

琵琶湖におけるピコプランクトンの異常増殖
—1989~1990—
(1) ピコプランクトンおよび他のプランクトン相

一瀬 諭* 若林徹哉* 山中 直* 園 正* 内藤幹滋*
川部浩市* 前畑佳代* 田中勝美* 野村 潔*

Abnormal Growth of Picoplankton Occured in Lake Biwa
—1989~1990—
(1) Picoplankton and Other Planktons

Satoshi ICHISE* Tetsuya WAKABAYASHI* Sunao YAMANAKA* Tadashi SONO*
Mikishige NAITO* Koichi KAWABE* Kayo MAEHATA* Katsumi TANAKA*
Kiyoshi NOMURA*

はじめに

琵琶湖北湖中央部における透明度は、通常5m前後であるが、1989年7月3日の琵琶湖定期調査時には北湖全地点で2.5~3mまで低下し、きわめて異常な状況であった。この水域の湖水を顕微鏡下でプランクトン計数した結果、通常計数している長さ10 μ m以上の植物プランクトン数は200cells \cdot mL⁻¹以下と非常に少なかった。しかし、クロロフィルa量の増加が各地点で認められた。

その後、微分干渉顕微鏡による詳細な観察により、霞のように見える微粒子が観察され、また、落射蛍光顕微鏡を用いた観察結果では、クロロフィル色素およびフィコ色素を有する約1 μ m程度の球形および短桿菌状の非常に微細なプランクトンが増殖していることが明らかになった。この微細なプランクトンの総細胞数は、琵琶湖北湖の全地点で10⁶cells \cdot mL⁻¹以上であった。

大きさが0.2~2 μ mという極めて微細な植物プランクトンの呼称は、国内および国外ともに統一され

ておらず、ピコプランクトンやウルトラプランクトン、ナノプランクトンおよび超微小藻類などが使われている。¹⁻³⁾

Sieburth⁴⁾らは、0.2~2 μ mという超微小な植物プランクトンをピコプランクトンと定義し、現在多く使われるようになった。永田らは⁵⁾1985年に琵琶湖で3 μ m以下の藍細菌(ピコプランクトン)が9月の初めに最高3.5 \times 10⁵cells \cdot mL⁻¹存在していたことを報告している。

一般に、ピコプランクトンは湖沼全般に生息しているが、琵琶湖では、そのピコプランクトンの大きさが他の藻類に比べ極めて小さいことから、あまり注目されなかった。しかし、今回のように透明度の低下の原因と考えられるような現象に直面し、注目されるようになってきた。

当所では、このピコプランクトンの季節的消長を把握すると同時に、関連性のある項目やこの種を取り巻く他のプランクトン変動について、北湖北部水域を中心とした調査を実施したのでその結果を報告する。

* 滋賀県立衛生環境センター 〒520 滋賀県大津市御殿浜13-45
Shiga Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science
13-45, Gotenhama, Otsu, Shiga 520

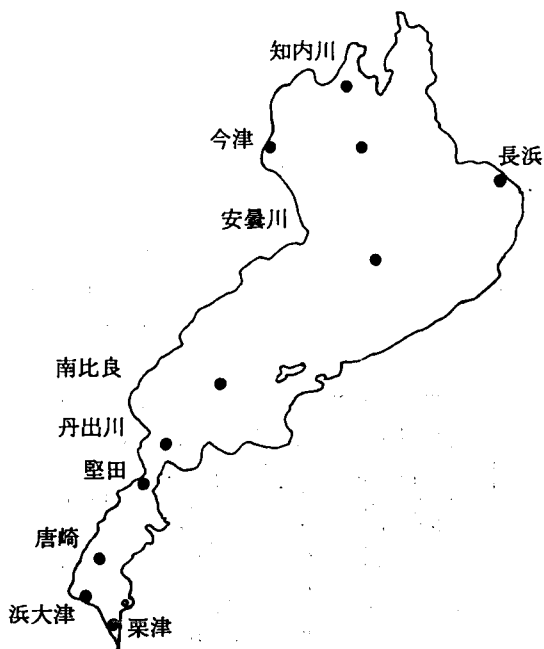


図1 琵琶湖におけるピコプランクトン調査の採水地点

調査方法

期間：1989年7月から1991年3月

回数：毎月1～2回，増殖時には週2回

地点：北湖7地点，南湖4地点の計11地点(図1)
(今津沖中央では水深別調査)

測定項目および方法

1. ピコプランクトン

計数方法は採水後，検水をすみやかに滅菌瓶に分取し，無染色のまま検鏡プレート(セキスイ)上に封入し，落射蛍光顕微鏡(G励起)により，黄橙色～橙色の蛍光を示す大きさ1 μmの程度の有色素細胞を250～1250倍の倍率で計数した。またクロロフィル色素およびフィコ色素等の確認についてはB励起も使用した。ピコプランクトンの中には黄橙色を示す種以外に，赤色～暗赤色を示す種も同時に観察されたため，2つのタイプに分けて計数を行った。

2. 全細菌数

検水をアクリジンオレンジ(0.01%)溶液で染色後，黒色ヌクレオアーフィルター(0.2 μm)で吸引ろ過し，フィルターをスライドガラス上に置き，1,250倍の倍率で計数を行った。

