

瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究 (I) 序報

杉本 隆成・樋口 明生

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

By *Takashige* SUGIMOTO and *Haruo* HIGUCHI

Synopsis

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

The tidal residual circulations near the straits and within the bays are most effective on the horizontal mixing of large scale.

There are some regions, where the tidal residue is much smaller, in the midst of Hiuchi-Nada, Iyo-Nada and so on, where the diffusion is so weak that the matter released in the Bisan-Seto Straits hardly reach westwards beyond there.

1. ま え が き

瀬戸内海は、屈曲した海岸線と多数の島を含み、いくつかの海峡によって比較的広い数個の灘に分けられている。出入口が複数であることと、地形の複雑なことのために、この海域では流れは極めて複雑である。このような海域を2次元的に解析的に取り扱うことは極めて困難であり、勢い観測と実験的手法に頼らざるを得ない。

最近、宇野木らは、瀬戸内海を1次元モデルとして10年間程度平均した塩分分布から、解析的手法によって、全体的な水平拡散係数を求め、 $10^7 \text{cm}^2/\text{sec}$ を得ている¹⁾。この拡散係数は主として潮流、吹送流およびそれに伴う水平・鉛直の環流によって支配されていると考えられる。ここではその中でも四季を通じて、全水深にわたって支配的であると考えられる潮流とそれによる潮汐混合を取りあげて、その実態、場所による違い、全体としての海水交流の中で占める位置などの解明を試みた。

今回は、原型に関するこれまでの2, 3の研究と、資料の検討を基盤にして、水平縮尺1/100000の小型模型を用いて予備的に行なった実験結果について、これまでに得られた所を報告する。

なお、すでに1928年には神戸海洋気象台において、高谷静馬らによって瀬戸内海東部の潮流の模型実験²⁾が行なわれている。用いられた模型の縮尺は水平1/100000、鉛直1/1000で、本実験と同じものである。大阪湾の流況(潮時別流速分布)と環流(湾規模のresidual circulation)に関して詳細な報告がなされているが、海水交流に関する検討はなされていない。

2. 原 型

一般に、内湾・沿岸海洋における塩分、水温、物質の濃度等の分布は、陸水の供給、外洋との交流、大気との水・熱の交換などの境界過程と、流動・拡散などの内部過程によって決定される。これらのうち、流動・拡散過程の支配因子の一つである潮流、およびそれに伴う環流の実態と、塩分および水温を指標とした



Fig. 1 Bathymetric chart of Seto Inland Sea.

Table 1 Tidal constant.

Station	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
	H(cm)	κ(°)	H(cm)	κ(°)	H(cm)	κ(°)	H(cm)	κ(°)
Tanabe	48.4	172.1	19.8	194.5	22.9	190.7	16.6	167.1
Komatsujima	42.7	180.3	22.0	205.9	21.8	195.0	17.1	173.5
Wakayama	46.2	186.4	22.2	210.3	24.2	192.4	18.0	171.7
Osaka	31.5	213.3	17.0	236.3	26.8	205.6	19.2	181.2
Akashi	15.9	240.3	9.3	236.6	23.6	216.4	16.7	201.3
Himeji	31.1	315.8	8.7	313.4	28.2	226.0	20.8	202.3
Mizushima	99.3	328.3	34.9	358.6	33.1	235.9	23.0	209.7
Niihama	107.1	319.6	39.1	355.4	33.3	234.7	24.7	209.7
Hashihama	108.5	296.4	41.9	327.0	32.2	222.7	23.9	200.7
Matsuyama	98.7	263.4	42.2	290.7	30.1	207.4	22.4	182.8
Kure	99.3	281.6	41.7	315.0	32.3	218.5	23.1	196.1
Tokuyama	88.1	252.1	38.0	282.8	29.1	207.4	20.8	186.2
Ube	102.2	258.9	46.0	287.3	29.9	214.5	23.2	189.4
Sadamisaki	62.0	218.2	26.2	242.2	24.9	197.0	19.1	173.8
Saeki	44.4	206.8	19.1	230.6	22.8	202.7	15.9	182.9
Uwajima	58.5	207.1	24.8	232.1	25.0	194.1	18.7	174.8

海況変動について、これまでに得られている原型に関する調査・研究の結果をここに要約しておく。

2.1 瀬戸内海の潮汐と潮流

瀬戸内海は、Fig. 1 に示すように、長さが東西に 500 km、幅が南北に 20~50 km、水深 15~50 m（平均 30 m）程度の、複数の開口部をもつ浅海内湾である。主として紀伊・豊後両水道によって外海に通じている。両水道から入ってくる潮汐は壱灘東部付近で相会する。図中黒丸で示される主な地点の潮汐常数を Table 1 に掲げる³⁾。これによると明石海峡付近を除けば、 M_2 分潮が卓越していることがわかる。その振幅と位相を Fig. 2 に示す。横軸は豊後水道から下関、または、伊予灘から備讃瀬戸、明石海峡を通して紀伊水道南部海域に至る距離を示す。径路を Fig. 1 に一点鎖線で示す。Fig. 2 によると位相は備後灘・壱灘東部付近で最も遅れ、振幅はそれより少し西よりと周防灘奥部で最大となる。図中、○印は本州、九州側の値、●印は四国・淡路島側の値、◎印は周防灘の値である。潮汐と潮流との位相差から判断すると、潮汐は紀伊・豊後両水道では進行波、内海中央部（壱灘から播磨灘間）および周防灘では定常波、安芸灘では混合型の性質を持っている。瀬戸内海の潮流は、各海峡、とくに明石海峡における大きな抵抗と、上に述べたような潮汐の特性によって支配されていると考えられる。

潮流に伴う水粒子の最大流動距離は、場所によって異なるが、紀伊水道・豊後水道では 5~10 km、海峡では 10~20 km、播磨灘や壱灘では 4~5 km 程度である。内海における潮流に伴う流れとしては、通常の往復流のほかに、海岸・海底地形あるいはコリオリ力に起因する全横断面にわたる長時間の平均流と考えられる恒流や、灘規模の環流、海峡前後の wake に伴う強い大規模渦流が存在する。現実の環流は潮流のほかに、局地的な吹送流を含む可能性がある。こうした環流については、研究目的の違いや観測の困難さもあって、まだよく把握されていないが、海水交流という観点からその実態を調べる必要がある。ここでは瀬戸内海海洋報告⁴⁾に掲載されている模式図を Fig. 3 に示す。

浮標追跡による流れの観測については、いくつかの断片的な報告がある。その一つに 4~6 月に行なわれた標識流れ藻の漂流調査がある⁵⁾。これによると、浮標は海陸風の影響を受けて近くの海岸に漂着するものが多いが、漂流経路の長いものは、10 日間で 20~60 km 程度流下している。冬期には季節風による吹送流のために、より強い流れが存在すると思われる。この種の流れは、浮遊性の物質の拡散に対してとくに重要性を持つと思われるので、風向・風速の異なる期間別に、さらに詳しい観測を行なう必要があろう。また、

