

成層貯水池における取水流れに関する調査研究

STUDY ON THE INTAKE FLOW IN A STRATIFIED RESERVOIR

新山雅紀¹・柘植将之²・横山勝英³・小泉明⁴・山崎公子⁵・増子敦⁶・小林康浩⁷

Masaki NIYAMA, Masayuki TSUGE, Katsuhide YOKOYAMA, Akira KOIZUMI

Kimiko YAMAZAKI, Atsushi MASHIKO and Yasuhiro KOBAYASHI

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 都市基盤環境工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴フェロー会員 工博 首都大学東京教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁵正会員 博(工) 首都大学東京助教 都市基盤環境コース(〒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)

⁷非会員 修(理) 東京都水道局(〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

Vertical distributions of current and temperature were investigated at a withdrawal facility in the Ogochi reservoir. The water current was plotted as the Gaussian distribution, and the maximum velocity was found a few meters above the gate. Current distribution was widely spread out from the gate. As a result, in the withdrawal facility, the temperature above the gate was warmer than in the reservoir. On the other hand, the temperature below the gate was colder because of the influence of intake flow.

We presented the way to predict current distribution. We set up fixed velocity above the first thermocline and used the equations for the withdrawal layer, and maximum velocity which based on the experience on the channel. The predicted current distribution showed good agreements compared with previous study. This study showed temperature and turbidity of the discharged water could be determined from predicted current.

Key Words: withdrawal facility, stratified reservoir, intake inflow, current distribution, discharge quality

1. はじめに

ダム貯水池から放流される冷水や濁質は、下流河川での魚類の成育やレクリエーション利用、景観などに悪影響を及ぼすため、放流水の水温、濁質の高度な管理が求められている。このような水質問題に対して、ダム貯水池では選択取水施設が設置され、夏期には表層取水、洪水時には中層取水といった取水深度を随時変更する運用が進められている¹⁾。

取水理論については、Debler ら²⁾による線形な密度分布を持つ二次元水域の底部に設けられたスリットからの取水実験、Koh ら³⁾、Brooks ら⁴⁾による流体の粘性や拡散性を考慮した流動層厚や流速に関する解析が行われている。また、Harleman ら⁵⁾により流動層内の流速分布を正規

分布に近似する手法が提唱され広く用いられている。

日本国内においては、日野ら⁶⁾、大西ら⁷⁾が一定密度勾配域における軸対象流れについて point sink への流れの理論解を示すとともに、取水口寸法が流動層厚さに及ぼす影響を示している。また、高須ら⁸⁾は選択取水設備の機能を軸対象流れとすることの妥当性を示し、設備と堤体、ピア一の張り出しの影響の重要性を示した。また、堀田ら⁹⁾は実測事例を踏まえて取水性能が放流水質に与える影響を検討し取水性能の評価法を示した。これらの研究成果は選択取水設備の設計に活用されている。

しかし、実貯水池における観測事例が少ないために、実験パラメータの実貯水池への適用条件が十分に検討されておらず、取水施設周辺での流動や水温、濁質の取水特性が十分に検証されていない。特に、実貯水池では表

層に一次躍層が発達しやすいが、このような水温成層場における観測事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、直線多段式ゲートの取水施設を対象として、施設内において流動及び水温、濁度分布に関する現地観測を行い貯水池取水施設の流動特性と放流水質について考察した。

2. 観測概要

(1) 対象貯水池及び取水施設

図-1に観測地点を示す。対象貯水池は、東京都奥多摩町に位置する小河内貯水池である。流域面積262.9km²、総貯水容量1億9千万m³の水道専用貯水池であり、平均滞留日数は240日¹⁰⁾であって、典型的な成層型貯水池である。取水ゲートは、6段の直線多段式であり上段から順にゲートを下げて、目標とする水深までの表層取水を可能にしている。

また、小河内貯水池では従来、中層取水によって放流されていたが、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表層取水に変更した。その後、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。北澤ら¹¹⁾、牧野ら¹²⁾は放流水深の変更によって貯水池内の水温特性が変化することが大きな要因であると指摘している。

