

沿岸海域における工業用水取排水問題のシミュレーション

和田 明*

1. ま え が き

海域における汚染物質の拡散問題の研究については、実証的な調査研究、数値実験をふくめた模型実験および個々の基礎的現象の理論解析が3本の柱となって発展することは他の研究分野と変わらない。将来、大規模な開発の行なわれる臨海コンビナートからの産業廃水による水質汚濁防止策を合理的かつ円滑に進めるためにも、計画完成後の状態を事前に予測して十分その対策を立案する必要がある。

このような海域での拡散問題についてのシミュレーションシステムの開発は、温排水問題に関連して行なってきた。この手法はアナログシミュレータとしての水理模型による水質汚濁予測を補完するものとして、あるいはこれにかわるものとして活用しているものである。

筆者らは冷却水排水に伴う海域での熱拡散性状を解明するためにいくつかの計算手法を展開してきた。その一つは排水水の力学的挙動と水温の熱拡散の両者を同時に考慮して海域の水温分布を算定する手法の開発である。他のものは、同一湾内での冷却水取排水による湾内表層水温の分布を算定するために、港をいくつかの水域ブロックに分割して潮汐効果も含めた熱収支論によるシミュレート計算手法である。上述の数値実験の手法としては、水理実験によって数量的に明らかになった下層冷水の加入連行の現象を、平面二次元的拡散の数値実験へ適用して、排水口近傍での下層水の加入による混合冷却過程を考慮に入れたより実態に近い水温分布の解を求める計算方法を提案している¹⁾。このような計算手法は、内湾に立地する発電所の冷却水排水による水温分布と計算結果との一致によって立証されており、平均的な海況条件の海域においては、妥当な解析手法であると考えられる。

一方、廃水の排出される海域において潮汐流が卓越しているような場合には、潮汐混合による稀釈拡散を考慮しなければならないし、とくに潮差の大きな湾内に放流される排水の拡散を解明する場合には、タイダルフラッシング作用を考慮した計算方式を確立することが必要である。筆者は干満差の大きい三池港での実測結果²⁾を検討した結果、二成層モデル方式の妥当であることを確認

し、この方式による潮汐流を考慮した湾内における排水拡散の計算手法を実用化した³⁾。今回は、直線状の沿岸線に平行な流れの場合（沿岸流、潮流）を有する半無限海域のモデルを考える。本計算モデルは瀬戸内海のごとき、沿岸に平行な流れの場が卓越している海域に有効であろう。この型の海域においては、沿岸に平行な方向に潮汐流や沿岸流が存在しているので、この方向に対しては渦動拡散に加えてこれらの流れによる分散効果をも考慮しなければならない。

2. 基本方程式の構成

海域での流動と密度の場を支配する運動量および質量の保存式は次のようにかける。

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + 2 \rho \epsilon_{ijk} \Omega_j u_k = - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g \delta_{si} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ρ : 密度、 u_i : 流速成分、 t : 時間、 p : 圧力、 Ω_i : 地球表面上での回転成分、 δ_{si} : $i=3$ に対して 1、 $i=1, 2$ に対して 0、 μ : 分子粘性、 ϵ_{ijk} は i, j および k が cyclic order のとき +1, anticyclic order であるとき -1, 他の組み合わせに対して 0。従属変数（流速成分、圧力、密度）を平均運動と乱流運動の成分に分ける。

$$u_i = U_i + u'_i, \quad p = P + p', \quad \rho = \bar{\rho} + \rho' \dots \dots \dots (3)$$

このとき、時間平均 $\overline{\rho u_i u_j}$ において、速度変動がかなり大きいので、密度と速度の変動の相関を含む項は速度成分間の相関を含む項に比して小さいと考えてよい。式(3)を式(1)、(2)へ代入すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{\rho} U_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} U_i U_j}{\partial x_j} + 2 \bar{\rho} \epsilon_{ijk} \Omega_j U_k = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \bar{\rho} g \delta_{si} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} U_i}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 R_{ij} は Reynolds 応力テンソルで、一般には次の形を有する渦動粘性率を導入している。

$$R_{ij} = - \overline{\rho u'_i u'_j} = A(j) \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + A(i) \cdot \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \dots \dots \dots (6)$$

