

土石流の流れに及ぼす砂粒子径の影響

INFLUENCE OF SEDIMENT GRAIN SIZE ON DEBRIS FLOW

伊藤隆郭¹・江頭進治²

Takahiro ITOH and Shinji EGASHIRA

¹正会員 博士(工学) 立命館大学理工学部都市システム工学科 講師(〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学理工学部都市システム工学科 教授(〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

Results obtained from both of flume data and theories suggest that equilibrium bed slope in flow over an erodible bed are determined uniquely by sediment discharge rate when the movements of sediment particles are laminar and thus no suspended transportation take place. This means that the static friction force is dominant in debris flow and that sediment concentration is determined by shear stress balance on the bed surface as seen in our previous studies. On the other hand, if part of sediment particles in debris flow body is transported in suspension, sediment concentration will be larger and the equilibrium bed slope will decrease. These facts are supported by Egashira et al.'s flume data and others' experimental data.

The present study discusses experimentally an influence of flow scales on an equilibrium bed slope and flow structure, based on experimental data and emphasizes that the equilibrium bed slope decreases with increasing of flow scale if part of debris flow body is turbulent.

Key Words : equilibrium bed slope, flow scale, grain size, debris flow, two layer model

1. 緒言

粒子径が小さく、かつ粒子濃度の小さい流れは、浮遊砂流と呼ばれている。これに関する研究は古くから行われており^{1)~4)}、局所平均流速や粒子濃度の構造はある程度明らかにされている。一方、粒子濃度が浮遊砂流のものよりも大きくなると、泥流や高濃度流と呼ばれているような流れになる。これらの流れの取り扱い、開水路浮遊砂流の延長上の研究が多い^{5)~9)}。例えば、新井ら⁷⁾、⁸⁾は、砂粒子径が0.099 mmから0.99 mmのデータとプラントル型の運動量輸送とBagnoldの粒子衝突に伴う応力モデルを用いて、抵抗則やカルマン定数に関する解析を行っている。Winterwerpら⁹⁾は、0.12 mmから0.225 mmの砂粒子を用いた実験データに基づいて、粒子径や粒子濃度と速度勾配の関係を議論している。いずれの研究においても、実験データは固定床開水路上のものであって、流速分布は対数型分布形を仮定して解析を行っている。例えば、従前の浮遊砂流において指摘されているように、清水流から粒子濃度がある濃度の範囲まで増加すると、乱れの混合距離は減少するが、粒子濃度がさらに増加すると再び増加する結果が得られている。

微細粒子を高濃度に含む移動床流れにおいては、次のような研究がある。Sumerら¹⁰⁾は、0.13 mmの砂粒子や0.6, 2.6, 3.0 mmの人工材料を用いた開水路・管路実験を行い、次のような結果を報告している。 $w_0/u_\tau > 0.8 \sim 1.0$ の流れ場では、 k_s/d が τ_* に比例し、 $w_0/u_\tau < 0.8 \sim 1.0$ になると、 k_s/d が τ_* と w_* に依存する。ここに、 k_s は

相当粗度、 d は粒子径、 τ_* は無次元掃流力、 w_0 は粒子の清水中の沈降速度、 u_τ は摩擦速度、 w_* は無次元沈降速度で、 $w_* = w_0 / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}$ である。ここに、 σ/ρ は粒子比重、 g は重力加速度である。さらに、河床近傍には粒子の高濃度層が形成され、流速分布はべき乗則に従い、濃度分布は直線分布となり、その上層には浮遊砂層が形成される。浮遊砂層においては、流速分布は対数型分布となり、濃度分布はラウス分布となることを報告している。

橋本ら^{11), 12)}は、粒子高濃度に含む流れにおいて、流れの応力構造を調べるための無次元パラメータを定義すると共に、固定床上で行われた実験データを基にして、泥流の解析を試みている。すなわち、提案された無次元パラメータを用いて、それがある値を境界として粒子高濃度層と慣性力の卓越する層に分割されることを提案している。

高橋¹³⁾は、輸送濃度が30%程度の流れにおいて、相対水深 h/d が30程度以上になれば、泥流型土石流の抵抗則が適合し、相対水深がそれよりも更に大きくなると、清水乱流の対数型の抵抗則に漸近することを指摘している。さらに、高橋ら¹⁴⁾は、Sumerら、および橋本らと同様に流れを2層に分割し、底面近傍の粒子衝突層とその上に形成される乱流混合層とした。粒子衝突層においては、プラントル型の運動量輸送とクーロン型の降伏応力を用いた流れのモデルを用い、乱流混合層においては、プラントル型の運動量輸送と粒子衝突に伴う応力を用い

