

## 東京湾湾奥部と湾口部の表層におけるサイズ分画 クロロフィルa濃度と植物プランクトン群集の季節変動

橋本慎治<sup>1†</sup>, 橋本千尋<sup>1</sup>

### Seasonal variations in size-fractionated Chl-*a* and cell density of phytoplankton communities at sea surface in the inner part and the mouth of the coast of Tokyo Bay

Shinji HASHIMOTO<sup>\*†</sup> and Chihiro HASHIMOTO<sup>\*</sup>

東京湾湾奥部と湾口部の観測定点において2012年4月から12月まで月1回沿岸海表面におけるサイズ分画 (>10 μm, 2–10 μm, <2 μm) したクロロフィルa濃度, 栄養塩濃度およびマイクロ植物プランクトン (>10 μm) の細胞密度を調べた。その結果, 両定点の植物プランクトン種やサイズ組成の季節変動は夏季を除くと類似していた。両定点とも4月は>10 μm画分の大型珪藻が高い割合を占めたが, 5月になると<2 μm画分が優占し, またラフィド藻 (*Heterosigma akashiwo*) が優占していた。このことから4月から5月にかけて湾奥部と湾口部で植物プランクトンの遷移が同期的に起こっていたと考えられた。また4月から5月にかけて両定点の硝酸塩+亜硝酸塩濃度が急激に減少したことがその要因として考えられた。一方, 夏季における両定点のサイズ分画したクロロフィルa濃度やマイクロ植物プランクトンの種組成で相違が見られ, 栄養塩濃度の違いが要因の一つとして示唆された。

キーワード: 栄養塩, サイズ分画クロロフィルa, 植物プランクトン群集, 東京湾, 湾奥, 湾口

To clarify the seasonal variations in the phytoplankton community and the mechanism in Tokyo Bay, the concentrations of size-fractionated (>10 μm, 2–10 μm, <2 μm) chlorophyll *a* (Chl-*a*) and nutrients, and the abundance of large-sized phytoplankton species (>10 μm) were investigated at the surface of the inner part and mouth of the bay from April to December 2012. In spring, fall and winter, the seasonal variations in the concentrations of size-fractionated Chl-*a* and the abundance of large-sized phytoplankton species were similar between the inner part and mouth of the bay. In April, the total Chl-*a* concentration was high during the observation periods at both stations, and the >10 μm fraction accounted for more than 50% of the total Chl-*a* concentration. Further, the large-sized diatom accounted for a high proportion of the phytoplankton community. However, in May, the <2 μm fraction and raphidophyte (*Heterosigma akashiwo*) were dominant at both stations. Consequently, it is probable that the succession of phytoplankton occurs synchronously in the inner part and mouth of the bay from April to May. Nitrate+nitrite concentrations rapidly decreased from April to May at both stations. Therefore, it is likely that the size-fractionated Chl-*a* concentration and the phytoplankton community in the bay were strongly affected by the nitrate+nitrite concentration. On the other hand, a difference was observed with the seasonal variations in the size-fractionated Chl-*a* concentrations and species composition of the phytoplankton community at both stations during summer. It is possible that the difference was caused by the nutrient concentrations.

**Key words:** inner part of bay, mouth of bay, nutrient, phytoplankton community, size-fractionated chlorophyll *a*, Tokyo Bay

2016年9月13日受付, 2019年7月4日受理

<sup>1</sup> 帝京科学大学生命環境学部, 〒120-0045 東京都足立区千住桜木 2-2-1

Teikyo University of Science, Faculty of Life and Environmental Sciences, 2-2-1 Senju Sakuragi, Adachi, Tokyo 120-0045, Japan

† hashimoto@ntu.ac.jp

#### はじめに

海洋生態系の一次生産を支える植物プランクトンについて, 現存量やそのサイズ組成を明らかにすることは, その海域における生態系や物質循環を理解するうえで重要である(例えば, Lalli and Parsons, 1993; Legendre and Rassoulzadegan, 1996). 日本周辺の内湾域における植物プランクトンのサ

イズ組成に着目した研究では、冬から春に大型植物プランクトンが優占し、夏から秋にかけて小型植物プランクトンが高い割合を示すことが報告されている（噴火湾：Maita and Odate, 1988, 広島湾：李ほか, 1996, 東京湾：Nakane et al., 2008）。しかしながら、富栄養化した内湾における植物プランクトンのサイズ組成に関する知見は少ない。

東京湾流域には約2600万人が生活しており、人間活動により排出された窒素やリンは河川や下水処理場、工場などを通じて東京湾に流入する（高田, 1993）。東京湾は閉鎖性内湾であるため富栄養状態となり、その結果、春から夏にかけて珪藻、ラフィド藻、渦鞭毛藻などナノからマイクロサイズの植物プランクトンによる  $100 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  を超える非常に高いクロロフィル *a* 濃度が見られ、世界で最も一次生産が高い海域の一つとなっている（岡市, 1987; 山口・有賀, 1988; 野村, 1995, 1998; Cloern et al., 2014）。植物プランクトンの死骸は海底に沈降し、バクテリアなどの分解を受けることにより海底付近には貧酸素水塊が発生し、底生生物や魚類に大きな影響をもたらすことが報告されている（風呂田, 1988）。さらに埋め立てによる浅海漁場の消失も加わり、東京湾の総漁獲量は1960年代半ば以降減少傾向を示している（東京湾海洋環境研究委員会, 2011）。このような状況から現在の東京湾における海洋環境や海洋生態系を理解することは東京湾の保全・再生に貢献するだけでなく、今後の漁業資源を理解するうえでも重要である。

