

非定常性と比重の効果に着目したシートフロー状砂移動機構

山下俊彦*・染矢武彦**・野崎克博***

1. はじめに

従来、波による漂砂量はシーلز数のみの関数として取り扱われてきた。しかしながら、波の持つ重要な特徴は非定常性である。Einstein (1972), 土屋ら (1984), 山下・金沢 (1989) は、掃流砂について、非定常性のパラメータとして d_0/d (d_0 : 水粒子移動距離, d : 底質粒径) を採用し、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。

シートフロー状砂移動については、牧野ら (1990, 1991) や山下ら (1992) が、同様に非定常性のパラメータとして d_0/d を使い、シーلز数が同じでも非定常性が強いほど移動層厚、底質移動距離、濃度が大きく漂砂量は著しく増加することを報告している。しかしこれらの研究では、同じ d_0/d のとき移動層厚はシーلز数の 3.5~4.5 乗という大きなべき乗に比例する結果となっており、シートフロー状砂移動については、非定常性のパラメータとして d_0/d では十分でないと考えられる。

一方、シートフロー状砂移動の実験は、実験の容易さから底質として比重の軽いプラスチック粒子がよく用いられる。実際は砂であるので、砂移動機構への比重の効果をもたらしておく必要がある。

そこで本研究では、ピストン駆動式還流型振動流装置を用い、シートフロー状態の底質粒子の移動速度、移動層厚を詳細に測定し、それらの諸量に対する非定常性と比重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ピストン駆動式振動流装置を用いた。用いた装置は山下ら (1992) と同じであるが、装置自身による乱れが少ないきれいな正弦振動流が得られるように改良した。底質運動が安定するのを 5 分間待って、水粒子速度は光ファイバレーザ流速計、底質の移動状況はビデオを用いて測定した。底質粒子としては、比重 $s=1.59$, $s=1.41$, $s=1.15$,

各々の粒径 $d=0.231$ cm, $d=0.276$ cm, $d=0.284$ cm の 3 種類の比較的球形に近い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ように、周期 $T=0.6\sim 3.5$ 秒、流速振幅 $U_m=13\sim 80$ cm/s の範囲で変化させて、全体で約 110 ケースの実験を行った。

3. 無次元パラメータの導出

表面上にある底質粒子に関する運動方程式は式 (1) である。

$$M \frac{dU_p}{dt} + C_M \cdot m \frac{d(U_p - u)}{dt} = m \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_w \cdot A (u - U_p)^2 - F \quad \cdots (1)$$

ここに、 M : 底質粒子の質量, m : 底質粒子が排除した流体の質量, U_p : 底質粒子速度, u : 底質粒子近傍の水粒子速度, U : 境界層外縁の水粒子速度, C_D : 抗力係数, C_M : 仮想質量係数, A : 底質粒子の投影面積, ρ_w : 水の単位体積質量, F : 底質粒子相互間の力である。この式を代表値を用いて無次元化して (ただし, $u=U, U_p=0$ とした) 整理すると式 (2) となる。

$$\left(\frac{s+C_M}{s-1} \right) \frac{1}{g} \frac{dU_p}{dt} = A_1 \left(\frac{1+C_M}{s-1} \right) \frac{U_m}{gT} + A_2 \cdot \Psi_m - F' \quad \cdots (2)$$

ここに、 g : 重力加速度, A_1, A_2 : 定数, Ψ_m : シールズ数である。左辺は粒子の加速度項で移動層厚と移動速度に関係する項と考えられる。右辺第 1 項は圧力勾配項, 第 2 項はせん断応力項, 第 3 項は底質粒子相互間の力の項である。右辺第 1 項と第 2 項が粒子を動かそうとする外力項であり、移動層厚、移動速度はこの 2 つの項に対応した無次元パラメータで整理できるものと考えられる。ただし、主流の圧力勾配による外力は移動層全層に働く。移動層内部の底質粒子に関する運動方程式については、圧力勾配項に対応した右辺第 1 項の C_M が落ちた形になると考えられる。これは、移動層内の水粒子速度 u が U に比較して小さいためである。以上より本研究では、移動層厚、移動速度を圧力勾配とせん断応力に各々対応した無次元パラメータ P_m と Ψ_m で整理を試みる。ここで P_m は、 $P_m=1/(s-1) \cdot U_m/gT$ である。比重の効果

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
 ** 学生員 北海道大学大学院
 *** 正会員 戸田建設

