平成 27(2015)年 9 月関東・東北豪雨における栃木県内の土砂移動分布図の作成と いくつかの斜面変動箇所の現地調査結果

- 特に、関東ロームと花崗岩類斜面における崩壊地の土層物性・安定性と土石流到達閾値について -

若月 強*・上田真理子*・竹田尚史*・青木慎弥*・佐藤昌人*・ 山田隆二**・飯田智之**・池永隆博*・篠原 徹*・酒井将也*

Sediment Movement Trace Map and Field Survey Results for Slope Movements in the Tochigi Prefecture during the Kanto-Tohoku Heavy Rainfall Disaster, September 2015

- Soil properties and slope stability for slope failures, and a geomorphic threshold for debris-flow arrival in the Kanto Loam and Granitic rock areas -

Tsuyoshi WAKATSUKI*, Mariko UEDA*, Naofumi TAKEDA*, Shinya AOKI*, Masato SATO*, Ryuji YAMADA**, Tomoyuki IIDA**, Takahiro IKENAGA*, Toru SHINOHARA*, and Masaya SAKAI*

*The Storm, Flood, and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
**Social System Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan

Abstract

Heavy Rainfall in the Kanto-Tohoku region induced serious slope disaster on September 9 and 10, 2015 in the middle to upper Kinu river basin and the Omoi river basin, Tochigi prefecture. We prepared a trace map of sediment movements, conducted a field investigation of slope failures, debris flows, and bank erosion, and undertook a topographic analysis for debris-flow-prone drainage basins. Slope movements occurred most frequently in the granitic rock area, also frequently in the volcanic rock area and less frequently in the sedimentary rock area, except for slopes in Kamuma City and southern Nikko City where the Kanto Loam consists mainly of colluvium. On the Kanto Loam slopes, slope failures corresponded to the timing of the maximum, comparatively long-term (6-24 h) cumulative rainfall. In a large-scale slope failure of the Kanto Loam in Iwasaki, southern Nikko City, the soil in the slip plane consisted of both pumice and transported gravelly soil. The large-scale slope failure was thought to have occurred when the groundwater level raised slightly after saturation and the strength of the soil in the potential slip plane was reduced. On the other hand, in the granitic rock area near Serizawa, northern Nikko City, slope failures and debris flows corresponded to both the timing of the maximum short-term (1-3 h) cumulative rainfall, and the maximum medium-term (6-12 h) cumulative rainfall. Granitic residual soil was slipped on a hillside slope, and valley-floor deposits consisting of both granitic and Kuroboku (andsol) soils were found at the head of a debris flow in a zero-order valley. The debris flows estimated to arrive less easily to the basin outlet compared to flows in the other granite slopes (e.g., in Hiroshima, Nagiso and Hofu) under the same rainfall conditions. The results of an investigation into the occurrence and timing of bank erosion in the towns of Onaribashi-cho, Kamuma City and Soutome, Sakura City are also shown.

Key words: Slope failure, Debris flow, Cumulative rainfall, Granitic rock, Kanto Loam, Topographic analysis

^{*} 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

^{**} 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部

1. はじめに

平成27 (2015) 年9月の台風17号と18号による関東・東北豪雨によって、鬼怒川流域や思川流域は記録的な大雨となった。鬼怒川下流域の茨城県常総市などでは9月10日に大規模な洪水によって甚大な被害が発生して、多数の報道が行われるなどの大きな注目を浴びたが、この豪雨では栃木県内の鬼怒川中~上流域や思川流域でも9日~10日に多数の斜面崩壊や土石流が発生する斜面災害となった。例えば、日光市芹沢地区では土石流が集中的に発生し、家屋被害や負傷者が発生した。また、日光市岩崎地区では、大規模な斜面崩壊が発生して、その崩土は土石流化して約1.7km 先まで流下した。

土砂災害の低減研究に資するために、本報では、以下の調査結果を報告する。(1) 栃木県の中~北西部を対象として、災害後に撮影した衛星画像を判読することにより、斜面崩壊や土石流など斜面変動の範囲を示す土砂移動分布図を作成して、降雨や地質の分布と比較した。(2) 鹿沼市と日光市の数カ所について災害直後に現地調査を行ない、斜面変動と河岸侵食による被害状況を把握して、斜面変動については災害時の雨量を整理した。(3) 上記斜面変動について、斜面崩壊の崩壊形状、土層構造・物性の詳細調査と斜面安定解析を実施した。(4) 土石流到達流域の形状特性と雨量との関係を検討した。

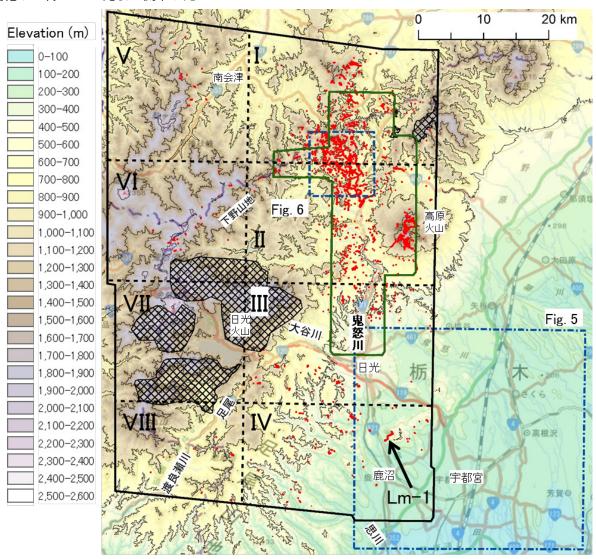


図1 土砂移動分布図. 赤色:土砂移動範囲, 黒線: 判読範囲, 緑線: 判読範囲のうち Pleades と WV2 の衛星画像を判読した範囲, 黒網線: 判読不能範囲. 黒線と点線により I ~ VIII の 8 区域に分割して, 区域 I, II, V, VI を**図 3A** に, 区域 III, IV, VII, VIII を**図 3B** にそれぞれ拡大表示した. 背景は国土地理院の標準地図と 10m メッシュ DEM, 等高線は500 m 間隔である.

Fig. 1 Trace map of sediment movements. The red lines show sediment movements, the black line shows the interpreted area, the green line shows the area interpreted using Pleades and WV2 satellite images and the black mesh shows areas where interpretation was not possible. The base map is based on the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) standard map and the GSI 10m DEM. The contour interval is 500 m.

2. 栃木県の中〜北西部の地形・地質, および災害時 の降雨と被害状況

2.1 栃木県の中~北西部の地形・地質

調査地域の地形図を図1に,地質図を図2にそれぞれ示す. 鹿沼市・日光市南部・宇都宮市等が含まれる栃木県中西部(図1と図3BのIII, IV, VII, VIIIの範囲)には,標高約1,000~1,500mの山々からなる足尾山地が存在しており,そこから渡良瀬川や思川が流下する. 地質は主に中古生界の付加体・チャート(すなわち堆積岩類),白亜紀~古第三紀の花崗岩類,第三紀の火山岩類等である(図2). ただし,栃木県中西部は,急峻な山地斜面を除くと,関東ローム(赤城山や日光男体山など更新世中期以降に活動した火山からの火山砕屑物(テフラ)を主体とする風

成堆積物やその風化物) が大量に地表面を覆っている. 例えば, 宇都宮市周辺では約25万年前(MIS8) に離水した宝積寺段丘上に約15 m もの関東ロームが存在する(山元, 2007).

一方, 主に日光市が含まれる栃木県北西部(図1と図3Aの区域I, II, VIの範囲)には, 南西から北西方向に連続する第四紀の日光火山群(山頂の標高約2,300~2,600 m)・高原山火山群(約1,600~1,800 m)と, その北側の福島県との県境付近に連なる白亜紀~古第三紀花崗岩類, 中古生界の付加体, 第三紀の火山岩類等からなる下野山地(約1,600~2,100 m)が存在しており, これらは鬼怒川や那珂川の上流域を構成する(図2). なお, 栃木県北西部は, 栃木県中西部に比べると関東ロームはかなり薄い.

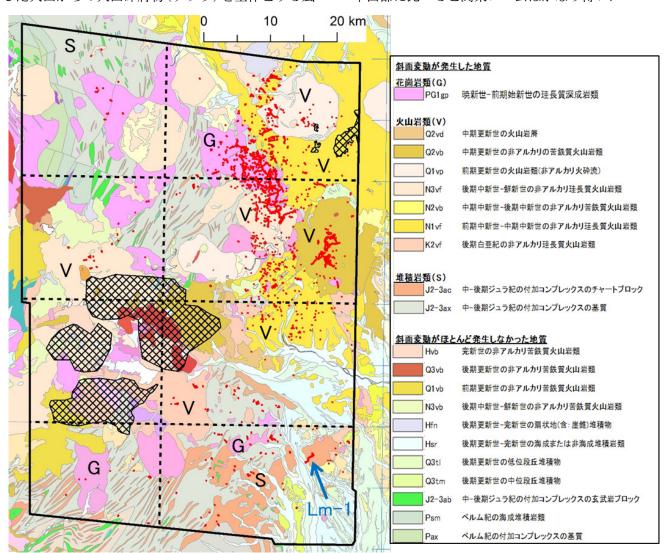


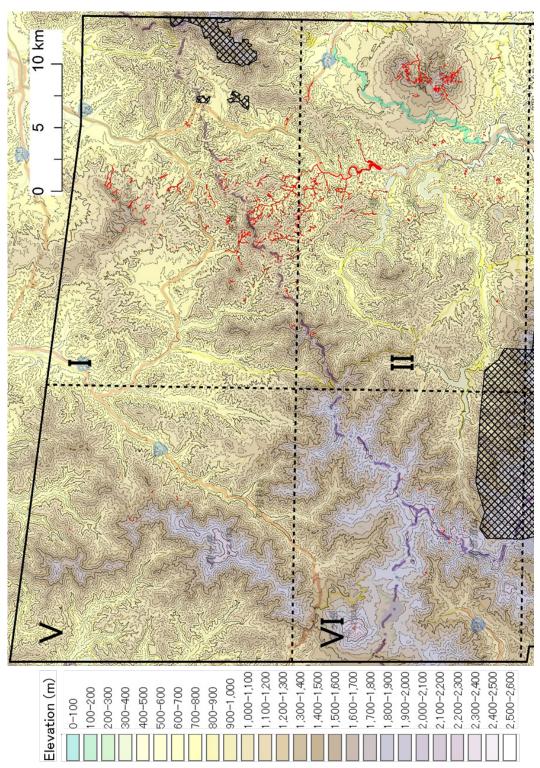
図2 地質と土砂移動分布.赤色:土砂移動範囲,黒線:判読範囲,黒網線:判読不能範囲.地質図は産総研地質調査 センターのシームレス地質図詳細版

Fig. 2 Geology and trace map of sediment movements. The red lines show sediment movements, the black line shows the interpreted area, and the black mesh shows areas where interpretation was not possible. The geology is based on the Geological Survey of Japan (GSJ) seamless digital geological map of Japan (1:200,000).

また、栃木県北西部と県境を挟んで隣接する福島 県南西部(南会津郡、図1と図3Aの区域I,Vの範囲) は、中古生界の付加体、白亜紀~古第三紀の花崗岩 類、第三紀の火山岩類等を基盤岩とする(図2). 関 東ロームはほとんど存在しない.

2.2 栃木県の中~北西部における災害時の降雨概況

災害が発生した9月10日までの気象庁解析雨量 を用いて計算した災害時の最大1,3,6,12,24,48時 間および最大 7, 14 日間雨量の分布を**図 4** に示す. この図によると、鬼怒川の上流域に相当する区域 I, II, III に降雨が集中したことがわかる. この範囲で は、最大 1, 3, 6, 12, 24, 48 時間雨量の最大値は、そ れ ぞ れ 70 mm, 160 mm, 270 mm, 450 mm, 560 mm, 630 mm を超えており、最大 7, 14 日間雨量の 最大値もそれぞれ 700 mm, 800 mm を超える豪雨で あった.

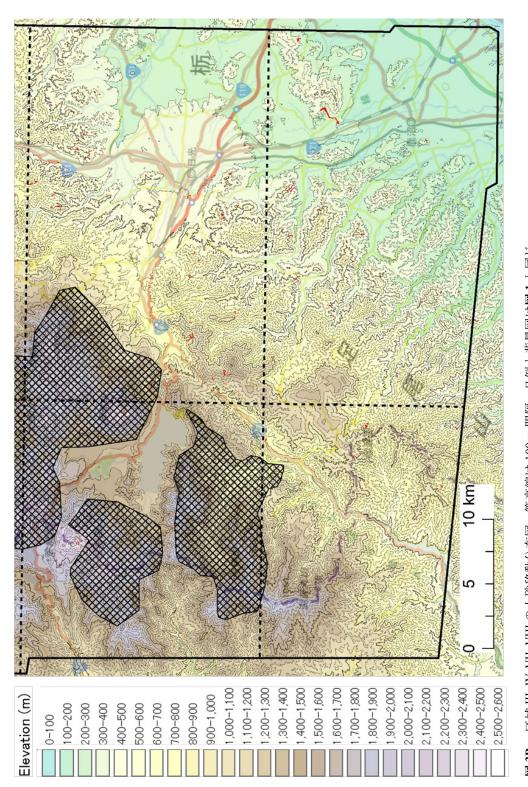


m. The legend and source of the base Trace map of sediment movements and topography in zones I, II, V and VI. The contour interval is 100 等高線は100m間隔. 凡例と背景図は図1と同 区域 I, II, V, VI の土砂移動分布図と地形. map are the same as in Fig.

