

# 沿岸海洋に関する水理模型実験

樋 口 明 生

## 1 まえがき

沿岸海洋というのは厳密な定義はないが、一般に陸水の影響をうける海域あるいは、地形的に大陸棚以浅と考えられている。大洋に較べて水深が浅いために、流れはコリオリの力よりもむしろ水深変化の影響を大きく受け、また海底摩擦のために現象は複雑となる。また、淡水・塩水の混合の場合であることや、水深の相異による熱容量の違いのために、海域による水温差ができるなど、密度変化の効果も大きい。一方、現象面からみると、風波やうねりのような短周期波、津波やエッジウェーブなどの長周期波、および潮汐などの波動現象、吹送流、傾斜流、慣性流等々多種にわたるが、これらのすべての現象を取扱うことはとうてい不可能であるから、ここでは浅海における潮流のみを考えることにする。

最近、わが国の経済発展にともない、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り、産業廃水の拡散の問題にもあてはまることである。

このような、潮流の変化を事前に知ろうとする場合に、2つの方法が考えられる。その一つは大型電子計算機による数値模型実験であるが、これは現在の段階では、主として計算機の容量が小さすぎるために、複雑な地形をもつ実際の場合に適用することは、ほとんど不可能といわねばならない。したがって、水理模型実験は、このための唯一の有用な手段ということになる。

水理模型実験は、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、簡単に答え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とても重要なことは、いうまでもなく、原型と模型との間に力学的な相似性が保たれていることである。これがおざりにされれば、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、まず検証実験をおこない、現地観測の資料と比較検討して十分相似性をたしかめた後、必要な実験を行なうべきである。

一口に潮流の実験といっても、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、その取扱いはかなり異なるのが常である。たとえば、対象とする海域が東京湾や有明海のように、先の閉じた袋状の湾であるか、あるいは瀬戸内海や津軽海峡のように、両側が開いた水路のような所であるか、それとも境界水道の場合のように比較的広い水域と海とを結ぶ水道のような所であるかによって、潮流の性質は異なるから、その取扱ひ方も自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、漁場の改善を目標とした、いわゆる海水の交流・交換などを調べることにある場合、産業廃水の拡散などを調べることにある

場合など、いろいろな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、まず基本的な事柄について述べた後、2,3の例について説明を加える。

## 2 潮流の実態

月と太陽との引力のために、海水の粒子は、普通の波動運動と同様な運動をする。ところが潮汐波は波長に比べて振幅がきわめて小さいから、水粒子の水平運動は鉛直運動に比較してはるかに大きい。このような水粒子の水平運動が潮流である。一地点の潮流は流向・流速ともに時間的に変化し、一定の時間がたつとふたたび最初の状態になり、これを繰返す。速度ベクトルの先端を結ぶと多くの場合楕円を、ときによると円または直線を示す。これを潮流楕円という。その回転方向は、北半球ではほとんど右回りになるが、位相角の異なる潮汐が強く影響するところでは左回りになることもある。

半日潮の卓越する場所では、1日に4回の転流があるが、特殊な場所では1日2回の場合もある。転流の周期は前者では6時間12分、後者では12時間25分である。最大流速は月令によって変化し、朔望の1～3日後が最も大きい。海流の大きい海峡では、流向が常に一定で、流速のみが周期的に変化し、転流しない所もある。海岸から遠く離れた沖合の潮流は、時とともにたえず流向・流速を変じ憩流を見ない。多くの場合、1日2回転するが、1日1回転、あるいは、はなはだ複雑な回転をするところもある。

潮流の推算値は任意の地点において得られるものではなく、比較的重要な海峡とか湾口とかについて与えられているだけであるから、ある特定の地点に関しては、観測によって求めなければならない。東播海岸における観測例を図-1<sup>1)</sup>に示す。図中の曲線は明石海峡中央部における推算値で

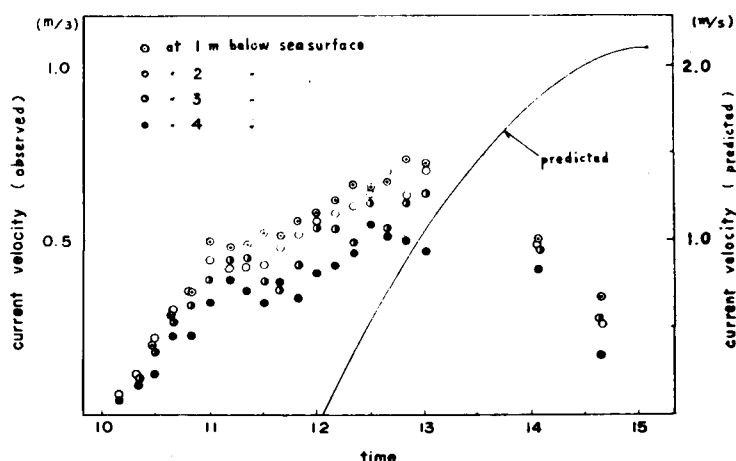


図-1 潮流の時間的变化、東播海岸距岸0.2 km地点における実測値と明石海峡中央部における予報値

あるが、わずか5 kmほど離れた地点でもかなり差があることがわかる。この測点のように、近くで予報値の得られるところでは、比較的短期間の実測によって対応をつけ、その地点における予報値を得ることができるが、そうでない地点では長期間の観測が必要となる。潮流の観測に関しては他

の文献<sup>2)</sup>を参考にされたい。わが国において、予報値が得られるのは表-1<sup>3)</sup>に示す地点だけで参考のために昭和43年度の予報値からその最大流速を示しておく。

同一地点における潮流槽円を表層から順次並べて見ると、水深が増すにつれて偏平で小さくなり位相角のずれが大きくなる。したがって、表層と底層とでは流れの方向が逆になることもある。潮流の鉛直分布には、海底地形、海底摩擦、海水の温度、塩分、密度などが影響する。海底摩擦係数については、いくつかの値が得られているが、代表的な例を示すと表-2<sup>4)</sup>のようである。

潮流の鉛直分布の時間的変化について、杉浦らは観測の結果から、その分布を図-2のように3つの形に分類し憩流から、最盛まで $a \rightarrow b \rightarrow a$  (または $c$ )の順に変化すると報じている。<sup>5)</sup>筆者らの観測によれば、必ずしもそのような変化を示さず、はなはだ複雑に変化する場合も見られる。<sup>6,7)</sup>

海岸線あるいは海岸構造物の近くでは、流れはそのような境界の影響をうける。たとえば、東播海岸における海岸線に垂直な測線上の最大表面流速は図-3<sup>1)</sup>のようであり、流速は海岸線からの距離と、ほぼ対数関係にあることがわかる。このことは、ある地点の潮流を知るためには、広い範囲の観測が必要であることを示唆している。

明石海峡全域にわたる最盛時の流速分布は図-4<sup>8)</sup>に示すようであるが、これによると流れは簡単に想像されるほど単純なものではなく、きわめて複雑な構造をしていることがわかる。

河口付近などで、密度成層のはっきりしている場合には、上層と下層とで、また上げ潮と下げ潮とでは憩流の起こる時刻が異なる。図-5<sup>9)</sup>は比較的淡水流入量の少ない時の、サンフランシスコ湾における流速と塩分の鉛直分布である。平均潮位近くで、高塩分の上げ潮流が下層にあり、低塩分の下げ潮流が上層に見られる。

