

# 大阪湾ベイエリア開発構想に係わる水環境の変化予測

中辻啓二\*・栗田秀明\*\*・狩野晋一\*\*\*・村岡浩爾\*\*\*\*

## 1. ま え が き

大阪湾や東京湾に代表される大都市周辺海域では埋立等が盛んに行われ、海岸地形は大きく変化しつつある。それにとまって海域の環境資源の価値や許容量に大きな変化がみられる。最近では、経済的、政治的、また余暇開発的な利用の方法のみに話題が集中している観がある。湾全体を顧み適切な水環境の保全や創造の見地からの総合的な評価の行われた例は少ない。上嶋ら（例えば、1989）が大型水理模型を用いて地形改変による流況改善技術の系統的な検討を行っているのは特筆に値する。

本研究では、10 m 水深の海域の埋立は既に完了し、さらに大水深での大規模な埋立が立案されつつある大阪湾を対象に具体的な埋立地形を想定して、埋立地形の流動や水質構造に及ぼす影響の定量的な把握を平面2次元数値実験から試みた。また、埋立による潮流の制御の可能性に関しても検討を行った。

## 2. 数値実験の内容

埋立地形の変化に伴う潮流の変化を正確にとらえ、且つ複雑な地形形状を良好に模擬でき、しかも広範囲の流動も狭範囲の流動も同時に同精度で計算する必要がある。これらの理由から、有限要素法による平面二次元潮流・拡散計算を行った。

### (1) 基礎方程式

非圧縮性粘性流体の Navier-Stokes 方程式を水深方向に積分した平面2次元の運動方程式、連続方程式、ならびに拡散方程式は次式のように表される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \varepsilon_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \{ (h + \zeta) U_i \}}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_j \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $x_i$ : 直交座標系 ( $i=1, 2$ ),  $t$ : 時間,  $U_i$ : 流速の  $x_i$  方向成分,  $\zeta$ : 水位変動,  $h$ : 水深,  $\tau_{bi}$ : 海底摩擦力 =  $\gamma_b^2 U_i \cdot \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ ,  $g$ : 重力加速度,  $\gamma_b$ : 海底摩擦係数,  $\varepsilon_j$ :  $x_j$  方向の渦動粘性係数,  $C$ : 物質濃度,  $K_j$ :  $x_j$  方向の渦拡散係数である。

### (2) 有限要素法

格子網を任意の大きさの任意形状に選ぶことが出来るという利点から、重み付き残差法に基づく定式化を採用した（樫木ら、1976, 1977）。屈曲した自然地形形状を平滑に表現するために曲線要素の導入を図り、変数の空間的な離散化に2次多項式であるアイソパラメトリック要素を適用した。最終的には次式に示すようなM個の未知節点値  $\zeta_j(t)$ ,  $U_j(t)$ ,  $V_j(t)$  に関する 3M 個の常微分方程式を離散化した連立一次方程式を解くことになる。

$$\begin{aligned} & \left\{ \theta [A] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right\} \phi_j^{n+1} \\ & = \left\{ (\theta - 1) [A] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right\} \phi_j^n - \{ (\theta - 1) \mathbf{b}^n + \theta \cdot \mathbf{b}^{n+1} \} \\ & \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $\phi_j^n$ :  $n$  時間ステップの  $\{\zeta_j, U_j, V_j\}$ ,  $[A]$ ,  $[C]$ : 係数行列,  $\mathbf{b}$ : 係数ベクトル,  $\Delta t$ : 離散化時間間隔,  $\theta$ : 離散化パラメーターである。通常、 $\theta=0.5$  の Crank-Ni-

