

広島湾における植物プランクトン群集のサイズ組成

多田邦尚・松本幸治・多田充利・越智 正

Size Distribution of Phytoplankton Community in Hiroshima Bay

Kuninao TADA, Koji MATSUMOTO, Mitsutoshi TADA and Tadashi OCHI

The size distribution of the phytoplankton community in surface seawater was investigated in Hiroshima Bay, in the Seto Inland Sea, Japan. The surface seawater was collected from 11 stations in Hiroshima Bay. The chlorophyll *a* concentrations of three size-fractionated samples (0.2~2.0 μm , 2.0~25 μm and >25 μm) were measured using various filters which had different pore sizes. The total chlorophyll *a* concentrations in the northern coastal and estuary areas were higher than those in the southern part of the bay. Moreover, in the size compositions, the picoplankton size (0.2~2.0 μm) was dominant in the southern part of the bay. It was expected that the chlorophyll *a* concentration and its size composition were influenced by the inflow of eutrophic river water from Ohta River. The chlorophyll *a* concentrations of nanoplankton size (2.0~25 μm) varied widely from 0.203 to 13.2 $\mu\text{g/l}$, and the alteration of this fraction was reflected in the total chlorophyll *a* concentration. On the other hand, the chlorophyll *a* concentrations of picoplankton size were within 0.700 to 3.15 $\mu\text{g/l}$. The concentrations of this fraction were low and constant in the entire bay. The chlorophyll *a* concentrations of the picoplankton size fraction occupied 39% of the total chlorophyll *a* biomass on the average in Hiroshima Bay. Hiroshima Bay was characterized as a eutrophic coastal sea area because of its lower content of nanoplankton size (22~66%) than that of the oligotrophic open ocean (80~90%).

Key words : size-fractionation, chlorophyll *a*, phytoplankton, Hiroshima Bay

緒 言

海洋の食物連鎖の出発点である植物プランクトンの海洋表層部での光合成作用は海洋生態系を支える基礎生産として位置づけられている。この光合成、即ち基礎生産に始まる生物生産の機構とそれを支配する要因を明らかにすることは、海洋の生態系とそれに組み込まれる物質循環を明らかにする上で非常に重要である。

従来の植物プランクトンについての研究では、メッシュサイズが十数 μm 程度のプランクトンネットで採集された植物プランクトンについて主に研究が行われていたが、近年、微小プランクトンについての研究が進み、海洋にはもっとサイズの小さな微小プランクトンが量的には無視できないほど存在し、さらに古典的な植物プランクトン→動物プランクトン→魚といった生態系の概念とはまったく異なった関係が成立していると考えられるようになった。

植物プランクトンの主要な光合成色素はクロロフィル *a* であり、サイズ別にこのクロロフィル *a* を測定することにより、植物プランクトン群集のサイズ分布を知ることができる。植物プランクトンは、その大きさにより0.2 μm 以下のフェムトプランクトン、0.2~2.0 μm のピコプランクトン、

2.0~20 μm のナノプランクトン, 20~200 μm のミクロプランクトンに分けられる⁽¹⁾。

植物プランクトン群集のサイズ分布については, 一般的には富栄養環境にある沿岸域, 湧昇域では珪藻を主な構成者とするミクロプランクトンが卓越しており, 貧栄養環境にある熱帯・亜熱帯海域では微小鞭毛藻を主な構成者とするナノプランクトンやピコプランクトンが卓越するとされている⁽²⁾⁽³⁾。

これまで, 外洋域や比較的貧栄養な沿岸海域においては植物プランクトンのサイズの時空間的変化が調べられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし, 富栄養化した内湾域でのサイズ組成についての報告は非常に少なく⁽⁸⁾⁽⁹⁾, 特に微小なサイズのピコプランクトンまで含めたサイズ分布についての情報は極めて不足している。また, 本研究でとりあげた広島湾は瀬戸内海の中でも大阪湾に次いで富栄養化した海域であり, かつ湾奥部から湾口部にかけての栄養塩濃度や植物プランクトン量等の化学的環境傾斜が比較的大きい海域である。そこで, 本研究ではこの広島湾の湾奥部から湾口部にかけての海域において表層海水中のクロロフィル a をプランクトンのサイズ別に測定し, 内湾域における植物プランクトン群集のサイズ組成の水平分布について調べることを目的とした。

