

貯水池におけるプランクトンの出現状況の変遷からみた 富栄養化の段階推移に関する研究

牧野育代*・寶 馨・立川康人

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

近年、水質汚濁化現象が目立つ奥多摩湖（小河内貯水池）を対象に、1974年-2003年の30年間にわたるプランクトン出現状況のデータと貯水池における水質保全策の資料とを用いて、貯水池の富栄養化現象の移行を検討した。その結果、優占種プランクトンの発生状況からみたダム地点の水質推移は3パターン・3時期に分けられ、現時点では藍藻類の増加に伴う富栄養化の段階にあることが認められた。ダム地点に出現する藍藻種が変化するようになった1992年は、同時に“選択取水”の変更が施行されるようになった年である。その年を境に種が変化した藍藻の数が特に増加するとともにその出現長期化が目立つようになったことから、富栄養化進行の原因には選択取水の変更が関与していることが考えられた。

キーワード： 奥多摩湖，プランクトン，富栄養化，選択取水，小河内ダム

1. はじめに

本研究で対象とする奥多摩湖（小河内貯水池）は、国内最大級の水道専用の水源林上流域に位置する唯一のダム貯水池である。ダムが完成して50年が経過したが、もともと富栄養化の兆候が見られた（小河内貯水池管理年報，1959）この貯水池では、近年、富栄養化に伴う水質汚濁現象が各方面に顕著に現れている。特に貯水池流入部からダム前に及んで出現するプランクトンの種構成の変化に伴う水質の悪化は、有害な藻類の増加に伴う飲料水問題（WHO飲料水水質ガイドライン改訂版，2004），広域にわたる「水の華」やアオコの発生などによる湖の景観上の問題や異常発生したプランクトンの放流によるダム下流の浄水場でのろ過障害（小河内貯水池管理年報，1998）などが挙げられ、さらには、これらの現象が長期化する傾向にあり、水源におかれている状況を深刻なものにしている。

一方、対象地において、プランクトン出現状況に関する長期にわたる報告はほとんどされておらず、奥多摩湖の出現プランクトンと水質問題との相互関係について検討するには、これらの基本的データの構築が不可欠となっている。

筆者らはそういった未整理のデータのうち、主要流入河川とダム前地点（表層・中層）における総窒素（T-N），総リン（T-P）などの水質汚濁物質の経年変化を整理して報告した（牧野ら，2006）。この報告の中では、河川起源のT-Nの流入量増加がダム前地点のクロロフィルa量の上昇に影響を及ぼすことを示唆している。湖沼においてクロロフィルa量の測定値は富栄養化に関して判断する大まかな基準にはなる。しかしながら、クロロフィルaは、先に述べたような水源の水質問題を検討するうえで特に重要となる藍藻（*Anabaena*, *Microcystis*など）には少量含まれる（丸山，1997）のみであるため、対象地のような藍藻の増加やその種の変化が顕著に見られる貯水池の水質判断基準として妥当な項目とは言えなくなっている。

富栄養化現象に関係した湖沼や貯水池の水質段階（Hutchinson, *et al.*, 1967）は、出現するプランクトンの種の移行で測ることができる。吉村（1937）は、植物プランクトンの移行を用いて貧栄養湖と富栄養湖の差異を説明している。すなわち、貧栄養湖は植物プランクトンの種構成が主として珪藻類からなり、かつ貧弱である。富栄養湖では植物プランクトンの量が豊富で、その種構成が主として、珪藻、虫藻からなり、夏

には「水の華」（藍藻）の形成がされる。

対象地においてもこのような植物プランクトンの種構成にみる富栄養化の状態になっていることを筆者らは見出した（5.1参照）。しかしながら、貯水池の水質段階を生物学的視点から検討するのに水道水源であることを考慮すれば、ここではさらに踏み込んだ出現するプランクトン種個々の発生状況を捉える必要性があるだろう。

このような背景から本稿では、富栄養化が報告されるようになりつつあった1970年代～2003年までのプランクトンの出現状況を整理してその変遷を明らかにし、対象地の水質問題を改善するための基本データの構築を第一の目的とする。そして、そのデータをもとに、貯水池の水理と水生生物の生態系に大きな変化を及ぼしていると考えられる中層から表層への放流水の切り替えである「選択取水」の変更と、湖上の水質保全装置を用いた「藻類回収」との影響をプランクトンの出現状況から検討・考察するものとする。

2. 対象地の概要

2.1 対象集水域の水源保全に関する現況

本研究の対象域は、東京都と山梨県にまたがる水道水源林上流の集水域である。その集水域で唯一の水源貯水池（奥多摩湖）へと流れ入る主要流入河川は丹波川、小菅川、後山川、峰谷川である（Fig.1）。集水域

面積（262.9km²）に対して4つの河川流域の占める割合は80%以上である。このうち、丹波川の上流域の一部と、各本流河川沿いおよび貯水池の周辺は民有地であり、温泉施設、民宿、キャンプ場、釣堀などの観光施設を含んだ集落が点在している。

定住人口は減少しているが、観光人口は増加が続き年間100万人を越えている。対象地ではこのような都市化に伴う水源水質の悪化をかんがみ、山梨県および東京都が連携して各水源保全策を試みている。1981年より始まった下水道設備工事は1987年に、特に水質汚濁負荷量の排出の多い小菅川流域と丹波川流域とで完成した。この結果、一部の水質汚濁項目では濃度の低下がみられ、河川放流水水質が改善された。その他には、工場等の排水規制の強化や鹿による水質汚染への対策等がなされている。しかしながらその一方では、釣堀や温泉などの増加・発掘など、観光施設の増設に伴う土地利用の変化が生じていて、再び水質への影響が懸念されている。

貯水池の水質保全においては、平成11年（1999年）以降において、特に問題となっている藍藻類の発生にあわせて毎年7月中旬から10月下旬までソーラーボート（藻類運搬電動船）による表層藻類の回収作業（東京都水道局、2000）を行ったり、河川流入部に藻類の流入を制圧するためにフェンスを設置（平成15年、2003年7月）したりなどの水質保全対策を運行・試行している。

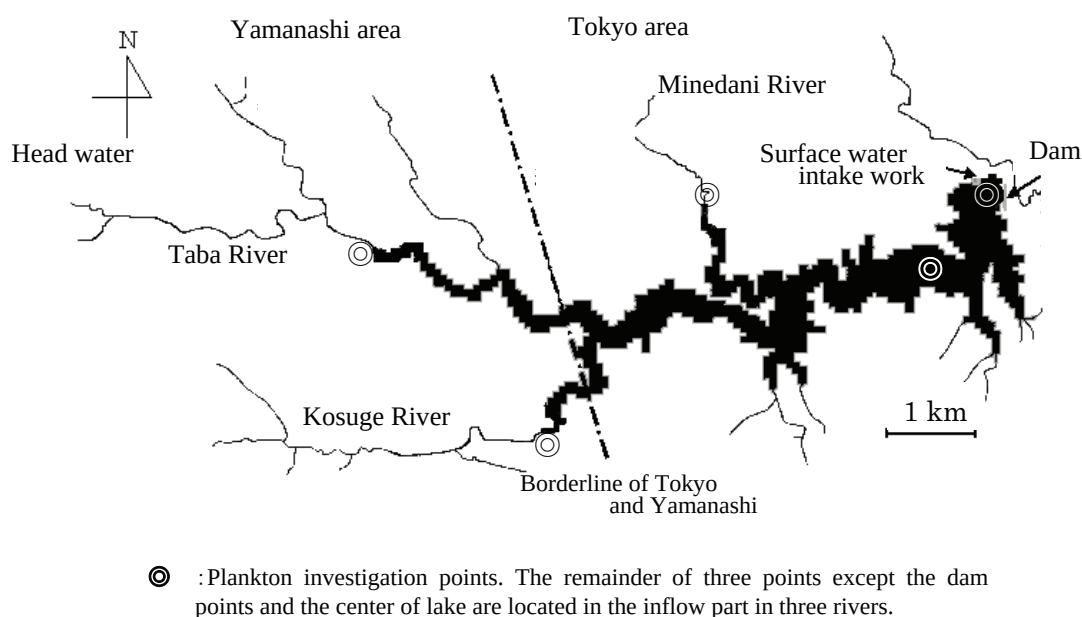
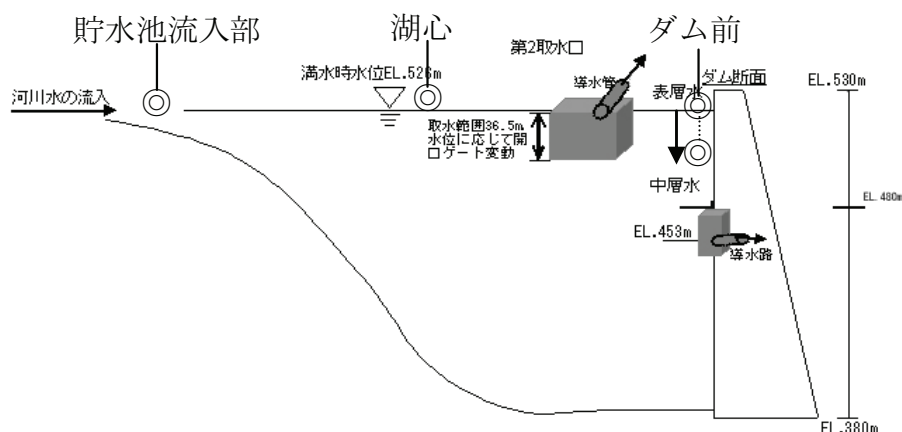


