

非定常性に着目したシートフロー状砂移動機構

山下俊彦*, 金岡 幹**, 牧野有洋***

1. はじめに

海浜変形の三次元数値シミュレーションを行う際に重要な問題は局所漂砂量の推定である。従来、波による漂砂量はシーلز数の関数としてのみ扱われてきた。しかし、波の持つ重要な特徴は非定常性である。掃流砂については、Einstein (1972), 土屋ら (1984) が、漂砂量への非定常性 (d_0/d : ここに d_0 : 水粒子移動振幅, d : 底質粒径) の効果を陽にとりあげ、流砂量式と比較することにより、同じシーلز数でも非定常性が強い (d_0/d が小) ほど漂砂量が増加することを明らかにしている。

山下ら (1989) は、振動流場の砂粒子の移動確率と移動距離及びそれらの諸量により求まる漂砂量を非定常性の効果を考慮することにより、波動場と一方向流場の砂移動現象を統一的に取り扱っている。

波による底面流速が大きくなるとシートフロー状砂移動が発生する。これは主に碎波帯周辺で発生しやすく、大量の砂移動を伴うため海浜変形を取り扱う際に重要である。そのため、シートフロー状砂移動に関する研究は最近活発に行われている (例えば、香取ら, 1980; 山下ら, 1984)。しかし、シートフロー状砂移動は、現象を実験室で発生させること自体が困難なため、非定常性の効果は牧野ら (1991) の研究以外ほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、ピストン駆動式振動流装置を用いたシートフロー状態の底質粒子の移動速度、濃度分布、移動層厚と水粒子速度を詳細に測定し、それらの諸量に対する非定常性の効果に着目して移動機構を明らかにする。

2. 実験装置及び方法

実験には、多量の砂移動を発生させることができる図-1 に示すピストン駆動式振動流装置を用いた。この装置は 0.6 秒から 20 秒までの広範囲の周期の振動流を発生させることができる。水粒子速度は光ファイバレーザ

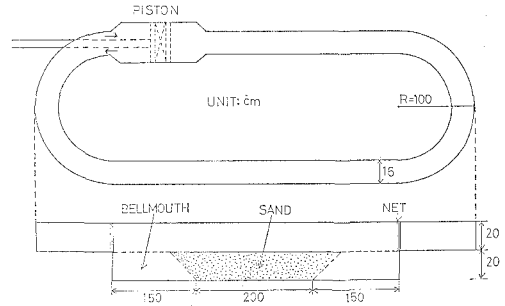


図-1 実験装置

流速計、底質速度はビデオを用いて測定した。底質粒子としては、移動状況が把握しやすい粒径 $d=2.8\text{ mm}$ 、比重 $s=1.41$ の数色に着色したプラスチック粒子を用いた。実験条件は、一層以上の底質移動が生じる様に、周期 $T=0.75\sim 5.5$ 秒、流速振幅 $U_m=15\sim 135\text{ cm/s}$ 、非定常性のパラメーター $d_0/d=15\sim 860$ の範囲で変化させ、約50ケースの実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 流速分布

図-2 に水粒子の瞬間流速 U の結果の一例を示す。 z は流れを静止させたときの底面の位置をゼロとし上向きを正とした。この図より、流速振幅は上方から $z=0$ まではほぼ同じで、 $z<0$ では下方に行くに従って小さくなっている。位相は $z\leq -1\text{ cm}$ ではかなり進んでいることがわかる。この傾向は非定常性を表すパラメーター d_0/d によらず同じである。また、 $z\leq -1\text{ cm}$ では、流速がほぼゼロになる部分が存在し、深い位置ほどこれが長い時間継続している。 d_0/d が小さい場合にはこのゼロの流速が続く状態はない。一方、乱れについては $z=0$ 付近で大きく、その上方下方で乱れが小さくなっている。これは、図-4、図-5 を見るとわかるように、 $z=0$ 付近では速度勾配が大きく、 $z<0$ では濃度が大きく $z>0$ では底質粒子がほとんどなく速度勾配も小さいためだと考えられる。この傾向は d_0/d によらずほぼ同じであるが、 d_0/d が小さいほど $z<0$ の乱れは大きい。ただし、 $z=9.5\text{ cm}$ の位置の乱れは装置自体の乱れによる

