

深層取水口の海底よりの高さとしサシの効果

EFFECTS OF SINK LEVEL AND HORIZONTAL ROOF ATTACHED TO INTAKE OPENING ON WITHDRAWAL CONDITION OF STRATIFIED FLUID

大西外明*
By Sotoaki Onishi

要旨 原子力発電所や火力発電所における復水器冷却水に海水を用いることはわが国では一般的であり、その取水口の設計には深層取水の考えを導入することが経済的であることが多い。筆者は、本論において、深層取水口設計に関係する二つの問題をとり上げて理論的な面から検討を行なった。とり扱った問題の一つは深層取水が可能となる取水開口部の限界位置についてであり、他の一つは取水構造物の寸法の減少を計るため開口部天端に水平ヒサシをとりつけるアイディアの提示である。

(1) 深層取水が可能となる取水開口部の限界位置について

取水開口部が海底にある場合の深層取水に関する設計条件については、従来多くの調査研究がなされてきているが、海底付近の浮遊砂や腐食土、腐食水等の有害物が冷却水の内に混入するのを防止するため、開口部を海底より上方におく必要が生じることがある。水の密度勾配が次式であられる直線分布をなし、

$$\rho = \rho_0(1 - \beta y), \quad \beta = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0 d} \dots\dots\dots (i)$$

(ここに ρ_0, ρ_1 は水域底部および水表面の水の密度、 y は底部よりの高さ)

line sink を水平な水域底部においた場合、水の粘性を無視すると、 $F < 1/\pi$ の条件下においてのみ深層取水が可能なることは Yih により示されている。

ここに、
$$F = \frac{(U'd)}{d^2} \sqrt{\frac{1}{g\beta}}$$

であり、 U' は sink から十分上流における流速を U とした場合 $\sqrt{d/\rho_0} U$ であらわされる一種の modified velocity であり d は全水深、 g は重力の加速度である。しかし、水域底の形状を水平としないで、line sink の直上流の底を、

$$\eta = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-1/n) \cdot \sin n \pi \eta}{\exp(n^2 \pi^2 - 1/F^2) |\xi|} \dots\dots\dots (ii)$$

(ここに $\eta = y/d, \xi = x/d$ で y, x は sink の位置を

原点にとり、上向きに y 軸、流れの方向に向って x 軸をとる)

に合せてかさ上げすると、 $1/2\pi < F < 1/\pi$ の範囲でも全水域からの取水が可能となる。福井県浦底湾内において観測した海水温分布と敦賀原子力発電所の取水口設計条件を用いて F の値を検討した結果、同地点ではその値は $1/\pi$ と $1/2\pi$ の間に入ることが判明した。したがって、この海水域で取水開口部を海底より上方におくことを考える場合、深層取水を行うためには、取水口周辺のせき上げ形状を、式(ii)であたえられる曲線以下になるように作ること、あるいは取水開口部位置の海底よりの高さを、式(ii)より計算される η の最大値 η_{max} に相当する高さ以下におく必要がある。本論において、筆者は η_{max} と F の関係をあたえた。

(2) 取水開口部天端の水平ヒサシの効果

取水開口部の寸法は水理的条件からきまってくるが、いわゆる skimmer wall 式取水口ではカーテンウォールの構造上、取水口に向う流れを横切って一定間隔ごとに H 型鋼杭を打ちこむことが一般に行なわれている。このため流れに面した取水口設備の平面寸法は H 型鋼杭の幅分だけ水理的に要求される純幅より広くなる。いま、取水開口部天端に流れと反対方向に水平ヒサシをとりつけ、流線が H 型鋼杭により変形されない位置までのばすと、上記の取水口設備平面寸法は H 型鋼杭の存在を無視した水理的純開口幅となる。しかし、その場合の水平ヒサシの長さは、流れを完全流体と仮定した場合、理論的には無視大となり、実際設計上意味をもたなくなる。そこで、

$$\frac{U-u}{U} = \epsilon \dots\dots\dots (iii)$$

(ここに、 U は開口部より十分上流における流速、 u は有限長の水平ヒサシの上流端における流速) とし、 ϵ をあたえた場合の水平ヒサシの所要長を算定する近似式を提示した。

* 正会員 工修 日本原子力発電(株)建設部

1. はじめに

火力発電所や原子力発電所でタービン熱効率がとくに問題となる7月ないし10月の季節には貯水池または海の表面付近の水は深部のものより高くなり、温度差に起因する密度差が生じることは一般に知られている。多くの発電所では、このことを利用して下層部の冷水のみを復水器冷却水として取水しようとする深層取水口を採用している。深層取水口を実際に設計する場合、海底の砂や腐食土あるいは海底部近くに分布している腐敗性の水の流入を防止するため、取水開口部を海底よりある程度上方におくことが必要となることがある。取水開口部と海底との鉛直距離の決定は、海底沿いの流速や海底土質がもつ移動に対する抵抗力等との関連において考えなくてはならないが、これら有害物の混入防止の面のみを強調して、取水開口部をあまり上方におくと、上層部水域の水も流入することになり、取水口が深層取水の機能をはたすことができなくなる。したがって実際の計画にあたっては、取水開口部を海底より上方におきうる限界高さについて一応の目安をえておくことが重要な項目の一つとなる。本論では、この問題について Yih の理論を用いて理論的な検討をおこなう。また、この問題とは別に、取水開口部天端に上流方向にむかって水平にヒサシをとりつけることにより、取水開口部構造の総幅を減少させ経済設計が可能であることを水理的な面からしめす。

2. 深層取水が可能な取水口の海底よりの限界高さ

(1) 二次元の成層流に対する Yih の理論解^{1),2)}

二次元の成層流体の定常流で、粘性と圧縮性を無視した場合の運動方程式は、つぎのようになる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - g \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 x, y は図-1 に示すような Cartesian 座標であり、 u, v はそれぞれ x 方向および y 方向の流速である。また、 ρ は水の密度、 p は圧力、 g は重力の加速度である。

定常流での連続の式は、

$$u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \dots\dots(3)$$

である。diffusion はないものとするれば、密度は流線に沿って一定で、

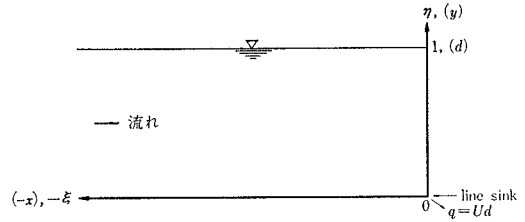


図-1 流れの座標系

$$\frac{D\rho}{Dt} = \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) \rho = 0 \dots\dots\dots(4)$$

