— 論 文 —

著しく富栄養化の進行した洞海湾の 植物プランクトン出現特性*

山田 真知子[†]・梶原 葉子[†]

要 旨

1980 年～1995 年の洞海湾における海水中の栄養塩濃度の年平均値と最大値は、全窒素において 474 μM と 1,290 μM , 全リンにおいて 4.6 μM と 13.9 μM であった。このように、周年にわたって窒素・リン濃度が著しく高い洞海湾の調査結果を解析して、富栄養型の極相に達している洞海湾の植物プランクトンの出現特性を研究した。洞海湾における植物プランクトン密度の季節変化パターンは、温帯域海洋に特徴的な 2 山型とは異なり、夏にピークを持つ 1 山型を示し、富栄養化した淡水湖や河口堰での場合と類似していた。しかし洞海湾が常に高栄養塩条件下にありながら、高水温期においてさえも常には赤潮が形成されない主要な原因は、エスチュアリー循環速度を促進し低日照をもたらす降雨であることが明らかになった。このことから、洞海湾の植物プランクトン密度には、気象・物理的環境因子が強く影響していることがわかる。植物プランクトンの種多様度指数 H' は低く、全窒素や植物プランクトン密度等がこの H' の低下に影響していた。また、洞海湾の赤潮生物は十数種に限定されたが、赤潮は珪藻によって形成されることが多く、代表的な赤潮生物は他の富栄養化した内湾と同様に珪藻類の *Skeletonema* 属であった。

キーワード：植物プランクトン、出現特性、富栄養型海域、洞海湾

1. はじめに

水界生態系において生物生産の起点となっている植物プランクトンの生産量は、高次である漁業生産に多大な影響を及ぼす (関・長沼, 1996; 高橋ら, 1996; 門谷, 1996)。このような水産資源からの観点に加え、近年、植物プランクトンの種組成が富栄養度など水質環境の指標になる可能性も示唆された (吉田, 1983) ことから、富栄養化の進行の程度と植物プランクトンの

種類や出現量、さらに窒素/リン比と植物プランクトンの多様性 (石田, 2000) に関する研究がなされるようになった。これらの研究の中でも、富栄養化の著しく進行した日本近海域における植物プランクトンの出現特性が詳細に研究された例は、東京湾 (丸茂・村野, 1973; 丸茂ら, 1974; 野村, 1998) や大阪湾 (城・矢持, 1986; 矢持, 1993; 吉田ら, 1998) など数海域に限定されたものとなっている。これら 2 海域と洞海湾の 1988 年における全窒素と全リン濃度の年間平均値 (山田・徳崎, 1993) は、順に、東京湾奥部で 86.9 μM , 2.72 μM , 大阪湾大和川沖で 60.7 μM , 1.82 μM , および洞海湾の湾央部で 563 μM , 5.75 μM と、洞海湾はこれら 2 海域と比較し窒素濃度が 1 桁高かったのが特徴的である。

* 2003 年 9 月 15 日 受領; 2004 年 2 月 13 日 受理
著作権: 日本海洋学会, 2004

[†] 北九州市環境科学研究所アクア研究センター
〒804-0082 北九州市戸畑区新池 1-2-1

主著者 e-mail: machiko.yamada01@mail2.city.kitakyushu.jp

このように、あたかも植物プランクトンの培養液 (Pacific Northwest Environmental Research Laboratory, 1974; 若林, 2000) のような高い窒素, リン濃度となっていた時代の洞海湾について、これまでに、窒素/リン比と出現植物プランクトンの関係 (山田・徳崎, 1993), 冬期に赤潮が発生しない理由 (柳・山田, 2000; Tada *et al.*, 2001) と植物プランクトンのサイズ別出現特性 (多田ら, 2001) が明らかにされている。これらの知見に加え、今回は洞海湾の水質環境の特徴を明らかにし、洞海湾における植物プランクトンの種組成の特徴や高水温期における赤潮消滅要因などについて検討することを試みた。

2. 洞海湾の概要

Fig. 1. Sampling station D6 in Dokai Bay.

洞海湾は、Fig. 1 に示すように、九州北部に位置し、湾の長さ約 13 km、湾幅は湾口で約 2 km、湾奥部で約 0.3 km、平均水深が 7 m、面積約 10 km² と細長く小さな内湾である。同湾は重化学工業を主体とする北九州工業地帯に囲まれており、約 1,000 の工場が林立している (山田, 1999)。約 44 km におよぶ湾岸は、ほとんどがコンクリート護岸等の人工護岸で、自然海岸はわずか約 280 m に過ぎない。湾奥部には三つの 2 級河川が流入しており、流出量の合計は約 309,000 m³ d⁻¹ (柳ら, 2001) である。また、工場排水から流入する淡水も含め、湾内の淡水の滞留時間は 7 日間 (柳ら, 2001) と算出されている。

洞海湾は 1970 年代、未処理の工場排水の流入により激甚な水質汚濁が進行し、無生物地帯が生じ「死の海」とまで称された。その後、洞海湾に対して実施された水質浄化対策が功を奏し、1980 年代からは COD (Chemical Oxygen Demand: 化学的酸素要求量) をはじめ当時の環境基準項目はすべて基準を達成し、今日にいたっている (山田, 1999)。

Fig. 2. Temporal variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations in the surface water at Sta. D6 in Dokai Bay (from data of Kitakyushu City Institute of Environmental Sciences).