ここでいう全細菌の計数とは，落射蛍光顕微鏡(B励起)を用いて観察した場合に，橙色または緑白色

の蛍光を発する全ての細菌をいう。定量方法は上水試験方法(1985年)に準じて行った。

3. 植物プランクトン

検水1 mlをプランクトン計数板に取り，125倍から500倍の倍率で観察し，各種ごとの細胞数(藍藻類は群体数)を計数した。

4. 動物プランクトン

検水500 mlを固定後，室内静置によって沈降させた。その後，上澄みを捨てて10 mlとし，この中の1 mlをプランクトン計数板に取り，50倍から250倍の倍率で観察し，各種ごとの個体数を計数した。また，甲殻類および大型の輪虫類については500 mlを1 mlにまで濃縮し各種ごとの個体数を計数した。

なお，固定にはグルタルアルデヒド，ホルマリン，塩化カルシウムの混合液⁶⁾を加え行った。

5. 沈澱量

表層部湖水(100 l)を，100 μmおよび40 μmの2種類の網目(以下各々「XX13」，「XXX25」)のプランクトンネットに順に(100～40 μm)同時に通過させ，サイズ別に捕集した。その後，ホルマリン(5% v/v)により固定を行い，沈澱量測定管に移し，24時間後その容積を測定するとともに，主な優占種について検鏡を行った。このサンプルについては，ホルマリン(10% v/v)により試料保存した。

調査結果

1. ピコプランクトンの形態 (写真1，写真2，写真3)

(1) 電子顕微鏡および微分干渉顕微鏡による観察
異常増殖があった1989年7月の湖水を電子顕微鏡および微分干渉顕微鏡により観察した結果，細胞の長さ約1 μmの球菌から短桿菌状の比較的細胞膜の厚い藻体が全体の90%以上を占め，他の大きさのものはほとんど観察されなかった。

(2) 落射蛍光顕微鏡による観察

落射蛍光顕微鏡による計数は，B励起とG励起について実施した。G励起を用いた場合は，視野全体が帯赤色となるものの，異常増殖したピコプランクトンはその橙色の輝きがB励起より特に強く，計数が容易に行えたためその後の計数はG励起を使用した。なお，B励起を用いても，ほとんどの細胞が黄橙色～薄い橙色の蛍光を示しており，フィコビリ蛋白フィコエリスリンを含有する藍藻類と考えられた。この種は，単細胞で浮遊し群体は形成しない。また，暗赤色を呈するものも少数であったが同時に観察された。B励起およびG励起を用いての観察結果を比較してみ

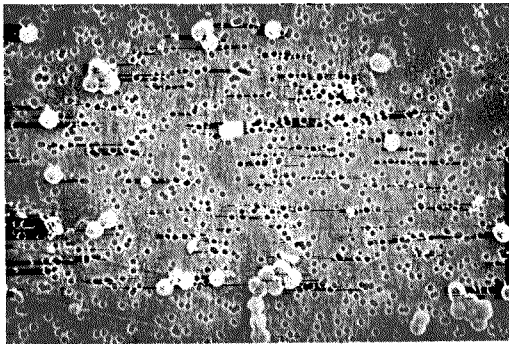


写真1 電子顕微鏡撮影 (×2000)

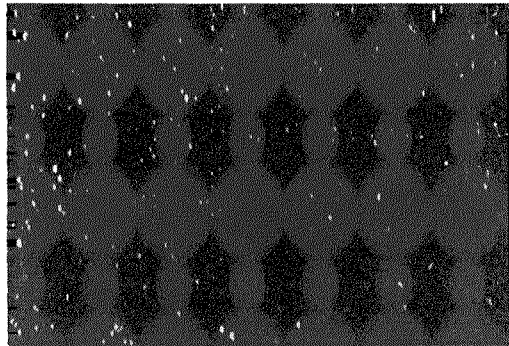


写真2 ピコプランクトン微分干渉顕微鏡撮影 (×1250)

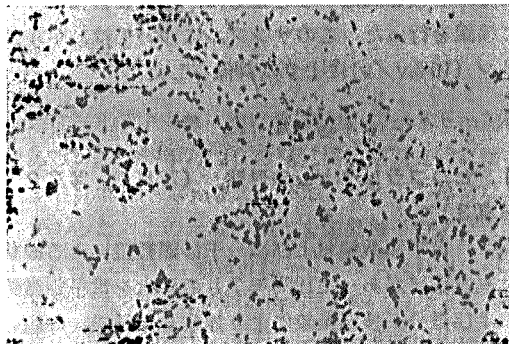


写真3 ピコプランクトングラム染色撮影 (×1000)

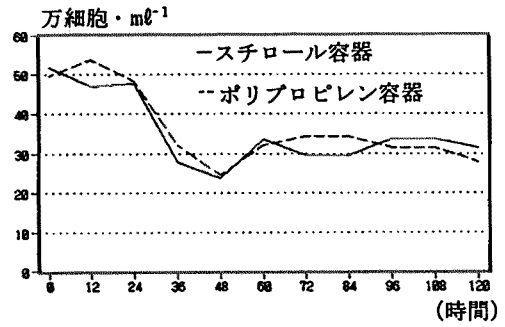


図2 採水時間経過におけるピコプランクトンの変動

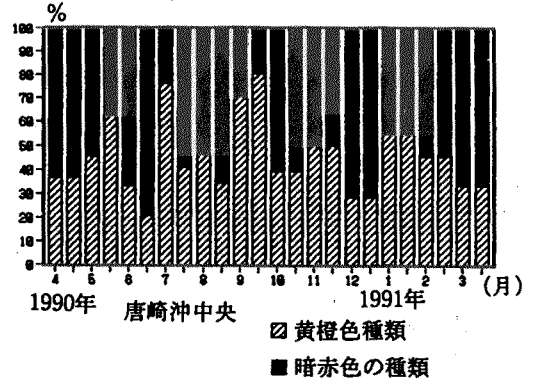
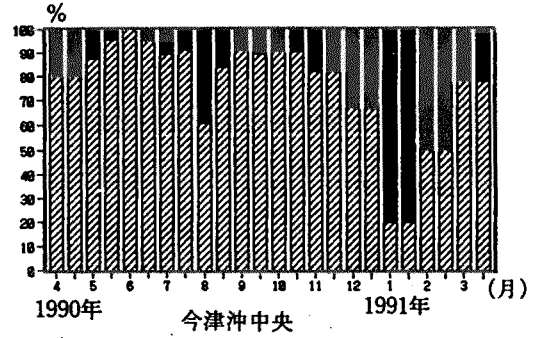


