

土石流の流動・堆積機構に関する研究

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

京都大学防災研究所 正員 江頭 進治

ハシフィックコンサルタンツインターナショナル 正員 〇矢島 啓

1. はじめに 土石流による災害防止・軽減対策をより有効に行うためには、現象の評価法を確立することが重要である。そのため、本報においては、芦田・江頭ら¹⁾によって導かれた土石流の支配方程式を水路実験と数値解析によって検討を加える。

2. 抵抗則 江頭・芦田ら²⁾は、土石流を水と砂礫の混合物である連続体として取り扱い、そのエネルギー散逸機構を議論することにより抵抗則および流速分布・濃度分布を導いている。この理論では、エネルギーの散逸機構として、1)粒子間の摩擦 2)粒子の非弾性衝突 3)間隙を占める水の乱れの3つのプロセスを考慮しており、濃度分布が一様な条件では以下のように抵抗則が示されている。

$$\tau_b = P_s \tan \phi + \rho_f V^2 \quad (1)$$

ここに、 $P_s = \{1/(1+\alpha)\}(\sigma - \rho)cg h \cos \theta$

$$f = (25/4)\{k_f(1-c)^{5/3}/c^{2/3} + k_g\sigma/\rho(1-e^2)c^{1/3}\}(h/d)^{-2}$$

ρ は水の密度、 σ は粒子の密度、 c は粒子体積濃度、 V は断面平均流速、 h は流動深、 θ は河床勾配、 ϕ は粒子の内部摩擦角、 e は粒子の反発係数である。また、 ϕ は砂粒子の場合 $\phi \approx 36.5^\circ$ 、 $e \approx 0.8$ であり、 $k_f = 0.25$ 、 $k_g = 0.0828$ 、 $\alpha = 0.25$ 程度の値をとる。

式(1)の右辺第1項が粒子の摩擦相対変位による散逸応力であって、これは降伏応力に対応している。このモデルによれば、重力によって与えられる外力が、降伏応力以下になると土石流は停止する。

3. 支配方程式 先に示した抵抗則を用いて、土石流の2次元支配方程式を次のように表すことができる。

$$\text{混合物の質量保存則: } \partial h/\partial t + \partial uh/\partial x + \partial vh/\partial y = -D/c. \quad (2)$$

$$\text{砂礫の質量保存則: } \partial ch/\partial t + \partial cuh/\partial x + \partial cvh/\partial y = -D \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{x方向の運動量保存則: } & \partial M/\partial t + \partial uM/\partial x + \partial vM/\partial y \\ & = gh \sin \theta_x - (1/\rho_m)\partial P/\partial x - (1/\rho_m)\tau_b u/\sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{y方向の運動量保存則: } & \partial N/\partial t + \partial uN/\partial x + \partial vN/\partial y \\ & = gh \sin \theta_y - (1/\rho_m)\partial P/\partial y - (1/\rho_m)\tau_b v/\sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\rho_m = (\rho - \sigma)c + \rho$ 、 $M = uh$ 、 $N = vh$ 、 u, v ; それぞれ x 方向、 y 方向の平均流速

$$P = \int_0^h p dz = \int_0^h \rho_m g(h-z) \cos \theta dz$$

θ_x 、 θ_y はそれぞれ x 、 y 方向の河床勾配、 θ は流れの最急勾配であり、次式で与えられる。

$$\theta = \arcsin\{(u \sin \theta_x + v \sin \theta_y)/\sqrt{u^2 + v^2}\}$$

$$\text{河床位方程式: } \partial z_b/\partial t = D/c. \quad (6)$$

$$\text{堆積速度式: } D/\sqrt{u^2 + v^2} = c \cdot \tan(\theta_e - \theta) \quad (7)$$

D は堆積速度であり、 $D > 0$ は堆積を、 $D < 0$ は侵食を表す。

堆積速度式中に含まれる θ_e は堆積も侵食も起こらない平衡勾配であり、次式で与えられる。

$$\theta_e = \arctan\{(\sigma - \rho)c\{\tan \phi/(1+\alpha)\}/\rho_m + \rho f(u^2 + v^2)/(\rho_m gh)\}$$