しかしこのような洞海湾も、1997 年に、洞海湾水域として「窒素・リンに係る環境基準」の「第 IV 類型」に指定され、とくに全窒素に関して暫定基準として 2 mg L⁻¹ (142 μM) が設定された (平成 9 年 4 月 28 日付環境庁告示第 19 号)。その結果、湾への窒素負荷低減の努力がなされ、Fig. 2 (北九州市環境科学研究所資料) に示すように、2001 年には全窒素濃度は 1.9 mg L⁻¹ (140 μM) にまで低下し、基準値の達成も間近となっている。なお、全窒素 (以後 TN)、全リン (以後 TP) のうち無機溶存態のものが順に 94.5% と 78.0% (山田・徳崎, 1993) を占めていたことから、TN や TP はほと

んどが植物プランクトンに利用可能な形態で存在していたといえる。また、湾内における TN と TP の滞留時間はそれぞれ 12 日と 14 日と報告されている (柳ら, 2001)。

3. 調査方法

1980 年 4 月から 1995 年 3 月までの 15 年間にわたって、毎月 1 回午前 10 時頃、洞海湾のほぼ中央部に位置する環境基準点 D6 (Fig. 2) で調査を実施した。調査期間中の降水量と日照時間については、気象月報 (福岡管区気象台編, 1980 年 4 月～1995 年 3 月) の値を用いて、それぞれ調査日前 3 日間の合計値を算出し検討に用いた。また、調査地点では透明度を測定するとともに、バケツを用いて表層水を採取し、この試料について水温、塩分、TN、TP 濃度の測定ならびに植物プランクトン組成の調査を行った。水温と塩分については、下層 (水深 7 m) についても測定を行った。なお、TN および TP 濃度については、1980 年 4 月から 1991 年 3 月に限り年 6 回のみの測定で、それ以降の 4 年間は毎月 1 回測定を行った。

透明度、水温および塩分の測定は、海洋観測指針 (気象庁, 1970) に準拠して行った。TN 濃度は JIS K 0102.45. 5 燃焼法 (日本工業調査審議, 1986) で、TP 濃度は海洋観測指針 8. 8 メンツェルの方法 (気象庁, 1970) で分析した。

植物プランクトンは採水法で採集し、生海水試料と安達液 (安達, 1980) で固定、濃縮した試料の両方について同定・計数を行った。なお、洞海湾ではピコ植物プランクトン ($0.2\sim 2.0\ \mu\text{m}$) が全クロロフィル a 濃度の 6～36% を占めると報告されている (多田ら, 2001) が、今回はこれは対象とせず、ナノ ($2\sim 20\ \mu\text{m}$) およびミクロ ($20\ \mu\text{m}<$) 植物プランクトンについて計数した。

植物プランクトンと高密度に出現した繊毛虫類に対する淡水産種、汽水産種、および海産種の区分、ならびに海産種における沿岸・内湾性種および外洋性種の区分は、丸茂・村野 (1973)、山路 (1974)、野村 (1998)、梅崎ら (1988)、福代ら (1990)、および千原ら (1997) に基づいて行った。また、今回の調査地点は染料排水の影響を受ける可能性があったことから、赤潮形成の有

無の判定は目視観察によらず、植物プランクトンのサイズと密度を用いて判定する安達 (1973) の方法に従った。本調査地点における植物プランクトンの調査は、表層水についてのみ行っている。調査地点から約 1 km 湾奥側の地点で、過去 4 年間に 19 回にわたって、表層から水深 10 m まで 2 m ごとに植物プランクトン組成を調べた結果、赤潮の形成が観察された際には、植物プランクトンが高密度に存在した水深は表層と 2 m 層のみであった。このことから、調査地点での赤潮の発生は、表層水についてのみ調査で確認できていたと考えられる。

この報告では、月ごとの赤潮形成率を以下のように算出した。

$$\text{赤潮形成率} = \frac{\text{各月で赤潮形成の認められた回数}}{\text{調査回数}}$$

多様度指数は Shannon (1948) が考案した平均多様度指数 H' を用いて検討した。

$$H' = - \sum_i (n_i / N) \log_2 (n_i / N)$$

ここで、 N は植物プランクトンの総密度、 n_i は i 番目の植物プランクトン密度である。

また、植物プランクトンの季節的な消長に関しては、調査期間の各月について 15 回のデータ数を得ることにより、その出現特性の抽出を試みた。

4. 結果および考察

4.1. 物理・化学的水質環境

15 年間にわたる観測データから、気象要因および水質環境パラメーターの季節的变化を Fig. 3 に、それら環境要因の相関関係を Table 1 に示した。調査日前 3 日間の降水量は $0\sim 241\ \text{mm}$ 、日照時間は 0 時間～34.5 時間の範囲で推移した。水温は $6.4\sim 29.5^\circ\text{C}$ の範囲で推移し、8 月に 1 山型のピークを持つ通常の温帯海域の様相を呈した。塩分は降水量との間に負の相関関係 ($r = -0.44$, $p = 0.05$) が認められることから、調査地点の塩分低下には降水とそれに伴う河川水量の増加が影響していたことが示唆される。しかし、塩分は平均

Fig. 3. Seasonal variation of environmental parameters in the surface water at Sta. D6 during 1980~1995.

