

Dynamic Behavior of A Moving Particle in Channel

○ 正 鳥居修一 (鹿児島大工) 正 矢野利明 (鹿児島大工)

Shuichi TORII, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima

Toshiaki YANO, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima

1. 緒言

火山灰を多量に含む流れが発生した場合に、土石流が下流域でどのように広がるかを把握することができれば、土砂災害の災害規模をある程度予測することができる。従って、1) 土石流が発生してどの位置に砂質土やシルスが堆積するか、2) 土石流がどのような流れの形態を示すのか、を明らかにする必要がある。これには、多くの要因が含まれるので、これらを全て実験によって明らかにするには限界がある。そこで、降水量、砂質土とシルスの粒径などが影響する要因を含んだ固液二相流の流動形態を把握し、これを基に土石流が発生した場合に影響を受ける地域を特定する。

本研究では、土石流の流動特性を数値解析によって明らかにするために、第一段階としてオープンチャンネル内の固液の流動を数値解析によって検討する。

2. 基礎方程式と解析手法

Figure 1 は二次元オープンチャンネルの計算体系を示している。計算では、非圧縮性ニュートン流体、粘性発熱なしを仮定している。計算を簡略化するために、計算は層流に限定する。流れ場を予測する基礎方程式をテンソル表記で以下にまとめる。

(連続の式)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(運動量方程式)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

ここで、 U_i は i 方向の速度成分、 x_i は座標、 P は圧力、 ρ は密度、 ν は粘性係数、 t は時間である。基礎方程式を離散化するために、Harlow と Welch⁽¹⁾、Hirt ら⁽²⁾ の有限差分法を使用した。このようにして離散化した方程式は非定常状態も取り扱うことができるもので、以下のように表される。

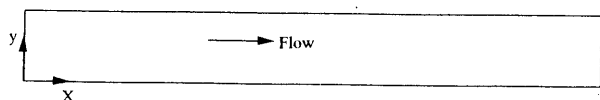


Figure 1 Coordinate System

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \Delta t \left[\frac{1}{\Delta X} (P_{i,j}^n - P_{i+1,j}^n) - FUX^n - FUY^n + VISX^n \right] \quad (3)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = V_{i,j}^n + \Delta t \left[\frac{1}{\Delta Y} (P_{i,j}^n - P_{i,j+1}^n) - FVX^n - FVY^n + VISY^n \right] \quad (4)$$

式(3)、式(4)中の FUX^n , FUY^n , $VISX^n$, FVX^n , FVY^n , $VISY^n$ は式(3-2)の対流項、圧力勾配項、粘性項を差分化したものである。離散化した式を以下の境界条件で計算する。本計算では、収束条件を 10^{-4} とする。

入り口 : 流路断面で一様流
下部 : 流速ゼロ
上部 : スリップ
出口 : x 方向の速度こう配がゼロ

解の信頼性を確認するために、格子数を $40 \times 2000 \sim 80 \times 4000$ の範囲で計算を行い、格子数の変化に伴って解が変化しないことを確認した。計算は、流路深さ 0.8m、流路長さ 800m、粒子粒径 (0.3cm~3cm)、粒子密度 ($1200 \sim 2000 \text{kgm}^{-3}$) の範囲で行った。作動媒体は水を使用している。

流体の流れに対しては上記で示した通常のオイラー的な運動方程式を用いて解き、粒子に対して作用する力を考慮したラグランジュ的な運動方程式を解く。現象を簡略化するために、流体中の粒子が受ける力は主として慣性力と重力のみであるとする。使用するラグランジュ的な運動方程式は以下のように表される。

$$\frac{dU_{p,i}}{dt} = \frac{3\rho C_D}{4\rho_p d_p} |\mathbf{U} - \mathbf{U}_p| (U_i - U_{p,i}) + \mathbf{g} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{U}_p , \mathbf{U} はそれぞれ粒子と流体の速度ベクトル、 $U_{p,i}$, U_i はそれぞれ粒子と流体の速度、 ρ_p , ρ はそれぞれ粒子と流体の密度、 d_p は粒子直径、 C_D は粒子の抗力係数、 \mathbf{g} は重力加速度である。粒子速度と位置を求める際、(1) 粒子同士の相互作用は無視、(2) 粒子が壁に衝突した場合は跳ね返らない、(3) 粒子が移動する場合に生じる後流によ

