

潮流拡散実験における模型歪の影響に関する考察

村上仁士*・細井由彦**・渡辺健也***

1. 緒 言

潮流拡散実験には、水平縮尺と鉛直縮尺が異なる歪模型が用いられるため、原型と模型との間に厳密には力学的相似が成立しない。しかしながら、原型で生ずる現象のすべてを細部にわたり相似させる必要はなく、予測したい事項に寄与する主要な因子が模型内で再現できれば十分である。潮流模型実験では、まず潮位および流動現象の再現がはかられる。この場合に最も重要で困難なことは、摩擦の相似を満たすような粗度をどのように与えるかという問題である。究極的には、現地の潮位、位相、流向および流速を一致させるよう試行錯誤的に人工粗度を模型に与えるのが現状である¹⁾。模型実験は、現状の把握に加えて、将来の変化の予測を行うことに意義があるとすれば、こうした方法には問題が多い²⁾。

一方、力学的相似が満たされた場合、拡散の相似がそのまま成立するかどうか、すなわち歪模型における拡散法則が原型と同じ法則に従うかどうかとも問題であり^{3)~5)}、それについても十分な検討を要する。

現地の地形は複雑で、種々の要因が流動・拡散現象に影響を及ぼしているので、個々の要因の影響を明らかにすることが模型実験から得られた情報を正しく評価するために不可欠なことである。

このようなことから、本研究では、まず模型歪の影響のみを抽出するため、底面摩擦の影響を最小にして歪率の異なる一様水深の長方形湾を用いた流動・拡散実験を行い、それらの特性を比較することにより模型歪の影響

を考察するという方法がとられる。

2. 実験モデルおよび摩擦に関する相似則

対象とする水域として、湾口が一方に偏った閉鎖性長方形湾を想定し、その水域には半日周潮が卓越している

表-1 原型および模型の諸元

	原 型	模 型				
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
湾 長	4.88 km	122 cm	122 cm	122 cm	69.7 cm	69.7 cm
湾 幅	7.28 km	182 cm	182 cm	182 cm	104 cm	104 cm
湾 口 幅	1.2 km	30 cm	30 cm	30 cm	17.14 cm	17.14 cm
水 深	20 m	5 cm	10 cm	20 cm	5.7 cm	20 cm
潮 差	1	0.5 cm	1 cm	2 cm	0.57 cm	2 cm
潮 汐 周 期	12 hr 25 min	3 min 44 sec	2 min 38 sec	1 min 52 sec	2 min	1 min 4 sec
水平縮尺 x_r	1	1/4000	1/4000	1/4000	1/7000	1/7000
鉛直縮尺 h_r	1	1/400	1/200	1/100	1/350	1/100
時間縮尺 t_r	1	1/200	1/282.8	1/400	1/374.2	1/700
歪 率 h_r/x_r	1	10	20	40	20	70

とする。起潮機および水槽による制約を考慮し、Froude 則に基づき歪率 h_r/x_r および水平縮尺 x_r が異なる 5 種類のモデルを設定した。それぞれの模型の諸元および原型の規模を表-1 に示す。普通この種の実験では、歪率を 10~20 以下にするのがよいとされているが¹⁾、ここではそれを 70 までとっている。水槽内壁および模型はすべてペイント仕上げとし、人工的な粗度はつけない。さらに、模型を歪めた場合でも海底地形の変化はないように一様水深としている。

さて、底面摩擦に関する相似則を、Manning の粗度係数 n で表わすと次式で与えられる²⁾。

$$n_r = n_m/n_p = (x_m/x_p)^{-1/2} (h_m/h_p)^{2/3} = x_r^{-1/2} h_r^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、添字 m, p は模型および原型に関する量を意味し、 x, h は水平および鉛直方向の長さを示す。また、 r は m と p との比を表わしている。

