

緩勾配渓流を流下する土石流の流動特性に及ぼす間隙水の微細砂濃度の影響

本田尚正¹

1 東京農業大学地域環境科学部

要旨： 一般に土石流は溪床勾配が急な場合、溪床堆積物を侵食しながら大規模化して流下する。そして平衡勾配を境として勾配が緩くなると溪床上に土砂を堆積させ、停止に至る。一方、火山灰のような細粒分を多く含む土石流では、標準的な停止・堆積勾配よりも緩い勾配であっても流下が進行する場合がある。本研究では、上流域で発生した土石流が停止・堆積勾配よりも緩い勾配を有する下流域まで到達・氾濫する要因について考察する。検討対象は 2013 年に集中豪雨に起因して伊豆大島で発生した大金沢泥流と、2014 年の熊本地震によって阿蘇地域で発生した山王谷川土石流の 2 事例である。溪床勾配と土石流の土砂濃度との関係に基づいて検討した結果、2 事例ともに粒子サイズの小さい材料が間隙水の密度を高め、泥流となって緩勾配の渓流を流下し、下流域まで到達・氾濫したと推察された。

キーワード： 緩勾配渓流, 土石流, 間隙水, 微細砂濃度, 泥流

Influence of fine sand concentration in pore water upon runoff characteristics of debris flow flowing down a torrent of mild gradient

Naomasa HONDA¹

1 Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Abstract: Generally, when the bed slope is steep, the debris flow erodes the bed material and flows down at a large scale. When the bed slope becomes gentle at an equilibrium bed slope for a debris flow with a sediment concentration as a boundary, the debris flow allows the sediment deposit and stops soon. But when the debris flow includes such fine sand as volcanic ash, it flows down at a smaller incline than a general stop incline. We discuss the factors under which a debris flow moves downhill even if the bed slope gradient is very small, based on the relationship between the bed slope and the sediment concentration of the debris flow. We investigated two debris flow disasters in Japan: the Ohkanazawa torrent of Izuohshima, Tokyo Prefecture in 2013 (caused by heavy rainfall) and the Sanohdani torrent of the Aso district, Kumamoto Prefecture in 2016 (caused by a huge earthquake). Judging from the results, when the debris flow structure consisted of a high sand-water mixture, material of a small particle size raised the density of the pore water. A mud flow formed in the torrent of a mild gradient, arrived downstream, and overflowed.

Key-word: Torrent of mild gradient, debris flow, pore water, fine sand concentration, mud flow

1 はじめに

土石流の流動特性は溪床勾配の影響を大きく受ける。一般に土石流は 15° を超えるような急斜面上で発生し、勾配が急な場所では溪床堆積物を侵食しながら流下して大規模化する。そして平衡勾配を境として勾配が緩くなると、流れの形態は土石流から土砂流を経て掃流状集合流動へと変化し、溪床上に土砂を堆積させ、停止に至る (1, 2) (図-1)。一方、火山灰のような細粒分を多く含む土石流では、標準的な停止勾配よりも緩い勾配であっても流下が進行する場合がある (4, 5)。

本研究では、上流域で発生した土石流が停止・堆積勾配よりも緩い勾配を有する下流域まで到達・氾濫する要因について、溪床勾配と土石流の土砂濃度との関係から

考察する。検討対象は 2013 年に集中豪雨に起因して伊豆大島で発生した大金沢泥流と、2014 年の熊本地震によって阿蘇地域で発生した山王谷川土石流の 2 事例である。

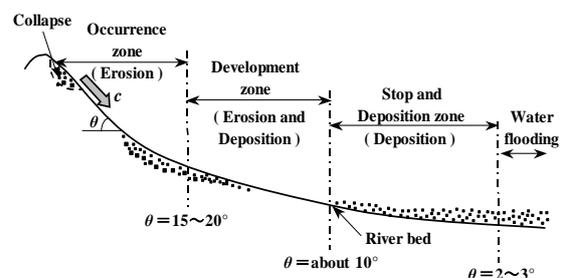


図-1. 土石流の流出過程

Fig.1 Debris flow runoff process

II 先行研究の概要および災害の概要

1. 先行研究の概要 一般に、土石流の平衡勾配は次式で与えられる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi \quad (1)$$

