

潮流による拡散の水理模型実験について (V)

樋口 明生・柳 哲雄・柏井 誠

ON THE HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE DIFFUSION DUE TO THE TIDAL CURRENT (V)

By Haruo HIGUCHI, Tetsuo YANAGI and Makoto KASHIWAI

Synopsis

The diffusion phenomena due to the tidal current are studied in a hydraulic model experiment, for which the Mikawa Bay area is used as the prototype. The effect of density, wind and waves are not considered.

A model of the Mikawa Bay, with horizontal and vertical scales of 1/2000 and 1/160 respectively was constructed and a semidiurnal tide was provided for it.

The diffusion of dyed water discharged from continuous point sources was investigated by concentration analysis.

The diffusivity calculated from the distribution of the dye concentration in the model, is about $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in the Mikawa Bay.

1. ま え が き

環境汚染は激化の一途をたどり、今や東京湾・伊勢湾・瀬戸内海は瀕死の状態にある。

この過程で水理模型実験の果たしてきた役割は防災＝災害の防止という意味では必ずしも十分であったとはいえない。

濃度規制から総量規制へとようやく政治が動き始めた現在、沿岸海洋の汚染を防止し、魚の安心して住める海を取り戻すといった立場から水理模型実験の役割を見直す時期でもあると思われる。

たとえば“拡散”，というコトバは社会的には、汚染物質を海に入れても薄まるから大丈夫なのだ，という事の裏付けのように使われてきた。しかしこれは大きな誤りである。沿岸においては，時・空間スケールにもよるが，投入された汚染物質は流れに乗ってそのまま運ばれると考えた方が妥当な場合が多い。今後は単に拡散係数を求めるといった“拡散”，の研究（それが誤解をうんだのだ）から，そのような現実に基づいた研究へと進んでいくべきであろう。

今回，三河湾の水理模型実験を行う機会を得，そのような観点から研究に取り組んだ。

未だ十分な結果は得られていないが現在までに得られた結果について報告する。

2. 原 型

三河湾は Fig. 1 に示すように知多・渥美両半島に囲まれ伊勢湾南部に開口している。伊良湖水道を通じて太平洋から入って来る潮浪は，湾口部から知多湾及び渥美湾に進入する。この海域の潮汐常数は Table 1 に示すようである。これによるとこの海域では半日周潮が卓越している事がわかる。各地点における大潮差 $2(M_2+S_2)$ ，平均潮差 $2M_2$ ，及び小潮差 $2(M_2-S_2)$ は Fig. 2 のようである。これによると大潮差は太平洋岸の赤羽根では 1.3m であるが湾奥の三河港では 1.9m となり，外海側より約 50% 大きい。小潮差は赤羽根で 0.46m 三河港では 0.66m である。 M_2 分潮の位相差は 12 度（24 分）である。

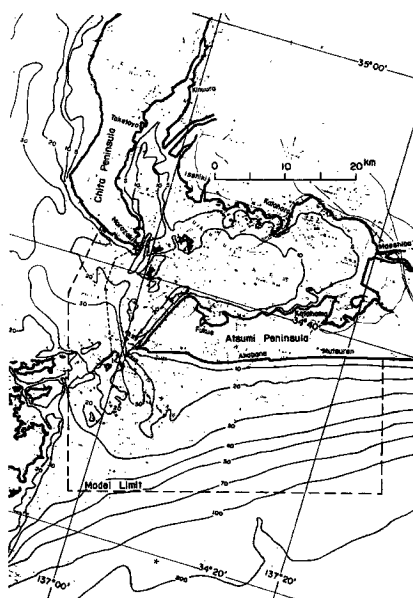
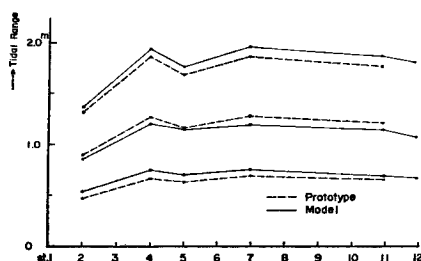


Fig. 1 Bathymorphic chart of the Mikawa bay.

