

三成層密度場の取水流動に関する研究

WITHDRAWAL FROM THREE-LAYERED STRATIFIED SYSTEMS

室田 明*・道奥 康治**

By Akira MUROTA and Kohji MICHIOKU

In pumped storage reservoirs, a well mixed layer is often produced between the upper and lower pycnoclines by discharges from and into the reservoirs. A turbid middle layer may develop when the flood flows into the thermally stratified reservoirs. To understand the flow fields of such systems, the withdrawal from the three layered stratified systems is investigated. A theoretical analysis is performed to estimate the incipient withdrawal and the discharge in each layer. The validity of the analysis is confirmed by laboratory experiments. By using the theory, the optimum height of the outlet for the drainage of the turbid middle layer fluid is evaluated, in practical sense, which may enable the effective operation of the selective withdrawal arrangement to reduce the retardation of turbidity.

1. 序 論

(1) はじめに

貯水池水温成層場においては、熱対流や風の応力による混合が熱と水質の鉛直方向輸送を担い、水収支に伴う池内流動が水平方向の輸送をもたらすと考えられる。池内の物質輸送過程を評価し、水質を予測するためには、このいずれに関しても基礎研究に基づいて、解析モデルを策定する必要がある。本文はその一環として後者の流動の問題に関し基礎的な実験・解析を行い、その成果を報告するものである。

(2) 研究の目的

密度成層場の取水流動は、工業用冷却水の深層取水の問題や成層型貯水池の選択取水の問題に関連してこれまで研究が行われてきた。従来の研究の流れは二成層密度場と線型密度分布成層場の取水流動に関するものに二分される。いずれの場合も取水口に流線が収斂し、乱れが発達しないことから、少なくとも実験モデル・解析モデルの範囲内においては完全流体の扱いによってほぼ正確な流動解析が行われているといえる。しかしながら実際

の貯水池の密度成層を対象にこれらの解析を適用するには、なお検討の余地が残されている。

成層型貯水池の多くは、表層と取水口付近に躍層が形成され、鉛直方向に不連続な水温分布を呈する。特に、大水深の揚水発電用貯水池では、水深半ばに設置された取水口における流出入によって表層躍層と主躍層の間が一樣に混合する。その結果図-1に示す例では5月下旬から8月上旬にかけての受熱期に三層系を呈する。しかも、表層躍層は水面での熱的・力学的作用によって鉛直混合が生じ、1日単位の時間スケールで絶えず上・下に変動する。したがって、2つの躍層間の間隔が小さくなる場合や、流出量が大いときには、表層・中層・底層から成る三層系での流出状態を想定する必要がある。し

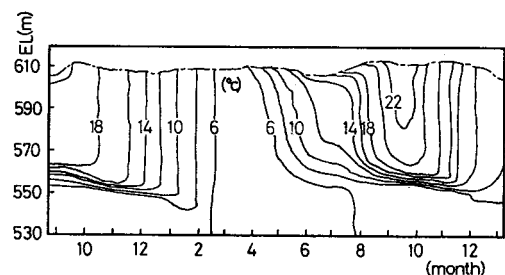


図-1 揚水発電用貯水池上部池での等水温線図¹⁾

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
(〒565 吹田市山田丘 2-1)

** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科 (同上)

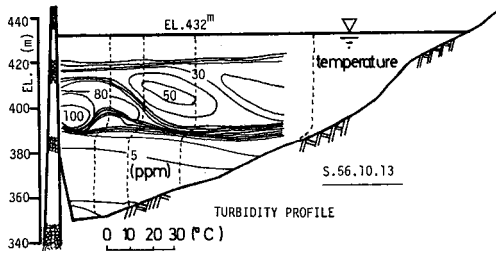


図-2 洪水流出後の濁水中間層の観測例 (上森ら⁴⁾による)

かしながら、これまでの貯水池水温予測モデル²⁾では、成層が発達した状態においても、線型密度場での取水理論³⁾を用いており、実測値との整合性は種々の経験定数を導入し、元の解析解をかなり変形することによって補償されている。本研究の第1の目的は、以上のように貯水池で特徴的にみられ、かつ従来の二層系・連続成層系の理論が適用し得ないような三層系密度場での取水流動の評価法を明らかにする点にある。本研究の成果は水温予測モデルの一端を構成するものとなる。

一方、貯水池の密度成層は、水温のほかに濁度によっても形成されることが知られている。洪水期には、上流から濁水が水温成層場に流入すると、その浮力効果によって図-2に示すような濁水中間層による三成層密度場が形成される。同図の上側密度境界面は主として濁度差によって、下側境界面は水温差と濁度差によって構成されている。濁水の早期排出のため、選択的放水が行われる。しかし、その排水流動を解析するためには従来の二成層取水理論では取り扱い不可能となり、濁水中間層をはさむ上下の密度境界面を考慮した三成層密度場としての取り扱いが必要となる。本研究の第2の目的は、濁水の長期滞留軽減対策として、「密度中間層の効率的排出のための最適取水口位置」を選定する点にある。

本論文は、以上2つの目的を意図して、二次元三成層密度場での取水流動に関する水理模型実験と解析的検討を行い、各層流出量の推定、中間層取水の最適取水口位置等について述べたものである。

2. 実験方法および実験条件

(1) 実験方法

本実験で用いた水槽を図-3に示す。幅30cm、底勾配1/10の透明塩化ビニール製二次元貯水池模型水槽に鉛直仕切り板1を設置し、幅10cm、長さ200cmの水路部を設ける。残りの部分は貯水部として使用し、取水による水位低下を極力抑える構造としている。これによって1つの実験runを終えるのに要する時間(約90秒~300秒)内で十分定常状態を得ることができる。塩分濃度成層を作製するため、2つの塩水供給用水槽3, 4