一方、Manning の粗度係数 n と底面の粗さを表わす特性量の相当粗度高さ k_s との間には次の関係がある¹⁾。

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部 助教授 土木工学科
** 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部 講 師 土木工学科
*** 正会員 工修 香川県

$$n = \frac{R^{1/6}}{\{6.0 + 2.5 \ln(R/k_s)\} \sqrt{g}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 R は径深、 g は重力加速度である。

したがって、原型の粗度係数 n_p が与えられると、式(1)および式(2)から、模型に付加すべき相当粗度高さ k_s が原理的には計算できる。

ここで、本実験の場合について底面摩擦の効果を若干検討しておく。模型の底面はペイント仕上げをしているので、 k_s はかなり大きい場合も考えて $k_s = 0.01 \sim 0.5$ cm の範囲にあると考えられる⁷⁾。これを原型の粗度係数に換算すると、 $k_s = 0.01$ とした場合、本実験における Case 1～Case 5 について、それぞれ $n_p = 0.013$, 0.009, 0.006, 0.010 および 0.005、一方、 $k_s = 0.5$ とした場合、それらはそれぞれ 0.02, 0.013, 0.009, 0.014 および 0.007 を得る。

したがって、本実験では、原型で底面摩擦がそれぞれ異なる場合の実験を行っていることになり歪の影響のみを取り出せないことになる。そこで、本研究では各模型実験から得た流況および流速を原型に換算して比較することにより上述の n_p の値の違いが現象に現われるかどうかをもって摩擦の効果を検討する。その効果を考慮した上で歪の影響を考察する。

3. 実験装置および実験方法

実験には、長さ 3.64 m、幅 1.82 m、深さ 0.3 m の木製内壁ペイント仕上げの潮汐発生水槽を用い²⁾、水槽中に表-1 で示した諸元をもつ木製の長方形湾を設置した。

流動実験では、トレーサーとして 2 cm (Case 1～3) および 1 cm (Case 4～5) 立方の水を含ませたスポンジ片を用い、これらの移動を水槽上方約 3 m に設置したモータドライブカメラで起潮後 30 周期経過後の満潮時より 1/12 周期間隔で 3 周期にわたり撮影し、その軌跡を読み取ることで流況および流速を求めた。さらに、水素気泡発生器を用いて、湾口部の水平流速分布およびこの近傍で発生する局所的な渦流の観測も合わせて行った。

拡散実験では、湾内の 3 点 (図-4, A～C) に加熱した 2500 ppm の濃度のメチレンブルー溶液を投入し、拡散状況を 1/24 周期間隔で 1/2 周期間隔撮影し、さらに 1 周期後の状況も撮影した。拡散解析を行うために、カラー写真上の染料雲の面積の時間変化を読み取った。なお、染料の投入時期は干潮および満潮期の 2 種類とした。

4. 流動特性に及ぼす模型歪の影響

図-1 は、上げ潮および下げ潮最強時の流況図を示したもので、1/12 周期ごと 2/12 周期間の浮標の動きを表わしている。湾内には、下げ潮時でも常に時計回りの環

