

沿岸海域における拡散の予測解析と それに伴う諸問題

和 田 明

1. まえがき

沿岸海域における海水混合の問題は、都市排水、産業排水による汚染の問題に関連して関心がもたれている。最近に至って、急速な経済発展とこれに伴う都市への人口集中のために、沿岸海域への汚濁負荷量は年々増加し、海域の水質はかなり汚染された状態にある。

従って海水汚染の対策については、今後十分吟味しておく必要がある。海水汚染の問題では、生物学、化学、工学、物理などの学際的領域にあるので、各分野における研究成果の集約が必要とされることはいうまでもないが、一方では沿岸海洋学の面から汚染される海域の水理特性に関する正確な把握が基本条件となる。

将来の工業開発、埋立造成など各種の開発計画や、都市排水量の増加に伴う水質汚染を未然に防止するためには、種々の対策を効率的に組み合わせ、総合的、広域的、長期的な対策を系統的に講ずる必要がある。そのためには、沿岸水域での混合現象を適確に予測できる手法を展開しなければならない。

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。

本文では、沿岸海域での水質汚濁のシミュレーション（数値実験）に関連してそのシステムと問題点について述べる。

拡散予測をするに当たって物理学的に、自然に起る統一的な普遍的法則を追求することは、それ自体重要なことである一方、どのような実験結果も理論も海洋という自然現象を扱う研究である以上、観測できる範囲は必ず観測によって裏づけられなければならない。さもないと空論をもてあそぶことになる危険があるといえよう。

ここにいうシミュレーションとは、単に微分方程式を数値的に積分するだけではなく、もっと他の多くの素過程が複雑に関与して関係が統計的にしかわかっていないようなものを確率処理しながら進めていく手法と考えられる。⁽¹⁾ 沿岸海域における物理的過程は非常に多くの法則によって支配されていて、我々が見出したいいくつかの法則に従って数学的な取り扱いだけでは物理現象すなわち観測事実を説明できないことがある。同じ問題でも既知の法則を組みこんだ実験による研究を行えば、二義的な法則に支配されている部分は、スケールは小さくとも同様な過程が進行して、単なる理論的研究よりも観測結果をよりうまく説明できるだろう。このような、観測と理論との間隙を埋める役目をさせようとする所に実験の意義があると考えられる。

2. 沿岸域における混合拡散一般論

2.1 海洋変動の予測

海洋を環境としてとらえるときには、海洋の動的な状態をいかに把握するかということが沿岸海洋過程における一つの大きな研究目標となっている。それは流動にせよ、密度構造にせよ、沿岸海洋の物理的素過程そのものが、時間的、空間的にかなりの変動性をもっているからである。たとえば、沿岸海域におけ

る流動を観測してみても、いろいろな段階が存在していることが認められている。密度躍層の付近で見られるきわめて小さい乱れ、数十メートル規模の対流・乱れから、水平運動の卓越する大きな渦や内部波、循環流などがある。これらの現象の空間スケールに対応して、その変動の時間スケールもかなり広い範囲にわたって変化する。

最近の乱流拡散に関する研究は、このように時間・空間的にいろいろのスケールをもつ現象が沿岸海域に存在することを認識した上で、それぞれの現象に特有な拡散法則を解明し、それから他のスケールの現象との相互作用をはっきりさせようとする方向にある。このような研究展開のうえにたつて、はじめて信頼できる沿岸域における拡散モデルシステムがつくられ、それに基いて海洋変動の予測も可能となるであろう。

2.2 沿岸域での拡散過程

沿岸域での放出プルームの拡がりに関連して混合拡散問題を考えると、時・空間スケールに注目すべきことは先にも述べたが、ここでは大小二つのスケールの拡散現象について注目してみよう。

1) 小スケールの拡散過程

小スケールの拡散問題において重要な役割を演じる因子は、場の流速 U_i 、水平ならびに鉛直方向の渦動拡散率 K_h 、 K_z であろう。渦動拡散率の値は乱れの強さに依存している。特に鉛直拡散を考えると、その値は密度成層の状態に支配される。放出プルームの拡散は流れのなかの乱渦によって行なわれ、鉛直方向と水平方向とは全く異なる。水平渦について乱れの場合が一樣であれば、Richardson の $4/3$ 乗則は近似的に妥当であるといわれている。物理的には、プルームの拡散幅が増大するにつれて、より大きい渦群が拡散において重要な役割をしめるようになることを意味している。

一般に沿岸域の流動は、連続流体の式系によって記述できると考えられる。このとき、考慮の対象となる現象スケールに対応したいくつかの平均化操作が行なわれるが、運動方程式の非線形性を Reynolds 応力の導入によって、平均的な運動と平均化のスケールよりも小さなスケールの運動との相互作用をもたすのが一般である。 $4/3$ 乗則は Reynolds 応力に関係した項を平均流の速度勾配のみに関連させたときにでてくる関係であって、慣性小領域内では渦動粘性係数が $L^{4/3}$ (L : 長さのスケール) に比例することを意味している。

現在、沿岸海域での拡散問題では、渦動粘性係数としてどういうものを採ればよいか、あるいは一般的に Reynolds 応力をどのように表示すればよいかということが重要な問題の一つとなっている。

$4/3$ 乗則が沿岸海域の全ての場合に有効であるとは断言できない。この法則が観測結果とよい一致をみたのは、おそらく限定された空間・時間スケールの問題を対象としたためであろう。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、かなり広い周波数のところで乱れのスペクトラムへ供給される。特に沿岸域においては、密度流や流れのせん断効果によって現象は複雑な状態を示すものと予想される。

さて、定常かつ一樣な乱れの場合における拡散過程であっても、海面近くでの強制対流であるラングミュア循環の出現によって現象は複雑化される。この状態はスリックスとも称せられ、図-1 に示すように渦の細胞状の循環構造をもっている。海面近くにスリックスが存在しているところでは、沈降あるいは上昇の流れが生じている。

このときの拡散過程はスリックスの方向に沿ってのみ起り、2次元現象というよりはむしろ1次元現象となろう。これら水平軸をもつ渦群は循環セル内での鉛直混合を促進させる代りに、水平方向の混合拡散を小さくする作用を有する。

海での水平混合は潮汐流、密度流および吹送流などによる流れのシア作用によって効果的に行なわれる。たとえば海域に投入した染料パッチの形状は決して円形ではなく、むしろある方向に細長く伸びているのが普通である。これは移流速度の不均一な分布とこの流れに直角な方向への拡散の作用とが重なって、流れの方向に大きな分散を生じているのであって、このような現象を移流分散と称している（図-2 参照）。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。

2) 大スケールの拡散過程

一方、より大きいスケールの拡散については、放出プルームのメアンダリングが重要な分散過程になるであろう。しかしながら、このメアンダリング作用があっても、汀線近くに放出した廃出物はほとんど岸近く滞留する、いわゆる coastal entrapment の現象が起ることもある。これは海岸流と離

岸流系から成る、いわゆる 海浜循環流セルの作用ならびに岸近くで生じる coastal jets, 内海部での慣性振動流によって特性づけられるものと思われる。

流れの場に放出プルームを考えると、プルームはその幅以下の渦の作用により相対的に広がりが増すとともに、重心もまた拡散場に存在するより大きな渦の作用により蛇行運動を呈し、流軸の平均径路とは異なるものとなる。このプルームの蛇行運動は廃出物の濃度変動、とくに最大と平均濃度との関係を知る上に重要である。

一方、内海の中央域で夏季、密度成層が発達しているときには慣性振動に伴う流れが生じることが考えられ、メソスケールでの拡散を支配することもありえよう。海岸付近では慣性振動は生じないが、風の作用による coastal jets の現象が考えられる。

2.3 拡散場の一表現法

図-3 に示すような沿岸海域での流れの場を例にとって考えよう。図に示す流速分布は流体力学の運動ならびに運動方程式を組み合わせる海底地形の変化を考慮して、平均流について解いた結果を示すものである。実際の海域においては、この平均流を包含した乱流場を形成していて、一般的には図-4 に示すようにいろいろな大きさの渦が重なり合っているものと考えることができる。このときの乱流場は種々の階級の乱子の運動の和として表わされ、各乱子はそれぞれの大きさ、速度、寿命時間を有している。

