

潮流による拡散の水力模型実験について

樋口 明生・杉本 隆成

ON THE HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE DIFFUSION DUE TO THE TIDAL CURRENT

By Haruo HIGUCHI and Takashige SUGIMOTO

Synopsis

The diffusion phenomena due to the tidal current in the shallow broad estuary are here studied in a hydraulic model experiment, for which Ariake Bay in the Omuta area of Kyushu, was used as the prototype. Only the tidal current is taken into account, the effect of the other factors, the ocean current, density stratification, the wind, waves, and so on, which may influence the diffusion in the estuary, is not considered.

A model of the northern half of Ariake Bay, with a horizontal and vertical scale of 1/2000 and 1/200 respectively, was constructed, and a semidiurnal tide generated by an automatically controlled pneumatic tide generator was provided for it. The water level at 5 stations, the current ellipses at 4 stations and the flow pattern were measured and compared with those in the prototype. The diffusion from an instantaneous point source and a continuous point source was investigated mainly by photographic method.

Experiments have shown that the tide and the tidal current are accurately reproduced in the model. And the diffusion coefficient evaluated through the mixing of the water from Chikugo River with the sea water is almost the same as in the prototype. However, the diffusion coefficient evaluated through the rate of increase of the dye patch is about 1/3 of that in the prototype. This may be due to the difference between the flow in the model and that in the prototype, the former belonging to the perfect turbulent regime and the latter to the transient regime. The diffusion coefficient in the model at a future stage, in which two areas of reclaimed land are presented, becomes a little larger than that at the present stage. The diffusion from a continuous point source at the mouth of Omuta River is also compared with the prototype.

1. ま え が き

近年、産業経済の発展に伴ない、全国各地に臨海工業地帯が造成されつつあるが、これらの計画が完成すると、多くの工場群から種々の工場廃水が排出されるようになる。このような廃水中に有害な物質を含む場合には、水質汚染による漁場喪失などいわゆる公害を起こす可能性がある。計画を合理的に進めるためには、廃水の拡散・混合について、現況をよく調査すると同時に、計画完成後の状態を事前に把握して十分その対策をたてておかねばならない。

海中への拡散現象を支配する因子としては、海流、潮流、密度流、波浪、風、その他多くのものがあげら

れるが、ここではそれらのうち、現地に則して、潮流が支配的な場合を取り扱うことにする。

一般に、こうした事前調査を行なう場合の一つの手段として模型実験が考えられる。ここでは、この地区における工場廃水の、潮流による拡散現象を実験的に取り扱ひ、こうした問題に関する水理模型実験の適用性を調べようと試みた。

estuary における拡散・混合に関する実験的研究としてこれまで行なわれてきたものは、塩水楔^{クラビ}や二層流における鉛直混合を主眼としたものがほとんどで、河川感潮部あるいは狭くて深い湾を対象としたものであり、広くて浅い湾、従って鉛直方向に様な estuary に於ける水平拡散を対象とした実験的研究はほとんどない。

有明海の潮汐に関しては長崎海洋气象台¹⁾、九州大学²⁾、³⁾、⁴⁾で実験が行なわれた例があるが、いずれも締切堤の設置による潮位変化を主眼としたものであり、拡散現象を取り扱うのはこれが初めての試みである。

まだ多くの不明の点が残されており、十分な結果を得るに到っていないが、現在までに得られた結果について述べる。

2. 原 型

有明海の海底地形、底質⁵⁾、⁶⁾、水温、塩素量⁷⁾、⁸⁾、潮流⁹⁾~¹²⁾についてはかなり調べられているが、大牟田地先に関する資料はそれほど多くはない。

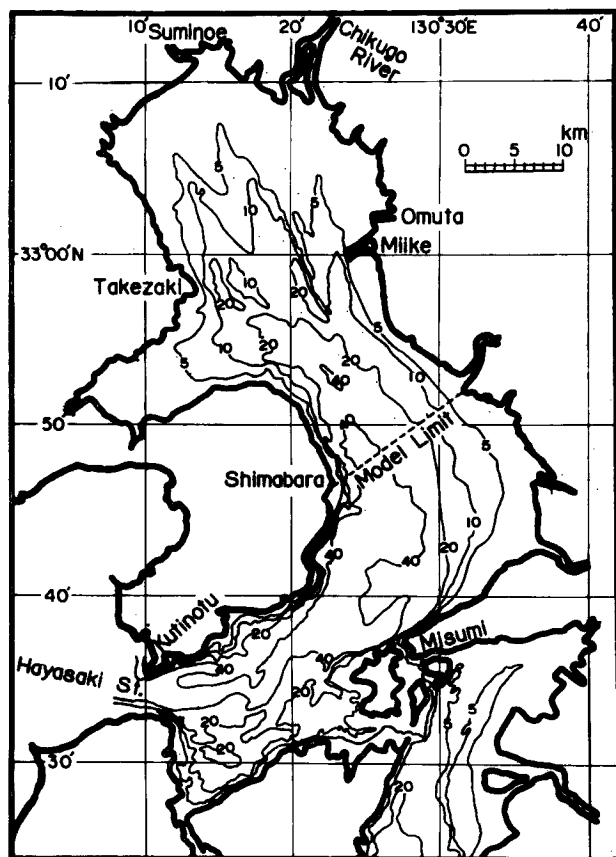


Fig. 1 Bathymographic chart of the Ariake Bay

有明海は Fig. 1 に示すような長さ約 90 km, 平均幅約 18 km, 平均水深約 20 m の内湾であり, 奥部では, 海底傾斜はゆるやかで, 底質は泥土である。ここはわが国でも有数の潮差の大きい地域であるが, この潮汐は主として早崎海峡(口の津の南側)を通じて外海の潮汐に支配されていると考えられている。主な地点の潮汐常数は Table 1 に示すようである¹³⁾。

Table 1 Tidal constant in the prototype

Constituent Station	M_2		S_2		K_1		O_1		Period (Month)
	$H(\text{cm})$	$k(^{\circ})$	$H(\text{cm})$	$k(^{\circ})$	$H(\text{cm})$	$k(^{\circ})$	$H(\text{cm})$	$k(^{\circ})$	
Tomioka	96	230	43	252	27	208	20	190	1
Kuchinotsu	104	253	41	290	28	216	21	192	4
Misumi	125	254	52	295	26	220	19	201	4
Shimabara	147	258	56	299	25	219	20	204	4
Takezakijima	158	259	69	299	29	220	22	203	1
Miike	159	259	69	299	27	219	21	198	4
Suminoe	172	267	75	306	27	221	22	205	1

これによると半日周潮が支配的であり, M_2 , S_2 潮の振幅は湾奥にいくにつれて大きくなっている。位相については海峡の前後で大きく遅れ, そこから湾奥までは, 大体距離に比例しているが遅れは小さい。平均潮位は湾内奥部では湾外に比して約 30 cm 高い。平均潮位の年変化は, 2月に最低, 8月に最高でその差は 38 cm 程度である¹⁴⁾。

