

工業用水の取放水問題

和田 明*・片野 尚 明*

1. ま え が き

沿岸海域における海水利用の問題は沿岸工業地帯の造成、都市排水、工場排水による汚染の問題に関連して関心がもたれている。最近に至って、これら汚染度合が工業の発達と人口の増加にともなわばく大な量に達し、環境衛生、沿岸資源および産業基盤としての水資源に対してかなり重大な影響をおよぼすようになっているのが現状である。

今後、沿岸工業地帯の造成や外かく堤防方式による港や掘込港の建設などによって工場進出にともない、海水の利用度が一層高まることは想像に難くない。工業用水は海水と淡水に分けると海水が多く6割程度であり、海水の大部分が冷却用水に使用される。本文では発電所冷却水の取放水問題に主眼をおいて議論を進める。

2. 沿岸海域の希釈混合過程

沿岸海域に直接工業廃水を放出した場合、その拡散の様相は複雑であり、かつ時間的にも変化する度合が大きいことが予想される。工業廃水あるいは汚濁源となる河川水の拡散形態は基本的には密度差、流動、量等によって定められるが、廃水の拡散範囲と希釈を支配する要因のうち自然的なものとしては地形、水深、潮流、吹送流、密度分布、湾内外水の置換等があり、これらは人工作用で根本的に変えることはできず、せいぜい放出時の潮汐の状態や風を考慮したり、取放水口の位置を選択するくらいのものであるが、人為的な要因に対しては海の特徴性を最大限に利用すべきであろう。もとより画一的な放出法があるわけではなく、現場に最適の方法をとるよう工事計画の際検討すべき事項の一つでもある。

湾内の水温や廃水の濃度分布を支配する物理的要因の主なものとは対象とする海域に存在する海水の流動状況であるといえよう。この海水流動は大きく分けてつぎのようになる¹⁾。

(I) 流れ(湾内では循環) 沖合水の流入、吹送流および地形によるこれらの流れの局所的変化、潮流流、河川水流入および工業廃水放出による流れ(密度流)、対流

(II) 海水の混合過程 渦動拡散、潮汐混合、下層

からの海水加入、対流による混合

渦動拡散に寄与する渦動の大きさを $|U_e|$ 、潮汐混合に寄与する潮流の大きさを $|U_t|$ 、下層水加入に寄与する河川水の流れの大きさを $|U_r|$ と考えると、これらの大小によってある程度、湾の特性(海水の循環や拡散混合の過程)を察知することができる。

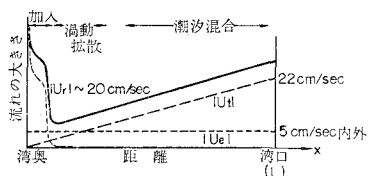
また $|U_e|$ は湾固有の流れに対応すると考え、ほぼ湾内では一定と考える。当然、 $|U_t|$ 、 $|U_e|$ 、 $|U_r|$ はそれぞれ湾のスケール、潮汐の大きさ、河川流量の大きさに対応して変化するものであるが、大まかにそれぞれが湾の地域において持つ役割を模式化すると図-1に示すように湾奥から湾口にかけてそれぞれの大きさを地域的に特徴づけることができる。かりにこのような湾が存在するとすると、湾の地域によって海水の循環や拡散混合の過程がことなり、 $|U_t|$ 、 $|U_e|$ 、 $|U_r|$ の大きさ、したがって湾内の流動特性の変化によって諸要素の動的な分布様式が変化することが考えられる。

このような湾内水循環機構の問題は従来 estuary の流れの構造の問題に関連して論じられてきた。本現象はさまざまな複雑な境界条件を受ける非線形方程式を解くことによって明らかにすることができる。湾内水の循環機構を鉛直方向、平面的に究明しておくことは工業用水の利用、沿岸漁業(養殖業も含めて)関係者に対してきわめて重要な情報を与えることができる。わが国には純粋な estuary が数多く存在しないのでこの面の研究はあまり行なわれていないが、今後、産業廃水による海域環境汚染の問題と関連してさらに発展させなければならない。

3. 沿岸域に放流される淡水系の廃水拡散

ここでは、用水として淡水を利用した工場の廃水とか河川水が汚濁源となっている場合の問題を論ずる。廃水の比重は海水と比較してむしろ淡水に近く低比重であり、したがって希釈をうけつつ海面を拡がり、海水との

図-1 流れの湾内地域的变化図
(平野:1966 による)



密度差がある限度になるまで海面に廃水の拡散域を形成する。

平坦な海岸線をもつ海域に放流された廃水は原則的な形としては図-2のように拡散する。図に示すように希釈するための海水は下から加入し、また拡散域の前縁部分は外から来た海水にけずり取られるように拡散域の下に海水中に混入してゆく。この拡散域の前縁には潮目ができることがしばしば認められている。廃水を含む水塊の外縁において、廃水が海水により60~100倍に希釈された状態にある。廃水拡散域の広さは廃水量と相関がある。廃水量 $x(\text{m}^3/\text{day})$ と影響面積 $y(\text{m}^2)$ との関係は新田の永年にわたる調査結果²⁾ にもとづいてつぎの実験式が提案されている。

$$\log y = 1.2261 \log x + 0.0855 \dots \dots \dots (1)$$

もし、河川水と廃水量と一緒に海面に流出しているなら、河川水量+廃水量がこの水量となる。

最近、平野(1966)は廃水の放流にともなう拡散を希釈混合の理論で解析している³⁾。廃水の希釈、混合の過程が初期の段階では海水加入(主として下層からの)による混合が渦動拡散によるものより大きいという考えのもとに、その関係式が導かれている。半無限海域を想定すると放出された廃水は、海域に恒流や潮汐流がないとすると、希釈が主として海水加入によって起こっているとみなすことができるならば、希釈倍率 n の点の流速は次式で示される。

$$u_n = n \cdot Q / \pi \cdot L_n \cdot h \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 Q は廃水量、 L_n は放出口から n 倍にうすまった表層水までの距離、 h は表層水の厚さである。

