

潮流水理模型実験

樋 口 明 生^{はる お}

1. まえがき

最近、わが国の経済発展に伴ない、海岸あるいは沿岸に多くの構造物が作られるようになった。たとえば、大規模な干拓、埋立て、湾を横切る大防波堤、あるいは浅海漁場の改善のための各種土木工事など枚挙にいとまがない。このような工事が進められると、付近の潮流の様相が変化するが、計画を合理的に進めるためには、これを事前に知ることが要求される。これは、大規模な臨海工業地帯の造成に伴ない、産業廃水の拡散の問題にもあてはまることである。

月と太陽とによる引力（起潮力）は、地球上に潮汐をひきおこすが、これに伴ない流れ、すなわち潮流は、深海では一般に微弱であるが、外洋に接した沿岸海域ではしばしば強くなることがある。わが国では、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海などでは潮流が卓越する。

水深の浅い沿岸海洋では、流れはコリオリの力よりも水深変化の影響を大きくうけ、また、海岸地形や海底摩擦のために現象は複雑になる。さらに淡塩水の混合の場合であることや、水深の相違に基づく海域の熱容量の差により生ずる水温差などのための密度変化の効果も大きい。

このような海域における流動、およびそれに伴ない物質の拡散を理解する有用な手段の一つに水理模型実験がある。これは、原型と力学的相似性を保ちながら幾何学的な大きさのみを変えることによって、簡単に答を出そうとする一種のアナログ計算機と考えられるが、それを行なう場合、もっとも重要なことはいうまでもなく、原型と模型との間に力学的相似性が保たれていることである。これがなおざりにされれば、完全な模型実験とはいえないから、この点を十分考慮し、実施にあたってはまず検証実験を行ない、現地観測の資料と比較検討して、十分相似性を確かめたのち、必要な実験を行なわねばならない。

沿岸海洋における流動や拡散に関与する因子はきわめて多いが、ここでは潮流のみについて述べることにする。一口に潮流の模型実験といっても、対象とする海域の大きさや形、あるいは実験の目的によって、その取り扱い方はかなり異なるのが常である。たとえば、対象とする海域が、先の閉じた袋状の湾であるか、両端の開いた水路のような海域であるかによって、潮流の性質は異なるから、その取り扱い方もおのずから異なってくる。また実験の目的が、大規模な土木工事が潮汐・潮流に与える影響を調べることにある場合、底質の移動を調べることにある場合、海水の交流・交換などを調べることにある場合、海水中の物質の混合・拡散などを調べることにある場合など、いろいろの場合が考えられるが、このような目的によってもそれぞれ考え方が異なってくる。あらゆる場合を網羅することはとうてい不可能であるから、ここでは基本的な事柄について述べたのち、内外における若干の例について述べる。

2. 相似性

原型における現象をすべての面について模型で再現させることは原理的に不可能であるから、ここにいう相似性とは現象のうちから抽出されたある特定の関係が、原型と模型において相似性を保つことを意味する。

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。この場合、海面から海底まで平均した、いわゆる鉛直平均流に関する運動方程式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + sU \frac{\partial U}{\partial x} + sV \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{C}{2h} U^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

ここにUおよびVはそれぞれxおよびy方向の平均流速、tは時間、 ζ は水面昇降量、Cは海底の摩擦係数、gは重力加速度、hは水深、sは流速の鉛直分布に関係した1に近い係数である。

現象が力学的に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（添字p）と、模型に関する量（添字m）との比を添字rで表わし、 $s_r = 1$ とみなせば、

$$U_r = V_r = h_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$t_r = x_r h_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C_r = x_r^{-1} h_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。(4)式はフルードの相似則であり、(5)式は摩擦抵抗を規定する条件である。流量の縮尺はつぎのようになる。

$$Q_r = x_r h_r^{3/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

この場合、水平縮尺 x_r と鉛直縮尺 h_r とを一致させなければならないという制約は入っていないから、模型は歪めてもかまわない。

原型と同一の流体を使って、フルードの相似則とレイノルズの相似則を同時に満たす模型は作れないから、(5)式で規定される摩擦係数を模型に与えることによって満足しなければならないが、実際にはこれはかなり厄介なことである。というのは、潮流は浅海では、憩流すなわち流速ゼロを中心に周期的に変化するから、レイノルズ数は時々刻々変化している。摩擦係数は一般にレイノルズ数の関数であるから、このような場合には、摩擦係数も時間的に変わるものと考えられる。厳密な意味で相似性を保たせようとするれば、原型の摩擦係数の時間的な変化に応じて変化する摩擦係数を模型に与えなければならない。ところが、原型の摩擦係数の時間的な変化がよくわからないばかりでなく、模型にそのような摩擦係数を与えることが可能かどうかともわからない。そこで何らかの便法が要求される。たとえば、代表的な摩擦係数を決定するために、時間的な平均流速とか、最大流速についての摩擦係数を考えるわけである。模型における潮流も、流速はゼロから始まって最大に達するわけであるから、流れは層流域から遷移域を通して乱流域に達するのであるが、この場合に、最大流速がどの範囲にまで及ぶかによって、大別して2つの相似則が考えられる。

1つは、模型における流れが終始層流域にあり、乱流域に達しない場合である。この場合、模型の摩擦係数 C_m として、層流におけるブラジウスの式が適用できるものとする¹⁾。

すなわち

$$C_m = \frac{1.328}{\sqrt{Re_m}}, \quad \text{ただし } Re_m < 10^5 \quad \dots\dots\dots (7)$$

この式は定常流に対して成立するものであるが、潮流のようにゆるやかに変化する流れに対しても平均的に成立するものと考ええる。レイノルズ数を最大流速と最大流動距離（憩流からつぎの憩流までに流下する距離）とで表わすことにする。原型と模型との間に相似が成立しているならば、流速の間には(8)式が成立しているはずであるから、原型のレイノルズ数 Re_p と模型のレイノルズ数 Re_m との間にはつぎの関係がある。

$$Re_m = Re_p / x_r h_r^{1/2} \nu_r^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

(5), (7)および(8)式から次式が得られる。

$$h_r^{5/4} = \frac{C_r}{1.328} Re_p^{1/2} \nu_r^{1/2} x_r^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

ここに ν は水の動粘性係数である。原型における潮流の最大流速を $U_{p\max}$, 周期を T_p とすると, 最大流動距離 L_p は

$$L_p = \frac{1}{\pi} U_{p\max} T_p \text{ となり, } Re_p = \frac{T_p}{\pi \nu_p} U_{p\max}^2 \text{ となる。}$$

したがって(9)式は下のように書ける。

$$h_r^{5/4} = \frac{C_p}{1.328} \left(\frac{T_p}{\pi \nu_p} \right)^{1/2} U_{p\max} \nu_r^{1/2} x_r^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

$C_p = 5 \times 10^{-3}$, $T_p = 12^h 25^m$, $\nu_p = 10^{-2}$ とし, $U_{p\max}$ をパラメーターとして(10)式を図に表わすと図-1のようになる²⁾。図の横軸は $\nu_r x_r$, 縦軸は h_r である。模型内で流体として水を使用する場合は $\nu_r = 1$ とみなせるから, x_r は横軸の値そのものとなる。粘性係数の異なる流体を使用する場合には,

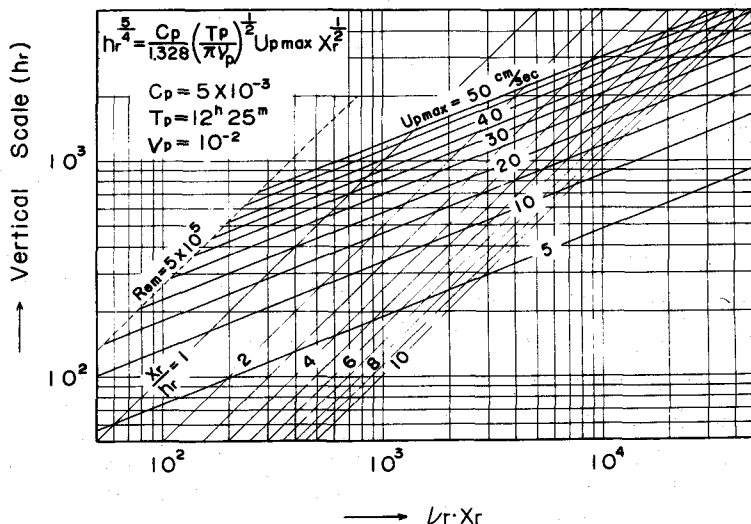


図-1 潮流実験用層流模型の縮尺

x_r は横軸の値を ν_r で除した値となる。

他の1つは, 模型における流れが乱流域に達する場合であるが, ここでは時間的に乱流が支配的である場合を考え, 抵抗則としてマニングの条件が適用できるとすると, 摩擦係数 C は, マニングの粗度係数 n を用いて, $C = 2g n^2 / h^{1/2}$ で表わされるから, (5)式はつぎのようになる。

$$n_r = x_r^{-1/2} h_r^{2/3} \dots\dots\dots (11)$$

これを図に表わすと図-2のようになる²⁾。この条件で実験されることが多いが, 実際には原型の粗度係数 n_p が明確でないから, まず n_r を大ざっぱに見積って模型を作り, 検証実験によって, 潮汐の振幅, 位相, 流向, 流速などが正しく再現できるように, 試行錯誤的に人工粗度を加減することが多い。

