

湾内水塊の海水交換性

—広島湾を対象とした海水交換実験より—

上嶋英機*・橋本英資***・山崎宗広****・宝田盛康**

1. ま え が き

水質汚濁に対する物理的な浄化能力や緩衝容量を把握するには、問題となる水域の海水交換規模を適正な時間スケールで評価する必要がある。

これまでに実施してきた瀬戸内海の海水交換性に関する研究の中で、対象とする空間スケールとして、瀬戸内海全域を対象とした交換性¹⁾と、湾、灘を単位とする交換性²⁾について水理模型実験を主体に段階的に進めてきた。上記では、海水交換機構に対して潮汐流より長い時間スケールを持つ循環流（恒流）の存在がその役割に大きく寄与し、長期的広域的な海水交換を保持していることを示した。しかし、実質的に水質汚濁の解明や浄化のため海水交換規模を把握しようとする水域は、湾内の小水域であることが多く、湾規模より更に小さな空間スケールが重要となる。海洋要素に見られる湾内の水塊分布が、地理的、物理的にどのように構成されているかは、現地調査に基づく解析が必要であり、水塊内の交換能力を適正に評価する前提となる。

従来、湾内小水域の交換規模を求める手法として、ボックスモデルが一般に使用されてきたが、ボックスの設定が実際の水塊分布と一致せず、不適当な結果を得る場合が見られた。そこで、瀬戸内海の中でも閉鎖的な広島湾内の各水域で海水交換機構と混合特性について詳細に現地調査して得た水塊分布を基にして、水理模型内を水域区分し、小水域（水塊）の交換能力を明らかにする海水交換実験を行った。本報ではこの実験結果に基づき、湾内水塊の海水交換性について紹介する。

2. 湾内の水塊分布

広島湾は図-1に示すように南北に奥長の湾であり、

湾口部は屋代島により閉鎖的な海域となっている。湾内は宮島瀬戸を節として、湾北部（湾奥部）と湾中央部に2分され、湾奥部の海深は20 m以下と浅く、一級河川の太田川河口が位置し多量の河川水が流入している。湾中央部では平均海深が約30 mで

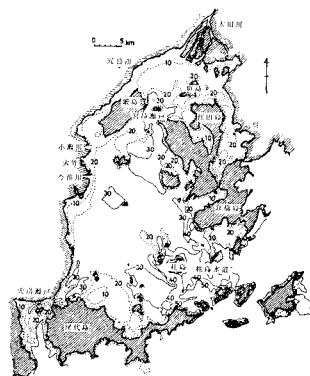


図-1 広島湾地形図

東西に柱島水道と大島瀬戸の二つの湾口を持つ。

図-2 左図の現地恒流分布によれば、湾中央には柱島

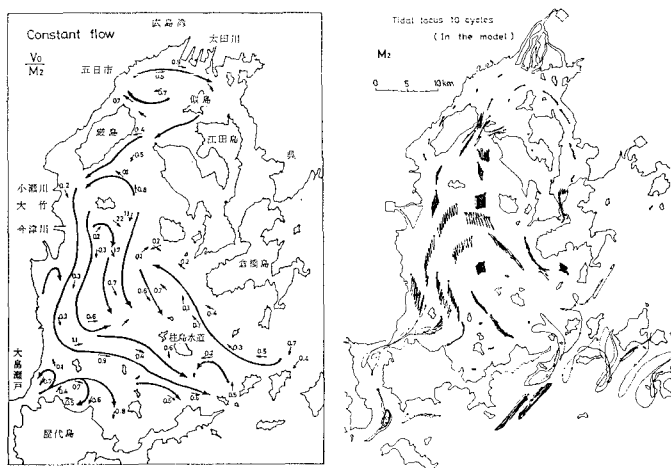


図-2 広島湾内恒流図

左図： 現地恒流分布図（科学技術庁資料， V_0 ：恒流， M_2 ：半日周潮流振幅）
右図： 水理模型での恒流図（ M_2 潮10周期間フロート追跡）

水道から北上し岩国沿岸を南下する反時計廻りの大きな循環流が存在している。この循環流は、半日周期（ M_2 ）の潮汐流を与えた水理模型実験から図-2右図に示す潮汐残差環流として裏付され、湾内の流況と水塊分布を決定する大きな要因となっている。

