

水理模型による瀬戸内海拡散現象の実験的研究

早川典生*・上嶋英機**・肥後竹彦***・田辺弘道***・高杉由夫***・
宝田盛康*・湯浅一郎***・藤原建紀****・橋本英資***・山崎宗広****

1. ま え が き

1973年中国工業技術試験所に建設された瀬戸内海水理模型は、水平縮尺 1/2 000、鉛直縮尺 1/159 で紀伊水道・豊後水道を含む世界最大級の潮汐水理模型である。この水理模型を用いての瀬戸内海の水質汚濁予測に関する研究は、潮汐潮流の相似性の確認にはじまり1年間を費して行われた。その後拡散現象に関する相似性について種々の角度から研究を続け成果を得た。本報ではこれらの成果の要約を報じるものである。

2. 瀬戸内海水理模型

この模型は別報に記したように^{1),2)}、紀伊水道、豊後水道を含み、東西約 460 km、南北約 100 km におよぶ。模型の鉛直縮尺は、Richardson-Ozmidov の 4/3 乗則に従う水平拡散が相似されるように定められた³⁾。模型の外海と接する境界部である紀伊水道、豊後水道、関門海峡の外側に堰式の起潮機がある。本報に用いた資料はすべて瀬戸内海に卓越する M₂ 潮を与えた実験であり、模型ではフルード相似則に従いその周期は 4 分 43 秒である。各起潮機に与えた模型潮汐の実験条件を表-1 に示す。

表-1 M₂ 潮実験条件

起潮機	模型振幅	位相遅れ
紀伊	3.2mm	0度
豊後	3.3	11
関門	1.9	122

この規模の海の水理模型は国内外を問わずその例がないが、ほぼ同縮尺の大阪湾の模型実験から⁴⁾、流況の相似を達するには付加粗度の必要性が予想された。建設時には模型に付加粗度が与えられておらず、初期実験の結果はその必要性を裏付けた。模型の規

模と時間的な制約から主として底面の粗度調整によりこれは達せられた。瀬戸内海に支配的な拡散現象は潮汐流とその変化をもたらし地形変化である。ここでは大河川の感潮域に比べて密度流現象はさ程重要ではないと思われる。瀬戸内海の灘や広い湾の中央部では、拡散現象は Richardson-Ozmidov の 4/3 乗則に従うことが予想される。狭くて深い海峡部ではシア拡散が卓越しているであろう。備讃瀬戸や芸予諸島部のように島の多い地形変化の多い海域では pumping や chopping⁵⁾ と呼ばれる機構が大切かもしれない。いずれにしてもこれだけの広い規模と複雑な地形の海の水理模型の拡散現象の相似性は、a priori な評価が困難であり、十分な実験的検証が必要である。

3. 潮汐潮流の相似性

瀬戸内海では大阪湾を除いて M₂ 潮が卓越し、その振幅は両水道部で約 50 cm、内部では 120 cm にも達し、位相は角度にして 180° も遅れる。例外は大阪湾であり、

