

二成層潮汐モデルによる工業用水取排水問題の展開

和 田 明*

1. ま え が き

ここでは、工業用水としての冷却水取排水の問題をとりあげる。

湾内に設置された発電所の冷却水排出によって、湾内表層水の水温は逐次上昇するが、一方潮汐による湾外への排熱作用や水面と大気間には冷却作用が働くので表層水温とりもなおさず冷却水取水水温が一定値に収れんすることが期待される。温水冷却水排出によって湾内表層水温が平衡状態に達するまでは、この排出熱エネルギーはそれぞれ海面からの冷却過程、湾外への逸散過程および湾内表層水の蓄熱作用におきかえられる。しかるに湾内表層水温が平衡状態に達した後は、この排出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。

筆者らは、第 14 回海岸工学講演会において潮汐作用による湾内外水の熱交換過程についてふれ、冷却水排出による熱エネルギーは排水による流れと潮汐流による移流効果によって湾内全域に拡散効果を受けること、およびとくに潮汐の大きい港の場合を例にとりて、表層温水の取水口への混入率が一潮時平均 30% 程度の場合には冷却水の排出によって湾内表層水温が平衡状態に達するまでに全排水熱エネルギーは、湾内表層蓄熱に 10%、大気への逸散過程に 20%、湾外への逸散過程に 55%、再循環熱に 15% 程度費やされ、さらにその平衡時においては湾外へ逸散する割合は 60%、大気への逸散割合は 20%、再循環熱に 20% 程度費されることを論じた。同一湾内で冷却水の取排水を行なう発電所においては、放流温水の取水口への影響を明らかにする必要がある、とくに取水口が表層温水の混入を許容する場合、表層水の平衡水温が冷却水の取水水温に重要な影響をおよぼすから平衡水温の算定はきわめて大切である。

そのためには、冷却水排出熱エネルギーの逸散過程をできるだけ実際の現象に近い状態でシミュレートする必要がある、ここにその一つのモデルを提示する。

2. 二成層潮汐モデルの設定の理由

冷却水熱拡散現象の実態と密度二成層分布の安定性を検討するべく、1966 年夏季、潮汐の大きい M 港内での

海象調査を実施する機会を得た。実施項目はつぎのようなものである。

- (Ⅰ) 港内定点における潮汐流の流速、流向の測定
- (Ⅱ) 港内定点における水温鉛直分布の観測
- (Ⅲ) 染料によるトレーサ拡散実験
- (Ⅳ) 冷却水排出に伴う排水口付近での流速および水温分布の測定

観測項目 (Ⅰ)、(Ⅱ) では冷却水排出温水塊の潮流移動に伴う拡散過程の調査および港内における水温躍層の安定性の確認、港内水と外海水との海水交換過程の確認、潮汐運動による水温鉛直分布の安定性の有無、項目 (Ⅲ) では港内と外海水との海水交換過程の調査、項目 (Ⅳ) では冷却水排出に伴う流動と水温分布の把握を意図とした。主たる観測点は図-1 に示してある。観測結果の一部が図-2 ないし図-5 に示してある。すなわち、図-2~4 は港内各点における漲潮時ならびに落潮時での流速分布を示し、図-5 は港内各点における水温鉛直分布の時間変化を表わしたものであり、干潮時、漲潮時、満潮時および落潮時の 4 つの段階における記録

図-1 M 港内の流速、水温観測点

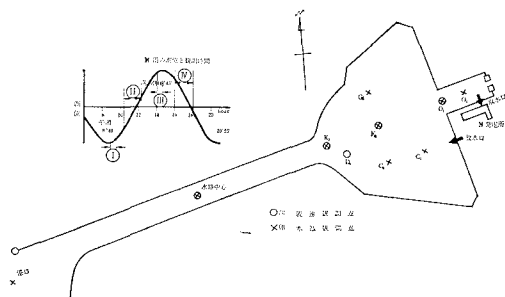
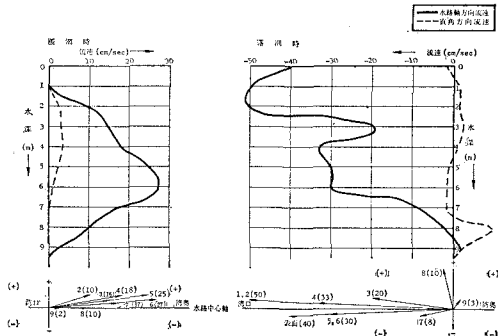


