

ダム貯水池の成層化過程

岩佐 義朗・井上 和也・野口 正人

ON THE STRATIFICATION PROCESS IN A DAM RESERVOIR

By *Yoshiaki IWASA, Kazuya INOUE and Masato NOGUCHI*

Synopsis

Continuous field observations of water temperatures during 1971-1972 at a system of two reservoirs of the run-of-the-river and the pumped storage show that the thermal stratification of stored waters would mostly be influenced by the inflow-outflow response of river waters to the reservoir system. A simple mathematical model for lowering of the interface as a metalimnion, verified experimentally by a hydraulic model test of densimetric stratified flows analogous to thermally stratified flows made at the Hydraulics Laboratory, Department of Civil Engineering, Kyoto University, will explain a bulk response action of the inflows and outflows to the thermally stratified flows.

1. 緒 言

一般に湖沼や貯水池あるいは海洋において夏季に水面近くの水温が上昇し、それより下層の水との間に密度差が生じて成層状態の発達することが数多くの事例から知られている。貯水池などに関してはこのような成層化の過程を冬季における循環期までを含めて表現しうるモデルもすでにいくつか提案されている^{1), 2)}。

湖沼や貯水池における水収支としてつぎのような項目が挙げられる。i) 流入河川などからの流入水, ii) 流出河川などへの流出水, iii) 水面への直接的な降水, iv) 地下水の湧出あるいは地下水源涵養としての流出, v) 水面からの蒸発などである。また熱収支については i) ~ v) にともなう熱エネルギーの移流の他に, vi) 水面を通じて行なわれる熱エネルギーの授受つまり蒸発・凝固にともなう潜熱の放出, 太陽からの輻射エネルギーの吸収とその内部への伝達および水面から大気中へ放出される輻射エネルギー (逆輻射), vii) 底部における地中への熱の放出あるいは吸収, viii) 水塊の内部で発生する熱エネルギーなどが考えられる。しかし通常のダム貯水池に限れば、水流にともなう熱の移流、それも流入水および流出水による移流ならびに水面における熱の授受が熱収支にとって最も重要な因子であって、それらの相対的な重要性は気象・水文的条件および地形によって決せられよう。

ここで報告するのは、淀川水系宇治川にある天ヶ瀬ダム貯水池において過去2年の主として夏季に行なわれた水温分布の観測結果と単純化された取水モデルにおける実験結果についてであるが、これらの調査は成層状態の発達にともなう貯水池の底部に滞留する水とその水質劣化が水質問題と関連して注目されたことなどから実施されたものである。したがってこの調査には、ここで述べる水理学的なもの他に化学的、生物学的な調査も含まれており、それらの間の相互的な対応関係を明らかにし、貯水池の水質変換に及ぼす役割を解明することが最終的な目標となっている。

この貯水池のように、従来河川であった所をダムによって締め切り貯水池とした場合、貯水池はいわゆる“run of the river”としての性質を有すると考えられ、熱収支および成層化の過程において、流入水・流出水が最も重要な役割を果すものと予想される。

2. 天ヶ瀬貯水池の概要

天ヶ瀬貯水池は、総容量 $26.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、有効貯水容量 $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ である。流入水の大部分は上流の琵琶湖からの放流水で南郷洗堰で流量の調節が行なわれている。最大流量やく $186 \text{ m}^3/\text{s}$ までは発電取水口（天ヶ瀬発電所）を通して貯水池からの放流が行なわれ、それ以上の放流には主ゲートが用いられる。他に $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ の都市用水の取水が行なわれている。貯水池の縦断面図は Fig. 1 に示されるとおりである。断面番号4と5