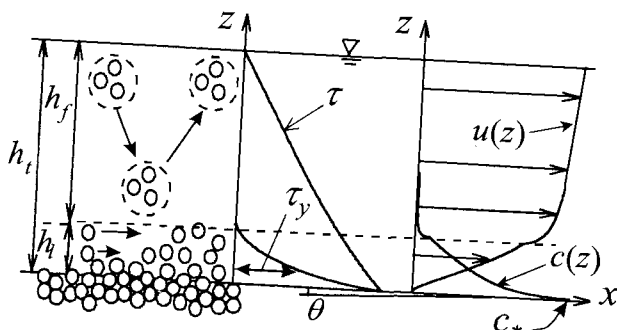


図-1 流れのモデル(二層モデル)

たモデルを用い、それぞれ流速分布および濃度分布を求めている。

江頭ら^{15), 16)}は、粒子径が0.017, 0.030, 0.066 cmの微細砂を用いて、粒子濃度が0から0.30までの幅広い領域にまたがる開水路移動床実験を行い、次のような結果を示した。浮遊砂流の領域から粒子濃度が増加すると、粒子の拡散係数が減少して流れ場は層流的になり、流れの抵抗は、粒子濃度が0.1程度を越えると増加する。粒子の輸送濃度に着目すると、それは微細砂の濃度と摩擦角に規定されるようになるものの、それは、土石流のように粒子が層流的な挙動をする時の平衡勾配よりも小さくなる。

これらの結果は、微細砂を含む高濃度流れにおいては、乱流と層流の両面を持っていることを示唆しているが、その流れの特性が明確にされているとは言い難い。著者らは、粗粒子と流体との混合物の流れを対象として、粒子濃度の小さい流れ(掃流砂流)を議論し、砂礫移動層の運動に着目すれば、その運動は土石流の流れの構造と殆ど違いがないものであることを示している^{17), 18)}。これらの知見と従前の研究を総合すると、移動床の微細砂を含む高濃度な流れにおいては、図-1のように2層にモデル化することができるようである。ここに、 h_t は全流動深、 h_f は上層の厚さ、 h_b は下層の厚さ、 θ は河床勾配、 τ はせん断応力、 u は局所平均流速、 c は粒子濃度、 c_* は静止堆積濃度、 τ_y は降伏応力である。すなわち、河床近傍における粒子移動層(下層)においては、土石流や掃流砂流と類似した粒子が層流流動する流れとなり、上層においては、レイノルズ応力が卓越し乱流拡散が支配的な流動層が形成される。

本研究においては、高濃度流れにおける粒子径の影響について、移動床流れにおける流速分布や平衡勾配の実験データを用いて解析を行う。特に、ここでは、江頭らの構成則を用いて定義される無次元パラメータを用いて、粒子が層流流動する時に形成される平衡勾配と流れが2層になる時の平衡勾配との比に着目する。

2. 水路実験

実験に用いた水路は、図-2に示すような幅5.0 cm、長さ12.0 mの片面がガラス張りの矩形断面の開水路である。水路上流端には定水頭タンクが設置されており、水路下流端より約8.0 mの位置には給砂ホッパーが設置されている。その直下の混合タンクで砂と水をミキサーによって十分に混合させて水路に混合物を供給している。水路下流端には高さ10 cmの砂止め(堰)を設置し、上流端から砂と水との混合物を定常的に供給し、水路に移動床流れを形成させている。

実験に用いた材料は、50%粒径 $d_{50} = 0.292$ mmのほぼ一様な砂で、粒子比重 $\sigma/\rho = 2.65$ 、内部摩擦角 $\phi_s = 38.3^\circ$ 、静止堆積濃度 $c_* = 0.537$ である。

流れに及ぼす砂粒子径の影響を直接的にみるためには、粒子径を小さくする実験が必要となるが、このとき、粒子の運動を直接的に追跡することが困難となる。そこで、流れに及ぼす流量スケールの影響を調べることは、流れに及ぼす砂粒子径の影響について検討することと等価であることに着目し、実験においては、混合物の単位幅流量 q_m を10, 30, 50, 100 cm^2/s のように変化させて、流れの規模を変化させた実験を行っている。

移動床区間は、5.0 m~7.0 mの区間において形成されており、 $h_t/L \ll w_0/u_\tau$ の関係を満たすように、十分長く確保されている。ここに、 L は移動床区間の長さである。なお、本研究で使用する水路で設定された移動床区間の長さが実験結果に影響を与えないことを予備実験で確認している。

