

論 説

表層堆積物に残された渦鞭毛藻シスト群集の変化と
閉鎖系沿岸海域での富栄養化—長崎湾の場合—

松岡 數充*・金 亨信**

Process of eutrophication in enclosed seas recorded in dinoflagellate cyst
assemblages and sediments — the case in Nagasaki Bay, west Japan —

Kazumi Matsuoka* and Hyeung-Sin Kim**

Abstract The change of water quality in Nagasaki Bay, West Japan after reclamation of the Koyagi Channel are reconstructed on the basis of analysis of sedimentary facies and dinoflagellate cyst assemblages in two cores collected at the stations NGB-1 and NGB-2 (86 cm and 60 cm in length respectively).

Sedimentation rates of these cores estimated by ^{210}Pb method were approximately 9.9 mm/year at St. NGB-1 and 4.3 mm/year at St. NGB-2. The median diameter of the sediments varied from 3.9 to 7.1 ϕ at St. NGB-1, and from 1.9 to 8.2 ϕ at St. NGB-2. The proportion of silt and clay increased upward at St. NGB-1 after reclamation of the Koyagi Channel in 1968, because larger sediment particles derived from the rivers became unable to be transported to this point. At NGB-2, the median diameter of the sediments became 3.9 ϕ from 1.9 ϕ around the 1943 year horizon, concordant with the remarkable increase of human population in Koyagi Town.

Dinoflagellate cysts mainly consisted of the autotrophic Gonyaulacoid *Spiniferites* spp., the heterotrophic Protoperidinioid *Brigantedinium* spp., and the autotrophic Gymnodinioid *Pheopolykrikos hartmannii*. At both stations, cyst abundance decreased approximately from 1969 to 1995, but cysts of heterotrophic species increased during this period. At St. NGB-2, the abundance of heterotrophic species recorded a maximum (ca. 64%) at the horizon deposited in about 1948. Since reproduction of heterotrophic dinoflagellate cysts is stimulated by foods such as diatoms and other smaller phytoplankton, the increase of these cysts indicate that primary production of diatoms and other phytoplanktons might have been accelerated, and that in that period nutrients for these autotrophic micro-algae such as nitrogen and phosphates probably increased. These data suggest that eutrophication started in around 1950 and was accelerated after reclamation of the Koyagi Channel.

はじめに

渦鞭毛藻化石(シスト)の研究は、これまで主

に石油資源開発に寄与するための生層序学的観点から推進されてきたが、最近では古海洋環境復元にも有効な道具であることが証明されつつある(例えば Versteegh *et al.*, 1996; Versteegh, 1997)。

しかし、それらの研究は $10^6 \sim 10^3$ 年間規模の環境変化を捉えたものであり、数カ月から数年間規模での渦鞭毛藻に関する生態学的知識に基づく議論とはかみ合わない点もある。例えば、シスト形成を行う渦鞭毛藻の大多数は沿岸性であるにもか

*長崎大学水産学部資源生物学講座沿岸環境学研究室
Laboratory of Coastal Environmental Sciences, Faculty of Fisheries, Nagasaki University

**長崎大学海洋生産科学研究科海洋資源学専攻,
〒852-8521 長崎市文教町1-14 Graduate School of Marine Science and Engineering, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan
1998年8月10日受付, 1999年1月21日受理

かわらず、半遠洋性から遠洋性堆積物に含まれる沿岸性渦鞭毛藻シストの群集組成を基に環境変化を論じていることなどである。この点では近年注目されつつある沿岸域での10³~10年ほどの間に生じた環境変化と渦鞭毛藻シスト群集の変化とを対応させた研究 (Dale and Fjellsa, 1994; 松岡, 1995; 金・松岡, 1998) が、渦鞭毛藻シストの生態学的知識を化石群集に応用するにあたって有益な基礎的情報を知る意味でも重要である。古環境復元のための基礎的情報を獲得する目的で表層堆積物中の渦鞭毛藻シスト群集を研究対象とする場合、戦術として海洋環境が変化した時期が明確である場を活用することが有利である。そしてこのような研究から得られた情報を活用して、逆に堆積物中に記録された渦鞭毛藻シスト群集の変化から、水質環境や堆積環境の変化を論理的に推定することが可能になると考える。本論は海洋環境が人為的に改変させられた記録が明確な長崎湾で、以上の観点に立って進めた研究の成果の一つである。

長崎湾の概要と人為的な環境変化の記録

長崎湾は面積7.1 Km² 湾長7.5 Km, 湾口幅0.9 Kmで、湾口部での最大水深が45 mに達する。湾奥部では水深10 m前後で浅く、勾配も穏やかで、湾中央部から湾口部にかけては水深が20~40 m前後で深くなる。一般的に最大湾奥長/湾口長比が4以上の場合を閉鎖性内湾とする区分 (Heaky and Harada, 1991) に従うと、長崎湾では最大湾奥長/湾口長比が8.3になり、閉鎖性内湾の一つとなる (図1)。

長崎湾奥部には長崎港があり、港内には浦上川、中島川、大浦川、鹿尾川が流入している。なかでも浦上川の流域面積は38.63 Km² で最も広く、流域には多くの住宅や事業場がある。それらから海湾域への流入負荷量が大きく、特に生活系・産業系排水の割合が高い (長崎県, 1997)。それは長崎市人口の約75% (約325,000人) が長崎湾周辺及びその集水域内に居住し、CODから発生負荷量を見ると、浦上川が全体の約51%, 中島川が22%を占めている (長崎県, 1997) からである。

長崎湾の水質に影響を与えたと思われる時期が明確な人為的事変は2件ある。一件は1943年ごろに香焼町の人口が一時的に急増したこと、他の一つは香焼瀬戸の埋め立てである。長崎湾口部に位置する香焼島は伊王島や沖の島と同様に、1960年代前半まで古第三系から多量の石炭を産していた。特に第二次世界大戦中は香焼炭坑最盛期であり、1936年では2,200人であった香焼町人口は23,000人余りに急増した。しかし、1964年の炭坑閉山と共に人口は減少し、最近では約5,000人になっている (香焼町, 1982)。

香焼島はかつては香焼瀬戸をへだてて長崎半島から離れていた。香焼瀬戸の人工埋立ては1966年に開始され、1968年に完了した。香焼瀬戸埋め立て前の長崎湾の海水の出入は、西方に開いた湾口部からとこの瀬戸を介して行われていた。下げ潮の時には湾全体の流水がおおむね港口に向い、上げ潮は下げ潮とは反対に全体が湾の長軸方向に平行し、やや東岸に片寄りながら湾奥に向かっていった (辻田, 1956) (図2)。

香焼瀬戸埋め立てによる潮流変化の事前予測によると、港内では埋め立てられる前とほとんど変わらないが、蔭尾~高銚島間では潮流が若干強くなるものの、埋立地の北側水域では弱くなり、外海との水の交換が少なくなると推測された (長崎海洋気象台, 1964)。香焼瀬戸埋め立て前の長崎湾に入る二つの湾入口のうち、香焼島~高銚島方面よりも深堀~香焼島方面が海水中のCl⁻が高く、また大腸菌群が少なく清浄であることから、外海水の流入率は後者が多い状態にあった (相沢ほか, 1966)。長崎湾内における香焼瀬戸埋め立てによる影響は単に流向のみにとどまるとは考えられない。相沢ほか (1966) は、外海に隣接する中の島沖で大腸菌群が出現することから港内汚濁の影響がその当時すでに湾全体的に及んでおり、香焼瀬戸が埋め立てられると外海水の流入口は香焼島~高銚島の一か所となり、加えるに埋立地からの下水や排水の流入も予想されるので周辺海域の水質汚濁が進行する可能性のあることを指摘していた。

