

波浪場における 非対称没水構造物群周りの残差流

RESIDUAL CURRENTS AROUND PLURAL SUBMERGED ASYMMETRICAL STRUCTURES IN WAVE FIELDS

押川英夫¹・武田宜紘²・石貫國郎³・添田宏⁴・中村嘉邦⁵・小松利光⁶
Hideo OSHIKAWA, Nobuhiro TAKEDA, Kunio ISHINUKI,
Hiroshi SOEDA, Yoshikuni Nakamura and Toshimitsu KOMATSU

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

²修(工) 前九州大学大学院生 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

³前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技術開発第一係長 (同上)

⁶フェロー 工博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

Characteristics of flows around submerged asymmetrical structures, known as *BaNK* blocks, were experimentally investigated. Komatsu *et al.* (2001) proposed '*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 structures in a wave field. As a result of this study, it is found that the appropriate transversal set length of half-cylinder type *BaNK* blocks is almost 2.5 times of the width of each block. In addition, it is demonstrated that residual currents in an irregular wave field are stronger than those in a regular one under the same condition with wave energy. Furthermore an empirical formula between a dimensionless residual current and a non-linear parameter with waves is established to predict residual currents generated in an irregular wave field.

Key Words : *BaNK system, submerged asymmetrical structures, wave field, residual current*

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,自在な底質移動の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,これまで著者らによって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)~10)}。*BaNK*システムに用いる小規模構造物(*BaNK*ブロック)の縦断方向の設置間隔については,押川ら³⁾が既に実験的検討を行っている。しかしながら横断方向の設置間隔については,押川ら⁵⁾が数百程度の低レイノルズ数の流れ場を対象にした数値シミュレーションにより検討を行なっているものの,ある程度の高レイノルズ数の流れ場に対しては,室内実験も含めて検討がなされておらず,最適な横断方向間隔はいまだに明らかにされていない。また著者らの研究グループでは,

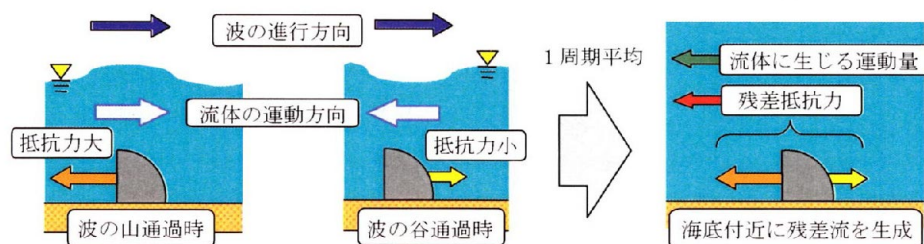


図-1 波浪残差流の発生機構

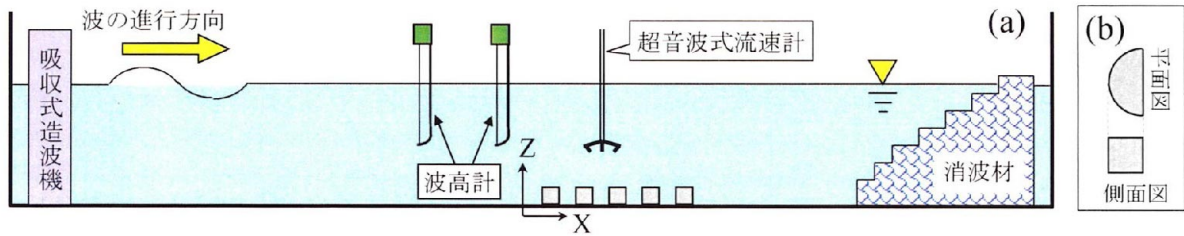


図-2 実験装置の概略図

従来から規則的な進行波あるいは振動流場を主対象に *BaNK* システムの有効性について検討を行ってきた^{1)~3),5),6)}。最近では、本システムの不規則波浪場への適用性を評価する第一歩として、不規則波の波浪条件を固定して非対称構造物群周りの広範囲な流れの構造について検討している¹⁰⁾。しかしながら、一種類の有義波のみを用いているため、波浪条件への依存性などについては明らかにされていない。

