

## 水理模型実験について\*

早 川 典 生\*\*

## 1. はじめに

沿岸海洋における環境影響事前評価の一手段として, 近年潮汐水理模型が注目を浴びてきた. 環境影響事前評価は, 昭和47年に制定された瀬戸内海臨時措置法と, 同年に改正された工場立地法において制度化されるに至った. 制度化されるとともに, マニュアルの作成が関係省庁において行われ, アセスメント技術はついに科学の手を離れて実用化の段階に達したかの感がある. しかしながら, 環境影響の事前評価は予測し難い自然現象を大胆に単純化し, 定量的な予測を行おうとするものであるから, 科学技術者にとって未知だらけの問題であることが認識されなければならない. マニュアルの制定は世間一般にとって事前評価技術に権威があるように見せかけるといふ弊害のほかに, 科学技術者にとってもマニュアルにとらわれるようであっては, 学問の進歩はあり得ないことを指摘したい. 本論ではこの認識のもとに水理模型実験についての state-of-art を論じようとするものである.

## 2. 海洋環境調査法のなかの水理模型実験

沿岸海洋環境影響事前評価の技術的側面は, 海洋を中心とする自然環境の事前調査と, 模型実験による将来予測によって構成される. 従って, 水理模型実験の技術的諸問題を論ずるに当たって, 事前評価全体の問題をまず考えてみたい.

自然環境の事前調査に当たっての第一の困難は, 信頼すべき現地資料を確保することである. 潮位の調和常数は信頼性があるとされているが, 潮流に関しては近年に至ってやっと15日以上を観測が行われるようになり, 流速計についても磁気

テープに記録する新型の開発がなされて, 急速に知識の集積が行われている. しかしながら, 潮流変動は潮位と異なり, 自然環境の変化に敏感に追随する傾向もうかがわれ, 15日間連続潮流観測によって得られた潮流調和常数値が, どの程度の信頼性があるのか, 季節により変動するものかどうか明らかでない. 第1表には瀬戸内海中で  $M_2$  分潮の卓越する2点において, 異なった時期になされた潮流観測より得られた  $M_2$  分潮流長軸成分および恒流成分について比較したものである. これより調和常数といわれるもののなかには, 卓越した成分であっても 20% 程度の変動があることがわかる. 半日周潮の卓越しない海域としては, 別府湾において昭和48年度の夏冬2回にわたって, 通産省により潮流観測が行われたが, 同じ測点間の潮流調和常数値(流速値)にすべて 30% 以上の差異が認められた. まして, 恒流成分を含めて論じるには, 1年程度長期間の潮流連続観測が必要である. また, 流速計の種類による観測値の相違,

第1表 同一測点における潮流調和常数の比較  
周防灘測点 33°53'.9N 131°7'.4E

| 観測期間            | 測定<br>水深 | $M_2$ 分潮流長軸成分 |           |     | 恒流成分 |          |
|-----------------|----------|---------------|-----------|-----|------|----------|
|                 |          | 方向            | 速度        | 遅角  | 方向   | 速度       |
| 47. 7. 10~7. 24 | 2 m      | 143°          | 13.2 cm/s | 10° | 12°  | 1.9 cm/s |
| 47. 7. 10~7. 24 | 10       | 139           | 18.1      | 6   | 338  | 2.4      |
| 48. 7. 2~7. 17  | 5        | 134           | 27.2      | 27  | 200  | 4.4      |

備讃瀬戸測点 34°24'.5N 133°56'.8E

| 観測期間           | 測定<br>水深 | $M_2$ 分潮流長軸成分 |           |     | 恒流成分 |           |
|----------------|----------|---------------|-----------|-----|------|-----------|
|                |          | 方向            | 速度        | 遅角  | 方向   | 速度        |
| 36. 6. 6~9. 2  | 10 m     | 84°           | 94.1 cm/s | 36° | 264° | 15.8 cm/s |
| 47. 7. 26~8. 9 | 10       | 82            | 79.4      | 35  | 254  | 18.3      |

\* 1976年6月16日受理

\*\* 中国工業技術試験所

## 水理模型実験について

繫留法による相違，風の影響の定量的評価に関する新知識が必要である。

海の事前調査において現在知識の積み上げの要求されるもう一つの課題は拡散係数の測定法である。拡散係数の測定法にはウラニンなどの蛍光染料を投入し，舟の上から広がり濃度を測定する法，航空写真から拡散面積を撮影して測定する法，複数個の浮標の動きを追跡してそれらの相互の広がり(分散)から拡散係数を求める法，および流速計による潮流変動の統計解析により拡散係数を推定する法などがある。これらの諸方法のうち，染料雲の濃度分散値は，精度よく求められることがほとんどないし，染料雲の拡散面積の時間的変化から求める方法や，流速変動の解析から求める方法は，得られた拡散係数が水域の海水交換の評価や，水質指標の拡散予測にそのまま使えるかどうかという疑問があるし，浮標の自動追跡の方法は極めて経費がかかるおそれがある。