Table 1 Tidal constants in the prototype.

Constituent Station	K ₁		O ₁		M ₂		S ₂	
	H (m)	K (°)	H (m)	K (°)	H (m)	K (°)	H (m)	K (°)
Katahama	0.246	191.9	0.183	167.4	0.634	176.2	0.304	207.1
Akabane	0.224	185.8	0.164	162.0	0.443	168.6	0.211	192.5
Maeshiba	0.224	190.2	0.153	174.7	0.579	188.8	0.264	213.1
Taketoyo	0.238	186.4	0.178	165.2	0.609	177.2	0.283	204.8
Miya	0.240	183.6	0.178	166.0	0.640	177.4	0.296	203.2
Gamagouri	0.260	185.3	0.190	166.9	0.620	177.3	0.280	204.7
Mikawako	0.232	194.0	0.181	165.0	0.635	180.6	0.303	205.9
Toba	0.226	189.1	0.174	167.1	0.534	177.8	0.245	205.1

Fig. 2 Tidal range $2(M_2 + S_2)$, $2M_2$, $2(M_2 - S_2)$ in the prototype and the model.

この海域における流れは主として潮汐によって支配されている。片浜における満潮前3時頃に上げ潮最強流が現われ、満潮後3時頃に下げ潮最強流が現われる。現地の資料⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾から集積した大潮上げ潮最盛時の流況を Fig. 3 (a) に、下げ潮最盛時のそれを Fig. 3 (b) に示す。

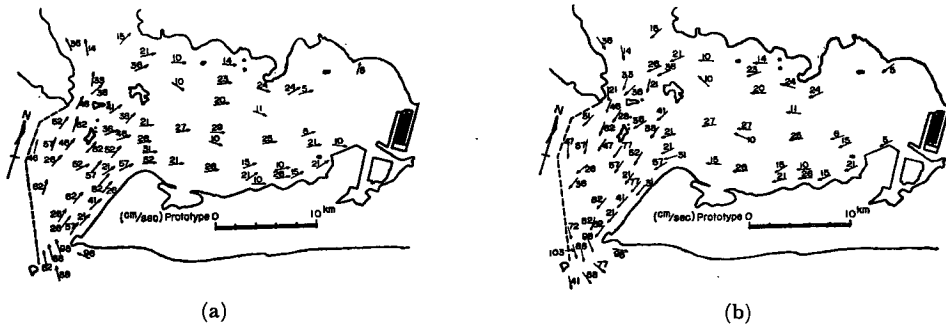


Fig. 3 Flow pattern in the flood (a) and in the ebb (b) [prototype].

3. 相 似 性

潮流は水平方向に卓越しており、圧力は静水圧分布をなすとしてよいから、海面から海底まで平均した流れについて考えればよい。流れが重力と粘性力によって規定されている時、海面から海底まで平均した流速成分 U, V に関する運動方程式は

$$\frac{\partial U}{\partial t} + sU \frac{\partial U}{\partial x} + sV \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{C}{2h} U^2 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + sU \frac{\partial V}{\partial x} + sV \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{C}{2h} V^2 \quad (3.2)$$

で与えられる。ここに t は時間、 x と y は水平方向の距離、 ζ は水面昇降量、 h は水深、 C は摩擦係数、 g は重力加速度、 s は流速の鉛直分布に関係する 1 に近い係数である。

現象が相似であるためには、原型に関するこれらの式と模型に関するこれらの式の、対応する各項の比が等しくなければならないから、原型に関する量と、模型に関する量との比を添字 r で表わせば、(3.1), (3.2) 式より次式が得られる。

$$\frac{U_r}{t_r} = s_r \frac{U_r^2}{x_r} = s_r \frac{U_r V_r}{y_r} = \frac{\zeta_r}{x_r} = C_r \frac{U_r^2}{h_r} \quad (3.3)$$