試料および方法

1. 広島湾の概要と観測

本研究でとりあげた広島湾は, 瀬戸内海の中でも極めて閉鎖性の強い内湾で, その面積は1,058 km^2 で, 湾内には江田島, 能美島, 厳島などの大小様々な島が存在している。広島湾には, 瀬戸内海の中でも, 淀川, 吉野川に次ぐ大きな流量を持つ太田川が湾奥部に流入している。また湾西部には錦川が流入しており, 広島湾は, このふたつの河川のため淡水流入の多い内湾である。水深は湾奥部では15m程度のところが多いが, 湾口部では深くなっており, 25mから深いところでは45mに達するところもある。広島湾の潮流あるいは海水交換等については, 川村・清水⁽¹⁰⁾により, またその化学環境については湯浅ら⁽¹¹⁾により既にまとめられている。

本研究における広島湾の観測には, Fig. 1 に示した湾の全域にわたる11の観測定点を設け, 特に栄養塩の流入が多く富栄養化していると思われる太田川の河口域には5個の観測点を設けた。各観測点では, 透明度測定とCTDによる水温, 塩分の測定および表層海水の採取を行った。

2. 試料

海水試料の採取は1993年6月28日と29日の両日に, 広島大学生物生産学部の豊潮丸 93-7 次航海において行った。Fig. 1 に示した各観測定点において水深0mはバケツで, また水深3mはバンドン型採水器を用いて海水試料を採取した。

3. 分析方法

3-1 クロロフィル a の測定

採取された海水試料は, 植物プランクトンの光合成色素(クロロフィル a)の分析のため, 常法⁽¹²⁾に従いWhatman GF/F フィルターを用いて一定量を濾過した。得られたフィルターはN, N-Dimethylformamide (以下DMFと略す)を用いて抽出した後-25 $^{\circ}\text{C}$ 以下で保存し⁽¹³⁾, 実験室持ち帰って分光法によりクロロフィル a を測定した⁽¹²⁾。

また, 常法のクロロフィル a 分析とは別に, サイズ別のクロロフィル a の分析も同時に行った。実際の操作は以下のとおりである。まず海水試料を孔径の異なるフィルター(25 μm , 2 μm , および0.2 μm)を用いて濾過した。孔径が25 μm のものは田中三次郎商店(株)社製のネット(Swiss Nylon Plankton Net Cloth P 25)を, 孔径が2 μm と0.2 μm のものは野村マイクロサイエンス社のNucleporeフィルターを使用した。得られたそれぞれのフィルターは, GF/F フィルターと同様の操作で処理した。サイズ別のクロロフィル a の測定には多くの海水試料が必要となるので, 濾過す

