

密度成層水域における取水特性

角 湯 正 剛*・ 和 田 明**・ 曾 我 雅 海***・ 宮 池 克 人****

1. ま え が き

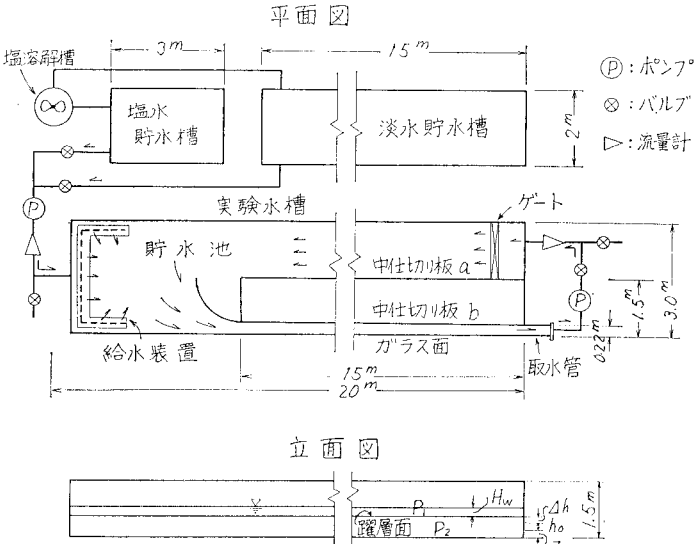
火力・原子力発電所等より放出される温排水や、夏季の大気からの放射等の自然条件によって水温成層が形成されるような海域より冷却水を取水する場合、下層の冷水のみを選択的に取水するために深層取水設備(たとえばカーテンウォール型式、海底取水管型式等)が設けられることが多い。これらに対する水理設計は、水理実験を主体とする数多くの研究成果を用いてなされてきた。これらの研究は、密度の鉛直分布が不連続的で、水温変化の勾配が急であるような、いわゆる水温躍層が存在し、上層の温水層と下層の冷水層が明確な二成層の形成を仮定できる場合に、下層水のみを取水できる限界条件を求める方向で行われてきた。しかしながら、水深の浅い水域で多量の冷却水を取水しなければならないような限定された条件下ではこの限界条件を超えて取水する場合も生じる。この場合の流動、密度分布および上層水の混入率を取り扱った研究はこれまであまり行われていない。

本研究は、これらの観点より、密度成層した水域より深層取水した場合の限界条件および限界条件を超えて取水した場合の流動、密度分布および混入率に関する検討を水理実験および数値実験により行なった結果について述べたものである。

2. 水理実験装置および実験方法

実験装置の概要を 図一1 に示す。水槽は長さ 20 m、幅 3 m、高さ 1.5 m の実験水槽のほか、塩水による密度成層を作成するための淡水槽、塩水貯水槽、塩水溶解槽を用意した。実験水槽は中仕切り板 a、b により仕切られており、鉛直二次元実験の場合には、中仕切り板 b

により幅 22 cm、長さ 15 m の水路を作成し、水平取水管の実験を行う場合には、b を取りはずし、ガラス面を対称面とする三次元取水実験が可能となる構造である。取水路の上流端には広い貯水池を設け、取水による水理現象の境界条件を一定にさせた。



図一1 水理実験装置の概要

実験は以下の手順で行なった。給水装置で所定の濃度の塩水を実験水槽に注入し、あらかじめ定めた塩分濃度の分布形状をもつ塩水成層を作成し、それが十分おちつくよう放置した後、取水調節バルブを徐々に開き、所定の流量で一定とし、密度分布がほぼ定常状態に達した段階で塩分濃度、水温分布および流速分布を測定し、その後順次流量を増加させて同様の測定を繰り返した。塩水の密度分布の測定には導電率計を用い、流速分布の測定にはトレーサーとしてウォータブルーの粒を投入し、トレーズの移動をモータードライブカメラにより連続撮影する方法を用いた。

3. 水理実験結果とその考察

3.1 実験条件

実験は二成層が形成されている場合を想定し、取水方

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木技術研究所
 ** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木技術研究所
 *** 正会員 (財)電力中央研究所 土木技術研究所
 **** 正会員 工修 中部電力株式会社 総合技術研究所