2.3 災害による栃木県内の被害概況

栃木県が発表した県内各市町村の人的被害と住家・非住家被害を表1に示す. 県内で合わせて, 死者3名, 負傷者5名, 住家全壊24戸の被害があった. 人的被害は日光市・鹿沼市・栃木市で発生したが, このうち, 土砂災害が原因と考えられる人的被害は

日光市と鹿沼市で発生した. すなわち,4.1 節と 5.2.1 節で述べる鹿沼市日吉町の斜面崩壊によって,死者 1名,負傷者 1名,住家全壊 1戸の被害が発生した.また 4.4 節・5.2.4 節・6章で述べる日光市芹沢地区の土石流によって,負傷者 2名,住家全壊 2戸の被害となった.



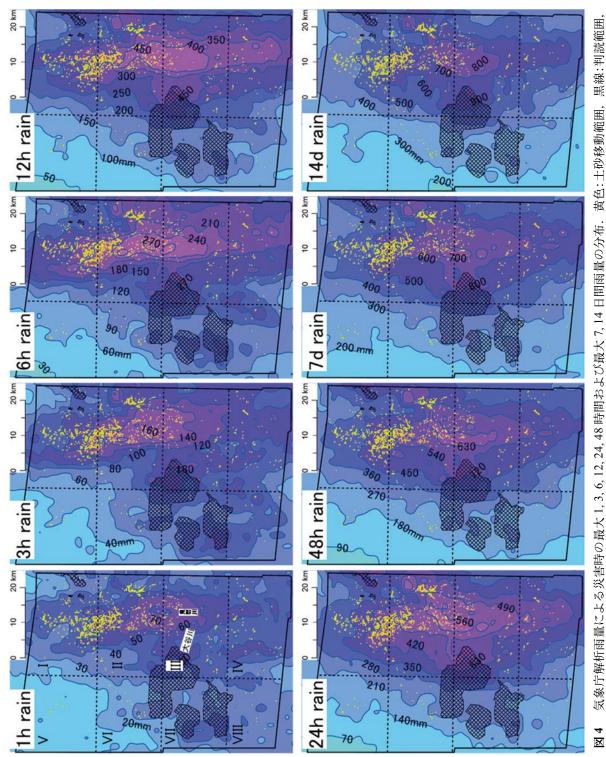
Trace map of sediment movements and topography in zones III, IV, VII and VIII. The contour interval is 100 m. The legend and source of the 凡例と背景図は図1と同じ、 等高線は 100 m 間隔. 区域 III, IV, VII, VIII の土砂移動分布図. base map are the same as in Fig. 1. Fig. 3B **⊠** 3B

3. 土砂移動分布図の作成と斜面変動の分布特性

3.1 土砂移動分布図の作成

土砂移動分布図は、斜面崩壊や土石流(土砂流も含む)などの斜面変動による土砂移動範囲を、空中写真や衛星画像から目視によって判読したものであり移動範囲は崩壊・土石流の源頭部、流送部、堆積部を全て含んでいる。具体的な作成方法は、若月(2017)を参照されたい(なお、2016年熊本地震

など数災害の土砂移動分布図を、防災科学技術研究所、水・土砂防災研究部門の web ページ (http://mizu.bosai.go.jp/c/c.cgi?key=Maps_of_Sediment_Movements) で試験公開中である)。今回の災害においては、表2に示す衛星画像を判読して土砂移動分布図を作成した。ここで、降雨が集中して斜面変動が多発した鬼怒川中~上流域に関しては、解像度が約0.5 m と高い Pleiades と WorldView-2 の衛星



Isohyetal maps of the maximum 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h, 7-day and 14-day rainfall based on the Japan Meteorological Agency (JMA)

Radar/raingauge analyzed precipitation. The yellow lines show sediment movements, the black line shows the interpreted area and the black

nesh shows areas where interpretation was not possible.

表 1 関東・東北豪雨による栃木県の市町村別の人的被害と住家・非住家被害(栃木県, 2015, 2015 年 11 月 19 日 13 時現在) **Table 1** Damage caused by heavy rainfall in the Kanto-Tohoku region, 2015 (summarized by the Tochigi Prefecture at 13:00 JST on November 19, 2015).

November	,,				 家 被	 害		
市町村	人的	被害		非住家被害				
111 m1 4.1	死者	負傷者	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水	(全壊・半壊)
宇都宮市			1			42	67	60
栃木市	1		3	78	3	635	1891	6
佐野市					1	1	1	
鹿沼市	1	1	10	12	19	321	677	
日光市	1	4	9	3	6	134	211	29
小山市			1	39		892	593	
真岡市							1	
大田原市							1	
那須塩原市				1		2	18	15
さくら市							1	
下野市						8	5	
上三川市							15	
益子町							2	
茂木町								2
壬生町						8	53	
野木町						10	273	
塩谷町						1	3	
合計	3	5	24	133	29	2054	3812	112

表 2 土砂移動分布図の作成に使用した衛星画像一覧 Table 2 Satellite images interpreted to develop the trace map of sediment movements.

衛星	撮影日	解像度	雲量	番号
		m	%	
Pleiades	2015/10/14	0.5	0.6	201510140136346
Worldview-2	2015/9/21	0.53	6.0	10300100470A3D00
SPOT6	2015/10/9	1.5	3.6	201510090058269
SPOT6	2015/10/19	1.5	1.7	201510190120345
SPOT6	2015/10/26	1.5	0.7	201510260117042
SPOT7	2015/10/27	1.5	0.0	201510270106435
SPOT6	2015/11/4	1.5	0.1	201511040059090

画像を用い(図1の緑線の範囲), それ以外の範囲は解像度が約1.5 mと低い SPOT6 と SPOT7の衛星画像を用いてそれぞれ判読を行なった. そのため, SPOT6,7の範囲内は、例えば崩壊幅が10 m以下の斜面崩壊など小規模の斜面変動が判読できていない可能性がある.

作成した土砂移動分布図の全体図を**図1**に、また 黒線と点線により I \sim VIII の8区域に分割して、区域 I, II, V, VI を**図3A**に、区域 III, IV, VII, VIII を**図3B**にそれぞれ拡大表示した.

3.2 斜面変動の分布と雨量・地質との関係

図4の雨量分布図には、土砂移動範囲を黄色で示した.この図によると、いずれの降雨継続時間に関しても、概ね降雨量が多い場所(図の赤紫色の範囲)

で斜面変動が多い傾向がある.しかし,詳細に見ると区域 I と区域 II の境界付近に斜面変動が集中しており,区域 II と区域 III の境界付近の降雨量が最も多い場所とは一致していない.

シームレス地質図に土砂移動範囲(赤色)を重ねた 図2を見ると、区域 I と区域 II の境界付近には花崗 岩類(G)が分布しており、この場所で斜面変動が最も多く発生している。また、火山岩類(V)にも斜面変動は多く、堆積岩類(S)の地域でも発生している。次章以降で現地調査を実施した、鹿沼市日吉町の斜面は火山岩類、鹿沼市油田町と日光市岩崎地区の斜面は堆積岩類、日光市芹沢地区の斜面は花崗岩類の地域にそれぞれ相当する。ただし、日吉町・油田町・岩崎地区の斜面は関東ロームの土層であり、これが崩壊していた。このことから、この地域は基盤地質を覆う関東ロームについての情報(分布・層厚・物性など)が、崩壊の分布特性を評価するために不可欠であると考えられる。

4. 現地調査による斜面変動と河岸侵食の被害状況把 握と災害時の雨量

斜面変動箇所に関しては, 鹿沼市日吉町と油田町の斜面崩壊, 日光市芹沢地区の斜面崩壊と土石流, 日光市岩崎地区の大規模崩壊について, また河岸侵

食箇所に関しては鹿沼市御成橋町とさくら市早乙女において、災害直後(鹿沼市とさくら市は 2015 年 9 月 11 日、日光市は 2015 年 9 月 23 日)に現地調査を実施した.調査内容は、被害状況や発生時刻に関する若干の聞き取り調査であり、斜面変動箇所については災害時の雨量も整理した.ここで斜面崩壊は、崩壊深の違いによって、表層崩壊(崩壊深約 2 m以下)、浅層崩壊(約 2 ~ 5 m)、大規模崩壊(約 10 m以上)の3種類に分けて呼ぶことににする.図5に鹿沼市とさくら市の調査地点を、図1と図5に日光市岩崎地区の崩壊地点を、図6に日光市芹沢地区の位置をそれぞれ示す.なお、災害直後であり救助活動等が進行中であるため、詳細な聞き取りや測量等は実施しなかった.また、図5の調査ルート上では

浸水痕はほとんど確認できなかった.

4.1 鹿沼市日吉町の斜面崩壊の状況と災害時の雨量

9月10日午前3時50分ごろ,図5に示す栃木県 鹿沼市日吉町日吉地区で住宅の裏山の斜面が崩れ, 住宅3棟に土砂が流入し(朝日新聞デジタル),死者 1名,重傷1名,家屋全壊1戸,半壊2戸の被害が 発生した(国土交通省,2016).この崩壊(Lm-2崩壊 と呼ぶ)は関東ロームが崩れたものであり,目視に よる大まかな崩壊形状は,最大崩壊深約5 m,崩壊 幅が約10 m,崩壊長が約15 m,崩壊面の勾配が約 25°の浅層崩壊である(写真1).なお,崩壊規模が 小さいため,解像度が低いSPOT6,7からは土砂移 動範囲を判読できなかった。そのため,土砂移動分 布図には記載されていない.



図5 2015 年 9 月 11 日の調査ルート (赤線) と調査地点 (青旗) および Lm-1 斜面の位置. 背景図は 20 万分 1 地勢図. 図 1 にこの図の位置を示す.

Fig. 5 Investigation route and sites visited on September 11, 2015, and location of the Lm-1 slope. The base map is based on the GSI 1/200, 000 topographical map.

気象庁解析雨量を用いて計算した,Lm-2 崩壊地付近の災害 2 週間前からの日雨量と 9 月 8 ~ 10 日の時間雨量を図 7 左に,1,2,3,6,12,24,48 時間雨量の最大値を表 3 に示す.図 7 左によると,崩壊の約 1 時間前 (10 日 3:00) までの 1 時間雨量は 45 mmと大きいが,崩壊発生時刻 (10 日 3:50 頃) を含む 10 日 4:00 までの 1 時間雨量は 11 mm と小さく,雨が

降り止み始めたタイミングで崩壊が発生したことがわかる. 表3 によると、 $1 \sim 3$ 時間雨量の最大値 (49 mm/lh, 114 mm/3h) は崩壊発生時刻よりも約5 ~ 6 時間早いが、12、24 時間雨量の最大値 (384 mm/12h, 536 mm/24h) は崩壊発生時刻付近と概ね一致した. したがって、 $12 \sim 24$ 時間程度の積算雨量が崩壊発生に関係した可能性がある.

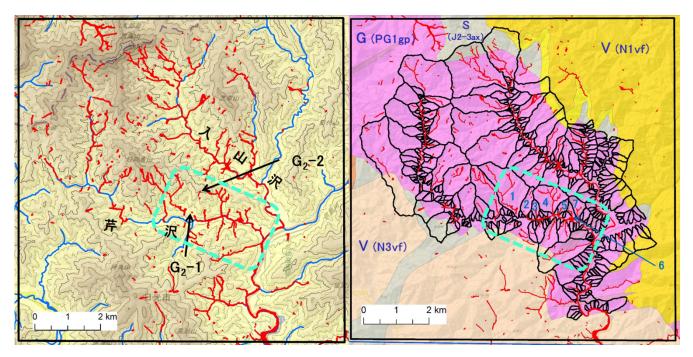


図6 (左)日光市芹沢付近の土砂移動分布図と地形, (右)土砂移動分布図と地質および流域区分. 図1にこの図の位置を示す. 水色破線の範囲が芹沢地区. 左図の等高線間隔は100 m で標高色の凡例は図1と同じ. 右図の地質記号の凡例は図2と同じ. 1:田茂沢, 2:ウドン沢, 3:中坪上沢, 4:中坪下沢, 5:滝向沢, 6:下坪上沢, 7:下坪沢.

Fig. 6 Trace map of sediment movements and topography (Left), and trace map of sediment movements, geology and drainage basins classification (right), around Serizawa, Nikko City. The light blue dashed line shows the Serizawa commune. The contour interval is 100 m, and the legend for the contour colors is shown in Fig. 1. The legend for the geological symbols is shown in Fig. 2. The drainage basins shown are 1-Tamosawa, 2-Udonsawa, 3-Nakatsubouesawa, 4-Nakatsuboshitasawa, 5-Takimukaisawa, 6-Shimotsubouesawa, 7-Shimotsubosawa.





写真1 鹿沼市日吉町の Lm-2 崩壊地の様子. (左)滑落崖, (右)住宅に土砂が押し寄せた様子.

Photo 1 Lm-2 slope failure in the town of Hiyoshi-cho, Kanuma City. The failure scar (left) and houses damaged by colluvium (right).

表3 斜面崩壊地点における 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 時間雨量の最大値と発生時刻. 中三依と参考の各災害の雨量は地上雨量計の値であり、それ以外は国交省解析雨量の値である.

Table 3 Volume and occurrence time of the maximum 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h and 48 h rainfall for each slope failure.