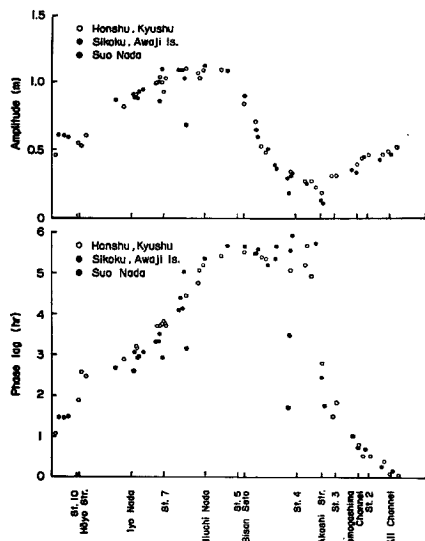


Fig. 2 Amplitude and phase lag versus distance in Seto Inland Sea. (prototype)

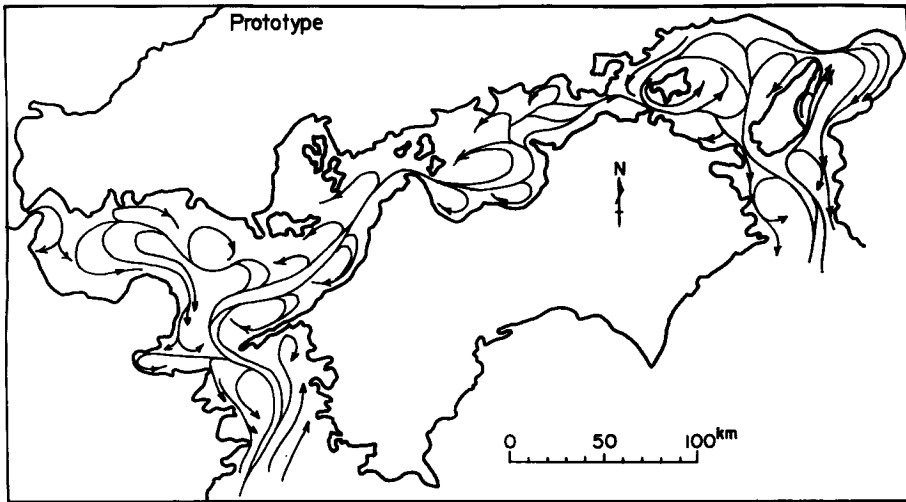


Fig. 3 Schematic diagram of flow pattern. (prototype)

底質の移動と関連する底層付近の流動調査も今後、さらに行なうことが必要であろう。

2.2 瀬戸内海の海況

1953年から10年間平均の、表層(0~10 m)の塩分の3, 6, 9, 12月における水平分布を Fig. 4 に示す³⁾。図によると、内海の塩分は明らかに東部で低く、西部で高い。その理由としては、基本的には東部が浅く、その結果東部海域の容積に対する河川流量の比が西部に比べて大きく、また紀伊水道の断面積が豊後水道に比べて小さいため、外洋との海水交流が相対的に弱いためであると思われる。各灘、湾の面積、水深、容量と、これに流入する河川の年間総流量を Table 2 に、海峡の大きさと最大流速を Table 3 に示す^{1), 3), 6)}。

Table 2 Geographical factors (1).

Bay or Strait	Area (km ²)	Mean water depth* (m)	Volume of sea water (km ³)	Rate of river flow ($\times 10^6$ m ³ /yr)
Kii St.	(1550. —)	(42. 0)	(65. 1—)	9434
Osaka Bay	1529. 34	27. 5	41. 80	12204
Harima Nada	3425. 90	25. 6	88. 71	9625
Bisan Seto	916. 38	13. 9	12. 73	3456
Total	7422. —	28. 1	208. 4	34719
Bingo Nada (Hiuchi Nada)	1906. 44	18. 6	35. 59	2697
Geiyo St.	622. 18	27. 1	16. 88	0
Aki Nada	574. 07	36. 1	20. 77	1103
Hiroshima Bay	1058. 02	23. 9	25. 30	5943
Iyo Nada	3498. 98	56. 1	196. 52	1551
Beppu Bay	475. 25	36. 1	17. 13	1501
Suo Nada	3100. 71	23. 7	73. 63	6725
Bungo St.	(3000. —)	(68. 0)	(204. —)	3135
Total	14236. —	41. 4	589. 82	22655
Sum Total	21658. —	36. 9	798. 22	57374

* Depth beneath the datum level of hydrographic chart

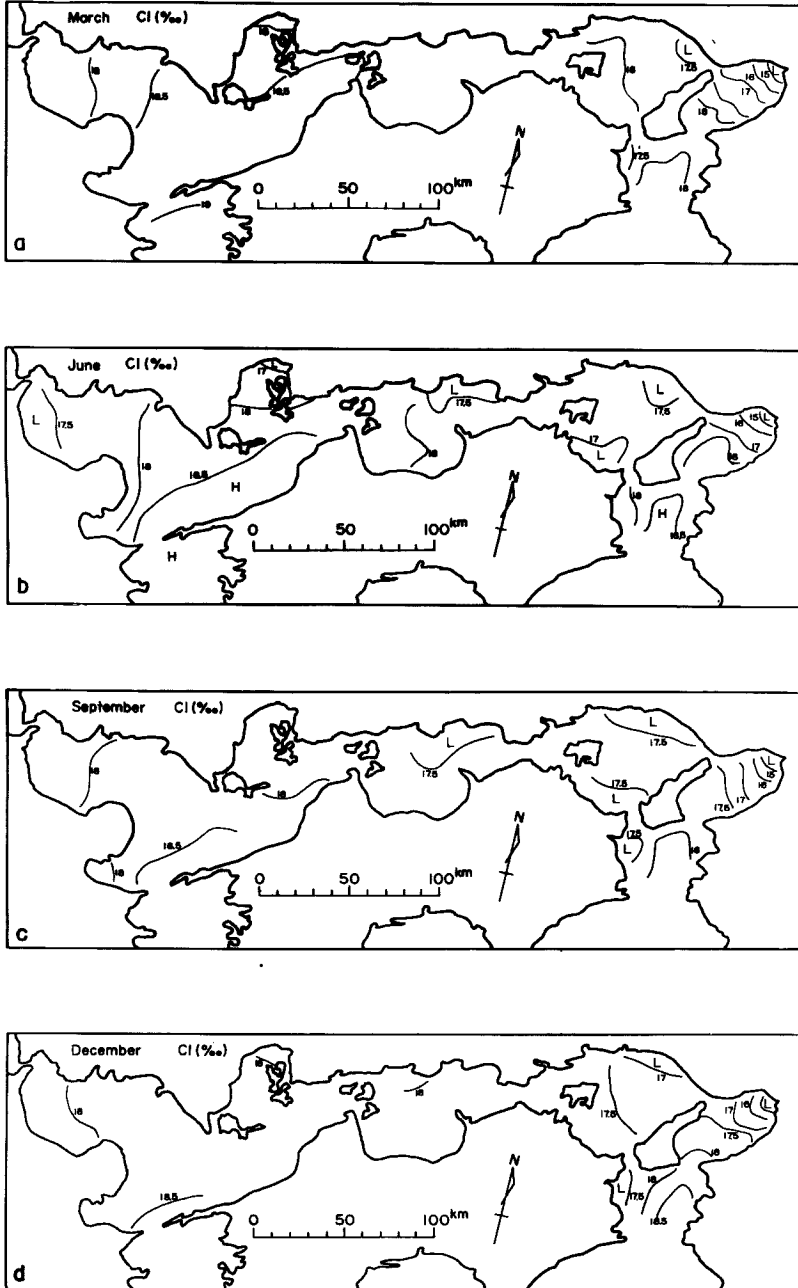


Fig. 4 Distribution of chlorinity of surface layer in March (a), June (b), September (c), and December (d).