Fig.1 Okutama lake and the water survey points



The range of the plankton scope of search (Depth: m) in the dam points is three times transparency (m) on the investigation day.

Fig.2 Model chart of dam reservoir including reservoir inflow part

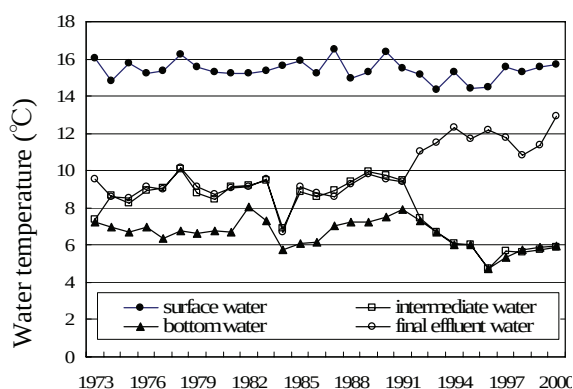


Fig.3 Transition of annual mean water temperature in surface water, intermediate water, bottom water, and final effluent

2.2 ダム貯水池の緒元と運転現況

Fig.2に貯水池流入部からダム地点におよぶ貯水池の模型図を示す。

貯水池は最大水深142.5m (EL.526.5m)，総貯水容量1億8,540万 m^3 を有し，国内では最大級の規模を持つ。集水流域面積に対して貯水池容量は大きく，満水になることは多くない。貯水池の年間交換率 (=年間総流入量/貯水池容量) は1~3 (24年間の変動) と低い。受熱期には安定した水温躍層が発達する。

対象地では，ダムより下流における冷水問題の改善を目的に，これまでは通年だった中層水の放流を，ダム下流と貯水池との温度差の小さい12月~3月に基本的に限定し，受熱期 (4月~11月) には暖かい表層水

を放流する (選択取水の変更) という，ダムの運転操作を大きく変更している (1992年7月より施行)。

Fig.3に，1978年~2000年までの貯留水各層と放流水における年平均水温の変遷を示す。1992年を境として，中層水の水温は極端に低下している。1991年までは放流水とほぼ同じ挙動を取っていたが，それ以降は同じく低下した底層水とほぼ同じ挙動を示している。表層水は，1992年以降に一旦，1°C程度の水温低下が見られたが，1997年には1992年より前とほぼ同じ水温に戻った。また，放流水の水温は上昇している。

このように，表層水の放流は，各層の水温に影響を及ぼしていることがわかる。中層水の冷水塊は表層放流のためそのまま残ることで，中層から下方水深の貯留水は低温化する。また，受熱期において植物プランクトンの多い表層水を放流することが，ろ過障害や臭気問題など，生物障害による影響をダム下流の浄水場へ及ぼす原因となる。

3. 方法

本稿で取り扱うプランクトンの変動スケールは経年変動および季節変動である。約30年間の長期にわたる水生生物調査は，優占種法を用いるのに妥当な年数を得ていると考えられる。そこで，優占種法と全体の生産量とを用いてプランクトンの変遷を捉えることとする。なお，プランクトン測定値の単位は個体数/mlである。具体的な方法は次の通りである。

(1) 優占種プランクトンは、ダム前地点で明らかにする。1978年～2003年の優占種の季節変動をグラフ化し、その生長に関して検討を加える。

(2) 「水の華」の構成種とアオコの出現状況については、各貯水池流入部（3地点）と湖心からダム前地点にかけての全てで明らかにする。この情報を用いて現在問題となっているプランクトン現存期間の長期化について検討する。なお、本稿では「水の華」とアオコの詳細な区別は行わず、これら2つの事象を富栄養化の現われとして同様に扱う。

(3) 特に着目する藍藻類に関しては、ダム前地点において1974年～2003年に出現する藍藻の種と測定数をまとめ、問題となる藍藻類の出現特性を明らかにする。

(4) 最後に、ダム前地点の鉛直方向に分布する1989年～2000年のプランクトンの種構成と生産量とを明らかにする。

4. 使用データおよび資料

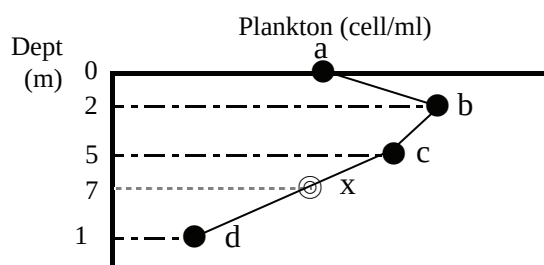
用いた約30年分のプランクトンデータおよび気象情報は東京都水道局所有の資料から得たものである。

気象情報については降水量や気温を考慮して、多雨年、渇水年、猛暑などの表現に要約した。藍藻類については、1974年～2003年のデータを用いた。「水の華」とアオコの発生状況については、数値データとして記載がないことから、これに関する記述を資料中から抜粋してデータ化した。優占種プランクトンについては、1978年～2003年までのデータを用いた。また、1989年～2000年については、ダム前地点における生産層低限までの水深毎のプランクトンデータもあわせて用いた。なお、これらのデータは全て月平均化したものである。

藍藻類および優占種データについては、2000年～2003年の補足的資料の一部を除いて、東京都水道局の算出した測定値（生産層におけるプランクトン数）をそのまま用いた。資料に記載されている計算方法の説明と計算例は、以下の通りである（Fig.4, H4小河内貯水池管理年報、P51、一部加筆）。

「観測日の透明度に対して3倍の水深（四捨五入して算出）を水生生物（プランクトン）の生産層とする。生産層で観測されたプランクトン量（個体数/ml）をその密度に平均化した値をプランクトン測定値とするが、毎週測定した藍藻類と珪藻類については、それからさらに月平均したものを生産層におけるプランクトン測定値とする。なお、透明度の3倍水深が10mを越え

た場合、それ以上の水深で観測された生物数は10mと同じとして計算する。計算された測定値が100（個体数/ml）を超えた場合、優占種プランクトンと位置づける。」



Depth of 1m, 2m, 5m, 10m and after that, the investigation water is sampling water from depth of every 10m.

Fig.4 Example for plankton's measurement in productive zone.

