

## 大阪湾・紀伊水道における植物プランクトン群集のサイズ組成\*

多田 邦尚\*\*・一見 和彦\*\*\*†・橋本 俊也†

### Size Fractionations of Phytoplankton Community in Osaka Bay and Kii Channel

Kuninao Tada, Kazuhiko Ichimi and Toshiya Hashimoto

大阪湾から紀伊水道にかけての海域において, 1993年10月, 1994年1月, 4月および6月の4回の航海において, 植物プランクトン群集のサイズ組成について調査した. クロロフィル *a* (Chl *a*) 濃度を三つのプランクトンサイズ (0.2-2.0  $\mu\text{m}$ , 2.0-25  $\mu\text{m}$ , >25  $\mu\text{m}$ ) に分画して測定した. 調査海域において全 Chl *a* 濃度は, 0.72から105  $\mu\text{g l}^{-1}$ であった. 大阪湾における平均 Chl *a* 濃度は6.41  $\mu\text{g l}^{-1}$ であり, 紀伊水道における平均 Chl *a* 濃度の0.87  $\mu\text{g l}^{-1}$ に比べて約7倍高かった. 全 Chl *a* 濃度に占めるピコ, ナノ, およびマイクロプランクトンサイズの割合は大阪湾でそれぞれ33%, 31%および36%であり, 紀伊水道ではそれぞれ62%, 27%および11%であった. このサイズ分布の結果より, 両海域では明らかにその植物プランクトンのサイズ組成が異なっており, その群集組成も異なることが予想された.

本研究におけるピコサイズの Chl *a* 濃度の最大値は6.0  $\mu\text{g l}^{-1}$ であり, この値は外洋域で報告されている値よりも明らかに高かった. さらに, このピコプランクトンサイズの Chl *a* 濃度の最大値は, 過去に報告されているピコ植物プランクトンの細胞当たりの Chl *a* 含量を 5 fg cell<sup>-1</sup>と仮定して算出すると, 10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup>の細胞密度であると推定された.

The phytoplankton community size distribution in Osaka Bay and Kii Channel was investigated, during four cruises in October 1993, and January, April and June 1994. The chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations of three size-fractionated samples (0.2-2.0  $\mu\text{m}$ , 2.0-25  $\mu\text{m}$ , > 25  $\mu\text{m}$ ) were measured. Total Chl *a* concentrations varied from 0.72 to 105  $\mu\text{g l}^{-1}$ . The average total Chl *a* concentrations in Osaka Bay was 6.41  $\mu\text{g l}^{-1}$ , which was about seven times higher than that of Kii Channel (0.87  $\mu\text{g l}^{-1}$ ). Moreover, the average contributions of the pico-, nano- and micro-phytoplankton to the total Chl *a* in Osaka Bay were 33%, 31% and 36%, respectively, but in Kii Channel were 62%, 27% and 11%, respectively. We concluded that phytoplankton community between Osaka Bay and Kii Channel differs according to size distribution.

This phytoplankton community in Osaka Bay and Kii Channel contained picoplankton with a maximum Chl *a* concentration of 6.0  $\mu\text{g l}^{-1}$ , apparently higher than that of open ocean. Also, the Chl *a* concentration is correlated with an organism density of 10<sup>6</sup> cells ml<sup>-1</sup>, assuming that the picoplankton Chl *a* content is 5 fg cell<sup>-1</sup>.

キーワード: 瀬戸内海, 大阪湾, 紀伊水道, 植物プランクトン, クロロフィル

#### 1. はじめに

植物プランクトンはそのサイズにより, 0.2-2.0  $\mu\text{m}$  のピコプランクトン, 2-20  $\mu\text{m}$  のナノプランクトン, 20-200  $\mu\text{m}$  のマイクロプランクトンに分けられる (Sieburth *et al.*, 1978<sup>1)</sup>). プランクトンをサイズで分類することは, 研究する立場からみればフィルター孔径を変えるだけで植物プランクトン群集のサイズ組成についての情報を簡単に得られるために非常に便利である.

\* 2002年7月4日受領, 2002年12月6日受理

\*\* 香川大学農学部

† 広島大学大学院生物圏科学研究科

†† 現所属: 新エネルギー産業技術総合開発機構

連絡先: 多田邦尚, 香川大学農学部

〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸2393

E-mail: tada@ag.kagawa-u.ac.jp

植物プランクトンのサイズに着目した研究は比較的多く, これまでに, 内湾域や湧昇域などの Chl *a* 濃度が比較的高い海域では珪藻を主な構成者とするマイクロプランクトンが卓越し, 逆に Chl *a* 濃度が低い熱帯・亜熱帯海域では微小鞭毛藻を主な構成者とするピコプランクトンが卓越することが明らかにされている (例えば, Stockner, 1988<sup>2)</sup>). また, ピコ植物プランクトンは非常に低濃度の栄養塩に適応していると考えられている (Agawin *et al.*, 2000<sup>3)</sup>). さらに, 全 Chl *a* 濃度の増加とともに, 各サイズ画分の Chl *a* 濃度も増加するが, その Chl *a* 濃度には上限値が存在することが知られている (Chisholm, 1992<sup>4)</sup>). しかし, 上記のような植物プランクトンのサイズに注目した研究は外洋域や比較的貧栄養な内湾では数多く行われているものの, 富栄養化した内湾における植物プランクトン群集のサイズ分布について

の報告は極めて少ないのが現状である。

本稿では、非常に富栄養化した大阪湾の湾奥から外洋水との混合域である紀伊水道にかけての環境変動の大きい海域における植物プランクトン群集のサイズ組成について報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 観測および試料採取

