

入江内における冷却水取放水の研究 (2)

和田 明*・片野 尚明**

1. 序 説

本文は、比較的せまい同一の湾内において冷却水を取水放水することの可能性やその水理設計法を解明するための一連の研究の一環として、従来実施してきた基礎的研究結果や本邦各地の湾における現地観測の調査資料にもとづいて、冷却水放水にともなう流動と熱拡散現象の問題を論じたものである。特に垂直断面内における現象について注目し、流動と水温分布との相互干渉によってどのような流れおよび拡散場が形成されるものかを電子計算機による数値実験によって検討したものである。

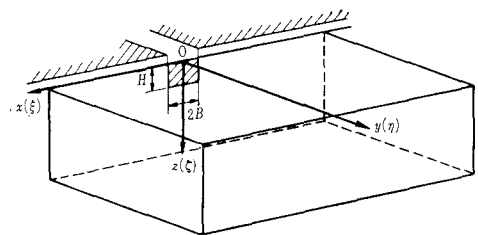
埋立地内の泊地、入江など限られた海域内において、冷却水の取水放水が行なわれている近時の傾向からすれば、多量の冷却水放水による湾内の水温上昇による取水水温の影響が重要な問題として浮かび上がってくる。筆者等はこのような発電所または工業用水の放水後の入江内における水温変化についての合理的な解析法を確立するために 1964 年以来冷却水密度流に関する研究を実施してきた。前回の報告^{1), 2)}においては、冷却水再循環問題を論ずるに当たって必要とされる気象・海洋水理学的諸量の役割を考察し、冷却水放水による湾内表面水の流動と収斂温度を電子計算機によって算出する方法を提示した。前回報告文の主眼点でもあった、冷却水放水による水温拡散分布の算定については、放出水の力学的挙動と水温の熱拡散現象の両者を同時に考慮すべきであるとの前提の下に、まず 3 次元空間における熱収支過程を考慮した熱拡散方程式を数値解析し、海域の水温鉛直分布の状態によって温水拡散がどのように支配されるかを調べた。この数値解析の結果や現地観測資料によって、冷却水放水による熱拡散分布は躍層面以上に限られるので平面状 2 次元的取り扱いができるとの仮定をたて、湾内流速分布と水温分布をデジタル・コンピュータで算定するいわゆる数理模型実験の手法を開発した。この方法によって、湾の実際の地形を対象に放水路の平面配置を決定することができる。他方、冷却水の深層取水の考え方の基本には、海水温の鉛直分布の定常性を仮定しているが、発電所の設置地点が湾奥部にあって吹送距離が長く、かつ湾口から湾奥へ向って吹き寄せる風が卓越する

ような場合には、風の効果すなわち風の応力による水面の上昇およびこれにともなう水温躍層面の低下を考慮して深層取水の水理設計を行なうことが必要である。これらの研究結果に基づいて、すでに水島湾、敦賀・浦底湾、大分鶴崎泊地などにある発電所の取放水口の水理設計を実施してきた。

2. 基本方程式の構成

冷却水放水による湾内の流動と熱拡散現象の問題を厳密に解くためには、放出水の力学的挙動と水温の熱拡散現象の両者を同時に考慮しなければならない。図-1 に

図-1 3 次元熱拡散模型図



示すごとく、3 次元空間に直交座標を考え、原点を放水口の上部中心にとる。放水口の形状はく形断面 (幅 $2B$ 、高さは H) とし、ここから温水冷却水が沿岸と直角方向に海域へ放出されるものとする。冷却水の流動を支配する運動および連続方程式はつぎのように書くことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g \lambda_k \quad \cdots (1)$$

および

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \cdots (2)$$

ここに、 $j=1, 2, 3$ はそれぞれ x, y, z 方向に対応しており、

λ_k : z 軸方向の単位ベクトル

u_i : 流速成分

A_j : 渦動粘性成分

p : 圧力

ρ : 密度

g : 重力加速度

である。一方、海面からの熱損失 (または獲得) を考慮した 3 次元空間における熱拡散方程式はつぎのようになる。

* 正会員 工博 財団法人 電力中央研究所

** 正会員 財団法人 電力中央研究所

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_j}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{Q_0}{\rho C_w \cdot H_w} \dots (3)$$

ここに、

T : 水温

K_j : 渦動拡散率の成分

Q_0 : 海表面からの表面冷却または加熱項

C_w : 海水の比熱

H_w : 大気と水塊との間でエネルギー授受が行なわれる厚さ

である。

一方密度と水温との間の関係はつぎの一次近似式によった。

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha T) \dots (4)$$

湾水域における熱バランスの主要な過程はつぎのとおりである。

表-1

水温を暖める過程	水温を冷やす過程
1. 太陽・天空からの輻射エネルギー — $Q_s = Q_s'(1 - \bar{\tau})$	1. 水面からの逆輻射, $Q_b = \sigma(T + 273^\circ) \{1 - a - b\sqrt{e(T_a)}\} \cdot (1 - Kn)$
2. 大気からの顕熱の対流, Q_h	2. 顕熱の大気への対流, $Q_h = h_a(T_a - T)$
3. 凝結, Q_e	3. 蒸発, $Q_e = k[e(T_a) - e(T)]$
4. 発電所からの熱量の付加 $Q_c = (Q/A) \cdot \{(1-r)T_b + T_c - (1-r)T\}$	4. 海底を通じての伝熱

ここに、

Q_s' : 海面に到達する太陽・天空からの短波輻射量

$\bar{\tau}$: 平均反射率

T : 海の表層水温

σ : 輻射定数 ($= 1.367 \times 10^{-12} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ \text{K}^4$),

a, b : 山本の定数 ($a = 0.51, b = 0.076$),

$e(T_a)$: 水面付近の水蒸気圧

K : 雲の高さによる係数 (雲の高さ 1.5~2 km に対して $K = 0.083$),

n : 雲量 ($n = 0 \sim 10$)

T_a : 大気温

$e(T)$: 水温に対する最大水蒸気張力

h_a : 顕熱伝達係数 [$= 2.77 \times 10^{-4} (0.48 + 0.272 V)$]

k : 潜熱伝達係数 ($k \approx 2 h$)

Q : 冷却水使用流量

A : 湾平面積

r : 上層温水層からの混入率

T_c : 復水器によって与えられる温度上昇 ($= 5 \sim 10^\circ \text{C}$)

