

湾内流況制御実験

工業技術院 正会員 宝田盛康 正会員 上嶋英機
中国工業技術試験所 正会員 橋本英資 山崎宗広

1. はじめに

瀬戸内海をはじめとする沿岸海域は、臨海都市、工業生産基地、海洋レクリエーション場、水産資源育成場などの沿岸海洋開発の格好な利用空間であり、最大限の利用が図られるべき空間である。しかし、自然状態のままでの海の流動場は、こうした多重的な利用を必ずしも受け入れるものとはなっていない。特に、湾・灘における停滞性海域の存在は、環境保全とも絡んで積極的な空間利用を図りにくくしている。従って、沿岸海洋開発を進めて行く上で、停滞性海域の流動場を人為的に制御し改良する流況制御技術の開発が必要となっている。幸いにも、瀬戸内海などの沿岸海域では、潮流流といった自然エネルギーを利用できることが少なくない。経済的な自然地形の操作や構造物の設置によって、これらのエネルギーをうまく利用する流況制御技術の開発は、空間利用場の適正配置技術の開発と併せて、沿岸海洋工学の重要課題の一つとして取り組むべきものである。

我々は、海域における浄化能力に直接関与する海水の交換性を研究する中で、上述した視点からの研究開発の必要性を痛感し、沿岸海域における流況制御技術の研究開発に着手している。本論に移る前に、沿岸海域における流動場の特徴を、これまでに得た我々の知見から以下に整理しておく。

表一1は、図一1に示す広島湾の海域区分をもとに、瀬戸内海大型水理模型実験により水粒子の移動を調べて、各海域の特徴を平均滞留時間として求めたものである。湾奥部Hnと湾口部Hm、或は湾中央部Hcとの平均滞留時間の相違は極めて大きい。こうした各海域での海水の平均滞留時間は、潮流流と地形の相互作用によって海域内に発生される潮汐周期をもった渦状の回転流（潮汐渦流）や、往復運動を繰返しながらも湾形状に従って循環する潮汐残査流、さらには、往復運動を繰返さずに湾形状に従って循環する回転流に左右されている。以下、このような海水粒子の循環を引き起こす3つの流れを循環流または環流と呼ぶことにする。

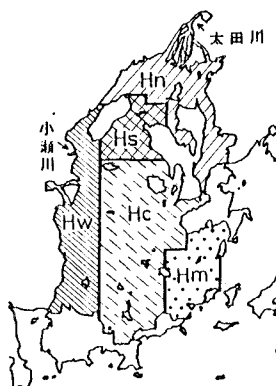
瀬戸内海の現地観測や水理模型実験などの結果をもとに、積極的な海域空間利用を拒む停滞性海域を循環流に着目して分類すると、図一2のようになる。タイプAは、広島湾に代表されるもので、島などによって環流域から隔離されて形成される。タイプBは、大阪湾に代表されるもので、環流域の規模が湾全体に及ばないことで形成される。タイプCは、別府湾に代表されるもので、タイプA、タイプBとは異なり、海峡部からの強い流れによって物理的に閉鎖されて形成される。いずれのタイプにおいても潮汐状態が変らなければ、海底地形も含めた湾形状や、湾口部の潮流強さを変えない限り、停滞性海域の流動場を変えることは不可能である。従って何らかの方法で、停滞性海域に循環流を発生させ、かつその経路も含めて可制御とすることができれば、その海域の開発利用度を高めることが可能となろう。

本報は、沿岸海洋開発を積極的に行う必要があるという立場から、流況制御技術の基礎を、地形操作を行った水理模型実験結果により明らかにしようとするものである。

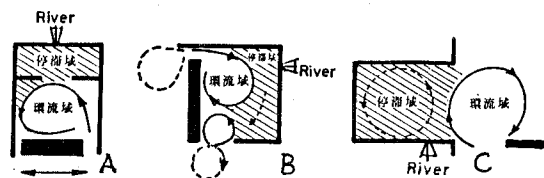
表一1 広島湾各海域の平均滞留時間

水域区分	滞留時間	Htとの比率
Hn	287pd	1.72
Hs	259	1.55
Hw	160	0.96
Hc	103	0.62
Hm	53	0.32
Ht	167	