栄養塩に関して東京湾中央部表層のリン酸塩濃度は1970年を境に減少傾向が認められるが、硝酸塩濃度は逆に増加傾向にある（東京湾海洋環境研究委員会, 2011）。N:P比は植物プランクトンの栄養制限を評価する指標として用いることができ（田口, 2016）、東京湾の植物プランクトンの栄養状態の指標となるレッドフィールド比（N:P比）は、38:1と一般的な要求比率（16:1）よりはるかに高く、リン制限となっていることが報告されている（東京湾海洋環境研究委員会, 2011）。

東京湾湾奥部は河川水（八木ほか, 1998; 鯉淵ほか, 2000; Nakane et al., 2008）、湾口部は外洋水の影響を強く受け（Yanagi et al., 1989; 八木ほか, 2003; 鈴木ほか, 2008）、一次生産の動態に重要な役割を果たす。東京湾表層におけるクロロフィル *a* 濃度は湾奥部で  $20\text{--}100 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、湾中央部で  $20\text{--}40 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、湾口部で  $10\text{--}20 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  と湾奥部から湾口部にかけて減少傾向が見られる（山口・柴田, 1979）。したがって、湾奥部と湾口部では植物プランクトン現存量やそのサイズ組成が異なることが推測される。しかしながら、これまでの調査の多くは湾奥部と湾口部の全クロロフィル *a* 濃度を調査したものや異なった季節や年の比較であり、湾奥部と湾口部それぞれにおける植物プランクトンのサイズ組成や種を同時に調査した例はない。特に、東京湾におけるサイズ分画した調査は Han and Furuya (2000) による湾奥部の報告のみであり、湾奥部と湾口部の同時期の植物プランク

トンのサイズや種についての季節変動は明らかではない。

そこで本研究は東京湾湾奥部および湾口部の沿岸域におけるクロロフィル *a* 濃度を3つのサイズ組成 ( $>10 \mu\text{m}$ ,  $2\text{--}10 \mu\text{m}$ ,  $<2 \mu\text{m}$ ) に分画し、各サイズ画分におけるクロロフィル *a* 濃度およびマイクロ植物プランクトン群集において湾奥部と湾口部の季節変動を明らかにし、その季節的、地理的変動の要因を考察した。

### 試料および方法

東京湾沿岸の豊海水産ふ頭（St. A: 湾奥部,  $35^{\circ}39.0'N$ ,  $139^{\circ}46.0'E$ ）と金沢漁港（St. B: 湾口部,  $35^{\circ}20.0'N$ ,  $139^{\circ}38.3'E$ ）に設置した観測地点において2012年4月から12月の間に月1回、同じ日にバケツを用いて表面水を採水することで試料を採集した（Fig. 1）。試料は水温を測定した後、サイズ別のクロロフィル *a* 濃度を測定するために3種類のフィルター {Whatmann GF/F フィルター（孔径：約  $0.7 \mu\text{m}$ ）、孔径  $2 \mu\text{m}$  と  $10 \mu\text{m}$  の Nuclepore フィルター} を用いて現場でろ過を行った。ろ過の吸引圧は  $200 \text{ mmHg}$  以下とし、ろ水量は状況に応じて  $100\text{--}200 \text{ ml}$  の範囲で調整した。実験室に持ち帰った後、それぞれのフィルターから90%アセトンを用いてクロロフィル *a* を抽出し（Parsons et al., 1984）、日本海洋学会（2008）の方法に従って、分光光度計（Thermo Scientific, GENESYS 10S UV-VIS）を用いてクロロフィル *a* 濃度を測定した。Whatmann GF/F フィルターで得られたクロロフィル *a* 濃度を植物プランクトン群集全体の値とした。 $<2 \mu\text{m}$  画分は Whatmann GF/F フィルターと  $2 \mu\text{m}$  Nuclepore フィルターのクロロフィル *a* 濃度の差から、 $2\text{--}10 \mu\text{m}$  画分は  $2 \mu\text{m}$  と  $10 \mu\text{m}$  の Nuclepore フィルターのクロロフィル *a* 濃度の差から、 $>10 \mu\text{m}$  画分は  $10 \mu\text{m}$  の Nuclepore フィルターのクロロフィル *a* 濃度から算出した。

Whatmann GF/F フィルターでろ過した海水を用いて栄養塩（硝酸塩+亜硝酸塩、アンモニウム塩、リン酸塩）濃度を測定した。ろ過から分析するまでの間、試料を  $-20^{\circ}\text{C}$  で凍結し保存した。各栄養塩濃度の測定方法は日本海洋学会（2008）に従い、分析機器としては分光光度計（Thermo Scientific: GENESYS 10S UV-VIS）を用いた。

マイクロ植物プランクトンの細胞密度を種レベルで調べるために海水試料  $100 \text{ ml}$  を採集し、グルタルアルデヒドで固定した（最終濃度1%）。検鏡には光学顕微鏡（Kenis: Model JTO）を用い  $100 \text{ ml}$  中の全細胞数を2週間以内に同定・計数し、 $1 \text{ ml}$  当たりの細胞密度を算出した。植物プランクトン種の同定は山路（1984）に従った。