・透明度2.3mの場合

3倍水深：2.3×3=6.9m → 7m

測定結果 0m → a 個/ml, 2m → b 個/ml,

5m → c 個/ml, 10m → d 個/ml

cとdから内挿した7mの生物数 → x 個/ml

生産層の生物総数をNとすると、次式が与えられる。

$$N = \left(\frac{a+b}{2}(2-0) + \frac{b+c}{2}(5-2) + \frac{c+d}{2}(7-5) \right) \div 7$$

5. プランクトンの出現状況の変遷

5.1 ダム前地点で遷移する優占種プランクトンのパターンについて

Fig.5に、1978年～2003年にわたるダム前地点の優占種プランクトンを示す。各年にはその年に優占種化したプランクトン全てを明記し、その右側には出現月を示すバーとその上に出現個体数を記入した。プランクトンはその種ごとに色分けしている。

対象地においては、各年に優占種化したプランクトンの多くが珪藻類であり、優占種化した珪藻類の出現を欠く年はない。緑藻類の優占種は1989年までは毎年のように出現していた。しかしながら、その年以降においては、3種類の出現があった1998年を除くと、1990年以降はほとんど見られていない。この1998年より後は、藍藻類のAbanaenaが優占種化（1999年と2003年）するようになってきたことが見てとれる。なお、Table2に示すように、平均化されていない年間最大数では、2001年にAbanaenaとMicrocystis、2003年にはMicrocystisも優占種の定義とする100個以上の出現が見られる。

The classification in the graph shows division of the plankton's species. Blue: Bacillariophyta, Green: Chlorophyceae, Grey: Chrysophyta, Purple: Dinophyta, Yellow: Cryptophyta, Red: Cyanophyceae.

Year	Month	Taxon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1978	Cyclotella spp.					159	280							
						354	746							
1979	Cyclotella spp. Fragilaria crotonensis Tetraedron sp.										1031	750		
1980	Cyclotella spp. Elakatothrix gelatinosa Gloeocystis sp. Tetraedron sp.					572	350			2150	1048			
										481	174			
1981	Cyclotella spp. Fragilaria crotonensis					177				199				
1982	Cyclotella spp. Rhizosolenia crotonensis Synedra acus Elakatothrix gelatinosa					192								
						1710	146			192				
1983	Synedra acus Synedra ulna Synedra sp. Nitzschia sp.													
						168	277	1180	195	306				
1984	Cyclotella spp. Rhizosolenia crotonensis Synedra sp. Kirchneriella Staurastrum sp.													
						107	2190							
1985	Asterionella formosa Rhizosolenia crotonensis Fragilaria crotonensis Synedra acus Ankistrodesmus Selenastrum sp. Kirchneriella Tetraedron sp.													
						113	346	869	1640	304				
1986	Rhizosolenia crotonensis Fragilaria crotonensis Synedra acus Kirchneriella Scenedesmus													
						106	275	117	158	586				
1987	Rhizosolenia crotonensis Cyclotella spp. Nitzschia palea Dinobryon sp.													
						400	135	351						643
1988	Nitzschia Asterionella formosa Rhizosolenia crotonensis Fragilaria crotonensis Synedra acus Elakatothrix sp. Schroederia spp. Gloeocystis Scenedesmus sp. Ankistrodesmus falcatus Tetraedron sp.													
						547	402			134	8920	2344	384	
1989	Melosira spp. Asterionella formosa Fragilaria crotonensis Synedra acus Nitzschia Synedra ulna Closterium spp. Tetraedron sp. Peridinium spp.													
						101	151	555	3035	361	351	4420	537	794
1990	Asterionella formosa Synedra acus													
1991	Synedra acus Rhizosolenia crotonensis Fragilaria crotonensis Asterionella formosa													
						131	454							
1992	Asterionella formosa Synedra acus Fragilaria crotonensis													
						362	276			285	314			
1993	Synedra acus Rhizosolenia Fragilaria crotonensis Asterionella formosa													
						131	454							
1994	Fragilaria crotonensis													
1995	Fragilaria crotonensis													
1996	Cyclotella spp.													
1997	Cyclotella spp. Rhizosolenia crotonensis Synedra acus Fragilaria crotonensis Selenastrum sp. Dinobryon sp.													
						176	855							
1998	Rhizosolenia crotonensis Cyclotella sp. Fragilaria crotonensis Asterionella formosa Selenastrum sp. Dictyosphaerium sp. Monoraphidium sp. Staurastrum sp. Cryptomonas sp. Peridinium spp.													
						116	152	272	336					
1999	Cyclotella spp. Synedra ulna Fragilaria crotonensis Anabaena spp. sp.													
2000	Fragilaria crotonensis													
2001	Cyclotella spp.													
2002	Asterionella spp. Synedra acus Cyclotella spp.													
2003	Asterionella spp. Cyclotella spp. Fragilaria crotonensis Chlamydomonas spp. Anabaena spp.													

Fig.5 Dominant species of plankton change in dam point

対象年における優占種プランクトンの季節変動の傾向は、まず、冬の終わり頃から珪藻類が出現しはじめ（3月～）、時期をずらして夏から秋口（7月～）に緑藻類が出現する傾向にある。ただし、これらの優占種の消滅の時期に大きな違いは見られない（8月～9月）。なお、1999年以降においては、本来、緑藻類が優占種化する8月～9月に藍藻類が優占種化する傾向が見られる。いずれの藻類においても、冬季の優占種の出現は大きく減少する。プランクトンの増殖には、光、熱、

栄養塩が必要である。このうち、河川から流入する栄養塩類の季節変動が小河内貯水池に対して影響の小さいものと考え、この原因のひとつとして水温の低下が考えられる。比較的高温な水温環境が必要な藍藻類（適温：20℃～30℃程度）は秋以降に、珪藻類や緑藻類は水温の低下が始まる秋から冬季の間において、優占種化していない。もうひとつの原因としては、珪藻類と緑藻類とのほとんどが浮遊性を持たないことに着目すると、台風や大雨時とその後日による濁質の大

量の流入とその貯留長期化がもたらす減光・遮光により、必要な光環境が確保できないことが秋以降に優占種が減少する原因であると考えられる。

以上をまとめると、優占種化したプランクトンの変遷はFig.6に示すように、3パターン・3時期に分けられた。パターン1は珪藻類と緑藻類の優占種が出現している。パターン2は珪藻類以外の優占種はない。パターン3は珪藻類に加えて藍藻類の優占種が出現している。珪藻類は3時期ともに見られるが、出現する月はだんだん短くなる。

このパターン1からパターン3に見られる珪藻や緑藻から藍藻への移行は、1978年～2003年における奥多摩湖の富栄養化段階の進行を明らかに表している。

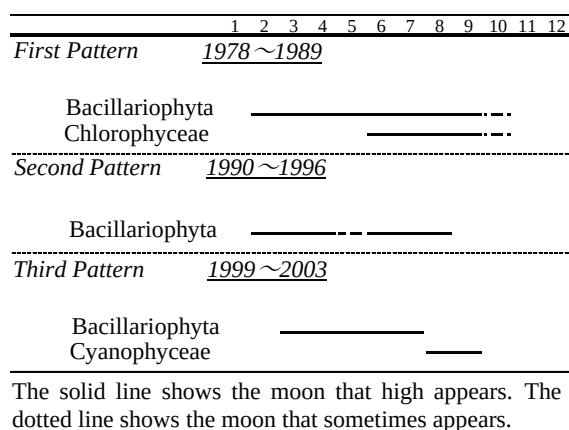


Fig.6 The patterns of dominator plankton's transition and change of the plankton seasonal growth

5.2. 優占種プランクトン個々の出現状況とその競争原理についての検討

次に、個々の優占種プランクトンについて検討する。出現頻度の最も高い優占種プランクトンは、珪藻類の *Fragilaria crotonensis* (16回年の出現、ろ過障害藻類) であった。ほとんどが6月～10月の出現である。猛暑や少雨の年は優占種プランクトンの出現は少ない傾向があるが、そういった年においてもこの珪藻は出現している。また、*Asterionella*, *Tabellaria*などの珪藻と同様に増殖の速さにおいて優れ、春先のブルーム（「水の華」）を起こす藻類として認識されている。対象地では夏から秋口にかけて優占種化している。次に頻度の高かった *Cyclotella* (珪藻類、出現頻度14回年) は、1978年～1987年の間では5月～6月にほぼ毎年出現していたが、1989年～1995年には出現していない。再び出現する1996年以降は2月～7月まで出現するようになり季節的消長規則が崩れ、出現期間が延びた。出現頻度12回年の *Cynedra acus* は底生性であるが、浮遊性の