であり、連続の方程式は結局

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(5)$$

となる。Yih は、 ρ_0 をある reference density (ここでは水域底の水の密度をとる) として、つぎの変換

$$(u', v') = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} (u, v) \dots\dots\dots(6)$$

を行なって、式(4)の関係を考慮に入れ、式(1)、(2)、(5)の変数を変換して、次式をえた。

$$u' \frac{\partial u'}{\partial x} + v' \frac{\partial u'}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(7)$$

$$u' \frac{\partial v'}{\partial x} + v' \frac{\partial v'}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\rho}{\rho_0} g \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

ここで、式(9)を満足する関数 ψ' を導入すると、

$$u' = \frac{\partial \psi'}{\partial y}, v' = -\frac{\partial \psi'}{\partial x} \dots\dots\dots(10)$$

なお、流れ関数 ψ と ψ' の間には次式であらわされる関係がある。

$$\psi' = \int (\rho/\rho_0)^{1/2} d\psi \dots\dots\dots(11)$$

いま、

$$q'^2 = u'^2 + v'^2 = (\rho/\rho_0)(u^2 + v^2) \dots\dots\dots(12)$$

および

$$\omega' = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} = -\Delta^2 \psi' \dots\dots\dots(13)$$

とおくと、式(7)、(8)より

$$\Delta^2 \psi' + \frac{gy}{\rho_0} \frac{d\rho}{d\psi'} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{dH}{d\psi'} \dots\dots\dots(14)$$

となる。ここに、

$$H = p + \frac{\rho(u^2 + v^2)}{2} + g\rho y \dots\dots\dots(15)$$

であり、これは Bernoulli の関係式であり、流線に沿って一定である。式(14)で、 $d\rho/d\psi', dH/d\psi'$ は、それぞれ水の密度変化および specific energy の変化が流れにあたる効果をあらわす項である。Yih は、式(14)を線型化するのにつぎの二つの仮定を行なった。

- (i) line sink より十分上流における水の密度分布はつぎのようにあたえられるものとする。

$$\rho = \rho_0(1 - \beta y), \quad \beta = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0 d} \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 ρ_0, ρ_1 は水域底部および水表面における水の密度、 d は全水深である。

(ii) line sink より十分上流で $\psi' = U'y$ である。 U' は一定で十分上流での流速 U との間にはつぎの関係がある。

$$U' = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} U \dots\dots\dots(17)$$

以上の二つの仮定により、式 (14) は線型化されて

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + F^{-2} \psi = F^{-2} \eta \dots\dots\dots(18)$$

となる。ここに、

$$\psi = \frac{\psi'}{U'd}, \quad \xi = \frac{x}{d}, \quad \eta = \frac{y}{d} \dots\dots\dots(19)$$

$$F = \frac{(U'd)}{d^2} \sqrt{\frac{1}{g\beta}} \dots\dots\dots(20)$$

である。式 (18) は密度が直線分布をなす場合の line sink への流れについて Yih が導いた基本方程式であり、その一般解は

$$\psi = \eta + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[(n^2\pi^2 - F^{-2})^{1/2} \xi] \cdot \sin n\pi\eta \dots\dots\dots(21)$$

である。line sink が $x \cdot y$ (または、 $\xi \cdot \eta$) 座標系の原点の位置にある場合には、境界条件は、

$$\begin{aligned} \eta = 1 \quad \text{および} \quad \xi = 0 \quad & \text{で} \quad \psi = 1 \\ \eta = 0 \quad & \text{で} \quad \psi = 0 \\ \xi = -\infty \quad & \text{で} \quad \psi = \eta \end{aligned}$$

となり、式 (18) の解は、式 (21) より

$$\psi = \eta + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi\eta}{n} \exp[(n^2\pi^2 - F^{-2})^{1/2} \xi] \dots\dots\dots(22)$$

となる。式 (22) は、 $F > F_{cr} = 1/\pi$ である限り流れの基本方程式 (18) が成り立つために必要な仮定条件 (i), (ii) をみたしている。しかし、 F の値が $1/\pi$ にむかって減少するにつれて、図-2 に示すように line sink の上部に渦が発生し、 $F = F_{cr} = 1/\pi$ になると渦は無限遠に達し、十分上流の仮定条件 (ii) がみたされなくなる。図-3 は $F = 1/\pi$ の場合の流れを示す。Delber³⁾ は $F < 1/\pi$ の場合の流れを実験的に検討し $F \leq 0.28$ で、水域上層

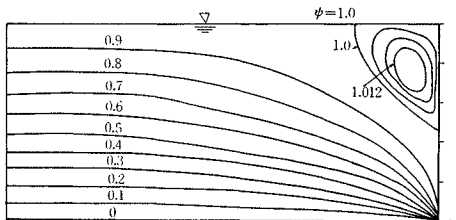


図-2 $F=0.35$ の場合の Yih の解

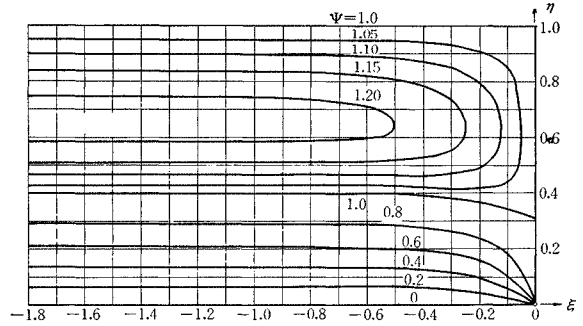


図-3 $F=1/\pi$ の場合の Yih の解

によみ層が発生することを見出し、Yih の理論解の妥当性を明らかにしている。

以上は水路底が全水域にわたり水平な場合についてであるが、sink の近傍の水路底を上方にあげると F_{cr} の値は $1/\pi$ より小さくなる。すなわち水路底に ϵ の大きさの開口を考え、つぎの境界条件、

$$\left. \begin{aligned} \xi = 0, \quad \epsilon \leq \eta \leq 1 \quad & \text{で} \quad \psi = 1 \\ \xi = 0, \quad 0 < \eta \leq \epsilon \quad & \text{で} \quad \psi = 1 - \frac{k^2}{\pi^3} \sin k\eta \\ & (\text{ここに } k\epsilon = \pi \text{ とする}) \\ \xi = 0, \quad \eta = 0 \quad & \text{で} \quad \psi = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

