

シンポジウム： 沿岸海域における陸水の混合過程

昭和48年10月25日, 鹿児島県産業会館 (鹿児島市)

本シンポジウムは, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会主催, 永田豊氏がコンビーナーになって開催された。ここに印刷された七つの話題提供があり, 更に活発な総合討論(永田豊氏司会)が行われた。

大きな河について*

和田 明**

要旨: 沿岸海域における海水混合の問題は水資源及び汚染の問題に関連して関心がもたれている。これら汚染の度合が産業の発達と人口の増加に伴って莫大な量に達し, 環境衛生, 沿岸資源に対してかなり重大な影響を及ぼすようになっているのが現状である。

本文では, 上記の沿岸海洋過程問題の一環として, 本邦における大きな川を対象として, 河口内外における河川流出水と母海水との希釈混合過程の現象を探り上げ, 物理的素過程についてふれると同時に, 沖合海流と沿岸水形成過程との相互作用について検討を加えた。

1. 河口密度流の形式

河川感潮部分の水理的状态を塩分侵入・混合の状況からみて, 河口密度流の形式は (i) 塩水楔が存在する弱混合型, (ii) 鉛直混合を伴う二層流型, (iii) 密度が鉛直方向に一樣な強混合型の3通りに大別される。淡水と塩水との間に発達する循環の型は主として, (i) 河川流量, (ii) 潮流, (iii) 河口の幅, (iv) 河口の深さに依存しているものと考えられる。第1表は PRITCHARD (1955)¹⁾ がまとめたもので, 上記因子間の関係によって河口循環の型が存在することを示している。

第1表 河口循環の型と支配因子

循環の型	河川 流量	潮流	比 (潮汐 河)	河口の大きさ	
				幅	深さ
(i) 塩水楔が存在する弱混合型	大	小	1	小	大
(ii) 鉛直混合を伴う二層流型	↑	↓	10~100	↓	↑
(iii) 密度が鉛直方向に一樣な強混合型	小	大	>1000	大	小

2. 弱混合型河口域の塩分分布

弱混合型密度流において, 下層海水が静止しているときの基礎方程式は次式のように書ける。

$$\left(1 - \frac{Q_1^2}{b_1^2 h_1^2} \frac{1}{\varepsilon g h_1}\right) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{Q_1^2}{b_1^2 h_1^2} \frac{1}{\varepsilon g} \times \left(\frac{k}{h_1} \cdot \frac{h_1 + h_2}{h_2} - \frac{\partial b_1 / \partial x}{b_1}\right) = 0 \quad (1)$$

ここに, h_1, h_2 : それぞれ河水層, 海水層の厚さ, b_1 : 河幅, $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, ρ_1, ρ_2 : それぞれ河水密度, 海水密度, k : 二層間の抵抗を $\rho k u_1^2$ (u_1 : 河水流速) とおいたときの抵抗係数, $\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2$, Q_1 : 河水流量。

式(1)から, (i) 抵抗係数 k が小さいとき, (ii) 海水層の厚さ h_2 が大きいとき, (iii) 河幅 b_1 が海側に向かって広がっているとき, 塩水楔の侵入距離は長くなることがわかる²⁾。また, 河口端では

* 1974年7月31日受理

** 電力中央研究所

支配断面が形成されるものとして、下層の流速を無視するとき、 $u_1^2 / \frac{\Delta\rho}{\rho} gh_1 = 1$ となり、河口端を通過して表層河水層の厚さは減少する。

河口に楔状に侵入する塩水楔の長さ、形状は淡塩境界面の摩擦抵抗係数のとりかたによって相当変化する。従って、係数の具体的な値を知ることが河口二層流の問題で重要となる。淡水塩水二層間の抵抗係数は次式で定義される。

$$\tau_i = \rho k |u_1 - u_2| (u_1 - u_2) \quad (2)$$

ここに、 τ_i : 二層間せん断応力、 k : 抵抗係数で、このほか f_i , C_i (Chézy 型抵抗係数) が用いられることがある ($k = f_i/2 = g/4C_i^2$)。