2変量の相関は Spearman の順位相関係数 ( $r_s$ ) を計算し、有意水準5%で *t* 検定を行った。

### 結果

#### 水温

調査期間における湾奥部および湾口部の水温はそれぞれ

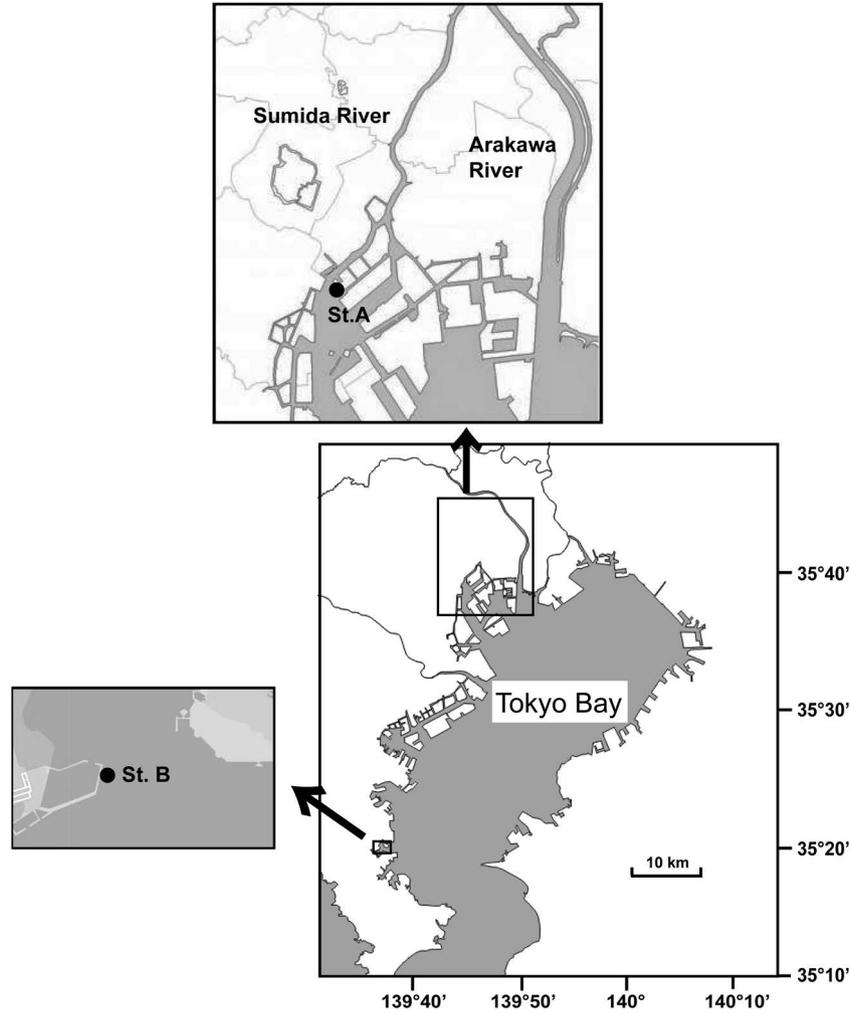


Figure 1. Location of sampling stations (St. A: Toyomi Suisan wharf, St. B: Kanazawa fishing port) in Tokyo Bay.

14.4–30.2°C (平均値±標準偏差: 22.0±5.7°C), 14.2–28.0°C (20.9±4.8°C) の範囲で, ほぼ同様の変動パターンを示し, 両定点ともに8月に最も高い値を示した (Fig. 2).

**栄養塩濃度**

調査期間における硝酸塩+亜硝酸塩濃度は湾奥部が5–123  $\mu\text{M}$  ( $59\pm 43 \mu\text{M}$ ), 湾口部が2–104  $\mu\text{M}$  ( $31\pm 41 \mu\text{M}$ ) の範囲で変動し, 湾奥部で高い傾向を示した (Fig. 3a). 両定点とも4月から9月にかけて季節変動が非常に大きかった. 湾奥部では5月と8月に約5  $\mu\text{M}$  と低い値であったが, 7月と9月に100  $\mu\text{M}$  以上の高い値を示した. 一方, 湾口部は5月, 7月, 9月に5  $\mu\text{M}$  以下の低い濃度を示し, 6月と8月に100  $\mu\text{M}$  程度の高い値を示した. アンモニウム塩濃度は湾奥部が20–65  $\mu\text{M}$  ( $38\pm 17 \mu\text{M}$ ), 湾口部が0.5–4.4  $\mu\text{M}$  ( $2.9\pm 2.7 \mu\text{M}$ ) の範囲であった (Fig. 3b). 湾奥部のアンモニウム塩濃度は調査期間を通して湾口部よりも高い値で変動幅も大きかった. リン酸塩濃度は湾奥部で2.7–6.9  $\mu\text{M}$  ( $4.5\pm 1.5 \mu\text{M}$ ), 湾口部で0.2–1.8  $\mu\text{M}$  ( $0.9\pm 0.6 \mu\text{M}$ ) の範囲で変化した (Fig.

