

固液 2 相流での碎波に伴う浮遊砂の移動速度に関する研究

鷲見浩一¹・兼藤 剛²・植松達也³

本研究では、碎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、浮遊砂の移動速度と水粒子速度の時空間分布を、可視化実験により究明した。さらに、波内部の速度場と砂の移動速度を関連づけて検討し、碎波に伴う浮遊砂の移動速度特性を考究した。その結果、浮遊砂の移動速度には、波内部の流れが支配的であることが明かとなった。すなわち、砂の沈降方向と波内部の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、砂の沈降方向と波内部の流れが逆方向ときは、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。また、碎波時にパー沖側上端部から、新たに底質が浮遊することを確認した。

1. はじめに

碎波により巻き上げられる底質の量は、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、海浜の安定性を確保するためには、碎波による底質の巻き上げ機構や浮遊した砂の移動速度など、底質の浮遊に関わる諸現象の実態解明が重要となる。碎波に伴う底質の浮遊現象を評価するにあたっては、波の進行状況に応じて、“海底地形のどの地点で、砂が浮遊するのか?”、“波内部の流れによって、浮遊砂はどのように移流するのか?”などの点に留意する必要がある。このような観点から、碎波帯内での底質の浮遊現象については、種々の研究が行われ、鶴崎ら(2005)が底質の巻き上げは波に依存し、その輸送は吹送流によるものが大部分であることを確認している。碎波乱流下においては、渡部ら(2003)が 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、有用な知見を得ている。また、著者ら(2005)が PIV を用いて、一様斜面に近い状態の海底から、碎波により浮遊する砂の移動速度分布を求め、 $k-\epsilon$ 乱流モデルによる波内部の流速分布との比較により、浮遊砂の移動速度と水粒子速度の関係を考察している。しかし、著者ら(2005)の研究は、固液 2 相流における砂の移動速度と水粒子速度の関係を検討したものではない。加えて、パー型海底地形の影響も考慮していない。したがって、碎波により浮遊した砂の移動過程とその速度については、研究が充分でなく、不明な点が多いのが現状である。

本研究は、パー型海底地形周辺で発生する碎波により巻き上げられた砂と水が共存する固液 2 相流において、砂の移動速度の時空間分布を究明するものである。さらに、波内部の速度場と砂の移動速度を関連づけて検討し、碎

波に伴う浮遊砂の移動速度特性を考究する。

2. 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、砂粒子の移動速度を究明する実験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。実験波は実験Ⅰと実験Ⅱともに、波高 $H_I=6.0$ cm, 周期 $T=0.8$ s の規則波とした。碎波形式は、Spilling 碎波と Plunging 碎波の中間の性質を持つ Spilling-Plunging 碎波(以下に S-P 碎波とする)である。な

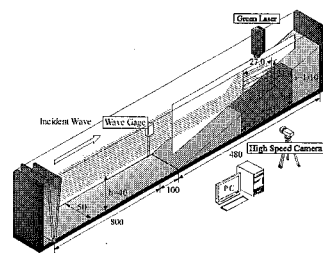
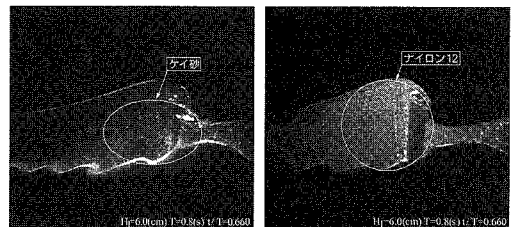


図-1 実験水槽 (単位: cm)



