

任意の方向に潮汐残差流を創造するための 偏流型粗度の開発

DEVELOPMENT OF BOTTOM ROUGHNESS TO CREATE
A TIDE-INDUCED RESIDUAL CURRENT IN AN ARBITRARY DIRECTION

小松利光¹・小橋乃子²・和田真人³・藤田和夫⁴・矢野真一郎⁵・安達貴浩⁶

Toshimitsu KOMATSU, Naoko KOHASHI, Makoto WADA,
Kazuo FUJITA, Shinichiro YANO and Takahiro ADACHI.

¹フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科海洋システム工学専攻 (〒812-8581 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建設システム工学専攻 (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 九州大学技官 工学部建設都市工学科 (同上)

⁵正会員 博(工) 長崎大学講師 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁶正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

Nowadays, water pollutions in many semi-enclosed bays have been a very serious social problem. In order to solve this problem, we have proposed the method to activate the water exchange between a bay and its outer sea area by using bottom roughness. In this study, we developed two types of bottom roughness and examined their resistance properties experimentally. At first, the bottom roughness which could create the tide-induced residual current normal to the main tidal flow was improved. Then, it was made clear that the bottom roughness with the shape of a quarter sphere had the property to produce directly the tide-induced residual current not only in the parallel direction but also in the arbitrary direction to the main tidal flow. Finally, it was confirmed from the results of the numerical experiment that the combination of these bottom roughness could efficiently make a stronger residual circulation.

Key Words: Bottom roughness, tide-induced residual current, arbitrary flow pattern, tidal exchange, water purification.

1. 目的

閉鎖性内湾のような停滞性水域の悪化した水質を改善するために、著者らは人工底面粗度を用いて潮汐残差流の流況を制御し、外海と内湾との物質輸送を効果的に行う方法を提案している¹⁾。底面粗度とは、潮汐残差流を創造・制御するために海底に沈設される小規模構造物の総称であり、これまで "主方向粗度²⁾"、"直交偏流型粗度³⁾" という2種類の底面粗度が考案され、有効な粗度形状が室内実験により既に明らかとなっている。主方向粗度は流れの向きによって抵抗が大きく異なる構造物であり、主流方向(潮流楕円の長軸方向)に潮汐残差流を生成するために用いられる。潮汐残差流の設計方向と主流とのなす角を γ とすると、主方向粗度は $\gamma = 0^\circ$ に相当

する(図-1参照)。一方、偏流型粗度は主流と異なる方向に潮汐残差流を創造・制御するための構造物であり、本論文では主流と直交する方向($\gamma = 90^\circ$)に潮汐残差流を偏向させる働きをもつ偏流型粗度を特に直交偏流型粗度と呼ぶことにする。潮汐残差流は必ず閉じた循環流を形成することから、主方向粗度もしくは直交偏流型粗度だけを用いても潮汐残差流のパターンをある程度規定することは可能である。しかし思い通りの残差流を積極的に創造・強化するためには、主方向や主方向に直交する方向以外の方向に対しても潮汐残差流を生成できる"偏流型粗度"を積極的に用いることがより有効であると考えられる。

