

## 内湾域におけるN・P・S i 循環の人為的擾乱と一次生産の 変質に関する研究

武田重信、古谷 研  
東京大学大学院農学生命科学研究科

陸域から沿岸域に供給される窒素・リン・ケイ素の量とその元素比は、人間活動により変化し、海洋生態系に長期的な影響を及ぼしていると考えられる。一般に、窒素・リンの負荷は人為影響で増加するのに対して、陸域からのケイ素の供給は自然の風化作用が主体であり、人為影響による増加は見られないか、むしろダム建設など水利用形態の変化の影響を受けて減少する可能性もある。その結果、植物プランクトン優占種が珪藻から渦鞭毛藻などの非珪藻類へと変化し、内湾域における一次生産の変質につながっていることが懸念される。本研究では、代表的な閉鎖性内湾の一つである浜名湖において、主要河川である都田川から浜名湖内に供給される栄養塩の特性と都田川ダムの影響を明らかにするとともに、浜名湖内における栄養塩濃度および窒素・リン・ケイ素比の変動と、それらに対する植物プランクトンの応答を明らかにすることを目的とした。

都田川流域の12測点と、浜名湖内の8測点において、栄養塩濃度、植物色素濃度などの観測を、季節毎に計4回実施した。その結果、河川水に含まれる栄養塩の窒素、リン、ケイ素の元素比は、人間活動による硝酸およびリン酸の流入負荷と、都田川ダム内での植物プランクトンによる取り込みの影響を受けて大きく変化していることがわかった。ダムに保留される割合は特にリンで大きく、河川水のリン酸濃度も総じて低かったことから、都田川より供給される栄養塩に基づく浜名湖内での一次生産は、リン制限を受け易いと考えられる。浜名湖の植物プランクトン群集は、主に珪藻によって構成されていたが、渦鞭毛藻も春と秋に湾奥部で見られるなど、分類群によって増殖する水域や時期に違いがあり、表層水に含まれる栄養塩の元素比の季節的な変動との関係が示唆された。

供給される栄養塩の窒素・リン・ケイ素比の違いが、植物プランクトンの増殖と群集組成に及ぼす影響を明らかにするため、浜名湖の現場海水を用いた栄養塩の添加培養実験を実施した。その結果、ケイ酸濃度の低い環境下において、植物プランクトン群集に占める渦鞭毛藻、ハプト藻など、珪藻以外の藻類の割合が大きくなることが確認された。また、海水中の各種栄養塩は、植物プランクトンの増殖フェーズによって異なる比率で消費されていることがわかった。さらに、一部の珪藻は、リン制限下においても、細胞内にプールしていたリンを使って増殖できることが示された。ケイ酸の消費は、窒素源が枯渇して増殖が止まった後も引き続き認められたことから、珪藻の休眠孢子形成に伴うケイ酸の取り込みが起きていた可能性が考えられ、このような形での栄養塩の消費が浜名湖における窒素・リン・ケイ素比の変動に及ぼす影響について、引き続き検討する必要がある。



## 23

助成番号 0223

内湾域におけるN・P・Si循環の人為的擾乱と  
一次生産の変質に関する研究

武田重信（東京大学大学院農学生命科学研究科）

古谷 研（東京大学大学院農学生命科学研究科）

## 1. 研究目的

陸域から沿岸域に供給あるいは負荷される窒素・リン・ケイ素の量とその元素比は、人間活動により変化し、海洋生態系に長期的な影響を及ぼしていると考えられる（Jickells, 1998）。一般に、窒素・リンの負荷は人為影響で増加するのに対して、陸域からのケイ素の供給は自然の風化作用が主体であり、人為影響による増加は見られないか、むしろダム建設など水利用形態の変化の影響を受けて陸域に保留される可能性もある。その結果、植物プランクトン優占種が珪藻類から渦鞭毛藻などの非珪藻類へと変化し、内湾・沿岸域における生物生産および物質循環の人為的な擾乱につながっていることが懸念される（Humborg et al., 1997）。

わが国の代表的な閉鎖性内湾の一つである浜名湖では、近年、赤潮原因種の変化が認められている。1980年代前半まで *Prorocentrum minimum* が多かったが、それ以降は *Gymnodinium mikimotoi* の頻度が高くなり、1996年以降は *Alexandrium catenella* の赤潮も出現するようになってきている（岡本, 1995; 津久井・小泉, 1998）。このような赤潮形成種の変遷は、周辺環境や湖内水質の長期的な変化を示唆するものであるが、浜名湖への栄養塩負荷の量及び質が実際にどのように変動してきたかについては、これまで詳細に検討されてこなかった。また、浜名湖に流入する河川のうち流域面積の最も大きな都田川には、1986年に貯水量 1034 万 m<sup>3</sup> の都田川ダムが建設されたが、ダム建設に伴う栄養塩負荷量および負荷される窒素・リン・ケイ素の元素比の変化や、それらが湖内の水質および一次生産に及ぼす影響について検討した例はない。

本研究では、窒素・リン・ケイ素循環の人為的擾乱が一次生産ならびに赤潮原因種の変化に及ぼす影響を解明することを目的として、浜名湖奥部に流入する主要河川である都田川から湖内に供給される栄養塩の特性を明らかにするとともに、浜名湖内における栄養塩濃度および窒素・リン・ケイ素比の変動と、それらに対する植物プランクトン種の応答について検討した。

## 2. 研究方法

## 2. 1 都田川から浜名湖に供給される栄養塩の特性

都田川ダム内での栄養塩の保留・除去の状況と、都田川流域における人為的な窒素・リン負荷の状況を把握するため、Fig. 1 に示す都田川の最上流から都田川ダムを経て浜名湖

奥部の河口域までの 12 測点およびいくつかの流入河川において、栄養塩濃度および植物色素濃度などの観測を、2002 年 3 月 16 日、6 月 22 日、9 月 14 日、12 月 15 日の 4 回実施した。水温、塩分、溶存酸素を CTDO センサー（YSI ; 600XLM-M）を用いて測定するとともに、水試料をサンプル容器に直接採取した。得られた水試料は、硝酸、亜硝酸、アンモニア、リン酸、ケイ酸、全窒素（T-N）、全リン（T-P）、クロロフィル *a*、植物色素組成、pH について測定を行った。窒素、リンはオートアナライザー（ブラン・ルーベ社、TRAACS2000）、ケイ素は、モリブデン酸黄法、クロロフィル *a* は DMF 抽出後、蛍光法より測定した。植物色素は、Zapata et al. (2000) の方法に従い、高速液体クロマトグラフィーにより分離定量した。

