

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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DIRECTIONAL RESISTANCE PROPERTIES OF A SUBMERGED ASYMMETRICAL ROUGHNESS

押川英夫¹・小松利光²・柴多哲郎³・深田剛教⁴

Hideo OSHIKAWA, Toshimitsu KOMATSU, Tetsuro SHIBATA and Takenori FUKATA

¹正会員 工修 九州大学大学院助手 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²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)

³学生員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

⁴正会員 福岡市土木局 (〒812-8620 福岡市中央区天神1-8-1)

Directional characteristics of hydrodynamic force on a submerged asymmetrical roughness (we call this roughness BaNK block) in oscillatory flows were experimentally investigated. In this study, a quarter sphere or a half cylinder is used as a BaNK block which is set on the bottom of channel with an angle of attack θ to an oscillating flow direction. It is found that residual hydrodynamic force on half cylinder is much larger than that on quarter sphere because the substantial length of quarter sphere is smaller than that of half cylinder. Furthermore, residual hydrodynamic force on BaNK blocks is almost constant with the change of θ when Keulegan-Carpenter number KC is small. However, in large KC number, the force on quarter sphere decreases with the increase of θ because residual lift force decreases in $\theta = 50^\circ \sim 90^\circ$.

Key Words : residual hydrodynamic force, oscillatory flow, submerged asymmetrical roughness, Keulegan-Carpenter number

1. 緒言

全国に約 19000 haある砂浜は、最近 15 年間でその約 13% に当たる約 2400ha が失われるなど、侵食被害が深刻化している。海岸侵食は陸域への波の侵入の増大、臨海施設などの機能低下の要因となるほか、貴重な国土の縮小にもつながるため、効果的な侵食防止対策・砂浜の創成技術の開発が、緊急を要する重要課題となっている。

このような背景の下、著者らは波浪エネルギーを用いた有効な海岸侵食防止技術であり、かつ積極的な砂浜の創成技術であるBaNK(Beach and Navigation Keeper)システムを提案している^{1),2)}。本技術は、波浪によって生じる往復流場に非対称形状を有する構造物(BaNKブロック)を複数個設置するだけで、海底付近に波の一周平均的な一方向流れを任意の方向に生成させ、底質移動の自在な制御を可能とするものである。

前報²⁾では3次元波浪場に複数のBaNKブロックを波の進行方向に対し 0° 、 30° 、 50° 傾けて設置して流速の空間分布を測定することで、BaNKシステムにおける波浪残差流の生成・偏流効果を示した。関連した研究として、小松ら³⁾は非対称形状を有する流況制御ブロック(ス

ケールは格段に小さいがBaNKブロックも同様な形状を想定している)の流れに対して傾けて設置することによって、定常流場における抵抗力を評価し、潮流をステップ関数的な往復流場と仮定した場合には、流況制御ブロックを潮流の主軸方向から傾けて設置することにより、任意の方向に残差抵抗力を生成できることを明らかにしている。BaNKシステムも基本的には同じ原理に基づいているため、本手法においても同様な効果が得られると期待される。しかし、定常流場における残差抵抗力はいわゆる抗力のみに基づいた力であり、本システムが対象とする周期の短い波浪場においては慣性力の寄与も大きいことが予想される。さらに浅海波浪場は非線型効果による波形の変形も生じるため、定常流場における残差抵抗特性がそのまま波浪場にも適用できるかどうかは明らかではない。そこで本研究では、任意の方向に任意の大きさで波浪残差流を生成可能とするため、詳細な室内実験により、波浪残差流の driving force となるBaNKブロック単体に作用する流体力の方向特性について検討した。なお、構造物の非対称性による効果のみを評価するため、本実験では往復流場として正弦波を発生させ易いピストン式の振動流場を採用している。

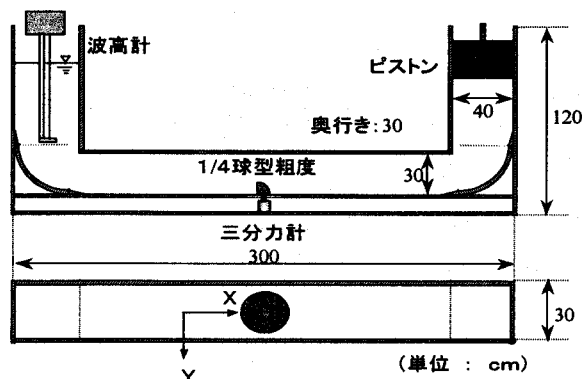


図-1 実験装置概略図

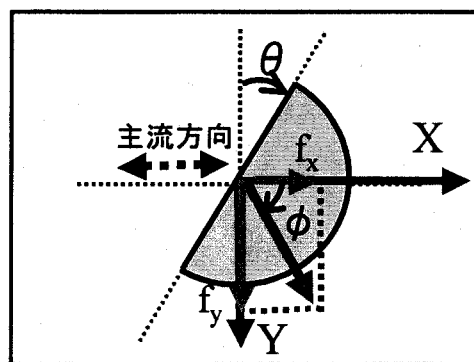


図-2 粗度の回転角度と座標系の定義

表-1 実験条件(実験Ⅰ)

