

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

AN APPROACH TO THE APPLICATION OF THE METHOD TO IMPROVE
WATER QUALITY BY USING BOTTOM ROUGHNESS

小松利光¹・小橋乃子²・田嶋健太郎³・藤田和夫⁴
安達貴浩⁵・矢野真一郎⁶・末松吉生⁷・甲斐一洋³

Toshimitsu KOMATSU, Naoko KOHASHI, Kentaro TASHIMA, Kazuo FUJITA,
Takahiro ADACHI, Shinichiro YANO, Yoshio SUEMATSU and Kazuhiro KAI

¹ 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海洋システム工学専攻 (同上)

⁴ 正会員 九州大学技官 工学部地球環境工学科 (同上)

⁵ 正会員 博(工) 日本学術振興会PD 特別研究員 (同上)

⁶ 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)

⁷ 正会員 東栄商興株式会社 代表取締役 (〒819-1132 福岡県前原市大字有田750 番地)

Nowadays water pollution caused by eutrophication in a semi-enclosed bay has been a serious problem. In order to solve this problem, a method has been proposed to activate the water exchange between an inner bay and its outer sea area by using Bottom Roughness with directional resistance properties. In this paper, a possibility for practical use of this method was examined from many angles. First, the basic effect of Bottom Roughness on substance transport was examined by a laboratory experiment. Next, 2-dimensional numerical simulations were carried out to estimate the validity of this method in the Nagoya Port that has a complicated topography. Lastly, it was reported that four kinds of Bottom Roughness were sunk to investigate their influence on the scour of seabed and the water environment. From these results, it becomes clear that this method is efficient to improve the water quality in real sea areas.

Key Words : Bottom Roughness, water restoration, tidal exchange, tide induced residual current, remediation technique

1. はじめに

近年、富栄養化に伴う海域の水質悪化が大きな社会問題として注目されているが、内湾などの閉鎖性海域における環境基準の達成率は依然として横ばい状態にある¹⁾。これは、従来の下水道整備や法規制といった取り組みだけではこれ以上の水質悪化を防ぐことだけで精一杯であり、抜本的な改善にまで至らないことを示唆している。しかも、内湾にもたらされる栄養塩は陸域からの流入だけでなく、底泥からの溶出にも強く依存していることを考えると、流入負荷の削減に加えて海域に直接働きかける水質改善技術が必要不可欠であると言える。

このような状況認識の下、著者らは潮流の向きにより抵抗特性の異なる底面粗度を利用して潮汐残差流を生成・制御し、停滞性海域の海水交換自体を活発化させる方法を提案している²⁾。本手法は人工エネルギーを一切用いない水質改善技術であり、海底面に設置する底面粗度に更に付加価値をもたせることによって、積極的に好

ましい環境創造を行うレギュレーション技術としてその実用化を目指している。本手法の特徴を以下にまとめる。

1. 本手法は人工エネルギーを一切使わず、日常的な自然エネルギーである潮汐流のみを使った水質改善策であり、一度設置するとメンテナンスで半永久的に効果が期待できる。
2. 底面粗度を海底に配置することにより潮汐場の残差流を自由にデザインできるようになるため、既に存在する固有の環流等も利用して最も物質輸送に有効な流れを創造・制御できる。
3. 底面粗度を高さが水深の1～1.5割程度の既製品のユニットとして沈めるため、景観上も全く問題がなく、除去も比較的容易であることから自然に対するインパクトの微調節が可能である。
4. 小さい漁港から重要港湾のような大きな閉鎖性海域や沿岸域まで、その規模を問わず適用可能である。
5. 沈設する底面粗度に魚礁・魚巢、藻場の育成、成層化抑制(湧昇流による貧酸素化の抑制)等の機能をもたせることにより、現状より大幅に豊かな生態環境への

