

流れを偏向させる働きをもつ偏流型粗度 を用いた潮汐残差流の創造

GENERATION OF TIDAL RESIDUAL CURRENT USING
THE BOTTOM ROUGHNESS TO BEND FLOW DIRECTION

小松利光¹・鞠 承淇²・小橋乃子²・和田真人³・矢野真一郎⁴

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

¹フェロー 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)

²学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程水工土木学専攻 (同上)

³学生員 九州大学大学院 工学研究科修士課程建設システム工学専攻 (同上)

⁴正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科 (同上)

Nowadays in most of semi-enclosed bays water qualities have been deteriorated. We have proposed the method to create and control the tidal residual current by bottom roughness for activating the tidal exchange. In this paper we introduced the new type of bottom roughness with a function to bend the flow direction and experimentally developed the most effective shape. Next we tried to examine the effect of the bending roughness by numerical simulation in the model bay. As a result, it is made clear that quarters of the cylinder arranged in two rows can get the large drag force in the normal direction of the flow and that the tidal exchange is promoted by the combination of the bottom roughness and the bending roughness.

Key Words: Bottom roughness, Bending flow, Tidal exchange, Tidal residual current, Water purification

1. 緒言

内湾における赤潮の発生や富栄養化などに代表されるように、我が国の沿岸域における水質問題は依然として深刻な状況にあると言える。特に大都市の窓口として発展を遂げる都市港では、背後地域からの大きな負荷に加え、埋め立てや人工島建設などによる港内の利用が進められており、水質の一層の悪化が懸念されている。

そこで、著者ら¹⁾は水質悪化が問題視されている海域の多くが閉鎖性あるいは半閉鎖性海域であることに着目し、外海と内湾の海水交換を促進させることで水質改善を図る方法を提案している。この手法は比較的小規模な構造物を複数個海底面に設置することで流れの創造・制御を行い、潮汐残差流を平面的にデザインすることにより最も効率的な海水交換を実現しようとするものである。

潮汐残差流を制御する構造物としては、流れの向きに対して非対称な形状をもつ三次元海底構造物(以下、主方向粗度と呼ぶ)が考えられており²⁾、形状の非対称性がつくる抵抗差によって潮汐残差流が

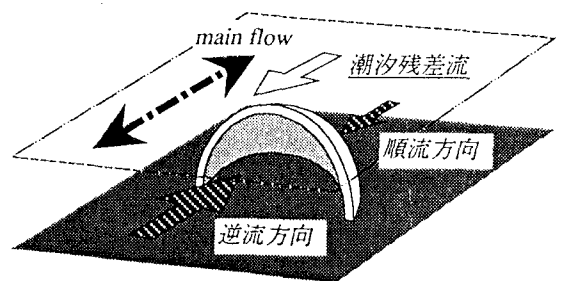


図-1 主方向粗度のイメージ図

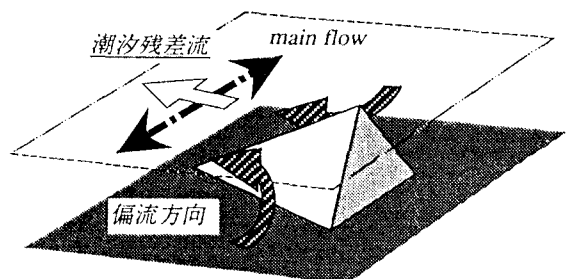


図-2 偏流型粗度のイメージ図

生成される(図-1参照)。粗度の配置を適宜変えることで潮汐残差流の流況パターンをアレンジすることが可能である²⁾が、主方向粗度は主流方向成分以外の潮汐残差流には直接的に寄与することができない。そこで、より積極的・効率的な流況制御を実現するために、流れの一部を偏流成分に変換し、主流方向以外の潮汐残差流を直接創造できる海底構造物(以下、偏流型粗度と呼ぶ)の開発を試みた。図-2の例に示すように偏流型粗度は上げ潮・下げ潮に関わらず常に同じ方向に流れを誘起することが可能であり、従来の主方向粗度とは潮汐残差流の生成機構が異なっている。そのため、偏流型粗度と主方向粗度を目的に応じて使い分けたり、組合せて用いることによって更に柔軟で効率的な潮汐残差流の生成が期待できる。

本研究では任意の方向に対して潮汐残差流の生成を促すため、各方向に対応した偏流型粗度の開発を目指しているが、ここではその第一段階として主流と直交する方向に偏流効果をもつ粗度を対象とし、各粗度の抵抗特性を室内水理実験により検討した。更に、得られた結果を基に、偏流型粗度の海水交換に対する寄与を調べるための潮流・拡散シミュレーションを行った。