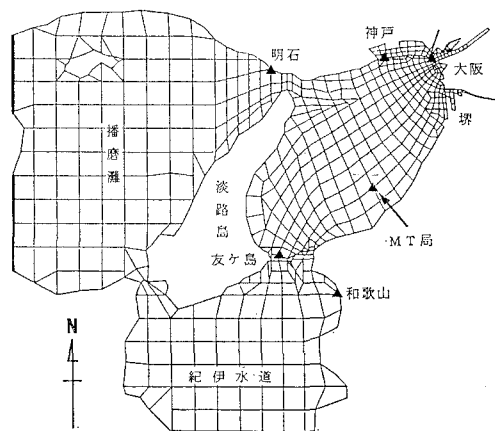


図-1 計算対象範囲

\* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 (株)建設技術研究所大阪支社

\*\*\* 正会員 工修 (株)建設技術研究所大阪支社

\*\*\*\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

表-1 開境界の振幅と位相差

| 位 置   |    | II: 振幅 (cm) | $\kappa$ : 位相差 (°) |
|-------|----|-------------|--------------------|
| 播磨灘北部 | 北端 | 38.0        | 319.0              |
|       | 南端 | 39.1        | 332.1              |
| 播磨灘南部 | 北端 | 38.5        | 324.4              |
|       | 南端 | 35.7        | 333.7              |
| 紀伊水道  | 西端 | 48.0        | 172.0              |
|       | 東端 | 45.9        | 174.1              |

colson 法,あるいは  $\theta=2/3$  の Galerkin 法が使われる。

### (3) モデル海域

計算対象領域は図-1 に示す紀伊水道の北緯  $33^{\circ}50'$  以北, 播磨灘の東経  $134^{\circ}19'$  以東の海域であり, 大阪湾南部海岸性状調査報告書(1980)に倣った。水深は海上保安庁水路部発行の海図から読み取った。要素分割は地形や流況を勘案して慎重に決める必要がある。例えば, 図-1 に示した現況地形の要素の長さは 800 m から 5000 m の範囲であり, 要素数ならびに節点数は 583 と 728 である。つまり, 節点数の 3 倍の未知数を持つ 2184 元連立一次方程式を繰り返して解くことになる。

### (4) 計算条件

潮汐は表-1 に示す半日周潮の振幅と位相差を有する余弦波を播磨灘西端と紀伊水道南端の開境界の両端で与えた。潮汐周期は便宜的に 12 時間とした。境界での水位の時間変化は両端点の内挿値を用いた。河川からの流入量は淀川, 大和川, 左門殿川, 中島川, 武庫川とし, 総量  $377 \text{ m}^3/\text{s}$  である。流速に関する境界条件は開境界で  $\partial U_n / \partial n = 0.0$ , 沿岸境界では  $U_n = 0.0$  を与えた。

水平方向渦動粘性係数  $\epsilon_j$  と渦拡散係数  $K_j$  はリチャードソン数の  $4/3$  乗則に基づき,  $\alpha \sqrt{A}^{4/3}$  (ここに,  $A$  は各要素の面積) で与えた。両係数は場所的, 時間的に変動するが, 標準的には比例常数  $\alpha = 0.005$  とした。ただし, 海峡部では乱れが大きくなり,  $\epsilon_j$  の値は当然大きくなる。その反面, 地形形状を平滑に表現するために有限要素を小さくしているので, 実現象をうまく再現するためには  $\alpha$  の値を大きくする必要がある。最終的には両係数

の値が湾内で  $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 海峡部で  $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$  のオーダーになるように  $\alpha$  の値を調整した。海底摩擦係数  $\gamma_b$  は  $0.0026$  を採用した。離散化時間間隔は CFL 条件から 20 分とし, 計算の定常性を検証して 6 潮汐目の計算結果を考察の対象にした。

数値実験は現況地形と大規模埋立構想, パリア島構想の 3 ケースで実施した。現況の沿岸地形は昭和 55 年時点での海岸地形 (大阪湾南部海岸性状調査報告書, 1980) を基本とした。仮想地形 I は運輸省第三港湾建設局の示した「大阪港湾計画の基本構想 (昭和 60 年)」の埋立構想図に加えて, 関西国際空港島とポートアイランドを結び, その東部を約 22,600 ha を埋め立てる大規模埋立構想である。基本構想の沿岸と幅約 3 km 隔て, 全長約 40 km の水域が残存する。この計算においてのみ河川流量を考慮しなかった。仮想地形 II は基本構想沿岸部の 5~6 km 沖に幅約 1.3 km の島を約 22 km にわたってリング状に連ねて埋め立てるパリア島構想である。

