

1. はじめに. 土石流や泥流は一般に広い粒度分布をもつため、似たような粒度分布からなる流れにおいても流れの規模、境界条件等によって流況が大幅に異なる場合がある¹⁾。また、土石流、泥流という流れの区分も経験的になされており、現場技術者や研究者ごとにまちまちであるようである。本文は、そのような反省にたつて、従来の土石流や泥流の流動機構に関する研究をもとにそれぞれの流れを力学的に定め、その領域区分についての考察を行ったものである。

2. 土石流、泥流と流動式. 従来、土石流は粒径の大きい砂礫を主体とする高濃度固液混相流として、泥流は粒径の小さいシルト、微細砂等を主体とする高濃度固液混相流としてとらえられているようである。これは、前者が流れの中で粗粒子が活発に衝突、接触を繰り返す、Bagnold によって提案された dilatant 流体としての性質をもつこと、後者が微細粒子の表面電荷にもとづく剪断降伏応力と非常に高いみかけの粘性係数をもつ Bingham 流体としての性質をもつことによると考えられる。そこで、ここでは、流れが dilatant 流体としての性質をもつ場合を土石流、Bingham 流体としての性質を持つ場合を泥流と呼ぶことにする。このように考えることによって、土石流か泥流かといった問題は、条件によって dilatant 流動と Bingham 流動にいかに分けられるかという問題になる。従来のこれらの流動式にかんする研究を整理すると、流動式は、土石流、泥流を問わず一般に、

$$\tau = \tau_y + \mu (du/dy) + f(C_g) \sigma D^2 (du/dy)^2 \quad \text{----- (1)}$$

と表される。ここで、 τ_y は剪断降伏応力、 μ はみかけの粘性係数、 D は活発に衝突、接触を繰り返している粒子の代表粒径、 C_g は粒径 D の粒子濃度、 f はその関数、 σ は粒子密度である。それぞれの項に最上²⁾、芦田・宮本ら³⁾、大同・宮本ら⁴⁾の研究を用いることにすると、

$$\tau_y = 9 \cdot 10^3 C_s (e^{3.71 C_s} - 1) + 8 \cdot 10^3 \left\{ 1 - \frac{1 + \frac{\lambda_s}{8} (e^{-\frac{8}{\lambda_s}} - 1)}{1 - e^{-\frac{8}{\lambda_s}}} \right\} + \sqrt{\frac{C_g^2}{1 - C_g^2}} P_s \quad (\text{dyn/cm}^2) \quad (2)$$

$$\mu = \mu_0 (1 + \lambda_g) (1 + \lambda_s) \quad \text{----- (3)}$$

$$f(C_g) = 3.40 \cdot 10^{-2} (C_g/C_0)^{1/3} \quad \text{----- (4)}$$

と表される。ここで、 C_s は微細粒子に関する濃度 ($C_s = (C - C_g)/(1 - C_g)$)、 C は粒子全体の粒子濃度、 P_s は粒径 D の粒子の粒子間圧力で、 $P_s = C_g (\sigma - \rho) g (h - y)$ ----- (5)、 λ_g 、 λ_s は、それぞれ $\lambda_g = 1 / [(C_0/C_g)^{1/3} - 1]$ 、 $\lambda_s = 1 / [(C_0/C_s)^{1/3} - 1]$ ----- (6)、 μ_0 は流体の真の粘性係数、 C_0 は粒子の充填濃度でほぼ $C_0 = 0.65$ 、 ρ は流れ全体のみかけの密度である。式(1)において流動形態を支配している項は右辺第2項と第3項であり、土石流では第2項に比べ第3項が卓越しており、泥流ではその逆になる。

3. 領域区分. 流れが土石流となるか泥流となるかについて式(1)をもとにして考察する。式(1)中の右辺の第2項と第3項との大小関係から土石流となるか泥流となるかがほぼ判断されることから、両項の比をとる。すなわち、式(1)、式(3)、式(4)より

$$R = \frac{3.4 \cdot 10^{-2} (C_g/C_0)^{1/3} \sigma D^2}{(1 + \lambda_g) \cdot (1 + \lambda_s) \cdot \mu_0} \left(\frac{du}{dy} \right) \quad \text{----- (7)}$$

