

潮流による拡散実験における底面粗度の影響について

村上仁士*・細井由彦**・渡辺健也***

1. ま え が き

公共用水域の環境保全という立場から、主要な湾や内海については汚染物質の拡散に関する水理模型実験が行われ、現地観測による資料の収集やその解析と相まって興味ある成果が得られている。潮流を主体とした水理模型実験には、一般に歪模型が用いられるが、この場合原型と模型との間に力学的相似が成立する必要があるが、フルード則に基づいて、水平縮尺と鉛直縮尺との関数として流速および時間縮尺を与え、さらに摩擦に関する相似の条件を付加している。一方、物質の拡散に関する相似則については通常水平拡散が鉛直拡散に比べてはるかに大きくなるため、水平拡散係数のみを相似させる方法がとられている。ここで、水平拡散係数が現象のスケールの $4/3$ 乗に比例すると仮定すれば、鉛直、時間および摩擦係数の縮尺は水平縮尺のみで決定でき、模型のすべてのディメンションが与えられる。

しかしながら、摩擦係数の相似性については未知の点が多く、対象水域の潮位や流速・潮速を再現すべく試行錯誤的に粗度を与えているのが現状である。そのため、現況の粗度をそのまま用いた状態で将来の地形変化をした場合の予測を行うと、得られる結果の妥当性は必ずしも保障されないことになる。また、摩擦係数に関する相似則に基づき粗度係数を粗度高さに換算すると模型の歪が大きの場合、実験に用いるべき粗度が水面よりも高くなるという不合理な結果も報告されており、粗度高さの定量的な評価法も確立されているとは言い難い。さらに、歪模型における拡散係数の相似則についても鉛直シアーによる分散効果が粗度により異なると考えられるため、 $4/3$ 乗則が成立するとして求めた模型のディメンションにもやや疑問点がある²⁾。その他、歪模型の粗度の疎密による乱れ構造の変化についても明確にされていない。

以上のように、歪模型における粗度の問題については未解決の点が少なくない。こうしたことから、本研究で

は最も形状の単純な一様水深の長方形湾を用いて流況・流速および拡散特性に及ぼす粗度の影響を実験的に調べることにし、現地の複雑な現象を対象としたこの種の研究に基礎資料を提供しようとするものである。

2. 実験装置・方法および模型諸元

(1) 実験装置および実験方法

$\phi 50$ mm のビニールサクシオンホース 4 本で水槽の一端と連結したヘッドタンクの周期的な昇降により潮汐を発生させた。水槽は木製で長さ 3.64 m、幅 1.82 m、深さ 0.3 m である。起潮機の周期は 1~6 分、水位変動は 0~2.5 cm の範囲で自由に換えられる。この水槽内に長さ 1.22 m、幅は水槽幅と等しく 1.82 m、湾口を中央にもつ湾口幅 0.4 m の長方形湾を設置した。底面粗度として湾内に、イ) 粗度をつけないペイント仕上げ、ロ) 10 mm の人工芝、ハ) 25 mm の人工芝、ニ) 鋳鉄製半球 (半径 33 mm) の 4 種類の人工粗度が用いられた。なお、ニ) の場合 6.6 cm 間隔にそれらは千鳥状に配置された。

まず、流況を調べるためにスポンジ片に水を含ませて浮標とし、モータードライブカメラを用いて起潮後 30 周期目の満潮時より 3 周期間 5 秒間隔でそれらの動きを撮影した。ついで、起潮後 30 周期目の干潮時、湾内の 3 点 (図-6 参照) に 2.5 g/l のメチレンブルー溶液を投入し、染料雲の動きを 1 周期間 5 秒間隔で撮影して拡散の様相を調べた。さらに、湾口を締切り湾内を一様濃度 3 ppm とした後、締切り板を除去して起潮し、6 周期目の上げ潮最強時に湾内 36 地点で同時採水を行い、湾内の濃度変化を光学式濃度計 (正豊製 MT-CMI) で調べた。

(2) 模型諸元

潮流実験においては、原型との力学的相似性より

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

$$C_r = x_r^{-1} h_r \dots\dots\dots (2)$$

が成立する。ここに、 u は流速、 x および h はそれぞれ水平および鉛直方向の距離、 t は時間、 C は Chezy の摩擦係数で、添字 r は模型に対する原型の諸量の割合を表わしている。