湾内全域の潮流については, 水路部および長崎海洋気象台の観測によれば, 下げ潮最盛期には Fig. 2 の

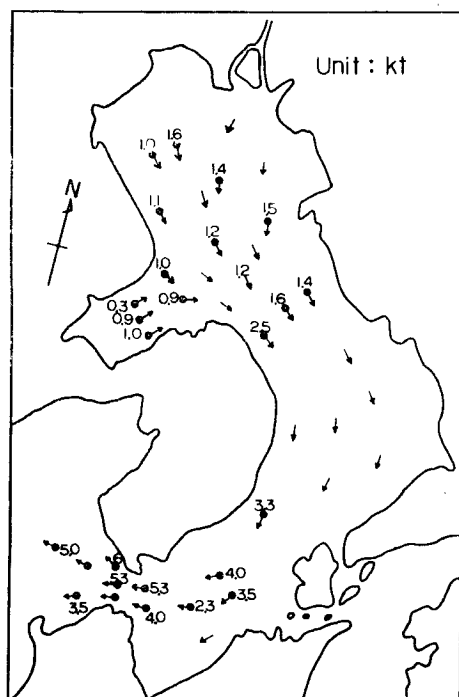


Fig. 2 Maximum tidal current in the ebb

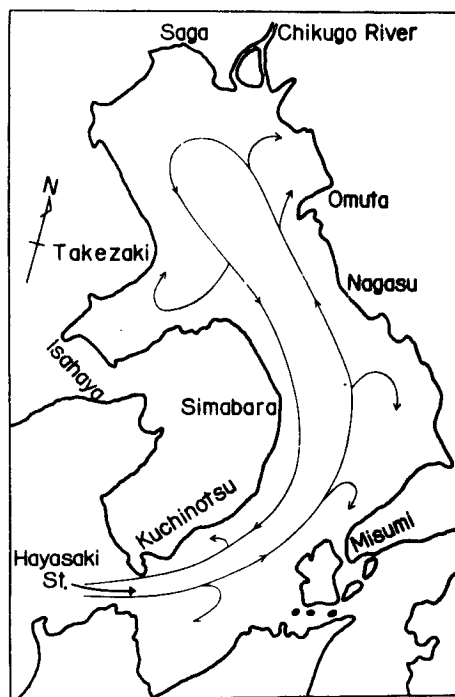


Fig. 3 General flow

ようであり、上げ潮時には方向が逆で流速はだいたい等しいと報じられている¹¹⁾。恒流は Fig. 3 に示すように南部では東岸沿いに北流し、長州沖付近で反時計回りに島原沖北部に達し、西岸沿いに南下しており、その速さは $0.3 \sim 0.8 \text{ kt}$ 位である。なお湾奥にはもう一つ反時計回りの環流があり、流速は $0.1 \sim 0.2 \text{ kt}$ である。なお、三池と筑後川を結ぶ線以東では時計回りの恒流が見られる⁹⁾。別の資料によれば、陸水の流出の影響で、全体として湾奥部から湾口部へ向う恒流があると報告されている⁶⁾。

大牟田付近の流況については、長崎海洋気象台の観測により、Fig. 4 に示すような流況が得られている。大牟田川河口付近から三池港防波堤に到る間では、上げ潮、下げ潮の衰微期にそれぞれ時計回り、反時計回りの反流が生じる。三池港先端では水深が深く、突堤による縮流のため最大流速が 2 kt 以上に達する。矢部川～堂面川沖では上げ潮時に時間回りの反流が見られる。また、大牟田地先4点 (St. A～D) における潮流楕円が得られている¹²⁾。同時に行なわれた浮標追跡の結果によると6時間の流程は約 11 km であった。

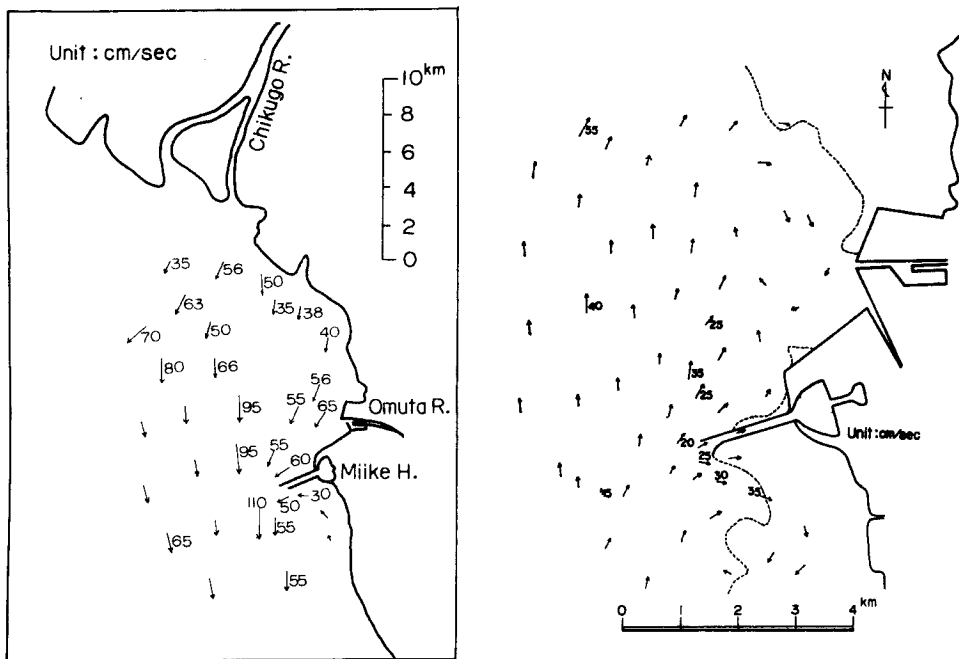


Fig. 4 Flow pattern in the Omuta area at maximum in the ebb (a) and at high water (b)

一方、筑後川はこの流域の卓越した淡水源となっているが、筑後川の延長上 17 km にわたる測線において塩素量および比重の分布が調べられている⁸⁾。代表例を Fig. 5 に示す。この図の塩分および比重分布から、この付近では上下によく混合した、いわゆる浅海強混合型の estuary になっているといえる。Arons と Stommel¹³⁾ はタイダルフラッシュに関する混合距離理論で、奥から河水流入のある入江内の塩分の、時間的に平均した分布を論じているが、この場合河口 ($x=0$) において塩分 $S=0$ 、estuary の端 ($x=L$) において塩分は外海に等しいとして、河川流量 D 、水深 H 、潮汐の振幅 ξ_0 、周期 T 、estuary の全容量 V 、および安定度、鉛直混合、海底粗度などによって変わる無次元量 B を用いたフラッシュ係数 F ($F = DH^2T / 4\pi B \xi_0^2 V$) を導入し、estuary 内の塩分分布を求めている。この理論は両側が岸で囲まれた estuary に関するものであり、いま考えている筑後川河口付近に適用するには多少問題があるが、拡散係数の一応の見

当をつけるために、さきの資料を使ってフラッシュ係数を求めると Fig. 6 に示すようである。一般に F は夏に大きく冬に小さくなるがこれは河川流量の違いによるものであろう。常数 B は Table 2 のようである。ただし、ここでは estuary の水量は、 $V = \frac{1}{5} L^2 H$ として求めた。水平交換係数 A は、 $A = 2 B \xi_0 U_0$ (ξ_0 は潮流による水粒子の水平移動距離、 U_0 は潮流の平均流速) で表われ、 $B = 0.08$ として求めると $A = 6.7 \times 10^6$ となる。これはこの程度の規模の現象に関する拡散係数と考えてよいであろう。

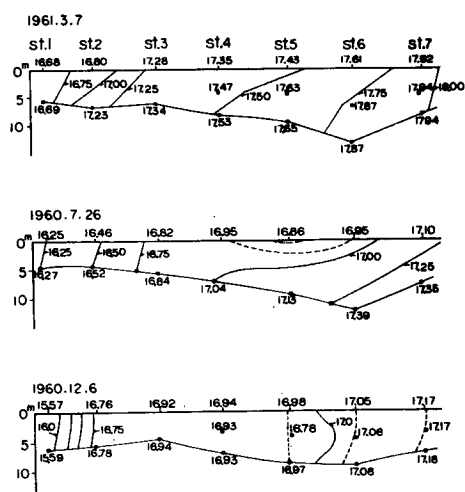


Fig. 5 Salinity distribution along the extension line of Chikugo River

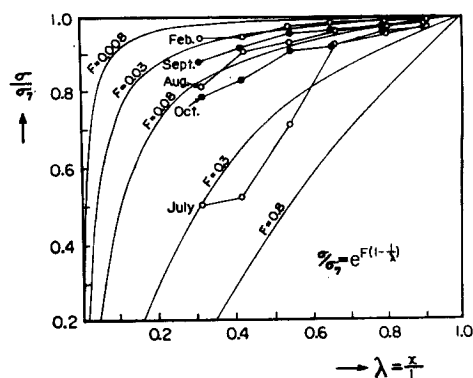


Fig. 6 Density distribution and flushing number F along the extension line of Chikugo River (prototype)

Table 2 Discharge from Chikugo River D , Flushing Number F , and Mixing Coefficient B at high tide in spring tide

Data	1962									1963			Mean
	Apr. 20	May 19	Jun. 19	Jul. —	Aug. 16	Sep. 14	Oct. 16	Nov. 28	Dec. 13	Jan. 18	Feb. 27	Mar. 26	
$D(\text{m}^3/\text{sec})$	40	80	100	360	150	100	100	70	50	85	65	67	105
F	0.04	0.05	0.08	0.30	0.08	0.05	0.10	0.08	0.03	0.08	0.03	0.05	0.08
B	0.06	0.09	0.07	0.07	0.11	0.11	0.06	0.05	0.10	0.06	0.12	0.08	0.08

