

瀬戸内海水と外洋水の海水交換

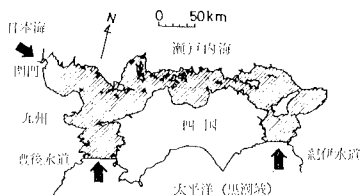
——瀬戸内海水理模型による海水交換実験——

上嶋英機*・橋本英資**・山崎宗広***・宝田盛康*

1. ま え が き

瀬戸内海全域の水質汚濁機構を物理的測面から解明し水質汚濁予測に役立てるには、内海水がどの程度の時間で外海に失われるのかの海水交換性を知ることが必要である。瀬戸内海の流動場を形成する要因の中では、潮汐流が最も卓越し恒常的に存在しているため、瀬戸内海の海水交換性を測る上で最も基礎となっている。しかし、実海域では、密度流、吹送流による流動要因が季節的に作用し、潮汐流と複雑に相乗し合いながら一方向の大規模な恒流（貫流）を生じさせて、瀬戸内海全域の海水交換に寄与していると見られる。

そこで、海水交換に係る流動要因として、潮汐流と貫流を対象とし、瀬戸内海全域と外洋水との海水交換性を解明するため、瀬戸内海大型水理模型を使用した実験を実施した。即ち、図一に示すように、各水道部から侵入する外洋水と瀬戸内海水がどのように交換するか、その機構と規模を明らかにするため、模型内に潮汐流を再現した中で、染料水と水中フロート（多数のボール）を外洋水に見立て、内海に侵入する外洋水の輸送過程をオイラー的、ラグランジュ的に追跡する長期海水交換実験を行った。更に、東西流（貫流）を潮汐流に加えた実験を行い、貫流による交換の量大きさを検討した。本報ではこれらの実験結果を紹介すると共に、前報¹⁾で示した、内海部の各灘、湾間での実験結果を合わせ、全域での海水交換性について示すものである。

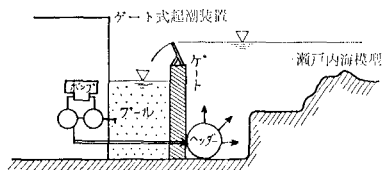


図一 瀬戸内海と外洋との交換水域

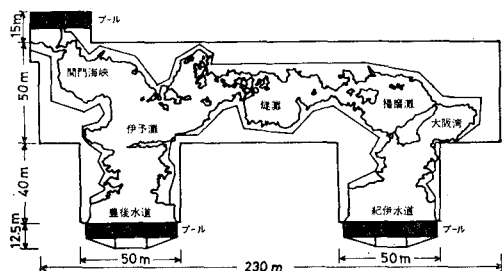
2. 実験内容と方法

瀬戸内海大型水理模型は、水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/160 の潮汐水理模型で潮汐流の相似性は達成されている²⁾。図一2、3に示すように紀伊水道、豊後水道、関門海峡にはゲート式起潮装置が設置され、水道部境界での潮汐に対応してゲート裏の貯水槽（プール）から、ヘッダー管を通して模型内に一定量、連続送水され、模型内潮汐をゲート作動によりコントロールしている。従って、潮汐周期間での水道部断面流出入量の収支は零となって、プール内水量は変わらない。

内海水がどの割合で外海に失なわれ、交換していくかの実験に於ては、逆に、外洋水に着目して内海部に各水道部から外洋水がどのように輸送されるかを知る実験手法を用いた。即ち、図一2に示す各水道部起潮装置のプールに、外洋水として一定濃度の染料水（ローダミンB、10 ppm 相当）を満し、この染料水が実験開始と同時に内海側に輸送される形態を追跡した。実験中は瀬戸内海縦断方向での多数測点での濃度測定、写真撮影を継続し染料雲の拡がりを観察した。なお、紀伊、豊後、関門の各プール水量は 515、570、170 m³ である。



図一2 各水道部入口での起潮装置



図一3 瀬戸内海大型水理模型の平面図

* 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

染料水を用いた外洋水交換実験の中で、Case I として、模型内には潮汐流のみを与え（各水道部間の平均水位差が無い場合）、紀伊水道と関門海峡からの外洋水侵入の実験を K-1、豊後水道からの場合を B-1 として別々に実験を行った。