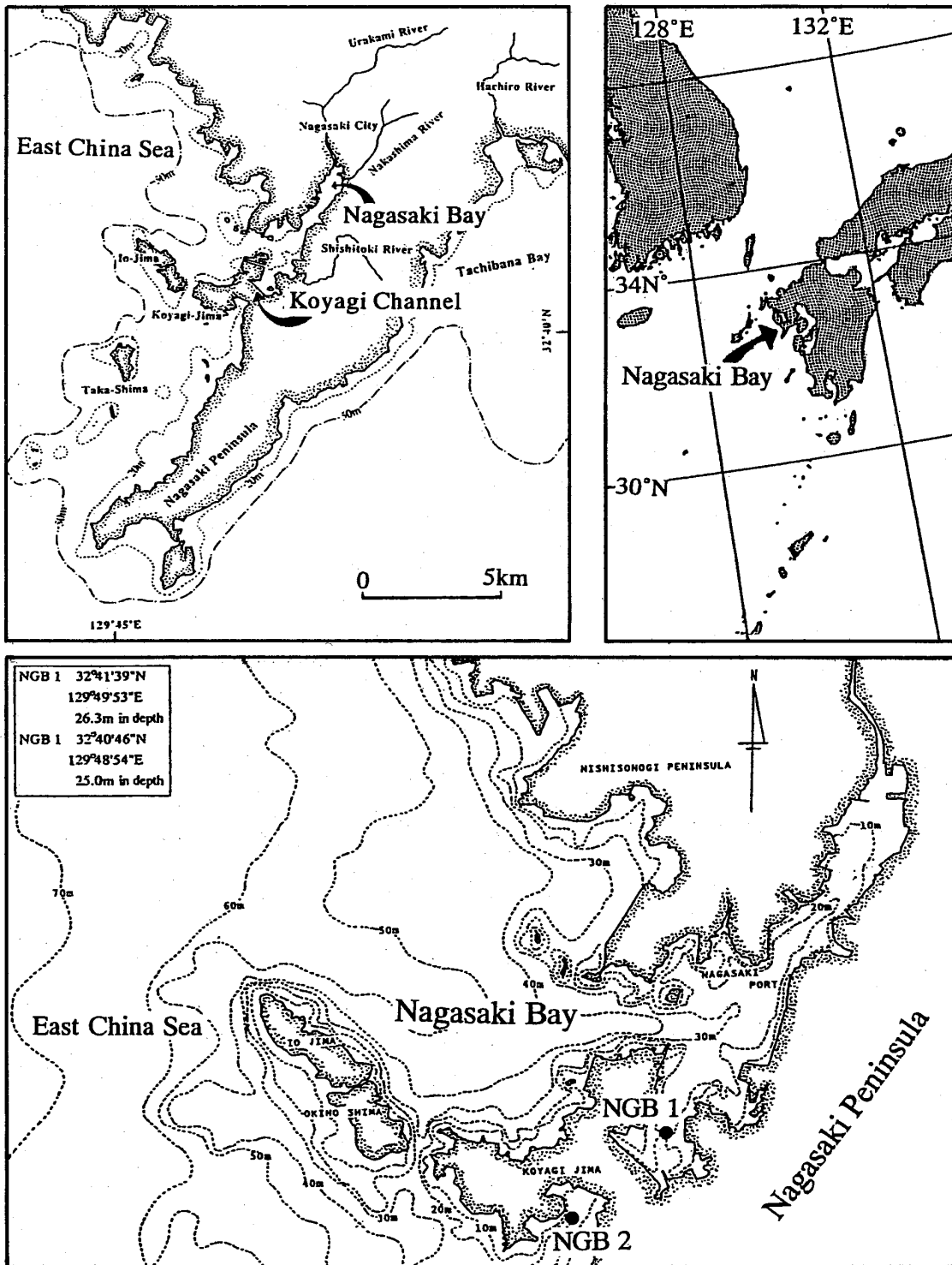


図 1. 試料採取地点と長崎湾の現在の海底地形.

Fig. 1. Sampling locations and submarine topography of Nagasaki Bay.

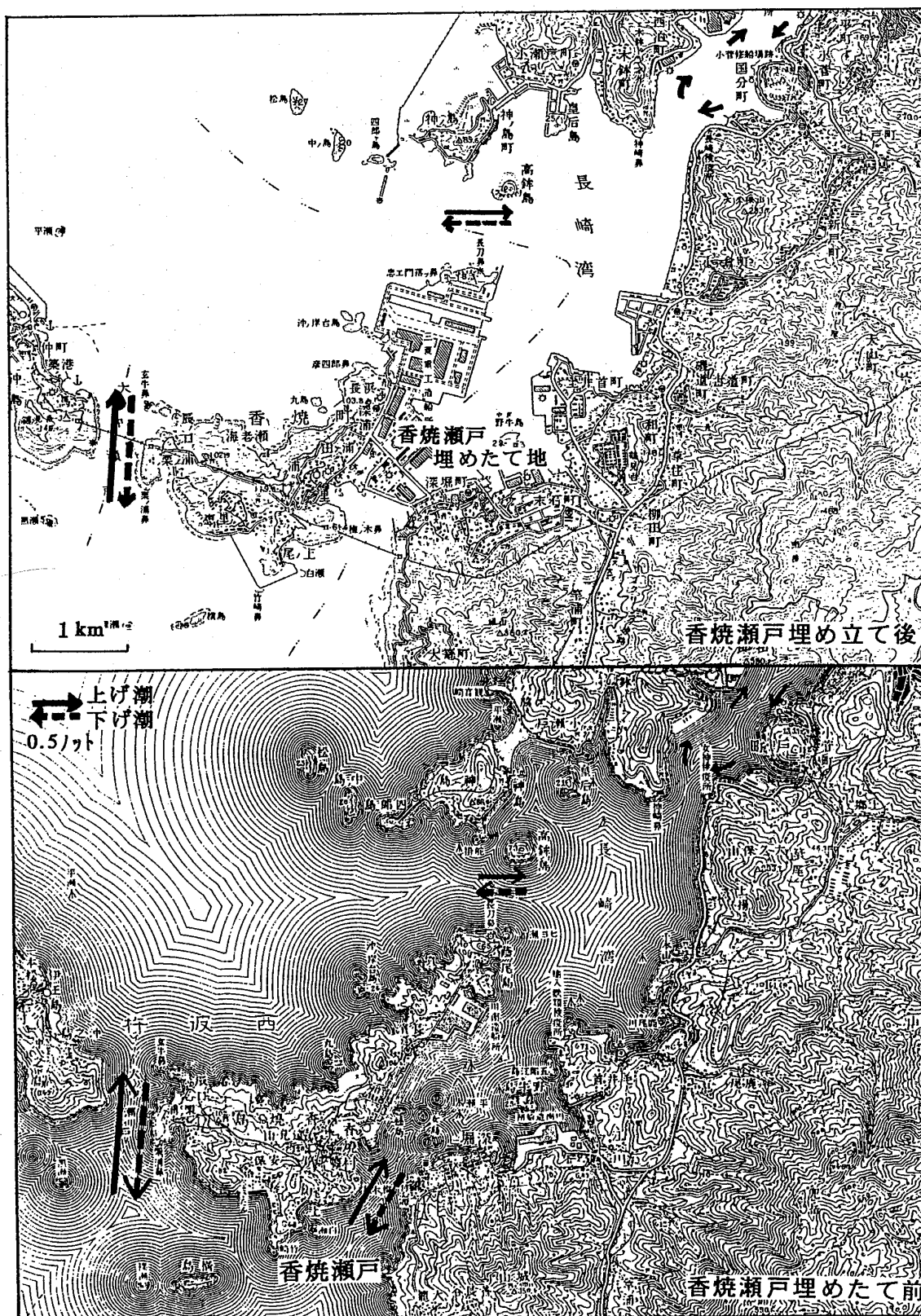


図2. 香焼瀬戸埋め立て前 (A) と埋め立て後 (B) の潮流変化予測図. A は国土地理院1953年発行「長崎図幅」, B は同じく1985年発行. 潮流変化予測は長崎海洋気象台 (1964) による.

Fig. 2. Change of flow in Nagasaki Bay after artificial recalimation in the Koyagi channel estimated by Nagasaki Marine Observatories (1964). A; Before recalimation (Map published in 1953 by Geographical Survey Institute). B; After recalimation (Map published in 1985 by Geographical Survey Institute).

