

有明海の潮流と拡散、混合に関する研究

——有明海湾奥海域の環流——

戸原義男*・渡辺 潔*・加藤 治**・瀬口昌洋***

1. ま え が き

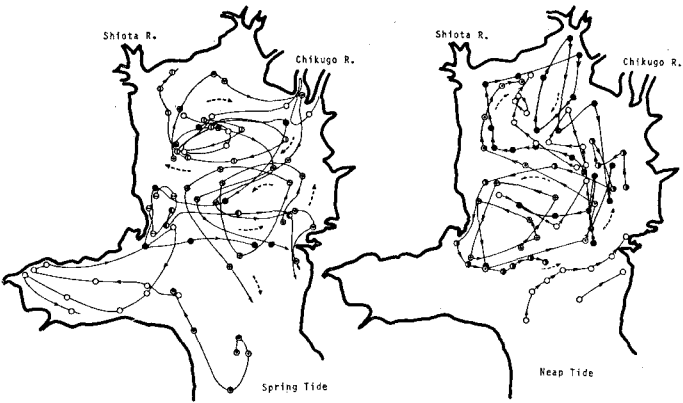
有明海湾奥部は広大な干潟が発達し、わが国有数の海苔、貝漁場として有効に利用されている。これは豊富な栄養塩による自然の生産力を利用したもので、河川より搬入された栄養塩の混合拡散状況や、浮遊物 SS の沈降による干潟の発達状況等が漁場の良否と密接に関係する。将来にわたって、この海域を保全しさらに、より高度な利用、開発を進めるためには流況特性を詳細に把握し、干潟形成過程や栄養物質の拡散、域内における保存機構を解明する必要がある。著者ら¹⁾は主として水理模型により有明海の海象を解明し、現地海象観測塔による観測結果と対比して沿岸干潟海域の潮流特性を明らかにしてきた。本研究では、この海域の恒流すなわち環流と、それによる比較的時空間スケールの大きい混合、拡散現象と海水交換特性との関連性を調べ、その結果よりこの海域の干潟形成過程における環流の役割について推論を行なった。なお使用した水理模型の諸元は表一のとおりである。

表一 模型諸元

	水平距離	垂直距離	時間	流速	拡散係数
縮尺	1/4000	1/160	1/316	1/12.6	1/50598

2. フロートの流跡と大局的な流れ

フロートの追跡は流れの可視化では最も簡易かつ原始的方法であるが、潮汐流のような平面往復流の水塊、物質の移動を調べるには有力な手法である。現地観測でも主として湾奥東岸の各河口を起源とした水塊が湾内をどのような径路で移動するかを調べるため、1973 年 7 月 27 日、福岡県有明水産試験場²⁾により実施されている。しかし現地では追跡時間は 1 潮時が限度で、往復運動を繰



図一 模型によるフロートの流跡（5 周期ごとの軌跡）

り返しながら、長周期間のうちに徐々に移動してゆく水塊移動の追跡はできない。水理模型では追跡時間の制約はないので数 10 周期間の観測を行なった。図一は繁雑をさけるため 5 周期ごとの流跡を示したものである。筑後川河口を出発したフロートは引き潮時南下し、満ち潮時は転流して西方を指向しながら北上する。このような流跡を繰り返し、徐々に佐賀地先きに達する時計回りの環流域を形成している。また、一部のフロートは東岸寄りに北上し筑後川河口に向かう。矢部川はじめ東岸河口より出発したフロートは引き潮時沖合いへ流下した後、満ち潮時は転流して、もとの河口へは戻らず筑後川河口へ向けて北上する傾向にある。このような水塊の動きと湾奥の塩分濃度の分布を対比してみると興味深い傾向がみられる。

図二は表層の塩分濃度分布を示したもので、淡水流入の大きい筑後川延長上は濃度が低いのは当然であるが流入河川の多い東岸に比して流入の少ない西岸および湾奥佐賀地先の濃度がむしろ低い、これは筑後川水塊の移動とよく一致している。また、時計回りの大きい環流域内の塩分濃度分布はほぼ一様である。

つぎに、底質土の分布と対比してみよう。九州農政局³⁾が実施した海底土壌調査土性図を図三に示す。粒度分布を考察すると、筑後川を主とする東岸河川群から搬入された SS は河口付近で粗粒子を沈降し、細粒質つまり Md_φ7 以上の微細粒子が潮流に浮遊して西寄りに