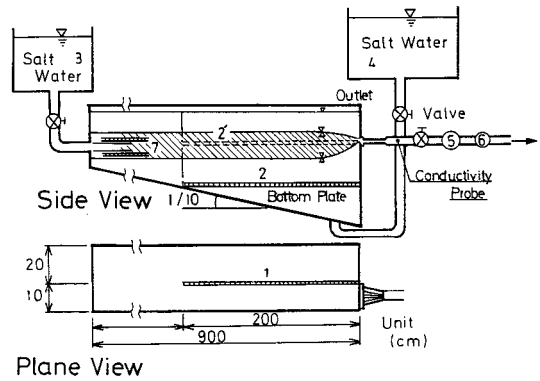


図-3 実験水槽

を設置している。水路下流端に幅10cm、開口高0.5cmの二次元取水口を設けている。三成層場の実験においては図-3中の2のように取水口30.25cm下方に水平の底板を設置する。二成層場の実験では、後述のように三層系と対応させるために、図-3中の2'のごとく取水口高さに水平底板を設けて取水口開口高を三層系の場合の半分としている。取水流量の調節には、取水口に接続したステンレス製ポンプ(最大容量120 ℓ /分、自吸式)とフロート式流量計を用いている。

二成層は、水路に所定量の淡水を満し、塩水を供給水槽4から底面供給口を介して流入させることによって作製される。三成層の場合には、さらに供給水槽3より蛍光染料ウラニンで着色された中間密度の塩水を上流端の水平ガイド7を通して静かに流入させ三層系を作製する。水槽内の鉛直方向濃度分布は電気伝導度計を用いて測定する。得られた初期濃度分布の一例を図-4に示す。

二層系における上・下層の流量比は取水口直下流のパイプ内に挿入された電気伝導度計の出力を連続記録し、これより算定される。三層系の実験においては、流出水を採水し、電気伝導度のほかFluoro Photometerを用いて蛍光度を測定してこれらの出力より三層からの流出量を算定する。密度境界面の形状は、二次元スリット光

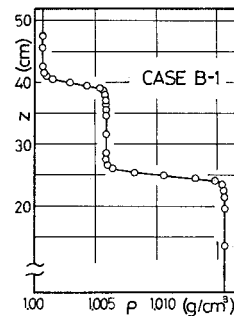


図-4 初期濃度分布の例

表一 二層系の実験条件

CASE	h_1 (cm)	h_2 (cm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	F_r
A-1	5.0	5.0	4.7	0.393~1.31
A-2	7.0	8.0	5.1	0.427~1.36
A-3	9.0	10.0	1.0	0.552~1.86
A-4	5.0	10.0	1.0	0.584~1.39
A-5	5.0	6.0	9.9	0.543~1.30
A-6	10.0	5.0	9.9	0.487~2.11
A-7	10.0	10.0	1.3	0.246~1.34
A-8	10.0	10.0	5.0	0.224~1.26

h_1, h_2 : 上・下層水深 (初期設定値), ϵ : 相対密度差,
 $F_r = q_i / \sqrt{\epsilon g h_i^3}$: 密度フルード数, q_i : 単位幅流量.

表二 三層系の実験条件

CASE	$\epsilon_1 \times 10^{-3}$	$\epsilon_2 \times 10^{-3}$	d_1 (cm)	d_2 (cm)	q_i (cm ² /s)
B-1	5.05	9.79	9.0	5.0	16.7~50.7
B-2	4.95	4.87	9.0	5.0	16.7~50.0
B-3	3.10	9.81	7.0	7.0	13.3~75.0
B-4	5.00	1.89	6.0	12.0	16.7~66.7
B-5	2.85	10.2	9.0	5.0	16.7~50.0
B-6	9.74	1.09	5.0	10.0	13.3~38.3
B-7	10.1	4.70	3.0	6.0	3.8~46.7

ϵ_1, ϵ_2 : 上側・下側密度境界面の相対密度差, d_1, d_2 :
 取水口から上側・下側密度境界面までの鉛直距離 (初
 期設定値), $F_r = q_i / \sqrt{\epsilon_i g H_i^3}$: 全水深 H_i で無次元化
 した密度フルード数, q_i : 単位幅流量.

束 (光束幅約 0.5 cm) を用いて可視化し, 35 mm スチールカメラで記録する. 流速分布は, 有機溶剤の混和液と染料メチレンブルーをトレーサーとして投入し, 写真撮影して求める.

(2) 実験条件

実験は二層系および三層系の密度場に対して行った. 表一, 表二に実験条件を記す.

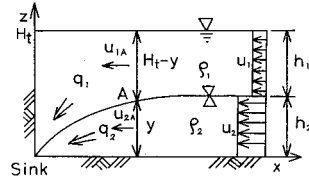
3. 二成層密度場の取水流動

(1) 理論解析

本節では, まず二層系での取水流動について論じ, 三成層密度場での取水理論を展開するための基礎的知見を示す.

