

別府湾停滯性水域の循環流と水塊構造

上嶋英機*・湯浅一郎**・宝田盛康***
橋本英資****・山崎宗広****・田辺弘道**

1. ま え が き

瀬戸内海圏では四全総や内需拡大政策が契機となり、海洋開発プロジェクトが急増する現状の中で、その対象水域が静穏で開発に有利な停滯性水域が多くなっている。しかし、この停滯性水域は強い貧酸素水塊を形成し、海水交換性の悪い赤潮発生水域となっており、今後の沿岸海洋開発を進めていく上で、この停滯性水域の流動水質環境の保全と、開発に対する適正な環境管理が必要不可欠となっている。このため、本研究では、停滯性水域の流動場と水質環境を工学的立場から人為的手法により改善し、湾・灘全体の適正環境と創造するための、潮汐流を利用した流況制御技術の開発を進めている。停滯性水域を含む湾内の地形を効果的に改変操作したり、海洋構造物を適正配置することから潮汐流による流動場を自在に可変・制御し、湾全体の流況を改善しようとするものである。

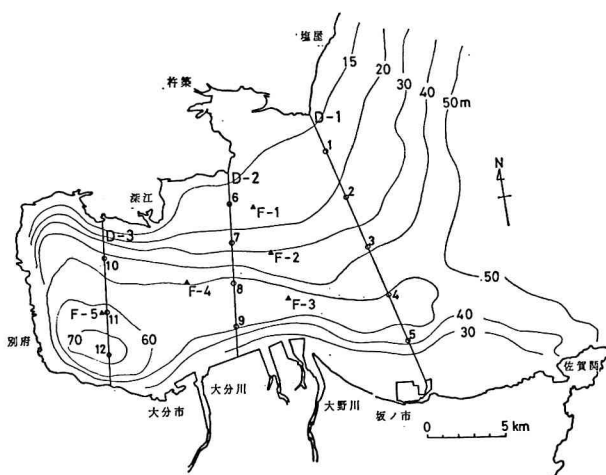
この研究の一環として、瀬戸内海に分布する代表的な停滯性水域での流動・水塊構造を明らかにするための現地観測を実施しており、前報(34回海構)¹⁾では大阪湾奥部の観測結果から、停滯性水域内に大規模な閉鎖型循環流の存在が初めて確認され、貧酸素水塊の物理的な形成要因となっている可能性を示した。本報では、大阪湾と異なるタイプの閉鎖的な別府湾停滯性水域を対象として、大阪湾と同様な観測を実施して得た解析結果から、別府湾の循環流形態と水塊構造について示すものである。

2. 観 測 結 果

別府湾の湾口幅は湾奥部に比べ広いが、豊予海峡から強く流入する外洋水によって湾口前面を物理的に遮断され、湾内は閉鎖的で湾奥には停滯性水域が存在していることが知られている。写真—1には冬季別府湾、豊予海



写真—1 別府湾、豊予海峡での海面温度画像
(1982年2月27日)



図—1 別府湾観測位置図 (D-1, 2, 3 横断観測面, F-1~F-5 浮標追跡始点)

峡での航空機による MSS 撮像から得た海面水温画像である。別府湾全域と国東半島東岸部には低温(8°C~10°C)な水塊が分布し、豊予海峡から流入する高温(14°C)な外洋水が伊予灘に分布している。温度差の著しい両者間には、強いフロントが形成され、別府湾を閉鎖した形態となっている²⁾。このような特性を持つ別府湾を対象として図—1に示す測点位置で、以下に示す調査項目で観測を行った。

① 湾内横断観測では、8月20, 21日に湾内に3断面(D-1, 2, 3)を設け、12測点に船を係留して水深方向7層(0, 1, 3, 5, 10, 20m, 底上2m)で、流動・

* 正会員 工博 通産省・中国工業技術試験所 海洋工学研究室長
** 理修 通産省・中国工業技術試験所 海洋工学研究室主研
*** 正会員 工修 通産省・中国工業技術試験所 海洋工学研究室主研
**** 正会員 通産省・中国工業技術試験所 海洋工学研究室