図3 琵琶湖における黄橙色と赤色のピコプランクトンの占める割合

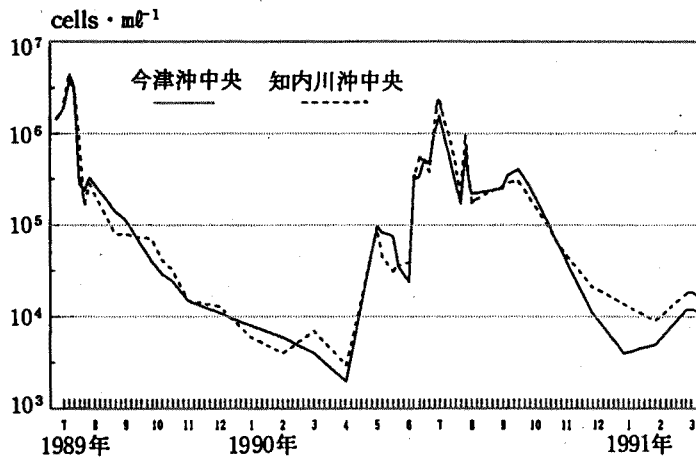


図4 琵琶湖におけるピコプランクトンの変動

ると、1989年の異常増殖期間中には、B励起よりもG励起の方が10~15%多く計数される傾向にあった。

(3) 鞭毛等の有無

鞭毛等の有無については、FITC (イソチオシアン酸フルオロセイン) 0.01%で染色後1,250倍の倍率で観察したが、大量増殖時のピコプランクトンについては鞭毛は観察されなかった。

(4) 採水後の時間経過による変動 (図2)

時間経過によるピコプランクトン細胞数の変動を調べた結果、ピコプランクトンは、容器による多少の相違はあるものの、24時間以内であれば90%以上が計数され、採水後の時間経過によるピコプランクトンの分解は、他の多くのプランクトンに比べると分解し難い種であると考えられた。

2. ピコプランクトンの変動

(1) 経日変動 (図3, 4)

黄橙色の蛍光を示す種および暗赤色を呈する種の2タイプに分けて計数を行った結果、琵琶湖北湖中央部の今津沖中央では黄橙色を示す種が多くを占めており、異常増殖前から増殖時にかけて85%以上であった。しかし、南湖では北湖より暗赤色を呈する種の割合が多く、50%以上暗赤色の種が占めた時期も多かった。

琵琶湖北湖におけるピコプランクトンの総細胞数は、年間を通し少なくとも $10^3 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上存在し、特に、1989年と1990年の7月には $10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上存在していた。最高値は、両年ともに北湖北部水域の知内川沖中央であり1989年は $4.6 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 、1990年は $2.5 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ のピコプランクトンが計数された。しかし、 $10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上は現在のところ計数されていない。

その消長をみると、冬季の間は $10^3 \sim 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ で少ないが、5月から増殖が始まり6月末に $10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ にまで増加し、7月上旬にピークとなった。8月に入ると、 $10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ にまで減少し11月から翌年の4月にかけて約 $10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 程度となった。

(2) 平面分布 (図5)

ピコプランクトンの平面分布の推移をみると、5月以前はどの地点も少なく推移していた。しかし、5月に入ると全地点で、同一時期に増加傾向がみられ、特に7月上旬の異常増殖時には、北湖北部水域での増殖が最も大きく、南湖の分布が比較的少なかった。また、減少する時期についても全地点で減少傾向を示し、11月以降はどの地点も少なかった。

表1 今津沖中央におけるピコプランクトン計数結果 (鉛直分布)

年月日	(細胞数 $\times 10^3 \cdot \text{m}^{-1}$)				
	水深 0.5m	5m	10m	30m	90m
89.12. 5	11	18	15	6	0
90. 1. 9	8	11	6	2	0
90. 2. 6	6	7	10	1	0
90. 3. 6	4	9	6	3	1
90. 4.10	2	2	2	1	0
90. 5. 8	98	140	140	35	2
90. 6. 5	24	35	97	34	9
90. 7. 3	1600	2800	2400	120	0
90. 8. 8	220	270	350	35	0
90. 9. 5	250	240	280	21	0
90.10. 2	270	250	180	98	0
90.11. 5	63	49	28	7	0
91.12. 6	11	27	12	7	0
91. 1. 8	4	11	7	10	0
91. 2. 6	5	11	4	7	2
91. 3. 6	12	12	14	7	12

(3) 鉛直分布 (表1)

ピコプランクトンが増殖した1989年7月12日今津沖中央部における鉛直分布は、表層部より5mおよび10m層で多い傾向にあり、15m以深になると減少する傾向にあった。また、1990年の増加時の鉛直分布でも、表層部(100%)に比べ5m層(150%)および10m層(140%)に多く存在し、30m層では表層の約15%と少なく、底部(90m層)では1%未満であった。しかし、1991年3月6日の調査時には90m層でも $1.2 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ のピコプランクトンが観察された。

