

波浪と流れの場における 非対称没水構造物群による残差流生成特性

CHARACTERISTICS OF RESIDUAL CURRENTS PRODUCED BY PLURAL SUBMERGED ASYMMETRICAL STRUCTURES IN WAVE-CURRENT COEXISTING FIELDS

押川英夫¹・武田宜紘²・吉田秀樹³・田中克己⁴・大波多昌志⁵・小松利光⁶
Hideo OSHIKAWA, Nobuhiro TAKEDA, Hideki YOSHIDA, Katsumi TANAKA, Masashi OHATA
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学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(同上)

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非会員 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技術開発課長(同上)

⁵非会員 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技術開発課係長(同上)

⁶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(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

Characteristics of residual currents caused by asymmetrical structures, known as *BaNK* blocks, were experimentally investigated in wave-current coexisting fields. Komatsu *et al.* (2001) proposed the effective method called 'Beach and Navigation Keeper: *BaNK* system' in order to cope with beach erosion and shoaling of fairways. The system is a method to control sediment transport using residual currents which are produced by plural submerged asymmetrical small structures in a sea. The system has so far been especially investigated in wave fields by laboratory experiments and numerical simulations. As a result of this study, it is found that an appropriate length of the *BaNK* block unit is an almost quarter of a wavelength in both a wave-only field and a wave-current coexisting field. Furthermore, an optimum on-offshore directional space between the two *BaNK* block units is approximately one-tenth of the wavelength.

Key Words : *BaNK* system, submerged asymmetrical structure, wave-current coexisting field, residual current, *BaNK* block unit

1. はじめに

小松ら¹⁾は底質の移動に起因した諸問題への対応策として波浪エネルギーの一部を利用するBaNK(Beach and Navigation Keeper)システムを提案している。BaNKシステムとは波浪による往復流場に小規

模の非対称構造物を設置して海底付近に一周期平均的な流れ(以下では波浪残差流, あるいは残差流と呼ぶ)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(図-1参照)。

本システムに関しては, これまで著者らによって

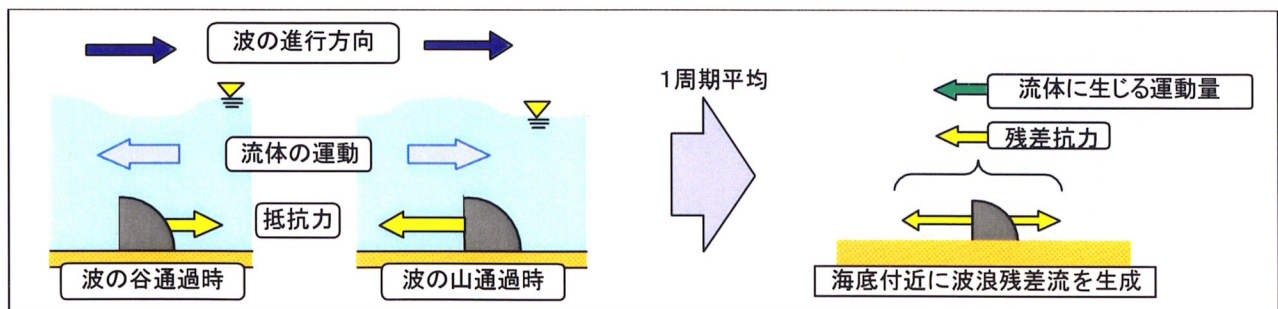


図-1 波浪場における残差流の生成メカニズム¹⁾

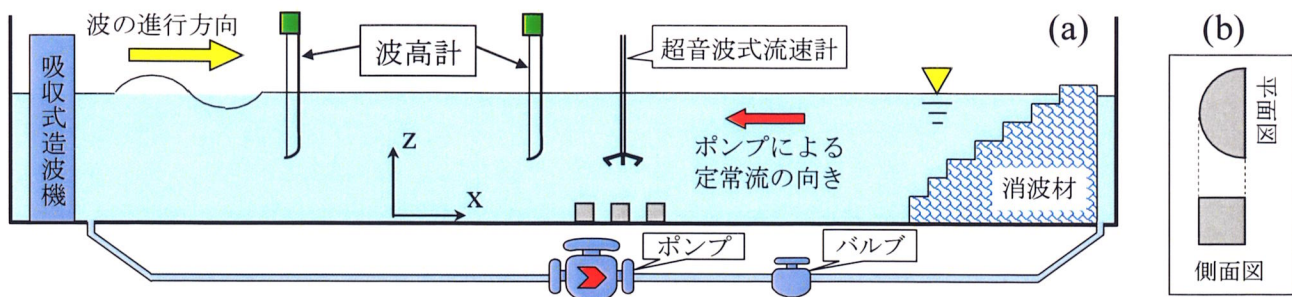


図-2 実験装置の概略図 [左図(a): 装置全体の側面図, 右図(b): 半円柱型構造物単体の向き]