一方、上記実験に貫流（東、西流）を加えた場合の実験を Case II とし、対象とする水道部の平均水位を他の水道部より 1 mm（現地 16 cm）高くし、紀伊水道から西流を与えた場合を K-2、豊後水道から東流を与えた場合を B-2 として実験を行った。なお、貫流を発生させるために与えた水位差（1 mm）は現地での季節的に見られる水道部間の平均潮位差を参考として暫定的に与えたものである。

ボールを使用した海水交換実験では Case III として、Case I と同条件下で紀伊水道と豊後水道内に、模型水の比重に近いカラースーパーボール（直径 6 cm、比重 0.92）を各々 1000 個、模型内 1 m² 当り 5 個の割合で配置し潮汐流を与えた後、全てのボールの移動を写真撮影し、ボールに記した背番号と位置を各周期毎にスケッチしてラグランジュ的に追跡した。詳細な実験手法は前報¹⁾に示すものである。

以上の Case I, II, III 実験では全て半日周期（M₂ 潮現地 12 時間 25 分で模型では 282 秒に相当）を実験潮汐とし、半年間に相当する 350 周期間、連続して行った。

3. 実験結果と考察

(1) 潮汐流による外洋水と内海水の交換過程

潮汐流によって瀬戸内海の各水域には潮汐周期以上の長い時間スケールの恒流が発生し、海水交換に大きく寄与している。図-4 には実験で得られた内海部での主要な恒流の分布を模式化して示したものである。物質の移動経路（位置組成）は、これらの恒流により支配され物質の滞留時間が決定される。瀬戸内海全体の海水交換を探るとき、内海部に潜在するこれら恒流の連結の形が大局的に交換規模を決定することになる。

Case I での実験から得た実験ケース K-1、B-1 での 50 周期毎（25 日毎）での染料輸送前線分布を図-5 に示す。図中の

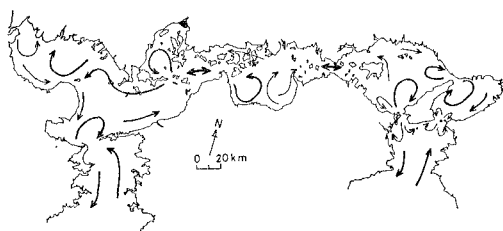


図-4 瀬戸内海の恒流分布模式図（水理実験結果）

数字は実験経過周期である。この輸送前線の分布と濃度分布とは相対的に類似している。

図-5 の K-1 の分布では、紀伊水道からの外洋水は 100 周期（50 日）で大阪湾口の紀淡海峡と、播磨灘口の鳴門海峡を通過する。その後、350 周期（半年）で瀬戸内海中央の燧灘東部、備後灘まで達する。しかし、関門海峡からの日本海水の輸送量は少なく、350 周期で周防灘にとどまる程度であった。一方、B-1 では豊後水道からの外洋水は、100 周期で豊予海峡を越え、伊予灘まで広く輸送される。350 周期では燧灘東部まで輸送され K-1 の前線と合致する。この合致点は潮汐の位相分岐点と一致する。

K-1、B-1 の分布から、紀伊、豊後の両水道から内海に輸送される外洋水は潮汐流のみにより約半年間で内海中央部まで達し交換していく、両者の分布を重ねれば瀬戸内海全域が外洋水により覆われる。この図に示す濃淡

