

## 2006年および2007年の大阪湾における有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* と *A. catenella* シストの分布と現存量

山本圭吾<sup>1†</sup>・鍋島靖信<sup>1</sup>・山口峰生<sup>2</sup>・板倉 茂<sup>2\*</sup>

### Distribution and abundance of resting cysts of the toxic dinoflagellates *Alexandrium tamarense* and *A. catenella* in 2006 and 2007 in Osaka Bay

Keigo YAMAMOTO<sup>1†</sup>, Yasunobu NABESHIMA<sup>1</sup>, Mineo YAMAGUCHI<sup>2</sup> and Shigeru ITAKURA<sup>2\*</sup>

Distribution and abundance of resting cysts of *Alexandrium tamarense* and *A. catenella* were investigated in the surface of bottom sediment of Osaka Bay in October, 2006 and in May and October 2007 using a primuline-staining direct count method. Cysts of *Alexandrium* spp. were found at all stations examined. In 2006, the cyst density ranged from 2 to 112 cysts·cm<sup>-3</sup> and the cysts were abundant at north-east coast of Osaka Bay and the intermediate area between Akashi Strait and Kitan Strait. In 2007, higher densities were observed after an occurrence of *A. tamarense* red tide, and the cyst density varied from 291 to 5,683 cysts·cm<sup>-3</sup> and 190 to 3,275 cysts·cm<sup>-3</sup> in May and October, respectively. These facts show an increasing tendency of cyst abundance from the previous research in 1993. The cysts were most abundant at the coastal waters off Izumiotsu City and Kishiwada City in the middle-east coast of the bay and the high densities were also observed at fishing ports. These areas agreed with the area of dense bloom in 2007, and have a potential for becoming seed banks of future blooms. These results suggest that the risk of *Alexandrium* bloom and shellfish poisoning in Osaka Bay has increased and careful monitoring are necessary to prevent paralytic shellfish poisoning (PSP) incidents in the bay.

**Key words:** toxic dinoflagellate, *Alexandrium*, resting cyst, distribution, Osaka Bay, paralytic shellfish poisoning (PSP)

#### はじめに

*Alexandrium tamarense* は麻痺性貝毒原因プランクトンとしてよく知られる種で、同じ麻痺性貝毒原因種である *A. catenella* と比べおよそ10倍の毒量があるとされ(高田ほか, 2000), 100 cells·l<sup>-1</sup> といった低密度の出現でも二枚貝が毒化する(福代, 2000)。*Alexandrium catenella* が比較的頻繁に赤潮を形成する(竹内, 1992; 坂本ほか, 1999など)

のに対し、本種は赤潮を形成することはまれで、これまで大阪湾を含む西日本での大規模な発生例はほとんど報告されていなかった。

大阪湾では2002年春期に東部海域の広い範囲で *A. tamarense* が増殖し、同海域で初となる二枚貝の毒化が確認された(濱野ほか, 2002; 山本, 2004)。以降、2006年、2007年にも *A. tamarense* の増殖と二枚貝の毒化が確認され(板倉, 2007; 長井・松山, 2008)、2007年には赤潮状態にまで増殖し、アサリ *Ruditapes philippinarum* のみならずアカガイ *Scapharca broughtonii*、トリガイ *Fulvia mutica*、ヤマトシジミ *Corbicula japonica* といった多種多様な二枚貝で毒化が報告された(山本ほか, 投稿中)。

渦鞭毛藻類には生活史の中に休眠期を持つものが多く、このような種類では増殖に不適な環境下ではシスト(休眠接合子)を形成し、海底泥中で生息している。*Alexandrium tamarense* もシストを形成することが知られていることから(福代, 1997など)、大阪湾では近年の発生により本種のシストが大量に形成されたことが推測される。シストは種の分布域の拡大、ブルームの開始や終焉、不適な環

2008年9月11日受付、2009年2月2日受理

<sup>1</sup> 大阪府環境農林水産総合研究所水産技術センター  
Marine Fisheries Research Center, Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefectural Government, 2926-1 Tanigawa, Tanagawa, Misaki, Sennan, Osaka 599-0311, Japan

<sup>2</sup> 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所  
National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan

\* 現所属：水産庁増殖推進部研究指導課  
Research and Technological Guidance Division, Resources Enhancement Promotion Department, Fisheries Agency, 1-2-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8907, Japan

† YamamotoK@o-suishi.zaqrs.jp

境下での生き残りに重要な役割を果たしていることが知られている (Anderson and Wall, 1978). またシストは seed population として遊泳細胞の供給源となっており (Anderson and Wall, 1978), 次年度以降の貝毒発生の可能性を推測する有用な指標であることから (Shimada and Miyazono, 2005), シストの分布状況を把握することは重要である.

本研究では, 大阪湾における今後の麻痺性貝毒発生リスクを評価する目的で, 春期に本種が増殖し, 麻痺性貝毒による二枚貝の毒化が確認された2006年, および2007年にシスト調査を行った結果について報告する.

## 材料と方法

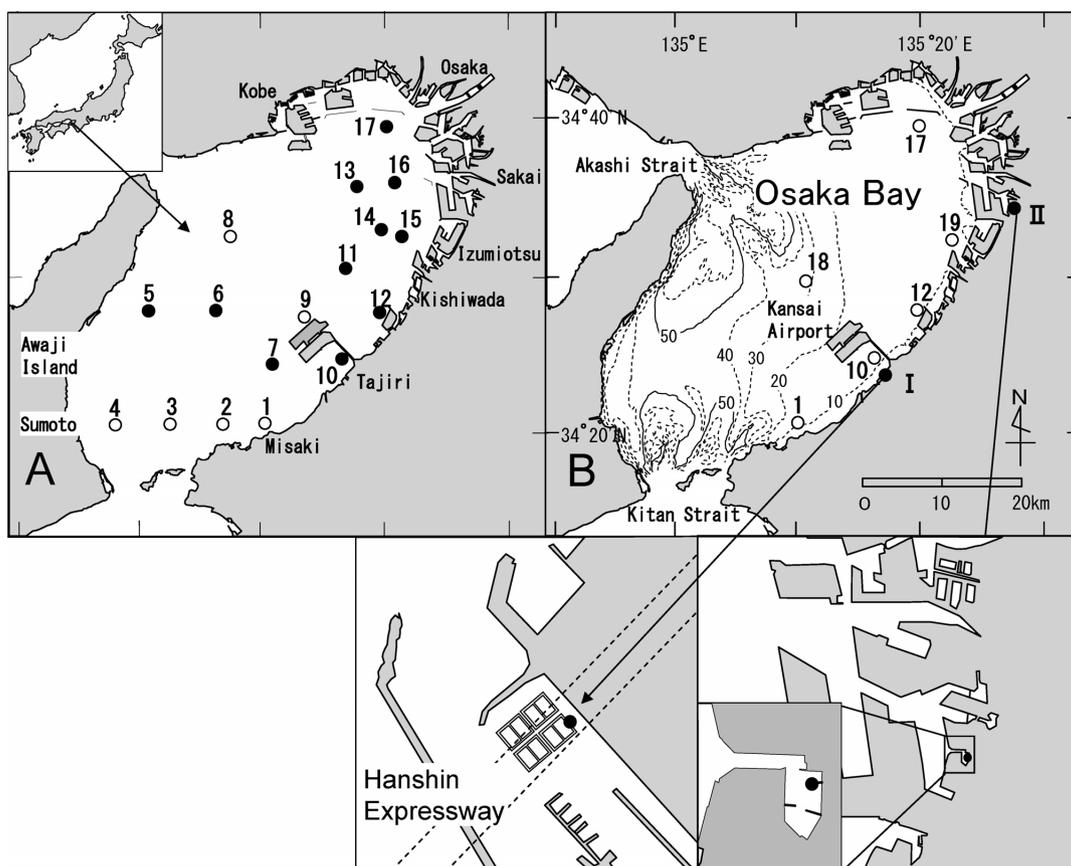
### 2006年シスト調査

調査は, 10月24~25日に, Fig. 1-Aに示した大阪湾内の17定点において, 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所調査船「しらふじ丸」(138トン)によって行った. 各定点においてG.S.型表層採泥器(アシュラ; 離合社)もしくはスミスマッキンタイヤ採泥器(採泥面積 $0.1\text{m}^2$ )を用いて海底泥試料を採取した. G. S. 型表層採泥器では1~3本の各コアの表面から1cm深までの泥を,

