

高濃度土砂流れの領域区分に関する検討

東京大学大学院 堀田 紀文

1. はじめに

一般に、石礫型土石流はダイラタント流体の層流として取り扱え、泥流はビンガム流体もしくは乱流として取り扱えるなど、高濃度土砂流れの流動機構に関しては、従来からの研究によってある程度の知見が得られてきた。しかしながら個々の研究は、予め経験的に上述の流れの区分を行った後になされ、理論の検証のための実験も限られた領域内でしか行われていないことが多い。他の研究者の実験との比較も、理論が要求するデータを満たせないために困難な場合がほとんどであるから、各流動現象のつながりが見えにくく、土砂流れの領域区分に関して、いくつかの考察が存在してはいるが¹⁾²⁾、未だ十分な理解は得られていない。

本文では以上を踏まえた上で、高濃度土砂流れの領域区分を行うにあたって、過去の実験データ³⁾⁻¹⁰⁾の解析によって総括的な立場からの検討を試みた。

2. 抵抗係数 f による整理

流れのエネルギー勾配と運動エネルギーの比を表す抵抗係数 f は、流れの内部構造に立ち入らずにマクロな特性を記述するのに有効である。今回レビューを行った実験における抵抗係数 f の範囲を図1に示した。開水路において抵抗係数は、

$$f = \frac{2ghi}{U_0^2} = 2iFr^{-2} \quad (1)$$

と表せる。ここで g は重力加速度、 h は水深、 i は水路勾配、 U_0 は平均流速、 Fr はフルード数である。したがって、図1におけるばらつきは実験における水路勾配 i の違いに起因することが分かる。また、図1から土砂流れの実験のほとんどが、フルード数が1より大きい、いわゆる射流の状態で行われていることが見て取れ、各実験を合わせると、抵抗係数 f に関して比較的広い範囲で実験が行われていることが分かる。なお、今回収集した実験データは、いずれも粒子に対する電気的な影響が無視できる程度の粒径の粒子を用いた結果である。

次に、 f と相対水深 h/d の関係を図2に示す。 d は構成粒子の代表粒径である。いわゆるダイラタント流体としての取り扱いをされる石礫型土石流においては、その構成則から、抵抗係数 f は理論的に h/d の関数として表せる³⁾⁸⁾。芦田ら⁸⁾によれば

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

となるが、ここで k_f は形状係数、 c は濃度、 k_s は係数で実験から0.0828、 σ は粒子密度、 ρ は清水の密度、 e は粒子の反発係数である。(2)式に各値を代入した理論線も図2に示してある。

図2において f は、濃度ごとにプロットされている。 f が0.1程度の領域で実験と理論は比較的良好に一致していることが分かる。また、理論との適合性が、 h/d に大きく影響されていることが見て取れる。 h/d が大きくなると、流れは清水の乱流に遷移すると考えられ、実際に、たとえば高濃度の泥流も清水の乱流と同様の挙動を示すことが知られている¹⁰⁾。図2から、多くの実験はダイラタント流体(層

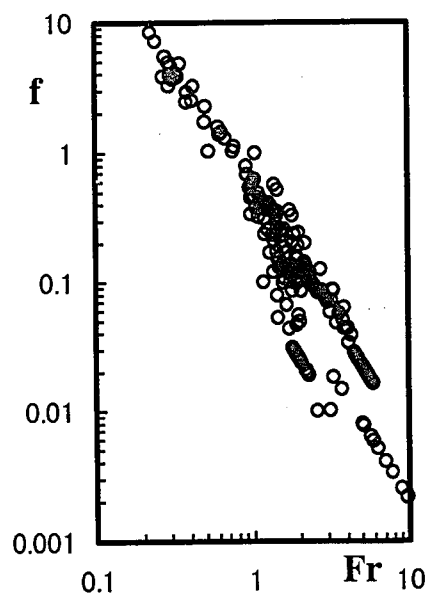


図1 抵抗係数 f の範囲

流)か乱流かに明確に分けられないような遷移域に集中していると言えそうである。つまり、現象面からの流れの区分を行うのは実際には困難であり、ある程度流れの領域を理論的に評価する手段を確立する必要があると思われる。

3. 土砂流れのレイノルズ数の検討

清水においては、レイノルズ数によって流れが層流であるか乱流であるかの判定が行われる。それにならい、ここでも土砂流れのレイノルズ数を導入する。

$$Re_* = \frac{U_0 h}{\gamma_*} \quad (3)$$

但し、 $\gamma_* = \frac{\mu_*}{\rho_m} = \frac{\tau_*}{\rho_m du/dy}$ となる。ここで τ_* は