表-1 実験条件 (実験A)

実験A	CaseA-1	CaseA-2	CaseA-3	CaseA-4	CaseA-5	CaseA-6
縦断方向のブロックの数	3	4	5	7	11	15
ブロックの敷設長: l_B (cm)	18.0	24.0	30.0	42.0	66.0	90.0
無次元敷設長: l_B/L	0.131	0.175	0.219	0.306	0.481	0.656

水槽実験や数値シミュレーション, 現地試験を通じて研究開発が進められてきた^{1)~11)}. しかしながら, 実海域においては短周期の波浪とともに長周期の潮流なども存在するため, BaNK システムを適用する際にはそれらの影響も併せて考慮する必要があるが, 過去の研究の殆どは波浪による短周期の往復流場のみを検討対象としてきた. 特に BaNK システムに用いる小規模構造物 (BaNK ブロック) の敷設長については, 小松ら¹⁾および押川ら¹¹⁾が既に検討を行っているが, 実験条件の制約もあり最適な敷設長は明らかにされていない. 特に押川ら¹¹⁾は, BaNK システムを適用する際には数個のユニット型式の BaNK ブロックを用いることが有効と指摘しているものの, 最適なユニット長やユニット間の間隔については未だ不明である.

そこで本研究は, BaNK システムの研究開発の一環として, 潮流を意図した定常流と波浪の重合場において, 用いる BaNK ブロックの最適な敷設長に関する検討を行った. 特に本実験では2つの点に関して検討を行っており, 一つは適切な単位ブロック群の縦断方向の長さ(換言すれば, ブロックの1ユニットの長さ)を調べたもので(実験A), もう一方は二つのブロック群の間の適切な間隔を調べたものである(実験B).

2. BaNK ブロックのユニット長さについて

(1) 実験装置および方法 (実験A)

実験には図-2(a)に示された全長 1600.0cm, 幅 25.0cm, 高さ 60.0cm の鉛直2次元吸収式造波水槽を用いた. BaNK ブロック (突起部) としては円柱を縦に2等分した半円柱を用いた. ブロックの直径は $D=3.0$ cm, 高さは 1.5cm で, 中心間隔 s は従来の研究成果^{3), 7)}を考慮して, $s/D=2.0$ となるように $s=6.0$ cm で

配置した. ブロックの数は横断方向に4列で, 縦断方向には敷設長 l_B に応じた表-1に示す条件となっている. 但し, 敷設長が長い CaseA-5 および CaseA-6 の一部では, 著者らが過去に行った実験結果¹¹⁾を併せて解析している.

用いた波浪は静水深 $h=30.0$ cm, 周期 $T=1.0$ sec, 波高 $H=5.0$ cm の規則的な進行波であり, 波高計を用いた実測結果によると波長 L は 1.37 m である. 波浪のみの実験も行っているが, 重合場の実験においては, 造波機で波を起こすのと同時にポンプで定常流(断面平均流速で 1cm/s 及び 2cm/s)を発生させ, ブロック設置領域付近の流速を超音波式流速計 (Nortek 社製, Vectorino, 以下では流速計と呼ぶ) により測定した. 定常流は, ブロックにより底面付近に生成される残差流を打ち消す方向に付加されている (図-2(b) 参照). 但し CaseA-2, CaseA-4 は波のみの場合である.

