2009 年 7 月防府市・山口市豪雨災害において 花崗岩斜面に発生した土石流と斜面崩壊の特徴

若月 強*·石澤岳昂**·植竹政樹***·川田真也***

Characteristics of Debris Flow and Slope Failure on Granite Slopes Caused by Heavy Rainfall on July 2009 in Hofu and Yamaguchi Cities, Japan

Tsuyoshi WAKATSUKI*, Takeaki ISHIZAWA**, Masaki UETAKE ***, and Shinya KAWADA ***

* The Storm, Flood, and Landslide Research Department, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan waka@bosai.go.jp ** Geoenvironmental Sciences, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Japan ** Visiting Researcher from Tokyo Fire Department

Abstract

Many debris flows and slope failures induced by heavy rainfall on July 2009, causing considerable damages to the habitants of Hofu and Yamaguchi cities. The disaster concentrated in the area underlain by granite rocks. The morphometric analysis shows that the many debris flows run down to the outside of the drainage basin with increasing of drainage area. The field surveys show that many slip scars of surface slope failure (soil slip) were formed at the source area of most debris flows, indicating that the slope failure changes into the debris flow. The debris flow runs down with catching up channel deposits. The soil surveys on and near the slip scar reveal that the surface soil layer, i.e. failure materials, is composed mainly of grus and has thin thickness, and a slightly weathered bedrock underlies just below the layer. In addition, sometimes soil pipes are formed between the surface soil layer and the slightly weathered bedrock. These results indicate that the slope failure should have easily occurred on these slopes because the subsurface water concentrates in the surface soil layer.

Key words : Granite, Slope failure, Debris flow, Drainage area

1.はじめに

山口県防府市から山口市南部の山地斜面では,平成21 年7月21日の豪雨によって,土石流や鉄砲水が多発し, 下流域の住民に多大な被害を与えた.この災害によって, 防府市では計14名の死者が出た.具体的には,土石流と その前後の鉄砲水によって,防府市上田の特別養護老人 ホーム「ライフケア高砂」では7名,防府市勝坂では4名, 防府市石原・大景では2名,防府市奈美では1名の方が 犠牲となった.その他に,防府市内では,負傷者計34名 (重傷12名,軽傷22名),住宅被害計1,216棟(全壊30 棟,半壊61棟,一部損壊2棟,床上浸水111棟,床下浸 水 1,012 棟)の被害があった(山口県, 2009). これらの災 害が発生したのは, 背後に花崗岩を基盤とする山地が存 在する集落がほとんどであった. なお, この地域では平 成5年8月2日にも, 死者8名を出す土砂災害によって, 土石流13箇所, 斜面崩壊107箇所, 地すべり22箇所が 発生したことが報告されている(山口県防府土木建築事務 所, 1993).

本報では、土砂災害の軽減に資するため、平成21年7 月21日の豪雨によって、災害の発生した防府市から山口 市南部の花崗岩山地において、土砂移動分布図の作成・ 斜面崩壊形状と土層構造の現地調査・土石流発生流域の

^{*} 独立行政法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部

^{**} 筑波大学大学院生命環境科学研究科

^{***} 独立行政法人 防災科学技術研究所 水·土砂防災研究部 外来研究員 (東京消防庁)

地形的特徴の解明するための地形計測などを実施することによって、今回の土砂災害の特徴を明らかにすることを目的とする.

2. 被災地付近の地形・地質および降雨概況 2.1 地形・地質

被災地は,西中国脊梁山地の南西端に位置する周防山 地の南西縁に位置する.図1に示すように,被災地の中 央には佐波川が南西方向に流れている.犠牲者を出した 上田,勝坂,石原・大景,奈美の4地区とその周辺には, 花崗岩類が広く分布している.この花崗岩類は防府花崗 岩と呼ばれ,中-粗粒黒雲母花崗岩(Gr)を主とし,部分 的に中-粗粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩(Gd)と細粒黒雲 母花崗岩および花崗閃緑岩(Gf)を伴っている(松浦ほか, 2007).本報では,これら3種類の花崗岩類をまとめて「花 崗岩」と呼ぶことにする.崩壊や土石流のほとんどはこの 花崗岩地域で発生している.

