

波浪場における非対称没水構造物周りの流れ

A FLOW AROUND A SUBMERGED ASYMMETRICAL STRUCTURE IN A WAVE FIELD

押川英夫¹・國澤義則²・吉田秀樹³・藤田和夫⁴・小松利光⁵

Hideo OSHIKAWA, Yoshinori KUNISAWA, Hideki YOSHIDA, Kazuo FUJITA and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²正会員 修(工) 戸田建設(株)大阪支店土木工務部工事課 (〒550-0005 大阪市西区西本町1-13-47)

³正会員 工修 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所長 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)

⁴正会員 九州大学技術員 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁵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)

Characteristics of a flow around a submerged asymmetrical structure (we refer to this structure as the BaNK block) in a wave field were investigated on the basis of laboratory experiments. Komatsu *et al.* (2001) proposed 'BaNK System' in order to cope with beach erosion and shoaling of fairways. In this study, a half cylinder is used as the BaNK block which is set on the bottom of a wave tank, and the flow around the block is measured in detail. As a result of this research, it is found that a residual current can be produced in a wide area in the onshore side of the structure even though it is longitudinally only one.

Key Words : Wave-induced residual current, BaNK system, submerged asymmetrical structure, control of sediment transport

1. はじめに

我が国は周囲を海に囲まれた島国であり，総延長3万5千km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．中でもその約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．しかしながら，我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の一部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)システムを提案している^{1)~10)}．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小規模な構造物(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(以下では，波浪残差流と呼ぶ)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・