本論文では、*BaNK* システムの更なる効率化を目指して二つの点に関して実験的検討を行った。まずブロックの適切な横断方向の設置間隔について検討を行った(実験 A)。更に実海域での適用に備えて、不規則波浪場における *BaNK* システムの効果を規則波との比較などを通して検討した(実験 B)。

2. ブロックの横断方向の設置間隔の検討

(1) 実験方法 (実験 A)

実験には全長1900cm、幅25cm、高さ60cmの鉛直2次元吸収式造波水槽を用いた(図-2参照)。設置する非対称構造物として、直径 $D=3.0\text{cm}$ 、高さ $k=1.5\text{cm}$ の半円柱型のブロックを用いた。ブロックの縦断方向(X方向)間隔は $(2D)=6.0\text{cm}$ で、横断方向(Y方向)間隔は $s=1.5D, 2D, 2.5D, 3D$ の4ケースそれぞれについて、表-1に示した波の条件下で実験を行った。その際、ブロックの横断方向の設置個数は各々5, 4, 3, 3個である。また過去の研究⁹⁾でブロックの敷設長 l_B と規則波の波長 L が $l_B/L \approx 0.22$ の場合において底面付近に最大の残差流が得られたことから、この結果を考慮してブロックの縦断方向の設置個数(N)を決定している。なお、用いた波浪は静水深 $h=30.0\text{cm}$ 、波高 $H=5.0\text{cm}$ の規則的な進行波である。横断方向間隔 s のそれぞれに対して、波の周期 T は0.8, 1.0, 1.3, 1.5(s)の4ケース行い、微小振幅波理論から表中に記載された沖の一樣水深部におけるブロック高さでの流速振幅 U_0 と波長 L を求めた。

表-1 実験条件 (実験 A)

周期 T (s)	0.8	1.0	1.3	1.5
波長 L (cm)	96.0	137	196	234
N (個)	4	5	7	9
l_B/L	0.25	0.22	0.21	0.23
KC数 ($\equiv U_0 T/D$)	1.51	2.84	4.70	5.86

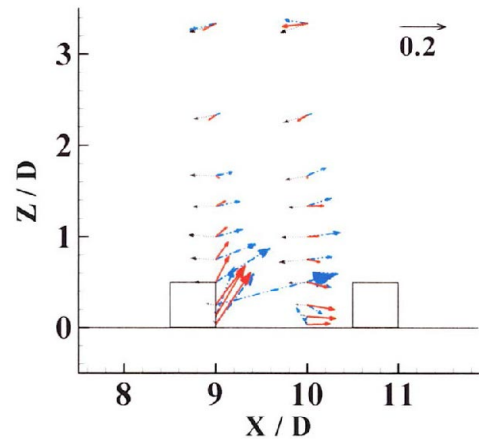


図-3 残差流速ベクトルの鉛直分布
[2点鎖線: $s=1.5D$, 実線: $s=2D$, 点線: $s=3D$]

構造物設置領域付近の流速を超音波式流速計(Nortek 社製, Vectrino)により測定した。縦断方向の流速の測定断面は、構造物の設置位置から沖側3.0cmの位置を原点とするデカルト座標系において、敷設長のほぼ中央と敷設長中央の断面から沖側に3.0cmの2断面とした。横断方向の測定断面は水路中央を $Y=0$ として、0, -3.0(cm)の2断面であり($Y=-3.0\text{cm}$ はブロックの中心線上の縦断面)、鉛直方向には水路床を $Z=0$ として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断面について測定を行った。

流速および容量式波高計による水位のサンプリング周波数はそれぞれ、100Hzおよび20Hzであり、各測点毎に得られた約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(波の一周期間でオイラー平均された流速)等を求めた。

