

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

CONTROL OF SEDIMENT TRANSPORT BY *BaNK BLOCKS* WITH DIRECTIONAL RESISTANCE PROPERTIES

小松利光¹・齋田倫範²・小橋乃子³・安達貴浩⁴・柴田卓也²

Toshimitsu KOMATSU, Tomonori SAITA, Naoko KOHASHI,
Takahiro ADACHI, and Takuya SHIBATA

¹ 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)

² 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)

³ 学生員 修(工) 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)

⁴ 正会員 博(工) 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

The problem of beach erosion in our country grows more and more serious, so we must countermeasure against this problem without delay. Then we develop a effective method (we call the blocks used in this method *BaNK block*) to control sediment transport to cope with this serious problem. In this paper, we examine the fundamental properties of this method by laboratory experiments and field works in Nogita Coast. Firstly, we investigated the condition of flow occurred when *BaNK blocks* were set in a wave progressing field by laboratory experiments. We confirmed that this method could make a flow at bottom layer and made a proper layout of *BaNK blocks* clear. Secondly, we set two kinds of blocks in Nogita Coast and observed a sediment transport around these blocks. By this field works we confirmed that sediment was transported by *BaNK blocks* to the direction we expected. From these results, we confirmed the possibility of beach nourishment by using *BaNK blocks*.

Key Words : sediment transport, *BaNK block*, beach nourishment method, wave energy

1. 緒言

近年, わが国の海岸侵食問題は深刻さを増しており, 早急な対策が求められている. しかしながら, 海岸侵食の問題は河川から海岸への土砂供給量の減少や海砂の採取, 更には海岸構造物の建設による漂砂現象の変化など, 人為的な影響が複雑に絡み合って生じており, それぞれに対して速やかに対策を講じることは容易ではない. 加えて, 地球温暖化による海面上昇といった地球規模での問題も生じ始めており, 近い将来, 海岸や砂浜は一段と深刻な危機に晒されようとしている. 従って, 侵食海岸にダイレクトに働きかける有効な侵食防止技術の開発が強く求められている.

著者らは, 潮汐場の水質改善を目的とした流況制御技術の研究開発を行っているが¹⁾, 本研究ではこのコンセプトを波浪場に拡張し, 底層付近の漂砂制御を可能にする新しい技術(*BaNK工法*)を開発している. 本論文では

室内実験および実海域での現地実験を行い, *BaNK工法*のもつ流況制御特性および漂砂制御特性に関して基礎的な検討を行った.

2. *BaNK工法*の概要

沿岸域では一般に波や潮汐によって往復流が形成されているが, 波浪により生じた往復流場に「流れの向きにより抵抗特性の異なる小規模構造物」を設置した場合, 一周平均的に見ると流体はある一方向に正味の抵抗力を受け, その結果生じた運動量によりこの方向に流れが生じることになる(図-1). 波浪による往復流場での残差流成分という意味で, 往復流の周期で平均して得られる正味の流れを「波浪残差流」と呼ぶことにする. 同様に, 流体に与えられる一周平均的な抵抗力を「波浪残差抵抗力」と呼ぶ.