## 2. 2 浜名湖内における栄養塩濃度およびその元素比の変動

浜名湖内における栄養塩濃度および窒素・リン・ケイ素比の変動と、出現する植物プランクトン種の関係について検討するため、上記の都田川の調査に合わせ、Fig. 1 に示す浜名湖奥部から湾口にかけての湖内 8 測点において、2002 年 3 月 15 日、6 月 21 日、9 月 13 日、12 月 16 日の 4 回の観測を実施した。CTDO センサー（YSI ; 600XLM-M）を用いて水温、塩分、溶存酸素の 1 m 毎の鉛直観測と、透明度板による透明度測定を行い、表層、中層（躍層直下）、下層（湖底直上）の 3 層からバンドン採水器を用いて採水した。得られた水試料の栄養塩濃度、植物色素濃度などの分析は、前述の方法を用いて行った。

## 2. 3 植物プランクトンの増殖および群集組成に及ぼす栄養塩の影響

浜名湖内の一次生産を制限する可能性のある栄養塩を特定するとともに、添加する栄養塩の組成比を変化させた場合に、植物プランクトンの増殖がどのように変化するのかを明らかにするため、現場海水を用いた栄養塩の添加培養実験を、9 月に実施した。

浜名湖の湖心（測点 D）の表層水を、大型動物プランクトンを排除するため孔径 200 $\mu$ m のナイロンメッシュを通して酸洗浄した容量 10 L の透明ポリエチレン容器に採取した。以下の処理を行った後、浜名湖の表層海水を掛け流した陸上水槽にて、自然光条件下で 9 日間の培養を行い、栄養塩および植物色素濃度の変化を毎日測定した。

実験 1 : 浜名湖への栄養塩負荷の状況を模擬して以下の 3 つの処理区と、対照区として栄養塩無添加の系を設定した。河川からの負荷を模擬して、都田川の平均的な栄養塩濃度に基づき、硝酸 7 $\mu$ M、ケイ酸 10 $\mu$ M、リン酸 0.05 $\mu$ M を添加した区（処理区 A）、初夏の比較的栄養塩濃度の低い浜名湖底層水の鉛直移流（エスチュアリー循環流：藤原，1997）によるリン酸とアンモニアの供給を考慮して、硝酸 7 $\mu$ M、アンモニア 3 $\mu$ M、ケイ酸 17.5 $\mu$ M、リン酸 0.38 $\mu$ M を添加した区（処理区 B）、晩夏の栄養塩濃度の高い浜名湖底層水の鉛直移流によるリン酸とアンモニアの供給を考慮して、硝酸 7 $\mu$ M、アンモニア 8.4 $\mu$ M、ケイ酸 17.5 $\mu$ M、リン酸 1.1 $\mu$ M を添加した区（処理区 C）を設けた。

実験2：ケイ酸濃度の違いによる植物プランクトン群集組成の変化を調べるため、以下の3つの処理区を設定した。ケイ酸は無添加とし、硝酸  $15\mu\text{M}$  とリン酸  $1.5\mu\text{M}$  のみを添加した区(処理区 A)、硝酸  $15\mu\text{M}$ 、ケイ酸  $15\mu\text{M}$ 、リン酸  $1.5\mu\text{M}$  を添加した区(処理区 B)、硝酸  $15\mu\text{M}$ 、ケイ酸  $30\mu\text{M}$ 、リン酸  $1.5\mu\text{M}$  を添加した区(処理区 C)。

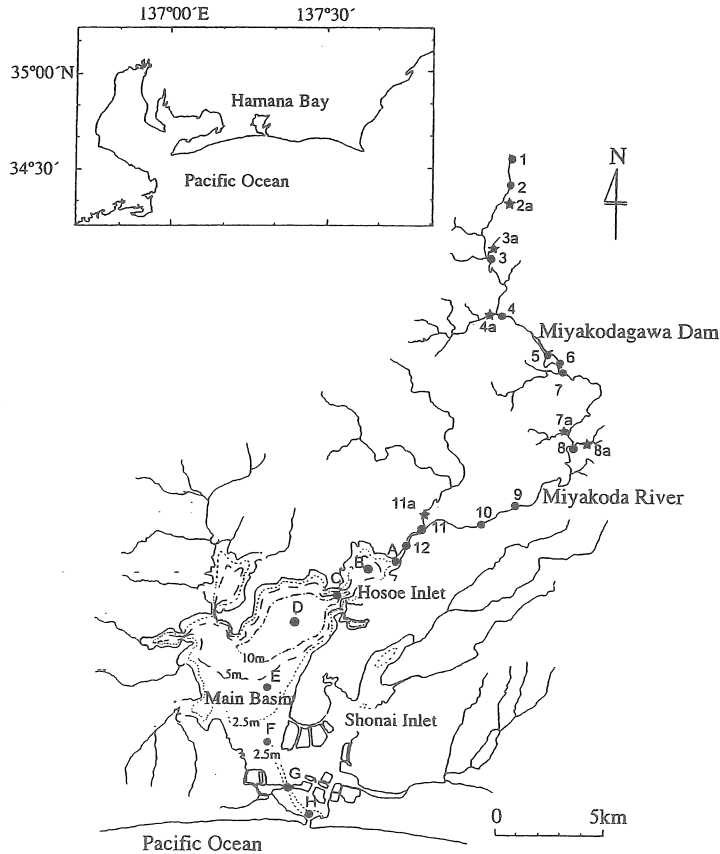


Fig. 1 Location of sampling stations in Miyakoda River (St. 1-12) and Hamana Bay (St. A-H). Stations at small rivers flowing into the Miyakoda River are also indicated (★).

### 3. 研究結果および考察

#### 3. 1 都田川から浜名湖に供給される栄養塩の特性

都田川においては、溶存無機窒素の大部分が硝酸で占められていた。硝酸濃度は、都田川ダムの上流で増加した後、年間を通じてダムで一度減少するものの、河口域に近づくにつれて  $100\mu\text{M}$  前後まで再び増加した (Fig.2)。アンモニア濃度は、概ね  $5\mu\text{M}$  以下であったが、9月と12月にやや高くなる傾向が見られた。また、6月と9月には河口付近で、 $20\mu\text{M}$  前後に達する顕著な増加が認められた (Fig.2)。このアンモニア濃度の上昇は、特に夏季に顕著であったことから、底層での有機物の分解再生に伴う供給によるものと推察される

が、河口付近で流入する井伊谷川（St.11a）のアンモニア濃度も高く、その流入負荷の影響も無視できないと考えられる（Table 1）。溶存無機窒素および全窒素の濃度は、硝酸と同様な変化を示し、9月に河口域で高くなるほかは、明瞭な季節変動がみられなかった。

ケイ酸については、200 $\mu$ M前後の高い濃度が観測された。渋川付近でまず増加がみられ、12月を除き都田川ダム内において一旦減少するが、須部取水場（St.8）付近ではダムに流入する前（川合淵（St.4））の水準まで回復していた（Fig.2）。それ以外の測点においては、多少季節変化があるものの、ほぼ一定の値を示した。これらのケイ酸の供給源としては、渋川付近で流入する温泉水（St.2a, 3a）や、ケイ酸濃度の高い灰ノ木川（St.8a）の影響によるものと考えられる（Table 1）。6月にはダムの上流で、また、ダムでの減少が小さかった12月にはダムの下流で、他の季節に比べてケイ酸濃度が高くなる傾向にあった。

