1949 年今市地震による崩壊性地すべりの実態

千木良雅弘¹•鈴木毅彦²•王 功輝³

¹深田地質研究所 ²東京都立大学都市環境学部 ³京都大学防災研究所

Collapsing landslides induced by the 1949 Imaichi earthquake

CHIGIRA Masahiro¹, SUZUKI Takehiko², WANG Gonghui³

¹Fukada Geological Institute ² Department of Geography, Tokyo Metropolitan University ³ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

要旨:1949年今市地震によって発生した崩壊性地すべりの実態を航空レーザー計測と現地調査に よって明らかにした.これらの地すべりは、降下火砕物の地すべりで、主に2つの層準をすべり 面として発生した.すなわち、地表から深さほぼ2mから2.5mの今市軽石基底、および、約5 mの深さにある小川火山角礫層上部である.これらのほかに4.4万年前の鹿沼軽石層をすべり層 としたものもあった可能性があるが、明確ではない.緩傾斜斜面では1949年に発生した地すべ りとして17個の地すべりが判読され、もっと古い地すべりも40個判読された.急斜面で1949 年に発生したものは、141個判読された.以上のように、1949年の崩壊と同様の形で、もっと古 いものが地形的に記録されていることから、降下火砕物の場合、大地震によって多数の斜面崩壊 が発生したとしても、斜面崩壊の免疫が得られるわけではないことが強く示唆される. キーワード:1949今市地震、降下火砕物、軽石、風化、地すべり

Abstract: Landslides induced by the 1949 Imaichi earthquake was investigated using Air-borne Laser Scanning and field survey. These landslides were of pyroclastic fall deposits and had two horizons for their sliding surfaces: the base of Imaichi Pumice in the depths of 2 to 2.5 m and the upper portion of Ogawa Lapilli in the depths of approximately 5 m. Some landslides could have their sliding surfaces in Kanuma Pumice of 32 ka below Ogawa Lapilli, but it is not certain. 1949 landslides on gentle slopes were identified as 17 in number and similar but older landslides were identified as 40 in number, which suggests that even after a big earthquake unstable pyroclastic fall deposits still remain to slide in future. 1949 landslides on steeper slopes were identified as 141 in number.

Keywords: 1949 Imaichi earthquake, pyroclastic fall deposits, pumice, weathering, landslide

1. はじめに

今市地震は, 1949 年 12 月 26 日に栃木県今市 市(現在の日光市)を震源とする内陸地震で, 8 時17分M6.2と8時24分M6.4の2つの連続的 な地震であった(Fig. 1)(宇佐美, 2003).この 地震によって、今市市南部の丘陵地で多数の斜面 崩壊が発生し、それによる死者は8名に上った.



Fig. 1 Index map of the study area. The basemap is from GIS Maps.

これらの斜面崩壊についてはいくつかの報告があ るが(Morimoto, 1950, 1951, 1957;小出, 1951), それらの分布性状や原因については十分には明ら かにされていない.Morimoto(1951)は,斜面 崩壊を軽石堆積物分布地の崩壊,斑状花こう岩分 布地の崩壊,そしてその他の落石などに分けて図 示した.それには,約 90 か所で軽石堆積物の崩 壊が示されている.しかしながら,論文中の地図 は,縮尺 10 万分の 1 で等高線間隔が 100m のも ので,正確な場所を特定するには使えないもので あった.小出(1951)は,いくつかの崩壊の特徴 を記述したが,図版に示されたわずかな事例を除 いて,この論文からは個々の崩壊地の位置を特定 することはできない.

調査地は、日光から今市の市街地の南に広が る丘陵地とその南側の山地であり(Fig. 2), Morimoto(1951)の軽石堆積物分布地に発生し たとされる崩壊の多発地である.丘陵地は、更新 世の岩屑なだれ堆積物からなり、その上をテフラ が覆っている(山元ほか,2000).その南側の山地 は、ジュラ紀の付加体および、それを貫く白亜紀 の花崗岩類からなる.この丘陵地の中を行川が西 から東, さらに南に向けて流下している. 震央は, Fig. 2 の鶏鳴山付近であった(宇佐美, 2003).

2. 調査方法

詳細地形を把握するために, 航空レーザー計 測を行った. 計測は, 2014 年 5 月 24 日に, 対地 高度 900 m, レーザー照射数 75 kHz, 照射密度 5.5/m² の条件で, 朝日航洋株式会社によって実施 された. このデータを用いて, 1 m メッシュの数 値標高データ (DEM) が作成された. この DEM を用い, QGIS3.14.1 を用いて地形判読および地 形解析を行った.

国土地理院の縮尺 2 万 5 千分の 1 地形図およ び、上記の 1m-DEM を用いて作成された任意の 縮尺の地形図を用いて地質踏査を実施し、火山灰 層序を組み立てた.

後述する野口, 沼内, および室瀬行川の崩壊 地では, 1949 年崩壊発生時の様子について, 現 地の住人に聞き取りを行った.

