

土石流に関する構成則の比較研究

COMPARATIVE STUDY OF CONSTITUTIVE EQUATIONS ON DEBRIS FLOWS

伊藤隆郭¹・江頭進治²

Takahiro ITOH, Shinji EGASHIRA

¹学生会員 立命館大学大学院 環境社会工学専攻 (〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Many constitutive equations describing the flow of sediment-water mixture have been presented. Several ones are chosen for discussions, which are concerned for coarse grains-water mixture flows, and developed by assuming a laminar grain motion. It is reported in their study papers that they successfully predict the flume data obtained by themselves. However the constitutive equations yield different explanations of the same phenomena. The present study gives some results on the characteristics of these constitutive equations by solving velocity profile, sediment concentration profile, flux sediment concentration and flow resistance.

Key Words : debris flow, sediment laden flow, constitutive equations

1. 緒言

土石流や泥流は、大小様々の砂礫粒子と水との混合物の流れであって、粒子濃度や粒子の粒度分布特性により流れの性質が変化する。これらの応力構造は Newton 流体とは本質的に異なるため、それらの構成則を合理的に評価するのは、かなり困難な状況にあり、これまでに多くの構成関係式が提案されてきた。いま仮に、砂礫粒子が層流運動をするような流れに限り、これを土石流と呼ぶことにし、その構成則についてみても、1980年代の後半までに高橋¹⁾、椿ら²⁾、宮本³⁾および江頭ら⁴⁾の式が提案されてきた。これらはいずれもそれぞれの研究の進展に伴い改良されてきたものの、土石流の流れあるいは力学的な解釈に顕著な違いがみられるばかりでなく、同じ現象に対して異なった結果を与えるという好ましくない状況になっている。

上述の状況にあって、これらのある統一的な観点から比較研究することは極めて重要である。ところがそれららを評価するための基準を何にするかによって、結果は左右される。その基準として、いずれの研究も移動床上において侵食も堆積もない状況、すなわち平衡状態を対象にしたものであることを考慮すれば、土石流の平衡濃度や土石流から土砂流への遷移の連続性などを調べるのも一つの方法と思われ、これらが各研究においていかに評価されるかを見ておくことは重要と思われる。

そこで、本研究においては、土石流に関する代表的な研究を選び、構成則に関する若干の私見を交え

ながらこれらを検討するとともに、これらの構成則を運動量保存則へ適用して得られる流速分布、粒子濃度分布、抵抗則などについて検討する。

2. 構成則の解釈および流速・粒子濃度分布則

定常等流を対象とし、流れ方向に x 軸をとり、流れに垂直方向に z 軸をとれば、運動量保存則は次式で表される。

$$0 = \int_z^{h_i} \rho_m g \sin \theta dz - \tau(z) \quad (1)$$

$$0 = \int_z^{h_i} \rho_m g \cos \theta dz - p(z) \quad (2)$$

ここに、 h_i は流れの厚さ、 g は重力加速度、 θ は x 軸と水平とのなす角度、 τ は河床から任意の高さにおけるせん断応力、 p は等方圧力、 ρ_m は混合物の密度で、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ である。ここに、 σ は粒子の密度、 ρ は水の密度、 c は混合物中の粒子の体積濃度である。また、式(2)の p のうちの間隙水圧を静水圧で近似すると式(2)は次のように表される。

$$0 = \int_z^{h_i} \rho(\sigma/\rho - 1)cg \cos \theta dz - p(z) \quad (3)$$

(1) Bagnold の構成則

Bagnold⁵⁾は、Newton 流体と中立粒子の混合物を二重円筒の中で一様にせん断させる実験を行い、応力と歪み速度との関係を求め、この結果より、慣性領域と粘性領域が存在することを示した。慣性領域において次式を提案した。

$$\tau_d = a_i \sin \alpha_i \left\{ (c./c)^{1/3} - 1 \right\}^{-2} \sigma d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (4)$$

$$p_d = a_i \cos \alpha_i \left\{ (c./c)^{1/3} - 1 \right\}^{-2} \sigma d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (5)$$

ここに、 a_i は実験定数 ($\cong 0.042$)、 α_i は粒子の衝突角、 $c_.$ は静止堆積層の濃度、 d は粒子径、 u は流速である。Bagnold は、粒子同士は完全弾性衝突をするものとみなし、応力の検査面を粒子の表面にとり、力を粒子衝突角を介して流れ方向と流れに垂直な方向に分けて、それぞれせん断応力、圧力と定義した。

