

細粒土砂を含む土石流の相変化が 流動・堆積に及ぼす影響

STUDY ON DEBRIS FLOW BEHAVIOR CONTAINING FINE SEDIMENT CONSIDERING PHASE SHIFT

長谷川祐治¹・中谷加奈²・麻野佑介²・里深好文³

Yuji HASEGAWA, Kana NAKATANI, Yusuke ASANO and Yoshifumi SATOFUKA

¹ 広島大学大学院総合科学研究科 (〒739-8521 東広島市鏡山 1-7-1)

E-mail: y-hasegawa@hiroshima-u.ac.jp

² 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: kana2151@kais.kyoto-u.ac.jp

³ 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Key Words: debris flow, fine sediment, phase shift, deposition, channel experiment

1. はじめに

土砂災害の中でも土石流は流動性が高く、住宅地まで到達して被害を拡大させる要因となる。2014年に発生した長野県南木曾町¹⁾や広島県広島市²⁾での土砂災害からも、土石流は数 m の巨礫から数 mm 以下の細粒土砂まで幅広い粒度分布の材料で構成されることが知られている。従来は巨礫が先頭部へ集中する分級現象に着目した検討が多く行われてきた^例え^ば³⁾。しかし、2012年の九州北部豪雨災害では熊本県阿蘇においては細粒土砂を多く含んだ土石流が発生し、警戒区域外の緩勾配の領域まで到達したことが報告され⁴⁾、細粒土砂を多く含む土石流は石礫を主体とする土石流と挙動が異なることが推測される。

石礫型土石流の内部は、層流状に流れる粗粒土砂で流れの骨格が形成される。一方、粗粒土砂の間隙流体中に細粒土砂が浮遊することで、粗粒土砂の輸送量が増えることや土石流中に乱流層が形成されとの報告もある^例え^ば⁵⁾、⁶⁾。また、日本の土石流研究や砂防計画では平衡濃度式⁷⁾が広く適用される。細粒土砂が多く含まれる土石流は、細粒土砂の一部が液相に取り込まれるため液相密度を 1.0 g/cm^3 とした場合の計算値よりも平衡濃度が大きくなることが示

されている⁸⁾。しかし、土砂の一部が液相に取り込まれた液相密度を定量的に推定する手法は十分な検討が行われているとは言い難い。

中谷ら⁹⁾は細粒土砂を多く含む土石流について新たに実験を行い、平衡濃度理論を用いて細粒土砂が液相化する条件を検討した。実験は粒径が異なる二種類の土砂（以降、粗粒と細粒と呼ぶ）を用いて行われ、結果から細粒の粒径が小さく且つ細粒土砂の濃度が高いほど液相化が起ることを確認した。摩擦速度と沈降速度の比が大きいほど液相化する割合が増え、粗粒を多く含む場合に液相化割合が増加する結果も見られた。最も粒径比が異なる条件（粗粒 2.81 mm, 細粒 0.13 mm, 粗粒と細粒の混合比 2:1）では、粗粒の一部までが液相化した可能性が示されている。粒径が大きく異なる土砂が混合する場で、細粒だけでなく粗粒の流れ構造までが変化したと推測されるが、その機構や発生条件は明らかでない。

本研究では、粒径比が大きく異なる細粒土砂と粗粒土砂で構成される土石流に着目して、土砂濃度や混合割合、水理条件が土石流挙動や液相密度に及ぼす影響、並びに粗粒土砂の液相化機構を把握するための知見を得ることを目的に、水理実験を行った。

2. 実験方法

(1) 実験条件

図-1 に示す長さ 500 cm, 幅 10 cm の可変勾配の矩形断面水路を使用し, 水路勾配を 10 deg. とした. 水路上流端のタンクから定常的に水を供給し, 水路下流端から上流約 400 cm の位置に粗粒土砂を, 450 cm の位置に細粒土砂をホッパーで定常的に供給した.