調査地において,動的簡易貫入試験機を用い た貫入試験および貫入サンプラーを用いた地中試 料採取を行った.この動的貫入試験器は,従来の 丸東製貫入試験器をさらに軽量化してポータブル にするために,戸邉 (2007)によって制作された ものであり,先端コーン直径 1.94 cm,先端角 60°のコーンを質量3 kgの重りの50 cm 落下に よって叩き,10 cm 貫入に要する打撃回数 (Nc) を測定するものである.急斜面など,作業性の悪 い場所での使用に適しており,地盤の強度を深さ 方向に連続的に調べるのに用いられている.これ を用いた試験結果と丸東製貫入試験器を用いた試 験結果とはほぼ同じであることが示されており (戸邉,2007),また,丸東製貫入試験の Nc 値

は、土研式簡易貫入試験の N10 値を通じて(若



Fig. 2 Locality map of the columnar sections. The background base map is from GIS Maps.

月ほか,2003),標準貫入試験のN値と関係付け られている.N10値とN値がほぼ同様だとする と,ここで得られたNc値の2倍から4倍の値を N値の第1近似的値と考えることができる.

貫入サンプラーは、外形 2 cm、内径 1.4 cm, 長さ 50 cm のチューブ状で、試料取り出し用に側 面に幅 0.7 cm のスリット状窓が開いている. こ のサンプラーを上記の簡易貫入試験機の先端に取 り付け、同じように質量 3 kg の重りの 50 cm 落 下によって地中に打ち込み、50 cm 貫入するごと に引き上げ、試料を採取した後、同様の作業を繰 り返す. 10 cm の貫入に要する打撃数を数えた. ただし、このサンプラーの場合、サンプラーの外 径が同じなので貫入深さの増加とともに周面の摩 擦は大きくなっていくことになる.

野外にて採取した試料を,株式会社リガク製

の MiniFlex600 を用いて X 線分析した. 測定条件 は、40 kV、15 mA、20 (2-60°)、scan step 0.02°、 scan rate 15°/min. 風化火砕物の場合、特にハロイ サイトのピーク位置は試料の乾燥の程度で変化す る場合があるので、試料は乾燥させず、すべて自 然含水状態ですりつぶしてホルダーにセットして 測定した.

崩壊地の地質構造を把握するために,後述の 沼内において高精度表面波探査を行った(Fig. 2). 探査においては,24 個の受振器(固有周波数: 4.5 Hz)を1mごとに配置し,移動式固定展開で 調査を実施した.こういった高精度表面波探査手 法により,地下12mまでの土層のS波速度 (Vs)を求めることができる.表面波探査を用 いた地盤構造調査に関するより詳細な情報につい ては,林ほか(2008)を参照のこと.

3. 結果

3.1 地質

3.1.1 層序

ここでは, 斜面崩壊に関与したテフラの分布 と特徴について述べる. テフラの名称は, 鈴木 (1990, 1993) に従う. テフラの柱状図を作成し た位置を Fig. 2 に, 柱状図を Fig. 3 に示す. 全体 のテフラを観察できた露頭は, Fig. 3 で 8 Interchange と記した位置にあり (Fig. 4), これに 沿って層序を記述する. 特徴的なテフラは, 下位 から上位に向けて, Nm-2 (行川第 2 軽石層),

Nm-1 (行川第1 軽石層), KP (鹿沼軽石層), Og (小川火山角礫層), IP (今市軽石層), SP (千 本桜軽石層) である. Nm-2, Nm-1, KP は, い ずれも赤城山起源(鈴木, 1990). Og, IP, SP は 男体山起源(関東ローム研究グループ, 1965)で ある. Nm-1 は厚さ 10 cm で深さ約7 m にあり、 その 30 cm 下に同様の軽石からなる Nm-2 (厚さ 10 cm) がある. 野口のボーリングでは, Nm-1 は、約8mの深さにある.両者ともに、直径0.5 ~1 cm の黄白色軽石からなり、やや粘土化して いる. KP は、白色粘土に変質した直径 1 cm 以 下の軽石からなり、深さ5.5 mから6 mにある. KP 直下の 10 cm 程度の範囲で KP の軽石が褐色 火山灰土と混合した層が認められる場合がある. Og は、砂から細礫サイズの石英や岩片を含む. 後述するように,一般的に白いグリース状の粘土 を伴う (Fig. 5). 厚さ 10 cm から 60 cm. 野口で は, Og 上部は砂質の火山灰. IP は, 直径1~3 cmの軽石からなり、厚さ50 cmから160 cmで、 特徴的に赤橙色をなすが、乾燥すると固くなり、 黄色味を帯びる. 下部では岩片が多く, 上部で発 泡程度が強い. IP の赤橙色の軽石は、指で容易 につぶして水を絞り出すことができるが、粘土質

ではない. 一方, IP の基底部が白色の粘土に変 質している場合がある. IP 直下の火山灰土最上 部で軽石と火山灰土とが混合したゾーンができて いる場合がある. SP は, IP の直上に載り, 直径 1~6 cm 程度の黄白色の固い軽石からなり, 厚さ 20 cm から 60 cm である.