水理模型実験により将来予測を行うに当たって，模型実験それ自体の精度向上は重要な課題である。一般に，沿岸海洋の潮汐水理模型は，水平縮尺  $1/1,000$  から  $1/2,000$  の範囲で作られることが多く，その大きさは数十 m に及ぶことがある。従って，一般に測定される量は拡散濃度も含めて極めて微量であり，しかも水理実験施設的环境は電子工学の立場からは非常に劣悪であるので，再現性の高い実験が困難である。水理模型実験用の高精度で再現性の良い測定技術に寄与した例としては，自動追尾式水位計と超音波流速計があげられる。当面の課題は染料濃度測定器の進歩であるように思われる。

模型実験による将来予測には，数値実験と水理実験があり，両者の比較は意見の分かれるところである。数値実験と水理実験の主な相違は，前者は力学的相似を達するのは容易であるが，幾何学的相似は困難であり，後者は全くその反対であるということである。数値実験は一般に繰り返し現象を確実に再現できるという長所があり，水理実験は流れの可視化が容易であるという長所がある。それよりも根本的な長所と限界は，水理模型

実験が限られた自然条件しか再現できないが，とにかくそれは水の流れだということであり，数値実験ではどんな現象でも記述する方程式さえ与えられれば解くことができるという長所があるが，数値解析の答が元の方程式の解とどの程度一致するのか確かでないうらみがある。この数値実験の本質的な難点は，流体力学で取り扱う方程式は非線型であるということと，方程式が複雑であるということの点によるのであろう。いずれにせよ数値実験の現状は，1974 年の Annual Review of Fluid Mechanics で ORSZAG と ISRAELI が "... numerical simulation of viscous flows remains an art ..." と述べているように，手法として現在進歩しつつある分野である。それにしても，しばしば「数値実験は何をやっているのか分りはしない」という言葉を耳にすることがあるが，これは前述したような手法としての未熟さを示すとともに，プログラムのソースリストがなくとも数値実験の結果を受け入れる一般の安易な態度にもよるのではなかろうか。

水理実験も数値実験もともに，科学技術的に少しずつ進歩の積み重ねられていく過程にあり，両者の相補う性格を考慮すれば，実験計画を慎重に検討して両者をともに活用しなければならない。

### 3. 水理模型実験の技術的諸問題

潮汐水理模型の相似律としてフルード則が満たされねばならないということに関して疑いを抱かれたことはない。相似律の残された問題は摩擦効果と拡散現象である。模型に原型と同じ流体を用いる限り，フルード則とレイノルズ則を同時に満たすことは不可能である。乱流模型で通常行われている方法は，これらの力学的相似を満たすために，人工粗度を投入することにより，幾何学的相似をいくぶんゆるめることである。人工粗度の大きさに関しては，一方向の乱流抵抗則からある程度の推測をすることができる<sup>1)</sup>。この方法によると，例えば瀬戸内海水理模型のように水深が大きいときには，水深の数割にも達する粗度が必要であるという結果が得られる。しかも，この方法で

は粗度の水平的分布は明らかではない．この人工粗度という概念は土木工学ではかなり古いものであるが，流体力学の実験として一般的なテクニックであろうか？例えば，船形の実験ではフルード則だけを満たして実験し，レイノルズ数の相違による影響は計算により修正するという．潮汐水理模型実験にも，フルード則を満たすだけの実験と，レイノルズ数を満たすだけの実験を別々に行って事足りるというような新手法は可能であろうか．

潮汐水理模型では表面張力の影響が支配的になるのを避け，測定可能な範囲を確保し，乱流状態をできれば保つために，模型の水平方向と鉛直方向の縮尺を変えた，いわゆる歪模型を用いることが必要であるが，歪ませたことにより特に狭さく部の抵抗は性質が異なるであろう．第1図は瀬戸内海水理模型で，海峡部付近にブロック粗度を配置して潮位の相似性の得られた状態で，超音波流速計により原型で15日以上連続潮流観測の資料のある点で模型潮流を測定し，潮流楕円を比較したものである．図より広い灘の中央部では，比較的良好な相似性が得られているが，狭さく部である関門海峡や釣島水道の測点では模型流速が大きく現れて，粗度調整の難しいことを示している．潮汐流の摩擦抵抗と模型相似律の，実験と観測に基づいた基礎的研究が必要である．