Bagnold の想定した系では、粒子同士の衝突によってエネルギー散逸は生じない。したがって、式(4)をせん断応力とみなすには少々無理があり、実験式程度の意味に解釈しておいた方が妥当であろう。

(2) 高橋の構成則

高橋¹⁾は、Bagnold⁵⁾の慣性領域における構成則を適用し、土石流の流速分布や砂礫の断面平均濃度式を提案した。断面平均濃度式は、次のように与えられている。

$$\bar{c} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (6)$$

ここに、 ϕ_s は砂礫の内部摩擦角である。式(6)は実験式であることに注意が必要である。

高橋は、その後の研究を通じて、式(4)、(5)の $\tan \alpha_i$ を Savage⁶⁾の実験結果を参考にして次式のように修正している⁷⁾。

$$\tan \alpha_i = (c./c)^{1/3} \tan \phi_s \quad (7)$$

これは、動摩擦係数を静摩擦係数よりも大きく与えるものであり、これについては、検討が必要である。

最近、河床近傍では降伏応力が存在するものとして、式(4)、(5)をそれぞれ次のように修正した⁸⁾。

$$\tau = p_s \tan \phi_s + \tau_d \quad (8)$$

$$p = p_s + p_d \quad (9)$$

ここに、 p_s は静的圧力であり、次式のような関数形を仮定している。

$$\frac{p_s}{p} = f(c) = \frac{c - c_3}{c_s - c_3} \quad (c \geq c_3) \quad (10)$$

ここに、 c_3 は p_s の作用する限界の濃度で、Bagnold の実験結果⁹⁾を参考にして $c_3 \cong 0.50$ としている。

式(10)によれば、静的な圧力の流れに及ぼす影響はごく僅かであり、流れを規定する応力は粒子衝突によるものが卓越する。

なお、式(6)は、土石流の断面平均濃度が勾配によって一義的に定まることを示したものである。同式は、式(1)、(3)に対し、式(4)、(5)および式(7)を適用し、 $z=0$ において $c=c_.$ とすれば導かれる。ところが、式(4)、(5)の代わりに式(8)、(9)を用い、 $z=0$ における $c=c_.$ の条件を与えると τ_d および p_d が発散する形になり、式(6)の導出は困難になる。これは、

$z=0$ における応力の不連続性に起因するものであって、これを回避するための工夫が必要になる。

流速分布と濃度の鉛直分布に関する予測式は、式(1)、(3)に式(7)、(8)、(9)および(10)を適用すれば、次式で与えられる。

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = \left(\frac{h_i}{d} \right) \left[\frac{\left\{ (c./c)^{1/3} - 1 \right\}^2}{a_i \sin \alpha_i \sigma / \rho} \right]^{1/2} \left\{ \sin \theta (1 - z') - f(c) (\sigma / \rho - 1) \cos \theta (\tan \phi_s - \tan \theta) \int_z^1 c dz' \right\}^{1/2} \quad (11)$$

$$\int_z^1 c dz' = \frac{1}{(\tan \alpha_i - \tan \theta) - (\tan \alpha_i - \tan \phi_s) f(c) \cdot \tan \theta (1 - z') / (\sigma / \rho)} \quad (12)$$

ここに、 $u' = u / \sqrt{gh_i}$ 、 $z' = z / h_i$ である。

高橋¹⁰⁾は、土砂流に関する取り扱いも提案した。このうち水流層についてのものを示すと、これは、次のようである。高濃度層と清水層との境界（以下、interface と呼ぶ。）を $c=0.2$ の位置に選び、仮想原点 ζ_B を導入して interface 近傍における速度勾配の連続性を考慮して、次式が与えられている⁸⁾。

$$\partial u' / \partial z' = \left\{ \sin \theta (1 - z') \right\}^{1/2} / l' \quad (13)$$

$$l' = \kappa \{ z' - h'_s + \zeta'_B \}$$

$$\zeta'_B = \left\{ \sin \theta (1 - h'_s) \right\}^{1/2} / \left\{ \kappa (\partial u' / \partial z') \right\}_{z'=h'_s}$$

$l' = l / h_i$ 、 κ は Kármán 定数、 h_s は河床から interface までの高さで $h'_s = h_s / h_i$ である。

