

1 発電所冷却水排水に伴う密度流現象

和田 明 (電力中央研究所)

※ 本文は、「温排水に関する水産海洋研究座談会」で発表した内容を主体にしてまとめたものである。

1) 緒 論

多量の冷却水を使用する火力(原子力)発電所の復水器冷却用水の取水温度は、発電コストを占める燃料費の節減に重要な関係を有している。すなわち、冷却用水として海水を直接使用する際には、冷却効率の点からみてできるだけ低温の海水を取水することが望ましい。

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趨向からすれば、多量の冷却水放水による湾内の水温上昇については取水温の影響が重要な問題として浮かび上ってくる。

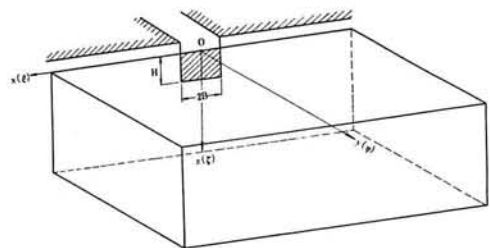
一般に、冷却水の再循環量に影響をおよぼす主要な因子は、取水・放水口間の距離、放出水温の拡散状況、湾内での熱収支、潮汐作用による外海との熱交換、風応力とその吹送方向、湾の形状とその水深、海水域における水温成層状態などである。これらさまざまな因子に依存する再循環問題を解くためには、これら作用因子の影響を個々に分離して考察し、それから得られた結果を総合的に考察することが必要である。

この問題に関する研究の1部として、冷却水取水構造物の設計に関連して、低温低層水の取水方法、それに伴う密度流現象についての検討も必要である。^{1) 2)}

さて冷却水の再循環問題については、まだ合理的な解析法が総合的に確立されていない。もとより、多くの要素と複雑な機構に支配される湾内の水温拡散現象を把握するためには、特にその目的のために計画された現場観測と、それにもとづく綿密な解析を要することはいうまでもない。そこで現段階で運転状態に入っている発電所のある湾内での水温拡散状況について現状把握し、将来のプラント増設計画に際して、水温変化を近似的にでも予想し得るような理論的解析を試みることは発電のみならず工業用水利用面からみてきわめて重要な課題である。

2) 基本方程式の構成

冷却水循環量を予知するために、復水器通過後の温水冷却水が海域へ拡散していついかなる水温分布状況を呈示し、いかに取水口へ再来するのかわかることは重要な問題である。こ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。つけ加えるに風、



第1図 3次元熱拡散模型図。

潮汐流、海水域の形状といったような多くの他の因子をも考えなければならない。第1図に示すごとく、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<形断面(幅2B、高さはH)とし、ここから温度T₀の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。慣性項と潮汐効果を見捨てた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。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g \lambda_k \quad (1)$$

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

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: x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: 海水密度、g: 重力の加速度である。

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。

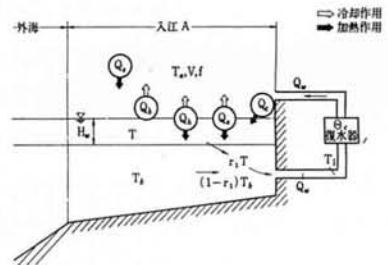
$$U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_j}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{Q_0}{\rho \cdot C_w \cdot H_w} \quad (3)$$

ここに、T: 水温、K_j: 渦動拡散率の成分、Q₀: 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。

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。(第2図参照)

第1表 熱バランスの主要過程

水温を暖める過程	水温を冷却する過程
1. 太陽・天空からの輻射エネルギー Q _s	1. 水面からの逆輻射 Q _b
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
3. 凝結 Q _e	3. 蒸発 Q _e
4. 発電所からの熱の付加 Q _c	4. 海底を通じての伝熱 Q _c



第2図 熱收支模型図。

以上の関係から、自然状態における表面層における熱得失に対する方程式は線型結合され、つぎのようになる。

$$Q = Q_s + Q_b + Q_h + Q_e = Q_0 - Q; T \quad (4)$$

海面での冷却項を含んだ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において零、海面および無限海域においては、水温勾配は一定の値を有する。

3) 冷却水熱拡散の3次元数値解析

(1) 湾内における熱収支の算定

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つて、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、冷却水の温水放水によつて、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、表面水温とりもな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まらぬ湾内の水温分布は放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つても求められるが、別の角度から熱収支論によるシミュレーションを主とした非定常現象として、アナログ・コンピュータを駆使した手法によつても算定することができる。

