

深層取水設備の選択取水特性

和田 明*・角湯正剛**・宮池克人***

1. ま え が き

火力・原子力発電所の復水器冷却水の取水にあたっては、放流温排水の取水口への再循環防止、低温で清澄な下層の海水の取水など、環境保全と発電設備の効率的な運転を目的として、深層取水設備を設ける事が多い。

大容量の発電設備の場合、取水する冷却水量は大量であり、これに適した深層取水設備の構造として、カーテンウォール、取水塔、標準型鉛直取水管（上面キャップ、底面導流板を有する）等があげられる。

深層取水設備の選択取水特性は、設備構造のほか、海域に形成される密度成層にも支配される。大気・日射による加熱や温排水の放流などにより形成される密度成層の多くは、上層が線形密度分布で、下層が一様密度の「勾配のある二成層」でモデル化する方が、密度二成層、あるいは線形密度分布でモデル化するよりも、実際の密度分布をより忠実に再現できる場合が多い。

著者の1人は、カーテンウォールを対象として、鉛直二次元流条件のもとに、3種類の密度成層（密度二成層、線形密度分布、勾配のある二成層）からの選択取水特性について水理実験を実施し、一次元エネルギー方程式に基づいた解析から、分離取水層の厚さ（密度二成層の場合は下層取水の限界条件）および取水される水の密度を求める計算式を提案するとともに、密度成層の種類により選択取水特性が異なるため、取水設備の水理設計にあたっては、実際の密度成層をより忠実に再現する成層モデルを選定する事が大切である事を示したり。

本報告では、取水塔や標準型鉛直取水管を対象として三次元軸対称流条件のもとに、3種類の密度成層からの取水実験を実施し、カーテンウォールと同様に、一次元エネルギー方程式に基づいた解析を行った結果を示すとともに、設備構造による選択取水特性の相違について、比較を行う。

2. 取水実験と解析

(1) 実験装置と実験方法

実験水槽は、深さ 0.5 m、一辺 10 m の正方形で、水槽の中央部に取水設備の模型を設置した。密度成層は、塩分濃度差による密度差を利用して、水槽底部に敷設した注水ビットから所定の濃度の食塩水を静かに注入し、上層水を徐々に押し上げながら作成した。

取水実験は、取水された水の塩分濃度が、ほぼ一定値となった時点で定常状態が達成されたとして、水槽内の密度分布を導電率計および水温計を用いて測定した。なお、水槽水位を一定に保つため、密度二成層および勾配のある二成層からの取水実験では、取水量と同量の下層水を注水ビットから補給したが、線形密度分布からの取水実験では密度成層分布を一定に保つため、下層水は補給しない。

取水設備の模型は、取水塔や標準型鉛直取水管を想定した円筒形で、任意の水深で全周にわたり設けられた取水口から均等に取水する構造とした。図-1 に取水設備の模型と、記号の定義を示す。

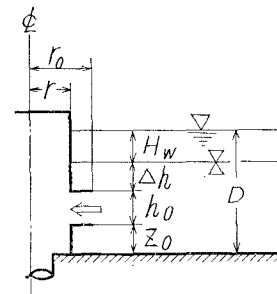


図-1 取水設備の模型と記号の定義

(2) 密度二成層からの取水

実験に用いた模型の諸元は、円筒の半径 $r=6.1$ cm、取水開口高さ $h_0=3.6$ cm、実験水深 $D=12\sim 21$ cm、上下層の密度差 $\Delta\rho=0.0013\sim 0.0036$ g/cm³ である。実験パラメータとして、内部境界面から取水開口部天端までの距離 Δh と h_0 との比 $\Delta h/h_0=0.5\sim 2.1$ 、取水口半径 r_0 と h_0 との比 $r_0/h_0=1.69, 2.69, 3.69$ 、取水開口部

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木研究所副所長

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木研究所構造水理研究室長

*** 正会員 工修 中部電力(株) 原子力計画部原子力土建課

敷から水底までの距離 z_0 と h_0 との比 $z_0/h_0=0, 1, 2$ を選び実験を行った。

下層水のみを取水し得る限界取水条件は、内部境界面が取水開口部天端まで低下した時に与えられるとして、軸対称流条件のもとに一次元エネルギー方程式を適用すると次式を得る。

