

2010年7月鹿児島県船石川土石流災害の流下実態

水野秀明* 小山内信智**

1. はじめに

鹿児島県船石川は深層崩壊に伴う土石流が2007年と2010年に続けて発生した溪流である。2007年7月14日に深層崩壊に起因する土石流が発生した。武澤ら¹⁾によると、その深層崩壊は深さ最大9m、幅最大40m、崩壊長165mであり、それに起因して発生した土石流の水深は3.3~5.0mで、流速は6~8m/sであった。その流速は焼岳・浦川・桜島等での観測事例とほぼ同じオーダーで、石礫型土石流より若干速く、泥流型土石流に近かったことと報告した。また、2010年7月4日から8日にかけて、小山内・武澤²⁾や下川ら³⁾は崩壊に伴う土石流が7回発生したと報告した。3回目までの土石流は砂防堰堤によって概ね捕捉されたが、一部が1号堰堤より下流に流れ出したものの、国道までは達しなかった。4回目から7回目までの土石流は砂防堰堤で捕捉されていた巨礫の一部を流れに取り込んで、泥とともに国道まで流したとの報告もある³⁾。これら7回の土石流のうち6回は無降雨時に発生した²⁾。

船石川の流域面積¹⁾は全体で0.32km²であり、焼岳(0.8km²)・浦川(1.8km²)・桜島(例えば野尻川で2.7km²)等と比べると小さい。そのため、降雨として供給される水の量が比較的少なくなり、土石流が余り多くの土砂を運搬できないか、あるいは、十分に流動化できないと想定される。しかしながら、船石川で発生した土石流は泥流型土石流に近い流動性を有する。このように、船石川で発生する土石流は水の量が少ない条件であるが、高い流動性を有することが特徴である。

既往の研究結果^{4),5)}によると、土石流の流れ方は土砂容積濃度だけでなく、粒度分布にも影響を受けると報告された。そこで、本研究では、船石川流域内の土質特性を把握するとともに、既往の調査結果を踏まえて、2007年7月に発生した土石流と2010年7月に発生した土石流を比較しながら、

土石流の流下実態について整理し報告する。

2. 船石川流域の土質特性と気象状況の概要

2.1 土質特性

図-1は船石川とその隣に位置する大浜川の流域で、平成22年9月に土砂を採取した地点を示した。船石川流域内で4カ所(D001,D002,D003,D004)、大浜川流域内で2カ所(D005,D006)で採取した。土砂の密度は船石川で2.650~2.676g/cm³で、大浜川で2.490~2.700g/cm³であった。

図-2は粒度分布である。粒度分布は船石川では崩壊地(D001)と堆積物(D002~004)で概ね同じ傾向であったが、大浜川では溪岸(D006)と堆積物(D005)で少し異なる傾向であった。

図-3は粒度を細粒分(0.075mm未満)、砂分(0.075mm以上2mm未満)、礫分(2mm以上)で示したものである。船石川では粒度の構成はほぼ同じ傾向で、砂分が最も多く50~60%程度で、細粒分、礫分の順で少なくなった。大浜川の溪岸では、細粒分が最も多く50%超、次いで砂分が50%弱で、礫分はほとんどなかった。一方、堆積物では、砂分が60%弱で最も多く、次いで礫分が40%弱を占めており、細粒分はほとんどなかった。

なお、難波ら⁶⁾が当該流域の南南西に約9km程度に位置する流域で計測した土質特性によれば、空隙率*は59.50%から69.92%であった。この結果から、船石川流域周辺の地山の空隙率も概ね