は、左辺の $(s+C_M)/(s-1)$, P_m と Ψ_m 中の $(s-1)$ で表される。従来用いられていた非定常性のパラメータ d_0/d は、式(2)より P_m と Ψ_m との比に関係していることが予想されるが、数値的に検討した結果、 d_0/d は P_m/Ψ_m のほぼ2乗に比例していることがわかった。

4. 実験結果及び考察

4.1 移動層厚

底質粒子の移動状態において、底質粒子が半周期間に主流の水粒子移動距離 d_0 の2%だけ水平に移動する層までを移動層とし、静止状態での底質粒子の表面からその層までの厚さを移動層厚と定義した。前報(山下ら, 1992)までは、移動層を下の粒子を半周期間に1個乗り越える層までとしたが、この定義では d_0/d が小さくなったとき等、底質は実際移動しているにもかかわらず、下の粒子を乗り越えないために移動層厚は0となってしまうためである。ただし、今回の実験条件の範囲では前報までの定義とここでの定義との移動層厚はほぼ同じであった。実験条件によっては、移動層の表層に砂漣が発生することがあった。そこで、砂漣の影響の強いケース(最大砂漣波高/移動層厚が0.5を越える場合)のデータは、以下のすべてのグラフにおいて削除した。

図-1~図-3に、各々の粒子についての移動層厚 δ_s の実験結果を示す。図-1は $s=1.59$ 、図-2は $s=1.41$ 、図-3は $s=1.15$ である。縦軸は粒径で無次元化した移動層厚 δ_s/d 、横軸はシールズ数であり、両対数をとった。図中の記号は3つの図で共通で無次元圧力勾配 U_m/gT の大ききで分けている。これらの図では、移動層厚への比重の効果も検討するため、無次元の移動層厚、圧力勾配には比重の効果は考慮していない。

各々の図を見ると、同じシールズ数でも U_m/gT が大きい(非定常性、あるいは圧力勾配が強い)ほど無次元移動層厚 δ_s/d は大きくなっていることがわかる。また、 U_m/gT が同じ場合には、データのバラツキがかなりあるが、今回の実験の範囲では、無次元移動層厚 δ_s/d はシールズ数 Ψ_m の約1.5乗に比例することがわかる。比重の効果を見るため、同じ U_m/gT で各々の図を比較すると、比重の小さい粒子の方が移動しやすいため移動層厚 δ_s/d が大きくなっていることがわかる。これは、シールズ数の分母の $(s-1)$ だけでは比重の効果はとりきれないためである。

図-4は、前述したように Ψ_m 以外にも比重の効果も考慮し、すなわち $(s+C_M)/(s-1) \cdot \delta_s/d$ と P_m を用い、全種類の粒子のデータをプロットしたものである。移動層内部での C_M の値は正確にはわからないが、 C_M の値を変化させてもここで問題となっている各々の粒子についての $(s+C_M)/(s-1)$ の値の相対的な比はほとんど変わ

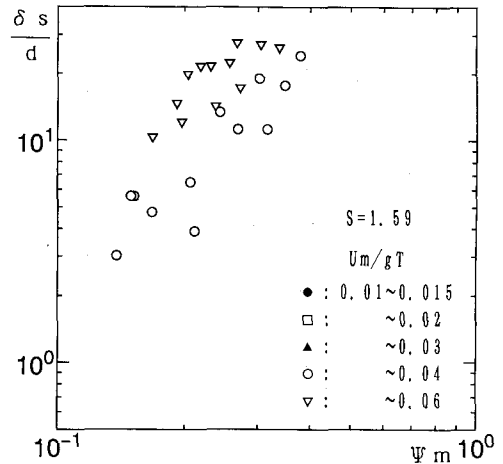


図-1 移動層厚と Ψ_m および U_m/gT の関係 ($s=1.59$)

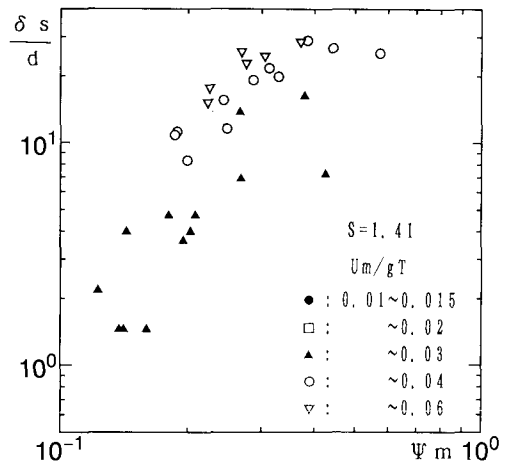


図-2 移動層厚と Ψ_m および U_m/gT の関係 ($s=1.41$)

