

表層選択取水流動層内流速分布の LDV による計測とその取水温度算定への応用

大西 外明*・今村 建二**・原口 俊蔵***

1. 緒 言

選択取水設備の設計法に関し筆者等は、前回研究において、選択取水設備の寸法が、流動層厚さに及ぼす影響についてあきらかにし¹⁾、従来のポイントシンク理論を発展させた新概念を展開した。本研究は、前回研究結果の実用性の一層の向上を目的とし、特に選択取水設備の最も重要な機能である、表層温水取水に関して、所期の機能を満たす設備の設計を合理的に進める手法の確立を図った。本研究の特徴は i) 流動層内流速分布を L.D.V. で正確に計測し取水温度算定に供し得るようにまとめたこと、ii) 水深方向に水温勾配が変化する場合の選択取水数 G_{cr} ($=Q/(2\pi\sqrt{g\beta}\cdot d_s^3)$; β は密度勾配パラメータ d_s は流動層厚さ) を実験的に求めて、実際の貯水池の水表面近辺にしばしばあらわれる水温分布に対しても、流動層厚さの推定を可能としたことにある。

これらの研究結果は、現地実測結果との照合に対しても実用性が確認された。

2. 従来研究と本研究との関連について

2.1 流動層内流速分布

従来研究では、Harleman の提唱にもとづき流動層内流速分布を正規分布に近似するのが通例であった。

このような正規分布近似は、中間取水の場合には十分な精度を有しているが、しかし表層取水の場合には、かなりこの仮定と異なっており、表面近くで高流速となる流速分布を示している。

そこで、本研究では、流動層内の流速分布を正確に把握し、また、その流速分布が温度分布の影響を受けて変化する状況を把握することを目的として実験的検討を行った。その際、流速分布測定には、レーザ流速計を用いた。

2.2 選択取水数

従来研究では、下記の選択取水数が提示されている。

a) 2次元流の場合²⁾

$$F = \frac{1}{\pi} = \frac{q}{h_{sp}^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{g\beta}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

b) 軸対称流の場合³⁾

$$G_{cr} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Q}{\sqrt{g\beta} d_s^3} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、上記 (1) 及び (2) 式において

q : 線吸込単位巾あたりの流量

Q : 軸対称流流量

h_{sp} : 2次元選択取水流動層厚さ

d_s : 軸対称流選択取水流動層厚さ

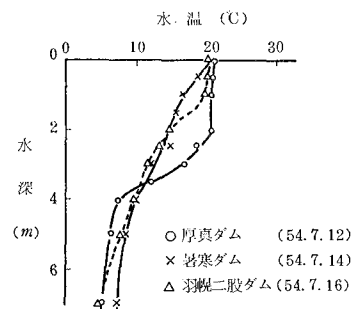
β ; 密度勾配パラメータ

式 (1) と (2) はいずれも密度勾配が水深方向に一定の場合を対象として、理論的及び実験的に導かれたものである。

一方実際の貯水池の水温分布を計測してみると、図一 1 に例示するように、必ずしも直線分布を呈さないことが多い。

このような水温分布領域に関して式 (1) あるいは (2) を適用しようとする場合密度勾配の代表値を適切に選定するとともに、その選定の仕方が、選択取水数に及ぼす影響を把握しておく必要がある。

以上の観点から本研究では、その代表密度勾配の決定法と、それが選択取水数に及ぼす効果について模型実験により検討して、密度勾配が非直線の場合の選択取水数を明らかにし、従来研究結果に一層の応用性の付加を図ることとした。



図一1 貯水池の水温分布の例

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 三菱重工(株) 高砂研究所水力研究室主務

*** 三菱重工(株) 横浜製作所水門鉄管設計課主任

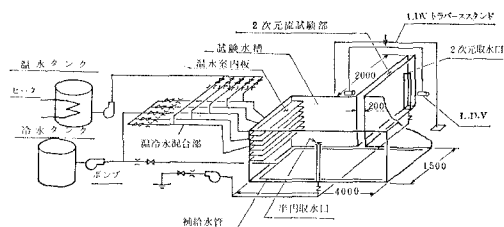


図-2 実験装置の概要

3. 実験装置

図-2 に実験装置の説明を示す。同図において、温水タンク及び冷水タンクからポンプにより温水及び冷水を吸引し、温冷水混合部で所定の水温の温水にする。それを温水案内板を経て試験水槽に導く。