一方、太田川から湾内に流した河川水は、湾奥部から

* 正会員 工修 通産省 中国工業技術試験所 内海水理研究室長
** 正会員 工修 通産省 中国工業技術試験所 内海水理研究室主研
*** 正会員 通産省 中国工業技術試験所 内海水理研究室
**** 通産省 中国工業技術試験所 内海水理研究室

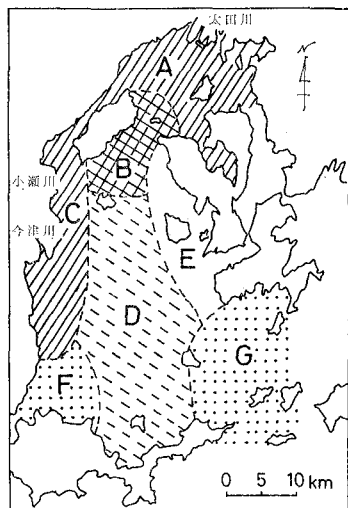


図-3 広島湾の水塊区分模式図

宮島瀬戸を南下した後、湾中央部の循環流により湾西岸から大島瀬戸と柱島水道に向い、湾外に流出する経路をとる。この為、湾奥部と湾西岸沿は河川水により強い密度成層が形成され、湾中央部では混合域となっている。

このような広島湾海域での海水交換機構を解明するため、数多くの現地観測を重ね各水域での海水交換性に係る素過程を明らかにしてきた^{3),4),5)}。その結果を総合して、混合形態とその素過程から湾内を水域区分すれば、図-3 に示す模式図のような水塊分布が得られる。各水塊の特性を示せば以下となる。

- ① 河川水流出に伴う密度流によって混合が卓越する海域 (図中 A, C 水域)、吹送流による効果も大きい。
 - ② 瀬戸部での地形性鉛直循環流による混合が卓越する海域 (図中、宮島瀬戸 B 水域、水深 50 m)。
 - ③ 潮汐残査流から成る水平循環流の形成による混合と交換が卓越する海域 (図中、湾中央 D 水域)。
 - ④ 湾口部での地形性渦流と湧昇により外海水との混合が卓越する海域 (図中、大島瀬戸 F、柱島水道 G)。
 - ⑤ 湾外水の湾内直接侵入域 (図中、湾東部 E 水域)。
- これらの水塊内での潮汐流による物質交換量、滞留時間を明らかにするため、水理模型による実験を実施した。

3. 実験方法と内容

瀬戸内海大型水理模型^{1),2)}(水平 1/2000、鉛直 1/159 縮尺)内の広島湾を使用し、図-3 に示した現地水塊分布を基にして湾内を図-4 に示す 5 水域に区分した。これら、小水域での交換能力を求める実験手法として、水粒子を代表し得る疑似粒子として、ボールを多数使用し

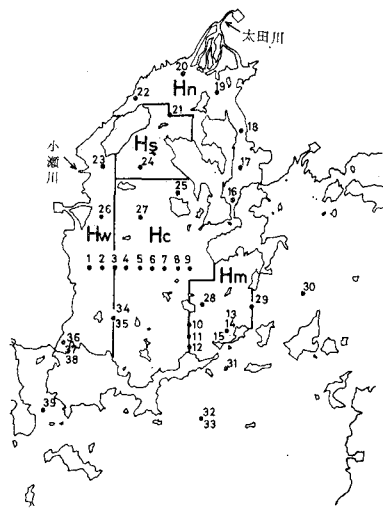


図-4 模型内水域区分(5水域)(図中の数字はブロープ比色計設置点)

