

2000年5–6月の日本周辺海域表面におけるサイズ分画 クロロフィル *a* 濃度の地理的分布

橋本慎治^{†1,2}, 塩本明弘¹

Regional Distribution of Size-fractionated Chlorophyll *a* Concentration at Sea Surface Water Adjacent to Japan in May–June 2000

Shinji HASHIMOTO^{†1,2} and Akihiro SHIOMOTO¹

Concentrations of size-fractionated (<2, 2–10 and >10 μm) chlorophyll *a* and nutrients (nitrite+nitrate, phosphate and silicate) were measured at the sea surface in the offshore waters around Japan in May–June 2000. According to Nagata and Ogawa (1997), the investigated waters were divided in eight regions: Oyashio waters, Perturbed waters, Tsugaru Current waters, Kuroshio axis waters, Coastal waters of the Kuroshio, Tsushima Current waters, Northern cold waters of the Japan Sea and Coastal waters of the East China Sea. Total chlorophyll *a* concentrations in the Oyashio waters and the Perturbed waters were more than $1.0 \mu\text{g l}^{-1}$ and higher than the other regions where were less than $0.5 \mu\text{g l}^{-1}$. The <2 μm fraction accounted for more than 50% of the total chlorophyll *a* concentrations at almost stations. However, the >10 μm fraction dominated at some stations in the Oyashio waters, the Coastal waters of the East China Sea and the Kuroshio axis waters. The chlorophyll *a* concentrations of the <2 and 2–10 μm fraction positively correlated with the nitrite+nitrate concentrations, whereas there was not a significant correlation for the >10 μm fraction. The small-sized phytoplankton seems to be related to the availability of nitrite+nitrate, whereas the large-sized phytoplankton may be affected by the other factors at the sea surface in the offshore waters around Japan in late spring.

Key words: size-fractionated chlorophyll *a*, nutrients, Japanese waters, late spring

はじめに

海洋において植物プランクトン現存量とそのサイズ組成を把握することはその海域の生態系を理解する上で重要である。Lalli and Parsons (1997)によると、海洋における植物プランクトンのサイズ組成はそれを利用するより高次の従属栄養生物と密接な関係がある。<2 μm 画分の小型植物プランクトンから始まる生態系では植物プランクトンによって生産されたエネルギーが高次の大型魚類へたどり着くまでに6つの栄養段階を経なければならないのに対して、>10 μm 画分の大型植物プランクトンから始まる生態

系では3–4つの栄養段階を経て高次の大型魚類までたどり着く。植物プランクトンのサイズ組成は、栄養塩濃度 (Legendre and Le Fèvre, 1989) や鉄成分などの微量元素 (Boyd *et al.*, 1996), さらに最近では栄養塩濃度とは関係なく海水の鉛直方向の動きの影響 (Rodríguez *et al.*, 2001) を受けることが報告されている。湧昇海域では有光層以深の栄養塩が有光層へもたらされることによって大型の植物プランクトンが優占する (Rodríguez *et al.*, 1998)。しかしながら、栄養塩濃度が高濃度に存在する海域において鉄成分が不足している (High Nutrient Low Chlorophyll 海域) とクロロフィル *a* 濃度が低く、小型の植物プランクトンが優占する (Martin and Fitzwater, 1988; Boyd *et al.*, 1996)。このように植物プランクトンのサイズ組成を決定する要因がいくつか存在するが、日本周辺海域においてそのサイズ組成を決定する要因については不明である。

春季における日本周辺海域海表面におけるクロロフィル *a* 濃度についてはこれまで多くの報告がある (Table 1)。親潮域は春季に珪藻類によるブルーミングが起こりクロロフィル *a* 濃度は $20 \mu\text{g l}^{-1}$ にも達する (例えば Saito *et al.*,

2001年11月1日受付, 2002年5月21日受理

¹ 遠洋水産研究所

National Research Institute of Far Seas Fisheries, 7-1 Orido 5 Chome, Shimizu, Shizuoka, 424-8633 Japan

² 現在の所属 科学技術振興事業団 名古屋大学地球水循環研究センター 気付

Japan Science and Technology Corporation c/o Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, Chikusa-Ku, Furo-Cho, Nagoya, 464-8601 Japan

[†] hasi@ihas.nagoya-u.ac.jp

1998). 春季の混乱水域における表面のクロロフィルa濃度は約 $1 \mu\text{g l}^{-1}$ である (横内ほか, 1996). 一方, 黒潮流軸域 (Kamiya and Aoyama, 1990) および黒潮内側域 (Yamamoto *et al.*, 1988), 対馬暖流域 (Nagata and Kitani, 1987) におけるクロロフィルa濃度はおよそ $0.2 \mu\text{g l}^{-1}$ である. 東シナ海沿岸域においては平均約 $0.5 \mu\text{g l}^{-1}$ である (小笹, 1989). これらの報告から春季の日本周辺海域表面におけるクロロフィルa濃度は親潮域や混乱水域で高く, 黒潮流軸域, 黒潮内側域, 東シナ海, 対馬暖流域で低い傾向を示す. このように様々な年の春季における日本周辺海域海表面のクロロフィルa濃度についてはこれまで多くの報告がなされている (Table 1) が, 同時期の日本周辺海域における植物プランクトンのサイズ組成について調べられた例はないことから本研究では春季の日本周辺海域においてどのサイズ画分の植物プランクトンが優占しているかを広範囲に調査

し, 海洋環境要因との関連性についての検討を行った.

