小河内貯水池における大雨時流入濁質による 高濁度化現象の要因分析

山崎 公子¹・村山 道彦^{2*}・小泉 明¹・横山 勝英¹
青木 秀幸³・岩本 智江³

¹正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0372東京都八王子市南大沢1-1)

²学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0372東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:murayama-michihiko@tmu.ac.jp

³東京都水道局 (〒163-8001東京都新宿区西新宿2-8-1)

台風等に起因する大雨により、貯水池に大量の濁質や高濁度水が流域から流入する。その結果、貯水池では長期間の高濁度状態が続き、長期にわたり水道水源として大きな問題が発生する。

本論文では、小河内貯水池において大雨時に流入した濁質や高濁度水の早期放流のための基礎的研究として、高濁度状態を引き起こす流入濁質の挙動を把握することを目的に、平常時と高濁度時の濁質の比較分析を行い、台風通過前後の差異を検討し、高濁度状態の主要な要因を明らかにするとともに、貯水池への影響を考察した。その結果、大雨によって流入する難沈降性濁質の成分は $5\mu\text{m}$ 以下の粘土粒子であることが明らかとなり、貯水池内の高濁度化現象の主因であることが示された。さらに、流入濁質とリンの挙動が類似して、リンは主に $\text{PO}_4\text{-P}$ (リン酸態リン)として存在していることが確認できた。

Key Words : reservoir, storm runoff, turbidity, phosphate

1. はじめに

水道システムが多様化するとともに高度化し、2010年度に水道普及率が97.5%を超えた今日において¹⁾、より良質な水を安全かつ安定的に供給することが求められる。

このような背景のもと、水道水源の水質保全や貯水池の水質管理対策が重要な課題となっている。貯水池のような閉鎖性水域では、低水温の河川水や流量減少等の河川環境の変化によって、水道水源としての水質は著しく低下する²⁾。さらに、流入河川水が長期間滞留することにより水環境の変化を引き起こし、様々な水質問題へと発展する³⁾。例えば、上流からの工場排水や人為的排水由来の窒素やリン等の栄養塩類が原因で富栄養化⁴⁾⁵⁾、植物プランクトンの異常増殖を引き起こす。また、大雨や台風等の気象要因が原因で、大量の栄養塩類を含む濁水が貯水池で長期滞留し、貯水池内が高濁度化することもある。さらに、この高濁度水が下流に流されることで利水における様々な問題を引き起こす。本論文の対象とする小河内貯水池でも、大雨による貯水池への濁質流入が生じている。2007年の台風9号では濁度2,000 度を超え

る河川水が貯水池に流入し、堤体前付近においても濁度は400 度を超え、貯水池内全体が白く濁った状態(白濁現象)となった。その後、約半年間、貯水池の白濁状態が継続した。大雨時に流入する濁質の挙動は、降雨状況、日射、風、水温、流入水量、貯水量などの多くの要因が影響している⁶⁾。

そこで本論文では、大雨や台風時に流入する濁質が原因で引き起こされる貯水池の高濁度化現象に着目し、高濁度水の原因と考えられる浮遊濁質、また沈降物質を含む流入濁質の性状を調査分析し、貯水池高濁度状態の対策の検討や高濁度水の早期放流のための基礎的研究を行うことを目的とする。

以下、2.では調査対象である小河内貯水池の概要、調査方法について述べる。3.では小河内貯水池の平常時における状況を、沈降物質と貯水池内に貯留した水(以下、貯水)の分析結果によって示す。4.では、台風通過後の高濁度状態の小河内貯水池の貯水と沈降物質の流下方向を分析結果により示し、平常時との比較分析によって、台風通過前後の貯水における濁質の差異を検討する。そして、窒素、リンや有機物を含む流入濁質の挙動の把握を

するとともに、貯水池の高濁度化を引き起こす主要な要因の分析を試み、貯水池に与える影響について考察する。

2. 調査概要

対象とする小河内貯水池は、多摩川最上流部に位置しており、東京都奥多摩町、山梨県丹波山村、小菅村、甲州市の4市町村に存在する、東京都水道局が所有する水道専用ダムであり、東京都民の水源として使用され、湖沼にかかわる環境基準の湖沼AA型に指定された高度な水質管理の求められる貯水池である⁷⁾。貯水池は、堤高149m、堤頂長353m、敷幅131.1m、満水面積4.25km²、最大水深142.5m、貯水池堤体部付近の有効水深101.5m、有効貯水容量1億8540万m³の非越流型直線重力式コンクリートダムとして1957年に完成した⁸⁾。

