

瀬戸内海水理模型による水質汚濁拡散実験

上嶋 英機*・橋本 英資**・山崎 宗広***・早川 典生****

1. はじめに

中国工業技術試験所では、水平縮尺 1/2 000、鉛直縮尺 1/160 の瀬戸内海全域の潮汐水理模型を主たる道具として、瀬戸内海全域の水質汚濁予測に係る研究を行っている。本報ではそのうち、この瀬戸内海の水理模型を用いた水質汚濁拡散実験の成果を述べるものである。

水理模型において局所的な流況や拡散の相似性が確立されるならば、局所的な水質汚濁予測は染料等を用いた拡散実験を行うことにより可能である。しかしながら長期的に持続する水質指標値を、広い範囲で定量的に予測する際に直面する困難は、水理模型で予測可能な水質指標の抽出と、長時間模型実験値の解釈にある。

瀬戸内海水理模型に匹敵する規模の水理模型としては東京湾¹⁾、大阪湾¹⁾、伊勢湾²⁾の水理模型が知られており、水質汚濁拡散実験も報じられている。これらの水理模型に比べて瀬戸内海水理模型は、異なった海洋学的性質を有する数個の水域よりなるという複雑な様相を呈している。また一般に湾灘規模の水質汚濁分布を定量的に予測するのは容易なことではない。この困難は前述したように、水質データの乏しさと拡散実験手法の未確立である点に求められる。

本研究では瀬戸内海全域の定量的な水質汚濁予測を目的として、水質汚濁指標の解析、水理模型による拡散実験、一次元分散係数の算出と非定常一次元分散模型を用いた検討結果を報じるものである。

2. 瀬戸内海水理模型

本水理模型は図-1に示すように、紀伊水道・豊後水道・響灘の一部を含む東西約 460 km、南北約 100 km におよび、模型水域の外海部と接する境界である紀伊・豊後両水道と関門海峡の外側には起潮機がある。本模型は M_2 潮の潮汐・潮流の相似性が付加粗度の使用により確認され、局所的な拡散の相似性も部分的にはあるが検証されている³⁾。高い精度の相似性や長い時間スケールの拡

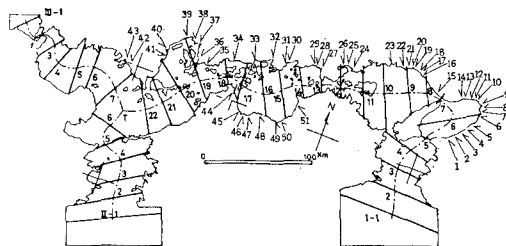


図-1 瀬戸内海水理模型平面図 (矢印は負荷点)

散の相似性に問題のない訳ではないが⁴⁾、対応する現地データも多くはなく検討を要する課題である。

本研究ではこの段階の瀬戸内海水理模型を用い、与えた潮汐はすべて M_2 潮であった。

3. 水質汚濁資料

瀬戸内海の有機物質による水質汚濁指標として一般に採用されるのは化学的酸素要求量 (COD) である。COD は通常、水理模型による拡散実験の対象となるような、保存性物質ではない。しかしながら、資料としては COD が最も豊富であり、本報でも環境庁の水質汚濁総合調査⁵⁾と水産庁の浅海定線調査⁶⁾の COD 資料を用いた。資料として豊富な COD も、元来が保存性物質ではあり得ず、又自然界の観測値としての変動であるという意味において、整理解析する必要がある。本研究では、COD 値が一般に夏に高く冬に低いという点を考慮して、中西ら⁷⁾の主張するように年最小値がいわゆる内部生産の寄与がなく、流入負荷量に対応しているものと仮定する。すなわち COD 年最小値は流入 COD 負荷量が保存性物質として拡散した結果であると考え、この考え方は、数年間にわたる流入負荷量と水域内 COD 存在量が線型関係をなすところからも部分的に裏付けされる⁸⁾。