温水案内板は 10 層からなり、温度を調節された温水を下層から順次ゆるやかに試験水槽内に満たし水槽内の温水の層をかさねていく。

試験水槽は軸対称流試験のための矩形水槽と、水路巾 200 mm の 2 次元流試験部からなる。

2 次元流試験部には、レーザ流速計による流速分布測定が可能な装置を設置した。

2 次元流試験の際は表面から 20 mm の深さを有する 2 次元取水口から取水し、軸対称流れ試験の際は水槽壁に装着した半円取水口から取水した。

取水時に水槽内の水位が低下するのを防止するために、水槽底部から冷水を補給した。こうすることにより当初に水槽内に形成した温度分布を実験中比較的ながく保存することが可能であった。

4. 2 次元流試験

4.1 流速分布測定結果

図-3 に表層取水時の流速分布測定結果を示す。同図には、後に述べる実験式による流速分布もあわせて示してある。また同図 (a) において、 h_{sp} として示してあるのは、2 次元流の流動層厚さに関する Y_{ih} の理論解 $h_{sp} = \sqrt{q/(1/\pi \cdot \sqrt{g\beta})}$ を表わしているが、それと本実験結果とはほぼ一致している。

図-3 に示す試験結果に関する特徴的事項として次の点をあげることができる。

i) 表層取水流動層内流速分布は、表層近辺で流速が高く、水深の増大とともに流速は次第に減少する。

ii) 上記の流速分布は、水温分布によって変化する。すなわち、同図 (b) 及び (c) のごとく、表層近辺にほぼ一定水温域がある場合、その水域内に流速のほぼ一定の領域が生ずる。

上述の事項は、従来の研究においても現象的には報告されていたが、本研究では、これを数値的に把握したこ

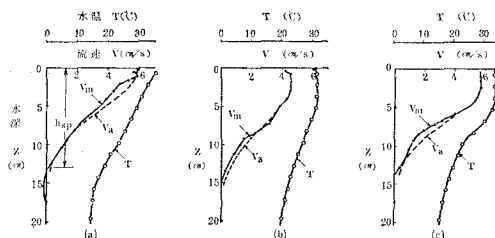


図-3 流速分布測定例

(V_m : 測定値, V_a : 実験式表現値, T : 水温分布)

とに加え、水温分布条件の変化に対する流速分布の変化を系統的に知ることができた点に意義がある。

4.2 流速分布の実験式表示の試み

上に示した流速分布を、数式で近似表現することを試みる。この目的とするところは、実機的设计において、取水温度の算定に便を図ることにある。

いま、 z を水深、 d_s を流動層厚さ、水温分布を $T(z)$ 流動層内流速分布を $v(z)$ 、その最大値を V_{max} とすると、取水温度 T_w は次式で与えられる。

$$T_w = \frac{\int_0^{d_s} T \cdot v \cdot dz}{\int_0^{d_s} v \cdot dz} = \frac{\int_0^{d_s} T \cdot v/V_{max} \cdot dz}{\int_0^{d_s} v/V_{max} \cdot dz} \quad \dots (3)$$

上記の計算において、水温分布 $T(z)$ は設計条件として与えられるので、 $v(z)/V_{max}$ が、水温分布の影響を考慮に入れた状態で実験式化されていれば計算に至便となる。

実験式化の考え方を図-4 に示す。すなわち、本論文では下記の 3 点に考えにもとづいて $v(z)/V_{max}$ を実験式化することとした。

i) 最大流速域は水表面にある。また、表層近辺にほぼ一定水温域がある場合は、その水域の一部にも、最大流速が生ずる。

ii) 流動層の下方に向かうにしたがって、流速が減少していく状況を正規分布関数の一部で近似する。

iii) 図-4 における Z_0 すなわち、流速一定領域の厚さを図-5 に示す方法により近似的に求める。これは流速分布の実測結果の平均的値を用いたものである。

上記を具体的に数式化すると下記のごとくなる。

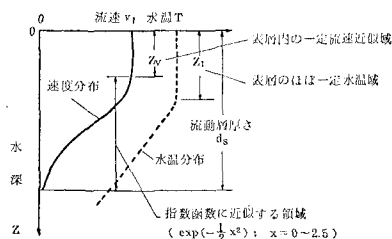
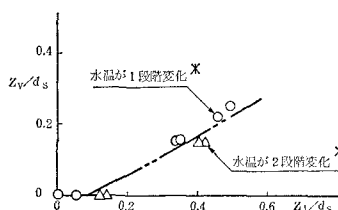