たラグランジュ的実験¹⁾と、染料水を使用したオイラー的実験の両手法を用いた。

(1) 染料による交換実験の方法

模型内の広島湾口部を仕切板で遮断し、湾内水としてローダミン B 染料水を均一濃度 (平均 3.2 ppm) で満し実験潮汐として半日周期 (M_2) を与えた後、湾口部の仕切板を一斉に除し、120 周期間 (約 2 ケ月間) 実験を行った。この間、染料濃度は湾内外に設けた 100 測点で各周期に一斉採水を行い、全域の濃度分布と変化量を求めた。更に、ブロープ比色計を図-4 に示す測点に配置し連続濃度測定した。一方、カメラによる連続撮影も実施し、染料の拡散分布を捉えた。

(2) ボールによる交換実験の方法

図-4 に示す湾内 5 水域 (Hn, Hs, Hw, Hc, Hm) に、水域毎に色分したカラースーパーボール (比重 0.92、直径 6 cm) を模型内 1 m² 当り 4 個の割合で均等に合計 1000 個を配置した。初期ボール位置は模型海底面に敷設したマグネットにより固定し、実験開始と同時にボールを一斉離脱した。実験潮汐は半日周期 (M_2) を与え、150 周期間実験を行った。実験中は各水域全ボールの移動を追跡し、輸送分布と経路を観測した。

4. 実験結果と考察

(1) 染料実験による各水域の交換性

図-5 には染料濃度測定から得た結果として、初期濃度に対する残留率 (%) の分布を 10, 60, 120 周期について示した。10 周期では湾口部柱島水道と大島瀬戸から湾内水は一挙に交換希釈され、60 周期 (1 ケ月) では、50% 交換の水域が湾中央部まで達するが、湾北部、西部では 90% 以上の残留率を示し、極めて交換が遅

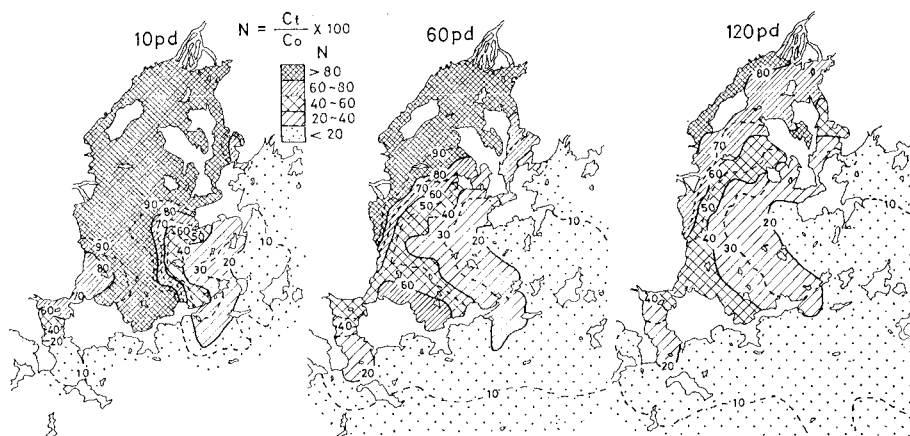


図-5 染料残留率分布, 10, 60, 120 周期 (残留率 $N = \text{残留量 } C_t / \text{初期濃度 } C_0$)

い、更に、120 周期 (約 2 ヶ月) では湾全体の濃度は 50% 以下に半減し、中央部ではすでに 30% 以下と交換が進んでいる。交換過程と分布形態は現地水塊分布とよく一致していることが解る。

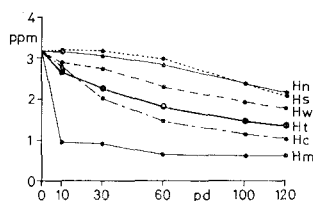


図-6 各水域内平均濃度の変化 (Ht: 湾全体平均濃度)

上記の濃度変化を基に、湾内 5 水域での平均濃度を求め、その変化を図-6 に示した。図中、Ht は湾全体の平均濃度を示す。各水域の濃度差が明確であるが、交換の最も遅い停滞性水域の湾北部 (Hn) では 30 周期まで初期濃度値が保たれ、その後ゆるやかに減少する。それに対し、湾口部 (Hm) では 10 周期目で、すでに 60% も交換し湾口部での湾外水との直接交換能力の大きさを示している。湾中央 (Hc) の値は 60 周期で半減し、湾全体の交換規模を大きく支配している。

