

非対称没水構造物による波浪残差流生成特性

CHARACTERISTICS OF WAVE-INDUCED RESIDUAL CURRENTS DUE TO PLURAL SUBMERGED ASYMMETRICAL ROUGHNESS

押川英夫¹・柴多哲郎²・小松利光³

Hideo OSHIKAWA, Tetsuro SHIBATA and Toshimitsu KOMATSU

¹ 正会員 修(工) 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 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ (株) (〒206-8550 東京都多摩市関戸 1-7-5)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 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

The characteristics of wave-induced residual currents and residual hydrodynamic force caused by plural submerged asymmetrical roughness in oscillatory flows were experimentally investigated. Firstly, the mechanism of residual currents induced by wave were discussed on the basis of hydrodynamic force on an asymmetrical roughness in an oscillatory flow tank and velocity around plural asymmetrical roughness in a vertical 2-dimensional wave tank. Secondly, some parameters affecting a wave-induced residual current were discussed. It is found that residual currents are produced by inertia force and drag one due to an asymmetry of roughness in an oscillatory flow. Furthermore, the directions of residual hydrodynamic force and a residual current are reversed in some condition of longitudinal interval of asymmetrical roughness.

Key Words : Wave-induced residual current, residual hydrodynamic force, BaNK system, submerged asymmetrical roughness

1. 緒言

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)}。³⁾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)を複数個設置することで,海底付近に波の一周期平均的な一方向流れ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BaNKブロックの受ける流体力,ブロック周りの流況,底質輸送能力などが明らかにされているが,波浪残差流の生成メカニズムについての基礎的研究が未だ十分ではない。そこで本研究では,系統的な室内実験を行うことでBaNKシステムにおける波浪残差流の生成機構とそれに寄与する条件について検討を行った。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示す2次元吸収式造波水槽を用いた。ブロックは比較用の対称形状として半球型, BaNKブロックとして1/4球型を用いた。粗度間隔 s と粗度高さ k の関係は(実験4を除いて) $s/k=4$ で一定とし,1/

4球は残差流が岸向きに生成される向きに設置した。ブロックの敷設長は水平床で1.8mとし,水路床に勾配をつけたときは造波板から6.0m離れた位置($x=0$,但し x 軸は水平であり岸向きを正とする)を基点として所定の勾配をつけ,傾斜固定床上で波長より十分長い敷設長を水面下に確保した。水路床勾配の有無に関わらず水路岸側端部には消波材を設置しており,本実験は進行波を対象としている。実験3までの実験条件を表-1に示す。 h_0 および H_0 はそれぞれ,沖側の一様水深部での静水深,波高である。流速測定には超音波ドップラー流速計(ADV)および電磁流速計(EV)を用いた。縦断方向の測定位置は水平床では $x=1.0$ m,傾斜床では測定位置の水深(静水深)を h として, $h=10.0$ cmから25.0cmまでの区間を水深2.5cm間隔で7箇所とした。それぞれの点の底面から鉛直上向きに z 軸を定義して,図-2に示された各測点において流速の鉛直分布を測定しており,水平方向には等間隔の格子状に設置された4つの粗度の中央の点Aと前後を粗度に挟まれた点Bの2点で測定している。また,容量式波高計により縦断方向に2点で水面変動の測定を行っているが,容量式波高計とEVは同期を取っており,EVの測定結果において波高と流速の位相差まで正確に評価している。一

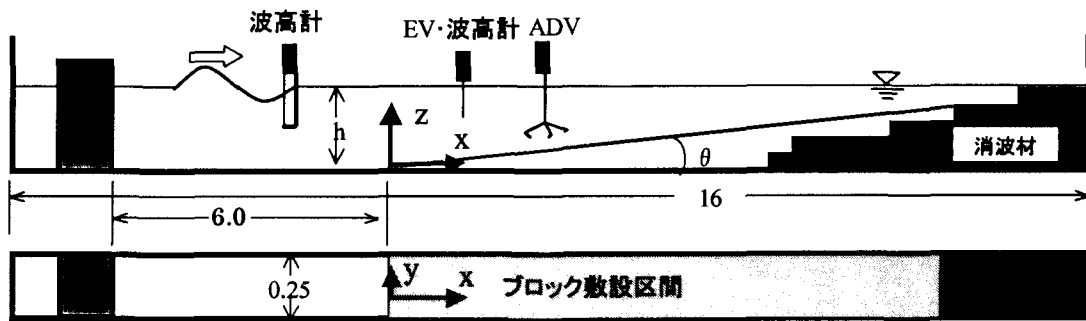
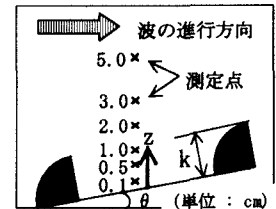