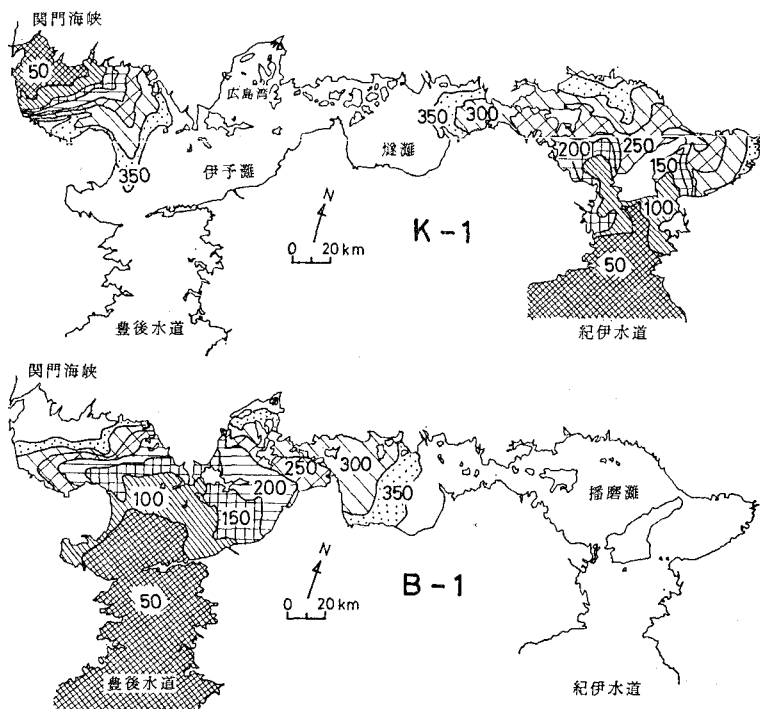


図-5 実験 Case I. 染料水輸送前線分布（潮汐流のみによる実験結果：図中数字は周期数）

の分布を逆にして描けば、内海水が外洋水に失われていく経過が解り、各水道部から最も遠い燧灘水が外洋に抜け始めるまでの時間が半年間であることを意味している。

(2) 貫流による外洋水と内海水との交換過程

Case II での貫流を与えた実験結果を Case I と同様に図-6に示す。紀伊水道からの西流による K-2 の実験では、紀伊水道の外洋水は 150 周期ですでに燧灘まで達し、350 周期では豊予海峡を抜け豊後水道に達する。潮流流のみによる K-1 と比較すれば約 2 倍の速さで輸

送され、内海水と交換していくことが解る。

一方、B-2 での豊後水道からの東流によって輸送される外洋水は、150 周期で燧灘中央部に達する。この位置は、B-1 での 350 周期位置に相当する。その後、約半年間で関門海峡及び紀伊水道を抜けて全域に輸送され、K-2 の西流に比べ B-2 の場合は、はるかに速く交換する。潮流流のみの B-1 の 2 倍以上の交換規模となり、貫流の存在と、その持続時間が海水交換規模に大きく影響することが解る。

図-7 には東部瀬戸内海に於ける K-1 と K-2 での

輸送過程を 10 周期毎に示し比較したものである。これより、鳴門海峡と紀淡海峡から流入する外洋水の輸送形態と速度の相違が見られ、貫流を与えた K-2 では大阪湾と鳴門海峡から播磨灘への流入が極度に速く、明石海峡からは 50 周期で播磨灘に輸送される。淀川河口水域へは長時間輸送されない。一方、鳴門海峡を通して播磨灘に輸送される高濃度の染料水量は意外に多く注目すべきである。

図-8 には、瀬戸内海縦断線上に設けた横断位置を示した。この横断面内の測点で、50 周期毎に採水を行い濃度測定を行った。その結果得られた Case I, Case II での 350 周期での濃度分布(断面平均濃度)を図-9に示す。