貯水池の流域面積は262.9km²で、その内、約21.6km²を水道水源林として東京都水道局が管理している。主要流入河川は丹波川、小菅川、後山川の3河川で、流域面積全体の75%を占めている。丹波川の流域面積は、127.29km²で、流入河川の中で最も広大な流域を持つ。丹波川と小菅川の流域には、集落、養魚場、観光施設が点在している。一方、後山川は、流域の大部分が山地となっており、三条の湯と呼ばれる山小屋が一軒あるだけで田畑や人家などの生活の場はない。地形は、切り立った溪谷と急峻な山地であり、貯水池に流入する直前で丹波川と合流する⁹⁾。これら主要流入河川からの全窒素濃度の年平均値(2009年度)は、丹波川 0.46 mg/L、小菅川 0.89 mg/L、後山川 0.55 mg/L、全リン濃度の年平均

値は、丹波川 0.007 mg/L、小菅川 0.035 mg/L、後山川 0.009 mg/L と東京都水道局の調査結果¹⁰⁾で報告されており、小菅川の全窒素、全リンの濃度が他の河川と比べて高いことが示された。河川流域を含めた貯水池全体図を図-1に示すとともに、調査地点も明記した。

貯水池の高濁度時の原因となる濁質の挙動を検討すると同時に、貯水池への流入と流出の入出力応答関係の差異を検討することも目標として、水深方向の浮遊物質を含む貯水、また移流により沈降拡散する沈降物質を捕集するために、図-2に示す沈降量測定装置を用いた。図-3に沈降量測定装置に使用した捕集瓶の概要を示す。沈降量測定装置は、濁質の入出力の差異の検討をするため、図-1に示す主要3河川からの流入水が合流するSt. 3と貯水池の最下流である堤体部のSt. 8の2地点に設置した。沈

図-1 小河内貯水池調査地点(上图)及び貯水池全体図(下图)

図-2 沈降量測定装置概要

図-3 捕集瓶概要

降量測定装置は、直径11.4 cm、高さ25 cmのふた付きの円筒容器を捕集瓶として用い、設置時はふたを外した状態で各水深に3個ずつ、表層から湖底部まで水深方向に適宜な間隔をあけて設置し、設置水深は過去の研究¹¹⁾の結果を基に決定した。St.3の設置水深は、2 m～17 mの5 m間隔に、St.8では、2 m～17 mの5 m間隔、37 m～77 mまでの20 m間隔とした。また装置回収時、捕集瓶中の貯水の混合を抑制するため、ロープにテンションをかけた状態を保ち、一定速度で装置を引き上げた。ここで、捕集瓶内の上澄水をその水深の貯水とし、貯留した堆積物を沈降物質と定義する。

湖底に堆積した底質をコアサンプラーにより図-1に示すSt.0～St.7で採取し平常時の堆積物とした。さらに、貯水の状況把握のため多項目水質計により水深方向の測定を図-1に示すSt.0、St.3、St.4、St.7、St.8の5地点で行った。多項目水質計(JFE Advantec社製、AAQ175)の測定項目は、深度、濁度、水温等である。深度センサは、半導体圧力センサ、濁度センサは後方散乱光方式のセンサを用い、水温センサは、サーミスタタイプを採用している。現地観測は、PCとケーブルで繋がった多項目水質計をリアルタイムでPC上で測定値を確認しながら、表

表-1 分析項目一覧

	沈降量測定装置		底質	採水試料
	上澄水	堆積物		
全窒素	○	○	○	○
IN	○	○		○
全リン	○	○	○	○
PO ₄ -P	○	○		○
TOC	○	○	○	○
粒度	○	○	○	○
濁度	○	○		○
強熱減量	○	○		
Chl-a		○		

層から水深方向にゆっくり湖底まで降ろして測定を行った。また、台風通過後の高濁度水の状況把握のため多項目水質計により濁度の測定値が最大となった水深において、バンドン式採水器(離合社製)を用いて採水を行った。

