

瀬戸内海における海水交流の実験的研究 (II)

樋口 明生・武岡 英隆・北川 吉男

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

By Haruo HIGUCHI, Hidetaka TAKEOKA and Yoshio KITAGAWA

Synopsis

The aspect of water exchange between Seto Inland sea and the Pacific Ocean is studied with use of the hydraulic model, of which the horizontal and vertical scales are 1/50000 and 1/500 respectively.

Sea water in Seto Inland Sea is replaced mainly with that in the Pacific Ocean through tidal mixing, and the effects of the constant flow passing through the inland sea and river discharge on the replacement are rather small. And the sea water which exists in the inland sea at some instant decreases approximately in the exponential form, then, like a radioactive decay process, it has a half life time, about 350~460 tidal cycles. But these values of the half life time predicted by the model experiment may be too small, because of the velocities of tidal residual circulations in the model are larger than those in the prototype.

1. ま え が き

前報¹⁾では、瀬戸内海の1/50000模型における潮汐・潮流・潮汐残渣流について、それらの再現状況を報告した。

今回の実験では、沿岸海洋における物質の拡散・分布過程の問題を海水の交換という側面から把え、瀬戸内海における海水の交流をそれに伴う海水交換の状況を把握するための第一段階として、瀬戸内海の海水と外洋(太平洋)の海水が長期間にわたってどのように入れ換わっていくかを、ある瞬間に内海を満たす海水のその後の挙動を追跡することによって調べることを試みた。また、これらの結果の検討と、瀬戸内海1/100000模型^{2),3)}との比較のために内海を一次元水路とみなした見かけの拡散係数の値を求めた。

2. 実験の概要

Fig. 1 は実験装置の一般図である。本模型の特徴は、太平洋の一部を模型に取り入れたことであり、このことは内海水の長期的な挙動を追跡する上で有利である。また、原型ではこの海域に黒潮が2~3 ktの流速を持って流れており、内海と外洋との接合域において、この存在は境界条件として重要であると思われる。このため模型の外洋の部分には、**Fig. 1** に示したポンプで水を循環させることによって流れを与えるようにした。また、この流れは **Fig. 1** の外洋部分に実線で示した複数の整流板によって、流れのパターンを種々調整することができる。

外洋における流況の例を **Fig. 2 a~c** に示す。**Fig. 2a** は、潮汐のみを与えて外洋には流れを与えない場合であり、起潮機の効果によって発生する本模型に特有の微弱な流れを示している。**Fig. 2b** は、潮汐を与えずに外洋に流れを与えた場合であり、紀伊・豊後両水道沖に反時計回りの環流が発生し、両水道との接合部付近で、0.5~1 kt程度の流速を持つ。この場合、内海の水は停滞し、東又は西に内海を通過する恒常

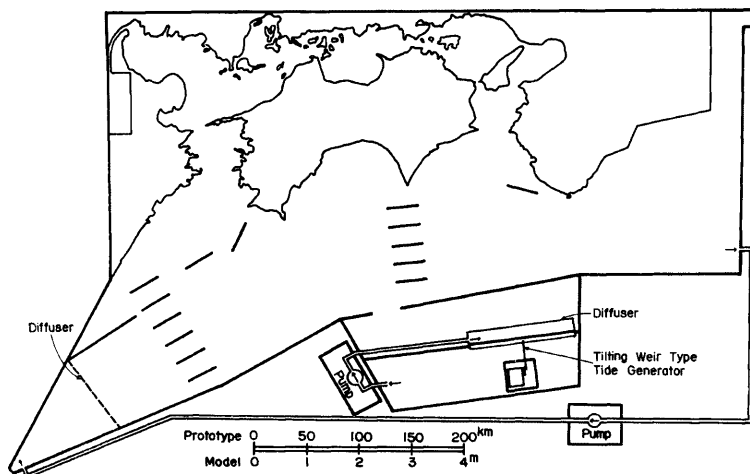


Fig. 1. Schematic diagram of experimental facilities.