試料及び分析方法

長崎半島と埋め立てによって人工的に接続した香焼島を挟んだ南北2地点、即ち湾内側である水深26.3 mの地点(32°41'N, 129°49'E, 以下NGB-1とする)と、外海側である水深25.0 mの地点(32°40'N, 129°48'E, 以下NGB-2とする)でダイバーに依頼して堆積物表層部の柱状試料を内径80 mm, 長さ1 mの亚克力パイプを用いて採取した(図1)。採取した柱状試料はNGB-1では86 cm, NGB-2では60 cmの長さであった。

堆積物の平均堆積速度は放射性鉛(^{210}Pb)の減衰状態の測定によって求めた。実際の測定はNGB-1については堆積物表層より2-3, 15-16, 30-31, 45-46, 60-61, 75-76 cmの深さから、NGB-2については2-3, 10-11, 20-21, 34-35, 45-46, 59-60 cmの深さからそれぞれ試料を採取し、分析はテレダインアイソトープ社に依頼した。

粒度分析は沈降法(ピペット法)や篩分法(Mcmanus, 1988)で行い、各柱状試料の表層から5 cm間隔で採取した30個の試料を分析した。その方法は次の通りである。ビーカーに10~15 gの堆積物試料を入れ、さらに蒸留水と20 mlの分散剤(二リン酸ナトリウム)を加えて1 l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た。一定温度条件下で分散させた試料を1 lのメスシリンダーに入れ、Stoke式に基づいて計算された堆積粒子の沈降時間から得た各時間ごとに、水面下10 cmから20 mlの試料を採取し、乾燥させて重さを計った。メスシリンダーに残った試料を目合63 μm のステンレス製篩にかけて砂を分離し、砂を除いた試料に凝集剤として硫酸アルミニウムを入れ、細かな粒子を凝集し、乾燥後に重さを計った。また、分離した砂を乾燥し目合-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4 ϕ の篩にかけて、各篩の上に残った砂の重さを計った。

渦鞭毛藻シスト分析用試料はMatsuoka *et al.* (1989)の方法によって処理した。堆積物試料2 mlを100 mlの耐薬品性のある樹脂製ビーカーに入れ、約10%のHClを加えて炭酸カルシウム粒子を、さらに約20%のHFを用いて珪酸質粒子

を除去し、目合125 μm のステンレス製の篩にかけて、20 μm の篩上に残った試料を集めて蒸留水を加え、全試料が10 mlになるように懸濁させて濃縮精製試料とした。濃縮試料は十分攪拌した後、1.0 mlの試料を界線入計数板に移し、さらに蒸留水を1.0~1.5 ml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)を用いてシストの同定及び計数を行った(表1, 2)。

結果

1) 堆積速度及び堆積物の年代

^{210}Pb 測定によって求めた平均堆積速度はNGB-1で9.9 mm/yearとなり、採取した86 cmの柱状試料は過去約90年間の記録を残していた。NGB-2での平均堆積速度は4.3 mm/yearであり、採取した60 cmの柱状試料からは過去約140年間の記録を得た。この結果に基づき、各グラフ(図3, 5)の縦軸に柱状試料表層からの深度と各平均堆積速度に基づいて換算した堆積物の年代を示した。

2) 粒度組成

NGB-1地点での柱状試料では砂成分が約8~52%, シルト成分が約22~65%, 粘土成分が21~34%の範囲内で変化したが、粘土成分の割合は試料全体を通して大きく変化しなかった。シルト成分は柱状試料下部から1964年頃までは22~32%で、大きな変化はなかったが、1968年頃以降増加しはじめ、表層部(1995年頃)では約65%に達した。砂成分の割合は表層部に向け減少傾向にあったが、特にシルト成分が増加に転じた1968年頃から急激に減少しはじめ、表層部では約8%になった。中央粒径値(Md ϕ)は1944年頃は3.9 ϕ であったのが、その後細粒化し表層部では7.1 ϕ になった(図3)。

NGB-2地点での柱状試料では砂成分が約23~88%, シルト成分が約6~25%, 粘土成分が6~52%の割合であった。砂成分は表層部を除いた試料全体を通してシルトや粘土成分より高い割合を占めていたが、1963年頃から表層部に向け少しずつ減少する傾向を示した。特に1970年頃

表 1. NGB-1コア試料中の渦鞭毛藻シスト産出表.

Table 1. Occurrence table of dinoflagellate cysts in NGB 1 core sample.

Species name	0-1cm	5-6cm	10-11cm	15-16cm	20-21cm	25-26cm	30-31cm	35-36cm	40-41cm	45-46cm	50-51cm	55-56cm	60-61cm	65-66cm	70-71cm	75-76cm	79-80cm	85-86cm
Gonyaulacoid group	2	12	5	17	29	26	10	31	19	18	27	25	22	25	34	39	47	14
<i>Spiniferites</i> spp.																		
<i>Spiniferites belerius</i>	1	1	2	18	50	3	1	6	1	1	2	2	3	6	9	3	3	2
<i>Spiniferites bertoni</i>	1	14	15	1	4	22	14	44	23	27	36	31	40	40	88	64	122	50
<i>Spiniferites pulchellus</i>	1	1	1	2	5	5	5	5	3	3	5	4	2	6	8	11	5	4
<i>Spiniferites cf. delicatus</i>	1	2	1	1	1	1	3	1	3	3	3	3	3	4	4	3	2	3
<i>Spiniferites hyperacanthus</i>	2	3	2	8	10	15	8	15	7	14	17	12	9	12	23	16	42	5
<i>Spiniferites mirabilis</i>	5	4	8	6	6	7	4	7	8	8	6	4	6	6	4	6	7	1
<i>Spiniferites ramosus</i>	1	1	1	9	2	7	4	7	3	5	12	9	4	16	12	10	18	2
<i>Operculodinium centrocarpum</i>	8	4	7	13	17	15	20	49	39	41	49	22	40	83	27	20	17	17
<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	27(33.8)	40(30.1)	41(38.7)	76(49.7)	121(54.5)	101(42.4)	69(55.2)	163(66.5)	101(65.7)	121(65.4)	157(68.6)	118(70.2)	129(69.4)	197(78.2)	209(77.4)	173(77.6)	258(65.5)	107(58.2)
Subtotal (%)																		
Tuberculodinium group	0	0	0	2(1.3)	2(0.9)	2(0.8)	2(1.6)	0	1(0.7)	1(0.5)	1(0.4)	0	4(2.2)	1(0.4)	1(0.4)	4(1.8)	4(1.0)	1(0.5)
<i>Tuberculodinium vancaempae</i>																		
Protoperidinioid group	5	17	9	13	21	30	10	22	8	6	21	6	9	7	12	10	32	20
<i>Brigantedinium</i> sp.	5	7	4	2	5	5	3	4	7	2	6	8	10	9	5	11	24	4
<i>Brigantedinium cariscoense</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	4	1
<i>Brigantedinium simplex</i>																		
<i>Protoperidinium denticulatum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Selenopemphix neptolekés</i>	4	5	3	3	4	2	2	5	4	7	5	5	3	6	4	1	8	2
<i>Selenopemphix quanta</i>																		
<i>Tetradium abei</i>	1	1	2	4	4	4	6	8	2	3	4	1	9	5	3	7	1	1
<i>Tironantidium capitatum</i>	2	5	1	2	6	6	8	6	1	3	4	5	3	4	5	7	16	2
<i>Votadinium carvum</i>																		
<i>Votadinium spinosum</i>																		
<i>Protoperidinium americanum</i>	1	1	1	3	8	9	6	5	7	3	3	1	2	1	1	1	12	10
<i>Protoperidinium lattisium</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Protoperidinium leonis</i>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>Protoperidinium</i> spp.																		
Cyst of <i>Protoperidinium minutum</i>																		
Subtotal (%)	21(26.3)	40(30.1)	22(20.8)	28(18.3)	50(22.5)	59(24.8)	30(24.0)	52(21.2)	30(20.4)	28(15.1)	41(17.9)	26(15.5)	38(20.4)	39(15.5)	37(13.7)	34(15.2)	99(25.1)	42(22.8)
Calchodonioid group	8	10	2	5	4	18	6	5	0	10	12	1	0	8	10	3	18	13
<i>Scrinopsiella trocoides</i>	8(10.0)	2(1.5)	2(1.9)	5(3.3)	4(1.8)	18(7.6)	6(4.8)	5(2.0)	0	10(5.4)	12(5.2)	1(0.6)	0	8(3.2)	10(3.7)	3(1.3)	18(4.6)	13(7.1)
Subtotal (%)																		
Diplopsalid group	2	6	1	1	1	14	2	4	1	1	3	3	1	1	4	4	7	6
<i>Diplopsalis fenticula</i>																		
<i>Diplopsalis parva</i>	1	1	1	1	1	4	3	3	1	9	3	6	1	4	4	4	7	6
<i>Diplopsalis caperatum</i>	3(3.8)	7(5.3)	4(3.8)	10(6.5)	6(2.7)	36(15.1)	10(8.0)	15(6.1)	8(5.4)	10(5.4)	3(1.3)	11(6.5)	10(5.5)	5(2.0)	8(3.0)	6(2.7)	8(2.0)	7(3.8)
Subtotal (%)																		
Gymnodinioid group	18	32	29	20	22	13	6	4	1	5	5	3	1	1	2	3	7	4
<i>Pleopolykrikos harmanii</i>	1	1	1	2	8	2	2	2	1	3	2	2	3	3	2	3	7	4
<i>Polykrikos cf. kotodii</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Polykrikos schwartzii</i>	2	11	8	10	9	6	5	5	6	7	8	7	10	2	2	3	3	6
<i>Cochlodinium</i> sp.																		
<i>Gymmodinium carenatum</i>																		
Subtotal (%)	21(26.3)	44(33.1)	37(34.9)	32(20.9)	39(17.6)	22(9.2)	8(6.4)	10(4.1)	7(4.8)	15(8.1)	15(6.6)	12(7.1)	14(7.5)	2(0.8)	5(1.9)	3(1.3)	7(1.8)	14(7.6)
Dinoflagellate cysts counted	80	133	106	153	222	238	125	245	147	185	229	168	186	252	270	223	394	184
Number of cysts/cm ³	400	665	530	765	1110	1190	625	1225	735	925	1145	840	930	1260	1350	1115	1970	920