漂砂は波によって誘起される底層付近の流況と密接な関係をもっていることから, 底面付近の流れを任意に創

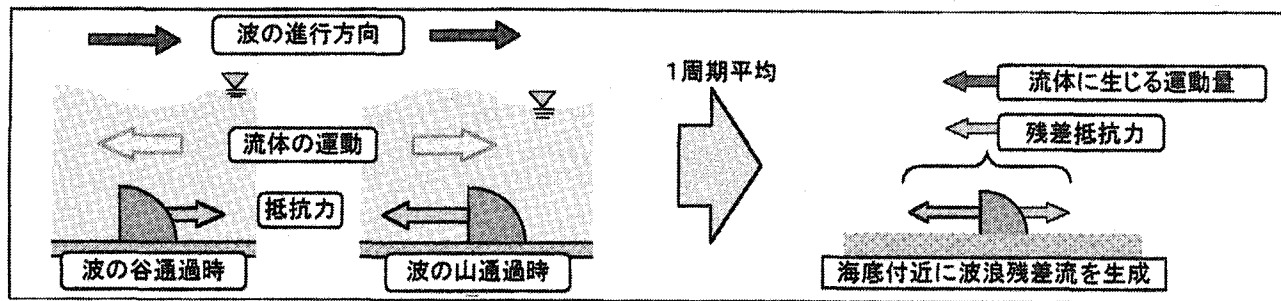


図-1 波浪残差流の生成メカニズム

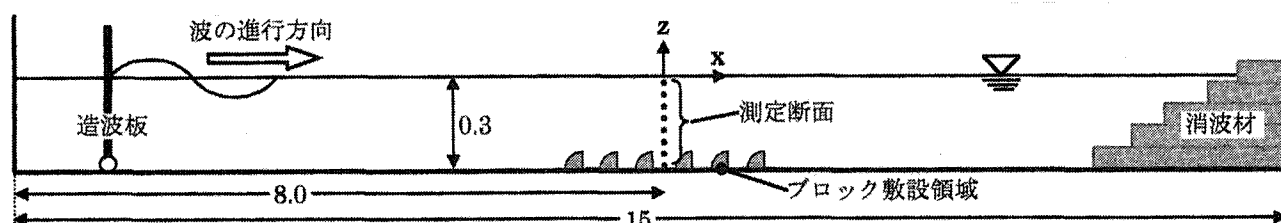


図-2 実験水槽の概略図

造・制御できれば底質移動の制御も可能になると考えられる。このような非対称構造物を利用して漂砂をはじめとする底質移動の制御を行う手法をBaNK工法(:Beach and Navigation Keeper), 制御に用いる構造物をBaNKブロックと呼んでいる。

ところで、漂砂の挙動は未だ不明な点が多く、その上沿岸域それぞれが独自の個性を有しているため、底質移動に起因した諸問題に対して完璧な対策を事前に構築することはほぼ不可能に近いと言える。しかしながら、BaNKブロックは設置・撤去が容易であり、配置パターン、配置間隔、方向の微調節も可能なため、設置後の不測の事態にも柔軟に対処できる。このように本手法は沿岸域個々の特性を観察・把握しながら最適な適用方法を見出すことが可能であり、従来工法にはない大きな柔軟性が特長と言える。

3. 室内実験

(1)室内実験の目的と内容

これまで、海底ブロックと呼ばれる構造物を対象に、潮汐場での流況制御技術が研究され⁹⁾、その残差流生成効果が既に検討されている。そこで、波浪のように潮汐と比べて極めて周期の短い往復流場においても、方向抵抗特性をもつ構造物によって同じように一周期平均的な流れが生成可能であるかどうかに着目した室内実験を行った。更に海底に設置する際のBaNKブロックの最適な敷設幅やブロックの配置方法についても検討した。

実験には全長15m、幅0.25mの2次元造波水槽(図-2)を用いた。平均水深 $h=30\text{cm}$ 、振幅 $a=2.5\text{cm}$ 、周期 $T=1.0\text{sec}$ 、波長 $L=1.3\text{m}$ という条件で規則的な進行波を生成し、ADV(アレック電子, ADVLab.)を用いて流速測定を行った。ブロックの配置は格子状および千鳥状の2種類を考え、いずれの場合にも最も基本的な形である1/4球型¹⁰⁾の模型(高さ2.0cm)を岸向きに残差流が生じるように設置した

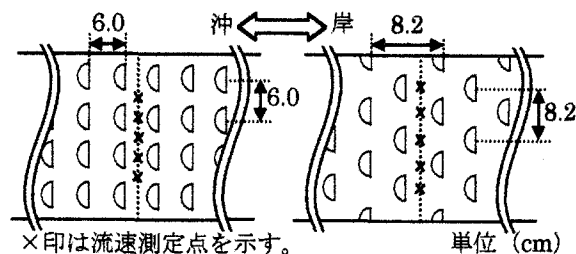


図-3 実験用模型ブロックの配置形態

表-1 実験条件

	配置形態	敷設長 l_B/L		配置形態	敷設長 l_B/L
case-1	格子配置	1/8	case-8	千鳥配置	1/8
case-2		1/4	case-9		1/4
case-3		1/2	case-10		1/2
case-4		3/4	case-11		3/4
case-5		1	case-12		1
case-6		3/2	case-13		3/2
case-7		2	case-14		2

(図-3)。また、それぞれの配置形態についてブロックの設置密度を一定とし、その敷設長を1/8波長(約18cm)から2波長(約260cm)まで変化させて実験を行った(表-1)。残差流速の幅平均値を求めるために、ブロック敷設区間の中央軸上の5点の鉛直線上で流速測定を行い(図-3)、測定した同じ高さの各点の流速の一周期平均値に対して重み付き平均をとって幅平均残差流速値を求め、更に、幅平均残差流速の鉛直分布も求めた。また、比較のためにブロックを設置しない場合についても同様の測定を行った。

