

植物プランクトンの出現状況の変遷からみた ダム貯水池における水質段階の推移に関する研究

牧野 育代¹⁾ 寶 馨²⁾ 立川 康人¹⁾

¹⁾京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²⁾京都大学防災研究所
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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ダム貯水池における運転操作の資料とを用いて、貯水池の水質汚濁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段階の推移は3パターン・3時期に分けられ、現時点では特定種の藍藻の増加に伴う水質汚濁化の進行段階にあることが明らかとなった。ダム地点に出現する藍藻の種が変化するようになった1992年は、同時に“選択取水”が行われるようになった年である。その年を境に藍藻類の*Anabaena*と*Microcystis*が出現して他の藍藻類は出現されなくなった。さらに、1999年以降では、*Anabaena*と*Microcystis*が優占種化するようになった。選択取水の施行は貯水池の流動機構に変化をもたらしたことから、*Anabaena*と*Microcystis*の出現に伴う水質汚濁化の進行の原因には、ダム貯水池の運転管理の変化が関与していると考えられた。

キーワード：小河内ダム貯水池、植物プランクトン、水質汚濁化、選択取水

I. はじめに

別称、奥多摩湖として都民をはじめとする人々に親しまれている小河内貯水池は、東京都が所有する国内最大級の水道専用水源林（東京都水道水源林）の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。建設構想時より貯水池水質の汚濁化の懸念があった小河内ダム貯水池の水質管理の一環として各種の水質保全策がとられるも（II.1参照）、近年、顕著な水質汚濁化現象が確認されている。水道水源としてのダム貯水池に関連して生じる水質問題は、プランクトンの多量発生に起因する生物障害、臭気障害と言った、水質汚濁化現象が支配的であると考えられる。そこで、本研究では植物プランクトンの出現特性に起因する水質汚濁の問題を取り扱う。

プランクトンが原因で生じている小河内ダム貯水池の問題を個別に挙げると、有害な藻類の増加に伴う飲料水問題（WHO, 2004）、異常発生したプランクトンによるカビ臭物質（ジオスミン）の発生、浄

水場でのろ過障害（東京都水道局、1974－2006の2004年度版）、水色の変色を伴う「水の華」、アオコ及び淡水赤潮等の発生による景観上の問題等がある。しかも、こういった水質問題を引き起こすプランクトンの集積体の発生期間が長期化する傾向にあることがわかり（Ⅶ参照）、水質汚濁化の進行が伺える。

小河内貯水池のプランクトンに関する報告としては、動物プランクトンを主に対象とした、1960年代に乙幡（1967）が、1980年代にはUrabe and Maruyama（1986）とUrabe and Murano（1986）があるが、いずれも数年間という短期間における調査結果にとどまっている。このように、小河内ダム貯水池においてはプランクトン出現状況に関して長期にわたる報告がほとんどされておらず、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。

貯水池集水域に視野をひろげると、観光人口・施設の増加・増設に伴う土地利用の変化と生活排水の河川放流（東京都環境局、2004a）、下水処理場から

の温排水（公共下水処理場における河川流入水と河川放流水との水温データ分析の結果、丹波山浄化センターおよび小菅浄化センター調べ、未発表）等、人為的起源による水質汚濁が進行する原因が存在するし、地質起源と考えられる硝酸イオン（ NO_3^- ）濃度も高く（牧野ら、2005）、自然発生源として水質汚濁にかかわる要因も存在する。

上記に挙げたような集水域を取り巻く人為的・自然的な環境形成からは、貯水池におけるプランクトンの多量発生や水質特性に対する貯水池流入河川水の密接な関与が推測され、水道専用の水源におかれている状況を深刻で複雑なものにしている。

筆者らは、主要な貯水池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及び植物プランクトン発生状況の指標となるクロロフィルa（Chl-a）について整理し報告した（牧野ら、2006）。ただし、Chl-aは光合成プランクトン全体を測定するため、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*Microcystis*、*Anabaena*等の増加に伴う問題が生じている対象地においては、水質汚濁化現象のレベルを判断する基準として妥当な項目とは言いがたい。また、T-N、T-Pのようなプランクトンの生長に必要な栄養素はプランクトンごとにその利用形態や必要量が異なり、栄養塩類とプランクトンとの直接的な関係を検討することは対象地のように複雑なプランクトン構成を有する水域では難しい。

対象地は貯水池内の流速が遅く（近時10年平均流速0.09 cm/s）、滞留時間は200日を越えるなど、水理学的側面において湖沼性の強い水域である。水理学的に河川性の強い水域では、プランクトンは発生した場所から流れてゆくため、観測されたプランクトンはその場の水質や環境条件を反映しているとは限らない。一方、湖沼性の強い水域では水の動きが鈍く、プランクトンは発生した場所の水質を反映しやすい環境におかれる。

よって、対象貯水池においてプランクトンの出現特性は、水質の汚濁化や段階推移等と言った貯水池の水質判断に役立てられようことが考えられる。

これまで吉村（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、虫藻からなる。夏には藍藻を主体とした「水の華」が形成される。

この吉村の説に従うと、現在の小河内貯水池の水質段階は、富栄養湖のレベルに移行しつつあるように思われる。

このような背景から本稿では、小河内貯水池の水質汚濁化の現象を改善するための一助として、プランクトンの出現に関わる基本データの構築を第一の目的とするとともに、水質汚濁化現象がたびたび報告されるようになった1970年代～2003年までの植物プランクトンの出現状況の変遷を把握することで、貯水池における水質段階の推移を明らかにする。

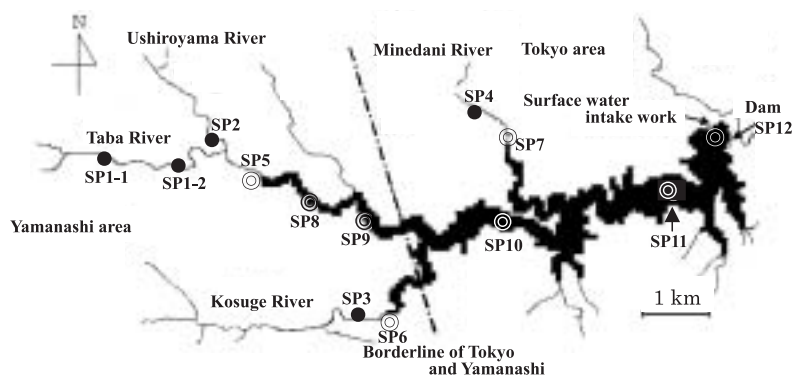
さらに、小河内ダム貯水池の水温や流動状況に変化を及ぼしている“選択取水”（1992年）の施行（Ⅲ参照）等が、ダム地点におけるプランクトンの出現特性に及ぼす影響について、考察を加えるものとする。

Ⅱ．貯水池集水域の水質保全に関する状況

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（小河内ダム貯水池）へと流入する主要河川は丹波川、小菅川、後山川、峰谷川である（図－1）。集水域面積（262.9 km²）に対して4つの河川流域の占める割合は80 %以上である。河川の本流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。

対象地ではこのような都市化に伴う水源水質の悪化を考慮して、山梨県および東京都が連携して各水源保全策を実施している。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。その他、工場等の排水規制の強化や鹿による水源被害への対策（東京都水道局、2006）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・発掘等、観光人口・施設の増加・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関しては、特に問題となっている「アオコの回収」などを目的として1999年～2003年に、藍藻類の発生にあわせた毎年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・富士重機、



- : SP1-1~SP4, Plankton and water quality investigation points. The inflow part in four rivers.
- : SP5~SP11, Plankton and water quality investigation points. The remainder of three points except the dam points and the center of lake are located in the inflow part in three rivers.
- : プランクトンの調査地点を指す。●は、4流入河川の調査地点で、貯水池流入部より上流に位置する (SP1-1~SP4)。なお、SP1-1とSP1-2は、同じ河川上の上流と下流に位置する。○は、貯水池流入部3地点 (丹波川SP5、小菅川SP6、峰谷川SP7)、湖心 (SP8~SP10)、及びダム前地点 (SP11) である。

図-1 小河内ダム貯水池と水質調査地点

Fig.1 Ogochi Dam Reservoir and the water survey points.