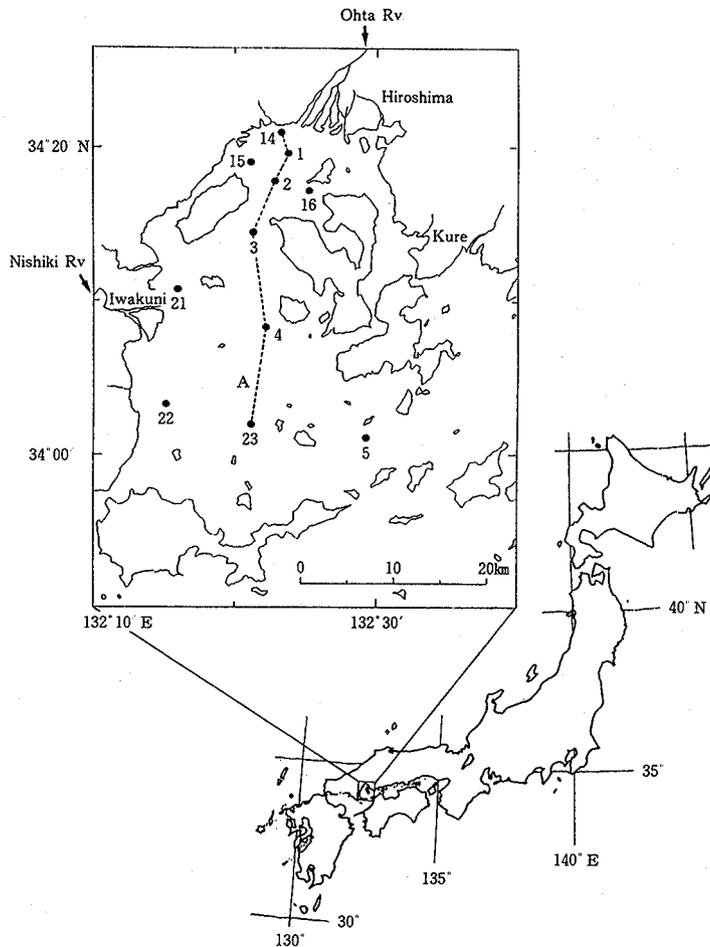


Fig.1 Location of sampling stations in Hiroshima Bay

る海水試料の体積を少なくするために、分光法よりも感度が高い蛍光法により測定した。分析の際に、蛍光光度計は、励起光の波長を436nm、受光部の波長を670nmにセットして、1 ppmのフルオレッセインナトリウム標準溶液の蛍光値が100になるように調整した。

3-2 分光法と蛍光法によるクロロフィルaの測定

分光法と蛍光法によるクロロフィルaの測定においては、以下に述べる方法でキャリブレーションを行った。

分光法によるクロロフィルaの測定では、下記の式(1)によってクロロフィルa濃度が計算される⁽¹²⁾。

$$\text{Chla } (\mu\text{g/l}) = \frac{26.7 (665_0 - 665_a) \times v}{V \times l} \dots\dots\dots(1)$$

但し、式(1)中の665₀は665nmの吸光度で、665_aはセル内に2 N塩酸を2から3滴添加後の吸光度である。またvは抽出に用いたDMFの体積 (ml)、Vは海水の濾過量 (リットル)、lはセル長 (cm)

である。一方、蛍光法によるクロロフィル a の測定では、下記の式(2)によってクロロフィル a 濃度が計算される⁽¹²⁾。

$$\text{Chl a } (\mu\text{g/l}) = F \times \frac{1.83 (R_0 - R_a) \times v}{V} \quad \text{-----(2)}$$

但し、式(2)中の R_0 は励起光が436nmにおける670nmの蛍光強度で、 R_a はセル内に2N塩酸を2から3滴添加後の蛍光強度である。 v と V については式(1)と同様である。係数 F は、市販のクロロフィル a の試薬等を用いて決定するのが一般的であるが、ここでは分光法と蛍光法の異なるふたつの方法による測定値の差をなくすために、 F は次の方法で決定した。まず同一海水試料の一定量を5回づつ濾過して分光法により測定し式(1)で計算して、その平均値よりクロロフィル a 濃度を決定した。次にクロロフィル a 濃度が決定された海水試料の一定量を5回づつ濾過して蛍光法により測定を行い、得られた蛍光値の R_0 、 R_a と分光法により得られたクロロフィル a 濃度を式(2)に代入し、係数 F を求めた。この操作により分光法と蛍光法の異なるふたつの方法による測定値の差は無いものと考えられる。

結果および考察

Fig. 2 に、それぞれの観測点における透明度と表層海水（水深 0 m と 3 m）のクロロフィル a 濃度を示した。但し、クロロフィル a 濃度は GF/F フィルターを用いて測定した値である。透明度は湾奥部で低く 2.5~3.0 m であり、湾口部では高く 8.0~10.5 m であった。一方クロロフィル a 濃度は湾奥部で高く 5.41~11.6 $\mu\text{g/l}$ であり、湾口部では低く 0~1.03 $\mu\text{g/l}$ であった。Fig 2 には、太田川の流入する広島湾北部で植物プランクトン量が豊富で透明度も低く、沖合いになるに従い植