3. ピコプランクトン増殖時における他の項目

(1) 水温 (図6)

水温の変動をみると7月上旬は、夏に向かっての上昇期であり、この上昇時期にピコプランクトンの急増がみられた。また琵琶湖北湖の6地点におけるピコプランクトンと水温の関係を見ると、22°C前後の水温域で $10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上のピコプランクトンが観察され、異常増殖する時期やその急増できる水温域は非常に狭い傾向にあった。なお、水温を含めた気象条件との関連は、本報別掲の報告で詳述した。

(2) 全細菌数 (0.3~2.0 μm : 図7)

全細菌数は、7月までは $10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 前後と比較的少なく推移したが、増殖直後から増加が始まり、12月まで $10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-1}$ 前後で推移した。その後、水

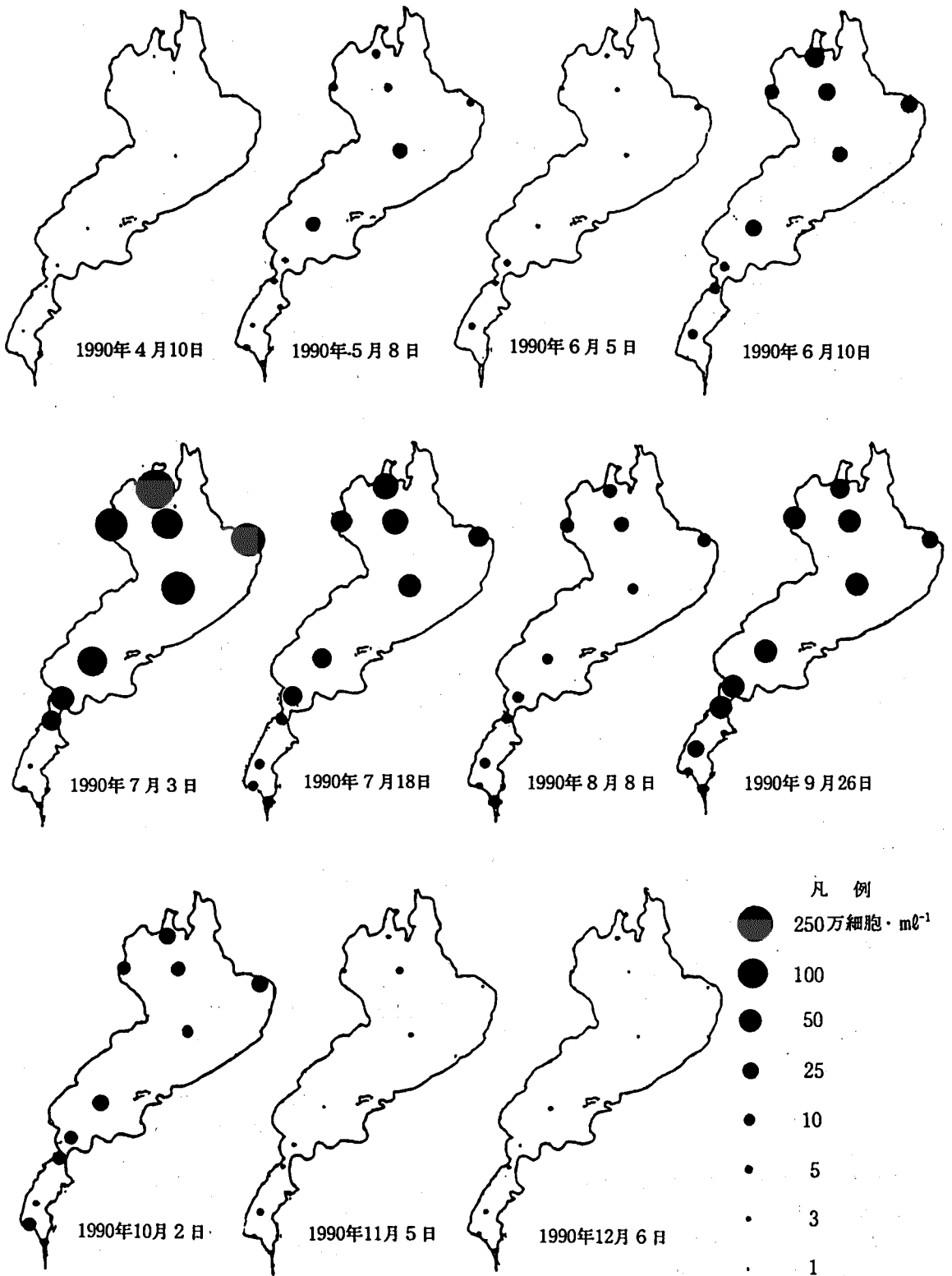


図5. 琵琶湖におけるピコプランクトンの平面分布

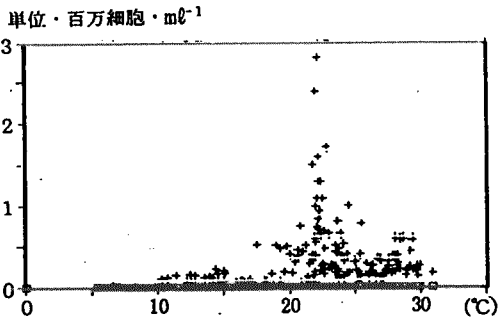


図6 琵琶湖北湖におけるピコプランクトン数と水温との関係

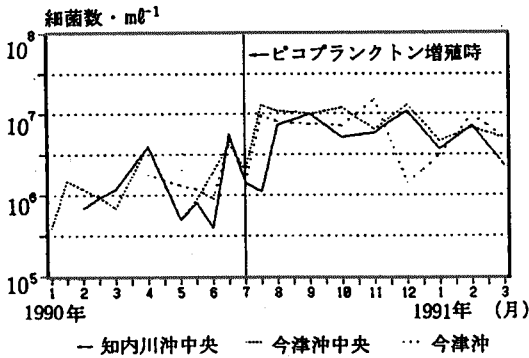


図7 琵琶湖北湖における全細菌数の変動

温の低下に伴い徐々に減少した。

今津沖中央のピコプランクトン増殖時期である7月の全細菌数は $2.1 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ であったのに対し同地点でピコプランクトンは $1.6 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ であった。この時期、全細菌数と同じ程度ピコプランクトンも存在していたと考えられる。

(3) 微小な植物プランクトン ($2.0 \sim 10 \mu\text{m}$: 図8)

$10 \mu\text{m}$ 以下の微小な植物プランクトンは、主に今回増殖したピコプランクトンと同属と考えられる棒状で長さ約 $5 \mu\text{m}$ の *Synechococcus* sp. (藍藻類: 写真

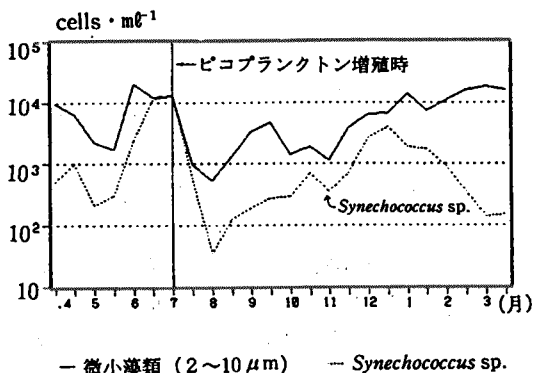


図8 今津沖中央における微小藻類の変動