各ケースでの縦断濃度分布と

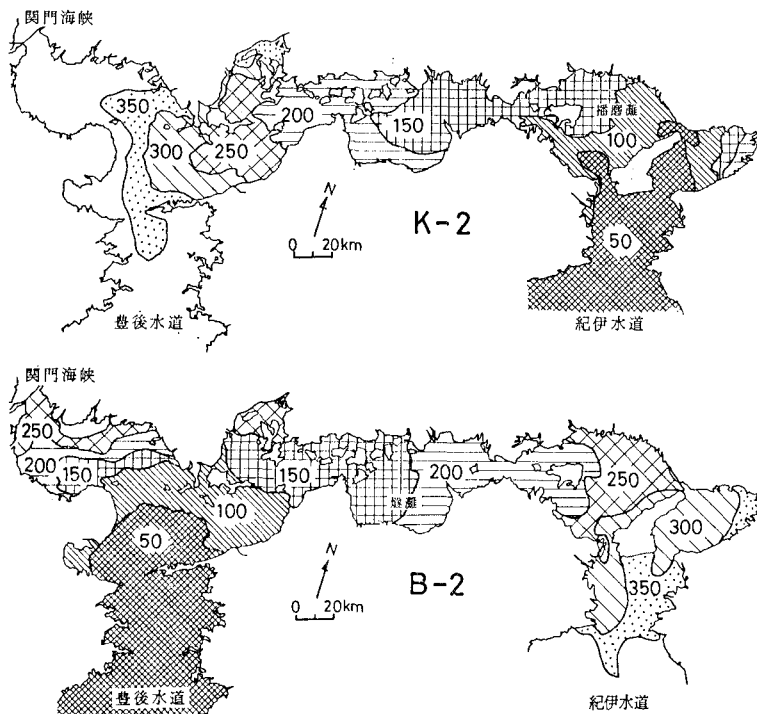


図-6 実験 Case II. 染料水輸送前線分布(貫流+潮流流)

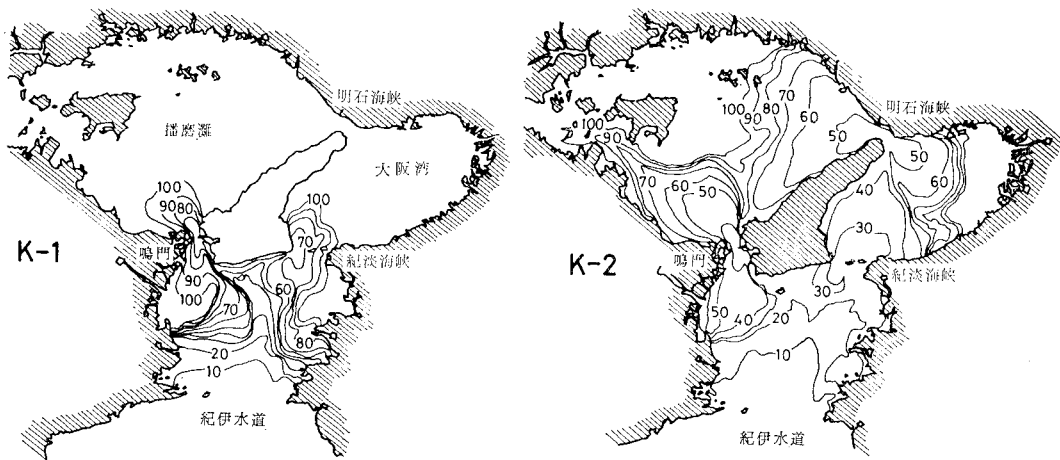


図-7 東部瀬戸内海での外洋水侵入過程 (K-1 潮流流, K-2, 貫流(西流)+潮流流, 図中数字は周期数)

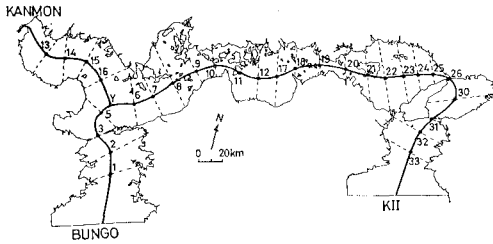


図-8 瀬戸内海縦断測線と横断位置図

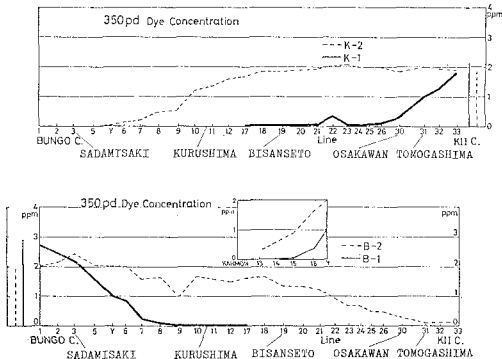


図-9 縦断方向濃度分布(横断面平均値)(350周期でのCase I, Case IIの分布)