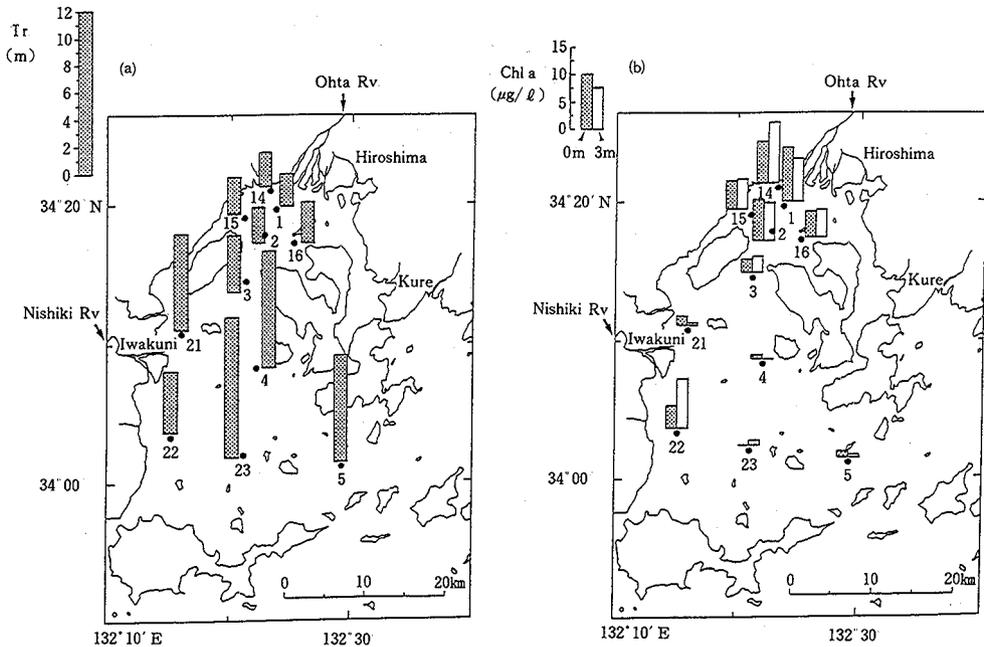


Fig 2a, 2b a ; Transparency in Hiroshima Bay
b ; Chlorophyll a concentrations of the surface seawater in Hiroshima Bay

物プランクトン量が減少し透明度も高くなる傾向がよく現れている。遠藤ら⁽¹⁴⁾は広島湾とそれに続く伊予灘にかけて水質調査を行い、その結果、広島湾北部の海域は陸水やそれともなう都市・産業排水の影響を受けているため、塩分は低く、窒素・リンの栄養塩は多く、また植物プランクトン量も多くて著しく富栄養化していることを明らかにしている。また湯浅ら⁽¹¹⁾によれば、広島湾では栄養塩と塩分の水平分布の関係から判断して海域の栄養塩はその大半が陸起源性のものであり、湾北部から流入する太田川の影響が大きいとしている。さらに、湾内の塩分、溶存酸素、栄養塩、植物プランクトン個体数等の季節変動から、富栄養化は湾奥部で最も著しく、ついで湾口部、中央部の順に進行していることが指摘されている。今回の観測で得られた透明度とクロロフィル a 濃度の水平分布は、この傾向をよく示している。なお、St.22で透明度が4.5mと低く、クロロフィル a 濃度が4.12~9.27 $\mu\text{g}/\ell$ と高いのは錦川からの栄養塩の豊富な河川水の流入の影響が考えられる。

Fig. 3は、本研究で用いた海水試料についてGF/Fフィルターを用いて求めたクロロフィル a の値と、孔径が0.2 μm のNucleporeフィルターを使用して求めたクロロフィル a の値を比較したものである。なおGF/Fフィルターの平均孔径は約1 μm である。クロロフィル a 濃度はGF/Fフィルターを用いた場合で0~11.6 $\mu\text{g}/\ell$ の広範囲にわたって変動し、両者の相関は高い ($r=0.893$, $n=21$)。また、この範囲内では、孔径が0.2 μm のNucleporeフィルターを使用して求めたクロロフィル a 濃度のほうが約1割高い。これは、平均孔径が約1 μm のGF/Fフィルターを通過するピコプランクトンが、平均的には全クロロフィル a 量の約1割程度存在していることを示している。しかし、関係式の切片は0.83で、クロロフィル a 濃度が1 $\mu\text{g}/\ell$ 程度の場合は両者の関係は大きく異なっている。前述のように通常クロロフィル a の測定にはGF/Fフィルターが用いられているが、広島湾の湾口部付近のようにクロロフィル a 濃度が1 $\mu\text{g}/\ell$ 程度の海域で測定を行う場合には注意が必要である。今後、広島湾以外の比較的貧栄養な海域においても、同様にGF/Fフィルターと孔径が0.2 μm のNucleporeフィルターを使用して得られるクロロフィル a の値の相互関係について、さらに検討を行う必要があると考えられる。

