小河内貯水池における出水に伴う水質状況の変化

北 田 真 吾* 國 枝 晴 子* 田 中 繁 樹*
 安 藤 敦 子* 齊 藤 滋** 宮 垣 融*

Alteration of Water Quality in Ogouchi Reservoir Caused by Freshets

Shingo KITADA*, Haruko KUNIEDA*, Shigeki TANAKA*,
 Atsuko ANDOH*, Shigeru SAITOH**, Tohru MIYAGAKI*
 and Masaru OZAKI***

* Water Quality Management Center, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government, Hongou 2-7-1, Bunkyo-ku 113-0033, Japan

** Water Resources Administration Office, Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government, Urajuku 600 Oume 198-0088, Japan

*** Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government, Nishi-shinjuku 2-8-1 Shinjuku-ku 163-8001, Japan

Abstract

The Ogouchi reservoir is one of the biggest dams for waterworks in Japan. We have been monitoring its water quality since its establishment. We introduced vertical curtains and some types of equipment in order to suppress algal blooms in the reservoir. The equipment showed suppressive effects against algal bloom expansion by suppressing the increase in surface temperature in the reservoir. An extensive flood in September 2007 induced a marked change in water quality. Because there was no turbidity before the flood, turbid water influx was observed in the depth range of 0-40 m near the dam. In the case of an extensive flood, it is necessary to operate the gates of the dam to form the secondary thermocline at an appropriate depth for discharging turbid water speedily.

Key words: reservoir, freshet, turbid water, nutrient

1. はじめに

東京都の水道水源は、利根川水系が約8割、多摩川水系が約2割である。多摩川水系の水源は、水需要が増加する夏季や利根川水系での水質事故時、渇水時などに活用する貴重な水源である。小河内貯水池は、この多摩川上流に位置し、東京都が所有する有効貯水量が1億8540万 m^3 、有効水深がダム堤体部付近で101.5m、水道専用としては国内最大級のダム湖である。

小河内貯水池では、平成2年以降、藍藻類による水の華であるアオコが毎年発生し、平成13年には、ダム放流水からカビ臭原因物質が検出されるようになった。そこで、昭和32年の貯水池竣工以来実施してきた水質調査を強化するとともに、アオコ抑制対策に着手した。水質センターでは、平成14年から水質調査の強化の一翼を担っている。

本報では、平成19年に小河内貯水池を管理する水源管理事務所と分担して実施した貯水池水質調査の結果を報告する。また、平成19年には、台風の襲来により多量の濁水が貯水池へ流入したので、この濁水の挙動についても合わせて報告する。

2. これまでのアオコ抑制対策の経過

小河内貯水池の集水域は、東京都奥多摩町、山梨県丹波山村、小菅村及び甲州市の4市町村に及ぶ。主な流入河川は、丹波川、後山川、小菅川、峰谷川の4河川で、年間を通じての平均的な流入量は、それぞれ約4, 1, 2, 0.5 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ であり、これらが全流入量の約9割を占めている。後山川を除いた3河川の上流には村落があり、栄養塩類は自然負荷と人為負荷が混在している。

一方、ダム放流水の水温が水辺のレジャー等に適する水温となるよう、平成4年以降4月から11月までの期間に貯水池表面から水深数mの水を放流している（以下、「冷水対策」という。）。近年、アオコの発生日数と発生規模が年々増加する傾向にあることから、栄養塩類の流入負荷や冷水対策とアオコ発生との因果関係について検討を進めるとともに¹⁾、この結果に基づいてアオコ抑制対策を実施している。この効果の検証については、別途報告されている^{2, 3)}。

小河内貯水池におけるアオコ抑制対策は、Fig. 1に示すとおり、①分画フェンスの設置、②表層水移送装置の設置、③冷水対策における放流水深の微調整の3点である。

* 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

** 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

*** 東京都水道局 〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1

Fig.1 Ogouchi reservoir and locations of equipments against algal bloom

分画フェンスの概要を、Fig. 2に示す。分画フェンスは、貯水池を横断するように水面から垂下することで、アオコの流下抑制あるいはアオコ形成域の狭小化を企図するものである。小河内貯水池では、藍藻類が増殖する起点は、河川流入部の上流部分であることが確認されていることから、丹波川及び小菅川、峰谷川の各流入部に水面から深さ10mまでフェンスを垂下した分画フェンス（以下、「第1フェンス」という。）を各1基、平成15年に設置した。さらに、平成17年には、丹波第1フェンス及び小菅第1フェンスの上流側には水面から深さ2mまでフェンスを垂下した分画フェンス（以下、「第2フェンス」という。）を1基ずつ設置している。