* 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

*** 学生会員 徳島大学大学院土木工学科

いま、取り扱う現象が乱流と考え摩擦係数 C のかわりに Manning の粗度係数を用いると、 $C=2gn^2R^{-1/3}$ の関係から、式 (2) は次式のように書きかえられる。

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

ここに、 g は重力加速度、 R は径深である。

本実験に用いた模型の規模とそれを原型に換算した値が表—1 に示されている。さらに、実験に用いた粗度高さ k_s に対し次式の関係³⁾ から模型における粗度係数を求め、それを原型に換算して両者を表—2 に示した。

表—1 模型および原型の諸元

	縮 尺	模 型	原 型
湾長・湾幅	1/7 450	122 cm×182 cm	9.1 km×13.6 km
水 深	1/100	15 cm	15 m
周 期	1/745	60 sec	12 hr 25 min
潮 差	1/100	2 cm	2 m

表—2 粗度係数と粗度高さ

粗度高さ k_s (mm)	10	25	33
粗度係数			
模 型 n_m	0.018	0.022	0.024
原 型 n_p	0.0045	0.0055	0.0060

$$n = R^{1/6} [g^{1/2} \{6.0 + 2.5 \ln (R/k_s)\}] \dots\dots\dots (4)$$

ただし、厳密には式 (4) 中の相当粗度 k_s と実験に用いた粗度の高さとは等しくないと考えられるが、ここでは両者は同一として計算されている。

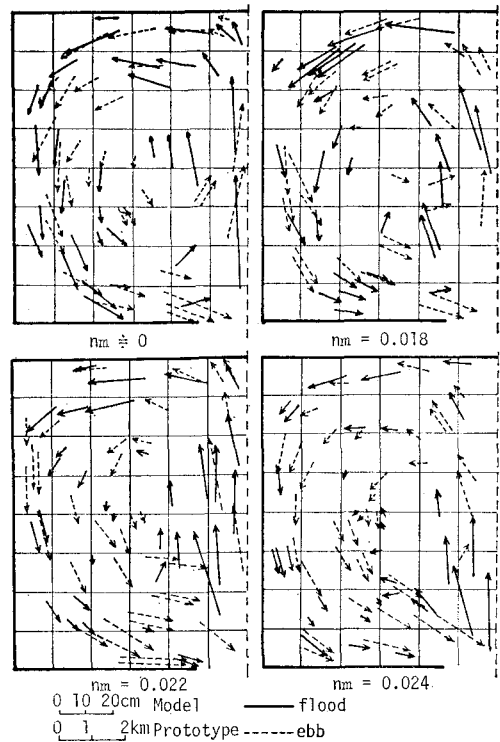
この表を見る限り、原型の粗度係数 n_p は非常に小さな値を示し、実験は原型の粗度の大きさと考えられる $n_p=0.01\sim0.04$ の範囲を再現していないように見える。ところが、式 (4) に従い $n_p=0.01$ に対し模型における k_s を求めると k_s の値は無視できるほど小さく、 $n_p=0.04$ では逆に k_s の値が水面よりも高くなるという結果を得る。したがって、本実験のように歪率が 74.5 と非常に大きい場合には原型の粗度が大きい場合を再現できなくなるのかも知れない。しかし模型における粗度高さをあまり大きくとれば流速が小さくなる結果乱流を再現しない可能性もあるので、ここでは予備実験で乱流が生じていると思われる値が採用された。

3. 実験結果および考察

以下の実験結果は、生ずる現象が湾軸に対称となるので潮汐の進入方向の左半分について考察されている。

(1) 流況特性

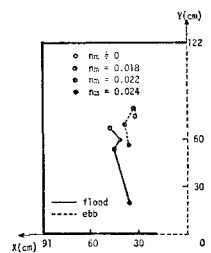
湾内の浮標は 1 周期後もとの位置に戻らず潮汐残差流が発生することが認められた。図—1 は上げおよび下げ潮最強時の前後 10 秒間の浮標を追跡して流況図を描いたもので、常に反時計回りの循環流が存在することがわかる。環流の速度は粗度の増大に伴い減小し、湾口にお



図—1 流況図

ける上げ・下げ両潮最強時の平均流速は、 $n_m=0$ の場合で 4.2 cm/sec, $n_m=0.018$, 0.022, 0.024 に対しそれぞれ 3.6 cm/sec, 3.0 cm/sec および 2.7 cm/sec となる。