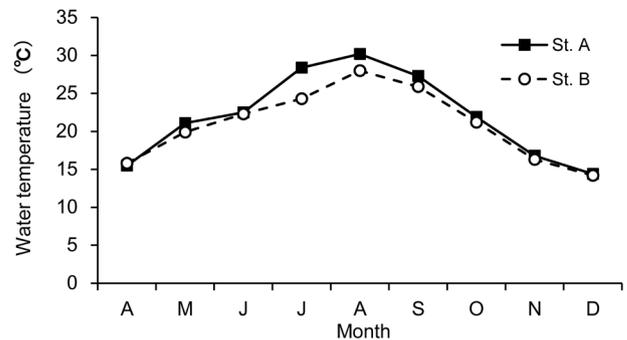
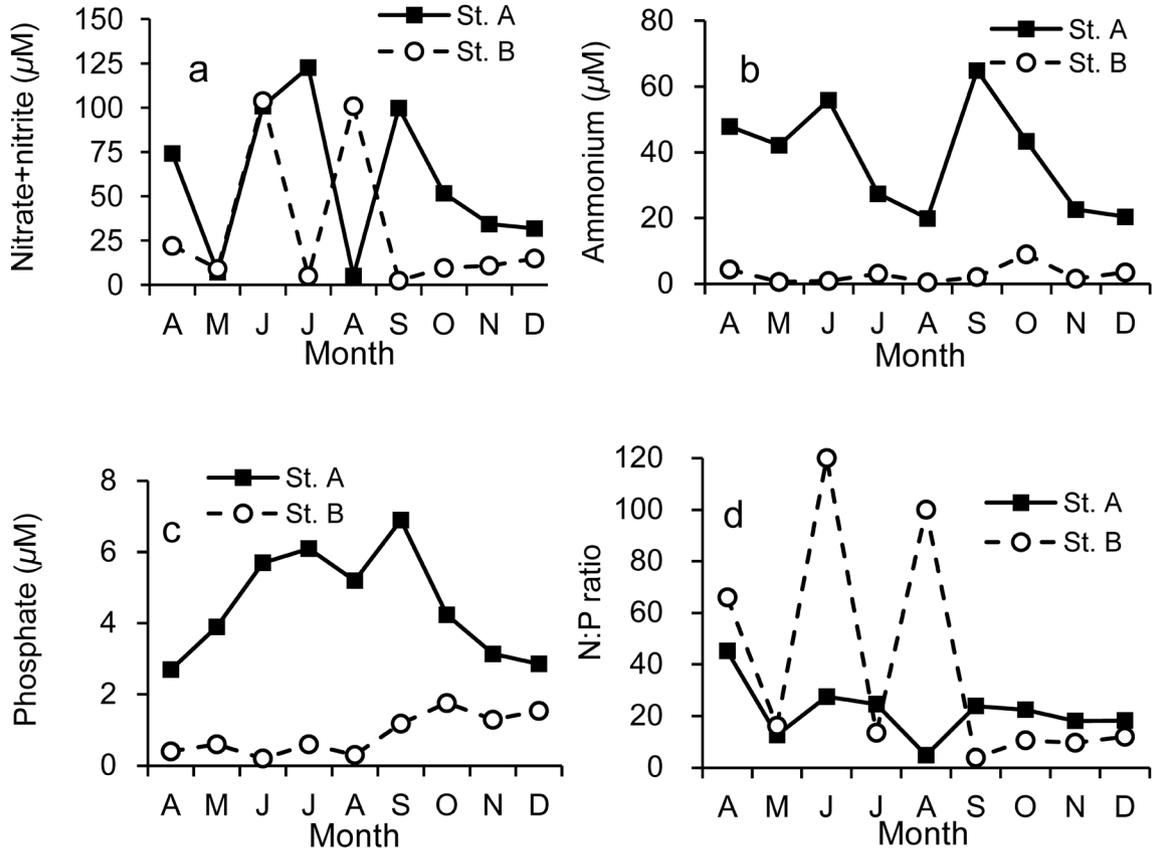


Figure 2. Seasonal variations in sea surface temperature at St. A (■) and St. B (○) from April 22 to December 20, 2012.

3c). アンモニウム塩と同様に, リン酸塩は調査期間を通して湾口部よりも高い値で推移し, 変動幅も大きかった. 湾奥部におけるすべての栄養塩濃度が4月から10月にかけて大きな変動を示したが, 11月と12月は大きな変動を示さなかった. このように両定点での各栄養塩濃度の季節変



**Figure 3.** Seasonal variations in concentrations of nitrate+nitrite (a), ammonium (b) and phosphate (c), and in N : P ratio (d) at St. A (■) and St. B (○) from April 22 to December 20, 2012.

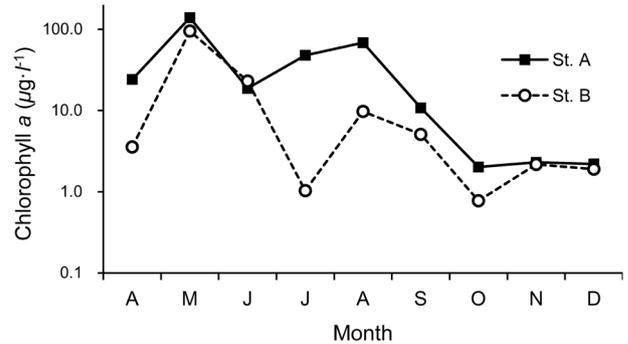
動パターンに大きな相違が認められた。

硝酸塩+亜硝酸塩濃度とアンモニウム濃度の合計 (DIN) とリン酸塩濃度 (DIP) の比 (DIN : DIP 比) は湾奥部が 4.8–45.2 ( $21.9 \pm 11.1$ ), 湾口部が 3.8–120.0 ( $39.1 \pm 44.5$ ) の範囲で変動した。DIN : DIP 比は 16 よりも低い月は湾奥部では 5 月, 8 月の 2 か月間のみであったが, 湾口部では 7 月, 9 月, 10 月, 11 月, 12 月と 5 か月間存在した (Fig. 3d)。これらの結果から, 植物プランクトンは湾奥部でリン制限, 湾口部で窒素制限を受けやすい状況にあったと考えられた。