測定項目は、混合物の流量・流砂量、水深、流速、平衡勾配である。水路下流端において、流量・流砂量を計測している。水路下流端より65 cmの位置で水路側壁から高速ビデオカメラを用いて流況を撮影し、撮影された粒子を1つずつ追跡することによって流速分布が得られている。水深については、水路下流端より65 cmの位置

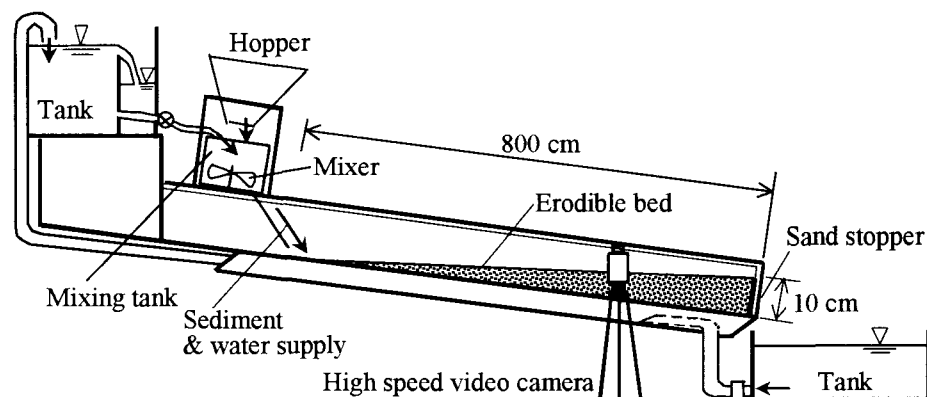


図-2 実験に用いた水路の概要

表-1 実験条件(一部)

Run	d (cm)	θ_e (deg.)	q_m (cm ² /s)	h_t (cm)	h_t/d	c_f	u_τ (cm/s)	τ_*	w_0 (cm/s)	w_0/u_τ	R_{e*}	F_r	R_e	T (°C)
003	0.0292	9.72	9.71	0.336	11.5	0.117	7.46	1.20	3.67	0.492	16.7	1.59	746	11.0
113	0.0292	9.75	29.8	0.539	18.4	0.176	9.45	1.93	3.67	0.388	19.0	2.41	2049	7.2
001	0.0292	9.49	49.8	0.870	29.8	0.189	11.9	2.98	3.67	0.310	39.4	1.96	5668	24.0
017	0.0292	9.83	102	1.19	40.9	0.257	14.1	4.31	3.67	0.260	27.5	2.50	6812	6.2

