

高濃度流れの相変化に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY FOR TRANSITION FROM LAMINAR TO TURBULENT FLOW IN DEBRIS FLOWS

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フェロー会員 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 and author's flume data and others' experimental data.

The present study discusses experimentally phase transition from solid phase to liquid phase based on experimental data and proposes thickness of laminar sediment moving layer and the methodology for the thickness if part of debris flow body is turbulent.

Key Words : phase transition, debris flow, flow scale, equilibrium bed slope, 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には、開水路浮遊砂流の延長上の研究^{5)~10)}や土石流の構成則を用いて、それらを拡張させた研究^{11)~16)}があり、多くの知見が得られている。

一方、著者らは、これまでの研究成果を基にして、高濃度流に対する考え方について、幾つか述べてきている^{17), 18)}。仮に、高濃度流において、混合物中の固体粒子群が層流運動をし、さらに、粒子が自由水面まで分散している流れを土石流と呼ぶことにする。このとき、流れの規模の増加に伴い、混合物中の粒子群の一部が乱流運動をする現象を「相変化」と呼ぶものとする。相変化によって土砂輸送能力が増大することが著者らの実験データを用いて示されている¹⁷⁾。更に、相変化が現れる際の水理条件は、相対水深を用いて表すと、概ね、高橋¹³⁾が提案する泥流型土石流の形成条件に酷似することも示している。

これらの結果は、高濃度流れにおいて流れの規模が大きくなると、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、層流流動する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^{19), 20)}。これらを総合すると、移動床上の高濃度流において相変化を生じた流れは、**図-1**のように2層にモデル化することができる。ここに、 h_t は全水深、 h_f は上層(乱流層)の厚さ、 h_l は下層(粒子の層流流動層)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相変化につ

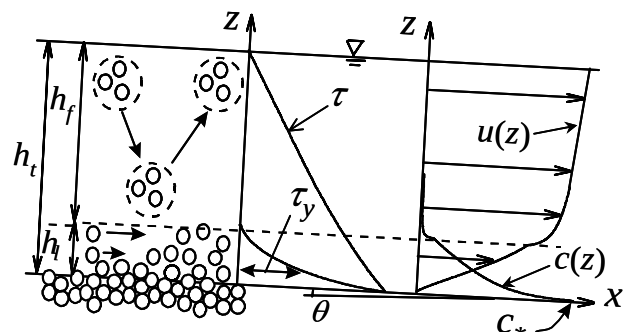


図-1 流れのモデル(2層モデル)

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
104	0.0292	9.71	50.4	0.707	24.2	0.208	10.8	2.52	3.67	0.340	21.9	2.71	3495	7.5
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
010	0.0292	10.0	216	1.60	54.8	0.270	16.5	5.87	3.67	0.222	34.2	3.41	15330	8.3

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、砂粒子が層流流動する層厚の決定法およびその値について議論する。

2. 水路実験

実験に用いた水路、実験方法および測定項目の詳細については、前報¹⁷⁾に譲ることとする。実験においては、上流端から砂と水との混合物を定常的に供給し、水路に定常の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 $d_{50} = 0.0292$ cm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。実験においては、相変化の現象が現れるように、混合物の単位幅流量 q_m を10, 30, 50, 100, 200 cm²/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。なお、移動床は、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、 h_t は全水深、 L は移動床区間の長さ、 w_0 は清水における砂の沈降速度、 u_τ は摩擦速度であり、定義については後述する。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は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。

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、 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、 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、 $R_e = \bar{u} h_t/\nu$ であり、 $\bar{u}$ 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である。

なお、後述する流速分布の実験データと河床で静止堆積濃度で水面において粒子濃度がゼロとなるような直線的な濃度分布形を用いて、フラックス型のリチャードソン数 R_f を計算すると次のようである。Run 003: 0.0294, Run 113: 0.0169, Run 104: 0.00788, Run 017: 0.0171となり、いずれも0.01～0.001のオーダーとなり、浮力の影響が無視できる流れである。ちなみに、TaylorやGoldsteinらによるせん断流かつ連続密度場における密度流の中立安定は、 $R_f = 0.25$ である²¹⁾。

3. 実験データとその解析

(1) 輸送濃度および流速分布

図-2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、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^{19), 20)}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。図-3 (a)～(d)は、平衡勾配が約 9.7° 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。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層との境界を'Interface'として表している。ここで、粒子群の運動が層流である場合には、これらの両層の境界、すなわち、'Interface'は力学的に定義されると共に、実験データにおいても明確に判別が可能である^{19), 20)}。更に、図-3に示す自由水面の位置に関する値は時間平均した値である。

