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

STUDY ON THE WATER CURRENT CONTROL
BY THE WATER PRESERVATION FACILITIES IN OGOUCHI RESERVOIR

新山雅紀¹・小林真之²・横山勝英³・小泉明⁴・山崎公子⁵・増子敦⁶・池田麻衣子⁶

Masaki NIYAMA, Masayuki KOBAYASHI, Katsuhide YOKOYAMA, Akira KOIZUMI,
Kimiko YAMAZAKI, Atsushi MASUKO and Maiko IKEDA

¹正会員 修(工) 首都大学東京大学院 都市基盤環境工学専攻(〒192-0397 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 都市基盤環境学域(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 博(工) 首都大学東京大学院准教授 都市環境科学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴フェロー会員 工博 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁵正会員 博(工) 首都大学東京大学院助教 都市環境科学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁶非会員 東京都水道局(〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

The vertical profiles of water current and temperature were measured in the Ogouchi Reservoir in order to investigate the mechanism of the water current control by the water preservation facilities. The constant current of 30 mm/s was observed around the vertical fence, it was suggested that these flows were a river inflow. And it was appeared that these flows were directed to the depth of 10 m by the vertical fences, and led to the layer which was the same temperature as the river inflow in center of the reservoir.

As results of numerical calculation, the mechanism of the water current control by the vertical fence is reproduced, it was shown that water temperature was decreased in the upstream region of the vertical fence. It was suggested that it is possible to lead efficiently the river inflow by setting the withdrawal gate on the layer of the same temperature as the river inflow.

Key Words: reservoir, current control, water preservation facility, vertical fence, numerical calculation

1. はじめに

ダム貯水池では、濁水長期化やアオコの異常発生などの水質問題に対して、曝気循環施設、選択取水施設、分画フェンスといった水質保全施設の設置による対策が進められている。近年は、これらの水質保全施設を複合的に利用し、貯水池内の流動を制御して河川から流入する濁質や栄養塩を速やかに効率良く放流する水質対策¹⁾が実施され始めている。そのため、貯水池内に流入する河川水や濁水の挙動を適確に把握し、水質保全施設の効果を適切に評価して効率の良い施設運用方法を確立することが求められている。

水質保全施設に関する研究としては、曝気循環施設の影響や効果に関する研究が進められており釜房ダム²⁾をはじめ、施設効果について数多くの知見が得られている。分画フェンスについては、秋山ら³⁾による潜入密度流へのフェンス効果の研究、古里ら⁴⁾によるフェンスを利用した成層破壊に関する研究などの水槽を用いた実験に基づく研究が多く実施されている。

また、吉村ら⁵⁾による寺内ダムを対象とした分画フェンス周辺の水温構造に関する調査結果が報告されているが、気象条件や成層状態により複雑な現象が発生する実貯水池における研究事例は少ない。分画フェンスや取水施設の複合的な運用による河川水の誘導効果に関する実

貯水池内での検証事例はほとんどないのが現状である。また、国外においては、数値シミュレーション手法の研究開発が活発に進められており、Cesare ら⁶⁾は3次元モデルを用いて貯水池の濁水挙動を検証できる貯水池管理に有用なツールを開発している。

そこで本研究では、小河内貯水池全体を対象として流速及び水温観測を行い分画フェンス周辺の流動制御機能と取水施設による河川水の誘導機能を把握するとともに、数値シミュレーションによって、これらの水質保全施設の湖内流動や水温構造への影響について考察した。

2. 観測概要

(1) 対象貯水池

研究対象池は、東京都奥多摩町に位置する小河内貯水池である。図-1に貯水池概要を示す。流域面積262.9 km²、総貯水容量1億9千万 m³ のわが国最大級の水道専用貯水池である。流入する主要河川は、丹波川 (127.3 km²)、後山川 (30.9 km²)、小菅川 (42.3 km²)、峰谷川 (15.5 km²) であり流域面積の約75%を占めている。

小河内貯水池では、従来中層取水が実施されていたが、放流水の冷水対策として1992年から第二取水施設を利用して成層期には常時表層取水を実施するように変更された。その後、藍藻類で構成されるアオコの発生が顕著になり湖心からダム地点でも確認されるようになったが、北澤ら⁷⁾、牧野ら⁸⁾は放流水深の変更によって貯水池内の水温特性が変化したことが大きな要因であると指摘している。

東京都水道局は、アオコ発生抑制対策として貯水池上流部に分画フェンス (図-2) を設置し2004年から本格的に運用し始めた。分画フェンスは、ダム貯水池の横断方向に水深10 mまでポリエスチル製のカーテンを吊り下げ、施設上流部で発生したアオコの拡散を防止するとともに、洪水時に流入する濁質や栄養塩を含む河川水を中層に誘導することが期待されている。