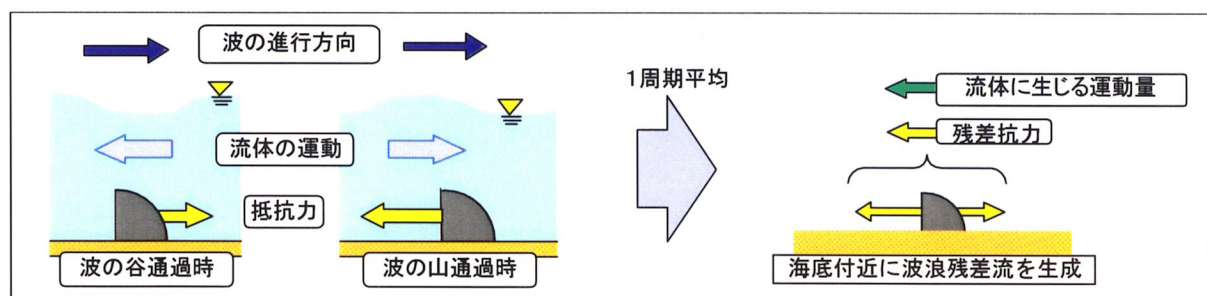


図-1 波浪残差流の生成機構¹⁾

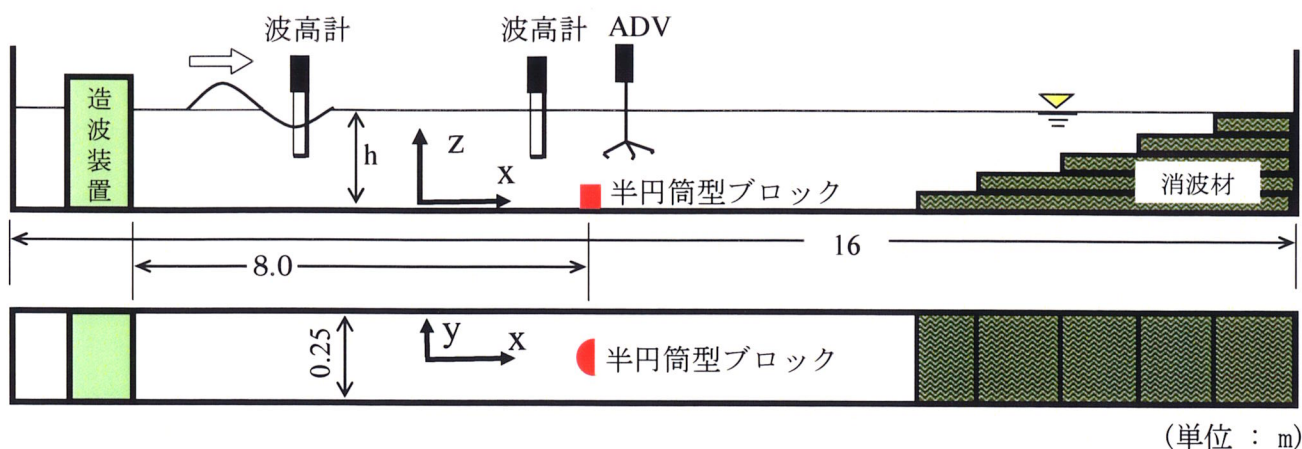


図-2 実験装置の概略図

底質の改善，河口閉塞の防止等，様々な応用が期待されている。本システムに関して，これまで小松ら¹⁾，Oshikawa *et al.*⁵⁾，押川ら^{6), 9)}において，海岸侵食の防止を主要なターゲットに水槽実験および現地試験を通じて研究開発が進められてきた。次なる展開として，著者らは航路埋没の防止にターゲットを定め，まずは基礎研究として室内実験に基づく検討を行っている^{7), 10)}。

非対称構造物により底質輸送を制御するという本システムに類似した研究としては，Inman and Tunstall による Phase Dependent Roughness による手法¹¹⁾，小田らによる硬質型人工海藻¹²⁾，小林らによる非対称人工海藻^{13), 14)}，仲座らによる砂雲輸送ブロック^{15), 16)}，入江らによる DRIM^{17), 18)}などが挙げられる。しかしながらこれらの一連の研究成果を用いても，本システムを実用化するための課題は未だに残されており，今後の研究成果の蓄積が期待されている。

BaNK システムにおいては，[往復流－非対称構造物（に働く流体力）－流れの生成（波浪残差流）－底質移動]といったプロセスによって漂砂制御が行われることになるが，ここでは波浪残差流の生成までを検討対象としている。従来の研究成果により，BaNK ブロックとしては半円柱（筒）型構造物が有利であることが明らかとなっている^{2), 4), 9)～10)}。しかしながら，半円柱型構造物近傍の詳細な流況に関しては，振動流場における数値的検討⁸⁾が行われている程度であり，本システムの基本となる波浪残差流に関する知見が十分に得られているとは言い難い。そこで本研究では，BaNK システムの基礎的研究として，波浪場に設置された半円筒型構造物単体の周囲の流れを室内実験により評価することで，非対称構造物周辺の流況および波浪残差流の特性について検討した。

2. 実験方法

実験には図-2に示す鉛直2次元吸収式造波水槽を

用いた。BaNK ブロックとして半円筒型（上面に半円形の蓋が付いたもの）を用い，岸向きに波浪残差流を生成させる向き（円弧部が沖側となる向き）にブロック1個を設置した。半円筒の直径 D は10.0cm，ブロック高さ k は5.0cmである。水路岸側端部には消波材を設置しており，本実験は規則的な進行波を対象としている。一様水深部における波高 H は5.0cm，周期 T は1.0s，静水深 h は30.0cmである。

流速測定には3成分の超音波式ドップラー流速計（Nortek社製，ADV）を用いた。ブロックの設置位置の中心（底面上の半円筒の切断面中央）を原点とするデカルト座標系において，縦断方向(x)の測定位置は無次元座標で $x/D = -1.25, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 2.0, 2.5$ の12断面とした。横断方向(y)の測定位置は水路幅方向の中央を $y=0$ とした無次元座標で $y/D = -0.875, -0.75, -0.5, -0.25, 0$ の5断面，鉛直方向(z)には水路床を $z=0$ とする無次元座標において， $z/D = 0.01, 0.05, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.7, 0.9, 1.2, 1.5, 2.0$ の11断面において測定が実施された。また，比較のためにブロックを置かない場合において，流速の鉛直分布がブロックを設置した位置の中心（原点上）で測定されている。また，併せて容量式波高計により縦断方向に2点で水面変位の測定を行っているが，波高計とADVは同期を取っており，水面と流速の位相差まで正確に評価している。サンプリング周波数はADVおよび波高計ともに25Hzであり，各測点において120秒程度の時系列データを取得している。

3. 実験結果および考察

(1) 構造物周辺の流速スペクトル

始めに，本実験における流れの状態を知るため，代表位置における速度のスペクトル解析を行った。結果の一例として構造物付近 ($x/D=1, y/D=0, z/D=0.25$) における x 方向流速 u の周波数スペクトル $F_u(f)$ を図-3に示す。比較のために，図中には同一地点における