図-2によると、 q_m が10 cm²/sのケース (Run 003) 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、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

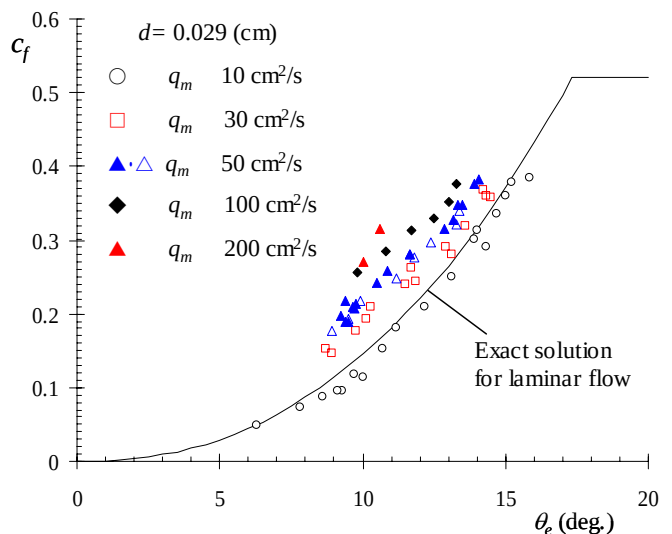


図-2 平衡勾配と輸送濃度の関係

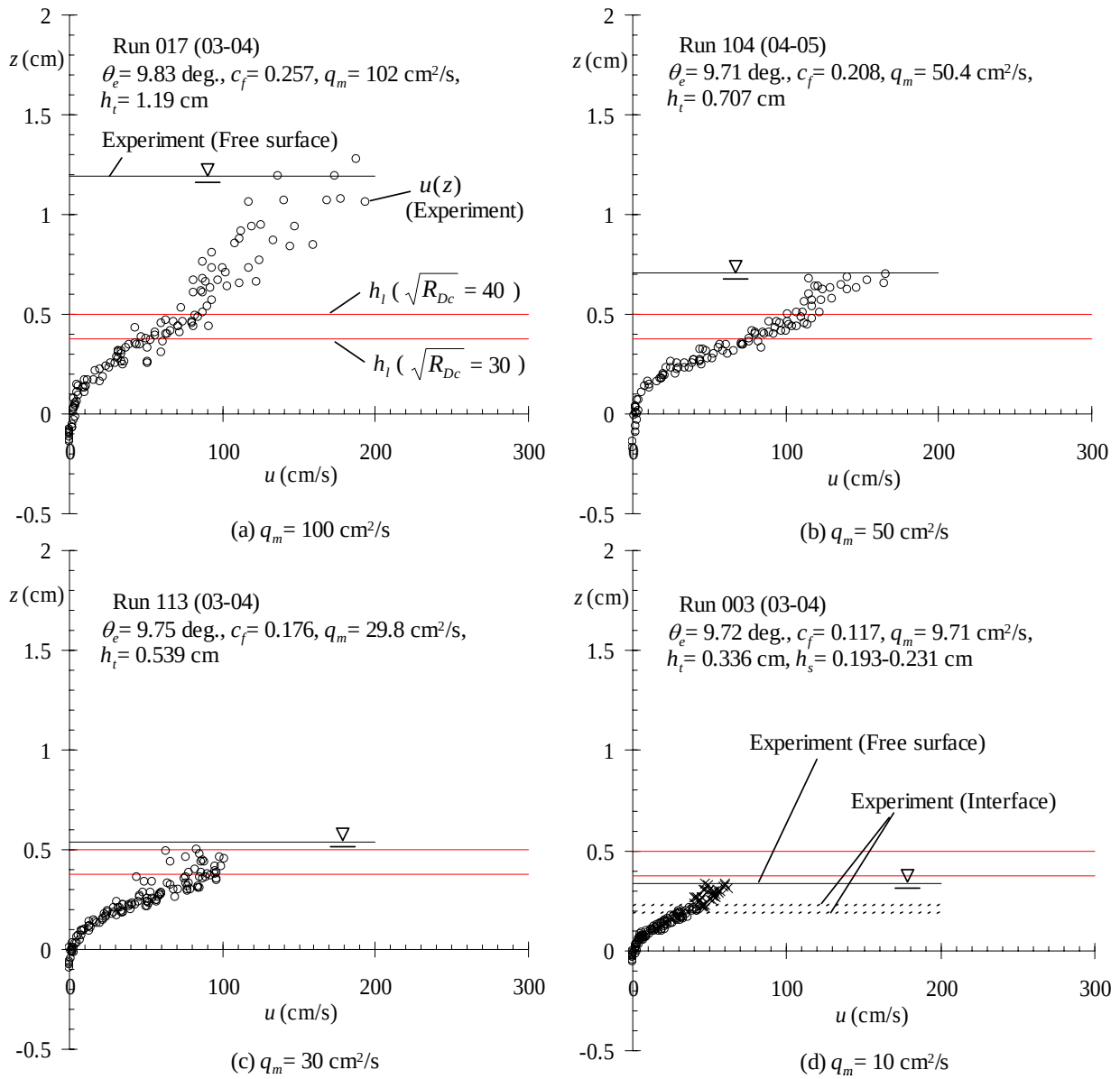


図-3 流速分布

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や乱流拡散が卓越する流れを呈することが分かる。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、相変化が生じると、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。

(2) 粒子の層流流動層の厚さ

前節において、相変化に伴って、自由水面近傍に乱流拡散の卓越する乱流層が形成され、2層構造の流れが形成されることが実験データを用いて確認された。橋本ら¹²⁾は、両層の境界を慣性力と粒子間衝突応力との比から求められる無次元パラメータを用いて、粒子間力層の厚さを流速分布に関する実験データを用いて定義している。一方、高橋ら^{14), 22)}は、粒子群の沈降を考慮した粒子の沈降速度と摩擦速度との比が1となる位置、も

しくは、実験データと粒子周辺の空間に関する実験的な考察から粒子濃度が $0.5c_*$ となる位置を両層の境界としている。しかしながら、両層の境界位置についての一般的な議論を行うには至っていない。ここでは、固相の砂粒子が層流運動する流動層を粒子の層流流動層と定義し、この層厚の決定法およびその値について、流速分布に関する実験データを用いて検討する。