佐波川の右岸側の花崗岩地域には、佐波川に沿って南 西から北東へ、楞厳寺山(370 m)・西目山(312 m)・右田ヶ 岳(426 m)・三谷山(325 m)・八幡岳(352 m)・山口尾(487 m)・三条山(279 m)が分布している。特に、楞厳寺山・西 目山・右田ヶ岳・三谷山・八幡岳の南東側斜面、すなわ ち佐波川に面する斜面は、佐波川の下刻に伴う侵食を受けて急勾配となっており、尾根部を中心として多くの場所で玉石状の岩塊(コアストーン)が露出している.それに対して、これらの山々の北西側の斜面は、比較的緩勾配であり、岩塊の露出は少ない.一方、佐波川左岸の花崗岩地域には、佐波川に沿って南西から北東へ、天神山(167 m)、多々良山(236 m)、矢筈ヶ岳(460 m)、松尾山(262 m)が分布する.これらの山々の斜面には、岩塊の露出は少ない.また、花崗岩地域には、北東-南西方向と北北西-南南東方向の谷やリニアメントが多く存在しており、露頭でも走向がほぼ北東-南西方向と北北西-南南東方向、傾斜がほぼ 90°の節理が数多く確認できた.

また,花崗岩地域の東西には,周南変成岩類の泥質片 岩を主とする片岩類(S)が広く分布している(図1).この 片岩類は花崗岩の貫入によってフォルンフェルス化して おり,特に佐波川左岸側の大平山(631 m),大谷山(559 m) など標高 600 m 前後の山地の基盤岩となっている.この 片岩類やその付近に分布する花崗斑岩,珪長岩および流 紋岩(Gp),流紋岩-デイサイト溶結凝灰岩(Sr)は風化を 受けにくいためなのか,これらの地域には崩壊や土石流 はほとんど発生していない.



図1 標高段彩図と地質 Fig.1 Color elevation map and Lith

Fig. 1 Color elevation map and Lithology.

2.2 降雨状況

図2と図3に、防府市役所から約3.5km南西に位置す るアメダス観測地点「防府」における、降雨量と気温を示 す.「防府」地点における年平均降雨量は1,636mmであり、 6月と7月の月平均降雨量はいずれも約286mmと1年で 最も多い(図2).年平均気温は15.3℃であり、最も暖か い8月の月平均気温は26.9℃、最も寒い1月の月平均気 温は4.7℃である.

図3には、平成21 (2009)年6~7月の日雨量と7月20 ~21日の時間雨量を示した.図3(a)によると、6月29 日から7月19日までの3週間で362mmもの先行降雨が あり、7月20日と災害の発生した7月21日の2日間に









はさらに 332 mm もの豪雨があった.また,図3(b)によ ると,21日の日雨量は 275 mm であり,21日5時から13 時までの8時間の降雨量は 239 mm にもなる.川田ほか (2010)は,犠牲者を出した上田,勝坂,石原・大景,奈 美の4地区では,21日の11時50分から12時28分の間 に消防機関に通報が入ったことを指摘していることから, 土石流や鉄砲水は,これらの通報の直前に発生したこと が考えられる.したがって,この8時間の連続した降雨 の終盤に土石流や鉄砲水が発生したことがわかる.なお, 7月21日の日雨量の再現期間は 82.6年,7月21日6時か ら12時までの6時間雨量220 mmの再現期間は 245.9年(福 岡ほか,2009)と報告されている.

3. 土砂移動分布図および被災地の状況

3.1 土砂移動分布図

土砂移動分布図を図4に示す.図中の青点線で囲まれ た範囲の土砂移動分布は、アジア航測株式会社が災害直 後の航空写真をもとに作成した「2009年7月山口県防府市 豪雨災害土砂移動範囲図」(http://www.ajiko.co.jp/bousai2/ hofu/hofu2.htm)から引用した.また、青実線で囲まれた 範囲の土砂移動分布は、国際航業株式会社と株式会社パ スコが災害直後に共同撮影した航空写真を著者が判読し た.航空写真の撮影範囲はほとんどが花崗岩地域内であ るのは、ほとんどの土砂災害が花崗岩地域で発生してい たからである.

図4から,花崗岩地域に数多くの土石流や崩壊が発生 していることがわかる.また,上田地区の南東や藪ヶ尻 地区付近にある水色で示された片岩類(S)地域には,土石 流や崩壊はほとんど発生していない.

3.2 被災地の状況

犠牲者を出した被災地のうち,上田地区,石原・大景 地区,勝坂地区の災害の状況を述べる.

3.2.1 上田地区

消防への通報時刻 12 時 28 分(川田ほか, 2010)の直前 に土石流の被害を受けたと考えられる.そして,発生し た土石流が特別養護老人ホーム「ライフケア高砂」を襲い 7名のお年寄りが亡くなった.なお,鉄砲水が発生したか どうかは明らかではない.