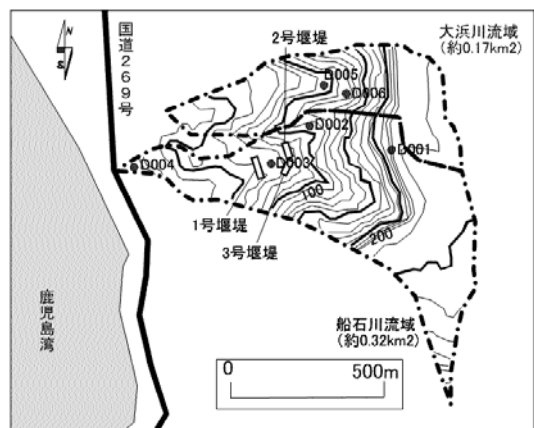


図-1 船石川と大浜川の流域と土砂採取箇所

Investigation into characteristics of debris flows in Funaiishi Torrent occurred in July 2010
*土木用語解説：空隙率

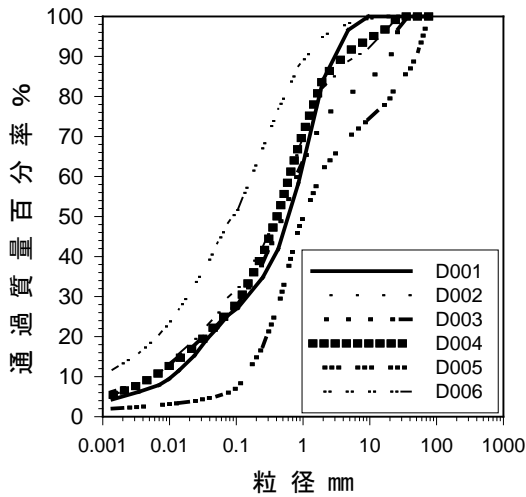


図-2 粒度分布

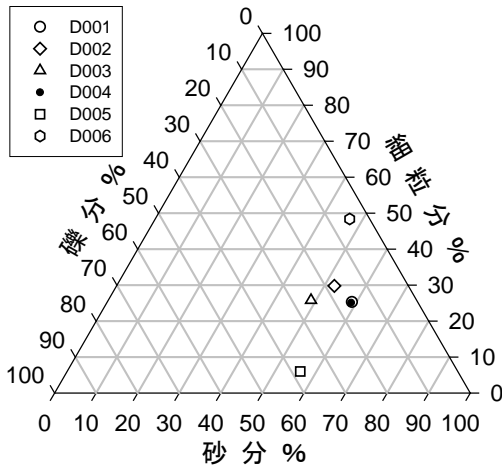


図-3 粒度の構成

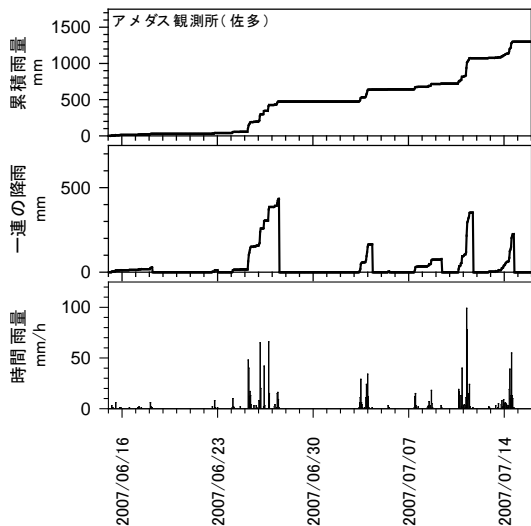


図-4 降水量の変化 (2007年)

60~70%程度と推測する。

2.2 気象状況

図-4は2007年6月15日から同年7月14日までにアメダス観測所(佐多)で計測された降水量である。土石流が発生した7月14日までの1ヶ月間の

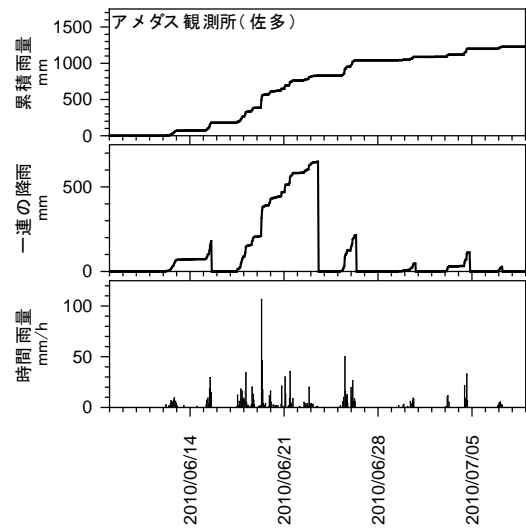


図-5 降水量の変化 (2010年)

