

播磨灘南西部における *Chattonella* (Raphidophyceae) の シスト密度と赤潮発生との関係

大山憲一・松岡 聡*・本田恵二・吉松定昭

Relationship between Cyst Density and Red Tide Outbreaks of *Chattonella*
(Raphidophyceae) in the South-western Part of Harima-Nada,
the Seto Inland Sea, Japan

Kenichi Oyama, Satoshi Matsuoka*, Keiji Honda, Sadaaki Yoshimatsu

In order to clarify relationship between cyst density and red tide outbreaks of *Chattonella antiqua* (Hada) Ono and *Chattonella marina* (Subrahmanyam) Hara et Chihara, field surveys were carried out in the south-western part of Harima-Nada, the Seto Inland Sea.

Water samples were collected from seven stations, also from the south-western area of Harima-Nada as red tide outbreaks were anticipated, and vegetative cells were counted. Sediment samples were collected from six stations in the middle of June 2001-2005, and total living cysts in sediment were counted by the direct count method. To know long term trend of cysts and vegetative cells, cyst density at the station (St.K4) in 1988-2005 (except 1990-1992, and 1999-2000) and appearances of vegetative cells in 1977-2005 were discussed.

The red tide outbreaks of *C.antiqua* and *C.marina* were classified into three terms, frequently occurring term(1977-1989), not occurring term(1990-1998), and sporadically occurring term(1999-2005). Cyst density changed in the range of 0 - 655 cysts/cm³·wet sediment. In the years which cyst density was high, the dispersions of cyst density varied more widely than when it was low. There was a positive significant correlation between cyst density and maximum vegetative cell density of each station during 2001-2005 ($r=0.83$). There was not a significant correlation between cyst density and maximum vegetative cell density at St.K4 in 13 years (1988-1989, 1993-1998, 2001-2005). But there developed a tendency for red tide outbreaks to become low frequency when cyst density was low. There was not a definite relation between maximum vegetative cell density and cyst density of next year at St.K4.

While it was necessary to consider environment conditions of investigating area, the result of this study suggested that cyst density played more important role as a factor of red tide outbreaks in recent years, in the south-western part of Harima-Nada.

キーワード：シスト, 栄養細胞, *Chattonella*, 赤潮, 播磨灘

(* 現所属香川県農政水産部水産課)

香川県における赤潮発生件数は、1974年の41件を最高として徐々に減少しているが¹²⁾、魚類養殖業者にとって赤潮の発生は、いまだに大きな脅威となっている。とりわけ *Chattonella antiqua* (Hada) Ono と *Chattonella marina* (Subrahmanyam) Hara et Chihara は、香川県沿岸で出現する赤潮プランクトンの中で最も注意を要する種であり³⁾、本県での両種の赤潮による漁業被害金額は、1970～2004年の累計で、85億6千万円にのぼり、赤潮による漁業被害金額の実に91%を占める⁴⁵⁾。最近では、2003年7月に播磨灘南西部で発生した *C. antiqua* 赤潮により、養殖中のハマチおよびカンパチがへい死し、4億9千万円の被害が生じた⁵⁾。

赤潮発生機構解明の1つとして、赤潮生物の生活史的観点からの研究の重要性が指摘され⁶⁾、シストは重要な生態学的意義をもつといわれている⁷⁾。*C. antiqua* と *C. marina* においても、生活史の一時期にシストを形成して海底泥中で越冬することが知られ⁸⁹⁾、シストの形成条件¹⁰⁾¹¹⁾、休眠と成熟および発芽についての生理生態的特徴¹¹⁾¹²⁾、水域における分布¹¹⁾¹³⁾¹⁴⁾に関する知見が集積されてきた。しかし、赤潮の発生にシスト密度がどのように関与しているのか長期間にわたって調査した事例は少なく、その関係はいまだに明らかで

ない。

そこで本研究では、播磨灘南西部（小豆島北部を除いた香川県播磨灘海域）における *C. antiqua* と *C. marina* のシスト密度および栄養細胞の出現状況を調査し、両者の関係を検討した。なお、本県海域で出現する *Chattonella* 属には、前2種の外にも *Chattonella ovata* Hara et Chihara、*Chattonella globosa* Hara et Chihara および *Chattonella verruculosa* Hara et Chihara の3種類があるが、本研究では、これら3種より圧倒的に出現頻度が高く、水産業上も重要な *C. antiqua* および *C. marina* を研究対象とし、以後、本報で *Chattonella* と記述する場合は、*C. antiqua* および *C. marina* を示すものとする。

材料および方法

栄養細胞の計数

海水試料は、播磨灘南西部の定点 K1～K7 において (Fig.1)、2001～2005年の6～9月に北原式採水器を用いて層別（2～4層）に採取し (Table 1)、試料1 mL中の *C. antiqua* と *C. marina* の栄養細胞数を計数した。定点 K4 では、毎月2～7回、5 m間隔で層別（8層）に海水をそれぞれ1 L採取し (Table 1)、ポアサイズ8 μ mのメンブランフィルターを用いて重力ろ過

