

# 海浜の平衡断面の相違による底質の 移動速度に関する研究

A STUDY ON THE DEPENDENCE OF THE MIGRATION RATE OF BOTTOM  
SEDIMENT ON DIFFERENT EQUILIBRIUM BEACH PROFILES

鷺見浩一<sup>1</sup>・野崎猛盛<sup>2</sup>・高江俊之<sup>2</sup>

Hirokazu SUMI, Takemori NOZAKI and Toshiyuki TAKAE

<sup>1</sup>正会員 工学(博士) 金沢工業大学准教授 環境・建築学部環境土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡  
野々市町扇が丘7-1)

<sup>2</sup>学生員 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (同上)

The relation between the migration rate of sand and water particle velocities in the two phase flow of a solid-liquid involving suspended sediments in the surf zone has not been satisfactorily understood yet. This study presents the effects of the different equilibrium beach profiles on the temporal and spatial distribution of migration rate of suspended sediments in the two phase flow of a solid-liquid, where sediments at the flow bottom are suspended under breaking waves. As a result, we have found that the migration rate of sediments averaged over a wave period between Type I and Type II of the beach profiles change. Type I has showed larger flow velocities than Type II in the entire region, particularly under wave crests. The migration direction of sand particles in Type I is the same as that in Type II. Specially, the migration direction is shoreward near the wave crests and seaward near the wave troughs in both types.

**Key Words :** *Suspended sediment, Equilibrium beach profile, Wave Breaking*

## 1. はじめに

砕波時には波内部で発生する渦と乱れによって、底質が巻き上げられる。砕波による底質の巻き上げ量は、掃流漂砂量やシートフロー漂砂量と比較すると多量である。したがって、砕波に伴う底質の浮遊現象は、海浜の安定化を支配する重要な因子である。砕波帯内での底質の浮遊現象を評価するにあたっては、進行波の砕波状況に応じて“海底地形のどの地点で砂が浮遊するのか?”、“浮遊した砂は波内部の流れによってどのように移流・拡散・沈降するのか?”などの点に留意する必要がある。このような観点から、砕波帯での底質の浮遊現象については幾つかの研究が行われている。渡部ら<sup>1)</sup>は砕波乱流下において3D-PTVを使用して、浮遊した底質の3次元粒子速度の高精度な計測を行い、底床粒子の移動過程についての知見を得ている。また、著者ら<sup>2)</sup>はバー型海底地形周辺において、砕波により巻き上げられた砂と水が混在する固液2相流での浮遊砂の移動速度をPIVにより検討をしている。しかし、著者ら<sup>2)</sup>の研究は砕波形式や海浜の平衡断面の相違による浮遊砂の移動過程を検討したものではない。したがって、海浜の平衡断面の相違による固液2相流での浮遊砂の移動機構については、研究が充分でなく、未解明な点が多いのが現状である。

本研究は、海浜の平衡断面が異なる場合に、砕波により浮遊した砂と水が共存する固液2相流において、浮遊砂の移動速度を検討するものである。

## 2. 可視化水理実験

本研究では、水中に砂粒子が混在する固液2相流において、砕波により舞い上がった砂が移流・拡散・沈降する速度を検討するために可視化水理実験を行った。実験は、図-1に示す金沢工業大学環境土木工学科の片面ガラス張りの2次元造波水槽(長さ18.0 m, 幅0.7 m, 高さ1.0 m)を用いて行った。水深  $h=40$  cm の水槽内に、外枠をアクリル板で作成した一様海底勾配(勾配  $\tan\beta=1/10$ , 長さ4.8 m, 幅0.7 m, 高さ0.48 m)を設置し、海底勾配の内部には中央粒径  $d_{50}=0.3$  mm のケイ砂(中央粒径  $d_{50}=0.3$  mm)を充填した。実験波は波高  $H_f=5.0$  cm, 周期  $T=1.0$  s と  $H_f=8.0$  cm,  $T=1.0$  s の2種類の規則波とした。砕波形式は、それぞれ Spilling 砕波と Plunging 砕波の中間の性質を持つ Spilling-Plunging 砕波(以下に、S-P 砕波とする)と Plunging 砕波である。侵食型と中間型、および堆積型の3タイプに海浜の平衡断面形状を分類する無次元係数  $C$  は、S-P 砕波で中間型(タイプII)の  $C=5.7$ , Plunging 砕波で侵食型(タ