を、流れの基本方程式 (18) にあたえ、 $\epsilon \rightarrow 0$ とするとつぎの解をうることができる。

$$\psi = \eta - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(n - \frac{1}{n}\right) \sin n\pi\eta \cdot \exp[(n^2\pi^2 - F^{-2})^{1/2} \xi] \dots\dots\dots(24)$$

図-4 は $F = 3/4\pi$ の場合の流れを示す。この図でみられるように、式 (24) は $1/2\pi < F < 1/\pi$ の範囲で、式 (18) に必要な前述の仮定条件をみたしている。したがって水路底を $\psi = 0$ の曲線にあわせてつくれば、 $F < 1/\pi$ であっても水域上層には、よみ層は生じない。

(2) 深層取水口の開口位置を支配する諸要素

火力発電所や原子力発電所でタービン熱効率が特に問

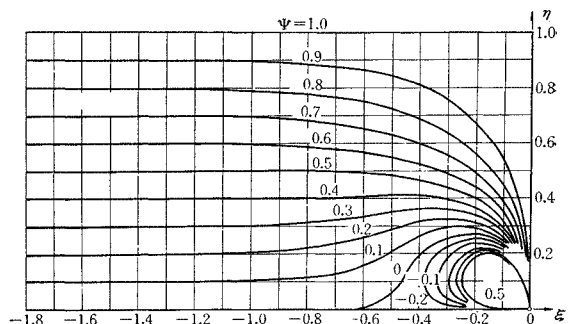


図-4 $F=3/4\pi$ の場合の Yih の解

題となる夏期においては沿岸水域の海水は上層部が温くなるため、下層の冷水部のみを冷却水として取水することが経済的となることが多い。この場合、要求される水表面から取水開口位置までの深さは、取水流量、開口高、水温分布、上層水混入率の許容値が与えられれば、計算することができ、これらについては千秋・和田^{4),5),6)}、Harlemann⁷⁾等によりすぐれた研究報告がなされている。発電所の冷却水取水口はタービン熱効率の面から、このように深層取水の機能を有することが要求される一方において、砂や海底腐食土あるいは腐敗性の有害量の流入を防止できるよう開口位置を適切に選定することもまた、重要な事項である。火力発電所は工場に囲まれた港内に設けられる例が多いが、この場合、漂砂や海底砂が冷却水に混入するおそれが少ない代りに、海底に堆積する腐食土や底層の腐敗性の水が問題となる。腐敗性物質が冷却水にまじってコンデンサーチューブのなかに流入すると、チューブ内壁面に粘膜炎を形成せしめて、タービン熱効率の低下をきたし、ときには、コンデンサーチューブの腐食をまねく。このことは、硫化水素を多く含む海水において、とくに顕著である。原子力発電所では周辺環境への高度な安全性が要求されるため、多少の送電ロスの増加を無視しても発電所を遠隔地に設置するため、冷却水取水に常に有利な海象条件にめぐまれるとは限らず、時には浮遊砂の多い沿岸海域より取水しなくてはならないこともありうる。流入する砂は沈砂池により排出するわけであるが、海岸地帯に設置されるこの種の発電所では山間部の水力発電所沈砂池と異なり、排砂に自然の重力を利用することができず、排砂作業に多くの困難をともなう。このため、砂の流入量をできるだけ少なくするための設計上の考慮が必要となってくる。取水口においてこれらの有害物の流入を制限するためには、設計取水流速を小さくすることも必要であるが、取水開口部の位置を適切にえらぶことがもっとも重要である。浮遊砂の面から考えてみると、本間・堀川⁸⁾が東海原子力発電所取水地点で現地調査した結果によると、浮遊砂量は海底に多く、海底から2mくらいの高さで急激に減少していると報告している。そしてこの場合には、開口部を浮遊砂量の鉛直濃度分布曲線の最大彎曲部より上部の水深の所におくことが必要であるとしている。なお海中の浮遊砂量の分布状態は各地点ごとに異なるので、取水口設計に先立って十分に現地調査を行なう必要があることはもちろんである。

以上のように、取水開口部の位置を、深層取水の立場と砂、腐食土等の有害物混入防止の立場といった相異なる二面から制限をあたえると、結果として、水域の上層と下層によどみ層が存在する中間層取水が可能ないように開口部位置をきめることになる。この中間層取水が可能

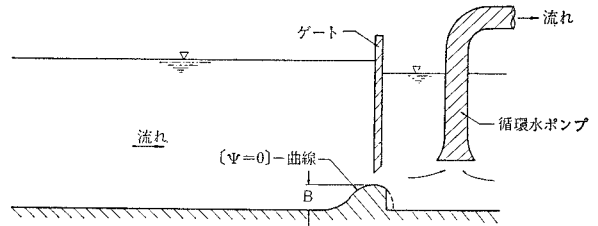


図-5 取水口の模型図

な条件については、現在のところ明確な解明がされていないが、ここでは、この問題解明の第1段階として、上部よどみ層のみに注目して、このよどみ層が存在している、つまり、深層取水が可能ない限りの開口部位置について考えてみる。いま、図-5に示すように、海底に高さ B のせきをつくり、その頂部におろしたゲートとの間の長方形のオリフィスを通して海水を取水することを想定し、 B の値を取水口の高さと定義する。 $B=0$ の場合は、上流水域の流れは、式(22)よりあらわされ、 $F > 1/\pi$ の時には全水域から取水が行なわれるが、 $F < 1/\pi$ の時には前述のように上流側全水域上層によどみ層発生して深層取水が可能となる。これに対して $B \neq 0$ の場合には、 F が $1/\pi$ より小さくても、常に、深層取水が可能とは限らない。このことは、たとえば $1/2\pi < F < 1/\pi$ の範囲の流れについてみると、その流れは式(24)であらわされ、水路底を $\psi=0$ の曲線にあわせてかさ上げすると、前節でのべたように全水域から取水が可能なることにより明らかである。いずれにしろ、水域内の流れを支配するのは F の大きさであり、この F は式(20)に示すように、取水流量、水深、および水温鉛直分布状態の関数である。したがって取水口設計に際しては、まず対象となる取水地点および季節における F の値の範囲を知る必要があるが、一例として福井県敦賀市浦底湾における観測資料をもとに F の値を調べてみるとつぎのとおりである。