一樣流中の拡散問題を考えると、任意点での乱流速度は x 方向の速度成分のみを考えると次式で表わされる。

$$u(t) = u_0(t) + u_1(t) + \cdots + u_n(t) + \cdots + u_{\infty}(t) \cdots \cdots (1)$$

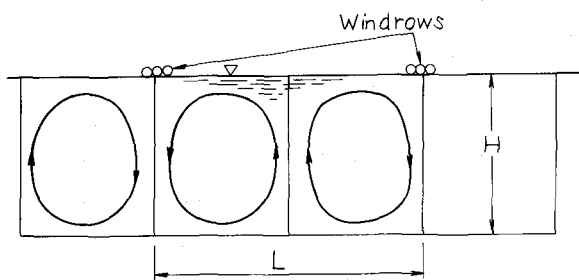


図-1 ラングミュア循環図

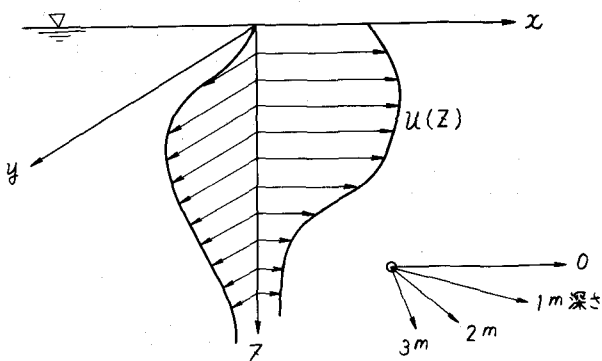


図-2 流れの Shear 効果

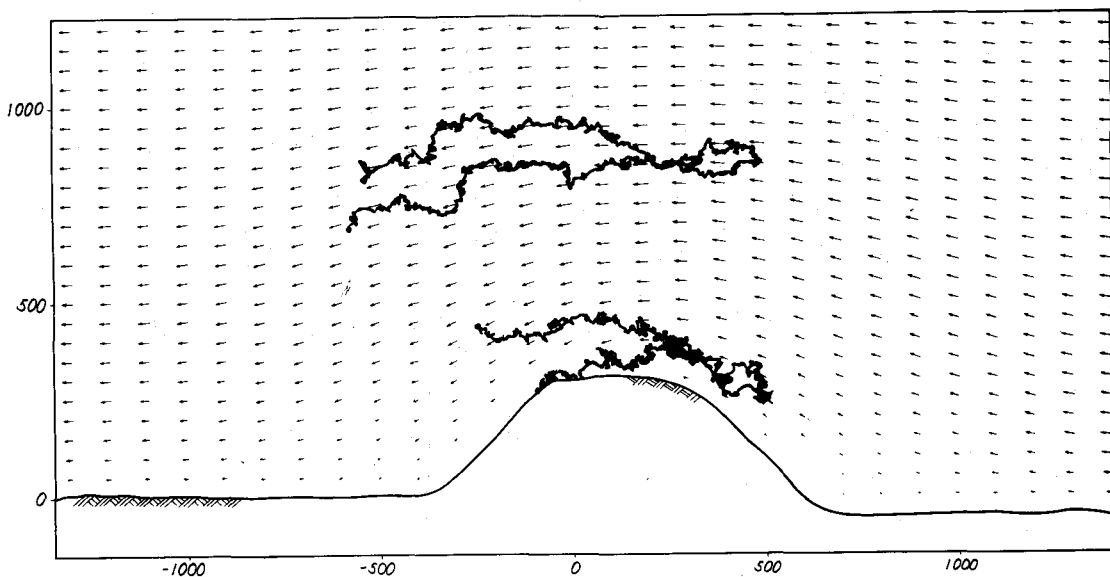


図 - 3 沿岸海域での流れの場

ここに、 $u_o(t)$ は最大渦、 $u_{\infty}(t)$ は最小渦に対応する。このとき、 n 階級の乱子のエネルギー逸散率は $\epsilon \equiv u_n^3 / \Lambda_n$ (Λ_n は乱子の大きさ) で表される。この量は大きな渦から小さな渦に手渡され、ついには粘性によって失われるエネルギーを表わしている。このように運動エネルギーを保存しつつ乱子がこわれてゆく範囲では n によらず上記の値は保存されるので u_o 、 Λ_o を初期値とすると、乱子スペクトルは次式で表される。

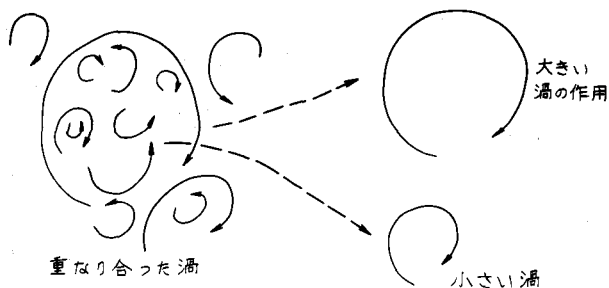


図 - 4 乱子モデル

$$\frac{u_n^3}{\Lambda_n} = \frac{u_o^3}{\Lambda_o} \quad \text{あるいは} \quad \frac{u_n}{u_o} = \left(\frac{\Lambda_n}{\Lambda_o} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

これを波数空間におけるエネルギー・スペクトルの形に直すと $k_n \approx 1/\Lambda_n$ の関係から $u_n^2 \propto \Lambda_n^{2/3} \approx k_n^{-2/3}$ となるから、次式が得られる。

$$F(k) \propto k^{-5/3} \dots\dots\dots (3)$$

上記の諸性質を利用して、直接、流体の乱流運動をシミュレートすることを考える。乱流の問題にモンテカルロ法を応用するときには、現象が単にある確率分布に従う不規則現象であることの他に相関やスペクトルなどの統計的特性が存在しなければならない。

分散の研究は本来ラグランジ流の考え方に基いている。つまり流体粒子の位置の変動を統計的に扱うことによって拡散場が規定される。座標系 (x_1, x_2) に関する確率分布は確率密度関数を $\varphi(x_1, x_2)$ とすると、次のようになる。

$$E(x_1, x_2) = \Pr \left\{ X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2 \right\} \\ = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} \varphi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\varphi(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{x_1^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \frac{x_1x_2}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{x_2^2}{\sigma_2^2} \right) \right] \\ \dots\dots\dots (5)$$

$\sigma_i^2 = \text{Var}(X_i)$, ρ : 相関係数。

排出源からの粒子を時間間隔 Δt ごとに追跡するものとする。 $t = i \cdot \Delta t$ における粒子の座標を (X_i, Y_i) 、乱流成分を (u'_i, v'_i) とすれば、各時間ステップにおける粒子の位置は式(6)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_i &= X_{i-1} + (\bar{u}(X_{i-1}) + u'_{i-1}) \Delta t \\ Y_i &= Y_{i-1} + (\bar{v}(X_{i-1}) + v'_{i-1}) \Delta t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

上式中、一印は平均値を表わす。

変動流速は2次元の正規乱数をとるものとして、次式で表わされるものとする。

$$(u'_{i-1}, v'_{i-1}) \in N(0, \Sigma)$$

ここに、

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 \\ \rho\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}$$

正規分布した組からランダムに抽出した乱数を用いて、図-3に示す流れの場における個々の粒子運動に関するシミュレーションを行なった。その結果の一部が図-3および5に示してある。図-3は汀線より沖合300、900 mの地点から2つの代表的な粒子の変位を求めたものである。図-5は上記の拡散源の一つに300個の粒子があるとき、各時間ステップごとに、これらの粒子を上述の方法で移動させて粒子雲の広がり状態を示している。

汀線付近では地形の影響を受けて、拡散分布が大きな変形を受けることが認められる。また、点源の近くでは広がり幅 $|Y|$ が到達距離に比例し、到達距離 L が長くなるにつれ、 $|Y| \propto \sqrt{L}$ となっている。⁽²⁾