実験には, 既往検討⁹⁾で粗粒土砂の液相化が確認された条件と同様に, 粗粒土砂の粒径 2.81 mm, 細粒土砂の粒径 0.13 mm を用いて, 表-1 に示す 19 ケースを実施した. 計測から実験使用砂の内部摩擦角 $\phi=35$ deg., 砂粒子の密度 $\sigma=2.61$ g/cm³ である. 水路下流端から 50 cm 上流の右岸側からハイスピードカメラ (300 f.p.s.) で実験中の流動深を読みとり, ほぼ土粒子が移動しない高さを河床と仮定した.

水路下流端から上流 10~50 cm の区間には, 超音波センサ (分解能 50 Hz) を 15 cm 間隔に 3 つ設置した. 水路下流端に高さ 10 cm の仕切板を設置して, 土砂を堆積させる移動床条件とした. 初期条件として河床勾配が水平になる程度まで土砂を堆積させた後に実験を開始した. 堆砂した河床勾配が安定する時間として約 2 分間, 水と土砂を供給した.

本検討ではセンサが 10 秒間同じ値を示した状態を平衡状態と見なし, 各センサでは水面の高さを計測し, 3 つのセンサで得られる平均値から水面勾配を求めた. なお, ここでは水面と河床の勾配が平行なることから水面勾配を河床勾配として扱った. 10 秒間を採用したのは, 実験ケースの一部で水面変動が激しい場合が確認されたためである. 土砂濃度と実験で得られた河床勾配の結果を 2.(2) に示す平衡濃度式^{9),7)}を用いて各ケースの液相密度を求めた.

(2) 液相密度の算出

土石流中の液相と固相の各成分のイメージを図-2 に示す. 土砂の液相化を考慮しない状態 (左) と考慮した状態 (中央), 更に細粒土砂だけでなく粗粒土砂の一部も液相化を考慮した状態 (右) である.

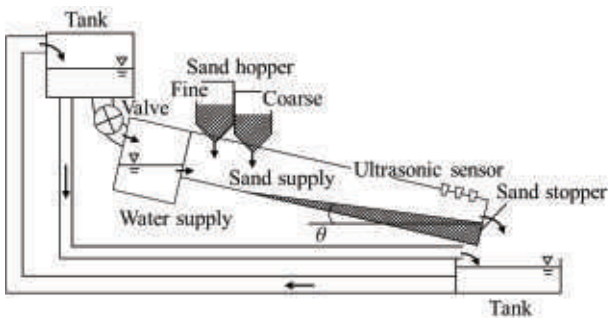


図-1 実験水路概要.

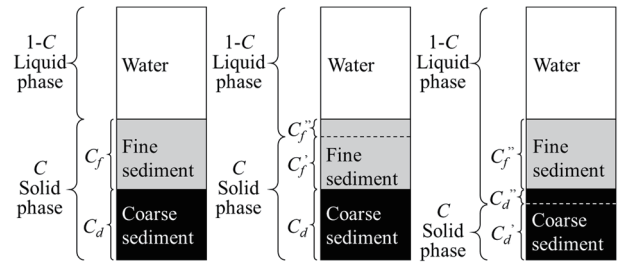


図-2 土石流中の液相と固相のイメージ (左: 土砂の液相化なし, 中央: 細粒土砂の液相化考慮, 右: 粗粒土砂の液相化も考慮).

$$C = C_d + C_f \quad (1)$$

$$C_f = C_f' + C_f'' \quad (2)$$

ここに, C : 土砂濃度, C_f : 細粒土砂の濃度, C_f' : 細粒土砂 (固相) の濃度, C_f'' : 細粒土砂 (液相) の濃度である.