今、 $s_r = 1$, $x_r = y_r$, $U_r = V_r$, $\zeta_r = h_r$ とすると、(3.2) 式から

$$t_r = \frac{x_r}{h_r^{1/2}} \quad (3.4)$$

$$C_r = \frac{h_r}{x_r} \quad (3.5)$$

となる。(3.4) 式は重力の効果に関して Froude 数を一致させる事に相当し、時間縮尺と空間縮尺との関係を与える。(3.5) 式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粗度係数 n を用いると、

$$C = \frac{2gn^2}{h^{1/3}} \quad (3.6)$$

で表わされるから、(3.5) 式から次のように書ける。

$$n_r = \frac{h_r^{2/3}}{x_r^{1/2}} \quad (3.7)$$

渦動粘性係数が単位時間、単位質量当りのエネルギー逸散率 ε の1/3乗と、長さのスケール L の4/3乗に比例する事を考えれば、渦動拡散係数を次的に見て x_r^3/t_r に比例させるためにも、乱れの Reynolds 数を一致させるためにも、 $\varepsilon_r=1$ としなければならない。ところで、 τ を摩擦応力とすれば、

$$\varepsilon = \frac{\tau \cdot U}{h} = \frac{CU^3}{2h} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

で表わされるから

$$\varepsilon_r = \frac{C_r U_r^3}{h_r} = \frac{U_r^3}{x_r^3} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

となる。(3.4)、(3.7)および(3.9)式より、

$$t_r = h_r = x_r^{2/3} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

$$n_r = x_r^{-1/18} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

が得られる。

いま、模型でも乱れが発達するかどうかを調べるために、三河湾の代表的な地点における最大流速を用いた Reynolds 数について検討しておく。原型では、水深 15m、最大流速 25cm/sec であるから、代表長として水深をとった Reynolds 数（鉛直 Reynolds 数）と、最大流動距離をとった Reynolds 数（水平 Reynolds 数）は、それぞれ 3.8×10^6 および 8.6×10^8 となる。水平縮尺 $x_r=2,000$ とするとこれらに対応する模型内の Reynolds 数は、それぞれ 1.9×10^8 および 2.9×10^4 となる。したがって、模型でも乱れが発達すると考えてよいであろう。

さてここでは、対象とする海域の広さ、水粒子の移動範囲と実験施設の大きさとを考慮して、水平縮尺として $1/x_r=1/2,000$ を採用した。原型と模型の諸元を **Table 2** に示す。

Table 2 Hydraulic factors in the prototype and the model.

	Scale	Prototype	Model
Distance	1/2,000	20 km	10 m
Water depth	1/160	12 m	7.5 cm
Tidal range	1/160	1.9 m	1.19 cm
Tidal period	1/160	12 h 25 m	4 m 40 sec
Current velocity	1/12.5	50 cm/sec	4.0 cm/sec
Discharge	$1/4 \times 10^6$	$4 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($\doteq 35 \text{ 万 m}^3/\text{day}$)	$1.0 \text{ cm}^3/\text{sec}$
Diffusion coefficient	$1/2.5 \times 10^4$	$10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$	$0.4 \text{ cm}^2/\text{sec}$

4. 実験施設

実験は前回と同様に宇治川水理実験所の海洋河口実験施設で行なった。

模型一般図を **Fig. 4** に示す。図中⊗印の 1~12 は水位計測点である。模型の水槽部の広さは 30m × 20m で最大水深は 30cm である。

模型の一部を **Photo. 1** に示す。

5. 実験経過

原型の海底摩擦係数がわからないので、これまでの経験に基づき模型の海底はモルタル刷毛仕上げとした。実験当初、湾内の潮差が原型のそれとかなり相違して表われたので、伊良潮水道の流跡図¹⁾をもとに **Fig. 4**

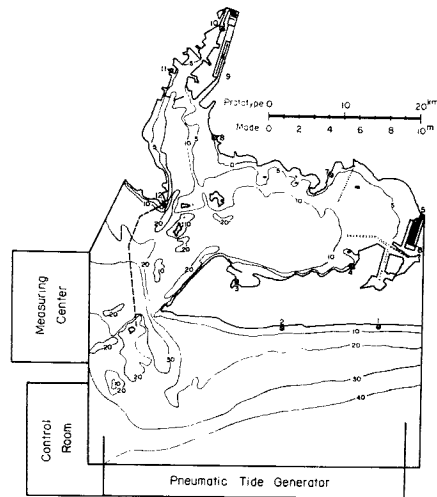


Fig. 4 Model of the Mikawa bay.

