

(61) 貯水池からの表層放流がアオコ発生に 及ぼす影響

北澤 弘美^{1,2*}・富永 和樹³・北田 真吾⁴・斉藤 滋⁵・
佐藤 親房^{1,4}・小泉 明¹

¹首都大学東京大学院都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

²東京都水道局金町浄水管理事務所 (〒125-0043 東京都葛飾区金町浄水場 1-1)

³東京都水道局三郷浄水場 (〒341-0058 埼玉県三郷市彦江 3-12-2)

⁴東京都水道局水質センター (〒113-0033 東京都文京区本郷 2-7-1)

⁵東京都水道局水源管理事務所 (〒198-0088 東京都青梅市裏宿町 600)

*E-mail: kitazawa-hiroyoshi@waterworks.metro.tokyo.jp

東京の小河内貯水池では、1990年以降、藍藻類のアオコが毎年発生しており、その発生域と発生期間は拡大及び長期化の傾向にある。1990年以降の貯水池管理で注目されるのは、1992年に冷水対策のため4月から11月までのダム放流水深を変更し、表層水を放流するようにしたことである。そこで、これまでのアオコの発生状況を整理するとともに、表層放流とアオコの発生との因果関係について検討した。その結果、表層放流が夏期における貯水池表層の水温上昇をもたらし、より高温を好むアオコ形成藍藻類の増殖に適した条件になったと推定された。また、表層放流に伴って二次水温躍層の位置が上昇し、光の当たる藻類生産層への栄養塩類の補給量が増加した。その結果、アオコを形成する藍藻類が増殖しやすくなったと推定された。

Key Words : thermocline, reservoir, surface water discharge, water bloom, blue-green algae

1. はじめに

小河内貯水池は奥多摩湖ともいい、東京都西多摩郡奥多摩町にある人造湖である。国内最大級の水道専用貯水池として1957年11月に竣工し、東京都民の貴重な「水ガメ」の一つとなっている。その集水区域は東京都奥多摩町、山梨県丹波山村、小菅村及び甲州市の4市町村に及んでおり、流域面積は262.8km²、有効貯水量は満水時

で1億8540万m³である。表-1に小河内貯水池の概要を示す。

小河内貯水池に対しては1998年度から「湖沼に係る環境基準」が適用され、AA類型に指定されている。しかし、2003年度の公共用水域の水質測定結果¹⁾を見ると、表-2からわかるようにCOD(環境基準値:1mg/L以下)が基準値を超過している。また、「窒素・りんに係る環境基準」については、総りんがI類型(環境基準値:

表-1 小河内貯水池の概要

堤 体		貯 水 池	
型 式	非越流型直線重 力式コンクリートダム	流域面積	262.8km ²
高 さ	149m	満水面積	4.25km ²
堤頂長	353m	満水周長	45.37km
堤頂幅	12.6m	満水延長	13.87km
敷幅	131.12m	満水位標高	526.5m
堤頂標高	530m	最大水深	142.5m
コンクリート体積	1,676 千 m ³	有効水深	101.5m
		有効貯水量	185 百万 m ³

表-2 小河内貯水池の水質 (2003年度平均値)¹⁾

	麦山		ダム前定点		
	表層	底層	表層	中層	底層
透明度 (m)	4.4	—	5.4	—	—
pH (—)	7.9	7.1	7.7	7.2	7.0
DO (mg/L)	10.6	7.4	9.8	8.6	6.2
BOD (mg/L)	1.4	0.5	0.9	0.5	<0.5
COD (mg/L)	3.5	1.4	2.7	1.2	1.1
浮遊物質 (mg/L)	3	3	1	1	1
総窒素 (mg/L)	0.63	0.60	0.58	0.58	0.59
総りん (mg/L)	0.014	0.010	0.008	0.006	0.008

0.005mg/L 以下) に指定されているが、環境基準は未達成である。

小河内貯水池の集水区域では、これまで下水処理場を建設して法令に基づく排水基準よりも厳しい水質目標を放流水に設定したり、養魚場に沈殿池を設置して魚糞回収機を導入したりしてきた。その結果、流入河川や貯水池の理化学的水質に顕著な改善はないものの、大きく悪化することなく推移している。しかし、小河内貯水池では、1990 年以降、藍藻類の *Microcystis* や *Anabaena* が異常増殖してアオコが毎年発生しており、その発生域と発生期間は拡大及び長期化の傾向にある。1995 年には湖水にカビ臭が確認されるようになり、2001 年には放流水からもカビ臭物質が検出されるようになった。

1990 年以降の貯水池管理で注目されるのは、1992 年以降、冷水対策のため春期から秋期までのダム放流水深を表層に変更したことである。このことが、流入河川の水質に大きな経年変化がないにもかかわらず、アオコの発生が目立つようになってきた原因として深く関与していると考えられる。小河内貯水池の水質変化に対しては、主成分分析の結果から流入河川の水温上昇と表層水の放流が最も影響を及ぼしているとする研究報告がある²⁾。また、小河内貯水池における藻類の出現状況の変遷について解析し、選択取水の変更が藍藻類を増加させたとする報告がある^{3), 4)}。そこで本論文では、藻類の増殖に影響を及ぼす要因がどう変化したかという観点から解析を行い、小河内貯水池の放流水深の変更がアオコ発生に及ぼす影響について解明した。

2. 方法

東京都水道局が毎年公表している小河内貯水池管理年報⁵⁾に基づいて解析を行った。解析に用いたのは、ダム放流水(水じょく池)、ダム前定点、丹波川、小菅川及び峰谷川における水質調査結果と放流量のデータである。丹波川、小菅川、峰谷川は、流域に集落が多い主要な流入河川である。この3河川の流域面積(それぞれ 127.3

km²、42.3km²、15.5km²) が貯水池全体の 70%を占めている。これらのほかに大きな流入河川として後山川(流域面積 30.9km²、全体の 12%)があるが、人為的な負荷がほとんどないため解析の対象から除外した。水質調査地点を図-1 に、水質調査の項目と頻度を表-3 に示す。

ダム前定点における藻類数は、生産層[小河内貯水池では透明度の3倍(小数点以下は四捨五入)までの水深(m)としている。]における平均的な値(個/mLあるいは群体/mL)として表した。ただし、3倍水深が10mを超えた場合、10m以深の藻類数は10mと同じと仮定して計算した。例えば透明度が2.2mの場合、生産層は7mになる。藻類数は0、2、5、10mで測定し、7mの藻類数は5mと7mの値から内挿して求める。0、2、5、7mの藻類数をa、b、c、dとすると、生産層の藻類数Nは、

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

となる。

3. 放流水深の変更

ダム完成以来、小河内貯水池からの放流は満水面より約74m下の発電用取水管(多摩川第1発電所取水管)から行っていた(中層放流)ため、貯水池下流の多摩川の夏期水温が約14℃と低く、「アユの成長や水遊びに支障をきたしている」などとして地元から強い改善要望が出されていた。そうした要望を受けて東京都水道局は、抜本的な対策として貯水池表層の温かい水を放流する新導水路を建設し、1992年7月から多摩川の夏期の冷水状態を改善した。この導水路は、他水系の渇水時などに放流量を増やす目的でダムの左岸側に設けられていた第2号取水施設と多摩川第1発電所とを結ぶもので、4月1日から11月30日までの間、貯水池表層の温かい水を多摩川第1発電所に送っている。この導水路の運用開始に伴い、貯水池の下流は自然河川と同様の水温となり、川遊びやキャンプに適した環境となった。