災害を引き起こした土石流は花崗岩(花崗閃緑岩,Gd) 斜面に発生していた(写真1(a)).また,老人ホームは, 流域出口辺りに分布する沖積錐の末端に建設されていた. まず,老人ホーム付近から上流側を見ると,かなり緩勾 配の流路(上田南川)が老人ホームへほぼ真っ直ぐ向かっ ていることがわかる(写真1(c)).そして,老人ホーム付 近からは土石流の流下痕や斜面崩壊地など流域内の様子 は全く見えなかった(写真1(b)).上田南川は,老人ホー ムから約30m上流側にある建設中の農業道路を貫く水路 につながっていたが,この水路は高さ約2m,幅約2.5m であり規模が小さい(写真1(d)).したがって,上田南川 の平常時の流量は少なかったと思われる.なお,水路は 土石流による土砂でほとんどが埋まっていた.水路の中 や水路上の道路面を通過した土砂は老人ホームの一階に 流れ込んでいた(写真1(e),(f)). この土砂は,砂(マサ) がほとんどであり,径1m以上の巨礫は見られなかった. 巨礫は老人ホームに到達せずに農業道路付近に停止して いた.また,災害後も数日間は老人ホームとその周辺に 大量の流水が続いたようである.なお,標高130m付近 の本流上には治山ダムが1基整備されていたが,袖部を 残して破壊されていた(厚井, 2009).

3.2.2 石原·大景地区

消防への通報時刻12時22分(川田ほか,2010)の直前に土石流が発生したと考えられる.この土石流により

2名のお年寄りが亡くなった.

土石流は、上田地区と同様に、花崗岩(花崗閃緑岩, Gd)斜面に発生していた(写真2(a)).しかし、被災地へと 続く流路の勾配は緩いため、被災地からは土石流の流下 痕など流域内の様子はほとんど見ることができなかった (写真2(b)).流下した大量の土砂は多数の家屋を破壊し て、最大2m程度の厚さで堆積していた(写真2(c)).こ の土砂は、径数10 cm~2m程度の巨礫やマサであった (写真2(d)).

- 図4 土砂移動分布図.赤色が土砂移動範囲 (青点線で囲まれた部分の土砂移動範囲はアジア航測株式会社が作成.青実線で囲まれた部分は国際航業株式会社と 株式会社パスコが共同撮影した航空写真を著者が判読した).
- Fig. 4 Distribution map of soil movement (The distribution surrounded by dashed line was interpreted by Asia Air Survey Co., Ltd. and the distribution surrounded by the solid line was interpreted by authors using air photographs taken by Kokusai Kogyo Co., Ltd. and Pasco Co., Ltd.).

3.2.3 勝坂地区

消防への通報時刻 11 時 53 分(川田ほか,2010)前後に 鉄砲水が発生したと考えられる.通報直後に駆けつけた 消防隊員の証言では、まず鉄砲水が流れて、その後に土 石流(土砂流)が発生したようである(川田ほか,2010). この土石流により4名のお年寄りが亡くなった.

土石流は,花崗岩(黒雲母花崗岩,Gr)斜面に発生して いた(写真3(a)).流域出口付近の流路は緩勾配であるた め,流域出口付近から流域内の土石流の流下痕や斜面崩 壊地は見えなかった(写真3(b)).流下した土砂や水は, 民家に流れ込むとともに,国道262号線に沿って南流し た(写真3(c)).この土砂は,ほとんどがマサであり,径 1メートル以上の巨礫は見られなかった.また,住民の話 によると,土砂が堆積して流域出口付近の河床は約7m

上昇した(写真3(b)). そのため,国道262号線に架かる 勝坂橋が最大約80 cm 押し上がった(写真2(d)).また, 流域出口の川幅は約5 mしかなく,平常時の流量はそれ ほど多くなかったと思われる.

3.2.4 被災地の特徴

今回の災害では、石原・大景地区を除くほとんどの地 域において、住宅地まで流下した土砂はマサが主体であっ た.同様の傾向は、奈美地区と十七地区でも見られた. また、土砂が流出するだけでなく、上田地区や勝坂地区 のように、鉄砲水などによって大量の水も流出したよう である.さらに、写真1(b)、写真2(b)、写真3(b)のよ うに、流域出口から流域内を見ると、河川の勾配は緩く 一見大量の土砂が押し寄せてくるとは想像しにくい.

しかし、今回の災害のように、流域の出口付近は、

写真1 上田地区の土石流被害状況. (a) に (b), (c), (d) の撮影位置を示す. (e) と (f) は老人ホーム. Photo 1 The debris-flow damage at Ueda. The shooting positions of Photos 1 (b), 1 (c) and 1 (d) are shown in Photo 1 (a). Photos (e) and (f)

The shooting positions of **Photos 1 (b)**, **1 (c)** and **1 (d)** are shown in **Photo 1 (a)**. **Photos (e)** and **(f)** shows in and out of the nursing home.

写真2 石原・大景地区の土石流被害状況. (a) に (b), (c), (d) の撮影位置を示す. Photo 2 The debris-flow damage at Ishihara and Okage. The shooting positions of Photos 2 (b), 2 (c) and 2 (d) are shown in Photo 2 (a).