的な流れは発生しない。Fig. 2c は同様に潮汐を与えず、外洋に流れを与えた場合であり、この場合には内海に東向き通過流が発生する。この通過流の流量は、原型に換算して $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{year}$ 程度、豊予海峡（速吸瀬戸）での流速にすれば、 1 cm/sec 程度のものである。また整流板の調整によって豊後水道沖の流れを停滞させると、内海に西向き通過流が発生する。

内海の水と外洋の水の交換を追跡する実験の方法は次のようである。まず豊予海峡・鳴門海峡・紀淡海峡の3カ所に仕切りを入れ、外洋（本実験では、紀伊・豊後両水道も外洋に含める）と区切り、内海に染料（ウラニン）を投入して攪拌し、内海全体が一樣な濃度になるようにする。このようにして色づけされた水

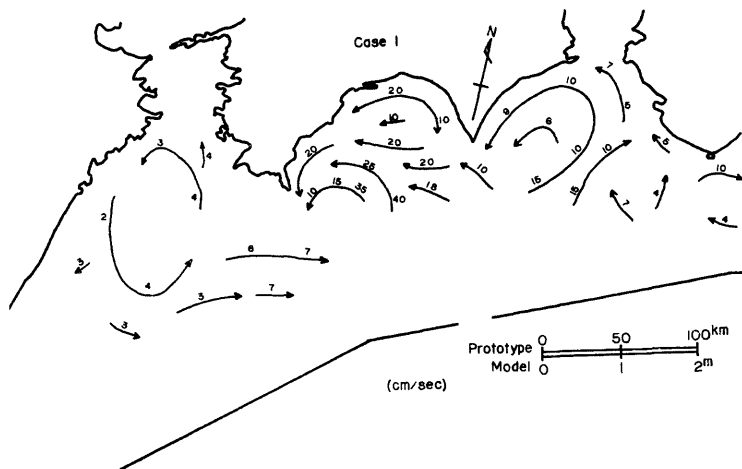


Fig. 2 a.

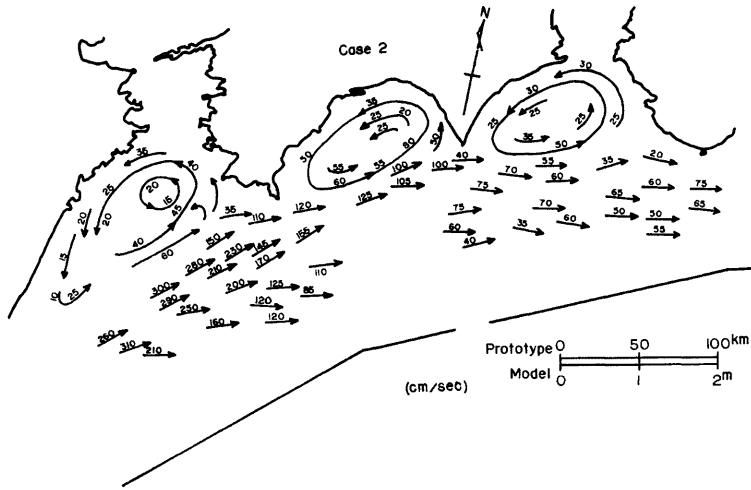


Fig. 2 b.

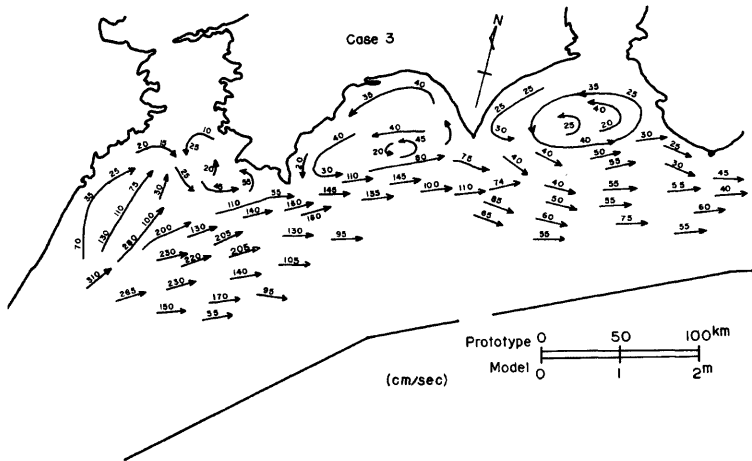


Fig. 2 c.