を得る。R ≪ 1 であれば、第2項が卓越し、流れは泥流となり、R ≫ 1 であれば第3項が卓越し、流れは土石流となる。式(7)は歪速度がパラメータとしてはいつているので、このままでは評価がしにくい。そこで、Rと対をなす無次元パラメータをBagnold にならって⁵⁾

$$G^2 = \frac{3.4 \cdot 10^{-2} (C_g/C_0)^{1/3} \sigma D^2}{(1+\lambda_g)^2 (1+\lambda_s)^2 \mu_0^2} (\tau - \tau_y) \quad \text{----- (8)}$$

で定義する。式(7)と式(8)の関係は、G² = Rⁿとおいたとき、n = 1ならば、式(1)の第3項を省略した形に、n = 2のとき、第2項を省略した形となる関係にある。式(8)を ρ U_{*}'² = (τ - τ_y) を用いて書き直すと

$$G = \frac{\sqrt{3.4}}{10} \frac{(C_g/C_0)^{1/6}}{(1+\lambda_g)(1+\lambda_s)} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_0}} \left[C \left(\frac{\sigma}{\rho_0} - 1 \right) + 1 \right] \frac{U_*' D}{\nu_0} \quad \text{----- (9)}$$

を得る。ここで、ρ₀は流体の真の密度である。両流動形態の境界はR = 1で与えられることは先に述べたが、このときG = 1であるから、結局、

$$Re = \frac{U_*' D}{\nu_0} = 5.42 \frac{(1+\lambda_g)(1+\lambda_s)}{(C_g/C_0)^{1/6}} \left[\frac{\sigma}{\rho_0} \left\{ C \left(\frac{\sigma}{\rho_0} - 1 \right) + 1 \right\} \right]^{-1/2} \quad \text{----- (10)}$$

が境界を表していることになる。右辺はσ = 2.65とすると濃度のみの関数となることから、縦軸を濃度に、横軸をRe数にとって式(10)を求めるとC_g/Cをパラメータとして図1を得る。このような整理を行うとほぼ一意的に両流動形態が決定されることがわかる。そこで限界レイノルズ数を図1に示した直線で近似すると、

$$Re_c = U_*' D / \nu_0 = 10.6 \cdot 10^{1.2C} \quad \text{----- (11)}$$

を得る。式(12)は領域区分の目安を与えるものであるが実際の流れに適用するとき、式(11)、式(2)のDとC_g/Cを決定しなければならない。この問題は最も難解な問題のひとつであるが、混合粒径からなる土石流の流動機構に関して得られた知見⁶⁾から一応つきのように定めることができるであろう。すなわち、Dとしては粒径加積曲線で最も勾配が急な点における粒径を、C_g/Cとしては、そのDの1/2倍以上の大きさをもつ粒径粒子の存在率を用いるということである。

4. おおひび 以上、土石流と泥流の領域区分について若干の考察を行い区分法の提案を行った。まだ実験や現場のデータと比較をしておらずははっきりしたことは分らないが、いずれにしてもこういうかたちで整理できるものと思っている。今後、さらに検討を加えていきたい。

参考文献: 1) 藤田, 長谷川, 山岡, 岡山; 土木学会北海道支部論文報告集, 1981, pp.267-272. 2) 最上; 土質力学, 第8章, 技報堂. 3) 芦田, 宮本, 神田; 高濃度流れに関する研究(2), 京大防災研年報29号B-2, 1968. 4) 宮本, 大同, 三輪, 西本; 土木学会39回年講, 1984, pp.367-368. 5) Bagnold, R. A.; Proc. Roy. Soc. A-225, 1954, pp49-63. 6) 宮本, 大同; 土木学会論文集第357号II-3, 1985, pp.25-34.

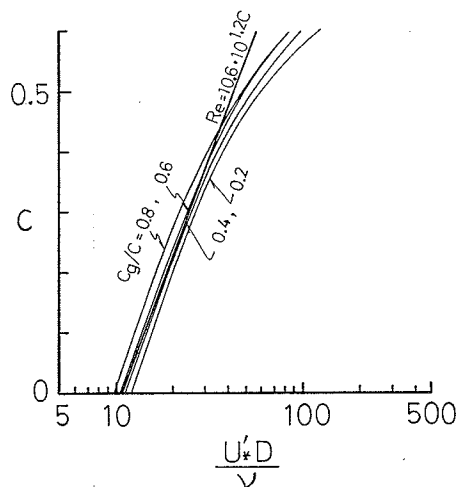


図 1