実験Ⅰ	case0-1	case0-2	case0-3	case0-4	case0-5	case0-6
ブロック直径D(cm)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
振幅a(cm)	12.0	10.0	6.0	12.0	10.0	6.0
周期T(s)	3.7	3.1	1.8	3.7	3.1	1.8
Re数	2.7×10^4	2.7×10^4	2.7×10^4	2.7×10^4	2.7×10^4	2.7×10^4
KC数	10.1	8.4	5.0	10.1	8.4	5.0
粗度形状	半球	半球	半球	1/4球	1/4球	1/4球

表-2 実験条件(実験Ⅱ)

実験Ⅱ	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10
ブロック直径D(cm)	7.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
振幅a(cm)	13.3	16.0	10.7	6.7	21.3	21.3	16.0	10.7	21.3	16.0
周期T(s)	2.4	5.0	3.3	2.1	6.7	6.0	4.4	3.0	5.3	4.0
Re数	2.4×10^4	2.4×10^4	2.4×10^4	2.4×10^4	2.4×10^4	2.7×10^4	2.7×10^4	2.7×10^4	3.0×10^4	3.0×10^4
KC数	12.0	8.4	5.6	3.5	11.2	11.2	8.4	5.6	11.2	8.4
粗度形状	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球	1/4球
実験Ⅱ	case11	case12	case13	case14	case15	case16	case17	case18	case19	case20
ブロック直径D(cm)	12.0	12.0	7.0	10.0	7.0	10.0	10.0	12.0	10.0	12.0
振幅a(cm)	10.7	16.0	8.3	6.0	13.4	16.0	11.9	7.2	9.0	14.3
周期T(s)	2.7	3.0	4.2	3.0	3.0	5.4	4.0	2.9	3.0	4.8
Re数	3.0×10^4	4.0×10^4	1.65×10^4	1.65×10^4	2.5×10^4	2.5×10^4	2.5×10^4	2.5×10^4	2.5×10^4	3.0×10^4
KC数	5.6	8.4	10.0	5.0	15.5	13.3	10.0	5.0	7.5	10.0
粗度形状	1/4球	1/4球	半円筒	半円筒	半円筒	半円筒	半円筒	半円筒	半円筒	半円筒

2. 実験装置および方法

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120cm×長さ300cm×奥行き30cm)を用いた。小型三分力計を取り付けた粗度を水槽の中央に設置して、粗度に作用する流体力のX、Y成分を測定した。座標系および粗度の設置角度 θ の定義を後述の記号も含めて図-2に示す。粗度は直径 $D=7.0$ 、 10.0 、 12.0 cmの球を4等分した形状の1/4球型粗度、同じく直径 $D=7.0$ 、 10.0 、 12.0 cmの半円筒(高さは D の1/2であり、1/4球と同じ高さ)を非対称構造物として用いた。比較のために対称構造物として $D=10.0$ cmの半球を用いた実験も行っている。また図-1の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。サンプリング周波数50Hzでデータを取得し、ゼロアップクロス法により100波分を抽出した。実験は二つに大別され、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)、もう一方は非対称構造物を回転させる実験で、迎角の違いによる特性について検討したものである(実験Ⅱ)。

実験Ⅰは表-1に示すように、対称構造物である半球型粗度と非対称構造物である1/4球型粗度それぞれについて、 R_e 数 $\{=U_0 D / \nu$ 、 U_0 は断面平均流速の最大値、

$\nu(=0.01\text{cm}^2/\text{s})$ は水の動粘性係数}を固定し、KC数 $(=U_0 T / D$ 、 T はピストンの周期)を3種類に変えて行われた。表中の a はピストンの振幅であるが、図-1からわ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および波高計による水位変動の振幅を4/3倍している。なお、この時の非対称構造物の設置角度は $\theta=0^\circ$ および 180° であり、投影面積は半球と1/4球で一致する。