(2) 実験結果および考察 (実験 A)

実験 A における残差流の空間分布の例を図-3に示す。このベクトル図は周期 $T=1.5\text{s}$ のときの、 $Y=0$ における鉛直断面分布を示している。また図中の□は構造物の位置と大きさを示している。横軸は X/D 、縦軸は Z/D であり、流速ベクトルは波の振幅 a と角周波数 σ で無次元表示されている。これより、ブロックの横断方向間隔が広い $s=3D$ の場合を除いて、ブロックの3倍程度の高さまで強い正(岸向き)の残差流が生成されていることがわかる。また $s=1.5D$ と $2D$ を比較すると、ベクトルの方向は概ね一致するものの、底面付近に生成される正の残差流は間隔が狭い $s=1.5D$ の場合に大きくなっているこ

とが分かる。一方、 $Z/D > 2$ の中層付近においては、構造物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（冲向き）の残差流が生じている。

次に構造物周辺の局所的な X 方向の平均残差流速 U_m を図-4 に示す。その際、X および Y 方向には計測された 2 点、鉛直方向には $Z=3.0\text{cm}$ までの 6 点の残差流速値を平均して U_m を算出した。横軸の横断間隔 s はブロックの直径 D で、縦軸の U_m は波の振幅 a と角周波数 σ でそれぞれ無次元表示されている。これより、 s/D が小さくなるにつれて $U_m/a\sigma$ の値がほぼ増加していることから、横断間隔が狭まるに伴って底面付近に生成される残差流が強くなることが分かる。概ね $U_m > 0$ であることから判断すると、横断間隔を $2.5D$ 程度にまで広げることが可能である。なお、本実験条件においては、周期の減少に基づく KC 数の減少に伴って残差流は弱まっている。押川ら³⁾によると非対称構造物設置により底面付近に発生する残差流は KC 数の減少に伴って増加することが明らかになっている。この差異の理由については、周期の減少に伴い (I_B/L を固定しているために) 敷設長 I_B が短くなることで X 方向に設置されているブロックの個数が減少していることから、残差流の発達が不十分なことが挙げられる。またレイノルズ数の影響^{2), 3), 6)}等も考えられる。

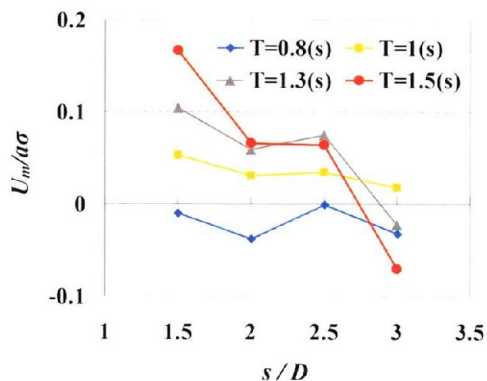


図-4 ブロックの横断方向間隔と残差流速の関係1

図-4 よりブロックの横断方向間隔は狭いほうが底面付近により強い残差流が生成されることが明らかになった。しかしながら、 s が小さくなると単位面積当たりのブロック（突起部）の個数が増えることになるため、BaNK システムとしては非効率となる。そこで、横断方向のブロック一個あたりに生成される残差流を無次元化した $U_m s/(a\sigma D)$ を指標として、効率を含めて適切と思われる s を評価した(図-5 参照)。これより、 $T=1.5\text{s}$ に見られるように $s/D=1.5$ において最大値が得られている場合もあるものの、全ての条件において $s/D=2.5$ で極大値 ($T=1.5\text{s}$ 以外では最大値) が存在していることから、図-4 で $s/D=2.5$ の残差流の絶対値も比較的大きいことを併せて考えると、適切なブロックの横断方向間隔は $s/D=2.5$ 程度と判断される。なお、低レイ