* 正会員 農博 佐賀大学教授 農学部
** 農博 佐賀大学助教授 農学部
*** 正会員 農修 九州大学助手 農学部

北上し環流域内で徐々に沈降するものと推察できる。

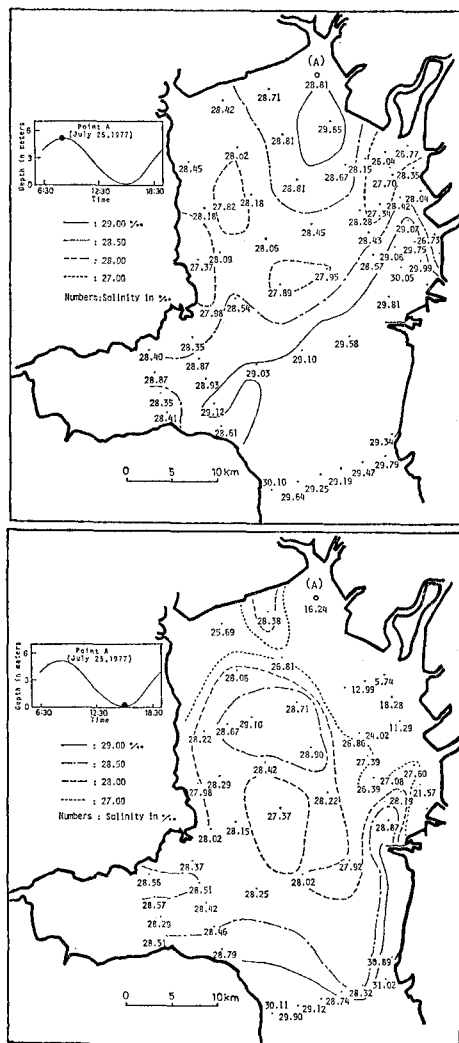


図-2 表層の塩分濃度分布(現地観測)