Fig. 2. Flow pattern in the Pacific Ocean.

をある瞬間に瀬戸内海を満たす海水（初期内海水）と考える。次に、仕切りを取り去って潮汐を与え、外海水と内海水とが混合して内海の染料濃度が減少していく様子を採水によって調べる。

以上のような手続きによる実験を、外洋の流れの状態の違いにより、3つの case にわけて行った。まず、潮汐は3つの case いずれについても平均潮（ M_2 分潮）を与えるが、case 1 については外洋には流れを与えない。case 2 では外洋に Fig. 2b の場合の流れを与え、case 3 では外洋に Fig. 2c の場合の流れを与

える。これらの実験により巨視的な海水交換の様相を調べることに加えて、これに対する外洋の流れの効果、及び内海を通過する移流の効果を評価することを試みた。

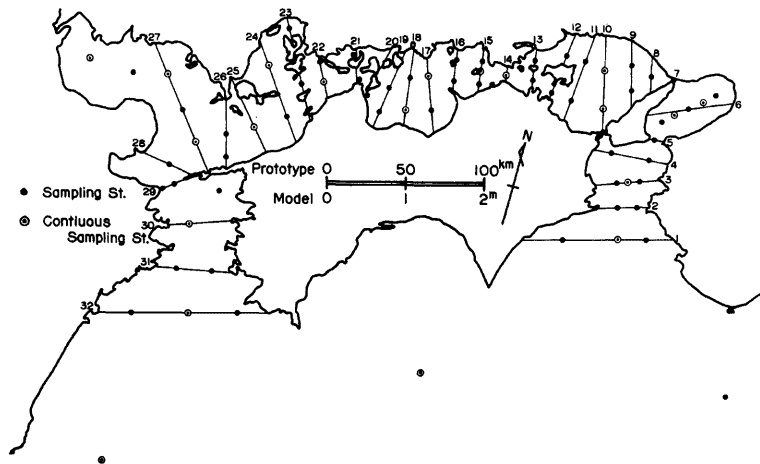


Fig. 3. Distribution of sampling stations in the model.

染料濃度を調べるための採水は、Fig. 3 に示した測点で行った。図中の◎の20点については、実験開始後、10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200の各周期と、以下100周期毎に900周期まで採水した。またそのうち400, 600周期には、図中の●の点を加えた65点で一斉採水を行った。case 1 については800周期にも一斉採水を行った。これらの染料の濃度は蛍光光度計 (Turner 社111型) により測定した。

また実験では関門海峡の影響は小さいと考え、ここを閉鎖した。

なお、本模型の潮汐については前報りに報告したが、今回の実験で与えた平均潮の場合については前報の実験の後、主要な海峡に金網による粗度を投入することによって再調整がなされた⁴⁾。この結果得られた潮差の分布を Fig. 4 に、潮汐の位相差の分布を Fig. 5 に示す。図中の●は金網粗度投入前、○は投入後の値である。またこの場合の潮汐残渣環流の模式的な分布を Fig. 6 に示す。この残渣流の流速は、全般に原型より大きめである。

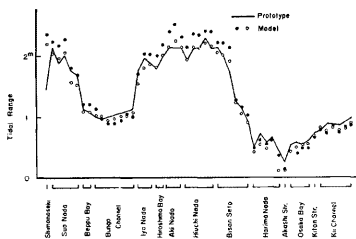


Fig. 4. Distribution of tidal range.

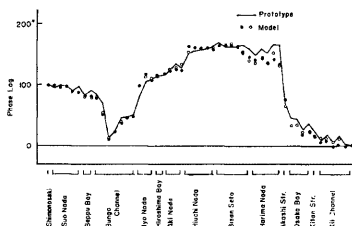


Fig. 5. Distribution of phase lag.