縦断方向 (X 方向) の流速の測定断面は, 最も沖側のブロックの設置位置 (円の中心) から更に沖側 3.0cm の位置を原点とするデカルト座標系 ($Y=0$ は水槽の幅方向の中央, $Z=0$ は水路床) において, 敷設領域のほぼ中央と岸側端付近, および両測定断面のほぼ中央の3断面 (それぞれ前後のブロック突起部の間) とした. 但し, 敷設長が短い CaseA-1 および CaseA-2 ではブロックの数が少なくなるため (表-1 参照), 前述の3断面の内の中央を除く, 両端の測定断面の2断面である. 横断方向の測定断面は $Y=0, -1.5, -3.0$ (cm) の3断面であり, 鉛直方向には $Z=0.1, 0.375, 0.75, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0$ (cm) の12点とした. 流速計のサンプリング周波数は 50Hz であり, 各点毎に得られた 100 波分の流速の時系列データを平均することで, 底質輸送制御効果の指標となる残差流速 (ここでは波の一周でオーバー平均された流速) のパターンを求めた.

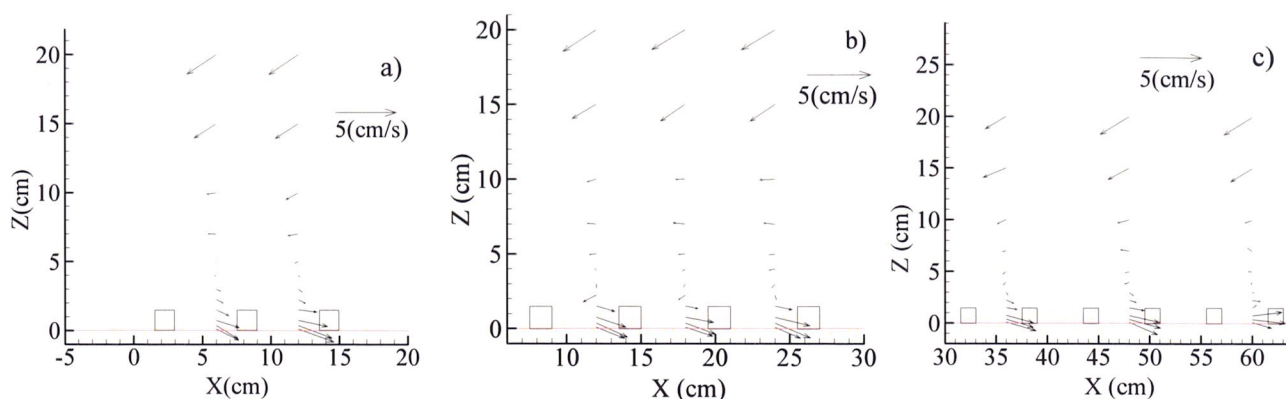


図-3 波のみの場合の残差流のベクトル図 [a): CaseA-1, b): CaseA-3, c): CaseA-5]

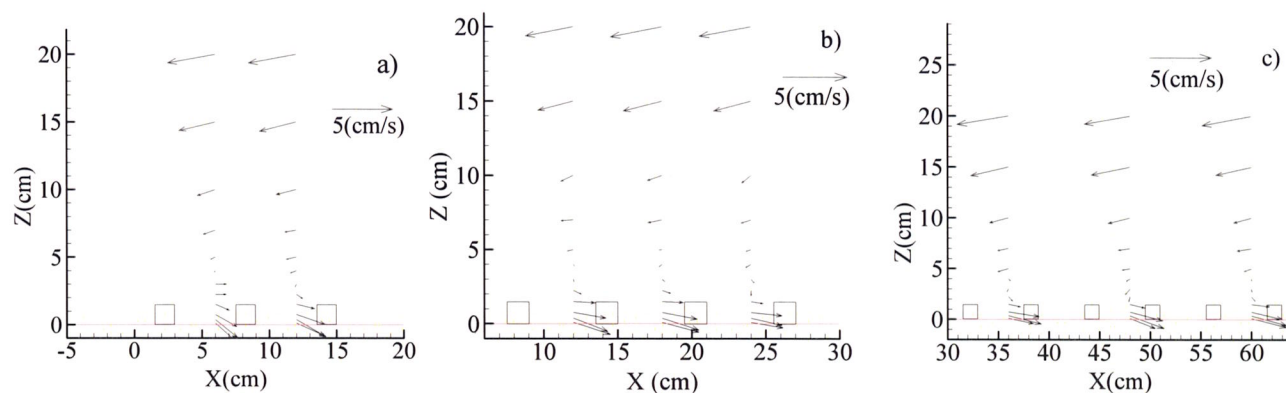


図-4 定常流 1cm/s が逆向きに付加された場合の残差流 [a): CaseA-1, b): CaseA-3, c): CaseA-5]