表層水移送装置の概要をFig.3に示す。表層水移送装置は、貯水池表層に浮遊するアオコ形成藍藻類を貯水池表面から水深1m程度までの水とともに吸入して貯水池中層へ移送することで、アオコ状態の解消を企図するものである。この装置は、平成16年から設置を進め、現在は、丹波川及び小菅川、峰谷川の流入部に処理水量 $2,000\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ の装置を各1基導入している。装置の吸入口は第1フェンスの上流側約100m地点、吐出口は満水面から水深40m（貯水位60m）程度となる地点（吸入口から400～600m下流の湖底）である。装置は、9月上旬の出水直後を除き、6月から10月まで連続運転した。

放流水温の低下を抑えながら放流水深の微調整を図ることにより、流入河川水中の栄養塩類を貯水池から迅速に排除する取り組みを行っている。

これらの対応により、アオコの発生は、平成16年から縮小傾向に転じている³⁾。

Fig.2 Vertical Curtain

Fig.3 Surface water transfer equipment

3. 平成19年調査の結果と考察

3.1 貯水位、流入量等

貯水位及び流入量の推移をFig. 4に示す。貯水位は概ね95m前後（貯水率で80%から90%程度）で推移した。台風等による多量な河川水の流入（以下、「出水」という。）は、7月中旬、7月下旬、9月上旬、10月下旬の4回発生している。特に、9月上旬の出水は既往最大規模で、流入量の合計は約1億 m^3 であった。これは、貯水量の約7割が入れ替わる水量に相当する。この出水の際、小菅第1フェンスと峰谷フェンスは、流入量が設定値を超えたことから安全装置が働き、切り離しを行っている。また、ダム施設の安全を確保するため、流入量に合わせて緊急放流を行っている。なお、緊急放流が行える貯水位は、95m以上である。

3.2 水温分布

ダム前の鉛直水温分布及び水温躍層の推移をFig. 5に示す。水温躍層は、水温鉛直分布のなかで水温が急激に変化する層のことをいう。ここでは、水深1mあたりの水温変化が 1°C 以上のものを「水温躍層」と呼び、 0.5°C から 1°C のものを「弱い水温躍層」と呼ぶこととする。貯水位60m程度で深の水温は、12月末まで 10°C 未満であるが、表層の水温は、8月には 25°C を超え、最高 27.4°C に達している。水温躍層は、最大で3段形成されていることが分かる。1段目の水温躍層は水深5mから10m程度（以下、「1次躍層」という。）、2段目の水温躍層は水深15mから30m程度（以下、「2次躍層」という。）、3段目の水温躍層は水深35mから40m程度（以下、「3次躍層」という。）に形成している。

2次躍層は、7月中旬及び9月上旬の出水の影響を受け、形成状況が変化している。7月中旬の出水後、1次躍層と2次躍層に挟まれる層が厚くなり、2次躍層がより深い水深に形成されている。一方、9月上旬の出水後は、1次躍層と2次躍層に挟まれる層が厚くなるばかりでなく、2次躍層が徐々に消滅している。3次躍層の形成水深は、表層水移送装置吐出口の設置水深と概ね同程度である。

年間を通じて平均的な流量となっている時期（以下、「平水時」という。）における河川流入部の水温縦断分布をFig. 6に示す。1次躍層は、フェンス下流側では水深5m程度であるのに対して、フェンス上流側では水深1m程度に形成されており、分画フェンスと表層水移送装置の相乗効果³⁾によって、第1フェンス上流側の水温が下流側の水温に比べて低く保たれていることが確認された。また、丹

Fig. 4 Seasonal variation of water level and the inflow rate (2007)

Fig. 5 Seasonal variation of water temperature at the point in front of the dam (2007)

Fig. 6 Profile of water temperature at the influx points in summer season (14th Aug)