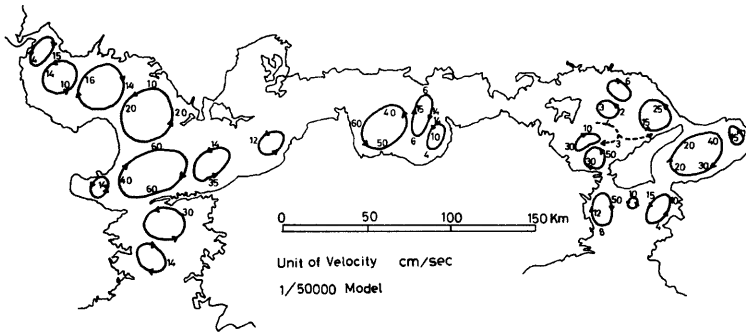


Fig. 6. Distribution of tidal residual circulation (model).

3. 実験結果

Fig. 7~10 に一斉採水の結果得られた濃度の分布の例を示す。これらの濃度の値は、各周期における瞬間的な値でなく、採水には1~2周期の時間がかかり、潮時も各点で異っている。従って各測点毎の個々の値を厳密な議論に用いることはできず、あくまで全体的傾向を見るものとして意味がある。この濃度の値は初期の内海水の濃度に対する百分率であり、この値はまた、その海域に残留する初期内海水の割合を示している。これらの分布図によれば、どのcaseも最も濃度の高い部分は備讃瀬戸と澁灘の境の付近になる。case 1 と case 2, 3 を比べると、case 1 の場合が全般的に濃度の値が大きい。case 2 と case 3 は大差ないが、伊予灘付近では case 3 が濃度が大きく、大阪湾では case 2 の方が大きい。外洋の濃度はどのcaseも1%前後であり、無視し得る程度に稀釈されている。(模型の外洋の容積は内海の容積の60~70倍程度である)

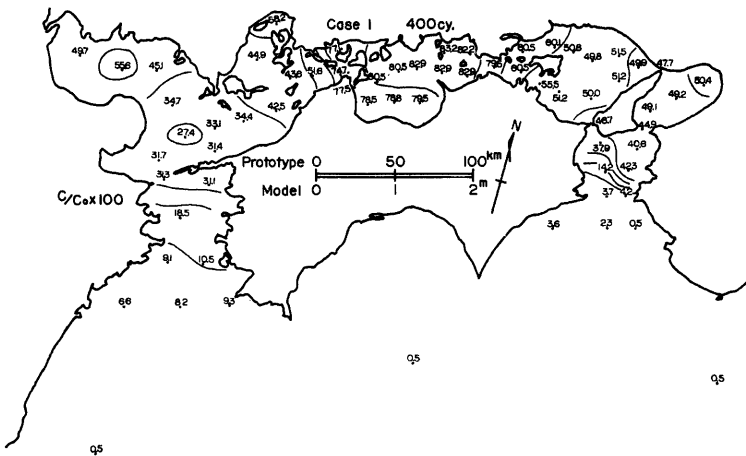


Fig. 7. Horizontal distribution of dye concentration (case 1 400 cy.).

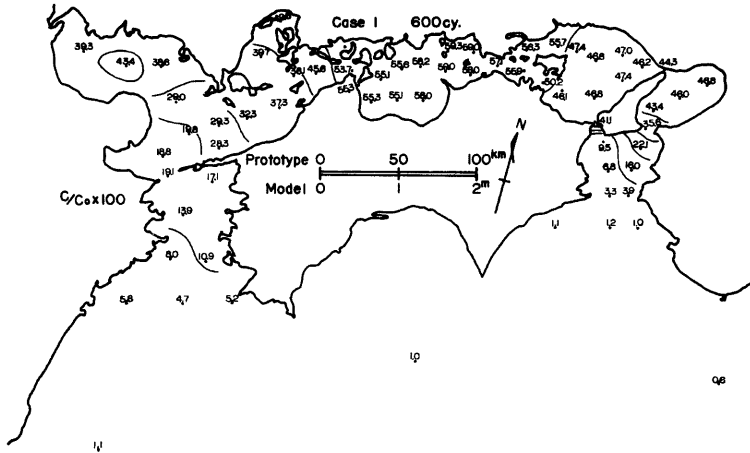


Fig. 8. Horizontal distribution of dye concentration (case 1 600 cy.).