(2) 実験結果および考察 (実験 A)

結果の例として, CaseA-1, CaseA-3, CaseA-5 の波のみの場合と 1cm/s の定常流が付加された場合の残差流の空間分布をそれぞれ図-3a), b), c) および図-4a), b), c) に示す. なお, これらのベクトル図は $Y=3.0\text{cm}$ の鉛直断面であり, ブロックの中心を通る断面である. また図中の□はブロックの位置と大きさを示している. まず基本場として定常流がない波のみの場合の残差流の分布について検討した. 図-3 より, 底面からブロックの高さの 2 倍程度まで X 方向の正 (岸向き) の残差流が生じていることが理解される. 一方, $Z=5\sim 20\text{(cm)}$ の中層付近においては, ブロックによって生じた底面付近の残差流, ならびに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) の補償流として負 (沖向き) の残差流が生じている. 逆行する定常流が付加された図-4 においては, 定常流に応じて中層では負の残差流が強くなっているものの, ブロックの影響が大きい底面付近では, 対応する波のみの図-3 と同程度の比較的強い正の残差流が生じている.

次に, ブロック周辺の局所的な X 方向の平均残差流速 U_m を算出することで, 本システムにおける適切なブロックの敷設長を検討する. その際, Y 方向には計測された 3 点, 鉛直方向にはブロックの高さまでの残

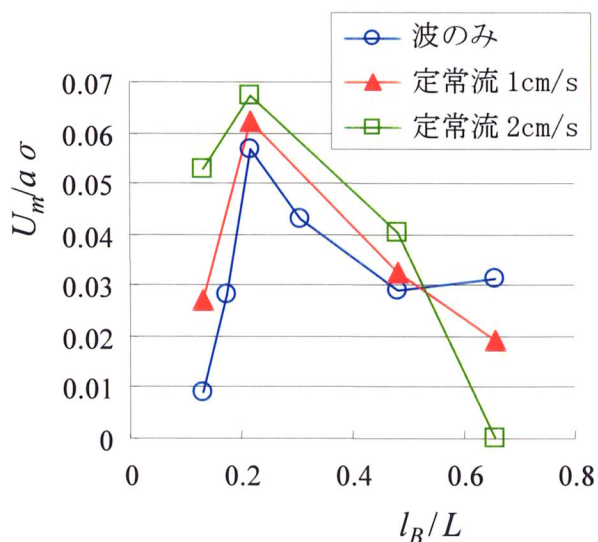


図-5 l_B / L とユニットの中央の残差流速の関係

差流速の測定値を平均して U_m を算出した. 縦断方向については, 残差流が敷設長に応じて X 方向に変化 (発達) するため, ここでは敷設長の中央断面の結果で代表させることとした. 結果を図-5 に示す. 横軸の敷設長 l_B は波の波長 L で, 縦軸の U_m は波の振幅 a ($=H/2$) と角周波数 σ で無次元表示されている. また, 図中には定常流が付加された場合の結果も併記されている. これより定常流の有無や大きさに拘らず, 無

次元敷設長 (l_b/L) が 0.219 の時に正の残差流が最大となっていることが分かる。従って、ブロックの敷設長は波長の 1/5 程度が最適と考えられる。類似の原理を用いた One-Way Pipe の川野ら¹²⁾の実験においても 1/4 波長程度以下の敷設長が適切とされており、符合した結果となっている。このような結果は、波浪場においては一波長の間に水面下の X 方向流速が正負両方をもつため、敷設長が長くなると 1 ユニット上で同時に相反する向きの流れをもつようになり、一方向の残差流の生成が抑制されることによる。定常流の有無と大きさによる残差流の値の変化については、逆向きの定常流が強くなるにつれて、若干ではあるが全体的に正の残差流がむしろ強くなっている。また全ての条件で U_m が正となっており、潮流や恒流が併存する波浪場においても BaNK システムが適用可能なことが明らかとなった。

3. BaNK ブロックのユニット間隔について

(1) 実験装置および方法 (実験 B)

