

カーテンウォールの深層取水特性

SELECTIVE WITHDRAWAL OF TWO-DIMENSIONAL SKIMMER WALL

宮 池 克 人*

By Yoshihito MIYAIKE

1. ま え が き

沿岸海域においては、特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。また、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。

密度成層の形成される海域から、火力・原子力発電所の冷却水を取水する場合、

- 1) 発電所から放流する温排水の取水口への再循環の防止
 - 2) 暖候期には下層の低温水の取水
 - 3) 河川水、都市下水、工業排水の流入海域では、汚濁浮遊物質の多い淡水を避け、下層の良質な冷却水を取水する
- 等、環境保全と発電設備の効率的な運転と保守のため、深層取水設備を設けることが多い。

さて、深層取水設備の水利特性に関する従来の研究は、密度成層の条件として、図-1 に示すように、上・下層の密度が明瞭に変化している不連続的な「2成層」を仮定した場合、および、水面と底部との間の密度が線形に変化する「連続成層」を仮定した場合を対象としている。これらの研究のうち、深層取水設備の形式として、本論文が対象とするカーテンウォールによる取水を取り

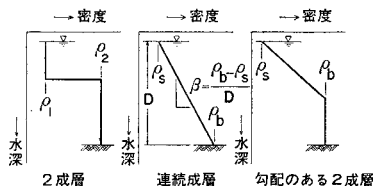


図-1 密度成層の種類

扱ったものとして、2成層からの取水を論じた、Harleman ほか^{1),2)}、千秋・和田³⁾、Jirka⁴⁾などが、また連続成層からの取水を論じた、Yih⁵⁾、Debler⁶⁾、Kao^{7),8)}などが挙げられる。

しかしながら、沿岸海域で観測される密度成層の多くは、図-2 に示す観測例のようなもので、これを2成層、または連続成層として単純化し、深層取水設備の設計を行う場合、単純化にあたっての主観的な差異が生じやすく、また、単純化により実際の現象とどのような差異が生じるのかは不明である。

そこで、実際に観測される密度成層を、より忠実に表現し、単純化にあたっての主観的な差異が生じにくいと考えられる、上層の密度は線形に変化し、下層は一様な密度から成る、「勾配のある2成層」から、カーテンウォールにより取水するときの水利特性を解明することを目的として、水利模型実験⁹⁾、および、カーテンウォールが設置された2つの水域での現地観測を行った。本論文は、これらの結果から解明された、以下の事項について述べたものである。

- 1) 勾配のある2成層からカーテンウォールにより取水するときの水利特性を与える計算式の誘導
- 2) 現地観測結果を用いた、水利特性を与える計算式の適合性の検討
- 3) 下層水を効率よく取水できるカーテンウォール取

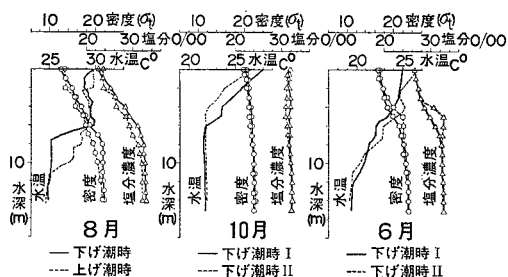


図-2 密度成層の観測例

* 正会員 工修 中部電力(株)原子力計画部原子力土建課

水口の設計条件式の提案

4) 従来、カーテンウォールの水理設計は、その水域で観測された密度成層を、2成層、ないし連続成層に置き換え、既往の研究結果を適用して行われてきたが、成層形状の違いが、取水特性にどのような差を与えるかの比較

2. 実験装置と実験条件

カーテンウォール形式の深層取水設備は、一般に、開口部の横幅がその高さに比べて大きい。いま、取水口前面の沖合密度成層の条件を与える地点が開口部の横幅程度の距離内にあるとすれば、取水に伴う3次元な接近流の効果を無視することができるから、鉛直2次元現象としての取り扱いが可能である。水理模型実験では、この性質を利用して、

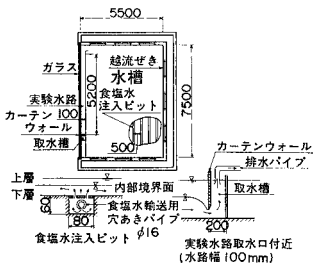


図-3 実験水槽 (単位: mm)

図-3に示すように、水槽の一端に沿って、長さ5.2m、幅0.1mの実験水路を設けて、水路の下流端にカーテンウォール、および、取水槽を配置し、取水槽の水面付近から所定の流量を排水する実験装置により、現象の観察と測定を行った。

実験水路の上流端は、水槽に接続しており、カーテンウォールによる取水量を、本実験のように、130~1000 cm³/s の範囲で設定しても、水槽面積が十分に大きいため、水位の低下速度は0.2~1.5 mm/min と、緩やかであり、取水口前面の沖合の条件に相当する、水槽での密度成層形状の条件を、ほぼ一定に保つことができる。

密度成層は、食塩水の濃度差を利用して作った。所定の濃度に調製した食塩水を、水槽底部に敷設した食塩水注入ピットから水槽へ静かに注入する。密度の小さい上層水から密度の大きい下層水の順に、先に注入した食塩水を、順に押し上げながら、密度成層を作成した。

食塩水の濃度測定には、導電率計を用いた。導電率計の検出部には、ビード型サーミスタを取り付けて、水温も同時に測定した。これらの検出部は、昇降架台に取り付けて、水槽や実験水路の任意の位置での測定が可能であるようにした。測定は、0.2秒間隔で25回サンプリングし、その平均値を求めて、測得値とした。