図-1 実験装置概略図

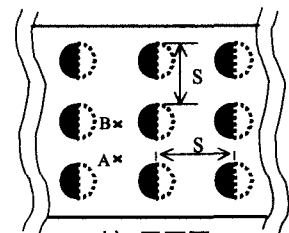
(単位 : m)

表-1 実験条件

沖水深: h (cm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
沖波波高: H_0 (cm)	3.3	5.8	8.3	3.3	5.8	8.3	3.3	5.8	8.3
周期: T (s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
水路床勾配: $\tan \theta$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
粗度形状, 高さ (cm)	なし	なし	なし	半球, 2.1	半球, 2.1	半球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1
沖水深: h (cm)	35	20	20	35	25	20	30	30	30
沖波波高: H_0 (cm)	3.2	3.1	2.5	7.6	5.3	3.9	2.1	3.5	7.0
周期: T (s)	1.0	1.0	2.5	1.0	1.0	1.0	2.2	1.5	1.0
水路床勾配: $\tan \theta$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
粗度形状, 高さ (cm)	1/4球, 3.7	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 3.7	1/4球, 3.7	1/4球, 3.7
沖水深: h (cm)	12.5	30	30	30	30	30	30		
沖波波高: H_0 (cm)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	5.8	8.3		
周期: T (s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
水路床勾配: $\tan \theta$	0	1/30	1/20	1/10	1/10	1/30	1/30		
粗度形状, 高さ (cm)	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1	半球, 2.1	1/4球, 2.1	1/4球, 2.1		



a) 側面図



b) 平面図

図-2 流速測定位置

般に ADV の方が EV よりも精度が高いと考えられるため、とくに断らない限り ADV の結果を用いているが、それらの図中における位相差は EV による結果を用いて可能な限り正確に図示している。サンプリング周波数は ADV, EV それぞれ 25, 20Hz である。得られたデータをゼロアップクロス法で 50 波分抽出して平均して得られた結果について考察を行っている。

本論文では、波浪残差流に影響を与える主なパラメータとして、後述のように KC 数, R_0 数, 相対粗度高の 3 つを考えている。本実験の相似則を考えると、KC 数と相対粗度高は実験と現地スケールで同程度となっているが、 R_0 数に関しては 1～2 オーダ程度実験の方が小さくなっている。また、水路床勾配を変えた実験も行っており、その際碎波や戻り流れの影響も詳細に検討すべきであるが、BaNK システムにおいては構造物を実際に設置する位置は碎波帯より沖側の沖浜帯を主に考えている。従って実験中に碎波点を目視により確認しているが、本論文では碎波点以深を検討対象としている。

3. 結果および考察

(1) 残差流の生成機構に関する検討 (実験 1)

ここでは昨年報告した振動流場における抗力測定実

験の結果³⁾と今回実施した 2 次元造波水槽での流速測定実験の結果を用いて、残差流生成機構について検討する。同じ波浪条件で EV により測定された 1/4 球, 半球, 粗度なしの結果について、A 地点の底面からの高さ 1.0cm における無次元化された流速の位相平均波形と水面変動を図-3 に示す。図の横軸は無次元時間 t/T であり、縦軸は無次元流速 u/U_0 である。 t は時間、 T は周期、 u は x 方向流速、 U_0 は微小振幅波理論より求めた沖の一樣水深部における粗度高さ位置での u の振幅 ($=H_0 \sigma \cosh Kk/2 \sinh Kh$)、 σ は角振動数、 K は波数である。図の上部には各時間における 1/4 球型粗度と u の関係を図示している。また参考として、抗力測定実験により得られた構造物単体 (半球および 1/4 球) に作用する無次元化された x 方向の抗力の位相平均波形 F_x^* を図-4 に示す。図中にはモリソン式中の抗力 (定常流体力に因る力) の位相を示す無次元抗力、および慣性流体力の位相を示す無次元加速度を併記している。