一方、影響域内における濃度分布は海水加入の状態と深い関係があるのでこれを理論的に求めることは困難である。そこで希釈倍率 n と放出口からの距離 L_n との間にはつぎの関係式が成立するものと仮定した。

$$L_n = \frac{n-1}{a-1} (L_a - L_1) + L_1 \approx \frac{n-1}{a-1} L_a \dots \dots (3)$$

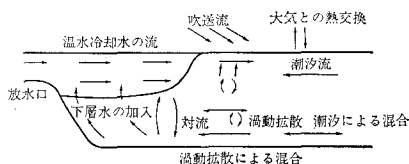
ここに、 a は任意の希釈率を示す。海水加入による希釈条件は

$$F = \frac{u_n}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} h}} > 1$$

であるとして、式(2)、(3)を考慮に入れてその影響面積は次式で表わされる。

$$\log A_a < 2 \log Q + \log \left(\frac{(a-1)^2}{2\pi} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_0} \right)$$

図-2 湾内における流れの状況の一例



$$\cdot \frac{1}{gh^3} \cdot \frac{n^3}{(n-1)^2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 A_a は希釈倍率 a のときのそれ以上の濃度を示す面積、 ρ_2 は海水密度、 ρ_0 は廃水密度、 g は重力の加速度、 h は廃水の厚さ、 n は $n^3/(n-1)^2$ の最小値を計算することにより、 $n=3$ である。

式(4)は新田の実験式とその形が同じとなり、 $a=10$ 、 $\rho_0=10$ 、 $\rho_2=1.023$ 、 $h=1\text{m}$ とした場合にかなり良い近似を示している。

4. 数値模型実験による結果と実測値との比較

冷却水を湾内へ放出したときの湾内における流速分布と水温分布の算定に当っては、平面状2次元の取り扱いができるとの仮定をたて、放出水の力学的挙動と熱拡散分布(海面からの表面冷却効果も含む)とを同時に考慮してデジタル・コンピュータでこれらの値を算定する、いわゆる数値模型実験の手法が開発されている⁴⁾。

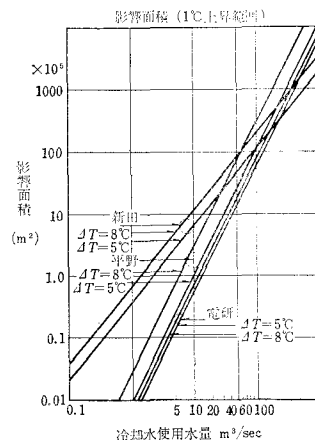
この計算法の最も基本的な適用例として、温水冷却水を半無限静水海域に放出したときの流速と水温の分布を数値計算し、放流に伴う流れおよび海域水温上昇の影響範囲と冷却水使用水量、放流流速との定量的な関係が求められている。

その結果が図-3に示してある。

この熱拡散計算の妥当性を検証すべく、湾内に設置された発電所の放水による水温実測分布と計算値を比較した例がある。それによると、放水口付近ではおよそ 1°C 程度の差が認められた。これはおそらく、実際には冷却水の表層流出に伴って下層水の湧昇がおきているにもかかわらず数値計算においては下層冷水の供給を考えていないことに起因しているものであろう。しかし放水口より60m以上沖合になると混合は渦動拡散、潮汐混合が主役を演じるようになるので実測値と計算値とがよく合致している結果が得られている(図-3参照)。

後述するように、冷却水放水による流れと熱拡散との

図-3 冷却水流量と水温上昇影響面積



減少するので加入は減少し、表層厚さの増加割合は小さくなる。さらにある距離を経過したところでは密度差と流れの状態に依存するが、表層厚さはほとんど変化なく表層混合層の乱れも消失し、2層間の混合も生じなくなるであろう。

質量欠損および下層水加入に対する式はつぎのように書ける (Ellison & Turner (1959))⁵⁾。

$$Uh \Delta = A = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{1}{U} \frac{d}{dx} (Uh) = E \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $U(x)$ は表層の平均速度、 h はその厚さである。また、

$$Uh = \int_0^H u dz, \quad U^2 h = \int_0^H u^2 dz,$$

$$A = \int_0^H \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \right) g u dz = Uh \Delta$$

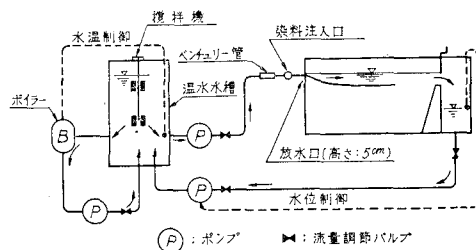
$u(x, z)$ は x 方向の速度、 ρ_1, ρ_2 はそれぞれ表層、底層の密度、 E は下層水加入係数で内部 Froude 数 (或は Richardson 数) の関数である。

Ellison & Turner (1959) は乱流加入についての実験的研究を行ない、十分大きい Re 数に対して下層水加入係数 E は内部 Froude 数 F_i のみの関数であること、および係数 E は F_i の減少と共に急激に小さくなり、 F_i がおよそ 1.2 以下のとき無視できることを結論している。図-11 は Ellison & Turner の実験結果であり、2層間で密度差がない場合すなわち $R_i = 0$ に対しては $E = 0.075$, $R_i = 0.5$ に対して $E = 0.01$ になる。これらの結果は $F_i > 1$ で $0 < R_i < 1$ のときに適用できる。