図一五に示すような点吸い込みによる水平床二層系二次元下層取水を対象とする. 吸い込み点より遠方においては, 平行流であり, 吸い込み点に近づくとき軸対称流に漸近する. 流れを規定する支配断面においてはおおむね一様な流速分布であると考え, 従来から用いられている二次元二層流の基礎式を用いることができる. しかし, 本研究では対象とする流れにおいて上流での接近水頭が無視し得ないため, これを考慮した理論解析を行う. 図一五中の等流部と点Aにおける密度境界面に沿った圧力のつり合いは次式で表わされる.

$$\frac{1}{2} \rho_1 (u_{1A}^2 - u_1^2) - \frac{1}{2} \rho_2 (u_{2A}^2 - u_2^2) = \Delta \rho g (y - h_2) \dots (1)$$



図一五 二層系での取水流動

ここで, $u_{1A} = \frac{\alpha_1 q_1}{h_1 + h_2 - y}$, $u_{2A} = \frac{\alpha_2 q_2}{y}$, $u_1 = q_1 / h_1$, $u_2 = q_2 / h_2$ であり, q_i は各層の単位幅流量, $u_i \cdot u_{iA}$ は等流部およびA点での流速, α_i は流速補正係数, h_i は等流部水深, y はA点での下層厚さ, ρ_i は密度, $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ は密度差であり, 添字 $i=1, 2$ はおのおの上層・下層の諸量であることを示す.

水平床水路の場合, 上・下層の流量 q_1, q_2 間の関係は式 (1) および式 (1) を y で微分した支配断面の条件式

$$\frac{\rho_1 u_{1A}^2}{\Delta \rho g (h_1 + h_2 - y)} + \frac{\rho_2 u_{2A}^2}{\Delta \rho g y} = 1 \dots (2)$$

とから決定される. 式 (1), (2) より上・下層流量比 $r = q_1 / q_2$ と密度フルード数 $F_r = q_i / \sqrt{\Delta \rho g h_i^3 / \rho_i}$ ($q_i = q_1 + q_2$) との関係は次のように得られる.

$$r \equiv \frac{q_1}{q_2} = \left[\frac{\rho_2 \cdot \alpha_2^2}{\rho_1 \cdot \alpha_1^2} \cdot \frac{(1+m-m\eta)^3 m}{(m\eta)^3 [1+3m-3m\eta]} \cdot \frac{\times (3\eta - 2 - \eta^3 / \alpha_2^2)}{-(1+m-m\eta)^3 / \alpha_1^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots (3)_{-1}$$

$$F_r \equiv \frac{q_i}{\sqrt{\Delta \rho g h_i^3 / \rho_i}} = \left[\left[\frac{1}{\alpha_1^2 m^3} (1+m-m\eta)^3 \times (3\eta - 2 - \eta^3 / \alpha_2^2) \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\eta^3}{\alpha_2^2} (1+3m-3m\eta) - (1+m-m\eta)^3 / \alpha_1^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] / |1+m - (1+m-m\eta)^3 / \alpha_1^2 - m\eta^3 / \alpha_2^2|^{\frac{1}{2}} \dots (3)_{-2}$$

ここで, $\eta = y / h_2$ は無次元支配断面水深であり, 式 (3)₋₁, (3)₋₂ 間の媒介変数となる. また, $m = h_2 / h_1$ である.

下層取水の限界最大流量 q_{2c} は式 (3)₋₁ において, $r=0$ とおいたときの全流量 q_i に等しく次式で与えられる.

$$F_c = \frac{q_{2c}}{\sqrt{\Delta \rho g h_i^3 / \rho_i}} = \left[\frac{\eta_c^2}{\alpha_2^2} \cdot \frac{1+3m-3m\eta_c}{1+m-m\eta_c^3 / \alpha_2^2} \cdot \frac{-(1+m-m\eta_c)^3 / \alpha_1^2}{-(1+m-m\eta_c)^3 / \alpha_1^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots (4)$$

ここで, F_c は限界密度フルード数, η_c は, $3\eta_c - 2 - \eta_c^3 / \alpha_2^2 = 0$ の解である. η は $\eta_c \leq \eta \leq 1$ の範囲の変数となる.

(2) 実験結果と考察

a) 流速分布

図-6は各計測断面での流速分布を示す。高さ y および取水口からの水平距離 x はいずれも全水深 H_t で無次元化されている。流速 U は単位幅流量 q_t を全水深 H_t で除した全層平均流速 $U_0 = q_t/H_t$ で無次元化されている。また、 H_t を用いた密度フルード数 $F_t = q_t/\sqrt{(\Delta\rho g/\rho_t)H_t^3}$ をパラメーターとして各実験値の記号を変えている。比較のため、均質密度場におけるポテンシャル流解析の値を破線で併記する。

上流においては各層内ではほぼ様な流速分布を呈する。支配断面は少なくとも同図より上流に生ずるため、前節での一次元解析の適用範囲内にあるといえよう。 F_t が小さい場合ほど浮力効果が大きいため、上・下層の速度差が大きくなっていることが図よりわかる。逆に F_t が大きいほど慣性効果が卓越し、ポテンシャル流動に近い。しかし、吸い込み口に近づくと、いずれの場合も慣性力が卓越してポテンシャル流的になり、各ケース間の差異が減少する。

b) 取水限界条件

下層取水のための限界条件式(4)の妥当性を検討する。まず、本研究では取水口上部に形成されたよどみ領域(stagnant region)が消失し、密度界面が取水口位置まで急激に低下した瞬間を視覚的な取水限界と定義する。しかし、現象が緩慢でありこの場合より小さいフルード数でも上層水の流入は観察されることがあるため、目視による決定にはあいまいさが含まれる。そこで次に、上層流体の流出率 q_1/q_2 のより普遍的な表示として相対流出率 $\lambda = (q_1/q_2) \cdot (H_t/h_2)$ を定義し、 λ と下層水深 h_2 で除したフルード数 $F_r = q_1/\sqrt{\epsilon gh_2^3}$ との関係を図-7に示すように各実験ケースごとにプロットして、 $\lambda=0$ に対応する F_r の値を外挿操作で求め、限界密度フルード数 F_c と定義する。このような F_c の決定法は、角湯ら⁹⁾によってなされ、その中で λ は「比混入率」という言葉で定義されている(ただし、角湯らは、本研究と異なり支配断面の現われない常流状態の取水流動を対象として