ここに θ_e は平衡勾配（土石流の土砂体積濃度（断面平均濃度） c に対して侵食も堆積も生じない勾配）、 σ は土粒子の密度、 ρ は間隙水の密度、 ϕ は土粒子の内部摩擦角である。なお、式(1)は次のように変形できる。

$$c_e = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (2)$$

ここに c_e は平衡濃度（溪流勾配 θ に対して侵食も堆積も生じない土砂体積濃度）である。

江頭ら(5)は、土石流の平衡勾配の式(1)に対して、泥流の性質を考慮した次式を提案した。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi \quad (3)$$

ここに h は流動深、 h_s は層流領域あるいは掃流砂層の厚さ ($h_s \leq h$) である。

式(3)で $0 < h_s/h < 1.0$ のとき、流れは土石流と浮遊砂流の中間的存在である。江頭ら(6)はそのうちの $h_s/h = 0.3$ のとき、流れは泥流の状態であるとした。同じく $h_s/h = 1.0$ のとき、流れは土石流の状態であり、式(1)と一致する。式(3)は、粒子サイズの小さい材料と水からなる泥流の方が石礫と水からなる土石流よりも流動性が高く、堆積勾配も緩くなることを示している。

江頭ら(4)は、1996年12月に長野県小谷村の蒲原沢で発生した土石流を多量の微細砂を含む泥水（微細砂濃

度 30~50%）と石礫で構成されるものとして、土石流の一次元支配方程式に基づく流動解析を行った。そして、土石流は泥水による浮力の増大によって流動性が高まり、緩勾配（3°程度）の流路工を流下した結果、流路工内の土砂堆積量が少量であったと説明した。

2. 大金沢泥流の概要(7) 伊豆大島では2013年10月の台風26号により24時間雨量824mmの記録的な集中豪雨（気象庁大島観測所で史上最大かつ500年超過確率規模を上回る豪雨）に見舞われ、島西部に位置する大金沢で16日未明に大規模な泥流が発生して家屋が多数被災し、死者・行方不明者39名を出す甚大な被害が生じた。

大金沢は三原山の噴火によって形成された西側山麓斜面を流下する溪流である（図-2）。山腹斜面は三原山に由来する溶岩流とスコリア丘を基盤岩とし、細粒の降下火砕物を含む1m未満の薄い表層土層で覆われている。斜面上の樹木根系は表層直下の難透土層である風化火山灰層（レス層）によって侵入を妨げられ、比較的水はけの良い表層内を斜面に平行に発達している。

以上述べたような斜面が豪雨に見舞われ、表層の根系部分がマット状に広く浅く崩壊する「根系層崩壊」と呼ばれる表層崩壊（崩壊深1m以下）が同時発生した。火山灰を主体とする崩土は多量の水を含んで泥流化し、表層土層を幅広く侵食しながら発達した。より起伏の少ない中・下流部では複雑な経路で流下して海にまで達し、広範囲にわたって氾濫した。

3. 山王谷川土石流の概要(8) 熊本県では2016年4月14日21時26分頃に熊本地方を震央（震源の深さ約11km）とするM=6.5の地震（前震）が発生し、益城町宮園で震度7、震央周辺の多くの地点で震度6弱を記録した。余震への警戒が続く中、4月16日1時25分頃に再び熊本地方を震央（震源の深さ約12km）とするM=7.3

