

海浜の平衡断面の相違による浮遊砂の移動速度と水粒子速度の関係

A Study on the Dependence of the Migration Rate of Bottom Sediment on Different Equilibrium Beach Profiles

鷺見浩一¹・高江俊之²・野崎猛盛²

Hirokazu SUMI, Toshiyuki TAKAE and Takemori NOZAKI

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.

1. はじめに

汀線付近で波が砕波するとき、波内部には水平渦や斜降渦が生成され、これらの渦や乱れによって底質は浮遊する。砕波による浮遊漂砂量は、掃流漂砂量よりも多量であり、砕波帯内で浮遊した砂は流れによって移動し、渦や乱れが弱まった海域に着底する。したがって、砕波に伴う砂の浮遊現象は海底地形の変化に影響し、その砂の挙動を把握することは、海浜の安定化を考慮するにあたって重要となる。砕波に伴う砂の移動現象を評価するには、どのように砂が浮遊するのかを検討し、浮遊した砂に波内部の流れが、どのように影響するのかを考察する必要がある。流体中に固体粒子が存在する場合の粒子の移動速度については、川西・塩崎 (2005) が ADV を用いた実験により、Trajectory biasing が乱流中の固体粒子の平均沈降速度を増加させるメカニズムであることを示唆している。また、著者ら (2006) が PIV を用いた実験により、砕波により浮遊した砂の移動速度について考察している。しかし、著者ら (2006) の研究は、海浜の平衡断面の相違による浮遊砂の移動速度を究明したものではない。加えて、オイラー的手法により砂の移動速度の妥当性も検討していない。したがって、海浜の平衡断面が異なる場合の浮遊砂の移動速度については、議論が充分ではなく、不明な点が山積している。

本研究では、海浜の平衡断面が異なる場合に、砕波により浮遊した砂が、波内部の流れによって移流・拡散・沈降する移動過程とその移動速度について究明する。さらに、波内部の水粒子速度と砂の移動速度を関連づけて検討し、砕波に伴う浮遊砂の移動速度特性を考究する。

2. 可視化水理実験

本研究では固液二相流において、海浜の平衡断面の相違による砂の移動速度を考究する実験Ⅰと水粒子速度を考究する実験Ⅱを行った。実験Ⅰと実験Ⅱともに、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。水深は $h=40$ cm とし、水槽内には外枠をアクリル板で作成した一様海底勾配 ($\tan \beta=1/10$, 長さ 4.8 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.48 m) を設置した。実験波は波高 $H_1=5.0$ cm, 周期 $T=1.0$ s と $H_1=8.0$ 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。堀川ら (1975) による無次

$$H_0/L_0 = C (\tan \beta)^{-0.27} (d/L_0)^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

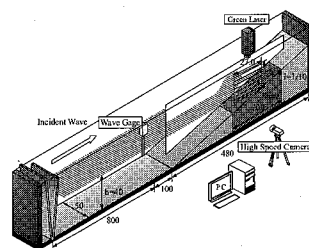
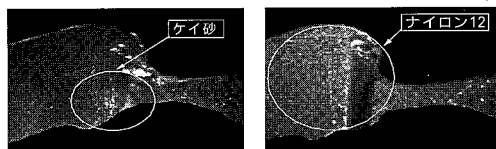


図-1 実験水槽 (単位: cm)



(a) ケイ砂 (b) ナイロン 12

図-2 可視化画像

1 正 会 員 博(工) 金沢工業大学准教授 環境・建築学部 環境土木工学科
2 学生会員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学科専攻

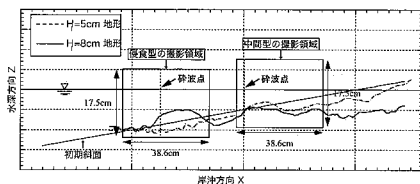


図-3 撮影領域

元係数 C は、入射波諸元から沖波波形勾配 H_0/L_0 を算定し、土粒子粒径 $d=0.3\text{ mm}$ とすると、式 (1) より S-P 砕波で中間型 (タイプ II) の $C=5.7$ 、Plunging 砕波で侵食型 (タイプ I) の $C=9.1$ となる。また、 $d=0.3\text{ mm}$ のケイ砂で作成した一様勾配の移動床斜面に、実験波を 24 時間造波し、地形が平衡断面に漸近した後実験 I と II を実施した。