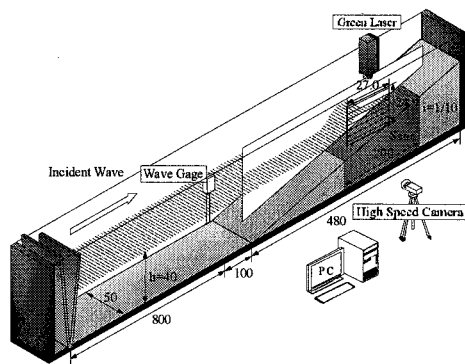


図-1 実験水槽(単位:cm)

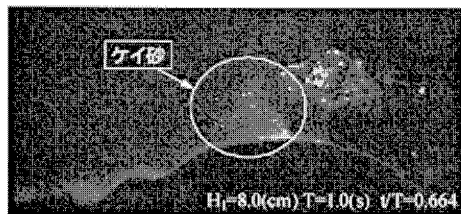


図-2 ケイ砂の可視化画像

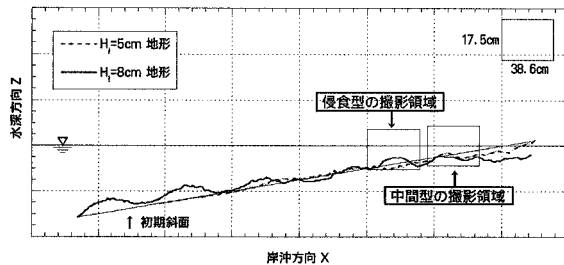
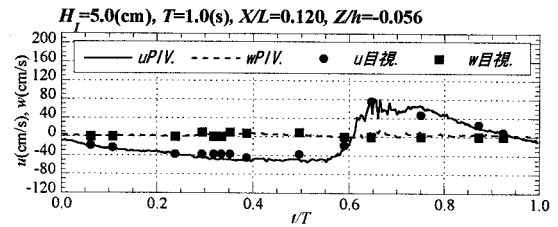
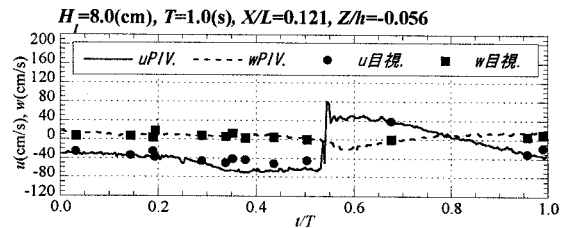


図-3 撮影領域

イブ I)の  $C=9.1$  である。ケイ砂で作成した一様勾配の移動床斜面に、前述した実験波を 24 時間造波し、地形が平衡断面に漸近した後に PIV 装置を用いて浮遊した砂の移動速度を計測した。水路上方からレーザースリット光(カトウ光研: Green Laser Sheet 50mG)を水槽内に向けて照射し、砂粒子を可視化させ、水路側方に設置した高速度カメラ(デジモ: VCC-H1000B)により、図-2 に示すような可視化画像を撮影した。高速度カメラの撮影速度は 500 fps であり、分解能は縦 232 pixel×横 512 pixel である。時間間隔  $\Delta t=3/500$  s の 2 時刻の画像から、検査窓サイズを 16 pixel×16 pixel、検査窓の重複度を 50 %として、可視化粒子の濃淡画像に相互相関法を適用する PIV 装置(ディテクト: DIPFLOW)により、砂粒子の移動速度を求めた。高速度カメラの撮影領域は、図-3 に示すように海底勾配上の碎波点周辺に縦 17.5 cm、横 38.6 cm の大きさで設定した。なお、PIV により測定した浮遊砂の移動速度の妥当性の検証は、時間間隔  $\Delta t=3/250$  s の 2 枚の画像から、目視により砂の移動距離を計測し、その距離を