T_b : 湾内深層の水温

以上の諸関係から自然状態における表面層の熱損失に対する方程式は線形結合され、つぎようになる。

$$Q_0 = Q_s + Q_b + Q_h + Q_e = Q_1 - Q_2 T \dots (5)$$

海面での冷却過程を含む3次元熱拡散問題を解くためには、2つの現象過程から解を求めなくてはならない。その1つは、表面加熱・冷却過程と拡散過程であり、ほかのものは内部水域における水温分布の非一様性にもとづく内部拡散過程である。

また流れと熱についての境界条件はつぎのようにとるべきである。(i) 海面では流れは表面に平行、固定壁では流れの速度は零、全体の輸送量は冷却水水量に等しくなければならない。(ii) 熱束は海面および無限海域を除

いた境界面に垂直方向は零、海面および無限海域境界設定線においては、水温勾配は一定の値を有するものとする。

さて、冷却水の流れと熱拡散の現象を支配する基礎方程式のなかには、密度の項が判然と入っている。したがって垂直方向で密度の変化が起これば、現象を変化させることが期待できるかもしれない。しかし、海における密度変化そのものは、非常にわずかであるのでこの点に関しては余り重要ではない。もし密度の変化が重力効果に結びついているならば、 ρg の項は冷却水の流れと熱拡散との間の相互作用において重要な役割を演ずるであろう。したがってこの項が存在している運動方程式においてはしん酌されるべきである。この仮定から、連続方程式は Boussinesq の近似によって置き代えることができる。さて問題は、さまざまな複雑な境界条件を受けた方程式の非線形系を解くことに帰せられたわけである。この系は既存の知られた解析方法によっては解くことがむずかしいので、差分近似の方法に頼ることとする。

3. 冷却水熱拡散現象の実態と密度成層分布の安定性

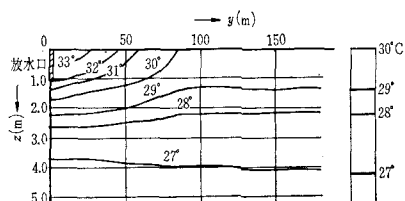
特に、冷却水放水にとまう惹起現象に関するこれまでの基礎研究や敦賀・浦底湾、水島湾、堺港泊地における現地調査を検討した結果、つぎの諸点が判明している。

(1) 入江内では、夏季表層と下層との間に $4^\circ \text{C} \sim 5^\circ \text{C}$ の温度差が存在し、この温度の異なる2層の境界面(躍層面という)は海面下 3~4 m に位する。

(2) この水温躍層面は、干満による潮位変化にかかわらずほぼ安定している。なお、水温躍層面におよぼす風の影響については後に述べる。

(3) 湾内で顕著な水温躍層面が存在している場合には、放出された温水塊はこの躍層面を通じて下層に拡散することなしに、表層付近の水塊と混合を生じる傾向にある。中国電力KK, M火力発電所における温水冷却水の放流に関する現場観測データを解析した結果によると、水平熱拡散率は垂直方向のそれのおよそ 50 倍程度の値を有しており、前者の影響が後者よりもより効果的であることがわかる(図-2, 3 および 4 参照)。

図-2 水温鉛直分布 (M 発電所放水口付近)



(3) したがって、海域には強い異方性の場が存在し、放水口から放出された冷却水温の減少は、大気との熱交換による表面冷却のほか、より低い温度を有する周囲の海水との水平混合によるものである。

(4) 密度の鉛直勾配が安定であればあるほど、水平混合の割合を増加せしめる傾向を有する。

(5) 大気との熱収支過程を考慮した

図-3 水温水平分布
(M 発電所放水口付近)

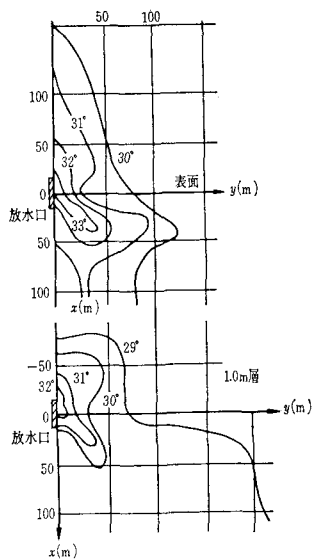
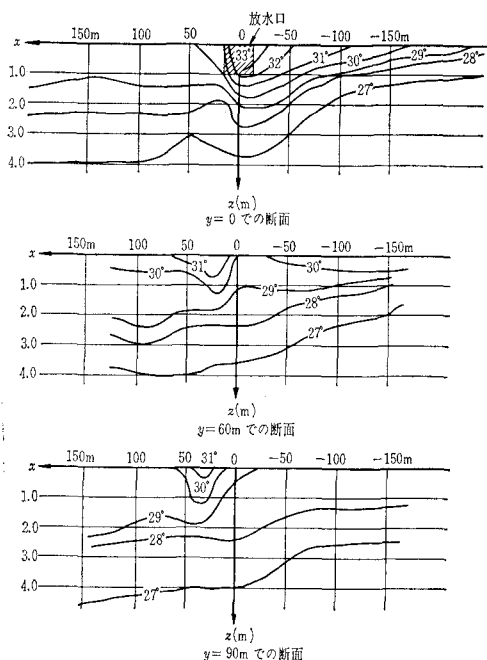


図-4 沿岸に平行な垂直断面における水温分布
(M 発電所放水口沖)



3次元空間における熱拡散方程式を数値解析し、海域の水温鉛直分布の状態によって温水拡散がどのように支配されるかを調べた。この数値解析の結果や現地観測資料の分析結果にもとづいて、放水口からの温水放出水による熱拡散分布は、ほぼ水温躍層面以上に限られることを結論した。

つぎに、風の吹送ともなう水温成層状態の安定性について考察してみる。一般に風の吹送が深層に波及する

程度は密度の鉛直傾度に依存している。夏季、湾内で表層と下層との間に顕著な温度差が存在しているとき、たとえ風がごく表面付近だけを攪乱させ、これに続く混合過程によって均質上層を形成したとしても、この躍層面と目される層の下底では鉛直安定度が大きくなるため、その渦粘性は小さくなることが期待される。

先に、筆者は風の応力が湾内の流速および水温成層分布におよぼす影響について検討し、湾奥部で冷却水取水を行なうにあたっては、風の影響を考慮に入れなければならないことを結論した²⁾。そして、風の吹送にともなう湾内各点の水面上昇量およびこれにともなう水温躍層面の低下量について、密度2成層湾における運動および連続方程式を組み合わせた解析を行ない、それらの算定式を求めている。研究結果の要点を紹介するとつぎのとおりである。