試料および方法

海水試料は陸地から平均約30マイル (約54km) の海域 (Fig. 1) において, 2000年5月16日 (St. 1) から6月26日 (St. 65) にかけて第二共新丸の航海中にポリバケツを用いて1日に約2点づつ (午前8時と午後2時頃) 海表面から採取した. なおSt. 1とSt. 65は同じ位置にある (Fig. 1). 採取した海水は直ちに孔径 $2 \mu\text{m}$ および $10 \mu\text{m}$ ニュークリポアフィルターとワットマンGF/Fフィルター (孔径約 $0.7 \mu\text{m}$) を用いてろ過した. ろ過はおよそ200mmHgの吸引圧で行った. ろ過に用いたフィルターはクロロフィルaの測定に供するまで -40°C で凍結保存した. クロロフィルaは90%アセトンで抽出した後, 市販されたクロロフィルa (和光純薬工業) でキャリブレーションした日立 F-2000蛍

Table 1. Chlorophyll a concentrations at the surface during spring around Japan.

Region	Year	Chlorophyll a ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Reference
Oyashio waters	1990–1994	0.5–23	Saito <i>et al.</i> (1998)
	1989–1994	0.5–9	Yokouchi <i>et al.</i> (1996)
Perturbed waters	1990–1991	0.5–8	Yokouchi <i>et al.</i> (1996)
Northern cold waters of the Japan Sea	1973–1984	0.2–4	Nagata and Kitani (1987)
Tsugaru Current waters	1973–1984	ca. 1	Imai <i>et al.</i> (1988)
Tsushima Current waters	1973–1984	0.2–1	Nagata and Kitani (1987)
Coastal waters of the East China Sea	1983	0.1–1	Imai <i>et al.</i> (1988), Kozasa (1989)
Kuroshio axis waters	1988	0.2	Kamiya and Aoyama (1990)
Coastal waters of the Kuroshio	1982	0.2	Yamamoto <i>et al.</i> (1988)

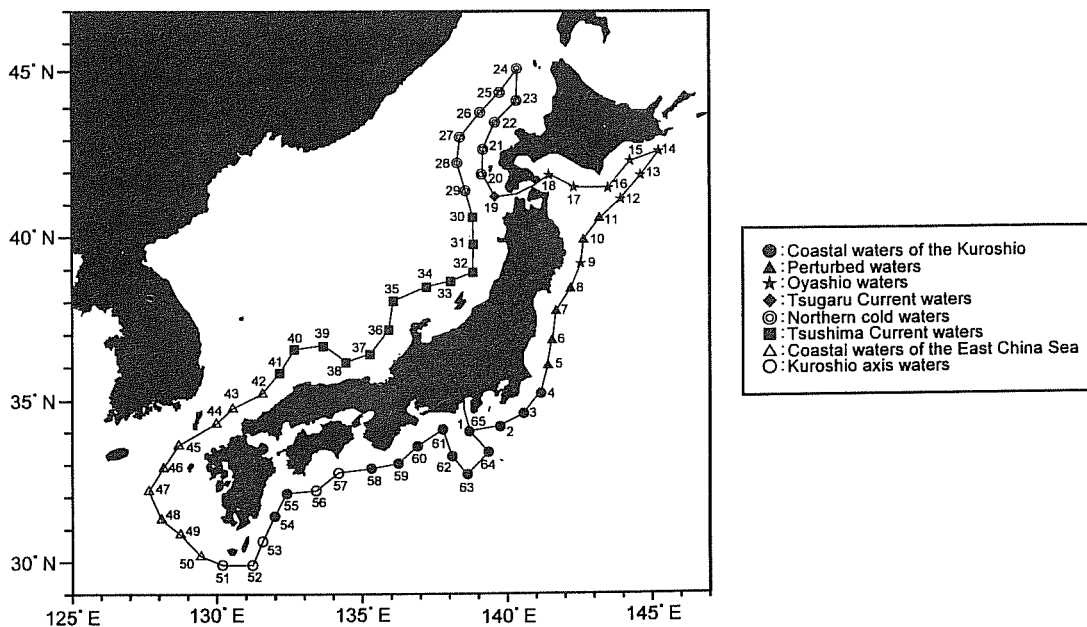


Figure 1. Location of sampling stations adjacent to Japan from May 16 to June 26, 2000.

