

流れの方向により抵抗特性の異なる人工粗度の開発

Development of Artificial Roughness with directional resistance properties

小松利光*・矢野真一郎**・小橋乃子***・鞠承淇****・藤田和夫*****

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

These days, pollution in a stagnant water area of a semi-enclosed bay is recognized as one of serious water environmental problems. In order to activate the tidal exchange, we proposed a new method to create and control a tidal residual current by using artificial bottom roughness with directional resistance property. On the basis of this idea it was attempted to determine the most effective shape of roughness experimentally. As a result of this research, it was made clear that the half cylinder type, half sphere type and other two types could get large differences of drag coefficient between two flow directions.

*Key words; tidal residual current, artificial roughness,
tidal exchange, difference of resistance, drag coefficient*

1. はじめに

我が国の沿岸には内湾や漁港など閉鎖性海域が数多く存在するが、このような海域では外海との海水交換が行われにくく、湾内水の停滞による慢性的な水質悪化が深刻な問題となっている。しかしながら湾全体に対して継続的に水質改善対策を講じることは容易ではなく、新たな手法の開発が望まれている。この様な現況を踏まえて、近年、防波堤や湾口部の形状を操作することにより湾内部の流況を制御し、海水交換の活性化を図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に防波堤のような構造物を設置する方法を、村上ら²⁾は湾口部の防波堤の形状を変える方法を、さらに大谷ら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⁾は流れの向きにより抵抗の異なる2次元形状構造物を側壁部に設置し、海岸線に沿った一方向流を生成する方法を提案している。しかし、これらの方法は長大構造物を建設することによる景観上の問題や、流況が制御できる範囲が構造物周辺のみに限定されるといった問題が予想され、親水空間としての役割が大き

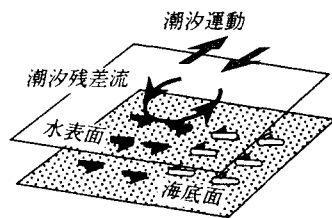


図-1 海底人工粗度による
潮汐残差流制御のイメージ図

- | | | | | | |
|-------|-----|----|---------------|---------------|-------------------------|
| * | 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 | (同上) |
| *** | 学生員 | | 九州大学大学院 修士課程 | 工学研究科 水工土木学専攻 | (同上) |
| **** | 学生員 | 工修 | 九州大学大学院博士後期課程 | 工学研究科 水工土木学専攻 | (同上) |
| ***** | 正会員 | | 九州大学技官 | 工学部建設都市工学科 | (同上) |

い海域や湾全体などの広い領域に対する水質改善策としてはなお問題が残るものと思われる。

そこで本研究では、流れの向きにより抵抗特性の異なる人工粗度を海底面に配置し、自然エネルギーである潮流エネルギーのみを利用して水質改善を図る方法を検討している。航路の安全の確保のため、海底人工粗度としては水深の1～2割程度の比較的小規模な構造物を考慮しており、海底面に複数個配置することによって広い海域の流況制御を可能とするものである。また、粗度の配置を適宜変えることで潮汐残差流のパターンを自由にデザインしたり、また既存の還流を適宜結合したり分断したりすることもできるようになることが期待されており⁹⁾、最も海水交換を活発にする流況パターンを積極的に作り出すことができるものと考えている。本論文では、最も大きい抵抗差を持つ単体粗度形状を開発することを目的とし、室内実験により様々な形状に対して流れやすい方向（以下、順流方向）と流れにくい方向（以下、逆流方向）の抵抗特性について検討を行った。