表 2. NGB-2コア試料中の渦鞭毛藻シスト産出表.

Table 2. Occurrence table of dinoflagellate cysts in NGB2 core sample.

species name	0-1cm	5-6cm	10-11cm	14-15cm	20-21cm	25-26cm	31-32cm	35-36cm	40-41cm	44-45cm	50-51cm	55-56cm	59-60cm
Gonyaulacoid group													
<i>Spiniferites bentoni</i>	22	21	32	47	11	18	11	7	15	21	23	38	30
<i>Spiniferites bulloideus</i>						1	1		2				2
<i>Spiniferites hyperacantus</i>	5		3	12	2	10	4	3	2	13	6	7	5
<i>Spiniferites mirabilis</i>						1	1		3		2	2	5
<i>Spiniferites ramosus</i>	5	4	8	9	6	13	10	7	20	5	19	23	15
<i>Spiniferites</i> spp.	2	2	14	5	5	9	6	4	15	4	9	16	11
<i>Operculodinium centrocarpum</i>	2				1								
<i>Operculodinium israelianum</i>													
<i>Lingulodinium machaerophorum</i>		5	5	4	10	4	5	1	3	4	12	3	9
Subtotal (%)	36(36.7)	32(25.0)	62(41.1)	77(37.9)	35(28.7)	56(41.2)	37(41.6)	22(43.1)	60(53.6)	50(61.7)	74(66.7)	89(58.9)	77(67.0)
Tuberculodinioid group													
<i>Tuberculodinium varcampopae</i>	2	1		0(0)	1	0	0(0)	2	0	1	1	0	1
Subtotal (%)	2(2.0)	1(0.8)	0	0(0)	1(0.8)	0	0(0)	2(3.9)	0	1(1.2)	1(0.9)	0	1(0.9)
Protoperidinioid group													
<i>Brigantedinium</i> spp.	9	16	18	33	26	23	12	8	11	16	7	12	10
<i>Brigantedinium cariacense</i>	8	6	3	24	20	7	16	3	7	4	3	6	11
<i>Brigantedinium simplex</i>		2	5		2	1	1	1				1	
<i>Selenoperphix nephroides</i>													
<i>Selenoperphix quanta</i>		5	5	2	4	1	1	1		1		4	5
<i>Stelladinium abei</i>					1	1							
<i>Stelladinium reidii</i>				1									
<i>Thinovantedinium capitatum</i>		2	1		2	5	2		2		4	2	1
<i>Votadinium carvum</i>	8	4	7	3	4	2	3	1	4		3	4	
<i>Votadinium spinosum</i>			1	2	2	1					1		
<i>Protoperidinium americanum</i>	1	1			1			2	1	2	4	1	2
<i>Protoperidinium lattisium</i>	4	5	2	13	7	4	3	2	7	2	4	1	2
<i>Protoperidinium leonis</i>													
<i>Protoperidinium minutum</i>	1												
Subtotal (%)	30(30.6)	42(32.8)	43(28.5)	78(38.4)	69(56.6)	45(33.1)	38(42.7)	18(35.3)	34(30.4)	23(28.4)	24(21.6)	31(20.5)	31(27.0)
Calciodinioid group													
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	10	12	15	29	6	15	9		10	4	2	10	1
Subtotal (%)	10(10.2)	12(9.4)	15(9.9)	29(14.3)	6(4.9)	15(11.0)	9(10.1)	0	10(8.9)	4(4.9)	2(1.8)	10(6.6)	1(0.9)
Diplopsalid group													
<i>Diplopsalis lenticula</i>	1	1	1	5	2	6	3	3	3	2	3	2	5
<i>Diplopetta parva</i>	2	1	1		3	1	1	1	3		4	2	
<i>Dubutdinium caperatum</i>													
Subtotal (%)	3(3.1)	3(2.3)	2(1.3)	5(2.5)	6(4.9)	7(5.1)	3(3.4)	4(7.8)	6(5.4)	2(2.5)	8(7.2)	4(2.6)	5(4.4)
Gymmodinioid group													
<i>Pheopolykrikos hartmannii</i>	9	26	14	13	2	9	2	3		1		13	
<i>Polykrikos</i> cf. <i>kofoidii</i>	3	6	9	1	1	1	1	1	2		1	3	
<i>Polykrikos schwartzii</i>	4	6	6		3	3							
<i>Cochlodinium</i> sp.	1												
Subtotal (%)	17(17.3)	38(29.7)	29(19.2)	14(6.9)	5(4.1)	13(9.6)	2(2.3)	5(9.8)	2(1.8)	1(1.2)	2(1.8)	17(11.3)	0(0)
Dinoflagellate cysts counted	98	128	151	203	122	136	89	51	112	81	111	151	115
Number of cysts/1 cm ³	490	640	755	1015	610	680	445	255	560	405	555	755	575

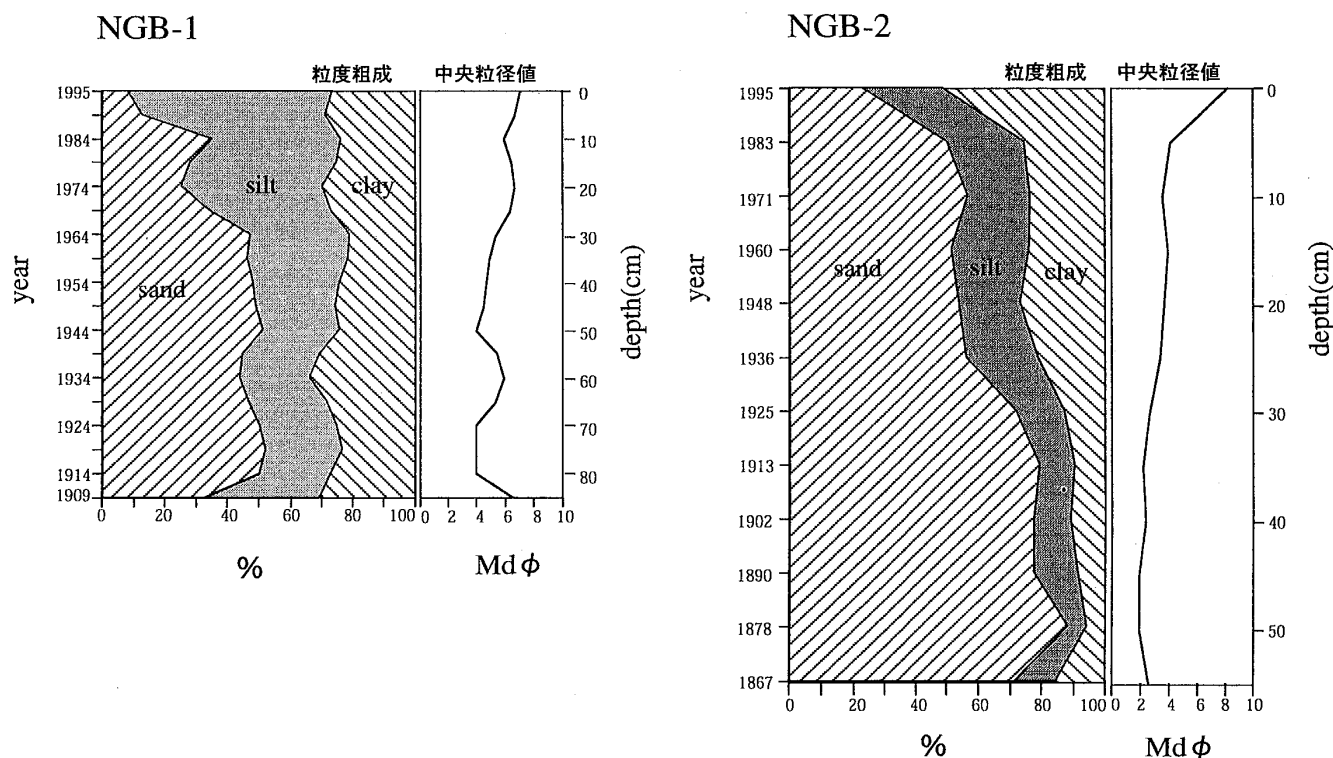


図3. NGB-1およびNGB-2コア試料の粒度組成と中央粒径値. 左の縦軸は ^{210}Pb 測定によって得た平均堆積速度を基にした堆積物の年代を, 右の縦軸は海底面からの深さを示す.