2.4 わが国沿岸海域における拡散特性

排水拡散の現象は複雑であるが、排水の影響範囲をできる限り正しく把握するには拡散過程におよぼす海域の流れと拡散の効果を時間空間スケールについて理解することが必要である。たとえば、排水拡散の短時間の変化を問題にするときは、潮流は流れとみなされるが、長時間の変化を問題にするときは流れというよりは大きなスケールの渦群として拡散に寄与すると考えられる。

以上のことから、わが国沿岸各地で流れ(水平方向の乱流)の長時間連続観測を実施し、流速変動の

統計解析を行なった結果、2つの拡散形態が認められることがわかった。その一つの拡散特性としては、流れの周期性が認められず、不規則な流れが卓越している海域（拡散タイプⅠ）であり、他の特性は、半日周潮流のような規則的な往復流が卓越している海域（拡散タイプⅡ）である。前者の乱れの特徴は、太平洋沿岸、日本海沿岸および北海道沿岸などでみられ、後者の乱れの特徴は瀬戸内海、東京湾、三河湾などの湾海域に認められる。

このような海域の拡散特性を事前調査によって十分に把握したうえで、それぞれに応じた拡散解析手法を適用して拡散範囲を予測することが必要である。

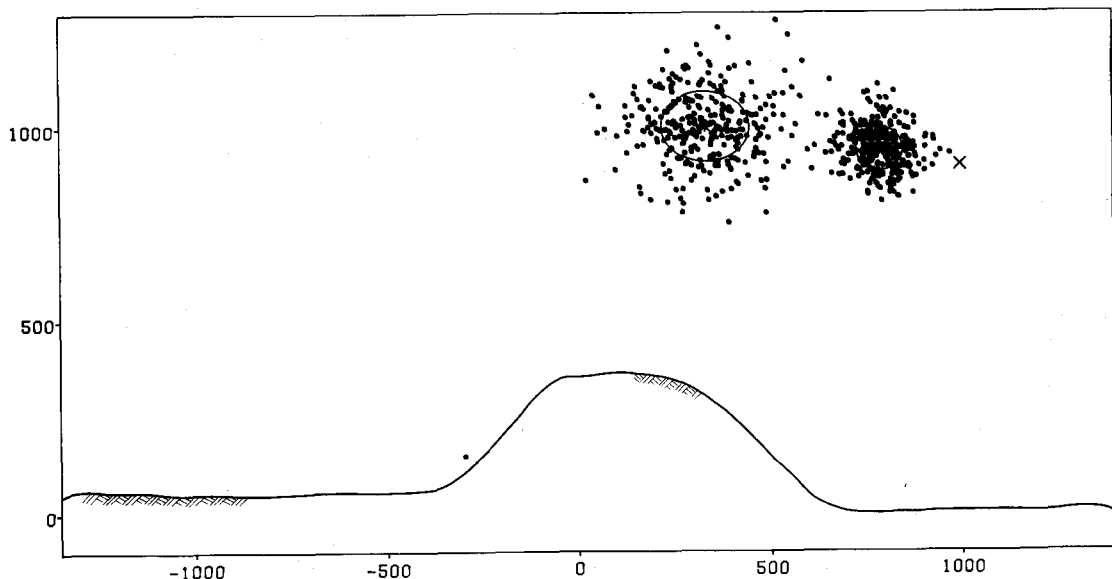


図-5 水粒子群の移動状況

3. 水質汚濁防止のためのシミュレーションシステム

3.1 シミュレーションシステムの考え方

水質汚濁防止のためのシミュレーションシステムは、海象調査結果の資料を基にして当該海域の将来の水質を予測する手法として、従来行なってきた水理模型による実験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こうとするものである。

それは、対象地区の地形、海象等のデータならびに発生源である工場・家庭排水などの各種のデータの管理の確立を図ると共に、新しい理論拡散式体系のもとに、電子計算機による計算により対象海域の潮流等の特性を再現し、そこに臨海部の工場等から排出された場合の水質汚濁の程度を計算するシステムであり、このような迅速な水質汚濁予測に基づき、システムの公害対策の推進を図ろうとするものである。このシステムを活用することにより、適正な工業開発、公害防止対策の推進はもとより工場の配置計画変更、新增設計画等があっても、迅速かつ弾力的にその個別の汚染影響予測と共に、海域全体の汚染状態をも予測することができる。このシステムの考え方は図-6に示すとおりである。

3.2 シミュレーションモデルの内容

水質管理システムの根幹をなすシミュレーションモデルとは、水理実験で模型として製作される海岸

地形、構造物の形状・配置などを電子計算機の記憶容量のなかに組み込んでおき、現象を支配する基礎式系（運動方程式、連続方程式および物質の保存方程式）に基づき、将来の水質汚染の予測を行なうものである。以上のシミュレーションシステムの考え方は、図-7に示すとおりである。このシミュレーションシステムを発展性のものにするためには、シミュレーションモデルを構成する各パートを遂次より高度なものとおきかえられるようにする必要があるので、プログラムの各サブルーチンは随時とりかえがきくようにすることが望ましい。

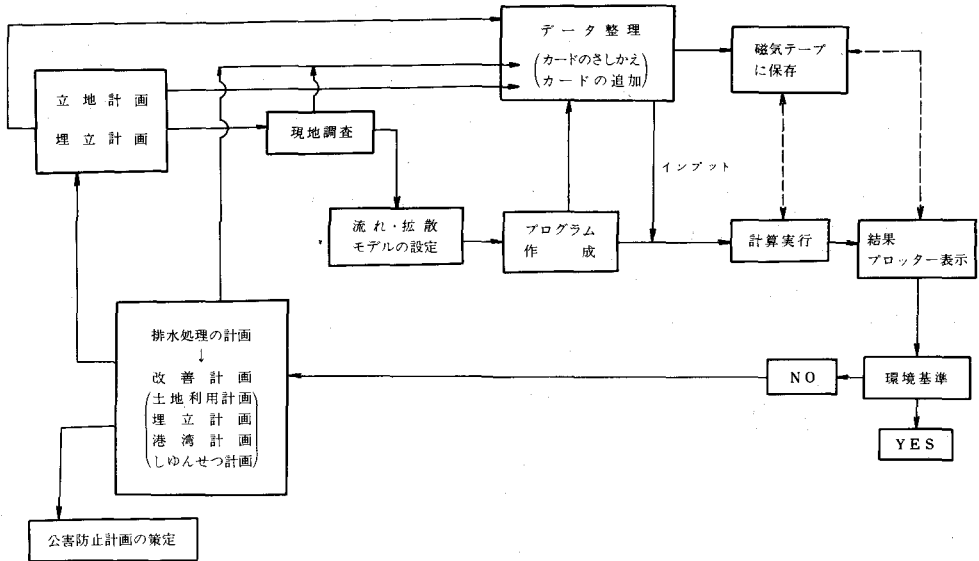


図-6 水質管理システムの考え方

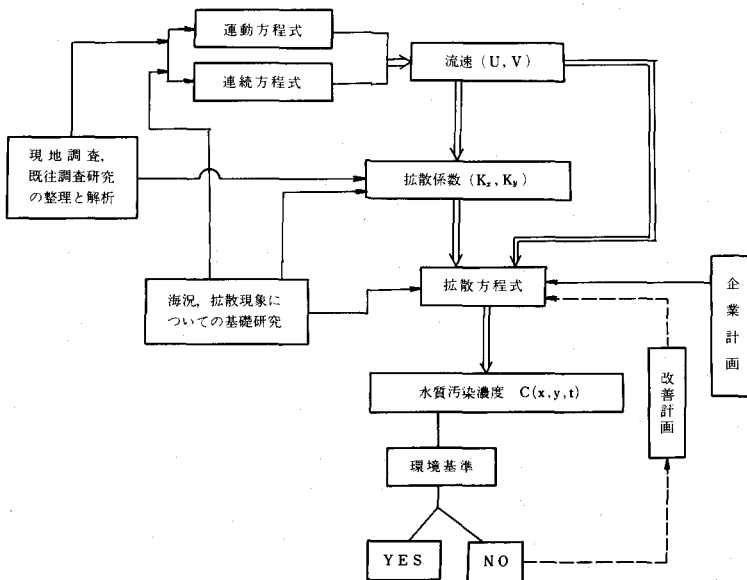


図-7 水質汚濁防止のためのシミュレーションシステム

海域への汚濁負荷に伴う海域での排水拡散予測を実施する場合、個々の地点の立地条件や海域の流れの特性に適応した既往の拡散モデルを選択し、あるいは新しい拡散モデルを作成してシミュレーション解析を行う必要がある。

