

# BaNK システムの底質輸送制御効果に関する研究

## STUDY ON EFFECTS OF BaNK SYSTEM ON CONTROL OF SEDIMENT TRANSPORT

小松利光<sup>1</sup>・柴田卓也<sup>2</sup>・押川英夫<sup>3</sup>・柴多哲郎<sup>2</sup>・安達貴浩<sup>4</sup>・小橋乃子<sup>5</sup>・櫛田操<sup>6</sup>  
Toshimitsu KOMATSU, Takuya SHIBATA, Hideo OSHIKAWA, Tetsuro SHIBATA,  
Takahiro ADACHI, Naoko KOHASHI and Misao HASHIDA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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 (同上)

<sup>4</sup>正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

<sup>5</sup>学生員 工修 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 日本学術振興会特別研究員 (同上)

<sup>6</sup>正会員 工博 日本文理大学教授 工学部建設都市工学科 (〒870-0316 大分市一木1727)

Directional characteristics of wave-induced residual current and control of littoral sand drift depending on wave direction and an angle of plural asymmetrical bottom roughness (we call the asymmetrical bottom roughness BaNK block) were experimentally investigated. Firstly, the distribution of residual velocity on the fixed bed with the bended BaNK blocks was measured in a 3-dimensional wave field. Secondly, the deformation of movable bed due to the effect of blocks was measured in other fields. As a result, direction of wave-induced residual current could be arbitrarily changed by setting blocks with an angle. Furthermore, it was demonstrated that the BaNK blocks are able to control littoral sand drift in a 3-dimensional wave field with movable bed.

**Key Words :** wave-induced residual current, BaNK block, littoral sand drift, beach nourishment method

### 1. 緒言

わが国は周囲を海に囲まれた島国であり、総延長34,390kmにもおよぶ海岸線は国土と海の境界として古くから様々な役割を果たしてきた。中でもその1/4を占める砂浜は、白砂青松に代表される景観美や海水浴・レクリエーションの場としての役割だけでなく、波浪外力を減衰させるという消波機能を有している。近年、その消波機能の重要性は改めて注目され、平成11年度に施行された新海岸法にも砂浜の保全が強調されて織り込まれている。しかしながら、わが国を含めた世界中の砂浜は深刻化する海岸侵食により年々減少しており、地球温暖化による海面上昇の問題とも相俟って、沿岸環境の維持が危ぶまれている。従って、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出技術であるBaNK(Beach and Navigation Keeper)工法を提案している<sup>1)</sup>。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期平均的な一方向流れを任意の方向に生成させ得ることから、底質移動の自在な制御を可能とするものである(図-1参照)。本技術は往復流場であればどこにでも適用できるため、海岸侵食の防止、航路埋没の防止、魚の養殖筏周辺の水質・底質の改善、河口閉塞の防止等、様々な応用が可能となる。また本技術は自然エネルギーのみを用いて豊かな砂浜の維持・創成を可能とすることから、地球温暖化による海面上昇への有効な対策となることも期待されている。

前報<sup>1)</sup>では、鉛直2次元波浪場においてBaNKブロックにより底層付近に強い波浪残差流が生成されることを示した。しかし、実際に本工法が対象とするのは3次元の実海域であるため、意図した任意の方向に波浪残差流が生成可能かどうかは明らかではない。関連した研究として、小松ら<sup>2)</sup>は非対称形状を有する海底ブロック(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)を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、海底ブロックを潮流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