スミスマッキンタイヤ採泥器では表層泥約1cmを薄くならざるように分取し, 不透明なプラスチック容器に入れ, 分析まで温度約 $10^\circ\text{C}$ の暗所に保存した.

### 2007年シスト調査

調査は5月18日および10月17日にFig. 1-Bに示した大阪湾東部海域の6定点において, 大阪府環境農林水産総合研究所調査船「おおさか」(28トン)によって行った. 採泥はスミスマッキンタイヤ採泥器(採泥面積 $0.1\text{m}^2$ )を用い, 採取した海底泥は表層泥を薄くならざるように分取した. また漁港内の調査として, 2007年春期に赤潮の発生が確認された(山本ほか, 投稿中)2漁港(田尻漁港, 堺出島漁港; Fig. 1-B I, II)において10月19日に採泥を行った. 田尻漁港では遊漁用いけすの筏から, 堺出島漁港では棧橋に停泊している遊漁船の船縁から, KK式柱状採泥器(木俣ほか, 1960)を用いて海底泥試料を1~3本採集した. 各コアの表面から1cm深までの泥をそれぞれ分取してあわせたものを試料に供した. 各試料は不透明なプラスチック容器に入れ, 分析まで温度約 $10^\circ\text{C}$ の暗所に保存した. 調査船から採取した泥については, 泥分率( $<63\mu\text{m}$ の粒子の重量%)の測定も併せて行った.



**Figure 1.** Location of the sampling stations for bottom sediment in Osaka Bay. A: stations in 2006, sampling by G. S. type core sampler (closed circle) and by Smith-McIntyre bottom sampler (open circle). B: stations in 2007, a: Tajiri fishing port, b: Sakai-dejima fishing port.

## シストの計数

シストの計数は、Yamaguchi et al. (1995) によって開発された primuline による蛍光染色と落射蛍光顕微鏡を用いた直接計数法によった。すなわち、湿泥 5g をふるい分けし、20–150  $\mu\text{m}$  画分を得た後、グルタルアルデヒドで固定、メタノールで処理を行い、primuline 溶液で染色した。さらに蒸留水で洗浄後、10 ml に定容したものから 0.1 ml を分取して蛍光顕微鏡下で観察した。本法で染色した *Alexandrium* 属シストは B 肋起（青色肋起）下で黄緑色の蛍光を発する (Yamaguchi et al., 1995)。蛍光が認められたシストのうち *A. tamarense* と *A. catenella* に特徴的な形状である長楕円形のシストのみについて計数を行い、各試料について 3 回の計数を繰り返し、平均値と標準偏差を求めた。2006 年については計数結果のばらつきが大きかったため同様の操作を再度行い、計 6 回の平均とした。*Alexandrium tamarense* のシストと *A. catenella* のシストは酷似しており、長径に若干の違いはあるものの (Itakura and Yamaguchi, 2005)、形態的には区別できないとされる (Fukuyo, 1985)。本報告では底泥中シストの培養法等による種同定を行っていないため、*A. tamarense* と *A. catenella* をあわせて扱った（以下、*Alexandrium* シストとする）。得られた値は底泥湿重あたりの数値となるため、Kamiyama (1996) に従い泥の比重を測定し、単位体積あたりのシスト量を求めた。

## 遊泳細胞分布調査

2007 年における *A. tamarense* 遊泳細胞の出現状況については他の学術誌に報告予定であるため、本報では 2006 年の出現状況についてのみ報告する。

*Alexandrium tamarense* 遊泳細胞の分布の変化状況を調べるため、Fig. 2 に示した 20 点 (Stns. 1–5, 7–14, 17–23)、もしくは 14 点 (Stns. 1, 7, 9–14, 17, 19–21, 24, 25) において、2006 年 1 月 31 日から 4 月 17 日まで月 2 回、大阪府環境農林水産総合研究所調査船「おおさか」によって定期調査を行い、遊泳細胞を計数した。さらに *A. tamarense* の出現状況に応じて陸上からの調査、および臨時の定点調査を加え、計 9 回の調査を行った。*Alexandrium tamarense* 遊泳細胞の密度は、表層水を現場でバケツ採水したものを実験室に持ち帰り、1 ml 中の細胞数を生物顕微鏡下で直接計数した。*A. tamarense* の計数には、原則として固定前の海水を用いたが、細胞数が多い場合には 25% グルタルアルデヒド水溶液を全体量の 10% になるように加えて固定したサンプルを用いた。遊泳細胞は Calcofluor white で染色したものについて蛍光顕微鏡下で鏡板観察を行い、第一頂板の腹孔 (ventral pore) の確認により *A. tamarense* と同定した。

## 結果

2006 年、2007 年の *Alexandrium* シスト分布状況

2006 年の *Alexandrium* シストの分布状況を Fig. 3 に示した。*Alexandrium* シストは調査を行った 17 定点すべてで確認さ

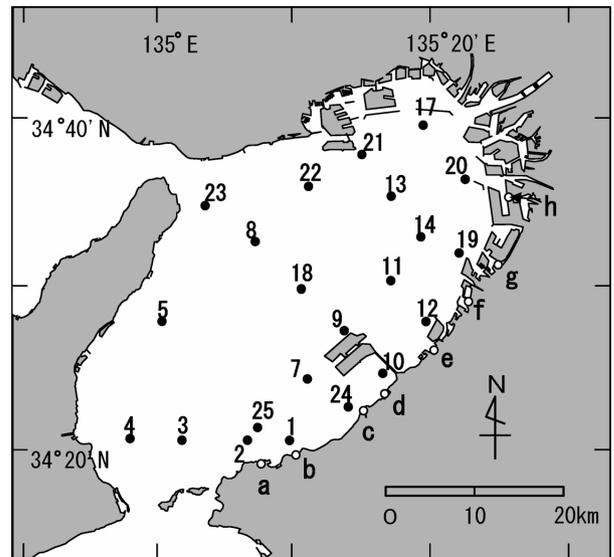


Figure 2. Location of the sampling stations for motile cells of *Alexandrium tamarense* in Osaka Bay. Stns. 1–5, 7–14, 17–25: sampling stations by research vessel, Stns. a–h: sampling sites along the coast.