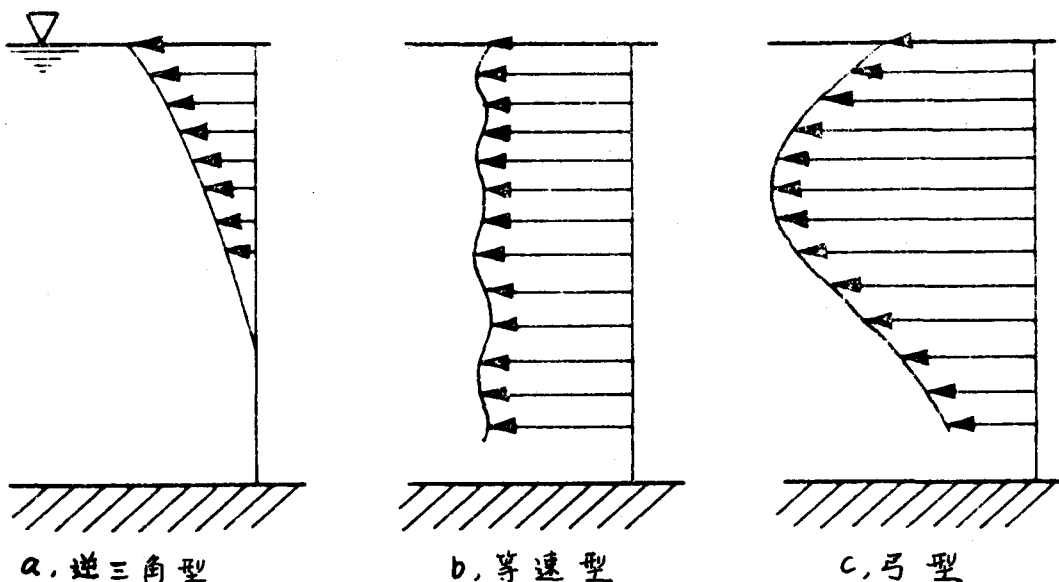
流れが深さ方向に異なる例を図-6<sup>10)</sup>に示す。この図は淡水流入量の比較的少ない時期と、比較的多い時期とにおける、潮汐1周期の上げ潮または下げ潮の卓越度を示している。ある深さにおける下げ潮流の卓越度は、流速曲線をプランメーターで積分することによって図-6(C)のようにし

表-1 海区と潮流の最大流速

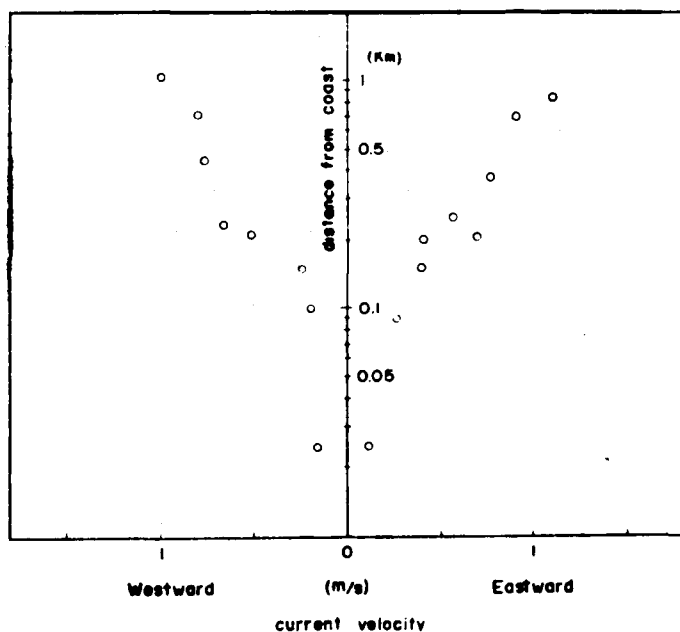
| 海 区 名  | 上 げ 潮 流<br>ノット (流向) | 下 げ 潮 流<br>ノット (流向) |
|--------|---------------------|---------------------|
| 東京湾湾口  | 1.9 (北西)            | 1.9 (南東)            |
| 伊良湖水道  | 1.5 (北西)            | 1.7 (南東)            |
| 友ヶ島水道  | 3.6 (北)             | 3.2 (南)             |
| 明石瀬戸   | 7.1 (西)             | 5.3 (東)             |
| 鳴門海峡   | 9.7 (北)             | 10.1 (南)            |
| 備讃瀬戸中部 | 3.3 (西)             | 2.7 (東)             |
| 来島海峡   | 10.2 (南)            | 8.2 (北)             |
| 釣島水道   | 3.3 (北東)            | 2.7 (南西)            |
| 関門海峡   | 8.1 (西)             | 7.8 (東)             |
| 速吸瀬戸   | 5.8 (北)             | 4.9 (南)             |
| 平戸瀬戸   | 3.4 (北)             | 4.0 (南)             |
| 早崎瀬戸   | 6.1 (東)             | 6.6 (西)             |

表-2 海底摩擦係数

| 人 名                              | 摩 擦 係 数                         | 場 所             |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Taylor, G. I.                    | $2 \times 10^{-3}$              | Irish Sea       |
| Grace, S. F.                     | $1.4 \sim 4.1 \times 10^{-3}$   | Bristol Channel |
| Grace, S. F.                     | $2.4 \sim 21.3 \times 10^{-3}$  | English Channel |
| Bowden, K. F. & Fairbairn, L. A. | $1.42 \sim 2.04 \times 10^{-3}$ | Red Wharf Bay   |
| Bowden, K. F.                    | $1.1 \sim 2.8 \times 10^{-3}$   | Red Wharf Bay   |
| Charnock                         | $3.4 \sim 11.6 \times 10^{-3}$  | Red Wharf Bay   |
| 樋口・中村                            | $0.95 \sim 2.49 \times 10^{-3}$ | 名古屋港            |



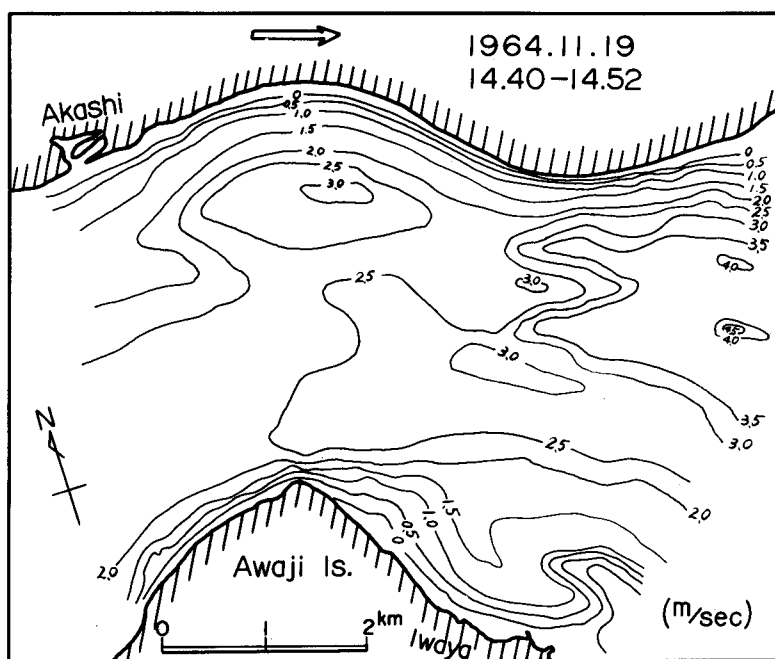
図一2 潮流の鉛直分布の模式図



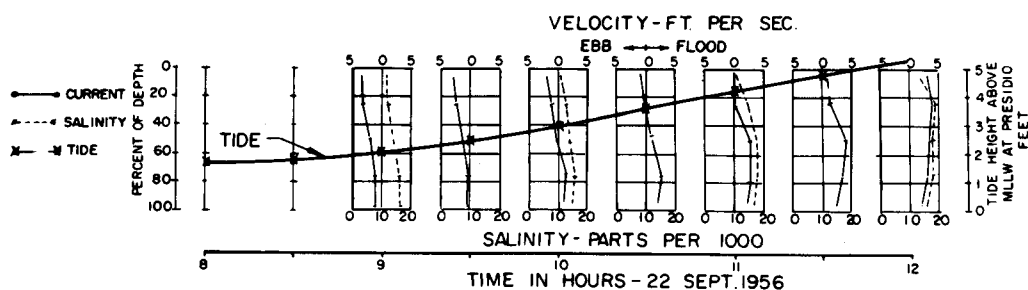
図一3 潮流の最大流速の水平分布（東播海岸）

て求める。この図によると、各深さにおける流量が明らかである。たとえば(a)では表面から20%までは下げ潮流が卓越し、下層80%では上げ潮流が卓越していることを示し、平らな塩水クサビが上流にまで達していることを表わしている。(b)では、多量の淡水のために曲線は垂直であり、塩水クサビはなく、下げ潮流が鉛直方向にほぼ一様の強さで卓越している。