降水量の総和は1300mmであった。土石流の発生までの一連の降雨量は134mmであった。

図-5は2010年6月9日から同年7月8日までの降水量である。土石流が発生した7月8日までの1ヶ月間の降水量の総和は1320 mmであった。土石流の発生までの一連の降雨量は第1波(7月4日夜)で112mm、第2波と第3波(5日未明と午後)で0mm、第4波と第5波(7日午前)で27.5mm、第6波と第7波(8日午前)で0mmであった。

3. 土石流の特徴

3.1 土石流の流下状況

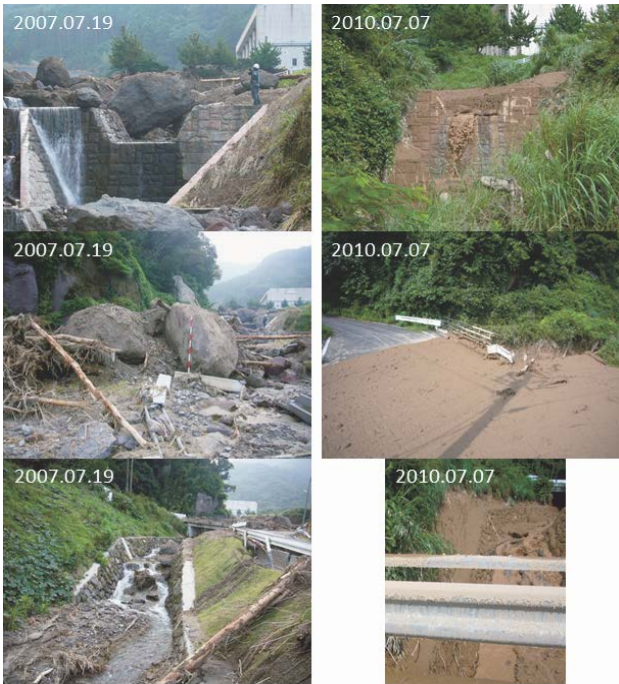
写真-1は1号堰堤付近の堆積状況の比較で、写真-2は1号堰堤の下流に位置する流路工での流下痕跡の比較である。

1号堰堤付近での堆砂状況を見ると、2007年7月の土石流の場合、2~4m程度の巨礫¹⁾に加えて、その巨礫の隙間に土砂が堆積していた。また、巨礫には泥があまり付着していなかった。一方、2010年7月の土石流の場合、先の事例と同じように2mを超える巨礫³⁾が堆積しており、その巨礫の隙間に土砂が堆積していた。巨礫には泥が付着していた。また、1号堰堤の袖上には泥が盛り上がったように堆積した。これらのことから、2010年7月の土石流は2007年7月のものに比べて高い粘性を有していたと推測できる。

流路工付近の流下痕跡を見ると、2007年7月の土石流は流路内で巨礫や土砂を堆積しながら流下した。一方で、2010年7月の土石流は流路内でほとんど堆積することなく流下した。



(a)2007年7月19日撮影 (b) 2010年7月7日撮影
写真-1 1号堰堤付近での堆積状況



撮影位置は上段・中段・下段の順で流路工の上流から下流へ移動した。

(a)2007年7月19日撮影 (b) 2010年7月7日撮影
写真-2 1号堰堤の下流にある流路工での流下痕跡

以上から、2007年7月の土石流は砂や礫を主体としたもので、2010年7月の土石流は泥を主体としたものであることが分かった。また、2010年7月の土石流は高い粘性を有しているものの、高い流動性を有していたと推測できる。