テフラ層の年代は、Nm-1 は直下の大山倉吉テ フラの年代が 59.6 ± 5.5 ka (Albert et al., 2018) なので約 60 ka, KP は 44.2 ± 4.5 ka (青木ほか, 2008) である.

3.1.2 貫入抵抗プロファイル

Fig. 2 の野口とインターチェンジで行った動的 貫入試験結果を Fig. 6 に示す. Fig. 6 では Nc 値 プロファイルとともに地質柱状図を示したが、イ ンターチェンジの露頭個所は、背後の貫入試験を 行った位置から約2m離れているので、両者は 詳細には多少ずれている可能性がある. 野口では, 貫入試験孔の 50 cm 以内で貫入サンプリングした ことから、両者の深さはほぼ一致している.SP のNcは3から8, IPはそれよりも小さく1から 2, その後下方に漸増し, Og の上で再度低下し, Og でいったん増加したのちに再度低下し、その 後下方に向けて漸増する. その中で KP は Nc が 2から5と小さい.なお,野口の Og は,上部の 20 cm が砂質で下部 30 cm が細礫質で、上部の Nc 値は2と下部の8から10よりも小さい. なお, 前述したように、貫入サンプラーは貫入とともに 周面摩擦の影響が大きくなるはずであり、貫入に 伴って計数した打撃数のプロファイルはこの影響 を受けるはずである. ただし, 隣接孔で計数した Nc 値とサンプラー10 cm 貫入に要した打撃数の プロファイルはほぼ同様の傾向を示していた (Fig. 7). つまり, このような土質の場合, 貫入 サンプラーによる打撃数プロファイルを動的貫入



Fig. 3 Columnar sections of tephra in the study area. Numbers correspond to the numbers in Fig. 2.



Fig. 4 Typical outcrop of tephra in the study area. The location is shown in Fig. 2 as 8 Interchange.



Fig. 5 Ogawa lapilli with grease-like white precipitates of halloysite. The width of the photograph is 12 mm. Noguchi landslide site. These materials were sheared and accommodated a sliding surface during the 1949 earthquake.



Fig. 6 Nc profiles obtained by dynamic cone penetration tests at the sites of Interchange and Noguchi.

試験によるプロファイルに代用することもほぼ可 能である.

3.1.3 粘土鉱物

野口の貫入サンプラー試料,および土沢イン ターチェンジ露頭で採取した試料の X 線回折図 を Figs. 8,9 に示す.同定された風化二次鉱物は ハロイサイト及び 14 Å 粘土鉱物である. SP およ び赤橙色の IP には,これらの鉱物は含まれず, 28 度付近にブロードなピークが認められ,これ はアロフェンのピークと推定される. IP は,そ の基底で白色化していることがあり,この場合, アロフェンではなく,10 Å にピークを持つハロ イサイトが形成されていた.14 Å 粘土鉱物は, Og よりも下位の試料には KP を除くすべてに含 まれていた.これらの粘土鉱物の分布は,インタ ーチェンジ露頭の場合も同様であった.

X線回折ピークの強度を見ると、上述の2か所 ともに、ハロイサイトのピークは、深さ6mま で強く、それよりも深いところでは相対的に小さ くなっていた.そして、一方で14Å粘土鉱物の ピークが強くなっていた.この違いは、両者の生 成条件を反映している可能性がある.IPの下の 火山灰土にハロイサイトが形成されていること、 また、KPの上部が白色化してハロイサイトが形 成されていることは長沢(1978)によって指摘さ れ、これは上位から運ばれたシリカによってアロ フェンが再珪化を受けたためであると考えられて いる.

3.2 崩壊性地すべり

3.2.1 緩斜面の地すべり

1949 年の地震時に発生した地すべりと、それ よりも古い地すべりとが、詳細 DEM から作成し た地形表現図によって判読された(Fig. 10).



Fig. 7 Blow numbers for 10-cm penetration of a cone and a sampler by 50-cm freefall of 3 kg weight. The sampler is 50-cm long so circumference friction increases with penetration, but these two patterns are generally consistent.

1949 年の地すべりでは、地すべりの分離崖の縁 や堆積物表面がシャープな形をしていたのに対し て、古いと判断されるものでは、これらが丸みを 帯びていた(Fig. 11).これらの地すべりの内、 貫入サンプラーによる試料採取を含む詳細な調査 を実施したのは、野口(Table 1 と Fig. 10 の Id3),と沼内(Table 1 と Fig. 10 の Id1).また、古 い地すべりの内室瀬行川東(Table 1 と Fig. 10 の Id20)では、崩壊源の側部に道路のり面があり、 そこと崩壊源での掘削調査を行った.

野口(Table 1と Fig. 10の Id3)

ここは今市地震の2回目の地震ですべったこと が目撃されている.長さ・幅約200mの範囲が 北北東に向かってすべり,河道を閉塞し,天然ダ



Fig. 8 X-ray diffractograms for the samples from the Tsuchizawa interchange outcrop. SP (Shichihonzakura pumice) and the main part of IP (Imaichi pumice) have no clay minerals except for the broad peak of allophane around 27°, but white IP (discolored IP) is clayey and has halloysite. All the samples below IP have halloysite and the deeper ones have also 140 nm clay mineral.

