

方向抵抗特性を有する2次元粗度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDYS OF 2-DIMENSIONAL ROUGHNESS WITH DIRECTIONAL RESISTANCE PROPERTIES

朴童津¹・堤啓²・佐々木亨²・小松利光³

Donjin PARK, Kei TSUTSUMI, Akira SASAKI and Toshimitsu KOMATSU

¹ 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

² 学生員 九州大学大学院 工学府修士課程 (同上)

³ フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

Nowadays there are some chronic serious environmental problems in a complicated coastal zone and a semi-enclosed bay, because the water exchange between an inner bay and an outer sea is weak compared with supply of contaminant. Under this situation, a new technique is introduced to improve water quality. That is the method of controlling a residual water flow directly by using a particular devised shape of roughness. In this paper, it was tried to develop the most suitable shape of wall roughness which has a function to create and control a residual water flow in a pipe and a channel. At first, three types of shape were examined as fundamental cases; projection, dent, hybrid type. Next, applied shapes were examined experimentally. As results of this research, we could make the directional resistance properties of the projection and dent type roughness clear and propose the new technique of improving water quality using the developed wall roughness.

Key Words : *directional resistance property, roughness, one-way flow, water purification*

1. はじめに

近年、有明海において大規模な赤潮が発生し、海苔の収穫に大きな被害を与えるなど、閉鎖性の強い内湾や港内において水質の悪化が大きな社会問題となっている。その主な原因としては、これらの水域への流入淡水の水質が悪化したことに加え、汚濁物質が湾内あるいは港内から速やかに流出することが困難であることが挙げられる。従来からの水質改善技術の開発は、汚濁負荷や内部生産を減らすことに目を向けていたものが多く、汚染海域の流動に着目した開発の例は少ない。しかしながら、近年は水質問題に対しても対象領域の基本流動に関する理解の重要性が認識されてきており、この点に着目した研究もいくつかなされている。例えば、小松ら¹⁾の底面粗度ブロックを用いた水質改善技術は、海底に設置したブロックにより潮汐残差流を生成して閉鎖性内湾の水質を改善しようとするものである。また、山崎ら²⁾は開口部地形改変による停滞性海域の流況改善に関する実験的研究を行っている。

これらの研究の特徴は、設置構造物に非対称性を持たせ、流れの向きにより異なる抵抗を生じさせるなどして積極的に流れを創造・制御することにより水域環境を改善しようとしていることである。

本研究では、特に管路や側溝などの開水路に生じる一方向流れや往復流れを対象として、流速の調節や一方向の残差流を創造することにより流況を制御することを目的として、そのために内壁に設置する2次元粗度の抵抗特性について実験的に検討した。また、その特性を生かした閉鎖性海域の水質改善手法を提案する。

2. 実験装置および実験方法

実験は全長600cm、幅50cm、高さ42.4cmの亚克力製直線開水路を用いて行い、上流端から365cmの水路底面に設置された三分力計(株式会社三計エンジニアリング製LB25-500)により、取り付けた粗度に加わる流下方向の力(抵抗力 τ)を測定した(図-1)。三分力計の最大計測荷重は、凸型、Hybrid型の場合は500gf、凹型の場

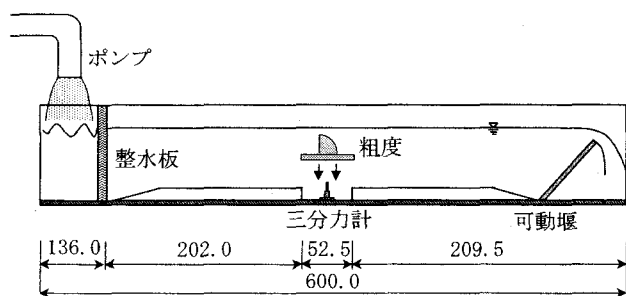


図-1 実験装置の概要図

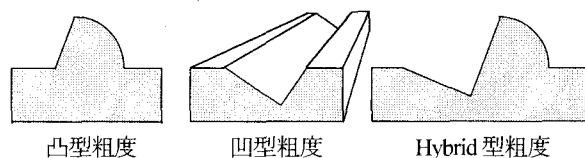


図-2 粗度の基本形状

表-1 実験条件

	凸型	凹型	Hybrid型
水深(cm)	30	14	30
断面平均流速(cm/s)	28	基本形状:62 三角形:100	35
Reynolds数	$7 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$	$9 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$	$8 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$
粗度幅(cm)	42.4	42.4	42.4
粗度高さ・深さ(cm)	5	7	12