	1時間 雨量 mm	2時間 雨量 mm	3時間 雨量 mm	6時間 雨量 mm	12時間 雨量 mm	24時間 雨量 mm	48時間 雨量 mm	年平均 降水量 mm	No.
鹿沼市									
Lm-2崩壊地	49	87	114	216	384	473	536	1.628	
[2015/9/10 3:50頃]	(9/9 21:30)				(9/10 3:00)	(9/10 6:00)	(9/10 11:00)	(鹿沼)	
Lm-3崩壊地	49	87	111	190	348	422	478	1,628	
[2015/9/9 21:30-22:30頃]	(9/10 3:00)	(9/9 18:00)	(9/9 18:00)	(9/9 21:30)	(9/10 3:00)	(9/10 6:00)	(9/10 11:00)	(鹿沼)	
日光市									
Lm-1崩壊地	41	79	108	194	319	404	459	1.628	
[2015/9/10 2時頃]							(9/10 11:00)	(鹿沼)	
G₂−1, 2崩壊地	53	88	134	218	356	468	532	1,596	
[2015/9/10 2時~4時頃]	(9/10 3:30)	(9/10 4:00)	(9/10 3:30)	(9/10 4:00)	(9/10 4:00)	(9/10 7:00)	(9/10 22:00)	(五十里)	
日光芹沢最大値	53	89	141	228	368	513	580		
(36°58'45", 139°40'53")	(9/10 3:30)	(9/10 4:00)	(9/10 3:30)	(9/10 4:00)	(9/10 4:00)	(9/10 7:00)	(9/10 12:00)		
中三依	57	100	141	230	380	502	579		1
(36°59'07", 139°41'33")	(9/10 3:00)	(9/10 4:00)	(9/10 4:00)	(9/10 3:00)	(9/10 4:00)	(9/10 6:00)	(9/10 12:00)		
(参考)									
みなかみ町災害(2015/7/20)								
土合	73	138	140	140	140	145	145	1734	2
片自士《字 (0014 (0 (00)								(みなかみ)	
広島市災害(2014/8/20) 上原	115	207	237	254	285	285	285	1.690	3
上/环	113	207	237	204	200	200	200	(三入)	3
岩国市災害 (2014/8/6)	50	100	440	100	400	0.10	204	4 707	à
岩国土建	56	109	149	186	199	210	231	1,727 (岩国)	4
南木曽町災害(2014/7/9)									
蘭	76	124	126	126	126	142	143	2,413 (南木曽)	5
防府市災害(2009/7/21)								(州小日)	
防府	64	88	126	220	229	244	286	1,638	6, 7
								(防府)	

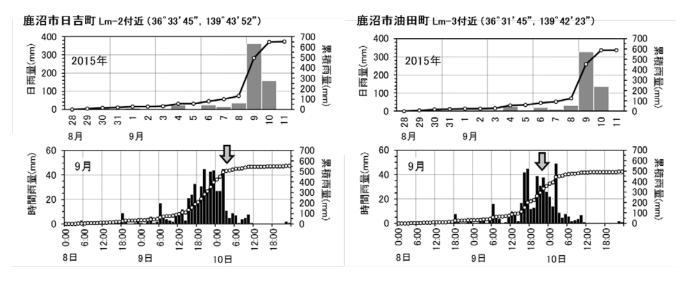


図7 Lm-2 崩壊地付近(左)とLm-3 崩壊地付近(右)における災害時の日雨量と時間雨量(気象庁解析雨量から作成). 矢印は推定崩壊発生時刻を示す.

Fig. 7 Daily and hourly rainfall near the Lm-2 and Lm-3 slopes based on the JMA Radar/raingauge analyzed precipitation. The arrows show the estimated times when the slope failures occurred.

また, この崩壊地から約140 m 南南東でも, 2 カ 所の崩壊地を確認した(写真2). 写真2 右の小崩壊 では崩土が民家に流入した. さらに, 日吉地区から 約400 m 南の金山地区でも, 12 日(時間不明)に斜 面の崩落が発生した(国土交通省, 2016).

4.2 鹿沼市油田町の斜面崩壊の状況と災害時の雨量

鹿沼市油田町の南摩小学校では(図5),小学校裏の斜面が崩れ、校舎の窓ガラスを突き破って土砂が流入した.この崩壊(Lm-3崩壊と呼ぶ)は関東ロームを主体とする土層が崩れたものであり、目視による大まか崩壊形状は、崩壊深約1m、崩壊幅約7m、崩壊長が約30m、崩壊面の勾配が約35~40°の表層崩壊である(写真3).上述の日吉町と同様に、土砂移動分布図では土砂移動範囲を判読できていない.

小学校の職員への聞き取り調査によると、「9月9日21時30分頃、職員が校務を終えて帰宅した、隣接するお寺の方が、ガスの配管が切れたと思われる

ガス漏れの臭いと、大きな音を聞いたため 22:30 頃 通報した. また、斜面を切り土して用地を広げた場所に校舎が建てられた.」とのことであった. 以上より、崩壊発生日時は9月9日21時30分から22時30分までの間と考えられる.

Lm-3 崩壊地付近の日雨量と時間雨量を**図7**右に, 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 時間雨量の最大値を表3に示す。崩壊発生時刻(9日21:30~22:30)を含む9日22:00と23:00までの1時間雨量は31~38 mmであり1時間雨量の最大値(49 mm/1h)よりは若干小さいものの,崩壊は概ね降雨が集中する時間帯に発生した。表3によると、1時間雨量の最大値は崩壊発生時刻(9日21:30~22:30)よりも約5時間遅くて3時間雨量の最大値(111 mm/3h)は約4時間早いが,6時間雨量の最大値(190 mm/6h)は崩壊発生時刻と概ね一致した。したがって,6時間程度の積算雨量が崩壊発生に関係した可能性がある。





写真 2 鹿沼市日吉町の Lm-2 崩壊地付近に存在する 2 カ所の崩壊地の様子 Photo 2 Two slope failures near the Lm-2 slope failure in the town of Hiyoshi-cho, Kanuma City.





写真 3 鹿沼市油田町南摩小学校裏の Lm-3 崩壊地の様子. (左)崩壊地遠景, (右)小学校校舎に土砂に土砂が押し寄せた様子 Photo 3 Lm-3 slope failure in the town of Aburaden-machi, Kanuma City. The failure scar (left) and the Nanma elementary school, damaged by colluvium (right).

4.3 日光市岩崎地区の大規模斜面崩壊の状況と災害 時の雨量

日光市岩崎地区では、武子川の支流白石川の右岸 斜面で大規模な斜面崩壊が発生し、その崩土は土石 流化して約1.7 km 先まで流下した(図1,5,8,写 真4,5). この崩壊(Lm-1 崩壊と呼ぶ)は関東ローム が崩れたものであり、崩壊形状は、5.2.3 節で述べ るように、崩壊厚約9.6~12.5 m、崩壊面の勾配約 15.8°、崩壊長約300 m、崩壊幅約75 mである.

落合ほか (2016) による地元への聞き取りによると,9月9日23 時頃から出水が始まり,9月10日2時頃から土砂が流出したようである.このことから,崩壊発生時刻は,9月10日2時頃と考えられる.

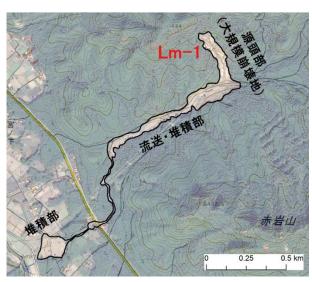


図8 日光市岩崎地区の大規模斜面崩壊に伴う土砂移動範囲(黒線). 背景は SPOT6 衛星画像(2015/10/9撮影)と国土地理院標準地図. 図1と図5にLm-1 斜面の位置を示す.

Fig. 8 Trace map of sediment movement for a large-scale slope failure (Lm-1) in Iwasaki, Nikko City. The base map is based on the SPOT6 satellite images from October 9, 2015, and the GSI standard map.

Lm-1 崩壊地付近の日雨量と時間雨量を**図9**左に、1,2,3,6,12,24,48時間雨量の最大値を**表3**に示す。 **図9**左によると、9日20:00頃の降雨が最も集中する時間帯から5~6時間遅れて発生した。**表3**によると、1~3時間雨量の最大値(41 mm/1h,108 mm/3h)は崩壊発生時刻(10日2時頃)よりも約5時間早いが、12時間雨量の最大値(319 mm/12h)は崩壊発生時刻と概ね一致した。したがって、12時間程度の積算雨量が崩壊発生に関係した可能性がある。

4.4 日光市芹沢地区の斜面崩壊と土石流の状況と災 害時の雨量

図6右に示すように、芹沢地区とその周辺では、 花崗岩類の地域において多数の斜面崩壊や土石流が 発生した。崩壊のタイプは、山腹斜面では表層崩壊 が、0次谷(谷頭部)では浅層崩壊がそれぞれ多いと 考えられる。住家が立ち並ぶ芹沢地区では8流域で 土石流が発生し、それらのうち芹沢左岸が7流域を 占めた(国土交通省、2015a)。すなわち、上流側か ら順に田茂沢(図6右の1)・ウドン沢(2)・中坪上 沢(3)・中坪下沢(4)・滝向沢(5、写真6)・下坪上 沢(6)・下坪沢(7)の7流域である。この災害によ



写真 5 Lm-1 崩壊による流送・堆積部の様子 Photo 5 The transport/deposition zone by the Lm-1 slope failure.



写真 4 日光市岩崎地区の Lm-1 崩壊地全景 Photo 4 Lm-1 slope failure in Iwasaki, Nikko City.

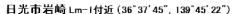
り, 負傷者 2 名, 住家全壊 2 戸, 半壊 5 戸の被害が発生し,住民 14 戸 25 名が一時孤立した(国土交通省, 2015b). 以下は芹沢地区の住民からの聞き取り内容であるが, これらより斜面崩壊や土石流の発生時刻は 9 月 10 日午前 2 ~ 4 時頃であると考えられる.

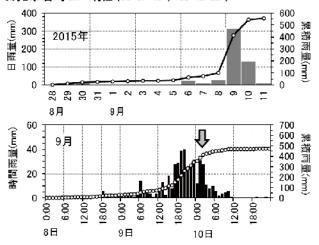
① 推定 60 代 中坪上沢付近の男性

- 10 日午前 3 時頃までテレビはつけていたが寝ていた.
- 隣(の斜面?沢?)が崩れた時間は2時から4時だと思う。
- ・ 自宅前の電線が切れて停電したのが3時30分頃.
- ・ 避難所へは12日の夕方に移動した.
- 奥のほうはこれまでに崩れたことがあった. 年 に1度程度は崩れる.
- 行政無線放送は家にあるが、流れていないと思った。寝ていたこともあり、わからない。
- 特別警報には気づいたが避難勧告等は出ていなかったと思う。

- 裏山の木(杉)が50年位のサイクルで植林されている。土が薄く、それが原因の1つだと思う。
- ② 推定 60 代 中坪下沢付近の女性他 2 名
- 停電は10日午前2時過ぎだったと思う.3時頃ではない.
- 12 日の夕方に皆で避難しようとなり、半強制的に避難所へ避難した。
- 防災行政無線は山なので響いてとても聞こえない.

また、被災地の日雨量と各時間雨量を**図9**右に、1,2,3,6,12,24,48時間雨量の最大値を表3に示す。ここで、**図9**右には5.2.4節の土層構造の調査地点(G₂-1,2)付近の雨量を、表3にはG₂-1,2付近の値と6章の流域調査範囲の最大値(日光芹沢最大値)、および最寄りの国交省雨量観測点「中三依」の値を示す。表3によると、各地点の雨量の差異は小さい。**図9**右から、崩壊・土石流発生時刻(10日2時~4時頃)は、雨量が徐々に増加して最も激しい





日光市芹沢 G.-1,2付近(36°59'45",139°40'53")

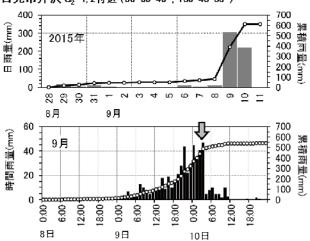


図9 Lm-1 崩壊地付近(左)と G₂-1,2 崩壊地付近(右)における災害時の日雨量と時間雨量(気象庁解析雨量から作成). 矢印は推定崩壊発生時刻を示す.

Fig. 9 Daily and hourly rainfall near the Lm-1 slope and the G_2 -1 and G_2 -2 slopes based on the JMA Radar/raingauge analyzed precipitation. The arrows show the estimated times when the slope failures occurred.





写真6 滝向沢の土石流の様子. (左)流域出口, (右)土石流により倒壊した家屋.

Photo 6 Debris flow in Takimukaisawa. The basin outlet (left), a house collapsed by the debris flow (right).



写真7 鹿沼市御成橋町の河岸侵食. 御成橋から上流側に向かって撮影. Photo 7 Bank erosion in the town of Onaribashi-cho, Kanuma City.

時刻で、かつ降雨が著しく減少する直前であることがわかる。このことを反映して、 $1 \sim 12$ 時間雨量の最大値 ($53 \sim 57$ mm/1h、 $88 \sim 100$ mm/3h、 $218 \sim 230$ mm/6h、 $356 \sim 380$ mm/12h)は崩壊・土石流発生時刻とほぼ一致した ($\mathbf{表}3$)。すなわち、 $1 \sim 3$ 時間の短時間雨量と $6 \sim 12$ 時間のやや長時間の雨量の両方が集中した時刻に崩壊・土石流が発生した。

4.5 鹿沼市御成橋町の河岸侵食の状況

鹿沼市御成橋町では、黒川の河岸侵食により、民家など3軒が傾くなどの被害を受けた(写真7).被害を受けた家の方の話では、「9月11日0時頃、増水が酷くなり避難のため家を離れたが、付近の人から2時頃崩れたと聞いた.」とのことである.

