

II-436

シートフロー層内の力学機構に関する2・3の考察

鹿児島大学 正会員 浅野 敏之

1. はじめに

漂砂の実験結果には多少のばらつきは避けられないが、シートフロー状漂砂では多量の底質が集合的に流送されるので、現象はさらに複雑化する。本論は、シートフロー状態の力学機構の解明という複雑かつ困難な課題に対して、著者なりに問題点の整理を行ったものである。

2. シートフロー層の力学機構

いま、図-1のような流体層、シートフロー層および底質粒子が密に充填された不動層からなる3層モデルを考える。ここでは物理的な見透しをよくするため、極力簡単な式で議論を進める。

シートフロー層内の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial(\rho_m u)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1)$$

混相体の密度 $\rho_m$ は底質濃度 $c$ と次の関係にある。

$$\rho_m(z, t) = \rho\{(s-1)c(z, t) + 1\} \quad (2)$$

ここに $s$ は底質の比重である。

シートフロー層表面 $z=0$ では流体せん断力 $\tau_0$ が作用し、不動層との境界面 $z=-\delta$ ではせん断変形が起こる限界降伏応力 $\tau_{yl}$ が働いているとすると、(1)式右辺第2項の $\partial\tau/\partial z$ は次式で近似できる。

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\tau_0 - \tau_{yl}}{\delta} \quad (3)$$

$\tau_0$ は摩擦係数 $f$ と主流流速振幅 $\hat{U}$ より

$$\tau_0 = 0.5\rho f \hat{U}^2 \cos^2(\sigma t + \theta) \quad (4)$$

で表される。位相の先行 $\theta$ は従来の波動乱流境界層の知識からすれば、シートフローが形成されるような高速の流れでは十分小さい。

一方、圧力勾配 $-\partial p/\partial x$ はシートフロー層厚があまり大きくなければ、主流の圧力勾配がそのまま作用する。すなわち、

$$-\partial p/\partial x = \rho \partial U/\partial t = -\rho \sigma \hat{U} \cos(\sigma t + \pi/2) \quad (5)$$

以上より、 $\tau_0$ は主流流速にはほぼ等しい位相で、圧力勾配は $\pi/2$ 進んだ位相で作用するから、振動流の周期が小さいほど圧力勾配の効果が大きくなり、シートフロー層内の混相体の運動の位相が進

むことになる。(3)を(1)に代入すると、 $\delta$ の表示式として

$$\delta = \frac{\tau_0 - \tau_{yl}}{\frac{\partial(\rho_m u)}{\partial t} - \left(-\frac{\partial p}{\partial x}\right)} \quad (6)$$

を得る。

一方、滑りの生じる $z=-\delta$ で次のクーロンの降伏条件を課することにより、 $\delta$ の概略値を求めることもできる。

$$\frac{\tau_{z=-\delta}}{\sigma_{z=-\delta}} = \tan \phi_r \quad (7)$$

ここに $\phi_r$ は底質粒子の内部摩擦角である。 $\sigma_{z=-\delta}$ は上載荷重 $\int_{-\delta}^0 \rho g(s-1)cdz$ に等しいとし、 $\tau_{z=-\delta} = \alpha \tau_{z=0}$ ( $\alpha$ は定数)、シートフロー層内の平均濃度を $\bar{c}$ とすると

$$\alpha \tau_0 = \rho g(s-1)\bar{c}\delta \tan \phi_r \quad (8)$$

となる。(4)で $\theta=0$ とし、(8)に代入すると

$$\frac{\delta(t)}{D} = \frac{\alpha \Psi(t)}{\bar{c} \tan \phi_r} \quad (9)$$

を得る。 $\Psi(t) = u_*^2(t)/\{g(s-1)D\}$ は時間的に変化するシェイズ数である。 $\phi_r$ に球形ガラスビーズに対する実測値 $26.5^\circ$ 、 $\bar{c}$ に0.40、 $\alpha=1$ を代入すると、

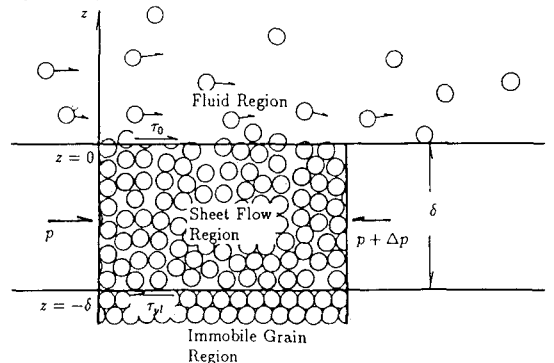


図-1 シートフロー状流れの模式図

$$\frac{\delta}{D} = 5.0\Psi(t) \quad (10)$$

が得られる。この係数5.0は著者らが実験的に得た8.5と比較的近い値である(浅野ら1992)。

### 3. 力学機構に内在する問題点

シートフロー漂砂の力学機構が複雑であるのは、

- (1) 流送される底質が多量で濃度が大きいこと
- (2) 流動が流向・流速ともに変化する非定常な流れであること

の2点に帰着すると考えられる。

まず、(1)の固液混相体の流動についてであるが、例えば内力としての圧力は江頭ら(1989)によれば、間隙水圧、間隙水の乱れによる圧力、粒子骨格圧力および粒子間の衝突により生じる分散圧力で構成される。しかし、非定常状態のそれぞれの特性はほとんど不明である。