(2)室内実験の結果と考察

ブロックの設置の有無による差異を示す代表的な例として、case-3とcase-10の波浪残差流速の水平成分 U_x の鉛直分布を図-4に示す。但し、水路床からの高さ($h+z$)は

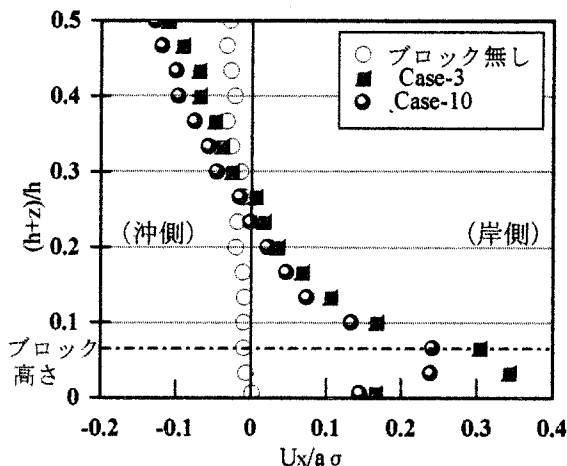


図-4 無次元波浪残差流速の鉛直分布

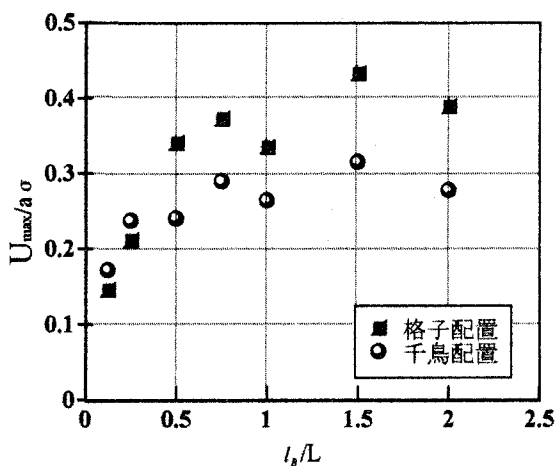


図-5 ブロック敷設長と無次元波浪残差流速の関係

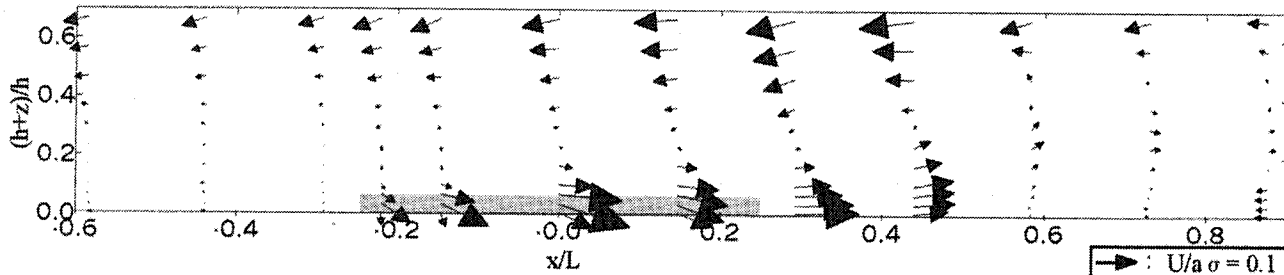


図-7 鉛直残差流速ベクトル図 (case3: 敷設長0.5L, 格子配置)

平均水深 h で、波浪残差流速 U は波の振幅 a および角周波数 σ で無次元表示されている。ブロックを設置した全ての実験ケースにおいて無次元水深0.25~0.30以下で岸向きに、それより上方では沖向きに新たに顕著な流れが形成されていた。これはブロックのもつ抵抗特性により底層付近に強い岸向きの波浪残差流が生成され、それを補償する流れとして上層に沖向き流れが生じたことを意味している。また、図-5に示されているように、残差流速の最大値は敷設長が長くなるに従って大きくなるが、その増加率は徐々に小さくなっている。なお、敷設長 l_b は波長 L で無次元化されている。このように底層付近の残差流速の最大値が往復流の流速振幅の1.5~4割にも及ぶ大きな値を示していることから、底質移動の制御に十分な効果をもつものと期待される。実際に水路床付近に浮遊粒子を投入したところ粒子が岸向きに輸送されていく様子が明確に観察された。