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

** 清水建設(株)

*** 工修 清水建設(株)

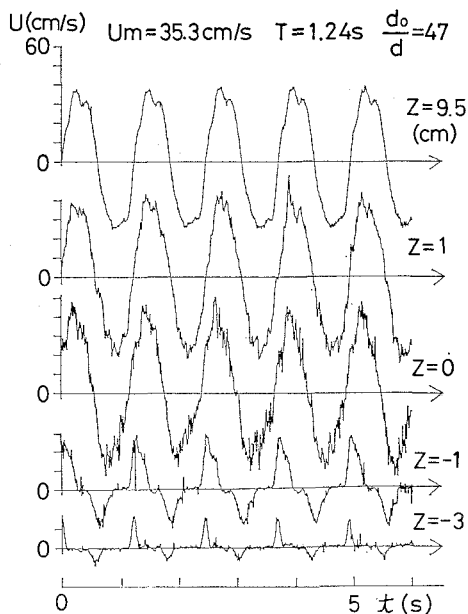


図-2 水粒子の瞬間流速

ものである。

図-3 に移動層内部の各位置における底質粒子速度 U_p の位相変化の一例を示す。 U_p は水粒子流速振幅 U_m で無次元化し、 δ_s は移動層厚である。位相は主流の反

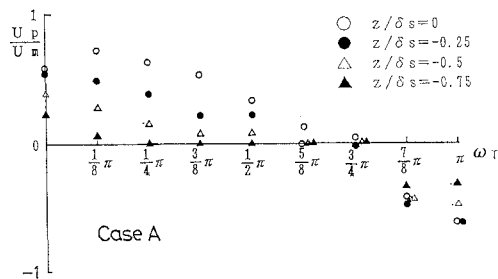


図-3 底質粒子速度の位相変化

転時を位相0とした。この図より、どの位置の層も $3/4\pi \sim 7/8\pi$ で流速の反転が起こっており、位相が主流よりかなり進んでいることがわかる。このケースは非定常性が強い場合であり、移動層が圧力勾配の影響を強く受けて移動しているためである。各位置での最大流速を比較すると上層ほど大きくなっている。また、最大値をとる位相は下層ほど早くなっており、これは下層ほど圧力勾配の影響を強く受けて移動しているためである。

図-4 は底質粒子速度 U_p への非定常性の効果をみるため、移動層厚 δ_s のほぼ同じものを選び比較した一例である。Case A は $\delta_o/d=64.6$, $\delta_s=6.7$ cm, Case B は $\delta_o/d=171.4$, $\delta_s=5.9$ cm, Case C は $\delta_o/d=856.5$, $\delta_s=4.0$ cm である。この図より、底質粒子の速度は $7/8\pi$ ですでに反転しており位相が主流よりかなり進んでいる