拡散現象を取り扱う場合には, 拡散方程式について, 運動方程式の場合と同様に考えると, 水平拡散係数を K として

$$K_r = x_r^2 / t_r \dots\dots\dots (12)$$

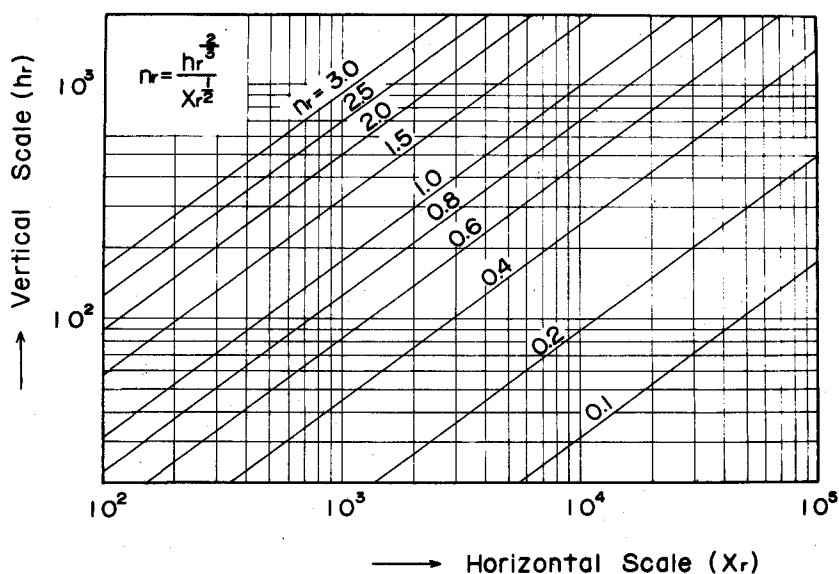


図-2 潮流実験用乱流模型の縮尺

が得られる。水平拡散係数として

$$K = \epsilon \ell^{4/3} \quad (13)$$

が成り立つとすると、その比は

$$K_r = \epsilon_r x_r^{4/3} \quad (14)$$

となる。ここに ϵ は単位質量、単位時間当りのエネルギー逸散率、 ℓ は現象の規模である。

原型と模型とで ϵ が等しいとすると、 $\epsilon_r = 1$ であるから(12)と(14)式から

$$t_r = x_r^{3/5} \quad (15)$$

が得られる。これと(4)式とから

$$h_r = x_r^{3/5} \quad (16)$$

となる。さらに(5)式から

$$C_r = x_r^{-1/5} \quad (17)$$

(11)式から

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

が得られる。

(15)～(18)式は、 $\epsilon_r = 1$ という仮定を入れることにより、鉛直、時間、および摩擦係数の縮尺が、水平縮尺のみによって決定されることを意味する。これらの式は、(4)、(5)、および(11)式を満足するから、模型の摩擦係数が(17)または(18)式で要求される範囲内にあれば、仮に $\epsilon_r \neq 1$ でも、このような縮尺を採用しても何ら不都合を生じない。

拡散実験の場合には、模型内でも乱流拡散を期待しているのであるが、模型内での流れがどの程度乱れているかを、レイノルズ数を指標として調べられる³⁾。鉛直平均流 U について考えることとし、代表長さを水深としたものを鉛直レイノルズ数 ($Re_v = Uh/\nu$)、潮流の最大流動距離 ℓ 。(憩流からつぎの憩

流までの流動距離)としたものを水平レイノルズ数 ($Re_h = U\ell_0/\nu$) と仮称する。

流速が正弦的に変化し ($U = U_0 \sin(2\pi/T)t$)、水深変化が小さいとすると、鉛直レイノズル数はつぎのように書ける。

$$Re_v = Re_{v0} |\sin(2\pi/T)t| \quad (19)$$

ここに $Re_{v0} = U_0 h/\nu$ 、 T は潮汐周期である。

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、

$$\frac{(T/4) - t_c}{T/4} = 1 - \frac{4t_c}{T} \equiv a_v \quad (20)$$

である。ここに t_c は(19)式において $Re_v = Re_{vc}$ となる時刻である。すなわち

$$Re_{vc} = Re_{v0} |\sin(2\pi/T)t_c| \quad (21)$$

より、

$$t_c = (T/2\pi) \sin^{-1}(Re_{vc}/Re_{v0}) \quad (22)$$

となり、(20)式に代入すれば

$$a_v = 1 - (2/\pi) \sin^{-1}(Re_{vc}/Re_{v0}) \quad (23)$$

となる。 $Re_{vc} = 500$ として図に表わすと図-3のようになる。これは、ある地点における流れが乱流とな

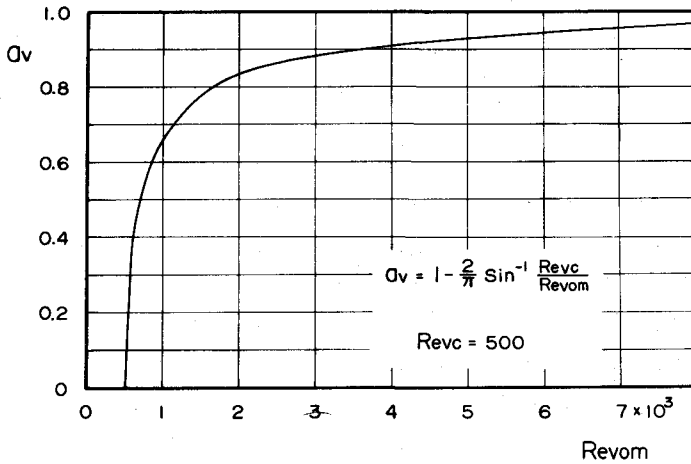


図-3 模型内の最大鉛直レイノルズ数と時間的乱流度

る時間的割合を示すもので、時間的乱流度とでも呼ぶべきものである。

つぎに、これの空間的役割を求めてみる。微小な海域 dS において、(23)式が成り立つとすると、全海域 S_0 にわたる時間的乱流度の平均値 A_v はつぎのようである。

$$A_v = \frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} a_v dS \quad (24)$$

これを平均乱流度と仮称する。これに(23)式を代入して

$$A_v = 1 - \frac{2}{\pi S_0} \int_0^{S_0} \sin^{-1} \frac{Re_{vc}}{Re_v} dS \quad (25)$$

を得る。差の形で表わすと

$$A_v = 1 - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_i}{S_0} \sin^{-1} \frac{Re_{vc}}{Re_{v0}} \quad (26)$$

となる。以上は、潮流が準定常状態にあるとみなした場合に成り立つと考えられる。

力学的相似が成り立つ場合には、鉛直レイノルズ数の比は

$$Re_{vr} = U_r h_r / \nu_r = h_r^{3/2} / \nu_r \quad \dots\dots\dots (27)$$

で表わされる。 $\epsilon_r = 1$ の場合には(26)式から

$$Re_{vr} = x_r / \nu_r \quad \dots\dots\dots (28)$$

となる。原型の値に添字p、模型の値に添字mをつけることにすれば、

$$Re_{vr} = Re_{vp} / Re_{vm} \quad \dots\dots\dots (29)$$

であるから、模型内の Re_{vo} すなわち Re_{vom} は、原型の Re_{vo} すなわち Re_{vop} から

$$Re_{vom} = Re_{vop} / Re_{vr} \quad \dots\dots\dots (30)$$

により求めることができる。

限界レイノルズ数については、普通 500 ～ 2000 といわれているが、海岸・海底地形の複雑な場合には、最低値 500 を採用してよいと考えられる。 $4S_i/S_o$ については、模型が幾何学的に相似であるから、数値としては原型の値をそのまま使用できる。以上により、(26)式は、対象海域（原型）の水深と、最大流速の分布がわかれば計算することができる。

つぎに水平レイノルズ数 ($Re_h = U_o \ell_o / \nu$) について考える。前と同様に、流れが正弦的に変化するすると、

$$\ell_o = U_o \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{T}{2} = \frac{U_o T}{\pi} \quad \dots\dots\dots (31)$$

と書けるから、水平レイノルズ数は

$$Re_h = U_o^2 T / \pi \nu \quad \dots\dots\dots (32)$$

となる。これを時間的に最大のレイノルズ数とみると、その時間変化は

$$Re_h = (U_o^2 T / \pi \nu) \sin^2 (2\pi/T)t = Re_{ho} \sin^2 (2\pi/T)t \quad \dots\dots\dots (33)$$

となる。前と同様に考えると $Re_h > Re_{hc}$ なる期間の割合は

$$a_h = 1 - (4t_c/T) \quad \dots\dots\dots (34)$$

となり、限界レイノルズ数 (Re_{hc}) に達する時刻 t_c は

$$Re_{hc} = Re_{ho} \sin^2 (2\pi/T)t_c \quad \dots\dots\dots (35)$$

より

$$t_c = (T/2\pi) \sin^{-1} (Re_{hc}/Re_{ho})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (36)$$

となり(34)式に代入すると

$$a_h = 1 - (2/\pi) \sin^{-1} (Re_{hc}/Re_{ho})^{1/2}$$

となる。(図-4)。この場合の限界レイノルズ数 Re_{hc} は前のもの Re_{vc} とは異なる。

平均乱流度は

$$A_h = 1 - \frac{2}{\pi S_o} \int_0^{S_o} \sin^{-1} \left(\frac{Re_{hc}}{Re_{ho}} \right)^{1/2} dS \quad \dots\dots\dots (37)$$

となり、差の形で表わすと

$$A_h = 1 - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{4S_i}{S_o} \sin^{-1} \left(\frac{Re_{hc}}{Re_{ho}} \right)^{1/2} dS \quad \dots\dots\dots (38)$$

となる。

力学的相似の成り立った場合には、水平レイノルズ数の比は

$$Re_{hr} = x_r h_r^{1/2} / \nu_r \quad \dots\dots\dots (39)$$

であり、 $\varepsilon_r = 1$ の場合には

$$Re_{hr} = x_r^{4/3} / \nu_r \quad \dots\dots\dots (40)$$

となる。前と同様に

$$Re_{hom} = Re_{hop} / Re_{hr} \quad \dots\dots\dots (41)$$

により、原型のレイノルズ数から求めることができる。限界レイノルズ数について、Collins⁴⁾ は実験の結果 2.56×10^4 を得ている。以上により、(38) 式は、対象海域（原型）の最大流速の分布と潮汐の周期がわかれば計算することができる。

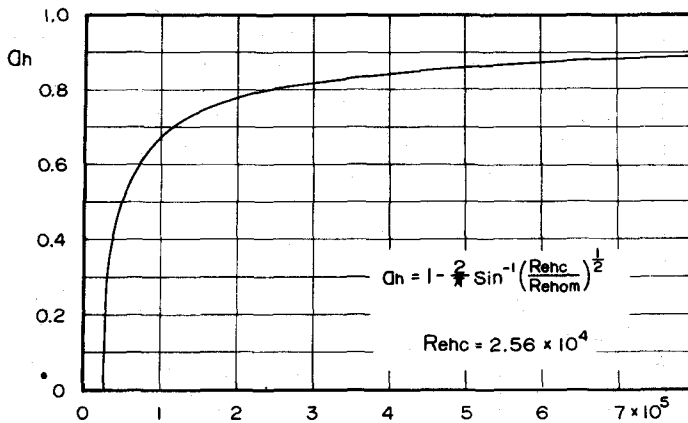


図-4 模型内の最大水平乱流度と時間的乱流度 Re_{hom}

以上述べたように、潮流に関する力学的相似則を考える場合には、流れの微細構造のすべてにわたって相似則を考えるのではなく、鉛直平均流に関する相似則を考えていることを銘記しなければならない。

つぎに、粗度について述べる。マニングの式と流速の対数公式とから粗度係数と各パラメーターの間にはつぎの関係がある⁵⁾。

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{1}{\sqrt{g}} / (A_0 + \frac{1}{\kappa} \ell_n \frac{R}{k}) \quad \dots\dots\dots (42)$$