次にブロックの配置形態が異なる場合の波浪残差流の生成状況を比較すると、全てのケースで千鳥配置よりも格子配置の場合に、より強い波浪残差流の生成が見られた。鉛直分布の流速最大値と比較すると(図-5)、その差は最大で約1.5倍にも及んでいる。配置による違いが生じる原因として、千鳥配置においてはその構造上底層付近に死水領域が生じやすく、同じ波浪条件下でも、流速が抑制されるためと考えられた。そこで、1波長の敷設区間をもつcase-5とcase-12における流速の二乗平方根値 u_{rms} の鉛直分布を求めた(図-6)。底層付近の u_{rms} を比較すると、予想どおりに格子配置に比べ千鳥配置において値が小さく、往復流そのものの振幅がブロック上方にまで広く抑えられ

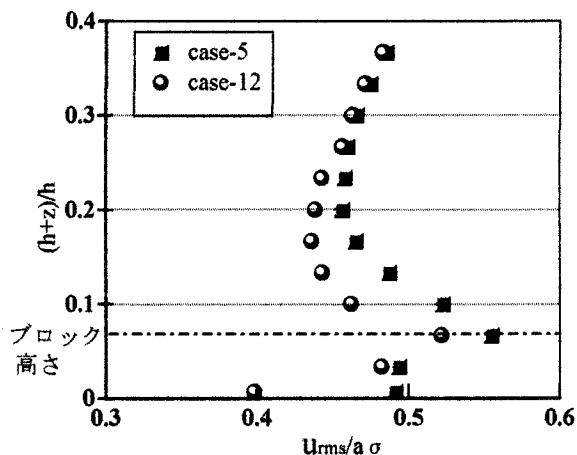


図-6 敷設領域中央における無次元 u_{rms} の鉛直分布

ていることが分かる。このように、同じ残差抵抗力を与える能力をもつブロックを用いても、千鳥配置の場合のブロックの投影面積は大きく、群体としてより大きな抵抗力を生じるのに対し格子配置は水粒子が運動を行う領域と残差抵抗力を生成する領域がほぼ区分されることになり、このことから効率良く残差流が生成されていると考えられる²⁾。

さらに、ブロック敷設区間周辺の流況、および影響領域の広がりを調べるため、case-3, case-10では複数の断面における水平成分 U_x 、鉛直成分 U_z を測定した。case-3における幅平均された残差流の鉛直2次元的なパターンを図-7に示す(但し、図の黒塗りはブロック敷設区間に相当する)。この結果から、ブロックの敷設区間を含む広い領域に渡って非常に強い鉛直循環流が生成されていることが分かる。その残差流のスケールはブロック敷設区間の1.5倍