観測および試料採取は広島大学生物生産学部附属練習船・豊潮丸を用いて、1993年10月12-22日、1994年1月8-21日、1994年4月12-22日、1994年6月20-30日の計4回行った。大阪湾から紀伊水道にかけて7測点を設け (Fig. 1), 表層水を採取し、試料中の Chl *a* 濃度を測定した。なお、この大阪湾から紀伊水道の海域を含む4回の観測における水質項目の調査結果は橋本ほか(1996)<sup>5)</sup>が調査報告として公表している。

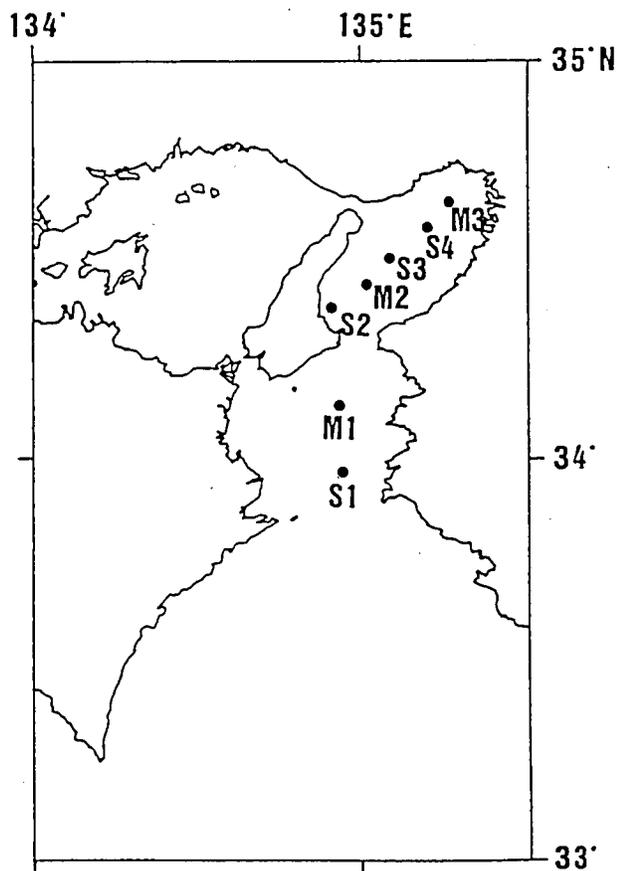


Fig. 1 Location of sampling stations in Osaka Bay and Kii Channel.

### 2.2 分析方法

採取された海水試料は、採取後直ちに Whatman GF/F フィルターを用いて300 mmHg 程度の圧力で吸引濾過した。得られたフィルターは *N, N*-dimethylformamide (以

下, DMF と略す) を用いて数日間抽出後 (Suzuki and Ishimaru, 1990<sup>6)</sup>), 吸光法 (Lorenzen, 1967<sup>7)</sup>) にて測定した。測定には50 mm セルを装着した分光光度計 (日本分光社, V-530) を用いた。なお, Lorenzen(1967)<sup>7)</sup> の Chl *a* 濃度の計算式は90%アセトン抽出に対するものであるが, Chl *a* の90%アセトンおよび DMF 中の吸収スペクトルおよび665 nm における吸光度はほぼ等しいため (Speziale *et al.*, 1984<sup>8)</sup>), Lorenzen(1967)<sup>7)</sup> の Chl *a* 濃度の計算式を用いることに問題はない。

またサイズ別に Chl *a* 濃度を測定するために、海水試料を孔径の異なるフィルター (25  $\mu$ m, 2  $\mu$ m および0.2  $\mu$ m) を用いて濾過した。用いたフィルターはメッシュサイズが25  $\mu$ m のネット (Swiss Nylon Plankton Net Cloth P 25), および孔径が2  $\mu$ m, 0.2  $\mu$ m の Nuclepore フィルター (PC MB 47 MM) である。これらのフィルターで濾過した試料についても、Whatman GF/F フィルターと同様に DMF 抽出を行い、吸光法にて Chl *a* 濃度を測定した。なお、用いたフィルターについてブランクテストを行ったところ、Chl *a* として測定される物質のフィルターからの溶出は認められなかった。異なる孔径のフィルターで得られた Chl *a* 濃度を差し引きすることにより、0.2-2.0  $\mu$ m, 2-25  $\mu$ m および25  $\mu$ m 以上のそれぞれの画分の Chl *a* 濃度を算出した。なお、Whatman GF/F フィルターの平均孔径は0.7  $\mu$ m である。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 海況

1993年10月、1994年1月、4月、および6月の計4回の航海における水温、塩分の各観測点における鉛直断面図を Fig. 2, 3 に示した。大阪湾内の最も陸側の観測点 M3 から紀伊水道の最も外側の観測点 S1 までの間の水塊構造は、表層に高水温低塩分水、下層に低水温高塩分水といった傾向は見られるものの、単純なエスチュアリー循環型ではなく複雑な水塊構造となっていた。観測点 S2 と M1 の間の友ヶ島水道 (紀淡海峡) を挟んで大阪湾側は低水温低塩分水、紀伊水道側では高水温高塩分水となっていた。また、大阪湾内の観測点 S3 から M2 の付近では四季を通じて成層構造は極めて弱く、特に1月には鉛直的によく混合していた (Fig. 2, 3)。この観測点 S3 から M2 の付近は潮汐フロントが認められる海域である (柳, 1990<sup>9)</sup>)。大阪湾から紀伊水道にかけての水塊構造は、詳しく調べられており、大阪湾と紀伊水道の双方にエスチュアリー循環があり、ふたつのエスチュアリー循環構造がその両者の間の友ヶ島水道により隔てられている。友ヶ島水道では潮流が速いため鉛直混合が強く、成層が弱くなっており、紀伊水道の底層水は