合は100gfである(凸型,凹型等の粗度形状については後述).流量は上流端に設置されたポンプにより調節可能であり,水路下流端の可動堰により水深も調節することができる.また,実験毎に得られた τ ,水深 h および流量 Q から各粗度の抵抗係数 $C_D = \tau / (\rho AU^2/2)$ (τ :粗度の抵抗, 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($=Q/hB$), B :水路の幅)を算出した.

実験に用いた粗度の基本形は,図-2に示す①凸型粗度,②凹型粗度,③Hybrid型粗度の三つに分類される.凸型粗度は水路壁面から突出した形状であり,凹型粗度は逆に水路壁中に窪んだ形状である.また,Hybrid型粗度は両者を組み合わせたものであり,凸型および凹型粗度を単体で用いる場合より大きな抵抗差を生成できるものと思われる.本研究では,まず各粗度の基本的な形状について実験を行い,その抵抗特性を調べた.粗度はすべて流れと直交する水路幅方向に一樣な幅42.4cmの2次元粗度である.また凸型粗度に関しては,相対水深を一定とするため粗度高さを5cmで一定とした.

表-1に各実験条件を示す.凸型粗度およびHybrid型粗度の実験と較べて,凹型粗度の実験条件が異なっているのは,凹型の抵抗力が他に比べて小さいと予測されたためである.計測は同一の粗度に対して3回行われ,抗力データは1回の計測につきサンプリング周波数2Hzで3分間に渡って取得したものを平均して用いた.

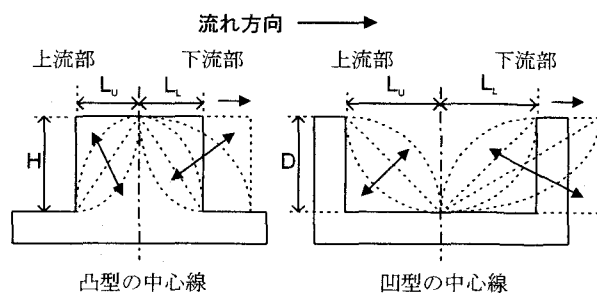


図-3 凸型粗度と凹型粗度の組み立て概念図

粗度の形状	C_D	粗度の形状	C_D
Case1-1 	1.42	Case1-6 	1.19
Case1-2 	1.38	Case1-7 	1.07
Case1-3 	1.26	Case1-8 	0.83
Case1-4 	1.23	Case1-9 	0.73
Case1-5 	1.20	Case1-10 	0.37

流れの方向

図-4 凸型粗度の基本形状および抵抗係数

3. 基本形状の抵抗特性

粗度形状は理論的には無数に考えられるが,すべての形状について実験を行うことは不可能である.従ってここでは,図-3に示すように,中心線を基準に上流側と下流側の形状の非対称性,および両者の流下方向長さ L_u, L_d の非対称性に着目し,まず凸型・凹型の大まかな抵抗特性について調べた.

(1) 凸型粗度の基本形状に関する実験

図-4に今回測定を行った凸型粗度の基本形状,および得られた抵抗係数の測定結果を示す.

まず,Case1-3,1-5を比較すると,Case1-3の方が抵抗がやや大きいことが分かる.この2つの粗度は,流れ方向の長さが10.0cm,流れに対する上流側が正方形である

粗度	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4
C_D	0.091	0.077	0.092	0.036
粗度	Case2-5	Case2-6	Case2-7	Case2-8
C_D	0.156	0.136	0.108	0.043
粗度	Case2-9	Case2-10	Case2-11	Case2-12
C_D	0.137	0.143	0.119	0.057
粗度	Case2-13	Case2-14	Case2-15	Case2-16
C_D	0.126	0.125	0.120	0.053

