

選択取水における取水口寸法の影響

大西 外明*・今村 建二**・寺田 博***・渋谷 八郎****

1. ま え が き

選択取水設備は、火力原子力発電所の冷却水取水設備を対象として研究が始められたが、現在貯水池の水質保全対策としても幅広く応用されてきている。すなわち、寒冷地の新設貯水池には例外なく選択取水設備が備えられるほか他地域にも同様の傾向がみられ、また既設の従来方式取水設備を選択取水設備に改造するケースもめずらしいことではない。このような状況下にあつて、選択取水設備の合理的設計法の確立が必要となつてきている。

選択取水設備の研究は、水域内に密度境界面を考えたいわゆる二成層密度流の考えに基づくものと、密度勾配を考慮したものとの大別される。しかし実際の現象においては、ほとんどの場合、分離取水域とよどみ域との境界が比較的ゆるやかな密度勾配域に生ずること、また、密度境界面と考へ得る領域を見出すことは困難であること等から、密度勾配を考慮して解析していくほうが実情に即していると考えられる。また、選択取水設備への流れは軸対称かもしくは軸対称に近い。そこで日野・大西は、密度勾配を有する水域の軸対称流れについて研究し、まず point sink への流れの研究¹⁾からスタートして、最終的に有限大きさの取水口への流れの理論解を発表²⁾している。その実験による検証は、日野等により取水半径の小さい point sink に近い状態で実施された³⁾ほかに、白砂等によつても試みられた⁴⁾が、有限大きさの取水口の影響を把握するにはいたつておらず、実際の設備設計に適用するには不十分な点があつた。

この観点から本研究は、実用上対象となる有限大きさの取水口に対して、分離取水深に及ぼす取水口寸法の影響を明らかにすることを目的とし、理論と実験により検証を行い、その結果をもとに選択取水設備の設計資料を提示する。

2. 有限寸法取水口を有する軸対称密度成層流の理論^{1),2)}

流体は対象としている水域の上面から下面まで直線的に密度 ρ が増大しており、非粘性かつ混合による拡散がないとする。図-1 のような座標系および記号を採用すれば、無次元化された流関数 ψ に関して表わした流体の運動基礎方程式は、日野・大西によつて導かれたように、

$$\frac{1}{\xi^2} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} - \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + G^{-2} \psi = -G^{-2} \eta \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに、 G は日野・大西の選択取水数であり、次式により定義される。

$$G = \frac{Q}{2\pi\sqrt{g\beta}d^3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Q は取水量、 β は密度成層度の強さを表わすパラメータで水域下面の密度を ρ_0 、上面の密度を ρ_1 とすると下式で定義される。

$$\beta = (\rho_0 - \rho_1) / \rho_0 d \quad \dots\dots\dots (3)$$

取水口は半径 r の取水塔の $\eta=a$ と $\eta=b$ の間にあり、この $\eta=a, b$ の間で流関数 ψ が 0 から 1 まで変化する。これを下式で表す。

$$\psi(r, \eta) = f(\eta) \quad (\xi=r, \quad a \leq \eta \leq b) \quad \dots\dots (4)$$

他の境界条件は次のごとくなる。

$$\left. \begin{aligned} \psi(\xi, \eta) &= -1 & (0 \leq \xi < \infty, \quad \eta=1) \\ \psi(\xi, \eta) &= -\eta & (\xi \rightarrow \infty, \quad 0 \leq \eta \leq 1) \\ \psi(\xi, \eta) &= 0 & (0 \leq \xi \leq \infty, \quad \eta=0) \\ \psi(\xi, \eta) &= 0 & (\xi=r, \quad 0 \leq \eta < a) \\ \psi(\xi, \eta) &= -1 & (\xi=r, \quad b \leq \eta \leq 1) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (5)$$