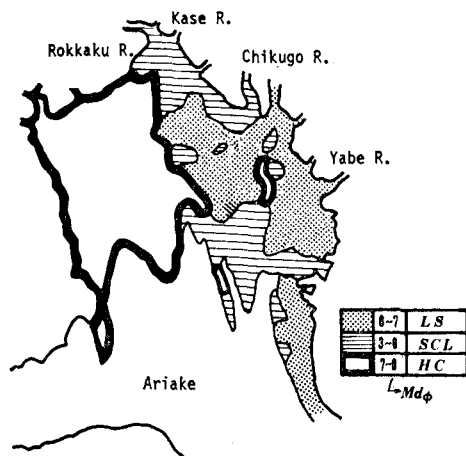


図-3 有明海湾奥部の底質土分布

3. 染料流しによる拡散実験

(1) 濃度分布と拡散の定性的傾向

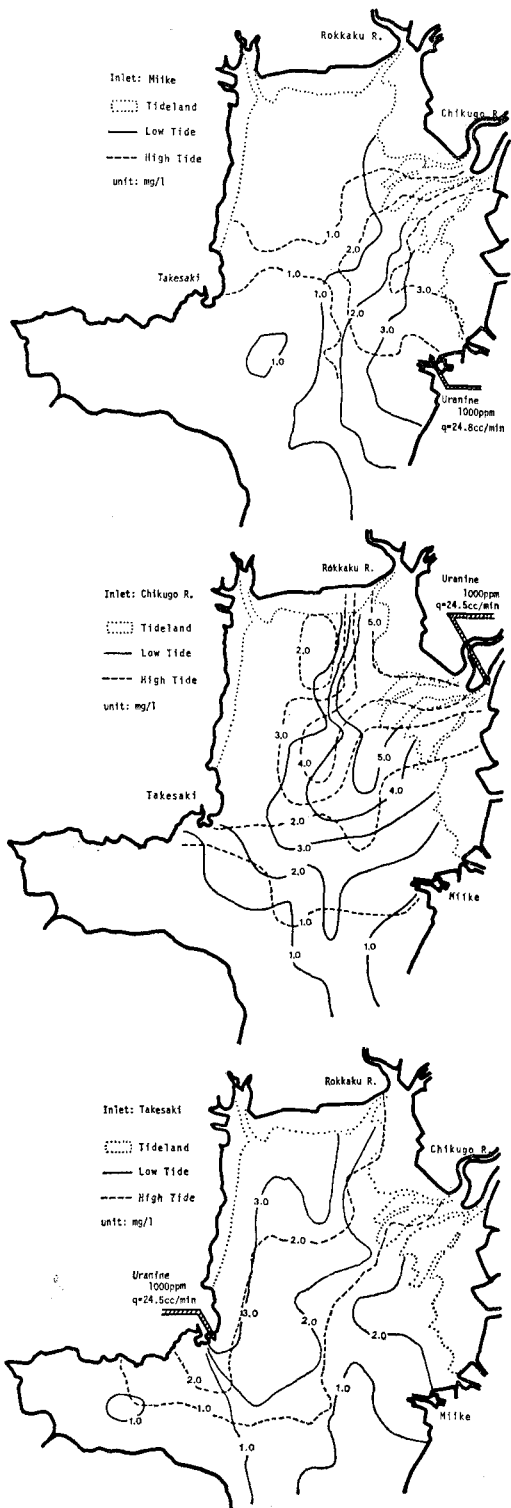
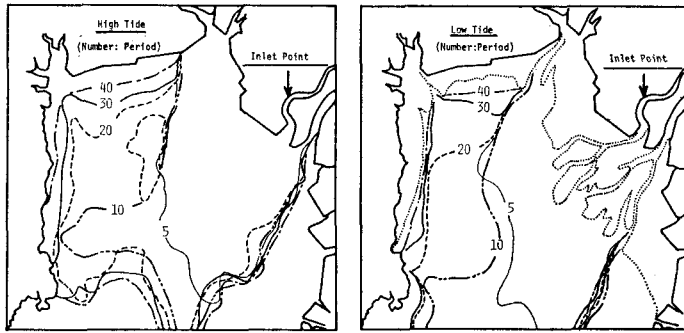


図-4 染料投入60周期後の濃度分布

湾奥部東岸2地点（早津江川河口，三池港）および西岸1地点（竹崎）の計3地点より，それぞれ連続点源による染料の拡散実験を行ない，採水および写真撮影により濃度分布を求めた。60周期後の濃度分布を図—4に示す。ただし，河川流量は筑後川 14.7 cm³/s (120 m³/s) で他の河川はすべて流量0としている。早津江川河口および三池港を起点とする染料は北西部および，それより西岸に向かって舌状にのびた海域に高濃度部分が認められる。これらの舌状部分は2つの環流の主流域にほぼ対応している。一方，竹崎を起点とした場合，高濃度部分は東岸から北部沿岸海域にそって分布している。これらの結果から60周期後でも，染料の拡散はほとんど湾奥海域に止まっている。筑後川河口から染料が拡がって行く過程を連続写真より図化し，結果を図—5に示す。染料は点源から10数Km（潮流の流動距離）を半径とする扇形の海域範囲では，ほぼ5周期以内に拡散する。これ



図—5 染料拡散の時間変化

は樹枝状に発達するミオ筋に起因すると考えられる無数の渦流によるもので扇形範囲の拡散は極めて速く，扇形領域外への拡散は環流によって徐々に進行する。

(2) ボックスモデルによる拡散および輸送係数

染料拡散実験による濃度分布から大局的に有明海湾奥部の海水交換を考察するため宇野木^{4),5)}によるボックスモデルの理論を適用し，拡散係数，輸送係数および湾奥での滞留時間を検討する。図—6に示す湾を適当に分割したボックスについて，単位時間にボックス*i*から*j*へ輸送される物質輸送量の連続式は，

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} V_i = \sum_j (\bar{c}_j Q_{ji} - \bar{c}_i Q_{ij}) + S_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし， $\bar{c}_i$ ：物質の濃度， V_i ：ボックスの容積， S_i ：ボックス内で生成，消滅する染料の量。

流水断面 A_{ij} の平均流速を v_{ij} とすれば

$$v_{ij} A_{ij} = Q_{ij} - Q_{ji}$$

Q_{ij} ， Q_{ji} が輸送係数で，ボックス内の平均濃度 $\bar{c}_i$ ， $\bar{c}_j$ を測定することによって，式(1)より代数的に求める。

