

有明海の潮流と拡散、混合に関する研究 (1)

戸原 義男*・加藤 治**・瀬口 昌洋***

1. ま え が き

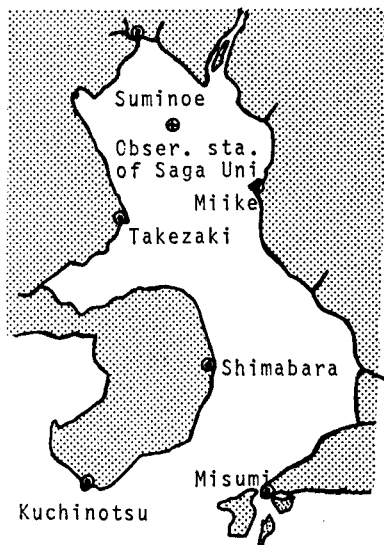
有明海はわが国最大の干満差を有する内湾であり、湾中央から湾奥にかけて大小の河川が流入している。とくに東岸では土砂および浮泥の搬入が多いために沿岸は広大な干潟が発達し古くから干拓による陸地化が進んできた。また干拓地先の干潟は速い潮流によって形成されたミオ筋が樹枝状に発達している。一方この干潟海域はわが国有数のノリ漁場、アサリ貝漁場ともなっている。これは複雑な潮流と豊富な栄養塩による自然の生産力を利用したものであり、河川流入水による栄養塩の混合拡散状況が漁場の良否と密接な関係にある。さて、これら研究のネックになっているのは干潟上における海象観測資料が非常にとぼしいことである。その理由はいろいろあるが流れについてみれば、流況の資料が従来、主として船舶航行の便に供されていたため陸岸近くでは不要であったことにもよるが、干潟は干出するため小舟以外は近づけなかったことが観測を妨げてきた大きな理由であ

る。

この研究は干潟のすぐ沖合に設けられた海象観測塔(佐賀大学)による観測記録および随時行なった一斉観測の結果と平面水理模型による測定結果を対比し、有明海沿岸干潟海域の潮流特性の解明ならびに原型における拡散、混合現象と模型におけるそれとを対比検討したものである。

2. 有明海平面模型

有明海の全体模型としてはこの研究に使用した施設を含めて表一に掲げるものがある。ほかに部分模型としては大牟田地先から湾奥部にかけて(京大・防災研)、諫早湾を対象とした模型(農業土木試験場・佐賀支場)等がある。使用した模型の特色は浅海域から干潟の海底地形、ミオ筋や河川の感潮部を重視し詳細に作成したことである。干潟は航空写真をもとに複雑なミオを忠実に配置した。さらに一級河川、筑後川、六角川、白川、緑川、菊池川、矢部川等については縦横断面図を参考にほぼ感潮域をとり入れてある。模型における潮汐現象の相似性については潮差、潮流(流向、流速、流跡その他)を主に原型と対比検討した。



図一 観測地点

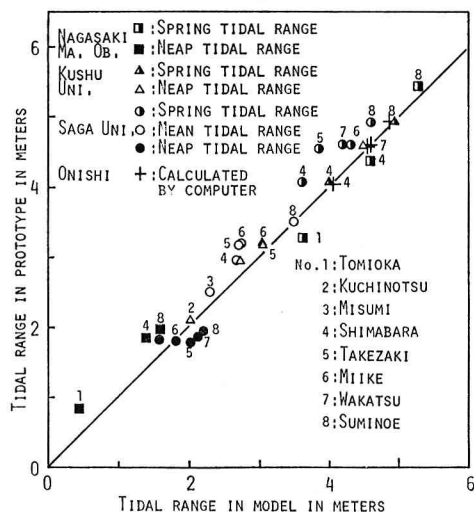
表一 有明海の模型

場 所	水平比	鉛直比	歪 粗 度	起潮機	水位計	流 速 計
長崎海洋気象台	40 000	1 000	160 サンフレックス	プランジャー	浮子式	
九州大学・農	8 000	250	32 モルタル 削仕上げ	同 上	同 上	浮標追跡 プロベラ式
佐賀大学・農	4 000	160	25 同上および 粒砂	水供給式	接針式	超音波式