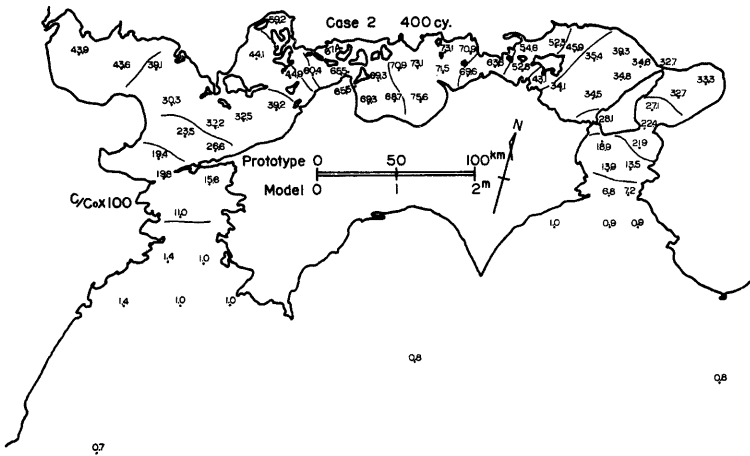


Fig. 9. Horizontal distribution of dye concentration (case 2 400 cy.).

次に、灘毎の相対的な濃度変化の様子を、**case 1** の場合について **Fig. 11** に示す。この濃度の値は灘毎の平均値である。この図によると、大阪湾と播磨灘の平均濃度はほぼ等しく、鳴門海峡による交換が無視できないことを示している。

次に、各灘・湾における平均濃度の時間的変化を **Fig. 12 a~d** に示す。図の縦軸は対数目盛である。これらを見ると、かなりのばらつきはあるが、指数関数的に濃度が減少する傾向がみられる。外洋との境界に接する、伊予灘・播磨灘・大阪湾では実験開始後直ちに濃度の減少が始まるが、周防灘では50~100周期、広島湾・安芸灘では100周期前後、備讃瀬戸では100~150周期、燧灘では150~200周期程度、それぞれ濃度

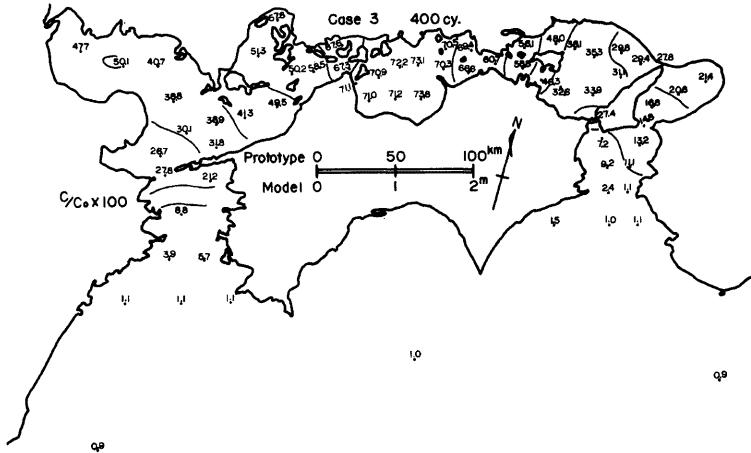


Fig. 10. Horizontal distribution of dye concentration (case 3 400 cy.).

の減少が始まるまでに経過する。

次に内海全体の平均濃度の時間的変化を Fig. 13 に示す。これによれば、各 case とも、最初の数10周期は急速な濃度の減少が始まるが、100周期前後からは安定し、かなりよく直線に乗り、指数関数的に減少していくことがわかる。これによって、より長期的な濃度変化もある程度予測できる。100周期前後から以後は、濃度の値はいわゆる半減期を持ち、これらを求めてみると、case 1 の場合では約460周期 (0.66年) case 2, 3 の場合では約350周期 (0.50年) になる。

4. 考 察

Fig. 13 によると、内海水の減少の様相は case 1 と case 2, 3 では歴然と異なる。すなわち外洋に流れを与えた場合の方が減少が早く、外洋との接合域での境界条件が重要であることを示している。本実験では、この境界条件として、両水道沖での水平環流とその流速の再現を試みた訳であるが、現実的には、こうした沿岸海域と外洋との接合域においては、流れの水平・鉛直構造や、塩分・水温による海洋構造等により複雑な問題を含んでいる。こうした問題が今後解明されていく必要があるだろう。