小河内貯水池ではアオコの発生抑制対策として、栄養塩を含む河川水を深層に引き込む流動制御に取り組み始めており、この場合は可能な限り下層から取水することが必要である。そのため、冷水対策とアオコの発生抑制対策の両者を満足させるゲート操作が求められているが、合理的なゲート操作の根拠は確立されておらず、経験に基づいて運用されている。

(2) 観測方法

図-1に小河内貯水池の全体図を、図-2に取水施設での観測方法を示す。貯水池では図-1に示すSt.2～St.6の5地点で、水温、濁度の分布を調査し、第二取水施設では流速の鉛直分布、及び水温、濁度を観測した。

取水施設内部のSt.1において、取水ゲートから約10m離れたステージから超音波微流速計(NORTEK製VECTOR CURRENT METER)を吊り下げて流速の鉛直分布を計測した。流速計の両端をステンレスワイヤーで固定し、水面より0.5m間隔で30秒間静止させて、16ないし32Hzでデータを取得し、その平均値を求めた。また、同時に多項目水質計(JFEアレック社製クロロテックAAQ1183)を用いて、水温、濁度の鉛直分布を観測した。観測は2008年7月と10月、2009年6月から9月に10回実施した(表-1)。

2009年7月にはSt.2～6において、多項目水質計を用いて水温、濁度の鉛直分布を観測した。なお、その他の観測日の水温、濁度については小河内貯水池管理事務所の自動観測データ(St.A)を活用した。

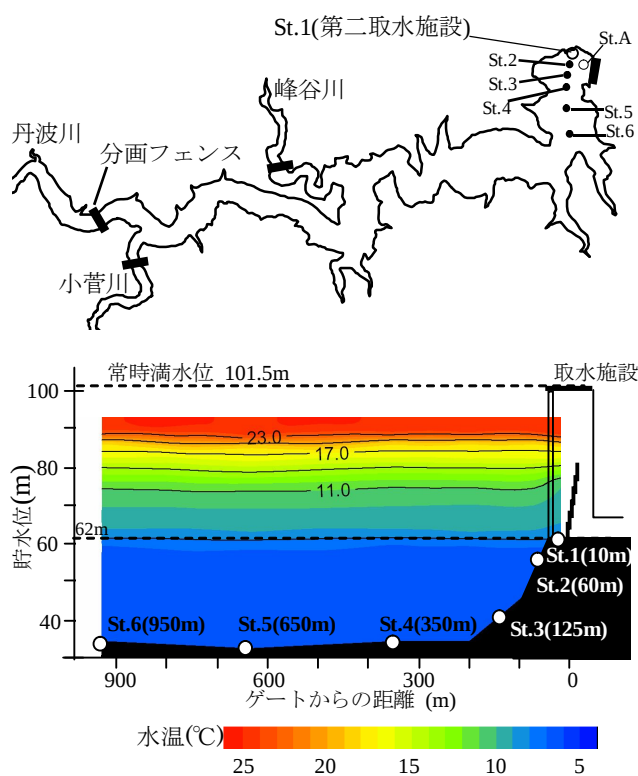


図-1 観測地点

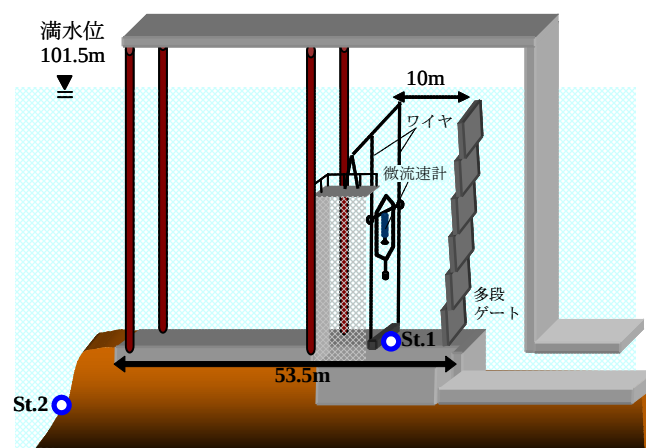


図-2 取水施設内の流動観測方法

3. 取水施設内の流動特性

(1) 貯水池の水温分布

図-3に2008年と2009年の夏期におけるSt.Aの水温分布及びゲート位置を示す。

夏期には貯水位90m付近(水深5m)に一次躍層を有する水温成層場が形成されている。7月には受熱量の増加に伴い、表層の水温が25℃を超え一次躍層が強化されている。9月以降、表層水温が徐々に低くなり、10月以降循環期に移行する。また、貯水位75m付近(水深20m)には、二次躍層が形成され、貯水位60m以深は5℃で一定となる。

