

瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究 (II)

杉 本 隆 成・樋 口 明 生

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE TIDAL MIXING IN SETO INLAND SEA (II)

By Takashige SUGIMOTO and Haruo HIGUCHI

Synopsis

The mechanism of the tidal mixing in Seto Inland Sea is studied with use of a small hydraulic model, of which the horizontal and vertical scales are 1/100000 and 1/1000 respectively.

There are a few regions, where the tidal residual circulation is weak and horizontal diffusivity is relatively small. Seto Inland Sea is divided into 3 or 4 areas by such regions.

The horizontal diffusivities, calculated from the distribution of the dye concentration in the model, are about $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in the central part and $3 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in the eastern or western parts of Seto Inland Sea. The diffusivity calculated as the product of the diameter and velocity of residual circulation is compared with these.

1. ま え が き

瀬戸内海の海水交流の実態を把握するために、四季を通じて全水深にわたって支配的であると考えられる、潮流に伴う水平混合の機構を、水理模型実験によって検討した。

序報¹⁾では原型の海水交流に関係する諸要素を整理するとともに、模型に豊後水道と紀伊水道から半日周潮を与えて内海の潮汐を再現し、さらに水島灘等に染料を連続的に投入し、その流動・拡散の模様を観察した。その結果、瀬戸内海規模の海水交流・物質の拡散過程には潮流に伴う環流（恒流）の分布および停滞域の存在が極めて重要であることがわかった。