実験条件は、勾配のある2成層からの取水実験を中心に、既往の研究結果との比較により実験結果の妥当性を検討するためと、密度成層の条件が取水特性にどの

ような差を与えるのかを明らかにする目的で、2成層、および連続成層からの取水実験もあわせて行った。

3. 実験結果と解析

(1) 2成層から取水する場合

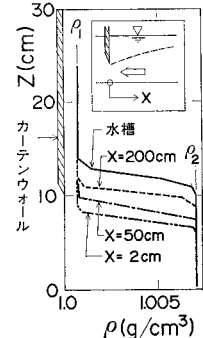
密度成層の条件を2成層として、取水実験を行った。図-4は、取水口前面の沖合の密度成層の条件に相当すると考えられる、水槽で測定された密度の鉛直分布と、カーテンウォール前面水域に相当すると考えられる、実験水路で測定された密度の鉛直分布の一例である。

2成層から取水する場合、上層と下層を分ける内部境界面の位置は、水槽からカーテンウォールに近づくに従って、徐々に低下していく。そして、図-4に示したケースでは、内部境界面がカーテンウォール下端よりも低下して、上層水が混入していると推定される。

Harleman ら¹⁾は、下層水のみを取水し得る限界取水条件は、内部境界がカーテンウォール下端まで低下したときに与えられるとして、1次元エネルギー方程式に基づいた解析から、次式を与えた。

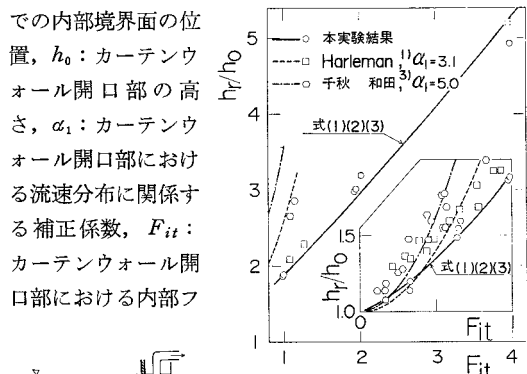
$$\left. \begin{aligned} h_r/h_0 &= 1 + \alpha_1 F_{it}^2/2 \\ F_{it} &= q_c / \sqrt{q' h_0^3} \\ g' &= (\rho_2 - \rho_1)g / \rho_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h_r : 水槽での内部境界面の位置、 h_0 : カーテンウォール開口部の高さ、 α_1 : カーテンウォール開口部における流速分布に関する補正係数、 F_{it} : カーテンウォール開口部における内部フ



(2成層からの取水の場合で、 $F_r=0.47$, $\lambda=0.24$ のとき。カーテンウォールから実験水路上流に向かう距離を x で示す)

図-4 実験水路と水槽で観測された密度の鉛直分布の一例



(既往の実験結果および本実験結果と、 α_1 を式(2),(3)で表わしたときの式(1)の曲線)

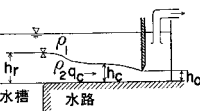
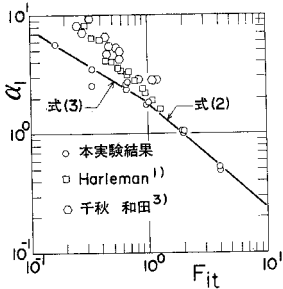


図-5 記号の定義

図-6 限界取水条件

ルード数, q_c : 限界取水条件を与える単位幅当たりの取水量, ρ_1 : 上層水密度, ρ_2 : 下層水密度, g : 重力加速度, で 図-5 のようである。

図-6 は, Harleman¹⁾, 千秋・和田³⁾, および本実験で得られた限界取水条件を, プロットするとともに, 前2者の実験結果を, それぞれ $\alpha_1=3.1, 5.0$ として式



(既往の実験結果および本実験結果と, 式(2),(3)による回帰)

図-7 α_1 と F_{it} の関係

本実験結果から得られる α_1 は, F_{it} の関数として, 次式で回帰できる。

$$\log \alpha_1 = -0.875 \log F_{it} + 0.255, F_{it} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\log \alpha_1 = -0.635 \log F_{it} + 0.255, F_{it} < 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)は, 式(2), (3)を用いると 図-6 に示す曲線となって, 実験結果を忠実に表現できる。

なお, 本実験結果が Harleman や 千秋・和田の実験結果とやや異なるのは, おもに限界取水条件の定義の違いによるものと考えられる。すなわち, 本実験では, 式(4)で定義する上層水の混入率 λ が, 0.05 以下のときに限界取水条件としているのに対し, 後2者は, 着色によって内部境界面の位置を観察し, これがカーテンウォール下端まで低下したときをもって定義しており, この結果, 本実験結果は, 既往の実験結果に比べてゆるい限

