

土石流の Phase transition に関する研究

滋賀県 正会員 ○磯部 智彦 立命館大学理工学部 フェロー 江頭 進治
立命館大学理工学部 正会員 伊藤 隆郭 立命館大学大学院 学生員 樋田 祥久

1. はじめに St. Helens の火山噴火による斜面崩壊および長野県西部地震による御嶽の斜面崩壊などの大規模な崩壊において、崩土は流動性が高く、通常の剛体・連続体の運動法則に基づく解析による到達距離よりもはるかに大きいことが報告されている^{1),2)}。このような現象は、固相の一部が液相に変化（相変化, Phase transition）したものと推測される。本研究においては、土石流の相変化による土砂輸送能力の増加現象について、実験データを用いて解析する。

2. 水路実験 実験には幅 5.0cm, 長さ 12.0m の可変勾配式矩形断面水路を用いている。砂と水を十分に混合させ、上流端から定常的に供給し、水路内に移動床を形成させている。移動床は下流端から 5.0m~7.0m の区間に十分に長く形成させている³⁾。使用した一様砂の材料特性値は、砂粒子径 $d = 0.0292$ cm, 粒子比重 $\sigma/\rho = 2.65$, 内部摩擦角 $\phi_s = 38.3^\circ$, 静止堆積濃度 $c_s = 0.537$ である。実験では混合物の流量を変化させて、相変化の影響をみる。流れが平衡状態に達した時に、平衡勾配, 水深, 流速分布, 流量・流砂量を測定している。実験条件および結果の一部を表-1 に示す。

表-1 実験条件（一部）

Run	d (cm)	θ_e (deg.)	q_m (cm ² /s)	q_s (cm ² /s)	c_f	h_t (cm)	h_t/d	u_τ (cm/s)	τ_*	w_0 (cm/s)	w_0/u_τ (cm/s)	R_{e*}	F_r	R_e	T (°C)
003	0.0292	9.72	9.71	1.14	0.117	0.336	11.5	7.46	1.20	3.67	0.492	16.7	1.59	746	11.0
113	0.0292	9.75	29.8	5.26	0.176	0.539	18.4	9.45	1.93	3.67	0.388	19.0	2.41	2049	7.2
001	0.0292	9.49	49.8	9.4	0.189	0.870	29.8	11.9	2.98	3.67	0.310	38.7	1.96	5567	24.0
017	0.0292	9.83	102	26.3	0.257	1.193	40.9	14.13	4.31	3.67	0.260	27.5	2.50	6812	6.2
010	0.0292	10.0	216.0	58.3	0.270	1.60	54.8	16.5	5.87	3.67	0.222	34.2	3.41	15330	8.3

ここに、 d は砂の粒径, θ_e は平衡勾配, q_m は砂粒子と水の混合物の単位幅流量, q_s は砂粒子の単位幅流量（流砂量）, c_f は輸送濃度（流砂量と全流量との比）, h_t は全流動深, u_τ は摩擦速度（ $u_\tau = \sqrt{gh_t \sin \theta_e}$ ）, 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（ $R_{e*} = u_\tau d / \nu$ ）, F_r はフルード数, R_e はレイノルズ数で、 $R_e = \bar{u} h_t / \nu$ （ $\bar{u}$ は断面平均流速）, T は水温である。

図-1 は平衡勾配と輸送濃度の関係、図-2 はほぼ同一の平衡勾配における流速分布の比較である。同図には、実験値および砂粒子が層流流動することを想定した土石流の構成則を用いて得られた計算値⁴⁾（以下、厳密解）を載せている。図-1 と図-2 を見ると、単位幅流量 q_m が 10 (cm²/s) 程度においては実験値と厳密解はほぼ一致しており、砂粒子は層流流動するようである。しかし、流量の増加に伴って両者のズレは大きくなっている。また、図-1 において、同一の平衡勾配における各流量の輸送濃度を見てみると、流量の増加に伴って輸送濃度が増加している。すなわち、流れの規模の増加に伴い、土砂輸送能力が大きくなることが確認できる。次に、図-2 に示す単位幅流量が $q_m > 10$ (cm²/s) の流速分布を見ると、河床近傍においては上に凸の分布形であるが、自由水面近傍における流速の変動が大きくなり乱流層が生じている。さらに、流量の増加に伴い、水面近傍の乱流層は大きくなっている。これらの結果

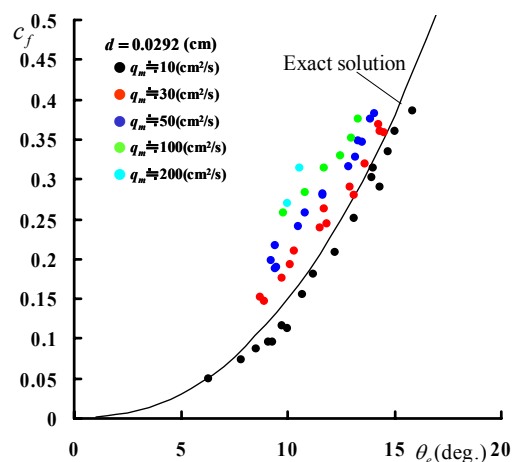
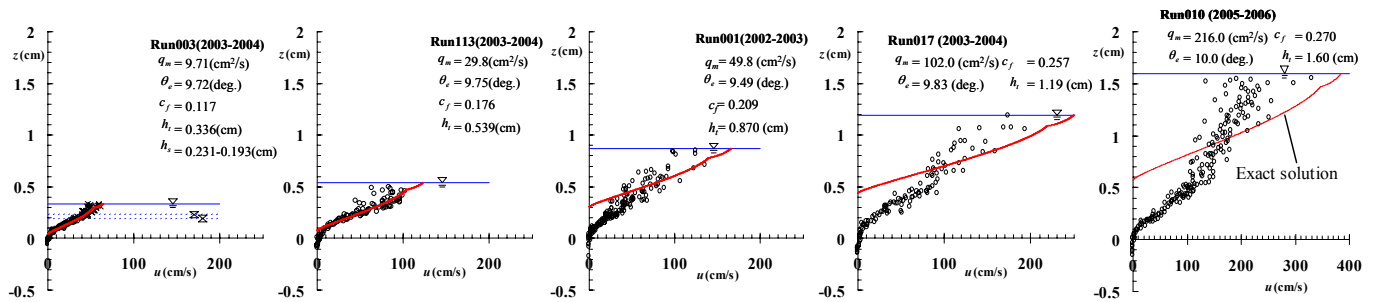