リン酸については全体的に1 $\mu$ M以下の低い値を示し、都田川ダムにおいて一旦濃度が減少した後、河口域に近づくにつれて増加していた（Fig.2）。9月には、河口域で3 $\mu$ M程度のピークがみられたが、これはアンモニアと同様、河口域での堆積物からの溶出と井伊谷川からの流入負荷によるものと推察される。全リン濃度は、リン酸濃度よりも1~2 $\mu$ M程度高い値を示し、粒子状リンあるいは有機リンが、用損無機リンと同程度存在していることを示唆している（Fig.2）。

クロロフィルa濃度は、都田川ダムの上流において極めて低く、ダム内で顕著な増加を示した後、河口域に近づくにつれて徐々に減少した（Fig.2）。ダム内で増殖した植物プランクトンが、下流の広い範囲まで輸送されている可能性が考えられる。ダム内のクロロフィルa濃度は、6月に25 $\mu$ g/lにまで達したのに対し、9月は年間を通して最も低い値となったが、これは9月の調査時にダムが渇水状態にあったことが原因の一つとしてあげられる。ダム内の植物色素組成の分析結果では、珪藻の指標色素であるフコキサンチンとディアディノキサンチンの濃度が高く、珪藻がダム内で優占していたと考えられる（Fig.3）。また、クリプト藻の指標色素であるアロキサンチンも、9月を除き高くなる傾向にあった。6月には、緑藻およびプラシノ藻の指標色素であるルテインも検出された。

都田川ダム内での水の滞留と植物プランクトンの増殖に伴い、河川水中から栄養塩が除去されていると考えられたことから、ダムの上流（St.4）およびダムの直下（St.7）の2測点間で、栄養塩濃度を比較した（Fig.4）。溶存無機窒素、リン酸、ケイ酸のいずれの濃度も、ダムを通過することにより明らかな減少を示したが、特にリン酸の濃度低下が年間を通して最も顕著であった。ダム下流のクロロフィルa濃度が高かった3月と6月には、ダムの上流と下流の間で、全窒素および全リンの濃度差が小さかったのに対し、ダム下流のクロロフィルa濃度が低かった9月と12月には、全窒素および全リンの濃度差が大きくなっていた。すなわち、ダム内における栄養塩の除去は、植物プランクトンによる取り込みが主体であり、粘土鉱物などに吸着して沈降除去される割合は小さいと予想される。また、ダムを經由して下流への窒素およびリンの供給は、植物プランクトン態としてダム

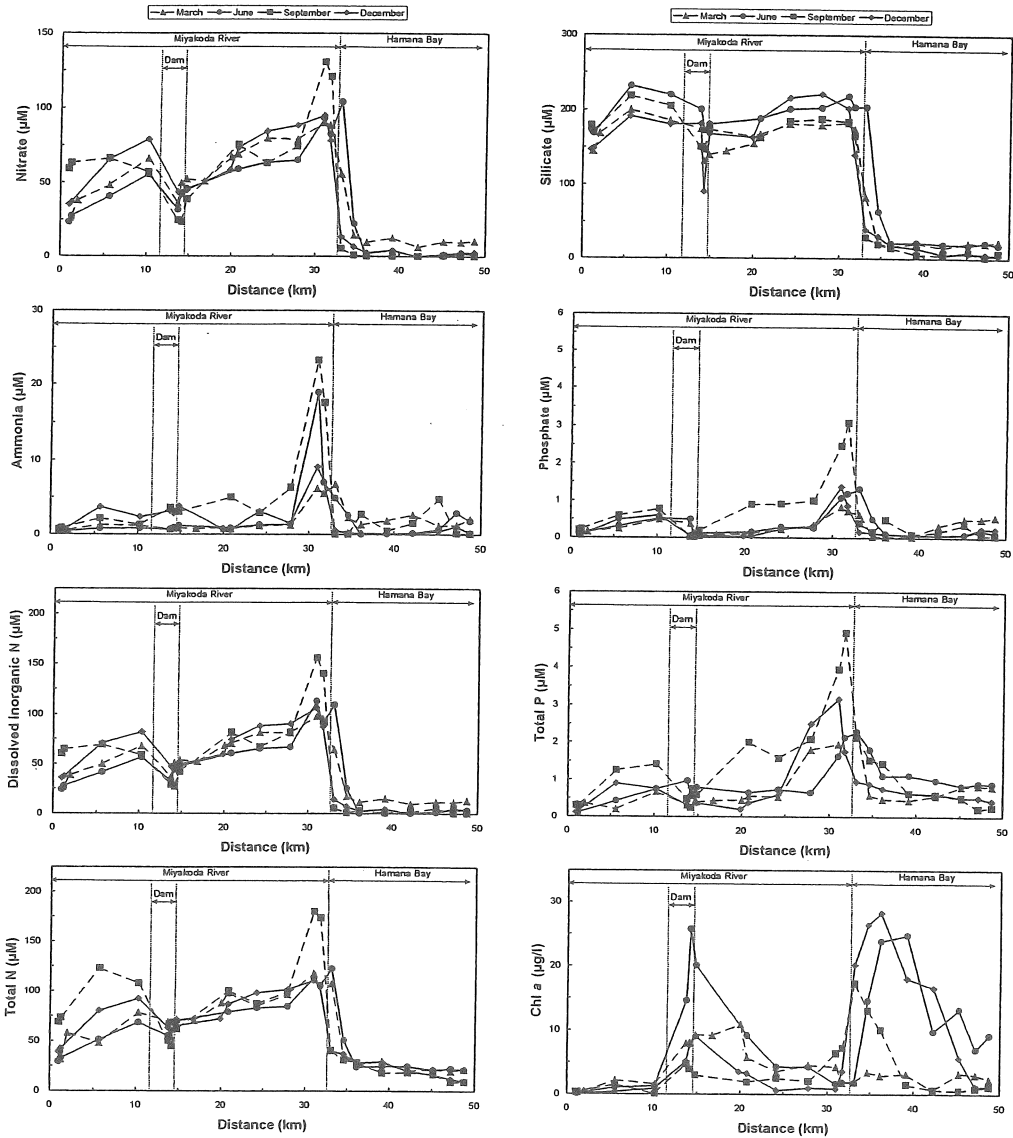


Fig. 2 Concentrations of nutrients and chlorophyll *a* along Miyakoda River (St. 1-12) and Hamana Bay (St. A-H, 0 m). A section of the reservoir of Miyakodagawa dam was indicated.