図-2 中央の様に細粒土砂を, 液相として挙動する相と固相として挙動する二つの相に分けて考えると, 細粒土砂が液相化した液相密度 ρ は式(3)で表される.

$$\rho = \frac{(1-C)\rho_w + C_f'' \cdot \sigma}{(1-C) + C_f''} \quad (3)$$

次に土砂濃度と勾配を用いて, 式(3)と勾配 (本研究では水面勾配を採用) に応じて使い分けられる平衡濃度式 (4), (5) の両式⁷⁾から ρ を算出し, 細粒土砂 (液相) 濃度 C_f'' を変えながら, 両式の値が一致するまで繰り返し計算を行った. 以降, この計算で求めた ρ の数値を細粒土砂が液相に取り込まれた ρ , C_f'' の数値を細粒土砂が液相に取り込まれる濃度とする.

$$\theta_x \leq \theta$$

$$C_\infty = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (4)$$

$$1.8 \leq \theta \leq \theta_x$$

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \right\}^2 \quad (5)$$

ここに, C_∞ : 平衡濃度, ρ : 液相密度, θ : 勾配, ϕ : 土砂の内部摩擦角, θ_x : 設定した ρ で式(4)と式(5)が一致する勾配 ($\rho=1.0$ g/cm³ で $\theta_x=7.81$ deg.) である. 平衡濃度式は流下形態が異なる境界で不連続な値を示すことが指摘されているため, 本検討では既往検討^{9), 10)}の手法と同様に θ_x により調整した.

また, 一部の条件では細粒土砂全てが液相化した

状態よりも大きな液相密度 ρ を示す結果が得られた。酒井ら¹¹⁾は平衡濃度による評価では接触摩擦応力に寄与しない土砂が液相化し、抵抗係数による評価では衝突応力に寄与しない土砂が液相化したと考え、両者の差が何れにも寄与しない粒子の存在を示唆するとしている。このような中間的な粒子の存在も考えられるが、本検討では ρ を満たすように細粒土砂だけでなく粗粒土砂の一部が液相化したと仮定して(図-2右, 式(6)), 検討を進めた。固相の土砂濃度 C_{Solid} は式(7)で表される。

$$C_d = C_d' + C_d'' \quad (6)$$

$$C_{Solid} = C_d' + C_f' \quad (7)$$

ここに, C_d : 粗粒土砂の濃度, C_d' : 粗粒土砂(固相)の濃度, C_d'' : 粗粒土砂(液相)の濃度である。なお図-2右の状態は式(7)の $C_f'=0$ である。

3. 実験結果と考察

実施した全ケースの実験条件と得られた実験結果を表-1に示す。また、図-3に本実験で得た河床勾配と土砂濃度 $C_d' + C_f'$ (固相のみ) の関係を示す。図-3には比較のため ρ を 1.0 g/cm^3 から 0.1 刻みで 1.4 g/cm^3 まで増加させた平衡濃度式(境界は前述手

法で調整)も併記した。

全ての実験結果は $\rho=1.0 \text{ g/cm}^3$ の平衡濃度式よりも土砂濃度が大きい。また、供給土砂濃度が小さいほど算出された ρ が小さく、既往の実験結果⁸⁾と同様の傾向を示す。また、同じ供給土砂濃度に着目すると、河床勾配が急になるほど ρ が小さくなる。実験ケースが少ないが同じ土砂を用いた中谷ら⁹⁾の結果も同様の傾向を示す。また、図-3や表-1に示す実験結果は、土砂濃度が液相化に影響すること、細粒土砂と粗粒土砂の混合比の違いが ρ に影響すること、すなわち粗粒土砂の存在も液相化に影響することを示す。本実験で最大の ρ は Case13 の $\rho=1.31 \text{ g/cm}^3$ であった。

(1) 液相化に影響する要因

図-4の上図に水、細粒土砂(液相, 固相), 粗粒土砂(液相, 固相)の供給流量・流砂量を、下図に相対的な各成分の割合を示す。左から同じ土砂濃度, 混合比のケースを順に示している。ただし混合比は(細粒:粗粒)が(1:1), (1:2)のケースのみを示す。

図-4, 表-1の結果から全ケースで細粒土砂が液相化しており, Case5, 7, 9, 11, 12, 15, 18, 19では細粒土砂が全て液相化しただけでなく粗粒土砂までが液相化する。粗粒土砂の半分以上が液相化した Case15, 19は土砂濃度 $C=0.17$, 供給流砂量が最小