2000) を行った。この水質保全策は、貯水池の中流部にパネル状の水質保全装置を設置してそこに流れ入る藻類をろ過、ろ過した藻類は運搬船により貯水池外に運び、ろ過後の排水は再び貯水池に戻すといったシステムを有する。

また、2003年7月末からは河川流入部に藻類の流入を制圧するために、分画フェンスを設置している。

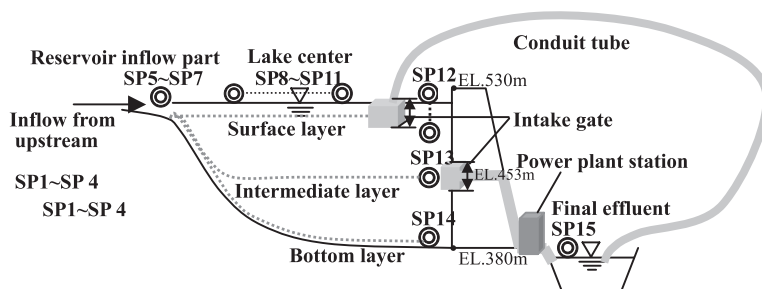
Ⅲ. ダム貯水池の運転方法と水温分布の変化

図-2に貯水池流入部から水褥池におよぶダム貯水池の全体図を示す。貯水池は最大水深142.5 m (海拔標高 526.5 m)、総貯水容量1億8,540万 m³を有する。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 (1977年~2000年の変動) 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、1992年より運転方法を大きく変更した (東京都水道局, 1992)。それまでは通年であ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) こととしたのである。

図-3に、1973年~2000年の貯留水各層及び放流水における年平均水温の変遷を示す。ダムの運転方法を変更した1992年を境として、中層水の水温は極



調査地点SP12のプランクトン数は、生産層 (透明度の3倍水深) におけるプランクトン数密度 (m) より求めている。SP12~SP15 (表層、中層、底層および放流水 (水褥池)) の水温は図-3に示している。破線は、季節によって流入層の異なる様を示す。
The number of plankton's at SP5 was obtained from the plankton number density in production layer (treble depth of transparency).
The water temperatures observed at SP12 to SP15 are shown in Fig.3. The broken lines show the difference of the inflow layer by the season.

図-2 水褥池 (放流水の貯留池) を含めた小河内ダム貯水池の全体模型図

Fig.2 Schematic diagram of Ogochi Dam Reservoir system including sampling points (SP1~SP12).

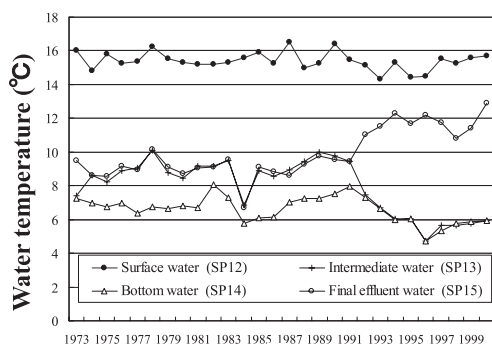


図-3 小河内貯水池の表層水 (SP12)、中層水 (SP13)、底層水 (SP14) および放流水 (水褥池) (SP15) における水温の変遷

Fig.3 Transition of annual mean water temperature in surface water (SP12), intermediate water (SP13), bottom water (SP14), final effluent (SP15).

端に低下している。中層水の水温は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。つまり、1992年以降は中層水の冷水塊が表層放流によってそのまま残るため、中層から下方水深の貯留水は低温化する。表層水は1992年以降に一旦、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。放流水の水温は表層水を放流することで、1992年から急激に上昇している。

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。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ことが伺える。

IV. 方法

本稿ではプランクトンの経年変動および季節変動を取り扱う。プランクトン測定値の単位は個体数/mlあるいは群体数/ml (以下, N/ml) である。検討するプランクトン種は植物性プランクトンで、動物プランクトンについてはデータ取得の基準や方法が統一されていないことを考慮して検討しない。

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、小河内貯水池に出現するプランクトン種は多いものの、出現数が100 (N/ml) を超えるものは少ない。それ

に、出現数100 (N/ml) 以下ではプランクトン間における出現数の差が小さく、出現数を用いて相対的な優占種を判断するのは難しい。また、小河内貯水池では、出現数が100 (N/ml) を超えたプランクトンを従来より優占種プランクトンと位置づけている (東京都水道局, 1974-2003の1992年度版) このことから本稿では、出現数が100 (N/ml) を超えたものを優占種とする。具体的な方法は次の通りである。

- (1) 貯水池への流入河川からの栄養塩類負荷量における長期変遷を明らかにする。その結果から、流入河川の栄養状態が貯水池の水質汚濁化に及ぼす影響を検討する。次に、貯水池流入部からダム地点表層に及ぶ水質汚濁要素の水平分布を明らかにし、植物プランクトンの発生に関わる環境勾配の現況について検討する。
- (2) 「水の華」の構成種及び出現状況については、丹波川 (SP5)、小菅川 (SP6)、峰谷川 (SP7) の流入部3地点と「湖心からダム前地点にかけて」 (SP8~SP12) の4調査地点について明らかにする。その結果と選択取水の施行に伴う流動機構の変化の情報等を用いて、「水の華」がダム地点へと到達するようになった状況について考察する。また、現在問題となっている「水の華」が長期化する傾向について検討を行う。
- (3) 優占種プランクトンは、ダム前地点 (図-2のSP12) における1978年~2003年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。また、特に着目する藍藻類に関して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。これらの結果を用いて、ダム地点におけるプランクトンから見た水質段階の推移を明らかにする。

なお、水質汚濁化を顕著に示す現象として、アオコや淡水赤潮などがある。小河内貯水池ではこれらプランクトンの集合状態をまとめて「水の華」として取り扱っている (小河内貯水池管理年報, 2003現在)。また、「水の華」については、プランクトンの発生規模等の定量的な記録はほとんど記載されず、プランクトン種といった定性的な情報と出現場所や発生日数等の出現状況の情報が述べられているにとどまっている。本稿では、その記述をもとに、プランクトン種とその発生場所とを整理し、「水の華」の発生状況の変遷を表に取りまとめた (表-1)。

表一 貯水池流入部 (SP5～SP7) と湖心からダム前地点 (SP8～SP12) に及ぶ「水の華」発生状況のリスト

Table 1 List of water bloom for developmental period from reservoir inflow parts (SP5～SP7) and the dam point to lake center (SP8～SP12 in 1978-2003.