2. 実験装置と実験方法

2-1 実験装置

本実験では、順流方向と逆流方向の抵抗差が最も大きくなるような単体粗度の最適形状を調べるために、抗力を直接測定できる装置を用いて粗度に作用する抗力を測定した。実験水路は図-2に示すような長さ6.0m、幅0.5m、高さ0.5mの亚克力製水路で、上流から1.8mの地点から4.8mまでの3m区間で水路床、側壁とも二重構造になっており、上流端から3.5mの地点に長さ0.2m、幅0.25mの抗力測定装置が設置されている。また、水深は下流端にある可動堰によって調節される。抗力測定装置に関しては、アルミ製の粗度設置板(幅0.25m、長さ0.2m、厚さ2mm)が三枚の磷青銅板(幅5mm、高さ8.5mm、厚さ1mm)により上流側2点、下流側1点で3点支持されており、下流側の磷青銅板の両面に歪みゲージが貼り付けられた(図-3参照)。抗力は設置板に働く力により生じる磷青銅板の変形を歪みゲージで読み取り、実験前後に行う検定から得られたキャリブレーション曲線より換算して求められた。なお、粗度設置板は粗度を設置したときに上面が水路床底面と同一の高さになるように調節されている。

2-2 抗力係数 C_d の算定

実験では粗度を粗度設置板に固定した状態で、順流方向（添字fで表示）ならびに逆流方向（添字bで表示）に対して設置板にかかる全抗力(D_f, D_b)を測定し、その後粗度を外した状態で設置板に働く底面摩擦力(F_f, F_b)を測定し、この値を差し引くことにより各粗度にかかる抗力($\tau_f (=D_f - F_f), \tau_b (=D_b - F_b)$)を求めた。水深hは抗力測定板の前後1mの2箇所ですーボ式水位計を用いて測定し、2点の平均により求めた。また、流量Qは流量バケツにより測定した。以上の要領で測定された τ, h, Q を用いて次式により各粗度の抗力係数 C_d を求めた。