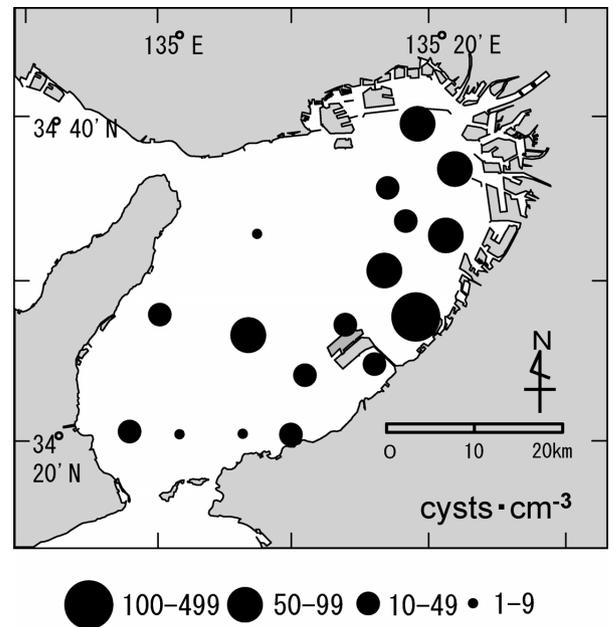
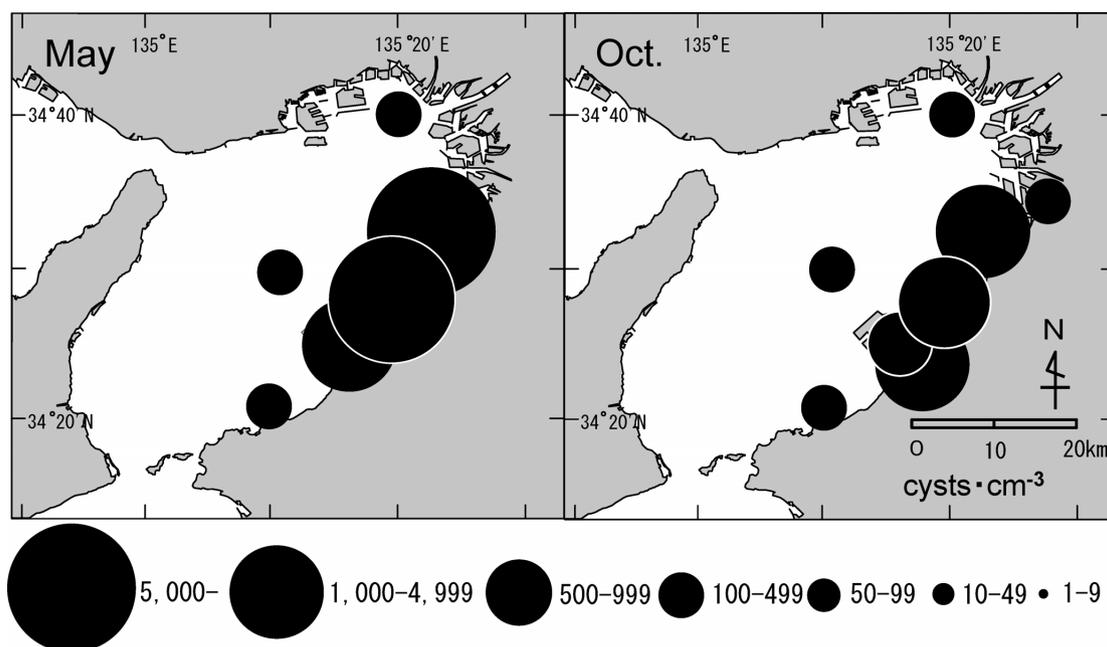


Figure 3. Distribution and abundance of *Alexandrium* (*Alexandrium tamarense* and *A. catenella*) resting cysts in Osaka Bay in October, 2006.

れた。最も密度が高かったのは中部沿岸の Stn. 12 で  $112 \pm 28$  (平均値  $\pm$  標準偏差, 以下同)  $\text{cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$  であった。分布の中心は関西国際空港（以下関空と称する）以北の東部沿岸域にみられ、さらに明石海峡と紀淡海峡の中間に位置する関空から淡路島にかけての定点 (Stns. 5, 6) でも比較的高密度（それぞれ  $29 \pm 24$   $\text{cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $55 \pm 26$   $\text{cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）



**Figure 4.** Distribution and abundance of *Alexandrium* (*Alexandrium tamarense* and *A. catenella*) resting cysts in Osaka Bay in May, 2007 (left) and October 2007 (right).

で観察された。一方、関空以南の沿岸部から紀淡海峡の定点 (Stns. 1~4, 7, 10), 明石海峡に近い定点 (Stn. 8) では分布密度は低く, 両海峡部の定点では  $2 \pm 5 \sim 13 \pm 8$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$  と特に少なかった。

2007年における海域および漁港における *Alexandrium* シストの分布状況を Fig. 4に示した。 *Alexandrium* シストは5月, 10月とも調査を行った全ての定点で確認された。5月のシストは分布密度が大きく偏っており, 大阪府中部の沿岸域で高密度に確認された。最も密度が高かったのは岸和田市沿岸の Stn. 12で  $5,683 \pm 631$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ であった。また, 泉大津市沿岸の Stn. 19で  $5,277 \pm 157$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ , 関空岸側の Stn. 10でも  $1,230 \pm 46$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ と沿岸部の多くの定点で  $10^3$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$  を超える密度となった。また, 他の定点 (Stns. 1, 17, 18) でもそれぞれ  $355 \pm 131$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ ,  $407 \pm 78$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ ,  $291 \pm 125$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$  と  $10^2$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$  を超える密度で存在し, 上記の定点と比べると少ないものの, 2006年のレベルを大きく上回っていた。10月のシストも海域における分布傾向は5月とほぼ同様であったが, 全体的に密度は低下していた ( $190 \pm 54 \sim 3,275 \pm 534$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ )。また, 各漁港における調査でも *Alexandrium* シストは多く確認され, 南部の田尻漁港 (Fig. 1-I) で  $2,115 \pm 177$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ , 北部の堺出島漁港 (Fig. 1-II) では  $330 \pm 48$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$  といずれの調査でも  $10^2$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$  を超えるレベルであった。

Table 1に2006年, 2007年に共通する定点における *Alexandrium* シストの密度の変化を示した。ただし, 2007年の Stn. 18, Stn. 19については2006年と共通する定点がなかったため, 位置が最も近い Stn. 9, Stn. 15と比較した。

**Table 1.** Resting cyst densities (cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ ) of *Alexandrium tamarense* and *A. catenella* in October 2006, May 2007 and October 2007.

St.	Oct. 2006	May 2007	Oct. 2007
1	27	355	289
10	31	1230	628
9	34		
18		291	190
12	58	5277	3275
15	112		
19		5683	2025
17	65	407	289

2006年から2007年5月には, 比較したすべての定点でシスト密度は増加しており, 特に岸和田市沿岸の Stn. 12では2006年比で90.5倍の密度となっていた。他にも Stn. 10で40.2倍, Stn. 19で50.6倍と増加傾向は中部の沿岸域で顕著であった。一方, 2007年5月から10月についてはすべての定点でシスト密度は減少していた。特に5月に最も密度が高かった Stn. 12では  $2,025 \pm 343$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ であり, 5月調査時の35.6%と大きく減少していた。また, Stn. 19では  $3,275$  cysts  $\cdot$  cm $^{-3}$ で, 5月調査時の6割程度となっていたが, Stn. 12に比べると減少率は小さく, 10月調査において最も高密度の定点となっていた。