図-6 の値を基にして、各水域の交換時間及び滞留時間を求めた。

滞留時間 τ_r は、各水域の残留量の変化を基にして、次式で求められる。

$$\tau_r = \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dR}{dt} \right) dt = \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} R dt \quad \dots (1)$$

R_0 : 初期 ($t=0$) 物質総量

$R(t)$: 時刻 t での湾内残留量

なお、各小水域の染料濃度の変化は、水域内に初期に存在した染料に限定したものでなく、他水域からの輸送も含めた見かけの残留量ではあるが、その水域の交換特性を充分反映していると考え、湾全体の中での相対的な

規模を評価するため式 (1) により滞留時間を算出した。

解析結果からは、湾全体 (Ht) の滞留時間が 151 周期 (約 76 日) で、50% 交換時間は 104 周期 (約 53 日) であった。小水域の滞留時間は、Hn で 279 周期と湾中央 Hc の 3 倍もの時間を必要としている。湾西部 Hw もに比べ交換が遅く、各小水域での交換能力の相異が鮮明になっている。

図-7 に、プローブ比色計による連続濃度記録を示す。図中実線は連続濃度からの回帰線を示す。図-4 に示す測点の中で、湾北部 Hn-19 では 50 周期以降に初めて

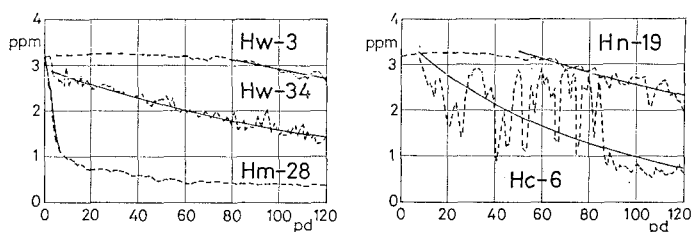


図-7 プローブ比色計による各水域濃度変化 (1 周期平均、図中実線は回帰線を示す)

湾外水の到達による濃度変化が見られる。湾中央 Hc-6 では 80 周期まで、循環流に伴う西部岸高濃度染料水の取り込みにより変動が著しいが、回帰線からは図-6 の Hc の変化と類似している。湾口部 Hm-28 では、僅か 10 周期で初期濃度の 3 分の 1 以下に低下する。湾西部 Hw-3 では高濃度水が沿岸に張り付き、長期間滞留する。しかし、大島瀬戸の湾口部影響域 (図-3 の F 水域) では一定勾配で減少する。これらの値は、水域内空間の平均的な代表性として充分ではないが、濃度変化から得られる残余関数は、水塊寿命を知る上で重要な目安となり得る。

