

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

INFLUENCE OF TRIBUTARY WATER QUALITY CHARACTERISTICS AND COLD WATER COUNTERMEASURE ON WATER QUALITY IN THE OKUTAMA RESERVOIR

牧野育代¹・寶 馨²・立川康人³

Ikuyo MAKINO, Kaoru TAKARA and Yasuto TACHIKAWA

¹正会員 学(工) 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所教授 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 博(工) 京都大学防災研究所助教授 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Change in the plankton and the increased phytoplankton confirmed in the Okutama reservoir indicate the progress of eutrophication. This paper discusses the factors deteriorating the water quality of the reservoir and aggravating eutrophication. The principal component analysis is used for the factorial experiment of the eutrophication. The results suggest that four principal components can explain the factors and influenced water quality. In addition, This paper examined correlations between the principal component scores for 24 years and countermeasures for the water quality preservation and against the cold water. Finally, it can be concluded that the factors that influenced the water quality of the reservoir most were the river water temperature rise and the cold water countermeasure.

Key Words: reservoir water quality, river water temperature, principal component analysis, cold water countermeasure

1. はじめに

筆者らは、関東山地水道水源林集水域における複数の貯水池流入河川(以下、流入河川)において、長期的にみて水温が上昇していることを1977年 - 2000年(24年間)の東京都水道局における観測データ¹⁾を用いて見出した(図-1)。特に1992年以降においては、それより以前と比べて0.5 上昇するなど顕著な水温変化を確認した。

水温の上昇は生態系の攪乱、水質汚濁性物質の生産増進など、特に水質への反応が促進され、水質特性に大きな影響を及ぼす。また、同域では観光人口の増加や土地利用形態の変化など、人間活動に起因する汚濁負荷の問題が深刻化している。このため、集水域内における唯一のダム貯水池の水質保全を目的とした下水道完備や廃水規制の強化などの行政対策²⁾がなされ、それは主要河川の一部において栄養塩濃度が減少したことで功を成している。しかしながら、対象地の水域におけるここ数年の“水の華”の発生は、その範囲、規模ともに著しい。この富栄養化現象に対する水質改善対策は種々の手法により試みられているが成果は明らかでない。その理由の一

つには、貯水池の目的に冷水対策が加えられて1992年より放流方法が変わったにもかかわらず、そのことが手法に取り入れられていないことにあるように思われる。

具体的には、対象貯水池において1992年以降、それまで中層から放流していたのをやめて、ダム下流における冷水対策として表層水の放流が行われるようになった事が考えられる。この冷水対策と水温上昇が原因となり、貯水池流入部から貯水池におよぶ水循環系機構に変化が生じ、その結果、“水の華”の発生状況にも影響を及ぼしたのではなかと推測される。