表-1 水理実験の実験条件

Run No.	取水方式	h_0 (cm)	z_0 (cm)	Hw (cm)	$\frac{\rho_2-1}{\rho_1-1} \times 10^{-3}$ (g/cm ³)	$\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_1-1} \times 10^{-3}$ (g/cm ³)
105	鉛直二次元	9	14.3	14.6	5.55	1.25
205		9	14.3	9.2	5.00	1.27
207		12	11.3	14.2	4.82	1.37
209		12	11.3	9.4	4.60	1.41
303	三次元	12	11.3	12.3	4.00	1.40
306		12	11.3	8.4	4.00	1.39
312		12	14.3	11.9	3.86	1.49
316		12	14.3	8.4	3.70	1.70

式は鉛直二次元及び三次元的な接近流速を考慮した三次元条件とし、さらに水中に設けた取水塔を想定し、接近流が軸対称となるような場合として、導流壁を設けた場合も行なった。実施した実験条件の一例を 表-1 に示す。

3.2 限界取水条件および上層の混入率

取水実験の結果より、取水量がある限界量 Q_{max} を超えると取水口前面で観測される接近流速の鉛直方向の分布形状は一樣となり、密度成層の効果が認められなくなり、いわゆる全層取水の状態となる。このような状態では取水量を増加しても混入率 $\lambda (= (\rho_2 - \rho_0) / (\rho_2 - \rho_1))$, ρ_1 , ρ_2 : それぞれ上層水, 下層水の密度, ρ_0 : 取水した水の密度) は一定値を保つ。これを最大混入率 λ_{max} で定義する。

$$\lambda_{max} = Q_1 / Q_{max} \cong Hw / D \dots\dots\dots (1)$$

ここに, Q_1 : 上層水の流量, Hw : 上層水の厚さ, D : 全水深。さらに比混入率 r を次式で定義する。

$$r = \lambda / \lambda_{max} = (\rho_2 - \rho_0) / (\rho_2 - \rho_1) \cdot D / Hw \dots\dots\dots (2)$$

$r=0$ の場合がいわゆる限界条件である。この条件は、カーテンウォール構造物を対象として、Harleman²⁾らは一次元エネルギー方程式より次式を与えている。

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \alpha \frac{V_c^2}{2gsh_0} = \alpha \frac{F_{i0}^2}{2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに, V_c : 下層取水の限界条件下における取水流速, α : 取水口における流速分布に関する補正係数, $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, h_0 : 取水口開口高さ, Δh : 上層躍層面より取水口天端までの高さ, F_{i0} : 取水口内部フルード数。

また、千秋⁴⁾らは、三次元的な接近流を考慮した長方形呑口の水平取水管について、次式に示す限界条件を求めている。

$$F_{i0}^3 = c (\Delta h / h_0)^{3/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに, c : 接近流速の流速分布に関する係数で、呑口形状および周辺地形を規定するパラメーターの関数として実験的に与えられる値である。

本研究で行なった実験において、限界条件を求めるために、比混入率 r と取水口内部フルード数の関係を求めた。図-2 にその一例を示す。 r の値が 1.0 なる付近を