写真3 勝坂地区の土石流被害状況. (a) に (b), (c), (d) の撮影位置を示す. Photo 3 The debris-flow damage at Kassaka. The shooting positions of Photos 3 (b), 3 (c) and 3 (d) are shown in Photo 3 (a).

たとえその場所の勾配が緩くとも土石流や鉄砲水に襲われる危険がある.なお,土石流が発生しやすい流域の地形形状については6章で詳しく検討する.

4. 流域内の土砂移動状況と崩壊形状

流域内の土砂移動状況を明らかにするため、三谷山・ 右田ヶ岳の周辺において、土石流の源頭部まで谷沿いを 踏査した.踏査は、写真4(a)において実線で囲まれた範 囲内で実施した.右田ヶ岳の北西側の踏査地は、勝坂地 区につながる流域内である.そして、流路脇や土石流の 源頭部の崩壊地において崩壊形状を計測した.なお、踏 査地の斜面の植生は、植生はシダ植物のコシダ・ウラジ ロや低木のヒサカキが多い.

4.1 流域内の土砂移動状況

流路沿いに歩くと,多くの場所で斜面脚部や渓床堆積 物が土石流によって削り取られていた(写真4(b)).また, 侵食を受けた渓床堆積物の露頭には,過去に発生した土 石流の堆積構造が見られる場所が多い(写真4(b)).この ことから,渓床堆積物の多くは過去の土石流堆積物によっ て構成されていると考えられる.また,土石流は渓床堆 積物を巻き込みながら規模が大きくなっていった可能性 がある.

一方,踏査地には多数の斜面崩壊が発生していた.こ れらの斜面崩壊地は崩壊発生位置に基づくと以下の3タ イプに分類できた.

- (i) 土石流の源頭部における斜面崩壊(写真4(c))
- (ii) 土石流の源頭部における渓床堆積物の崩壊
 (写真4(d))
- (iii) 流路脇の斜面崩壊(写真 4 (e))

ここで,(i)とは,崩土が土石流化した斜面崩壊である. 崩壊の頭部の下方には崩土が流動化したことを示す流送 部が形成されていた(写真4(c)).(ii)とは,渓床(流路内) に堆積していた土砂が多くの水を含み崩壊して土石流化 したものである(写真4(d)).土石流の源頭部には以上の 2タイプの土砂移動形態が見られた.一方,(iii)とは,流 路脇の斜面に発生した斜面崩壊であり,崩壊の頭部が直 接流路に面していて,流送部がほとんど存在しない(写真 4(e)).このタイプの多くは,流路を流下する土石流や流 水によって斜面脚部が侵食されたり,土石流の衝撃を受 けたりすることによって,斜面が不安定になり崩壊した と考えられるが,一部の崩壊は,土石流や流水の影響を 受けずに崩れている.

また,(i)と(iii)のタイプの斜面崩壊地は,崩壊面に露 出していた斜面物質に着目すると,以下の3種類に分類 できた.

- (a) 崩壊面に土層が露出している崩壊地(写真4(f))
- (β) 崩壊面に岩盤が露出している崩壊地(写真4(g))
- (γ) 崩壊面に土層とコアストーンが露出している崩壊地(写真4(h))

(α)では、土層中にせん断面(崩壊面)が形成されたと考 えられる.(β)は、崩壊面にあまり風化を受けていない岩 盤が露出している崩壊地であり、土層と岩盤の境界また は岩盤内の節理に沿って崩壊したと考えられる.また、(γ) では、コアストーンのまわりの土層中にせん断面が形成 されたと考えられる.

(α) と(β)のタイプの崩壊面は,(i) と(iii)の斜面崩壊地 のどちらにも形成されていた.ただし,多くの崩壊地では, (α) と(β)のタイプが混ざっている,すなわち土層や岩盤 が混在している崩壊面が形成されていることが多かった. なお、5章で詳述するが,土層が露出している(α)のタイ プの崩壊面であっても,崩壊面より深部の土層は薄く, すぐに弱風化岩盤になる場合が多いと考えられる.一方, コアストーンが露出している(γ)のタイプの崩壊面の多く は,(i)の斜面崩壊地に形成されており,特に山頂付近に 発生した崩壊地によく見られた.

また, (α) と (γ) のタイプは崩壊面とそれより浅部の土 層中に, (β) のタイプは崩壊面より浅部の土層中に, それ ぞれ土壌パイプが形成されていることが頻繁に確認され ており, 土壌パイプへの土中水の集中が崩壊発生に寄与 した可能性があることを示している. その他, 破砕した 岩脈の位置に崩壊が発生している事例や, 斜面にほぼ平 行なシーティングジョイントに沿って崩壊が発生してい る事例も見られた.

