

スキマウォールの取水特性に関する実験的研究

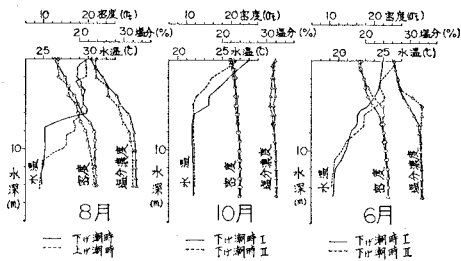
宮 池 克 人*

1. ま え が き

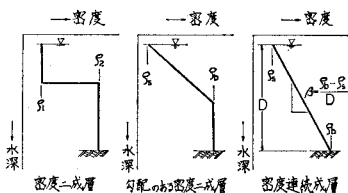
沿岸海域においては、とくに、春から夏にかけての暖候期に表層水が暖められて、水温差による密度成層が形成されやすい。温排水などの人工的排熱によっても、同様に密度成層が形成される。一方、河川水や都市下水、工業排水などの淡水の流入によっても、塩分濃度差による密度成層が形成される。

このような密度成層の形成される海域から、発電所冷却水を取水する場合、次のような目的から下層水を選択的に取水する深層取水設備を設けることが多い。それは、i) 放流温排水の取水口への再循環の防止、ii) 暖候期には、下層低温水を取水する、iii) 排水流入海域では、汚濁浮遊物質の多い淡水をさけ、下層の良質な冷却水をうる、など環境保全と発電設備の効率的な運転と維持のため、深層取水設備が有効な役割を果たすからである。

従来、深層取水設備の水利設計は、上層と下層のそれぞれにおいて、水温や塩分濃度の鉛直分布が一樣の、明確な密度二成層を仮定する条件のもとでなされてきた。



図—1 水温・塩分濃度の鉛直分布の観測例（伊勢湾奥）



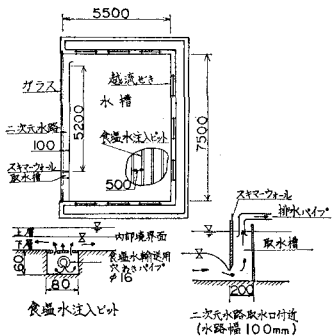
図—2 密度の鉛直構造

しかしながら、実際の海域で観測される水温や塩分濃度の鉛直分布形状は、明確な密度二成層の分布形状と著しく異なるものが少なくない。図—1 に、観測例を示す。

本報告では、河口付近の海域を含む多くの観測点における実測結果より、沿岸海域における密度の鉛直構造は図—2 に示すように、i) 密度二成層、ii) 密度連続成層、iii) 勾配のある密度二成層、の3種類に大別できるとして、これらの密度構造の水域からスキマウォール形式による深層取水を行うときの取水特性を、水利模型実験によって検討する。

2. 実験装置と実験方法

実験は、図—3 に示す密度流実験水槽を用いた。スキマウォール形式による深層取水設備は、一般に取水口の開口高さに比べて開口幅が大きく、3次元的な接近流の効果を無視し、鉛直2次元現象としての取り扱いが可能である。これより、水槽の一边に沿って、長さ5.2m幅0.1m（一部の実験は0.2m）の2次元水路を設け、その上流端は水槽につながり、下流端にはスキマウォールと取水槽を設け、取水槽の水面付近から排水パイプにより排水する。水槽内に密度成層を作成するにあたっては、食塩水の濃度差を利用する。所定の濃度に調製された食塩水は、水槽底部一面に敷設した食塩水注入ビットから静かに水槽へ送りこまれる。密度の小さい上層水から順に密度の大きい下層水へと、さきに送りこんだ食塩水をおし上げる要領で成層を作成していく。



図—3 密度流実験水槽概略図（単位 mm）

* 正会員 工修 中部電力(株)総合技術研究所

食塩水の濃度測定は導電率計を用いた。その検出部には、ビード型サーミスタを取り付けて水温も同時に測定できるようにし、測定値の校正と密度の算定に用いる。

流速分布の測定には、超音波流速計(発・受信子間隔85 mm)を用いたほか、染料粒子を投入し、その軌跡の移動を撮影して解析する方法を用いた。

データは、0.2秒間隔で25回サンプリングし、A-D変換ののち、その平均値と偏差をカセット磁気テープに収録し、のちに校正および密度の算定をおこなう。

3. 実験結果と考察

(1) 密度二成層水域からの取水実験

スキマーウォールを想定した密度二成層水域からの取水特性は、限界取水条件を与える Harleman¹⁾、千秋・和田²⁾の研究、限界取水量を与える Harleman³⁾の研究があり、その後、Jirka⁴⁾は上層水の混入率を与える理論式を示した。ここでは、これらの研究成果の検証のほか、とくに取水口条件(取水口内部フルード数)が、上層水の混入のはじまったのちに与える影響を実験的に検討する。