図-2 M 港水路中心における流速分布



* 正会員 工博 電力中央研究所 技術研究所

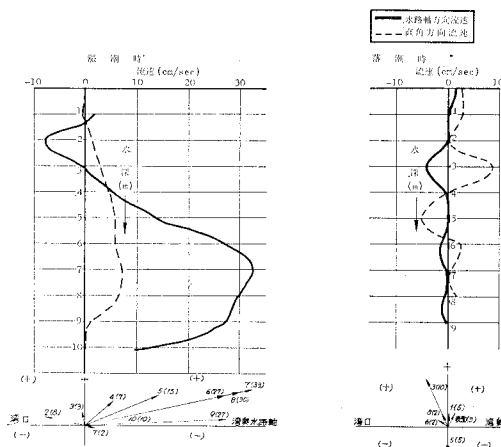
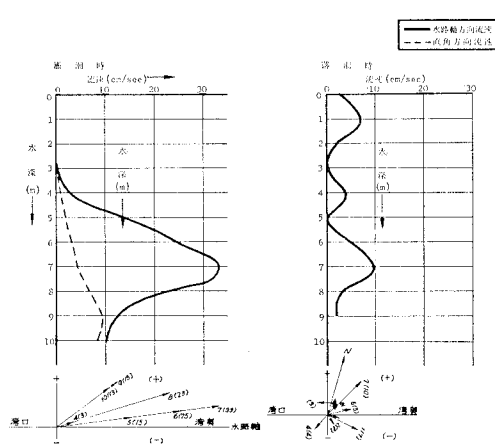
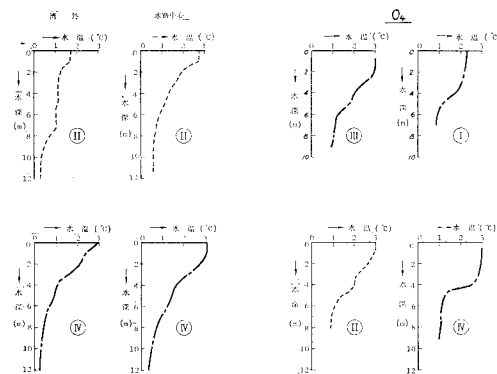
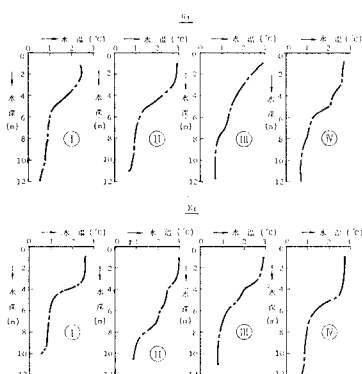
図-3 M 港内 K_2 における流速分布図-4 M 港内 E_1 における流速分布

図-5 M 港内水温分布実測結果

(イ)



(ロ)



が記入されている。図中の I, II, III および IV は潮汐の各段階での観測時刻を示すものであり、図-1 に M 港の潮位記録と対応させて図示してある。なお、水温の値は任意に定めた基準値からの偏差が記入されている。

一連の実験結果から、つぎの諸点が判明している。水路区間においては港軸方向の流れが卓越しているが、いったん泊地内へ入り込むと、その流れは非常に複雑になり、ただ水路軸線のところで流向がかなり明瞭に判別できる程度である。漲潮時においてはその速度分布が放物型をした中層流が卓越し、その最大速度は 27 cm/sec に達している。落潮時においては表層流がきわめて卓越する。これはおそらく、前者の場合には港奥で行き止まりとなっているため入射波の進行性が上昇流に代るために表層速度が減ずるためであろうし、後者の場合には水路が直接外海に連なっているため引潮によって大きな水面勾配が生じるために起こるものと思われる。

一方、漲潮時において、水路より泊地内へ入りこんだ地点（観測点 K_2 ）で中層流が底層流に変化しており、その最大速度は 30 cm/sec 以上に達している。この底層流は取水口近くの地点（観測点 O_4 ）まで存在しており、