Table 2. Mean±standard error of temperature, salinity, and concentrations of silicate, nitrite+nitrate and phosphate at the surface in the eight water masses adjacent to Japan. The n indicates the number of data used for calculation of the mean+standard error.

Region	Temperature (°C)	Salinity (PSU)	Silicate	Nitrite+nitrate	Phosphate
			(μM)		
Coastal waters of the Kuroshio (n=14)	23.1±0.5	34.30±0.12	2.42±0.11	0.14±0.03	0.04±0.01
Perturbed waters (n=6)	12.2±0.5	33.54±0.15	4.91±1.00	2.27±0.94	0.19±0.03
Oyashio waters (n=8)	10.5±0.9	33.14±0.16	1.71±0.35	1.25±0.41	0.20±0.01
Tsugaru Current waters (n=1)	15.7	33.49	1.71	0.10	0.09
Northern cold waters of the Japan Sea (n=10)	11.8±0.3	33.98±0.01	2.59±0.32	0.08±0.04	0.10±0.00
Tsushima Current waters (n=12)	17.6±0.5	34.17±0.13	3.10±0.27	0.14±0.08	0.06±0.00
Coastal waters of the East China Sea (n=9)	22.5±0.8	34.06±0.19	3.07±0.38	0.09±0.05	0.02±0.01
Kuroshio axis waters (n=5)	26.3±0.0	34.09±0.06	2.06±0.08	0.05±0.01	0.01±0.00

光分光光度計により測定した (Parsons *et al.*, 1984), ワットマン GF/F フィルター上に捕集されたクロロフィル *a* を全画分とした, 10 μm ニュークリポアフィルター上に捕集されたクロロフィル *a* を >10 μm 画分とした, <2 μm 画分のクロロフィル *a* 濃度はワットマン GF/F フィルターと 2 μm ニュークリポアフィルター上に捕集されたクロロフィル *a* の差から算出した. また, 2–10 μm 画分は 2 μm と 10 μm ニュークリポアフィルター上に捕集されたクロロフィル *a* の差から算出した.

栄養塩分析用の海水試料もまた分析に供するまで -40°C で凍結保存した. 亜硝酸塩+硝酸塩, リン酸塩, ケイ酸塩濃度はブラン・ルーベ社の TRAACS 800 により測定した. 海表面の水温および塩分は棒状水温計およびサリノメーター (Guild line Instruments) を用いて, また, メモリー STD (アレック電子: AST1000-PK) を用いて水深 250 m までの水温および塩分も同時に測定した.

本研究では, 長田・小川 (1997) が示した水温と塩分の相違による海域区分に従い, 調査海域を親潮域, 混乱水域, 津軽暖流域, 黒潮流軸域, 黒潮内側域, 対馬暖流域, 日本海の北方冷水域, 東シナ海沿岸水域の 8 海域に区分した.

結果

海表面の水温は 4.5–26.4°C であった. 海域別にみると黒潮内側域, 東シナ海沿岸水域, 黒潮流軸域で高い傾向を示し, 混乱水域, 親潮域で低い傾向を示した (Table 2). 海表面の塩分は, 32.50–34.68 PSU であった. 一般的に水温の高い海域で塩分が相対的に高い傾向であった (Table 2).

亜硝酸塩+硝酸塩濃度は親潮域および混乱水域を除くと 0.1 μM かあるいはそれ以下の枯渇した状態であり, 黒潮流軸域が最も低い値であった (Table 2). 親潮域および混乱水域における亜硝酸塩+硝酸塩濃度の平均値はそれぞれ 1.3 μM および 2.3 μM であり, 他の海域よりも有意に高い値で

あった (Mann Whitney U-test, $p < 0.001$). リン酸塩濃度は亜硝酸塩+硝酸塩濃度と同様の傾向を示し, 親潮域および混乱水域は他の海域よりも有意に高い値であった (Table 2, U-test, $p < 0.001$). 親潮域および混乱水域の平均値はそれぞれ 0.2 μM であったが, 他の海域は 0.1 μM 以下で枯渇していた. 海域別にみたケイ酸塩濃度の平均値は親潮域 (1.7 μM) および津軽暖流域 (1.7 μM) で低く, 混乱水域 (4.9 μM) で高かった. ケイ酸塩濃度はいずれの海域においても本質的に大きな違いはみられず, 親潮域および混乱水域の亜硝酸塩+硝酸塩濃度およびリン酸塩濃度でみられた他の海域と有意な相違は認められなかった (Table 2, U-test, $p > 0.5$).