4) や *Chrysochromulina* 属 (ハプト藻), *Rhodomonas* 属 (褐色鞭毛藻) および *Cyclotella* 属 (珪藻) 等が多く観察されたが、透明度低下時には *Synechococcus* sp. (最高 $1.3 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$) のみが増加し、他の微小なプランクトンは少なく推移した。

(4) 植物プランクトン ($10 \sim 1,000 \mu\text{m}$: 図9)

$10 \mu\text{m}$ 以上の植物プランクトンの総細胞数は、5月に「淡水赤潮」の原因となる *Uroglena americana* (最高 $12 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$) の減少に伴って減少しはじめ、透明度の低下時には $1.0 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ にまで減少した。8月に入ると黄緑藻類の *Botryosphaerella* sp. を中心に総細胞数は $10^4 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 近くまで増加した。また、透明度の低下時には、渦鞭毛藻に属する *Ceratium hirundinella* (写真5) が一時的に増加傾向にあった。この種は「イケツノオビムシ」と呼ばれ、古くから琵琶湖に存在するプランクトンである。

(5) 繊毛虫類 ($20 \sim 300 \mu\text{m}$: 図10, 11)

$30 \mu\text{m}$ 以下の小型の動物プランクトンである繊毛虫はピコプランクトン増殖前の5月には *Halteria grandinella* や *Strombidium* sp. 等が多く観察されていたが、透明度低下時にはこの種は減少した。これに対し $30 \mu\text{m}$ 以上の大型の繊毛虫である *Epistylis* sp. ($4.1 \times 10^3 \text{ particles} \cdot \text{ml}^{-1}$: 写真6) はこの時期にのみ大きな増加を示した。この種は「エダワカレツリガネムシ」と呼ばれ、大型で木の幹に似た群体を形成し水中を遊泳する種である。

(6) 輪虫類 ($50 \sim 500 \mu\text{m}$: 図12)

輪虫類は「淡水赤潮」発生後の6月に、*Polyarthra* sp. および *Synchaeta stylata* による大きな増加がみら

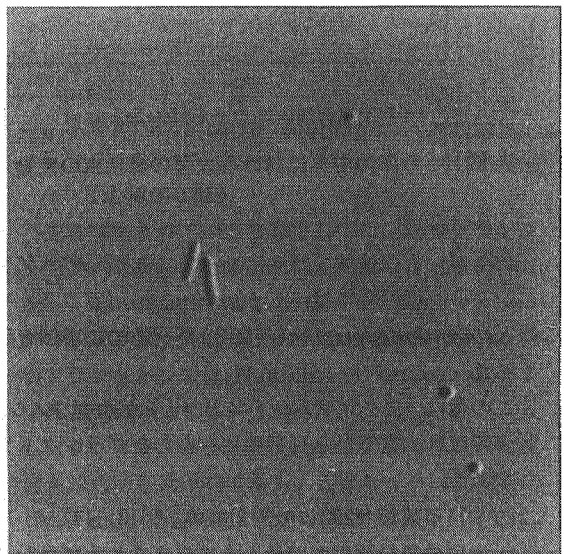


写真4 *Synechococcus* sp. ($\times 1250$)

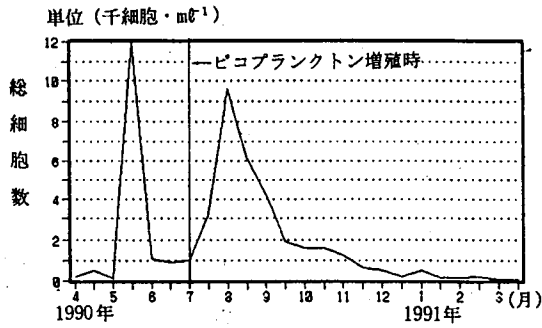


図9 今津沖中央における植物プランクトン総細胞数の変動 (10 μm 以上)