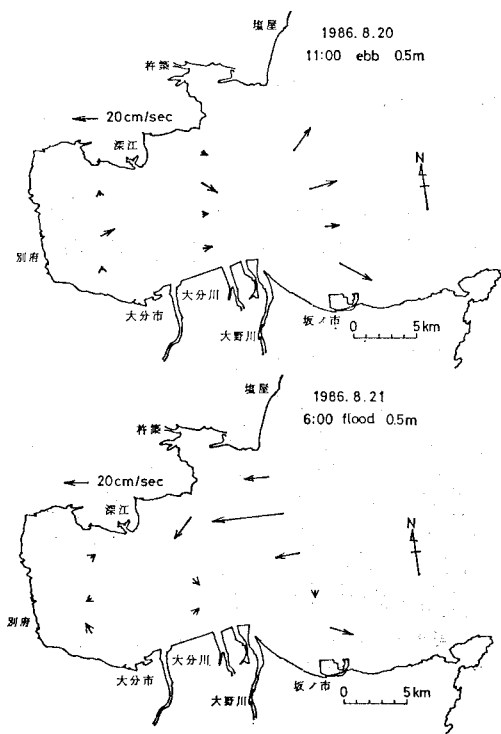


図-2 表層流速分布
(上図: 下げ潮時, 下図: 上げ潮時)

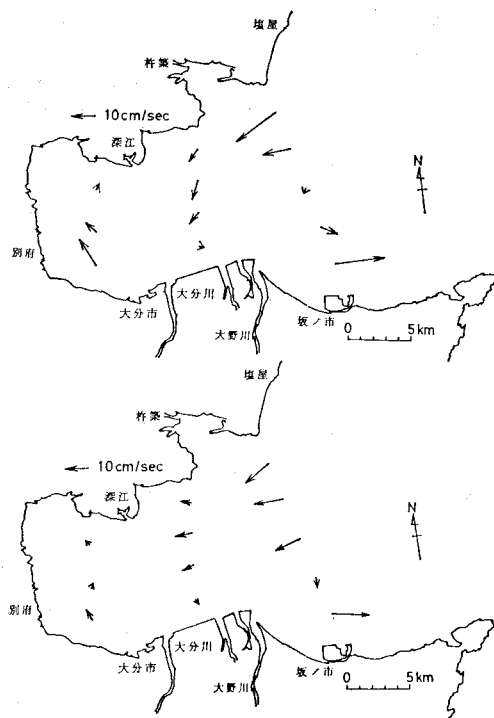


図-3 2 潮汐間平均流速分布
(上図: 1 m 層, 下図: 10 m 層)

水質を1時間毎25回(2潮汐間)の連続観測を行った。

② 浮標追跡調査では、8月23日に湾内の物質粒子の移動をラグランジュ的に捉えるため、図-1に示すF-1~F-5の5測点で上層1mと中層10mの2層に各々1個の円板型浮標(直径90cm ペニャフロート)を同時投入し、その移動を1潮汐間(13時間)船で追跡した。観測は8月23日8時の上げ潮初期から開始された。

③ 湾内水塊分布調査は、航空機によるMSS撮像により海面水塊分布を捉え、水塊特性を解析した。

以上の観測から、湾内循環流の形態と水塊分布を求め物質輸送機構を解析した。

3. 観測結果

(1) 別府湾内の水平流動構造

図-2は、3断面(D-1, 2, 3)での横断観測から得られた、下げ潮時と上げ潮時での表層流速ベクトル図である。下げ潮では全体として湾口から流出し、上げ潮時にはD-1, D-2断面の湾北部から湾内に流入するが、大野川河口沖から坂ノ市沖にかけての南岸沿からは、潮時に関係なく流出する。D-1断面のSt.2では上げ潮時の流速は1.5kt以上にも達する。湾奥部では時計回りの流れが見られ、湾口部に比べ微流である。

上記の流速値を2潮汐間平均した残差流(平均流)を表層と10m層について示したのが図-3である。2層

とも湾口側では、北部から流入し南部から流出する反時計回りの明確な循環流が存在し、湾奥部では反対に時計回りの循環流が認められ、回転方向の異なる2つの循環流が湾全体の流動場を支配していることが確認された。湾奥部の循環流は、図-1の海深図からも分るように、水深70mの凹地形上に形成される閉鎖型循環流となっている。このため、湾奥部は物質滞留時間の長い停滞性水域となっていることが考えられる。