改善が期待できる。

この技術を実用化するために、有効な形状をもつ底面粗度の開発や²⁾、効果的な物質輸送を実現する流況制御法についてこれまで検討されてきたが³⁾、実地的な側面に関する議論はまだそれ程なされていなかった。また、これまでの研究では数値計算でのみ水質改善効果を確認していたことから、室内実験等の実際の往復流場でその効果を確認する必要があった。そこで、本論文ではまず第一に室内水理実験を行い、本手法のもつ基本的な物質輸送促進能力を確認した。更に、流入河川や既存の環流が存在する複雑な海域での物質輸送促進効果を検証するために、閉鎖性の強い名古屋港を対象とした平面2次元数値シミュレーションを行った。なお、本手法では底面粗度を海底面に設置することから、粗度の埋没や滑動、周辺底層の洗掘等の可能性についてかねてよりそれらの検証が望まれていた。そこで現在これらの問題を検討するための現地実験が行われているので、その概要と観測結果についても併せて報告する。

2. 底面粗度による物質輸送促進効果の検証実験

本手法は潮流場で底面粗度の形状特性によって与えられる残差抵抗力を用いて、停滞性海域に新たな残差流を生成しようとするものである。残差抵抗力とは粗度によって流体に与えられる時々刻々の抵抗力を一潮汐平均したもので、この残差抵抗力を平面的にデザインすることで流体に運動量を与え、残差環流を生成する。従来の数値シミュレーションでは、流体の連続条件を考慮しながら残差抵抗力の配置を行うことではほぼ想定どおりの結果が得られているが、これまで実験的な裏付けはなされていなかった。そこで、底面粗度により実際に湾内の物質を輸送できるかどうかを確認するための粒子追跡実験を行った。

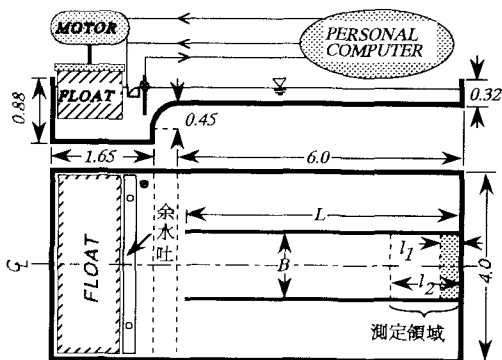


図-1 平面水槽模式図（上：側面図、下：平面図、単位：m）

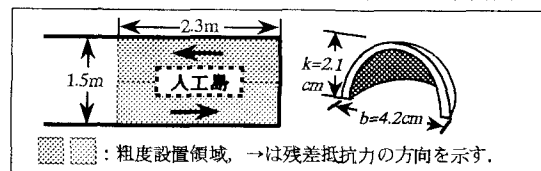


図-2 粗度配置図（実験1）および1/4球型粗度の概略図

実験装置は「ランジャタイプ」の潮汐発生装置と幅4m、奥行き6m、高さ0.32mの水槽から構成されており、水槽内部に設置された仕切り板により矩形湾の形状（幅B、奥行きL）を2通りに変化させた（図-1）。

(1) 人工島がある矩形湾の場合：実験 1

まず最初に細長い矩形湾（幅B=1.5m、奥行きL=4.5m）に人工島（幅50cm、奥行き136cm、高さ30cm）が存在する閉鎖性海域を想定し、底面粗度を配置しない場合（Case1）と配置した場合（Case2）について実験を行った。実験に用いた底面粗度は1/4球型粗度（粗度高さk=2.1cm）で、15cm×15cmの領域に1個の割合で人工島を中心に反時計周りに残差抵抗力が働くように粗度配置を行った（図-2）。また、実験で与えた潮汐は周期120秒、振幅2cmの正弦波であり、平均水深は10.5cmとした。各Case毎の実験条件を表-1に示す。