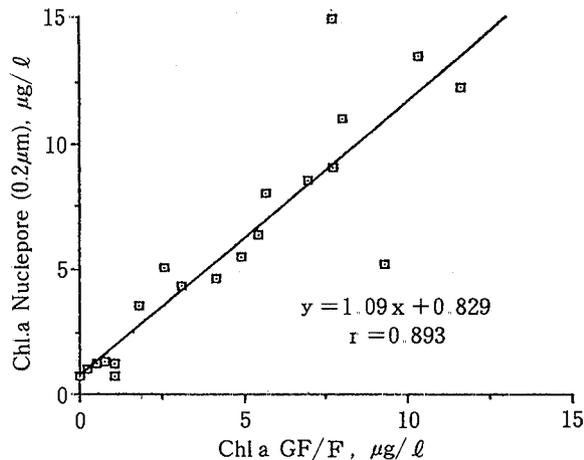


Fig.3 Chlorophyll a concentrations in the surface seawater measured on Whatman GF/F and Nuclepore (0.2 μm) filters in Hiroshima Bay

Fig. 4に、太田川河口域から湾口へ向けての南北線上 (Fig. 1中のA) の観測点について、表層水 (水深2m) 中の塩分とサイズ別のクロロフィル a 濃度を示した。太田川河口域から湾口へ向け

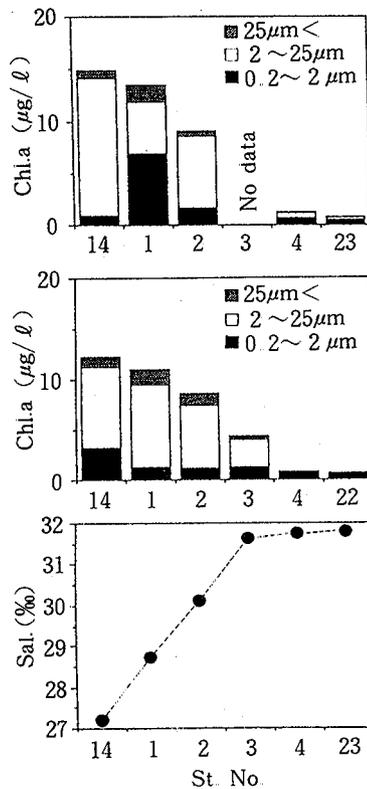


Fig 4 Changes in three size-fractionated concentrations of chlorophyll a at 0m depth (top), at 3m depth (middle) and salinity at 2m depth (bottom) on line A (from St.14 to St.23) in Hiroshima Bay

て、塩分は漸増し、逆にクロロフィルa濃度は漸減している。さらに、サイズ別のクロロフィルa濃度に注目すると2~25μmのナノプランクトンサイズの増減がいちばん大きい。一方、栄養塩濃度は湾奥部より湾口部が低くなっていることが知られており⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾、太田川からの栄養塩の流入が植物プランクトン量とそのサイズ組成に影響を及ぼしていることが予想される。

Fig. 5は、広島湾の全域に渡る観測点についてクロロフィルa濃度を0~5および5~15μg/lのふたつの画分に分けて、植物プランクトンのサイズ組成を表したものである。前述のようにクロロフィルa濃度は湾の中央部や湾口部では低く、この海域のクロロフィルa濃度は0~5μg/lであり、この濃度範囲ではピコプランクトンが平均57%を占めている。一方、湾奥部ではクロロフィルa濃度は高く5μg/l以上であり、この濃度範囲ではナノプランクトンが平均68%を占め最も卓越している。以上のように、クロロフィルa濃度により、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いる。湾の全域において、ピコプランクトンサイズのクロロフィルa濃度はSt.1の0mでは6.86μg/lであるが、これを除くと0.700~3.15μg/lでその変動割合は小さく、湾内のどの海域においてもほぼ一定量存在していることがわかる。一方、ナノプランクトンサイズのクロロフィルa濃度の増減は0.203~13.2μg/lで最も大きい。次に、全クロロフィルa濃度とナノプランクトンサイズが全クロロフィルa濃度に占める割合との関係について見てみると (Fig 6), 両者の