(3) 椿・橋本・末次および橋本・椿・平野の構成則

椿²⁾、橋本¹¹⁾は、砂粒子および人工材料を用いた移動床開水路上の実験を詳細に観察することにより、運動量交換の概念から固体表面に作用する力を評価し、次式を導いた。

$$\tau = K_M \sigma d^2 (c/c_.)^2 / (1 - c/c_.) (\partial u / \partial z)^2 \quad (14)$$

$$p = \frac{1}{\alpha} \tau + K_p \frac{c}{c_} \frac{c - c_s}{c_s} \quad (15)$$

$$K_M = \frac{\pi}{6} (0.0762 + 0.102\mu) \beta^2 k_M$$

$$K_p = c_s \rho (\sigma / \rho - 1) g h_i \cos \theta \chi$$

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \rho / (2\sigma)}, \quad \beta = c_./\frac{\pi}{6}, \quad \gamma = \frac{0.0762 + 0.102\mu}{0.0898 - 0.067\mu}$$

ここに、 c_s は表面濃度、 μ は砂粒子同士の動摩擦係数 ($= 0.05 \sim 0.1$)、 k_M は経験定数 ($= 5 \sim 7.5$)、 χ は経験定数 ($= 1/5 \sim 1/3$) である。式(14)は粒子衝突によるせん断力を示し、式(15)の右辺第一項は粒子衝突による圧力であり、第二項は粒子接触による圧力

である。椿ら、橋本らの研究の意義は、粒子衝突現象を非弾性衝突の多体問題として取り扱った点にあるものと思われる。式(14), (15)によれば、高橋のものと同様に $c = c_s$ において応力は不連続になる。ところが、後述の式(16)を式(14), (15)に代入すると、応力の連続性は保証されていることになる。なお、式(14)の導出において、粒子一個の質量が実際のものの $k_M/(1-c/c_s)$ 倍 (約10~100倍) に見積もられている。これは、粒子接触によるせん断力が省略されていることにも一因があるように思われる。

速度と濃度分布に関する式は、式(1), (3)に式(14), (15)を適用すれば、次式で与えられる。

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = \left(\frac{h_t}{d}\right) \left\{ \frac{\sin \theta}{(\sigma/\rho) K_M \Psi (c/c_s)^2} \right\}^{1/2} \cdot \left\{ (1-z') + \chi(\sigma/\rho - 1)(c - c_s) \frac{c}{c_s} \right\}^{1/2} \quad (16)$$

$$2 \frac{c_s - c}{c_s} - \frac{2c_s - c_s}{c_s} \ln \left(\frac{c - c_s}{c_s - c_s} \right) = \frac{\Psi}{\chi} z' \quad (17)$$

$$c_s = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\alpha - \tan \theta)}, \quad \Psi = (\alpha - \tan \theta)/\alpha$$

土砂流に関しては、水流層内では流速を一定と近似し、下層においては、式(1), (3)に対し式(14)にレイノルズ応力を考慮したものと式(15)を適用した。速度と濃度分布に関する予測式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = \left(\frac{h_t}{d}\right) \left\{ \frac{\sin \theta}{(\sigma/\rho) K_M \Psi (c/c_s)^2} \right\}^{1/2} \times \left\{ (h'_s - z') + \chi_d(\sigma/\rho - 1) h'_s (c - c_s) \frac{c}{c_s} \right\}^{1/2} \quad (18)$$

$$z' = \frac{\chi_d h'_s}{\Psi c_s} \left\{ 2(c_0 - c) - (2c_s - c_s) \ln \frac{c - c_s}{c_0 - c_s} \right\} \quad (19)$$

ここに、 χ は経験定数 ($= 1/5 \sim 1/3$) で、 h'_s は下層の厚さで、これには実験式を適用している。 c_0 は $z=0$ における濃度で、 $c_0 = a_0 c_s$ として $a_0 \cong 1.978$ としている。これによれば、土砂流の $z=0$ における濃度は、土石流の $z=0$ における濃度 c_s よりも小さくなる。また、 $z=0$ において速度勾配をもち、土石流の場合のものとなっている。

最近、橋本ら¹²⁾は、水流層内にレイノルズ応力を適用した構成則を提案している。

(4) 江頭・宮本・伊藤の構成則

江頭・芦田ら⁴⁾は、土石流におけるエネルギー散逸は、層流粘性、粒子の接触、間隙の流体の乱れおよび粒子の非弾性衝突によるものが支配的であり、これらを線形的に加算して評価できると考え、非弾