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^{19), 20)}を用いるものとする、せん断応力は次式のようなものである。

$$\tau = p_s \tan \phi_s + \rho (f_d + f_f) d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (1)$$

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

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¹⁹⁾。式(1)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

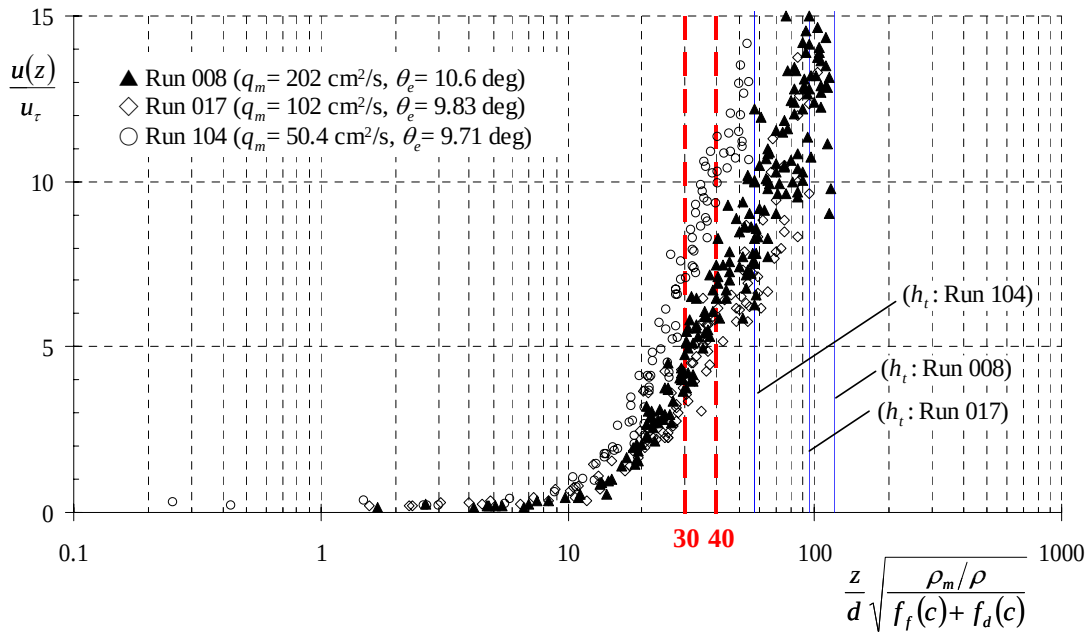


図-4 無次元パラメータと無次元局所流速の関係

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。

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

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

ここに、 ε は粒子間隙スケールにおける渦動粘性係数である。

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。

$$\tau_T = \rho_m l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z}, \quad l \sim z \quad (3)$$