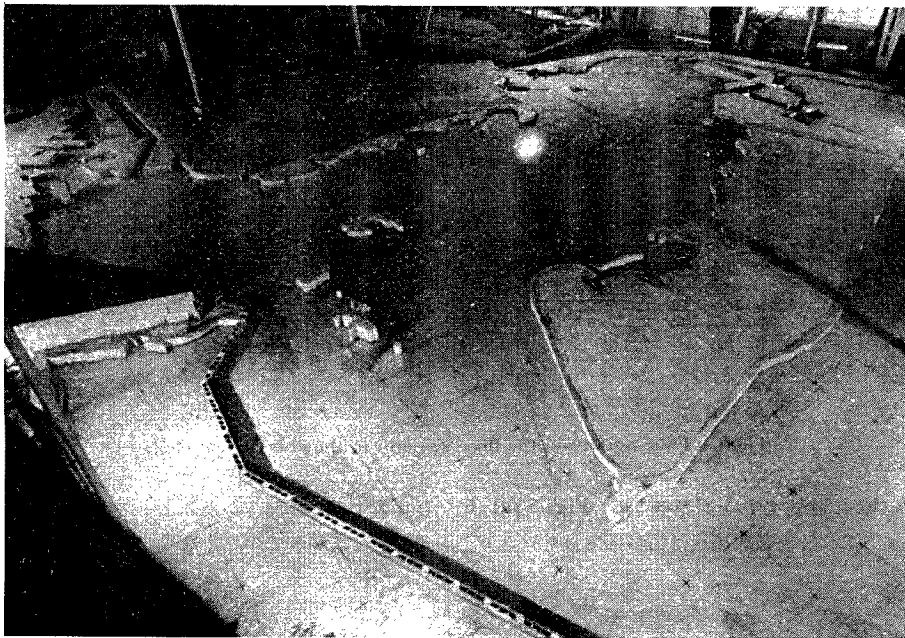


Photo. 1 Model of the Mikawa bay.

図中に破線で示したような人工的な境界を設け、潮差を一致させた。

潮汐に関しては大潮、平均潮、小潮に相当する水位変動を与え各地点の振幅を調べた。つぎに浮子を1/24周期毎に写真撮影し、潮流流速の水平分布、流跡等を調べた。

潮汐および流況の再現性を確認した後、連続点源染料域の拡散実験を行なった。染料水は75ppmのウラン溶液を用い、小さいヘッドタンクを持つ投入槽の中で暖める事により、密度を模型水槽の水と等しくするようにしながら、一定の割合で連続的に投入した。採水は内径6mmのガラス管を用い、全水深にわたっ

て行なった。濃度測定は蛍光光度計(ターナー社製111型)を用いた。この計器はウラン溶液 5ppb~10ppmの間では直線性が保たれている。

6. 実験結果・考察

(1) 潮 汐

湾内各点における水位記録の一例を Fig. 5 に示す。このような水位記録から潮差を読みとり、測点別にプロットすると Fig. 2 のようになる。図中実線は模型における潮差、破線は原型におけるそれを示している。この図から模型内では潮汐がよく再現されているといえる。測点5の前芝の潮差はやや小さくなっているが、これは河川内にあるためと思われる。この点を除けば湾内の潮差はほぼ一様で、外海より50%程度大きくなっている。

(2) 流況・流跡

片浜における潮差が1.95mの場合の上げ潮最盛時の流況を Fig. 6 (a) に、下げ潮最盛時のそれを

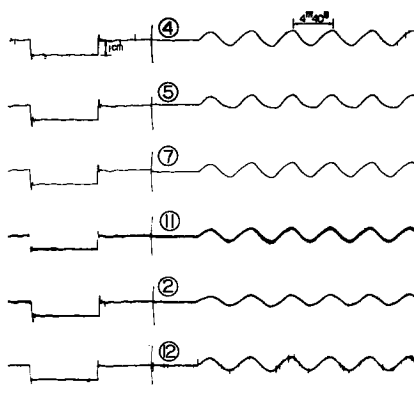


Fig. 5 Record of sea level in the model of the Mikawa bay.