ここに R : 径深（流水の断面積／潤辺長）、 A_0 : 潤辺の粗滑、流速分布に与える諸要素の関数と考えられる積分常数、 κ : カルマン常数、 k : 潤辺の粗滑の高さを表わす値である。

一例として、上式において、水路幅無限大に対応する $A_0 = 6.25$ 、 $\kappa = 0.4$ を用いて得られる関係と、

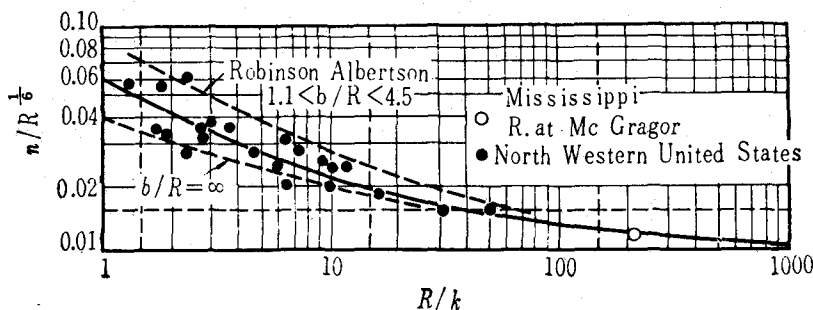


図-5 $n/R^{1/6}$ の実測値の一例

1. $1 < b/R < 4.5$ (b は水路幅)の人工粗度水路における実験結果と、2, 3の実河川における実測値をプロットすると図-5⁶⁾(Boyerによる)のようであって、前者が実河川の測定値の下限を、後者が上限を与えていることから、水路幅と水深との関係が、どの程度の影響を与えるかを推定する手がかりの一つが得られる。一般に広い海域は水路幅無限大の場合に相当するが、感潮河川などでは、河川幅の影響を考慮しなければならない場合もある。

(42)式の中で、 $A_0 = 6$ として計算された結果を図-6⁶⁾に示す。図の横軸は相当粗度 k であり、縦軸はマンニングの粗度係数 n である。実際に模型に与える粗度としては、流砂のない場合には k の高さの凹凸

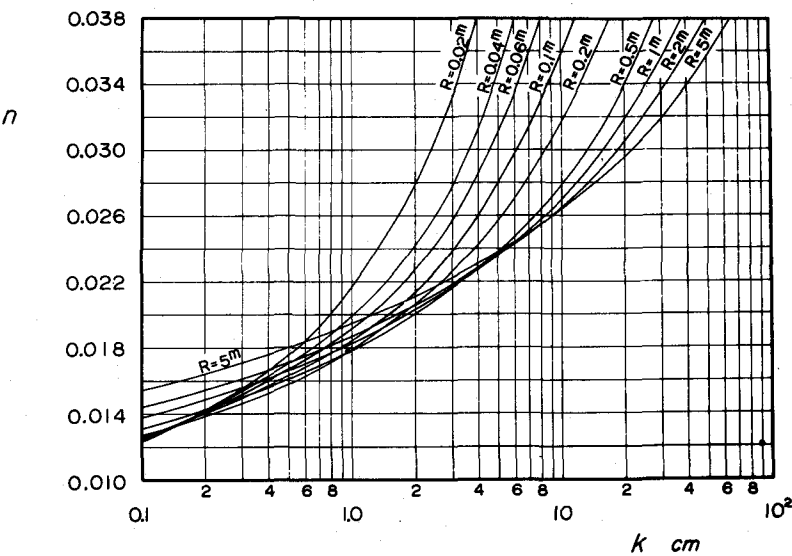


図-6 相当粗度 k と粗度係数 n

を作ればよい。そのために、粒径 k の砂を使ったモルタルで海底を作り、乾ききらぬうちに、刷毛でセメントだけをこすり落す、いわゆる刷毛仕上げが用いられることが多い。このほか、実用されている人工粗度としては、小砂利、小型ブロック、有刺鉄線、枠組鉄線、金網⁷⁾、金属板などがあり、流れの方向が一定している場合には棧型粗度⁸⁾が用いられることもある。また、これらのうち幾種類かを併用することもある。これらの人工粗度に関する系統的な研究は少なく、不明の点が多いため、多くは試行錯誤により決定しているようであるが、力学的相似を考える場合の重要なポイントであるから、今後の研究に望むところが大きい。

塩水と淡水の二層を含むときには、重力 g の代りに塩水と淡水との密度差の割合と重力との積 ($\Delta \rho / \rho$) g を用いたフルード数が同一になるようにしなければならないし、両者の混合に対してはリャードソン数 $\theta = - (g/\rho) (d\rho/dz) / (du/dz)^2$ をも考慮に入れる必要があるだろう。コリオリの力を近似するために模型を回転台にのせて回す方法や、水中でシリンダー (Coriolis-top) を回してマグナス効果を利用する方法がある。さらに、風の応力なども考慮しなければならない場合も考えられるが、一般にこのような条件を満たすことは困難であり、省略するか、別途に理論的に補正を行なうのが常である。

3. 実験計画

実験の目的と対象海域が決定された場合、潮流に関する模型実験は、つぎの順序⁹⁾に従って行なわれる。

1. 模型範囲の決定

模型に含める範囲は、起潮機などの人工的境界が、目的とする現象に及ぼす影響を十分考慮して決定しなければならない。後に述べる実験施設とも関連するが、一般に、入口の広くない袋状の湾の場合には、湾口で区切ると境界条件を与えやすい。着目する海域付近における、潮流の最大流動距離は、一次的な影響を示す指標になるから、これを範囲決定の目安に使うとよい。人工的境界の影響を小さくするために、少くとも最大流動距離の2倍以上の余裕をとらねばならない。しかし、あまり広くとり過ぎると、模型が大きくなり過ぎ、起潮機も大容量のものが必要となるから不経済である。

2. 縮尺の決定

水平縮尺は一般に対象とする海域の大きさと、実験施設の大きさから決定される。鉛直縮尺は、前節に述べた相似則を考慮して決定される。模型内の流れが乱流であることを期待する場合には、前節に述べた平均乱流度が一つの基準になるだろう。

模型があまり大きすぎると費用がかかり過ぎるし、小さすぎると摩擦や水の表面張力のほかに、模型製作の精度、起潮機の作動精度、測定器の精度などに問題が生ずる。

3. 外力の決定

潮汐は、日によって潮差や形が異なるから、対象とする潮汐を明確にする必要がある。水位変化を単純正弦波として与えることが多いが、長期的な問題を取り扱う場合には、日潮不等など潮汐の形の影響を受けると考えられるから、できるだけ現実の潮汐を再現することが望ましい。

風や波の影響は、模型で再現することが困難なため、通常省略される。

密度成層の影響は、とくに感潮河川では重要であると考えられるが、広い海域ではあまり重要でないことが多いため、省略されることが多い。

4. 起潮機等の選択

起潮機には、各種の方式のものがあるが、実験の目的、規模に応じて適当なものを選ばなければならない。実験によっては補助的に回流装置を必要とすることもある。どの方式の場合にも、自動制御するのが望ましい。以下に、各方式について概説する。

(1) 気圧式起潮機

模型水槽の一端に、水面下に口を開いた空気室がつながったもので、空気室内の気圧を変えることにより、模型水槽の水位を制御しようとするもので、2つの方式に分かれる。一つは減圧式で、空気室内は常に負圧になっている。他の一つは加減圧式で、正圧と負圧とを繰り返すことになる。後者は、実験開始前に予め水を吸い上げる必要がないから準備の点で有利である。

気圧式起潮機は、1958年京都大学防災研究所で、それまでの高潮発生装置を改造して作られたのがわが国における最初のものであり、これは減圧式¹⁰⁾であるが、その後各所で改良されて減圧式のものが普及するようになった。加減圧式には、加圧・減圧を繰り返すために特殊十字弁を用いるもの¹¹⁾、制御弁を2台¹²⁾、または4台用いるもの^{13), 14)}がある。特殊な例として、英国国立水理研究所では、等潮時線に沿った4つの空気室をパイプで結び、1台のプロアーで水位制御を行なっている(写真-5)。

気圧式起潮機は、比較的容易に広い幅にわたって一様に水位を上下させることができるのが特長であるが、空気の圧縮性のために系全体の応答が遅く、急速な水位変化を制御するのが困難なのが短所

と言える。

(2) プランジャー式起潮機

一部水面下に入るように吊り下げた箱を上下させて水位を変化させる方式で、偏心円板から銷で吊り下げるものや、油圧で駆動するもの^{15), 16)}がある。この方式は、気圧式に比較すると応答は速い。容量の関係で、小型または中型の模型に使用されている。

(3) 水供給式起潮機

別に設けた水槽からポンプで模型水槽内に水を送り込んだり、汲み出したりするもの¹⁷⁾であり、特に大型の模型に適している。これの変形として、水底に沈めた袋の中の水を出し入れする方式のものがある。

(4) 堰式起潮機

水供給式と似ているが、ポンプで汲み出すかわりに、堰を通して貯水槽に水を返す方式である。堰としては溢流堰を使用することが多いが、堰板が鉛直に上下するもの（鉛直堰）、水平軸のまわりに回転するもの（傾斜堰）¹⁸⁾があり、特殊な例としては、潜り堰を用いる場合もある。いずれも大型模型に適しているが、傾斜堰を油圧制御する方式は制御特性がよく、瀬戸内海大型水理模型に用いられている。

(5) フラッター式起潮機

通常のフラッター式造波機と同様に、海底にある軸を中心に、水中の板を前後に傾けるもので、短周期の波を起こすのに適しているから、小縮尺の小型模型に適している。グルノーブル大学流体力学研究所の英仏海峡の模型（写真－8）にはこの方式を使用している。

(6) その他の起潮機

特殊な例として、湾の振動特性を調べるための実験に、水中に錘を吊した水平振子を用いた例¹⁹⁾があるが、一般的ではない。

(7) 回流装置

起潮機は原則として等潮時線に沿って配置されるが、特殊な地形であるためにこの原則が守れない場合や、潮流以外の流れの影響を取り入れる場合などに、起潮機に平行な流れを起こす必要が生ずることがある。そのために回流装置が用いられる。

模型の一端から水を取り、他端から排出するために、2台のポンプを用いるのが普通で、特殊な例としては、船舶の動揺防止に用いる可変ピッチのヒーリングポンプを用いることもある（公害資源研究所）。また、水槽の両端にプランジャーを設け、これらを交互にシーソーのように動かすことにより流れを起こす装置や、水槽の両端をつなぐ別の水路の中でピストンを動かして流れを起こす装置なども考案されているが、いずれも一般的なものではない。