(3) 浦底湾内観測資料より算定した F の値

敦賀市浦底湾内で水面下 0.5 m、10 m および 13 m のところに設けた定置水温観測点において、昭和 42 年 7 月 11 日から 8 月 10 日までの 1 カ月間、海水水温を測定した結果は表-1 に示すとおりである。水温測定は芝浦電子の K-30-11 型サーミスターと電子自働平行記録計 ST-3200 型(6接点)を用いて自動的に記録した。また、表-1 には、淡水とした場合の各水温に相当する水の密度の計算値が示してある。表-1 の結果を図にあらわして、水深と水の密度変化の状態との関係を見ると、図-6 のとおりである。これによってみると、水深 0.5 m の水の密度と水深 13 m のものを直線で結んで θ をもともても、実際上さしつかえないものと考

表-1 浦底湾における海水水温分布と F の値

観測月日	① 水深 0.5 m		② 水深 10 m		③ 水深 13 m		④ β	⑤ $1/\beta$	⑥ $\sqrt{1/\beta}$	⑦ F	⑧ 摘要
	水温 $t^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho_{0.5}$	水温 $t^{\circ}\text{C}$	密度 ρ_{10}	水温 $t^{\circ}\text{C}$	密度 ρ_{13}					
42. 7. 11	23.6	1.01705	22.7	1.01728	22.0	1.01700	3.302×10^{-5}	0.303×10^5	174	0.270	$F = \frac{q}{d^2} \sqrt{\frac{1}{g\beta}}$ $q = 0.7 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ $d = 12 \text{ m}$ として $F = 0.00155 \sqrt{\frac{1}{\beta}}$ $\beta = \frac{\beta_{13} - \beta_{0.5}}{\beta_{13} \times d}$
12	24.5	1.01686	23.0	1.01720	22.3	1.01740	$4.246 \times "$	$0.236 \times "$	154	0.237	
13	24.0	1.01700	23.0	1.01720	22.2	1.01744	$3.460 \times "$	$0.289 \times "$	170	0.263	
14	26.0	1.01650	22.8	1.01726	22.2	1.01744	$7.390 \times "$	$0.135 \times "$	116	1.180	
15	25.5	1.01660	23.9	1.01702	22.5	1.01735	$5.898 \times "$	$0.170 \times "$	130	0.202	
16	26.3	1.01640	23.3	1.01714	22.4	1.01738	$7.706 \times "$	$0.130 \times "$	114	0.177	
17	27.6	1.01602	23.2	1.01716	22.4	1.01738	$10.694 \times "$	$0.0935 \times "$	97	0.150	
18	26.5	1.01634	23.1	1.01718	22.5	1.01738	$8.178 \times "$	$0.122 \times "$	110	0.171	
19	28.4	1.01578	23.3	1.01714	22.8	1.01726	$11.639 \times "$	$0.0859 \times "$	93	0.144	
20	28.5	1.01575	23.4	1.01712	23.1	1.01728	$11.247 \times "$	$0.0889 \times "$	94	0.146	
21	28.5	1.01575	23.9	1.01702	22.9	1.01723	$11.639 \times "$	$0.0859 \times "$	93	0.144	
22	28.3	1.01582	25.6	1.01658	24.4	1.01688	$8.339 \times "$	$0.120 \times "$	110	0.171	
23	26.4	1.01638	24.8	1.01676	23.3	1.01714	$5.976 \times "$	$0.167 \times "$	129	0.200	
24	27.2	1.01614	25.8	1.01654	23.4	1.01712	$7.708 \times "$	$0.130 \times "$	114	0.177	
25	28.6	1.01572	24.3	1.01692	23.6	1.01708	$10.697 \times "$	$0.0935 \times "$	97	0.156	
26	28.2	1.01584	27.0	1.01620	23.8	1.01704	$9.439 \times "$	$0.106 \times "$	103	0.160	
27	28.0	1.01590	26.5	1.01634	24.0	1.01700	$8.653 \times "$	$0.116 \times "$	108	0.167	
28	28.3	1.01581	24.7	1.01680	23.7	1.01704	$9.675 \times "$	$0.103 \times "$	101	0.157	
29	28.0	1.01590	25.4	1.01662	23.5	1.01710	$9.439 \times "$	$0.106 \times "$	103	0.160	
30	28.7	1.01570	24.3	1.01692	23.7	1.01706	$10.698 \times "$	$0.0934 \times "$	97	0.150	
31	28.9	1.01563	26.3	1.01640	24.8	1.01676	$8.890 \times "$	$0.112 \times "$	106	0.164	
42. 8. 1	28.8	1.01566	26.5	1.01634	24.5	1.01686	$9.441 \times "$	$0.106 \times "$	103	0.160	
2	29.0	1.01560	24.5	1.01686	23.8	1.01704	$11.327 \times "$	$0.0883 \times "$	94	0.146	
3	29.3	1.01551	26.7	1.01628	24.5	1.01686	$10.621 \times "$	$0.0942 \times "$	97	0.150	
4	29.4	1.01548	26.4	1.01638	25.0	1.01670	$9.600 \times "$	$0.106 \times "$	103	0.160	
5	28.2	1.01584	26.5	1.01634	25.2	1.01666	$5.980 \times "$	$0.167 \times "$	129	0.200	
6	28.9	1.01563	26.7	1.01629	25.9	1.01651	$6.926 \times "$	$0.144 \times "$	120	0.186	
7	28.8	1.01566	25.7	1.01656	25.0	1.01670	$8.183 \times "$	$0.122 \times "$	110	0.171	
8	28.7	1.01570	25.2	1.01664	23.6	1.01708	$10.855 \times "$	$0.0921 \times "$	96	0.149	
9	29.2	1.01554	27.4	1.01608	26.8	1.01626	$5.668 \times "$	$0.176 \times "$	133	0.206	
10	28.8	1.01566	27.1	1.01617	26.4	1.01638	$5.667 \times "$	$0.176 \times "$	133	0.206	