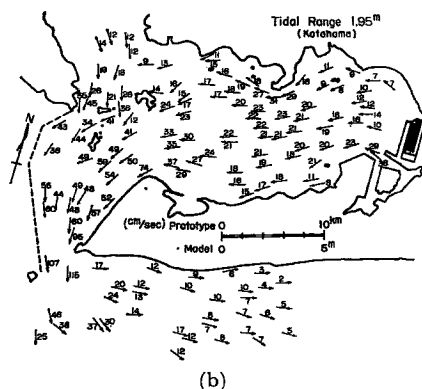
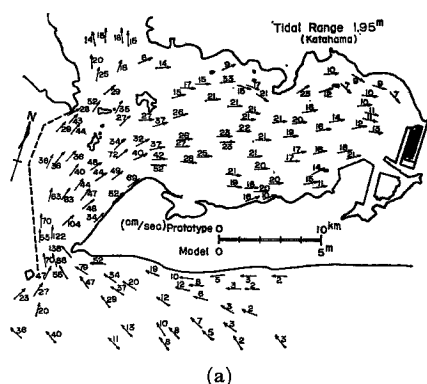


Fig. 6 Flow pattern in the flood (a) and in the ebb (b) [model].

Fig. 6 (b) に示す。これを原型のもの [Fig. 3 (a) (b)] と比較すると流況もかなりよく再現されている事がわかる。図によると最大流速は湾口部で最も大きく、湾奥にいくにつれて小さくなっている。この模様をも

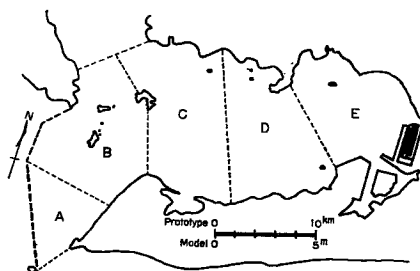


Fig. 7 Sections of the Mikawa bay.

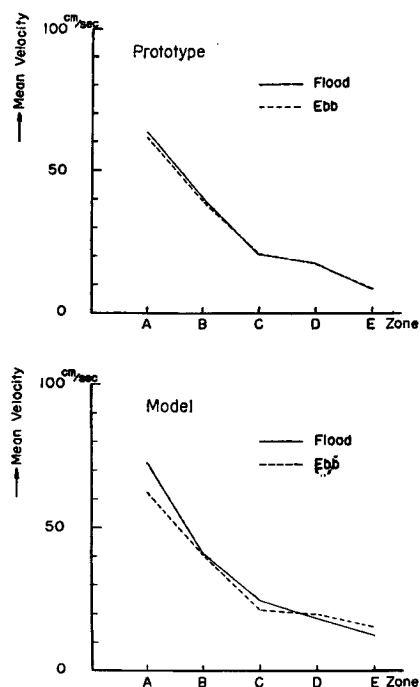


Fig. 8 Mean velocity of the each section.

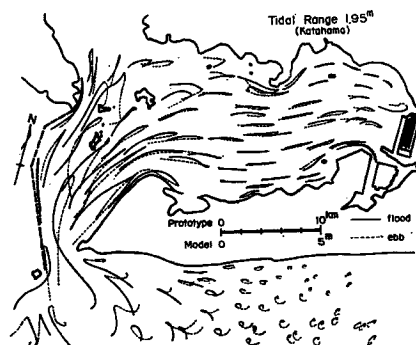


Fig. 9 Tidal locus (model).