図-4 流速分布の近似式化法説明図 (式 (4) 参照)



図—5 表層内ではほぼ一定の流速をとる領域の実験値 (記号は 図—4 参照, * は 図—7 参照)

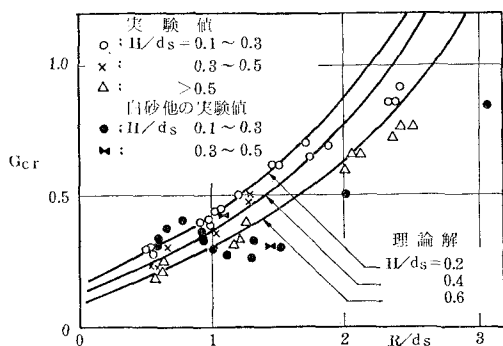
$$\frac{v}{V_{\max}} = \begin{cases} 1 & ; Z < Z_v \\ \exp \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[2.5 \frac{Z - Z_v}{d_s - Z_v} \right]^2 & ; Z_v \leq Z \leq d_s \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに Z_v : 流速一定に近似する水深

以上の考えにもとづいて求めた近似表現流速分布の計算値を 図—3 に, 実測値と比較して示す. 同図の比較から, 上に述べた流速分布の近似法は実測流速分布を充分な精度で表し得るものと考えられる.

5. 軸対称流試験

軸対称選択取水時の流れに関する研究では, 日野・大西のポイントシンクへの流れの研究³⁾が知られており, また筆者等はそれを発展させて有限寸法取水口への流れを論じ, 所期の流動層厚さを選択取水するために必要な取水設備寸法の決定法を示した. 図—6 は前回発表論文から転載したものである. これらの従来の研究では, 密度勾配が一定の場合を対象としているのに対し, 本論文は, 前述のように温度勾配が変化する場合を対象としたものであり, 研究方法としては, 密度勾配が変化しない場合について得られている選択取水数に対する補正值を実験的に求めることにした. また, そのときの取水温度を, 前述の近似表現流速分布を用いて計算し, 実際の取水温度と比較して, 補正值を求めて実用性を検討した.



図—6 表層取水時の選択取水数 (R : 取水口半径, H : 呑口高さ, d_s : 流動層厚さ)

5.1 代表密度勾配の提案とそれにもとづく選択取水数の検討

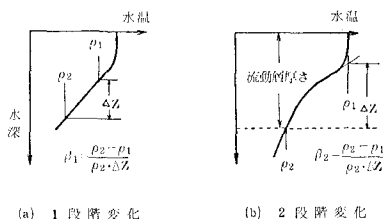
前述 (2) 式は, 密度勾配が一定の条件のもとで導かれた内部フルード数であるが, 密度勾配が変化する場合も, 密度勾配パラメータを適切に選定すれば (ここではそれを代表密度勾配と名付ける) その密度変化状態に関する選択取水状態を規定する内部フルード数あるいは選択取水数が, (2) 式と同じ形で表現できると考えられる. 但し, 密度分布形状が変化することにもなう補正を, 式 (2) に付加することが必要となる.

本論文では, 密度勾配が変化する場合の, 選択取水流動層近辺の代表密度勾配の定め方として, 図—7 に示す方法を考え, 試験水槽内に種々の水温分布をもつ密度場をつくり, 選択取水流動層厚さ d_s を計測し, 得られた d_s と代表密度勾配を式 (2) に代入して, 密度勾配が変化する場合の選択取水数を求めてみた. さらに 図—7 に示す代表密度勾配及び取水量に対して測定された流動層厚さは, その代表密度勾配で全水深にわたり密度が変化するものと仮定して式 (2) より求めた流動層厚さに比し, どのように変化するかを比較することとした.