(a) ケイ砂 (b) ナイロン 12

図-2 高速カメラによる可視化画像

1 正 会 員 博(工) 金沢工業大学助教授 環境・建築学部 環境土木工学科

2 正 会 員 修(工) (株)国土開発センター 技術開発研究所

3 学生会員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻

お、実験波は縮尺を 1/50 として、現地における有義波高 $H_{1/3}=3.0$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=5.7$ s の冬期波浪を想定したものである。海底勾配の内部には中央粒径 $d_{50}=0.3$ mm のケイ砂を充填した。このケイ砂で作成した一様勾配の移動床斜面に、前述した実験波を約 6 時間造波し、単一のバーが形成される海浜形状が平衡断面に漸近した後に、実験ⅠとⅡを実施した。堀川 (1975) らによる海浜の平衡断面形状を分類する無次元係数 C は、中間型 (タイプⅡ) の $C=7.4$ である。後述する図-3, 4, 5 の $X/L=0.155$ のバー沖側端の水深は $h=6.26$ cm であり、 $X/L=0.22$ のバーの頂部は造波開始前の初期斜面と比較すると、約 2.6 cm の砂が堆積している。

(1) 砂粒子の移動速度を究明する実験Ⅰ

実験Ⅰでは、砕波点周辺でのケイ砂の浮遊状況を、水路上方からレーザースリット光 (カトウ光研: Green-Laser Sheet 50mG) を照射させて可視化した。そして、水路側方に設置した撮影速度 1/250 コマ/s の高速度カメラ (デジモ: VCC-H1000B) により、浮遊した砂を可視化画像内にトレーサとして記録した。その画像を図-2(a)に示す。砂粒子の移動速度は、時間間隔 $\Delta t=1/250$ s の 2 時刻の画像から、相関法によりトレーサ粒子群のパターンをマッチングさせて、トレーサの移動速度を求める PIV 装置 (ディテクト: DIPP-FLOW) により算定した。可視化画像の撮影領域は、縦 24.9 cm × 横

27.0 cm とした。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、目視にて砂の移動距離を計測し、その距離を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。

(2) 水粒子速度を考究する実験Ⅱ

実験Ⅱでは固液 2 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 $d_{50}=12 \mu\text{m}$ のナイロン 12 とした。この実験では、固液 2 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. 浮遊砂の移動過程

砕波に伴う底質の浮遊現象と移動過程について検討する。高速度カメラにより撮影した浮遊砂の移動過程を図-3(a)~(f)に示す。なお、図中の時刻 t は、図示領域内の $X/L=0.05$ に計測対象波の波頂部が到達した時刻を基準としている。また、白色の矢印は、連続する 2 時刻の可視化画像から目視にて確認した砂粒子群の移動方向を表している。矢印の周辺に表示した数字は、第 2 章 1 節で述べた目視による砂の移動速度である。また、計測