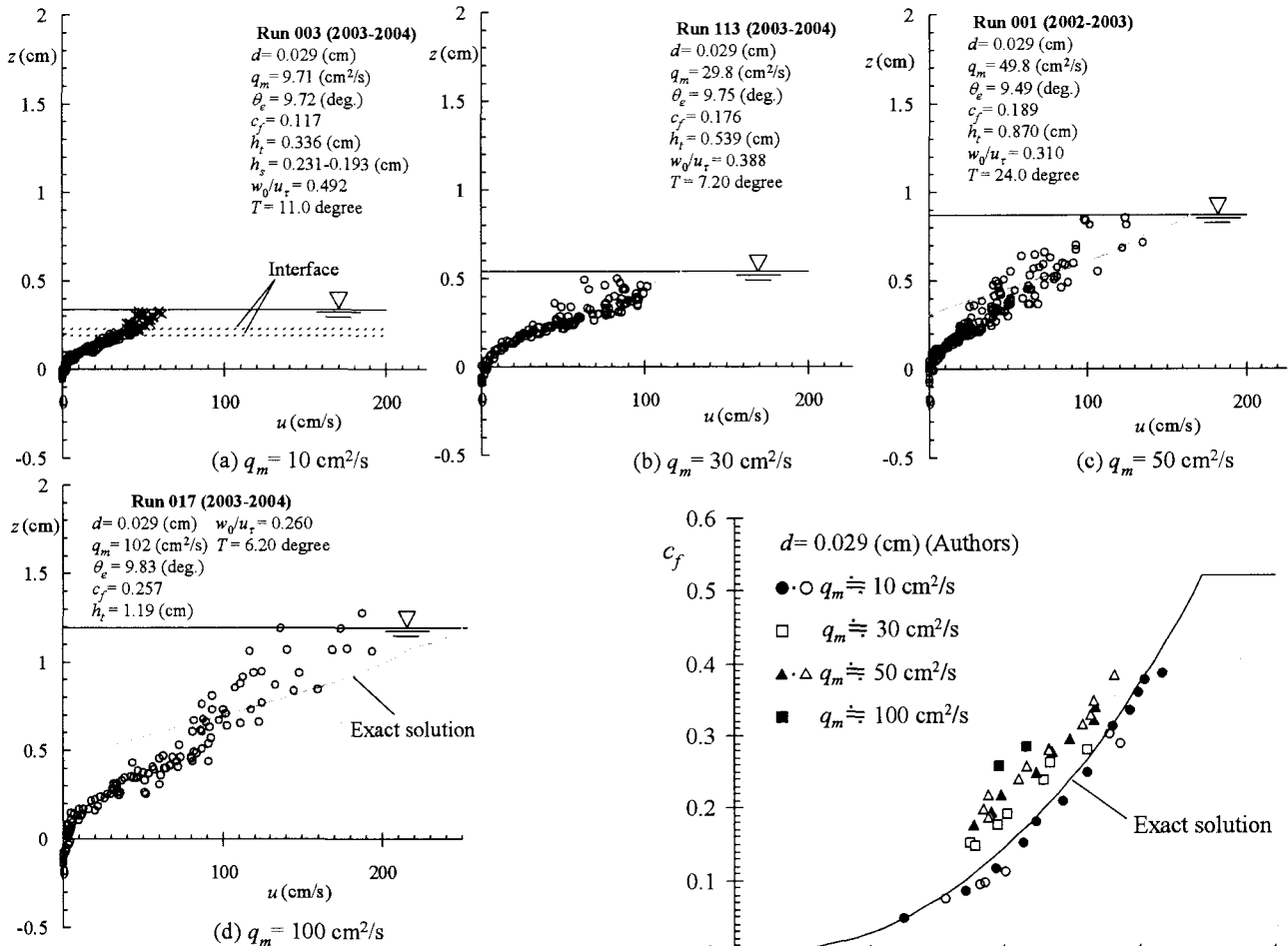


図-3 流速分布の比較

のポイントゲージで計測すると共に、ビデオカメラで撮影された画像解析の両方によって求められている。平衡勾配は、流れが平衡状態に達した時点で、水面および河床面に相当する部分に水路側壁よりシールを貼り、それに基づいて計測している。

実験条件および結果の一部を表-1に示す。ここに、 d は砂の粒径、 θ_e は河床の平衡勾配、 q_m は砂粒子と水の混合物の単位幅流量、 h_t は全流動深、 c_f は輸送濃度(流砂量と全流量との比)、 u_τ は摩擦速度で、 $u_\tau = \sqrt{gh_t \sin \theta_e}$ である。 τ_* は無次元掃流力、 w_0 は清水における砂の沈降速度、 R_{e*} は粒子レイノルズ数で、 $R_{e*} = u_\tau d / \nu$ 、 F_r はフルード数、 R_e はレイノルズ数で、 $R_e = \bar{u} h_t / \nu$ である。ここに、 $\bar{u}$ は断面平均流速である。 T は水温である。いずれのケースにおいても、 $w_0/u_\tau < 1$ の領域にあり、砂粒子の浮遊が卓越する流れ

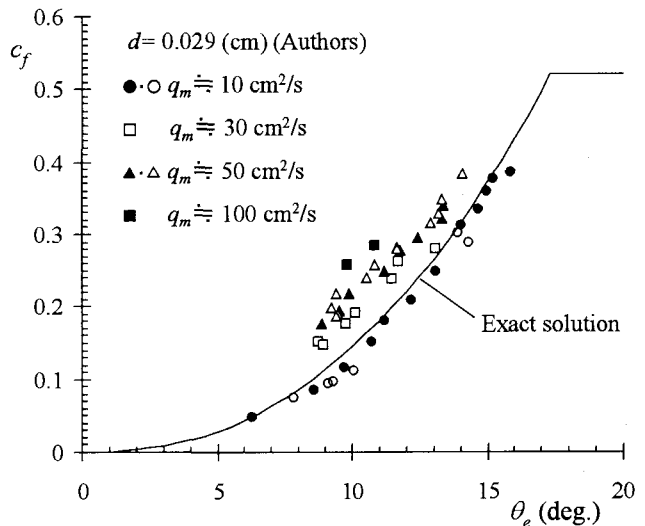


図-4 平衡勾配と輸送濃度の関係

である。

3. 実験データとその解析

(1) 平衡勾配と輸送濃度および流速分布

図-3(a)~(d)は、平衡勾配が約10°における流速分布の実験データである。流速分布のデータは、下流端で測定される混合物の流量に合うように補正されている。同図には、粒子が層流運動するものとして導かれた江頭らの構成則^{17), 18)}を用いて得られた計算値(以下、厳密解と呼ぶ。)が掲載されている。なお、Run 003においては、自由水面近傍に清水流の層が形成されており、厚さが h_s の粒子流動層と清水流層との境界を'Interface'として表している。図-4は平衡勾配 θ_e と輸送濃度 c_f に関する実験データである。同図には、混合

