

密度成層海における流れと密度の分布について

電力中央研究所 和田 明

本文は、密度連続分布の海域における流れと密度の場を決定するためのアプローチの一つとして、数値実験による方式をとりあげ深層水取水による海域での流れと密度の分布の形成過程を論じたものである。

1. まえがき

密度流の問題を取り扱うに当って、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いる例が多い。たとえば風の吹送に伴う水温躍層の挙動とか冷却水深層水取水における計算・実験方式等の問題がそれに相当していた。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する分布形状を示していない。したがって問題を2層に分離せしめて解析・実験を進める際に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わけである。ただ躍層と目される付近での渦動粘性、安定度を検討してみて、この付近では非常に安定していること、またたとえ2層間で混合が起ったとしても中間内部層を形成してしまうために、かえって2層間の安定度が増すという事実のため上述の仮定に基く問題のとらえ方でも差支えないと考えてきた。しかし現在の時点においては、改めてこの仮定の妥当性を確認する必要がある。この問題を処理するには、密度と流れとの相互干渉が大きなweightを占める密度場の流れの現象を取り扱うことになり、ある程度実験に頼らざるを得ないであろう。そして与えられたモデルに対して最小限の仮定、基礎式の最小限の簡素化のもとに解析を進めることによって、研究目的が遂行されると考える。本文においては、冷却水深層水取水に伴う海域での流れと水温の分布を求めるための計算を例にとってこの問題のとらえ方を紹介する。密度連続場からの選択取水の研究としては、W.R.Debler,¹⁾ Yih, O'Dill & Debler,²⁾ Robert C.Y. Koh³⁾ および大西・日野⁴⁾等のそれが挙げられる。いずれの場合も、密度が表面より深さとともに直線的に増加する場合を考えており、取水口も点源としてとり扱っている。

2. 基礎方程式と計算方式

この種の問題を解明してゆく上に、2つの計算方法が考えられる。その一つは鉛直断面について積分した物理量(たとえば質量輸送)で解を求める方式である。しかし本問題のごとき鉛直断面内での流れおよび密度の構造を知るためにはあまり有力な手段ではない。というのは、この方式によれば求められるのは海面から海底に到るある鉛直線をよぎって輸送される和であるから、ある点での流速、流量とも関係がない。そういえるのはある層厚をもつ平面状の流れ、鉛直方向に循環のない流れに限られている場合だけである。このように質量輸送の理論は水の流れや熱拡散を論ずるのに無力に近い。他の方式は流速そのもので流出機構を扱うもので、この場合には密度の変化が問題となってくる。本文で行なう計算もこの方式にしたがうものである。筆者らは冷却水の流れおよび熱拡散現象を支配する基礎方程式および式中にてでくる熱収支項の役割を第12, 13回海岸工学講演集⁵⁾で論じたのでここでは簡単に触れておく。

$$\text{運動方程式} \quad \frac{\partial}{\partial x_j} (A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) = u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g \lambda_k \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{連続方程式} \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} \approx 0 \dots\dots\dots (2) \quad \text{密度と水温との関係式} \quad \rho = \rho_0(1 - \alpha T) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{熱拡散方程式} \quad u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_j}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{Q_0}{\rho_w C_w H_w} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_i ：速度成分、 A_j 、 K_j ：渦動粘性および渦動拡散率のテンソル ($K_{ij}=0$ for $i \neq j$, $K_{ij} \approx 0$ for $i = j$), p ：圧力、 g ：重力加速度、 λ_k ： z 軸方向の単位ベクトル、 T ：水温、 Q_0 ：海面での表面冷却・加熱項の線形結合 ($= Q_1 - Q_2 T$), 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。

流動と熱拡散過程の両者を同時に考慮した場を解くためには、基本式(1)～(4)を連立させて同時に解く必要がある。さて現実の流れの機構は、この解の表わすほど単純ではないかも知れないし、拡散方程式の適用の是否・拡散率のモデル設定の方法等に批判の余地も少なくないが、他の手段による解析が困難である以上、各種の拡散モデル設定による流れの様相の解明および現実の現象に対する説明ができるか否か検討することはあながちむだなことではあるまい。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解くことがむづかしいので、差分近似の方法にたよることにし電子計算機 (IBM 360 モデル 75) による数値計算を実施した。

