

振動流場における非対称没水構造物の抵抗特性

押川 英夫*・國澤 義則**・鞠 承 淇***・小松 利 光****

著者は小規模非対称構造物を海底に設置することにより底質の移動に起因した諸問題に対処する技術を開発している。本研究では、非対称形状を有する半円筒型粗度の抵抗特性について実験的に検討を行った。その結果、構造物の非対称性によって付加される抗力と慣性力により残差抵抗力が生じること、非対称構造物の形状（ここではアスペクト比）によって、抵抗特性が異なることが明らかとなった。また、非対称構造物に海藻が繁茂しても、抵抗力の波形の概形は殆ど変化せずピーク付近の絶対値のみが増加し、残差抵抗力の減少や向きの変転は起きないことが明らかとなった。

1. はじめに

著者は海岸侵食等の底質の輸送に起因した諸問題への対応策として、BaNK (Beach and Navigation Keeper) システムを提案している。BaNK システムとは波浪による往復流場に非対称構造物を設置して底層付近に一周期平均的な流れ（以下では、波浪残差流と呼ぶ）を任意の方向に生成させることにより、底質移動の自在な制御を可能とするものである。本システムに関して、これまで小松ら (2001, 2002), 押川ら (2003, 2004) 等において、非対称構造物(主に球を 4 等分した 1/4 球型)の受ける流体力、構造物周りの流況、波浪残差流の生成メカニズム、底質輸送能力などが検討され、その有効性が示されている。次なる展開として、本研究グループでは、古タイヤを半分に切断した非対称構造物を利用した現地試験を試みている。ブロックの試作体の 1 ユニットの写真を写真-1 に示す。

非対称構造物により底質輸送を制御するという本研究に類似した研究としては仲座ら (1995), 山口ら (2003) などが挙げられる。また、非対称構造物に作用する揚力についても最近、許ら (2003) が実験及び数値計算によって検討を行っているが、本システムを実用化するための基本的な知見が、既存の研究によって十分に蓄積されているとは言い難い。

海底に構造物を長期間設置する場合、海生生物の付着は避けられない。藻場や水辺植生の育成等に関連して、田村・灘岡 (2002), 辻本ら (2003), 林ら (2004) 等に見られるように、動揺する海藻に関する波力やその周囲の流動特性などが最近精力的に研究されている。しかしながら、構造物に海藻が繁茂した場合についての研究は未だ少なく、まして海藻が繁茂した非対称構造物の抵抗特性についての研究は行われていない。

本研究は切断された古タイヤの形状(写真-1の突起部分)の原型であり、基本的な水理構造物形状である円

筒を非対称にした半円筒型粗度の抵抗特性について実験的に検討を行ったものである。また、構造物に海藻が繁茂した場合の抵抗特性、即ち構造物の沈設後の時間の経過に伴い、本手法の効果に顕著な変化が生じるか否かについても検討を行っている。

2. 半円筒型粗度の抵抗特性 (実験 I)

(1) 実験方法

実験は図-1 に示すピストン駆動式 U 字管振動流装置 (高さ 120 cm×長さ 300 cm×奥行き 30 cm) を用いた。小型三分力計を取り付けた粗度単体を水槽の中央に設置して、粗度に作用する抵抗力の X , Y 成分である F_x , F_y を測定した。座標系および半円筒型粗度の設置角度 θ の定義を後出の記号も含めて図-2 に示す。本章の実験 I は二つに大別され、一つは対称構造物と非対称構造物の抵抗特性の違いを調べた実験であり (実験 I-1), もう一つは半円筒型粗度のアスペクト比を変えた実験で、効果的な非対称構造物形状を検討するための実験である (実験 I-2)。実験 I における非対称構造物の設置角度は $\theta=0^\circ$ であり、実験 I-1 で粗度の主流方向の投影面積 A_x は対称型と非対称型で一致する。