構造物が無い場合の $F_u(f)$ も併せて示している。これより、入射波の周波数1Hzに相当するピーク付近は構造物の有無に因らず一致しているものの、それ以外の周波数におけるスペクトルのパワーは構造物がある場合の方が顕著に大きくなっている。超音波式流速計を用いているため乱流を測定するには精度的に若干不十分な可能性もあるが、半円筒が設置された場合には、ほぼ $-5/3$ 乗則に従っていると思われる乱流域が形成されている。一方、図-3の測定位置の上層($x/D=1$, $y/D=0$, $z/D=2$)に相当する図-4では、構造物の有無に拘らず $F_u(f)$ はほぼ一致しており、構造物の影響は殆ど見られない。

(2) 非対称構造物周辺の流況について

流況の一例として $y=0$ 断面、即ち水路横断方向の中心線上のおよそ4分の1周期ずつずらした時間帯の流速ベクトルの空間分布を図-5～図-8に示す。但し、各図の上図a)は比較用のブロックなしの場合、下図b)は半円筒型ブロックを設置した場合である。これらの図は各位相における位相平均によって求められている(今後も含めてベクトル図の速度スケールの単位は cm/s)。各図の上部の実線は波高計との対応のもとに描かれた水面(静水面の高さは $z/D=3.0$)であり、各図b)の中の□は、半円筒型ブロックの位置と大きさを示している。

波峰が $x=0$ 、即ちブロック直上を通過する位相(ここでの x 方向流速が極大となる)にほぼ相当する $t/T=0$ (t は時間)の図-5において、ブロックの岸側の $x/D=0.5 \sim 1$ 付近の流れがブロック無しの場合と比較して著しく速くなっていることが分かる。一方、波谷がブロック上を通過する位相にほぼ相当する $t/T=0.48$ (ここでの x 方向流速が極小値となる)の図-7では、ブロックが無い場合と比較してブロックの周辺の冲向き流れが全体的に小さくなっている。これは構造物(の切断面)に働く抗力(Morison式¹⁹⁾中の定常項に基づく力の絶対値がこの位相付近において大きくなることによる^{2), 3), 4), 8)}。また従来²⁾の知見に対応して^{2)~4)}、ブロックの非対称性に起因した慣性力が発生する位相の $t/T=0.24$ においても(図-6参照)、ブロックの岸側の $x/D=0.5 \sim 2.5$ においてブロック無しと比較して岸向きの流速が顕著に大きくなっている。それに対して半周期後の $t/T=0.76$ においては(図-8参照)、ブロックの極近傍を除いてブロック無しの場合と同様な流速分布となっている。

(3) 非対称構造物周辺の波浪残差流について

鉛直断面内における波浪残差流の一例として、 $y=0$ 断面における残差流の空間分布を図-9に示す。ここでもa)は比較用のブロック無し、b)が半円筒型ブロックが設置された場合である。両図でベクトルのスケールが異なることも考慮すると、ブロック無しでは残差流が殆ど生じていないのに対し、b)ではブ

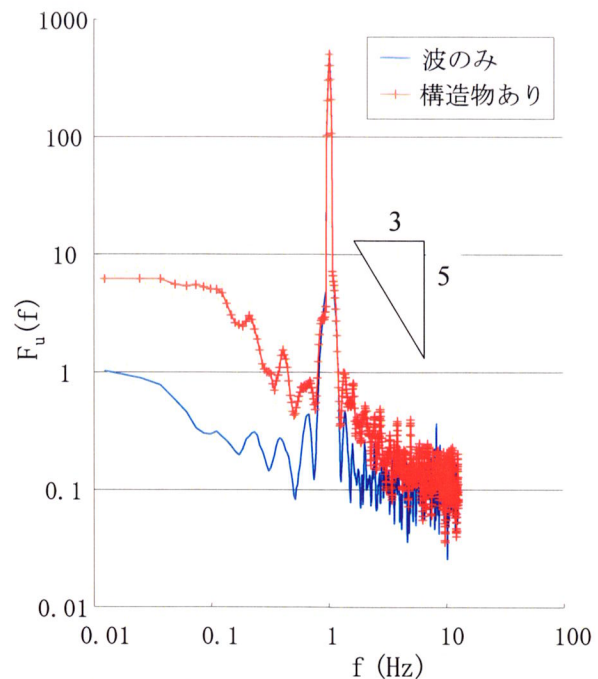


図-3 底面付近の x 方向流速のスペクトル
($x/D=1$, $y/D=0$, $z/D=0.25$)

