〈論 文〉

瀬戸内海西部域，太平洋における植物プランクトン群集の サイズ構造とその制限栄養塩に関する研究

李 英 植* 向 井 徹 雄*
瀧 本 和 人* 岡 田 光 正*

Study of Limiting Nutrient and Size Structure of Phytoplankton Community in Western Seto Inland Sea and Pacific Ocean

Young Sik LEE*, Tetsuo MUKAI*,
Kazuto TAKIMOTO* and Mitsumasa OKADA*

* Department of Environmental Science, Faculty of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama,
Higashi-Hiroshima 739 Japan

Abstract

Horizontal variations of limiting nutrient and size structure of phytoplankton community at estuarine and oceanic stations from Hiroshima Bay to the Pacific Ocean were studied. The following results were obtained:

- 1) Concentrations of DIN, DIP and chlorophyll *a* were very high in Hiroshima Bay estuary and decreased toward the south sea area.
- 2) Limiting nutrient of phytoplankton in the Hiroshima Bay estuary was estimated to be phosphorus, whereas that in other stations was estimated to be nitrogen.
- 3) Nanophytoplankton dominated total biomass of phytoplankton population in terms of chlorophyll *a* in Hiroshima Bay. On the contrary, picophytoplankton showed the greatest fraction of total biomass of phytoplankton population in terms of chlorophyll *a* from the Sea of Iyo to the Pacific Ocean.
- 4) Cell density of picocyanobacteria was maximum in the Hiroshima Bay estuary, but the lowest was observed in southernmost station of the Pacific Ocean.

Key words: estuary, limiting nutrient, micro., nano., picophytoplankton

1. はじめに

瀬戸内海や東京湾、伊勢湾のような内海、内湾は陸域と海域との中間にあるため、河川水の流入や排水の放流などの陸水の影響と外洋水の流入による影響を同時に受ける海域である。このような海域は陸域からの栄養塩負荷量の増加によって富栄養化が進行し、さまざまな問題が生じている¹⁾。

植物プランクトン増殖の制限栄養塩は、一般的に陸

域ではリン、海域では窒素と見なされている²⁾。しかし、海域によっては陸域からの栄養塩負荷により、その制限栄養塩が季節的に変動する場合も知られている。例えば、米国東部の Chesapeake 湾の場合、陸域からの河川流量が少ない夏季末期では窒素が制限栄養塩であるが、逆に河川流量の多い春季初めには多量の無機体窒素の負荷により、リンが制限栄養塩となった。このような場合、有効な富栄養化対策としては窒素、リンの両者の削減が必要とされている^{3),4)}。このよう

に、沿岸河口域における植物プランクトン増殖の制限栄養塩は地域的特性により時間的あるいは空間的に変動する。

一方、植物プランクトンをサイズ別に分画する場合、一般にマイクロ ($200\sim 20\mu\text{m}$)、ナノ ($20\sim 2.0\mu\text{m}$) およびピコ植物プランクトン ($2.0\sim 0.2\mu\text{m}$) に分けられている⁵⁾。ナノサイズ以上の植物プランクトンとピコ植物プランクトンの分布や生態学的特徴は大きく異なることが報告されている。すなわち、Chesapeake 湾や San Francisco 湾のような沿岸海域ではマイクロやナノ植物プランクトンが一次生産やバイオマスに占める割合が大きいが^{8)~10)}、外洋ではピコ植物プランクトンの寄与が大きい¹¹⁾。植物プランクトン体の C:N:P モル比は Redfield らにより平均的に 106:16:1 であるとされているが¹²⁾、ピコシアノバクテリアである *Synechococcus* WH7803 の C:N:P モル比は 32:5:1 である¹³⁾。ナノ植物プランクトンは硝酸塩に対して高い親和性を持つとされている¹⁴⁾。このように植物プランクトンの生態学的特徴はそのサイズによっても異なることから、陸域から窒素が豊富な河川水が流入する場合、そのサイズ構造や制限栄養塩の変動が予想される。