界取水条件を与えている。

$$\lambda = Q_1/Q = (\rho_2 - \rho_0)/(\rho_2 - \rho_1) \dots\dots\dots (4)$$

ここに, Q_1 : 上層水の取水量, Q : 全取水量, ρ_0 : 取水される水の密度。

限界取水条件をこえて取水すると, 上層水が混入する。図-8 は, 実験から求めた上層水の混入率 λ を, 式(5)で定義する下層流動層に関する内部フルード数 F_r との関係で示したものである。

$$F_r = q/\sqrt{g'h_r^3} \dots\dots\dots (5)$$

ここに, q : 単位幅当たりの取水量。

図-8 には, Jirka⁴⁾ が理論的に求めた結果をあわせて示す。実験結果では, 流体の粘性, 流線の曲がり, カーテンウォール開口部での流速分布などの影響を受けるため, 理論的に求まる λ よりも大きな値を与えることが, Jirka の論文⁴⁾にも示されているが, 本実験結果についても同様の傾向が認められる。また, 与えられた h_r に対して, 上層水を混入することなく取水できる最大流量は, 理論的には $h_r/h_0 \geq 3/2$ の範囲で, $F_r = (2/3)^{3/2}$ のとき与えられるが, 実験結果によれば, $h_r/h_0 \geq 2$ の範囲で, $F_r = 0.35$ のとき与えられ, これについても, Jirka の論文⁴⁾に示されている実験結果と理論解との比較の結果と同様の傾向を示している。

2成層から取水する場合, 限界取水条件をこえて取水すると, F_r のわずかな増加に対して, λ は急激に増大する性質のあることが, これらの結果から確認できる。

ここに示した実験結果は, 成層の条件として, 水深 D は 26~28 cm, h_r は 11~18 cm, $\rho_2 - \rho_1$ は 0.003~0.007 g/cm³ の範囲で設定し, 取水量 Q は 130~550 cm³/s の範囲で設定して得られたものである。

なお, 実験水路で測定された密度の鉛直分布によれば, 取水によって上下層間に中間層が発達することはなく, また上下層の各密度は, 水槽, 実験水路内で一定値を示すことを確認しており, 実験水路における界面連行は無視できる状態のもとで実験が行われた。

(2) 連続成層から取水する場合

密度成層の条件を連続成層として取水実験を行った。図-9 は, 水槽と実験水路で測定された密度の鉛直分布の一例である。分布形状は, カーテンウォールに近づくに従って変化していくが, 注目すべき点は, 密度の鉛直分布が一樣となる層が形成されることである。この層はカーテンウォール近傍で最も厚くなっている。超音波流速計と染料粒子の投入により, 流速の鉛直分布を測定した結果, 密度が一樣となる層の下端は, 流動層と滞流層を分ける分離流線にほぼ一致することが認められた。

密度の鉛直分布, および流動層に関するこれらの測定結果に基づいて, 連続成層から取水する場合の取水モデ

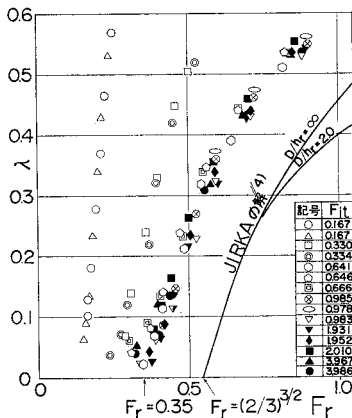


図-8 λ と F_r の関係

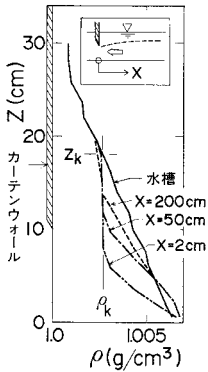


図-9 実験水路と水槽で測定された密度の鉛直分布の一例

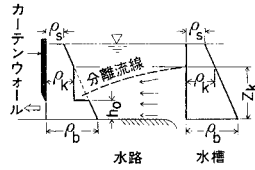


図-10 連続成層からの取水モデル

るを 図-10 に示すように設定して、カテンウォール開口部断面と水槽について、1 次元エネルギー方程式を、次の仮定のもとに、式 (6) のように表わす。

- 1) 水槽内の流速は、カテンウォール開口部断面での流速に比して小さいので省略
- 2) 水槽とカテンウォール開口部断面の間の全抵抗損失

- (分離流線，側壁，底面での摩擦損失など) を無視する
- 3) 流線の曲率，傾きによる圧力補正を無視する
- 4) 流動層の水の平均密度は，水槽における Z_k の区間の平均密度で与えられる。

$$\frac{\rho_s + \rho_b}{2} D = \frac{\rho_s + \rho_k}{2} (D - Z_k) + \rho_k (Z_k - h_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s - \rho_b}{D} h_0 + 2 \rho_b \right) h_0 + \alpha_2 \frac{v_0^2}{2g} \frac{\rho_k + \rho_b}{2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ρ_s ：水面の密度， ρ_b ：水底の密度， D ：水深， ρ_k ：密度の鉛直分布が一様となる層の密度， Z_k ：水槽での分離流線の位置， α_2 ：カテンウォール開口部における流速分布に関する補正係数， v_0 ：カテンウォール開口部における平均流速，であり 図-10 のようである。

式 (6) は，次のように表わされる。

$$\left(\frac{Z_k}{D} \right)^2 + \left\{ \frac{\alpha_2}{2} \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_b} \right) \left(\frac{D}{h_0} \right)^2 F_D^2 - 2 \frac{h_0}{D} \right\} \frac{Z_k}{D} - \alpha_2 F_D^2 \left(\frac{D}{h_0} \right)^2 + \left(\frac{h_0}{D} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots (7)$$