小河内貯水池の断面図と取水口の位置を図-2 に示す。

表-3 水質調査の項目と頻度

調査地点	項目	頻度
ダム放流水(水じょく池)	水温	毎日
ダム前定点	気温、水温、藻類、透明度	原則 週1回
表層(0m)、2m、5m、10m、 10m以下10mごとに底層 (池底から2m上)まで	総窒素(1987年から)、 アンモニア態窒素、総りん、 りん酸態りん(0mのみ)	原則 月1回
丹波川(流域面積127.3km ²)	水温、総窒素(1987年から)、 アンモニア態窒素、	
小菅川(流域面積42.3km ²)	総りん、りん酸態りん	
峰谷川(流域面積15.5km ²)		

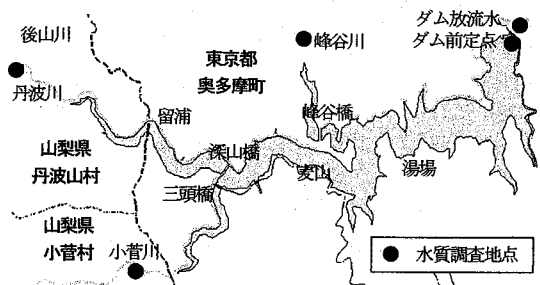


図-1 水質調査地点

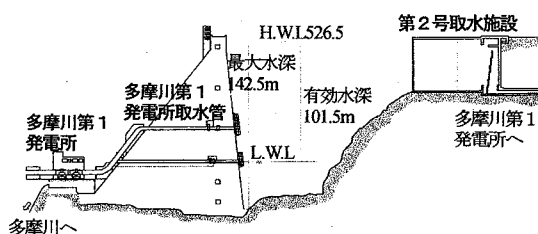


図-2 小河内貯水池の断面図

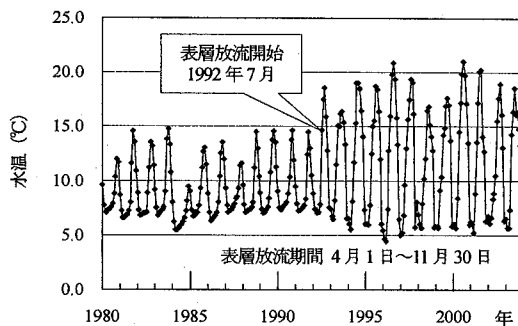


図-3 放流水温の推移

表-4 小河内貯水池における水の華発生状況

年	発生期間	発生日数 (日)	発生域				発生藻類												その他
			丹波川 流入部	小昔川 流入部	峰谷川 流入部	湖心部	珪藻類			緑藻類			藍藻類		黄金藻類	渦鞭藻類	褐鞭藻類		
							<i>Synedra</i>	<i>Fragilaria</i>	<i>Cyclotella</i>	<i>Chlamydomonas</i>	<i>Pandorina</i>	<i>Volvox</i>	<i>Eudorina</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Uroglena</i>	<i>Peridinium</i>	<i>Cryptomonas</i>	
1975	05.15～09.28	12		○													●	●	
1976	05.25～06.06	13		○														●	
1977	04.26～11.14	77	○	○	○					●	●						●		●
1978	06.08～07.19	21		○						●	●								
1979	05.07～11.16	89	○	○	○					●							●	●	
1980	05.12～10.27	110	○	○	○	○				●	●						●	●	
1981	05.06～10.19	41	○	○	○	○										●	●		
1982	04.09～09.13	6		○	○	○											●		
1983	07.22～09.26	54	○	○	○	○				●	●						●		
1984	04.05～09.13	63	○	○	○	○				●			●						
1985	07.29～08.08	11		○						●									
1986	07.07～10.09	42	○	○	○												●		
1987		0																	
1988		0																	
1989	08.29～10.04	37				○	●												
1990	06.13～11.30	135	○	○	○	○				●		●		●		●	●		
1991	07.02～09.07	43	○	○	○					●	●	●		●			●		
1992	07.16～11.30	127	○	○	○	○				●	●			●	●		●		
1993	05.06～10.26	132	○	○	○	○						●		●			●		●
1994	04.28～11.17	61	○	○	○	○								●			●		●
1995	05.12～10.31	129	○	○	○	○						●			●		●		●
1996	07.23～10.16	86	○	○	○	○								●	●		●		
1997	07.17～10.14	90	○	○	○	○		●						●	●			●	
1998	07.08～09.28	83	○	○	○	○								●	●				
1999	07.26～10.31	97	○	○	○	○		●		●				●	●		●		
2000	05.27～01.14	228	○	○	○	○				●				●	●		●		●
2001	05.01～10.28	181	○	○	○	○			●				●	●	●		●		●
2002	04.29～01.20	179	○	○	○	○				●				●	●		●		
2003	07.25～11.14	136	○	○	○	○				●				●	●		●		

(注) 丹波川流入部とは深山橋まで、小昔川流入部とは三頭橋まで、峰谷川流入部とは峰谷橋まで、湖心部とは深山橋からダムまでの範囲をいう(図-1参照)。

また、図-3に放流水温の月平均値の推移を示す。表層放流を開始してから夏期の放流水温は数℃上昇したが、冬期の放流水温はやや低下した。冬季の水温が下がったのは、表層放流に伴って夏期における水温躍層の位置が上昇し、躍層下にある入れ替わりのない低温の水塊量が増大した影響で、循環期における貯水池の水温が以前より低くなったためである。

4. 小河内貯水池における水の華発生状況

小河内貯水池では、春から秋までの期間を中心に毎年のように水の華が発生している。表-4に1975年から2003年までの発生状況を示した。1979年までは水の華の発生が河川の貯水池への流入部に限られていたが、次第に湖心部でも発生するようになり、表層放流を開始した1992年以降は毎年湖心部でも発生している。水の華を形成した藻類は、1983年までは緑藻類の *Chlamydomonas*、*Pandorina*、黄金藻類の *Uroglena*、渦鞭藻類の *Peridinium*、褐鞭藻類の *Cryptomonas* などであり、すべて鞭毛を持つ運動性のものであった。しかし、1984年に初めて藍藻類の *Microcystis* による水の華が発生し、1990年以降は毎年藍藻類による水の華が発生している。表層放流を開始した1992年からは藍藻類の *Anabaena* による水の華も発生するようになった。

藍藻類の *Microcystis* や *Anabaena* が著しく増殖すると、それらの藻類が水面付近に集積し、帯状あるいは一面に緑色のペンキを流したような状態になる。本論文ではこれらの藍藻類による水の華を特にアオコと記述することとする。

図-4は水の華の年間発生日数の推移を示したものである。図-4では、藍藻類による水の華の発生日数とその他の藻類による水の華の発生日数とを分けて表示した。この図から、表層放流の開始後、藍藻類による水の華であるアオコの発生日数が増加したことがわかる。表層放流開始以前にも、1984年、1990年、1991年に藍藻類による水の華は発生しているが、年間の発生日数は24~37