4.6 さくら市早乙女の河岸侵食の状況

荒川の河岸侵食により、堤防上の歩道が流された(写真8).付近の方の話では、「9月10日10時から12時の間に、河岸が徐々に削られたようである.9日22時頃に橋の袂にある防災無線を通して避難指示があったため、9日22時30分頃避難した.これより下流側の2カ所以上でも河岸侵食が発生した. 荒川は頻繁に河岸侵食が発生するので、応急処置のための消波ブロックが予め河岸付近に準備されている.」とのことである.

5. 関東ローム斜面と花崗岩類斜面における崩壊地の 土層構造・物性と安定性、および崩壊の特徴

前章で述べた各地の斜面崩壊地において地盤調査を実施した. すなわち, Lm-2 崩壊地(鹿沼市日吉町)と Lm-3 崩壊地(鹿沼市油田町)では土層の物性を計測した. Lm-1 崩壊地(日光市岩崎地区)と G₂-1, 2 崩壊地(日光市芹沢地区)では、崩壊形状、土層構造、土層物性の計測を実施し、得られた結果を使用して斜面安定解析を行なった. 現地調査は、鹿沼市日吉



写真8 さくら市早乙女の河岸侵食. 黄色の油圧ショベルがある場所で侵食が発生した.

Photo 8 Bank erosion in Soutome, Sakura City. The erosion occurred near a yellow hydraulic shovel.

町・油田町は 2015 年 9 月 23 日,日光市芹沢地区は 2016 年 11 月 7 ~ 8 日,日光市岩崎地区は 2016 年 11 月 9 日にそれぞれ実施した.調査結果とそこから推察される崩壊の特徴について,関東ローム斜面 (Lm-1,2,3)と花崗岩類斜面 (G_2 -1,2)に分けて述べる.

5.1 調査方法

崩壊形状

崩壊形状に関しては、レーザー距離計 (MDL 製,LaserAce300)を用いて、縦断形状、平面形状、横断形状の簡易測量を行ない、崩壊地の斜面勾配 (i)・崩壊厚 (x)・崩壊幅を求めた、ここで崩壊厚は、崩壊地周辺の斜面形状から崩壊前の地形を推定して求めた法線方向の平均的な厚さであり、重力方向に計測した厚さである崩壊深 (z) とは、z=x /cosi の関係がある。ただし、Lm-1 崩壊地に関しては崩壊の規模が大きいことから、災害後に撮影された SPOT6 衛星画像を判読して平面形状を作成するとともに、国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュ DEM (2.5 万

	土粒子 の密度	単位体	責重量		間隙率	間隙比	含水比	飽和度	強熱 減量	飽和 透水係数		粘着力		せん断担	抗角	土壤硬度		簡易貫入 試験値
		乾燥	自然	飽和								自然	飽和	自然	飽和	平均	標準偏差	
	G_s	γ_d	γ_{nat}	γ_{sat}	n	e	W	S_r	L_i	K ₁₅		C nat	$c_{\it sat}$	ϕ_{nat}	ϕ_{sat}	P		N_c
	g/cm ³	gf/cm ³	gf/cm ³	gf/cm ³	%		%	%	%	cm/sec	mm/hr	gf/cm ²	gf/cm ²	degree	degree	kgf/cm ²	kgf/cm ²	
Lm-1																		
0.7 m	-	-	-	-	-	-	100.0	-	19.6	-	-	-	-	-	-	9.1	2.8	3
2 m	-	0.69	1.25	1.44	74.5	2.92	81.5	75.7	10.1	1.09 × 10-3	39	-	-	-	-	5.1	1.3	5
nwTf	_	-	-	-	-	-	27.7	_	6.2	-			_	_	_	98.3	27.9	7-10
Pum	2.62	0.38	0.75	1.23	85.6	5.96	98.6	43.2	7.7	1.30 × 10-2	467	151.3	186.0	15.2	10.0	4.2	1.4	2-3
Trans1	2.74	0.93	1.54	1.59	66.1	1.95	65.7	92.3	8.0	1.14 × 10-3	41	132.4	14.8	20.9	18.6	73.6	156.3	4-7
Trans2	2.71	0.87	1.51	1.55	67.8	2.11	73.2	93.9	8.5	5.38 × 10-6	0.2	89.3	11.0	16.9	12.3	9.8	1.3	-
Lm-2-col	2.72	_	_	_	-	_	101.1	-	11.8	-	_	_	-	-	-	-	_	-
Lm-3-col	2.68	-	-	-	-	-	91.7	-	13.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G ₂ -1																		
0.4 m	-	1.13	1.28	1.71	57.8	1.37	13.0	25.5	3.3	5.30 × 10-3	191		-	-	-	1.1	0.2	2
0.6 m	2.67	1.12	1.32	1.70	58.0	1.38	17.7	34.1	2.6	6.54 × 10-3	236	-	-	-	-	8.0	0.2	1-2
0.75 m	2.71	1.38	1.50	1.87	49.3	0.97	8.9	24.8	1.9	5.08 × 10-3	183	45.6	14.2	40.5	38.2	8.0	0.3	1-2
0.75 m _mod	2.71	1.45	1.58	1.91	-	-	-	-	-	=-	-	96.6	37.1	36.4	37.5	-	-	-
0.85 m	2.68	1.67	1.75	2.05	37.4	0.60	4.7	20.9	1.9	6.64 × 10-3	239	138.8	111.3	37.4	37.0	5.5	4.1	4-5
1.1 m	_	1.89	1.97	2.19	29.3	0.41	4.2	27.3	1.5	2.96 × 10-3	106	-	-	-	-	34.6	8.3	10
Hard grus	_	_	_	_	_	_	6.3	_	1.9	_	_	_	_	_	_	_	_	_

68.2 16.7 2.74 × 10-3 99

表 4 土層の諸物性値一覧 Table 4 Soil properties in the Lm-1, Lm-2, Lm-3, G₂-1 and G₂-2 slopes.

分の1地形図の等高線データから作成)から作成した斜面の縦断形状と横断形状を参考に、崩壊前の地表面を推定した.

土層構造

斜面土層構造は、斜面簡易貫入試験機 (筑波丸東製、先端コーン径 $2.5~{\rm cm}$) を用いて計測した。得られた結果は、先端コーンが $10~{\rm cm}$ 貫入するのに要する打撃回数である Nc 値で表した。そして、Nc<5の軟弱土層を U層、 $5\leq Nc<10$ のやや締まった土層を M層、 $10\leq Nc<30$ のかなり締まった土層を L層と設定した。

土層の物性

土層の物性に関しては、滑落崖などにトレンチを掘り、その場で土壌硬度を測定するとともに、100 cm³の採土缶とサンプル袋に試料を採取して、実験室で物理的性質 (土粒子の密度・単位体積重量・間隙率・間隙比・含水比・飽和度・強熱減量・飽和透水係数・粒径) と力学的性質 (せん断強度定数 (粘着力 c, せん断抵抗角 ϕ)) を測定した、土壌硬度は、山中式土壌硬度計 (大起理化工業 (株)) を用いて測定した、この硬度計のバネの縮み X (mm) を、P = 100~X/(0.7952~(40-<math>X)²) の式により換算した支持強

度 $P(kgf/cm^2)$ で表した. 採土缶については,採取時の重量,飽和透水係数 (K, JIS A 1218 の変水位透水試験法による),110℃で 48 時間炉乾燥後の重量を順に計測した.これらの重量から採土缶の重量を引いて,自然単位体積重量 $(\gamma_{nat}, gf/cm^3)$ と乾燥単位体積重量 $(\gamma_{nat}, gf/cm^3)$ と乾燥単位体積重量 $(\gamma_{nat}, gf/cm^3)$ を対し、含水比 (w, %) を求めた.また,サンプル袋の試料を用い,粒度組成 $(JIS A 1204, シルト以下の細粒分は沈降法・砂以上の粗粒分は篩分け法による),土粒子の密度 <math>(G_s, g/cm^3, JIS A 1202)$,800℃加熱による強熱減量 $(L_i, \%, JIS A 1226)$ を計測した.なお,採土缶で採取していない地点の含水比は,サンプル袋の試料を用いて測定した.飽和単位体積重量 $(\gamma_{sat}, gf/cm^3)$,間隙率 (n, %),間隙比 (e),飽和度 $(S_r, \%)$ は以下の式によって求めた.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e \cdot \gamma_w}{1 + e} \tag{1}$$

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100 \tag{2}$$

$$e = \frac{G_s}{\gamma_d} - 1 \tag{3}$$

$$S_r = \frac{G_s \cdot w}{e} \tag{4}$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量である。せん断強度定数 (c,ϕ) は,自然状態 (試料採取時の含水比) と飽和状態の含水比に調整した撹乱試料を,直径 6 cm・高さ 2 cm のせん断箱に,試料採取ポイントの単位体積重量で詰めて,排水条件の一面せん断試験により求めた。せん断速度は 1 mm/min である。垂直応力 σ は,日光市芹沢地区の表層崩壊や浅層崩壊は崩壊深が 2 \sim 3 m 以下であることを考慮して 50 \sim 500 gf/cm² の 3 \sim 4 段階の小さな値を,日光市岩崎地区の大規模崩壊は崩壊深が 10 m 前後と大きいことを考慮して 50 \sim 2,300 gf/cm² の 3 \sim 4 段階の大きな値をそれぞれ与えた。

斜面の安定性

c, ϕ , 単位体積重量 (γ) の実測値を斜面安定解析式にあてはめて, F_S (安全率) = 1 の限界条件における斜面勾配と土層厚の関係曲線を作成し、さらに実測した崩壊厚と斜面勾配をプロットして、関係曲線と比較した。調査対象の崩壊地は、崩壊前斜面と崩壊面はほぼ平行であったので、斜面安定解析には以下の無限長斜面の式 (Skempton and DeLory, 1957) を使用した。

$$F_{S} = \frac{F_{R}}{F_{D}} = \frac{c + (\gamma - m \cdot \gamma_{w}) \cdot x \cdot \cos i \cdot \tan \phi}{\gamma \cdot x \cdot \sin i}$$
 (5)

ここで、 F_S : 安全率、 F_R : せん断抵抗力 (gf/cm²)、 F_D : せん断力 (gf/cm²)、 γ_w : 水の単位体積重量 (gf/cm³)、x: 土層厚 (cm)、i: 斜面勾配 (°)、m: 地下水位をあらわすパラメータである。m は、地表面からの地下水面までの深さを z_w とすると、 $m = (z - z_w)/z$ と表すことができ、すべり面より浅部に飽和側方流が発生していない場合の値は 0、地下水面が地表

面に達した場合の値は 1 となる. γ は,すべり面より浅部の土層の単位体積重量の平均値である.自然含水状態の c, ϕ , γ と m=0 を用いた場合と,飽和含水状態の c, ϕ , γ と m=0, 0.5, 1 を用いた場合についての計算を行なった.

5.2 関東ローム斜面の調査結果と崩壊の特徴

5.2.1 鹿沼市日吉町の崩土の物性

Lm-2 崩壊(写真1; 4.1 節で述べたように,最大崩壊深約5 m,崩壊幅約10 m,崩壊長約15 m,崩壊面の勾配約25°)の崩土の様子を写真9に示す。崩土は関東ロームであり、土質はわずかに軽石を含む粘性土で、崩壊面に岩盤は露出していなかった。崩土の土粒子密度・含水比・強熱減量を表4に、粒度組成を図10に、それぞれ示す。Lm-2 の崩土は、粘性土であることを反映して、粘土・シルト画分は54%、含水比は101.1%、強熱減量は11.8%といずれも、後述する日光市芹沢地区のマサ土などよりも高い値を示す。

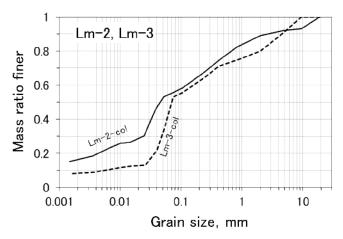


図10 Lm-2, Lm-3 崩壊における崩土の粒度組成 Fig. 10 Grain size distribution of colluvium by the Lm-2 and Lm-3 slope failures.





写真9 鹿沼市日吉町の Lm-2 崩壊による崩土の様子. 左写真の拡大図が右写真 **Photo 9** Colluvium by the Lm-2 slope failure in the town of Hiyoshi-cho, Kanuma City.

5.2.2 鹿沼市油田町の崩土の物性

Lm-3 崩壊 (写真 3; 4.2 節で述べたように、崩壊深約 1 m、崩壊幅約 7 m、崩壊長が約 30 m、崩壊面の勾配が約 $35 \sim 40$ °)の崩壊面と崩土の様子を写真10 に示す、崩壊面の一部に岩盤が露出しており (写

真 10 左), 崩土は関東ロームの粘性土とジュラ系足尾帯の堆積岩の礫と風化土からなる(写真 10 右). 崩土の粘土・シルト画分は 44 %, 含水比は 91.7 %, 強熱減量は 13.3 % と, 関東ロームである Lm-2 に近い値を示す(表 4, 図 10).



写真 10 鹿沼市油田町南摩小学校の Lm-3 崩壊による崩壊面(左)と崩土(右)の様子 Photo 10 The failure scar (left), and colluvium (right) by the Lm-3 slope failure in the town of Aburaden-machi, Kanuma City.