ここに、 z は河床からの高さ、「 $\sim$ 」は比例かつ同オーダーであることを意味する。

式(3)と式(2)の比をとると、次式の無次元パラメータが定義される。

$$R_D = \frac{\rho_m l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)}{\rho (f_d + f_f) d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)} \quad (4)$$

式(4)において、長さスケールに対して全水深 h_t 、粒子濃度に対して断面平均値濃度 $\bar{c}$ を用いると、著者らの提案した次式の無次元パラメータ $\bar{R}_D$ が求められる¹⁷⁾。

$$\bar{R}_D = \frac{\bar{\rho}_m / \rho}{f_f(\bar{c}) + f_d(\bar{c})} \left(\frac{h_t}{d} \right)^2 \quad (5)$$

なお、このパラメータは、混合物の運動方程式を用いて求められるレイノルズ数と全く同形である²³⁾。

一方、式(4)において、 $l \sim z$ のようにおくと、次式の無次元パラメータが求められる。

$$R_D = \frac{\rho_m / \rho}{f_f(c) + f_d(c)} \left(\frac{z}{d} \right)^2 \quad (6)$$

ここに、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ である。さらに、式(5)を用いて、次式が得られる。

$$\sqrt{R_D} = \sqrt{\frac{\rho_m / \rho}{f_f(c) + f_d(c)}} \left(\frac{z}{d} \right) \quad (7)$$

固定床上の清水乱流に見られるような粘性低層と乱流層が形成されるような知見を参考して、式(7)において、粒子の層流流動層厚に対応する無次元数を $\sqrt{R_{Dc}}$ とし、その時の層流流動層厚を h_l とすると、この値が一意的に決定することができる。ここでは、局所流速と式(7)のパラメータを用いて、流速分布を解析する。このとき、式(7)において、 R_D を R_{Dc} 、 z を h_l とすれば、次式が得られる。

$$\sqrt{R_{Dc}} = \frac{h_l}{d} \sqrt{\frac{\rho_m / \rho}{f_f(c) + f_d(c)}} \quad (8)$$

図-4は、流速分布に関する実験データを $u(z)/u_\tau$ と式(7)の平面で整理したものである。ここに、摩擦速度の定義は混合物の密度を考慮せず、便宜的に $\sqrt{gh_t \sin \theta}$ のようにしている。なお、式(7)の計算においては、粒子濃度分布に関するデータが必要であるが、実験では濃度分布が得られていないため、仮に、その値を $c_*/2$ としている。この値は実際のものよりも若干過小評価となるが、結果にそれほど大きな影響を及ぼさないことは確認している。なお、 $\sqrt{R_{Dc}}$ の値を決定する時には、図-3、図-4および後述の図-5を用いて、試行錯誤的にその値を変化させることによって求めている。これらによって、図に示すような乱流の対数型分布形とそれ以外