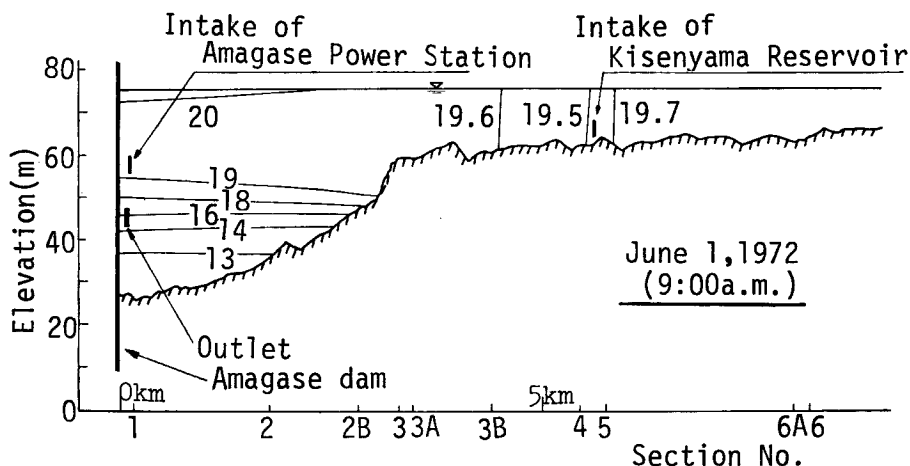


Fig. 1 Longitudinal section of the reservoir and isotherms in warm season.

の間にこの貯水池を下池とする揚水発電所（喜撰山発電所）の取水口（放水口）があり、最大揚水量 $220 \text{ m}^3/\text{s}$ 、最大放水量 $248 \text{ m}^3/\text{s}$ の取・放水のくり返しが毎日行なわれている。Fig. 2 は天ヶ瀬貯水池における流入流量、流出流量および揚水発電所の使用水量の一例である。

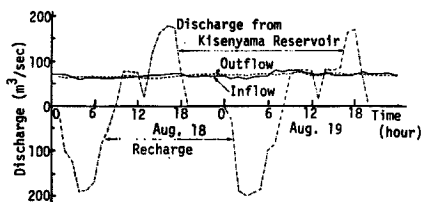


Fig. 2 Daily cycle of water uses in reservoir (1971).

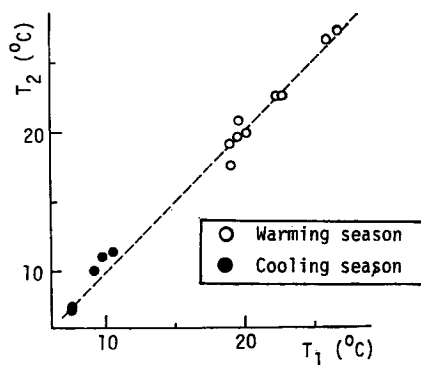


Fig. 3 Correlation of water temperatures between surface layer and upstream river.

3. 観測結果と考察

(1) 表水層

Fig. 1 は温暖期における貯水池の等温線図の例である。貯水池の水深の大きい部分には縦断方向にほぼ

一様な成層状態がみられるのに対し、断面 NO.3 より上流においては成層はみられない。このことから、貯水池の断面 3～4 の間を境にして下流区間は成層化の発達する部分と考えられ、またこれより上流区間は通常の河川とよく似た状態を示す部分とみられる。Fig. 3 はこの河川部分の水温 T_1 と下流の水温躍層より上の部分の水温 T_2 (断面 2 の水面下 1.0 m の水温) との相関であるが、この貯水池では水温躍層より上の水温は上、下流区間を通じて一様であって、流れ方向の変化は少ないとみることができる。流入水・流出水の少ないふつうの湖沼の場合、躍層は 10～20 m の深さにあることが多いが、この貯水池ではそれが水面下 20～30 m とかなり深い部分にあり、それより上層部は、Fig. 5 のように、昼間にダム近くの水面で一次躍層のみられることがある以外は、ほとんど一様な水温であり、この部分が表水層を形成している。観測の行なわれた両年がともに豊水年であって流入・流出量が多く、このような場合には、躍層の位置は後述のように流量制御の方法と取・放水口の位置によることがみられる。つまり貯水池の水面における熱の吸収によって成層化が生じてもそれは比較的小さく、十分発達しないままに流入・出水による移流によって破壊され、これが上昇した水温の流入水によって置き換えられる結果として躍層が発達するものと考えられる。

つぎに、貯水池の表水層の水温として天ヶ瀬発電所の取水水温をとり、これと上流の大貯水池である琵琶湖における水温(瀬田浄水場の水温)との相関を求めるため、1971年の1年間の水温の変化をつぎの Fourier 級数に展開した。

$$T(t) = T_m + \sum_n C_n \sin\{2\pi f_n(t + \varphi_n)\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで $f_n = n/T$ ($T=365$ 日) であり、 T_m は年間の平均水温である。Fig. 4(a), (b) は C_n, φ_n を f_n のスペクトルとして求めた結果である。Fig. 4(b) には瀬田における水温と天ヶ瀬でのそれとの位相の差も示されている。年周期 ($f=1/365$ (日)) の変動成分に比し他の成分はかなり小さく、またこれらの周期の変動