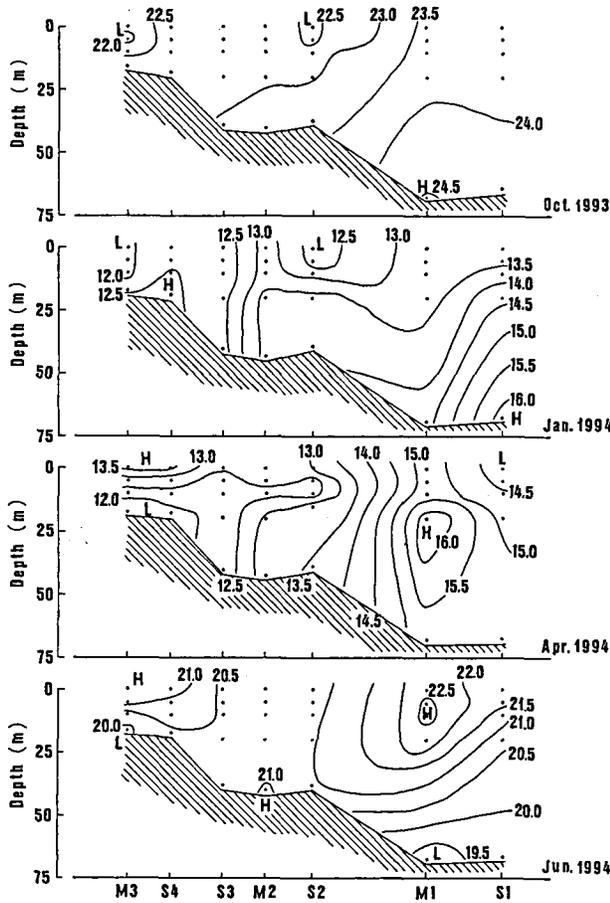


Fig. 2 Vertical distributions of water temperature (°C) in October 1993, January, April and June 1994.

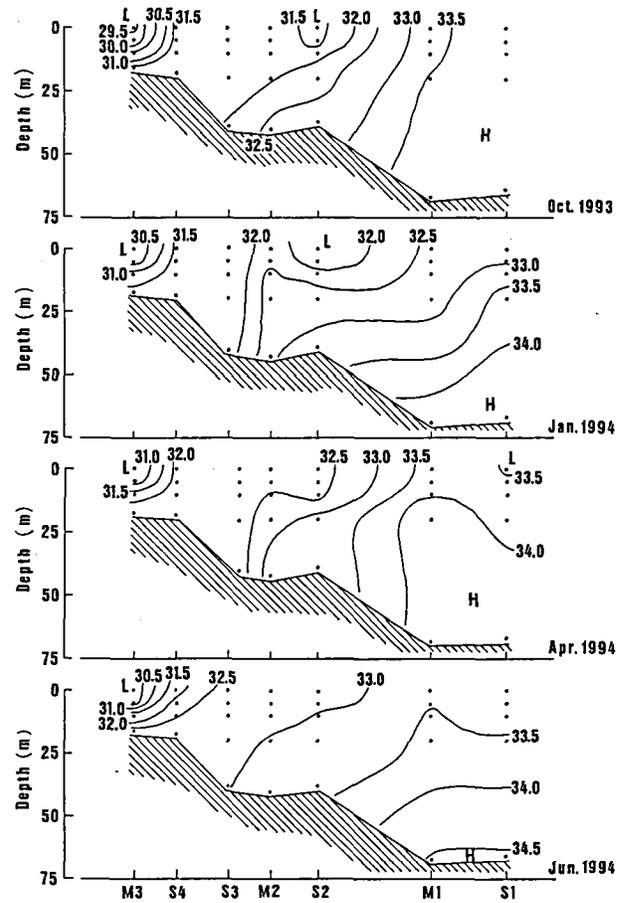


Fig. 3 Vertical distributions of Salinity (psu) in October 1993, January, April and June 1994.

そのまま大阪湾に流入するわけではなく、友ヶ島水道で大阪湾水と混合したのち大阪湾下層に広がると考えられている(斎藤ほか, 1978<sup>10)</sup>, 藤原ほか, 1997<sup>11)</sup>)。今回の調査で得られた観測結果は基本的には過去の報告とよく一致している。なお、表層水中の塩分は大阪湾の湾奥から紀伊水道の外側に向かって増加していく傾向を示すものの、観測点S2とS1付近で塩分が若干低下することが観測された。観測点S2で低塩分値が観測されたことは淡路島洲本市付近からの陸水の影響が考えられる。一方、S1付近での塩分の低下は0.4 psu以下で非常に小さく、これは紀伊水道の幅が40-50 kmで、水深も最深部では70 mを超えるため地球自転の効果により、流れがかなり複雑になっていること(Kasai *et al.*, 2000<sup>12)</sup>)などがその原因と考えられる。

Whatman GF/Fフィルターを用いて測定したChl *a*濃度は、1993年10月には1.00-11.47  $\mu\text{g l}^{-1}$ 、1994年1月には0.80-7.84  $\mu\text{g l}^{-1}$ 、4月には0.72-8.08  $\mu\text{g l}^{-1}$ 、そして6月には0.72-105  $\mu\text{g l}^{-1}$ であった。6月の観測時には大阪湾の湾奥部で*Heterosigma akashiwo*の赤潮が発生しており(Tada *et al.*, 1998<sup>13)</sup>)、湾奥の観測点ではChl *a*

Table 1 Total Chl *a* concentration ( $0.2 \mu\text{m} <$ ) and relative abundances of size-fractionated Chl *a* in Osaka Bay and Kii Channel.