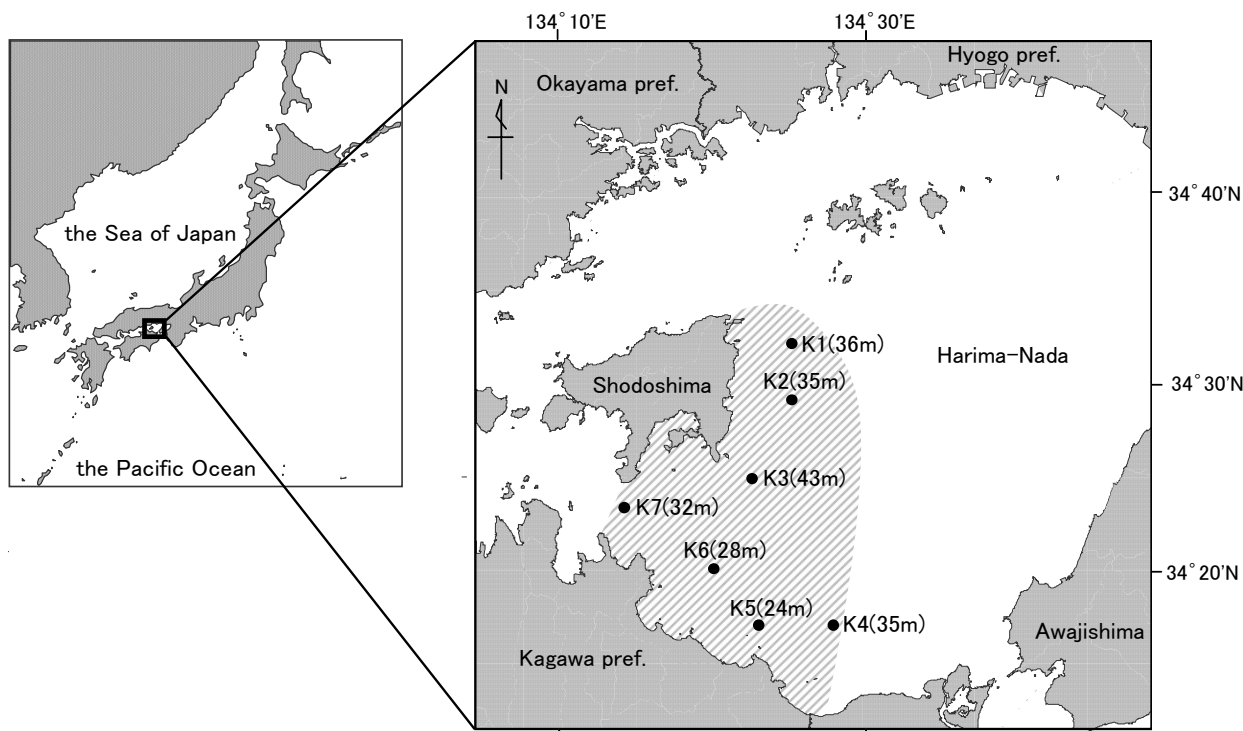


Fig.1. Locations of sampling stations in the south-western part of Harima-Nada, the Seto Inland Sea. Water samples were collected from Sts. K1-K7, and also from the area of diagonal lines as red tide outbreaks were anticipated. Sediment samples were collected from Sts. K1-K3・K5-K6 in June 2001-2005, and from St. K4 from May to July 1988-1989・1993-1998・2001-2005. Numbers in the parenthesis indicate to the average depth of the stations.

Table 1. The number of plankton investigations

Year	Month	Station						
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
2001	6	2	2	2	2(2)	2	2	2
	7	10	11	13	12(5)	13	13	15
	8	6	6	6	5(3)	5	5	6
	9	1	3	3	3(3)	3	3	4
2002	6	1	2	2	3(3)	1	2	3
	7	11	11	11	10(4)	10	11	12
	8	3	3	3	3(3)	3	3	4
	9	1	4	2	4(4)	2	2	5
2003	6	2	2	2	4(3)	2	2	3
	7	19	19	19	18(5)	18	18	19
	8	5	5	5	6(3)	6	6	8
	9	3	3	4	3(3)	3	3	5
2004	6	4	4	4	4(4)	4	4	5
	7	13	13	13	12(4)	12	14	15
	8	5	5	6	6(4)	6	6	6
	9	4	4	5	5(5)	5	5	5
2005	6	3	3	3	4(4)	3	3	4
	7	7	7	7	7(7)	7	7	9
	8	6	6	6	6(6)	6	6	7
	9	1	1	1	2(2)	1	1	3

Numbers in parenthesis : the number of samples given concentrated treatment

により 50 mL に濃縮し、そのうちの 1 mL を計数した。検出される最小細胞数は 0.05 細胞 / mL である。計数は、いずれも採取したその日のうちに完了させた。

また、*C.antiqua* と *C.marina* の長期的出現動向を把握するために、1977～2005 年に、定点 K1～K7 を含めた播磨灘南西部 (Fig.1) で、香川県赤潮研究所および香川県水産試験場において計数された数値を解析して用いた。

なお、本研究では、*C.antiqua* と *C.marina* の遊泳細胞を栄養細胞として扱った。また、体長 50～85 μ m 前後で細胞後端の伸長が不明瞭な *C.antiqua* と *C.marina* の中間的な個体 (*Chattonella* 区分不能として記録) も両種の栄養細胞として扱った。

海底泥の粒度組成

定点 K1～K6 の海底泥の性状を把握するため、2005 年 6 月 13 日に柱状採泥器により採取した表面から 3cm 深の海底泥試料を用いて、粒度組成 (62～125 μ m, 125～250 μ m, 250～500 μ m, 500 μ m 以上の画分の乾燥重量) を求めた。

シストの計数

海底泥試料は、播磨灘に設けた定点 K1～K6 において (Fig.1), 2001 年 6 月 11 日, 2002 年 6 月 17 日, 2003 年 6 月 16 日, 2004 年 6 月 14 日および 2005 年 6 月 13 日に、柱状採泥器 (内径 40 mm) を用いて採取した。

各定点において 2001～2003 年は 2 本, 2004～2005 年は 1 本のコア試料を得、表面から 3cm 深の

海底泥をプラスチック容器に採って混合し、温度約 8℃ の暗所に保存したものをシスト計数用の試料とした。

Chattonella のシストの計数は、落射蛍光顕微鏡を用いる直接計数法¹¹⁾¹⁵⁾によって行い、各試料につき 3 回計数した。得られた値に、海底泥試料のみかけの比重を乗じて、湿泥 1cm³ あたりのシスト密度を求めた。なお、比重を求めている 2004 年については、2001～2003 年および 2005 年の各定点の比重の平均値から密度を求めた。試料の粒子径画分は、20～125 μ m 画分を使用し、計数は、採泥後 2 ヶ月以内に完了させた。

また、東部瀬戸内海シャットネラ赤潮広域調査¹⁶⁾ および瀬戸内海東部海域赤潮広域共同調査¹⁷⁾ のシストに関する結果を用いて、定点 K4 のシストの長期的変動を把握した。これは、1988～1989 年および 1993～1998 年の 5 月下旬～7 月上旬に、香川県赤潮研究所または瀬戸内海区水産研究所 (旧名称：南西海区水産研究所) によって採取された定点 K4 の表面から 3cm 深の海底泥中のシストを、瀬戸内海区水産研究所において直接計数法で計数されたものである。なお、比重を求めている年は、2001～2003 年および 2005 年の定点 K4 における平均比重を用いて、湿泥 1cm³ あたりの密度を求めた。

C.antiqua と *C.marina* のシストの区別は困難¹¹⁾¹⁵⁾ であることから、本研究で計数の対象とした *Chattonella* のシストとは、両種を一括したものである。また、最近になって *C.ovata* のシストが発見され、その形態は、*C.antiqua* と *C.marina* に酷似していることが明らかになった (山口, 私信)。このため従来 *C.antiqua* または *C.marina* のシストとして計数された中に、*C.ovata* のシストも含まれている可能性がある。しかし、播磨灘南西部での *C.ovata* の栄養細胞の出現量は、*C.antiqua*, *C.marina* と比較して圧倒的に少ないことから、海底泥中の *C.ovata* のシストの密度も低いと考え、本研究では *C.ovata* のシストについては考慮しなかった。

結 果

栄養細胞の出現動向

定点 K1～K7 における 2001～2005 年の 6～9 月の日別の最高細胞密度の変動を Fig.2 に示す。栄養細胞は、6 月下旬～9 月下旬にかけて出現した。2003 年は最も高密度に出現し、7 月 14 日に定点 K2 で 212 細胞 / mL が記録された。次いで 2002 年が高く、7 月 19 日に定点 K1 で 92 細胞 / mL であった。2004 年は、7 月 8 日に定点 K1 で 18 細胞 / mL が記録されたのが最高で、2001 年および 2005 年は、最高でも 3 細胞 / mL 以下と非常に低密度であった。2002～2004 年

