

長・短周期合成波による遡上域付近の波と漂砂量に関する実験的研究

Laboratory Study on Waves and Sediment Transport near Swash Zone by the Combined Short and Long Waves

池田 仁¹・岡本 弘²・水口 優³

Jin IKEDA, Hiroshi OKAMOTO and Masaru MIZUGUCHI

Experiments with short waves, long waves and their combined waves are conducted both on a fixed and on a movable bed. Water and sand surfaces are measured simultaneously by using a video technique. In the uniform depth area the combined waves are linear sum of the component waves as short waves show no reflection. On the slope, particularly near the shoreline, short waves break riding on the long waves together with considerable modulation, which cannot be described by simple sum of component waves. Nor can be sediment transport rate. Sediment transport rate in the surf zone are evaluated for uprush and downrush respectively. Their amount is proportional to $3/2$ power of Shields number with large scatter for the downrush, the direction being onshore for the uprush and offshore for the downrush.

1. はじめに

海浜変形という現象を理解するためには、遡上域付近における波の挙動と砂移動のメカニズムを解明することが必要である。現地観測においては、加藤ら(1989)はバームの侵食には汀線付近の長周期波が関与しているとし、内野ら(2004)はバームの侵食は重複波構造を成す長周期波によって起こると推察している。一方、室内実験においては砂村(1984)を始めとして短周期波による岸沖漂砂量に関する研究は数多く行われているが、長周期波を考慮した実験は行われていない。

本研究では、短周期波、長周期波および長・短周期合成波の一樣水深部および斜面上における波の特性と、遡上域内のuprush/downrush時の遡上波特性および岸沖漂砂量について実験的に検討する。

2. 固定床実験の概要

実験は吸引制御機能付きピストン型造波機を有する断面水槽を用いて行った。図-1に実験水槽概要図(固定床実験)を示す。斜面勾配 $\tan\beta$ は長周期波(波高 $H=1.5\text{cm}$ 、周期 $T=3.5\text{s}$)が完全重複波となるように $1/7.8$ とした。

実験ケースは表-1に示すように、短周期波(以下、 $w(0.7)$)、長周期波(以下、 $w(3.5)$)および $w(0.7)$ と $w(3.5)$ の合成波(以下、 $w(0.7+3.5)$)の3ケースである。なお目標波高は一樣水深部において、 $w(0.7)$ および $w(3.5)$ は 1.5cm 、 $w(0.7+3.5)$ はその線形重ね合わせで、zero-up cross点で同期した。

計測は分圧式波高計(正豊工学製)、電磁流速計

1 修(工) 東光コンサルタンツ(株)
2 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
3 正会員 工博 中央大学教授理工学部都市環境学科

(KENEK製)を設置し、水面変動および流速を収録した。データの収録にはAD変換ボードを実装したノートパソコンを用い、サンプリング周波数 150Hz で収録した。

一樣水深部(水深 $d=30\text{cm}$)において、波高計群による入・反射波分離手法を適用するために5本の波高計を設置した(水口, 1991)。波高計の設置間隔は、入・反射波分離手法の適用範囲を考慮して、 $1/16 \sim 1/8$ 波長に収まるように設置した。また、斜面上では先端部($x=11.80\text{m}$) \sim $x=14.20\text{m}$ まで、 10cm 間隔で水位変動を計測し、 $w(3.5)$ で節となる地点($x=13.55\text{m}$, 目測)を含む $x=13.49\text{m} \sim 13.96\text{m}$ の範囲では流速変動も計測した。