Table 3 Geographical factors (2).

Straits	Width (km)	Mean water depth* (m)	Minimum cross-sectional area (km ²)	Maximum velocity of tidal current (knot)	
				flood	ebb
Tomogashima Suido	5.55	55.9	0.3108	3.5	3.3
Naruto St.	1.48	16.8	0.0248	9.8	10.2
Muya St.	0.25	6.9	0.0017	3.0	3.7
Akashi St.	4.00	50.0	0.2000	7.0	5.4
Central part of Bisan Seto	6.46	33.2	0.2147	3.3	2.9
Kurushima St.	2.58	43.9	0.1263	10.2	8.1
Hayatomo Seto	0.64	13.6	0.0087	8.3	7.9
Hoyo St.	12.40	91.5	1.1134	5.9	4.9

* Depth beneath the datum level of hydrographic chart

ここで紀伊水道北部海域とは、鳴門海峡と友が島水道および日ノ御崎と伊島を結ぶ線で囲まれる海域を、また、豊後水道とは、豊予海峡（音吸瀬戸）と、芹崎と高茂崎を結ぶ線で囲まれる海域をさす。Table 2によると、備讃瀬戸から紀伊水道までの海域に注ぐ河川の年間総流量と全容積との比は1/6であるのに対して、西側の豊後水道までの海域では1/26である。また、友が島水道と鳴門海峡をあわせた断面積は、豊予海峡のその約1/3である。

Fig. 4において18.5%、18.0%の等塩分線は、西側では9月に最も豊後水道に近づき、12月から3月にかけて備讃瀬戸から、さらには播磨灘中部にまで達している。東側（紀伊水道側）では、それらは紀伊水道北部から大阪湾南部において見られる。興味深いことは、冬季には河川流量が小さくなるにもかかわらず、大阪湾、播磨灘において、河川水の影響を示す17.0、17.5%以下の塩分域が、それ程変化していないか、むしろ広がっていることである。これは河川水の西方への輸送を弱めるような東向流が冬期季節風によって発生すること、または紀伊水道を通しての海水交流が、冬季には夏季に比べてかなり弱くなることを思わせる。flushingに大きな影響をもつ成層状態の季節的变化から、こういうことは十分予想できる。

1950年から15年間平均の表層(0~10m)の水温の、1月と8月における水平分布をFig. 5に示す³⁾。図に見られるように、表層水温の年較差は、開口部では12°程度であるのに対して、内海中央部では20°にもなっている。夏季に播磨灘北部や瀬灘南部でより高温になるのは水塊が停滞していることを、また、海峡付近でより低温になるのは、海峡部では上下によく混合することを示している。

停滞域あるいは海峡部における混合の実態と、内海の海水交流の中で果す役割を知るためには、もちろん現地観測が必要であるが、ここでは模型実験から示唆を見出したいと考える。

3. 実験の概要

瀬戸内海という海水交流の場を解析的に理解する方法の一つは、内海を一つの水路と見なし、塩分、水温を指標として1次元の拡散方程式を通して理解すること、すなわち移流や拡散係数の大きさを求めることである。第2の方法は、内海を数個の水溜めの連結系と見なし、水溜めへの河川水の流入と、水溜め相互間および外洋との海水交流によって、塩分等の濃度が決まるという考えに立って、交流量、交換（滞留）時間、および潮汐混合の混合係数を求めることである。第3の方法は、海水交流の微細構造を通じて全体像を追求することである。その一つとして、われわれも、潮汐混合の実態の解明、および対流（密度流）による内湾水の流出過程等の解明を目指している。

第3の、流動、交換過程の分析には、数学的解析や数値実験とともに、水理模型による実験的研究⁷⁾も一つの有力な手段である。われわれが手法として水理模型実験を選ぶ理由は、長期的に見た内海の水平混合に

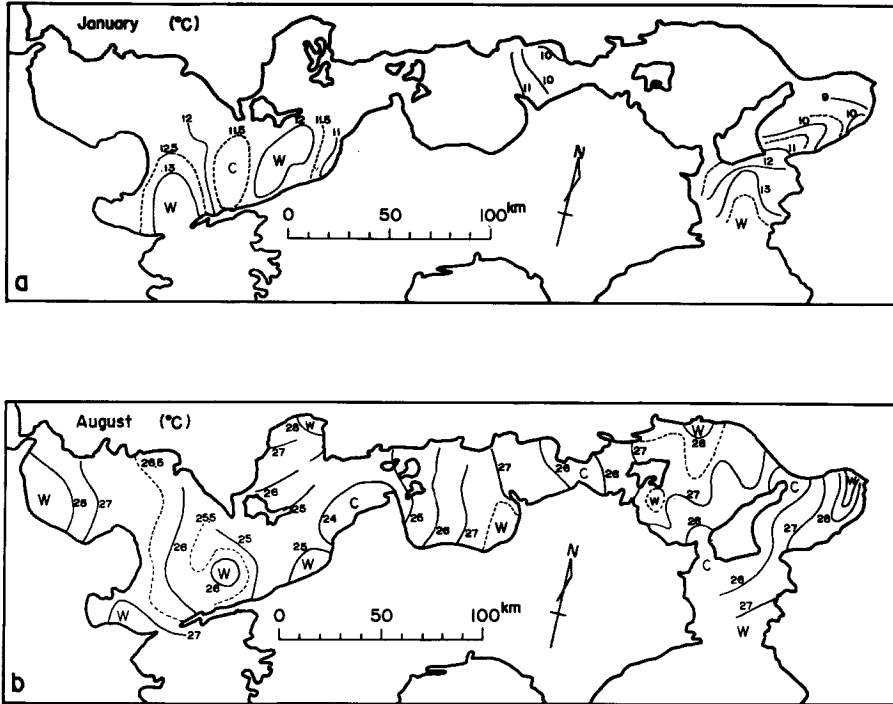


Fig. 5 Distribution of water temperature of surface layer in January (a) and August (b).

Table 4 Hydraulic factors.