一方、大牟田地先海域において、瞬間点源染料域の拡がりから、拡散係数が求められている。大牟田川河口付近で3回、大牟田川の延長線上約3 km 沖合で2回、20 kg のウランを投入して、空中写真によりその染料域の拡がりを撮影したものである。染料域の拡がりの模様および投入後の経過時間と染料域の面積との関係をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。図中の記号は潮位 $\xi = \xi_0 \sin \theta$ をで表わしたときの θ の象限である。従って I は上げ潮後期、II, III は下げ潮時の資料である。添字 A は大牟田川河口より沖合約3 km の地点 B は大牟田川河口に染料を投入したことを表わしている。染料域は投入後しばらくはその面積が増加するが、やがて薄くなって可視範囲は減少する。図中、右上の方で折線の勾配が逆になっているのは、染料域の減少を示している。

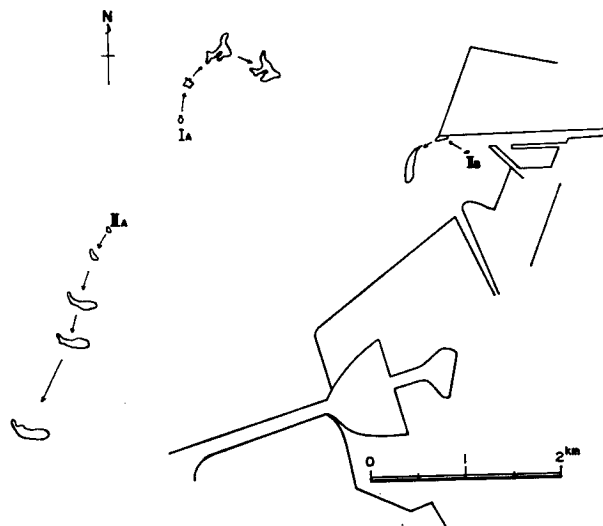


Fig. 7 Sketch of the change of the area of dye patch from instantaneous point sources (prototype)

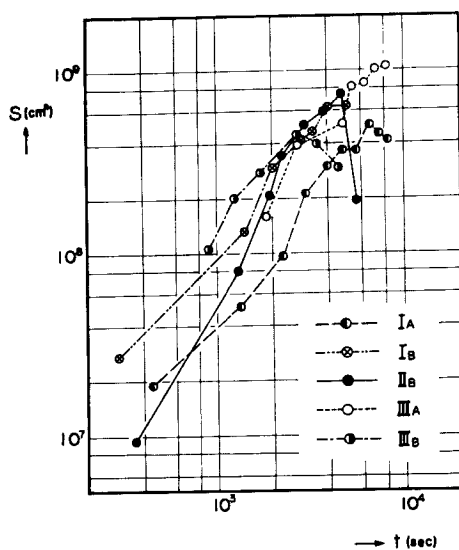


Fig. 8 Time change of the area of dye patch from instantaneous point sources (prototype)

こうした観測から拡散係数を求めるにあたり、平野敏行、杉浦健三の解析法¹⁶⁾と同じものを用いた。
初め $C = C_0 e^{-(r/a)^2}$ のような同心円的な濃度分布をしている染料の時間後の濃度は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$$

から

$$C = \frac{C_0}{1 + 4Kt/a^2} \exp\left\{\frac{-r^2}{a^2(1 + 4Kt/a^2)}\right\}$$

が得られるが、染料域縁辺の濃度が常に等しいとすると、時刻 t_{i-1} , t_i に測定した染料域の相当半径の間には、

$$\frac{C_0}{1 + \frac{4Kt_i}{a^2}} \exp\left\{\frac{-r^2}{a^2(1 + \frac{4Kt_i}{a^2})}\right\} = \frac{C_0}{1 + \frac{4Kt_{i-1}}{a^2}} \exp\left\{\frac{-r_{i-1}^2}{a^2(1 + \frac{4Kt_{i-1}}{a^2})}\right\}$$

の関係がある。

$$\frac{1}{1 + \frac{4Kt_i}{a^2}} \sim \frac{1}{1 + \frac{4Kt_{i-1}}{a^2}}$$

$$\exp\left\{\frac{-r^2}{a^2(1 + \frac{4Kt_i}{a^2})}\right\} \sim 1 - \frac{r^2}{a^2(1 + \frac{4Kt_i}{a^2})}$$

とすると、

$$K \sim \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})}$$

と推定される。観測された染料域の面積 S に等しい円を考え、 $S_i - S_{i-1} = \Delta S_i$, $t_i - t_{i-1} = \Delta t_i$ と書くと上式は

$$K \sim \frac{\Delta S_i}{4\pi \Delta t_i}$$

となる。

この式を用いて求めた K を、相当半径 r を横軸にとって Fig. 9 に示す。図中の直線は勾配が $4/3$ である。これによると、拡散係数の r に対する $4/3$ 乗則が成り立つものと考えられる。Fig. 9 に於いて、右側でⅡ象限の場合の勾配が大きくなっており、他方Ⅰ, Ⅲ象限の場合の勾配が小さくなっているのは、前者では、流速が大きくなる時期にあり、後者では逆に次第に小さくなる時期にあたるためかも知れない。

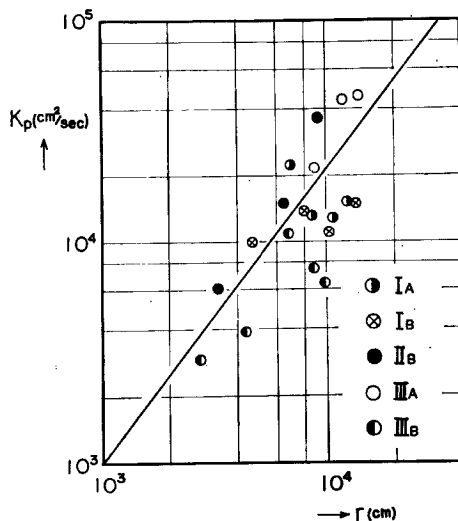


Fig. 9 Relation between diffusion coefficient K_p and equivalent radius of the dye patch (prototype)

一方、大牟田川河口近辺の養殖貝の被害分布から見た、大牟田川河水の拡散稀釈に関する資料^{8), 9)}によると、大牟田地区には化学・塩業・鋁山などの工場があって、一日約15~20万トンの工業廃水が排出され、

大牟田川の水量は、ほぼこれと都市下水とからなっている。この汚染水の潮汐による拡散模式は Fig. 10 に示すようであり、上げ潮時には、主流が岸寄りに濃厚かつ低速の水塊として拡がり、堂面川河口付近に停滞しやすい。沖合では雲型の排水塊が速い潮流に乗って拡がる。また、南に分かれた汚水は三池港北岸沿いにできる満ち潮逆流と共に大牟田川河口左岸から三池港北防波堤の前面に停滞しやすい。これらの排水塊の停滞域とノリ、アサリの発病域分布とはよく対応していると報告されている⁹⁾。

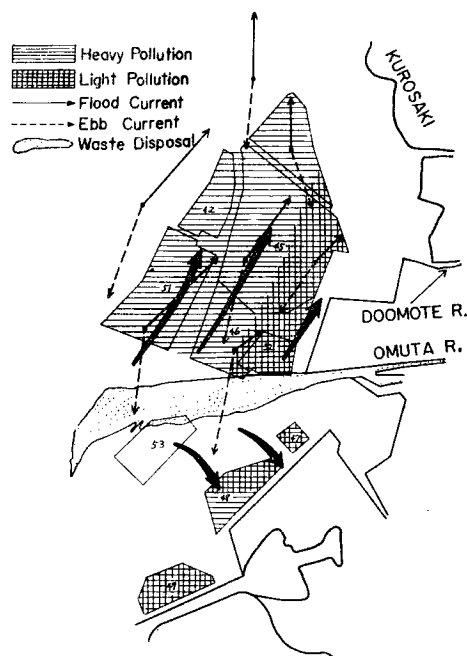


Fig. 10 Sketch of the diffusion of the waste disposal from Omuta River and the distribution of the sick shellfish

3. 相 似 性

潮流に関する水理模型実験において、原型と模型との流れが力学的に相似であるためには、つぎの関係式が成り立たねばならない¹⁷⁾。

$$t_r = x_r \cdot h_r^{-1/2} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$C_{fr} = x_r^{-1} \cdot h_r \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに t は時間, x は水平方向の距離, h は鉛直方向の距離, C_f は摩擦係数であり、添字 r は原型に対する量と模型に対する量との比を表わしている。式(3.1)は Froude 数を合わせることに相当し、式(3.2)は摩擦係数を規定する条件を表わしている。模型における流れも乱流であるとし、摩擦係数としてマンニングの係数 n を採用すれば式(3.2)はつぎのようになる。

$$n_r = x_r^{-1/3} \cdot h_r^{2/3} \dots\dots\dots (3.3)$$

着目する海域における水粒子の移動距離は 10~12 km 程度であるから、距離的に十分余裕を見て島原と菊池川河口とを結ぶ線を模型の限界とすると、原型と実験施設の大きさから考えて水平縮尺 $1/x_r = 1/2000$ が適当となる。原型の摩擦係数 n_p はよくわからないが、長崎海洋気象台¹⁾によれば、 $n_p = 0.01$ の程度と推定されているのでこれを採用し、 $n_m = 0.013$ とすると式(3.3)より、鉛直縮尺 $1/h_r = 1/200$ が求まる。模型において粗度係数 $n_m = 0.013$ とするためには、相当粗度 $k_s = 1.3 \text{ mm}$ の程度とすればよく¹⁸⁾、このた