物の単位幅流量 q_m がそれぞれ、10, 30, 50, 100 cm²/s 程度の実験値、ならびに、厳密解も掲載されている。

図によると、 q_m が10 cm²/sのケースにおいては、実験データと厳密解はよく一致しており、砂粒子の運動が層流的なものであることを示している。これに対して、 q_m が10 cm²/sよりも大きくなると、図-3と図-4に示すように、粒子の層流運動を想定した厳密解は実験データと大きなズレを生じており、ズレの大きさは流量の増加に伴い大きくなっている。さらに、図-3の流速分布をみると、流量の増加と共に自由水面近傍における流速の変動が大きくなっており、水深スケールの乱れが卓越する流れを呈することを伺わせる。一方、河床近傍においては、流速分布は上に凸の分布形を呈しており、粒子が層流運動をする移動床流れの分布形と同じである。これは、従前の高濃度流れに関する研究が指摘するように、河床近傍においては、粒子間の応力が卓越し、自由水面近傍には乱流応力の卓越する流れが存在するような2層構造の流れが形成されていることを示している。さらに、河床近傍の層(下層)においては、流速分布が上に凸であるような分布形であることから、江頭らの土石流研究^{17), 18)}に示すように、静的な降伏応力が卓越していると考えられる。

図-4において、 q_m が30, 50, 100 cm²/s程度の流れにおいて、平衡勾配が約9°以下の領域においてはデータが掲載されていない。この勾配よりも小さい時には、antiduneやchutes and poolsのような河床波が発生し、実験データが得られていない。通水時における実験条件は、福岡ら¹⁹⁾の河床形態の領域区分では、平坦河床の領域に属し、岸ら²⁰⁾の領域区分においてはantiduneの領域に属するものと考えられる。しかしながら、粒子濃度が高濃度な流れにおける河床形態の形成については、今後検討する必要がある。

(2) 二層モデルと平衡勾配

平衡勾配および流速分布から、 q_m が10(cm²/s)程度のケースにおいては、流速分布と輸送濃度のデータを用いて、砂粒子は層流流動することが示され、流量の増加に伴い、粒子の運動が層流のものとは異なる流れになることが明らかとなった。さらに、図-1に示すように、河床近傍に砂粒子が層流運動をする層(下層)と自由水面近傍にレイノルズ応力の卓越する層(上層)の2層の流れが形成されることが確認されると共に、この2層構造の形成が、同一勾配に対する図-4に示すような輸送濃度の増加をもたらすことが確認された。

江頭らは、図-1に示す2層モデルを提案している¹⁶⁾。同図を参考にして等流状態における運動量保存則を示すと次のようである。

上層($h_l \leq z \leq h_t$)

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

$$p_w(z) = \int_z^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz \quad (2)$$

ここに、 ρ_m は混合物の密度($\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$)、 σ は粒子の密度、 ρ は流体の密度、 c は粒子濃度、 g は重力加速度、 θ は路床と水平とのなす角度、 p_w は粒子が浮遊し、乱流拡散が卓越している時の静水圧である。

下層の流れにおいては、著者らの構成則^{17), 18)}を適用すると、次式のようである。

下層($0 \leq z \leq h_l$)

$$p_s(z) \tan \phi_s + \tau_f(z) + \tau_d(z) = \int_z^{h_l} \rho_m g \sin \theta dz \quad (3)$$

$$p_s(z) + p_d(z) + p_w(z) = \int_z^{h_l} \rho_m g \cos \theta dz + p_w(h_l) \quad (4)$$

$$p_w(z) = p_w(h_l) + \int_z^{h_l} \rho g \cos \theta dz$$

ここに、 τ_y は降伏応力($= p_s \tan \phi_s$)、 ϕ_s は粒子の内部摩擦角、 τ_d は粒子の非弾性衝突による応力、 τ_f は間隙流体のせん断による応力、 p_s は静的圧力、 p_d は粒子の非弾性衝突の前後において保存されるエネルギー、 p_w は間隙水圧である。

移動床の理論河床面における外力と静的なクーロン応力との応力の釣り合い、すなわち、式(3)と式(4)において $z=0$ 、 $\partial u / \partial z = 0$ とすると、平衡勾配 θ_e と移動層厚比 h_l/h_t の関係が次式のように求められる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} \tan \phi_s}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_l}{h_t} \quad (5)$$