中国工業技術試験所や、デルフト水理実験所（オランダ）で用いているような、数スパンに分割された堰式起潮機の位相を適当に変化させれば、起潮機に平行な流れを起こすことができるから、制御の方法によっては回流装置の機能ある程度兼ねることが可能となる。

5. 計測器の選定

一般に水位と流速を測定する必要があるが、そのための測器を選ばなければならない。実験の目的に応じた計測器を選定する必要がある。これらにも各種の方式のものがあるが、現在利用可能なものうち若干の例について概説する。

(1) 水位計

水位計は、ポイントゲージやマンノメーターのほかに、自記記録のできるものが用いられる。記録の方法は、直接機械的に記録する方式より、電気的な方式が主流となっている。受感部あるいは変換部の様式によって、つぎのようなものが用いられる。

1) 水圧式：水位変化に応じて変る水圧によるベローズ等の変化を動歪計、差動変圧器、磁歪式変換器等で電気的な信号に変えるものである。水圧を変位に変換するために用いるベローズの特性のために、あまり微小な変化は測れない。

2) 浮子式：水面に浮かぶ浮子の上下をポテンシオメーター等で電気抵抗の変化に変えるものや、浮力の変化を動歪計で電氣量に変換するものがある。

3) 電気抵抗式：一部水中に浸った2本の電極間の、水位変化に応じて生ずる抵抗値の変化を検出するもので、比較的安くて簡便なため広く使用されている。水温・水質の変化に敏感であるから、その都度校正を要する。

4) 階段抵抗式：多数の電極を一定の間隔で階段状に並べたもので、どの電極まで水に接したかによって水位を知るものである。その都度校正の必要はないが、分解能を高めようとするとな多数の電極が必要となり、受感部が大きくなって使いにくくなる。

5) 触針式：振動子の先端を水に接したり離れたりさせて、水中におかれたもう一つの電極との間の電気回路を断続し、電流の断続時間を一定に保つようにサーボ機構を使って水面を追従させ、振動子の変位をポテンシオメーターで電気抵抗の変化として取り出すもの（振動子式）や、水中にわずかに没した針と、水中にある他の電極との間の抵抗を一定に保つようにサーボ機構を働かせて針の変位を測定する方法（定抵抗式）がある。安定性がよいため長期間の実験に適している。

6) 電気容量式：被覆電線を水中に立て、導線と水との間の電気容量の変化を取り出すもので、水温・水質の影響を受けないが、被覆材質の関係で水切れが悪くて正確な水位を示さない場合がある。

7) 定容量式：水面上数mmにおかれた金属板と水面との間の電気容量を一定に保つように、サーボ機構によって金属板を上下させ、その変位を測定するもので、これも安定性がよいが、金属板に結露することがあるので注意を要する。

以上のように種々の変換器があるが、使用例としては1)は起潮機の自動制御用の検出計として2、3用いられているが、水位の微小な変化が測定しにくいいため、高精度は期待できない。2)のうち浮力式は、京都大学防災研究所の瀬戸内海小型模型で使われたが、あまり一般的ではない。少数の例ではあるが、浮力の上下を直接ドラムにペン書きさせている例もある（ハノーバー工科大学）。3)は低廉で簡便なため広く利用されており、最も一般的なものである。4)は防災研究所で使用されたことはあるが、現在は用いられていない。5)のうち振動子式のものは、オランダのデルフト水理実験所、フランス中央水理実験所、ドイツ国立水理実験所等、ヨーロッパで広く用いられている。定抵抗式のものは、通産省中国工業技術試験所の瀬戸内海大型水理模型で用いられている。6)は通産省公害資源研究所で使用されている。7)はまだ試用の段階であるが、多少の改良により、安定性がよく精度の高い測器となる可能性が強く、今後の開発がまたれる。

以上、水位計の原理と若干の使用例を述べたが、価格の点を除けば、安定性の高精度の点で、5)、7)の方式のものが潮流実験には適していると思われる。

(2) 流速計

流速計としてはつぎのようなものが用いられている。

1) ピトー管：流体の動圧と静圧の差から流速を測定するもので、高速流体には適するが、潮流模

型実験のように比較的小さい流速を測定するのには適さないので、特殊な場合のほかあまり用いられない。

2) プロペラ式：流速に応じて変化するプロペラの回転数を測定する方法で、小部分の流速を測定するためにプロペラを小型にしたり、慣性を小さくするためにプラスチックを用いたり、摩擦を小さくするために無接点にしたり、接点の配置によって正逆方向を区別できるようにしたものなど、いろいろの工夫改良が行なわれている。とくに興味をひくのは、デルフト水理実験所で開発されたもので、これはプロペラの回りをプラスチックの円筒で取り巻き、それに等間隔に60個の穴を開け2本の電極を円筒のごく近くに配置し、穴が電極の前面に来たときに電気抵抗が小さくなることを利用して、回転数をパルスとして取り出すものである。同様な考え方で穴明き円板をのせたカップ式流速計も用いられている（米国水路実験所）。こうした方法によって、流速の微小な変化を測定することが可能になる。

3) 熱線式：水流によって熱線が冷却されることを利用するもので、微流速の測定に適し、時間的応答の速いことを利用して乱れの測定にも用いられる。これと同じ原理による熱膜式やサーミスター式のものもある。流速が大きくなると特性が悪くなることと、方向性のないことが欠点といえる。

4) 超音波式：流下方向と逆方向とで音速の異なることを利用して流速を測定するもので、応答が早く、乱れの測定に適している。送・受信器の大きさおよびその支柱によって制限され、いまのところスパン5 cm位が最小である。送・受信器の配置により2方向あるいは3方向同時に測定できる利点があるが、流向によっては支柱によって起こされる乱れを測る危険がある。これを避けるために送・受信器をある程度離れたところに置き、ドブラー効果を利用して測定する方法が開発されている。

5) 水素気泡法：水中に張られた導線を陰極として、高電圧をかけると水の電気分解により水素気泡が発生するが、これを写真撮影により追跡して流速を測定する方法で、流れの微細構造を知るのに有利である。水中カメラが利用できるときはかなり有効である。

6) 浮標追跡法：水面にまかれた多数の浮標を、間欠的に写真撮影することによって流速を測定する方法で、流れのパターンを知るのに有利である。実験室を暗室にして間欠的に照明し、多重露光により流跡を知ることができる。

浮標に抵抗板をつけたり、あるいは円筒形のものを使用することにより平均流速を求めることができる。

(3) その他の計測器

塩水を用いる場合には電気伝導度計、温度変化を伴うときにはサーミスターや熱電対等を用いた水温計、染料濃度の測定は光電比色計や蛍光光度計などが用いられる。

また、移動床の実験用として、小舟から先端に電極のついた棒をおろし、底に近づくことにより生ずる電気抵抗の変化により水深を測定する装置（ドイツ国立水理実験所）や、小型の音響測深器（フランスSOGREAH, 精度1/20 mm）なども用いられる。

4. 国内における実験例

わが国で初めて行なわれた潮流模型実験は、1930年に神戸海洋気象台の瀬戸内海東部の実験²⁰⁾である。これは水平縮尺1/10万、鉛直縮尺1/1000の模型にプランジャー式起潮機で潮汐を与え、水面に撒いた

アルミ粉末を写真撮影することにより流況を求めている。

これに類したものに東京大学で行なわれた一連の実験¹⁸⁾があるが、これは湾の振動特性を調べるためのもので、潮流の実験には属さない。

わが国で行なわれた潮汐・潮流に関する水理模型実験の主なものを表-1^{20)~37)}に示す。

表-1 潮流の模型実験例(国内)

対 象 海 域	縮 尺		歪	実 施 機 関	年 代
	水 平	鉛 直			
瀬戸内海東部	100,000	1,000	100	神戸海洋気象台	1930
広島湾	500	250	2	京大防災研	1958
有明海	40,000	250	160	長崎海気	1959
関門海峡	350	60	5.8	運輸技研	1959
境水道	500	125	4	京大防災研	1959
名古屋港	2,000	667	3	京大防災研	1961
津軽海峡	50,000	500	100	函館海気	1961
名古屋港	700	500	1.4	京大防災研	1962
有明海	8,000	250	32	九大農	1962
関門海峡	300	100	3	四港建	1963
伊勢湾	1,000	65	15.4	農土試	1963
東京湾	500	100	5	東大工・震研	1964
有明海	2,000	200	10	京大防災研	1966
中海	400	50	8	中海干拓	1967
鹿島港	500	63	8	京大防災研	1968
東京湾	2,000	100	20	資源試	1968
水島灘	2,000	160	12.5	京大防災研	1968
長崎干拓	1,000	50	20	農土試	1970
松川浦	600	50	12	京大防災研	1970
岡山湾	1,000	100	10	公資研	1970
三河湾	1,500	100	15	公資研	1970
瀬戸内海	100,000	1,000	100	京大防災研	1971
来島海峡	300	250	1.2	港湾技研	1971
東京湾	2,000	100	20	港湾技研	1971
大阪湾	2,000	100	20	港湾技研	1971
志布志湾	1,500	150	10	公資研	1972
東京湾	2,000	200	10	公資研	1972
三河湾	2,000	160	12.5	京大防災研	1972
松山地先	1,000	200	5	電中研	1972
中海	300	10	30	京大農	1972
瀬戸内海	2,000	160	12.5	中工試	1973
伊勢湾	2,000	160	12.5	五港建	1974
瀬戸内海	50,000	500	100	京大防災研	建設中

水理模型をその水平縮尺を基準に分類し、1/1000以上を大縮尺、1/1000～1/1万を中縮尺、1/1万以下を小縮尺と呼ぶことにする。模型内の鉛直レイノルズ数は、鉛直縮尺のみに依存するから、直接水平縮尺とは関係しないが、実際には無制限に模型を歪めることはできないので、無関係ではあり得ない。また、水平レイノルズ数は水平縮尺に比例するから、一般に小縮尺になれば模型内の流れは層流になる。ま

た、原型の水深や流速が小さい場合には層流になり易い。

模型の歪（鉛直縮尺と水平縮尺との比）についてみると、模型内の水深が浅くなり過ぎるといろいろ不都合な問題が生ずるから、ある程度（数cm）の水深は必要であるが、このため小縮尺になるほど歪が大きくなる傾向がある。

戦後初めて京都大学防災研究所で行なわれた広島湾の実験¹⁾は、大縮尺であるが層流模型である。このような例は、その後名古屋港の実験^{23,27)}があるのみで、他に例はない。