2. 偏流型粗度の抵抗特性を調べる実験

(1) 実験方法及び実験装置について

図-3に示すように、流下方向に L 軸を、それと直交する方向に T 軸をもつ右手系の TL 平面座標系を考える。流れに対して傾きをもつ平板が存在する場合、流れ方向の抵抗力 F_L だけでなく流れと直交する方向にも抵抗力 F_T が働く。この結果、元々の流下方向から流れは偏向することになり、 F_T が大きくなるに従って偏流効果も大きくなっていく。そこで、偏流型粗度のもつ抵抗特性を調べるために、定常一方向流れの中に粗度を設置し、抵抗を直接計測する室内実験を行った。

室内実験には小松ら²⁾が主方向粗度の抵抗特性を調べるのに利用したアクリル製水路(長さ6.0m, 幅0.5m, 高さ0.5m)を用い、水路上流端から3.5mの地点に、小型三分力計(株)三計エンジニアリング製LB25-1000, 直径3cm, 高さ8cm)を設置し、粗度に働く流体力(抵抗力と同じ大きさで向きが反対の力) $D_T = -F_T$, $D_L = -F_L$ の測定を行った。三分力計は最大 $9.8\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ までの流体力を3方向同時に測定することが可能であるが、今回は水平面内の直交する2方向の流体力成分を測定した。実験に用いた粗度は三分力計のセンサー部に取り付けられたフランジに固定されており、三分力計を水路床内部に納めることで平坦な水路床に粗度を設置した状態を作った(図-4参照)。

(2) 各粗度形状の抵抗力の評価(実験1)

偏流型粗度としての効率的な単体形状を開発す

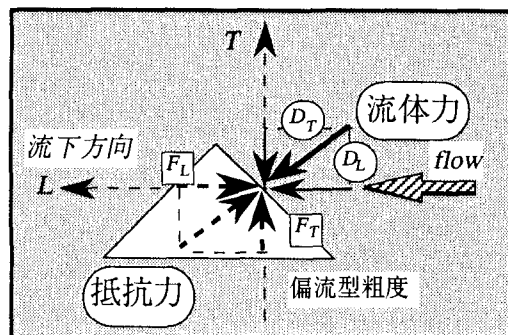


図-3 抵抗力測定における座標系(平面図)

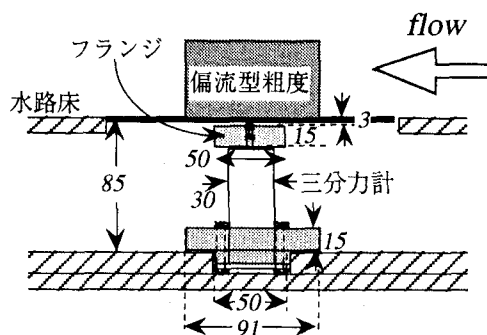


図-4 粗度の設置状況と三分力計
(側面図・単位 mm)

るため、図-5に示すような8種類の粗度形状について、偏流成分の生成能力を表す流体力 D_T をそれぞれ計測して比較した。

今回対象とした粗度は、偏流効果をもつと思われる中で最もシンプルな形状である三角柱(粗度No.1)に加え、1/2四角柱(粗度No.2)、1/4円筒(粗度No.3, 4)、また円筒形もしくはその組合せよりなる粗度に対して上板を取り付けたもの(粗度No.5~7)、更に、2枚の平板を直交させたT字型(粗度No.8)であり、これらについて検討を行った。また、今回は主流方向と直交する方向に偏流効果をもつ粗度のみを対象にしていることから、一潮汐平均後に偏流成分のみが残るように、流れを偏向させる2つの面を面対称構造とした。

実験は図-5において、紙面右手から左手方向に流れがある場合について行い、 Re 数と相対水深 h/k (水深と粗度高さの比)をそれぞれ独立に変化させることで各粗度の抵抗特性の比較を行った(表-1参照)。結果を図-6に示す。偏流面の存在によりどの粗度形状も偏流効果をもっていることが分かる。また、いずれの D_T も負の値を示していることから、流体は粗度から T 軸の正の方向に抵抗力を受けることになり、流れは T 軸方向に運動量を与えられて偏向していくものと考えられる。

なお、1/4円筒の内側の曲面をもつ形状では、単構造と二重構造とでは D_T の値が大きく異なり、1/4円筒を二列重ねて配置した粗度形状No.4, 5, 7が大きな偏流効果をもっていることが分かった。上板の有無による流体力の違いはそれ程見られないことを考慮すると、1/4円筒を二列に重ねることにより2列間の流れが拘束・抑制されて偏流効果が大きくなった