すでに筆者等は、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流量等によつていかなる値となるかについて結果をもとめている。³⁾

(2) 冷却水熱拡散現象の実態と密度成層分布の安定性

一般に、海水温の鉛直分布を調べると水温躍層と目される面上ではほぼ一定の水温を示している。この部分は水温ばかりでなく塩分したがって密度もほぼ一定で均質な海水から成っていて、いわゆる表層混合層を形成している。風などの外力作用によつて上下2層の混合が進んでくると、中間層が発達して密度鉛直分布は連続的になる。表層水が夏季、日射によつて加熱されると、鉛直安定度 $B = (1/\rho) \cdot (\partial\rho/\partial Z)$ がきわめて大きくなるため、Richardson数 $R_i > 1$ となり下層水との鉛直混合が起りにくくなる。さて、湾内の水温と外海のそれとは若干異なることが予想される。事実、各地の湾での水温調査の結果、表面水温は湾の内外では $1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ 程度相違していることがあるので、深層水温についても湾内と外海とは相違があり、また湾内に温水冷却水が放出される場合、逐次その熱が下層に拡散し、次第に湾内水温上昇が起こるのではないかという疑問がもたれる。しかしながら、全国各地の湾における水温成層状況を観測した資料によると、湾奥より湾口に至る水温躍層面は水平成層状態を呈し、湾内深層水温は外海深層水塊と同様な水温を示している。そしてこの躍層面の深さは $3\text{m} \sim 5\text{m}$ 程度の位置にあり、湾ごとにあまり大きな変化が認められない。⁴⁾

さて一般に温水冷却水の拡散の様相を知るためには、現場実測や水理模型または数値実験に頼らざるを得ない。しかし水理模型実験によつては実際の現象との相似性ととの点で問題が生じてくる。そのためにも実際の発電所温水放水時の拡散の実態を正しく把握しそれから数値実験ないし水理模型実験を行なう必要があると思われる。一般に入江内放水口付近の海況は排出される冷却水量の影響を受けておりその付近の水温混合状況を推定するには、冷却水の海域への流入混合の機構を知る必要がある。そこで過去2年間にわたつて瀬戸内海に面する湾内のM火力発電所で現場実測が行なわれた。そして、この温水拡散のデータをもとにして水平および垂直方向の渦動熱拡散率を算定するとともに、潮汐流の落潮期および漲潮時、水温成層状態によつて温水拡散がどのように支配されるかを詳細に検討した。⁵⁾ これらの水平分布を見るに放水口から遠ざかるに従つて、放出された冷却水水温は徐々に減少し、いわゆる舌状分布を呈示し、比較的高温を有している層は放水口から、みかけ上、60m~80m離れた領域にまで、およそ2~4mの厚さの表面層のみに観察される。海面下4m層以下には、この放水温の影響が急になつており、これは表層と下層間の密度差の大なる為、安定度が大きで鉛直交換が生じていない事を示している。これに反して、明白な水温成層状態のない季節においては、水平拡散の影響も受けるが鉛直混合の効果も現われ、そのため下層の低温水と混合して水温は低下すると考えられる。また放水口から沖へ向かう方向の拡散効果は潮汐流の作用を受けている沿岸に平行な方向の拡散の2~3倍のオーダーを有しており、また水平熱拡散性が垂直方向のそれのおよそ50~80倍であつて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。また、日本沿岸の入江内水域においては、放出水温舌状分布形状はもちろん放水流量によつて異なるが、潮汐流の advection 効果によつて孤立水塊形状をなす事はないと思われる。

以上のことからして放出水温の減少は、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べきであると結論される。

次に、風の吹送に伴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。密度差の小さい均質海水については、短時間の吹送によつてもかなりの深さにまで混合が発達するであろう。しかし上層水が加熱されたりして密度差が大きくなると鉛直安定度がよくて乱流がなかなか起りにくく、渦粘性の値は小さくなる。たとえ、風がごく表面付近だけを擾乱させ、これに続く混合過程によつて均質上層を形成したとしても、この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。したがつて、この均質な上層はそれ以上発達しにくくなる。このように上述の種々の原因により海の表面にある温水が下層に達し底層まで均一化するようなことは起らないだろうと予想される。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おこなうにあつては、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。^{6) 7)}