Table 1 Nutrient concentrations in river waters flowing into the Miyakoda River

Station	Nitrate (µM)	Ammonia (µM)	Phosphate (µM)	Silicate (µM)
2a	42.6	0.6	0.33	215
3a	55.6	5.5	1.25	248
4a	71.8	2.3	1.11	188
7a	120.0	1.0	0.57	216
8a	94.7	5.9	0.87	332
11a	111.7	43.1	1.54	201

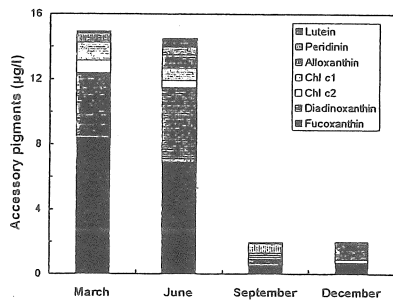


Fig. 3 Seasonal variation in major accessory pigments composition at St. 6 in Miyakodagawa-dam reservoir.

から流出する量に依存すると考えられる。但し、減少した栄養塩の N/P モル比は 22~58、Si/P 比は 22~108、Si/N 比は 0.4~4.4 となり、平均的な植物プランクトンの N/P 比、Si/P 比よりも大きくなった。これは窒素やケイ素がリンよりも相対的に除去されやすくなっていることを意味するが、ダム内のリン酸濃度がケイ酸や硝酸に比べて著しく低いことから、低リン酸環境に適応した植物プランクトンが増殖している可能性も考えられる。今後、ダム内で増殖する植物プランクトン種組成とその栄養生理を詳細に調査する必要がある。

都田川河川水中の栄養塩の窒素、リン、ケイ素の元素比は、都田川ダム上流および下流における人間活動による流入負荷と、ダム内での植物プランクトンによる消費によって大きく変化した (Fig.5)。溶存無機窒素/リン酸比およびケイ酸/リン酸比は、リン酸の濃度変化の影響を強く受け、都田川ダム上流および下流で減少し、ダム通過で増大するというパターンを示すとともに、リン酸濃度の低い 12 月および 3 月の元素比の変動幅が大きくなった。一方、ケイ酸/溶存無機窒素比は、源流付近 (St.1) から河口域 (St.12) に向けて徐々に減少し、季節による違いも明瞭ではなかった。ケイ酸濃度は流域を通して高濃度で変動幅が比較的小さいことから、ケイ酸/溶存無機窒素比の減少は、人間活動による窒素の負荷を反映していると考えられる。全窒素/全リン比でみると、ダム通過の影響は小さく、河口域に向けて減少する傾向にあった。従って、都田川河川水のリン濃度は低く抑えられているものの、植物プランクトン(珪藻)の平均的な元素組成比(N:P:Si=16:1:16)を仮定すると、僅かな濃度変化が、浜名湖に流入する窒素およびケイ素の植物プランクトンによる利用に大きく影響するものと推察される。

### 3. 2 浜名湖内における栄養塩濃度およびその元素比の変動

都田川の河川水と浜名湖の内湾水が混合する河口付近では、ケイ酸および溶存無機窒素は河口から細江湖 (St.B) の間で急激に減少し、河口付近で 1.5~3 $\mu$ M 前後の高い値を示したリン酸濃度も細江湖内で 0.5 $\mu$ M 以下に低下した (Fig.2)。また、河口付近におけるクロロフィル *a* 濃度は 20~30 $\mu$ g/l と極めて高く、植物プランクトンによる活発な栄養塩の消費が起きていたことが示唆される。このような河口付近における表層水の栄養塩濃度と塩分の関係を見ると、ケイ酸では理論希釈直線上とほぼ一致しているか、若干下にずれていることから、水中からの弱い除去作用を受けていることが予想される。しかしながら、溶存無機窒素とリン酸の濃度変化は理論希釈直線よりも上に凸となっており、河川水が湖水で希釈されていく過程で、窒素とリンの供給があったと考えられる。

浜名湖本湖の表層水の硝酸とリン酸濃度は、6月から12月にかけて広い範囲で一様に低く、一部で枯渇状態となった (Fig.2)。ケイ酸は、9月と12月に湾中央から湾口にかけて 10 $\mu$ M 以下の低い値が観測されたものの、枯渇することはなかった。珪藻を主体とする海洋性植物プランクトンの細胞に含まれる平均的な N:P:Si 比は 16:1:16 に近い値を示すが、都田川から浜名湖に負荷される栄養塩の元素比を見ると、Si/P 比と N/P 比が非常に大きく、



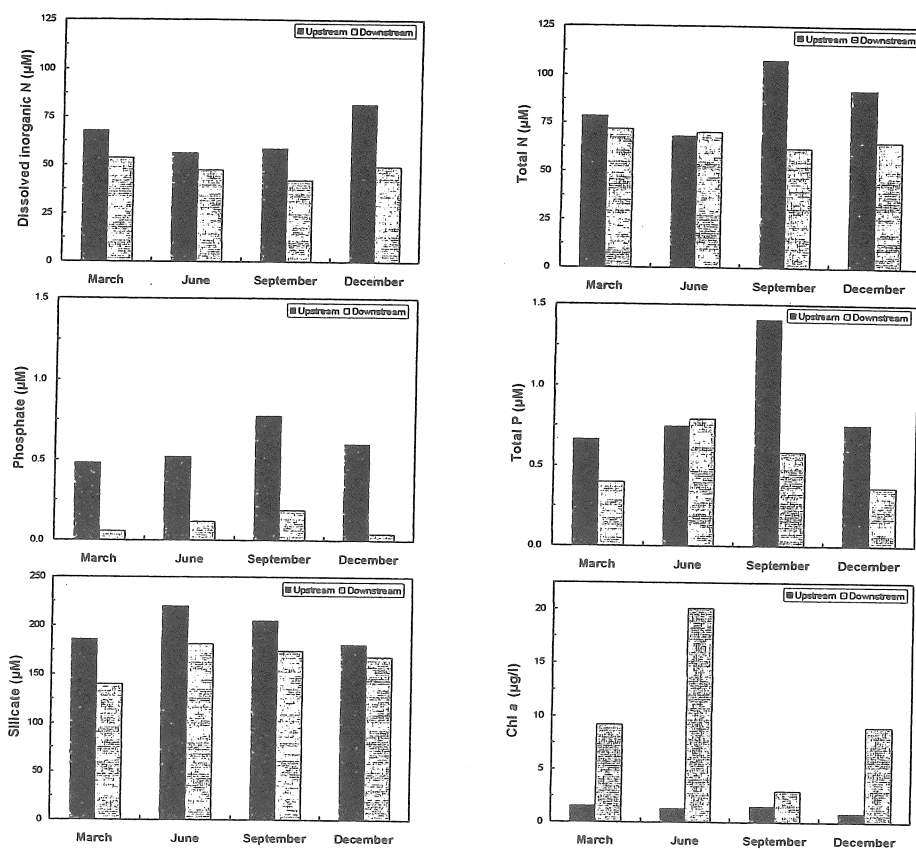


Fig. 4 Changes in nutrients and chlorophyll a concentrations between upstream (St. 4) and downstream (St. 7) of the Miyakodagawa-dam reservoir.