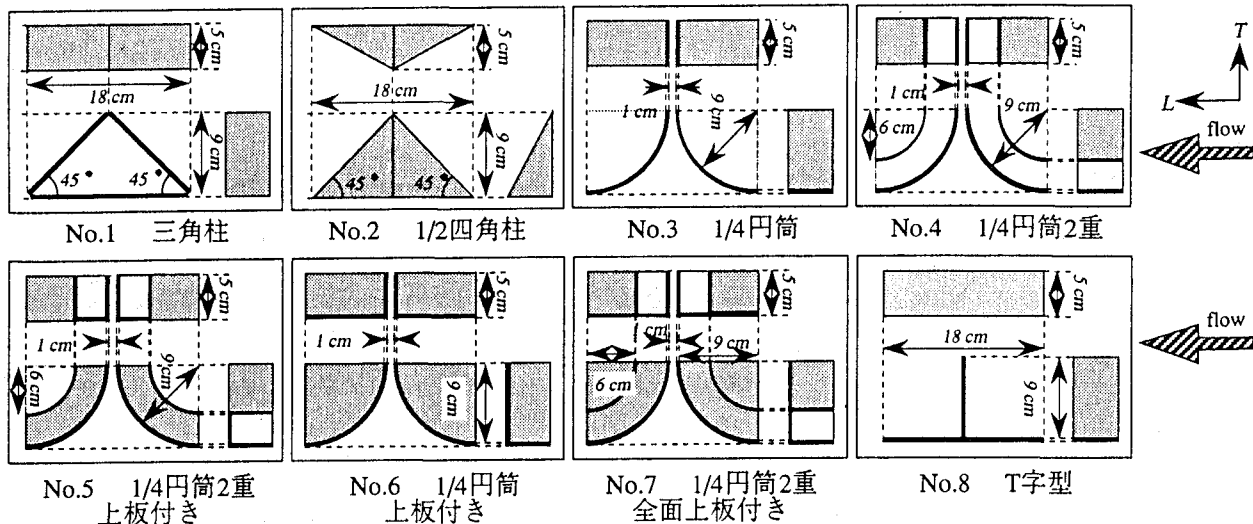


図-5 各粗度の形状

(図は反時計回りに上から、T方向から見た投影図、水路上部から見た平面図、L方向から見た投影図を表している)

表-1 実験条件 (実験1)

実験番号	Reynolds数	相対水深 h/k
Case 1	7×10^4	4, 4.5, 5, 5.5, 6
Case 2	8×10^4	4, 4.5, 5, 5.5, 6
Case 3	9×10^4	4, 4.5, 5, 5.5, 6

というよりも、流体力を受ける面の表面積が大きくなったために偏流効果が強化されたものと考えられる。

次に、T方向とL方向の流体力の比 D_T/D_L について検討を行った。各粗度形状と各Re数に対して、5通りの h/k についての平均的な D_T/D_L の値を算出し、比較を行った。結果を図-7に示す。同程度の偏流効果をもつ場合には、粗度による主流のエネルギーの減衰が小さい方が好ましいことから、 $|D_T|$ と D_T/D_L の両方共に大きな値をもつ粗度がより効果的であると考えられる。1/4 円筒の内側の曲面をもつ形状は、 D_L の値にほとんど違いがないため、 D_T/D_L についても、図-6の結果と同様に粗度形状No.4, 5, 7が大きな値を示している。以上の結果より、今回の実験の範囲では1/4 円筒を二列重ねて配置した粗度が最も効率良く偏流効果を生じさせる粗度となっている。得られた結果を基に、更に効果的な形状を新たに開発することも可能ではあるが、最も効果があった粗度4のT方向の抗力係数は、有効な主方向粗度で得られる抗力係数差 ΔC_d と同程度の値 ($C_{dT} = 0.6 \sim 1.0$ 程度) を示していることから、偏流型粗度4でも十分有効な潮汐残差流を生成することが可能であると考えられる。

(3) 流向と偏流効果の関係 (実験2)

実験1では、粗度の対称軸が潮流往復流の主流軸と直交する場合についての抵抗特性を調べた。しかし、実際の海域では流軸が一定ではなく、潮流楕円を描くのが一般的である。そこで、実験1で最も効