(1) 水島湾、堺港泊地および敦賀・浦底湾での海洋調査の結果を解析し、水温鉛直勾配の大きい躍層面は、風の吹送(5~10 m/sec)による擾乱過程によっても破壊されないことおよび躍層面付近での渦粘性が非常に小さい(0.05 c.g.s)ことを見出した。このことはとりもなおさず、同一湾内での冷却水取放水の可能性を示唆している。

(2) 風の吹送によって、水温躍層面が低下するという考え方は、堺港泊地、水島湾での実測結果によって立証され、一般的に実際の湾において惹起される現象であることが判明した。

(3) 数値計算例を示すと、湾長2 km程度の湾において上下2層間の温度差が5~7°Cであって常時6 m/secの風が湾奥に向かって吹送していれば、湾奥での水温躍層面の低下量は0.80~1.10 mにも達する。一方、取水口断面での取水平均流速を0.12 m/secにおさえたとき、風による水温躍層面の低下量は、取水にともなう躍層面のそれのおよそ半分位に達する。このことからしても風の影響の大なることがわかる。

以上述べてきた理論解析ならびに数値計算などの結果をもとにして、風の効果の考慮に入れた冷却水取水構造物の水利設計を、原子力発電所の建設が行なわれている敦賀・浦底湾について実施した³⁾。

以上の結果から、温水冷却水を湾内へ放流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現象(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理模型実験の手法を開発した。すなわち、渦粘性の卓越する流れの場の問題においては、慣性項が無視できると考えて流線関数 P の導入によって重調和型の方程式

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(A_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}\right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(A_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y}\left((A_x + A_y) \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y}\right) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

の解によって求められることを示し、かつここで求めた移流成分を熱拡散方程式の該当項に代入することによって平面状熱拡散分布が算出できるわけである。ここに開発した計算手法を実際の計画地点に適用し、各発電所冷却水放水口の水利設計を実施した。すなわち実際の地形を対象に種々の放水路設置案について、流速と水温の分布を電子計算機を用いて数値計算し、この計算結果を比較検討して冷却水放水口の適切な平面配置を決定することができる。

この計算方法の最も基本的な適用例として、温水冷却水を半無限海域に放出したときの流速と水温の分布を数値計算し、放水にともな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を求めた²⁾。計算結果の一部を表-2、3に示す。

表-2 冷却水放出による流れの最大影響範囲
(放出流速 $V_0=1\text{m/sec}$ 、放水口の高さを 1m と仮定)

冷却水使用水量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	20	40	60	80	100
冷却水放流による流れの最大影響範囲 (放水口からの距離: m)	60	120	180	240	300

ここで定義した流れの最大影響範囲とは、海域での流速値が放流流速の 10% 以上の値の表われている場所を指している。

表-3 冷却水放出による水温上昇の影響範囲
(放出流速 $V_0=1\text{m/sec}$ 、放水口の高さを 1m と仮定)

冷却水使用水量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	20	40	60	80	100
冷却水放水によって海域水温が 1°C 上昇する影響範囲 (m)	460	920	1380	1840	2300
その影響面積 (m^2)	$\times 10^4$ 17.8	$\times 10^4$ 71.4	$\times 10^4$ 160.5	$\times 10^4$ 285.4	$\times 10^4$ 446.0

なお、この数値実験を行なうにあたってつぎのような気象条件を考えた。

表-4

大気温 T_a	平均気温 28.5°C (最高 32.9°C 、最低 25.2°C)		
輻射量 Q_s	平均日量 436.7 cal/cm^2		
平均風速 V	3.3 m/s	雲量 n	6.3
相対湿度 f	79%	雲の高さの係数 K	0.083
深層水温 T_b	25°C	水温躍層面の深さ H_w	3 m
復水器通過後の温度上昇 T_c	8°C		

ここにいう流れおよび水温上昇の最大影響範囲の諸値は、冷却水を海域に放出したとき、2重成層を形成して表層を冷却水の流れが拡がって行くと仮定した場合のそれであり、潮汐による移流効果は含まれていない。特に、様々の因子を考えに入れなければならないような特定な地点については、上記の計算方法を基本として改めてそれぞれの条件に応じた数値実験を行なう必要がある。

後述するように、垂直断面における冷却水放水による

流れと熱拡散との相互干渉を考慮に入れた数値実験の結果によれば、放水口付近で冷却水の表層流出にともなう、下層からの湧昇流の現象がみられることである。したがって実際にはある程度、下層冷水の供給を考えた水温分布を算出しなければならないが、放水口からの放流流速値を上層温水、下層冷水という2層分離という立場から小さくせしめれば、それ程大きな修正を施す必要はないと考える。その代り、表-2、3の諸値は、静水海域内における水温上昇の影響最大範囲を提示するものである。

さて一方、実際に冷却水放水口の断面設計にあたって、その放流流速を均一にし、かつ湾内の船舶航行および繫留に支障のない所定の低流速となるような断面形状を決定することが必要である。すなわち、放水口が位置する付近の海域には常時船舶が就航するとか、放水口の隣接地帯が岸壁となっているようなとき、放水口から海中へ流出する水流が、これら船舶の航行繫留に支障をおよぼさないことが、放水口の水利設計条件の一つである。

さらに、放流流速が局部的にでも大きくなると、上下2層間の安定性を失ない、上層水と下層水との間に熱交換が生じるようになる。この結果、上層温水、下層冷水という均衡条件が破れ、ひいては取水効率に悪影響をおよぼすことも考えられる。そのことからして、放水口終端断面において所定の低流速を期待するためには、与えられた流水断面で均一化した流速分布を得ることが必要である³⁾。