今回は、こうした環流の強弱による水平拡散係数の場所的変化を定量的に調べるために拡散実験を行なった。同時に拡散係数と環流等との対応を調べた。

2. 実 験 結 果

モルタル滑面のフルード模型の、一般図を Fig. 1 に示す。この模型に豊後水道と紀伊水道から位相差と

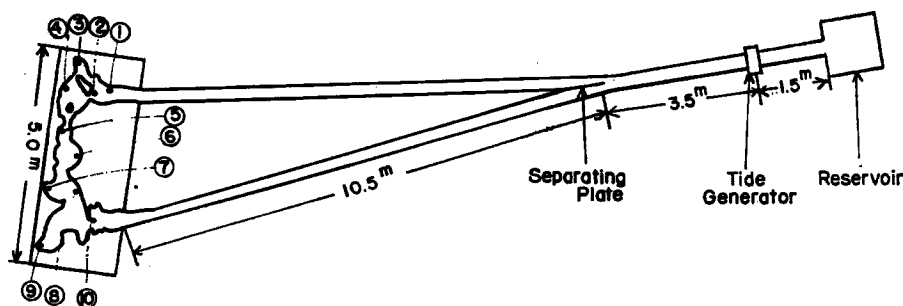
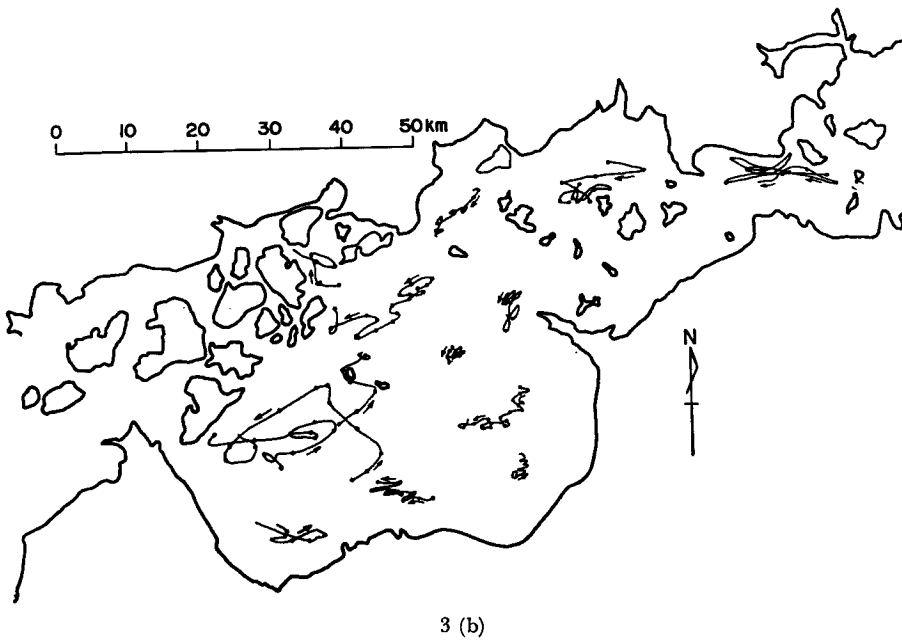
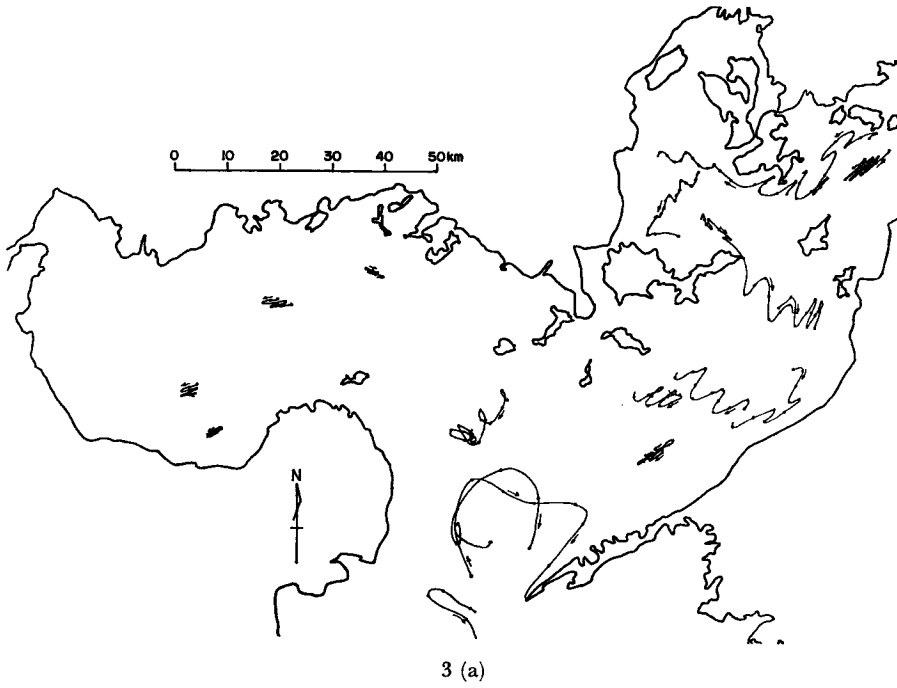


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facilities.