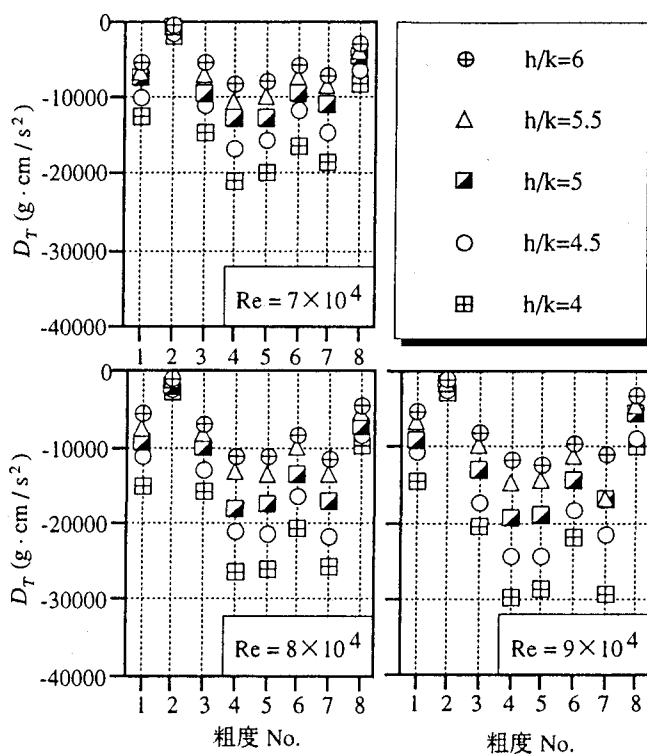


図-6 各粗度形状の D_T の比較

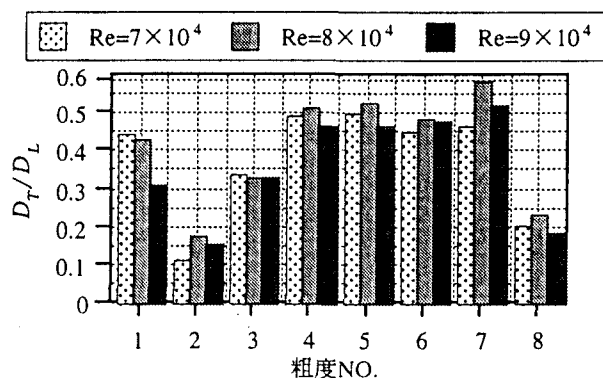


図-7 各粗度形状の D_T/D_L の比較

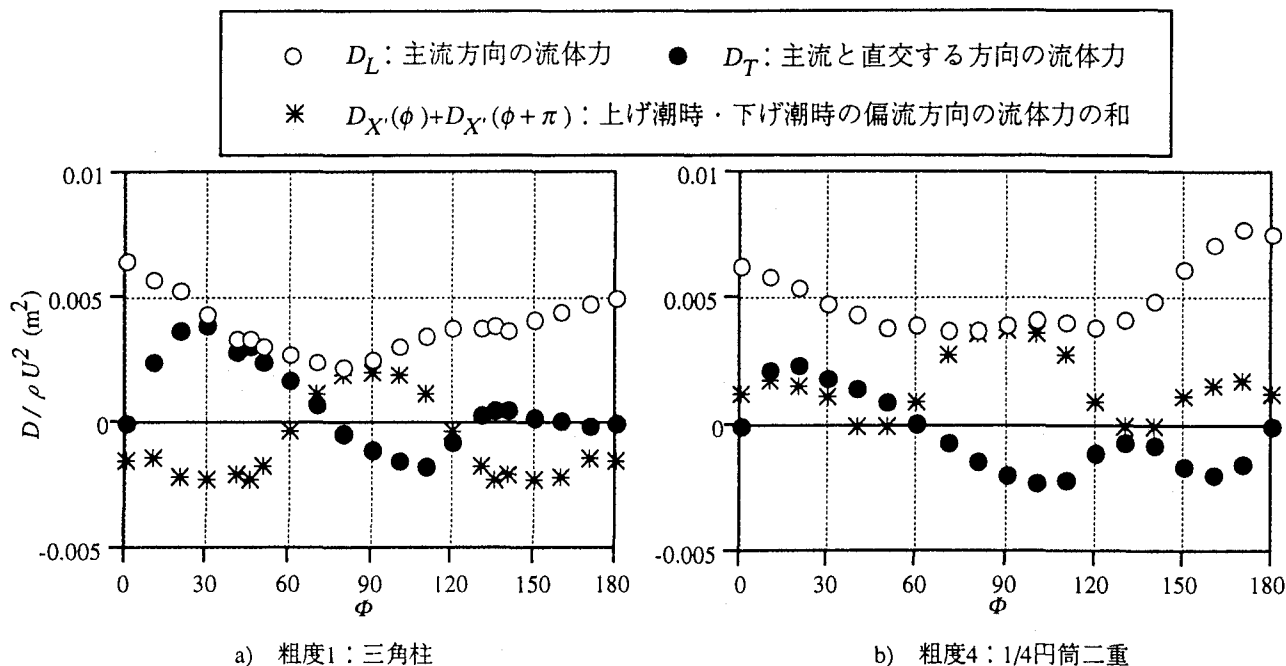


図-8 流れの入射角変化による偏流効果の特性

果のあった粗度4と基本形状である粗度1について、相対水深を $h/k=5$ に固定し、Reynolds数 $Re = 7.5 \times 10^4$ 、 8.5×10^4 の2通りの条件下で、粗度に対して流れの方向を変化させた場合の抵抗特性を調べた。粗度に固定された X' 軸(対象軸)と流速ベクトルのなす角を ϕ (図-9中において $\phi = \theta - \alpha$)とし、 $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ の範囲でほぼ 10° 毎に角度を変化させて、 L 方向及び T 方向の流体力 D_L 、 D_T の測定を行った。今回の実験では Re 数による違いはほとんど見られなかったため、平均値を図-8に示した。また、得られた結果から角度 ϕ と $\phi + \pi$ の上げ潮・下げ潮時の X' 方向の流体力 $D_{X'}(\phi)$ 、 $D_{X'}(\phi + \pi)$ の和を求め図-8に示した。粗度1、粗度4とも $\phi = 60^\circ$ 付近から $\phi = 120^\circ$ 付近まで $D_{X'}(\phi) + D_{X'}(\phi + \pi) > 0$ ($F_{X'}(\phi) + F_{X'}(\phi + \pi) < 0$)となり $-X'$ 方向に偏流効果をもっている。