4. 熱収支論にもとづいた湾内表面水温の収斂値

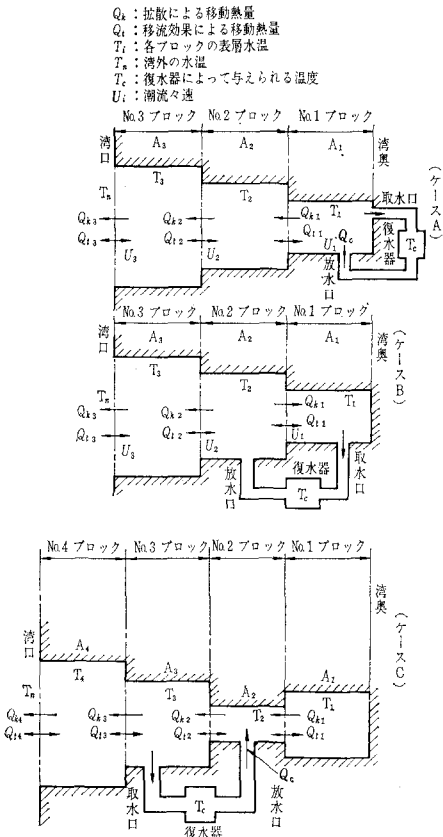
4.1 湾内平衡水温の算定

同一湾内で冷却水が取水放水されている場合、取水された比較的冷たい水は復水器を経て温水と変わり、この温水は再び湾内の表層に放水され、advection の効果および湾内水との混合によって湾内に拡散し、この混合水が干潮、満潮に応じて移動しつつ取水口に到達するまでの間に大気との熱交換による冷却あるいは加熱作用を受ける。しかして、冷却水の温水放水によって、湾内表層水の水温は逐次上昇するが、一方水面と大気間には冷却作用が働くので、表面水温とりもおさず冷却水取水水温が一定値に収斂することが期待される。さて冷却水放水にともなう湾内の水温分布は、前述のごとく放出水の力学的挙動と水温の熱拡散現象を支配する微分方程式を解くことによっても求められるが、別の角度から熱収支論によるシミュレートを中心とした非定常現象として、アナログ・コンピューターを駆使した手法によっても算定することができる。本章においては、冷却水取水放水口の配置状態が異なっている二、三の湾について後者の算定方法を適用し、湾内表層水の平衡水温が湾の規模、気象

条件, 潮流効果および冷却水使用水量等によっていかなる値となるかについて検討した結果を紹介する。

前回の報告¹⁾においては, 湾全体を1ブロックとして取扱い, かつ潮流および拡散効果を無視しているため, 湾全体の平均水温としては実際の水温よりも高い水温を与える一方, 水温分布も実際とは異なるものと思われる。熱収支計算をさらに実際に近づけるために, 湾内に

図-5 ブロック割り熱収支計算における熱量移動の模型図



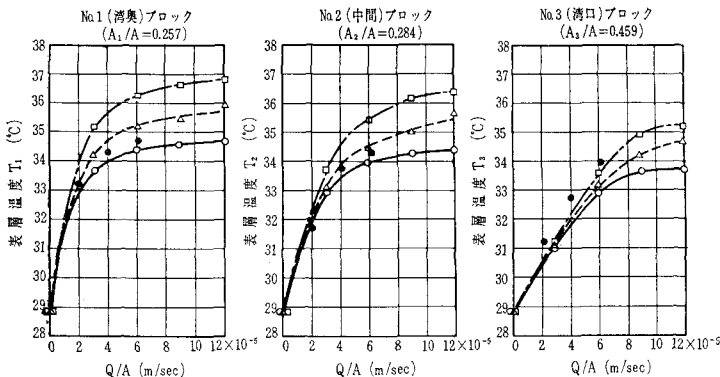
位置している取放水口, 地形条件により, いくつかのブロックに分割して潮流, 熱拡散効果を考慮したシミュレート計算を実施した。計算の仮定を列挙すればつぎのとおりである。

(1) 夏季の気象条件下で湾内に顕著な躍層面の形成が確認され, しかも潮流などによって乱されず安定であること, (2) 放流された温水は表層を拡散して躍層面下には潜りこまないこと, (3) 潮流は現場観測データにもとづく近似的な正弦曲線で表わせること, (4) 湾外水は温水排熱の影響を受けない自然状態時の収斂水温とするなどである。

上記の仮定および計算条件にしたがい, 図-5 に示すような取放水口配置の異なった地点の3つのケースについての計算結果を簡単に紹介する。すなわち, A, B, C 3つのケースについてのアナログ・コンピュータによる熱収支計算を行ない, 計算結果から表層平衡水温の平均値と Q/A との関係を各ブロックごとに図示したものが図-6, 図-7 および図-8 である。図-6 は, ケースAすなわち No. 1 (湾奥) ブロックにおいて取水・放水が行なわれる場合, 図-7 は, ケースBすなわち No. 1 (湾奥) ブロックにおいて取水, No. 2 (湾中間部) ブロックにおいて放水が行なわれる場合, 図-8 は No. 3 (湾中間部) ブロックにおいて取水, No. 2 (湾奥側) ブロックにおいて放水が行なわれる場合について, それぞれ取水の表層水混入率 r をパラメーターとした図表である。計算結果から一般的につぎのことがいえる。

(1) 表層水温は, 放水口の位置するブロックにおいてもっとも高くなり, 湾口に向うにしたがって低下する。(2) 表層水温と冷却水使用流量との関係は飽和曲線形態をとる。(3) 潮流効果が大きければ表層より取水する割合を示す混入率の影響はあまり受けない。(4) 放水口が湾中間部に位置する場合は, 潮流によって逆に湾奥部に熱の蓄積がひき起される。(5) 潮流は湾内水と湾外水との置換をつかさどり, 温水排水を湾外へ排熱させる作用

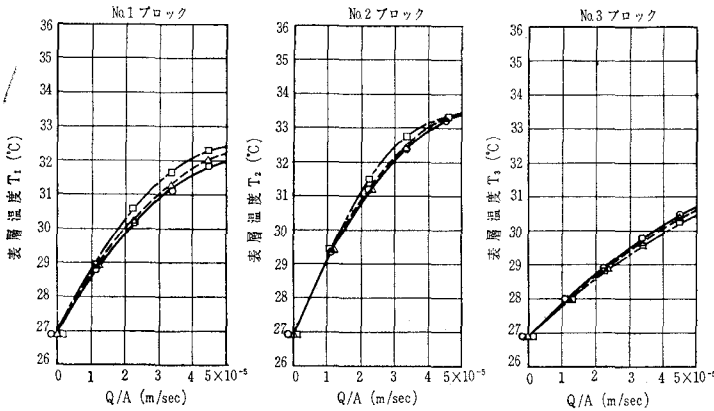
図-6 平均表層温度と Q/A との関係 (ケース A)
(ケース A: No. 1 ブロックにおいて取, 放水, 潮流流速 $u_a=0.05$ m/sec)