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

ここに、 α_1 ：取水口開口部における流速分布に関する補正係数、 F_{it} ：取水開口部における内部フルード数、 q_c ：限界取水量を与える取水口単位長さ当りの取水量、 ρ_1, ρ_2 ：各々、上・下層の密度、である。

実験結果を式(1)に適用して α_1 を求め、図-2 に示す。 α_1 は、 z_0/h_0 をパラメータとして、 F_{it} の関数として次式で回帰できる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 1.69 F_{it}^{-1.32}, & z_0/h_0 &= 0 \\ \alpha_1 &= 1.67 F_{it}^{-1.56}, & z_0/h_0 &= 1 \\ \alpha_1 &= 1.77 F_{it}^{-1.69}, & z_0/h_0 &= 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

なお、限界取水条件は、測定器の誤差等を考慮して、次式で定義する比混入率 $\gamma_1=0.05$ のもとに定義している。

$$\gamma_1 = (\rho_2 - \rho_0)D/(\rho_2 - \rho_1)H_w \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ_0 ：取水される水の密度、 H_w ：上層の厚さ、である。

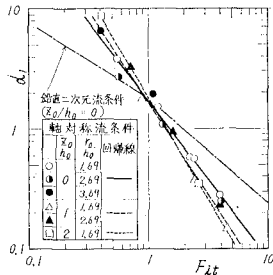


図-2 α_1 と F_{it} の関係

千秋は、標準型鉛直取水管の限界取水条件として、水平取水管に対する条件を適用すべきである事を提案している²⁾。図-3 は、式(1)、(2)を用いて計算した限界取水条件を、水平取水管に対するそれと比較して示す。両者は比較的一致しており、水平取水管と標準型鉛直取水管や取水塔の呑口は、類似した水理特性を有する事が確認された。また、図より、取水開口部敷の水底からの高さ z_0 が限界取水条件の緩和に寄与する効果は、 $F_{it} > 1$ の範囲で認められるが、 z_0/h_0 が 1 を越えると、その効果は減少する傾向にある。

図-2 には、カーテンウォールを対象として行った鉛直二次元流条件での実験結果をあわせて示す。 $F_{it} \geq 1$ の

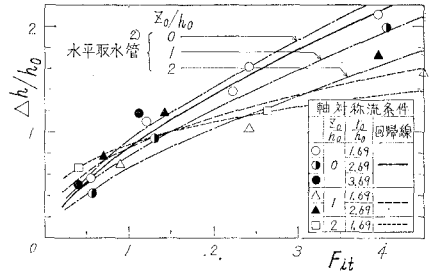


図-3 限界取水条件

範囲では、鉛直二次元流条件における α_1 が、軸対称流条件における α_1 よりも大きい。すなわち、同一の成層水域から、選択取水を行う場合、取水口単位長さ当りの限界取水量は、取水塔や標準型鉛直取水管の方がカーテンウォールよりも、 $F_{it} \geq 1$ の範囲では大きい。

(3) 勾配のある二成層からの取水

実験に用いた模型の諸元は、 $r=6.1, 12.2, 48.2$ cm, $h_0=3.6$ cm, $D=12 \sim 21$ cm, 水面密度 ρ_s と下層密度 ρ_b との差 $\Delta\rho=0.0011 \sim 0.0051$ g/cm³ である。実験パラメータとして、 $\Delta h/h_0=0.17 \sim 2.28$, $r_0/h_0=1.69, 2.69, 3.69$, $z_0/h_0=0.1, 1.11, 2$ を選び実験を行った。

図-4 は、取水により形成された水槽内の密度の鉛直分布の一例である。鉛直二次元流条件の取水実験で観察されたと同様¹⁾、本実験においても取水開口部近傍においては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一致する事が認められた。