## 3. 現地実測データによる適用モデルの検証

まず, 数値実験の再現性を検証するために, 現況地形で潮流の計算を行った。図-2 は明石海峡での東流最強時を 0 時として 4 時間毎に流速ベクトルを示す。東流最強時に明石海峡から大阪湾に流入した流れは湾全域に広がるが, 主流は淡路島東岸の深溝を通して友ヶ島水道から流出している。神戸沖を東に向かった流れは大きく時計廻りに回り, 泉南沖では沿岸に平行な流れになって友ヶ島水道に至っている。4 時間後は西流最強時 2 時間前であり, 友ヶ島水道から大阪湾への流入量は最大である。流入水は湾全域に広がる傾向にあるが, 淡路島東岸に沿って直接明石海峡に向かう流れと, 泉南沖から湾奥へ向かう流れに分かれる。西流最強時には両者は合流して明石海峡から流出する。8 時間後 (西流最強時 2 時間後) には, 湾奥から須磨沖を明石海峡に向かう流れと, 湾奥から西南に向かい沖ノ瀬を時計廻りに回る流れとが特徴的に観られる。潮流楕円を描いたところ, 大阪湾奥では流速の絶対値が実測値と比較して小さいが, 全体として

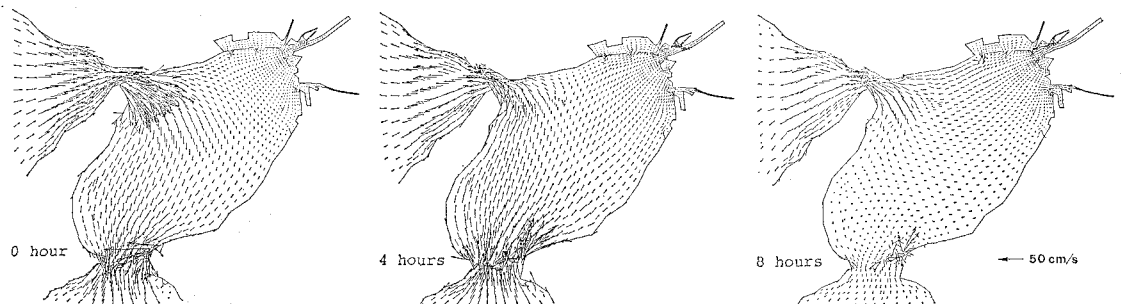


図-2 現況地形での潮流の時間変化

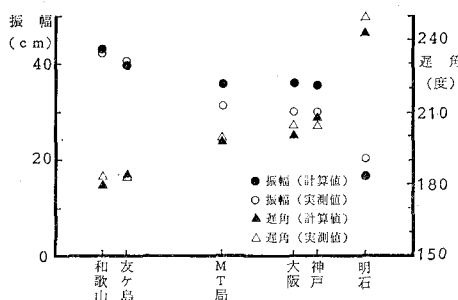


図-3 潮汐の振幅と遅角の実測値との比較

の再現度はよい。

図-3 は図-1 に示した観測地点での潮汐の振幅と遅角の計算結果と実測値との比較を示す。大阪湾奥の振幅が平均して実測値の 85 % と小さいことを除いて、計算結果と実測値とは良好な一致を示している。

#### 4. 大規模埋立構想における潮流特性

図-4 は図-2 と同一の条件で計算した4時間毎の流速ベクトルを示す。大規模な埋立にとまう流況の変化に着目して記述すると、明石海峡東流最強時には神戸沖を東進した流れが埋立造成による断面縮小の効果で埋立北端部で加速され、東向きに流入するのがみられる。また、湾奥の淀川河口や大和川河口から陸岸に沿って南下する流れが顕著にみられる。4時間経過後の明石海峡西流最強時2時間前にも北端部から湾奥に向かう流れが相変わらず観察される。一方、友ヶ島水道から泉南沿岸に沿った流れが埋立地の南端部から湾奥に向かって強くなっている。現況地形で観られた友ヶ島水道から北上した流れが須磨沖で東西方向に分岐する流動は埋立地形においても認められる。図には示さないが、西流最強時には水路南端部から堺付近にかけて湾奥に向かう弱い流れが現れている。8時間後（西流最強時2時間後）の流れは現況地形の流れとは大きく異なり、湾奥から埋立地形の両端部に向かう流れが特徴的に現れる。また、両端部に