(1) の連続式を積分型の拡散方程式で表わせば

$$\int_{V_i} \frac{\partial c_i}{\partial t} dV = \int_A \left(-vc + K \frac{\partial c}{\partial n} \right) dA + S_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし， n ：境界面の外向き法線， K ：渦動粘性係数，いま v と c を境界面上の平均値と，それからの変動値で表わし

$$v_{ij} = \bar{v}_{ij} + v'_{ij}, \quad c_{ij} = \bar{c}_{ij} + c'_{ij} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)を式(2)に代入して

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} V_i = \sum_j \left\{ -\bar{v}_{ij} \bar{c}_{ij} - \bar{v}'_{ij} \bar{c}'_{ij} + \left(K \frac{\partial \bar{c}}{\partial n} \right)_{ij} \right\} A_{ij} + S_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

いま，

$$-\bar{v}'_{ij} \bar{c}'_{ij} + \left(K \frac{\partial \bar{c}}{\partial n} \right)_{ij} = D_{ij} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial n} \right)_{ij} \quad \dots\dots\dots (5)$$

として，広義の拡散係数 D_{ij} を考える。また，濃度勾配がほぼ一樣に近いので $\bar{c}_{ij} \doteq (\bar{c}_i + \bar{c}_j)/2$ とおける。各ボ

ックス間の距離を L_{ij} とおけば，式(1)

と式(4)，(5)から拡散係数は，

$$D_{ij} = L_{ij} (Q_{ij} + Q_{ji}) / 2 A_{ij} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で輸送係数と拡散係数が関係づけられる。また，海水の滞留時間（置換時間）は

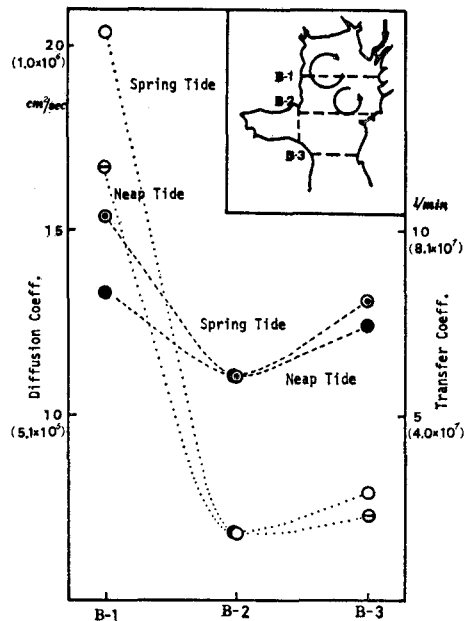
$$\tau'_i = V_i / \sum_j Q_{ji} \quad \dots\dots\dots (7)$$

あるいは保存物質に対して

$$\tau'_i = \bar{c}_i V_i / \sum_j \bar{c}_j Q_{ji} \quad \dots\dots\dots (7')$$

で定義され，海水交換の指標が求まる。

図—6のボックスモデルの諸元を表—2



図—6 ボックスモデルによる拡散及び輸送係数

表-1 各ボックスモデルの諸量(模型)

Box	面 積 (m ²)	平均水深 (cm)	容 積 (m ³)	断 面 積 (cm ²)
1	13.46	2.67	0.36	2125.0
2	13.55	6.33	0.86	3790.5
3	10.80	10.00	1.08	4263.3

に示す。早津江川河口から $S_t=0.0245$ gr/min の染料を連続注入し、40 周期および 60 周期に一斉観測を行ない、ブロック内の平均濃度より拡散係数 D_{ij} および輸送係数 Q_{ij} を求めると 図-6 のとおりである。ブロック 1 (B-1) では大潮時 $D_{1,2}=1.0 \times 10^6$ cm²/s, 小潮時 8.5×10^5 cm²/s, ブロック 2, 3 (B-2, B-3) では大潮時 $D_{2,3} \approx D_{3,4}=3.4 \sim 4.0 \times 10^5$ cm²/s, 小潮時 $3.4 \sim 3.7 \times 10^5$ cm²/s で大潮時と小潮時の差は小さい。もちろん河川流量とくに筑後川流量を増減すればこの値は変化すると考えられる。B-1 の値が B-2 および B-3 の値に比してとくに大きいのは B-1 を時計まわりの環流域に選比 B-2, B-3 は環流の外に選んだためと考える。つぎに式 (7) から滞留時間は B-3 線(長州一多比良)では大潮時で 60 日, 小潮時で 70 日, 海水交換の指標としては悪いことがうかがえる。例えば東京湾⁵⁾では約 1 ヶ月前後の値が報告されている。