流れの方向
→

図-5 凹型粗度の基本形状および抵抗係数

点が共通しており、下流側の形状のみ異なっている。従って、これらの間の抵抗係数の差は粗度の下流側の形状差によるものと考えられる。下流側形状は45° 傾斜板の場合に比べ、1/4円弧の場合の方がより大きな抵抗を生み出すものと考えられる。次に、下流側の形状のみに着目し、Case1-2, 1-4, 1-6を比較すると、Case1-2の抵抗係数が最も大きく、次いでCase1-4, 1-6となっている。従って、粗度下流部の形状は①1/4円弧、②45° 傾斜板、③垂直板の順に大きな抵抗を生じさせることになる。

次に、Case1-5, 1-7およびCase1-3, 1-9をそれぞれ比較してみる。これらの粗度は、流下方向の長さがすべて10cmであり、下流側の形状が45° 傾斜板、あるいは1/4円弧であるという点で共通しており、上流側の形状のみが異なっている。Case1-5と1-7の比較から、流れに対する上流側の形状は45° 傾斜板に比べて垂直板の方が大きな抵抗を示しており、またCase1-3と1-9の比較から、1/4円弧に比べて垂直板の方が大きな抵抗を生成している。さらに、前述の結果より、流れに対する粗度下流部の形状は45° 傾斜板よりも1/4円弧の方が大きな抵抗を生み出すことを考慮すると、Case1-7と1-9の比較から、粗度上流部の形状は45° 傾斜板よりも、1/4円弧の方が小さな抵抗を示すものと考えられる。従って、粗度前面の形状は①垂直板、②45° 傾斜板、③1/4円弧の順に大きな抵抗を生み出すことが分かる。

また、粗度の長さが抵抗力に及ぼす影響については、Case1-7とCase1-8およびCase1-9とCase1-10をそれぞれ比較することによって、流下方向に長くなるにつれて抵抗係数が小さくなることが分かる。

以上の点を踏まえると、上流側の形状が垂直板、下流側の形状が1/4円弧、且つ流下方向の長さが短い粗度

ほど大きな抵抗を示すことになり、構造的安定性に欠けるCase1-1を除いて考えた場合、ここではCase1-2が最も大きな抵抗を生じさせる粗度形状であると言える。一方、抵抗が小さな粗度形状は、上流側が1/4円弧、下流側が垂直板の粗度となるが、これは最も大きな抵抗を示す形状と対称な形状である。従って、Case1-2が流れの向きによって最も大きい抵抗差を生み出す形状であると言える。

(2) 凹型粗度の基本形状に関する実験

凹型粗度の基本形状としてここでは、図-5に示す16ケースについて実験を行った。主として上流側と下流側の形状の非対称性に着目し、また前項の結果を踏まえ、一方向のみでなく両方向の流れに対する抵抗を測定した。

図中の粗度の配列は、横一列では上流側の形状が同一で下流側の形状が変化し、縦一列を見るとその逆の関係となるように並べられている。抵抗係数 C_D を比較すると、横の一列では右へ行くほど値が小さくなっており、特に下流側の形状が1/4円弧である場合に抵抗係数は大幅に小さくなることが分かる。一方、縦の各列では、若干のばらつきはあるものの、表中の下へ行くほど値が大きくなる。これより下流側の形状は1/4円弧形からL型に近づくほど抵抗力は増大し、上流部の形状はその逆の傾向であると言える。ちなみに、抵抗係数の大きさは凸型と比べると1/10程度に小さくなっており、単純に比較はできないがほぼ1オーダーの差があることが分かった。しかしながら、水路壁面や管路壁面より窪んだ粗度に対しても形状に非対称性を持たせることによって、流れの向きにより最大で4倍近く大きい抵抗力を生み出せることが分かった。

4. 方向抵抗特性をもつ粗度形状に関する実験

前章までの基本形状実験の結果、凸型・凹型ともに同一形状の粗度が流れの向きによって最大の抵抗と最小の抵抗を生み出す傾向があることが分かった。この結果は粗度がそのまま流況を制御する上で必要な方向抵抗特性をもつことを示している。ここではより大きな抵抗力差を得るため、前章の基本形状の結果をもとに、さらに形状を種々変化させて実験を行った。

(1) 凸型粗度の抵抗差を増大させるための実験

基本形状に関する実験結果より、凸型粗度に関しては、構造的安定性に欠けるCase1-1を除くと、Case1-2が最大の抵抗差を示すことが分かった。ここではこの形状を基本として、図-6に示す2つのパラメータを変化させることによって、抵抗力の差がどの程度変化するかを調べた。