これら式(2)から式(7)を用いて、土石流の流動・堆積現象を追跡することができる。

4. 支配方程式の適用性 支配方程式を検討するために、2種類の実験と数値解析を行った。数値解析は、中川の研究³⁾を参考にして支配方程式をリーブフロッグ法によって差分化を行い計算した。

まず、図-1に示すように1次元水路にあらかじめ砂礫を敷き、その後通水を行い土石流が形成されていく様子を側面からビデオ撮影した。実験結果と計算結果を図-2に示す。いずれの図も、勾配変化点付近の結果である。計算結果において斜線を施した部分はその時刻における河床高を示したものである。計算では、 $\Delta x = 5.0 \text{ cm}$ 、 $\Delta t = 0.002 \text{ sec}$ としている。濃度が薄い場合には抵抗則に若干の問題があるものの、図-2の結果より、計算によってほぼ現象が表現できていることが分かる。これは、芦田・江頭らによる支配方程式を用いれば河床が侵食され土石流が形成されるような現象でも評価できることを意味している。

次に、2次元氾濫堆積実験を行い支配方程式を検討してみる。実験装置は、上流部の水路(長さ4m 幅10.5cm)と下流部の氾濫台(長さ2m 幅60cm)からなるものを用いた。実験方法は、水路上流側から一定量の水と砂礫を一定時間供給(約10秒)することにより土石流を発生させた。最終時間における等堆積厚線の実験結果と計算結果を図-3に示す。実験条件は図中に示すとおりである。計算条件は、 $\Delta x = \Delta y = 5.0 \text{ cm}$ 、 $\Delta t = 0.002 \text{ sec}$ とし、上流端での境界条件として、実験で測定した給砂量、給水量を用いている。図-3の結果より、実験結果と計算結果はほぼ一致していることが分かる。細かくみると、計算結果の方が若干流下方向に長く堆積しているが、これは、堆積が進んでいき土石流の濃度が薄くなると水と土砂が分離するためであると思われる。

5. あとがき 本研究によって、芦田・江頭らによって示された土石流の支配方程式の妥当性が示された。今後、この支配方程式を用いた数値シミュレーションにより、土石流の堆積危険範囲の普遍表示法について検討したい。また、今後の研究の方向としては、実際に土石流が起こった場合は、いろいろな流れの形態を含む場合が多いと思われるので、広い意味での流砂現象を一般的に表すことのできる基礎式を構築していきたい。

6. 参考文献

- 1) 芦田・江頭・矢島:土石流の流動・堆積機構、京大防災年報、第31号B-2、1988
- 2) 芦田・江頭・矢島・高濱:土石流の構成則に関する研究、京大防災年報、第32号B-2、1989
- 3) 中川:洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究、京大学位論文、1989

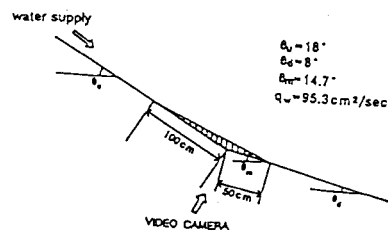
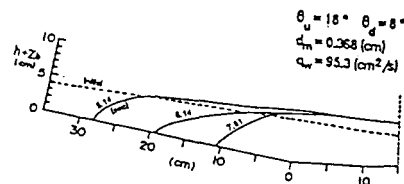


図-1

Experiment



Calculation

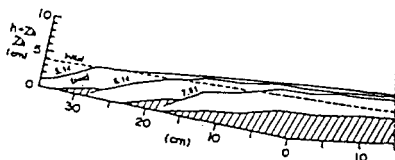


図-2

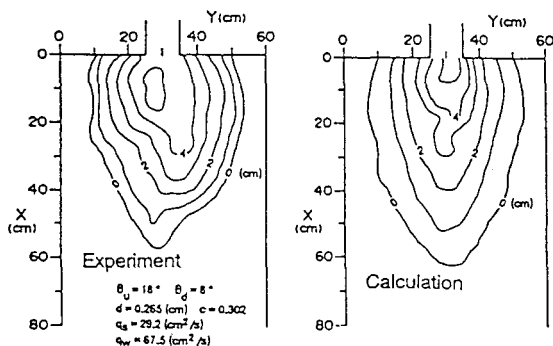


図-3