

方向性を持つ底面粗度を用いた潮汐残差流の創造と制御

On Creation and Control of Tidal Residual Current by Bottom Roughness with Directional Characteristic

小松利光*・矢野真一郎**・鞠承淇***・小橋乃子****

By Toshimitsu KOMATSU, Shinichiro YANO, Seung-Gi GUG and Naoko KOHASHI

Water pollution in a semi-enclosed sea area such as a bay or a fishing port due to stagnancy of water has been a serious problem on water environment. We proposed a new method to activate the tidal exchange between an inner and an outer sea area by creation and control of a tidal residual current. In this new method, the tidal residual current is produced and controlled by artificial structures, which change properties of resistance according to a direction of flow, set on the bottom. In this study, several tidal current and particle movement simulations with various arrangements of artificial bottom roughness in a semi-enclosed model bay were carried out. As a result of many kinds of numerical experiments, it becomes clear that it is possible to generate the tidal residual current and to activate the tidal exchange by only operation of bottom roughness.

Keywords :tidal exchange, tidal residual current, Euler-Lagrange method, bottom roughness, water purification

1. まえがき

内湾や漁港のような閉鎖性海域では、湾内水の停滞に起因する水質の悪化が問題となっている。近年、人工構造物を用いて潮流を制御し、外海との海水交換を活性化させて水質の改善を図ろうとする方法が幾つか提案されている。例えば、上嶋ら¹⁾は湾内もしくは湾口付近に防波堤のような構造物を設置し湾内の潮流を制御する方法を、村上ら²⁾は湾口に設置されている防波堤の形状による制御法を、大谷ら³⁾は湾口部の両岸に潮流の剥離を促進させる構造物を設置する方法を提案している。また、栗谷・小松ら⁴⁾は湾内に建設された人工島の背後にできる停滞水域の流動を活性化するために、岸壁に流れの方向により抵抗特性の異なる2次元構造物を配置し、岸に沿って潮汐残差流を発生させる方法を提案している(図-1参照)。これらの方法には、長大構造物を建設することによる景観上の問題や潜堤にした場合の船舶の航行の安全性の問題が、また湾口部の改変による方法や側岸に方向特性のある構造物を設置する方法では潮流を制御できる範囲が限定されてしまうなどの問題がある。また、全てに共通する問題点としては、万が一予想と異なる効果が発生してしまった場合に簡単には構造物を除去することが出来ないことがあげられる。本研究では、上述の問題点を全て解決すべく、流れの方向により抵抗特性が異なる比較的小規模な構造物(以下、底面粗度と呼ぶ)を海底面に並べて沈設することにより、湾内に発生する潮汐残差流を制御するという方法を提案し、その効果について数値解析により検討してみた。