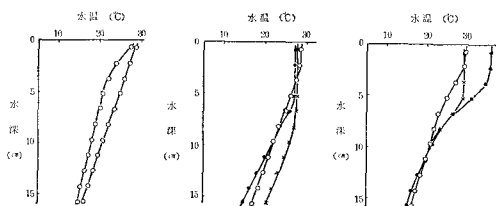
(1) 実験条件

図—8 に温度勾配が変化する場合の選択取水数を求めるために行なった実験における水温分布の例を示す.

この図に示した水温分布の形状を定めるに際しては, 実際の貯水池における水温分布の typical なものをカバーし得るように表層近辺のほぼ一定水温域の厚さを変え, するとともに, その下方の水温勾配の変化部についても, 前の 図—7 (a) に示されるような 1 個の直線で表現される形状, 及び 図—7 (b) 様の 2 個の直線で近似化し得る



図—7 密度勾配が変化する場合の代表密度勾配の採用法



図—8 軸対称選択取水実験水温分布例 (実験流動層厚さ; 10~14 cm)

ような形状をもたせるように配慮した。

(2) 実験結果

いま、図-8に例示した試験条件に対する代表密度勾配、取水量及び流動層厚さから算出した選択取水数を G'_{cr} と記号づける。他方それらの代表密度勾配で全水深にわたって密度が変化すると仮定した場合の選択取水数が前掲図-6から求まる。

この G'_{cr} と G_{cr} との比を示したのが図-9である。計測結果は多少のばらつきを示しているが、平均的な傾向をみる事ができる。なお、このばらつきには、 G_{cr} 及び G'_{cr} の計算にあたっての流動層厚さ d_s の3乗の項が大きく影響をしていると考えられる。

すなわち、流動層厚さ計測値のばらつきが約3倍に拡大されて、選択取水数のばらつきとして示されているわけであるが、この観点にたてば、図-9にあらわれたばらつきは、この種の密度流の実験ではやむを得ない範囲のものとする。

図-9をみると、表層にほぼ一定水温域がある場合、代表密度勾配を用いた選択取水数すなわち G'_{cr} は G_{cr} に比し小さな値をとる。これは、表層にほぼ一定の水温域がある場合、それを含む流動域の密度勾配は実質的に小さいものになっているわけであるから、流動層厚さを大きくする効果を生み、ひいては選択取水数を小さくする効果を生むためと考えられる。

5.2 取水温度の検討

取水温度の測定を、前述の選択取水数に関する実験と同時にこなした。したがって、実験時の水温分布等の条件は、前掲の図-8に示すとおりである。

図-8に示すような水温分布のもとでの選択取水流動層厚さが定まれば、流速分布実験式(4)式とまた(3)式を用いることにより取水温度を算定することができる。

	水温変化	R/d_s	H/d_s
○	2段階変化		≈ 0.4
●	1 "	≈ 1.2	
△	2 "		≈ 0.2
▲	1 "		
x	2 "	≈ 0.65	≈ 0.4
□	1 "		

R: 取水口半径 H: 呑口高さ, d_s : 流動層厚さ

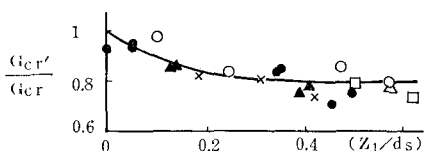


図-9 表面に一定水温域(深さ Z_1)がある場合の選択取水数の変化

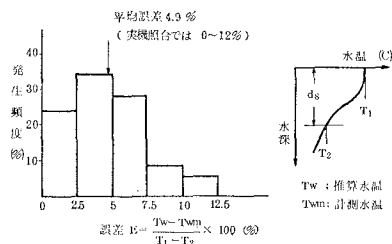


図-10 取水温度の計算の実験値に対する誤差

そこで軸対称選択取水実験の結果を用いて、取水温度の推定計算を行なうとともに、実測取水温度との比較を行ない両者間にあらわれる誤差を求めると、図-10に示す結果が得られた。

この図に示すように、推算値のほうが実測値に比し高くなる傾向がある。このような差が生じる要因としては2次元流について得られた流速分布の実験式(4)式を、軸対称流に適用したこと及び取水設備の呑口近辺で流動層と下層冷水域との間に混合が生じていること等が考えられる。