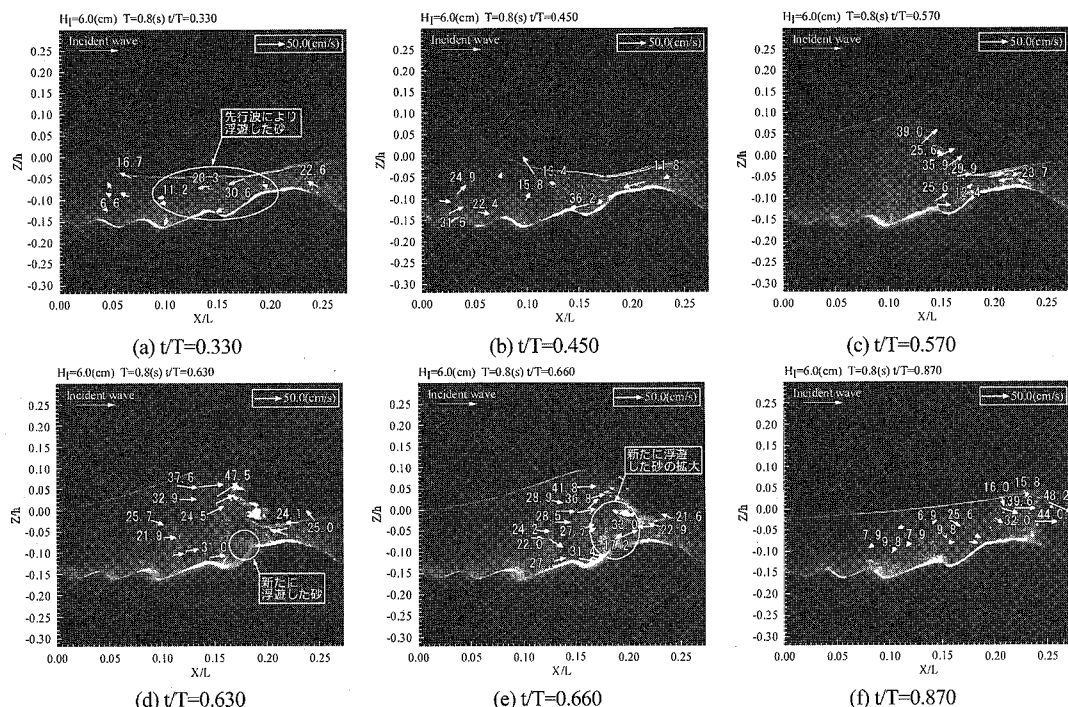


図-3 目視による浮遊砂の移動過程と移動速度

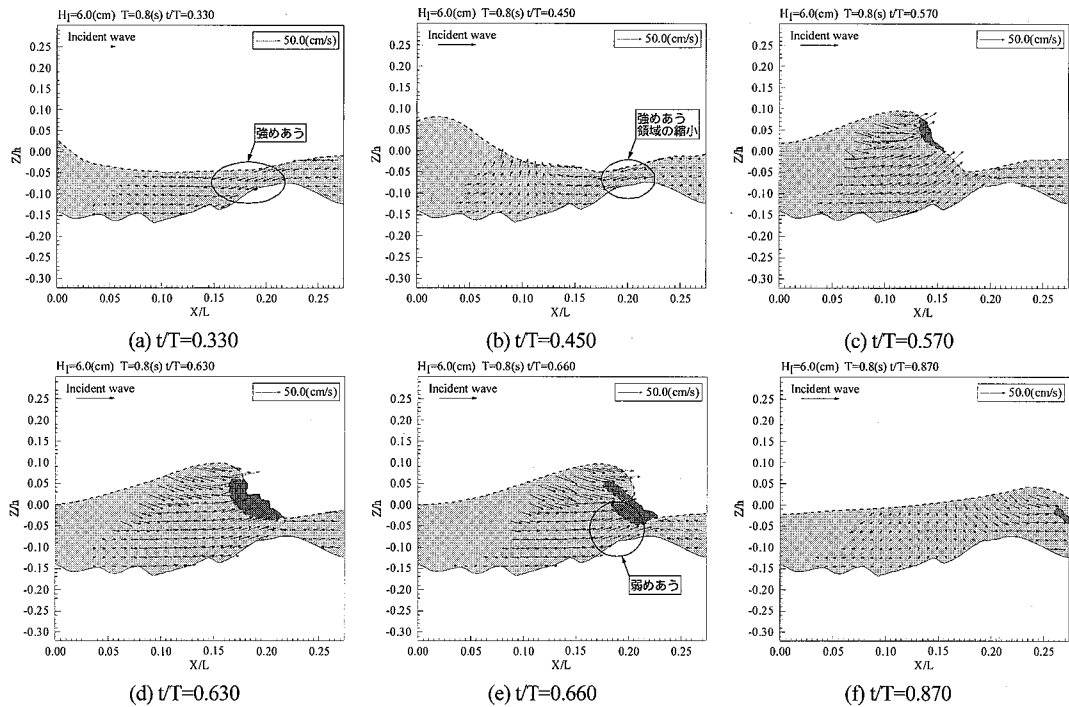


図-4 固液 2 相流での浮遊砂の移動速度の空間分布

対象波は、造波機の始動から第 10 波目の波とした。

図-3(a)に示すように、碎波帯内のバー沖側において、先行波により浮遊した砂は、戻り流れによって沖方向に移動することが判る。図-3(b)では、計測対象となる波が碎波点に接近するにつれて、岸向きの流れが強まり、 $0.01 \leq X/L \leq 0.05$ では、この流れと同方向に浮遊砂が移動している。また、 $0.15 \leq X/L \leq 0.25$ のバー周辺では、沖方向に砂が移流している。波前脚部が $X/L=0.185$ のバー沖側上端部に到達した図-3(c)では、波峰前面において、波の進行方向と同方向に移動する浮遊砂が確認できる。この波峰前面の浮遊砂の移動速度は約 25~40 cm/s であり、図-3(b)の岸方向に移流する砂の速度の約 20~30 cm/s と比較して、速くなっている。図-3(d)では、波峰前面において、図-3(c)よりも速い約 50 cm/s で移動する砂も確認できる。波前脚部下では、岸方向と沖方向に、それぞれ移流している砂が合流し、 $X/L=0.185$ のバー沖側上端部では、新たに砂が浮遊し始めている。この底質の浮遊には、海底地形による流向の変化が寄与していると考えられる。