潮流はいうまでもなく乱流であり、いろいろの周期の乱れが共存していると考えられるが、その微細構造はあまりよくわかっていない。Bowden<sup>11)</sup>、Stewart<sup>12, 13)</sup>らはこの乱れを測定して



図一四 明石海峡の潮流（下げ潮最盛時）



図一五 潮流と塩分の鉛直分布（サンフランシスコ湾）

スペクトル構造を明らかにし、この問題の解決に一步を進めている。杉浦らは、海底近くの流れに12時間から20分までの間のいろいろの周期のものが含まれていることを報じている<sup>5)</sup>。東播海岸における観測例からも、こうした特性が伺われる。<sup>14)</sup> 乱れの空間的分布の一例として、港口付近で観測された流速の鉛直分布を図一七<sup>7)</sup>に示す。この図は、完全な同時観測の結果を示すものではないがこの程度の変動は一般的なものと考えられる。この様な空間的変化は、水平方向にも存在し、とくに瀬戸内海のように島の多い所では、その下流側にwakeができたり、渦が発生したりするのが見られる。この点に関しては、観測例も少なく、今後の調査にまたねばならない。

### 3 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、ここにいる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  
いから、運動方程式および連続式  
はつぎのように表わされる。

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

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + \frac{\partial}{\partial y} (Vh) = 0 \quad (3)$$

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、 $\zeta$  は水面昇降量、 $C$  は水底の摩擦係数、 $g$  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、

$$U_r = V_r = h_r^{1/2} \quad (4)$$

$$t_r = x_r h_r^{-1/2} \quad (5)$$

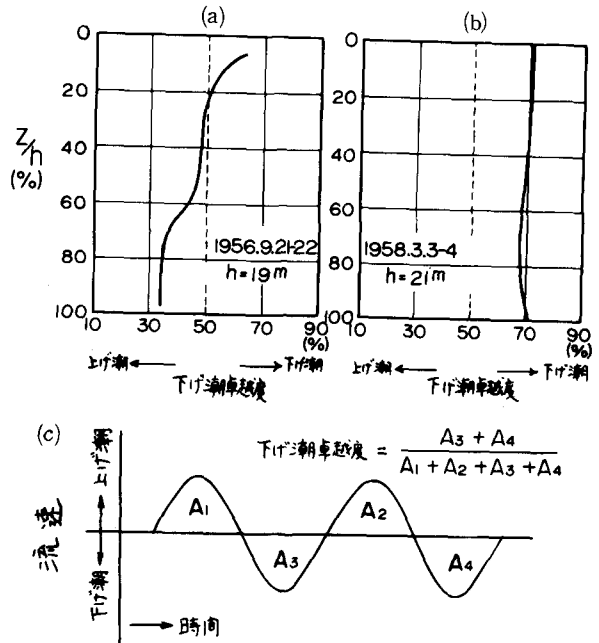
$$C_r = x_r h_r^{3/2} \quad (6)$$

が得られる。(5)式は Froude の相似則であり、(6)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。

$$Q_r = x_r h_r^{3/2}$$

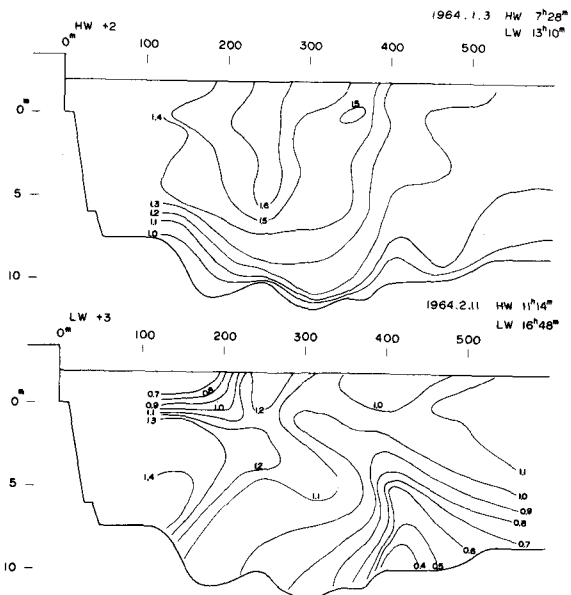
この場合、水平縮尺  $x_r$  と垂直縮尺  $h_r$  とを等しくしなければならないという制約は入っていないので、模型を歪めてもかまわない。

(5)式については、決定された空間縮尺に応じた時間縮尺を用いて実験を行えばよいから問題は



(a) 乾期 (b) 雨期 (c) 卓越度の求め方

図—6 下げ潮卓越度曲線の例 (Carquinez 海峡)



図—7 港口における流速の鉛直断面  
(上段は上げ潮、下段は下げ潮、流速はノット)

ないが、(6)式についてはいささか厄介である。というのは、潮流は浅海では一般に、憩流すなわち流速ゼロを中心に周期的に変化するから、レイノルズ数も時々刻々に変化している。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よくわからない。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、最大流速とか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、大別して二つの相似則が考えられる。

一つは、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。模型の摩擦係数  $C_m$  として、層流における Blasius の公式が適用できるものとする。<sup>15)</sup>  
すなわち

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

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する。レイノルズ数を最大流速と最大流動距離（憩流から次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(4)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  $Re_m$  との間には次の関係がある。

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

(6)、(7)および(8)式から次式が得られる。

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

ここに  $\nu$  は水の動粘性係数である。潮流の最大流速を  $Up_{max}$ 、潮流の周期を  $T_p$  とすると、最大流動距離  $L_p$  は、

$$L_p = Up \cdot \frac{T_p}{2} \quad \text{であるから, } L_p = \frac{1}{\pi} Up_{max} T_p \text{ となり, } Re_p = \frac{T_p}{\pi \nu_p} Up_{max}^2 \text{ となる。}$$

したがって(9)式は下のよう書きける。

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

$C_p = 5 \times 10^{-3}$ 、 $T_p = 12 \text{ h } 25 \text{ m}$ 、 $\nu_p = 10^{-2}$  として、 $Up_{max}$  をパラメーターとして、(10)式を図に表わすと図-8<sup>16)</sup> のようになる。図の横軸は  $x_r \nu_r$ 、縦軸は  $h_r$  である。模型内で真水を使用するときは、 $\nu_r = 1$  とみなせるから、 $x_r$  は図中の値そのものである。粘性係数の大きい流体を使用する場合は  $x_r$  は横軸の値を  $\nu_r$  で割った値となる。

他の一つは、模型における流れが乱流域に達する場合であるが、この場合潮汐の全周期のうち、

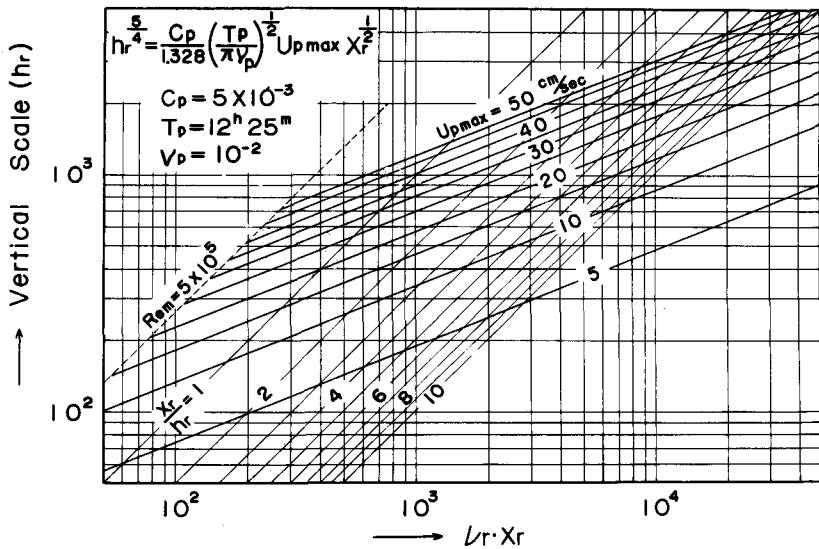


図-8 潮流実験用層流模型の縮尺

乱流が支配的である場合を考え、抵抗則としてManning の条件が適用できるとすると、摩擦係数  $C$  はManning の粗度係数  $n$  を用いて、 $C = 2 g n^2 / h^{1/3}$  で表わされるから(6)式により、つぎのように表わされる。