この現象が深層水の供給を保証していることがわかる。落潮時での泊地内の流速分布の特徴は水路区間でのそれにくらべてほとんど感知できず、はっきりした傾向がつかめない。

港口、水路中心点での落潮時における水温鉛直分布をみるに表層では流速分布に対応して水温鉛直傾度は大きく、潮汐作用による排熱効果が卓越していることがわかる。この現象は水路部分のみならず港内各点の水温鉛直分布の変化過程にもいえる。すなわち、落潮時から干潮時にかけて排熱の影響による水温鉛直傾度の増大がみられる。このことからして、港内水温の水平勾配は排出熱エネルギーに比して港内面積の小さいことからしてもほとんどないことが確認されている。

いずれにせよ注目すべき一つの点は、潮汐変化の大きい M 港内でも水温躍層がやはり存在していることである。躍層の厚さは一般の港では 2 m くらいであるが、M 港では潮汐乱れの影響もあって 4~5 m の深さに位置しており、上下 2 層間の温度差は夏季、3~4°C である。また夏季、冬季を問わず、明瞭な水温躍層が存在している。取水口近傍の点（観測点 O_2 ）では満潮時から落

潮時にかけてとくに躍層の勾配が大きくなる。

上記の M 港の場合のみならず、各地での海象調査の結果、湾奥より湾口に至る密度の不連続面は水平成層状態を呈し、この躍層の深さは 2~3m 程度の位置にあり、湾ごとにあまり大きな変化がないことおよびこの水温躍層は干満による潮位変化にかかわらずほぼ安定していることが確認されている。

一方、冷却水排出の現象スケールの面から考えると、一般的に流量と流れおよび水温上昇の影響面積との間には相関関係が認められている。これを半無限海域への排水現象について考えると、空間スケールの面からみると、排水量が 50 m³/sec とすれば環境水温 1°C の上昇域は 1.1 km くらいであり、時間スケールの面からみれば上記の拡散範囲に達するまで数時間を要するだけである。一方、冷却水取排水問題が計算の対象となる湾内の場合にも、数週間にわたる時間スケール、あるいは湾の空間スケールの現象に対しては、海域で成層が十分保持できるものと想定される。

3. 二成層潮汐モデル

一般に、湾内の水温拡散分布を支配するタイダル・フ

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{上層} \left\{ \begin{array}{l} \text{連続式: } \frac{\partial}{\partial x_j} \int_d^s \rho_1 u_j dz = -\rho_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t} (s-d) \dots\dots\dots (1) \\ \text{運動方程式: } \frac{\partial}{\partial t} \int_d^s \rho_1 u_i dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_d^s \rho_1 u_i u_j dz - f \int_d^s \rho_1 v dz = \\ \quad -\rho_1 g(s-d) \frac{\partial s}{\partial x_i} + A_h \nabla^2 \int_d^s \rho_1 u_i^2 dz + \left[\left(A_z \cdot \frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_s - \left(A_z \cdot \frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_d \right] \dots\dots (2) \\ \text{熱拡散方程式: } \frac{\partial}{\partial t} \int_d^s \rho_1 dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_d^s (\rho_1 u_j) dz = \frac{\partial}{\partial x_j} \int_d^s \left(K_j \cdot \frac{\partial \rho_1}{\partial x_j} \right) dz + \int_d^s \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \rho_1}{\partial z} \right) dz \dots\dots (3) \end{array} \right. \\ \text{下層} \left\{ \begin{array}{l} \text{連続式: } \frac{\partial}{\partial x_j} \int_b^d \rho_2 u_j dz = -\rho_2 \frac{\partial d}{\partial t} \dots\dots\dots (4) \\ \text{運動方程式: } \frac{\partial}{\partial t} \int_b^d \rho_2 u_i dz + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_b^d \rho_2 u_i u_j dz + f \int_b^d \rho_2 u_j dz = -g(d-b) \rho_1 \frac{\partial s}{\partial x_i} \\ \quad -g(d-b) (\rho_2 - \rho_1) \frac{\partial d}{\partial x_i} + A_h \nabla^2 \int_b^d \rho_2 u_i^2 dz + \left[\left(A_z \cdot \frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_d - \left(A_z \cdot \frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_b \right] \dots\dots (5) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

ここに、 $i, j=1, 2$ はそれぞれ x, y 方向に対応しており、 u_i は流速成分、 A_h および A_z はそれぞれ水平および鉛直方向の渦動粘性、 K_j は渦動拡散率、 ρ は密度、 s, d および b はそれぞれ海面、内部境界面および海底面の位置、 g は重力加速度、 f は coriolis のパラメーター、 E は下層水加入係数、 T および T_b はそれぞれ上層および下層での水温である。suffix の 1, 2 は上層、下層を意味する。また $|u|$ は $\sqrt{u^2 + v^2}$ とかける。