抵抗係数の値としては、現地実測、模型実験とも相当散乱するため、ある一定の表示では示し

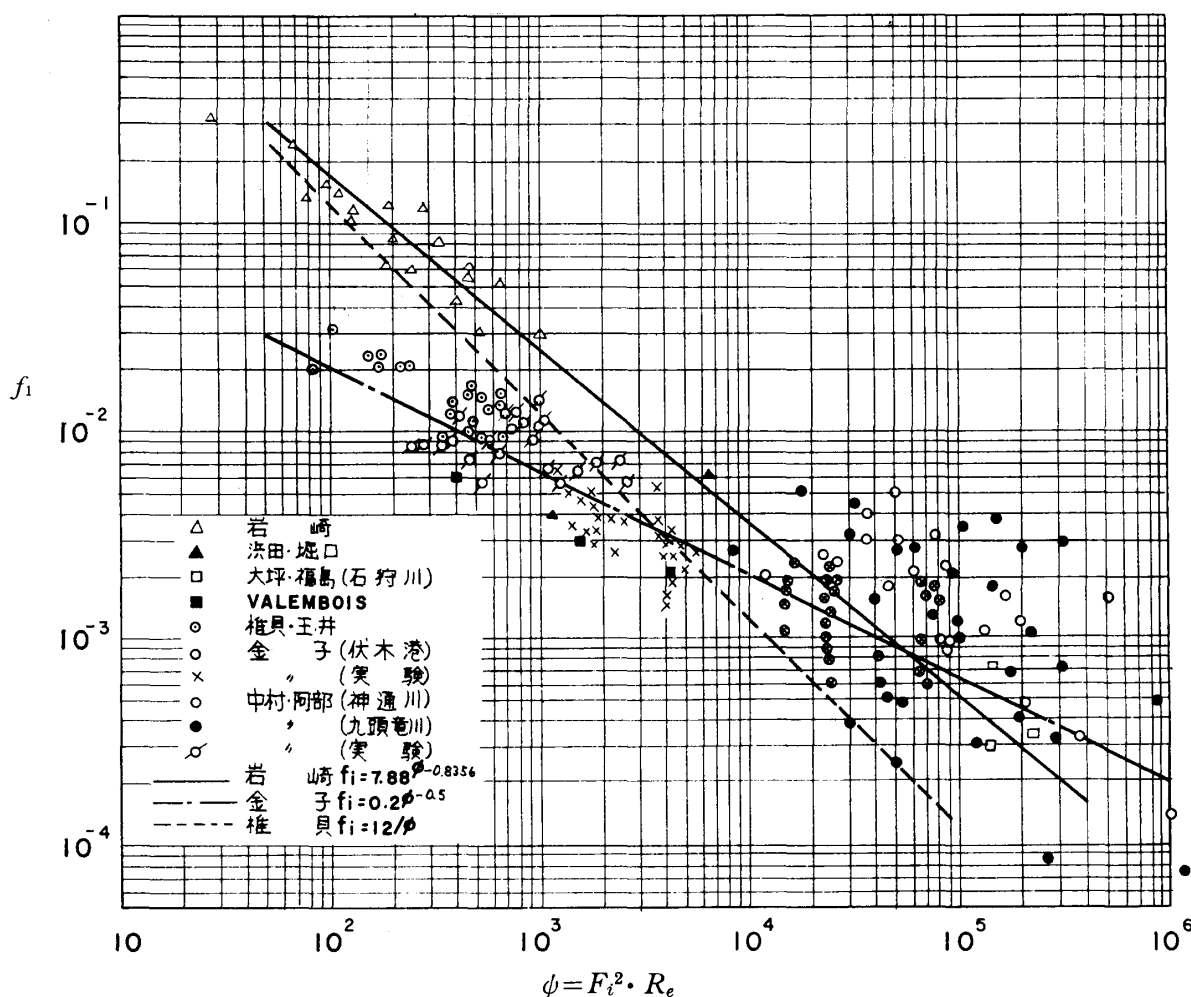
がたいがその傾向は式 (3) の形に表示することができる。

$$f_i = c [R_e \cdot F_i^2]^{-n} \quad (3)$$

抵抗係数 f_i の値は模型実験で 10^{-2} 程度、現地観測で $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度の値となっていて、現象の規模の拡大とともに減少してゆく傾向にある。第1図は各方面で行われた抵抗係数の実験値並びに実測値を $\phi (= R_e \cdot F_i^2)$ について整理して表わしたものである。

淡塩境界面が不安定になって混合が活発になったとき、塩水が下層から上層淡水中へ混入移動する問題については、KEULEGAN³⁾, ROUSE⁴⁾ 及び岡崎⁵⁾ の実験的研究が見受けられる。

成層流の安定問題、つまり二層流のなかになん



第1図 抵抗係数と ϕ との関係 (水理公式集より)

大きな河について

らかの理由で発生した攪乱が時間とともに、あるいは伝播するにつれて増幅されない条件を求める問題は KELVIN, HELMHOLTZ 以来多くの研究がなされ、最近の流体力学の中心課題の一つでもある。

3. 緩及び強混合型河口域の塩分分布

二層の混合が発達して、緩混合及び強混合になった場合の、河口内の塩分分布はいわゆる水平渦動拡散による混合とは別に、潮汐流の混合効果によって定まる場合が想定される。Ketchum の方法や Arons・Stommel の潮汐による混合理論などはその典型的なものといえる。

河口内の塩分濃度の分散過程は河口内で見出される塩分侵入、つまり循環の型に関連している。

縦方向及び鉛直方向の密度勾配の影響に加えて、潮流速度の振動現象は縦方向の分散に大きな影響をもつ。淡水流出による湾内の流速は一般的に潮汐流速に比して大きくない。しかし、淡水流による海側へ向かう流れは湾内におけるフラッシング作用の役割を有している。また河川水に含まれる汚染物が溶解性の浮遊物である場合には水への溶解が良好であって、その中での重力沈降性を示すものや、凝集沈降を生ずるものなどがある。このように、河口内における質量輸送過程は、非保存性物質の特性に加えて、潮汐作用による流れの振動のためと塩分侵入を伴う大きいスケールの重力循環のために、河川におけるそれよりも複雑である。

断面積が変化する河口内塩分濃度を支配する式は次のように与えられる。

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \right) + R_a \quad (4)$$

ここに、 $\bar{S}$: 塩分濃度、 E : 拡散係数、 R_a : 単位時間当り放出される淡水量、 $\bar{U}$: 軸方向の流速。ここに、一印は断面平均値を意味する。 $\bar{U} = Q/A$ 、 Q は潮汐と淡水流出の両者を含む流れの量を表わす。

河口内濃度分布の一次元解析は式(4)によるわ

けであるが、この式の実扱い方については二つの方法が考えられてきている。初期の数学モデル、例えば STOMMEL (1952) らの研究は河口内への淡水流出のみの項によって移流過程を考えている。この式の形は1潮汐周期間の河口内の任意断面で時間平均をとることによって求めることができ、従来、定常状態を想定して式(4)を変形し現状の塩分などの観測データから縦方向の拡散係数の評価が行われてきた。