3.2 崩壊に含まれていた土砂と水の推定

表-1は2007年7月の土石流と2010年7月の土石流の場合における崩壊した体積と、それに含まれる土砂と水の体積の推定値である。

2007年7月の土石流の場合、崩壊した体積は崩壊地の生産土砂量として報告された数値¹⁾を採用し、その空隙率は近隣のシラス流域での土質特性⁶⁾より0.6~0.7と想定した。

2010年7月の土石流の場合、崩壊した体積は砂防堰堤で捕捉した土砂量³⁾から推定した。崩壊した土砂が流動化して土石流へと発達し砂防堰堤

表-1 土石流によって運搬された土砂量の推定

	崩壊した体積 [m ³] (空隙込み)	土砂の体積 [m ³] (空隙無し)	水の体積 [m ³]	備考
2007年7月の土石流	29,000	8,700 ~11,600	17,400 ~20,300	地山の空隙率を0.6~0.7と想定した。空隙が水で飽和していたと想定した。
2010年7月の土石流	135,000 ~180,000	54,000	81,000 ~126,000	地山の空隙率を0.6~0.7、砂防堰堤に堆積した土砂の空隙率を0.4と想定した。空隙が水で飽和していたと想定した。

に堆積したことから、堆砂の空隙率は一般的な河床材料の値と同じ0.4と想定した。それにより求めた空隙無しの土砂の体積を前述の空隙率0.6~0.7で割ることで、崩壊の体積を推定した。

また、シラス地帯の流出特性を計測した事例では、直接流出率が10%以下であると報告⁶⁾された。船石川でも同じ傾向にあると仮定すると、土石流が発生するまでの降水の大半は地面に浸透したと考えられる。そこで、本報告では、空隙が水で飽和していたと仮定して、水の体積を推定した。

3.3 土石流の土砂容積濃度と流動特性の推定

武澤ら¹⁾の報告によれば、2007年7月の土石流は1号堰堤付近で流速6~8m/s、水深3.3~5.0mと推定し、石礫型土石流や泥流型土石流に近い特徴を有していた。また、1号堰堤付近の巨礫の大半は直径2~4m程度であった。ダイラタント流体^{*}が一樣進行流となったときの運動方程式は式(1)のように書ける⁷⁾。

$$q_T = \left\{ \frac{2}{5d} \sqrt{\frac{g}{0.02}} \left\{ C + (1-C) \frac{\sigma}{\rho} \right\}^3 \sqrt{\frac{C_*}{C} - 1} \right\} h^{5/2} \sqrt{\sin \theta} \dots \text{式(1)}$$

ここで、 q_T ：単位幅流量[m³/s/m](=uh)、 d ：粒径[m]、 g ：重力加速度[m/s²]、 C ：土砂容積濃度、 σ ：砂の密度[kg/m³]、 ρ ：水の密度[kg/m³]、 C_* ：土石流から離脱して堆積した土砂の体積濃度、 u ：流速[m/s]、 h ：水深[m]、 θ ：河床勾配である。2007年7月の土石流が式(1)の適用範囲にあるとすれば、 $C_*=0.6$ 、25000分の1地形図から1号堰堤より上流200m区間の平均勾配を読み取った値(7.2度)を θ の値とすると、土砂容積濃度は0.23~0.35程度と推定できた。直接流出率を10%とすると、2.2より一連の降水量134mmのうち13.4mm分が土石流に供給された可能性が高いと考えられる。その降水量に船石川流域の流域面積を掛け合わせて求めた水量(4,288m³)を表-1に

*土木用語解説：ダイラタント流体

加えると、2007年7月の土石流の平均的な土砂容積濃度は0.26～0.35となり、式(1)を用いた推定値と概ね一致する。このことから本報告での仮定は現在得られた情報の下では概ね妥当と考えられる。