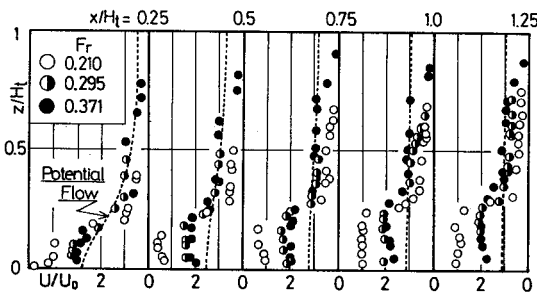


図-6 二層流動の流速分布

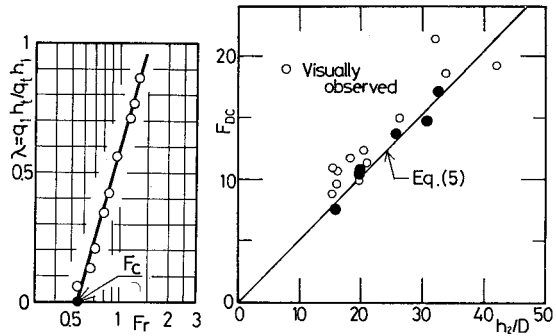


図-7 限界密度フルード数の決定法

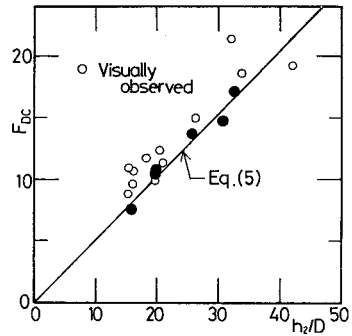


図-8 限界取水口フルード数 F_{dc} と無次元下層水深 h_2/D

いる)。なお、 F_r 中の長さ代表量としては平行流部における取水口位置からの界面高さ h_2 (図-5 参照) を用いている。したがって静止帯水域での界面高さを用いた Jirka⁷⁾ の Skimmer Wall に関する限界フルード数の定義とは異なるため、限界取水条件に関する本実験値と Jirka の理論値⁷⁾ との直接比較はできない。

以上のようにして得られた取水限界条件を図-8に示す。同図においては取水口開口高さ D の影響の有無を確認するため Skimmer Wall の場合と同じく D を用いた限界取水口フルード数 $F_{dc} = (q_{2c}/D)/\sqrt{\epsilon gh_2}$ を新たに定義して縦軸にとり、横軸に h_2/D とする。参考のため、目視によって判断される取水限界も同図中に併記している。式(4)で与えられる F_c を用いれば、限界条件は

$$F_{dc} = F_c \cdot \frac{h_2}{D} \dots \dots \dots (5)$$

で表わされる。実験値に最もよく適合する F_c の値として、式(4)において $\alpha_2^2 = 1.4$ としたときの $F_c = 0.51$ が得られる。式(5)においては両辺から D の項が消失される。実験値はこれを支持することから、限界条件は取水口開口高さ D に無関係に決定され点吸い込みの流れとみなしてよいことが示される。 α_2 は流速分布のひずみ、取水限界の決定誤差等を含めた実験係数と考えられる。しかるに、限界状態(流動状態よりも流速のひずみは大きい)においても α_2 は1に近く、本実験範囲内においては一次元解析が適用できることが再確認される。

c) 二層流出状態での流量比

流量が取水限界流量を越えると、上下両層からの流出が生ずる。そこで、二層流動状態での上・下層流量の比 $r = q_1/q_2$ と密度フルード数 F_r の関係について式(3)と実験値の比較を行い、理論の妥当性を検討する。

図-6の流速分布に示したように、密度フルード数が大きいほど、流れはポテンシャル流動に近づく。 $F_r \rightarrow \infty$ の極限においては、上流で全層一様の流速分布

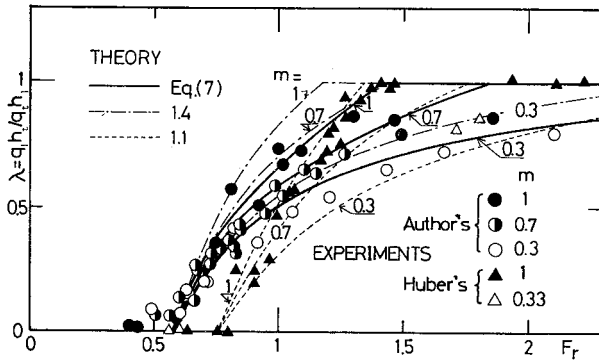


図-9 上層水の相対流出率 λ と密度フルード数 Fr の関係

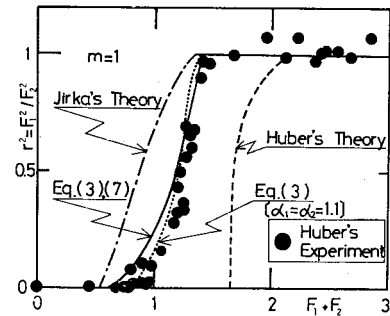


図-10 他の研究と本理論との比較

$U/U_0=1$ となる。このとき、 r は密度差に無関係に上・下層の水深比 h_1/h_2 に等しくなることがわかる。これより、 r のかわりに前述の上層水の相対流出率 $\lambda = (q_1/q_2) \cdot (H_1/h_1)$ を用いれば、 F_r の増加とともに、 m に無関係に $\lambda \rightarrow 1$ へと漸近し、より普遍的に r が表示される。なお、定義より λ は r と次の関係をもつ。