図-3 より 1/4 球では他の条件下の場合と比較して流速波形が著しく異なっていることがわかる。半球および粗度なしの条件では、 $t/T=0.75$ 付近において流速がゼロとなるのに対し、1/4 球では正方向 (岸向き) 流速が存在している。図-4 から明らかなように、これは $t/T=0.75$ 付近が慣性流体力の卓越する位相であり、構造物の非対称性によって半球よりも 1/4 球に働く慣性

流体力の絶対値が大きくなっているためである。また図-4では、粗度の非対称面に流れがあたる位相に相当する $t/T=1$ (または0) でも半球と1/4球の F_x^* に差異が認められる。この付近は図-4の実線で示されるように抗力が卓越する位相であるため、抗力によっても残差流が生じることが期待されるが、実際に図-3の負方向流速のピークにも差異が生じており、粗度形状の違いに因る抵抗差のために流速の絶対値が減少している。以上より短周期の往復流場では、構造物の非対称性により抗力、慣性流体力の絶対値が異なる位相で大きくなる結果として、一周期平均値である残差抵抗および残差流が発生することになる。

(2) 残差流に及ぼすパラメータの検討 (実験2)

残差流生成に寄与するパラメータとして KC 数 $\{=U_0 T/D, D(=2k)$ は粗度の直径 $\}$, R_e 数 $\{=U_0 D/\nu, \nu(=0.01\text{cm}^2/\text{s})$ は水の動粘性係数 $\}$, 相対粗度高 k/h_0 の3つを主要なものと考え、それら3つのうちの2つを固定し、1つのパラメータのみ変化させることでそれらが残差流に及ぼす影響を検討した。

$k/h_0=0.11$, R_e 数を約3400に固定して KC 数をパラメータとした場合のA地点における残差流速 U の鉛直分布を無次元化して図-5に示す。これより KC 数が小さいほど底層の岸向き残差流速は大きくなっていることがわかる。逆に中層はその順序が入れ替わっており、底層の残差流に対する補償流が生成されている(上層でも同様と考えられる)。ここで、無次元高さ z/h_0 が約0.05での無次元流速の位相平均波形をA, B両地点についてそれぞれ図-6, 7に示す。 KC 数の減少は一般に慣性流体力の増加をもたらすため、流速に差異が生じるのは加速度が最小となる位相の $t/T=0.75$ 付近であると考えられる。実際に両図においてその位相付近で流速の増加が認められるが、とくにB地点の図-7で顕著である。 KC 数の減少とともにその位相付近の流速値が著しく大きくなっており、慣性流体力の増加が残差流に寄与していることが理解される。また、両地点の波形を比較すると位相やピーク値に顕著な差異が認められる。 KC 数が大きい5.0の場合、両地点の流速波形はよく似ているが、 KC 数の減少とともに両図の差異は顕著になってくる。これは前述の慣性流体力の増加に因るものであり、 KC 数の減少に伴って正のピーク値はA地点よりもB地点の方が大きくなり、その時の位相は $t/T=0.5$ から0.75に向かって遅れてくる。それに伴い正方向流速となる時間帯もB地点では KC 数の減少とともに著しく大きくなるが、A地点では僅かに増加するのみである。逆に負のピークの絶対値はB地点よりもA地点の方が大きくなっていく。これは前節で示したように $t/T=1$ (または, 0)

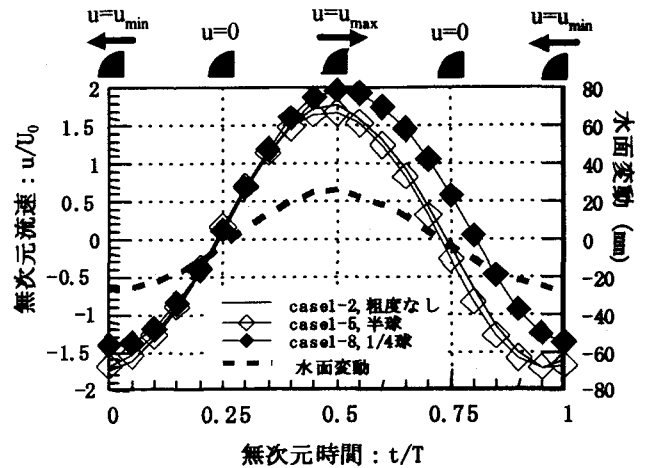


図-3 流速の位相平均波形 ($H=5.8\text{cm}$, A地点)