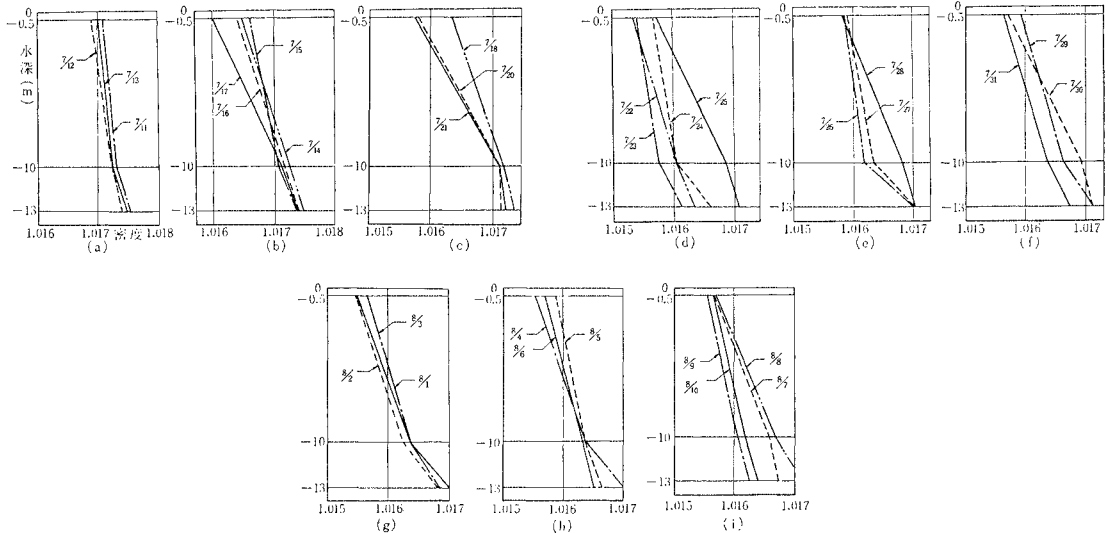


図-6 浦底湾内海水密度の鉛直分布

えられる。すなわち、式(16)の仮定は、この観測例の範囲では妥当であると考えてよい。このように仮定して β を計算すると表-1の④欄のとおりである。また、式(20)の U および d に、実際的な数値として、敦賀

原子力発電所取水口におけるものを参考にして、 $Ud = 0.7 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 、 $d = 12 \text{ m}$ をあたえて、 F の値を計算すると表-1の⑦欄に示すとおりである。これにより、この観測期間における F の値は、ほとんど $1/2\pi$ と $1/\pi$

の間に入っていると考えてよい。

表-2 [$\psi=0$]-曲線の座標

(4) 深層取水が可能となる取水口の限界高さ

前節でのべたように、浦底湾内における水温観測値と、敦賀原子力発電所深層取水口の設計流速と水深を用いてもとめた F の値は $1/\pi$ と $1/2\pi$ の間にある。したがって同発電所取水口の高さ B を 0 とした場合には、前述のように、水域上層によどみ層が生じて、深層取水の目的を果たすことができる。いま、海海底質が冷却水内に混入することを防止するため取水開口部を海底より上方に移すことを考える。上流水域では $1/2\pi < F < 1/\pi$ であるから、式(24)で $\psi=0$ とおいてえられる式

$$\eta = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-1/n) \cdot \sin n\pi\eta}{\exp(n^2\pi^2 - 1/F^2)^{1/2} | \xi |} \dots (25)$$

によってあらわされる曲線に沿って開口部直上流の水路底をかき上げると、前節でのべたように、水域上層のよどみ層は消失し、取水が全水域よりおこなわれることになり取水口の機能を果たさなくなる。図-5に示すように、せきの上流側形状を式(25)であたえられる [$\psi=0$]-曲線の頂部より上流側の部分にあわせて作り、曲線頂部に設けた開口部を通じて取水することを考えると、この場合の上流側水域内の流れは、水路底を [$\psi=0$]-曲線にあわせて作ったときの原点に設けた line sink への流れによって近似できるものと考えられる。このように考えると、 $1/2\pi$ と $1/\pi$ の間であたえられる F の値を一定に保ちながら、最初図-7(c)のように式(25)よりえられる η の最大値 η_{max} の位置にあったせきとゲートとともに次第に下方におろし、最後には図-7(a)のように水平な海底のごく近くにまで達せしめる場合、(c)図の状態では全水域から取水しているのに対し(a)図の状態では、同じ F の値において深層水のみ取水することになる。そして、これら両者の流れの中間的状态として、ゲートの位置によって図-7(b)の流れの状態が存在することが考えられる。すなわち、取水開口部の位置を海底より上方に置き、かつ、表層水の混入を防止しようとする場合には、せきの形状寸法を [$\psi=0$]-曲線の下

ξ	η					
	$F = \frac{1}{1.1\pi}$	$F = \frac{1}{1.2\pi}$	$F = \frac{1}{1.4\pi}$	$F = \frac{1}{1.6\pi}$	$F = \frac{1}{1.8\pi}$	$F = \frac{1}{1.95\pi}$
0.100	0.2368	0.2384	0.2424	0.2479	0.2566	0.2694
0.120	0.2477	0.2495	0.2542	0.2607	0.2710	0.2865
0.140	0.2558	0.2579	0.2633	0.2708	0.2827	0.3007
0.160	0.2615	0.2640	0.2701	0.2787	0.2922	0.3128
0.180	0.2652	0.2680	0.2749	0.2846	0.2999	0.3229
0.200	0.2670	0.2701	0.2779	0.2888	0.3059	0.3313
0.220	0.2669	0.2704	0.2791	0.2914	0.3105	0.3384
0.240	0.2650	0.2689	0.2788	0.2925	0.3138	0.3443
0.260	0.2613	0.2657	0.2769	0.2932	0.3158	0.3490
0.280	0.2557	0.2608	0.2734	0.2906	0.3167	0.3529
0.300	0.2483	0.2540	0.2682	0.2876	0.3166	0.3559
0.320	0.2387	0.2452	0.2614	0.2832	0.3155	0.3581
0.340	0.2267	0.2343	0.2528	0.2775	0.3134	0.3597
0.360	0.2121	0.2209	0.2422	0.2703	0.3103	0.3607
0.380	0.1941	0.2046	0.2295	0.2616	0.3064	0.3612
0.400	0.1717	0.1845	0.2141	0.2512	0.3015	0.3612
0.420	0.1431	0.1594	0.1956	0.2389	0.2957	0.3607
0.440	0.1029	0.1262	0.1729	0.2245	0.2890	0.3598
0.460	0.0000	0.0751	0.1441	0.2076	0.2812	0.3585
0.480	—	0.0000	0.1044	0.1875	0.2725	0.3569
0.500	—	—	0.0165	0.1630	0.2627	0.3550
0.520	—	—	0.0000	0.1318	0.2517	0.3528
0.540	—	—	—	0.0871	0.2394	0.3504
0.560	—	—	—	0.0000	0.2256	0.3477
0.580	—	—	—	—	0.2101	0.3447
0.600	—	—	—	—	0.1925	0.3415
0.620	—	—	—	—	0.1721	0.3382
0.640	—	—	—	—	0.1480	0.3346
0.660	—	—	—	—	0.1178	0.3308
0.680	—	—	—	—	0.0746	0.3268
0.700	—	—	—	—	0.0000	0.3227
0.720	—	—	—	—	—	0.3183
0.740	—	—	—	—	—	0.3138
0.760	—	—	—	—	—	0.3091
0.780	—	—	—	—	—	0.3043
0.800	—	—	—	—	—	0.2992
0.820	—	—	—	—	—	0.2940
0.840	—	—	—	—	—	0.2885
0.860	—	—	—	—	—	0.2829
0.880	—	—	—	—	—	0.2770
0.900	—	—	—	—	—	0.2709
0.920	—	—	—	—	—	0.2646
0.940	—	—	—	—	—	0.2580
0.960	—	—	—	—	—	0.2512
0.980	—	—	—	—	—	0.2440
1.000	—	—	—	—	—	0.2366
1.020	—	—	—	—	—	0.2288
1.040	—	—	—	—	—	0.2206
1.060	—	—	—	—	—	0.2120
1.080	—	—	—	—	—	0.2029
1.100	—	—	—	—	—	0.1933
1.120	—	—	—	—	—	0.1831
1.140	—	—	—	—	—	0.1721
1.160	—	—	—	—	—	0.1602
1.180	—	—	—	—	—	0.1471
1.100	—	—	—	—	—	0.1327
1.220	—	—	—	—	—	0.1163
1.240	—	—	—	—	—	0.0968
1.260	—	—	—	—	—	0.0721
1.280	—	—	—	—	—	0.0310
1.000	—	—	—	—	—	0.0000