$$\lambda = \frac{r}{r+1} (m+1) \dots \dots \dots (6)$$

図-9 に λ と F_r の関係を示す。Huber らの実験結果⁶⁾ の換算値を同図中に併記する。丸印が各水深比に対する本実験結果である。

式(3)、(6)によって $\lambda \sim F_r$ の理論値を算定するに際し、流速補正係数 α_1, α_2 の値が問題となる。まず λ の小さい範囲においては、限界取水条件式(5)から定まる $\alpha_2^2=1.4$ が適していよう。このとき、 $\eta \approx \eta_c$ であり、支配断面は比較的取水口に近い流速分布のひずんだ領域に生じるであろう。逆に $\lambda=1$ に近づくほど、 $\eta \rightarrow 1$ となり、上流の等流部近傍に支配断面が生じるため、流速のひずみは小さくなって $\alpha_1 = \alpha_2 \rightarrow 1$ に漸近すると考えられる。本実験値は図-9 に示すように、ほぼ $\alpha_1^2 = \alpha_2^2 = 1.4$ の場合の理論値(図中、一点鎖線)と $\alpha_1^2 = \alpha_2^2 = 1.1$ の場合の理論値(図中、点線)の間にある。そこで α_1, α_2 が無次元支配断面水深 η の単調減少関数であると考へ、次式で表わす。

$$\alpha_1^2 = \alpha_2^2 = (\alpha_c - \alpha_0) \exp \left[-\beta \frac{\eta - \eta_c}{1 - \eta_c} \right] + \alpha_0 \dots \dots \dots (7)$$

ここで $\alpha_c = 1.4, \alpha_0 = 1.0$ である。

上式中、 $\beta = 3.0$ とした場合、 $\lambda \sim F_r$ の理論曲線は実験値に最もよく適合する。これを図-9 中の実線群で表わす。

d) 他の実験および本理論との比較

図-10 は $m=1$ の場合の Huber の実験値⁶⁾ を上・下層の密度フルード数の二乗の比 $r^2 = F_1^2/F_2^2$ と $F_1 + F_2$ (ここに、 $F_1 = q_1/\sqrt{\epsilon g h_1^3}, F_2 = q_2/\sqrt{\epsilon g h_2^3}, \epsilon = \Delta\rho/\rho_1$)

の関係として示したものである。まず、本研究の理論値は $\alpha_1^2 = \alpha_2^2 = 1.1$ の場合(点線)と式(7)を用いた場合(実線)について示しているが、いずれの場合もよく適合している。 $r=0$ の付近において、本理論値と Huber の実験値が多少異なる理由として、限界条件の定義の違いが考えられるが、明らかではない。これに対し、カーテンウォール取水に関する Jirka の理論値⁷⁾あるいは二層系のポテンシャル解析による Huber の数値計算値⁸⁾は Huber 自身の実験値から大きくはずれている。前者の不一致は、接近水頭を考慮していないためであると考えられる。後者の理論値は $F_1^2 + F_2^2 > 1$ の全域射流状態の流れを対象としており、本実験はもちろん、Huber 自身の実験⁶⁾に対しても適用範囲外にあるため実験値に適合しないのである。このような条件の流れを二層流の実験で検証することは困難である。

以上のように、従来からの一次元解析に接近水頭を考慮する程度の改良で、従来の理論より精度のよい理論解が得られた。

4. 三成層密度場の取水流動

(1) 理論解析

図-11 に示す三成層密度場の取水流動を考える。二

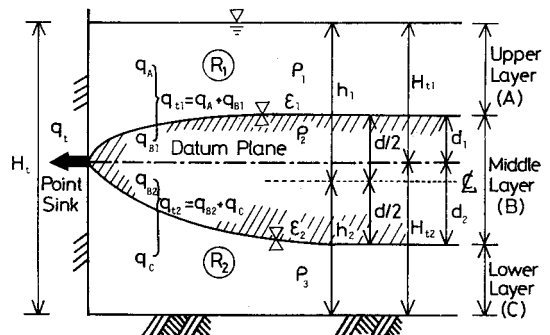


図 11 三成層での取水流動

層系の場合と同じく一次元流の仮定が妥当であるとす。今、取水口の高さに一点鎖線で示すような仮想底面を想定し、これを境とする上下の密度場に対し、3.(1)で述べた二層系の取水理論を導入する。まず、平行流を仮定すれば、仮想底面は1つの流線と考えることができる。したがって中間層(B層)の流量 q_B を仮想底面上側の流量 q_{B1} と下側の流量 q_{B2} に分ければ、次式が成り立つ。

$$q_{B1}/q_{B2} = d_1/d_2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $q_B = q_{B1} + q_{B2}$ である。

次に、式(3)の関数形を $r = f(F_r, m)$ とおき、

図-11中の仮想底面より上側と下側の二層系に対してこれを適用すれば、次式を得る。

$$r_j = f(F_{rj}, m_j) \quad (j=1, 2) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、添字 $j=1, 2$ はおのおの、仮想底面の上側および下側の諸量であることを示し、 $r_1 = q_A/q_{B1}$ と $r_2 = q_C/q_{B2}$ はその流量比である。また、 $m_j = d_j/(H_{tj} - d_j)$ 、 $F_{rj} = q_{tj}/\sqrt{\varepsilon_j g d_j^3}$ 、 $\varepsilon_1 = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ 、 $\varepsilon_2 = (\rho_3 - \rho_2)/\rho_3$ 、 q_A 、 q_B 、 q_C はおのおの上・中・下層の単位幅流量であり、

$$\left. \begin{aligned} q_{t1} &= q_A + q_{B1} = (1 + r_1)q_{B1} \\ q_{t2} &= q_{B2} + q_C = (1 + r_2)q_{B2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