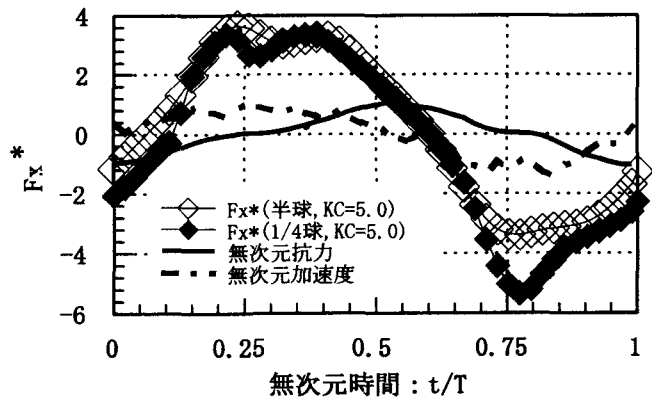


図-4 粗度が受ける抗力の位相平均波形 [押川ら³⁾より引用]

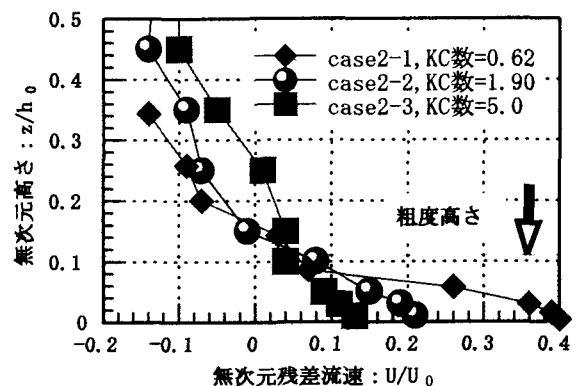


図-5 KC 数毎の残差流速の鉛直分布 (R_e 数 ≈ 3400 , $k/h_0=0.11$, A地点)

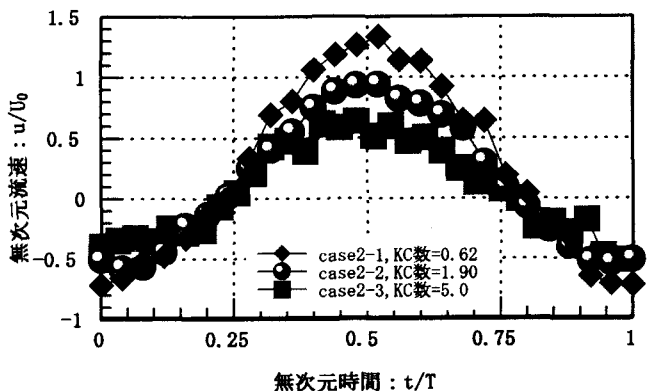


図-6 KC 数毎の流速の位相平均波形 (R_e 数 ≈ 3400 , $k/h_0=0.11$, $z/h_0 \approx 0.05$, A地点)

付近の位相は、構造物の非対称性に因る抗力の影響が大きい位相であるために、波の進行方向に対して前後を粗度に挟まれているために構造物の影響を受けやすいB地点の流速の絶対値の方がA地点よりも小さくなったものと考えられる。このように位置によって流速に差異がみられるものの、両地点の底層の残差流速はともに正であり、意図した方向への底質輸送の促進が期待できる。

$k/h_0=0.12$, KC数を約1.6に固定し R_0 数をパラメータとしたA地点の無次元残差流速の鉛直分布を図-8に示す。図より R_0 数の増加に伴い残差流速が大きくなることがわかる。しかし底層での残差流が大きくなるよりは、むしろ正方向の残差流の生成厚が大きくなっている。更に詳しく検討するため、比較的残差流速の大きな $z/h_0=0.17$ でのA地点における無次元流速の位相平均波形を図-9に示す。これより、 R_0 数の増加に伴って正方向流速となる時間帯が長くなり、波形の歪みが大きくなっていることが分かる。また波形の全体的な傾向として、これらの条件下では正方向流速のピークに比べ負方向流速のピークが著しく小さくなっており、粗度の非対称性の効果が顕著である。

KC数を約2.5, R_0 数を約4500に固定し、相対粗度高 k/h_0 をパラメータとしたA地点における無次元残差流速の鉛直分布を図-10に示す。両ケースとも底層に岸向き残差流速が生じているが、今回の実験条件内ではそれらの最大値に顕著な差異は認められなかった。しかしながら、岸向き残差流の生成厚は k/h_0 の増加に伴って増加しており、相対粗度高は残差流の生成厚には寄与していることが明らかとなった。