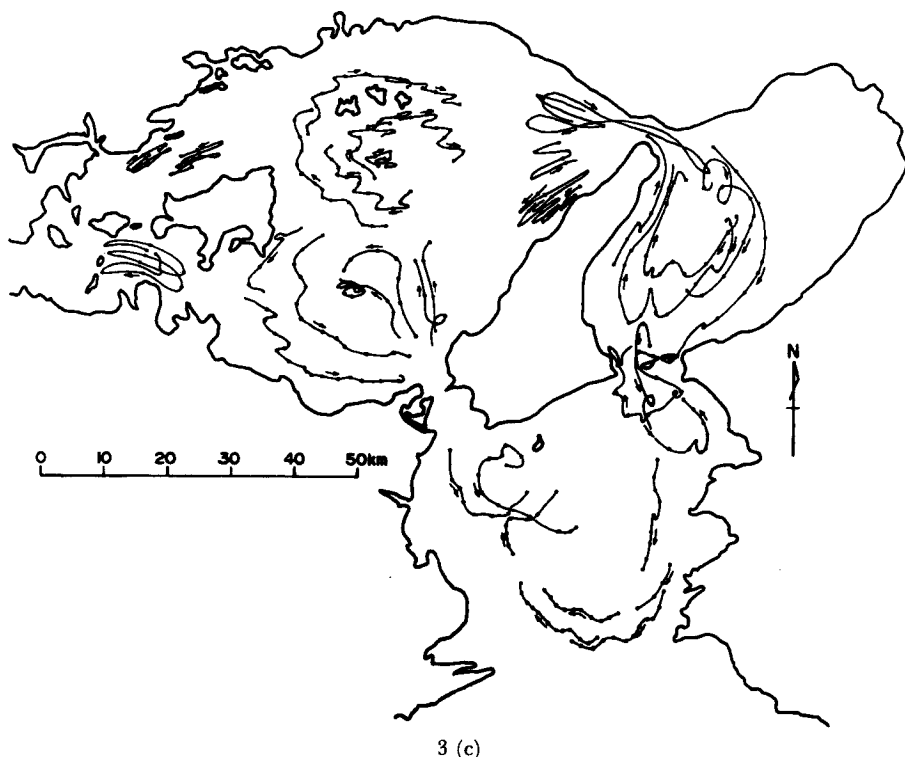


Fig. 3 Tidal locus in the model in the western part (a), central part (b), and eastern part (c).

これらの環流 (tidal residual circulation) の模式図を Fig. 4 にあげる。環流の幾何学的なパターンは前報で述べた如く原型のものとななり一致している。一例として播磨灘における原型の資料を Fig. 5 a, b にあげる。Fig. 5 a は県水産試験場による 1963 年 7 月の表面塩分分布であり、Fig. 5 b は 1928 年に神戸海洋気象台によって行なわれた潮流観測の結果得られた 5 m 層の恒流成分である。南部の環流は模型の方が規模が若干大きい。北部の環流は原型と規模はほとんど同程度であるが、流速は模型の方が 2 倍程大きい。

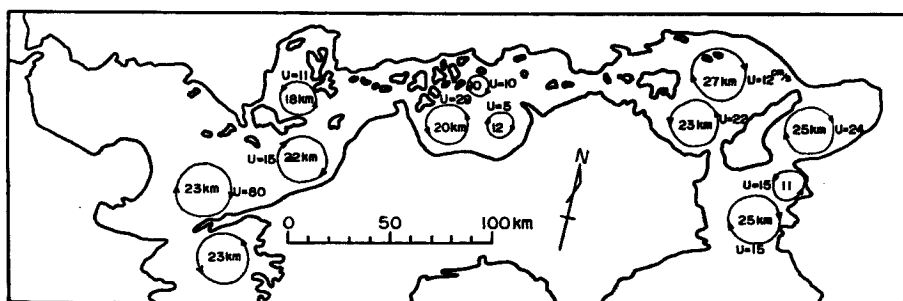


Fig. 4 Distribution of tidal residual circulation (model).