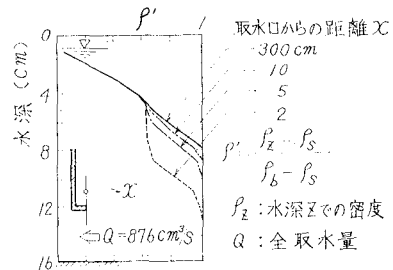


図-4 密度の鉛直分布の測定例

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、勾配のある二成層から取水する時の取水モデルを、図-5 に示す様に設定し、取水開口部と、これから十分に離れた水域の2断面において一次元エネルギー方程式を、次の仮定のもとに、式(4)で表わす。

- 1) 取水開口部から十分離れた海域での流速は小さいので無視する。
- 2) 全抵抗損失(分離流線、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) 速度水頭項の水の密度は、近似的に下層水の密度

(4) 線形密度分布からの取水

実験に用いた模型の諸元は, $r=6.1$ cm, $h_0=3.6, 5.0$ cm, $D=15\sim 18$ cm, 密度勾配 $\beta=(\rho_b-\rho_s)/D=1.76\sim 1.82\times 10^{-4}$ g/cm⁴ の範囲である。実験パラメータとして, $r_0/h_0=1.22, 1.69, z_0/h_0=0$ を選び実験を行った。

図-8 は, 取水により形成された水槽内の密度の鉛直分布の一例である。鉛直二次元流条件の取水実験で観察されたと同様, 本実験においても取水開口部近傍においては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一致する事が認められた。

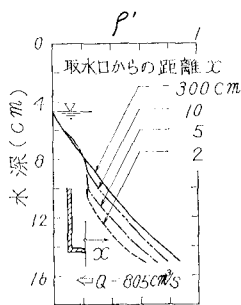


図-8 密度の鉛直分布の測定例

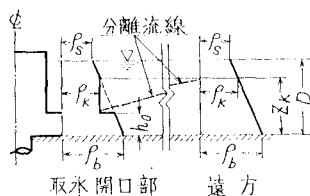


図-9 取水モデル

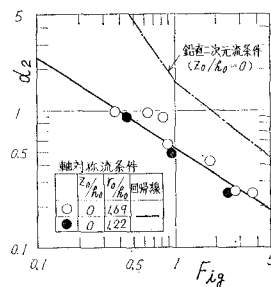
密度の鉛直分布, および流動層に関するこれらの測定結果に基づいて, 線形密度分布場から取水する時の取水モデルを図-9に示す様に設定し, 取水開口部とこれから十分離れた水域の2断面において一次元エネルギー方程式を, 前節で述べた仮定 1)~3) を適用して, 式 (13) で表わす。

$$\begin{aligned} \frac{\rho_s - \rho_b}{2} D = & \frac{\rho_s - \rho_k}{2} (D - z_k) + \rho_k (z_k - h_0) \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s - \rho_b}{D} h_0 + 2\rho_b \right) h_0 \\ & + \alpha_2 \frac{v_0^2}{2g} \frac{\rho_k + \rho_b}{2} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここに, α_2 : 取水口開口部における流速分布に関する補正係数, である。なお, 式 (13) 中, 速度水頭項の水の密度は, 近似的に流動層の平均密度で与える。

式 (13) より, 微小項を無視して¹⁾, 次式を得る。

$$\left(\frac{z_k}{D} \right)^2 - 2 \frac{h_0 z_k}{D^2} - \alpha_2 F_D^2 \left(\frac{D}{h_0} \right)^2 + \left(\frac{h_0}{D} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots (14)$$

図-10 α_2 と F_{Dg} との関係

実験結果を式 (14) に適用して α_2 を求め, 図-10に示す。 α_2 は, α_3 の場合と同様の理由により, 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範囲で変化している。

α_2 は, F_{Dg} の関数として次式で回帰する。

$$\alpha_2 = 0.570 F_{Dg}^{-0.656} \dots\dots\dots (15)$$

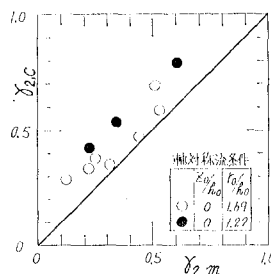
図-10 には, カーテンウォールを対象として行った鉛直二次元流条件での実験結果をあわせて示す。軸対称流条件における α_2 の方が, 鉛直二次元流条件における α_2 よりも小さい。したがって, 同一の取水条件で, 両者の選択取水効率を比較すると, 軸対称流条件の方が分離流線の位置は低くなって, 下層水を効率良く取水できる。