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科

*** 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科修士後期課程

**** 学生員 九州大学大学院 工学研究科修士課程

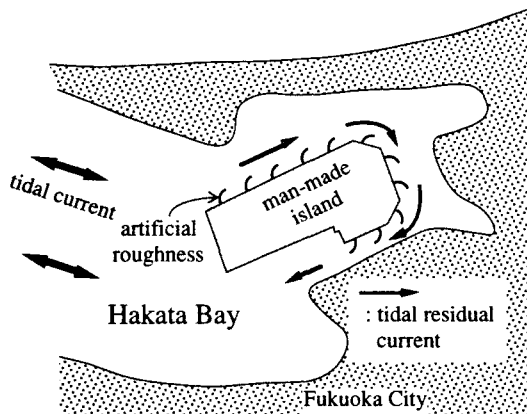


図-1 側壁人工粗度による潮汐残差流の制御法概念図

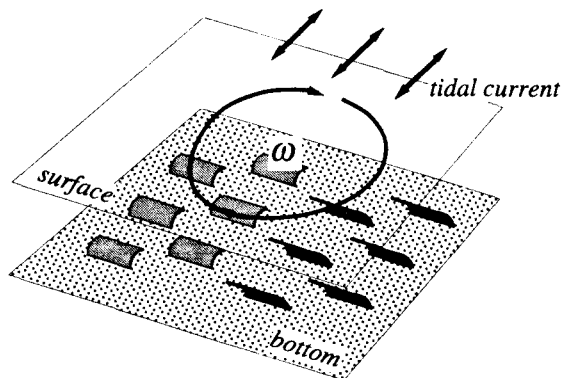


図-2 海底人工粗度による潮汐残差流の制御法概念図

2. 底面粗度について

本研究で提案する方法は、図-2に示すように流れの方向により抵抗が異なる3次元底面人工粗度を湾内の海底面に配置し、潮流が上げ潮・下げ潮のどちらであっても常に同じ符号の渦度を発生させることにより、一周期平均で得られる潮汐残差流を創造・制御しようとするものである。この方法は、湾内において底面粗度を基本的に自由に配置することが可能であるので、海水交換に有利になるように潮汐残差流のパターンを自由にデザインすることを可能とするものである。粗度形状の工夫次第でより大きな粗度差を獲得でき、効率よく潮流を制御できることが期待されるが、その形状については並行して研究中^{5), 6)}であり現在のところまだ最適形状の決定にまでは至っていない。

栗谷・小松⁴⁾は流れの方向により最も抵抗差が大きい側壁2次元構造物について十数種類の形状に関して実験的に調べ、1/2円筒もしくは1/4円筒の形状がそれらのうち最も有効であることを見出している。今回は底面粗度についての情報が無いので、この実験結果を援用して議論を進める。底面粗度の高さを水深の2割程度とした場合に、水深10mの現場で得られる粗度差は、栗谷・小松らの実験結果より換算してManningの粗度係数で0.06程度である。船舶の航行の安全性を踏まえて粗度の高さを水深の1~2割程度に設定すること、3次元構造物を底面粗度として想定していることなどから、これより小さな粗度係数差しか得られない可能性がある。そこで、今回は底面粗度により得られる粗度係数差を0.01に設定して、底面粗度の効果の検討を行った。今回の検討に用いた平面2次元モデルでは、海底摩擦による底面せん断力は次式の様に評価される。

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \gamma_b^2 U |U| \quad (1)$$

ここで、 $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ ：底面せん断力ベクトル、 γ_b^2 ：海底摩擦係数、 $U = (U, V)$ ：水深平均流速ベクトル、 ρ ：海水の密度である。

海底摩擦係数は鷲見⁷⁾によりまとめられた過去の代表的な観測結果より、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ のオーダーと幅広い値が得られている。今回は通常用いられている $\gamma_b^2 = 0.0026$ を基準値として用いた。海底摩擦係数とManningの粗度係数 n の関係は次式で表される。

$$\gamma_b^2 = \frac{n^2 g}{h^{1/3}} \quad (2)$$

よって、水深を10mとした場合には粗度係数は $n = 0.024$ と換算される。今回は、底面粗度を設置した場合の海底摩擦係数がどの程度になるのかがまだ明らかでなかったため、 $n = 0.024$ を底面粗度を設置していない通常の海域ならびに底面粗度を設置した海域における順流（抵抗が小さい方向の流れ）に対する粗度係数とした。よって、逆流（抵抗が大きい方向の流れ）に対する粗度係数は $n = 0.034$ ($\gamma_b^2 = 0.0053$)となる。

3. 潮流シミュレーション

方向特性を持つ底面粗度の配置により、潮汐残差流のパターンを変え得るかどうかを確認するために、図-3に示したモデル湾においてADI法による平面2次元潮流シミュレーションを行った。計算条件は、計算格子間隔： $\Delta x = \Delta y = 500$ (m), 時間格子間隔： $\Delta t = 15$ (sec.), 渦動粘性係数： $\nu_t = 100.0$ ($\text{m}^2/\text{sec.}$), コリオリ係数： $f = 0$ (sec.^{-1})とした。境界条件は、開境界 B-C で振幅： $a = 1.0$ (m), 周期： $T = 12\text{hr. } 25\text{min.}$ の正弦波を与え、開境界 A-B, C-D で $U = 0, dV/dx = 0$ を、壁面境界上では no-slip 条件を与えている。