その後、展開された数学モデルは、HOLLEY *et al.* (1970)⁶⁾、和田・片野 (1971)⁷⁾ らの研究によって代表されるように、「潮汐が時間的に変化する移流モデル」を用いた。ここでは、移流項は時間的に変化する速度(淡水流出と潮流の両者を含む)の断面平均値を表わす。分散項は鉛直及び横方向の速度分布と乱流拡散の影響を示す。すなわち、一次元の場合を考えると、式(4)の右辺の拡散項は次のように表わすことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot K_x \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} - \int_A u' s' dA \right) \quad (5)$$

ここに、 $\bar{S}$: 断面平均濃度、 K_x : 縦方向の乱流拡散係数で断面平均値、 u' 及び s' : 断面平均値からの流速及び濃度の偏差 ($u = \bar{U} + u'$, $S = \bar{S} + s'$)。

式(5)において、 E は分散係数と称せられる。“分散” はこれと乱流拡散と区別するために、“ $u's'$ ” 輸送に対して使われる。特に、河口での混合は潮汐流、密度流、吹送流による流れのせん断作用によって効果的に生じる。

鉛直方向の速度変化による分散係数は Elder の式 ($E = 5.93 u_* h$, u_* : 摩擦速度、 h : 水深) から求められる。一方、速度の横方向の変化による分散係数は Elder の式による値に比して 10~100 倍大きい値を生ずることがある。この場の分散係数は近似的に次式で表わされる。(FISCHER, 1967)。

$$\frac{E_\infty}{u_* \cdot h} = 0.3 \left(\frac{\bar{u}'^2}{u_*^2} \right) \left(\frac{b}{h} \right) \quad (6)$$

ここに、 b : 各断面における最大流速の点から岸までの距離、 h : 水深。

次に、分散に及ぼす流れの振動の影響について調べることにし、流速の横方向あるいは鉛直方向の変化のどちらかが分散過程に卓越する影響を及ぼすときの条件を検討しよう。この取扱いは湾内において一様な密度を有する断面に限定される。

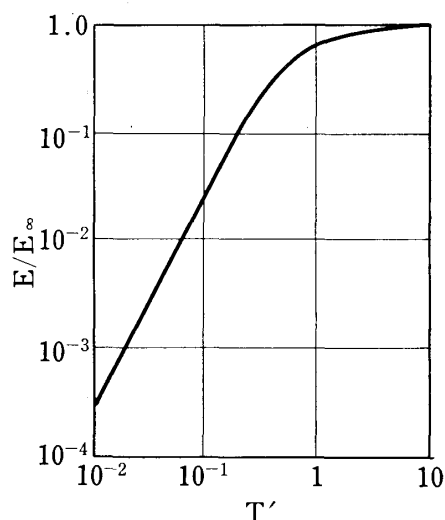
湾内の振動流を正弦的であるとみなすとき、式(4)のなかの $\bar{U}$ は次式により表示できる。

$$\bar{U} = U_0 + U_T \cdot \sin \sigma t$$

ここに、 $U_0 = Q/A$, $\sigma = 2\pi/T$, T : 潮流の周期。以下の解析では U_0 は U_T よりも小さいものと仮定する。

HOLLEY *et al.* (1970) は estuary 内の分散過程に及ぼす潮汐振動流の影響について検討し、第2図の関係を求めた。

図のなかで E は縦方向の分散係数、 E_∞ は無限に大きい T' (振動周期が非常に長い、すなわち定常流) に対する E の値である。第2図から一次元湾モデルにおいて、潮汐往復流による分散係数は、 $T' = T/T_e$ と定義した無次元パラメータに依存している。ここに、 T_e は $T_e = l^2/K$ によって与えられ、断面混合の時間スケールを意味する。ここに、 l は乱流拡散が生ずる方向の距離のスケール、 K はその方向における拡散係数を表わす。



第2図 分散係数と潮汐振動流の周期との関係

いま、鉛直及び横方向の混合に対する時間スケールを定義すると次のように書ける。

$$T_{cv} = h^2/K_v, \quad T_{ct} = b^2/K_t$$

第2図から $0 < T' < 1$ に対しては、 E は近似的に T' の二乗に正比例することが認められる。

また、 $T' > 1$ に対しては E は一定になり、定常流に対する分散係数で置き換えられる。分散に及ぼす横方向の速度分布の影響は、湾の幅が増すにつれて減少してくる。従って、幅の広い湾における分散係数は鉛直方向の速度分布によって支配を受け、その値は Elder の式から求められる。一方、幅の狭い湾における分散は主として横方向の速度分布によって生ずるであろう。

4. 河口流出

1. 河口近傍での湧昇流の存在

河口から流出する河川水は、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海域表層を流下する。この上層内の河川水の流れは、ある面で下層に対して接線応力を作用させ、これが下層において河口へ向かう補償流の介入を促し、河口付近で湧昇運動を惹起せしめることになる。

この湧昇流現象の存在は、密度鉛直分布の連続分布の場合において流動と塩分濃度分布との相互干渉を理論的に解析した研究⁸⁾によっても確認されており、この事実から、河口近傍においては下層塩水の加入による混合によって主に河川水の塩分濃度が増大し、河口部から遠ざかるにつれて次第に海域の渦動拡散や潮汐による混合が希釈を支配するようになるものと考えられる。従って、河川水の表層流出による海域の塩分濃度分布をより精度高く求めるためには、河口近傍での下層水供給を考えた希釈過程を考慮しなければならない。

ELLISON らは乱流加入現象を実験的に検討し、十分大きい Re 数に対して加入係数 E は Richardson 数 Ri のみの関数であること、及び係数 E は Ri の増大と共に急激に減少し、 Ri がおよそ 0.8 以上のとき無視できることを見出している⁹⁾。