値が 29.0 で、20 以下への低下は 180 回におよぶ調査の中で 8 回と少なかったため、調査地点は淡水の影響は受けるものの、淡水より海水の影響の強い汽水域であったといえる。また、 $\Delta\sigma_t$ (下層の σ_t - 表層の σ_t) と水温、 $\Delta\sigma_t$ と塩分の相関係数が順に 0.38, -0.94 であったことから、洞海湾の密度成層は水温より塩分の方に強く影響されていた。

TN 濃度は 104~1,290 μM , TP 濃度は 0.81~13.9 μM の範囲を推移し、これらには明瞭な季節変化

は認められなかった。また、TN と TP はともに降水量とは相関関係は示さないが、塩分とは負の相関関係 $r = -0.35$ がみられたことから、これらは降水による地表水流入ではなく、例えば工場排水などにより湾に負荷されていたことが示唆される。また、今回の調査地点 (D6) から湾奥側に約 2 km の調査地点では、1995 年 8 月 31 日から 9 月 1 日の連続 2 日間にわたる調査において、TN 濃度が 1 日目 258 μM , 2 日目 2,200 μM とわずか 2 日間で 1,942 μM という急激な濃度変化が認

Table 1. Relationships between categories of climate, water quality, and phytoplankton in the surface water at Sta. D6 in Dokai Bay during 1980~1995.

	Pre.	D.L.	Tra.	W.T.	Sal.	$\Delta\sigma_t$	TN	TP	Density	H'
Pre.										
D.L.	0.08									
Tra.	-0.22	-0.09								
W.T.	0.14	0.15	-0.43							
Sal.	-0.44	0.01	0.36	-0.39						
$\Delta\sigma_t$	-0.39	0.02	-0.35	0.38	-0.94					
TN	0.01	-0.08	-0.24	0.08	-0.35	0.39				
TP	0.17	0.39	-0.28	0.26	-0.35	0.36	0.43			
Density	-0.06	0.24	-0.35	0.70	-0.03	0.07	0.02	0.14		
H'	-0.08	0.06	0.21	-0.12	0.14	-0.13	-0.21	-0.07	-0.31	

Correlation coefficient is shown by italic letters when correlation is significant relation $p < 0.05$, $N=107$.

Pre., the mean value for three days precipitation before the sampling day (mm);

D.L., the mean value for three days daylight time before the sampling day (h);

Tra., Transparency (m); W.T., Water temperature ($^{\circ}\text{C}$); Sal., Salinity;

$\Delta\sigma_t$, σ_t at the bottom water - σ_t at the surface water; TN, Total nitrogen (μM);

TP, Total phosphorus (μM); Density, Phytoplankton density ($\log_{10}$ cells ml^{-1});

H' , Phytoplankton diversity index (Shannon index).

められた。これらの調査日および調査前3日間には顕著な降雨がなかったことから、湾への窒素負荷は、主に地表水以外のものであったと推定される。

以上のことから、洞海湾の調査地点の塩分環境は海水の影響が強く、また栄養塩は河川水には由来しない窒素やリンが多量に負荷され、常に高い栄養塩濃度を呈していた。なお、1995年から1998年の4年間に13回にわたって、今回の調査地点から約1.5 km 湾奥側の定点で測定された表層水中のケイ酸態ケイ素は4.8~66.9 μM の濃度範囲で、平均値は21.1 μM であった。

4.2. 植物プランクトンの出現状況

15年間にわたる洞海湾調査において出現した植物プランクトンは、藍藻類5種、渦鞭毛藻類32種、珪藻類100種、ラフィド藻類1種、黄金色藻類5種、ユーグレナ藻類4種、プラシノ藻類3種、緑藻類7種の計157種であった。なお、クリプト藻類や大きさが10 μm 前後で葉緑体を持たないか、持っていても僅かなノコ鞭毛藻類も観察されたが、同定が困難であったため、こ

れらについては出現量(細胞数)のみ測定した。

出現種の中で、淡水産種は12種、汽水産種は3種で残り144種は海産種であった。また、海産種ではほとんどが沿岸・内湾性種とされているもので、外洋性種は含まれなかった。このように、洞海湾で淡水種より海産種が圧倒的に多かったのは、Fig. 3で示された本調査地点での塩分の測定値と矛盾しない。

4.2.1. 植物プランクトン密度の季節変化

植物プランクトン密度は、Fig. 3に示すように、48~240,000 cells ml^{-1} の範囲(平均22,000 cells ml^{-1})にあり、1月に最も低く8月に最も高くなる1山型の変化パターンを示した。このような季節変化は、クロロフィル a 濃度や一次生産量の調査(Tada *et al.*, 2001)からも報告されている。

通常、温帯(貧栄養)海域での植物プランクトン現存量は、水温躍層の発達にともない変化する栄養塩濃度と動物プランクトンによる摂食圧とから、春季と秋

Fig. 4. Seasonal occurrence of phytoplankton groups in the surface water at Sta. D6 during 1980~1995.

季にピークを持つ2山型を示す (Carefoot, 1979; Sze, 1993)。一方 Sze (1993) によれば、淡水湖では貧栄養の場合植物プランクトン量の季節変化は2山型であるが、富栄養化が進行すればこれに夏季のピークが付け加えられ、1山型を呈するようになる。実際、我が国の富栄養化した湖沼として代表的な諏訪湖では、植物プランクトン現存量の季節的出現パターンが富栄養化の進行に伴い春季と秋季にピークを持つ2山型から夏季にピークを持つ1山型に移行している (坂本, 1978)。さらに、長良川河口堰のように富栄養化した河川下流域の堰内では、植物プランクトンが夏季にピークを持つ1山型の出現パターンを示すことも報告されている (村上, 1996)。洞海湾においても、現象的には、富栄養湖や河口堰等の閉鎖系淡水域の植物プランクトン現存量と同じ1山型の増殖パターンを示したことが特徴的である。