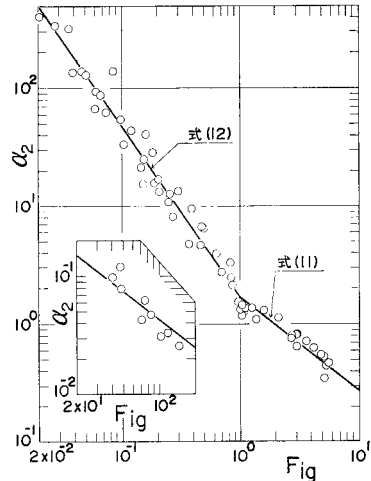
ここに、 F_D は次式で定義される。

$$F_D = \left(\frac{q}{D^3} \right) \sqrt{\frac{\rho_b}{g\beta}} \quad \beta = (\rho_b - \rho_s) / D \dots\dots\dots (8)$$

式 (7) の左辺第 2 項で、 $\alpha_2 (1 - \rho_s / \rho_b) (D / h_0)^2 F_D^2 / 2$ は、 $2 h_0 / D$ に比べて小さく、これを無視すると、式 (9) を得る。

$$\left(\frac{Z_k}{D} \right)^2 - 2 \frac{h_0}{D} \frac{Z_k}{D} - \alpha_2 F_D^2 \left(\frac{D}{h_0} \right)^2 + \left(\frac{h_0}{D} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots (9)$$

Z_k は，水槽で測定した密度の鉛直分布が ρ_k を与え



(実験結果と式 (11), (12) による回帰)

図-11 α_2 と F_{ig} の関係

る位置として求めることができるから，実験結果を式 (9) に適用して α_2 を求め， F_{ig} との関係でプロットし，図-11 に示す。ここで求まる α_2 は，カテンウォール開口部における流速分布に関する補正係数としてのほか，式 (6) の誘導過程で用いた，取水モデルによる近似や，1)~4) の仮定などによる誤差の補正も含んでおり，このため流速分布に関する補正係数としては物理的に考えられない広い範囲で変化している。したがって，2 次元水路のアプローチの長さなど，実験条件によっても変化することも考えられる。ここに， F_{ig} は，カテンウォール開口部での内部フルード数で，式 (10) で定義する。

$$F_{ig} = (q / h_0^2) \sqrt{\rho_b / g\beta} \dots\dots\dots (10)$$

α_2 は， F_{ig} の関数として，次式で回帰する。

$$\log \alpha_2 = -1.47 \log F_{ig} + 0.212, F_{ig} \geq 1 \dots\dots\dots (11)$$

$$\log \alpha_2 = -0.785 \log F_{ig} + 0.212, F_{ig} < 1 \dots\dots\dots (12)$$

F_D と F_{ig} の関係は，式 (8), (10) より，式 (13) で与えられる。

$$F_{ig} = (D / h_0)^2 F_D \dots\dots\dots (13)$$

水槽での分離流線の位置を与える無次元量 Z_k / D は，式 (9), (10), (11), (12), (13) を用いて， F_D と h_0 / D の関数として表わすことができる。

図-12 は，

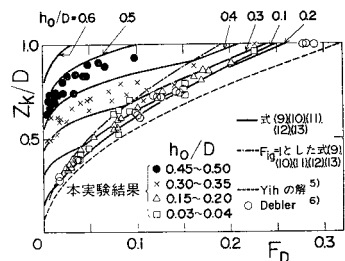


図-12 Z_k / D と F_D の関係

その計算例である。図中には本実験結果のほか、既往の研究結果として、Yih⁵⁾の解や Debler⁶⁾の実験結果をあわせて示している。これらの結果は、線吸込みの条件のもとに得られており、 h_0/D が小さい範囲での計算結果とよく一致している。

下層水を効率よく取水するためには、取水口前面の沖合の条件に相当する水槽での分離流線の位置が、できるだけ低くなるような設計とすべきである。図-12によれば、おおよその目安として、 $F_{ig} \geq 1$ としてやれば下層水を効率よく取水することができる。一方、 $F_{ig} < 1$ の範囲では、水槽での分離流線の位置が高く与えられることになり、下層水を効率よく取水できない。

ここに示した実験結果は、成層の条件として、水深 $D=32.5$ cm, $\beta=1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ g/cm³, $h_0=1, 5, 10, 15$ cm の範囲で設定して得られたものである。

(3) 勾配のある2成層から取水する場合

密度成層の条件を勾配のある2成層として取水実験を行った。図-13は、水槽と実験水路で測定された密度の鉛直分布の一例である。連続成層からの取水実験の場合と同じように、密度の鉛直分布が一樣となる層が形成され、この層の下端は、流動層と滞流層を分ける分離流線にほぼ一致することが認められた。

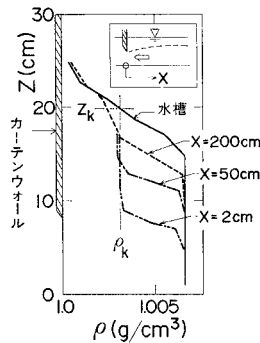


図-13 実験水路と水槽で測定された密度の鉛直分布の一例

密度の鉛直分布、および流動層に関するこれらの測定結果に基づいて、勾配のある2成層から取水する場合の取水モデルを図-14に示すように設定し、カーテンウォール開口部断面と水槽について、1次元エネルギー方程式を、式(6)の誘導に用いた仮定1)~4)を適用して、次式のように表わす。

$$\frac{\rho_s + \rho_b}{2} (D - Z_i) + \rho_b Z_i = \frac{\rho_s + \rho_k}{2} (D - Z_k) + \rho_k (Z_k - h_0) + \rho_b h_0 + \alpha_3 \frac{v_0^2}{2g} \rho_b,$$