次に COD 変動ないしはパラツキが多いことから、また本研究の目的が全域的な規模での定量的予測にあることから、予測の対象としては水域毎の平均値を用いることにする。水域区分として紀伊水道・大阪湾・播磨灘・備讃瀬戸・備後灘・燧灘・安芸灘・広島湾・伊予灘・周防灘、豊後水道とし、昭和 47 年 5 月から昭和 48 年 5 月までの 5 回の調査資料について平均値を求めた。水域

* 正会員 工 修 工業技術院中国工業技術試験所

** 正会員 工業技術院中国工業技術試験所

*** 工業技術院中国工業技術試験所

**** 正会員 Ph. D. 長岡技術科学大学助教授

表-1 拡散実験流量および負荷量

No.	流 量 10 ⁴ t/day	負 荷 量 t/day	No.	流 量 10 ⁴ t/day	負 荷 量 t/day	No.	流 量 10 ⁴ t/day	負 荷 量 t/day
1	0.015	0.149	18	0.052	2.616	35	0.277	1.076
2	0.052	1.585	19	0.247	2.064	36	0.949	40.394
3	0.014	0.292	20	1.335	8.388	37	0.363	5.535
4	0.026	0.278	21	0.046	1.716	38	6.459	14.818
5	0.070	0.699	22	2.172	26.062	39	0.286	2.052
6	0.479	9.588	23	0.154	0.308	40	2.212	40.177
7	2.078	20.766	24	4.710	15.252	41	0.542	207.581
8	2.272	45.322	25	5.316	28.371	42	0.660	3.597
9	5.130	102.418	26	0.135	0.714	43	0.100	1.177
10	24.235	727.056	27	1.498	10.867	44	0.037	1.681
11	4.216	84.1884	28	6.270	21.195	45	0.040	0.720
12	1.336	0.096	29	0.259	2.203	46	0.054	0.086
13	0.207	2.069	30	0.597	12.981	47	0.450	6.238
14	0.210	4.207	31	1.322	4.629	48	0.690	31.030
15	0.052	0.530	32	0.047	0.140	49	0.211	34.757
16	1.002	3.691	33	0.092	0.941	50	0.293	30.469
17	5.865	38.243	34	0.098	0.239	51	0.156	1.201

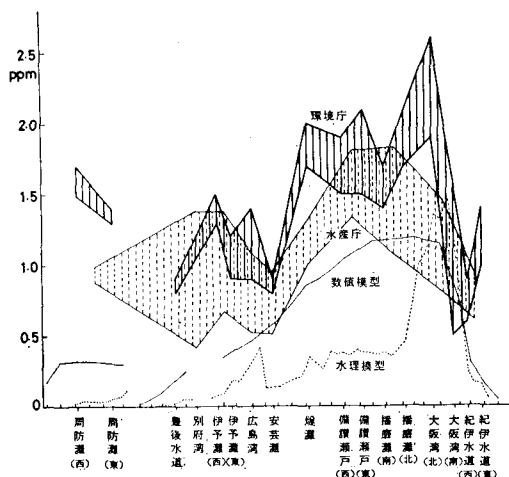


図-2 COD 水域平均値の平均および最小値 (□ 環境庁資料, ▨ 水産庁資料)

平均値を求めるに当ってはその精度を向上させるため、Thiessen 法により各測定点の受け持つ面積を求め、それを重みとした。このようにして求めた重み付平均値は一般に、単純平均値よりも小さ目であった。測定値は表層値と底層値があるが、水質汚濁予測指標としては表層値を採用した。図-2 にこのようにして求めた各水域平均値の5回の資料の平均値と最小値を示す。

次にこの指標に対応する流入 COD 負荷量としては、昭和 47 年の環境庁資料を整理し、図-1 に示す 43 箇所の負荷点を定めた。各負荷点における流量・負荷量は表-1 に示した。

4. 水質汚濁予測拡散実験

表-1 の負荷量に相当するローダミンB染料水を、模型内各水域毎に連続放流して水質汚濁予測拡散実験を行った。実験は以下の水域周辺の負荷源毎に行った。①大阪湾、②播磨灘、③岡山水道、④水島・備後灘、⑤嵯