ノルズ数の振動流場を対象とした数値解析では、適切な横断方向間隔は $2.0D$ 程度という成果が得られており⁵⁾、本実験はほぼ符合した結果となっている。

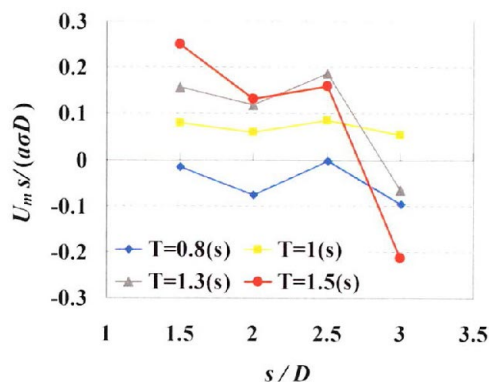


図-5 ブロックの横断方向間隔と残差流速の関係2

Russel and Huntley¹¹⁾によると流速の 3 次モーメントが底質輸送能力の指標となることが知られている。そこで、X 方向流速 ($\equiv u$) の 3 次モーメントを U_m と同様に空間平均して、 a および σ により無次元化した $q^* [\equiv \langle u^3 \rangle / (a\sigma)^3]$ を求めて図-6 に示す。 $\langle \rangle$ は時間平均を意味している。これより q^* はほぼ正の値を取っており、残差流の結果 (図-3~図-5) と併せて考えると、 $s/D \leq 2.5$ の範囲では、底面付近において強い底質輸送促進効果が期待される。

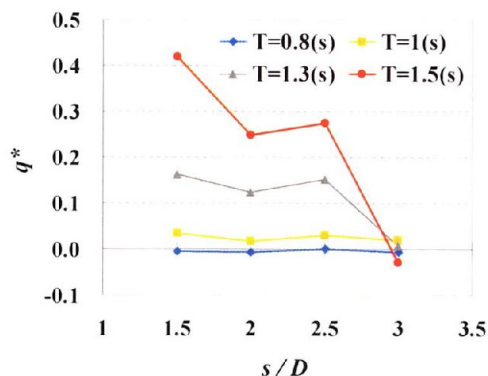


図-6 ブロックの横断方向間隔と3次モーメント q^* の関係

3. 不規則波浪場における流れの特性

(1) 実験方法 (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でのブロックの配置は実験Aの $s=2D$ の場合と同じである。また不規則入射波の造波には合田らの入・反射波分離推定法¹²⁾ が用いられており、Bretschneider-Mitsuyasu スペクトル¹³⁾の係数を修正した以下の式¹⁴⁾を目標のスペクトルにした (表-2参照)。比較のために殆どの不規則波の条件に対して、エネルギー平均波¹⁵⁾がほぼ一致する規則波の実験を併せて実施している。表-2の $H_{1/3}(\text{cm})$ は有義波高、 $T_{1/3}(\text{s})$ は有義波周期、 $H_{rms}(\text{cm})$ はエネルギー平均波高、 $T_{rms}(\text{s})$ はエネルギー平均周期である。なおこれらの値は、得られた水面変位を実験後にゼロアップクロス法により波別解析して

求められた値である。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (1)$$

表-2 実験条件（実験B）

不規則波の条件				規則波の条件	
$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{rms}	T_{rms}	H	T
2.9	0.87	2.1	0.85	2.1	0.87
2.9	0.9	1.9	0.73		
2.9	1.4	2.1	1.3	2.1	1.2
4.1	1.0	3.1	1.0		
5.5	0.89	4.1	0.93	3.9	0.87
5.4	1.0	4.0	0.95	3.9	1.0
5.4	1.2	3.9	1.1	3.9	1.1