表-1 実験ケースと実験結果 (一 は水深が得られなかったケース)。

Case	実験条件					実験結果				
	供給流量(水)	供給土砂量(細粒)	供給土砂量(粗粒)	供給土砂濃度	細粒と粗粒の割合	河床勾配 θ	水深 h	液相化した細粒土砂の割合	液相化した粗粒土砂の割合	液相密度 ρ
	cm^3/s	cm^3/s	cm^3/s	C_f+C_d	$C_f : C_d$	deg.	cm	C_f''/C_f	C_d''/C_d	g/cm^3
1	1500	370	370	0.33	1 : 1	10.56	1.6	0.34	0	1.12
2	1500	150	150	0.17	1 : 1	7.03	2.2	0.35	0	1.05
3	1500	150	300	0.23	1 : 2	8.19	1.4	0.58	0	1.09
4	1000	300	0	0.23	3 : 0	8.80	2.0	0.15	(only C_f)	1.07
5	1000	165	330	0.33	1 : 2	7.22	1.6	1.00	0.07	1.25
6	1000	250	250	0.33	1 : 1	7.28	1.3	0.75	0	1.25
7	1000	100	200	0.23	1 : 2	6.23	1.3	1.00	0.05	1.16
8	1000	150	150	0.23	1 : 1	7.61	1.6	0.49	0	1.11
9	1000	70	140	0.17	1 : 2	4.48	1.3	1.00	0.36	1.17
10	1000	100	100	0.17	1 : 1	5.30	1.3	0.93	0	1.14
11	1000	90	120	0.17	3 : 4	5.36	1.3	1.00	0.01	1.13
12	600	100	200	0.33	1 : 2	7.35	1.0	1.00	0.05	1.25
13	600	150	150	0.33	1 : 1	5.79	0.9	0.96	0	1.31
14	600	90	90	0.23	1 : 1	6.38	0.8	0.69	0	1.15
15	600	60	60	0.17	1 : 1	2.50	1.0	1.00	0.75	1.24
16	600	300	0	0.33	3 : 0	8.41	-	0.30	(only C_f)	1.21
17	600	40	80	0.17	1 : 2	7.25	1.35	0.42	0	1.04
18	600	70	110	0.23	7 : 11	4.85	1.45	1.00	0.28	1.23
19	600	50	70	0.17	5 : 7	3.65	1.1	1.00	0.53	1.20

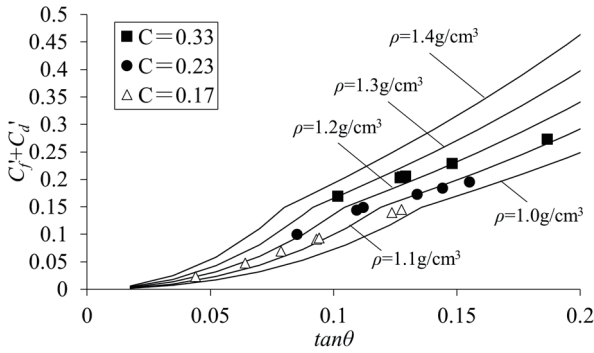


図-3 堆砂勾配と固相の土砂濃度 $C'_d + C'_f$ の関係.

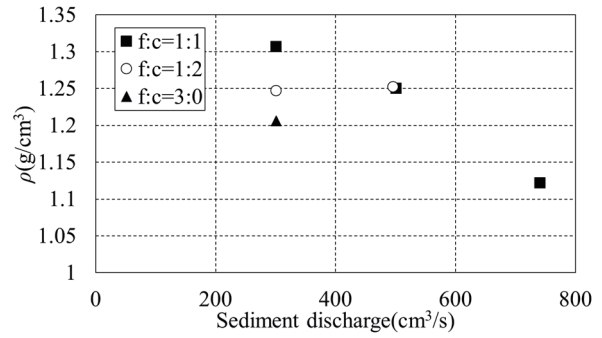


図-5 流砂量と液相密度 ρ の関係($C=0.33$).