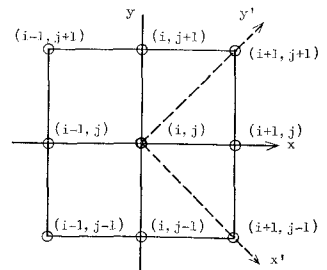
式(1)~(5)を上、下層にわたって積分すると以下の基礎方程式が得られる。これらの式は 図-6 のように $x-y$ 座標と 45° の角をなす新しい座標系 ($x'-y'$) で考えている。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{連続式: } \frac{\partial(s-d)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x'} + \frac{\partial N_1}{\partial y'} = 0 \dots\dots\dots (6) \\ \text{運動方程式: } \frac{\partial M_1}{\partial t} + \left(\frac{\partial(u_1^2)}{\partial x'} + \frac{\partial(u_1 v_1)}{\partial y'} \right) (s-d) + g(s-d) \frac{\partial s}{\partial x'} = \\ \quad -\frac{g(s-d)^2}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial x'} + A_h \nabla^2 M_1 + \left[\left(A_z \cdot \frac{\partial u_1}{\partial z'} \right)_s - \left(A_z \cdot \frac{\partial u_1}{\partial z'} \right)_d \right] (x \text{ 方向}) \dots\dots (7) \end{array} \right.$$

ラッシング作用の解明は冷却水取排水の問題にとって重要である。この問題を解決するためには、沿岸海域における流れ、密度の場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。筆者らはこの問題に関連してアナログ計算機あるいはディジタル計算機の計算手法による空間的あるいは時間的に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、局所的な流れ、水温の時間的変化を算定するためには二成層潮汐流の計算方式が必要とされる。筆者は潮位差の大きい湾内における温水拡散の挙動を電子計算機で算定する数理模型実験の手法の一つとして、二成層モデルによる潮汐と冷却水取排水の条件を考慮に入れて、海域の上層、下層における流動、水温分布および取水温、排水温の値を算定する計算方式を立案した。

湾内のタイダル・フラッシング作用を支配する基礎方程式は上層における拡散方程式を入れて、上下2層に対して以下に示す7元非線形偏微分方程式を解かなくてはならない。さて2成層潮汐モデル方程式は運動および連続方程式、拡散方程式について底面から内部境界面および内部境界面から海面まで積分したものから得られる。

図-6



$$\left. \begin{aligned} \text{上層} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial N_1}{\partial t} + \left(\frac{\partial(u_1 v_1)}{\partial x'} + \frac{\partial(v_1^2)}{\partial y'} \right) (s-d) + g(s-d) \frac{\partial s}{\partial x'} = \\ & - \frac{g(s-d)^2}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial y'} + A_h \nu^2 N_1 + \left[\left(A_z \cdot \frac{\partial v_1}{\partial z'} \right)_s - \left(A_z \cdot \frac{\partial v_1}{\partial z'} \right)_d \right] \quad (y \text{ 方向}) \dots\dots\dots (8) \\ \text{熱拡散方程式: } & \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x'} + v_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial y'} = \frac{1}{(s-d)} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_j (s-d) \frac{\partial \rho_1}{\partial x_j} \right) + \frac{Q_0}{C_p T} - E(R_i) |u| (\rho_1 - \rho_2) \right] \dots\dots\dots (9) \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{下層} \left\{ \begin{aligned} \text{連続式: } & \frac{\partial(d-b)}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x'} + \frac{\partial N_2}{\partial y'} = 0 \dots\dots\dots (10) \\ \text{運動方程式: } & \frac{\partial M_2}{\partial t} + \left(\frac{\partial(u_2^2)}{\partial x'} + \frac{\partial(u_2 v_2)}{\partial y'} \right) (d-b) = - \frac{g(s-d)(d-b)}{\rho_2} \cdot \frac{\partial \rho_1}{\partial x'} + g(d-b) \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial s}{\partial x'} \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial d}{\partial x'} \right] + A_h \nu^2 M_2 + \left[\left(A_z \cdot \frac{\partial u_2}{\partial z'} \right)_d - \left(A_z \cdot \frac{\partial u_2}{\partial z'} \right)_b \right] \quad (x \text{ 方向}) \dots\dots\dots (11) \\ & \frac{\partial N_2}{\partial t} + \left(\frac{\partial(u_2 v_2)}{\partial x'} + \frac{\partial(v_2^2)}{\partial y'} \right) (s-d) = - \frac{g(s-d)(d-b)}{\rho_2} \cdot \frac{\partial \rho_1}{\partial y'} + g(d-b) \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial s}{\partial y'} \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial d}{\partial y'} \right] + A_h \nu^2 N_2 + \left[\left(A_z \cdot \frac{\partial v_2}{\partial z'} \right)_d - \left(A_z \cdot \frac{\partial v_2}{\partial z'} \right)_b \right] \quad (y \text{ 方向}) \dots\dots\dots (12) \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