4.2.2. 植物プランクトン網別分類群の季節変化

網別にまとめた植物プランクトン密度の出現割合を、月ごとに15年間の平均値で、Fig. 4に示した。洞海湾で出現割合の高かったのは、珪藻類 (Bacillariophyceae)、微小鞭毛藻類 (Micro flagellates) およびクリプト藻類 (Cryptophyceae) の3分類群で、これらは合計すると、周年にわたって各月の65~90%を占めていた。これら3群の合計が60%台に落ちたのは、黄緑色藻類やユーグレナ藻類およびプラシノ藻類が優占した4月と5月、藍藻類が優占した8月、9月および10月の計5か月間であった。

なお、東京湾では渦鞭毛藻類の現存量がしばしば珪藻類をしのぐと報告 (山口, 1997) されたが、洞海湾の場合には、そのような現象は観察されなかった。

4.2.3. 優占種の出現状況

調査時に出現密度が高くまた出現頻度が高かった植物プランクトンを優占種として、各月の細胞密度と出現頻度を Fig. 5 に示した。藍藻類クロオコックス科 *Chroococcaceae* の 1 種が、高水温期にのみ優勢に出現した。本種は、長径および短径が順に 3~4 μm , 2~3 μm とピコプランクトンよりやや大型で、海水中に分散して出現した。クリプト藻類は周年にわたって出現頻度が高く、定常的に 10 cells ml^{-1} 以上の細胞密度が観察された。渦鞭毛藻類の主な出現種は *Prorocentrum minimum* および *P. triestinum* の 2 種で、両者共に春期には観察されないという傾向が認められた。珪藻類の *Cyclotella striata* (高野, 1990), *C. striata* var. *subsalina* および *Chaetoceros salsugineum* の 3 種は夏期に多量出現した。また, *Skeletonema costatum* (高野, 1990) および *Skeletonema tropicum* の *Skeletonema* 属が周年にわたって観察されたが、出現量は高水温期に著しく増加した。一方、洞海湾が開口する響灘で優占する *Leptocylindrus* 属, *Rhizosolenia* 属, *Chaetoceros* 属および *Eucampia* 属などの珪藻類は、密度が低いものの周年にわたって認められ、その出現頻度は低水温期に高くなっていた。ラフィド藻類の *Heterosigma akashiwo* は、周年にわたって出現した。黄金色藻類では *Pseudopedinella pyriformis* と *Apedinella spinifera* の 2 種が春期に優占した。*Eutreptiella* 属などユーグレナ藻類は周年にわたって出現頻度が高く、出現量は春期に多かった。ブラシノ藻類の *Pyramimonas lunata* や *Pyramimonas longicauda* などの *Pyramimonas* 属も周年にわたって出現したが、春期に出現量が増加した。その他の微小鞭毛藻類は周年にわたって出現したが、夏期に出現頻度が低下していた。このように、富栄養化が著しく進行した洞海湾においても他の内湾と同様、プランクトン優勢種は水温変化に伴う独自の出現パターンを持ち季節的な遷移をしていた。

4.2.4. 赤潮生物の出現状況

洞海湾での赤潮構成種について、その出現状況を①単一種が高密度に出現していた場合、② 2 種~3 種が

単独でも赤潮形成密度に達する程度出現していた場合、および③ 2 種~3 種のプランクトン密度の合計値が赤潮形成密度に達していた場合の 3 通りに分け、各赤潮生物の出現回数を Table 2 に示した。なおここでは、赤潮発生時、それを構成していた種類を赤潮生物と表現する。赤潮生物として出現頻度が最も高かったのは珪藻類の *Skeletonema* 属で、単独赤潮形成が 20 回、混合赤潮形成が 16 回で、その合計は計 36 回であった。調査期間中の赤潮形成回数が 51 回であったことから、洞海湾で形成される赤潮の約 75% に本属が関与していたことになる。次に赤潮形成頻度が高かったのは藍藻類の *Chroococcaceae* と珪藻類の *Cyclotella striata* および *C. striata* var. *subsalina* で、これらのことから洞海湾では *Skeletonema* 属など珪藻類と藍藻類が赤潮を形成する種類として重要であったことがわかる。

なお、1982 年 6 月には繊毛虫類のみによる海面変色が観察され、その細胞数は *Cyclidium* 属の 1 種が約 640 cells ml^{-1} , *Strobilidium* 属の数種が約 530 cells ml^{-1} , *Mesodinium rubrum* が約 210 cells ml^{-1} であった。なお、この時の植物プランクトンは *S. costatum* を主体に 381 cells ml^{-1} しか観察されず、6 月の植物プランクトン密度としては低レベルであった。共生藻を持つ *M. rubrum* (高野, 1990) の赤潮形成報告は、東京湾をはじめ世界の沿岸海域で多数知られている (岡市, 1997) が、淡水種と推定される *Cyclidium* 属と海産種の *Strobilidium* 属などが同時に多数出現したという報告は、我が国の沿岸海域ではほとんどみあたらない。このように、一回ではあれ、従属栄養性の原生生物の大量増殖が認められたことは、洞海湾における赤潮生物出現パターンの特徴の一つと考えられる。

4.2.5. 富栄養化が著しく進行した洞海湾と東京湾における赤潮生物の比較

洞海湾より TN 濃度が 1 桁低いものの富栄養化が著しく進行した海域とされる東京湾の赤潮生物 (野村, 1998) と洞海湾の赤潮生物を比較した (Table 3)。東京湾と洞海湾に共通して出現がみられたのは、*S. costatum* をはじめ、*H. akashiwo* など 9 種であった。とくにこの中で、*S. costatum* は東京湾においても、富栄養化の進行

Fig. 5. Seasonal occurrence of dominant phytoplankters in the surface water at Sta. D6 during 1980~1995.