性衝突によるエネルギー散逸および粒子衝突による圧力に関する宮本³⁾の研究成果を適用して、次のような関係式を導いた。

$$\tau_v = \rho v_f (1-c) (\partial u / \partial z) \quad (20)$$

$$\tau_y = p_s \tan \phi_s \quad (21)$$

$$\tau_f = \rho k_f d^2 (1-c)^{5/3} c^{-2/3} (\partial u / \partial z)^2 \quad (22)$$

$$\tau_d = k_d (1-e^2) \sigma d^2 c^{1/3} (\partial u / \partial z)^2 \quad (23)$$

$$p_d = k_d \sigma e^2 d^2 c^{1/3} (\partial u / \partial z)^2 \quad (24)$$

$$p_s / (p_s + p_d) \equiv 1 / (1 + \alpha) \quad (\alpha \cong 0.25) \quad (25)$$

ここに、 τ_v は液相の粘性応力、 τ_y は降伏応力、 τ_f は間隙水のせん断に伴う応力、 τ_d は粒子衝突に伴うせん断応力、 p_s は静的な骨格圧力、 p_d は粒子衝突に伴う動的圧力、 v_f は液相の動粘性係数、 k_f 、 k_d は経験定数で、それぞれ0.16~0.25、0.0828である。ところが、式(25)は固定床と移動床の問題を同時に議論できない矛盾を持っている。そこで、移動床の理論河床 $z=0$ において $p = p_s$ となるような関数形について検討し、式(25)の代わりに次式を提案した¹³⁾。

$$p_s / (p_s + p_d) \equiv f(c) = (c/c_s)^{1/n} \quad (26)$$

ここに、 $n=5$ である。これは、実験結果に基づいて決められている。

江頭らの研究は、移動床における河床の位置 $z=0$ (理論河床) を明らかにしたことに意義がある。すなわち、式(1), (3)に式(21), (22), (23), (24)および(26)を適用して、 $z=0$ において $\partial u / \partial z = 0$ になることを示すとともに、断面平均濃度 (平衡濃度) が次式によって与えられることを導いた。

$$\int_0^{h_t} c dz / h_t \equiv \bar{c} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (27)$$

速度と濃度分布の予測式は、式(1), (3)に式(21)~(24)および(26)を適用すれば次式によって与えられる。

$$\partial u' / \partial z' = (h_t / d) \left[(G - Y) / (f_d + f_f) \right]^{1/2} \quad (28)$$

$$(1 - z') \frac{\partial F}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial z'} = F - c \quad (29)$$

ここに、 $G = \sin \theta \int_z^1 \{ (\sigma/\rho - 1)c + 1 \} dz'$

$$Y = (c/c_s)^{1/n} \cos \theta \tan \phi_s \int_z^1 (\sigma/\rho - 1) c dz'$$

$$F = f_{pd} \tan \theta / \{ (\sigma/\rho - 1)(F_1 - F_2) \}$$

$$F_1 = f_f + f_d - f_{pd} \tan \theta$$

$$F_2 = (c/c_s)^{1/n} (f_f + f_d - f_{pd} \tan \phi_s)$$

$$f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma/\rho) c^{1/3}, \quad f_f = k_f (1 - c)^{5/3} / c^{2/3}$$

$$f_{pd} = k_d e^2 (\sigma/\rho) c^{1/3}$$

土砂流の下層の流れは、土石流と同じであり、水流層の取り扱いには次のようである。interface の位置を $c = 0.05$ の位置に選び、仮想原点 η_0 を導入して得られる対数則を適用して次式のように与えている。

$$u(z)/u_{*w} = u_i/u_{*w} + (1/\kappa) \ln \{ (z - h_s + \eta_0)/\eta_0 \} \quad (30)$$

ここに、 $u_{*w} = \sqrt{gh_w \sin \theta}$ 、 h_w は水流層の厚さ、 u_i は interface における流速で、 η_0 は粒子間隙スケールで、 η_0 は粒子間隙スケールに関する江頭らの式¹³⁾より次式で与えられる。

$$\eta_0 = al_0 = a \sqrt{k_f} \{ (1-c)/c \}^{1/3} d, \quad (a \cong 1.0) \quad (31)$$