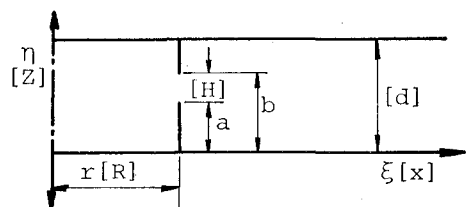


図-1 円筒座標系と記号
(座標は水深 d により無次元化してある。)
〔 〕内は次元をもった値を示す。

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科
** 正会員 三菱重工業(株)横浜研究所基礎技術研究室
*** 三菱重工業(株)横浜造船所鉄橋部
**** 三菱重工業(株)横浜造船所水門鉄管設計課

式(1)の摂動法による第3近似までの解が、日野・大西により下記のごとく得られた²⁾。

$$\begin{aligned} \psi(\xi, \eta; a, b, r) \\ = -\eta + \sum_{n=1}^{\infty} B_n(a, b, r) \sin n\pi\eta \left[\xi K_1 \right. \\ + \frac{\mu_1}{6n\pi} \xi^4 K_2 + \frac{\mu_2}{6n\pi} \cdot \xi^7 \left\{ \frac{\xi}{12} (-I_1 K_2 K_3 \right. \\ + I_1 K_3 K_4 + I_3 K_1 K_2 + I_4 K_1 K_3) \\ + \frac{2}{5n\pi} \left(\frac{K_2}{n\pi\xi} - I_1 K_3^2 + I_3 K_1 K_3 \right) \left. \right\} + \dots \left. \right] \end{aligned} \quad (6)$$

ここに I_k, K_k 等は $n\pi\xi$ を独立変数とする第一種および第二種の変形 Bessel 関数であり、係数 μ_1, μ_2 は G の大きさによりつぎのような値をとる。

$$[G > 1] \quad \mu_1 = G^{-2}, \quad \mu_2 = G^{-4} \quad (7a)$$

$$[G < 1] \quad \mu_1 = G^{-2}, \quad \mu_2 = 1 \quad (7b)$$

また係数 $B_n(a, b, r)$ は下記のごとくなる。

$$B_n = 2 \left[\int_a^b f(\eta) \cdot \sin n\pi\eta \cdot d\eta - \frac{\cos n\pi b}{n\pi} \right] / [r K_1(n\pi r)] \quad (8)$$

ここに $K_1(n\pi r)$ は $n\pi r$ を独立変数とする第二種の変形 Bessel 関数である。

関数 $f(\eta)$ については、ある程度自由性を与えると同時に、上記(8)式を実際計算しやすいように次のごとくおく。

$f(\eta)$ を $f(a)=0, f(b)=-1$ の間の直線、放物線及び三次曲線の和で表わす。

すなわち、

$$f(\eta) = f_1(\eta) + p_2 f_2(\eta) + p_3 f_3(\eta) \quad (9)$$

ここに

$$f_1(\eta) = -(\eta-a)/(b-a) \quad (10a)$$

$$f_2(\eta) = (\eta-a)(\eta-b) \quad (10b)$$

$$f_3(\eta) = (\eta-a)(\eta-b)(\eta-c) \quad (10c)$$

$$c = (b-a)/2$$

上記の $f(\eta)$ を用いれば

$$\begin{aligned} \int_a^b f(\eta) \cdot \sin n\pi\eta \cdot d\eta \\ = \frac{1}{b-a} [p_3 I_3 + \{p_2 - p_3(a+b+c)\} I_2 \\ + \{(ab+bc+ca)p_3 - (a+b)p_2 - 1\} I_1 \\ + \{a + p_2 ab - p_3 abc\} I_0] \quad (11) \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} I_3 = (n\pi)^{-4} [(\pi b)^2 (3 \sin n\pi b - n\pi b \cdot \cos n\pi b) \\ - (n\pi a)^2 (3 \sin n\pi a - n\pi a \cdot \cos n\pi a) \\ - 6(\sin n\pi b - n\pi b \cdot \cos n\pi b) \\ + 6(\sin n\pi a - n\pi a \cdot \cos n\pi a)] \quad (12a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 = (n\pi)^{-3} [n\pi b (2 \sin n\pi b - n\pi b \cdot \cos n\pi b) \\ - n\pi a (2 \sin n\pi a - n\pi a \cdot \cos n\pi a) \\ + 2(\cos n\pi b - \cos n\pi a)] \quad (12b) \end{aligned}$$