とともに出現量が増加した種類であり、赤潮形成回数が最も多い種として掲げられている (山口, 1993; 山口, 1997; 野村, 1998)。さらに本種は、大阪湾 (城, 2002) をはじめ我が国の沿岸海域においても、赤潮形成頻度が著しく高い (岡市, 1997)。また、これら 9 種の中で *Prorocentrum minimum*, *S. costatum*, *Thalassiosira* spp., *Heterosigma akashiwo*, *Eutreptiella* sp., および *Mesodinium rubrum* の 6 種は、東京湾の中でもとくに富栄養化の進行していた 1976 年から 1986 年に湾奥部の隅田川河口域で赤潮を形成した種類である (Takano, 1987)。

洞海湾でのみ出現した赤潮生物は Chroococcaceae, *Cyclotella striata* および *C. striata* var. *subsalina*, *S.*

tropicum および *C. salsugineum* の 4 種であった。一方、東京湾でのみ赤潮が報告されたのは珪藻類の *Eucampia zodiacus* など 10 種と渦鞭毛藻類の *Noctiluca scintillans* (夜光虫) など 2 種であった。これらは警灘や周防灘で赤潮を形成する (未発表) 種類であるが、*N. scintillans* は洞海湾では全く観察されたことがなく、他の 11 種も洞海湾では少量観察されるのみである。なお、*N. scintillans* は従属栄養を行うため植物に分類できないと指摘されるが、植物プランクトンとして扱われる場合 (入江, 1988; 千原ら, 1997) が多く、この報告でも植物プランクトンとして取り扱う。

ここで、今回の調査地点のような内湾域では、低塩分が植物プランクトンの増殖を阻害していたことも考

Table 2. Occurrence frequency of organisms comprising the fifty-one blooms in the surface water at Sta. D6 in Dokai Bay during 1980~1995.

Phytoplankton		Exclusively* ²	Mixture 1* ³	Mixture 2* ⁴	Total
Cyanophyceae	Chroococcaceae	3	4	3	10
Cryptophyceae				2	2
Dinophyceae	<i>Prorocentrum minimum</i>		1		1
	<i>P. triestinum</i>		1		1
Bacillariophyceae	<i>Cyclotella striata</i> and <i>C. striata</i> var. <i>subsalina</i>	3	6	1	10
	<i>Skeletonema costatum</i> and <i>S. tropicum</i>	20	10	6	36
	<i>Thalassiosira</i> spp.			2	2
	<i>Chaetoceros salsugineum</i>	2			2
Raphidophyceae	<i>Heterosigma akashiwo</i>			1	1
Euglenophyceae	<i>Eutreptiella</i> spp.	1		6	7
Prasinophyceae	<i>Nephroselmis</i> sp.		2		2
	<i>Pyramimonas</i> spp.			2	2
Ciliates* ¹				(1)	(1)

*¹, Ciliates include *Cyclidium* sp., *Mesodinium rubrum* and *Strobilidium* spp.

*², Red tide was formed by only one species.

*³, Red tide was formed by a few species when the densities in each species was up to/higher than the least density of a red tide formation.

*⁴, Red tide was formed by a few species when the each species densities was lower than the least density of a red tide formation but the total density in each species was up to/higher than that.

Table 3. Comparison of organisms between Dokai Bay during 1980~1995 and Tokyo Bay during 1979~1996 (Nomura, 1998).

Dokai Bay only	Both Dokai Bay and Tokyo Bay	Tokyo Bay only
Chroococcaceae	Cryptophyceae	<i>Cerataulina pelagica</i>
<i>Cyclotella striata</i> and <i>C. striata</i> var. <i>subsalina</i>	<i>Prorocentrum minimum</i> <i>P. triestinum</i>	<i>Eucampia zodiacus</i>
<i>Skeletonema tropicum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>	Naviculaceae spp.
<i>Chaetoceros salsugineum</i>	<i>Thalassiosira</i> spp. <i>Heterosigma akashiwo</i> <i>Eutreptiella</i> spp. <i>Pyramimonas</i> spp. <i>Mesodinium rubrum</i>	<i>Dactyliosolen fragilisimus</i> <i>Rhizosolenia</i> spp. <i>Cylindrotheca closterium</i> <i>Leptocylindrus minimus</i> <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> <i>Chaetoceros</i> spp. <i>Thalassiosira binata</i> <i>Gymnodinium</i> spp. <i>Noctiluca scintillans</i>

えられる。しかし、一般に植物プランクトンは比較的
低塩分 (20~25) の条件下で最適の増殖を示すことが
培養実験で明らかにされており (岩崎, 1975), 今回の
調査地点では, 前述のように塩分の 20 以下への低下は
全調査回数の 5% にもみたなかった。また実際, Guil-
lard (1963) の行った培養実験結果によれば, これら
12 種のうち *E. zodiacus* と *Chaetoceros lorenzianum*
の生育可能な最低塩分はそれぞれ 9 と 16 であり, 上
野 (1958) が行った現場海域での調査結果 (27.0~34.2)
を参照すると, *Rhizosolenia setigera*, *Nitzschia pun-
gens* (*Pseudo-nitzschia pungens*, *Nitzschia seriata*),
Chaetoceros affine および *C. curvisetum* など 4 種は,
塩分の低下した環境下において出現割合が高かった。ま
た, *N. scintillance* については, 塩分 8.5~34 で生息が
みられ, 塩分が 22 で最大の増殖率が報告されている
(Lee and Hirayama, 1992)。今回の調査地点の塩分平
均値が 29 (Fig. 3) あったことを勘案すれば, Table 3
で東京湾にのみ赤潮を形成した種類が洞海湾で赤潮を
形成できなかった原因として, 塩分は挙げ難い。

