

## II-51

## 流動する粒子間の衝突力に関する研究

東北大学大学院 学生員 ○李 立亜  
東北大学工学部 正 員 沢本 正樹  
東北大学工学部 学生員 佐藤 忠浩

1. はじめに： 著者らは、漂砂に関連して固体粒子の運動に従来より関心を持ってきており、波によるシートフロー状の砂移動機構の実験とモデル化を目指していくつかの研究を行ってきた<sup>1)・2)</sup>。今回は、分散した固体粒子の衝突による運動量の伝播について、できるだけ理想化された単純な条件のもとで計測することを試みた。

2. 衝突力に関する実験： 実験は、ある角度 $\theta$  [ $\theta \in (\phi_0, \phi_{max})$ ]、 $\phi_0$ は内部摩擦角、 $\phi_{max}$ は最大動摩擦角]で流路を固定し、粒子流量を調整できるホッパーから粒子を流し、水中および空中の2種類で行った。角度は流路下部を上下に移動させることにより自由に調整できる。流路の寸法は、 $100 \times 100 \times 3000$ mmであり、側壁の上部2000mmは木製、下部1000mmはアクリル製である。なお、流量は最下部で粒子を採取することにより測定した。また、水中での実験は、 $1500 \times 1500 \times 120$ mmの水槽を水で満たし流路下部を水中に沈めて行った。

実験条件は、人工真珠、ガラスビーズ、および砂を用いて粗面を作り、それらをそれぞれ角度、流量を3種類ずつ変化させ、水中と空中の状態で合計33ケースを行った。

落下実験の様子をアクリル製側壁を通してビデオで撮影し（シャッタースピード1/500sec）、その画像を1/30sec毎にコマ送りし、粒子の座標を読みとることにより、ラグランジェ的に速度を求めた。さらに、平均速度および速度の乱れ強度も求めた。また、壁の影響を排除するために、流路の真上からもビデオを用いて撮影し、その表面の粒子速度分布も計算した。上から観察すると、側壁に接する粒子は壁面の摩擦により、減速されていることが分かった。断面中央の速度分布は観測できないので、上から観測される粒子速度の分布形が、各高さでも生じているものと考え、中央断面の速度分布を推算した。

濃度についてはアクリル越しにカメラで撮影し、側板に接している粒子の個数を数えることにより、相対濃度を求めた。

3. 実験結果と考察： 図-1は流れのパターンを示す。数多くの実験をまとめた結果として、流れはその速度分布形より3種類に分類することができる。このパターンは水中、空中の違い、粒子流量 $Q_s$ にも関連しない。流れのパターンに最も影響を与えるものは斜面角度 $\theta$ である。 $\theta$ が $\phi_0$ に近いと、その速度は上部から下部へ向かって急激に減少し、パターン①となる。また、 $\theta$ の増加に伴い、速度勾配は全層にわたってどんどん差が小さくなりパターン②となる。さらに $\theta$ がもっと大きくなると、表面に近いところではその速度勾配は増加せずに逆に減少するようになり、パターン③となることが分かった。

パターン③のようなものは、速度のバラつきがあまりない。このパターンは粒子が球形の人工真珠とガラスビーズの試料を用いて行った実験では見られず砂（粒径0.85mm～2.00mm、外径様々）の場合でのみ生じた。このことは、粒径分布のバラつきおよび粒子の形状が流れのパターンに及ぼす影響も無視できないためであると考えられる。

図-2にY方向での濃度変化の一例を示す。横軸は $C/C_0$ 、 $C_0$ は0.9 $C_m$ に相当する。図から分かるように、濃度は深くなるにつれて増加し、全移動層の上から約1/4のところからは濃度の変化は小さくなる。濃度の低い区域で、粒子が前進するたびに衝突が頻繁に生じるのに対し、高い区域では、粒子はすぐ下層の粒子を乗り越えながら前進し、衝突は生じにくくなっている。したがって、この区域では、粒子間の摩擦力が運動状態に与える影響は無視しえなくなる。

4. 固体粒子の衝突力の評価： 斜面で粒子が流れる場合、力の釣合により、せん断力について、上記の

摩擦力をCoulomb摩擦力で表わし、Bagnoldの衝突力の式<sup>3)</sup>を修正したものとして、下記の式が得られる。

$$af(\lambda)\lambda\rho_sD^2\sin(\alpha)\left(\frac{du}{dy}\right)^2=\{\tan(\theta)-\tan(\phi_D)\beta\}(\rho_s-\rho)g\cos(\theta)\int_y^\delta Cdy\tag{1}$$