縦断方向の測定断面は、ブロック敷設領域内の $X = 12.0, 18.0, 24.0, 30.0(\text{cm})$ の4断面とした。但し、 $H_{1/3} = 5.4(\text{cm})$ 、 $T_{1/3} = 1.0(\text{s})$ の波浪条件については、過去の研究¹⁰⁾で $X = 0$ から 6.0cm ごとに計11断面で広範囲に計測を行っているため、ここではそれらの結果も併せて検討を行っている。流速および水位のサンプリング周波数はそれぞれ、 100Hz および 20Hz であるが、 $H_{1/3} = 5.4(\text{cm})$ 、 $T_{1/3} = 1.0(\text{s})$ の条件のみ流速のサンプリング周波数が 50Hz となっている。不規則波の残差流についても、ここでは比較的長時間（有義波周期の $150 \sim 200$ 倍程度）のオイラー平均流速としている。

(2) 実験結果および考察（実験B）

実験時に造波された不規則波の水面変位の周波数スペクトルの例を、式(1)により求められた目標のスペクトルと併せて図-7に示す。これは、目標とする有義波 $H_{1/3} = 5.0\text{cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.25\text{s}$ に対して、測定値の解析後の有義波が（平均で） $H_{1/3} = 5.4\text{cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.2\text{s}$ の結果である。これより、多少の差異はあるものの、十分な精度で目標とするスペクトル形状を有する不規則波が造波されていることが理解される。

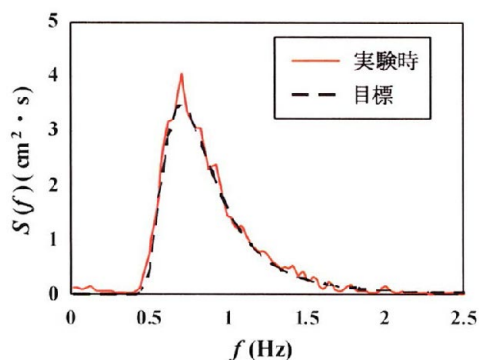


図-7 水面変位の周波数スペクトル
($H_{1/3} = 5.4\text{cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.2\text{s}$)

不規則波浪場におけるブロック周りの残差流速の

分布を図-8に示す。これより、不規則波においても実験Aの規則波の結果と同様に、ブロック付近に顕著な岸向きの残差流が発生することが理解される。また底面付近に生成される正の残差流は、ブロック敷設領域内（ $X = 3 \sim 27\text{cm}$ ）の左端 $X = 6\text{cm}$ において既に強くなっており、ブロック敷設領域を大きく越えた $X = 48\text{cm}$ まで維持されている。

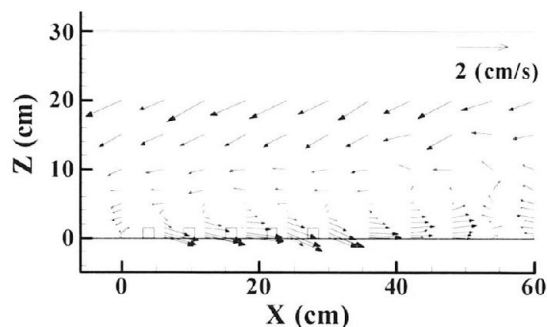


図-8 不規則波における残差流速分布
($H_{1/3} = 5.4\text{cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.0\text{s}$ 、 $Y = -3.0\text{cm}$)

波の平均エネルギーがほぼ一致する規則波と不規則波の残差流速の比較の例を、異なる波浪条件に対して図-9～図-12に示す。それぞれの残差流速は実験Aと同様の方法で無次元化されており、不規則波ではエネルギー平均波の振幅 a （ $\equiv H_{rms}/2$ ）および角周波数 σ （ $\equiv 2\pi/T_{rms}$ ）により無次元化している（ π は円周率）。これより、波高が同じ不規則波の結果をみると、周期の増加にともなって正の残差流が強くなっていることが分かる。また、残差流の方向は（同じエネルギーをもつ）規則波と不規則波で概ね一致しているものの、規則波では波高が小さい条件の沖側（ $X/D = 4$ ）において残差流が負となっており、それより岸側ではブロック高の2～3倍程度の高さまで正の残差流が生成されているのに対し、不規則波では既に $X/D = 4$ の断面から岸向きの残差流が生成され、ブロック高の4倍程度の高さまで正の残差流が生成されている。従って、不規則波において底面付近に生じる岸向きの残差流は、規則波と比較して絶対値、生成厚ともにやや大きくなっている。