(3) 冷却水熱拡散の3次元数値解析⁵⁾

3次元空間における熱拡散方程式(3)は、一般性をもたせるために、次のような異なる座標系の項によつて表わすことができる。

$$\rho_0(1-\alpha T)\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\xi^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \zeta^2} - \left(\frac{\partial}{1-\alpha T}\right) \left[\left(\frac{\partial T}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \zeta}\right)^2 \right] + B_0 - B_1 T \quad (5)$$

ここに、 $\lambda = U/\sqrt{K_X}$, $\xi = x/\sqrt{K_X}$, $\eta = y/\sqrt{K_Y}$, $\zeta = z/\sqrt{K_Z}$, $B_0 = b_0/C_w \cdot H_w$, $B_1 = b_1/C_w \cdot H_w$ である。

2. で述べた境界条件についても座標変換を行なうと、つぎのようになる。

- (i) $\eta = 0$, $-B/\sqrt{K_X} \leq \xi \leq B/\sqrt{K_X}$, $0 \leq \zeta \leq H/\sqrt{K_X}$ で $T = T_0$
- (ii) $\eta = 0$, $\xi > B/\sqrt{K_X}$ か $\xi < -B/\sqrt{K_X}$, すべての ζ および $\eta = 0$, $-B/\sqrt{K_X} < \xi < B/\sqrt{K_X}$, $H < \zeta$ に対して $\partial T / \partial \eta = 0$
- (iii) 放水口より無限遠(充分遠方)においては、水温の沿直分布は温水放流の影響を受けない自然状態の形状を有しているものとする。
- (iv) $\zeta = 0$ で $\partial^2 T / \partial \zeta^2 = 0$ とする。
- (v) $\zeta = \zeta_b$ (海底)で $T = T_b$ (深層水温)が保たれているものとする。

電子計算機によつて水温拡散分布を計算するために、有限差分を使う加速 Liéhnmann 法を導入する。⁸⁾ 熱拡散方程式(5)に対する差分近似式として次式を得る。

$$T(\xi, \eta, \zeta) = [F1 \cdot T(\xi+1, \eta, \zeta) + F2 \cdot T(\xi-1, \eta, \zeta) + F4 \{ T(\xi, \eta+1, \zeta) + T(\xi, \eta-1, \zeta) + T(\xi, \eta, \zeta+1) + T(\xi, \eta, \zeta-1) \} + F5 \cdot B_0 + F6 \{ (T(\xi+1, \eta, \zeta) - T(\xi-1, \eta, \zeta))^2 + (T(\xi, \eta+1, \zeta) - T(\xi, \eta-1, \zeta))^2 + (T(\xi, \eta, \zeta+1) - T(\xi, \eta, \zeta-1))^2 \} (1-\alpha \cdot T(\xi, \eta, \zeta))^{-1}] \div [1 - F3 \cdot (T(\xi+1, \eta, \zeta) - T(\xi-1, \eta, \zeta))] \quad (6)$$

式(6)について、 $T^{(k+1)}(\xi, \eta, \zeta)$ と $T^{(k)}(\xi, \eta, \zeta)$ との差 $R^{(k)}(\xi, \eta, \zeta)$ に加速パラメータ A_p を乗じて新しい $(k+1)$ 近似値

$$T^{(k+1)}(\xi, \eta, \zeta) = T^{(k)}(\xi, \eta, \zeta) + A_p \cdot R^{(k)}(\xi, \eta, \zeta) \quad (7)$$

を作る。そして海域内すべての節点に水温分布の初期近似値を与えて、IBM 7090型の電子計算機によつて計算を実施した。

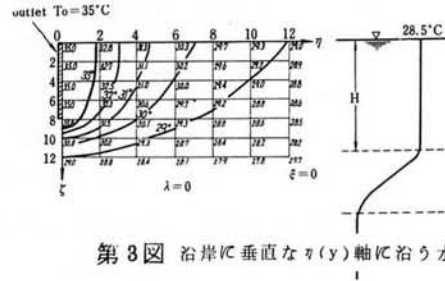
数値計算は、沿岸に平行な潮流効果を含んでおり、海域で水温鉛直分布が一様な場合と、夏季に相当する水面下3~5m層に大きな水温鉛直勾配を与えた場合の2ケースにつき、沿岸水域の水温鉛直分布状態によつて温水拡散がどのように支配されるかを調べた。