シミュレーション解析手法による計算の進め方の順序としては、図-8の方法が考えられる。

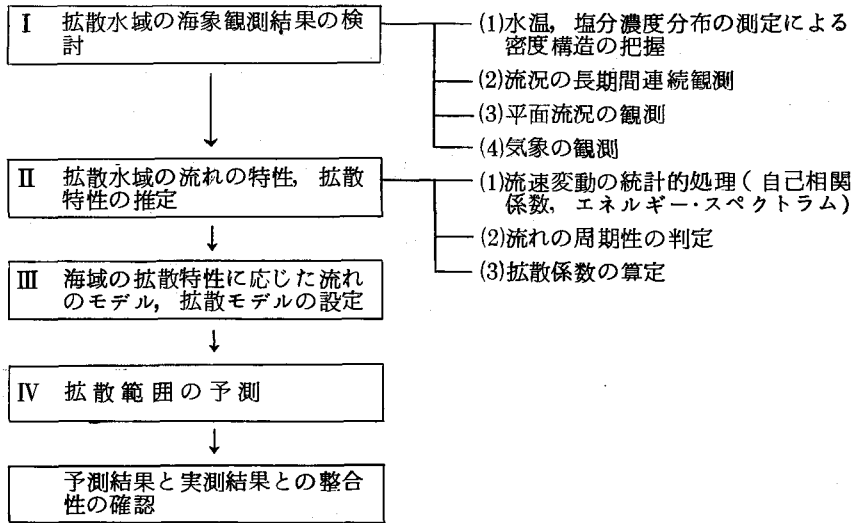


図-8 計算の進め方

3.3 基本式系

沿岸海域での排水および沿岸流の流動を支配する運動および連続方程式は次のように書くことができる。

$$\frac{\partial \bar{\rho} U_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} U_i U_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{\rho} g \delta_{3i} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

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

$$R_{ij} = - \overline{\rho u'_i u'_j} = A_{(j)} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + A_{(i)} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $A_{(j)}$ 、 $A_{(i)}$ は $i, j = 3$ のとき水平渦動粘性率 A_h 、 $i, j = 3$ のとき鉛直渦動粘性率 A_z 。拡散物質の保存条件式は、次式で表されるようである。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ K_{ij} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 c は拡散物質の濃度、 $K_{ij} = 0$ ($i \neq j$)、 $K_{ij} > 0$ ($i = j$)、 K_{ij} は次式で定義されている。

$$\overline{u'_i c'} = -K_{ij} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}$$

このとき、 u_i と c は時間平均値と変動値に分けられている。

$$u_i = U_i + u'_i, \quad c_i = \bar{c} + c'$$

数値モデルの一例として、排水に伴う海域での流速と水質濃度の鉛直分布に関して相似性が成り立つと仮定した式系のもとに展開を行い、各水深ごとの流速、濃度鉛直分布を算定する方法について述べる。

流速成分 u 、 v について、沿岸流による成分(記号を T とおく)と排水放出(記号を O とおく)による成分とに分割すると

$$u = u_T + u_O, \quad v = v_T + v_O \quad \dots\dots\dots(11)$$

のようになる。 u_O, v_O の鉛直方向の分布形状がそれぞれ相似性を有するものとすれば次のように書ける。

$$u_O = U_S(x, y) \cdot f(\eta), \quad v_O = V_S(x, y) \cdot f(\eta) \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 U_S, V_S :それぞれ放水による x, y 方向の表面流速、 H_w :廃水が含まれる厚さ、 $f(\eta)$:放流速の鉛直方向の分布形、 $\eta = (S+Z)/(S+H_w)$ 、 S :水面上昇量。

このとき、 x, y 方向の線流量は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-S}^{H_w} u_O dz = U_S(S+H_w) \alpha \\ N &= \int_{-S}^{H_w} v_O dz = V_S(S+H_w) \alpha \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{ここに、} \alpha = \int_0^1 f(\eta) d\eta.$$

深さ方向に積分した運動方程式および連続式は次のようになる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{r}{\alpha} \left(U_S \frac{\partial M}{\partial x} + V_S \frac{\partial M}{\partial y} \right) = -g(S+H_w) \frac{\partial S}{\partial x} + A_h \nabla^2 M - f^2(O) k_f U_S |V| \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{r}{\alpha} \left(U_S \frac{\partial N}{\partial x} + V_S \frac{\partial N}{\partial y} \right) = -g(S+H_w) \frac{\partial S}{\partial y} + A_h \nabla^2 N - f^2(O) k_f V_S |V| \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\text{ここに、} r = \int_{-S}^{H_w} f^2(\eta) dz$$

境界条件としては、海岸線上には常に流量点を取り、ここでは排水口部分を除いてつねに流量を零とおく。また、沖合三方の半無限境界設定線上では水位を固定して与えればよい。この計算方式によれば、複雑な地形が存在していても、容易に流速成分、水面上昇量が求められる。

沿岸海域における潮流などの流速成分は、平面的な海岸地形および水深などの変化によって複雑な様相を呈する。特に、当該海域に孤立状の防波堤、島などが存在しているときには、計算領域の両境界で適当な水位上昇量や流量を与え、内部領域で水位上昇量、流速成分は式(4)および(5)の右辺にそれぞれ $-\tau_x$, $-\tau_y$ を加え、かつ $r = \alpha = 1$, $U_s \rightarrow U$, $V_s \rightarrow V$ とおくことによって求められる。 τ_x , τ_y はそれぞれ x , y 方向の海底摩擦抵抗で次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_x &= (K_b / h^2) M \sqrt{M^2 + N^2} \\ \tau_y &= (K_b / h^2) N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

K_b は海底摩擦係数で 2.6×10^{-5} の値を採る。

拡散物質の濃度についても、流れの場合と同様に深さ方向に積分すると次式を得る。

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U_s \frac{\partial c_s}{\partial x} + V_s \frac{\partial c_s}{\partial y}) = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial c_s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial c_s}{\partial y}) \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{ここに、} \partial = \int_{-S}^{H_w} f(\eta) \cdot g(\eta) d\eta, \quad c = c_s(x, y) \cdot g(\eta)。$$

3.4 拡散係数の算定⁽⁸⁾

この拡散係数は、対象海域で行なった流速、流向変動の長時間連続観測結果の統計処理に基づいて定めるものである。

半日周潮流のような規則的な流れが卓越した海域においては、周期性成分を取り除いた残りの乱れ成分を拡散係数として評価することにする。

不規則な流れをもつ海域においては、ある時間スケール以上の長周期の流れは恒流成分などとして扱い、スケール以下の高周波成分の乱れは、拡散係数として評価することにする。このような海域においては、恒流成分は別として、不規則な流れを一連の大きな渦の集まりとみなして、この作用を拡散係数のなかに包含して数値計算を行なう。

温排水の場合で、 $1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ の水温上昇域を問題にする場合、従来より実施されてきた各地点における水温拡散分布の実測結果ならびに数値実験による予測結果より、各流量に対する 1°C 上昇の拡散面積と水平スケールとの関係は、表-1 に示すようである。ここにいう水平スケールとは、拡散分布が半円状に拡がると仮定した場合の平均半径と定義したものである。