そこで、本研究ではほぼ同一時期に広島湾の太田川河口域から伊予灘、豊後水道、太平洋までを対象水域とし、植物プランクトン群集のサイズ構造とその制限栄養塩の変化を明らかにすることを目的として検討を行った。

2. 実験方法

Fig. 1 に広島湾から伊予灘、豊後水道さらに太平洋の黒潮域に至る試料の採取地点を示した。S12 および S14 は広島湾の奥部に位置する。広島湾は瀬戸内海の中で極めて閉鎖性が高い内湾で、大きな流量を持つ太田川 (年平均流量; $74\times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 1987と1988年の5月~7月の平均 DIN; $43\mu\text{g}\cdot\text{N}\cdot\text{l}^{-1}$, DIP; $0.8\mu\text{g}\cdot\text{P}\cdot\text{l}^{-1}$) が湾奥部に流入しており、河川水の影響を受けやすい水域である。B1-B5 は伊予灘にある。また、B7-B11 は豊後水道に位置し、黒潮の影響を受けていると考えられる。AS1-AS14 は太平洋の黒潮域にある。試料水は1994年6月1日から6月7日の期間に行なわれた豊潮丸 (広島大学生物生産学部調査船) の航海時に表層 (0.5m) から水中ポンプを用いて採取した。塩分濃度は CTD システム (シーバード社製 SBE-9) を用いて測定した。

無機態の窒素 (DIN) およびリン (DIP) 測定用試料は、採水後、船上でグラスファイバーフィルター (Whatman GF/C) を用いて吸引濾過し、1 l ポリエ

Fig. 1 Location of sampling stations in Hiroshima bay(A), Seto Inland Sea and the Pacific Ocean(B)

チレン瓶に入れて凍結保存した。実験室で解凍後 DIN ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) と DIP ($\text{PO}_4\text{-P}$) を海洋観測指針に従って測定した¹⁵⁾。

サイズ別の植物プランクトンバイオマス量を測定するため、船上で海水試料を $20\mu\text{m}$ ナイロンメッシュフィルター (NBC 工業), $2.0\mu\text{m}$ と $0.2\mu\text{m}$ のニュクリポアフィルターを順次用いて濾過した^{16), 17)}。 $20\mu\text{m}$ ナイロンメッシュフィルターによる濾過は大気圧で、 $2.0\mu\text{m}$ と $0.2\mu\text{m}$ のフィルターの場合は吸引濾過した ($< 300\text{mm Hg}$)。濾過量はマイクロ植物プランクトン ($20\mu\text{m}$ 以上) の場合 $5\sim 30\text{ l}$, ナノ植物プランクトン ($20\sim 2.0\mu\text{m}$) の場合 $0.2\sim 8 \text{ l}$, ピコ植物プランクトン ($2.0\sim 0.2\mu\text{m}$) の場合 $0.2\sim 1.5\text{ l}$ とした。濾過後の濾紙はアルミニウム箔に包み、クロロフィル a 濃度の測定時まで凍結乾燥保存した。クロロフィル a 濃度は、濾紙に 90% アセトン溶液 5 ml を加え、 4°C の暗所で 24 時間抽出後、吸光法により測定した¹⁵⁾。

ピコシアノバクテリア用の試料は採水後、速やかにホルマリン液を添加 ($2\% \text{ v/v}$) し、 4°C で保存した。実験室で $2.0\mu\text{m}$ のポリカーボネートフィルターで濾過後、一定量を再び $0.2\mu\text{m}$ のポリカーボネートフィルターで濾過し (濾過量: $4\sim 50\text{ ml}$)、そのフィルターを落射式蛍光顕微鏡 (Nikon Optiphot-2, Hg100W ランプ, Nikon filter cassette B, B 励起; ダイグロック