(a) 中間型



(b) 侵食型

図-4 PIVと目視による砂の移動速度の比較

時間間隔で除して求めた流速(以下に、目視による砂の移動速度とする)との比較により行った。

### 3. PIV による砂の移動速度の検証

PIV により求めた浮遊砂の移動速度の信頼性を検討する必要がある。そこで、第 2 章で説明した目視による砂の移動速度と PIV により得た砂の移動速度を比較することで、PIV による砂の移動速度の妥当性を検証した。図-4(a),(b)に中間型と侵食型の PIV による砂の移動速度と目視による砂の移動速度の比較結果を示す。なお、図中の実線と破線は、PIV による砂の移動速度の水平成分  $u$  と鉛直成分  $w$  である。また、黒丸と黒四角は、目視による砂の移動速度の  $u$  と  $w$  である。 $u$  は岸方向の流れを、 $w$  は上方向の流れを正としている。同図より、 $w$  は中間型と侵食型の両平横断面において、PIV と目視による砂の移動速度がよく一致していることが判る。 $u$  は砂が戻り流れと同方向に移動し、負となっている場合は、両平衡断面において、ほぼ一致している。また、入射波が碎波点に接近し、 $u$  が正となり、砂が比較的速い速度で岸方向に移動する場合も PIV と目視による砂の移動速度は両平衡断面において、ほぼ一致している。しかし、 $u$  が正の場合に、目視による砂の移動速度の計測プロット点が少ないことに気付く。これは、砂が高速で移動するために時間間隔  $\Delta t=0.012$  s の 2 枚の可視化画像から同一な砂粒群の分布を、目視にて見つけだすことが困難であったことに起因している。このように、 $u$  が正となる場合の目視による砂の移動速度のデータ数が小数であるものの、波 1 周期にわたって PIV と目視による砂の移動速度は一致していることが判る。これにより、PIV による砂の移動速度の妥当性が確認できたといえる。

#### 4. 浮遊砂の移動過程

海浜の平衡断面が異なる場合の浮遊砂の移動過程について検討する。高速度カメラにより得た中間型と侵食型の浮遊砂の移動過程を撮影した画像を、図-5(a)～(f)と図-6(a)～(f)にそれぞれ示す。なお、時刻  $t$  は、両平衡断面において碎波時の時刻を  $t/T=0.544$  とし、この時刻よりも約半周期前の時刻を基準としている。図中の白色の矢印は、第2章で説明した目視による砂の水平方向の移動速度  $u$  と鉛直方向の移動速度  $w$  の合成流速を重力加速度  $g$  と

入射波高  $H_I$  の積の平方根で無次元化したパラメータの大きさと方向を示している。矢印の周辺に表示してある数値は、この速度の無次元パラメータの値である。計測対象波は造波機の始動後、設定波高が観測されてから第3波目の波とした。

図-5(a),(b)と図-6(a),(b)に示すように、非碎波時の波内部で沖方向の流れが発生している時刻では、先行波により浮遊した砂は、両平衡断面において沖方向の流れと同方向の沖側斜め下方向に移動している。浮遊砂の移動速度は、中間型よりも侵食型が大きくなっている。計測対象波が碎波点に接近する図-5(c)では、岸向きの流れが強まり、 $0.03 \leq X/L \leq 0.05$  の波前脚部下では、沖方向に移流す