一方、染料などによる海洋での拡散実験の結果から、拡散現象のスケール (ℓ) と時間 (t) の関係は、

$$\ell \text{ (cm)} = 0.312 t^{1.17} \text{ (sec)}$$

で求められる。表-1 には、上式に基く放水量と時・空間スケールとの関係を参考程度に示してある。

従って、不規則な海域においては、放水量が $20, 80 \text{ m}^3/\text{sec}$ のときは、それぞれ流れのもとのデータにより半日周潮ならびに日周潮周期より長周期成分を取り除き、それ以下の高周波周期成分の乱れを拡散係数として評価することにする。

表一 1 放水量と時間スケールとの関係(角湯らによる)

放 水 量 (m^3/sec)	拡 散 面 積 (km^2)		相 当 半 径		時間スケール (時間)
	1 $^{\circ}C$ 上 昇	2 $^{\circ}C$ 上 昇	1 $^{\circ}C$ 上 昇	2 $^{\circ}C$ 上 昇	
20	1.15	0.5	0.86	0.56	約 1.25
40	2.5	1.1	1.26	0.84	" 17.2
80	5.4	2.4	1.85	1.24	" 23.5
120	8.5	3.7	2.33	1.53	" 29.5
200	15.0	6.6	3.09	2.05	" 37.0

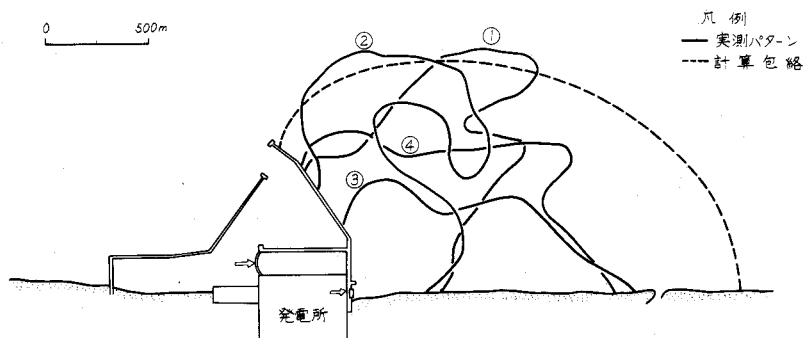
4. 拡散予測解析例

検討対象地点の地域特性、ならびに拡散特性に応じた代表的な三つの海域を選び、拡散範囲を算定するための手法について簡単にふれることにする。

4.1 外海における拡散過程

わが国の太平洋沿岸、日本海沿岸および北海道沿岸などの海域においては、流れの周期性が微弱で、不規則な流れが卓越していることが確認されている。この海域において排水の拡散分布を支配する要因としては、流れの影響がもっとも大きいと考えられる。したがって、潮位変化と拡散形状との関係も明確に認められない。このような地点における拡散予測手法は、不規則な流れを一種の大きな渦の集まりとみなして、この作用を拡散係数の形で表わし計算を行うものである。

この拡散係数は対象海域で行った流れの長時間連続観測結果の統計処理を参考にして定めるものである。太平洋に直接面した地点で、2年間の四季を通して実施した測流結果から拡散係数値を算定した結果、拡散係数の値として、 K_x (汀線に平行な方向) = $(0.2 \sim 1.9) \times 10^5 cm^2/sec$, K_y (汀線に直角な方向) = $(0.1 \sim 0.9) \times 10^5 cm^2/sec$ の値が求められ、値として one order 以上変化しないことが確認されている。⁽⁸⁾ したがって、排水拡散分布を求めるにあたって、自然現象の変動性を考慮して上下に one order の幅をもたせ、これらの値を組合わせるか、あるいは恒流成分が存在している場合には、恒流成分を考慮した場合と考慮しない場合の組み合わせを考えて計算を進めることが望ましい。そして、これらの各ケースについての計算結果を包絡した拡散範囲を以て起り得る拡散分布の殆んど大部分を包含できる拡散範囲とみなす。



図一 9 外海に直接面した発電所における温排水拡散予測結果と実測結果との比較(表層 $1^{\circ}C$ 上昇の場合, $Q = 25 m^3/sec$, $\Delta T = 7^{\circ}C$)

図-9は太平洋岸に直接面している発電所における温排水拡散予測結果と実測結果とを比較したものである。この地点においては、恒流成分を考慮に入れることによって拡散場の異方性の程度の違いを考えたケースについて計算を行うとき、比較的実測結果に近い拡散範囲が得られることが認められた。

このように、海流あるいは海流からの分枝流の影響を受ける海域の拡散過程は、主として沖合海流の海岸への接近、離反にともなう沖合水の流入などの作用により行なわれているものと考えられる。従って、このような海域での排水拡散問題を考えるときは、汀線付近の流動と沖合水水塊の動きとの相互作用を考慮していかなければならない。

また、砕波帯内に汚染水が放流されている地点においては、砕波帯内の複雑な海浜流の作用によって非常に複雑な拡散分布を示すことがある。砕波帯内の混合過程としては砕波による乱れと移流作用が卓越するであろう。この2つの過程が海岸流と離岸流とから成る、いわゆる海浜循環セルを形成している。このような混合作用が卓越する地点にあつては、不規則な波浪の作用や海岸での砕波に伴う海浜流などが排水拡散過程におよぼす影響を明らかにし、この現象の理論体系を完成させるとともに、この種の環境条件に応じた拡散予測手法を研究する必要がある。

4.2 内海における拡散過程

この海域に存在する沿岸流は、沿岸に平行に流れる極めて周期的な潮汐流が存在している。この海域での拡散状態は、半日周潮、日周潮あるいは両者の合成潮の振動周期を有する周期振動流の上に、小さいスケールの不規則な過程が重畳している乱れの場合と考えることができる。この拡散特性は、瀬戸内海などに主に認められる。海岸に平行な潮汐流が卓越している地点では漲潮時、落潮時に応じ、水質汚濁濃度分布は潮流の移動に対応する繰り返しの分布形状を示す。しかし、海域には必ずしも半日周潮のみが卓越していないので、その拡散分布が同一の形状を示すとは限らない。このような海域における排水拡散予測は、潮流の流れを時間の関数として計算に加味し、水質濃度拡散分布を非定常現象としてとらえ、濃度分布の時々刻々の変化を把握することができる。

この場合は、予測計算によって得られた各時刻での影響域をすべて包絡する領域をもって、水質汚濁範囲とみなすことができよう。このような流れを有する海域においては、潮汐流のようなメソスケールの渦群が主として拡散分布を支配することになるので、恒流成分を含めた潮流成分についての十分な把握が必要とされる。

このような解析手法に基いて実施した瀬戸内海に面した発電所地点における予測解析結果と実測結果を比較した結果、本解析手法が拡散範囲の予測に十分有効であることが認められる(図-10参照)。

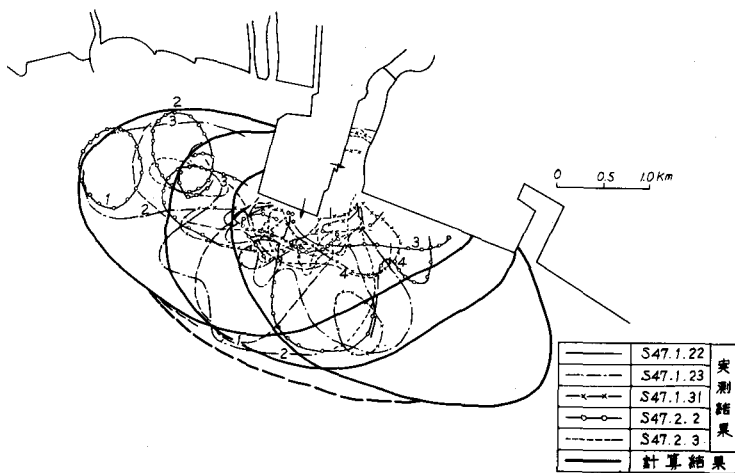


図-10 内海に位置する発電所温排水拡散予測結果と実測結果との比較(1℃上昇、海面、 $Q=55.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $\Delta T=7.2^\circ\text{C}$)