ミラー510nm, 励起フィルタ450~490nm, 吸収フィルタ520nm)で観察した。オレンジ色の蛍光を発する細胞をピコシアノバクテリアとして計数した¹⁹⁾。

3. 結果

3.1 塩分濃度の変動

本研究海域における河川水と外洋水の寄与を明らかにするため、表層(0.5m)における塩分の水平変化を調べた。その結果をFig. 2に示した。塩分濃度は河口域のS12が27.8pptで最も低く、南下するに従って急激に増加し、B7では34.4pptであった。豊後水道より南のB7からAS14まではほぼ一定(34.3~34.7ppt)であった。S12, S14, B0における低い塩分濃度は太田川からの河川水の流入によるものと考えられる。また、B7から南部の海域では太平洋の黒潮の寄与が大きいと考えられる。

3.2 栄養塩の変動

Fig. 3に表層のDIN, DIP濃度およびDIN/DIP比の変化を示した。DIN濃度は沿岸河口域のS12で最も高く、 $8.92\mu\text{g-N}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。S14からAS14までは $0.61\sim 0.14\mu\text{g-N}\cdot\text{l}^{-1}$ で、S12と比べ非常に低く、かつ地点による大きな変化は認められなかった。S14とB0は塩分濃度(Fig. 2)からみると河川水による寄与があったと考えられるが、そのDIN濃度は太平洋の地点の濃度とほぼ等しく、低濃度であった。これは後述(Fig. 3 C)するように窒素制限の海域に陸域から流入した窒素は速やかに植物プランクトンにより取り込まれたためと考えられる。DINの内訳をみるとS12では $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ がそれぞれ42%, 12%, 46%であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ がDINの大部分を占めていた。しかし、DINの濃度が低いS14からAS14までは59~99%が $\text{NO}_3\text{-N}$ であった。

S12のDIP濃度は $0.15\mu\text{g-P}\cdot\text{l}^{-1}$ でDINと同様に最も高かった。しかし、南下するに伴ってDIN濃度が

Fig. 2 Salinity in the surface water at different stations from Hiroshima Bay to the Pacific Ocean

急激に減少したのに対し、DIP濃度は徐々に減少し、伊予灘、豊後水道および太平洋では $0.07\sim 0.03\mu\text{g-P}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。本研究の伊予灘、豊後水道および太平洋におけるDIN, DIP濃度を瀬戸内海の播磨灘(DIN, $0.8\mu\text{g-N}\cdot\text{l}^{-1}$; DIP, $0.13\mu\text{g-P}\cdot\text{l}^{-1}$)¹⁹⁾および太平洋(DIN, $0.2\mu\text{g-N}\cdot\text{l}^{-1}$; DIP, $0.04\mu\text{g-P}\cdot\text{l}^{-1}$)²⁰⁾の値と比べると、播磨灘のDIPが本研究の伊予灘、豊後水道の地点より高く、その他は本研究とほぼ同様であった。

植物プランクトンの制限栄養塩を推定するため、DIN/DIP比を求めた。DIN/DIPは河口域のS12が60程度で最も高く、伊予灘のB1とB3が5以下で最も低く、その他はほぼ16以下であった(Fig. 3 C)。本研究の伊予灘のB1-B5におけるDIN/DIP比2.0~5.5は、Nakamuraら¹⁹⁾により報告された瀬戸内海の播磨灘

Fig. 3 Concentrations of DIN(A), DIP(B) and DIN/DIP ratio(C) in the surface water at different stations from Hiroshima Bay to the Pacific Ocean

における値 (3.3~7.6) とほぼ同じであった。Redfield 比 (16:1) に従い、植物プランクトンの制限栄養塩を推定すると、S12 の河口域では強いリン制限、その他の地点は窒素制限であった。しかし、ピコシアノバクテリアである *Synechococcus* の N:P モル比が 5:1 であることから、B0 と B5 から AS14 まではピコシアノバクテリアの制限栄養塩はリンになりうるものと推定される。