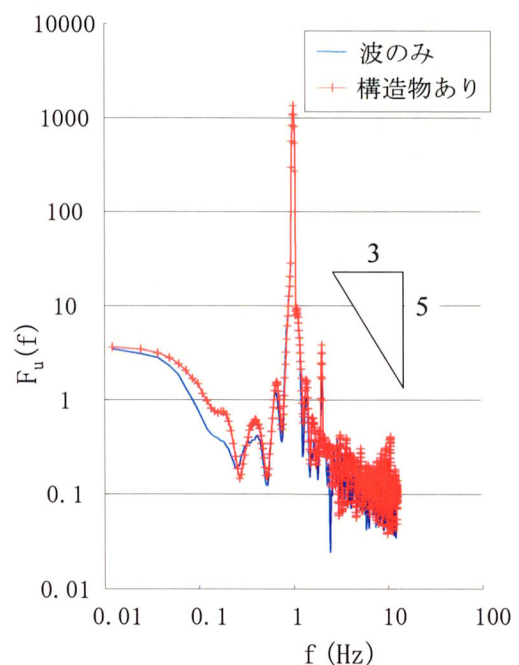
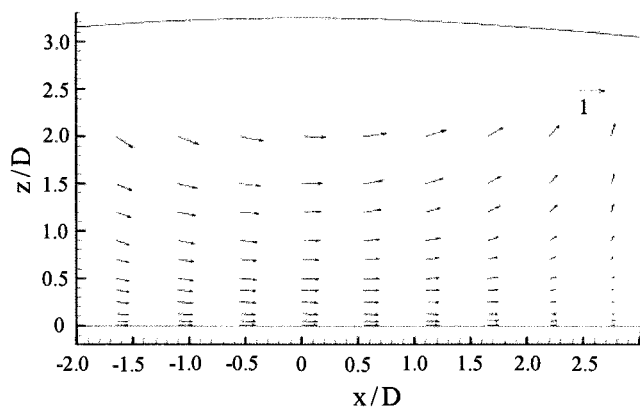
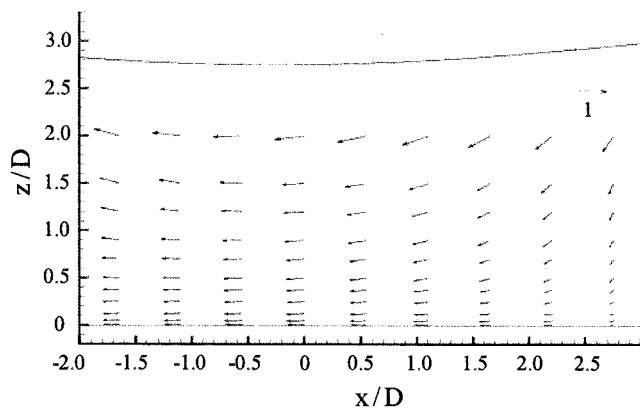


図-4 構造物付近上層の x 方向流速のスペクトル
($x/D=1$, $y/D=0$, $z/D=2$)

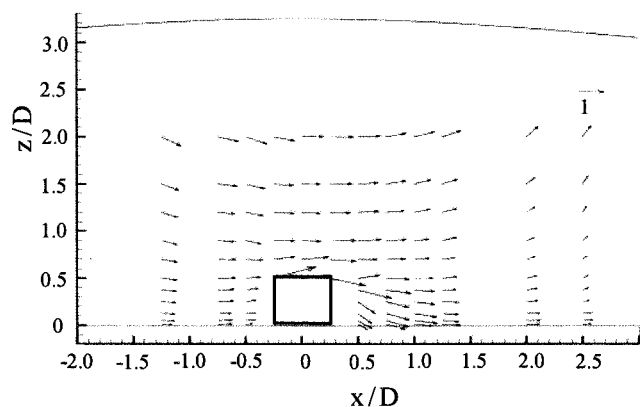
ロックの岸側($x>0$)に強い岸向きの波浪残差流が生じていることが理解される。このとき図-5～図-8からも推察されるように、ブロックからある程度離れた $x/D \geq 2$ においても底面付近には岸向きの残差流が生じている。鉛直方向については、構造物の存在により $z/D=1.0$ 程度まで流れが変化しており、構造物高さの2倍程度までがブロックの影響範囲と考えられるが、顕著な岸向きの残差流の生成範囲はブロックの高さ程度までとなっている。従来の群体に関して行われ