4.3 湾内における拡散過程

湾内での排水拡散過程は潮汐作用による潮汐混合が主役を演じること、しかも開放的な海域と異なり、湾外への排熱作用に限度があるため、閉鎖的の海湾における汚染水の停滞現象が存在するという物理的特性を有している。汚染の拡散分布は潮の干満に応じて、漲潮時湾奥へおしこめられる傾向にあり、落潮時表層水の湾外への流出に伴い、汚染水が湾外へ分散するという一定のくり返しのパターンを示す。

汚染水層の厚さは、防波堤などで外海への分散が遮断される傾向にあるので、外海への排出の場合とは異なり、比較的厚くなる傾向にある。一般に潮汐作用が卓越している閉塞型の湾においては、拡散率は湾口の方が大きく、湾口付近では外海の値に近い。

湾内海域として伊勢湾奥の名古屋港を選び、当該海域での流動・拡散解析の概要を紹介しよう。図-11は名古屋港内外での潮流観測点配置図を示したものである。流動について数値シミュレーションにより求めた結果と実測資料を調和解析して求めた結果とを比較すれば、両者はほぼ良好な一致を示し、数値モデルにおいては港内外海について平均的な流況が再現されていることが確認されている。図-12は潮流楕円による比較を行なったものである。これらの結果によれば潮流楕円の長軸成分については、その方向と大きさは概ね良好な一致を示すが、一方短軸成分については観測値にくらべて計算値が小さい結果を与えている。これは潮位設定の位置が伊勢湾口にあるのではなく、四日市一常滑にあるためと考えられる。

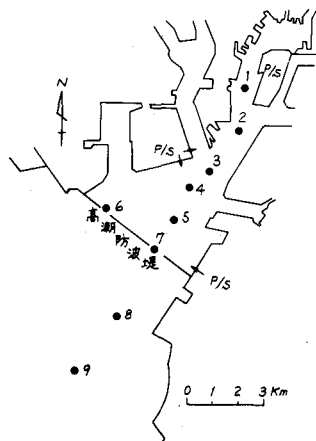


図-11 潮流観測点配置図

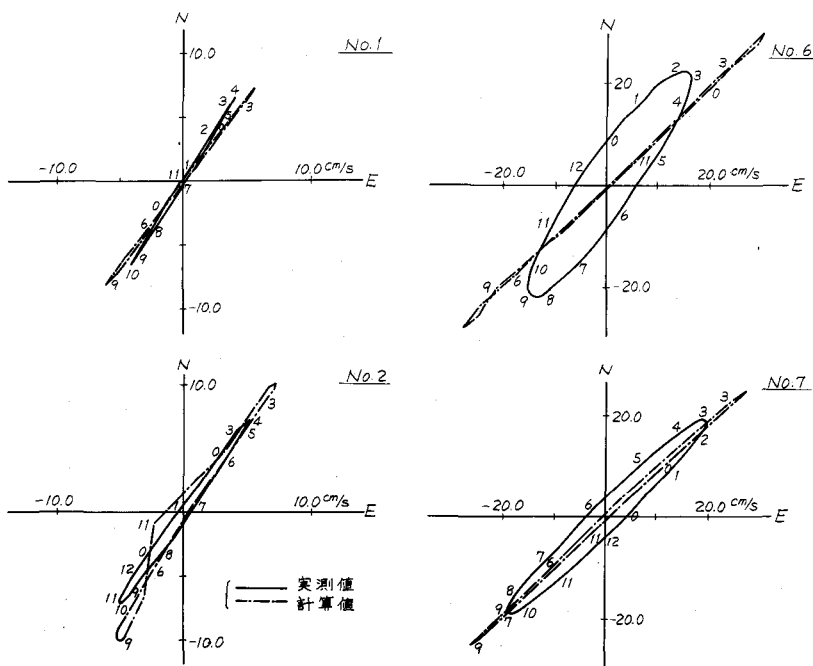


図-12 潮流楕円比較図

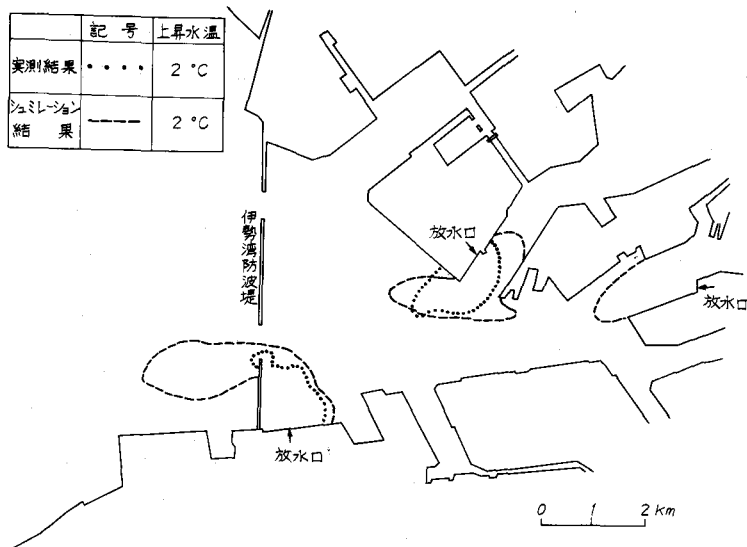


図-13 拡散予測結果と実測結果との比較(表層)

しかし、この差異は排水拡散分布の予測にはそれ程影響を与えない。たとえば、図-13は港内に位置する発電所群からの温排水拡散現象の数値シミュレーション解析結果と実測結果とを比較したものである。

この場合の拡散範囲は、一潮時の間に時々刻々に変化する水温上昇範囲をすべて包絡する領域をもって起り得る拡散分布のほとんど大部分を包含できるものとみなせる。図-13に示す予測結果の水温上昇包絡範囲は、ほぼ実測結果の拡散範囲を包含しており、数値モデル、潮位変動、拡散係数などの選定が妥当であったと判断される。

上述のように、湾内外水の水塊が湾口を通じて潮汐往復流によって交換される状態が常に生じるとは限らない。たとえば、三陸沖に近い沿岸域においては、物理的特性の異なるいくつかの水塊が遭遇することが多い。沖合水域で暖水塊があり、地形性要因に基づく水平旋回流の影響も加わると、湾内と湾外水域の間に不連続面を形成することがある。この不連続面は湾口沖合付近で湧昇流を発生させ、密度安定度の大きい夏季を除いて、この付近で強い鉛直混合現象が生じる。このために、汚染水影響域が湾外に広がることが阻止される例が多々認められている。

湾内であっても潮汐作用が小さいときは、汚染水の拡散分布形状(拡がり方と厚さ)は外海の高泥条件、すなわち風向、風速、沖合水の流入、潮流、さらには湾内の副振動の影響を受けて変化する。これらの外海の海洋構造の変化により、汚染水の分布形状は表層の拡がり方よりも、むしろ汚染水が含まれる厚さに影響を与えているようである。

4.4 流動特性が拡散タイプⅠとⅡの中間に属する海域⁽⁵⁾

図-14および15は川内川河口沖合1.0 km地点で測定した流速変動の自己相関関数とエネルギースペクトラムを示す。統計解析の結果より、流れの自己相関関数は周期的な振動を示しているが、瀬戸内海などのような半日周潮流が卓越した海域にみられる非常に強い相関は示していない。また図-15のエネルギースペクトル関数は、半日周潮流の周期に相当する周波数においてピークを示しているが、エネルギー

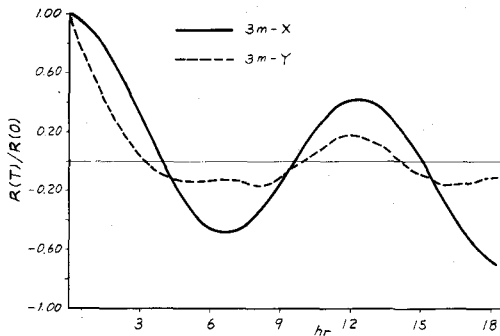


図-14 流速変動の自己相関分布
(川内川河口沖)

一の集中度も半日周潮流が卓越している海域に比べ顕著ではない。

これらの統計的特性から判断し、川内地点前面海域においては半日周潮流の存在は認められるが海域の流れが半日周潮流に支配されているとは言えない。これら海域の流れの特性は流れの長期間連続観測を繰り返し実施することによりさらに明らかになるものと思われる。