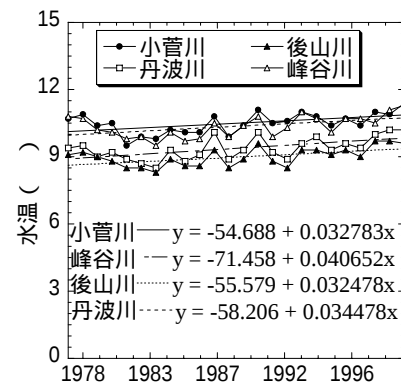


図-1 貯水池主要流入河川における水温の変遷

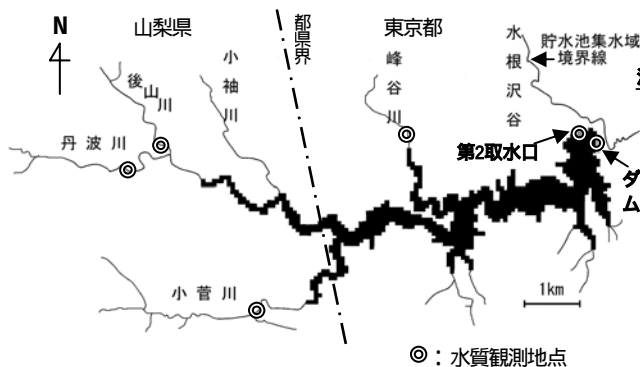


図-2 流入河川と貯水池の位置および水質調査地点

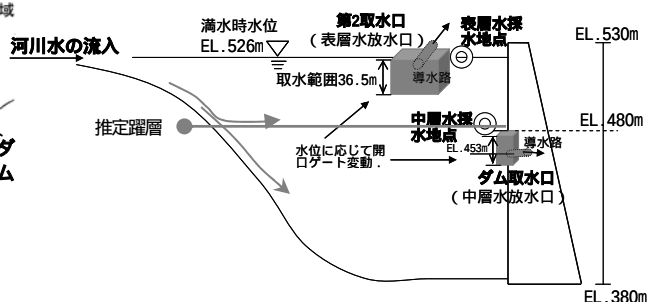


図-3 貯水池とダムの模式図

このような背景から本稿は貯水池の富栄養化を考慮して、流入河川の水質汚濁特性が貯水池内の水質に及ぼす影響を明らかにすることを第一の目的とする。そして、水質以外の因子として、水質保全対策や下流域への冷水対策が貯水池の水循環特性に与える影響を追究し、その考察を加える。方法は次のようである。1)各流入河川が貯水池へもたらす水質汚濁物質の寄与量を推定する。2)東京都水道局における24年間の観測データを用いて降雨量、水温、栄養塩類をはじめとする水質特性の変遷と現状を把握するとともに、水質保全対策と冷水対策の施行による個々の水質の変化について検討する。これより得た資料をもとに、3)影響因子（原因系）に対する貯水池水質（結果）の反応特性を主成分分析より明らかにし、個々の水質成分ではわからなかった物理化学的現象面を捉える。4)物理化学的な流動が水域にもたらす変化のメカニズムについて考察を加える。

2. 対象地の概要

(1)対象集水域の現況

本研究の対象域は、東京都と山梨県にまたがる山間部に位置する水道水源林集水域である。集水域内で唯一の小河内貯水池（以下、貯水池）へと流れ入る主要流入河川は丹波川、小菅川、後山川、峰谷川があり、貯水池集水域面積（262.9km²）に対して4つの河川小流域の占める割合は、80%以上である（表-1）。人為的活動場所は丹波川流域の民有地である一部を除いてほとんどない。貯水池の周辺と本流河川沿いには、集落や、民宿、キャンプ場、釣堀などの観光施設が点在する。特に、小菅川流域は他と比較して、流域面積の割には人口、産業が多く、それら起源による河川・貯水池への水質汚濁が問題となっていて、廃水や河川に入水する砂利採取などにおいて規制強化がされている。

(2)流入河川および貯水池の緒元と使用データ

流入河川と貯水池の位置および水質調査地点を図-2に示す。水質データは、各流入河川について月1回の水質

調査結果を、貯水池内の水質については表層水（ダム前左岸にある第2取水口より採水、貯水池水位に相当）および中層水（ダムサイトの第1取水口直上水を採水、水深約50m）における週に1回測定されたデータを用いた。なお、中層水は昭和52年度から60年度まで、ダム堰下の水褥地（中層に相当する観測結果が得られる）での測定結果、昭和61年度以降は第1取水口での測定結果である。気象観測データはダム前地点の日データを用いた。また、水質試験はクロロフィルaを除いて、上水試験方法（日本水道協会）、水質調査法（半田谷高久著、1957）、湖沼調査法（西条八束著、1957）に準じている。ただし、クロロフィルa量（Cha）については、透明度の3倍の深度を生産層（植生プランクトンの繁殖可能な層）とし、その範囲の総量より求めている。

ダム貯水池の模式図を図-3に示す。貯水池は最大水深142.5m（EL.526.5m）、総貯水容量1億8,540万m³を有し、国内では最大級の規模を持つ。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。このように、十分な水深があると同時に流速が遅いので受熱期には安定した水温躍層が発達するが、冬期にはほぼ循環する。1991年7月以降において、4月～11月までの期間は表層水が放流されるようになり、これまで通年放流だった中層水は12月～3月の期間の放流となっている。

表-1 河川単位の流域面積とその比率

流域単位	面積 (km ²)	比率 (%)
貯水池集水域	262.88	100.0
丹波川	127.29	48.4
小菅川	42.34	16.1
後山川	30.89	11.8
峰谷川	15.5	5.9
流入4河川合計比率		82.2

表-2 各河川の年流入量の比率

流入河川	比率 (%)
丹波川	50.6
小菅川	18
後山川	12.8
峰谷川	6.2

表-3 対象地における水質保全対策の一覧

流入河川	1981	1987
丹波山村	下水道事業団へ委託	丹波山村の公共下水道施設が11月に完成。
小菅村		小菅村の公共下水道施設が4月に完成。

3. 流入河川の水質汚濁負荷寄与率の算出

1977年 - 2000年における毎年の貯水池流入総量の変遷を図-4に、貯水池年総流量に対して各河川の占める24年間の平均比率を表-2に、丹波山村（丹波川流域）と小菅村（小菅川流域）で施行された水質保全対策である公共下水道工事の経過を表-3に、また、各河川の総窒素（TN）、総リン（TP）、過マンガン酸消費量（KM）における負荷寄与率の変遷を表-4に示す。なお、負荷寄与率は貯水池流入4河川の合計負荷量を100として算出した。