(2) ボール実験による各水域の交換性

ボールを使用した海水交換実験については既に前報¹⁾で紹介しているが、特定水域内の物質輸送経路や滞留時

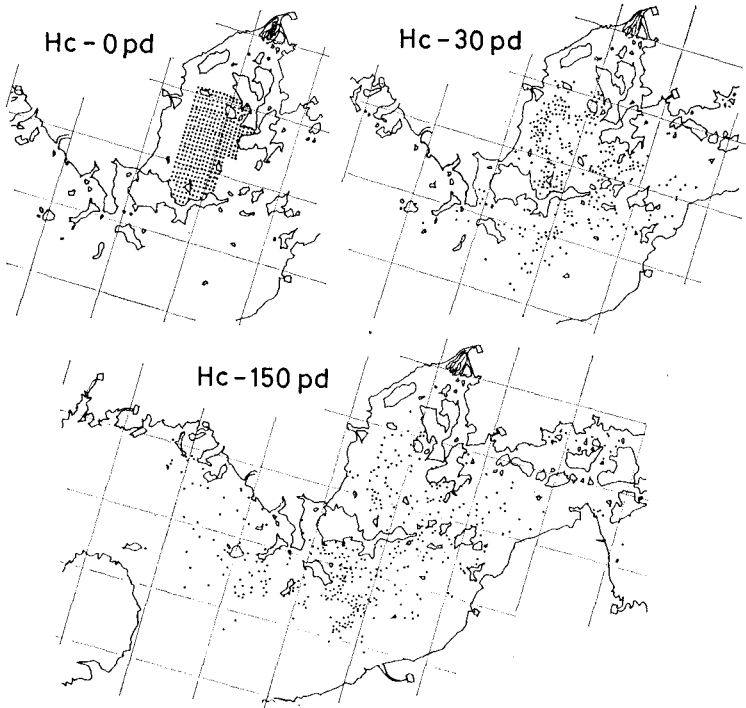


図-8 広島湾中央水域(Hc)配置ボールの輸送分布
初期投入位置(0 pd), 30 周期(pd), 150 周期(pd)の分布

間を把握する上で、有効な手法である。そこで、5 水域に区分された広島湾内の各小水域の物質が湾外に輸送されるまでの時間と、物質が対象水域中に滞留している時間と量を捉え、各水域の交換能力をボール実験から定量的に求める。

図-8 は、広島湾中央部に配置した 397 個の初期ボール位置(0 pd)と、実験開始後、30 周期目と 150 周期目でのボール輸送分布図を一例として示したものである。湾中央の反時計廻りの循環流により決定される輸送経路に従って湾外に運ばれる。

図-9 には、湾内に配置した全ボール(Ht) 1,000 個の湾内残留量と湾外流出量の変化を示したものである。湾全体としては、約 100 周期で 50% が交換し、先に示した染料実験結果とよく一致している。

一方、各水域に配置したボールの湾内残留量変化を示

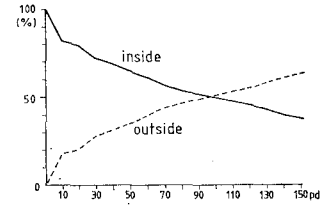


図-9 湾内残留量と湾外流出量の変化(湾内全体 Ht, 1000 個)

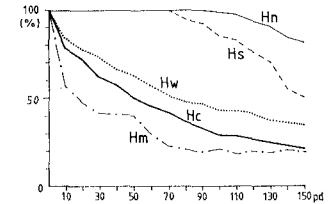


図-10 各水域ボールの湾内残留量変化(5 水域)

したのが 図-10 である。各水域の初期投入量を 100% として示してあるが、湾北部 Hn のボール(初期 179 個)が湾外に出始めるまで約 100 周期(50 日)で、他水域に比べ著しく遅い。各水域の物質が湾外に流出するまでの時間、即ち、湾外水との交換能力の相異が、この結果から明らかである。

各水域の物質(ボール)の湾内残留量変化から各々の残余関数を求め、交換時間と滞留時間を τ_r 算出し示したのが 表-1 である。この結果より、各水域の物質が湾外水と 90% 交換するに要する時間を 図-11 に示した。湾全体(Ht)では約 6.8 ヶ月であるが、湾中央 Hc では約 4 ヶ月、湾北部 Hn では Hc の 3 倍以上の 13 ヶ月を要する。なお、湾口部 Hm では Ht の 1/3 の時間であるが、一旦湾外に流出したボールが、再び湾外水として立場を変えて流入することにより、実際より交換時間が多く見積られている。

各水域内の物質が隣接する水域と交換する時間について考えて見る。見方を換えれば、対象水域中の物質が、

表-1 各水域ボール湾内残留量からの交換時間と滞留時間(Ht: 湾全体)

実験対象水域	対象周期	残留量回帰式 $N = e^X$	残留率(%)	交換時間										滞留時間 τ_r (pd)
				90	80	70	60	50	40	30	20	10		
Hn	90-150	$X = 4.944568 - 0.003480 t$		128	162	200	244	297	361	443	560	759		287
Hs	0-150	$X = 4.749857 - 0.003867 t$		65	95	130	169	217	274	349	454	632		259
Hw	0-150	$X = 4.461170 - 0.006234 t$		17	36	57	82	101	147	193	258	369		160
Hc	0-150	$X = 4.453784 - 0.009690 t$		11	23	37	53	72	95	125	166	238		103
Hm	0-70	$X = 4.433577 - 0.018879 t$		5	12	19	27	37	48	64	85	122		53
Ht	0-150	$X = 4.477961 - 0.005983 t$		17	37	59	85	115	153	201	269	385		167