う少しわかりやすくするために、海域を Fig. 7 に示すような A~E の 5 つの海区に分け、各海区における平均最大流速を求めてみた。結果は Fig. 8 のようになる。

測点の位置が模型と原型では同一でないで、厳密な議論はできないが、各海区の平均流速は E 海区を除いてきわめてよく一致している。E 海区は原型に関する沖合の資料が少なく、流速の小さい岸寄りの値を平均したため、原型の流速が小さくなりすぎているものと考えられる。

浮標が一周期の間に移動した流跡を Fig. 9 に示す。湾中部以東では流跡が短くなっている。これは前述した流速の減少と対応している。

(3) 恒流

前述した流跡図をみると、ほとんどの場所で流跡は閉じていない。このような tidal residue はいわゆる恒流（潮流観測値の 25 時間にわたる平均値）をつくる。恒流の研究は未だ十分に行なわれておらず、その実体はよくつかめていないが、一般に恒流は潮流の地形の影響による偏流と河川水の流入によるものが主なものと考えられている⁴⁾。

模型で得られた恒流（河川水の流入は考慮されていない。）を Fig. 10 に示す。これは Lagrange 法で測定したものを Euler 法で表現したものであるから、各ベクトルはその起点を中心として潮流楕円の主軸方向に 1/2 tidal excursion の範囲の平均値と考えられる。

原型の恒流図を Fig. 11 に示す。Fig. 10 と Fig. 11 を比較してみると一致点もあるが相違点もある。今後河川水流入のある場合、小潮の場合等の実験を行なって、さらに検討していく予定である。

(4) 連続点源拡散実験

実験は模型に大潮を与え、Fig. 12 に示される A 点から $0.69\text{cm}^3/\text{sec}$ の割合で 75ppm のウラン溶液を連続投入し、代表測点 (7, 11, 21, 27) で 5 周期毎に、満潮時と干潮時に採水し、濃度の時間的な変化を調べた。80 周期、100 周期目には各測点で、上げ潮時、満潮時、下げ潮時、干潮時に同時採水を行ない、濃度の水平分布を調べた。

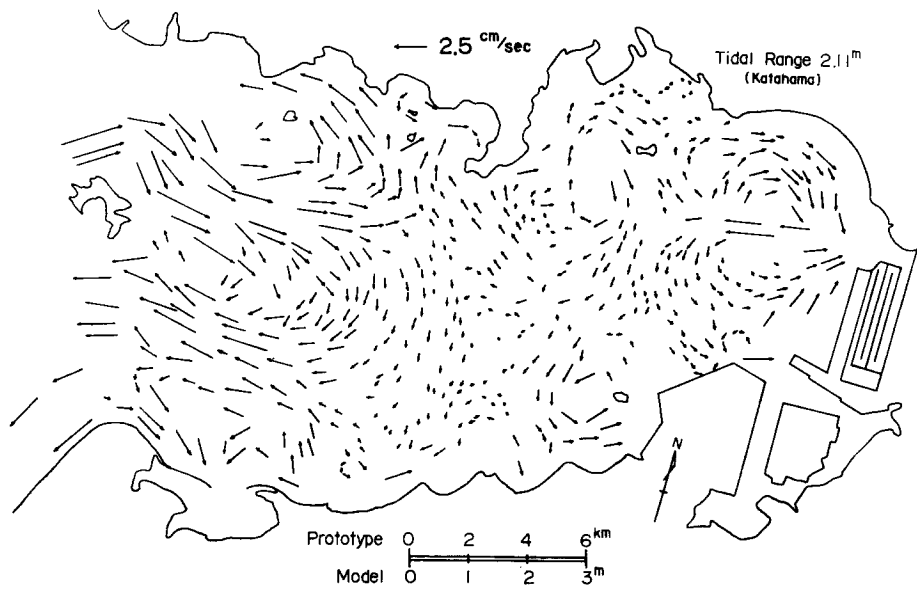


Fig. 10 Constant flow (model).

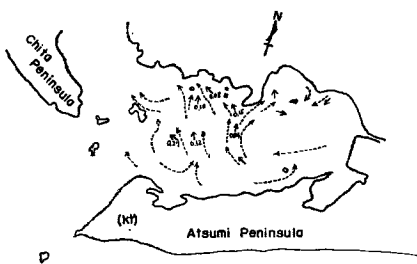


Fig. 11 Constant flow (prototype).

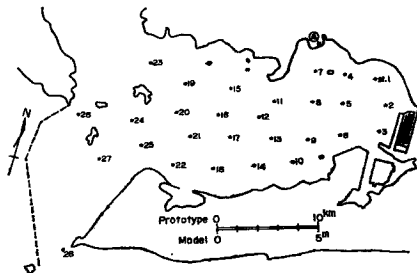


Fig. 12 Stations of discharging and sampling.