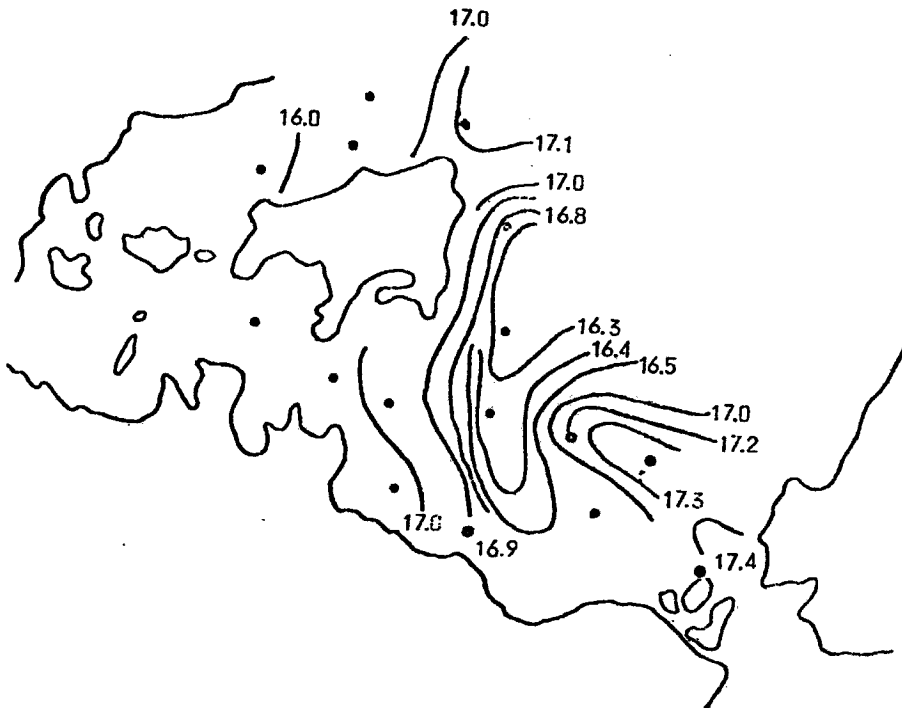


Fig. 5 a. Chlorinity in the surface layer in July, 1963.

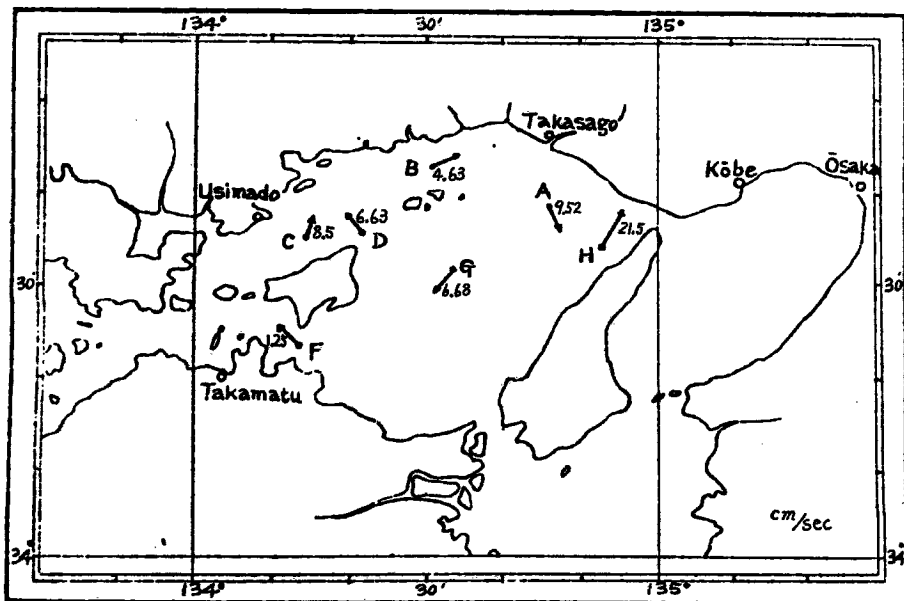


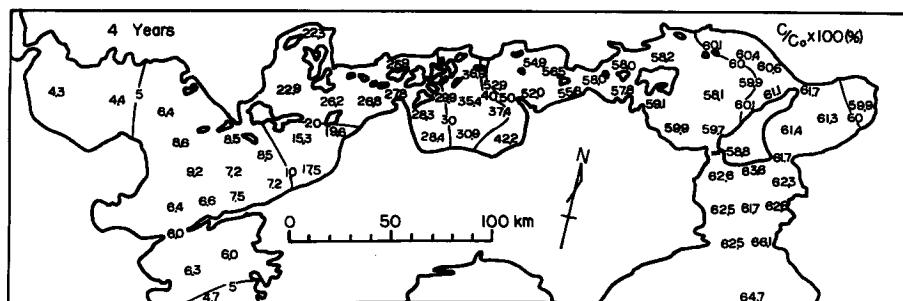
Fig. 5 b. Constant flow at 5m depth observed in 1928.