$$I_1 = (n\pi)^{-2} [\sin n\pi b - \sin n\pi a - n\pi b \cdot \cos n\pi b \\ + n\pi a \cdot \cos n\pi a] \quad (12c)$$

$$I_0 = (n\pi)^{-1} [\cos n\pi a - \cos n\pi b] \quad (12d)$$

上述のごとくして水域内の任意の点における流関数 ψ を計算することにより、密度勾配を有する水域の流動状況を解析することができる。

3. 選択取水数 G_{or} の解析解

選択取水状態が、取水量 Q 、密度成層度パラメータ β また分離取水深 d_s のもとに達成できるとき、その条件に対する選択取水数を $G_{or} (=Q/[2\pi\sqrt{g\beta}d_s^3])$ と記号づける。前述の流関数計算による流動状況解析をとおして G_{or} の解析解を以下に求める。

3.1 表層取水の G_{or}

表層取水時の流れ解析結果の例を図-2に示す。同図に示されるごとく、取水により水域内に渦が発生すること、またその渦領域の大きさは、 G の値に関連することは、point sink への流れの場合と同様である^{1),2)}。

この計算上の渦領域は、実現象ではよどみ域になるこ

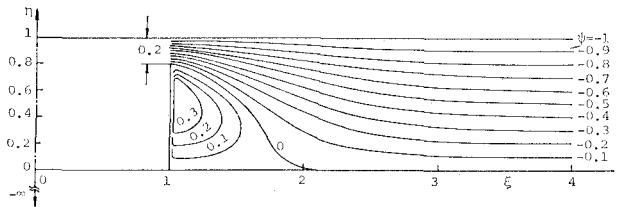


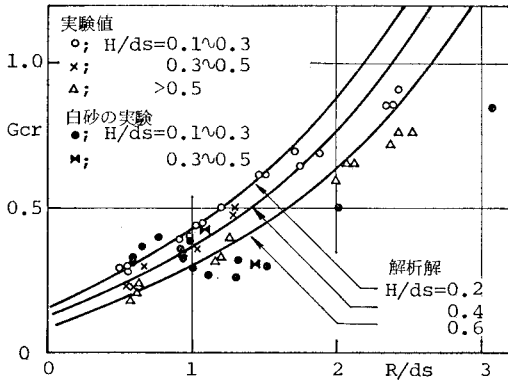
図-2 表層取水の流れ解析例 ($G=0.3$)

と、またそのよどみ域の発達により、水域は無限遠点までよどみ域と分離取水域とにわけられることが知られている。本解析では、図-2に示す様に $1 \geq \eta \geq -\infty$ の水域のなかで $1 \geq \eta \geq 0$ の水域(すなわち、流れ解析水域)がちょうど分離取水域になる条件を求める。この点に関しては、日野等は point sink への流れの研究において、解析水域内の $\xi \geq 0.5$ の領域に渦が残らない場合が解析水域を無限遠点まで分離取水域とする条件に近いと考察して G_{or} の解析解を求め、それを実験により検証している。

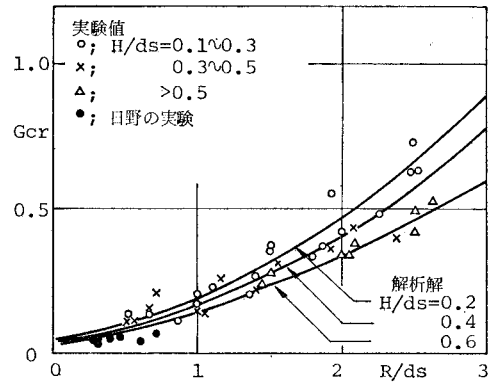
今回の研究においても、それを参考として、取水半径が r の場合には、 $\xi \geq r+0.5$ の領域に渦領域が残らないという条件から G_{or} の解析解を求めた。取水半径及び取水開口高さを種々変えた場合の G_{or} の解析解を図-3(a)に示す。同図には後述する実験データもあわせて示してある。