(2) 観測方法

図-3に観測方法を示す。集水面積の約60%を占める丹波川筋 (後山川を含む) の分画フェンス上下流100 m地点 (St.A, St.B) と貯水池中心部 (St.C) において流速及び水温を連続観測した。

流速計 (RDI製WH-ADCP1200kHz, 600kHz) を底層上向きに設置して、層厚0.5 m, 10分間隔で流速を連続計測した。また、小型水温計 (Onset製Tidbit) を水面から水深20 mまで1 m毎にロープに取り付け、それぞれ10分間隔で連続計測した。観測期間は2008年7月である。

流入河川 (丹波川, 後山川, 小菅川, 峰谷川) における流量、水温及び降雨量データに関しては、東京都水道局のデータを使用した。また、気温、湿度に関しては、気象庁小河内観測所のアメダスデータを用いた。

図-1 対象貯水池

図-2 水質保全施設

図-3 観測方法

3. 水質保全施設による流動制御機能

(1) 降雨量及び河川状況

図-4に降雨量、流入量、放流量及び河川水温の時系列変化を示す。降雨量は小河内ダム流域平均雨量、河川流量は丹波川、後山川、小菅川、峰谷川の総流量、河川水温は丹波川と小菅川の観測値を用いた。

観測期間内では、7月15日に時間雨量20 mm程度の降雨によるピーク流入量20 m³/sの中規模出水が発生した以外は大きな出水は無く穏やかな気象条件であった。小河内貯水池への流入量は平常時に約10 m³/sであり、対象期

間内は流入量と同程度の $12 \text{ m}^3/\text{s}$ の放流を続けていた。河川水温は7月10日には 15°C であったが、 2°C 程度の日変動を伴いながら気温の上昇とともに7月20日には 20°C まで上昇している。丹波川と小菅川は流域面積が4倍の違いがあるものの流入河川水温は同程度であり日変動状況はほとんど変わらないことがわかる。

(2) 貯水池内の鉛直水温構造

図-5にSt.A（分画フェンス上流側）、St.B（分画フェンス下流側）及びSt.C（湖心）の水温変化を示す。水面から水深20 mまで1m毎に観測した水温データを用いて等水温線図を作成した。

St.A（上流側）をみると、水深2 mまでの表層で水温上昇がみられ、7月10日で 20°C 、7月20日で 25°C まで上昇している。一方で水深3 m付近に一次躍層が発達しており、水深12 m付近まで流入河川水温とほぼ同程度の水温層が形成されていた。また、水深12 m付近に二次躍層が発達している。

次に、St.B（下流側）をみると、水深5 mまでの表層で水温上昇がみられ7月20日には 28°C まで上昇していた。一次躍層の位置は水深5 m付近に発達しており、St.Aと比べると2 m程度深い位置に発達していることがわかった。また、水深12 m付近には二次躍層は見られない。St.C（湖心）をみると、水深5 m付近に一次躍層が発達した連続成層場が形成されておりSt.Bと同じ状況である。したがって、分画フェンスの上流側と下流側で異なる水温分布特性であることがわかった。

図-6に7月10日と20日の鉛直水温分布を示す。7月10日をみると、St.BとSt.Cはほぼ同じ鉛直水温分布を示しているが、St.Aの表層から水深5 m付近までの水温が低いことがわかる。これは7月20日においても同じ現象が発生しており、水温成層発達期には常に分画フェンス上流側の表層水温が低く維持されると考えられる。

また、St.Aの水深3 mから10 mまでの一定水温層は7月10日で 16°C 、20日で 18°C であり流入河川水温と同じである。したがって、水深10 mまで吊り下げられたカーテンにより水深3 mから10 mの領域に河川水が滞留し、その影響で表層水温が低く維持されると考えられる。

(3) 分画フェンスの流動制御と河川水の誘導

図-7にSt.A（分画フェンス上流側）、St.B（分画フェンス下流側）及びSt.C（湖心）の流速変化を示す。層厚0.5 m、10分間隔で計測された流速データを6時間移動平均し時系列図を作成した。プラスを下流へ向かう流速、マイナスを上流へ向かう流速とし、表層は計測水深の6%をブランク領域として黒色で表現した。

St.A（上流側）をみると、水深8 mから11 mの領域に下流へ向かう 30 mm/s 程度の定常流が発生していることがわかる。この流れは、一日の中で流速の強弱が見られるが水深10 m付近で常時発生しており、湖水がフェンス

図-4 気象及び河川水状況

図-5 水温時系列変化

図-6 鉛直水温分布

下端を潜り下流へ向って動いていることを示している。また、下流向きの流れが強まると、水深12 mから17 m付近や水深3 mから7 m付近に上流へ向かう流れ（反転流）が発生しており、下流へ向かう定常流の影響により中層で逆向きの流れが発生していると推測される。