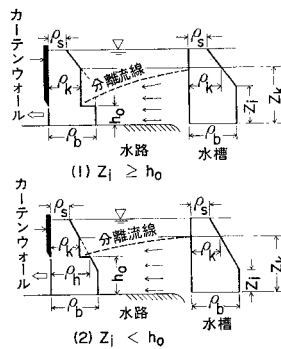


図-14 勾配のある2成層からの取水モデル

密度の鉛直分布、および流動層に関するこれらの測定結果に基づいて、勾配のある2成層から取水する場合の取水モデルを図-14に示すように設定し、カーテンウォール開口部断面と水槽について、1次元エネルギー方程式を、式(6)の誘導に用いた仮定1)~4)を適用して、次式のように表わす。

$$Z_i \geq h_0 \text{ に対し} \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{\rho_s + \rho_b}{2} (D - Z_i) + \rho_b Z_i = \frac{\rho_s + \rho_k}{2} (D - Z_k) + \rho_k (Z_k - h_0) + \frac{\rho_h + \rho_b}{2} (h_0 - Z_i) + \rho_b Z_i + \alpha_3 \frac{v_0^2}{2g} \rho_b, \quad Z_i < h_0 \text{ に対し} \dots \dots \dots (15)$$

ここに、 Z_i : 水槽での内部境界面の位置、 α_3 : カーテンウォール開口部における流速分布に関する補正係数、 ρ_h : カーテンウォール下端位置での密度、であり図-14のようである。

式(14),(15)は、次のように表わせる。

$$\left(\frac{Z_k - Z_i}{D - Z_i}\right)^2 + 2 \frac{Z_i - h_0}{D - Z_i} \frac{Z_k - Z_i}{D - Z_i} - \alpha_3 \frac{D}{D - Z_i} \left(\frac{D}{h_0}\right)^2 F_D^2 = 0, \quad Z_i \geq h_0 \text{ に対し} \dots \dots \dots (16)$$

$$\left(\frac{Z_k - Z_i}{D - Z_i}\right)^2 + 2 \frac{Z_i - h_0}{D - Z_i} \frac{Z_k - Z_i}{D - Z_i} + \left(\frac{h_0 - Z_i}{D - Z_i}\right)^2 - \alpha_3 \frac{D}{D - Z_i} \left(\frac{D}{h_0}\right)^2 F_D^2 = 0, \quad Z_i < h_0 \text{ に対し} \dots \dots \dots (17)$$

式(16),(17)の解は、それぞれ次式で与えられる。

$$\frac{Z_k - Z_i}{D - Z_i} = -\frac{Z_i - h_0}{D - Z_i} + \sqrt{\left(\frac{Z_i - h_0}{D - Z_i}\right)^2 + \alpha_3 \frac{1}{1 - \frac{Z_i}{D}} \left(\frac{D}{h_0}\right)^2 F_D^2}, \quad Z_i \geq h_0 \text{ に対し} \dots \dots \dots (18)$$

$$\frac{Z_k - Z_i}{D - Z_i} = -\frac{Z_i - h_0}{D - Z_i} + \sqrt{\alpha_3 \frac{1}{1 - \frac{Z_i}{D}} \frac{D}{h_0} F_D}, \quad Z_i < h_0 \text{ に対し} \dots \dots \dots (19)$$

実験結果を式(16),(17)に適用して α_3 を求め、 F_{ig} との関係でプロットし、図-15に示す。ここで求まる α_3 は、 α_2 と同様に、カーテンウォール開口部における流速分布に関する補正係数のほか、式(14),(15)の誘導過程で用いた仮定による誤差の補正も含んでおり、このため、流速分布に関する補正係数としては、物理的に考えられない広い範囲で変化している。また、2次元水路長など、実験条件によっても変化することも考えられる。 α_3 は、 F_{ig} の関

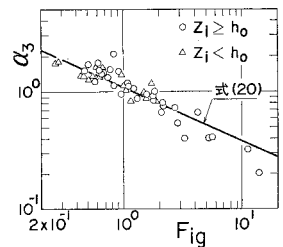


図-15 α_3 と F_{ig} の関係

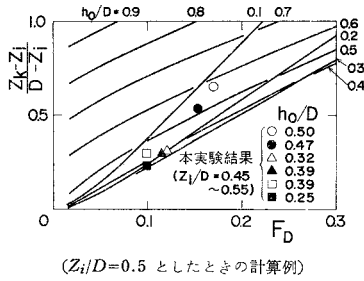


図-16 $(Z_k - Z_i)/(D - Z_i)$ と F_D の関係

数として、次式で回帰する。

$$\log \alpha_3 = -0.460 \log F_{Dg} + 0.041 \dots\dots\dots(20)$$

水槽での分離流線の位置を与える無次元量 $(Z_k - Z_i)/(D - Z_i)$ は、式 (10), (13), (18), (19), (20) を用いて、 Z_i/D , h_0/D , および F_D の関数として表わすことができる。図-16 は、 $Z_i/D = 0.5$ としたときの計算例と、これと比較するため $Z_i/D = 0.45 \sim 0.55$ の範囲で行った実験結果を示したものである。図から、 $(Z_k - Z_i)/(D - Z_i)$ の最小値を与える h_0/D が存在することが推定できる。下層水を効率よく取水するためには、この h_0/D を用いて、カーテンウォールを設計すればよい。

ここに示した実験結果は、成層の条件として、 $D = 20 \sim 36$ cm, $Z_i = 10 \sim 25$ cm, $\beta = 1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ g/cm⁴, $h_0 = 3 \sim 15$ cm の範囲で設定して得られたものである。