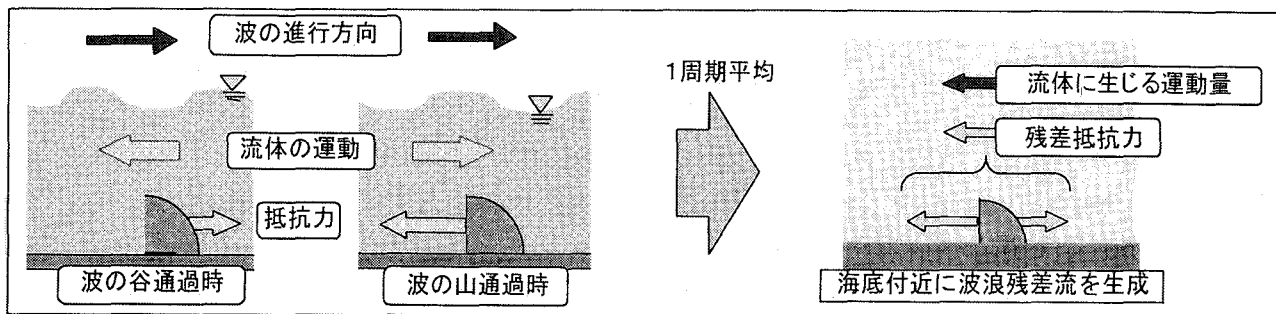


図-1 波浪残差流の生成メカニズム

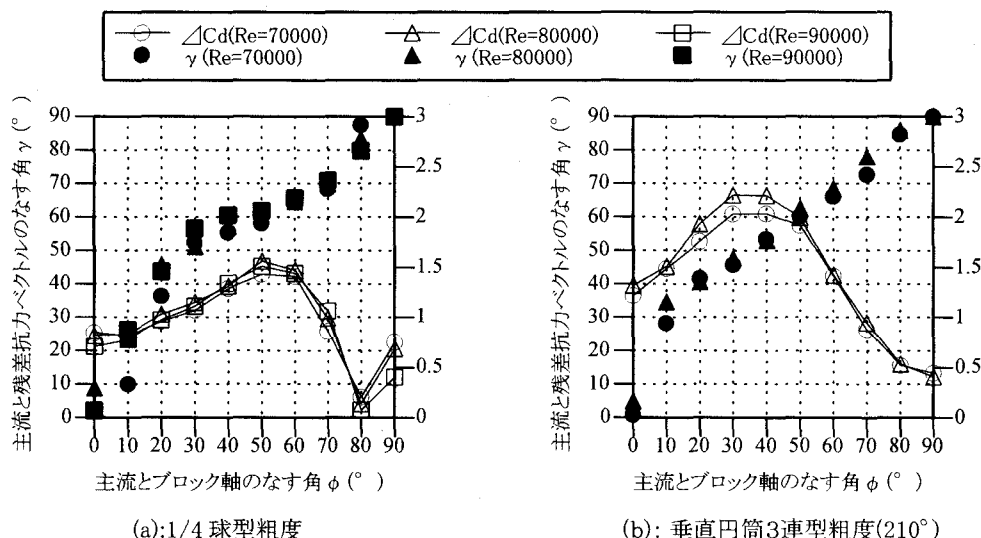


図-2 定常流に対する残差抵抗力ベクトルの偏流角度および抗力係数 [小松ら<sup>2)</sup>より引用]

とを明らかにしている(図-2参照)。BaNK工法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、本手法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。さらに波浪場は非線型性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、本工法の特長の一つである「任意の方向に任意の大きさの波浪残差流を創造することが可能」を実現するため、3次元波浪場における実験を行い、波浪残差流の生成ならびに方向特性、また直接的な漂砂制御について検討を行った。