勾配には顕著な相違が見られ、Case I での K-1, B-1 の先端部では、横断面方向の濃度分布に大きな差があり、平均値としては小さくなっている。Case I での濃度分布は各水域内の潮流流(恒流も含む)から誘起される分散効果により決定され、Case II ではこの上に貫流による輸送が加算され、全体の輸送を著しく促進したことによる。

(3) 貫流速と貫流量の発生分布

Case II で与えた東流、西流の貫流によって生じる各水道部への貫流量と内海部に分布する貫流速について紹介する。

種々の要因で発生する貫流の大きさは、内海部の地形と海底摩擦に係りを持って決定されると見られる。本実験では、水道部間の水位差を暫定的に与えたが、この結果として発生した東流(B-2)と西流(K-2)による貫流速と、各水道部での貫流量は、図-10、表-1 に示すものであった。

K-2 の西流による貫流量は、紀伊水道から内海部に現地換算値で $15100 \text{ m}^3/\text{sec}$ の流入があ

表-1 西流(K-2)、東流(B-2)の貫流量と分配率

	紀伊水道	豊後水道	関門海峡
K-2	$-15100 \text{ m}^3/\text{sec}$	$+13500 \text{ m}^3/\text{sec}$	$+1600 \text{ m}^3/\text{sec}$
分配率	—	89%	11%
B-2	$+16600 \text{ m}^3/\text{sec}$	$-22700 \text{ m}^3/\text{sec}$	$+6100 \text{ m}^3/\text{sec}$
分配率	73%	—	27%

り、これが豊後水道と関門海峡に各々 $13500 \text{ m}^3/\text{sec}$, $1600 \text{ m}^3/\text{sec}$ で輸送され、その分配比は 9 : 1 となっている。B-2 の東流によっては豊後水道から $22700 \text{ m}^3/\text{sec}$ 流入し、紀伊水道と関門海峡に $16600 \text{ m}^3/\text{sec}$, $6100 \text{ m}^3/\text{sec}$ 分配されて、

その比は 7 : 3 となっている。同じ水位差を与えても、豊後水道断面面積が大きいことにより東流の貫流量の方が多くなっている。

東西流によって分布する内海部での貫流速の大きさは図-10 に示すものとなる。豊後水道から伊予灘までは、断面平均値で 1 cm/s (現地値) 前後であるが、安芸灘では約 2 cm/sec 、備讃瀬戸で $5 \sim 6 \text{ cm/sec}$ の速い値となった。

(4) ボールによる実験結果

実験 Case III に於ては、紀伊水道と豊後水道に各々 1000 個のボールを配置しその移動をラグランジュ的に追跡した。図-11 には 1 例として豊後水道からのボー

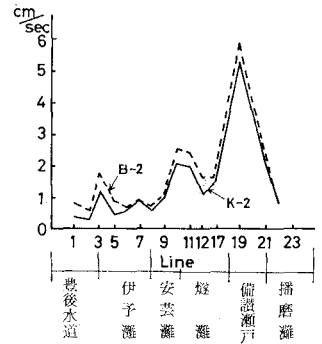


図-10 瀬戸内海での貫流速分布(値は現地換算)

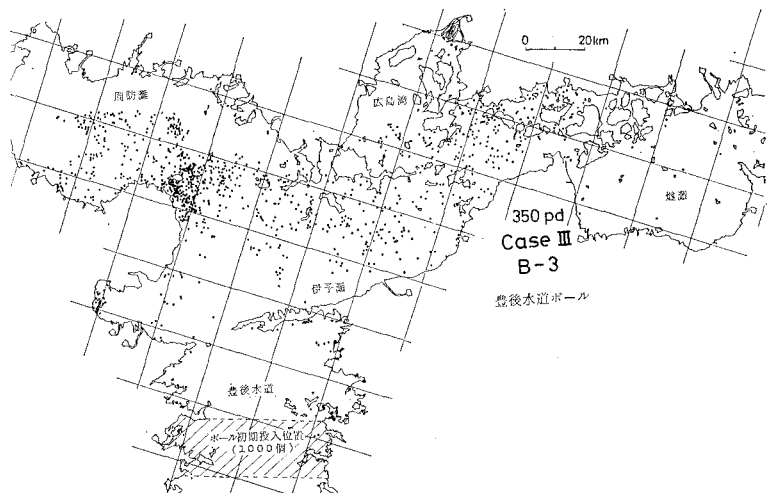


図-11 豊後水道からのボール輸送分布図, 350周期(初期投入数 1000 個)