(3) 実験装置および実験方法

図-6 は実験装置の概略を示す。実験装置は大別して、ボイラーと温水水槽から成る温水供給部分、温水を実験水槽へ導くポンプ、放水路部分、鉛直二次元拡散水槽および温水の帰還部分で構成される。温水供給装置は最大 50°C 、 3 l/sec の流量を供給する能力を有し、放水口出口の水温変動は約 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ である。実験水槽の長さは 25 m で反射を軽減させるべく水槽末端に導流板が設置されてある。また、水槽は透明観測の便宜のため片側を透明アクリル板とした。流速の測定は表層の温水流れおよび下層冷水の流れに対して電界型小型流速計や染

図-6 模型装置概略図



料トレーサの動きを連続写真撮影することにより求めた。水温の測定はサーミスタ型多点水温計を用いた。なお、本実験装置には下層水加入量を濃度法によって求めるための染料の注入装置が設置されている。

水理実験は図-7 に示すように表層放出方式を取り、放出流量は $0.5 \sim 2.5 \text{ l/sec}$ 、放出水温は温排水を受ける水槽内の水温よりも約 $10 \sim 25^\circ\text{C}$ 高くし、実験条件範囲での放出口での Reynolds 数は $3 \sim 15 (\times 10^3)$ 、内部 Froude 数は $0.8 \sim 6.5$ である。放出口で放出流速が十分均等な分布になるよう、放水路に整流格子 2 個が取り付けられている。

図-7 記号の説明

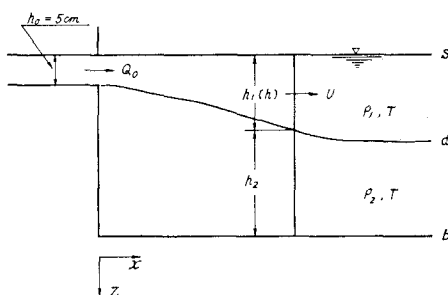


図-8 放水口下流における表層流速の変化

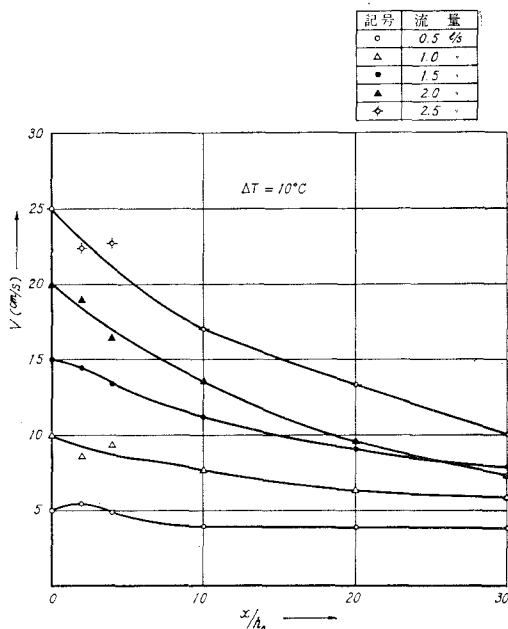


図-8 および 9 は放水温と水槽内の水温差 $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ ($\Delta\rho \approx 0.003$) に対応する実験結果であり、それぞれ放水口断面より下流における表層流速および表層水深の変化を示したものである。実験条件範囲に対する放水口出口における内部フルード数 F_i は表-1 のようになる。

実際の発電所では冷却水は取水された後、復水器で昇

図-9 放水口下流における表層水深の変化

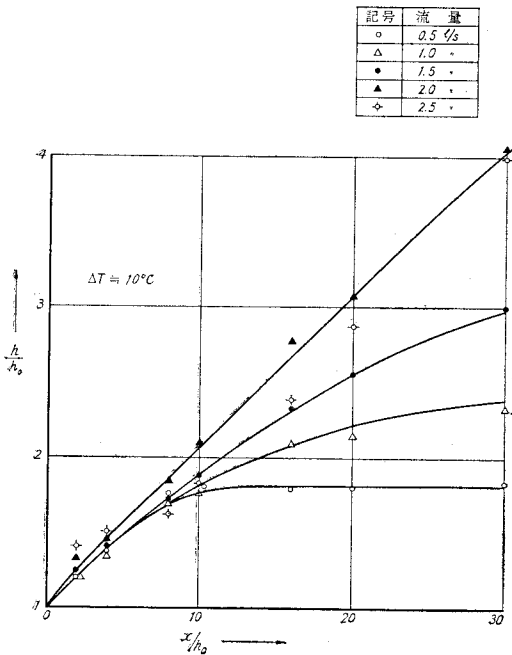


表-1 放水口出口での内部フルード数 (実験値)

実験条件	放出流量 Q (l/sec)	放出流速 u_0 (cm/sec)	放水口出口の値	
			Fi	Ri
I ($\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$)	0.5	5	1.30	0.59
	1.0	10	2.61	0.15
	1.5	15	3.91	0.07
	2.0	20	5.22	0.04
	2.5	25	6.52	0.02
II ($\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$)	0.5	5	0.94	1.14
	1.0	10	1.88	0.28
	1.5	15	2.82	0.13
	2.0	20	3.76	0.07
	2.5	25	4.70	0.05
III ($\Delta T \approx 25^\circ\text{C}$)	0.5	5	0.83	1.47
	1.0	10	1.65	0.37
	1.5	15	2.47	0.16
	2.0	20	3.30	0.09
	2.5	25	4.12	0.06