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

これを図に表わすと図-9<sup>17)</sup> のようになる。この条件で実験されることが多いが、実際には原型

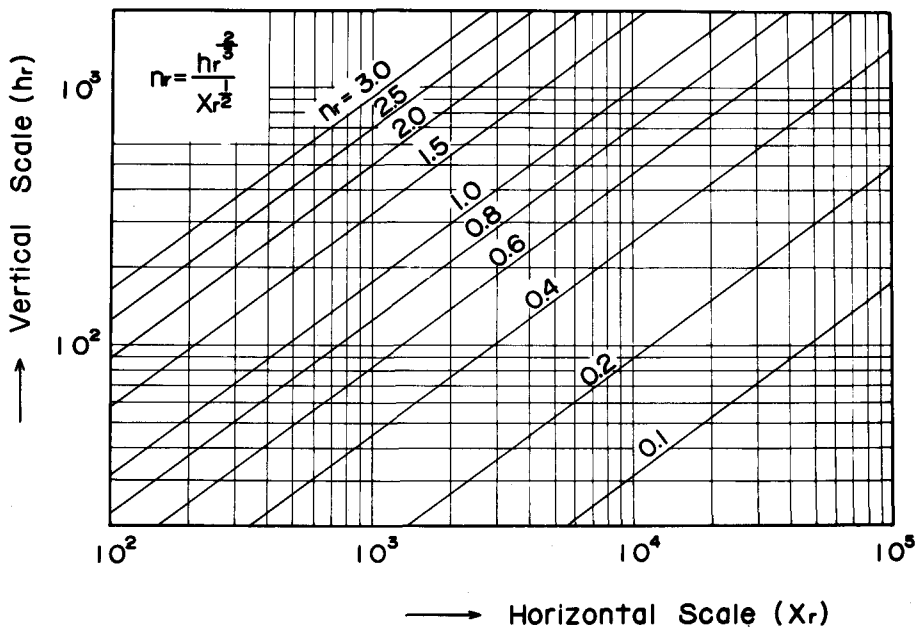


図-9 潮流実験用乱流模型の縮尺

の粗度係数  $n_p$  が明確ではないから、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、流況、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

したのち実験が行なわれることが多い。

拡散現象を取扱う場合には、拡散方程式について運動方程式と同様に考えると、水平拡散係数を  $K$  として

$$K r = x_r^2 / t_r \quad (12)$$

が得られる。水平拡散係数として

$$K = \varepsilon l^{4/3} \quad (13)$$

が成り立つとすると、その比は

$$K r = \varepsilon_r x_r^{4/3} \quad (14)$$

となる。ここに  $\varepsilon$  は単位質量、単位時間当りのエネルギー逸散率である。

原型と模型とで  $\varepsilon$  が等しいと仮定すると、 $\varepsilon_r = 1$  であるから、(12)式と(14)式とから

$$t_r = x_r^{2/3} \quad (15)$$

が得られる。これと(5)式から

$$h_r = x_r^{2/3} \quad (16)$$

となる。さらに(6)式から

$$C_r = x_r^{-1/3} \quad (17)$$

(11)式から

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

となる。

(15)~(18) 式は、 $\varepsilon_r = 1$  の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、(5)、(6)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、このような縮尺を使うことによって何ら不都合は生じない。

いま、模型内の流れがどの程度乱れているかをレイノルズ数を指標に調べる方法を考えてみよう。代表長さを水深  $h$  としたものを鉛直レイノルズ数 (添字  $v$ )、潮流の最大流動距離  $l_0$  (憩流からつぎの憩流までに水粒子が移動する距離) としたものを水平レイノルズ数 (添字  $h$ ) と仮称すると両者は

$$Re v = u h / \nu \quad (19)$$

$$Re h = u l_0 / \nu \quad (20)$$

と書ける。流速が正弦的に変化し、水深変化が小さいとするとつぎのようになる。

$$Re v = Re v_0 \left| \sin \frac{2\pi}{T} t \right| \quad (21)$$

ここに  $Re v_0$  は最大レイノルズ数である。憩流から限界レイノルズ数  $Re v_c$  に達するまでの時間  $t_c$  はつぎのようである。

$$t_c = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1} \frac{Re v_c}{Re v_0} \quad (22)$$

したがって、ある点における流れが乱流である時間的割合  $a_v$  は

$$a_v = 1 - \frac{4 t_c}{T} = 1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{Re v_c}{Re v_0} \quad (23)$$

これを空間平均  $A_v$  は  $S_o$  を全水面積として

$$A_v = \frac{1}{S_o} \int_0^{s_o} a_v ds = 1 - \frac{2}{\pi S_o} \int_0^{s_o} \sin^{-1} \frac{Re_{vc}}{Re_{vo}} ds \quad (24)$$

となり、差の形で表わすと

$$A_v = 1 - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_i}{S_o} \sin^{-1} \frac{Re_{vc}}{Re_{vo}} \quad (25)$$

となる。レイノルズ数の比  $Re_{vr}$  は

$$Re_{vr} = \frac{U_r h_r}{\nu_r} = \frac{h_r^{3/2}}{\nu_r} \quad (26)$$

であるから、原型のレイノルズ数がわかれば (25) 式は計算することができる。  $Re_{vc}$  は 500 ~ 2000 である。

つぎに水平レイノルズ数について考える。最大流動距離  $l_0$  は

$$l_0 = u_0 T / \pi \quad (27)$$

であるから

$$Re_{ho} = u_o^2 T / \nu \pi \quad (28)$$

これが、時間的に最大レイノルズ数であるとすると

$$Re_h = Re_{ho} \sin^2 \frac{2\pi}{T} t \quad (29)$$

となり、前と同様に考えると、憩流から限界レイノルズ数  $Re_{hc}$  に達するまでの時間  $t_c$  は

$$t_c = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1} \left( \frac{Re_{hc}}{Re_{ho}} \right)^{1/2} \quad (30)$$

であるから、ある点における流れが乱流である時間的割合  $ah$  は

$$ah = 1 - \frac{4t_c}{T} = 1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{Re_{hc}}{Re_{ho}} \right)^{1/2} \quad (31)$$

空間平均すると

$$Ah = 1 - \frac{2}{\pi S_o} \int_0^{s_o} \sin^{-1} \left( \frac{Re_{hc}}{Re_{ho}} \right)^{1/2} ds \quad (32)$$

差の形で表わすと、

$$Ah = 1 - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_i}{S_o} \sin^{-1} \left( \frac{Re_{hc}}{Re_{ho}} \right)^{1/2} \quad (33)$$

レイノルズ数の比  $Re_{hr}$  は

$$Re_{hr} = \frac{u_r x_r}{\nu_r} = \frac{x_r h_r^{1/2}}{\nu_r}$$

であるから、原型のレイノルズ数がわかれば (33) 式は計算することができる。限界レイノルズ数  $Re_{hc}$  は, Collins<sup>18)</sup> によれば  $2.56 \times 10^4$  といわれている。これらの式から模型内でどの程度乱れがあるかを、原型の資料から予め求めることができる。

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、前節で述べた潮流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、深さ方向の平均流速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。

つぎに粗度に関して少し述べる。**Manning** の公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。<sup>19)</sup>

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{1}{\sqrt{g}} / \left( A_0 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{R}{K} \right) \quad (34)$$

ここに  $R$  : 径深 (流水の断面積 / 潤辺長),  $A_0$  : 潤辺の粗滑, 流速分布に關与する諸要素の関数と考えられる積分常数項,  $\kappa$  : カルマン常数,  $K$  : 潤辺の粗滑の高さをあらわす値である。 $A_0$  は断面内の流速分布の積分に關係することから, 水路断面形状が  $n$  の要素の一つになることがわかる。一例として, 上式において水路幅無限大に対応する  $A_0 = 6.25$ ,  $\kappa = 0.4$  を採用して得られる関係と,  $1.1 < b/R < 4.5$  ( $b$  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とをプロットすると (**Boyer** による) 図-10<sup>20)</sup> のようであって, 前者が実河川の測定