3.2 中間取水の G_{or}

中間取水の G_{or} の解析値も表層取水と同様の考えから求まるが、表層取水と異なるのは渦なし領域を $\xi \geq r+0.25$ とするところにある。その説明を以下に記す。



(a) 表層取水



(b) 中間取水

図-3 選択取水数 G_{cr}

(d_s ; 分離取水深, R ; 取水半径, H ; 取水開口高さ)

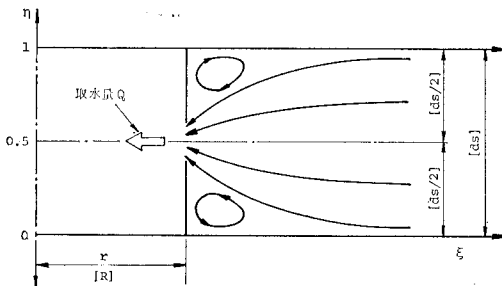


図-4 中間取水の流れ説明図

([] 内は次元をもった値を示す。)

図-4 に中間取水の流れの説明図を示すが、同図にてあきらかなごとく流れは $\eta=0.5$ を対称面とする上下対称流とみなすことができる。また、その対称流は、 $\eta=0.5$ を表面とし分離取水深が $d_s/2$ の表層取水と、 $\eta=0.5$ を底面とする深層取水とみなすことができる。深層取水の特性は表層取水と同一であるから、中間取水特性は表層取水特性からも説明されなければならない。

さて、表層取水特性解析における $\xi=r+0.5$ の位置とは、有次元数におきかえると {取水半径(有次元値)+ $0.5 \times$ 表層分離取水深} の位置であることを考えてそれに相当する位置を中間取水の上下対称流に求めると {取水半径(有次元値)+ $0.5 \times 0.5 \times$ 中間分離取水深} の位置となる。これを中間分離取水深で無次元化すると $\xi=r+0.25$ となり前述の中間取水における渦なし領域の限界点となる。

上述の考えと、流れ関数計算結果から得た中間取水の G_{cr} の解析解を図-3 (b) に示す。同図には表層取水の場合と同様に後述する実験データが併記してある。

なお、日野・大西の point sink への流れの研究において、中間取水の G_{cr} は表層取水の G_{cr} の $1/4$ となることが示されている。今回の、有限寸法取水口を対象と

した研究においても同様な関連性が保持されているが、それにも取水口寸法が影響する。すなわち、図-4 の記号を用いて説明すると、表層取水に関しては

$$G_{cr} = \frac{Q/2}{2\pi\sqrt{g\beta}(d_s/2)^3} = 4 \frac{Q}{2\pi\sqrt{g\beta}d_s^3}$$

であり、そのときの無次元取水半径は

$$r = R/(d_s/2) = 2R/d_s$$

である。一方中間取水に関しては

$$G_{cr} = \frac{Q}{2\pi\sqrt{g\beta}d_s^3} \quad r = R/d_s$$

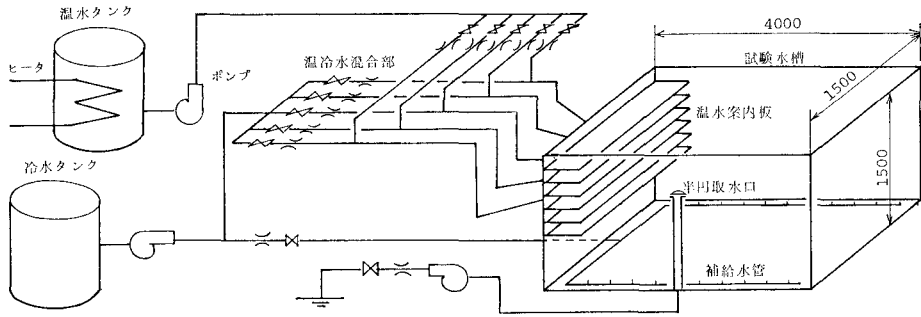
である。したがって、表層取水の $R/d_s=2$ の場合の G_{cr} の $1/4$ が中間取水の $R/d_s=1$ の G_{cr} にほぼ合致しなくてはならないが、図-3 (a) 及び (b) にその関係を見ることができる。もとより上記の関係は、表層取水の $R/d_s=1$ の点と中間取水の $R/d_s=0.5$ の点等 R/d_s が 2 対 1 の比をとる任意の点についてもいえる。