4.2 崩壊発生位置による斜面崩壊形状の違い

4.2.1 調査方法

踏査地に存在していた斜面崩壊地に対して,斜面勾配・ 崩壊幅・崩壊深を計測した.そして,崩壊発生位置(すな わち,(i),(ii),(iii)のタイプ)の違いによる斜面崩壊形 状について検討した.調査は,踏査範囲内に見られたほ ぼ全ての崩壊地(計48個)に対して実施した.斜面勾配・ 崩壊幅はレーザー距離計(LaserAce[®]300, MDL 製)を 使用して計測し,崩壊深はレーザー距離計・ポケットメ ジャー・目視によって計測した.

4.2.2 崩壊発生位置による斜面崩壊形状の違い

調査結果は図5に示した.調査した48箇所の崩壊地の うち,13箇所(27%)で(i)「土石流の源頭部における斜面崩 壊」,3箇所(6%)で(ii)「土石流の源頭部における渓床堆積 物の崩壊」が発生したが,前者の発生数は後者よりかなり 多い.一方,(iii)「流路脇の斜面崩壊」は48箇所中32箇所 (67%)と最も多かった.

3 種類の斜面崩壊地の崩壊幅は、大部分が 5 ~ 10 m で あり規模が小さい(図 5).また、(i)と(iii)のタイプの斜面 崩壊地においては、崩壊地の斜面勾配は 25 ~ 45°、崩壊 深は 0.5 ~ 2 m が大部分を占めており、いずれの崩壊も表 層崩壊であることがわかる.なお、(i)と(iii)のタイプの 崩壊の 60 % が斜面勾配 35°以上の急勾配斜面において発 生していたが、残りの 40 % は斜面勾配 25 ~ 35°の緩勾配 斜面で発生しており、表層崩壊が発生する斜面勾配は急 勾配斜面だけではないといえる.一方、(ii)のタイプの斜 面崩壊地は、他の 2 タイプの崩壊と比べて、斜面勾配は 15 ~ 30°と小さく、崩壊深は 2.5 ~ 3.5 m と大きい.

5. 表層崩壊地の土層構造

4章で踏査をした表層崩壊地のうち,2箇所において簡 易貫入試験による土層構造(表層土層厚)の調査を行なっ

た(写真4(a)). 調査した2斜面を,それぞれをGr-A斜面, Gr-B斜面と呼ぶことにする. いずれの斜面の崩壊地も,

以上より,踏査範囲内に関する限り,土石流の発生原 因は主に表層崩壊であり,わずかに渓床堆積物の崩壊が 原因になる場合もあることが明らかになった.また,流 路脇には多数の表層崩壊が発生していることも明らかに なった.

(a) (b) Gr Gr-B Gr−A 三谷仙 2009年10月26日撮影) (c) Gf 右田ヶ岳 500 m (2009年10月26日撮影) (d) (e) (2009年10月26日撮影 (2009年10月26日撮影) (f) (g) 🚮 (h)

写真4 斜面崩壊および河床の様子. (a) に (b) から (f) の撮影位置を示す. Photo 4 The slope failures and the channel bed. The shooting positions of Photos 4 (b), 4 (c), 4 (d), 4 (e), 4 (f), 4 (g) and 4 (h) are shown in Photo 4 (a).

(2009年10月26日撮影)

(2009年10月29日撮影)

(2009年10月26日撮影)

図5 斜面崩壊地の斜面勾配,崩壊深,崩壊幅 Fig.5 Slope angle, slip depth and width of failure scar.

流路脇に発生した(iii) タイプに相当するが,斜面脚部は 土石流などによって侵食されてはいない.また,いずれ も崩壊面に土層が露出している(α)タイプの崩壊地である が,Gr-A 斜面の崩壊面には径 30 cm 以下の礫が散在して いる(写真 5).また,Gr-B 斜面には,数個の土壌パイプ が存在していた.

5.1 調査方法

両斜面において,詳細な測量によって正確な斜面崩壊 形状(縦断形状・平面形状・横断形状)を把握したのち, 崩壊地内外の数地点において表層土層厚を計測した.測 量に際しては,レーザー距離計(LaserAce[®]300)を使用し た.表層土層厚の調査には,簡易貫入試験機(筑波丸東製) を用いた簡易貫入試験をおこなった.簡易貫入試験機と は,5kgの重りを50 cmの高さから自由落下させたとき の運動エネルギーで先端コーン(先端角60°,コーン直径 25 mm)を貫入させるものである.簡易貫入試験による結 果は,先端コーンが10 cm 貫入するのに要する打撃回数 である Nc 値で表した.