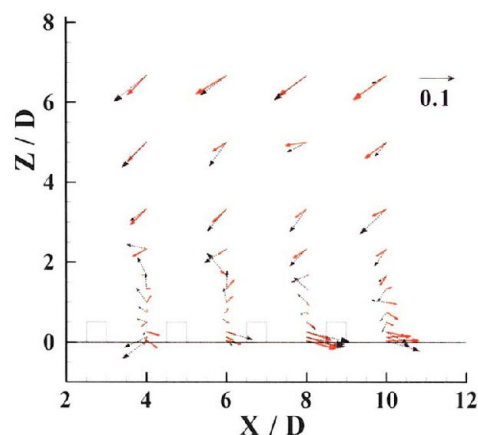


図-9 残差流速ベクトルの鉛直分布 [実線：不規則波、点線：規則波] ($H_{1/3} = 2.9\text{cm}$ 、 $T_{1/3} = 0.9\text{s}$ 、 $Y = -3.0\text{cm}$)

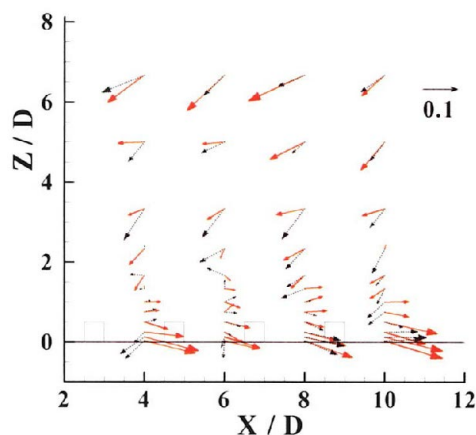


図-10 残差流速ベクトルの鉛直分布 [実線：不規則波，点線：規則波] ($H_{I3}=2.9\text{cm}$, $T_{I3}=1.4\text{s}$, $Y=-3.0\text{cm}$)

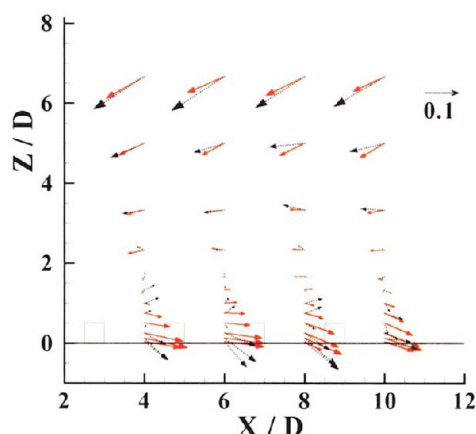


図-11 残差流速ベクトルの鉛直分布 [実線：不規則波，点線：規則波] ($H_{I3}=5.4\text{cm}$, $T_{I3}=1.0\text{s}$, $Y=-3.0\text{cm}$)

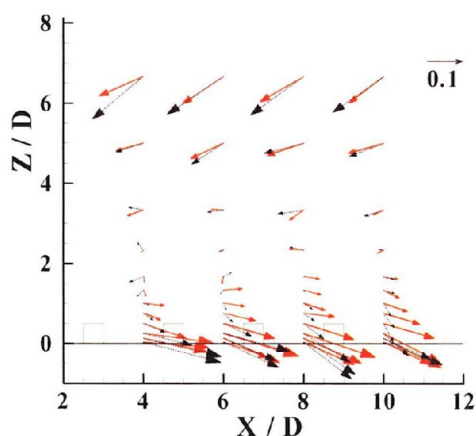


図-12 残差流速ベクトルの鉛直分布 [実線：不規則波，点線：規則波] ($H_{I3}=5.4\text{cm}$, $T_{I3}=1.2\text{s}$, $Y=-3.0\text{cm}$)