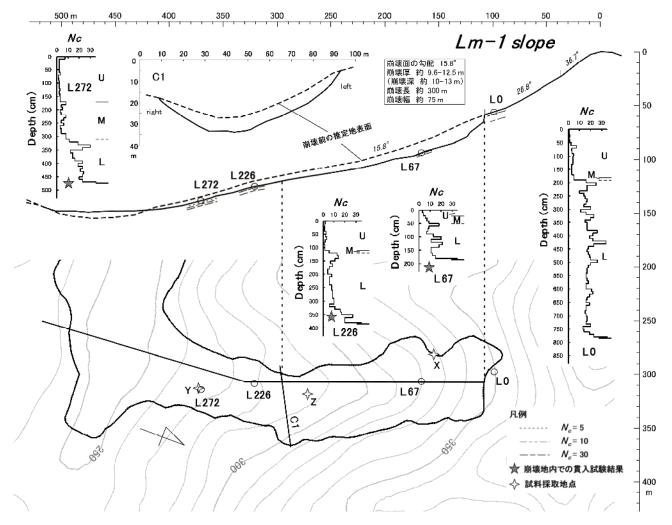


図11 Lm-1 崩壊地の崩壊形状と土層構造. 0.7 m, 2 m の試料は X で, nwTf, Pum, Trans1 の試料は Y で, Trans2 の試料は Z でそれぞれ採取した.

Fig. 11 Slope form and soil-layer structure for the Lm-1 failure scar.

5.2.3 日光市岩崎地区の大規模斜面崩壊の土層構造・ 物性と安定性

大規模崩壊である Lm-1 崩壊 (**図 8**) に対して, 詳細調査を実施した.

(1) 日光市岩崎地区の地形・岩質の概要

日光市岩崎地区は、思川の二次支川武子川の左岸に位置しており、標高約 200 m から 220 m の武子川と最大標高 440 m の山地斜面に挟まれている.

Lm-1崩壊地付近の基盤岩は、図2では堆積岩類(S)であり、5万分の1地質図「宇都宮」では上部ジュラ系栃木コンプレックスの層状チャートと記載されている.しかし、現地観察によると表層から少なくとも崩壊面の深度(約12 m)までは軽石などの火山砕屑物(テフラ)とその運積土を主体とする関東ロームに覆われている.

(2) Lm-1 崩壊地の崩壊形状・土層構造・物性と安定性 崩壊形状

図11に示す簡易測量の結果や滑落崖の高さや周辺斜面との連続性から、Lm-1崩壊地の形状は、崩壊面の勾配約15.8°、崩壊厚約9.6~12.5 m (崩壊深約10~13 m、頂部滑落崖の高さ約9~10 m)、崩壊長約300 m、崩壊幅約75 m であった(図11). また、崩壊地より下部の流送・堆積域の長さは約1.67 km、平均勾配は約1.65°とかなり緩勾配であり、崩壊地頂部から流下域末端までの移動距離は約2 kmで、平均勾配は約4.48°(等価摩擦係数は0.0785)とこちらもかなり緩い(図8).

土層構造

図11においてLに続く数字は斜面最上方の貫入試験ポイント(L0)からの水平距離(m)を示す。L0は滑落崖直上の試験ポイントであり、L67、L226、L272は崩壊地内の試験ポイントである。滑落崖の観察とL0の貫入試験値との比較から、U層、M層、L層のいずれも軽石層などの火山砕屑物ないしはその運積土により構成されていた。また、崩土もほぼ全て火山砕屑物とその運積土であり、崩壊面(すべり面)の物質も同様に、軽石層ないしは軽石・火山灰を含む暗褐色の礫混ざり運積土であった(写真4、5、11、12、13)。なお、L272に関しては、深度0.4 m以深には後述する崩壊面物質が残存しており、局所的な崩れ残り土層であると考えられる(写真11)。

図 11 において、滑落崖直上にある L0 の U 層・M

層・L 層を合わせた土層(以後, U + M + L 層と表 記) の厚さは 7.8 m であり、その中で L 層の厚さは 5.9 m と多く(約3/4)存在している. L層の中を見る と、多くは N_c 値が20以下の層であるが、局所的に N_c 値が 30 に近い層が存在する. この硬質な部分は, 層そのものが硬質な場合や、軟質な層中に硬い礫が 含まれている場合があり、いずれも火山砕屑物の堆 積構造を反映していると考えられる. すなわち. 火 山砕屑物の硬質層と軟質層がランダムに堆積する土 層構造であることが推察される. このことから, L0 では深度 7.8 m で N_c 値が 30 を超える硬質層に達し たが、深部では再び N_c 値が30以下となる層(L層) が出現する可能性がある. この推察は、崩壊前は深 度約 10~13 m (崩壊深) よりも深部に位置していた 崩壊地内の土層 (L67, L226, L272) に、1.3 ~ 2.6 m の厚さの L層が残存している結果と調和的である. なお、崩壊地内の土層の表層から深度 0.5 ~ 3.2 m には軟弱な U 層や M 層が存在しているが、これら は厚さ $10 \sim 13$ m もの土層が除去されたため、除荷 作用によって緩んだ土層である可能性がある.

土層物性とすべり面

崩壊面(すべり面)付近の層序は、崩壊地内の上部と下部で異なる。下部では礫混ざり運積土を軽石層が覆っており、多くの場所で軽石層が除去されて礫混ざり運積土が露出している(写真12)。一方、上部では礫混ざり運積土が露出しているが、その直上には軽石層が存在しない(写真13)。このことから、すべり面の土層は軽石層と礫混ざり運積土であると考えられる。また、上述したように、すべり面の浅部・深部のいずれにもL層が数mの厚さで存在することから、すべり面はL層中に形成されたと考えられる。

試料は図11に示すようにLm-1 斜面の X, Y, Z で採取した. Xでは滑落崖にトレンチを掘り,深度 0.7 m (茶褐色の運積土) と 2 m (暗灰褐色の運積土) の表層土層を採取した. Yでは、崩壊面物質の崩れ残り土層の中から、風化した非溶結凝灰岩 (nwTf)、軽石 (Pum)、礫混ざり運積土 (Trans1)の試料を採取した(写真11). すべり面上の Zでは、すべり面に露出した礫混ざり運積土 (Trans2)を採取した(写真13). Pum と Trans1, 2 がすべり面の土層である. これらの地点では土壌硬度と貫入試験値も測定した.

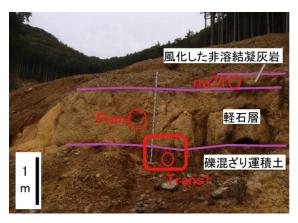




写真 11 Lm-1 崩壊地内下部にある崩壊面物質の崩れ残り土層の様子 (貫入試験地点 L272, 試料採取 地点 Y). 左写真の赤四角を拡大したものが右写真である.

Photo 11 A remaining soil-layer corresponding to the slip plane at points L272 and Y in the lower part of the Lm-1 failure scar.



写真 12 Lm-1 崩壊地内下部の側方滑落崖付近に露出する崩壊面物質の崩れ残り土層 Photo 12 A remaining soil-layer corresponding to the slip plane at the side scarp in the lower part of the Lm-1 failure scar.





写真 13 Lm-1 崩壊地内上部の様子. 左写真の赤四角が Trans2 を採取した試料採取地点 Z であり, 拡大したのが右写真である.

Photo 13 The upper part of the Lm-1 failure scar. The photo to the right is an enlargement of the red square (point Z) in the photo on the left.

土層物性の測定結果を表4と図12,13,14に示 す. すべり面に関しては、軽石 (Pum) は、礫混ざり 運積土 (Trans1, 2) よりも,土粒子密度,単位体積重 量(乾燥・自然・飽和), 土壌硬度, 簡易貫入試験値 が小さくて、飽和透水係数、粒径が大きい. ただし いずれも崩壊面の深度 1.5 m 以浅で採取し、簡易貫 入試験値が小さいが($N_c=2\sim7$, U層かM層に相当), L 層相当の締まった土層が応力開放により緩んだ後 の土層を採取していたとすると、本来の単位体積重 量,土壌硬度,簡易貫入試験値は今回の計測値より も大きく, 飽和透水係数はより小さい可能性がある. c, ϕ 値については、Pum (軽石) は Trans1, 2 (礫混ざり 運積土) よりもc値が大きくて ϕ 値が小さい(表 4, 図 14). 具体的には、飽和時において、Pum は c_{sat} = 186.0 gf/cm², ϕ_{sat} = 10.0° であり、Trans1 は c_{sat} = 14.8 gf/cm², ϕ_{sat} = 18.6° であり, Trans2 は c_{sat} = 11.0 gf/ cm^2 , $\phi_{sat} = 12.0$ ° である. なお, Trans1 と Trans2 の 礫混ざり運積土は、粒径や強熱減量、単位体積重量 (乾燥・自然・飽和), 間隙率等が類似しているが, Transl の方が土壌硬度やc, ϕ 値が大きくて飽和透水 係数が小さい結果となった. この原因は不明である.

表層土層に関しては, 0.7 m は粘土画分が少なくて(2.7 %), 粒径の淘汰が良いが, 2.0 m は粘土画分が多くて(24.2 %), 粒径の淘汰が悪い(図12, 13). これは, 母材(すなわち火山砕屑物)の粒径の違い

を反映していると考えられる. また, nwTf (風化した非溶結凝灰岩) は, ほとんど砂画分からなり (80.4%), Lm-1 斜面の試料の中では, 最も土壌硬度や簡易貫入試験値が大きくて強熱減量が小さい.

以上より、Lm-1 斜面の土層は、粒径、単位体積重量、強度(土壌硬度・簡易貫入試験値・c、 ϕ 値)等の物性が異なる複数の火山砕屑物が積み重なった構造を示すことが明らかになった。

斜面の安定性

図 15 に斜面勾配と土層厚の関係曲線を示す. 図 15A は Pum (軽石) の c, ϕ を用いた結果, 図 15B, 15C はそれぞれ Trans1 と Trans2 (いずれも礫混ざり

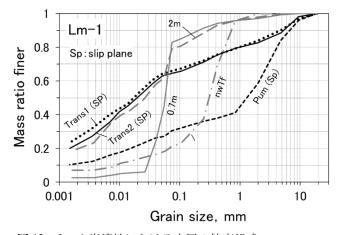


図 13 Lm-1 崩壊地における土層の粒度組成 Fig. 13 Grain size distribution of soils in the Lm-1 failure scar.

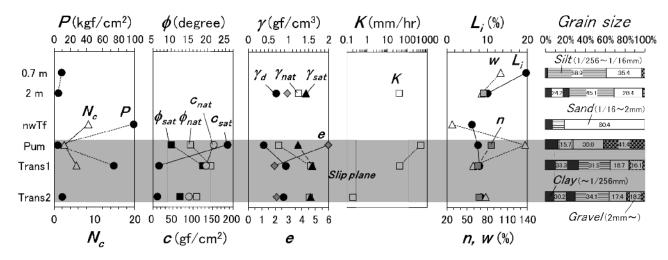


図 12 Lm-1 崩壊地における土層の諸物性値. P: 土壌硬度, N_c : 簡易貫入試験値, ϕ : せん断抵抗角, c: 粘着力, γ : 単位体積重量, e: 間隙比, : K: 透水係数, L_i : 強熱減量, n: 間隙率, w: 含水比, Grain size: 粒度組成. c, ϕ と γ に付記された, d は乾燥状態, nat は自然含水比状態, sat は飽和含水比状態をそれぞれ示す.

Fig. 12 Soil properties of the Lm-1 failure scar. Where P: Yamanaka-type soil hardness, N_c : Tsukuba-Maruto-type simplified cone penetrometer hardness, ϕ : angle of shear resistance, c: cohesion, γ : unit weight, e: void ratio, K: hydraulic conductivity, L_i : ignition loss, n: porosity, and w: water content. The subscripts d, nat and sat refer to 'dry condition', 'natural water content' and 'saturated water content' respectively.

運積土) の c, ϕ を用いた結果である。それぞれの曲線の右上側が不安定領域で左下側が安定領域となる。

この図に、Lm-1 斜面の斜面勾配 (15.8°) と崩壊厚 $(9.6 \sim 12.5 \text{ m})$ をプロットすると、Pum の c 、 ϕ を用いた場合は m = -0.03 (すなわち不飽和) ~ 0.23 であり、Trans1 の c 、 ϕ を用いた場合は $m = 0.28 \sim 0.29$ であり、Trans2 の c 、 ϕ を用いた場合は m = -0.40 (不飽和) であるとそれぞれ計算された。m 値は試料ごとに若干ばらつくが、大雑把に解釈すると、Lm-1 斜面は、すべり面が飽和して強度低下し、かつすべり面より浅部に地下水面がわずかでも形成されたときに、崩壊が発生したと推定できる。平常時のすべり面の水分状態のデータは無いが、飽和透水係数は

Trans2 は 10^{-6} cm/sec オーダー (0.2 mm/hr), Pum と Trans1 は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/sec オーダー (41 \sim 467 mm/hr) とばらつきは大きいものの,ある程度排水可能であったと考えられることから (表 4, 図 12),不飽和状態であったと思われる.