実験 I-1 は、対称構造物である直径 D の円筒型粗度 (上面に円形の蓋が付いている) と、それを半分に切断した非対称構造物である半円筒型粗度 (上面に半円形の蓋が付いている) それぞれについて、 R_e 数 ($=U_0 D/\nu$, U_0 は断面平均流速の最大値, ν は水の動粘性係数であり $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$) と KC 数 ($=U_0 T/D$, T はピストンの周期) をそれぞれ変えて行われた。粗度の高さ h は D の半分であり、小松ら (2001, 2002) が用いた 1/4 球型粗度とアスペクト比を一致させている。 $D=7 \text{ cm}$ の場合の半円筒型粗度を

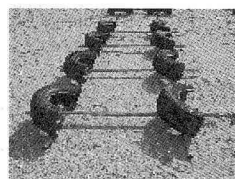


写真-1 非対称構造物の試作体の 1 ユニット (5 m×2 m)

* 正 会 員 修(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門

** 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

*** 正 会 員 博(工) 韓国海洋大学校助教授 海洋警察学科

**** フェロー 工 博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門

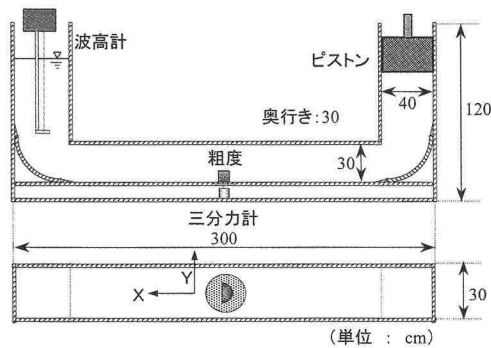


図-1 実験装置概略図

写真-2に示す(後述の半タイヤ型, およびP1が併せて示されている)。また, 図-1左上に示すように水位変動を容量式波高計により測定しているが, 図から分かるように水槽の両サイドと粗度のある中央部では水槽の管径が異なるため, 本研究では実際のピストンの振幅および波高計による水位変動を4/3倍して振幅 a 及び水位変動 ξ としている。測定ではサンプリング周波数50 Hzでデータを取得し, ゼロアップクロス法により120波分を抽出した。

実験I-2には, 直径 D で高さ h の(半円形の蓋が付いた)半円筒を非対称構造物として用いた。 $A_x (=Dh)$ は 38.5 cm^2 であり, 表-2に示すように粗度の横と縦の比 h/D を6種類に変化させている。実験は表-3に示した3ケースそれぞれにおいて, 6種類の粗度を用いた計18条件について行われている。本論文では, 実験I-2のみKC数と R_e 数の定義が異なり, 表-3中のKC数, R_e 数はそれぞれ $U_0 T / (Dh)^{1/2}$, $U_0 (Dh)^{1/2} / \nu$ で定義されている。

(2) 実験結果および考察

本論文では, 主流方向(X 方向)の一周期平均的な抵抗力を残差抵抗力, 横断方向(Y 方向)の一周期平均的な力を残差揚力, それらを合成したものを残差合力と呼ぶこととする。また今後は, 力は全て $0.5\rho A_0 U_0^2$ (A_0 は $\theta=0$ の時の粗度の X 方向の投影面積)で無次元化して表記し, 上ツキ*を付記して示す。

まず対称構造物である円筒型との比較を通して, 非対称構造物である半円筒型粗度の基本的な抵抗特性を検討した(実験I-1)。半円筒と円筒に関して, X 方向に働く抵抗力および水位変動 ξ を位相平均した一波長の例を無次元化して図-3に示す。図の横軸は無次元時間 t/T であり(t は実時間), 縦軸は主流方向の無次元抵抗力 F_x^* 及び無次元水位変動 ξ/a である。なお F_x^* の位相関係は各条件の水面変動のゼロアップクロス時を一致させている。また, 参考のため図-3の上部に各時間における半