貯水池への年流入量は丹波川が50%、小菅川と合わせて70%近くを占めている。その順位は丹波川、小菅川、後山川、峰谷川の順でかわりはない。一方、TN、TP、

およびKMにみる負荷寄与率はいずれも、丹波川と小菅川とでその80%前後を占め、貯水池への影響にはこの2つの流入河川の流域条件や水質特性が問題となると考えられる。TN負荷寄与率において、1977年 - 1987年までは小菅川の負荷寄与率が最も高く、1993年を除いた1988年 - 2000年では、丹波川で最も高くなり、順位が入れ替わっている。これは、公共下水道施設の完成時期とほぼ一致する。また、TPは24年間のうち小菅川で20回、残り4回が丹波川で最も高い。そして、KMは全ての年で丹波川が最も高い負荷寄与率を示しその割合は、50% - 80%近くに及んでいる。以下では、貯水池への水質汚濁負荷量の寄与率が高く、水温にみる熱量の蓄積を考慮して年流量の多い丹波川と小菅川を対象に解析する。

表-4 主要貯水池流入河川の栄養塩類における負荷寄与率の変遷

		1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
総窒素 (TN)	丹波川	33.4	31.0	33.8	37.8	37.6	41.5	28.8	31.5	33.5	35.8	34.3	41.3	39.7	44.2	40.5	44.8	38.0	39.9	42.7	51.5	41.9	42.9	43.2	44.9
	後山川	11.4	8.0	8.6	6.5	10.2	6.3	7.3	8.8	13.0	11.0	8.2	13.9	13.0	11.5	14.0	12.5	11.8	12.9	12.5	16.2	14.8	14.5	14.0	16.8
	小菅川	46.8	54.5	50.9	49.0	42.3	46.8	58.2	52.3	44.0	45.1	46.4	35.0	38.8	35.3	37.5	35.5	43.0	38.9	37.3	24.2	35.7	34.2	34.5	31.3
	峰谷川	8.3	6.6	6.7	6.8	10.0	5.3	5.7	7.4	9.5	8.1	11.1	9.8	8.4	8.9	8.0	7.2	7.1	8.3	7.5	8.1	7.6	8.4	8.3	7.0
	(%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
総リン (TP)	丹波川	30.5	29.9	25.4	23.0	25.2	57.8	43.4	20.7	30.7	29.8	24.3	24.6	26.9	31.9	32.9	24.0	26.1	26.1	30.0	35.4	25.2	42.8	35.9	46.4
	後山川	9.8	7.9	6.6	5.4	7.0	2.9	8.5	4.9	7.8	6.6	3.4	7.4	8.7	8.9	10.9	13.1	10.2	12.9	9.3	12.9	11.4	11.3	11.1	9.6
	小菅川	53.5	56.4	63.6	65.1	58.2	33.8	40.8	68.4	48.0	55.9	67.1	59.5	58.2	51.7	49.9	58.6	58.3	52.7	54.1	43.5	55.8	37.7	44.4	38.1
	峰谷川	6.2	5.9	4.4	6.5	9.5	5.6	7.2	6.0	13.5	7.7	5.3	8.4	6.2	7.5	6.3	4.2	5.3	8.4	6.5	8.3	7.6	8.3	8.6	5.8
	(%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
KMnO4 酸消費量 (KM)	丹波川	54.0	58.9	49.0	61.8	60.1	70.3	70.1	61.0	63.1	61.8	60.4	62.3	60.2	62.3	55.2	59.4	59.5	54.8	61.4	61.7	55.7	61.6	63.6	77.0
	後山川	13.2	10.9	7.9	8.8	12.0	5.0	9.0	10.5	12.6	10.9	7.9	13.1	13.2	11.9	16.0	14.3	15.3	14.0	13.8	10.7	20.1	13.7	12.0	12.1
	小菅川	26.3	24.1	38.1	22.5	18.7	18.6	16.1	21.1	16.2	17.9	23.3	18.2	19.8	18.2	22.4	21.0	19.1	18.9	17.3	20.6	18.6	17.6	19.0	7.6
	峰谷川	6.5	6.1	5.0	7.0	9.2	6.0	4.9	7.3	8.1	9.3	8.5	6.4	6.9	7.5	6.4	5.2	6.2	12.2	7.5	7.1	5.6	7.1	5.4	3.3
	(%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