* 正会員 工博 電力中央研究所 技術第二研究所

ここに、 $A(j)$, $A(i)$: $i, j \neq 3$ のとき水平渦動粘性率, A_h , $i, j=3$ のときの鉛直渦動粘性率。
拡散物質の保存条件式は次式で表わされるようである。

$$-\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \text{div}(\rho c \mathbf{u}) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 c : 拡散物質の濃度, $\mathbf{u}$: 速度ベクトル。

$\mathbf{u}$ と c を時間平均値と変動値に分け

$$u_i = \bar{U}_i + u_i', \quad c = \bar{c} + c'$$

の関係式を式 (7) に代入すると、基本式として次式を得る。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ K_{ij} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $K_{ij}=0$ ($i \neq j$), $K_{ij} > 0$ ($i=j$)。 K_{ij} は次式で定義されている。

$$\overline{u_i' \cdot c'} = -K_{ij} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (9)$$

2. 沿岸海域での拡散過程におよぼす流れのせん断効果

海の水平拡散については、いろいろなとり扱いが与えられてきた。その 1 つは半経験的な要素が入っているもので、異なった特性を有する海域の拡散と仮想交換係数との関係を対象とし、交換係数と現象のスケールの対応を追求するものである。多くの研究結果から、この法則が海における水平拡散の問題に適用できることを指摘されている。しかし、理論の成り立つ条件が沿岸海域において有効であるとは決して断言できない。4/3 乗則が観測結果と良い一致をみたのは、おそらく比較的大きな空間および時間スケールの問題を対象としたものであり、風や潮流の条件はこのスケールのなかに包含され平均的な影響だけが結果としてでているためである。とくに、乱れのエネルギーは潮汐による乱れや海底摩擦などによって広い周波数帯のところで乱れのスペクトルへ供給される。とくに estuary においては、密度流や流れのせん断効果によって現象は複雑である。該当海域での実験が立証しない限り、拡散の 4/3 乗則は沿岸海域の場に適用することは賢明でないと考えらる。

海での水平混合は潮汐流、密度流および風成海流によるせん断効果によって効果的に生じる。この過程による拡散は、沿岸海域できわめて有効であるように思われる。沿岸からさらに沖合海域では、大きな水平渦のごとき他の様相の影響が卓越してくるであろう。

水深方向に速度勾配をもつ定常流を考えると、このせん断流による拡散問題は、濃度 c のモーメントを考慮することによってとり扱うことが可能である⁴⁾。これは定常的な一方向に流れるせん断流の場において、式 (8) を境界条件として水面、水底で $\partial c / \partial z = 0$, $x, y \rightarrow \pm \infty$ で $c=0$ を満足する解を見い出すことに帰着でき

る。 c のモーメントを

$$\theta_{m,n}(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^n y^m c dx dy \quad (n \geq 0, m \geq 0)$$

と定義することによって汚染物質の瞬間放出の場合を考える。このとき、拡散物質の流れ方向での分散 σ_x^2 は次式で示される。

$$\sigma_x^2 \sim 2 D_x t + \text{const.} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ここに、} D_x = \bar{K}_x + \int_0^h (U - \bar{U}) \theta_{10} dz, \quad \theta_{10} = \bar{U} \frac{t}{h} + \frac{1}{h} \cdot \int_0^z \frac{dz}{K_z} \int_0^z (U - \bar{U}) dz$$