Fig. 13 において case 2 と case 3 の違いは明らかでない。case 3 の場合が若干濃度の値が大きい、すなわち減り方が遅いがこの程度の差は実験の精度上区別し得る程のものではない。case 3 で与えた東向きの通過流の流量は、速水・宇野木⁵⁾によって得られた、現実的な塩分分布を説明するために最適な流量の値 $7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}$ に比べて5倍の大きさを持ち、現実的に東向きの通過流が存在しても、本実験で与えた流量を大きく越えることはないと思われる。このことは、内海水と外洋水の交換にとって、内海の通過流の存在がさほど重要でなく、基本的には潮汐による見かけ上の拡散が支配的であることを示している。但し、この議論は外洋のみに流れを与えた場合に発生する内海の通過量が更に潮汐を加えた場合にも同様に存在するという仮定の上に成立する。潮汐を与えた場合の通過流の測定は非常に困難であるが、今後何らかの方法で

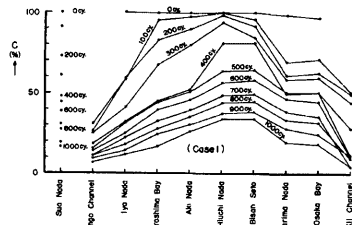


Fig. 11. Time change of dye concentration (case 1).

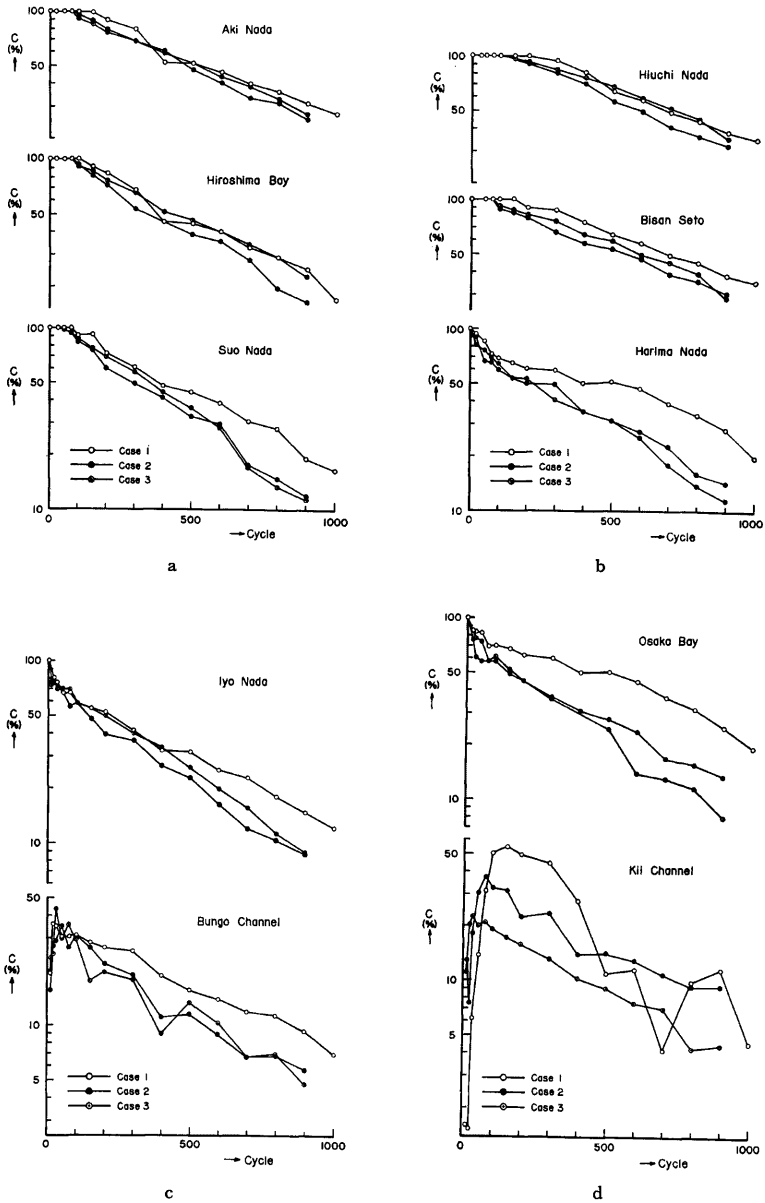


Fig. 12. Time change of dye concentration in each Nada or Bay.