5.2 調査結果

Gr-A 斜面と Gr-B 斜面における斜面崩壊形状と土層構造 の調査結果は図6に示した.また,崩壊前の地表面を崩 壊面の縦断形状および横断形状から推定して,図中に破 線で示した.斜面崩壊形状の調査結果から,両斜面の崩 壊地における崩壊前の斜面勾配は 32 ~ 33°,崩壊深は約1 m,崩壊幅は5 ~ 10 m,崩壊長は 13 ~ 15 m であること がわかった(図6).

土層構造の調査結果, すなわち貫入試験結果を整理するため, Nc < 5の軟弱土層をU層, $5 \le Nc < 10$ のやや締まった土層をM層, $10 \le Nc < 30$ のかなり締まった土層をL層, Nc > 30の層を弱風化岩盤と定義する.

貫入試験の各調査ポイントは以下の3種類の土層に分 類できる(図6):崩壊地内の土層(Gr-A 斜面の①,④,⑤ 地点とGr-B 斜面の①,②地点),崩壊地脇の非崩壊斜面 の土層(Gr-A 斜面の⑥,⑦地点とGr-B 斜面の③,④地点), 崩積土(Gr-A 斜面の②,③地点).

Gr-A 斜面と Gr-B 斜面のいずれも、崩壊地内と非崩壊

写真5 Gr-A 斜面 (a) と Gr-b 斜面 (b) の斜面崩壊地 Photo5 The failure scars on Gr-A (a) and Gr-B (b) slopes.

図6 Gr-A 斜面と Gr-B 斜面における斜面崩壊形状と簡易貫入試験結果 Fig. 6 Slope form and soil structure on Gr-A and Gr-B slopes.

斜面の土層のU層を比較すると,非崩壊斜面には70~ 120 cm ものU層が存在していたのに対して,崩壊地内に はほとんど残っていなかった.このことから,崩壊地内 ではU層は表層崩壊によって除去されたと考えることが できる.そして,崩壊面はU層とM層の境界(*Nc*=5)にあ ると推測できる.なお,崩壊地内のGr-A-⑤地点には,80 cm ものU層が存在するが,この地点は崩壊地の縁である ことから,この土層は崩れ残ったものと考えられる.また, 非崩壊斜面においては,ばらつきはあるもののM層やL 層はU層よりもかなり薄く,軟弱なU層が弱風化岩盤の 上に載るような土層構造となっている.このような土層 構造を持つ斜面では,豪雨によって弱風化岩盤より上方 に地下水面が形成されやすくなるので,崩壊が容易に発 生すると考えられる.

次に、Gr-A 斜面と Gr-B 斜面を比較する. U層・M層・ L層を合わせた土層厚(以後,U+M+L層と表記)は、崩 壊地内と非崩壊斜面のそれぞれで Gr-B 斜面の方が Gr-A 斜面よりも 50 ~ 70 cm 程度厚い. これは、Gr-B 斜面の M + L層が Gr-A 斜面よりも厚いためである. このことから、 Gr-B 斜面の方が土層深部まで風化が進行していたことが わかる. このことは、Gr-A 斜面の崩壊面上には多くの礫 があるが、Gr-B 斜面の崩壊面上には礫がほとんどないこ とからもある程度推測できる(写真5).以上のように、両 斜面は同じ花崗岩が基盤岩であっても土層構造にある程 度の違いがみられたが、この原因として風化の不均一性 が考えられる.

6. 土石流が発生する流域地形条件

今回の災害では、山地流域内で発生した土石流が、日 常的な生活活動の場である道路・住宅地・農地等に流下

図7 流域区分 Fig.7 Division into drainage basins.

した.そこで,このように生活活動の場まで土石流が押 し寄せた流域は,どのような地形形状であったのかを検 討する.

6.1 調査方法

調査対象とする流域は、花崗岩地域において流域出口 が道路・住宅地・農地に面するように設定した(図7).具 体的には、まず犠牲者を出した佐波川本流沿いの平野、 国道262号線、上田地区横切る真尾川に流域出口が位置 するように流域を設定した.さらに、土石流が発生した 稔畑・藪ヶ尻集落や矢筈ヶ岳・多々良山・天神山の南東

図8 流域面積と起伏比の定義

Fig. 8 Definition of drainage area and relief ratio.

向き斜面にも流域を設定した.設定した流域の数は計 343 流域である.そして,それぞれの流域において流域面積 と起伏比を計測した(図8).

6.2 調査結果

計測した流域面積と起伏比は,流域内で発生した土砂 移動のタイプごとに整理した.ここで,土砂移動は以下 の4タイプに分類した.