実験Ⅱは表-2に示す20ケースについて、主流方向(X方向)に対する粗度の迎角 θ を 10° ずつ傾け、 0° から 180° まで、また 270° の場合の計 $20 \times 20=400$ 条件について行われた。

片側のみ駆動するピストン式の振動流では、対称構造物を設置した場合でも流速波形に若干の非対称性が生じる。本研究では実験Ⅰの条件以外にも対称構造物を用いた予備実験を行い、流れの非対称性が小さくなる条件を選定して実験を行っている。しかし厳密に対称とはいえない為、 θ が 0° から 90° までの結果と対応する 180° から 90° までの結果を適宜平均することで、この問題の解決を図っている($\theta=270^\circ$ は 90° に対応する)。

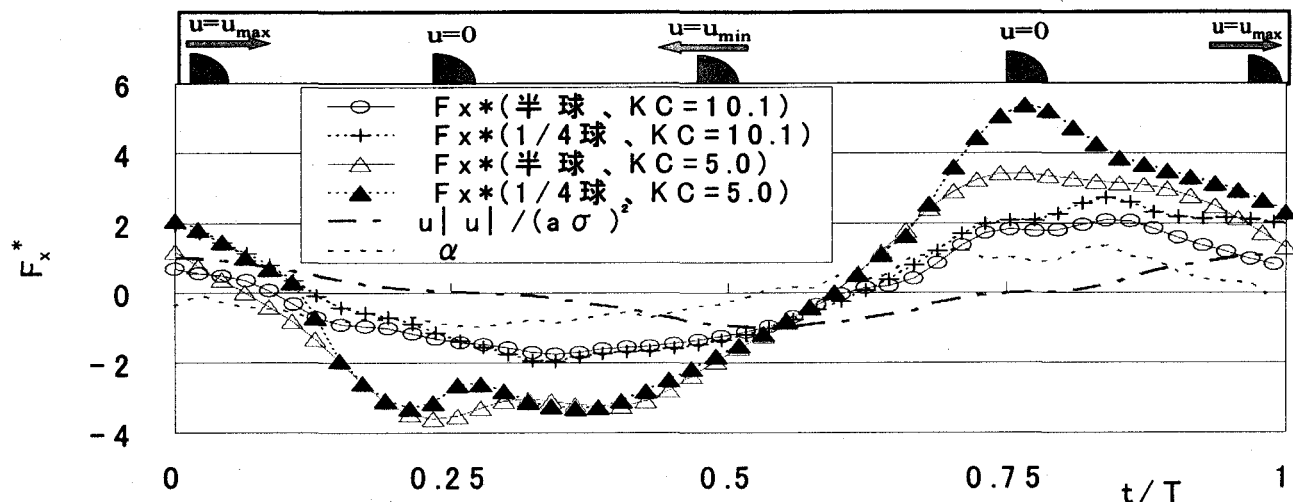


図-3 無次元化された抗力の位相平均波形

3. 結果および考察

本論文では、円筒や球等の対称構造物に作用する波力の議論で頻繁に用いられるモリソン式^{4),5)}が、非対称構造物を用いた本実験においても準用できるものとし、例えば主流方向に対して線型化した式(1)を仮定する。

$$F_x = \int_{A_x} (1/2) C_D \rho u |u| dA_x + \int_V C_M \rho (\partial u / \partial t) dV \quad (1)$$

ここで第1項が定常成分の寄与を示す抗力項、第2項が慣性項であり、 u はX方向の流速、 C_D は抗力係数、 C_M は慣性係数、 $A_x = \{A_x(\theta)\}$ は粗度のX方向の投影面積、 V は粗度の体積である。 C_D 、 C_M は本来 R_o 数および KC 数の関数と考えられる⁴⁾が、本研究の実験条件内では R_o 数、 KC 数の変化に対して C_D 、 C_M の変化は小さいものとする。便宜上主流方向(X方向)の一周期平均的な抵抗力を残差抗力、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 $\rho A_0 U_0^2 / 2$ (A_0 は $\theta = 0^\circ$ の時の粗度のX方向の投影面積、 ρ は水の密度で 1g/cm^3)で無次元化して表記し、上ツキ*を付記して示す。

(1)対称構造物との比較検討(実験I)