第3、第4および第5図は数値計算によつて求めた。3次元空間における各断面での放水熱拡散分布状態を示したものであつて、ちょうど夏季に相当した水温鉛直分布を境界条件のなかに考慮してある。これらの図から、3方向の渦動熱拡散率を設定して、図上の座

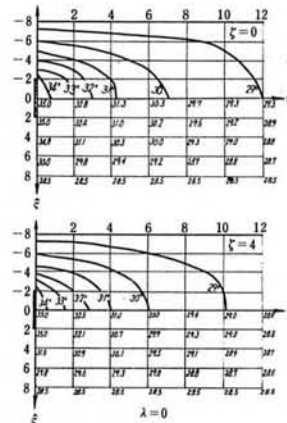
標を適当に伸縮させてやれば各種の拡散場に対する水温分布図をただちに求める事ができる。さらにもとの座標系にもどつて、拡散係数值に現場実測によつて得たそれを代入して数値計算を実施した。計算結果によると、沿岸域で顕著な水温躍層面が存在している場合には、水温躍層面と目される層での大きな安定度のために放出温水塊はこの躍層面を通じて下層に拡散することなしに表層付近の水塊と混合を生じる傾向にあり、等温線の放水口からの距離も海域で鉛直水温分布が一様な場合に比して大となつている。しかるに、後者の場合には放出温水塊は比較的下層部にまで一様混合する傾向を示している。

4) 冷却水の力学的挙動を考慮に入れた熱拡散現象^{5) 9)}

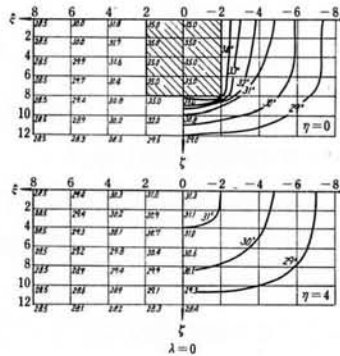
冷却水放水口からの放出水による水深方向の流速分布とそれに伴う熱拡散分布は、現地観測および数値解析の結果からしてほとんど躍層面以上に限られることが判明している。そこで冷却水の流動および熱拡散現象は、平面状2次元の取り扱いができると仮定して、その数値解析をおこなつた。すなわち、渦粘性の卓越する流れの場の問題は、流線関数の導入によつて、重調和型の方程式の解によつて求めることができ、かつここで求めた移流成分を、熱拡散方程式内の該当項に代入することによつて平面状熱拡散分布が求められる。連続式(2)に流線関数を導入すると流れを規制する方程式は次式によつて表わすことができる。



第3図 沿岸に垂直な $y(y)$ 軸に沿う水温の垂直分布



第4図 表面および $\zeta = 4$ 層での水温の水平分布



第5図 沿岸に平行した各断面での水温の鉛直分布。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(A_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(A_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left((A_x + A_y) \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (8)$$

ここで、水平方向の渦粘性 A_x , A_y が一定であると仮定すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial^4 P}{\partial x^4} + \delta \frac{\partial^4 P}{\partial x^2 \partial y^2} + (1 + \delta) \frac{\partial^4 P}{\partial y^4} = 0 \quad (9)$$

ここに、 $\delta = A_y / A_x$

従つて、任意の平面地形を有する湾内の流れの場合は、式(1)、(2)を連立させて定まる u , v , P の代りに、式(8) (あるいは式(9)) で定まる $P(x, y)$ を事後に方向微分して得られるわけである。これよりさらに、その合成速度および流れの方向が算出できる。

境界条件は

$$P = \int \frac{\partial P}{\partial x} dx + \int \frac{\partial P}{\partial y} dy = -V_0 \int dx + U_0 \int dy \quad (10)$$

によつて、沿岸境界上の各点における流線関数 P の値を設定できる。

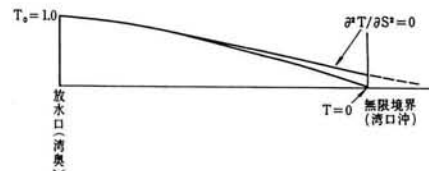
一方、熱拡散方程式(3)は、見かけの水温 T_2 を導入することによつて次式のように書きかえることができる。

$$U \frac{\partial T_2}{\partial x} + V \frac{\partial T_2}{\partial y} + B_1 \cdot T_2 = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) \quad (11)$$