(2) 拡散係数の場所的変化

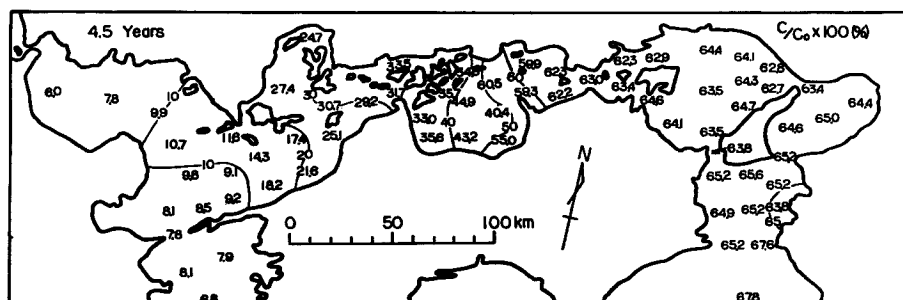
前報において、瀬戸内海全域規模における潮汐混合は主として地形性の環流によって支配されており、瀬戸内海東部の停滞域の存在によって、水島灘へ投入された物質の2/3は東部に拡がることを述べた。

これらを水平拡散係数を用いて定量的に表現するために、瀬戸内海を一次元の水路と見なして、染料の連続点源拡散実験の解析を行なった。紀伊水道開口部にポリエチレンの薄膜で作ったやわらかい仕切りを設け、その内海側に濃度 0.0167 g/l の蛍光染料ウラニン溶液を 1.05 cc/sec (原型では $3318 \text{ m}^3/\text{sec}$ に相当) の割合で投入した。投入開始後4年目および4.5年目の染料の濃度分布を、原液の濃度を100として Fig. 6 a, b に示す。

この図から、Fig. 7 に示すような各断面における平均濃度を求め、紀伊水道開口部 (L_0) から豊後水道に



(a)



(b)

Fig. 6 a,b Horizontal distribution of dye concentration, after 4 (a) and 4.5 years (b), discharged from Kii-Channel.

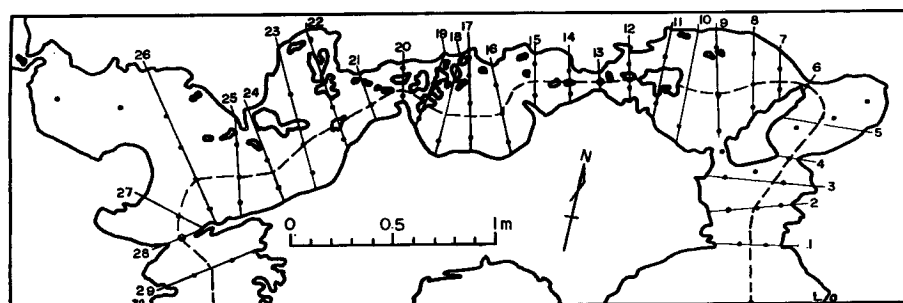


Fig. 7 Distribution of sampling station and section used for averaging.

いたる線に沿って表わすと、Fig. 8 のようになる。●印は4年目の、○印は4.5年目の値を示す。その間の折線は濃度勾配がほぼ等しい海域の平均的な勾配を示す。拡散係数の計算にはこの値を用いた。この図によると、さきに述べた停滞域である幾灘東部と伊予灘中部では勾配は非常に大きく、明瞭な環流のある海域では、濃度は一定に近い。