大縮尺の乱流模型は各地で用いられている。この中には関門海峡や来島海峡の実験のように、往復流でなく一方向の流れによる実験も含まれている。

また、この分類に属する実験の一つに、密度成層を考慮した中海の模型実験が行なわれつつあるが、研究成果に期待したい。

中縮尺の模型では、有明海の1/8000の例を除けば、水平縮尺は1/1000～1/2000に集中しており、名古屋港の例^{23,27)}以外はすべて乱流模型である。模型歪は大部分10～20になっている。実験の目的は多様であるが、有明海の1/2000模型²⁸⁾以降は、長崎干拓の実験以外すべて拡散現象を取り扱っている。これらはいずれも密度成層を考慮していない。

拡散現象を取り扱う場合には、模型内でも乱流拡散を期待するわけであるから、縮尺は大きい方が有利であり、できるだけ大縮尺の方が望ましいが、費用の関係で多くの場合1/2000に止まっている。

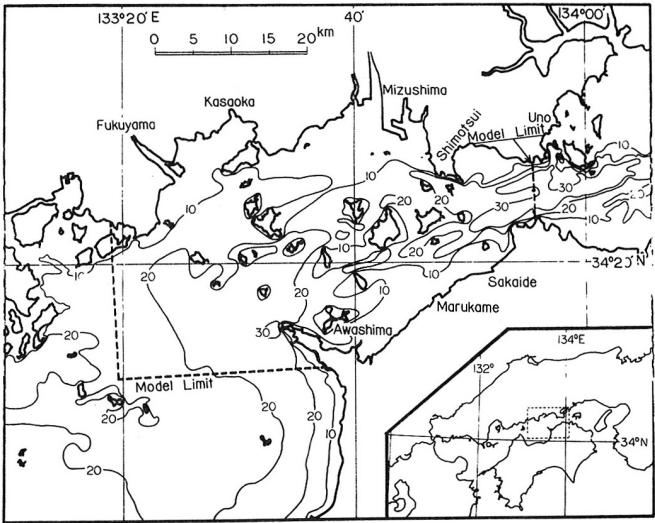
小縮尺の実験では、すべて模型歪は100以上となり、縮尺からみて層流模型に属すると考えられる。

表－1のうち、筆者が取り扱った2つの例について概説する。

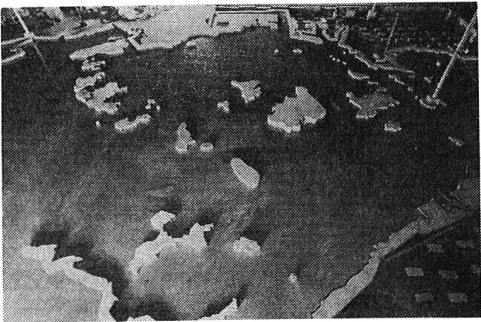
(1) 水島灘^{30), 31)}

瀬戸内海の中央部水島灘に排出される産業廃水の拡散を調べる目的で実験が行なわれた。これは乱流模型で α 、 β 式が適用された。すなわち、水平縮尺として1/2000が選ばれ、 $h_r = t_r = 160$ が採用された。模型はモルタル刷毛仕上げである。拡散係数の縮率は、 $K_r = \alpha_r^{1/3}$ である。対象海域における塩分等の現地観測資料によると、この海域は強混合海域と考えてよさそうであるから、とくに密度差の影響は考えなかった。

図－7および写真－1に模型と水槽を示す。実験の結果、つぎのことが明らかになった。
a) 潮汐はほぼ再現される。b) 潮流については、最大流動距離程度の大規模な流れ、および地形性渦流程度の中規模の流れがともに



図－7 水島灘模型の範囲



写真－1 水島灘模型($\alpha_r = h_r = 160$)

再現される。c) 潮流に伴う水平乱れには、底面境界層性水深程度の規模のものと、島や半島の後流中の乱れとが含まれている。後者については、定量的にはまだ確かなことは言えないが、模型の方が幾分大きいようである。d) 染料の拡散実験から求めた拡散係数は、100～1000 mの規模ではほぼ再現される。また、この規模では、100 m以下の規模に対する拡散係数は、模型内の方が小さくなる傾向がある。e) 河口付近の塩分分布と、模型内のそれに対応する染料濃度分布とはかなりよく一致する。f) これから求めた拡散係数と、浮標の一潮時あたりの分散から求めた10km程度の規模の現象に対する拡散係数は、ともにさきの拡散係数から4/3乗則により外挿した値とよく一致する(図-8)。g) 原型の資料が得がたいので比較は困難であるが、実験によると、港口や河口付近における産業廃水の濃度分布および最大流動距離程度の規模の水平混合に対して、潮流に伴う地形性の渦流が重要な役割を果たしている。h) 潮汐および鉛直平均流は、底面摩擦をあわせると再現できる。

i) 局所的な地形性渦流は、いま述べた大規模な平均流速 U と、渦の原因となる地形の大きさ L とを、それぞれ代表流速、代表長さとし、地形性渦流より一段小さな規模の渦動拡散係数 K を粘性係数とする、一種の乱流レイノルズ数 $Re_t = UL/K$ が模型と原型とで一致するために再現されると考えられる。j) 水深の数倍程度以下の乱れについては、その異方性の度合から考えると、歪模型では再現されないはずのものであるが、このような乱れは、粘性および内部混合を通じて、より大規模の渦流および拡散に関係するはずであるから、その構造については検討の必要がある。

(2) 三河湾^{35), 39)}

愛知県三河湾東部に排出される産業廃水の拡散を調べる目的で実験が行なわれた。これも乱流模型で、縮尺は水島灘の場合と同じ($\alpha_r = 2000$, $h_r = 160$)である。模型はモルタル刷毛仕上げ、真水を使用している。

図-9および写真-2に模型と水槽を示す。実験の結果、つぎのことが明らかになった。

a) 潮汐・潮流はほぼ再現される。

b) 長期的(潮汐の100周期程度)にみ

た廃水の濃度分布は、恒流(図-10)に支配されている。

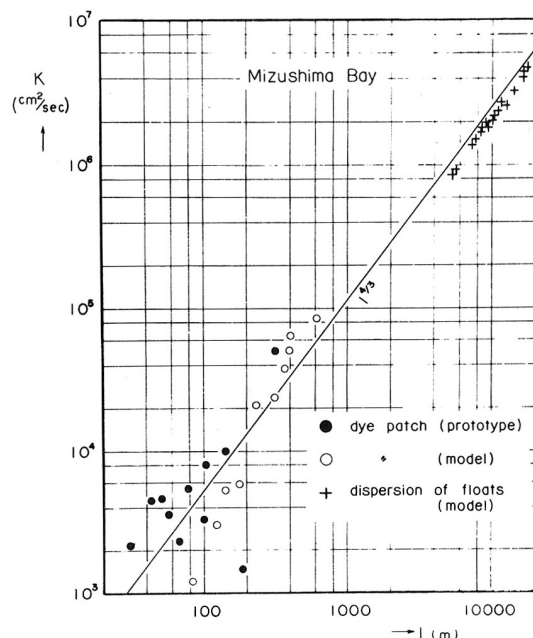


図-8 現象の規模 l と拡散係数 K



写真-2 三河湾模型($\alpha_r = 2000$, $h_r = 160$)

c) 湾奥から連続的に投入した染料水の濃度分布から、湾を1次元として求めた拡散係数は $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 一方、湾中中部のbox modelで2次元的に求めた拡散係数は、潮流の主軸方向に $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 直角方向に $1.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり、1桁小さい値となる。

d) 湾内の各断面での恒流による染料fluxから求めた分散係数が、さきの1次元の拡散係数に近いことから、三河湾程度の規模における物質分布は潮流による拡散としてよりも、恒流による分散として理解できる。なお、このことは、現地観測によって確める必要がある。

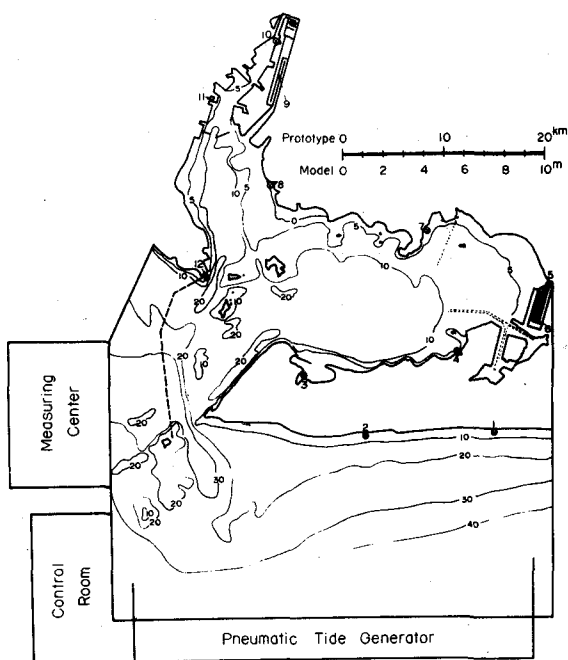


図-9 三河湾模型 ($x_r=2000$, $h_r=160$)

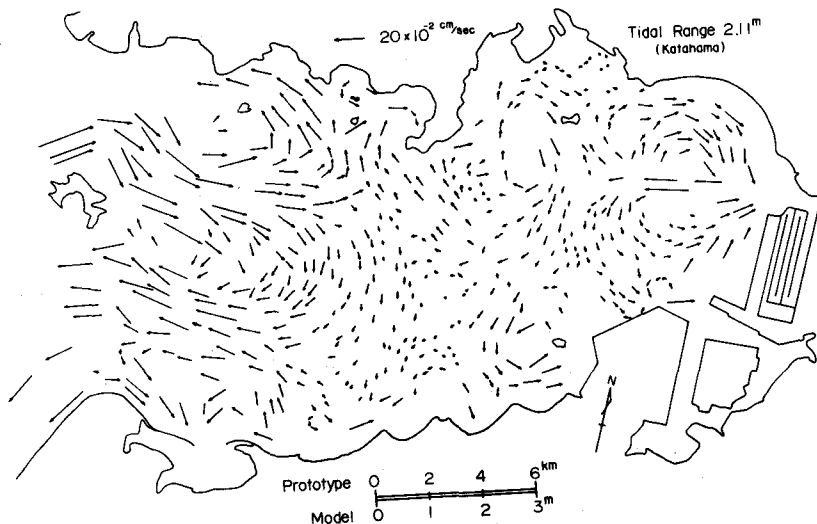


図-10 三河湾の恒流(模型)

(3) 瀬戸内海¹⁸⁾

瀬戸内海的环境保全の研究のために昨年5月完成した。これも乱流模型で、水平縮尺 $1/2000$, 鉛直縮尺 $1/160$ である。模型は現在のところモルタル刷毛仕上げであるが、検証実験により人工粗度を取り付ける必要が生ずるかも知れない。将来は淡塩水が使用できるよう設計されている。