3.3 マイクロ、ナノ、ピコ植物プランクトンのバイオマス

表層におけるサイズ別植物プランクトンのクロロフィル a 濃度および全クロロフィル a 中に占めるその割合を Table 1 と Fig. 4 に示した。クロロフィル a 濃度は沿岸河口域の S12 が $19.38 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ と最も高く、南下するに伴い急激に減少し、B1 では $0.23 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。B1 から太平洋の AS14 までにおいて、B5 が $0.92 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ で若干高い値が得られた程度で、それ以外の地点では $0.48 \sim 0.10 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。広島湾の S12、S14 および B0 では全クロロフィル a 中、マイクロ、ナノ、ピコ植物プランクトンの割合がそれぞれ 1~4%, 60~85%, 14~36% で、ナノ植物プランクトンの割合が最も高かった。しかし、クロロフィル a 濃度が低かった伊予灘から太平洋にかけては、マイクロ、ナノ、ピコ植物プランクトンがそれぞれ 0~19%, 12~46%, 46~85% で、ピコ植物プランクトンの割合が最も高かった。

Fig. 5 にピコシアノバクテリアの細胞密度変化を示した。ピコシアノバクテリアの細胞密度は沿岸河口域

の S12 が $1.7 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ で最も高く、南下に伴って徐々に減少した。しかし、B9 から AS6 までは若干高く、その後 AS8 から再び南下に伴い急激に減少した。最南の地点である AS14 では $8.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{l}^{-1}$ まで減少した。この値は最大値が得られた沿岸河口域 S12 の約 1/20 程度であった。

4. 考 察

本研究の地点中、DIN および DIP 濃度は塩分濃度

Fig. 4 Total chlorophyll *a* concentrations, and contribution of Picophytoplankton (■), Nanophytoplankton (▨) and Microphytoplankton (□) to total chlorophyll *a* biomass (%) in the surface water at different stations from Hiroshima Bay to the Pacific Ocean

Table 1 Size-fractionated biomass (μg chlorophyll *a* $\cdot \text{l}^{-1}$) in surface water at different stations from Hiroshima Bay to the Pacific Ocean. Values in parentheses indicate contributions of each size fraction to the total phytoplankton chlorophyll *a* biomass (%)

Station	Pico.	Nano.	Micro.	Total
S12	2.71 (14.0)	16.40 (84.6)	0.27 (1.4)	19.38
S14	1.50 (29.5)	3.53 (69.4)	0.06 (1.2)	5.09
B0	0.44 (36.1)	0.73 (59.8)	0.05 (4.1)	1.22
B1	0.19 (82.6)	0.04 (17.4)	0.00 (0.0)	0.23
B3	0.21 (75.0)	0.04 (14.3)	0.03 (10.7)	0.28
B5	0.51 (55.4)	0.33 (35.9)	0.08 (8.7)	0.92
B7	0.25 (52.1)	0.14 (29.2)	0.09 (18.8)	0.48
B9	0.06 (60.0)	0.03 (30.0)	0.01 (10.0)	0.10
B11	0.11 (68.8)	0.04 (25.0)	0.01 (6.3)	0.16
AS1	0.14 (77.8)	0.03 (16.7)	0.01 (5.6)	0.18
AS2	0.17 (73.9)	0.04 (17.4)	0.02 (8.7)	0.23
AS4	0.22 (84.6)	0.03 (11.5)	0.01 (3.8)	0.26
AS6	0.20 (80.0)	0.04 (16.0)	0.01 (4.0)	0.25
AS8	0.31 (79.5)	0.07 (17.9)	0.01 (2.6)	0.39
AS10	0.17 (77.3)	0.04 (18.2)	0.01 (4.5)	0.22
AS12	0.10 (83.3)	0.02 (16.7)	0.00 (0.0)	0.12
AS14	0.05 (45.5)	0.05 (45.5)	0.01 (9.1)	0.11