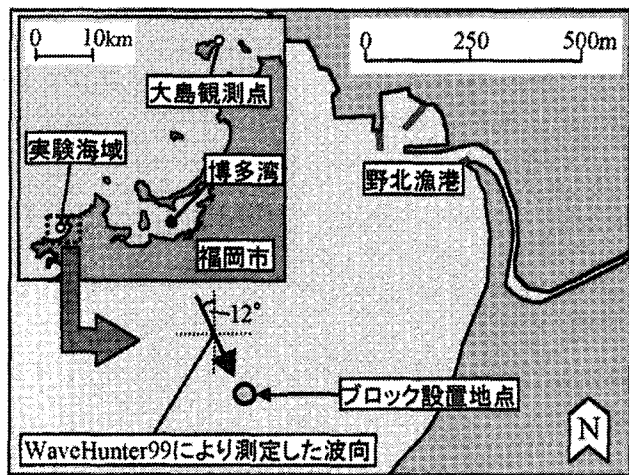


図-8 実験海域の概略図

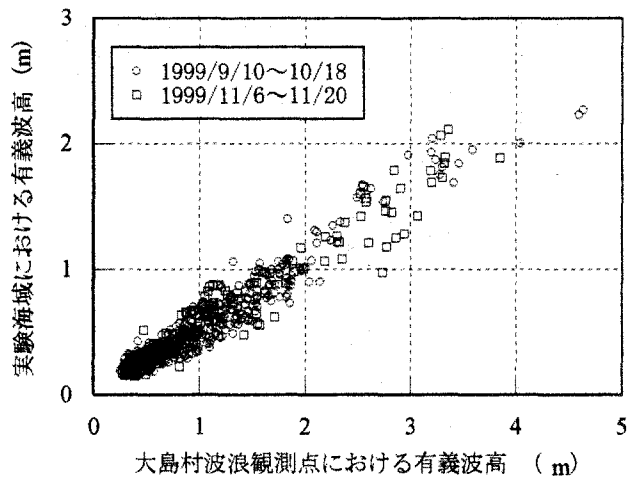


図-10 有義波高の相関図

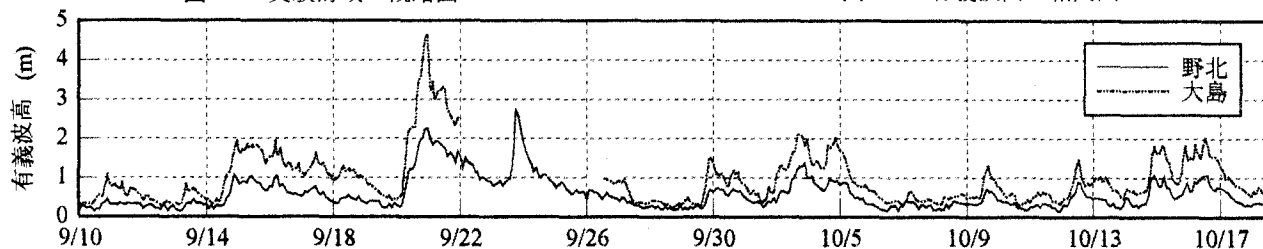


図-9 有義波高の時系列

以上の領域に及び、敷設区間以上の残差流生成効果をもつことが分かった。

4. 現地実験による効果の検討

(1) 現地実験の目的

前章の室内実験によりBaNK工法による底面付近の流況の創造・制御効果が示されたが、実海域では複雑な現象が非定常に生じており、室内実験で見られた効果が十分に発揮されない場合も考えられる。そこで、実海域における本手法の効果を検証するために、福岡県糸島郡の野北漁港沖に実物体のBaNKブロックを設置し、実際の砂移動を計測するための現地実験を行った(図-8)。

(2) 実験海域の特性

現地実験海域の波浪特性を把握するために、1999年9月10日～10月18日と同年11月6日～11月20日の2回に渡って海洋観測装置(アイオーテック、WaveHunter99)による波浪観測を実施した。しかしながら、波浪観測データがブロックの設置箇所近傍に限られたことや観測期間に制限があることなどから、実験海域全体の特徴や季節的な波浪特性を把握するには上記の観測結果のみでは不十分であった。そこで、福岡県糸島郡大島村における運輸省の波浪観測データ³⁾を活用することにして、実験海域の海象を考察した。なお、1999年9月22日～9月26日の大島における波浪データが欠損しており、この期間は考察の対象となっていない。

9月10日～10月18日に野北漁港沖で観測された有義波高と大島村で観測された有義波高の時系列を図-9に示

す。この結果から明らかなように、これら二地点における有義波高の変動傾向は極めて類似していることが分かる。そこで、各々の有義波高の相関係数を求めると0.96という強い相関を示した。従って、図-10の相関図から得られた比例係数0.52を用いて大島のデータから野北漁港沖の波浪データを推測しても十分信頼性があることが分かった。図-11に実験海域の1999年9月1日から2000年8月31日までの1年間に渡る1日平均の推定有義波高とそれらの1ヶ月毎の平均値の時系列変化を示す。9月から10月にかけては台風等により極端に大きな波高を示すことがあるが、平常時はそれほど大きくはなく、むしろそれ以降の冬季節風の影響を受ける時期に定常的に高い波高を示すようになる。季節風が弱まる3、4月になると次第に波高も減少し、5月以降は有義波高0.3m程度の穏やかな波浪状態を示している。このような変化は九州北部に見られる一般的な傾向と一致している。

(3) 現地実験の概要

1999年11月5日、BaNKブロックならびに砂の移動量を計測するための捕砂器が、海岸より約350m離れた平均水深6.5mの海域に設置された。高さ30cmの1/4球型BaNKブロックが6個、長さ2.2m、幅3.4m、厚さ25cmのコンクリート底盤上に配置され、それら全体で基本ユニットを構成している(図-12)。また、比較用としてブロック部分の形状に1/2球型粗度を採用したものを製作し、各ユニットを3基ずつ設置した(図-13)。なお、2種類のブロックの岸沖方向の投影面積を揃えることにより遮蔽効果が等しくなるように設定し、抵抗特性の違いによ