めには模型の粗度をモルタル刷毛仕上げとすればよい。模型における Reynolds 数 Re_m は時間的に変化するが最大値は、大牟田地先における原型の値 $Re_p=10^7$ から計算すると $Re_m=3.6 \times 10^3$ となり、流速が正弦的に変化すると考えると $Re_m > 2000$ である時間が62%以上あり、まず乱流域における実験と考えてよいであろう。

一方、拡散には種々の周期の乱れが関与しているが、このうち潮汐の周期の乱れによるものについては、潮汐に関する相似が成り立っておれば、当然拡散現象についても相似が成り立つと考えられる。しかし、こうした潮流に関する相似性を考える場合、流れの微細構造まで相似性を保たせることは困難であり、深さ方向に平均した量について相似であればよいと考えているために、他の周期の乱れに起因する拡散現象が厳密な意味で相似になるとは考えられない。しかし、ここでは、模型における拡散と原型における拡散とに何らかの関係があり、適当な補正をして原型の値が求められる場合には、広い意味での相似が成り立つものとする。拡散係数 K は $[L^2 T^{-1}]$ なるディメンジョンをもつから、相似が成り立つ場合には、

$$K_r = x_r^2 t_r^{-1} = x_r h_r^{1/2}$$

なる関係があり、この模型では $K_r = 2.8 \times 10^4$ となるはずである。ここでは、この縮尺を使って原型の値に換算した値について考えることにする。

なお、このような現象については密度その他の影響があると考えられるが、実験施設その他の関係で今回は取り入れることができなかった。

模型諸元を Table 3 に示す。

Table 3 Hydraulic factors in the prototype and the model

	Scale	Prototype	Model
Distance	1/2000	20 km	10 m
Water depth	1/200	10 m	5 cm
Tidal range	1/200	5 m	2.5 cm
Tidal period	1/141	12 h 25 m	5 m 17 sec
Current velocity	1/14.1	1 kt	3.53 cm/sec
Discharge	$1/5.666 \times 10^6$	$10^6 \text{ m}^3/\text{day}$	$0.206 \text{ cm}^3/\text{sec}$
Diffusion coefficient	$1/2.8 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$	$1 \text{ cm}^2/\text{sec}$

4. 実験施設

実験は防災研究所宇治川水利実験所の海洋河口実験施設で行なった。実験施設は、模型水槽、起潮機、および計測装置より成っている。

(1) 模型水槽

前節で述べたように Fig. 11 に示すような、島原と菊池川を結ぶ線以北を含む水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/200 の有明海の模型を作った (Photo. 1)。模型はコンクリートブロックで外壁を作りその内部にアスファルト防水を施して漏水を防ぎ、その中に海底地形をモルタルで作し、刷毛仕上げとした。海底には、流況測定のために十字印を 1 m 間隔につけた。

(2) 起潮機

模型に潮汐を与えるために、気圧式起潮機を用いた。これは、幅 20 m、高さ 2 m、奥行 2 m の空気室、7.5 HP のルーツブロワー、φ 100 mm の空気作動制御弁、および自動制御装置 (関数指示器、調節記録計、および水位検出計) から成っている。この起潮機により、本実験では、潮差 1.5~2.5 cm、周期 5 分 17 秒の潮汐を与えた。

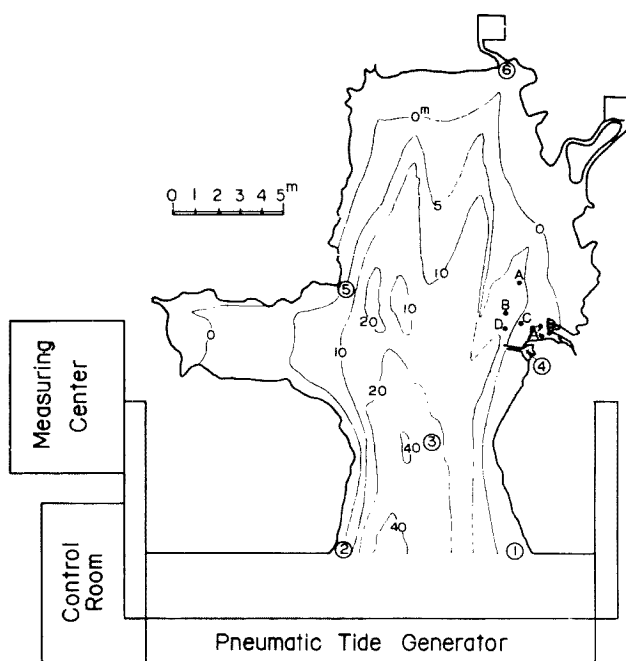


Fig. 11 Model of the Ariake Bay

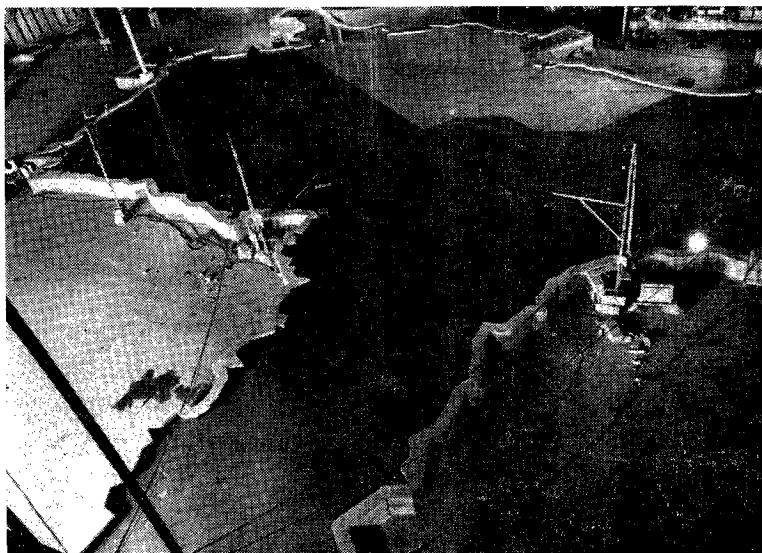


Photo. 1 Model of the Ariake Bay

(3) 計測装置

この実験では、模型内5点の水位の時間的変化、表面流速の水平分布、染料域の面積および濃度変化を主として測定し、さらに試験的に流速の鉛直分布、乱流の微細構造の測定を行なった。

水位は、Fig. 11 の①～⑥の通水口から検出部に水を導き、電気抵抗式水位計で測定した。記録の一例を Photo. 2 に示す。

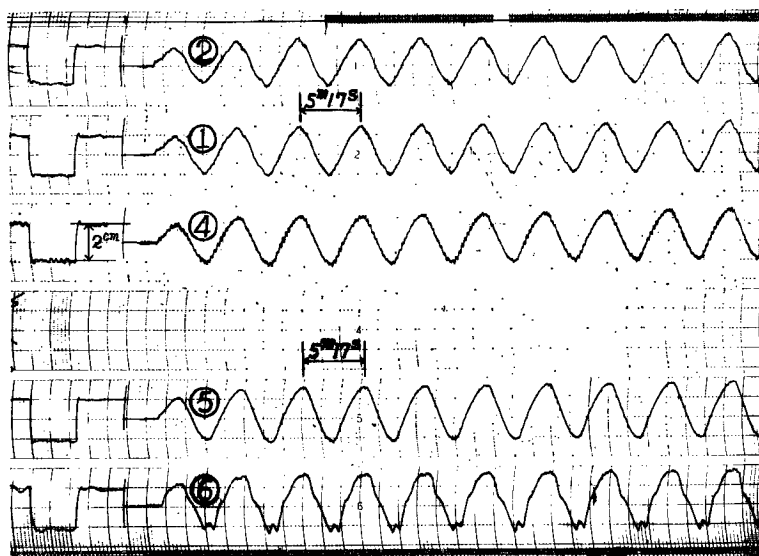


Photo. 2 Record of sea level in the model of Ariake Bay

流況は、多数の浮標を海面に浮かべ、実験室を暗室にし、間歇的に照明し、これを高さ 9 m の天井から $f: 21 \text{ mm}$ の起広角レンズで撮影することにより測定した。また 16 mm 撮影機による騎落し撮影をも併用し、0.5秒間隔で撮影した。