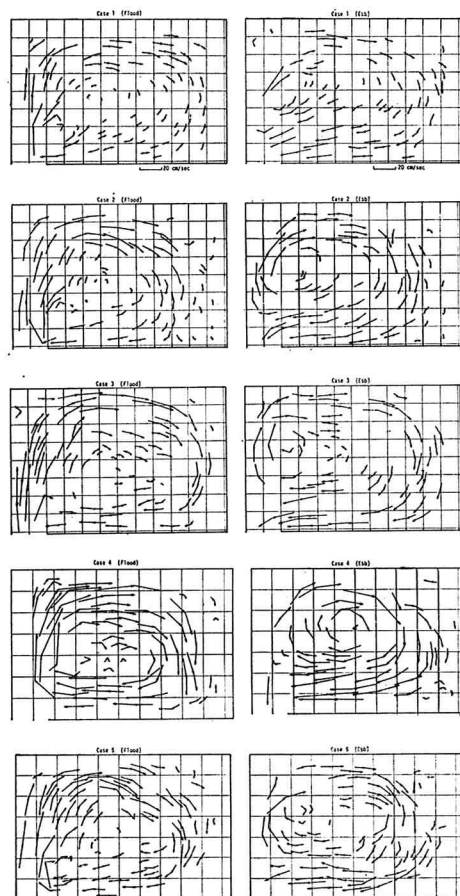


図-1 流況図

流が発生し、その中心は上げ潮時には湾中央部、下げ潮時にはその左側上方に移動する。図-2 は、写真-1 に例示したような水素気泡をトレーサーとした速流

の観測結果をもとに、湾口部の流速分布の変化と堤突端で発生する渦の様相を模式的に示している。干潮時には堤の近傍でも渦の生成はなく、環流の中心は湾中央部にあり、上げ潮時には堤の突端で発生した渦がしだいに湾口中央に進み局所的な渦流を発生させる。

その後、満潮時になると湾水の流出に伴い局所的な渦も流れに運ばれ環流と隣りあうか環流中に吸収されてしまい、下げ潮最強時には局所的な渦は湾内に存在しない。

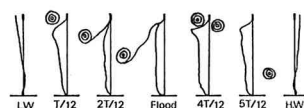


図-2 湾口部における水平流速分布の変化

上端：堤突端
下端：水槽内壁
左側：湾内

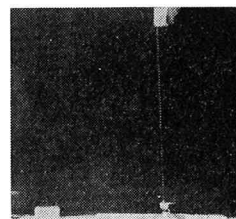


写真-1 湾口部の流速と渦 (左側：湾内)

くなる。

こうした傾向は全実験に共通している。しかし、局所的な渦流の大きさが異なるようにもみえたが、定量的な評価はしていないためその影響については明らかでない。

Case 1～Case 5 について、干潮時の浮標の位置と 1 周期後のその位置から求められる Lagrange 的な恒流（残差流）を求め、図-3 に同時に示した。それぞれ同一地点の流速を示していないので歪率の違いによる流速

の差異を比較することができないが、流向および環流の中心位置はほとんど変化しないように見える。各実験の流速を比較するため流況図から、図-4 に示した原型換算で 0.6 km 四方の水域での流速を求め、図-5 に示した。この図は、流速が最大となる上げ潮最強時について、Case 2～Case 5 の各水域における流速 U を Case 1 の流速 U_1 で除して、その値を求めたもので、横軸の上列には水域番号、下列には Case 1 の原型換算流速を示している。流況図からもわかるように、わずかの時間変化（この場合 1/12 周期間）でも、当該水域内で流向および流速が変化することもあるので、必ずしもこうした解析方法は適当でないが、流速の差異の概略的な傾向程度は把握できるはずである。

図から、Case 4 は他の場合と比較してほぼ全域で U/U_1 の値が大きく、Case 2, 3 および Case 5 については顕著な差異はないものの、ほぼ全域で U/U_1 は 1 以上の値をとり、いずれも Case 1 より流速は大きいことがわかる。しかしながら、ここに現われた値の差異も流速の絶対値をとればわかるように、またこの解析法の精度の尺度でみる限り、必ずしも大きいとはいえない。もし、本実験の場合に底面摩擦が流速を大きく支配するとすれば、2. で示した粗度係数 n_p が最も小さい Case 5 が流速は最大となり、以下 Case 3, Case 2, Case 4 および Case 1 の順に小さくなるはずである。しかし、こうした一定の傾向はなく、図に現われた流速の値の差異は底面摩擦によるものではないと考えられる。

以上のことから、本実験の範囲内では歪率が異なって

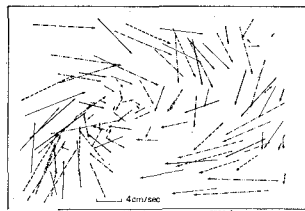


図-3 恒流図

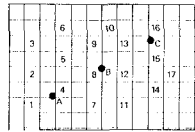


図-4 流速比較水域と染料投入点

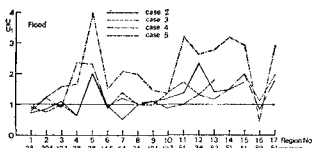


図-5 各水域の流速比較

も流速変化に及ぼす底面摩擦の効果は顕著でないといえる。また、歪率が異なっても海底地形の変化がない場合には、流動特性に及ぼす歪率の影響は大きくなく、流動現象は模型に再現できると考えられる。