模型および実験施設を図-11および写真-3に示す。この模型は、瀬戸内海全域と紀伊・豊後両水道と関門海峡および外海部を含み、東西約230 m, 南北約100 mに及び、一海域の模型としては、世界最大のも

のである。計算機制御による傾斜堰式起潮機、定抵抗触針式水位計、超音波流速計のほか、自動採水器や数基のクレーン等最新の装置を備えている。

、現在調整中で、まだ結果はでていないが研究成果が期待される。

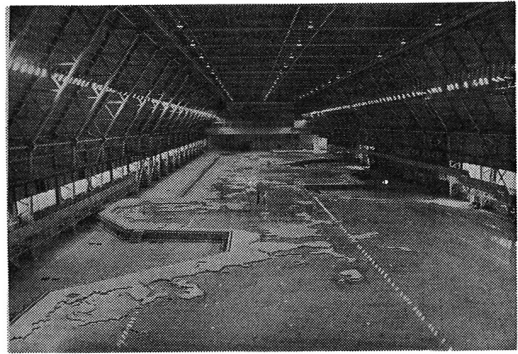


写真-3 瀬戸内海模型 ($x_r=2000$, $h_r=160$)

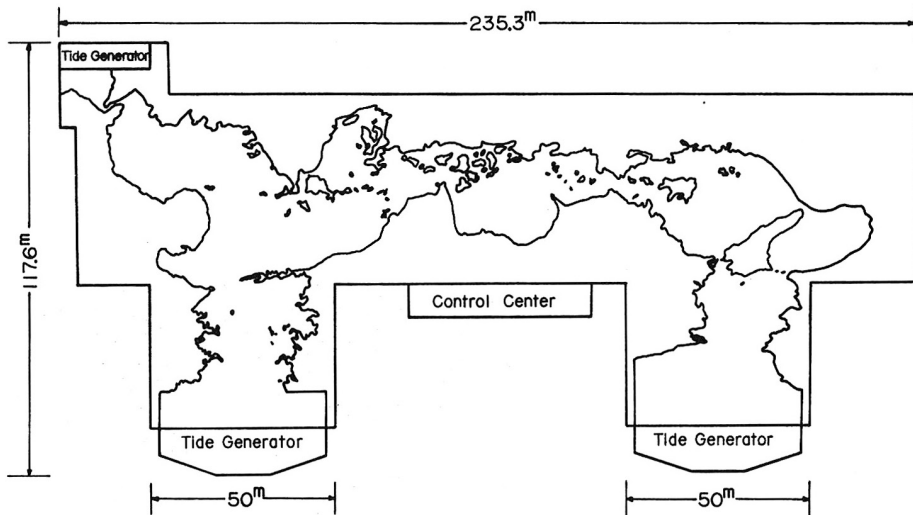


図-11 瀬戸内海模型 ($x_r=2000$, $h_r=160$)

以上若干の例について概説したが、初めに述べたように、一般に、実験内容は多種多様であるから、個々の例についてはそれぞれの文献を参照されたい。

今後ますますこの種の実験は発展するものと考えられ、それに応じて幾多の困難な問題が発生することが予想されるが、その解決のためには基礎的な研究を進める必要があるだろう。

5. 国外における実験例³⁸⁾

1971年に筆者が見聞した諸外国における潮流実験の例は表-2のようである。このほか、イタリアのパドバ大学におけるベニス・ラグーンの実験、ジョンズホプキンス大学におけるチェサピーク湾の実験等が計画中であった。

以下に研究施設ごとに実験例について概説する。

1) スウェーデン国立電力水理実験所

スウェーデン最大の水理実験所で、フォースマーク原子力発電所の取排水の実験を行なっている。発電所の能力は350～900万kwで、冷却水の流量は200～450 m³/sec、取排水の温度差は10度である。この発電所完成後の、地先海域における冷却水の再循環の模様を実験的に求めようとするもので、水平縮

表-2 潮流の模型実験例(国外)

国 名	対 象 海 域	縮 尺		歪	実 施 機 関
		水 平	鉛 直		
スウェーデン	フォースマーク	350	50	7	国立電力水力実験所
英 国	モアカム湾	1,000	100	10	国立水力研究所
ドイ ツ	エルベ河口	500	100	5	国立水力実験所
"	"	800	100	8	"
"	ハンブルグ港	500	100	5	ハノーバー工大
"	ウェーザー河口	300	100	3	"
フ ラ ン ス	英 仏 海 峡	50,000	500	100	グルノーブル大
オ ラ ン ダ	ラインデルタ	2,400	64	37.5	デルフト水力実験所
"	"	300	100	3	"
"	ライン河口	640	64	10	"
"	ラインデルタ	400	100	4	"
"	"	80	80	1	"
米 国	ニューヨーク港	1,000	100	10	水路実験所
"	ティラムク湾	500	100	5	"
"	デラウエア湾	1,000	100	10	"
"	サンフランシスコ湾	1,000	100	10	陸軍技術部隊

尺 $1/350$ 、鉛直縮尺 $1/50$ の模型(写真-4)が用いられている。実験室は 45×43 m のテント張りで、室内の気圧を高めて、風船のようにふくらませて使用している。ここでは潮流を擬似定常とみなして、いくつかの代表的な流況について、定常流で実験を行なっている。水温の測定はサーミスター、記録はデーターロガーで行なっている。

2) 英国国立水力実験所

アイリッシュ海に臨むモアカム湾の湾口に、延長30哩の潮止め堰を設け、内部を淡水化しようという計画のための実験で、堰の建設による流れおよび海底地形の変化を知ろうとするものである。この辺りの大潮差は10m、小潮差は3mである。水平縮尺 $1/1000$ 、鉛直縮尺 $1/100$ の模型(写真-5)が造られ、固定床と移動床と両方の実験が行なわれている。ここでは唯一の例として気圧式の起潮機が用いられている。等潮時線に沿った4つの空気室がパイプで結ばれ、1台のプロアーにより水位制御が行

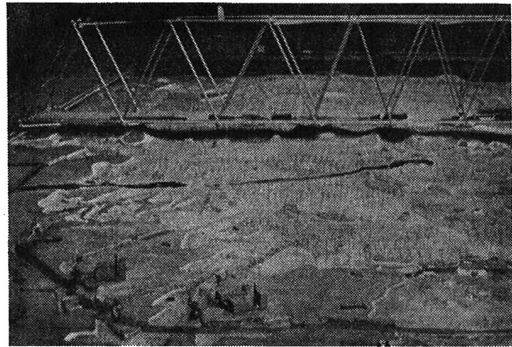


写真-4 フォースマーク海域模型 ($x_r=350$, $h_r=50$, スウェーデン国立電力水力実験所)

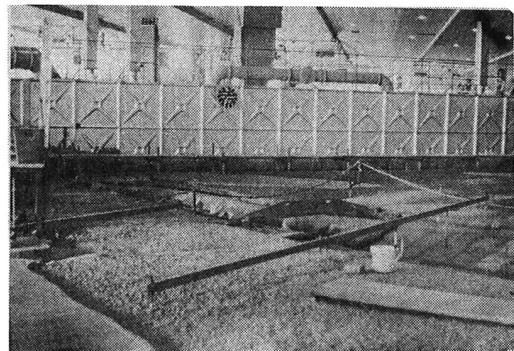


写真-5 モアカム湾模型 ($x_r=1000$, $h_r=100$, 英国国立水力研究所)

なわれている。移動床の実験には、底質として、直径 0.5 mm の木屑に湯を通したものをを用いている。現地では、底質の移動を放射性同位元素を用いて測定しているが、底質の再現性についての証明は困難なようである。

3) ドイツ国立水理実験所

ドイツ最大の水理実験所で、北海に注ぐ三大河川（東からエルベ、ウェーザー、エムス）の河口付近の模型実験を行なっている。代表的なものは、エルベ河口の実験で、目的は、河口導流堤の延長による航路埋没の問題である。模型は、水平縮尺 1/500、鉛直縮尺 1/100 の固定床模型と、水平 1/800、鉛直 1/100 の移動床模型（写真-6）とがある。移動床の底質はプラスチックの粉末を使用している。

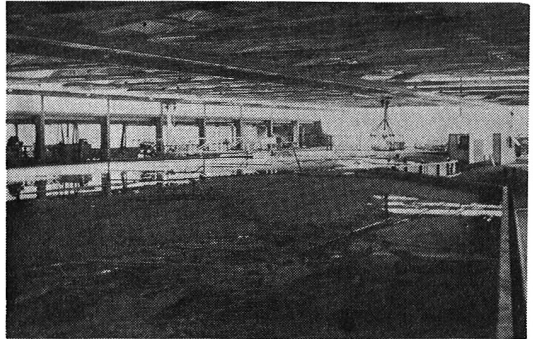


写真-6 エルベ河口模型 ($x_r=500$, $h_r=100$,
ドイツ国立水理実験所)

4) ハノーバー工科大学（ドイツ）

エルベの河口港であるハンブルク港の栈橋の実験（水平縮尺 1/500、鉛直縮尺 1/100、写真-7）、ウェーザー河口の潮止め堰の建設による流れの変化の実験（1/200、1/100）、クェートのシャイバ港の温排水の再循環の実験（1/100、1/100）ウェーザー河口部の流況の実験（1/300、1/100）などを行なっている。ウェーザー河の模型では、高潮と潮汐が重なった場合の実験を行なっている。

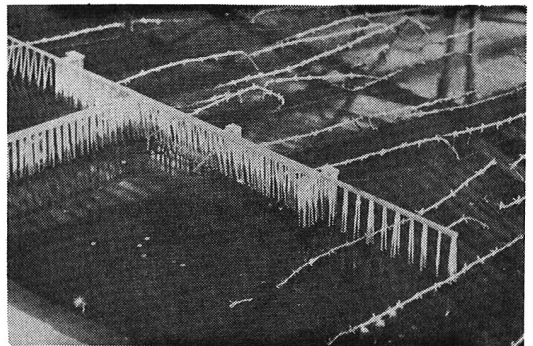


写真-7 ハンブルク港模型 ($x_r=500$, $h_r=100$,
ハノーバー工科大学)

5) グルノーブル大学流体力学研究所（フランス）

回転模型による英仏海峡の潮汐の実験を行なっている。海峡の北岸（英国）では潮差は 3 m、南岸（フランス）では 12 m ありフランスではこれを利用して、ランス河の河口に潮力発電所を作った。この装置は、その調査のために作られたもので、高調波の無潮点を含めて、海峡内の潮汐がよく再現されている。水平縮尺は 1/50000、鉛直縮尺は 1/500、フラッター式の起潮機がついている。（写真-8）。回転台は直径 14 m のコンクリート製で、リムドライブにより回転する。人工粗度として針金を組み合わせた枠を用いている。