取水を開始する前の実験条件は、水深 $D=26\sim28$ cm, 下層水深 $h_r=11\sim18$ cm,

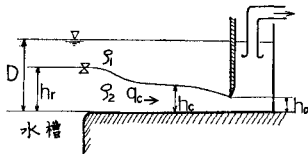


図-4 記号の定義

取水口開口高さ $h_0=3\sim10$ cm, 上・下層間の密度差 $\Delta\rho=0.003\sim0.007$ g/cm³ の範囲で設定した。実験中の取水量は一定に保つ。取水開始後、しばらくは下層水のみを取水する状態がつづくが、下層水の排水によって内部境界面が低下し、やがて限界取水条件をこえて上層水の混入がはじまる。取水槽から排水される水の塩分濃度を観察することにより、上層水の混入率をおおよそ推定することができるから、必要に応じて、水槽内や2次元水路内の塩分濃度と水温の鉛直分布の測定を行う。取水量は130~550 cm³/s の範囲で、これによる水面の低下速度は0.2~0.8 mm/min とゆるやかであるのに比べて、この変化を伝えられると考えられる内部波の伝播に必要な時間は短かく、実験結果はほぼ定常状態の結果を与えられられる。このような実験方法をとることによって、広い範囲の取水条件に対し安定したデータを得ることができる。なお、2次元水路内の流動層のレイノルズ数は、400~1400 の範囲である。

2次元水路と水槽で測定された密度の鉛直分布の一例を図-5に示す。図より、密度二成層から取水する場合、上・下層をわける内部境界面が、スキマーウォール下端より低下することにより上層水の混入がはじまり、上層水の混入の有無によらず、内部境界面は安定した状

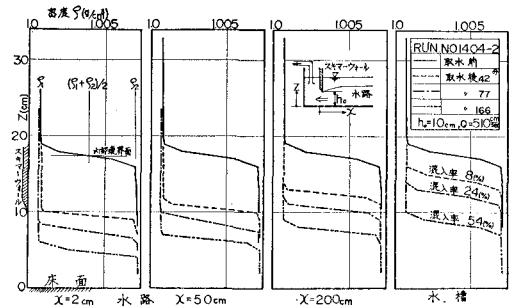


図-5 取水にともなう密度の鉛直分布の変化

態が保たれることがわかる。

図-6は、限界取水条件を既往の研究結果^{1),2)}と比較して示す。本実験結果は、同一の取水口フルード数 F_i に対し h_r/h_0 の値はやや小さい値を示す。ここに、 $F_i=q/\sqrt{g'h_0^3}$, q ; スキマーウォール単位幅当りの取水量,

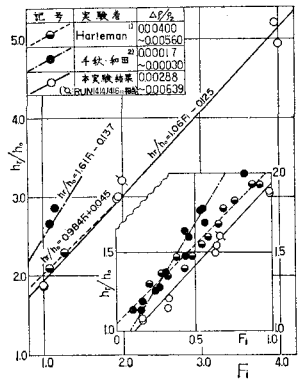


図-6 限界取水条件

$g'=(\rho_2-\rho_1)g/\rho_2$, ρ_1 , ρ_2 ; それぞれ、上・下層の密度, g ; 重力加速度, h_r ; 下層水深, h_0 ; 取水口開口高さ, である(図-4 参照)。この原因は、限界取水条件の定義の違いによるもので、本実験は上層水の混入率が5%以下の範囲で定義している。

図-7は、上層水の混入率 λ と下層のフルード数 F_r との関係を示す。ここに、 $\lambda=Q_1/Q=(\rho_2-\rho_0)/(\rho_2-\rho_1)$, Q_1 ; 上層水の取水量, Q ; 全取水量, ρ_0 ; 取水した水の密度, $F_r=q/\sqrt{g'h_0^3}$, である。最大限界取水量 q_c は、理論解析によれば、 $F_{r,c}=(2/3)^{3/2}$ のとき与えられる⁴⁾。これに対