ここに, M, N はそれぞれ x, y 方向の流量成分で次式で定義されるものとする。

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \int_a^s u_1 dz = u_1 h_1, \quad N_1 = \int_a^s v_1 dz = v_1 h_1 \quad (\text{上層}) \\ M_2 &= \int_b^d u_2 dz = u_2 h_2, \quad N_2 = \int_b^d v_2 dz = v_2 h_2 \quad (\text{下層}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

上式で, $h_1 = s-d, h_2 = d-b$ である。式(7), (8), (11) および (12) 中の摩擦応力の取り扱い, つぎのように行なった。表層では風の応力を考慮しないことから, つぎのようにかける。

$$(A_z \cdot \partial u_1 / \partial z)_s = (A_z \cdot \partial v_1 / \partial z)_s = 0 \dots\dots\dots (14)$$

境界面および海底での摩擦応力は従来の式を採用して次式のように仮定した。

$$\left. \begin{aligned} (A_z \cdot \partial u_1 / \partial z)_d &= k |u_1 - u_2| \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \\ (A_z \cdot \frac{\partial v_1}{\partial z})_d &= k |v_1 - v_2| \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{境界面}) \dots\dots\dots (15)$$

$$\begin{aligned} (A_z \cdot \partial u_2 / \partial z)_d &= k_b u_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2}, \quad (\text{海底}) \dots\dots\dots (16) \\ (A_z \cdot \partial v_2 / \partial z)_b &= k_b v_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \end{aligned}$$

式(6)~(12)の解は, 境界および初期条件を与えないと定まらない。一般の沿岸では取排水口に当る部分を除いて外海と湾口との境界値, すなわち湾口条件は直接計算全体に大きな影響を与える問題である。計算開始時の M, N および海面, 境界面の位置の初期値はそれぞれ零および湾全域にわたって一定の潮位を与えた。

差分の方法: 図-8 に示すように計算の対象となる海域を $4s$ 間隔の格子で切り, 流量, 水温 (○印) および水位点 (×印) を交互にとる。海岸線上には常に流量点を取り, ここでは取水排水口部分を除いてつねに流量を零とおく。また, 湾口にもっとも近い水位点 (×印) には後で述べる湾口条件を与える。格子点 (i, j) における運動方程式の非線形項の差分については, この点にも

っとも近いまわりの4点 ($i \pm 1, j \pm 1$) における流速から求めればよい。このため, 図-6 に示したようにもとの (x', y') 座標を 45° 回転した (x, y) 座標系について非線形項を求めると, 次式のようになる。

関係式

$$\frac{\partial}{\partial x'} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial}{\partial y'} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

から,

$$\frac{\partial}{\partial x'} (u_1^2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\partial(u_1^2)}{\partial x} - \frac{\partial(u_1^2)}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial}{\partial y'} (u_1 v_1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\partial(u_1 v_1)}{\partial x} + \frac{\partial(u_1 v_1)}{\partial y} \right)$$

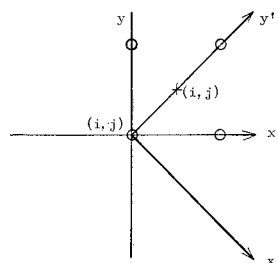
を得る。粘性項の $\nu^2 X_i$ および $\nu^2 T$ の差分は座標変換しても点 (i, j) のまわりの4点 ($i \pm 1, j \pm 1$) から求められる。