ここに、各記号は下記の通りである。aは係数で、Bagnoldの実験で慣性区域では、a=0.042；λは線濃度であり、その定義および濃度との関係は方程式（8）で表す。

$$\lambda=D/s=[(C_m/C)^{1/3}-1]^{-1}\tag{2}$$

sは分散状態の粒子間の最小距離；f(λ)はλの関数、慣性区域で、f(λ)=λ；ρs、Dはそれぞれ固体粒子の密度と直径；ρは液体の密度；αは衝突角度；θは斜面の角度；φDは運動安息角；Cは固体粒子の濃度；Cmは固体粒子の最大可能濃度、理論分析で、球体に対し、Cm=0.74；uはX方向の固体粒子の速度；βは未定係数である。βについて、下記のようにモデルを設定した。

$$\beta=\begin{cases}0&\lambda\leq12\\(\lambda-12)/(\lambda_c-12)&12<\lambda<\lambda_c\\1&\lambda\geq\lambda_c\end{cases}\tag{3}$$

λcは移動可能の最大濃度 0.9Cm<sup>4)</sup>に対応する線濃度である。

方程式(1)を、実験により得られた濃度の値を代入して数値積分した。その結果を図-8に示す。ここで、aおよびf(λ)についてBagnoldの実験値を使用した。図に示すように計算値と実験値を比べると、下部ではよく合っているが、上部ではその計算値は実験値より少し大きくなる傾向がある。それは実験の精度、特に濃度の計測の精度に影響されていると考えられる。

### 5. 結論： 本研究より下記の結論が得られた。

- a. 流れのパターンは、その斜面の角度θが一番重要なパラメーターであり、そのほか、粒子自身の形状や分布のバラツキも無視できない。
- b. 粒子流の下層の濃度はかなり濃く、ここでの粒子は、他の粒子を乗り越えながら前進するので粒子間の摩擦力が運動状態に与える影響を無視することはできない。
- c. 上記の粒子間の摩擦力を、線形モデルを考えて修正したBagnoldの衝突力の式を用いて計算した。その結果、大粒子からなる粒子流に対しては実験との一致が確認されたが、小粒子の場合にはずれがあることが分かった。

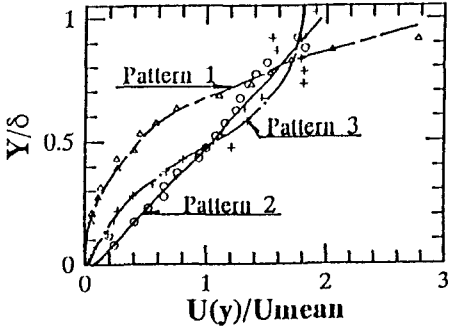


図-1. 流れのパターン

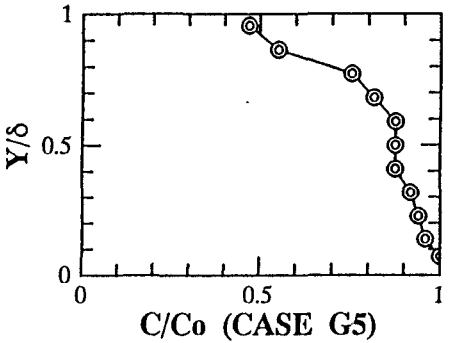


図-2. 濃度の分布

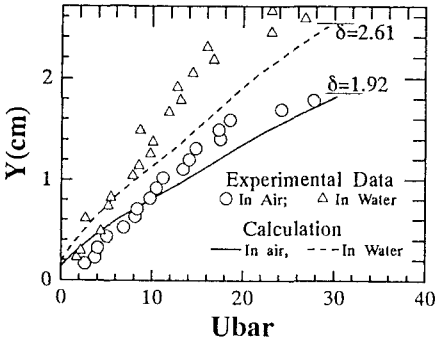


図-3. 計算結果と実験結果の比較

参考文献： 1) Sawamoto・M. and T.・Yamashita (1987):Sediment Transport in Sheet Flow Regime, Coastal Sediment '87, WW Div. ASCE,pp.415-423.； 2) 李 立亜ら(1992): 振動流におけるSheet Flowに関する研究, 土木学会第47回年次学術講演会概要集第2部 pp.1132-1133.； 3) Bagnold,R.A.(1954): Experiment on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc.Roy. London A225 pp.49-63. 4)高橋 保(1984): 土石流の流れ学, ながれ3, pp.307-317.