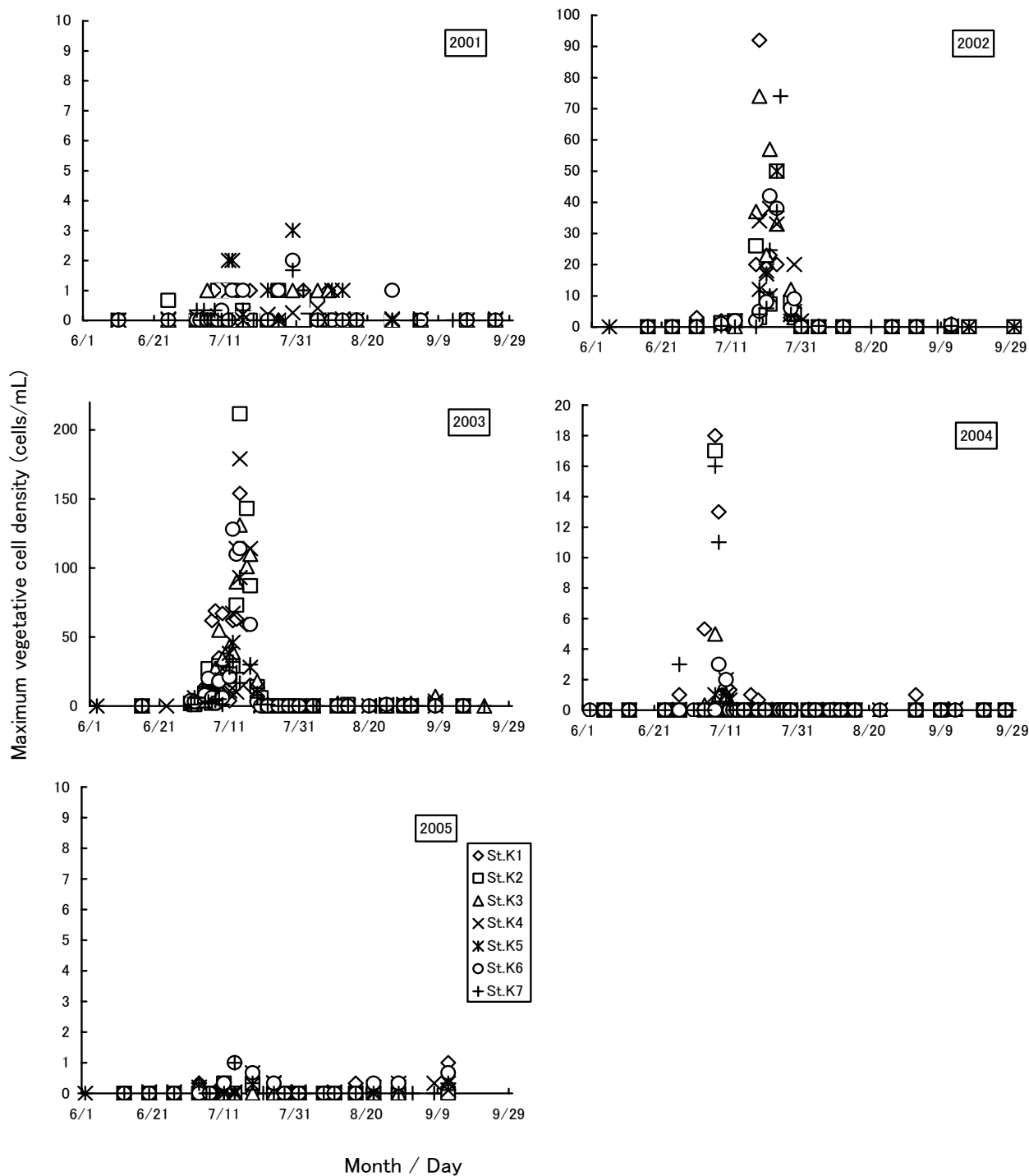


Fig.2. Daily changes of maximum vegetative cell density of *Chattonella antiqua* and *Chattonella marina* at Sts.K1-K7 in the south-western part of Harima-Nada from 2001-2005.

は、7月上旬～中旬にかけて出現のピークが観察されたが、密度の低かった2001年および2005年は、出現の明瞭なピークは観察されなかった。年ごとの最高細胞密度を定点別に比較すると、小豆島沿岸の定点 (K1～K3, K7) の方が、四国沿岸沖の定点 (K4～K6) よりも高い傾向を示した。

播磨灘南西部 (1977～2005年) および定点 K4 (1983～2005年) で観察された年別の最高細胞密度の変動

ならびに同海域で *Chattonella* 赤潮が形成された年を Fig.3 に示す。播磨灘南西部における *Chattonella* 赤潮の発生状況は、頻発期 (1977～1989年)、非発生期 (1990～1998年)、散发期 (1999～2005年) の大きく3期に分類できた。1977～1979年に3年連続で大規模な赤潮が発生し、最高細胞密度は、それぞれ1230, 7050, 3330細胞/mLを記録した。その後も、1983年に3270細胞/mL, 1986年に1620細胞/mL,