3. 固定床実験の結果

(1) 一樣水深部における波の特性

一樣水深部における波の特性について検討するために、入・反射波の水位変動データのスペクトル解析を行った。入・反射波の0次モーメント m_{0i} 、 m_{0r} を求め、エネルギー反射率 K_{RE} を算定した。結果が表-2である。表-2から全ての m_0 について $w(0.7) + w(3.5) = w(0.7+3.5)$ が成り立ち、合成波における相互干渉はないと考えられる。 $w(0.7)$ は $K_{RE}=0.07$ で進行波であり、 $w(3.5)$ は $K_{RE}=0.88$ で完全重複波であった。また、図-2に $w(0.7+3.5)$ の入・反射波分離結果を示す。 $w(0.7+3.5)$ の入射波は長周期成分

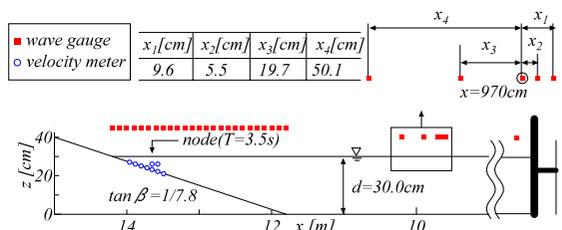


図-1 実験水槽概要図(固定床実験)

表-1 実験ケース

case	H [cm] (一様水深部)	T [s]
w0.7 (短周期波)	1.53	0.7
w3.5 (長周期波)	1.37	3.5
w (0.7+3.5) (長・短周期合成波)	2.69	3.5

表-2 各ケースの m_0 およびエネルギー反射率 K_{RE}

case	m_{0i} [cm ²]	m_{0r} [cm ²]	m_{0t} [cm ²]	m_{0rav} [cm ²]	K_{RE}
w0.7	0.291	0.002	0.306	0.306	0.07
w3.5	0.226	0.175	0.651	0.659	0.88
w (0.7+3.5)	0.506	0.158	0.901	0.918	0.56
w0.7+w3.5	0.517	0.177	0.957	0.964	0.58

ラス短周期成分であり、反射波は長周期成分のみとなっている。これらの事から、今回のケースでは重ね合わせは成立していると考えられる。

(2) 砕波点付近における水位と水平流速の変動

斜面上における波の特性について検討するために、合成波 $w (0.7+3.5)$ の短周期成分および長周期成分(境界周波数 $f_c=0.86\text{Hz}$)と、 $w0.7$ および $w3.5$ の水位・流速変動データを比較した。図-3に $x=13.40\text{m} \sim 13.80\text{m}$ の範囲における水位・流速変動時系列を示す。

水位変動について見ると、 $w (0.7+3.5)$ の長周期成分は

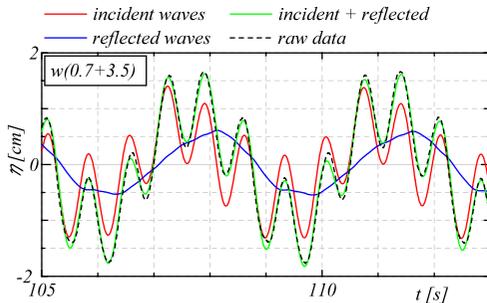


図-2 $w (0.7+3.5)$ の入・反射波分離結果 ($x=9.70\text{m}$)

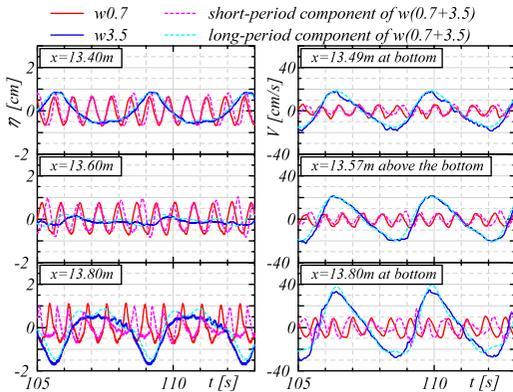


図-3 斜面上における $w (0.7+3.5)$ の長・短周期成分と $w0.7, w3.5$ の水位・水平流速変動

$w3.5$ とほぼ一致する。一方、短周期成分の振幅は $w0.7$ の振幅とほぼ一致するが、周期は長周期波の流速場に対応して伸び縮みする。短周期成分の砕波点 ($x=13.97\text{m}$, 目測) 付近では、 $w (0.7+3.5)$ における短周期成分の周期は変動する ($0.1\text{s} \sim 0.3\text{s}$)。流速変動についても、長周期成分はほぼ一致するが、短周期成分は砕波点に近づくにつれ周期変動に加え振幅もズレが大きくなり、 $w0.7+w3.5 \neq w (0.7+3.5)$ となった。