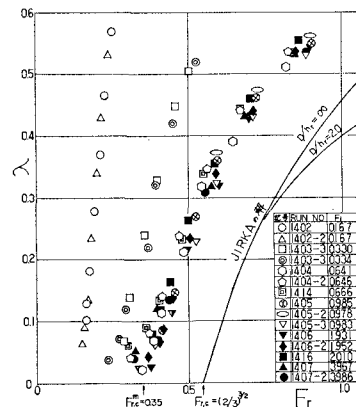


図-7 混入率 λ と F_r の関係

し、本実験結果は $F_{r,c}=0.35$ を与える。このときの限界水深 h_0 は、理論解析が $2h_r/3$ で与えられるのに対し、本実験結果は $h_r/2$ で与えられる。 $h_c=h_0$ とすると $F_i=1$ を得る。

図-7 には、Jirka⁴⁾ が与えた理論解の関係も示してある。本実験結果は、さきの $F_{r,c}$ と $F_{r,c}^m$ の差だけ平行移動してやると、理論解と良好な一致を示す。

これらの差異の原因として、i) 内部境界面での粘性効果、ii) 流速分布の非一様性、iii) 二次元水路におけるまさつ損失、などの取り扱いが異なるためと考えられる。

以上の記述は、 $F_i \geq 1$ の場合についてであるが、図-7 からわかるように、 $F_i < 1$ の範囲で行った実験結果は、 F_i が小さくなるほど取水現象に明確な差異があらわれる。すなわち、取水量が最大限界取水量に達する前に上層水の混入がはじまり、 F_r のわずかな増分に対し混入率は極めて急激に増大する。

(2) 密度連続成層水域からの取水実験

密度連続成層からの選択取水に関する研究は極めて多い。しかしながら、これらの研究では、取水口を線吸込みとして取り扱っているものがほとんどである。ここでは、有限開口高さを有する取水口を検討の対象として、密度連続成層からの選択取水特性を実験的に検討する。

実験条件は、水深 $D=32.5$ cm、取水口開口高さ $h_0=1, 5, 10, 15$ cm、密度勾配 $\beta=(\rho_b-\rho_s)/D=1\sim4$ ($\times 10^{-4}$ g/cm⁴)、の範囲で設定した。ここに、 ρ_b, ρ_s ; それぞれ水路底、水面の密度である。取水量は、さきの実験とは異なり、段階的に増大していく方式をとる。所定の取水量まで静かに増加し、現象が十分定常状態となるのを確認して流速や塩分濃度などの測定を行う。水槽内の密度の鉛直分布は、しだいに变形するから、これが密度連続成層とみなし得る範囲内で実験を終了した。流動層のレイノルズ数は $100\sim2600$ の範囲である。

図-8 は、二次元水路と水槽で測定された密度の鉛直分布の一例である。水槽においては、密度連続成層の形状が実験中を通じて保持されていることが認められる。

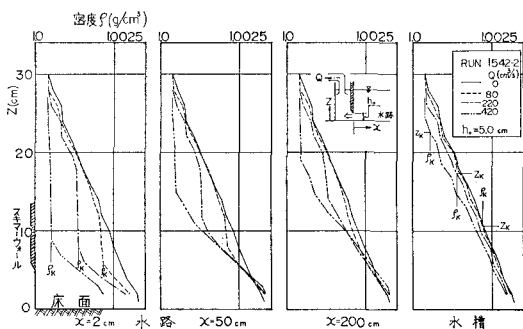


図-8 取水にともなう密度の鉛直分布の変化

二次元水路における密度の鉛直分布は、取水口に近づくに従ってしだいに变形している。特に、密度の鉛直分布が一様となる層が形成され、観察によれば、この層はよどみ層の領域に属し、その下端は分離流線の位置に一致することが認められた。いま、取水口近傍で測定されるこの層の密度を ρ_k とし、これが水槽で測定された密度の鉛直分布ではどの位置に相当するのかを求め、これを z_k とあらわす。

流動層の厚さと全水深に関する内部フルード数 F_2 との関係性を求め、図-9 に示す。ここに、 $F_2=(q/D^2)\cdot\sqrt{\rho_b/g\beta}$ 、である。また、流動層の厚さの定義として、さきの z_k 、および流速分布から求めた分離流線の位置(取水口上流 4.5 m の二次元水路で測定) du を併用する。図より、取水口内部フルード数 $F_i=(q/h_0^2)\sqrt{\rho_b/g\beta}$ が 1 より大きい範囲では、線吸込みによる Deblor⁵⁾ の実験結果とよく一致し、取水口開口高さによる影響は認められない。また z_k は du と一致するものと考えられる。