## 2. 流速測定による偏流効果の検討(実験Ⅰ)

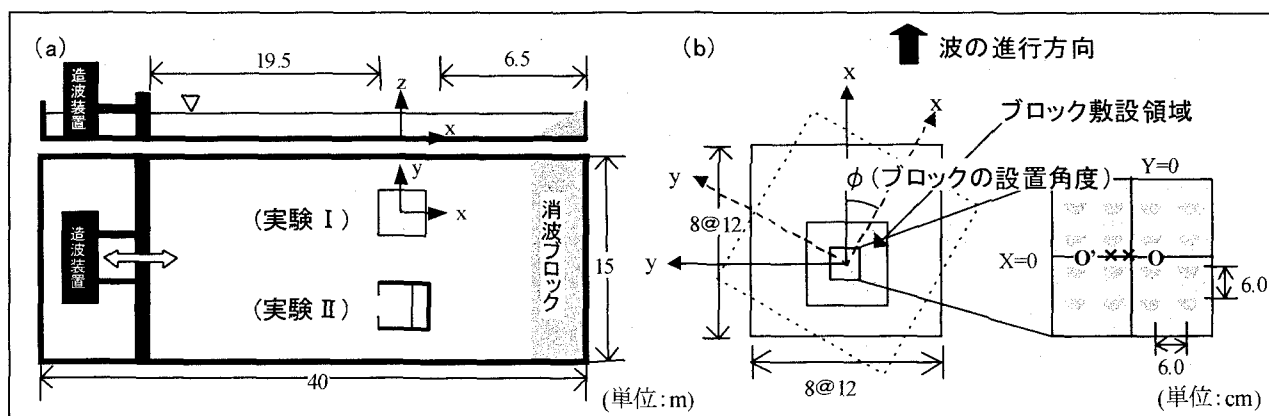
### (1) 実験方法

実験は図-3に示す大型の3次元造波水槽を用いて行われた。用いられたBaNKブロックの模型は、ステンレス製の基盤(120×120×0.2cm)上に高さ2.1cmの1/4球型粗度81個(9×9)を図-3b)のように6.0cm間隔で取り付けたものである。それを波向きに対する角度φを変化させて設置(Case-1: φ=0°, Case-2: φ=30°, Case-3: φ=50°)、水深h=30.0cmで波高5.0cm、周期1.0sの規則波を作用させた。ブロック敷設領域の中心を原点とし、

基盤に固定してx,y軸を、また底面から鉛直上向きにz軸を設定し、x=0, ±12, ±24, ±36, 48, 60cmの9測線とy方向にy=0, ±12, ±24, ±36, ±48cmの9測線の各交点においてブロック高さにほぼ相当するz=2.0cmにおける流速をADV(超音波ドップラー流速計)を用い測定した。1測点あたりサンプリング周波数20Hzで測定時間は2分間とした。また、原点Oとその近傍の点O'(x=0, y=3cm)においてはz方向の9点(z=0.1, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 12, 15cm)で流速測定を行い、OとO'の2点で得られた結果を平均することで残差流速の鉛直分布を求めた。

### (2) 結果および考察

波の振幅aと角周波数σで無次元化されたブロック周りの波浪残差流速の平面分布を図-4に示す。残差流速は得られた流速時系列データからゼロアップクロス法により100波分を抽出した後平均して求められている。これよりCase-1ではブロック敷設領域上においてxの正の方向、すなわちブロックを設置した方向の波浪残差流が生成されていることが分かる。また生成された残差流はxの増加とともに強くなっており、ブロック敷設領域外においても大きな残差流が認められ、残差流の生成領域は前報<sup>1)</sup>で得られた結果(鉛直2次元波浪場の場合で敷設領域の1.5倍程度)よりもさらに広い領域に渡っているものと思われる。ブロックをφ=30°傾けて設置したCase-2においても、ブロック敷設領域で残差流が生成されているが、設置角度の違