4. 実験による検証

4.1 実験装置

図-5 に実験装置の構成図を示す。密度勾配は温度勾配により形成した。すなわち冷水タンク及び温水タンクの双方からポンプで吸引した水を、10本の分岐及び合流管からなる温冷水混合部で水温調整をし、10層からなる温水案内板から試験水槽に導く。水温を段階的に変えて水槽に温水をつみかさねていき、最後に整定させると一定勾配に近い温度分布が得られた。模型取水ゲートは半円形とした。試験水面位置を保持するために、取水すると同時に水槽に水を補給するにあたっては、水層底部に冷水を補給した。この方式によれば表層に温水を補給する方式に比し試験取水域の温度分布保持特性がよくなる。

分離水深の計測は色素トレーサーの移動領域を読みとる方式をとった。



図—5 実験装置の構成説明図

4.2 実験条件及び結果

実験条件の概要を表—1に示す。また、実験で得られた G_{cr} を図—3 (a), (b) に解析解とあわせて記す。実験においては、 G_{cr} の解析解が示した特性、すなわち G_{cr} は R/d_s 及び H/d_s の値によって変化するということを、実機設備設計上の実用的範囲を網羅して検証することを目的とし、ほぼそれを達成することができた。図—3 (a), (b) に示した実験値と解析解とは、 $G_{cr} \approx 0.7$ 程度までよく合致している。

表—1 実験条件の概要

取水半径	7.5, 14, 25 cm
取水開口高さ	2~7.5 cm
取水量	300~1400 cc/sec
密度勾配	$1.3 \sim 5.6 \times 10^{-4} \text{ 1/cm}$
分離取水深	7~15 cm

4.3 従来の実験研究結果との比較

G_{cr} を実験的に求めた研究として、日野・古沢及び白砂・安芸の研究がよく知られている。それらの研究と今回の研究を照合してみる。

(1) 日野・古沢の実験³⁾との比較

日野・古沢は point sink への流れに対する中間取水の G_{cr} の検証を主目的として実験を行なった。そのデータを図—3 (b) に本研究の解析解及び実験データとあわせて示す。本研究の解析解及び実験データは、日野等のそれに比し大きめであるがその差異は密度流の実験においては許容できる範囲であり、本研究と日野・古沢の実験は合致しているとみてよい。

(2) 白砂・安芸の実験結果⁴⁾との比較

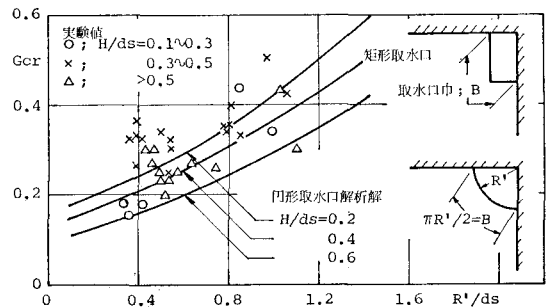
白砂・安芸は表層取水の G_{cr} に関し、1/3 円周取水口と矩形取水口に関して実験し、その平均値として $G_{cr} = 0.324$ を提唱したことで知られている。その実験データ中 1/3 円周取水口に関する G_{cr} を図—3 (a) に他データとあわせて示す。同図より本研究の解析解及び実験データは、白砂等のそれとはほぼ同値であること、また R/d_s の増大とともに G_{cr} が大きな値をとる傾向についても、白砂等のデータの $R/d_s = 2$ 及び 3 近辺の点のデータに同傾向をみることができる。

矩形取水口の場合の G_{cr} は、本研究の対象である円形取水口の G_{cr} とは多少異なるであろうが、白砂等が 1/3

円周取水口に関する試験結果と矩形取水口に関する結果を合わせた平均値として $G_{cr} = 0.324$ を提唱したことに推察されるごとく、双方のデータはほぼ類似のものであると考えられる。そこで矩形取水口の G_{cr} にも、本研究で対象としている取水口寸法の影響が含まれているか否かについて、以下に近似的取り扱いではあるが検討を加えてみる。