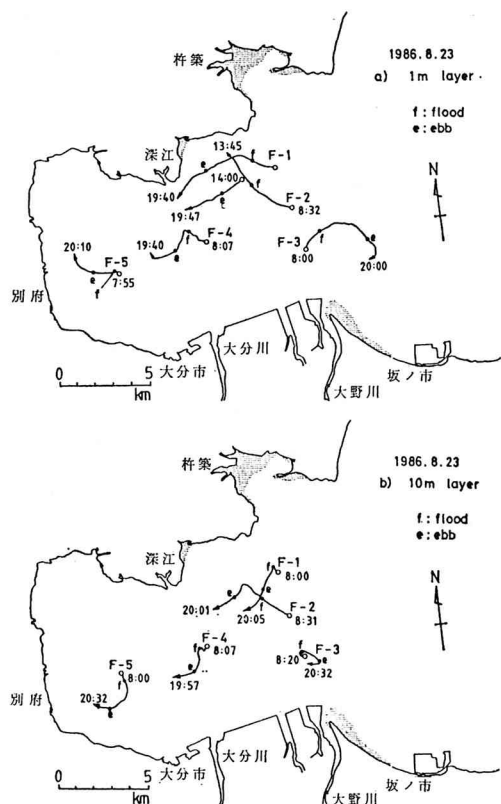
(2) 湾内のラグランジュ的流動構造

浮標追跡調査から得られた結果として、図-4に1潮汐間のラグランジュ的流跡図を示す。全体的には、上層と中層の動きは同様な傾向を持っている。図中のfは大分港の満潮時(H.W), eは干潮時(L.W)を示す。

F-1, 2, 4では湾奥に向かって移動し、F-3では逆に東北東へと湾外に流出する。F-3を除いては、下げ潮になっても転流せず、そのまま湾内に向かって一方向に移動するためF-1, 4, 5のラグランジュ的流速は南西方向に6~10cm/sの流速を、F-3は8cm/sの南東流を保っている。これらの流跡は、先に示したオイラー的な流速値から得られた循環流の存在を裏付けており、特に、湾奥F-5の流跡からは時計回りの循環流形態が明確である。

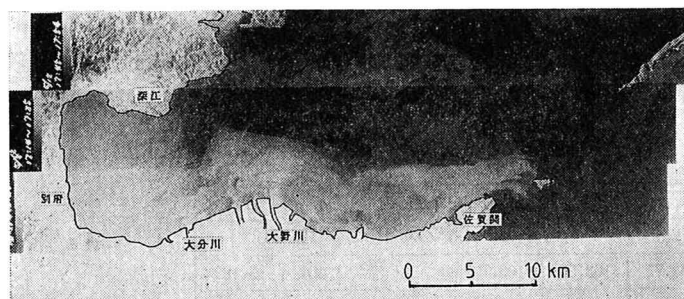
(3) MSS 撮像による湾内水塊分布

別府湾内の水塊分布と形態を捉えるため、航空機によるMSS撮像資料を解析し、写真-2に示す海面温度画



図—4 現地浮標追跡による流跡図(1988.8.23, 1 潮汐間, 上図; 1m 層, 下図; 10m 層)

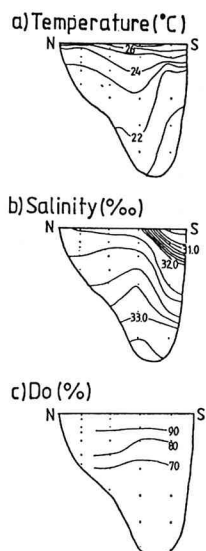
像を得た。撮像は1986年5月の下げ期末期に行なわれたものである。湾奥の閉鎖型循環流域には、トラップされて高温化した水塊が分布し、大分川系河川水の一部を取り込んでいる。更に、湾口北部の国東半島から南下する低温な水塊が湾中央に向かってクサビ状に侵入し、湾口部の循環流により形成される水塊分布を示している。大分沖の南岸には大野川、大分川の両河川水が帯状に位置し、先端が佐賀関から豊予海峡を南下する形の分布が見られる。以上から、湾内循環流の分布を裏付ける水塊分布が明確となり水塊形成に対して循環流が大きな役割を果たしていることが証明される。