ゲート位置は貯水位90m～70mの範囲で運用され、常時表層取水を実施している。また、表-1に示すように観測日の放流量は4m³/sから16m³/sであり、平常時は河川の流量とほぼ同量が放流され貯水位が維持されている。このようなゲート及び放流量の運用により河川水温とほぼ同程度の放流水温となるゲート操作を実施している。

2008年、2009年は大きな出水が発生していないことから、概ね同様の水温分布、ゲート操作が実施されている。

(2) 貯水池と取水施設内の水温分布の違い

図-4にNo.3(10月)とNo.6(8月)のダム堤体前(St.A)と取水施設内(St.1)の水温及び濁度鉛直分布を示す。

No.6におけるSt.AとSt.1の水温鉛直分布を比較すると、どちらも貯水位88m付近に一次躍層がみられその位置に違いはないことがわかる。しかし、一次躍層よりも下層領域では、ゲート位置よりも上層でSt.Aに比べSt.1の水温が高く、下層には低い領域がある。

また、No.3(10月)の鉛直濁度分布をみると、ゲート位置付近に濁度のピークが見られる。中層に滞留していた濁質が取水口に向い引き込まれていると考えられる。なお、St.AとSt.1では濁度分布にほとんど変化はなかった。

図-5にNo.5(2009年7月17日、ゲート位置82m)の貯水池及び取水施設内の水温縦断変化を示す。St.1～6における鉛直水温データを用いて、貯水位74mから88mの範囲を表示した。St.2～6(ダム堤体前の貯水池)では、水温分布にほとんど違いは見られなかったが、St.1(取水塔内部)では水温分布が変化している。したがって、取水塔内部で急激に流れが強くなり水塊を混合させていると考えられる。

(3) 取水施設内の流動及び水温特性

図-6に取水施設内部で観測した流速及び水温鉛直分布を示す。これは取水方向と鉛直方向の流速を合成したベクトル図である。

a) 流速と水温分布

No.1(7月)を例にとると、流速はゲート位置の90m付近で最大0.15m/sとなり、その鉛直分布はゲート上部の最大

表-1 観測状況

	観測日	貯水位 (m)	ゲート 位置 (m)	放流量 (m³/s)	放流 水温 (℃)	流入河 川水温 (℃)
No.1	2008/7/24	96.3	90.0	8.0	18.8	19.0
No.2	2008/10/2	95.6	80.7	16.0	16.2	12.7
No.3	2008/10/6	96.5	78.4	8.0	16.5	13.4
No.4	2009/6/19	92.4	80.4	4.0	13.6	13.7
No.5	2009/7/17	94.0	82.0	6.0	15.1	17.4
No.6	2009/8/7	95.0	82.1	4.2	16.2	17.7
No.7	2009/8/20	95.7	83.6	6.2	17.4	17.2
No.8	2009/9/4	95.3	83.3	9.0	18.8	15.9
No.9	2009/9/4	95.3	83.3	10.5	18.6	15.9
No.10	2009/9/4	95.3	83.3	12.0	18.2	15.9

