

海峡部における人工的地形改変が内湾の流動構造に及ぼす 影響の数値実験

石 塚 正 秀*・中 辻 啓 二**

1. はじめに

1990 年に通産省中国工業技術試験所（現独立行政法人産業技術研究所中国センター）が超大型瀬戸内海水理模型を用いて興味深い水理実験を行った（樋端ら, 1991）。それは、海峡部の地形を人工的に改変することで潮汐流の自然エネルギーを利用して湾内の流動を強制的に変化させ、湾内の停滞した水塊の海水交換を促進させる実験である。その結果、わずか 3 km の堤防により直径約 15 km の大規模環流が反転する結果が得られた。海峡部におけるエネルギーは海盆におけるエネルギーの約 800 倍であるという試算もあり（藤原・中田, 1990）、海峡部における巨大なエネルギーを利用する試みは、湾奥部の水質改善が進まず、また、多くの埋立て事業が実施されている半閉鎖性海域の現状において依然として強い期待感が寄せられている。しかし、このような現象が本当に生じ得るのか明らかでない。10 年前の知識では、潮流による影響を考慮するだけで十分であったが、内湾の流動を考える上で地球自転効果や成層は無視できない。本研究では、バロクリニック条件下において、水理実験を追認する三次元数値実験を行い、海峡部における地形改変が停滞水域の流動・密度構造および物質輸送に及ぼす影響を再考する。

2. 数値実験の概要

計算領域は大阪を原点とした 64 km×64 km の範囲であり、水平格子幅は 1 km×1 km、鉛直方向には不等間隔で 10 層に分割した。また、紀伊水道側と播磨灘側の境界において 12 時間周期の潮汐変動を与えた。計算領域および流動モデルは中辻 (1996) と同様である。大阪湾湾奥部の河川流量は 1983～1992 年の淀川における 8 月の平均流量 241 m³/s（建設省（現国土交通省））を与えた。まず、計算条件の妥当性を検討するためにバロトロピック流れ場における数値実験を行い、水理実験と数値実験の結果を比較した。つぎに、淡水流入、海面熱収支、地球自転を考慮したバロクリニック流れの数値実験を実施し

表-1 明石海峡と紀淡海峡における地形改変の条件

ケース	条件
Case 0	現状地形
Case 1	紀淡海峡の加太瀬戸を締め切った場合
Case 2	紀淡海峡の加太瀬戸と中ノ瀬戸を締め切った場合
Case 3	紀淡海峡の友ヶ島を水深 20 m まで掘削した場合
Case 4	明石海峡の本州側に 3 km の堤防を設置した場合
Case 5	明石海峡の淡路島側に 2 km の堤防を設置した場合

た。さらに、流動の数値実験により得られた結果を用いて、淀川河口の水深 2 m, 4 m に各 500 個づつ計 1000 個の中立粒子を配置した 50 日間の粒子追跡の数値実験を実施した。

海峡部の地形改変の条件は水理実験に倣い、紀淡海峡および明石海峡について計 5 ケースを検討した。紀淡海峡では、加太瀬戸を閉め切った場合 (Case 1)、加太瀬戸と中ノ瀬戸を閉め切った場合 (Case 2)、友ヶ島を水深 20 m まで掘削した場合 (Case 3)、明石海峡では本州側に長さ 3 km の堤防を設置した場合 (Case 4)、淡路島側に長さ 2 km の堤防を設置した場合 (Case 5) である。これらをまとめて表-1 に示す。

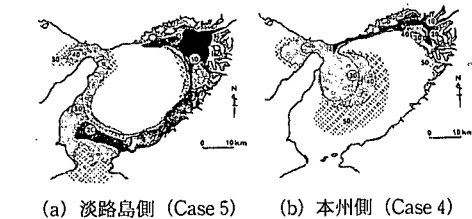
3. 数値実験の結果

(1) 水理実験との比較

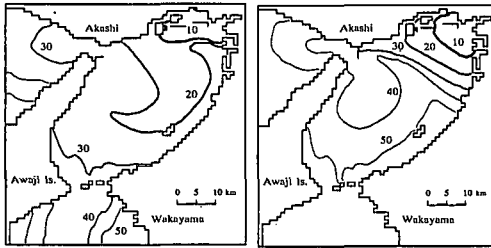
図-1 は明石海峡に堤防を設置した場合における水理実験およびバロトロピック流れの数値実験により得られた淀川河口から放出されたトレーサ濃度の拡がりを示す。ここで、水理実験の結果は拡散した染料の最前線を示しており、濃度が明らかでないため、数値実験により得られた濃度の等値線は河川境界値に対して 1/10000 の濃度の先端部とした。