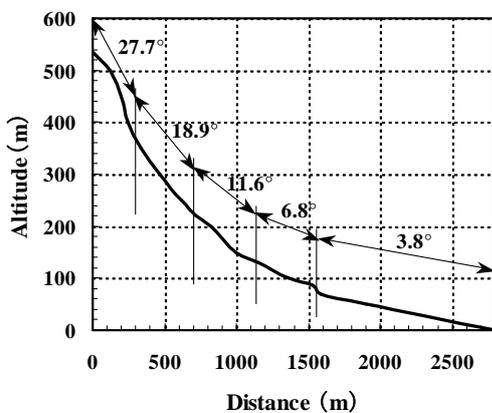


図-2. 大金沢 溪流縦断形状

Fig.2 Bed profile of Okanazawa torrent

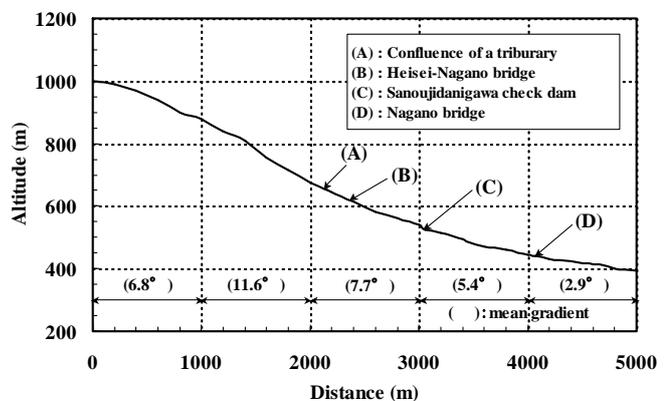


図-3. 山王谷川 河床縦断形状

Fig.3 Bed profile of Sanohdani torrent

の地震（本震）が発生し、益城町宮園と西原村小森で震度7を記録したほか、熊本県内の広範囲と大分県別府市、由布市で震度6弱以上が観測された。

のちに気象庁により「平成28年（2016年）熊本地震」と名付けられるこの地震により、南阿蘇村の山王谷川では強振動によって崩壊した山腹斜面の崩土が流動化した。山王谷川は流域面積2.34km²、流路延長約5km、平均勾配6.9°の荒廃溪流であり、土石流危険渓流Iに指定されている（図-3）。土石流の土砂供給源は山腹崩壊の表土、黒ボク土、ロームなどを主体とする崩土、中流域の溪岸崩壊による崩土、溪床堆積物の侵食による生産土砂などである。なお、下流域の砂防堰堤によって約20,000m³の土砂が捕捉され、被害が軽減された。

III 検討方法および計算条件

ここでは、上流域で発生した土石流が停止・堆積勾配よりも緩い勾配を有する下流域まで到達・氾濫した要因を明らかにするために、土石流の平衡勾配に関する式(1)～式(3)を用いて溪流勾配と土砂濃度との関係を調べる。

なお、間隙水が微細砂を含む場合、それによる浮力の影響は無視できない(4)。ここで間隙水に含まれる微細砂とは、厳密には江頭ら(5)が定義した土石流と浮遊砂流の中間的存在としての泥流における乱流の上層を形成する微細砂と下層（掃流砂層）の間隙流体を構成する微細砂に分けられるが、本研究ではその両方を同じ扱いとし、 ρ を次式で与えることとする。

$$\rho = (\sigma - \rho_w)c_s + \rho_w \tag{4}$$

ここに ρ_w は清水の密度、 c_s は間隙水中の微細砂濃度である。計算では $\sigma = 2.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_w = 1.00\text{g/cm}^3$ を用いる。

IV 結果および考察

図-4は、式(1)と(3)に σ 、 ρ 、 ϕ および h_s/h を与え

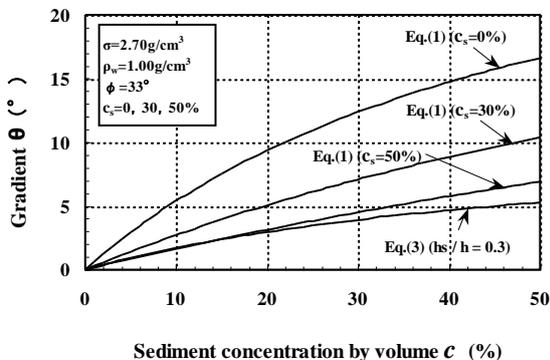


図-4. 土砂体積濃度 c と溪床勾配 θ の関係

Fig.4 Relationship between c and θ

て土石流の土砂濃度 c と溪床勾配 θ との関係を示したものである。同図における ϕ は、土石流の流動解析で汎用される $\phi = 33 \sim 39^\circ$ の範囲で実現象での流動性の高さを考慮して、最も小さい $\phi = 33^\circ$ を与えた(3, 4)。式(2)中の h_s/h は泥流の性質を示す $h_s/h = 0.3$ とし、 $\rho = \rho_w$ とした(6)。図-5は、式(2)において θ が 3° または 6° のとき、 c_s が 0% 、 30% 、 50% の場合の ϕ と c_e の関係を示したものである。図-6は、式(1)において c_s が 0% 、 30% 、 50% のときと、式(3)において $h_s/h = 0.3$ および $c_s = 0\%$ のとき、 ϕ が 25° 、 30° 、 35° の場合の土砂濃度 c と平衡勾配 θ_e の関係を調べたものである。