(4) 取水される水の密度

カーテンウォールから取水される水の密度の算定法について述べる。

2成層から取水する場合、取水される水の密度は、限界取水条件をこえて取水する場合は、図-8 から求めることができる。

連続成層、および、勾配のある2成層から取水する場合、水槽での分離流線の位置 Z_k を用いて、取水される水の密度の計算式は、次のように書ける。

$$\rho_{oc} = \{\rho_b Z_i + (\rho_k + \rho_b)(Z_k - Z_i)/2\} / Z_k \dots\dots(21)$$

ここに、 ρ_{oc} ：水槽での分離流線の位置から求まる取水される水の密度である。式 (21) を誘導するにあたっては、水槽での流動層の流速の鉛直分布は一樣であると仮定している。

取水実験の条件を、式 (9), (10), (11), (12), (13), または、式 (10), (13), (18), (19), (20) に適用して、水槽での分離流線の位置を求め、式 (21) によって取水される水の密度 ρ_{oc} を算定する。これを、取水実験で実際に測定された取水される水の密度 ρ_{om} と比較するため、比混入率を定義する。

$$r = (\rho_{max} - \rho_o) / (\rho_{max} - \rho_{min}), 0 \leq r \leq 1 \dots\dots\dots(22)$$

ここに、 r ：比混入率、
 ρ_{max} ：取水し得る最大密度、
 ρ_o ：取水される水の密度、
 ρ_{min} ：取水し得る最小密度。
 ρ_{max} , および ρ_{min} は、それぞれ下層水のみを取水する場合、および全層取水となる場合に対応するものとして、次式で表わされる。

$$\rho_{max} = \rho_b \dots\dots\dots(23)$$

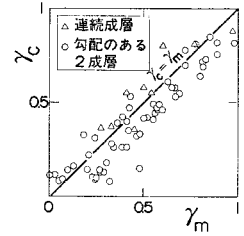
$$\rho_{min} = (\rho_s + \rho_b)/2 + (\rho_b - \rho_s)Z_i/2D \dots\dots\dots(24)$$

ここに、連続成層のとき、 $Z_i = 0$ である。

式 (23), (24) を用いると、式 (22) は次のように表わせる。

$$r = 2 \frac{\rho_b - \rho_o}{\rho_b - \rho_s} \frac{D}{D - Z_i}, 0 \leq r \leq 1 \dots\dots\dots(25)$$

式 (25) で、 $\rho_o = \rho_{oc}$ において求まる比混入率を r_c , $\rho_o = \rho_{om}$ において求まる比混入率を r_m と表わし、両者を比較して図-17 に示す。図より、実験結果に含まれる誤差のため、プロットされた点は、ややばらつきがあるものの、両者は良好な一致を示すことが認められ、式 (21) によって、取水される水の密度を推定することが妥当であることが確認できる。



(計算結果と実験結果の比較) 図-17 r_c と r_m の比較

4. 実測による検証

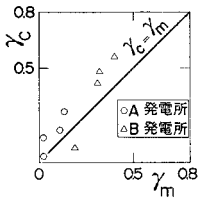
カーテンウォールが設置された2つの水域での現地観測結果を、さきに述べた、分離流線、および取水される水の密度の計算式に適用して、それらの適合性について検討した。

現地観測を行ったA発電所のカーテンウォールは、開口部の高さ $h_0 = 5.0$ m, 開口部の横幅 $B = 132.6$ m, 単位幅当たりの取水量 $q = 0.544$ m²/s, 設置水深 $D = 12.0$ m (大潮平均干潮面基準) である。一方、B発電所は、 $h_0 = 7.0$ m, $B = 103.6$ m, $q = 1.4$ m²/s, $D = 12.0$ m, である。

観測は、カーテンウォールが設置されている水域の水温、および塩分濃度の鉛直分布、および、カーテンウォールにより取水された水の水温、塩分濃度の測定を行い、これらの結果から海水密度を算定した。

観測点の位置は、カーテンウォールの沖合約300mから、開口部に向かって約8か所の測点を設定した。

観測の結果によれば、密度成層の形状として、勾配のある2成層で近似することが適当であると判断され、また、取水により密度成層が影響を受ける水域は、A, B両発電所の観測結果からは、開口部から数10mより近



(計算結果と現地観測結果の比較)

図-18 γ_c と γ_m の比較

い範囲内に限られることがわかった。そこで、カーテンウォール前面の 50 m より沖合で観測された密度の鉛直分布と、カーテンウォールの取水条件を、式(10)、(13)、(18)、(19)、(20)、(21)に適用して、取水される水の密度 ρ_{oc} を求め、式(25)から $\rho_o = \rho_{oc}$ において比混入率 γ_c を求める。一方、実際に観測された取水される水の密度 ρ_{om} から、このときの比混入率 γ_m を求める。

γ_c と γ_m を比較して、図-18 に示す。 γ_c と γ_m は、ほぼ一致しており、本論文で示した計算式の実規模スケールでの適合性が検証できた。

5. 考 察

(1) カーテンウォールの設計

連続成層、および勾配のある2成層から取水する場合、下層水を効率よく取水するためには、取水口前面の沖合で分離流線の位置をできるだけ低くおさえるよう、カーテンウォールを設計することが必要である。

連続成層から取水する場合については、おおよその目安として、 $F_{i0} \geq 1$ としてやればよいことを、図-12で示した。

勾配のある2成層から取水する場合、同一の取水条件に対して分離流線の位置を最小にする h_0/D が存在することの一例を、図-16 に示した。そこで、最も低い分離流線の位置を与える h_0/D (以下 $(h_0/D)_{\min}$ と表わ