である。その他の諸量については図中に示す。

次に、合流量の比 $\hat{r} = q_{t1}/q_{t2}$ を定義すれば、総流量 q_t は、

$$q_t = (1 + \hat{r})q_{t2} = (1 + \hat{r})/\hat{r} \cdot q_{t1} \dots\dots\dots (11)$$

で表わされる。式(8)、(10)から \hat{r} について、

$$\hat{r} = \frac{r_1 + 1}{r_2 + 1} \frac{d_1}{d_2} \dots\dots\dots (12)$$

を得る。結局、式(9)、(12)を同時に満足する $r_1 \cdot r_2$ を以下の手順で求めれば、各層の流量 q_A 、 q_B 、 q_C が算出される。

与えられた総流量 q_t に対し、まず \hat{r} の初期値 \hat{r}_0 を仮定し、これに対する q_{t1} 、 q_{t2} を式(11)から求める。次に、式(9)から r_j を求める。これより式(12)を用いて算定される \hat{r} が最初に仮定した \hat{r}_0 と異なる場合には、 \hat{r} を新たな仮定値として、以下同様の計算を収束するまで繰り返す。最終的に得られた \hat{r} 、 r_j から q_A 、 q_B 、 q_C が求められる。図-12に計算のフローチャートを示す。

(2) 実験結果と考察

a) 流況と流速分布

流量の増加に伴う流動状態の変化を図-13に示す。流量が小さな範囲では上下の密度境界面はほぼ水平に保たれ、中層のみの流動状態を呈する(a)。取水口近傍の上下には二層系の場合と同様によどみ領域が観察される。流量の増加とともに、いずれか一方の停滞水域が消失して、密度界面が第1の限界状態に達し(b)、その

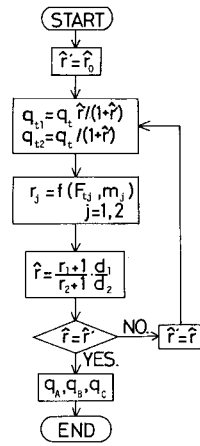


図-12 計算のフローチャート

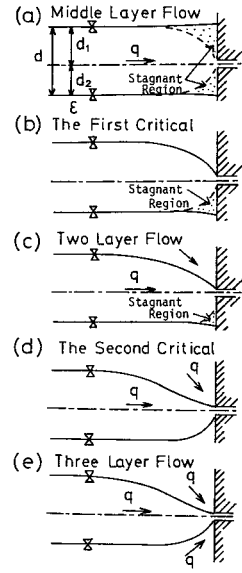


図-13 流量の増加に伴う流動状態の推移

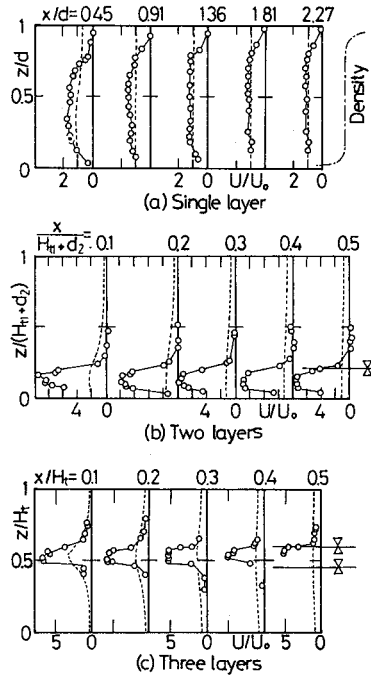


図-14 各流動状態における流速分布

後二層流動状態へと移行する(c)。さらに流量が増加するともう一方の密度境界面も取水口に接近して第2の限界状態に至る(d)。最終的に三層流動状態(e)に達する。

図-14はCase B-1における各流動状態での水平流速の分布を示す。各図において、水平距離 x および高

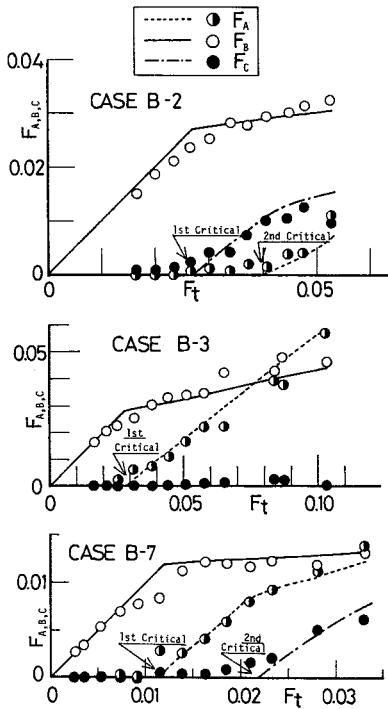


図-15 各層流出量の理論値と実験値の比較

さ z は各流動層の厚さの和で無次元化されている。流速 U は q_t を各流動層の厚さの和で除した平均流速 U_0 で無次元化されている。点線は、ポテンシャル流の値である。

(a) の中層流動では、上流において流速が一樣で、ポテンシャル流の値とほぼ等しいが、取水口近傍では図-13(a) で示される上下のよどみ領域の存在によって、流水断面が減少し、流速分布はひずんでいる。二層流動状態 (b) においても、上流では流速分布が一樣に近いが、取水口付近では下方によどみ領域が存在することがわかる。(c) の三層流動状態においては、もはやよどみ領域は消失し、上流位置においては、各層内でおおむね一樣な流速分布形状を呈する。