次に、St.B（下流側）をみると、水深5 mから8 m付近に下流へ向かう30 mm/s程度の定常流が発生していることがわかる。分画フェンス下端を潜った流れは、下流側で2 mから5 m浮上し下流へ向かう特性があることがわかった。St.C（湖心）をみると、St.Bに比べて流速は小さくなるが15 mm/sの下流へ向かう定常流がSt.Bと同じ水深に発生していることがわかる。

図-8に7月10日と20日の鉛直流速分布を示す。7月10日をみると、下流へ向かう流れが発生しているがピーク流速は下流側ほど小さくなることがわかる。また、ピーク流速の発生位置は、St.Aで水深10 m、St.Bで8 m、St.Cで7 mである。この層の水温は、St.Aで15.9℃、St.Bで16.0℃、St.Cで16.7℃であり、流入河川水温とほぼ一致する。

従って、この流れは流入河川水であると推測され、分画フェンスの設置により上流側では水深10 m付近の中層へ河川水が誘導されていることを示している。また、河川水温が18℃に上昇した7月20日でもSt.Aでは水深10 mにピーク流速が発生しており、常に河川水を中層へ誘導する制御機能が発揮されていることがわかる。

7月20日ではSt.B及びSt.Cで水深6 mにピーク流速が発生しており、湖心においても河川水が下流へ導かれていることを示している。観測期間内の取水施設のゲート位置は水深6.5 mに設定されており、流入河川水温と同水温層にゲートを設定することで、河川水を効率よく導いていると考えられる。

4. 数値解析による流動制御機能の検証

新谷⁹⁾が開発した三次元流体モデルFantom 3D¹⁰⁾を用いて、ダム貯水池における分画フェンスと取水施設による河川水の流動制御メカニズムを検証する。数値解析モデルの概要を表-1に示す。

本モデルは、基礎方程式に非圧縮とブジネスク近似を施した3次元Navier-Stokes式を用い鉛直方向に静水圧近似を設けた3次元流体モデルである。計算格子にスタガード格子を用いUltimate Quickest法によって離散化した。貯水池全体を10個の領域に分け（図-9）、水平方向（ Δx 、 Δy ）をフェンス周辺12.5 m、その他25 m、50 m、100 m、鉛直方向（ Δz ）を1.0 mのグリッドサイズでモデル化した。分画フェンス地点では流下方向の流速をゼロとする境界条件を設定した。検証期間は2008年7月10日から20日である。

領域全体に7月10日0時のSt.B（分画フェンス下流側）の鉛直水温分布を初期設定し、分画フェンス周辺の流動及び水温構造の変化を調べ、その後の河川水の誘導状況を検証した。表層取水施設の鉛直流速分布については、ゲート位置上部に最大流速を持つ正規分布に近似できることを指摘した筆者らの論文¹¹⁾を参考にして設定した。その他の境界条件は東京都水道局及び気象庁所管の観測データを用いて設定した。

図-7 流速時系列変化

図-8 鉛直流速分布

表-1 3次元流体モデルの概要

基礎方程式	3次元Navier-Stokes式
計算格子	スタガード格子
離散化	Ultimate Quickest法
乱流モデル	LESモデル
グリッド(水平)	フェンス周辺：12.5m その他：25m, 50m, 100m
グリッド(鉛直)	1.0m
タイムステップ	5s

図-9 計算領域(点線内)

(1) 数値解析モデルの検証

St.A 及び St.B における鉛直水温分布を用いて数値解析モデルの検証を行った。図-10 に数値計算結果を示す。St.A における計算結果をみると、時間が進むにつれて実績値に近づき、120 時間後にはほぼ実測値を再現することができている。また、St.B における計算結果をみると、表層の高水温層が維持され、気温上昇に伴う水温上昇が表現されており概ね現況を再現していると考えられる。

(2) 分画フェンス周辺の流動制御機能

分画フェンス周辺に着目し、流動制御機能と水温構造への影響について検証した。図-11 に鉛直水温分布の変化を示す。分画フェンス上流側を見ると、計算初期に水

図-10 計算結果の検証

図-11 分画フェンスによる水温構造の変化

深 5 m にあった 17°C の層が、時間が進むにつれて水深 10 m 付近まで徐々に広がる様子がわかる。また、72 時間後には、分画フェンス下流側で表層水温が上昇するにもかかわらず上流側では低く維持されている。

これは比較的水温の低い河川水が貯水池の同水温層に貫入するため、分画フェンスの設置により水深 3m から 10m の領域に河川水が滞留し河川水と同程度の一定水温層を形成した結果だと考えられる。また、河川水が貯水池に潜入する -1500 m 地点の表層で高水温の水塊と混合することで、分画フェンス上流側の表層水温が低く維持されたと考えられる。