実験 B の方法と条件は実験 A と同じ点が多いため、異なる点のみ説明する。実験 B では縦断方向のブロックの数を実験 A の結果を踏まえて 1 ユニットにつき 5 列 (無次元敷設長: $l_b/L = 0.219$) とし、2 つのユニットを間隔 l_s (cm) を変えて設置した。 l_s は 3 パターン (CaseB-1: $l_s = 11.0$, CaseB-2: $l_s = 28.0$, CaseB-3: $l_s = 45.0$) とした。縦断方向の測定断面は各ブロックユニットの中央 (CaseA-3 のブロック上の中央と同じ位置) と、 l_s のほぼ中央の 3 断面である。

(2) 実験結果および考察 (実験 B)

各条件における残差流の空間分布の例を図-6 ~ 図-11 に示す。なお、これらのベクトル図は $Y = -3.0$ cm の鉛直断面であり、構造物の中心を通る鉛直断面である。また図中の□は構造物の位置と大きさを示している。まず定常流がない波のみの場合における 2 つのブロックユニットの中間の残差流について検討した。図-6, 図-8, 図-10 より、周囲にブロックがない 2 つのユニットの間においても、 $l_s/L = 0.0803$ から $l_s/L = 0.328$ の範囲においては、底面から構造物の高さの 2 ~ 3 倍程度まで X 方向の正 (岸向き) の残差流が生じている。一方、 $Z = 5 \sim 20$ (cm) の中層付近においては、補償流としての負 (沖向き) の残差流が生じている。逆行する 1 cm/s の定常流が付加された場合の図-7, 図-9, 図-11 をみると、ユニット間の中央では、その間隔が長い図-11 ($l_s/L = 0.328$) のみ底面付近の岸向き残差流が小さくなっているものの、 $l_s/L \leq 0.204$ の範囲では底面付近の強い岸向き残差流が維持されていることが分かる。

次に実験 B の結果より、ブロックユニット間の最適な間隔について検討する。ここでも実験 A と同様に、局所的な X 方向の平均残差流速 U_m^* によって評価

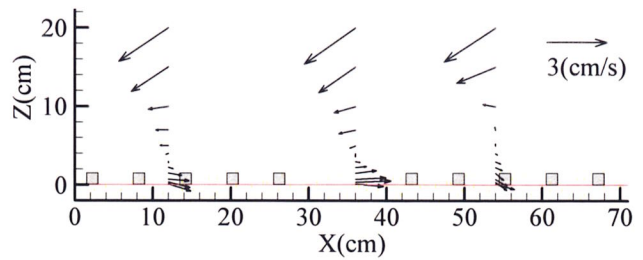


図-6 残差流ベクトル (CaseB-1, $l_s/L = 0.0803$, 波のみ)

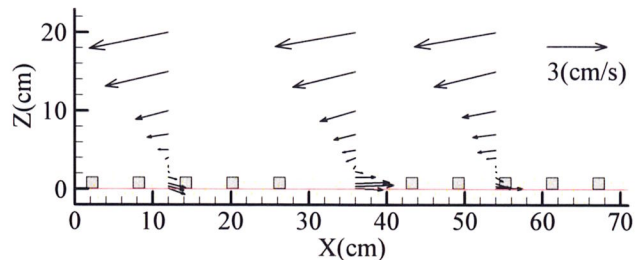


図-7 残差流ベクトル (CaseB-1, $l_s/L = 0.0803$, 定常流 1cm/s)

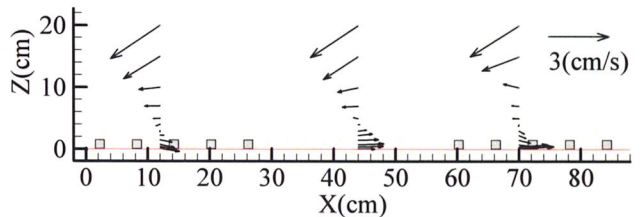


図-8 残差流ベクトル (CaseB-2, $l_s/L = 0.204$, 波のみ)

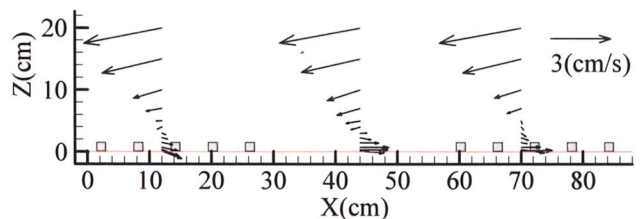


図-9 残差流ベクトル (CaseB-2, $l_s/L = 0.204$, 定常流 1cm/s)