表-2 発電所放水口出口での内部フルード数

放出流速 (m/sec)	放水口の深さ (m)	Fi
0.5	2	2.06
0.5	3	1.68
1.0	2	4.12
1.0	3	3.37

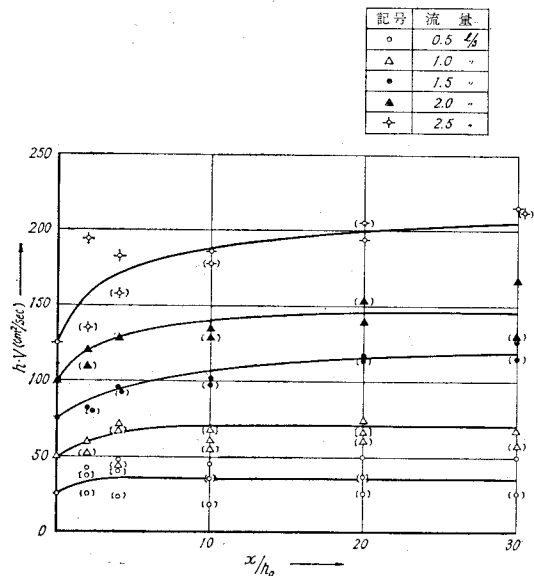
温され海域水温よりも $4 \sim 7^\circ\text{C}$ 程度高い温度で放流される。発電所放水口出口での内部フルード数は放流水と海域水温との差 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ に対して表-2 の値になる。

このことからして現実に取り得る放水口での内部フル

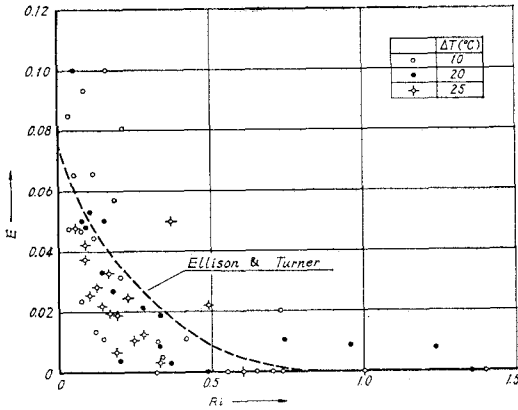
ード数は $2 \sim 4$ 位の値であると考えることができる。表-1 の実験条件 I が比較的現実の現象に近いものと思われるが放出流量が $Q = 2.0 \text{ l/sec}$ 以上になれば実際の放流状態とは異なった現象を示すことが予想される。さて図-8 および 9 における表層流速とは表層での平均値を意味し、また表層水深は流速分布と水温分布から求められるが、この両者の値に差があり、ここでは流速分布の不連続部分までの深さを採っている。この決定は放水口上流より染料をトレーサとして放出せしめ、2層境界面に当る部分を写真判定によってなされている。水槽幅 (20 cm) 方向における流速の平面分布形状は流速が小さいときにはほぼ放物線形状を呈し、流量が増すにしたがって偏平化する。図-8 から明らかなように、流速の変化割合は表層水深のそれにくらべて大きく、実験流量の範囲に対して $x/h_0 > 30$ (h_0 は放水口高さ) になれば小さくなっている。また、Richardson 数を算定する際必要となる水温の値は表層での鉛直方向に平均した値を用いている。図-10 は放水口断面より下流域における表層の流量増加割合を示したものである。流速と表層水深の変化割合から予期されるように下層から上層への加入量は放出条件によってその変化率は異なるが下流方向に急激に減ることがわかる。実際の現象に近いと思われる放出量 $Q = 0.5 \sim 1.5 \text{ l/sec}$ (放水口出口での Fi は $1.3 \sim 3.9$) の場合においては、放水口断面より $x/h_0 = 10 \sim 20$ 沖合で下層水の entrainment が生じていないことがわかる。

さて、下層水の上層への加入量を論議する際、大局的にみて 2 つの方法が考えられる。その 1 つは流れの連続条件から求めるものであり (I)、他の 1 つは熱量保存の

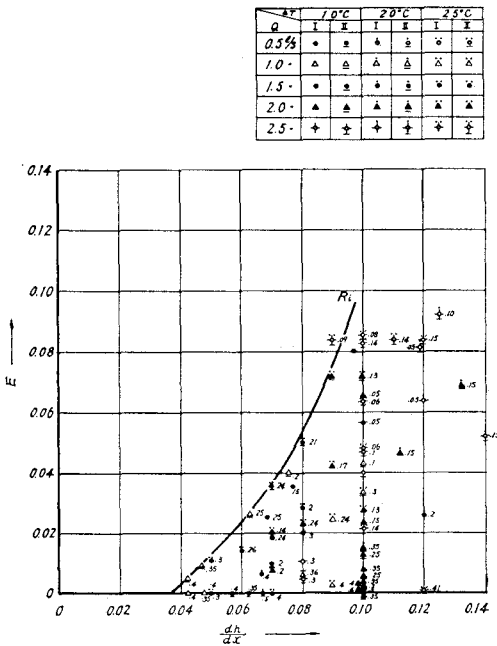
図-10 放水口下流における表層流量の変化



図—11 下層水加入量 E と R_i 数との変化



図—12 R_i をパラメーターとした dh/dx と E との関係



面から検討するものである(II)。それは熱拡散式より、流れに沿う拡散項および熱収支項を小さいとして無視すればつぎの式が得られる。

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E \cdot |u|}{h_1} (T - T_b) \dots \dots \dots (7)$$