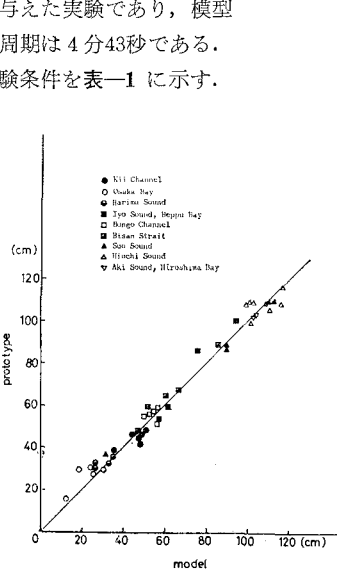


図-1 a 振幅比較図

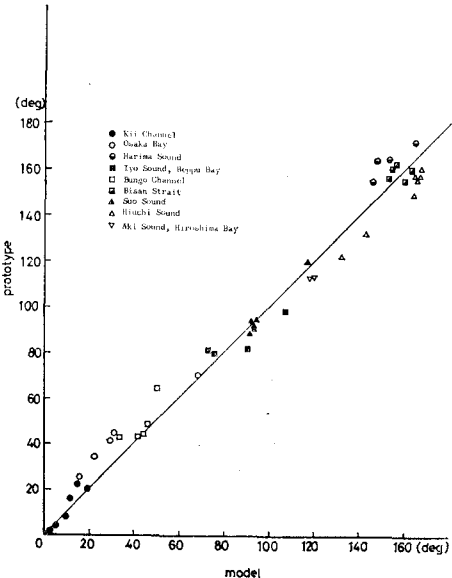


図-1 b 位相遅れ比較図

* 正会員 Ph.D. 中国工業技術試験所
*** 工修 中国工業技術試験所
** 正会員 工修 中国工業技術試験所
**** 中国工業技術試験所

水道部に比べ振幅は小さく、位相は進む。この潮汐波特性は模型海底面の主として海峡部付近に、コンクリートブロックを配置することによって得られた。図-1 a および 1 b は52検潮所の M_2 潮振幅と位相遅れの比較図であり、この図で原型と模型との値の差の標準偏差は振幅で 7.6 cm、位相遅れで 4.5° 度である。

原型と模型の潮流の比較は、原型で15日間以上連続観測の知られている点で、超音波流速計を用いて測定し、調

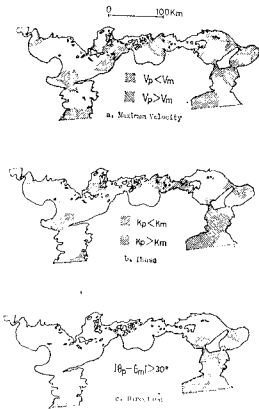


図-2 M_2 潮流楕円要素比較図 (最大速度は 20% 以上の差、位相は 15° 以上の差を示す)

和解して M_2 潮流成分について行った。図-2 a, b, c は M_2 潮流楕円要素について原型と模型との差の大きい海域を示したものであり、海峡部や地形の複雑な海域では合いにくい傾向を示している。一般に潮流は潮位よりも合いにくく、その理由に15日程度では観測期間が短いと思われること、係留法による誤差が避けられないこと、気象の影響を除くのは困難なことがあげられる。

この模型を用いて瀬戸内海流況の詳細な再現を試みた。図-3 は超音波流速計により測定した 10 km 格子点における潮流の M_2 成分から、瀬戸内海に流入する流れが最強の紀伊水道満潮後1時間の分布を示したものである。模型水面上のフロート群を追跡することにより、同様のより詳細な流況図も作成した。フロートは長時間追跡することにより、いわゆる環流あるいは恒流の存在を明らかにすることができる。図-4 はその例であり、全域でこのような図を作成した。図で観察されるような環流の分布は、長期的物質拡散に大きな役割を果すものと思われるが²⁾、原型の観測例に信頼性が乏しく、合うと思われる例もあるとしか言えない現状である。

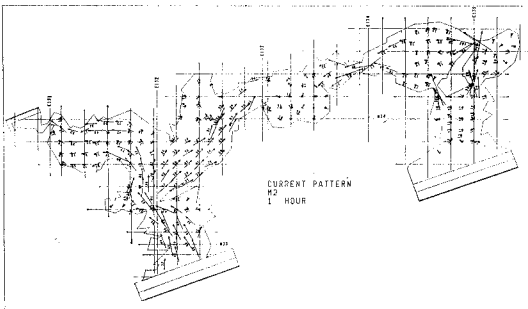


図-3 瀬戸内海流況図 (紀伊満潮後1時間)



図-4 播磨灘流跡線図 (フロート 10 周期間追跡)