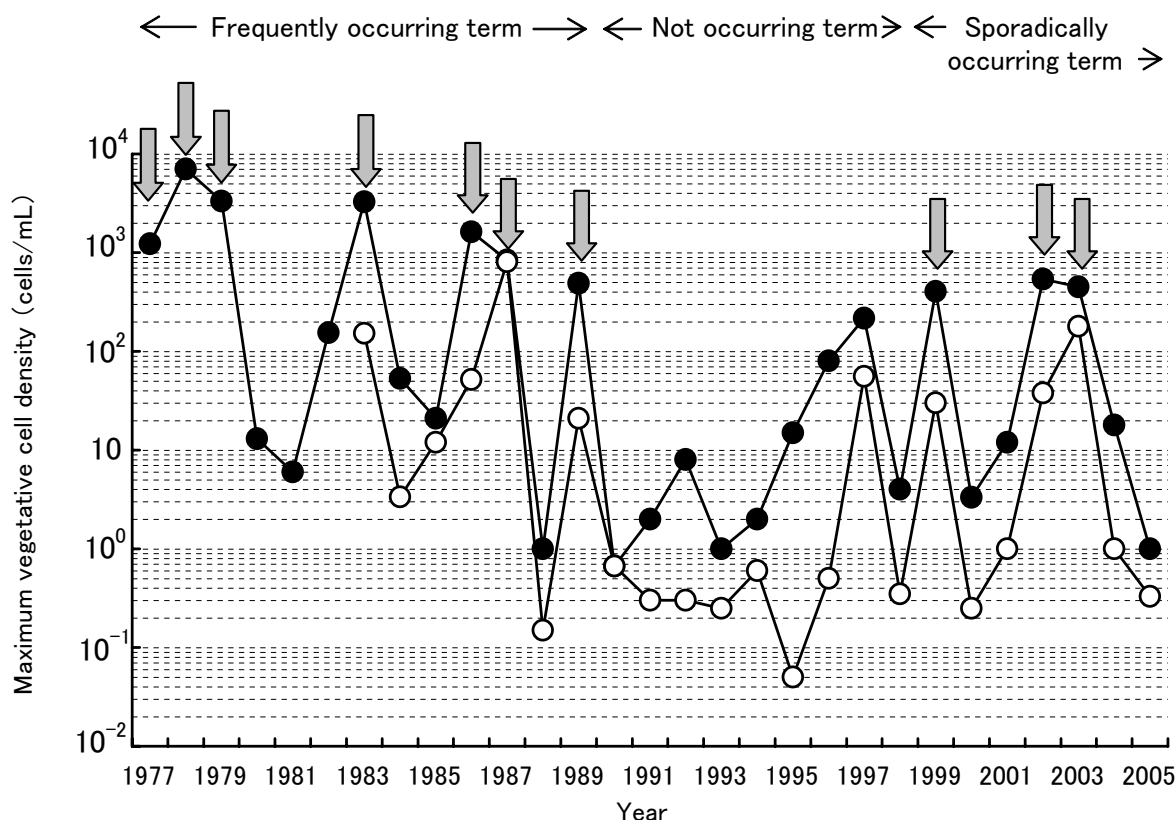


Fig.3. Yearly changes of maximum vegetative cell density of *Chattonella antiqua* and *Chattonella marina*. Closed circles (●) show changes in the south-western part of Harima-Nada, 1977-2005, and open circles (○) show at St.K4, 1983-2005. Arrows show red tide outbreaks of *Chattonella* in the south-western part of Harima-Nada.

1987年に843細胞/mL, 1989年に489細胞/mLと、1977～1989年の13年間で7回もの赤潮が発生した。1990～1998年は低水準で推移したが、1999年以降は、細胞密度の高い年には500細胞/mL前後まで増殖するなど、増減を繰り返した。定点K4では、1987年に809細胞/mLと最も高く、次いで2003年に179細胞/mLであった。最高細胞密度が1細胞/mL以下の年は、23カ年中13カ年で記録された。播磨灘南西部と定点K4の年別の最高細胞密度は、同じような変動傾向を示した。

海底泥の粒度組成

定点K1～K6の粒度組成をTable 2に示す。粒度

62 μ m未満の泥分率は、定点K1～K5では82～93%と高く、定点K6では54%と他の定点より低かった。各定点の粒度125 μ m未満(泥+微粒砂)の百分率は、87～96%と高く、ほとんどの粒子が、シスト計数用の粒子径画分(20～125 μ m)に含まれていた。

シスト密度の変動

5～7月の発芽前のシスト密度の短期的変動(定点K1～K6:2001～2005年)および長期的変動(定点K4:1988～2005年)をFig.4に示す。シスト密度は、年ごとに大きく変動した。定点K1では、2002年に最高値(85個/cm³)を示し、その後減少した。定点K2～K6では、2001年から徐々に増加し、2003年

Table 2. Percentage (dry weight) of five size fractions of sediment at Sts.K1-K6 collected on 13 July 2005

St.	Size fraction				
	<62 μ m	62-125 μ m	125-250 μ m	250-500 μ m	500 μ m<
K1	82%	8%	5%	3%	2%
K2	93%	3%	2%	1%	1%
K3	86%	6%	4%	3%	1%
K4	92%	4%	3%	1%	1%
K5	87%	6%	4%	3%	1%
K6	54%	33%	9%	3%	1%

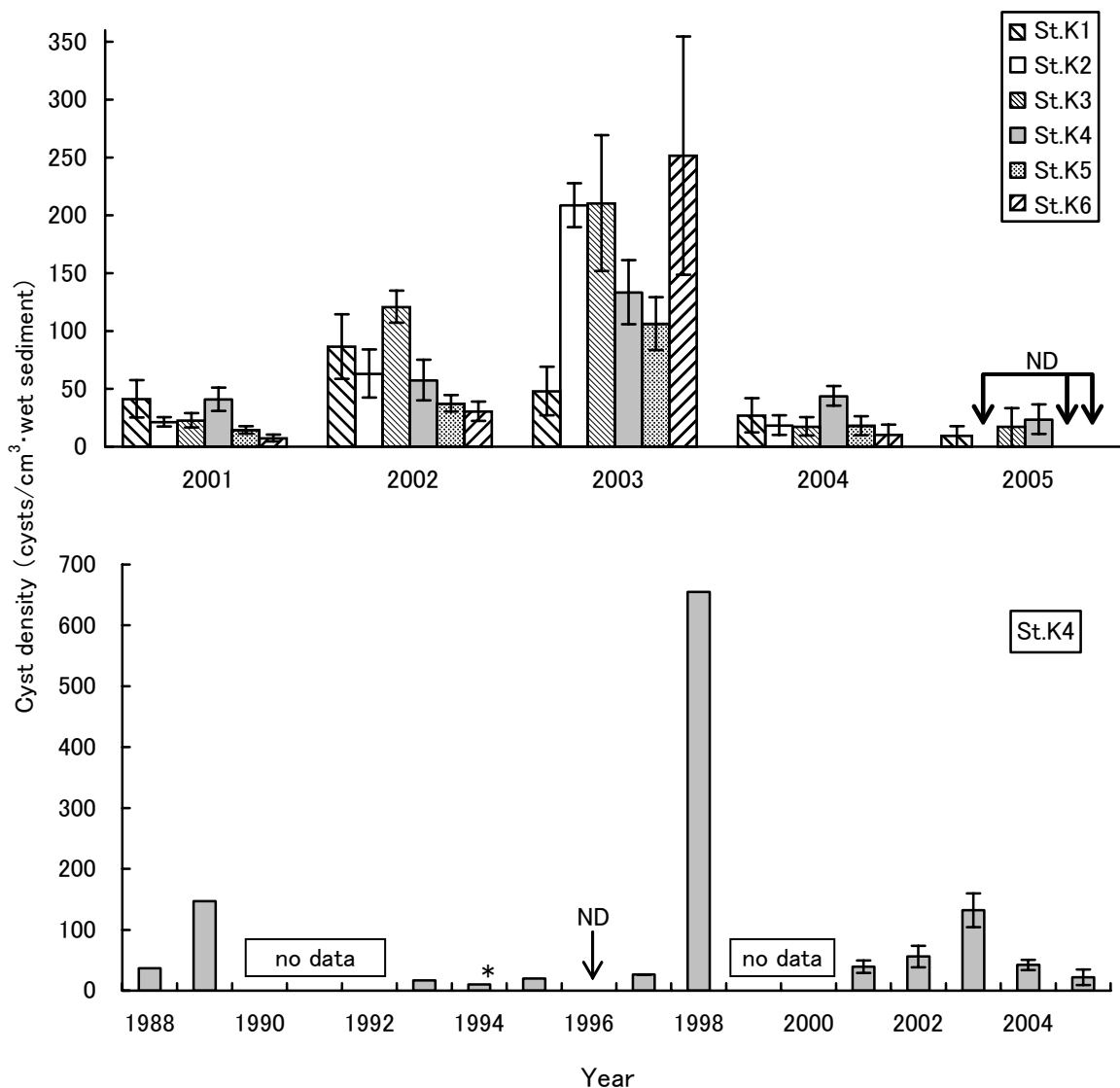


Fig.4. Changes of cyst density of *Chattonella* before cyst germination in surface (top 3 cm depth) sediment at Sts. K1-K6 from 2001-2005 (upper), and St.K4 from 1988-2005 (lower). Bars represent standard errors. ND means not detected data. Data at St.K4 1988-1998 are cited from Okayama pref. *et al.* (1999).
 * Lower than 10 cysts/cm³ wet sediment