Factor	Scale	Prototype	Model
Distance	1/100 000	500 km	5 m
Water Depth	1/1 000	30 m	3 cm
Tidal Range	1/1 000	1 m	1 mm
Tidal Period	1/3 162	12 h 25 m	14.1 sec
Velocity	1/31.6	73 cm/sec	2 cm/sec
Discharge	1/31.6 × 10 ⁸	31.6 m ³ /sec	0.01 cc/sec
Horizontal Diffusivity K_x	1/31.6 × 10 ⁶	7.3 × 10 ⁴ cm ² /sec	0.02 cm ² /sec
Vertical Diffusivity K_z	1/316	7.3 cm ² /sec	0.02 cm ² /sec

は、海峡付近の潮流に伴う非定常な大規模渦流や灘全体に広がる環流 (Residual local circulation) が支配的なのではないかと考えて、これらが流動・交換に及ぼす効果を検討するのに水理模型実験が有利であると考えたためである。

実験は、水平縮尺 1/100 000、鉛直縮尺 1/1000 の、モルタル滑面の Froude 模型を用いて潮流による各灘内の水平混合、および灘相互間の海水交流に着目して行なった。

模型諸元を Table 4 に、模型一般図を Fig. 6 に、写真を Photo. 1 に示す。模型では備讃諸島、芸予諸島のうち、とくに小さな島は省略した。一台のプランジャー式起潮機で潮汐を起こし、途中分岐板で2つの水路に分けて、紀伊・豊後水道から潮汐を与えた。まず、水路の水深と起潮機のストロークおよび分岐板の位置を調節して、紀伊水道、豊後水道における潮汐の位相と振幅を再現させた。つぎに、摩擦の不足を補

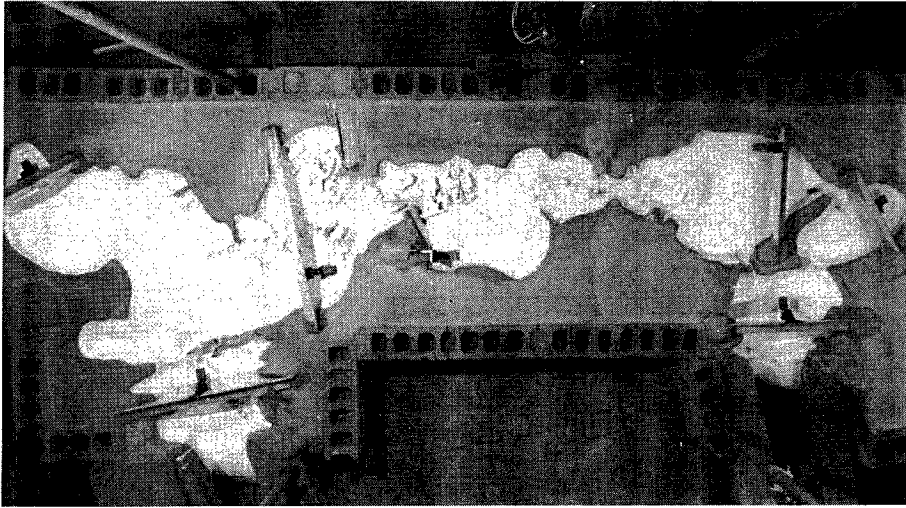


Photo. 1 Model of Seto Inland Sea.

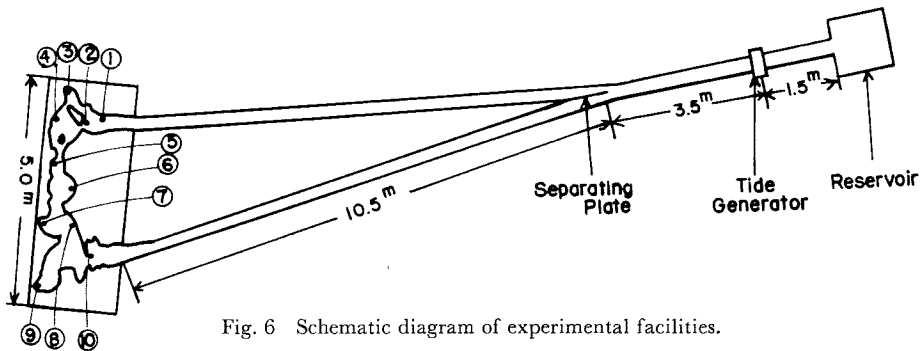


Fig. 6 Schematic diagram of experimental facilities.

うために、便宜的に豊予海峡、明石海峡、友ガ島水道、鳴戸海峡の断面積を $2/3$ 程度に縮小し、模型内の潮差の場所的变化を再現させた。実験では M_2 分潮のみを考え、Fig. 6 の ①～⑩の測点で浮力式水位計により水位を測定した。流況は、35 mm カメラおよび 16 mm シネカメラを用いて浮標追跡を行なって求めた。浮標には直径 5 mm、長さ 5 mm の着色したパラフィン製の円柱を用いた。模型に固有の恒流の有無を調べるために、両側の取付け水路に染料を流して、検出できる程度でないことを確認した。なお、実験では河川流量は与えなかった。

拡散実験としては、まず、水島灘および大阪湾に、定量ポンプで 0.01 cc/sec (原型では $31.6 \text{ m}^3/\text{sec}$) の割合で、メチレンブルーの溶液を連続的に投入し、染料水の流動、拡散状態を観察するとともに、映画撮影を行なった。つぎに、大阪湾、播磨灘、水島灘、広島湾等に濃度 $1\text{g}/10\text{l}$ のウラニン溶液を同じ割合いで投入し、流出・拡散状況を調べるとともに、1年後および2年後の、濃度の水平分布を調べた。染料投入点および採水点を Fig. 7 に示す。また $C_1 \sim C_5$ の地点では、25 cycle (約 13 日) ごとに連続採水を行なった。内径 7.0 mm のガラス管によって、全層にわたるように採水し、ただちに蛍光光度計により、その濃度を測定した。

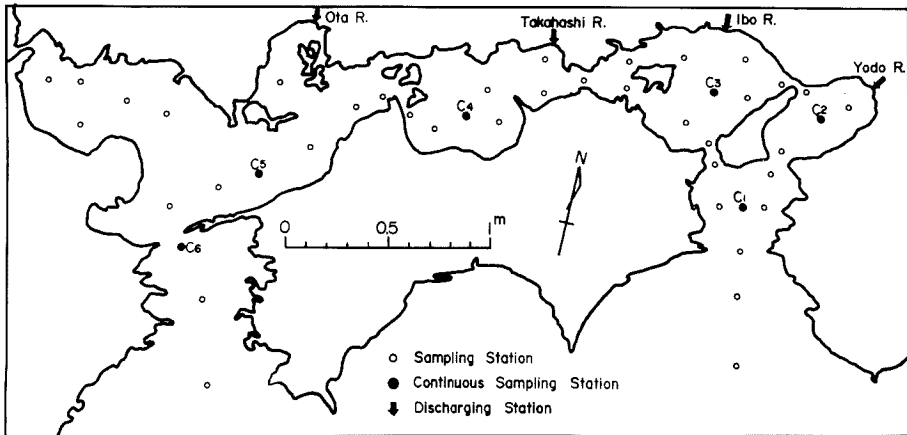


Fig. 7 Distribution of sampling stations in the model.