大 き な 河 に つ い て

上述のように、Richardson 数と下層水加入係数 E との間には一義的な関係のみが存在すると思われない。すなわち、下層水加入量は Richardson 数の同じ値に対して、表層水深つまり内部境界面の勾配の大きさによって異なることが予想される¹⁰⁾。

2. 表面流の広がり

海域で密度成層を形成しているときの河川流出の研究は TAKANO (1954)¹¹⁾ や福島ら (1961)¹²⁾ により式 (7), (8) が導かれている。

$$y^2 - x^2 = B_0^2 \quad (7)$$

$$l = l_0 \cdot e^{kx} \quad (8)$$

ここに、 B_0 : 河口幅の半分、 x : 河口から沖合方向に測った距離、 y : 河口中央線から横方向に測った距離、 l : 流線相互の距離、 l_0 : 河口における任意の流線相互の距離、 k : 流出量によって変わる定数。

式 (7) は塩分の鉛直分布が水深の中ほどで、指数関数的に分布することを仮定してたてた理論から、流出する表面淡水流の外縁形状を求めたものである。表層水は双曲線で囲まれる区域内に限られ、その厚さ h は x 軸に対称に分布するが地球自転の影響を考えると、表層水の流出は右の方へ曲げられ、かつ河口付近ではその水深は河口のすぐ右で最大の深さを示す。

密度成層をなす石狩川河口沖合での実測によると、表面流の流線形状は式 (8) のような指数関数的拡がりをすることが認められている¹²⁾。

浜田²⁾ は式 (1) において全水深の変化は微小であるから一定として理論的に検討を行い、河口での支配断面の近傍では河水流の幅は $B = B_0 \cdot e^{\alpha x}$ とおくことができ、 $\alpha > 0$ となって河水流の幅は増大すること及び河水層の厚さは支配断面で減少することを示した。実際の河口からの淡水流出幅の広がりや水平拡散や流下方向と直角方向の密度勾配の影響のため $B = B_0 \cdot e^{\alpha x}$ で示されるものよりは大きくなることが、柏村・吉田による石狩川河口沖の河水流の実測結果¹³⁾ から確認されている。

5. 河川流出水の拡散に及ぼす流れの影響

1. 我が国沿岸各地の流れの特性

海域における河川流出水の拡散過程に及ぼす流れと拡散の効果との区別は、現象自体のスケールとそれを取り上げるときの時間・空間スケールとの問題によって決まる。河川水濃度の短時間の変化を問題にするときは、潮流は流れとしてみなされるが、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として拡散に参与すると考えられる。従って、海域の海水の混合問題においては、問題に対する時間・空間スケールのはっきりした認識が必要になるであろう。

国司 (1966)¹⁴⁾ は、田辺湾の湾口で水温の連続観測結果から内湾の海水交流は連続的に行われるのではなく、断続的に変わり、沖合水と沿岸水の交換は安定が破られるときに急激に起こることを指摘している。

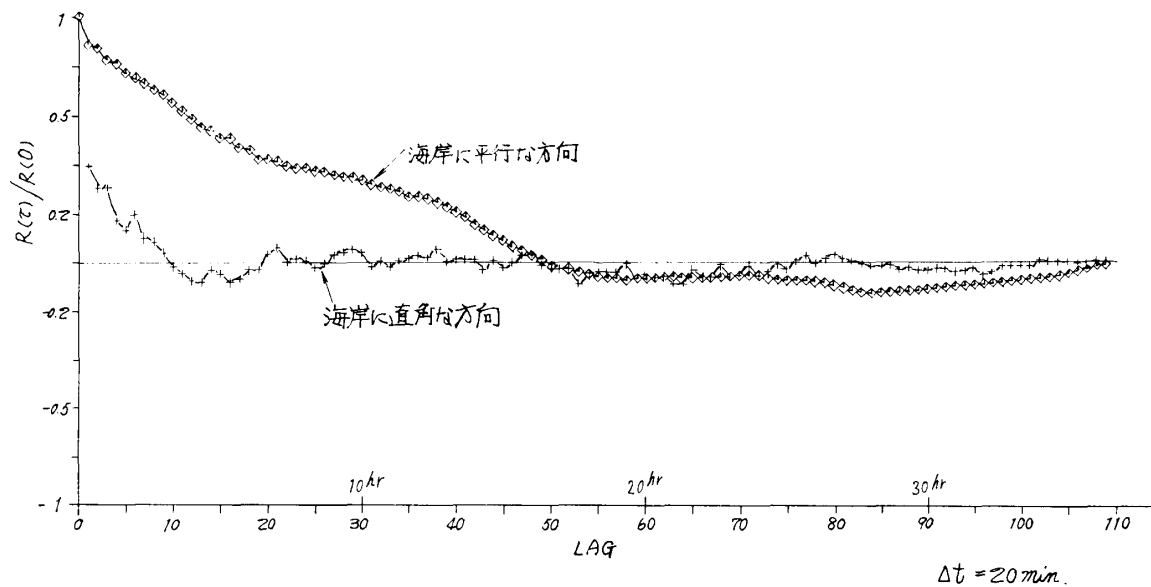
従って、沿岸海域での汚染物質の拡散問題においては、拡散現象というよりは流れの様相が卓越してくる場合も考えられ、ミクロというよりはメソスケールの問題の研究が重要な課題になるであろう。

以上のことから、我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った結果、二つの拡散形態が認められることがわかった⁷⁾。その一つの拡散特性としては、流れに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、日本海沿岸及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及び湾などに認められる。具体的に二つの地点を例にとって説明しよう。