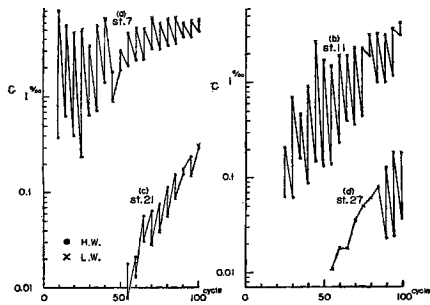


Fig. 13 Time change of dye concentration.

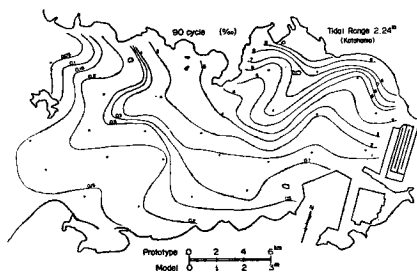


Fig. 14 Horizontal distribution of dye concentration.

濃度の時間的变化を Fig. 13 に示す。図の横軸は半日潮の一周期を単位とする時間、縦軸は投入原液との千分率(‰)で表わした濃度である。

これをみると、投入点に近いほど濃度の立ち上がりが速く、早く定常に近くなり、投入点から遠いほど立ち上がりが遅く、定常になりにくい事がわかる。

80周期と100周期の値を平均して得られた90周期目の濃度の水平分布を Fig. 14 に示す。これをみると濃度の拡がりの模様は Fig. 11 で示した恒流図とよく対応している事がわかる。

a) 1次元考察

Fig. 15 に示すように投入点 A を原点とし、湾口までの一次元座標を考えて、図に示したような各ブロックで濃度を平均すると Fig. 16 のようになる。

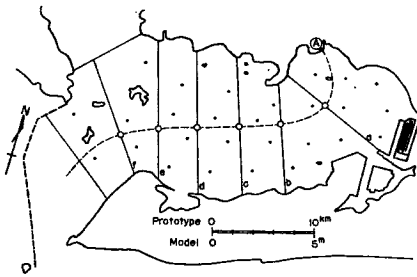


Fig. 15 Section used for averaging.

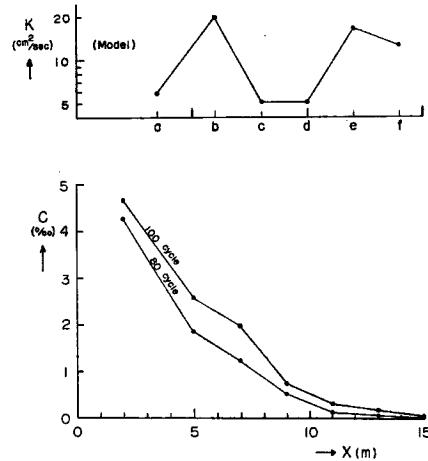


Fig. 16 Sectional mean concentration of dye and diffusivity.

このような濃度勾配を与える拡散係数を1次元拡散方程式の差分近似によって求めてみた。

1次元拡散方程式は次のように書ける。

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + Q \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot K \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

ここに A は断面積, C は染料濃度, Q は染料投入量, K は拡散係数である。

(4.1)式を差分近似すると

$$K = \frac{A \cdot \Delta x \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} + Q \cdot \Delta C}{A \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x}} \quad \dots \dots \dots (6.2)$$

となる。

このようにして求めた拡散係数を Fig. 16 に示した。各海区の K を平均して, $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を三河湾の拡散係数と考えてもよいであろう。このような大きさ (order) の拡散係数が得られた mechanism については tidal residual circulation の shear effect 等が考えられるが詳しくは今後検討していきたい。

b) 2次元考察

1次元的な考察においては恒流による染料輸送も潮流の往復運動による染料輸送もすべて拡散項に含めて

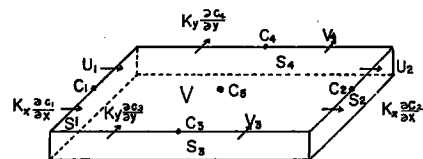


Fig. 17 Box model.