以上の図より、大金沢泥流および山王谷川土石流を事例として、間隙水の微細砂濃度 c_s の変化を考慮した溪床勾配 θ と土石流の土砂濃度 c との関係から緩勾配溪流を流下する土石流の特徴を考察すると、次のとおりである。

いま、大金沢下流部の平均勾配は、図-2より 3.8° である。これを図-4中の式(1)でみると、流れは $c_s = 30\%$ のときには $c = 15\%$ 程度の土砂流の性質を保持し、 $c_s = 50\%$ のときには $c = 30\%$ 近くの高濃度の土石流の性質を有することがわかる。また、同図中の式(3)でみると、泥流は 30% を超える高い濃度を保持していた可能性があった。

一方、山王谷川下流部の平均勾配は、図-3より 5.4° 、 2.9° である。そこで、図-5で $33 \sim 39^\circ$ の範囲に着目してみると、 $\phi = 35^\circ$ の場合、 $c_s = 30 \sim 50\%$ のとき、 $\theta = 6^\circ$ では $c = 22 \sim 38\%$ の高濃度であり、 $\theta = 3^\circ$ の緩勾配でも $c = 10 \sim 18\%$ の土砂流の濃度を保持できることがわかる。

砂防学会の現地調査によれば、山王谷川で発生した土砂の流れは、本震直後の土石流以外は粘土やシルトを多く含み、粘性が高い状態にあったとされ、上流域の崩壊地表面付近の黒ボク土層や下流域の泥流堆積物の d_{50} （通過質量百分率 50% 粒径）はともに 0.1mm 以下と非常に小さい値が報告されている(8)。それらより、山王谷川土石流の構成材料の ϕ は、通常の砂礫粒子で構成される土石流の ϕ