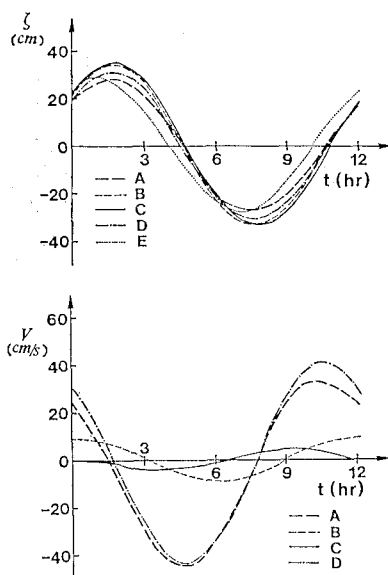


図-5 残存水域内各点での潮位と流速の時間変化

近づくほど、その流速は大きくなっている。

そこで、図-4 に示した埋立地と陸岸に挟まれた残存水域の各点での潮位と流速の時間変化を図-5 に示す。流速  $V$  は埋立地形に沿って湾奥に向かう成分を正符号で表した。潮位変動は明石海峡の大阪側の  $E$  で約 0.6 時間の位相のずれがある程度であり、水域内の 4 点では同じ位相で、同じ振幅で変動しているのがわかる。一方、潮流の駆動力は水面勾配にあることから、流速変動は潮位変動に  $1/4$  周期の位相の遅れをとまって変動する。この傾向は埋立地両端部の  $A$  と  $D$  で顕著である。しかも、両点での振幅もほぼ同じである。つまり、明石海峡東流最強時は 9 時 20 分に対応するから、東流最強 1 時間前から半周期の間に埋立地形の両端から湾奥に流入する流れが生じる。他の時間帯には逆に埋立地形に沿って湾奥から流出する流れが生じている。これに対して、淀川河口 ( $C$ ) や大和川河口 ( $B$ ) では流速の位相は潮位変

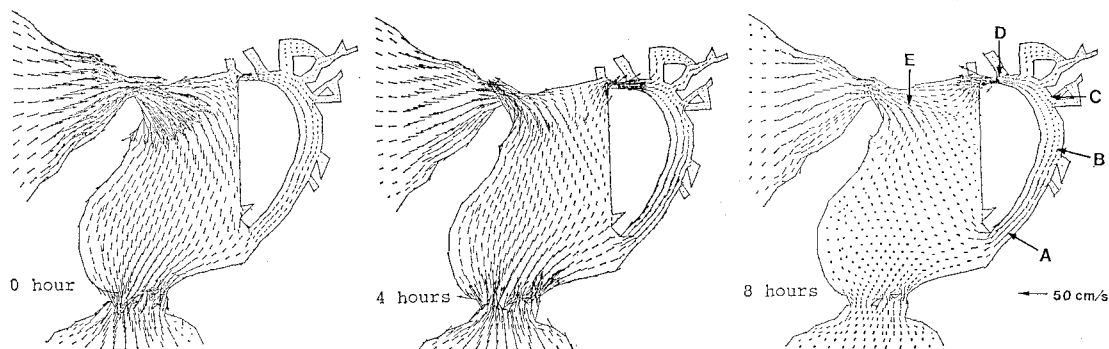


図-4 大規模埋立構想での潮流の時間変化

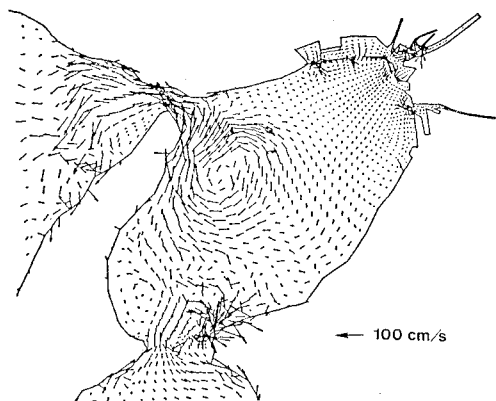


図-6 現況地形での潮汐残差流

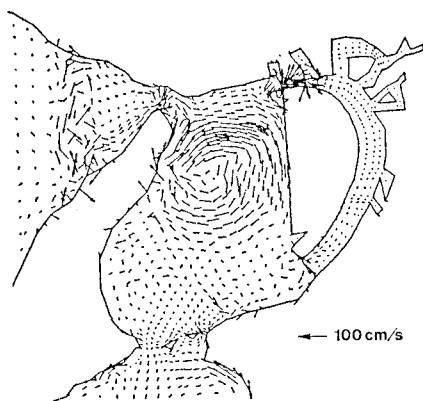


図-7 大規模埋立構想での潮汐残差流

動と対応していない。しかも、その絶対値は非常に小さくなっている。両端部から残存水域に同時に流入してくる流塊がぶつかり合うためであろう。ちなみに、北端部 E での流速を積分することによって得られる行程距離は、流入・流出方向ともに約 6 km である。湾奥部の水塊と大阪湾の水塊との間の交換は期待できないことがわかる。