この関係式から下層水加入量を求めることができる。

図—11 は下層水加入係数と Richardson 数との関係を示している。同図には Ellison & Turner の実験結果が付記されているが、われわれの実験値とほぼ同じ傾向にある。しかし、Richardson 数と下層水加入係数 E との間には一義的な関係のみが存在するとは思われない。すなわち、下層水加入量は Richardson 数の同じ値に対して、表層水深つまり内部境界面の勾配の大きさによって異なることが予想される。図—12 はこれを意図して整理した結果である。

さて、下層水加入係数 E は内部境界面の勾配の増大、Richardson 数の減少に伴って増大することがわかる。 E は同一の dh_1/dx 値に対して R_i 数の値によって変化するようである。このことは E の定義から当然の帰結であるが下層水加入条件の判定という観点からみれば意味がある。本実験範囲から推定すれば、 $dh_1/dx < 0.04$ であれば、Richardson 数の値に関係なく下層水の上層への加入はないものと結論できる。

6. 下層冷水の供給を考えた海域での水温上昇 影響範囲の推定計算

火力・原子力発電所から放出される冷却水の水温が海域へおよぼす影響が重要な問題となっている現在、放流温水の拡散機構の一部を明らかにし、排水口付近の水温分布の算定をより高い精度で行なうことが必要である。

さて式 (6) で示した関係式は 3 次元廃水拡散の場合にも適用可能である。すなわち、連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

において、 x —一定の断面で積分すると次式を得る。

$$\frac{d}{dx} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} u dy dz - 2 \int_0^{\infty} v_* dz - \int_{-\infty}^{\infty} w_* dy = 0 \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 v_* 、 w_* はそれぞれ、 $y \rightarrow \infty$ 、 $z \rightarrow \infty$ での周囲の流体における速度である。式 (8) は容量保存関係を示しており、 x 方向の流量変化 $Q = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u dy dz$ が y 、 z 方向の静止流体を加入する割合に等しいことを意味する。したがっていま廃水塊の任意断面での幅およびその深さを b 、 h とすれば廃水塊の周囲 ($b+2h$) から加入速度は次式によって表わすことができる。

$$\frac{dQ}{dx} - 2v_*h - v_*b = 0 \dots \dots \dots (9)$$

下層水加入係数 E は加入速度と流れの特性速度（たとえば最大速度）との比で表わされる。

$$E = \frac{dQ/dx}{(b+2h)u_{\max}} = \frac{d}{dx} \frac{(bhu_{\max})}{(b+2h)u_{\max}} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 h 、 b はそれぞれ特性水深、特性幅であり、

$$h = \int_0^{\infty} u dz / u_{\max},$$

$$b = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u dy dz / h \cdot u_{\max} = Q / u_{\max} \cdot h$$

で表示できる。

現地観測および数値解析の結果明らかにされた湧昇流現象を加味した計算を半無限海域を対象にして 2 層モデルによって行なった。

本問題の基礎方程式は上層における拡散方程式を入れて上下層について以下に示す 7 元非線形方程式を解かねばならない。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{上層} \\ \text{連続式: } \frac{\partial}{\partial x_j} \int_d^s \rho_1 u_j dz = -\rho_1 \frac{\partial}{\partial t} (s-d) + E \cdot |u| \\ \text{運動方程式: } \frac{\partial}{\partial t} \int_d^s \rho_1 u_i dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_d^s \rho_1 u_i u_j dz - f \int_d^s \rho v dz = -\rho_1 g (s-d) \frac{\partial s}{\partial x_i} + A_h d^2 \int_d^s \rho_1 u_i^2 dz \\ \quad + A_z \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_s - A_z \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_d \\ \text{熱拡散方程式: } \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_1 u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_j}{\rho_1} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) + \frac{Q_0}{\rho_w C_w H_w} \end{array} \right. \\
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{下層} \\ \text{連続式: } \frac{\partial}{\partial x_j} \int_b^d \rho_2 u_j dz = -\rho_2 \frac{\partial d}{\partial t} - E \cdot |u| \\ \text{運動方程式: } \frac{\partial}{\partial t} \int_b^d \rho_2 u_i dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_b^d \rho_2 u_i dz + f \int_b^d \rho_2 u dz = -g(d-b) \left[\rho_1 \frac{\partial s}{\partial x_i} + (\rho_2 - \rho_1) \frac{\partial d}{\partial x_i} \right] \\ \quad + A_h d^2 \int_b^d \rho_2 u_i^2 dz + A_z \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_d - A_z \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_b \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

.....(11)

ここに、 f : Coriolis のパラメーター、suffix の 1, 2 はそれぞれ上層、下層を意味する。また $|u|$ は $\sqrt{u^2 + v^2}$ とかける。

計算結果の一例が 図-13 および 14 に示してある。結果は冷却水放出後約 30 分経過したときの流れおよび水温の場を示したものである。図-13 から下層水の供給および周囲流体の冷却水表面層流れへの加入状況が察知できる。水温分布図(図-14) からみても希釈過程が放水口付近での下層水加入、周囲流体との渦動拡散、大気との熱交換のほかに、放水口近傍での周囲海水の entrainment にも影響されることがわかる。図-14 の点線は運動方程式内の慣性項を無視したときの解であり、放水口近傍での周囲表面層水の entrainment は流れの非線形性にもとづいていることがわかる。

7. 入江内の水温拡散分布を支配するタイダル・フラッシング作用

この問題を解決するためには、沿岸海域における潮流構造の実態とその解明が必要であり、実際の沿岸における流れの実測とともに潮汐モデル計算方式を確立しなければならない。冷却水の問題に関連して、筆者らはアナコンの手法による平均的な考え方に立脚してこの問題を処理してきた。しかし局部的な流れ、水温分布を算定するためには、デジコンによる 2 層潮汐流の計算方式が必要とされる。

