

碎波に伴い浮遊した海底砂の移動速度に関する実験的研究

金沢工業大学大学院 学生員 兼藤 剛 植松 達也
 金沢工業大学 正会員 鷲見 浩一

1. はじめに

碎波により浮遊した底質は、流れにより移流し、乱れが弱まった海域に沈降し堆積するので、海岸の漂砂現象を支配する重要な因子である。これまでに碎波帯内の海底砂の浮遊現象については、多くの研究が行われ、砂の浮遊には斜降渦の海底面への到着が支配的であることを岡安ら¹⁾が実験的に確認し、浮遊砂濃度の定量的な評価方法に関しては、柴山ら^{2),3)}の研究により重要な知見が得られている。しかし、碎波に伴い浮遊した砂の移動過程と移動速度については、碎波という力学的に極限状態にある現象を対象としているので、その定量的評価が困難であり、依然として不明な点が多いのが現状である。

本研究では、PIV システムを用いた可視化水理実験を実施して、碎波に伴う浮遊砂の移動過程と移動速度について考究した。

2. 実験概要

本研究では、砂の移動速度を PIV 装置を用いて計測するために、まず、砂が PIV の追跡粒子となりえるのかを検証する実験を行った。そして、砂が PIV で流速を測定可能な追跡粒子となることを確認した後に、碎波による砂の移動速度を考究する移動床の実験を実施した。実験では、図-1 に示すように内径 6.8cm のメスシリンダーに水を高さ 40cm まで入れ、側方に設置した CCD カメラ(Sony 製:WB CCD)により、静水中を沈降するケイ砂(中央粒径 $d_m=0.3\text{mm}$)の可視化画像を撮影した。この画像からケイ砂の沈降速度を算定するアルゴリズムとして微小時刻差の 2 枚の画像から相関関係を用いて粒子同士

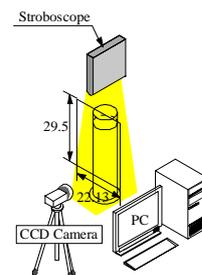


図-1 沈降実験装置

を対応づける PIV 法(nexus:PIV Ver.1.1d)を採用した。可視化画像の撮影領域は、縦 29.5cm × 横 22.13cm に設定した。タイミングコントローラにより撮影時間とメスシリンダーの上方のストロボスコープ(日進電子工業: Short Arc Storobo)の照射間隔を同期制御して、撮影間隔を $t=1/30\text{s}$ に調整した。そして、式(1)に示す Rubey の式から求まる底質の沈降速度と PIV によるケイ砂の沈降速度とを比較検証した。

$$w_0 = \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gd + 36\nu^2}{3\rho}} - \frac{6\nu}{d} \quad (1)$$

ここに、 w_0 は沈降速度、 ρ' は砂粒子の密度、 ρ は流体の密度、 ν は水の動粘性係数、 d は砂の粒径である。

実験は、図-2 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 10.0m、幅 0.7m、高さ 1.0m)で行った。水深 $h=40\text{cm}$ の水平床上に外枠をアクリル板で作成した勾配 $\tan\beta=1/10$ (長さ 4.8m、高さ 0.48m)の一樣海底勾配を設置し、海底勾配の内部に実験で使用したケイ砂を敷き詰めた。碎波による浮遊砂の移動速度の測定には、実験と同じ PIV 装置を用いた。可視化画像の撮影領域は縦 25.8cm × 横 34.4cm に設定した。実験波は波高 $H_1=6\text{cm}$ 、周期 $T=0.8\text{s}$ の規則波とした。この実験波の碎波形式は、Spilling 碎波と Plunging 碎波の中間の性質を持つ Spilling-Plunging 碎波(S-P 碎波)である。計測対象波は造波開始から 5 波目の波とした。また、海底地形は、造波の度に砂が削られるので、造波の都度、削られた領域を埋め戻し、一樣勾配斜面の状態から実験を開始した。PIV による砂の移動速度は、24 波の位相平均により求めた。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 $\Delta t=1/30\text{s}$ の 2 枚の画像から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、画像解析による砂の移動速度とする)との比較により行った。