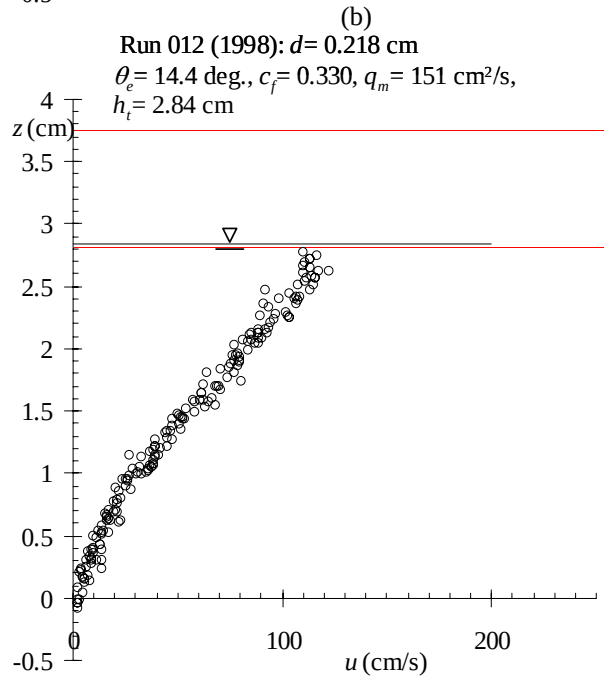
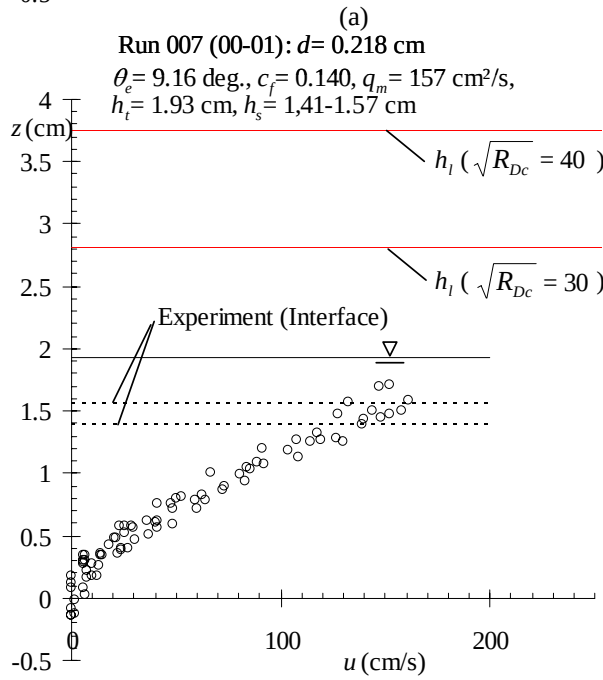
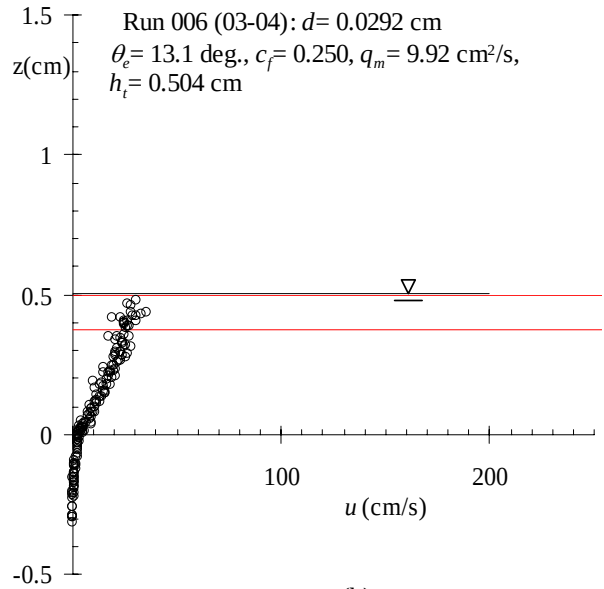
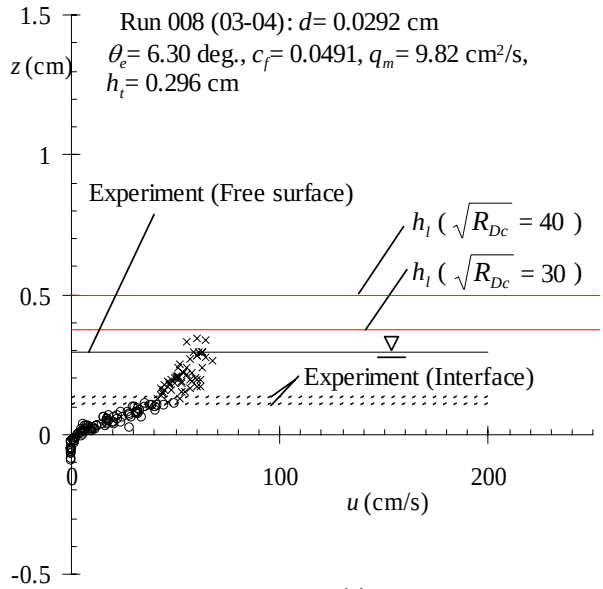