ここに、一印は深さ方向の平均値を表わし、 h は水深とする。

水平方向の拡がりは拡散率に関する二つの成分の線形和により表示できる。一つは、流れの水平方向の乱れ変動の影響を表わし、他のものは流れの shear effect と乱れによる物質の鉛直拡散との相互作用の影響を表わしている。流れのせん断による拡散過程が卓越するか否かは、 $\bar{K}_x$, $\bar{K}_y$ の値による。一例として、 $U=2 \bar{U} z/h$, $K_z=K$ —一定とすると、

$$D_x = \bar{K}_x + \bar{U}^2 h^2 / 30 K$$

となる。一方、管路および開水路における流れの shear effect による物質の輸送係数は次式により表わせる⁵⁾、⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} K_e &= 5.93 U_* h \quad (\text{開水路}) \\ &= 10.1 U_* a \quad (\text{管路}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 a : 管路の半径, U_* : 摩擦速度。浅海での潮流観測結果を加味すると、開水路の式は

$$K_e = 0.295 \bar{U} h \quad \text{と変形できる。}$$

一方、湾や沿岸海域においては乱れの主要な原因は潮流である。流れが振幅 U を有する単弦振動、 $\bar{U} = U \cos \sigma t$, をし、鉛直方向の乱れの流速、濃度分布は相似形を保つとすると ($u' = U \cdot f_1(z)$, $c' = U \cdot f_2(z)$)、一潮時間での物質輸送量の平均値は $\frac{1}{T} \int_0^T \overline{u' c'} dt = (1/2) U^2 \cdot \overline{f_1(z) f_2(z)}$

となる。一方、定常流では $\overline{u' c'} = U^2 \overline{f_1(z) f_2(z)}$ の関係が成り立つので、振幅が U である潮流に対する K_x の有効値は

$$K_x = 0.15 U h \quad \dots\dots\dots (12)$$

で表わされる⁷⁾。

Kolmogoroff, Richardson および Joseph & Sendner などの理論に表われる拡散過程とは異なって、せん断効果による拡散係数は水平方向のスケール・ファクターを含んでいなく、水深 h しが含まれていない。したがって小さいスケールの運動においてはせん断効果が重要となってくるが、5~10 km より大きい空間スケールに対しては、Joseph & Sendner あるいは Richardson が考えた不規則過程が卓越してくるものと思われる。

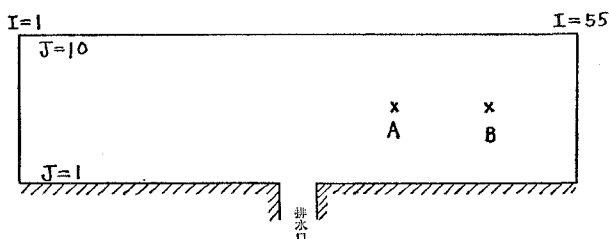


図-1 沿岸に平行な流れの場を有する半無限海域モデル

4. 沿岸に平行な流れの場の拡散

沿岸流による物質拡散の実態と密度成層の安定性を検討するために、図-1 に示すような沿岸に平行な潮流流が卓越する半無限海域の場で海象調査を実施する機会を得た。観測結果より、潮流は沿岸に平行に流れており、落潮時には表層流が、漲潮時には中層流が、卓越している。最大流速は落潮時で 70 cm/sec、漲潮時 60 cm/sec 程度である。水深方向の速度勾配は常時認められ、とくに転流時において顕著になる。距岸距離の差による流動の著しい差は見られないが岸より数十米のところでは地形の影響および摩擦によるためか多少複雑な動きをみせている。大潮時には、半日周潮流が卓越し、長軸半径は 1 日周潮流の 2～8 倍である。また、落潮時に行なった測流板の長時間の追跡の結果、落潮開始から落潮終了までの 7 時間に表層 1 m、3 m の各層では約 9 km 流れ、その後転流した。このときの沿岸に平行の拡散係数は、

$$K_x = \alpha ul \approx 10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