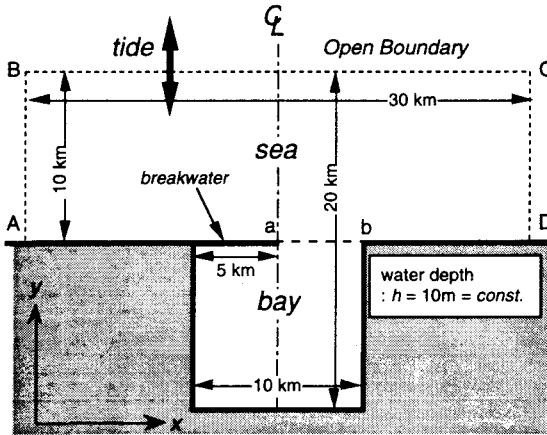


図-3 モデル湾概略図

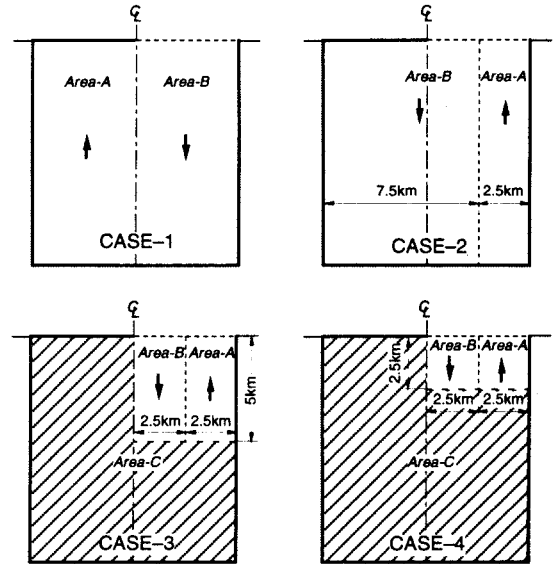


図-4 モデル湾における底面粗度の配置

今回は、湾内のみに底面粗度を配した場合を検討の対象とし、図-4に示す CASE-1~4 と CASE-0 として粗度を配置しない場合の5つのケースについて計算を行った。粗度の配置の仕方は、図-4に示すArea-A,Bについては矢印の方向を順流方向に、例えば Area-A では流速のy軸の正方向成分に対して $\gamma_p^2 = 0.0026$ を、負の方向に対して $\gamma_p^2 = 0.0053$ を与えて抵抗差を表している。ただし、CASE-4 については逆流に対して粗度係数差を2倍にして $\gamma_p^2 = 0.0088$ ($n = 0.044$) を与えた。また、斜線部分のArea-Cは粗度を配置しない水域である。

1周期分の潮流の計算結果を平均することにより得られた潮汐残差流とその流線の計算結果をCASE-0, 1, 4についてのみ図-5に示す。CASE-1では、CASE-0で湾内に既に存在していた湾スケールの循環流が強化され