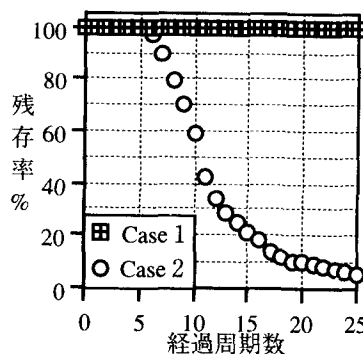


図-3 浮標残存率の経時変化（実験1）

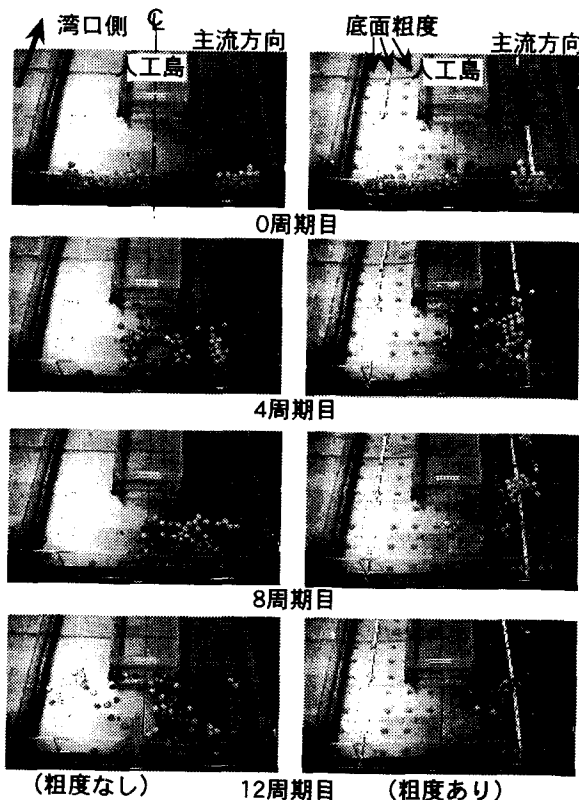


図-4 各周期満潮時の浮標の様子（最湾奥部から湾口に向かって撮影）

表-1 実験条件

	実験 1	実験 2
湾幅B	1.5m	3.0m
奥行きL	4.5m	4.3m
人工島	有	無
浮標投入領域 $l_1 \times B$	$0.3 \times 1.5 \text{ m}^2$	$0.6 \times 3.0 \text{ m}^2$
測定領域 $l_2 \times B$	$1.0 \times 1.5 \text{ m}^2$	$1.5 \times 3.0 \text{ m}^2$
浮標投入数	72個	288個
粗度配置	無 (Case1)	無 (Case3)
	有 最湾奥から2.3m までの領域 (Case2)	有 最湾奥から3.0m までの領域 (Case4)

物質輸送能力を評価するためにプラスチック製の浮標(直径約5cm)を湾奥から $l_1=0.3\text{m}$ までの領域に投入し、各周期の満潮時毎に浮標測定領域内(湾奥から $l_2=1.0\text{m}$ までの領域)に残存する浮標の数を調べた。実験は各3回ずつ行い、初期投入個数に対する浮標の平均残存率を算出した。この際、測定領域内から一度流出した浮標については再度の投入はしないことにした。平均残存率の経時変化を図-3に、浮標を投入してから0, 4, 8, 12周期後の湾奥部における浮標の残存状況を図-4に示す。

図-3から、底面粗度を配置しないCase1では浮標投入後25周期経っても浮標の実質的移动は全くなく、浮標が停滞している様子が分かる(図-4)。一方、底面粗度を配置したCase2の場合、初期状態では均等に配置されていた粒子が、次第に反時計周りに移動し、湾外へ流出する様子がはっきりと見られる。この結果は残存率にも反映されており、粒子が測定領域境界に初めて到達する6~7周期を過ぎた辺りから残存率が低減し、25周期後になるとほとんどの浮標が測定領域の外に運ばれている。このことは底面粗度による残差抵抗力によって反時計周りの潮汐残差流が生成され、それによって浮標が輸送された結果に他ならない。

以上のことから人工島背後のような停滞性海域においても、底面粗度によって物質輸送の促進が可能であることが実験的にも明らかとなった。

(2) 開放性矩形湾の場合(人工島無し):実験2

実験1において本手法による効果が実際に確認されたが、人工島があるような領域では、人工島に沿った一方向流れが形成されやすく、流況制御に有利な状況であったと考えられる。そこで湾幅を2倍に広げ、人工島を取り除いた開放性矩形湾 ($B=3.0\text{m}$, $L=4.3\text{m}$) を対象として、底面粗度単独での流況制御効果を調べた。実験1と同様に底面粗度を配置しない場合(Case3)と配置した場合(Case4: $3 \times 3 \text{ m}^2$ の領域に粗度を配置)の2ケースについて実験を行った(表-1参照)。