6. 実機計測結果との比較

現地の貯水池において前掲の図-1の水温分布を測定した際に、そこに設けられた選択取水設備での取水温度も計測された。(流動層厚さの計測も、小型のボートから吊り下げたプロベラ流速計を用いて試みたが、充分な精度が得られなかったのでここには示していない。)

これらの実機条件、すなわち、実機における水温分布、取水量及び取水設備寸法を用いて、上で述べてきた手法にそって取水温度を推定し、実測値と比較してみる。

計算に用いた諸数値を表-1に示すが、それらの算定方法は以下のとおりである。

i) 流動層厚さの推定

流動層厚さの推定は、選択取水数が図-6に示すように取水設備寸法によって変化するために密度勾配が全水深にわたって一定の場合に対しても逐次近似計算となる。具体的にはまず流動層厚さ d_s を仮定した後、密度勾配 β 及び取水量 Q を用いて、選択取水数 G_{cr} を求める。つぎに図-6においてその G_{cr} は取水設備の半径 R 及び呑口高さ H の流動層厚さに対する比すなわち R/d_s 及び H/d_s に対する G_{cr} に整合しているか否かをチェックしていく。

密度勾配が変化する場合、 G_{cr} のかわりに図-9で補正される G'_{cr} を用いる。

ii) 取水温度の推定

流動層厚さが定まれば、前述の模型水理実験結果に対する検討と同手法により取水温度の推定が可能である。

以上のようにして求めた取水温度推定値と実測値とを

表一 取水温度の実機計測結果と推定値との比較

	岩倉ダム	羽根二股ダム	厚良ダム
推定流動層高さ (m)	3	2.2	2.2
取水温度 (℃)	18.1	19.5	20.6
実測 (℃)	17.2	18.8	20.6
流動層内最高水温 (℃)	20.7	20	20.6
最低 (℃)	12.5	14.3	20.6
推定値の誤差 (℃)	0.9	0.7	0
(%)	11	12	0

表一に示す。同表に見ることのできるように、推定計算取水温度は実測値に対して、0～12% 高目の値を与える。この誤差の評価については次項で述べる。

7. 結果の検討

5, 及び 6 節でのべたように、ここに提示した表層取水時の取水温度推定法によれば、模型及び実機計測結果との比較において 0～12% 高目の水温計算値を与える。

この比較のなかで、実機実測値を対象とした誤差の生成要因としては i) テレスコープ形取水設備の継目や、非常用取水ゲート部等からの冷水浸入、および ii) 長さ数十メートルの導水管における放熱等が挙げられる。

これらの事項を考慮に入れると、ここに提示した手法は、上述の誤差を示すものの致命的欠陥を有するものではなく、むしろ、その誤差相当値の補正値を加算することにより実用に供し得ると筆者等は考える。特に、流動層内流速分布の計測結果を反映させていることは、取水温度推定の基本的事項をおさえていると考える。

8. 結 言

選択取水設備において、最も重要な機能のひとつは表層温水取水であることから、与えられた水温分布に対して目的とする水温の取水を可能とする設備を設計する合理的手法の確立が望まれていた。

また、その設計時の水温分布条件として、本文 図一1 に例示したごとく、表層近辺のほぼ一定水温域やその下方で水温勾配が変化する場合についてもとおりあつかいが可能であることが望まれていた。

本研究では上記の事項をカバーすることを目的として前回の研究の密度勾配が一定の場合の選択取水特性研究の延長線上において実験研究を行なった。

取水温度推定法の確立には、流動層内の流速分布の精度よい把握が不可欠であるが、本研究では LDV によりそれを計測し、有用な資料を得ることができた。

本研究で提示した取水温度推定法は、水理模型実験結果との比較において平均的誤差約 5%, また、実機実測結果との比較において、0～12% の誤差を示したが、それらの誤差を補正値として考え、実用に供することが可能であると考ええる。

参 考 文 献

- 1) 大西外明・今村建二 他: 選択取水における取水口寸法の影響, 第 28 回海講演集, pp. 490～494, 1981.
- 2) Yih, C. S.: On the flow into a line sink, Prod. 3rd U.S. Nat. Cong. of Appl. Mech., 1958.
- 3) 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, 土木学会論文報告集, 第 168 号, pp. 39～48, 1969.