ここで、堤体部St.8から各地点までの縦断距離(堤体部からの平行横断面の最深部を結んだ縦断線)は、1.7km(St.7)、3.5km(St.6)、4.1km(St.5)、5.0km(St.4)、6.4km(St.3)、6.8km(St.2)、7.2km(St.1)、7.8km(St.0)である。

得られた試料の分析項目は、全窒素、亜硝酸及び硝酸態窒素(以下IN)、全リン、リン酸態リン(以下PO₄-P)、全有機炭素(以下TOC)、粒度、クロロフィルa(以下Chl-a)、強熱減量であるが、試料により分析項目が異なるため、表-1に沈降量測定装置回収試料、底質試料、採水試料それぞれの分析項目を示す。

分析は、主に上水試験法¹²⁾に基づいて行った。分析は、原水とろ液それぞれについて行い、原水濾過は、孔径1.0 μmのろ紙(Whatman社製)を用いて、吸引濾過をした¹²⁾。

全窒素は、アルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウムにより加圧加熱分解後、INと同様に、カドミウム・銅カラム還元法と同一の原理を用いた連続流れ分析法(オートアナライザー)を使用した¹²⁾。

全リンは、ペルオキシ二硫酸カリウム分解法を用いPO₄-Pとし、PO₄-Pは、モリブデン青法を使用した¹²⁾。

各測定における精度は、CV(相対的なばらつき)約10%である。

TOCは、燃焼酸化法を使用した¹²⁾。強熱減量は、上水試験法に記載された方法¹²⁾を用いた。濁度は、透過光測定法¹²⁾を使用した。Chl-aは、Holm-Hansen法¹³⁾を用いた。

粒度は、レーザー回折式粒度分析装置(SHIMADZU社製、SALD3100)により測定した。計測範囲は、0.05 μm～3000 μmである。本機の性能は、JIS試験用ダスト11により、25%径 0.871±0.27、50%径 2.127±0.41、75%径 4.332±0.99の測定精度である。ここで、積算値50%の粒度を平均粒径(d₅₀)とよぶ。(1)、(2)式に算出式を示す。

$$\mu = \frac{(\log_{10} a - \log_{10} b)(50 - d)}{(c - d)} + \log_{10} b \quad \cdots(1)$$

$$d_{50} = 10^\mu \quad \cdots(2)$$

ここで、 μ : 対数スケール上の粒子径

a : 粒径積算割合50%直後の粒子径

b : 粒径積算割合50%直前の粒子径

c : a の粒径割合

d : b の粒径割合

沈降量は、沈降物質から含水比より乾燥試料を算出し、装置設置日数と捕集面積で除した。(3)、(4)式に沈降量の算出式を記す。

$$m_{dry} = m \times (1 - w) \quad \cdots(3)$$

$$D = m_{dry} / \text{day} / A \quad \cdots(4)$$

ここで、 m_{dry} : 乾燥試料(g) m : 沈降物質重量(g)

w : 含水比, D : 沈降量(gdry/day/m²)

day : 調査日数(日), A : 捕集面積(m²)

調査は、2011年9月1日と2011年9月21日に襲来した台風12号と15号の通過を含む7月27日～10月28日の約3ヶ月間実施した。沈降量測定装置は、平常時として7月27日～8月16日、台風通過期として8月16日～10月7日。貯水池回復期間として10月7日～10月28日の3期間に分けて設置した。また、沈降量測定装置の回収時の8月16日、10月7日、10月28日に多項目水質計による水質測定を実施し、台風通過後の10月7日と10月28日は採水も行った。なお、平常時の底質は、7月27日に採取したものを用いている。

3. 平常時の分析結果

平常時(2011年7月27日～2011年8月16日)における小河内貯水池の日最大放流量は約40万m³/dayであり、主要3河川からの流入量は、最大で丹波川2.9万m³/h、小菅川2.5万m³/h、後山川は1万m³/hであった。

最初に、平常時に貯水池の湖底部に堆積した底質の粒度分析結果を図-4に示す。分析に使用した底質は、採取されたそれぞれの地点のコアサンプルを表層部から1cmの厚さに分画した試料の最上部を用いた。上流部のSt. 0～St. 2では75μm～250μmの粒径の細砂区分の粒子が存在した。St. 3以降の下流の地点では細砂以上の粒径は存在せず、5μm以下の粘土や5μm～75μmのシルトで構成されており、平均粒径からも貯水池内を流下するに従って徐々に粒径が小さくなる傾向が示されている。これ