(3) 残差流に及ぼす海底勾配の影響 (実験3)

図-11はKC数=2.9, R_0 数=5100, $k/h=0.17$ で、A地点における水路床勾配をパラメータとした残差流速の鉛直分布である。比較のために半球を設置した $\tan \theta = 1/10$ の場合を併記している。無次元化に用いられた U_0^* は沖の一樣水深部での粗度高さの位置における流速振幅である。但し、本節の実験3では流速測定にADVのみを用いているため、位相平均波形はゼロアップクロス時が一致するように描かれており、それらの位相の相対関係は考慮されていない。この図より対称構造の半球では底層付近の残差流速が殆どゼロであるのに対し、1/4球では粗度高さ付近まで残差流速はほぼ正の値となっている。勾配が急になるとともに残差流速が大きくなっているが、これは急勾配になるほど浅水変形により波高が高くなることが一因と考えられる。

図-12は波高をパラメータとした $\tan \theta = 1/30$, $h=10.0\text{cm}$ の場合のA地点での無次元化されたx方向残差流速の鉛直分布である。これより波高が小さい

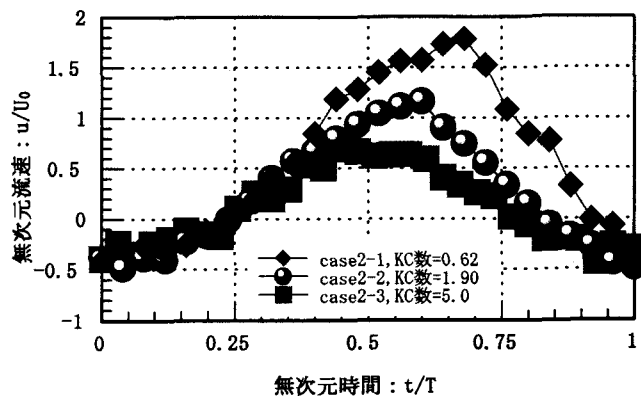


図-7 KC数毎の流速の位相平均波形
(R_0 数 ≈ 3400 , $k/h_0=0.11$, $z/h_0=0.05$, B地点)

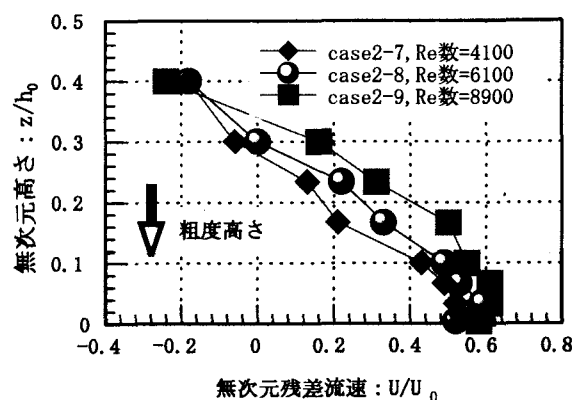


図-8 R_0 数毎の無次元残差流速の鉛直分布
(KC数 ≈ 1.6 , $k/h_0=0.12$, A地点)

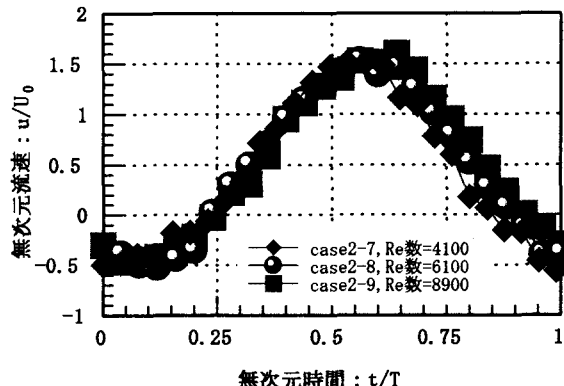


図-9 R_0 数毎の流速の位相平均波形
(KC数 ≈ 1.6 , $k/h_0=0.12$, $z/h_0=0.17$, A地点)

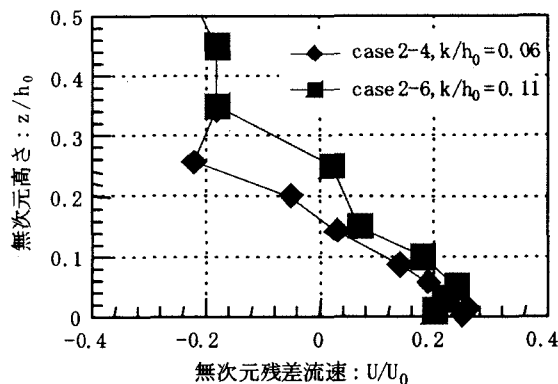


図-10 相対粗度高毎の無次元残差流速の鉛直分布
(KC数 ≈ 2.5 , R_0 数 ≈ 4500 , A地点)