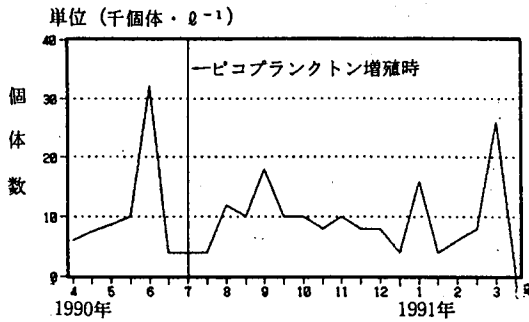


図10 今津沖中央における小型の繊毛虫の変動 (30 μm 以下)

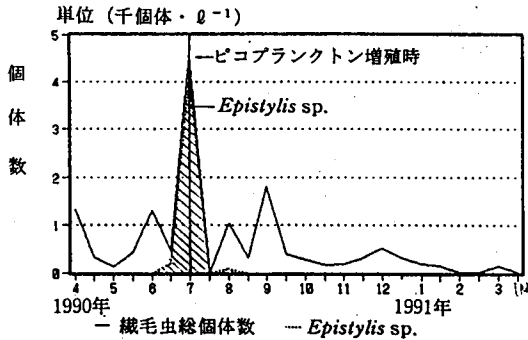


図11 今津沖中央における大型の繊毛虫の変動 (30 μm 以上)

れたが、その後減少傾向にあった。しかしピコプランクトン増殖時には、*Asplanchna* sp. (写真7) や *Kellicottia longispina* (写真8) が一時的に増加を示した。

この種は「フクロワムシ」および「トゲナガワムシ」と呼ばれ、古くから琵琶湖に存在したプランクトンである。

(7) 甲殻類 (200 μm ~ 2 mm : 図13, 14)

大型の甲殻類の中で最も多く観察されるプランクトンは *Eodiaptomus japonicus* (写真9) である。「ヤ

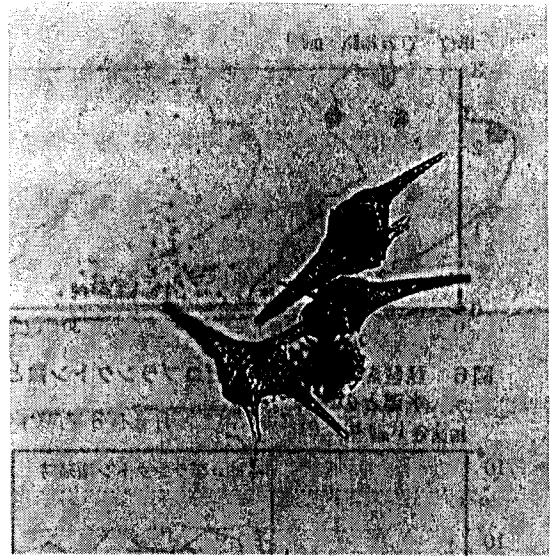


写真5 *Ceratium hirundinella* ($\times 125$)



写真6 *Epistylis* sp. ($\times 50$)

マトヒゲナガケンミジンコ」と呼ばれ、この種は冬季には少ないが3~4月頃からその卵や幼生である Nauplius (写真10) が多く出現し、その後1 mm以上と大型に成長したケンミジンコのピークがみられる。しかし、ピコプランクトン異常増殖時には、この種の幼生である、Naupliusの増加はみられたものの、成長したケンミジンコは一時的に減少した。また、この種は7月の下旬~10月にかけて再度増加がみられた。

この *E. japonicus* やその幼生の体中を落射蛍光顕微

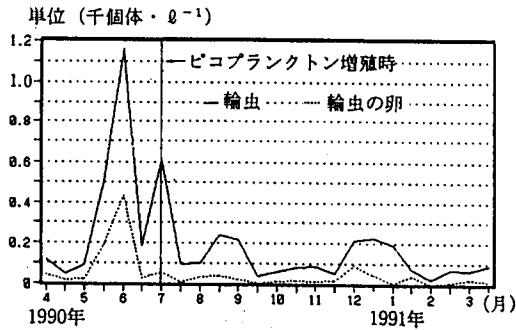


図12 今津沖中央における輪虫類の変動

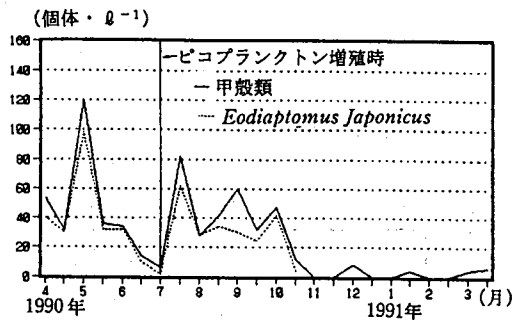


図13 今津沖中央における甲殻類の変動

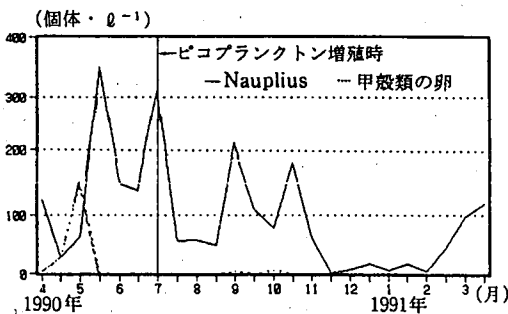


図14 今津沖中央におけるNaupliusとその卵の変動

鏡で観察した結果、黄橙色～橙色の蛍光を示す大きさ $1 \mu\text{m}$ 程度の微細な細胞が体内の消化管の位置に数百個、葡萄の房状となり観察された。この色素を有する細胞が異常増殖をしたピコプランクトンがこれらのものに捕食されたものであるのか、今後の調査が必要である。