3. 流速分布および濃度分布の解析

流速と濃度分布の予測式は前述の通りである。構成則の構造をさらに詳しく知るためには、流速分布と濃度分布の同時解（以下、厳密解と呼ぶ。）を求めることが必要である。

図-1(a), (b)は、各研究者の流速分布と濃度分布に関する厳密解を比較したものである。計算に用いた定数は、各々の提唱するものをを用いたが、共通するものについては統一し、 $\phi_s = 34.0^\circ$ 、 $c_s = 0.52$ 、 $h_t/d = 10.0$ としている。図-2(a), (b)は、 ϕ_s に対する感度を検討したものである。計算結果は、 $\theta = 5.0^\circ, 15.0^\circ$ のもので、 $\theta = 15.0^\circ$ が土石流に、 $\theta = 5.0^\circ$ が土砂流に対応する。高橋のものは、 $z = 0$ における濃度を c_s にすると、 τ_d 、 p_d が不定形になるため $0.983c_s$ として計算している⁸⁾。

図-1(a), (b)の土石流 ($\theta = 15.0^\circ$) に関する流速と粒子の鉛直分布についてみる。流速分布は、いずれも、 $z = 0$ 近傍で上に凸の形状を示し、自由表面近傍では下に凸の形状を示している。高橋のものは、椿らおよび江頭らのものに比べて流速の絶対値そのものが小さくなるため扁平な分布形になる。濃度分布には、濃度の絶対値そのものには顕著な違いは見られないが、分布形状は、江頭らのものは逆 S 字状の形状を示すのに対し、高橋および椿らのものは下に凸の形状を呈する。これは構成則の本質的な違いからくるもので、この種の研究において粒子接触応力あるいは骨格応力 τ_y が重要か否かによって異なる。

ついで、図-1(a), (b)の土砂流 ($\theta = 5.0^\circ$) の計算結果についてみる。水と砂礫の混合物の流れの領域（以下、下層と呼ぶ。）の流速分布形状は、高橋と江頭らのものは同様であり、橋本らのものは $z = 0$ において速度勾配をもち流速も大きく与えられている。水流層の領域では、橋本らのものは一定値を与えている。これに対し、高橋および江頭らは対数則型の分布形を基礎としているが、interface において高橋は速度勾配の連続性を、江頭らは速度の連続性を用いており、これが図のような違いとして現れて

いる。ついで、粒子濃度の鉛直分布についてみる。このとき、2章で示した $z = 0$ および interface の定義の違いに注意が必要である。仮に、interface の存在を無視して、 $z = 0$ における境界条件を与えて粒子濃度の鉛直分布を計算すると、高橋および橋本らのものは、自由表面である値に漸近するような分布形になる。これに対し、江頭らのものは図の結果に見られるように、ある高さにおいて粒子が存在しなくなり、これよりも上方では水流の領域が形成されるような分布形になる。各構成則から得られる分布形に対し interface を定義（高橋： $c = 0.2$ 、橋本ら：実験式、江頭ら： $c = 0.05$ ）すると、図-1 (b) のようになる。

図-2(a), (b)は、図-1 の結果が ϕ_s を 38.5° としたときどの程度変わるかをみたものである。これによれば、高橋の結果は比較的敏感に変化し、江頭らのものは少し変化する。いずれも、濃度が減少することによって流速が増加するような結果になる。なお、椿らや橋本らのものは、構成則に ϕ_s が含まれていないため、図-1(a), (b)の結果をそのまま示している。

図-3 は、土石流および土砂流における砂礫粒子の断面平均濃度（平衡濃度） $\bar{c} = \int_0^{h_t} cdz/h_t$ に関する結果である。江頭らの結果は、土石流、土砂流に関係なく、 $\bar{c}$ と θ とは一意的な関係にあり、式(6)あるいは式(27)に完全に一致し、高橋の結果は、勾配が 13.0° 以上のところで完全に一致し、土砂流の領域では、かなり小さくなる。椿らの結果は、いずれの領域でも式(6)よりも小さめの値になる。

なお、以上において Takahashi として示した曲線は、原文の式に沿って計算したもので、原文に示されているのものとは少々異なっている。原文の曲線の計算には錯誤があると判断される。以下、原文に示された曲線は ** 印を付けて示す。