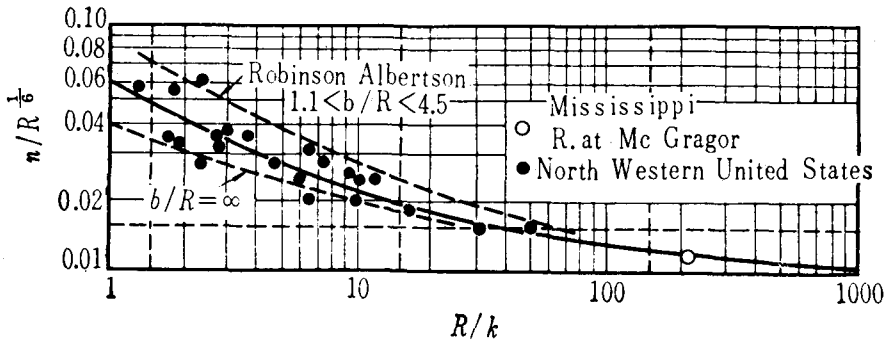


図-10  $n/R^{1/6}$  の実測値の一例

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せねばならぬ場合もある。

(34) 式の中で  $A_0 = 6$  として計算された結果を図-11<sup>21)</sup> に示す。図の横軸は相当粗度  $k$  であり縦軸は **Manning** の粗度係数  $n$  である。実際に模型に与えられる粗度は, 流砂のない場合には,  $k$  の高さの凸凹を作ればよい。したがって, 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。感潮河川などのように流れの方向が一定している場合には棧型粗度が用いられることがあるが, これについては他の文献<sup>22)</sup>を参考にされたい。

河口付近の実験のように, 塩水と淡水の二層流を含むときには, 重力  $g$  の代わりに塩水と淡水との密度差の割合と重力との積  $(4\rho/\rho)g$  を用いた **Froude** 数が同一になるようにしなければならないし, 両者の混合の場合に対しては **Richardson** 数  $\theta = -(g/\rho)(d\rho/dz)/(du/dz)^2$  をも考慮に入れる必要がある。コリオリの力を近似するために模型を回転台の上のせて回す方法や, 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が考えられるが, このような条件を満たすことは一般に困難であり, 省略するのが常である。

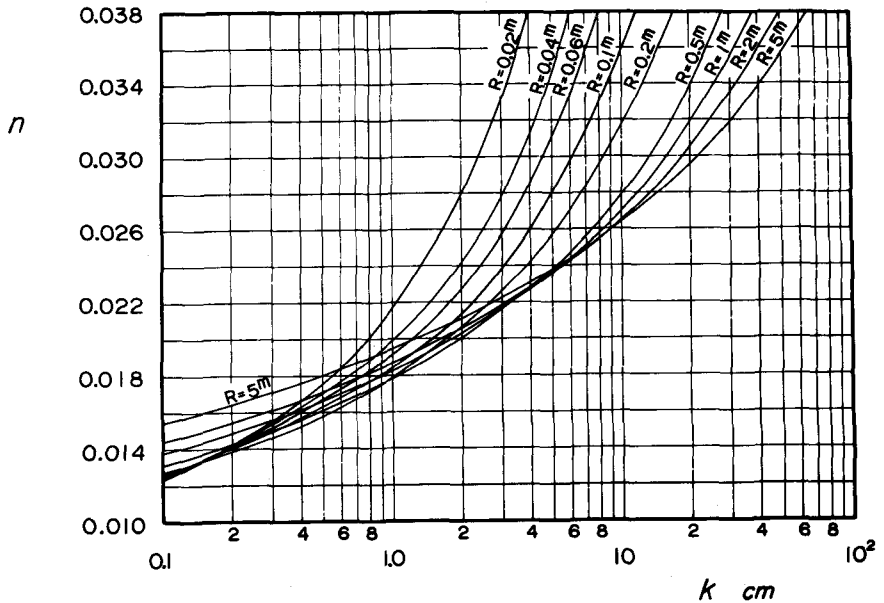


図-11 粗度係数  $n$  と相当粗度  $k$

#### 4 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、次の順序<sup>23)</sup>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、起潮機などを設置するための人工的境界が、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、起潮機が1台の場合には、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易い。着目する海域付近における、潮流の最大流動距離は、一次的な影響範囲を示す指標になるから、これを範囲決定の際の目安に使うとよい。起潮機などの影響を小さくするために、最大流動距離の2倍以上離れた所で区切ることが望ましい。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り不経済である。

##### 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、実験施設の大きさとから決定される。鉛直縮尺は、前節に述べた相似則を考慮して決定される。

模型があまり大きすぎると、費用が多くなりすぎるし、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。

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. 起潮機を選択

起潮機には、気圧式、プランジャー式、水供給式、堰式などがあるが、実験の規模、目的に応じて適当なものを選ばなければならない。どの方法による場合にも、自動制御するのが望ましい。気圧式起潮機の一例を図-12<sup>24)</sup>に示す。ここに示したものは、最も簡単な機構であるが、

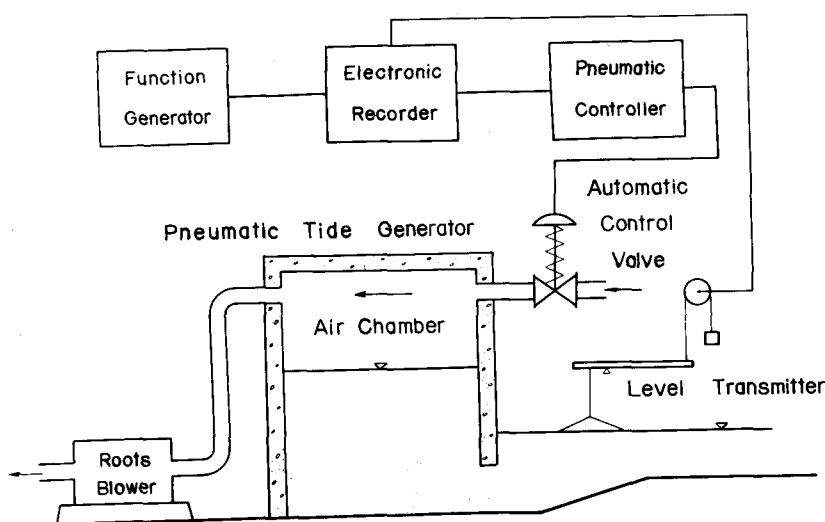


図-12 気圧式起潮機（減圧式）

これは、負圧にした空気室の中に水を吸い上げておき、制御弁を開閉して空気圧を調節することにより、水槽内の水位を制御する仕掛けになっている。これを改良して、空気室内を加圧、減圧して水位を制御する方式のもの<sup>25)</sup>があるが、この方が、実験開始前に予め水を吸い上げる必要がないから準備が楽である。加圧・減圧を繰り返すために特殊十字弁を用いるもの<sup>26)</sup>、制御弁を2台<sup>27)</sup>または4台いるもの<sup>25)</sup>がある。この方式は、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、係全体の応答が遅く、急速な水位変化を制御するのが困難なのが短所といえる。

プランジャー式は、半分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の起潮機であり、油圧で駆動する方式のもの<sup>28)</sup><sup>29)</sup>が多い。油を使用するため気圧式に比較するとはるかに応答は速い。主として、小型または中型の模型に使用される。

水供給式は、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、汲み出したりする方式のもの<sup>30)</sup>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が、これは、模型内に塩水を入れた場合に適した方法である。

堰式は、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のものである。これも大型模型に適しており、制御特性がよい。