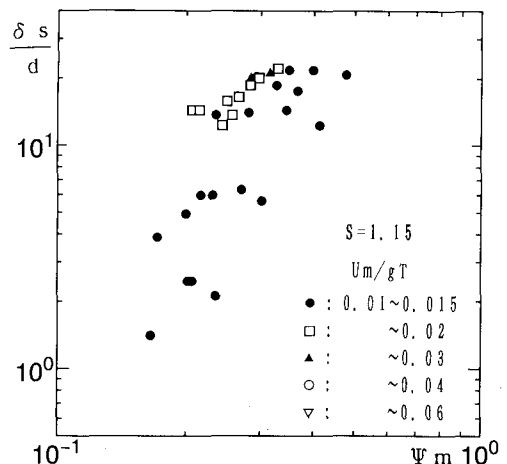


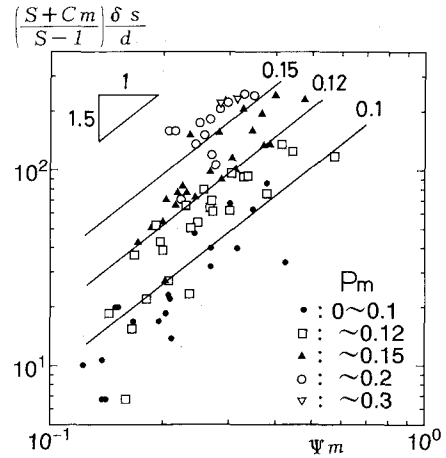
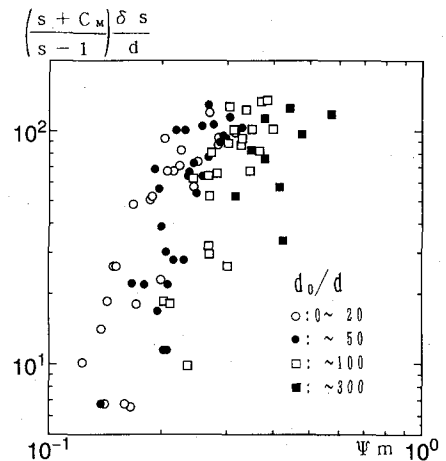
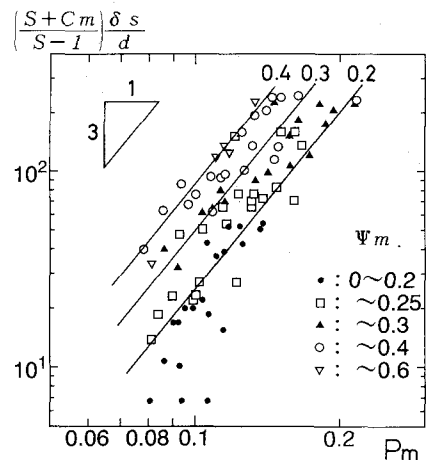
図-3 移動層厚と Ψ_m および U_m/gT の関係 ($s=1.15$)

らないため、本研究では $C_M=0.5$ とした。図中の記号は P_m の大ききで分けている。粒子が異なっているにもかかわらずこの図で用いた比重の効果を含んだ3つの無次元パラメータでよく整理されており、比重の効果はこの3つのパラメータで考慮できると考えられる。移動層厚と2つのパラメータの関係を見てみると、同じシールズ数 Ψ_m では P_m が大（非定常性が強い）ほど移動層厚が大きくなっている。 P_m が同じ場合には移動層厚は Ψ_m の約1.5乗に比例していることがわかる。

図-5は、両軸は図-4と同じで、非定常性のパラメータとして P_m のかわりに d_0/d をとったものである。無次元移動層厚は、 Ψ_m , d_0/d で図-4と同程度によく整理されることがわかる。比重の効果もこれらのパラメータで考慮できることがわかる。同じシールズ数では d_0/d が小（非定常性が強い）程移動層厚は大きくなっている。しかし、同じ d_0/d では、牧野・山下 (1991), 山下ら (1992), と同様、移動層厚はシールズ数の4~5乗という高次のべき乗に比例する結果となっている。