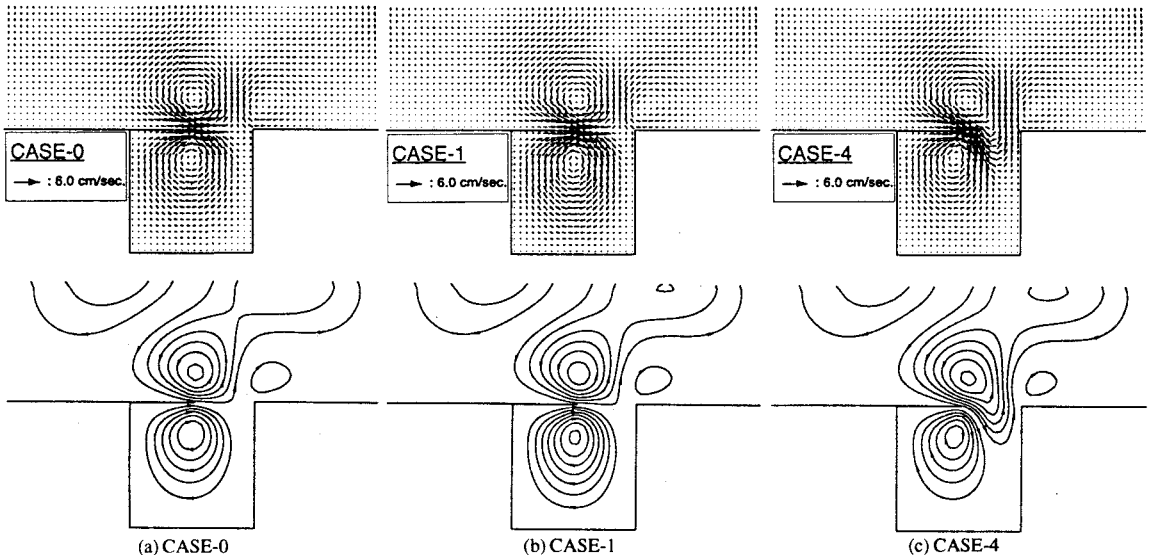


図-5 潮汐残差流の計算結果 (上段：ベクトル図、下段：流線図)

ているのが分かる。紙幅の関係上示してはいないが CASE-2, 3 では、CASE-4の結果と同じように外海に発達した循環流が湾内部にまで侵入していた。このことは、粗度の配置を工夫することと抵抗差の大きい形状を持つ粗度を開発することで、潮汐残差流をより効率よく制御できることを示唆している。また、CASE-1 のように湾内の循環流を強化するだけではなく、CASE-2, 3, 4のように湾口付近の外海の循環流を変化させて湾内へ侵入させ湾内の循環流と混合させることが外海との海水交換をより活発化させるものと予想される。

4. Euler-Lagrange 法による海水交換率の評価

4.1 Euler-Lagrange 法と海水交換率

次に、底面粗度による潮汐残差流の制御が海水交換へ及ぼす影響について調べるために、湾内に標識粒子を配置し粒子追跡計算（Euler-Lagrange 法）を行った。各時刻における粒子の位置ベクトルは (3) 式により計算された。

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = \mathbf{X}(t) + \Delta t \cdot \mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t) + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{D\mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t)}{Dt} \quad (3)$$

ここで、

$$\frac{D U_i(\mathbf{X}(t), t)}{Dt} = \frac{\partial U_i(\mathbf{X}(t), t)}{\partial t} + \mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t) \cdot \nabla_H U_i(\mathbf{X}(t), t) \quad (4),$$

$\mathbf{X}(t)$, $\mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t)$ は各時刻の粒子の位置ベクトルとその位置における流速ベクトル、 $\nabla_H = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ である。

3.において各CASE について得られた1 周期分の流速データを基に標識粒子の移動は計算された。計算時間間隔は粒子の移動距離が1 メッシュ以上にならないように $\Delta t = 150\text{sec}$ と設定された。境界付近の処理は、壁面で粒子は完全反射し、開境界から流出した粒子は再び計算領域内へは戻らないものとした。また、乱流拡散・移流分散による効果は今回の計算には取り入れなかった。なお、乱れの海水交換率への影響についてはAwaji[®]により言及されており、それによると粒子の拡がりには影響するが海水交換率にはあまり大きく影響はしないと報告されている。