#### 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、そのための測器は選ばねばならない。

水位計としては、いわゆるポイントゲージやマンオメーターのほか、記録のとれるものとして

(1)水圧式 (2)浮子式 (3)電気抵抗式 (4) 電気容量式 (5) 階段抵抗式 (6) 触針式 (7)定容量式などがある。水圧式には、変換器として、動歪計や差動変圧器のほか磁歪式の変換器が用いられる。浮子式は、浮子の上下をポテンシオメーターなどで電気抵抗に変えるものや動歪計で浮力を測る方式のものがある。電気抵抗式は、一部水中に浸った二本の電極間の抵抗値の変化を取り出すもので、比較的簡便であり、よく使用されている。ただし水温・水質の変化に敏感であるから、実験毎に校正する必要がある。電気容量式は、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とり出すもので、水温・水質の影響をうけないが、材質の関係で水切れが悪くて正確な水位を示さないことがある。階段抵抗式は、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。この方法は、その都度校正の必要がなく便利であるが、間隔を縮めて精度をあげようとするとも電極の数が多くなるために、受感部が大きくなって使いにくくなるのが欠点である。触針式は、振動子の先の針が水に接したり離れたりしながら水面を追いつさせ、振動子の変位をポテンシオで測定する。以上述べたように、いろいろの水位計があるが、それぞれ利点欠点をもっているから、よく研究して決定しなければならない。

流速の測定には、(1)ピトー管 (2) プロベラ式 (3)熱線式 (4) 超音波式などの流速計を使用するほか、(5)水素気泡追跡 (6) 浮標追跡による方法も用いられる。(1)ピトー管や(2)プロベラ式については今さら、説明の要はないがプロベラ式のものでは、慣性を小さくするためにプラスチックで作ったり、無接点で回転数を測れるように改良されたものや、接点の配置によって、正逆方向の分離のできるものもある。(3)熱線式のもの、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ほか、方向性のないのが欠点といえば欠点である。(4)超音波流速計は、流下方向と逆の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速く、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り制限され、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所におき、ドップラー効果を利用して、測定する方法が開発されている。(5)水素気泡追跡による方法は、水中に張られた導線を陰極として、水の電気分解を行なうと、水素気泡が発生するが、これを写真撮影で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効である。水中カメラが利用できる場合には、かなり有用である。(6)浮標追跡は、水面にまかれた多数の浮標を、間欠的に写真撮影して流速を測定する方法で、流れの 패턴を知るのに有利である。実験室を暗室にしておき、間欠的に照明して、多重露光により、流跡を知ることができる。

このように流速測定にも、いろいろの方法があり、それぞれ長短があるから、事前によく調べて選定するとよい。

そのほか、塩を用いる場合には塩分計、温度変化を伴う場合には温度計、染料を用いる場合には、光電比色計や蛍光光度計などが必要である。

## 6. 模型粗度の決定

模型内の流れが乱流域に属する場合には、前述の相似則により要求される模型粗度を与えなければ

ばならない。これは(12式あるいは図-11により相当粗度を求めて、模型に与えるほか、別途に試行錯誤により実験的に求める場合も多い。潮流実験の場合には、上式で求められた粗度に相当する砂粒や礫を用いるほか、サンフレックス粗度や機型・イボ型人工粗度なども用いられる。

## 7. 模型の製作

模型は、モルタル、石膏、パラフィン蠟などで製作するが、縮率の大きいときはとくに精度に留意しなければならない。

模型の作り方は、対象海域の地形によって様々であるが、比較的凸凹の少ない場合の製作手順の一例を紹介しておく。

- (1) まず、対象海域の海図から、模型の製作図面を作る。
- (2) 模型を作る場所にコンクリートの床を打つ。床の不等沈下は、ヒビ割れ、漏水の原因となるから、グリ石を入れるなり、鉄筋を入れるなりしてこれを防ぐとよい。
- (3) 模型の輪郭を床上に描く、いわゆるスミイレをする。
- (4) それに従って、模型水槽の外壁をコンクリートブロックなどで作る。
- (5) 水槽の内面をアスファルトなどで防水する。この際、水位計測用に連通管を用いるなら、壁を貫く部分だけ先に作り、まわりを防水しておく。
- (6) 中込めの砂を入れ、大ざっぱな地形を作る。
- (7) その上に海底地形を作るためのスミダシ用に、棄てコンクリートの床を打つ。
- (8) その床の上に等深線図を描く。
- (9) 等深線に沿って、必要な高さの天端をもつ堤防のようなものをモルタルで作る。これが、さきに描いた等深線の数だけできまるわけである。
- (10) これらの堤防の間を塗りこめてならす。この場合、最後の仕上げの段階で、前節で決定した粗度に相当する砂粒をまぜたモルタルを塗り、必要なら乾かない間に刷毛で表面を荒らして粗度を与える。以上で一応できあがるが、模型内で位置を知るのに必要であれば、ベンキ等で目地を入れる。

このような模型は、風の影響をさけるために、可能な限り屋内に作ることが望ましいが、屋外に作る場合には風よけの覆いをするのが望ましい。

## 8. 検証実験と模型の修正

まず現状（現地資料のある時点）の模型を製作し、現地資料のある場合（潮差、流況など）の実験を行ない、潮汐の振幅や位相が場所的に変化する状況や、流速分布、流況、流跡など可能な限りの多くの資料について実験結果と観測資料とを比較検討して相似性をたしかめる。その結果不都合であれば、人工粗度の調節など、模型の修正を行なう。

## 9. 新計画に関する実験

しかる後、計画されている新しい地形の模型を作り、必要な実験を行ない、得られた結果を解析し、相似則の関係をを用いて原型に換算する。

## 5 模型実験の実例

わが国で行われた潮汐・潮流に関する模型実験のうち、おもなものは表-3<sup>32)～46)</sup>のようである。このうち筆者の取り扱った2、3の例について概説する。

表 一 潮 流 の 模 型 実 験 例

| 対象海域   | 縮尺      |       | 歪    | 模 型  |         | 実 験   |     | 装 置                                                 |                  | 実施機関・年代                   |   |
|--------|---------|-------|------|------|---------|-------|-----|-----------------------------------------------------|------------------|---------------------------|---|
|        | 水 平     | 鉛 直   |      | 材 料  | 粗 度     | 起 潮 機 | 水 位 | 計                                                   | 流 速              |                           | 計 |
|        |         |       |      |      |         |       |     |                                                     |                  |                           |   |
| 瀬戸内海東部 | 100,000 | 1,000 | 100  | パラピン |         | プランジャ | ー   | ア<br>浮                                              | ミ<br>粉<br>追<br>跡 | 神戸海洋气象台 1930              |   |
| 広島湾    | 500     | 250   | 2    | モルタル | ナシ(層流)  | 気圧    | 式   | 電<br>気<br>抵<br>抗<br>式                               | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1958            |   |
| 有明海    | 40,000  | 250   | 160  | モルタル | サンフレックス | プランジャ | ー   | 浮<br>子<br>式<br>併<br>用                               |                  | 長崎海洋气象台 1959              |   |
| 関門海峡   | 350     | 60    | 5.8  | モルタル | イボ型粗度   | 水供給   | 式   | マ<br>ノ<br>メ<br>ー<br>タ<br>ー                          | 式                | 運輸技術研究所 1959              |   |
| 境水道美保湾 | 500     | 125   | 4    | モルタル | 刷毛仕上げ   | 気圧    | 式   | 電<br>気<br>抵<br>抗<br>式                               | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1959            |   |
| 名古屋港   | 2,000   | 667   | 3    | モルタル | ナシ(層流)  | プランジャ | ー   | 電<br>気<br>抵<br>抗<br>式                               | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1959            |   |
| 津軽海峡   | 50,000  | 500   | 100  | モルタル |         | 気圧    | 式   | ア<br>ル<br>ミ<br>粉<br>末<br>追<br>跡                     |                  | 函館海洋气象台 1961              |   |
| 有明海    | 8,000   | 250   | 32   | モルタル | サンフレックス | プランジャ | ー   | 浮<br>子<br>式                                         | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 九州大学農学部 1962              |   |
| 関門海峡   | 300     | 100   | 3    | モルタル | イボ型粗度   | 水供給   | 式   | マ<br>ノ<br>メ<br>ー<br>タ<br>ー<br>電<br>気<br>抵<br>抗<br>式 | 式<br>併<br>用      | 第四港湾建設局 1963              |   |
| 伊勢湾    | 1,000   | 65    | 15.4 | モルタル | サンフレックス | 気圧    | 式   | 回<br>転<br>式<br>流<br>向<br>流<br>速<br>計                |                  | 農業土木研究所 1963              |   |
| 東京港    | 500     | 100   | 5    | モルタル | ナシ      | 気圧    | 式   | 浮<br>子<br>式                                         | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 東京大学工学部<br>東京大学地震研究所 1964 |   |
| 有明海    | 2,000   | 200   | 10   | モルタル | 刷毛仕上げ   | 気圧    | 式   | 電<br>気<br>抵<br>抗<br>式                               | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1966            |   |
| 中海     | 400     | 50    | 8    | モルタル | 刷毛仕上げ   | 水供給   | 式   | 地<br>下<br>水<br>微<br>流<br>速<br>計<br>併<br>用           |                  | 中海干拓事務所 1967              |   |
| 鹿島港    | 500     | 63    | 8    | モルタル | 砂粒粗度    | 気圧    | 式   | 電<br>気<br>抵<br>抗<br>式                               | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1968            |   |
| 東京港    | 2,000   | 100   | 20   | モルタル | 刷毛仕上げ   | 気圧    | 式   | 超<br>音<br>波<br>流<br>速<br>計<br>併<br>用                |                  | 資源技術試験所 1968              |   |
| 水島灘    | 2,000   | 160   | 12.5 | モルタル | 刷毛仕上げ   | 気圧    | 式   | 浮<br>子<br>式                                         | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1969            |   |
| 瀬戸内海全域 | 100,000 | 1,000 | 100  | モルタル |         | プランジャ | ー   | 浮<br>子<br>式                                         | 浮<br>子<br>追<br>跡 | 京都大学防災研究所 1971            |   |