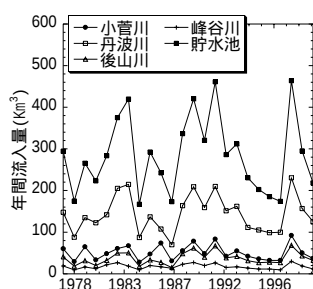


図-4 年流入量の変遷

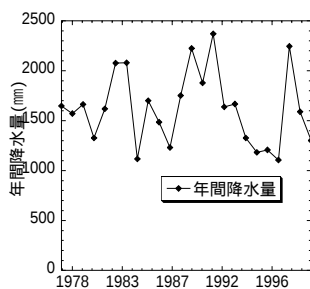


図-5 貯水池上流の年間降水量の変遷

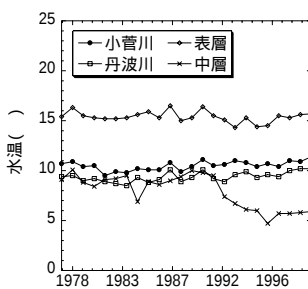


図-6 流入2河川と貯水池内における水温の変遷

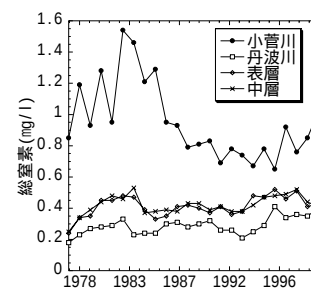


図-7 流入2河川と貯水池内における総窒素の変遷

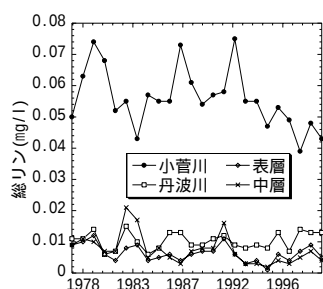


図-8 流入2河川と貯水池内における総リンの変遷

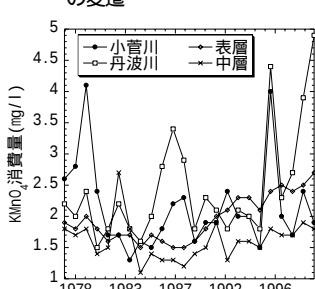


図-9 流入2河川と貯水池内における過マンガン酸消費量の変遷

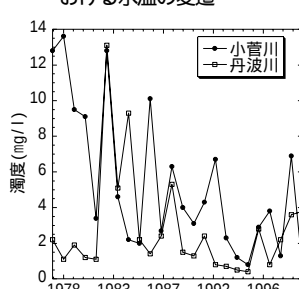


図-10 流入2河川における濁度の変遷

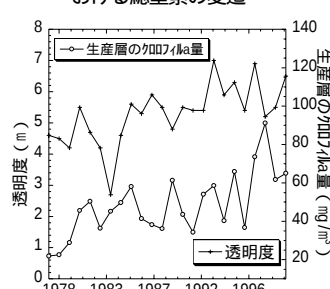


図-11 貯水池表層における透明度と生産層のクロロフィルa量

4. 貯水池と流入2河川の水質特性の変動

解析の対象とした24年間に丹波川流域、小菅川流域では、水質保全対策として下水道施設工事の開始と完成

（表-3）、また、貯水池より下流の冷水改善対策として冬場を除く4月～11月の期間における水温の低い中層水から暖かい表層水への放流水の切り替えなど、ともに水質特性に大きな影響を及ぼすであろうことがあった。以下ではこれらの情報と水質などのデータを照らし合

せながら相互の関係を検討する。

図-5から図-11に貯水池と流入河川の水質特性に關すると考えられる年間降水量（以下、降水量）、年平均の水温および水質濃度の1977年 - 2000年にわたる経年変化を示す。貯水池地点の降水量（図-5）は年による変動が大きく一定の傾向を示さない。水温（図-6）は貯水池表層で最も高く15 のラインに沿って推移する。小菅川は10 ~ 11、丹波川は9 ~ 10 の間で推移し、上昇傾向にある。中層は観測期間の途中まで流入2河川とほぼ同じに推移していくが、1991年以降の中層には急激な水温低下（5 前後）が見られる。この原因としては、1991年の後期から始まった冷水対策（冬期を除く4月から11月に暖かい表層水を放流する）により、中層水においては冷たい水が中層または底層付近に入ったまま放流されず滞留するようになったことで低水温化現象が生じるようになったことが考えられる。