本研究で対象としている偏流型粗度を実際の潮流場に設置する場合、潮流楕円の長軸方向(主流方向)と Y' 軸が一致するように設置することになる。その場合、 $\phi = 90^\circ$ 付近の入射角の時に最も流速が大きいときに相当する。図-8において $\phi = 90^\circ$ 付近の $D_{X'}(\phi) + D_{X'}(\phi + \pi)$ の変化を見ると、大きな正の値を有していることが分かる。これより粗度1、4ともに有効な偏流効果が期待できる。

3. 偏流型粗度を用いた潮汐残差流の生成

(1) 偏流型粗度の設置効果のモデル化

形状抵抗を評価するための抗力係数は Re 数に依存するが、 $Re=1 \times 10^5$ 付近以上になると各粗度毎にはほぼ一定値を示すようになる³⁾。2章で得られた実験結果は比較的高 Re 数の条件下で得られたものであるため、この結果を基に偏流型粗度の抵抗特性を以下のようにモデル化し、運動方程式中の外力項として取り扱うことにした。

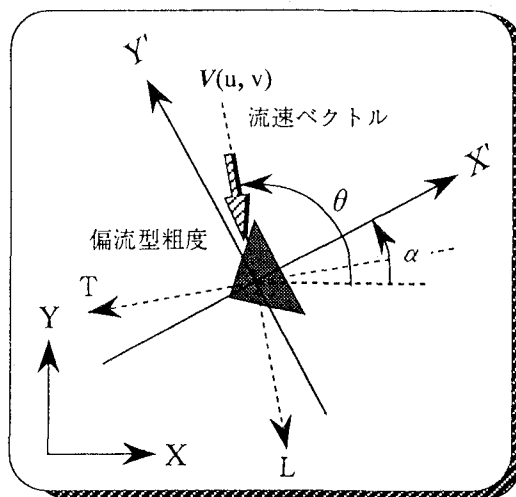


図-9 各座標の関係

図-9に示すような固定平面座標系 $X-Y$ 、粗度に固定された平面座標系 $X'-Y'$ 、更に、2章と同様に流向によって定義される $T-L$ 座標系を用いた。流速ベクトル $V(u, v)$ と X 軸とのなす角を θ 、 $X'-Y'$ 座標系の $X-Y$ 座標系に対する反時計回りの回転角を α とした。

