

瀬戸内海における海水交流の実験的研究(Ⅲ)

樋口 明生, 武岡 英隆, 黒田 芳史, 北川 吉男

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE WATER EXCHANGE IN SETO INLAND SEA (III)

By Haruo HIGUCHI, Hidetaka TAKEOKA, Yoshifumi KURODA
and Yoshio KITAGAWA

Synopsis

Tidal exchange and dispersion in Seto Inland Sea are studied with use of a hydraulic model, of which the horizontal and vertical scales are 1/50000 and 1/500 respectively.

Dye was released throughout two tidal cycles. Time-concentration curves and age distribution curves for various locations were obtained. Steady state concentrations were determined from these curves. The distribution of continuously released water was determined from these steady state concentrations. The results were compared with salinity distributions in the prototype.

1. ま え が き

沿岸海洋における物質の拡散問題において、実際に必要な事はある地点から投入された物質がどこにどれくらいの期間存在するかを知ることである。特に、瀬戸内海のように閉鎖的な海域においては、短期間の物質の分散過程を知ると共に、長期にわたる大規模の海水交換を知る事が重要な問題となる。ここでは水理模型を使い実験的にこれらの問題を調べていく。

前報¹⁾では、瀬戸内海全域の海水と外洋の海水が長期に渡ってどのように入れ換っていかを、ある瞬間に内海を満たす染料水のその後の挙動を追跡することにより調べた。その結果、内海水の入れ替わりは潮汐混合による外洋水との交換に支配され、ある瞬間における内海水は、その後ほぼ指数関数的に減少することがわかった。

今回は、単位時間内にある灘に投入された染料水の挙動を調べた。そしてその結果から、大規模の物質分散、海水交換を考えていくのに重要と思われる、投入水の年令組成、各投入点からの寄与率等が求められることを示した。今後、水理模型と原型との相似性が改善されれば、これらの考え方は非常に有用なものと考えられる。

2. 実験の概要

Fig. 1 は実験装置の一般図である。模型は水平縮尺 1/5 万、鉛直縮尺 1/500 のモルタル滑面の Froude 模型である。模型諸元を **Table 1** に示す。この模型では M_2 分潮の潮汐の潮差と位相差を再現している。潮汐、潮流、潮汐残差流についての状況は前報¹⁾に示されている。

実験方法は次のとおりである。**Fig. 2** に投入点と採水点を示す。図中 *A, B, C, D, E* はそれぞれ紀伊水道、大阪湾、播磨灘と備讃瀬戸、備後灘と燧灘、安芸灘と広島湾と伊予灘と周防灘に流入する河川のうち最大の流量をもつ河川である。各地点から各灘に流入する河川流量の総計を投入する。河川流量については、瀬戸内海全域の塩分データが環境庁瀬戸内海水質汚濁総合調査で1972年5月、8月、10月、1973年1月

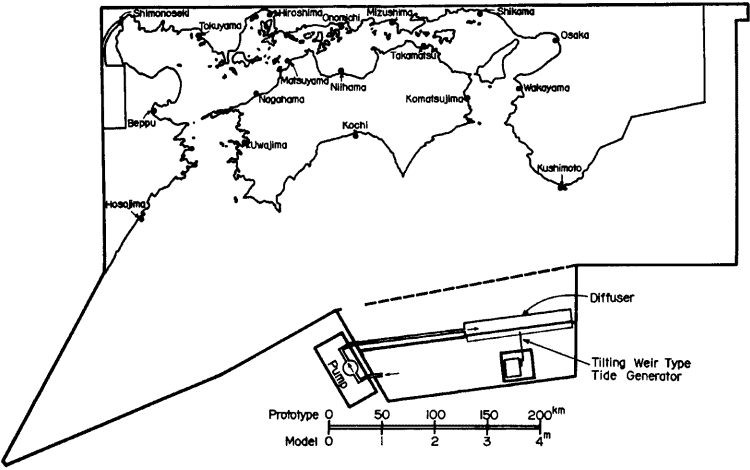


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facilities.

Table 1 Hydranlic factors.