a) 3次元造波水槽の全体図 b) 偏流実験におけるブロックの設置状況

図-3 3次元造波水槽概略図

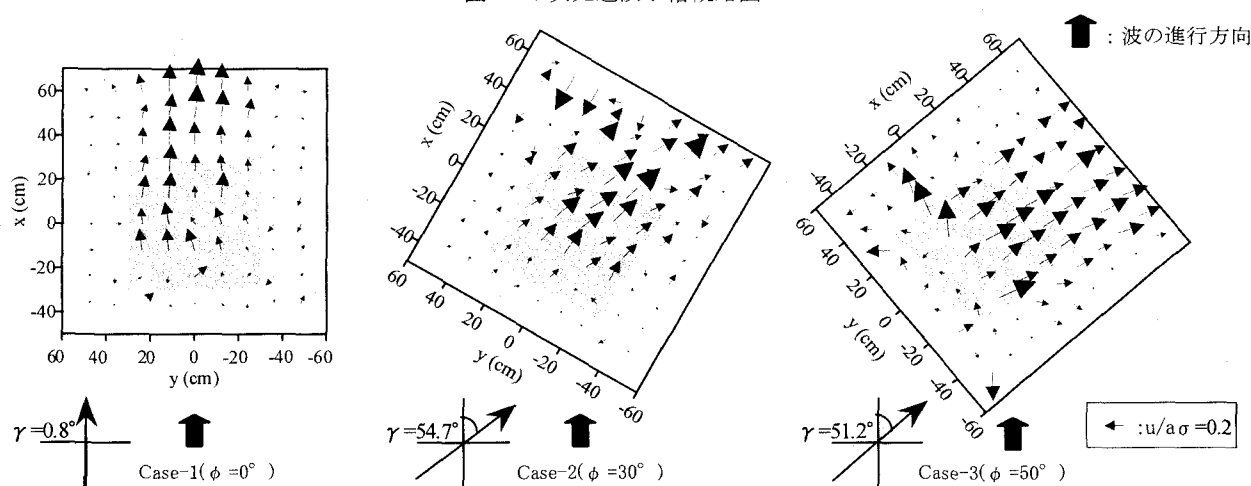


図-4 無次元波残差流の平面分布

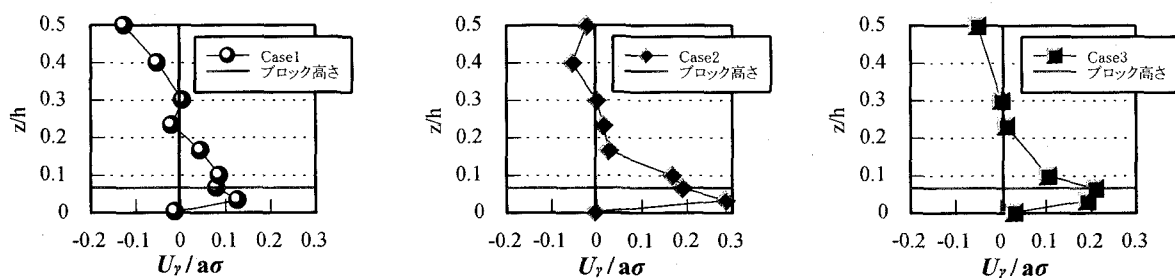


図-5 原点における無次元残差流速ベクトルの主流方向成分の鉛直分布

いにより残差流は大きく右方向に傾いている。φ = 50°としたCase-3においても同様に波の進行方向に対して右方向に傾いた残差流が見られ、これらの結果によりBaNKブロックの設置角度を変化させることによって残差流の生成方向を変えることが可能であることが確認された。

#### (a) 偏流効果の検討

次に、図-4に示した結果から各Caseにおける残差流速ベクトルの主流方向を求め、BaNKブロックの偏流効果の定量評価を試みた。図-3b)のブロック敷設領域内の前方の9測点、即ちx=0,12,24cmの3測線と、y=-12,0,12の3測線との交点において得られた残差流速の平均値をそのCaseの代表残差流速 $U_r$ とした。さらに得られた全データの中から $U_r$ の大きさの5割以上の大きさをもつベクトルのみを有意なものとみなし、それら全ての平均ベクトルの方向を

もって、各Caseの主流方向 $\gamma$  (波の進行方向からの角度)とした。その結果、Case-1,2,3の主流方向はそれぞれ $\gamma = 0.8, 54.7, 51.2^\circ$ であった。Case-2とCase-3で $\gamma$ の値が逆転するなど結果に若干ばらつきが見られるが、これらの値は図-2に引用した定常流場において1/4球型粗度を回転させた場合の残差抵抗力の方向特性(φ = 30°に対しては $\gamma = 50^\circ$ 、φ = 50°のときは $\gamma = 60^\circ$ 程度)に類似している。

#### (b) ブロック近傍の残差流況

図-5は原点 (実際はOとO'の平均) における残差流の主流方向成分 $U_r$ の鉛直分布である。縦軸は水深h、横軸は $a\sigma$ により無次元化されている。なおCase-1の $\gamma = 0.8^\circ$ は微小と考え、x方向成分をそのまま用いている。これより全Caseにおいて底面付近に強い主流方向の波浪