TN（図-7）は小菅川において観測期間を通し他の2倍近くから6倍程度の濃度である。振幅の大きい1977年 - 1986年の間に濃度のピーク（1982年）があり、その後、徐々に低下する。その低下には、1981年以降の下水道工事の関与が考えられる。一方、丹波川は1984年以降上昇傾向にあり、下水道の効果は確認できない。小菅流域、丹波流域のどちらもオキシデーションディッチ法（OD法）を用いる水処理施設を有するが、もともと濃度の高い小菅は、下水道を完備したことで、その濃度とOD能力に応じてT-Nの除去がされてT-N濃度が急激に低下し、はじめからT-N濃度の低い（小菅よりも）丹波は、ODで処理しても、その除去能力よりも低い濃度であるため、処理水のT-N濃度はほとんど変わらなかったと考えられる。表層と中層は1992年以降1998年まで上昇傾向にあるが1999年以降低下し、冷水対策の影響は明らかでない。また、先述の水温のように、表層水取水による表層と中層の差（濃度）は生じていない。

TP（図-8）は小菅川において他の2倍から70倍程度の濃度である。濃度の上昇は1984年、1987年および1992年にみられ、それは降水量減少の年と一致している。このピークを除くと濃度は1994年まで維持傾向にあり、それ以降は減少する。丹波川では一定の傾向を示さない。これらのことから、TPにおいては流入2河川ともに下水道の効果は確認できない。表層と中層の濃度を比べて、冷水対策前では中層で高いが、冷水対策後は濃度の位置関係が逆転し、表層で高くなっている。表-5に示すように小菅川の濁度と表層および中層のTPの相関係数はやや高く、濁度に見る、濁質由来のTPの各層への流入が考えられる。そして、小菅川の水温が丹波川のそれよりも高いことを考慮すると、濁質、つまりTPは、冷水対策以降、表層よりに流入するようになったと示唆される。

KM（図-9）は流入2河川とも一定の傾向を示さない。表層と中層は1992年より以前から上昇しているが、冷水対策後は表層での濃度上昇が著しく、中層との濃度差は

広がっている。

図-10の流入2河川の濁度（Tu）年は変動が大きく、それは小菅川で特に表れている。対象河川の上流では砂利採取が行われており、その下流では濁質の巻上げによるTuの上昇が報告されている。降雨量と比較してもTuは応答していないことから、流入2河川の変遷には砂利採取の影響が反映されていると考えられる。

Chaと透明度（図-11）は対象期間を通してともに大きく上下しながら上昇しているが、冷水対策以前は上下の折り返しに数年間かかっていたものの、対策後はほぼ1年単位で上下移動を繰り返し、変動幅が大きくなっている。

このように、公共下水道普及工事や貯水池運転上の変化（冷水対策による表層水の取水）が個々の水質汚濁因子に及ぼす影響については断面的にわかった。しかしながら、これらのグラフでは複数因子の相互関係が成す総合的特性を知ることはできない。そこで次には、変数間の相関係数により用いるデータの有効性の判断などをするため単回帰分析を、そしてその結果をもとに総合的特性を判定できる主成分分析を行い、特定の現象が示す水質特性を明らかにすることを試みる。

5．主成分分析による流入河川の水質特性が貯水池内の水質に及ぼす影響の検討

(1) 単回帰分析

用いたソフトは「Excelアドイン工房」の主成分分析アドイン³⁾である。表-5に、図-5から図-11のデータを用いた単回帰分析の結果を示す。なお、原因系（降水量および河川水質）と結果系（貯水池水質）の相互間の相関係数のみ示している。どの原因系も相関を示す結果系を持っている（単相関係数 ± 0.4 以上）ので主成分分析に全てのデータを用いることとした。相関係数を用いて特徴的な水質の傾向を挙げると次のようになる。

同じ水質項目について流入2河川と貯水池内（表層あるいは中層）とが相関関係を持つのは中層水温だけである。中層水温を除くと丹波川のみ相関を持っている。特に、丹波川TNは表層・中層ともに相関がある。そこには、流入河川と貯水池間における直接的な物質輸送が成り立っていると考えられる。Tu（流入2河川）と透明度は負の相関関係にあり、濁質の流入の減少は透明度の上昇につながる事がわかる。ChaはTN（丹波川）と正相関を持つことから、栄養素として河川起源のTNがChaの生成に大きく寄与していることがうかがえる。一方、Tu、KMおよびTP（いずれも小菅川）とは負の相関関係を持つことから、これら栄養塩類は河川起源の影響は小さく、貯水池での滞留がChaの生成に影響を及ぼしていることが考えられる。さらに、降水量は表層・中層のTPと正の相関を持ち、降水によるTPの流入が考えられる。