以上のことから, 洞海湾と東京湾とでは湾の規模や
物理構造が異なるが, 9 種の植物プランクトンが共通
の赤潮生物として認められた。また, 洞海湾より N・
P 濃度の低い海域の赤潮形成プランクトン, 例えば *N.
scintillance* 等が東京湾では赤潮生物となっていたが,
洞海湾では赤潮を形成していないなど, 赤潮生物の種
類が限定されていたことも確かめられた。

4.3. 環境要因と植物プランクトンの関連

4.3.1. 高水温期の赤潮消滅と環境要因

高い栄養塩条件下の洞海湾では, Table 1 に示すよう
に, 植物プランクトン密度は 8 項目の環境要因の中で,
水温や日照時間との間の相関係数が順に $r = 0.70$ と r
 $= -0.31$ であったことから, 気象要因や物理要因との
関連が強いことがわかる。とくに, 洞海湾において低
水温期に赤潮がみられない (Fig. 6) のは, 植物プラン
クトンがエスチュアリー循環によって湾外へ輸送され,
低水温と低日照により赤潮密度に到達する分裂速度を
獲得できないためであることが既に柳・山田 (2000) や
Tada *et al.* (2001) によって明らかにされている。

しかし, Fig. 6 に示すように, 洞海湾では 15 年間に
わたる調査において, 赤潮形成率は 8 月には 87% と最
も高かったが, 9 月は 60%, 5 月, 6 月, 7 月および 10
月の 4 か月は 47% と, 高水温期においても常に赤潮が
形成されていたわけではなかった。そこで, その原因
について, 以下に検討を試みた。

Fig. 6. Occurrence frequency (%) at the average water temperature of each month in the surface water at Sta. D6 during 1980~1995.

まず, 上記の洞海湾のエスチュアリー循環を加速させ,
低日照をもたらす要因として, 降水の影響について検
討した。高水温期に調査日前 3 日間の降水量が 20 mm
以上であったのは 33 回で, このうち 25 回の調査日
には赤潮の形成は認められなかった。とくに, 平均水温
が 25°C を上まわった 8 月と 9 月では, 赤潮が観察さ
れなかった 8 回の調査時にはすべて調査日前の 3 日間
で降水量が 20 mm 以上の降水が確認されており, 高水
温期に赤潮が形成されなかったことには降水が寄与し
ていたと考えられる。なお, 調査を行った 15 年間に
おいて赤潮発生が 1 回も確認できなかった年は 1980 年と
1993 年の 2 か年であったが, これら両年は「冷夏多雨」
と呼ばれた年であった。

次に, 動物プランクトンによる植物プランクトンへ
の摂食圧について検討する。Uye *et al.* (1998) は, 1996
年 8 月 21 日に湾内全域にわたって行った調査をもとに,
洞海湾の低次生産について炭素フロー図を作成し, 検
討を加えた結果, 植物プランクトンの摂食者である動
物プランクトンは現存量, 生産速度ともに高く, 夏期

には細菌を含めた従属栄養性生物が植物プランクトンが生産した有機物をほぼ消費している可能性を指摘した。このように、夏期にネット動物プランクトンの摂食圧が高いのは、他の富栄養化した海域とは異なった現象とされており、これが高水温期の赤潮消滅要因の一つになっていた可能性も示唆される。

4.3.2. 植物プランクトンの多様度と環境要因

植物プランクトンの多様度指数 H' は、Fig. 1 に示すように、0.03 から 3.12 の範囲を明瞭な季節変化を示さずに推移し、平均値は 1.38 と低めであった。Margalef (1967) によれば、多様度指数 H' は活発に増殖している沿岸性の植物プランクトンの場合には 2.5 付近の値であるが、沿岸域や赤潮発生域ではそれ以下になるとされている。したがって、今回洞海湾から得た多様度指数 H' はこの範囲に入っていたことがわかる。 H' が最低値の 0.03 は、1992 年 8 月に珪藻類の *S. costatum* 1 種のみが優勢に出現した場合であった。一方、 H' の最高値 3.12 が得られたのは 1989 年 6 月で、*S. costatum* をはじめ *Cyclotella striata* や *Eutryptiella* sp. 等 6 種の植物プランクトンによって赤潮が形成されて場合で、このように多様性の要素である「種類の豊富さ」と「個体数の均等性」のうち後者が機能していた場合、赤潮が形成されていても、 H' が 3 以上となることもみられた。

多様度指数 H' は環境要因の中で、Table 1 に示すように、透明度との間に正 ($r = 0.21$) の、TN 濃度との間に負 ($r = -0.21$) の弱い相関関係が認められた。また、 H' は植物プランクトン密度との間に相関係数が -0.31 と、弱い相関関係がみられた。これらのことから、透明度の悪化、赤潮生物の異常増殖および高濃度の全窒素濃度等、人為的富栄養化に関連の深い環境要因や生物要因が植物プランクトン多様度の貧弱化に関与していたことが判明した。

謝 辞

この研究をまとめるにあたり、九州大学応用力学研究所の柳 哲雄教授、北海道大学大学院の門谷 茂教授、香川大学農学部が多田 邦尚教授および一見 和彦助教授に、貴重な助言を賜りました。心から、感謝の意を表