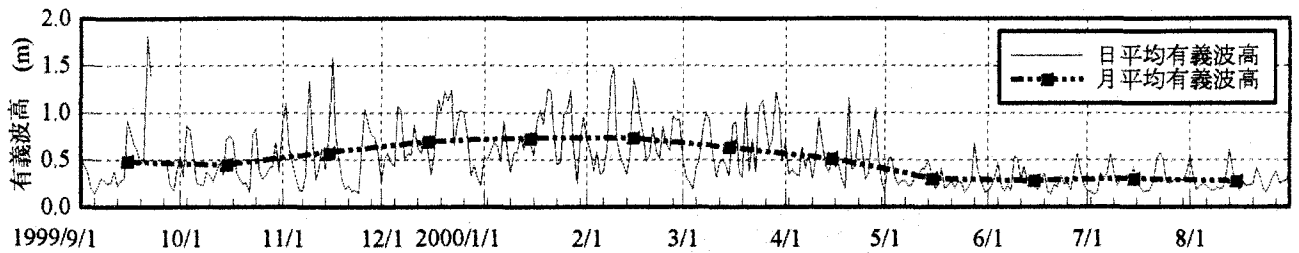


図-11 実験海域の有義波高の時系列

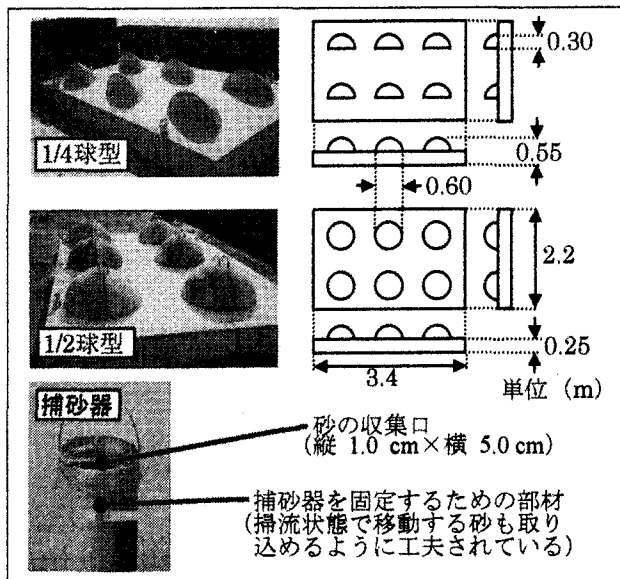


図-12 実験に使用したブロックと捕砂器

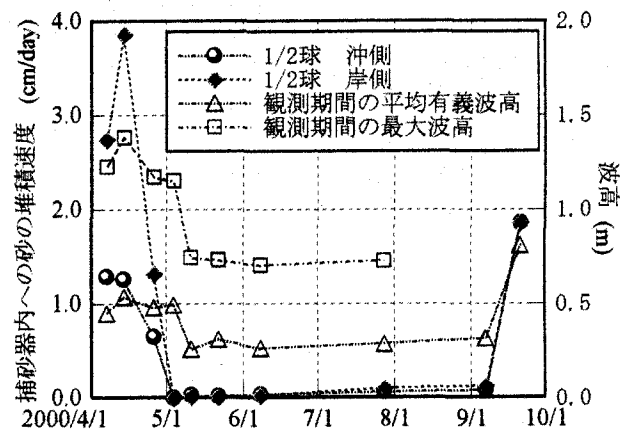


図-14 砂の堆積速度と波高の関係

日から観測を開始したが、設置後に捕砂器の破損や不具合等が生じたため、有効な観測データが得られなかった。その後、捕砂器の改良を重ねた結果(図-12)、2000年3月31日以降は有効な観測結果が得られた。