模型と原型の抗力係数は高 Re 数の条件下では一致することから、流れ方向に垂直な面への粗度の投影面積 A を用いると、流体力の $T-L$ 方向の成分は以下のように表すことができる。(添え字 p は原型を示す。)

$$(D_{TP}, D_{LP}) = \frac{|V_P|^2}{|V|^2} \frac{A_P}{A} (D_T, D_L) \quad (1)$$

ただし、 A, A_p はいずれも θ によって変化する量であるが、その比 A/A_p は θ には依存せず、実験(模型)と実物(原型)の粗度のスケール比によって一意的に決定される。 D_T 及び D_L は $\phi = (\theta - \alpha)$ によって変化し、その関数形は図-8の結果によって表すこ

とができる。ここで、

$$(g_T(\phi), g_L(\phi)) = \frac{1}{|V|^2} \left(\frac{A_P}{A} \right) (D_T(\phi), D_L(\phi)) \quad (2)$$

とおくと、 D_{LP} 、 D_{TP} は以下ようになる。

$$(D_{TP}, D_{LP}) = (g_T(\phi), g_L(\phi)) |V_P|^2 \quad (3)$$

従って、流体力 D_P (D_{TP} , D_{LP}) の X , Y 成分 D_{XP} , D_{YP} は

$$D_{XP} = \left(g_L(\theta - \alpha) \frac{u_P}{|V_P|} + g_T(\theta - \alpha) \frac{v_P}{|V_P|} \right) |V_P|^2 \quad (4)$$

$$D_{YP} = \left(g_L(\theta - \alpha) \frac{v_P}{|V_P|} - g_T(\theta - \alpha) \frac{u_P}{|V_P|} \right) |V_P|^2 \quad (5)$$

の関係式により算出され、偏流型粗度を配置することによって、流体に対し以下のような新たな力 F_{XP} 、 F_{YP} を与えることになる。

$$F_{XP} = -D_{XP}, \quad F_{YP} = -D_{YP} \quad (6)$$

(2) 偏流型粗度を考慮した数値計算

(1) で得られたモデルを用い、偏流型粗度が潮汐残差流の生成及び海水交換の促進にどのように寄与するかを調べるために潮流・拡散シミュレーションを行った。計算はADI法⁴⁾による平面二次元モデルにより行い、対象としたモデル湾、境界条件は小松ら²⁾と同一のものをを用いた。計算条件としては、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： $\nu_t = 100$ (m²/sec.)、コリオリ係数： $f = 0$ (sec⁻¹) を与え、今回は以下の4ケースを対象にして計算を行った(図-10 参照)。

まず、Case0として粗度を配置しない場合を、Case1として湾内に時計周りの潮汐残差流が形成されるように湾口側と湾奥側で向きを変えて偏流型粗度を設置した。粗度の高さは平均水深 ($h = 10$ m) の1/5である2mとし、50m四方 (2500 m²) に1つの割合で偏流型粗度 (1/2円筒2重型粗度、高さ2m、幅3.6m、奥行き7.2m) を配置した。また、比較のために従来の主方向粗度 (1/4球型粗度、高さ2m、幅4m、奥行き2m) のみを用いた場合 (Case2)、についても検討を行った。主方向粗度については、これまでの室内実験から得られた、順流方向の抗力係数 $C_{df} = 0.8$ 、逆流方向の抗力係数 $C_{db} = 1.8$ 、 $\Delta C_d = 1.0$ の条件を与え、偏流型粗度と主方向粗度の占有面積がほぼ同程度になるように単位面積当たりの配置個数を28.86m四方 (833.3 m²) に1つとした。

また、初期濃度として湾内部にのみ一定濃度の拡散物質を投じ、内湾全体に残存する物質の経時変化を調べるための拡散シミュレーションを行った。潮汐残差流の計算結果(ベクトル図及び流線図)を図-11に、湾内の拡散物質の残存率の経時変化を図-12に示す。

Case0の粗度なしの場合については湾口の両端に一對の微弱な渦が生成されるのみで、湾内に顕著な残差流は見られない。湾内拡散物質の残存率も最も緩やかに減少し、200周期後でも75%程度が湾内に滞留している。一方、偏流型粗度のみを配置した