表-5 流入2河川と貯水池内における単回帰分析の結果

		原因系									
		丹波川 WT	小菅川 WT	丹波川 Tu	小菅川 Tu	丹波川 KM	小菅川 KM	丹波川 TN	小菅川 TN	丹波川 TP	小菅川 TP
		年間降 水量									
結果系	表層WT	0.28	0.21	0.02	0.14	0.06	-0.06	0.00	0.30	0.20	0.25
	中層WT	-0.47	-0.42	0.10	0.49	-0.46	-0.13	-0.49	0.38	-0.01	0.39
	表層KM	0.55	0.65	-0.31	-0.32	0.51	0.21	0.45	-0.44	0.20	-0.41
	中層KM	-0.07	0.06	0.44	0.35	0.19	0.12	0.21	0.27	0.58	-0.30
	表層TN	0.08	-0.10	0.19	-0.44	0.20	-0.13	0.60	-0.02	0.04	-0.35
	中層TN	-0.13	-0.31	0.10	-0.42	0.08	-0.25	0.54	0.07	-0.02	-0.44
	表層TP	-0.15	0.03	0.11	0.61	0.02	0.39	-0.12	0.14	0.54	0.11
	中層TP	-0.54	-0.39	0.53	0.52	-0.26	-0.07	-0.22	0.56	0.32	0.03
	表層Cha	0.27	0.17	-0.16	-0.62	0.09	-0.47	0.43	-0.15	-0.19	-0.53
	透明度	0.53	0.49	-0.42	-0.47	0.29	-0.06	0.29	-0.52	-0.20	-0.04
	年降水量	-0.24	-0.16	0.16	0.16	-0.24	-0.24	-0.13	0.05	0.29	-0.15
											1

(2)主成分分析による貯水池内の水質特性の検討

表-6に主成分の固有値・寄与率等を示す。本稿では、水質特性の70%以上を説明できる主成分4までを対象とする。表-7には各変数と各主成分との相関係数である主成分負荷量を示す。なお、原因と結果の因果関係を明瞭にするため主成分の解釈では解釈に重なりのないよう代表的パラメータを選び、それに対して各主成分の特性を検討している。

主成分1では流入2河川水温と中層水温が強く相反する。これは、貯水池水温より低い河川水温の流入による密度差の発生が中層水温の低下につながるとの説明が可能である。流入2河川水温とChaの関係は、先で明らかとなった流入河川の水温上昇がChaの増加に寄与していることを示すと考えられる。透明度と濁度の関係は、流入するTuが減少したことで上昇した副次的な現象と考えられる。透明度は結果系を代表するパラメータであるが、副次的な関係以外は明らかでない。一方、水温は主成分1において特徴的なパラメータとの関係が明らかに説明できる。これらのことから、主成分1は水温特性と解釈する。

主成分2はKM、TNおよびTPについて流入2河川と貯水池内の直接的な関係が成り立っている。これより、主成分2は物質輸送特性と解釈する。次に、主成分3については、小菅川TNが表層と中層に流入し、また、Chaの栄養素であることを考えると、TN特性と解釈できる。主成分4は降水による河川水温の貯水池への輸送を示すと考えられるので、熱輸送特性と解釈する。

さらに、主成分間の関係から水質特性を考えてみる。主成分1と主成分3はChaが高い。それをChaの生成から捉えると、第1に丹波川と小菅川の水温、第2に河川起源のTNの関与がCha生成の条件であることが考えられる。

6. 水質保全対策と冷水対策が流入河川と貯水池内に及ぼす物理化学的な影響

表-8に主成分得点を示す。主成分得点は1981年より始まった下水道工事の前後と、貯水池下流への冷水対策の開始1992年以降を分けて水質保全対策を整理した。主成分1は1993年を境にプラスの値となり、冷水対策が水温特性に与えた影響の大きさがわかる。ここで、1992年がわずかにマイナス値なのはその前年の7月より冷水対策が施行されたので、分散に影響する期間に満たなかったことが原因と考えられる。他主成分については表-8から

は分離できないので、次に主成分得点を時系列に並べてその挙動から水質特性の変化を検討する。

表-6 固有値および寄与率

成分	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
固有値	6.38	3.67	3.51	1.64
寄与率(%)	30.39	17.47	16.69	7.83
累積寄与率	30.39	47.86	64.55	72.38

表-7 主成分負荷量

(各主成分と各変数との相関係数)