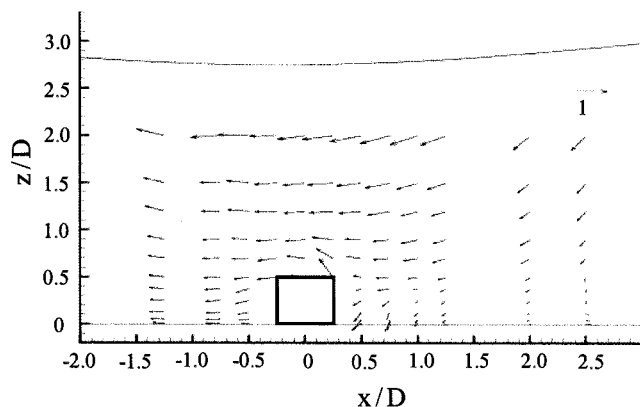
a) ブロックが無い場合



a) ブロックが無い場合



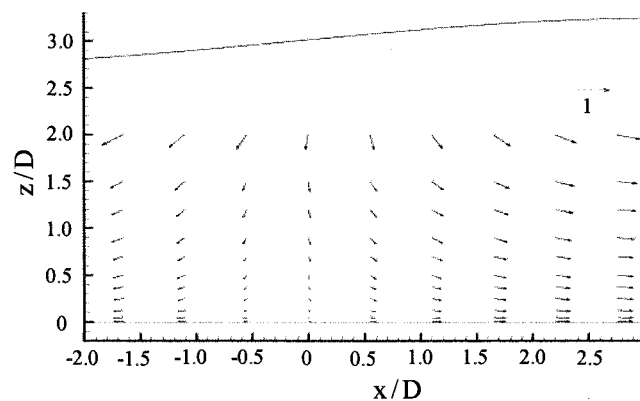
b) 半円筒が設置された場合



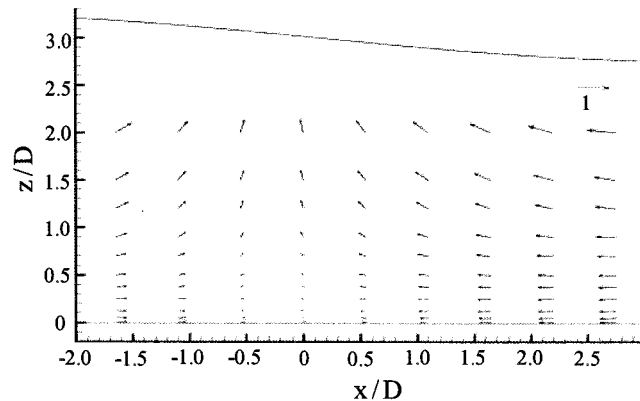
b) 半円筒が設置された場合

図-5 流れの空間分布 [$t/T=0$ (or 1), $y=0$ 断面]

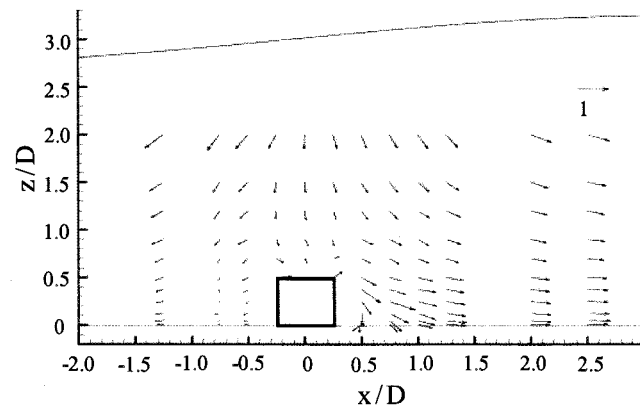
図-7 流れの空間分布 ($t/T=0.48 \div 2/4$, $y=0$ 断面)