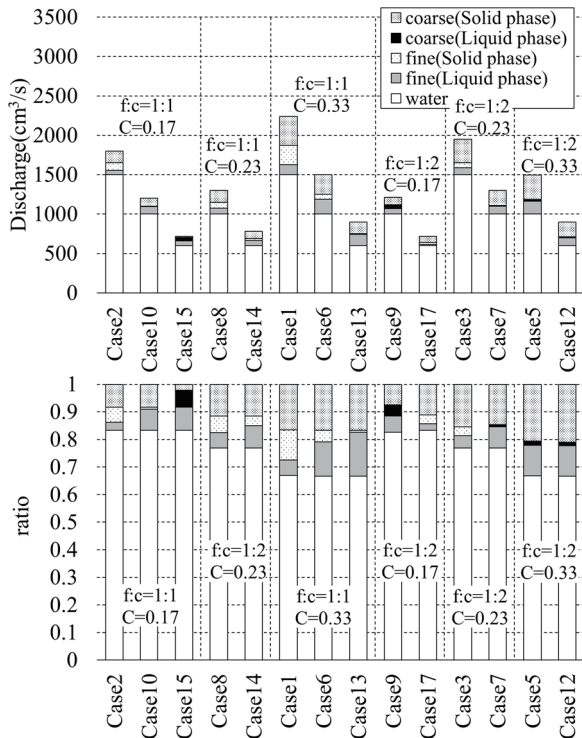


図-4 細粒土砂：粗粒土砂(図中の f:c)が1:1, 1:2のケースの実験結果(上 供給量, 下 割合).

(細粒+粗粒=120 cm³/s)のケースで f:c=(1:1)と(5:7)だった。但し、 $C=0.17$ で同じ供給流砂量 120 cm³/sでも(1:2)の Case17 では粗粒の液相化は確認されていない。また、粗粒土砂が液相化したと考えられるケースは Case15 を除くと混合比が粗粒の方が多きケースで、混合割合が液相化に影響することが推測される。一方、 $\rho=1.25$ g/cm³を超えるのは $C=0.33$ の Case5, 6, 12, 13 であり、濃度や供給流砂量も液相化に影響すると考えられる。

(2) 液相密度と流砂量

図-5, 6, 7に供給流砂量と液相密度 ρ の関係を示す。それぞれの図を土砂濃度 $C=0.33, 0.23, 0.17$ で分類し、各図中には土砂の混合比(細粒：粗粒を f:c で記載)

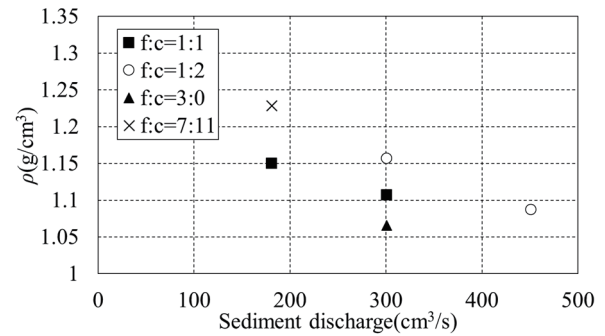


図-6 流砂量と液相密度 ρ の関係($C=0.23$).

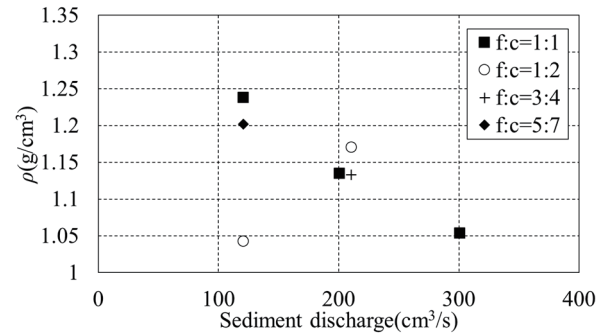


図-7 流砂量と液相密度 ρ の関係($C=0.17$).