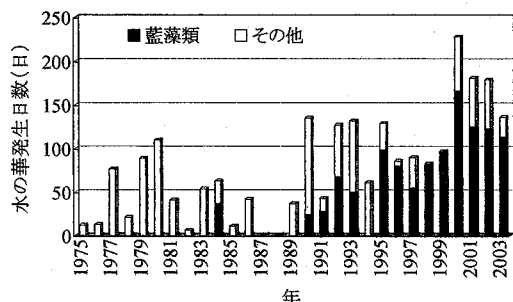


図-4 水の華の年間発生日数の推移

日であった。しかし、表層放流を開始した1992年以降は、1994年を除いて毎年藍藻類による水の華が発生し、年間発生日数も50~166日と長期化している。

図-5は、ダム前定点の生産層における主要な藻類の年間最大数の推移である。ここでいう年間最大数とは、生産層における藻類数の月平均値の年間最大である。*Asterionella*、*Cyclotella*、*Fragilaria*、*Rhizosolenia*、*Synedra* が珪藻類、*Chlamydomonas* と *Scenedesmus* が緑藻類、*Microcystis* と *Anabaena* が藍藻類、*Mallomonas* が黄金藻類、*Peridinium* が渦鞭藻類、*Cryptomonas* が褐鞭藻類である。どの藻類の数も変動が大きく、年によって2桁から3桁の変動がある。ほとんどの藻類で特徴的な傾向は認められない中で、唯一の例外は藍藻類の *Microcystis* と *Anabaena* である。表層放流開始に呼応して *Microcystis* は1993年から、*Anabaena* は1992年からダム前定点で出現し始め、その検出数は増加傾向にある。表層放流開始直後は、年間最大数が1mLあたり数群体であったのに対し、年による変動が大きいとはいえ、10年後には1mLあたり数100群体にまで増加している。

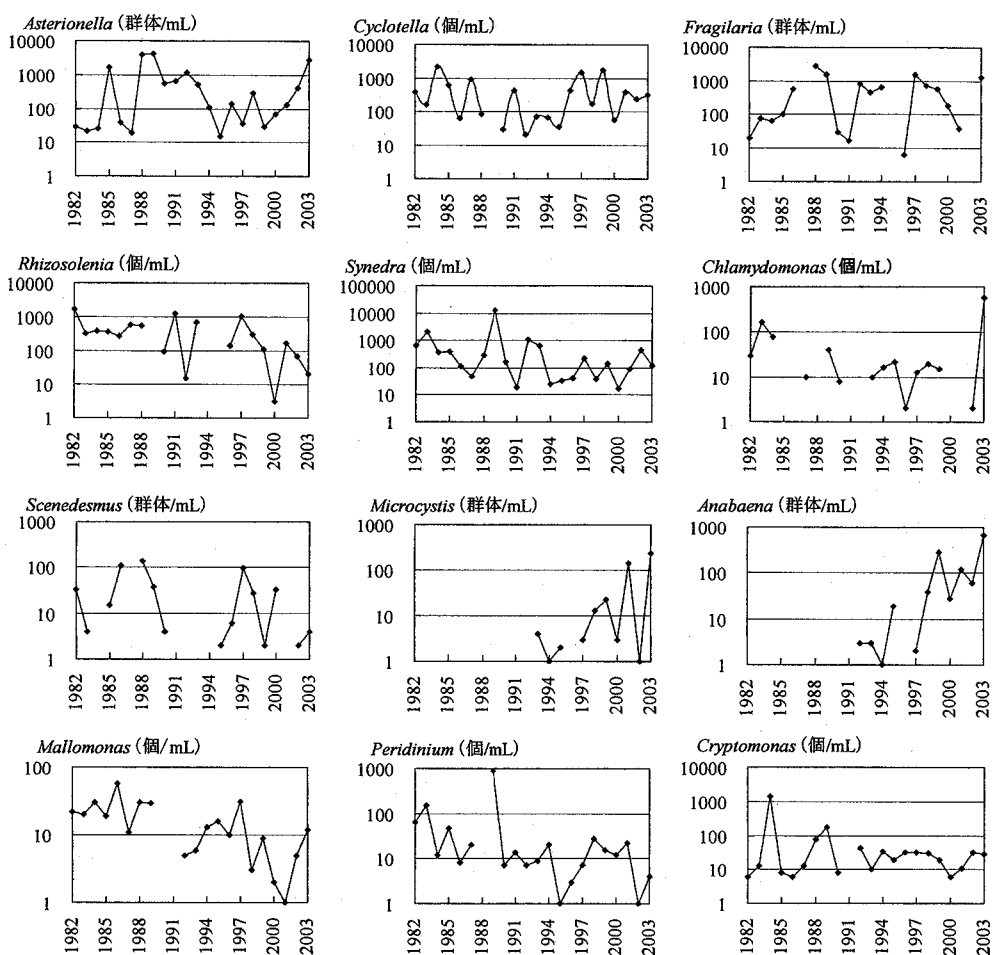
5. 表層放流とアオコ発生との関係

前述のように、小河内貯水池では表層放流を行うようになってからアオコの発生が顕著になってきた。藻類の増殖に影響を及ぼす要因は、主に湖水の滞留時間、水温、栄養塩類、光である。表層放流を行うことによってこれらの要因がどう変化し、アオコの発生に都合のよい条件を与えることになったかを考察する。

(1) 滞留時間

藻類の増殖には、流入水の貯水池内での滞留時間が関係する。藻類が増殖するより速く貯水池の水が入れ替われば、アオコの発生は抑制される。図-6は1989年(中層放流)と1999年(4~11月に表層放流)のダム前定点における水温の垂直分布を比較したものである。この図の水温分布からわかるように、小河内貯水池では表層放流を行うようになってから成層期(特に夏期と秋期)の二次水温躍層の位置が上昇し、入れ替わらない水の量が増加したので、夏期と秋期には河川からの流入水の滞留時間がかかり短くなった。表層放流の結果、水が入れ替わるのが水深20mまでの層になったとすると、貯水率90%のとき約6460万 m^3 の水が入れ替わることになる。

表-5は、小河内貯水池の表層放流時(1992~2003年、4~11月)における各年の一日最大放流量と一日放流量の月平均値を示している。洪水時には一時的に放流量が3000万 m^3 /日を超えた日もあったが、これは洪水時でもきわめてまれな事例である。表-5に示した12年間の月



(注) 年間最大数がプロットされていない年は、1年を通じて1個/mL以上または1群体/mL以上の藻類が計数されなかったことを示す。

図-5 生産層（ダム前定点）における主要藻類の年間最大数の推移

平均値を見ると、最大でも 372 万 m^3 /日である。流入量と放流量が同じと仮定すると、放流量 372 万 m^3 /日のとき水深 20m までの層における流入水の平均滞留時間は 17.4 日である。放流量が 26 万 m^3 /日のときには、平均滞留時間は 248 日になる。実際の水の動きは完全混合ではないので、一部の水の滞留時間ももっと長くなる。