本論文ではまず、直交偏流型粗度の改良を行い、より効果的な粗度形状の開発を試みた。次に偏流型

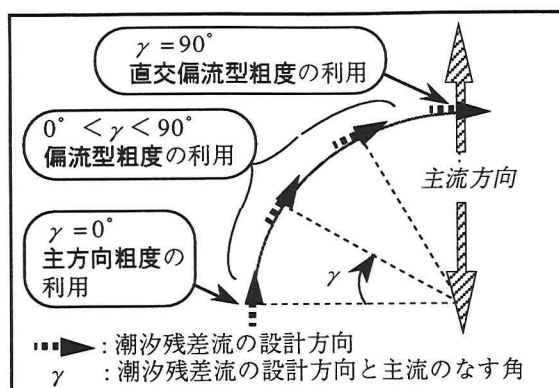


図-1 主流に対する底面粗度の流況制御方向

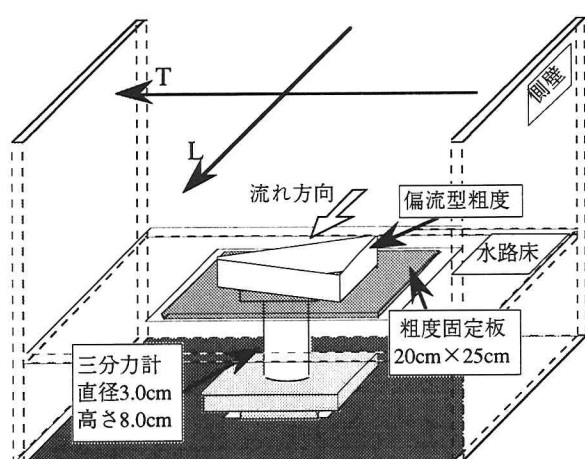


図-2 流体力の測定状況の概略図
(水路断面を下流側から見た場合)

粗度に必要な抵抗特性を考察するとともに、有効な粗度形状およびその配置方法について検討を行った。また水理実験の結果を用いた数値シミュレーションを行い、偏流型粗度による流況制御の有効性を確認した。

2. 実験装置および実験方法

まず最初に、各底面粗度の形状の開発・改良を目的とした室内水理実験が行われた。本実験に用いた水路および装置は小松ら³⁾と同一のものであり、アクリル製直線開水路(長さ6.0m, 幅0.5m, 高さ0.5m)の水路床のほぼ中央部に埋設された小型三分力計により、粗度に働く流体力(抵抗力 τ と同じ大きさで向きが反対の力)が直接測定された(図-2参照)。また、実験毎に得られた τ ならびに水深 h 、流量 Q から、各粗度の抵抗力係数 $C_d = \tau / (\rho A U^2 / 2)$ (τ : 粗度の抵抗力, ρ : 水の密度, A : 粗度の流れ方向の投影面積, U : 断面平均流速($= Q / h B$), B : 水路の幅)が算定された。座標系としては、横方向に T 軸、流下方向に L 軸、 TL 平面の垂直上方に Z 軸をもつ右手系の TLZ 座標を考え、流れ方向の抵抗

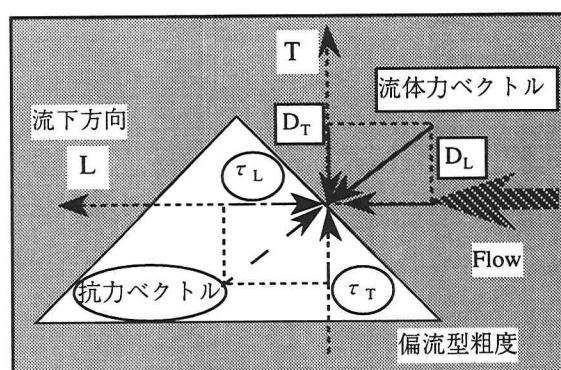


図-3 流体力測定で用いた座標系(平面図)

力を τ_L ($= -D_L$: 流れ方向の流体力)、流れと直交する方向の抵抗力を τ_T ($= -D_T$: 流れと直交する方向の流体力)と定義した(図-3参照)。上記の表記にしたがって、以後、添字 L 、 T はそれぞれ L 方向、 T 方向の値を意味するものとする。

本研究の提案する水質改善技術では底面粗度を実海域に配置して利用するため、模型実験を行う場合には原型との対応を考える必要がある。しかし、現場スケール(Reynolds数 $\div 10^6$)と室内実験スケール(Re数 $= 7 \sim 9 \times 10^4$)を含む範囲で、底面粗度のRe数依存性を調べた結果⁴⁾、(1)室内実験の結果を用いても粗度形状の比較は可能であること、(2)底面粗度の抵抗力係数はRe数の増加に伴って若干の減少傾向を示すものの、その値の変化は室内実験結果の10~8割程度であること、等の知見が既に得られている。従って、本研究では通常室内実験で得られた結果を用いて底面粗度の考察を進めることにする。

