

潮流による拡散の水理模型実験について (Ⅲ)

樋口 明生・杉本 隆成

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

By Haruo HIGUCHI and Takashige SUGIMOTO

Synopsis

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

A model of a part of Seto Inland Sea including Mizushima Harbor, 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 both instantaneous and continuous point sources was investigated by photographic method. The diffusion phenomena with scale of 100 to 1000 m were well reproduced.

1. ま え が き

近年、産業経済の発展に伴ない、各地に臨海工業地帯が造成されつつあるが、計画を合理的に進めるためには、種々の廃水の流動・拡散機構などについて現況をよく調査するとともに、計画完成後の状態を事前に把握して、公害を起こす可能性のある場合には、これを未然に防ぐ対策が必要である。

こうした事前調査の手段として水理模型実験が考えられる。過去2年間、有明海大牟田地区、茨木県鹿島地区を対象として、その適用性の研究を行なった結果、有用な結果を得た^{1),2)}。

今回対象としている瀬戸内海の水島地先海域は、比較的潮流が大きく、水深は10m前後で海水は上下によく混合している所である。したがって有明海の場合とよく似た例であるが、多島海であるという点で異なっている。

現状の模型における、潮流および拡散現象の再現性について、実験結果を述べる。

2. 原 型

瀬戸内海は、Fig. 1に示すように、紀伊、豊後両水道によって外海に通じており、両水道から入ってくる潮流は、だいたい燐灘東部付近で相会する³⁾。備讃瀬戸から燐灘に至る主な地点の潮汐常数は、Table 1に示すようである^{3),4)}が、これによると半日周潮が卓越していることがわかる。各地点の大潮差 $2(M_2+S_2)$ と、 M_2 潮の位相をFig. 2に示す。これによると潮差は東経133°30'笠岡付近にゆくにつれて次第に大きくなっている。水島港での大潮差は2.7m、小潮差は1.3mである。位相は宇野と水島の間で約5°(10分)遅れるが、着目している海域である水島灘では、位相差は小さい。

この海域の流れは、主として潮汐によって支配されている。水島灘の半日周潮流の位相は、備讃瀬戸東部に比べて1時間ほど進んでおり、水島港の干潮前1時頃より、満潮前1時頃まで西流し(上げ潮)、干潮後

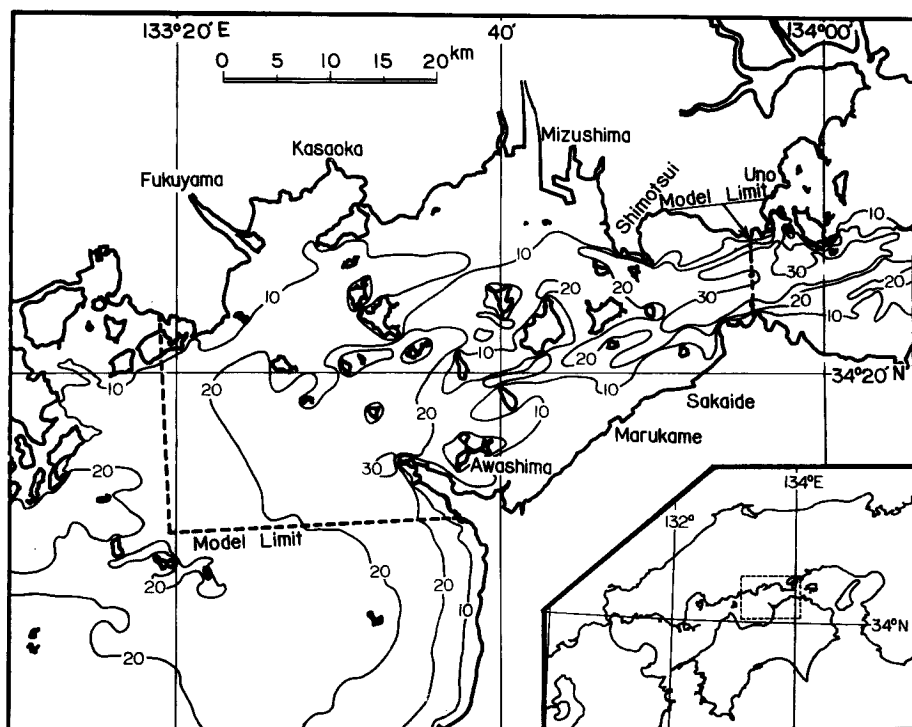


Fig. 1 Bathymetric chart of the central part of Seto Inland Sea.

Table 1 Tidal constant in the prototype

Constituent Station	M_2		S_2		K_1		O_1	
	H (cm)	k (°)	H (cm)	k (°)	H (cm)	k (°)	H (cm)	k (°)
Uno	67	323	21	348	31	231	23	207
Nabeshima	89	333	31	5	34	239	24	211
Shimotsui	88	329	32	359	33	239	22	214
Mizushima	99	328	35	359	33	236	23	210
Awashima	108	333	41	9	33	240	24	216
Tomotsu	108	327	42	6	36	236	25	208

2時頃に西流最盛となる。また、東流（下げ潮）は満潮後2時頃に最盛となる⁵⁾。大潮時における下げ潮、上げ潮最盛時の流速分布をそれぞれ、Fig. 3 (a), (b) に示す⁶⁾。