(1) 砂の移動速度を考究する実験 I

実験 I では、水路上方からレーザースリット光 (カトウ光研: Green Laser Sheet 50 mG) を水槽内に向けて照射し、砕波点周辺でのケイ砂の浮遊状況を可視化させ、高速カメラ (デジモ: VCC-H1000B) により、図-2(a) に示す画像を撮影した。高速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 $\Delta t=3/500\text{ s}$ の 2 時刻の可視化粒子の濃淡画像に、相互相関法による PIV 法 (ディテクト: DIPFLOW) を適用して、砂粒子の移動速度を求めた。なお、検査窓サイズは 16 pixel × 16 pixel、検査窓の重複度は 50% とした。高速カメラの撮影領域は、図-3 に示すように砕波点周辺に縦 17.5 cm、横 38.6 cm の大きさで設定した。PIV による砂の移動速度の妥当性の検証は、目視による砂の移動速度との比較により行った。目視による砂の移動速度とは、 $\Delta t=3/250\text{ s}$ の 2 時刻の可視化画像において、目視により同一と判別できる砂粒子群を特定し、その砂粒子群の移動距離を 2 時刻の画像から画像処理ソフトにより計測し、計測した移動距離を時間間隔で除して求めた砂の移動速度である。

(2) 固液二相流における水粒子速度を考究する実験 II

実験 II では固液二相流での水粒子速度を、実験 I と同じ PIV 装置を用いて計測した。PIV のトレーサは水中に投入した粒径 $d=12\text{ }\mu\text{m}$ のナイロン 12 とした。この実験では、固液二相流における水粒子速度を計測するので、可視化画像に砂が撮影されないように、ケイ砂を黒色に塗装し、ナイロン 12 のみが撮影されるように工夫した。その可視化画像を図-2(b) に示す。また、実験波や撮影領域などの実験条件は、すべて実験 I と同様にした。

3. PIV による砂の移動速度の妥当性

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、前章で説明した目視による砂

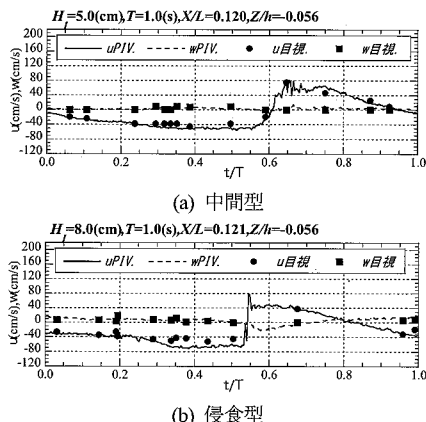


図-4 PIV と目視による砂の移動速度の比較

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衡断面において、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 は砂が沖方向に移動し、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、入射波が砕波点に接近し、 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 $\Delta t=0.012\text{ s}$ の 2 枚の可視化画像から同一な砂粒子群の分布を、目視にて判別するの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. 砕波帯内での砂の移動過程

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 と図-6 にそれぞれ示す。なお、時刻 t は、中間型の砕波時の時刻を $t/T=0.544$ 、侵食型の砕波時の時刻を $t/T=0.564$ としてある。図中の白色の矢印は、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