一方、アオコを発生させる藍藻類の増殖速度は、最大比増殖速度で比較した場合、珪藻類や緑藻類よりも遅い傾向がある⁶⁾。それでも、自然界で藍藻類の増殖速度を測定した事例⁷⁾では、*Microcystis* の倍加時間 (doubling time) が 2.1~4.4 日 (15~20℃)、*Anabaena* の倍加時間が 2.0~9.9 日 (11~26℃) と報告されている。この倍加時間と流入水の平均滞留時間とを比べると、洪水時を除けば平均滞留時間の方がずっと大きい。したがって、表層放流に伴って流入水の滞留時間が短くなったものの、アオコを発生させる藍藻類の増殖を抑制することはない

表-5 表層放流時における一日最大放流量及び一日放流量の月平均値

年	一日最大放流量 (4~11月) $\text{m}^3/\text{日}$	一日放流量の月平均値 (4~11月) $\text{m}^3/\text{日}$
1992	4,320,000	532,000~1,240,000
1993	1,860,000	558,000~1,410,000
1994	2,290,000	352,000~1,330,000
1995	1,840,000	337,000~1,230,000
1996	1,810,000	259,000~ 739,000
1997	1,840,000	347,000~ 719,000
1998	14,200,000	636,000~3,350,000
1999	13,300,000	432,000~2,160,000
2000	1,960,000	393,000~ 822,000
2001	32,600,000	428,000~3,720,000
2002	3,530,000	359,000~1,190,000
2003	6,020,000	367,000~2,080,000

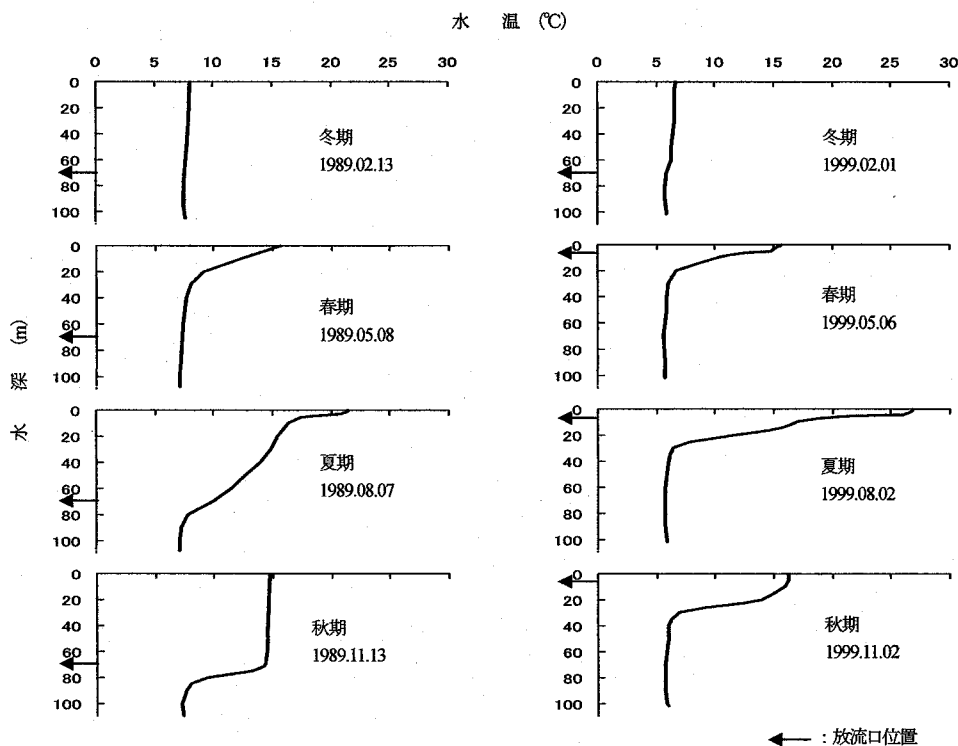


図-6 表層放流開始前(左)後(右)のダム前定点における水温の垂直分布

と考えられる。

(2) 水温

増殖に適した水温は、藻類の種類によって異なる。アオコを形成する藍藻類は、珪藻類や緑藻類に比べて、増殖に適する水温が高いとされている⁸⁾。また、水温が25°C以上になると、*Microcystis*によるアオコが発生すると言われている⁹⁾。Konopkaら¹⁰⁾は、Mendota湖から分離した3種の藍藻(*Microcystis*属、*Anabaena*属、*Aphanizomenon*属)の増殖速度が、25°Cで最大となることを示している。

藤本ら¹¹⁾は、日本全国の211湖沼を対象に、優占的に増殖する藻類と水温との関係を調査している。その結果では、水温の上昇とともに藍藻類の優占率が高くなり、水温25°C未満の場合と25°C以上の場合とでは、藍藻類の優占率に有意な差があった。一方、緑藻類の優占率は水温による違いが認められなかった。また、珪藻類の優占率は水温30°C以上で著しく低下し、珪藻類が高温に適応しないことが明らかとなった。

千葉県の高滝ダム貯水池の例¹²⁾では、藍藻類の出現は水温が高い夏期に多く、15°C以下の低水温期には少なくなった。それに対して、珪藻類は低水温期に多く見られ、20°C以上になると減少する傾向が

あった。緑藻類は、優占種が藍藻類から珪藻類、あるいは珪藻類から藍藻類に切り替わる時期に増加する傾向があった。

Reynolds¹³⁾は、隔離水塊実験において藍藻類、珪藻類、緑藻類をはじめとする12種類の藻類を出現水温に基づいて順位付けた。それによると、藍藻類の*Microcystis*が最も高水温を好み、珪藻類の*Asterionella*が最も低水温を好んで出現した。藍藻類の*Anabaena*も高温側で出現していた。

こうしたことから藤本ら¹⁴⁾は、水温の上昇に伴い緑藻類、珪藻類から藍藻類へと生物相が変化し、藍藻類のなかでも高温耐性を有する*Microcystis*属等へと種の変遷が起これと考えられるとしている。

図-7は、小河内貯水池のダム前定点における4月から10月の水温の垂直分布(毎週1回定期的に測定)を表層放流の開始前と開始後とで比較したものである。表層放流開始前としては1986~1989年の4年間を、表層放流開始後としては1999~2002年の4年間を例示した。これら以外の年も傾向は同様であった。図-7からわかるように、表層放流を実施してからは表層放流開始前に比べて25°C以上の水温を観測した回数が増加している。毎週1回の測定において表層のどこかで水温が25°C以上になった年間回数は、1986~1989年がそれぞれ2、5、0、0回であったの