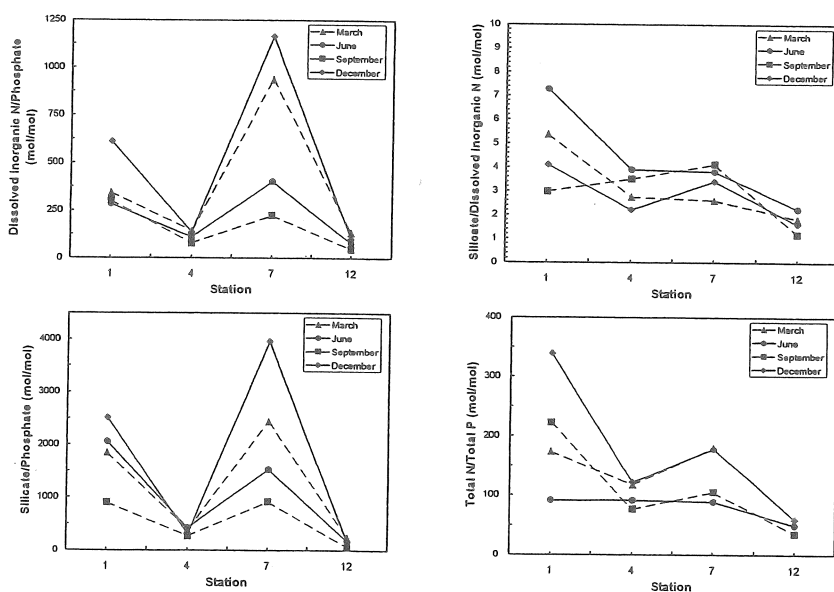


Fig. 5 Seasonal variation in elemental ratio of nutrients in river water of the Miyakoda River.

リンが制限因子になり易いことが推察される (Fig.5)。一方、浜名湖の表面水に含まれる栄養塩の元素比を植物プランクトンの平均的な元素比と比較すると、ケイ酸よりも溶存無機窒素およびリン酸が先に消費される傾向にあり、さらに、9月を除いて溶存無機窒素よりもリン酸の消費が進行しやすいと推察される (Fig.6)。このような栄養塩の元素比の季節的な違いは、下層に比較的高濃度で存在するリン酸を利用可能な鉛直移動を行う植物プランクトン、あるいは細胞内リンパールの大きな藻類の優占を、夏季に生じさせる可能性があると考えられる。

浜名湖の河口域 (St. A) から湖心 (St. D) の4測点における植物プランクトン群集組成については、いずれの測点においても珪藻の指標色素であるフコキサンチンとディアディノキサンチンの濃度が高く、珪藻が浜名湖における主要な構成群であることがわかる (Fig.7)。渦鞭毛藻もディアディノキサンチンを持つが、渦鞭毛藻に特異的な指標色素であるペリディニンが多くみられたのは、3月と9月の細江湖周辺域であった。この結果は、細江湖水域で渦鞭毛藻の有害赤潮の発生がしばしば見られるという報告とも一致する (津久井・小泉, 1998)。また6月は、河口域を除く測点で、ハプト藻の指標色素である19'-ヘキサノイルオキシフコキサンチンや、クリプト藻の指標色素であるアロキサンチンが認められ、多様なグループで植物プランクトン群集が構成されていたと考えられる。9月には、表層の栄養塩がほぼ枯渇状態にあった湖心を除き、シアノバクテリアの指標色素であるゼアキサンチンの濃度が比較的高かった。このように各植物プランクトングループによって、増殖する水域や時期に違いがみられたが、その群集組成の遷移と都田川あるいは下層から供給される栄養塩の元素比との関係について明らかにするためには、今後、代表的な植物プランクトン種の培養株を確立し、その栄養生理を解明することが重要になる。

### 3. 3 植物プランクトンの増殖および群集組成に及ぼす栄養塩の影響

浜名湖への栄養塩負荷の状況を模擬して3つの異なる元素比で栄養塩を添加した実験1では、処理区によってクロロフィル *a* 濃度の増加に明瞭な差が見られた (Fig. 8)。硝酸が完全に枯渇しており、リン酸濃度も極めて低かった対照区では、クロロフィル *a* 濃度がわずかに減少したのに対して、都田川からの負荷を模擬して硝酸およびケイ酸と  $0.05\mu\text{M}$  のリン酸を添加した処理区 A では、リン律速条件下であるにも関わらず、クロロフィル *a* 濃度が徐々に約  $6\mu\text{g/l}$  まで増加し、硝酸とケイ酸が消費されて、5日目には硝酸がほぼ枯渇状態となった。初夏の比較的栄養塩濃度の低い底層水の鉛直移流による供給を考慮して、硝酸およびケイ酸と、アンモニア  $3\mu\text{M}$ 、リン酸  $0.38\mu\text{M}$  を添加した処理区 B では、アンモニアが1日で、リン酸が2日で消費され、さらに4日目には硝酸が枯渇状態となった (Fig. 8)。クロロフィル *a* 濃度も4日目に最大となり、処理区 A の2倍に相当する約  $12\mu\text{g/l}$  に達した。ケイ酸は、硝酸が枯渇してクロロフィル *a* 濃度が減少した4~5日目にかけても、減少が認められた。晩夏のリン酸とアンモニアの濃度の高い底層水の鉛直移流による供給

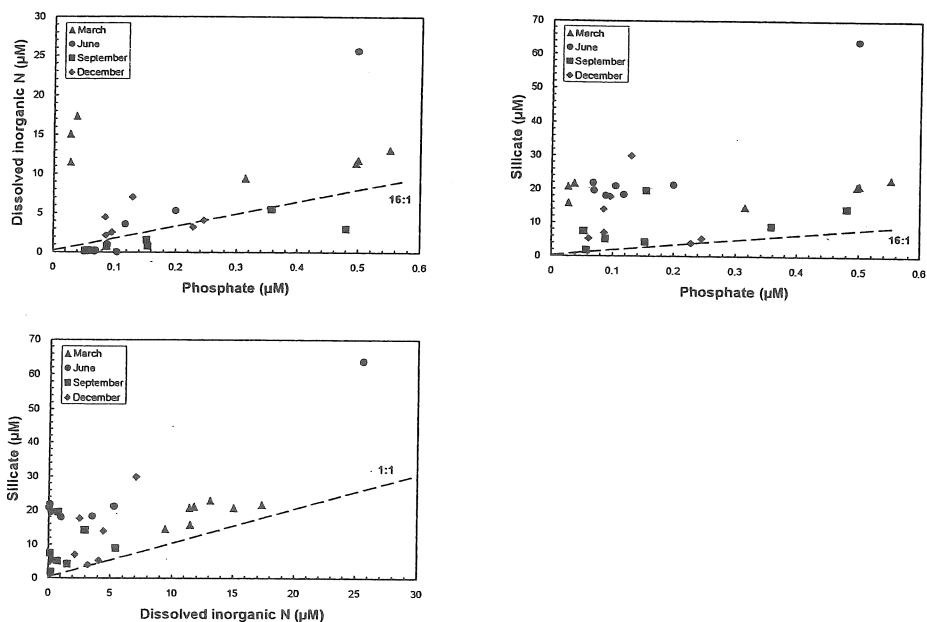


Fig. 6 Relationship between N, P and Si nutrient concentrations in the surface water of Hamana Bay. Dotted line indicate the elemental ratio of 16N:1P, 16Si:1P or 1Si:1N.