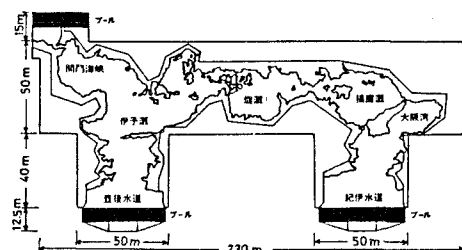
pd = 潮汐周期



図一1 広島湾海域区分



図一2 停滞性海域の分類



図一3 瀬戸内海大型水理模型平面図

2. 実験概要

潮汐流を伴う湾や灘での流動場を制御するためには、潮汐状態が変わらなければ、構造物の設置も含めた人為的な地形操作が必要となることを1.で述べた。地形操作で先ず考えられることは、海水の湾内への出入を司どる湾口や瀬戸の操作である。これまで、水産的な立場から、湾口断面の拡大による海水交通量の増大を図り、湾内海水の交換を促進する技術が確立されてはいる⁴⁾。しかし、湾口断面の縮小によるものについては、断面縮小による海水交通量が変化しない範囲での湾口流速の増大が望ましいと述べるにとどまっており、これに関連した湾口改良技術は未だ確立されていないといえる。このような理由もあって、湾口部での水深を浅くして、1.で述べた湾内循環流がどのように変化するかを、

図-3に示す瀬戸内海大型水理模型（水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/160）での徳山湾を例にして調べることにした。

図-4は、徳山湾の現況水深図である。南の湾口部で水深は急に深くなるが、湾内地形は平坦である。湾口部水深を浅くする実験ケースとしては、湾口断面の平均水深30mとするCase 0に対し、24mとするCase 1、19mとするCase 2を扱った。図-4には、実験ケースごとのA-B縦断面図も同時に示してある。

実験潮汐は、図-3の紀伊水道、豊後水道、響灘に設置してあるゲート式起潮装置で周期282secの正弦波として与えられる。なお、実験海域で測定された潮汐・潮流の周期282secの基本調和成分は、図中の潮汐測定点W₁～W₃、流速測定点V₁に対して、表-2で示した。また、流動場の測定は、水面に浮べたカラスーパーボール（比重0.92）の1/10周期ごとの写真像を追跡することで行った。

堤設置による循環流変化を調べる付加的な実験は、平面水槽を用いた一様水深の矩形湾で行った。矩形湾の大きさは、幅3m、奥行3.6m、水深10cmであり、実験潮汐は、湾口から5m離れたプランジャー式起潮装置により、周期200sec、振幅0.25cmとして与えた。

3. 実験結果と考察

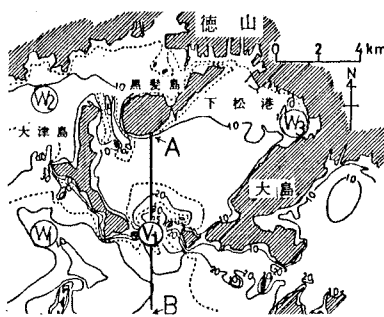
湾口部水深を浅くすることによる流動場の変化は、ボールの移動を水粒子の移動と做すことにより、図-5に示すように得られた。図中の番号①、②及び③、④は、それぞれ上げ潮期、下げ潮期に対応し、①、③は湾口部憩流時からの1/10周期間の、②、④は湾口部最強流時直後の1/10周期間の水粒子移動を示す。

湾口部水深が現況水深となっているCase 0では、上げ潮期、下げ潮期とも水粒子の移動は、ポテンシャル流的な移動となっている。しかし②、④図を比較すると、上げ潮期の湾中央部から東部にかけての水粒子の移動は、ほぼ北北東になっているのに対し、下げ潮期のそれは、南西もしくは西南西方向となっている。このことは、潮汐周期より長い時間スケールでみた水粒子の移動が、この海域でゆっくりとした反時計回りの移動になることを示すものである。