△: 珪藻, ▼: クリプト藻類, □: 緑藻, ■: 黄金色藻類, ○: 渦鞭毛藻類, ●: 不明種小型鞭毛藻類, ◎: 藍藻

△: Bacillariophyceae, ▼: Cryptophyceae, □: Chlorophyceae, ■: Chrysophyceae, ○: Dinophyceae, ●: Unclear small flagellatae, ◎: Cyanophyceae

	Taba river (SP5)		Kosuge river (SP6)		Minedani river (SP7)		Between from the prize to Dam point (SP8～SP12)	
	Developmental period	Composition species	Developmental period	Composition species	Developmental period	Composition species	Developmental period	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, 小菅川の一部) でわずかに褐色の変色が認められるが, 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, 小菅川の一部) でわずかに褐色の変色が認められるが, 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
1990	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 9月10日～9月20日 9月25日～10月3日 10月8日～11月15日	■ Uroglena americana □ Chlamydomonas sp. ○ Peridinium spp. ◎ Microcystis spp. □ Volvox ◎ Microcystis spp. ○ Peridinium spp. ○ Peridinium spp.	6月13日～7月3日 7月4日～7月20日 9月10日～9月20日 9月25日～10月3日 10月5日～11月15日	■ Uroglena americana ○ Peridinium spp. ◎ Microcystis spp. ◎ Microcystis spp. ○ Peridinium spp. ○ Peridinium spp.	6月21日～10月4日 10月15日～10月30日	■ Uroglena americana ○ Peridinium spp.
1991	7月2日～7月30日	○ Peridinium spp.	7月2日～7月23日 9月2日～9月7日	○ Peridinium spp. □ Volvox □ Chlamydomonas sp. □ Pandorina	7月23日～7月30日 8月12日～8月19日 9月2日～9月7日	◎ Microcystis spp. ◎ Microcystis spp. □ Chlamydomonas sp. □ Pandorina		
1992	7月16日～7月24日 8月10日～9月7日 9月7日～10月3日 10月23日～11月5日	○ Peridinium spp. ◎ Microcystis spp. ◎ Anabaena spp. ○ Peridinium spp.	7月16日～7月24日 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	○ Peridinium spp. □ Pandorina ◎ Microcystis spp. ◎ Microcystis spp. ◎ Anabaena spp. ◎ Anabaena spp.	7月20日～7月24日 8月10日～9月25日 9月28日～11月30日	○ Peridinium spp. □ Chlamydomonas sp. ◎ Microcystis spp.	8月14日～9月7日	◎ Microcystis spp.

△: 珪藻, ▼: クリプト藻類, □: 緑藻, ■: 黄金色藻類, ○: 渦鞭毛藻類, ●: 不明種小型鞭毛藻類, ◎: 藍藻

△: Bacillariophyceae, ▼: Cryptophyceae, □: Chlorophyceae, ■: Chrysophyceae, ○: Dinophyceae, ●: Unclear small flagellatae, ◎: Cyanophyceae

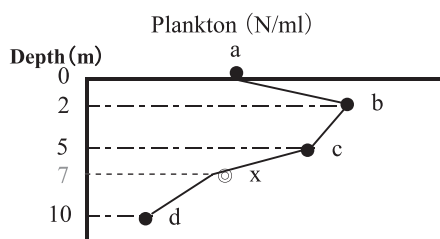
	Taba river (SP5)		Kosuge river (SP6)		Minedani river (SP7)		Between from the prize to Dam point (SP8~SP12)	
	Developmental period	Composition species	Developmental period	Composition species	Developmental period	Composition species	Developmental period	Composition species
1993	7月15日~8月25日	□ Volvox	5月6日~5月16日	◎ Anabaena spp.			7月15日~8月25日	□ Volvox
	8月19日~9月16日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	6月28日~8月10日	□ Volvox			8月25日~9月16日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.
			8月10日~9月28日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	8月10日~9月16日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.		
	9月16日~10月21日	○ Peridinium spp.	9月28日~10月26日	○ Peridinium spp.	9月16日~10月21日	○ Peridinium spp.		
1994			4月28日~5月16日	● 種不明小型鞭毛藻類			9月22日~9月27日	◎ Microcystis spp.
	10月13日~11月17日	○ Peridinium spp.	10月13日~11月17日	○ Peridinium spp.	10月13日~11月17日	○ Peridinium spp.	10月27日~11月1日	○ Peridinium spp.
1995	6月27日~7月6日	○ Peridinium spp.	6月27日~7月6日	○ Peridinium spp.	5月12日~5月15日	● 種不明小型鞭毛藻類	6月27日~7月6日	○ Peridinium spp.
	7月20日~7月23日	□ Volvox	7月18日	□ Volvox	7月17日~7月20日	□ Volvox		
	7月24日	□ Volvox, ○ Peridinium spp.	7月19日~7月24日	□ Volvox, ○ Peridinium spp.	7月21日~7月24日	□ Volvox, ○ Peridinium spp.		
	7月25日~10月31日	◎ Anabaena spp.	7月25日~10月31日	◎ Anabaena spp.	7月25日~10月31日	◎ Anabaena spp.	7月25日~10月31日	◎ Anabaena spp.
1996	7月23日~9月23日	○ Peridinium spp.	7月23日~9月23日	○ Peridinium spp.	8月9日~9月23日	◎ Anabaena spp.	9月2日~9月23日	◎ Anabaena spp.
	7月29日~10月16日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	7月29日~10月16日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	7月29日~10月16日	◎ Anabaena spp.	9月2日~9月23日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.
1997	7月17日~8月6日	△ Fragilaria crotonensis	7月17日~8月6日	△ Fragilaria crotonensis	7月17日~8月6日		7月17日~8月6日	△ Fragilaria crotonensis
			8月6日~8月21日	◎ Anabaena spp.				
			8月21日~8月26日	□ Chlamydomonas sp.				
1998	8月6日~10月14日	◎ Microcystis spp.	8月6日~10月14日	◎ Microcystis spp.	8月21日~10月14日	◎ Microcystis spp.	9月11日~9月23日	◎ Microcystis spp.
	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月下旬日~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~	△ Asterionella	5月17日~6月7日	□ Pandorina				
	6月19日~8月3日	△ Asterionella, ◎ Anabaena spp.	6月13日~	△ Asterionella	6月13日~	△ Asterionella		
			6月19日~8月3日	△ Asterionella, ◎ Anabaena spp.	7月3日~8月3日	△ Asterionella, ◎ Anabaena spp.		
	8月20日~11月中旬 11月~12月下旬	◎ Anabaena spp. ○ Peridinium spp.	8月20日~11月中旬 11月~12月下旬	◎ Anabaena spp. ○ Peridinium spp.	8月20日~11月末 11月下旬~翌年	◎ 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~	● 種不明小型鞭毛藻類	昨年~1月14日	○ Peridinium spp.		
			5月15日~	● 種不明小型鞭毛藻類, ○ Peridinium spp.	5月15日~6月初旬	● 種不明小型鞭毛藻類, ○ Peridinium spp.		
			6月13日~6月25日	○ Peridinium spp., □ Pandorina, ◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.				
			6月26日~10月28日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	7月23日~8月20日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	8月27日~10月28日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.
2002			4月末~5月下旬	● 種不明小型鞭毛藻類				
			5月下旬~6月4日	△ Cyclotella spp.				
	7月25日~	△ Cyclotella spp.	6月6日~6月8日	● 種不明小型鞭毛藻類	6月6日~6月8日	△ Cyclotella spp.		
	7月末~9月10日	◎ Anabaena spp.	7月1日~	△ Cyclotella spp.	7月25日~	△ Cyclotella spp.	7月19日~10月末	◎ Anabaena spp.
2003			7月末~9月10日	◎ Anabaena spp.	7月末~10月末	◎ Anabaena spp.		◎ Anabaena spp.
			9月19日~10月上旬	◎ Anabaena spp.				◎ Anabaena spp.
	10月中旬~翌年	○ Peridinium spp.	10月中旬~翌年	○ Peridinium spp.				
	昨年~1月中旬	○ Peridinium spp.	昨年1~1月中旬	○ Peridinium spp.				
	7月18日~	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	4月末~5月中旬	□ Chlamydomonas sp.				
			7月18日~	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	7月18日~	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	8月4日~	◎ Anabaena spp.
	8月1日~11月14日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	8月1日~11月14日	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.	10月22日~11月14日	◎ Anabaena spp. (新たに発生)	9月16日~	◎ Anabaena spp., ◎ Microcystis spp.
							9月30日~11月14日	◎ Microcystis spp.