程度であると考えられる。ここに、 α ：潮汐の半周期ごとの海水混合の割合で、速水らの明石海峡での塩素量の実測資料から $\alpha=0.12$ が得られている⁸⁾。 u ：潮流の平均流速、 l ：半潮時における潮流の流程（漲潮あるいは落潮期間に水粒子が流れる全行程）。一方、流れの shear effect による水平拡散率は $K=0.150 U h=10^4 \sim 10^5 (\text{cm}^2/\text{sec})$ となり、現地観測結果による係数と比較すると 1/10～1/100 のオーダーだけ小さくなっている。このことは、海底摩擦の影響による速度形状が変化することに起因するのではなく、むしろ鉛直方向の密度勾配の生起によるものであろう。

本節においては、図-1 に示す直線状の海岸線に沿って沖合に無限に広い半無限海域のシミュレーション モデルを考える。このモデルは瀬戸内海のように、沿岸に平行な流れの場が卓越している海域に有効であろう。

この型の海域においては、沿岸に平行な方向に潮流流や沿岸流が存在しているので、この方向に対しては渦動拡散に加えてこれらの流れによる分散効果をも考慮しなければならない。

計算の目的は産業廃水の沿岸海域への排水によって排水口付近海域の水質や流れがどのように影響を受けるか予察することである。

選定した計算方式は、二層モデルによる沿岸流（潮流も含む）と廃水の排出条件を考慮に入れて海域の上層、下層における流動、拡散物質の濃度の値を算定するものである。本計算に用いる二成層モデル設定の理由は次のようである。

従来から実施されてきた湾内での現地観測結果などを考慮すると、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 2～3 m 程度にあり、海域ごとにあまり大きな変化がないこと、およびこの密度躍層は潮位変化があってもほぼ安定していることが確認されている。一方、廃水排出の現象スケールの面から考えると、一般的に排出量と流れおよび廃水による汚濁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 とすれば環境汚濁をうける影響域は 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十数時間を要するだけである。一方、産業廃水の排水問題が計算の対象となる本海域の場合にも、数十時間にわたる時間スケールあるいは数 km におよぶ空間スケールの現象に対しても、海域で成層が十分保持できるものと想定される。

2 成層モデルの基礎方程式は上層での拡散方程式を入れて、上下 2 層に対して以下に示す 7 元非線形方程式から成り立っている。式は運動、連続および拡散方程式について海底から内部境界面、および内部境界面より海面まで積分したものから得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{連続式: } \frac{\partial(s-d)}{\partial t} + \frac{\partial M_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (13) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{運動方程式: } \frac{\partial M_{i,i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho(s-d) U_{i,i} U_{1,j} \right\} + g(s-d) \frac{\partial s}{\partial x_i} = - \frac{g(s-d)^2}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial x_i} + A_h F^2 M_{i,i} \\ \quad + \left[\left(A_z \frac{\partial u_{i,i}}{\partial z} \right)_s - \left(A_z \cdot \frac{\partial u_{i,i}}{\partial z} \right)_d \right] \dots\dots\dots (14) \end{array} \right.$$

上層 } 拡散方程式:

(i) 拡散物質濃度 (COD) に対して

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u_j \frac{\partial W}{\partial x_j} - \frac{W}{(s-d)} u_j \frac{\partial (s-d)}{\partial x_j} = \frac{1}{(s-d)} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ K_j (s-d) \frac{\partial W}{\partial x_j} \right\} + R_a w (s-d) \Delta x \cdot \Delta y - R_r \cdot w (s-d) \Delta x \cdot \Delta y \dots (15)$$

(ii) 水温分布に対して

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{1}{(s-d)} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ K_j (s-d) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} + \frac{Q_0 - Q_1 T}{c \rho (s-d)} \dots (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{連続式: } \frac{\partial (d-b)}{\partial t} + \frac{\partial M_{2i}}{\partial x_i} = 0 \dots (17) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{下層運動方程式: } \frac{\partial M_{2i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \rho (s-d) U_{2i} U_{2j} \} - g (d-b) \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial s}{\partial x_i} + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial d}{\partial x_i} \right] = - \frac{g (s-d) (d-b)}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x_i} + A_h d^2 M_{2i} + \left[\left(A_z \frac{\partial u_{2i}}{\partial z} \right)_d - \left(A_z \frac{\partial u_{2i}}{\partial z} \right)_b \right] \dots (18) \end{array} \right.$$