## 1. 広島湾<sup>16, 24)</sup>

広島港西側の海域の潮流が、已斐川河口に作られる導流堤によって、どのように変化するかを知る目的で実験が行なわれた。これは、いわゆる層流模型で、この実験の結果から(10)式の適用性が見出された。図-13および写真-1は模型と実験水槽を示したもので、水平縮尺は $1/500$ である。3種類の鉛直縮尺( $1/62.5$ ,  $1/125$ , および  $1/250$ )の模型に気圧式起潮機により潮汐が与えられ浮子の軌跡が写真撮影により追跡され、各点における流向・流速が求められ、現地観測の資料と比較された。その結果、鉛直縮尺が $1/250$ 、すなわち歪(鉛直縮尺と水平縮尺との比)が2の場合に、流速の水平分布が原型と最もよく一致することが明らかにされた。その理由については前記(6)式を満足するのは歪がこの場合であることが見出された。導流堤築造後は、対象海域の流速がほぼ $1/2$ に低下すること、その影響はほぼ導流堤を一边とする正方形の範囲に及ぶことなどが明らかにされた。これによって、対象海域における拡散係数が約 $1/4$ に低下することが結論された。

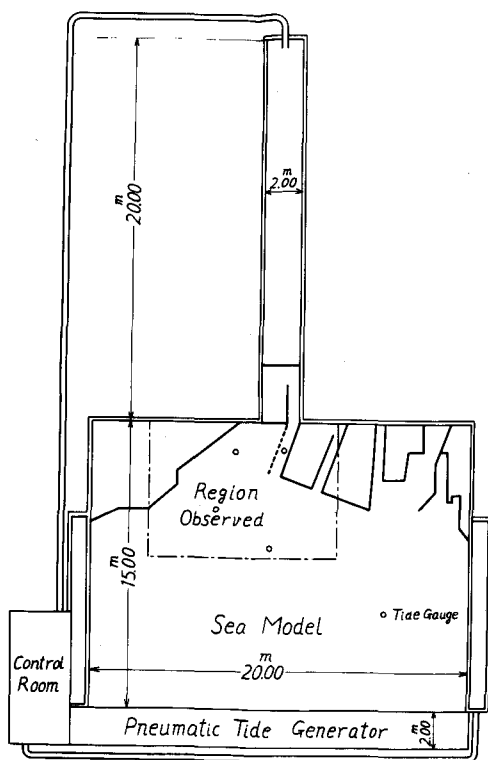


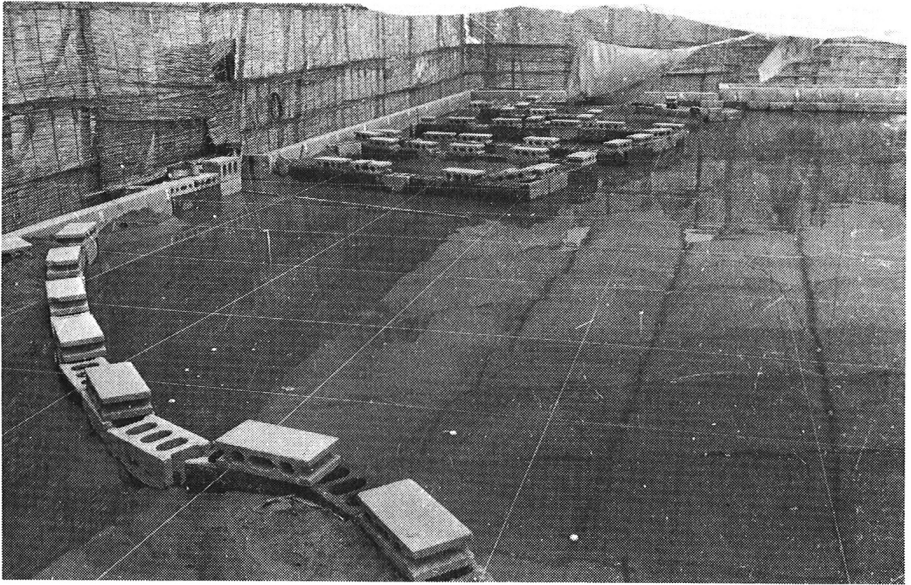
図-13 広島湾の模型

## 2. 水島灘

瀬戸内海の中央部水島灘に排出さ

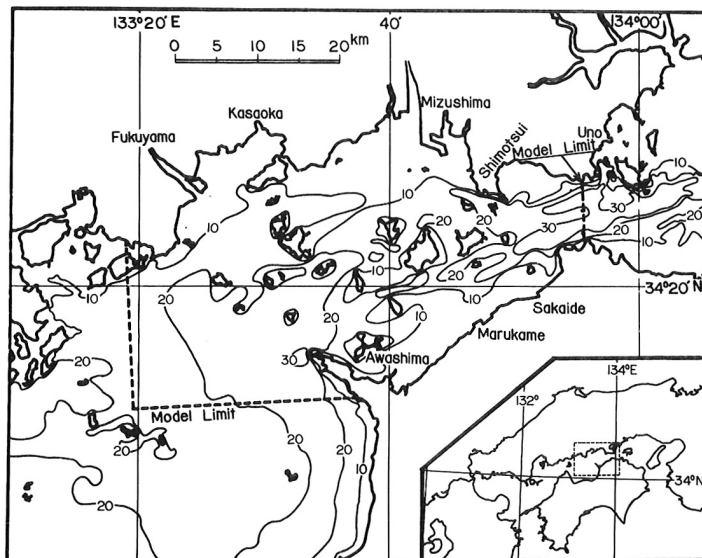
れる産業廃水の拡散を調べる目的で実験が行なわれた。これは乱流模型で(15), (16)式が適用された。すなわち、水平縮尺として $1/2000$ が選ばれ、 $h_r = t_r = 160$ が採用された。模型はモルタル刷毛仕上げである。拡散係数については $K_r = x_r^{4/3}$ である。対象海域における塩分等の現地観測資料によると、この海域は強混合域と考えてよさそうであるから、とくに密度差の影響は考えなかった。図-14および写真-2に模型と水槽を示す。実験の結果、つぎのことが明らかになった。

a) 潮汐はほぼ再現される。b) 潮流については、最大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再現される。c) 潮流に伴う水平乱れには、底面境界層性の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 $100\text{m} \sim 1000\text{m}$ の規模でほぼ再現される。水平縮尺 $1/2000$ の模型では $100\text{m}$ 以下の規模の拡散係数は、模型の方が小さくなる傾向がある。e) 河口先の塩分分布と