親潮域および混乱水域における全画分のクロロフィル *a* 濃度は, それぞれ 0.79–2.45 μg l⁻¹ および 0.86–1.88 μg l⁻¹ で他の海域よりも変動が大きく, 相対的に高い傾向を示した (Table 3, Fig. 2d). 一方, その他の各海域における全画分のクロロフィル *a* 濃度は北方冷水域が 0.37–0.91 μg l⁻¹ であり, 親潮域および混乱水域に続いて高かった. 津軽暖流域 (0.24 μg l⁻¹), 黒潮流軸域 (0.22–0.34 μg l⁻¹), 黒潮内側域 (0.19–0.86 μg l⁻¹), 対馬暖流域 (0.16–0.41 μg l⁻¹), 東シナ海沿岸水域 (0.18–0.60 μg l⁻¹) におけるクロロフィル *a* 濃度は相対的に低く, 各海域において本質的に大きな違いはなかった (Table 3, Fig. 2d). 親潮域および混乱水域におけるクロロフィル *a* 濃度は他の海域よりも有意に高い値であった (U-test, $p < 0.001$).

サイズ分画したクロロフィル *a* 濃度についてみると, 親潮域の >10 μm 画分 (0.03–1.02 μg l⁻¹) は日本周辺海域において最も高い値を示した (Table 3, Fig. 2a). 混乱水域 (0.01–0.35 μg l⁻¹), 東シナ海沿岸水域 (0.04–0.32 μg l⁻¹) および黒潮流軸域 (0.06–0.20 μg l⁻¹) における >10 μm 画分のクロロフィル *a* 濃度が親潮域に続いて高い傾向を示した. その他の海域の >10 μm 画分は黒潮内側域が 0.02–0.12 μg l⁻¹, 北方冷水域が 0.01–0.10 μg l⁻¹, 対馬暖流域が

Table 3. Mean±standard error (SE) of size-fractionated chlorophyll *a* concentrations ($\mu\text{g l}^{-1}$) at the surface in the eight water masses adjacent to Japan. The n indicates the number of data used for calculation of the mean±SE.

Region	Chlorophyll <i>a</i> concentration ($\mu\text{g l}^{-1}$)			
	>10 μm	2–10 μm	<2 μm	Total
Coastal waters of the Kuroshio (n=14)	0.06±0.01	0.05±0.01	0.29±0.05	0.39±0.05
Perturbed waters (n=6)	0.11±0.06	0.22±0.05	0.94±0.14	1.27±0.15
Oyashio waters (n=8)	0.35±0.13	0.23±0.09	0.81±0.11	1.39±0.19
Tsugaru Current waters (n=1)	0.02	0.05	0.17	0.24
Northern cold waters of the Japan Sea (n=10)	0.04±0.01	0.11±0.02	0.52±0.04	0.67±0.05
Tsushima Current waters (n=12)	0.02±0.01	0.03±0.00	0.21±0.02	0.26±0.02
Coastal waters of the East China Sea (n=9)	0.12±0.04	0.03±0.01	0.18±0.02	0.32±0.05
Kuroshio axis waters (n=5)	0.12±0.03	0.01±0.00	0.15±0.02	0.28±0.02

0.01–0.06 $\mu\text{g l}^{-1}$, 津軽暖流域が0.02 $\mu\text{g l}^{-1}$ であり相対的に低い値であった。<2 μm 画分のクロロフィルa濃度は、親潮域および混乱水域でそれぞれ0.17–1.11 $\mu\text{g l}^{-1}$ および0.61–1.60 $\mu\text{g l}^{-1}$ で相対的に高く、その他の各海域における<2 μm 画分のクロロフィルa濃度は北方冷水域(0.33–0.67 $\mu\text{g l}^{-1}$)で親潮域および混乱水域に次いで高い値であったが、黒潮内側域(0.09–0.75 $\mu\text{g l}^{-1}$)、対馬暖流域(0.13–0.31 $\mu\text{g l}^{-1}$)、東シナ海沿岸水域(0.12–0.26 $\mu\text{g l}^{-1}$)、津軽暖流域(0.17 $\mu\text{g l}^{-1}$)および黒潮流軸域(0.10–0.22 $\mu\text{g l}^{-1}$)で相対的に低く本質的に大きな違いはなかった。<2 μm 画分のクロロフィルa濃度は、全画分のクロロフィルa濃度と同様の傾向を示した(Table 3, Fig. 2c, d)。2–10 μm 画分のクロロフィルa濃度は、親潮域(0.04–0.75 $\mu\text{g l}^{-1}$)、混乱水域(0.09–0.41 $\mu\text{g l}^{-1}$)で他の海域よりも高く、次いで北方冷水域(0.03–0.18 $\mu\text{g l}^{-1}$)で高い値を示し、全画分および<2 μm 画分の分布と類似していた。黒潮内側域(0.02–0.12 $\mu\text{g l}^{-1}$)、対馬暖流域(0.02–0.05 $\mu\text{g l}^{-1}$)、東シナ海沿岸水域(0.01–0.04 $\mu\text{g l}^{-1}$)、津軽暖流域(0.05 $\mu\text{g l}^{-1}$)および黒潮流軸域(0.01–0.02 $\mu\text{g l}^{-1}$)は0.1 $\mu\text{g l}^{-1}$ 以下と相対的に低い値であった(Table 3, Fig. 2b)。