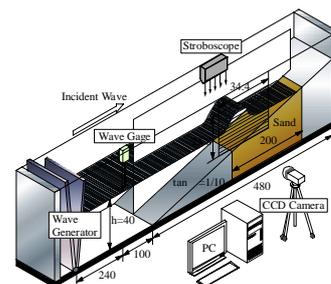


図-2 実験水槽と撮影領域

3. 実験結果

3.1 砂粒子の沈降速度

メスシリンダー内を降下させる砂粒子は、静水面の 20cm 上方から自由落下させているので、約 2.0cm/s の速度で静水面に達している。したがって、静水面近傍では局所的に流れが乱れるために、砂粒子は揺らぎながら降下していた。図-3 は、静水中を降下する砂粒子の沈降速度分布を示している。-10 $Z < 0\text{cm}$ の領域は、斜め側方を向くベクトルも確認できるが、 $Z < -10\text{cm}$ の領域では、鉛直下向きとなっている。また、この領域での PIV 法によるケイ砂の沈降速度の平均を求めると $\bar{w} = 3.95\text{cm/s}$ であり、Rubey の式より算定した底質の沈降速度の $w_0 = 3.97\text{cm/s}$ と一致した。これより、ケイ砂が PIV 装置による流速測定の追跡粒子となることが確認できた。

キーワード 碎波、浮遊砂、PIV

連絡先 〒921-851 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1 金沢工業大学環境・建築学部環境土木工学科 TEL 076-248-9756

3.2 砂の移動方向と移動速度

図-4 は、砂の移動過程を示した可視化画像である。なお、図中の白抜きの矢印は、連続する2時刻の可視化画像から目視にて確認した砂の移動方向を表している。また、矢印の上に表示した数字は、第2章で説明した画像解析による砂の移動速度である。

図-4(a)に示す $t/T=0.458$ の時刻では、 $0.135 < X/L < 0.230$ の領域で浮遊している砂は、先行波により浮遊した砂である。この領域の砂は戻り流れとともに沖方向に移動している。 $0.020 < X/L < 0.065$ の領域で浮遊している砂は、計測対象波が碎波点に接近するにつれ、新たに浮遊した砂であり、この領域の砂は進行波とともに岸方向に移動している。図-4(b)に示す $t/T=0.542$ の時刻では、計測対象波が碎波点に到達し、先行波より浮遊した砂と新たに浮遊した砂は、気泡混入領域の下部で合流し、砂の浮遊範囲を拡大している。

図-5 は、碎波時の砂の移動速度分布を図示しており、図中の破線は水表面を、ハッチ部は気泡混入領域を図化したものである。同図に示した砂の移動速度と前述した画像解析による砂の移動速度は、ほぼ一致している。図-5(a)の $t/T=0.458$ の時刻では、 $0.15 < X/L < 0.32$ の戻り流れによる砂の移動速度は約 $15 \sim 28 \text{ cm/s}$ であり、水表面近傍の砂の移動速度は速いが、海底面近傍の砂の移動速度は水表面近傍の移動速度と比較すると遅くなる。 $0.10 < X/L < 0.15$ では、砂は海底面から沖方向の斜め上向に約 17 cm/s で移動する砂が確認された。図-5(b)の $t/T=0.542$ の時刻では、 $0.00 < X/L < 0.10$ では、波頂部後方から岸方向に斜め下向に約 $30 \sim 40 \text{ cm/s}$ で砂が移動している。 $0.10 < X/L < 0.15$ の領域では、海底面から波峰前面に向かう斜め上向の砂が確認され、約 20 cm/s の速度で砂が移動している。