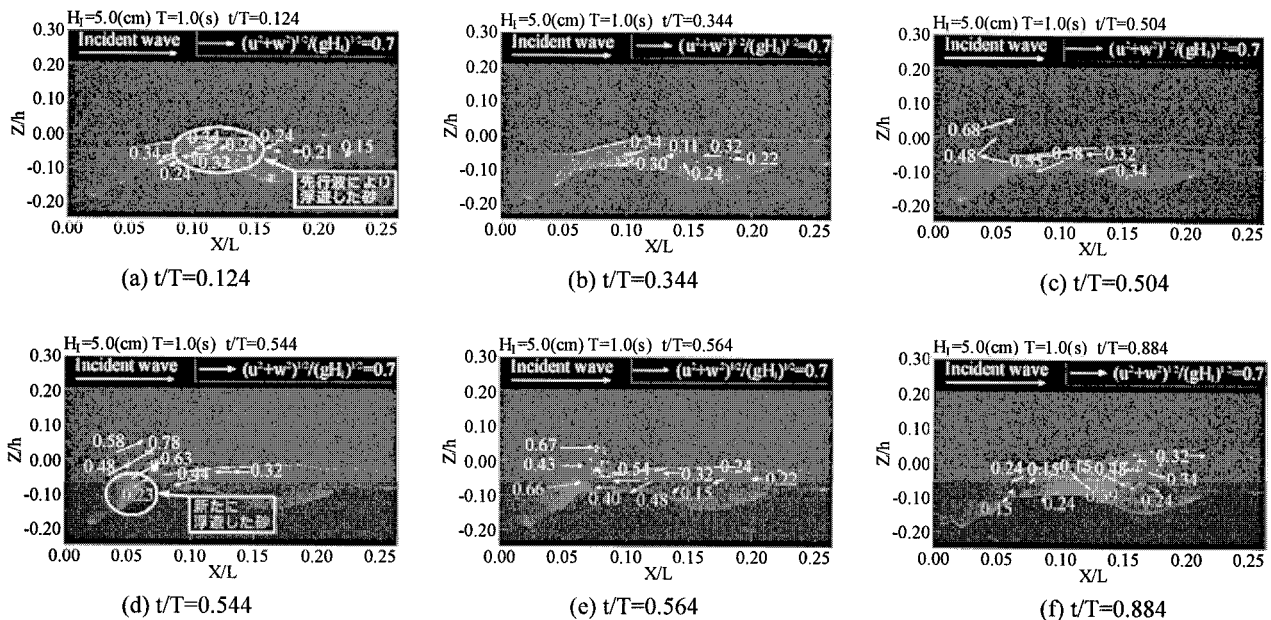


図-5 中間型の浮遊砂の移動過程

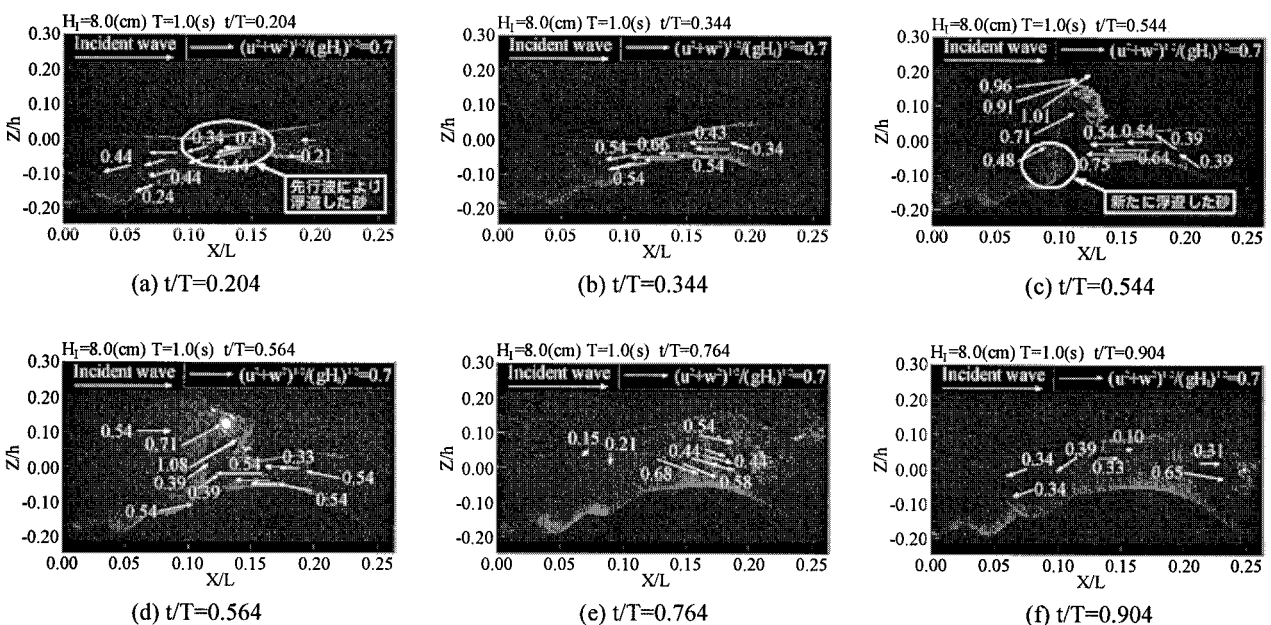


図-6 侵食型の浮遊砂の移動過程

る砂と岸方向に移流する砂が合流している。また、 $0.08 \leq X/L \leq 0.15$  のバー周辺では沖方向に砂が移動し、波峰前面では、波の進行方向と同方向に移動する砂が確認できる。この波峰前面の浮遊砂の移動速度は、図-5(a),(b)の岸方向に移流する砂の速度と比較すると大きくなっている。中間型と侵食型の目視による砕波時の砂の移動速度を、図-5(d)と図-6(c)に示す。両平衡断面において、波峰前面で最大速度をもつ砂が移動していることが判る。中間型の  $X/L \cong 0.075$ 、侵食型の  $X/L \cong 0.13$  の波前脚部下においては、戻り流れによって沖方向に移動していた砂と入射波の進行に伴って岸方向に移流していた砂が合流している。また、中間型の  $X/L \cong 0.05$  と侵食型の  $X/L \cong 0.10$  のバー沖側上端部では、砕波により新たに砂が浮遊することが判る。この底質の浮遊には、海底地形による水粒子速度の流向の変化が寄与していると考えられる。すなわち、非砕波時にバー沖側域で発生していた沖側斜め下方向の流れは、入射波のバー接近に伴って、流向を岸側斜め上方向に変化させられる。この岸側斜め上方向の流れが、バー沖側斜面で卓越することによって、バー沖側上端部で新たに砂が浮遊すると推察できる。波峰前面に気泡が混入している時刻の図-5(e)と図-6(d)では、両平衡断面において、バー沖側上端部で新たに浮遊した砂が、その浮遊領域を拡大していることが判る。さらに、波が岸側に伝播した時刻の図-5(f)では、バー岸側上部の  $0.12 \leq X/L \leq 0.15$  で砕波による気泡連行を伴う波面崩壊が生じる。この波面崩壊による水塊の乱れと気泡がバー岸側上部に接触することにより、同領域の砂は約 40 cm/s で浮遊する。侵食型の砕波後の砂の移動速度を図-6(f)に示す。同図から、砕波後、浮遊砂は海底へ向けて着底することが判る。このように図-5 と図-6 から、両平衡断面において、戻り流れと同方向の沖側に移動していた砂が、入射波の砕波