V. 使用データおよび資料

解析に用いたデータは、東京都水道局所有の資料（1974-2006）および東京都環境局（2006）の公開資料から得た。なお、本稿で用いたプランクトン調査地点において、継続して観測されている定点は、SP12（ダム地点、東京都水道局）とSP10（麦山地点、東京都環境局）の2地点である。他の観測地点においては、夏季の集中観測や「水の華」の発生期間についてプランクトン調査を行っている。プランクトン数は、透明度（表-2）の3倍水深に相当する生産層（光が届く植物プランクトンの生息が可能な範囲）において算出する。すなわち、各深さに均一分布すると仮定し、生産層におけるプランクトン数を生産層の深さ（m）で割って求める。本稿では基本的に、この生産層におけるプランクトン数を用いて解析するとともに、これを“生産層のプランクトン数密度”と称する。生産層におけるプランクトン数密度の詳しい算出方法については、小河内貯水池管理年報（東京都水道局、1974-2006）の平成4年（1992年）度版に記載されている。その計算方法の説明と計算例は、以下の通りである（図-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（N/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。」次に計算例を示す。

生産層におけるプランクトン数密度のデータの



観測水深は、0m, 2m, 5m, 10m, 以降は10mおきおきである。
・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。

$$N = \left(\frac{a+b}{2}(2-0) + \frac{b+c}{2}(5-2) + \frac{c+d}{2}(10-5) \right) \div 7$$

図-4 生産層の算出とプランクトンの計測

Fig.4 Example for plankton's measurement in production layer.

うち藍藻類については、1974年～2003年のデータを用いた。その他の藻類については1978年～2003年のデータを用いた。優占種プランクトン（ダム前地点）については、1978年～2003年までの生産層におけるプランクトン数密度を用いている。「水の華」の発生状況（貯水池流入部）については数値データとしての記載がないことから、これに関する発生期間、構成プランクトンの種類等の記述を資料中から抜粋して表の形式にとりまとめた（表-1）。なお、小河内貯水池の生産層については、昭和40年代に水中照度計を用いて測定した透過光量の結果から、透明度の3倍水深を生産層と規定して、現在まで用いている（東京都水道局、1974-2003の1992年度版）。

表-2 解析対象期間（1977年～2004年）のダム地点における透明度の年平均、最大値、最小値の変遷

Table 2 Transition of annual average, maxima, and minimum value in transparency of dam point.

	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
average	4.6	4.5	4.2	5.5	4.7	4.2	2.7	4.6	5.6	5.3	5.9	5.5	4.8	5.6
max	7.0	7.2	6.7	10.0	8.1	8.1	8.5	8.8	9.8	8.9	8.7	9.2	9.1	11.2
min	1.4	1.5	1.6	2.8	1.1	0.3	0.4	0.9	2.0	1.7	2.9	2.8	2.0	1.2
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
average	5.1	5.4	7.0	5.9	6.3	5.4	6.9	5.2	5.5	6.5	5.5	5.7	4.8	6.2
max	14.2	9.7	9.2	9.9	8.8	9.9	11.0	8.1	7.6	10.0	9.9	9.1	8.2	9.4
min	0.5	1.3	4.9	1.4	3.5	3.2	3.6	2.2	3.5	4.0	0.6	2.5	1.7	3.2

Ⅵ. 流入河川からダム地点にかけての栄養状況の変化

1. 貯水池への流入負荷量の変遷

貯水池の水質汚濁化の原因としては、流入負荷量の増加に伴う貯水池の富栄養化が挙げられる。以下に対象地におけるT-N、T-Pおよび有機物の流入状況について調べた。

図-5から図-7に、1977年～2004年の主要流入河川における、富栄養化の指標であるT-N、T-Pおよび有機物(KMnO₄消費量に基づく有機物)の流量あたりの負荷量の変遷を示す。なお、3つの図で共通する各流入河川における1998年のピークは、その年の高い降水量(1998年ダム地点年間降水量: 2455 mm, ダム完成以降平均: 1604 mm)に伴った一時的な増加の現象を表すものである。

T-N(図-5)は、流入量の多い丹波川(SP1)と小菅川(SP3)とで高く、大きく振幅しながら増加と減少を繰り返している。全体をみるとわずかながら4河川ともに増加傾向にある。T-P(図-6)は、T-Nほど大きくはない振幅を繰り返していて、一時的な増加を除くと減少傾向にある。有機物(図-7)

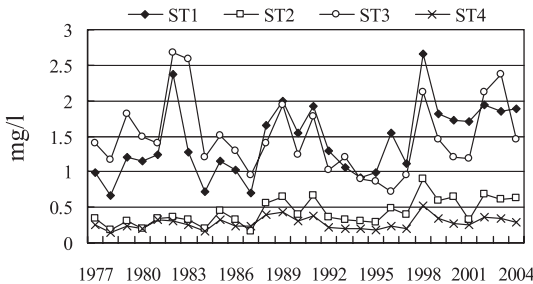


図-5 流入河川からの総窒素の流入負荷量の変遷
Fig.5 Change of inflow load of T-N from feeder river.

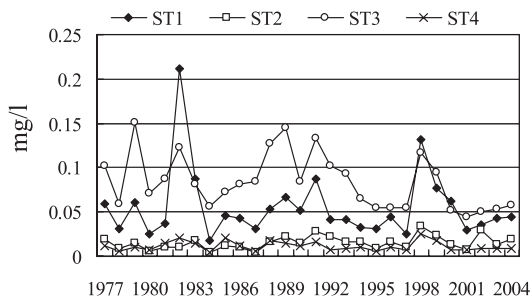


図-6 流入河川からの総リンの流入負荷量の変遷
Fig.6 Change of inflow load of T-P from feeder river.

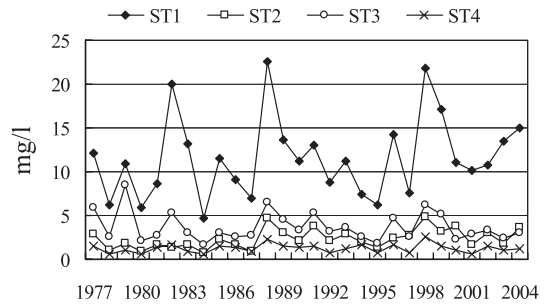


図-7 流入河川からの有機物の流入負荷量の変遷
Fig.7 Change of inflow load of Organic from feeder river.