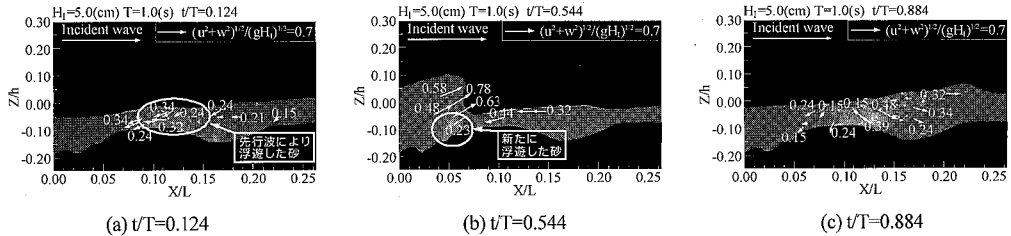


図-5 中間型の目視による浮遊砂の移動過程と移動速度

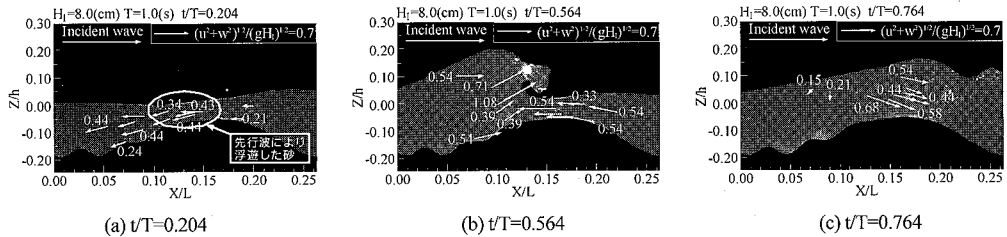


図-6 侵食型の目視による浮遊砂の移動過程と移動速度

力加速度 g と入射波高 H_1 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)と図-6(a)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流速成分と同方向の沖側斜め下方向に移動している。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。中間型と侵食型の目視による碎波時の砂の移動速度を、図-5(b)と図-6(b)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 $X/L \approx 0.075$ 、侵食型の $X/L \approx 0.13$ の波前脚部下においては、沖方向流速成分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一している。また、中間型の $X/L \approx 0.05$ と侵食型の $X/L \approx 0.10$ のバー沖側上端部では、碎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、非碎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。碎波直後の波峰前面に気泡が混入している時刻では、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た。波が岸側に伝播した時刻の図-5(c)では、バー沖側上部の $0.12 \leq X/L \leq 0.15$ で碎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。侵食型の碎波後の砂の移動速度を図-6(c)に示す。同図から、碎波後、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、沖方向流速成分と同方向の沖側に移動していた砂が、入射波の碎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碎波時に、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、碎波後、海底へ着底することが確認できた。

5. 固液二相流での浮遊砂の移動速度

PIV により得た浮遊砂の移動速度について考究する。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。

非碎波時の図-7(a)と図-8(a)では、目視による砂の移動方向と同様に、両平衡断面において先行波により浮遊した砂が沖方向流速成分により、沖側斜め下方向に移動していることが判る。図-7(b)と図-8(b)は、それぞれ中間型と侵食型の碎波時の砂の移動速度を示している。砂は波峰中央部から波峰前面へ向けて、斜め上方向に中間型で約 40 ~ 50 cm/s、侵食型で約 45 ~ 55 cm/s の速い速度で移動している。また、碎波直後にはバー沖側上端部で浮遊した砂が、波内部の流れにより移流して浮遊領域を拡大し、浮遊砂雲を形成するのが確認できた。

図-7(c)と図-8(c)に示す碎波後の砂の移動ベクトルは、波の岸側への伝播により、水表面付近の浮遊砂が海底へ向けて沈降する過程であることが判る。

6. 固液二相流での水粒子速度

固液二相流における波内部の水粒子速度の空間的な分布特性について検討する。図-9と図-10は、それぞれ実験Ⅱによる固液二相流での中間型と侵食型の水粒子速度を図示したものである。

図-9(a)と図-10(a)から両平衡断面において、計測対象波が碎波前に到達する前の時刻では、バー周辺で沖方向の流れが発生している。碎波時の水粒子速度を示す

図-9(b)と図-10(b)では、波峰前面において最大流速が発生し、波前脚部が到達したバー上部で沖方向と岸方向の流れが合流している。侵食型の図-8(b)においても沖方向と岸方向に移流する砂がバー上部で合流することが確認できる。また、中間型の $X/L \approx 0.05$ と侵食型の $X/L \approx 0.09$ の海底面近傍の流れは、バー型海底地形の影響を受けて、流向が岸側斜め上方向となっていることが判る。この岸側斜め上方向の流れが影響して、図-5(b)と図-6(b)で確認したバー沖側上端部からの新たな砂の浮遊が発生したと考えられる。碎波後の図-9(c)と図-10(c)では、両平衡断面で碎波時よりも速度が小さくなり、砂粒子の海底への着底を促進させる下方向の流れが発生し