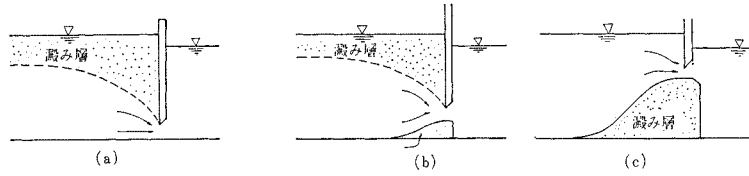


図-7 $1/2\pi < F < 1/\pi$ の場合の開口部位置と流れの関係

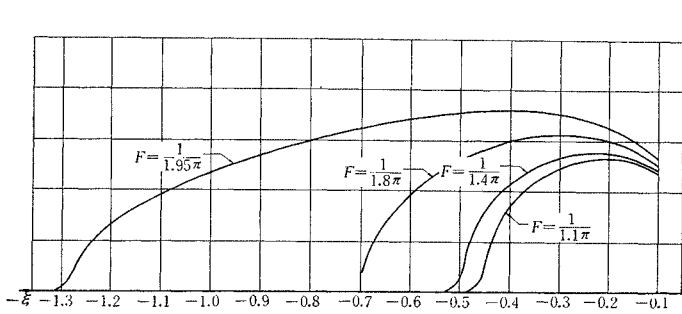


図-8 $[\psi=0]$ 曲線

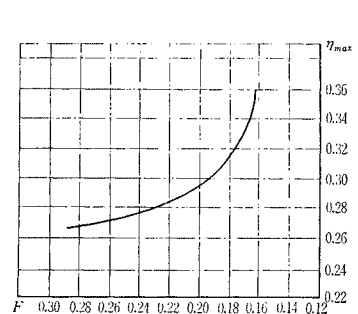


図-9 F と取水開口部の限界高さの関係

方におくように、あるいは、取水口高さを上記の η_{max} より下方におくようにする必要がある。式 (25) を用いて、 F をパラメーターとして、 $[\psi=0]$ -曲線をもとめると表-2、図-8 のとおりである。また、 $[\psi=0]$ -曲線の頂点の高さ η_{max} と F の関係は図-9 のとおりである。

に、幅 30 m × 高さ 4.65 m の開口部を設けることになっている。この開口部の大きさは、水理的な面からきまってくる、いわゆる純面積であるが、設計の実際面では、構造上、図-10 のように流れと直角の方向に一定間隔ごとに、カーテンウォール支持用の柱を鉛直に建てこみ

3. 取水開口部上端に設けるヒサシの効果

深層取水口を設計する場合、取水量と取水水温があたりえられると、貯水池（または海）の水温鉛直分布状態から、取水されるべき水層の深さがきまり、さらに、取水開口部の大きさがきまる。敦賀原子力発電所のカーテンウォール式深層取水口を例⁹⁾にとると、20 m³/s の冷却水を取水するのに、開口部入口における取水流速を 0.14 m/s として、水深 12 m の水域で水面下 7 m のところ

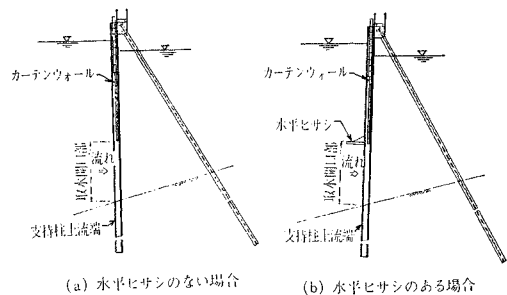


図-11 カーテンウォール式取水口横断面

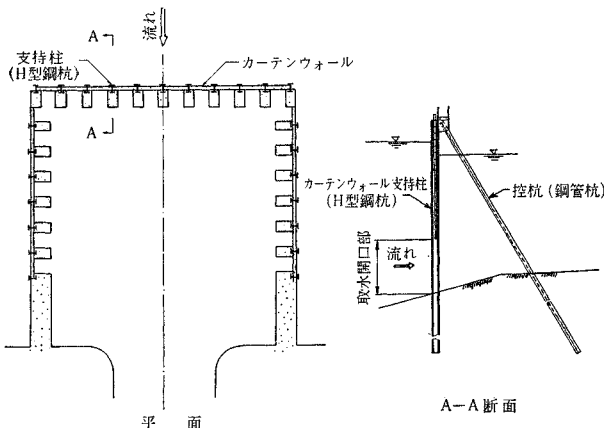


図-10 カーテンウォール式取水口

おのおのの支持柱間を取水開口部を残して、コンクリートその他の材料により閉鎖することが必要となる。敦賀原子力発電所や堺港火力発電所等では、支持柱として H 型鋼を使用している。H 型鋼の寸法は、敦賀発電所ではフランジ幅 500 mm × ウェブ高 500 mm であり、これを 3 m 間隔に 13 本用いている。また、堺港火力発電所では¹⁰⁾ I-394 mm × 405 mm のものを 4.40 間隔に使用している。開口部の寸法は、その直上流断面における流速によりきめられるが、開口部上流端を図-11 (a) のように支持柱の上流面と一致させると、カーテンウォール総幅は、損失水頭を無視して考えると、純開口幅に支持柱のフランジ幅分を加えたものとなる。敦賀発電所の場合、所要開口幅 30 m に対してカーテンウ