で整理した。f:c=(1:1)では、流砂量に対する流体密度の変化率は濃度が高いほど小さくなる傾向が認められるが、 $C=0.33$ では流砂量が最大のケースでは急減して、流砂量が増えると液相化し難くなったと推測できる。f:c=(1:2)では、 $C=0.33$ は流砂量が多くなっても ρ はほぼ同じ値を示し、 $C=0.23$ は流砂量が多くなると ρ が小さくなるのに対して、 $C=0.17$ は流砂量が多くなると ρ が大きくなる。

土砂濃度が同じ条件下では流砂量が少ない方が細粒土砂周辺の空間体積は小さくなる。一般には空間が大きい方が乱れが発生しやすく液相化しやすいと考えられる。しかし、本実験では異なる傾向を示しており、流砂量が増えて細粒土砂が多くなると、細粒土砂の占める空間体積が増えることで、乱れが発

生し難く、液相化し難くなる」と推測される。乱れ強度がどの程度の空間スケールまで影響するかは明らかにされていない。空間体積が乱れ強度のスケールを超えたと考えると、本実験のように細粒土砂が占める空間体積、すなわち流砂量が大きくなると液相化し難くなる現象が説明できる。一方、 $C=0.33$, (1:2)では流砂量が増えても ρ がほぼ同じケースもあるが、これは乱れ強度が影響する空間体積のスケールが上限付近まで達したと推測される。 $C=0.23$, (1:2)では流砂量が大きくなると ρ が小さくなるが、 $C=0.33$ より流砂量は少ない条件の傾向のため、上述と同様の傾向を示したと考えられる。一方、 $C=0.17$, (1:2)では流砂量が大きいと ρ が大きくなる傾向を示すが、ここでの乱れ強度のスケールが空間体積のスケールに影響が及んだため、従来通り乱れ強度が大きくなると ρ が大きくなったと考えられる。

(3) 乱れによる液相化の検討

乱れの強度を現す指標として、土石流中の間隙流体の乱れに伴う運動エネルギー散逸量に関する因子である土砂の間隙スケールに着目した。本検討では間隙スケールを土砂の動きやすさに関する要素として考えた。江頭ら¹²⁾の検討を参考に、土砂の間隙スケール l は以下のように表される。

$$l = \sqrt{k_f} \left(\frac{1 - C_{solid}}{C_{solid}} \right)^{\frac{1}{3}} d \quad (8)$$

ここに、 k_f : 係数、 d : 固相として振る舞う土砂の粒径（細粒土砂の一部のみが液相化したケースでは細粒土砂の粒径、細粒土砂が全て液相化して一部の粗粒のみが固相となるケースでは粗粒土砂の粒径）、 $\sqrt{k_f}$ の値は一定とみなし、既往検討^{9), 12)}を参考に $\sqrt{k_f}=0.5$ とした。

図-8に l/d （間隙スケールに対する粒径の比）と液相密度（ここでは、無次元化のための水の密度 $\rho_w=1.0 \text{ g/cm}^3$ で除した ρ/ρ_w ）の関係を、供給土砂濃度 C と供給流砂量に着目して整理した。結果から、 l/d が大きくなると ρ/ρ_w が大きくなる。また、 C が大きいほど l/d は小さく、 ρ/ρ_w の値が大きく、傾きも大きい。式(8)で l/d を算出する際、濃度が大きくなるほど l/d は小さくなり、乱れにくくなると推測される。しかし、本結果では C が高いほど l/d は小さいが、高い ρ/ρ_w を示し液相化が起こりやすいことを示す。既往検討⁹⁾では、 l/d の範囲は0.6-1.2で、全体的に粒径毎で l/d が大きくなると ρ/ρ_w が小さくなる傾向を示したが、細粒0.13 mmでは4ケースのうち1ケースだけ大きくなる傾向を示した。