$$C_d = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (1)$$

ここで、 τ ；粗度の抗力、 ρ ；水の密度、A；粗度の流れ方向への投影面積、

U；断面平均流速($=Q/hB, B=42.4\text{cm}$)である。

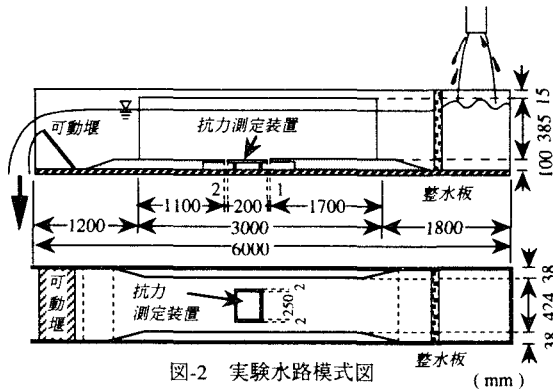


図-2 実験水路模式図

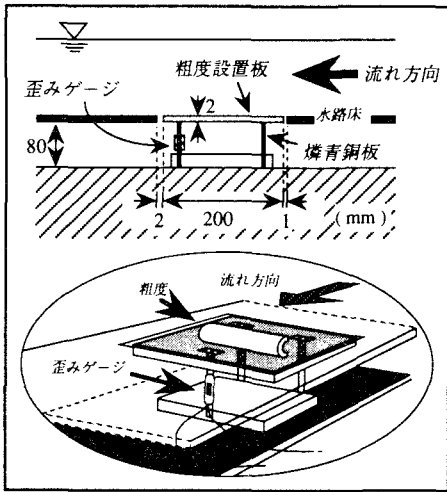


図-3 抗力測定装置と測定状況概略図

3.実験結果とその考察

3-1 粗度の基本形状について

表-1 粗度の基本形状に関する実験条件

run θ 1. 円筒粗度の形状変化と抗力係数 C_d の関係を調べる実験： 円筒型を流れ方向に垂直に設置し、水路床と直交する基準線からの角度 θ を120度～240度まで30度毎に変化させた。 (粗度半径 $r=2.5\text{cm}$、粗度幅 $b=20\text{cm}$、肉厚 $t=0.3\text{cm}$)	
run θ 2. 垂直円筒粗度の形状変化と抗力係数 C_d の関係を調べる実験： 円筒型を水路床に垂直に立て、かつ対称面が流れ方向と一致するように設置し、円弧の開き角度 θ を90度～240度まで30度毎に変化させた。 (粗度高さ $k=5\text{cm}$、粗度半径 $r=10\text{cm}$、肉厚 $t=0.3\text{cm}$)	
run θ 3. 1/4球の形状変化と抗力係数 C_d の関係を調べる実験： 球形の1/4である1/4球を基本形状として、水路床からの角度 θ を60度～150度まで30度毎に変化させた。 (粗度半径 $r=7.5\text{cm}$、粗度幅 $b=15\text{cm}$、肉厚 $t=1\text{cm}$)	
run k 4. 1/2球の高さと抗力係数 C_d の関係を調べる実験：直径 $d=10\text{cm}$ の球形の半分である1/2球の下部を水路床に平行な直面でカットし、粗度高さ k を5～10cmの間で変化させた。 (粗度幅 $b=10\text{cm}$、肉厚 $t=1\text{cm}$)	

$\leftarrow F$: 順流方向 $\rightarrow B$: 逆流方向

これまでの側壁粗度(2次元構造物)の研究結果⁴⁾から1/2あるいは1/4円筒粗度を棧粗度状に配置することによって有効な抵抗差を生じることが期待されるが、側壁粗度の場合でも粗度が水面下に没する場合には3次元的な効果により抵抗特性が変化することが分かっており、今回のように3次元構造物の場合にはさらに工夫が必要であることが予想される。そこで、円筒形を水路床に寝かせた形と立てた形(以後、それぞれを円筒粗度、垂直円筒粗度と呼ぶ)について形状を系統的に変化させ、より有効な円筒粗度形状について調べた。また、かつて気象器機として利用されていたRobinson風速計⁵⁾は風杯の形状による抵抗差を利用して一方向に風杯を回転させ、その回転数から風速を測定する計測器であるが、これに用いられている風杯の形状が1/2球であることから1/2球型粗度の抵抗差についても検討を行った。各実験の詳細は表-1に示した通りである。なお、run θ 1～ θ 3ならびに k 4における相対水深、流量はそれぞれ $h/k=5$ 、 $Q=0.034\text{m}^3/\text{sec}$ 。(レイノルズ数 $Re=Uh/\nu=8\times 10^4$ に相当)に固定して実験を行った。

図-4に実験結果を示す。run θ 1の円筒粗度の開口角度を変化させる実験では、150度までは抗力係数差 ΔC_d はほとんど得られないが、 $\theta=180$ 度つまり1/2円筒型に近

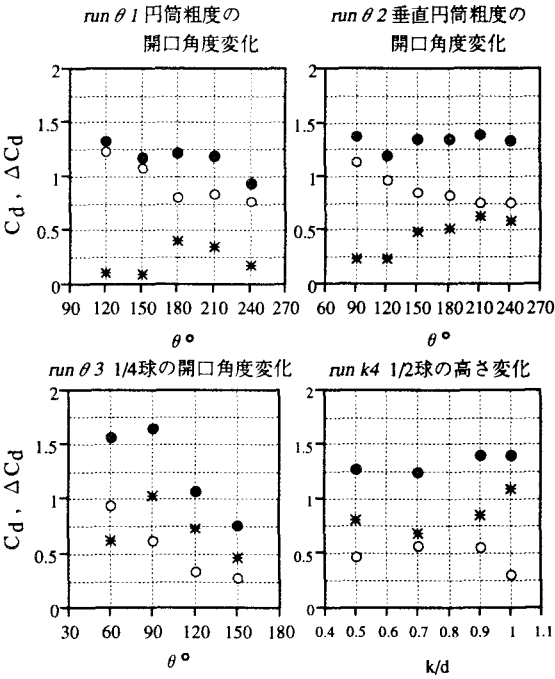
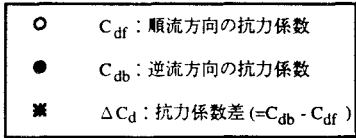