4. 移動床実験の概要

移動床実験は図-1に示す斜面上に硅砂7号(平均粒径 $D_{50}=0.18\text{mm}$, 淘汰係数 $S_0=1.28$, 密度 $\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$)を鉛直方向に 5cm の厚さで敷いて行った。

遡上域付近の水面および砂面形をビデオカメラを用いた画像解析から取得した。データの収録にあたってはビデオカメラ(SANYO DMX-FHI, 走査方式:プログレッシブタイプ, 横解像度 1920pixel , 縦解像度 1080pixel)2台を横に並べて用い、サンプリング周波数 59.94Hz で断面水槽の側面から直角に撮影した。撮影した動画データから、断面画像解析ソフトを用いて1コマ毎に水面形および砂面形を取得した。断面画像解析ソフトは色の識別により水領域、砂面領域を検索し水面と砂面の位置を特定するもので、水をウォーターブルーで着色して実験を行った。

5. 移動床実験の結果

(1) 遡上波特性

取得した画像データの1コマ毎に水面・砂面データを取り出し、緩起動終了後の5波をuprush/downrush毎に検討した。図-4(a), (b)に $w3.5$ の3波目におけるmax-uprush/max-downrush時の水面形および砂面形を示す。

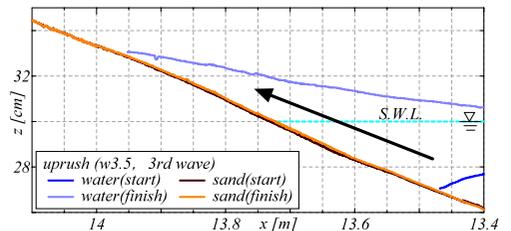


図-4 (a) uprush時の水面形および砂面形

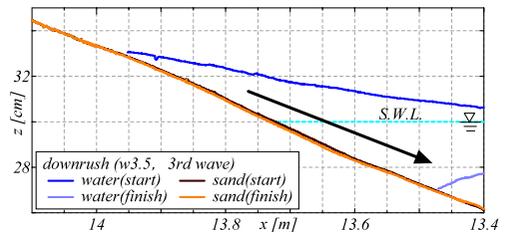


図-4 (b) downrush時の水面形および砂面形

図-5 (a)~(c) に各ケースの遡上域付近の水面形を示す。図-5からw0.7は碎波していることおよびw3.5は重複波構造を成していることが分かる。また、w (0.7+3.5) は長周期成分に短周期成分が乗っているようには見えないが、斜面上では明らかに $w_{0.7}+w_{3.5} \neq w_{(0.7+3.5)}$ である。

各ケースの遡上波形状 $r(t)$ を図-6に示す。遡上波形は、断面画像解析から得られた水面形の岸側端を追跡して求めた。遡上波形においても、w (0.7+3.5) については長周期成分に短周期成分が乗っている形となるが、波形的には $w_{0.7}+w_{3.5} \neq w_{(0.7+3.5)}$ となった。ただし、合成にあたってはw (0.7+3.5) の遡上波の谷の波形が合うように時間を合わせた。