ここに、 $i, j=1,2$ はそれぞれ x, y 方向に対応しており、 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、 T は水温、 Q_0, Q_1 は大気と海面間の熱収支項、 W は容積 $(s-d) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$ に含まれる拡散物質の重量、濃度 c は $W/\{w(s-d) \cdot \Delta x \cdot \Delta y\}$ により求められる。 w は海水の単位体積の重量、 R_a は拡散物質の海域への排水割合、 R_r は自浄作用による拡散物質の除去割合、 $M_{1i} = \int_a^s \rho_1 u_{1i} dz$ 、 $M_{2i} = \int_b^d \rho_2 u_{2i} dz$ 、suffix の1,2は上層、下層を意味する。

境界面および海底摩擦応力の表示式、差分の与えかたおよび運動方程式の非線形項の差分については、先回の講演会³⁾で報告したとおりである。

数値実験の対象となる海域のモデルは、図-1に示す水域を形成している。図には排水口の配置が示しており、排水口は直接外海に面した沿岸に設置してある。海域の水深は干潮面以下最大20mとしてある。計算上の

境界範囲としては、沿岸線沖合1.8km、沿岸に平行な方向に排水口の左右片側領域にそれぞれ5.4kmの長さの海域を包含している。格子は縦横200m間隔の平行線群によって構成されている。したがって格子点の数は10個×55個である。計算境界条件として、次の項目が考慮されている。

- (1) 廃水は表層に排出される。
- (2) 沿岸線に直角方向の濃度勾配は零である。
- (3) 沖合の境界線上の流れは、沿岸に平行な流れの成分のみを有す。しかし、物質濃度は境界線上で変化する。

- (4) 沿岸に平行な流れのモデルとしては、左右両端の境界線上で実際の潮位条件を与えることによって、所要の速度が生じる。すなわち、両端での潮位差が4cm、2cm、時間の位相差が4分、2分程度で沿岸海域での最大流速はそれぞれ70、30cm/secに達する。前者は瀬戸内