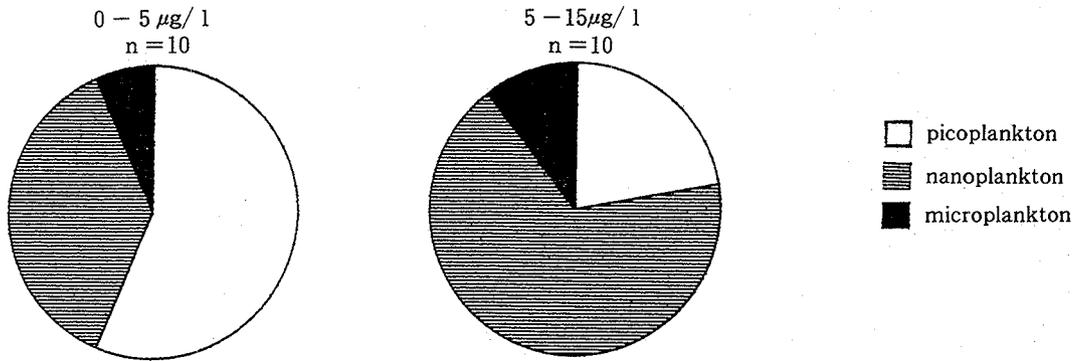


Fig 5 Size composition of the chlorophyll a of the surface seawater in Hiroshima Bay

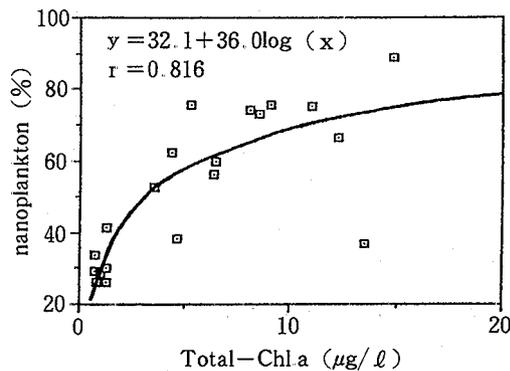


Fig 6 Correlation between total chlorophyll a concentrations and nanoplankton content of the surface seawater in Hiroshima Bay

相関は高く ($r = 0.816$, $n = 20$)、このサイズの変動が全クロロフィル a 濃度の増減に大きく寄与していることがわかる。

以上の結果より、明らかに植物プランクトン群集のサイズ組成は湾奥部から沖合いに向かって小型化しており、栄養塩濃度は前述のように湾奥部より沖合いになるほど低くなっていると考えられる。Parsons and Takahashi⁽¹⁵⁾は、栄養塩濃度はセルサイズを決定する重要な要因であることを指摘している。一般に細胞サイズの小さいものほど表面積/体積比が大きいため栄養塩濃度の低い環境下での生存に有利とされている。本研究で得られた広島湾内の植物プランクトンのサイズ組成の水平分布は、このことを支持している。

広島湾では、サイズ別にみるとミクロプランクトン、ナノプランクトンおよびピコプランクトンが全植物プランクトンに占める割合は、湾全域の平均でそれぞれ 8、53および39%となっており、ナノプランクトンのサイズ画分が最も多い。山口⁽⁹⁾は大阪湾において、全植物プランクトンに占めるナノプランクトンの割合は平均45%と報告しており、この値は今回得られた値と同程度である。またピコプランクトンの割合は湾奥部で平均22%、湾口部で平均66%であり湾全域では平均39%である。この割合は、これまでに外洋域の亜熱帯水域等で報告されている値 (80~90%)⁽³⁾に比べるとはるかに小さく、このことは内湾域の特徴を示していると思われる。なお今回の調査で得られた結

果ではミクロプランクトンが全植物プランクトンに占める割合は平均で8%と低い値であったが、この割合は季節的に変化し、その変動割合も他のサイズ画分のそれに比べて大きいことが予想される⁽⁶⁾⁽⁷⁾。事実、瀬戸内海の播磨灘では夏季に鉛直混合が起こった直後にはミクロプランクトンが卓越することが観察されている(多田, 未発表)。

本研究で取りあげた広島湾は、湾内の湾奥部と湾口部では化学環境が著しく異なっている。今後、この湾のサイズ別のクロロフィルa濃度の変動だけでなく、各サイズを構成するプランクトンの種類の変化についても検討する必要がある。また、これらの方法によって得られるデータを様々な海域において蓄積することにより、内湾域でセルサイズを決定する環境要因がより明らかになると考えられる。さらに、サイズ別のクロロフィルa量と有機炭素量との比あるいは、サイズ別の光合成速度についても、今後に残された興味ある研究課題である。