各観測点におけるサイズ画分の相対的な割合をFig. 2eに、各海域におけるサイズ画分の相対的な割合の平均値をFig. 3に示す。概して日本周辺海域の各海域において<2 μm 画分の割合が高く、平均で50%以上を占めていた(Figs. 2, 3)。2–10 μm 画分はいずれの海域においても優占する測点は存在しなかった。東シナ海沿岸水域および黒潮流軸域の2–10 μm 画分は平均10%以下と相対的に低い割合であったが、他の海域では10–20%であった。>10 μm 画分は親潮域、東シナ海沿岸水域および黒潮流軸域で平均25%以上と相対的に高い割合であり、特に黒潮流軸域では平均で40%を占めていた。他の海域では平均で15%以下であった。親潮域の測点15、東シナ海沿岸水域の測点43, 44および黒潮流軸域の測点51, 53, 57では>10 μm 画分が優占

していた(Fig. 2e)。また日本海に位置する対馬暖流域と北方冷水域における植物プランクトンのサイズ組成は平均で>10 μm 画分が7%、2–10 μm 画分が14%、<2 μm 画分が79%であり測点間の変動は小さかった(Fig. 2e)。

考 察

2000年5–6月の日本周辺海域の海表面における全画分のクロロフィルa濃度は親潮域および混乱水域で高く、続いて北方冷水域であり、その他の海域は相対的に低くほぼ同程度であった(Table 3, Fig. 2d)。同様に亜硝酸塩+硝酸塩濃度もまた親潮域および混乱水域で他の海域よりも有意に高い値であった(Table 2)。全画分のクロロフィルa濃度と亜硝酸塩+硝酸塩濃度との間に有意な正のスピアマンの順位相関が認められた(Fig. 4d)。サイズ分画したクロロフィルa濃度と亜硝酸塩+硝酸塩濃度との関係を調べた結果、<2 μm 画分および2–10 μm 画分は有意な正のスピアマンの順位相関が認められたが、>10 μm 画分においては有意な相関性を示さなかった(Fig. 4a, b, c)。従って晩春の日本周辺海域表面における小型の植物プランクトン生物量は亜硝酸塩+硝酸塩濃度に影響されるのかもしれない。小型の植物プランクトン生物量が亜硝酸塩+硝酸塩濃度と関係があることは東経175度線を広範囲に調査したIshizaka *et al.* (1994)によっても報告されている。

>10 μm 画分のクロロフィルa濃度は親潮域、混乱水域、東シナ海沿岸水域および黒潮流軸域で高い傾向を示した(Table 3, Fig. 2a)。鉄は植物プランクトンの光合成過程に重要な役割を果たす(Boyd *et al.*, 1996)。沿岸域において海表面における鉄は河川や大気からもたらされることが予想される。本研究における観測点は陸域からおおよそ同距離の位置にある(Fig. 1)ため、観測点間における鉄濃度が大きく異なるとは考えにくい。従って、鉄は日本周辺海域における植物プランクトンにあまり影響を及ぼしていないものと思われる。