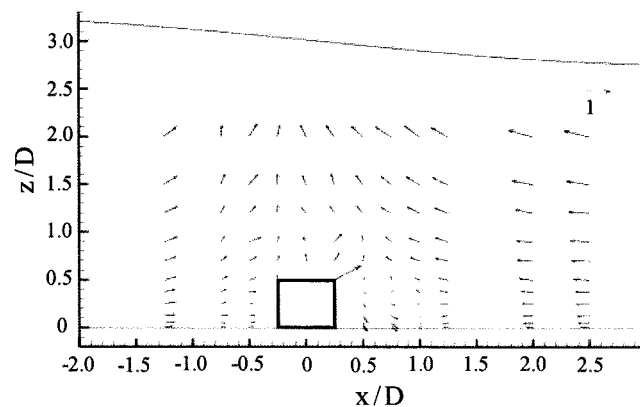
a) ブロックが無い場合



a) ブロックが無い場合



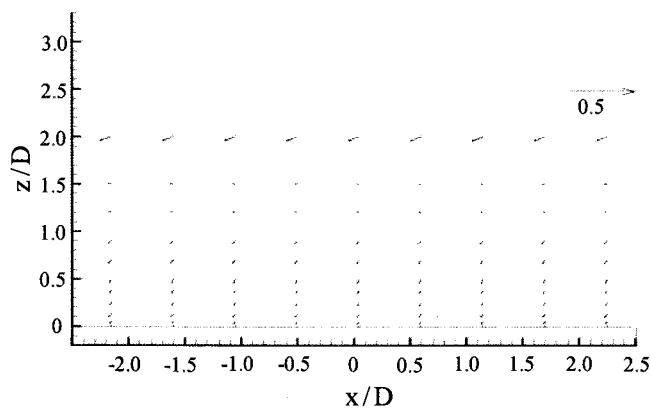
b) 半円筒が設置された場合



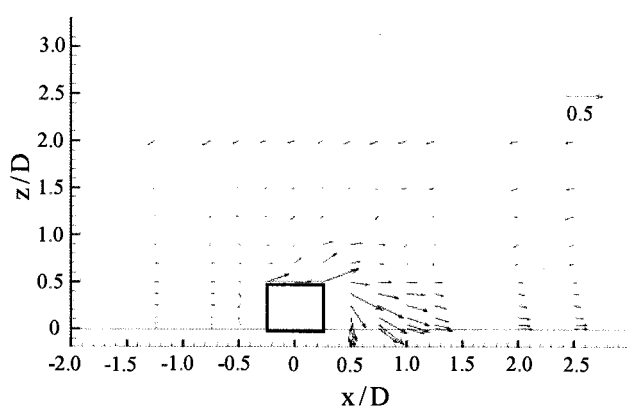
b) 半円筒が設置された場合

図-6 流れの空間分布 ($t/T=0.24 \div 1/4$, $y=0$ 断面)

図-8 流れの空間分布 ($t/T=0.76 \div 3/4$, $y=0$ 断面)



a) ブロックが無い場合



b) 半円筒型構造物が設置された場合

図-9 波浪残差流の空間分布 ($y=0$ 断面)

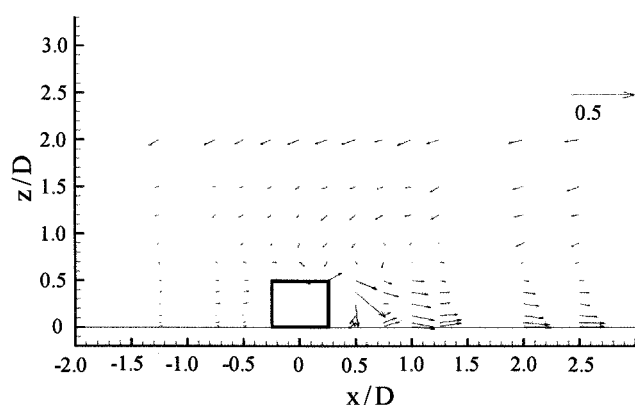


図-10 波浪残差流の空間分布 ($y/D=-0.25$ 断面)

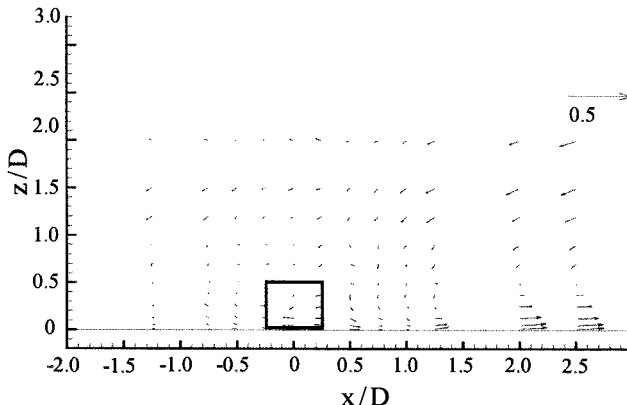


図-11 波浪残差流の空間分布 ($y/D=-0.75$ 断面)