水理模型実験において，現在最も重要な課題は拡



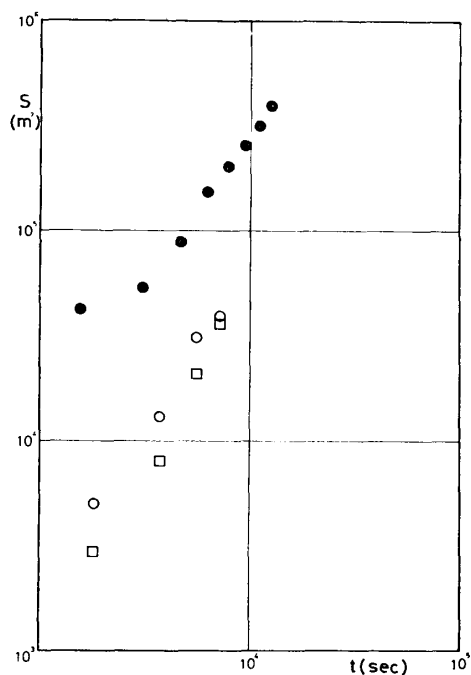
第1図 潮流楕円比較図

単位: cm/sec, 黒丸は 135°E に月南中時

散現象の相似律とその検証法である．拡散現象に関する相似律は OZMIDOV の拡散法則とエネルギー逸散率一定の仮定に基づいた成果が知られている．拡散係数の検証はしかし，拡散係数と長さスケールを，両対数グラフにプロットして論じられることが多いので，実験上問題とされる精度は極めてゆるいものである．将来，水理模型実験に要求される精度が高くなるにつれて，拡散現象の相似律の議論も進められるであろう．その一つの方向として，理論の前提としての仮定は検証することが望ましい．すなわち，例えば乱れエネルギー逸散率  $\varepsilon$  というものは測定しにくい量であるが，その値はよく知られている  $\varepsilon \propto \bar{u}^3/L$  (ここで  $\bar{u}$  は乱れ速度の強さ， $L$  は平均渦径) という近似理論から確かめることも可能ではないだろうか．

水理模型実験において拡散係数の再現性の検証は，通常模型水中に少量の染料水を投入し，染料雲の拡散を写真撮影して拡散係数を求め，原型の資料と比較することにより行われる．OZMIDOV の拡散則とエネルギー逸散率一定の仮定から導かれる相似則に基づいて，水平縮尺と鉛直縮尺との間の関係を定めておけば，拡散係数の検証を省略できるという考え方もあるが，海域により拡散法則は異なる可能性もあり，検証実験は行わねばならない．ところで，染料雲の拡散面積から拡散係数を求める方法は，写真撮影から測定した時刻  $t_i$  における染料雲面積  $S_i$  から拡散係数  $K_i$  を  $K_i = (S_{i+1} - S_i) / 4(t_{i+1} - t_i)$  により計算し，染料雲の長さスケール  $l_i = \sqrt{S_{i+1} + S_i} / \sqrt{\pi}$  と  $K \propto l^{4/3}$  の OZMIDOV 則に従うかどうかを確かめるのが通例である．第2図に  $S_i - t_i$  図の例を，第3図に  $K_i - l_i$  図の例を示す．この方法はしかし，第1に染料雲の写真面積はどういう意味を持つかという疑問と， $S - t$  図で明確に観察される関数関係が，微係数を求めることによりバラツキを増して不鮮明になるという欠点がある．第2図で鮮明に認められる  $S - t$  関数関係から， $K = \Delta S / 4\Delta t$ ， $l = \sqrt{S} / \pi$  として  $K \propto l^\beta$  の  $\beta$  値を求めたのが第3図中に示してあるが，第3図からは推定しにくい値が得ら