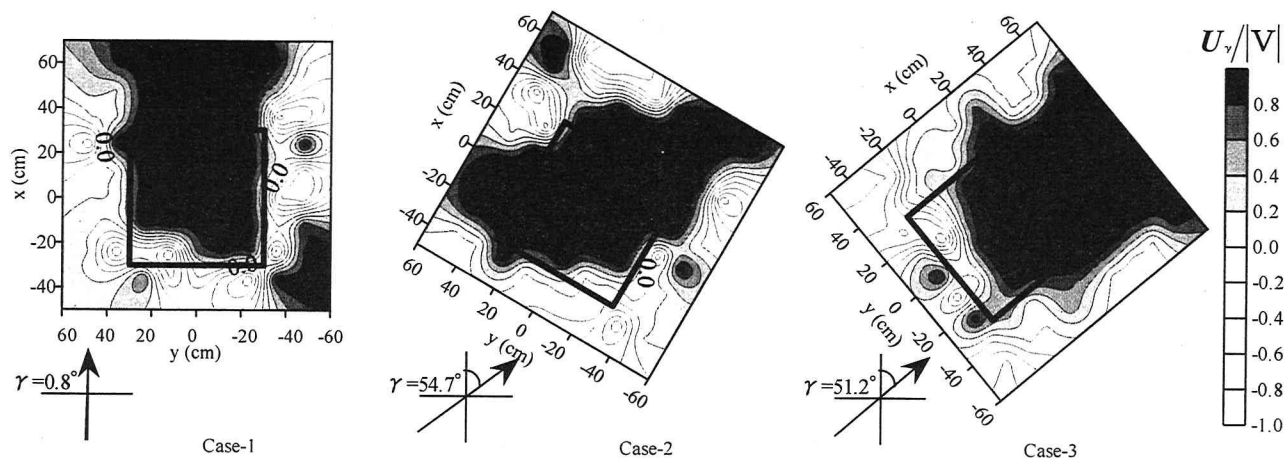


図-6 残差流速に対するブロックに起因した主流方向成分の割合の分布

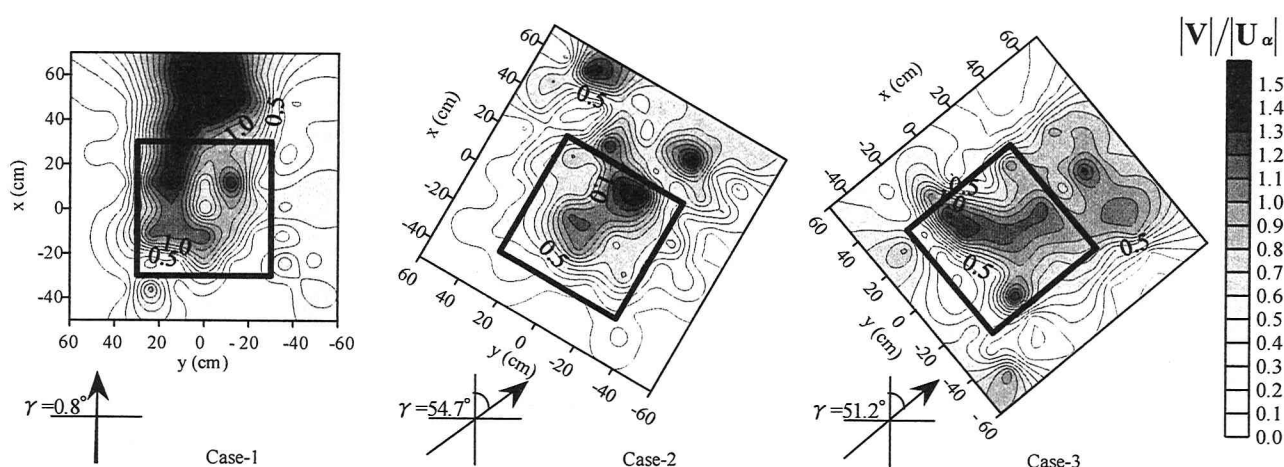


図-7 残差流速の大きさからみたブロックの影響範囲の分布図

残差流が生成され、それよりも上方の領域では逆向きの残差流が生じていることがわかる。これは前報<sup>1)</sup>における鉛直2次元波浪場での室内実験から得られた結果と類似しており、ブロックの設置領域上において強い鉛直残差還流が生じていることが予想される。また全Caseで無次元高さ  $z/h=0.2 \sim 0.3$  において主流方向の残差流の向きが逆転すること、残差流の最大値がブロック高さ付近において生じること等も2次元の研究結果<sup>1)</sup>と同様である。

図-5において各Caseの  $U_v/a\sigma$  の最大値を比較するとCase-2が最も大きく、最も小さいCase-1の3倍近くにも達している。この傾向は全体的に表示されている図-4においても認められる。残差流はブロック上の流れの向きによる抵抗差によって引き起こされる。波向きに対して  $30^\circ$  と  $50^\circ$  傾けた場合の抵抗係数差  $\Delta C_d$  は図-2から分るように  $\phi=0^\circ$  の場合よりも大きくなっていることから理解できる結果といえる。ただ、本実験における波の進行方向に対する角度  $\phi$  は図-2に示したブロック単体の回転角と異なり、原点を中心にブロック群全体を回転するものである。このため以下に述べるような物理的な理由も考えられる。波の進行方向に対する単位ブロック群あたりの投影面積は、Case-2のようにブロックを  $30^\circ$  傾けると前後のブロック同