2. 信濃川河口沖の分散特性

本海域における水平方向の乱流の統計的特性を把握するために沖合 1 km 及び 2 km の地点で実施した流れの長時間連続観測の結果について検討してみよう。

速度変動の記録では一日周潮、半日周潮などの



第3図 流速変動の自己相関係数（沖合 1km の地点）

振動流のほかにもっと細かい周期をもつ乱流的特性を有するスペクトルが存在する。このような変動過程は統計的取扱いにより、各特性（自己相関関数、エネルギースペクトル関数、構造関数など）が求められ、また integral scale も算定できる。

速度変動の記録に基づいて、速度場の乱流成分間の相関関係が時間の経過につれてどのように変化するかを明らかにするために自己相関係数を計算した。第3図は自己相関の分布曲線の例を示す。本地点においては、極めて長い時間間隔にわたり相関していることがわかる。沿岸に平行な方向の自己相関は15時間後にはじめて零を通過している。自己相関分布のこのような挙動は、大規模な速度変動が問題となる流れのなかに存在することを示している。

海域における拡散特性が自己相関関数の形で明瞭に現われていることが第3図からわかる。自己相関関数の形によって、海域での乱流状態の性質や拡散特性を判断することができる。

周知のように、定常ランダムプロセスについては下記の条件が満足される。

$$R(\tau) = R_h(\tau) + R_r(\tau) \quad (9)$$

ただし、 $R(\tau)$ は周期的なプロセスの自己相関関数 $R_h(\tau)$ とランダムプロセスに対するそれ $R_r(\tau)$

との和である。

この等式はここで検討対象とした一連の場合に対して成り立つと近似的にみなすことにする。このとき、式から $R_r(\tau)$ が求まる。また乱れの integral scale は次式によって算定できる。

$$\theta_E = \int_0^{\infty} R_r(\tau) d\tau \quad (10)$$

海域における渦はいろいろなサイズを有している。海域におけるメソスケールの乱れは主として大きい渦によって支配されている。乱流の重要な統計的特性の一つは、そのスペクトル関数 $F(f)$ であり、これは速度の乱流変動の運動エネルギーがこれら変動のさまざまな周波数 f についてどのように分布しているかを示すものである。エネルギースペクトル関数は成分 u について次式で表わされる。

$$F_u(f) = 4 \int_0^{\infty} R_u(\tau) \cos 2\pi f\tau \cdot d\tau \quad (11)$$

第4図は本地点の自己相関曲線に基づいて算出したエネルギースペクトルの分布を示したものである。これらの図からわかるように、流れの基本的エネルギーは半日周潮より低周波領域、つまり大規模な変動に集中している。また、沿岸に平行な方向の乱れのエネルギー密度は、沿岸に直角方

大 き な 河 に つ い て

向のそれよりも数倍大きく、実測した周波数の領域では等方向性がない。特に、本地点における変動速度の運動エネルギーは一般的に低周波数から高周波数領域に単調減少する分布を示し、いくつかの周波数のところに集中していて、スペクトルに種々の山が見られる。特に著しい山は、半日周潮周期のところに存在しているが、時には高周波領域のところに小さい山がみられる。また、海岸に平行な方向と直角方向の成分に対するエネルギースペクトルの曲線はそれぞれ相似形状を呈している。エネルギーの減衰様相も同じである。

このように、自己相関係数及びエネルギースペクトラムの分布形から、本海域は周期成分をもた

ない不規則な過程が卓越している乱れの場合であることが確認された。また、本海域には北上する対馬暖流の影響を受けて沿岸に平行に北上する流れが卓越し、その平均流速は 15~20 cm/sec であることが見出された。

実測した水平流速 (u, v) の記録は 20 分間隔で読み取られているので、この方法で時間のスケールにして 40 分よりも大きい乱れがとらえられる。より大きい周波数の変動に対する考察は将来の研究に待たなければならない。

拡散係数は G. I. Taylor の定理を使って次式より算定できる。

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \overline{u'^2} \cdot \int_0^\infty R_{Eu}(\tau) d\tau \cdot \beta \\ K_y &= \overline{v'^2} \cdot \int_0^\infty R_{Ev}(\tau) d\tau \cdot \beta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここに、 β は乱れのスケールに依存する無次元パラメータでメソスケールの乱れに対して、オイラー・ラグランジ自己相関の分布において相似性が成り立つと仮定すると、次の関係を有している。

$$\beta = \frac{\theta_{Lu}}{\theta_{Eu}} \quad (13)$$

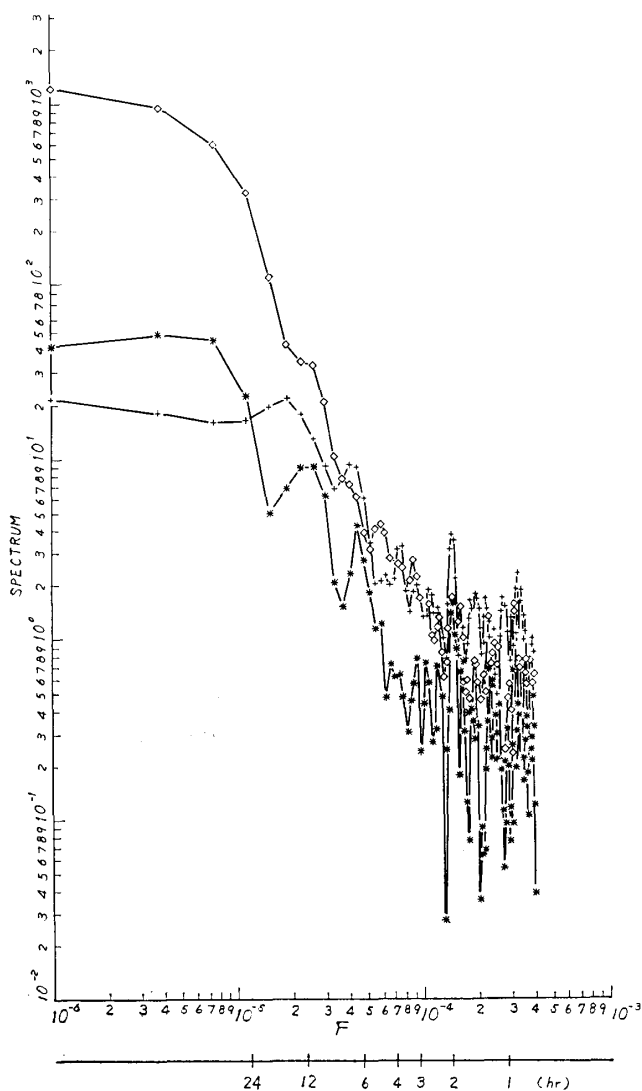
従って、 β はラグランジとオイラーの integral time scale の比から決定できる。