4. 輸送濃度および抵抗則

移動床の土石流や土砂流の実験において、精度の良いデータを得るのはかなり難しいが、輸送濃度 $c_t = \int_0^{h_t} cudz / \int_0^{h_t} u dz$ に関する実験データはかなり信頼性が高い。そこで、3章において得られた $u(z)$ 、 $c(z)$ の結果を用いて輸送濃度を調べる。ついで、流れの抵抗特性をみる。

図-4 は、輸送濃度と勾配の関係である。図には、式(6)および江頭らによる実験値¹⁴⁾⁻¹⁶⁾も載せている。実験データによれば、輸送濃度は勾配とともに連続的に変化するのに対し、高橋、および椿らのものは土石流と土砂流との境界で不連続な結果になる。一方、江頭らのものは実験値と同様に連続的な解になっており、実験値に一致している。これは、江頭らの構成則が、 $p_s + p_d = p_s$ すなわち、 $p_d = 0$ となるところが理論河床 $z = 0$ であり、土石流であれ土砂流

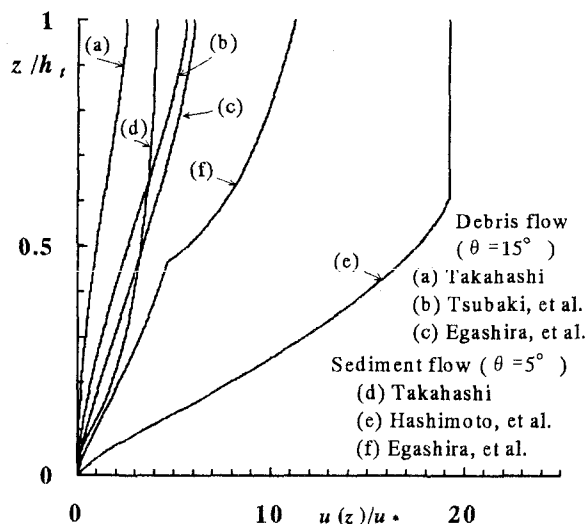


図-1 (a) 流速分布の比較 ($\phi_s = 34.0^\circ$)

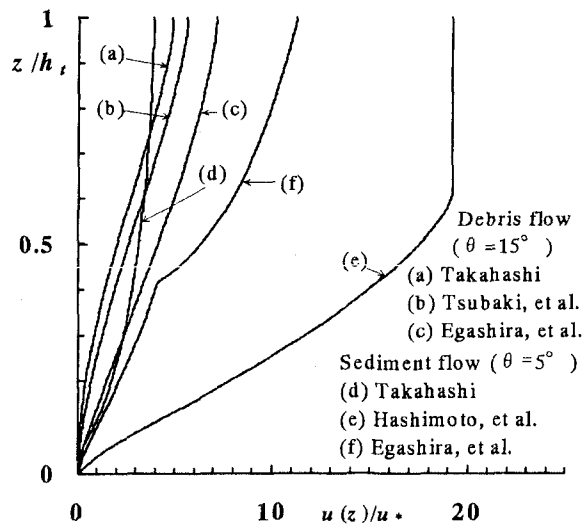


図-2 (a) 流速分布の比較 ($\phi_s = 38.5^\circ$)

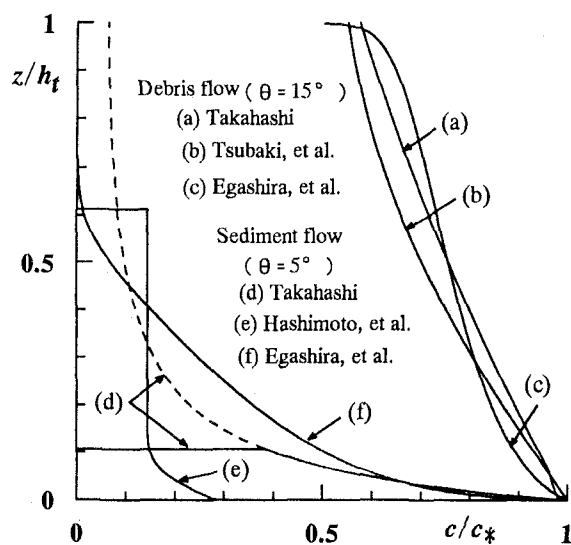


図-1 (b) 濃度分布の比較 ($\phi_s = 34.0^\circ$)