要 約

瀬戸内海の中でも比較的富栄養化度の高い海域である広島湾内の表層海水中の植物プランクトンのサイズ分布について調べた。湾内に設定した11の観測点から採取された表層水について、孔径の異なるフィルターを用いて海水を濾過し、0.2~2.0 μm 、2.0~25 μm 、25 μm 以上の3画分のサイズ別のクロロフィルa濃度を測定した。全クロロフィルa濃度は湾奥部で高く湾口部では低くなっており、さらにそのサイズ組成から見ると湾口部ほど小型の植物プランクトンが優先していた。この傾向は塩分の分布等から、太田川からの栄養塩の流入の影響によるものと推察された。また、湾内の全域におけるクロロフィルa濃度のサイズ組成の変動では、ナノプランクトンサイズの変動が0.203~13.2 $\mu\text{g}/\text{l}$ で最も大きく、このサイズの変動が全クロロフィルa濃度の増減に大きく寄与していた。一方、ピコプランクトンサイズは0.700~3.15 $\mu\text{g}/\text{l}$ でその変動割合は小さく、湾内のどの海域においてもほぼ一定量存在していた。さらにピコプランクトンが全植物プランクトンに占める割合は湾全域の平均値で39%であり、これまでに外洋域の亜熱帯水域等で報告されている値(80~90%)に比べるとはるかに小さく、このことは内湾域の特徴を示していると思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、広島大学生物生産学部・練習船豊潮丸に乗船する機会を与えて下さった同学部水産環境学講座松田治教授、山本民次講師および試料採取の際に大変お世話になった同講座の橋本俊也先生に、深く感謝致します。また海洋観測や試料採取に御協力いただいた豊潮丸の郷秋雄船長をはじめ乗組員の皆様に深く感謝致します。

最後に、原稿を校閲して懇切な御助言を下された香川大学農学部門谷茂助教授に厚く感謝致します。

引 用 文 献

- (1) 谷口 旭：海とプランクトン，1. 浮遊生物学概説(1). 海洋と生物，43，82-87 (1986)。
- (2) 田中庸央・佐野万昂・大沼淳一：三河湾におけるナノ植物プランクトンの生産。月刊海洋，22，87-92 (1990)。
- (3) Stockner, J. G.: Phototrophic picoplankton; An overview from marine and freshwater ecosystems. *Limnol Oceanogr.* 33, 765-775 (1988)。
- (4) Furuya, K and Marumo, R.: Size distribution of phytoplankton in the western Pacific Ocean and adjacent waters in summer. *Bull Plankton Soc Japan*, 30, 21-32 (1983)。
- (5) 米田義昭・小達恒夫：北太平洋におけるクロロフィルaを指標とした植物プランクトンのサイズ分布。海洋工学コンフェレンス論文集，1，37-43 (1989)。

- (6) Odate, T., Yanada, M., Mizuta, H., and Maita, Y.: Phytoplankton carbon estimated from the size-fractionated chlorophyll *a* concentration and cell density in the north coastal waters from spring bloom to summer. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 39, 127-144 (1993).
- (7) Maita, Y. and Odate, T.: Seasonal changes in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funka Bay, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 44, 268-279 (1988).
- (8) Tanaka, T., Sano, M., and Ohnuma, J.: Changes in size composition of summer primary producers in eutrophic Mikawa Bay, Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 35, 21-34 (1988).
- (9) 山口峰生：植物プランクトンの生産，海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究（第1期）成果報告書，科学技術庁研究開発局，218-222 (1985).
- (10) 川村雅彦・清水浩輔：瀬戸内海Ⅱ（C. 広島湾），pp. 698-702. 日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，東京（1985）.
- (11) 湯浅一郎・上嶋英機・室田盛康・橋本英資：広島湾・呉湾における水質変動特性. 中国工業技術試験所報告，22, 47-66 (1984).
- (12) Parsons, T. R., Maita, Y. and Lalli, G. M.: A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis 173 p. Pergamon Press, Oxford (1984).
- (13) Suzuki, R. and Ishimaru, T.: An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-Dimethyl-formamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 46, 190-194 (1990).
- (14) 遠藤拓郎・坪田博行・早瀬光司・岡野正義・荒谷孝昭：太田川・広島湾・伊予灘の水質環境. 環境科学研究報告書. B-204-R01-2 瀬戸内河口域における生物の動態と環境 (1984).
- (15) Parsons, T. R. and Takahashi, M.: Environment control of phytoplankton cell size. *Limnol. Oceanogr.*, 18, 511-515 (1973).

(1993年10月29日受理)