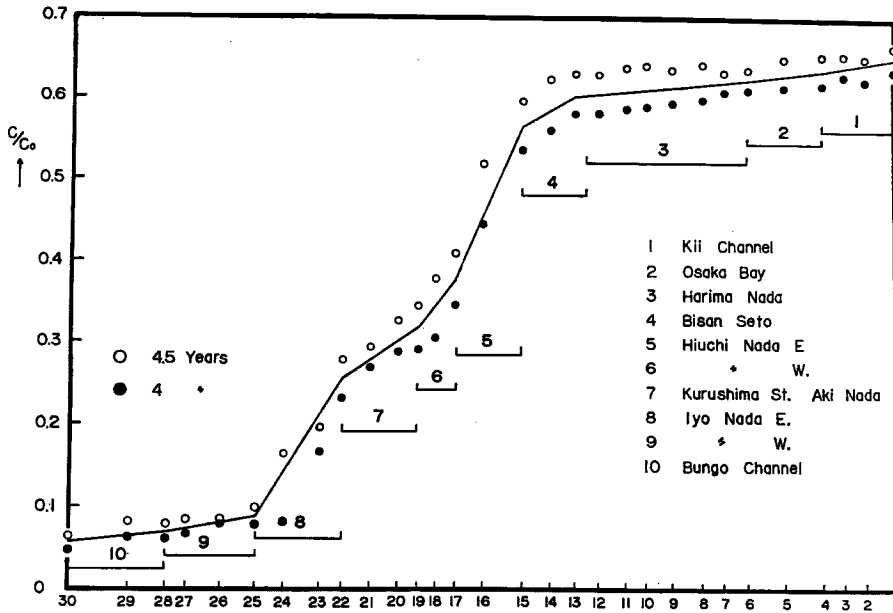


Fig. 8 Sectional mean concentration of dye after 4 and 4.5 years versus distance.

さて、一次元の拡散方程式は、染料の濃度を C 、移流としての断面平均流量を Q 、断面積を A 、水平拡散係数を K とすると、次式で与えられる。

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + Q \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A K \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

ただし、紀伊水道開口部の、ポリエチレン膜の仕切りの内側の、染料投入点を原点とし、豊後水道に向かう長さを x とする。

投入原液の濃度を C_0 、豊後水道開口部の地点 $x=L_{30}$ における断面平均濃度を C_L として(2.1)式を地点 x から $L(=L_{30})$ の断面まで積分するとつぎようになる。

$$\int_x^L A \frac{\partial C}{\partial t} dx - Q C + Q C_L + A K \frac{\partial C}{\partial x} - \left[A K \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=L} = 0$$

第1項は断面 x から断面 L までの部分における貯留量、第2, 3項はそれぞれ移流による流入、および流出量、第4, 5項はそれぞれ拡散による流入、および流出量である。

ここで、 L_{30} の断面を通して外洋に流出する染料の量(上式の第3, 5項)は、 L_0 に投入される量から内海の各部分の濃度上昇に使われる量を引いたものに等しい。Fig. 6 a, b において、4年目から4.5年目について求めてみると、流出量は投入量の7割程度になる。

$$Q C_L - \left[A K \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=L} = 0.70 Q C_0$$

したがって、水平拡散係数は次式で与えられる。

$$K = \frac{\int_x^L A \frac{\partial C}{\partial t} dx + Q(0.70 C_0 - C)}{-A \frac{\partial C}{\partial x}} \dots\dots\dots (2.2)$$

この式の各項と AK の値を Table 1 に示す。

Table 1 Terms of the diffusion equation, and the horizontal diffusivity.

	(1) $\int_x^L A \frac{\partial C}{\partial t} dx$	(2) $Q(0.7C_0 - C)$	(3) $-A \frac{\partial C}{\partial x}$	(1)+(2)/(3) $K(\text{cm}^2/\text{sec})$	$AK(\text{cm}^4/\text{sec})$
1 Kill-Channel	142×10^7	6×10^7	48.3	3.1×10^7	4.5×10^{17}
2 Osaka Bay	131	9	42.2	3.3	2.9
3 Harima Nada	110	13	39.6	3.1	2.8
4 Bisan St.	100	24	47.9	2.6	0.86
5 Hiuchi Nada(E)	93	59	233	0.65	0.32
6 Hiuchi Nada(W)	83	108	168	1.1	0.69
7 Geiyo St., Aki Nada	75	115	118	1.6	1.3
8 Iyo Nada(E)	50	164	450	0.5	0.96
9 Iyo Nada(W)	26	191	66.6	3.2	6.0
10 Bungo St.	11	196	40.6	3.4	11.7