って流れ場は変化しない、を仮定する。

3 結果と考察

Figure 2 と Figure 3 はそれぞれ、流路に突起物がない場合とある場合の流路断面流速分布を示している。この場合のレイノルズ数 Re (代表長さとして流路深さ、代表速度として流路断面平均速度をそれぞれ用いている) は、2000 である。速度分布を明確にするために流路の深さを拡大して示している。流路出口での流路断面速度分布は、流体力学的に十分発達した流れの厳密解と一致することを予備計算で確認している。流路底部に突起物が存在することによって、その後方に再循環領域が存在することが再現されている。Figure 4 は、突起物が流路底部に存在しない場合に、粒子の密度が小さい粒子 ($d_p=1\text{mm}$ 、 $\rho=1200\text{kgm}^{-3}$) の下流方向の軌跡を示したものである。ここで、図中の粒子直径は位置を表すために拡大されている。粒子の密度が小さい場合、粒子は設定した流路内ではその底部に達していない。一方、粒子密度 ($\rho=2000\text{kgm}^{-3}$) が比較的大きくなれば、粒子は早い段階で流路底部に達していることが分かる (Fig. 5)。更に、粒子密度は Fig. 4 の場合と同じであるが、粒径 ($d_p=10\text{mm}$ 、 $\rho=1200\text{kgm}^{-3}$) が大きい粒子の下流方向軌跡を Fig. 6 に示す。粒径が大きくなれば、式(1)より粒子は流れ場の影響を受けやすくなり、粒子の密度が同じでも粒子は早い段階で流路底部に達している。Figure 7 は、突起物が流路底部に存在する場合に、粒子の密度が小さい粒子 ($d_p=1\text{mm}$ 、 $\rho=1200\text{kgm}^{-3}$) の下流方向の軌跡を示したものである。突起物の存在によって流れはその上部で変化し、これに伴って粒子も変化している。粒子が突起物を通過した後、その後方に形成された後流の影響で、粒子は流路底部に急激に接近している。一方、粒子密度 ($\rho=2000\text{kgm}^{-3}$) が比較的大きい場合、粒子は突起物前方に形成された循環領域に引き寄せられ、突起物を通過することなくその前方で流路底部に接する。



Figure 2 Velocity distribution in channel without rib



Figure 3 Velocity distribution in channel with rib



Figure 4 Path of a moving particle for $d_p=1\text{mm}$ and $\rho=1200\text{kgm}^{-3}$



Figure 5 Path of a moving particle for $d_p=1\text{mm}$ and $\rho=2000\text{kgm}^{-3}$

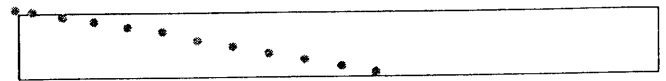


Figure 6 Path of a moving particle for $d_p=10\text{mm}$ and $\rho=1200\text{kgm}^{-3}$

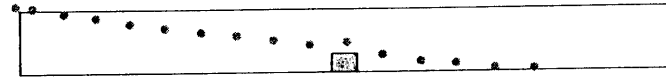


Figure 7 Path of a moving particle in channel with rib for $d_p=1\text{mm}$ and $\rho=1200\text{kgm}^{-3}$

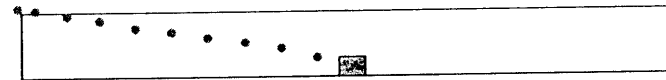


Figure 8 Path of a moving particle in channel with rib for $d_p=1\text{mm}$ and $\rho=2000\text{kgm}^{-3}$

4 まとめ

- (1) 浮遊する粒子の動きをラグランジュ的に解析した結果、粒子の密度や直径によって粒子の軌跡は影響される。
- (2) 流路に突起物が存在する場合、粒子の密度によって粒子の挙動が大きく変化する。

謝辞

本研究の遂行にあたり、財団法人 東電記念科学技術研究所の援助に負う部分が大きかった。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] F. H. Harlow and E. J. Welch, "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface," *Phys. Fluids* 8, 1965, pp. 2182-2189.
- [2] C. W. Hirt, B. D. Nichols and N. C. Romero, "SOLA-a numerical solution algorithm for transient fluid flows," *LASL Report*, LA-5852, 1975.