ほど底層にみられる岸向きの無次元残差流速が大きいことがわかる。図-13は同一地点における $z=0.1\text{cm}$ の位置での無次元化された x 方向流速の位相平均波形である。水面波形の有限振幅効果による変形に類似して、波高が大きくなるほど流速波形が歪んでいる。

波高をパラメータとした $\tan \theta = 1/30$, $h=15.0\text{cm}$ の場合のA地点の $z=0.1\text{cm}$ の高さにおける無次元化された x 方向流速の位相平均波形を図-14に示す。これは図-13の条件よりもやや沖側での結果である。図-14をみると、 $H=8.3\text{cm}$ では有限振幅効果により $H=3.3$, 5.8cm と比較して流速波形は僅かに変形しているが、図-13と比較して波高による変化は全体的に小さく、また u/U_0^* の最大値はいずれも1程度であることがわかる。これより流速波形の変形は 15.0cm 程度の水深($k/h=0.14$)までは比較的小さいが、より浅くなった 10.0cm 程度の水深($k/h=0.21$)では顕著になっていると考えられる。

(4) 残差流に及ぼす主流方向粗度間隔の影響(実験4)

主流方向の粗度間隔 s を変化させて、それが残差抗力と残差流に及ぼす影響を検討した。流速測定実験には図-1の装置を用い、実験条件として水平床、 $T=1.0\text{s}$, $H=5.8\text{cm}$, $h_0=30\text{cm}$, $k=2.1\text{cm}$ において、 $s(\text{cm})$ を2.1, 3.15, 4.2, 5.25, 6.3, 8.4, 10.5, 12.6, 14.7の9条件に変化させたものである。測定位置は図-2のA, B両地点である。抗力測定実験には前報³⁾で用いた実験装置を用い、実験条件は前報におけるKC数の異なるcase0-4(断面平均流速を代表流速とした KC数=10.1), case0-5(KC数=8.4), case0-6(KC数=5.0)のそれぞれの条件(R_s 数と相対粗度高は固定されており、27000と0.17)において、粗度間隔 $s(\text{cm})$ を8.5(7), 10(7), 15(7), 17.5(7), 20(7), 22.5(7), 25(5), 30(5), 40(5), 50(3), 60(3), 70(3), 80(3)と変化させたものである。但し、 s の横の括弧内の値は縦断方向に設置された粗度の数である。この際、中央の粗度のみに三分力計に取り付け、その粗度に働く抗力を測定した。

粗度間隔をパラメータとしたB地点における残差流速の鉛直分布を図-15に示す。これより s/k によって大きさは異なるものの粗度高さの位置付近には岸向き残差流が生じていることが分かる。しかしながら、底面近傍では残差流の大きさが急減しており、 s/k が2.5以下の場合には残差流の向きが逆転(沖向き)している。図-16にA地点、 $z=1.0\text{cm}$ における s/k をパラメータとした流速の位相平均波形を示す。この条件では s/k が1~1.5の間で波形が急変し残差流も大きくなっているが、 $s/k=2\sim4$ ではピーク値が徐々に減少しており、 $s/k>4$ の範囲においては位相平均波形がほぼ一致している。流速の位相平均波形に変化が見られなくなる s/k の値は測定位置によって異なっていたものの、 $s/k>4$ の範囲ではほぼ流速波形が一定であった。

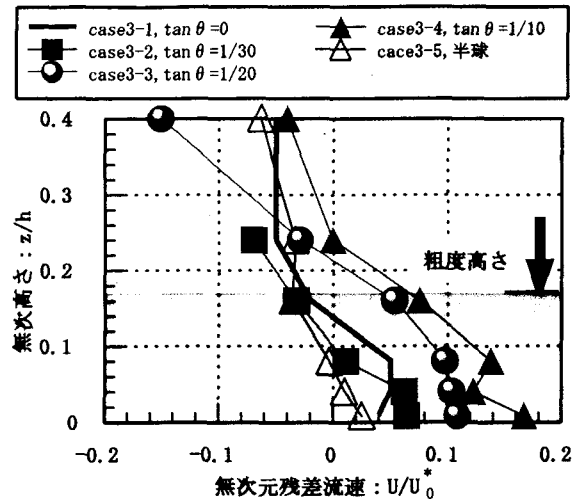


図-11 水路床勾配毎の無次元残差流速の鉛直分布 (KC数=2.9, R_s 数=5100, $k/h=0.17$, A地点)