	Chl <i>a</i> ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	0.2-2.0 $\mu\text{m}$ (%)	2.0-25 $\mu\text{m}$ (%)	25 $\mu\text{m} <$ (%)
Osaka Bay (n=19)	6.41 $\pm$ 6.05	33 $\pm$ 23	31 $\pm$ 14	36 $\pm$ 21
Kii Channel (n=8)	0.87 $\pm$ 0.39	62 $\pm$ 15	27 $\pm$ 9	11 $\pm$ 7
Osaka Bay	: Six stations (M3, S4, S3, M2, S2)			
Kii Channel	: Two stations (M1, S1)			

濃度が100  $\mu\text{g l}^{-1}$ を超える高い値であった。Chl *a*濃度は、大阪湾と紀伊水道域の両海域で比較すると大阪湾で圧倒的に高い(Table 1)。また大阪湾内では、Chl *a*濃度が湾奥部の観測点M2から沖合いに向けて減少し、再び湾中央部のM2で高い値となる傾向が認められた。

### 3.2 Whatman GF/Fおよび0.2 $\mu\text{m}$ Nuclepore フィルター上に捕集されたChl *a*濃度

Whatman GF/Fフィルター(平均孔径0.7  $\mu\text{m}$ )と、孔径0.2  $\mu\text{m}$ のNucleporeフィルターを用いて求めたChl *a*濃度を比較したところ、Nucleporeフィルターを用いて測定した方が高い値が得られた。即ち、両フィルターを用いて求めたChl *a*濃度をそれぞれX軸、Y軸にプロッ

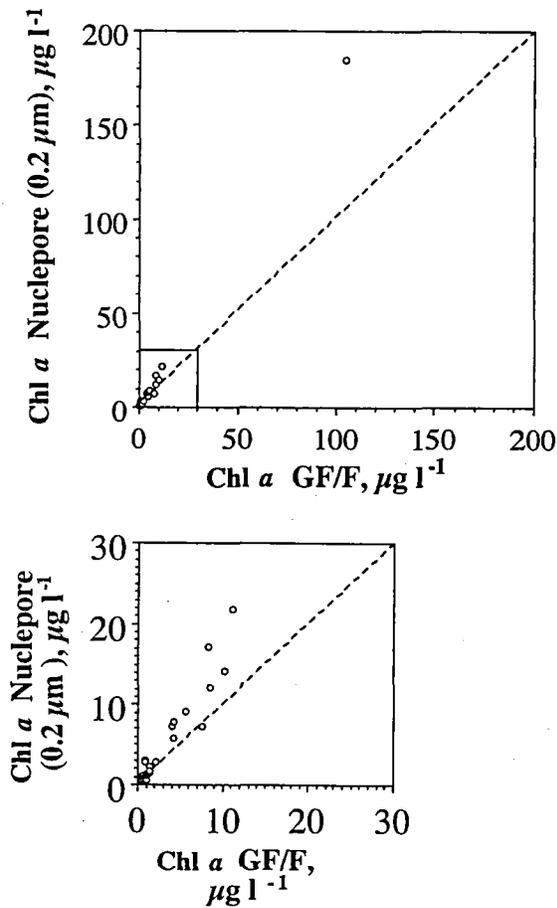


Fig. 4 Comparison of Chl *a* measurements made with Whatman GF/F filters and Nuclepore filter (pore size: 0.2 μm)

トしたところ、測定値はそのほとんどが $Y = X$ のラインよりも上側に分布していた (Fig. 4). Chavez *et al.* (1995)<sup>14)</sup>は東部太平洋において Whatman GF/F フィルターと、孔径0.2 μm の Nuclepore フィルターとを用いて求めた Chl *a* 濃度はほぼ同程度の値を示すことを報告したが、一方、Taguchi and Laws (1988)<sup>15)</sup>はハワイ島周辺海域において Whatman GF/F フィルターを通過し、孔径0.2 μm の Nuclepore フィルター上に捕集される Chl *a* の存在を指摘している。また、Tada *et al.* (1999)<sup>16)</sup>も沖縄本島のサンゴ礁域において同様の結果を報告している。さらに、富栄養化した沿岸域でも今回得られたように両者の値が異なることが、瀬戸内海の広島湾 (多田ほか, 1994<sup>17)</sup>), 北九州市の洞海湾 (多田ほか, 2001<sup>18)</sup>) において報告されている。これらのことは、平均孔径0.7 μm の Whatman GF/F フィルターを通過し、孔径0.2 μm の Nuclepore フィルター上に捕集される植物プランクトン量が特に沿岸域では無視できないことを示している。

### 3.3 植物プランクトン群集のサイズ分布

今回得られた0.2-2.0 μm, 2.0-25 μm, および25 μm以上の画分の Chl *a* 濃度を、それぞれ、ピコプランクトン、ナノプランクトン、マイクロプランクトン画分として、それぞれの画分の Chl *a* 濃度の増減について検討した。

今回の調査において、6月の湾奥の観測点 (M3) で *Heterosigma akashiwo* の赤潮が発生していた際のピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度は85.1 μg l<sup>-1</sup>と非常に高い値であった (Fig. 5)。 *H. akashiwo* の細胞サイズは8-