## 水理模型実験について

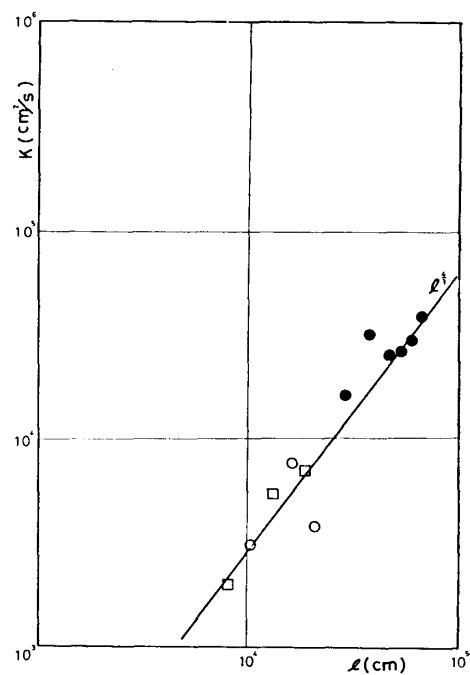


観測層

現地: ○ 3.3 m

□ 0.5 m

模型: ●

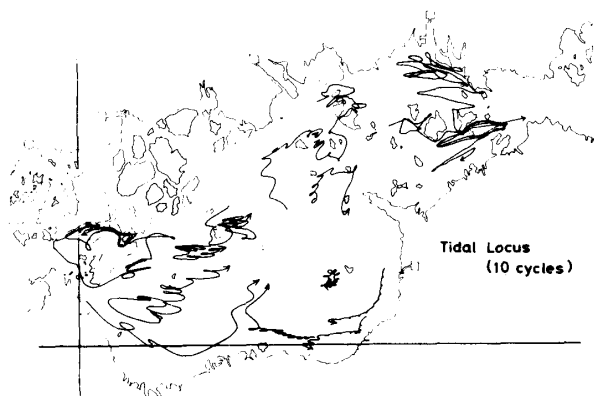
第2図 拡散面積 ( $S$ ) と時間 ( $t$ ) との関係の例


観測層

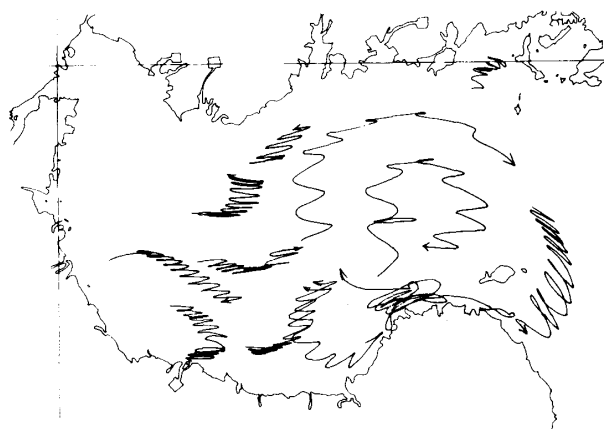
現地: ○ 0.3 m 1.04

□ 0.5 m 1.07

模型: ● 0.46

第3図 拡散係数 ( $K$ ) と拡散スケール ( $L$ ) との関係


第4図 浮標追跡図 (燧灘)



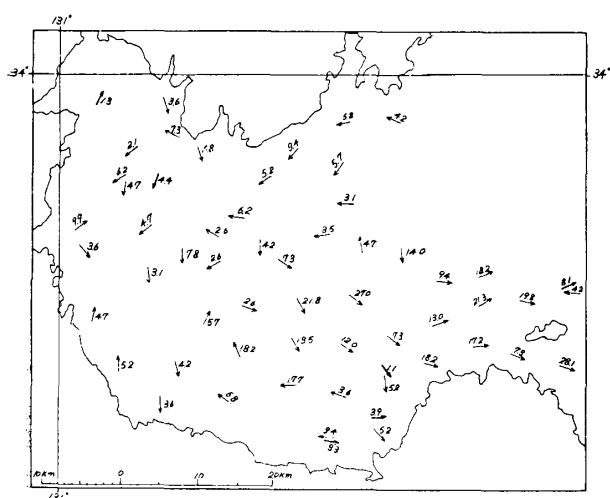
第5図 浮標追跡図 (周防灘)

れている。

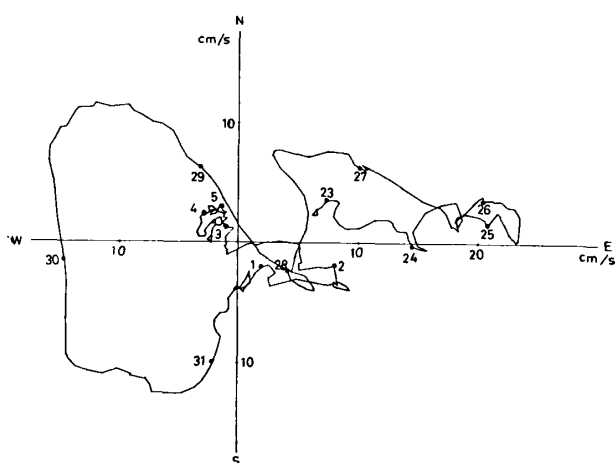
長期間の拡散予測に際して、重要な役割を果たすと思われる現象に恒流または環流がある。恒流の存在とその重要性は早くから注目されていたようであるが、主に現地における資料を得るのが困難なために、その定義や解釈に混乱をきたしている傾向がある。いわゆる環流の重要性は湾内における拡散現象の定常性を定める因子になっている