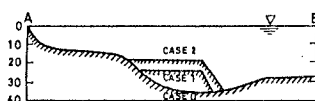
湾口断面の平均水深を現況の4/5としたCase 1の水粒子の移動は、湾口部を除くとほぼCase 0のようになっている。湾口部では②でも明らかなように、上げ潮最盛時頃から、水粒子移動に東向のものが現れ、そこに潮汐渦と做される循環流を形成しながら③の下げ潮期の初期状態を作り出している。しかし、こうして出現された循環流は④に示すように、下げ潮最盛時まで湾内に停ることはなく、比較的短期間のうちに湾外へ流去されている。

湾口断面の平均水深を現況の2/3としたCase 2の水粒子変位は、これまでの場合とは様相を全く異にし、Case 1における湾口部の時計回りの循環流を優勢にしている。この時計回りの循環流は、①から②へと湾口部からの上げ潮流で強化され、下げ潮期の初期状態③へと移り大きく成長している。また、下げ潮期には、④でも示されるように、循環流は多少弱くなるものの、以前として同じ回転性を保っている。このことは、湾内に潮汐周期の全区間にわたって時計回りの循環流が存在することを示し、そこでは、水粒子の移動に潮汐周期の往復運動がみられないことを意味している。

引き続き、潮汐周期より長い時間スケールでの水粒子の移動を求めると、図-6の結果が得られる。Case 0、



(a) 平面水深



(b) 縦断面水深

図-4 徳山湾海底地形図

表-2 実験条件

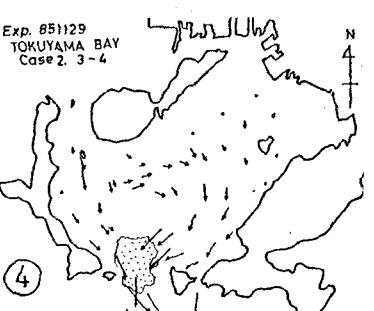
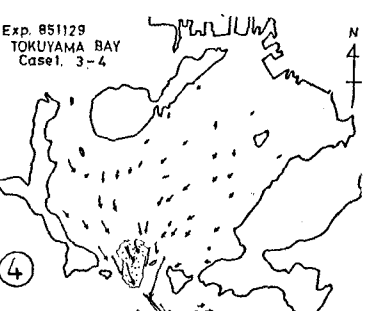
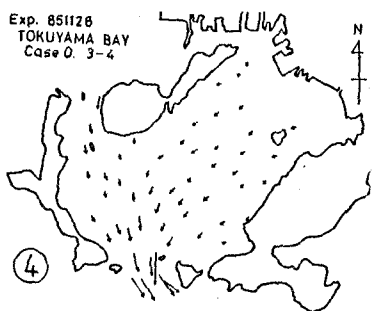