ここに、 $T_2 = T_1 + (B_1 T_s - B_0) / (\Delta T \cdot B_1)$, $T_1 = (T - T_s) / (T_0 - T_s)$
 $= (T - T_s) / \Delta T$, $B_0 = b_0 / C_w \cdot H_w$, $B_1 = b_1 / C_w \cdot H_w$, T_0 : 放水口出口の放水温度、 T_s : 放水の影響を受けない水域の表面層温度である。境界条件式としては、 s を距離とすると沿岸に垂直方向の熱勾配 ($\partial T / \partial s$) はないものと仮定できる。その他に、 $T_2 = (T - B_0 / B_1) / \Delta T$ となるゆゑ、放水口では $T_2 = 1.0$, 放水の影響を受けない海水域の表面温度を $T_2 = 0.0$ ととることができ、放水口出口の放水温度、無限域における表面層温度の値いかにかわらず、湾内水温分布を求めることができる。しかし、無限域境界 (たとえば湾口よりかなり沖のところ) で放水の影響がないとする境界条件のとり方は熱拡散方程式の性質からみたら必ずしも妥当なものとは考えられない。むしろ水温についての 2 次微分 $\partial^2 T / \partial s^2 = 0$ とつて、境界条件におき代えた方がよい。

実際の湾の場合を例にとつて、この両者の場合の値を比較してみると、湾口沖の境界値設定付近のみに第 6 図で示すように、両者の値に差が認められる。ただ、表面冷却項が卓越するとか、移流効果が小さくなるとかして、湾口沖付近の温度勾配が小さくなつておれば、後者の境界値設定条件に近づいてくる。

一般に、放水口から放出される放流流速は低流速である。したがつて、湾内の流れの場



第 6 図 境界条件設定の違いによる湾内水温分布の様相。

には、渦粘性が卓越しているので、放水口付近の境界の影響、入江の地形にかなりの影響を受ける。この点が一般の噴流現象とおおいに異なるところである。したがって放水口平面配置を決定するにしてもいくつかの平面配置案を考え、それに対して厳密な数値実験をおこない、この計算結果を比較検討して冷却水放水口の最適な平面配置を設定することが望ましい。実際、この算定方法にもとづいて、浦底湾、水島湾などの実際の計画地点に適用し、各発電所冷却水放水口の水力設計を実施してきた。

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量、放流流速との定量的な関係を求めた。計算結果の1部を表一2、3に示す。

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

冷却水使用量 Q (m^3/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。

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

冷却水使用量 Q (m^3/s)	20	40	60	80	100
冷却水放流によつて海域水温が 1°C 上昇する影響範囲	460	920	1,380	1,840	2,300
その影響面積 (m^2)	$\times 10^4$ 178.8	$\times 10^4$ 71.3	$\times 10^4$ 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つてつぎのような気象条件を考えた。

気温：平均気温 28.5°C （最高 32.9°C 、最低 25.2°C ）

輻射量：平均日量 436.7 cal/cm^2

平均風速： $V = 3.3 \text{ m/s}$

相対湿度： $f = 79\%$

雲量： $n = 6.3$

雲の高さに関する係数： $k = 0.083$

深層水温： $T_b = 25^\circ\text{C}$

復水器通過後による温度上昇： $T_c = 8^\circ\text{C}$

水温躍層面の深さ: $H_w = 3 \text{ m}$

上記の諸値は、復水器冷却水設計温度として最も危険側にある夏季 7、8月の気象データである。

ここにいう流れ及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、様々の因子を考へに入れなければならないような特定の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おこなう必要がある。

後述する様に、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伴つて、下層からの湧昇流の現象がみられることである。¹⁰⁾ したがつ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、放水口からの放出流速値を上層温水、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へる。その代り、表一 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。