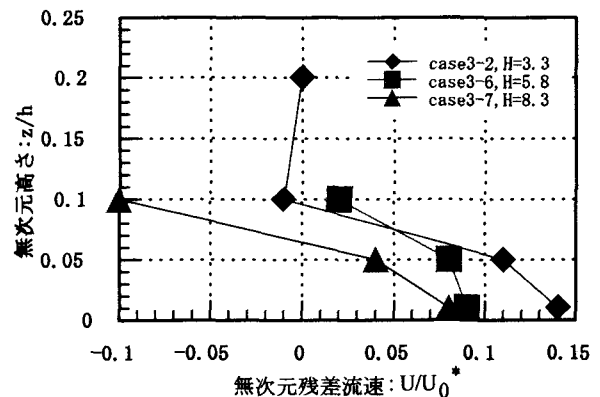


図-12 波高毎の無次元残差流速の鉛直分布 ($h=10.0\text{cm}$, $\tan \theta = 1/30$, A地点)

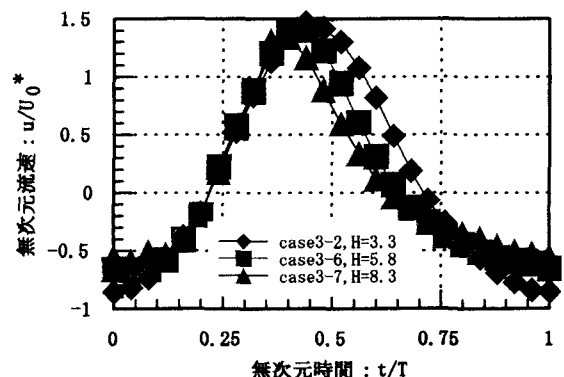


図-13 波高毎の流速の位相平均波形 ($h=10.0\text{cm}$, $z=0.1\text{cm}$, A地点)

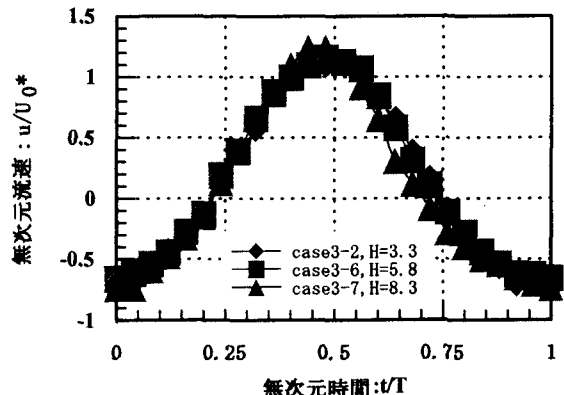


図-14 波高毎の流速の位相平均波形 ($h=15.0\text{cm}$, $z=0.1\text{cm}$, A地点)

最後に、縦軸を粗度単体の場合の残差抗力³⁾で無次元化した残差抗力 f^* 、横軸を s/k 、KC数をパラメータとした抗力測定実験の結果を図-17に示す。これより残差抗力は $1.7 < s/k < 4$ の範囲に極小値を有し、その値はKC数が小さい場合(KC=5.0, 8.4)には負となっている。これは前述の流速測定実験において、 s/k が小さい場合底面近傍で残差流の値が負となっていた結果と符合しており、流体力学的には興味深い。本工法としては少なくとも $s/k > 4$ の粗度間隔を考えるべきであろう。またこのことは、本工法に類似した入江の一連の研究⁴⁾で用いられている非対称構造物(DRIM)の向きが、著者らの研究におけるブロックの向きと一見逆であるかのように見える理由と考えられる。因みに単純比較は出来ないものの、DRIMの粗度間隔における s/k に換算すると $s/k=5.5$ である。図-17では $s/k=5$ 付近にも極小値が認められるが、 $s/k=5$ を境に粗度の個数が7個から5個に変わっているため、この極小値が物理的意味を有するものであるかどうかは今のところ不明で今後の課題である。