します。また、この研究の一部は水産庁委託水産振興事業委託費で実施したものであり、お礼申し上げます。

References

- 安達 六郎 (1973) : 赤潮の規定. 1973 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p. 210.
- 安達 六郎 (1980) : 4-2 固定液, p. 169. 赤潮マニュアル I 試料の採集・処理・観察法, 安達 六郎, 入江 春彦編, 赤潮研究会分類班, 三重.
- Carefoot, T. (1979) : Chapter 5, The economy of shore, p. 106-152. In *Pacific Seashore*, University of Washington Press, Seattle.
- 千原 光雄・石丸 隆・井上 勲・井上 博明・梅崎 勇・恵良田 真由実・河地 正伸・斉藤 実・高野 秀昭・高山 晴義・鳥海 三郎・原 慶明・福代 康夫・堀口 健男・松岡 数充 (1997) : 植物プランクトン編, p. 3-330. 日本海洋プランクトン検索図説, 千原 光雄, 村野 正昭編, 内田老鶴園, 東京.
- 福岡管区気象台編 (1984.4~1990) : 福岡県気象月報. 財団法人 日本気象協会福岡本部, 福岡市.
- 福代 康夫・石田 祐三郎・石丸 隆・井上 勲・井上 博明・今村 賢太郎・入江 春彦・梅崎 勇・恵良田 真由実・小野 知足・黒田 一紀・斉藤 実・高野 秀昭・高山 晴義・千原 光雄・鳥海 三郎・中村 恵江・原 慶明・堀口 健男・Pornsilp Pholpunthin・松岡 数充・結城 勝久・吉松 定昭 (1990) : 日本の赤潮生物-写真と解説-. 福代 康夫, 高野 秀昭, 千原 光雄, 松岡 数充編, 内田老鶴園, 東京, 407 pp.
- Guillard, R. R. L. (1963) : Organic source of nitrogen for nutrient of marine centric diatoms, p. 93-104. In *Symposium of Marine Microbiology*, edited by C. H. Oppenheimer and C. C. Thomas, Springfield, Illinois.
- 石田 祐三郎 (2000) : 第 1 章, 栄養塩とその比は、海域に共通した要因として種の多様性に影響するのか, p. 3-5. 栄養塩と生物多様性調査・最終報告書.
- 入江 春彦 (1988) : 緒言, p. 9-13. 赤潮生物調査指針, 日本水産資源保護協会編, 秀和, 東京.
- 岩崎 英雄 (1987) : 植物プランクトンの生理, p. 49-116. 海洋プランクトン, 海洋科学基礎講座 6, 元田 茂編, 東海大学出版会, 東京.
- 城 久・矢持 進 (1986) : III. 4, 赤潮, p. 32-47. 漁業からみた閉鎖性海域の窒素・リン規制, 水産学シリーズ 62, 村上 彰男編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 城 久 (2002) : 2.2.1) 植物プランクトンと基礎生産, p. 34-35. 大阪湾の海域環境と生物生産, 水産研究叢書 49, 日本水産資源保護学会, 東京.
- 気象庁 (1970) : 8.8 Total-P, p. 171-172. 海洋観測指針, 日本気象協会, 東京.