(2) 遡上域付近の流速変動

遡上域内の砂移動に対する外力を評価するために、計算する地点よりも岸側の水面形から連続式を用いて断面平均流速 U を求めた。遡上域沖端と中央点の水位変動 η_s および U を図-7 (a)~図-8 (c) に示す。図中の x_s は静水汀線からの距離 (岸向きが正) を表す。全ケースで1波平均の流量 Q はほぼゼロ ($|Q|/Q_{max} \leq 0.02$) となるが、 U は沖向きとなる ($-3.89 \leq U/U_{max} \leq -0.24$)。

図-7中の水位について見ると、w3.5とw (0.7+3.5) は最大遡上時刻と遡上域沖端の水位が最大になる時刻は

ほぼ一致するが、w0.7では後者の方が前者よりかなり早くなる。波形を見ると、w0.7は前傾して進行しており、w3.5は重複波の腹としての上下運動をしている。w (0.7+3.5) については、短周期成分の水位が長周期成分の水位に乗って進行していることが分かる。downrush時の方がuprush時よりも短周期成分が目立たないのは、長周期成分のdownrush時は短周期成分が遡上しにくいからだと考えられる。また、図-7 (c)、図-8 (c) からw (0.7+3.5) の水位変動には短周期成分の影響が残るとはいえ、遡上域の水位変動は $w_{0.7}+w_{3.5} \neq w_{(0.7+3.5)}$ となった。

(3) 遡上域付近の砂移動

砂面形から各ケースのuprush/downrush時における地形変化量の5波平均 Δz を図-9 (a)~(c) に示す。図-4と図-9から遡上域内の地形変化は全てのケースでuprush時に砂面が上昇し、downrush時には砂面が低下することが分かる。次に各ケースの断面地形 (図-4) および Δz (図-9) に着目する。w0.7は砂面の変化量は小さいものの、 Δz はuprush/downrush共に空間的にはほぼ同様であった。w3.5とw (0.7+3.5) の Δz の形は一致しなかったが、最大地形変化量はほぼ同程度であった。w3.5の Δz の形は、遡上域岸端を0、沖端を1とすると遡上域0.7付近までは沖側にかけて直線的に増加し、それよりも沖側は徐々に減少している。それに対し、w (0.7+3.5) は遡上域0.7付近までは俵型で、それよりも沖側は遡上域沖端に近づくほど急激に減少している。この違いは短周期成分の影響と考えられる。

次に砂の連続式を用いて空隙無しの岸沖漂砂量 $q[\text{cm}^3/\text{cm}/\text{s}]$ を求め、さらに無次元漂砂量の5波平均 ϕ_{exp} を式 (1) を用いて求めた (Fredsoeら, 1992)。

$$\phi = \frac{q}{\sqrt{(s-1)gD_{50}^3}} \dots\dots\dots (1)$$

式 (1) 中の s は比重、 g は重力加速度を表す。今回は $s=2.65$ とした。結果を図-10 (a)~(c) に示す。uprush/downrush時の遡上域内における実測値 ϕ_{exp} は、遡上域沖端で最大値を取る。 ϕ_{exp} の形はw0.7がほぼ直線的に増加し、w3.5が正規分布の分布をしている。w (0.7+3.5)

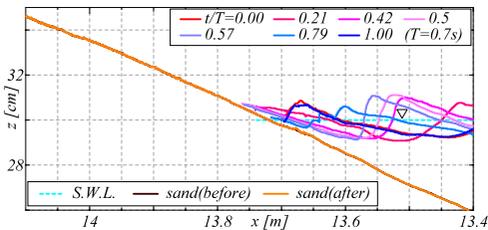


図-5 (a) w0.7の水面形 (一波分)

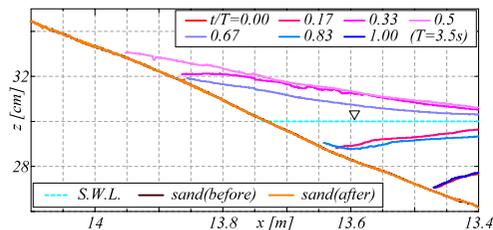


図-5 (b) w3.5の水面形 (一波分)