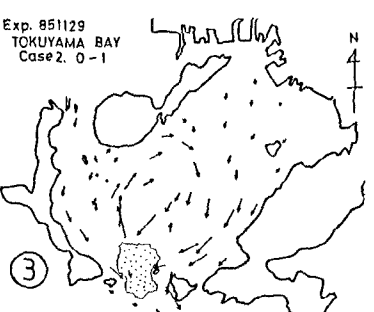
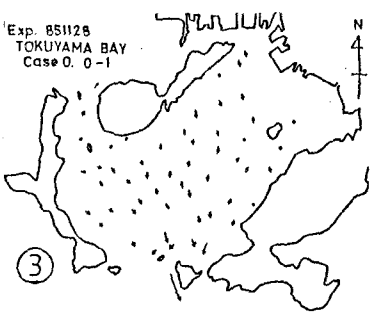
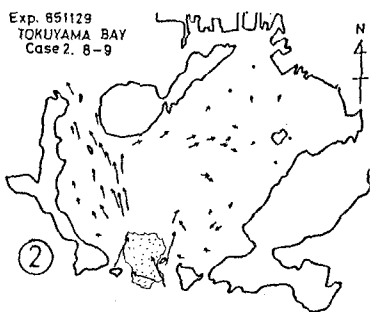
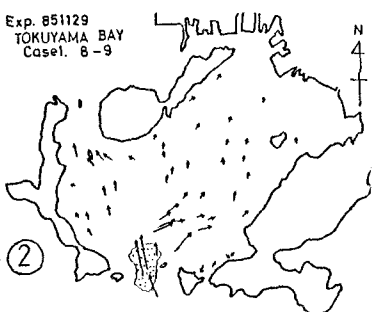
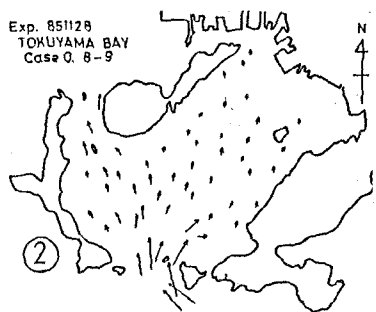
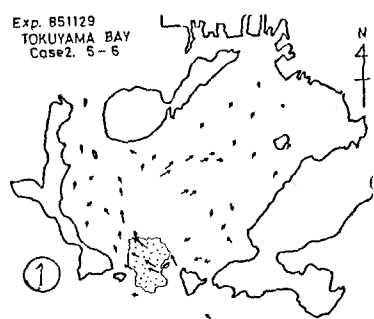
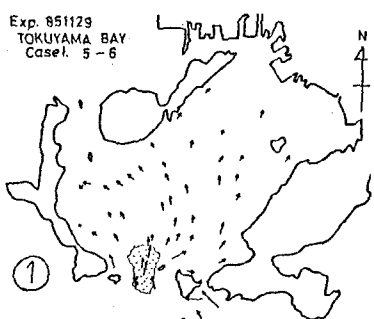
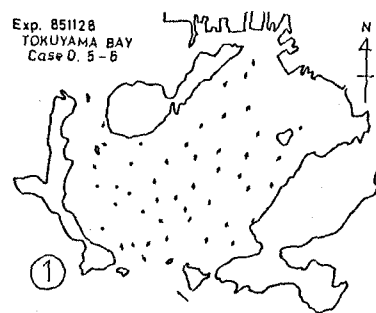
ケース 地点	0	1	2
W ₁	0.55	0.54	0.54
	0	0	0
W ₂	0.55	0.56	0.55
	0	1	1
W ₃	0.54	0.55	0.54
	0	0	1
V ₁	1.09	1.44	2.39
	299	300	285

潮汐：上段振幅 (cm)

下段位相 (W₁ 基準)

潮流：上段流速 (cm/sec)

下段位相 (W₁ 基準)



(a) Case 0

(b) Case 1

(c) Case 2

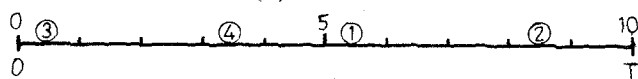


図-5 周期内水粒子移動

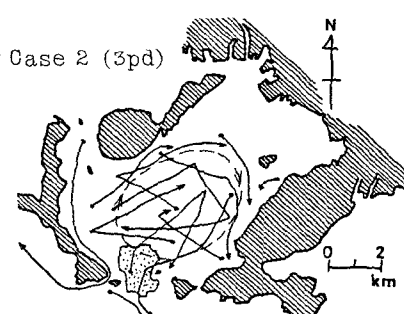
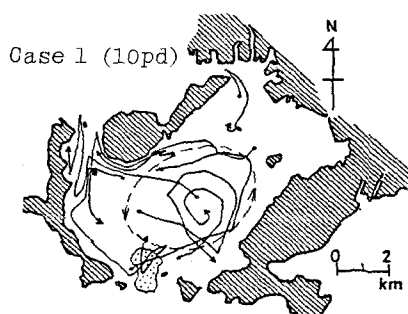
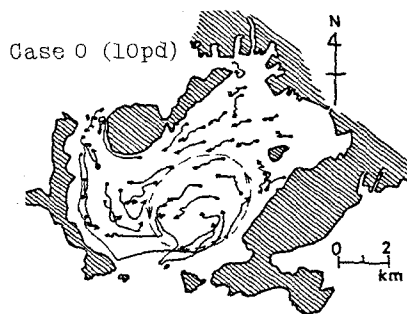