明石海峡の淡路島側に堤防を設置した場合では、淀川から流入した河川水は大阪府沿岸を時計回りに移動する。30 潮汐後には淡路島まで到達し、その後、紀伊水道や播磨灘まで拡がる。一方、明石海峡の本州側に堤防を設置した場合では、淀川河川水は兵庫県側に運ばれる。30 潮汐後も兵庫県側に分布し、明石海峡まで移動する。

* 正会員 博(工) 和歌山大学助手 システム工学部環境システム学科
** 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻



(a) 淡路島側 (Case 5) (b) 本州側 (Case 4)



(c) 淡路島側 (Case 5) (d) 本州側 (Case 4)

図一 淀川から放出されたトレーサ濃度の水平分布 (50 潮汐間)。上図：水理実験 (樋端ら, 1991), 下図：数値実験。

そして、大阪湾の中央海域において円形に分布し、40~50 潮汐後も大阪湾内に残留している。このように、堤防の設置場所によりトレーサ濃度の拡がりや全く異なる結果が示された。また、バロトロピック流れの数値実験の結果は水理実験の結果とほぼ一致しており、本数値実験の計算条件は妥当といえる。

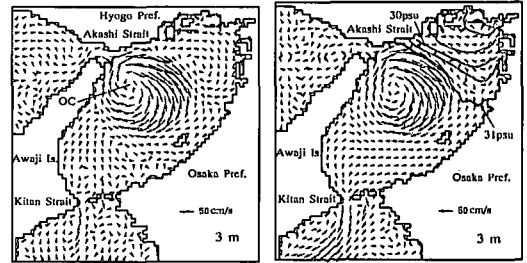
(2) バロトロピック流れとバロクリニック流れにおける残差流系の相違

図二は明石海峡の淡路島側・本州側に堤防を設置した場合のバロトロピック条件・バロクリニック条件における計算開始から 25 日後の水深 3 m における残差流の水平分布を示す。等値線は一潮汐平均された塩分分布を示す。

a) 淡路島側に堤防を設置した場合

バロトロピック流れの場合、明石海峡からの強い潮流により形成される時計回りの沖ノ瀬環流 (OC) が現況地形の場合と比較して約 2 倍も拡大し、また、沖ノ瀬環流と対をなす須磨沖反流 (OSC) が湾奥部まで分布する結果が得られた。

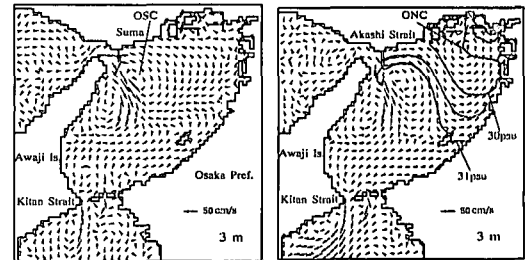
一方、バロクリニック流れの場合、時計回りの沖ノ瀬環流の規模はバロトロピック流れと同じ結果となった。しかし、湾奥部の成層海域の面積が現状地形と比較して縮小しており、従来みられる時計回りの西宮沖環流 (ONC) や大阪府側の海岸に沿った低塩分水塊の拡がり形成されておらず、複雑な流れとなっている。これは沖ノ瀬環流が拡大したためと考えられる。また、沖ノ瀬環流の外縁は成層海域との境界を形成しており、塩分 31