Factor	Scale	Prototype	Model
Distance	1/50000	100 km	2 m
Water Depth	1/500	10 m	2 cm
Tidal Range	1/500	1 m	2 mm
Tidal Period	1/2236	12 ^h 25 ^m	20.0 sec
Velocity	1/22.4	44.8 cm/sec	2 cm/sec
Horizontal Diffusivity K_x	1/11.2 $\times 10^5$	11.2 $\times 10^4$ cm ² /sec	0.1 cm ² /sec
Vertical Diffusivity K_z	1/112	11.2 cm ² /sec	0.1 cm ² /sec
Discharge	1/55.9 $\times 10^7$	55.9 m ³ /sec	0.1 cc/sec

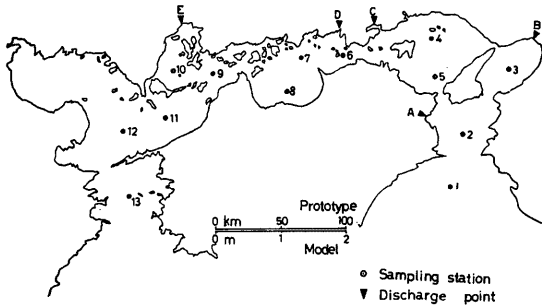


Fig. 2 Distribution of sampling stations and discharge points in the model.

Table 2 Discharge.

Discharge points	A	B	C	D	E
Prototype (m ³ /sec)	318	302	235	101	352
Model (cm ³ /sec)	0.57	0.54	0.42	0.18	0.63

に得られているので、その塩分分布と比較の為に、その4ヶ月の河川流量の平均値を使用した。その値を Table 2 に示した。

まず、全地点から河川流量に見合う水道水を流しつづける。十分時間を経て、ある一つの投入点のみ水道水に換えて螢光染料（200 ppm のウラニン）を2潮汐周期に渡り連続的に投入する。2潮汐周期はほぼ1日に相当し模型では40secである。染料投入後も全地点から水道水は投入し続ける。染料投入後採水点 St. 1～13において、定めた周期毎に採水し螢光光度計（Turner 社 111 型）により濃度を測定した。以上の方法でそれぞれ5つの投入点について実験を行なった。

3. 実験結果

Fig. 3 a, b に投入点 C, E から染料を投入した場合に得られる、それぞれの採水点における染料濃度の時間変化曲線を示した。他の投入点に関しても同様の図が得られた。図の中で縦軸は対数目盛であらわしている。200～300 周期以後濃度は指数関数的に減少している。

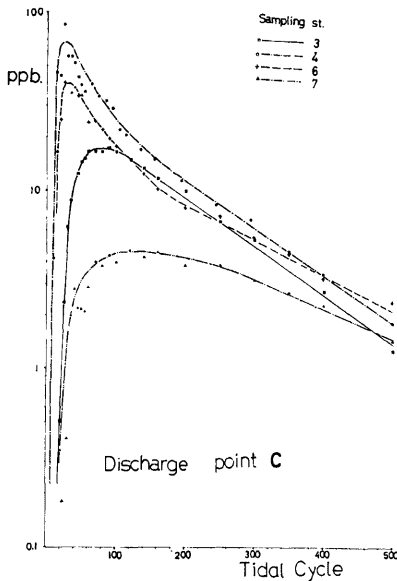


Fig. 3-a Time change of dye concentration (discharge point C).

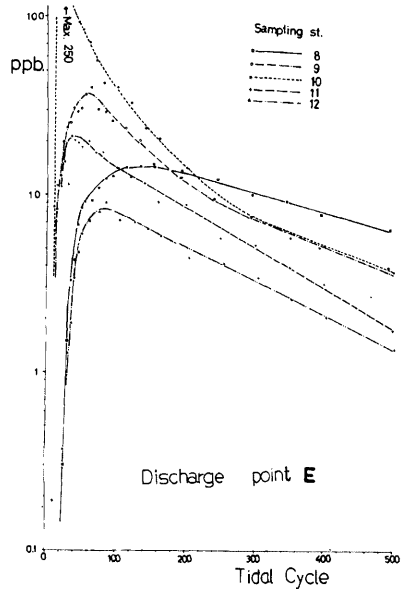


Fig. 3-b Same as Fig. 3-a but for discharge point E.