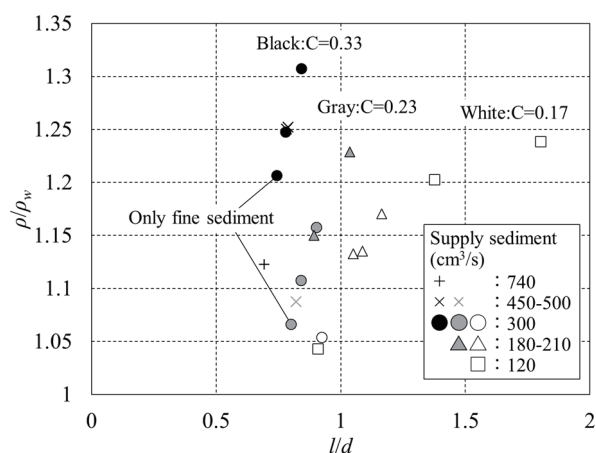


図-8 間隙スケールと粒径の比 l/d と液相密度 ρ/ρ_w 。

また、同じ供給土砂濃度では、供給流砂量が少ないケースで（ $C=0.33$ で $300 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $C=0.23$ で $180\text{-}210 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $C=0.17$ で $120 \text{ cm}^3/\text{s}$ ）大きな l/d 、 ρ/ρ_w を示し、液相化が進んだことを示す。また、 $C=0.33$ で最も l/d 、 ρ/ρ_w が小さいのは供給流砂量が最大の $740 \text{ cm}^3/\text{s}$ で、供給流砂量が大きいと乱れが起こりにくく、液相化し難くなった一例と推測される。二番目に l/d 、 ρ/ρ_w が小さい $300 \text{ cm}^3/\text{s}$ は細粒のみのCase16で、これを除くと次に大きな l/d 、 ρ/ρ_w を示すのは $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ と $300 \text{ cm}^3/\text{s}$ であり、比較的小さな供給流砂量の方が大きくなる傾向を説明できる。 $C=0.23$ では ρ/ρ_w が最小のケース（Case4、細粒土砂のみ、 $300 \text{ cm}^3/\text{s}$ ）を除くと、供給流砂量が $C=0.23$ で最大の $450 \text{ cm}^3/\text{s}$ で小さな l/d 、 ρ/ρ_w を示す。 $C=0.17$ では、 l/d 、 ρ/ρ_w が最小のCase17を除くと、供給流砂量が小さくなるほど l/d 、 ρ/ρ_w が大きくなる。また、同じ濃度や供給流砂量でも、細粒のみでは l/d 、 ρ/ρ_w が小さく粗粒を混合したケースと比べて液相化し難いことが示された。

次に、乱れ強度の指標に一般に河床に存在する砂粒子の流れやすさの指標に用いられる式(9)の無次元掃流力 τ_* を用いて検討する。

$$\tau_* = \frac{\rho_w h \sin \theta}{(\sigma - \rho_w) d_f} \quad (9)$$

ここに、 ρ_w : 水の密度(g/cm^3)、 h : 水深(cm)、 θ : 河床勾配、 σ : 砂礫の密度(g/cm^3)、 d_f : 細粒土砂の粒径(cm)で、 h は表-1に示す値を用いた。

図-9に τ_* と液相化した土砂の割合($C_a'' + C_f''$)/($C_a + C_f$)の関係を示す。結果から、 τ_* が大きいほど土砂が液相化した割合が小さくなる。この傾向は τ_* 、あるいは同様の指標として用いられる摩擦速度と沈降速度の比 u^*/w_0 が大きい方が液相に取り込まれや

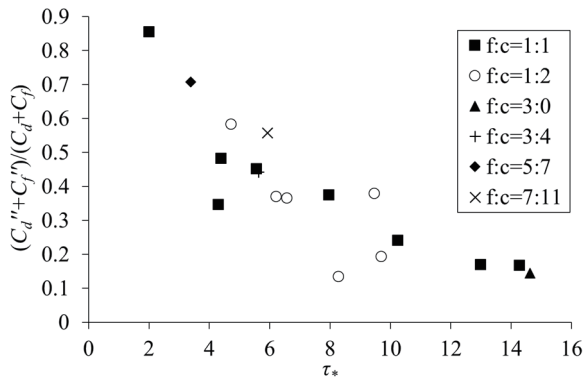


図-9 無次元掃流力 τ_* と液相化した土砂の割合.