#### 2006年の *A. tamarense* 遊泳細胞の出現状況

2006年の *A. tamarense* 遊泳細胞の水平分布の推移を Fig. 5

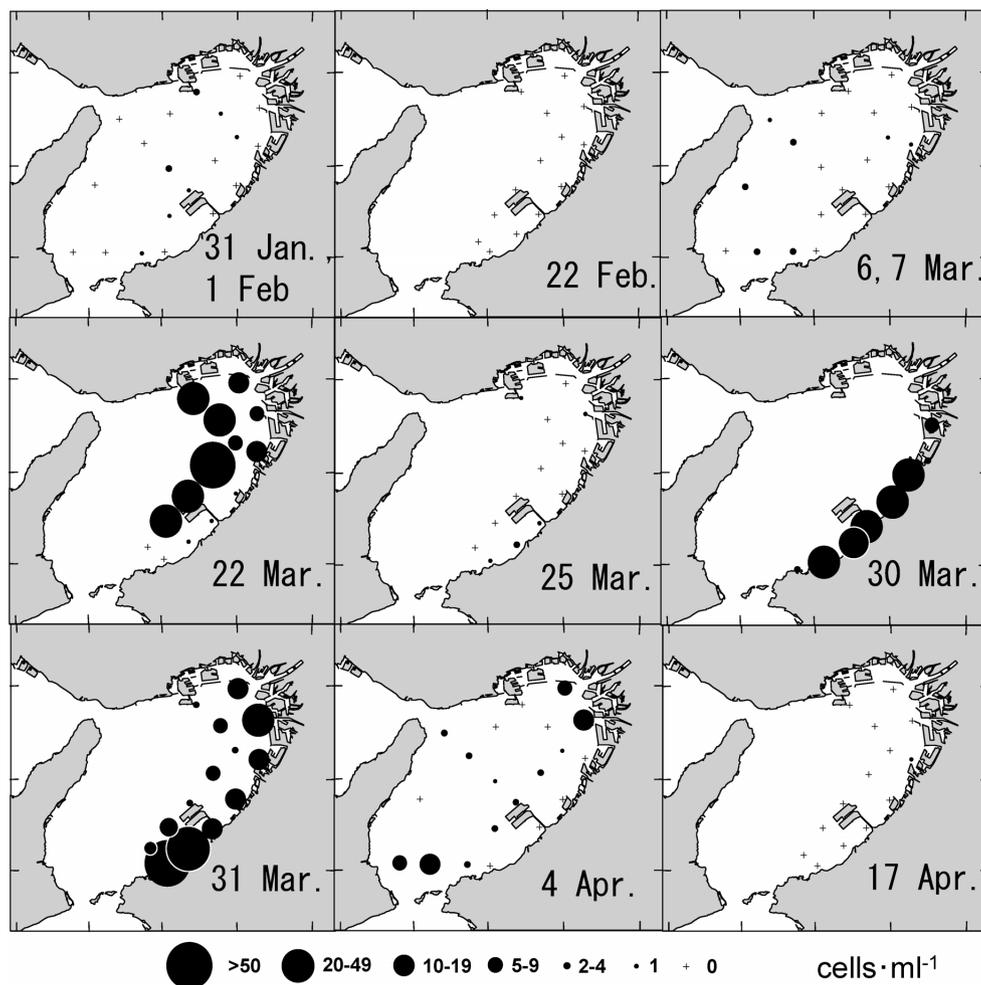


Figure 5. Change in distributions of cell density of *Alexandrium tamarense* in surface water during the period from January 31 to April 17 in 2006.

に示した。遊泳細胞が初めて確認されたのは1月31日～2月1日の調査時で、湾中央部を通り南北に帯状に出現していた (Fig. 2: Stns. 2, 7, 9, 13, 14, 18, 21)。本格的な増殖は3月に入ってからで、3月6～7日の調査では西部海域を中心 (Stns. 2, 3, 5, 8, 23) に、一部東部沿岸域 (Stns. 14, 19) でも最高4 cells·ml<sup>-1</sup>で確認された。3月22日には遊泳細胞はさらに増加し、関空沖のStn. 11で最高83 cells·ml<sup>-1</sup>で確認された他、6定点で10 cells·ml<sup>-1</sup>を超える密度で存在した。また分布範囲も拡大し、南部沿岸を除く東部海域全ての定点で確認された。3月25日には、最大2 cells·ml<sup>-1</sup> (Stn. 24) と一旦減少したかに見えたが、30日に沿岸域で陸上からの採水を行ったところ、東部沿岸の中部から南部にかけて最高37 cells·ml<sup>-1</sup> (Stn. c) と高い密度で確認された。そのため、31日に沖合域を調査した結果、南部海域および湾奥部を中心に東部の観測点すべてで遊泳細胞が確認され、最高細胞密度も58 cells·ml<sup>-1</sup> (Stn. 1) と高密度で分布していた。4月に入ると広い範囲で分布は見られるものの細胞密

度は減少し、4月4日の調査では南部の海峡部や湾奥海域を中心に最高細胞密度12 cells·ml<sup>-1</sup> (Stn. 20)、17日には泉大津市沿岸のStn. 19で1 cells·ml<sup>-1</sup>となった後、確認されなくなった。

#### 遊泳細胞の出現および泥分率とシスト密度の関係

Fig. 6に2006年、2007年のシスト調査を行った定点における遊泳細胞の最高細胞密度とシスト密度の関係を示した。2006年、2007年とも最高細胞密度の高い定点ではシスト密度も高い傾向であった。しかし一方で、高密度で遊泳細胞が観察されるにもかかわらず、シスト密度が低い定点もみられた。

Fig. 7に2007年の調査におけるシスト密度と泥分率 (粒径63 μm以下) の関係を示した。図からは概ね泥分率の高いところでシスト密度が高い傾向が窺え、シストの分布密度が低かったStn. 1, Stn. 18などでは泥分率も低い傾向であった。また、5月よりも10月における関係がより明瞭であった。ただし、湾奥のStn. 17では泥分率が高いにもか

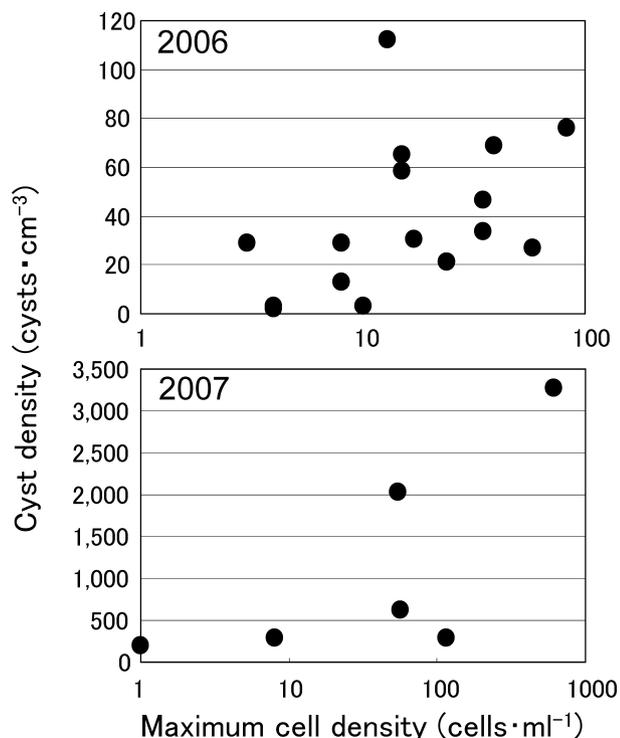


Figure 6. Relationships between the maximum cell density and the density of resting cysts in each sampling station.