Cynedra ulna (3年回) よりも出現している。また、1982年～1989年までは6月～10月にかけて出現していたが、1990年以降は2月～4月に出現するようになり、季節的生長期にずれが生じている。出現頻度10回年の *Asterionella fomsa* (珪藻類) は、ろ過障害植物であり、中栄養～富栄養の水域に出現する。また、増殖の速さに優れ、栄養の増加よりも光の増加が原因で春先に優先的に出現する種である。対象地では、1985年から出現しているが、季節的に一定のパターンは見られず1月～10月までさまざまに出現する。また、長期にわたり生長する傾向があり、そのときは個体数も1000をこえる大繁殖をすることが多く、対象地においても、この種によるろ過障害がたびたび生じている。緑藻類は、*Tetraedron* が1990年まで比較的多くの年数で出現していたが、1991年以降、出現しなくなった。緑藻類については、その他規則的な傾向を持つ出現は見当たらない。

藍藻類については *Anabaena* が、1999年（9月）と2003年（8月）とに出現している。なお、表にあるような月平均ではないが、2001年と2003年のともに9月の第1週目の観測では、*Microcystis* あるいは *Anabaena* が、100（個体数/ml）を超えて測定され、優占種化している。

1999年から表層の藻類回収作業が行われている（2.1参照）。それまでの6月～9月は、珪藻類または緑藻類の優占種が出現していたが、2000年～2002年の6月～9月においてそれら藻類の出現がほとんどなく、藻類の回収は、優占種プランクトンにおける形成の低下に影響すると考えられる。しかしながら、2003年には6月～9月において珪藻類の優占種化が復活している。

Anabaena や *Microcystis* などの藍藻は、その毒性から捕食されにくく、栄養素の確保や光環境に合わせて表層と底層の間を浮遊する能力が備わっている。さらに、*Anabaena* は休眠段階をとり湖内で越冬をしたり、窒素固定をする。*Microcystis* は、水中の生物が排出したアンモニアをリサイクリングして利用することができるので、栄養素欠乏下でも増殖に優位に立つ。つまり、流入する栄養素（流入河川に含まれる）が減少（下水道普及による効果など）したり、他の藻類の季節的に早期の増殖による栄養素濃度の低下が生じたとき（夏から秋口）に藍藻類の増加があることは矛盾しない。

このため、一旦、これら藍藻類が優占種となる湖内環境が整う（湖内での循環構造）と、なかなか消失しないことが考えられ、今後も藍藻類の優占種化は生じると予測される。

Table1 List of water-bloom generated from the dam point reservoir inflow parts in 1978-2003

Blue: Bacillariophyta, Green: Chlorophyceae, Grey: Chrysophyta, Purple: Dinophyta, Yellow: Cryptophyta, Red: Cyanophyceae.