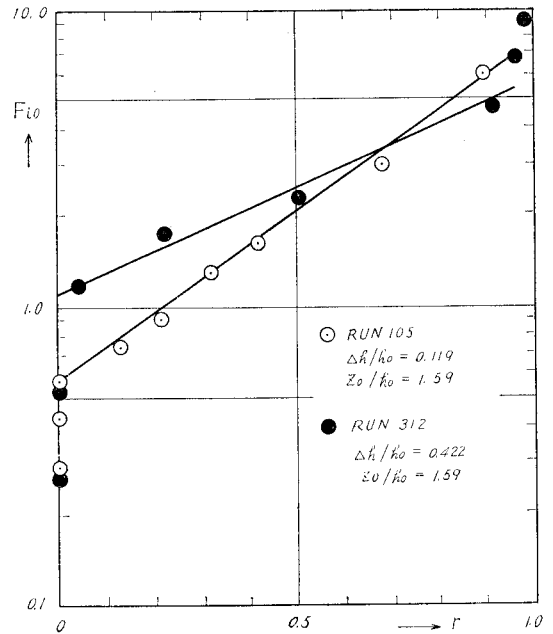


図-2 比混入率と取水口内部フルード数の関係

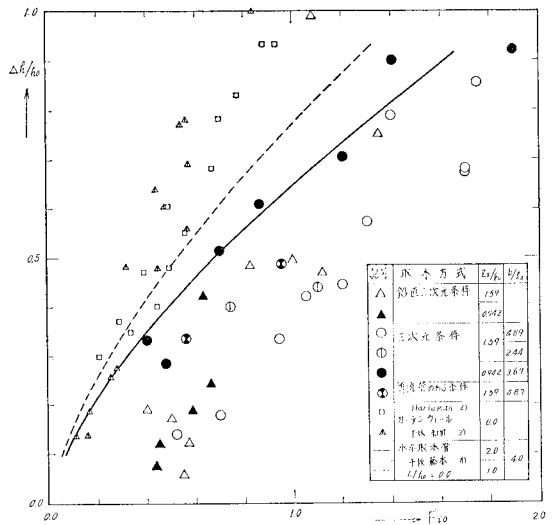


図-3 深層取水の限界取水条件

除けばこれらの点は直線上に乗ることが認められる。各実験ケースについてこの直線を読み、限界取水条件 (ここでは $r=0$ となるときの取水口内部フルード数 F_{i0} で定義する), および代表的な比混入率に対する取水口内部フルード数を読みとった。

このようにして求めた限界取水条件を 図-3 に示す。図中には、カーテンウォール型式による Harleman ら²⁾, 千秋・和田³⁾ の実験結果, および水平取水管型式による千秋・藤本⁴⁾ の実験結果も示している。

鉛直二次元条件の結果をカーテンウォール型式の結果

と比較すると、 z_0 の存在により限界取水条件が緩和されることが認められる。三次元条件についても同様の傾向が見出される。鉛直二次元条件と三次元条件を比較すると、三次元的な接近流の効果により、限界取水条件を緩和することが認められる。

式 (3) に示される限界条件における流速分布に関する補正係数 α として、Harleman 等²⁾ は水平床面上のカーテンウォールに関する実験結果から $\alpha=3.1$ 、千秋・和田³⁾ は、開口部における上り勾配の場合の実験から $\alpha=5.0$ を与えている。しかし、取水口における流速分布は一定の形状を有するものでなく、取水方式、 z_0/h_0 、 $\Delta h/h_0$ 、取水口内部フルード数などに関係してくるものと考えられる。そこで、式 (3) の関係が成り立つものとして、図-3 に示した実験結果について α を求めた。その結果を 図-4 に示す。かなりのバラツキはあるもの

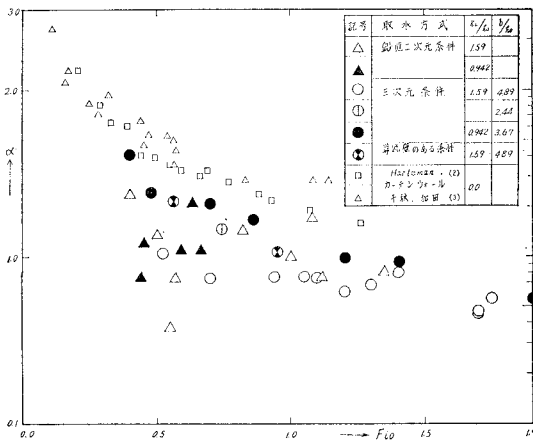


図-4 α と取水口内部フルード数との関係

の、 α は内部フルード数に逆比例し、 F_{i0} が 1 をこえるとほぼ α も 1 となる関係が示される。すなわち、実験における目視観測からも推定されるが、内部フルード数が小さい間は細長い舌状の状態で、大きくなるに従い取水口の流速分布は様になっていくものと考えられる。