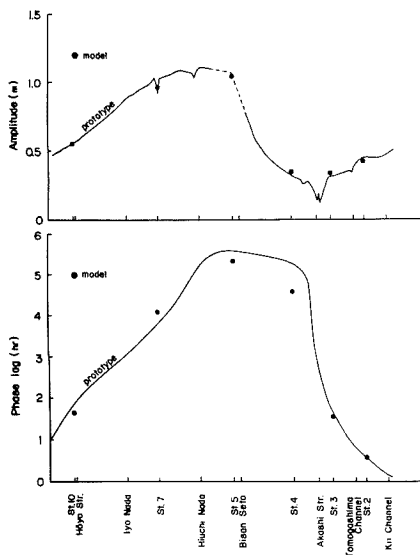


Fig. 8 Amplitude and phase lag versus distance. (model)

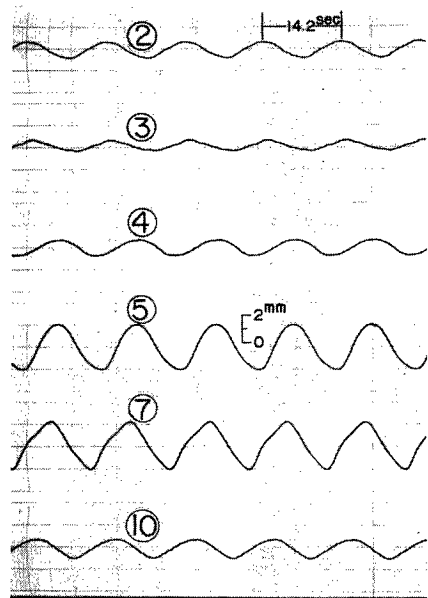


Photo. 2 Record of sea level in the model.

4. 実験結果

4.1 潮 汐

水位記録の一例を Photo. 2 に示す。各点における潮差は Fig. 8 のようである。図中、実線は原型、黒丸は模型に関するものである。水位計に対する表面張力の影響をよく調べていないので正確なことは言えないが、主な海峡の断面積を 1/3 程度縮小することによって、潮差の場所的变化を比較的よく再現することができた。このことから、断面平均流量も潮汐と同程度の精度で再現されていると考えられる。

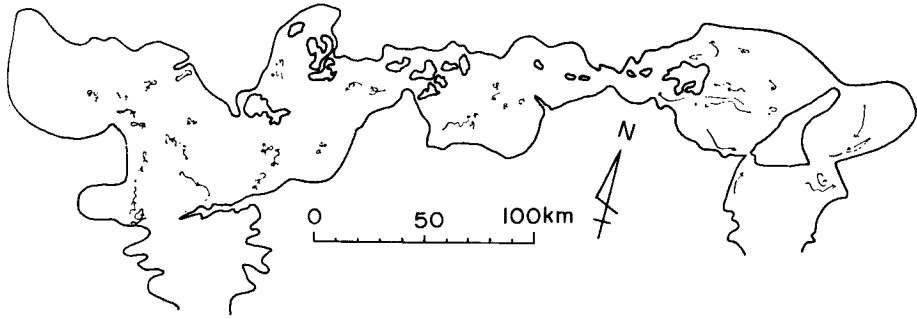


Fig. 9 Tidal locus in the model.

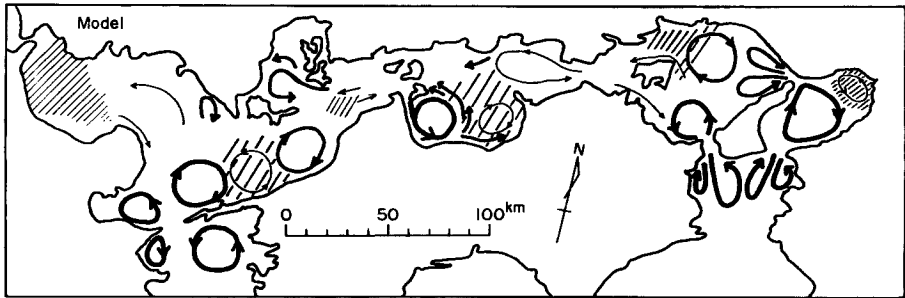


Fig. 10 Distribution of residual circulation. (model)

4.2 潮流と環流

浮標が一潮時の間に描いた流跡の一例を Fig. 9 に示す。半潮時間の流れは、例えば伊予灘では 6~8 km 程度で、原型の値と比較すれば妥当な値であるといえるが、大阪湾や播磨灘南部、伊予灘西部では多少大きすぎる。浮標は一周期の後に元の位置に戻らないが、これは環流（恒流）と乱れとの重なったものを表わしている。浮子および染料の動きから見た各灘における環流の模様を、Fig. 10 に示す。図中、矢印は流れの方向を示す。太い矢印は流れがとくに強いことを示す。斜線の部分は環流・恒流がほとんど見られない、すなわち環流・恒流という立場から見た停滞域を示す。このような停滞域は、大阪湾奥部、播磨灘北部、燧灘南部、伊予長浜町地先、および周防灘にみられる。

なお、前記の高谷らによる実験によれば、大阪湾の流況と環流に関して非常によい再現性が得られている。われわれの実験も、これと同縮尺の模型を用いているから、他の各灘、湾についても同程度の精度で、流況と環流の再現性が期待されるが、今回は時間的な制約のために、Fig. 9, Fig. 10 に示すような大雑把なものしか得ることができなかった。

4.3 連続点源染料域の流動・拡散

大阪湾淀川河口、播磨灘揖保川河口、水島灘高梁川河口、および広島湾太田川河口に染料を投入し、内海における拡がり方を調べた。

(a) 大阪湾淀川河口に投入した場合

染料域はまず、岸沿いに神戸地先に達し、環流に乗って岸和田地先に流出する。その一部は岸沿いにゆっくりと奥部に戻るが、かなりの部分が中部南西部の強い環流に乗って友ガ島水道付近に達する。友ガ島水道付近に拡がった染料域の一部は環流に乗ってよく混合しながら淡路島東岸沿いに明石海峡に達し、さらに播磨灘北東部に拡がる。大部分は、紀伊水道北部海域から南部海域へ急速に流出・拡散する。

(b) 播磨灘揖保川河口に投入した場合

染料域はまず、岸沿いに高砂市地先付近に達し、播磨灘北部海域の時計回りの弱い環流に乗って中央部 (Fig. 7 の St. C₈ 付近) に達する。その後、一部は小豆島南東部に達するが、大部分は淡路島西岸沿いに北上し、明石海峡を通過して、大阪湾に流入し、さらに友ガ島水道を通過して紀伊水道北部海域に拡がり、一部は鳴門海峡を通過して播磨灘中部南部海域に拡がるが、大部分は紀伊水道から南部海域に流出・拡散する。

(c) 水島灘高梁川河口に投入した場合

染料はまず、水島灘北辺部に拡がり、一部は下津井半島先から潮流に乗って東部に拡散するが、大部分は神島付近から四国側に南下し、粟島・高見島付近からよく混合しながら備讃瀬戸東部に達する。その後、Fig. 10 に見られる播磨灘南部の反時計まわりの環流に乗って、四国沿岸沿いに鳴門海峡に達し、紀伊水道北部海域に流出する。鳴門海峡付近の染料域はさらに播磨灘中部に広く拡がる。また、紀伊水道北部海域に達した染料域は、友ガ島水道を通過して大阪湾南部から中部に拡がる。