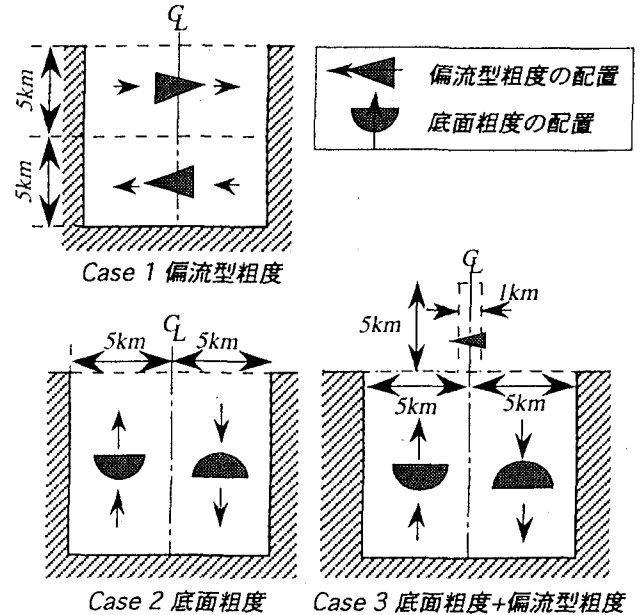


図-10 粗度の配置の概要

Case1では湾口付近に偏流型粗度の特徴である顕著な主流と直交する方向の残差流成分が生成されており、偏流型粗度の潮汐残差流生成能力は主方向粗度と比較しても全く遜色のないものであると言える。しかし、残存率の経時変化を見るとCase1は早い時期には湾口付近の渦によって比較的速やかに湾内濃度を減少させているものの、時間が経過するにつれ海水交換率は鈍化する。湾奥部の残差流成分が小さいことから分かるように、偏流粗度は主流と直角な方向の輸送能力の強化に効力を発揮することはできるが、偏流型粗度のみで湾全体の海水交換を大幅に促進するような流況をつくることは容易ではない。

次に、主方向粗度を設置したCase2の結果をみると、湾口付近に中心をもつ縦長の渦が湾奥にかけて伸びているのが見てとれる。また、湾右側では外海水が順調に流入しているに対し、湾左側では顕著な湾口渦が形成されており、それに押し流されるように外海において潮汐残差流が閉じてしまっている。本来潮汐残差流は渦を形成するものであるが、渦径が小さすぎると湾口から一旦運ばれた物質がそのまま湾内に残り、残差流が海水交換に寄与しないことになる。そこで、Case3として偏流型粗度によって閉じた流れを湾口中心部で分離し、拡散物質を外海へ流出させるような大きなスケールの潮汐残差流をつくることを試みた。粗度の配置としてはCase2の粗度配置に加え、湾口中心部の幅1km×5kmの細長い外海域に左向きの流れをつくるようにCase1と同様の割合で偏流型粗度を配置した。その結果、湾口中心部で閉じる流れは減少し、左側の湾奥部から湾口部への流れが湾口部の偏流成分により左向きに分岐されるようになり、その結果、湾内残存率は大幅に減少することが明らかとなった。