(8) プランクトン沈澱量 (図15)

プランクトンネット $40 \mu\text{m}$ (XXX25) で捕集したプランクトン沈澱量の消長は、7月および11月の2回ピークがあり、7月(北湖平均 $20 \text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) のピークが最も大きかった。



写真7 *Asplanchna* sp. ($\times 50$)

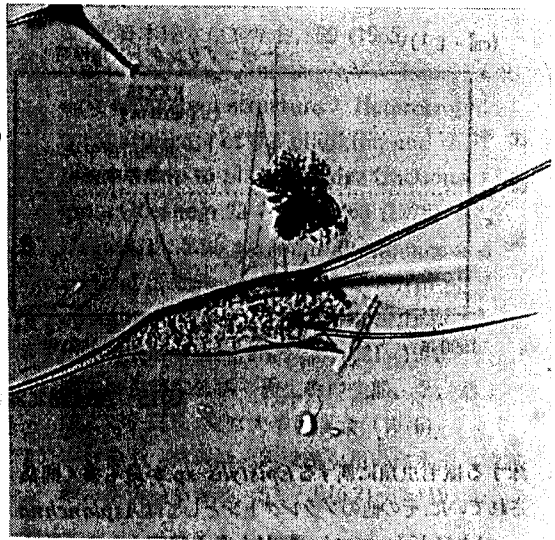


写真8 *Kellicottia longispina* ($\times 125$)

主に捕集されていた種類としては、植物プランクトンでは *C.hirundinella* や *Staurastrum dorsidentifelum* var. *ornatum*, *Closterium aciculare* var. *subpronum* および *Fragilaria crotonensis* 等であり、動物プランクトンでは、Nauplius や *Vorticella* sp. および *K.longispina* などが多かった。

プランクトンネット $100 \mu\text{m}$ (XX13) で捕集した沈澱量は透明度低下時に最も大きなピーク(北湖平均 $15 \text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) が認められた。動物プランクトンでは、この時期毎年多く見られる甲殻類の *E.Japonicus* は少なく推移し、これに変わり、大型の群体を形成し遊

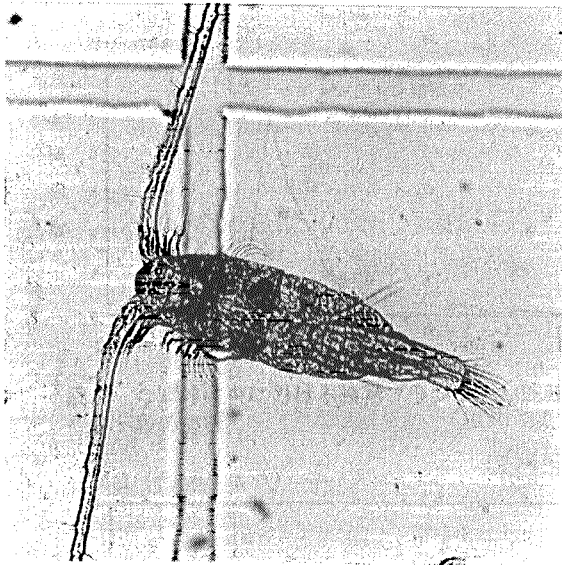


写真9 *Eodiaptomus Japonicus* (×50)

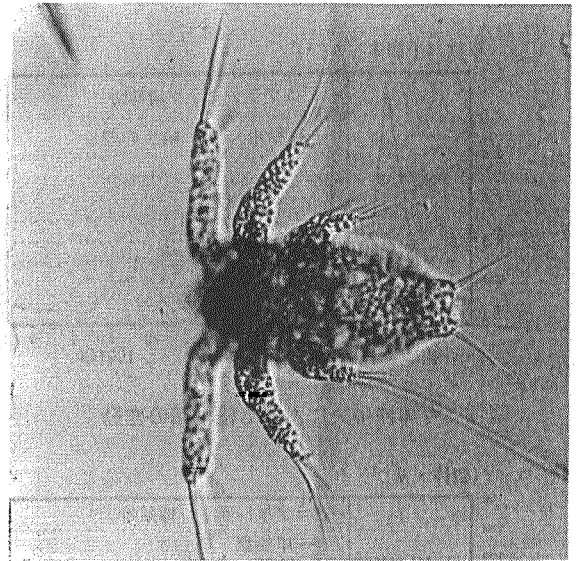


写真10 Nauplius (×250)