(d) 広島湾太田川河口に投入した場合

染料域はまず、湾奥の広島地先海域に拡がる。その一部は音戸瀬戸を通過して芸予諸島付近に拡がるが、大部分は広島湾中央部を南下して屋代島北岸部に達したのち、防予諸島付近に流出・拡散する。この染料域は、西向きには伊予灘、東向きには安芸灘から来島海峡を通過して瀬灘に拡がってゆくが、伊予長浜町地先の停滞海域のために、それより西には拡がりにくい。

さて、上に述べたような染料の流出・拡散に伴って内海各地点の濃度は次第に高くなってゆく。主な地点 (St. C₁~C₆) の濃度の時間的変化を各々の場合について、Fig. 11 a~c に示す。この図から、濃度は投入点の近くから逐次定常に近づいてゆくのがわかる。投入点から離れた開口部付近では2年後でも濃度の上昇率は小さくなっていない。

染料投入開始後、1年目および2年目の濃度分布を、Fig. 12 a~h に示す。ただし本来は境界条件として、外洋開口部付近の濃度、海水交流の大きさを制御しなければならないが、本実験では行なっていない。

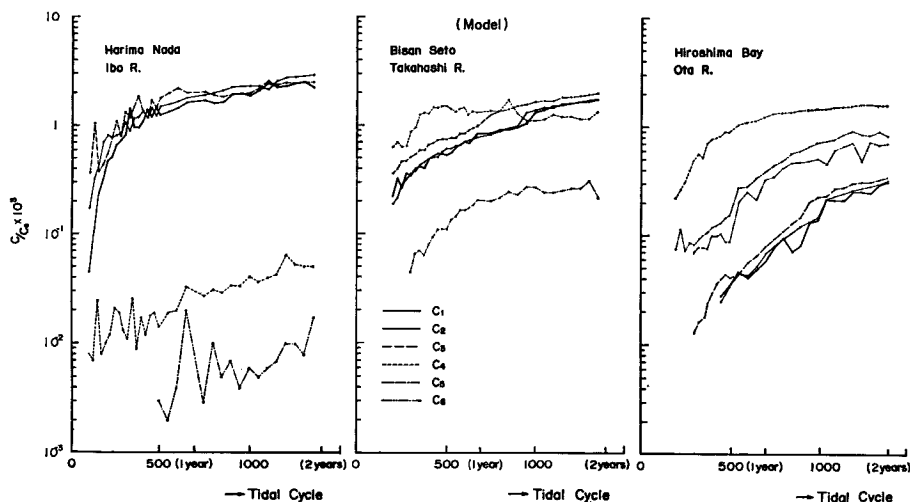


Fig. 11 Time change of dye concentration from a point source at Bisan Seto (left), Harima Nada (center), and Hiroshima Bay (right).

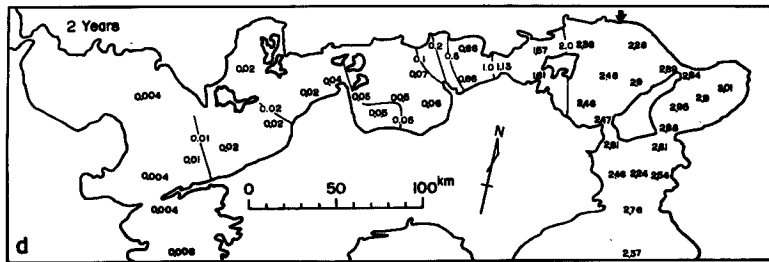
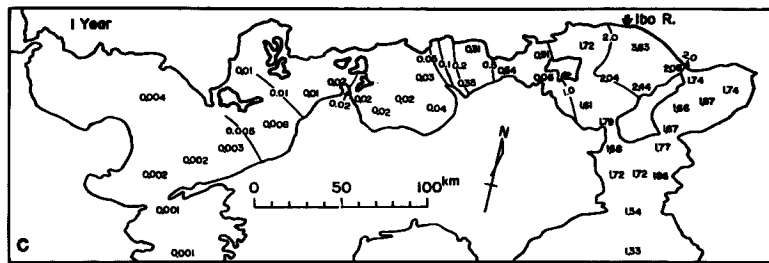
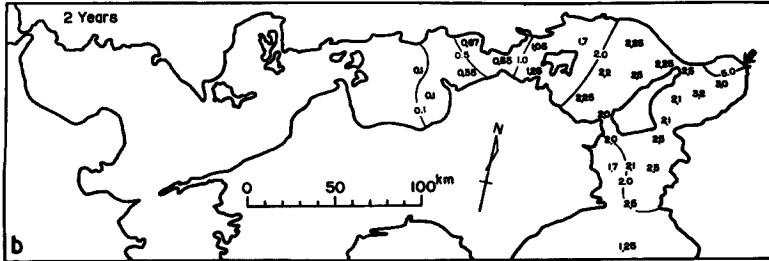
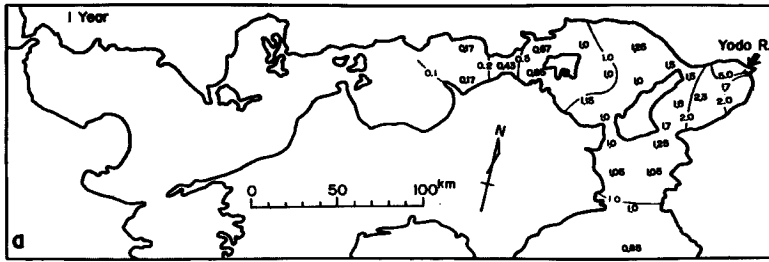


Fig. 12 a-d Horizontal distribution of the concentration of dye discharged from Osaka Bay (a, b) and Harima Nada (c, d), after one (a, c) and two years (b, d).