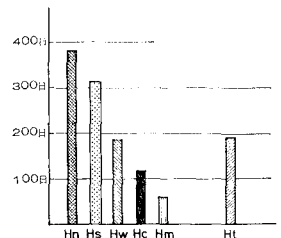


図-11 各水域と湾外水の 90% 交換時間比較図

その水域に滞留する時間である。図-12には、実験結果から得た、5水域での各水域残留量の変化を示したものである。

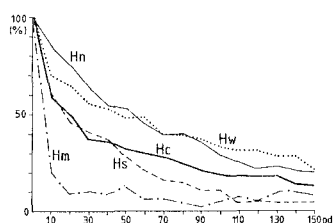


図-12 各水域内残留量の変化

これより交換時間と滞留時間を算出したのが表-2の結果である。90%交換に要する時間として、停滞性の強い水域であるHn, Hwで3.5, 4ヶ月、循環域であるHs, Hcで1.5, 2.7ヶ月と速く、湾口部Hmでは15日で交換する値が得られた。

表-2 各水域の交換時間と滞留時間(水塊内の交換能力)

水域	交換時間			滞留時間 Zr(pd)
	10	50	90	
Hn	10	63	209	100
Hs	5	28	92	44
Hw	15	74	244	128
Hc	7	49	164	96
Hm	2	9	30	19

この結果は図-3に示した現地水塊の交換特性と対応した交換能力であり、その規模が具体的な時空間スケールとして明らかにされたと言える。

5. 結 論

地形的、物理的特性から構成されている湾内水塊の海水交換能力を定量的に求めるため、閉鎖的な広島湾に於て、現地水塊分布に基づく水域区分を行った水理模型内で、染料とボールによる海水交換実験を実施し次の結果

表-3 広島湾各水域別の滞留時間、染料(Dye)とボール(Ball)との対比

水域	滞留時間		Htに対する比率		相関性
	Dye	Ball	Dye	Ball	
Hn	279 pd	287 pd	1.85	1.72	0.97
Hs	242	259	1.60	1.55	0.93
Hw	206	160	1.36	0.96	1.28
Hc	95	103	0.63	0.62	0.92
Hm	71	53	0.47	0.32	1.34
Ht	151	167			1.08

を得た。

① 染料とボールによる海水交換実験で得た湾内5水域での滞留時間をまとめ比較したのが、表-3である。染料とボールの結果は高い相関性がある。停滞性の強い湾北部Hnは、湾全体(Ht)の滞留時間に対し2倍、循環流の発達した湾中央HcはHtの2/3、湾口部HmでHtの1/2~1/3となり各水域で大きな差が認められた。特に、HnはHcの3倍もの時間を要する。

② ボール実験による結果からは、90%交換時間が、Hnで13ヶ月、Hcで4ヶ月、Hmで2ヶ月、湾全体で6.8ヶ月であった。

③ 水塊内の交換能力として、停滞性水域のHn, Hwで遅く、循環水域のHs, Hcと湾口部Hmで速い交換時間が見られた。これより、水塊内の交換能力が定量的に評価できた。

④ 環境保全を考える上で、対象とする小水域の交換能力、混合強度に係る時間空間スケールの適正な評価が、予測精度に重要な意味を持ち、そのためにも、湾内ボックスの設定に対して実際に存在する水塊の空間スケールを充分配慮して取り扱う必要がある。本結果により、現地水塊分布を基にして行った実験手法の妥当性、有効性が確認され、ボックスモデルの使用上に対する一つの考えを示した。

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・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康：瀬戸内海水と外洋水の海水交換，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 742~746, 1985.
- 3) 上嶋英機・早川典生：河川水の流出する湾内の分散機構，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 492~496, 1980.
- 4) 上嶋英機：湾口部流入水塊の移動と海水交換機構，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 461~465, 1981.
- 5) 上嶋英機・早川典生：瀬戸内海の物質拡散・分散特性，沿岸海洋研究ノート，Vol. 20, No. 1, pp. 1~11, 1982.