当該地点前面海域における拡散係数の平均値としては沿岸に平行な方向の成分 (K_x) とこれに直角な方向の成分 (K_y) のそれぞれに対して第 2 表に示すような値が得られた。

第 5 図は、信濃川河口沖の塩分濃度分布を示しており、拡散場の異方向性による拡散分布の特性が認められる。

本海域では沿岸に平行な流れが卓越しているので、塩分分布は沖合方向へはのびずに偏平化した形状を呈している。

本地点は不規則な過程が卓越する流れの場合であ



第 4 図 流速変動のエネルギースペクトラム
(沖合 1 km の地点)

◇ 沿岸に平行な方向 * 沿岸に直角な方向

第 2 表 拡 散 係 数 値

	沿岸に平行な方向 (K_x)	沿岸に直角な方向 (K_y)
拡散係数 (cm^2/sec)	およそ 10^6	およそ 10^5

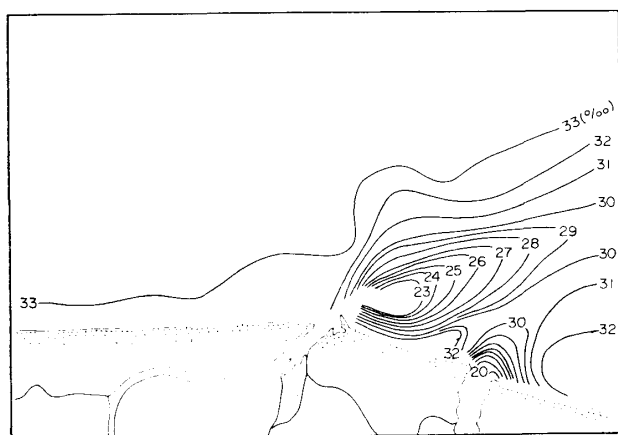
るので、河川水の拡散解析においては恒流成分以外の沿岸往復流は移流効果として作用するのではなく、むしろ大きなスケールの渦群として拡散に寄与するものと考えることができる。

3. 川内川河口沖の分散特性

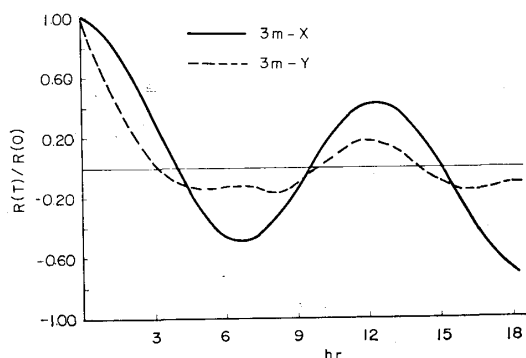
川内川沖合海域は南九州西岸に位し、そのはるか沖合を北上する対馬暖流の影響を受ける。川内川の流入量は相当大きな変動を示すが、平均 $100 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。

川内川沖合海域での拡散特性を検討するために、汀線より沖合 $0.5 \sim 1.0 \text{ km}$ 地点で流れの長期間連続観測を実施した。

第6図及び第7図は、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



第5図 信濃川河口沖表面塩分水平分布図



第6図 流速変動の自己相関分布
(川内川河口沖)

X: 汀線に平行な方向 Y: 汀線に直角な方向

いない。

又、第7図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。

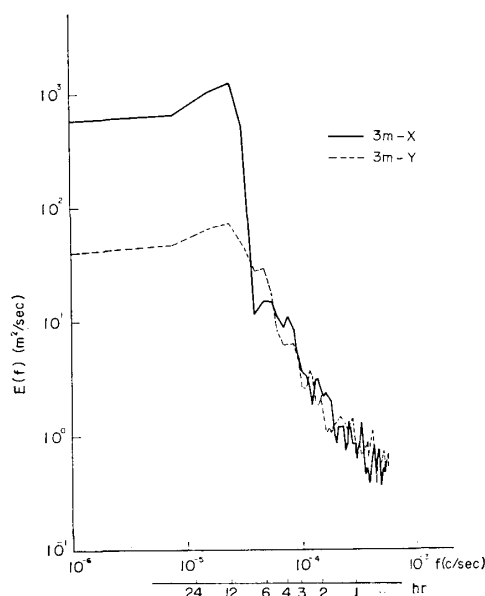
これらの統計的特性から判断し、川内地点前面海域においては半日周潮流は認められるが海域の流れが半日周潮流に支配されているとは言えない。

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更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汐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。