Fig. 5 Cell density of picocyanobacteria in the surface water at different stations from Hiroshima Bay to the Pacific Ocean

の分布 (Fig. 2) からわかるように、河川水の寄与が最も大きいと考えられる沿岸河口域の S12 で最も高かった。一方、伊予灘、豊後水道、太平洋での DIN, DIP 濃度は S12 より著しく低い値であった (Fig. 3)。S12 における DIN, DIP 濃度を伊予灘から太平洋までの濃度と比較すると DIN はほぼ30倍, DIP はほぼ4倍高く、特に DIN が非常に高かった。Larsson ら²¹⁾は Baltic 海の北部では、下水の影響を受ける湾内の NO₃-N 濃度は湾口の3倍, DIP 濃度は1.3倍であると報告している。また、Chesapeake 湾奥部⁴⁾での DIN 濃度は、ダムからの河川水の流入が多い時期には、流入が少ない時期に比べ3倍高かった。しかし、DIP 濃度はむしろダムからの流入が少ない時期に若干高いことが報告された。以上のことから、沿岸河口域は河川水など陸水の影響を受けるため、窒素、あるいは窒素とリンの両方の濃度が外洋より高いと考えられる。

DIN/DIP 比から、塩分濃度が高い (31ppt 以上) S14 から AS14 までの植物プランクトンの制限栄養塩は窒素であることが推定された。しかし、本研究の地点中、河川水の寄与が最も大きい (塩分濃度: 28ppt) 沿岸河口域の S12 では DIN/DIP 比が非常に高く、リン制限と推定された (Fig. 3 C)。Caraco ら²²⁾の沿岸池を対象にしたバイオアッセイの結果から、塩分濃度が6.5ppt 以下の池ではリン制限、31ppt 以上の池では窒素制限であった。Chesapeake 湾⁴⁾では、ダムからの河川水の流入が多い時期にはリン制限、ダムからの河川水の流入が少ない時期には窒素制限であると報告されている。また、中国の Xiamen 湾²³⁾では、中国農民が高価なリン肥料より、安価な窒素肥料を多用したため、その影響を受ける沿岸海域ではリン制限、影響を受け難い外洋では窒素制限であると報告されている。以上のことから、海域における植物プランクトンの制限栄養塩は陸域の影響が強いとリン制限、少ないと海域の本来の特徴である窒素制限となるものと推定される。

クロロフィル a 濃度は、窒素、リンと共に S12 で最も高く (19.38 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$)、広島湾を南下すると共に急激に減少し、B1 から太平洋にかけてその濃度は 0.92 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった (Table 1, Fig. 4)。S12 のクロロフィル a 濃度は、San Francisco 湾奥部⁹⁾の 10~50 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ 、Chesapeake 湾⁹⁾の 3~47 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ と比較すると、それほど高い値ではないと考えられる。しかし、San Francisco 湾奥部⁶⁾では年平均 13~20 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ であるのに対し、湾中央部では 3.0~9.3 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ と報告されている。また、Narragansett 湾奥部²⁴⁾では年間 5~73 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ 、湾中央部では 5~22 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、沿岸河口域で高く、湾中央部で低かった。

一方、海洋におけるクロロフィル a 濃度はほぼ 1.0 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であることが報告されている^{25)~28)}。本研究の B1 から AS14 に至る海域におけるその値は 0.92 $\mu\text{gChl.} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった (Table 1, Fig. 4)。海洋あるいはそれに隣接する内海域は沿岸河口域に比べて、直接陸域からの栄養塩の影響を受けにくく、そのため窒素、リンおよびクロロフィル a 濃度も低いと考えられる。