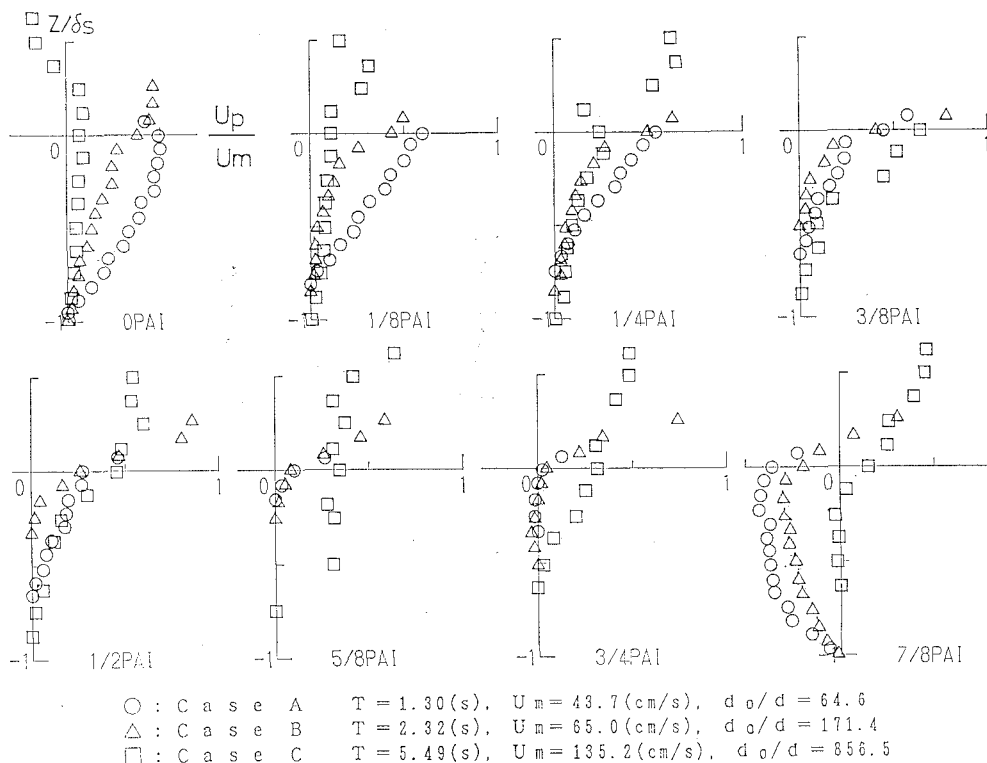


図-4 各位相における底質粒子速度分布

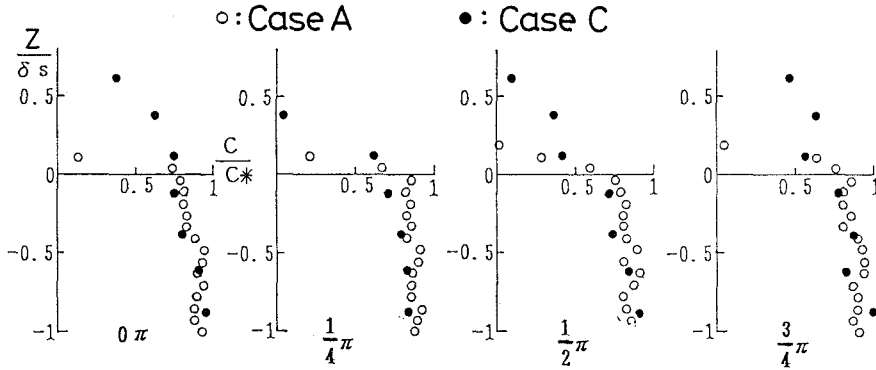


図-5 濃度分布

ことがわかる。これは移動層が圧力勾配の影響を強く受けて移動しているためである。また、 d_0/d が小さい（非定常性が強い）ほど移動層内部の流速が大きくなっている。圧力勾配が最大となる位相 0π では特に顕著である。これは非定常性が強いほど圧力勾配の影響が大きいと考えられる。逆に非定常性が弱くなると、せん断応力によって上層が水粒子流速に引っ張られる形になる。また、Case C の非定常性が最も弱い場合には、位相 0π の上層で底質粒子の慣性力のため主流よりも粒子の動きが遅れている。なお、Case C の場合には底面に砂澱が形成されたため流速分布の形状が変化していると思われる（例えば、 $5/8\pi$ ）。非定常性を表すパラメーター d_0/d が同じで流速振幅が異なる（移動層厚も異なる）場合について同様の比較を行うと、非定常性の違う場合よりも底質粒子速度の分布形の違いは少なかった。