ここに、 h_l は下層の厚さである。

一方、粒子が層流流動する場合、平衡勾配 θ_{e0} は次式のように表される¹⁷⁾。

$$\tan \theta_{e0} = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} \tan \phi_s}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{c}$ は砂粒子の断面平均濃度である。式(5)と式(6)を用いると、同一の粒子濃度における平衡勾配比と移動層厚比 h_a/h_l の関係は次式ようになる。

$$\frac{\tan \theta_e}{\tan \theta_{e0}} = \frac{h_l}{h_t} \quad (7)$$

式(7)における移動層厚比が一般的に求められることが望まれるが、ここでは、実験データを用いて流れの規模と平衡勾配比の関係について調べる。

(3) 混合物の流れの無次元パラメータ

式(7)を念頭において、平衡勾配比、あるいは移動層厚比に及ぼす流れの規模の影響について実験データを用いて解析する。

まず、流れの無次元パラメータを定義しよう。ここでは、江頭らの土石流の構成則^{17), 18)}を用いるものとする、せん断応力は次式のようである。

$$\tau = p_s \tan \phi_s + \rho(f_d + f_f)d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z} \quad (8)$$

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

ここに、 d は砂粒子径、 u は局所平均流速、 e は反発係数、 $k_f = 0.16$ 、 $k_d = 0.0828$ である¹⁷⁾。式(8)において、粒子間隙スケールにおける動的な散逸応力は右辺2項目である。これは、次式のように粒子スケールのレイノルズ応力 τ_D と定義することができる。

$$\tau_D = \rho(f_d + f_f)d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z} \quad (9)$$

一方、水深スケールのレイノルズ応力 τ_T は、混合距離 l を用いると次式のように表される。

$$\tau_T = \rho_m l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z}, \quad l \sim h_t \quad (10)$$

式(10)と式(9)の比をとると、次式の無次元パラメータが定義される。

$$R_D = \frac{\rho_m h_t^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)}{\rho(f_d + f_f)d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)} \quad (11)$$

式(10)において、 $c \sim \bar{c}$ 、 $\partial u / \partial z \sim \bar{u} / h_t$ のように流速や粒子濃度に断面平均値を用いると、次式の無次元パラメータ $\bar{R}_D$ が求められる²¹⁾。

$$\bar{R}_D = \frac{\bar{\rho}_m / \rho}{f_f(\bar{c}) + f_d(\bar{c})} \left(\frac{h_t}{d} \right)^2 \quad (12)$$

ここに、 $\bar{\rho}_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho$ である。

式(11)および式(12)のような取り扱い方の妥当性については、今後の議論の余地が残されているが、式(11)および式(12)は、水深スケールのレイノルズ応力と粒子スケールのレイノルズ応力の比を表している。式(12)において $\bar{R}_D$ が大きくなると、水深スケールの乱れが卓越し、 $\bar{R}_D$ が小さいときには、粒子スケールの乱れが卓越することを示すパラメータである。