士で互いに隙間を埋めてしまい、Case-1のそれよりも大きくなる。そのためにCase-2ではCase-1と比較して、群体としてより大きな抵抗力が生じたものと思われる。なお各Caseの波向きに対する投影面積の大きさはCase-2>Case-3>Case-1の順となっており、粗度高さ付近に生じた  $U_v$  の最大値の大きさの順序と一致している。

#### (c) ブロックによる残差流生成の影響範囲

図-6は残差流速ベクトルの絶対値に対する主流方向成分の比の分布である。各点における残差流速ベクトルの主流方向への寄与の強さを表している。ただし、算出に際しては残差流速の絶対値が各Caseにおける  $U_a$  の2割以上の大きさをもつデータのみを有意なベクトルとして採用している。値が大きい程色濃く表示し、また値が負のものはブロックの影響が大きい領域を明示する為にすべて白く表示している。これより、主流方向における影響領域はブロック設置領域前方に帯状に分布していることがよくわかる。この結果からもブロックの敷設領域上において残差流の主流方向に沿った鉛直残差還流が生成されていることが示唆される。また図中の濃い帯状領域の両側には白い領域の分布が見られる。これは影響帯を挟むように主流方向とは逆向きの流れが生じていることを示す。つまり、ブロックによっ

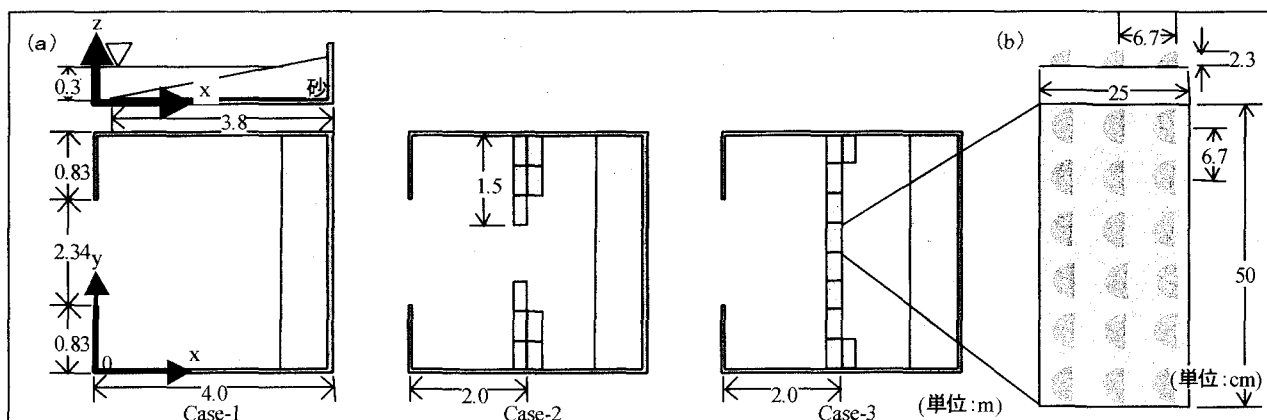


図-8 模型海浜およびブロック配置形態の概略図 [(a) 海浜内の平面図, (b) 模型 BaNK ブロック1ユニットの拡大図]

て生じた残差流によって前述の鉛直残差還流だけでなく、平面的な還流も同時に生成されていることを示す。これは図-4のCase-1の右側基盤端部やCase-2の左上の基盤外などから、弱いながらもベクトルとして直接確認できる。

図-7は、生成された残差流速の大きさに着目し、各点ごとに残差流速と $U_b$ の絶対値の比を求め、その分布を示したものである。 $\phi=0^\circ$ の場合は集中しているが、角度 $\phi$ の増加とともに値の比較的大きい領域が周囲に広がっていくように見える。これより少なくとも $\phi=50^\circ$ までは、角度 $\phi$ の増加とともにブロックの効果が分散していくものと思われる。