Fig. 9 X-ray diffractograms for the samples obtained at Noguchi. IP has no clay minerals except for the broad peak of allophane around 27° .



Fig. 10 Landslide inventory map made by the interpretation of slope images from 1-m DEMs. The base image is an overlay of slope image and elevation image.



Fig. 11 Topographic image and a cross section at Noguchi. We see 1949 landslides and older landslides which have rounded topographic edges. Black circles in the cross section show the points where we found Ogawa lapilli below the thin veneer of debris. The 1949 landslide blocked a river and made a lake in the upper right. We see small ridges in the landslide deposits. ムと湖をつくった(Fig. 12a). すべり面は平滑で, 移動層はほとんどすべて滑り落ちて対岸に衝突し て停止した. 堆積物表面は小山の集合体のような 形態を示すことから,移動は地層が小規模なブロ ックに分離して生じたと推定される. 堆積域は, 現在は胸高直径 30 cm 程度の杉林になっており (Fig. 12b),航空レーザーによる地形イメージな しに現地でそれと同定するのは容易ではない.

冠頂で行った貫入採土によれば, 4.70 m まで SP, IP, および火山灰土からなり, 4.70 m から 5.25 m まで灰色シルト質火山灰土 (Og 上部), 5.25 mから 5.45 m まで火山礫 (Og 下部) である. その下は火山灰が 7.10 m まで続き,そこから 7.40 m まで白色軽石 (KP), 7.80 m まで火山灰土, 7.86 m まで砂質軽石 (Nm-1) である. 断面図に 黒丸で示した崩壊源内部の数か所で地表面を掘る と,地表面からわずか数 10 cm で Og が確認され た. このことから,すべり面は Og 上部のシルト 質火山灰に形成されたことがわかる. このシルト 質火山灰は Nc 値が最も低く,2 であった (Fig. 6). KP の Nc 値はその上下の火山灰土とであま り差がなかった. すべった地層の厚さは約 5 m

Table 1 Numerical data of landslides induced by the 1949 Imaichi earthquake and those before 1949. Id numbers correspond to those in Fig. 10.

1949 landslides					Landslides before 1949					
ld	Area (m²)	Mean slope (°)	Apparent friction angle (°)	Id	Area (m²)	Mean slope (°)	Id	Area (m²)	Mean slope (°)	
1	6116	12	7	1	992	29	21	8865	21	
2	2767	14	13	2	14932	28	22	27949	18	
3	55709	15	9	3	8187	12	23	23838	14	
4	6634	16	9	4	7023	20	24	5427	14	
5	3404	17	6	5	6367	27	25	8158	19	
6	5330	18	8	6	25199	19	26	4928	22	
7	2417	19	11	7	7162	23	27	20137	17	
8	5632	19	13	8	4206	13	28	2074	18	
9	6125	20	8	9	4886	18	29	2585	20	
10	2331	21	15	10	18975	26	30	11494	11	
11	1588	22	18	11	4129	17	31	5762	17	
12	1454	23	9	12	4075	13	32	3727	21	
13	5805	23	17	13	11135	15	33	13451	9	
14	3429	23	19	14	31395	15	34	6107	20	
15	1602	24	9	15	13646	22	35	4849	20	
16	685	25	20	16	21433	11	36	19911	17	
17	575	25	17	17	11310	20	37	26993	18	
Mean	6565	20	12	18	1079	19	38	8307	17	
				19	1534	16	39	5023	12	
				20	12092	14	40	50960	14	
							Mean	11758	18	



Fig. 12 Landslide dam lake and depositional area of the Noguchi landslide in 1949. a: landslide dam lake. b: depositional area covered by trees with approximately 30-cm diameter.

である.この崩壊による河道閉塞部の上下流では, 河川両側の急崖は高さ 5-6 m あるので,この地 すべり発生前に,すべる層は下部切断されていた と推定される.

沼内(Table 1と Fig. 10の Id1)

ここでは、幅・長さともに約 80 m の範囲が南 南東にすべり、下方の河道を閉塞し、対岸に衝突 して停止した(Fig. 13). 2 回目の地震で、人が 歩くような速さですべったことが目撃されている. 滑落上方の冠頂 1 ヵ所(NUC # 1)、地すべり地 内 2 か所(NUC # 2, 3)の合計 3 か所貫入採土 を行った(Fig. 13). その結果、冠頂では 4.9 m から 5.3 m まで灰色の小川火山礫、7.25 m から 7.45 m(孔底)まで白色軽石であった. この白色 軽石は固くしまっていて Nm-1 の可能性もあるが、 KP の可能性もある.