次に、2010年7月の土石流の土砂容積濃度を推定してみる。現時点で、この土石流の流速や水深はまだ明らかになっていない。そこで、2007年7月の土石流の土砂容積濃度を降水量から推定した方法を適用して見ると、2.2より一連の降水量112mmのうち10%が土石流に供給されたと仮定すると、表-1より、2010年7月の土石流の平均的な土砂容積濃度は0.29～0.39となる。

土石流がある地点の勾配で含みうる平衡濃度(C_d)は式(2)のように書ける⁷⁾

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad \dots\dots \text{式(2)}$$

ここで、φ：砂礫の内部摩擦角である。1号堰堤より上流200mの区間の平均的な河床勾配は土石流の発生前で7.2度であったことから、砂礫の内部摩擦角を一般的な数値である35度とすれば、1号堰堤付近ではC_d=0.13となり、先に推定した土砂容積濃度よりも低い値になった。つまり、土石流は堆積し始める可能性が高いと言える。3.1で整理したように、2007年7月の土石流は流路工内で土砂を堆積しながら流下しており、これと矛盾しない。しかし、2010年7月の場合、土石流は土砂を殆ど堆積することなく流路工内を流下し、一部の巨礫を国道付近まで運搬しており、これと矛盾する。これは、土砂のうち細粒分の占める割合が高いため流動性が高かったとも推測できる。また、D006の結果のように阿多火砕流堆積物の非溶結部では細粒分と砂分を多く含んでいたことから、崩壊源頭部での侵食の進行により、第4波以降の土石流は溶結部(溶結凝灰岩)の下にある非溶結部の、細粒分の多い土砂を主体とするようになった可能性がある。さらに、それらの土石流は第3波までに第1号堰堤付近まで到達していた巨礫を巻き込んで、さらに下流へと運搬した可能性がある。細粒分の割合が高かったことは土石流の流動特性に影響を及ぼしたと考えられるが、現時点で収集した情報だけでは詳細を推定するには至っていない。

4. まとめ

本報告では、2010年7月に鹿児島県船石川で発生した土石流の実態を推定するために、土質調査を行ってその特徴を把握するとともに、2007年7月に発生した土石流と比較してその流下特性を整理した。その中で、例えば土砂容積濃度や土砂のうち細粒分の占める割合といった指標からみた流れの特徴をレオロジー的に分析できていないなど、まだ十分に分析できていない点もあるので、今後解明していきたいと考えている。最後に土質試験の結果を快く提供していただいた鹿児島県土木部砂防課の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 武澤永純、内田太郎、鈴木隆司、田村圭司：鹿児島県船石川で発生した深層崩壊に起因する土石流の推定、砂防学会誌、Vol.62、No.2、pp.21～28、2009
- 2) 小山内信智、武澤永純：2010年7月鹿児島県南大隅町で発生した土石流災害、土木技術資料、第52巻、第9号、pp.4～5、2010
- 3) 下川悦郎、小山内信智、武澤永純、地頭菌隆、寺元行芳、権田豊：2010年(平成22年)7月鹿児島県南大隅町で発生した連続土石流災害、砂防学会誌、Vol.63、No.3、pp.50～53、2010
- 4) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究、京大防災研究所年報、第20号B-2、pp.405～435、1977
- 5) Philippe COUSSOT: Rheology of mud suspensions, IAHR Mudflow Rheology and Dynamics, p.121-143, 1997
- 6) 難波直彦、河原田礼次郎、三輪晃一、長勝史、若松千秋：南九州の小河川流域における土層と流出特性、鹿大農学術報告、第37号、pp.237～259、1987
- 7) 高橋保：第3章土石流の発生・発達過程、土石流の機構と対策、近未来社、pp.113～172

水野秀明*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 主任研究員(前 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室主任研究官)、博士(農学)
Dr.Hideaki MIZUNO

小山内信智**



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室長、博士(農学)
Dr.Nobutomo OSANAI