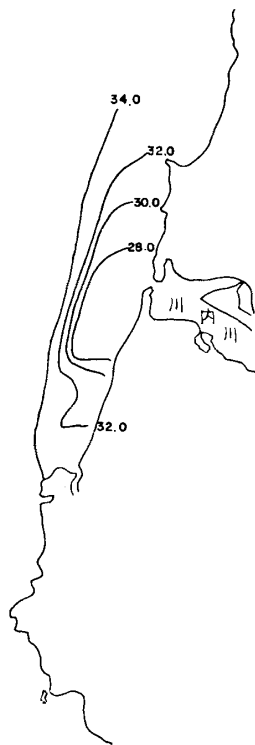
当該海域における拡散係数としては、沿岸に平行な方向の成分はこれに直角な成分に比して10～100倍大きい値を有しており、異方性の強い拡散場であることがわかる。

第8図は川内川河口沖での塩分濃度分布を示す



第7図 流速変動のエネルギースペクトラム
(川内川河口沖)

大きな河について



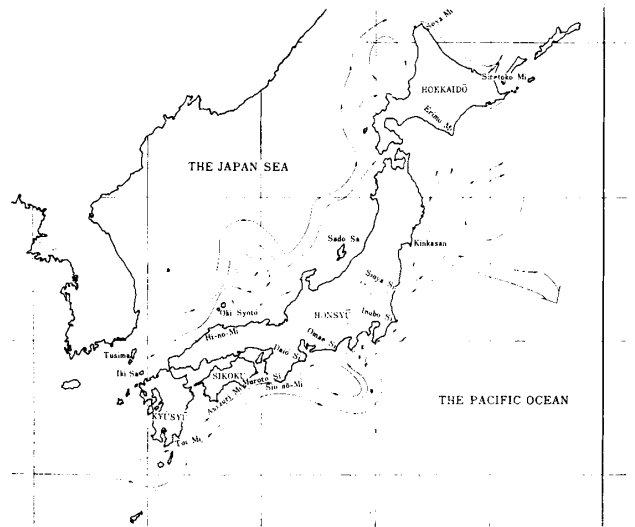
第8図 川内川河口付近での塩分濃度（表面）
（高橋・茶田（1968）による）

が、沿岸に平行な流れが卓越しているので、分布は沖合方向にのびずに偏平化した形状を呈し、上記の拡散特性を反映している。

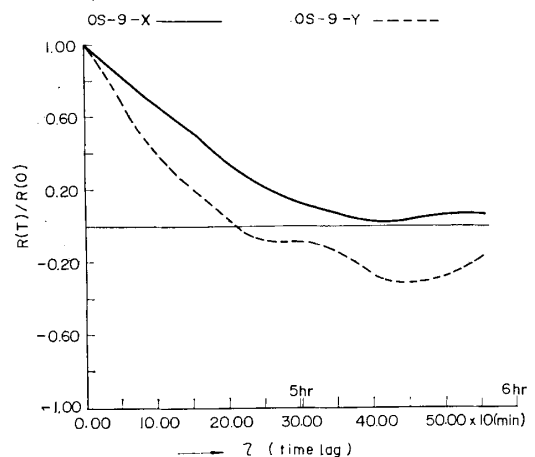
6. 沖合海流と沿岸水形成過程との相互作用

第9図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、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。例えば、第9図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。

例えば、外海に直接面した湾水域に流出する河川水の分散について検討するために、数か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。



第9図 日本近海海流図



第10図 流速変動の自己相関分布
X: N成分 Y: E成分

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、多少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へ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