バロトロピック流れ

バロクリニック流れ

(a) 明石海峡の淡路島側に 2 km の堤防を設置した場合



バロトロピック流れ

バロクリニック流れ

(b) 明石海峡の本州側に 3 km の堤防を設置した場合

図二 計算開始から 25 日後の水深 3 m における残差流の水平分布。上図は淡路島側に設置、下図は本州側に設置。等値線は塩分分布を示す (0.5 psu 間隔)。

psu の等値線と一致している。

b) 本州側に堤防を設置した場合

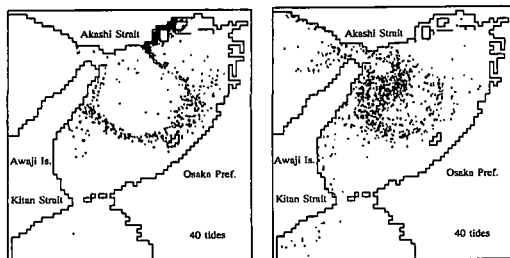
バロトロピック流れでは、時計回りの沖ノ瀬環流の規模が現況地形の場合と比較して約 1/2 倍に縮小し、その中心は淡路島付近まで移動する結果が得られた。逆に、沖ノ瀬環流が従来存在する位置には反時計回りの残差流が存在しており、この流れは大阪湾の東部海域全体に分布する結果となった。

一方、バロクリニック流れにおいてもバロトロピック流れと同様にこれら二つの渦対が存在している。また、成層海域における流動を淡路島側に堤防を設置した場合と比較すると、湾奥部では従来と同様に成層海域が発達しており、高気圧性循環の西宮沖環流や大阪府側における低密度水塊の拡がり形成されている。

以上の結果から、(a)、(b) どちらの場合も明石海峡からの強い潮流の影響を受けた渦対について、バロクリニック流れとバロトロピック流れによる違いは得られなかった。しかし、成層海域の流動は堤防の位置により大きく異なる結果となった。

(3) バロトロピック流れとバロクリニック流れにおける淀川河川水の挙動

図三は明石海峡の淡路島に堤防を設置した場合の計



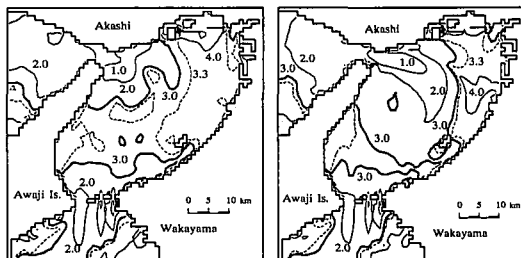
(a) バロトロピック流れ (b) バロクリニック流れ

図-3 計算開始から20日後における淀川から放出された中立粒子の分布 (Case 5)

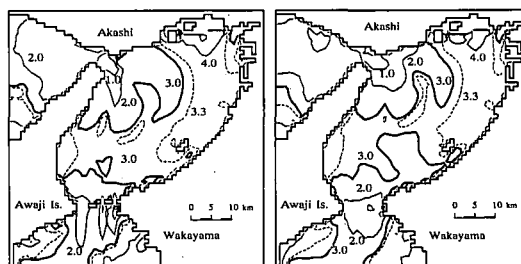
算開始から20日後における淀川から放出された中立粒子の分布を示す。図-2(a)で示したように、湾西部海域に発生した時計回りの大規模渦(沖ノ瀬環流)の形状はバロトロピック流れとバロクリニック流れともに同じであるが、粒子の挙動は全く異なる結果となった。バロクリニック流れでは、粒子群は沖ノ瀬環流に取り込まれ、計算開始から20日後においても環流内を滞留している。一方、バロトロピック流れにおいては、粒子群は沖ノ瀬環流には取り込まれずに沖ノ瀬環流の外縁に分布している。現状地形では、バロクリニック流れの場合、湾奥部から流入する河川水は海水との密度差と地球自転による高気圧性循環流およびそれに伴う表層水平発散流の影響を受けて大阪府側を南下し、その後、水深20m等深線に沿って形成される潮汐フロントを北上して神戸方面に移動し、沖ノ瀬環流に取り込まれる(Nakatsuji and Fujiwara, 1997)。したがって、ここで得られたバロトロピック流れとバロクリニック流れにおける淀川河川水の輸送機構の違いから、密度成層および潮汐フロントの存在の重要性が示唆される。