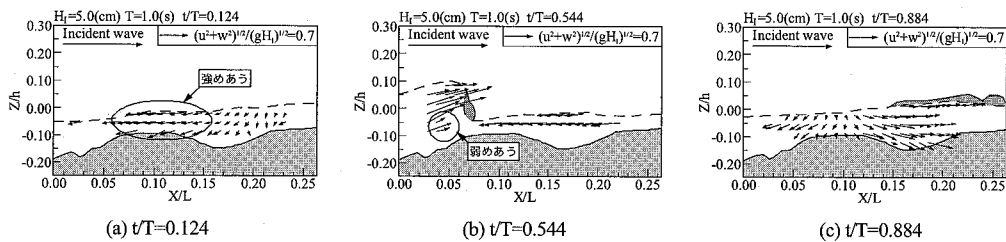


図-7 中間型の砂の移動速度

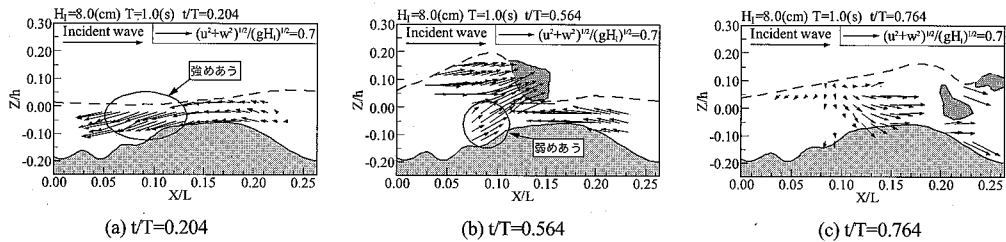


図-8 侵食型の砂の移動速度

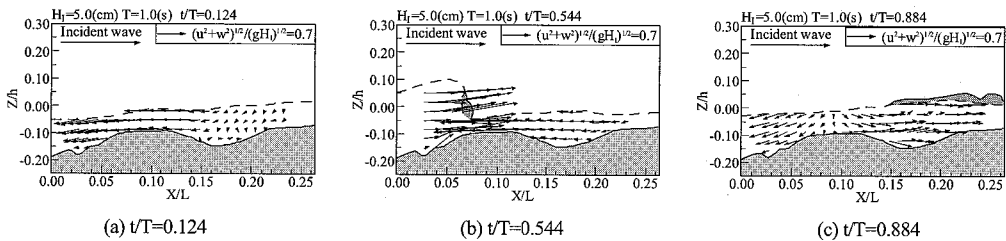


図-9 中間型の固液二相流で水粒子速度

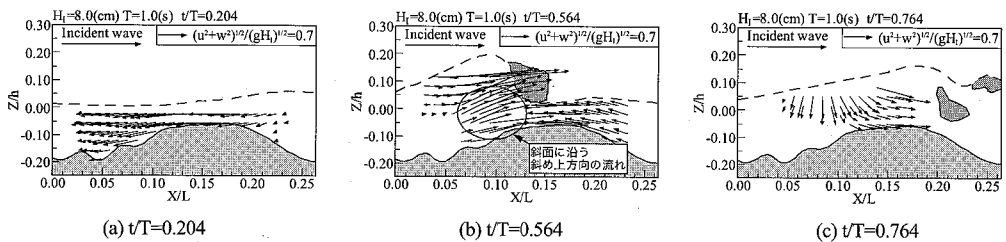


図-10 侵食型の固液二相流で水粒子速度

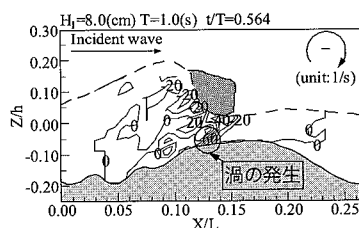


図-11 侵食型の渦度の空間分布

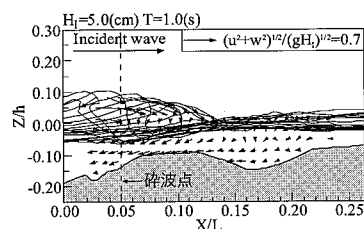
ている。

図-5～図-10を関連づけて考察する。先行波により浮遊した砂は、中間型と侵食型の両平衡断面において沖方向の流れと同方向に移流し、その速度は中間型で約31 cm/s、侵食型で約50 cm/sである。また、図-7(a)と図-8(a)に示すように両平衡断面のバー周辺の $0.05 \leq X/L \leq 0.15$ では、砂は水粒子よりも大きい速度で沖側の斜め下方向に移流している。そして、波が伝播し岸向きの流れが強まると、砂が水粒子速度よりも速く斜め下方向に移動する領域は岸方向に縮小する。その後、入射波が砕波点に接近すると、図-9(b)と図-10(b)に示すように、両平衡断面においてバー沖側斜面に沿う斜め上方向の流れが卓越し、バー沖側上部では新たに砂が中間型で約16 cm/s、侵食型で約27 cm/sの速度で浮遊する。この新たな砂の浮遊には、図-11に図示するように、バー沖側斜面に沿う流れの底面からの剥離によって生じた渦が寄与していると考えられる。さらに、波が進行すると新たに浮遊した砂は、両平衡断面において先行波により浮遊した砂と合一し、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、浮遊砂は波内部の流れと同方向に海底へ沈降する。

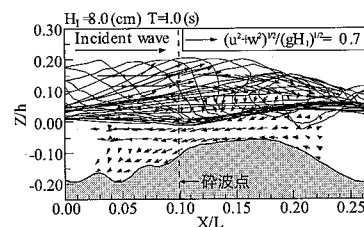
次に、砂の移動速度と波内部の速度場を関連づけて考察する。浮遊砂の移動速度は水粒子速度と比較すると、その大きさが砂の移動方向によって異なることが判明した。図-8(a)に示す侵食型の $0.05 \leq X/L \leq 0.1$ の沖方向の流れと同方向の砂の移動速度は、図-10(a)の同領域の水粒子速度と比較して大きい。これは、砂が沈降しようとする下向き流速と沖側斜め下方向の流れが強めあうためであると推察できる。