代表的な比混入率 r について、 z_0/h_0 をパラメーターとして、 $\Delta h/h_0$ と F_{i0} の関係を鉛直二次元および三次元条件について、それぞれ 図-5, 6 に示す。これらの図より、鉛直二次元、三次元条件とも r の値が大きくなると $\Delta h/h_0$ の効果が認められなくなる傾向となる。鉛直二次元条件と三次元条件を比較すると、三次元的な接近流が比混入率にも影響を及ぼしていることが認められる。

3.3 密度分布および流速分布の検討

図-7 に鉛直二次元条件において測定した密度成層の一例を示す。取水口内部フルード数の増加に伴い、取水

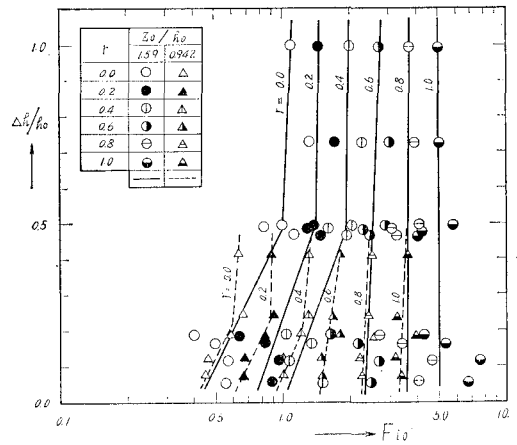


図-5 比混入率 (鉛直二次元条件)

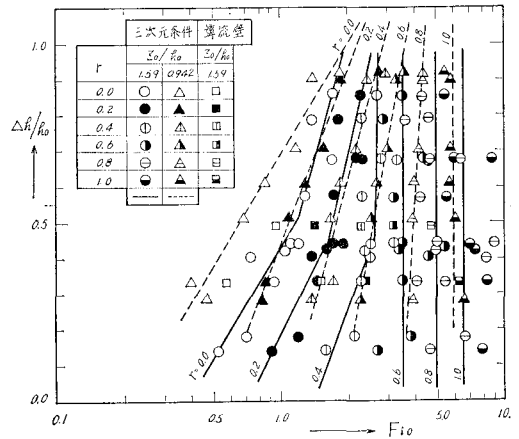


図-6 比混入率 (三次元条件および導流壁設置の場合)

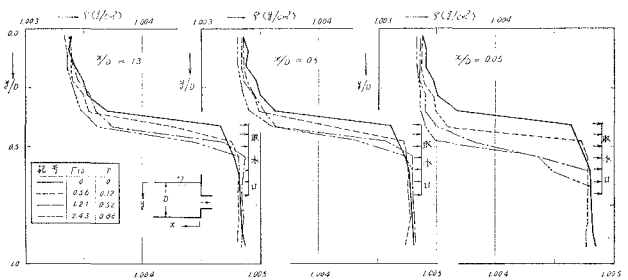


図-7 密度の鉛直分布の変化 (RUN 207)

口付近では躍層面が次第に低下し、上層水の混入は、躍層面が取水口天端以下になったとき生じる。その後、内部フルード数の増加に伴い躍層面は低下し、徐々に躍層面が崩れはじめ中間層を形成するようになる。しかし、取水口より少し離れると様相は若干異なり、 $x/D=1.3$ の付近では、躍層面の密度勾配は、内部フルード数に関係せずほぼ一定で、躍層面の低下がみられるだけである。

中間層の発達が取水口近傍に限定されるのは、この原因が上下層間の流速差に起因するのではなく、むしろ取水口近傍での鉛直方向の流速成分に起因するためではないかと考えられる。

水平流速成分の分布形状を前述の密度分布と同じ実験ケースの場合について図-8に示す。下層水のみを取水する場合には、下層水のみが流動し、中間層にシャープな流速の変化域が形成される。このとき、上層内では微弱な循環流が形成される。また、下層水の流速分布は、取水口近傍ではかなり細長い舌状の分布形状となっている。上層水の混入がはじまると上層水は次第に流動を開始し、比混入率の増加とともに上下層間の流速差は減少し、流速分布は、取水口に近づくに従い、上層、下層でそれぞれ一様化する傾向となる。