4. 拡散現象の相似性

瀬戸内海水理模型は小縮尺模型であるから、拡散の相似性を検証する必要がある。しかしながら地形の複雑さと原型実験例の乏しさのために極めて困難である。わが国では和田⁶⁾ らによって開発された流速計の乱れ解析による方法が一般的であるが、データの扱い方によって異なった結果が得られるようであり、染料水の点源拡散実験など他の方法も併用すべきである。

瀬戸内海において点源拡散実験の行なわれた例は、数例にしかすぎず、しかもその殆んどについて染料雲の面積の時間変化が得られているのみである。そこでここでは足立⁷⁾の方法を応用して原型と模型の資料を比較してみた。すなわち時刻 t の染料雲のアンサンブル平均濃度 C が重心距離 r から次式で与えられるものとする。

$$C = \frac{A}{(kt)^{2n/m}} \exp \left\{ -\frac{n}{m^2 k} \frac{r^m}{t^n} \right\} \quad \text{.....(1)}$$

ここで A は染料の全量で、 k は拡散係数 K を $K = kr^{2-m} \cdot t^{n-1}$ で与える係数である。係数 m, n の値は数種提案されているが、Richardson-Ozmidov 説によると $m=2/3, n=1$ である。式 (1) の対数を取り、 i 番目のデータから 0 番目のデータを差し引くと次式を得る。

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

模型における点源拡散実験はできるだけ表層付近に等方的な染料雲を作るよう工夫した。しかし染料雲は初期の大きさを点にできないので、図-5 に示すように染料雲面積一時間のプロットから面積 0 に相当する時間原点を求めた。このようにして (2) 式の両辺の無次元量をプロットしたのが図-6 である。図からこの二海域のデータは 4/3 乗則によくのることが分る。また図から計算した係数 k の値は模型と原型とでよく一致した値を得た。他の海域における結果からは、水島灘、姫路沖の原型資料は (2) 式が適用できず、周防灘、別府湾奥部、広島湾で

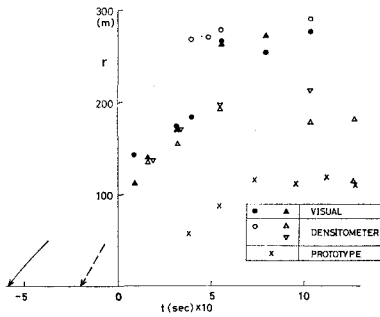


図-5 染料雲等価半径の時間変化 (矢印は仮想原点, 実線は○印破線は△印)

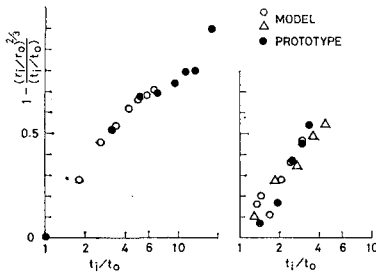


図-6 染料拡散の相似性 (右は豊後高田沖, 左は岡山水道沖)

は原型の k が模型より大きく, 別府湾外側, 備後灘では反対の結果を得たが, 差異は1桁以内であった。

この方法の妥当性を確かめ, より直接に拡散係数を求めるため, 原型で染料雲濃度分布の得られている豊後高田沖で模型の染料雲濃度分布を測定した。方法はデンストメーターを用い模型上で1cmの分解能で写真濃度分布を測定した(図-7)。

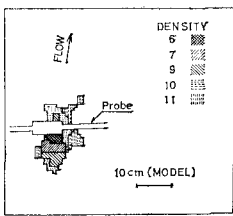


図-7 染料雲の写真濃度

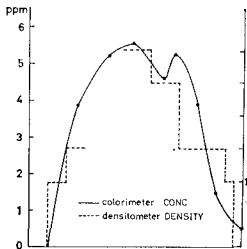


図-8 比色計濃度と写真濃度比較図 (図-7の場合)