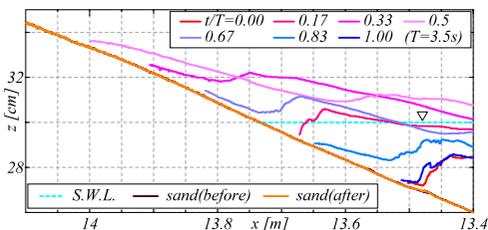


図-5 (c) w (0.7+3.5) の水面形 (一波分)

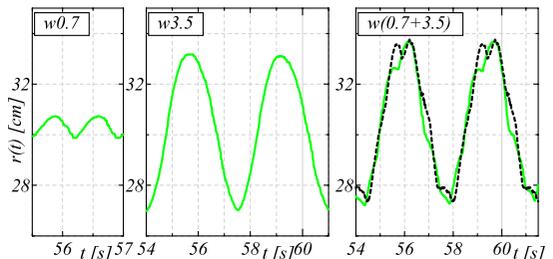


図-6 各ケースの遡上波形 (破線は単純合成した場合)

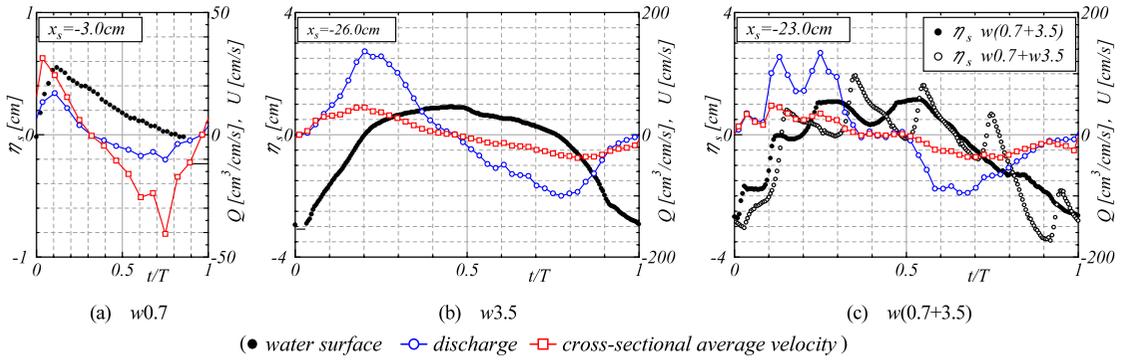


図-7 遡上域沖端の水位と断面平均流速

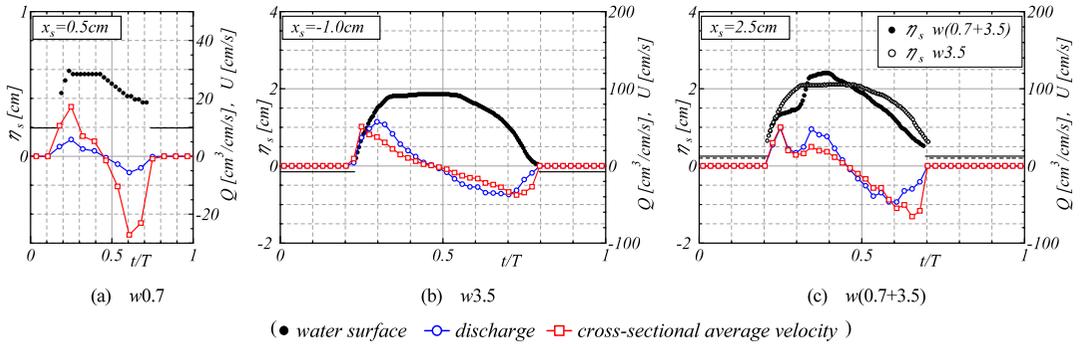


図-8 遡上域中央点の水位と断面平均流速

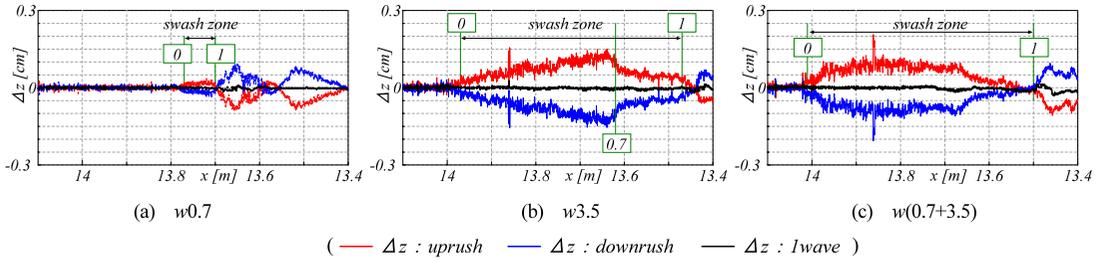


図-9 地形変化量

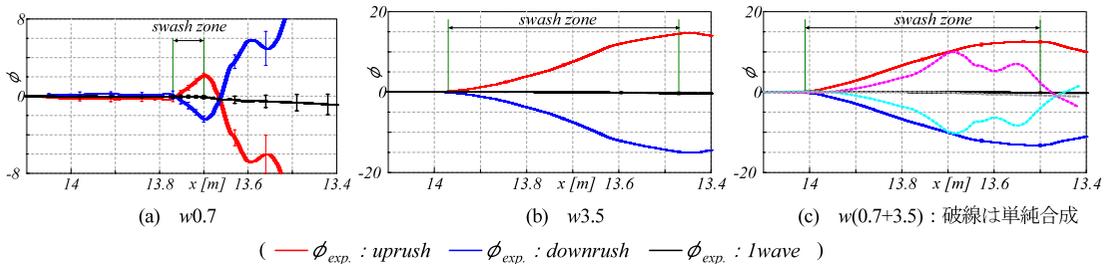


図-10 5平均波無次元漂砂量

は中央部分に膨らみのある形をしている。そして、1波当たりの漂砂量は微小ながら侵食傾向を示したが、誤差の範囲とも考えられる。最後に遡上域内の ϕ_{exp} は $w0.7+w3.5 \neq w(0.7+3.5)$ となった。

6. 遡上域における掃流力と漂砂量の関係

無次元掃流力 (Shields数 θ) と無次元漂砂量の関係について検討した。 θ は式 (2) を用いて求め、無次元漂砂

量 ϕ_{model} は式 (3) に示す Meyer-Peter・Muller の掃流砂式 (Fredsoeら, 1992) を model として採用し, 時間で積分し求めた. 式 (2) 中の $-2/3\sin\beta$ は斜面勾配の影響を考慮したものである.