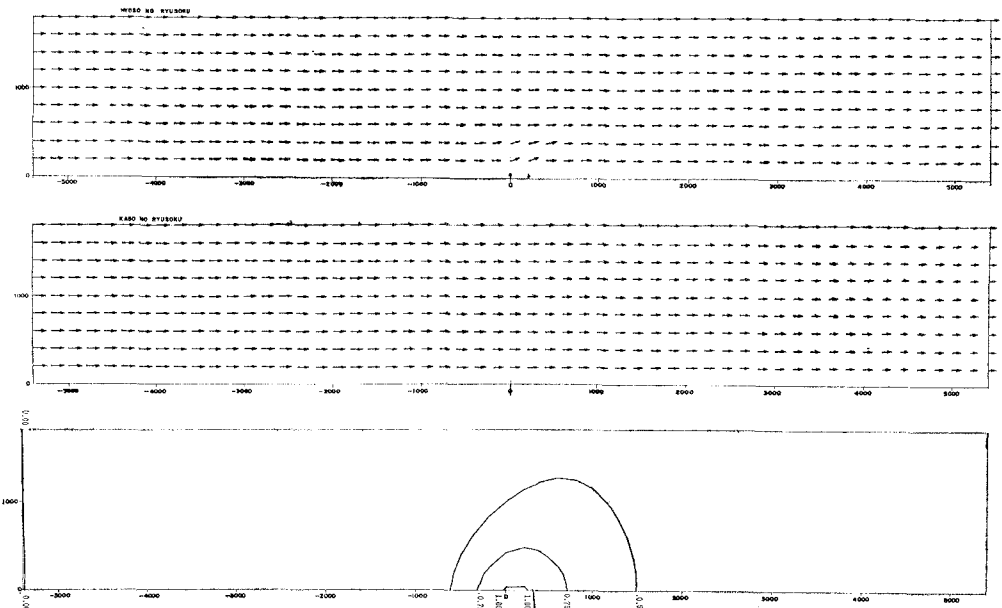
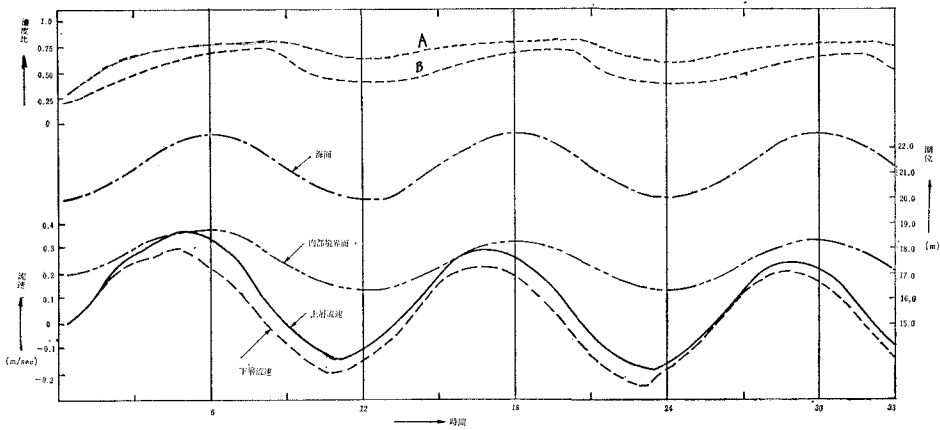


図-2 上層、下層での流速および濃度分布(29時間後) — 廃水量 $Q=30\text{m}^3/\text{sec}$ 、廃水と海水との密度差 $\Delta\rho=0.002$ —



図—3 数値モデルの水域 A 点における海面, 界面の水位, 上下 2 層の流速および濃度の経時変化

海入口, 後者は中央部付近の流れの様相を示すことが確認されている。

(5) 内部境界面の深さは沿岸流速の大きさ, 廃水排出量, 上下二層間の密度差などによって異なり, この厚さは二層モデルの式によって内部的に求められる。

数値計算結果の一例が図—2 に示してある。これは, 最干潮時からの計算開始後 29 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濃度平面分布図を示している。図—3 は数値モデルの海域 A 点座標 (37, 5) における海面, 界面の水位, 上下二層の流速および濃度の変化様相を示すもので, あわせて B 点での濃度値の経時変化も記してある。計算結果を要約すると次のようである。

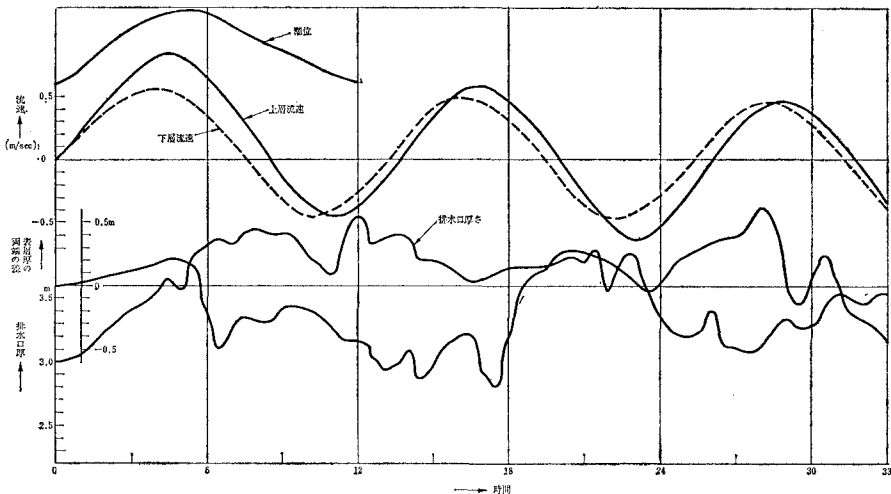
(1) 内部界面は潮の干満に伴う海面昇降に順応して, その厚さの経時変化もほとんど安定していて少ない。落潮時にその厚さが最小, 漲潮時に最大となり, そ