4. 考 察

4. 1 定常濃度

定常濃度は染料水を連続投入した場合、投入量と外洋に運び出される量が平衡状態に達した後の一定の濃度のことをいう。ここでは実験より得られた、染料水の時間・濃度曲線から定常濃度を求める³⁾。定常濃度は単位時間染料投入実験で得られた時間・濃度曲線を時刻0から ∞ まで積分したものに等しい。本実験の場合、投入後500周期までしか測っていないので濃度は十分減衰しない。しかし、200~300周期を経過するとはば指数関数的に減少するので、500周期以降も、その傾きのまま減少していくと考えられる。これから得られた定常濃度を **Table 3** に示した。これらの定常濃度から、ある採水点の単位体積中に占める投入点起源の水の割合を求めることができる。それを **Fig. 4** に示した。横軸は採水点の水平距離、縦軸は単位体積中に占める投入点起源の水の百分率である。

Table 3 Steady state concentrations.

Sampling stations	Discharge points ($\times 10^2$ pph)					Total
	A	B	C	D	E	
1	5.8	5.9	7.2			18.9
2	14.2	9.2	18.7	2.8		44.9
3	19.7	39.8	40.3	7.3		107.1
4	27.1	32.0	35.1	12.4		106.7
5	46.1	23.3	29.5	14.9		113.8
6	14.5	12.8	7.7	36.1	21.1	92.2
7	2.1		2.4	11.2	32.2	47.9
8				8.1	31.5	39.6
9					35.6	35.6
10					68.9	68.9
11					20.7	20.7
12					10.9	10.9
13					4.8	4.8

大阪湾内の *St. 3* を例にとれば、定常状態を考えれば *St. 3* の単位体積に占める、全ての投入点起源の水は約4.3%である。そして、その4.3%に対する *A, B, C, D, E* 起源の水の寄与率は、それぞれ23%, 47%, 22%, 8%である。このようにある地点でそれぞれの起源からの水の寄与率がわかることは实际的に有用と考えられる。**Fig. 4** を見ると *A, B, C* 起源の水は *St. 7* (備後灘) 以西では、ほとんど寄与しない。このことはこの間の海域を通じて東と西の海水交換が小さいことを示している。この海域の特性が内海全域に渡る分散過程に与える影響は極めて大きい。

次に染料濃度の分布を塩分分布に換算し、原型の分布と比較する。内海の塩分分布を考える場合、蒸発量と降水量の差は無視することができる⁴⁾。又、密度流は内海においては極めて小さいと考えられる⁵⁾。風による流れは、よくわかっていないが、時間スケールは小さいと考えられ、今考えているような長期に渡る現象では考えなくても良いだろう。以上のことから内海の塩分分布の基本的な部分は潮流及び潮汐残差流に支配されていると考えられる。外洋の塩分濃度を34%とし、実験から得られた定常濃度の分布から塩分分布を算定したものを **Fig. 5** に示した。実際の塩分分布は1972年5月、8月、10月、1973年1月のそれぞれ灘毎に平均した値である⁶⁾。**Fig. 5** を見ると模型の方が、内海部と外洋側の塩分差がかなり小さくあらわれる。これは模型の河川水が原型より早く内海部から流出していることを示している。言い換えれば、模型では原型

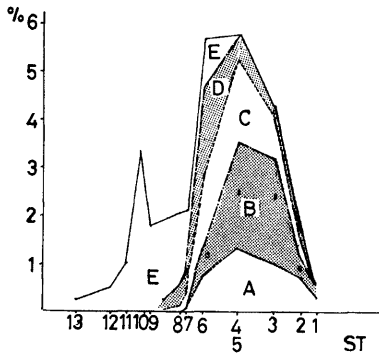


Fig. 4 Distribution of the proportion of discharged water to unit volume.

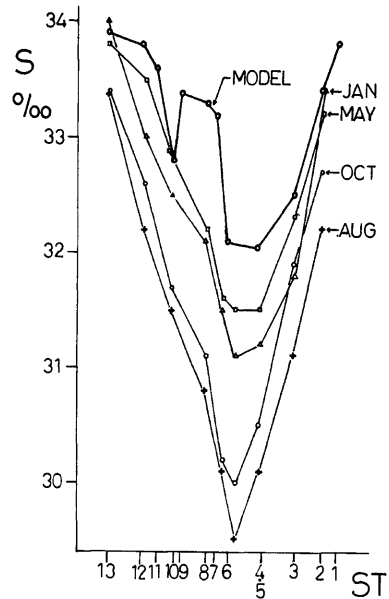


Fig. 5 Distribution of salinity in the model and prototype.