すい既往研究^{9), 13)}と逆の傾向を示す. この違いは, 既往研究の実験ではほぼ一定の供給流砂量を用いたのに対し, 本実験は供給流砂量を変化させている. すなわち流砂量が多い条件では少ない条件と比べて土砂が流下中に受ける河床せん断力や粒子の接触による損失が大きくなるため, 流動性が低下し液相密度 ρ が小さくなったと推測される.

4. おわりに

本報では細粒土砂を含む土石流の相変化について実験により検討した. 結果から細粒だけでなく粗粒土砂の一部が液相化するケースが複数確認された. また, 乱れの強さを示す指標と液相密度は既往検討と異なる傾向を示し, 液相化が乱れ強度のスケールとその粒子周辺に占める空間体積のスケール, すなわち濃度や流砂量が影響することを明らかにした. 本検討では濃度が高い方が液相化しやすく, 流砂量が多いと液相化し難くなることが確認された. 土砂の混合比も影響し, 細粒のみでは粗粒を混合する場合よりも液相化し難く, 混合による乱れが液相化に影響することが推測された.

一方, 土石流中には固相・液相だけでなく中間的な何れにも寄与しない粒子の存在も示唆されるため¹¹⁾, 土砂の供給条件を変えた検討や抵抗係数との考察などについて, 引き続き検討を進める.

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 15K16312 の助成を受けたものです. また, 本研究は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの実験施設を利用しました. ここに記して感謝致します.

参考文献

1) 平松晋也, 福山泰治郎, 山田孝ら, 他 11 名: 平成 26

- 年 7 月 9 日長野県南木曾町で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.3, pp.38-48, 2014.
- 2) 海堀正博, 石川芳治, 里深好文ら, 他 13 名: 2014 年 8 月 20 日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.3, pp.49-59, 2014.
 - 3) 和田孝志, 古谷智彦, 中谷加奈, 里深好文, 水山高久: 土石流先頭部における大粒子集積に影響を及ぼす要素に関する実験的検討, 砂防学会誌, Vol.67, No.6, pp.56-63, 2015.
 - 4) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部: 土砂災害対策の強化に向けた検討会 ハード対策分科会討議資料 ①, pp.1-38, 2014.
 - 5) 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, No.37, B-2, pp.359-369, 1994.
 - 6) 高橋保, 中川一, 原田達夫: 混合粒径材料からなる渓床侵食型土石流の予測, 京大防災研年報, No.33, B-2, pp.443-456, 1990
 - 7) Takahashi T.: Debris Flow. Balkema, Rotterdam, 165pp. 1991.
 - 8) 長谷川祐治, 杉浦信男, 岡本敦ら, 他 4 名: 細粒土砂が土石流の平衡濃度に及ぼす影響に関する実験, 砂防学会研究発表会概要集 B, pp.118-119, 2013.
 - 9) 中谷加奈, 古谷智彦, 長谷川祐治, 小杉賢一朗, 里深好文: 細粒土砂の液相化が土石流挙動に及ぼす影響とその要因に関する検討, 砂防学会誌, Vol.7, No.6, pp.3-11, 2018.
 - 10) 鈴木拓郎, 内田太郎, 岡本敦: 土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究, 砂防学会誌, Vol.66, No.2, pp.21-30, 2013.
 - 11) 酒井佑一, 堀田紀文, 長谷川祐治, 中谷加奈: 微細土砂を含む混合粒径土石流の応力構造, 砂防学会研究発表会概要集, pp.106-107, 2017.
 - 12) 江頭進治, 芦田和男, 矢島啓, 高濱淳一郎: 土石流の構成則に関する研究, 京大防災研年報, 第 32 号 B-2, p.487-499, 1989.
 - 13) 古谷智彦, 中谷加奈, 小杉賢一朗, 長谷川祐治, 里深好文, 水山高久: 火山地域の大規模土砂移動による被害範囲の推定手法の検討, 砂防学会研究発表会概要集 B, pp.62-63, 2016

(2018. 5. 18 受付)