測定する必要がある。

次に、内海水の入れ換わりに関わる河川水供給の問題を考えてみよう。内海の容積を河川水の供給量で割った値は、河川水による交換を考えた場合の交換時間 (turn over time) と呼ばれるもので、この値は約12年となる。これは、最も理想的に河川水と内海の入れ換えが起った場合、すなわち内海水が河川水と混合しないで内海水のみが押し出される場合、12年で完全に入れ換わるということであり、同様の入れ換えが起っても内海水が半分になるのに約6年かかることになる。より現実的には、はるかに長時間かかると思われ、明らかに外洋との交換が卓越している。

次に、本実験の現実性の検討、及び1/100000模型との比較といった目的で、内海を一次元水路とみなして、見かけの拡散係数を Fig. 3 に示した各断面について求めた。

内海に通過流がないとすれば、物質輸送はみかけ上拡散のみによると考えられ、これを支配する一次元の拡散方程式は次のようになる。

$$A \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AK \frac{\partial C}{\partial x} \right) \dots\dots\dots(4.1)$$

ここに A は水路の断面積、C は染料の濃度、K は拡散係数である。Fig. 7~10 により、濃度の最大値が Fig. 3 の断面16にあると考え、この断面によって瀬戸内海を東西にわけ、東側の内海水は紀伊水道側へ流出し、西側では豊後水道側へ流出すると仮定する。断面16を x=0 とし、ここから地点 x まで式 (4.1) を積分すると次のようになる。

$$\int_0^x A \frac{\partial C}{\partial t} dx = AK \frac{\partial C}{\partial x} - \left[AK \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=0} \dots\dots\dots(4.2)$$

この式の右辺第2項は0と考えられるから、

$$K = \frac{\int_0^x A \frac{\partial C}{\partial t} dx}{A \frac{\partial C}{\partial x}} \dots\dots\dots(4.3)$$

となる。

case 1 の600周期と800周期における濃度の分布から計算した結果を、Fig. 14 に示す。横軸は Fig. 3 に示した断面座標である。断面18, 19においては負の値が生じたが、これは Fig. 11 でわかるように濃度勾配の符号が他と逆転したためであり、明らかに鳴門海峡の影響によるものである。従ってこの付近では、一次元的取り扱いには無理がある。ここより断面5までは流出した内海水がすべて明石海峡を通るとしてあるから、このことは (4.3) における分子を大きく見積ったことに相当し、従って K の値は何割か大きく出ているであろう。これ以外の K の値について見れば大体 10⁶~10⁷ cm²/sec の間におさまるが、来島海峡、豊予海峡及びそれらの隣の断面19, 28において、10⁷を大きく越えている。断面19, 28は、強い潮汐残渣環流が存在する海域で、濃度が一様化した結果大きな拡散係数を生じたものである。1/100000模型で、連続点源の実験により得られた一次元拡散係数の値³⁾には海峡における値がないが、それ以外の値についてみると、大体2×10⁷程度の値になっており、一部を除いては本実験の結果より大きい。この原因は今のところ明らかではないが、今後検討していきたい。

速水・宇野木²⁾は、瀬戸内海の塩分分布を説明するために最適な一次元拡散係数の値として10⁷ cm²/secを得ているが、これを本実験の結果と比較してみよう。この10⁷ cm²/sec という値は内海全体について一様に与えたものであり、直接比較することはできないが、平均的にはさほど大きな差はないであろう。然しながら

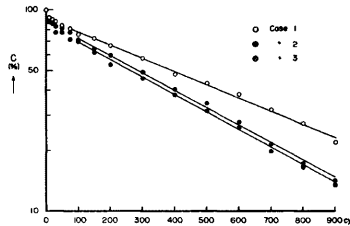


Fig. 13. Time change of average dye concentration in Seto Inland Sea.