**クロロフィル a 濃度**

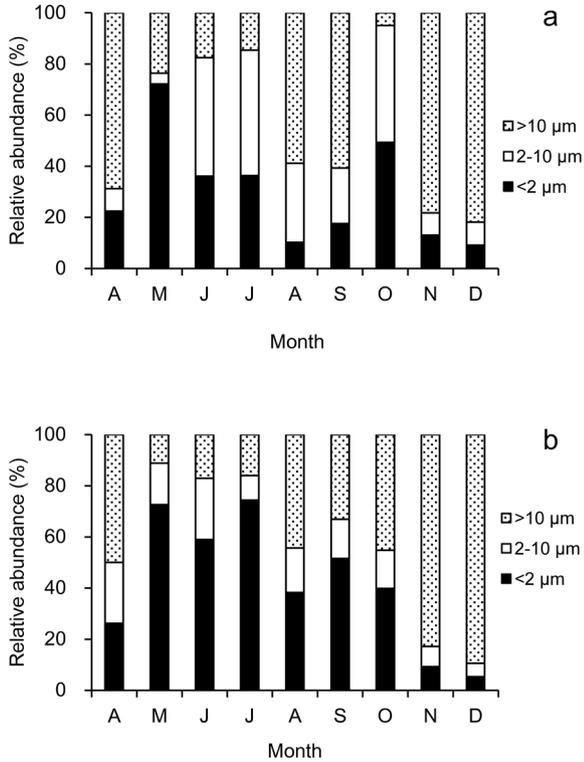
調査期間における全クロロフィル a 濃度は湾奥部では 2.0–138.9  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $35.1 \pm 45.1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ), 湾口部では 0.8–95.2  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $15.8 \pm 30.6 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) の範囲で変動した (Fig. 4)。両定点とも 5 月に最大値を示した。また, 湾奥部では 8 月にも 50  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  以上の高い値が観測されたが, 湾口部では観測されなかった。湾奥部の全クロロフィル a 濃度は湾口部よりも高い傾向を示した。両定点とも 4 月から 10 月にかけて大きな変動を示したが, 11 月と 12 月は安定して推移した (Fig. 4)。

各サイズ画分の相対的な割合についてみると, 湾奥部における  $<2 \mu\text{m}$  画分の割合は, 9–72% ( $30 \pm 21\%$ ),  $2\text{--}10 \mu\text{m}$  画分では 4–49% ( $25 \pm 18\%$ ),  $>10 \mu\text{m}$  画分では 5–82% ( $45 \pm 30\%$ )



**Figure 4.** Seasonal variations in concentrations of total chlorophyll a at St. A (■) and St. B (○) from April 22 to December 20, 2012.

の範囲で変動した (Fig. 5a)。一方, 湾口部ではそれぞれ  $<2 \mu\text{m}$  画分は 5–74% ( $42 \pm 25\%$ ),  $2\text{--}10 \mu\text{m}$  画分では 5–24% ( $15 \pm 6\%$ ),  $>10 \mu\text{m}$  画分では 11–89% ( $43 \pm 28\%$ ) の範囲で変動した (Fig. 5b)。両定点とも全クロロフィル a 濃度の最も高い値を示した 5 月に,  $<2 \mu\text{m}$  画分が 70% 以上の高い割合を示した。湾奥部の  $>10 \mu\text{m}$  画分は 4, 8, 9, 11, 12 月, 湾口部では 4, 11, 12 月に 50% 以上を占めていた (Fig. 5a, b)。湾奥

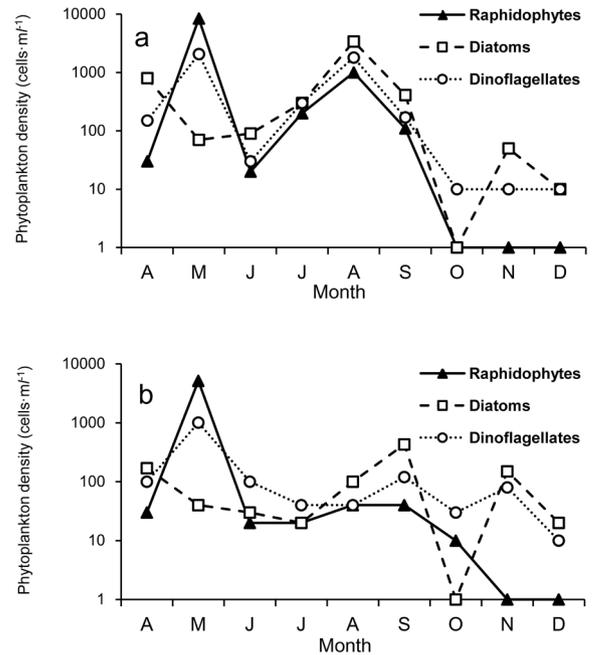


**Figure 5.** Seasonal variations in relative abundance of size-fractionated chlorophyll *a* at St. A (a) and St. B (b) from April 22 to December 20, 2012.

部では8月と9月に>10 μm画分の高い値が見られたが、湾口部では見られなかった。また、11月と12月の>10 μm画分は両定点とも80%前後の高い割合を示した (Fig. 5a, b).