かわらず2006年, 2007年ともシスト密度は低かった。

### 考察

#### 大阪湾における *Alexandrium* シストの分布特性

山口ほか (1995) が広島湾で行ったシスト調査の報告では *Alexandrium* シストの高分布密度域は遊泳細胞が高密度で確認された海域とが一致する傾向があるとしており, 他の海域においても同様の傾向があったことが報告されている (竹内ほか, 1990; 尊田ほか, 2006). 大阪湾における2006年, 2007年のシスト分布では関空以北の東部沿岸域, 特に中北部で高密度の分布域がみられた点で共通していた. この海域は両年のプランクトン調査でも遊泳細胞が多く確認された海域であり, 遊泳細胞の出現においても主出現域の一つであるといえる. 最高細胞密度とシスト密度の関係でも概ね正の傾向であったが, 今回の結果では増殖の後半で比較的高密度に遊泳細胞が出現する南部沿岸域や湾最奥部で高密度で遊泳細胞が観察されるにもかかわらず, 中北部沿岸に比べシスト密度は低い傾向がみられた. 福代 (1997) は *A. tamarense* は栄養細胞が盛んに増殖している時期に遊泳接合子が形成され, しかもその形成された遊泳接合子のうちでも初期に形成されたものだけがシストになると報告しており, 後半に高密度域が確認された南部海域ではシストの形成が少なかった可能性もある. しかし, 現場海域で個体群が盛んに増殖している時期にシストの形成は

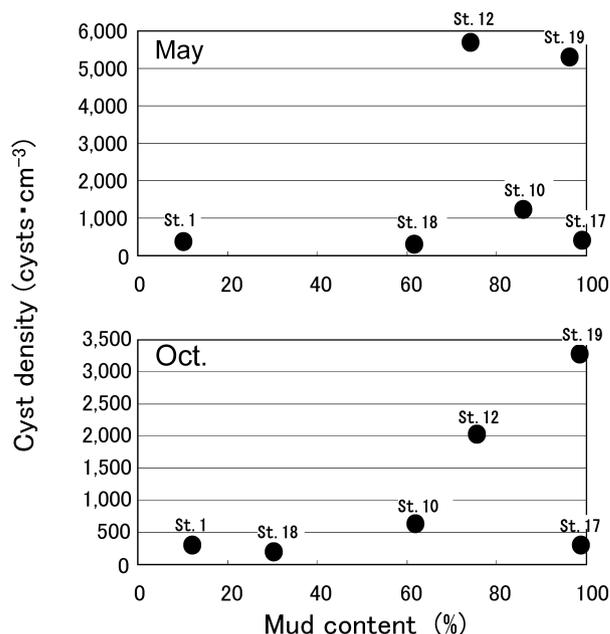


Figure 7. Relationships between the abundance of *Alexandrium* (*Alexandrium tamarense* and *A. catenella*) resting cysts and the mud contents of sediments in May 2007(upper) and October 2007(lower).

ほとんどなく, 増殖のピークから減少期に集中して形成されるという報告もある (Ichimi et al., 2001). Ichimi et al. (2001) ではシストが形成された水温が7.5~9°Cと低く, シストの形成要因が海域により異なる可能性もあることから, 大阪湾東部海域におけるシストの形成機構については更なる検討が必要であろう.

シストの分布に影響を及ぼすもう一つの要因としては流動が考えられる. シストは運動性がないため, 海底泥と同じく流れの影響を受け, 停滞性の高い水域に高密度域が形成される (Tyler et al., 1982). 山口ほか (1995) は, シストの高密度分布域がプランクトンが高密度で確認された海域と一致するという特徴とともに, 泥分率の高いところでシスト密度が高い傾向があることを示しており, 同様の結果は宇和海沿岸や三河湾, 伊勢湾における調査でも見られている (山下・小泉, 2001; 石川ほか, 2007). 大阪湾における底質の分布は, 城 (1986) によると神戸港を通る南北線の東側の海域が泥分率95%以上で, 大阪湾で卓越する恒流 (藤原ほか, 1989) に沿って湾西部の中央海域が泥分率90%以上の泥質海域となっており, 2006年のシスト高密度分布域は概ねこの泥分率の高い海域と一致していた. 大阪湾では1993年にも Yamaguchi et al. (1996) によりシスト調査が行われているが, その分布状況を見ると, 東部沿岸で密度が高く, 海峡部で低いという傾向で2006年の分布傾向と酷似しており, 1993年のシスト分布や2006年調査のシスト分布は, 大阪湾における安定的な分布パターンとし

でもとらえることができよう。2007年は分布の偏りが大きかったが泥分率との関係は5月より10月の方がより明瞭であった。長尾ら(2001)は広島湾において風による底泥からの巻き上がりを観測するとともに、モデルによる再現を行った結果、海面近くまで底泥が巻き上げられていることを示した。また、高杉ら(1998)は台風や冬季の季節風により底泥のシストが再懸濁された場合、風による鉛直循環流により他の水域へと輸送・拡散され、潮流の微弱な領域で再び沈降、堆積することを報告している。2007年は、近畿地方にも計4個の台風の接近が観測されていることから(気象庁ホームページ、<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/accession/kinki.html>)、増殖直後の5月には遊泳細胞の高密度出現域にシストが集中していたものが、時間の経過とともに、風による海底の擾乱などにより泥分率の高い停滞域に分布が安定した可能性が推察された。その一方で、湾奥の定点(Stn. 17)では泥分率が5月、10月とも100%に近いにもかかわらずシストの密度が低いことが特徴的であった。2007年においては、湾奥に流入する淀川河口内で赤潮が確認された(山本ほか、投稿中)ものの、シストの高密度な分布が確認されたStns. 12, 19等と比較してシストの分布密度は明らかに低かった。三河湾、伊勢湾の例でも泥分率が高いからといって必ずしも *Alexandrium* 属のシスト密度が高い値であったというわけではなかったことを示し、水柱中での栄養細胞の有性生殖によるシストの供給機構が同様に重要と考察している(石川ほか、2007)。今回の結果では湾奥では増殖前期にも遊泳細胞は多かったことから、シストが比較的少なかった理由として、シストは形成したものの流れ等の作用により沈降するまでに他海域に移動した、もしくは湾奥では遊泳細胞は多いもののシストが形成されなかった、などの可能性が推測される。大阪湾奥部の流れとしては湾奥に時計回りの流れとして存在する西宮沖環流や、湾奥から東岸沿いに南下する東岸恒流帯があり(藤原ほか、1989)、淀川から流れ出た河川水は河口から南の方向に舌状に流出することが知られている。大阪湾東岸の中北部海域で高い密度のシストが観察されたことは、このような恒流の状況にも合致することから、同海域では増殖した遊泳細胞からだけでなく、湾奥海域で形成されたシストも流され、沈降した可能性が考えられる。

#### 栄養細胞の高密度発生域とシスト分布の差異

2007年春期は大阪湾で過去最大規模に *A. tamarense* が増殖し、本種ではまれであるとされる赤潮の形成も確認された(山本ほか、投稿中)。今回調査を行った2漁港はともに赤潮が確認された漁港である。これらの漁港におけるシストの出現状況は、田尻漁港では海域の密度よりも一桁高く、堺出島漁港では逆に海域の密度よりも一桁低かった。一方遊泳細胞では、両漁港ともに  $10^4$  cells·ml<sup>-1</sup> の密度で赤潮が確認されていた。海域の定点における細胞密度は最高  $10^2$

cells·ml<sup>-1</sup> のオーダーであり(山本ほか、投稿中)、漁港内では周辺海域に比べ2~3桁高い密度の遊泳細胞が確認されていたことがわかる。遊泳細胞の出現状況とシストの分布状況が異なる理由については先にも考察したが、港の中においても港内からの流出と、水柱中での栄養細胞の有性生殖によるシストの供給機構が問題になると思われる。堺出島漁港は大阪湾堺泉北港の最奥部に位置しており、夏期には貧酸素化するなど海水交換の悪い港として知られ、田尻漁港より量的に多くシストが流出したとは考えにくい。堺出島漁港においては、増殖後期に降雨とともに急速に消滅したことが観察されており(山本ほか、投稿中)、シストの形成が順調に進行しなかった可能性があることから、セディメントトラップなどの調査により漁港ごとのシスト形成過程を明らかにする必要がある。