に最高値 (105 ~ 250 個 /cm³) を示し、その後減少した。2005年の定点K2, K5およびK6では、シストは検出されなかった。定点K4では、1998年は655 個 /cm³と突出して高く、1989年および2003年は、147 個 /cm³および132 個 /cm³とやや高く、その他の年は100 個 /cm³以下であった。

最大分散比 F_{max} を用いて、シスト密度の低かった2001年、2004年および2005年におけるシスト密度の分散の一様性を検定したところ、分散が等しくないとはいえなかった ($P < 0.05$)。そこで、密度の高かった2002年および2003年と、低かった年(2001年、2004年および2005年)の母分散の比をそれぞれ推定したところ、少なめに見積もっても、シスト密度の低かった年と比べて、2002年は1.37倍、2003年は3.14倍で、ばらつきが大きかった ($P < 0.05$)。

シスト密度とその年に出現する栄養細胞密度との関係

2001 ~ 2005年の6月における定点K1 ~ K6のシスト密度とその年の6 ~ 9月に出現した各定点での栄養細胞の最高細胞密度との関係を Fig.5 に示す。定点K2 ~ K6では、シスト密度と栄養細胞密度との間に、高い正の相関が認められ ($r=0.97 \sim 0.99$)、K1ではやや低かった ($r=0.59$)。全体としては、シスト密度と栄養細胞密度との間に、有意な正の相関が認められ ($r=0.83, P < 0.01, n=30$)、*Chattonella* のシスト密度が高ければ、その年に出現する栄養細胞密度も高い傾向にあった。

シスト密度とその年に出現する栄養細胞密度との関係を長期的に把握するため、1988 ~ 2005年の5 ~ 7月の定点K4におけるシスト密度とその年の6 ~ 9月に出現した定点K4および播磨灘南西部における栄養

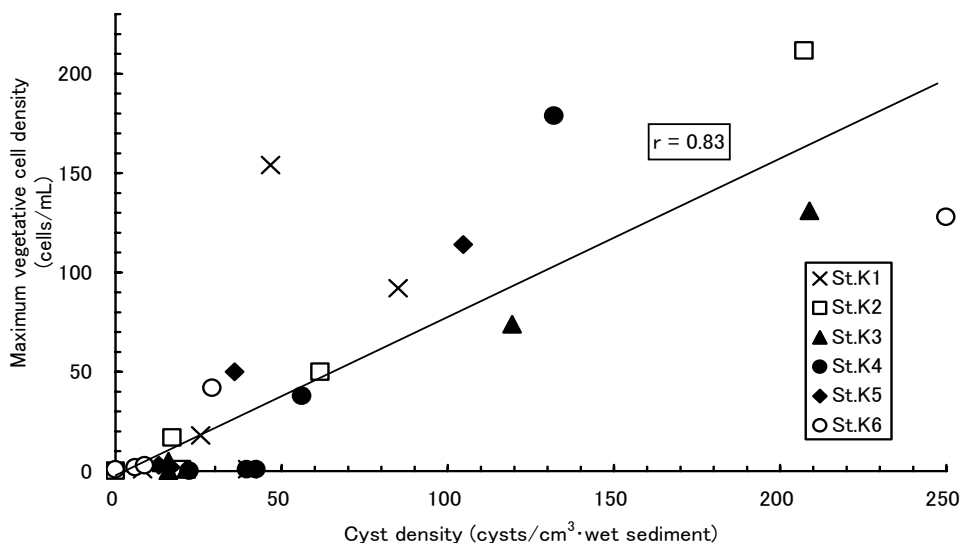


Fig.5. Relationship between cyst density and maximum vegetative cell density of *Chattonella* for each year at Sts.K1-K6 from 2001-2005.

細胞の最高細胞密度との関係を Fig.6 に示す。655 個/cm³ とシスト密度が突出して高かった 1998 年の栄養細胞の最高細胞密度は、定点 K4 で 0.35 細胞/mL、播磨灘南西部で 4 細胞/mL と低かった。シスト密度と栄養細胞密度との間に、有意な相関は認められなかったが、シスト密度の低い年は、夏の赤潮発生の頻度も低い傾向にあった。

栄養細胞密度と翌年のシスト密度との関係

定点 K4 および播磨灘南西部における栄養細胞の

最高細胞密度と定点 K4 における翌年のシスト密度との関係を Fig.7 に示す。栄養細胞は 1987～1988 年、1992～1997 年および 2000～2004 年、シストは 1988～1989 年、1993～1998 年および 2001～2005 年のデータを用いた。赤潮発生年の翌年のシスト密度は 37～132 個/cm³ と赤潮非発生年に比べて高いという傾向はなく、栄養細胞密度と翌年のシスト密度との間に一定の関係は認められなかった。

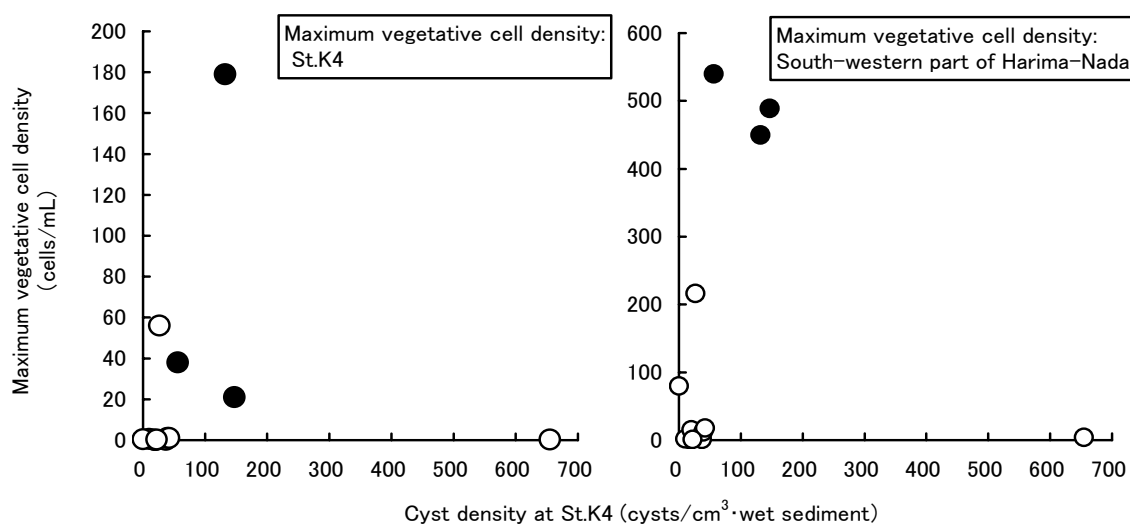


Fig.6. Relationship between cyst density of St.K4 and maximum vegetative cell density (left : St.K4, right : South-western part of Harima-Nada) of *Chattonella* for each year from 1988-1989, 1993-1998, and 2001-2005. Closed circles (●) show red tide outbreaks of *Chattonella* and open circles (○) show no occurrence. Cysts' data from 1988-1989 and 1993-1998 are cited from Okayama pref. *et al.*(1999).