6. で述べた 2 層モデル方程式に基づいて、潮汐を加味して閉そくした水域内における冷却水再循環の計算を実施した。計算境界条件として次の項目が考慮されている。(1) 港口で実際の潮位条件を与える。(2) 取水口においては潮汐の干満によって表面層温水混入率が変化する。取水に伴う 2 層境界面の低下現象をも考慮する。(3) 放出流は上層に放出される。(4) 冷却水の復水器通過後の温度上昇は一定とする。計算結果の一例が 図-15~16 に示されている。図-15 および 16 は干

図-13 下層水加入を考慮した流速分布

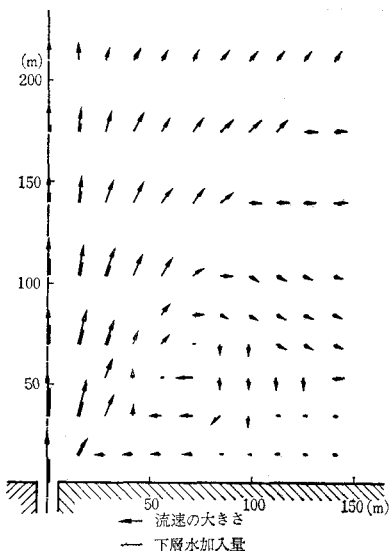


図-14 下層水加入を考慮した水温分布

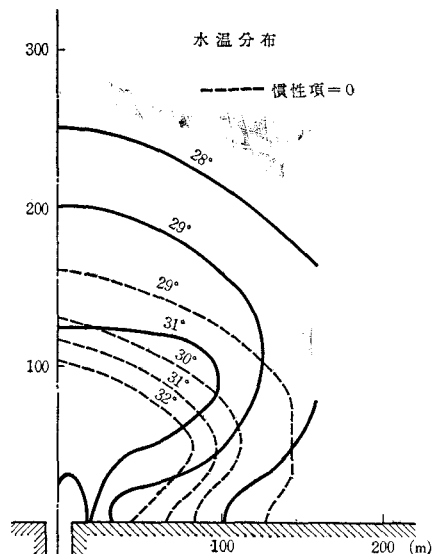


図-15 表層, 底層での流速分布 (60 分後)

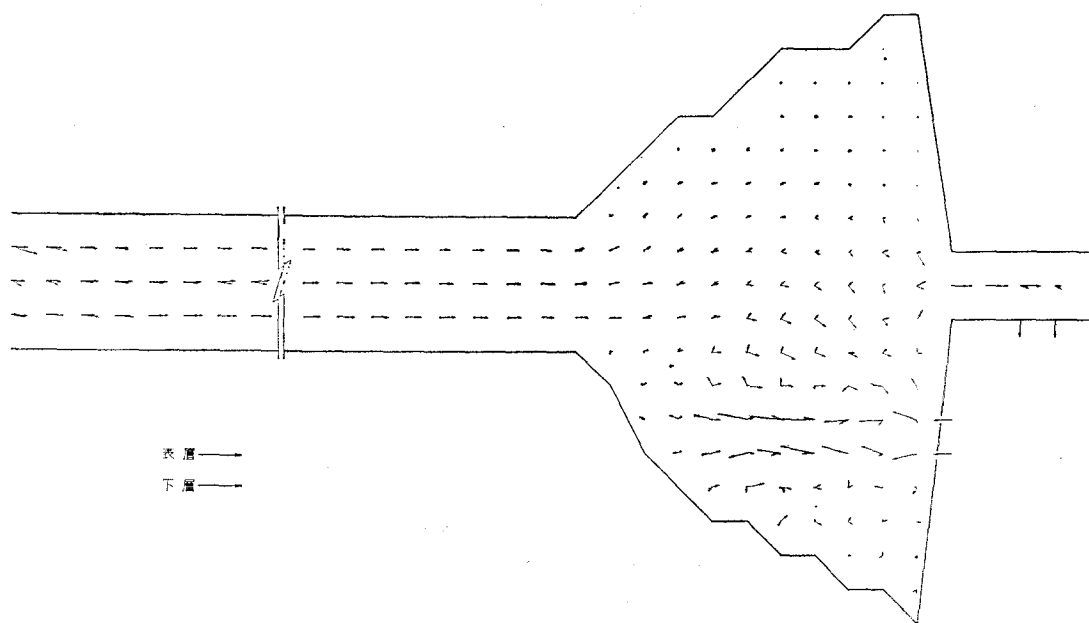
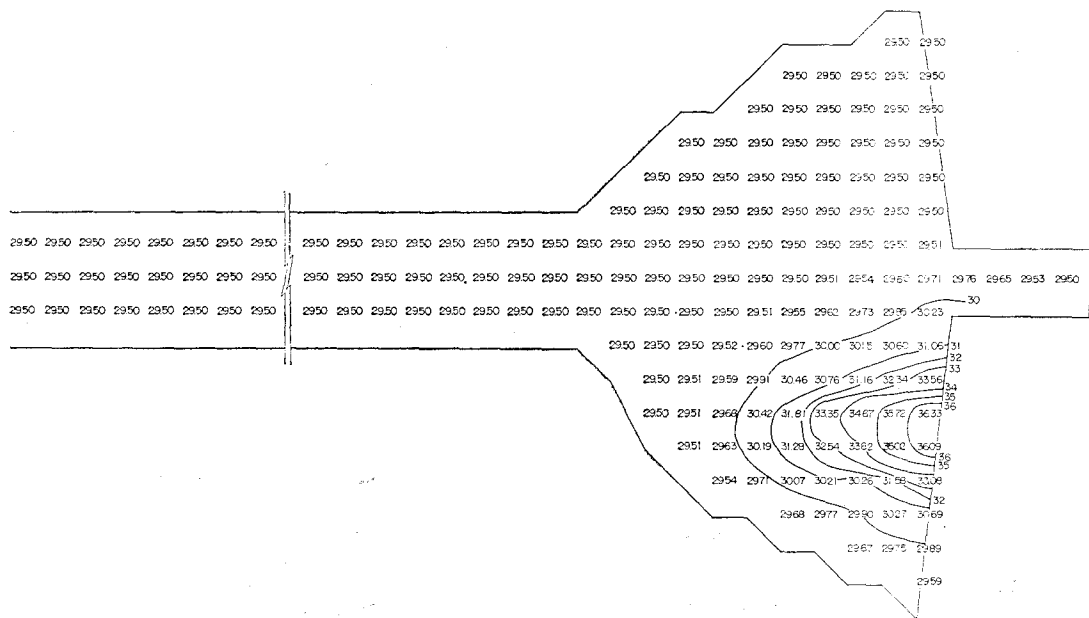