難、⑥広島湾。模型に拡散した染料濃度は開発したプロープ比色計およびガラス管採水の方法により測定した。

第一段階として各水域毎に 300 M² 潮周期連続拡散実験を行った。図-3 に 300 周期目の一潮時平均の染料濃度を重ね合せた結果を示す。この図を例えば環境庁調査結果と比較するのは困難なことが多い。その理由は主として現地測定値が年 4 回だけで、各回毎の変動が大きいことに起因する。図-4 は、図-3 の結果を一次元的に示したものである。図は各水域毎の実験結果を大阪湾負荷源の値を①とし、それに播磨灘負荷源の値を足し合わせたのを②、として描いたものである。同図にはまた一次元定常拡散数値模型による予測値を示している。一次元模型は、速水・宇野木⁹⁾により開発された模型であり、瀬戸内海を図-1 に示すように 20km 区間の一次元

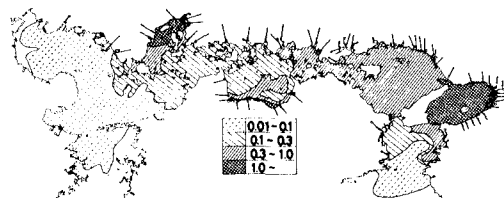


図-3 300 周期染料濃度分布図 (ppm, 矢印は負荷点)

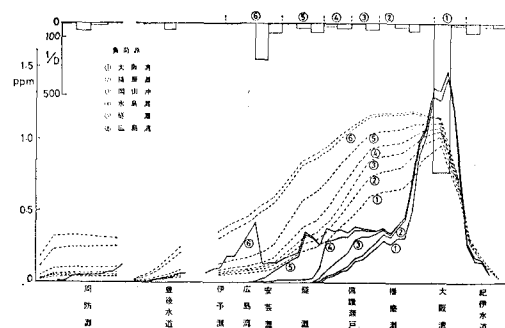


図-4 300 周期染料濃度 (実線) と一次元模型計算値 (点線) 比較図 (上段は負荷量分布)

水路の連続されたものと考え、図-3と図-2を比較すると水理模型実験値は大阪湾の現地CODをかなり良く予測するが、播磨灘以西ではかなり低目である。

これは水理模型実験の方が一次元分散係数が大きいから、実験時間の300周期が濃度の「定常状態」に達するためには短いのかどちらかであると思われる。そこで後者の可能性を追求するため、負荷量の特に大きい大阪湾・広島湾について、1年間に相等する700周期実験を行った。その途中の染料濃度分布図を見る限りにおいては、700周期目で大阪湾・広島湾において濃度分布の定常状態はほぼ達せられていた。図-5は大阪湾・広島湾実験

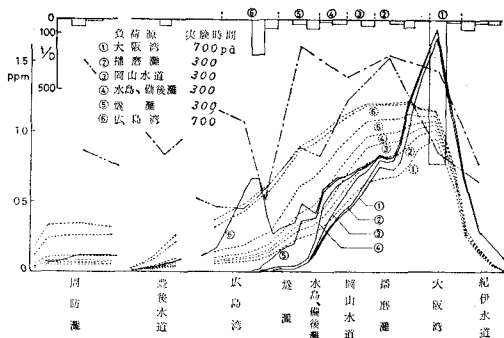


図-5 拡散実験結果比較図 (実線: 染料濃度, 点線: 一次元模型, 一点鎖線: 環境庁, 二点鎖線: 水産庁)

濃度の700周期目の値を、他の実験濃度は300周期目の値を用いて図-4と同様な図を作製したものである。同図にはまた、環境庁・水産庁の資料も示した。図-5の実験値は、大阪湾では現地の値より大きく、広島湾では両者の値は同程度であり、その間の水域では実験値は低目である。

図-4または図-5のように一次的に比較して模型実験により現地の値を予測するには、一次元分散係数が適当であり、実験で定常性が得られているかどうかを確かめねばならない。