は、丹波川で特に高く、大きく振幅しながら増加と減少を繰り返している。全体をみると4河川ともに横ばい傾向にある。

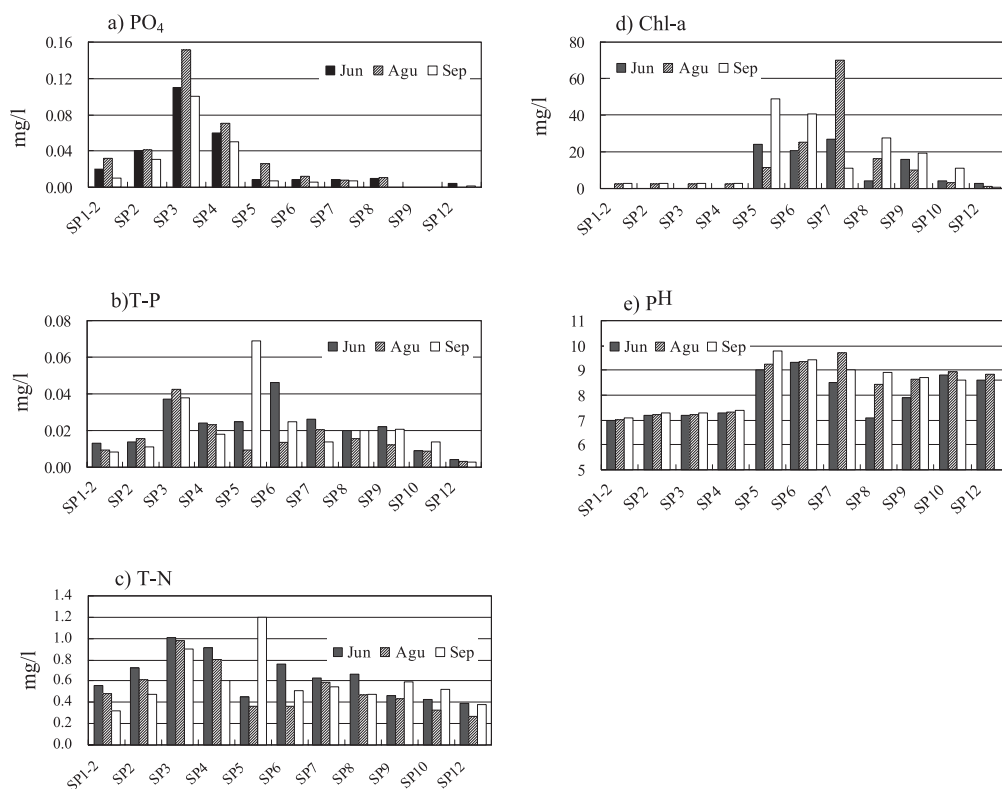
このように、全体的にみて流入負荷量の変化は乏しい。よって、流入負荷量の増加による貯水池の直接的な富栄養化は考えられず、貯水池の水質汚濁化が進行する栄養上の原因は、ダムより上流の水域ではみつからなかった。

2. 流入河川からダム地点表層にかけての栄養塩類等の水平分布の変遷

図-8に、平成16年6月～9月に集中観測された流入河川からダム地点に及ぶ各調査地点の栄養塩類、クロロフィルa量(以下、Chl-a)等の水平分布を示す。なお、表中のいずれのデータも表層あるいは生産層において調査した結果である(SP1～SP9およびSP11, SP12: 東京都水道局, 1974～2006, および東京都水道局, 2006)(SP10: 東京都環境局, 2006)。

栄養状況の指標となる、a) PO₄, b) T-N, c) T-P およびd) Chl-aは、流入河川あるいは流入部からダム地点に向かって、いずれも減少傾向が認められる。占部ら(1997)は、1993年～1994年にかけて小河内貯水池の栄養状況などを調査して報告している。それによると、貯水池のリン酸態リンとChl-aはダム地点に下って減少する環境勾配が形成されていることを明らかにしており、2004年の現在においてもその形成に変化は見られない。

プランクトンに吸収されやすい化学的形態を有するリン酸イオンは流入河川で高いが、流入部で急に減少している。一方、Chl-aは流入河川で低いが入流部で急に増加している。このことは、流入河川に含まれるリン酸イオンが流入部において、Chl-aを生産する光合成プランクトンに栄養素として吸収さ



図ー8 流入河川からダム地点までの水質における変化
Fig.8 Change of water quality from feeder river to dam point.

れたために生じた現象と推察される。プランクトンの光合成に伴い上昇するpHが、流入河川と比べて流入部で高くなっていることから、プランクトンが活性化していることが伺える。すなわち、貯水池流入部において植物プランクトンが発生し易い高栄養的な環境が形成されていると言えよう。

また、リン酸イオンは流入部ではほぼ消費されたまま、ダム地点に向かって大きな変化がないことを考えると、流入部以降のChl-aの減少は、流入部で発生した植物プランクトンがダム地点に向かって拡散してゆく様を表しているものと考えられる。

これまでで、小河内貯水池の各調査地点の表層(生産層)の栄養素における水平分布は、流入部からダムに下るに従い減少する傾向にあることが明らかとなった。つまり、貯水池流入部の栄養状況は相対的にみて高栄養であり、ダム地点表層(生産層)では、貧栄養状態にあると言える。しかしながら、近年、ダム地点へと富栄養湖指標とも言われるアオコ等が顕著に出現するようになった。このため、飲料水を考える上では、貯水池からの最終的な取水位置

に接するダム地点のプランクトンにおける出現特性と水質との関係を明らかにすることが重要である。

以下には、貯水池流入からダム地点に及ぶアオコ、赤潮を含む「水の華」の発生状況の長期変遷を明らかにして、ダム地点へと到達する「水の華」の状況を把握する。次に、ダム地点の「水の華」の発生状況とダム地点の優占種プランクトンの出現状況とを交互に考察し、プランクトンからみたダム地点における水質段階の推移について検討する。なお、検討にはダム貯水池の運転上の変化の情報を加え、その影響についても考察する。

Ⅶ. 貯水池流入部からダム地点にかけての「水の華」の発生状況の変遷と流動機構の変化が及ぼす影響

表一1に、プランクトン観測調査地点(図一1)の貯水池流入部(SP5, SP6, SP7)および湖心～ダム地点(SP8～SP12)における、「水の華」の発生状況と発生期間を示す。「水の華」の表をまとめるに

あたっては、用いた資料に定量的な記述がほとんどなかったため、発生日とその期間、および出現プランクトンの種類について、整理した。よって、この「水の華」の表からは、地点間のプランクトン発生規模の差異、栄養塩類をとりまく競争等、定量にかかわる議論には用いることができない。また、記載されている情報からは、湖心およびダム地点の「水の華」の観測位置の判断が難しい場合が多く、そのため、湖心～ダム地点として同じ項にまとめた。

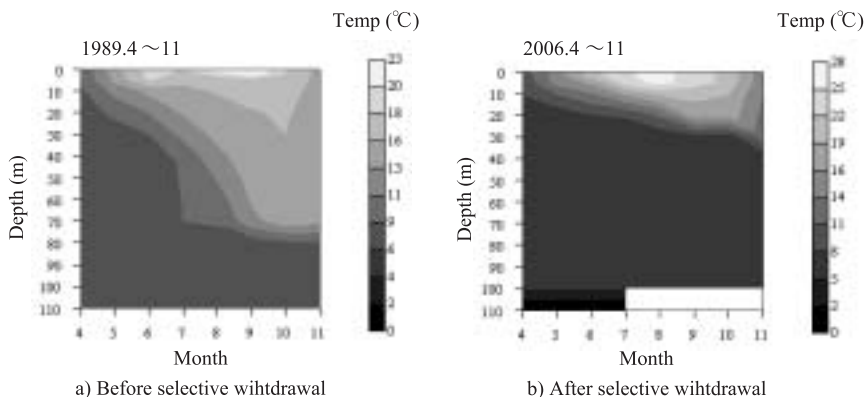
いずれの観測地点においても1978年～1983年までのほとんどが、渦鞭毛藻類の*Peridinium*による「水の華」が発生している。1987年～1989年の3年間は「水の華」はほとんど発生していない。全域で発生した*Microcystis*によるアオコは、1984年に貯水池完成後初めて観測された後しばらく出現していなかったが、1990年以降、小菅川流入部（以下、小菅）と峰谷川流入部（以下、峰谷）での発生をかわきりに再び観測されるようになり、1992年にはダム前に到達している。さらに、1992年以降、まず、丹波川流入部（以下、丹波）と小菅に、翌年1993年には全域で*Anabaena*が出現し、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月から選択取水を導入し、表層水を放流するようになった。図一2に示すように、表層水は第2取水口（表層のIntake gate）へと運ばれる。このとき貯水池流入部の水はダム方向へと引っ張られる力が加わる。