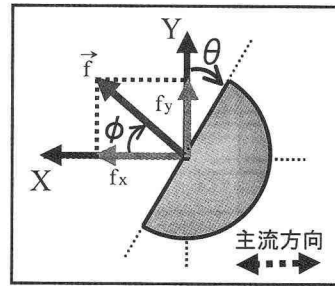


図-2 粗度の迎角と座標系の定義

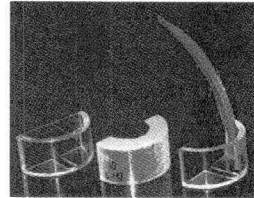


写真-2 直径7 cmの半円筒型粗度(左から実験I-1, II, IIIで用いられたもの)

表-1 実験条件(実験I-1, III)

case No.	D (cm)	a (cm)	T (s)	KC数	R_e 数
case 1	7.0	10.7	2.9	9.6	1.6×10^4
case 2	10.0	8.0	2.9	5.0	1.7×10^4
case 3	7.0	17.3	2.9	15.5	2.6×10^4
case 4	10.0	19.5	4.8	12.3	2.5×10^4
case 5	10.0	15.6	3.8	9.8	2.5×10^4
case 6	12.0	9.4	2.7	4.9	2.6×10^4
case 7	10.0	11.9	2.9	7.5	2.5×10^4
case 8	12.0	18.3	4.8	9.6	2.8×10^4
case 9	7.0	15.9	2.7	14.3	2.5×10^4
case 10	7.0	8.0	2.0	7.2	1.7×10^4
case 11	10.0	7.8	4.9	4.9	1.0×10^4
case 12	7.0	10.7	2.0	9.6	2.2×10^4

表-2 半円筒型粗度の諸元(実験I-2)

h/D	0.27	0.39	0.48	0.76	1.07	1.54
h (cm)	3.2	3.9	4.3	5.4	6.4	7.7
D (cm)	12.0	10.0	9.0	7.1	6.0	5.0

表-3 実験条件(実験I-2)

case No.	a (cm)	T (s)	KC数	R_e 数
case 13	14.7	4.3	14.9	1.3×10^4
case 14	10.7	3.2	10.8	1.3×10^4
case 15	6.7	2.0	6.8	1.3×10^4

円筒型粗度と X 方向の断面平均流速 u の関係を図示している。

図-3より F_x^* の大きさを全体的に比較すると, KC数が小さい $KC=7.5$ では, KC数が大きい $KC=15.5$ と比較して絶対値が大きくなっており, 慣性抵抗が大きく寄与していることが分かる。両KC数ともに円筒と半円筒の F_x^* が大きく異なるのは $t/T \approx 0.5$ の時であり, u の絶対値が最大で粗度の非対称面(切断面)に流れが当たる

位相と一致していることから、モリソン式中の抗力が非対称性による力の発生に強く影響していることが分かる。 $t/T \approx 0.3$ 付近においても両 KC 数において円筒と半円筒の間に顕著な差異が認められるが、これは押川ら (2003) が示した加速度の絶対値が大きい位相付近 ($t/T \approx 0.25$) において発生する、構造物の非対称性に起因した慣性抵抗に因るものと考えられる。 $t/T \approx 0.2$ 付近では、その差は小さいが半円筒の F_x^* の方が円筒の F_x^* よりも小さくなっている。これはモリソン式中の慣性項から分かるように、慣性力には粗度の体積が関係しており、半円筒の体積は円筒の体積の半分と小さいためである。つまり、半円筒では形状の非対称性によっても慣性力が発生するために、体積は小さくても大きな慣性抵抗を生じており、 $t/T > 0.25$ においては円筒よりも大きな F_x^* を生じていたものと考えられる。KC 数の減少は慣性力の増加に繋がるため、この位相付近の差異は、 $KC = 15.5$ よりも $KC = 7.5$ において顕著となっている。結果的には $t/T = 0.2 \sim 0.8$ 付近における円筒と半円筒の間の F_x^* の違いにより、一周平均値である残差抵抗力が発生している。