さらに、碎波後では波の岸側への伝播により、水表面付近の浮遊砂が約 $10 \sim 20 \text{ cm/s}$ で沈降する着底の過程であることが判明した。この砂の移動速度は、碎波時よりも遅くなっているが、第3章で検証した静水中を降下する底質の沈降速度と比較すると速度を増している。これより、波動運動により発生する流速成分が、砂の着底を加速していると考えられる。また、図-4(a),(b)より、 $X/L=0.25$ 周辺の海底の砂が最も削られていると判断できる。この領域は、入射波の碎波後に多量の気泡が液体内に混入し、水表面が著しく乱れ、混入した気泡が海底面へ接触する場合も確認できた領域に相当している。これより、従来から指摘されているように、砂が浮遊して海底面が削られるには、碎波による流れの乱れが支配的であることを、本研究においても実証できた。

4. 結論

本研究では、砂が PIV の追跡粒子となりえるのかを検証した後に、碎波に伴う浮遊砂の移動速度を検討する移動床の水理実験を実施した。その結果、PIV によるケイ砂の沈降速度と Rubey の式より算定した底質の沈降速度は一致し、ケイ砂が PIV 法の追跡粒子となることを確認した。碎波に伴う海底砂の浮遊は、先行波により浮遊した砂と、入射波が碎波点に接近するにつれ、新たに砂が浮遊する。この新たに浮遊した砂は、気泡混入領域の下部で、先行波より浮遊した砂と合流し、砂の浮遊範囲を拡大することが判明した。

【参考文献】

- 岡安彰夫, 敦賀仁, 松川祐, Nimal Waijyaratn, 片山裕之: 画像解析による斜降渦の特性とその発生分布について, 土木学会, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.141-145, 2000.
- 柴山和也, Winyu Rattanapitikon, 岡安彰夫: 碎波帯内の浮遊砂量の算定モデル, 土木学会, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.431-435, 1994.
- 柴山和也, M.P.R.Jayarathne: 碎波帯内浮遊砂量の評価方法, 土木学会, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.451-455, 2003.

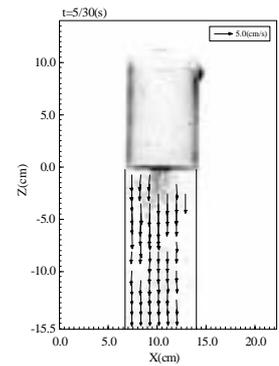


図-3 砂の沈降速度分布

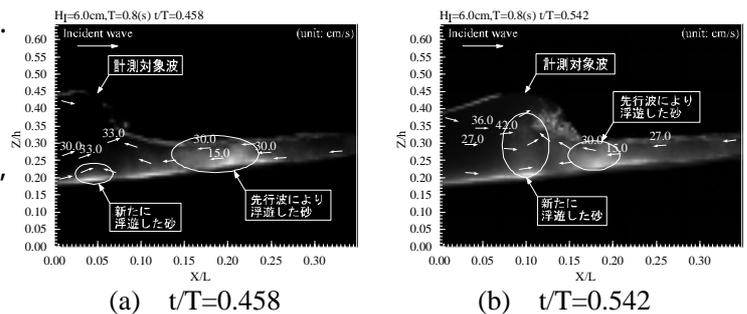


図-4 目視による砂の移動方向

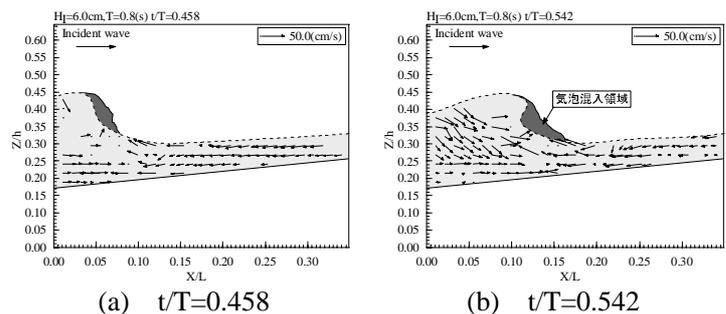


図-5 砂の移動速度分布