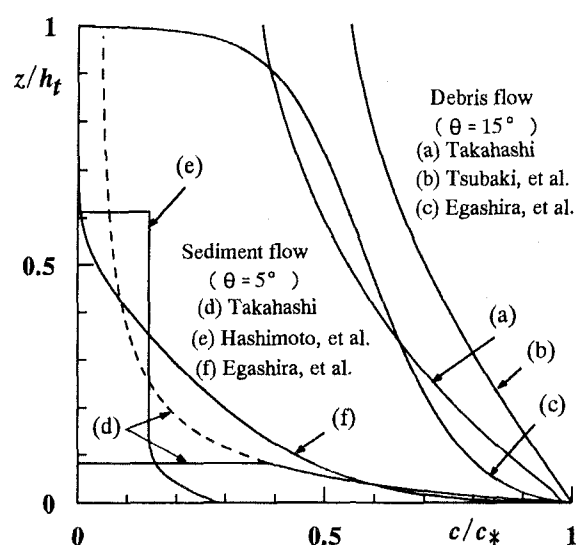


図-2 (b) 濃度分布の比較 ($\phi_s = 38.5^\circ$)

であれ、断面平均濃度（平衡濃度）は式(6)あるいは(27)で与えられる構成になっているからである。

図-5 は、流速係数と相対水深の関係を示したものである。比較のため対数則型の抵抗則も示している。相当粗度は $k_s = 2d$ としている。これにより、各々の流れの抵抗については、流速分布の比較によってみられた傾向が確認できる。すなわち、土石流の領域では、高橋の流速係数は他のものよりも小さく、土砂流の領域では、椿らのものが他のものに比べて大きい値を示すようである。

5. 結語

土石流および土砂流に関する代表的な構成則を選び、それらの特徴について検討した。どの構成則が優れているかは、今後の研究を待たねばならないが、本研究によって次のようなことが示された。

(1) 高橋および椿・橋本らの構成則と江頭らのものの本質的な違いは、後者において降伏応力と粒子間隙

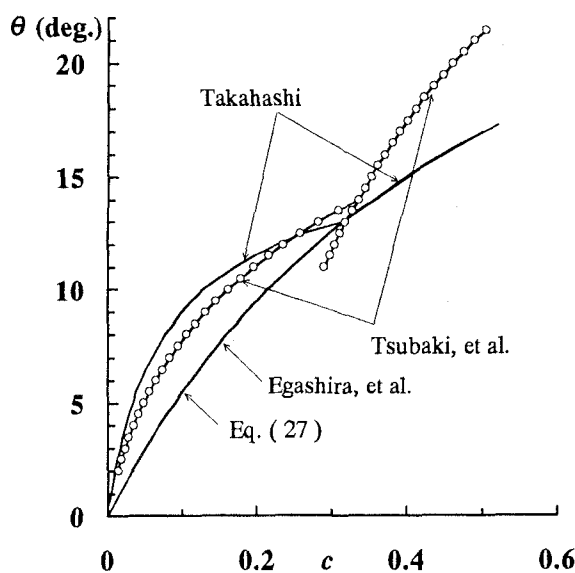


図-3 平衡濃度 $\bar{c}$ の比較 ($\phi_s = 34.0^\circ$)

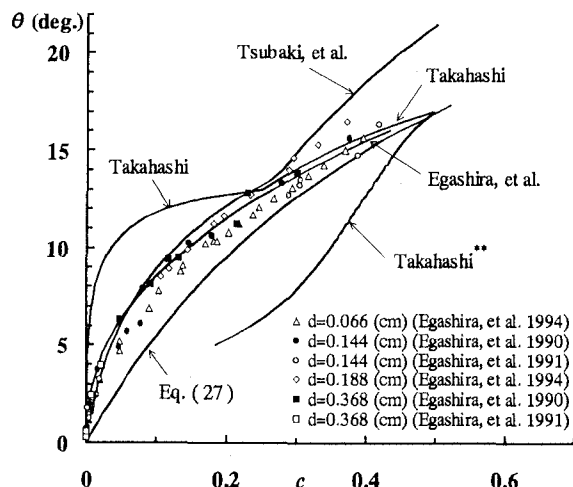


図-4 輸送濃度 c_t の比較 ($\phi_s = 34.0^\circ$)