以上から、移動層厚は非定常性のパラメータとして P_m を用いた場合にはシールズ数の約1.5乗、 d_0/d を用いた場合には約4~5乗に比例することがわかり、シートフロー状態の移動層厚を取り扱う際には P_m の方がよいと判断できる。この理由は以下のように考えられる。図-4, 5と同じ両軸で移動層厚への非定常性の効果を見るときには、移動層全体に働いている圧力勾配による力とせん断応力による力の比を考える必要がある。圧力勾配は移動層の内部まで伝わるため、移動層全体に働く圧力勾配による力は圧力勾配と移動層厚の積となる。説明を容易にするため、移動層厚はシールズ数に比例し、移動層全体に働くせん断応力による力は移動層厚に関係しないと仮定する。このとき、前述の移動層全体に働く圧力勾配による力とせん断応力による力の比は単に圧力勾配だけとなる。よって、多層の底質移動が発生するシートフロー状態の移動層厚への非定常性の効果は、無次元圧力勾配である P_m で考慮されるものと考えられる。また非定常性のパラメータとして d_0/d を用いたとき移動層厚がシールズ数の高いべき乗に比例するのは、 $d/d_0 \propto (P_m/\Psi_m)^2$ がほぼ成立し、分母に Ψ_m があるためである。一方、表層での底質移動しか生じない掃流砂に対しては、移動する底質粒子に働く圧力勾配による力とせん断応力による力の比は P_m/Ψ_m となる。よって、掃流砂の移動層厚を考える際には、非定常性のパラメータとして P_m/Ψ_m あるいは d_0/d が良いと考えられる。

図-6は、横軸に無次元圧力勾配 P_m をとり、シールズ数の大ききで記号を変えて全種類の底質の移動層厚のデータをプロットしたものである。移動層厚は、同じシールズ数では P_m のほぼ3乗に比例していることがわか


 図-4 移動層厚と Ψ_m および P_m の関係

 図-5 移動層厚と Ψ_m および d_0/d の関係

 図-6 移動層厚と P_m および Ψ_m の関係

る。また、同じ P_m では移動層厚はシールズ数が大きいほど大きくなっている。この図からも、用いた3つの無次元パラメータで比重の効果を考慮できることがわかる。

4.2 底質移動速度の鉛直分布

図-7は、底質粒子速度 U_b の鉛直分布の位相変化の一例を示したものである。 U_b は水粒子流速振幅 U_m 、鉛直座標 Z は移動層厚 δ_s で無次元化している。位相は主流の反転時をゼロとした。この図は、3種類の粒子について P_m/Ψ_m の値がほぼ等しい場合の底質粒子速度を比較したものである。移動層厚 δ_s は、 $s=1.59$ の粒子で 4.0 cm 、 $s=1.41$ で $\delta_s=6.0\text{ cm}$ 、 $s=1.15$ で $\delta_s=5.3\text{ cm}$ である。この図を見ると $s=1.59$ のものは位相が少し遅れているため位相 $3/4\pi$ 、 $7/8\pi$ で他のものより流速が少し小さくなっているが、それ以外では各々の位相で流速分布は3つの粒子ではほぼ同じとなっている。 P_m/Ψ_m が図-7と異なる場合についても各粒子について同様の比較を行い、 P_m/Ψ_m が同じ場合には比重が異なってもほぼ同じ流速分布になることがわかった。これより、底質粒子の速度分布が粒子を動かそうとする2つの外力（圧力勾配、せん断応力）の比 P_m/Ψ_m でほぼ決定されることがわかった。ここに示した3つのケースはかなり非定常性が高い（ P_m/Ψ_m が大）場合である。各位相ごとに見ていくと、底質粒子の速度は $3/4\pi$ 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。位相 $7/8\pi$ 、 0π までは、移動層は圧力勾配の影響を強く受けて加速し、位相 0π では放物型の流速分布を示している。位相 $1/8\pi$ では、下層は位相 0π の時と変化ないが上層が主流に引っ張られた形になっている。位相 $1/4\pi$ から $1/2\pi$ までは、下層は圧力勾配が小さくなっていくため徐々に減速し、上層は主流に引っ張られる形になっている。 $5/8\pi$ では、下層はほぼ静止した状態となり、 $3/4\pi$ で先に述べたように下層のながれが反転する。図-7で、底質粒子速度は P_m/Ψ_m でほぼ規定されることがわかったので、図-8に底質粒子速度への P_m/Ψ_m の効果を見た一例を示す。ここに示したものはすべて比重 $s=1.41$ の粒子の結果である。なお、 $P_m/\Psi_m =$