図-16 表層での水温分布 (60 分後)



潮時から漲潮時に向かった 60 分後の流速および水温分布図である。

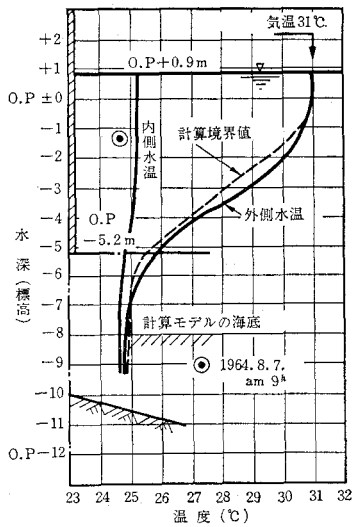
図-15 から上層および下層での流れの様相が把握できる。すなわち、湾内においては表層では放流による流れ、下層では潮汐および冷却水取水による流れが卓越している。特に放水口沖合の水域において冷却水の表層流れに伴って下層での逆流現象すなわち補流が顕著に表われている。

8. 用水取水問題

取水については、カーテンウォール式や海底取水管式の深層取水工の水理特性を解明した基礎研究⁶⁾や、風による水温躍層の低下が深層取水におよぼす影響を論じた研究⁷⁾がある。これらの研究結果にもとづく設計法を用いて、関西電力・堺港火力発電所(冷却水流量 100 m³/sec)をはじめ、主として内湾に面するいくつかの火力発電所の取水口が設計、施工され、運転を開始したもの

図-17 堺港火力発電所深層取水カーテンウォール内外海水温実測結果

(取水量: $12.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, 取水流速: 0.03 m/sec)



については取水水温の実測が行なわれ、その効果が確認されている⁹⁾。選択取水の問題を取り扱う際、これまでは密度連続分布を不連続面を有する上下2層に分離せしめて解析を進める方式が採られてきた。しかし海域に表われる実際の密度鉛直分布は明瞭な不連続面を有していな

い。したがって問題を2層に分離せしめて解析・実験を進める際、実現象への再現性に対する保証は何も与えられていない。この仮定の妥当性を確認する意図で、密度連続場での取水に伴う密度と流れの場を求めた研究報告¹⁰⁾がある。

計算モデルは鉛直2次元流れを対象としてとり扱われており、冷却水取水方式は図-17に示すごとく深層取水するものとし、取水口高さは3mである。計算境界条件の1つである無限海域での水温鉛直分布の設定は堺港火力発電所の実測データを背景にしてつぎのように行なっている。海面では 31°C 、海底では 25°C の値を有するものとし、その間の水温値は鉛直方向の拡散方程式 $d/dz \cdot (K_z/\rho \cdot dT/dz) = 0$ を拡散率モデル ($K_z = K_1 + K_2 \cdot e^{-nRz}$) によって定めることにした。その計算結果は図-17のなかで点線で示してある。取水流速の変化による取水水温の値、海域での流れおよび水温の分布の様相を調べるために数値計算が実施され、その速度解の一般特性は図-18に示してある。パラメータとしての取水流速の大きさは $u_0 = 0.2, 0.5 \text{ m/sec}$ の2通りの値を用いている。図-18は第1次および第5次近似の速度解を与えるものである。取水口断面より沖合における速度分布曲線を見るに、底層においては外海からの流れが取水口へ接近するにつれてその速度が増幅される様相がわか