	Ogouchi riservoir inflow part in Taba river		Ogouchi riservoir inflow part in Kosuge river		Ogouchi riservoir inflow part in Minedani river		Between from the prize to Dam point	
	Period of generate	Composition species	Period of generate	Composition species	Period of generate	Composition species	Period of generate	Composition species
1978			6月8日～6月21日 7月13日～7月19日	Chlamydomonas sp. Peridinium spp. Chlamydomonas sp. Peridinium spp.				
1979	5月7日～5月24日 9月17日～11月16日	Peridinium spp. Peridinium spp.	5月11日 5月17日～5月26日 6月28日～7月4日 9月21日～11月16日	Cryptomonas sp. Cryptomonas sp. Cryptomonas sp. Peridinium spp.	5月7日～5月9日 5月15日～5月23日 6月23日 10月29日 11月6日～11月9日	Cryptomonas sp. Cryptomonas sp. Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp.		
1980	5月14日～5月20日 7月3日 7月9日～7月10日 9月8日～10月27日	Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp.	5月13日～5月20日 6月17日～7月14日 7月2日 9月2日～10月27日	Pandorina Chlamydomonas sp. Peridinium spp. Peridinium spp.	5月12日～5月20日 6月23日～6月25日 9月11日～9月22日 10月1日～10月21日	Peridinium spp. Cryptomonas sp. Peridinium spp. Peridinium spp.	7月14日～7月19日 8月21日～9月3日	Peridinium spp. Peridinium spp.
1981	9月17日～10月19日	Peridinium spp. Uroglena americana	5月6日～5月11日 7月10日 9月17日～10月19日	Peridinium spp. Chlamydomonas sp. Peridinium spp. Uroglena americana	9月17日～10月19日	Peridinium spp. Uroglena americana	9月23日～10月13日	Uroglena americana
1982			4月9日 4月23日 4月30日 9月17日～9月13日	Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp.	4月9日 4月23日 4月30日 9月17日～9月13日	Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp. Peridinium spp.	9月8日 9月10日	Peridinium spp. Peridinium spp.
1983	8月中旬 9月下旬	Chlamydomonas sp. Pandorina Peridinium spp.	7月22日～8月31日	Chlamydomonas sp. Pandorina	8月中旬 8月下旬	Chlamydomonas sp. Pandorina Peridinium spp.	8月15日～8月31日 9月14日～9月26日	Peridinium spp. Peridinium spp.
1984	4月5日～4月39日 8月8日～9月13日	Chlamydomonas sp. Microcystis spp.	8月8日～9月13日	Microcystis spp.	4月5日～4月39日 8月8日～9月13日	Chlamydomonas sp. Microcystis spp.	8月8日～9月13日	Microcystis spp.
1985			7月29日～8月8日	Chlamydomonas sp.				
1986	7月10日～7月17日 9月10日～10月9日	Peridinium spp. Peridinium spp.	7月7日～7月17日 9月9日～10月9日	Peridinium spp. Peridinium spp.	7月7日～7月17日 9月16日～10月9日	Peridinium spp. Peridinium spp.		
1987	ごく限られた範囲(丹波川, 小笠川の一部)で, わずかに褐色の発色が認められるが, いずれも短期間で消滅し, 「水の華」を形成するに至らなかった。						水の華の確認なし	
1988	ごく限られた範囲(丹波川, 小笠川の一部)で, わずかに褐色の発色が認められるが, いずれも短期間で消滅し, 「水の華」を形成するに至らなかった。						水の華の確認なし	
1989	水の華の確認なし						8月29日～10月4日	Synedra acus
	6月18日～7月3日 7月4日～8月9日	Uroglena americana Peridinium spp. Uroglena americana	6月18日～7月3日 7月4日～8月9日	Uroglena americana Chlamydomonas sp. Peridinium spp.	6月13日～7月3日 7月4日～7月20日	Uroglena americana Peridinium spp.	6月21日～10月4日	Uroglena americana
1990			9月10日から9月20日 9月25日～10月3日 10月8日～11月15日	Microcystis spp. Volvox Microcystis spp. Peridinium spp.	9月10日～9月20日 9月25日～10月3日 10月5日～11月15日	Microcystis spp. Microcystis spp. Peridinium spp.	10月15日～10月30日	Peridinium spp.
	7月2日～7月30日	Peridinium spp.	7月2日～7月23日	Peridinium spp. Volvox	7月23日～7月30日	Microcystis spp.		
1991			9月2日～9月7日	Chlamydomonas sp. Pandorina	8月12日～8月19日 9月2日～9月7日	Microcystis spp. Chlamydomonas sp. Pandorina		
	7月16日～7月24日	Peridinium spp.	7月16日～7月24日	Peridinium spp. Pandorina	7月20日～7月24日	Peridinium spp. Chlamydomonas sp.		
1992	8月10日～9月7日 9月7日～10月3日 10月23日～11月5日	Microcystis spp. Anabaena spp. Peridinium spp.	7月28日～8月1日 8月10日～9月7日 9月7日～10月3日 10月15日～11月5日	Microcystis spp. Microcystis spp. Anabaena spp. Peridinium spp.	8月10日～9月25日 9月28日～11月30日	Microcystis spp. Peridinium spp.	8月14日～9月7日	Microcystis spp.
1993	7月15日～8月25日 8月19日～9月16日 9月16日～10月21日	Volvox Anabaena spp. Microcystis spp. Peridinium spp.	5月6日～5月16日 6月28日～8月10日 8月10日～9月28日 9月28日～10月26日	種不明小型鞭毛藻類 Volvox Anabaena spp. Microcystis spp. Peridinium spp.	8月10日～9月16日 9月16日～10月21日	Anabaena spp. Microcystis spp. Peridinium spp.	7月15日～8月25日 8月25日～9月16日	Volvox Anabaena spp. Microcystis spp.
1994	10月13日～11月17日	Peridinium spp.	4月28日～5月16日 10月13日～11月17日	種不明小型鞭毛藻類 Peridinium spp.	10月13日～11月17日	Peridinium spp.	9月22日～9月27日 10月27日～11月1日	Microcystis spp. Peridinium spp.
	6月27日～7月6日 7月20日～7月23日 7月24日	Peridinium spp. Volvox Volvox	6月27日～7月6日 7月18日 7月19日～7月24日	Peridinium spp. Volvox Volvox	5月12日～5月15日 7月17日～7月20日 7月21日～7月24日	種不明小型鞭毛藻類 Volvox Volvox	6月27日～7月6日	Peridinium spp.
1995	7月25日～10月31日	Peridinium spp. Anabaena spp.	7月25日～10月31日	Peridinium spp. Anabaena spp.	7月25日～10月31日	Peridinium spp. Anabaena spp.	7月25日～10月31日	Anabaena spp.
1996	7月23日～9月23日 7月29日～10月16日	Peridinium spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	7月23日～9月23日 7月29日～10月16日	Peridinium spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	8月9日～9月23日 7月29日～10月16日	Peridinium spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	9月2日～9月23日 9月2日～9月23日	Peridinium spp. Anabaena spp. Microcystis spp.
1997	7月17日～8月6日 8月6日～10月14日	Fragilaria crotonensis Microcystis spp.	7月17日～8月6日 8月6日～8月21日 8月21日～8月26日 8月6日～10月14日	Fragilaria crotonensis Anabaena spp. Chlamydomonas sp. Microcystis spp.	7月17日～8月6日 8月21日～10月14日	Microcystis spp.	7月17日～8月6日 9月11日～9月23日	Fragilaria crotonensis Microcystis spp.
1998	7月15日～8月18日	Anabaena spp. Microcystis spp.	7月15日～8月18日	Anabaena spp. Microcystis spp.	7月8日～8月18日	Anabaena spp. Microcystis spp.	8月下旬～9月29日	Anabaena spp. Microcystis spp.
1999	7月26日～10月末	Anabaena spp. Microcystis spp. Fragilaria	7月26日～10月末	Anabaena spp. Microcystis spp.	7月26日～10月末	Anabaena spp. Microcystis spp.	8月2日～10月上旬	Anabaena spp. Microcystis spp.
2000	6月13日～ 6月19日～8月3日 8月20日～11月中旬 11月～12月下旬	Asterionella Asterionella Anabaena spp. Anabaena spp. Peridinium spp.	5月17日～6月7日 6月13日～ 6月19日～8月3日 8月20日～11月中旬 11月～12月下旬	Pandorina Asterionella Asterionella Anabaena spp. Anabaena spp. Peridinium spp.	6月13日～ 7月3日～8月3日 8月20日～11月末 11月下旬～翌年に及ぶ	Asterionella Asterionella Anabaena spp. Anabaena spp. Peridinium spp.		
2001	5月15日～6月初旬	種不明小型鞭毛藻類 Peridinium spp.	5月1日～ 5月15日～ 6月13日～6月25日 6月26日～10月28日	種不明小型鞭毛藻類 種不明小型鞭毛藻類 Peridinium spp. Pandorina Anabaena spp. Microcystis spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	昨年～1月14日 5月15日～6月初旬 7月23日～8月20日	Peridinium spp. 種不明小型鞭毛藻類 Peridinium spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	8月27日～10月28日	Anabaena spp. Microcystis spp.
2002	7月25日～ 7月末～9月10日 10月中旬～翌年に及ぶ	Cyclotella spp. Anabaena spp. Peridinium spp.	4月末～5月下旬 5月下旬～6月4日 6月6日～6月8日 7月1日～ 7月末～9月10日 9月19日～10月上旬 10月中旬～翌年に及ぶ	種不明小型鞭毛藻類 Cyclotella spp. 種不明小型鞭毛藻類 Cyclotella spp. Anabaena spp. Anabaena spp. Peridinium spp.	6月6日～6月8日 7月25日～ 7月末～10月末	Cyclotella spp. Cyclotella spp. Anabaena spp.	7月19日～10月末	Anabaena spp.
2003	昨年10月中旬～1月中旬 7月18日～ 8月1日～11月14日	Peridinium spp. Anabaena spp. Microcystis spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	昨年10月～1月中旬 4月末～5月中旬 7月18日～ 8月1日～11月14日	Peridinium spp. Chlamydomonas spp. Anabaena spp. Microcystis spp. Anabaena spp. Microcystis spp.	7月18日～ 10月22日～11月14日	Anabaena spp. Microcystis spp. Anabaena spp.	8月4日～ 9月16日～ 9月30日～11月14日	Anabaena spp. Anabaena spp. Microcystis spp. Microcystis spp.

6. 「水の華」とアオコにおける発生状況の変遷と構成種の変化

Table1に、プランクトン観測調査地点（Fig.1）ごとにまとめた、「水の華」とアオコの発生状況と発生期間を示す。灰色に塗りつぶした年は選択取水の施行を、また、黄緑色に塗りつぶしているのは湖沼表層において藻類回収作業があった年を示す。1978年～1983年までのほとんどが、渦鞭毛藻類の*Peridinium*による「水の華」が発生している。1987年～1989年の3年間は「水の華」とアオコともにほとんど発生が見られない。全域で発生した*Microcystis*によるアオコは、1984年に貯水池完成後初めて観測された後しばらく出現していなかったが、1990年以降、小菅川流入部（以下、小菅）と峰谷川流入部（以下、峰谷）での発生をかわきりに再び観測されるようになり、1992年にはダム前に到達している。さらに、1992年以降、まず、丹波川流入部（以下、丹波）と小菅に、翌年1993年には全域で*Anabaena*が出現し、アオコの構成種に*Anabaena*が加わった。また、同年から時折、種不明の鞭毛藻類が出現している。

1992年7月から選択取水が変わり、表層水を放流するようになった。Fig.2に示すように、表層水は第2取水口へと運ばれる。このとき貯水池流入部の水はダム地点へと引っ張られる力が加わる。この力と還流とが原因で、浮遊性の*Microcystis*や*Anabaena*は湖心・ダム前へと運ばれるようになった可能性が伺える。また、上記の“力”が加わるのであれば、同時に生じる水中の抵抗流（吹送流）は湖心から貯水池流入部に種不明鞭毛藻類を運ぶことも可能であるなど、中層から表層への選択取水の変化は、貯水池の湖流と物質の輸送機構に大きな影響を及ぼしていることが推測される。他方、湖面の藻類の回収作業（1999年7月以降）が施行されたが、2000年に湖心からダム地点にかけて「水の華」とアオコが発生しなかったことを除くと、現在のところ、その除去における寄与は大きなものではないと考えられる。

次に「水の華」の発生期間の長期化について検討する。貯水池流入部における「水の華」の発生長期化の傾向は、2000年以降において*Peridinium*が年をまたいで出現するようになったことで確認できる。湖心からダム地点においては、これまで夏に発生していた*Anabaena*と*Microcystis*で構成されたアオコが1995年ごろから晩秋近く（10月末）になっても出現し続けるようになった。また、1回の発生につきその現存期間