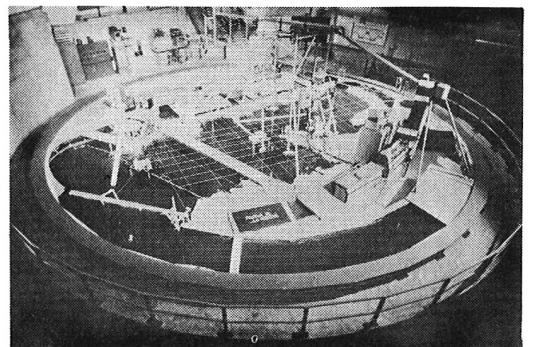


写真-8 英仏海峡回転模型 ($x_r=50,000$, $h_r=500$,
グルノーブル大学)

6) デルフト水理実験所（オランダ）

i) デルタ計画で実現する淡水湖 (Brouwer shavenshe Gat) を対象に、拡散実

験に対する水理模型の適用性と縮尺効果の研究が行なわれている。水平縮尺と鉛直縮尺がそれぞれ、 $1/2400$ と $1/64$ ，および $1/300$ と $1/100$ の模型による実験結果と、現地観測資料とから、染料濃度の時間的変化について比較している。結論はまだ発表されていない。

ii) 同じくデルタ計画の一つとして建設予定のEuroportに関連して、ライン河口付近の塩水クサビの問題と、埋立地造成による流況の変化を知るために、水平縮尺 $1/640$ ，鉛直縮尺 $1/64$ の模型(写真-9)が使われている。人工粗度として7cm角のコンクリートブロックが用いられており、追跡用の浮標として、直径1cm，長さ4～5cmの白い塩化ビニールの円筒が用いられている。

7) デボースト水理実験所(オランダ)

さきのデルフト水理実験所の分所で、アイゼル湖の干拓地にある実に広大な敷地(1×2 km)をもつ実験所で、40個以上の模型が常設され、各種の実験が行なわれている。

代表的なものは、デルタ計画の一つであるOosterscheldeの締切りに関連した研究で、延長約10kmの締切り堤を作るために、締切工法の研究を行なっている。工事の順序、最後に残される3つの開口部の配置および締切りの順序、締切り地点の兩岸の洗堀、工事中の海底の洗堀等の研究を、水平および鉛直縮尺が $1/80$ の移動床模型(写真-10)で、定常流により行なっている。流量 200l/sec のポンプ15台を備え、10mの可動堰25門によって流量を制御し、上げ潮、下げ潮の代表的な流れについて定常流により実験を行なっている。将来は、非定常流(潮流)の実験が行なわれる予定である。移動床の底質は、ポリスチレンで、電気抵抗式の測深器で水深変化を測定してい

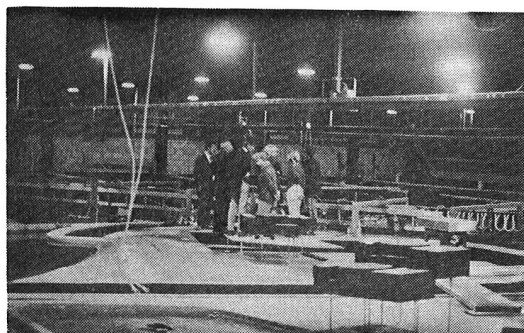


写真-9 ライン河口模型($x_r=640$, $h_r=64$, デルフト水理実験所)

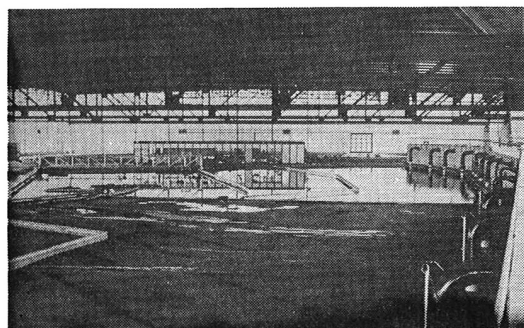


写真-10 ライン・デルタ移動床模型($x_r=80$, $h_r=80$, デルフト水理実験所)

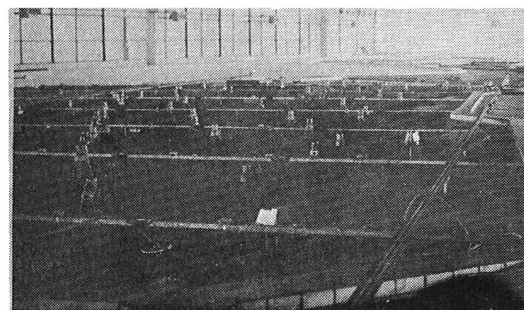


写真-11 ライン・デルタ固定床模型($x_r=400$, $h_r=100$, デルフト水理実験所)



写真-12 コリオリ・トップとブロック粗度(ライン・デルタ固定床模型用, デルフト水理実験所)

る。

一方、この模型に与える境界条件を決定するために広域潮流模型が用いられている。水平縮尺は $1/400$ 、鉛直縮尺は $1/100$ で、長さ約 170 m 、幅 80 m の模型（写真-11）である。模型の一端に、北海の潮汐を与えるために 10 m の自動制御堰8門が備えられている。この模型に、さきにのべたCoriolis - Top（写真-12）が使われている。

この2つの模型は、総延長 350 m 、幅 80 m （床面積 25000 m^2 ）の建物の中にあり、中央制御室で運転・制御・計測・記録が行なわれている。測定資料は96要素のペン書きと、電算機用の磁気テープとの両方に記録される。これらの模型は、工事完了予定の1978年まで使われる予定である。

8）水路実験所（米国）

米国では、この種の大型模型は、ミシシッピ州にある水路実験所に集中されており、陸軍技術部隊が管理している。実験には、大学の研究者との共同研究が行なわれている。

i）ニューヨーク港模型（写真-13）

いろいろな港湾計画のもとにおける、潮汐、潮流、塩分の模様や、浚渫の効果を調べたり、熱汚染や水質汚濁の研究をするために、水平縮尺 $1/1000$ 、鉛直縮尺 $1/100$ の模型が使われている。起潮機は3台あり、バルブによる流量調節を行なう方式である。2台は天文潮を、1台は高潮を再現するために用いられている。拡散実験用の染料は、ウランのほか、ポンタシブリリアアントピンクが用いられ、蛍光光度計で濃度測定が行なわれている。

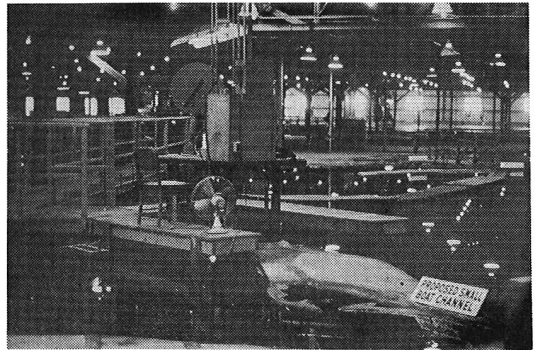


写真-13 ニューヨーク港模型（ $x_r=1000$ ， $h_r=100$ ，米国水路実験所）

ii）ティラムク湾模型（写真-14）

湾口の防波堤の建設による、湾内の流況と塩分の変化を知るために、水平縮尺 $1/500$ 、鉛直縮尺 $1/100$ の模型が用いられている。起潮機は、カムによるプログラムで水銀スイッチを作動させ、スルース弁を開閉して潮汐を発生させる方式のものである。塩分は、採水して、滴定により校正しながら電気伝導計により測定している。

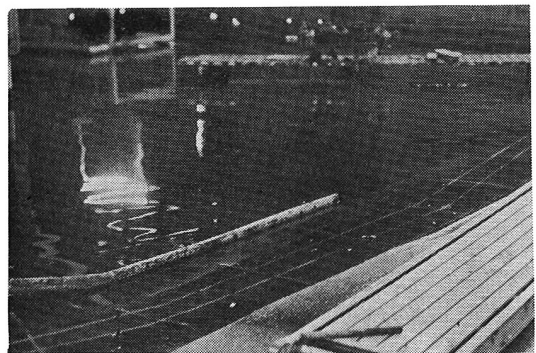


写真-14 ティラムク湾模型（ $x_r=500$ ， $h_r=100$ ，米国水路実験所）

iii）デラウェア湾模型（写真-15）

湾内の潮汐、潮流等に関する基礎調査、航路拡張、堤防や河川工作物の建設による流況や塩分分布の変化、潮汐混合、水質汚濁、熱汚染等、きわめて広範囲の研究を行なうために水平縮尺 $1/1000$ 、鉛直縮尺 $1/100$ の模型が用いられている。現在は、チェサピーク湾と結ぶ運河建設により生ずる塩分分布の変化が研究されている。

9）サンフランシスコ湾模型（写真-16）（米国）

これも、陸軍技術部隊が管理している。1956年に完成したもので、当初から、水供給、水質保全、船

船舶の航行、洪水調節、潮止め堰や埋立地造成による潮汐・潮流の変化の研究等多目的であったが、後にサクラメント河のデルタ地帯の水供給、水質保全の問題が提起され、デルタ部分の模型をつぎ足した。水平縮尺は $1/1000$ 、鉛直縮尺は $1/100$ 、で、太平洋の一部（ 17×25 哩）を含み、模型の大きさは約 100×100 mである。模型は四隅をジャッキで支えた約 4 m 角の部分模型を多数つなぎ合せたもので、年 1 回高さの調節を行なって地盤の不同沈下に対処している。模型内には多数の金属片の人工粗度がおかれている。

起潮機は、1 サイクルが 25 時間に相当する 2 つのカム（プログラム）により給排水用のスルース弁の開度調節を行なうものである。大潮差は 5 呎である。

実験には 32% の人工海水を用い、外海側の塩分を一定に保つように調節しているが、塩を節約するために、河川水による表層の低塩分を捨てるように工夫されている。染料実験の場合には 20～40 周期、塩分分布の実験では 50～60 周期繰り返され、最長 300 周期の実験が行なわれている。