小管内貯水池の流動調査の結果（東京都水道局、

2005）では、貯水池流入水（小菅川流入水）は分画フェンスの下をくぐり、その場に生じた水温成層に沿ってそのままダム地点まで到達することを報告している。一般的に平常時の河川流入水は貯水池の水温躍層に沿って流入する。「水の華」形成の時期は夏から秋であり、同期間の貯水池流入部の水温は貯水池の水温に近づくほどに上昇している。たとえば、2004年9月東京都水道局が調査した際の小菅川の貯水池流入部（SP2）表層における水温は22℃程度、同月の貯水池湖心表層の水温は25℃前後であった。このとき、一次水温躍層下水深約8mの水温は22℃程度であり、小菅川貯水池流入水はこの水深に流入してダム地点へと到達したことが考えられる。

図一9に選択取水の施行を前後する年（1989年と2006年）のダム地点における鉛直方向の水温分布を示す。なお、図の水温分布は選択取水による表層水の放流期間の4月～11月とした。1989年と比べて2006年の表層水の水温は高く、水の華が顕著に発生する6月～9月の水温は22℃～28℃である。一方、2004年の小菅流入部の水温は6月～8月に22℃～27℃、9月は25℃である。この水温条件は、2004の流動調査時のものとほぼ同じであることから、2006年も流入河川からの流入水は、一次水温躍層（水深10m付近）に沿って流入し、ダム地点へと到達したと推測される。また、2006年には著しい成層が4月～11月にかけて表層近傍で形成されている。このような著しい成層の発達にはアオコ（藍藻）の増殖に有利となる。さらに、藍藻の*Microcystis*と*Anabaena*が比較的高水温で増殖することも「水の華」



左図の7月～11月まで水深100m～110mが白くなっているのは、貯水位が110mに満たなかったため。

図一9 選択取水の施行前後と水温躍層の変化

Fig.9 Change of selective withdrawal thermocline.

(アオコ)の発生に有利に働いたことが考えられる。

これらのことから、選択取水による流動機構の変化に伴う著しい成層の形成および還流が原因となり、浮遊性の*Microcystis*や*Anabaena*は発生の好条件を得て、湖心・ダム地点へと以前より容易に運ばれるようになったと考えられる。また、上記の流動機構が発達するのであれば、同時に生じる水中の抵抗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。このように、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。ただし、栄養塩類の物質輸送については、湖心での選択取水前のデータがないため検討できなかった。

他方、湖面の藻類の回収作業(1999年7月以降)の施行は、2000年に湖心からダム地点にかけて「水の華」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*が年を越えて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発生期間は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」の構成種は変化し、またそれは長期化して出現する傾向にあることがわかった。1992年以降は、*Microcystis*と*Anabaena*によるアオコの形成に変わり、「水の華」現象にみる水質汚濁の段階が進行したことが示された。

VIII. プランクトンの出現状況の変遷

1. ダム前地点の生産層における優占種プランクトンの出現状況

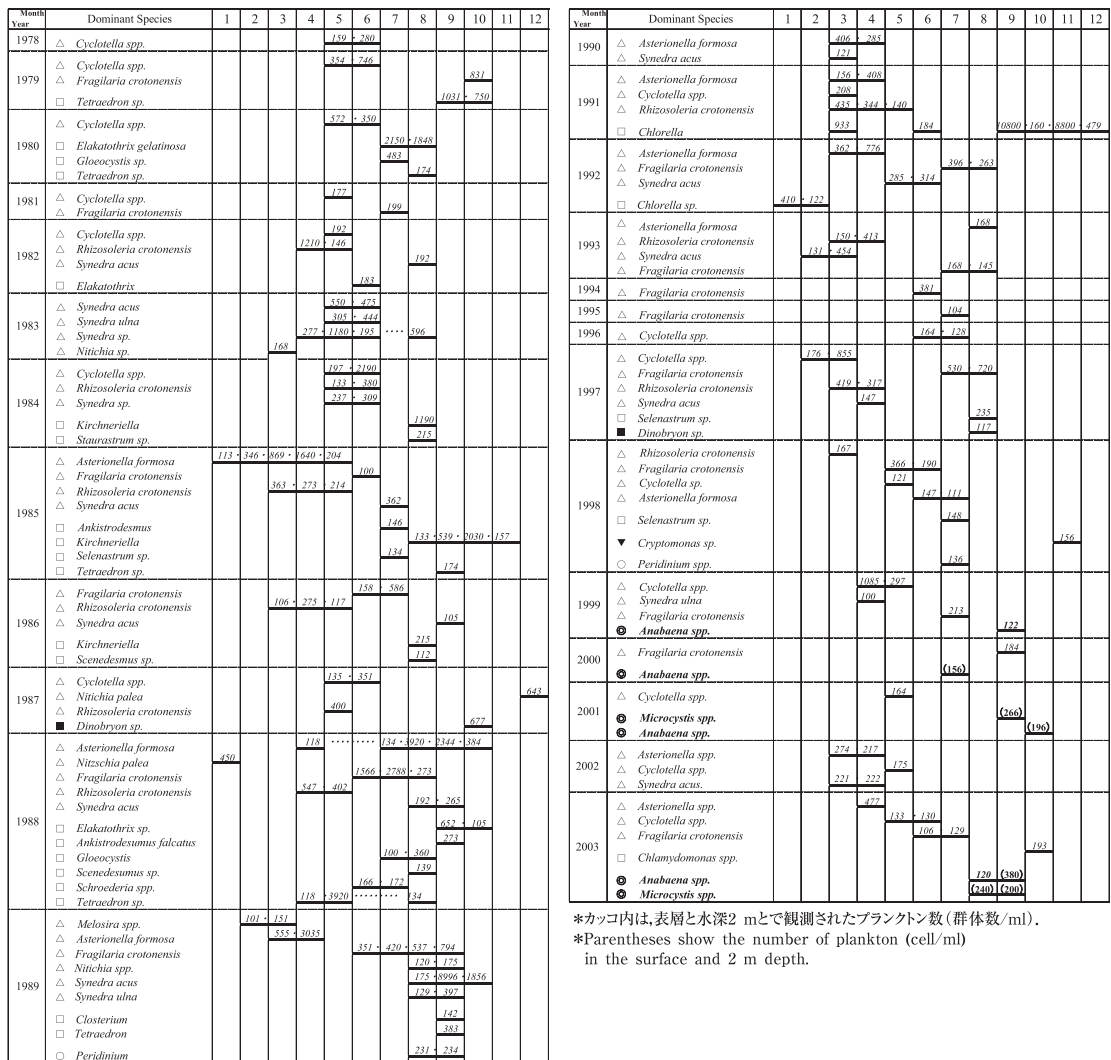
図-10に、1978年～2003年(26年間)のダム前地点における優占種プランクトンを示す。なお、本稿では出現数が100(N/ml)を超えるものを優占種プランクトンとした(IV.方法を参照)。各年にはその年に優占種化したプランクトン全てを明記し、その