は1-2週間であることが多かったが、2ヶ月程度出現するようになっている。さらに、2000年以降は発生期間を合計すると毎年100日以上発生している。

このように、「水の華」とアオコもダム地点の優占種の変遷と同じように富栄養化に伴う構成種の変化がみられ、それは長期化して出現する傾向にあることがわかった。

7. 藍藻の種の変化とそのダム前地点における優占種化への傾向

Table2に、ダム地点における藍藻類の出現種と生産層における出現個体数の月平均（個体数/ml）を示す。1992年に着目すると、その前後で種が異なることがわかる。1991年前では出現種が7種類と比較的豊富であるのに対し1992年以降では、*Anabaena*と*Microcystis*の2種類のみの出現となっている。また、季節的生長に関しては、1991年以前の藍藻類は春から冬まで存在する傾向があるが、*Anabaena*と*Microcystis*は夏に発生して晩秋には消滅するといった、短い期間の集中した発生が特徴的である。その中でも*Anabaena*は*Microcystis*よりも先の月に出現する機会が多く、生長が終わるのも遅い傾向がある。年間最大数をみると、年々その数が増加傾向にあることがわかる。*Anabaena*は優先種化またはそれに近い値を生産するようになってきたが、*Microcystis*はまとまった出現が少ない。

藍藻類は、低温期では珪藻類よりも遅い増殖となるが、高温期にはどの藻類よりも増殖が早い。また、*Anabaena*や*Microcystis*のようなプランクトン性の藍藻は増殖に適した水柱に移動するので、夏季に見られる栄養素の欠乏にも有利に増殖することができる。よって、奥多摩湖では、1992年に*Anabaena*と*Microcystis*が発生してからは、これらの増殖戦略が他の藍藻類よりも優れているために、以降その発生が続いていると考えられる。また、*Anabaena*の増殖が*Microcystis*よりも大きい傾向が見られることについて、*Anabaena*は休眠段階をとって越冬する機能と空中の窒素を栄養源として固定する能力も持つため、より競争に優れているためだと推察する。なお、種の変化の原因としては、1992年より始まった、選択取水の施行の影響が示唆される。

5.2で述べたようにダム前へと運ばれるようになった*Anabaena*と*Microcystis*は、その優れた増殖戦略により、他の藍藻類よりもダム前地点の環境に適応して優先的に生息するようになったと考えられる。

Table2 Transition of the number and Cyanophyceae in dam point at 1974-2003

Observation year	Cyanophyceae	Month												Maximum number of the year
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
S49	1974	<i>Chroococcus</i>					2	6	4	1				11
S50	1975	<i>Chroococcus</i>					1	10	4					17
		<i>Oscillatoria</i>	39			228								750
S51	1976	<i>Chroococcus</i>						3		1				7
		<i>Oscillatoria</i>										20		76
S52	1977	<i>Oscillatoria</i>	9	12	85	58	67	26	103	3	13	8	7	152
S53	1978	<i>Chroococcus</i>					1	2	6					9
S54	1979	<i>Aphanothece</i>						43	57	1	1			201
S59	1984	<i>Dactylococcopsis</i>						1	1	35	18	1	2	35
S60	1985	<i>Dactylococcopsis</i>				4	2	3	3	29		1		29
H1	1989	<i>Oscillatoria</i>								17				32
		<i>Phormidium</i>							10	8	1			32
H3	1991	<i>Aphanocapsa</i>							1					3
H4	1992	<i>Anabaena</i>							1	3				3
H5	1993	<i>Anabaena</i>							1	1				3
		<i>Microcystis</i>								1				4
H7	1995	<i>Anabaena</i>							1	5	5	1		9
		<i>Microcystis</i>								1				2
H9	1997	<i>Microcystis</i>								1				1
H10	1998	<i>Anabaena</i>						3	9	19	2			40
		<i>Microcystis</i>								4	1			13
H11	1999	<i>Anabaena</i>						2	76	122	3	1		290
		<i>Microcystis</i>							8	1				23
H12	2000	<i>Anabaena</i>						28	8	17	3	4		28
		<i>Microcystis</i>							1	2	2			2
H13	2001	<i>Anabaena</i>							6	7	67	3		122
		<i>Microcystis</i>							30	40				144
H14	2002	<i>Anabaena</i>						1	21	7				5
H15	2003	<i>Anabaena</i>						1	120	83	1			680
		<i>Microcystis</i>						1	18		17	3		240

8. 生産層におけるプランクトン数の変動と“選択取水の変更”との関係における一考察

これまでの、生産層における密度からプランクトンの数を求め、それをもとに議論してきた。しかしながら、プランクトンは生産層に均一に分布をするわけではない。一部のプランクトンは栄養素を求め、増殖により有利な層へ移行したり、珪藻類に多い比較的大型のプランクトンは沈殿しやすく、季節によっては生産層より深い水深で観測されたりするため、生産層によるプランクトン数の推測では、対象地のように深い水深の貯水池において、水柱方向で生じているプランクトン出現状況を見逃すおそれがある。それは結果として、生物数の測定結果に誤差が生じる可能性をも意味する。

そこで、以下には貯水池の湖流と物質の輸送機構に大きな影響が及んだと考えられる1992年（5.2参照）

を前後する1989年～2000年を対象にダム地点における生産層までのプランクトンの水柱分布を明らかにする。

Table3 Transition of annual mean depth in production layer

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
生産層の水深(m)	13	17	16	16	20	18	18	18	21	17	17	20