すなわち、バー近傍域で発生する岸向きの流れは、波の碎波点への接近に伴い流向をバーにより、斜め上方向に変化させられる。この流れが卓越することによって、バーの沖側上端部から砂が浮遊するものと推察できる。波峰前面に気泡が混入している時刻の図-3(e)では、バー沖側上端部で浮遊

した砂が、その浮遊領域を拡大していることが判る。碎波後の図-3(f)では、浮遊砂は波頂部後方の $0.05 \leq X/L \leq 0.15$ で沖側斜め下方向に移動し、海底面近傍の浮遊砂は着底することが確認できる。

以上のように図-3 から、戻り流れ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時刻に、バー沖側上端部では、新たに砂が浮遊することが判明した。そして、バー沖側上端部から浮遊した砂は、波峰前面へ向かって浮遊領域を拡大することが判った。碎波後、波峰後方の浮遊砂は沈降し、海底面近傍の砂は着底することが確認できた。

4. 固液 2 相流での碎波に伴う浮遊砂の移動速度

碎波により浮遊した砂の移動速度を考究する。ここでは、PIV によって得た砂の移動速度の信頼性を検討する必要がある。そこで、本研究では、第 2 章 1 節で説明した目視による砂の移動速度と PIV による砂の移動速度を比較することで、PIV より算定した砂の移動速度の妥当性を検証した。なお、目視による砂の移動速度は図-3(a)~(f)に、PIV による砂の移動速度は図-4(a)~(f)に、それぞれ同時刻で図示してある。図-3 と図-4 より、目視による砂の移動方向と速度は、PIV による砂の移動速度ベクトルとはほぼ一致していることが判る。し