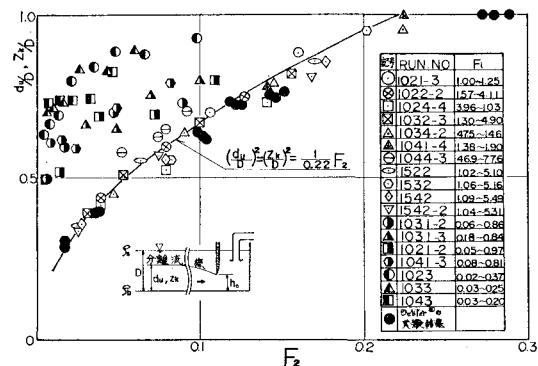


図-9 流動層の厚さと F_2 の関係

$F_i \geq 1$ のときの流速の鉛直分布を、図-10 に示す。図より、 h_0 の大きさによらず流速分布は一意的にあらわされる。

一方、 $F_i < 1$ の場合の実験結果によれば、分離流線の位置は、 $F_i \geq 1$ の場合に比べて高くなる。これは、 F_i の値

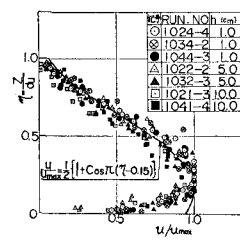


図-10 流速の鉛直分布 ($F_i \geq 1.0$)

が小さくなるに従って、最大流速を示す流動層の中心がしだいに上昇し、やがてスキマウォール下端を線吸込みとする中層取水の形態へ流速の鉛直分布が変化していくことによる。このとき、取水口開口部は全断面にわたって有効に働いておらず、図-11 に示す

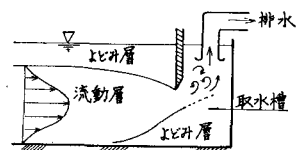


図-11 $F_i < 1.0$ のときの取水状況

ようなよどみ層が取水槽や開口部に形成される。

(3) 勾配のある密度二成層水域からの取水実験

密度の鉛直分布形状は、図-12に示すごとく、線形的な変化を示す上層と、一様分布となる下層とから成り、上層と下層を区別する内部境界面の位置を z_i で示す。取水の開始前の実験条件は、水深 $D=20\sim36$ cm、下層水深 $z_i=10\sim25$ cm、取水口開口高さ $h_0=3\sim15$ cm、密度勾配 $\beta=(\rho_b-\rho_s)/D=1\sim5$ ($\times 10^{-4}$ g/cm⁴)、の範囲で設定した。ここに、 ρ_b, ρ_s ; それぞれ水路底、水面の密度、である。下層流動層のレイノルズ数は、700 $\sim$ 1200の範囲である。実験中の取水量は一定に保つ。

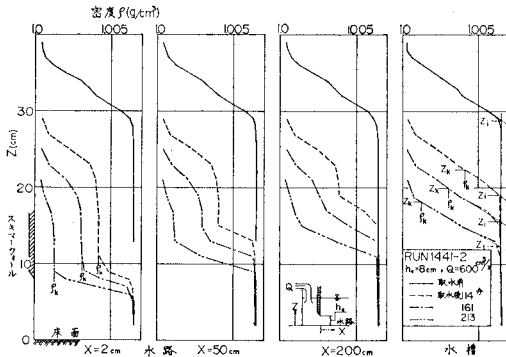


図-12 取水にともなう密度の鉛直分布の変化

取水を開始したのちの密度の鉛直分布形状は、図-12に示すように水槽においては下層水深が減少するのみで、上層の分布形状は一定に保たれている。一方、2次元水路では、上層の密度分布に変化が生じ、密度の鉛直分布が一様となる層が形成される。この層は、さきと同様、よどみ層の領域に属し、その下端は分離流線の位置に一致する。取水口近傍で測定されるこの層の密度を ρ_k とし、これが水槽で測定された密度の鉛直分布ではどの位置に相当するのかを求め、これを z_k とあらわす。

流動層の厚さを z_k で定義し、実験結果を上層内に占める流動層の厚さの割合 $(z_k - z_i)/(D - z_i)$ と F_2 の関係で整理し、図-13に示す。ここに、 $F_2 = (q/D^2)\sqrt{\rho_b/\rho_s}$ 、である。図より、この関係は上層が全水深に占める割合