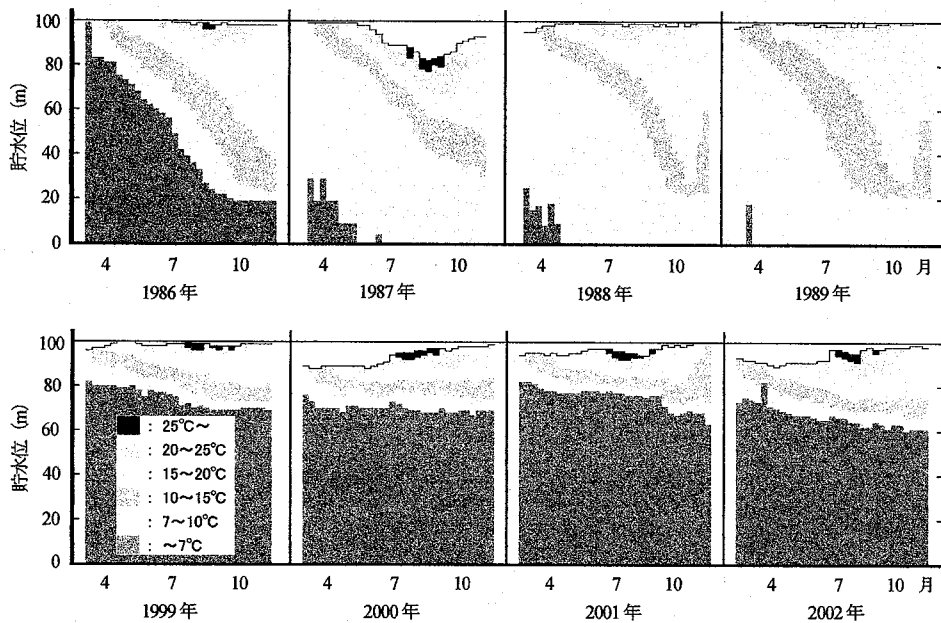


図-7 ダム前定点における表層放流実施前（上段）後（下段）の水温分布（4～10月）

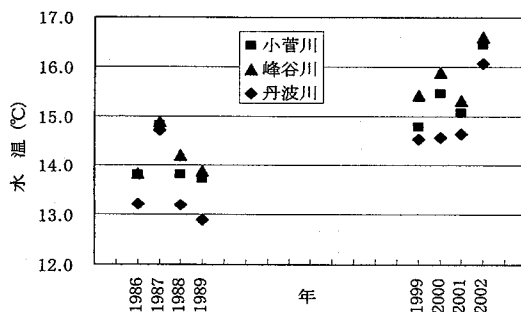


図-8 4～10月における流入河川の平均水温

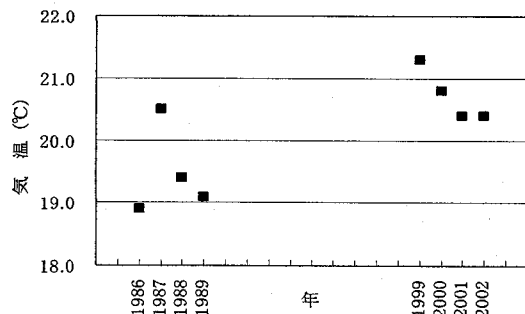


図-9 4～10月におけるダム前定点の平均気温

に対し、1999～2002 年はそれぞれ 5、7、7、5 回になった。成層期においては、湖水の流動が二次水温躍層より上の部分で起こる。表層放流を行うと二次水温躍層の位置が上昇するため、日射熱が伝わる湖水の容積が小さくなり、躍層より上の部分の水温が上昇するようになったと考えられる。なお、1987 年は例年になく夏期の貯水位が低かった年である。二次水温躍層の位置が前後の年とほとんど変わらないため、水位の低下で日射熱が伝わる湖水容積が小さくなり、その結果水温の上昇を招いたと考えられる。

一方、図-8 及び図-9 は、図-7 に例示した年の 4 月から 10 月における流入河川の平均水温、及びダム前定点の平均気温を図示したものである。牧野ら²⁾が指摘しているとおり、表層放流開始後はそれ以前に比べて流入河川の水温が上昇した。また、図-9 からわかるように、気温

も以前に比べて上昇した。1999～2002 年 4～10 月の流入河川の水温とダム前定点の平均気温は、1986～1989 年 4～10 月と比べるとどちらも 1℃程度は上昇している。この流入河川の水温上昇と気温の上昇も表層放流開始後の貯水池水温の上昇に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

以上のことから、流入河川の水温上昇、気温の上昇、及び表層放流に伴う二次水温躍層の位置の上昇が相乗的に作用し、貯水池表層の水温が 25℃以上になる日数が増加し、アオコを形成する藍藻類である *Microcystis* や *Anabaena* の増殖に都合のよい条件を作り出したと考えられる。