写真—2 別府湾海面温度画像
(1986.5.12, 下げ期末期, 濃は低温, 淡は高温)

(4) 湾内水塊の鉛直構造

湾内3断面での観測結果から1例としてD-2断面での水温、塩分、溶存酸素(DO)の鉛直分布を示したのが図—5である。表層と底層の水温差は $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 、塩分差は約2‰で一定の密度成層が存在する。南岸部の表層水は、流出した河川水の影響を受け、高温・低塩分の水塊となって成層も著しい。DOは表層で飽和状態であるが、深くなるにつれて減少し、水深30m以深で60%台となり高塩・低温でやや貧酸素の水塊が分布している。



図—5 D-2断面での水温、塩分、DOの鉛直分布

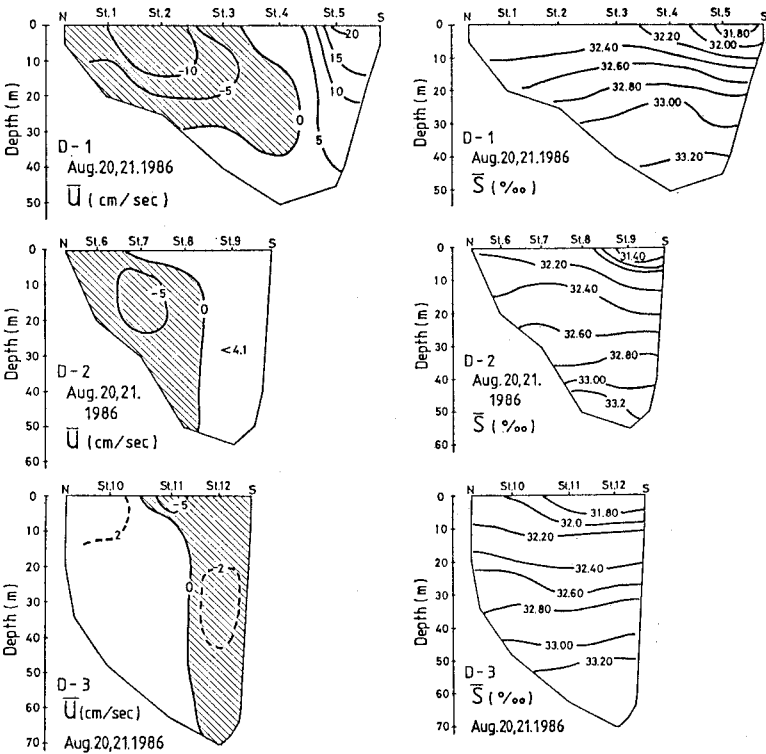
図—6 左側には各断面を垂直に横切る流速分布の2潮汐間平均流速断面分布を示した。斜線部(負値)は湾内に向う流れを示す。湾口部D-1断面では北部St. 1, 2, 3から流入し、南部St. 4, 5から流出する。特に、St. 5の表層からは20 cm/s以上の流出速度が見られる。湾中央断面D-2では北部から流入し、南部から流出する形に2分される。しかし、湾奥部D-3断面では、北部は東流、南部は西流となり、D-1, 2と全く逆のパターンを示す。平均流速値の大きさはD-3で最も小さい。

図—6 右側には各断面の2潮汐平均塩分分布を示す。河川水流出の影響による表層低塩分化はD-2, D-1に見られるが全体的に安定した分布を示している。

4. 湾内循環流による物質輸送特性

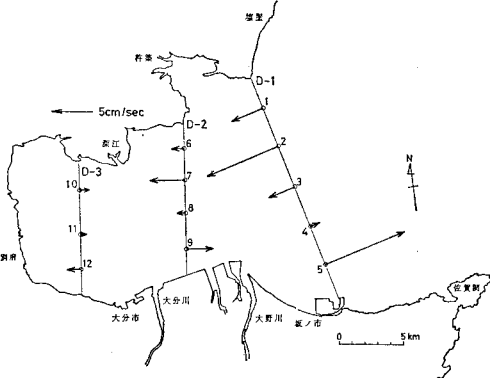
横断観測資料に基づきD-1, D-2, D-3断面を通しての塩分輸送量を算出し、循環流の存在する湾内の輸送特性について解析した。なお、塩分輸送量の算出方法については前報¹⁾に譲り省略する。