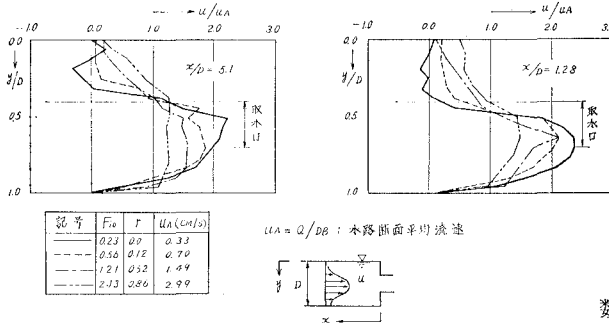


図-8 水平流速の鉛直分布の変化 (RUN 207)

4. 数値シミュレーションによる検討

二成層水域からの取水問題に対しては、下層水のみを取水する限界条件は、エネルギー方程式を用いて解析的に解けるが、上層の水塊が混入する場合、これを解析的に解くことは、取水口点の特異点となり困難である。それ故、これを数値モデルでシミュレートし、水理実験結果と比較検討する。

4.1 数値モデルの内容と計算条件

水理実験で用いたと同様の水平床の鉛直二次元問題を考える。基本方程式は、流れ関数 φ 、および渦度 ω を

用いると、流体の運動、連続式および密度の保存式より以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = & -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ & + A_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial A_y}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (6)$$

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \dots \dots \dots (7)$$

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\nabla^2 \varphi \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 x, y : それぞれ水平、鉛直方向、 A_x, A_y : 渦動粘性係数、 K_x, K_y : 渦動拡散係数。

以上の式(5)~式(8)を差分法により求めた。境界条件としては、(i) 鉛直壁面上、 $u=0, \partial v/\partial x=0, \partial \rho/\partial x=0$, (ii) 底面上、 $v=0, \partial u/\partial z=0, \partial \rho/\partial z=0$, (iii) 上流端、 $\partial^2 \varphi/\partial x^2=0, \partial^2 \rho/\partial x^2=0, \omega$ については計算領域内の値を用いて片側差分で求めた。(iv) 水表面、 $\varphi=\text{const.}, \omega=0, \rho=\text{const.}$ とした。

数値シミュレーションの対象水域は、水理実験規模とした。格子間隔としては、 $\Delta x=5 \text{ cm}, \Delta y=2 \text{ cm}$ とし、鉛直方向 40 cm、水平方向 2.5 m を計算対象とした。

4.2 数値シミュレーション結果とその考察

図-7に示した鉛直二次元の水理実験とほぼ同じ条件となるような数値シミュレーションを実施した。密度分布が二成層状態である場合には、流れのない場において、式(6)の密度保存式を成立させるためには境界面において $K_y=0$ となるような拡散係数を与えねばならないが、実際問題への適用はできない。そこで、これに比較的近い Mawayer の提案した Richardson 数を用いた次式を鉛直方向の渦動粘性、渦動拡散係数に採用した。

$$\left. \begin{aligned} A_y &= A_0 + A_1 \exp(-mRi) \\ K_y &= K_0 + K_1 \exp(-nRi) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

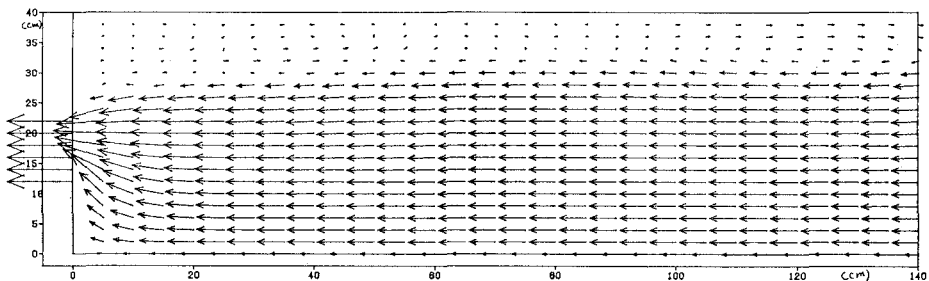
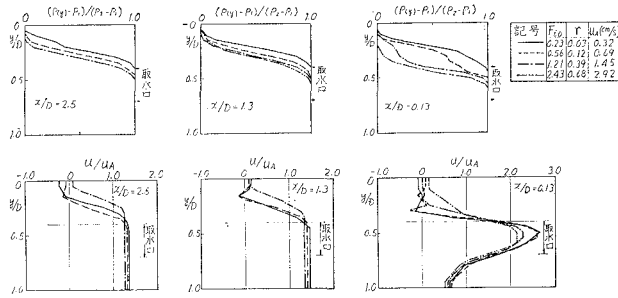