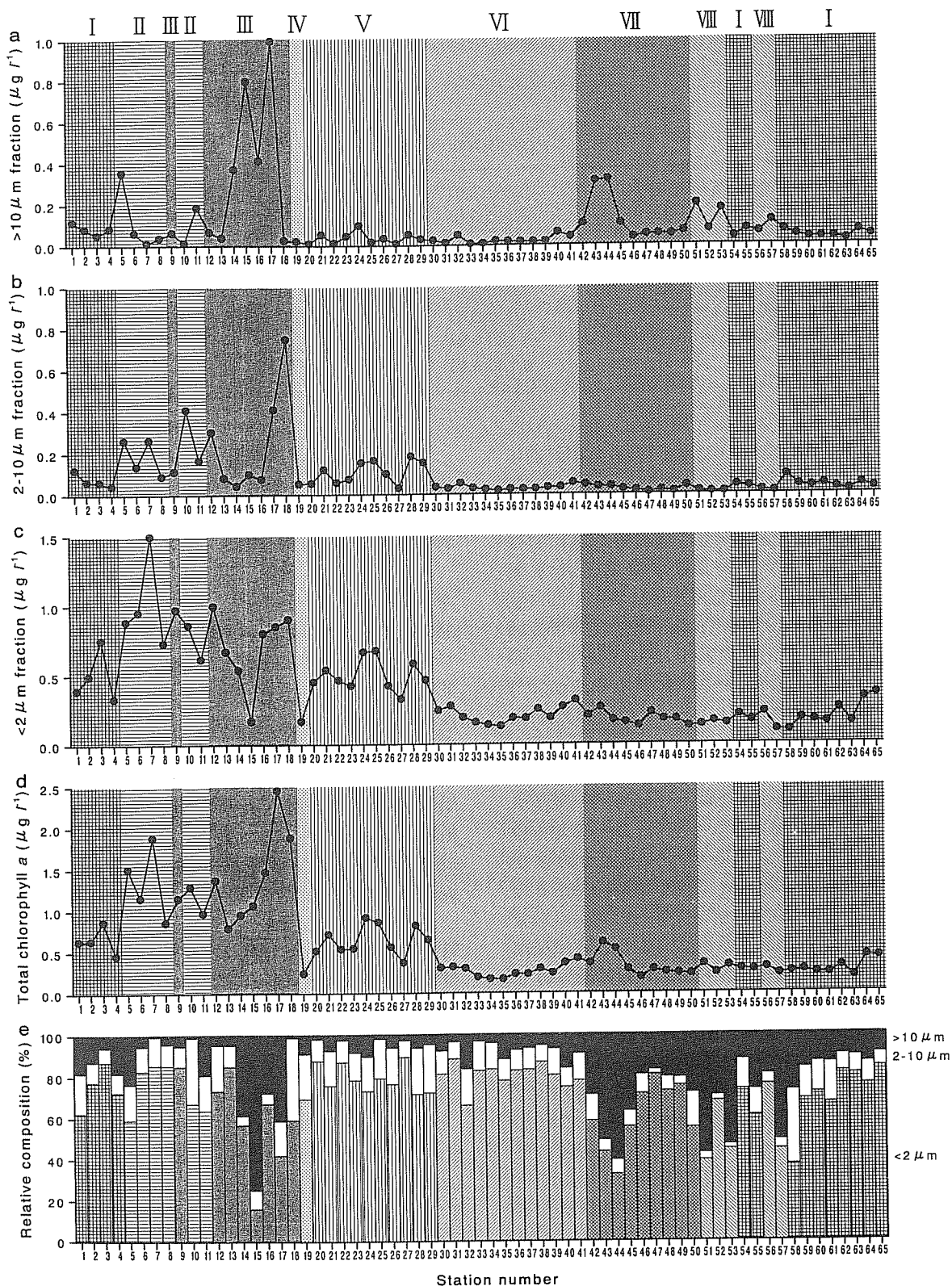


Figure 2. Regional distributions in concentrations and the relative compositions of size-fractionated chlorophyll *a* at the surface of 65 stations in the eight water masses adjacent to Japan. Roman numeral of I to VIII shows Coastal waters of the Kuroshio, Perturbed waters, Oyashio waters, Tsugaru Current waters, Northern cold waters in the Japan Sea, Tsushima Current waters, Coastal waters of the East China Sea, Kuroshio axis waters, respectively.

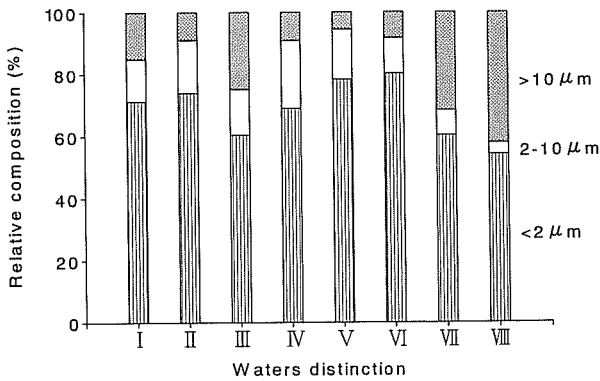


Figure 3. Mean relative compositions of the $>10 \mu\text{m}$ fraction, the $2\text{--}10 \mu\text{m}$ fraction and the $<2 \mu\text{m}$ fraction at the surface in the eight water masses adjacent to Japan.

親潮域や混乱水域では春季から夏季にかけて $>10 \mu\text{m}$ 画分の大型珪藻によるブルーミングが起こる (Odate and Maita, 1988, 1989). 本研究において、親潮域や混乱水域における $>10 \mu\text{m}$ 画分のクロロフィルa濃度は他の海域に比べて高い値を示した (Table 3, Fig. 2a). また親潮域では $>10 \mu\text{m}$ 画分のクロロフィルa濃度が約 $1 \mu\text{g l}^{-1}$ であり、 $>10 \mu\text{m}$ 画分が優占した点が存在していた (Fig. 2a, e). 両海域では亜硝酸塩+硝酸塩濃度が枯渇していた点も存在していたことから、親潮域や混乱水域はブルーミング後期の状態であったのかもしれない。