波第2フェンス付近における1次躍層の形成水深は、丹波第1フェンス直上流では1m程度であるのに対し、2から4m程度とより深くなっていた。丹波第1フェンス及び小菅第1フェンスの上流域においては、日中に表層で発生する上流へ向かう流れ^{3, 4)}により、表層の温かい水が第2フェンスの下流側近傍に集められているものと考えられる。

貯水池等の表面水温が25℃程度以上になるとアオコが形成されやすいと言われている⁵⁾ことから、第1フェンスの上下流において貯水池表面の水温が25℃以上になる期間を比較した。結果をFig. 7に示す。水温が25℃を越える期間は、フェンスの下流域では40日程度であるのに対し、フェンスの上流域では丹波川流入部で20日程度、小菅川及び峰谷川流入部では10日程度であった。

Fig. 7 Surface water temperature near the curtains (2007)

河川流入部に架かる橋梁地点における鉛直水温分布及び水温躍層の推移をFig. 8に示す。これらの地点では、ダム前とは異なり、8月中旬から9月上旬にかけて1次躍層と2次躍層の間に新たな水温躍層（以下、「1.5次躍層」という。）が形成され、最大4段の水温躍層が形成されている（貯水位60m程度に形成されている3次躍層は、紙面の関係から省略した）。この1.5次躍層は、7月中旬の出水前における2次躍層と概ね同程度の水深に形成されていた。

3.3 濁度分布

ダム前の鉛直濁度分布をFig. 9に示す。7月中旬の出水直後を除き、8月末頃までは、全層に渡り3度程度以下であった。しかし、9月上旬の出水後には、3次躍層相当水深まで100度以上の濁水が流入した。この濁水は、水温躍層の消滅とともに拡散し、平成19年12月末現在も一部が残留している。

3.4 藻類発生状況

ダム前及び河川流入部における藻類の発生状況をFig. 10に示す。6月中は珪藻類が、7月から8月は緑藻類が目立つが、9月以降はその他の藻類の比率が高くなっている。アオコ形成藍藻類のアナベナ、ミクロキスチスは、主に8月中旬に小菅川流入部で検出されているが、アオコ形成には至らなかった。これは、第1フェンス上流側の貯水池表面の水温が下流側よりも低く抑えられたことにより、藍藻類が増殖できる期間を短くすることができたこと等によるものと考えられる。

Fig. 8 Water temperature at the influx points (2007)

Fig.9 Seasonal variation of turbidity at the point in front of the dam (2007)

Fig.10 Enumeration of phytoplankton in summer (2007)

3.5 カビ臭原因物質検出状況

カビ臭原因物質の検出状況をFig. 11に示す。カビ臭は、8月上旬に小菅川流入部で検出され、8月中旬に $80\text{ng}\cdot\ell^{-1}$ を記録したのち、減少傾向に転じた。他の河川流入部でも小菅川流入部に遅れて検出されるようになったが、ダム前では検出されなかった。カビ臭原因物質は、9月上旬以降は、出水により押し流されたものと推定される。

4. 出水に伴う濁質の大量流入とその後の経過

平成19年の出水は、7月中旬、7月下旬、9月上旬及び10月下旬の4回発生しているが、比較的規模の大きかった7

Fig.11 Concentration of geosmin in summer (2007)

月中旬と9月上旬の出水について、濁度分布と栄養塩類の分布について詳しく述べる。

4.1 7月中旬の出水に伴う貯水池水質状況の変化

7月中旬の出水後約1ヶ月経過した時点における河川流入部の水温分布をFig. 12に示す。いずれの河川流入部でも、水深10mから12m、すなわち第1フェンス下端の直下1m程度に1.5次躍層が形成され、これが第1フェンスの上流側は100m程度以上、第1フェンスの下流側は湖心部まで広がっている。この時点における流入水温と1.5次躍層の上側直近の水温は、いずれも 18°C 程度であった。また、1.5次躍層の形成は、Fig. 8に示したとおり、出水後1ヶ月程度経過した時点でも見られる。このことから、1.5次躍層は、河川流入水が貯水池内を流下する際、その下側の層との境界面として形成されていることが示唆され、Fig. 12に示す状況は、河川流入水が第1フェンスの少なくとも100m上流で水深10mから12m程度を流下するように流れを変えている可能性を示唆するものであると考えられる。