5. 拡散特性に及ぼす模型歪の影響

本実験では底面摩擦の効果は顕著でなく、したがって歪率の違いにかかわらず流速はほぼ相似すると考えた。しかし、これは平均流についてみたものであり、乱れ特性の相似性については何らふれなかった。歪率の違いにより乱れ特性が変化するとすれば、それは底面の粗さに起因するものではなく、湾口部で生ずる渦による乱れや、環流の水平シアーの違いによるものと推定できる。

図-6 は、図-4 の A～C 点に投入した染料の拡散の様相を示したものの一例で、複雑な形状に変形しながら拡散することがわかる。図中の Δt は染料雲の時間間隔で $T/8$ をとっている。ただし、 T は周期である。この染料雲の中心の軌跡はおおむね浮標の流動の軌跡と一致する。A 点へ投入した染料は、上げ潮時よりも下げ潮時の方が壁面近くまで大きな曲率を描いて移動し、C 点では上げ・下げ両潮時ともほぼ同一の軌跡を描く。一方、B 点では環流の中心に近いためか上げ潮および下げ潮時に定まった方向はなく、染料雲は放射状に移動することが認められた。

染料雲の拡散面積の時間変化をもとにして、次に拡散係数 K を求め拡散特性に及ぼす歪率の影響を調べる。

拡散に関する相似則は、拡散係数を相似させることによって満足される。すなわち、拡散係数に関する相似則は、

$$K_r = \nu r h^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。この式を用いて模型から得られた値を原型に換算して歪率の影響を考察することにする。

図-7 は、平野・杉浦の方法⁸⁾により求めた拡散係数 K_p を各実験について比較したものである。この図の横軸は染料雲を円形パッチに換算して求めた相当半径 r_p を表わしている。ただし、A～C は干潮時に、A'～C' は満潮時に各点に染料を投入した場合の結果である。各地点について、各実験ごとの K_p と r_p との関係には一定の傾向がみられず、また同じ拡散スケール(拡散半径)に対する各実験の K_p の値を比較し歪率の影響をみたがこれにも一定の傾向は見い出せなかった。さらに染料投入時期の違いによる変化も同様である。そこで、歪率の違いを考慮しないで全描点を概観すると、A および A'

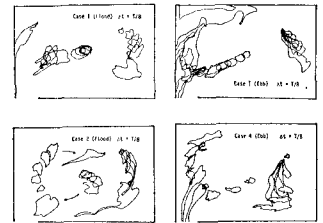


図-6 染料雲の拡散状況

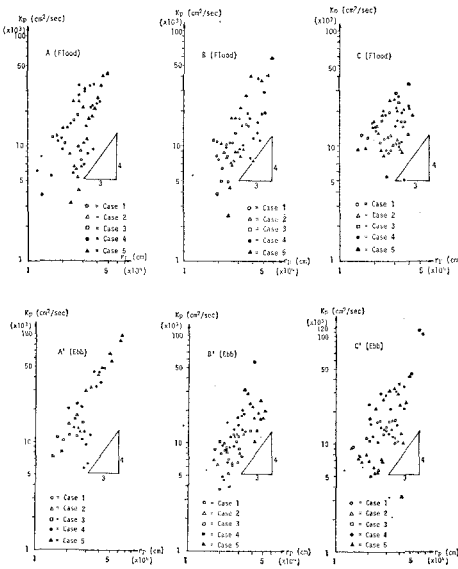


図-7 K_p と r_p との関係

では 4/3 乗より勾配が大きく, B, B' ではほぼ 4/3 乗の勾配を, C, C' ではばらつきが大きく一定の勾配を決めがたい。

平野・杉浦の方法では, 時間の経過に伴い染料雲の面積の増加率が減少する場合には K の値にばらつきが出る欠点がある。

そこで, 同様に染料雲の拡がりから拡散係数を求める足立らの方法⁹⁾で拡散特性を考察しよう。この方法は, 2次元等方性乱流場の拡散方程式

$$\frac{\partial C(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ Kr \frac{\partial C(r, t)}{\partial r} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