図-18 速度分布の形状

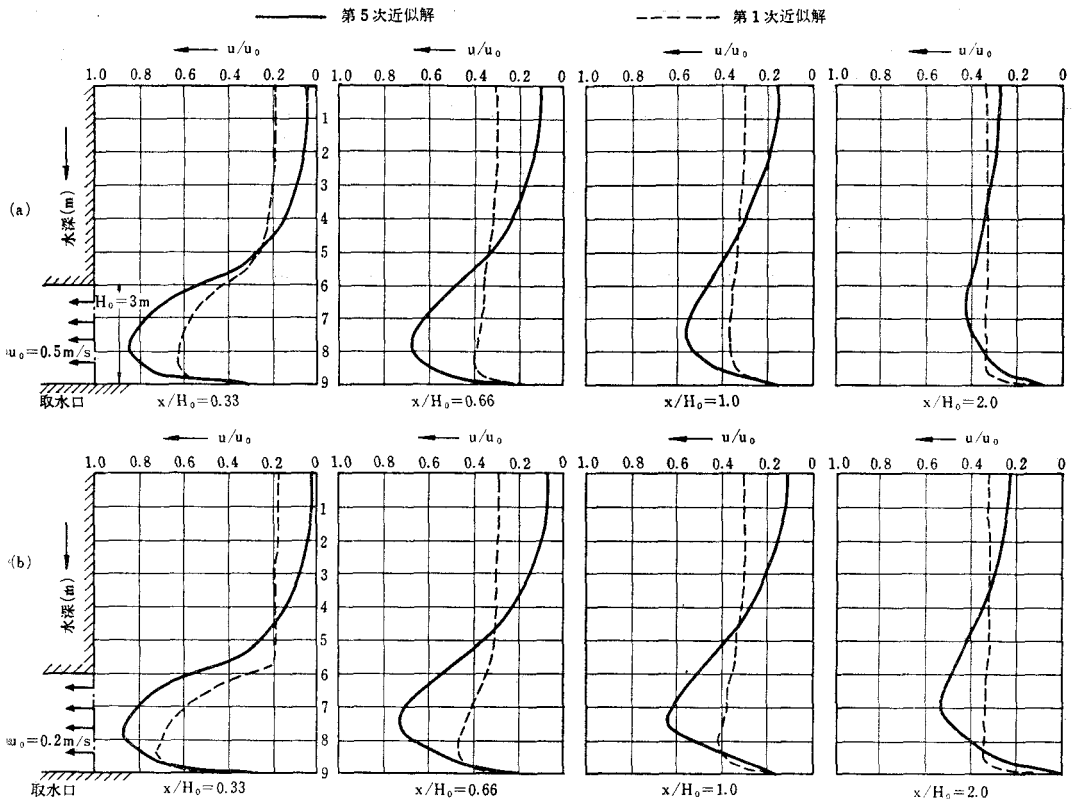
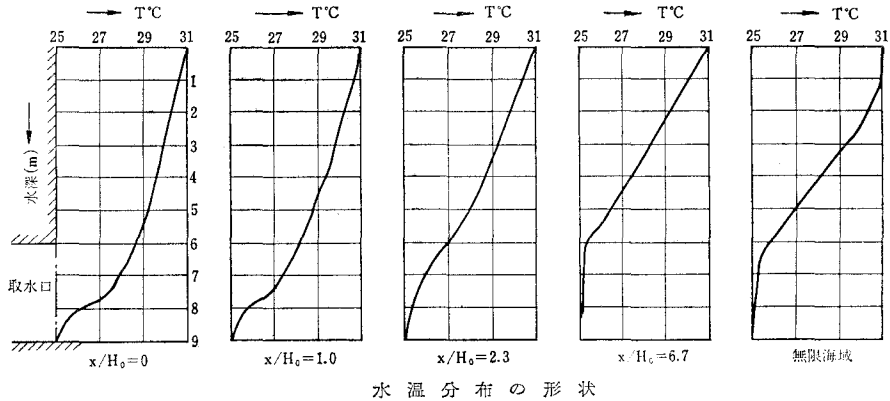


図-19 水温分布の形状



水温分布の形状

り、表層でもわずかであるが流速値が存在している。相互干渉を考慮に入れた高次近似解は第1次近似解に比して水温と速度の鉛直分布形状に相当な影響をおよぼしている。とくに取水口付近の解は第1次近似解に比して底層流入速度を著しく増加させ、上層での流速値を減少せしめる傾向を示している。図-18 (a), (b) から取水流速値の大小による取水特性の傾向がつかめる。すなわち取水流速値を極力小さくせしめれば、深層取水の点からみてより好ましい流速分布の構造形態をとることがわかる。また、取水口断面沖合 $x/H_0 = 5 \sim 6$ 以上になれば無限海域での水温鉛直分布は取水の影響をあまり受けずその形を保持することが確認されている (図-19 参照)。

このような流れおよび水温の場が実際に起こり得るか否かはまだ確かではないが明瞭な不連続面をもつ2成層の流れとはかなり異質的なものであることは疑いない。今後残された課題は計算、実験の積み重ね、現地観測結果との照合と相まって水温連続分布を対象にした深層水取水設備の水利設計法を明らかにすることであろう。

参考文献

- 1) 平野敏行 (1966): 赤潮の発生と微細海況変化, 水産海洋研究会会報第9号.
- 2) 新田忠雄 (1963): 海洋域における工場廃水の希釈と拡散について, 用水と廃水.
- 3) 平野敏行 (1966): 温排水に関する研究座談会, 水産海洋研究会報, 第9号.
- 4) 和田 明・片野尚明 (1965, 1966, 1967): 入江内における冷却水取放水の研究 (1), (2), (3), 土木学会第12回・第13回・第14回海岸工学講演会講演集.
- 5) Ellison, T.H. & J.S. Turner (1959): Turbulent entrainment in stratified flows, Jour. Fluid Mech.
- 6) 千秋信一・和田 明 (1964): 火力発電所冷却水深層取水に関する研究, 電研報告 No. 64 005.
- 7) 千秋信一・藤本稔美 (1967): 冷却水深層取水工の取水特性, 電研報告 No. 66 097.
- 8) 和田 明 (1966): 水温躍層面におよぼす風の影響, 電研報告 No. 65084.
- 9) 千秋信一 (1968): 火力発電所冷却水深層取水工の水利設計, 発電水力 No. 92.
- 10) 和田 明 (1968): 密度成層海での流れと密度の分布について, 第12回水利講演会講演集.