5. 一次元分散係数の評価

瀬戸内海全域を一次的に見てその分散係数を評価しようという試みはいくつかなされている。速水・宇野木⁹⁾は定常拡散模型により塩分分布を再現するには分散係数として1000m²/sが適切であることを見出した。杉本・樋口¹⁰⁾は1/10000水理模型より500~3000m²/s、安田ら⁴⁾は1/50000水理模型より1000m²/s、玉井・早川¹¹⁾は模式化した環流モデルより4500m²/s、村上ら¹²⁾は非定常に二層の単一内海モデルより5~7×10³m²/sを得たのが報じられている。ここでは前出の拡散実験における濃度の時間変化より分散係数を逆算する。

大阪湾・広島湾の700周期実験では、この目的のために図-1の一次元モデルの区分線上で採水を行った。

図-1で一次元軸に関して断面平均濃度Cに関する非定常分散方程式は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(AC) + \frac{\partial}{\partial x}(QC) - \frac{\partial}{\partial x}\left(AK\frac{\partial C}{\partial x}\right) &= \frac{m}{\rho} \\ Q &= \int_{x_0}^x q(\xi)d\xi + Q_0 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここでAは断面積であり、tは時間、qは単位長さ当りの流入流量、Kは分散係数、mは単位長さ当りの負荷量である。模型実験ではQ₀は紀伊・豊後両水道に均等に流出するように制御した。

時間tについては潮汐周期を平均した単位であると考え、t=jΔtを中央に差分化し、x=x_sからx=x_iまで積分して結果を差分化するとKについて次式を得る。

$$\alpha K = \frac{(dx)^2}{2\Delta t} \beta + 2\Delta x(Q_i C_i - Q_s C_s) - \sum_{i=s}^{i-1} 2\Delta x \frac{R_i}{\rho} \dots (2)$$

ここで $\alpha = A_i(C_{i+1} - C_{i-1}) - A_s(C_{i+1} - C_{s-1})$,

$$\beta = \sum_{i=s}^{i-1} \{A_{i+1}(C_{i+1} - C_{i-1}) + A_i(C_{i+1} - C_{i-1})\}$$

ただしKはx_s~x_i間で一定であると仮定した。またR_iは各区間における負荷量である。

表-2 分散係数の計算値

大阪湾	j	s	l	K (m ² /s)	広島湾	j	s	l	K (m ² /s)
200	5	10	998		200	18	21	99.7	
300	5	11	587		300	17	21	143	
400	5	12	868		400	16	21	144	
500	5	12	851		500	15	21	107	
600	5	13	738		500	17	21	116	
600	5	14	716		900	15	21	128	
600	5	15	635		600	14	21	136	

表-2は各々大阪湾・広島湾の実験結果を用いて計算した分散係数値である。大阪湾周辺の分散係数値は、600~1000m²/sの間であり、既往の成果のうち小さい値に一致するが、広島湾周辺では100m²/sと小さい値が得られている。これは元来、広島湾周辺は地形が極めて複雑であり、図-1の一次元化ではよく表し得ないのではないと思われる。

6. 一次元模型

水理模型実験における一周期平均の染料濃度は、負荷点付近から定常値に近づいて行くように見え、従来の模型実験でもこの定常値により水質予測を行った例がある¹³⁾。しかしながら瀬戸内海水理模型のように規模が大きくなると、700周期の長時間をもってしても、どの程度定常状態に近づいたか判断し難い。そこで図-1の一次元分散模型により数値計算を行った。基礎方程式(1)であり、陽型式差分解法を用い時間ステップは6時間とした。また移流項の差分化より発生する擬似拡散の効果については、Bella and Dobbins¹⁴⁾の方法に依り補正し

た. なお差分分解の近似度に関しては, 流量 0, 断面積一定値の場合の厳密解と比較してその精度を確めた. 計算において外海側の境界濃度は 0 に保ち, 流入流量は 94% が均等に紀伊豊後両水道より流出するとした.