水島港付近における浮標追跡の結果を Fig. 4 に示す。流れは場所によって異なるが 10 km 程度である。水島港付近の数地点 (Fig. 6 の St. A, B など) において 20 kg のウラニンを投入して、染料域の拡がりを、空中から15分毎に撮影した。染料域の可視面積の時間的変化から、拡散係数 K を $K = \Delta S / 4\pi \Delta t^{1/2}$ により求めた。ここに ΔS は Δt 時間の間に増加した面積である。これを、現象の規模を表わす指標として相当直径（染料域と同面積の円の直径）を横軸にとって Fig. 5 に示す。拡散係数の大きさは、相当直径が 100 m のとき $4 \sim 8 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。この際、St. B の染料域は、風で少し引き伸ばされているので、この効果を除けば、値はもう少し小さくなるであろう。図中の直線は、比例係数が 0.023、勾配 4/3 の

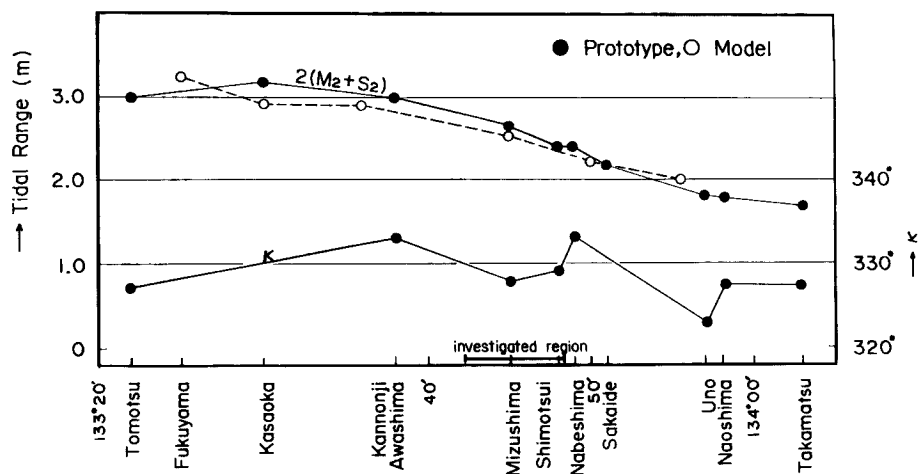


Fig. 2 Tidal range, $2(M_2+S_2)$, and phase angle of M_2 constituent in the prototype and the model.

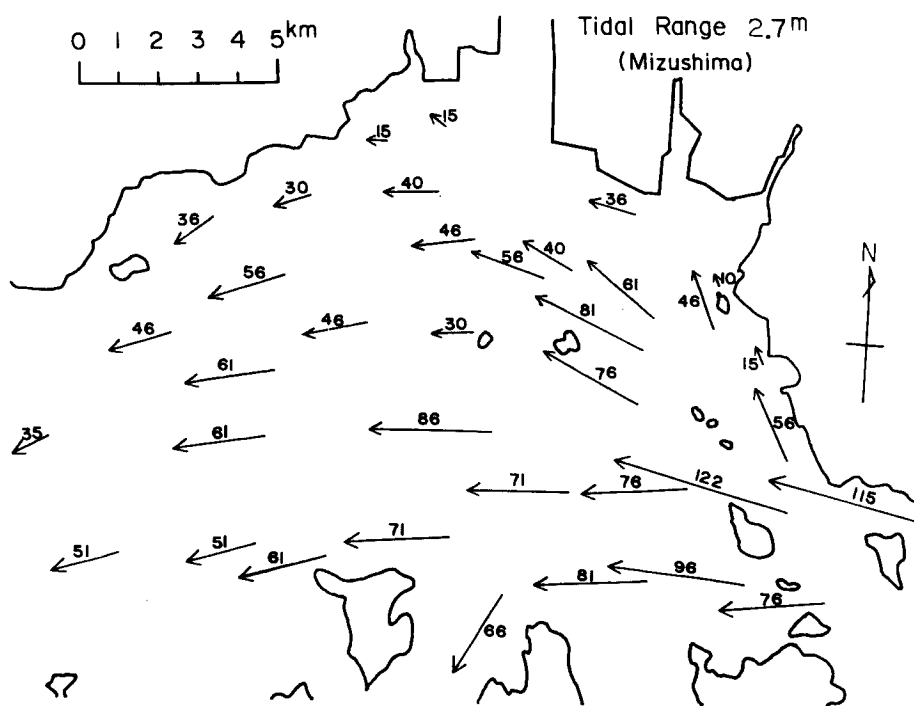


Fig. 3 (a) Flow pattern in the ebb, numeral means velocity in cm/sec (prototype).