平均浮標残存率の経時変化を図-5に示す。Case3, 4の浮標残存率に明らかな差が見られ、底面粗度により湾奥の物質輸送が更に促進されたことがわかる。開放性の湾であるためCase3においても残存率の低下が見られたが、これは定常的な残差流というより、むしろ傾向性のない

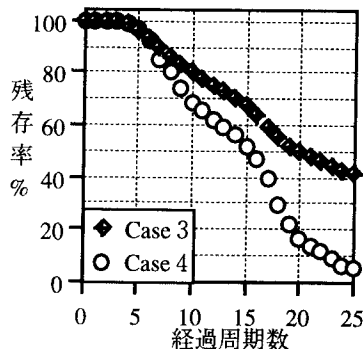


図-5 浮標残存率の経時変化(実験2)

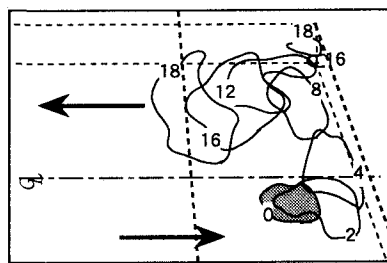


図-6 各周期満潮時の浮標追跡結果(実験2)
図中の数字は経過周期数を示す

ランダムな流れによるものであることが実験時の観察により確認されている。これに対し、Case4の流況を調べるため、湾のほぼ中央に浮かべた浮標群の位置を各周期の満潮時に追跡したところ、浮標群が次第に拡がりながら反時計周りの残差流に乗って湾口へと移動していく様子が観察された(図-6)。

以上の実験結果から、人工島の有無に拘わらず、底面粗度のみでも十分効力のある潮汐残差流を生成できることが実証された。

3. 実海域を対象とした本手法の適用の検討

実際の海域は一般に複雑な地形をもち、河川流入等の影響も受けることから、単純な矩形湾よりも底面粗度による流況制御が困難であると予想される。そこで閉鎖性の強い海域で水質悪化の深刻な名古屋港に対して本手法を適用した場合の海水交換の促進効果を数値シミュレーションにより検討した。更に、この結果から実用化の可能性についても検討を行った。

(1) 数値シミュレーションの概要と結果

最初に伊勢湾全体(大領域:メッシュ間隔 $\Delta x = \Delta y = 600\text{m}$) に対してADI法による平面2次元潮流計算を行った後、その結果を境界条件として名古屋港を含む湾奥側(常滑市より北側の海域(小領域:メッシュ間隔 $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$))について計算を行った。対象潮汐をM₂潮とし、伊勢湾開口部における潮位振幅を49cm、渦動粘性係数を大領域で $100.0\text{m}^2/\text{s}$ 、小領域で $10.0\text{m}^2/\text{s}$ 、コリオリ係数を $8.3 \times 10^{-5} 1/\text{s}$ 、海底摩擦係数を0.0026とした。底面粗度の効果は室内実験から得られた流向と抵抗力の関係をを用いて、運