5.2.4 関東ローム斜面における崩壊の特徴

 $4.1 \sim 4.3$ 節と $5.2.1 \sim 5.2.3$ 節によると, 3 斜面 のみの調査結果ではあるが, それぞれ崩壊の規模が大きく異なっていた. すなわち, Lm-2 は浅層崩壊 (崩壊深約 5 m), Lm-3 は表層崩壊 (崩壊深約 1 m), Lm-1 は大規模崩壊 (崩壊深約 $10 \sim 13$ m) であった. 図 3B を見る限り, 図内には Lm-1 以外に大規模崩壊 (壊はほとんどなく, 関東ローム斜面の崩壊の多くは

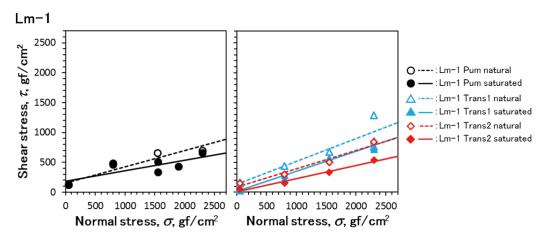


図 14 Lm-l 崩壊地における土層の一面せん断試験結果 Fig. 14 Shear test results of soils in the Lm-l failure scar.

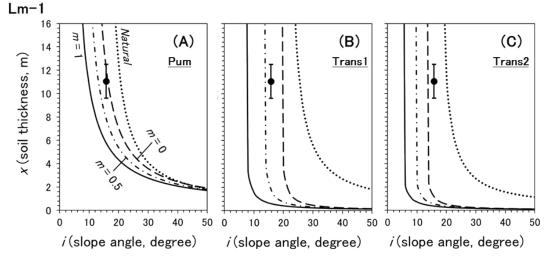


図15 Lm-1 崩壊の斜面安定解析結果. 各曲線の左下側は不安定領域,右上側は安定領域である. (A) Pum, (B) Trans1, (C) Trans2 のせん断強度定数をそれぞれ使用した(表4).

Fig. 15 The relationship between soil thickness and slope angle in the critical state for slippage on the Lm-1 slope failure. The curve indicates the boundary between stable and unstable slopes. The m-values show the relative groundwater level above the failure plane. The c and ϕ values obtained for (A) Pum, (B) Trans 1, and (C) Trans 2 (**Table 4**) are substituted.

表層崩壊か浅層崩壊であったと考えられる. また, 関東ローム斜面では, 土層が比較的細粒であり透水 性が低いためか, 6~24時間の比較的長時間の積 算雨量が崩壊発生に関係している可能性がある.

崩壊規模による降雨と崩壊の関係については、3 斜面は災害時の降雨パターンや降雨量の差異は少ないにも関わらず(表3や図7,9左),崩壊発生時刻は浅層崩壊(9/103:50頃)と大規模崩壊(9/102時頃)の方が表層崩壊(9/921:30-22:30)よりも4~6時間遅い.また、表層崩壊は6時間雨量の最大値、浅層崩壊は12~24時間雨量の最大値、大規模崩壊は12時間雨量の最大値が、それぞれ崩壊発生時刻と概ね一致しており、崩壊深が大きい浅層崩壊や大規模崩壊は表層崩壊よりも長時間の積算雨量が崩壊発生に影響した可能性が考えられる。この原因としては、すべり面が位置する深部まで雨水を浸透させるために、長時間の降雨が必要であったことが考えられる。

日光市岩崎地区の大規模斜面崩壊は関東ロームが厚く堆積する斜面で発生した(5.2.3 節). この場所の関東ロームは、簡易貫入試験等の土質試験によると、様々な物性をもつ複数の火山砕屑物(テフラ)が積み重なった構造をもつ土層である. すべり面は、軽石層と礫混ざり運積土により構成されており、すべり面が飽和して強度低下し、かつすべり面より浅部に地下水面がわずかでも形成されたときに、崩壊が発生すると推定された. 崩土は平均勾配約1.65°のかなり緩勾配の流路を約1.7 km も流下した.

5.3 花崗岩類斜面の調査結果と崩壊の特徴

5.3.1 日光市芹沢地区の斜面崩壊地の土層構造・物 性と安定性

日光市芹沢地区では、図6と図16に示すウドン沢の2カ所の斜面(G_2 -1 斜面、 G_2 -2 斜面)に発生した崩壊跡地において、詳細調査を実施した。 G_2 -1 斜面は山腹斜面に発生した表層崩壊であり(写真14)、 G_2 -2 斜面は土石流源頭部の0次谷に発生した浅層崩壊である。

(1) 日光市芹沢地区の地形・岩質の概要

鬼怒川支川男鹿川の支流である芹沢は西から東に向かって流下しており、下流部の流路沿いの標高約640 mから680 mの場所に芹沢地区の家屋などが立ち並んでいる(図1、図6左).谷底平野の幅は100 m以下であり、標高1,000 m前後を最高点とする急勾配な小流域や山地斜面が家屋の背後に存在している。また、滝向山を挟んだ北側には入山沢が存

在する. 芹沢や入山沢付近の主な地質は図6によると花崗岩類(G)である(図6右). 岩相については,20万分の1地質図「日光」では後期白亜紀から前期古第三紀の黒雲母花崗岩・角閃石黒雲母花崗岩を角閃石黒雲母花崗岩と分類されており、7.5万分の1地質図「塩原」では角閃石黒雲母花崗岩と分類されている. 以上より、この地域の花崗岩類は、角閃石や黒雲母が含まれる花崗閃緑岩的組成を示すと考えられる. ただし、流域出口で流出礫の岩質を確認したところ、ウドン沢・中坪上沢・中坪下沢では花崗岩類以外に火山岩類(V)の一種である溶結凝灰岩が最大50%程度、下坪上沢では溶結凝灰岩が最大10%程度、それぞれ存在していた. これらは、かつて花崗岩類の上部を覆っていた火山岩類の崩れ残りである可能性がある.

芹沢地区とその周辺の斜面崩壊や土石流の多くが、花崗岩類(G)の地域内で発生した(図 6 右).

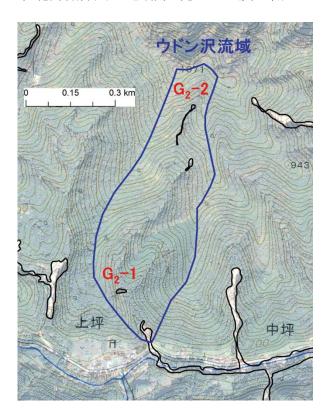


図 16 ウドン沢流域と G₂-1 崩壊地と G₂-2 崩壊地の位置. 黒線は土砂移動範囲を示す. 背景は, Pleiades 衛星画像 (2015/10/14 撮影) と国土地理院の標準地図である.

Fig. 16 The position of the G_2 -1 and G_2 -2 failure scars in the Udonsawa basin. The black lines show the sediment movement traces. The base map is based on the Pleiades satellite images from October 14, 2015, and the GSI standard map.

(2) G_2 -1 崩壊地の崩壊形状・土層構造・物性と安定性 写真 14 と図 17 に示すように、花崗岩類を基盤と するこの崩壊地には上部崩壊地 (Scar A) と下部崩壊地 (Scar B) の 2 つの崩壊地が存在する。Scar B 上に Scar A の崩土が載っていないことを現地で確認した ことから、Scar A の崩壊後に Scar B の崩壊が発生したと考えられる。

崩壊形状

簡易測量の結果,滑落崖の高さや周辺斜面との連続性から, Scar A は崩壊面勾配約 41.2°,崩壊厚約 0.7 m (崩壊深約 0.9 m),崩壊長約 17 m,崩壊幅約 18 m であり, Scar B は崩壊面勾配約 35.4°,崩壊厚約 2.3 m (崩壊深約 1.5 m),崩壊長約 27 m,崩壊幅約 12 m である(図 17). いずれの崩壊も崩壊厚が小さい表層崩壊である.



写真 14 G₂-1 崩壊地全景 **Photo 14** The G₂-1 slope failure.

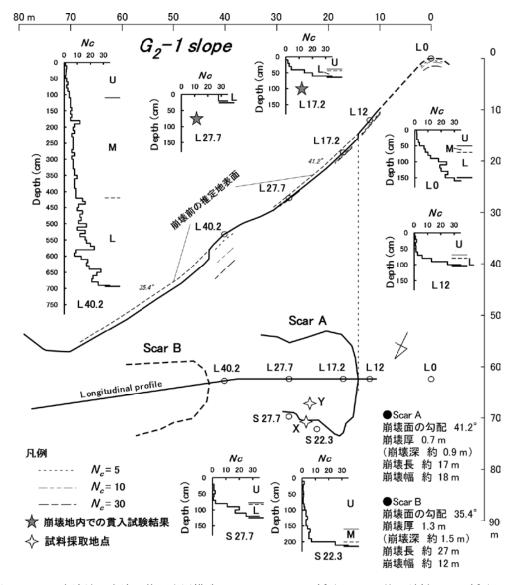


図 17 G_{2} -1 崩壊地の崩壊形状と土層構造. Hard grus は Y で採取し, その他の試料は X で採取した. Fig. 17 Slope form and soil-layer structure for the G_{2} -1 failure scar.

<u>土層構造</u>

図17に示すように、L0は尾根、L40.2は Scar B の滑落崖直上の試験ポイントであり、それ以外は Scar A の崩壊地内と崩壊地脇の試験ポイントである. 現地観察によると、U層は運積土と原位置風化土(基盤岩の岩石組織が残る)により、M層とL層は原位置風化土によりそれぞれ構成される.

図 17 において、U+M+L 層の厚さは、L40.2 を除くと、約2 m以下と薄い、特に、Scar A の崩壊地内 (L17.2, L27.7) の U+M+L 層 (0.2 \sim 0.6 m) は、崩壊地脇 (L12、S22.3、S27.7) の U+M+L 層 (1.0 \sim 2.1 m) よりもかなり薄い、詳しく見ると、L 層の厚さは崩壊地内 (0.2 m) と崩壊地脇 (0.2 \sim 0.4 m) であまり変わらないが、U 層と M 層をあわせた土層 (U+M 層) 厚さは崩壊地内 ($0\sim0.4$ m) が崩壊地脇 ($0.8\sim2.0$ m) よりもかなり薄い、このことから、崩壊によって U 層と M 層がほとんど除去されたと考えられる、一方、Scar B に関しては、滑落崖直上の L40.2 の結果だけであるが、U+M+L 層 (2.8 m)、

U + M 層 (2.6 m) はともに大きい. Scar B の崩壊深は 1.5 m であるので、崩壊によって U + M 層の約 6割が除去されたと考えられる.

土層物性とすべり面

試料は**図17**に示すように Scar A の X, Y で採取

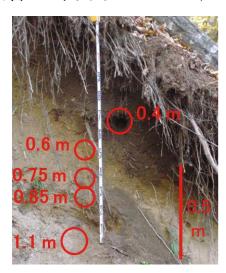


写真 15 G₂-1 崩壊地(Scar A) の側方滑落崖 Photo 15 The side scarp of the G₂-1 failure, Scar A.

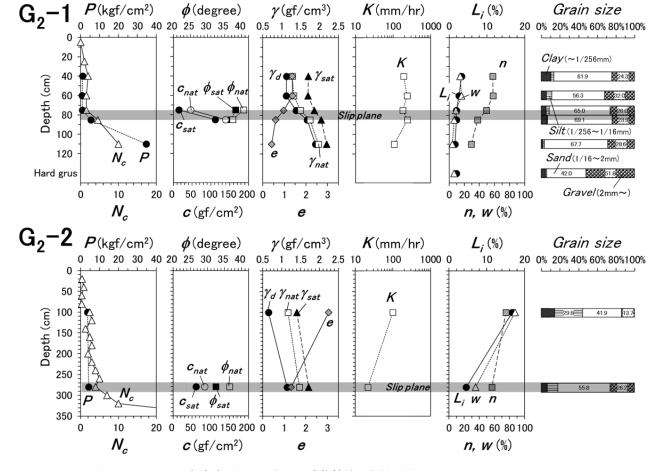


図 18 G₂-1, G₂-2 崩壊地における土層の諸物性値. 記号は図 12 と同じ.

Fig. 18 Soil properties of the G₂-1 and G₂-2 failure scars. The symbols are the same as in Fig. 12.

した. Xでは滑落崖にトレンチを掘り、深度 $0.4 \sim 1.1$ m の試料を採取した (写真 15). 崩壊面上の Y では、原位置風化した鬼マサ状の試料 (hard grus) を採取した. これらの地点では土壌硬度と貫入試験値も測定した. 土色は、hard grus や深度 1.1 m は白褐色であり、表層に近づくほど色が濃くなり、深度 0.4 m は茶褐色を呈す (写真 15).

土層物性の測定結果を示した表4と図18,19,20によると、表層に近づくほど、単位体積重量(乾燥・自然・飽和)・粘着力・土壌硬度・簡易貫入試験値が小さくなり、間隙率・間隙比・含水比・強熱減量は大きくなる傾向がある。粒度組成に関しては、いずれの深度においても粘土・シルト画分が15%以下の粗粒土であるが、表層に近づくほど粘土・シルト画分がわずかに増加する(図18,19)。これらの物性値や土色の特徴は、表層に向かって物理的・化学的風化が進行していることを示している。深度0.4,

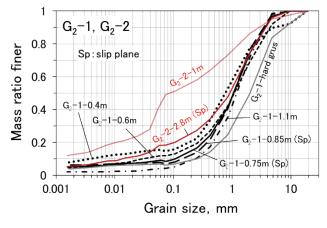


図 19 G₂-1, G₂-2 崩壊地における土層の粒度組成 **Fig. 19** Grain size distribution of soils in the G₂-1 and G₂-2 failure scars.

0.6, 0.75 m は U 層, 0.85 m は M 層, 1.1 m は M 層 と L 層の境界, hard grus は L 層にそれぞれ相当する. U 層と M 層の飽和透水係数は 100 mm/hr 以上であり, 透水性が大きい(表 4).