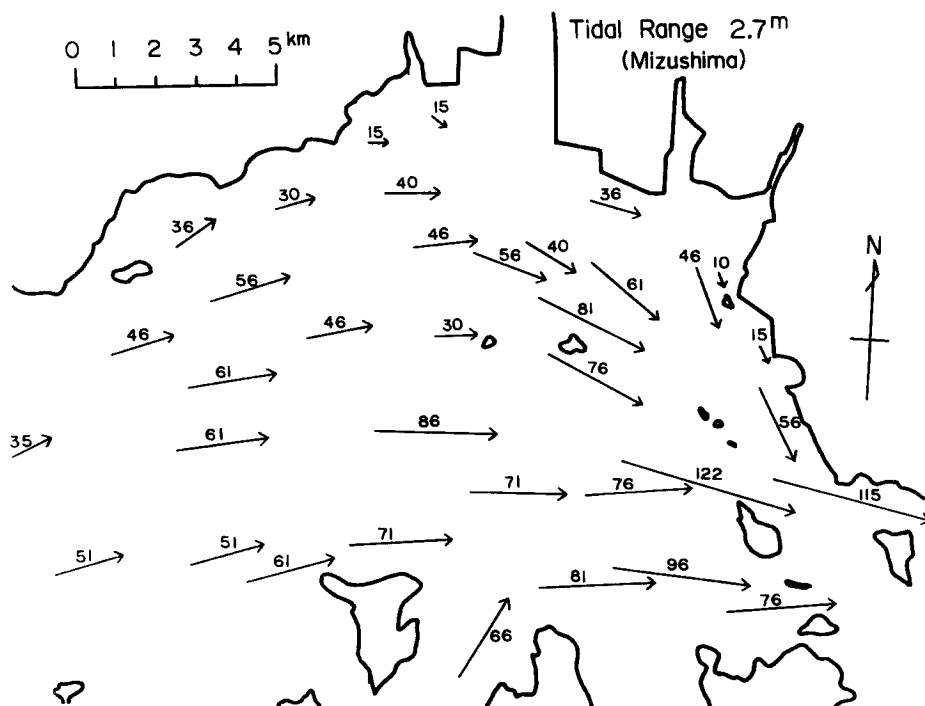


Fig. 3 (b) Flow pattern in the flood, numeral means velocity in cm/sec (prototype).

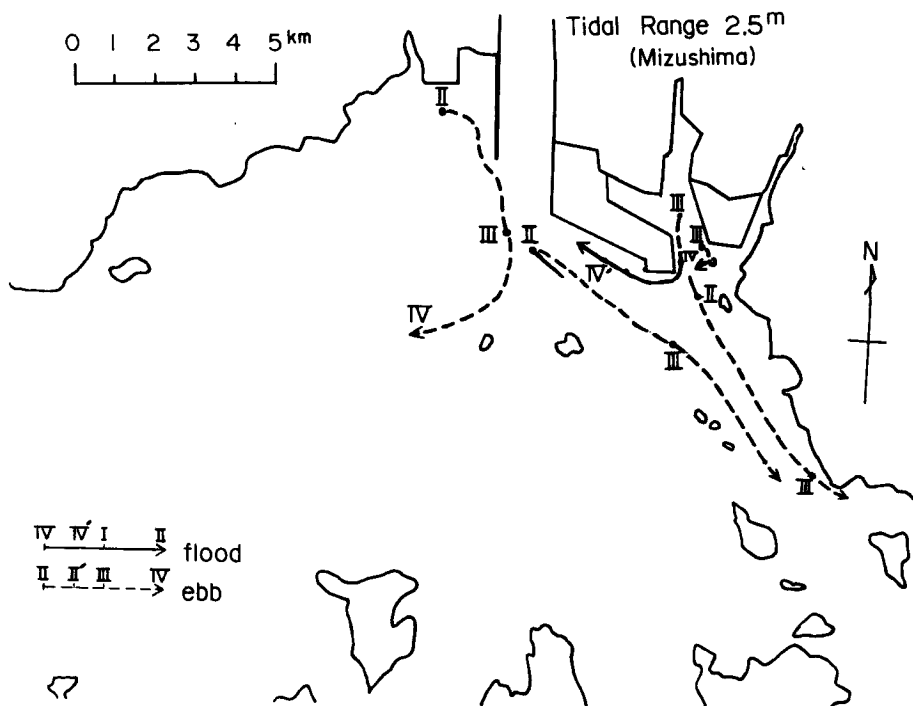


Fig. 4 Tidal locus (prototype).

直線である。

なお、港外の海域では、上下層の混合が著しいので、流れや拡散に対する、成層の効果の影響は大きくないと思われる。

水島地先の海底地質は、表層は砂または粘土まじりの砂層である。対岸の丸亀地先の海域では、砂または礫である^{5),7)}。

瀬戸内海は、中国、四国両山地に囲まれているために、冬期以外は風は弱く風浪は小さい。冬期には 8 m/sec 程度の偏西風が卓越する⁹⁾。

3. 相 似 性

問題にしている対象は産業廃水の水島港内外における拡がり方、および稀釈度分布である。港内に放出された密度の小さな水は、港内においては 2 層流の上層を形成し、下層水との鉛直混合で稀釈されながら港外に流出するものと思われる。港外においては速い流れと海岸・海底地形、海底摩擦に伴う渦動のために、上下によく混合し、水平渦動拡散あるいは shear diffusion による水平拡散が支配的になるものと考えられる。これらの諸過程のすべてを矛盾なく再現することは難しいので、本実験ではとくに港外における水平拡散現象に主眼をおくことにする。

水平と鉛直の縮率の異なる、いわゆる歪んだ Froude の模型で、染料や産業廃水の拡散現象が再現されるという確かな理論的保証のされていない現段階で、島の後にできる wake やその周辺の乱れについても原型との相似性を保ちつつ再現できるということについてはかなり疑問がある。しかし、ここでは、模型内の分子 Reynolds 数が十分大きい場合、Froude 数をあわせれば、乱れや、乱れの Reynolds 数、剥離条件等が大雑把には再現できるものと仮定する。