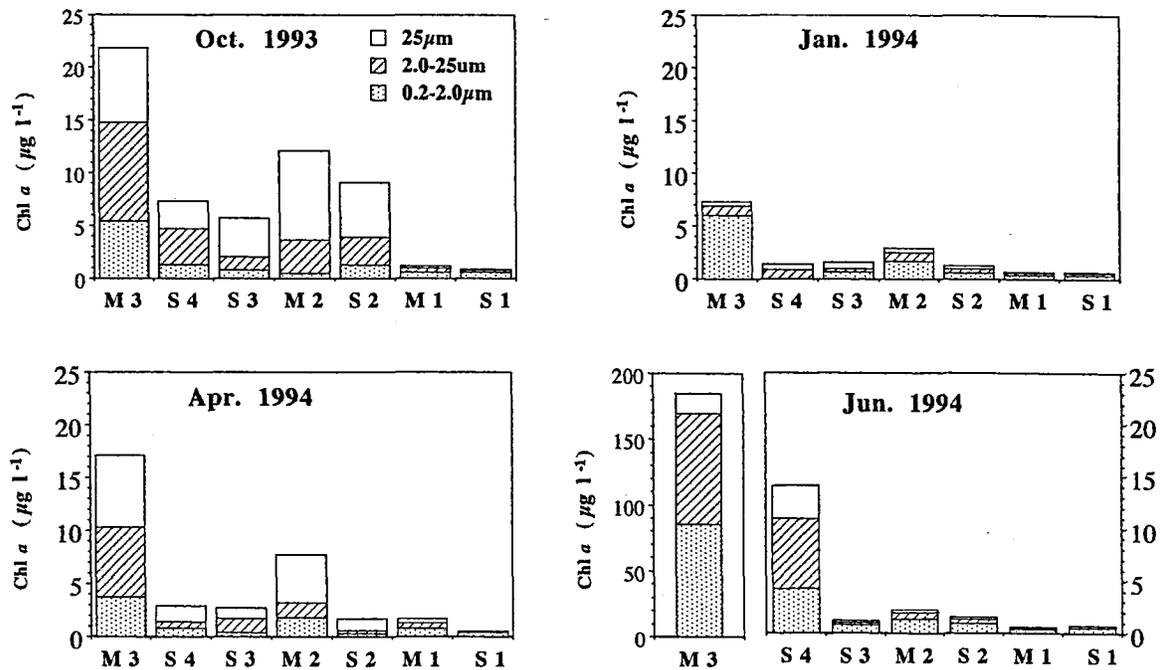


Fig. 5 Three size-fractionated concentrations of chlorophyll *a* at surface seawater in October 1993, January, April and June 1994.

25  $\mu\text{m}$   $\times$  6-15  $\mu\text{m}$  であり (福代ほか, 1990<sup>19)</sup>), ナノプランクトン画分に分類されるはずである。しかし, 著者らが行った対数増殖期の *H. akashiwo* 細胞を用いたサイズ分画実験では, 細胞の一部 (21-37%) が孔径2.0  $\mu\text{m}$  の Nuclepore フィルターを通過することが確認されており (未発表データ), 今回の調査で *H. akashiwo* 赤潮発生時の0.2-2.0  $\mu\text{m}$  のピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度が高いのは *H. akashiwo* 細胞の一部が, 0.2  $\mu\text{m}$  の Nuclepore フィルターを通過した為と考えられる。Han and Furuya (2000)<sup>20)</sup> も東京湾において *H. akashiwo* が大増殖した際には3  $\mu\text{m}$  以下の画分の Chl *a* 濃度が50  $\mu\text{g l}^{-1}$  以上の高い値であったことを報告している。従って, 以下の考察では, この6月の湾奥の観測点 (M3) の値は除いて議論する。珪藻類の優占している場合には問題ないが, このように無殻鞭毛藻など壊れやすい細胞が高密度な場合では, 全 Chl *a* 濃度の上昇とともにピコサイズに入る Chl *a* 濃度も上昇してしまう場合がある。しかし, 1994年1月には2.0  $\mu\text{m}$  以下の画分の Chl *a* 濃度が全 Chl *a* 濃度のほとんどを占めており, このことは, 富栄養化した内湾でもピコプランクトンが卓越する場合があることを示している。

四季を通じて, ピコプランクトン, ナノプランクトンおよびマイクロプランクトン画分の Chl *a* 濃度は, それぞれ, 0-6.0  $\mu\text{g l}^{-1}$ , 0.03-9.37  $\mu\text{g l}^{-1}$ , 0-8.55  $\mu\text{g l}^{-1}$  の範囲であり (Fig. 5), 全 Chl *a* 濃度に占める割合は平均でそれぞれ42( $\pm$ 25)%, 30( $\pm$ 13)%, 28( $\pm$ 21)%であった ( $n=27$ )。また, 大阪湾内の5観測点 (M3, S4, S3, M2, S2) と紀伊水道の2観測点 (M1, S1) とで植物プランクトン群集のサイズ組成を比較した結果 (Table 1), 大阪湾内では全 Chl *a* 濃度は平均で6.41  $\pm$  6.05  $\mu\text{g l}^{-1}$  ( $n=19$ ) であるのに対し, 紀伊水道では0.87  $\pm$  0.39  $\mu\text{g l}^{-1}$  ( $n=8$ ) と約7倍の差があった。そして, そのサイズ組成に注目すると, ピコプランクトン, ナノプランクトン, マイクロプランクトン画分の割合が大阪湾内ではそれぞれ, 33( $\pm$ 23)%, 31( $\pm$ 14)%, 36( $\pm$ 21)% であり ( $n=19$ ), 一方, 紀伊水道ではそれぞれ, 62( $\pm$ 15)%, 27( $\pm$ 9)%, 11( $\pm$ 7)%であった ( $n=8$ )。即ち, 大阪湾と紀伊水道では植物プランクトン群集のサイズ組成は明らかに異なっており, 全 Chl *a* 濃度の高い大阪湾内ではピコプランクトン画分の相対割合が紀伊水道に比べて約半分で, 逆にマイクロプランクトン画分の相対割合は約3倍であり, サイズ分布がより大型化していた。