(4) 成層海域と混合海域の拡がり

図-4は $\log(H/U^3)$ の水平分布を示す。 H は水深(m)、 U は潮流振幅(m/s)を表す。海底摩擦による潮流のエネルギー逸散の一部がポテンシャルエネルギーを増加するために使われると仮定した場合、 $\log(H/U^3)$ の値により混合海域と成層海域を区別することができる(Simpson and Hunter, 1974)。つまり、 $\log(H/U^3)$ の等値線は潮汐フロントの位置を表す。Yanagiら(1995)はバロトロピック流れの数値シミュレーションと人工衛星画像を比較し、大阪湾における潮汐フロントの位置を季節変化を含めて $\log(H/U^3)=2.5\sim 3.5$ とした。また、Yuasa and Ueshima(1992)は $\log(H/U^3)$ が河川流量と強い関係があることを示した。このように、 H/U^3 の値の変動が大きい原因は成層海域の拡がりや河川流量により変化し、その結果、潮流振幅が変化するためと考えられる。しかし、ここでは地形改変による強制的な潮流振幅の変動により



(a) 現状地形 (b) 淡路島に堤防を設置



(c) 本州側に堤防を設置 (d) 友ヶ島を掘削

 図-4 $\log(H/U^3)$ の水平分布。実線は1.0間隔、点線は3.3を表す。

H/U^3 が変化する場合を考える。現況地形による結果から、潮汐フロントは $\log(H/U^3)=3.3$ の等値線に等しいことが分かるが、明石海峡の淡路島側に堤防を設置した場合(図-4(b))では、潮汐フロントは湾奥部まで移動し、同時に3.3以下の混合海域が拡大している。一方、本州側に堤防を設置した場合では、混合海域における大規模環流が従来とは逆方向に循環しているにもかかわらず、潮汐フロントの位置は現状地形と比較して変化していない。つまり、混合海域と成層海域とのバランスが従来どおり維持されていることが明らかとなった。また、友ヶ島を掘削した場合でも、潮汐フロントの位置は変化していない。図には示していないが、Case 1, Case 2においても同様の結果が得られ、紀淡海峡における地形改変が成層海域と混合海域の拡がりを与える影響は小さい結果が示された。

(5) 海水交換の特性

図-5は計算開始から50日後における淀川から放出された中立粒子の大阪湾、紀伊水道、播磨灘での存在割合を示す。図中の数値は各海域に分布する粒子数を全粒子で除した値である。現況地形の場合(Case 0)、大阪湾に30%、播磨灘に4%、紀伊水道に66%の粒子が分布する結果となった。紀淡海峡の地形を改変したCase 1~3を比較すると、友ヶ島を水深20mまで掘削した場合(Case 3)、大阪湾における粒子の残留率が18%と最も低い結果となった。また、加太瀬戸と中ノ瀬戸を閉め切っ

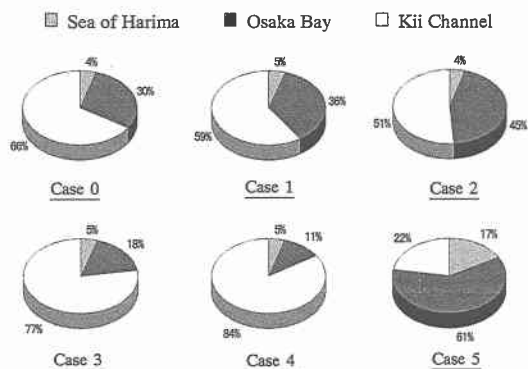


図-5 計算開始から50日後の淀川河川水の分布

た場合 (Case 2) は加太瀬戸だけを閉め切った場合 (Case 1) よりも大阪湾における残留率が9%高い結果となった。同様に、現況地形 (Case 0) と Case 1, Case 2 を比較すると、淀川河川水の大阪湾への残留率は30%から36% (Case 1), 45% (Case 2) と大きくなり、紀淡海峡を閉め切る面積が大きくなれば残留率が高くなる結果が得られた。つまり、水塊の出入り口の面積を狭めることで、開口部における流速は速くなるが、それ以上に、疎通能力の低下が大きいたことが分かった。また、友ヶ島が掘削された場合 (Case 3) は、残留率は18%となり海水交換が促進された。しかし、大規模な地形改変を行った