次に構造物周辺の局所的なX方向の平均残差流速 U_m を図-13に示す。縦軸の U_m は実験Aでの方法と同様に $a\sigma$ で無次元化されており、横軸には波の非線形性を表す無次元パラメータの (周期を用いた場合の) アーセル数¹⁶⁾ [$Ur \equiv gHT^2/h^2$] を用いている。なお、ここでは不規則波の波浪条件と残差流の関係の把握を目的としており、不規則波には慣例的に有義波を用いることから、無次元化においては (エネ

ルギー平均波ではなく) 有義波の特性量が用いられている。これより不規則波では Ur の増加に伴ってほぼ線形的に残差流速が増加していることが分かる。図中には、最小自乗法による近似直線が示されている。従って不規則波の波浪条件が設定されれば、底面付近に発生する平均的な残差流速をある程度予測できることになる。しかしながら、本実験では波浪条件がそれ程広範囲には取られていない (特に水深は一定)、構造物の大きさが陽的には考慮されていないこと (KC 数の実験範囲 $\equiv$ 適用範囲という意味では考慮される) 等、やや不十分と思われる点もあるため、今後更なる検討を行う必要があると思われる。

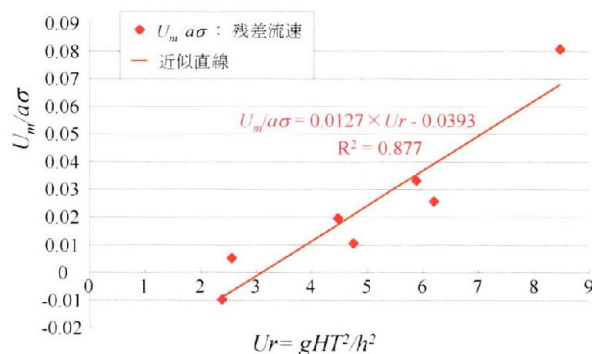


図-13 不規則波におけるX方向の残差流速と波浪条件の関係

得られた流速の時系列データより周波数スペクトルを算定した。ブロック付近のX方向流速 u のスペクトル $F_u(f)$ の例を図-14に示す。ブロック付近の $X=12\sim 30\text{cm}$ の範囲では、 f が 1.7Hz (以後では f_c と呼ぶ) を越えた範囲においてほぼ $-5/3$ 乗則に従った乱流域が形成されている。ブロックなしの結果では慣性領域が形成されていないことを踏まえると、ブロック近傍での乱流域の形成はブロックによる後流の影響によるものと思われる。

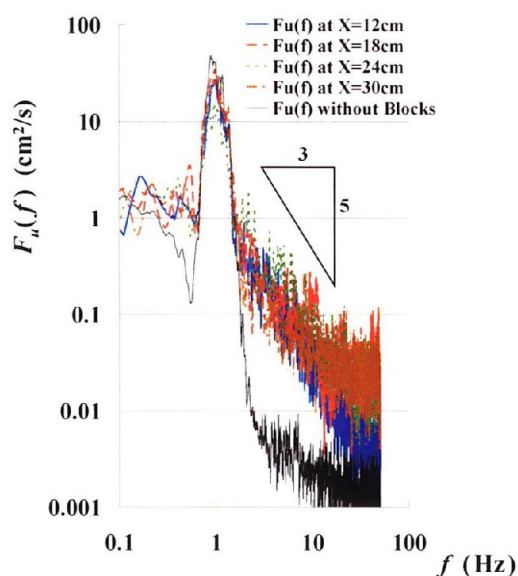


図-14 X方向流速の周波数スペクトル ($H_{I3}=5.5\text{cm}$, $T_{I3}=0.89\text{s}$, $Y=-3.0\text{cm}$, $Z=0.75\text{cm}$)