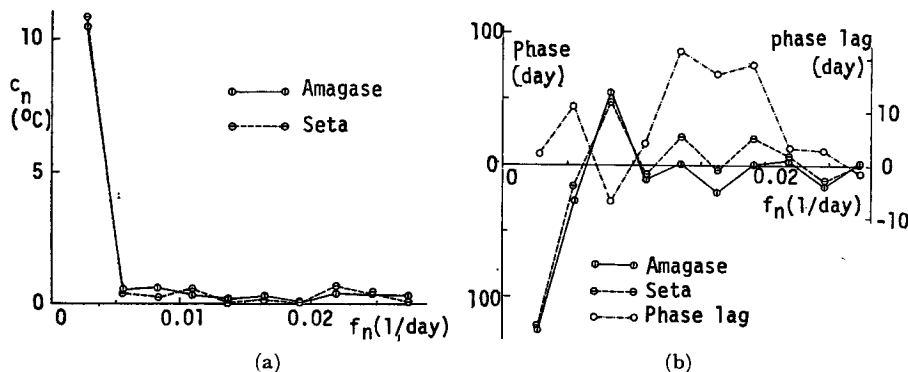


Fig. 4 Spectrum and phase of the temperature variations.

成分の位相差が両者の水温変化の相関に持つ意義は明らかでないが、年周期のその位相差が数日程度であることはこの貯水池の表水層の“run of the river”としての特性の一つを表わすものと考えられる。

(2) 底層水温

吉川・山本¹⁾ はわが国の多くの貯水池の水温の年間の変化を詳細に調査し、底層水温が年間を通じてほとんど変化しない場合と、洪水期にそれが上昇するという二つの型のあること、および底層水温の変動の著しい貯水池ほど流入水の影響が大であることの二つを見い出した。そして洪水期に底層水温が上昇するのは、水温は高いが高濁度のため密度の大きくなっている洪水流が密度流的に貯水池の底部へ浸入した場合であるとしている。また白砂³⁾ も一ツ瀬ダム貯水池の濁水問題に関連して同様のことを指摘している。Fig. 5 は天ヶ瀬貯水池の底層水温を過去の観測結果をも含めて示したものであるが、その変動は著しい。この貯水池においては濁度は観測されていないので、水温変動と濁水との関連は明らかでない。しかし、この貯水池へ

の流入水のほとんどが琵琶湖よりの放流によるものであること、ならびに洪水時における放流による躍層の破壊、あるいは極端な場合放流が貯水池から全層取水の型で行なわれる結果、貯水池の水がすべて流入水によって交換されてしまうことが底層水温の変動の主要原因と考えられ、濁水のそれは比較的小さいであろう。

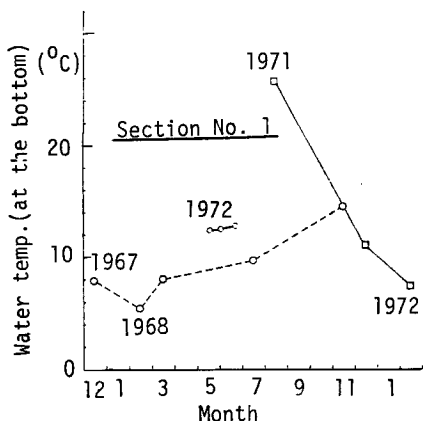


Fig. 5 Seasonal variation of water temperature at bottom.

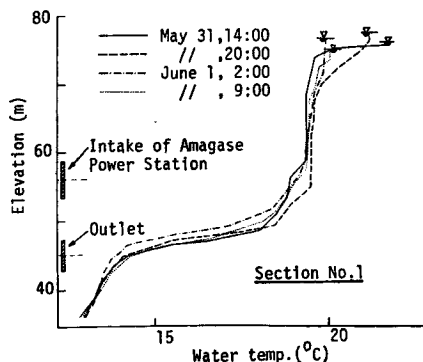


Fig. 6 Daily change of temperature distributions in reservoir.