Scar A のすべり面は、崩壊面との連続性から深度 $0.75 \sim 0.85 \, \mathrm{m}$ の土層中、すなわち U 層と M 層の境界付近に形成されたと考えられる。この深度で実施したせん断試験によると、 ϕ 値は自然・飽和の含水状態に関係なく約 $36 \sim 40^{\circ}$ とほぼ一定であるが、c 値は $0.75 \, \mathrm{m}$ ($c_{nat} = 45.6 \, \mathrm{gf/cm^2}$) は $0.85 \, \mathrm{m}$ ($c_{nat} = 138.8 \, \mathrm{gf/cm^2}$) $c_{sat} = 14.2 \, \mathrm{gf/cm^2}$) は $0.85 \, \mathrm{m}$ ($c_{nat} = 138.8 \, \mathrm{gf/cm^2}$) よりもかなり小さく、わずか $10 \, \mathrm{cm}$ 表層に近づくだけで大きく強度低下することがわかる (表4、図 18、20). また、c、 ϕ と同じ力学的性質である土壌硬度や貫入試験値もこの深度で大きく強度低下している.

一方、 $Scar\ B$ のすべり面は、L40.2 の簡易貫入試験結果において、 $Scar\ B$ の崩壊深に相当する深度 1.5 m の N_c 値が $5\sim 6$ なので、こちらも U 層と M 層の境界付近と考えられる。

斜面の安定性

図 21 に斜面勾配と土層厚の関係曲線を示す。図 21A は深度 0.75~m の c, ϕ を用いた結果,図 21C は深度 0.85~m の c, ϕ を用いた結果である。それぞれの曲線の右上側が不安定領域で左下側が安定領域となる。各関係曲線は Scar A の物性値を用いて作成されているが,Scar B は Scar A と同様に U 層と M 層の境界付近がすべり面なので,Scar B に関してもこの関係曲線を用いて議論しても問題ないと判断した。

この図に、Scar A と Scar B の斜面勾配と崩壊厚を プロットすると、深度 0.75 m (U 層) の c , ϕ を用い

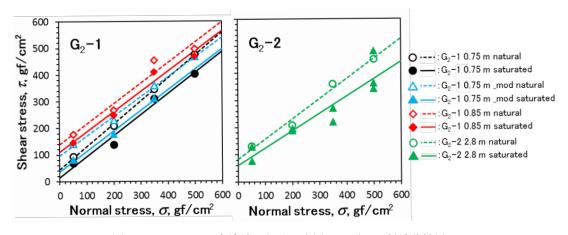


図 20 G_2 -1, G_2 -2 崩壊地における土層の一面せん断試験結果 Fig. 20 Shear test results of soils in the G_2 -1 and G_2 -2 failure scars.

た場合は、m 値は Scar A が 0.15, Scar B が 0.34 と計算され、いずれも地下水面がそれほど上昇しなくても崩壊が発生したと推定できる (図 21A). 一方、深度 0.85 m (M 層) の c, ϕ を用いた場合、m 値は Scar A が 2.52, Scar B が 1.49 といずれも 1 以上の値になり、斜面は不安定とならず崩壊は発生しないことを示す (図 21C). このような m 値の大きな違いは、深度 0.85 m の c 値が 0.75 m の c 値よりもかな

り大きいことが原因である。わずか $10~\rm cm$ の深度の違いで c 値が大きく変わるため,すべり面の正確ないしは平均的な c , ϕ を推定することは困難であるが,ここでは深度 $0.75~\rm m$ の試料を用いて,乾燥単位体積重量 (γ_d) を深度 $0.75~\rm m$ $(1.38~\rm gf/cm^3)$ と深度 $0.85~\rm m$ $(1.67~\rm gf/cm^3)$ の中間的な値である $1.45~\rm gf/cm^3$ に調整した試料 $(0.75~\rm m_mod$ と呼ぶ)を U 層と M 層の境界の土層と見なして,c , ϕ を測定して安定解析を実

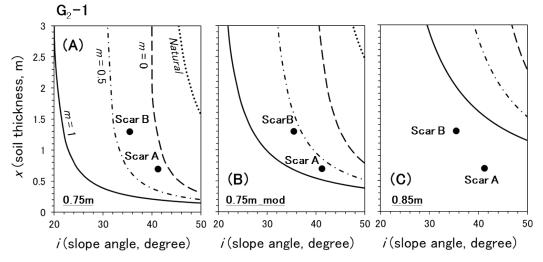


図21 G_2 -1 崩壊の斜面安定解析結果. 各曲線の左下側は不安定領域、右上側は安定領域である. (A) G_2 -1-0.75m, (B) G_2 -1-0.75m_mod, (C) G_2 -1-0.85m のせん断強度定数をそれぞれ使用した(表 4).

Fig. 21 The relationship between soil thickness and slope angle in the critical state for slippage on the G_2 -1 slope failure. The curve indicates the boundary between stable and unstable slopes. The c and ϕ values obtained from (A) G_2 -1-0.75m, (B) G_2 -1-0.75m mod and (C) G_2 -1-0.85m (Table 4) are substituted.

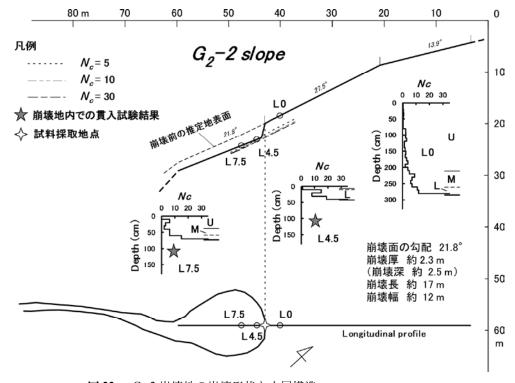


図22 G₂-2 崩壊地の崩壊形状と土層構造

Fig. 22 Slope form and soil layer structure for the G_2 -2 failure scar.

施してみた.その結果, c_{nat} = 96.6 gf/cm², c_{sat} = 37.1 gf/cm² となり,m 値は Scar A が 0.67,Scar B が 0.58 とそれぞれ計算された (表 4,図 20,図 21B).これらの値は,いずれも深度 0.75 m と 0.85 m の中間的な値を示す.ここで,0.75 m と 0.75 m_mod がすべり面の土層であると大雑把に考えた場合は,崩壊時の地下水位はすべり面と地表面の中間以下 (m < 0.5)であったと推定できる.

(2) G₂-2 崩壊地の崩壊形状・土層構造・物性と安定性 崩壊形状

 G_2 -2 崩壊地は, G_2 -1 崩壊地と同様に花崗岩類を基盤岩とする. G_2 -2 斜面の崩壊地の形状は,崩壊面勾配約 21.8°,崩壊厚約 2.3 m (崩壊深約 2.5 m),崩壊長約 17 m,崩壊幅約 12 m である (図 22).同じ流域にある G_2 -1 斜面の表層崩壊よりも崩壊厚が大きくて,崩壊面勾配が小さい浅層崩壊である.また,崩壊地より上流には明瞭な流路は形成されていないことから,0 次谷で発生した崩壊であると考えられる.

土層構造

図 22 に示すように、L0 は滑落崖直上、L4.5 とL7.5 は崩壊地内の貫入試験ポイントである。現地観察によると、U層とM層は運積土である (L層は確認できていない)。この図によると、U+M+L層の厚さは、滑落崖直上 (L0) は 2.8 m と厚いが、崩壊地内 (L4.5、L7.5) は $0.4 \sim 0.7$ m と薄い、詳しく見ると、L層は、崩壊地内 ($0.2 \sim 0.3$ m) と崩壊地直上



写真 16 G₂-2 崩壊地の頂部滑落崖の様子 Photo 16 The head scarp of the G₂-2 failure scar.

(0.2 m) のいずれもかなり薄い. M 層は, 崩壊地内(0 $\sim 0.2 \text{ m})$ よりも崩壊地直上 (0.5 m) の方が若干厚い. U 層は, 崩壊地内 $(0.1 \sim 0.4 \text{ m})$ にはほとんど存在しないが, 崩壊地直上 (2.1 m) はかなり厚い. 以上より, 崩壊によって U 層全部と M 層の一部が除去されたと考えられる.

土層物性とすべり面

滑落崖にトレンチを掘り(図22、写真16)、採取・ 測定した深度1mと2.8mの試料の物性を表4と図 18,19,20 に示す. 貫入試験値から深度1 mはU層,2.8 mはU層とM層の境界の土層と考えられる.深度 1 m は, 深度 2.8 m や G₂-1 斜面の土層と比較すると, 土色が黒褐色とかなり濃く, 粒径がかなり小さく(粘 土・シルト画分、約45%)、強熱減量がかなり大き い(16.7%). 以上より、深度1mの土層は、テフラ 起源の黒ボク土が花崗岩の風化土に混ざった土層で あると考えられる. 深度 2.8 m の土層に関しても, G2-1 斜面の土層と比べて、土色が茶褐色とやや濃い こと、粒径がやや小さくて強熱減量がやや大きいこ とから、花崗岩の風化土に若干黒ボク土が混ざった 土層の可能性がある. これら深度 1 m と 2.8 m の土 層は、 G_2 -1 斜面の土層よりも粒径が小さいため、飽 和透水係数も小さい.

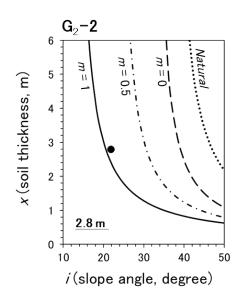


図23 G₂-2 崩壊の斜面安定解析結果. 各曲線の左下側は不安定領域,右上側は安定領域である. 使用したせん断強度定数は表4に示す.

Fig. 23 The relationship between soil thickness and slope angle in the critical state for slippage on the G_2 -2 slope failure. The curve indicates the boundary between stable and unstable slopes. The substituted c and ϕ values are shown in **Table 4**.

崩壊のすべり面は、貫入試験結果や崩壊面との連続性から、深度 2.8 m 付近の土層中、すなわち U 層と M 層の境界付近に形成されたと考えられる。深度 2.8 m の透水性 (22 mm/hr) は U 層 (99 mm/hr) よりもかなり小さいことから、すべり面付近が難透水層となって雨水の降下浸透をある程度妨げることが考えられる $(\mathbf{表 4}, \mathbf{図 18})$. この深度で実施したせん断試験から、飽和時のせん断強度定数、 $c_{sat} = 60.4 \text{ gf/cm}^2$, $o_{sat} = 32.4 \text{°}$ が得られた $(\mathbf{表 4}, \mathbf{\boxtimes 20})$.

斜面の安定性

深度 2.8 m (すべり面相当) の c, ϕ を用いて計算した, G_2 -2 斜面の崩壊地の斜面勾配と土層厚の関係曲線を図 23 に示す.それぞれの曲線の右上側が不安定領域で左下側が安定領域となる.この図に,崩壊地の斜面勾配と崩壊厚をプロットすると,m 値は 0.94 と計算され,崩壊時には地下水面が地表面にほぼ到達していたと推定される.0 次谷であるため平常時と豪雨時のいずれにおいても地中水が集まり易いこと,すべり面付近が難透水層となって雨水の降下浸透を妨げることが,高い地下水面を形成した理由であろう.

5.3.2 花崗岩類の斜面における崩壊の特徴

今回の災害では、崩壊・土石流は花崗岩類の地域に特に多発している(3.2 節). 現地調査を実施した日光市芹沢地区付近の花崗岩類は、角閃石や黒雲母が含まれる花崗閃緑岩的組成を示すと考えられる. 2 斜面のみの調査結果ではあるが、それぞれ崩壊形

状や土層構造が異なっていた(5.3.1節). すなわち, G₂-1 崩壊は、山腹斜面で発生した主に花崗岩類の 原位置風化土層の表層崩壊であった. 崩壊時の地下 水位は、すべり面と地表面の中間以下だったと推定 された. 一方, G₂-2 崩壊は, 0 次谷で発生した谷底 堆積物の浅層崩壊であり、花崗岩類の風化土とテフ ラ起源と考えられる黒ボク土が混ざった土層であっ た. 崩壊時には地下水面が地表面にほぼ到達してい たと推定された. 0次谷は集水しやすく平常時から 水分が多いため、また黒ボク混ざりの透水性の低い 土層であるため, 山腹崩壊よりも高い地下水面が形 成された可能性がある.また、図3Aを見る限り、 図内には大規模崩壊はほとんど存在しない. 降雨と 崩壊の関係については、日光市芹沢地区では短時間 (1~3時間)とやや長時間(6~12時間)の雨量の 両方が集中した時刻に崩壊・土石流が発生した(4.4 節).