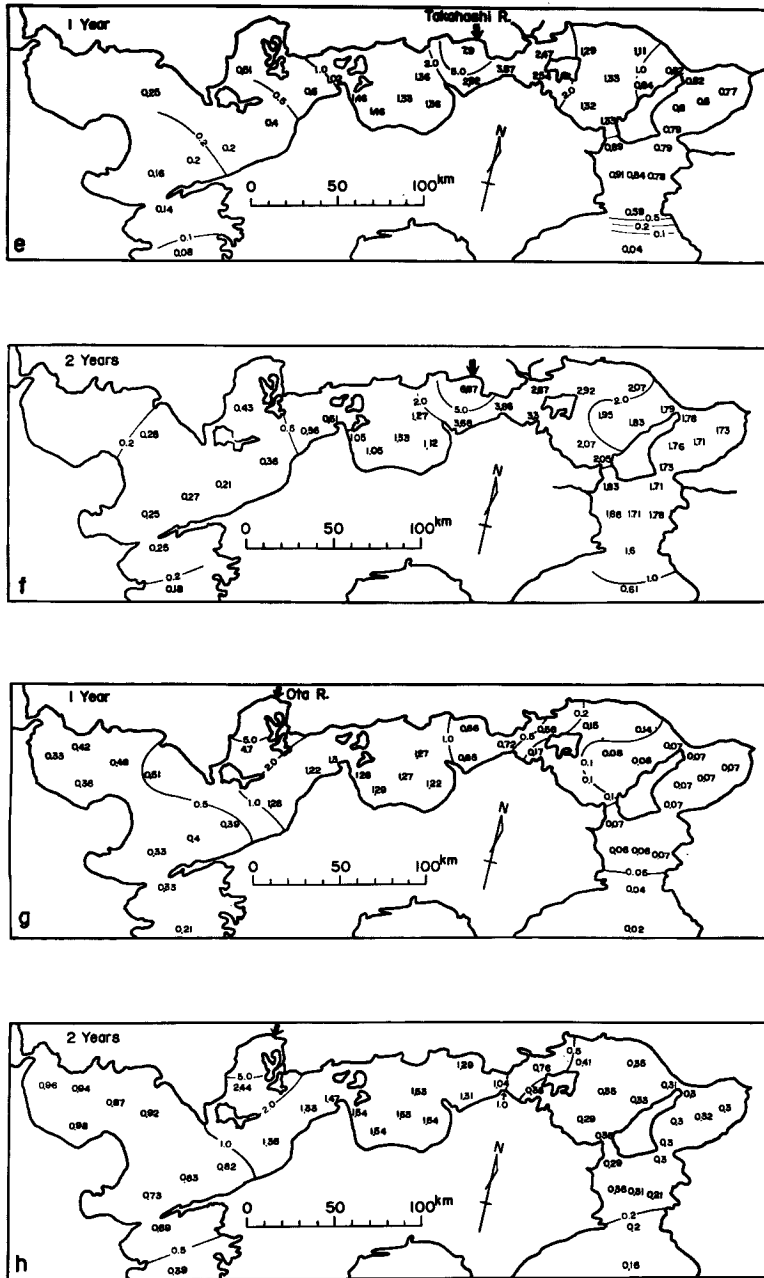


Fig. 12 e-h Horizontal distribution of the concentration of dye discharged from Bisan Seto (e, f) and Hiroshima Bay (g, h), after one (e, g) and two years (f, h).

5. 考 察

瀬戸内海規模の潮汐混合が、主として灘規模の環流と、海峡付近の大規模渦流 (wake) によって支配されていることが明らかにされた。定量的に厳密な議論は次報で行なうことにして、ここではまず、内海規模の潮流と拡散現象に対する水平縮尺 1/100000 の水理模型の相似性について検討した上で、模型から推測される潮流と潮汐混合の実態、強い環流の空間分布、および環流が陸から流入する物質の flushing に及ぼす効果について考察する。また、水理模型を用いて内海の拡散現象を水平 2 次元的に見ることの優位性について述べる。

5.1 模型の相似性

一般に相似性の考え方は、問題の取り扱い方と現象の規模によって異なる。たとえば、瀬戸内海を 1 次元の水路と見る場合には、断面積と見かけの水平拡散係数と境界 (開口部) での交流を一致させることによって相似性は満たされるであろう。また、水溜めの連結系と見る場合には、水溜めの volume と tidal prism の大きさおよび内部混合係数を一致させればよい。見掛けの水平拡散係数や混合係数は、風やとくに成層の影響を受けて大きく変化し、一定値となるものではないが、実験においては、たとえば現在の塩分分布が再現できるように攪拌用金属片等を取りつけることによって、結果として、拡散係数または混合係数と、境界条件とを合わせればよい。これらの値は、瞬間あるいは連続点源染料域の拡散実験を行なって求めることもできる。最も巨視的な内海の平均濃度は、これらの相似条件によって原型と相似に再現されると考えられる。

本実験は、潮汐混合の機構を知ることを第 1 の目的にしているから、潮汐・潮流の力学的相似条件と、潮流内部での拡散係数 (純乱流拡散係数 + 鉛直 shear に伴う水平分散係数) に関する相似条件が要求される。力学的な相似条件としては、Froude 数の一致と摩擦効果の一致があげられる。本実験では摩擦効果を十分な形で与えておらず、前述のように、海峡断面を 2/3 程度に縮小することによってその効果を補っているから、海峡付近の流れ、環流が強調されている可能性がある。

模型における水平 Reynolds 数 $Re = Ul/\nu$ (ただし U, l はそれぞれ潮流に伴う水粒子の平均流速および最大流動距離、 ν は水の分子動粘性係数で約 $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$) は 10^3 程度であるから、海峡付近を除けば層流状態に近い。水中における染料 (ウランあるいはメチレンブルー) の分子拡散係数が、水の分子動粘性係数と同程度 ($0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$) と考えると、これを原型に換算した場合、 $K_x = 0.01 \times 10 \sqrt{1000} = 3.2$, $K_x = 0.01 \times 10^3 \sqrt{1000} = 3.2 \times 10^4$ の程度になる。原型における潮流に伴う乱流拡散係数は場所によって異なるが、 K_x も K_y もこの程度か、あるいは K_x についてはもう少し大きいと考えられる。模型では摩擦が小さく、流れが強くなるのは、このことと関係しているかも知れない。

流況や環流に関する定量的な追求が必要であるが、精度が十分とはいえないので、厳密な議論はできない。定性的にはパターンはある程度よく再現されているといえる。たとえば、Fig. 5 と Fig. 10 を比べてみると、原型の高温域と模型の停滞域とがよく対応している。wake と関係した Reynolds 数 $Re = Ud/\nu$ (d は島の直径に相当する代表長さ) は、 $U = 1 \sim 2 \text{ kt}$, $d = 10 \sim 20 \text{ km}$ とした場合、模型でも 3000 程度であるので乱流状態の wake が存在しうると思われる。

内海の潮汐に及ぼすコリオリ力の影響は高々数%といわれているが、流速が一桁ほど小さな灘規模の環流に対してはかなり影響している可能性がある。灘規模の環流の大きさは入れものの形、大きさに決まるとしても、その強さおよび成因・維持などに関する力学的な検討は今後の問題である。

今回の実験の目的は、現象を定量的に再現し、濃度や諸係数を正確に求めるのではなくて、パターンを再現し、支配因子の振舞いを分析しようとするものであるから、1/100000 の模型でも目的には適っていると考えられる。

5.2 環流の分布が流出・拡散に及ぼす効果

模型で見た限りでは、連続点源染料域の流出・拡散には、Fig. 10 に示すような環流の強い所と弱い所、あるいは停滞域の存在が非常に大きな影響をもつことがわかった。たとえば、Fig. 12 の c, d を見ると、

0.1, 0.2 の等濃度線は備讃瀬戸西端の、三崎と笠岡を結ぶ線付近から西へほとんど進まず、等濃度線の幅がせばまっている。また、同図 g, h を見ると、1.0, 0.5 の等濃度線は西側では、1.0 の線が伊予灘中部にあつてあまり進んでいないが 0.5 の線は豊予海峡の付近まで達しており、かなりの速度で移動している。東側では、1.0, 0.5 の線は進みが小さいが、0.1 0.2 の線は播磨灘から大阪湾、紀伊水道北部海域を非常に速く進んでいる。これは容積の変化、あるいは濃度の分布曲線の形によるよりは、むしろ拡散係数の場所的变化によるものではなからうか。内海の中央部からやや東寄りに位置する水島から投入した場合、投入点から西へ運ばれる量の東へ運ばれる量に対する比を、Fig. 12 e, f の灘毎の平均濃度と容積との積の比として求めてみると、1年目で 63%, 2年目で 43% である。大阪湾、播磨灘から投入した場合は備讃瀬戸西部より西へ進む量ははるかに少ない。広島湾からの場合は逆に東へ、とくに備讃瀬戸から東へ進む量は、西に拡がる量に比して少ない。