(3) 揚水発電の影響

Fig. 6 は揚水発電所の運転の状況に応じて観測された水温分布である (断面 1)。図中の実線および点線は揚水発電所の発電 (放流) 中、鎖線は揚水中、また破線は運転休止中にそれぞれ対応する。図より明らかなように、水面近くを除いて水温分布には明瞭な差はみられない。また水面近くの水温の変化は昼間に一次躍層が発達し、それが夜間に冷却され対流によって消滅することを表わしており、一次躍層はより深い部分へあまり影響しないものとみられる。

揚水発電所の全揚水量は天ヶ瀬貯水池の有効貯水容量の20%程度に達する。しかし後述するように、貯水池の成層状態および躍層の位置がこの貯水池からの取水に密接に関係していること、および揚水発電所が一日周期で運転され発電後上池に残留する水が少なく上池に滞留する時間が短いため水温変化をほとんど受けないと考えられることから、天ヶ瀬貯水池からの流出水が極端に少なくなる場合を除いて揚水発電の揚・放水のサイクルを通じて貯水池の水温分布が著しい変化を受けるとは考えられない。つまり揚水発電によって天ヶ瀬貯水池の水温分布は、表水層にいくらかの混合の効果を受ける以外、大きい影響をうけないものとみなされる。

(4) 躍層の位置

Fig. 7 は 1971 年、72 年の温暖期の水温分布である。71 年には成層がほとんどみられないのに対し、72 年には明瞭な躍層が発達している。両年の気象条件には大きい差はないが、Fig. 8 のように貯水池からの放流量に大きい違いがみられる。すなわち、71 年 7 月には平均 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ に達する流入流量があり、またしたがって同程度の流量の流出 (放流) があったが、72 年では 6 月初旬まで流入流量は約 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ で発電取水を通じてのみ同量の流出が行なわれており、このような違いの結果全く異なった水温分布が現われたと考えざるをえない。

72 年の観測結果からみて、躍層の位置と取水口の位置の関係が明らかである。すなわち、上述のように 6 月初旬までは発電取水口 (取水口中心位置 O.P. 56m) を通じての放流が行なわれた。6 月 10 日以降、貯水位を夏季制限水位に下げたため、放流が洪水放流工 (中心位置 O.P. 45m) を通じて行なわれ、二つの取水口にはさまれる領域の水が放流された。その結果、躍層は O.P. 39m にまで低下している。これらのことを水理学的

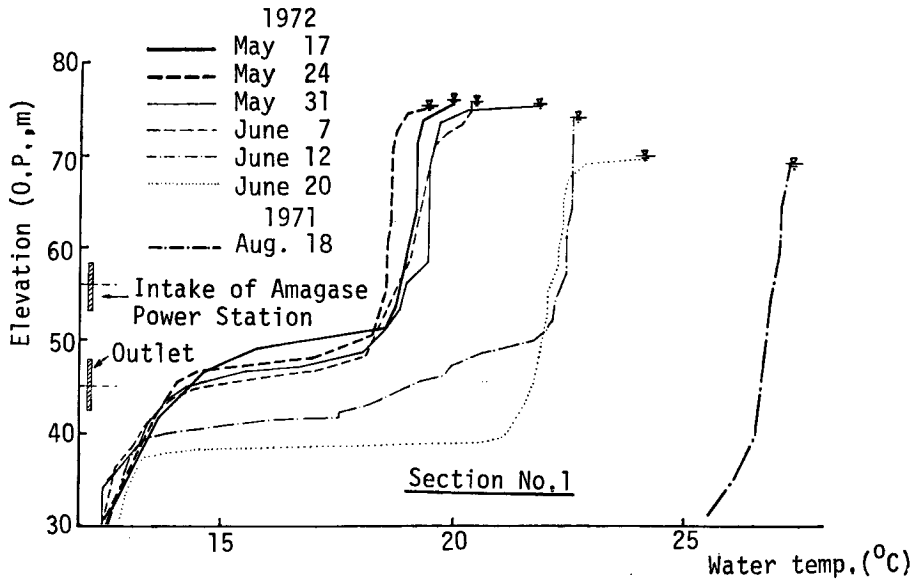


Fig. 7 Depth-wise distribution of water temperature during warm seasons.