### 3. 3次元移動床制御実験（実験Ⅱ）

#### (1) 実験方法

実験は図-3で示された大型の3次元造波水槽に模型海浜を設置して行われた。この模型海浜は防波堤（突堤及び離岸堤）に囲まれたシンプルな形状の半閉鎖性的人工海浜を想定しており、その形をアクリル板で再現したものである。模型内に中央粒径0.23 mmの珪砂を一様勾配(1/10)で敷き詰め、一様水深部を30.0 cmとして沖波波高5.0 cm、周期1.0 sの規則波を4時間に渡って作用させた。またその時に形成された海浜形状は砂面測定器を用いて測定した。実験は3ケース行われ、Case-1はBaNKブロックを設置しない場合、Case-2,3は設置形態を変えて初期一様勾配面にブロックを設置した場合で、各ケースごとに波を作用させることによる地形変化の違いを調べた。大型水槽内に設置した海浜模型の概略図とCase-2,3のブロックの設置状況を図-8に示す。設置したBaNKブロックの1ユニットは厚さ1.0mm、長さ25.0cm、幅50.0cmの板に高さ2.3 cmの1/4球型粗度を18個貼り付けたものであり、Case-2,3ではともに10ユニットずつ設置されている。

#### (2) 結果および考察

図-9a)に造波4時間後に形成された海浜地形を、また図-9a)から初期地形の砂面高さを差し引いた砂面の変化量の分布を、図-9b)に各ケース毎に示す。後者は初期地形と比較して堆積した箇所を濃く、侵食された箇所を

淡く塗りつぶしている。

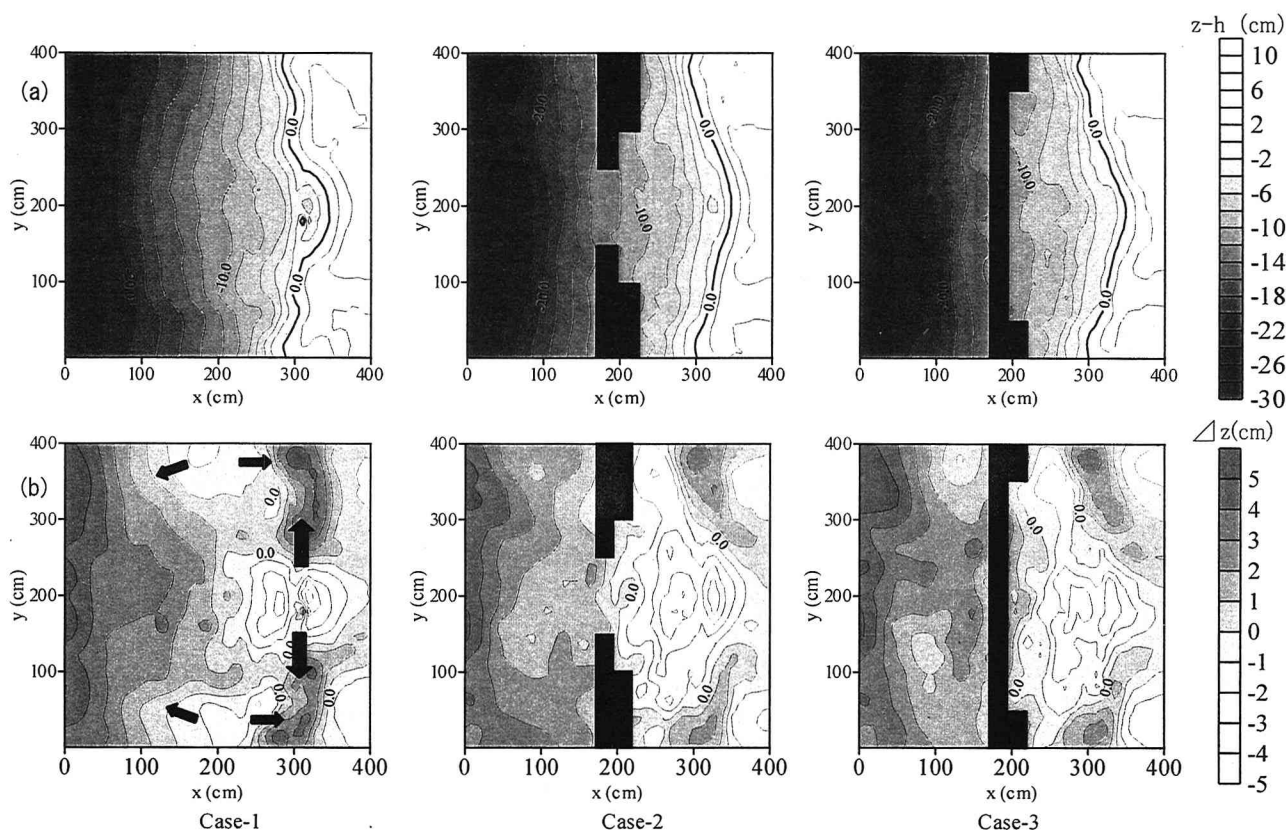
#### (a) 造波のみによる砂移動(Case-1)