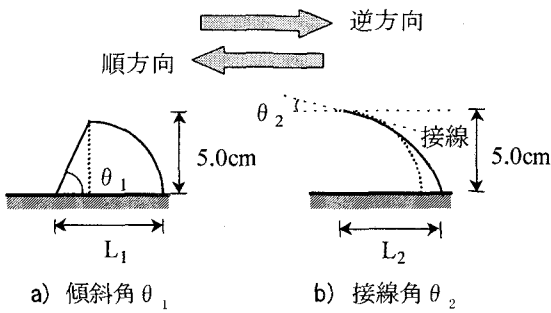


図-6 凸型粗度の形状変化に用いるパラメーター

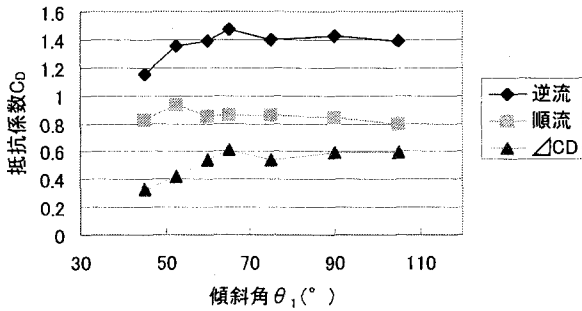


図-7 傾斜角 θ_1 と抵抗係数の関係

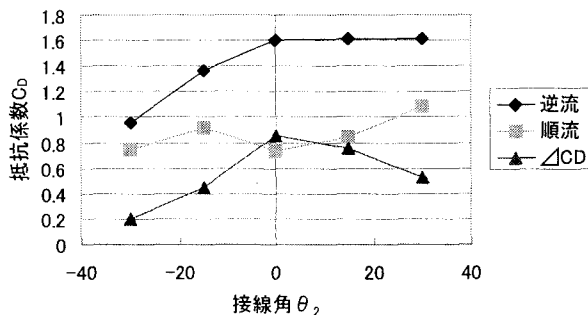


図-8 接線角 θ_2 と抵抗係数の関係

a) 粗度前面の傾斜角 θ_1 を変化させる実験

基本形状実験では、粗度の傾斜角 θ_1 について 45° と 90° の2ケースしか実験を行っておらず、その間の値に関する傾向は不明である。そこで、ここでは前面平板の傾斜角 θ_1 を変化させ、往復両方向の流れに対する抵抗力を測定した。1/4円弧の部分はすべて半径5cmの同一のものをを用い、実験は $\theta_1 = 45^\circ, 52.5^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$ の7通りについて行った。

図-7は傾斜角度 θ_1 と抵抗係数 C_D の関係を示したものである。ここで、図中の順流とは、小さな抵抗値を示した流れの向きを示しており、逆流とは抵抗が大きかった流れの向きとして定義している(図-6)。逆流に対する抵抗値では、 θ_1 の増加につれて $\theta_1 = 65^\circ$ までは抵抗係数は増加傾向にあるが、それ以上ではほぼ一定値を示している。一方、順方向流れに対しては、全角度にわたってほぼ一定の値を示している。その結果、順・逆両方向の抵抗係数の差 ΔC_D は逆方向抵抗係数に支配され、 $\theta_1 = 65^\circ$ で ΔC_D が最大値をとり、それ以

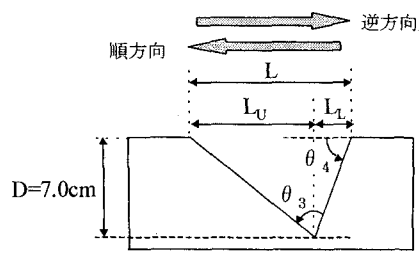


図-9 三角形凹型粗度の変形に用いるパラメーター

上ではほぼ一定になる。

b) 円弧部分の接線角 θ_2 を変化させる実験

粗度形状を変化させるもう一つのパラメーターとして、図-6のb)に示す円弧端の接線角 θ_2 について考える。 θ_2 を変化させることで抵抗係数が大きくなれば、傾斜角 θ_1 の効果と組み合わせることで抵抗係数差をより大きくできることになる。接線角 θ_2 は半径の異なる円筒管を適当に切断することによって調整されており、水路床と平行な直線を基準とし、時計回りの角度を正と定義した。高さは5cmで一定としている。