3. 密度連続場からの冷却水取水水温の推定

冷却水取水による流れと水温分布の形成過程は、複雑な過程から成り立っておりお互いに独立に考えられる現象ではありえなく両者の相互干渉にもとづく流れと水温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水温との相互干渉を考慮に入れた鉛直断面内 ($x-z$ 面) での数値実験を行ない、冷却水を深層取水せしめる方式としたときの流れと水温の分布形成過程を確認する必要がある。計算は先に実施した解析の方法⁶⁾とは異なり、基礎方程式(1)～(4)においていかなる項も省略せずに実施するものである。すなわち直接 u_i , p , T を求める代り、渦度 ξ , 流れの関数 P および水温 T の連立方程式の根を求めればよい。なお、基礎方程式のなかに存在している密度変化の取り扱いについては、Boussinesq の近似を適用している。この仮定にもとづくと、流れの関数 P が導入できるので海域での流れと水温の分布を規制する式はつぎのようになる。

$$\xi = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$2 \left(\frac{\partial P}{\partial z} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial z} \right) = -g \alpha \rho_w \frac{\partial T}{\partial x} + 2(A_h \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + A_z \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial A_z}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_z}{\rho_w} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_z}{\rho_w} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (7)$$

式(6)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。計算手順はつぎのようである。 ϵ の第一次近似値は式(5)の左辺を無視して得た解 $P_{i,k}^{(0)}$ (つまり、 $u_{i,k}^{(0)}, w_{i,k}^{(0)}$) を式(6)に代入して得られた結果を用いることにした。この $\epsilon_{i,k}^{(1)}$ を改めて式(5)に代入して流れ関数 $P_{i,k}^{(1)}$ (つまり、 $u_{i,k}^{(1)}, w_{i,k}^{(1)}$) の第一次近似解を求める。したがって式(7)から水温についての第一次近似解が求められる。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、第一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。

渦動粘性および渦動拡散率の設定は乱れ状態におよぼす熱成層分布の影響が Richardson 数によって支配されるとした Mamayev の提案式を基本とした。その基本形はいずれも $(A_z, K_z) = (A_0 \cdot e^{-mR_i}, K_0 \cdot e^{-nR_i}) (A_0, K_0, m, n: \text{定数})$ であるけれども、式系の安定性の面から R_i が大きいときにも (A_z, K_z) の限界値が存在すると仮定して

$$\begin{aligned} A_z &= (A_1 + A_0 \cdot e^{-mR_i}) \\ K_z &= (K_1 + K_0 \cdot e^{-nR_i}) \end{aligned} \quad (8)$$

の形を採用した。ただし、 $n - m > 0$ であり、 $n = 0.8, m = 0.4$ 。係数値として、 $A_1 = K_1 = 0.01 \text{ m}^2/\text{sec}$, $A_0 = K_0 = 0.1 \text{ m}^2/\text{sec}$ を採った。流れと熱についての計算境界条件はつぎのように設定した。(i) 海面では流れは表面に平行、固体壁に直角方向の流れの速度は零、(ii) 熱束は壁に垂直方向は零とする。水温については海面、海底で一定値を与え、無限海域設定境界線において鉛直方向に実際の状態に近い水温鉛直分布を想定した。計算モデルは鉛直 2 次元流れを対象としてとり扱うこととし、冷却水取水方式は図-2 に示すごとく深層取水するものとし、取水口高さは 3 m とした。モデルの大きさは深さ方向に 9 m、長さ方向として取水口沖合 390 m の領域を包含している。格子間隔は水平方向に $\Delta x = 1.0 \text{ m}$ 、深さ方向に $\Delta z = 0.3 \text{ m}$ とした。本計算モデルの取水形式は現在運転中の堺港火力発電所のカーテンウォール取水形式と全く類似しており、計算条件は堺港火力地点の実測データを背景にして設定した。一つの実測例を紹介すると図-1 のようである。したがって計算境界条件(ii)における無限海域での水温鉛直分布の設定はつぎのようになされた。海面では 31°C 、海底では 2.5°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 $d/dz \cdot (Kz/\rho \cdot dT/dz) = 0$ を拡散率モデル(式(8))によって定めることにした。その計算結果は図-1 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を実施した。パラメータとしての取水流速の大きさは $u_0 = 0.2 \text{ m/sec}$, 0.5 m/sec の 2 通りの値を用いた。