一方、流況図から環流の中心位置を求めると図—2 のように粗度の増大に伴いそれが湾口に近づく。この傾向は、残差流による環流から求めた安田・早川⁴⁾の結果と一致している。こうした現象は、残差流は鉛直レイノルズ数が大きくなるほど湾内全体に拡がるということから説明できる^{5),6)}。



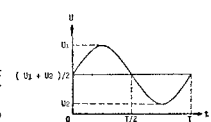
図—2 環流中心位置の変化

(2) 乱流特性

本実験のように歪率が大きい模型では乱流が再現されているかどうかを調べる必要がある。既述のように環流が支配的となる場合には憩流がなく流速変動はあっても流向の変化はない。このような場合について流れが時間的に乱流となる割合を樋口³⁾ にない乱流度と呼び、乱流度を求めて模型内の乱流特性を考察する。

a) 鉛直レイノルズ数に基づく乱流度

いま、図—3 のように流向は変らないで流速 U が正弦的に変わると考えると U は次式のように



図—3 流速変動

表わされる。

$$U = (U_1 + U_2)/2 + \{(U_1 - U_2)/2\} \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 T は周期である。

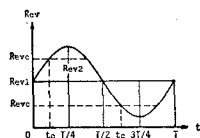


図-4 鉛直レイノルズ数の時間的変化

鉛直レイノルズ数 Re_V は Uh/ν で、これに式 (5) を代入すると次式を得る (図-4)。

$$Re_V = Re_{V1} + Re_{V2} \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $Re_{V1} = (U_1 + U_2)h/2\nu$ 、 $Re_{V2} = (U_1 - U_2)h/2\nu$ 、 h は水深、 ν は動粘性係数である。

Re_V が限界レイノルズ数 Re_{Vc} よりも大きい期間の割合は、図-4 でもわかるように次の 2 通りである。

$$a_V = \{2(T/4 - t_0)/T = 1/2 - 2t_0/T, \quad Re_{Vc} > Re_{V1}\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$a_V = \{T - 2(3T/4 - t_0)/T = 2t_0/T - 1/2, \quad Re_{Vc} < Re_{V1}\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

t_0 は限界レイノルズ数に達する時間で

$$t_0 = (T/2\pi) \sin^{-1} \{(Re_{Vc} - Re_{V1})/Re_{V2}\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、これを式 (7)、(8) に代入すると時間的乱流度 a_V が計算できる。

さらに、微小な水域 dS において a_V が求められると、全水域 S_0 にわたる時間的乱流度の平均値 (平均乱流度) A_V は次式で計算できる。

$$A_V = (1/S_0) \int_0^{S_0} a_V dS \quad \dots\dots\dots (10)$$

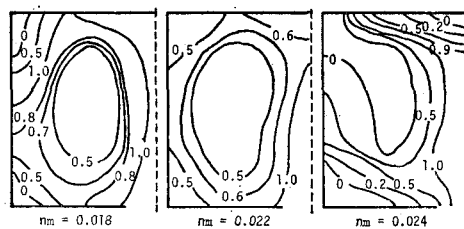
b) 湾内における乱流の状況

限界レイノルズ数 Re_{Vc} の値は一般に 500~2000 とされているので、ここでは Re_{Vc} として 2000, 1000 および大村湾の実験⁷⁾における値 800 をとり、それぞれの Re_{Vc} を用いた湾内の乱流度の分布が図-5 に示されている。図から $Re_{Vc} = 2000$ の場合にやや乱流度の値が低くなるほか、環流の中心部または湾の隅角部でそれが低い値を示す以外はほぼ乱流状態が再現されていることがわかる。表-3 に湾内全域の平均乱流度を示した

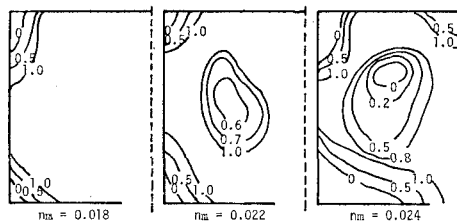
表-3 平均乱流度

nm \ Re_{Vc}	2000	1000	800
0.018	0.66	0.94	0.95
0.022	0.48	0.89	0.91
0.024	0.36	0.70	0.76