の一般解

$$C = \{a/(kt^n)^{2/m}\} \exp \{(-nr^m)/m^2 kt^n\} \dots\dots\dots (5)$$

$$K = k r^{2-m} t^{n-1} \dots\dots\dots (6)$$

に対し, 式(5)の両辺の対数をと, もし表-2に示した係数の異なる各種の解が実験結果に適用できるとす

れば, $\log(t_i/t_0)$ と $\{(r_i^m/t_i^n)/(r_0^m/t_0^n)\}$ との関係が片対数紙上で直線的になることを利用して拡散パラメータ k を求めようとする方法である。ここに, a は瞬間点源の強さに関する定数, r_i および r_0 は時刻 t_i および t_0 における相当半径である。なお, 本解析での t_0 の与え方は $r-t$ 曲線から逆算して t_0 を求める湯浅・早川¹⁰⁾と同様な方法によった。ここでは, 足立らの式を次式のように無次元化して表示し¹⁰⁾, 左辺と右辺の $\log(t_i/t_0)$ との関係を各理論解について点描し, その結果を用いて拡散パラメータ k を求め, 各実験における値を比較することにより歪率の影響を調べることにする。

$$1 - \frac{(r_i/r_0)^m}{(t_i/t_0)^n} = \frac{2mk(t_0^n/r_0^m)}{\log e} \log(t_i/t_0) \dots\dots\dots (7)$$

ここに, $e=2.7183$ である。

図-8 は, 一例として干潮時に C 点に染料を投入した場合について上述の関係を点描したものである。図によれば, Ozmidov の理論が最も適合するようである。

表-3 Ozmidov の解に基づく k の値

	A	B	C
Case 1	—	JS, Oz, Ok 0.0256	JS, Oz 0.0471
Case 2	Oz, Ok 0.0329	Oz, Ok 0.0243	Oz, Ok 0.0265
Case 3	JS, Oz, Ok 0.0294	JS, Oz, Ok 0.0183	JS, Oz, Ok 0.0291
Case 4	Oz, Ok 0.0668	Oz, Ok 0.0303	Oz, Ok 0.0368
Case 5	Oz, Ok 0.0393	Oz, Ok 0.0170	Oz 0.0235