(3) 栄養塩類

藻類の増殖にとって窒素、りんといった栄養塩類は必

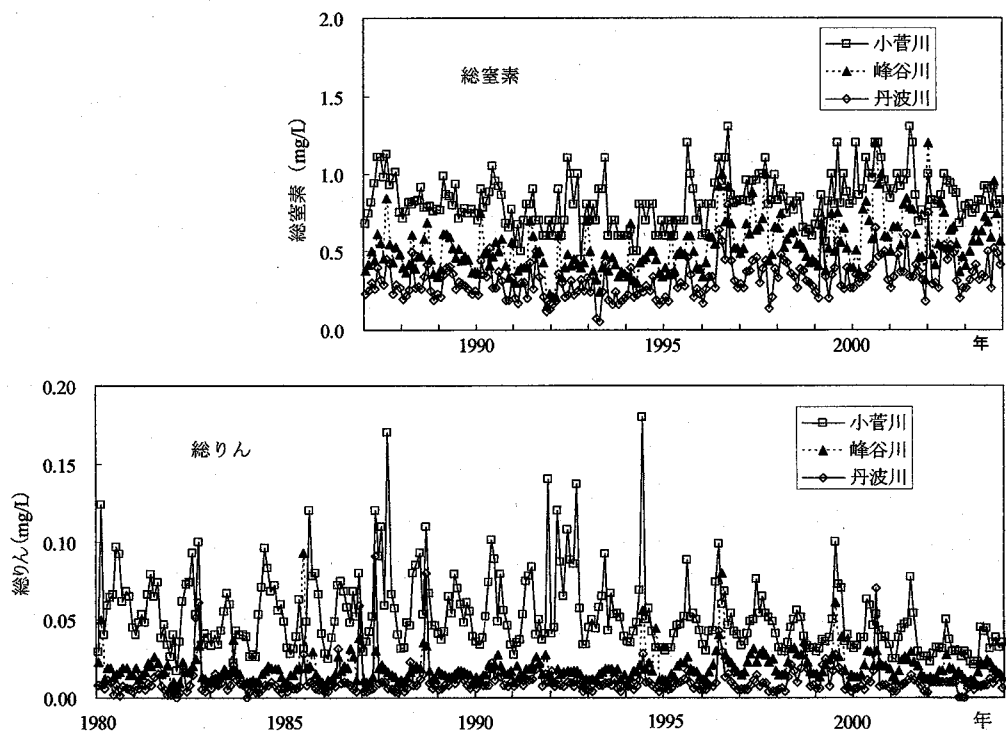


図-10 流入河川における総室素・総りん濃度の経年変化

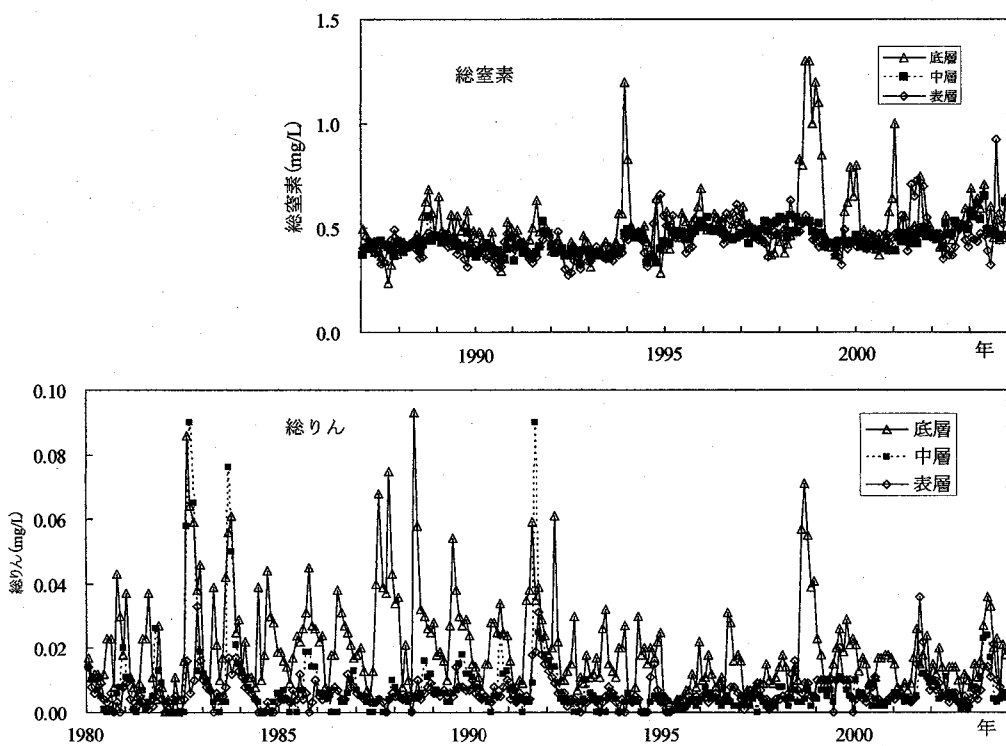


図-11 ダム前定点における総室素・総りん濃度の経年変化

須のものである。一般に貧栄養の条件では、藍藻類は窒素、りんをめぐる他の藻類との競争に敗れるために優占しないとされている¹⁵⁾。閉鎖性水域で窒素、りん濃度が増加すると、藍藻類によるアオコが発生するようになる。高村¹⁶⁾は、藍藻の *Microcystis* 属が優占する湖沼の総窒素、総りん濃度をそれぞれ 0.5mg/L 以上、0.08mg/L 以上と報告している。

また、藻類にとって窒素とりんは水中で不足しがちであるが、そのどちらが藻類増殖の制限要因になっているかは、窒素とりんの比 (N/P 比) によって決まる。OECD¹⁷⁾は、N/P 比 17 以上ではりん制限、N/P 比 10 以下では窒素制限であるとしている。日本では N/P 比 20 以上がりん制限、N/P 比 10 以下が窒素制限で、N/P 比 10 以下のところでは主に藍藻類の水の華が出現しているとの調査結果がある¹⁸⁾。藍藻類の中には *Anabaena* のように窒素固定を行うものがあり、このことが窒素制限下で藍藻類の水の華が出現する理由の一つと考えられる。

図-10 は主要流入 3 河川における総窒素、総りん濃度の経年変化である。毎月 1 回実施している定期試験の結果を、総窒素は測定を開始した 1987 年から、総りんは 1980 年からプロットしたものである。総窒素、総りんともに小菅川の濃度が最も高く、峰谷川、丹波川の順に低くなっている。小菅川では総窒素は 0.8mg/L 前後で横ばいであり、総りんは 0.06mg/L 前後から 0.04mg/L 前後に

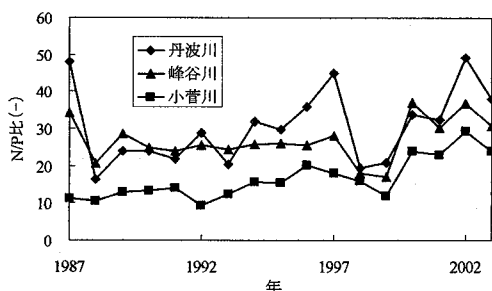


図-12 流入河川水の N/P 比 (7,8,9 月の平均値) の推移

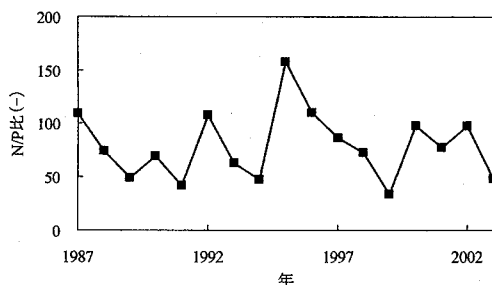


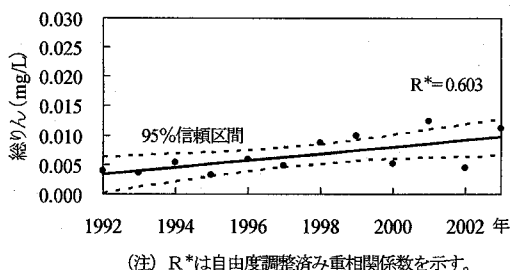
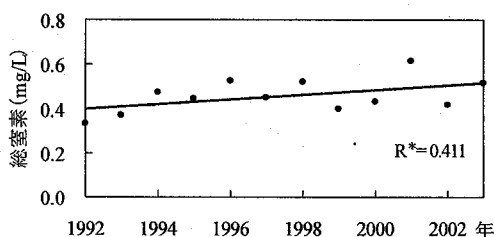
図-13 ダム前定点表層水の N/P 比 (7,8,9 月の平均値) の推移

まで下がってきている。峰谷川では総窒素は 0.4mg/L 前後であったのが 0.6mg/L 前後に上がってきており、総りんは 0.02mg/L 前後で横ばいである。丹波川では総窒素は 0.3mg/L 前後であるが、若干上昇傾向であり、総りんは 0.01mg/L 前後で横ばいである。全体として見ると、総窒素の流入濃度はやや増加し、総りんの流入濃度はやや減少しているが、1992 年に表層放流を開始してから極端に大きく変化したわけではない。

図-11 は小河内貯水池のダム前定点における総窒素、総りん濃度の経年変化である。流入河川と同様に、毎月 1 回実施している定期試験の結果をプロットしたものである。表層は貯水池表面、中層は多摩川第 1 発電所取水口の直上、底層は池底上 2m における試験結果である。総窒素濃度は表層、中層、底層で大差ないが、経年的に見ると増加傾向にある。総りん濃度は表層と中層が 0.005mg/L 前後の値を中心に変動しているのに対し、底層は倍以上高い値で推移している。底層の濃度が高いのは、底泥からの溶出があるためと考えられる。しかし、小河内貯水池の場合、底泥からの栄養塩類の溶出は少なく、負荷量としてはほとんど問題にならないことが明らかになっている^{19), 20)}。毎月の総りん濃度の変動はかなり大きい、図-11 では経年的にはほぼ横ばいのように見える。

無機態窒素については、アンモニア態窒素を除いて 1986 年以前と 2000 年以降の流入河川のデータしかないが、流入河川では窒素の大部分が硝酸態窒素であるので、流入河川における経年変化は総窒素と同様と考えられる。