Froude 数および海底摩擦の効果をあわせるという条件から導かれる、時間、空間、マンニングの粗度係数の各縮率間の関係は、前年報²⁾に述べた通り、

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

$$n_r = h_r^{3/2} / x_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

で与えられる。ここに x は水平方向の長さ、 h は鉛直方向の長さ、 t は時間、 n はマンニングの粗度係数であり、添字 r は原型と模型との比を表わす。

鉛直に平均した、単位質量、単位時間あたりの乱れのエネルギー逸散率は次式で与えられる。

$$\varepsilon = \tau \cdot U / h = C U^3 / 2h \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

したがって、その縮率は次のようになる。

$$\varepsilon_r = U_r^3 x_r^{-1} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ただし、 τ は摩擦応力、 U は平均流速、 h は水深、 C は海底摩擦係数である。水平渦動拡散係数として $K = \varepsilon^{1/3} L^{4/3}$ が適用できるものとする、その縮率は (3.4) 式より、次式で与えられる。

$$K_r = \varepsilon_r^{1/3} L_r^{4/3} = U_r L_r = x_r^2 t_r^{-1} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

いま、 $\varepsilon_r = 1$ とするためには (3.4) 式より

$$U_r = x_r^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

が必要となる。(3.1)、(3.2) および (3.6) 式より、

$$t_r = h_r = x_r^{2/3} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$$n_r = x_r^{-1/18} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

が得られる。

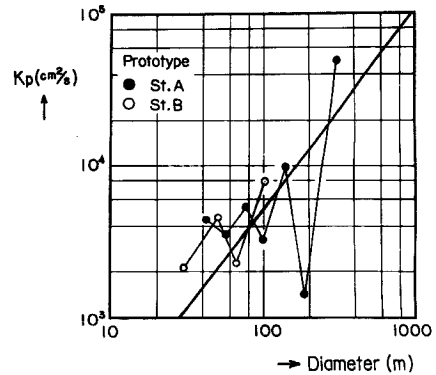


Fig. 5 Relation between diffusion coefficient K_p and equivalent diameter of dye patch (prototype).

Table 2 Hydraulic factors in the prototype and the model

factors	Scale	Prototype	Model
Distance	1/2000	20 km	10 m
Water depth	1/160	12 m	7.5 cm
Tidal range	1/160	2.7 m	1.69 cm
Tidal period	1/160	12 h 25 m	4 m 40 sec
Current velocity	1/12.5	100 cm/sec	8.0 cm/sec
Discharge	$1/4 \times 10^6$	4 m ³ /sec	1.0 cm ³ /sec
Diffusion coefficient	$1/2.5 \times 10^4$	10 ⁴ cm ² /sec	0.4 cm ² /sec

いま、模型でも乱れが発達するかどうかを調べるために、水島地先の代表的な地点での最大流速を用いて検討しておく。原型では、水深 10 m、最大流速 70 cm/sec であるから、代表的長さに水深をとった場合、および最大流動距離をとった場合の Reynolds 数はそれぞれ 7×10^8 、 7×10^9 である。これに対応する模型の Reynolds 数は、 3.5×10^3 、 2.8×10^5 である。したがって、港内を除く地先海域においては、模型でも乱れが十分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を考慮して、水平縮尺として $1/x_r = 1/2000$ を採用した。原型、模型の諸元を Table 2 に示す。

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. 6 に示す。

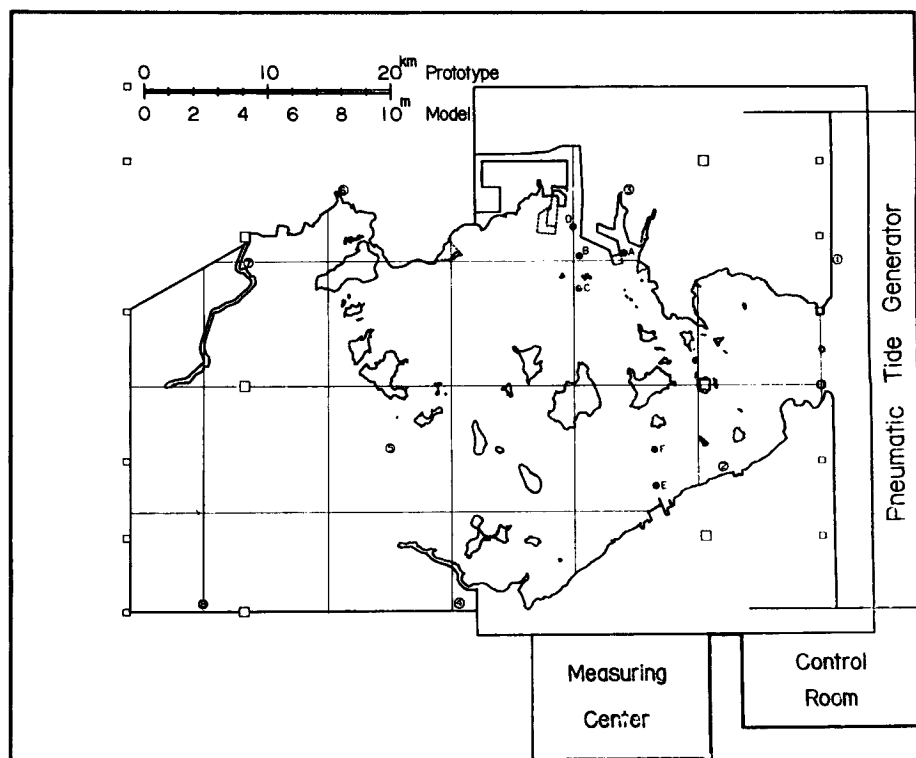


Fig. 6 Model of a part of Seto Inland Sea including Mizushima Harbor.