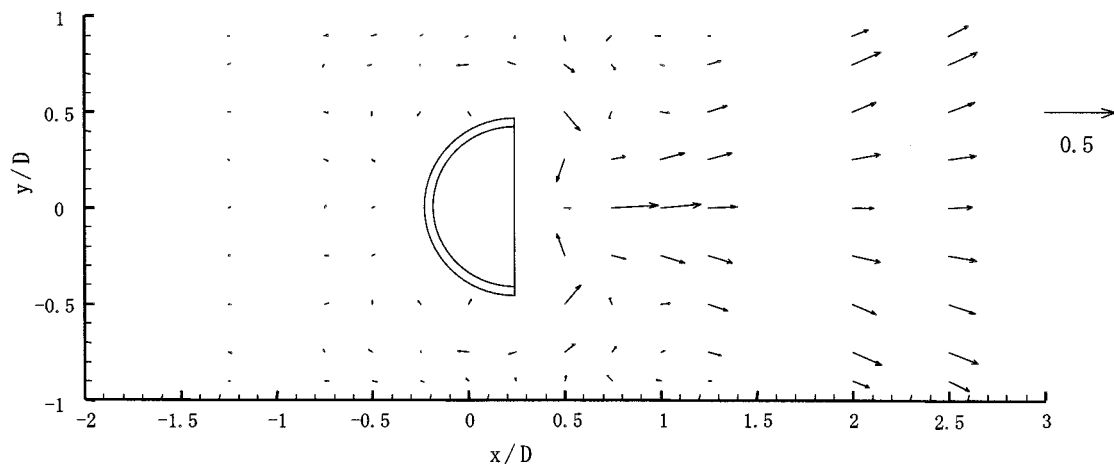


図-12 底面付近の波浪残差流の空間分布 ($z/D=0.05$)

た実験^{1), 3), 5), 10)}では、岸向き残差流の生成厚は構造物の高さの2～4倍程度となっており、本研究の単体の結果はやや小さくなっている。しかしながら、本実験で用いられた構造物単体が比較的大きいことから、Keulegan-Carpenter数（いわゆるKC数）²⁰⁾やReynolds数、相対的な構造物の大きさ等が従来の群体の実験と本実験とでかなり異なっているため、単体であることが主因かどうかは今後の検討課題となっている。尚、両図において、測定領域の上層の $z/D=2.0$ 付近に冲向きの残差流が認められるが、これ

は波の進行方向に生じる表層付近の強い残差流（ここでは計測器の制約から測定されていない）の補償流と推察される。

図-10、図-11はそれぞれ、ブロックが設置された場合の $y/D=-0.25$ および $y/D=-0.75$ の鉛直断面における残差流の分布である。図-10では、ブロック近傍前面の底面付近（ $x/D=0.5$ ）を除いて、前面の広い範囲で岸向きの残差流が生成されている。図-11では、ブロックの側面（ $-0.25 \leq x/D \leq 0.25$ ）において冲向きの残差流となっているものの、 $x/D \geq 0.5$ で岸向きの残差流

となっている。また鉛直方向のブロックの影響範囲については、ブロックが設置された場合の図-9～図-11より、ブロック中心 ($y=0$) から離れるのに伴って岸向き残差流の生成厚が小さくなっていることが分かる。尚、図-9b), 図-10から分かるように、ブロック近傍に発生する残差流は下向きの成分を含んでおり、ブロックの突起部を個々に海底面に設置する場合には局所洗掘への配慮が必要と考えられるが、複数の非対称な突起部を床板に取り付けるユニット形式のBaNKブロックを用いることで問題は解決されるものと考えられる。