にもかかわらず現況地形による結果 (Case 0) と比べて約3割の改善であり、紀淡海峡の流動が大阪湾における物質輸送に与える影響は予想以上に小さいことが明らかとなった。この原因は図-4(d)で示したように、明石海峡から発生する沖ノ瀬環流の規模が変化していないために、潮汐フロントの位置が現状地形と比べて変化しておらず、湾奥部に配置された粒子の輸送過程が変化していないためである。

明石海峡に堤防を設置した場合は、堤防の設置場所の違いにより、粒子の存在割合が大きく異なる結果が得られた。本州側に設置した場合 (Case 4)、淀川河川水の大阪湾への残留率は11%となり、現況地形の結果よりも大幅に減少している。これは図-2(b)で示したように、粒子を滞留させる役割を有する時計回りの沖ノ瀬環流の規模が従来よりも小さくなり、反対に、沖ノ瀬環流と渦対を形成する反時計回りの須磨沖反流の規模が大きくなっているためである。したがって、淀川河川水は明石方向に移動し、須磨沖反流にいったん取り込まれるが、水塊を残留させることができずに粒子は紀伊水道へとただちに流出する。一方、淡路島側に堤防を設置した場合には、沖ノ瀬環流の規模が大きくなるため、図-3(b)で示したように沖ノ瀬環流に取り込まれた水塊はそこから抜け出すことができずに、大阪湾内に残留する。この場合、淀川河川水の大阪湾への残留率は61%と最も高くなり、海

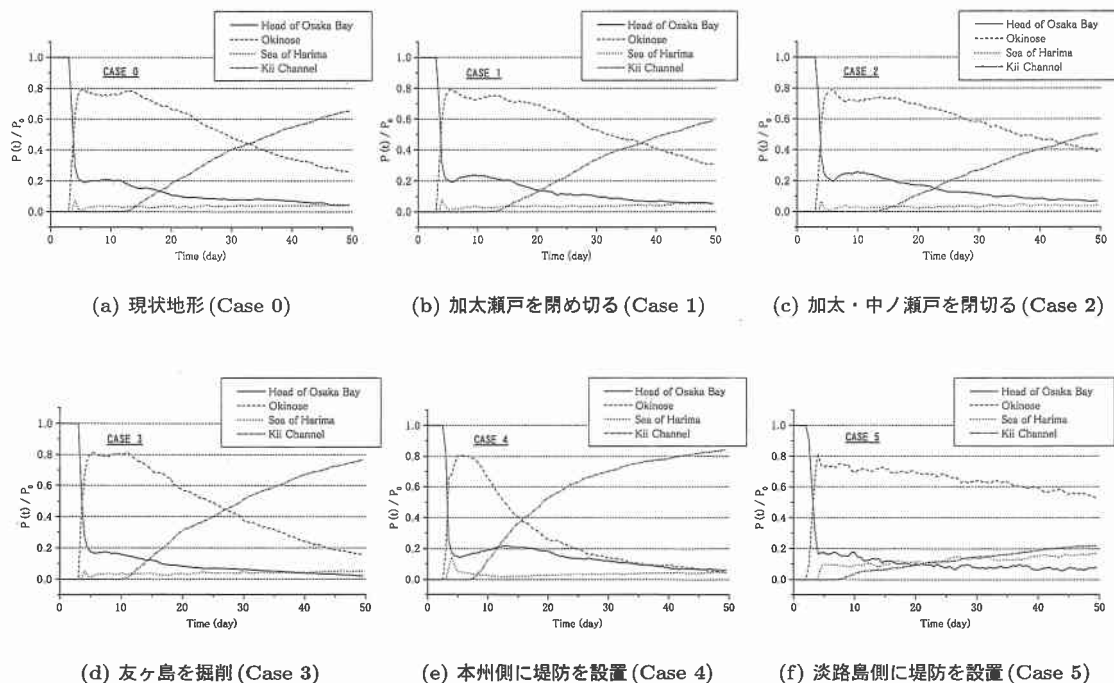


図-6 淀川河口から放出された粒子の大阪湾湾奥部、沖ノ瀬海域、紀伊水道、播磨灘における粒子数の時間変化 (50日間)