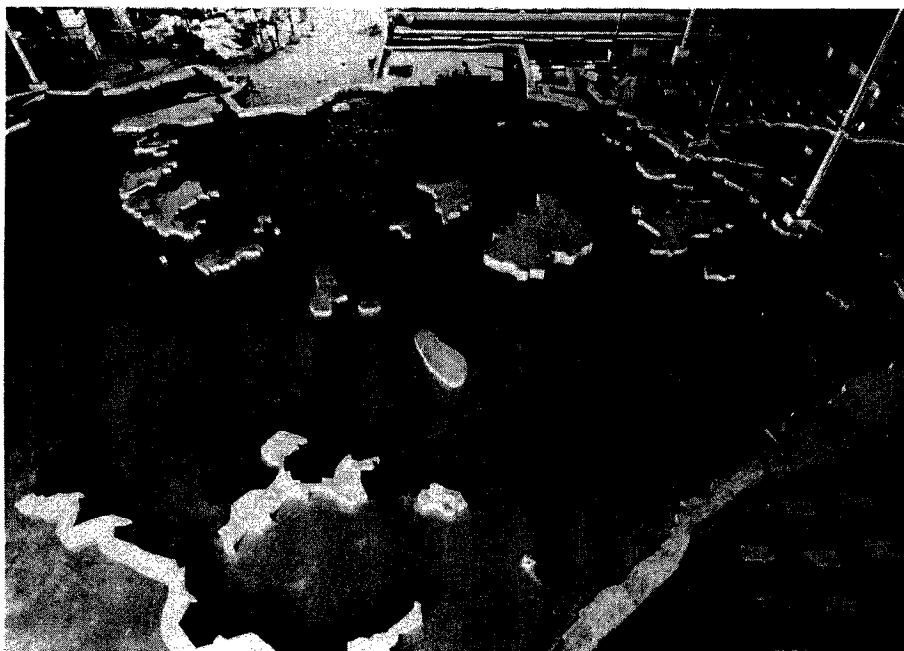


Photo. 1 Model of a part of Seto Inland Sea including Mizushima Harbor.

図中 ①～⑧ は水位計測点である。模型の水槽部の広さは $30\text{ m} \times 20\text{ m}$ で、最大水深は 30 cm である。模型の一部を Photo. 1 に示す。

5. 実験経過

実験施設の都合上、原型と同じように、2つの水道から潮汐を与えて、着目する海域付近で重ね合わせることはできないので、つぎのように考えた。すなわち、両水道から入ってくる潮汐の出会いと思われる海域に境界を考え、東から入って来た潮汐をここで反射させることによって、Fig. 2 に示されるような潮汐の位相、および振幅の変化を対象海域内で再現することが可能であるとした。

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とした。

前述の境界の位置、および底面粗度の値は、流速分布や乱れの発達に影響を与えるから、水島灘の流速、潮汐の振幅、乱れなどが再現されるように、試行錯誤によって調整することにした。

実験当初、模型内に、水槽の固有振動に相当する静振が現われたので、これを取り除くために、福山、三崎間に、平均水面から 1 cm 以深を板でしきった結果、静振を十分小さくすることができた。

潮汐に関しては、大潮差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、(1)瞬間点源染料域の拡散、(2)連続点源染料域の拡散、および(3)港内の放流点から連続的に出される染料の拡散に関する実験を行なった。前の2者については写真撮影を行ない、その結果を解析した。現地の拡散実験では主として経済的な理由で多量の染料を投入することは難しいので、瞬間点源型の実験だけが行なわれることが多いが、模型では、瞬間点源染料域の拡散実験と連続点源の場合とを併用し、これを比較した。港内の連続点源からの拡散実験については、写真撮影による解析のほかに、採水して比色により濃度分布を調べた。

6. 実験結果

(1) 潮 汐

得られた水位記録の一例を **Photo. 2** に示す。これを調和分析して求めた潮差を **Fig. 2** 中に白丸と破線で示した。

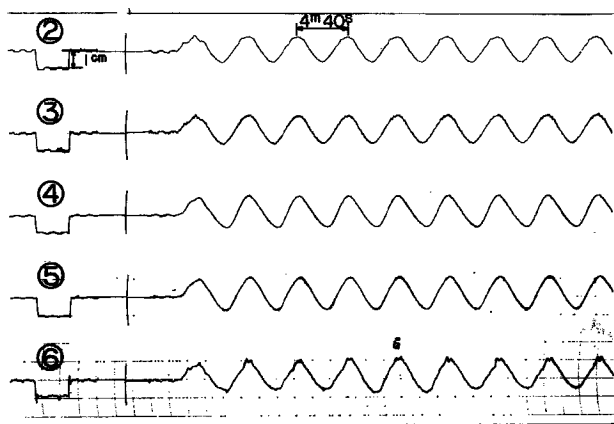


Photo. 2 Record of sea level in the model.