#### 植物プランクトンの種組成

本研究では珪藻、渦鞭毛藻、ラフィド藻が多く出現した (Fig. 6a, b)。いずれの定点においても珪藻では *Skeletonema costatum*、渦鞭毛藻では春季に *Prorocentrum minimum*、夏季に *Prorocentrum triestinum*、ラフィド藻では *Heterosigma akashiwo* が多く出現した。湾奥部におけるそれぞれの細胞密度は、珪藻が  $1\text{--}3400\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ( $570\pm 1100\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )、渦鞭毛藻が  $10\text{--}2070\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ( $510\pm 820\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )、ラフィド藻が  $1\text{--}8400\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ( $1090\pm 2760\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) であった (Fig. 6a)。一方、湾口部では珪藻が  $1\text{--}430\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ( $110\pm 140\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )、渦鞭毛藻が  $10\text{--}1010\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ( $170\pm 320\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )、ラフィド藻が  $1\text{--}5160\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  ( $590\pm 1710\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) であった (Fig. 6b)。4月には両定点とも *S. costatum* が優占していた (Table 1)。しかしながら、両定点とも5月にはラフィド藻が最大密度を示し (Fig. 6a, b)、その優占種は *H. akashiwo* であった (Table 1)。一方、8月の湾奥部は湾口部と異なり、ラフィド藻、珪藻、渦鞭毛藻とすべての植物プランクトン種が高い細胞密度を示した (Fig. 6a)。いずれの分類群においても湾口部と湾奥部の細胞密度の間で有意な相関関係は認められなかった (ラフィド藻:  $r_s=0.22$ ,



**Figure 6.** Seasonal variations in cell density of phytoplankton (cell size of >10 μm) at St. A (a) and St. B (b) from April 22 to December 20, 2012.

**Table 1.** Cell density (cells mL<sup>-1</sup>) of phytoplankton species observed at St. A and St. B in April 22 and May 24, 2012.

	April		May	
	St. A	St. B	St. A	St. B
<i>Heterosigma akashiwo</i>	30	30	8400	5160
<i>Skeletonema costatum</i>	800	170	70	40
<i>Heterocapsa</i> spp.	50	50	0	0
<i>Gymnodinium</i> spp.	10	20	0	0
<i>Prorocentrum minimum</i>	20	0	2030	1010
<i>Prorocentrum micans</i>	50	10	0	0
<i>Protoperdinium</i> spp.	20	20	0	0
<i>Ceratium furca</i>	0	0	30	0
<i>Ceratium fusus</i>	0	0	10	0

$p>0.5$ ; 珪藻:  $r_s=0.38, p>0.1$ ; 渦鞭毛藻:  $r_s=0.59, p>0.05$ ).

各細胞密度の相対的な割合は、湾奥部ではラフィド藻が2–80% (19±24%), 珪藻が1–82% (48±29%), 渦鞭毛藻が15–83% (33±22%) の範囲であった。一方、湾口部ではラフィド藻が1–83% (21±25%), 珪藻が1–73% (40±28%), 渦鞭毛藻が16–73% (39±20%) の範囲であった。ラフィド藻は両定点とも5月を除くと相対的に低い割合であった。

#### 植物プランクトン群集の季節変動と環境要因との関係

全クロロフィル *a* 濃度と水温および各栄養塩濃度との相関についての有意性を調べた。その結果、全クロロフィル *a* 濃度は水温 ( $r_s=0.32, p>0.1$ ) および各栄養塩濃度 (硝酸塩+

亜硝酸塩： $r_s=0.17, p>0.5$ ；アンモニウム塩： $r_s=0.17, p>0.1$ ；リン酸塩： $r_s=0.23, p>0.1$ ）とは相関関係が認められなかった。また、すべてのサイズ画分においても水温および栄養塩濃度とは有意な関係は得られなかった。

それぞれの植物プランクトン細胞密度と水温、各栄養塩濃度およびDIN:DIP比との相関についての有意性を調べた。どの植物プランクトン種においても測定したすべての栄養塩濃度およびDIN:DIP比と有意な相関を示さなかった。また水温に関しても珪藻、渦鞭毛藻は相関関係を示さなかった（珪藻： $r_s=0.37, p>0.1$ ；渦鞭毛藻： $r_s=0.40, p>0.1$ ）が、ラフィド藻は有意な正の相関関係を示した（ $r_s=0.53, p<0.05$ ）。

## 考察

### クロロフィルa濃度と植物プランクトンの季節変動

#### 春季

春季のクロロフィルa濃度やそのサイズ組成およびマイクロ植物プランクトンの細胞密度や種組成は湾奥部と湾口部で類似した季節変動が観察された。サイズ分画したクロロフィルa濃度から、両定点とも4月には $>10\mu\text{m}$ 画分が50%以上の高い割合を示し、大型珪藻が大きな割合を占めていたことから、他の沿岸海域で見られるような大型珪藻によるブルームを形成していた（例えば、Maita and Odate, 1988; 塩本ほか, 2018）。このような事象は過去にも報告され、東京湾では一般的な特徴の一つであると考えられる（Han et al., 1992; Nakane et al., 2008）。沿岸域では大型珪藻による春季ブルームは窒素成分（硝酸塩）の枯渇とともに終了することが報告されている（例えば、Kudo et al., 2000; 塩本ほか, 2015, 2018）。5月の栄養塩濃度を見ると、硝酸塩+亜硝酸塩濃度が4月よりも急激に減少していた（Fig. 3a）。これは大型珪藻による取り込みによってもたらされたと考えられる。両定点とも4月に大きな割合を占めていた大型珪藻が5月には密度、割合ともに減少したことから、硝酸塩+亜硝酸塩濃度がその要因の一つであると考えられた。