海水交換率を評価する境界線は図-3 に示す湾口部のライン a-b とする。標識粒子をラインより湾内側全域に1 メッシュ (500m×500m) 当たり25 個、計10,000 個配置し、下げ潮最強時から始まる1 潮汐間にわたって各粒子の軌跡を計算する。今里[®]は潮汐の1 周期間で境界線よりも外側へ出た粒子が代表する湾内水の体積が最大となるとき（通常は最干潮時付近）の体積を V_{max} 、1 周期後の下げ潮最強時にライン外側に残っている粒子が代表する体積を V_{res} とし、海水交換率を次式で定義している。

$$EX = \frac{V_{res}}{V_{max}} \quad (5)$$

本研究では、この海水交換率EX により底面粗度の効果を評価した。

粒子追跡計算結果の一例としてCASE-0 とCASE-4 の V_{max} と V_{res} が得られた時刻の湾口部付近の粒子の分布を図-6 に示す。また、各CASE において得られた V_{max} 、 V_{res} 、海水交換率EX の値を表-1 に示す。この結果によると、CASE-4 が最も海水交換が活発化されており、海底粗度を敷設しない場合 (CASE-0) の約2 倍の交換率が得られている。CASE-4 は粗度を配置した面積は最も小さかったが粗度差を他のCASE より大きく設定したものであったことより、海水交換率を大きくするには湾口付近に局所的に強い粗度差を与えて渦度の発生を促進させることが重要であることが推定できる。

表-1 各CASE の V_{max} , V_{res} , EX の値

CASE	V_{max} (10^6 m^3)	V_{res} (10^6 m^3)	EX (%)
0	103.1	13.9	13.5
1	103.0	14.7	14.3
2	103.4	19.1	18.5
3	103.2	19.2	18.6
4	103.2	26.1	25.3

4.2 湾内水の滞留について

次に、湾内水の長期的な交換能力について比較するために、粒子追跡計算を60周期（約1ヶ月）にわたって

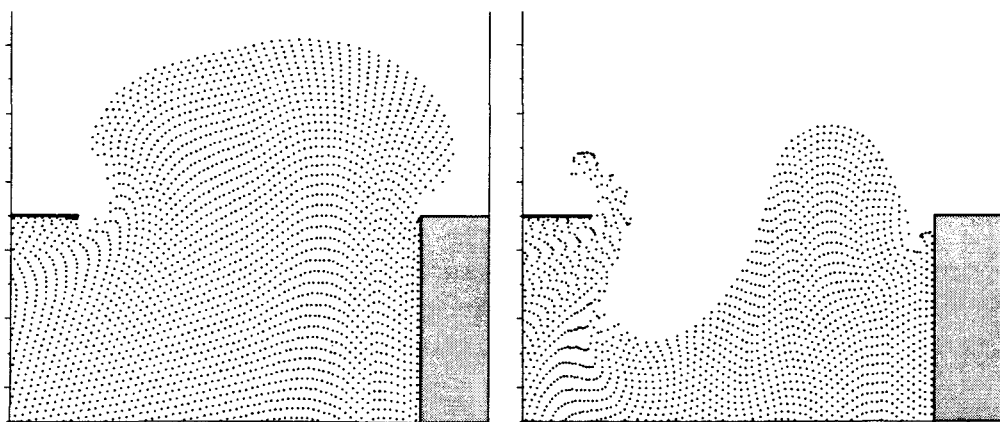
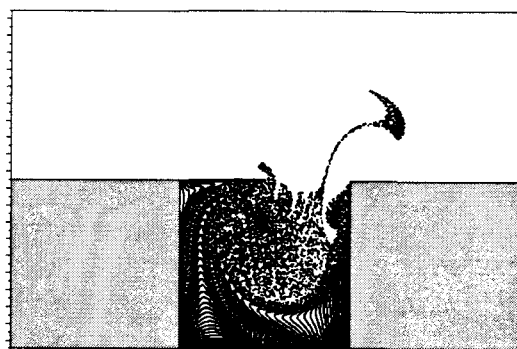
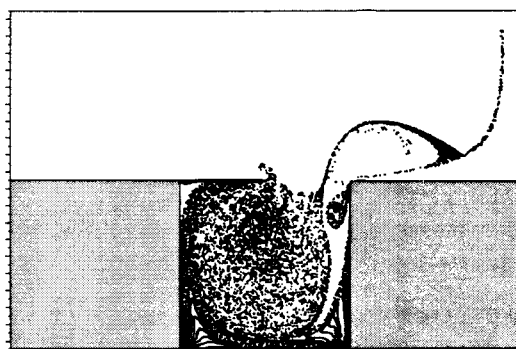