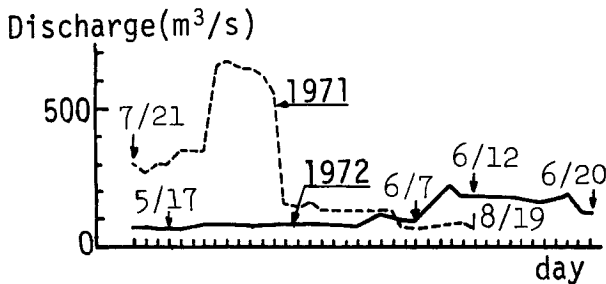


Fig. 8 Outflow discharges in 1971 and 1972.

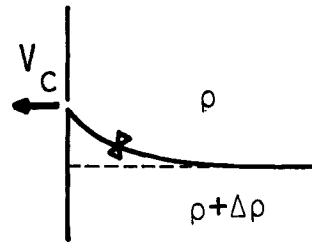


Fig. 9 Craya's definition sketch.

にみれば成層流からの選択取水の問題の一つであると考えられる。

いま躍層を密度の不連続面とみなして2成層流の問題として不連続面の位置を求めてみよう。Craya⁴⁾はFig. 9のような上層水の選択取水において下層水をまきこまない限界流速として取水口がオリフィスの場合につぎの関係を得た。

$$\frac{V_c}{\sqrt{\varepsilon g y_0}} = 3.25 \left(\frac{y_0}{D} \right)^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに $\varepsilon = \Delta \rho / \rho$ 、 D はオリフィスの径である。この関係はある不連続な密度分布の成層状態で不連続面（内部境界面）が取水口より上にあるような場合に V_c の流速で取水を続けたとき、二成層流場が平衡状態に達したときの不連続面の位置を与える関係ともみられよう。(2)式を取水流量 Q を用いて改めれば、

$$Q = 2.55 \sqrt{\varepsilon g y_0}^5 \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。

さて、発電取水のみが行なわれていた6月初旬の躍層の位置は約 O.P. 47 m にあり発電用取水口より 9 m 低下しているが、 $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ として求められる計算値は 9.8 m であって、吉川・山本らと同じ結果が得ら

れる。一方、洪水期の予備放流が行なわれた後の 6 月 20 日では躍層は洪水放流工の中心位置より約 6 m 低下しているのに対し、計算値は 12 m であって過大となる。この差の一因として放流が一部発電取水をかねて行なわれており、放流工からのみ放流されたのではないこと、および躍層が最終的な位置に達していないことが考えられる。

洪水時の放流のような大流量に (3) 式が適用できるかどうかの問題はあるが、以上の考え方からすれば、71 年 8 月の状態は放流による躍層の低下が著しく、下層が消失した結果と推測されよう。

4. 取水に関する模型および実験結果

上述のように躍層の位置は、貯水池からの取水あるいは放流といった流出流量および取水口の位置と関連することが見られたが、このことをその過程も含めて簡単な水理モデルによって検討し実験により検証した。

密度が一様でない場からの取水に関しては従来より選択取水の問題として多くの研究が行なわれている。それらは対象とする密度分布が不連続か連続的あるいは二成層流系か多成層流系かによって二分される。前者は先述の Craya の他に Rouse⁵⁾ らが研究しており、また後者については Yih⁶⁾, Koh⁷⁾, 日野・大西⁸⁾ のものがある。これらの研究では、いずれも取水される場合は十分に大きく取水によって密度分布は変化しないとされているから、ここで問題とするように取水によってある層の水が取水されその部分にそれより上にあった水塊あるいは流入水が置き換るといった成層化の過程に対しては、そのまま適用することはできない。

つぎに密度分布が不連続な場合と連続な場合に分けて上の過程を表現しうるモデルについて考察する。

(1) 不連続な密度分布の場合

取水流量 Q から (3) 式によって求められる長さを y_0 、取水口を基準にして内部境界面の位置を y とする (Fig. 10)。取水される水には上層水 (密度 ρ_1) および下層水がそれぞれつぎのように含まれていると仮定する。

$$\begin{aligned} \text{i) } y > y_0 \text{ のとき} & \quad \begin{array}{l} \text{上層水: } 0 \\ \text{下層水: } Q \end{array} \\ \text{ii) } y < y_0 \text{ のとき} & \quad \left. \begin{array}{l} \text{上層水: } \frac{y_1 - y}{y_1 + y_2} Q \\ \text{下層水: } \frac{y + y_2}{y_1 + y_2} Q \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで Fig. 10 を参照して $y_1 = \min(y_0, y_u)$, $y_2 = \min(y_0, y_l)$ である。(4) 式の仮定は取水口を中心に上方に y_1 、下方に y_2 の長さできりとられる帯状領域に含まれる上層水と下層水の割合で取水流量 Q を分割したものである。この貯水池の特徴より Q と同量の水が上流側から上層水として補給され、自由表面の高さは変らないものと仮定する。いま、 $t=0$ で $y=y_i$ ($y_i > y_0$ とする) とし、また A を内部境界面の面積で一