まず対称構造物との比較を通して、非対称構造物の抵抗特性を検討した。1/4球と半球に関して、X方向に働く抵抗力および水位変動を位相平均した1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)、縦軸は抵抗力 F_x^* である。また図中には、式(1)における抗力の位相を示す $u|u|/(a\sigma)^2$ 、および慣性力の位相を示す無次元加速度 $\alpha (= \partial u / \partial t / a\sigma^2)$ を併記している(σ は角振動数)。 u および α は t を時間差分して求めた。式(1)を仮定するにあたり u は本来は局所的な値となるべきであるが、ここでは u 、 α は断面平均値を用いた。抗力と慣性力の位相を押えるだけなので代用可能とした。ま

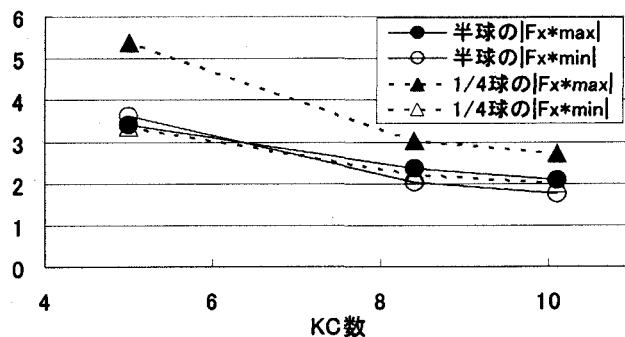


図-4 抗力の代表値とKC数の関係(実験I)

た、図-3の上部に各時間における1/4球型粗度と u の関係を図示している。

全体的に F_x^* の大きさを比較すると、 KC 数が小さい $KC=5.0$ の場合の方が、 KC 数が大きい $KC=10.1$ に比較して値が大きくなっており、式(1)から予想されるように慣性力が大きく寄与していることが分かる。位相を概観すると、同一 KC 数における対称構造物と非対称構造物の間に抵抗力の位相の差はほとんど無いが、 KC 数が大きい場合のほうが小さい場合と比べて位相が若干遅れ、 $u|u|/(a\sigma)^2$ の位相に近づいていることが分かる。これも式(1)から想定されるように、 KC 数が大きくなったために相対的に抗力が卓越したため、その位相に近づいたと考えることが出来よう。次に一周期間における半球と1/4球の F_x^* の挙動をみると、同じ KC 数では $t/T=0.15 \sim 0.7$ においてそれらの曲線はほぼ一致している。 KC 数が大きい $KC=10.1$ では、対称と非対称で大きく F_x^* が異なるのは $t/T=1$ (または、0)の時であり、 $u|u|/(a\sigma)^2$ が最大になる位相と一致していることから、抗力が強く影響していることが分かる。逆に KC 数が小さい $KC=5.0$ では、対称と非対称で大きく F_x^* が異なるのは $t/T=0.75$ の時であり、 α が最大になる位相であることから慣性力が大きく寄与していると思われる。この時の F_x^* は流速が0であり、また慣性力の大きさに関係すると考えられる構造物の体積が対称構造物に比べて半分にすぎないのに、とくに急激な増加を示しており興味深い。但し図から分か

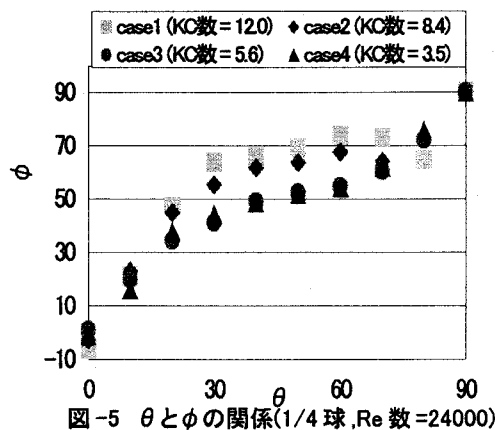


図-5 θ と ϕ の関係(1/4球, Re 数=24000)

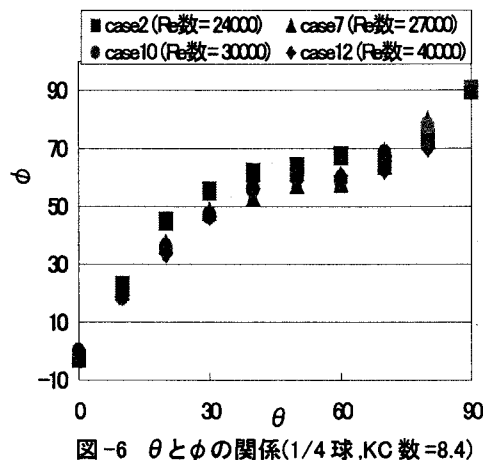


図-6 θ と ϕ の関係(1/4球, KC 数=8.4)