3. 直交偏流型粗度の改良

従来の直交偏流型粗度³⁾を更に効果的な形状に改良するために、1/4円筒を基本形状とする粗度形状の開発を行った(図-4参照)。図-4において紙面右から左方向に流れが当るように粗度が設置されており、その直交偏流効果は T 方向(図-4の紙面上方)の抵抗力係数 C_{dT} によって比較された。また、 D_T が同程度の時には D_L が小さい程、偏流効果が効率的に発揮されと考えられたため、 D_T / D_L を算定しこの値についても比較を行った。粗度形状No.1は T 軸に対して1/4円筒を対称に配置したものであり、No.2~No.6は、2枚~6枚の1/4円筒を等間隔に配置した粗度形状である。これら6種類の粗度形状に対して表-1に示す条件の下で実験を行い、 C_{dT} 、 D_T / D_L の比較を行った。結果を図-5に示す。1/4円筒の枚数が増えるにつれて直交方向の偏流効果および D_T / D_L が増加し、1/4円筒が4、5枚のときにピークをとることが分かる。このことから

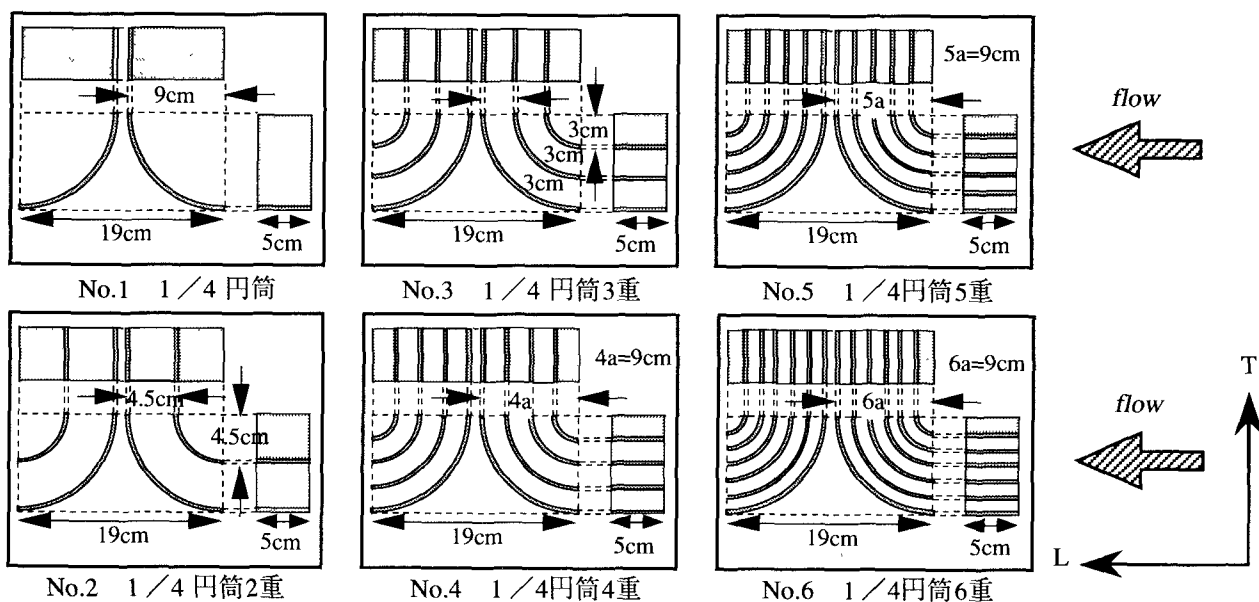


図-4 各直交偏流型粗度の形状

表-1 実験条件

実験条件	Reynolds数	相対水深 h/k
Case1	7×10^4	5
Case2	8×10^4	5
Case3	9×10^4	5

Reynolds数 $= U h / \nu$ ($= Re$)

U : 断面平均流速, h : 平均水深, ν : 動粘性係数
相対水深 $= h / k$

k : 粗度高さ

□ $C_{dr} : Re = 7 \times 10^4$	■ $D_T/D_L : Re = 7 \times 10^4$
◇ $C_{dr} : Re = 8 \times 10^4$	◆ $D_T/D_L : Re = 8 \times 10^4$
○ $C_{dr} : Re = 9 \times 10^4$	● $D_T/D_L : Re = 9 \times 10^4$