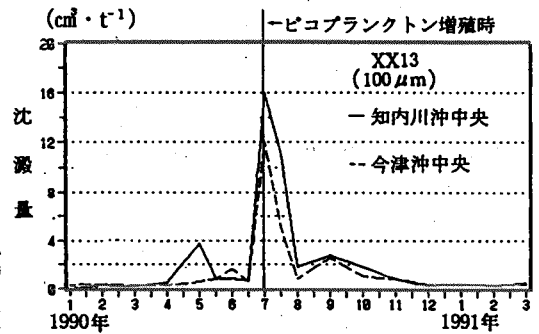
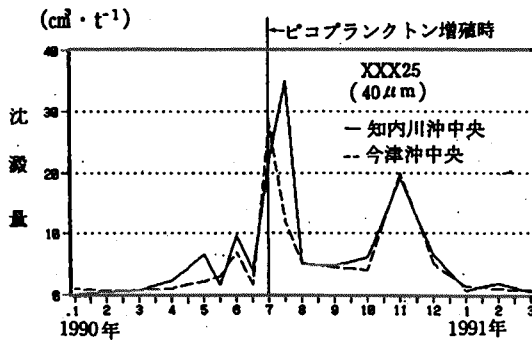


図15 琵琶湖北湖における沈澱量の変動

泳する繊毛虫類に属する *Epistylis* sp. が最も多く捕集されていた。その他のプランクトンとしては *Asplanchna* sp. および *K. longispina* など多く観察された。植物プランクトンについては、ほとんど網目から通過するため少なかった。

ビコプラクトン異常増殖時期のピークと、このプランクトン沈澱量のピークが一致する傾向がみられたが、透明度の低下時に、ビコプラクトンが増加し、それを餌として繊毛虫の増加がみられたのか、繊毛虫の増加の要因がビコプラクトン異常増殖に影響を与えているのか、もう少し詳細な調査が必要であると考えられる。

まとめ

一般にプランクトンと言っても、大きさ $1 \mu\text{m}$ 程度の小型の種から 1cm 以上の大型の種まで様々であり、その変動についても同様には比較できない。しかし、透明度の低下時には、今までに見られなかったビコプラクトンが異常増殖を起こしていたことが明らかとなり、この水界に大きく影響を与えていたことが示唆された。このプランクトンの異常増殖は1989年と1990年の7月にピークが観察され、その大きさは約 $1 \mu\text{m}$ の球菌から短桿菌状の細胞が多かった。また、落射蛍光顕微鏡 (B励起) の観察により、フィコビリ蛋白を含有する藍藻類と考えられ、鞭毛等は観察されなかった。

このビコプラクトンは、採水後、冷蔵庫保存の場合では24時間以内では90%以上が計数され、5日

間経過しても約50%の細胞が計数された。蛍光を示す種を2タイプに分けて計数した結果、北湖の異常増殖水域では黄橙色を示す種が85%以上を占めていたが、南湖では、その比率が北湖より低かった。

琵琶湖では年間を通し 10^3 cells \cdot ml $^{-1}$ 以上のピコプランクトンが存在し、最高値は1989年7月の 4.6×10^6 cells \cdot ml $^{-1}$ でありこの時期の全細菌数と同じ程度にまで増加した。しかし、 10^7 cells \cdot ml $^{-1}$ 以上は現在のところ計数されていない。このピコプランクトンは冬季の間は $10^3 \sim 10^4$ cells \cdot ml $^{-1}$ と少なく推移し6月末～7月上旬に 10^6 cells \cdot ml $^{-1}$ 以上までに増加しその後、約 10^4 cells \cdot ml $^{-1}$ 程度で推移した。

平面分布は、5月頃より琵琶湖の全地点で増加がみられ、異常増殖時には、北部水域で最も多く、南部水域で少なかった。また、水温22℃前後の時に、全域で異常増殖が起こることが観測された。鉛直分布をみると、表層部に比べ5mおよび10m層に多く存在し、30m層では表層の約15%と少なく、底部90m層では、1%以下であった。

透明度低下との関係を見ると、低下以前の5～6月のプランクトン相は、輪虫類や小型の甲殻類および「淡水赤潮」の原因となる植物プランクトンが多く分布していたが、梅雨時期である7月上旬には、これらの種は減少し、これらに変わりピコプランクトンが異常増殖し、同時期に透明度の低下が起こった。その後、透明度の回復時期には全細菌数や10 μ m以上の植物プランクトン数および甲殻類が増加傾向を示した。また、ピコプランクトンの異常増殖時には長さ5 μ m前後の*Synchococcus* sp.やプランクトン沈澱量の増加がみられ、動物プランクトンでは*Epistylis* sp.や*Asplanchna* sp.およびNauplius等の種が多く

観察された。

第一次生産者であるピコプランクトンと、捕食の関係にあると思われる鞭毛虫類や繊毛虫類、輪虫類および甲殻類などの種が、この食物連鎖にどのような形で関与し、ピコプランクトンの異常増殖に関わっているのか、今後も調査研究を進めていく必要がある。なお、この調査は現在継続中である。

文 献

- 1) 永田俊：「琵琶湖北湖における nanoplankton と picoplankton の分布と現存量」, 日本生態学会, 32 (1985)
- 2) Nagata, T: Filter mesh-size of *Daphnia longispina* and its filtering rates on natural bacteria. Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto Univ. ser. of Biol. 10, 109-114 (1985)
- 3) 永田俊：「浮遊生物の食物網とピコプランクトン」, 日本陸水生態学会, 50 (1985)
- 4) Sieburth, J. McN., Smetacek, V. & Lenz, J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. Limnol. Oceanogr. 23: 1256-1263 (1978)
- 5) Nagata, T: The seasonal abundance and vertical distribution of the < 3 μ m phytoplankton in the north basin of Lake Biwa. Ecological Research. 1, 207-221 (1986)
- 6) 微生物生態学会編：微生物の生態, 3, 第1版, 236-268, 東京大学出版会 (1976)
- 7) 中村寿子：落射蛍光顕微鏡を用いた水道生物試験, 水道協会雑誌, 57, 7, 646, 21-32 (1988)