4. 結論

波浪場に非対称構造物を設置することにより発生する波浪残差流の生成機構を解明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がもたらす定常流体力と慣性流体力に起因して流速が増加することにより、波浪残差流が生成される。
- 2) KC数が小さいほど底層付近に大きな岸向き残差流が発生する。
- 3) R_s 数が大きいほど底層付近に大きな岸向き残差流が発生する。しかしながら、その変化は残差流速の最大値よりも岸向き残差流の生成厚に顕著な影響を及ぼす。
- 4) 相対粗度高の増加に伴い岸向き残差流の生成厚は大きくなる。
- 5) 海底勾配が急になるほど残差流は大きくなる。
- 6) 効率を考えると波高が小さい方が構造物の非対称性による効果を発揮し易い。
- 7) 粗度間隔が小さいと残差抵抗力・残差流の向きが逆転する。従って逆流を防ぐという観点からは、少なくとも本工法における粗度間隔 s/k は4以上とすべきである。

謝辞：本研究を行うにあたり、九州大学大学院工学府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。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

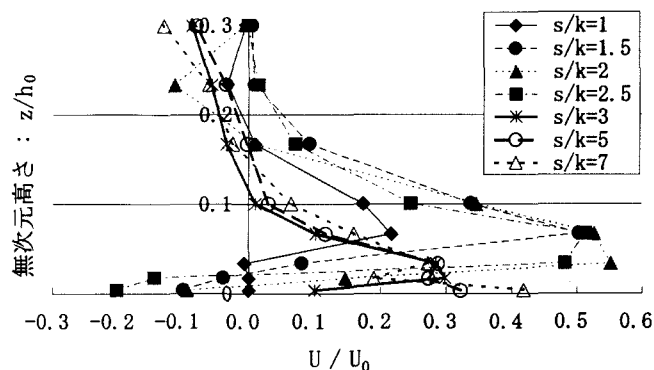


図-15 粗度間隔毎の残差流速の鉛直分布(B地点)

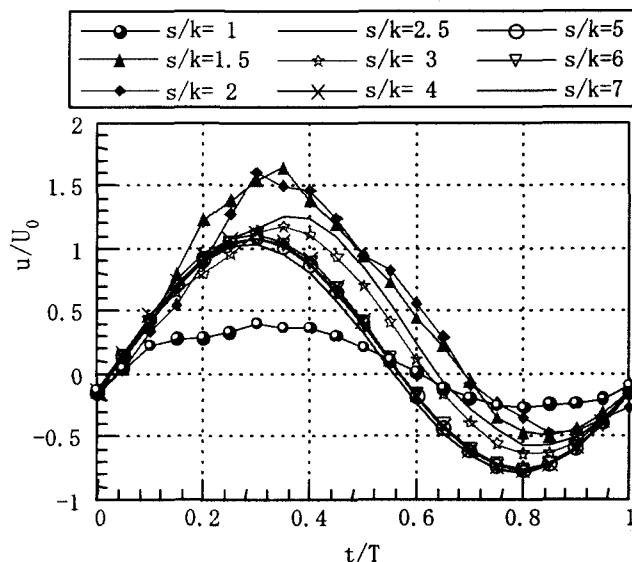


図-16 粗度間隔毎の流速の位相平均波形($z=1.0\text{cm}$, A地点)

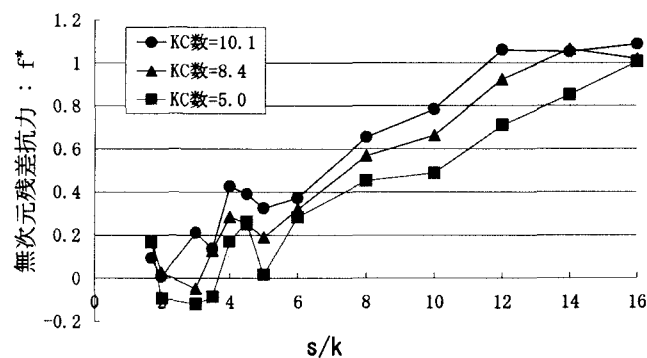


図-17 粗度間隔と残差抗力の関係(R_s 数=27000)

- 1) 小松利光他：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) 小松利光他：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) 押川英夫他：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.805-810，2003
- 4) 例えば，入江功他：歪み砂れんマットによる沖浜帯の岸沖漂砂の制御，海岸工学論文集，第40巻，pp.561-565，1993

(2003.9.30 受付)