3.2 濃度分布

図-5 に、図-4 で示した Case A と Case C の条件での濃度分布の位相変化を示す。濃度 C は静止状態の濃度 C^* で無次元化している。非定常性が強い場合には、下層 ($z/\delta_s < 0$) の濃度が濃く（静止状態の $8 \sim 9$ 割）鉛直方向に一定の領域と、上層の濃度が急激に減少する層が存在する。非定常性が弱い場合には、明確に二層に分かれることはなく連続的に上方へ行くに従って濃度が低下している。非定常性が弱い場合には、水粒子の流速振幅が大きく周期も長いので、底質粒子がより上方まで舞い上がっている。濃度の位相変化は、下層ではほとんどなく、上層では非定常性の弱い場合に粒子の舞い上がり状態によって少しある。また、高濃度で移動する層の割合は非定常性が強いほど大きい。

図-6 は、Case A の場合の移動層上端位置の位相変化を示したものである。上端位置は $\pi/4$ で最小、 $3/4\pi$ で最大になることがわかる。これは水粒子流速が $\pi/2$ で最大になっていることにより、底質粒子がその流れにより舞い上がるためと考えられる。非定常性の移動層上端位置への効果は、前述の様に非定常性が弱いほど底質粒

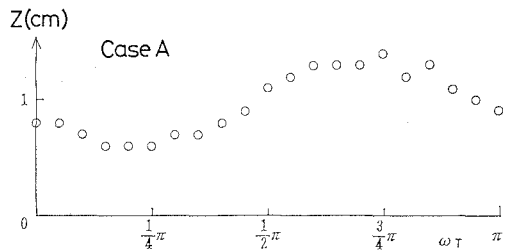


図-6 移動層上端位置の位相変化

子の舞い上がり高さは高く上端位置も高くなる。またある程度非定常性が強い場合には、移動層内部では、底質粒子はどの位置でも一定の高さのところを往復運動しており、底質粒子の運動が瞬間的に止まる位相 $3/4\pi$ 前後においても、濃度は増加することなく、常に動きやすい状態にあることがわかる。

3.3 移動層厚

図-7 は、移動層厚の時間変化の一例を示したものである。移動層厚 δ_s は、移動している層が流れを静止した時にとる厚さで、移動層厚下端はすぐ下の粒子を半周期の間に1個以上乗り越える位置とした。移動層厚は時間的に変化するものとし、ないものも存在する。変化する場合には、移動層厚はしばらく厚い状態が続いた後、急激に減少し、再びゆっくり増加して厚い状態に戻ると

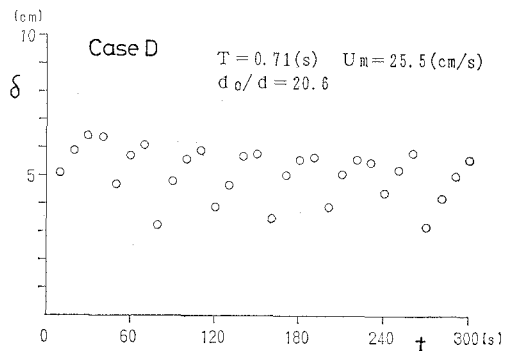


図-7 移動層厚の時間変化

いうパターンが繰り返される。この様に移動層厚が変化する場合があることは山下ら (1988) も報告している。この移動層の変化を粒子の運動状態からみると、移動層厚が厚い状態の初期は下層全体にせん断的運動が起こっており、その後最下端を除く下方で粒子どうしの噛み合わせがきつくなり、ほぼ剛体的運動を起こす。その領域が時間とともに上方に増加し、ある厚さに達すると、最下端でのせん断的運動はストップして移動層は急激に減少する。その後中層から運動量の輸送が起こり、徐々に移動層は増加していく。このような変化がかなり周期的に発生する。この移動層厚の変化は、各 d_0/d についてシールズ数が大きいほど発生しやすい様であるが、明確な発生条件、移動層厚の変化量等は今後調べる必要がある。

図-8 は、移動層厚が急減する直前 (図-7 で $t=40s$) の底質粒子の移動速度分布の例を示したものである。この図を見ると、移動層厚が厚い状態で、 $z/\delta_s = -0.5$ 付近に流速分布の折れ曲がる部分があり、それより上方に