以上の結果より、偏流型粗度は潮汐残差流を生成する能力に優れており、利用法によっては少ない粗

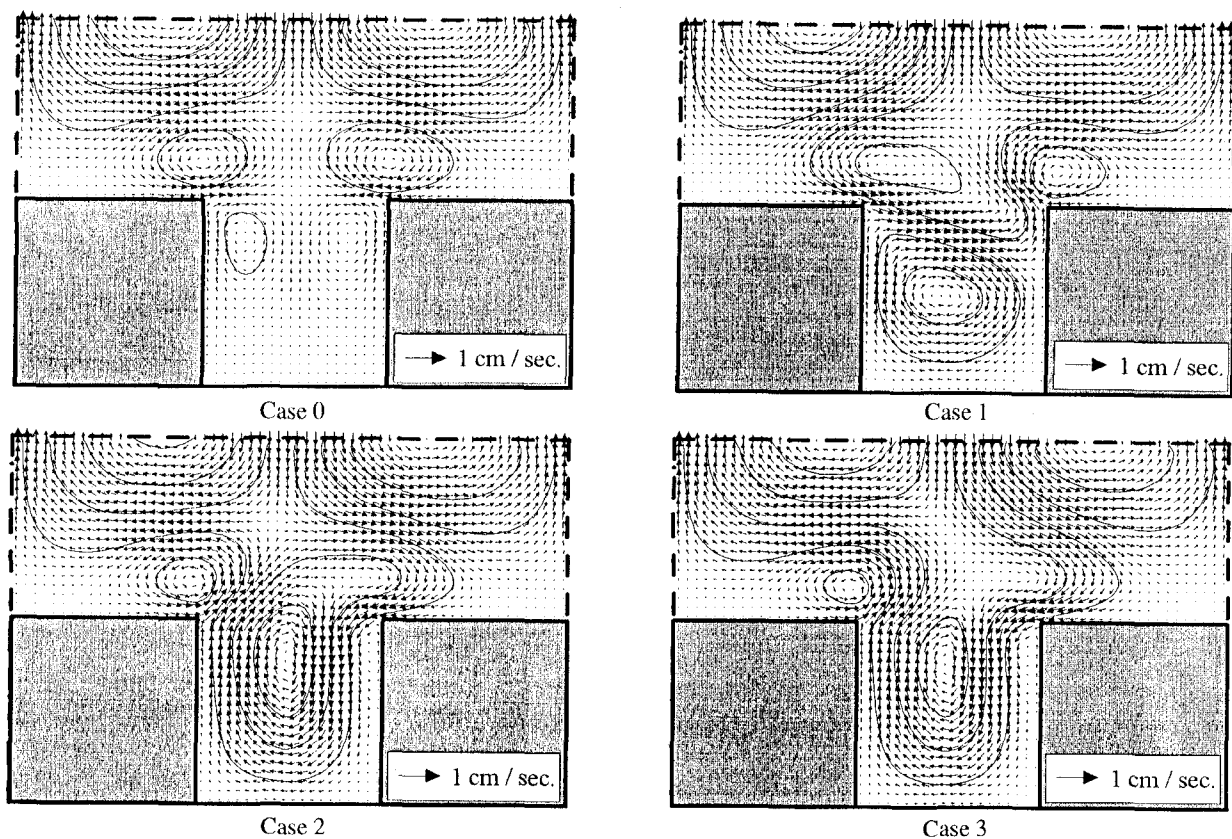


図-11 各ケースの潮汐残差流のパターン (ベクトル図・流線図)

度で大幅な海水交換促進効果が期待できる。また、これまで主方向粗度のみでは直接的には発生させることができなかった横方向の潮汐残差流を自在に生成できるため、主方向粗度と組み合わせることによってより自由度の高い潮汐残差流の創造・制御が可能となった。

4. 結論

本研究の結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 流れの向きを偏向させる機能をもつ偏流型粗度の有効な形状を水理実験により検討した結果、1/4 円筒を組み合わせた形状が効率的であり、その中でも 1/4 円筒を二重に配列した形状が最も有効であることが明らかとなった。横方向の抗力係数は $C_{dr}=0.6\sim 1.0$ 程度の大きさをもつ。
- 2) 流れの方向の変化による偏流型粗度の抵抗特性を三角柱と1/4 円筒二重配置型に対して調べた結果、潮流の一周期間に渡る流向の変化に対して偏流効果が得られる時間帯が相対的に長いこと、また最も潮流流速が強くなると期待される最大上げ潮流もしくは最大下げ潮流の近傍で偏流機能が相対的に強いことから潮汐残差流の偏流効果が十分期待できることが明らかとなった。
- 3) 得られた実験結果を用い、偏流型粗度を設置した場合の潮流・拡散シミュレーションを行った。その結果、偏流型粗度には有効な潮汐残差流生成機能があることが明らかとなった。また、主方向粗度と偏流型粗度を組み合わせて用

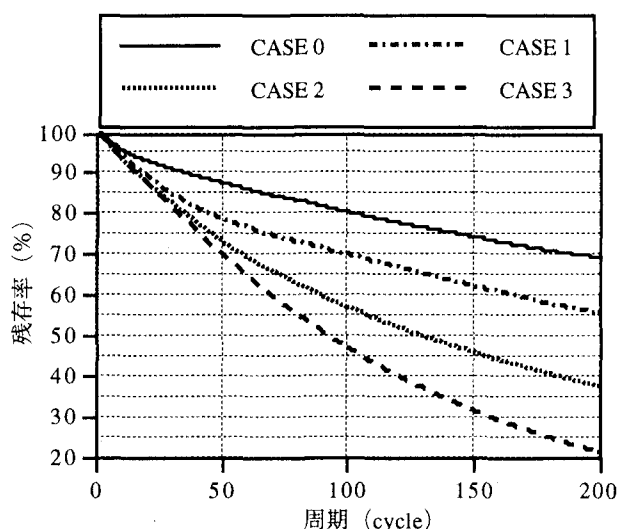


図-12 濃度の残存率の経時変化

いることによって、より自由度が高く効率的な流況制御ができることが分かった。

—参考文献—

- (1)小松ら: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,1997年3月,第41巻,pp705-710
- (2)小松ら: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.水工学論文集,1997年3月,第41巻,pp.323-328
- (3)小松ら:流れに対し方向特性をもつ人工底面粗度の抵抗特性に関する実験的研究.土木学会第52回年次学術講演会,pp.200-201.
- (4)金子ら:ADI法による潮流汚染拡散の数値計算.港湾技術研究所報告,1975年3月,第14巻,第1号,pp3-61

(1997.9.30受付)