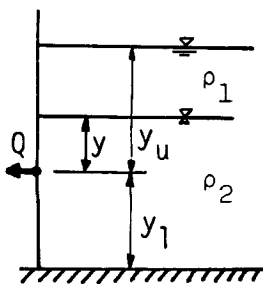
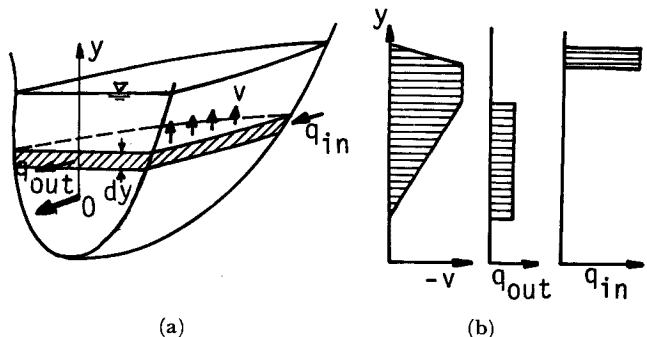


Fig. 10 Definition sketch in two-layered system.



(a) (b)
Fig. 11 Schematization of reservoir.

定であるとする、時間 $t_1 = A(y_1 - y_0)/Q$ までは下層水のみが取水される分離取水であり、それ以後は上・下層水の混合した取水が行なわれる。このときの y は次式で表わされる。

$$A \frac{dy}{dt} = -\frac{y+y_2}{y_1+y_2} Q \quad \dots\dots\dots (5)$$

$t=t_1$ で $y=y_0$ の条件より (5) 式の解はつぎようになる。

$$\frac{y}{y_0} = (1+\beta) e^{-\frac{Q(t-t_1)}{A(\alpha+\beta)y_0}} - \beta \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\alpha = y_1/y_0$, $\beta = y_2/y_0$ である。

また取水流体の密度は、

$$\frac{\rho}{\rho_1} = 1 + \varepsilon e^{-\frac{Q(t-t_1)}{A(\alpha+\beta)y_0}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。ここで $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ である。

(2) 密度分布が連続な場合

貯水池内の成層状態が水平方向に一様であるとするれば、Fig. 11(a) に示される高さが y と $y+dy$ にはさまれる control volume 内で次式が成立する¹⁾。

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} (Av\rho) + (\rho_{in}q_{in} - \rho q_{out}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (Av) = q_{in} - q_{out} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで A は高さ y における貯水池水面の面積、 v は y 方向の流速、 q_{in} , q_{out} はそれぞれ高さ y における流入水および流出水の強さ、 ρ_{in} は流入水の密度である。(8)式では q_{in} , q_{out} による熱の移流のみを考えており、水面における熱エネルギーの授受とその内部への伝導は無視されている。なお、(8)式は(9)式を用いれば、つぎのように改められる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{A} (\rho_{in} - \rho) q_{in} \quad \dots\dots\dots (8)'$$

さて、 y の原点を取水口の高さにとる。 $\varepsilon = (\rho(0) - \rho_{in})/\rho(0)$ とし、取水流量 Q_{out} および (3) 式から求められる y_0 , および y_1 , y_2 を (1) と同様に定義し、さらにつぎの仮定を設ける。

- i) $-y_2 \leq y \leq y_1$ のとき $q_{out} = Q/(y_1 + y_2)$ とし、それ以外では $q_{out} \equiv 0$
- ii) 成層化の進行する夏季を想定し流入水の密度は貯水池におけるそれより小さく流入水はすべて貯水池表面に流入する。すなわち、 δ を長さの元を有する小さい量として $y_i - \delta \leq y \leq y_i$ で $q_{in} = Q_{in}/\delta$, それ以外で $q_{in} \equiv 0$ とする。ただし Q_{in} は流入流量である。