より早く内海水と外洋水が交換しているといつてよい。この原因については海峡部で拡散係数が大きい事、又潮汐残差流が強すぎる事¹⁾が考えられる。

4. 2 年令組成

海水中の非保存性物質の挙動を知る上において、年令 (age) という概念は重要である。この年令とは、ある海域内の水やその他の物質粒子の各々について、それらがその海域内に入った時から経過した時間として定義される。瀬戸内海のようなモデルでは、内海水の起源は、蒸発、降水等による海面での出入りを無視して考えれば外洋水と河川水である。外洋水の供給は流入ではなく、見かけ上の拡散によるものであるから、外洋起源の水または物質の年令の定義は困難である。河川に起源を持つ水や物質の年令は、一つの河川を設定すれば定義が可能であり、実際の沿岸海域における汚染等を考える場合、汚染物質は陸岸から供給される場合が多いから、河川起源の水の年令を知るとは重要であると考えられる。

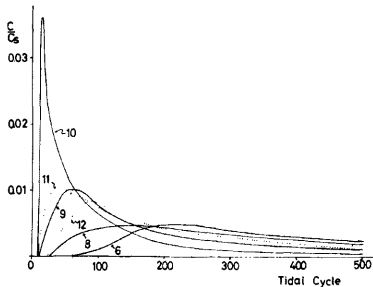


Fig. 6 Age distribution curves (discharge point E).

本実験のような、河川からの単位時間の染料投入実験を行えば、ある地点において、投入点に起源を持つ水の年令を知ることは容易である。今ある測点において、投入時より t 時間後の濃度が $C(t)$ であるとする、 $C(t)$ はその測点において年令 t の水の占め

る割合を表わすことになる。先に求めた、その測点での定常濃度を C_s とすれば C_s は投入点起源の水の占める割合でもあるから、 $C(t)/C_s$ は、投入点起源の水のうち年齢 t のものの割合を表わす。これは t の関数であり、その測点における投入点起源の水の年齢組成と呼ぶことができる。

一例として、 E から投入した場合の各採水点での年齢組成を Fig. 6 に示した。縦軸は測定された濃度 C の、Table 3 に示された各採水点における定常濃度 C_s に対する比をあらわしている。図中の数字は採水点を示している。 $St. 10$ が投入点 E に一番近く、点線はそれより外洋側、実線は内海側の採水点を示し、それぞれその地点での年齢組成を示す。

5. あ と が き

瀬戸内海における海水交流とそれに伴う海水交換の研究として単位時間染料水投入実験を行なった。その結果として時間・濃度曲線が各測点で得られた。これより定常濃度を算定し、その値から、全ての投入点起源の水が、ある場所で単位体積中に占める割合を示した。又、それに対する各投入点の寄与率がわかることを示した。又、定常濃度分布を塩分に換算して、原型の塩分分布との比較を行なった。その結果、模型の海水交換がかなり大きいことがわかった。又、時間・濃度曲線と定常濃度から、非保存性物質の挙動を知る上で重要な、年齢組成が求まることを示した。

塩分分布の比較のところで述べた様に、ここでできた実験結果をそのまま原型に適用することはできない。しかし、ここで使われた手法や考え方は、今後、模型の相似性が改善されれば、物質の分散過程や海水の交換を研究する上で非常に有効なものと考えられる。

本研究には、多くの方々の御協力をいただいた。京都大学理学部国司秀明教授、京都大学防災研究所田中正昭助教授、愛媛大学工学部柳 哲雄講師、及び京都大学理学部海洋物理学研究室、京都大学防災研究所災害気候部門の諸氏から貴重な討論と助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生, 武岡英隆, 北川吉男: 瀬戸内海における海水交流の実験的研究(Ⅰ), 京都大学防災研究所年報第19号 B-2, 1975, pp. 411-421.
- 2) 環境庁水質保全局: 昭和47年度瀬戸内海水質汚濁総合調査, 1973.
- 3) Thomas E. Bailey, Charles A. McCullough, and Charles G. Gunnerson: Mixing and dispersion studies in San Francisco Bay, ASCE, SA5, October, 1966, pp. 23-44.
- 4) 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回海岸工学講演会論文集 1970, pp. 385-393.
- 5) 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, 塩分分布の数値シミュレーション: 沿岸海洋研究ノート, 第15巻第2号, 1978, pp. 130-137.
- 6) 今里哲久, 国司秀明, 武岡英雄, 吉岡 洋, 柳 哲雄, 淡路敏之, 遠藤修一: 瀬戸内海の家況変動について, 沿岸海洋研究ノート, 第15巻第2号, 1978, pp. 138-142.