図-8は接線角 θ_2 と抵抗係数 C_D の関係を示したものである。逆流に対しては、接線角 θ_2 が負である場合は抵抗係数の値が減少傾向にあり、 θ_2 が正の場合はほぼ横ばいとなっている。これは負の場合は、覆い被さった分だけ粗度の開口部が減少し、抵抗を生成しづらくなるためと考えられる。一方、順方向流れに対する抵抗は θ_2 が正の領域において若干の増加傾向が見られ、その結果抵抗係数の差 ΔC_D は $\theta_2 = 0^\circ$ 、つまり1/4円弧のときに最大となっている。

従ってこれまでの1/4円弧形凸型粗度実験で、 $\theta_1 = 65^\circ$ 以上、 $\theta_2 = 0^\circ$ の場合が抵抗差が最大になることが明らかになった。

(2) 三角形凹型粗度の抵抗力を増大させるための実験

前章において、凹型粗度に関してはCase2-4(Case2-13)が最大の抵抗力差を示していることが分かった。しかしながら、基本形は全て上流側と下流側の形状は非対称であるが、両者の流下方向長さの非対称性は考慮されておらず、この点に関する知見は得られていない。ここでは、比較的形状が単純である三角形凹型粗度を対象にして考察を行った。形状は図-9に示す2つのパラメーターをもとに変化させ、抵抗力の変化について調べた。

a) 底角 θ_3 を変化させる実験

前章の凸型粗度に関する実験では、流れに対する上流部の形状が、流れ方向と 65° 以上の角度をなす場合に抵抗力の差が最も大きかった。この事実を踏まえ、平板の傾斜角 θ_4 を 65° および 90° に固定し、それぞれについて θ_3 のみを変化させ、上流側の流下方向長さ L_u を変化させた。測定は $\theta_4 = 65^\circ$ に対しては $\theta_3 =$

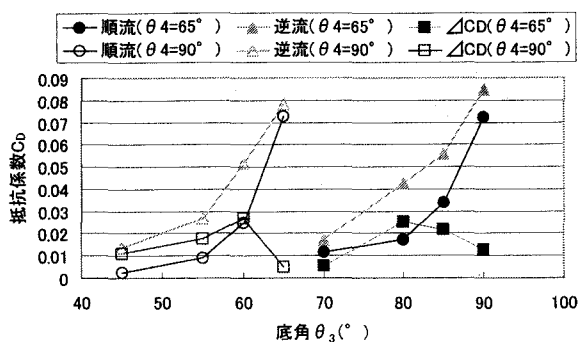


図-10 底角 θ_3 と抵抗係数の関係

70°, 80°, 85°, 90° について, $\theta_4=90^\circ$ に対しては $\theta_3=45^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$ について行われた。

図-10に測定結果を示す。 $\theta_4=65^\circ$ の場合は $\theta_3=80^\circ$ において, $\theta_4=90^\circ$ では $\theta_3=60^\circ$ において抵抗力の差が最大となった。このとき, 粗度の開口部の長さ L は 12.3cm と 11.9cm と算出され, これらより求められる L/D の値は 1.76 および 1.70 である。このことから, 最大の抵抗値を生み出す L/D 値は 1.7 程度であると考えられる。

b) 傾斜角 θ_4 を変化させる実験

前項より得られた知見から L/D を 1.76 に固定し, 傾斜角 θ_4 を変化させて実験を行った。 θ_4 の値は, 57.5°, 65°, 75°, 90°, 97°, 105°, 120° の 7 ケースである。なお, θ_4 の変化に伴い θ_3 も変化しており, 三角形凹型粗度を構成する 2 辺は, 共にその傾斜角が変化している。

図-11に測定結果を示す。順・逆両方向ともに抵抗係数は θ_4 が 90° 以上において減少をはじめるが, 一方抵抗係数の差は 100° 前後で大きな値を示している。これは, θ_4 が 90° 以上になると, 図-12に示すような死水領域が生じ, 実質の粗度深さが減少することによって, 抵抗を生成する面積が小さくなってしまったためと考えられる。

これまでの三角形凹型粗度の実験から, 深さに対する長さの比が約 1.7, $\theta_4=100^\circ$ 程度で最も大きな抵抗差を生じさせることが分かった。