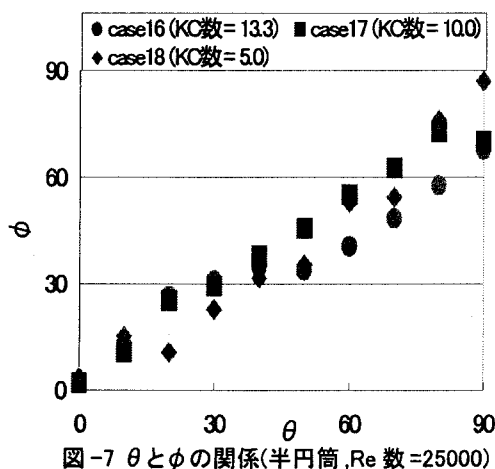


図-7 θ と ϕ の関係(半円筒, Re 数=25000)

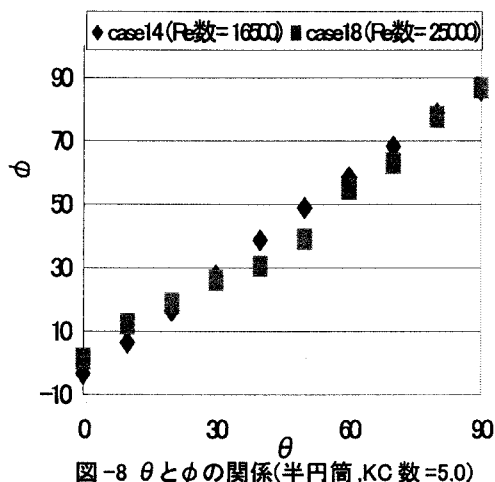


図-8 θ と ϕ の関係(半円筒, KC 数=5.0)

るように, どちらの KC 数でも $t/T=0 \sim 0.15$ および $0.7 \sim 1$ で 1/4 球型粗度の F_x^* は半球型粗度に比べて増加しており, 構造物の非対称性によって抗力, 慣性力ともに増加する. 結果的にはこの時間帯における力の増加分により, 一周平均値である残差抗力が発生している.

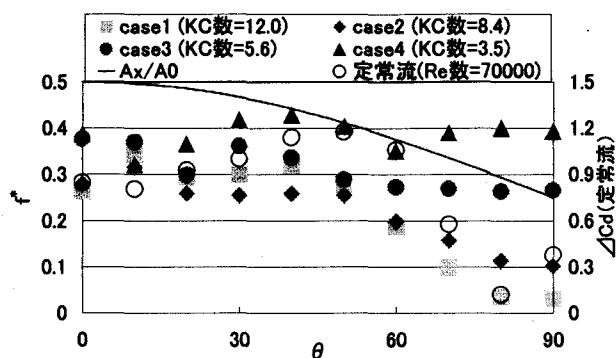
抵抗波の最大値の絶対値 $|F_{x \max}^*|$ と最小値の絶対値 $|F_{x \min}^*|$ を抵抗力の代表値として求めると (図-4), $|F_{x \min}^*|$ は KC 数に関わらず 1/4 球型粗度と半球型粗度で一致しているが, $|F_{x \max}^*|$ は KC 数の減少とともに 1/4 球型粗度の方が大きくなっている. これは図-3 から分かるように, $t/T=0.75$ 付近で構造物の非対称性によって慣性力が大きくなったことに因る. 図-4 から粗度の非対称性に関わらず KC 数の増加に伴い $|F_{x \min}^*|$ および $|F_{x \max}^*|$ は減少し, 一定に近づく傾向が伺える. 対称構造物では KC 数が大きくなると抗力振幅は一定になることが明らかとなっており⁵⁾, 同様の理由と考えられる.

(2)非対称構造物の方向抵抗特性(実験Ⅱ)

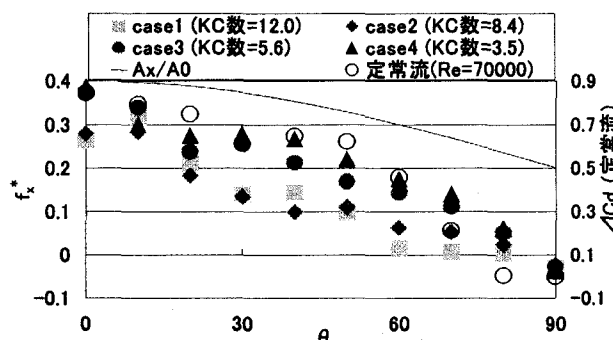
1/4 球型粗度と半円筒型粗度それぞれを主流に対して傾けて設置することで, 迎角の変化に伴う非対称構造物の残差抵抗特性を調べた. X, Y 二方向の力の時系列を一周平均することで各方向の残差抗力 f_x^* , 残差揚力 f_y^* , 更にそれらを合成することで残差合力 f^* を算定した. また f_x^* , f_y^* より残差合力の働く角度 ϕ を算定した.