以上のように、三層系においても上流側での流速分布の一樣性は二層系の場合と同様であり、一次元解析に基づく本理論が適用され得ると考える。

b) 各層流出量の推定

前節での解析法を用いて各層の流量 q_A, q_B, q_C を求め、実験値との比較を行う。

図-15 はその結果の例である。横軸には総流量 q_t を上側界面での相対密度差 ϵ_1 と全水深 H_t で無次元化した密度フルード数 $F_t = q_t / \sqrt{\epsilon_1 g H_t^3}$ 、縦軸には同様にして無次元化された各層の密度フルード数 $(F_A, F_B, F_C) = (q_A, q_B, q_C) / \sqrt{\epsilon_1 g H_t^3}$ をとる (q_A, q_B, q_C は各層の単

位幅流量)。

理論値は、単層流動状態・二層流動状態および三層流動状態のいずれにおいても、各層流量を精度よく評価している。また、第1・第2限界条件も実験と理論においてよく一致しており、理論解析の妥当性が裏づけられる。

(3) 密度中間層の効率的排水

洪水期には上流域から高濃度の濁水が貯水池に流入し、水温成層の浮力効果や躍層界面の不安定化等によって濁水中間層が形成され、濁水の長期化問題が生じる。選択取水施設が装備された貯水池においては、取水口を最適位置に設定し、効率的に濁水層を排除すれば、濁水長期化の軽減になるばかりでなく、堆砂量を減じ貯水池有効寿命を延長することにもつながる。しかしながら、現在のところ最適取水口位置を決定づける方策はなく、経験的に選択取水を行っているのが現状である。そこで、

表-3 対象とする三層系密度場

ϵ_1/ϵ_2	0.2, 1.0, 5.0		
h_2/H_t	C-1	C-2	C-3
0.25	C-1	C-2	C-3
0.50	C-4	C-5	C-6
0.75	C-7	C-8	C-9

\tilde{h}_2 : 中間層中心線高さ、 d : 中間層厚さ
 $d/H_t = 0.2$ (図-11 参照)。

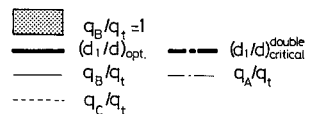
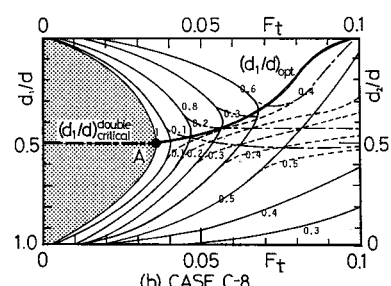
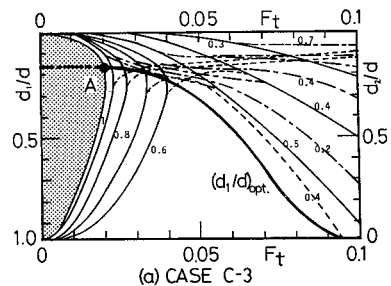


図-16 各層流出率 $(q_A, q_B, q_C)/q_t$ と取水口位置 d_1/d と密度フルード数 F_t の関係 (Case C-3, C-8)

本節では三成層取水理論を用いて流量・取水口位置と中間層流出率の関係を明らかにし、密度中間層排水のための最適取水口位置の制御法を論ずる。

今、表—3に示すように、中間層位置 \tilde{h}_2 、中間層厚さ d 、上下層界面の相対密度差の比 $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ を変化させた C-1~C-9 の 9 種類の三成層密度場を対象とする。

前節で述べた三層系の取水理論を各密度場に適用し、取水口位置・総流量・各層流出率の関係を調べる。図—16はその例である。横軸に密度フルード数 F_t (無次元化された総流量)、縦軸に無次元取水口位置 d_1/d (または d_2/d) をとり、各層からの流出率 q_A/q_t 、 q_B/q_t 、 q_C/q_t の等値線をそれぞれ、一点鎖線・実線・点線で結んでいる。黒い部分は $q_B/q_t=1$ すなわち中間層のみを取水し得るような (d_1/d) と F_t の組合せの範囲 (以下、「中間層取水領域」と称す) である。

取水限界条件式 (4) を変形すれば、中間層取水領域の解析的な表現は次のように得られる。

$$F_{tc}^B \equiv \frac{q_{tc}^B}{\sqrt{\varepsilon_1 g H_t^3}} = \text{Min.} (F_{tc}^A, F_{tc}^C) \dots \dots \dots (13)$$

ここで q_{tc}^B は最大中間層取水流量、 F_{tc}^B はその無次元流量 (密度フルード数) で、 $\text{Min.} (,)$ はいずれか小さい方の値を採択することを意味する。上式中の F_{tc}^A 、 F_{tc}^C は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_{tc}^A &= F_c \left(\frac{d}{H_t} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d_1}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \\ F_{tc}^C &= F_c \left(\frac{d}{H_t} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{d_1}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

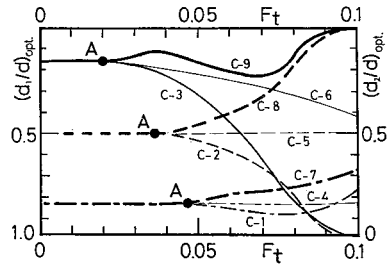
本来は全水深 H_t が代表量として取水限界条件式 (13) に入るべきではないが、ここでは図—16中に式 (13) を組み入れるためあえて H_t を用いた限界フルード数 F_{tc}^B を定義しなおしていることを付記する。式(13)、(14)により図—16中の中間層取水領域の外縁が与えられる。