$$\theta(x,t) = \frac{1}{2} \frac{f_w U(x,t) U(x,t)}{(s-1)gD_{s0}} - \frac{2}{3} \sin\beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi(x,t) = 8(\theta(x,t) - \theta_c)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (2), (3) 中の f_w は摩擦係数, θ_c は限界 Shields 数を表す. 例として $w3.5$ の断面平均流速 U から θ を求めた結果を図-11 に示す. なお, 限界 Shields 数 $\theta_c = 0$ した. 摩擦係数 f_w は Moody 図表 (例えば, 日野, 1983) から完全粗面状態で d は遡上域沖端の平均水深, 相対粗度 $k_s = 0.018\text{cm}$ として求めた. f_w は $w0.7$ で 0.061 , $w3.5$ で 0.033 , $w(0.7+3.5)$ で 0.032 とした. 遡上域内の相対位置 $0.25, 0.5, 0.75, 1$ の地点における実測値 ϕ_{exp} と理論値 ϕ_{model} の比較を図-12 に示す. ϕ_{exp} は uprush 時はばらつきもなく式 (2) の係数を約 5 倍するとより一致を示す. downrush 時はばらつきが大きく全体的に uprush 時に比べて小さい. 細かく見ると戻りの流速が大きい割には漂砂量が特に少ないケースが $w0.7$ 及び $w(0.7+3.5)$ で見られた. この理由は downrush 時は水深が浅いため, 流速が大

きくても流量が少なく漂砂量が少ないためと考えられる (図-7 参照).