(1) 潮 差

有明海の潮汐は湾口から湾奥にかけて、その振幅が漸増している。これは地形によるもので、湾軸に沿って断面平均水深がほぼ一様に漸減しているためグリーンの定理で説明される振幅の増幅と考えられる。したがって有明海の湾口よりやや外海に位置する富岡の潮差を基準に各検潮所の振幅比を調べれば潮差の再現性は検証できる。大潮、平均潮、小潮について原型と模型の潮差を図二に示す。なお九州大学¹⁾と長崎海洋気象台²⁾の結

* 正会員 農博 佐賀大学教授 農学部農業土木科
 ** 農博 佐賀大学助教授 農学部農業土木科
 *** 農修 佐賀大学助手 農学部農業土木科



図—2 潮差の比較

果も合せて示した。潮差については小スケール(長崎 1/40 000), 大スケール(佐大 1/4 000)ともによく再現されている。また数値モデルによる計算³⁾でもよい結果がえられている。

(2) 潮 流

潮流とくに沿岸部の流れは地形の起伏, 河口の形状に左右されやすいため, 大型模型でないと再現されないものの一つと考えられる。流向, 流速について 1975.8 の一斉観測から大潮上げ潮最盛時について模型と対比したものが図—3である。沿岸部については原型の観測資料が少なく図—3からは明言できないが少なくとも干出しない沖合では流向・流速ともよく再現される。

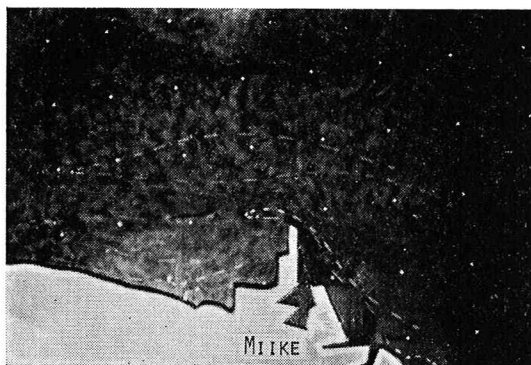
海上保安庁水路部によってこの海域の恒流図が発表されている。模型では海域一面にフロート(発泡スチロール径 10mm)を浮かべ, 数周期間その移動を追跡するこ



図—4 恒流の比較

とにより恒流あるいは環流の状況を把握することができる。図—4に両者の比較を示す。いずれも反時計まわりの環流がみられ類似の結果が観測された。

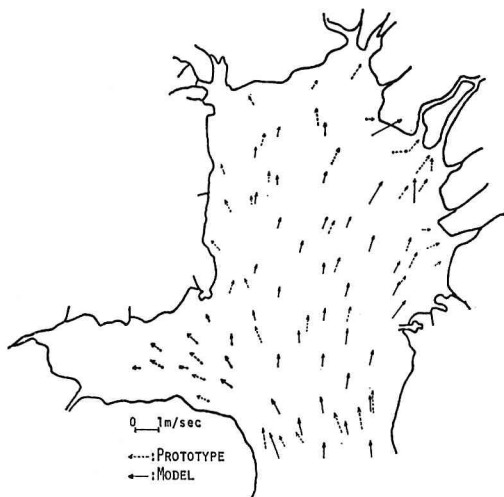
以上の結果から潮差, 潮流については模型での再現性は良好とみてよいであろう。写真—1は湾奥部東岸における大潮での流動の一例を示したものである。大潮時の半周期間の流動距離は東岸海域および西岸海域においてそれぞれ 12 km および 8 km 程度である。