図-5 粒子が層流運動する流れにおける層流流動層厚の比較

の分布形との境界の値は、 $\sqrt{R_{Dc}}=30\sim40$ 程度の値をとることが予想される。図-3には、 $\sqrt{R_{Dc}}$ の値を30および40のように設定した時の粒子の層流流動層の厚さ h_l の計算値を掲載している。流速分布の実験データのみを用いての解析のため、普遍的な議論になっていない可能性があるが、図-3の流速分布における粒子の層流流動層と乱流層との境界をほぼ説明できているものと思われる。さらに、 q_m が $10(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度においては、粒子が層流運動をすることが確認されているが、このときには、粒子の層流流動層の厚さ h_l が全水深よりも大きく、 $h_t \leq h_l$ となり、流れ全体が層流であることを示している。

図-5 (a)～(d)は、粒子が層流運動するケースにおいて、 $\sqrt{R_{Dc}}=30\sim40$ 程度の値を用いて計算した層流流動層

の厚さ h_l と著者らの実験データ^{17), 24)}を比較したものである。Run 006とRun 012においては、河床近傍でのクリーピングの影響が現れており、全水深は図に示したものよりも、若干小さくなることが予想される。これを考慮すると、粒子の層流流動層の厚さ h_l が $h_t \leq h_l$ の関係となり、粒子移動層が層流流動層内にあることが確認できる。

ここまでのデータ解析においては、移動床流れの実験データを用いているため、 $\sqrt{R_{Dc}}=30\sim40$ 程度の値をとる。一方、固定床上の流れにおいては、粒子濃度が移動床上流れのそれと比べて小さいため、粒子の層流流動層の厚さ h_l は、移動床流れで決定した値よりも小さくなることも予想される。これについては、更なる検討が必要である。

また、試算として、式(7)において、 $\sqrt{R_{Dc}}=40$ とし、

$c_* = 0.52$ として、 $c_*/2$ の値を粒子濃度に代入して計算すると、粒子の層流流動層の層厚比 $h_l/d = 17.6$ となる。これは、橋本ら¹²⁾の提案する粒子間力層の厚さ $\delta_G/d = 14.1$ と酷似した値となっている。ただし、橋本らの研究においては、流れが固定床流れに近い流速分布を用いて解析が行われているため、本研究における結果と単純な比較が難しい面もあることを付記しておく。

4. 結語

土石流の流れにおける相変化現象を実験的に検討するために、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) 高濃度流において、固相の砂粒子が層流運動をしているものを土石流と呼び、この流れが流れの規模の増加に伴い、粒子群の一部の挙動が乱流状態となる現象を相変化と定義した。相変化が生じると、河床近傍に砂粒子が層流運動をする層流流動層が形成され、水面近傍には、乱流拡散が卓越する乱流層が形成される。移動床流れの流速分布および輸送濃度に関するデータから、これらの流れの特性が検証された。

(2) (1)における粒子の層流流動層と乱流層との境界を定義するために、江頭らの土石流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、流速分布の実験データを解析し、粒子の層流流動層の厚さを決定した。今後、層流流動層内の濃度を考慮した解析や固定床流れにおける検討を行うことによって、普遍的な議論を行う予定である。

更に、本研究に掲載したような実験データや圧力分布に関するデータを収集すると共に、上層・下層の流速分布、濃度分布および流れの抵抗に関する検討を行い、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乱流層の形成機構についても、今後、検討する予定である。

謝辞: 本研究の推進に当たって、実験およびデータ解析において、当時、立命館大学大学院 博士前期課程学生であった内海敦郎君、黒田尚吾君、衛藤祐介君、吉田圭祐君および磯部智彦君、および、立命館大学大学院 博士前期課程の安道明寿君および樋田祥久君に尽力頂いた。記して謝意を示します。また、本研究の一部は、文科省科学研究費補助金(基盤B)(研究代表者:江頭進治)、文科省21世紀COEプログラム・研究拠点形成費等補助金(研究代表者:村橋正武)、ハイテク・リサーチ・センター整備事業(研究代表者:児島孝之)および学術フロンティア推進事業(研究代表者:土岐憲三)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・パルーニムハマド=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) 伊藤隆郭・江頭進治: 土石流の流れに及ぼす砂粒子径の影響, 水工学論文集, 第49巻(2), pp. 895-900, 2005.
- 18) Itoh, T. and S. Egashira: Effect of debris flow discharge on equilibrium bed slope, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005-Parker & Garcia (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 111-118, 2005.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 例えば、玉井信行: 密度流の水理, 新体系土木工学(土木学会編), 22, 第6章, 1980.
- 22) 高橋 保: 土石流の機構と対策一地質・砂防・土木技術者/研究者のための一, 近未来社, 第2章, 2004.
- 23) 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.
- 24) 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.

(2006.9.30 受付)