図-12 に 96 時間後のフェンス周辺の流動と水温分布を示す。フェンス上流側の水温が変化し、ほぼ実測値と同じ鉛直水温分布となっている。また、水深 10 m 付近に下流向きの流れが発生するとともに、その上部ではフェンスにより遮られ滞留していることがわかる。一方、フェンス下流側では、フェンスを通過した流れが水深 6 m 層に浮上し流下している。図-13 に 96 時間後の水平流速分布を示す。水深 10.5 m では一様に下流向きの流れとなるが、分画フェンス通過後に水温の低い水塊に衝突し水平的な循環流が発生している。また、水深 7.5 m では分画フェンス上流側で反時計回りの循環流が発生しており、水平

図-12 分画フェンス周辺の鉛直流速及び水温分布

図-13 分画フェンス周辺の水平流速分布

図-14 流入河川水の誘導(計算値 96h 後)

図-15 St. A, St. B, St. C の鉛直流速分布(計算結果 96h 後)

的な流れの構造を持っていることがわかった。

したがって分画フェンスで遮られることで水平の循環流が発生し、水深 3 m から 10 m 付近の同水温層が形成される過程で水塊の混合を促進していると考えられる。

(3) 取水施設による河川水の誘導機能

分画フェンスを通過した河川水に着目し、貯水池全体の流動構造を検証した。図-14 に 96 時間後の貯水池全体の鉛直水温分布と流速分布を示す。鉛直流速分布をみると、-1000 m 地点まで流入河川水が底層密度流として底面を流下した後、-600 m 地点(堆砂の肩)で水深 10 m 付近に貫入する様子がわかる。その後、分画フェンス下流側で同水温層の 5 m 付近に浮上し下流へ向かって誘導されている。計算値と実測値を比較すると(図-15)下流へ向かう流れの位置が再現されており、前述した流動が貯水池内で発生していると考えられる。取水施設のゲート位置は水深 6.5 m 地点に設定されており、流入河川水温と同水温層にゲートを設定することで、効率良く河川水を誘導することが可能であることを示している。

5. おわりに

小河内貯水池における現地観測により河川水の流動制御状況を把握し、数値解析により水質保全施設の機能について検証を行った。貯水池内で約 30 mm/s の流れが連続的に発生し、流入河川水の流れであることを示した。その流れは、分画フェンスにより水深 10 m 付近に誘導され、湖心においても河川水温と同水温層に河川水が誘導されていることを示した。また、数値解析モデルを用いて検証した結果、分画フェンス上流側の流動制御機能が再現でき水温構造に対する影響を示すことができた。河川水温と同水温層に取水ゲートを設定することで、河川水を効率よく誘導することが可能であることを示した。

謝辞：東京都水道局浄水課、小河内貯水池管理事務所には、現地観測やデータ提供に協力して頂いた。また、首都大学東京新谷哲也助教には数値解析に関する多くのアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 深谷壽久, 岡本幸久, 城敬治, 竹尾敬三: 矢作ダム浮沈式濁水対策フェンスの操作方法と構造, ダム工学, Vol.17, pp.54-64, 2007.
- 2) 天野邦彦, 丹羽薫, 三浦進: 貯水池における曝気循環の影響に関する現地観測, 水工学論文集, 第35巻, pp. 211-216, 1991.
- 3) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 安藤祐馬, 小野修平, 小川真由子: フェンスによる貯水池潜密度流の流動制御, 水工学論文集, 第50巻, pp.1285-1290, 2006.
- 4) 古里栄一, 武村武, 有田正光: 流動制御フェンスを利用した貯水池の成層破壊に関する実験的検討, 第65回年次学術講演会論文集, II -162, pp.323-324, 2010.
- 5) 吉村佐, 田嶋良一, 斉藤暁樹, 伊芽寧: 寺内ダム貯水池における水質管理の調査報告, ダム技術, Vol.114, pp.1-12, 1996.
- 6) G.De Cesare, A.Schleiss and F.Hermann: Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation, J. of Hydraulic Engineering, Vol. 127, pp.6-16, 2001.
- 7) 北澤弘美, 北田真吾, 斉藤滋, 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, 77(9), pp.10-24, 2008.
- 8) 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, 第51巻, pp.1379-1382, 2007.
- 9) 新谷哲也: <http://www.comp.tmu.ac.jp/shintani/>
- 10) 新谷哲也, 中山恵介: 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検証, 水工学論文集, 第53巻, pp.1267-1272, 2009.
- 11) 新山雅紀, 柘植将之, 横山勝英, 小泉明, 山崎公子, 増子敦, 小林康浩: 成層貯水池における取水流れに関する調査研究, 水工学論文集, 第54巻, pp.1411-1416, 2010.

(2010. 9. 30 受付)