つぎに、潮汐残差流に及ぼす埋立の影響を比較するために現況地形と大規模埋立地形での計算結果を示したのが図-6, 7 である。大阪湾の潮汐残差流の特徴として時計廻りの沖ノ瀬還流と東岸沿いに南下する流れが挙げられている。この二つの潮汐残差流が図-6 でうまく再現されている。とくに、沖ノ瀬還流の淡路島側の流速は 0.5 m/s 強であり、潮汐の流速に匹敵しているのは注目し値する。

大規模埋立地形ではこの沖ノ瀬還流は循環の規模を拡大して、北端を垂水沖、東端を埋立地、西端を淡路島とする直径約 20 km の円形の循環を形成する。すなわち、沖ノ瀬還流は埋立によって大規模となり、且つ安定化することになる。残存水域内の潮汐残差流はなく、今回の計算では考慮しなかった河川流入量のみによって流動が生起されることになる。仮に平均水深を 6 m として、

河川水が両端に向かって流れると仮定すると、その移流速度は約 0.01 m/s となる。残存水域から湾中央へ運ばれるのに 20 日以上の日数を要することになる。河川水はもちろん密度流効果により海表面を拡がるから、交換日数は短縮されるに違いないが、結局その一部は沖ノ瀬還流に取り込まれ、極めて長期にわたって大阪湾に残存することになる(中辻ら, 1991)。いま一つ注目すべき点は播磨灘東部の潮汐残差流が変化したことである。この程度の大規模な埋立となると、その影響が大阪湾に留まらないことを示唆している。

## 5. バリア島構想による埋立地形での潮流・拡散特性

そこで、残存水域の流動を促進し、且つ潮流の改善・制御の可能性も期待して描いたのが、図-8 で黒塗りで示すバリア島構想である。同図は明石海峡東流・西流最大時の潮流と潮汐残差流の分布を示す。東流最強時(0 時)には、神戸沖に向かって東進する流れが現況と比較して加速されて、バリア島北端部およびバリア島間から湾奥に向かう流れが促進されている。一方、明石海峡西流最強時(6 時後)においても湾奥の淀川・大和川河口から明石海峡に向かう流れが少し加速されている傾向が