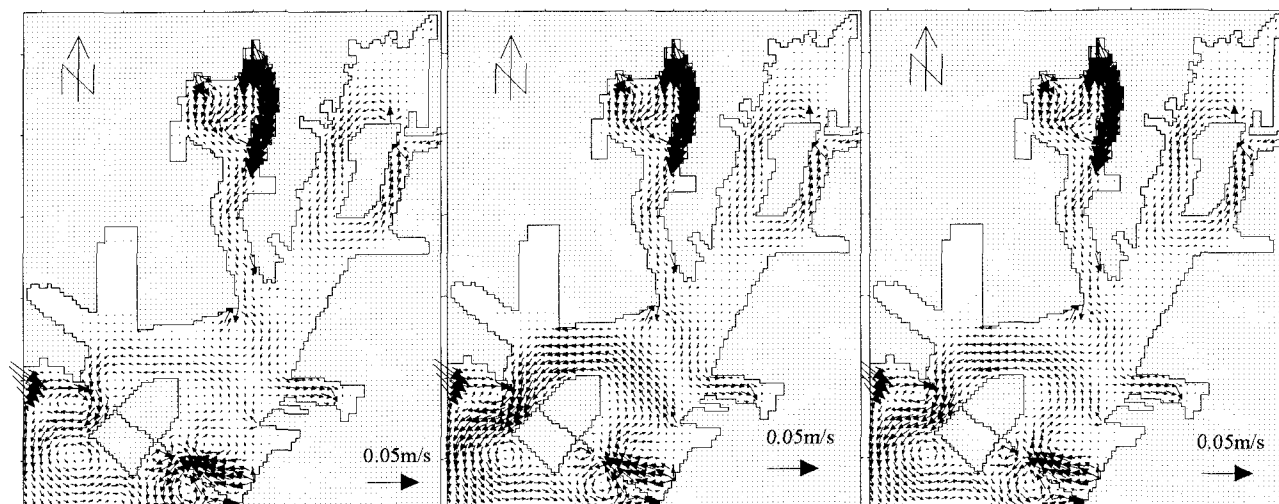


図-7 潮汐残差流計算結果(Cal-1)

図-9 潮汐残差流計算結果(Cal-2)

図-12 潮汐残差流計算結果(Cal-4)

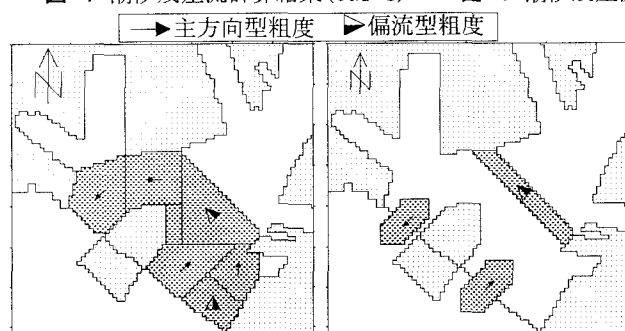


図-8 粗度配置図(Cal-2)

図-11 粗度配置図(Cal-3, 4)

動方程式中の外力項として取り入れた。なお、底面粗度には主方向型(1/4球型粗度、高さ2m、幅4m)、直交偏流型(1/4円筒2重型粗度、高さ2m、幅3.6m)の2種類を用いた。ここで、主方向型は流れの方向に、直交偏流型は流れと直交する方向にそれぞれ残差抵抗力生成能力をもつ粗度となっている。更に、底面粗度による物質輸送促進効果を調べるために、防潮堤より奥側全域に一樣濃度($C = 10.0$)の拡散物質を投入し、その港内残存率の経時変化を調べた。以下に具体的な結果を示す。

名古屋港は港口に防潮堤が整備されており、それによって港外側と港内側の水質が大きく変化している(CODにして1mg/l変化)。そのため名古屋港内の海水交換を効率的に促進するには、港内と港外にまたがる残差環流を生成することが最も有効であると考えられた。現況の潮汐残差流計算結果(Cal-1: 図-7)を見ると、港口の人工島を中心とする反時計周りの弱い残差環流が見られることから、この環流を更に強化する方向で流況制御を試みた。

まず最初に港口部のほぼ全域に対して、1メッシュ当たり主方向型100個もしくは直交偏流型50個の底面粗度を配置するケース(Cal-2)について計算を行った(図-8、但し、図中の矢印は残差抵抗力の方向を示す)。図-9に名古屋港付近の潮汐残差流の状況を、図-10に港内残存率を示す。