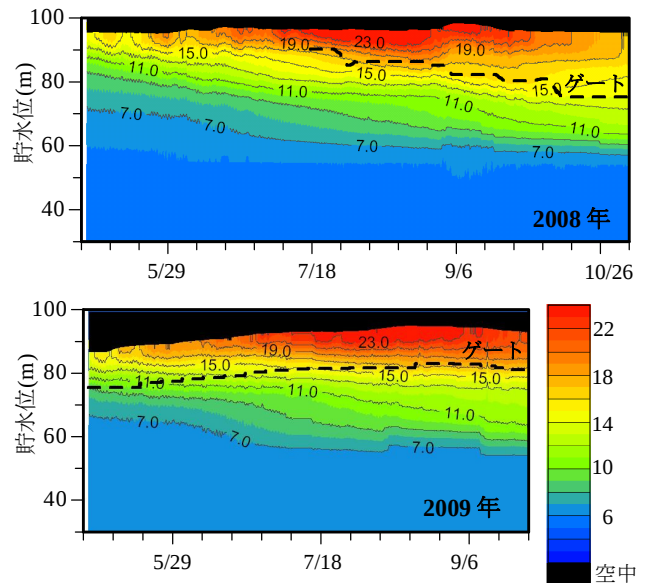


図-3 ダム堤体前の水温分布及びゲート位置

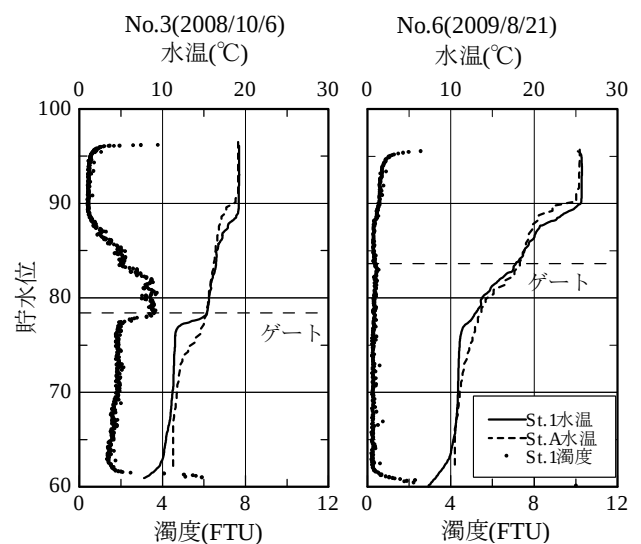


図-4 ダム堤体前と取水施設内部の水温鉛直分布

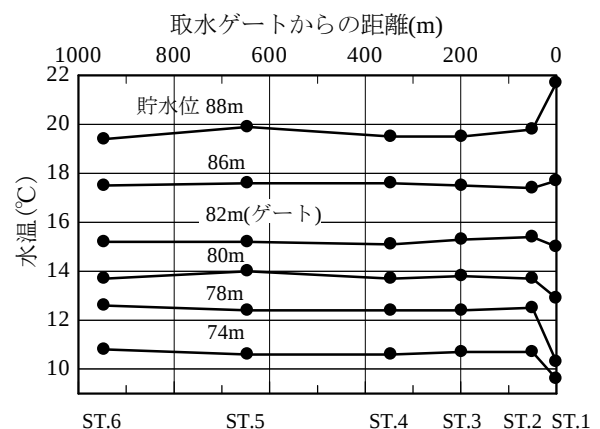
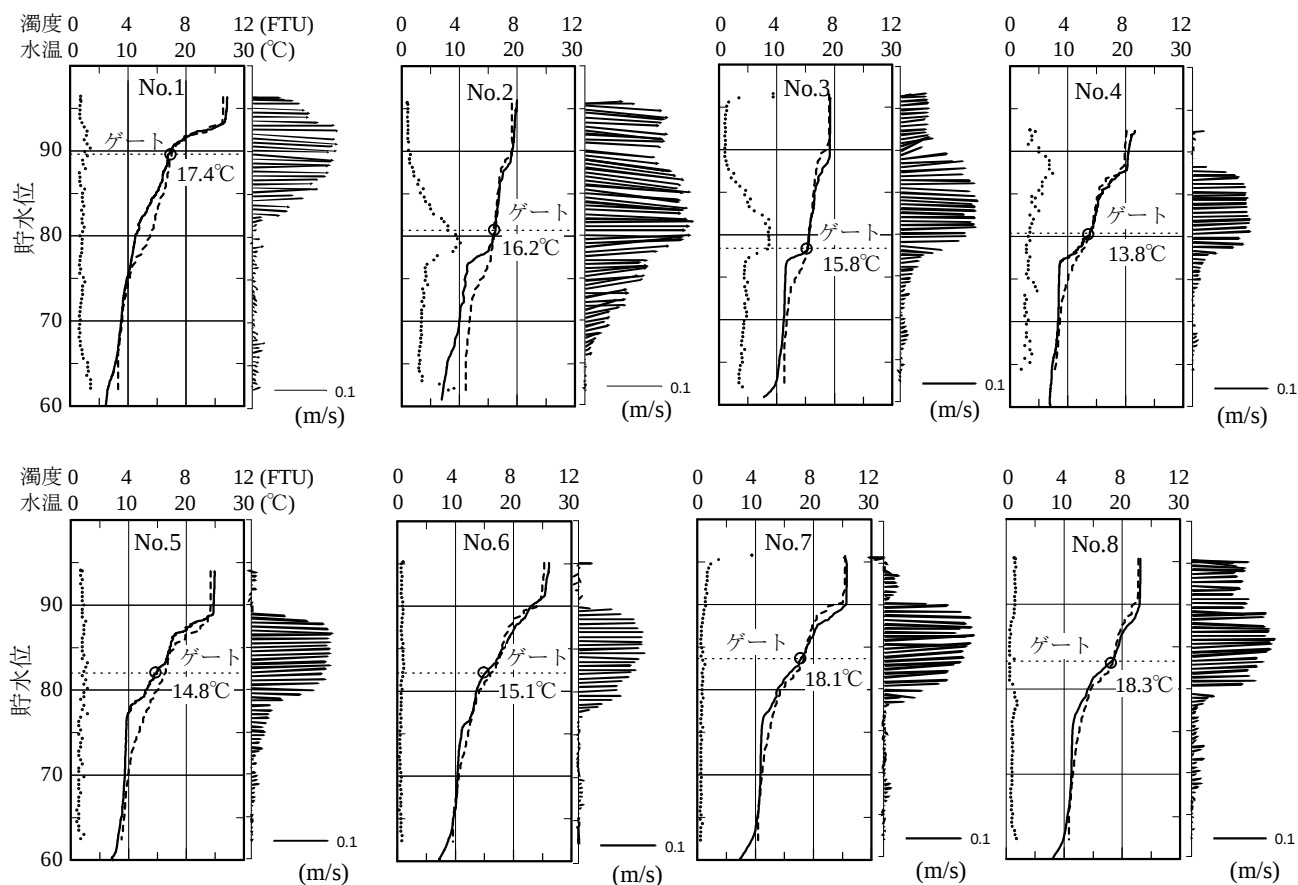