ことである。すなわち、湾内に物質を排出する実験を行うとき、その物質は湾内に環流により満たされた後に初めて、外洋水との交換との間に定常状態が保たれるのである。

しかしながら、恒流および環流の水理模型による再現は困難なことである。例として瀬戸内海 1/2,000 水理模型で観測された、燧灘および周防



第6図 恒流図 数字は流速 (cm/sec)



第7図 時間移動平均流速値の例(周防灘)  
 黒丸脇数字は日付(昭和49年8月23日~9月5日)  
 零時を中心とする値

灘の最大10周期の浮標追跡結果を第4図と第5図に示す。これらの図より環流と呼ばれるものはかなり複雑な分布をしていることがわかる。これらの図に現れている周防灘の大きな時計回りの環流および燧灘西部の反時計回りの環流(?)は海上保安庁によって行われた潮流調査の結果と回転方向が反対であることに注目したい。第6図<sup>2)</sup>はその例であり、同図には太矢印で通産省によって行われた、15日間連続観測の平均値も示してある。第5図と第6図は明らかに矛盾するが、現地資料から恒流を論ずるのは困難であることを指摘したい。第6図の恒流ベクトルは25時間観測の平均値をもって描かれているが、同図の太矢印の一つの

15日間連続観測値から25時間移動平均値を計算してプロットしたのが第7図であり、これより25時間平均値をもって恒流を定義するのは適当でないことがわかる。15日間平均の恒流値にも、季節による変動があるようにも思われ、恒流・環流の成因は1年程度の長い観測資料と、気象の資料を併せて研究する必要がある。そして、水理模型実験に従事する立場からは、その成因を1日も早く明らかにし、水理模型に現れる恒流・環流は歪度や粗度の影響が大きいであろうか、あるいは現在の技術で水理模型実験の予測するこれらの現象は信頼できるであろうかという疑問に答えなければならない。

#### 4. 水理模型実験の将来

潮汐水理模型実験は現在環境アセスメントの一手法として実用化しているが、要求される精度が高まるにつれ、拡散現象のモデル化を中心に手法としては未洗練、理論としては未解決の余地が残されている。将来の課題としては拡散現象の相似性と実験法、簡単には取り入れることのできない物理現象(例えば、密度差とか風)に対する配慮をまずあげることができる。さらに、水理模型実験による拡散予測がどの程度合うのか、というだれしもが感じる疑問に対して解答が試みられたことさえないことを指摘したい。すなわち、拡散模型実験を定量的に使用するには、事前・事後調査と結び付いた hindcasting の努力が最も必要とされるのである。最後に、定量的予測の試みという課題は、生物・化学的機構のモデル化という側面まで手を染める必要があるであろうことを指摘したい。

将来、大型の模型は主に経済的な理由でますます作られなくなるであろう。筆者は瀬戸内海大型水理模型の運営に携っているが、研究所の所有し、行う水理模型実験は大規模性、長期性、高精度性を目標としたたくさんの課題を抱えている。

#### 5. あとがき

沿岸海洋シンポジウムから1年、筆者がこの分

## 水理模型実験について

野に携るようになってから3年を経過し、水理模型実験に関する考え方もさらに進歩を重ねているようである。その中でも特筆すべきは FISCHER and HANAMURA<sup>3)</sup> の粗度の拡散係数に及ぼす半経験論と、FISCHER の review<sup>4)</sup> である。一時期拡散現象の相似性が達せられないとされていた潮汐水理模型が新たな角度から見直されているようである。筆者も水理模型実験と数値模型実験について小論を書く機会を得た<sup>5)</sup>。

この分野が今、脈動しつつ発展する分野であることを信じてこの小論を結びたい。

## 参 考 文 献

- 1) 樋口明生(1972): 沿岸海洋に関する水理模型実験. 1922年度水工学に関する夏期研修講義集, B-9 土木学会.
- 2) 第七管区海上保安本部(1962): 周防灘(宇部沖)潮流観測報告. 昭和37年3月.
- 3) FISCHER, H. B. and T. HANAMURA (1975): The effect of roughness strips on transverse mixing in hydraulic models. *Water Resources Research*, **11**(2), 362-364.
- 4) FISCHER, H. B. (1976): Mixing and dispersion in estuaries. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **8**, 107-133.
- 5) 早川典生(1976): 水理系一模型実験と数値解析一. 土木学会誌, **61**(5), 25-28.