6. 花崗岩類の地域における土石流到達流域の形状特性と雨量との関係

若月・石澤(2010),若月ほか(2017)は、山地小流域の流域出口に土石流が到達することによって甚大な人的・物的被害が発生するという観点から、計11地域において、流域出口への土石流到達の有無と流域地形量との関係を検討し、流域出口に土石流が到達する地形的閾値(以下、土石流到達閾値)を求め、地質や雨量との関係を検討した。本報でも、日光市

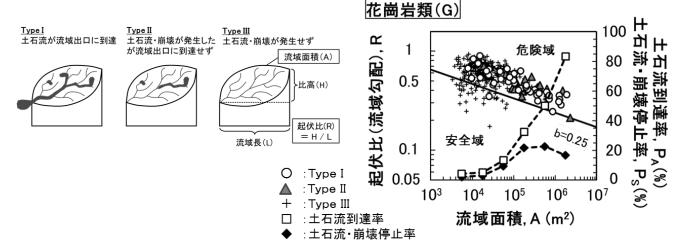


図 24 (左) 土砂移動形態と流域地形量の定義, (右) 土砂移動形態ごとの流域面積と起伏比の関係, 土石流到達率と土石流・ 崩壊停止率の流域面積との関係, および土石流到達閾値(実線)

Fig. 24 Types of sediment movements and drainage-basin geometry (left), The relationship between the drainage area (A) and the relief ratio (R) based on the type of sediment movement, the ratio of debris flow reaching the basin outlet, the stop ratio of debris flow and slope failure in the basin, and the geomorphic threshold for the debris-flow arrival (solid line) (right).

芹沢地区付近の花崗岩類の地域における土石流到達 閾値について検討する.

6.1 方法

小流域は、約 0.001 km² (1,000 m²) から約 5 km² までの面積であり、流域出口が生活の場である道路・住宅地・農地に面するように設定した(図 6 右).流域地形量としては流域面積と起伏比を計測した.起伏比は流域の比高を流域最大長で除した値である(図 24 左). ESRI 社の ArcGIS を用いて、国土地理院作成の 10 m メッシュ数値標高モデル (DEM) から流域ポリゴンを作成し、独自開発した土石流危険度評価設定ツール (DFR_TOOL) を使用して各地形量を計測した.

図 24 左に示すように、土砂移動のタイプによって各小流域は 3 タイプに分けることができる. 災害発生の観点からは土石流が流域出口に到達する Type I を評価することが重要である. Type I の分布の下限を示す地形的な閾値を表す直線、すなわち土石流到達閾値は流域面積 $A(m^2)$ と起伏比 R を用いた以下の式で示される(若月・石澤、2010).

$$\log_{10} R = a \times \log_{10} A + b \tag{6}$$

ここで、 $a \ge b$ は係数である。若月ほか (2017) は、地質や雨量に関係なく、a 値は -0.145 と見なして良いと指摘している。本報でもこの値を使用して、b 値のみを変化させて、土石流到達閾値を設定した(図 24 右の実線)。

また、任意の流域面積区間における危険側の流域数 (N_D) に占める Type I の流域数 (N_1) の割合を土石流到達率 (P_A) と呼び (若月ほか、2007)、 N_D に占める Type II の流域数 (N_2) の割合を土石流・崩壊停止率 (P_S) と呼ぶことにする. P_A と P_S はそれぞれ以下の式で表わされ、10 の 0.5 乗ごとの流域面積区間について計算した.

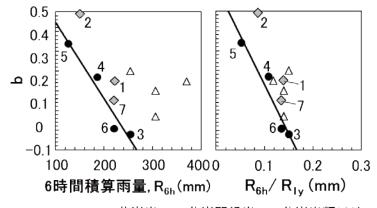
$$P_A = \frac{N_1}{N_D} \times 100 \,(\%) \tag{7}$$

$$P_S = \frac{N_2}{N_D} \times 100 \,(\%) \tag{8}$$

6.2 結果

土石流到達流域の形状特性

小流域の流域面積 A と起伏比 R との関係図(以下, A-R 図と呼ぶ)を図 24 右に示す。実線で示す土石流到達閾値に関しては、本災害においても、設定した a 値によって Type I の下限値の傾きをうまく示すことができている。b 値は 0.25 となった。また、Type I,Type II,Type II,Type II(の順に流域面積と起伏比が大きい傾向があり、かつ流域面積が増加するほど土石流到達率が高くなって、災害の危険性が大きくなることがわかる(図 24 右)。これらは、他災害の事例(若月ほか、2017)と同じ結果である。土石流・崩壊が発生したが流域出口に到達しなかった流域の割合を示す土石流・崩壊停止率は、流域面積の増大とともに増加するが、 10^6 m² 以上の土石流到達率が高い領域では若干小さくなる。



●: 花崗岩, ◆: 花崗閃緑岩, △: 花崗岩類以外

図25 (左)6時間積算雨量とb値の関係,(右)6時間積算雨量÷年平均降水量の値とb値の関係.実線は花崗岩地域の一次回帰直線であり、1~7は表3の地質番号に対応している.

Fig. 25 The relationship between 6 h rainfall and b-values (left), the relationship between 6 h rainfall divided by annual rainfall and b-values (right). The points labeled 1 to 7 correspond to the data in **Table 3**. The solid lines are fitting lines for granite slopes.

土石流到達閾値と雨量の関係

図 25 は、若月ほか (2017) が様々な地域の b 値と雨量指標値をプロットしたものに、本研究のデータと 2015 年 7 月 20 日に群馬県みなかみ町の谷川岳から流れる西黒石沢で発生した土石流のデータを追加したものである。雨量指標値の元データは、各災害において最も激しい降雨を記録した雨量計の値であり、本災害については中三依のデータである (表3,みなかみ町と各花崗岩地域のデータも併記している)。また、花崗岩類以外に含まれる地質は、花崗斑岩、変成岩・堆積岩、火山岩・溶岩、トーナル岩である。雨量指標値は 6 時間雨量 (R_6) と 6 時間雨量 ÷年平均降水量 (R_6 / R_{1y}) であり、これらの指標値は花崗岩地域の b 値と相関が良いことが明らかになっている (図 25 の両図の実線は花崗岩地域の一次回帰直線)。

本災害の花崗岩類 (図 25 の 1) は、5.3.1 (1) 節で述べたように、花崗閃緑岩に近い組成をもつ花崗岩類であると考えられる。みなかみ町 (2) と防府市 (7) にも花崗閃緑岩地域が存在する。これら 3 地域のプロットは花崗岩地域の各災害 (2014 年広島市 (3)・2014 年岩国市 (4)・2014 年南木曽町 (5)・2009 年防府市 (6) の各災害) の回帰直線よりも若干右上側に位置する。すなわち、6時間積算雨量が同程度であれば、花崗岩閃緑岩地域は花崗岩地域よりも b 値が大きくなり、土石流が流域出口まで到達しにくいことを示している。一方、免疫性の影響を考慮した雨量指標値である R_{6h}/R_{1y} を用いた場合には、図 24 右に示すように、花崗岩類以外の各プロットは花崗岩の回帰直線に近づく。

なお、本地域の花崗岩類の土層には、テフラ起源の黒ボク土が混ざっている場合があり、そのため浸透能の低下や粘着力の増大によって崩壊や土石流を発生しにくくしている可能性があるので、より詳細な検討が必要である.

7. まとめ

本報では、平成27(2015)年9月の台風17号と18号による関東・東北豪雨による土砂災害に対して、土砂移動分布図を作成して、降雨や地質との関係を検討するとともに、鹿沼市と日光市の数カ所で斜面変動と河岸侵食による被害状況の調査を行ない、斜面変動については災害時の雨量を整理した。また、

崩壊地の形状・土層物性・斜面安定性など斜面崩壊の特徴や、土石流到達流域の形状特性と雨量との関係を検討した。主な結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 斜面変動の分布と雨量・地質を比較することにより、降雨量が多い場所で斜面変動が多い傾向があることがわかった。また、花崗岩類の地域で斜面変動が最も多く発生し、火山岩類の地域も多く、堆積岩類の地域でも発生していたが、判読範囲の南半分を占める鹿沼市・日光市南部などにおける斜面変動は主に基盤地質を覆う関東ロームが崩れていた。
- (2) 鹿沼市日吉町,鹿沼市油田町,日光市岩崎地区の斜面崩壊は関東ロームで発生し,それぞれ浅層崩壊,表層崩壊,大規模崩壊と崩壊規模が異なっていた.崩壊発生時刻と6~24時間の積算雨量の最大値が概ね一致しており,比較的長時間の積算雨量が崩壊発生に寄与した可能性がある.

日光市岩崎地区の大規模斜面崩壊のすべり面は、軽石層と礫混ざり運積土により構成されていた. 土層物性を用いた斜面安定解析の結果、すべり面が飽和して強度低下して地下水面がわずかでも形成された場合に、崩壊が発生すると推定された. 崩土は平均勾配約1.65°というかなり緩勾配の流路を約1.7kmも流下した.

(3) 日光市芹沢地区では、土石流・崩壊は花崗岩類 の地域で集中しており、短時間 (1~3時間) とやや 長時間(6~12時間)の雨量の両方がほぼ最大となっ た時刻に崩壊・土石流が発生した. この地域の花崗 岩類は、角閃石や黒雲母が含まれる花崗閃緑岩的組 成を示すと考えられる. 山腹斜面の崩壊は、主に花 崗岩類の原位置風化土層の表層崩壊であった. 土層 物性を用いた斜面安定解析の結果, 崩壊時の地下水 面は、すべり面と地表面の中間以下だった可能性が ある. 一方、土石流源頭部の崩壊は、0 次谷の谷底 堆積物の浅層崩壊であり、谷底堆積物の土層は、花 崗岩類の風化土とテフラ起源と考えられる黒ボク土 が混ざっていた. 崩壊時には地下水面が地表面にほ ぼ到達していたと推定された. また, 小流域の形状 と雨量との関係から,本地域は他の花崗岩地域(2014 年広島市・2014年岩国市・2014年南木曽町・2009 年防府市の各災害)と比較すると、同程度の降雨で は土石流が流域出口まで若干到達しにくい地質・地 盤をもつと考えられた.

参考文献

- 1) 国土交通省(2015a): 台風 18 号の大雨による 日光市芹沢地区における土石流災害(平成 27 年 9 月 15 日 時 点), 1p. (URL: http://www.ktr. mlit.go.jp/ktr_content/content/000631912.pdf, 2015.9.20 閲覧)
- 2) 国土交通省 (2015b): 栃木県日光市芹沢で同時多発的に発生した土石流災害の被害及び対応状況に関する資料 (平成27年10月2日時点), 11p. (URL: http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h27dosha/151007_serisawa_nikko_dosekiryu_taiou4.pdf, 2017.4.18 閲覧)
- 3) 国土交通省(2016), 平成27年の土砂災害, 27pp. (URL: http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/ h27dosha/H27_dosyasaigai.pdf, 2017.4.18 閲覧)
- 4) 落合博貴・櫻井正明・若井明彦・蔡 飛・林 一成(2016): 平成27年9月関東・東北豪雨による栃木県内の土砂災害調査報告. 日本地すべり学会誌, **53**-3, 105-108.
- Skempton, A.W. and DeLory, F.A. (1957): Stability of natural slopes in London Clay. Proceedings of the 4th International Conference Soil Mechanics and

- Foundation Engineering, London, 2, 378-381.
- 6) 栃木県 (2015): 平成 27 年 9 月 関東・東北豪雨 による被害について(第 25 報).
- 7) 若月 強・石澤岳昂 (2010): 花崗岩山地における土石流発生流域の地形的特徴 2009 年 7 月 防府市・山口市豪雨災害の事例 . 地形, **31**, 423-436.
- 8) 若月 強・佐藤昌人・菊池輝海・石川美樹・山 岸千鶴・山下久美子(2017): 土砂移動分布図を 利用した土石流到達流域の推定 - 降雨を考慮 した地形的閾値について - . 地すべり学会誌, 54-3, 13-24.
- 9) 若月 強(2018): 土砂移動データベース, 小司 禎教・三隅良平・中谷 剛編『都市における極端 気象の観測・予測・情報伝達』, 気象研究ノート, Vol.235, (印刷中).
- 10) 山元孝広 (2007): 宇都宮市宝積寺段丘で掘削された UT05 コアの層序記載と鬼怒川の堆積侵食履歴. 地質調査研究報告, 57, 217-228.

(2017年9月29日原稿受付, 2017年12月28日改稿受付, 2017年12月28日原稿受理)

要旨

平成 27 (2015) 年9月の関東・東北豪雨によって、栃木県内の鬼怒川中~上流域や思川流域では、9月9日~10日に多数の斜面崩壊や土石流が発生した。土砂移動分布図の作成、崩壊地や河岸侵食の現地調査、土石流到達流域の地形解析を実施した結果、以下が明らかになった。花崗岩類の地域で斜面変動が最も多く発生し、火山岩類の地域も多く、堆積岩類の地域でも発生した。ただし、鹿沼市・日光市南部などの斜面変動は主に関東ロームが崩壊物質であった。関東ロームの斜面崩壊のタイプは表層崩壊・浅層崩壊・大規模崩壊であり、いずれも6~24時間程度の比較的長時間の積算雨量が最大値になった時刻に発生した。日光市岩崎地区のローム層の大規模斜面崩壊のすべり面は、軽石層と礫混ざり運積土により構成されている。斜面安定解析の結果、すべり面が飽和して強度低下して地下水面がわずかでも形成された場合に、崩壊が発生することが推定された。一方、日光市芹沢地区の花崗岩類の地域での崩壊・土石流は、短時間(1~3時間)とやや長時間(6~12時間)の積算雨量の両方がほぼ最大値になった時刻に発生した。山腹斜面の崩壊は、主に花崗岩類の原位置風化土層の表層崩壊であるが、土石流源頭部の崩壊は0次谷の黒ボク混ざりの谷底堆積物の浅層崩壊であった。また、流域地形解析から、既往災害の花崗岩地域よりも、土石流が流域出口まで到達しにくいという結果になった。その他、鹿沼市御成橋町とさくら市早乙女の河岸侵食の発生時刻を明らかにした。

キーワード:斜面崩壊, 土石流, 積算雨量, 花崗岩類, 関東ローム, 地形解析