図-5 貯水池内水温の縦断変化



流速位置を対象にして正規分布に近い分布形を示している。小河内貯水池のような直線多段式ゲートによる表層取水施設内においても一般的に示される分布形⁵⁾となることわかった。また、ゲート位置の水温を読み取ると、放流水温よりも低くなることが多いことがわかった。

さらに、No.2、No.3、No.8 (No.9、No.10)では、表層に一定流速が発生している。既往研究においても一次躍層上に一定流速が存在することが指摘されているが⁷⁾、その発生メカニズムは明確ではない。今回の観測では、ゲート位置とは関連はなく、放流量 $6\text{m}^3/\text{s}$ よりも大きい場合に一次躍層上の一定流速が発生していた。

b) ゲート位置の影響

放流量が $8\text{m}^3/\text{s}$ 、 $9\text{m}^3/\text{s}$ でゲート位置が異なるNo.1(7月)とNo.8(9月)を比較すると、最大流速はいずれも 0.15m/s である。また、最大流速の位置はゲート上部にあり、その位置を対象にして正規分布形を示している。最大流速及び分布形はほぼ同じことから、ゲート位置は最大流速の発生標高にのみ影響を与えていると考えられる。

c) 放流量の影響

ゲート位置を 83.3m に固定して放流量を変化させたNo.8、No.9、No.10を比較すると、最大流速は 0.150m/s 、 0.190m/s 、 0.192m/s と放流量の増加に伴って大きくなる。また、流動層が放流量の増加に伴って増大しゲートより下層からの引き込みが大きくなっている。放流水温が放流量に反比例して低下しているのは($18.8\text{度} \rightarrow 18.2\text{度}$)、このため