次に h/D の違いに因る半円筒型粗度の抵抗特性の変化について検討した (実験 I-2)。 h/D をパラメータとした F_x^* の一周期間の位相平均波形の例を図-4 に示す。これより、 $t/T \approx 0.5$ において h/D に応じて F_x^* に顕著な差異が認められる。そこでは h/D が最大の 1.54 を除いて、 h/D が大きくなるにつれ F_x^* が大きくなっているが、前述のように、この付近の位相は u の絶対値が最大で抗力が強く影響する。図-4 中の条件はピストンの振動条件が同じであるため、粗度が無ければ流れは全く同じである。従って水路底面から発達する振動流境界層を考えると、 h/D が小さい (粗度が低い) 場合、境界層の中に埋没する粗度の割合が大きく粗度の非対称面にあたる平均的な流速の絶対値が小さくなり、抵抗が小さくなっていたものと考えられる。また $t/T \approx 0.25$ においても h/D によって顕著な差異が認められるが、この位相では u が 0 となり、前述のように非対称性に起因する慣性抵抗が発生する。粗度に作用する慣性力の大きさは粗度の体積に関係するが、 h/D が小さい粗度ほどその体積が大きいため慣性抵抗が大きくなり (投影面積は同じ)、 F_x^* が大きくなったものと考えられる。また F_x^* の正のピーク位置が、 h/D の大きい場合は流速の絶対値が最大となる位相 ($t/T \approx 0.5$) に、小さい場合は加速度の絶対値が最大となる位相 ($t/T \approx 0.25$) にそれぞれ近くなっていることは、 F_x^* への抗力と慣性力の影響を考慮すると妥当なものと考えられる。但し、 h/D が最大の 1.54 のみ傾向が異なっているが、これは極端に h/D が大きくなると粗度が細くなりすぎる (本節の定義では D が小さくなる) ために、形

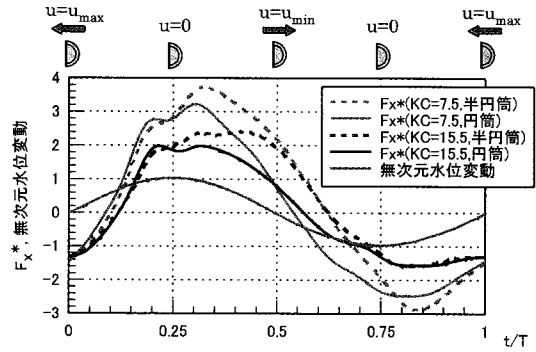


図-3 力の位相平均波形 (実験 I-1, 非対称性の効果)

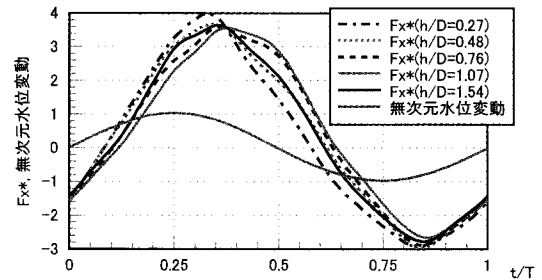


図-4 力の位相平均波形 (実験 I-2, h/D の効果, case 14)

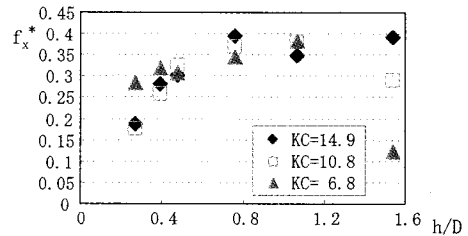


図-5 残差抵抗力 f_x^* と h/D の関係 (実験 I-2)