図-4 run θ 1～ θ 3, k 4の実験結果

づくとも順流方向の抗力係数 C_{df} が小さくなり ΔC_d が最大となることが分かる。一方、垂直円筒粗度 ($run\ \theta 2$) については逆流方向の抗力係数 C_{db} は150度以上になるとほぼ一定値を取るが、 C_{df} は θ が増加するにつれて減少傾向を示し、180度より大きな210度付近で ΔC_d はピークをとることが分かった。このように同じ円筒形でも、円弧部分の形状及び底面との位置関係によって抵抗特性が異なるという結果が得られた。

また、 $run\ \theta 3$ の1/4球の角度を変えた実験では、 C_{db} のピークと一致するかのようになり $\theta = 90$ 度の時に ΔC_d も最大となっている。一方、1/2球の高さを変化させた実験 ($run\ k4$) では、 k/d が1に近づくとも順流方向の抗力係数 C_{df} が急激に減少し、その結果 $k/d = 1$ の時つまり1/2球の形状の時に ΔC_d が最大となった。

以上の結果より粗度の基本形状として、円筒形では1/2円筒型が、垂直円筒型では1/2円筒より少し開きが小さい $\theta = 210$ 度の形状が、最も抗力係数差 ΔC_d が大きくなり、一方球形に関しては1/4球あるいは1/2球が最適な形状であるということが分かった。

3-2 粗度形状の改良

3-1の結果より、1/2円筒や1/4球といった基本型をもとに図-5に示したような改良型粗度形状を考案し、それぞれについて抵抗特性を検討した。図-5のそれぞれの粗度については右上から時計周りに立体図、水路側壁側から見た側面図、逆流の時の上流から見た正面図、上側から見た平面図となっている。立体図中の F の矢印は順流方向を、 B の矢印は逆流方向を表し、また各図の下方にそれぞれの粗度形状の諸元を示している。

粗度1は円筒粗度の中で最も有効と思われる1/2円筒粗度であり、粗度2, 3, 4, 5はそれぞれ1/2円筒を基本にした形状となっている。粗度2は順流の抵抗を増やさずにより一層逆流を妨げるという目的で1/2円筒の両端に側板を取り付け、同じ理由から粗度3では1/2円筒の内側に二枚の中板を設けた。また、粗度4については逆流時の抵抗を大きくする目的で1/2円筒の上部に板を伸ばした形状を採用している。粗度5は抵抗差をつくる機能を二重に組み合わせたものとして、1/2円筒をV字形状にしたものである。粗度6は1/4球、粗度7は下部を球状にし、上部を円錐型にしたロート型の形状となっている。粗度8は角度 $\theta = 180$ 度とした垂直円筒粗度の中心軸に沿った面に隙間を設けたもので、粗度9は粗度8にフタを付けた形、粗度10は平板を45度傾けた形状である。