一方、平衡勾配比 $\tan \theta_e / \tan \theta_{e0}$ は、図-4において、

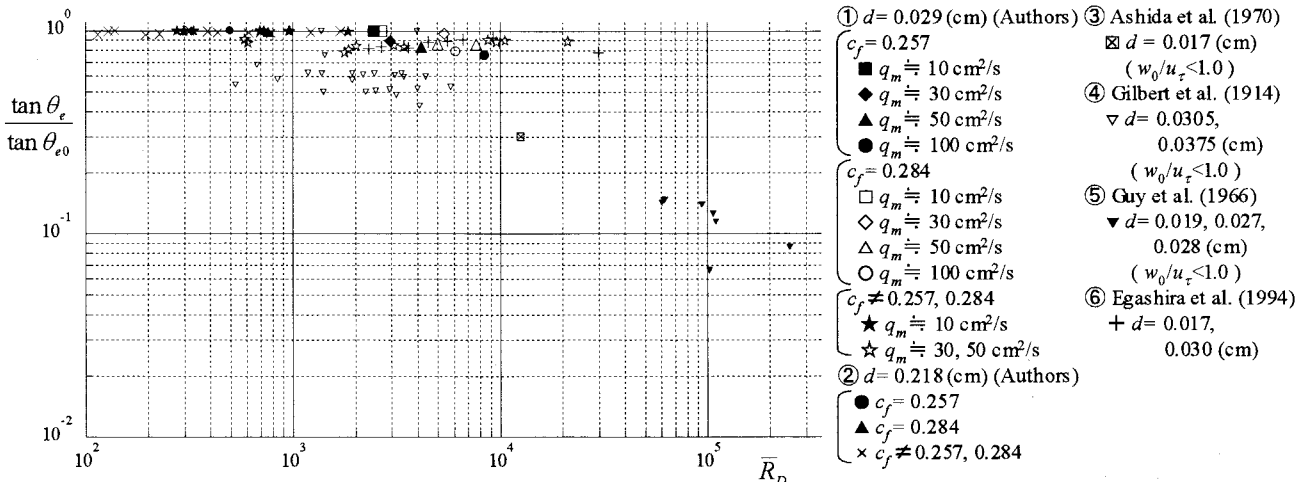


図-5 無次元パラメータと平衡勾配比の関係

同一輸送濃度の時の q_m が $10(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度における平衡勾配 $\tan \theta_{e0}$ に対する q_m が $10(\text{cm}^2/\text{s})$ 以外の平衡勾配 $\tan \theta_e$ の比を計算することによって求められる。

図-5は、無次元パラメータ $\bar{R}_D$ と平衡勾配比の関係である。同図には、本研究で得られたデータのうちのほぼ同一濃度($c_f = 0.257, 0.284$)における実験値を載せている。比較のために、本研究で得られた $c_f = 0.257, 0.284$ 以外のデータ、粒子が層流流動をする粗粒子($d = 0.218$ cm)の実験データ²²⁾、江頭らの微細砂を伴う流れの実験データ¹⁶⁾、および平坦河床におけるGilbertら²³⁾、Guyら²⁴⁾および芦田ら²⁵⁾の浮遊砂流のデータも載せている。これらのデータのうち、粒子が層流流動する時に形成される平衡勾配 θ_0 に対するデータが得られていないものについては、輸送濃度に対して厳密解を計算し、平衡勾配 θ_0 を逆算している。また、無次元パラメータ数 $\bar{R}_D$ の計算においては、実験で粒子濃度が求められていないため、断面平均濃度の代わりに、輸送濃度を用いるものとする。

図-5によると、データはかなりばらついているが、 $\bar{R}_D$ がほぼ4000~5000を越えると平衡勾配比は1より小さくなり、 $\bar{R}_D$ の増加に伴って平衡勾配比が単調に減少していることが分かる。ここで、 $\bar{R}_D$ がほぼ4000~5000の時の値を限界値 $\bar{R}_{Dc}$ と呼ぶことにすると、平衡勾配比、すなわち、移動層厚比は、無次元パラメータが $\bar{R}_{Dc}$ よりも大きくなると1より小さくなり、自由水面近傍にレイノルズ応力の卓越する上層が現れ、流れが2層構造を呈することを表している。さらに、レイノルズ数の増大に伴って、単調に移動層厚比は小さくなっている。

4. 結語

土石流の流れに及ぼす砂粒子径の影響を検討するために、移動床の水路実験およびデータ収集を行い、それらのデータに基づいて検討を行った。本研究によって

得られた知見は次のようである。

(1) 平衡勾配に対する流量規模、すなわち、砂粒子径の影響は大きく、同一の平衡勾配のもとでは、流量規模が大きくなると、輸送濃度が大きくなる。一方、 q_m が $10(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度で流量規模が小さいときには、砂粒子の運動は層流的であることが確認された。また、流量が大きい時には、平衡勾配が 9° 程度よりも小さい流れにおいて河床波が形成し、平坦河床のデータが得られなかった。高濃度流れにおける河床形態の形成については、今後検討する必要がある。

(2) 流速分布に関するデータから、(1)における傾向が確認された。さらに、従前の研究に示すように、2層構造の流れが形成されていることが示された。上層の流れの構造については検討する必要があるが、下層においては、移動床での粗粒子の土石流にみられるように、河床近傍で流速分布が上に凸の分布形となり、粒子摩擦の卓越する流れが形成されていることを示す。また、(1)に述べた流れの規模の増加に伴う輸送濃度の増加は、2層構造の形成に伴う上層の流れによる土砂輸送により生じている。

(3) 江頭らの土石流の構成則を用いて、無次元パラメータ $\bar{R}_D$ を定義し、平衡勾配比と $\bar{R}_D$ との関係について実験データを用いて検討した。この無次元パラメータは、粒子スケールのレイノルズ応力に対する水深スケールのレイノルズ数の比を表す。仮に、2層モデルを用いると、平衡勾配比は、全水深に対する下層の厚さの比、すなわち、移動層厚比を表す。無次元パラメータ $\bar{R}_D$ が限界値 $\bar{R}_{Dc}$ ($= 4000 \sim 5000$ 程度) よりも大きくなると移動層厚比は1より小さくなり、 $\bar{R}_D$ の増加に伴って単調に減少するようである。