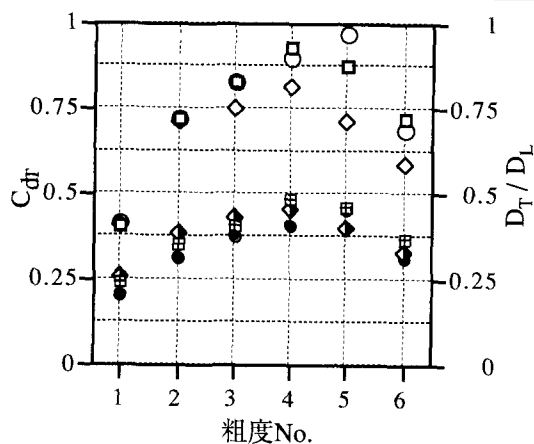


図-5 各粗度の C_{dr} および D_T/D_L の比較

むやみに円筒を重ねれば良いというわけではなく、 C_{dr} や D_T/D_L の値がピークをもつ形状が途中に存在すると思われる。従って、1/4円筒粗度の枚数や間隔を変化させる実験を更に重ねることにより、直交偏流型粗度の効果を更に高めることも可能であると考える。

4. 偏流型粗度の開発

前章において改良された直交偏流型粗度と従来の主方向粗度を組合せることで、更に効果的な残差流の流況制御が期待できる³⁾。しかし、これら2種類の粗度によって制御できる方向はたかだか2方向 ($\gamma = 0^\circ, 90^\circ$) であり、円環流などを生成する場合には必ずしもこれだけでは効率的とは言えない。そこで、主方向や主方向に直交する方向以外の方向 ($0^\circ < \gamma < 90^\circ$) に対しても潮汐残差流を創造・制御できるような偏流型粗度の開発を行った。

Euler的な潮汐残差流の流向操作は、連続条件を無視した粗度配置や強い既存の残差流が存在する場合以外は、基本的には残差流を生成したい方向に残差抗力を与えることによって制御可能と考えられる。ここで残差抗力ベクトル $\vec{\tau}$ とは、底面粗度によって流れに作用する抗力 τ の一潮汐平均として定義される。一潮汐平均して得られる残差抗力ベクトルと時々刻々変化する抗力の向きとは必ずしも一致しないため、同じ残差抗力をもつ底面粗度であっても残差流生成の効果が異なる場合が考えられる。しかし、本研究では偏流型粗度を開発するための第一段階であり、Euler的な残差流を制御するための粗度形状に着目して検討を行った。

潮流を単純なステップ関数的な往復流と見なし、残差抗力ベクトル $\vec{\tau} (= \tau_f + \tau_e$; 添え字 f, e はそれぞれ上げ潮・下げ潮時を表す) と主流軸とのなす角を改めて γ と置いた (図-6参照)。角度 γ は $\gamma = \tan^{-1}(\tau_T / \tau_L)$ より τ_L と τ_T の比で決定される。しかし、 τ_T の値は上げ潮時と下げ潮時の抵抗の和となることが多く、大きな値を取りやすいのに対