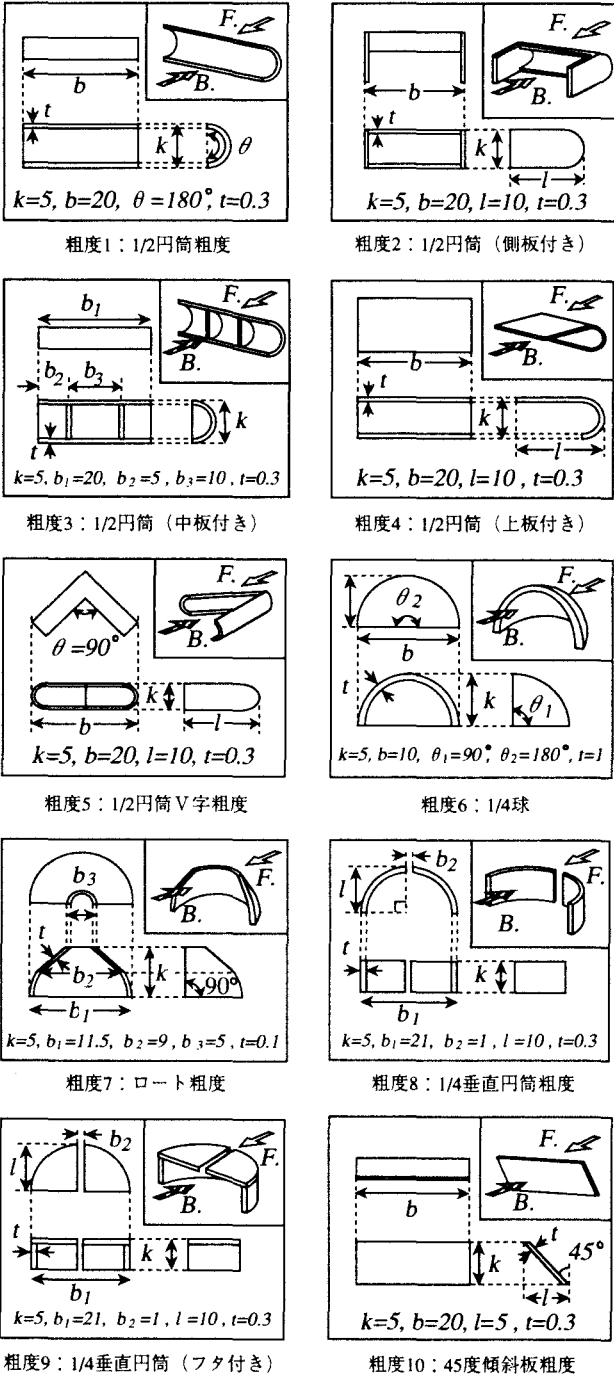


図-5 各粗度形状の概略図 (諸元の単位 cm)

3-3 C_d と相対水深、レイノルズ数の関係

水路床に固定した粗度の抗力係数 C_d を用いて最適形状の選定を行うに当たり、 C_d に関与すると考えられるパラメータとして相対水深 h/k とレイノルズ数 Re を選び、いくつかの粗度形状に対して C_d とこれらのパラメータの間の関係について検討するための実験を行った(表-2参照)。さらに、表-2の run-1~3 に示すように Re 数、相対水深を3通りずつ変化させた実験を行い、考案された10個の粗度の抗力係数を比較した。

抗力係数に対するレイノルズ数の依存性を調べるためには、本来ならばある程度広い範囲の Re 数に対して実験を行う必要がある。しかし、今回行った実験では実験水路等の制約から $Re=4 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ の間でしか測定することができなかった。今回対象とした粗度に対する C_d の Re 数依存性については今後の課題としたい。 Re 数を変えた実験結果(run R)の一例として、粗度5の場合について図-6に示す。実験を行った Re 数の範囲内での C_d 、 ΔC_d の変化は小さい。また他の粗度に対しても同様の結果が得られている。

C_d の相対水深への依存性を調べるための実験(run h)においては、 Re 数を 8×10^4 に固定し相対水深を変化させた。なお、この実験に関しては板に働く底面摩擦力を差し引く操作は行っていない。図-7に得られた結果を示す。 h/k が大きくなるに従い C_d の値は単調に減少しているが、これは h/k が大きくなるにつれて流路断面面積に対する粗度の遮蔽効果が小さくなるためと考えられる。また、相対水深5.5付近で抗力係数の傾きが変化しており、この付近で流れの構造が粗度形状に起因する三次元的なものから対数則に準ずるような二次元的な流れへと遷移しているものと推測される。その確認は今後の課題としたい。さらに、 ΔC_d に関しても相対水深が増加するにつれ減少していることから、相対水深は C_d に対して支配的なパラメータであると言える。

表-2 実験条件

run	Reynolds数	相対水深 h/k	粗度 No.
R	$(4 \sim 10) \times 10^4$	5	4, 5, 6, 7
h	8×10^4	3~8	4, 5, 6
1	5×10^4	4, 5, 6	1~10
2	6×10^4	4, 5, 6	1~10
3	7×10^4	4, 5, 6	1~10