図-9 取水に伴う流動の数値実験結果



図—10 数値実験による水平流速および密度の鉛直分布

ここに, A_0, A_1, K_0, K_1, m, n : 定数, R_L : リチャードソン数 $= (g\partial\rho/\partial y)/(\rho|\partial u/\partial y|^2)$
 式 (9) の定数としては, 水の分子粘性程度を考え, $A_0 = K_0 = 0.001$, $A_1 = K_1 = 0.01$ (cm²/sec) を採用したが, この作用はかなり大きく, 取水流動の影響の小さい上流部でも初期条件として設定した二成層が崩れ, 指数関数的な分布形状となる。

図—9 に限界条件に近い条件下での取水流動のシミュレーション結果を示す。下層はほぼ一様に取水口に向かって流れるが, 上層部では流れはほとんどなく, スケールの小さい循環流が認められ, 水理実験の結果を良好に再現している。この状態より取水流速を増加してゆくと, 密度躍層面は徐々に低下してゆく。図—10 に取水口前面と, それより $x/D = 1.3, 2.5$ 離れた位置での水平流速及び密度の鉛直分布を示す。取水口内部フルード数が 1.21 までの流速分布には, 底面付近を除いて水理実験と数値シミュレーション結果には良好な対応が認められる。底面付近については, 計算上では滑面としたため, 取水口上流部では下層の流速分布が一様となったが, 底面摩擦を導入するような条件を適用すれば, より現象に近い分布形状になるものと考えられる。 $F_{i0} = 2.43$ の状態では, シミュレーションではほぼ完全なポテンシャル流となった。水理実験においては, 底面と水表面で若干流速が小さい分布となっているが, これより取水流速を少し大にするとポテンシャル流となったことから, 初期の密度分布の相違を考慮すれば, シミュレーション結果は実験結果を再現しているものと考えられる。密度分布については, シミュレーションでは, 初期条件が前述の通りシャープな二成層を形成せず実験条件とは少し異なるが, 躍層面が F_{i0} の増加とともに低下してゆく傾向は良好に再現している。すなわち, 取水口より少し離

れた測点では, 限界取水条件より F_{i0} が少し大きくなる付近で躍層面の低下量は著しく, その後の F_{i0} の増加に対しては, その低下量は小さくなっている。

数値シミュレーションによる密度分布を近似的に二成層とみなし, 式 (1) に従い比混入率を求めた。その結果は, 図—10 中に示しているが, 水理実験結果と良好な一致を示す。

5. あとがき

二成層を形成した水域より深層取水した場合の選択取水の限界条件およびその条件をこえて取水した場合の上層水の混入率, 流動および密度分布を, 水理実験ならびに数値実験により検討し, 水理実験結果より限界条件および比混入率を求め, 数値実験によりこれを再現した。密度流の実験は非常に微妙であり, 測定誤差の他, 実験条件のわずかな差異が限界条件や上層水の混入量に与える影響は大きい。実験結果の水理設計への適用には, 実験結果のバラツキの他に潮汐, 海流, 波浪, 風等の自然現象の変動性を充分加味して行う必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会: 土木工学ハンドブック, 技報堂, 479p, 1974.
- 2) Harleman, D. R. F., R. S. Gooch and A. T. Ippen: Submerged sluice control of stratified flow, Proc. ASCE, Vol. 84, HY2, 1958.
- 3) 千秋信一・和田 明: 火力発電所冷却水深層取水に関する研究, 電力中央研究所技術研究所報告, 土木 64005, 1964.
- 4) 千秋信一・藤本稔美: 冷却水深層取水工の取水特性, 電力中央研究所技術研究所報告, 土木 66079, 1967.