点接近に伴って移動方向を岸側に変化させ、波前脚部がバー周辺に到達した砕波時に、バー沖側上端部で、新たに砂が浮遊することが明かとなった。そして、バー沖側上端部から新たに浮遊した砂は、波峰前面へ向けて浮遊領域を拡大し、砕波後、浮遊砂は海底へ着底することが確認できた。

## 5. 固液 2 相流での浮遊砂の移動速度

砕波により浮遊した砂の移動速度について考究する。図-7 と図-8 に、それぞれ中間型と侵食型の PIV による砂の移動速度を示す。既に第 3 章において、PIV による砂の移動速度の妥当性を検討しているが、図-7 と図-8 に図示した中間型と侵食型の PIV の砂の移動速度を、目視による中間型と侵食型の砂の移動速度である図-5 と図-6 と、再度、照らし合わせて検討すると、PIV による砂の移動速度ベクトルは目視による砂の移動速度とほぼ一致していることが判る。図-7 と図-8 の時刻  $t$  の基準と速度の無次元パラメータは、図-5 と図-6 と同様に設定してある。非砕波時の図-7(a),(b)と図-8(a),(b)では、先行波により浮遊した砂は、波内部の戻り流れと同方向の沖側に中間型で 15~25 cm/s、侵食型で 23~40 cm/s で移流する。砕波時の砂の移動速度の図-7(d)と図-8(c)を比較すると、波峰前面で砂の移動速度が大きくなる傾向は、両平衡断面で一致しているが、その大きさは異なり、侵食型が中間型よりも大きくなっている。図-8(c)の  $0.08 \leq X/L \leq 0.1$  のバー沖側上端部周辺では、海底地形の影響を受けて砂が岸側斜め上方向に移流している。同領域は図-6(c)で示したように、砕波により新たに砂が浮遊した地点である。砂が浮遊するときの速度は、中間型で約 16 cm/s、侵食型で約 27 cm/s である。また、新たな