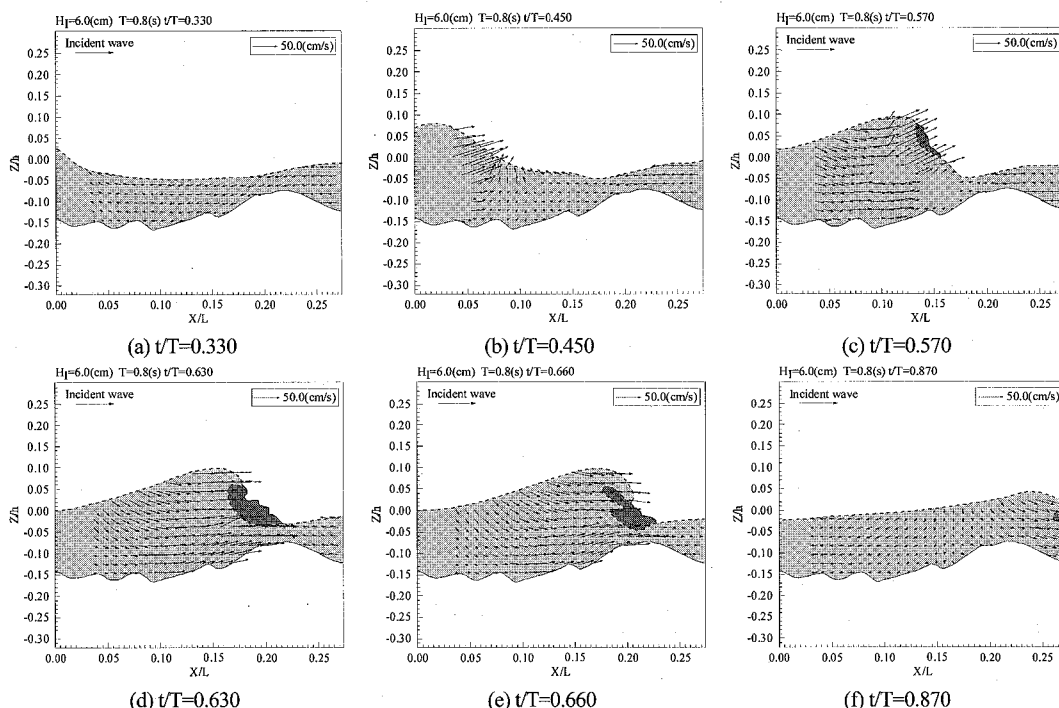


図-5 固液 2 相流での水粒子速度の空間分布

かしながら、オイラーの方法により波 1 周期にわたって、目視による砂の移動速度と PIV による砂の移動速度を定量的に比較する必要がある。これについては、今後の検討課題としたい。なお、図-4 のハッチ部の薄いグレーは液体域を、濃いグレーは気泡混入領域を図化したものである。時刻 t の基準は、図-3 と同様である。

図-4(a)では、先行波により浮遊した砂が戻り流れにより、 $X/L \approx 0.15$ では沖側に約 20 cm/s で斜め下方向に移動している。計測対象波の波頂が $X/L = 0.025$ に到達した図-4(b)では、波の入射に伴う岸方向の流れと同方向に移動する砂と戻り流れと同方向に移流する砂が、 $X/L = 0.10$ 付近で合流している。また、合流後の砂は、上昇することが判る。図-4(c)は波峰前面の勾配が最も急峻となっており、波頂の前後において波形が非対称である。さらに、前述した図-4(a), (b)と比較して波高が大きく、後述する図-4(d)~(f)では波高が減衰していることから、同図は碎波点での砂の移動速度であるとすることができる。砂は波峰中央部から波峰前面へ向けて、斜め上方向に約 17~23 cm/s の速い速度で移動している。また、波頂部後方から波峰中央部に向かう斜め下方向に移動する砂も存在している。バー沖側上端部から砂の浮遊を確認した時刻 $t/T = 0.630$ の図-4(d)では、図-4(c)のバー沖側での砂の移動速度が約 15 cm/s であったのに対し、約 26 cm/s と速くなっている。このように

新たに砂が浮遊する場合には、その移動速度が大きくなることが判る。図-3(d)では目視により、 $X/L \geq 0.21$ で沖方向に、 $X/L \leq 0.15$ で岸方向にそれぞれ移動していた砂が、バー上部で合流することが確認できた。図-4(d)においても岸方向と沖方向にそれぞれ移動していた砂が $X/L \approx 0.21$ 合流してすることが判る。図-4(e)では、図-3(e)においてバー沖側上端部で浮遊した砂が、浮遊領域を拡大したのと同方向の砂の移動速度ベクトルが確認できる。その速度は約 34 cm/s である。図-4(f)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約 6~12 cm/s で沈降する過程であることが判る。

5. 固液 2 相流での水粒子速度

固液 2 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-5(a)~(f)は、実験 II による固液 2 相流での水粒子速度を図示したものである。なお、図中のハッチ部の薄いグレーは液体域を、濃いグレーは気泡混入領域を図化したものである。時刻 t の基準は、図-3, 4 と同様である。

図-5(a)では、 $0.05 \leq X/L \leq 0.25$ の広範囲にわたって戻り流れが発生している。図-5(b)では、沖方向と岸方向の流れが $X/L \approx 0.10$ で合流し上昇流が発生している。この領域では、図-4(b)において、海底から水表面向か