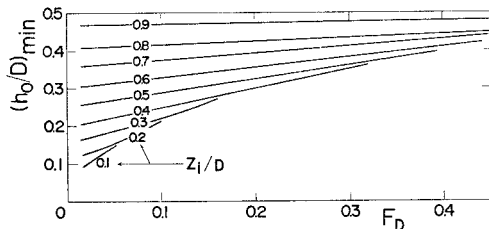


図-19 $(h_0/D)_{\min}$ と F_D の関係

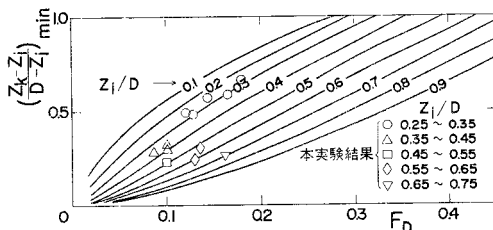


図-20 $((Z_k - Z_i)/(D - Z_i))_{\min}$ と F_D の関係

す)と、そのときの $(Z_k - Z_i)/(D - Z_i)$ (以下、 $((Z_k - Z_i)/(D - Z_i))_{\min}$ と表わす)を、式(10)、(13)、(18)、(19)、(20)を用いて算定し、図-19、20 に示す。なお、図-20 には、本研究で実施した多くの実験条件のうち、図-19 が与える $(h_0/D)_{\min}$ の条件のもとで実施した実験結果を、プロットしてある。

勾配のある2成層から取水する場合、下層水を効率よく取水できるカーテンウォールは、これらの図を用いて設計すればよい。設計例を、付録-1 に示す。

(2) 密度成層の条件と取水特性

密度成層の形状の違いが、取水特性にどのような差異を与えるのかについて、検討する。

比較する密度成層は、図-21 に示すように、勾配のある2成層と、これを2成層に置き換えた場合である。置き換えの方法として、密度差 $(\rho_b - \rho_s)$ を、2成層の上・下層間の密度差とする Model I、および、 $(\rho_b - \rho_s)/2$ を上・下層間の密度差とする Model II を考える。

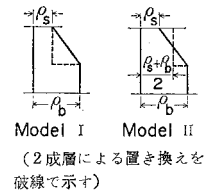


図-21 勾配のある2成層と2成層による置き換え

2成層から取水する場合、上層水を混入することなく取水できる最大流量は、図-8 に示した実験結果によれば、 $F_r = 0.35$ (ただし、 $h_r/h_0 \geq 2$) のとき与えられる。

また、2成層からの取水が、全層取水となるとき混入率 λ_{\max} は、流速の鉛直分布が全層にわたって一様であると仮定すると、次式で与えられる。

$$\lambda_{\max} = (D - h_r)/D \dots\dots\dots (26)$$

λ_{\max} を与えるときの F_r は、図-8 に示した実験結果から読み取ることができる。

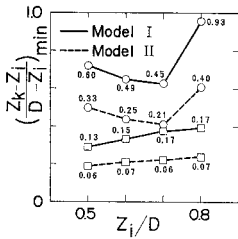
F_r と F_D の関係は、式(5)、および式(8)から、 $h_r = Z_i$ として、

$$F_D = F_r \sqrt{(Z_i/D)^3}, \text{ Model I に対し} \dots\dots (27)$$

$$F_D = F_r \sqrt{0.5(Z_i/D)^3}, \text{ Model II に対し} \dots\dots (28)$$

のように表わすことができるから、それぞれの F_r に相当する F_D を求め、図-20を用いて、 $((Z_k - Z_i)/(D - Z_i))_{\min}$ を求めることができる。

図-22 は、その計算例で、2成層からの取水では上層水を混入することなく最大流量を取水できるとき取水条件 ($F_r = 0.35$)、および、2成層からの取水が全層取水となるとき取水条件のそれぞれを、勾配のある2成層からの取水に適用して得られた、 $((Z_k - Z_i)/(D - Z_i))_{\min}$ の値を示す。図中には、式(21)、(25)から求まる比混入率 γ_c もあわせて示している。これより、



□：2成層からの取水では上層水を混入することなく最大流量を取水できるときの取水条件 ($F_D=0.35$)，○：2成層からの取水が全層取水となるときの取水条件，図中の数字は、比混入率 r_c を表わす)

図-22 勾配のある2成層から取水する場合の $((Z_k - Z_i) / (D - Z_i))_{\min}$

なることがわかった。

6. 結 論

沿岸海域で観測される密度成層の多くは、勾配のある2成層により一般化して表現することが適当と考えられる。そこで、勾配のある2成層から、カーテンウォールにより取水するときの水利特性を解明することを目的として、水利模型実験、および、カーテンウォールが設置された2つの水域での現地観測を行った。これらの結果を解析して、次の結論を得た。

(1) 2成層から取水する場合のみならず、連続成層、勾配のある2成層から取水する場合についても、カーテンウォール開口部における流速分布に関する補正係数 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ など) を、カーテンウォール開口部における内部フルード数 (F_{it}, F_{ig} など) の関数として与えることにより、1次元エネルギー方程式に基づいて、実験結果から得られる分離流線 (2成層からの取水の場合は、内部境界面) の位置を説明することができる。

(2) 連続成層、勾配のある2成層から取水する場合の、取水口前面の沖合での分離流線の位置を求める計算式、および、カーテンウォールから取水される水の密度を求める計算式を、実験結果の解析に基づいて提案した。