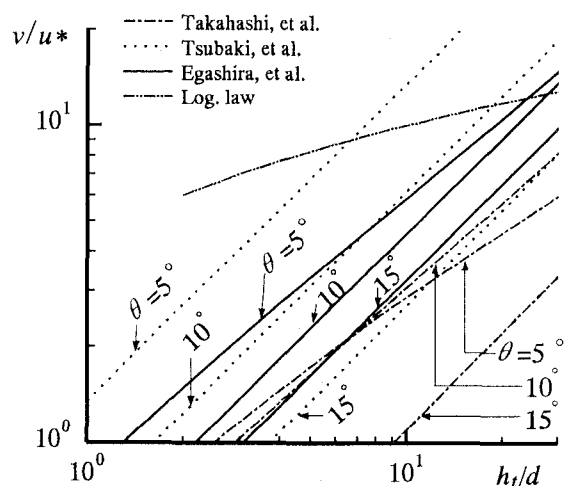


図-5 抵抗則の比較 ($\phi_s = 34.0^\circ$)

スケールの乱れが重要な役割を持っていることである。

(2)高橋の最も新しい構成則は、土石流の領域の輸送濃度をうまく説明するものの、土砂流の領域の輸送濃度は小さく推定される。適合性の面からは、土砂流の領域では、古い方法⁷⁾の方が優れている。

(3)椿らおよび橋本らの構成則は、実験値との適合には土石流の領域ではほぼ妥当のように思われるが、土砂流の領域では、流れの抵抗が少し小さく推定されるようである。ただし、構成則の中に重要な係数が含まれており、また、静止堆積層濃度 c_s や土砂流の下層厚など実験的に定められているため、他の研究との厳密な比較は難しい。

(4)江頭らの構成則は、現象が土石流から土砂流へ滑らかに遷移するものとすれば、これを統一的に説明できる特徴を持っている。さらに、これによれば、理論河床 $z=0$ において $c=c_s$ であれば、式(6)あるいは式(27)は、土石流や土砂流はもちろんのこと、理論上は掃流砂流の領域まで成り立つ。

以上、著者らの研究グループの視点で他の研究成果をみているため、計算結果の解釈には一般性を欠いた部分もあると推察される。しかし、議論を活発

にするためには、この種の研究も必要である。

謝辞: 本研究は、一部、文部省科学研究費基盤研究B(代表者 江頭進治)の補助を受けて進めているものである。また、鳥取大学助教授 宮本邦明先生には、種々御討議頂いている。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 高橋 保: 土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研年報, 20B-2, 405-435, 1977.
- 2) 椿・橋本・末次: 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文報告集, 317, 79-91, 1982.
- 3) 宮本邦明: Newton 流体を含む粒子流の流動機構に関する基礎的研究, 立命館大学学位論文, 39-72, 1985.
- 4) 江頭・芦田・矢島・高濱: 土石流の構成則に関する研究, 京大防災研年報, 32B-2, 487-501, 1989.
- 5) Bagnold, R. A.: Experiments on a Gravity free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear, Pro. Roy. Soc. A, 225, 49-63, 1954.
- 6) Savage, S. and Sayed, M.: Stress developed by dry cohesionless granular materials sheared in an annular shear cell, J. Fluid Mech., 142, 391-430, 1984.
- 7) Takahashi, T.: Debris flow, IAHR Monograph, Balkema, 1991.
- 8) 高橋・里深・千代: 土石流の慣性領域での流動則, 京大防災研年報, 39B-2, 333-346, 1996.
- 9) Bagnold, R. A.: The shearing and dilatation of dry sand the 'singing' mechanism, Pro. Roy. Soc. A, 295, 219-232, 1966.
- 10) 高橋 保: 土石流の停止・堆積機構に関する研究 (3), 京大防災研年報, 25B-2, 327-348, 1982.
- 11) 橋本・椿・平野: 土砂の集合流動について, 第30回水理講演会論文集, 235-240, 1986.
- 12) 橋本・平野: 掃流状集合流動の抵抗則と流砂量, 土木学会論文集, 545/II-36, 33-42, 1996.
- 13) 江頭・宮本・伊藤: 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 41 巻, 789-794.
- 14) 江頭・芦田・田野中・高橋: 連続体手法による掃流砂量式に関する研究, 京大防災研年報, 34B-2, 261-274, 1991.
- 15) 江頭・芦田・高濱・田野中: エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル, 京大防災研年報, 33B-2, 293-306, 1990.
- 16) 江頭・佐藤・千代: 砂粒子を高濃度を含む流れに及ぼす粒子径の影響, 京大防災研年報, 37B-2, 359-361, 1994.

(1997.9.30 受付)