植物プランクトン群集のサイズ分布についての研究は数多く行われており, その成果は Chisholm (1992)<sup>4)</sup> の総説などによくまとめられている。即ち Chl *a* 濃度の低い海水中の植物プランクトン群集ではピコプランクトンが

卓越しており, Chl *a* 濃度の増加とともにサイズの大きいものの占める割合が高くなる。また, 大型画分の Chl *a* 濃度の増加には珪藻類の寄与が大きい (Odate and Maita, 1988<sup>21)</sup>)。さらに, 全 Chl *a* 濃度の増加とともに, ピコサイズやナノサイズの Chl *a* 濃度も増加するが, その Chl *a* 濃度にはそれぞれ上限値が存在し, 上限値に達した後は, より大きなサイズ画分の Chl *a* 濃度が増加することが知られている。例えば, 海域や水深によらず1  $\mu\text{m}$  以下の画分は0.5  $\mu\text{g l}^{-1}$  を超えないとされている (Raimbault et al., 1988<sup>22)</sup>)。しかし, 今回の調査において, 0.2-2.0  $\mu\text{m}$  のピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度は0-6.0  $\mu\text{g l}^{-1}$  の範囲であった。

以上のように, 今回の調査で得られた植物プランクトン群集のサイズ分布の結果は, これまでに外洋域あるいは貧栄養海域において明らかにされてきたサイズ分布傾向には基本的には当てはまるものの, ピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度の上限値は明らかに異なっていた。

### 3.4 温帯沿岸域におけるピコ植物プランクトン

ピコ植物プランクトンは, 外洋や貧栄養海域の生態系において極めて重要な存在であるとされ, 蛍光顕微鏡やフローサイトメーターの発達によって, 近年になって脚光を浴びるようになった。ピコ植物プランクトンは世界中の海域に広く分布することが知られており (Waterbury et al., 1979<sup>23)</sup>), 2つの主要なグループ, 即ち, ラン藻類の *Synechococcus* と原核緑藻の *Prochlorococcus* により構成され, 特に *Synechococcus* は世界中の海域に優占して存在すると報告されている (Stockner, 1988<sup>24)</sup>)。しかし, 外洋と内湾でピコプランクトンの主要構成種が類似したものであるかどうかについてはよくわかっていない。現在, 沿岸域におけるピコ植物プランクトンの同定とそれらの細胞密度についてのデータの蓄積が強く望まれている。

前述のように今回の結果より, 沿岸域, 特に富栄養海域では, これまで外洋域あるいは貧栄養海域において明らかにされてきたサイズ分布傾向には基本的には当てはまるものの, ピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度の上限値は明らかに異なっている。0.2-2.0  $\mu\text{m}$  のサイズの植物プランクトンがどの程度の Chl *a* 濃度になるまで増殖が可能であるのかは興味ある問題である。一方, 淡水域では, ピコ植物プランクトンのブルーミングの報告があり (例えば, 高村ほか, 1996<sup>24)</sup>), 富栄養海域でピコプランクトンがブルーミングを起こす可能性も十分考えられる。実際に Narragansett Bay (Smayda and Villareal, 1989<sup>25)</sup>) や Long Island (Nuzzi and Waters, 1989<sup>26)</sup>) で黄金色藻の *Aureococcus anophagefferens* (2-3  $\mu\text{m}$ ) のブルームが観察されている。これは本稿の定義より

細胞径が大きい、Sieburth *et al.* (1988)<sup>27)</sup>はピコプランクトンと呼んでいる。今回の調査において、0.2-2.0  $\mu\text{m}$  のピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度は 0-6.0  $\mu\text{g l}^{-1}$  の範囲であった。西日本の様々な海域で行った調査における全 Chl *a* 濃度は 0-160  $\mu\text{g l}^{-1}$  で、その際のピコプランクトンサイズの Chl *a* 濃度は、0-11.7  $\mu\text{g l}^{-1}$  の範囲であり (多田ほか, 2001<sup>18)</sup>), 今回の結果はこの報告値の範囲内である。さらに、海外の富栄養海域における情報として、米国の Chesapeake Bay でも全 Chl *a* 濃度が約 5-45  $\mu\text{g l}^{-1}$  で、そのうち 3  $\mu\text{m}$  以下の Chl *a* 濃度が 1-5  $\mu\text{g l}^{-1}$  であったこと (Ray *et al.*, 1989<sup>28)</sup>), またシンガポールの Johor Strait では全 Chl *a* 濃度が 1.0-57  $\mu\text{g l}^{-1}$  で、そのうち 8  $\mu\text{m}$  以下の Chl *a* 濃度が約 0.4-4  $\mu\text{g l}^{-1}$  であったこと (Gin *et al.*, 2000<sup>29)</sup>) などが報告されている。このように、本研究により得られた全 Chl *a* の濃度範囲 (0.47-21.8  $\mu\text{g l}^{-1}$ ) は上記の富栄養海域における全 Chl *a* の濃度範囲 (0-57  $\mu\text{g l}^{-1}$ ) に比べて低いが、ピコプランクトンの Chl *a* 濃度範囲がほぼ同程度であったことは、ピコプランクトンが全 Chl *a* の濃度の増加に関わらず常に低い密度で存在する事を示している。前述のように、全 Chl *a* 濃度の増加とともに、ピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度も増加するが、その Chl *a* 濃度には上限値が存在し、上限値に達した後は全 Chl *a* 濃度の増加にかかわらず一定の値を示すことが知られている (Raimbault *et al.*, 1988<sup>22)</sup>)。これまで研究されてきた貧栄養海域や湧昇域ばかりでなく、非常に富栄養化された海域においてもピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度にも上限値が存在するのか、あるいはその上限値は Chl *a* 濃度でどの程度かについての検討はほとんどなされていない。多田ほか (2001)<sup>18)</sup>は西日本の様々な海域で行った調査における全 Chl *a* 濃度とピコプランクトンサイズの Chl *a* 濃度との関係より、ピコプランクトンの Chl *a* 濃度の上限値は 10  $\mu\text{g l}^{-1}$  程度と推察している。この上限値は外洋域で考えられている上限値 (例えば, 0.5  $\mu\text{g l}^{-1}$ , Raimbault *et al.*, 1988<sup>22)</sup>) よりも明らかに高い。