状の非対称性の効果が小さくなったものと考えられる。

次に、 F_x^* の時系列を平均して得られる主流方向の無次元残差抵抗力 f_x^* について検討する。横軸を h/D 、縦軸を f_x^* 、KC 数をパラメータとしたものを図-5 に示す。これより f_x^* は h/D の増加に伴い増加するが、 $h/D = 0.76 \sim 1.07$ 程度で極大値をとる。これは、前述のように極端に h/D が大きくなると形状の非対称性の効果が小さくなることによる。また $h/D = 0.39 \sim 1.07$ において、KC 数に因らず f_x^* はほぼ一定であり、この範囲では安定した残差抵抗力が得られている。一方、 $h/D = 0.27$ で KC 数が大きい場合 (KC 数 = 10.8, 14.9)、 f_x^* は極端に小さくなっている。

3. 半円筒型粗度の方向抵抗特性 (実験 II)

(1) 実験方法

本システムの特長のひとつとなり得る任意の方向におけ

表-4 実験Ⅱの条件(粗度の迎角 θ の効果)

実験Ⅱ	case 16	case 17	case 18	case 19
直径 D (cm)	7.0	7.0	10.0	10.0
振幅 a (cm)	11.1	11.1	15.9	15.9
周期 T (s)	3.0	3.0	4.0	4.0
KC 数	10.0	10.0	10.0	10.0
Re 数	1.6×10^4	1.6×10^4	2.5×10^4	2.5×10^4
粗度形状	半円筒	半タイヤ	半円筒	半タイヤ

る漂砂制御を実現するため、波向きに相当する粗度の迎角を変えた実験を行った。

実験には図-1の装置を用い、粗度単体に作用する抵抗力 F_x , F_y を測定した。粗度には直径 $D=7.0, 10.0$ cm の円筒を半分に切断した半円筒(高さは D の $1/2$) を非対称構造物として用いた。またタイヤの形状に似せるため、それぞれの半円筒の上部を端から 1.5 cm 覆った半タイヤ型粗度(写真-2 参照)も同様に用いている。実験Ⅱは表-4 に示す4ケースそれぞれについて、 X 方向に対する粗度の迎角 θ を 10° ずつ傾け、 0° から 90° までの場合について行われた。

(2) 実験結果と考察

半円筒型粗度および半タイヤ型粗度をそれぞれ主流方向に対して傾けて設置することで、迎角の変化に伴う非対称構造物の残差抵抗特性を調べた。 X , Y 両方向の力の時系列をそれぞれ一周期平均することで f_x^* , f_y^* , 更にそれらを合成して f^* を算定した。また f_x^* , f_y^* より残差合力 f^* の働く角度 ϕ を算定した。

迎角 θ の変化に伴う ϕ の応答を図-6 に示す。これより、半円筒型および半タイヤ型における θ と ϕ の関係は 0 から 90° までほぼ $\theta \approx \phi$ となることが分かる。因みに $\theta=0$ および 90° では、本来は対称性から $\theta=\phi$ となるが、とくに $\theta=90^\circ$ においてばらつきが見られるのは、揚力の値が抵抗力に比較して小さいことに起因した測定精度の問題である。

半円筒型および半タイヤ型の残差合力 f^* の迎角依存性の例を図-7 に示す。半円筒型では $\theta \approx 50^\circ$, 半タイヤ型では $\theta=30^\circ$ において極大値をとるものの、全体的には2つの f^* の曲線に顕著な差異は見られない。また、 $\theta=0$ および 90° においても、 f^* は極端に減少することはなく、比較的大きな値をもつことが分かる。

以上の結果は、半円筒型粗度について行われた押川ら(2003)による同様な実験結果ともほぼ符合する。従って、タイヤに似せるために設けた蓋は残差抵抗力の方向特性には顕著な影響を及ぼしていないことが分かる。