赤潮研究において、種場や初期発生域と初期個体群の出現域を究明することは極めて重要な課題と考えられ、シストの分布や量的変動の調査は、それらを明らかにするアプローチの一つとして各地で行われてきた。竹内(1994)は田辺湾における *A. catenella* の一連の研究の中で、シストの分布密度が高かった東部海域の内ノ浦で停滞域を形成しやすいこと、栄養細胞も高密度に出現することなどから、*A. catenella* の種場かつ増殖域と推定した。大阪湾においてはこのような小湾は存在しないが、沿岸部では大規模な埋め立てや人工島建設等により、閉鎖性水域の中に流動が低下したさらなる閉鎖水域が形成されている。今回調査を行った堺出島漁港はその典型的な水域と考えられ、*A. tamarense* 以外にも恒常的に赤潮が発生しているような状況が見られている。三重県五ヶ所湾での *Karenia (Gymnodinium) mikimotoi* の増殖においては、初期出現が見られる海域は海水交換が他の場所に比較して顕著に低く、その理由として湾外への流出による細胞の損出が少なく、より早く所定の細胞密度に到達するためと考察している(Uchida et al., 1998)。田尻漁港に比べ、より閉鎖性の高い堺出島漁港でシストの密度が低かった原因は不明であるが、高いシスト密度が確認されたこと、2007年に赤潮の発生が確認された海域が概ねこのような港湾域であったことを考えると、増殖に適した水域であり、今後これらの水域が大阪湾における種場や初期発生域として機能する可能性は高いと推察される。

#### ブルーム非発生期間におけるシスト密度の減少及び分布変動要因

2007年調査では5月および10月の2回定点調査を行った結果、すべての定点で5月に比べ、10月のシスト密度が低下している状況が観察された。他海域におけるシスト密度の経時変化を調査した例を見ると、広島湾では特に顕著な季節変動は認められないが3~4月にシスト密度の値が低下し、極小値を示していた(板倉・山口、1999)。また、三河湾では水温下降期の12~1月と上昇期の3~4月にシスト

密度の増減が観察されている (尊田ほか, 2006). これらは, その時期から発芽により影響を受けているものと考察されているが, 今回の減少は10月までのものであり時期的には異なっている. 前述の2海域の例では同時に天然海域から採集された *A. tamarensis* シストの発芽率の季節変動を調査しているが, 両海域とも11月までの発芽率は極めて低い点で共通している. *A. tamarensis* は内因性休眠期をもつため一度シストを形成すると発芽能を獲得するのに現場水温で約半年かかるとされる (Anderson et al., 1987; 板倉・山口, 2001). 2007年の大阪湾における増殖のピークは4月下旬から5月上旬であり (山本ほか, 投稿中), 消滅期が5月中旬までと推測されることから, シスト調査が行われた10月においては内因性休眠期間内にあったと推定される. また, *A. tamarensis* は約15°C以下の水温で比較的高い発芽率を示す一方で, 15°C以上の水温ではほとんど発芽しない (板倉・山口, 1999). 大阪湾の日別平均水温データでは底層で水温が15°Cを下回るのは12月以降である (中嶋, 1994) ことから, この時期までの発芽によるシストの減少は少ないと考えられる. 前述の通り, 調査が行われた10月までの間には台風等の風による輸送・拡散があったと考えられる. さらに, 大阪湾でシストが多く確認

された海域は, ほぼ周年底曳き網などの漁業が盛んに行われている海域でもある (辻野, 2002). これらのことから, 今回のシスト密度の減少は発芽によるものではなく, 海域の擾乱で巻き上げられたものが発散したことや漁業による耕耘作用等で海底泥が鉛直的に希釈されたものと推察される. また, 泉大津市前の Stn. 12 で周辺に比べ減少率が低かったのも, 発散する一方で, 流れによる湾奥からの補給もあったためと推測される.

#### 大阪湾における *Alexandrium* シストの経年変化

Yamaguchi et al. (1996) による1993年のシスト調査では  $0.5 \sim 58 \text{ cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$  と同時に行われた播磨灘の値 ( $2 \sim 869 \text{ cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) と比べても低い値であり, 大阪湾の2006年のシスト密度は1993年の密度と比較して最大値で約2倍であったことが確認された. さらに2007年においては, 2006年と比べても共通するすべての定点でシスト密度がさらに大きく増加していた. ここで, 1993~2006年の増加要因について考察するため, Fig. 8に2002年以降の *A. tamarensis* および *A. catenella* 遊泳細胞の年別出現状況を示した. 大阪湾では2002年に同海域で初となる規制値を超える貝毒が確認されており, このとき, *A. tamarensis* が  $37 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$  まで増殖したことが報告されている (山本,