次に、ピコプランクトンサイズの Chl *a* 濃度の推定上限値について、植物ピコプランクトンの細胞密度の報告値より検討する。植物ピコプランクトンを構成する主要な種である *Synechococcus* の細胞内 Chl *a* 含量は、1 から 5  $\text{fg cell}^{-1}$  と報告されている (Kana and Glibert, 1987<sup>30)</sup>)。ここで、ピコ植物プランクトンの Chl *a* 含量を 5  $\text{fg cell}^{-1}$  と仮定すると、本研究で得られた 0.2-2.0  $\mu\text{m}$  のピコプランクトン画分の Chl *a* 濃度の最大値の 6.0  $\mu\text{g l}^{-1}$  を達成するためには、ピコ植物プランクトンが少なくとも  $1.2 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$  の細胞密度で存在したことになる。日本国内におけるピコ植物プランクトンの細胞密度について

の報告は極めて少ないが、愛媛県宇和海では高水温期に *Synechococcus* が  $10^5 \text{ cells ml}^{-1}$  後半の細胞密度で出現していた (中野私信)。米国, Woods Hole Harbor では *Synechococcus* のみで  $10^5 \text{ cells ml}^{-1}$  の細胞密度が報告されており (Waterbury *et al.*, 1986<sup>31)</sup>), Narragansett Bay における *A. anophagefferens* の最大密度は  $1.5 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$  であった (Smayda and Villareal, 1989<sup>25)</sup>)。また, Partensky *et al.* (1999)<sup>32)</sup> は世界の様々な海域における *Prochlorococcus* および *Synechococcus* の分布について過去の報告値をとりまとめ、両種がともに表層水名中では最高で  $10^6 \text{ cells ml}^{-1}$  の細胞密度で出現するとしている。一方、淡水域においては、Nagata *et al.* (1996)<sup>33)</sup> は琵琶湖において、ピコプランクトンが  $3.6-7.4 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$  の細胞密度で出現したと報告している。

植物プランクトンを Chl *a* を指標としてサイズで分画することは、ろ紙の目詰まり、あるいは *H. akashiwo* 細胞に見られるようなフィルターの孔径よりも大きな細胞の通過等の操作上の問題はあるものの、これらの報告と今回の結果を総合して考えると、富栄養化した沿岸域には、外洋域や貧栄養な沿岸海域よりも高い密度でピコ植物プランクトンが存在していることが推定される。また、突発的に大増殖した *A. anophagefferens* のように、今まで知られていない種類、あるいは遺伝的特性を持ったピコプランクトンが存在している可能性も考えられる。一般に植物プランクトン現存量の上限は増殖や摂食などの除去過程により制御されているとされており、今後、沿岸域あるいは富栄養海域におけるピコ植物プランクトンの細胞密度のデータ、あるいはその増殖と捕食者との両面からの情報の蓄積も必要であろう。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、有益なご助言を頂いた広島大学大学院生物圏科学研究科・松田 治教授、上 真一教授、北海道大学大学院水産科学研究科・門谷 茂教授に感謝致します。また、観測・試料の分析にご協力頂いた香川大学農学部海洋環境学研究室、広島大学生物生産学部水圏環境学研究室の専攻生諸氏に心から感謝致します。さらに、調査にご協力頂いた広島大学練習船豊潮丸・郷 秋雄船長、中口和光主席一等航海士をはじめとする乗組員の皆様に感謝致します。ピコ植物プランクトンについて、有意義なご助言を頂くとともに数々の文献を紹介して下さった鹿児島大学水産学部・前田広人助教授、愛媛大学沿岸海洋研究センター・中野伸一助教授に感謝致します。また、原稿に対する有益なご助言をいただいた編集委員および査読者の先生方に感謝致します。最後に本研究プロジェクトに参加する機会を与えて下