Fig. 3. Temporal distribution of grain size components and median diameter of NGB 1 and NGB 2 core samples. Vertical axis of the left side represents the age of sediments inferred from the sedimentation rate according to ^{210}Pb measurement.

から砂の割合は急激に減少しはじめ, 表層部では22%になった. それに伴って試料下部では $1.9\sim 3.9\phi$ であった中央粒径値が表層部では 8.2ϕ になった. シルト成分の割合は大きく変動することなく, 表層部に向けてわずかに増加した. 粘土成分は砂成分の減少が始まっていた1970年頃から増加をはじめ, その割合は最低の約6% (1878年頃, 表層から-50 cm) から表層部では最高の約52%にまで増加した (図3).

3) 渦鞭毛藻シスト群集組成

渦鞭毛藻では栄養細胞と休眠細胞 (シストとも呼ばれ, 化石になり得る細胞) に与えられた学名が異なる種もあり, その場合には単一の生物種に異なった二つの学名が慣用されている. 本論ではシスト名の表記として古生物学的に記載・命名された名称を用いるが, シスト名が与えられていない場合には, それに*印を学名の後に付けて区別

した.

今回観察でき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 (化石名 *Operculodinium* 属), *Lingulodinium** 属, *Tuberculodinium* 属, Calciodineloid 類の *Scrippsiella* 属, Gymnodinioid 類の *Pheopolykrikos hartmannii* (Zimmermann)* や *Cochlodinium** 属, *Gymnodinium** 属, (*G. catenatum** ; 図3-3, 4) など, 従属栄養種群としては Protoperidinioid 類の *Brigantedinium* 属, *Selenopemphix* 属, *Stelladinium* 属, *Trinovantedinium* 属 (図4-1), *Votadinium* 属, その他の *Protoperidinium** 属 (図4-2), *Xandarodinium* 属 と Diplopsaloid 類の *Diplopsalis** 属, *Diplopelta* 属, *Dubridinium* 属, Gymnodinioid 類の *Polykrikos** 属などであった.

両地点で産出したシストの種類はほとんど同じであったが, 未記載の *Protoperidinium** spp. (金・

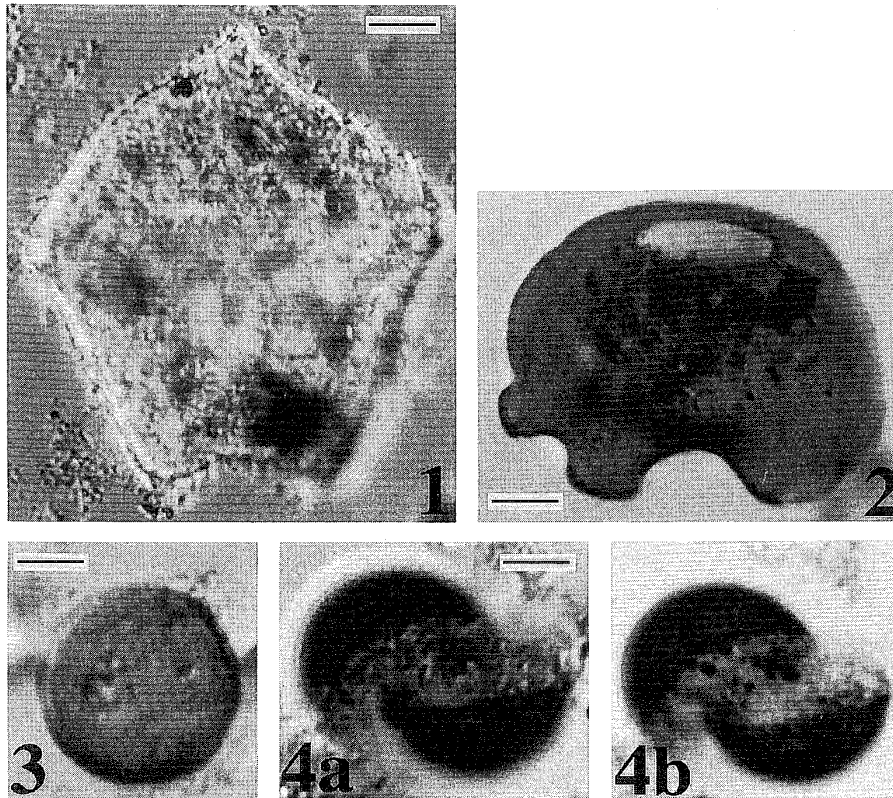


図4. NGB-1コア (40-41 cm depth) 試料から産出した渦鞭毛藻シスト.

Fig. 4. Dinoflagellate cysts found in sample of 40-41 cm depth in NGB-1. 1. *Trinovantedinium capitatum* Reid (heterotrophic), 2. *Proto-peridinium* sp. indet. (heterotrophic), 3. *Gymnodinium catenatum* Graham (autotrophic; reticulate surface), 4. *Gymnodinium catenatum* Graham (autotrophic; chasmic archeopyle); scale bar is 20 μ m.

松岡, 1998 ; 図6) のシストが NGB-1 から産出し, NGB-2 地点では全く産出しなかった.

渦鞭毛藻シスト数は NGB-1 地点では 400~1350 cells/cm³ の範囲にあり, 平均で 925 cells/cm³, NGB-2 地点では 255~755 cells/cm³ で, 平均すると 588 cells/cm³ であった. 種類数では NGB-1 地点では 20~27 種, NGB-2 地点では 18~23 種であった. NGB-1 地点は NGB-2 地点に比べてシスト数の変動幅が大きかった. 総シスト数は両地点とも柱状試料下部から表層部に向け減少したが, その傾向は NGB-1 で顕著であった.

NGB-1 地点では 1905 年頃から 1965 年頃までは, *Spiniferites* 属や *Lingulodinium machaerophorum* などの独立栄養種シストが多産した. 1968 年頃以降表層部までは独立栄養種シストの割合は減少傾向を示したのに対して, 従属栄養

種の *Brigantedinium* spp. や独立栄養種の *Pheopolykrikos hartmannii* などは増加した.

NGB-2 地点では, 1855 年頃から 1936 年頃までの間は独立栄養種シストの *Spiniferites* 属が多産したが, 1945 年頃には一度急減した. この属は 1971 年頃に再びやや増加したが, その後表層部に向けて再び減少した. 特に 1940 年代から 1960 年頃までの間は *Brigantedinium* 属などの従属栄養種シストの割合が増加し, 最高値の約 64% にまで達した. 1913 年頃には柱状試料全体を通してシスト数は最低値の 255 cells/cm³ まで減少したが, それでも *Brigantedinium* 属などの従属栄養種シストの割合は約 47% にまで増加した.