3. 考 察

Table 1 をみると、拡散係数の値は、豊後水道、伊予灘西部、および播磨灘以東では $3 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度である。内海中央部の燧灘および伊予灘中部の停滞域では小さく、 $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度であり、備讃瀬戸その他の海域では $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度である。

速水・宇野木²⁾ は原型の10年間程度平均した塩分分布から、内海を一次元の水路と見なし、水平拡散係数を一定として、これを解析的に求めた。その結果によると、現実の塩分分布に最もよくあう拡散係数の値は $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度である。これに対して模型の値は平均して2倍程度大きいこれは、模型では潮汐として大潮を与えていることと、海峡断面積を縮小したため、環流が強くあらわれていることに等よると考えられる。

定常状態における染料の断面流量は各断面で等しく、濃度勾配 $\partial C/\partial x$ は AK に反比例する。濃度勾配の逆数を示す AK の値は、燧灘東部で著しく小さく、豊後水道、伊予灘西部や大阪湾、紀伊水道に比べて1桁以上小さい。次いで燧灘西部、備讃瀬戸が小さい。Fig. 8 は非定常な状態のものであるが近似的にこのことを示している。伊予灘東部は、貯留が急速に進んでいる段階と見られる。

この模型は、以上のような値をもつ拡散係数の内部構造を定量的に議論できる精度を持たないが、濃度分布から求めた拡散係数の値 K_e と、Fig. 4 の環流の規模 l と強さ v から予想される拡散係数の値 $K_v (= \alpha v l)$ との対応付けをしてみた。 K_e と vl を Table 2 に示す。両者から得られる α の値は0.2~0.8、平均して0.5の程度である。

海峡部における潮流の最大流動距離 L は、たとえば明石海峡については、実験によれば20~30 km の程度である (Fig. 3c)。混合距離理論の考え方に従えば、拡散係数は次式で与えられる。

Table 2 Horizontal diffusivity obtained from the dye diffusion experiment and from the tidal residual circulations.

Area No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	mean
K_c	3.1	3.3	3.1	2.6	0.65	1.1	1.6	0.5	3.2	$\times 10^7$ 3.4	$\times 10^7$ 2.3
vl	3.8	6.0	4.1			5.6	3.5		$\times 10^7$ 19		
α	0.8	0.6	0.8			0.2	0.5		0.2		0.5

$$K_e = \beta UL = 2\beta L^2/T \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、 β は混合係数、 U は潮流の平均速度、 T は周期（12時間25分）である。これにさき程の値を入れると、 $K_e = 2 \times 10^8 \beta \sim 4 \times 10^8 \beta \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度である。一方濃度分布から求めた拡散係数は Table 1 から、 $K_e = 3.2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ないし、それ以上と推定されるから、 β の値は0.08～0.16の程度となる。また、備讃瀬戸では L は20kmの程度であるから、 $K_e = 2 \times 10^8 \beta \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、 K_e は 2.6×10^7 であるから、 β の値は0.13となる。これらは、かつて速水、福尾、依田³⁾が、明石海峡の塩分分布の時間的变化から、これを空間的に置きかえて推算した値 $\beta = 0.12$ と同程度である。明石海峡や備讃瀬戸のように、流れが比較的直線に近い運動を示す場合には β は0.1の程度であるが、鳴門海峡などのように大きな環流を伴う場合にはもう少し大きくなると思われる。

Fig. 8を見ると、燧灘東部と伊予灘東部とでジャンプする階段状の濃度分布を示している。一方、豊後水道、伊予灘西部や播磨灘、大阪湾、紀伊水道のように断面積が大きく、環流も強い海域では、濃度は均一に近い。

一般に、定常状態の濃度分布は境界条件の値と内部の AK の値で決定される。 AK に、Table 2に見られるような場所的な差があると、両境界の濃度差の大部分は AK の小さな海域で使われ、その結果として、瀬戸内海は濃度レベルが比較的に一様な3～4個の水系に分かれる。