(2)の非定常性は、固液混相体の流動をさらに複雑化する。まず、振動流下では一方向流と異なり、底面に作用するせん断応力が水面勾配から直接評価できない事が挙げられる。さらに、流動を記述するには構成則が明らかでなければならないが、振動流下の応力-歪速度の関係に対する実験的知見は皆無に近い。

非定常性の影響は内部摩擦角にも現れる。移動しているときの動摩擦角は動き始めるときの初期降伏角より小さい。したがって、(9)式中の $\phi$ は時間的に変動するため、シートフロー厚 $\delta(t)$ は左右対称から歪んでくると予想される。また、(9)式では $\delta(t)$ は外力の $\Psi(t)$ の増減とともに上下することになるが、いったん内部せん断破壊面ができてしまうと、そこでのせん断抵抗が減少してしまうため、それが $\delta(t)$ の変動に影響することも考えられる。

シートフロー漂砂では、粒子が密に充填されている領域での力学まで考究する必要がある。この領域では粒子間の噛み合わせのずれによって、正弦変動する外力下で外力が0に近づいても、粒子群の密度は初期の静水時充填密度に復元していかない。すなわち、固液混相体はこの領域では連続体ではなく粒状体の性質を持つ。例えば周期的な外力を作用した場合でも、粒状体の噛み合わせが徐々に緩んでゆき、周期的な挙動の再現性が必ずしも保証されない(浅野・筒井、1990)。

### 4. 実験に関わる問題点

高濃度の固液混相流れの測定は一般に難しい。底質が大量に流送されるため、振動流作用中に底質表面高さの流れ方向の一様性を長時間にわたって確保する事が容易ではない。

粒子が密に充填されている層の濃度は、側壁の粒子数から求めることが多いが、側壁によって粒子群骨格の3次元構造が乱されることにも留意すべきである。

振動流は、ピストンまたは空気圧で一方の鉛直部水柱上端を加圧することによって駆動される。理想的なシートフローの流送は、(1)式に示される圧力勾配と底面摩擦力によって水槽内で再現されるべきものである。しかしながら、機械的加圧 $\Delta p$ により水槽内の圧力勾配は $-\partial p/\partial x$ ではなく、 $-\partial(p+\Delta p)/\partial x$ となる。この $\Delta p$ による擾乱の影響は、振動する水柱の運動とピストンの運動の同期をうまくとれば小さくできるが、この操作は容易ではない。この駆動力が加わることによって、圧力勾配がシートフロー層の運動量変化 $\partial(\rho_m u)/\partial t$ への寄与の大半を占めてしまうと、(6)式中の分母が0に近くなって、本来生起すべき $\delta$ より大きな $\delta$ が発生してしまうことになる。この機械的加圧の影響は、静止状態から急に振動流を発生させる場合や、短周期の振動流を発生させる場合に大きくなると考えられ、過大なシートフロー厚が測定される恐れがある。

### 5. あとがき

本論では、シートフロー漂砂の力学機構解明の困難性の指摘に終始したため、研究の前途は遠いように思われるが、逆に考えれば、この研究が、これまで未解明の課題であった移動床上の摩擦力の評価につながり、また工学的にきわめて重要な暴浪時の土砂移動量の定量的予測に結実するものと期待される。

### 参考文献

- 浅野敏之・中村和夫・中野康弘・高沢俊満(1992): シートフロー状態の底質移動に関する実験的研究、海岸工学論文集、第39巻、pp.295-299。
- 浅野敏之・筒井勝治(1990): シートフロー状漂砂が生起するときの底質粒子群の運動特性、海岸工学論文集、第37巻、pp.244-248。
- 江頭進治・芦田和男・矢島啓・高浜淳一郎(1989): 土石流の構成則に関する研究、京都大学防災研究所年報、第32号、B-2、pp.487-501。
- Hanes D. M. and A. J. Bowen(1985): A granular-fluid model for steady intense bed-load transport, J. of Geophysical Research, Vol. 90, No. C5, pp.9149-9158。
- Bagnold, R. A.(1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Royal Soc. London, Ser. A, 225, pp.49-63。