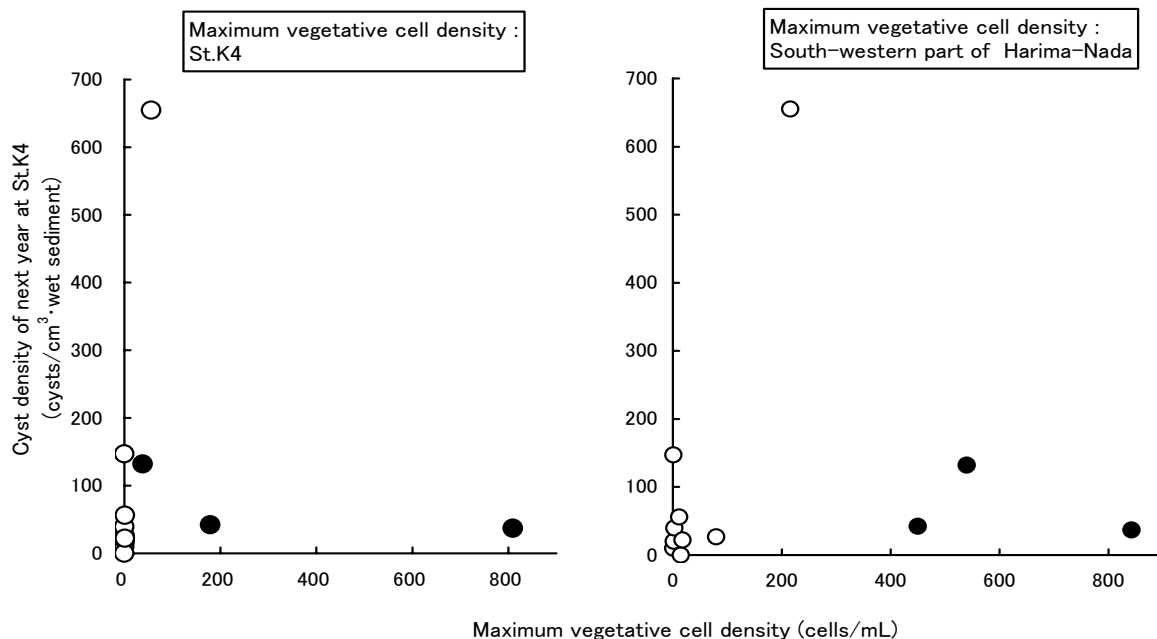


Fig.7. Relationship between maximum vegetative cell density (left : St.K4, right : South-western part of Harima-Nada) and cyst density of next year of *Chattonella*. Closed circles(●) show red tide outbreaks of *Chattonella* and open circles(○) show no occurrence. Data of vegetative cells are used from 1987-1988, 1992-1997, and 2000-2004. Data of cysts are used from 1988-1989, 1993-1998, and 2001-2005. Cysts' data from 1988-1989 and 1993-1998 are cited from Okayama pref. *et al.*(1999).

考 察

同一定点での採泥回数

今井¹¹⁾は、同一定点で柱状採泥器によって採取した4本のコアの*Chattonella*のシストを直接計数法により計数し、その値を比較しているが、コア間の計数値の変動は若干認められるものの、水平的に小さいスケールでのシスト分布のパッチネスはさほど大きくないと思われると論じている。また、香川県赤潮研究所¹⁸⁾は、播磨灘定点K4で2本のコアにより、海底泥から出現する*Chattonella* spp., *Fibrocapsa japonica* Toriumi & Takano, *Heterosigma akashiwo* (Hada) Hada および *Gyrodinium instriatum* Freudenthal の栄養細胞数を比較しているが、コアによる大きな差はないと考えると述べている。以上のことから本研究では、同一定点でのサンプリングによるシスト密度の差は小さいと考え、コアは1本または2本用い、コアを2本用いた場合は、各コアから採取した3cm深の海底泥試料を1つにしてよく混ぜ合わせ、計数用の試料とした。

採泥深度

一見ら¹⁹⁾は、²¹⁰Pb法により播磨灘の3定点の堆積速度を見積もり、小豆島東部で0.18cm/年、播磨灘中央部で0.26cm/年、播磨灘南部で0.75cm/年と報告している。仮に播磨灘南西部の堆積速度を0.5cm/年とすると、本研究で用いた採泥深度3cmは、過去6年

のシストの平均密度を表していることになる。本研究で示したシスト密度は、採泥深度を考慮した年補正をしていないため、例えばある年のシスト密度だけが突出して高かったのか、あるいはその前後の年の密度も高かったのか、詳細は把握できない。しかし、シスト密度の変動傾向については議論が可能であると思われる、便宜上、発芽前の3cm深の海底泥試料のシスト密度をその年のシスト密度とした。

Chattonella のシストと赤潮発生との関係

今井¹¹⁾は、1986年3月～1988年3月にかけて、周防灘の5定点の表層泥(1cm深まで)中のシストを直接計数法により計数している。1987年夏季には*Chattonella*の栄養細胞が100細胞/mL以上と多く出現したが、赤潮発生直前の同年6月のシスト密度は、10～160個/cm³程度で、赤潮が発生しなかった前年と同様に低い水準であった。

板倉ら¹³⁾は、1988～1989年にかけて東部瀬戸内海の70～72定点において、表面から3cm深の泥中のシストを直接計数法と終点希釈法²⁰⁾で計数している。播磨灘において、春季にシスト密度が高かった1988年の夏季に赤潮が発生せず、いっぽう、春季のシスト密度が比較的低く発芽可能率も低かった1989年の夏季には赤潮が発生したことから、春季のシストの量とそれぞれの年の夏季の赤潮発生の関係は単純でないとしている。

今井ら¹⁴⁾は、1990年4月～1992年2月にかけて、

北部広島湾の2定点の表層泥(1cm深)中のシスト密度を直接計数法により計数している。1990年7月4日は、0~20個/cm³程度と低いシスト密度であったにもかかわらず、広島湾奥で*Chattonella*赤潮が発生し、同年9月7日には、最高細胞密度1125細胞/mLを記録した。これは、1990年夏季の自然条件が、シストから発芽した栄養細胞の増殖にとって極めて好ましいものであったことを示唆していると述べている。