5) 冷却水放水に伴う流れと熱拡散との相互干渉¹⁰⁾

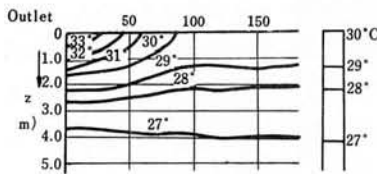
一般的に、冷却水放水による流れと熱拡散の現象は複雑な過程からなり立つているように思へる。冷却水放水による流動形態は海域内の水温分布を変化させるであろうし、また逆に水温成層分布形態は流れの現象を支配するであろうことが予想される。このように、流動現象と熱拡散のそれとはお互いに独立に考へられる現象過程でありえず、両者の相互干渉にもとづく流れおよび拡散場を形成しているものと思へられる。そこで、これらの現象過程を確認するために、流れと熱拡散の相互干渉を考慮に入れた放水口を含めた垂直断面内 ($X-Z$ 面) での数値実験を行ない、温水を表層流出せしめる方式としたとき、湾内 2 成層分離状態の出現つまり水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

流動と熱拡散現象過程の両者を同時に考へた場を解くためには、式(1)~(3)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伴う密度変化の項が入つており、これをそのまま考へ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、連続式(2)は Boussinesque の近似におきかえても差支えないものと思へる。この仮定にもとづくと、流線関数 P が導入できるので、流動を規制する方程式(1)、(2)はつぎのようになる。

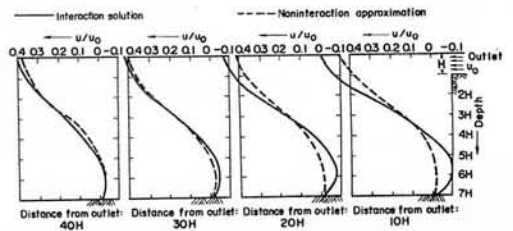
$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} (A_x \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}) + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} (A_Z \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial Z^2}) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial Z} ((A_x + A_Z) \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial Z}) \\ & = -\alpha \rho_0 g \frac{\partial T}{\partial r} \end{aligned} \quad (12)$$

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抱束力を持つものと解することができる。ここに至つて、流動と熱拡散分布についての解は式(8)と(12)との連立解に置き代えられた訳であるが、これらの式をそれぞれ差分式に変換して数値計算を実施した。計算手順としては、第1近似として、式(12)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近似解 $T_{i,k}^{(1)}$ を求める。この $T_{i,k}^{(1)}$ を改めて式(12)に代入して、流線関数の第2近似解 $F_{i,k}^{(2)}$ を求める。この過程が繰り返されるならば、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。

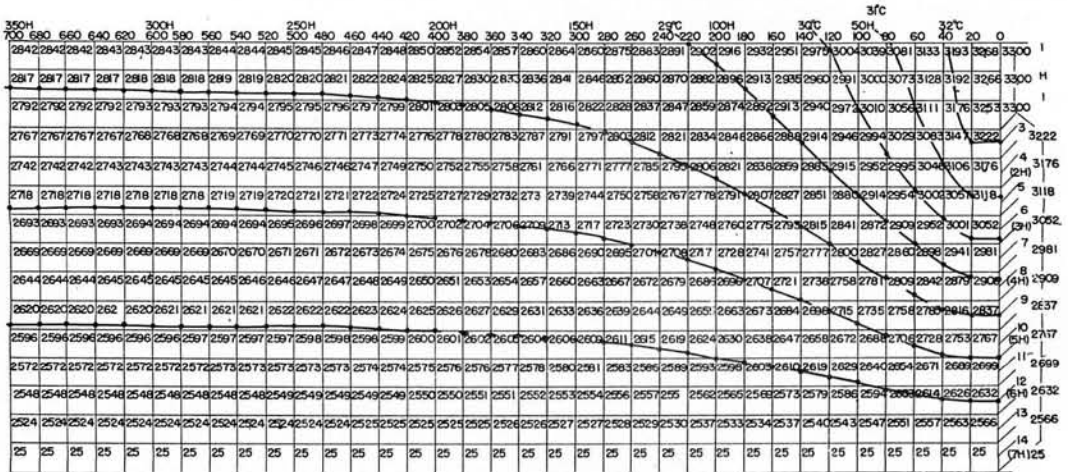
さて放水口から放出された温水冷却水は、一つはその慣性モーメントのため、一つはその低密度のために、上層流れとして湾内を流下する。したがつて、この上層内の冷却水の流れは、ある面のところで深層に対して切線応力を作用させ、これが海底に沿つて放水口へ向かう補償流の介入を促すであろう。筆者は、M火力発電所の放水口付近での現場海洋観測結果からつぎの事を見出した(6~7図参照)それは、冷却水放水に伴う湾内の表面流れは、下層において外海水の流入現象を惹き起すということである。したがつて表層と下層との間で相対速度が大なるところでは、下層からの湧昇運動が起つてゐるものと思われる。湾内においてこの種のタイプの下層流れが生起する現象は数値実験によつても再現することができた。(第8図参照)