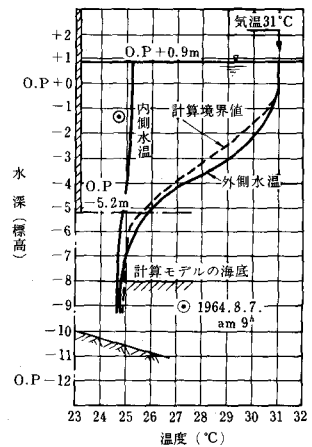


図-1 堺港火力発電所深層取水カーテンウォール内外海水温実測結果 (取水量: $12.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, 取水流速: 0.03 m/sec)

4. 計算結果とその考察

数値実験による速度解の一般的特性は図-2に示されている。この図は第1次および第5次近似の速度解を与えるものである。ここにいう第1次近似解(図中、点線で示した曲線)とは水温と流れとの相互干渉を考慮に入れていない場つまり鉛直方向に水温変化がない海域からの取水特性を意味し、第5次近似解(図中、実線で示した曲線)は両者の相互干渉を加味した場を与えるものである。図-2(a)に対応した水温分布が図-3に示してある。取水口断面より沖合における速度分布曲線をみると、底層においては外海からの流れが取水口へ接近するに伴ってその速度が増幅される様相がわかり、表層でもわずかでは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次近似解に対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。特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。しかしながら、取水口から遠ざかるに従って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生させるようになり、このことは鉛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。図-2(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、低温の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っていることがわかる。図-4は取水流速値の違いによる取水口付近での水温