染料域の拡がり方は、写真撮影に関しては流況と同様な方法で測定した。投入染料としては、ウラニン、ローダミン等も考えられるが、この実験では海底を白地にしていること、溶媒が水であるため、比重を少しでも小さくする必要からメチレンブルーを採用した。点源の溶液としては濃度 2.5 gr/l 、温度 30°C 前後、比重が 0.9983 前後のメチレンブルー溶液を用い、約半滴～1滴投入した。連続源の拡散の実験にも同じ液を $0.4 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の割で大牟田川上流から流した。

流速の鉛直分布は、過マンガン酸カリの粒を落とし、その結果できる糸筋状の染料域の移動を、流向と直角、距離 $1\sim 2 \text{ m}$ の位置から、水中カメラで撮影し測定した。

乱流測定には DISA 製の恒温式ホットフィルム流速計を使用し、大牟田先および三池先の2点で上・下潮とも三層ずつ平均流速と乱流度とを測定した。

5. 実験経過

(1) 原型においては半日潮が卓越しているので模型ではもっぱら半日周潮だけ取り扱った。まず現況の模型により3種類の潮差の潮汐を与えて、水位、潮流槽円、流況などを測定し、潮位、潮流について相似性が成り立っているかどうかを検討した。

(2) 拡散現象の相似性を調べるために、3種類の実験を行った。はじめに筑後川上流から染料を連続的に流して河口沖で採水し、濃度分布を調べた。流量は原型の値に換算して $70 \text{ m}^3/\text{sec}$ と $35 \text{ m}^3/\text{sec}$ の2種

類について行ない、濃度は比色によって求めた。つぎに、大牟田地先に染料メチレンブルーを投入し、染料域の拡がり方を調べた。また大牟田川上流から染料を連続的に流してその拡がり方と濃度分布を調べた。

(3) その後、埋立地完成後の模型について大牟田地先の点源および連続源染料域の拡散に関して同様の実験を行ない比較した。

(4) 最後に粒状の過マンガン酸カリを2, 3粒落して、流速の鉛直分布を調べる実験と、乱流計による流速および乱れの測定を試験的に行なった。

6. 実験結果

(1) 潮 汐

模型内5点で電気抵抗式水位計を用いて水位を測定したが、記録の一例を **Photo. 2** に示す。これらを調和分析し、第1項 H_1 , 第2項 H_2 , および位相差 $\Delta\delta$ を **Table 4** に示す。

Table 4 Harmonic constant of the tide in the model (Run 29)

Station	①	②	④	⑤	⑥
$H_1(\text{cm})$	1.13	1.13	1.24	1.26	1.34
H_1^m/H_1^l	1.00	1.00	1.10	1.12	1.19
$H_2(\text{cm})$	0.03	0.03	0.05	0.06	0.08
$\Delta\delta$	$0^\circ 00'$	$+30'$	$-20'$	$+10'$	$+2^\circ 30'$

各点における潮差は **Fig. 12** のようである。図中、黒丸と実線は模型、白丸と破線は原型に関するものである。原型の値としては、大潮差 $2(M_2+S_2)$, 平均潮差 $2M_2$, および小潮差 $2(M_2-S_2)$ を示した。

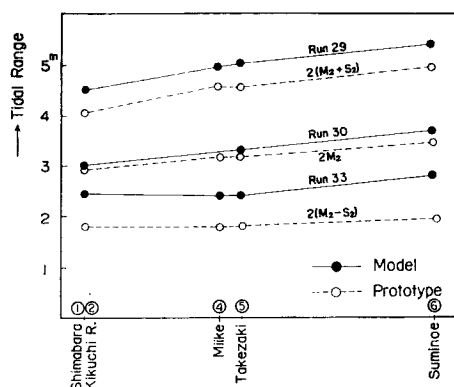


Fig. 12 Tidal range

(2) 潮流槽円

模型内4点 (**Fig. 11** の St. A, B, C, D) において直径 5mm の紙の浮標の追跡を間歇的に行ない。10~15cm 流下する方向と時間から表面の流向、流速を測定し、潮流槽円を求めた。現地の資料とともに St. B および St. D の例を **Fig. 13** に示す。

(3) 流 況

上げ潮・下げ潮最盛時の流速分布は **Fig. 14 a, b** のようである。大牟田付近の高潮時の流況は **Fig. 15** のようである。

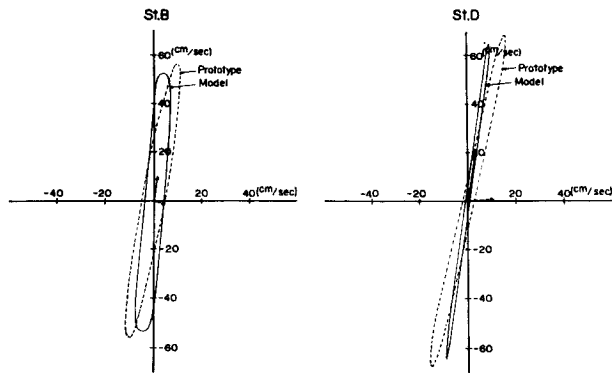


Fig. 13 Current ellipse at Station *B* and *D* (full line : model, broken line : prototype)

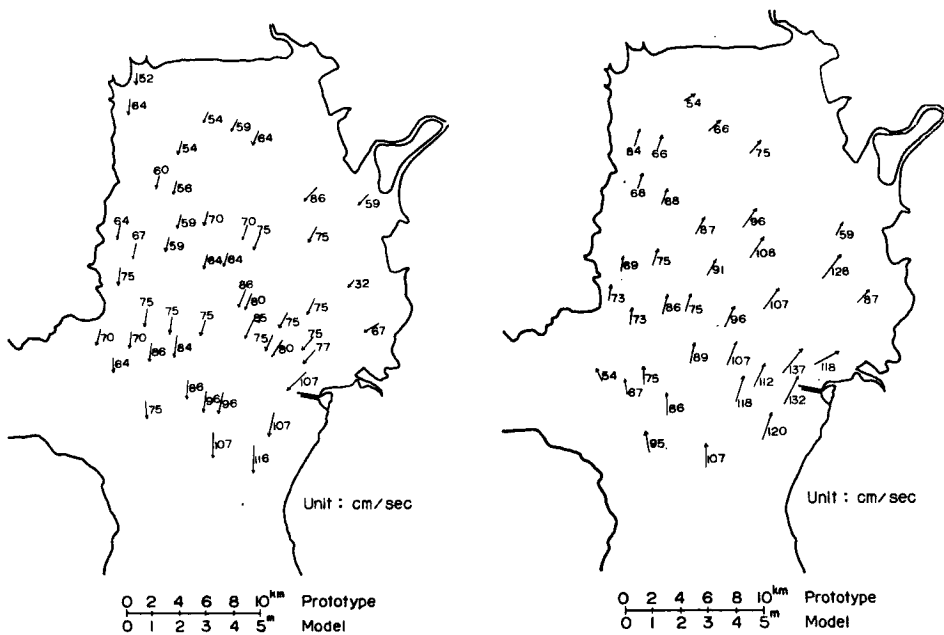


Fig. 14 Flow pattern in the ebb (a) and in the flood (b)

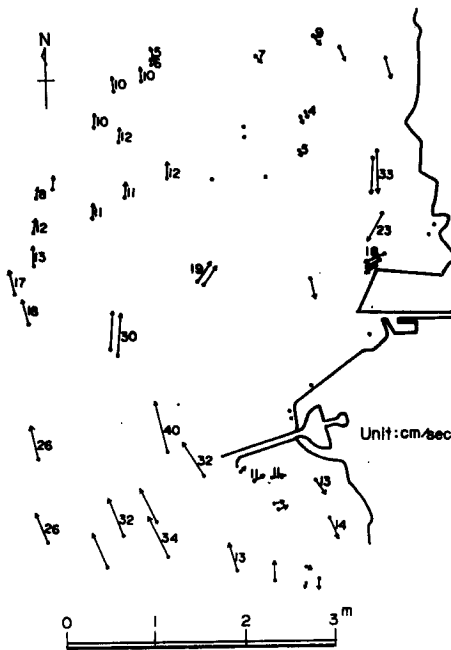


Fig. 15 Flow pattern at high water in Omuta area



Fig. 16 Tidal locus

(4) 流 跡

浮標が潮汐の一周期の間に描いた軌跡の一例を Fig. 16 に示す。図中実線は上げ潮時、点線は下げ潮時に関するものである。なお浮標は一周期の後に元の位置に戻らないが、これは一種の恒流を表わすものである。このような恒流を Fig. 17 に示す。