もし、拡散係数が一様に近いと AK は A だけに依存するから、海峡部で濃度勾配が大きくなり、灘毎の水塊に分かれることになるが、この実験結果によれば、むしろ灘内の環流の停滞域の存在の方が水系分離に効いているように思われる。

燧灘、伊予灘中部、紀伊水道などの停滞域、海峡部は各灘の濃度レベルの決定に重要であるから、なお詳細な研究が必要である。

4. あ と が き

以上、著者らは水平縮尺1/100000、鉛直縮尺1/1000の模型を使って、潮汐混合の機構、拡散係数の場所的变化とその意味について調べた結果、前報に引き続きつぎのことが明らかになった。

(1) 潮流に伴って発生する地形性の環流 (tidal residual circulation) は直径20km、周辺の流速が20cm/sec程度で、原型と比べて規模はほぼ等しいが、流速は約2倍に強調されている。

(2) 連続点源染料の拡散実験から求めた拡散係数は、潮流・環流の停滞域である燧灘東部では $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり、強い環流の存在する豊後水道、伊予灘西部と播磨灘以東では $3 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度の大きさである。

(3) 模型で、染料の濃度分布から求めた各海域の拡散係数 K_e と、環流および停滞域とは、比較的よい対応があり、 $K_e = K_v (= \alpha vl)$ 、ただし v, l はそれぞれ環流の周辺速度と直径)とすると、 α は0.2～0.8の程度である。また、海峡部の海水交流について、 $K_e = K_u (= \beta UL)$ 、ただし U, L はそれぞれ海峡の潮流の平均流速と流動距離)とすると、 β は0.08～0.16の程度である。

(4) 瀬戸内海は両端の開いた、数個の灘の海峡による連結系と見られ、内海規模の海水交流には環流の分布が支配的な役割を演じている。とくに、環流と環流の間の停滞域の存在は大きな濃度勾配をもたらす、瀬戸内海を濃度レベルの異った3~4個の水系に分ける。また、環流・停滞域の分布と、原型における水温・塩分を指標とした水塊構造との間には対応がある。

ただし、

(5) この実験では、海峡の断面を便宜的に縮小したために環流が強調され、相似性は十分満足されていないが、今後、海峡の断面積を小さくするかわりに金網を入れて乱れをつくるとか、粘性の大きな流体を用いるとか、大潮差のかわりに平均潮差で実験をすれば、原型により近い状態が得られよう。

(6) 地球の回転の影響、風・密度の影響、および断面平均の恒流については考慮していない。とくに停滞域では、環流が風・密度分布によって発生・発達あるいは減衰する可能性がある。しかし、今回模型に与えた条件、すなわち潮流だけでも、主要な環流の分布は再現されており、瀬戸内海規模の海水交流について、とくに潮汐混合の内部構造の最も重要な部分について照明を当てることができたといえよう。

(7) 縮尺1/100000という小型模型で、水平鉛直の縮尺比も100倍という大きなものであるから、実験精度に問題があり、播磨灘の水塊の流出に対する鳴門海峡の影響とか、各灘内の小内湾規模の濃度分布、海水交流の機構などについては、ここでは立ち入った議論をすることはできない。これらの、より小規模の個々のことについては、現地観測や大型の模型実験による研究によらねばならない。一例として、水島灘等については、別報「潮流による拡散の水理模型実験について(IV)⁴⁾」を参照されたい。

最後に、実験および資料整理に協力して頂いた北川吉男、川崎博一の両氏と藤田政伸君に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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(I)序報，京都大学防災研究所年報，第14号B，1971，pp. 435-450.
- 2) 速水頌一郎・宇野木早苗：瀬戸内海における海水交流と物質の拡散，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 385-393.
- 3) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について，第3回海岸工学講演会講演集，1956，pp. 49-53.
- 4) 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)，京都大学防災研究所年報，第13号B，1970，pp. 457-470.