土砂流れにおいて流動に關与する内部せん断応力成分であり、江頭ら⁴⁾によって

$$\tau_* = \tau_f + \tau_d = k_f \rho d^2 \frac{(1-c)^{2/3}}{c^{2/3}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + k_g \sigma (1-e^2) d^2 c^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (4)$$

とおかれている。

この土砂流れのレイノルズ数を、ガラスビーズを用いた高濃度固液混相流における間隙水圧の測定結果¹⁾を適用して検討する。構成粒子の流線が平行な、いわゆる層流状態の土砂流れにおいて間隙水圧は静水圧に近い値をとるとされるが、流れが乱流に遷移すれば間隙水圧は粒子の水中重量の分だけ増大する。厳密には層流状態の土砂流れにおいても、そのレイノルズ数に応じた間隙水圧をとることになる筈だから、レイノルズ数と間隙水圧の大きさには正の相関関係が存在すると考えられる。(3)式に実験の各値を代入したものと、路床底面における間隙水圧水頭を水深で無次元化したものを図3において比較したところ、両者の間に正の相関があることが確認できた。これより、(3)式によって示された土砂流れのレイノルズ数は土砂流れの状態を反映しており、領域区分をおこなううえでもある程度有効であると考えられる。

4. おわりに

過去の実験データより、我々の対象とする土砂流れが層流から乱流への遷移領域にあると考えられることが分かった。よって、土砂流れの領域区分を理論的に行うことが必要となり、ここで導入されたレイノルズ数はある程度流れの状態を反映することが確認できた。

参考文献

- 1)宮本:昭和 61 年砂防学会研究発表会概要集, pp.146-147, 1986, 2)平野ら:水工学論文集, 第 36 巻, pp.221-226, 1992, 3)Maniali, A. et al.:J.Hydr. Engrg., ASCE, 120(1), 104-123, 1994, 4)江頭ら:京大防災研年報, 第 20 号, B-2, pp.487-501, 1989, 5)江頭ら:水工学論文集, 第 35 巻, pp.441-446, 1991, 6)江頭ら:京大防災研年報, 第 37 号, B-2, pp.359-369, 1994, 7)高橋ら:京大防災研年報, 第 39 号, B-2, pp.333-346, 1996, 8)芦田ら:京大防災研年報, 第 31 号, B-2, pp.411-422, 1988, 9)石川ら:平成 7 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.317-322, 1995, 10)芦田ら:京大防災研年報, 第 29 号, B-2, pp.361-375, 1986, 11)堀田ら, 砂防学会誌, Vol.50, No.6, pp.11-16, 1998

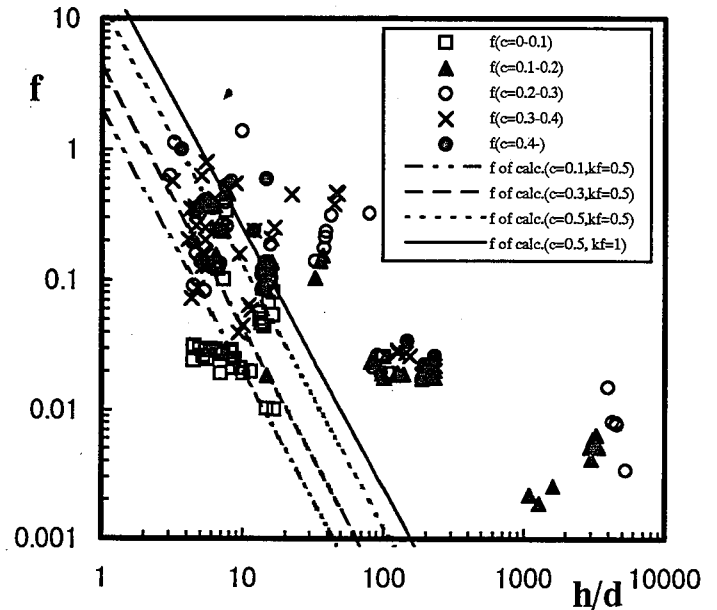


図2 f-h/d 関係

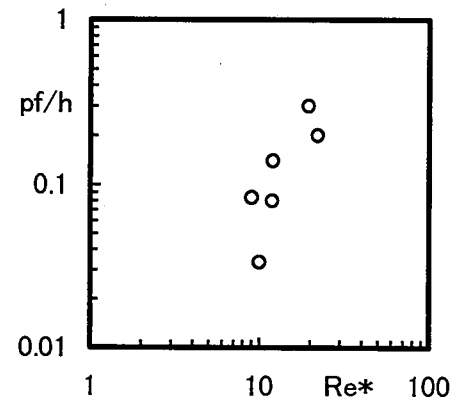


図3 pf/h-Re* 関係