は、貯水池内では流れや流速が緩やかになるため、河川から流入する粒径の大きな粒子は、St. 0～St. 2の上流部付近で沈降したためと考えられる。一方、粒径の小さな粒子は、貯水池内での移流効果による緩やかな流れとともに堤体部まで到達することができたと考えられる。したがって、流下方向に平均粒径が減少し、上流部の湖底に粒径の大きな粒子が堆積する一方、小さな粒子は堤体前までに移動したということが明らかとなった。

図-5に、各地点の底質の全窒素、全リン濃度及び強熱減量を示す。全窒素濃度は、2.4 mg/gdry～8.5 mg/gdryの間で変動し、全リン濃度は、0.76 mg/gdry～1.03 mg/gdryの間で変動しているという結果が得られた。全窒素は、St. 0からSt. 2まで増加傾向にあったがSt. 3から減少に転じ、St. 6からまた増加傾向となっている。一方、全リンは、St. 1からSt. 3の過程で減少傾向にあるが、St. 3からSt. 6で増加し、St. 7で減少する。強熱減量はSt. 0からSt. 3において全リンと同様の挙動であるが、St. 5～St. 7は全リンのような濃度増加傾向は見られなかった。

以上の結果から、St. 0、St. 1付近の貯水には藻類が存在し沈降したことが想定される。St. 0の上流部には水深

図-4 底質表層部の粒径の推移

図-5 底質表層部の全窒素、全リンと強熱減量

2 m までの分画フェンス, St. 1の下流部には水深 10 m の分画フェンスが設置されており, 貯水の外観の観察によっても, この2地点間は藻類の存在量が多い水域となっていることが確認されている。一方, この2地点以降からSt. 6までの過程において, 強熱減量が減少していることが示されたことにより, 2つの分画フェンスによって藻類の貯水池下流部への拡散を防止していることが推察される。分画フェンスとは水面から水深方向に垂らしたポリエステル製カーテン状のものである。フェンスには, 藻類の増殖を抑制させるために, 表層水中の栄養塩類を光の当たらないより深い所に導くことを念頭に置いているが, 北澤らは⁹⁾, 2004年7~9月の調査期間において, フェンスのアオコ流下抑制効果があることを確認している。また, 表層水移送装置の排出口がSt. 3付近の底層部にあり, 水温躍層の関係でSt. 5付近以降で沈降したことも一因として考えられるが原因は明確ではない。

つぎに, 平常時に沈降量測定装置によって採取された貯水及び沈降物質の分析結果について述べる。ここで, 本論文では, 沈降量測定装置によって回収された貯水中に含まれる浮遊濁質を難沈降性濁質と定義し, 沈降物質は回収容器内に完全に沈殿堆積した物質と定義する。なお, 容器を引き上げた後の運搬中に, 密栓容器内で上澄水と堆積物が多少混合するため, 実験室内で 12 時間以上静置し, 難沈降性濁質と沈降物質に再分離して分析を行った。

図-6 に堤体部付近の沈降量測定装置設置地点である St. 8 において, 回収時である 8 月 16 日に測定をした濁度と水温, さらに沈降量測定装置で採取した貯水中の全窒素と全リンの結果を示す。水温は緩やかな勾配で連続成層を形成し, 水深 30 m 付近に水温躍層みられ, 水深 30 m 以深では水温変化がほとんどなく均一状態となっ

図-6 St. 8での平常時の水深方向の水質変化

ていることが分かる。また, 平常時の水深方向の濁度は, 表層部, 水深 30 m 付近, 底層部では 10 度となっているが, その他の水深では 1 度 前後と低い値で推移している。このため, 貯水中の濁質の粒度分布は測定できなかった。

全窒素, 全リンに関しては, 水深方向の濃度はほぼ一定の値を示した。なお, 上流の St. 3 においても, 連続成層を成した水温分布が存在し, 全窒素, 全リンも水深方向にほとんど変化のないという St. 8 と同様の結果が得られている。TOC も 4 mg/L 程度でほぼ一定であった。