考えた。今度は 2 次的に湾内に Fig. 17 のような box を考え、恒流による染料輸送を移流項として考え、潮流の往復運動による染料輸送を拡散項として考えて、拡散係数を算出してみた。

Fig. 17 において box の大きさは潮流槽円の主軸方向に 4km, その直角方向に 1.5km とした。C は染料濃度, u は潮流槽円の主軸方向の恒流流速, v はその直角方向の恒流流速, S は断面積, V は box の体積, K_x は潮流槽円の主軸方向の拡散係数, K_y はその直角方向の拡散係数である。

染料の収支は次式で与えられる

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \cdot (u C) + V \cdot (K \nabla C) \dots\dots\dots (6.3)$$

実際には次式を使って計算する。

$$V \frac{\Delta C_s}{\Delta t} = S_1 u_1 C_1 - S_2 u_2 C_2 + S_3 v_3 C_3 - S_4 v_4 C_4 \\ + S_1 K_x \frac{\Delta C_1}{\Delta x} - S_2 K_x \frac{\Delta C_2}{\Delta x} + S_3 K_y \frac{\Delta C_3}{\Delta y} - S_4 K_y \frac{\Delta C_4}{\Delta y} \dots\dots\dots (6.4)$$

ひとつの box について未知数は K_x, K_y の 2 つがある。そこで隣りあう box では K_x, K_y はそれぞれ等しいと仮定して解いた。

その結果、湾の中央部 (測点 13 附近, tidal excursion 3km, 最大流速 20cm/sec, 水深 13m) で, $K_x = 4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $K_y = 1.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ という値が得られた。

計算上の技術的な問題が大きくて、この値自体の信頼性は高くないが order としては妥当なように思われる。

この order は前項の 1 次元の計算で求めた拡散係数と比較すると、1 桁ほど小さくなっている。この事は三河湾のスケールでの染料の拡がりにはほぼ恒流によって決められており、潮汐混合による拡散の効果は大きくない事を示している。

7. あ と が き

以上著者らは水平縮率 1/2,000, 鉛直縮率 1/160 の模型を使って、三河湾海域における拡散現象に関する実験を行ない、現在までに次の事が明らかになった。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・潮流はほぼ再現された。
- (2) 水平的な染料の拡がりの pattern は tidal residual circulation に支配されている。
- (3) 連続点源染料域の水平分布から求めた三河湾の平均的な拡散係数は $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度である。
- (4) tidal excursion 3km, 最大流速 20cm, 水深 13m の場所で潮流の往復運動による拡散係数として潮流槽円の主軸方向に $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ その直角方向に $1.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値が得られた。

前報⁵⁾ までは主として tidal excursion 以下、比較的短時間スケール (10 潮汐周期以下) の拡散現象に関して研究を行ってきた。

今回、tidal excursion 以上、 10^8 潮汐周期の拡散現象には恒流が支配的である事を明らかにし、それと潮汐混合の関連を調べてみた。

今後、沿岸において、ある場所から投入された物質が海域のどの地点でどの位の濃度になるか、少なくとも 2 次的にかんがりの精度で知る事ができるように、研究を進めていきたいと考えている。

最後にこの研究を進めるにあたって、実験並びに資料の整理に協力していただいた北川吉男技官、および中国工業技術試験所の星加章氏に謝意を表する次第である。

なおこの研究は一部愛知県委託によって行なったものである事を付記する。

参 考 文 献

- 1) 小野弘平：伊良湖水道及び附近の潮流，昭 22.
- 2) 第 4 管区水路部：昭和 27 年夏季における渥美湾並びに伊勢湾の海象潮流観測報告，昭 27.
- 3) 第 4 管区海上保安本部水路部：三河湾潮流観測報告，昭 36.5.
- 4) 山田紀男：東京湾の潮流，水路要報 91 号，昭 46.
- 5) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の数理模型実験について (I) (II) (III) (IV)，京都大学防災研究所年報，第 10～13 号 B，昭 42～45.