図-1 平衡勾配と輸送濃度の関係

キーワード 相変化, 土石流, 土砂輸送能力, 浮遊砂流

連絡先 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1 立命館大学理工学部都市システム工学科 TEL077-561-5035

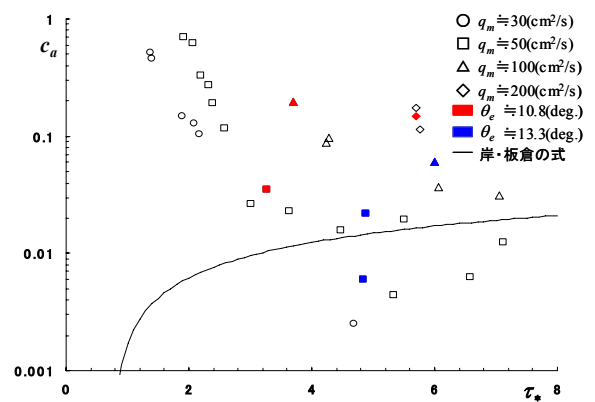
は、流れの規模の増加に伴って、砂粒子が層流流動する流れにおいて、上層に相変化に伴う乱流拡散が卓越する層が形成され、二層構造の流れに変化することを示唆している。



図－2 流速分布

3. 相変化と土砂輸送能力 流れの規模の増加に伴い、砂粒子の運動が固相のものから液相のものへと遷移する相変化が起こり、水面近傍に乱流拡散が卓越する流れが形成され得ることが示された。土砂輸送能力の増大は、乱流層による土砂輸送能力によるものと推測できる。そこで、従前の浮遊砂量式を用いて、土砂輸送能力の増加について解析する。

図－1に示す厳密解は砂粒子が層流流動するものとして求められた解である。これに浮流砂流によって輸送される土砂量を加えることによって、全流砂量における浮遊砂量の寄与を計算する。層流流動する流砂量を q_b 、浮遊砂量を q_{su} とし、 q_b には江頭らの流砂量式⁴⁾を用い、 q_{su} の計算には対数型の流速分布、ラウス型の濃度分布則を用いることにする。基準面高さ a は $a = 0.05h_i$ とし、図－1に示す実験値に輸送濃度が一致するような基準面濃度 c_a を逆算する。なお、濃度分布の計算においては $\beta = 1.2$ 、 $\kappa = 0.4$



図－3 無次元掃流力と基準面濃度の関係

としている。図－3は、このようにして求められた無次元掃流力 τ_* と基準面濃度 c_a の関係である。同図には、比較のために岸・板倉の式を載せている。基準面濃度 c_a の計算値は岸・板倉の計算値より1オーダーから2オーダー程度大きい値となっている。特に、無次元掃流力 τ_* の小さいときには、基準面濃度 c_a は大きく、静止堆積濃度 $c_* = 0.537$ に近い値になっている。同一の流量において、無次元掃流力 τ_* の増加は勾配の増加に対応して、 c_a が減少しており、従前の基準面濃度の計算結果とは逆の傾向がみられる。また、同一の平衡勾配($\theta_e \approx 10.8, 13.3 \text{ deg.}$)において、無次元掃流力 τ_* の増加に伴い基準面濃度 c_a が増加する傾向は、岸・板倉の計算値と同じであるが、両者は1オーダー程度異なり、岸・板倉の計算値よりも大きい値となっている。

従前の浮遊砂量式を用いると、濃度分布形をラウス型の分布形とした場合には、基準面濃度 c_a をかなり大きい値に設定する必要がある。これは、乱流層の濃度分布形状が一様化していることを示す一因とも言える。今後、乱流層内の濃度分布則や層流層と乱流層との境界の位置の決定機構についても検討する必要がある。

4. おわりに 相変化による土砂輸送能力の増加現象について、層流流動する砂粒子の輸送濃度に加えて、浮遊砂流によるものを考慮して検討を行った。水路実験により、相変化によって、砂粒子が層流流動する流れの上層に乱流層が形成し、土砂輸送能力が増加することが確認できた。さらに、従前の浮遊砂流のラウス型の濃度分布則を用いて、輸送濃度の実験データから基準面濃度を逆算したところ、基準面濃度の計算値はかなり大きい値となった。今後、二層構造における層流層と乱流層との境界の位置および乱流層の濃度分布などの内部構造について検討する必要がある。

参考文献 1) 芦田ら：京大防災研年報，28B-2，263-281，1985，2) 高橋：京大防災研年報，24A，15-34，1981，3) 伊藤：水工学論文集，49-2，895-900，2005，4) 伊藤：立命館大学学位論文，2000