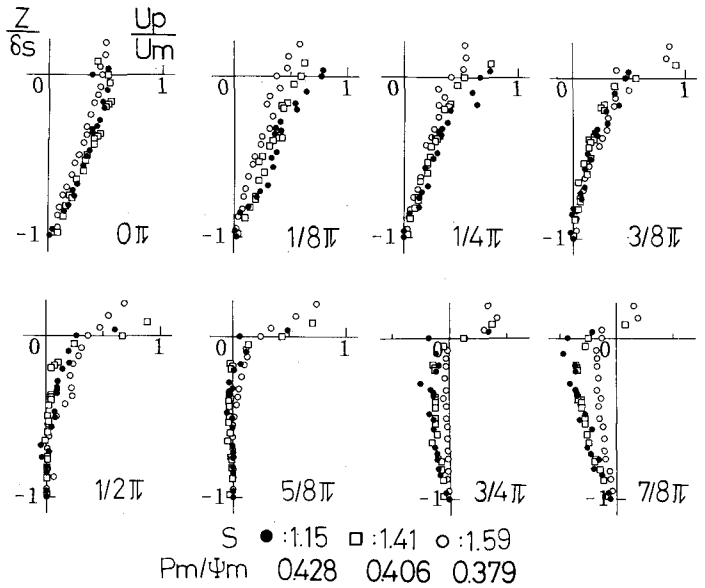


図-7 底質移動速度への比重の効果

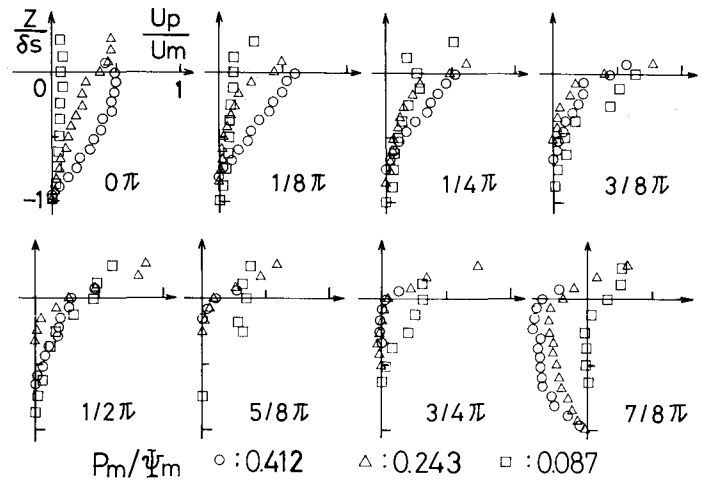


図-8 底質移動速度への P_m/Ψ_m の効果

0.087 のデータは山下・金沢 (1989) が使用した U 字管振動流装置を用いて得られた結果である。 P_m/Ψ_m の値が大きい程移動層内部の流速が大きくなっている。これは、底質粒子が主に圧力勾配による外力により移動しているためで、圧力勾配が最大となる 0π で特に顕著である。逆に P_m/Ψ_m が小さい場合には、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。

5. おわりに

非定常性と比重の効果に着目したシートフロー状砂移動に関する詳細な実験をピストン駆動式振動流装置を用いて行うことにより次の点が明らかになった。シートフ

ロー状態の底質の移動速度、移動層厚は無次元パラメータ Ψ_m と P_m で規定される。移動層厚はほぼシールズ数 Ψ_m の 1.5 乗と P_m の 3 乗に比例する。底質粒子速度分布は P_m/Ψ_m で規定され、 P_m/Ψ_m が大きい程大きくなることがわかった。移動層厚、底質移動速度への比重の効果も明らかにした。本研究では、比重の異なる 3 種類の底質粒子について全体で約 110 ケースという比較的多くの実験を行ったが、一般性のある結論を導くにはさらに多くの広い範囲の実験を行う必要がある。

参 考 文 献

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・浅川典敬・山下俊彦 (1990): 非定常性に着目したシートフロー状砂移動機構, 第 45 回年次学術講演会概要集, pp. 632-633.

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・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.

山下俊彦・金岡 幹・牧野有洋 (1992): 非定常性に着目したシートフロー状砂移動機構, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 291-294.

Einstein, H. A. (1972): Sediment Transport by Wave Action, Proc. 13th ICCE, pp. 933-952.