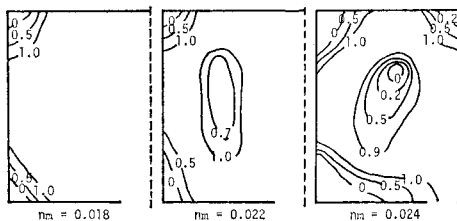
が、粗度の増大に伴い乱流度は減少し、粗度を大きくすることが乱流の再現に適当な方法であるとは必ずしも言えないことが理解されよう。



(1)



(2)



(3)

図-5 時間的乱流度の分布

(3) 拡散特性

a) 拡散係数

図-6 の 3 点における上げ潮時の 30 秒間について平野・杉浦の方法⁸⁾により拡散係数 K_m と相当半径 r_m との関係を求め図-7 に示した。 r_m に対する K_m の値は C 点で最も大きく、B、A 点の順に小さくなる。拡散係数は乱流相似理論による拡散スケールの 4/3 乗則に従うといわれているが本実験ではその傾向は認められない。ことに A 点および B 点では一つの法則性すら見出せない。いま、C 点についてみると、 K_m が 5/2 乗の線に沿うようである。このように 4/3 乗則に従わない原因として模型歪の影響も考えられるが、環流水域ではスケールの 2 乗に比例するという報告例^{9), 10)}もあることから判断して、環流に基づくシア分散効果の増大によるものと考えられよう。

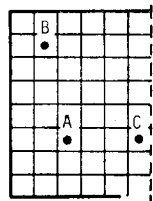


図-6 染料投入点

足立ら¹¹⁾は、環流水域では拡散係数が点源の中心からの距離に比例すると考えた Joseph-Sendner の仮説が妥当として、時間と相当半径との関係すなわち $\ln(t_i/t_0)$ と $(r_0/t_0) - (r_i/t_i)$ との関係が直線的であればその仮説が成

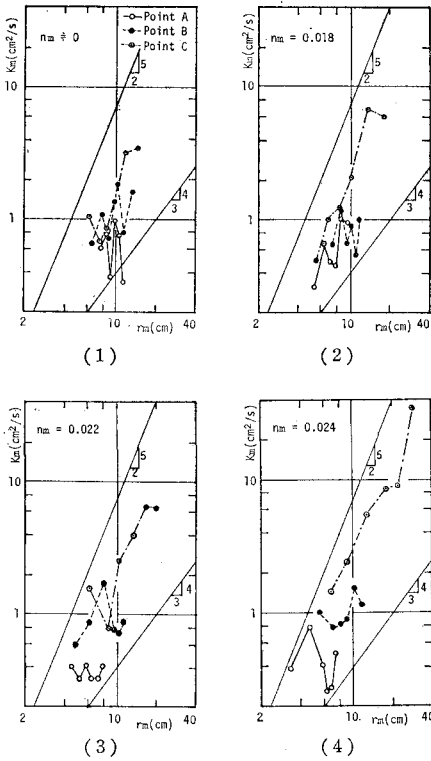


図-7 K_m と r_m との関係

立することを示している。そこで、A点での実測値を図-8のように点描してみた。その結果、点描された値は粗度により多少勾配を異にするが、ほぼ直線的に変化するといえるので、先の図で拡散係数に一定の傾向を見い出せなかったがA点での実験結果が環流水域の一つの特徴を表わしていると解釈することも可能である。

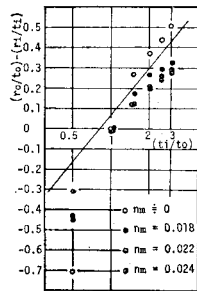


図-8 $(r_0/t_0) - (r_i/t_i)$ と $\ln(t_i/t_0)$ との関係

図-7 により粗度による違いを見ると、AおよびB点では顕著な差異はなく、C点では粗度の増大に伴い染料雲の面積が大きくなり平均乱流速度は低下するにもかかわらず乱れ拡散の効果が助長されると考えられる。しかし橋本・宇多¹⁰⁾も指摘したように拡散係数の拡散スケールに対する勾配は底面粗度に依存していないようである。

ついで、C点に対し Gifford の方法を用い水平分散 $\sigma^2(t)$ より拡散係数を求めてみた¹²⁾。水平分散 $\sigma^2(t)$ は

$$\sigma^2(t) = r_v^2(t) [\ln(r_v^2(t) \cdot e/2) - \ln\{\sigma^2(t)/2\}]^{-1} \quad (11)$$