(5) 筑後川河口先の染料濃度分布

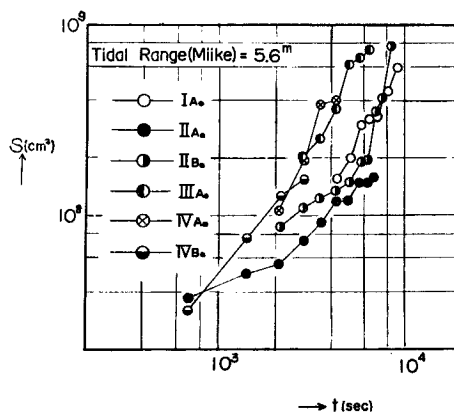
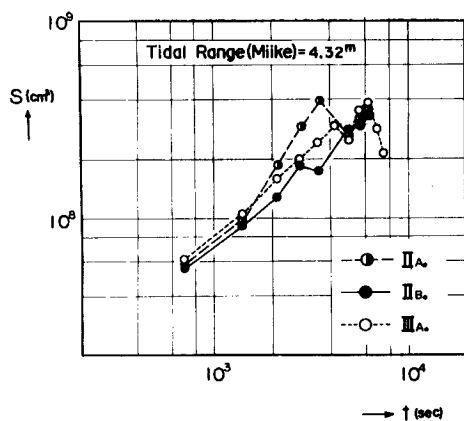
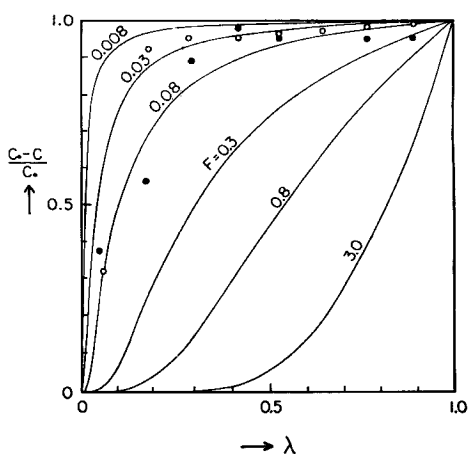
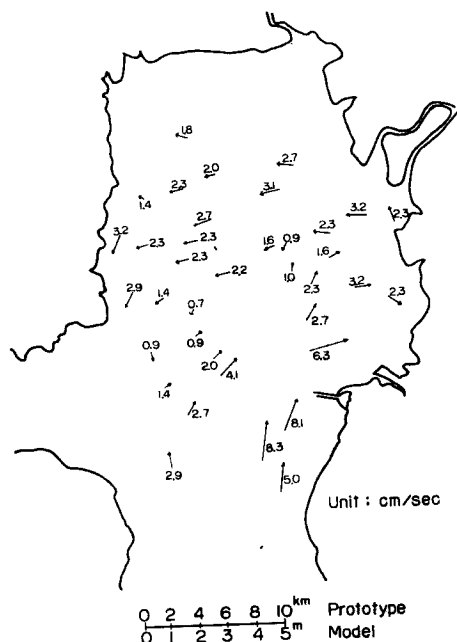
筑後川上流から染料を連続的に入れ、11~25周期後の、定常に近い分布状態において河口先 17 km にわたる濃度分布を調べた。河口の濃度を C_0 、河口先の各採点における濃度を C として、横軸に河口からの距離 x/L ($L=17$ km) をとり、縦軸には σ/σ_L のかわりに $\frac{C_0-C}{C}$ をとって、濃度分布を Fig. 18 に示す。

(6) 拡散 (瞬間点源)

大牟田河口 (B_0 点) と大牟田川の延長線上沖合 1 km (A_0 点) の 2 点に、約半滴のメチレンブルーを小さな平さじで、水に乗せるように投入し、その面積の時間的変化を調べた。この場合、現地のような染料域の拡がりを得るために染料をあたためて、比重を若干小さくするようにした。この時の水温は約 25°C 、比重 0.9990 であり、染料の液温は約 30°C 、比重 0.9983、濃度 2.5 gr/l である。染料域面積の時間的変化を Fig. 19 に示す。II, III は下げ潮、IV, I は上げ潮に関するものである。経過時間、面積、半径はすべて原型の値に換算したものである。Fig. 20 に示すような埋立地ができた模型における。同様の実験結果を Fig. 21 に示すが但し投入染料は一滴である。

(7) 拡散 (連続点源)

大牟田川の上流部で染料を連続的に入れ、海中への拡がり方を調べた。下げ潮時には三池港の突堤先を越えて長州沖の方まで南下し、低潮時には大牟田川の延長線上を沖に向かって 5, 6 km 流れ、上げ潮時には、沖に延びた帯が全体的に大牟田川と筑後川とを結ぶ線から東の領域に侵入し、黒崎・堂面川沖の 2, 3 km



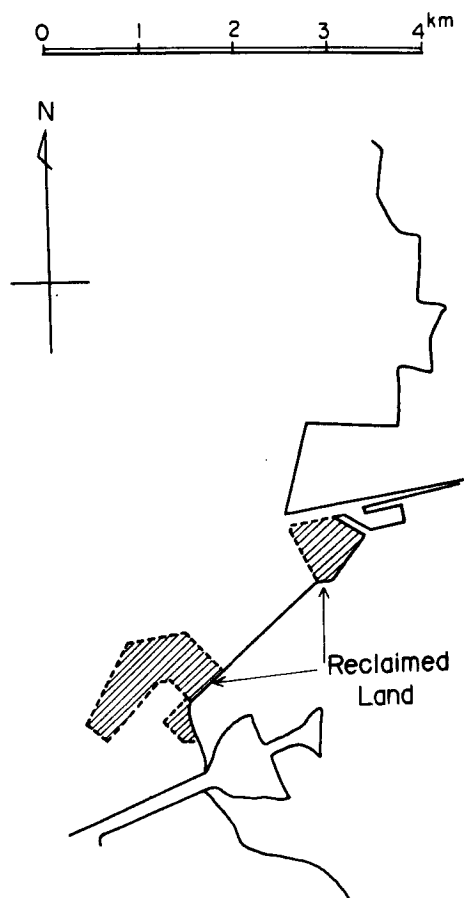


Fig. 20 Reclaimed land

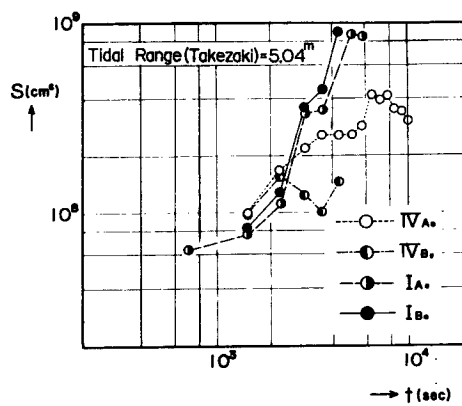
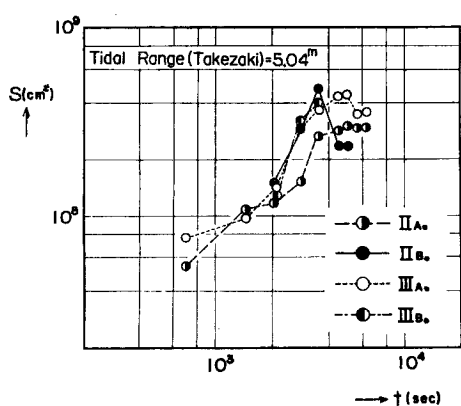


Fig. 21 Time change of the area of dye patch from instantaneous point sources in the ebb (a) and flood (b) (future stage)

以内の海域に到達する。上げ潮衰微期には三池港北岸沿いに満ち潮反流が生じ、大牟田川河口左岸から三池港北防波堤の前面付近は、下げ潮時になるまで高濃度の染料域におおわれる。また、下げ潮時に三池港南方に流下した染料水塊は、上げ潮時に大牟田沖まで北上し、一部は53漁場一帯に侵入する。さらに数周期後には上げ潮時に染料が侵入する領域での濃度が漸時高くなっていくが、この状態を Fig. 22 に示す。横軸は潮時（時間経過）を表わし、縦軸はメチレンブルー 6.8 gr/l の原液を1としたときの濃度を表わす。大牟田川河口先の図に示す4点で採水したが、各点における濃度は潮時とともに周期的に変化し、同じ位相における濃度は時間とともに大きくなっていくことがわかる。