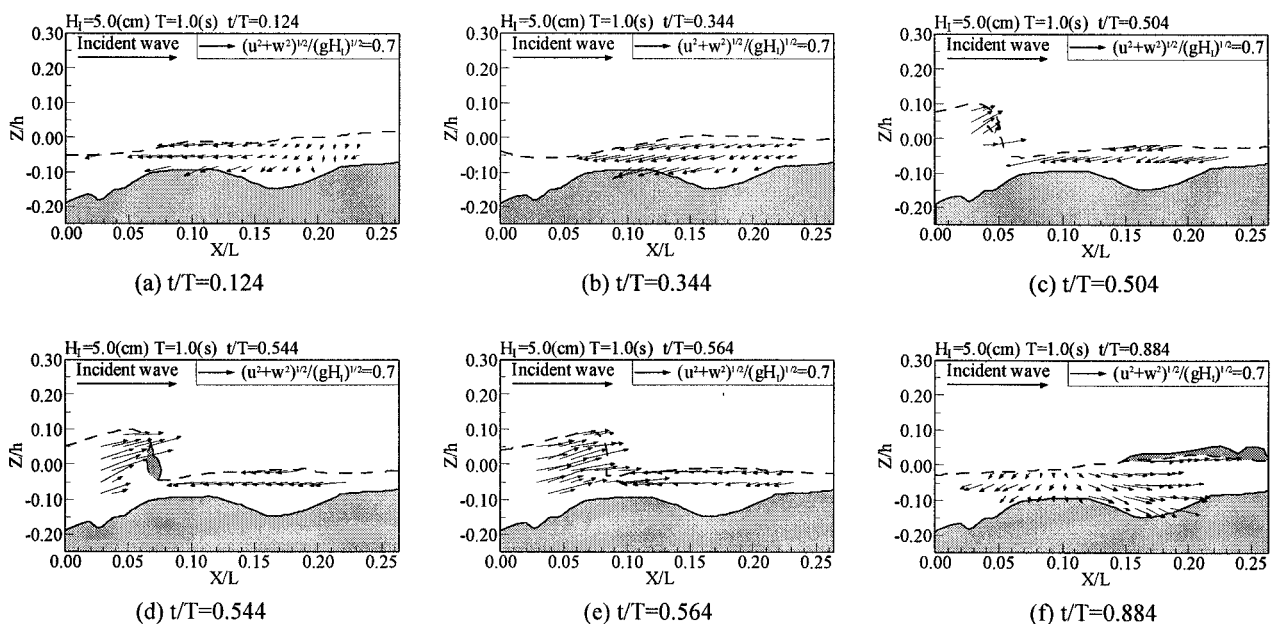


図-7 中間型の浮遊砂の移動速度

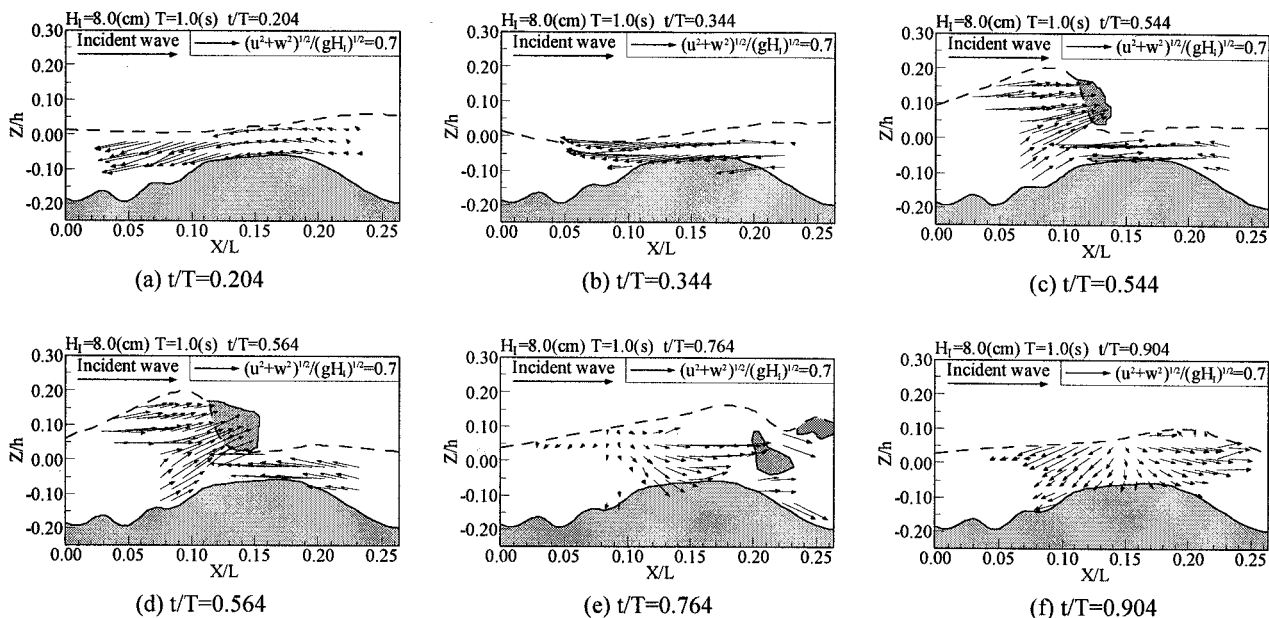


図-8 侵食型の浮遊砂の移動速度

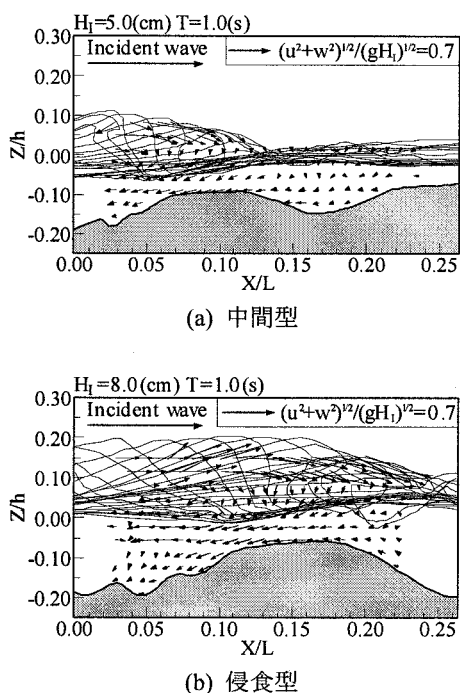


図-9 1周期平均した浮遊砂の移動速度

砂の浮遊には、バー沖側斜面近傍で発生する岸向き斜め上方向の流れが海底面から剥離することによって生じる渦も寄与していると考えられる。砕波により浮遊した砂は、図-7(e)と図-8(d)に示すように浮遊直後とほぼ同じ速度で移流・拡散し、先行波により浮遊した砂と合一する。その後、波峰前面へ向けて浮遊領域を拡大し、浮遊砂雲を形成する。砕波後、波頂部後方の砂は、図-7(f)と図-8(f)に示すように中間型で約 17 cm/s、侵食型で約 24 cm/s で海底へ沈降する。

## 6. 平衡断面の相違による浮遊砂の移動速度

平衡断面の相違による浮遊砂の移動速度特性について検討する。図-9(a),(b)に、中間型と侵食型の 1 周期平均した浮遊砂の移動速度を示す。同図より砂の移動方向は、両平衡断面において波頂部周辺では岸方向、波谷レベル以深では沖方向に移動することが判明した。特に海底面近傍での 1 周期平均した砂の移動方向は、海底面に沿うような分布となる。

## 7. 結語

本研究では、海浜の平衡断面が異なる場合に、砕波によって浮遊した砂の移動速度の時空間分布を検討した。

以下に、本研究で得られた主要な結論を示す。

- (1) 波 1 周期間での目視による砂の移動速度ベクトルと PIV による砂の移動速度ベクトルは、中間型と侵食型の両平衡断面でほぼ一致した。
- (2) 浮遊砂の移動速度の時空間分布特性が明らかとなった。非砕波時では先行波により浮遊した砂は戻り流れと同方向に移流し、砕波時では両平衡断面においてバー沖側上端部で新たに砂が浮遊する。砕波後、浮遊砂は海底へ向けて沈降する。

## 参考文献

- 1) 渡部靖憲・秀島賢保・佐伯浩 (2003) : 砕波乱流下の底質粒子の三次元的挙動及び巻き上げに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 446-450.
- 2) 鷺見浩一・兼藤剛・植松達也 (2006) : 固液 2 相流での砕波に伴う浮遊砂の移動速度に関する研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 81-85.