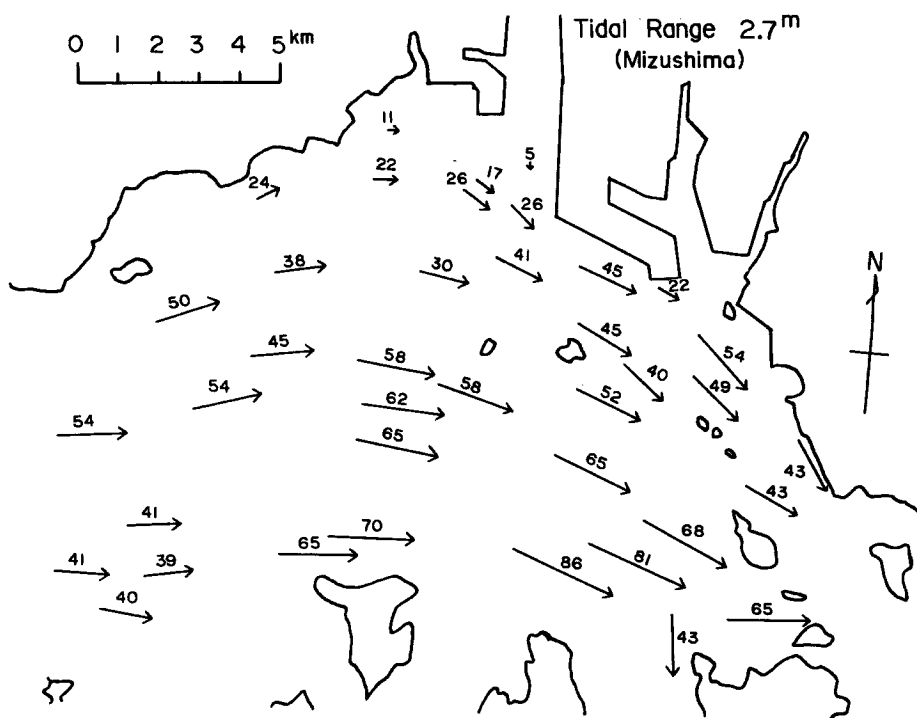


Fig. 7 (a) Flow pattern in the ebb numeral means velocity in cm/sec (model).

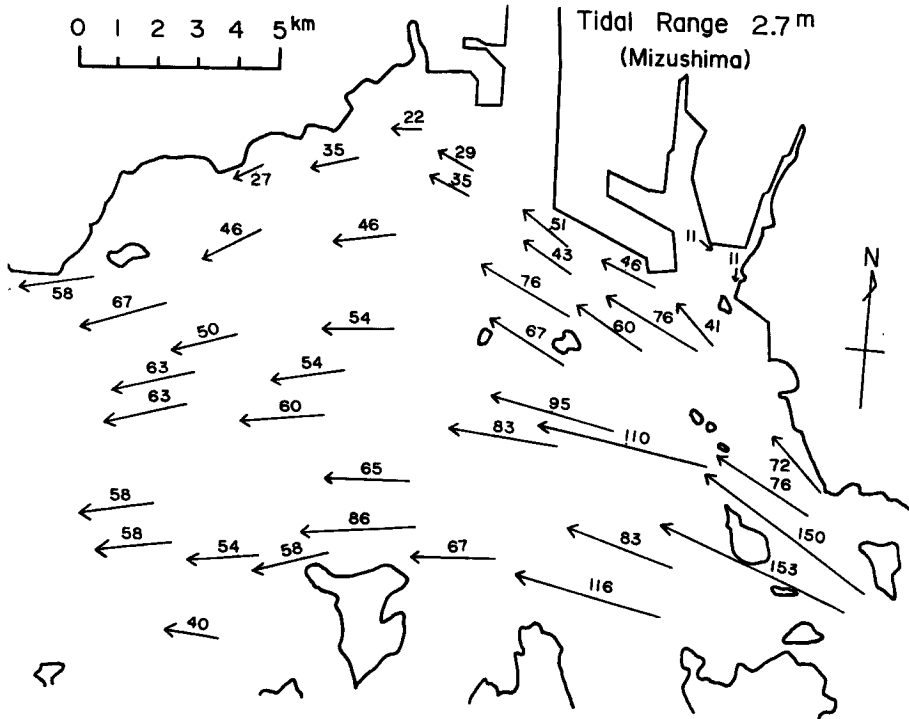


Fig. 7 (b) Flow pattern in the flood, numeral means velocity in cm/sec (model).

(2) 流況・流跡

下げ潮および上げ潮最盛時の流速分布を Fig. 7 (a) および (b) に示す。浮標が一潮時の間に移動した流跡を Fig. 8 に示す。

(3) 瞬間点源染料域の拡散

瞬間点源染料域の面積の時間的变化から求めた拡散係数を原型の値に換算して、相当直径を横軸にとって示すと Fig. 9 および 10 のようである。Fig. 9 は水島地先の B, C 点に関するものであり、Fig. 10 は丸亀地先の E, F 点に関するものである。拡散係数 K は次式によって求めた。

$$K = \frac{\Delta S}{4\pi \Delta t} = \frac{\Delta d^2}{16\Delta t} \dots\dots\dots (6.1)$$

ここに ΔS は Δt 時間の間の染料域の面積の変化、 d は染料域を円と見なしたときの直径である。

(4) 連続点源染料域の拡散

港外において染料を連続的に放流した場合に、その染料の帯の幅から求めた拡散係数を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。Fig. 11 は Fig. 9 と同じ地点（水島地先 St. B, C）に関するものであり、Fig. 12 は Fig. 10 と同じ地点（丸亀地先, St. E, F）に関するものである。この拡散係数は、濃度分布の函数である σ と可視範囲の拡がり幅 W との間に $W = 4\sigma$ という関係が成り立つものとして⁸⁾ 拡散係数を次式により求めたものである。