- Lee J. K. and K. Hirayama (1992) : Effects of salinity, food level and temperature on the population growth on *Noctiluca scintillans* (Macarthy). *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **71**, 163-168.
- Margalef, R. (1967) : Some concepts relative to the organization of plankton. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **5**, 257-289.
- 丸茂 隆三・村野 正昭 (1973) : 東京湾の珪藻プランクトンの遷移. *La mer*, **11**, 70-82.
- 丸茂 隆三・佐野 昭・村野 正昭 (1974) : 東京湾の珪藻プランクトンの遷移—続. *La mer*, **12**, 145-156.
- 門谷 茂 (1996) : 第1章, 瀬戸内海の環境と漁業関わり, p. 1-40. 瀬戸内科の生物資源と環境, 岡市 友利・小森 星児・中西 弘編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 村上 哲生 (1996) : 第5章, 河川棲植物プランクトン, p. 123-150. 河川感潮域—その自然と変貌—, 西條 八束・奥田 節夫編, 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 日本工業調査審議 (1986) : 45. 5 全窒素, 熱分解法, p. 156-157. 工場排水試験法 JIS K 0102, 日本工業規格, 東京.
- 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.
- 岡市 友利 (1997) : 2 赤潮現象, p. 5-33. 赤潮の科学 第二版, 岡市 友利編, 恒星社厚生閣, 東京.
- Pacific Northwest Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon (1974) : Marine algal assay procedure : Bottle test. distributed by National Technical Information Service, 43 pp.
- 坂本 充 (1978) : 第2章, 短期間内の群集の生態遷移, p. 100. 生態遷移 II, 生態学講座 11-b, 共立出版, 東京.
- 關 文威監訳, 長沼 毅訳 (1996) : 第5章 エネルギー源と物質循環, p. 80-106. 生物海洋学入門, 講談社, 東京.
- Shannon, C. E. (1948) : A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, **27**, 379-427, 623-656.
- Sze, P. (1993) : Chapter 7, Phytoplankton, p. 165-191. In *A Biology of the Algae*, Second Edition, Wm. C. Brown Publishers, Oxford.
- Tada, K., M. Morisita, K. Hamada, S. Montani, and M. Yamada (2001) : Standing stock and production rate of phytoplankton and a red tide outbreak in a heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan. *Mar. Pollut. Bull.*, **42**, 1,177-1,186.
- 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, **7**, 9-15.
- 高橋 正征・古谷 研・石丸 隆監訳 (1996) : 7.2.4 漁業管理, p. 32-40. 現実問題への生物海洋学の応用, 生物海洋学 5, 東海大学出版会, 東京.
- Takano, H. (1987) : Red-tides at the Mouth of Sumida River, Tokyo, During the Last Years. 1976-1986, p. 117-124. In *Red Tides*, edited by T. Okaichi, D. M. Anderson and T. Nemoto, Elsevier, New York.
- 高野 秀昭 (1990) : *Cyclotella striata* (Kutzing) Grunow, p. 166-167. *Skeletonema costatum* (Greville) Gleave, p. 178-179. *Mesodinium rubrum* (Lohmann) Hamburger et Buddenbrock, p. 398-399. 日本の赤潮生物—写真と解説—, 福代 康夫・高野 秀昭・千原 光雄・松岡 敷充編, 内田老鶴園, 東京.
- 上野 福三 (1958) : 本州南岸付近の珪藻量と海況との関係, 主として重要種の水温および塩素量に対する一般的特性について. 海と空, **34**, 92-112.
- 梅崎 勇・井上 勲・恵良田 真由実・斉藤 実・高野 秀昭・千原 光雄・鳥海 三郎・原 慶明・福代 康夫・松岡 敷充 (1988) : II 赤潮生物の分類, p. 246-697. 赤潮生物調査指針, 日本水産資源保護協会編, 秀和, 東京.
- Uye, S., N. Nagano, and T. Shimazu (1998) : Biomass production and trophic roles of micro- and net-zooplankton in Dokai Inlet, a heavily eutrophic inlet in summer. *Plankton Biol. Ecol.*, **45**, 171-182.
- 若林 明子 (2000) : OECD テスト ガイド ライン, 201 藻類生長阻害試験, p. 323-351. 化学物質と生態毒性, 社団法人 蚕業環境管理協会, 東京.
- 山田 真知子・徳崎 健史 (1993) : 9. 洞海湾・響灘, p. 96-106. 水域の窒素 : リン比と水産動物, 水産学シリーズ 95, 吉田 陽一編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 山田 真知子 (1999) : 第12章, 洞海湾, p. 166-177. 日本の水環境行政, 日本水環境学会編, ぎょうせい, 東京.
- 山口 征矢 (1993) : 2.1.3.1) 植物プランクトン, p. 64-67. 東京湾—100年の環境変遷—, 小倉 紀雄編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 山口 征矢 (1997) : 第1部 第2章, プランクトン, p. 24-36. 東京湾の生物誌, 沼田 真, 風呂田 利夫編, 築地書館, 東京.
- 山路 勇 (1974) : 日本海洋プランクトン図鑑, p. 1-109. 保育社, 恒星社厚生閣, 大阪.
- 矢持 進 (1993) : 8. 大阪湾, p. 84-956. 水域の窒素 : リン比と水産動物, 水産学シリーズ 95, 吉田 陽一編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 柳 哲雄・山田 真知子 (2000) : 洞海湾で冬季赤潮が発生しない理由. 海の研究, **9**, 125-132.
- 柳 哲雄・山田 真知子・中嶋 雅孝 (2001) : 洞海湾と博多湾の富栄養化機構の比較. 海の研究, **10**, 275-283.
- 吉田 陽一 (1983) : III. 3 生物指標法, p. 25-28. 漁業環境アセスメント, 水産学シリーズ 48, 吉田 多摩夫編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 吉田 陽一・小玉 一哉・酒井 康彦・辻野 耕実・中島 唱紀・山本 圭吾・堀 豊・西川 哲也・宮原 一隆・長井 敏 (1998) : 大阪湾および播磨灘におけるギムノデイニウム高密度発生と水質, 気象要因との関係. 日水誌, **64**, 1,013-1,019.

Characteristics of Phytoplankton Occurrence in the Hyper-eutrophic Environment, Dokai Bay, Japan

Machiko Yamada[†] and Yoko Kaziwara[†]

Abstract

The heavily eutrophied coastal waters of Dokai Bay during 1980 and 1995 should afford optimal environmental conditions for the red-tide phytoplankters throughout the year, because of high concentrations of total nitrogen (mean 474 μM and maximum 1,290 μM of the year) and total phosphorus (mean 4.6 μM and maximum 13 μM of the year). However, the phytoplankters in Dokai Bay form a single bloom during summer, this is the same as in every typical eutrophied freshwater lake or estuarine dam and is in contrast to the temperate ocean where the blooms occur with a bimodal annual pattern. In spite of the rich nutrient condition of Dokai Bay, a red tide formed not always even during the warmer season, possibly because of the high estuary circulation rate and low irradiance due to heavy precipitation. Thus climatic and physical factors must regulate principally the phytoplankton density in Dokai Bay. The phytoplankton diversity index H' (Shannon index) was low (mean = 1.38) as controlled by the concentration of total nitrogen and the high density of phytoplankton. Though a little greater than 10 species of the red tide organisms occurred in Dokai Bay, diatoms usually formed the major component of the phytoplankton in the bay; the representative diatom was *Skeletonema*, similar to most cases in the eutrophic coastal areas of Japan.

Key words: occurrence characteristics of phytoplankton, heavily eutrophied coastal water, hyper-eutrophic marine environment, Dokai Bay

(Corresponding author's e-mail address: machiko_yamada01@mail2.city.kitakyushu.jp)

(Received September 15, 2003; accepted February 13, 2004)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2004)

[†] Kitakyushu City Institute of Environmental Sciences, Aqua Research Center, 1-2-1 Shin-ike, Tobata-ku, Kitakyushu 804-0082, Japan