写真—1 流跡線の一部

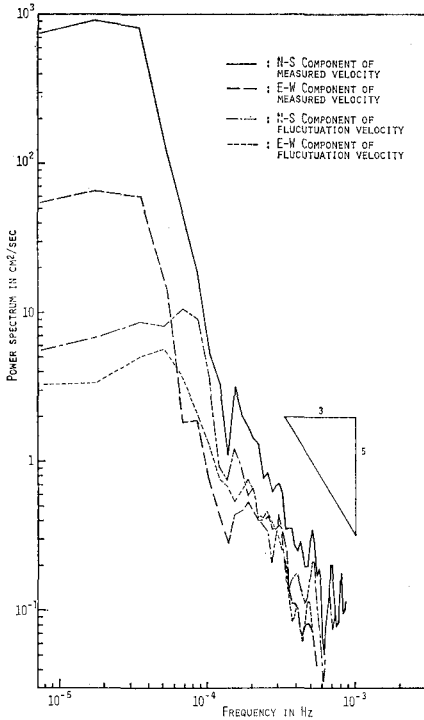
3. 変動流速のエネルギースペクトル分布

潮流について乱流変動の運動エネルギーが変動の周波数に関してどのような分布をしているかを調べるためエネルギースペクトルを求めた。原型資料として佐賀大学海象観測塔の観測値を用いた。流速は小野式流向流速計を用いて測定した。なお測定時の平均潮差は 3.82 m であった。模型では, ほぼ同じ地点に超音波流速計を設置して測定した。潮差は原型換算で 4.90 m である。結果を原型について図—5に, 模型について図—6にそれぞれ示す。なお模型の計算結果はフルードの相似則により

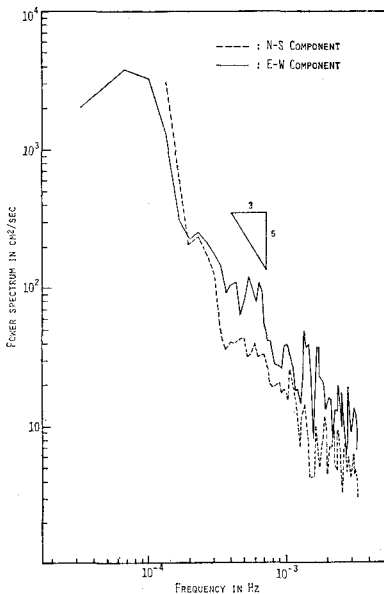


図—3 大潮差上げ潮時の最強流の比較

原型に換算してある。また、図—5, 6 に示したエネルギースペクトルは潮汐流成分に重畳されている水平乱れの特徴を調べるため模型においては半日周潮成分, 原型においては半日周潮および日周潮成分を除去したものである。なお 図—5 については潮汐流成分も含んだ場合(観測データそのもの)のスペクトル分布も併記してある。



図—5 変動流速のエネルギースペクトル (原型)



図—6 変動流速のエネルギースペクトル (模型)

原型, 模型のいずれの場合も N-S, E-W 方向共エネルギースペクトル分布は, ほぼ同じで等方向性であるといえる。またそれぞれのスペクトルは乱流相似理論による $-5/3$ 乗則を近似的に満たしている。エネルギー密度は模型の方が原型より 100 倍程度大きくなった。これは平均潮差の違いが大きな原因であろう。

4. 拡散係数の推定

拡散係数を推定する方法としては変動流速から求める方法, 染料水の点源拡散実験による方法, さらにフロートの拡散実験によって求める方法等がある。今回は原型と模型とで変動流速から求める方法と点源拡散実験より求める方法を用いそれぞれ比較検討した。

変動速度から拡散係数を求める方法は和田ら⁴⁾の方法がある。すなわち, G. I. Taylor の定理を用いると,

$$K_x = \bar{u}_L'^2 \int_0^\infty R_{Lu}(\tau) d\tau, \quad K_y = \bar{v}_L'^2 \int_0^\infty R_{Lv}(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに, $\bar{u}_L'^2, \bar{v}_L'^2$ は Lagrange 変動速度の自乗平均, $R_{Lu}(\tau), R_{Lv}(\tau)$ はそれぞれ x, y 方向の Lagrange 自己相関係数である。しかし一般に得られるデータは Euler 系であり, Lagrange 系における流速測定は一般に困難である。しかし Euler, Lagrange 系速度の自己相関分布には相似性があるということから

$$R_L(\eta) = R_E(\tau), \quad \eta = \beta\tau \quad \dots\dots\dots (2)$$

なる Euler, Lagrange 変換式が成立する。ここに β は無次元パラメータである。

式 (1), (2) より Euler 速度による拡散係数は

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \bar{u}_E'^2 \cdot \beta \int_0^\infty R_{Eu}(\tau) d\tau \\ K_y &= \bar{v}_E'^2 \cdot \beta \int_0^\infty R_{Ev}(\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, $\bar{u}_E'^2, \bar{v}_E'^2$ は Euler 速度の自乗平均, $R_{Eu}(\tau), R_{Ev}(\tau)$ は Euler 自己相関係数である。 β は実験でえられ $0.4 \sim 0.6$ とされているが, 今回は $\beta=1$ として計算した。