水交換が悪くなる。また、播磨灘における粒子の残留率は17%と他のケースと比較して大きくなった。これは、粒子群が沖ノ瀬海域に留まる時間が長くなり、明石海峡における潮流振動により播磨灘まで運ばれたためである。

(6) 湾内水塊の輸送機構

図一6は淀川河口から放出された粒子の大阪湾湾奥部、沖ノ瀬海域、紀伊水道、播磨灘における粒子数の時間変化を示す。 P_0 は投入した粒子の個数、 $P(t)$ は時間 t における粒子の個数である。大阪湾における残留率が低いCase 4では、沖ノ瀬海域に運ばれた粒子がただちに紀伊水道へ流出していることが分かる。また、淀川河口から放出した粒子の5割が紀伊水道へ流出する時間は、Case 0からCase 4まで順に、計算開始から36日、42日、50日、30日、20日である。したがって、紀淡海峡の友ヶ島を掘削するよりも明石海峡の本州側に堤防を設置した方が湾内水塊の交換が早くなる。ここで、Case 5は計算開始から50日後においても22%しか紀伊水道へ流出していない。また、沖ノ瀬海域における残留率が低いCase 4を除いて、沖ノ瀬海域に存在する粒子に対する湾奥部の粒子数の割合は約2割程度で推移しており、粒子がエスチュアリー循環によって湾奥部に輸送されていることが分かる。

4. おわりに

バロクリニック流れの数値実験により、わずか2~3 kmの堤防が大阪湾の流動構造に大きな影響をおよぼす結果が示された。とくに、明石海峡からの強い潮流により励起される沖ノ瀬環流の形状に大きな変化がみられた。淡路島側に堤防を設置した場合、時計回りの大規模渦が従来の大きさと比較して約2倍に拡大した。一方、本州側に堤防を設置した場合では、時計回りの大規模渦が縮小し、反時計回りの流れが広く分布する結果が得られた。これらは混合海域における地形性の流動であり、水理実験と同様の結果であった。

しかし、物質輸送はバロクリニック流れとバロトロ

ピック流れでは全く異なる結果となった。これは、密度流の重要性を示している。とくに、潮汐フロントの位置は成層海域と混合海域との境界を表すことから、成層海域と混合海域の分布を知る上で重要である。また、明石海峡の淡路島側に堤防を設置した場合、神戸沖に運ばれた粒子は、バロクリニック流れでは神戸沖で明石方向へ移動するが、バロトロピック流れでは沖ノ瀬環流の外縁を移動する結果が得られた。

鉛直方向に混合した沖ノ瀬環流は水塊を取り込み滞留させる役割を有するため、沖ノ瀬環流の規模およびそれに伴う成層海域の拡がりが大阪湾の物質輸送に大きな影響を与えることが明らかとなった。したがって、沖ノ瀬環流の規模を変化させる明石海峡の地形改変は大阪湾の海水交換に与える影響が大きいことが示された。一方、紀淡海峡の地形改変では、沖ノ瀬環流の規模が変化しないため、淀川河川水の輸送に与える影響は小さく、湾内の水質改善への効果は小さいことが分かった。

最後に、本研究の実施に際しては、文部省科学研究費補助金(基盤(A)11305036)(研究代表者 中辻啓二)の交付を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 藤原建紀・中田英昭(1990): 大阪湾の流動特性と水質・底質との関連, 海の気象, 第35巻, pp. 58-71.
- 樋端保夫ら(1991): 潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究, 中国工業技術試験所研究報告, 第8号, pp. 48-49.
- 中辻啓二(1996): 海洋: 閉鎖性海域, 数値流体力学, 第4巻, 第4号, pp. 306-332.
- Nakatsuji, K., and T. Fujiwara (1997): Residual baroclinic circulation in semi-enclosed coastal seas, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 362-377.
- Simpson, J. H. and J. R. Hunter (1974): Fronts in the Irish Sea, *Nature*, Vol. 250, pp. 404-406.
- Yanagi, T., S. Igawa and O. Matsuda (1995): Tidal front at Osaka Bay, Japan, in winter, *Continental Shelf Research*, Vol. 15, No. 14, pp. 1723-1735.
- Yuasa, I. and H. Ueshima (1992): A tidal front in winter influenced by river discharge, *Journal of Oceanography*, Vol. 48, pp. 239-255.