これらの火山礫と軽石は NUC#2 と NUC#3 に 連続し,それらを繋いだ線は平行である.このこ とと, NUC#3 では, Og の上位の層が著しく緩ん でいることから、すべり面は小川火山礫上面付近 にあると推定される.表面波探査の結果を断面図 に重ね合わせたものを Fig. 14 に示す.この図か らも、Vs が小さいのは Og よりも上の層であり、 すべり面が小川火山礫にあることが示唆される. この場合、すべった層の厚さは約 5 m である. すべり面の傾斜は8°. Table 1 にある崩壊源の平 均傾斜は 12°となっているが、これは崩壊源の 地表面傾斜の平均値であるので、断面図から求め たすべり面の傾斜の方が正確である.この地すべ りは、斜面下部の谷の対岸に衝突して停止したが、 地元での聞き取り調査からは、谷は十分に Og が 谷に露出する程度の深さであった、つまり、地震 前に地層の斜面下部切断があったと推定される.

鹿沼軽石層がすべり層となった場合

地すべりとして発生の記録もなく,また,地 形的には滑落崖などが明確ではないが,地質構造 から,明らかに鹿沼軽石がすべり層となり,そこ から上の層がすべった事例があった (Fig. 15).



Fig. 13 Topographic image and cross section of the Numauchi landslide. The sliding surface is inferred to be along the Ogawa lapilli.



Fig. 14 Overlay of a cross section and the S-wave velocity profiles obtained by surface wave prospecting. The prospecting lines are approximately normal to the cross section and cross the section at lines A and B, where we can compare the velocities and the geology.

Fig. 15の人の右足は Nm-1の上に載り、人の腰の 部分に火炎状に変形した KP がある(Fig. 15挿入 写真). 地層はほとんど水平. KP の形状から, この地すべりは, KP の一種の液状化を伴ったも ので,やはり過去の地震によって発生したもので あると推定される.ただし,この場合の液状化は, 砂の液状化のように粒子の噛み合いが失われて生 じる液状化ではなく,粘土化した軽石粒子が破壊 されて軽石に含まれていた水分とともにスラリー 状になるような現象であったと推定される.

室瀬東(Table 1, Fig. 10 の Id20)

ここでは、明瞭な地すべりの地形が残存して いるが、滑落崖は少し丸みを帯びる(Fig. 16). また、1949年の地すべりの時にはこの斜面の下 方の行川には土砂が落ちなかったようであること から(証言)、これはそれ以前の古い崩壊である と推定される.すべり面と見られる面は平滑で、 おそらく移動物質はほとんどすべて滑り落ちたと 思われる.崩壊の西に隣接する不動域沿いの道路 切り取り斜面には、地表から黒土70 cm、七本桜 軽石 45 cm、今市軽石 1 m 以上が露出しており、 この崩壊斜面もそれに覆われていたと推定される. 一方、崩壊地内で掘削および貫入採土を行った結 果, 地表から約 50 cm 黒土があり, その下に 1 cmから5cmの厚さの今市軽石があり、その下は 火山灰土であった. したがって、この崩壊はおそ らく今市軽石基底付近にすべり面を持つ地すべり であったと判断される。崩壊地内の地表面傾斜は 9°であり、これはすべり面と平行であると推定さ れる. この斜面の 400 m 東では、今市軽石層 (IP) の厚さが 130 cm, 七本桜軽石層 (SP) が 30 cm, 黒土が 40 cm であった. 今市軽石の厚さ が、この崩壊地と同じであるとすると、ここです べった地層の厚さは合計 70 + 45 + 130 ≅ 240 cm であることになる.

3.2.2 急斜面の浅い地すべり

浅い地すべりは地形的には明瞭に認められない 場合が多いが、小出(1951)の残した記録と 1m-



Fig. 15 Landslide with a sliding zone in KP. KP bed was deformed to form a flame structure (inset) and the beds on it slid and rotated. This flame structure is presumably due to the "liquefaction" of KP induced by an earthquake. The location of this outcrop is at the rim of old landslide #14 shown in Fig. 11. The topography suggests that this landslide is from the back to the front of this outcrop.



Fig. 16 Topographic image and cross sections of old landslide #20 in Fig. 10. The sliding surface was made at the base of Imaichi pumice (IP). The outline of this landslide is rounded, which suggests that this landslide is before the 1949 earthquake.

DEM から作成した地形イメージとを比較した結 果,これらの崩壊の位置を特定することができた.

明神西 (Figs. 10, 17)

谷には基盤岩の花崗斑岩が露出,あるいは, その岩片が多く認められた.基盤の谷上部の急斜 面(傾斜 35 度~40 度)に,今市軽石が載り,そ の内部にすべり面ができて,そこから上がすべっ た.尾根には点々と花崗斑岩が露出し,テフラは 残っていない.急斜面を横断する道路法面には, 基盤の上の崖錐堆積物の上に今市軽石が残存して いる(Fig. 17). Fig. 17c は傾斜 37°の浅い谷. (傾斜 23°と緩い尾根の下には鹿沼軽石と行川第
1,第2が残存している部分もあったが、傾斜
35°から 40°の谷には認められなかった.また、このような急斜面には SP もなかった.

この近くの上板橋と十石坂での,黒土と SP の 厚さは,それぞれ 80 cm と 70 cm,今市軽石の厚 さは 115 cm と 130 cm. 急斜面にもこれと同じ厚 さで堆積したとすると,今市基底から上の地層の 厚さは,195 cm と 200 cm. つまり,約2 m の厚 さのテフラが滑り落ちたことになる.