図-6 長周期水粒子移動

1は10潮汐周期間の結果であり、Case 2は3潮汐周期間の結果である。長期スケールでの循環流は、Case 1と2ではその回転方向を異にするものの、湾中央部にその中心を置き、Case 0では湾口近くに中心を置く。Case 0とCase 1の循環流の回転方向が同一であることを考えると、Case 1の循環流の中心は、表-2に示すように湾口部の潮流流速の増大により、Case 0の循環流中心が移動してきたものと倣される。循環流の一巡時間を図中の点線部で概略的に求めると、Case 0, 1, 2の順に40, 20, 10周期程度と見積られる。なお、循環流の規模は、Case 1と2ではほぼ同じで、その直径を湾幅程度としている。

図-5, 6から明らかにされた循環流の特徴をもとに、湾内にできる循環流を模式的に形態分けして示すと図-7のようになる。形態Ⅰは、Case 0, 1にみられる循環流であり、湾内に形成される循環流は、水粒子の往復運動の繰り返しがある中で形成され、反時計回りとなる一方で、湾口部の循環流は、潮汐周期内の短期間だけ存在する時計回りの潮汐渦によるものである。図-5のCase 0には、この時計回りの循環流がみられないが、これは、ボールがこの循環流に追従しなかったためと考えられる。

形態Ⅲの循環流は、Case 2にみられる循環流であり、水粒子に往復運動を与えることなく、水粒子を一定方向に移動させてしまうものである。形態Ⅲの循環流は、俗に片潮と呼ばれるものである。

形態Ⅱの循環流は、形態Ⅰにおける時計回りの循環流が湾内で優勢を保つようになって形成されるが、形態Ⅲのような片潮的にならず、水粒子に往復運動を与えるものである。形態Ⅱの循環流は、形態ⅠとⅢの中間的な位置付で予想したものである。次に、これらの循環流形態を地形形状と湾口での流れとの関係から整理し、徳山湾実験結果をまとめることにする。



図-7 循環流の形態分類

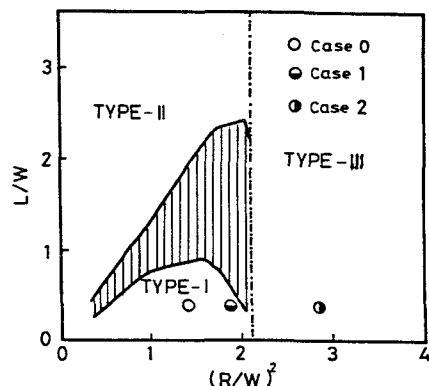


図-8 循環流の存在領域

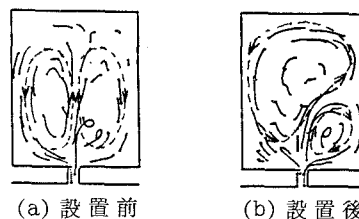
図-7に示された循環流の形態は、Kashiwaiによれば、湾口水道開口端の急拡部での流れの剥離によって放出される不連続面がその自由端まわりに捲き上って形成する潮汐渦の挙動を、潮汐周期を単位にして調べることによって分類される。潮汐渦を渦点でモデル化し、渦点に循環値を与えてその挙動を解析することで、各形態の循環流は、図-8のようなパラメータ空間での存在領域を有する⁵⁾。図の縦軸は、湾口幅 W と湾口水路長 L によるアスペクト比であり、横軸は、タイダルプリズム量を長さの次元で示した R と W によるもので、 R/W なるストロハル数に関連する無次元パラメータである。タイダルプリズム量を Q 、湾内平均水深を H_b とすると、 R と Q の間に $Q = \pi R^2 H_b / 2$ なる関係がある。これは、タイダルプリズム量を半円柱で置きかえることであり、半円柱の半径 R をタイダルプリズム量の特性長とすることである。 Q はまた、湾口流速を $U_0 \sin(2\pi t/T)$ 、湾口水深を H_b とすれば、 $Q = H_b U_0 T W / \pi$ となる。図中のハッチ部分は、図-7で示した形態Ⅰの湾口部にある時計回りの循環流が湾外に流出し再び湾内に戻ることがないという条件と、湾口水路には流下するが再び湾内に戻ってしまうという条件から決定される、形態ⅠからⅡへの遷移領域である。また形態ⅢをⅠ, Ⅱから分離する限界は、潮汐渦が常に湾奥方向に輸送されるようになる $(R/W)^2$ を、潮汐渦の挙動モデルの数値解から決定したものである。