	変数名	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
原因系	丹波川WT	0.683	0.020	-0.505	0.359
	小菅川WT	0.551	0.006	-0.653	0.321
	丹波川Tu	-0.378	0.502	0.218	-0.129
	小菅川Tu	-0.698	0.083	-0.396	-0.231
	丹波川KM	0.518	0.439	-0.485	-0.120
	小菅川KM	-0.006	0.025	-0.687	-0.620
	丹波川TN	0.581	0.581	-0.073	-0.109
	小菅川TN	-0.579	0.221	0.317	0.022
	丹波川TP	-0.051	0.675	-0.580	0.015
	小菅川TP	-0.370	-0.480	-0.360	-0.353
	年降水量	-0.460	0.426	0.084	0.477
	表層WT	-0.266	-0.085	-0.382	0.517
結果系	中層WT	-0.655	-0.176	-0.029	0.256
	表層KM	0.743	0.328	-0.260	0.016
	中層KM	-0.201	0.809	-0.169	-0.030
	表層TN	0.439	0.530	0.482	-0.277
	中層TN	0.310	0.548	0.631	-0.142
	表層TP	-0.575	0.434	-0.490	0.123
	中層TP	-0.801	0.517	0.037	0.114
	表層Cha	0.661	0.152	0.458	0.343
	透明度	0.771	-0.320	-0.091	0.041

(検討したパラメータには、網掛けをしている。)

表-8 主成分得点

観測年	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
1977	-2.82	-1.41	-2.97	0.526
1978	-3.19	-0.91	-2.73	0.429
1979	-2.72	0.458	-3.09	-1.91
1980	-0.78	-1.5	0.876	-1.19
1981	-0.7	-0.64	2.936	-0.51
1982	-4.41	4.968	1.193	-0.86
1983	-3.72	2.467	3.302	0.507
1984	-0.63	-2.16	2.055	-0.25
1985	-1.27	-1.53	1.309	1.268
1986	-0.92	-0.88	-0.36	-0.42
*1987	0.678	-1.59	-1.89	0.394
1988	-1.07	-0.91	0.925	-1.32
1989	-0.81	-0.39	1.151	1.499
1990	0.035	-0.61	-1.43	2.307
1991	-1.9	1.202	-0.78	1.179
1992	-0.2	-2.04	-0.42	-0.77
1993	2.348	-1.96	0.29	0.197
1994	2.352	-1.03	-0.01	-0.12
1995	3.105	-1.18	2.647	-0.71
1996	3.514	2.225	-1.49	-3.45
1997	3.219	-0.14	1.326	-0.34
1998	3.352	3.037	0.808	0.912
1999	2.193	2.362	-2.01	0.563
2000	4.33	2.152	-1.64	1.075

* 公共下水道工事の完了。

図-12から図-15に主成分得点より作成した各主成分の1977年 - 2000年までの変遷を示す。また、水質保全対策施行前を第1期、公共下水道普及工事期間を第2期、冷水対策期間を第3期とした。図中の上下に延びる2線は中期と後期の始まりの年を示す。なお、下水道は降水量によって処理能力に差が生じる可能性があるため、Yの第2軸に年間降水量をとって降水量の影響についても検討する。水温特性(図-12)は第1, 2期において降水量と反する動きをする。これは、降水による河川水温の低下の影響を示すと考えられ、下水道普及の影響は確認できない。物質輸送特性(主成分2)は降水量に沿って推移するものの、下水道が普及するにつれてその反応は小さくかつ、安定している。このことから、下水道工事は水質汚濁物質の輸送の安定化に効果があると考えられる。TN特性(主成分3)はいずれの時期にも一貫した傾向が示されないことから、水質保全対策と冷水対策の影響は受けないと考えられる。熱輸送特性(主成分4)は第2期において上昇傾向がみられる。これは、下水道の普及に伴う排水の熱の蓄積が示されたと考えられる。このように流入河川水の水質特性の変化は明らかになり、貯水池水質に影響を及ぼす要因は4つの主成分によって説明できた。そのうち、富栄養化現象の象徴であるChaの生成に関しては流入水温と河川起源のTNの寄与が大きいことがわかった。次に、富栄養化の規模拡大の原因について検討する。

表-9に冷水対策前後と24年間の水温の平均を示す。着目するのは、1992年 - 2000年の各水温である。流入河川水の流入層は、小菅川ではわずかに表層水との水温差が中層のそれよりも近いことから表層よりに多く流入し、一方の丹波川は、中層の水温と近いことからその層よりに流入していると、水温差から推察できる。すなわち、表層よりに流入するようになったこの水に含まれる栄養