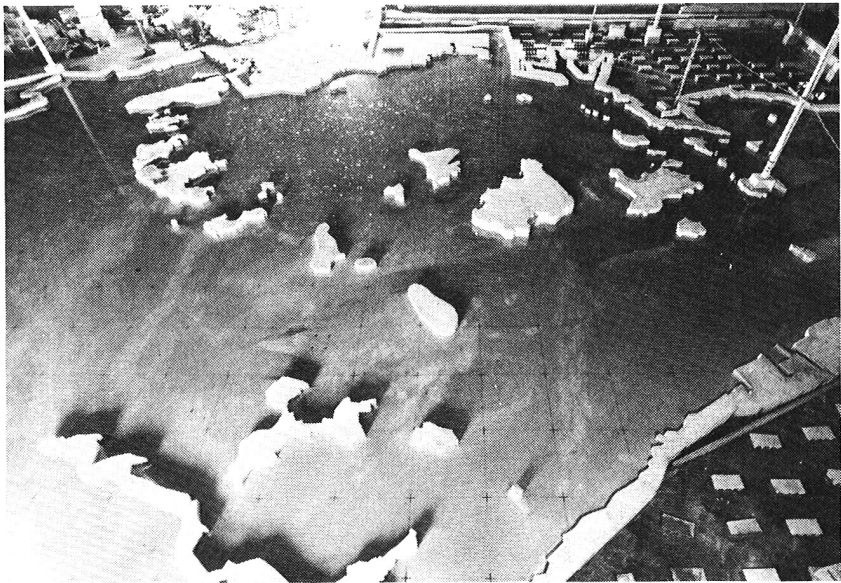


写真一 広島湾の模型

模型内でそれに対応する染料濃度分布は、かなりよく一致する。f) また、e) から求めた拡散係数、および浮子の一潮時あたりの分散から求めた 10 km 程度の規模の現象に対する拡散係数は d) の拡散係数からの  $4/3$  乗則により外挿した値と一致する。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、潮流に伴なう地形性の渦流が、産業廃水などの港口、河口付近の濃度分布、および最大流動距離程度の規模の水平混合に重要な役割を果している。h) 潮汐および鉛直に平均した最大流動距離程度の規模の流動は、これに対する底面摩擦をあわせる



図一 14 水島灘模型の範囲



写真一 2 水島灘の模型

と再現できる。i) 局所的な地形性渦流は h) に述べた大きな規模の平均流速  $U$  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、代表長さにとり、地形性渦流より一段小さな規模の渦動拡散係数  $K$  を粘性項にとった、一種の乱流 Reynolds 数  $Re_r = UL/K$  を模型と原型とで一致させることで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、より大きな規模の渦流、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。

以上、2 例について概要を記述したが、詳細についてはそれぞれの文献を参照されたい。

## 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。

- a) 条件を固定して何回でも繰り返すことができる。
- b) メソ規模の現象の、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、相似則の範囲内では、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・拡散の様子が目でよく見え、実体がつかみやすい。
- f) 地形性の渦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（tidal excursion）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似定常状態としては、着目海域での濃度の時間的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、特別の境界を作ったことによるセインがあらわれる。

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、**Manning** 式の適用限界からも、模型の水深が1 cm以上必要である。

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  $3/2$  乗倍大きくあらわれる。従って狭い estuary のような、シア効率が卓越する所では、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

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10m である。その他、恒流、密度流、長周期の擾乱などの影響により、あるいは起潮機の計測器などの精度により、それぞれ、上限、下限が決まる可能性が考えられる。

## 3) 可能性

これまで、浅くて潮流の強い、従って密度が上下に様に近い海域における、保存性のある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螢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、**Coriolis-top**の利用や、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、実験的に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、潮流の模型実験に関して、潮流の実態と、相似則に関する考察、およびそれにもとづいて行なう模型実験の計画の簡単な解説を行ない、京大防災研究所で行なわれた模型実験の例を紹介しさらに、水理模型実験の有用性と限界について述べた。

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ということ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行なった実験について述べたが、これ以外に密度差、偏向力、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る。

#### 参 考 文 献

- 1) 樋口明生, 中村重久; 東播海岸の潮流について, 京大防災研年報 6 号, 1966, 771 ~ 777.
- 2) たとえば防災ハンドブック編集委員会編; 防災ハンドブック, 技報堂, 昭 39, 609 ~ 611.
- 3) 海上保安庁; 潮汐表, 昭 43, 187 ~ 258.
- 4) 2), 608.
- 5) 杉浦健三, 平野敏行; 浅海域における海底堆積物の形成, 移動に關与する潮汐流について(予報) 水産土木, 4 - 2, 1968, 15 ~ 21.
- 6) 樋口明生, 中村重久; 名古屋港の潮流観測について, 京大防災研年報 7 号, 昭 39, 413.
- 7) 樋口明生, 中村重久; 名古屋港および明石川河口付近における潮流の二, 三の特性, 京大防災研年報 8 号, 昭 40, 439 ~ 457.
- 8) 樋口明生; 湾内の流れ, 水理学・水文学における最近の進歩, 土木学会関西支部, 昭 42, 192.
- 9) Wiegel, R.L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall 1964, 328
- 10) 9), 329
- 11) Bowden, K.F.: Measurement of turbulence near the sea bed in a tidal current. Jour. Geophys. Res., 67-8, 1962, 3181-3186
- 12) Grant, H.L., R.W. Stewart and A. Moilliet: Turbulence spectra from a tidal channel, Jour. Fluid Mech., 12-2, 1962, 241-268
- 13) Stewart, R.W. and H.L. Grant: Determination of the rate of dissipation of turbulent energy near the sea surface in the presence of waves, Jour. Geophys. Res., 67-8, 1962, 3117-3180
- 14) 樋口明生, 中村重久; 東播海岸における潮流について(II), 京大防災研年報, 10B, 365 ~ 373.
- 15) 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 号, 昭 33, 93 ~ 94
- 16) 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.
- 17) 16)と同じ
- 18) Collins, J.I.: Inception of turbulence at the bed under periodic gravity waves, J.G.R. Vol. 68, No. 21, 1963, pp. 6007-6014
- 19) 土木学会; 水理公式集, 昭 38, 8.
- 20) 19)と同じ
- 21) 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.
- 22) たとえば, 足立昭平; 水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 号, 昭 36, 185 ~ 193.

- 23) 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.
- 24) 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
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 農林省熊本農地事務局，長崎海洋气象台；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
- 29) 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.
- 30) 運輸省第四港湾建設局；関門海峡潮流模型実験報告書，昭 35, 1 ～ 122.
- 31) 江村富雄，鬼塚正光；廃水拡散試験装置，公害，2-2, 昭 42, 84 ～ 92.
- 32) 高谷静馬；瀬戸内海東部の潮流実験報告(1)，海洋气象台（神戸） 1930, 1 - 11.
- 33) 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 号，昭 34, 54 ～ 64.
- 34) 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 号，昭 36, 237 ～ 249.
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) 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 号，昭 38, 346 ～ 364.
- 40) 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.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) 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.

- 44) 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. 3, pp 1 ~ 24.
- 45) 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 14 B, 昭 46, 415 ~ 434.
- 46) 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(1), 序報, 京大防災研年報 14 B, 昭 46, 435 ~ 450.
- 47) Okubo, A.: The Effect of Shear in an Oscillatory Current on Horizontal Diffusion from an Instantaneous Source, *Int. J. Oceanol. & Limnol.* Vol. 1, No. 3, 19, p. 198
- 48) Ippen, A.T.: *Estuary and coastline Hydrodynamics*, McGraw-Hill, 1966, pp. 698-700
- 49) Bowden, K.F.: Horizontal Mixing in the Sea Due to a Shearing Current, *J. Fluid Mech.*, Vol. 21 part 2, 1965, p. 88
- 50) Harleman, D.R.F.: The Significance of Longitudinal Dispersion in the Analysis of Pollution in Estuaries, *Advance in Water Pollution Res. Proc. 2nd Int. Conf.*, 1965, p. 286
- 51) Bailey, T.E., C.A., Mc Cullough, and C.G., Gunnerson: *Mixing and Dispersion Studies in San Francisco Bay*, A.S.C.E., SA5, 1966, p. 23-45