植物プランクトンのサイズ別クロロフィル a の内訳に関しては、Chesapeake 湾奥部¹⁰⁾では 10 μm 以下が 81%、Chesapeake 湾⁹⁾では 35 μm 以下が 93%、Narragansett 湾²⁴⁾ではナノ植物プランクトン以下が 70% で、クロロフィル a の大部分が 35 μm 以下のナノまたはピコ植物プランクトンにより占められると報告されている。本研究での S12, S14 および B0 ではナノ植物プランクトンが 60~85%、ピコ植物プランクトンが 14~36% を占め、上記の海域と同様に全クロロフィル a の大部分がナノ以下の植物プランクトンであった。

ピコ植物プランクトンの割合は、S12, S14 および B0 では 14~36%、外洋環境に近い B1 から AS14 までは 46~85% を占めていた。B1 から AS14 におけるピコ植物プランクトンの割合を、太平洋²⁸⁾の 20~100% (平均 60%, 3 μm 以下)、熱帯海洋²⁶⁾の 25~90% (0.2~1.0 μm)、熱帯海洋²⁷⁾の 70% 以上 (3 μm ~0.22 μm)、亜熱帯海域²⁹⁾の 80% 以上 (3 μm 以下) の結果と比較するとほぼ同程度であり、外洋では全植物プランクトンに占めるピコ植物プランクトンの割合が高い。

クロロフィル a 濃度が高かった S12~B0 ではナノ植物プランクトンが優占的であり、伊予灘、豊後水道および太平洋ではピコ植物プランクトンが優占的であった。これらの現象の違いは次のように説明できるであろう。

沿岸河口域では河川の影響を受けやすく、栄養塩の流入負荷 (特に窒素) により DIN/DIP 比が高くなり、ピコ植物プランクトンに比べて多量の窒素を要求し^{12),13)}、硝酸塩に対して高い親和性を持つ¹⁴⁾ ナノ植物プランクトンが増殖しやすいものと考えられる。Iwanai 湾で春季にナノ以上の植物プランクトンが大発生した後、無機態窒素濃度が低くなり、次にピコ植物プランクトンが優占的になったことが報告されており³⁰⁾、上記の考え方を支持している。他方、外洋では DIN/DIP 比が低く、すなわちリン濃度に比較して窒素濃度が低いため、ナノ植物プランクトンに比べて窒素要求量の低いピコ植物プランクトン^{12),13)} が優占的になるものと推測される。

ピコシアノバクテリアの細胞密度は、温帯や熱帯海域では約 $10^7 \text{cells} \cdot \text{l}^{-1}$ であると報告されている⁵⁾。本研

究ではピコ植物プランクトンの大部分を占める³¹⁾ピコシアノバクテリアの細胞密度は、沿岸河口域のS12で最も高く(2×10^7 cells $\cdot$ l $^{-1}$)、沿岸河口域から伊予灘、豊後水道を経由し、太平洋に近づくにつれ減少する傾向が認められた (Fig. 5)。同様の傾向は El Hag ら³²⁾の沿岸と外海との比較研究、Olson ら³³⁾の沿岸から外洋までの研究、Murphy ら³¹⁾の大洋と沿岸の比較研究にも認められた。El Hag ら³²⁾は栄養塩に富んだ海域ではピコシアノバクテリアの密度が高かったことを報告している。本研究でピコシアノバクテリアの密度が沿岸河口域で最も高かったのは河川水の流入に伴う栄養塩の負荷のためと考えられる。しかし、本研究における太平洋の AS 地点で、DIN および DIP 濃度の明確な差がないにもかかわらず AS1 から AS14 に向かって細胞数が減少した理由は現在のところ不明である。

5. ま と め

広島湾の河口域から伊予灘、豊後水道、太平洋までの植物プランクトンのサイズ構造とその制限栄養塩の変化について検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