これらの報告は、*Chattonella*のシストと赤潮発生との明らかな因果関係を認めていないが、本研究で行った2001~2005年の調査結果では、発芽直前(6月中旬)のシスト密度と同一定点でその年に出現する栄養細胞の最高細胞密度との間に有意な正の相関が認められ、シスト密度が高いほど出現する栄養細胞密度も高いことが示された。また、定点K4で1988~2005年に行った長期間の調査結果をとりまとめたところ、発芽前のシストとその年に出現する栄養細胞の最高細胞密度との間に正の相関は認められなかった。しかし、シスト密度の低い年には、赤潮発生の頻度も低い傾向にあった。

今井¹¹⁾、板倉ら¹³⁾、今井ら¹⁴⁾の報告と異なる結果が今回得られた理由として次の二点があげられる。

一点は、調査海域の設定範囲である。栄養細胞密度とシスト密度とを比較する場合、他海域からの流れ込みや赤潮が集積するような地点での比較は、両者の関係を分かりづらくすると思われ、調査海域の設定が重要になると考えられる。例えば今井ら¹⁴⁾の事例では、潮流や風の影響によって*Chattonella*が広島湾奥部に集積した可能性が考えられ、そのような環境では栄養細胞密度とシスト密度を比較するのには適していないといえるであろう。

板倉ら¹³⁾は、播磨灘における*Chattonella*のシストの高密度域は、北西部から北部にかけてと東部中央部に存在し、これは播磨灘の北部に時計回り、南部に反時計回りの顕著な循環流が、シストの運搬および堆積作用に対して強い影響を及ぼしていると推察している。今回調査対象とした播磨灘南西部は、播磨灘の中では*Chattonella*のシストの低密度域に該当し、同海域内の水平的分布密度にさほど大きな差はないと考えられる。これは言い換えると、残差流がほぼ調査海域内で均一であることを示し、他海域からのシストや栄養細胞の流れ込みの影響を考慮する必要性が比較的低いといえ、シストと出現する栄養細胞の関係を把握するうえでは好条件であったと思われる。

いっぽうで、定点K1におけるシストと出現した栄養細胞との相関関係が、他の定点と比べて低く、栄養細胞密度が高かったことは、定点K1が今回の調査定点中最も北部(岡山県寄り)に位置し、播磨灘北部の

シストの高密度域¹³⁾からの栄養細胞の流れ込みの影響を反映しているためではないかと予想される。また、今回の調査定点中最も西部に位置し、底質が砂泥質で他の定点と違いのある定点K7では、シスト密度は低い¹³⁾が、定点K1~K6と同じレベルで栄養細胞が出現していることから、他海域からの栄養細胞の流入の影響を受けやすい定点であるといえる。したがって、播磨灘南西部でも周縁部と中央部ではシストと栄養細胞との関係に違いがみられ、両者の関係を把握するには、潮汐残差流、吹送流、密度流等の残差流の条件を考慮する必要があるといえるだろう。

もう一点は、*Chattonella*赤潮が頻発していた1970~1980年代に比べ海域の環境条件が改善されたことに伴い、赤潮発生要因としてのシストの重要性が相対的に増している可能性が高いと思われることである。すなわち播磨灘南西部における*Chattonella*赤潮頻発期(1977~1989年)の赤潮継続平均日数は22.2日であったのに対し、散發期(1999~2005年)の平均日数は、8.5日しかなく⁴⁵⁾²¹⁾、以前に比べて最近の*Chattonella*赤潮は、最高細胞数とともに発生期間も短期化している。海域への栄養塩の負荷量が法的に制限され、特にDIP濃度が低下したこと²²⁾は、リンの最小細胞内含量が高い*C.antiqua*(620fmol/細胞)²³⁾にとって、瀬戸内海で*Chattonella*と競合する他の有害赤潮種のリンの最小細胞内含量、例えば*Karenia mikimotoi*(Miyake & Kominami ex Oda) Hansen & Moestrupの250fmol/細胞²⁴⁾、*Cochlodinium polykrikoides* Margalefの370fmol/細胞²⁵⁾などと比較して、リン制限環境下での増殖は不利である。したがって、海域の環境条件が改善傾向にある現在、*Chattonella*が大規模に増殖する可能性は低くなっていると予想され、赤潮発生に及ぼす各種要因の重要度も変化してきていると推察される。すなわち、小規模な赤潮が発生するという事は、それだけ増殖初期の条件が赤潮の発生海域および規模に大きな影響を及ぼすものと思われ、*Chattonella*にとって競合種の少ない7月上中旬に、いかに多くの栄養細胞がシストから発芽しているかということが重要になると考えられる。そういう意味では、播磨灘南西部のようにシストの水平的分布密度にさほど差のない海域では、赤潮発生の十分条件としてのシストの重要性が、相対的に増している可能性が高いと推察できる。

以上のように、赤潮の発生には物理化学生物学的諸要因が相互に関与するため、シスト密度のみ取り上げて赤潮発生を論じることは難しい。シストを赤潮発生予察の指標として利用しようとするときには、シスト密度が赤潮の発生に効いてくる様々な条件を明らかにする必要があるし、それらの条件は各海域の特性によっても左右されるであろう。

ところで、一見ら¹⁹⁾は、播磨灘において *Chattonella* 属の総シスト密度（生シスト、発芽後の空シストおよび死滅したものと思われるシストを合計したシスト密度）の鉛直分布を調べ、100年以上前の播磨灘での総シスト密度は低かったが、赤潮被害が顕著となった1970年前後に総シスト密度は最も高くなり、その後の瀬戸内海の水質改善に伴い再び減少に転じていると報告しており、シストと赤潮発生との何らかの因果関係を示唆している。

では、赤潮発生の可能性は低いといえるシスト密度はどのあたりであろうか。Fig.6をみるとシスト密度50個/cm³付近に境界域があるように見受けられるが、今井¹¹⁾、板倉ら¹³⁾、今井ら¹⁴⁾の結果と比較すると赤潮発生の可能性は低いといえるシスト密度の境界域は、海域や年によって随分異なり、標準的に決められる性質のものではないと思われる。ただ、シスト密度を継続的に調査している事例は少なく、今後とも継続してデータを蓄積していくことは、赤潮発生の解明・予察のうえで重要である。また、シスト密度が高い播磨灘北部海域¹³⁾のシストと栄養細胞との関係を把握することは、播磨灘での赤潮発生機構を理解するうえで非常に役立つと思われ、今後はより広域的な調査が望まれる。

栄養細胞の出現状況とシストの供給との関係

今井¹¹⁾は、周防灘で1987年夏季の *Chattonella* 赤潮発生後、これに伴ってシスト密度が激増したことから、栄養細胞の出現状況が、海底泥へのシストの供給と密接に関連していると述べている。また、今井ら¹⁴⁾は、北部広島湾で1990年夏季の *Chattonella* 赤潮直後のシスト密度は、赤潮発生前と比較して激増していたと報告している。*Chattonella* と同じラフィド藻の *F.japonica* では、吉松²⁶⁾が、海底泥より出現した同種の栄養細胞累積数の季節変化を1985年4月～1986年4月に調査しているが、同種が赤潮を形成した後のシスト量の著しい増加は、遊泳細胞に由来するものと考えられると述べている。