- (1) 土石流・崩壊が発生しなかった流域
 (図9(a),図10(a))
- (2) 土石流・崩壊が発生したが流域外まで流下しなかった流域(図9(b),図10(b))
- (3) 土石流が流域外まで流下した流域(図9(c),図10(c))
- (4) 土石流が流域外まで流下したと判断した流域 (図9(c),図10(c))

図9 土砂移動のタイプごとの流域面積

(4) は、実際には堰堤によって土石流が流域外まで流下 するのが止められていたものの、土石流の規模や流域出 口までの距離・勾配などから、もし堰堤が無ければ土砂 が流域外まで押し寄せたであろうと判断した流域である. 全 343 流域中、(1)は 216 流域(63%)、(2)は 68 流域(20%)、 (3)は45 流域(13%)、(4)は 14 流域(4%)であった.なお、(4) は堰堤の無い場合には(3) と同じタイプと見なすことがで きるので、以降は両タイプをまとめて「土石流が流域外ま で流下した流域」と呼ぶことにする.

図9に示すように、「土石流・崩壊が発生しなかった流 域」、「土石流・崩壊が発生したが流域外まで流下しなかっ た流域」、「土石流が流域外まで流下した流域」の順に、流 域面積の平均値が大きくなっていた.また、流域面積が 10^{5.5} m² 以上の流域では必ず流域内のどこかで崩壊か土石 流が発生していた.そして、頻度分布のほとんどの階級 において、2タイプ以上の土砂移動が発生していた(図9). 特に、10^{3.5} m² から 10^{6.5} m² までの各階級において、「土 石流・崩壊が発生したが流域外まで流下した流域」(図9(c)) がともに存在しており、同じ流域面積でも土石流が流域 外まで流下した流域としなかった流域に分かれた.

一方,図10に示すように、土砂移動のタイプごとの起 伏比の平均値はほとんど同じである.ただし、「土石流・ 崩壊が発生しなかった流域」の起伏比が他のタイプよりや や大きいのは、他のタイプより流域面積がかなり小さい ためであると考えられる.

6.3 土石流が発生する流域地形条件に関する一考察

6.2節の結果から、流域面積が大きな流域ほど土石流が 流域外まで流下する危険性が高いといえる(図9).すな わち、流域面積が大きな流域ほど渓流の流量が多くなり、

図10 土砂移動のタイプごとの起伏比 Fig. 10 Relief ratio to each type of soil movements.

土砂の運搬力が大きくなるため、土石流が流域外まで流 下しやすくなると考えられる.

また、図9に示すように、同じ流域面積の区分であっ ても土石流が流域外まで流下した流域としなかった流域 に分かれた原因としては、渓床堆積物の量が異なってい たことが考えられる.すなわち、「土石流が流域外まで流 下した流域」には、流域外まで流下できるだけの大規模な 土石流を形成するのに十分な土砂が、渓床堆積物として 流路に蓄積されていたのであろう.一方、「土石流・崩壊 が発生したが流域外まで流下しなかった流域」には、流域 外まで流下できるだけの大規模な土石流を形成するのに 十分な土砂が、渓床堆積物として流路に蓄積されていな かったと考えられる.

したがって、「土石流・崩壊が発生したが流域外まで流 下しなかった流域」では、今回の豪雨では流域外まで流下 するような土石流が発生しなかったが、崩壊による土砂 が流路へ供給されて流路の土砂量は災害前よりも増加し たと考えられる. それゆえ, 今後の豪雨時には流域外ま で流下できる大規模な土石流が発生する可能性がある. 一方,「土石流が流域外まで流下した流域」は、今回の豪 雨で流路の土砂の多くが流域外に排除されてしまったの で,当分の間は荒廃した流路から多少の土砂流出はある だろうが、流域外まで流下するような大規模な土石流が 発生する可能性は低いであろう. このような流域では, 今後、斜面崩壊や流域外まで流下しない規模の小さな土 石流によって徐々に流路に土砂が蓄積され、いずれは流 域外まで流下するような土石流が発生すると考えられる. 土石流の再発生までの時間を土石流の再現周期というが, その具体的な値は明らかではなく今後解明していく必要 がある.

なお,実際には流域面積や流路の土砂量だけで,土石 流の流域外まで流下の有無を説明できるわけではなく, 流路長・個々の斜面の勾配・斜面ごとの地質の不均一性 など,それぞれの流域の地形地質特性も少なからず影響 を与えていると考えられる.

また、「土石流・崩壊が発生しなかった流域」の流域面 積が、土石流や崩壊が発生した他のタイプに比べてかな り小さくなったのは、流域面積が小さな流域ほど流路脇 などに多く存在する急勾配斜面の数が少なくなり、それ ゆえ流域内のどこかで崩壊が発生する確率が低くなった ためであろう.

7. まとめ

平成21年7月21日の豪雨によって、山口県防府市か ら山口市南部の花崗岩分布域では、土石流や斜面崩壊が 多発し、下流域の住民に多大な被害を与えた.そこで、 被災状況や土石流・斜面崩壊の特徴を明らかにするため に、土砂移動分布図の作成・現地調査・地形計測を実施 した.得られた結果は以下のようにまとめられる.