ϕ_{exp} と ϕ_{model} が一致しない理由はモデルが適切でない事と解析の誤差が考えられる. 実験では掃流砂だけでなく浮遊砂もあった. また, 定常モデルを非定常現象に適用したことの誤差や移動床の相似則の違いも考えられる. 解析の誤差としては, 断面画像解析において水面および砂面の識別精度が十分でなく, 特に汀線付近及び碎波時に水面を捉えきれないため, 断面平均流速 U も正確に評価出来ていない. 加えて摩擦係数 f_w の決め方にも問題がある事が考えられる.

7. 結論

本研究は, 短周期波, 長周期波および長・短周期合成波を用いた実験を行い, 波の特性および遡上域における漂砂量について調べ, 以下に示す結論を得た.

- ① 一樣水深部においては, 短周期波は反射率が 0.07 で進行波であり, 長周期波は反射率が 0.88 で重複波であった. 今回のケースでは, 長・短周期合成波は短周期成分の反射がほとんどなく, 短周期波と長周期波を重ね合わせた波といえるものになった.
- ② 斜面上においては, 水位が浅くなると短周期成分に周期変調が顕著に現れることだけでなく, 遡上域では短周期波が長周期波に乗って進行, 碎波し, 短周期波と長周期波の単純な重ね合わせは成立しない.
- ③ 遡上域における漂砂は uprush 時に岸向き, downrush 時に冲向きとなる事が確認された. 量としては uprush 時には Shields 数の $3/2$ 乗に比例する形になるが, downrush 時は同じ傾向はあるものの水位の影響などでばらついた.

謝辞: 画像解析に際して, アルファード株式会社 の西受由裕氏が作成した断面画像解析ソフトを使用させて頂いた. ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

内野敬太・山口隼人・関克己・水口 優 (2004): 大規模侵食時における汀線付近の漂砂量・地形変化・波浪特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 446-450.
 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良: 荒天時のバーム地形の侵食—長周期波に注目した現地観測—, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
 砂村継夫 (1984): Swash zone を含む碎波帯の岸沖漂砂量に関する研究, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 316-320.
 日野幹夫 (1983): 明解水理学, 丸善株式会社, p. 180.
 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 31-35.
 Fredsoe, J., R. Deigaard (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport, World Scientific, pp. 206-214.

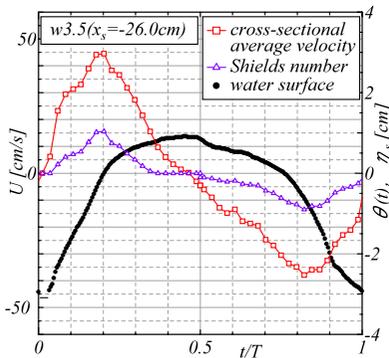


図-11 断面平均流速 U と Shields 数 θ , 水位 η_s (相対位置 1.0)

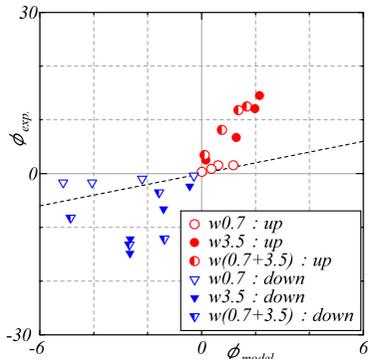


図-12 uprush, downrush 時における漂砂量の比較