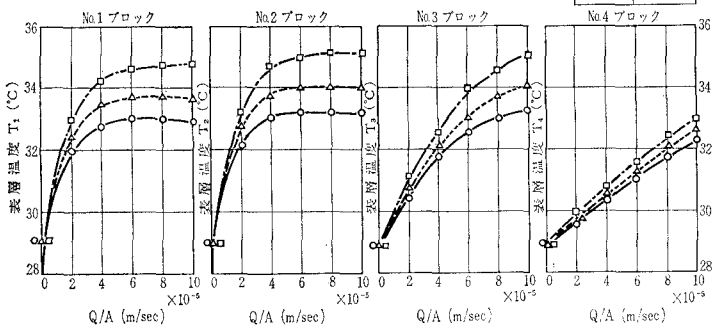
をもつ。図-6 のなかにある黒丸は熱拡散方程式の差分近似式によるデジタル・コンピュータの計算結果を示したものである。つぎに, 湾全体を1ブロックに限定した前回報告の計算結果¹⁾と比較してみるために, ケースAについての3ブロック割り計算結果から湾全体の平均表層水温を算出して前者と比較すると図-9 になる。これより, 湾内平均水温は, 潮流および熱拡散を考慮した3ブロック割り計算の方が低い値を与えることがわかる。特に湾表面積の割に放流流量の小さいときにその傾向が顕著である。こ

図-7 平均表層温度と Q/A との関係 (ケース B)

(ケース B: No. 1 ブロックにおいて取水 No. 2 ブロックにおいて放水, 潮流流速, $u_1=0.05$ m/sec, $u_2=0.10$ m/sec, $u_3=0.15$ m/sec)

図-8 平均表層温度と Q/A との関係 (ケース C)

(ケース C: No. 3 ブロックにおいて取水, No. 2 ブロックにおいて放水, 潮流流速 $u_1=0.05$ m/sec, $u_2=0.10$ m/sec, $u_3=0.07$ m/sec, $u_4=0.11$ m/sec)



のことは, 移流, 水塊の混合による拡散現象が湾外との熱交換を促進することを示している。たまたま, ケース A の場合は潮汐効果が小なので両者の値の差はそれほどでもないが他の 2 ケースの場合にはその差がさらに大きくなると思われる。

4.2 潮汐作用による湾内外水の熱交換過程

前節の各熱収支モデルについて, 各ブロック別における熱収支項の役割を検討した結果によると, 冷却水放流と潮流による移流効果がきわめて大きく, 湾内全域に

図-10 熱収支模型図

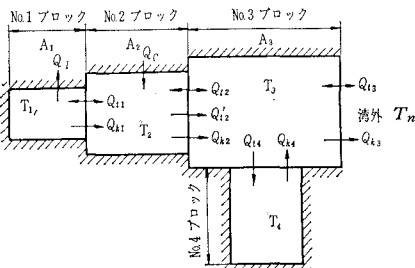
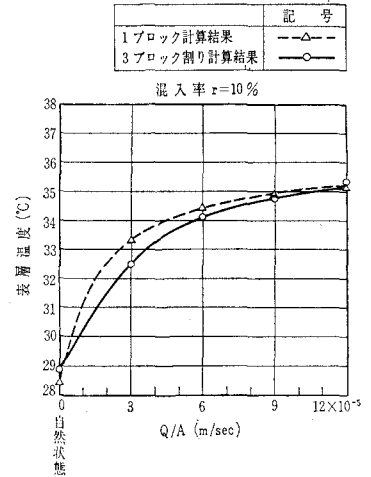


図-9 1 ブロック計算と 3 ブロック割り計算との湾内平均水温の比較 (ケース A)



放流熱エネルギーを拡散させ, 湾内外との熱交換に重要な役割をなしていることがわかった。そこで本節においては, 特に潮流による移流効果に着目して湾内水が潮汐の干満によって湾外にどの程度排熱されるか検討を行なうためにつぎのような熱収支モデル (図-10 参照) を考えた。それは, 取水口が湾奥, 放水口が湾中間部に位置する場合であって, 潮汐, 熱拡散効果を考慮した熱収支基礎方程式はつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned}
 dT_1/dt &= \{C_w \cdot \rho (H_{w1} + \eta_1)\}^{-1} \{ (Q_{ps} + Q_a + Q_{r1}) + A_1^{-1} (-Q_I - Q_{t1} - Q_{k1}) \} \\
 dT_2/dt &= \{C_w \cdot \rho (H_{w2} + \eta_2)\}^{-1} \{ (Q_{ps} + Q_a + Q_{r2}) + A_2^{-1} [Q_c + (Q_{t1} - Q_{t2} - Q_{t2}') + (Q_{k1} - Q_{k2})] \} \\
 dT_3/dt &= \{C_w \cdot \rho (H_{w3} + \eta_3)\}^{-1} \{ (Q_{ps} + Q_a + Q_{r3}) + A_3^{-1} \{ (Q_{t2} + Q_{t2}' - Q_{t3} + Q_{t4}) + (Q_{k2} - Q_{k3} + Q_{k4}) \} \} \\
 dT_4/dt &= \{C_w \cdot \rho (H_{w4} + \eta_4)\}^{-1} \{ (Q_{ps} + Q_a - Q_{r4}) + A_4^{-1} \{ (-Q_{t4} - Q_{k4}) \} \} \\
 dT_n/dt &= (C_w \cdot \rho \cdot H_{wn})^{-1} \cdot (Q_{ps} + Q_a - Q_{rn}) \quad \dots \dots \dots (7)
 \end{aligned}$$

式中の符号は入る熱量を+, 出る熱量を-とする。式中の記号について説明すれば, T_i : ブロックの表層温度, H_{wi} : 躍層水深, η_i : 潮位の変化, A_i : ブロックの平面積, Q_{ps} : 純輻射量, Q_a : 顕熱, 潜熱量のうち気温に関する項, Q_{ri} : 顕熱, 潜熱量のうち水温に関する項, Q_c : 温水放流熱量, Q_I : 表層からの取水混入による移動熱量, Q_{ti} : 温水放流, 潮流による移流熱量, Q_{ki} : 拡散による移動熱量である。なお, 脚添字 i はブロック番

号を示し、 n は湾外を示す。つぎに計算条件を列記すればつぎのとおりである。

表-5

気象条件: 輻射量の平均日量 492 cal/cm ² , 平均気温 26.9°C, 平均風速 3.3 m/s, 湿度 78%
潮位の変化: 108, 217, 325 cm,
温水放流量: 20, 40, 60, 80, 100 m ³ /s
上層温水の混入率: 0, 20, 40, 60, 80, 100%

上記の値を適宜組合せてシミュレート計算を実施した。図-11 はこれらの計算結果の一部であって、潮汐の大きさをパラメータとした、冷却水使用水量と湾内表層温度との関係を示すものである。この結果より前述のごとく潮汐が大きくなると明らかに水温低下の現象がみられる。しかし湾奥部は、潮汐作用が大きくなるにつれて熱