染料液による点源拡散実験で拡散係数を求める手法として平野らの方法, 足立らの方法等があるが, ここでは平野ら⁵⁾の方法を用いた。すなわち, 2次元等方拡散場における円形パッチは

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial S}{\partial r} \right) \quad (r \geq 0, t \geq 0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。ここに, S は濃度, r は点源からの距離, K は2次元の水平拡散係数である。

$t=0$ で $S=S_0 \exp(-r/a^2)$, $K=\text{const.}$ として式 (4) を解くと

$$S = S_0 / (1 + 4Kt/a^2) \cdot \exp(-r^2/a^2(1 + 4Kt/a^2)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

以下平野らの方法はつぎのようである。染料域縁辺の濃度は常に等しいと仮定し、さらにある時刻 t_{i-1} , t_i に測定した染料域の面積を等面積の円に換算して、その半径をそれぞれ r_{i-1} , r_i (以下これを相当半径という) とすれば

$$\begin{aligned} S_0/(1+4Kt_i/a^2) \cdot \exp(-r_i^2/a^2(1+4Kt_i/a^2)) \\ = S_0/(1+4Kt_{i-1}/a^2) \cdot \exp(-r_{i-1}^2/a^2(1+4Kt_{i-1}/a^2)) \end{aligned} \quad (6)$$

いま

$$1/(1+4Kt_i/a^2) \approx 1/(1+4Kt_{i-1}/a^2) \quad (7)$$

また t が十分大きいものとしてつぎのように近似する。

$$\exp(-r^2/a^2(1+4Kt/a^2)) \approx 1 - r^2/a^2(1+4Kt/a^2) \quad (8)$$

以上の式 (7) までの結果から拡散係数 K は

$$\begin{aligned} K &\approx (r_i^2 - r_{i-1}^2)/4\pi(t_i - t_{i-1}) \\ &\approx (S_i - S_{i-1})/4\pi(t_i - t_{i-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

湾奥の中央部にウランを注入して染料の拡散過程の相当半径と模型での拡散係数の関係を 図-7 に示す。こ

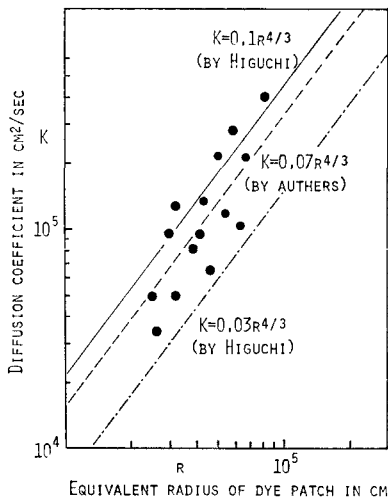


図-7 相当半径と拡散係数

れら理論的な $4/3$ 乗則にほぼ近似していることがわかる(破線)。また 図-7 の実線は樋口⁶⁾らが大牟田地先で行なった染料拡散実験の結果であり、一点鎖線は樋口が模型実験で求めた同海域の値である。

式 (9) で求めた有明海沿岸各地(原型)の拡散係数と模型のそれとを一括して 表-2 に示す。

表-2 拡散係数の比較

場 所	変動流速より算定		染料より算定	
	原 形 (cm²/sec)	模 型 (cm²/sec)	原 形 (cm²/sec)	模 型 (cm²/sec)
佐賀大学観測塔	10⁴	10⁴~10⁵		0.07r⁴/³
大牟田地先			0.1r⁴/³	
熊 本 港	10⁵~10⁶			

5. 環流と塩分濃度分布

フロートの流跡を模型で 60 周期にわたって実施した結果を 図-8 に示す。また 図-9 は 1977 年 7 月 30 日に一斉観測した大潮時(佐ノ江潮差 5.1m)の下げ潮時における塩分濃度分布図である。有明海は閉鎖湾であることと、大河川の流入が東岸から湾奥の干潟海域に集中しているため湾奥の塩分濃度は湾央に比して 1.5‰ 程度低い。この低かん度の海域が湾奥の環流と関係の深いことは 図-8 と 図-9 の対比によってかなり明確である。筑後川からの流れのエネルギーが対岸の竹崎付近まで伝わり、竹崎沖で湾奥に向かう流れと湾央に向かう流れにわかれる。湾奥部に分流した流れが右まわりの環流となっている(図-8)。また湾央に向かった流れは、湾口部に