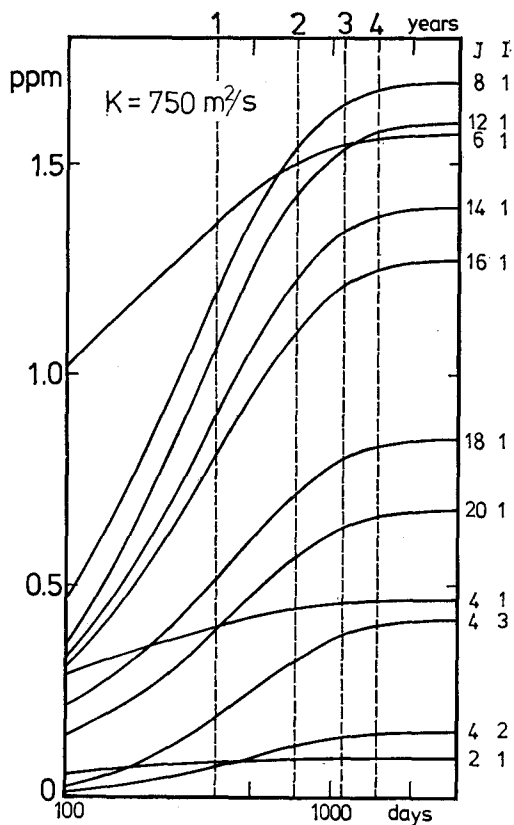


図-6 一次元模型による濃度の時間変化

図-6 は 表-1 のすべての負荷量を用い, K を水理模型から得られた $750 \text{ m}^2/\text{s}$ を用いて年間計算した結果から, 断面間濃度の上昇の様子を示したものである. 図より濃度は放流開始後単調に増加するが, 終局的には定常値に達することが分る. 全域的に定常に達するのは, 0.02 ppm の精度で問題にすれば, 3 年間の経過時間を必要とする. 模型実験技術上は 3 年間の実験は極めて困難である. また一定負荷量が 1 年以上続くというのは考えにくい状況である. ここで出来ることは 1~3 年の一次元模型による計算値が現地 COD にいくらかでも近い値となるかどうか, また一次元模型の 1 年計算値が水理模型実験値と近い値となるかどうかを確めることである.

その前に 図-7 大阪湾実験の濃度変化を, 水理模型実験と一次元模型について示す. 図から水理模型では最大濃度値付近がとりわけ大きく, 全体を一定分散数値で表わすのは至当でないことを示している. しかしながら裾野の広がりを含めた全体的な形状の変化は類似している.

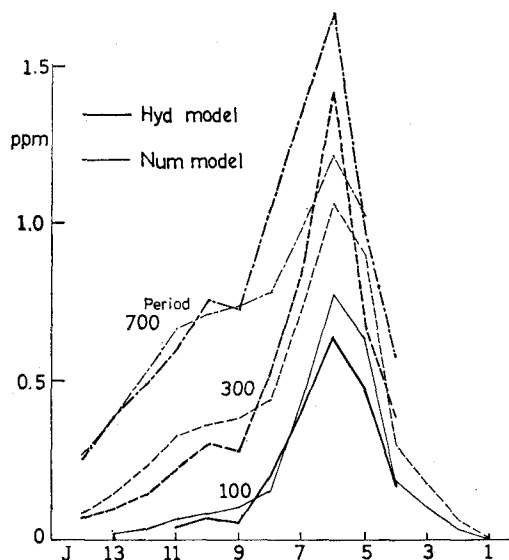


図-7 大阪湾実験の濃度分布

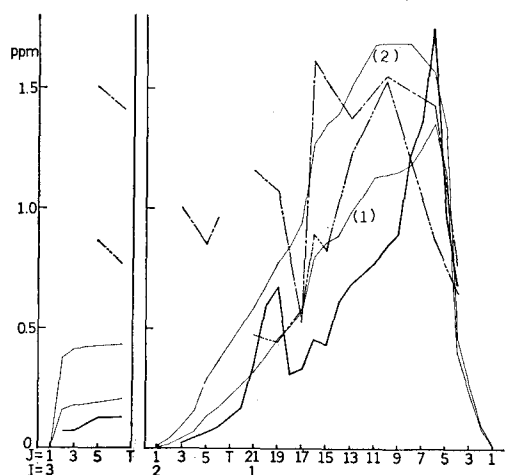


図-8 一次元濃度比較図 (太線: 実験値, 細線: (1) 1 年 (2) 3 年計算値, 一点鎖線: 環境庁, 二点鎖線: 水産庁)