両地点ともシスト数は 1982 年頃に減少した. また独立栄養種シストの *Spiniferites* 属も減少

したが、同じ独立栄養種の *Pheopolykrikos hartmannii* は増加し、NGB-1地点で約27%、NGB-2地点では約20%の割合を示した(図5)。

考 察

1945年前後の香焼町での急激な人口増加が長崎湾の水質に与えるであろう影響を事前に推察した例はない。一方、長崎湾南部の香焼瀬戸埋め立てが水質環境に与える影響に関しては次の事前予測がある。1)長崎海洋气象台(1964)は、港内では埋め立ての影響がほとんど現れないが蔭尾～高銚島間で潮流が強くなり、さらに埋め立て地の北側水域ではそれが弱くなることにより、外海との海水交換が少なくなると予測した(図2)。2)寺田ほか(1968, 1969)や伴ほか(1969,

1970, 1971)は、香焼瀬戸の締め切りによって埋め立て地北側の海水の流れが悪くなり、かつ将来埋め立て地に工場や住宅地が建設されることによって産業・生活排水が増加することから、この海域の水質汚濁は急速に進行すると推測した。

このような事前予測は、埋め立てが完了してからほぼ30年ほど経過した現在どのように評価できるのであるか、埋め立て後の水質環境変化は、今回採取した堆積物の粒度組成や渦鞭毛藻シスト群集にどのように反映されているのであろうか。また、柱状試料全体から取り出すことが出来る環境の変化の情報はどうのようなものであろうか。

1) 堆積速度

^{210}Pb 測定によって求めた平均堆積速度は

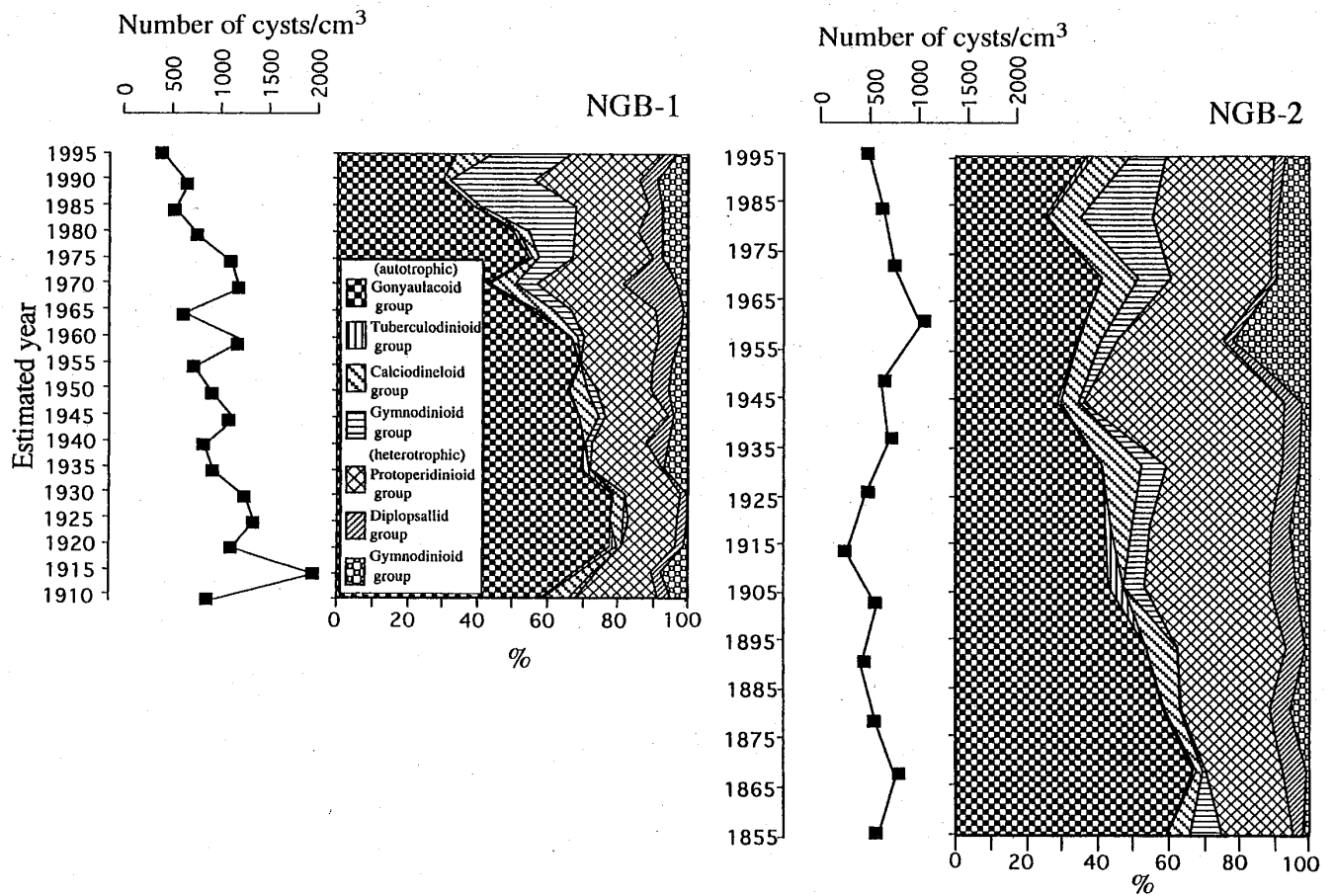


図5. NGB-1およびNGB-2コア試料の渦鞭毛藻シスト数および群集組成の変化。縦軸は ^{210}Pb 測定によって得た平均堆積速度を基にした堆積物の年代を示す。

Fig. 5. Temporal change of dinoflagellate cysts' number and their assemblages in NGB-1 and NGB-2 core samples. Vertical axis represents the age of sediments inferred from the sedimentation rate according to ^{210}Pb measurement.

NGB-1 地点で9.9 mm/year, NGB-2地点で4.3 mm/yearであった。長崎湾の両地点での平均堆積速度は大村湾中央部から奥部での2.1~2.7 mm/year (金・松岡, 1998) に比較すると大きい。大村湾の総海域面積は320 Km², 総流入量は160 万 m³/日 (飯塚・田北, 1985) であるのに対して, 長崎湾の総海域面積は17.1 Km², 河川水の総流入量は44万 m³/日である (長崎県, 1997)。長崎湾での平均堆積速度が大きいのは湾内に搬入される堆積物量が海域面積に比較して多いことに起因すると考えられる。また NGB-2での平均堆積速度が NGB-1よりも小さいことは, そこに流入する河川が小規模で, 搬入される堆積物量が少ないことに原因がある。

2) 粒度組成

NGB-1と NGB-2の両地点で表層部を除いた柱状試料全体を通して, 砂成分は約12~88%であり, 大村湾での砂成分の割合が10%以下である (金・松岡, 1998) ことと比較するとかなり高率である。これは前述のように大村湾より長崎湾の方が海域面積に比べて河川からの総流入量が多いこと, また試料採取位置が河口に近かったことによるものである。

NGB-1 地点での砂成分の割合は表層部に向けて減少した。特に1968年頃からシルト成分が急激に増加し, 砂成分は減少しはじめた。これは埋め立て以前に香焼瀬戸を通して行われていた湾内側と外海側との海水交換が埋め立てによってなくなり, 長崎湾奥部への海水入出流路が変化したためであると考えられる。つまり, 埋立地の北側水域で流れが弱くなり, 外海との水の交換が少なくなったために湾奥の河川から搬入される比較的大きな粒径の堆積物が NGB-1地点まで運搬されなくなり, NGB-1地点でシルトの大部分が沈積するようになったと推察される。それに伴って中央粒径値も1944年頃 (表層から-50 cm 層準) は3.9φであったのが香焼瀬戸の埋立以降急速に細粒化し, 1969年頃には6.3φに, 表層部では7.1φになった。

長崎湾では含泥量の割合が高いほど水質環境汚濁指標の一つとなる COD が高くなる (長崎県水

産試験場, 1971)。これに従うと, NGB-1地点では1968年頃から堆積物中の含泥量が増加したことから, CODが高くなったと考えられる。

NGB-2地点でも柱状試料全体を通して砂成分の割合は表層部に向けて減少した。特に香焼町の人口が24,000人以上に達した1943年頃に砂成分は減少し, 逆に粘土成分は増加した。このことから, 前述 (長崎県水産試験場, 1971) のように, その周辺海域で水質汚濁が進行したことがうかがえる。さらに NGB-1地点と同様に, 1968年頃から砂成分は再び減少し, 逆に粘土成分は増加した。これは香焼瀬戸の埋め立てによって, 湾内での潮流が変化した結果, 粗粒堆積物の供給がなくなったことによるものであろう。1878年頃には1.9φであった中央粒径値が1943年頃には3.9φになり, 香焼瀬戸が埋め立てられた1968年以降表層部では8.2φになっていることにも現れている。