1) DIN, DIP およびクロロフィル a 濃度は沿岸河口域が非常に高く、南下するに伴い減少した。

2) 植物プランクトンの制限栄養塩は、沿岸河口域ではリン、その他の地点では窒素であることが推定された。

3) 広島湾では全クロロフィル a 中ナノ植物プランクトンが、伊予灘から太平洋の地点においてはピコ植物プランクトンが優占した。

4) ピコシアノバクテリアの細胞密度は広島湾の沿岸河口域で最も高く、太平洋の最南地点で最も低かった。

謝 辞

試料採取にあたり、ご協力いただいた豊潮丸の船長および本研究航海の実施に種々ご配慮をいただいた広島大学環境基礎学講座の金子新教授をはじめ、同講座の伊藤一明助手、張小春助手、平川剛氏、竹之内俊孝氏および桐山健司氏に深甚なる謝意を表します。

(原稿受付 1995年1月12日)

(原稿受理 1995年6月19日)

引用文献

- 1) Clasen, J. (1979) OECD Cooperative Programme for Monitoring Inland Waters (Eutrophication Control), Regional Project Shallow Lakes and Reservoirs, Final Report, OECD.
- 2) Hecky, R. E. and Kilham, P. (1988) Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment, *Limnology and Oceanography*, **33**, 796-822.
- 3) D'Elia, C.F., Sanders, J.G. and Boynton, W.R. (1986) Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: Phytoplankton growth in large-scale, continuous cultures, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **43**, 397-406.
- 4) Fisher, T.R., Peele, E.R., Ammerman, J.W. and Harding, L. (1992) Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay, *Marine Ecology Progress Series*, **82**, 51-63.
- 5) Fogg, G.E. (1987) Marine planktonic cyanobacteria, in *The Cyanobacteria* (Fay, P. and Van Baalen, C. ed.), pp.393-414, Elsevier.
- 6) Cole, B.E., Cloern, J.E. and Alpine, A.E. (1986) Biomass and productivity of three phytoplankton size classes in San Francisco Bay, *Estuaries*, **9**, 117-126.
- 7) Durbin, E.G., Krawiec, R.W. and Smayda, T. J. (1975) Seasonal studies on the relative importance of different size fractions of phytoplankton in Narragansett Bay (USA), *Marine Biology*, **32**, 271-287.
- 8) McCarthy, J.J., Rowland Taylor, W. and Loftus, M.E. (1974) Significance of nanoplankton in the Chesapeake Bay estuary and problems associated with the measurement of nanoplankton productivity, *Marine Biology*, **24**, 7-16.
- 9) Ray, R.T., Haas, L.W. and Sieracki, M.E. (1989) Autotrophic picoplankton dynamics in a Chesapeake Bay sub-estuary, *Marine Ecology Progress Series*, **52**, 273-285.
- 10) Sellner, K.G. (1983) Plankton productivity and biomass in a tributary of the upper Chesapeake Bay. I. Importance of size-fractionated phytoplankton productivity, biomass and species composition in carbon export, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **17**, 197-206.
- 11) Stockner, J.G. (1988) Phototrophic picoplankton: An overview from marine and freshwater ecosystems, *Limnology and Oceanography*, **33**, 765-775.
- 12) Redfield, A.C., Ketchum, B.H. and Richards, F.A. (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water, in *The Sea*, 2 (Hill, M. N. ed.), pp.26-77, Wiley Interscience, New York.
- 13) Cuhel, R.L. and Waterbury, J.B. (1984) Biochemical composition and short term nutrient incorporation patterns in a unicellular marine cyanobacterium, *Synechococcus* (WH7803), *Limnology and Oceanography*, **29**, 370-374.
- 14) Herbland, A., Le Bouteiller, A. and Raimbault, P. (1985) Size structure of phytoplankton biomass in the equatorial Atlantic Ocean, *Deep-Sea Research*, **32**, 819-836.
- 15) Oceanogr. Soc. Japan, Tokyo (1985) Kaiyo Kansoku Sisin (A Manual for Oceanographical Observation), 428pp. Oceanogr. Soc. Japan.
- 16) Joint, I. R. and Pomroy, A. J. (1983) Production of picoplankton and small nanoplankton in the Celtic Sea, *Marine Biology*, **77**, 19-27.
- 17) Krempin, D.W. and Sullivan, C.W. (1981) The seasonal abundance, vertical distribution, and relative microbial biomass of chroococcoid cyanobacteria at a station in