図-8 に分散係数 $750 \text{ m}^2/\text{s}$ で全負荷量を与えた時の一年経過濃度, 定常濃度, 図-5 の水理模型実験濃度の包らる値, 環境庁・水産庁資料の現地 COD 最小値を示す. 図から定常濃度分布は現地 COD に近いこと, 水理模型実験濃度は, 大阪湾で高い値を示し, 備讃瀬戸から燧灘にかけて小さめであるが, 全体として一次元模型の一年濃度値に近いことが分る.

7. 結 論

本研究の目的は水理模型の染料拡散実験による瀬戸内海の水質汚濁予測である. そのためにまず COD 分布には年間変動があることを示し, 予測の対象を水域平均年間最小値とした. 染料拡散実験結果は, 濃度が時間と共

に定常状態に近づくことを示した。また一年相当の実験時間では現地 COD の予測の成否は判断が困難であった。

そこで水理模型実験結果を評価するために、実験濃度分布から一次元分散係数を逆算した。その結果、東半分一帯で平均 $750 \text{ m}^2/\text{s}$ が得られ、やや低めではあるが既往の値の範囲であった。次に一次元分散模型により分散計算を行った。その結果、定常状態に達するのは3年間も経過する必要があることが分った。計算結果の定常状態は現地 COD 分布に近く、一年間計算結果は模型実験濃度に近い。よって一年間程度の水理模型拡散実験を行うことにより、瀬戸内海の水質汚濁予測は可能であると思われる。なお模型実験の大部分は紙面の都合上割愛した⁹⁾。

謝 辞

本研究のうち5章までは中国工業技術試験所において公害防止技術特別研究として行われたものであり、関係各位に謹んでここに謝意を表する。

参 考 文 献

1) 金子安雄・堀江 毅・村上和男: 大阪湾の潮流と汚染拡

散, 第 21 回海講論文集, pp. 309~314, 1974.

- 2) 藤森研一・稲富隆昌・金子俊六: 伊勢湾水理模型実験と現地調査 (第 1 報), 第 22 回海講論文集, pp. 219~226, 1975.
- 3) 早川典生 他: 水理模型による瀬戸内海拡散現象の実験的研究, 第 24 回海講論文集, pp. 496~499, 1977.
- 4) 安田秀一・樋口明生・早川典生: 潮汐水理模型の縮率効果について, 第 24 回海講論文集, pp. 577~581, 1977.
- 5) 環境庁水質汚濁総合調査, 1972.
- 6) 水産庁南西海区水産研究所: 瀬戸内海浅海定線特殊項目測定資料, 昭和 47~51 年度, 1978.
- 7) 中西 弘・浮田正夫・宇野良治: 用水と廃水, 17-6, p. 43, 1975.
- 8) 工業技術院中国工業技術試験所: 瀬戸内海全域の汚濁予測に関する研究, pp. 633~655, 1980.
- 9) 速水頌一郎・宇野木早苗: 瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散, 第 17 回海講論文集, pp. 385~394, 1970.
- 10) 杉本隆成・樋口明生: 潮流による拡散の水理模型実験について, 京都大学防災研年報第 15 号 B, pp. 431~440, 1972.
- 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, D-1005, 1975.
- 12) 村上真裕美・大西行雄・原島 省・国司秀明: 瀬戸内海における水温・塩分分布のシミュレーション, 沿岸海洋研究ノート, 第 15 巻第 2 号, pp. 130~137, 1978.
- 13) Simons, H. B.: Use of hydraulic models in resolving tidal problems, Jour. Hydraulics Div., Proc. ASCE, Vol. 95, HY 1, pp. 125~146, 1969.
- 14) Bella, D. A. and W. E. Dobbins: Difference modeling of stream pollution, Jour. Sanitary Engrg. Div. Proc. ASCE, Vol. 94, No. 5, pp. 995~1016, 1968.