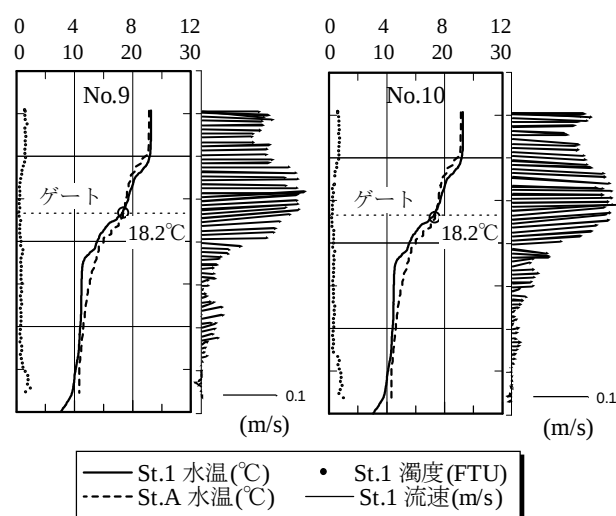


図-6 取水施設内部の流速鉛直分布

だと考えられる。

d) 季節による影響

ゲート位置及び放流量が比較的近く、季節が異なるNo.3(10月)とNo.5(7月)を比較する。a)で述べた放流量の違いによる表層の一定流速の有無を除けば、最大流速が概ね 0.15m/s 、流動層厚がほぼ同じ領域にあり、観測結果からは季節変化による水温成層の強弱が最大流速及び流速分布に与える影響は確認されなかった。

4. 放流水質の予測に関する検討

冷水及び濁水長期化対策には、放流水の水温及び濁度の予測が重要である。貯水池内の水温や濁度は常時モニタリングされていることが多いため、流速分布が把握できれば放流水質予測が可能である。一般に、流速分布形については最大流速位置で対称となる正規分布になることが示されているため⁵⁾、ゲート位置と流動層厚と最大流速値がわかれば流速分布を設定できる。

(1) 流動層厚及び最大流速の算出方法

日野・大西⁶⁾は一定密度勾配の連続成層場における点吸い込み流れに関する条件式として選択取水係数 G を提案している。

$$G = \frac{Q}{2\pi\sqrt{gd_\epsilon}d^3} \quad (1)$$

ここで、 Q ：取水量、 d_ϵ ：密度勾配 $(\rho_z - \rho_0) / \rho_0 y$ 、 y ：ゲート水深、 ρ_z ：ゲート上端の密度、 ρ_0 ：水面の密度、 d ：流動層厚、 g ：重力加速度である。白砂・安芸¹³⁾は実験から H/d (H ：取水深、 d ：流動層厚) が $1/2 \sim 1/3$ 以下のとき、表層取水時 $G=0.324$ と報告しており、 G を定数とすれば、取水量及び密度勾配から流動層厚を算出できることになる。

観測時の取水量、水温分布を用いて $G=0.324$ とし流動層厚 d を計算すると $6\text{m} \sim 10\text{m}$ になり、観測値の $1/2 \sim 1/3$ となった。これは、今回の観測では H/d が $1/2$ 以上で G の適用条件を超えており、また、取水施設が貯水池に張り出しているためゲート幅と等幅の二次元水路内の現象として扱う必要があることが考えられる。

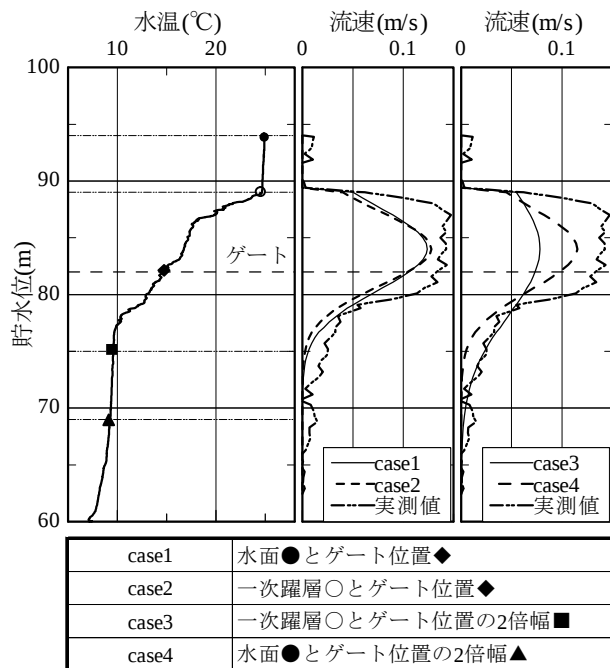


図-7 流速分布予測における密度勾配の影響 (No. 5)