その結果、底面粗度により港口の残差環流が強化され、60周期後には港内残存率を現況(Cal-1)より約10%ほど

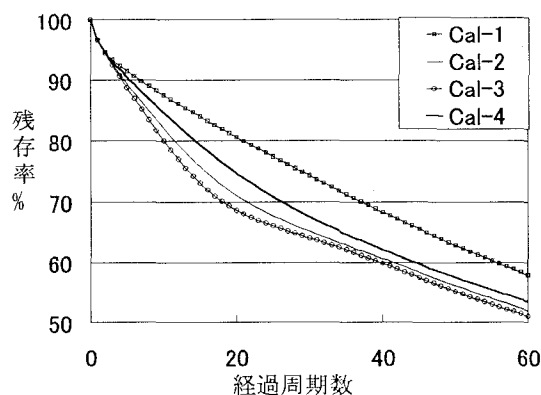


図-10 拡散物質残存率の経時変化

低減することが出来た。

この結果から、複雑な実海域においても本手法によって流況制御が可能であることが示されたが、Cal-2では約8.32km²に7万個もの底面粗度を設置することになるため、現実性の乏しい適用例と言える。そこで、潮流流速の速い港口付近に、局所集中的に粗度を配置(図-11)することで配置個数の削減を試みた(Cal-3; 約3.4 km²の領域に2万7千個配置)。Cal-3の計算を行った結果、Cal-2とほぼ同様の残差環流を生成することができ(結果省略)、しかも残存率についてはわずかながらCal-2よりも減少していた。このことから、海域の効果的な流況制御ならびに海水交換の促進には、単に大量の粗度を広範囲に配置すれば良いというわけではなく、潮流エネルギーが卓越するような領域に対して部分的に配置することが効率的かつ経済的であることが分かる。

更に、Cal-3と同じ配置パターンで底面粗度の個数を1メッシュ当たり主方向型25個もしくは直交偏流型10個(計約6500個)と1/4以下に減らしたところ(Cal-4)、残差流の強さは若干弱くなったものの人工島を中心とする環流は生成されており(図-12)、十分に流れを制御できることが示された。また、Cal-3と比べて1/4以下の粗度個数であるにも拘わらず、残存率の差はそれほど見られなかった。

底面粗度を配置した各ケースについて比較を行うと、港口の残差環流が強い順に残存率が低くなっているが、その差は予想以上に小さい。従って、物質輸送能力の促進効果に対しては、残差流の強弱よりもその存在の有無が特に重要な要素であると考えられる。残差環流の効果を維持しながら粗度の個数をどの程度まで減らすことが可能かという問題については今後のより詳細な検討を必要とするが、6500個程度の粗度配置でも名古屋港という複雑かつ広大な領域に対して海水交換を促進できることから、本手法は十分実用的な技術であると言える。

(2) 古タイヤを用いたリサイクル底面粗度の提案

本手法では多数の底面粗度を海底面に配置することから、そのコストについても配慮する必要がある。そこで、タイヤを半分に切断した形状に着目し、単体もしくはその組み合わせによって作られる底面粗度の残差抵抗力生成能力について調べた。

実験水路として小松ら²⁾と同一のアクリル製直線開水路(長さ6m, 幅0.5m, 高さ0.5m)を用い、小型3分力計によって測定された底面粗度への抗力から、抗力係数Cd($=D/(1/2 \rho AU^2)$; ここで D: 粗度に対する抗力, ρ : 水の密度, A: 粗度の投影面積, U: 断面平均流速)を求めた。Reynolds 数 70000, 相対水深 $h/k=4$ として、流れやすい方向 (Cdf) と流れにくい方向 (Cdb) の抗力係数差 ($\Delta Cd = Cdb - Cdf$) を求め、最も基本的かつ効果的な粗度の1つである1/4球型底面粗度との比較によりタイヤを用いた底面粗度の効果を評価した。

1/4 球型粗度(半径6.0cm)を Type 1 とし、Type2は外径3.8cm, 内径2.5cm, 幅3.7cmのタイヤを半分に切断した形状(図-13)とした。Type3はType2を2段に重ねた形状、Type4は開口部が60°になるようにType2をハの字に並べた形状をもち、Type5はタイヤを1/4に切断しそれを2列並べて立てた形状である(図-13)。またタイヤの単体の大きさには限度があるため、比較的水深の深い所では複数個のタイヤを組み合わせる必要がある。そこで外径