7月中旬の出水後における濁度縦断分布をFig. 13に示す。比較的高い濁度を示しているのは、丹波第1フェンスと丹波第2フェンスに挟まれた区間の水深5m程度の部分及び第1フェンスからダム前までの水深10m程度の部分である。このことから、7月中旬の出水によって流入した濁水は、2次躍層を破壊することなく1次躍層と2次躍

Fig.12 Profile of water temperature at the influx points in summer (28th Aug)

Fig.13 Profile of turbidity after the small freshet (18th Jul)

層の間を流下していることが示唆された。これは、Fig. 9に示したとおり、貯水池の濁度状況が迅速に回復していることから推測できる。また、濁質の分布状況から、河川流入部には、流入端から第1フェンスに達する水深5m程度の流れがあり、第1フェンス付近で穏やかな下降流が発生していることも考えられる。

以上のことから、河川流入部において、河川流入水はFig. 14に示すように流動している可能性が示唆された。平成18年度に実施したコンピュータによる水質シミュレーション調査の結果でも、このような2層に分かれる流れが発生する可能性が示唆されている。濁度分布から導き出される湖水の流れが実際に存在し、かつ、アオコ形成藍藻類が流入端でその流れに連行されていると仮定すると、平成16年に行った調査の結果のとおりアオコ形成域が第1フェンス上流側に限定されていたことが説明できる。すなわち、アオコ形成藍藻類には浮上性があることから、流入端から流下する過程で徐々に浮上していくとともに、第1フェンス付近の緩やかな下降流には連行されず、表層に浮上することでフェンス下流側へ流出する可能性はほとんどなくなり、フェンス上流側に集積するからであると考えられる。今後、河川流入部において湖水の流動と藻類の挙動に関する詳しい調査が必要と考えられる。

2次躍層あるいは1.5次躍層の形成水深は、流入河川水の水温、貯水池水温分布、取水口水深等に依存しており、出水によって貯水池の水温分布が乱されても、台風による出水は比較的高水温期に発生することから、平水状態へ戻る過程で取水口水深にあわせた水深に水温躍層が新たに形成されることが考えられる。また、河川流入水は、2次躍層の上面に沿って1次躍層と2次躍層の間を流れると考えられる。このことから、冷水対策の観点から放流水温の低下に留意する必要があるが、出水時の流入量を勘案して、適切な水深に水温躍層を形成できるよう取水口水深を設定して強固な2次躍層を形成させることで、台風後の水質回復の迅速化が図れる可能性があると考えられる。

4.2 9月上旬の出水に伴う貯水池水質状況の変化

流入量が既往最大規模であった9月上旬の出水によって流入した濁水は、1次躍層と2次躍層に挟まれた層の容積に対して流入量が極めて多かった。このため、Fig. 15に示すとおり、2次躍層の形成水深を押し下げるとともに躍層そのものを不鮮明にし、さらに2次躍層と3次躍層に挟まれた層へも流入したと考えられる。濁水の迅速排除のた

Fig.14 Enlarged view of the vertical curtain area

め、放流量の増加や第2取水施設の運用期間延長などによって対応してきたが、前述のとおり、19年12月末現在も貯水池内に濁水の一部が残留している。濁水と栄養塩類である総リンの分布には相関がある⁶⁾ことから、平成20年の春季以降、水温の上昇に伴って藻類の異常増殖を引き起こす可能性がある状況となっている。今後も、貯水池の水質状況を注視していく必要がある。

平水時における栄養塩類の検出状況は、過去の調査でおおむね明確になっているが¹⁾、出水時における栄養塩類の分布については、詳細な調査が行えず、これまで明確でなかった。9月上旬の出水から約10日経過した時点における総リン及びリン酸態リンの縦断分布をFig. 16及びFig. 17に示す。総リンは、湖心部下流部分及び峰谷川流入部の水深15mから20m程度を中心に高濃度で分布している。一方、リン酸態リンは総リンの分布傾向とは異なり、今回の台風による出水時のように藻類がほとんど存在していないと考えられる状況下では、湖心部上流部分及び小菅川流