高須⁸⁾は、直線型ゲートではピアーの張り出し長が取水幅の3倍を超えた場合、張り出していない場合と比べ流動層は約2倍、 G が約 $1/3$ になることを指摘している。

そこで本検討では、二次元水路での実験値を基に得られた Brooks・Koh⁹⁾による流動層厚 δ 、最大流速 $U_{\max}$ の式を使用することとした。

$$\delta = A \times \left(\frac{q}{\sqrt{gd_\epsilon}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$U_{\max} = \frac{q}{y_0} \times B \quad (3)$$

ここで、 q ：単位幅あたりの取水量、 y_0 ：流動層厚の $1/2$ 、 A ：定数 (2.7 ± 0.2) 、 B ：定数 (実験値 0.955) である。小河内貯水池の取水施設が十分に貯水池に張り出しているため二次元水路での実験結果の適用性が高いと考えられ、選択取水係数によらず密度勾配と取水量のみで評価できる利点がある。

(2) 流速鉛直分布の予測

流速分布は最大流速位置で対称となる正規分布として扱った。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

ここで、 $f(x)$ ：確率密度関数、 σ ：標準偏差 ($\delta/3.92$)、 x ：距離である。本検討では(2)、(3)式を(4)式に代入し、(5)式により流速鉛直分布を予測した。

$$U(x) = U_{\max} f(x) = \frac{7.84A^2Bq^2}{2\pi\sqrt{gd_\epsilon}} \exp\left(-\frac{15.37x^2\sqrt{gd_\epsilon}}{A^2q}\right) \quad (5)$$

なお、表層の一定流速は3章で述べたように放流量により変化することから、放流量 $6\text{m}^3/\text{s}$ を境にして大きい場合は一次躍層位置での流速を水面まで一定とし、小さい場合はゼロとして扱った。

最大流速位置は、水面とゲートの中心点に設定することが多いが、既往研究でも明確な根拠は示されていない。観測値をみるとゲート位置の上部数 m にあることから(図-6)、本検討では 2m 上部に設定した。

流速値の算出には、密度勾配と係数 A 、 B の取り扱いによって流速分布の予測形が異なる。図-7に4ケースの密度勾配による算出結果(No.5)を示す。なお、係数 A 、 B は実測値との差の二乗和が最も小さい値を採用した。

その結果、絶対誤差で比較すると CASE1 ($A=2.9$, $B=0.89$, ただし A は次元量である) が最も誤差が小さく、それぞれ最大流速値を1とした相対流速で誤差を比較すると CASE4 ($A=2.9$, $B=0.89$) が誤差が小さかった。実貯水池に適用する場合には、水温の読み取り方が最も簡易であり、 B 値が実験値に近い CASE1 (水面とゲート位置の密度勾配) が適していると考えられる。

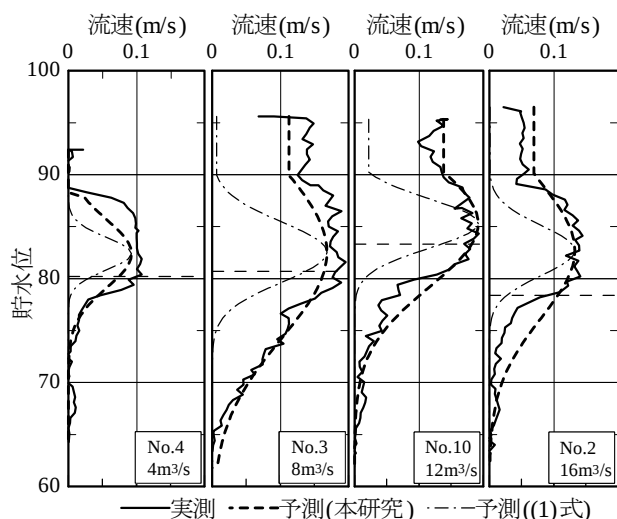


図-8 流速鉛直分布の予測結果

図-8に放流量別の流速分布形の予測結果(CASE1)を示す。図の一点鎖線で示した既往研究で提案されている方法($G=0.324$ で(1)式から δ を算出したときの流速分布)と比べると、本研究で提案した予測結果が精度良く実測流速を再現できていることがわかる。