の蓄積作用が生じ逆に水温上昇がおこる。また、No. 4 ブロックは 図-10 の熱収支模型から明らかなように放水の移流効果をほとんど受けることがないので、水温はたかだか自然状態より 1°C 程度の上昇をみるだけである。一方、他の条件を一定にして潮汐の大きさを変えた場合の各ブロック別の熱収支項の計算結果を 表-6 に示す。

温水冷却水放出によって湾内表層水温が平衡状態に達した後は、この放水熱エネルギーの一部は海面からの冷却過程、残りは湾口での内外湾水の交換現象により逸散される。表-7 は、温水放流熱量の散逸エネルギー分担配分比を計算した結果を示したものである。

これより一般的につぎのようなことがいえる。

(1) 冷却水使用水量が同量であるとき、潮汐効果が

大であれば、湾外への熱量移動は多くなる。一方、海面からの冷却効果は潮汐が大なる方が小さくなる傾向を有している。

(2) 湾に出入りする潮流による移流流量を同じ条件としたとき、冷却水使用水量の増加にともなう湾内海面からの散逸エネルギー分担割合はむしろ減少し、湾口での移流効果による湾外への逸散熱量が大きな割合を有する。

(3) 冷却水放出熱エネルギーの潮汐による湾外への移動分担比は、上層

図-11 潮汐の大小による平均表層温度と Q/A との関係
(No. 1 ブロックにおいて取水, No. 2 ブロックにおいて放水, 混入率: 20%)

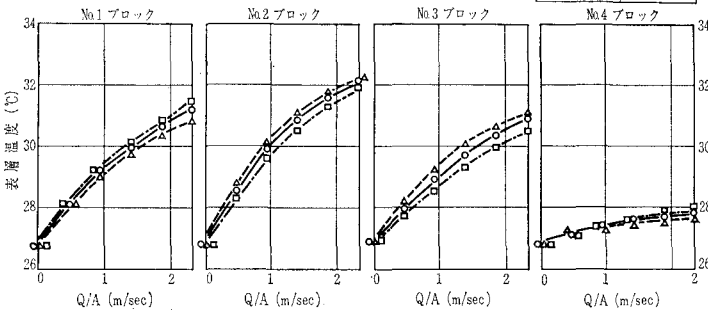


表-6 温水放流のある場合の各ブロックの熱量分布 [$Q=20$ m³/sec, $r=20\%$, $H_w=3$ m] 熱量の単位は $10^{-8} \times \text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$.

潮位の変化 (cm)	No. 1 ブロック $A_1=53.97 \times 10^4 \text{ m}^2$					No. 2 ブロック $A_2=73.54 \times 10^4 \text{ m}^2$					温水放流熱量 $Q_e(\text{cal/sec})$
	$T_1(^{\circ}\text{C})$	Q_{ps}	Q_{h1}	Q_{e1}	計	$T_2(^{\circ}\text{C})$	Q_{ps}	Q_{h2}	Q_{e2}	計	
$\eta=108$	28.10	4.65	-0.46	-6.50	-2.21	28.80	4.65	-0.72	-7.15	-3.22	13.44×10^7
207	28.04	4.65	-0.45	-6.30	-2.10	28.49	4.65	-0.61	-6.68	-2.64	13.42×10^7
潮位の変化 (cm)	No. 3 ブロック $A_3=231.8 \times 10^4 \text{ m}^2$					No. 4 ブロック $A_4=71.3 \times 10^4 \text{ m}^2$					湾外逸散熱量 $Q_n(\text{cal/s})$
	$T_3(^{\circ}\text{C})$	Q_{ps}	Q_{h3}	Q_{e3}	計	$T_4(^{\circ}\text{C})$	Q_{ps}	Q_{h4}	Q_{e4}	計	
$\eta=108$	28.19	4.65	-0.40	-6.30	-2.05	27.20	4.65	-0.10	-5.7	-1.15	4.30×10^7
207	27.91	4.65	-0.38	-6.13	-1.86	27.13	4.65	-0.09	-5.6	-1.03	5.24×10^7

表-7 温水放流熱量の散逸エネルギー分担配分比 (r : 混入率, η : 潮位の変化)

冷却水 使用水量	熱エネルギー散逸分担	ブロック 番号	$r=20\%$ $\eta=108$ cm	$r=20\%$ $\eta=217$ cm	$r=60\%$ $\eta=217$ cm
$Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$	海面から冷却する熱エネルギーの割合	1	0.09	0.08	0.08
		2	0.18	0.14	0.17
		3	0.35	0.32	0.28
		4	0.06	0.05	0.05
$Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$	移流効果によって湾外へ逸散する熱エネルギーの割合	潮 汐	0.22	0.32	0.37
		放流水流れ	0.10	0.07	0.04
	海面から冷却する熱エネルギーの割合	1	0.06	0.07	0.07
		2	0.13	0.12	0.11
		3	0.30	0.26	0.23
		4	0.03	0.04	0.04
$Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$	移流効果によって湾外へ逸散する熱エネルギーの割合	潮 汐	0.20	0.30	0.40
		放流水流れ	0.28	0.21	0.15
	海面から冷却する熱エネルギーの割合	1	0.06	0.07	0.07
		2	0.13	0.12	0.11
		3	0.30	0.26	0.23
		4	0.03	0.04	0.04

温水層からの混入率を 20% 以内におさえれば、潮位変化 108~217 cm, $Q/A=(0.46\sim 1.39) \times 10^{-5}$ m/sec の値に対してほぼ 20~30% の値を有する。したがって残りの熱エネルギーの散逸は放流水の湾外への移流効果で 10~30%、海面からの表面冷却過程が 50~60% 程度受けもつわけである。しかし、取水地点前面海域の水深が浅く上層温水混入量がかなり大きいときには (たとえば混入率 60% に対して) 潮汐による移流効果が 4 割ほどの熱エネルギーを湾外へ運び出す作用を分担している。

5. 冷却水放水に伴う流れと熱拡散との相互干渉⁷⁾

一般的に、冷却水放水による流れと熱拡散の現象は、複雑な過程から成り立っている。冷却水放水による流動形態は、海域内における水温分布を変化させるであろうし、また逆に水温成層分布形態は流れの現象を支配するであろうことが予想される。このように、流動の現象と熱拡散のそれとは、お互いに独立に考えられる現象過程ではありえなく、両者の相互干渉にもとづく流れおよび拡散の場を形成しているものと考えられる。そこで、これらの現象過程を確認するために、流れと熱拡散との相互干渉を考慮に入れた放水口を含めた垂直断面内 ($x-z$ 面) での数値実験を行ない、温水冷却水を表層流出せしめる方式としたとき、湾内2成層分離状態の出現つまり水温躍層面の形成過程の確認をする必要がある。