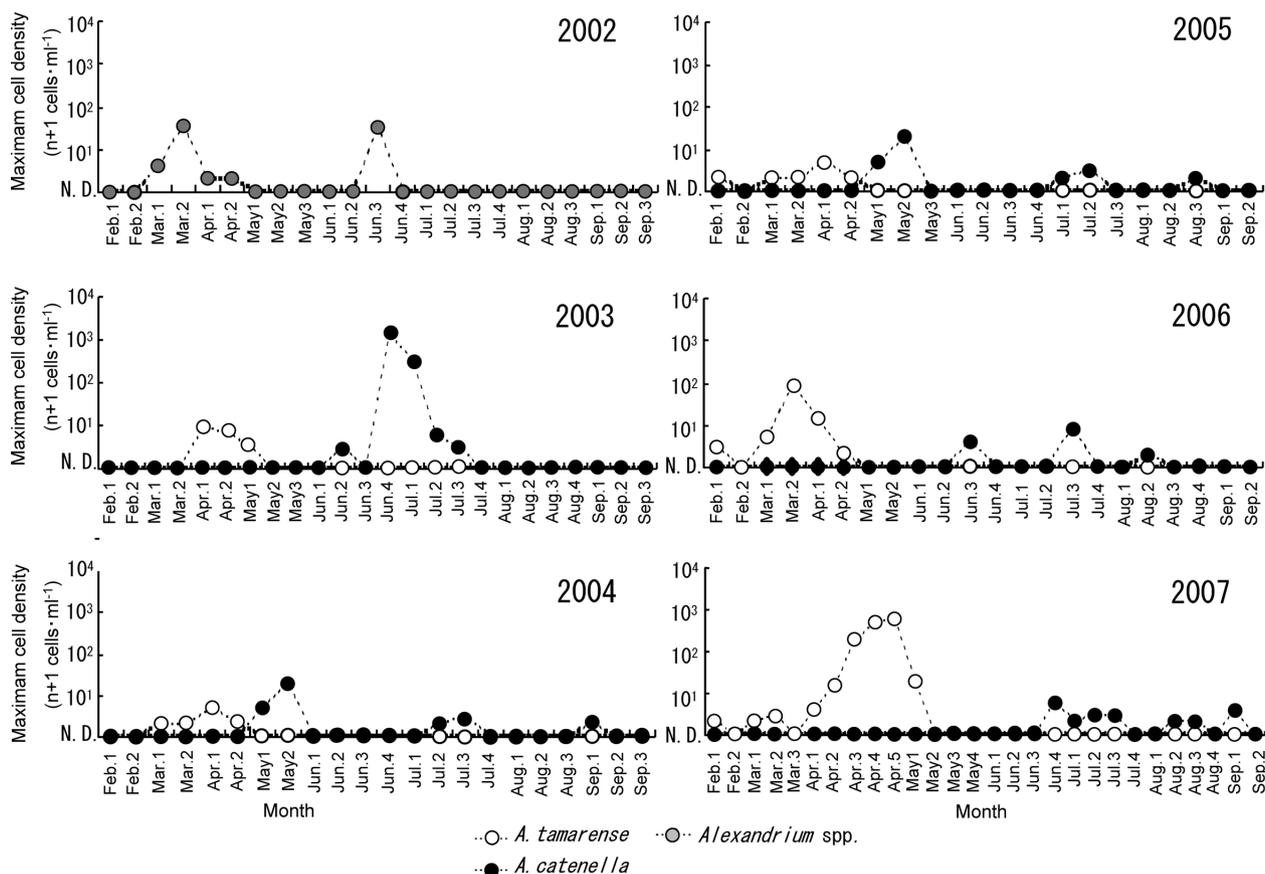


Figure 8. Changes in maximum cell densities of *Alexandrium* spp. from February to September in 2002–2007 in Osaka Bay. The cell densities were examined 2–5 times per month.

2004). また, 2003年には *A. catenella* の赤潮が最大  $1,290 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$  の密度で発生し, 2004年5月に行った採泥調査では, 赤潮が確認された1定点 (Fig. 1A-Stn. 12) のみの結果ではあるが,  $753 \text{ cysts} \cdot \text{g}^{-1} \text{ wet sediment}$  のシストが確認されている (山口未発表). 2004年, 2005年は両種とも小規模な発生にとどまり, *A. tamarensense* がともに最大  $4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ , *A. catenella* がそれぞれ最大  $17, 13 \text{ cell} \cdot \text{ml}^{-1}$  であった. さらに今回報告したとおり2006年春期は *A. tamarensense* が  $83 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$  まで増殖した一方で *A. catenella* の増殖は  $8 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$  に留まった. なお, 2002年以前の出現については散発的に確認された模様であるがほとんど記録には残っておらず, 大規模なものではなかったと推測される. このように, シストの調査が行われなかった期間も *A. tamarensense*, *A. catenella* の出現は確認されており, 表層泥では物理的攪乱等により鉛直的に混合されていると考えられることから2006年の調査で確認された *Alexandrium* シストはこれらの履歴を反映しているものと推察される. ただし, 大阪湾の堆積速度は  $0.24 \sim 1.2 \text{ cm} \cdot \text{year}^{-1}$  と見積もられており (城, 1986), 今回の調査では表層1 cmまでの試料を用いたことから, 2006年に新たに形成された *A. tamarensense* のシストを最も反映しているものとしてよいだろう. また, 2007年は *A. tamarensense* の増殖は過去最大規模の大きいものであった一方で, *A. catenella* の増殖は最大  $5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$  と小規模であったことから, 増加したシストの多くが同年に形成された *A. tamarensense* のシストであることが推察される.

以上のように大阪湾では2002年~2006年の *A. tamarensense* および *A. catenella* の増殖, および2007年の *A. tamarensense* による赤潮形成により, 多くのシストが形成されたことが明らかになった. 広島湾では1992年に *A. tamarensense* によるカキの麻痺性貝毒が初めて問題 (Asakawa et al., 1993) となって以降, ほぼ毎年のように春期に本種による麻痺性貝毒が問題となっていたが, 1993年に行われた調査では *Alexandrium* 属のシストが  $10^3 \text{ cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$  を超える密度となった点も見られており, 1987年に行われた調査と比べて6年間で約30倍のシスト密度が増加したことが報告されている (山口ほか, 1995). この増加についてはサンプルの計数方法の違いにより過大評価の可能性も指摘されているが, 今回比較した結果はすべて primuline による蛍光染色法を用いた計数によるものであり, 大阪湾での *Alexandrium* シストが最近増加しているという解釈は妥当なものと思われる. また, 三河湾, 伊勢湾においても同様に  $10^3 \text{ cysts} \cdot \text{cm}^{-3}$  を超える密度と, 過去の調査に比べ最大10倍以上の増加が確認されており (石川ほか, 2007), 近年, 西日本を中心とする麻痺性貝毒の広域化が問題になっている (Imai et al., 2006) のに比例してシストの増加傾向も各地で顕著になってきていると考えられる. 今回の大阪湾の結果はこれらの海域に匹敵する増加率であり, 他の海域と同様, 大阪湾における今後の麻痺性貝毒の発生リスクは増大して

いることが明らかにされた. *Alexandrium tamarensense* のシストは海底泥中で長期間生存可能で, 寿命は2~10年と推定されており (Keafer et al., 1992), 今後しばらくは *A. tamarensense* の動向に注視しモニタリングを行う必要がある. 広島湾の研究においては底泥中のシストがすべて発芽し, 放出されても現場で確認される遊泳細胞の密度より1~2桁低く, ブルームの形成には栄養細胞の増殖が重要と考察されており (樽谷, 1999), シストの存在量が直ちに次の年の発生量に結びつくわけではない. しかし, 本研究により大阪湾におけるシストの分布傾向は比較的安定して東部海域で高く, また栄養細胞の出現傾向とも概ね一致していたことが明らかになった. このことから, 麻痺性貝毒発生リスクは東部海域でより高いことが推察され, モニタリングに際してはこれらの海域を重点的に調査することで, 効率的に麻痺性貝毒の発生に備えることが可能になると考えられる.

## 謝辞

本研究を行うにあたり, ご協力頂いた独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所調査船「しらふじ丸」, および大阪府環境農林水産総合研究所調査船「おおさか」の乗組員各位に心から御礼を申し上げます. 大阪府環境農林水産総合研究所水産技術センター職員の方々には, 本報告をまとめるにあたり有益なご助言と激励をいただきました. ここに記して深く感謝の意を表します.

## 引用文献

- Anderson, D. M., C. D. Taylor and E. V. Armbrust (1987) The effect of darkness and anaerobiosis on dinoflagellate cyst germination. *Limnol. Oceanogr.*, **32**, 340-351.
- Anderson, D. M. and D. Wall (1978) Potential importance of benthic cysts of *Gonyaulax tamarensis* and *G. excavata* in initiating toxic dinoflagellate blooms. *J. Phycol.*, **14**, 224-234.
- Asakawa, M., K. Miyazawa, H. Takayama and T. Noguchi (1993) Dinoflagellate *Alexandrium tamarensense* as the source of Paralytic Shellfish Poison (PSP) contaminated in bivalves from Hiroshima Bay, Hiroshima Prefecture, Japan. *Toxicon*, **33**, 691-697.
- 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫 (1989) 大阪湾の恒流と潮流・渦. 海岸工学論文集, **36**, 209-213.
- Fukuyo, Y. (1985) Morphology of *Protogonyaulax tamarensis* (Lebour) Taylor and *Protogonyaulax catenella* (Whedon and Kofoid) Taylor from Japanese coastal waters. *Bull. Mar. Sci.*, **37**, 529-537.
- 福代康夫 (1997) 赤潮種と発生環境—アレキサンドリウム—. 「赤潮の科学」岡市友利編, 恒星社厚生閣, 東京, 278-282.
- 福代康夫 (2000) 有毒プランクトンによる漁業被害の現状と研究の問題点. 「有害・有毒赤潮の発生と予知・予防」(水産研究叢書 48), 日本水産資源保護協会, 東京, 18-28.
- 濱野米一, 川津健太郎, 塚本定三 (2002) 大阪湾における麻痺性貝毒による二枚貝の毒化. 大阪府立公衆衛生研究所報告, **40**, 11-18.
- Ichimi, K., M. Yamazaki, Y. Okumura and T. Suzuki (2001) The growth and cyst formation of a toxic dinoflagellate, *Alexandrium tamarensense*, at low water temperatures in northeastern Japan. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **261**, 17-29.