つぎに, 沈降量測定装置に堆積した沈降物質の分析結果について述べる。沈降量測定装置に堆積した沈降物質中の植物プランクトンのChl-aと有機物の指標とされる強熱減量の測定結果について St. 3は図-7に, St. 8は図-8に示す。St. 3の水深2 m に設置された容器内の堆積物の分析結果は, Chl-a濃度 832 $\mu\text{g/gdry}$, 強熱減量は37% であった。表層に近いほどChl-a濃度は高く, 強熱減量も大きい。また, St. 8の水深 2 m の堆積物の分析結果は, Chl-a 濃度 942 $\mu\text{g/gdry}$, 強熱減量 63% であり, St. 3 と同様に,

図-7 St. 3の堆積物中の Chl-a 濃度, 強熱減量分布

図-8 St. 8における Chl-a の濃度分布

表層に近いほどChl-a濃度は高く、強熱減量も大きくなっている。

ここで、St. 3の沈降量測定装置の水深2 mと17 mの堆積物の粒度分析結果を図-9に示す。水深2 mでは細砂と中砂と同粒径の濁質が確認されたが、水深17 mの湖底部には存在しなかった。また図-7に示したようにChl-a濃度や強熱減量は、湖底部の濃度は表層と比較して激減していることから、両地点の表層で確認できた細砂と中砂と同粒径の濁質は、藻類であるとの推測ができる。沈降量測定装置に堆積した沈降物質の外見は、灰緑色を帯びており、図-10のSt. 3の粒度の構成割合の結果からも水深12 m、17 mでは細砂と中砂と同径の粒子が存在しておらず、同様のことが推定できる。

以上のことから、平常時の貯水池においては、水面付近の表層部の貯水には藻類が多く存在し、水深30 m付近までは、水温は連続成層をなしているが、30 m以深ではほぼ均一な温度分布となっていることが示された。また、窒素、リンの濃度もほとんど変化のない低い値で水深方向に推移していることも明らかとなった。

図-9 St. 3の表層と最深部の堆積物の粒度分析結果

図-10 St. 3の水深別堆積物の粒度の構成結果

4. 高濁度時の分析結果および考察

台風による大雨後の小河内貯水池の流入濁質の沈降量及び水環境の詳細を把握するために、台風通過期のデータを高濁度時のデータとし大雨後の貯水池の流下方向の水質分析を行い、貯水池の高濁度時の水質について調査した。なお、台風12号(9月1日)は、最大日降水量140 mm/dayを小河内流域にもたらし、ダム放流量は180万 m³/day、丹波川の最大流量は73万 m³/h、小菅川の最大流量は12万 m³/h、後山川の最大流量26万 m³/hの規模であった。また、台風15号(9月21日)は、最大日降水量145 mm/dayであり、ダム放流量185万 m³/day、丹波川の最大流量132万 m³/h、小菅川の最大流量13万 m³/h、後山川の最大流量23万 m³/hを記録した。

(1) 流入濁質の沈降量

最初に、捕集瓶で採取された沈降物質の沈降量について述べる。上流のSt. 3における沈降量を図-11、堤体付近のSt. 8での沈降量を図-12に示す。両地点ともに、表層から水深40 mの間で水深が増すにつれて、沈降量もまた増加する傾向が確認できる。平常時St. 3での沈降濁質は、水深17 mにおいて19.69 gdry/day/m²であったのに対し、台風通過期の場合239.33 gdry/day/m²と急増した。St. 8での結果もまた、急激に増加したことが確認できた。図-13、14に示した平均粒径から、各捕集瓶に堆積した沈降物質のは、平常時にはシルト粒子がほとんど占めていたの

図-11 St. 3の水深方向の沈降量変化

図-12 St. 8の水深方向の沈降量変化

図-13 St. 3の水深方向の平均粒径の変化

図-14 St. 8の水深方向の平均粒径の変化

に対し、大雨による高濁度時においては、粘土粒子の割合が増加していることが示された。

(2) 流入濁質・全窒素・全リン等の分析

台風15号が通過してから約16日後の10月7日に測定した濁度と水温、また沈降量測定装置により採取された貯水の全窒素と全リンの水深方向の濃度分布についてSt. 3を図-15、St. 8を図-16にそれぞれ示した。両地点ともに平常時と比較して表層における濁度の上昇と全リンの濃度増加傾向が類似しており、小河内貯水池の流入河川は濁度が高いほど全リン濃度も高くなるという過去の研究^{14) 15)}からも、全リンと濁質の挙動が類似していることが確認された。