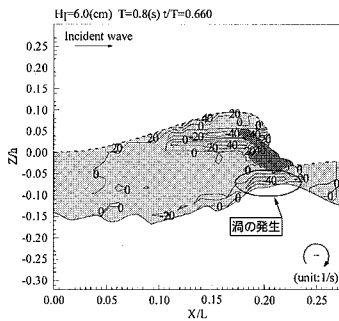


図-6 渦度の空間分布

う砂が確認できた。図-5(c)に示す、碎波時の波内部の水粒子の速度分布は、波頂部の後方から波峰の前面へ向かう反時計回りの流速分布となっている。波頂部近傍では最大流速が発生している。図-5(d), (e)では $0.05 \leq X/L \leq 0.12$ の海底面近傍における、ほぼ水平な流れが、 $0.15 < X/L \leq 0.20$ のバー近傍では地形の影響を受けて、流向を岸側斜め上方向に変化させていることが判る。この岸側斜め上方向の流れにより、図-3(d)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-5(f)では、 $0.05 \leq X/L \leq 0.15$ の波峰後方で沖向きの弱い流れが生じている。

6. 浮遊砂の移動速度特性

波の進行に伴う浮遊砂の移動速度の時空間分布を、図-3, 4, 5を照らし合わせて検討する。図-3, 4(a)に示す先行波により浮遊した砂は、図-5(a)に図示した戻り流れと同方向に移流する。図-4(a)に示したバーの沖側域の $0.15 \leq X/L \leq 0.2$ 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動している。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、図-4(b)に図示したように、岸方向にバー近傍域まで縮小する。その後、入射波が碎波点に接近すると、図-5(d)に示すように、 $0.15 \leq X/L \leq 0.2$ のバー沖側では水平方向の流れが、バーの影響により流向を岸側斜め上方に変化させる。この約 40 cm/s の斜め上方向の流れにより、バーの沖側上端部では、図-3, 4(d)に示すように新たに砂が約 20 cm/s で浮遊する。さらに、新たに浮遊した砂は、先行波により浮遊した砂と合一する。碎波後、浮遊砂は波内部の流れと同方向に沈降する。

浮遊砂の移動速度と波内部の速度場を関連づけて考察する。図-4(a)に示す $0.15 \leq X/L \leq 0.23$ の戻り流れと同方向の砂の移動速度は、図-5(a)に示す同領域の水粒子速度と比較して大きい。これは、砂の沈降しようとする下向き流速と斜め下方向の戻り流れが強めあうためであると推察できる。一方、図-4(c)の $0.18 \leq X/L \leq 0.22$ の

斜め上方向の砂の移動速度は、図-5(c)の同領域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れが弱めあうためであると考えられる。

以上のように、固液 2 相流における浮遊砂の移動速度は、波動運動に伴う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、異なることが明かとなった。

図-6に図-5(e)の水粒子速度から算定した渦度分布を示す。同図から、新たに砂が浮遊した領域では、渦の生成が確認できる。これより、従来から指摘されているように、砂が浮遊するには、碎波による渦の発生が関連していることが、本研究においても確認できた。

7. おわりに

本研究では、碎波に伴う浮遊砂が水中に混在する固液 2 相流において、砂の移動速度と水粒子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) 第 2 章 1 節で述べた目視による砂の移動速度と PIV 法による砂の移動方向と速度は、波 1 周期にわたって、ほぼ一致した。これより、PIV による浮遊砂の移動速度の妥当性が確認できた。今後、オイラー的方法により、目視による砂の移動速度と PIV による砂の移動速度を定量的に比較することが必要である。
- 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、両者は互いに弱め合って、砂の移動速度は水粒子速度よりも遅くなる。
- 3) バー沖側上端部では、入射波の碎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。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(若手 (B)：鷺見浩一，課題番号：17760410)の援助を受けて行ったことを明記し、謝意を表する。

参考文献

- 鷺崎賢一・田端敦主・戸谷昭浩・松永信博(2005)：底質の移動限界と浮遊砂フラックスにおける吹送流の影響，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 386-390。
 鷺見浩一・兼藤剛・植松達也(2005)：碎波形式の相違による浮遊砂の移動速度に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 111-115。
 渡部靖恵・秀島賢保・佐伯浩(2003)：碎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。