数値実験に際して、流動と熱拡散現象過程の両者を同時に考慮した場を解くためには、式(1)~(4)を連立させて、同時に解く必要がある。ただ、注目すべきは、各式に水温の変化にともなう密度変化の項が入っており、これをそのまま考慮して厳密に解くことは非常に困難であるし、はたしてそれ程必要であるかという疑問が生じ

てくる。というのは、 ρ の変化は重力効果と結びついて始めて重要性を帯びてくるからである。すなわち、連続方程式(2)は Boussinesq の近似におきかえても差し支えないものと思われる。

この仮定にもとづくと、流線関数 P が導入できるので、冷却水放水による湾内の流動を規制する方程式(1)、(2)はつぎようになる。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(A_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(A_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left((A_x + A_z) \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} \right) = -\rho_0 \alpha g \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots (8)$$

上式の右辺には、水温の水平勾配の項が含まれており、これが流れに対してある拘束力を持つものと解することができる。ここに至って、流動と熱拡散分布についての解は、式(3)と(8)との連立解に置き換えられたわけであるが、これらの式をそれぞれ差分方程式に変換して、電子計算機による数値計算を実施した。

計算手順としては、第1次近似として式(8)の右辺を無視して得た解 $P_{i,k}^{(1)}$ (つまり、 $u_{i,k}^{(1)}$, $w_{i,k}^{(1)}$) を式(3)に代入して、水温についての第1次近似解 $T_{i,k}^{(1)}$ を求める。この $T_{i,k}^{(1)}$ を改めて式(8)に代入して、流

図-12 冷却水放出にともなう流速分布形状 (M 発電所放水口沖)

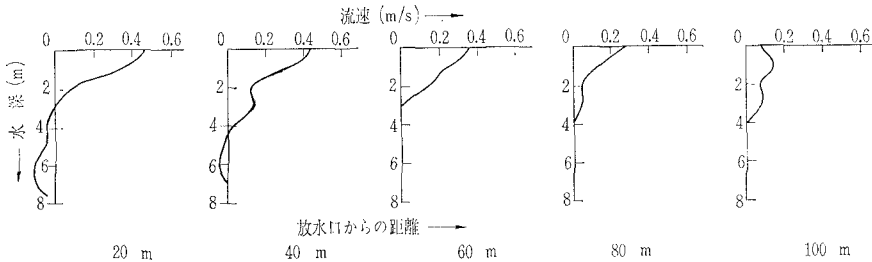


図-13 数値実験による流速鉛直分布の一例

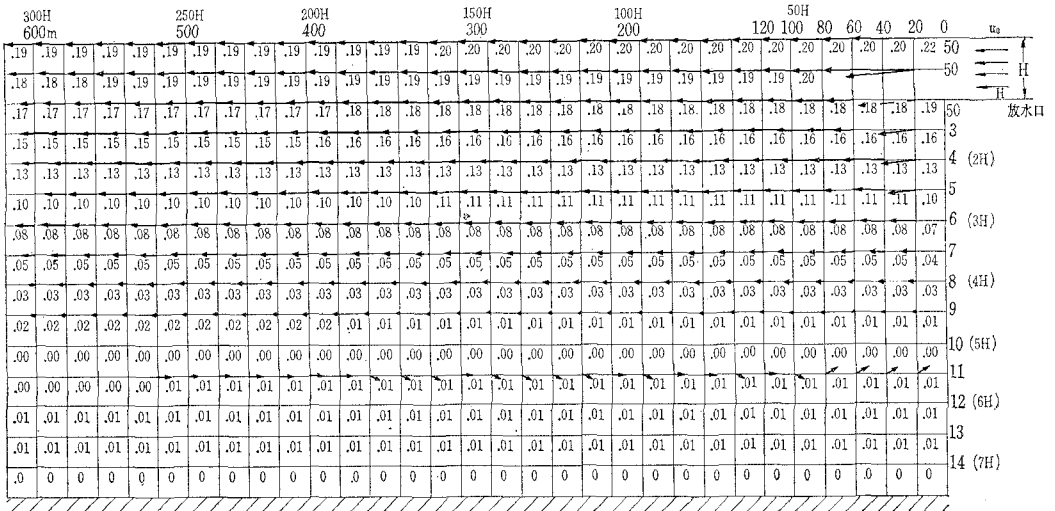


図-14 数値実験による水温鉛直分布の一例

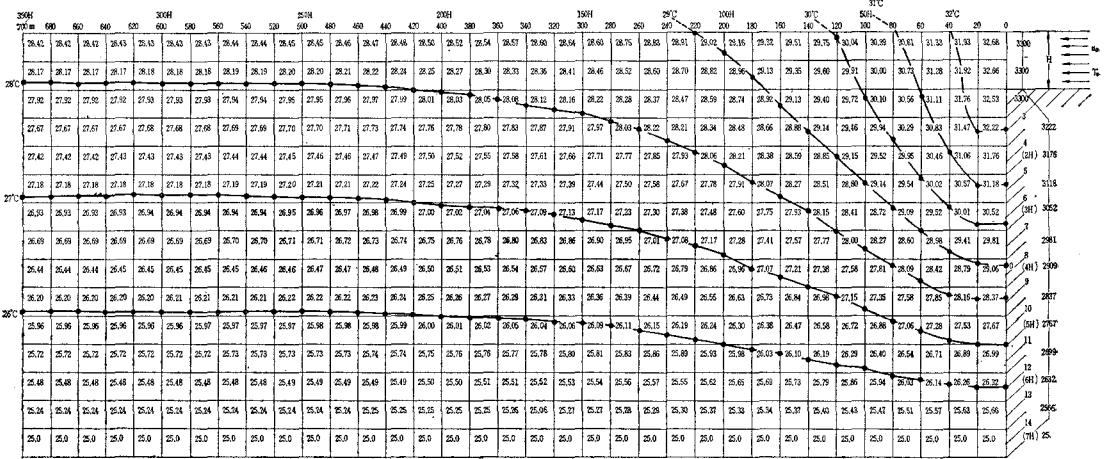
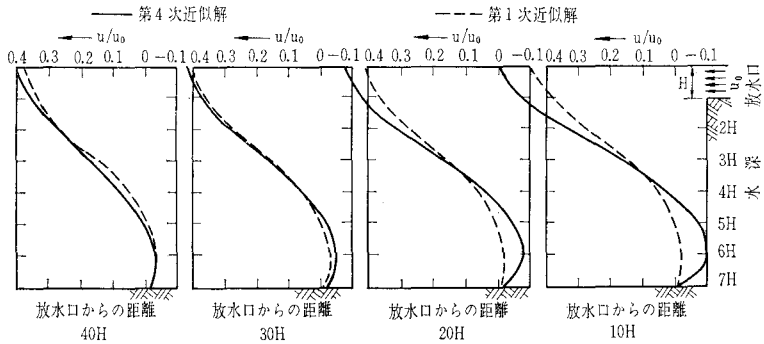