一方、全窒素は大雨前後に関わらず水深方向の濃度変化は見られなかった。貯水の表層部のTOC濃度は、およそ2 mg/L程度の結果が得られており、平常時に比べて半減していた。また、水深2 mでの沈降量測定装置に堆

図-15 高濁度時(10/7)のSt. 3の貯水の水質変化

図-16 高濁度時(10/7)のSt. 8の貯水の水質変化

積した沈降物質のChl-a濃度を分析したところ、St. 3において127 $\mu\text{g/gdry}$ 、St. 8では174 $\mu\text{g/gdry}$ であった。このことから、3で示した平常時のChl-aの濃度と比較すると、大雨後における藻類の存在量は、平常時と比較して激減したことが確認できた。

以上の結果から、貯水池に流入する濁質は全リンと移動をとにすることが示されたが、全窒素や有機物に対する影響は小さいことが明らかとなった。また、平常時と比べて植物プランクトンが大きく減少しており、原因として、小河内貯水池では表層放流をしていることから、台風時の大量の放流量により流されたことが推測できる。

(3) 高濁度水の挙動

St. 3とSt. 8の水深40 m付近までは水温分布が15°Cでほぼ一定であった。また、両地点とも表層から水深40 m付近まで100度を超える高濁度水の存在が確認できた。St. 8では、水温躍層以深において濁度が減少しており、

このことから、河川から貯水池に流入した高濁度水が、水深 40 m 付近に形成されている水温躍層上を流れていることが推察できた。さらに St. 3 と St. 8 の 2 地点の濁度の結果から、St. 3 で観測した表層から水深 40 m の全層にわたって高濁度水が存在し、堤体部の St. 8 にまで到達していることが明らかとなった。

(4) 難沈降性濁質の分析

(I) 粒度分析結果

貯水池の高濁度状態を引き起こす物質としては、貯水中の難沈降性濁質の存在が考えられる。そこで、高濁度状態の要因と考えられる貯水中の濁質粒子の構成に着目し、(a) 沈降量測定装置で回収した貯水と(b) 各調査地点の最大濁度を得た水深から採取された高濁度水を試料とし粒度分布の測定を行った。

(a) 沈降量測定装置の試料

まず、St. 3 と St. 8 の 2 地点の沈降量測定装置に採取された貯水の粒度分析では、粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以下の粘土区分の濁質が全体の 98% 強を占めていた。これらの濁質の強熱減量が 10% と低かったことから、大雨により流入する貯水中の難沈降性濁質には粘土や粘土区分の濁質が多く含まれており、小河内貯水池の高濁度状態は流入濁質中の微細な粒子である粘土が主な原因と推察された。また、St. 8 における貯水の粒度分析結果を図-17 に示した。この結果から、粘土粒子の中でも、特に $1\ \mu\text{m}$ に相対粒子量のピークが存在することが確認できる。

(b) 最大濁度水深における試料

各調査地点の高濁度水の粒度分析からも 99% 強が微細粒子の粘土で構成されていたことが確認できた。ここで、各調査地点の高濁度水を孔径 $1.0\ \mu\text{m}$ のろ紙を用いてろ過し、ろ液の濁度を測定した。結果を図-18 に示す。ろ液の濁度は $1 \sim 2.5$ 度の範囲となっており、平常時の貯水の濁度とほぼ同じ値となっている。

以上の結果から、高濁度水の要因として、 $1 \sim 5\ \mu\text{m}$ の粘土粒子が主となっていることが示された。

(II) 栄養塩の推移

流入水量が増加する大雨後には、流入濁質の濃度が高くなり、高濁度水の水塊には高濃度の栄養塩が存在することが知られており¹⁰⁾、前述したように今回の結果からも、流入濁質と貯水中の全リンは挙動を共にすることが推察された。そこで、貯水を対象とした全リンと栄養塩の $\text{PO}_4\text{-P}$ に着目して難沈降性濁質との挙動について考察する。まず、貯水を対象に全リンと $\text{PO}_4\text{-P}$ について測定した。また、貯水を孔径 $1.0\ \mu\text{m}$ のろ紙を用いてろ過し、ろ液中の全リンと $\text{PO}_4\text{-P}$ についても分析を行った。貯水の流下方向のリンの分析結果を図-19 に示す。図から、貯水中の全リンの濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は追従しており、