朝岡 (1975) は5月から6月にかけて大型植物プランクトンの *Trichodesmium* が東シナ海や黒潮流域の表面に出現することを報告している。本種は幅がおよそ $10 \mu\text{m}$ の細胞が多くの場合数十個つながって長さ約 0.5mm の藻糸をつくり、ガス胞を持っているため海表面を浮遊する。また本種は 20°C 以上の水に生息し (Marumo and Asaoka, 1974), 亜硝酸塩+硝酸塩やアンモニアを利用することができるがそれらの栄養塩が枯渇した状態でも増殖することができる (Ohki *et al.*, 1986; Mulholland and Capone, 1999). 本研究結果において東シナ海沿岸水域および黒潮流域における海洋環境は水温が 20°C 以上で硝酸塩+亜硝酸塩が枯渇した状態であったことから、観測された $>10 \mu\text{m}$ 画分は *Trichodesmium* によってもたらされたのかもしれない。従って、親潮域で観測された珪藻主体と考えられる大型植物プランクトンと東シナ海沿岸水域および黒潮流域で観測された大型植物プランクトンは種類が違っている可能性がある。今後は日本周辺海域において植物プランクトン種組成を考慮した調査が必要である。

植物プランクトンのサイズ組成は栄養塩濃度に影響される (Legendre and Le Fèvre, 1989) ことが報告されている一方、栄養塩濃度とは関係なく海水の鉛直方向の動きに影響を受けることもまた報告されている (Rodríguez *et al.*, 2001). 亜硝酸塩+硝酸塩濃度は親潮域および混乱水域で

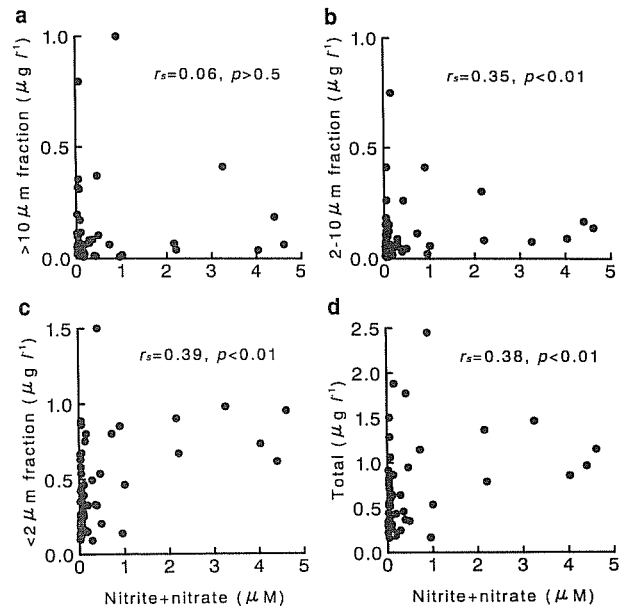


Figure 4. Relationship between nitrite±nitrate and total, size-fractionated chlorophyll a concentrations.

他の海域よりも有意に高い傾向を示した。一方、東シナ海沿岸水域および黒潮流域の亜硝酸塩+硝酸塩濃度は低い (Table 2). 前述したように $>10 \mu\text{m}$ 画分のクロロフィルa濃度と亜硝酸塩+硝酸塩濃度は有意な相関性が認められなかった。従って、晩春の日本周辺海域の表面における $>10 \mu\text{m}$ 画分のクロロフィルa濃度を決定する要因は栄養塩濃度ではないのかもしれない。有意な相関性が認められなかった要因として親潮域や混乱水域は他の海域よりも亜硝酸塩+硝酸塩濃度が高かったが Malone (1980) によって報告された大型植物プランクトンの半飽和定数 ($1\text{--}2 \mu\text{M}$) とほとんど同じ濃度であり、さらに東シナ海沿岸水域および黒潮流域は半飽和定数以下の濃度であったこと、また別の要因として栄養塩濃度とは関係なく海水の鉛直方向の動きといった物理的要因によって $>10 \mu\text{m}$ 画分の植物プランクトンが影響されたことが考えられる。その他に動物プランクトンによる捕食の影響もまた一つの要因として考えられる (Odate, 1994, 1996). 本研究結果から日本周辺海域表面における $>10 \mu\text{m}$ 画分の植物プランクトン生物量を支配する要因を明らかにすることはできなかった。今後、この要因を明らかにするために植物プランクトン種組成を考慮した調査を含めて、海水の鉛直方向の動きを把握する調査 (例えば海域の面的かつ鉛直的な調査) や同時に動物プランクトン現存量を調査する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、採水および海洋観測にご協力いただいた「第二共新丸」の船長をはじめとする乗組員の

方々に深く感謝する。また、有益なご助言をいただいた独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所の佐々木克之博士に感謝する。

