

固定床上を流れる土石流の流動特性

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 ○鶴見侑生 宮本邦明

1 はじめに

ハザードマップの作成や砂防施設の機能評価といった防災的観点から、土石流のシミュレーションが行われている。これまでのシミュレーションは移動床を対象として開発されている。一方、移動床と固定床では次の理由から流速分布や濃度分布といった流動特性に違いがあることが理論的¹⁾、実験的²⁾に分かっている。

○移動床: 外力としてのせん断応力と降伏応力が釣り合う位置が河床となり、流速分布と濃度分布が河床勾配に対して一意的に決まる¹⁾。

○固定床: 河床でせん断応力と降伏応力が釣り合っておらず、河床の位置を条件として与えることができ、流速分布や濃度分布は河床勾配に対して一意的に決まらない¹⁾。

しかしながら固定床での流動特性の詳細は明らかになっていない。そこで本研究ではもう一度基礎式に立ち返って定常等流の運動方程式、江頭らの構成則³⁾からこれを明らかにすることを目的とする。

2 濃度分布を表す微分方程式の導出過程の見直し

流下方向に x 軸、 x 軸に直角上向きに z 軸をとると、定常等流での運動方程式はそれぞれ次式で表される。

x 方向成分:

z 方向成分:

$$0 = g \sin \theta \int_z^h \{(\sigma - \rho)c(z) + \rho\} dz - \tau(z) \quad (1) \quad 0 = g \cos \theta \int_z^h \{(\sigma - \rho)c(z) + \rho\} dz - p(z) \quad (2)$$

この $\tau(z), p(z)$ に江頭らの構成則³⁾を適用して、既往研究^{1), 2)}にあるように濃度分布を表す微分方程式を導く過程をたどると式 (3) が出てくる。

$$\bar{c}(z) = \frac{\int_z^h c dz}{h - z} = \frac{f_{pd} \tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)\{f_d + f_f - f_{pd} \tan \theta - ((c/c_*)^{0.2}(f_d + f_f - f_{pd} \tan \theta))\}} \quad (3)$$

ここで $f_d = k_d(1 - e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}$, $f_f = k_f(1 - c)^{5/3}/c^{2/3}$, $f_{pd} = k_d e^2(\sigma/\rho)c^{1/3}$ である。これを z で微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial z} = \frac{\bar{c}(z) - c(z)}{h - z} \quad (4)$$

この式で $h - z$ は常に正の値をとるため、 $\bar{c}(z) - c(z)$ が $\partial \bar{c}(z)/\partial z$ の正負を支配している。ここで、ある z で $\bar{c}(z) - c(z) > 0$ ならば $\partial \bar{c}(z)/\partial z > 0$ となり、 $\bar{c}(z)$ は z に対して単調増加する。これはつまり、ある z より上方では濃度勾配 $\partial c/\partial z$ が常に正の値をとることを表している。逆もまた同様に、 $\bar{c}(z) - c(z) < 0$ ならばある z より上方では濃度勾配が常に負の値をとることを表している。従来、式 (4) の $c(z)$ を F とした濃度分布を表す微分方程式が用いられている。

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{1}{\partial F/\partial c} \frac{F - c}{h - z} \quad (5)$$

式 (5) に河床面濃度を境界条件として与えることにより移動床、固定床によらず濃度分布を計算できる。江頭ら³⁾や伊藤ら²⁾は式 (5) を数値的に解くことや、実験においてこの濃度勾配が正の値をとる現象を確認し、濃度の逆転現象と呼んでいる。本研究では式 (3) が任意の深さから水面までの深さ方向の平均濃度式であることに着目する。そこで $z = 0$ で $c(0) = c_0 (< c_*)$ を与えると土石流の平均濃度式は次式のように表される。

$$\bar{c} = \frac{\int_0^h c dz}{h} = \frac{f_{pd} \tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)\{f_{pd}((c_0/c_*)^{0.2} \tan \phi_s - \tan \theta) + (1 - (c_0/c_*)^{0.2})(f_d + f_f)\}} \quad (6)$$

この式で $c_0 = c_*$ (移動床) とすれば、従来から知られている平均濃度式となる。

$$\bar{c} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (7)$$

3 濃度分布と流れの領域区分図

図 1 に、河床勾配と境界条件として河床面濃度を与えて式 (5) を数値的に解いたもの (以後厳密解と呼ぶ) の一例を示す。計算には $c_*=0.52$, $\phi_s=38.7(\text{deg.})$, $k_d=0.0828$, $e=0.85$, $\sigma/\rho=2.65$, $k_f=0.16$, $h=0.0218(\text{m})$ を