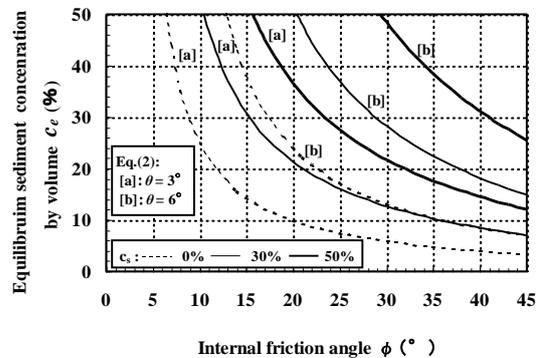


図-5. 内部摩擦角 ϕ と平衡濃度 c_e の関係

Fig.5 Relationship between ϕ and c_e

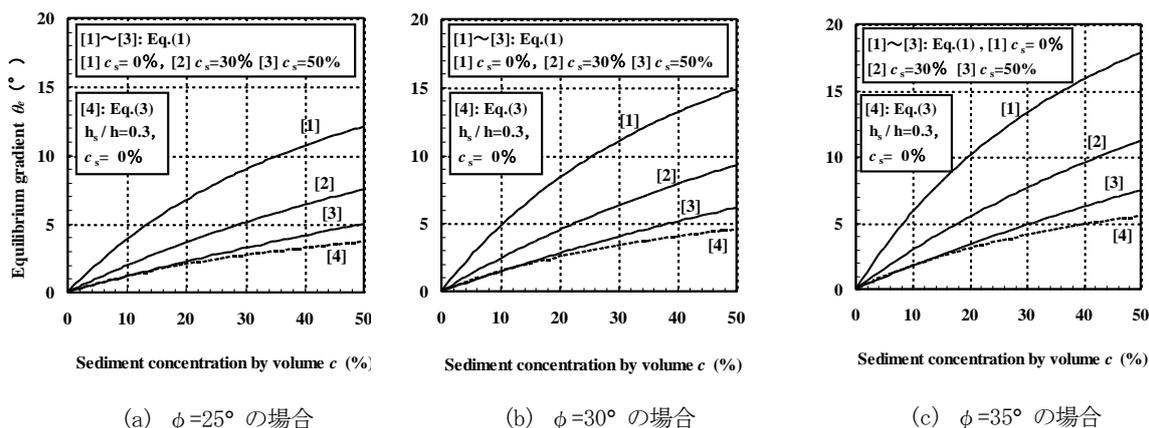


図-6. 土砂濃度 c と平衡勾配 θ_e の関係

Fig.6 Relationship between c and θ_e

よりも小さかったことが想定される。そこで、図-6 により、 ϕ の変化に伴う c と平衡勾配 θ_e の関係の変化をさらに細かくみてみる。すると、同図(a) ($\phi=25^\circ$) より $\theta_e=3^\circ$ となる c は、式(1)では $c_s=30\sim 50\%$ のとき $c=16\sim 28\%$ であり、式(3)では $c=35\%$ 程度である。同図(b) ($\phi=30^\circ$) より $\theta_e=3^\circ$ となる c は、式(1)では $c_s=30\sim 50\%$ のとき $c=13\sim 22\%$ であり、式(3)では $c=26\%$ 程度である。いずれも緩勾配で高濃度の流れを保持できることがわかる。

ここで、式(1)において $h_s/h = 0.3$ の場合の式(3)による θ_e とほぼ一致する c_s の値は 55% であり、それは河床における土砂の静止堆積濃度（土石流が土砂を取り込める限界の濃度）とほぼ等しい。さらに、 $c_s=30\sim 50\%$ は江頭ら(4)による蒲原沢土石流の流動解析結果から推定した間隙水中の微細砂濃度ともよく一致している。

以上より、大金沢、山王谷川ともに粒子サイズの小さい材料が土石流を構成する間隙水の密度を高め、浮力を増大化させ、緩勾配の溪流を流下したと推察される。大金沢では、火山灰を主体とした泥流が高い流動性を保持したまま海にまで達し、広範囲にわたって氾濫した。山王谷川では黒ボク土、ロームなどを主体とする崩土が土砂流または泥流となって下流域まで到達し、氾濫した。

V おわりに

土石流は一般に、急勾配地形における土砂災害と認識されがちであるが、その流動特性は溪流勾配の影響とともに、土石流を構成する材料（土砂および泥水）の影響も強く受ける。その結果、土石流、土砂流、泥流など、流れの質が変化し、災害の形態や規模も異なってくることを防災対策上、十分留意する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたっては、東京農業大学「大学戦略研究プロジェクト（研究課題名：伝統的農地管理による生物多様性ならびに国土保全の評価と持続的地域防災マネジメントの構築）」から研究費の補助を受けた。ここに記して深謝いたします。

引用文献

- (1) 江頭進治 (1993a) 土石流の停止・堆積のメカニズム(1). 砂防学会誌 46(1) : 45-49
- (2) 江頭進治 (1993b) 土石流の停止・堆積のメカニズム(2). 砂防学会誌 46(2) : 51-56
- (3) 江頭進治・本田尚正・伊藤隆郭・有村真一 (1999) 土石流による河床侵食に関する実験的研究. 水工学論文集 43 : 641-646
- (4) 江頭進治・本田尚正・宮本邦明 (1998) 姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション. 水工学論文集 42 : 919-924
- (5) 江頭進治・佐藤隆宏・千代啓三 (1994) 砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響. 京都大学防災研究所年報 37(B-2) : 359-369
- (6) 江頭進治・関根正人・竹林洋史 (2014) 砂防施設の役割と課題. 土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会 平成 25 年 10 月台風 26 号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団報告会資料, 東京 : 6pp
- (7) 平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団 (2014) 平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書. 土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会, 東京 : 90pp
- (8) 砂防学会 (2016) 平成 28 年熊本地震による土砂災害に関する緊急調査報告書. 砂防学会, 東京 : 81pp