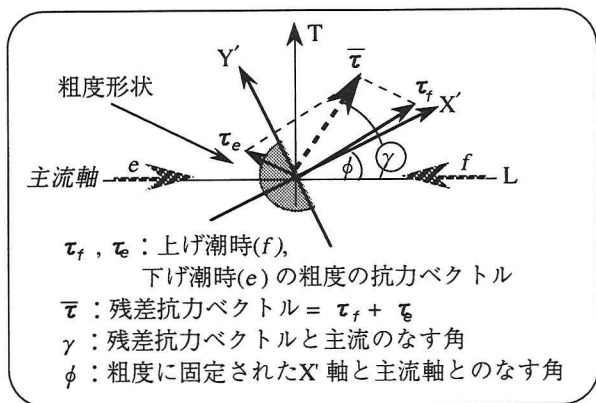


図-6 残差抗力ベクトルと角度の関係

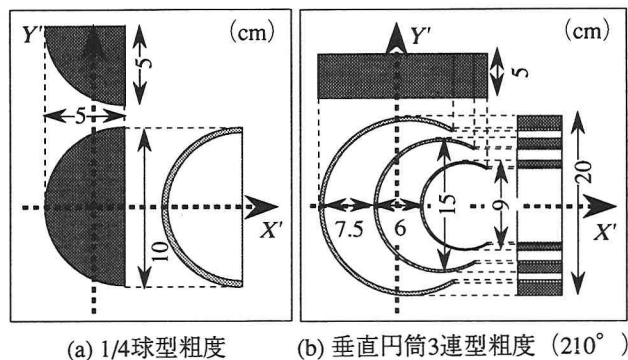


図-7 偏流型粗度として用いた底面粗度

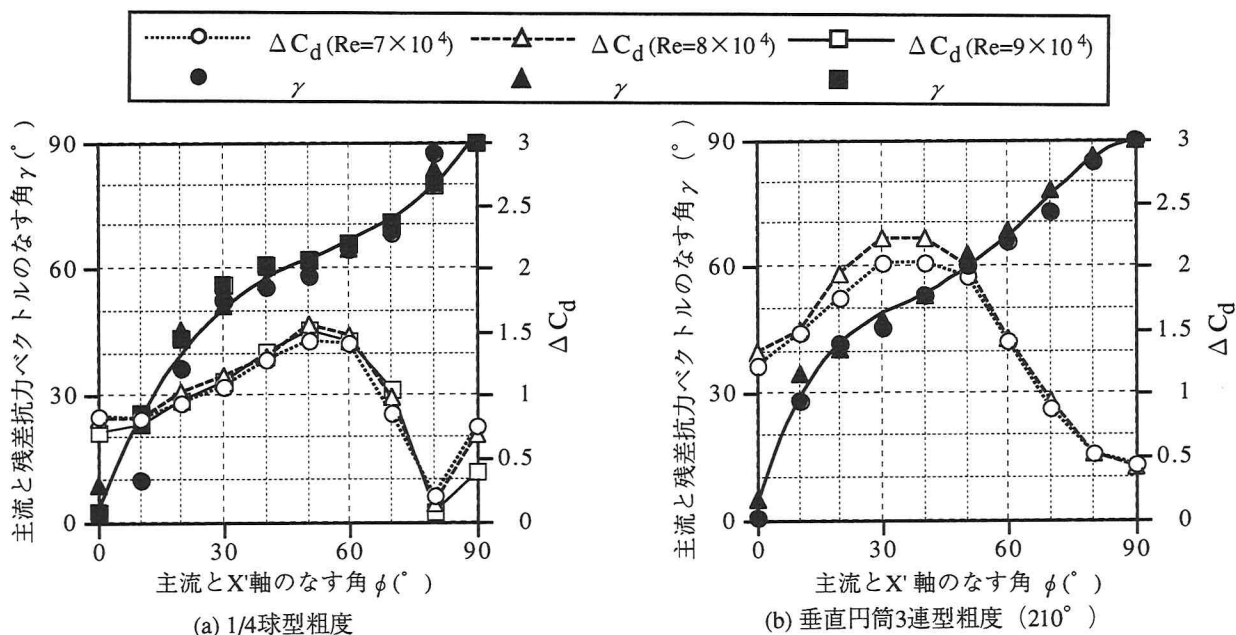


図-8 主流に対する残差抗力ベクトルの偏流角度及び抗力係数

し、 $\bar{\tau}_L$ は主流方向の抵抗の差として与えられるため通常それ程大きな値にはならない。従って、主流方向に対し幅広い角度に対応して偏流効果をもつ粗度となるための条件として、 $\bar{\tau}_L$ が大きくなる形状を見つける必要がある。このことから、主方向粗度として大きな $\bar{\tau}_L$ をもつ(a)1/4球型粗度および(b)垂直円筒3連型粗度 ($\theta=210^\circ$) (図-7参照)を主流に対して傾けて設置した場合に、任意の方向に偏流効果を発揮できるかどうかについて調べるための実験を行った。表-1と同様の実験条件に対して、粗度に対する主流の角度 ϕ (主流に対する粗度の設置角度)を $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ の範囲でほぼ 10° 毎に変化させた。図-8に得られた残差抗力ベクトルと主流のなす角度 γ (偏向角) および抗力係数差 ΔC_d ($= |\bar{\tau}| / \rho AU^2 / 2$)の結果を示す。1/4球型粗度を主流に対して傾けて設置することにより、主流に対して 0° から 90° までの全ての角度に渡って残差抗力ベクトルの生成が可能なが分かる。次に、残差抗力ベクトルの大きさに対応する ΔC_d の変化に