以上に述べたことから, 香焼島と長崎半島を隔てた香焼瀬戸の人工埋め立てが完了した1968年頃を境にして, 長崎湾の海水移動流路が大きく変化した。特に今回柱状試料の採取地点である NGB-1地点から NGB-2間の流路が遮断されたことによって, 湾内からの堆積物運搬経路も大きく変化し, 結果として細粒堆積物が沈積するようになったことが粒径分布の変化から読み取ることができる。

3) 渦鞭毛藻シスト群集組成

長崎湾の2地点で採取した柱状試料から産出した渦鞭毛藻シスト群集の種構成は Matsuoka (1984), 小林ほか (1986), 金・松岡 (1998) によって報告された大村湾や長崎湾など対馬暖流域の沿岸性表層堆積物から産出するものと同様であった。また約1万年前以降の対馬西岸海底堆積物に保存されている渦鞭毛藻シストの種構成 (Matsuoka, 1994) と類似することから, 堆積物中での続成作用や処理方法が原因となって群集組成が変質した可能性は低い。

渦鞭毛藻シストの平均個体数は NGB-1地点で925 cells/cm³, NGB-2地点で588 cells/cm³で, 隣接する大村湾 (金・松岡, 1998) で産出した平均シスト個体数1046~1835 cells/cm³ に比べ

ると少ない。長崎湾の平均堆積速度が大村湾より著しく大きいことから、この違いは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ていることによると思われる。さらに、NGB-1地点はNGB-2地点（1913年頃を除いて）に比べてシスト個体数が最低400 cells/cm³ から最高1350 cells/cm³ まで増減し、変動幅が大きい。これはNGB-1地点が比較的河川に近く、湾奥から運搬されてくる堆積物量の増減によりシスト量が希釈されることによると考えられる。両地点ともに下部から表層部に向けシスト個体数は減少傾向を、従属栄養種群シストの割合は増加傾向を示した。従属栄養性渦鞭毛藻シストの増加と栄養塩類の増加、すなわち富栄養化進行との間には以下のような生態学的関連性があり、海水中の栄養塩を利用した植物性プランクトンの増殖は一般的には次のように起こると説明されている。まず、栄養塩類の増加にしたがって光合成能が独立栄養性渦鞭毛藻よりも高い珪藻類が増殖し、ついで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する（高橋ほか、1996）。それと相まって珪藻類やバクテリアなどを捕食する従属栄養性渦鞭毛藻が増殖する（Gaines and Taylor, 1984; Jacobson and Anderson, 1986; Lessard and Swift, 1985; Hansen, 1991; Jeong and Latz, 1994; Neuer and Cowles, 1995）（図6）。したがって堆積物中で従属栄養性渦鞭毛藻シストが増加することは、一次生産者としての珪藻類などの増殖を反映しており、ひいては藻類の増殖を促した栄養塩類（窒素やリン）の増加を伴う富栄養化の進行を示唆している。

NGB-1地点では香焼瀬戸埋め立て後の1969年頃には、*Brigantedinium* 属や *Diplopsalid* 類が増加するなど、従属栄養種群シストの割合は約43%にまで増加した。しかし同じ時期に、独立栄養種群シストの *Spiniferites* 属や *Lingulodinium machaerophorum* などは減少した。香焼瀬戸埋め立て完了後から観測が開始されたNGB-1付近のCODは5年ほどの間に2.5 ppmまで急増した後、2 ppm前後で推移しながら徐々に小さくなり、1995年には1.4 ppmになっている（長崎市保健環境部環境保全課、1995）。渦鞭毛

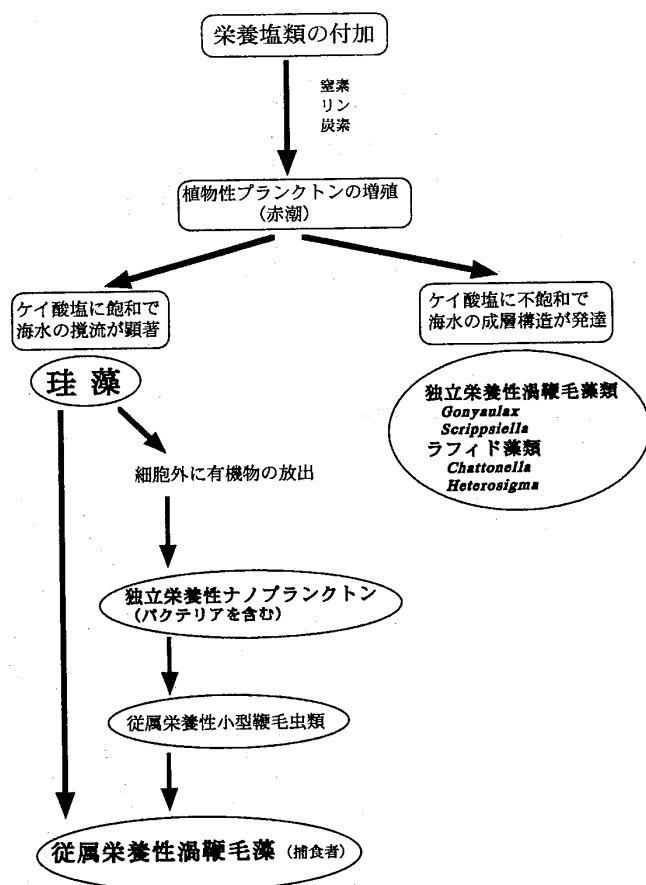


図6. 栄養塩類の増加と独立栄養性渦鞭毛藻および従属栄養性渦鞭毛藻の増殖関係。

Fig. 6. Relationship between increase of nutrient, and autotrophic and heterotrophic dinoflagellates.

藻シスト個体数も1970年頃に10³ cells/cm³ にまで増加した後、表層部の1995年には0.5×10³ cells/cm³ にまで減少している。このような状況は水質改善取り組みの成果が現れてきた可能性を示しているとも考えられるが、その一方で従属栄養種群が表層に向かって増加傾向にあるので、栄養塩類の負荷が少なくなったのかどうかは明言できない。一方、NGB-2地点では、1940年代から1960年頃の間、*Spiniferites* 属や *Pheopolykrikos hartmannii* など独立栄養種群シストが減少した。逆に *Brigantedinium* 属や *Diplopsalid* 類などの従属栄養種群シストが1948年頃には64%にまで達した。これらの現象は、NGB-2地点周辺の人口増加による水質汚濁の進行を反映していると考えられる。すなわち1943年頃に香焼町の人口が

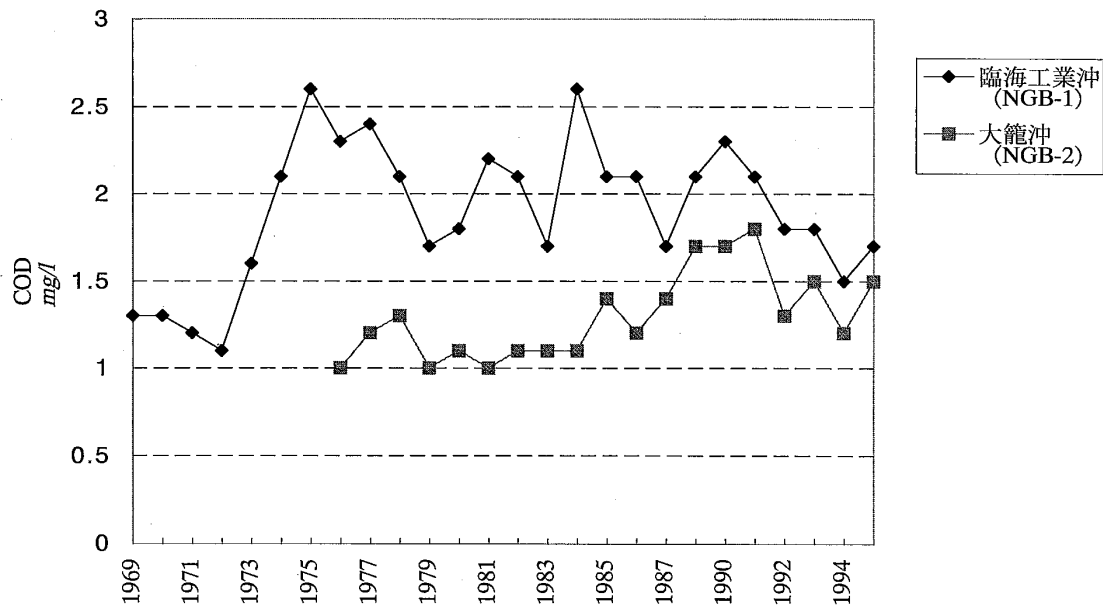


図7. 長崎湾における最近のCODの変化(長崎市保健環境部環境保全課 1995). 本論では同報告書に置いてNGB-1地点は臨海工業沖の測点に, NGB-2は大籠沖での測点に近接しているため, それぞれの観測記録を引用した.