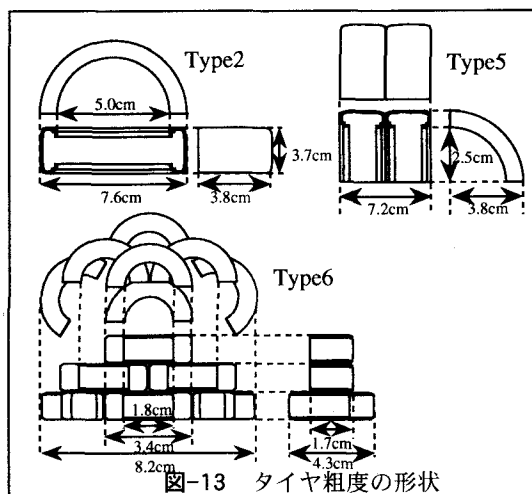


図-13 タイヤ粗度の形状

1.7cm, 内径0.9cm, 幅1.3cmのタイヤを図-13のように3段に組み合わせたものをType6とし、その効果についても検討を行った。

図-14に示す実験結果から明らかなように、今回用いた形状では1/4球型の抗力差が最も大きく、それよりも優れた効果をもつタイヤ粗度を開発することは出来なかった。しかし比較的大きな抗力係数差をもつType3, 5の形状は簡単で加工しやすいため、古タイヤを用いることの社会的意義および経済性を考えると、これらの粗度の利用価値は十分に高いものと考えられる。特にマリーナや漁港といった小規模海域に対しては、現実的で安価な粗度として活用できる可能性が高い。

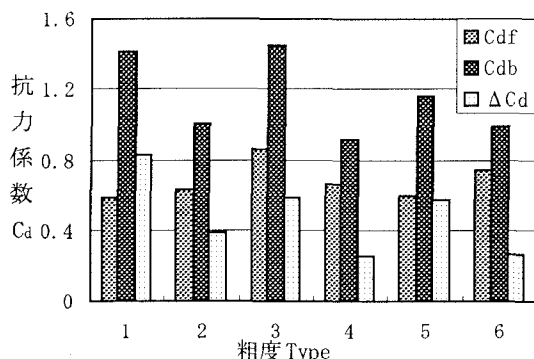


図-14 各タイヤ粗度の抗力係数

4. 現地実験の概要

著者らは施工の簡単化や設置後の微調整を可能にするため、粗度と底盤を1ユニットとして海底面に単に置いていく手法を考えている。このような方法を適用する場合、粗度の埋没や滑動、周基底層の洗掘等が問題となると考えられた。そのため、底面粗度の安定性と強度および底面粗度のもつ魚礁、藻場育成機能等を確認するために、1999年8月11日に福岡県志摩町野北漁港沖(図-15)の水深6.5m程度の海域に実物スケールの底面粗度4基を設置して現地実験を行っている。

(1) 現地および設置状況

野北漁港は唐津と博多港の間に位置し、玄界灘に面する外海である。そのため、夏季は比較的穏やかというものの、台風時や北風が吹きこむ冬場には強いうねりや波浪が発生し、底面粗度の設置に対してはかなり厳しい条

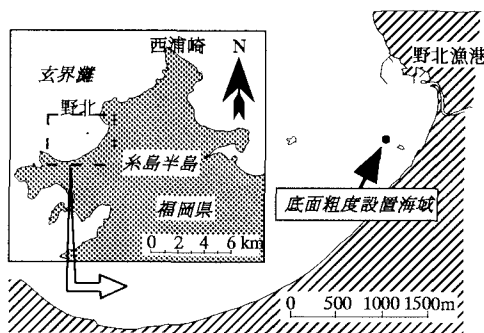


図-15 底面粗度の設置海域

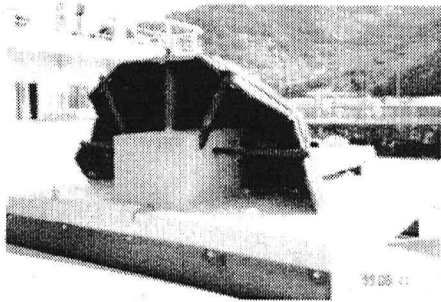


図-16 1/4 球型粗度(廃プラスチック製)

件といえる。波浪は海岸線にほぼ垂直に入射するため、抵抗が大きい面を沖に向け、海岸線と平行になるように約9mの間隔で設置した。実験には1/4球型(図-16)、異径円筒3連型、タヤ型、可動式の4種類の底面粗度を用いた。いずれも3m×2.5m×0.25mのコンクリート製底盤に据付けており、高さを1.5mとした。また、各底盤には滑動防止用として底面より更に20cmほど突出した鉄板杭を設けている。