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} = \frac{\Delta W^2}{32\Delta x} U \dots\dots\dots (6.2)$$

ここに Δx は Δt 時間に流下する距離、 U は平均流速である。ここで考えている幅 W は、染料の帯の蛇行範囲を覆う包絡線に関するものではなく、ある瞬間における染料の帯の幅である。

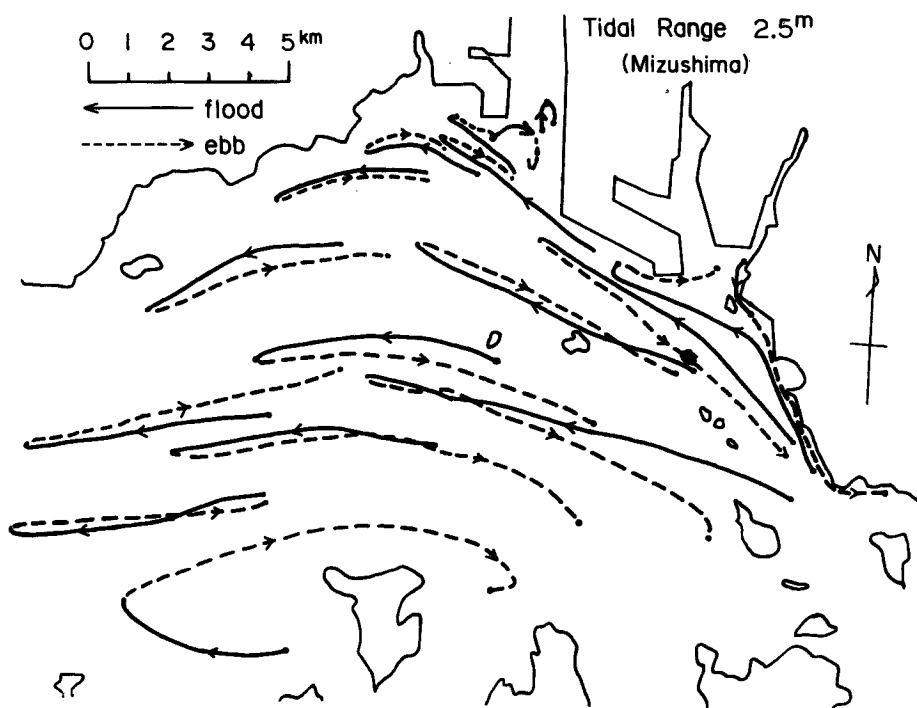
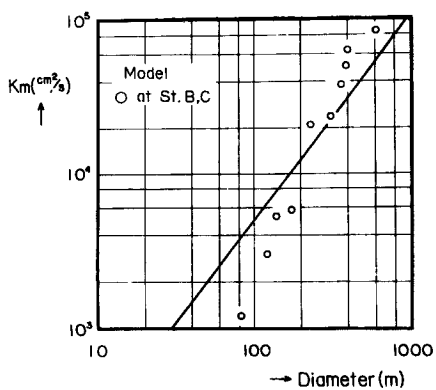
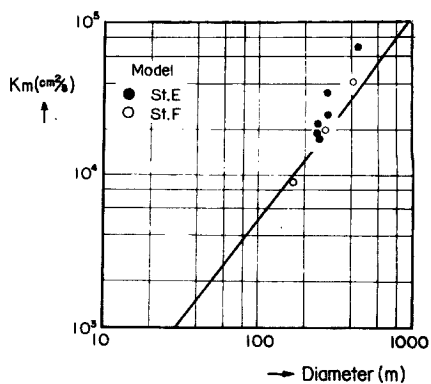


Fig. 8 Tidal locus (model).

Fig. 9 Relation between diffusion coefficient K_m and equivalent diameter of dye patch (model).Fig. 10 Relation between diffusion coefficient K_m and equivalent diameter of dye patch (model).

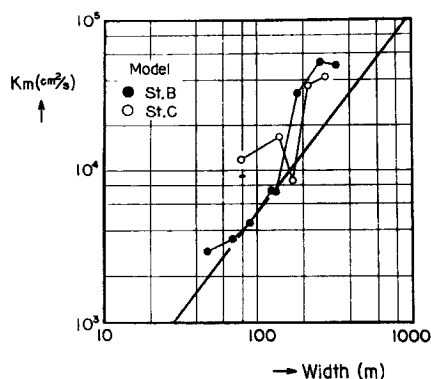


Fig. 11 Relation between diffusion coefficient K_m and width of dye plume (model).

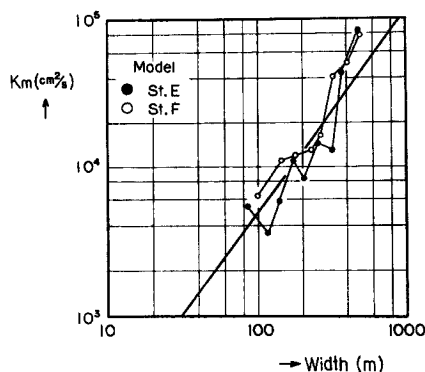


Fig. 12 Relation between diffusion coefficient K_m and width of dye plume (model).