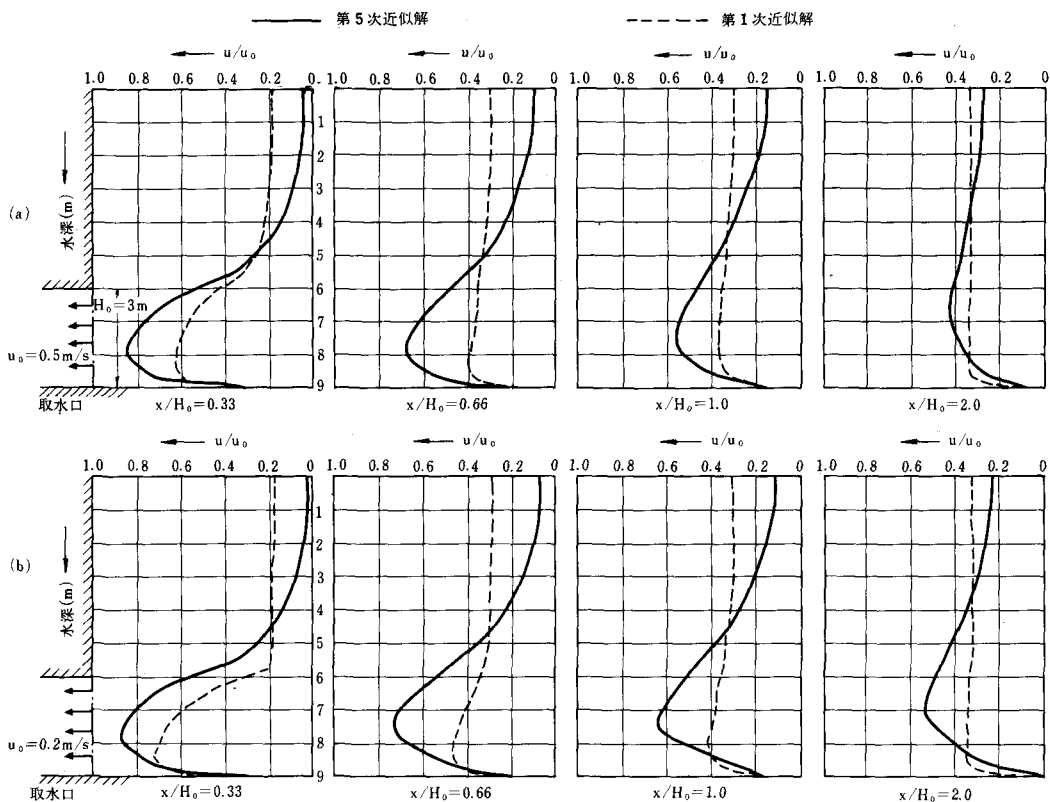


図-2 速度分布の形状

分布を示したものである。図-3および4から、取水口断面の沖合 $x/H_0 = 5 \sim 6$ 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た。

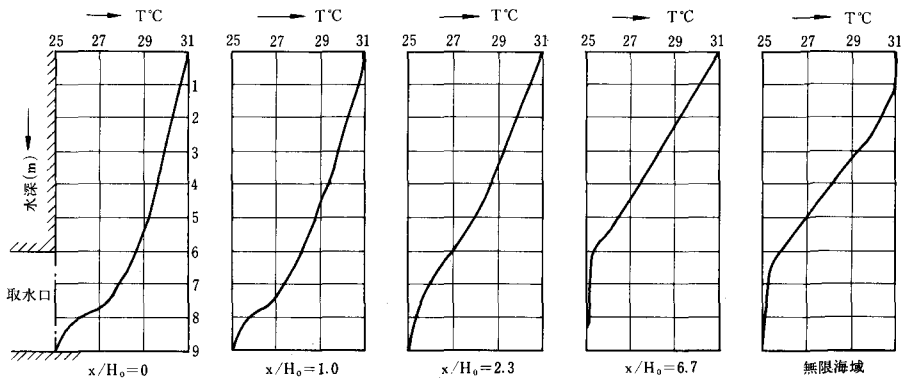


図-3 水温分布の形状

水温連続場からの取水温度 T_i の計算結果は図-5に示してある。取水流速が $u_0 = 0.5 \text{ m/sec}$ のときには $T_i = 27^\circ\text{C}$ ， $u_0 = 0.2 \text{ m/sec}$ のときには $T_i = 26.4^\circ\text{C}$ となり，取水流速値が $1/2.5$ 倍になっても予期した程には取水温度の値には変化が認められない。取水流速を小さくせしめたとき，取水口に向う下層流速の顕著な増加現象が起るのにもかかわらず，この傾向が表われるのは表層において絶対値は小さいが流れが存在していることに起因していると考えられる。そしてこの表層流れが取水口上端の鉛直壁前面付近において鉛直下方に向う流れに変わるため取水流速値を小さくとっても卓越した取水効果が表われないものと思われる。

このような流れおよび水温の場が実際に起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。

本問題に限らず，水理現象の解析を行なうに当って現象面からみて，方程式およびそのなかに含まれる係数の簡素化を行なうのが普通である。しかしこの行為に対する裏付けが完全であるとは常にいえるわけではない。本計算を例にとって考えれば，方程式の非線形項の必要性，渦粘性や渦拡散率といった係数の設定法等が考慮の対象になるであろう。問題によってはかなり簡素化した方程式の組合せによって解けば十分な場合も起り得るであろう。