で表わされ、水平拡散係数 K と拡散スケール r との間に

$$K = (1/2) [\{ \sigma^2(t_i) - \sigma^2(t_{i-1}) \} / (t_i - t_{i-1})] \quad (12)$$

$$r = 4\sigma \quad (13)$$

が成立する。ここに、 $r_v(t)$ は染料雲の相当半径、 $r_{v \max}$ はその最大値、 $e=2.72$ である。

図-9 はC点での K_m と r_m との関係を示しており、この場合も K_m は拡散スケールの 5/2 乗に従うようである。

b) 湾内における濃度分布

図-10 は上げ潮最強時の湾内の濃度分布であり、初期濃度 3 ppm を 1 として等濃度線が描か

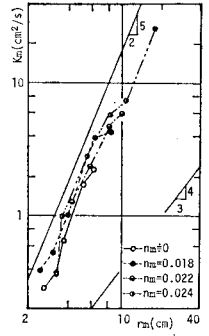


図-9 K_m と r_m との関係

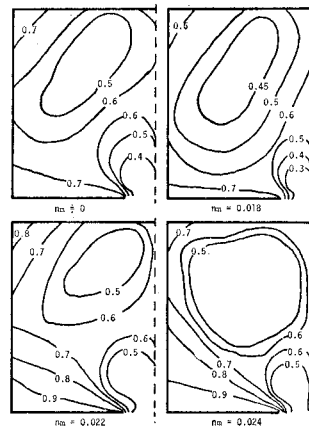


図-10 湾内の濃度分布

れている。等濃度線は閉曲線となり環流に依存することが明らかである。大体環流の中心近傍および湾口で低濃度、環流の速度が大きい領域で高濃度を示す。

粗度に注目すれば、 $n_m=0$ と $n_m=0.018$ では後者が多少低濃度域が大きいことを除いて顕著な違いはない。しかし、 $n_m=0.022$ では環流の速度減少により低濃度域が小さくなり、 $n_m=0.024$ では再びそれが大きくなっていく。この原因は、 $n_m=0.022$ では流速の減少に伴うシア一分散効果の低下、 $n_m=0.024$ では乱れ拡散効果の増大によるものと考えることができ、粗度の疎密により拡散現象の特性が大きく変化することが示唆される。

4. あとがき

本研究では、底面粗度を変えると歪模型内の流況・流速および拡散特性が変化することを数種の実験によって確認するにとどまった。今後さらに基礎的研究を行い、人工粗度の高さおよびその配置と疎密に対する定量的な評価法の確立まで研究を進展させなければならない。

最後に、本研究にあたり御助言、御激励を賜った京都大学岩垣雄一教授、徳島大学三井宏教授、多くの研究論文を参考にさせて戴いた愛媛大学樋口明生教授および実

験に協力を惜しまなかった当時学部学生 of 森田憲太，古
沖隆志両君に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生・辻 正明：松川浦における潮流の水理模型実験，京大防災研究所年報，第 14 号 B，pp. 415~434, 1963.
- 2) 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.
- 3) 樋口明生：潮流模型水理実験，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.
- 4) 安田秀一・早川典生：潮汐残渣流の生成機構と潮汐水理模型での再現性について，第 26 回海講論文集，pp. 532~536, 1979.
- 5) 国司秀明・大西行雄：恒流の影響に関する研究——その発生機構——，沿岸海洋災害にかかわる海水の流動・拡散の研究報告書，文部省科研，pp. 30~42, 1976.
- 6) 笥 源亮・梅田眞三郎・保科公伯：湾内における海水交換に関する研究，第 25 回海講論文集，pp. 538~542, 1978.
- 7) 富樫宏由・中村武弘・宇都幸一・田中清裕：大村湾潮汐水理模型実験による水質汚濁予測に関する研究（第 1 報），第 23 回海講論文集，pp. 512~517, 1976.
- 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. 15~15, 1951.
- 9) 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），京大防災研究所年報，第 11 号 B，pp. 447~461, 1968.
- 10) 橋本 宏・宇多高明：潮流の再現性に関する研究，第 24 回海講論文集，pp. 567~571, 1977.
- 11) 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.
- 12) 和田 明・片野尚明・加藤正進：潮汐水理実験による拡散予測（Ⅰ），第 19 回海講論文集，pp. 277~281, 1972.