これらの仮定から $y_0 < y_1$, y_2 であるとき、 A を一定とすれば、 v , q_{out} , q_{in} の分布は Fig. 11(b) のようになる。

なおこの場合の取水流体の密度 ρ_{out} は次式で与えられる。

$$\rho_{out} = \int \rho q_{out} dy / Q_{out} \quad \dots\dots\dots (10)$$

以上のようにして密度分布が連続的な場合の問題が定式化されたからこれを適当な初期条件のもとで解けばよいが、一般には数値計算によらなければならない。

(3) 実験結果と考察

実験は長さ 4 m, 幅 25 cm, 高さ 35 cm のアクリライト製水槽に水温成層に代るものとして淡・塩水の成層を作り、下流端に設けられたオリフィスから一定流量の取水を行なった。また上流側から流入水としてつねに取水流量にひとしい流量の水を補給した。

Fig. 12(a), (b) は密度分布が不連続な二成層系の場合の結果で、図中の曲線はそれぞれ (6) 式および (7) 式を表わしている。 $\beta=1$ のときすなわち取水される場が十分大きいとき実験値と (6) 式および (7) 式とはよくあっている。さらに取水流量が大きいほど適合性がよくなる結果が得られており、このことは取水層の

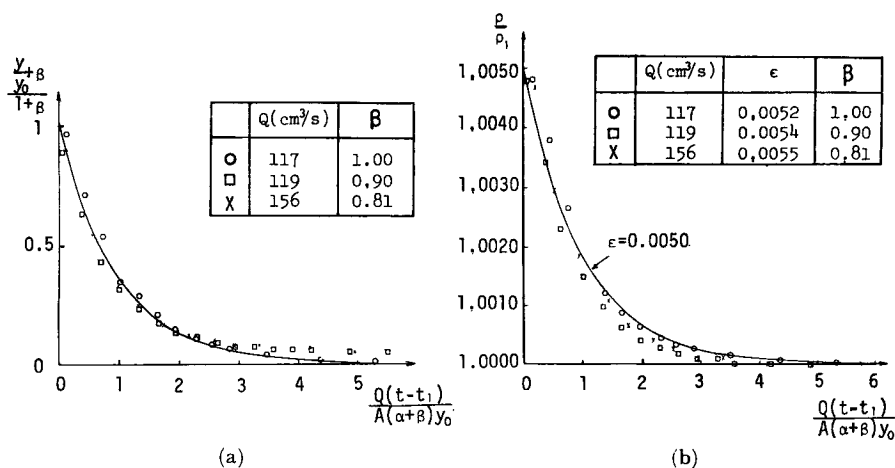
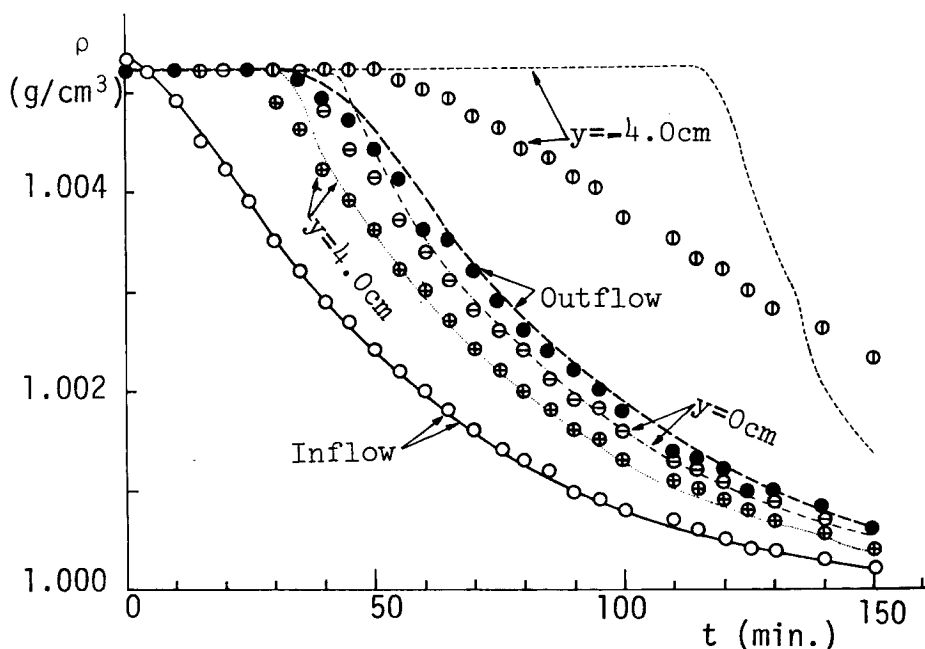


Fig. 12 Temporal lowering of interface and change of fluid density of water withdrawn.