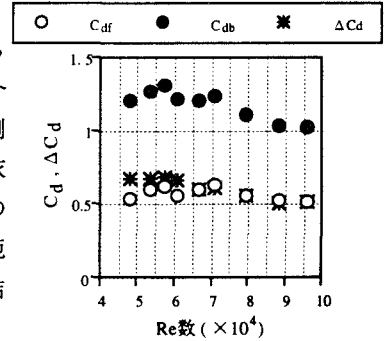


図-6 C_d と Re 数の関係 (粗度5の場合)

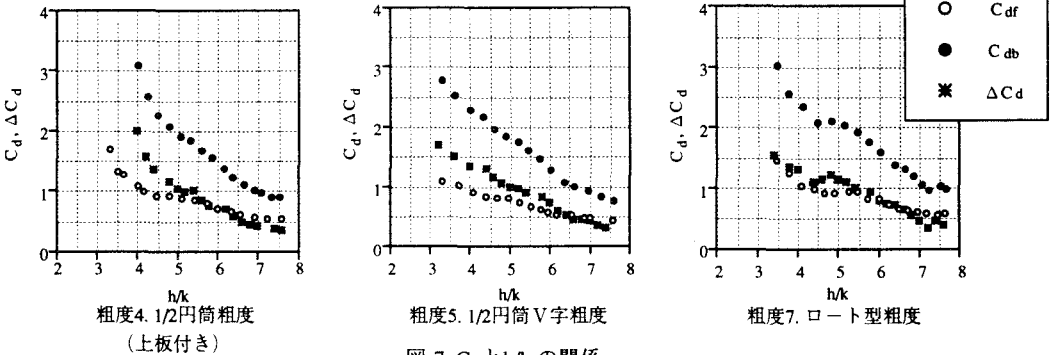


図-7 C_d と h/k の関係

次にrun1~3における抗力係数差 ΔC_d の実験結果を図-8に、相対水深 $h/k=5$ のときの C_{df} 、 C_{db} を図-9に示す。対象とした10種類の粗度形状の中では、どの相対水深においても粗度4: 1/2円筒上板付き粗度、粗度5: 1/2円筒V字型粗度、粗度6: 1/4球、粗度7: ロート型粗度の4種類の粗度が他の粗度と比較して ΔC_d が大きいことが分かった。また、図-9より逆流方向に比べ順流方向の各粗度の抗力係数の違いが大きくなっていることが分かる。粗度4~7の順流方向の抗力係数が他の形状の粗度と比較してかなり小さくなっているために、相対的に大きな ΔC_d が生じている。また、粗度2~5は1/2円筒粗度(粗度1)の変形であるが、粗度4のように上板を取り付けたり、粗度5のように1/2円筒を斜めに接合したりするだけで、順流の C_d が1/2~1/3に減少するという結果は大変興味深い。なお、1/4球(粗度6)あるいは球と円錐の組み合わせ(粗度7)も全体的に大きな ΔC_d が得られており、有力な形状と思われる。

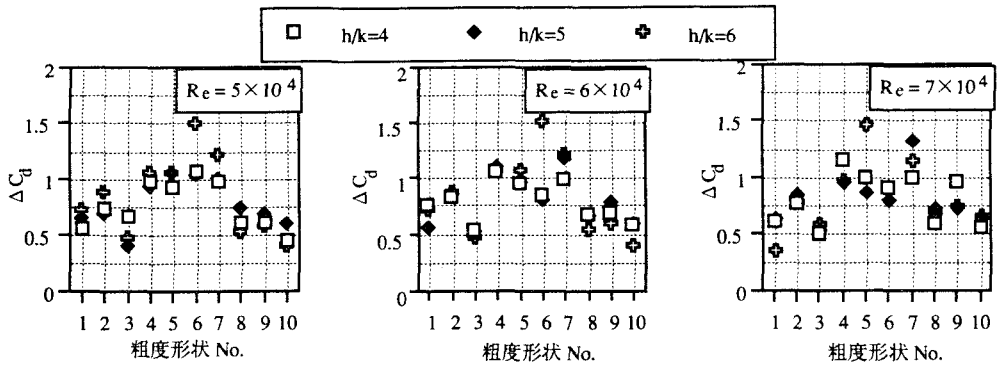


図-8 各粗度の抗力係数差

3-4 実験結果の総合的評価

実験の結果から ΔC_d に関しては粗度4~7が有効であることが期待できるが、潮流流速を減らさずかつ効果的な潮汐残差流を生成するためには、同じ ΔC_d の場合には順流方向の抗力係数が小さい方が有利と言える。そこで抗力係数の差と順流方向の抗力係数の比