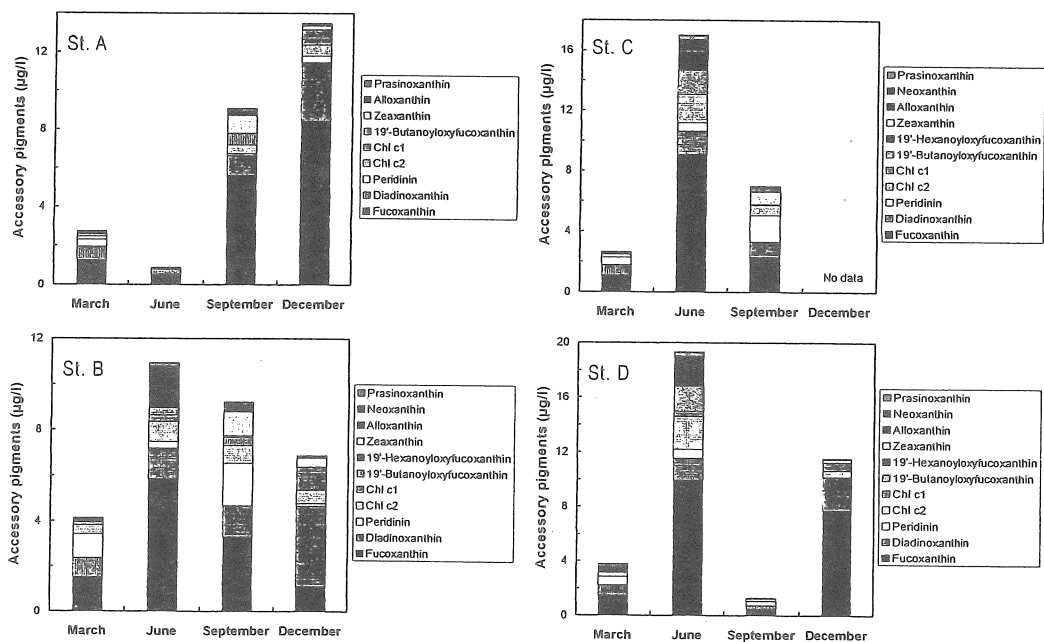


Fig. 7 Seasonal variation in composition of major accessory pigments in the surface water at St. A, B, C and D in Hamana Bay.

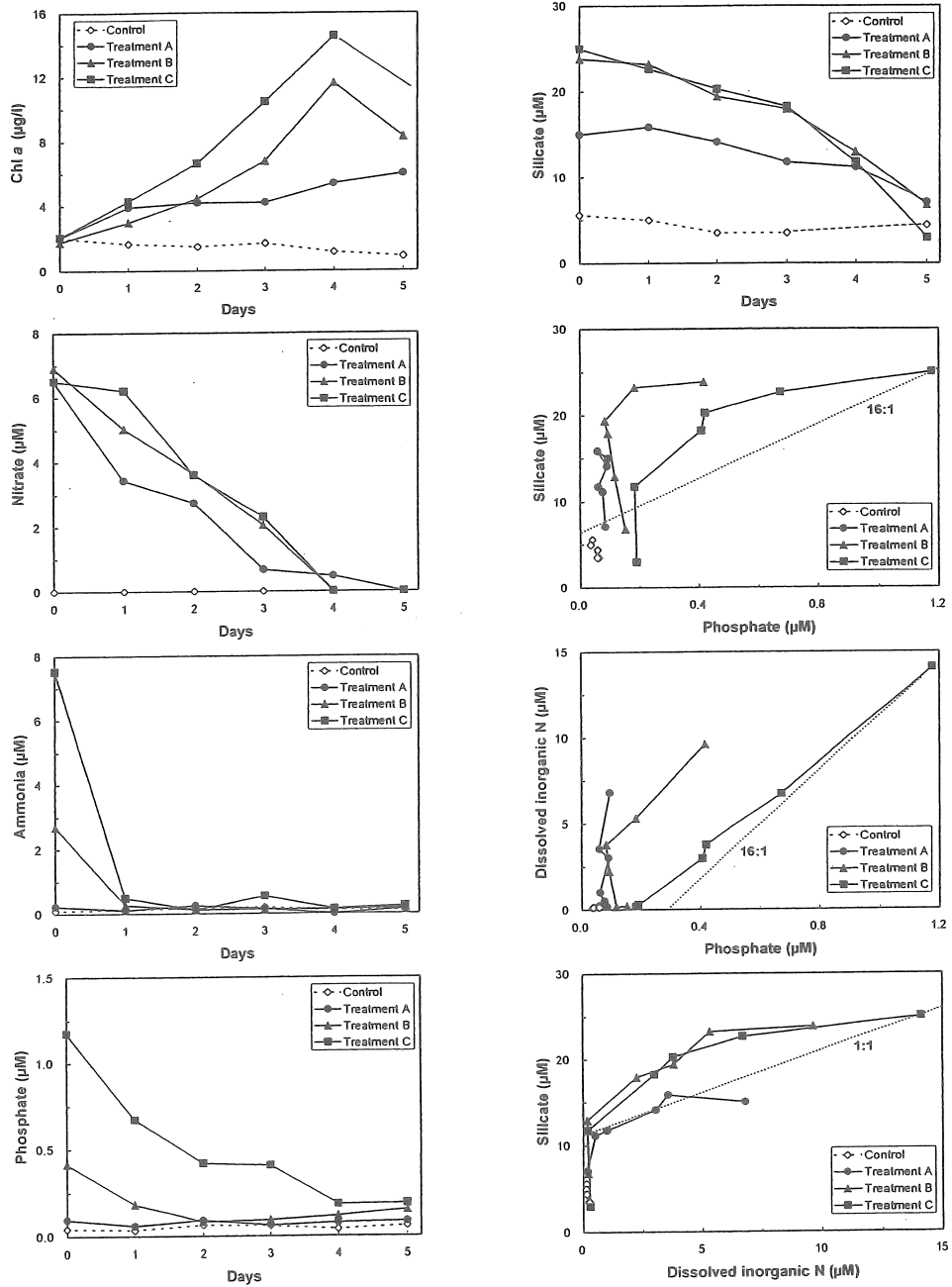


Fig. 8 Nitrate, ammonia, phosphate and/or silicate enrichment experiments using surface water collected at St. D in Hamana Bay in September 2002: Effects on concentrations of chlorophyll a and dissolved nutrients over time, and on nutrient consumption ratios.