(3) これらの計算式のうち、勾配のある2成層から取水する場合の計算式を、カーテンウォールが設置された2つの水域での現地観測結果に適用した結果、計算式は実規模スケールにおいても適合性のあることが検証された。

(4) 連続成層、勾配のある2成層からカーテンウォールにより取水する場合、下層水を効率よく取水できる

1) 2成層からの取水では上層水を混入することなく最大流量を取水できるときの取水条件を、勾配のある2成層からの取水に適用すると、上層水を、わずかではあるが、混入して取水することになる

2) 2成層からの取水が全層取水となるときの取水条件を、勾配のある2成層からの取水に適用すると、全層取水とはならず、選択取水の状態がまだ続いているなど、密度成層の形状の違いによって取水特性が異なる

条件を、分離流線の位置を求める計算式を用いて求め、下層水を効率よく取水できるカーテンウォールの設計条件を提案した。

(5) 勾配のある2成層からの取水特性を、2成層からの取水特性と比較し、上層水の混入が始まる条件、全層取水となる条件が、異なることを示した。

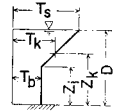
謝 辞：本論文の作成にあたり、ご懇切なるご指導を賜った、電力中央研究所 和田明博士に、深甚なる謝意を表します。

付録—1

図—A・1 に示す水温成層が形成されている海域から取水する場合、上層水の混入による水温の上昇を、0.1℃ まで許容するカーテンウォールを設計する。

ここに、水面水温 $T_s=23^\circ\text{C}$ 、水底水温 $T_b=20^\circ\text{C}$ 、 $D=10\text{ m}$ 、 $Z_i=5\text{ m}$ とし、塩分濃度は上・下層ともに 34‰ で一様とする。海水密度は、次のようになる。

$$\rho_s=1.02320\text{ g/cm}^3, \rho_b=1.02402\text{ g/cm}^3.$$



図—A・1 水温成層

海水密度は、水温変化が小さい区間で、近似的に線形関係が成立する。よって、式 (21) を、水温に関する表示で読みかえて、次式を得る。

$$T_0 = \{T_b Z_i + (T_k + T_b)(Z_k - Z_i)/2\} / Z_k \quad \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 1)$$

ここに、 T_0 ：取水される水の水温、 T_k ： Z_k における水温、であり、 T_k と Z_k の関係は、図—A・1 から次のように表わされる。

$$T_k = \frac{T_s - T_b}{D - Z_i} (Z_k - Z_i) + T_b \quad \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 2)$$

$T_0 = T_b + 0.1 = 20.1^\circ\text{C}$ 、 $Z_k > Z_i$ であるから、式 (A・1)、(A・2) から、 $Z_k = 6.47\text{ m}$ を得る。よって、 $((Z_k - Z_i) / (D - Z_i)) = 0.294$ 。

図—20 より、 $((Z_k - Z_i) / (D - Z_i))_{\min} = 0.294$ 、 $Z_i / D = 0.5$ に対する F_D は、0.126。

図—19 より、 $F_D = 0.126$ 、 $Z_i / D = 0.5$ に対する $(h_0 / D)_{\min}$ は、0.295。

よって、カーテンウォールの開口高さ $h_0 = 2.95\text{ m}$ 。

カーテンウォールの単位幅当たりの取水量は、式 (8) より

$$q = F_D D^2 / \sqrt{\rho_b / g \beta} = 0.353\text{ m}^3/\text{s}$$

付録—2

本文中に現われる内部フルード数の定義と、その式番を、表—A・1 にまとめて示す。

表-A・1

記号	定 義	本文中の 式番
F_{it}	2成層から取水する場合、限界取水条件を与えるときのカーテンウォール開口部における内部フルード数	式(1)
F_r	2成層から取水する場合、下層流動層に関する内部フルード数	式(5)
F_D	連続成層、勾配のある2成層から取水する場合、カーテンウォール前面水域で定義する内部フルード数	式(8)
F_{ig}	連続成層、勾配のある2成層から取水する場合、カーテンウォール開口部で定義する内部フルード数	式(10)

参 考 文 献

- 1) Harleman, D.R.F., R.S. Gooch and A.T. Ippen : Submerged sluice control of stratified flow, Proc. ASCE, Vol. 84, HY 2, Paper 1584, 15 p., 1958.
- 2) Harleman, D.R.F. and R.E. Elder : Withdrawal from two-layer stratified flows, Proc. ASCE, Vol. 91, HY 4, pp. 43~58, 1965.
- 3) 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.
- 4) Jirka, G.H. : Supercritical withdrawal from two-layered fluid systems, Part 1 : Two dimensional skimmer wall, J. Hydraulic Research, Vol. 17, No. 1, pp. 43~51, 1979.
- 5) Yih, C.S. : On the flow of a stratified fluid, Proc. 3rd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech. pp. 857~861, 1958.
- 6) Debler, W.R. : Stratified flow into a line sink, Proc. ASCE, Vol. 85, EM 3, pp. 51~65, 1959.
- 7) Kao, T.W. : A free-streamline solution for stratified flow into a line sink, J. Fluid Mech., Vol. 21, pp. 535~543, 1965.
- 8) Kao, T.W. : Free-streamline theory for inviscid stratified flow into a line sink, Phys. Fluid, Vol. 13, No. 3, pp. 535~543, 1970.
- 9) 宮池克人 : スキマーウォールの取水特性に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 497~501, 1980.

(1983.5.13・受付)