はじめに、実験海域の砂移動の傾向を把握するために1/2球型ブロックに取りつけた捕砂器へ取り込まれた砂の堆積速度と波高の関係を調べた(図-14)。ここで、砂の堆積速度とは砂の堆積量を堆積期間の日数(7～50日)で割ったものであり、波高は大島村の波浪観測データを野北漁港沖の波高に換算したものをを用いている。この結果より、実験海域の砂移動は0.5m程度の有義波高を境としてそれ以上の波高で生じていることが分かる。この有義波高に対応する初期移動限界水深を求めたところ1.30～19.2mとなり、砂移動が生じた期間の移動限界水深はブロックの設置水深である6.5mとほぼ一致した。ブロックによる局所流や底盤の厚みの影響などを考慮する必要があるため、一般的な初期移動限界水深とは異なるが、この有義波高の値が対象海域の砂移動に対して1つの目安を与えるものと考えられる。また、砂移動の生じている時期では沖側よりも岸側の捕砂器への堆積速度が大きいことから、観測期間中における砂移動は概ね岸向きであったことが分かる。

以上のような性質の海域に、岸向きに砂輸送を促進するようにBaNKブロックのユニットが3体設置されている訳であるが、海岸全体のスケールに対するブロック敷設面積や暴浪時の大きな砂の移動量等を考慮すると、本実験におけるブロックの効果は極めて小さいものであると予想される。しかしながら、BaNKブロックは波浪エネルギーの一部を借りて定期的に砂移動を制御しており、その効果の積み重ねによって、海底・海岸形状に影

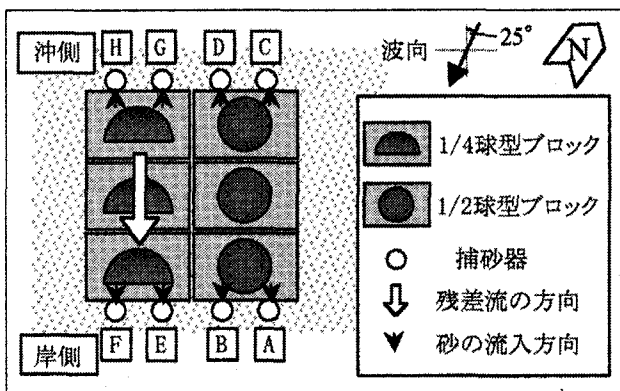


図-13 実験海域におけるブロック配置状況の概略図

る漂砂制御の効果のみを抽出できるようにしている。

計測に用いた捕砂器は内径85mm、高さ270mmの円筒形で、縦10mm×横50mmの大きさの砂の収集口を有している。収集口には指向性があり、ブロックの影響を受けて移動してきた砂を採取できるように工夫されている。なお、捕砂器はブロックの沖側に4カ所、岸側に4カ所の合計8カ所にブロック底盤上面と砂の収集口の高さが一致するように埋設され、1/2球型岸側(捕砂器No. A, B)、1/2球型沖側(C, D)、1/4球型岸側(E, F)、1/4球型沖側(G, H)の4グループに分けて、岸沖方向の砂の移動傾向の違いを観測した。

(4) 現地実験の結果と考察

BaNKブロックおよび捕砂器を設置した1999年11月5

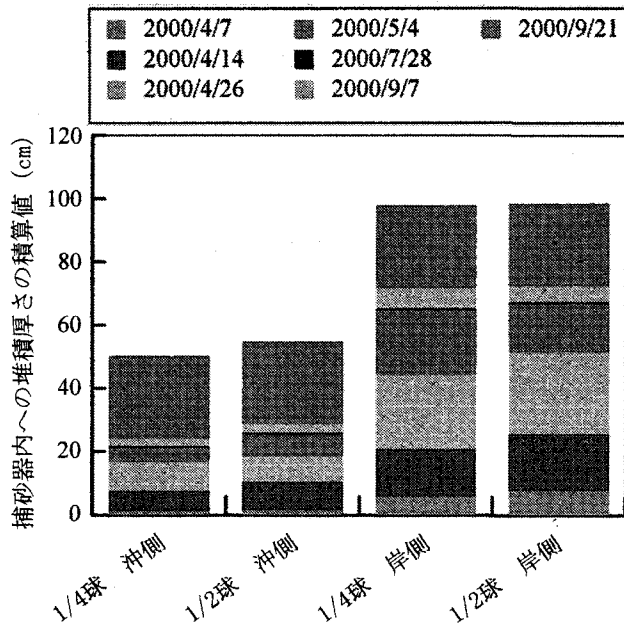


図-15 捕砂器内への砂の堆積厚さ積算値と
(各グループの捕砂器の平均値)