(4) 放流水温及び濁度

流速分布の予測値を用いて放流水温を予測した。図-9に予測結果を示す。水温及び濁度分布についてSt.1(取水施設内)とSt.A(ダム堤体前)の比較を行った。

放流水温については、取水施設内の水温分布を使用した場合、No.5とNo.7を除き実測値との誤差は概ね $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ で予測できた。小河内貯水池管理事務所の自動観測データ(St.A)を用いた場合でもほぼ同程度の誤差であり、ダム堤体前の水温分布から放流水温を予測することが可能であることがわかった。

放流濁度は、 ± 2 度の範囲に収まった。濁度が小さく予測精度の評価は難しいが、水温と同様にSt.Aの濁度データでも予測可能だと考えられる。

5. おわりに

貯水池取水施設内の流動及び水質に関する現地観測を行い、貯水池取水施設の流動特性と放流水質について考察した。その結果、取水施設内では、ゲート位置の上下層から水塊を引き込んでおり、水温鉛直分布を変化させていることがわかった。また、貯水池に張り出した取水施設内では選択取水係数の一般値を適用し難いことを示し、二次元水路での実験を基に得られたBrooks・Kohらによる流動層厚及び最大流速の算出式を適用するとともに一次躍層上の一定流速を設定することを提案した。その結果、流速分布形を精度よく予測できた。さらに、取水施設内(St.1)またはダム堤体前(St.A)の水温、濁度分布を使用して放流水質を予測可能であることを示した。

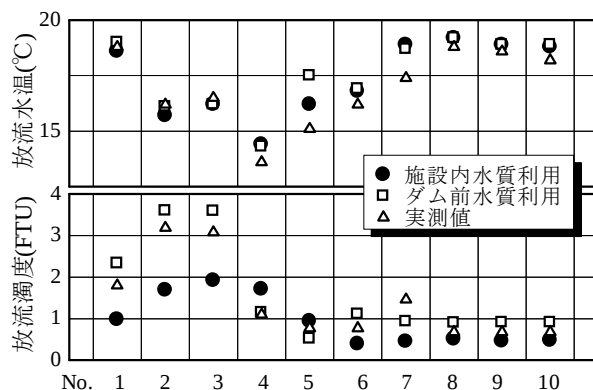


図-9 放流水温および濁度

謝辞：東京都水道局浄水課、小河内貯水池管理事務所、首都大学東京都市基盤環境コース水工学研究室の学生には、現地観測やデータ提供などに多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)国土交通省河川局河川環境課：曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案)，2006。
- 2)Walter R.Debler：Stratified flow into a line sink, J.Engineering Mechanics Division ASCE, Vol.85, EM3, pp.51-65, 1959.
- 3)Robert C.Y.Koh：Viscous stratified flow towards a sink, J.Fluid Mechanics, Vol24, part3, pp.555-575, 1966.
- 4)Norman H Brooks, Robert C.Y.Koh：Selective withdrawal from density-stratified reservoirs, J.Hydraulics Division, HY4, pp.1369-1400, 1969.
- 5)Harleman,D.R.F：Temperature prediction in stratified reservoirs, Proc.ASCE, HY4, pp.645-666, 1972.
- 6)日野幹雄，大西外明：密度成層流におよぼすpoint sinkの高さの効果，土木学会論文集，No.163, pp.39-47, 1969.
- 7)大西外明，今村健二，原口俊蔵：貯水池の選択取水に関する研究，土木学会論文集，No.369/II-5, pp.79-87, 1986.
- 8)高須修二，宮脇千晴：選択取水設備の機能比較，ダム技術，No.35, pp.15-23, 1989.
- 9)堀田哲夫，東海林光，山下芳浩，陳飛勇，伊藤英夫：選択取水施設の取水性能と水質への影響，ダム工学会，Vol.15, No.1, pp.28-36, 2005.
- 10)環境省中央環境審議会：第7回水環境部会資料，2003.
- 11)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.
- 12)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.
- 13)白砂孝夫，安芸周一：貯水池の濁水現象とその水理学的軽減対策，発電水力，No.126, pp.3-25, 1973.

(2009.9.30受付)