迎角 θ の変化に伴う ϕ の応答の例を図-5 ~ 8 に示す. 1/4 球型粗度において Re 数を固定して KC 数をパラメータとした図-5 では, KC 数が大きくなると ϕ が増加しており, 若干の KC 数依存性が認められた. しかし, KC 数を固定した図-6 からは, Re 数への依存性は殆どみられなかった. 半円筒については KC 数依存性を調べた図-7, Re 数依存性を調べた図-8 から分かるように, 明確な依存性はともに認められなかった. これより, いずれの条件においても θ の増加に伴って ϕ は単調に増加しており, 周期の短い往復流場においても非対称構造物の設置角度を変えることにより, 任意の方向に残差合力を生成可能であることが分かった.

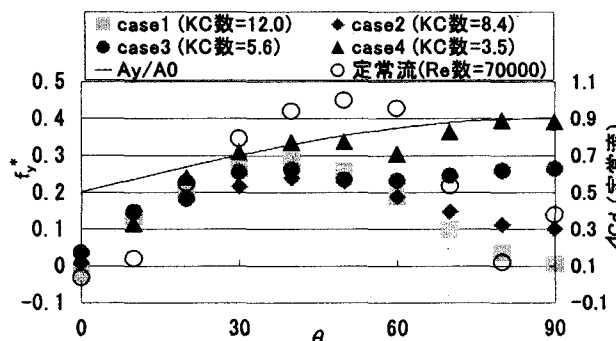
横軸に迎角 θ , 縦軸を a) 残差合力 f^* , b) 残差抗力 f_x^* , c) 残差揚力 f_y^* とし, KC 数をパラメータにして 1/4 球, 半円筒についての結果をそれぞれ図-9, 10 に示す. 各縦軸の力に及ぼす投影面積の影響を評価するため, 参考として図中には実線で a), b), c) それぞれに A_x/A_0 , A_x/A_0 , A_y/A_0 を併記している. 但し, $A_y(\theta)$ は Y 方向の投影面積である. またこれらの面積比の値は図の左側の縦軸に順応しているが, 実際には $\theta=0$ において $A_x/A_0=1$, $A_y/A_0=0.5$ であり, $\theta=90^\circ$ では $A_x/A_0=0.5$, $A_y/A_0=1$ である.



a) 残差合力



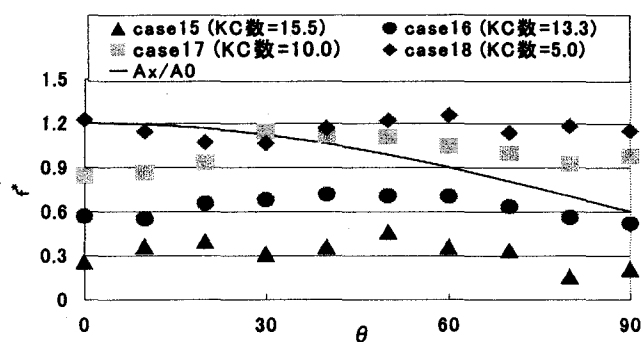
b) X方向残差抵抗力



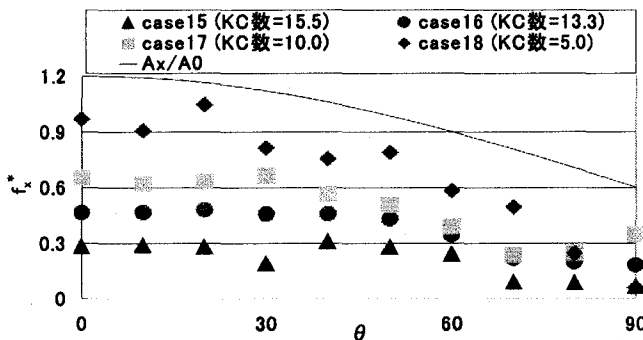
c) y方向残差揚力

図-9 1/4球型粗度の残差抵抗特性 (Re数=24000)