最後に水平断面内における波浪残差流の例として、底質輸送に重要な底面付近 $z/D=0.05$ の断面における残差流の空間分布を図-12に示す。本実験では $y>0$ の領域は測定していないため、対称性の仮定（鏡像の原理）の下に、 $y>0$ には $y<0$ の領域の結果を用いて図示している。また参考として、半円筒型ブロックが併記されている。これより、ブロックの岸側 ($x/D \geq 0.75$) に非常に強い岸向きの波浪残差流が生じていることが分かる。また x 方向の残差流は横断方向 (y 方向) にも広がっており、 $x/D \geq 2$ では測定領域の端 ($y/D = -0.875$) まで及んでいることが分かる。一方、ブロックの沖側には顕著な残差流は認められない。

4. おわりに

非対称没水構造物を用いた底質輸送制御技術に有効な形状と考えられる半円筒の周辺の流況を室内実験に基づいて検討した。その結果、波浪場に設置された半円筒型の構造物の周辺には、それが単体であったとしても非常に強い一周平均的な流れ（波浪残差流）が生じることが明らかとなった。特に構造物の切断面側（ここでは岸側）に強い残差流が広範囲に生じる点等は、1/4 球型構造物を用いた群体（波浪場）の場合の従来の知見^{1), 3), 5)}、および押川ら⁸⁾により得られた振動流場に設置された半円柱型構造物周辺の流況ともほぼ符合している。

謝辞：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）の援助のもとに行われた。ここに記して謝意を表します。

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) 押川英夫, 小松利光, 柴多哲郎, 深田剛教: 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.
- 3) 押川英夫, 柴多哲郎, 小松利光: 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, No.2, pp.1255-1260, 2004.
- 4) 押川英夫, 國澤義則, 鞠承洪, 小松利光: 振動流場における非対称没水構造物の抵抗特性, 海岸工学論文集, 第51巻, No.1, pp.671-675, 2004.
- 5) Oshikawa H., Komatsu T. and Hashida M.: Control of substance transport due to plural submerged asymmetrical roughness in wave fields, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, Volume 1, pp.1017-1022, 2005.
- 6) 押川英夫, 張信一郎, 鞠承洪, 小松利光: 地行浜におけるBaNKシステムの現地試験, 水工学論文集, 第49巻, No.2, pp.1309-1314, 2005.
- 7) 押川英夫, 國澤義則, 吉田秀樹, 谷川晴一, 黒田祐一, 藤田和夫, 小松利光: 非対称没水構造物を用いた航路埋没防止技術に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, No.1, pp.486-490, 2005.
- 8) 押川英夫, 小松利光: 振動流場における非対称没水構造物周りの流動解析, 水工学論文集, 第50巻, pp.817-822, 2006.
- 9) 押川英夫, 張信一郎, 井芹寧, 堀田剛広, 小松利光: 閉鎖性人工海浜の変形とその制御の試み, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.905-910, 2006.
- 10) 押川英夫, 國澤義則, 沖田翔吾, 吉田秀樹, 山内洋志, 黒田祐一, 藤田和夫, 小松利光: 非対称没水構造物群による海底近傍の物質輸送の制御, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.746-750, 2006.
- 11) Inman, D. L. and Tunstall, E. B.: Phase dependent roughness control of sand movement, *Proc. 13th. ICCE*, pp.1155-1171, 1972.
- 12) 小田一紀, 天野健次, 小林憲一, 坂田則彦: 硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.331-335, 1991.
- 13) 小林智尚, 仲座栄三, 星野仁, 石塚昭彦, 石原慎太郎: 非対称人工海藻による流れ場の制御, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.566-570, 1993.
- 14) 小林智尚, 仲座栄三, 星野仁, 高山義明: 非対称人工海藻による平均流速場制御の定量評価, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.691-695, 1994.
- 15) 仲座栄三, 津嘉山正光, 赤嶺好祐, 小林智尚: リーフ海岸における堆砂特性と新たな人工ビーチの創造, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.326-330, 1991.
- 16) 仲座栄三, 津嘉山正光, 上原学, 砂川恵輝, 小林智尚: 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, 1995.
- 17) 入江功, 辻利徳, 村上啓介, 藤井研一, 牛房幸光: 歪み砂れんマットによる底層流の制御とその応用, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.476-480, 1992.
- 18) 入江功, 小野信幸, 村上啓介, 橋本誠也, 中村聡: 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.
- 19) Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A.: The forces exerted by surface waves on piles, *Petroleum Transactions, AIME*, Vol.189, pp.149-154, 1950.
- 20) Keulegan, G. M. and Carpenter, L. H., Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol.60, No.5, pp.423-440, 1958.