川内地点の海域特性は、上述のように不規則過程が卓越した海域と潮流流が卓越した海域の中間的特性を有しており、河川水の分散解析においては沿岸流は移流効果として作用するのではなく、むしろ大スケールの渦群として寄与するものと考え、長期間にわたって起こり得る頻度の高い塩分濃度分布を求めることになる。

当該海域における拡散係数としては、沿岸に平行な方向の成分はこれに直角な成分に比して10～100倍大きい値を有しており、異方性の強い拡散場であることがわかる。

図-16は川内川河口沖での塩分濃度分布を示すが、沿岸に平行な流れが卓越しているため、分布は沖合方向にのびず偏平化した形状を呈し、上記の拡散特性を反映している。

5. 沖合海流と沿岸水形成過程との相互作用⁽⁵⁾

図-17は日本近海の海流の概念図である。この黒潮や対馬暖流の存在は、極めて巨視的な一定の流れとして理解される。しかし、実際に観測される現実的なスケールでの海流は、

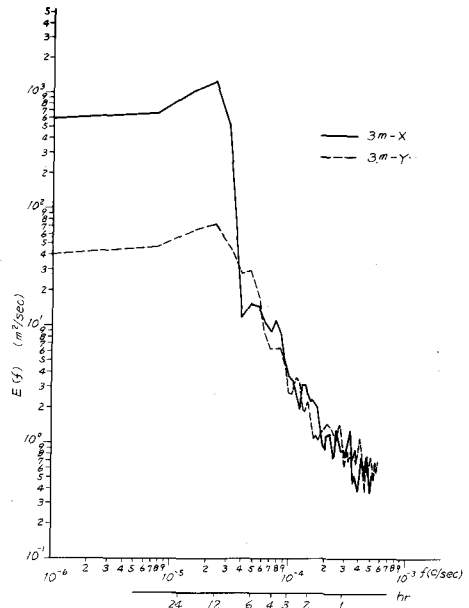


図-15 流速変動のエネルギー・スペクトラム(川内川河口沖)

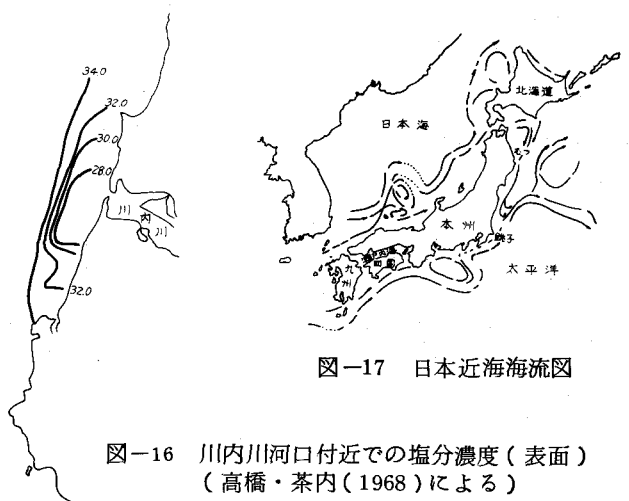


図-16 川内川河口付近での塩分濃度(表面)
(高橋・茶内(1968)による)

図-17 日本近海海流図

決して一定したものではなく、比較的短期間の間に大きく変動をしている。この現象は、拡散問題に関連した沿岸海洋過程の解明と密接な関係にある。たとえば、図-17に示してある南九州沿岸海域に存在する湾、土佐湾内の流れは、潮流としての性格は弱く、湾内水と外海水との交換は主として黒潮の接近、離反に伴う沖合水の流入などの作用により行われているものと考えられる。

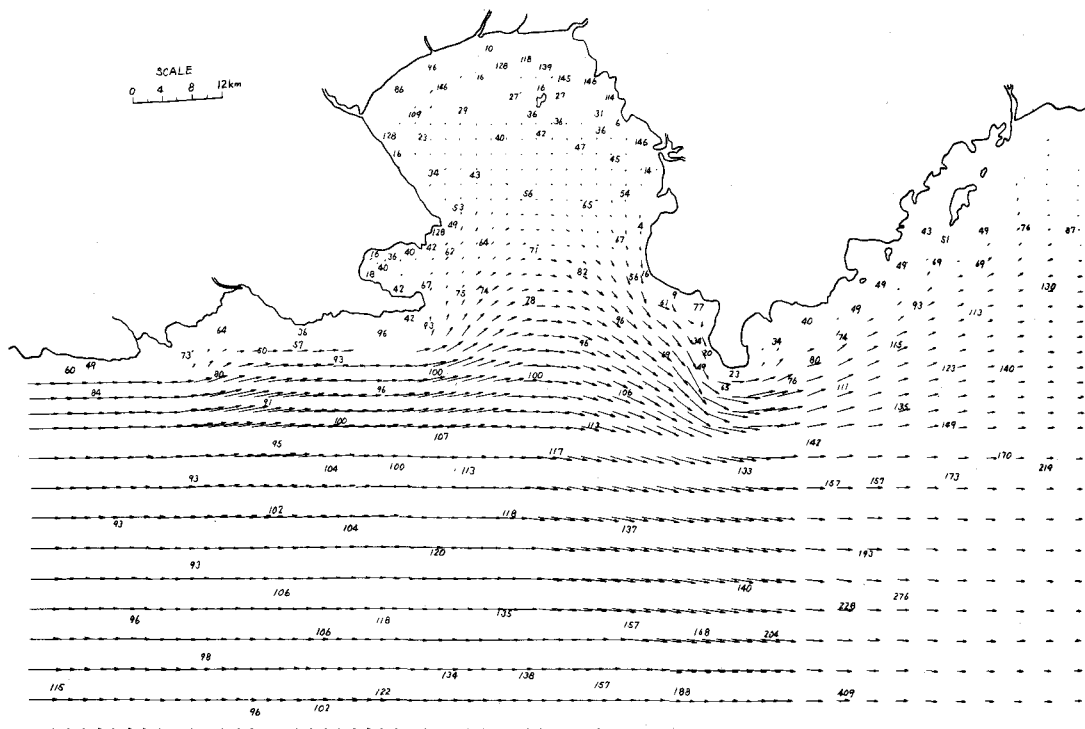


図-18 海流の流速分布

外海に直接面した湾水域に流入する河川水の分散について検討するために、図-18に示す湾内数ヶ所の地点で実施した流れの連続観測結果をもとにして流況特性をみよう。

検討対象としたこの湾口沖合には海流の流軸があり、観測によると約1.0～1.5 knotの速さで流れている。流軸が沖合へ移動すると、湾口付近には反流が存在する。海流の流軸には、多小の移動は見られるが平均的にはほぼ同じところに位置しているようである。この湾の水深は湾奥から湾口へと次第に深くなり、外海水は海底地形に妨げられることなく容易に湾内出入り可能な状態にある。このため、湾内の中層、下層水は、ほぼ外海水、すなわち海流系水塊が主体をなし、湾内水と外海水との交換は海流の接近、離反に伴う沖合水の流入、潮流などの作用により行われているものと考えられる。従って、湾内の河川水分散問題を考えるときは、湾内水の流動と沖合水水塊の動きとの相互作用を考慮していかなければならない。

図-19および20は湾内での流速変動の自己相関分布およびエネルギースペクトル分布の一例を示したものである。これらの流動解析結果より湾内においては周期成分は微弱であって不規則な過程が卓越している乱れの場合であることがわかる。従って、湾内での河川水の拡散分布形状（広がり方と厚さ）は上記の外海の場合によって変化する。