一方、中間層のみの取水を行うための最大流量を与える取水口位置 (図—16中の点A) は、上側・下側密度界面が同時に第1限界状態に至るときの (d_1/d) に等しく、式 (14) で $F_{tc}^A = F_{tc}^C$ とおいて

$$(d_1/d)_{\text{critical}}^{\text{double}} = 1/(1 + \varepsilon_1/\varepsilon_2) \dots \dots \dots (15)$$

のごとく得られる。この値は、図—16中の太い一点鎖線で示す。比較的小流量で中間層のみの排水を行う場合には、 $(d_1/d)_{\text{critical}}^{\text{double}}$ の位置に取水口を設定すれば、最も効率よく選択取水を行うことができる。

排水流量が増加し、二層あるいは三層流出状態になると、中層排水のための最適取水口位置 $(d_1/d)_{\text{opt}}$ (図中、太い実線) は最大中間層流出率 $(q_B/q_t)_{\text{max}}$ を与える取水口位置として定義される。これを図—16中に太い実線で示す。図のように $(d_1/d)_{\text{opt}}$ は流量の関数であり、その増加とともに式 (15) で与えられる $(d_1/d)_{\text{critical}}^{\text{double}}$



図—17 各成層場の最適取水口位置の変化

の位置からしだいに各成層状態に応じて変化する。図—17は、表—3中の各密度成層場に対する $(d_1/d)_{\text{opt}}$ と F_t の関係を示す。同図より、境界面位置や密度差に関する密度場の上下非対称性が、 $(d_1/d)_{\text{opt}}$ に及ぼす影響がわかる。

ここでは、二次元密度場を対象としたが、式 (9) に三次元二成層場の取水流動に関する適当な理論式 (たとえば文献9) 等) あるいは経験式を当てはめれば、本理論は実際の貯水池へも応用することができる。取水口高さが連続的に設定できるような鉛直方向滑動式の選択取水施設を有する場合には、排水流量 F_t に対する $(d_1/d)_{\text{opt}}$ の位置に取水口を設定すればよい。また、鉛直方向に離散的に複数個の取水口を有する場合には、所定の排水流量に対する各取水口位置で (q_B/q_t) を図—16より求め、そのうち (q_B/q_t) が最大となる取水口を選んで放水を行えばよい。これにより、濁水中間層の効率的な排出操作を行うことができる。加えて、流出濁度の推定も可能となる。

5. 結 論

以下に本研究の成果を要約する。

- (1) 二次元二成層および三成層密度場での取水流動の模型実験を行い、流速分布の測定から本実験範囲内において一次元解析が可能であることを確認した。
- (2) 二次元二成層場での底層取水に対する一次元解析を行い、取水限界条件および各層流出量の評価法を確立した。接近水頭を考慮することによって、これまで理論的には説明されなかった他の研究者の実験結果を説明できた。また、流速補正係数を無次元支配断面水深の単調減少関数として表示すれば、本理論値は本実験結果に適合するよう改善される。
- (3) 二層系の取水理論を基礎にして、貯水池の水温成層や濁水中間層を対象とし、三成層密度場での取水理論を展開した。これを実験結果と比較したところ、第1・第2限界条件ならびに各層流出量のいずれもがきわめて精度よく評価された。
- (4) 三成層密度場の取水理論を用いて、濁水中間層

早期排出の方策を論じた。すなわち、中間層流出率 (q_b/q_i) を取水口位置と流量の関数として表示し、任意の流量に対して (q_b/q_i) を最大にらしめる「最適取水口位置」を数例の密度場に対して示した。これにより、実貯水池の濁水問題を軽減するための選択取水操作が可能であることを示した。

なお、本論文の4.において述べた三成層密度場の解析法は、式(9)に他の研究成果をそのままあてはめれば、同様の展開ができるため、種々の条件の密度成層場に対して適用できる汎用的なものと考えている。

水理模型実験は、当時本学大学院学生および学部学生であった大石富彦(現・関西電力(株))・亀沢 寛(現・大成建設(株)) 両氏の熱心な協力のもとに行われたものである。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

1) 狭間 滋・室田 明・道奥康治：揚水発電用貯水池の熱収支に関する実態調査と一考察，第39回土木学会年次学術講演会概要集，pp.517~518, 1984.
 2) (たとえば) Huber, W.C., Harleman, D.R.F. and Ryan, P.J. : Temperature Prediction in Stratified

Reservoirs, J. Hydraulics Div., Proc. A.S.C.E., HY 4, pp.645~666, 1972.
 3) (たとえば) Koh, R.C.Y. : Viscous Stratified Flow towards a Line Sink; J. Fluid Mech., Vol.24, pp.555~575, 1966.
 4) 上森千秋：人工貯水池の湖水の流動と水質に関する研究，昭和56~57年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書，1983.
 5) 角湯正剛・和田 明・曾我雅海・宮池克人：密度成層水域における取水特性，第25回海岸工学講演会論文集，pp.485~489, 1978.
 6) Huber, D.G. and Reid, T.L. : Experimental Study of Two-Layered Flow through a Sink, J. Hydraulics Div., HY 1, Proc. A.S.C.E., HY 1, pp.31~41, 1966.
 7) Jirka, G.H. : Supercritical Withdrawal from Two-Layered Fluid Systems, J. Hydraulics Res., Vol.17, pp.43~51, 1979.
 8) Huber, D.G. : Irrotational Motion of Two Fluid Strata towards a Line Sink, J. Engineering Mechanics Div., Proc. A.S.C.E., EM 4, pp.71~86, 1960.
 9) Wood, I.R. : Selective Withdrawal from Two-Layer Fluid, J. Hydraulics Div., Proc. A.S.C.E., HY 12, pp.1647~1659, 1978.

(1984.5.23・受付)