矩形取水口幅 B (図—6の説明図参照) のかわりに、それと同じ円周長さを有する取水半径 $R' = B/(\pi/2)$ (図—6の説明図参照) を考え、 R'/d_s に対して矩形取水口に関する G_{cr} の実験値と円形取水口に関する G_{cr} の解析解をプロットすると図—6に示す結果が得られた。

図—6の結果から、矩形取水口の G_{cr} の実験値は R' の値によって変化しており、したがって、取水口幅 B の影響を含んでいると考えられる。そして、その取水口寸法の影響は、今回の研究の対象である円形取水口の場合と非常に類似していると考ええる。



図—6 白砂の実験の矩形取水口の G_{cr}
($R' = B/(\pi/2)$ で整理)

5. 考 察

今まで述べてきた選択取水数 G_{cr} の解析解及び実験値に関して考察すると次のことがいえる。

(1) 取水半径の増大につれ G_{cr} は増大する。これはたとえば、分離取水深 d_s を一定値とした場合、取水量の増大に応じて取水半径を大きくする必要があるとの概念に定量的裏付けを与えたものであり、選択取水設備の設計に関して有用な論拠となると考える。

(2) 取水開口高さ H の増大につれ、 G_{cr} は減少する。但し、白砂・安芸の実験では彼等の指摘どおりにこの現象はばらつきのなかに埋没しているというべきであろう。実現象においては、 H の増大とともに分離取水深 d_s が増大するという傾向は納得できるので、 G_{cr} の基本的特性としては解析解と今回の実験が示す傾向を有していると考ええる。

(3) 従来の実験値のうち、日野・古沢の実験は十分に point sink に近い状態で行なわれており、 $G_{cr}=0.04$ が得られたのは極めて妥当であるといえる。白砂・安芸の実験は、大部分が $R/d_s=0.6\sim 1.5$ あるいは $R'/d_s=0.4\sim 1.1$ の範囲で行なわれており、彼等の実験の平均値である $G_{cr}=0.324$ は、上述の取水口寸法に対する値として説明づけられる。

(4) 選択取水設備の設計にあたっては、 Q 及び β が与えられ d_s を定めれば G_{cr} が計算でき、その G_{cr} を得るに必要な R/d_s 及び H/d_s を図-3 より求めればよい。

6. あとがき

無限の広がり水域あるいは無限大深さ水域を考えても分離取水深 d_s については有限値を考えなければ選択取水設備の設計はできない。選択取水設備の取水半径 R あるいは取水開口高さ H は d_s に対して同レベルの値

であるから d_s とともに R や H も有限値を考えなければならぬ。いいかえれば、いかに無限の水域を考えようとも、選択取水の研究においては d_s が寸法の基準となるわけであり、 R や H もそれとの対応において考えていく必要があるわけである。本研究は上記の観点のもとに選択取水設備の寸法が分離取水特性に及ぼす影響を求めたものであり、日野・大西の理論にもとづき選択取水数 G_{cr} の解析解を求めるとともに実験による検討を行なった。また、従来より発表されてきた日野・古沢及び白砂・安芸の実験結果とも照合し、解析解の妥当性を確めた。

研究の結果、取水半径及び取水開口高さが選択数水数 G_{cr} に及ぼす影響が把握でき、今後の選択取水設備の設計の一助となり得るものとする。

参 考 文 献

- 1) 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，pp. 39～48，1969.
- 2) 大西外明・日野幹雄：深層取水の流れへの考察 (II)，第 15 回海岸工学講演会講演集，pp. 203～211，1968.
- 3) 日野幹雄・古沢 恵：成層密度流体からの選択取水に関する実験——層分離現象と中層取水——，第 16 回海岸工学講演会講演集，pp. 231～236，1969.
- 4) 白砂孝夫・安芸周一：貯水池の濁水現象とその水理学的軽減対策，発電水力，No. 126，pp. 3～25，1973.