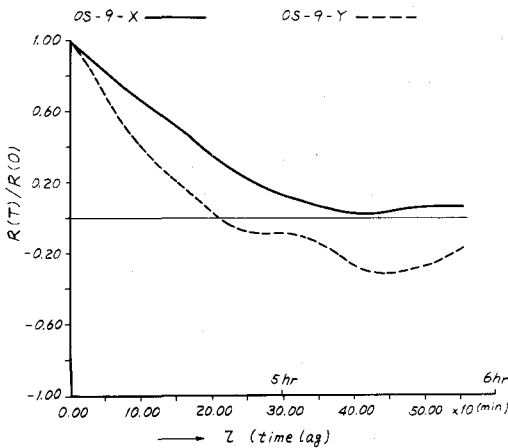


図-19 流速変動の自己相関分布

この湾海域での海流からの分枝流を再現させるために風の作用を2次的なものに考え、左側からの海流の供給を考える。図-18は両端境界線で水位差を与えて、運動方程式と連続方程式を連立して解析した結果を示す。

この流況図から、湾内中央部より湾口側には海流の支流によるところの環流が存在している。流速についての計算結果を現地における実測結果と対比してみると、流速の大きさはほぼ一致しているが、その流況パターンについてはすべての地点が必ずしも両者とも一致していない。

今後、このような海域での河川水分散問題を考えるときは、湾内水の流動と沖合水水塊の動きとの相互作用を考慮する必要がある。

しかし、沿岸域と海洋における海流系への接続の実態は十分把握されていなく、それらは今後の研究の推進にまづほかはない。

6. シミュレーション解析手法の適用上の問題点

沿岸海域における拡散予測を展開する場合、シミュレーション解析だけでできることに限界があることは今さらいうまでもない。現場での観測はもとより、解析的な理論、あるいは模型実験がシミュレーション解析手法を助けねばならず、シミュレーション解析手法はまた観測や理論を助けて、相互に有効なフィードバックの操作を繰り返すことが要求される。この点は自明なことだけれども、その重要性が必ずしも正当に認識されていない現状にある。

数値モデルを単純化して取り扱うには、通常いくつかの平均過程を行なう。たとえば時間、流れの断面あるいは両者に関してである。その結果として、二つの項が生じてくる。その一つは移流項であり、他のものは拡散率として称するものであって、平均化のために表れた付加的な影響をひとまとめにした

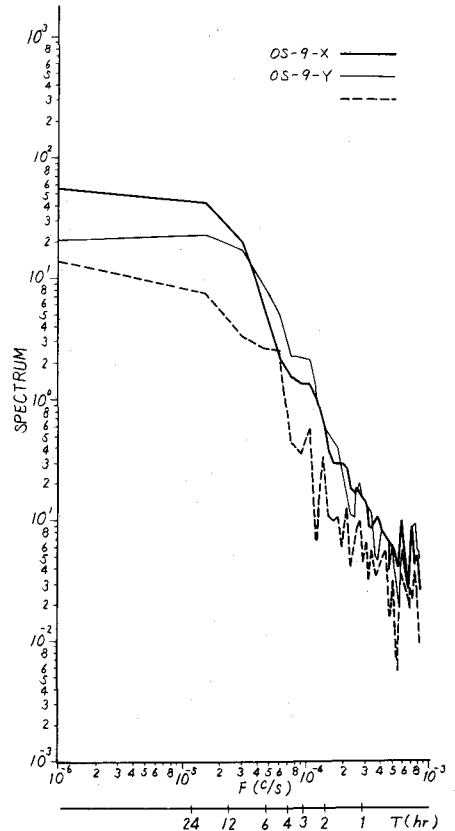


図-20 流速変動のエネルギー・スペクトラム

ものである。ここにいう拡散とは概念的にいて流体と物質との間の運動の差として説明できる。拡散係数あるいは乱流混合のテンソル K_{ij} は流線間の物質の局所的混合の度合を表わしている。

沿岸水域の拡散物質の濃度の広がりを決めるためには、流れの場がたとえば適当な条件下での運動方程式の解によってわかっており、さらに流線間の質量輸送と濃度勾配とを関係づける乱流混合のテンソル K_{ij} が空間および時間の関数として規定されなければならない。いかに大型の電子計算機をもってしても、このような現象のシミュレーションは難しいであろう。というのは、流動および拡散の現象は3次元であるのみならず、境界条件も潮の干満に応じて時間的に変化するからである。また、海面あるいは密度境界面、海底での摩擦係数や乱れ混合テンソルの正しい値はよくわかっていない。沿岸海域の流れおよび拡散の場のシミュレーションはこのような困難性を伴うので、従来から現象を単純化した“モデル”が工夫されとり扱われてきている。しかし、単純化すればする程、拡散モデルは取り扱い易くなるが、それだけ実際現象への再現性がなくなる。

非定常な平面二次元の計算式は強混合型の水域に対しては適合性を有しているが、依然として式のなかには鉛直方向の積分効果が残っている。このことから、鉛直混合を弱めるような流速分布の修正、鉛直混合を抑制させる鉛直方向の密度変化の影響を含ませることは不可能である。水面におよぼす風の応力は考慮できるが、これによって水平循環を期待できる程度である。しかし、底層で起こる return current、湧昇流および速度ベクトルの深さ方向の変化を考えることができない。この場合においても、鉛直方向の速度勾配を平均化した影響が残存するために、瞬間的流れの方向における shear effect による拡散効果を考えることが必要であろう。

要するに、非定常な平面二次元解析によってしては、3次元的な現象効果を説明するためには、モデル作成者の現象判断が依然として残されてくる。

以上の議論は、単層モデルについてであって、そこでは密度はせいぜい (x, y) の関数であって、 z については無関係であった。湾内に密度不連続面を有するとき、汚染物質の分散形態を求めるには二層あるいは成層流の物理構造を知る必要がある。たとえば、二層流の安定条件、密度の界面を横切る拡散率および成層流の流れの構造などがはっきりしてくれば、密度効果が拡散係数の値にどのように影響するのかわかるようになる。

すでに述べたことから理解されるように、個々の特定地点のシミュレーション解析を実施するに当たっては、当該地点の流れや乱れの特性を把握して、その海域の拡散特性に応じた適切な拡散モデルを設定する必要がある。

このように数理モデルによるシミュレーション解析手法は、物理モデルと数学モデルとの対応性を追求しながら、計算を実施する必要がある、また計算結果に対する物理評価もきわめて重要であって、単に物理的なインプットデータと計算式だけで処理できるものでないことを認識すべきであろう。

むすび —エコロジー・システムとの関連—

汚染予測シミュレーション解析と公害防止計画との関係は、図-6に示すようなフロー・チャートによって示すことができる。

このような水質管理システムは、科学的調査にもとづく公害防止計画を推進するものとして考えられるが、モデルの対象がエコシステムの複雑なメカニズムのうち、物理的な移送、拡散による現象に限定されていて、生物的影響まで含みえないところに限界がある。また、改善計画、被害影響などの経済的なモデル化までは、進んでいない。

一般の環境モデルでは、環境状態の指標設定と環境状態の変化の原因となる素過程のモデル化の問題が中心となろう。

また、エコロジー・システムの研究においては、環境素過程（基本的な現象）の成果をシミュレーションの方へフィードバックしていくと同時に、シミュレーション研究によって素過程研究の方向と問題点を明確に照らし出す必要があろう。これら環境素過程の研究にあたり、以下のプロセスが解明されなければならない。

- (1) 物理的变化（移流、拡散、凝集、沈澱など）
- (2) 化学的变化（水中における化学反応、底泥からの溶出、蓄積など）
- (3) 生物学変化（光合成、同化吸収、バクテリアなどによる分解など）

エコロジカルな現象との相互関連については、今後の研究過程によって検討され、より高度な総合的なモデルが作られることが期待される。

参 考 文 献

- (1) 安井 正 (1971) : 海洋のシミュレーション, 海洋の科学, vol. 4, № 12
- (2) 和田 明・片野 尚明 (1971) : 海域での物質拡散におよぼす流れの影響, 第18回海岸工学講演会論文集
- (3) 和田 明・片野 尚明・角湯 正剛・荒木 洋 (1974) : 沿岸海域における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究, 電中研報告, № 73011
- (4) 和田 明・宮池 克人 (1975) : 内湾における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究, 電中研報告, № 74017
- (5) 和田 明 (1974) : 大きな河について, 沿岸海洋研究ノート, vol. 12, № 1