表—1にはD-1, D-2, D-3断面での2潮汐間平均塩分輸送量の算出結果を示す。表中 $\bar{u}_A$ は、断面に垂直成分流速値から得た2潮汐間の断面平均恒流、 $\bar{s}_A$ は同様に断面平均塩分値である。また、 T_1 は断面平均恒流による輸送項、 T_2 は潮汐流のtrappingによる輸送項、 T_3 , T_4 は断面内の水平・鉛直shearによる輸送量を意味し、 T_3 は特に水平循環流の寄与を含む水平勾配分散、 T_4 は鉛直循環流の寄与を含む鉛直勾配分散項である。



図一6 左図：断面平均流速分布（陰影部負値は西流）
右図：断面平均塩分分布

$\bar{u}_A$ の値は全て流入方向を示しているが全体に小さい。特に D-3 断面では零に近い。これは 図一9 で示したように断面内の左右で流入，流出量がバランスしているこ



図一7 鉛直平均恒流による水平シア分布

とによる。一方、 $\bar{s}_A$ の値は D-2 で河川水流出により最も低塩分となっている。

各断面内の塩分輸送量の内訳として、 T_1 の移流による輸送量は支配的である。分散項としての T_2 の trapping flux は D-3 断面で最も大きく、湾奥の海底地形が凹形となっていることと、一時的に河川水が湾奥にトラップされることにより発生するためと考えられる。

Shear 分散項 (T_3 , T_4) の値は D-1 断面で最も大きく、また水平勾配分散 T_3 と鉛直勾配分散 T_4 による寄与は同等である。D-2 では T_3 が大きく、D-3 では T_4 の値が大きくなっている。この結果から湾奥の循環流域では T_2 と T_4 の効果が輸送特性として示される。

次に、各断面での測点における鉛直平均恒流による水平 shear の大きさを求め 図一7 に示した。各

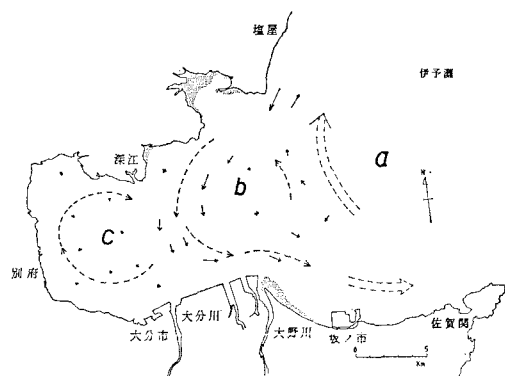
断面での shear 強度が明らかであり、湾口部と湾奥部の 2 つの水平循環流の存在がより明確である。

5. 水理模型実験による循環流形成機構の把握

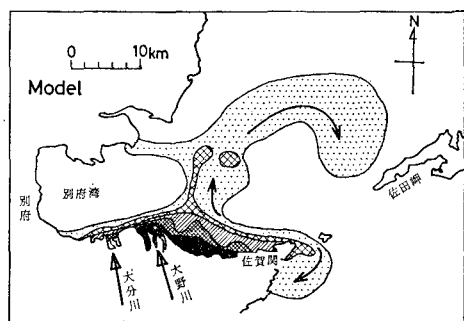
前記の 図一3, 4 で確認された湾内循環流が、潮汐残差流によるものかどうか、その形成機構を確認するため、瀬戸内海大型水理模型³⁾ (水平 1/2 000, 鉛直 1/149) により M_2 潮を実験潮汐とする流動場を与え、水面に浮標を投入して 1 潮汐間の浮標追跡実験を行った。図一8 には実験結果から 1 潮汐間の移動量 (残差) の大きさと、循環流の模式図を示した。湾口前面には 写真一1 で示したように豊予海峡から伊予灘を北上する大規模な循環流 a が位置し、湾内には現地観測結果と同様、湾口側に反時計回りの循環流 b が存在する。更に、湾奥部には時計回りの循環流 c が存在し、これら 3 個の循環流が地形と潮汐残差流によって形成され、連動して分布しているこ