ついて見てみると、比較的広範囲にわたって大きな値を示しており、特に $0^\circ \leq \phi \leq 70^\circ$ の範囲については1/4球型粗度を主方向粗度 ($\phi=0^\circ$)として用いる場合よりもむしろ大きな残差抗力が生成されていることが分かった。また、垂直円筒3連型粗度 ($\theta=210^\circ$)についても同様の傾向が見られるが、1/4球型粗度よりも全体的に大きな抗力係数差が得られており、特に $\phi=30^\circ$ 付近では2倍程度となっていることが明らかとなった。以上の結果より、1/4球型粗度・垂直円筒3連型粗度 ($\theta=210^\circ$) は共に主方向粗度としての機能だけでなく、主流に対して $0^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$ の角度をなす残差流を生成するためにも有効に使用できることが明らかとなった。例えば主流に対して γ の角度の方向に残差流を生成したい時には、図-8の黒塗りのプロットが γ となる点の横軸の ϕ の値を読み取り、その角度に主流から傾けて粗度を設置することにより、所定方向 ($0^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$) に残差流を生成することが可能となった。

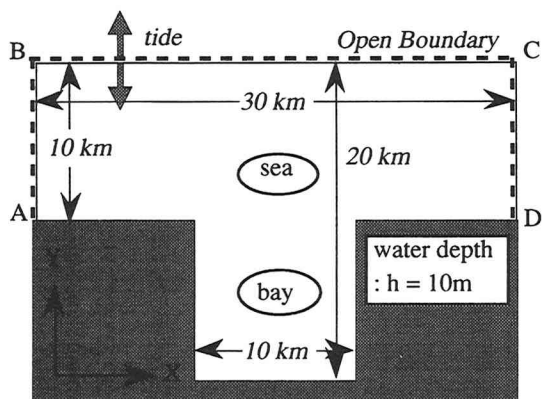


図-9 計算領域 (平面図)

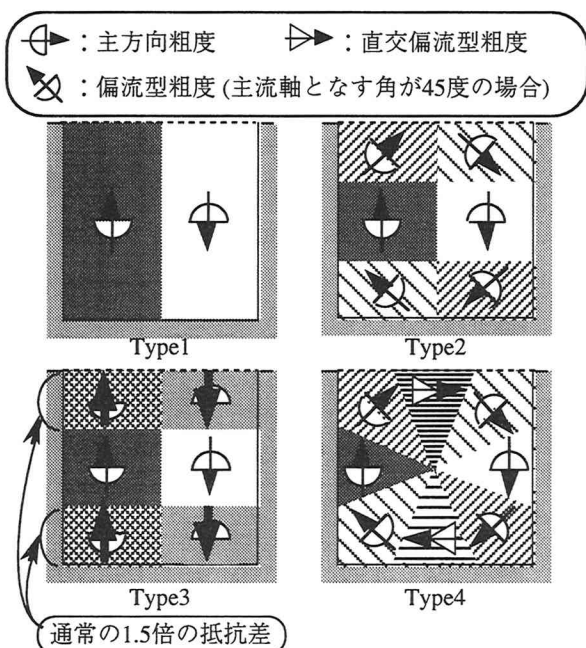


図-10 粗度配置図 (10km×10kmの湾内のみ敷設)

5. 偏流型粗度の効果を取り入れた数値計算

任意方向偏流型粗度を用いることのメリットとして潮汐残差流のパターンを自由にデザインできるという点が挙げられるが、同時に生成したい残差環流に沿って設置することにより残差流を直接強化できることから、効率自体も良くなると考えられる。そこで偏流型粗度による残差流生成能力を調べるため、10×10 km²の内湾と10×30km²の外海をもつ矩形モデル湾を対象とした平面2次元潮流シミュレーションにより検討を行った (図-9 参照)。計算条件は計算格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 500(\text{m})$ 、時間格子間隔 $\Delta t = 15(\text{sec.})$ 、渦動粘性係数100 (m²/sec.)、コリオリ係数0 (1/sec.)、粗度なしの海底摩擦係数 0.0026とした。境界条件は開境界B-Cで振幅2(m)、周期12時間25分の正弦波を与え、外海の開境界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。また、底面粗度の抵抗効果は外力項と