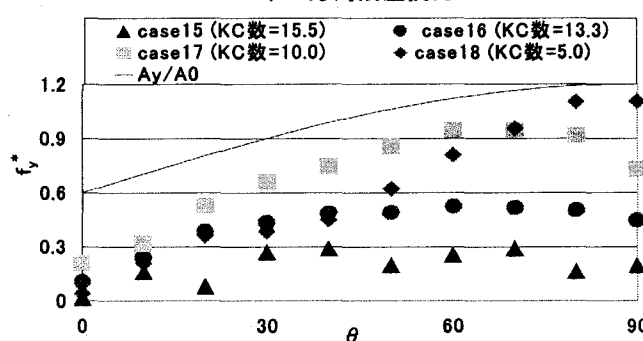
図-9a)から分かるように、1/4球型粗度の残差合力 f^* はKC数が小さい場合 θ に関わらずほぼ一定であるが、KC数の増加に伴い f^* は減少しており、その傾向は θ が大きいところで顕著である。これは成分ごとに示した図-9b), c) から明らかなように、図-9c) でKC数が大きい場合に、 θ が $0 \sim 40^\circ$ 程度までは θ の増加に伴い残差揚力 f_y^* が増加するのに対し、 50° 以上になると逆に θ の増加に対して f_y^* が減少することに起因している。これより θ が大きいときには、KC数に応じて慣性残差揚力は働くが定常残差揚力（ここではY方向モリソン式の抗力項に起因する力のこと）は殆ど働かないことが分かる。図-9には、小松ら³⁾による定常流場で1/4球型粗度を回転させて残差抵抗力を評価した実験結果も併記している。KC数が十分大きい場合に相当する定常流場においても同様な結果となっており、この結果からも定常残差揚力が小さいことが伺える。投影面積 A_y は θ が $0 \sim 90^\circ$ まで単調に増加するため、 θ の増加に伴う f_y^* の減少は特筆すべき点である。 f_x^* は θ の増加に伴い単調に減少するが、その変化率は投



a) 残差合力



b) X方向残差抵抗力



c) y方向残差揚力

図-10 半円筒型粗度の残差抵抗特性 (Re数=25000)

影面積の減少より若干大きくなっておりそれ以外の効果も寄与している。いずれの θ においてもKC数の増加に伴い f_x^* はほぼ減少しているが、これは主流方向の慣性力が小さくなるためである。

半円筒では、図-10a)から分かるようにKC数の増加に伴い f^* は減少するものの、 θ の変化に関わらずほぼ一定であった。成分ごとにみると、図-10b)から f_x^* は θ の増加に伴い単調に減少し、逆に f_y^* は図-10c)に示された様にほぼ単調増加である。投影面積の変化と定性的には同じ傾向であるが、投影面積の変化よりもKC数の変化、即ち慣性力の影響の方が大きい。

図-9と図-10の R_θ 数、KC数は同程度であることから、両図における類似した条件の結果を比較すると、1/4球型よりも半円筒型の方が f^* , f_x^* , f_y^* 全て大きく、BaNK工法に用いる構造物としては有利なことが分かる。これは球体の代表スケールとして直径をとると実質的な代表スケールを過大評価することによる。つまり1/4球と半円筒で代表長さとして定義した直径 D は半円筒では高さ方向に一定であるが、1/4球型では高

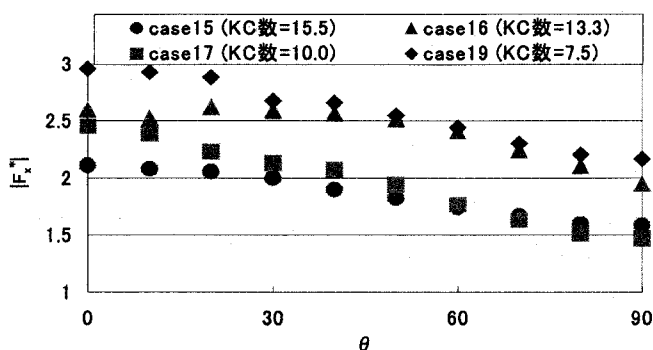


図-11 抗力振幅の方向抵抗特性(X方向)

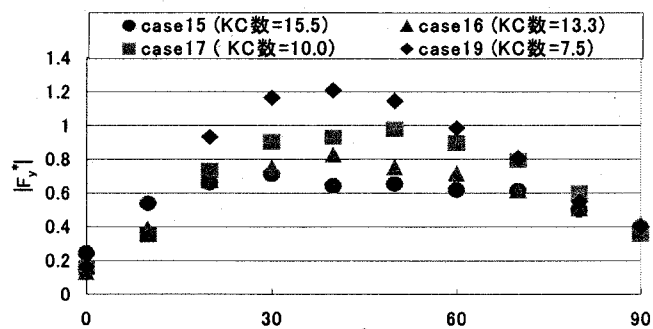


図-12 抗力振幅の方向抵抗特性(Y方向)