表一1 塩分輸送の算出結果

	断面積	$\bar{u}_A$	$\bar{s}_A$	F	T_1	T_2	T_3	T_4
単位	m ²	cm/s	‰	(F=T ₁ +T ₂ +T ₃ +T ₄)				
				kg/sec				
D-1	59.0×10 ⁴	-0.54	32.72	-103,565	-103,799	-13	3,454	-3,182
D-2	37.5×10 ⁴	-0.92	32.55	-112,013	-112,235	-158	382	3
D-3	58.4×10 ⁴	-0.04	32.62	-9,299	-9,299	690	-132	1,747



図—8 水理模型による1潮汐間の残差流(浮標追跡により恒流)破線は環流(a, b, c)の模式図



図—9 水理模型による大分川、大野川河川水拡散分布(M_2 潮による50周期目の分布)

とが確認された。この実験結果から 図—3, 4 で示された現地環流が、潮汐残差流により発生していることが証明された訳である。

次に、大野川、大分川河川水の拡散実験を実施し、循環流によってどのように湾外に流出するがを明らかにした。

実験では、半日周潮(M_2 潮)を与え、大野川、大分川から年平均流量に相当する染料水を50周期間連続放流し、その拡散分布を求めた。図—9には50周期目に得られた拡散分布を示す。河川水は南岸部を這って佐賀関に向い、下げ潮時には豊予海峡を南下し、上げ潮時には、伊予灘を北上する時計回りの循環流c(図—9)に大きく輸送され佐田岬北岸に運ばれる形態が見られた。この結果は写真—1に示した別府湾湾口部に位置する水塊分布の形成機構を説明するものである。

一方、湾奥部では大分川河川水が徐々に西進するが、他方では循環流bによって国東半島に北上した河川水が北部から湾奥部へ輸送される様子が見られる。

以上から、水理模型実験により循環流形成機構と河川水拡散形態が明らかとなった。

6. 結 語

停滞性水域が存在する閉鎖的な別府湾内の流動と水塊構造を明らかにするため、夏季に現地観測を実施し、その資料解析から次の結果が得られた。

① 別府湾前面の伊予灘には豊予海峡からの外洋水侵入に伴う大規模な循環流があり、湾口部は物理的に閉鎖されている。伊予灘の循環流に連動されて、湾口部から湾中央にかけて反時計回りの強い循環流が存在し、湾奥部の停滞性水域には微弱ながら時計回りの閉鎖型循環流が存在していることを確認した。

② 現地での1潮汐間浮標追跡による流跡からは、湾内循環流の形態を明確化する結果を得、そのラグランジュ流速は湾奥で南西方向に6~10 cm/s、湾口中央で南東方向に8 cm/sの平均流速を保ち、転流せずに一方に進行する形態を得た。

③ 海面温度画像からは湾内循環流に対応し、特徴的に形成される水塊分布が明確に捉えられた。

④ 横断面恒流分布からは3断面の鉛直流動構造が明らかとなり、湾奥断面と湾口部断面とは対照的な分布を示し、断面中央から南北に区分される恒流分布が存在していた。

⑤ 断面を通しての塩分輸送量の解析結果によれば、湾口断面(D-1)で水平・鉛直循環流による寄与が共に大きく、閉鎖型循環流が存在する湾奥断面(D-3)での輸送特性として、地形効果を伴うトラッピング輸送と鉛直shearによる輸送の寄与が顕著に示された。

⑥ 別府湾での水理模型実験結果からは、現地観測で捉えた循環流の成因が潮汐残差流によることが明らかとなり、湾奥から湾外にかけて3個の循環流が連動し存在していることが分った。

本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究による「潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究」の一環として行ったものである。

参 考 文 献

- 1) 上嶋英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広・田辺弘道: 大阪湾停滞性水域の流動と水塊構造, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 661~665, 1987.
- 2) 上嶋英機: 瀬戸内海の物質輸送と海水交換性に関する研究, 中国工業技術試験所研究報告, 第1号, pp. 23~25, 1980.
- 3) 工業技術院中国工業技術試験所: 瀬戸内海全域の汚濁予測に関する研究報告書, pp. 7~25, 1980.