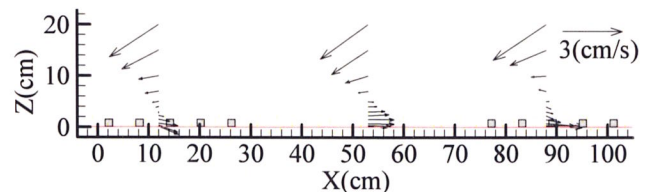


図-10 残差流ベクトル (CaseB-3, $l_s/L = 0.328$, 波のみ)

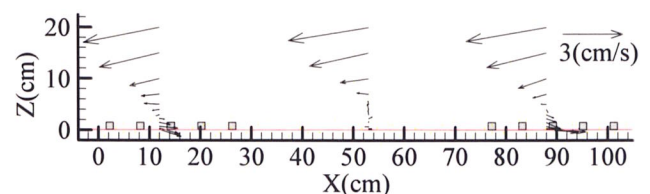


図-11 残差流ベクトル (CaseB-3, $l_s/L = 0.328$, 定常流 1cm/s)

するものとし、X方向については二つのブロックユニット間の中央 (l_s の中間) を代表位置として、またY、Z方向に関しては実験Aの U_m と同様な方法で U_m^* を算出した。結果を図-12に示す。横軸は規則波の波長 L で、縦軸は実験AのCaseA-3 ($l_s/L=0.219$) の場合の U_m で無次元化されている。また2つのユニットが連続的に設置された場合の $l_s=0$ の結果には、ブロックの敷設長が1ユニットの約2倍に相当する実験AのCaseA-5の結果を用いている。これより定常流の有無や強さによらず $l_s/L=0.0803$ に残差流の最大値が存在しており、ブロックユニットの間隔は波の波長の1割程度が最適と考えられる。またこの時の残差流は、1ユニットの場合 (CaseA-3) の1.5倍程度にまで増加しており、ブロックは連続的に設置するよりもユニットの間を空ける方がより効果的である。経済性を考慮すると l_s は長い方が効率的であるとともに、波のみの場合は l_s の増加に伴う最大値以降の残差流の減少が小さいこと、本実験では逆行する定常流が付加されているにも拘らず全ての条件で U_m^* が正となっていること等も踏まえると、 $l_s/L \leq 1/5$ 程度であれば良いとも考えられる。

次に l_s が変化した場合の沖側 (一番目) のブロックユニット上の残差流について検討する。沖側のブロックユニットの中央における局所的なX方向の平均残差流速 U_{mf}^* を U_m^* と同様に求めた結果を図-13に示す。図-12と同様に横軸は規則波の波長 L で、縦軸は実験AのCaseA-3の U_m で無次元化されており、 $l_s=0$ の結果としては実験AのCaseA-5の結果を用いている。これよりバラつきは見られるものの、 $0.0803 \leq l_s/L \leq 0.328$ の範囲においては、沖側のブロック上にもユニットが単体で設置された場合と同程度の残差流が生じていることが分かる。しかしながら $l_s=0$ の場合の結果が示すように、ユニット間隔が極端に狭くなるとブロック (突起部) が連続的に設置されていることになり、結局ユニット長 (l_b) が長くなることで図-5が示すように残差流は小さくなる。

最後に l_s が変化した場合の岸側 (二番目) のブロックユニット上の残差流について検討する。岸側のブロックユニットの中央における局所的なX方向の平均残差流速 U_{mb}^* を U_{mf}^* と同様に求めた結果を図-14に示す。これより $l_s/L \leq 0.0803$ の範囲では、ユニットが単体で設置された場合と同程度の残差流が岸側のブロック上に生じているものの、 $0.0803 \leq l_s/L \leq 0.328$ の範囲においては、敷設間隔の増加に伴って U_{mb}^* は増加している。従来の研究^{1), 5), 9), 11)}により、ブロックの後方 (岸側) には敷設領域を超えて強い残差流が生じていることが明らかになっており、ある程度までのユニット間隔であれば、一番目のユニットの効果が二番目のブロック上にも及ぶことで U_{mb}^* は U_m よりも大きくなったものと推察される。従って、後方のブロック上の残差流を強化する意味では、 $l_s/L=1/3$ 程度にまで l_s を広げることがむしろ効率的と考えられる。