の差は 0.5m くらいである。

(2) 上げ潮時には, 下層流速が, 下げ潮時には上層流速が卓越して流れる様相を示している。このことは観測結果の様相と似ている。流速が最大となるときは干満潮時に比して 2 時間位進んでいる。

(3) ある場所での濃度分布の経時変化は潮位のそれに対応しており, 濃度が最大となる時刻は満潮時より遅れ, およそ 2~3 時間の位相差がみられる。

図—4 は数値モデル海域の左端境界端での潮位, 上下層の流速, 表層厚の両端の差および排水口前面域の上層厚の経時変化を示したものである。ここにいう表層厚の両端差とはモデル海域での左端と右端の表層厚さの差を意味し, その経時変化が小さいことは計算の安定性に対する一つの指標でもある。図からわかるように, 計算の初期の段階においては表層厚の両端差は著しく偏異することもあるが, その差は絶対値で 0.6~0.8 m くらいで



図—4 潮位, 上, 下層の流速および表層厚の経時変化 (廃水量 $Q=60 \text{ m}^3/\text{sec}$, 廃水と海水との密度差 $\Delta\rho=0.002$)

潮汐の 2 cycle 後にはほぼ安定した値を保つようになる。

排水口の地先の表層厚さは、計算時間の経過に伴い不規則に変動しているが、最終的にはほぼ一定の値におちつく様相を示している。その厚さは沿岸海域の流れの大きさ、廃水量の大小、廃水と海水との密度差、などによって変化するが、本計算のごとき密度差が $\Delta\rho/\rho=0.002$ と小さく、しかも廃水量が多量のとき、その影響水深は増大する。廃水量が $Q=30, 60 \text{ m}^3/\text{sec}$ の場合には、その影響水深はそれぞれ約 2.7 m および 3.5 m の値になる。

上記の計算方式に基づいて、両端での潮汐条件、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、廃水の排出方法および左右両端での流動および濃度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

上記の計算手法に基づいて、計算境界である左右両端での潮位差、時間の位相差などについて適切なデータを与えることによって、対象とする海域に特有な沿岸流および拡散特性を引き出すことが可能である。

上記の計算方式を二、三の実際地点における流動と濃度分布の予測計算に適用した結果、現地での海洋観測結果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。

参 考 文 献

- 1) 和田明・片野尚明：工業用水の取放水問題，第 15 回海岸工学講演会講演集，pp. 297～306，1968
- 2) 和田明・片野尚明：新港火力発電所の冷却水取排水に関する水理学的検討，電研技研報告，土木 60525，1969
- 3) 和田明：二成層潮汐モデルによる工業用水取排水問題の展開，第 16 回海岸工学講演会講演集，pp. 203～208，1969
- 4) Saffman, P. G. : The effect of wind shear on horizontal spread from an instantaneous ground source, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 88, pp. 382～393, 1962.
- 5) Taylor, G. I. : The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe, Proc. Roy. Soc. London, A 223, pp. 446～467, 1954.
- 6) Elder, J. W. : The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, J. Fluid Mech., 8, pp. 33～40, 1959.
- 7) Bowden, K. F. : Horizontal mixing in the sea due to a shearing current, J. Fluid Mech., 21, pp. 83～96, 1965.
- 8) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について，第 3 回海岸工学講演会講演集，pp. 49～53，1956.