さった岡市友利博士（前香川大学学長）、九州大学応用力学研究所・柳 哲雄教授に感謝致します。

なお、本研究は「瀬戸内海における有用水産資源の持続的生産と環境保全に関する学際的研究」（日本生命財団特別助成、1992年10月－1995年9月、研究代表者 岡市友利）の成果の一部であることを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) Sieburth, J. McN., V. Smetacek and J. Lwnz (1978): Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.*, 23, 1256-1263.
- 2) Stockner, J. G. (1988): Phototrophic picoplankton: An overview from marine and freshwater ecosystems. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 765-775.
- 3) Agawin, N. S. R., C. M. Duarte and S. Agusti (2000): Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol. Oceanogr.*, 45, 591-600.
- 4) Chisholm, S. W. (1992): Phytoplankton size. p.213-217. In P. G. Falkowski and A. D. Woodhead (eds.), *Primary production and biogeochemical cycles in the sea*. Plenum Press.
- 5) 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田治・末永寿宏・多田充利・郷秋雄・中口和光(1996): 瀬戸内海全域の季節別水質調査結果. 広島大学生物生産学部紀要, 35, 243-273.
- 6) Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990): An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-Dimethyl-formamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 46, 190-194.
- 7) Lorenzen, C. J. (1967): Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 12, 343-346.
- 8) Speziale, B. J., S. P. Schreiner, P. A. Giammatteo and J. E. Schindler (1984): Comparison of N, N-dimethyl-formamide, dimethylsulfoxide, and acetone for extraction of phytoplankton chlorophyll. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41, 1519-1522.
- 9) 柳 哲雄(1990): 潮目の科学. 恒星社厚生閣, 169pp.
- 10) 斎藤 実・石崎 廣・上平悦朗・南 秀人・西沢純一・江口一平(1978): 友が島水道における海水の交流について. 海と空, 54, 75-89.
- 11) 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘(1997): 紀伊水道の流れと栄養塩輸送. 海と空, 73, 63-72.
- 12) Kasai A., A. E. Hill, T. Fujiwara and J. H. Simpson (2000): Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions freshwater influence. *J. Geophys. Res.*, 105, C7, 16961-16969.
- 13) Tada, K., K. Monaka, M. Morishita and T. Hashimoto (1998): Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.* 54, 285-295.
- 14) Chavez, F. P., R. B. Bidigare, D. M. Karl, D. Hebel, M. Latasa, L. Campbell, and J. Newton (1995): On the chlorophyll a retention properties of glass-fiber GF/F filters. *Limnol. Oceanogr.*, 40, 428-433.
- 15) Taguchi, S. and E. A. Laws (1988): On the microparticles which pass through glass fiber filter type GF/F in coastal and open waters. *J. Plankton Res.*, 10, 999-1008.
- 16) Tada, K., M. Yamada, A. Takemura and Y. Nakano (1999): Size distribution of phytoplankton community in oligotrophic tropical coastal waters. *La mer*, 36, 139-145.
- 17) 多田邦尚・松本幸治・多田充利・越智 正 (1994): 広島湾における植物プランクトン群集のサイズ組成. 香川大学学術報告, 46, 27-35.
- 18) 多田邦尚・濱田建一郎・門谷 茂・山田真知子 (2001): 過栄養海域(北九州市・洞海湾)における植物プランクトン群集のサイズ組成. 海と空, 77, 9-15.
- 19) 福代康夫・高野秀昭・千原光雄・松岡数充 (1990): 日本の赤潮生物, 内田老鶴圃, 407pp.
- 20) Han, M-S. and K. Furuya (2000): Size and species-specific primary productivity and community structure of phytoplankton in Tokyo Bay. *J. Plankton Res.*, 22, 1221-1235.
- 21) Odate, T. and Y. Maita (1988): Regional variation in the size composition of phytoplankton communities in the Western North Pacific Ocean, Spring 1985. *Biol. Oceanogr.*, 6, 65-77.
- 22) Raimbault, P., M. Rodier and I. Taupier-letage (1988): Size fraction of phytoplankton in the Ligurian Sea and the Algerian Basin (Mediterranean Sea): Size distribution versus total concentration. *Mar. Microb. Food Webs*, 3, 1-7.
- 23) Waterbury, J. B., S. W. Watson, R. R. Guillard and L. E. Brand (1979): Widespread occurrence of a unicellular marine planktonic cyanobacterium. *Nature*, 277, 239-294.
- 24) 高村典子・石川 靖・三上英敏・三上 一・藤田幸生・樋口澄男・村瀬秀也・山中 直・南條吉之・猪狩忠光・福島武彦(1996): 日本の湖沼34水域の栄養塩レベルと細菌, ピコ植物プランクトン, 鞭毛藻(虫)および密度の関係. 日本陸水学会誌, 57, 245-259.
- 25) Smayda, T. J. and T. A. Villareal (1989): The 1985 'brown-tide' and the open phytoplankton niche in Narragansett Bay during summer. p.159-187, In, *Coastal and Estuarine Studies 35, Novel Phytoplankton Blooms*, eds. E. M. Cosper, V. M. Bricelj, E. J. Carpenter, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 26) Nuzzi, R. and R. M. Waters (1989): The spatial and temporal distribution of "brown tide" in eastern Long Island. p.117-137, In, *Coastal and Estuarine Studies 35, Novel Phytoplankton Blooms*, eds. E. M. Cosper, V. M. Bricelj, E. J. Carpenter, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 27) Sieburth, J. McN., P. W. Johnson and P. E. Hargraves (1988): Ultrastructure and ecology of *Aureococcus anophagefferens* gen. et sp. nov. (chrysophyceae): the dominant picoplankton during a bloom in Narragansett Bay, Rhode Island, summer 1985. *J. Phycol.*, 24, 416-425.
- 28) Ray, R. T., L. W. Haas and M. E. Sieracki (1989): Autotrophic picoplankton dynamics in a Chesapeake Bay subestuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 52, 273-285.
- 29) Gin, K. Y. H., X. Lin and S. Zhang (2000): Dynamics and size structure of phytoplankton in the coastal waters of Singapore. *J. Plankton Res.*, 22, 1465-1484.
- 30) Kana, T. M. and P. M. Glibert (1987): Effect of irradiances up to 2000  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  on marine *Synechococcus* WH 7803-I. Growth, pigmentation, and cell composition. *Deep-Sea Res.*, 34, 479-495.
- 31) Waterbury, J. B., S. W. Watson, F. W. Valois and D. G. Franks

- (1986) : Biological and ecological characterization of marine unicellular cyanobacterium *Synechococcus*. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci., 214, 71-120.
- 32) Partensky, F., W. R. Hess and D. Vaulot (1999) : *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. Microbiol. Mol. Biol. R., 63, 106-127.
- 33) Nagata, T., K. Takai, K. Kawabata, M. Nakanishi and J. Urabe (1996) : The trophic transfer via a picoplankton-flagellate-copepod food chain during a picocyanobacterial bloom in Lake Biwa. Arch. Hydrobiol., 137, 145-160.