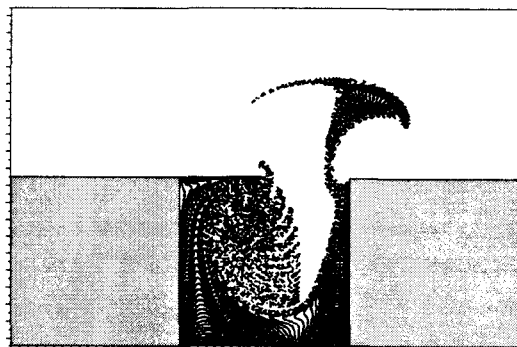
図-6 粒子追跡計算の計算結果 (CASE-4) (左図: V_{max} が得られた時刻、右図: 1 周期後の最大下げ潮時)



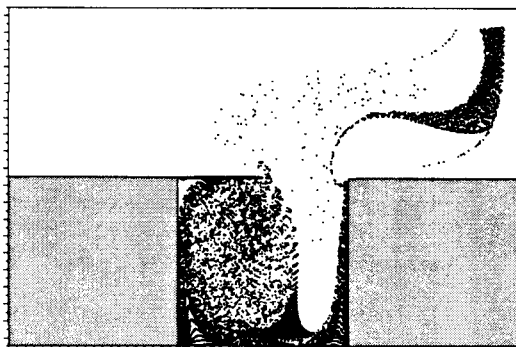
(a) CASE-0: 15 周期後



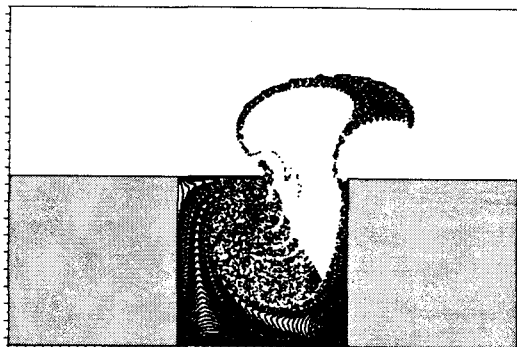
(b) CASE-0: 60 周期後



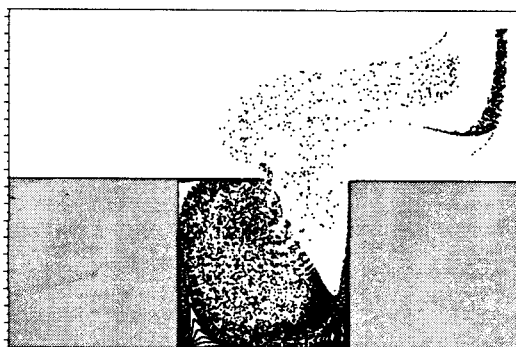
(c) CASE-2: 15 周期後



(d) CASE-2: 60 周期後



(e) CASE-4: 15 周期後



(f) CASE-4: 60 周期後

図-7 粒子追跡計算の計算結果 (上段: CASE-0、中段: CASE-2、下段: CASE-4)

行った。初期時刻から15周期後と60周期後の最大下げ潮時の粒子の分布をCASE-0, 2, 4について図-7に示す。また、初期時刻に湾内に配置された全粒子のうち各周期の最後の時刻（最大下げ潮時）に湾内に存在している粒子残存率の経時変化を図-8に示す。

これらの結果を比較すると、比較的初期の段階では海水交換率の大きいCASE-4が湾内水を外海に流出させる能力が大きいことが分かるが、10周期を過ぎると外海への流出が少なくなっている。20周期程度からはむしろCASE-2の方が残存率が下がっており、長期間