(1) 崩壊や土石流のほとんどが花崗岩(Gr)地域で発生し ており,周辺に分布する片岩類(S)や花崗斑岩,珪長 岩および流紋岩(Gp),流紋岩-デイサイト溶結凝灰 岩(Sr)の地域には崩壊や土石流はほとんど発生して いなかった.

- (2) 三谷山・右田ヶ岳の周辺の花崗岩地域において踏査 を行った結果、土石流の発生原因は主に表層崩壊で あり、わずかに渓床堆積物の崩壊が原因になる場合 もあった、そして、土石流は渓床堆積物を巻き込み ながら規模が大きくなっていったと思われる、一方、 流路脇には多数の表層崩壊が発生していた。
- (3) 花崗岩地域の表層崩壊地の崩壊面には、土層や岩盤が露出しており、土壌パイプも散見された. 簡易貫入試験を行なった結果、崩壊面に土層が露出している崩壊地であっても、崩壊面より深部の土層はかなり薄いことが確認された. このことから、表層崩壊が発生した斜面は、軟弱土層が弱風化岩盤の上に載るような土層構造であり、崩壊面付近から浅部に地中水が集中して崩壊が発生しやすいことがわかった.
- (4) 土石流が発生した流域の地形形状を計測した結果, 流域面積が大きな流域ほど土石流が流域外まで流下 する危険性が高いことがわかった.
- (5) 土石流によって、マサを主体とする土砂が流域の出口付近の住宅地や道路など生活活動の場まで流下した.また、土砂流出だけでなく、鉄砲水などによる大量の流水も発生した.

また、被害軽減のための教訓を以下に示す.

- (6)流域の出口付近は、たとえその場所の勾配が緩くとも土石流や鉄砲水に襲われる危険がある.したがって、流域出口に民家や施設が建設されている場合は、豪雨や地震の際には、土石流や鉄砲水に対する注意が必要である.
- (7) 土石流による災害が発生しなかった流域においては、 斜面崩壊や小規模な土石流によって徐々に流路の土 砂量は増加していると考えられる.したがって、今 後の豪雨時には流域外まで流下できる大規模な土石 流が発生する可能性があるので注意が必要である.

謝辞

アジア航測株式会社には、土砂移動範囲図の使用を許可していただいた.国際航業株式会社・株式会社パスコ には航空写真を提供していただいた.また、防災科学技 術研究所・防災システム研究センターの長坂俊成・坪川 博彰・田口 仁の各氏,水・土砂防災研究部の三隅良平, 加藤 敦,平野洪賓の各氏とは現地調査を共同で行なった. これらの方々に、深く感謝致します.

参考文献

 福岡浩・山本 晴彦・宮田 雄一郎・汪 発武・王 功輝 (2009):平成21年7月中国・九州北部豪雨による山 口県防府市土砂災害.自然災害科学, No.28-2, 185-201.

- 2) 川田真也・植竹政樹・三隅良平・若月強(2010):平 成21年7月中国・九州北部豪雨における防府市の被 害状況-消防の動きから-.防災科学技術研究所主要 災害調査, No.44, 63-77.
- 厚井高志 (2009): 平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨 における山口県防府市での土砂災害箇所緊急調査報 告. Sabo, Vol.100, 8-11.
- 4) 松浦浩久・尾崎正紀・脇田浩二・牧本 浩・水野清秀・

亀高正男・須藤定久・森尻理恵・駒沢正夫(2007): 20万分の1地質図福「山口及び見島」. 産業総合技術 研究所地質調査総合センター.

- 5) 山口県 (2009): 災害記録 平成 21 年 7 月 21 日豪雨 災害-, 37pp.
- 山口県防府土木建築事務所(1993):山が崩れた!~防 府市土砂災害~. 23pp.

(原稿受理:2010年5月7日)

要 旨

平成21年7月中国・九州北部豪雨災害により山口県防府市では、花崗岩を基盤岩とする山地斜面において土石流 や斜面崩壊が多発し、下流域の住民に多大な被害を与えた.地形計測によると、流域面積が大きいほど、土石流が 流域外まで到達しやすいことが明らかになった.また、現地調査から、ほとんどの土石流の源頭部には表層崩壊地 が存在しており、表層崩壊の崩土が土石流化して、流路の堆積物を巻き込みながら流下していることがわかった. 表層崩壊地の土層は砂質(マサ)で薄く、その下部には弱風化の基盤岩が存在しており、またパイプが存在する場合 もあることから、地中水が集中して崩壊が発生しやすい土層構造であったと考えられる.

キーワード:花崗岩,土石流,斜面崩壊,流域面積