引用文献

- 朝岡 治 (1975) 東シナ海の植物プランクトン分布と海況. 海洋科学, **7**, 38–45.
- Boyd, P.W., D.L. Muggli, D.E. Varela, R.H. Goldblatt, R. Chretien, K.J. Orians and P.J. Harrison (1996) *In vitro* iron enrichment experiments in the NE subarctic Pacific. Mar. Ecol. Prog. Ser., **136**, 179–193.
- Imai, M., S. Ebara, K. Kawashima, N. Kubo, N. Sato and E. Noriyama (1988) Seasonal variation of chlorophyll-a in the seas around Japan. The Oceanogr. Mag., **38**, 23–32.
- Ishizaka, J., H. Kiyosawa, K. Ishida, K. Ishikawa and M. Takahashi (1994) Meridional distribution and carbon biomass of autotrophic picoplankton in the central North Pacific Ocean during late northern summer 1990. Deep-Sea Res., **41**, 1745–1766.
- Kamiya, H. and M. Aoyama (1990) Regional variation of the phytoplankton size estimated from the chlorophyll-a concentration in the East China Sea. Proceedings of Japan China Joint Symposium of the Co-operative Study on the Kuroshio, 291–301.
- 小笹悦二 (1989) 東シナ海におけるクロロフィルの分布特性. 海と空, **64**, 285–294.
- Lalli, C.M. and T.R. Parsons (1997) Biological Oceanography: An Introduction. Second edition., Butterworth & Heinemann, Oxford, 301 pp.
- 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, eds. W. H. Berger *et al.*, John Wiley & Sons, 49–63.
- Malone, T.C. (1980) Algal size. In: The Physiological Ecology of Phytoplankton, ed. I. Morris, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 433–463.
- Martin, J.H. and S.E. Fitzwater (1988) Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. Nature, **331**, 341–343.
- Marumo, R. and O. Asaoka (1974) Distribution of pelagic blue-green algae in the North Pacific Ocean. J. Oceanogr. Soc. Japan., **30**, 77–85.
- Mulholland, M.R. and D.G. Capone (1999) N₂ fixation, N uptake and N metabolism in natural and cultured populations of *Trichodesmium* spp. Mar. Ecol. Prog. Ser., **188**, 33–49.
- Nagata, H. and K. Kitani (1987) Vertical distribution of chlorophyll *a* along the PM Line in the Japan Sea. Bull. Japan Sea Reg. Fish. Lab., **37**, 13–19.
- 長田 宏・小川嘉彦 (1997) 日本周辺海域における透明度の季節変動と臨界深度との関係. 海の研究, **6**, 351–360.
- Odate, T. (1994) Plankton abundance and size structure in the northern North Pacific Ocean in early summer. Fish. Oceanogr., **3**, 267–278.
- Odate, T. (1996) Abundance and size composition of the summer phytoplankton communities in the western North Pacific Ocean, the Bering Sea, and the Gulf of Alaska. J. Oceanogr., **52**, 335–351.
- Odate, T. and Y. Maita (1988/1989) Regional variation in the size composition of phytoplankton communities in the western North Pacific Ocean, spring 1985. Biol. Oceanogr., **6**, 65–77.
- Ohki, K., J.G. Rueter and Y. Fujita (1986) Cultures of the pelagic cyanophytes *Trichodesmium erythraeum* and *T. thiebautii* in synthetic medium. Mar. Biol., **91**, 9–13.
- 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.
- Rodríguez, J., J.M. Blanco, F. Jiménez-Gómez, F. Echevarría, J. Gil, V. Rodríguez, J. Ruiz, B. Bautista and F. Guerrero (1998) Patterns in the size structure of the phytoplankton community in the deep fluorescence maximum of the Alboran Sea (southwestern Mediterranean). Deep-Sea Res., **45**, 1577–1593.
- Rodríguez, J., J. Tintoré, J.T. Allen, J.M. Blanco, D. Gomis, A. Reul, J. Ruiz, V. Rodríguez, F. Echevarría and F. Jiménez-Gómez (2001) Mesoscale vertical motion and the size structure of phytoplankton in the ocean. Nature, **410**, 360–363.
- Saito, H., H. Kasai, M. Kashiwai, Y. Kawasaki, T. Kono, S. Taguchi and A. Tsuda (1998) General description of seasonal variations in nutrients, chlorophyll *a*, and netplankton biomass along the A-line transect, western subarctic Pacific, from 1990 to 1994. Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst., **62**, 1–62.
- Yamamoto, T., S. Nishizawa and A. Taniguchi (1988) Formation and retention mechanisms of phytoplankton peak abundance in the Kuroshio front. J. Plankton Res., **10**, 1113–1130.
- 横内克巳・友定 彰・松尾 豊・稲掛伝三 (1996) 東北海域におけるクロロフィル *a* の鉛直分布の季節変化. 東北水研報告, **58**, 11–26.