この点をいろいろな角度から吟味しておくことは，今後の解析

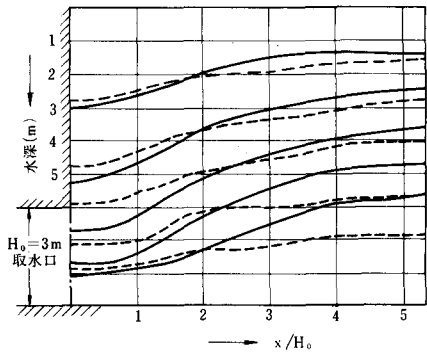


図-4 取水口付近の水温分布

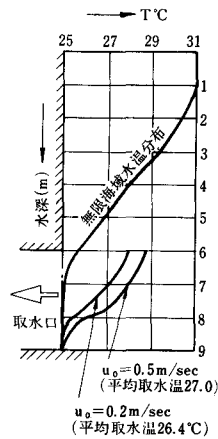


図-5 取水温度

のために有用な示唆を与えるものと考え。ここでは一つの試みとして渦動粘性を一定としたときの数値計算を実施し、上に述べた結果と比較検討することにする。

数値計算の結果、渦動粘性の設定の違いによる流れのパターンの変化は特に速度勾配の大きいところできわめて鋭敏に影響を受けることが判明した。その影響を図示したものが図-6である。この図は図-2 (b) に対応するものであって、第4次から第5次近似解への移行に伴う数値計算の結果を示したものである。 $A_z = \text{一定}$ とした解と $A_z = f(R_i)$ としたときの解の間には予想外な大きな差が表われている。第1次近似解に対する補正量は $A_z = \text{一定}$ とした方が小さい。水温連続分布海域における流れと水温の場を求めるときに当って、渦拡散率と渦粘性とが少なくとも同じオーダーの働きをもつことが確かめられ、この点は今後の解析において念頭に入れるべき事柄と考える。

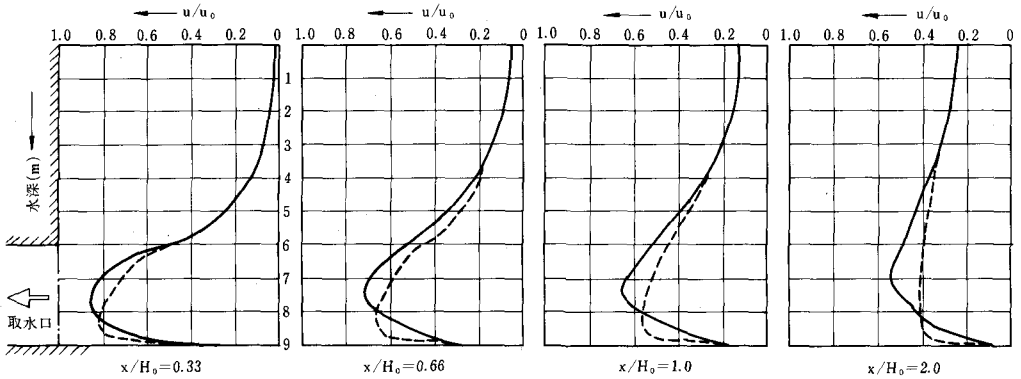


図-6 渦粘性の設定の違いによる速度分布の変化

5. あとがき

今後残された課題は計算の積み重ね、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取水設備の水理設計法を明らかにすることである。電子計算機による数値実験を遂行するに際して、ご協力をいただいた三菱原子力工業KK 古林澄子氏に厚くお礼を申し上げる次第である。

文 献

- 1) Deblor, W.R. (1959) : Stratified flow into a line sink, Trans. A.S.C.E., No. 3101, 491-504.
- 2) Yih, C.S., O'Dill, W. & Deblor, W.R. (1962) : Prevention of stagnation zones in flows of stratified or a rotating fluid, Proc. 4th U.S. Natl. Congr. App. Mech. 1441-1453.
- 3) Robert C.Y. Koh (1966) : Viscous stratified flow towards a sink, J. Fluid Mech., Vol. 24, 555-575.
- 4) 大西外明・日野幹雄 (1967) : 深層取水の流れへの考察 (1), 第14回海岸工学講演会講演集
- 5) 和田 明・片野尚明 (1965, 1966) : 入江内における冷却水取放水の研究 (I), (II), 第12, 13回海岸工学講演会講演集
- 6) 千秋信一・和田 明 (1964) : 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・技研報告 No. 64008