(3) Hybrid 型粗度に関する実験

前項までの実験により, 凸型・凹型粗度はともに流れの向きによって異なる抵抗特性を持たせ得ることが確認された。そこで, これらの粗度をうまく組み合わせて Hybrid 型粗度とすることで, より大きな効果を得られることが期待される。ここでは, 凹型粗度に比べ, 凸型粗度の抵抗係数がワンオーダー大きかったことから, 抵抗特性については凸型粗度が支配的であると考え, 凸型粗度としてこれまでの実験で最も顕著な方向抵抗特性を示した 65° 傾斜板と 1/4 円弧の組み合わせを採用し, 補助的な役割を担うと思われる凹型粗度に

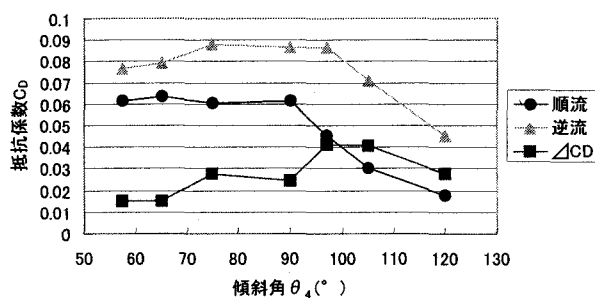


図-11 傾斜角 θ_4 と抵抗係数の関係

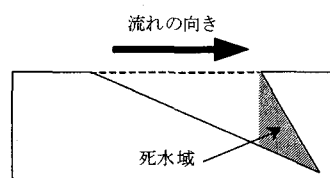


図-12 θ_4 が 90° 以上における死水域

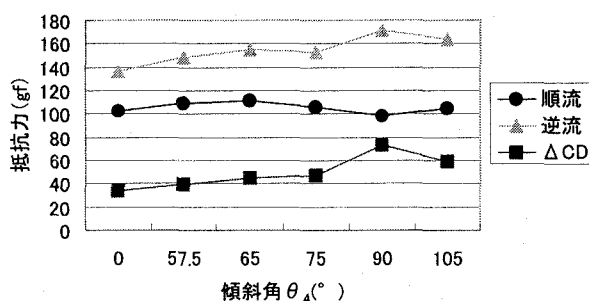


図-13 Hybrid 型粗度の傾斜角 θ_4 と抵抗力の関係

については, 前項の実験で用いた $D=7.0\text{cm}$, $L/D=1.76$, θ_4 を変化させた 7 ケースのうちの 6 ケースを用いて順・逆流の場合の抵抗を測定した。

図-13に測定結果を示す。凸型粗度と Hybrid 型粗度の比較を行う上で凹型部分の投影面積の定義が大きな影響を及ぼすため, ここでは抵抗力そのもので比較を行った。順流の抵抗力は $\theta_4=0^\circ$, すなわち凸型のみの場合とほとんど同値であるが, 逆流の抵抗力は 90° までは増加傾向にあり, その結果抵抗力差も増加傾向を示している。これより, Hybrid 型粗度にする事で方向抵抗差が大きくなることが確認された。

5. 方向抵抗特性をもつ粗度を用いた水質改善手法の提案

これまでの実験結果から得られた知見をもとに, 突堤や離岸堤などの防波堤下部にパイプ (以降 One-Way Pipe と呼ぶ) を設け, その形状を工夫することによって, パイプ内に実質的に一方向流れを生成し, 閉鎖性水域の海水交換を促進する方法を提案する (図-14)。