図-15 水温分布と流れとの相互干渉を考慮に入れた流速分布の形状



線関数の第2次近似解を求める。この過程がくり返されるならば、必要とする解が最終的に得られるであろう。このようにして求めた解は、第1次近似解に対して流動と水温成層分布との相互干渉の影響をある程度与えるものと思われる。

さて、放水口から放出された温水冷却水は、一つはその慣性モーメントのため、一つはその低密度のために、上層流れとして湾内を流下するであろう。したがって、この上層内の冷却水の流れは、ある面のところで下層に対して接線応力を作用させ、これが海底に沿って放水口へ向かう補償流の介入を促すであろう。最近まで、この現象の内部機構を把握するための研究はほとんどないと思われる。筆者らは、沿岸域における湧昇運動についての系統的な現場実測を1964年以来、水島湾、三池港に位置している発電所放水口付近で実施してきた。これらの海洋観測結果から、つぎのことが見出されている。それは、冷却水放水にともなう湾内表面流出によって、下層において外海水の流入現象をひき起こすということである。したがって表層と下層との間で相対速度が大なるところでは、下層からの湧昇運動が起こっているものと思われる。図-12は、M火力発電所における冷

却水放出による沿岸域での return flow 生起の状態を表わしている。湧昇運動の存在は図-2に示された熱拡散の垂直構造を見ても理解できる。ここにおいて、沿岸の放水口に向かう等温線のゆるやかな上昇形態が湧昇領域の水温分布構造の顕著な様相を示すものである。

湾内において、この種のタイプの下層流れが生起する現象は、数値実験によっても再現することができた。図-13, 14は、それぞれ数値実験による流速および水温鉛直分布の一例を呈示したものである。

数値実験による解の一般的特性は、図-15に示されている。この図は、第1次および第4次近似の速度解を与えるものである。ここにいう第1次近似解(図中、点線で示された曲線)とは水温と流れとの相互干渉を考慮に入れていない、つまり同じ密度を有する流体内へ冷却水を放出せしめたときの拡散場を意味し、第4次近似解(図中、実線で示された曲線)は流れの場に熱拡散現象を加味した場を与えるものである。放水口断面より沖合における流速分布曲線を見るに、表面では outflow, そして下層では外海水の inflow の流況を呈示していることがわかる。相互干渉を考慮に入れた高次近似解は、第1次近似値に対して水温と流速の垂直分布形状に相当の

影響をおよぼしている。特に放水口付近の相互干渉を考慮に入れた解は、第1次近似解に比して表面流出速度を増加させ、底層流入速度を減少つまり放水口へ向う流れを生ぜしめている。しかしながら、放水口を遠ざかるにしたがって、2層間のいわゆる“differential advection”効果は、これらの層における不安定性を発達させるようになり、このことはつまり、垂直方向の拡散率をより増加させる働きをさせるものと思われる。

流れに密度変化を加えると、つぎのごとき流れのモデル場が考えられる。それは、下層水は境界面と目される面を通して上層に吸いこまれ、この面直下のところでは沖に向う流れが存在し、この一部分が上層に吸いこまれる。他方、放出流の速度は深さとともに減少し、ある深さ以下では底層海水は逆に岸の方向に向かって流入してくる。これらの流れの様相は、冷却水放水にとりなう流れの機構をある程度示唆しているように思われる。以上の計算過程においては、渦動拡散係数は乱れに強く支配されるのかかわらず一定であると仮定してきた。乱れの状態におよぼす熱成層分布の影響は Richardson 数によって表わされる。しかし流速の鉛直勾配が小さいとか、密度の鉛直勾配が強いときには、乱れは stability に依存している。現在成層海域において渦動拡散を変化させたときの計算を実施中である。この計算においては、渦動拡散係数は、static stability の関数であると仮定している。

6. む す び

以上、筆者らは従来実施してきた温度密度流に関する基礎的研究や本邦各地の湾における現地観測の調査資料にもとづいて冷却水熱拡散現象の実態と密度成層分布の安定性を論じた。さらに熱収支モデルによるシミュレー

ト計算を実施し、湾内外水の熱交換過程に潮汐作用が大きいことを確認した。また放水口沖における流速と水温に関する系統的な現場観測を行なった結果、冷却水表面流出にとりなう底層における return flow の生起が確認された。他方、湧昇流の発達の機構が流れと熱拡散との相互干渉を考慮に入れた数値実験によって明らかにされた。今後本研究に要求される課題として、冷却水放水にとりなう湾内水温鉛直分布—水温躍層面—の形成過程、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、湾内水循環の機構の解明などが考えられる。こうした点についてさらに検討して冷却水再循環問題の解決に努めたいと考えている。

謝 辞 本文の内容について、種々ご教示、ご討議をいただいた東京大学・海洋研究所 高野健三博士に厚くお礼を申し上げる次第である。さらに海象調査を行なうに際して、終始懇切な御配慮と熱心なご協力をたまわった中国電力KK土木部ならびに日本原子力発電KK建設部土木建築課の関係各位に厚くお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 和田 明・中川友康・片野尚明(1965): 入江内における冷却水取放水の研究(1), 土木学会第12回海岸工学講演会講演集。
- 2) 和田 明(1965): 水温躍層面におよぼす風の影響。土木学会第12回海岸工学講演会講演集, 電力中央研・技研報告, No. 65084。
- 3) 和田 明・中川友康・片野尚明(1965): 敦賀地点原子力発電所の冷却水取排水に関する水理学的検討・電力中央研・技研依頼報告, No. 65095。
- 4) 和田 明(1966): 冷却水放水に伴う流動と熱拡散現象・電力中央研・技研報告, No. 66033。
- 5) Wada, A (1966): A study on phenomena of flow and thermal diffusion caused by outfall of cooling water, The Tenth Conference on Coastal Engineering, Tokyo。