一方、5月の全クロロフィルa濃度は両定点とも調査期間を通して最も高く（湾奥部： $139\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 、湾口部： $95\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ）、4月とは異なり $<2\mu\text{m}$ 画分が優占していた（Figs. 4, 5）。さらに、4月から5月にかけて湾奥部および湾口部においてラフィド藻の*H. akashiwo*が優占し、植物プランクトン種の遷移も同期的に起こることが明らかとなった（Table 1）。このように4月から5月にかけて両定点とも植物プランクトンの種組成やサイズ組成に大きな変化が見られた（Table 1, Figs. 5, 6）。東京湾における*H. akashiwo*は5月にしばしば優占することが報告されており（野村, 1998）、本研究結果は特別な事象ではないと考えられる。*H. akashiwo*の増殖に関する水温の好適条件は $15\text{--}25^\circ\text{C}$ である（吉田ほか, 1998a）。5月の水温は両定点とも約 $20^\circ\text{C}$ であったことから、*H. akashiwo*にとって好適条件下であったと考えられた（Fig. 2）。吉田ほか（1998a, b）はまた*H. akashiwo*がDIN:

DIP比の低い水域に高密度に出現する傾向を示した。調査期間を通じた*H. akashiwo*とDIN:DIP比との間に有意な相関性は示さなかったが、両定点における5月のDIN:DIP比は他の時期よりも低い傾向を示した（Fig. 3d）。したがって、4月から5月にかけて硝酸塩+亜硝酸塩濃度の急激な減少が植物プランクトンの種組成やサイズ組成に大きな変化をもたらしたと考えられた。このようなプロセスは東京湾全域で起きていた可能性があり、この時期の東京湾における群集構造の遷移を理解するうえで重要であると考えられた。

#### 夏季

湾奥部では8月にも硝酸塩+亜硝酸塩は低い濃度（約 $5\mu\text{M}$ ）を示す一方で、全クロロフィルa濃度は高い値（ $68\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ）を示した（Fig. 4）。過去の研究（山口・有賀, 1988）でも夏季の湾奥部において高いクロロフィルa濃度（ $50\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上）が報告されており、湾奥部では夏にも植物プランクトンの高い生産が維持されていると考えられた。8月のクロロフィルa濃度は $>10\mu\text{m}$ 画分の割合が最も高く、5月にはほとんど出現しなかった珪藻（*S. costatum*）や渦鞭毛藻（*P. triestinum*）が多く出現した（Fig. 6a）。東京湾では夏に珪藻の*S. costatum*による赤潮もまた報告されている（野村, 1998; Han and Furuya, 2000）。以上のことから、湾奥部における5月と8月のサイズ組成の変化は渦鞭毛藻や珪藻の増加に伴う群集構造の変化が原因であると考えられた。また、8月の硝酸塩+亜硝酸塩濃度の低下は大型植物プランクトンによって消費されたためと推測された。

湾奥部におけるケイ酸塩の多くは河川水によって供給されることが報告されている（鯉淵ほか, 2000; 東・木幡, 2007）。8月の調査日の2日前に東京で降水が記録され、さらに東京湾岸自治体環境保全会議（2014）により報告された湾奥部の採水地点近くの「船の科学館」前における2012年8月の塩分は約22であったことから、河川水によってケイ酸塩が湾奥部の観測地点に供給された可能性がある。したがって、8月に観察された*S. costatum*の増加は河川水からケイ酸塩が供給されたことも一因になったと推測された。また過去の研究では湾奥部の7月から9月に多く観察された*P. triestinum*は夏を盛期に6月から10月にかけて増加する（西島ほか, 1989）。*P. triestinum*の増殖至適水温は $20^\circ\text{C}$ から $30^\circ\text{C}$ で、硝酸態窒素（ $10\mu\text{M}\text{--}1\text{mM}$ ）、リン酸態リン（ $5\text{--}100\mu\text{M}$ ）ともに比較的高濃度に適応した種である（西島ほか, 1989）。高い細胞密度を示した湾奥部の7月から9月の水温、栄養塩濃度もその範囲内であった（Fig. 2）。

一方、湾口部における7月と9月の硝酸塩+亜硝酸塩濃度は $<5\mu\text{M}$ であり、8月のリン酸塩濃度は $<0.5\mu\text{M}$ であった。湾奥部で観察された高い細胞密度が湾口部で見られなかったのは、低い栄養塩濃度が要因の一つであると考えられた。以上のことから、夏季のクロロフィルa濃度や植物プランクトンの群集構造は春季に見られたような湾奥部と湾口部での同期性は観察されなかった。湾奥部と湾口部に

における栄養塩濃度の違いがその一因として示唆された。

### 秋季・冬季

11月と12月の全クロロフィル $a$ 濃度は両定点とも低く、ほぼ一定の値であった。両定点とも各栄養塩は十分に存在していたが、10月から12月にかけて水温が減少していたことから、鉛直混合が活発になり植物プランクトンの光合成速度が低下したと考えられる (Bouman et al., 2010)。また、11月と12月は両定点でサイズ組成に類似性が認められ、 $>10\ \mu\text{m}$ 画分が大部分を占めた (Fig. 5)。混合期は小型植物プランクトンよりも大型植物プランクトンにとって好適であることが報告されている (Legendre and Le Fèvre, 1989)。東京湾においても冬の混合期は大型植物プランクトン (主に珪藻) が優占することが報告されている (野村・吉田, 1997; Nakane et al., 2008)。混合期では湾全域で大型植物プランクトンが優占すると推測された。