用いた。このように濃度分布の厳密解は曲線であるが、これを直線で近似した⁴⁾(以後近似解と呼ぶ)。濃度分布を直線で近似すると、河床面濃度、河床勾配が小さい条件では高濃度に土砂を含む砂礫流動層と土砂を含まない清水層との2層流となる。このとき2層の境界位置を h_s とすると、 $\bar{c}_s = \int_0^{h_s} c dz / h_s$ で定義される砂礫流動層の平均濃度は $\bar{c}_s = 0.5c_0$ で与えられる。この $\bar{c}_s$ が式(6)で計算した平均濃度と一致するとき土砂流、 $\bar{c} < \bar{c}_s$ の場合土砂流である。また、土砂流において $\bar{c} > c_0$ の場合濃度の逆転現象である。近似解も厳密解と同様に濃度が単調減少もしくは単調増加していることが分かる。図2は、濃度分布の直線近似により区別した土砂流や土石流、濃度の逆転現象といった流れの状態を、各河床面濃度、河床勾配ごとにまとめたものである。これによると、一定の河床勾配で河床面濃度を变化させると土砂流～土砂流～濃度の逆転現象の間で流れの状態が変化することが分かる。

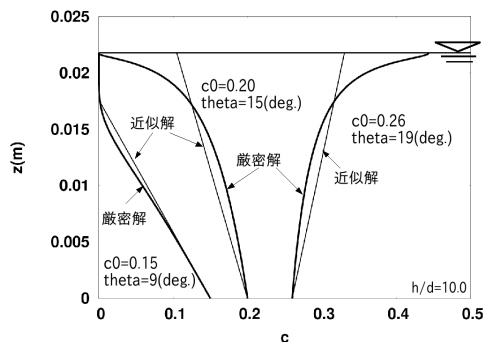


図1 濃度分布の厳密解と近似解

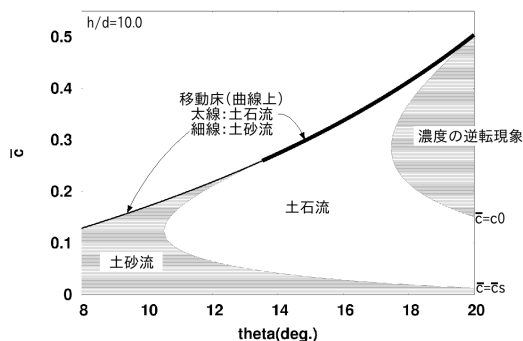


図2 領域区分図

4 抵抗則

$\theta=11, 15, 19(\text{deg.})$ での抵抗則の計算結果を図3-5に示す。計算には宮本ら⁴⁾の式を用いた。一定の河床勾配、相対水深でみると、河床面濃度を大きくすると無次元平均流速は一旦大きくなるが、その後小さくなるという傾向が見られた。

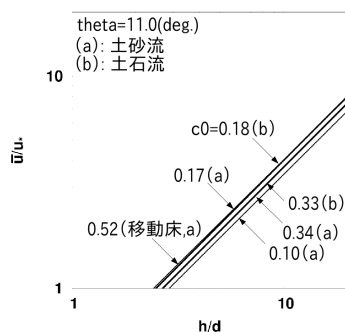


図3 抵抗則の計算結果 ($\theta=11(\text{deg.})$)

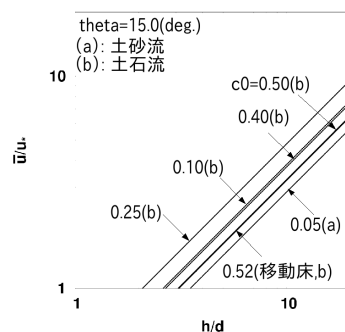


図4 抵抗則の計算結果 ($\theta=15(\text{deg.})$)

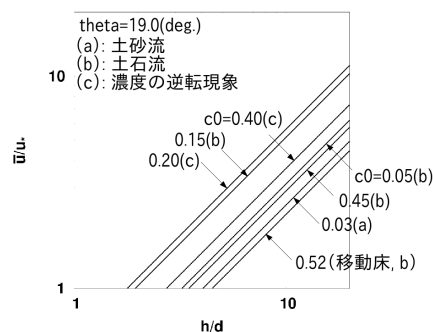


図5 抵抗則の計算結果 ($\theta=19(\text{deg.})$)

5 おわりに

濃度分布を直線で近似し、式(6)で計算した $\bar{c}$ と $\bar{c}_s$ の大小から土砂流、土石流を区分した。さらにこの区分を各河床面濃度と河床勾配でまとめ、領域区分図を作成した。この図で一定勾配として河床面濃度を大きくすると流れの状態が変化することから、これをパラメータとして抵抗則を計算した。その結果、河床面濃度が大きくなると一旦は無次元平均流速は大きくなるものの、その後小さくなる傾向を示した。今後はこれらをシミュレーションに適用し、水路実験との比較により計算方法が適当であることを確認する。

- 1) S. Egashira, et al.: 1st. International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation ASCE: 340-349, 1997
- 2) 伊藤ら: 水工学論文集, 第43巻, pp. 635-640, 1999
- 3) 江頭ら: 京都大学防災研究所年報, 第32号, B-2, pp. 487-501, 1989
- 4) 宮本ら: 砂防学会誌, Vol. 55, No. 2, 24-35, 2002