模型上にはプローブ型比色計を配置し染料雲が横切る時の濃度を測定して, 写真濃度のキャリブレーションを作成した(図-8)。染料濃度分布が正規分布と仮定した時の分散値 S^2 を, 濃度と等価半径を半対数紙にプロットして求めた⁹⁾(図-9)。図-10は拡散係数 K を $K=S^2/4t$ で計算し, 長さスケール $l=3S_r$ でプロットしたものである。図は拡散係数が模型と原型とでほぼ同じ関数関係を示していること, 従って図-6の一致も裏付けることを示している。

瀬戸内海全域では点源染料実験よりも流速計連続記録の方が例が多いし, 後者は乱れ拡散だけを比較できる利点がある。拡散係数の値の計算は和田ら⁹⁾の方法があるが模型の場合には倍潮成分の項が大きいので, ここでは乱れ成分のパワースペクトルを比較した。用いた原型の資料は20分間隔の15日間連続記録であり, aliasing をなくすため1時間の移動平均を施し, 長周期成分は6時間のフィルターで除去した。模型の資料は超

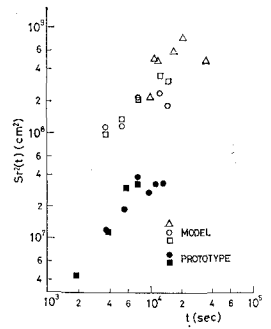


図-9 染料雲濃度分散値の時間変化

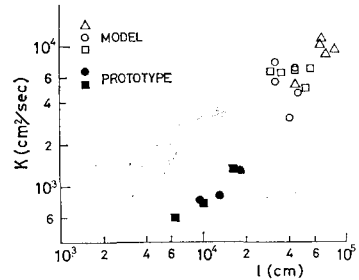


図-10 拡散係数比較図

音波流速計の記録を0.015cm/sの単位でデジタル化し1秒毎に磁気テープに収録し, さらにそれを8秒で平均化し, 8秒毎(原型換算21分)のデータをさらに1時間の移動平均と6時間のフィルターをかけた。これらの資料について Blackman-Tukey の方法で最大遅れ1/10でパワースペクトルを求めた。結果の一部を図-11 a, bに示す。図から数時間以下の成分は, 備讃瀬戸で模型の方が大きく, 播磨灘で小さい。

以上の結果を総合して備讃瀬戸のような海域では, 拡散現象の相似性が良いが播磨灘のような広い海域では付加粗度のようなものを必要とするといえる。しかし長期的な拡散現象を支配する因子には, 別報のように環流の分布もありその相似性はあまり明らかでない。別報には模型でのフロート, 染料拡散が報じられているが, 同規模の原型実験は行われたことがなく将来の課題である。ただそこで得られた備讃瀬戸における値は, 過去に推定された値(和田ら⁹⁾, 中田・平野¹⁰⁾, 玉井・早川¹¹⁾)と比べてよい一致を見ている。広い灘ではこのようなことは明らかではないが, 最終的には模型内に原型の水質分布を再現させて確かめられる。現在環境庁による水質汚濁総合調査に基づいて, 汚濁負荷量に相当する染料水拡散実験を実施中である。海の水質汚濁指標は必ずしも流入負荷に対応しないともいわれ, その解析は困難であるが,