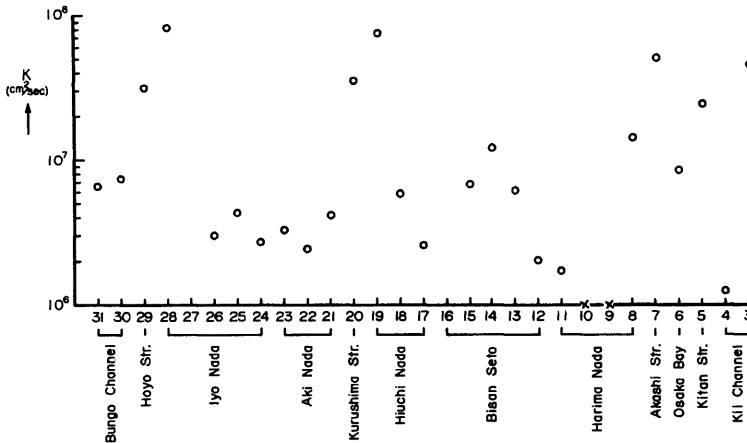


Fig. 14. Distribution of one-dimensional diffusivity, K , at each section.

ら、例えば伊予灘の容積が内海全体の4割近くを占めることを考えれば、断面28における大きな K の値は、外海との境界付近であるという意味も含めて、内海全体の交換に対して大きな影響を持つと思われるが、逆に断面16前後では、 K の値は全体には大きな影響を持たない。このような意味で拡散係数が場所的に違うことは重要である。断面28, 19における潮汐残渣環流は原型より大きな値を持っており、これらの生み出す K の値は原型における値より大きくなっていると思われる。こうした残渣流系をより現実的な形にすることができれば、模型で予測される内海水の減少はより遅くなるであろう。

なお、本実験では外洋の流れの調整によって内海の通過流を調整することができたが、この理由については今のところ充分には明らかではない。基本的には外洋の流れは流軸方向に水位差を与えることによって流れる訳で、現実の黒潮とは異なるが、内海にも同程度の水位差ができて東向き通過流が発生するのは予期されることである。然しながら西向き通過流も発生させ得たことを考えると、両水道と外洋との境界に接する流れの流速が内海通過流を支配している可能性も考えられる。すなわち、これらの流れは曲率を持つから半径方向に水位差を持つ筈であり、これが外洋における水位差をしのぐものであるかもしれない。これらについても、今後検討していきたいと考える。

5. あとがき

以上、著者らは瀬戸内海における海水の交流とそれに伴う海水交換の研究の一段階として、内海水と外洋水の交換の大局的様相を把握するための実験を行った。この結果明らかになったことは次のようである。

- (1) 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よって支配され、内海を通過する移流の効果は小さい。また河川水の供給による水の入れ替わりは外洋との交換に比べて小さい。
- (2) 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し、半減期を持つ。
- (3) 外洋との交換に対し、紀伊、豊後両水道沖の流れの存在は重要である。
- (4) 内海を一次元水路とみなした見かけの拡散係数の値は、灘・湾の内部で大体 $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値を持ち、強い潮汐残渣環流の存在する場所及び海峡部で $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を越える。

実験結果の現実性については、境界条件の再現性や潮汐残渣流系の問題等に実験上の問題を含む他、実験で与えていない種々の条件、例えば吹走流や密度流に伴う、水平・鉛直の流れ、夏季における成層や冬季に

おける front の形成等の問題があり、ここで得られた値を直ちに原型に適用することはできないが、大局的な交換の相様を把握するという目的はある程度達せられたと考える。今後は、海峡・水道を通じての灘相互の交換等について検討していきたい。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生・武岡英隆・安田秀一・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18号 B，1975，pp. 621-635.
- 2) 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.
- 3) 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（Ⅱ），京都大学大学防災研究所報，第15号 B，1972，pp. 431-440.
- 4) 樋口明生・安田秀一・早川典生：瀬戸内海水理模型における縮率効果に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第19号 B，1976.
- 5) 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回海岸工学講演会講演集，1970，pp. 385-393.