4. 海草の繁茂した非対称構造物の抵抗特性

(1) 実験方法

実験には図-1の装置を用い、海草の取り付けられた

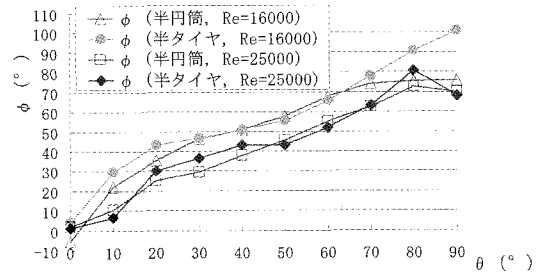
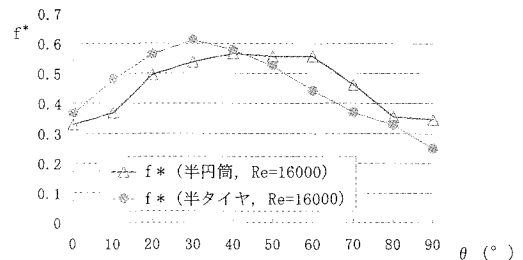
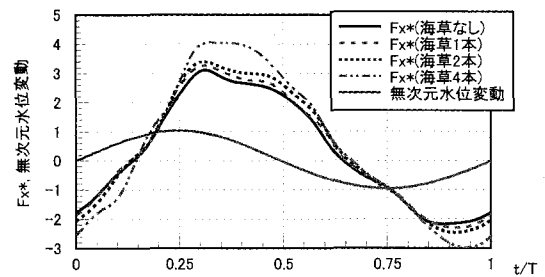
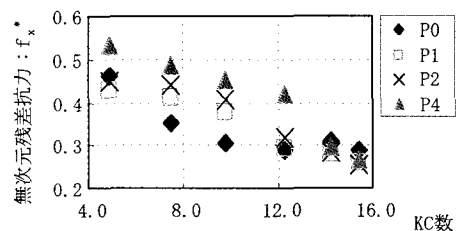
図-6 θ と ϕ の関係(実験Ⅱ, KC 数=10.0)図-7 θ と f^* の関係(実験Ⅱ, KC 数=10.0, Re 数=16000)

図-8 力の位相平均波形(実験Ⅲ, 海草の効果, case 5)

図-9 残差抵抗力 f_x^* の KC 数依存性(実験Ⅲ, 海草の効果)

$\theta=0^\circ$ の粗度単体に作用する抵抗力 F_x , F_y を測定した(実験Ⅲ)。直径が D で高さ h がそれぞれの半径と等しい半円筒(上蓋なし)が非対称構造物として用いられた。実験は表-1 に示された12ケースそれぞれにおいて、粗度のみの場合(P0とする)と粗度に市販の模型プラント(ジェックス株式会社製, リアルプラント M-05, ポリエステル製, 長さ 14.0 cm $\times$ 幅約 1.3 cm, 以下では海草と

呼ぶ)の葉を取り付けた場合(n を整数とし、海草 n 本の場合を Pn とする、P1の写真—2参照)について行った。

(2) 実験結果および考察

写真—2から分かるように、海草そのものが方向抵抗特性を有する可能性があるため、海草を写真—2とは逆向きに取り付けた予備実験を行っている。その結果本実験で用いた海草の向きは、本実験条件内では、粗度の方向抵抗特性に殆ど影響を与えないことが分かった。

海草の本数 n をパラメータとした F^* の一周期間の位相平均波形の例を図—8に示す。これより、海草が存在しても抵抗力の波形の概形は殆ど変化せず、ピーク付近の大きさのみ変化していることが分かる。 n によって波形に違いが見られる位相は、 $t/T \approx 0.25 \sim 0.55$ および $0.8 \sim 1.1 (=0.1)$ であり、それらの期間において、海草は起きた状態であることが目視により確認されている。それぞれの期間の終わり $t/T = 0.55$ および 1.1 は u の絶対値が大きくなる位相にほぼ対応しており、抗力の増加により海草が転倒したものと考えられるが、半円筒の曲面に流れがあたる際、海草転倒の位相が他の結果を踏まえても $t/T = 1.1 \sim 1.15$ 付近となっており、流速最大の位相 $t/T = 1$ からの遅れが顕著で、構造物形状の非対称性の影響が認められる。 n の増加に伴いピーク付近の絶対値が大きくなっているのは、海草の存在による主流方向の投影面積の増加が主要因である。