室瀬行川(Figs. 10, 18)

小出(1951)によれば,1949年今市地震の時 に、ここが最も斜面崩壊被害が大きかったと報告 されており、その対岸の家で話を伺った.ここで は4名が死亡し、もっと上流で女子小学生が1名 死亡.被害は行川右岸側がひどかった.ここから 下流では、少なくとも本流に土砂が大量に出るよ うな崩壊はなかった模様である.

崩壊源は谷の上部の凹部(小出の報告書にも そう記述されている). 40 度以上の急斜面には花 崗斑岩が露出. 凹部では,基盤の上の花崗斑岩の 崩積土とロームの上に 10 cm から 40 cm の IP が 残存していた. このことから IP 下部にすべり面 ができて,そこから上の土砂が崩壊し,谷にあっ た崩積土を巻き込んで流下したものと判断される. IP は,一部で白色・粘土化しており,それには ハロイサイトが検出された. SP の露頭は見られ なかったが,堆積物の中には SP のブロックも含 まれていた. 谷の傾斜は上部で約 40 度,谷の平 均傾斜は 27 度,最も高標高にある崩壊地の頂部 から堆積域の末端まで流下経路沿いに距離を計測 して見かけの摩擦角を計算したところ, 16 度で あった.



Fig. 17 Landslides and outcrops in the west of Myojin. a: Slope image. b: A part of attachment figure 3 of Koide (1951). c: Enlarged image of the square in a. Imaichi pumice, which should have covered the whole slope, is partially remaining at the foot of the source area. This suggests that the sliding surface was made at the base of the Imaichi pumice and the overlying beds slid during the 1949 earthquake.



Fig. 18 Landslides and outcrops in Murose Namegawa. a: Slope image. b: Landslides. c: Outcrops in the square area in a. We see Imaichi pumice that remained on the bedrock of granite porphyry. Sliding surface was probably made in the lower portion of IP and the beds on it slid down, burying the valley bottom with 4 fatalities.

4. 考察

4.1 地すべり層準

3.2 節で述べたように、1949 年今市地震による 崩壊性地すべりのすべり面は、IP 基底部、Og に あるものが確認された. 急斜面に発生した地すべ りで地質が確認されたものは、IP 基底部にすべ り面をもち、そこから上の地層が滑り落ちた. IP は一般的に赤橙色をしていて、その場合には粘土 鉱物は形成されていなかったが、IPの基底部は、 しばしば白色粘土化してハロイサイトに富む場合 があった. この白色粘土化が地すべりの原因であ った可能性もあるが、いまだに不明確である. Og にすべり面を持つ地すべりは、野口と沼内の 2 か所で確認された. Og は、石英を特徴的に含 む火山礫であり、構成粒子自体は硬質のため、 KP のように軽石粒子が破壊して液状化するよう な現象は起こさないと推定される. しかしながら、 粒子の間をグリース状のハロイサイトが充填して おり、グリースの入ったボールベアリングのよう な現象が起こった可能性がある. また、1949 年 今市地震以前の地すべりでは、KP が液状化して 上の地層が滑ったと推定されるものがあった.

前述したように, KP は赤城山起源, IP, Og は 男体山起源とされており, KP と IP の分布は町 田・新井 (2003) に示されている. Og の分布は 図示されたものはないが,本調査地域では当方に 薄くなることから,本調査域から,その西縁から 13 km 西北西にある男体山の間で厚いものと考え られる.

従来、降下火砕物の地震時崩壊性地すべりは 多数報告されている(Chigira and Suzuki, 2016; 千 木良、2018). これらのすべり面の多くは風化軽石 層あるいはその直下の火山灰土に形成されていた. 本報告の IP 基底および KP にすべり面を持つ地 すべりは、これらと同様である. しかしながら、 Og のような火山礫にすべり面の形成された例は 従来報告されていない. Og に含まれる白色グリ ース状のハロイサイトは, IPやKPのような軽石 が変質して形成されたものではなく、その産状か ら推定して、火山礫の間隙に沈殿したものである. おそらく, Og よりも上の地層を雨水が浸透する 間に Si と Al を溶脱し, Og の大間隙中に止まり, ハロイサイトを沈殿させたものと推定される.本 調査域には、全域にわたって地表付近に厚さ30 cm から1 m の黒土が分布しており、それに起因 する腐食酸がこれらの溶脱にかかわった可能性が ある. KP の軽石は園芸用に一般的に用いられる もので、これらは、本調査地域のように粘土質に

風化してはいない. つまり, KP が広域的に地震 に対して弱いわけではない. しかしながら, 未風 化の KP 直下の火山灰土に地震時にすべり面が形 成される場合もあったことから(2011 年東北地 方太平洋沖地震時の栃木県那珂川町押野, 千木良 未公表データ), KP の分布域が地震に対して要 注意地域であることはかわらない.