今後、更に実験データを収集すると共に、上層・下層の濃度分布を測定し、濃度場の情報を得ることによってリチャードソン数などのデータを収集し、従前の浮遊砂流における理論と対比させながら、流れの内部構造に関する検討を行っていく予定である。また、自由水面近傍に形成される上層の形成機構についても、今後、検討する必要がある。

謝辞: 本研究を推進するに当たって、実験およびデータ解析において、立命館大学大学院 博士前期課程内海敦郎君(現 パシフィックコンサルタンツ株)、黒田尚吾君(現 株)東京建設コンサルタント)、衛藤祐介君および吉田圭祐君に尽力頂いた。記して謝意を示したい。また、本研究の一部は科学研究費補助金 若手研究(B)(研究代表者:伊藤隆郭)の補助を受けて推進している。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) Rouse, H.: Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence, Trans. ASCE, No. 1965, 463-543, 1936.
- 2) Lane, E. W. and A. A. Kalinske: Engineering calculation of suspended sediment, Trans., A. G. U., Reports and papers, Hydrology, 603-607, 1939.
- 3) Vanoni, V. A.: Transportation of suspended sediment by

water, Trans., ASCE, 2267, 67-133, 1944.

- 4) Einstein, H. A.: Soil Conservation Service, Tech. Bull. 1025, 1-71, 1950.
- 5) Chen, Cheng-Lung: Generalized viscoplastic modeling of debris flow, Jour. Hydr. Eng., 114, No. 3, 237-258, 1988.
- 6) O'Brien, J. S. and P. Y. Julien: Laboratory analysis of mudflow properties, Jour. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 114, No. 8, 877-887, 1988.
- 7) Arai, M. and T. Takahashi: The karman constant of the flow laden with high sediment, Third Int. Sym. on River Sedimentation, The University of Mississippi, 824-833, 1986.
- 8) 新井宗之・高橋 保: 泥流型土石流の流動機構, 土木学会論文集, 375, 69-77, 1986.
- 9) Winterwerp, J. C., M. B. de Groot, D. R. Mastbergen and H. Verwoert: Hyperconcentrated sand-water mixture flows over flat bed, Jour. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 116, No. 1, 36-54, 1990.
- 10) B. M. Sumer, A. Kozakiewicz, J. Fredsøe and R. Deigaard: Velocity and concentration profiles in sheet-flow layer of movable bed, Jour. Hydr. Eng. 122, No. 10, 549-558, 1996.
- 11) 平野宗夫・橋本晴行・福富 章・田熊幸二・パル＝ムハマト＝サレー: 開水路における高濃度流の無次元パラメータ, 水工学論文集, 36, 221-226, 1992.
- 12) 橋本晴行・平野宗夫: 泥流の抵抗則に関する研究, 水工学論文集, 39, 495-500, 1995.
- 13) 高橋 保: 土石流・泥流の流動機構, 土砂移動現象に関するシンポジウム論文集(芦田和男先生退官記念), 39-55, 1992.
- 14) 高橋 保・里深好文: 石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 3, 33-42, 2002.
- 15) 江頭進治・芦田和男・田野中 新・佐藤隆宏: 泥流に関する研究一応力構造一, 京大防災研年報, 35B-2, 79-88, 1992.
- 16) 江頭進治・佐藤隆宏・千代啓三: 砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響, 京大防災研年報, 37B-2, 359-369, 1994.
- 17) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭: 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 41巻, 789-794, 1997.
- 18) Egashira, S., K. Miyamoto and T. Itoh: Constitutive equations of debris flow and their applicability, 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349, 1997.
- 19) 福岡捷二・奥津一夫・山坂昌成: 急勾配移動床流れにおける河床波の形状, 伝播特性, 土木学会論文報告集, 323, 77-89, 1982.
- 20) 岸 力・黒木幹男: 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗(I), 北海道大学工学部研究報告, 67, 1-23, 1973.
- 21) 宮本邦明・伊藤隆郭: 土石流の数値シミュレーションと相似則, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 6, 40-51, 2003.
- 22) 伊藤隆郭: 土石流の構成則およびその適用に関する研究, 立命館大学学位論文, 2000.
- 23) Gilbert, G. K.: The transportation of debris by running water, USGS Prof. Paper, 86, 1914.
- 24) Guy, H. P., D. B. Simons and E. V. Richardson: Summary of Alluvial channel data from flume experiments, 1956-61, Professional Paper 462-I, U. S. G. S., 1966.
- 25) 芦田和男・道上正規: 浮遊砂に関する研究(1)―河床付近の濃度―, 京大防災研年報, 13B-2, 233-242, 1970.

(2004. 9. 30 受付)