図-7 は連続方程式に対する差分点の図示である。熱拡散方程式に対する差分点は図-6 に示したすべての点を利用している。

4. 数値計算例

数値実験の対象となる湾のモデルは, 図-8 に示すように大略く形状の水域を形成しており, 海域の水深は干潮面以下 7 m としてある。図には取排水口の配置が示してある。排水口は湾奥に, 取水口は比較的外海に面した沿岸に設置した場合である。数値実験に当っては平面状海域を縦横 100 m 間隔の平行線群によって格子状に分割し, 格子点の数は 9 個 $\times$ 13 個 (800 m $\times$ 1 200 m)

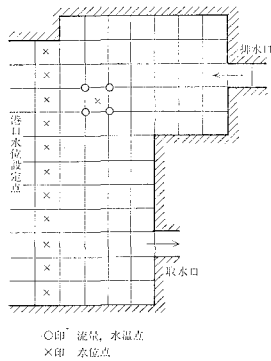
図-7 連続方程式に対する差分点



にとってある。計算上の境界範囲としては排水口沖合およそ1200 mまでの海域を包含している。本計算で用いる格子図中の○印は流量および水温、×印は水位の代表点である。計算境界条件としてつぎの項目が考慮されている。

(1) 計算境界で実際の潮位条件を与える。本計算においては最干潮時を計算初期時として、これから12時間の潮汐流を計算期間とした。そしてこの12時間の計算を1周期として同一現象が得られるまで数回これを行なうわけであるが、今回は2周期目の最初の極値

図-8 モデル海域と格子点



すなわち満潮時をもって、合計 18 時間分で計算を終了させた。潮位差は2通り考えてある。

(2) 取水口においては、潮汐の干満によって表層水混入率が変化する(図-9 参照)。混入率を $r=H_1/H$ と定義すると各時刻での取水温度は $T_i=rT_s+(1-r)T_b$ (T_s , T_b は表層, 下層水温)となる。上層での取水流速は混入率の変化にしたがって変動する。

(3) 温水冷却水は表層に排出される。

図-9 取水口断面図と潮位との関係

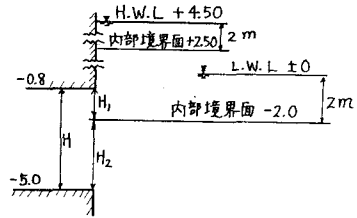
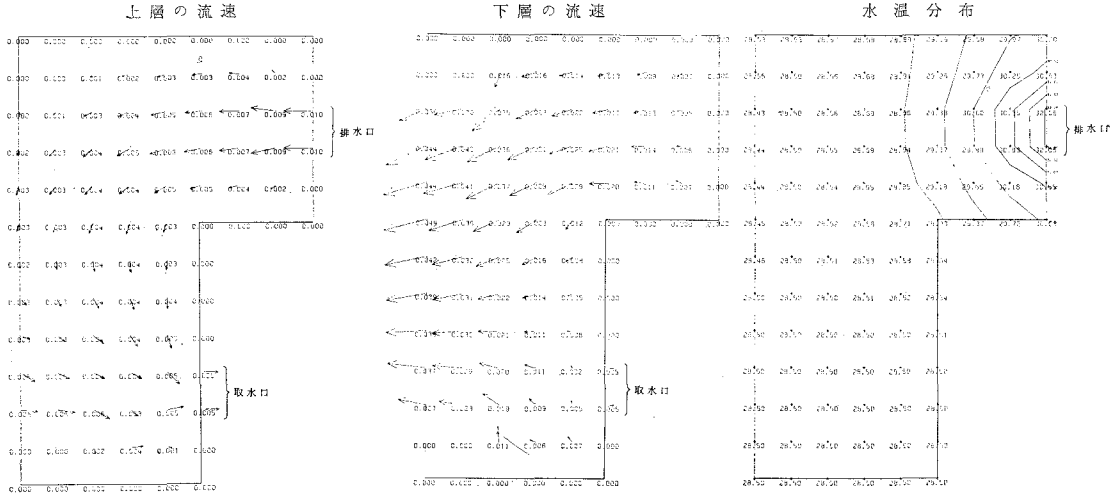
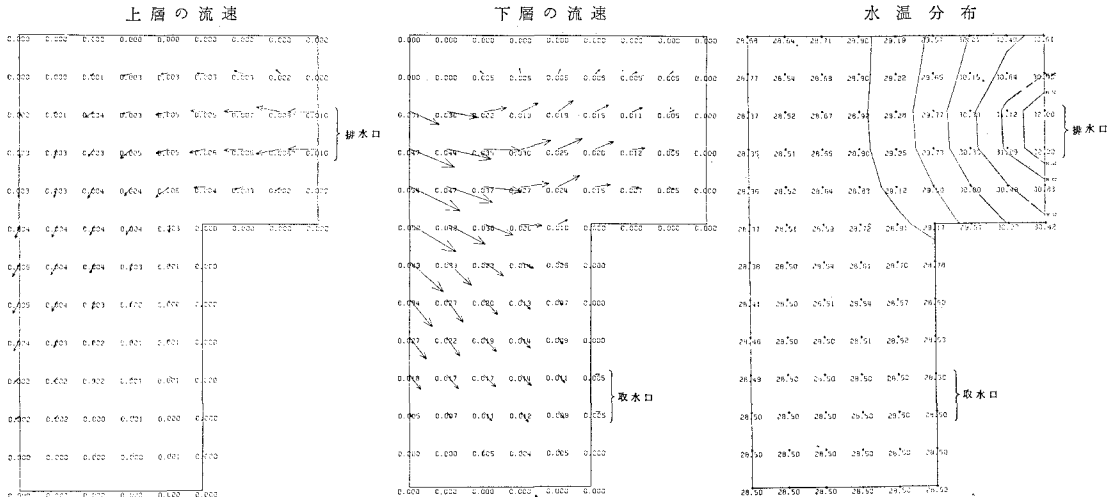