長周期拡散実験 (300 周期) の結果はかなりの程度明らかにすることができるものと思われ別の機会に報じたい。

5. 結 び

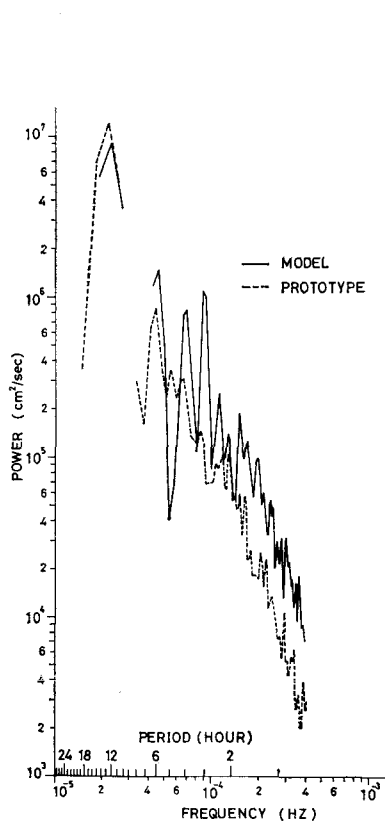
瀬戸内海水理模型の潮汐・潮流の相似は底面粗度により達せられた。瀬戸内海の詳細な流況を明らかにすることを得、特に環流の存在を明らかにしたが原型における対応はこれからの課題である。乱れスケールの拡散現象については、新しい実験技術により点源染料実験を解析し、拡散係数が違っても 1 桁以内の結果を得た。流速計の乱れ解析と総合すると、備讃瀬戸のような海域では相似性が高いが、広い灘では手を加える必要が認められた。しかしながら長周期の拡散実験には種々の因子が働らくものと思われ早急な結論は下し難い。

6. 謝 辞

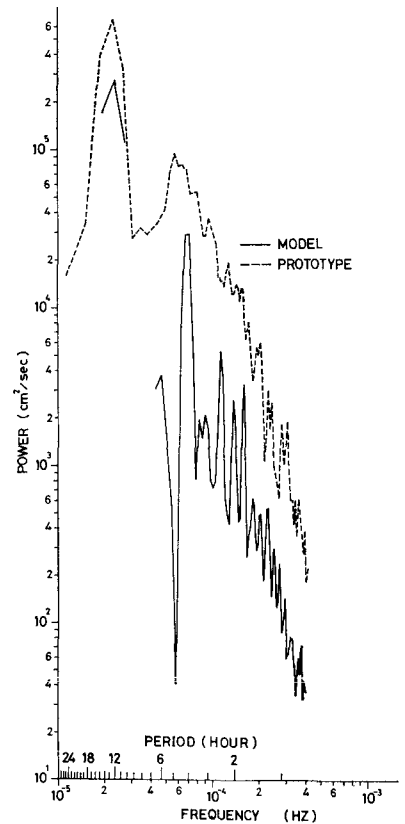
本研究は環境庁計上公害防止技術特別研究として、当所の福田保所長、斉藤竜夫研究部長の指導のもと、多数の所員、関係者の支援のもとに進められたものであり、謹んでここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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回海講演文集，pp. 221-225，1973。
- 2) 樋口明生・安田秀一・早川典生：潮汐水理模型の縮率効果について，第24回海講演文集，1977。
- 3) 樋口明生：沿岸海洋に関する水理模型実験，水工学シリーズB，土木学会，pp. B-9-1-B-9-23，1972。
- 4) 金子安雄・堀江 毅・村上和夫：大阪湾の潮流と汚染拡散，第21回海講演文集，pp. 309-314，1976。



図—11 a 流速変動パワースペクトル比較図 (備讃瀬戸測点，東西成分)



図—11 b 流速変動パワースペクトル比較図 (播磨灘姫路沖測点，東西成分)

- 5) Fischer, H. B.: Mixing and dispersion in estuaries, Annual Rev. of Fluid Mech., Vol. 8, pp. 107-134, 1976.
- 6) 和田 明・加藤正進：潮汐水理模型による拡散予測 (その3)，第22回海講演文集，pp. 227-231，1975。
- 7) 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回海講演文集，pp. 303-308，1974。
- 8) Murthy, C. R.: An experimental study of horizontal diffusion in Lake Ontario, Proc. 13th Conf. Great Lakes Res., pp. 477-489, 1970.
- 9) 和田 明・角湯正剛：瀬戸内海における流況と拡散特性，第21回海講演文集，pp. 297-302，1974。
- 10) 中田英昭・平野敏行：瀬戸内海中央部における表層水の流動，1976年度海洋学会秋季大会講演集，pp. 166-167，1976。
- 11) 玉井信行・早川典生：瀬戸内海における潮流と混合に関する研究，第3回国際海洋開発会議，1975。