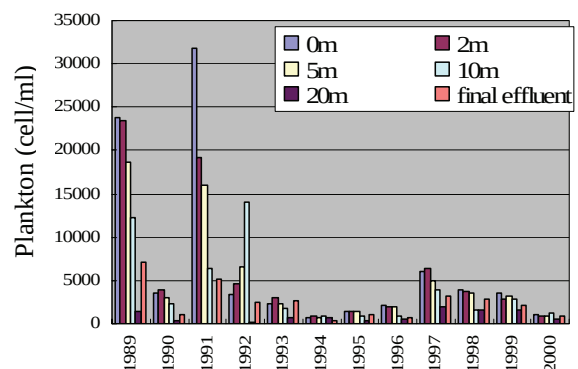


Fig.7 Transition of plankton's distribution in direction of water column

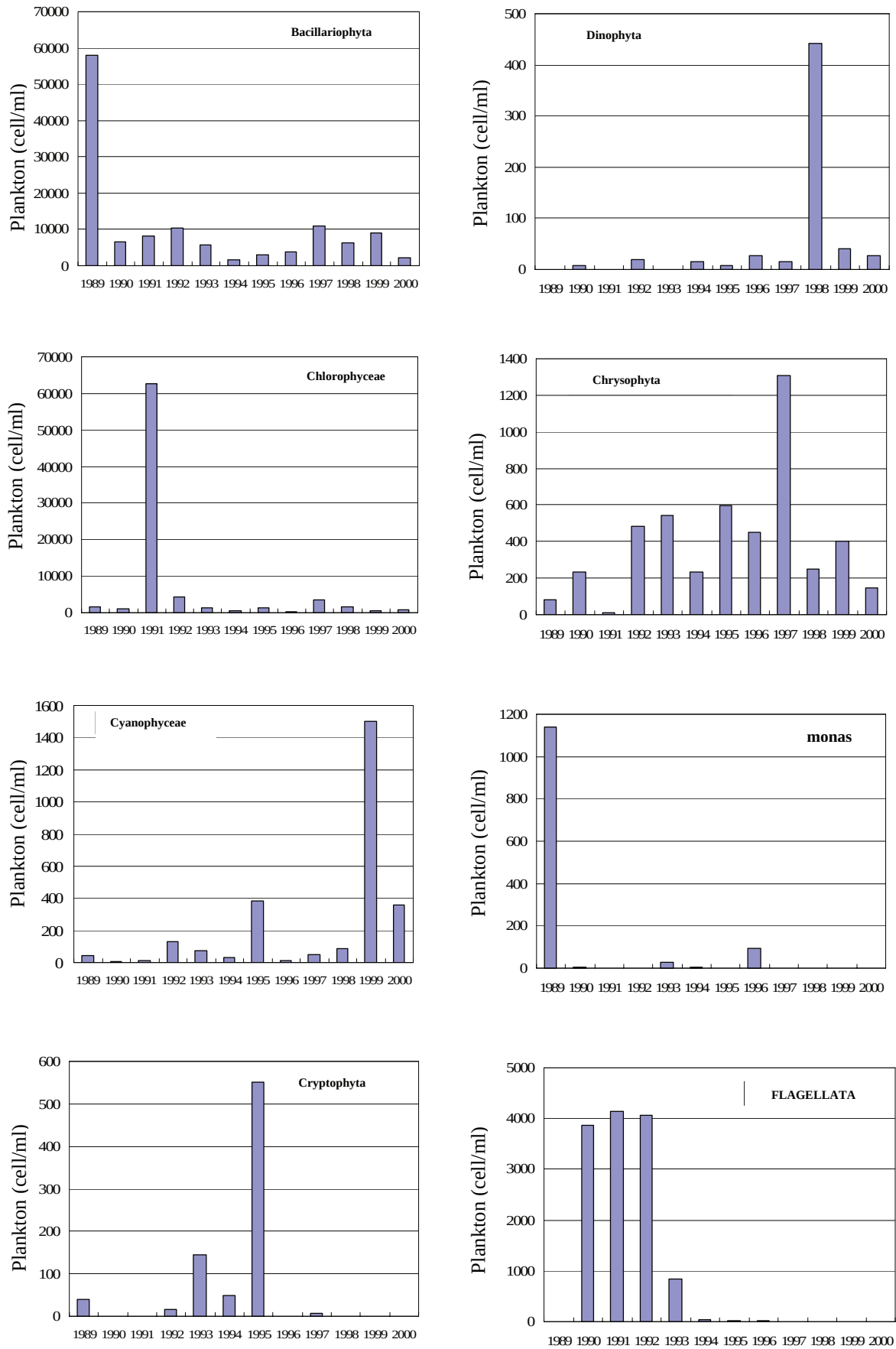


Fig.8 Transition of annual mean plankton in 1989-2000

Table3に、生産層における水深の変遷を示す。この結果から、水柱分布の低限水深は20mとして検討していく。Fig.7に、生産層（0m～20m）と放流口（放流水）における出現したプランクトンの年間合計数を示す。この図からわかるように、1989年はプランクトンの異常発生が生じている。同様の現象が1991年にも生じているが、その原因は明らかとなっていない。1992年までは貯水池内に出現したプランクトン数と放流されるプランクトン数との差が大きいが、以降はその差が縮んでいる。これは、1992年以降の選択取水の変更の影響で表層水に含まれるプランクトンが放流されるようになったことのためである。

あろう。

Fig.8には、珪藻類、緑藻類、藍藻類、褐色鞭毛藻類、渦鞭毛藻類、黄金藻類、原生動物鞭毛虫類（monasおよびFLAGELLA）の年間合計量の変遷を示す。“異常発生”に見る構成種は、1989年：珪藻類とmonas、1991年：緑藻類、1995年：クリプトモナス、1998年：渦鞭毛藻類、1999年：藍藻類については生じている。また、いずれの年においても珪藻類の占める割合が最も高い。異常発生の年を除くと珪藻類と緑藻類は相互の増減のバランスが保たれていたが、1999年は、珪藻類の増加に対して緑藻類は減少している。一方、この年の藍藻類はこれまでにない増加している。

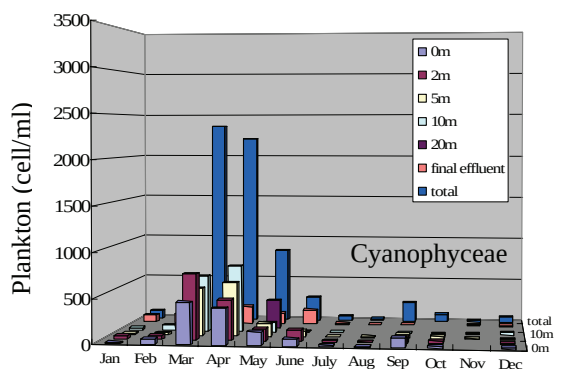
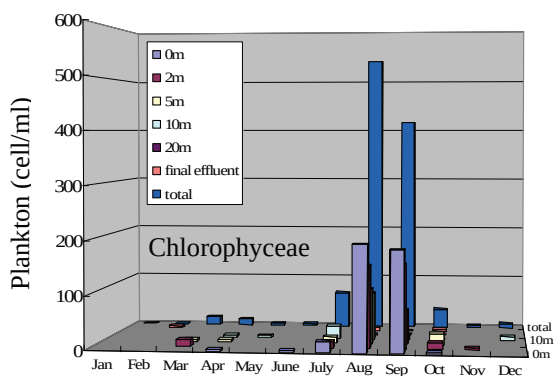
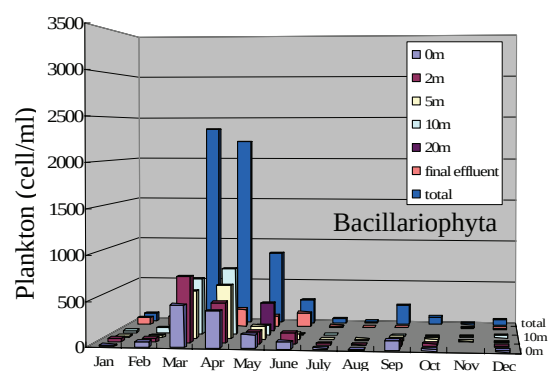


Fig.9 Revenue and expenditure according to the moon of plankton in 1990

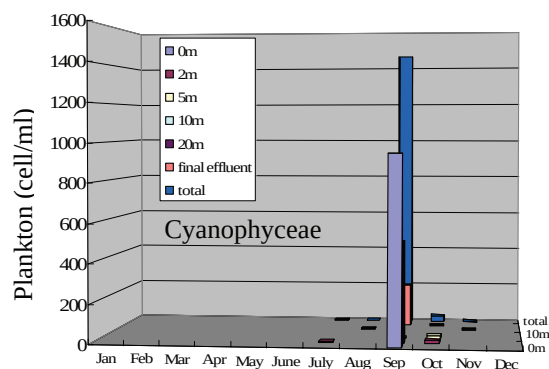
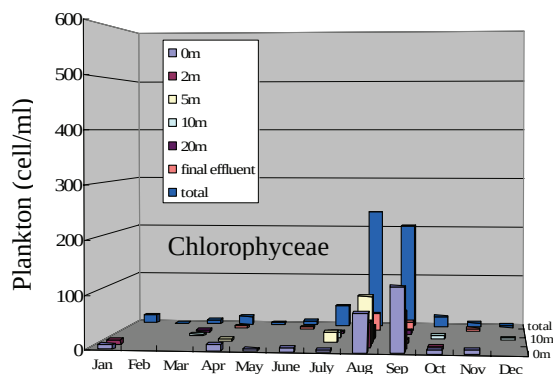
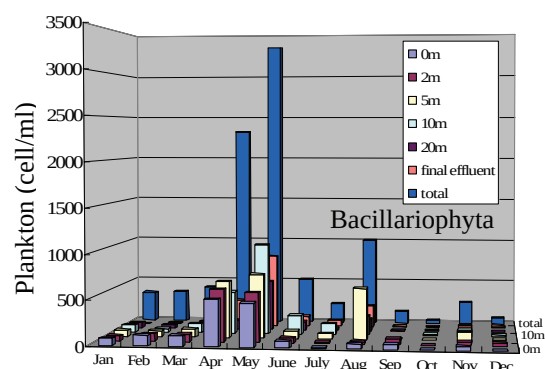


Fig.10 Revenue and expenditure according to the month of plankton in 1999

Fig.9に1990年, Fig.10に1999年の珪藻類, 緑藻類および藍藻類における月収支を示す。1999年では, 8月の珪藻類が増加して発生した後の9月に緑藻類ではなく藍藻類が増加し, 年間出現数によるプランクトンの富栄養化への移行と優占種に見るその傾向がと一致していることがわかる。