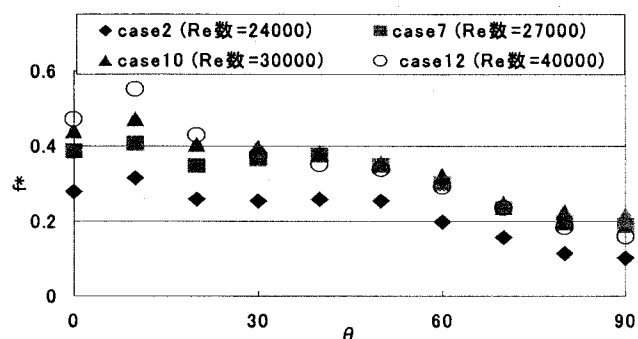


図-13 1/4球型粗度の残差合力のRe数依存性(KC数=8.4)

さ方向に減少していくためである。このように考えると、1/4球の実質的なKC数は現在の定義より大きいことになる。全ての実験条件における半円筒の特性が、1/4球のKC数が小さい場合(KC数=3.5)と同様な傾向を示したのはこのような理由によると考えられる。

成分毎の抵抗力の代表値として、各方向の最大値と最小値から求めた平均振幅 $|F_x^*| = (|F_{x\max}^*| + |F_{x\min}^*|) / 2$ 、および $|F_y^*| = (|F_{y\max}^*| + |F_{y\min}^*|) / 2$ の迎角依存性を半円筒に関してそれぞれ図-11, 12に示す。これより半円筒の抵抗力の振幅は、KC数が大きい場合の1/4球型粗度の残差抵抗特性と類似しているが、この点は今後の課題である。全体的に振動方向の振幅の方が大きく、 $\theta = 0^\circ$ の抵抗力の振幅は、 $\theta = 90^\circ$ の際の揚力振幅より5倍程度大きい。先述のように半円筒型粗度および1/4球型粗度でKC数が小さい場合には、 $\theta = 0^\circ$ における f_x^* と $\theta = 90^\circ$ のときの f_y^* が同程度である。振幅は非等方的であるのに対し、一周平均でみると等方的となることは興味深い。

最後に残差抵抗力の方向特性に対する R_s 数の効果を示す例として、横軸に θ 、縦軸を f^* とし、 R_s 数をパラメータとした1/4球型粗度の結果を図-13に示す。今回の実験条件内では R_s 数が変化しても f^* の方向特性は殆ど変化しておらず、大きさのみに影響しており、 R_s 数の増加によって残差合力は若干増加している。

4. 結論

周期の短い往復流場における非対称構造物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) 構造物形状の非対称性によって残差抗力が生じることが明らかとなった。1/4球型粗度では、加速度が大きくなる位相から流速が大きくなる位相までの抵抗抗力の増加によって残差抗力が発生する。
- 2) 1/4球型粗度および半円筒型粗度を主流方向に対して傾けて設置することによって任意の方向に残差合力が生成可能である。従って、任意の方向に波浪残差流が生成可能となることが期待される。
- 3) 1/4球型粗度でKC数が大きい場合、迎角 θ が $50 \sim 90^\circ$ の範囲では θ の増加に伴い残差揚力が減少する。また、それに伴い残差合力も減少する。
- 4) 波浪場のようにKC数が小さい場合、残差合力が迎角に殆ど影響されずに生じるため、BaNKシステムにおいて著しい残差流の偏流効果が期待される。

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いただいた。また、本研究の一部はNEDOの平成13年度産業技術研究助成事業のもとに行われた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 小松利光, 齋田倫範, 小橋乃子, 安達貴浩, 柴田卓也: 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, 2001
- 2) 小松利光, 柴田卓也, 押川英夫, 柴多哲郎, 安達貴浩, 小橋乃子, 樋田操: 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, 2002
- 3) 小松利光, 小橋乃子, 和田真人, 藤田和夫, 矢野真一郎, 安達貴浩: 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, 水工学論文集, 第43巻, pp.833-838, 1999
- 4) 岩垣雄一: 最新 海岸工学, 森北出版, pp.61-66, 1987
- 5) 岩田好一朗, 水谷法美: 没水球体に作用する波力の特性に関する研究, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp.215-224, 1989

(2002. 9. 30受付)