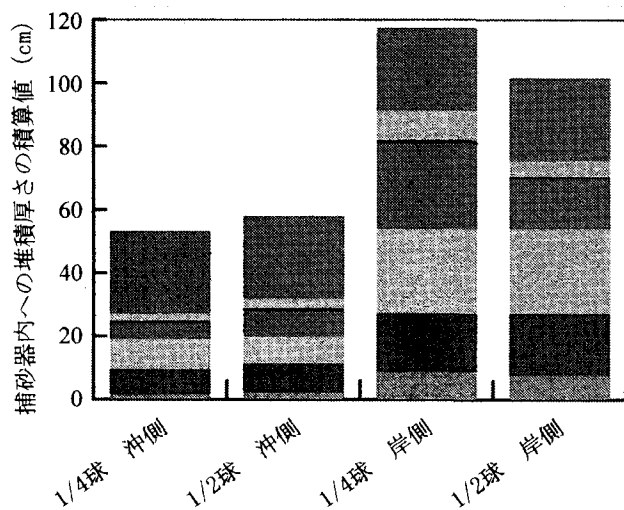


図-16 捕砂器内への砂の堆積厚さ積算値と
(各グループの捕砂器の最大値)

響を及ぼそうとするものである。そこで、捕砂器内の砂の堆積厚さを積算することにより、BaNKブロックの効果を比較してみた。なお、各グループの堆積厚さはそれぞれ2本ずつの捕砂器の平均値としている。

まず、2000年3月31日～同年9月21日の160日間の累積堆積厚さに着目した(図-15)。各ブロックの岸側と沖側の堆積厚さの差が正味の砂輸送に相当するが、1/4球型岸側(E, F)と沖側(G, H)の差と1/2球型の岸側(A, B)と沖側(C, D)の差を比較すると、僅かではあるが1/4球型の輸送量が多く、設定した方向(岸向き)に底質の移動が制御されていたことが窺える。

ところで、海中では生物や漂流物などにより捕砂器内への砂の流入を妨げるような事態が生じることも十分考えられる。砂の流入を阻害する要因は発生し易いが、逆に促進するような要因はほとんど見当たらないことから4グループそれぞれに設置されている2本の捕砂器のう

ち堆積厚さの大きい捕砂器の結果のみを用いて再検討した(図-16)。この場合も、1/4球型沖側(G, H)は堆積が最も少なく、逆に岸側(E, F)は堆積量が最も大きくなっていた。BaNKブロックと1/2球型ブロックはほんの数mしか離れておらず、少なくとも岸沖方向の砂移動に関してはほぼ同一条件下にあったものと考えられる。従って、堆積厚さの差はBaNKブロックの効果に他ならず、BaNKブロックによって岸向きの砂輸送が生じていたものと考えられる。

実海域では岸沖漂砂だけでなく沿岸漂砂も存在するため、現地実験による効果の検出が難しい状況にある。しかしながら、上記のようにBaNKブロックによる砂移動を検出することができたことから、本手法の漂砂制御効果が実海域においても確認された。

5. 結論

本研究より、次のような結論が得られた。

- BaNKブロックにより、底層付近に波浪残差流を生成することが可能であり、その影響領域はブロック高さの4倍程度にまで及ぶ。
- BaNKブロックによって、波の進行により生じる往復流の流速振幅の1.5～4割程度にも及ぶ波浪残差流を生成できる。
- 同じ敷設長で比較した場合には、千鳥配置よりも格子配置のほうがより強い波浪残差流の生成能力をもつ。
- ブロック敷設区間の1.5倍以上の領域に渡って強い鉛直循環流が生成されていることから、間隔をあけてブロック群(帯)を設置しても連続した残差流が生成できる可能性がある。
- 複雑な現場海域においても、BaNKブロックによる漂砂制御が確認された。

謝辞：福岡県宗像郡大島村の波浪観測データの入手にあたっては第四港湾建設局の梅崎康法氏、雪丸敏昭氏に協力をお願いした。また、本研究の遂行に際して、九州大学大学院工学研究院技官の藤田和夫氏、日本海洋コンサルタント(株)の近藤亀治氏、東栄商興株式会社の末松吉生氏に多大なる援助をお願いした。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, 矢野真一郎, 鞠承洪, 小橋乃子: 方向性をも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, No. 41, pp323-328, 1997
- 2) 福岡捷二, 内田龍彦, 福岡琢二, 水口雅教: 水没大型粗度を有する浅い流れの一次元解析と二次元解析, 水工学論文集, No. 44, pp533-538, 2000
- 3) 運輸省 第四港湾建設局 博多港湾空港工事事務所 波浪観測データより

(2000. 10. 2受付)