を考慮して、硝酸およびケイ酸と、アンモニア  $8.4\mu\text{M}$ 、リン酸  $1.1\mu\text{M}$  を添加した処理区 C では、ほぼ全量のアンモニアが 1 日で急速に消費され、2 日目からは硝酸の消費が進み、硝酸も処理区 B と同様に 4 日目に枯渇状態となった (Fig. 8)。処理区 B では、1 日目にアンモニアと硝酸の消費が同時に進んだのに対して、比較的高濃度のアンモニアを添加した処理区 C では、アンモニアによる硝酸の取り込み阻害が起きていたと考えられる。リン酸はほぼ一定の速度で徐々に減少したが、硝酸が枯渇した 4 日目においても少量のリン酸が残っていた。処理区 C のケイ酸の減少は、処理区 B と同様の速度で、5 日目まで見られた。処理区 B および C における硝酸とケイ酸の減少パターンに類似性が見られたことから、珪藻類が主に硝酸を消費しながら比較的ゆっくりと増殖したのに対して、珪藻以外の藻類が実験初期のアンモニアの急速な利用に寄与していたことが推察される。処理区 C においても、硝酸が枯渇した 4 日目に、クロロフィル *a* 濃度が約  $15\mu\text{g/l}$  最大になった。

培養実験期間中の栄養塩の消費は、植物プランクトンの増殖フェーズによって異なる比率と速度で取り込まれていた。栄養塩の消費比率の変化を見ると、有意な量のリン酸を添加した処理区 B および C では、溶存無機窒素とリン酸がレッドフィールド比 ( $16\text{N}:1\text{P}$ ) に近い比率で減少していたのに対して、ケイ酸は溶存無機窒素とリン酸の急激な消費が収まってから減少を始め、窒素源が枯渇した後も引き続き消費されるという特異的なパターンを示した (Fig. 8)。窒素源枯渇後のケイ酸の取り込みは、珪藻の休眠孢子形成に起因するものと考えられ (Oku & Kamatani, 1995)、浜名湖内の窒素・リン・ケイ素の循環を考える上で、重要な示唆を与えるものである。一方、リン酸をほとんど添加しなかった処理区 A においても、溶存無機窒素とケイ酸と消費が認められた。すなわち、今回の実験では、浜名湖内から採取した自然の植物プランクトン群集は主に窒素制限を受けており、処理区 A では、細胞内にプールしていたリンを使って増殖したものと推測される。瀬戸内海などでは、COD やリンなどの流入負荷を削減指導した結果、夜光虫や珪藻類などから、ラフィド藻や渦鞭毛藻のなかでも細胞内リン・プールの大きい種へと優占群が変化してきたことが報告されている (山本ら, 2002)。しかしながら、本実験におけるケイ酸と溶存無機窒素の消費比率は、ほぼ  $1:1$  であったことから、実験系内で細胞内にリンをプールしていたのは、珪藻類であったことが示唆される。今後、浜名湖における有機態リンを含めたリンの動態とともに、珪藻および他分類群の赤潮形成種の細胞内リン・プールの大きさなどについても明らかにしていく必要がある。

ケイ酸濃度の違いに対する植物プランクトン群集組成の変化を調べた実験 2 では、ケイ酸添加濃度  $0$ 、 $15$ 、 $30\mu\text{M}$  の 3 つの処理区で、いずれも同様なクロロフィル *a* 濃度の増加が見られ、硝酸が枯渇した 4 日目にピークを示した (Fig. 9)。硝酸とリン酸濃度の減少についても処理区による大きな違いは認められず、リン酸は 5 日目においても  $0.3\sim 0.5\mu\text{M}$  残存していた。ケイ酸の消費は 3 日目まで緩やかであったが、その後は処理区による差がみられ、実験系内のケイ酸濃度に比例して大きく減少した (Fig. 9)。また、本実験におい

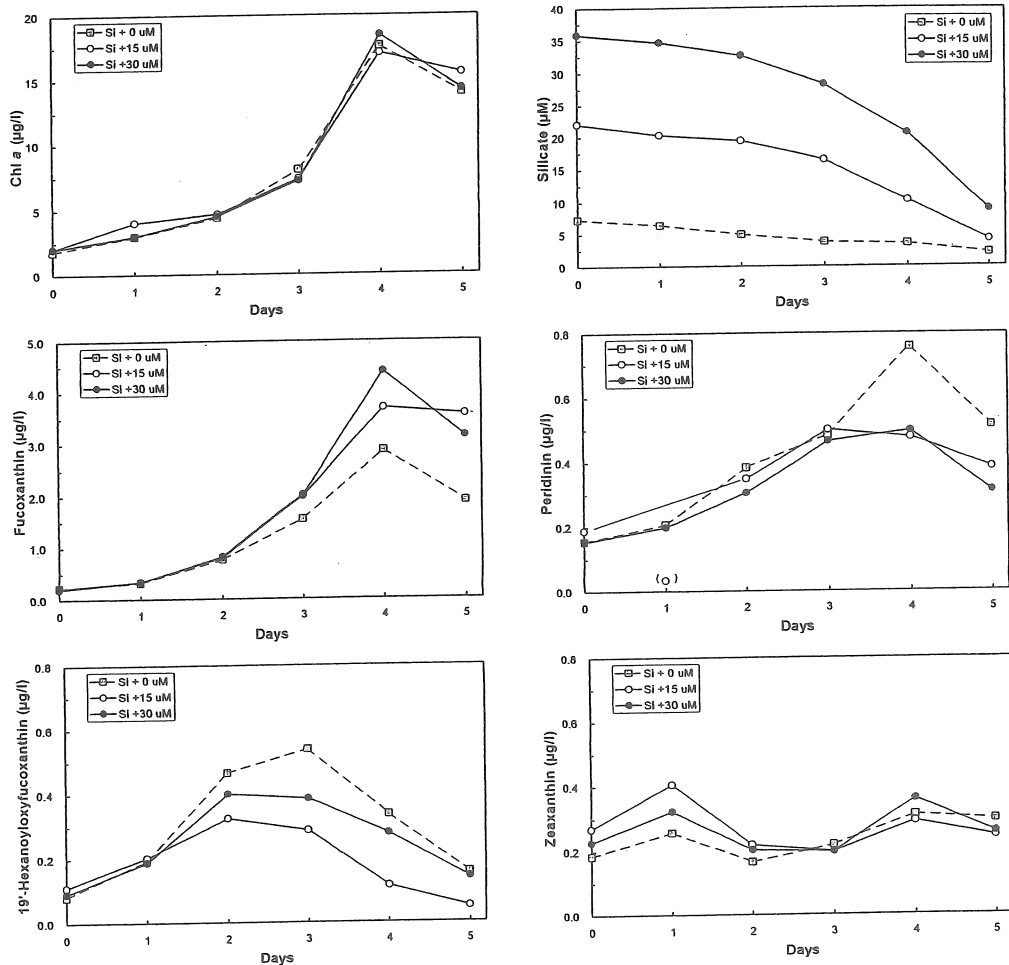


Fig. 9 Effects of silicate enrichment with three different concentrations on chlorophyll a and silicate and major accessory pigments over time. Surface water for the experiment was collected at St. D in Hamana Bay in September 2002.