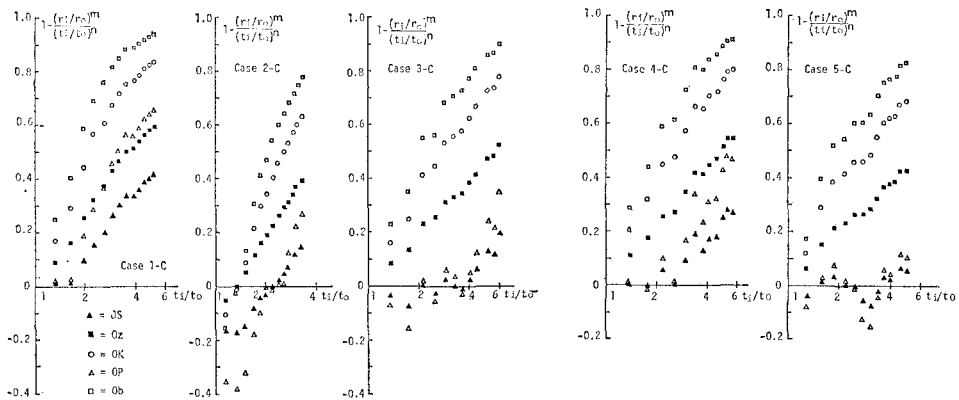


図-8 $1 - \{(r_i/r_0)^m/(t_i/t_0)^n\}$ と $\log(t_i/t_0)$ との関係

ここには示していないが他の地点についてもほぼ同様なことがいえる。ただ、Case 1 の A 点はどの理論にも従わなかった。Ozmidov の理論により、拡散パラメータ k を求め、表—3 に示した。表中には、図—8 からわかるように Ozmidov 以外の理論にも従う場合があるので、その理論をも略号で併記した。しかし、この場合の k の値は計算していない。表によれば、各実験とも k の値は A 点で最も大きく、ついで C 点、B 点の順に小さくなり、平野・杉浦の方法で明らかでなかった同スケールの拡散係数はこの順に小さくなることがわかる。また、同一地点では歪率の増大に伴い k の値は小さくなる。この原因は歪率が増大するに伴って模型内の水平シア分散が実際の現象よりも過小に現われるためと考えられる。さらに、Case 2 と Case 4 とを比較した結果、歪率が等しい場合には水平縮尺が小さい方が拡散現象は過大視されることがわかった。

6. 結 言

歪率の異なる長方形湾モデルの流動・拡散特性を比較することにより、模型歪の影響を考察した。

まず、流速については、その値自体が大きくないので測定精度がやや劣ること、恒流の相似の検討が十分でなかったことなど問題は残ったが、歪率が異なる場合でも、海底地形の変化はなく、底面摩擦の効果が大きくない場合には、流況・流速はほぼ原型と同様に再現できる。

一方、拡散特性については、平野・杉浦の方法では歪率の影響を明らかにしえなかった。しかし、足立らの方法で考察した結果、拡散現象は Ozmidov の理論に従い、拡散係数は拡散スケールの $4/3$ 乗に比例することがわかった。また、歪率が大きくなるほど模型では水平シア分散が小さく現われることになり、拡散係数は小さくなることを示した。地点別に拡散現象をみると、湾口に近

い A 点で物質は最も拡散されやすく、ついで環流に沿った C 点、湾中央部の B 点が最も拡散されにくいことがわかった。

以上のような結果を得たが、なお今後解決すべき多くの問題が残された。

最後に、本研究にあたり実験および資料整理に協力を惜しまなかった猿渡 守（現大成道路(株)）、平野俊秀両君に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生：潮流水理模型実験，1974 年水工学夏期研修会講義集，B コース，土木学会，pp. 8-1~8-25, 1974.
- 2) 村上仁士・細井由彦・渡辺健也：潮流による拡散実験における底面摩擦の影響について，第 27 回海講論文集，pp. 468~472, 1980.
- 3) Harleman, D. R. F.: The significance of longitudinal dispersion in the analysis of pollution in estuaries, *Advance in Water Pollution Res.*, Vol. 1, Pergamon Press, pp. 279~306, 1965.
- 4) Fischer, H. B. and E. R. Holley: Analysis of the use of distorted hydraulic models for dispersion studies, *Water Resources Res.*, Vol. 7, No. 1, pp. 46~51, 1971.
- 5) Crickmore, M. J.: Tracer tests of eddy diffusion in field and model, *Proc. ASCE, Hy. Div.*, Vol. 98, pp. 1737~1752, 1972.
- 6) Fischer, H. B.: Mixing and dispersion in estuaries, *Annual Review of Fluid Mech.*, Vol. 8, pp. 107~133, 1976.
- 7) 土木学会編：水理公式集，p. 157, 1974.
- 8) 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，東海区水産研究報告，第 22 号，pp. 1~15, 1951.
- 9) 足立昭平・中村俊六・森 章：潮汐による港内の移流拡散に関する実験的研究，第 21 回海講論文集，pp. 303~314, 1974.
- 10) 湯浅一郎・早川典生：瞬間点源染料拡散実験からみた水理模型の拡散現象，中国工業技術試験所報告，No. 10, pp. 19~51, 1980.