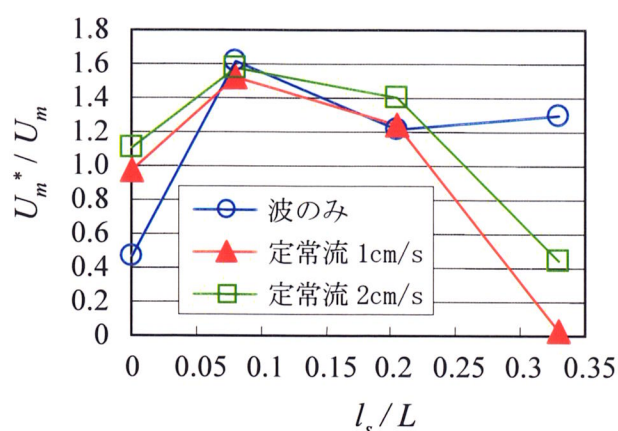


図-12 l_s/L とユニット間残差流速の関係

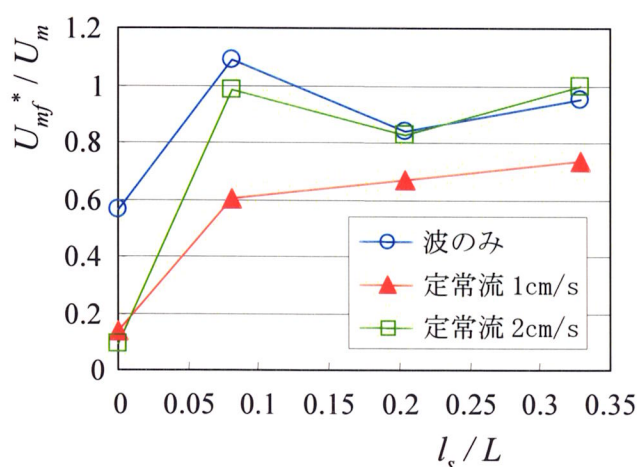


図-13 l_s/L と一番目のユニット上の残差流速の関係

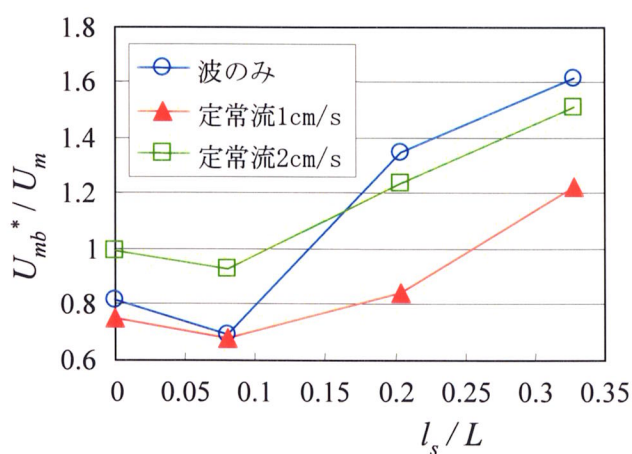


図-14 l_s/L と二番目のユニット上の残差流速の関係

4. おわりに

BaNK ブロックの適切な敷設長について室内実験に基づく検討を行った。その結果、定常流の有無に

拘らず、波長の1/5程度の敷設長の場合に底面付近に最大の残差流が得られることが分かった。またブロックユニットの設置間隔としては、波長の1/10程度でユニット間の残差流速が強くなることが分かった。しかしながらユニット間隔は広い方が経済的であること、またある程度までは間隔の増加に伴って二番目のブロックユニット上の残差流が強化されること等を踏まえると、波長の1/3程度まで設置間隔を拡げることにも有効である。なお、ユニットを3個以上連ねた場合は2個の場合と特性が変わってくることも考えられる。この点は今後検討が必要である。

謝辞：本実験を行うにあたり、九州大学大学院工学研究院技術員の藤田和夫氏に多大なる援助を頂いた。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) 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, 小松利光: 往復流場における非対称没水構造物周りの数値解析, 日本流体力学会 年会2005講演論文集, CD-ROM, AM05-09-002, 2005.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 川野立, Mukhsan Putra Hatta, 藤田和夫, 松田如水, 押川英夫, 小松利光, 波浪場における方向抵抗差を有する管路の残差流特性, 水工学論文集, 第50巻, pp. 1435-1440, 2006.