Fig. 12 a~h を通してみると、地形と共に述べた停滞域の存在によって、いくつかの水系ができていくのがわかる。大きくみて、大阪湾・紀伊水道北部海域・播磨灘ブロック、備讃瀬戸ブロック、備後灘・燧灘・安芸灘ブロック、伊予灘西部・豊後水道ブロック、周防灘ブロックに分けられる。ただし、Fig. 4, Fig. 5 に示される原型の平均的な塩分や水温を指標とした水系とは、source の異なることもあつて直接比較することは困難である。

つぎに、東部への流出・拡散に対する鳴門海峡と明石海峡の影響を比べてみる。Table 3 を見れば、鳴門海峡の断面積は、明石海峡のその 1/8 程度であるが、流速は 2 倍程度であるので、流量比としては 1/4 程度になる。海峡を通しての海水交換量を流動距離と混合係数との積に比例する量として考えれば、交換係数が 1/2 程度になる。より具体的には、海水交換量は、流量と、通過した水のうち戻ってこないものの割合で決定される。この割合は海峡前後の wake の形状によって非常に異なる。鳴門海峡の場合から紀伊水道北部海域へ通過した水は、ほとんど戻らず、反時計まわりの環流に乗って南下してしまう。また、紀伊水道北部海域の北の中部付近から播磨灘へ流入した水は、環流に乗って中央部に拡がる。これに対し、明石海峡の場合、大阪湾から播磨灘へ流入した水の大部分は、中央部へ進入することなく、元に戻る。これは混合係数の小さいことを意味する。このことは 4. (3) で述べたように、鳴門海峡の海水交換に及ぼす効果が、播磨灘の水の flushing、とくに備讃瀬戸および播磨灘南部海域の水塊の流出・拡散にとって、決して無視できないことを意味している。

5.3 2次元水理模型の優位性

宇野木らの方法は、瀬戸内海を 1 次元水路と見なし、淡水の供給と、外洋からの流入 (恒流)、および拡散係数を定数として与えて、定常状態の解析解を求めたものである。これは瀬戸内海の海水交換の全体としての平均的な大きさを初めて求めたものとして注目に値するが、単純化したために、つぎのような難点をもっている。

i) 海水交換という観点から見る場合、瀬戸内海のとくに播磨灘以東を 1 次元水路で代表することは困難であり、したがって内海東部の塩分分布がよく説明できない。

ii) 拡散係数を一定にしたために、flux は断面積に比例し、海峡では著しく小さく見積られる。

これに対し、水理模型実験は、相似性になお問題はあるとはいえ、以下の特長がある。

i) 海水交換の大きさの場所的变化、とくに停滞域などを現実的かつ 2 次元的に取り入れることができる。

ii) 特定の河口に投入された物質が環流の存在のために、lateral にどちら側を通して、どう流出・拡散してゆくかという経路が非常に明瞭にわかる。

iii) 停滞域の存在のために、投入点の位置によって、流出量の東西への配分が異なることや、異なった水系の形成されることなどが、より現実的な形で理解できる。

一方、2次元モデルにおける海水交換、物質の拡散に関して数値実験を行なうことも考えられるが、格子点数の制約、場所的に著しく変化する拡散係数の与え方等のために、大きな困難さを伴っている。しかし、コリオリ力を取り入れたら、吹送流による環流の効果を取り入れることなどは比較的容易であるから、この

ような機構の解明のためには、積極的に併用されるべきものと考えられる。

6. 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、瀬戸内海における潮流、潮汐混合について調べた結果、つぎのことが明らかになった。

(1) M_2 分潮は、モルタル滑面の Froude 模型によっては再現されないが、海峡の断面積を 2/3 程度に小さくすることによって調整できた。

(2) 流れは多少強調されているが、流況・環流のパターンはかなりよく再現されている。

(3) 内海規模の潮汐混合には、環流（潮流に伴う地形性の wake, residual circulation）と、停滞域（一潮時以上平均した流れの小さい所を含む）の存在が決定的な役割を果している。

(4) 瀬戸中央部に存在する停滞域を通しての輸送が著しく小さいために、備讃瀬戸東部に投入された物質のほとんどは、紀伊水道を通して流出する。

(5) 播磨灘北部に投入された物質の大部分は大阪湾に入る。大阪湾奥部に投入された物質の大部分は友ガ島水道から紀伊水道を通して、比較的早く流出・拡散する。

なお、今後明らかにすべきことは、

(1) 灘規模の環流の実態と、海水交流における機能を観測と実験から定量化し、模型にも相似に取り入れること、

(2) 海峡付近における、潮流に伴う大規模渦流 (wake) の構造と海水交流への役割を明らかにすること、などである。

ここでは、主として内海の内部に着目して実験を行なったが、1/100000 という小さい模型であるから、模型製作精度や実験精度にも問題はあり、また摩擦条件にも若干問題があるので、精度的には十分とはいえない。したがって、定量的には多少不安があるとはいえ、大局的には、瀬戸内海における潮流による流動・拡散の様相は、ここに述べたようであると考えられる。より正確に把握するためには、ここで見いだされた事柄を、現地観測や大型模型によって検討しなければならない。

また、ここでは実験施設の都合上、紀伊水道、豊後水道などの開口部の外海側に存在すると考えられる黒潮逆流などの流れを与えることができなかったため、染料濃度の境界条件を規定することができなかったが、長期的に見れば、このような境界条件が、内海における濃度を規定するはずであるから、将来は何らかの方法でこの条件を与える必要がある。内海の灘規模の環流と濃度分布には、コリオリ力の影響が現われる可能性があるため、将来は回転模型による検討も必要となるであろう。なお、ここでは省略した風や密度成層の影響も実際には重要と考えられるから、十分留意しなければならない。

おわりにあたって、実験および資料整理に協力して頂いた北川吉男、川崎博一の両氏と神谷キミヨ嬢に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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，昭 45，pp. 385-393.
- 2) 高谷静馬他：瀬戸内海東部の潮流実験報告(-)，海と空，Vol. 8, No. 5, 昭 3, pp. 69-78.
- 3) 神戸海洋気象台：瀬戸内海の気象と海象，神戸海洋気象台彙報，第 177 号，昭 17.
- 4) 須田皖次他：瀬戸内海海洋観測調査報告，神戸海洋気象台海洋時報，第 2 巻，第 34 号，昭 4, p. 574.
- 5) 千田哲資：瀬戸内海におけるサヨリの産卵 II，流れ藻に産みつけられた卵の漂流経路と運命，日本生態学会誌，Vol. 16, No. 5, 昭 41, pp. 171-175.
- 6) 海上保安庁水路部：昭和 39 年度潮汐表，昭 38.
- 7) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水利模型実験について (IV)，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，昭 45. 3, pp. 457-470.