第7図 M発電所冷却水放水に伴う垂直水温分布の様相。



第9図 流れと水温拡散との相互干渉を考慮した速度解。



第8図 数値実験による水温鉛直分布の1例(放水路軸方向断面)。

数値実験による解の一般的特性は図-9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部へ放出せしめたときの拡散場を意味し、第4次近似解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。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及ぼしている。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じせしめている。しかしながら、放水口を遠ざかるにしたがつて、2層間の微動対流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共に減少し、ある深さ以下では底層海水は岸の方向に向つて流入してくる。これらの流れの様相は、冷却水放水に伴う流れの機構をある程度示唆しているように思える。

要 旨

本文は、比較的せまい同一湾内において、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、冷却水放水に伴う流動と熱拡散現象の問題を論じたものである。

参 考 文 献

- 1) 千秋信一・和田明(1964); 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・技研報告。
- 2) Senshu, S and Wada, A(1966): Study on bottom water intake for condenser cooling system of power station sited on a bay, Proc. of the 10th Conference on Coastal Engineering.
- 3) 和田明・中川友康・片野尙明(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、電力中央研究所・技研依頼報告。
- 4) 新見正(1963); 堺港発電所復水器の深層取水に関する調査報告書、資 科学研究所。
- 5) 和田明・中川友康・片野尙明(1965); 入江内における冷却水取放水の研究(I)、土木学会第12回海岸工学講演会講演集。
- 6) 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、電力中央研究所・技研報告。

- 7) Wada, A(1966);Effect of winds on a stratied sea bay.
Technical Report of Central Research Institute of Electric
Power Industry., Coastal Engineering in Japan, Vol. 9,
Japan Soc. of civie Engrs.
- 8) Forsythe, G. E. and Wasow, W. R. (1960);Finite-difference
methods for partial differential equations.
- 9) 和田明(1966);冷却水放水に伴う流動と熱拡散現象。電力中央研究所・技研報告。
- 10) Wada, A(1966);Astudy on phenomena of flow and thermal
diffusion by outfall of cooling water. proc. of the 10
th Conference on Coastal Engineering.
- その他、海洋学関係の教科書として次の文献によつた。
- a) Defant, A(1961);Physical Oceanography. Vol. 1, 2.
- b) Sverdrup, H. U. et al. (1946);The Oceans
- c) Proudmann, T. (1955);Dynamical Oceanography.

2 ベネズエラの水産海洋学

福岡 二郎 (ベネズエラ国立東部大学海洋研究所)

1) 序

水産海洋学とは一体何をさすのか著者自身正確な定義は知らなくてこの一文を草するのだから厚顔すぎるようである。しかし、通算してこの国に3ケ年住んでいて現在海洋研究所(ベネズエラの)に身をおき、及ばずながらラテンアメリカの海洋学界の為に働いている。水産と結びつく海洋の研究というような意味でなら何か書けるかも知れないと思ひ、宇田先生のおすすめのまま駄文をつづることにした。

2) 海洋研究機関

最初この国の海洋研究機関について述べておきたい。著者のいるのは国立東部大学附属海洋研究所であり、この国の中心的な海洋研究所である。5部門(物理、化学、地質、生物、漁業生物)があり、2研究部門は日本人が長となつている。この他著者が過去2ケ年を過したマルガリッタ島の海洋生物研究所(民間財団設立)がある。カラカスの中央大学には生物関係の研究部門があるが、海洋物理部門の講義は同大学の水理気象の教室でごく簡単に行なわれているに過ぎない。農林省には水産試験場がある。この機関もクマナにある。別に、I. V. I. C (Instituto Venezeulano de Investigaciones, 厚生省附属)ではマラカイボ湖や、ベネズエラ湾のエピについて研究を進めている。海軍には水路部があるが殆んど活動はしていないようである。著者の見た所、これらお互いの研究機関は協力という事が殆んどない。この点日本は遙かに進んでいる。現在少しづつ共同研究とか協力態勢が問題になつてき