右側には出現月を示すバーとその上に出現個体数あるいは群體数を記入した。プランクトンはその種ごとに記号をつけて区別した。

出現頻度が10回を超える優先種プランクトンはすべて珪藻類であった。出現頻度の最も高い優占種プランクトンは、珪藻類の*Fragilaria*属(以下、*Fragilaria*、26年中15回の出現、ろ過障害藻類)である。ほとんどが6月～10月に出現している。*Fragilaria*は、下記に述べる*Asterionella*等と同様に増殖の速さにおいて優れ(Vanni and Temte, 1990)、春先に「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*属(以下、*Cyclotella*、珪藻類、出現頻度15回)は、1978年～1987年の間では5月～6月に出現(9年間に7回)していたが、1991年を除く1988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た。出現頻度11回の*Synedra acus*は底生性であるが、浮遊性の*Synedra ulna*(3回)よりも出現している。1982年～1989年までは5月～10月にかけて出現していたが、1990年以降(1992年は除く)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回の*Asterionella*属(以下、*Asterionella*、珪藻類)は、ろ過障害植物であり、富栄養状態の水域に出現する(Humphries and Lyne, 1988)。長期にわたり優占種化する傾向があり、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。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。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月までさまざまに優占種化する。対象地では、*Cyclotella*と入れ替わるように優占種化している。

緑藻類については、*Teraedron*が1989年(12年中5回)まで比較的多くの年数で出現していたが、1991年以降では出現しなくなった。1992年には*Chlorella*の大繁殖が見られ、それは9月から連続して翌年(1993年)の2月まで続いた。優占種化した*Chlorella*は1992年と1993年を除いて出現がない。緑藻類は1978年～1992年までは比較的出現が見られたが、1993年以降においては、出現頻度(10年間で3回)、種類(2種類)、出現数および出現月のすべてにおいて、縮小が確認できる。

藍藻類については*Anabaena*属(以下、*Anabaena*)



*カッコ内は、表層と水深2 mとで観測されたプランクトン数(群体数/ml).
 *Parentheses show the number of plankton (cell/ml)
 in the surface and 2 m depth.

図-10 ダム前地点 (SP5) の生産層における優占種プランクトンの変遷 (1978-2003)
 Fig.10 Change of Dominant plankton species in productive zone at dam point (SP5) during 1978-2003.

が、1999年(9月)と2003年(8月)とに優占種化している。なお、表層および水深2 m(図-4のaとb)の範囲では、2000年、2001年および2003年の7月～10月(図-10の括弧の数値)において、*Microcystis*属(以下、*Microcystis*)あるいは*Anabaena*が100(N/ml)を超えて測定され、優占種化した。

2. 優占種プランクトンにおける競争原理

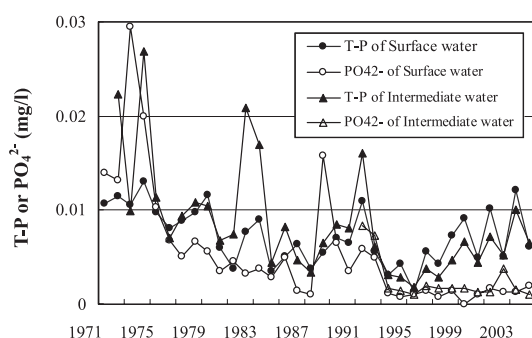


図-11 ダム前地点の表層と中層におけるT-Pと PO_4^{3-} 濃度（年平均）の変遷

Fig.11 Transition of T-P and PO_4^{3-} (annual mean) in surface water and intermediate water at dam point.

*Cyclotella*との競争においては、P欠乏以外の他の要素に依存していることが考えられる。

Sarosら（2005）は、*Asterionella*と*Fragilaria*との優位な増殖においてNの豊富な存在が重要であることを指摘している。小河内貯水池におけるT-Nの値は高く（東京都環境局，2004b），*Asterionella*と*Fragilaria*が優位に増殖する条件を有している。

*Anabaena*と*Microcystis*は、アオコの主要な形成種である。いずれもその毒性から捕食されにくく、ガス胞を有し（Reynolds *et al*, 1987）で、栄養素の確保や光環境に合わせ表層と底層の間を浮遊する能力が備わっている（Gant, 1974）。また、*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（Mcqueen and Lean, 1987）。*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（Horne, 1975）。このように、藍藻類は周辺環境の化学的特性を変化させる能力が高い（Vincent, 1989）。つまり、対象地の集水域にみられ

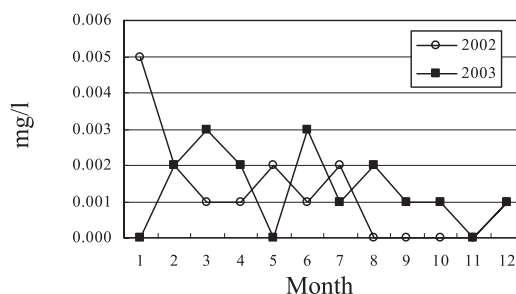


図-12 ダム地点表層における PO_4^{3-} 濃度の季節変動

Fig.12 Seasonal variation of PO_4^{3-} in production layer of dam point.

るような、水質保全策により流入河川に含まれる栄養塩類が減少（下水道普及による効果）したり、珪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（春から夏）後に、藍藻類の増加があることは矛盾しない。

*Anabaena*と*Microcystis*はダム貯水池起源の水質障害における代表的な植物プランクトンであり、また、これらの発生状況によっては富栄養湖への移行と水質判断される。そのため、これらの藍藻の出現状況を把握することは、プランクトンからみた水質段階の推移を明らかにするために必要である。次には、ダム地点における藍藻種の出現特性と種の変化について検討する。

3. 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

表-2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（N/ml）を示す。1992年に着目すると、その前後で種が全く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、これまで出現のなかった*Anabaena*と*Microcystis*の2種類のみの出

Stage	Month												Dominate plankton	Pattern
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1978 ～1992	a) b) 												a) <i>Bacillariophyceae</i> b) <i>Chlorophyceae</i>	First
1993 ～1998	a) 												a) <i>Bacillariophyceae</i>	Second
1999 ～2003	a) c) 												a) <i>Bacillariophyceae</i> c) <i>Cyanophyceae</i>	Third

破線は、出現頻度が低いことを示す。

The broken line part shows relatively low appearance frequency.

図-13 小河内ダム貯水池の優占種プランクトンにみる水質段階の推移パターン

Fig.13 The patterns of dominate plankton's transition and change of the plankton seasonal growth.

表-3 ダム前地点における藍藻類の月別出現状況の変遷

Table 3 Transition of number and species of Cyanophyceae at dam point at 1974-2003.