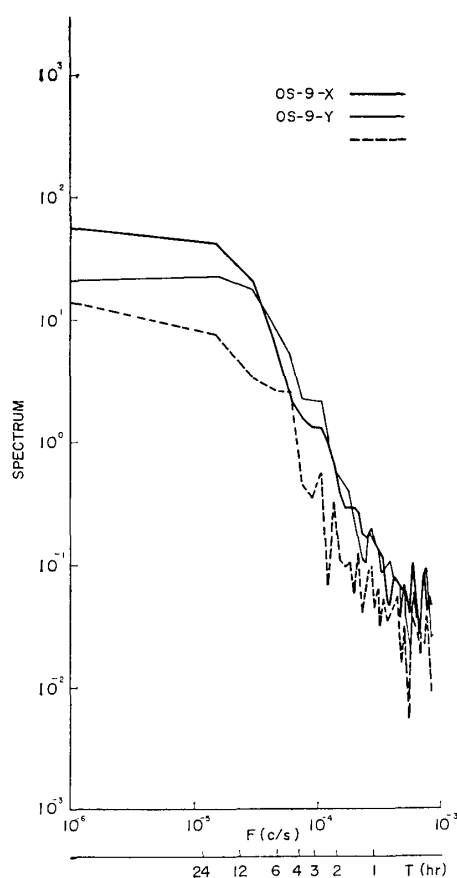
との相互作用を考慮していかなければならない。

第10図及び第11図は湾内での流速変動の自己相関分布及びエネルギースペクトルの分布の一例を示したものである。

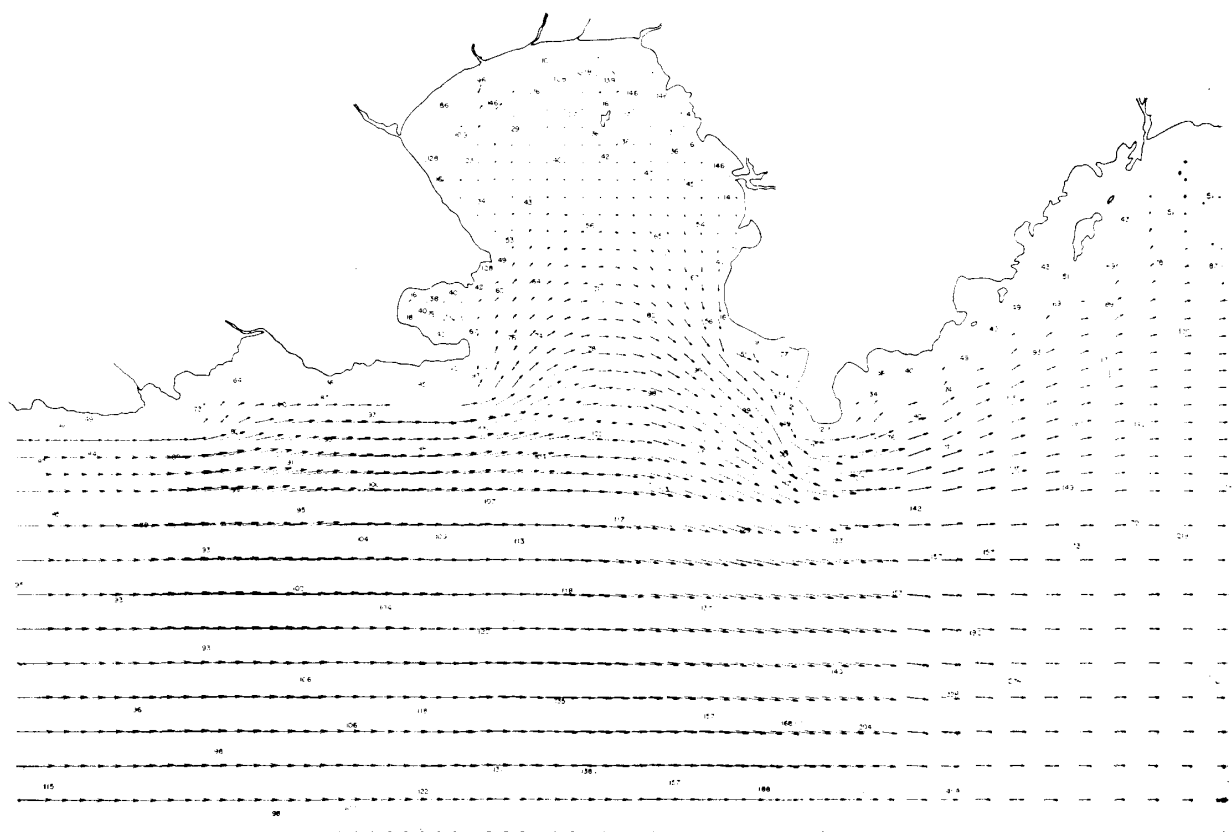
これらの流動解析結果より湾内においては周期成分は微弱であって、不規則な過程が卓越している乱れの間であることがわかる。従って、湾内での河川水の拡散分布形状（広がり方と厚さ）は上記の外海の場合によって変化する。

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、南側からの海流の供給を考える。第12図は北側境界線と南側境界線との水位差を $\Delta H = 20$ cm として、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。コリオリの力を考慮したときと、考慮しないときの湾内の流況はコリオリの力によって大きな影響を受けない。流速についての計算結果を現地におけ



第11図 流速変動のエネルギースペクトラム



第12図 海流の流速分布

大きな河について

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つほかはない。

参考文献

- 1) PRITCHARD, D.W. (1955): Estuarine circulation patterns, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., **81**, (717).
- 2) 浜田徳一 (1969): 河口密度流の 2, 3 の性質について. 不等質の流れのシンポジウム, 日本学術会議.
- 3) KEULEGAN, G.H. (1949): Interfacial instability and mixing in stratified flows. J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol. 43, 00.
- 4) ROUSE, H. (1950): Engineering Hydraulics. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 5) 岡崎守良 (1962): 二層流の境界面における内部波および混合の実験的研究. 沿岸海洋研究ノート, **1**(1), 20-29.
- 6) HOLLEY, E. R., D.R.F. HARLEMAN and H. B. FISCHER (1970): Dispersion in homogeneous estuary flow. Proc. A.S.C.E., HY8.
- 7) 和田 明, 片野尚明 (1972): 海域での温排水拡散におよぼす流れの影響. 電中研報告, No. 71008.
- 8) 和田 明 (1973): 大きな河について. 沿岸海洋シ

ンポジウム講演要旨集, 昭和 48 年度日本海洋学会秋季大会.

- 9) ELLISON, T.H. and J.S. TURNER (1959): Turbulent entrainment in stratified flows. J. Fluid Mech., **6**.
- 10) 和田 明, 片野尚明 (1968): 工業用水の取放水問題. 第 15 回海岸工学講演会講演集.
- 11) TAKANO, K. (1954): On the salinity and velocity distributions off the mouth of a river. J. Oceanog. Soc. Japan, **10**(3).
- 12) 福島久雄, 柏村正和, 八鍬 功, 高橋 将 (1961): 石狩川の河口構造. 第 8 回海岸工学講演会講演集.
- 13) 柏村正和, 吉田静男 (1966): 河口を出る淡水の流れ. 第 13 回海岸工学講演会講演集.
- 14) 国司秀明 (1966): 沿岸海洋過程と微海洋学の立場. 沿岸海洋研究ノート, **5**(1), 50-54.

質疑応答

コメント: 振動成分とそうでないものとを区別するという考えは重要であって, これまで振動成分の卓越した海域に気をとられすぎていたのではないかと思う. その意味で外洋との関連を考える取組み方の可能性を示唆されたことは重要な事柄と考える. (京大・理, 国司秀明)

問: Entrainment はリチャードソン数との関係で混合係数と同じように扱われるか.

(東海大・海洋, 宇田道隆)

答: Entrainment の概念は, 特に河口近傍で河川流出水の流速が大きい領域で適用できる. (本文の 4. 河口流出の項を参照)