4. 干潟の堆積・発達

湾奥とくに北西部である佐賀県地先は年々干潟の発達が著しい。図-7 は 1957 年と 1978 年に実施した測量結果の比較である。河口ミオ筋付近を除くとほぼ様な堆積が進んでいる。最も堆積, 発達が著しい国造干拓地先では -1.0 m 等高線は 22 年間に約 1~2 Km 前進している。つまり毎年約 50~100 m 前進していることになる。また堆積高も大きい所では 1~1.5 m (4~7 cm/年) にも達する所がみられる。堆積土の土性は細粒質である

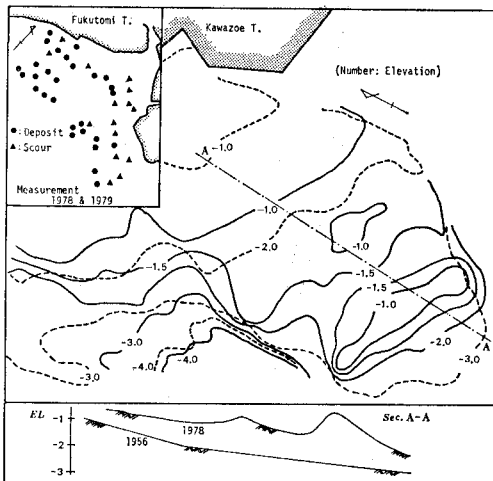


図-7 北部沿岸海域の干潟の発達

が六角川のミオ筋(海底水道)を境に西側は $Md\phi$ が 7 以上の泥質堆積物が一様に分布し、東側でも干拓のすぐ地先は西側と同じ泥質堆積物であるが早津江川河口から沖合にかけては $Md\phi$ が 0 から 7 に及ぶ広範な粒径分布をしている。なおミオ筋付近はむしろ侵食の傾向にあり、粒度分布も広範である。

5. 結 論

水理模型による拡散実験および現地観測資料の分析結果, つぎの点を明らかにした。

- (1) 有明海湾奥部には相反する方向の 2 つの環流が存在する。すなわち早津江川および筑後川河口の延長上に主流域をもち、その主流域から分岐して時計回りに北上する環流と反時計回りに南下する環流とが確認された。
- (2) 連続点源による拡散実験を行なった結果, 点源から 10 数 Km (半日周期の流動距離) を半径とする扇形の海域範囲では, ほぼ 5 周期以内に拡散する。しかし扇形領域外への拡散は環流によって徐々に進行することが確認された。すなわち, この海域では時空間スケールの大きい拡散現象は環流の果す役割が大きい。また, 筑後川河口, 東岸および西岸の地点より, それぞれ染料を連続点源として投入した結果, 終局的には環流により北西部(佐賀県沿岸)に拡散, 滞留することが認められた。
- (3) ボックスモデルによる環流域の拡散係数 D は大潮, 小潮共に 10^6 cm²/s で非環流のそれは環流域の約半分程度と推測される。また同モデルによって求めた滞留時間は大潮で約 2 カ月と見込まれ, 東京湾に比較しても海水交換指標はよくない。
- (4) 湾奥部では滞留時間が長いので, 東岸に流入する河川群より搬入される浮遊物 SS が環流によって北西部沿岸域に運搬され, 徐々に沈降している。

なお, 本論文は昭和 54 年度文部省特定研究, 有明海の浅海域の開発と環境保全に関する総合的研究による成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) 戸原義男・加藤 治・瀬口昌洋: 有明海の潮流と拡散, 混合に関する研究 (1), 第 25 回海講論文集, pp. 556~560, 1978.
- 2) 井上尚文: 有明海の物理環境, 沿岸海洋研究ノート, 第 17 巻, pp. 151~165, 1980.
- 3) 九州農政局・九州地方建設局・第四港湾建設局・福岡通商産業局・有明海地域総合開発協議会: 有明海地域総合開発調査結果の概要, pp. 88~89, 1966.
- 4) 宇野木早苗・片野元彰: 大局的に見た内湾の海水交流, 第 24 回海講論文集, pp. 486~490, 1977.
- 5) 宇野木早苗: 海水交換とその素過程について, 沿岸海洋研究ノート, 第 17 巻, pp. 89~98, 1980.