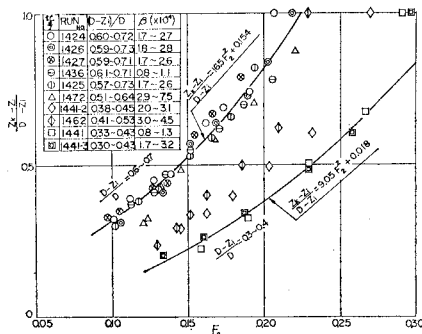


図-13 $(z_k - z_i)/(D - z_i)$ と F_2 の関係 ($F_2 \geq 1.0$)

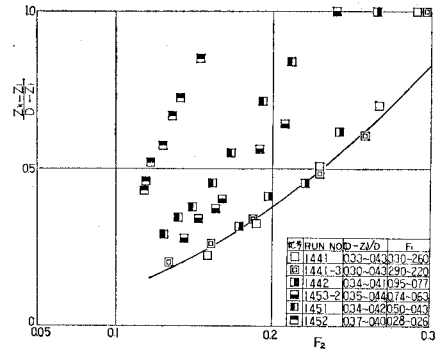


図-14 $(z_k - z_i)/(D - z_i)$ と F_2 の関係 ($(D - z_i)/D = 0.3 \sim 0.4$)

$(D - z_i)/D$ をパラメータとする曲線群であらわせる。ここに示した結果は、 $F_2 \geq 1$ の範囲でおこなった実験結果である。 $F_2 < 1$ の場合の実験結果によれば、 F_2 が同一であっても、流動層は $F_2 \geq 1$ の場合に比べて厚く、また F_2 のわずかな増加に対して流動層の厚さは急激に増加する。実験結果の一例を図-14に示す。

いま、流動層における水平流速の鉛直分布は一様であると仮定して、上層水の混入量を見積もると、実験結果と比較して良好な一致を示すか、もしくは実験結果よりやや大きめの密度を与える。

(4) 取水口の設計

上述した実験結果より、取水口の設計にあたり $F_2 \geq 1$ とすることが、深層取水効果を高めるうえでも、また密度成層の変動に対し、できるだけ安定した深層取水効果を保つためにも、有利であるといえる。ただし、 F_2 の値をむやみに大きくすることは、スキマウォール開口部におけるエネルギーの散逸や、上下層間の混合を助長するだけで意味をもたない。

いま、密度連続成層および勾配のある密度連続成層からの取水実験において定義した F_1, F_2 を用いると、 $F_1/F_2 = (D/h_0)^2$ が得られ、 $F_1=1$ とすれば、これは密度連続成層および勾配のある密度二成層水域から取水する場合の最適開口高さを与える。

(5) 密度成層形状の近似的取り扱い

従来、勾配のある密度二成層からの取水特性を検討する場合、図-15に示すように、これを密度二成層におきかえて検討する方法がとられてきた。密度二成層からの最大限界取水量 q_0 は、本実験結果によれば、 $F_{r,c} = q_0\sqrt{g'h_r^3} = 0.35$ で与えられるから、これを図-13に示した実験結果の回帰式に代入すると、たとえば $h_r/D = 0.6 \sim 0.7$ のとき、次式を得る。

$$(z_k - z_i)/(D - z_i) = 0.12 \sim 0.19 \quad \dots\dots\dots (1)$$

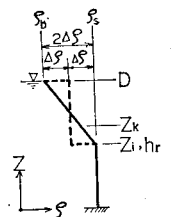


図-15 密度二成層による置きかえ

すなわち、このようにして求めた限界取水量 q_0 は、式(1)で示される範囲の上層水を混入する。

4. 結 び

今後の課題として、理論的解析のほか、現地観測による本実験結果の検証が必要である。

本研究の遂行にあたり、助言と協力を得た電力中央研究所環境水理部の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Harleman, D. R. F., R. S. Gooch and A. T. Ippen: Submerged sluice control of stratified flow, Proc. A.S.C.E., Vol. 84, HY2, 1958.
 - 2) 千秋信一・和田 明: 火力発電所冷却水の深層取水に関する研究, 電力中央研究所報告, 土木 64005, 1964.
 - 3) Harleman, D. R. F. and R. E. Elder: Withdrawal from two-layer stratified flows, A.S.C.E., Vol. 91, HY4, 1965.
 - 4) Jirka, G. H.: Supercritical withdrawal from two-layered fluid systems, Part 1: Two dimensional skimmer wall, J. Hydraulic Research, 17, 1979.
 - 5) Debler, W. R.: Stratified flow into a line sink, Proc. A.S.C.E., Vol. 85, EM3, 1959.
-