ルの輸送分布を示したものである。この図から 350 周期 (半年間) での各水域に輸送されたボールの位置が明らかである。

実験 B-3 での豊後水道ボールが、350 周期で各水域に輸送される分配率は、豊後水道内に 15% の残留、周防灘に 35%、伊予灘に 39%、安芸灘、広島湾に 7%、2%、燧灘に 2% となった。なお、50 周期では豊後水道内の残留量は 50% となり、約 1 ヶ月で 50% が内海に輸送される。

K-3 での紀伊水道ボールは 350 周期で、紀伊水道内に 20% 残留、大坂湾、播磨灘に各々 30%、48%、備讃瀬戸、燧灘に 2% の分配率となっている。これらの分布は、Case I での染料輸送分布とよく対応しており、紀伊水道及び豊後水道からの内海に輸送されるボールの速度は両者とも平均 1.3 cm/sec (現地換算値) であった。

4. 結 論

瀬戸内海大型水理模型を使用し、染料水及びボールを用いた外洋水と内海水との海水交換実験を行い、潮流流による海水交換規模と、貫流を与えた場合の海水交換性について検討し次の結果を得た。

① 潮流流のみによる実験 Case I によって、紀伊、豊後水道から侵入する外洋水は、約半年間で瀬戸内海中央部の燧灘まで達した。関門海峡からの輸送量は少なく周防灘水域に止まる程度であった。しかし、各水道部からの輸送分布を重ねると、半年間で全域が外洋水により覆われる結果となった。

② Case I の上記結果と、前報で示した燧灘水が隣接海域と 90% 交換に要する時間が 6 ヶ月であることを合わせれば、瀬戸内海中央の燧灘が外洋水と 90% 交換する時間は約 1 年となることが解った。この結果から、燧灘が瀬戸内海の中で最も外洋水と交換時間が遅いことと、他の湾、灘自体の交換時間が燧灘と同程度か、より

表-2 瀬戸内海の海水交換規模 (実験結果)

対 象 水 域	交 換 時 間		
瀬戸内海全域の海水交換 (外洋水と内海水) 潮 汐 流 潮流流+貫流	約 1 年 ~ 6 ヶ月~		
湾、灘間での海水交換	50%	90%	滞留時間
大 阪 湾	1.7 ヶ月	5.1 ヶ月	2.3 ヶ月
広 島 湾	2.0	6.8	3.0
燧 灘	1.9	6.1	2.6

速いことを考慮すれば、瀬戸内海全体が外洋水とほぼ交換するには約 1 年となる。(表-2 参照)

③ 貫流による交換規模は、潮流流のみの場合に比べ 2 倍以上の大きさとなり、特に東流の場合、半年間で、豊後水道から紀伊水道、関門海峡を通過した。

④ 平均水位差 16 cm (現地換算) による東流、西流の貫流量は各々 22700 m³/sec, 15100 m³/sec (現地換算) であった。

⑤ ボールによる実験では、その輸送分布は染料による実験 Case I での分布とよく一致し、各水域への分配率と位置組成が明らかとなった。内海部へのボール輸送速度は平均 1.3 cm/sec (現地換算) であった。

以上、外洋水と内海水との交換性について示したが、今後、密度流に伴う海水交換について検討していく。本研究は公害防止技術特別研究「瀬戸内海における海水交換性及び負荷量影響度の研究」の一環で行った。

参 考 文 献

- 1) 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康: 瀬戸内海の海水交換機構, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 665~669, 1984.
- 2) 上嶋英機・橋本英機・橋本英資・山崎宗広・早川典生: 瀬戸内海水理模型による水質汚濁拡散実験, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 575~579, 1982.