線形密度分布場から取水する場合, 流動層の流速鉛直分布が一樣であると仮定すると, 比混入率 $\gamma_{2,e}$ は式 (12) で $z_i=0$ とおくことにより, 次式で与えられる。

$$\gamma_{2,e} = z_k/D \dots\dots\dots (16)$$

一方, 取水実験で実際に測定された, 取水される水の密度 $\rho_{0,m}$ を用いて, 式 (10) で $\rho_0 = \rho_{0,m}$ として求まる比混入率を $\gamma_{2,m}$ と表わす。

図-11 に, $\gamma_{2,m}$ と $\gamma_{2,e}$ を比較して示す。プロットされた点はややばつぎが認められるものの両者は良好な一致を示すことが認められ, 式 (11) により取水される水のおおよその密度を推定する事が妥当である事が確認できる。

図-11 $\gamma_{2,m}$ と $\gamma_{2,e}$ の関係

(5) 構造物支持柱とひさしの効果

取水塔や標準型鉛直取水管の取水開口部には, 一般に構造物支持柱が存在し, 取水流動に影響を及ぼす。この影響を緩和させるのに, ひさしを設けるのが有効であ

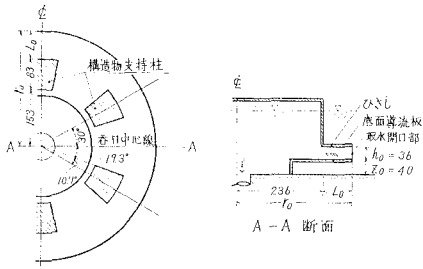


図-12 取水塔模型

る。ひさしは、通常、海底底質掃流吸い込みを抑制するための底面導流板と一対で設けられる。

図-12 に示す取水塔模型を用いた実験結果を図-6, 7 にあわせて示す。ひさしのない場合の水理学的な取水開口部は、構造物支持柱を除いた断面で、また、ひさしと底面導流板のある場合 ($L_0/h_0=1.11$ および 2.0) には、ひさし先端部断面で、それぞれ取水開口部を評価すると、図-6, 7 に示されている他の実験結果と良好な一致を示す。また、ひさし先端部で流速分布の測定を行った結果によれば、取水口全周にわたりほぼ均等な流速分布となっている事が確認された。これらの結果から、ひさしは、構造物支持柱による選択取水効率の低下防止に有効な対策であると言える。

3. 結 論

- 1) 3 種類の密度成層から取水する場合の分離流線

(密度二成層の場合は内部境界面) の位置は、各々、軸対称流条件、鉛直二次元流条件ともに、一次元エネルギー方程式から誘導される、式 (1), (5), (14) などにより統一して表わす事ができる。軸対称流条件と鉛直二次元流条件の取水特性の差異は、 α_i に反映される。

2) 同一の取水条件のもとに、軸対称流条件と鉛直二次元流条件の分離流線(密度二成層の場合は内部境界面)の位置を比較すると、取水開口部における内部フルード数が 1 より大きい範囲では、前者が後者に比較して低い位置にあり、選択取水効率が良い。

3) 取水される水の密度は、式 (11) により、おおよそその値を推定する事ができる。

4) 取水塔や標準型鉛直取水管の取水開口部には、構造物支持柱が一般に存在し、水理学的な取水開口部断面を減少せしめている。これに対し、ひさしを設ける事は、水理学的な取水開口部をひさし先端断面で評価できるので、効率の良い選択取水設備の設計に有効である。

謝 辞： 実験の実施にあたり、曾我雅海、渋谷旬、黒沢博はじめ、関係各位の協力を得た事を記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宮池克人：カーテンウォールの深層取水特性，土木学会論文報告集第 342 号，pp. 77~85, 1984.
- 2) 千秋信一：深層取水工の設計に関する 2, 3 の問題，第 14 回海岸工学講演会論文集，昭和 42 年 12 月。