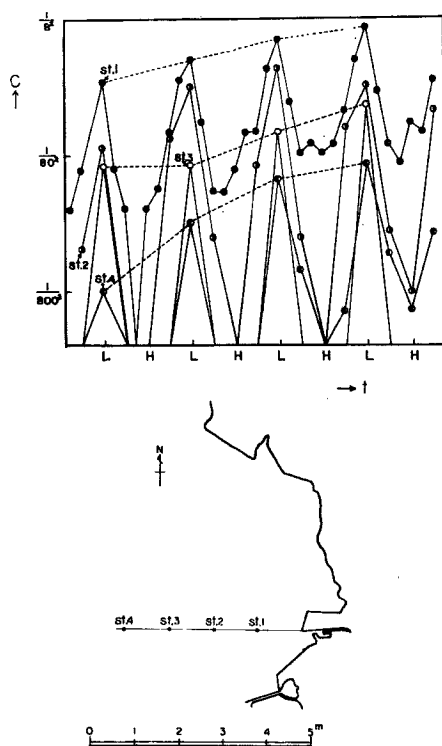


Fig. 22 Time change of the concentration of dye from a continuous point source

埋立地ができた場合、全体的な傾向は変わらないが、三池港北岸にあった上下潮の反流は、小さくなって大牟田河口近くに移る。また、黒崎～大牟田先の濃度は、埋立地のない場合に比べて幾分低くなるようである。

7. 考 察

(1) 潮 汐

水位記録を見ると測点④、および⑥に副振動が見られる以外は、かなりよい正弦波形が得られている。測点④は三池港の港内にあり、⑥は住ノ江にあるが、六角川のみお筋のかなり奥にあるため、このような副振動が見られるものと思われる。これらが原型でも存在すかどうかは調べる必要がある。

Table 4 には、調和分析の結果とともに、各測点における潮差の潮点①に対する比が示されているが、これによると湾奥では、潮差が20%程度大きくなっている。倍振動は基本振動の数%程度であり、ほとんど正

弦波と考えて差支えないが、わずかながら湾奥に行くにつれてその値は増しており、形が歪んでくることがわかる。位相の遅れについては **Table 1** に示された原型の値に比べて小さいが、これは、模型では一周期分について分析したものであり、記録紙の 1 mm が位相差 $11^{\circ} 15'$ に相当することをあわせ考えると、この程度の差が現われるのはやむを得ない。

潮差の場所的变化は **Fig. 12** に示されているが、**Table 1** に見られた湾奥での増加の様相が模型でよく再現されており、潮汐に関しては相似であると考えてよい。

(2) 潮流槽円

Fig. 13 に示された St. B および St. D における潮流槽円は原型のものとよく一致していると言える。恒流については原型では B, D で東流であるにもかかわらず、模型では北流になっている。C では一致しているが A では模型が北流、原型が西流と不一致である。すなわち模型では、環流および分岐点の位置が、原型に比べて湾奥へ片寄っているように思われるが、原型における河川水の流入、あるいは観測時における風の効果などを考えるとこの程度の不一致はあり得ることである。

(3) 流況

全体的な流況としては、**Fig. 14** に示された模型における下げ潮および上げ潮最盛時の流速分布と、**Fig. 2** に示された原型のそれとを比較すると、流向、流速ともよく一致していることがわかる。大牟田地先付近の流況については、転流時前後に、三池北岸から大牟田西南数 km 沖にかけてできる反流の方向、大きさについて **Fig. 15** と **Fig. 4b** とを比較するとよく合っている。これは大牟田地先海域において、潮流槽円がよく合っていることと共に空間的にも流況がよく再現されることを意味する。

(4) 流跡

Fig. 16 に見られるようにこの地域の流動距離は、9~14 km の程度であり、湾奥にゆくにつれて短くなる。これは当然場所、潮差によって異なるが、現地における浮標追跡によって得られた値 (11 km) とは潮差の違いを考慮すればよく一致しているといえる。

Fig. 17 に示された恒流は、先の潮流槽円で得られた恒流とは異なった方法で表わされたものである。前者は Euler 的、後者は Lagrange 的なものである。通常は前者をさして恒流と呼んでいるが、後者もまた恒流を表わすことには相違ない。この図によると、やや湾奥で、反時計まわりの大きい流れが存在し、大牟田地先に小さい時計まわりの流れが見られる。このような流れ方は **Fig. 3** に示された原型の恒流と比較すると傾向はよく似ている。このような広い湾では恒流には河川からの流入水や、風などが大きな影響を与えられと考えられるが、模型ではこれらを取り入れておらず、一方、原型の資料として定量的に比較する資料がないため、恒流については、大体の傾向が再現されていると言うにとどめる。

以上のことから、潮位、潮流については、模型が原型をよく再現していると結論してよいと考えられる。

(5) 筑後川河口先の染料濃度分布

Fig. 18 から、河川流量 $70 \text{ m}^3/\text{sec}$, $35 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対するフラッシュ係数はそれぞれ 0.05, 0.03 程度であることがわかる。**Table 2** において、小流量 $D=40, 50, 65 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対するフラッシュ係数 F はそれぞれ 0.04, 0.03, 0.03 であり、また中程度の流量 $D=67, 70, 80 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対する F はそれぞれ 0.05, 0.08, 0.05 程度であるから、移流による輸送の強さと乱流拡散による輸送の強さの比を示す F がほぼ再現されているといえる。これから求めた模型の混合係数 B は 0.08~0.10 であるが **Table 2** の原型 (平均 0.08) と比べて、この種の値としては、かなりよく一致しており、従ってこれから求めた拡散係数 $A (=2B \text{ 且 } U_0)$ は、同程度に再現されているといえる。

(6) 拡散 (瞬間点源)

Fig. 19 に示された模型の染料域の面積の時間的変化は **Fig. 8** に示された原型のそれと比較するとわかるように、投入量は縮率を考慮してほぼ等しくしたにもかかわらず、模型の方の染料域は原型の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{2}{3}$ 倍になっている。減衰ははじめまでの時間はほぼ等しい。全体的に勾配は、模型の方が緩く拡散係数が小さいことを示している。この資料から原型と同様な手続きで拡散係数を求め、これを縦軸にとり、染料域の相当

半径を横軸にとって図示すると Fig. 23 のようになる。試みに $4/3$ の直線を引いてみたが、点の範囲が狭くてよくわからないけれども、もう少し勾配が急な方がよくあうように思われる。この図と原型に関する Fig. 9 とを比較すると、係数の値は、原型の約 $1/3$ 程度である。この違いは、模型ではこの位置における最大 R_0 数が 800 であり、乱れが十分発達していないためであろうと想像される。問題点は恐らくここに残され、適当な規模で適当な強さの乱れを如何にして起こすかにかかっていると云えよう。特殊な底面粗度、格子、振動子などによる攪乱の方法及びこの際の乱流機構については、さらに研究をする必要がある。

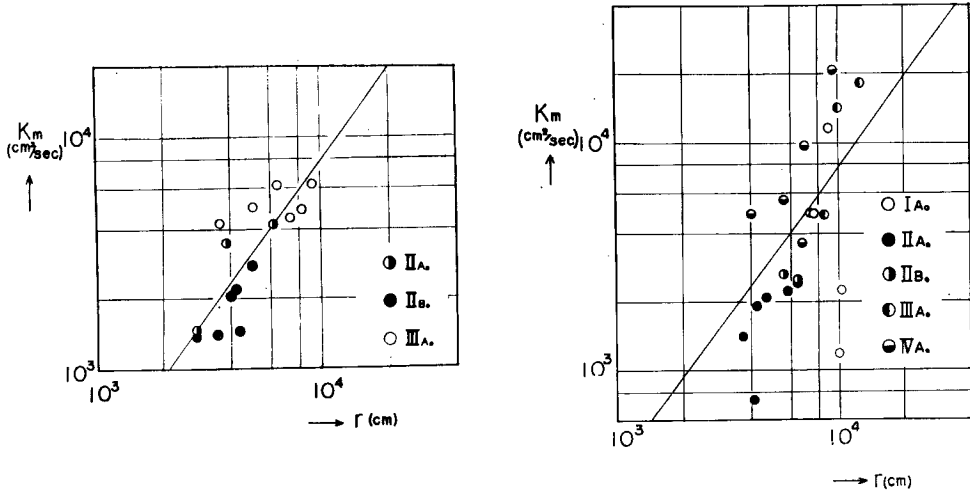


Fig. 23 Relation between the diffusion coefficient K_m and the equivalent radius r of dye patch in existing stage