拡がりが大きくなって仮定がみたされやすくなることによると考えられる。また、内部境界面の最終的な位置が(3)式で示される関係を満たすことは3.(4)での推論を裏づけるものと考えられる。 $\beta < 1$ のときも上と同様のことが言えるが、ただこの場合時間が十分になっても下層水が完全に流出しきらないで底部にいくらか残留することがみられる。これは底面における摩擦の影響などによるせん断流に根ざすものと考えられるが、今後流速分布の観測を行なうことによりさらに検討しなければならない。

Fig. 13 は密度分布が連続的で流入水の密度が図中の実線で示されるように緩やかに変化する場合の結果

Fig. 13 Changes of fluid density of water withdrawn and in the reservoir. ($Q_{out} = 80 \text{ cm}^3/\text{sec}$, elevation of outlet is 12 cm above the bottom.)

である。図中の各曲線は(8)'式および(9)式を数値的に解いて求められた水槽内の密度ならびに取水された水の密度の時間的変化を示すものである。底部近くの密度変化を除いては、計算値と実験値とはきわめて良く一致しており、仮定が妥当なものであったといえよう。底部近くの誤差は、Fig. 12 に関して述べたことの他に、 γ_0 が取水口位置の密度と水面へ流入する密度との差から決められていて底部の密度が γ_0 を求めるのに何ら考慮されていないために、 q_{out} の分布の推定が底部で適切でなかったことによると考えられる。 γ_0 の推定に密度分布が連続な場合の Koh⁷⁾ の結果を用い、さらに Harleman²⁾ らのように、 q_{out} の分布をたとえば正規分布型にすれば、上のような点は改められうと思われる。

5. 結 言

以上天ヶ瀬貯水池における観測結果および躍層の位置に関する簡単な水理モデルとその実験結果について述べてきた。天ヶ瀬貯水池の成層化の過程においては流入水、流出水および取・放水口の位置が重要な役割を果たしており、これに比し貯水池水面における熱エネルギーの吸収あるいは放出などの影響は少ないものとみられ、通常の湖沼とは異なって貯水池の表水層が“run of the river”としての特性を有することが見出された。

取水に関する実験においてきわめて単純なモデルによって内部境界面の位置および取水流体の密度を知ることが分ったが、底部近くの扱いにおお若干の修正を必要としている。底部に滞留する水は水質問題に直接関連するからとくに重要な問題点である。水温差による密度差と濃度差によるそれとの互換性および相似律が十分解明されていないが、このような結果が現地の貯水池にも適用されうの可能性が示唆されており興味ある結果と考えている。

最後に現地観測において多大の便宜を図っていただいた建設省淀川ダム統合管理事務所の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉川秀夫・山本晃一：貯水池の水の挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第 186 号，昭 46. 2, pp. 39-54.
- 2) Huber, W. C., D.R.F. Harleman and D. J. Ryan: Temperature prediction in stratified reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 98, HY-4, April 1972, pp. 645-666.
- 3) 白砂孝夫：貯水池濁水対策に関する研究（第一報），電力中央研究所報告 72503，昭 47. 7, pp. 1-22.
- 4) 土木学会編水理公式集，土木学会，昭 46, p. 352.
- 5) Rouse, H.: Seven exploratory studies in hydraulics, Proc. ASCE, Vol. 82, HY-4, Aug. 1956, pp. 1038-1072.
- 6) Yih, C. S.: Dynamics of Nonhomogeneous Fluid, Macmillan, 1965, pp. 75-140.
- 7) Brooks, N. H. and R. C. Y. Koh: Selective withdrawal from density-stratified reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 95, HY-4, July 1969, pp. 1369-1400.
- 8) 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 163 号，昭 44. 3, pp. 39-48.