. Gonyaulacacean dinoflagellate cysts from the British Isles. *Nova Hedwigia* **25**: 579–637.
- 高橋正征・古谷 研・石丸 隆 (監訳) 1996a. プランクトンの分布/化学組成. 生物海洋学 **1**, pp. 55–86. 東海大学出版会, 東京. (*Biological Oceanographic Processes, 3rd edition* by T. R. Parsons, M. Takahashi & B. Hargrave. Butterworth-Heinemann Limited, 1984).
- 高橋正征・古谷 研・石丸 隆 (監訳) 1996b. 動物プランクトン/生物サイクル. 生物海洋学 **3**, pp. 3–64. 東海大学出版会, 東京. (*Biological Oceanographic Processes, 3rd edition* by T. R. Parsons, M. Takahashi & B. Hargrave. Butterworth-Heinemann Limited, 1984).
- Van Den Hook, C., D. G. Mann & H. M. Jahns 1995. *Algae: An introduction to phycology*. Cambridge University Press, Cambridge, 627 pp.
- 山田鉄雄 1957. 大村湾の特徴的な動物プランクトン 20 種について. 長崎大学水産学部研究報告 No. 5: 91–103.
- 吉田陽一 1983. 環境変化の予測と評価の方法. 水産学シリーズ 48, 漁業環境アセスメント: pp. 25–46. 恒星社厚生閣, 東京.