図-10 上層, 下層での流速および水温分布

(A) 10 時間後



(B) 16 時間後



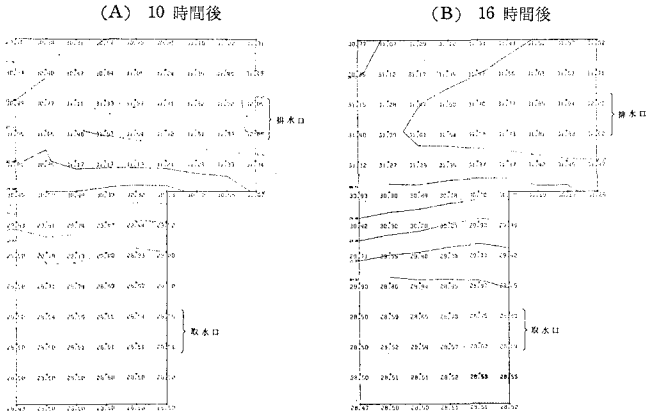
表—1 数値計算に使用するデータ

計 算 ケ ー ス	潮 位 差 (m)	冷 却 水 使 用 水量 (m ³ /sec)	深 層 水 温 (°C)	無限海域での表層平衡 水温 (°C)	水 平 拡 散 率 (m ² /sec)	沖合湾口地点での海面および内部 境界面の位置 (m)
I	4.5	2	25	28.5	$A_h=K_h=1.0$	海 面：最大 11.5 最小 7.0
II		20				内部境界面：最大 9.5, 最小 5.0
III	1.7					海 面：最大 8.7, 最小 7.0 内部境界面：最大 6.7, 最小 5.0

(4) 冷却水の得水器通過後の温度上昇は一定とする。本計算においては 7°C と設定してある。

数値計算の内容は 表—1 に示してある。
数値計算結果の一例が 図—10 (A), 10 (B) および 図—11 に示してある。図—10 (A) および (B) は、冷却水流量が 2 m³/sec の場合で、最干潮時からの計算開始後 10 時間および 16 時間後の計算 run の結果であり、それぞれ上層、下層での流速および上層での水温分布図を示している。図—11 は冷却水流量が 20 m³/sec のときの水温分布図である。図—10 (A) および 10 (B) 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、湾内においては上層では冷却水排水による流れ、潮時によっては取水口での表層水取水に伴う補流、また下層では潮汐流および特に取水口前面海域で冷却水取水による流れが卓越している。潮位差、排水量などの計算パラメーターをいろいろ変化させて長期間にわたる計算 run を行なったにもかかわらず、計算は十分安定した状態で遂行できることを確認した。したがって本計算で採用した計算の scheme, 計算時間間隔 ($\Delta t=10$ sec), 冷却水の取水、

図—11 上層での水温分布
($Q=20$ m³/sec)



排水方法および湾口での流動および水温値の設定法には十分適合性があることが判明した。

5. 応 用

上記の計算方式を二、三の実際の地点の流動と熱拡散の計算に適用した結果、実際の現象を合理的に説明しており、この手法が実際の問題に適用できることを確認した。