図-8(b)に示す侵食型の $0.08 \leq X/L \leq 0.12$ の斜め上方向の砂の移動速度は、図-10(b)の水粒子速度と比較して小さい。これは、波動運動に伴う斜め上方向の流速と砂が沈降しようとする下向きの流速が弱めあうためであると考えられる。このような砂の移動速度と水粒子速度の関係は、中間型においても確認できた。

7. 海浜の平衡断面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-12(a)と(b)に、中間型と侵食型の1周期



(a) 中間型



(b) 侵食型

図-12 1周期平均した浮遊砂の移動速度

平均した浮遊砂の移動速度を示す。砕波点での砂は、中間型では $Z/h \geq 0.05$ 、侵食型では $Z/h \geq 0.1$ で岸方向に移動し、 $Z/h \leq -0.05$ では中間型と侵食型ともに沖方向に移動する。

8. 結 論

本研究では、砕波に伴う浮遊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。なお、固液二相流において砂に作用する力の特性や波内部の渦構造を考慮し、水粒子速度と砂の移動速度の相互関係を定量的に検討することは、今後の課題としたい。

- 1) バー沖側上部では、入射波の砕波時に新たに砂が浮遊する。この領域では、渦が生成され、浮遊した砂は波内部の流速場と同方向に浮遊領域を拡大し、浮遊砂雲を形成する。
- 2) 浮遊砂の移動速度には、波動運動に伴う流れが支配的であることが判明した。すなわち、砂の沈降方向と流れが同方向のときは、両者は互いに強めあって、砂の移動速度は水粒子速度よりも速くなる。一方、砂の沈降方向と流れが逆方向のときは、両者は互いに弱めあって、砂の移動速度は水粒子速度よりも遅くなる。

参 考 文 献

- 川西 澄・塩崎遼平(2005): 乱流境界層における固体粒子の沈降速度, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 371-375.
- 鷺見浩一・兼藤 剛・植松達也(2006): 固液二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.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩石・岡田 滋(1975): 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 329-333.