$$\alpha = \frac{\Delta C_d}{C_{df}} = \frac{C_{db} - C_{df}}{C_{df}} \quad (2)$$

により効率を比較することにする。run1~3の結果を α で評価したものを図-10に示す。抗力係数差に関しては粗度4~7はいずれも $\Delta C_d = 1.0$ 程度の値が得られていたが、 α で評価し直すと粗度6、7の形状が若干有利であると思われる。

4.まとめ 本研究の実験結果より以下のような知見が得られた。

- 1) 円筒型の抵抗差に着目すると、円筒を水路床に寝かせた場合は開口角度180度の1/2円筒が、立てた場合はそれよりもやや大きな210度付近で最大の抵抗差を持つ。
- 2) 球形に関しては1/2球が最も抵抗差が大きくなる。
- 3) 底面に固定した粗度の抗力係数の相対水深に対する依存性は大きく、 h/k が増加するにつれ、 ΔC_d も減少する。
- 4) 今回実験を行った形状に対しては1/2円筒V字型粗度、1/2円筒上フタ付き粗度、1/4球型粗度、ロート型粗度が単体としては大きな抗力係数差を生じる形状であるが、その中でも順流方向の抗力係数が小さいことから1/4球、ロート型が最も有力な形状であるということが分かった。

今後は、より有利な単体粗度の形状の開発と、粗度の配列による抵抗特性について研究を進めていく予定である。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。ここに記して謝意を表します。なお、研究を進めるに当たり、有益なご助言を頂いた四川連合大学 李 嘉教授、九州大学 柴田敏彦技官に、また実験に多大なる協力をお願いした九州大学工学部4年生 和田真人君に感謝の意を表します。

—参考文献—

- 1) 上嶋英機, 他; 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, 海岸工学論文集, No. 38, pp. 851~855, 1991.
- 2) 村上和男, 他; 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, No. 37, pp. 411~418, 1993.
- 3) 大谷英夫, 他; 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, No. 42, pp. 1221~1225, 1995.
- 4) 栗谷陽一, 小松利光, 他; 人工粗度を用いた一方向流れの生成に関する研究, 水工学論文集, No. 39, pp. 589~594, 1995.
- 5) 矢野真一郎, 小松利光, 他; 内湾における潮汐残差流の制御の検討, 日本流体力学会年会'96 講演論文集, pp.367~368, 1996.
- 6) 気象学ハンドブック, pp. 291, 技報堂出版, 1958.

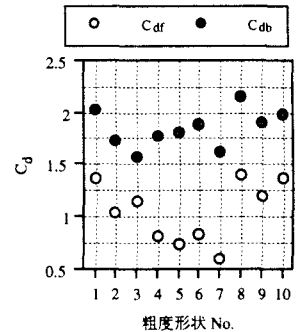


図-9 $Re = 5 \times 10^4$, $h/k = 5$ の時の各粗度形状の C_{df} と C_{db}

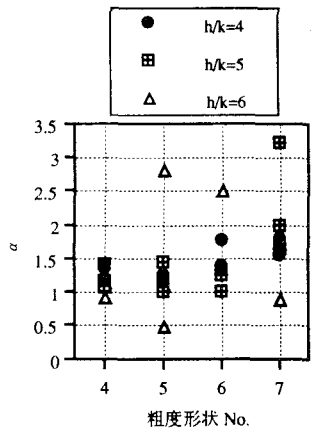


図-10 各粗度形状の α の比較