ォール総幅は 36 m となる。その結果として、カーテンウォールの工事費がふえるとともに、設備によりしめられる海水面積が増加する。工事費の減少をはかることはいかなる設備の計画、設計においても常に重要なことであるが、発電所地点によっては取水口設備の占有水面積をできるだけ少なくすることが必要となることがある。こうした場合には、図-11 (b) のように支持柱の上流面から流れと反対方向に、片持ばり構造の水平ヒサシをのばして、開口部を支持柱より上流側に移すことにより、支持柱の存在が開口部の流れにおよぼす影響を緩和することができる。以下、カーテンウォール総幅とヒサシの長さとの関係を、水理学的な見地から検討する。

(1) カーテンウォール支持柱上流水域の流れの式

支持柱上流水域内の流速分布がわかると、水平ヒサシが有効にはたらくために必要なヒサシの長さをもとめることができる。しかし、この流速分布をげん密にもとめることは容易ではないので、つぎのように考える。すなわち、支持柱に H 型鋼を用いるものとし、フランジが流れと直角な方向におかれるものとする、その上流水域においてもっとも顕著な流速変化が生じるのは、フランジ中心を通りフランジに直角な線上においてであるので、この線にそった流速分布を基にして、ヒサシの長さをきめれば、安全側の設計となる。支持柱の H 型鋼を幅 C の平板として取扱い、この平板を、一様流速 U を有する流れに直角におくものとする。図-12 のように、平板の中心 A に原点をとり、AB を x 軸に、また流れの方向に y 軸をとると任意点 z は、

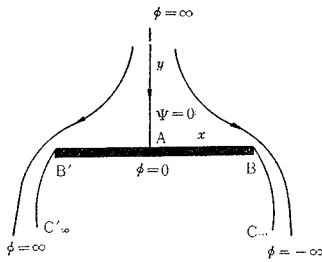


図-12 z-平面

$$z = x + iy \quad \dots\dots\dots(26)$$

によりあたえられる。φ を等ポテンシャル関数、ψ を流れ関数をあらわすものとして、

$$w = \phi + i\psi \quad \dots\dots\dots(27)$$

であたえられる w-平面を考え、A 点で φ=0、y 軸に沿って ψ=0 となるようにすると、式 (27) であたえられる w-平面は図-13 のようになる。さらに、次式であらわされる Schwarz-Christofel 変換を行なうと、

$$\frac{dw}{d\zeta} = K\zeta, \quad w = \frac{1}{2} K\zeta^2 \quad \dots\dots\dots(28)$$

z-平面上の全水域は、図-14 のように、ζ-平面上の上半

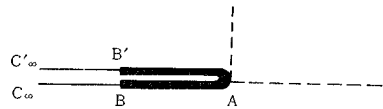


図-13 w-平面



図-14 ζ-平面

分の領域に変換される。この場合、z-平面、w-平面、ζ-平面の間には、

$$-U \frac{dz}{dw} = \frac{1}{\zeta} + \sqrt{\frac{1}{\zeta^2} - 1} \quad \dots\dots\dots(29)$$

の関係がある。さらに式 (28) と (29) より

$$U \frac{dz}{d\zeta} = K(-1 - \sqrt{1 - \zeta^2}) \quad \dots\dots\dots(30)$$

となる。式 (30) を B' から B まで、すなわち、ζ=-1 から ζ=1 までの間で積分すると、

$$UC = -K \int_{-1}^1 (1 + \sqrt{1 - \zeta^2}) \cdot d\zeta = -K \left(2 + \frac{1}{2} \pi \right) \quad \dots\dots\dots(31)$$

となる。これにより

$$K = -\frac{2UC}{\pi + 4} \quad \dots\dots\dots(32)$$

をうる。式 (32) を式 (28) に代入すると、

$$w = -\frac{UC\zeta^2}{\pi + 4} \quad \dots\dots\dots(33)$$

となる (以上たとえば Milne-Thomson¹¹⁾)。

式 (33) を式 (29) に代入すると、つぎの関係をうる。

$$-U \cdot \frac{dz}{dw} = \pm i \sqrt{\frac{UC}{(\pi + 4)w}} + i \sqrt{\frac{UC}{(\pi + 4)w} + 1} \quad \dots\dots\dots(34)$$

w=0 のところで、dw/dz=0、したがって、dz/dw = ∞ でなくてはならないことから、式 (34) の右辺第 1 項の符号は正となる。よって、

$$\frac{dz}{dw} = -\frac{i}{U} \left[\sqrt{\frac{a}{w}} + \sqrt{\frac{a}{w} + 1} \right] \quad \dots\dots\dots(35)$$

ここに

$$a = \frac{UC}{\pi + 4} \quad \dots\dots\dots(36)$$

平板の上流側 y 軸上では、dz=-idy であり、また ψ=0 であることから、w=φ、したがって、dw=dφ となる。これらの関係を式 (35) に代入すると、平板上流の y 軸上の水域では、

$$\frac{dy}{d\phi} = \frac{1}{U} \left[\sqrt{\frac{a}{\phi}} + \sqrt{\frac{a}{\phi} + 1} \right] \quad \dots\dots\dots(37)$$

をうる。式 (37) より、上記水域内の y 軸上の任意の点における流速 u は、次式によりあたえられる。

$$\frac{u}{U} = \sqrt{\frac{a}{\phi} + 1} - \sqrt{\frac{a}{\phi}} \dots\dots\dots(38)$$

また、式(37)を ϕ で積分して、 $\phi=0$ のとき $y=0$ であることを考慮すると、

$$y = \frac{1}{U} \left[2\sqrt{a\phi} + \sqrt{a\phi + \phi^2} + a \log \left(\sqrt{\frac{\phi}{a}} + \sqrt{\frac{\phi}{a} + 1} \right) \right] \dots\dots\dots(39)$$