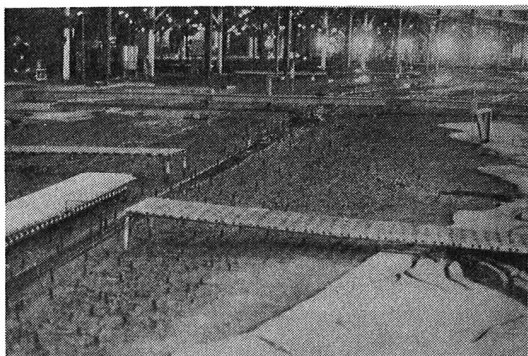


写真-15 デラウェア湾模型（ $x_r=1000$, $h_r=100$, 米国水路実験所）

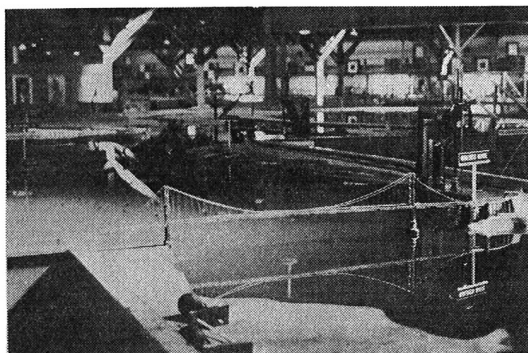


写真-16 サンフランシスコ湾模型（ $x_r=1000$, $h_r=100$, 米陸軍技術部隊）

以上、諸外国における大型水理模型実験について、興味深かったものを書き並べたが、これらを見て感じたことは、国によって差はあるが、一般に設備が充実していることである。また一つの模型が、総合的に利用されており一連の実験が終っても、すぐ取りこわさずに長期間保存され、新しい問題が出るたびに何度も使用されており、わが国のように、同一海域の模型が何ヶ所かで作られるような不経済なことはい。

また、データ集録・処理装置の充実により、省力化・能率化を計っており、大規模な実験を小人数で能率よく行なえるよう努力している。また、電気・機械関係の熟練者を擁している所が多く、新しい実験用機器や測器の開発が各所で行なわれていることも見逃してはならない。

6. 水理模型実験の有用性と限界

1) 有用性

水理模型実験の特長を列挙する。

- 条件を固定して何回でも繰り返すことが出来る。
- 中規模の現象の野外での観測は、多大の労力を必要とし、また限定した条件で長期間連続で行な

うことが困難である。模型実験では容易に、かつ、いつでも行なうことができる。

- c) 空間の単位が水粒子の大きさであるから、相似側の範囲内では、数値実験に比べて精度は非常によい。
- d) 実験条件を変えることによって、未知の因子およびその重要性を明らかにすることができる。
- e) 浮子や染料域の流動・拡散の様子が目で見え、実体がつかみやすい。
- f) 地形性の過流の存在に基づく濃度分布の局地性を調べたり、地形、河水・廃水の流量、および投入位置などの実用的な条件を変えて与えるのが容易である。

2) 限界

水理模型実験の、技術的な限界および本質的な限界について略述する。

a) Model limit の影響

境界における、水位、流速、塩分、染料濃度などの諸量は与えるべきものである。便宜的には着目海域の流況への影響が無視できる距離（最大流動距離）以上の余裕をもって境界を決め、水位だけをあわせる。また、連続点源による濃度分布の擬定常状態としては、着目海域での濃度の時間的な変化率がある値より小さくなったときのものを、代用している。また、模型では、人工的に境界を作ったことによる静振があらわれることがあるから注意を用する。

b) 底面の粘性境界層および表面張力の影響

大体の Model limit が決まると、実験施設との関係から水平縮尺が決まる。対象が浅海の場合には、底面の粘性境界層と表面張力の影響を除くため、模型を歪ませねばならないが、歪をあまり大きくすると底面粗度を極端に大きくしなければならぬし、鉛直流の影響が現われるから、10～20以下の歪にするのが普通である。通常、表面張力を除くためにもマニング式の適用限界からも、模型の水深が1 cm以上は必要である。

c) 拡散現象の再現性に及ぼす模型歪の影響

シア効果による水平分散係数は Harleman によって指摘されているように、歪模型では歪率の $\frac{3}{2}$ 乗倍大きくあらわれる。従って狭い estuary のような、シア効果が卓越する所では、濃度分布は再現されない。

d) 模型で再現可能な現象の規模

一般に上限は、コリオリ項が無視できる範囲すなわち数10 km程度である。下限は、分子粘性を無視できる範囲すなわち模型のスケールで数 mm、原型のスケールに換算して、1/2000 の模型では数10 mである。その他に、恒流、密度流、長周期の擾乱などの影響により、あるいは起潮機や計測器などの精度により、それぞれ、上限、下限がきまる可能性が考えられる。

3) 可能性

これまででは、浅くて潮流の強い、従って密度が上下に一樣に近い海域における、保存性の物質の拡散をとり扱ってきた。塩水が使える施設で、流速の鉛直分布が再現できるような摩擦の与え方をし、退色速度が安定して速い蛍光染料を開発すれば、非保存性物質の、成層流域における拡散を扱うことへの拡張が可能となるであろう。また、回転水槽や Coriolis - Top の利用、あるいは方向可変で多孔の翼型抵抗板等を開発して、平面水槽に、コリオリ力を導入できれば、さきに述べた実験的に取り扱える現象の規模はさらに拡張されよう。

7. あとがき

以上、潮流の水理模型実験に関して、相似則に関する考え方、および実験計画等について述べ、国内で行なわれた実験のうち、筆者の行なった2例と最近完成した瀬戸内海大型模型について概説し、国外の分については、1971年に見聞した大型水理模型について紹介した。さらに、水理模型実験の有用性と限界および可能性について述べた。

さきに述べたように、模型実験ではあらゆる現象をすべて相似にすることはできないから、何が重要な因子であるかを見付けるのが大切なことである。ここではもっぱら海底摩擦を重要な因子と考えて実験を行なう場合について述べたが、これ以外に密度差、コリオリの力、風の応力などが重要な役割を演ずる場合もあるわけで、これらについては今後の研究にまたねばならない。

ここにあげた実験例では、縮尺を決定する場合に、原型の海底摩擦係数が重要な意味をもつが、これについては現地観測資料の集積を行ない、さらに明らかにする必要がある。なお、実験の精度をあげ、能率よく行なうためには、実験用測器、とりわけ流向・流速計などの開発は重要な仕事である。着目する現象を再現できる縮尺の限界の決定、あるいは、水以外の流体を使用することなども考えねばならぬことであろう。

参考文献

- 1) 速水頌一郎、樋口明生、吉田幸三：潮流を含む水理模型実験の相似性について、京大防災研年報2，昭33，93～94
- 2) 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，2-2，1963，15
- 3) 樋口明生：潮流模型における乱流度に関する一考察，京大防災研年報15B，昭47，425～430
- 4) Collins, J. I. : Inception of turbulence at the bed under periodic gravity waves, J. G. R. Vol. 68, No. 21, 1963, 6007～6014
- 5) 土木学会：水理公式集，昭46，11
- 6) 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28，16
- 7) 樋口明生，辻正明：松川浦における潮流の水理模型実験，京大防災研年報14B，昭46，415～434
- 8) たとえば，足立昭平：人工粗度の実験的研究（棧型粗度と溝型粗度），京大防災研年報4，昭36，185～193
- 9) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，昭36，21～42
- 10) Higuchi, H. : Hydraulic model experiment involving tidal motion, Part I, II, III and IV, Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Bull. No. 59, 1963, 3～6
- 11) 中村充，大西英夫，白石英彦，佐々木泰雄：伊勢湾の水理模型実験について，第9回海岸工学講演会講演集，昭37，28～33
- 12) 堀川清司，梶浦欣二郎，相田勇，長谷直樹：東京湾の潮流に関する実験的研究，第11回海岸工学講演会講演集，昭39，118～125
- 13) 江村富雄，鬼塚正光：廃水拡散試験装置，公害，2-2，昭42，84～92
- 14) 江村富男，鬼塚正光，深尾浩，山口文男：水理模型実験による廃水拡散の研究(1)，第15回海岸工学講演会講演集，昭43，331～333
- 15) 農林省熊本農地事務局，長崎海洋気象台：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33，1～67
- 16) 高田雄之，戸原義男：有明海の水理実験について(1)，第10回海岸工学講演会講演集，昭38，70～74

- 17) 運輸省第4港湾建設局；関門海峡潮流模型実験報告書，昭35， 1～122
- 18) 井原潤，肥後竹彦，田辺弘道，平田静子；瀬戸内海大型水理模型による実験的研究（序報），第20回海岸工学講演会論文集，昭48， 221～225
- 19) Honda, K., Terada, T., Yoshida, Y and Ishitani, D.; Secondary Undulation of Oceanic Tide, Jour College of Science. Univ. of Tokyo 24, 1912
- 20) 高谷静男；瀬戸内海東部の潮流実験報告(I) 海洋气象台（神戸），1930， 1～11
- 21) 樋口明生；境水道の水位変動に関する水理模型実験(I)，京大防災研年報3，昭34， 54～64
- 22) 樋口明生；境水道の水位変動に関する水理模型実験(II)，京大防災研年報4，昭36， 237～249
- 23) 樋口明生，吉田幸三；名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験について(1)，京大防災研年報5 A，昭37， 323～331
- 24) 安井善一，渡辺貫太郎，梶原明仁，桑田富；津軽海峡潮流の模型実験について，昭37年日本海洋学会秋季大会講演要旨，昭37， 5
- 25) 高田雄之，戸原義男；有明海の水理模型実験について(2)，第10回海岸工学講演会講演集，昭38， 75～79
- 26) 中村充，白石英彦，佐々木泰雄，大西英夫；伊勢湾の水理模型実験について(II)，第10回海岸工学講演会講演集，昭38， 70～74
- 27) 樋口明生，吉田幸三；名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験について(2)，京大防災研年報6，昭38， 346～364
- 28) 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，京大防災研年報10 B，昭42， 343～363
- 29) 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)，京大防災研年報11 B，昭43， 447～461
- 30) 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(III)，京大防災研年報12 B，昭44， 633～634
- 31) 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(IV)，京大防災研年報13 B，昭45， 457～470
- 32) 山田英太郎，満田雅男；湾口締切りに関する潮汐模型実験，長崎干拓潮汐実験報告(II)，農業土木試験場技報E（佐賀支場）第7号，昭45， 1～24
- 33) 杉本隆成，樋口明生；瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(I)，序報，京大防災研年報14 B，昭46， 435～450
- 34) 杉本隆成，樋口明生；瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(II)，京大防災研年報15 B，昭47， 431～440
- 35) 樋口明生，柳哲雄，柏井誠；潮流による拡散の水理模型実験について(V)，京大防災研年報16 B，昭48， 619～629
- 36) 和田明，片野尚明，加藤正道；潮汐水理模型による拡散予測(1)，第19回海洋工学講演会論文集，昭47， 277～281
- 37) 和田明，加藤正道，片野尚明；潮汐水理模型による拡散予測（その2），第20回海岸工学講演会論文集，昭48， 221～225
- 38) 樋口明生；諸外国における沿岸海洋の研究について，京大防災研年報15 A，昭47， 25～34
- 39) 樋口明生，柳哲雄，柏井誠；潮流による拡散の水理模型実験について(VI)，京大防災研年報17 B，昭49