でも実験1と同様に、植物プランクトンの増殖がピークを迎えた4日目以降にケイ酸の消費が認められた。このように、ケイ酸濃度を変化させたにもかかわらず、他の栄養塩の消費と、植物プランクトン群集全体の増殖に関しては、変化が認められなかった。しかし、増殖した植物プランクトンの群集組成は処理区によって異なっており、珪藻の指標色素であるフコキサンチンの5日目の濃度は、ケイ酸添加量にほぼ比例した値となった(Fig. 9)。ケイ酸を添加しなかった処理区では、4日目にペリディニンが顕著に高くなり、渦鞭毛藻の増殖が促されたものと推察される。また、ハプト藻の指標色素である19'-ヘキサノイルオキシフコキサンチンもケイ酸無添加区において濃度が高くなり、そのピークはクロロフィル *a* やフコキサンチンなどとは違って2~3日目に見られた。一方、原核藻類であるシアノバクテリアの生物量は、指標色素であるゼアキサンチン濃度が明瞭な変化を示さなかったことから判断すると、ケイ酸濃度および珪藻の優占度による影響を受け難いと考えられる。このように、実験系内のケイ酸濃度は、窒素、リンの消費やクロロフィル *a* 濃度の変化に、見かけ上大きな影響を及ぼさないが、植物プランクトン群集組成は、低いケイ酸濃度環境下では珪藻以外のグループの割合が大きくなることが確認された。

#### 4. まとめと今後の課題

窒素・リン・ケイ素循環の人為的擾乱が内湾域の一次生産に及ぼす影響を検討するため、閉鎖性内湾である浜名湖において、都田川からの栄養塩負荷の特性と、栄養塩環境の変化に対する植物プランクトンの応答について調査を行った。その結果、都田川ダム内において栄養塩が植物プランクトンに取り込まれ、特にリンが保留されており、湾内に供給される窒素・リン・ケイ素の元素比を変化させる要因になっていることがわかった。また、河川水のリン濃度は低く抑えられているものの、僅かな濃度変化が、浜名湖に流入する窒素およびケイ素の植物プランクトンによる利用に大きく影響するものと推察される。ダム内のリン酸濃度がケイ酸や硝酸に比べて著しく低いことから、ダム内では低リン酸環境に適応した植物プランクトンが増殖している可能性も考えられ、今後、ダム内で増殖する植物プランクトン種組成とその栄養生理を詳細に調査する必要がある。

浜名湖では、各植物プランクトングループによって、増殖する水域や時期に違いがみられた。その群集組成の遷移と供給される栄養塩の元素比との関係について明らかにするために培養実験を行ったところ、植物プランクトンによる栄養塩の消費は、増殖のフェーズによって異なる比率と速度で取り込まれていることがわかった。また、ケイ酸は、窒素源が枯渇した後も引き続き消費されるという特異的なパターンを示し、珪藻の休眠胞子形成に起因するものと考えられた。この増殖末期のケイ酸の取り込みは、浜名湖内の窒素・リン・ケイ素の循環を考える上で、重要な示唆を与えるものである。さらに、珪藻類が細胞内にリンをプールしていた可能性が示唆され、今後、これらの植物プランクトンの細胞内リン・プールの大きさなどについても明らかにしていく必要があると思われる。

## 5. 謝辞

本研究の実施にあたって、終始ご協力頂いた東京大学大学院農学生命科学研究科岡本研博士に厚く御礼申し上げますと共に、現地調査にご協力頂いた同院生井上雄介君、及び杉浦潤君に感謝する。

## 6. 文献

- Humborg, C., Ittekkot V., Cociasu A., Bodungen B. v. (1997) : Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, **386**, 385-388.
- Jickells, T. D. (1998) : Nutrient biogeochemistry of the coastal zone. *Science*, **281**, 217-222.
- 岡本研 (1995) : 浜名湖の植物プランクトン—汽水性の強い内湾の事例として—。水産海洋研究, **59**, 175-179.
- Oku O., Kamatani A. (1995): Resting spore formation and phosphorus composition of the marine diatom *Chaetoceros pseudocurvisetus* under various nutrient conditions. *Mar. Biol.*, **123**, 393-399.
- 藤原建紀 (1997) : 淡水影響域におけるエスチュアリー循環流と生物・物質輸送。海と空, **73**, 23-30.
- 津久井文男・小泉鏡子 (1998) : 浜名湖における *Alexandrium catenella* の出現。静岡水試研究報告, **33**, 27-29.
- 山本民次・橋本俊也・辻けい子・松田治・樽谷賢治 (2002) : 1991~2000年の広島湾海中における親生物元素の時空間的変動, 特に植物プランクトン態 C:N:P 比のレッドフィールド比からの乖離。沿岸海洋研究, **39**, 162-169.
- Zapata M., Rodriguez F., Garrido J. L. (2000): Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **195**, 29-45.



Anthropogenic perturbations of N, P and Si cycles and its impacts  
on primary production in coastal waters

Shigenobu Takeda, Ken Furuya

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

Summary

Fluxes of nutrients to the coastal waters have been changed by human activity. In addition, the N:P:Si ratios of these inputs have been perturbed. Changes in these nutrients inputs seem to have significant impact on coastal ecosystem in long time scale. Riverine inputs of N and P to the coastal water have been increased considerably by human activity. While riverine Si fluxes are predominantly controlled by mineral weathering and have been altered little by human activity. Thus, resulting changes in the ratio of N:P:Si can be expected to yield a succession of phytoplankton assemblage such as displacement of diatoms by other phytoplankton species and consequently affect primary productivity in coastal waters. In order to elucidate the impact of changing nutrient inputs on plankton productivity in the coastal water, characteristics of riverine inputs of N, P and Si to the coastal zone, effects of damming of a major river on nutrients fluxes, and responses of phytoplankton growth and relative species abundance to changing N:P:Si supply ratio have been studied in an enclosed Hamana Bay.

In Miyakoda River, a major river system flowing into the Hamana Bay, concentration of dissolved nutrients and ratio of N, P and Si were perturbed by N and P discharge from human activity and phytoplankton nutrient consumption at Miyakodagawa-dam reservoir. Low P flux relative to N and Si seems to make phytoplankton production toward P limitation in the Hamana Bay. Nutrient enrichment incubation experiments using natural phytoplankton assemblage of the Hamana Bay revealed that decreasing flux of Si relative to N and P would increase abundances of dinoflagellates and prymnesiophytes. The N:P:Si consumption ratio varied with phytoplankton growth phase and diatoms took up silicate even after the N depletion suggesting resting spore formation. Diatoms showed some growth under P limitation, probably by using P stored in the cells.