Fig.15 Profile of turbidity after the big freshet (13th Sep)

Fig.16 Profile of total phosphorus after the big freshet (13th Sep)

Fig.17 Profile of orthophosphoric acid after the big freshet (13th Sep)

入部の水深15mから20m程度を中心に比較的高濃度で分布していることが分かる。これについては、①リン酸態リンと総リンの貯水池への流入は同時であったが、リン酸態リンは貯水池内でわずかに残留している藻類に吸収、あるいは濁質に吸着されたため検出されなかった、②総リンは、水源林表層の土砂とともに貯水池へ流入したが、リン酸態リンは土壌を経由して地下浸透水に出たものであることから、貯水池への流入に時間差が生じた、などの理由が考えられる。引き続き調査の必要があると思われる。

5. まとめ

平成19年における小河内貯水池の水質調査を実施した。その結果は、以下のとおりであった。

1) 貯水位は、90m台で推移した。台風等による出水は4回あり、このうち9月上旬の出水による流入量は、既往最大規模であった。

2) ダム前の水温は、貯水位60m以深は年間を通じて概ね10℃以下であったが、表層では最高27.4℃に達した。

3) 水温躍層は、ダム前で最大3段、河川流入部では最大4段形成され、ダム前の2次躍層は、9月上旬の出水により消滅した。

4) ダム前の濁度は、7月中旬の出水直後を除き、8月末頃まで全層に渡り3度以下であったが、9月上旬の出水

後には、3次躍層相当水深まで100度以上の濁水が流入した。この際に流入した濁水は、12月末現在も一部が残留している。

5) 藍藻類は、8月に河川流入部で藍藻類が観察されたが、アオコ形成には至らなかった。

6) カビ臭原因物質は、藍藻類の出現に伴って河川流入部で検出されたが、ダム前では検出されなかった。

7) 7月中旬に発生した出水後の濁度分布状況から、第1フェンス近傍では、鉛直方向で2層に分かれた流れがある可能性が示唆された。分画フェンスの機能をより明確にするためには、河川流入部における潮水の流動と藻類の挙動について調査していく必要がある。

8) 大規模出水があった場合でも濁水を迅速に排除するためには、出水による流入量を勘案した水深に2次躍層を形成できるような貯水池運用が必要であると考えられた。

9) 9月上旬に発生した出水により大量の濁水が貯水池へ流入した。この際に流入した濁水は、12月末現在一部が未だに貯水池内に残留しており、平成20年の春季以降、水温の上昇に伴って藻類の異常増殖を引き起こす可能性がある状況となっている。

10) 9月上旬の出水後において、総リンは主に湖心部下流部分に高濃度で分布し、リン酸態リンは主に湖心部上流部分に高濃度で分布していた。これらの分布状況の違いについて、引き続き調査の必要があると思われる。

(原稿受付 2008年3月29日)

(原稿受理 2008年8月22日)

参考文献

- 1) 北澤弘美, 富永和樹, 北田真吾, 斉藤滋, 佐藤親房, 小泉明 (2007) 貯水池からの表層放流がアオコ発生に及ぼす影響, 環境工学研究論文集, 44, 513-524.
- 2) 北澤弘美, 北田真吾, 湯浅岳史, 佐藤親房, 小泉明 (2007) 小河内貯水池における潮水流動・水質モデルの構築, 水道協会雑誌, 76 (7), 16-30.
- 3) 北澤弘美, 北田真吾, 斉藤滋, 佐藤親房, 小泉明 (2008) 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, 77 (9), 10-24.
- 4) 横山勝英, 小泉明, 山崎公子, 前田英二, 北澤弘美, 金見拓 (2007) 小河内貯水池分画フェンスの水理的機能と水質制御について, pp. 112-113, 第58回全国水道研究発表会講演集 (社) 日本水道協会.
- 5) 水資源開発公団 試験研究所 水環境研究室 (2000) ダム貯水池の水質 (2訂版), pp. 35-54, (水資源開発公団).
- 6) 山崎公子, 小泉明, 宇野仁昭, 横山勝英, 北澤弘美, 金見拓 (2007) 森林河川に与える降雨の影響, pp. 564-565, 第58回全国水道研究発表会講演集 (社) 日本水道協会.