4.2 地すべりの面積, 傾斜

1m-DEM から作成した傾斜図を用いて,1949 年の崩壊性地すべりの輪郭を判読し,その水平面 への投影面積を計算し,さらに,崩壊地内の地表 面傾斜角の平均値を求めた.それを Fig.19 と Table 2 に示す.

4.2.1 緩斜面の地すべり

1949年の緩斜面の地すべりは、傾斜10度から 25 度の斜面で発生しており、平均値は 20 度であ った. それ以前の地すべりは、傾斜 9 度から 29 度の斜面で発生し、平均値は 18 度であった. つ まり,両者とも同様の緩斜面で発生したことがわ かる.このように緩傾斜の斜面で発生することは, 降下火砕物の地震時法崩壊性地すべりの特徴であ る (Chigira, 2014). 面積についてみると, 1949 年の地すべりでは、野口の地すべりが飛びぬけて 大きく, 55700 m², 平均的には 6570 m² である. 仮に野口と沼内の地すべりと同様に約5mの厚 さの地層が滑ったとすると、平均的には、33000 m³の土砂が生産されたことになる.また,野口 の地すべりの厚さが 5.3 m とすると、体積は 295000 m³であったと推定される. 1949 年よりも 前の地すべりでは、1949年の場合よりももっと 大きな面積のものが多く認められたが、これらは 複数の地すべりを一つのものとみなしている場合 もあるためであると考えられる.



Fig. 19 Areas and slope angles of the source areas of landslides and apparent friction angles of landslides occurred during the 1949 Imaichi earthquake and before this earthquake. (a) to (e): on gentle slopes. (f) and (g): on steep slopes.

1949 年の緩斜面の地すべりの多くでは、堆積 物を地表形態から認定できたため、地形断面図を 描き、見かけの摩擦角を計測した.その結果、7 度から 20 度であり、平均値は 12 度と小さかった. これは、地すべりの流動性が非常に高かったこと を示している.

4.2.2 急斜面の地すべり

急斜面の地すべりの面積は,141 個判読された. 斜面単位が小さいこともあり,比較的小規模で 5500 m²以下,平均1590 m³であった.崩壊源の 平均傾斜角は,17 度から48 度,平均37 度であ った.

4.3 地震時地すべりの免疫性

3.2 節で述べたように、1m-DEM から作成した 地形イメージ判読の結果では、1949 年の地震時 崩壊に類似した形態でもっと古い崩壊地が多数存 在していた.これらの古い崩壊地は、1949 年の ものと同様に緩傾斜の斜面で発生し、テフラが滑 ったものである.このことから、これらの崩壊地 は、1949 年よりも前の地震で発生したものであ ると推定される.言い換えれば、1949 年よりも 前の地震で不安定な斜面がすべてすべったのでは なく、後の地震時にすべる領域も残存していたこ とになる.つまり、降下火砕物の地震時地すべり の免疫性は得られていなかったことになる.これ

1949 landslides				Landslides before 1949					
ld	Area (m²)	Mean slope (°)	Apparent friction angle (°)	ld	Area (m²)	Mean slope (°)	ld	Area (m²)	Mean slope (°)
1	6116	12	7	1	992	29	21	8865	21
2	2767	14	13	2	14932	28	22	27949	18
3	55709	15	9	3	8187	12	23	23838	14
4	6634	16	9	4	7023	20	24	5427	14
5	3404	17	6	5	6367	27	25	8158	19
6	5330	18	8	6	25199	19	26	4928	22
7	2417	19	11	7	7162	23	27	20137	17
8	5632	19	13	8	4206	13	28	2074	18
9	6125	20	8	9	4886	18	29	2585	20
10	2331	21	15	10	18975	26	30	11494	11
11	1588	22	18	11	4129	17	31	5762	17
12	1454	23	9	12	4075	13	32	3727	21
13	5805	23	17	13	11135	15	33	13451	9
14	3429	23	19	14	31395	15	34	6107	20
15	1602	24	9	15	13646	22	35	4849	20
16	685	25	20	16	21433	11	36	19911	17
17	575	25	17	17	11310	20	37	26993	18
Mean	6565	20	12	18	1079	19	38	8307	17
				19	1534	16	39	5023	12
				20	12092	14	40	50960	14
							Mean	11758	18

Table 2 Numerical data of landslides induced by the 1949 Imaichi earthquake and those before 1949. Id numbers correspond to those in Fig. 10.

と似た事例は、1968 年十勝沖地震による八戸周 辺の崩壊性地すべりでも認められている(Ling et al., 2019).