底面粗度の設置前後の変化を調べるために、1999年7月12日に事前調査として深浅測量および潜水調査を行った。その結果、底面粗度の設置海域はなだらかな砂地であり、周辺海域では特に動植物は観測されなかった。

(2) 底面粗度設置後の調査

設置から約1ヶ月後(同年9月9日)に潜水調査を行い、底面粗度の洗掘や埋没状況、滑動の有無、砂の移動、底生生物・魚類・藻等の育成状況を調べた。

まず最も懸念されていた底面粗度の埋没について見ると、底面粗度およびその周辺部での砂の堆積はほとんど見られず、むしろ底盤の角の滑動防止用鉄板杭部分で若干の洗掘が見られた(図-17)。しかし、洗掘の程度もそれほど大きくなく、それによる底面粗度の転倒、傾斜はまったくなかった。この鉄板杭は台風等による暴浪時の滑動防止のために設けられたが、設置後は比較的穏やかな日が続いたため、現在のところその効果は確認されていない。平面的な滑動についても海底深く埋設された基準点から測量を行ったところ、移動は見られなかった。

次に底面粗度の付加機能について着目すると、底面粗度には藻が着床し始め、洗掘によって生じた穴には魚類が生息している様子が観測された(図-17)。設置前には

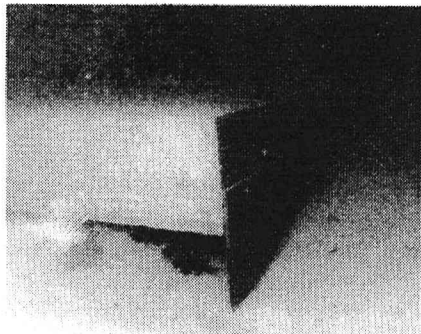


図-17 滑動防止杭付近の洗掘状況(設置後1ヶ月経過)

生物はほとんど見られなかったことから、何も無い砂地に底面粗度のような構造物を設置するだけでも魚の集積効果があることが分かる。また、洗掘による窪みを住処としていることから、底面粗度に適当な穴を設けることで魚礁としての効果をより発揮できる可能性も示唆された。なお現在、多機能観測装置(流向、流速、波高の測定が可能)による連続計測を実施している最中であり、今後は台風などの暴浪をうけた場合の底面粗度の状況などについて、より詳細な検討を行っていく予定である。

5. 結論

本論文において、底面粗度による水質改善技術の実用性を検討した結果、次のような知見が得られた。

1. 室内実験水槽において浮標実験を行った結果、底面粗度によって潮汐残差環流を生成することが十分可能であり、海水交換が全くない停滞性水域においても効果的な物質輸送能力を発揮できることが明らかとなった。
 2. 名古屋港を例として数値シミュレーションによる検討を行った結果、複雑な地形の実海域に対しても本手法を適用でき、物質輸送を促進できる可能性が示された。また、効果的な場所に集中して粗度を配置することにより、底面粗度の設置面積および設置個数を大幅に削減できることが期待される。
 3. 古タヤを用いたタヤ粗度を提案し、室内実験で有効な形状を開発した。1/4球型よりも優れた効果をもつ形状は見つからなかったものの、底面粗度として十分活用できる形状が得られた。これにより低コストで産業廃棄物の再利用にもつながるタヤ粗度の有効性が示された。
 4. 実物大底面粗度4基を実海域に設置し、安定性および強度等を調べる現地実験を行った。設置から1ヶ月後の調査では底面粗度の埋没、沈下は全くなく、若干の洗掘が見られたものの安定性に問題はなかった。また、設置以前には見られなかった魚類が底面粗度を住処としていること、底面粗度に藻が生え始めていることから、今後更に改良を加えることによって底面粗度を魚礁、藻場としても利用できる可能性が示された。
- 以上の結果から、底面粗度による水質改善技術は、閉鎖性海域での富栄養化という深刻な問題に対する効果的な解決策の1つであり、その実用化は十分可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 平成11年度版 環境白書 環境庁編
- 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、PP. 705-710
- 4) 小松ら：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、水工学論文集、1998年2月、第42巻、PP. 577-582

(1999. 9. 30 受付)