アオコを捕食するmonasは1996年以降, 出現が確認されていない。1996年以降しばらくしてアオコの形成種である藍藻類は大きく増加した。これらのことより, 藍藻類の増加に関しては, 緑藻類とmonasの減少が影響していることが考えられる。

Fig.11に, 表層を除く生産層 (5m~20m) の珪藻類, 緑藻類, 藍藻類, 褐色鞭毛藻類, 渦鞭毛藻類, および

黄金藻類における水中分布の変遷を示す。いずれの藻類についても, 選択取水後 (1992年以降, 表層水の放流) に分布する水深が深くなったことがわかる。この現象はTable3にあるように1992年を境に生産層 (透明度の3倍水深) が増加したために生じたもので, プランクトンの生息範囲が増加した。それは, 各藻類の年間出現数の変遷を示したFig.8の中にある上下運動が可能である鞭毛藻類 (褐色鞭毛藻類と渦鞭毛藻類) が, 1992年を境に増加していることから示唆される。したがって, 表層水の放流は, プランクトンの水柱下方向への分布, すなわち, 分散することによるプランクトン密度の低下が透明の上昇に寄与していることが考えられる。

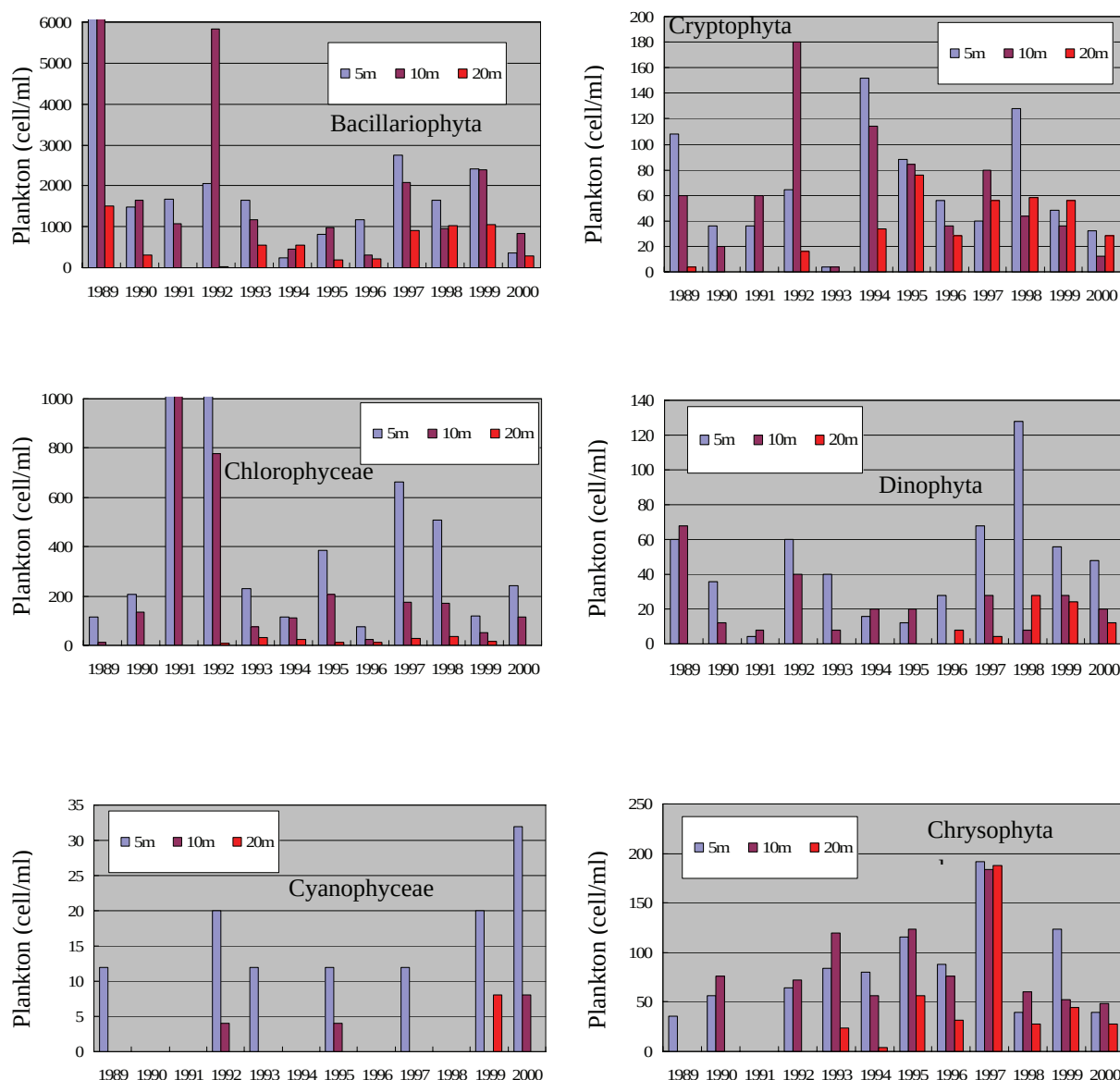


Fig.11 Revenue and expenditure according to the month of plankton in 1999

9. まとめ

近年、水質汚濁化現象が目立つ奥多摩湖（小河内貯水池）を対象に、1974年～2003年の30年間にわたるプランクトン出現状況のデータと貯水池における水質保全策の資料とを用いて、貯水池の富栄養化現象の移行を検討した。その結果、優先種プランクトンの発生状況からみたダム地点の水質推移は、珪藻類と緑藻類（1978年～1989年）→珪藻類（1990年～1996年）→珪藻類と藍藻類（1999年～2003年）の3パターン・3時期に分けられ、現時点では藍藻類の増加に伴う富栄養化の段階にあることが認められた。

ダム地点に出現する藍藻種が*Anabaena*と*Microcystis*に変化するようになった1992年は、同時に“選択取水の変更”（放流水における中層から表層への切り替え）が施行されるようになった年である。その年を境に種が変化した藍藻の出現数が、特に増加するとともに出現長期化が目立つようになったことから、富栄養化進行の原因には選択取水の変更が関与していることが考えられた。今後は、選択取水の変更が貯水池の水理や物質輸送に及ぼす影響を検討し、富栄養化の移行との関係を明らかにする予定である。

謝 辞

本稿で用いた水質調査のデータは、東京都水道局から貸与いただいたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 東京都水道局（1959-2000）：小河内貯水池管理年報。
東京都水道局・富士電機（2000）：小河内太陽光発電事業設備及び水質改善等調査研究報告書。
東京都水道局（1992）：多摩川冷水対策同水路築造工事。
丸山晃（1997）：原生動物の世界，内田老鶴圃出版。
吉村信吉（1937）：湖沼学，三省堂。
WHO（2004）：飲料水水質ガイドライン改訂版。
Hutchinson, G.E. (1967): A treatise on limnology. Vol. II.

Transition of Eutrophic Phenomena in Lake Okutama: Status changes of Plankton

Ikuyo MAKINO*, Kaoru TAKARA, Yasuto TACHIKAWA

* Graduate School of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

Synopsis

Lake Okutama is an artificial lake formed by the Ogochi Dam that blocks the upstream of the Tama River. Analyzing the plankton data of 30 years (1974–2003) at the Ogochi Dam point, this paper characterized the water quality transition that can be divided into three patterns and three periods in terms of the increase of dominant plankton's species. The eutrophication phenomenon according to an increase of cyanobacteria is caused in 2003 of the third pattern. After the enforcement of “Selective withdrawal” in 1992, the species of blue-green alga have been changed at the dam point, the number of planktons has increased and the period of their presence became longer. It was considered that the switch in the discharge water to the upper-layer water was related to the appearance of *Anabaena*, which indicates the eutrophication.

Keywords: Lake Okutama, plankton, eutrophication, selective withdrawal, Ogochi Dam