無機態りんについては、りん酸態りん濃度の経年変化が総りんとはほぼ同様の傾向になっていた。



(注) R*は自由度調整済み重相関係数を示す。

図-14 ダム前定点表層における表層放流期間中の総窒素・総りん濃度 (4~11 月の平均値) の経年変化

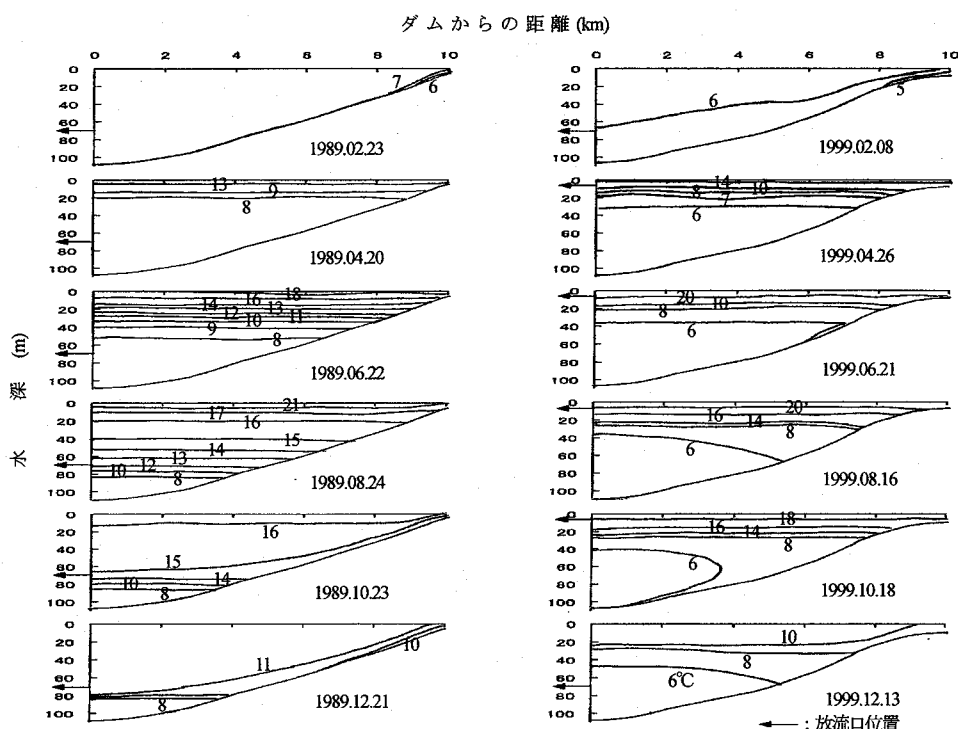


図-15 中層放流時（左）と表層放流時（右）における貯水池水温の縦断分布

図-10、図-11 の値から N/P 比を計算すると、流入河川の小菅川では 10~20 であるが、流入河川の峰谷川と丹波川、及び小河内貯水池のダム前定点（表層、中層、底層）においてはほとんどの場合に 20 を大きく上回っている。したがって、小河内貯水池ではりんが制限要因になっているといえる。小河内貯水池では藍藻類によるアオコは 7~9 月に発生しているが、この時期の N/P 比の値が表層放流開始の前後で変化したかどうかを見たのが図-12、図-13 である。流入河川水とダム前定点表層水の N/P 比について 7、8、9 月の平均値を算出し、その経年変化をプロットしてある。1992 年以降に小菅川の N/P 比が上昇傾向にあるほかは、特別な変化はなく、アオコの発生時期に N/P 比が 10 以下になる傾向は全く認められなかった。

次に、表層放流を行っている時期だけに着目し、ダム前定点表層における総窒素と総りん濃度の推移を見た。図-14 は、ダム前定点表層の総窒素、総りん濃度について、表層放流を行っている 4~11 月の平均値を算出し、1992 年から 2003 年まで経年的にプロットしたものである。図-14 からわかるように、貯水池表層の総窒素、総りん濃度は年々増加する傾向が認められる。図-14 の回帰直線に対し、有意水準 5% で検定を行ったところ、総窒素に関しては、回帰式は統計的に意味がないと判定されたが、藻類増殖の制限要因となっている総りんに関しては、回帰式は統計的に意味があるとの判定結果であった。一方、表層放流期間における流入河川での総窒素、

総りん濃度は既述の傾向と同様であり、総窒素は主要 3 河川すべてで増加傾向にあるものの、総りんは峰谷川と丹波川では横ばい、小菅川では大きく減少していた。

小河内貯水池で藻類増殖の制限要因となっているりん濃度が流入河川で増加していないにもかかわらず、表層放流時の貯水池表層で増加傾向にあるのは、表層放流に伴い、流入河川水中の栄養塩類が表層部に多く供給されるようになったためと考えられる。河川水は水温が同じ、すなわち密度が同じ深さの所に流入し、放流口に向かって移動していく。貯水池水温の縦断分布図（図-15）からわかるように、中層放流時には二次水温躍層の位置が深いため、成層期においても放流水深である 70m 付近まで河川水が入っていく。しかし、表層放流時には水深 20m 付近に二次水温躍層ができてしまうので、それより深い所には河川水が入っていかない。したがって、成層期に表層放流を行うと、流入河川水に含まれる栄養塩類がすべて 20m 以浅の層に供給されてしまい、その結果として表層部での栄養塩類の増加傾向を引き起こしたと考えられる。

リモートセンシングによる調査の結果、小河内貯水池では藍藻類は河川の貯水池への流入部で増殖し始めることがわかっている²¹⁾。貯水池表層部での栄養塩類の増加は、湖心部に流された藍藻類をさらに増殖させる要因になっていると考えられる。

(4) 光

藻類の増殖には光が必要である。太陽光は貯水池の深部には届かないため、藻類が増殖するのは表層部に限られる。これまでの多くの測定結果から、藻類などの光合成による生産と呼吸による消費とが等しくなる深度、いわゆる生産層の深さは、表面光を 100%とした場合の相対照度が 1%になる深さとほぼ一致するとされている^{2,2)}。そして、この深度は貧栄養湖で 20~30m、中栄養湖で 10~20m、富栄養湖で 10m 以下である。

小河内貯水池における調査では、相対照度が 1%になる深さは透明度の約 3 倍であり、3 倍までの深さの層を生産層として扱っている。1980~2003 年の週 1 回の測定結果では、小河内貯水池のダム前定点における透明度は 0.2~14.2m の間で変動しているが、平均すると 5~7m である。したがって、小河内貯水池の生産層は通常 15~20m 前後の深さであり、深いときでも 30m 程度と推定できる。

図-15 に示した水温の縦断分布からわかるように、表層放流を行うことにより、夏期~秋期における二次水温躍層の位置が大きく上昇した。表層放流を行う前には夏期~秋期に放流水深である 70m 位までの層に入っていた河川水は、表層放流を行ってからは 20m 位までの層に入るようになった。この 20m 位までの層は小河内貯水池の生産層であり、表層放流を行うことで栄養塩類を含む河川からの流入水に光がよく当たるようになった。その結果、藻類の増殖に都合のよい条件を与えることになったと考えられる。