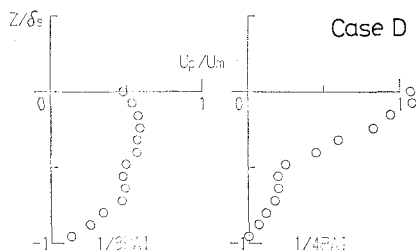


図-8 底質粒子速度の鉛直方向分布

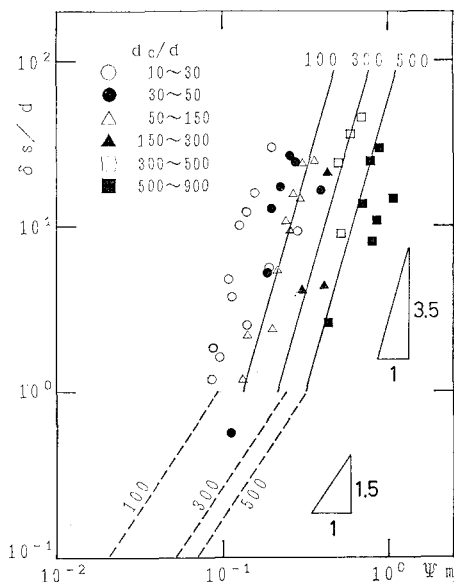


図-9 移動層厚と Ψ_m および d_0/d の関係

粒子が動きやすい層、下方に動きにくい層があることがわかる。移動層厚はその後この流速の折れ曲がり点まで減少する。

図-9 は、粒径で無次元化した移動層厚 δ_s/d と最大シールズ数 Ψ_m の関係を、 d_0/d の大きさに分けてグラフ化したものである。移動層厚が時間的に変化する場合には、 δ_s は平均値ではなく最大値とした。図中の破線は、山下ら (1989) の研究で得られた掃流砂の移動確率の推定式から求めたものである。この推定式の適用範囲は $\delta_s/d \leq 1$ である。各 d_0/d ごとにみると、ばらつきは多いが δ_s/d は Ψ_m のほぼ 3.5 乗に比例していることがわかる。掃流砂の場合の移動確率が Ψ_m の 1.5 乗に比例しているのに比べ、大きなべき乗となっている。各 d_0/d について、シートフロー状砂移動の実験値から求めた実線と掃流砂の推定式が両者の適用限界である $\delta_s/d=1$ 付近で交点を持つことは妥当な結果と考えられる。また同じシールズ数では、非定常性が強い (d_0/d が小さい) ほど移動層厚 δ_s/d が大きくなっている。

4. おわりに

非定常性に着目したシートフロー状砂移動に関する系統的実験を振動流装置を用いて行うことにより次の点が明らかとなった。シートフロー状砂移動では、シールズ数が同じでも非定常性が強いほど、移動層内の底質粒子速度は大きく、移動層厚も大きくなる。また濃度についても非定常性が強い程高濃度で移動する層の割合が多いので、同じシールズ数でも非定常性が強いと漂砂量は著しく増加することが明らかとなった。

最後に、本研究に対し文部省科学研究費の補助を受けた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 香取完和・渡辺 晃・堀川清司 (1980): シートフロー状態の底質移動に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 202-206.
- 土屋義人・上田康裕・大下哲則 (1984): 掃流漂砂量則について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 306-310.
- 牧野有洋・山下俊彦 (1991): 非定常性に着目したシートフロー状砂移動に関する実験的研究, 第46回年次学術講演会概要集, pp. 1008-1009.
- 山下俊彦・沢本正樹・横山博実 (1984): 非定常流による平坦床漂砂量と砂の移動機構に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 281-285.
- 山下俊彦・日比康生・寺島貴志 (1988): シートフロー状漂砂の移動機構と net の漂砂量, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.
- 山下俊彦・金沢一郎 (1989): 非定常性に着目した掃流砂の移動機構, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 254-258.
- Einstein, H. A. (1972): Sediment Transport by Wave Action, Proc. 13th ICCE, pp. 933-952.