- southern California coastal waters, *Canadian Journal of Microbiology*, **27**, 1341-1344.
- 18) Odate, T. (1989) Seasonal changes in cell density of cyanobacteria and other picophytoplankton populations in Funka Bay, Japan, *Bulletin of Plankton Society of Japan*, **36**, 53-61.
- 19) Nakamura, Y., Sasaki, S., Hiromi, J. and Fukami, K. (1993) Dynamics of picocyanobacteria in the Seto Inland Sea (Japan) during summer, *Marine Ecology Progress Series*, **96**, 117-124.
- 20) Kobe Kaiyo Kisho-dai (1993) Kaiyo Sokuho, **132**, pp1-45, Kobe Kaiyo Kisho-dai.
- 21) Larsson, U. and Hagstrom, A. (1982) Fractionated phytoplankton primary production, exudate release and bacterial production in a Baltic eutrophication gradient, *Marine Biology*, **67**, 57-70.
- 22) Caraco, N., Tamse, A., Boutros, O. and Valiela, I. (1987) Nutrient limitation of phytoplankton growth in brackish coastal ponds, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **44**, 473-476.
- 23) Harrison, P. J., Hu, M. H., Yang, Y. P. and Lu, X. (1990) Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **140**, 79-87.
- 24) Durbin, A.G. and Durbin, E.G. (1981) Standing stock and estimated production rates of phytoplankton and zooplankton in Narragansett Bay, Rhode Island, *Estuaries*, **4**, 24-41.
- 25) Angelica Pena, M., Lewis, M.R. and Glen Harrison, W. (1990) Primary productivity and size structure of phytoplankton biomass on a transect of the equator at 135°W in the Pacific Ocean, *Deep-Sea Research*, **37**, 295-315.
- 26) Li, W. K. W., Subba Rao, D. V., Harrison, W. G., Smith, J. C., Cullen, J. J., Irwin, B. and Platt, T. (1983) Autotrophic picoplankton in the tropical ocean, *Science*, **219**, 292-295.
- 27) Takahashi, M. and Hori, T. (1984) Abundance of picophytoplankton in the subsurface chlorophyll maximum layer in subtropical and tropical waters, *Marine Biology*, **79**, 199-186.
- 28) Takahashi, M., Kikuchi, K. and Hara, Y. (1985) Importance of picocyanobacteria biomass (unicellular, blue-green algae) in the phytoplankton population of the coastal waters off Japan, *Marine Biology*, **89**, 63-69.
- 29) Takahashi, M. and Bienfang, P. K. (1983) Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters, *Marine Biology*, **76**, 203-211.
- 30) Miyazono, A., Odate, T. and Maita, Y. (1992) Seasonal fluctuations of cell density of cyanobacteria and other picophytoplankton in Iwanai Bay, Hokkaido, Japan, *Journal of Oceanography*, **48**, 257-266.
- 31) Murphy, L.S. and Haugen, E.M. (1985) The distribution and abundance of phototrophic ultraplankton in the north Atlantic, *Limnology and Oceanography*, **30**, 47-58.
- 32) El Hag, A.G.D. and Fogg, G.E. (1986) The distribution of coccoid blue-green algae (cyanobacteria) in the Menai Straits and the Irish Sea, *British Phycological Journal*, **21**, 45-54.
- 33) Olson, R.J., Chisholm, S.W., Zettler, E.R. and Virginia Armbrust, E. (1990) Pigments, size, and distribution of *Synechococcus* in the North Atlantic and Pacific Oceans, *Limnology and Oceanography*, **35**, 45-58.