図-17 高濁度時(10/7)の St. 8 の貯水の粒度分析

図-18 流下方向の濁度及び平均粒径

図-19 流下方向のリンの構成成分

全リンは主に $\text{PO}_4\text{-P}$ によって構成されていることが確認できた。さらに、孔径 $1.0\ \mu\text{m}$ のろ紙により得られたろ液の $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は、ほぼ $0\ \text{mg/L}$ を示していた。このことから、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は濁質に吸着され、難沈降性濁質とともに移動していることが明らかとなった。

なお、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と、負に帯電しているコロイド粒子である粘土¹⁷⁾が挙動を共にしている原因としては、吸着態無機態リンとしてリンが存在していたと推察される。流域の土壌にはCa, Na, Kに富んだ閃緑岩が広く分布し、特に、広大な流域をもつ丹波川の流域面積 $127.29\ \text{km}^2$ 中の地質の40%を閃緑岩が占めていたため、大雨により流出した粘土粒子はCaを多く含有し、吸着性の高いカルシウム態リンを形成したことにより、リンと粘土粒子が移動を共にしたものと考えられる。

一方、台風後にSt. 3とSt. 8の沈降量測定装置により採取された貯水分析の結果ではほとんど濃度が変化しなかった全窒素について、流下方向における濃度変化を図-20に示す。窒素は大部分が亜硝酸・硝酸態窒素として存在しており、貯水とろ液の亜硝酸・硝酸態窒素濃度はほぼ同じであった。このことから、小河内貯水池では、窒素への高濁度水の影響はほとんどないといえる。

5. おわりに

本論文では、東京都水道局が保有する小河内貯水池を対象とし、平常期、台風通過期、回復期の3期間に分けて比較分析を行い、大雨や台風時の貯水池の高濁度状態の要因分析を試みた。以下に主要な結果を示す。

- (1) 平常時の小河内貯水池では、水面付近の表層部の貯水には藻類が多く存在し、水深 30 m 付近までは、水温は連続成層をなしているが、30 m 以深ではほぼ均一な温度分布となっていることが示された。また、窒素、リンの濃度もほとんど変化のない低い値で水深方向に分布していることも明らかとなった。さらに、水深 30 m 付近では濁度10度となっているが、他の水深ではおよそ1度の低い値であることが示された。
- (2) 台風通過後の貯水池では、水深 40 m 付近の水温躍層上に高濁度水が存在し、表層から水温躍層までの間に広がっていることが明らかとなった。
- (3) 貯水池の高濁度状態を引き起こす難沈降性濁質の98%強を粘土が占めていることが明らかとなった。粒子径1～5 μm の粘土粒子が難沈降性濁質として小河内貯水池における高濁度化現象の主要な要因であることが示された。
- (4) 全リンは流入濁質と移動をともにし、リンはお

図-20 流下方向の窒素の構成成分

おむね $\text{PO}_4\text{-P}$ で構成されていることが示された。

また、ろ液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、ほぼ $0\ \text{mg/L}$ であったことから、吸着態無機態リンとして難沈降性濁質に吸着されていることが推察された。

- (5) 小河内貯水池では、大雨による濁質の流入によっても全窒素濃度は上昇しないことが示された。

以上の結果から、小河内貯水池では高濁度水が水深 40 m の水温躍層上に存在したため、放流水深の調整により、高濁度化の主因となる微細粒子の早期放流をすることが可能であると考えられる。また、小河内貯水池での藻類発生はリン制御とされているため、大雨によって濁質とともに流入するリンの早期放流は、アオコ発生対策としても重要である。

本論文では、夏季から秋季にかけての高濁度化現象の調査結果について述べたが、今後の課題として、主要な要因である微細粒子の発生源、発生状況を自然データや社会データを用いて明らかにするとともに、高濁度状態の原因物質の流入防止対策の検討が必要である。