最後に F^* の時系列から求めた無次元残差抵抗力 f^* について検討する。 Re 数が約26000の場合について、横軸をKC数、縦軸を f^* 、海草の本数をパラメータとして図—9を示す。これよりKC数の増加に伴い f^* はほぼ単調に減少していることが分かる。海草の存在・動揺が F^* の平均的な変動の概形に顕著な影響を与えなかったことを踏まえると、これらの結果は海草のない場合の従来の研究成果(押川ら, 2003)にも符号しており、この傾向は妥当なものと考えられる。海草の繁茂による残差抵抗力の変化をみると、KC数が大きい場合($KC > 12$)には海草の有無によって f^* は殆ど変化していないようであるが、KC数がある程度小さい場合には海草の繁茂によって f^* は大きくなっている。

5. おわりに

半円筒型粗度の抵抗特性を把握するための実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 構造物の非対称性によって付加される抗力と慣性力により、残差抵抗力が生じる。
- 2) 半円筒型粗度の横と縦の比が小さい場合($h/D = 0.27$)、非対称構造物の効果が小さくなり、 $h/D = 0.39 \sim 1.07$ では安定した残差抵抗力が得られる。船舶の

航行等を考慮すると、一般に構造物は低い方が望ましいと考えられるため、本手法における半円筒型粗度の h/D は $0.3 \sim 0.4$ 程度が適切と考えられる。因みに、タイヤの h/D は約0.33である。

3) 構造物の設置角度と残差抵抗力の向きはほぼ一致する。この結果は本手法にとって非常に有利な結果であり、本手法を適用した際には、波向きに因らずブロックを設置した向きに残差抵抗力が働くことになる。例を挙げると、著者らは本手法を航路埋没の抑制に適用することも考えているが、航路に直角方向にブロックを向ければ、あらゆる方向からの波に対して効果を発揮できることになる。

4) 非対称構造物に海草が繁茂した場合でも、残差抵抗力の顕著な減少や向きの逆転は起きず、KC数が小さな場合はむしろ残差抵抗力は大きくなる。従って、海草の繁茂は本技術の効果を著しく低下させるものではない。

謝辞：本研究を行うにあたり、九州大学大学院工学研究院技術専門官の藤田和夫氏に実験装置の製作において多大なる援助を頂いた。また、本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究(B)、代表：押川英夫)の援助の下に行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 押川英夫・小松利光・柴多哲郎・深田剛教(2003): 振動流場における非対称没水構造物の方向抵抗特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第47巻, pp. 805-810.
- 押川英夫・柴多哲郎・小松利光(2004): 非対称没水構造物による波浪残差流生成特性, 水工学論文集, 第48巻, pp. 1255-1260.
- 小松利光・齋田倫範・小橋乃子・安達貴浩・柴田卓也(2001): 方向抵抗特性をもつ海底小規模構造物を用いた海底近傍の物質輸送の制御, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1087-1092.
- 小松利光・柴田卓也・押川英夫・柴多哲郎・安達貴浩・小橋乃子・檀田 操(2002): BaNKシステムの底質輸送制御効果に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp. 457-462.
- 田村 仁・灘岡和夫(2002): 可撓性に着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 341-345.
- 辻本剛三・山田浩之・柿木哲哉・日下部重幸(2003): 画像計測による海草周辺の水理特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1091-1095.
- 仲座栄三・津嘉山正光・上原 学・砂川恵輝・小林智尚(1995): 波動場における底面近傍定常流速の人工的コントロール, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 211-215.
- 林建二郎・今野政則・重村利幸(2004): 沈水模型植物(コアマモ)が有する消波特性に関する研究, 水工学論文集, 第48巻, pp. 883-888.
- 許 東秀・水谷法美・田康 隆(2003): 非対称構造物に作用する揚力の発生機構とその直接数値計算法, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 736-740.
- 山口 洋・小野信幸・入江 功・渡部耕平・村瀬芳満(2003): 歪み砂れんマット(DRIM)による3次元の漂砂制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 601-605.