5. おわりに

1949 年今市地震発生から約 65 年経過した後, 航空レーザー計測を行い,樹林に覆われた地域で 地震時の崩壊性地すべりを明瞭にとらえ,その地 形分析および地質調査を行った.作成した 1m-DEM から傾斜図を作成した結果,緩傾斜面で発 生した深さ数 m の地すべりが,崩壊源および崩 壊堆積物共に鮮明に残っていることが確認された. また,これらは平均 12 度と小さな見かけ摩擦角 を有しており,高い流動性を持っていたことも認 められた. 1949 年の緩傾斜面の崩壊性地すべり と似た地形で,角の丸くなった地形も多数認めら れ,これらは,1949 年以前に地震で発生したも のと推定される.すなわち,この地域では,2 回 以上の地震によって場所を変えて同様の崩壊性地 すべりが発生してきたことがわかった.つまり, このような地震時地すべりの危険性は容易には下 がらないものと考えられる.1949 年の地震で急 斜面で発生したものは,崩壊地形の保存状態があ まりよくなく,発生当時の記録と比較してようや く認められる程度であった.これらの地すべりの すべり面は,小川火山角礫層,今市軽石基底に形 成されたものが確認された.また,地質構造から 鹿沼軽石層にすべり面を持つ地すべりもかつて発 生したことが認められた.これらのテフラは地震 時の地すべりに対して要注意であるといえる.

謝辞

本研究の主要部は、千木良が京都大学防災研 究所に在職中に実施したものである.本研究は、 文部科学省による「災害の軽減に貢献するための 地震火山観測研究計画」の支援を受けた.また、 科学研究費助成金 26282102 (研究代表者千木 良)を使用した.地形分析には、朝日航洋株式会 社が実施した航空レーザー計測による 1m-DEM を使用した.X線分析にあたっては、平田康人氏 (現所属一般財団法人電力中央研究所)の協力を 受けた.また、野外における飛田哲男氏(現所属 関西大学)との議論は有益であった.

文献

- Albert, P., Smith, V., Suzuki, T., Tomlinson, E., Nakagawa, T., McLean, D., Yamada, M., Staff, R., Schlolaut, G., Takemura, K., Nagahashi, Y., Kimura, J. and Suigetsu 2006 Project Members (2018): Constraints on the frequency and dispersal of explosive eruptions at Sambe and Daisen volcanoes (South-West Japan Arc) from the distal Lake Suigetsu record (SG06 core). *Earth-Science Reviews*, **185**, 1004–1028.
- 青木かおり・入野智久・大場忠道 (2008): 鹿島 沖海底コア MD01-2421 の後期更新世テフラ層

序. 第四紀研究, 47, 391-407.

- Chigira, M. (2014): Geological and geomorphological features of deep-seated catastrophic landslides in tectonically active regions of Asia and implications for hazard mapping. *Episodes*, **37**, 284–294.
- 千木良雅弘(2018):災害地質学ノート.近未来 社,246p.
- Chigira, M. and Suzuki, T. (2016): Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits. *In* Aversa, S., Cascini, L., Picarelli, L. & Scavia, C., eds., *Landslides and Engineered Slopes*. *Experience, Theory and Practice*, Associone Geotecnica Italiana, Rome, 93–100.
- 林 宏一・平出 務・飯場正紀・稲崎富士・高橋 広人(2008):表面波探査と微動アレイ探査に よる石川県穴水町中心部の地盤構造調査.物 理探査,61,483-498.
- 小出 博(1951):災害の研究(1950年の山地災 害を中心として).治山事業参考資料 Ⅲ,林 野庁, 1–75.
- Ling, S. and Chigira, M. (2020): Characteristics and triggers of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits: An example from Hachinohe during the 1968 M7.9 tokachi-Oki earthquake, Japan. *Engineering Geology*, **264**, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105301.
- 町田 洋・新井房夫(2003):新編火山灰アトラ ス 日本列島とその周辺.東京大学出版会, 336p.
- Morimoto, R. (1950): Geology of Imaichi District with special reference to the earthquakes of Dec. 26th., 1949. (I). *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 28, 379–386.

- Morimoto, R. (1951): Geology of Imaichi District with special reference to the earthquakes of Dec. 26th., 1949. (II). Bulletin of the Earthquake Research Institute, 29, 349–358.
- Morimoto, R. (1957): Geology of Imaichi District with special reference to the earthquakes of Dec. 26th., 1949. (III). Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35, 359–374.
- 長沢敬之助(1978):北関東における火山砕屑物 の風化に関する一事実.粘土化学,18,68–71.
- 鈴木毅彦(1990): テフロクロノロジーからみた 赤城火山最近 20 万年間の噴火史.地学雑誌,
- **99**, 182–197, doi: 10.5026/jgeography.99.182. 鈴木毅彦(1993):北関東那須野原周辺に分布す

る指標テフラ層.地学雑誌, 102, 73-90.

- 戸邊隼人(2007):風化花崗岩類の表層崩壊と風 化様式,および岩石組織との関係について. 京都大学大学院理学研究科,地球惑星科学専 攻,学位論文.
- 宇佐美龍夫(2003):最新版日本被害地震総覧. 東京大学出版会,728p.
- 若月 強・佐々木良宜・松倉公憲(2003): 粒度 組成の異なる地盤における土研式と筑波丸東 製の簡易貫入試験計測値の比較. 筑波大学陸 域環境研究センター報告, 4, 135–140.
- 山元孝広・滝沢文教・高橋 浩・久保和也・駒澤 正夫・広島俊男・須藤定久(2000):20 万分 の1地質図幅「日光」,地質調査所.