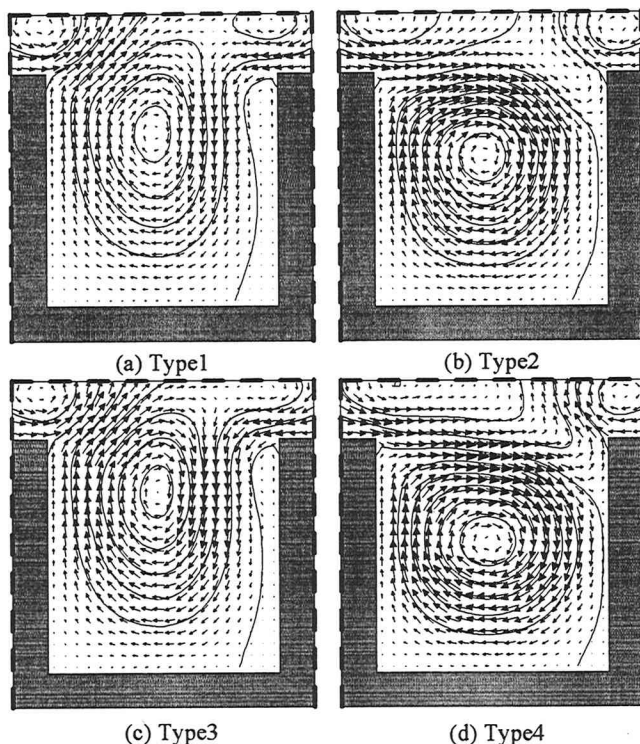


図-11 潮流計算の計算結果
(潮汐残差流のベクトル図・流線図) → 3 cm/sec.

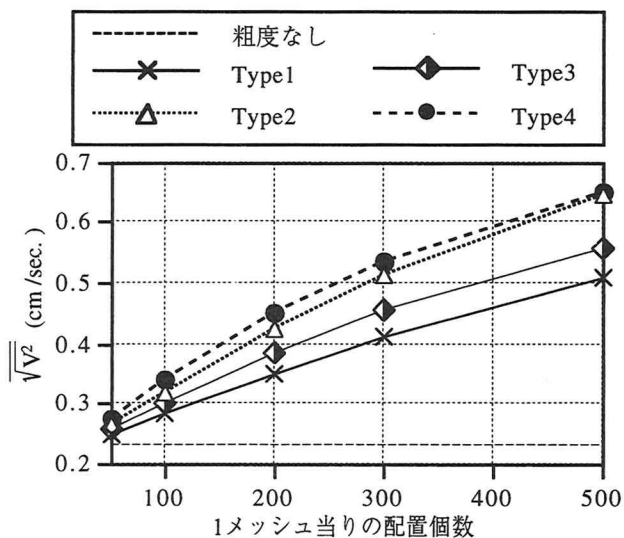


図-12 粗度配置密度と環流強度の関係

して運動方程式に組み込まれており、その大きさと方向は潮流の向きと抵抗力の関係の室内実験結果を用いることによって、各計算点の流向・流速からその都度決定された³⁾。

計算を行った4種類の粗度配置図を図-10に示す。Type1、3は主方向粗度のみ (1/4球型を想定) を、Type2は主方向粗度と偏流型粗度のみ (1/4球型を想定、粗度高さ2m) を配置したものである。また湾幅とほぼ同じスケールの残差環流の生成を意識しながらType4では主方向、偏流型、直交偏流型 (1/4円筒2重型粗度を想定、粗度高さ2m。図-4、No2参照)

の3種類の粗度が配置された。各粗度配置に従って1計算メッシュあたり200個の粗度を配置した場合(1250m²に1個の割合で配置)の潮汐残差流の計算結果のベクトル図および流線図を図-11に示す。

Type1は主方向粗度のみを用いていることから、湾内に縦長の潮汐残差環流が生成されている。湾奥部、湾口付近では連続条件を満たすように横向きの潮汐残差流が生成されており、効率の悪い環流生成であることが予想される。そこで、主方向粗度に45度の偏流型粗度を組合わせたType2の計算結果を見ると、偏流型粗度の働きによりほぼ湾スケールの環流が形成されていることが分かる。また、残差流ベクトルの大きさ自体も強化されている。