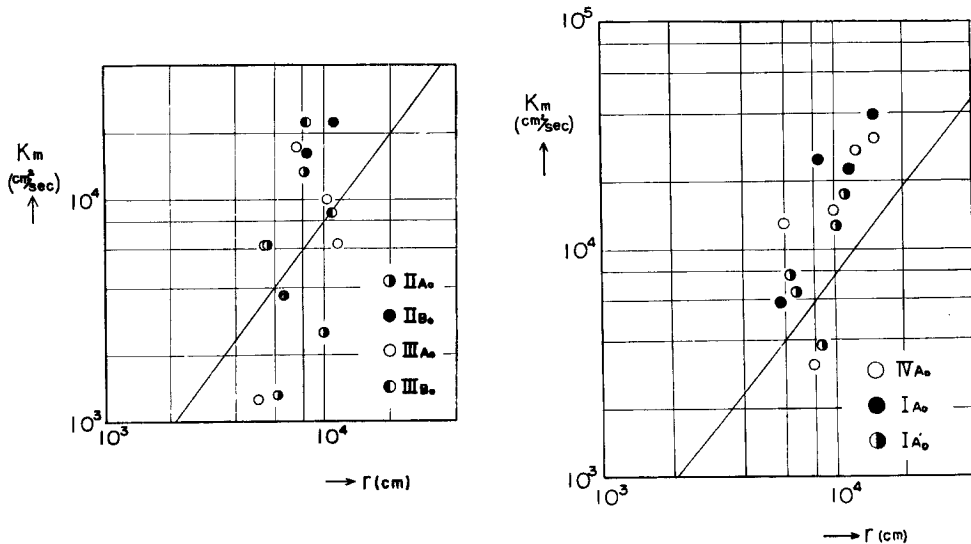


Fig. 24 Relation between the diffusion coefficient K_m and the equivalent radius r of dye patch in future stage

埋立後の模型については、染料の投入量を一滴にして同様の実験を行っている。染料域の面積の時間的変化を比べてみるとほぼ等しいが、この場合の拡散係数を示す Fig. 24 と Fig. 23 とを比べてみると、埋立後の模型では、拡散係数の値が少しばらついているが、埋立前よりも少し大きいようである。また埋立後の模型で、IV, I 象限のものは全般に大きい、これは上げ潮衰微時に、投入点の付近に小さな時計まわりの反流が出来、新しい地形の影響をうけて、この海域が以前より強く攪乱されるようになるためであろう。

(7) 拡散 (連続点源)

現地の定量的な資料がないので量的な比較は困難だが、染料の分布、停滞様式はかなりよく再現されているようである。模型において見る限り、下げ潮衰微時には三池北岸の反時計まわりの反流に乗って、多量の染料水が西流し始め、低潮転流時には、沖へ 5~6 km 細長く羽毛状に突出す。その後、上げ潮の流れに乗り、筑後川河口から大牟田川河口北岸にわたって帯状の前線を形成して拡がる。これらの時期における染料の輸送量は一周期の全輸送量の大半を占めるが、この輸送は、三池北岸の下げ潮反流、及び上げ潮時の発散流によって大勢が決まるようである。さらにこの染料域は、満潮時前後に地形の影響を大きく受けて拡散し、下げ潮時には、50 km² 以上の雲状の染料域となって三池港沖まで南下する。一方、下げ潮最盛時には、三池北岸に沿って南流するが染料の量は少ない。この潮時に三池港突堤先を南下する染料域の拡散・稀釈は突堤先における流れの収束・発散によって加速されている。これから考えて、浅くて広い湾における拡散混合を扱う場合、現象の規模によっては、地形の影響による流速場の収束・発散を検討することも重要であると思われる。

埋立後の模型では、上げ潮衰微時に右回りの反流が河口と三池港北部埋立地の間に生ずる。この反流はこの時期に西方に突き出している帯状の染料域の河口近くの2, 3割を南側へ取り込みながら時計まわりに回転し、しかも埋立前と違って、埋立地の為に南下が遅れるので、この地域は濃度がかなり高くなる。逆に、埋立前大牟田川河口北部海岸沿いに北上していた染料域の侵入がなくなるので、大牟田北岸海域の濃度は若干低くなるようである。

8. あとがき

以上著者らは水平縮尺 1/2000, 鉛直縮尺 1/200 の模型を使って有明海大牟田地先における拡散現象に関する実験を行ない、つぎのことが明らかになった。ただし、ここでは半日周潮のみを対象とし、密度・波浪・風などの影響は考慮していない。

- (1) 潮汐に関しては、湾奥における潮差の増加なども含めてよく再現されている。
- (2) 大牟田地先距岸約 4 km の地点における潮流楕円はよく再現されている。
- (3) 対象海域の流況はよく再現されている。
- (4) 潮流による水粒子の流動距離は、ほぼ再現されている。
- (5) 恒流については、定量的な原型の資料が少ないため比較しにくい、大体の傾向は、再現されているようである。
- (6) 筑後川の河川水の海中への拡散から求めた拡散係数は原型の値とほぼ一致している。
- (7) 大牟田地先における、100 m 程度の染料域の拡がりから求めた拡散係数は、原型とは一致せず、模型の値は原型の約 1/3 程度である。

このように潮汐ないしは潮流自体はかなりよく再現されており、平均的な流れそのものに関しては満足すべき結果が得られた。また、公害の対象となるような海水の汚染には、潮流による水粒子の移動距離程度の規模の大きい現象が大きな役割を果たすと考えられるが、このような現象については現地の状態をよく再現できるようである。この意味において、こうした排水拡散の問題に関して、水理模型実験はかなり有用であるといえる。

しかしながら、100 m 程度の小規模の拡散現象については、模型では拡散係数が小さくなりすぎる傾向があり、十分満足すべき結果とは言い難い。このような拡散係数の不一致は原型と模型との間の乱流構造の違い

いに起因すると思われるので、両者においてこれを詳細に調べ、拡散現象との関連を研究すると同時に、実験的にこれを解決する方法を開発しなければならない。

なお、ここでは省略したが、将来は密度その他の影響をも考慮して行きたい。

最後に、この研究を遂行するにあたって、終始適切な御指導を賜った速水頌一郎教授・岩垣雄一教授、および有益なる御対論を頂いた国司秀明教授、ならびに実験に協力して頂いた北川吉男・多河英雄の両氏に深甚なる謝意を表する次第である。なお、この研究は一部通商産業省の委託によって行なったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 農林省熊本農地事務局・長崎海洋气象台：有明海域総合開発計画模型実験報告書—有明海の潮汐に関して—、昭34.4, pp.1—67.
- 2) 戸原義男：長崎干拓計画における潮止流速および地区内水位の推定，九州大学農学部干拓工学教室業績第82号，Nov.1961, pp.1—32.
- 3) 高田雄之・戸原義男：有明海の水理模型実験について（1），第10回海岸工学講演会講演集，昭38.10, pp.70—74.
- 4) 同上（2）昭38.10, pp.75—79.
- 5) 星野通平：三池港（島原海湾北部）付近の海底地形と底質について，海上保安庁水路部測量課，昭29.9, pp.1—8.
- 6) 海上保安庁水路部：島原海湾の海底地形，底質分布および潮流，海上保安庁水路部調査報告，昭34.8, pp.1—42.
- 7) 福岡県有明水産試験場：福岡県有明水産試験場事業報告書 昭35年度，昭37.3.
- 8) 同上 昭37年度報告書
- 9) 大牟田有明地区新産業都市建設促進協議会：大牟田有明新産業都市建設計画にともなう有明海のり養殖業への影響予測調査，昭39.2, pp.1—27.
- 10) 日本港湾コンサルタント：三池港港湾計画書（自然条件調査編）昭39.5, pp.1—57.
- 11) 第7管区海上保安本部水路部：三池港潮流図（春秋大潮期の平均流況），昭30.1.
- 12) 長崎海洋气象台：沿岸埋立に伴う廃水拡散に関する研究に伴う海象観測，昭40.10.
- 13) 中野猿人：潮汐学，古今書院，昭15.12, p.481.
- 14) 気象庁：昭41年潮位表，昭40.11, p.438.
- 15) Arons, A. B. and Stommel, H. : A Mixing Length Theory of Tidal Flushing, Trans. A.G.U. Vol.32, No.3, June 1951, pp.419—521.
- 16) 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，東海区水産研究所研究報告，第22号，昭33.12, pp.1—15.
- 17) 樋口明生：沿岸潮流の水理実験について，沿岸海洋研究ノート第2号，1963, pp.14—17.
- 18) 岩垣雄一：開水路水流の理論，水工学の最近の進歩，土木学会，昭28.3, p.16.