7. 考 察

(1) 潮 汐

Photo. 2 によると ⑥ に多少副振動が見られる以外は、水位はほぼ正弦的に変化している。⑥ は袋状の湾の奥に存在するため、このような振動が卓越するのであろう。

Fig. 2 に白丸で示されているように、潮差の分布はかなりよく再現されているといえる。しかし、細かく見ると、西に向って潮差の増加する割合が模型の方が多少小さいが、これは模型の底面粗度が多少大きすぎるためかも知れない。

(2) 流況・流跡

全体的な流況としては、Fig. 7 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. 3 に示された原型のそれとを比較すると、流向はよく一致している。流速もほぼ一致しているが模型の方が多少小さいように思われる。このことは前項に述べた底面粗度に関する見方の妥当性を裏づけているように思えるが、これを確かめるためには底面粗度を変えて実験を行なう必要がある。

流跡については、Fig. 8 と Fig. 4 とを比較すると、原型において高梁川右岸よりで南流している浮標を除けば、流れ方はほぼ一致しているように思える。この原型の浮標の動きは高梁川の河川水の影響によると考えられるが、模型では河川水を流さなかったから、この差が出るのは当然である。しかし、原型の浮標の流下時間が半潮時に及ばないことを考慮すると、この場合にも多少模型の方が流跡が短かいと見るべきかも知れない。

(3) 瞬間点源の拡散

Fig. 9 と Fig. 5 とを比較すると、相当直径 200 m 程度で原型と模型との間で拡散係数がほぼ一致するが、模型ではそれ以下の直径に関しては拡散係数は小さ目になり、それ以上では大き目になる。勾配は 4/3 よりむしろ 2 に近い。Fig. 10 でも同様な傾向が見られる。この傾向は、前回の実験²⁾でも見られたが、模型の歪あるいは乱れの発達や構造の違いに関係するのかも知れないがよくわからない。これは今後研究すべき問題である。しかしながら、拡散係数そのものの性質上、大雑把には現象がほぼ再現されていると考えて差支えないであろう。

(4) 連続点源染料域の拡散

連続点源染料域の拡散現象については、染料の帯の幅(または拡がりの角度)が原型と模型とで一致しておれば、再現性が満たされたことになるが、これに対する原型の資料がないので直接比較することはできない。

同一地点における瞬間点源と連続点源に関する結果を比較すると、St. B, C に関する Fig. 9 と Fig. 11

とを対比すると、同一規模に対して連続の場合 (Fig. 11) の方が多少拡散係数が大きい、Fig. 10 と Fig. 12 との対比では、とくにそのような傾向は見られない。この理由については、局地的な条件の違いによるものではないかと想像されるが、これについてもさらに調べてみる必要がある。

8. あとがき

以上、著者らは水平縮率 1/2000、鉛直縮率 1/160 の模型を使って瀬戸内海水島地先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、潮流はほぼ再現された。

(2) 瞬間点源染料域面積の時間的な変化から求めた拡散係数は、100 m~1000 m の規模の現象に関してほぼ再現された。しかし、その内部機構については、今後検討が必要である。

(3) 模型で連続点源染料域の拡がり幅 W の増加率から $W=4\sigma$ として求めた拡散係数は、上の瞬間点源から求めたものとはほぼ一致する。

ここでは、前述のような現状地形における流動・拡散機構を、比較的小さな現象 (100~1000 m) について再現性を確めた。港内に連続的に放流される染料の拡散については目下資料を整理中である。なお将来地形における拡散については現在実験中である。

これまで、有明、鹿島、水島の3地区を対象にして、主として染料域の水平的な拡がりを写真撮影により調べてきた。その結果、底面粗度を考慮しただけの Froude の模型でも、水平縮率が1/2000程度の場合に、100~1000 m の規模の染料の拡散現象がかなりよく再現できることがわかった。また、それ以下の規模の場合には、原型よりも小さい拡散係数を与える結果になることも明らかにされた。

しかしながら、拡散現象を支配する流れの微細構造に関しては、原型においても観測例は少なく、模型においてはその例がない。相似性を明確にするためには、こうした流れの微細構造を知ることは必須であり、このために現在測器を開発中であるが、その完成によって、理論的な裏付けとともに実験的に相似則を明らかにしたいと考えている。

これまで取り扱ってきたのは、主として半日周潮であるが、拡散現象を考える場合には空間的規模とともに時間的規模についても十分配慮する必要がある、現実の問題を考える場合には、一般に恒流といわれているような流れも重要な役割を演ずるであろうことを忘れてはならない。

最後に、この研究をするにあたって、実験ならびに資料の整理に協力して頂いた北川吉男技官および川崎博一補佐員に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) 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、京都大学防災研究所年報第10号 B, 昭42. 3, pp. 343—363.
- 2) 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 (Ⅱ)、京都大学防災研究所年報第11号 B, 昭43. 3, pp. 447—461.
- 3) 神戸海洋気象台：瀬戸内海の気象と海象、神戸海洋気象台彙報第177号, 昭42. 2, pp. 227—240.
- 4) 中野猿人：潮汐学、古今書院, 昭15. 12, p. 481.
- 5) 岡山県水島港湾局：水島港概要, 昭41. 3, p. 6.
- 6) 第六管区海上保安本部：水島港付近の潮流, 昭35. 5, pp. 1—16.
- 7) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：備讃瀬戸航路調査 (潮流調査・底質調査) 昭38. 3, p. 38.
- 8) 南部特一：海岸汚染に関する諸問題、海岸工学の最近の進歩, 昭36. 3, p. 60.