循環流の形態を変えるには L/W を変えるか、 $(R/W)^2$ を変えるかすればよく、形態の変え方はⅠ-Ⅱ, Ⅱ-Ⅲ, Ⅲ-Ⅰの3通りである。徳山湾の結果も同図に示してあるが、 L, W は変えていないので、徳山湾の例は水深を浅くすることで R を変えているわけである。従って、地形操作としては湾口の幅、水深、水路長操作の3つになり、前2者は湾口断面操作となる。但し、幅の操作と水深操作は、循環流形態の転換において異なることに注意しておこう。

ところで、徳山湾におけるような湾口水深の操作は、経済的、工法的にみて現実的であるとは限らない。このような場合には、湾内での潮汐渦の移動を導流堤などによって、湾内循環流の規模・経路を変える同一循環流形

態内の流況制御技術が考えられる。この例の平面水槽実験結果を図一 9 に示す。水粒子の移動は 1 潮汐周期間のものである。循環流形態はⅢであり、堤設置後には、湾左側の循環流は規模を大きくし、右側のものは小さくなる。また、水粒子が一巡するに要する時間は、堤設置前の約 6 周期から、堤設置後には、右側の循環流で約 3 周期となるが、左側は堤設定前のそれと同じである。堤設置による流況制御は、循環流形態内の経路変更と規模の変更ということになる。

これまでの議論は、湾口部における水深操作と堤設置のみである。しかし、湾内循環流には、和田・中村の知多湾実験でも指摘されているように、湾内における海底地形も影響していることから、海底地形操作も流況制御技術の一環として検討していく必要がある。



図一 9 堤設置効果

4. ま と め

湾や灘における流況制御技術を確立していくには、潮流と地形の相互作用によって形成される循環流に着目していく必要がある。徳山湾実験、平面水槽実験から次のことが明らかにされた。

- 湾内における循環流には 3 つの形態があり、これらは湾口部の水深 H 、幅 W 、水路長 L とタイダルプリズムの特性長 R による無次元パラメータ L/W と $(R/W)^2$ のパラメータ空間でそれぞれの存在領域をもつ。
- 湾口に着目した湾内流況制御技術の要素は、湾口幅、湾口水深、湾口水路長の 3 つであり、これら进行操作することで循環流の形態を転換し得る。
- 同一形態内の循環流の制御には導流堤が効果的であり、湾内における循環流の規模強さを調節し得る。

これらの結果は定性的なものであるが、今後、循環流の規模、強さを、湾口部流速や湾内形状などをパラメータにして定量化していかなければならない。

参 考 文 献

- 1) 上嶋・橋本・山崎・宝田：第 31 回海岸工学講演会論文集，pp.665—669 (1984)
- 2) 上嶋・橋本・山崎・宝田：第 32 回海岸工学講演会論文集，pp.742—746 (1985)
- 3) 上嶋・宝田・橋本・山崎：日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 257—258 (1986)
- 4) 例えば、中村 充：「水産土木学」，工業時事通信社 (1979)
- 5) M.Kashiwai：Jour.Oceanog.Soc. Japan, Vol. 40, pp. 279—294 (1984)
- 6) 和田・中村：第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 521—525 (1983)