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

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ことが多く、生長が終わるのも遅い傾向がある。*Anabaena*は*Microcystis*と比べて適温は低い。年間最大数をみると、年々その数が増加傾向にあり、1999年以降には、優占種化するようになったことがわかる。

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、小河内貯水池では、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理由としては、*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できる。種の急激な変化の原因としては、1992年より始まった選択取水の施行による流動の変化に起因するものと、発生種の明らかな違い（1992年より*Microcystis*と*Anabaena*が発生）から推測されるが、その具体的な仕組みは現時点ではわかりえない。

4. ダム地点の優占種プランクトンからみた水質段階の推移パターン

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（図一10）。緑藻類の優占種は、選択取水が行われるようになった1992年以前に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ほとんど見られていない。1999年以降から、藍藻類の*Anabaena*と*Microcystis*が優占種化している。

1978年～2003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～10月）。1999年以降においては、本来、緑藻類が優占種化する7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内貯水池に対して影響の小さいものとする、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、ほとんどの珪藻類と緑藻類が浮遊性を持たないことに着目すると、台風や大雨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図一11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。

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、虫藻からなる。夏には藍藻を主体と

した「水の華」が形成される。

今回明らかになったパターン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、吉村（1937）の説に従うと、1978年～2003年における小内ダム貯水池の水質汚濁段階の進行を明らかに表わす結果となった。

Ⅸ. まとめ

近年、水質汚濁化現象が目立つ小内貯水池を対象に、1974年～2003年の30年間にわたるプランクトンの出現に関わる基本データの整理をするとともに、貯水池の水質汚濁化の進行について検討した。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～1992年）→珪藻類（1993年～1998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、特定種の藍藻の増加に伴う水質汚濁化の進行段階にあることが認められた。

ダム前地点に出現する藍藻類が*Anabaena*属と*Microcystis*属に変化した1992年は、同時に“選択取水”（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。同年以降の「水の華」の出現状況においては、貯水池全域で*Anabaena*属と*Microcystis*属が毎年のように出現している。また、1999年以降には、ダム前地点において*Anabaena*属と*Microcystis*属が優占種化するようになった。表層の水を取水するようになり貯水池の流動機構は大きく変化し、藍藻の出現にとって好条件の環境が得られた。このことから、特定種の藍藻の増加に伴う水質汚濁化の進行原因として、ダム貯水池の運転管理の変化の関与が考えられた。

本稿では、生産層におけるプランクトン数密度を対象に議論してきた。プランクトン種によっては、水柱の深い場所に生息する底生種（たとえば、*Synedra ulna*）があり、対象貯水池においてもこの種が優占種化するなど、無視できない存在であることを考慮すると、小内貯水池のプランクトン構成と水質汚濁化の現状とを把握するには鉛直方向のプランクトン分布を明らかにする必要がある。

今後は貯水池の鉛直方向におけるプランクトンをはじめとする水温・化学物質等の分布を明らかにした上で、水質汚濁化のメカニズムを明らかにしてゆく予定である。

謝辞

本稿で用いた水質調査のデータの多くは、東京都水道局水道水源林事務所より貸与いただいたものです。その貸与の際には、同事務所所長及び技術課の皆様にご協力を賜りました。また、査読者の方々には、重要な指摘を頂き勉強になりました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- Gant, G. G. 1974. Diurnal mixing and the vertical distribution of phytoplankton in a shallow equatorial lake. *Lake George, Ugand.*
- Horne, A. J. 1975. The Ecology of Claer Lake Phytoplankton. Special report the Clear Lake Algal Research Unit, *Lakeport, Calif.*: 116.
- Hutchinson, G. E. 1957. A Treatise on Limnology. *Geography, Physics and chemistry* II : 1015.
- Humphries S.E. and Lyne V.D. 1988. "Cyanophyte blooms : The role of cell buoyancy". *American Society of Limnology and Oceanography* 30 (1) : 79-91.
- 牧野育代・松永恒雄・梅干野晃 (2005) : 関東山地の水道水源林における渓流水の水質—渓流水の水質形成に及ぼす諸要因の検討—, 水文・水資源学会誌, 第18巻, 4号, pp. 424-434.
- 牧野育代・寶 馨・立川康人 (2006) : 流入河川の水質特性と冷水対策が貯水池水質に及ぼす影響, 水工学論文集, 第50巻.
- 丸山晃 (1997) : 原生動物の世界, 内田老鶴圃出版.
- Mcqueen, D.J. and Lean D.R.S. 1987. Influence of water temperature and nitrogen to phosphorous ratios on the dominance of blue-green algae in Lake St. Geroge, Ontario. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44 : 598-604.
- 乙幡恵 (1967) : 小河内貯水池におけるプランクトンの経年変移, 水道協会雑誌, No.396, pp. 23-30.
- Reynolds, C.S., R.L.Oliver, and A.E.Walsby. 1987. "Cyanobacteria Dominance: The Role Buoyancy Regulation in Dynamic Lake Environments." *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.* 21 : 379-390.
- Saros J.E., Michel T.J., Interlandi S.J., and Wolfe A.P. 2005. Resource requirements of *Asterionella Formosa* and *Fragilaria crotonensis* in oligotrophic alpine lakes: implications for recent phytoplankton community reorganizations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62 : 1681-1689.
- Tilman D. 1982. Resource Competition and Community Structure. *Princeton.*
- 東京都環境局 (2004a) : 奥多摩周辺の旅館, キャンプ場の排水実態調査結果, 多摩環境事務所環境改善課, 16環多改第197号.
- 東京都環境局 (2004b) : 平成15年度公共用水域及び地下水の水質測定結果 (総括編).
- 東京都環境局 (2006) : 平成16年度公共用水域及び地下水の水質測定結果 (データ編).
- 東京都水道局 (1974—2006) : 小河内貯水池管理年報.
- 東京都水道局 (2005) : 小河内貯水池流動及び底質栄養塩類溶出調査.
- 東京都水道局 (2006) : 平成16年度水質年報.
- 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 (2006) : 第10次水道水源林管理計画.
- 東京都水道局 (1992) : 多摩川冷水対策同水路築造工事.
- Urabe, J. and Maruyama, T. 1986. Prey selectivity of two cyprinid fishes in Ogochi Reservoir. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.* 52: 2045-2054.
- Urabe, J. and Murano, M. 1986. Seasonal and horizontal variations in the zooplankton community of Ogochi Reservoir, Tokyo. *Bull. Plankton Soc. Jpn.* 33: 101-112.
- 占部城太郎 (1997) : 奥多摩湖における浮遊微生物群集の動態と物質循環に果たす役割, とうきゅう環境浄化財団研究助成, No.186.
- Vanni M.J. and Temte J. 1990. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *American Society of Limnology and Oceanography* 35 (3) : 697-709.
- Vincent, W. F. 1989. "Cyanobacterial growth and dominance in two Eutrophic lakes; review and synthesis". *Arch. Hydrobiol. Beih* 32: 239-254.
- WHO (2004) : 飲料水水質ガイドライン改訂版.
- 吉村信吉 (1937) : 湖沼学, 三省堂.

(受付：2006年8月7日, 受理：2007年2月8日)

Transtation of Water Quality Class in Ogochi Dam Reservoir in Terms of Status Changes of Phytoplankton in Production Layer

Ikuyo MAKINO ¹⁾ Kaoru TAKARA ²⁾ Yasuto TACHIKAWA ²⁾

¹⁾ Graduate School of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University
(Kyoto 615-8530, Japan)

²⁾ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
(Uji 611-0011, Japan)

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 species. This paper revealed that the recent water pollution phenomenon is caused by the third pattern, which indicates an increase of cyanobacteria. After the enforcement of "selective withdrawal" in 1992, *Anabana* and the *Microcystis* became the dominant species in 1999. The selective withdrawal has changed the flow mechanism of the reservoir. It was considered that management of dam reservoir operation was related to the appearance of *Anabaena* and *Microcystis*, which cause the water pollution.

Key words : Ogochi dam reservoir, phytoplankton, water pollution , selective withdrawal