次に乱れエネルギー $[k \equiv (\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle)/2]$ の評価を行った。 u' , v' , w' はそれぞれ X, Y, Z 方向の流速変動成分である。ここでは、最終的にブロックにより発生した乱れエネルギーの評価を行うことが目的であるが、図-14 から分かるように単純に k を求めるとブロックの影響が少ない低周波数側のパワースペクトルのわずかな違いに k が著しく影響を受けるため、実験および解析の精度上ブロックの効果(後流の影響)を評価できなかった。そこでブロックの影響による乱れ(以降では後流成分と呼ぶ)を以下の便宜的な方法により抽出した。各点の流速データから周波数スペクトルを求め、ブロックの影響による後流成分と判断された低限界の周波数 f_c よりも高周波の成分のみから k を算出した。結果の例として、図-14 と同じ条件において、各測点のブロック無しでの乱れエネルギー k_{NB} で無次元化された k の鉛直分布を図-15 に示す。これよりブロック設置領域内の底面付近 ($Z/D < 1.5$) において、ブロック無しの場合と比較して k の値が顕著に大きくなっているとともに、X に伴って乱れが発達して、 k が増加していることが分かる。

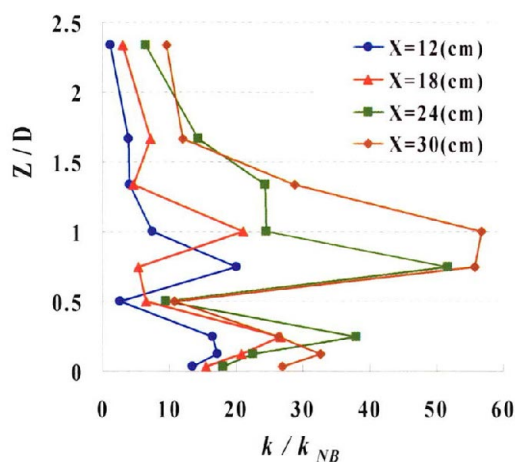


図-15 乱れエネルギーの鉛直分布
($H_{I3} = 5.5\text{cm}$, $T_{I3} = 0.89\text{s}$, $Y = -3.0\text{cm}$)

4. おわりに

本研究により得られた主要な知見は以下の通りである。

1. BaNK ブロックの適切な横断方向の設置間隔について検討を行った結果、横断間隔が狭まるにつれて生成される正の残差流は強まることが分かった。しかしながら効率までを含めて判断すると、適切な横断方向間隔は $2.5D$ 程度となる。
2. 不規則波浪場における BaNK システムの有効性が明らかになった。また、不規則波と規則波を比較すると残差流の方向は概ね一致するものの、不規則波の方が底面付近に強い残差流が生成され、またその生成厚も若干大きいことが分かった。

3. 不規則波浪場において BaNK システムにより発生する底面付近の残差流速がある程度予測可能となった。

謝辞：本研究を実施するにあたり、九州大学大学院工学府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, 張信一郎, 鞠承淇, 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 押川英夫, 武田宜紘, 吉田秀樹, 田中克己, 大波多昌志, 小松利光：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, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.883-888, 2007.
- 10) 押川英夫, 武田宜紘, 吉田秀樹, 田中克己, 大波多昌志, Andi Rusdin, 小松利光：不規則波浪場における非対称没水構造物周りの流れ, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1417-1422, 2008.
- 11) Russel, P.E. and Huntley, D.A.: A Cross-Shore Transport "Shape Function" for High Energy Beaches, *Journal of Coastal Research*, Vol.15, No.1, pp.198-205, 1999.
- 12) 合田良實・鈴木康正・岸良安治・菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, pp.1-23, 1976.
- 13) 光易恒：海洋波の物理, 岩波書店, 210p., 1995.
- 14) 合田良實：[増補改訂] 港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説, 鹿島出版会, 333p., 1990.
- 15) 樫木亨・出口一郎：新編海岸工学, 共立出版, pp.38-41, 1996.
- 16) 本間仁監修/堀川清司編：海岸環境工学 海岸過程の理論・観測・予測方法, 東京大学出版会, 582p., 1985.