まず、ブロックを設置しなかったCase-1における砂移動に注目する。図-9a)の汀線は波が直接入射してくる中央部では後退し、逆に両側では大きく前進しており、造波前に直線であった汀線は4時間の波の作用によっていびつな弧の字型に変形していることが分かる。図-9b)の砂面高さの変化量を見ると $200 < x < 400$  (以後座標の単位はcm)、 $150 < y < 250$ の付近と、それからやや沖側( $150 < x < 250$ )の両突堤付近(即ち両側面付近)において侵食傾向、 $x=300$ 前後の両突堤付近と $x < 100$ の沖側には堆積の傾向が認められる。これより、図-9b)のCase-1中に示した矢印(矢印の大きさが輸送量をイメージしている)の向きに砂が輸送されたため、いびつな弧の字型の汀線形状が生じたものと考えられる。特に $200 < x < 400$ 、 $150 < y < 250$ 付近の侵食は著しく、多量の砂が波打ち帯の中央付近から両サイドへ輸送されたものと推測される。

#### (b) ブロックの底質輸送能力の検討

Case-2,3は、上述のCase-1の結果を踏まえた上でBaNKブロックの模型を配置し、ブロックによる砂移動の抑制効果およびその地形変化への寄与について調べるために行われた。Case-2は図-8のようにブロックを設置することにより、浜の両側に岸向きの残差流を生成させ、Case-1で見られた中央から両サイドへの顕著な砂移動を抑制することを意図している。つまり、平面内での連続条件により中央岸側にみられた侵食領域から両サイドに向かう砂移動を示す大きな矢印の抑制を試みたものである。またCase-3では、Case-2とほぼ同じ効果を意図しているが、中央部分にもブロックを設置することでCase-2との違いを調べた。

図-9a)を見るとCase-2,3ともに汀線中央部の後退が抑えられており、Case-1で見られたいびつな弧の字型の汀線形状は認められず、なめらかな直線形状に近い状態となっている。左右の両サイドにおいて堆積が抑えられており、Case-1に比べCase-2,3では堆積厚、堆積面積共に小さくなっている。これらは明らかにブロック設置に起因して生成された残差流によって、Case-1でみられた波打ち帯中央部から両サイドへの砂の移動が抑制された為であると言え



(a) 造波開始 4 時間後の砂面形状 (b) 砂面高さの変化量

図-9 3次元移動床実験の結果

る。また、ブロック前面（岸側）の侵食領域は広がっているが、これはCase-1において $x=200$ 付近の両側に見られた砂の供給源となる侵食域をブロックが覆ってしまったこと、ブロック前部で局所洗掘が生じたことなどが影響しているものと思われる。

最後にCase-2とCase-3を比較する。造波後に得られた両地形はほぼ同様な分布を示すが、Case-3ではCase-2より中央の前浜勾配が若干緩やかになっていることが図-9 a)から分かる。さらにブロック前部の中央付近の侵食の程度がCase-3では小さくなっていることが図-9 b)でみてとれる。これは中央に設置されたブロックによる効果で、岸向きの残差流により移動した砂が中央岸側の侵食を抑制したものと理解される。

#### 4. 結論

3次元波浪場においてBaNKシステムの底質輸送制御能力を把握するための実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) BaNKブロックを傾けて設置した場合の波浪残差流の方向特性は、ステップ関数的な往復流場におけるそれと類似しており、波浪による往復流場においても任意方向に残差流を生成できることが示唆された。
- 2) 波向き方向にBaNKブロックを設置した場合、3次元波浪場においても鉛直2次元波浪場と同様に、敷設領域からそれを過ぎた前方にまで鉛直残差還流が生成される。またその際、両側には微弱ではあるが

平面的残差還流が生成されるため、条件次第では横断方向のBaNKブロックの設置間隔の決定に注意が必要となる。

- 3) 波向きに対してブロックを傾けて設置した場合も2)とほぼ同様であり、残差流の生成方向に強い鉛直残差還流が生成され、両サイドには平面的な残差還流が生成される。
- 4) 適切にBaNKブロックを設置することによって、地形変化を制御することが可能である。

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官の藤田和夫氏に実験装置の製作において、また4年生の深田剛教君には実験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

- 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, 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

(2001. 10. 1受付)