得られた結果から粗度配置領域内(矩形湾内10×10 km²)における残差流ベクトルの絶対値の空間平均値 $|\bar{V}|$ を算定し、底面粗度の潮汐残差流生成効率を表す指標として用いた。その際、1メッシュ当たり($\Delta x = \Delta y = 500\text{m}$)に設置する粗度の個数を変化させ、各粗度配置についての比較を行った(図-12参照)。Type1とType2を比較すると、Type2の方が大きな残差流が生成されており、効率の良い配置であることが分かる。しかし、1/4球型粗度は主方向粗度として用いられる時よりもむしろ主流方向から約40°から60°傾けて設置された方が大きな残差抗力を生成するため(図-8(a)参照)、残差流が強化された理由が抵抗差が大きくなったことによるものか、偏流型粗度によって効率的な流況制御が行われたためなのかを判断することはできない。そこで粗度配置Type2における偏流型粗度の配置領域に相当するType1の領域の主方向粗度の抵抗差を1.5倍することにより両者の残差抗力をほぼ一致させて計算を行った(Type3)。その結果、Type1よりはType3の方が大きな残差流ベクトルが生成されているものの、Type2と比較するとその効果は低くなっている。これは主方向粗度のみの一方向の制御では設定方向以外の残差流も生成されることになり、効率が悪くなるためと考えられる(図-11参照)。従って偏流型粗度を用いて、潮汐残差流を生成したい方向に残差抗力ベクトルを作用させることにより、効率的な残差流生成ができることが明らかとなった。更に、主方向粗度、直交偏流型粗度および任意方向の偏流型粗度を全て組み合わせたType4の結果を見るとType2の環流は更に強化され、Type1(主方向粗度のみ)では400個近く用いてやっと生成される残差流レベルでもType4の配置では半分程度の数で生成できることが分かった。

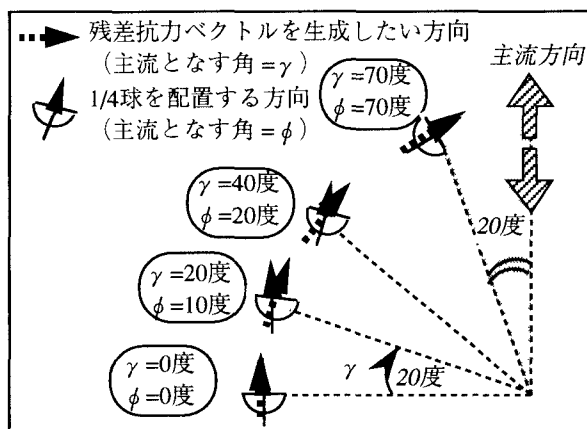


図-13 偏流型粗度として1/4球を用いた場合の粗度配置(円環流の残差流を形成する場合)

6. 結論

本研究の結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 室内水理実験により直交偏流型粗度の改良を試みた結果、今回実験を行った粗度形状の中では1/4円筒を3~5枚並べた形状(粗度No.3~5)が有効な形状であり、円筒の枚数や間隔を調節することで更に効率的な粗度の開発が期待できることが分った。
- 2) 新たに任意の方向に潮汐残差流を生成する偏流型粗度が開発・提案された。その結果、ほぼ全流向に対して効果的な流況制御が行えるようになった。
- 3) 潮汐残差流を生成する残差抗力ベクトルの方向が主流方向の抵抗差に大きく依存していることから、主方向粗度を偏流型粗度として利用できる可能性が高いことが示された。1/4球型粗度および垂直円筒3連型粗度($\theta = 210^\circ$)を偏流型粗度として用いた場合、 $0^\circ \leq \phi \leq 70^\circ$ の範囲で主流が流入するように粗度を配置することによって、主流に対して $0^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$ の方向の残差抗力ベクトルを生成できることが明らかとなった(図-13参照)。
- 4) 主方向粗度と偏流型粗度を組合せて用いることにより潮汐残差流の生成効率を飛躍的に向上できることが数値シミュレーションより明らかとなった。

参考文献

- 1)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, 41, PP. 323-328, 1997.
- 2)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, 41, PP. 705-710, 1997.
- 3)小松ら：流れを偏流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, 水工学論文集, 42, PP. 577-582, 1998.
- 4)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, 1997.

(1998.9.30受付)