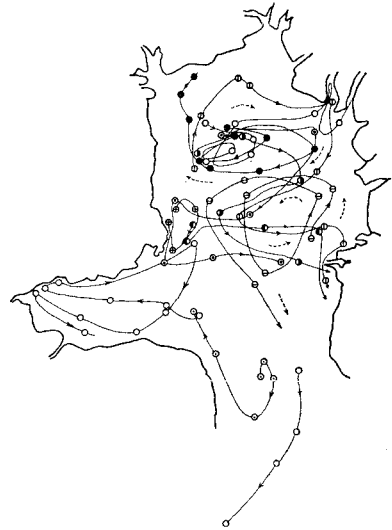


図-8 大潮差時 60 周期間のフロートの流跡

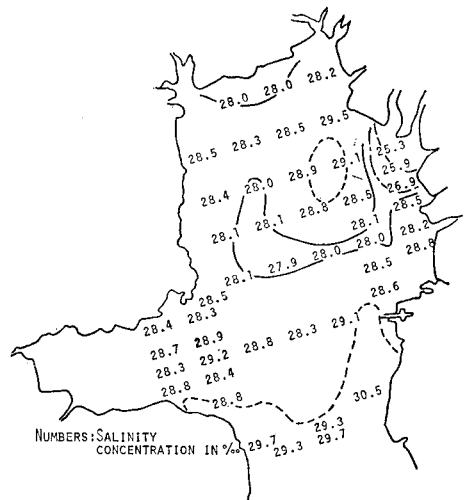


図-9 表層の塩分濃度分布(大潮下げ潮時)

向かう流れと三池沖に向かう流れとにわかれ、後者が左まわりの環流を形成している。これら2つの相反する大きな環流は空間スケールで10数km、時間スケールで20日前後である。これらの環流の成因はいくつか考えられるが、その1つは沿岸干潟部のミオに沿って河川に出入する、いわゆる河口流によるものと考えられる。とくに有明海は潮差が大きい因此この影響が顕著で小潮の場合でも同じ傾向を示しているのは注目すべきであろう。この環流が有明海における長期的な物質の拡散に大きな役割を果たすことが考えられる。

6. ま と め

有明海海象観測および水理模型実験からつぎの結果をえた。

(1) フルードの相似律を満足する模型では、原型の水平乱れとそれとともなう乱流拡散現象をほぼ再現する。

(2) 湾奥部東岸海域での潮汐による流動は西岸海域よりも大きい。とくに半日周期間の流動距離は大潮時で東岸が12km、西岸が8km程度である。

(3) 竹崎～三池以北の海域には空間スケール(直径)が10数km、また時間的スケール(1周期)が20日前後の相反する2個の環流が認められる。この環流には

ミオに沿って河川に出入する河口流の影響が大きいものと推定される。

(4) 変動流速で求めた水平乱れのスペクトルは周期が数10分～3時間程度の範囲で $-5/3$ 乗則をほぼ満たしている。拡散係数は原型で $10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ のオーダーであり、模型で $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ のオーダーであった。

最後に、本研究を実施するに当たり、御助力を頂いた佐賀大学農学部渡辺潔教授に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 高田雄之・戸原義男：有明海の水理模型実験について(2)，第10回海講講演集，pp. 75～79，1963.
- 2) 農林省熊本農地事務所・長崎海洋气象台：有明海域総合開発計画模型実験報告書，pp. 59～60，1959.
- 3) 九州農政局・長崎南部地域総合開発調査事務所：諫早湾淡水湖造成に伴う湾外漁業に与える影響調査報告書(環境編)，p. 146，1977.
- 4) 和田 明・角湯正剛：瀬戸内海における流況と分散特性，第21回海講講演集，pp. 297～302，1974.
- 5) 平野敏行・杉浦健三：河川流入のある小内湾の塩分分布について，東海区水産研報告22号，pp. 1～16，1958.
- 6) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水理模型実験について，京大防災研年報10B，pp. 343～363，1967.