Fig. 7. Temporal change of COD in Nagasaki Bay after Environment Conservation Section in Division of Public Health and Environment of Nagasaki City (1995).

23,000人以上になった(香焼町, 1982)ことは, 生活排水量の増加をもたらし, 加えて長崎市街からの汚濁水流入によっても周辺海域の富栄養化が促進された可能性のことである. さらに前述のように, 同じ時期に堆積物中の砂成分が減少し, 粘土成分が増加していることは, 長崎県水産試験場(1971)が示唆するように, CODの増加に帰因していると考えられる. これらの資料は, 人口の急激な増加による周辺海域の汚濁が進行したことがうかがわせる. その一方で, NGB-2地点では香焼瀬戸埋め立ての影響はNGB-1地点ほど著しくはなかったようである(図7). NGB-2地点付近でのCODの増加は埋め立て直後ではなく1990年以降に生じ, それも最近では減少傾向にある(長崎市保健環境部環境保全課, 1995). 渦鞭毛藻シスト個体数が, 埋め立て前の1965年頃にやや増加するもののそれ以降では減少していることや, 群集組成では独立栄養種が増加していることなどからみると, NGB-2地点では富栄養化の進行は止まっているようである. このことは香焼炭坑閉鎖に伴う急激な人口減少や, 香焼埋め

立てによって汚濁が進行している長崎港からの海水がNGB-2地点へ到達しなくなったこと, さらに水質改善への取り組みなどの効果が複合して現れてきていることを示唆している.

結 論

長崎湾ではNGB-2地点の1940年代から1960年代の試料に従属栄養種群渦鞭毛藻シストの増加として記録されているように, 沿岸域の開発に起因する人口増や工場進出によって生活排水や産業排水が増加し, その結果として富栄養化が進行した. さらに1960年代中頃の香焼瀬戸の埋め立てによって潮流系に変化が起き, NGB-1地点付近には外洋水の流入する割合が少なくなった. それによって埋め立て北側(NGB-1地点)と南側(NGB-2)地点で海水の流動が少なくなり, 細粒堆積物の沈積が促進された. また埋め立て地に住宅地や工場が建設されたことによって, そこからの汚濁水が増加し, 富栄養化が促進された. それが原因でNGB-1では埋め立て直後の1965年頃には渦鞭毛藻シスト個体数が増加したとともに, そ

れ以降の堆積物では従属栄養種群シストの比率が増加する事になった。

この様に、堆積物に残された渦鞭毛藻シスト群集は、水質とりわけ栄養塩類の挙動をよく反映しており、水質環境変遷を復元する際の良好な指標となりうる。

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、長崎大学平山和次名誉教授、また本論の査読を通して有益な議論をしていただいた静岡大学北里 洋教授に感謝する。

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; 松岡數充) および基盤研究 C (課題番号10640452, 代表; 松岡數充) による。記して当局に感謝の意を表します。

引用文献

- 相沢 龍・山口道雄・野見山季治, 1966. 長崎市内河川, 及び港湾の水質汚濁の実態. 長崎県衛生研究所報, 103-116.
- 伴与一郎・山口道雄・赤枝 宏, 1969. 長崎港の水質について (第3報). 長崎県衛生研究所報, 57-58.
- 伴与一郎・赤枝 宏・松本紘明・吉弘誠子・井上 亨, 1970. 長崎港の水質について (第4報). 長崎県衛生研究所報, 31-32.
- 伴与一郎・赤枝 宏・松本紘明・白井玄爾・吉弘誠子・井上 亨・朝長宗樹・松尾礼三・熊 正昭・萱場正一・上田成一, 1971. 長崎港の水質について (第5報). 長崎県衛生研究所報, 13-14.
- Dale, B. and Fjellsa, A., 1994. Dinoflagellate cysts as paleoproductivity indicators: state of the art, potential, and limits; *In Zahn, R. et al. (eds.), Carbon cycling in the glacial ocean: constrains on the ocean's role in global change*, 521-537, Springer-Verlag, Berlin.
- Gaines, G. and F. J. R. Taylor, 1984. Extracellular digestion in marine dinoflagellates. *J. Plankton Res.*, **6**, 1057-1061.
- Hansen, P. J., 1991. Quantitative importance and trophic role of heterotrophic dinoflagellates in a coastal and pelagical food web. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **73**, 253-261.
- Healy, T. and Harada, K., 1991. Definition and physical characteristics of the world's enclosed coastal seas. *Marine Pollut. Bull.*, **23**, 639-644.
- 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). 879-900, 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会.
- Jacobson, D. M. and D. M. Anderson, 1986. Thecate heterotrophic dinoflagellates: Feeding behavior and mechanisms. *J. Phycol.*, **22**, 249-258.
- Jeong, H. G. and M. I. Latz, 1994. Growth and grazing rates of the heterotrophic dinoflagellates *Proto-peridinium* spp. on red tide dinoflagellates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **106**, 173-185.
- 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.
- 香焼町, 1982. 香焼町史. pp. 303.
- 小林 聡・松岡數充・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告, **33**, 81-93.
- Lessard, E. J. and 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-底質柱状試料中の生物化石調査-」, 横浜市環境科学研究所試料, No.116, 45-61, 横浜市.
- Matsuoka, K., 1984. Organic-walled dinoflagellate cysts from surface sediments of Nagasaki Bay and Senzaki Bay, West Japan. *Bull. Fac. Liberal Arts, Nagasaki Univ., (Natural Science)*, **25**, 21-115.
- Matsuoka, K., 1994. Holocene dinoflagellate cyst assemblages in shallow water sediments of the Tsushima Islands, West Japan. *Rev. Palaeobotan. Palynol.*, **84**, 155-168
- Matsuoka, K., Y. Fukuyo and D. M. Anderson, 1989. Methods for modern dinoflagellate cyst studies. *In Okaichi, T., Anderson D. M. and Nemoto T. eds. Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, 461-479, Elsevier, New York.
- Mcmanus, J., 1988. Grain size determination and interpretation. *In Tucker, M. ed. Techniques in sedimentology*, 63-95, Blackwell Sci. Publ. London.
- 長崎海洋気象台, 1964. 長崎港の潮流について. 1-3.
- 長崎県水産試験場, 1971. 長崎湾及び周辺漁場環境保全基礎調査報告. 長崎県水産試験場資料集, 第18冊

- 1-102.
- 長崎県, 1997. 長崎県統計年鑑, 第43版, 1-409.
- 長崎市保健環境部環境保全課, 1996. 平成7年版環境保全行政, 1-171, 長崎市.
- Neuer, S. and Cowles, T. J., 1995. Comparative size-specific grazing rates in field population of ciliates and dinoflagellates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **125**, 259-267.
- 高橋正征・古谷 研・石丸 隆 (監訳), 1996. 動物プランクトン/生物サイクル. 生物海洋学3, 東海大学出版会, pp. 3-64.
- 寺田精介・山口道雄・川本 功・伴与一郎・山口昌昭, 1968. 長崎港の水質について. 長崎県衛生研究所報, 97-103.
- 寺田精介・山口道雄・赤枝 宏・伴与一郎・西河昌昭, 1969. 長崎港の水質について (第2報). 長崎県衛生研究所報, 53-56.
- 辻田時美, 1956. 長崎湾. 長崎市制六十五年史-前編-, 298-308, 長崎市.
- Versteegh, G. J. M., Brinkhuis, H., Visscher, H. and Zonneveld, K. A. F., 1996. The relation between productivity and temperature in the Pliocene North Atlantic at the onset of northern hemisphere glaciation: a palynological study. *Global and Planetary Change*, **11**, 155-165.
- Versteegh, G. J. M., 1997. The onset of major northern hemisphere glaciations and their impact on dinoflagellate cysts and acritarchs from the Singa section, Calabrizza (southern Italy) and DSDP Holes 607/607A (North Atlantic). *Marine Micropaleontology*, **30**, 319-343.