往復流場である海域の防波堤下部にパイプを設けると, パイプの両端における水頭差の時間変化や波浪に

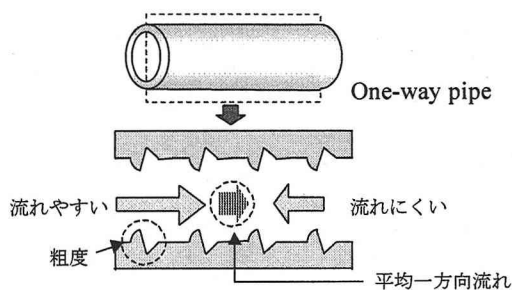


図-14 One-way pipe の概念図

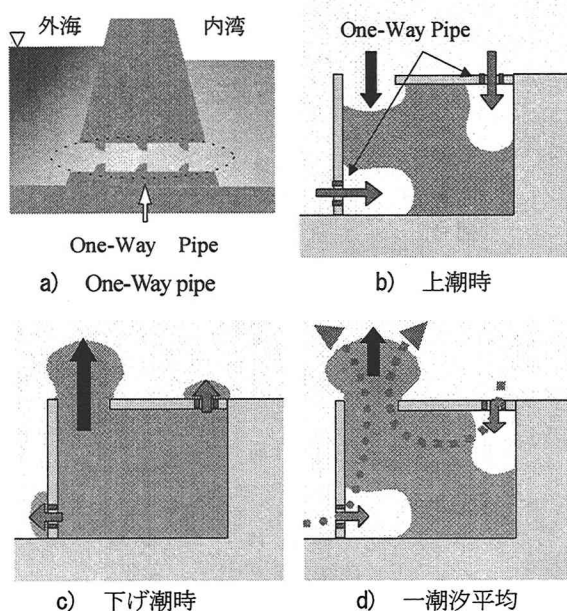


図-15 One-Way pipe を用いた水質改善の概念図

よってパイプ内に往復流が形成されるが、パイプの出・入口の形状に非対称性を持たせたり、内壁に非対称な凹凸形状を設けたりすると、パイプを通過する流体が受ける抵抗力が流向によって異なってくるため、長期間にわたって平均すると実質的な一方向流れが生成されることになる。そのため防波堤より奥側と沖側との間の海水交換が促進され、水質の改善が期待できる(図-15)。本手法は一旦適用されるとその後はメンテナンス・フリーとなるため、低コストで閉鎖性水域の水質改善を達成することが可能となる。

6. 矩形管による One-Way Pipe の効果に関する実証実験

One-Way pipe の効果を確認するために、抵抗差が大きく、比較的単純な形状の凸型基本形状粗度 Case1-2 を間隔 $L=8\text{cm}$ 、高さ $k=1\text{cm}$ として 10cm 四方の矩形管内壁に設置し、流量を変化させて損失水頭を測定した(図-16)。測定結果をもとに粗度係数 n を求めたところ、順方向では $n=0.037(\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s})$ 、逆方向では $n=0.050(\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s})$ 、粗度がない場合では $n=0.007(\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s})$ であった。この結

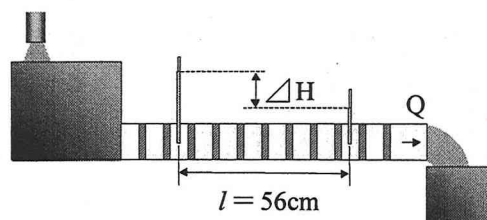


図-16 矩形管水路実験装置

果より、One-Way pipe を防波堤に設けた際に前後の水位差が順方向、逆方向で等しい場合、順方向の流量は逆方向の1.35倍多くなることが予測される。今後、矩形管断面積、粗度高さ、設置間隔、粗度形状などを工夫・変化させることによって、抵抗力差をさらに増大させたり、あるいは抵抗力差はそのまま抵抗力の絶対値を抑えたりできることから、今回求められた結果よりも更に大きな流量差が得られることが期待される。

7. 終わりに

今回の実験により、粗度の形状を工夫することによって、流れの向きによって異なる抵抗力を生み出せることが確認された。中でも、凸型粗度はその効果が大きく、港湾のような閉鎖性海域の水質改善技術への応用が期待される。また、凹型粗度のコンセプトは初の試みであり、非対称形状の凹型粗度に関しては、一般的な抵抗特性を明らかにすることができた。

水質改善技術としての One-Way pipe の効果が確認できた。技術の実用化に向けて今後も研究を進めていく方針である。

謝辞: 本研究を行うに際して、九州大学4年生の工藤教勇君には多大なる協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小松利光・小橋乃子・田嶋健太郎・藤田和夫・安達貴浩・矢野真一郎・末松吉生・甲斐一洋：底面粗度を用いた海域の水質改善技術の実用化へのアプローチ，水工学論文集，2000年3月，第44巻，pp.957-962
- 2) 山崎宗広・宝田盛康・上嶋英機・朝位孝二：開口部地形改変による停滞性海域の流況改善に関する実験的研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.1026-1030

(2001. 10. 1受付)