本研究においても、*Chattonella* の栄養細胞の最高細胞密度と翌年のシスト密度との関係を調べたが、一定の関係は見出せなかった。これは、シストが形成されるであろう8～9月から翌年5～7月の採泥までの間に、残差流によるシストの流入・流出・埋没、他生物による捕食など、様々な要因によってシスト密度が変動した結果の数値であり、栄養細胞と形成されるシストとの関係を直接的に示すものではないといえるであろう。そのいっぽうで、単純に栄養細胞数が多いからといってその海域で形成されるシストの量も多いとはいえないと考えられ、シストの形成率は、栄養細胞の生理状態やシスト形成時の環境条件にも左右されると

思われる。

竹内²⁷⁾は、田辺湾において *Alexandrium catenella* (Whedon et Kofoid) Balech のシスト形成数をセジメントトラップにより定期的に調査している。しかし、*Chattonella* について同様の研究は進んでいない。栄養細胞の出現と翌年のシストとの関係を把握するには、年間を通じてシスト密度や海況を調査する必要がある、今後の研究課題である。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、御指導をいただき本稿の御校閲を賜った香川県赤潮研究所顧問 岡市友利博士、小野知足博士に厚く御礼申し上げるとともに、*Chattonella* 属のシストについて御助言いただいた香川大学農学部助教授 一見和彦博士、瀬戸内海区水産研究所赤潮生物研究室長 山口峰生博士、京都大学大学院助教授 今井一郎博士に深く感謝する。そして、試料採集に協力いただいた香川県漁業調査船「やくり」乗組員はじめ、香川県赤潮研究所、香川県水産試験場の方々から御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 吉松定昭・小野知足：1985, 香川県における1974年から1983年の赤潮発生状況. 香赤潮研報, (1), 1-16.
- 2) 香川県赤潮研究所：1985-2005, 香赤潮研年報.
- 3) 香川県：1999, 香川の赤潮生物 (第2版). 3-4.
- 4) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所：2000, 別冊 瀬戸内海の赤潮 - 漁業被害編 -. 112p.
- 5) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所：2000-2005, 瀬戸内海の赤潮.
- 6) 小野知足・楠木 豊・九万田一巳・代田昭彦・城 久・田原恒男・深瀬 茂・吉田陽一・村上彰男・渡辺 弘：1980, 赤潮の発生は予知できるか. 赤潮に関する近年の知見と研究の問題点 (水産研究叢書 33), 日本水産資源保護協会, 東京, pp.147-181.
- 7) Steidinger, K. A. : 1975, Basic factors influencing red tides. In "Pro. First Int. Con. On Toxic Dinoflagellate Blooms", (ed. V. R. LoCicero), Mass. Sci. Tech. Found., Wakefield, MA., pp.153-162.
- 8) 今井一郎・伊藤克彦・安楽正照：1984, 播磨灘における *Chattonella* 耐久細胞の分布と発芽温度. 日本プランクトン学会報, 31, 35-42.
- 9) 今井一郎・伊藤克彦：1986, 周防灘海底泥から見出された *Chattonella* のシストについて (予報). 日本プランクトン学会報, 33, 61-63.
- 10) Nakamura, Y., T. Umemori, M. Watanabe, D. M. Kulis,

- and D. M. Anderson : 1990, Encystment of *Chattonella antiqua* in Laboratory Cultures. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 35-43.
- 11) 今井一郎 : 1990, 有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella* のシストに関する生理生態学的研究. 南西水研研報, (23), 63-166.
- 12) 吉松定昭 : 1992, 瀬戸内海における赤潮生物特に渦鞭毛藻類 *Alexandrium* 属 2 種, ラフィド藻類 3 種の生活史に関する研究. 香赤潮研報, (4), 1-90.
- 13) 板倉茂・今井一郎・伊藤克彦 : 1991, 東部瀬戸内海域の底泥中における有害赤潮鞭毛藻 *Chattonella* (Raphidophyceae) のシストの分布. 日水誌, **57**(6), 1079-1088.
- 14) 今井一郎・板倉茂・大内晟 : 1993, 北部広島湾における *Chattonella* 赤潮の発生と海底泥中のシストの挙動. 日水誌, **59**(1), 1-6.
- 15) Imai, I. and K. Itoh : 1988, Cysts of *Chattonella antiqua* and *C.marina* (Raphidophyceae) in Sediments of the Inland Sea of Japan. *Bull. plankton Soc. Japan*, **35**, 35-44.
- 16) 岡山県・兵庫県・徳島県・香川県・大阪府・(株)東京久栄・芙蓉海洋開発(株)・阪神臨海測量(株)・新日本気象海洋(株) : 1989-1994, 東部瀬戸内海シャットネラ赤潮広域共同調査報告書.
- 17) 岡山県・兵庫県・徳島県・香川県・大阪府・(株)東京久栄・芙蓉海洋開発(株)・阪神臨海測量(株)・新日本気象海洋(株) : 1995-1999, 瀬戸内海東部海域赤潮広域共同調査(夏季調査)報告書.
- 18) 香川県赤潮研究所 : 1986, 昭和 60 年度内湾海域シスト調査報告書. 1-14.
- 19) 一見和彦・多田邦尚・門谷茂 : 2005, 瀬戸内海の植物プランクトン量の過去と現在 - 堆積物試料からの推定. 海洋と生物, **27**(3), 214-221.
- 20) 伊藤克彦・今井一郎 : 1987, 赤潮生物研究指針. 日本水産資源保護協会編, 秀和, 東京, pp.122-130.
- 21) 香川県 : 1979, 昭和 53 年 6 月発生ホルネリア赤潮に関する調査報告書. 156p.
- 22) 呉 碩津・松山幸彦・山本民次・中島昌紀・高辻英之・藤沢邦康 : 2005, 近年の瀬戸内海における有害・有毒渦鞭毛藻の分布拡大とその原因 - 溶存態有機リンの生態学的重要性. 沿岸海洋研究, **43**(1), 85-95.
- 23) Nakamura, Y. : 1985, Kinetics of nitrogen- or phosphorus-limited growth and effects of growth conditions on nutrient uptake in *Chattonella antiqua*. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 381-387.
- 24) Yamaguchi, M. and S. Itakura : 1999, Nutrition and growth kinetics in nitrogen- or phosphorus-limited cultures of the noxious red tide dinoflagellate *Gymnodinium mikimotoi*. *Fisheries Science*, **65**(3), 367-373.
- 25) 金大一 : 2003, 有害赤潮渦鞭毛藻 *Cochlodinium polykrikoides* の生理生態学的研究. 九州大学博士論文, 福岡, 154p.
- 26) 吉松定昭 : 1987, 瀬戸内海播磨灘より見出された *Fibrocapsa japonica* (Raphidophyceae) のシスト. 日本プランクトン学会報, **34**, 25-31.
- 27) 竹内照文 : 1985, 紀伊半島西岸域. 貝毒プランクトン - 生物学と生態学 (福代康夫編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.98-108.