塩が表層のChl-a増加の原因となり、富栄養化が進行したと推察される。

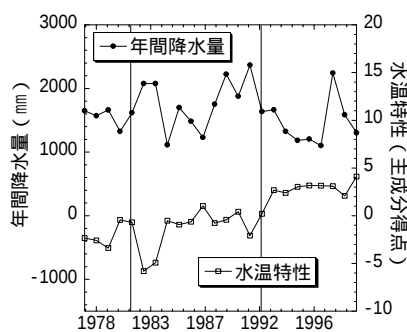


図-12 水温特性の変遷

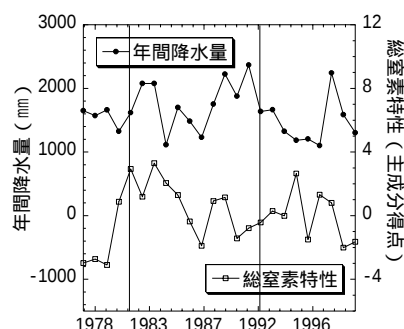


図-13 物質輸送特性の変遷

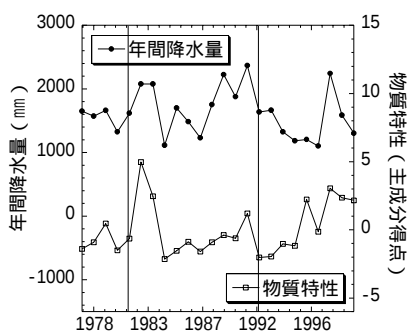


図-14 総窒素特性の変遷

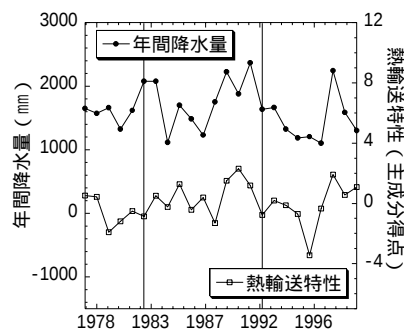


図-15 熱輸送特性の変遷

表-9 貯水池内2層と流入2河川の水温(°C)

期間	表層	中層	丹波川	小菅川
1977-1991	15.6	9.1	9.2	10.3
1992-2000	15.1	6.0	9.7	10.8
1977-2000	15.4	7.9	9.4	10.5

7. まとめ

以上より、水質保全対策と冷水対策が貯水池の水質特

性に及ぼす影響について次のような解釈ができる。

- 1) 貯水池下流への冷水対策として 1991 年まで中層から放流していたのを暖かい表層水の放流に変えたことは、中層の水温を低下させた。流入河川のうち 1 河川は表層水との水温差(密度差)が小さくなったことから表層より流入するようになり、表層の栄養塩濃度が上昇するようになった。
- 2) 下水道の普及は一時的に排水を貯めることからその熱を蓄積することになる。つまり、下水道による河川への熱の放流とその熱の貯水池への流入が考えられる。
- 3) クロロフィル a の生成には河川の水温上昇が大きく寄与している。また、主要流入河川の総窒素の増加はこれを栄養源とするクロロフィル a の生成にも有効である。
- 4) 下水道工事開始から完成後に至る期間は、物質輸送特性における主成分得点の分散が比較的安定している。これは、下水道施設により降雨の影響を受けにくくなり、水質汚濁物質の流出量が安定したことによると考えられる。

8. おわりに

水質汚濁系の流出負荷量が合わせて全体の80%に達する貯水池流入2河川を対象に、その水質特性が貯水池水質に及ぼす影響を、主成分分析を用いて明らかにした。その結果、貯水池の水質特性に最も影響を及ぼすのは流入河川水の水温であることが明らかになった。これら河川水水温の上昇は断続的で、貯水池はもとより流入河川においても富栄養化現象の拡大が懸念される。また、水質以外の要素の影響については冷水対策、つまり、表層水の放流が大きく作用していることがわかった。表層の放流が流入河川水との水温差を小さくしたことで負荷量の多い河川水が表層水と混合するようになり、総窒素が増加した結果、クロロフィルaも増加したと推察される。

本対象地ではここ数年来、“水の華”の規模拡大と植物プランクトン種の変化が報告されている。今後は、その原因を追究していきたい。

謝辞：本研究は東京都水道局の許可のもと行われました。また、用いたデータの多くは、東京都水道局水源管理事務所より借用しました。深く感謝します。

参考文献

- 1) 小河内貯水池管理年報，東京都水道局，1977-2000。
- 2) 平成17年版事業概要，東京都水道局，pp.17-48,2005。
- 3) <http://www.jomon.ne.jp/~hayakari/index.html>，早狩進。

(2005.9.30.受付)