6. 結論

小河内貯水池における水の華発生状況を 20 年以上にわたって整理したところ、流入河川水中の栄養塩類濃度が大きく増加していないにもかかわらず、1992 年に冷水対策としての表層放流を開始してから、藍藻類による水の華であるアオコの発生日数が増加した。また、藍藻類の *Microcystis* や *Anabaena* のダム前定点における検出数も増加傾向にあった。そのため、ダム放流水深の変更(表層放流)とアオコの発生要因(湖水の滞留時間、水温、栄養塩類、光)との関係について検討し、アオコの発生に関し次の結論を得た。

(1) 表層放流に伴う二次水温躍層の位置の上昇によって、成層期には流入河川水の貯水池内での滞留時間が短くなったが、藍藻類の倍增時間に比べ流入水の滞留時間の方がずっと大きかったため、滞留時間の短縮がアオコ形成藍藻類の増殖を抑制することはなかった。

(2) 流入河川の水温上昇、気温の上昇、及び表層放流に伴う二次水温躍層の位置の上昇が相乗的に作用し、貯水池表層の水温が 25℃以上になる日数が増加し、より高温

を好むアオコ形成藍藻類の *Microcystis* や *Anabaena* の増殖に適した条件を提供することになった。

(3) 表層放流に伴う二次水温躍層の位置の上昇によって、中層放流時には放流水深である 70m 付近まで入っていた河川水が、表層放流時には 20m 以深の層には入らなくなった。その結果、流入河川水に含まれる栄養塩類が貯水池表層部に多く供給され、流入部で増殖した藍藻類が湖心部に流された際にさらに増殖させる要因になった。

(4) 栄養塩類の供給量が増加した貯水池の表層部は、光の当たる生産層であるため、アオコを形成する藍藻類の増殖が促進された。

これらの結論を踏まえると、表層放流を行いながらアオコの発生を抑制するためには、貯水池表層の水温を低下させる、栄養塩類が表層に蓄積しないようにする、流入部で増殖した藍藻類が湖心部に流れ込まないようにする、藻類に当たる光を遮るなどの方策が考えられる。

2003 年以降、小河内貯水池では、①河川流入部へのアオコ分画フェンスの設置、②分画フェンス上流部への表層水移送装置の設置、③表層放流における放流水深の微調整といった対策を講じている。アオコ分画フェンスには、河川流入部で発生したアオコが湖心部に入らないようにする効果と流入部の表層水温を低下させる効果がある。表層水移送装置には、分画フェンス上流部に集積したアオコを光の当たらない水深に送り込む効果と河川流入部の表層水温を低下させる効果を期待している。放流水深の微調整では、流入河川水中の栄養塩類を貯水池内で循環させずに放流する操作を心掛けている。現在、その効果を検証、解析中である。

参考文献

- 1) 平成 15 年度公共用水域の水質測定結果(総括編)、東京都環境局(2005)
- 2) 牧野育代、寶 馨、立川康人：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、50, pp.1369-1372(2006)
- 3) 牧野育代、寶 馨、立川康人：選択取水方式の導入が植物プランクトンの鉛直分布と生長環境に及ぼす影響、水工学論文集、51, pp.1379-1384(2007)
- 4) 牧野育代、寶 馨、立川康人：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、京都大学防災研究所年報、49B, pp.105-117(2006)
- 5) 小河内貯水池管理年報、昭和 50 年度~平成 15 年度、東京都水道局(1977~2005)
- 6) 岩佐義朗編著：湖沼工学、山海堂(1990)
- 7) Reynolds, C.S. & Walsby, A.E. : Water-blooms. Biol. Rev., 50, pp.437-481(1975)
- 8) 島谷幸宏、細見正明、中村圭吾編：エコテクノロジー

- による河川・湖沼の水質浄化、ソフトサイエンス社 (2003)
- 9) 矢木修身、岡田光正、須藤隆一、萩原富司、高村義親：
Microcystis の増殖特性、国立環境研究所研究報告、第
25号、pp.47-58(1981)
 - 10) Konopka, A., Brock, T.D. : Effect of temperature on
blue-green algae (Cyanobacteria) in Lake Mendota, Appl.
Environ. Microbiol. 36, pp.572-576(1978)
 - 11) 藤本尚志、福島武彦、稲森悠平、須藤隆一：全国湖
沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子と
の関係、水環境学会誌、18, pp.901-908(1995)
 - 12) 高効率浄水技術開発研究(ACT21)、凝集沈澱処理と高
速ろ過に関する技術資料、(財)水道技術研究センター
(2006)
 - 13) Reynolds, C.S. : The ecology of freshwater phytoplankton,
Cambridge University Press, UK(1984)
 - 14) 藤本尚志、岩見徳雄：水温上昇が及ぼす水圏生態系
への影響、用水と廃水、45, (4), pp.13-18(2003)
 - 15) 須藤隆一編：水環境保全のための生物学、産業用水
調査会(2004)
 - 16) 高村典子：ラン藻による水の華、特に *Microcystis* 属
の生態学的研究の現状、藻類、36, pp.65-79(1988)
 - 17) OECD : Eutrophication of waters-monitoring, assessment
and control, OECD(1982)
 - 18) 門田元編：淡水赤潮、恒星社厚生閣(1987)
 - 19) 小河内貯水池 流動及び底質栄養塩類溶出調査委託
報告書、東京都水道局(2003)
 - 20) 小河内貯水池 流動及び底質栄養塩類溶出調査委託
その2 報告書、東京都水道局(2005)
 - 21) 小河内貯水池アオコ分布調査委託 報告書、東京都
水道局(2005)
 - 22) 有賀祐勝：水界植物群落の物質生産Ⅱ、共立出版
(1973)

(2007. 5. 25 受付)

Influence of Surface Water Discharge from a Reservoir on an Outbreak of Blue-green Algae Bloom

Hiroyoshi KITAZAWA^{1,2}, Kazuki TOMINAGA³, Shingo KITADA⁴, Shigeru SAITO⁵,
Chikafusa SATO^{1,4} and Akira KOIZUMI¹

¹Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University

²Kanamachi Purification Administration Office, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government

³Misato Purification Plant, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government

⁴Water Quality Management Center, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government

⁵Water Resources Administration Office, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government

In the Ogochi Reservoir, one of Japan's largest reservoirs used exclusively for supplying water, the concentration of total phosphorus (which is the limiting nutrient) in the rivers flowing into the reservoir has remained at a steady level, or shown a gradual decrease over the years. However, after 1990, every year algae bloom is caused by the excessive growth of blue-green algae, such as *Microcystis* and *Anabaena*, and its scale and duration are expanding. In a notable change in reservoir management after 1990, a spout from the dam was changed and, since 1992, surface water was discharged from April to November as a measure against cold water. We therefore investigated outbreaks of blue-green algae bloom on the basis of our previous data, and analyzed relations of surface discharge to bloom. Consequently, we discovered that a rise in surface water temperature, caused by surface discharge during summer, would promote the growth of bloom-forming blue-green algae which preferred higher temperatures. We also concluded that the discharge from the upper spout made the depth of the secondary thermocline shallow, so that the nutrient supply to the productive zone of the reservoir would increase and bloom-forming blue-green algae would easily grow.