参考文献

- 1) 社団法人日本水道協会：平成22年度水道統計 施設・業務編，p.32，2010。
- 2) 滝沢智，小熊久美子，伊藤くみ，村上道夫：地球温暖化に伴う水道水源水質の変化の推定方法に関する検討，第43回日本水環境学会年会講演集，p.12，2009。
- 3) 新山雅紀，小林真之，横山勝英，小泉明，山崎公子，増子敦，池田麻衣子：小河内貯水池における水質保全施設の流動制御機能に関する研究，水工学論文集，第55巻，pp.S_1501-S_1506，2011。

- 4) 吉村信吉：湖沼学増補版，生産技術センター，pp.327-350，1979.
- 5) 橋治国，那須義和：富栄養化水域での水質の解析，水の分析（日本化学分析科学会北海道支部），p.493，化学同人，1999.
- 6) K.W.ソーントン，B.L.キメル，F.E.ペイン：ダム湖の陸水学，生物研究社，pp.13-33，2004.
- 7) 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規2012(水質編) 別冊公害防止関連法 水質編，p.35，2012.
- 8) 山崎公子，菊池彩子，小泉明，横山勝英，関丙大，田村聡志，池田麻衣子：小河内貯水池における降雨時流入濁質に関する流出時間の推定，土木学会論文集G(環境)，Vol.67，No.6(環境システム研究論文集 第39巻)，pp.IL 385-IL 393，2011.
- 9) 北澤弘美，北田真吾，斎藤滋，佐藤親房，小泉明：小河内貯水池におけるアオコ発生抑制対策とその効果，水道協会雑誌第77巻，第9号(第888号)，pp.10-24，2008.
- 10) 東京都水道局：平成21年度小河内貯水池管理年報，pp.76-77，2009.
- 11) 早川友康，山崎公子，小泉明，川村竜也，横山勝英，田村聡志，池田麻衣子：小河内貯水池における濁質沈降量の測定実験，第62回全国水道研究発表会講演集，pp.172-173，2011.
- 12) 日本水道協会：上水試験方法2001年版，p.84，pp.117-118，p.156，p.119，pp.214-215，p.217，p.238，pp.240-241，2001.
- 13) APHA，AWWA，WEF：STANDARD METHOD for the examination of water and wastewater，10200 H. Chlorophyll，pp.10-17-10-20，1999.
- 14) 佐藤慎司：地域環境システム，p.149，2011.
- 15) 津崎将人，小泉明，山崎公子，横山勝英，北澤弘美，金見拓：小河内貯水池に流入する総リン，総窒素に関するマクロ的算定方法の検討，第58回全国水道研究発表会講演集，pp.114-115，2007.
- 16) Kennedy，R.H.，K.W.Thornton，and R.C.Gunkel，Jr.1982.The establishment of water quality gradients in reservoirs. Can. Wat. Res.J.7：pp.71-87，1982.
- 17) 日本粘土学会：粘土ハンドブック，p.5，p.711，1967.

(2012. 5. 25 受付)

Factor Analysis of High Turbidity Phenomenon in Ogouchi Reservoir Caused by the Suspended Matter Inflow During Heavy Rain

Kimiko YAMAZAKI¹, Michihiko MURAYAMA^{1*}, Akira KOIZUMI¹,
Katsuhide YOKOYAMA¹, Hideyuki AOKI² and Tomoe IWAMOTO²

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University

²Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government

Following periods of heavy rain from severe storms and typhoons, water with high turbidity and high levels of suspended matter flows into reservoirs from watershed areas. High turbidity levels may continue to persist for some time. Furthermore, when reservoir water turns cloudy, it can disrupt water purification system and resources for an extended period. This paper, as basic research, measures the movement of high turbidity water through Ogouchi Reservoir in order to control water quality by releasing high turbidity water during heavy rains. We compare suspended solids between normal conditions and periods of high turbidity, and this analysis of suspended solids that flow into the reservoir during rainfall forms the basis of our data. We discuss the causes of turbidity and consider its influence. As a result, we show that the high turbidity in the reservoir is due mainly to clay particles with the size of less than 5 μ m. Moreover, we confirmed that the suspended solids contain certain amount of phosphorus which is consisted mainly of phosphate ion.