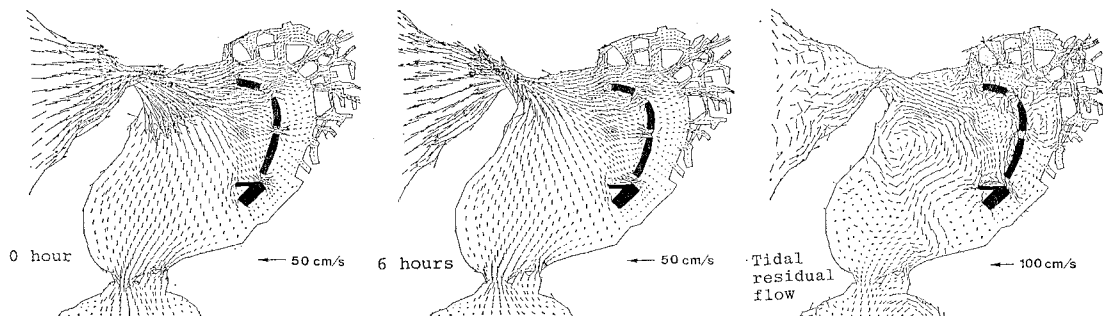


図-8 バリア構想での明石海峡東流・西流最強時潮流と潮汐残差流

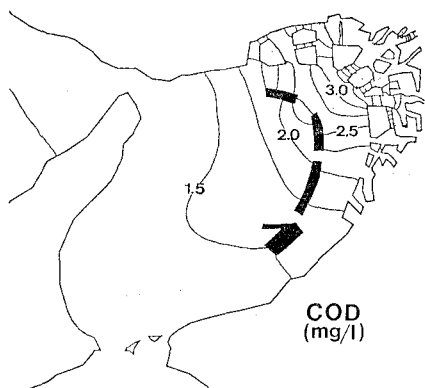


図-9 バリア島構想での50潮汐後のCOD分布

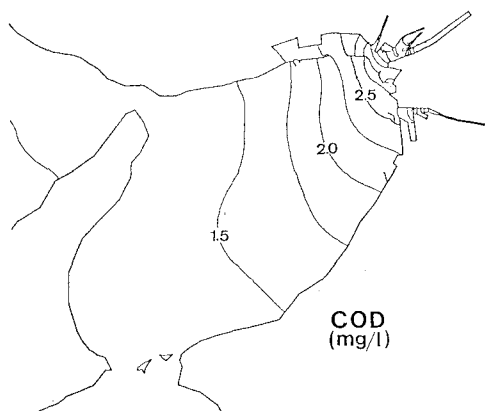


図-10 現況地形での50潮汐後のCOD分布

うかがえる。兩潮時に共通して特徴的なのはバリア島間のフラッシング流動である。この事実は、大阪湾中央と湾奥との間にバリア島群によって水位差が生じることを意味しており、局所的な拡散・混合の促進が期待される。一方、潮汐残差流は図-6, 7と比較して複雑になっている。明石海峡から沖ノ瀬環流を時計廻りに回転しながら南下する流れが現れる。その結果、沖ノ瀬環流の中心は少し淡路島に近づき、淡路島沿岸沿いの流速は小さくなっている。また、堺とバリア島の間で弱い反時計廻りの環流が現れている。物質の輸送の面から考えると、停滞を引き起こす可能性のある循環流である。

そこで、潮汐残差流を移流項としてバリア島構想と現況に対して拡散計算した結果を図-9, 10に示す。ここでの汚染物質はCODを指標として計算しており、湾奥5河川からの流入負荷量ならびに開境界での濃度設定は大阪湾南部海岸性状調査報告書(1980)に基づいた。渦拡散係数は渦動粘性係数と同じ値とし、離散化時間間隔を12時間に設定して、50潮汐の拡散計算を行った。バリア島構想地形での2 mg/l以上の等濃度線が現況と比較して湾奥から沖出しされて拡がっているのが認められる。しかし、1.5 mg/lの等濃度線はほとんど同じ位置に現れる。但し、バリア島構想地形では図-8での潮汐残差流に親られた明石海峡から沖ノ瀬環流の外縁を回る流れに沿って等濃度線が湾中央に少し張り出す傾向にある。

## 6. あとがき

有限要素法を用いた平面2次元数値実験から大阪湾の

具体的大規模埋立地形を仮想して、流動や水質に与える影響を検討した。本研究で想定したような大規模な埋立地形になると、大阪湾の恒流に支配的な沖ノ瀬環流に影響を与えることが明らかになった。汚濁源が湾奥に位置する河川からの流入負荷であることから、埋立によって残存することになる水域での流れや水質が問題になる。このことから、バリア構想での流動や水質を検討した。潮流や潮汐残差流には現況と比較して少し変化がみられたが、当初目論だ明石海峡から流入する水塊の導水効果やバリア島間のフラッシングによる水質混合は期待ほどではなかった。潮流の制御を期待するには、異なった埋立形状で検討する必要がある。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金(重点領域研究(1), 代表者中辻啓二)ならびに日本証券奨学財団の助成金を受けた。記して、謝意を表する。

## 参考文献

- 上嶋英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広・田辺弘道(1989): 大阪湾停滞水域の流況改善技術に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 839-843.
- 運輸省第三港湾建設局関西空港調査室(1980): 大阪湾南部海岸性状調査報告書(通年報告書), pp. 276-331.
- 樫木 亨・中辻啓二・和手信泰(1976): 潮流解析における重み付き残差法の適用について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 488-492.
- 樫木 亨・中辻啓二・和手信泰(1977): 潮流解析における重み付き残差法の適用について(第2報), 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 558-562.
- 中辻啓二・山本信弘・山見晴三・室田 明(1991): 淀川洪水流の振舞いに及ぼす密度流と潮流の相乗効果, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 186-190.