となる。支持柱上流水域内の y 軸上の任意の点の流速は、 a の値があたえた場合、式(39)より ϕ を計算し、これを式(38)に代入することによりもとめることができる。

(2) ヒサシの長さとかーテンウォール幅の関係

式(38)、(39)より明らかのように、支持柱の影響が全くない、つまり、 $u/U=1$ となる水域までヒサシをのばすものとする、その長さは完全流体の場合には無限大となる。このことは、実際面への応用において無意味である。そこで、

$$1 - \frac{u}{U} = \epsilon \quad \text{ただし} \quad 0 < \epsilon < 1 \dots\dots\dots(40)$$

とおき、式(38)を上式に代入すると

$$1 - \epsilon = \sqrt{\frac{a}{\phi} + 1} - \sqrt{\frac{a}{\phi}} \dots\dots\dots(41)$$

となる。上式を ϕ についてとくと

$$\phi = \frac{4a(\epsilon^2 - 2\epsilon + 1)}{\epsilon^4 - 4\epsilon^3 + 4\epsilon^2} \dots\dots\dots(42)$$

をうる。 $\epsilon < 1$ であることから、上式の分母にふくまれる ϵ^4 の項を省略すると、

$$\phi = \frac{a(1-\epsilon)}{\epsilon^2} \dots\dots\dots(43)$$

となる。式(39)と式(43)あるいは式(42)を用いて、水平ヒサシを $(U-u)/U=\epsilon$ の位置までのばした場合の、ヒサシの長さをもとめることができる。また、ヒサシ先端部水域における流速分布は式(29)、式(33)よりもとめることができるが、設計の実際面では図-15のように仮定しても大きな支障はないと考えられる。いま、フランジ幅を C とし、カーテンウォール総水平幅

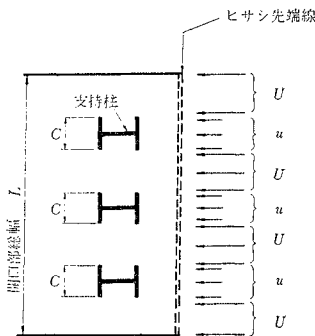


図-15 開口部先端水域内の流速分布の近似

内でしめるフランジの合計幅を nC とする。またカーテンウォール総幅を L 、流れている水域の深さを d 、取水量を Q とすると、

$$Q = nCud + (L - nC)Ud \dots\dots\dots(44)$$

をうる。一方、支持柱がないものとした場合の取水口純開口幅を L_0 とすると、

$$Q = UdL_0 \dots\dots\dots(45)$$

となる。式(44)、(45)をひとしいとおいて、

$$L = L_0 + nC\epsilon \dots\dots\dots(46)$$

の関係をうる。すなわち水平ヒサシを $(U-u)/U$ の水域までのばすと、カーテンウォール総幅は純開口幅より $nC\epsilon$ だけひろくなる。

数値計算例として、 $C=0.5$ m、 $U=0.15$ m/sec、 $\epsilon=0.3$ とした場合のヒサシの長さ y をもとめてみる。式(36)より $a=0.0105$ をうる。この値と $\epsilon=0.3$ を、式(43)に代入すると $\phi=0.0815$ となる。以上でえられた、 a と ϕ の数値を式(39)に代入すると、ヒサシの長さは1.09 mとなる。

4. おわりに

以上、復水器冷却取水設備の設計に関連した二つの問題、すなわち、(i) 取水開口部の海底よりの高さの流れの関係、(ii) 取水開口部にとりつける水平ヒサシが開口部構造物の総幅にあたる影響について検討を加えた。その結果、深層取水を可能にしながら取水開口部を上方に移しうる限界高さ F 値の関係として図-9をえた。また取水開口部天端にとりつける水平ヒサシの所要長を計算するための式(39)、(42)、(43)をえた。カーテンウォール沿いには水表面から取水開口部に向う鉛直流が存在することが知られているが、水平ヒサシはこの鉛直流を阻止するためにも有効であると考えられる。

水理構造物の設計にあたり、数値模型や通常の模型実験による解決法が一般に用いられているが、これらに解決をもとめる以前に、経験と既存の理論に基づいた予備的検討を十分に行ない、ある程度、最終的な姿を予知することが、筆者ら実務にたずさわる技術者にとって、常に基本的な態度であるべきであると考えている。稿をおくに当り、有益なアドバイスをいただいた巽友東京工大助教授 日野幹雄博士に厚く感謝の意を表したい。また、筆者が水理学への関心をふかめる過程において、種々指導をいただいた東京大学名誉教授 本間 仁博士、埼玉大学教授 嶋 祐之博士にも紙面をかりてお礼を申し上げる。

参考文献

1) C.S. Yih: "On the flow of a stratified fluid" (1958) Proc. Third Nat. Cong. Appl. Mech.

- 2) C.S. Yih, W. O'Dell, W.R. Debler : "Prevention of stagnation zones in flows of stratified or a rotating fluid", Proc. of 4th Nat. Congr. Appl. Mec. (1962).
- 3) W.R. Debler : Stratified flow into a line sink", Proc. of A.S.C.E. July 1959.
- 4) 千秋・和田 : "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年8月)
- 5) 千秋・和田 : "堺港火力発電所冷却水深層取水に関する水理学的検討", 電力中央研究所報告, 土木 64008 (1964年6月)
- 6) 千秋・藤本 : "冷却水深層取水工の取水特性", 電力中央研究所報告, 土木 66079 (1967年3月)
- 7) D.F. Harleman R.A. Elder : "Withdrawal from two-layer stratified flows", Proc. of A.S.C.E. July 1965
- 8) H. Hom-ma, K. Horikawa : "Experimental studies on the cooling water intake system for the atomic power plant at Tokai, Japan", Coastal Engineering in Japan, Vol. V, 1962.
- 9) Manabe, Watanabe, Wada : "Study of recirculation of cooling water of Tsuruga nuclear power station on Urazoko Bay", Coastal Engineering in Japan (1966).
- 10) 千秋 : "火力発電所冷却水の深層取水", 発電水力講習会テキスト, 第8回, (昭和41年).
- 11) L.M. Milne-Tohmson : "Theoretical Hydrodynamics" (1960) the Macmillan Co.

(1968.1.23・受付)