### 謝辞

本論文を作成するにあたり、2名の査読者から非常に有益なコメントを頂き、感謝いたします。

### 引用文献

- Bouman, H. A., T. Nakane, K. Oka, K. Nakata, K. Kurita, S. Sathyendranath and T. Platt (2010) Environmental controls on phytoplankton production in coastal ecosystems: A case study from Tokyo Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **87**, 63–72.
- Cloern, J. E., S. Q. Foster and A. E. Kleckner (2014) Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems. *Biogeosciences*, **11**, 2477–2501.
- 風呂田利夫 (1988) 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について。沿岸海洋研究ノート, **25**, 104–113.
- 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.
- Han, M.-S., K. Furuya and T. Nemoto (1992) Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae) in the inner part of Tokyo Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **79**, 267–273.
- 東博紀・木幡邦男 (2007) 東京湾における赤潮発生形態の変化。水工学論文集, **51**, 1303–1308.
- 鯉淵幸生・小倉久子・安藤晴夫・五明美智男・佐々木 淳・磯部雅彦 (2000) 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測。海岸工学論文集, **47**, 1066–1070.
- Kudo, I. T. Yoshimura, M. Yanada and K. Matsunaga (2000) Exhaustion of nitrate terminates a phytoplankton bloom in Funka Bay, Japan: change in  $\text{SiO}_4 : \text{NO}_3$  consumption rate during the bloom. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **193**, 45–51.
- Lalli, C. M. and T. R. Parsons (1993) *Biological oceanography: An introduction*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 301 pp.
- 李英植・清木 徹・向井徹雄・瀧本和人・岡田光正 (1996) 広島湾におけるマイクロ、ナノおよびピコ植物プランクトンの季節変動。水環境学会誌, **19**, 405–411.
- Legendre, L. and J. Le Fèvre (1989) Hydrodynamical singularities as controls of recycled versus export production in oceans. In: *Productivity of the ocean: Present and past*, ed. W. H. Berger, V. S. Smetacek & G. Wefer, John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 49–63.
- Legendre, L. and F. Rassoulzadegan (1996) Food-web mediated export of biogenic carbon in oceans: Hydrodynamic control. *Mar. Ecol. Prog.*

- Ser.*, **145**, 179–193.
- Maita, Y. and T. Odate (1988) 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.
- Nakane, T., K. Nakata, H. Bouman and T. Platt (2008) Environmental control of short-term variation in the plankton community of inner Tokyo Bay, Japan. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **78**, 796–810.
- 日本海洋学会編 (2008) 「海洋環境調査法—改訂版」。恒星社厚生閣, 東京, 666 pp.
- 西島敏隆・畑 幸彦・山内章三 (1989) 赤潮渦鞭毛藻 *Prorocentrum triestinum* の増殖生理。日本水産学会誌, **55**, 2009–2014.
- 野村英明 (1995) 東京湾における水域環境構成要素の経年変化。La mer, **33**, 107–118.
- 野村英明 (1998) 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷。海の研究, **7**, 159–178.
- 野村英明・吉田 誠 (1997) 東京湾における近年の植物プランクトンの出現状況。La mer, **35**, 107–121.
- 岡市友利 (1987) 赤潮現象。「赤潮の科学」岡市友利編, 恒星社厚生閣, 東京, 5–36.
- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli (1984) *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- 塩本明弘・藤本康孝・三村尚哉・佐々木章裕・糸井大地・今翔翔真・高橋尚文・竹中柚実・藤田知則 (2018) 北海道オホーツク海沿岸域におけるクロロフィル $a$ と環境要因の季節変動について。日本水産学会誌, **84**, 241–253.
- 塩本明弘・市野亜佐美・小野寺拓海・石田恵多・原田弘一朗・井上岳実・三浦智史・藤田知則 (2015) 根室海峡標準沿岸域におけるクロロフィル $a$ 並びに環境要因の季節変動。沿岸海洋研究, **53**, 73–85.
- 鈴木高二朗・磯部雅彦・諸星一信 (2008) 流況・水質の長期連続データから見た東京湾口と湾奥の関係について。海岸工学論文集, **55**, 1076–1080.
- 高田秀重 (1993) 水質。「東京湾—100年の環境変遷—」小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京, 39–44.
- 田口 哲 (2016) レッドフィールド比: 研究の歴史と現状, 今後の展望。海の研究, **25**, 123–132.
- 東京湾海洋環境研究委員会編 (2011) 「東京湾」。恒星社厚生閣, 東京, 389 pp.
- 東京湾岸自治体環境保全会議 (2014) 東京湾水質調査報告書 (平成24年度)。
- 八木 宏・片岡理英子・山口 肇・藤原建紀 (2003) 東京湾の外海水進入特性に関する数値実験。海岸工学論文集, **50**, 931–935.
- 八木 宏・鯉淵幸生・日向博文・灘岡和夫 (1998) 東京湾湾奥部の水環境に与える河川水の影響について。海岸工学論文集, **45**, 986–990.
- 山口征矢・有賀祐勝 (1988) 東京湾における基礎生産の変遷。沿岸海洋研究ノート, **25**, 87–95.
- 山口征矢・柴田佳明 (1979) 東京湾における基礎生産の現況。沿岸海洋研究ノート, **16**, 106–111.
- 山路 勇 (1984) 「日本海洋プランクトン図鑑」第3版。保育社, 538 pp.
- Yanagi, T., H. Tamaru, T. Ishimaru and T. Saino (1989) Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer. *La mer*, **27**, 34–40.
- 吉田陽一・小島伸一・佐藤正春 (1998a) 東京湾奥域におけるヘテロシグマの高密度発生と水質, 気象要因との関係。日本水産学会誌, **64**, 1013–1019.
- 吉田陽一・三嶋義人・佐藤正春 (1998b) 東京湾奥域における主要植物プランクトンと DIN : DIP 比等との相互関係。日本水産学会誌, **64**, 259–263.