- Imai, I., M. Yamaguchi and Y. Hori (2006) Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Benthos Res.*, **1**, 71–84.
- 石川 輝・服部真由子・宮間秀樹・今井一郎 (2007) 伊勢湾および三河湾の海底泥表層における *Alexandrium* 属シストの現存量と分布. *水産海洋研究*, **71**, 183–189.
- 板倉 茂 (2007) 平成18年における貝毒発生状況と原因プランクトンの特徴. 漁場環境保全関係試験研究推進会議赤潮・貝毒部会議事要録, 平成18年度, 瀬戸内海区水産研究所, 15–20.
- 板倉 茂・山口峰生 (1999) 広島湾における *Alexandrium tamarense* シストの存在密度と発芽率の季節変動. パイオニア特別研究麻痺性有毒プランクトンの発生予察手法の開発, 平成10年度研究報告, 瀬戸内海区水産研究所, 12–17.
- 板倉 茂・山口峰生 (2001) 栄養細胞の増殖特性とシストの休眠・発芽生理の解明. パイオニア特別研究 麻痺性有毒プランクトンの発生予察手法の開発, 平成12年度推進評価会議資料, 瀬戸内海区水産研究所, 5–6.
- Itakura, S. and M. Yamaguchi (2005) Morphological and physiological differences between the cysts of *Alexandrium catenella* and *A. tamarense* (Dinophyceae) in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Biol. Ecol.*, **52**, 85–91.
- 城 久 (1986) 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について. *大阪水試研報*, **7**, 1–174.
- Kamiyama, T. (1996) Determination of the abundance of viable tintinnid cysts in marine sediments in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea of Japan, using a modified MPN method. *J. Plankton Res.*, **18**, 1253–1259.
- Keafer, B. A., K. O. Buesseler and D. M. Anderson (1992) Burial of living dinoflagellate cysts in estuarine and nearshore sediments. *Mar. Micropaleont.*, **20**, 147–161.
- 木俣正夫・河合 章・石田祐三郎 (1960) 海底泥土の採集法. *日本誌*, **26**, 1227–1230.
- 長井 敏・松山幸彦 (2008) 平成19年における貝毒発生状況と原因プランクトンの特徴. 漁場環境保全関係試験研究推進会議赤潮・貝毒部会議事要録, 平成19年度, 瀬戸内海区水産研究所, 13–18.
- 長尾正之・橋本英資・吉田みゆき・高杉由夫 (2001) 広島湾・呉湾における有毒プランクトンシストの発芽要因と海域攪乱. *海岸工学論文集*, **48**, 1081–1085.
- 中嶋昌紀 (1994) 大阪湾の水温年変動. 平成4年度大阪府立水産試験場事業報告, 23–28.
- 坂本節子・長崎慶三・松山幸彦・小谷祐一 (1999) 徳山湾に発生した *Alexandrium catenella* 赤潮による二枚貝の毒化—麻痺性貝毒の毒量および毒性分組成の比較—. *瀬戸内水研報*, **1**, 55–61.
- Shimada, H. and A. Miyazono (2005) Horizontal distribution of toxic *Alexandrium* spp. (Dinophyceae) resting cysts around Hokkaido, Japan. *Plankton Biol. Ecol.*, **52**, 76–84.
- 尊田佳子・石川雅章・松澤忠嗣 (2006) 三河湾における *Alexandrium tamarense* シストの堆積密度及び発芽率の季節変動について. *愛知水試研報*, **12**, 13–17.
- 高杉由夫・埜口 英昭・安田 秀一 (1998) 広島湾における風による鉛直循環流と底泥プランクトンシスト分布. *水産海洋研究*, **62**, 187–198.
- 高田久美代・山田圭一・小川博美 (2000) 広島湾海域における麻痺性貝毒原因プランクトン *Alexandrium catenella* の毒組成. 広島県保健環境センター研報, **8**, 1–5.
- 竹内照文 (1992) 主要赤潮種の増殖動態—田辺湾におけるアレキサンドリウムの増殖動態. *月刊海洋*, **24**, 17–24.
- 竹内照文 (1994) 和歌山県田辺湾における赤潮渦鞭毛藻 *Alexandrium catenella* の生態に関する研究. *和歌山県水試特別研報*, **2**, 1–88.
- 竹内照文・小久保友義・福代康夫 (1990) 田辺湾における *Alexandrium catenella* (Dinophyceae) の栄養細胞とシストの分布. *日本プランクトン学会報*, **37**, 157–165.
- 樽谷賢治 (1999) 有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* の増殖機構に関する生理生態学的研究. *瀬戸内水研報*, **1**, 63–96.
- 辻野耕實 (2002) 漁場の現状と変遷. 「大阪湾の海域環境と生物生産」(水産研究叢書49), 日本水産資源保護協会, 東京, 62–86.
- Tyler, M. A., D. W. Coats and D. M. Anderson (1982) Encystment in a dynamic environment: Deposition of dinoflagellate cysts by a frontal convergence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **7**, 163–178.
- Uchida, T., S. Toda, O. Nakamura, K. Abo, Y. Matsuyama and T. Honjo (1998) Initial site of *Gymnodinium mikimotoi* blooms in relation to the seawater exchange rate in Gokasho Bay, Japan. *Plankton Biol. Ecol.*, **45**, 129–137.
- 山口峰生・板倉 茂・今井一郎 (1995) 広島湾海底泥における有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* および *Alexandrium catenella* シストの現存量と水平・鉛直分布. *日本誌*, **61**, 700–706.
- Yamaguchi, M., S. Itakura, I. Imai and Y. Ishida (1995) A rapid and precise technique for enumeration of resting cysts of *Alexandrium* spp. (Dinophyceae) in natural sediments. *Phycologia*, **34**, 207–214.
- Yamaguchi, M., S. Itakura, K. Nagasaki and I. Imai (1996) Distribution and abundance of resting cysts of the toxic dinoflagellates *Alexandrium tamarense* and *A. catenella* in sediments of the eastern Seto Inland Sea, Japan. In: *Harmful and Toxic Algal Blooms*, eds. Yasumoto, T., Y. Oshima and Y. Fukuyo, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, 177–180.
- 山本圭吾 (2004) 2002年春期に大阪湾東部海域で発生した麻痺性貝毒について. *大阪水試研報*, **15**, 1–8.
- 山下亜純・小泉喜嗣 (2001) 宇和海沿岸域における有毒渦鞭毛藻赤潮の発生記録と *Alexandrium catenella* 及び *Alexandrium tamarense* シストの分布. *愛媛水試研報*, **9**, 35–40.