にわたる交換能力は最も優れているという結果になった。CASE-2が湾口から湾奥まで粗度を配置していたのに対しCASE-4が湾口部付近にのみ強い抵抗差を与えていたことを考えると、閉鎖性海域の海水交換の促進には湾口部の海水交換能力の引き上げと湾全体にわたるスケールの循環流により湾奥部の海水を湾口部付近に運ぶ機能の2つが必要であることが分かる。これらを両立させる底面粗度の配置パターンを解明することが底面粗度による海水交換促進技術の発展にとって急務であると言えよう。

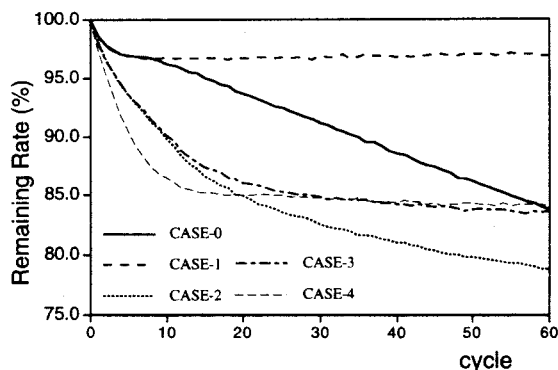


図-8 粒子残存率の時系列変化 (CASE-4)

5. 結論

方向特性を持つ底面粗度を湾内に配置することにより潮汐残差流のパターンをコントロールできることが数値解析により分かった。また、海水交換を活発化出来ることも粒子追跡計算により確認された。このことは、従来空間的に一様として与えられていた海底摩擦係数の分布の重要性をも示唆するものである。本研究は比較的単純な地形をもち成層化の影響もないものと仮定されたモデル湾におけるものであり、比較的有利な条件下で検討されている。今後は、実際の閉鎖性内湾における検討と3次元シミュレーションによる成層や風の影響を取り入れた検討を行う必要があると考えられる。

最後に、本研究は（財）服部報公会の研究助成の下に行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1). 上嶋英機、橋本英資、田辺弘道、宝田盛康：流況制御構造物設置による流況制御技術の効果検証実験—瀬戸内海大型水理模型による別府湾・大阪湾での実験結果—, 海岸工学論文集, 38, pp. 851-855, 1991.
- 2). 村上和男、菅沼史典、宮崎啓司、山田邦明、清水勝義：潮汐エネルギーを利用した海水交換促進に関する水理模型実験, 水工学論文集, 37, pp. 411-418, 1993.
- 3). 大谷英夫、高山百合子、石野和男、勝井秀博、宝田盛康：流況制御のための湾口渦と水平循環流に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 42, pp. 1221-1225, 1995.
- 4). 栗谷陽一、小松利光、川崎昌三、朝位孝二、藤田和夫：人工粗度を用いた恒流の生成に関する研究, 水工学論文集, 39, pp. 589-594, 1995.
- 5). 小橋乃子、鞠承淇、小松利光、矢野真一郎、藤田和夫：方向性をもつ海底人工粗度による潮汐残差流の制御について, 土木学会第51回年次学術講演会, II, pp. 212-213, 1996.
- 6). 小松利光、矢野真一郎、小橋乃子、鞠承淇、藤田和夫：流れの方向により抵抗特性の異なる人工粗度の開発, 水工学論文集, 41, 1997.
- 7). 鷺見栄一、橋間元徳：沿岸海域における海底摩擦係数の評価, 公害資源研究所彙報, 12 (2), pp. 63-74, 1982.
- 8). Awaji, T.: Water Mixing in a Tidal Current and the Effect of Turbulence on Tidal Exchange through a Strait, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.12, pp. 501-514, 1982.
- 9). 今里哲久：海水交換の概念と交換率, 沿岸海洋研究ノート30周年記念特別号, pp. 111-123, 1993.