

Geological causes of the landslide of an embankment at the Aizome River, Atami

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2023-01-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 千木良, 雅弘, 北村, 晃寿, 木村, 克己, 市村, 康治 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00029321

熱海市逢初川盛土崩壊の地質的原因について

千木良雅弘^{1,2}・北村晃寿^{2,3}・木村克己¹・市村康治⁴

Geological causes of the landslide of an embankment at the Aizome River, Atami

MASAHIRO CHIGIRA^{1,2}, AKIHISA KITAMURA^{2,3},
KATSUMI KIMURA¹ and KOJI ICHIMURA⁴

Abstract On 3 July 2021, a heavy rainstorm induced landslide of an embankment in Atami, Shizuoka Prefecture; it transformed into debris flow along the Aizome River hit a town of Izusan causing heavy damage including 26 fatalities and 1 missing. The cause of the landslide of the embankment was first attributed to probable inappropriate workmanship and poor drainage control of the embankment. We performed careful field survey after the landslide, and found that the area used to be covered by fluvial deposits (chaotic debris flow deposits). These fluvial deposits overlie hydrothermally altered andesite rich in smectite, which likely caused their landslide with the sliding surface in between since geological past. The fluvial deposits covered not only the Narusawa River but also the upstream of the Aizome River, where the shape of fluvial cone has been erased because of recent artificial modification. The embankment was made above the fluvial deposits. The landslide scar after the event suggested that water had gushed out from the basal parts of the old landslides. The water is assumed to be not only from the catchment of the Aizome River but also from that of the Narusawa River through the fluvial deposits, particularly along the basal part of the old landslides on the impervious clayey materials.

Keywords: heavy rain, embankment, landslide, debris flow, fluvial cone

1. はじめに

静岡県熱海市逢初川上流部では、2021年7月3日に盛土が崩壊して土石流（泥流）となり、下流の伊豆山地区を襲い、死者26名、災害関連死1名、行方不明者1名、全・半壊家屋64棟の被害を生じた。災害の概要と土石流の発生原因については静岡県（2022）が中間報告としてまとめている。熱海雨量観測所の観測によれば、6月28日から崩壊発生時の7月3日10時までの総雨量は461mmであった。崩壊土砂量は55,500m³と見積もられている。流

下する泥流の目撃証言や記録映像によって、土砂とともに非常に大量の水が流下したことが指摘されている。盛土崩壊と土石流については、その概要と地質的背景を木村（2021）がまとめている。

本報告では、盛土の崩壊跡を調査し、また、5本のボーリングコア観察、周辺地形分析、地質試料の年代測定、鉱物分析をした結果について述べる。現地調査は、2022年3月30日と5月2日に行い、ボーリングコア観察は2022年4月15日に行った。踏査は、鳴沢川沿い、逢初川崩壊地内、鳴沢川と逢初川の中の尾根（A尾根と仮称）の道

2022年5月31日受付 2022年6月15日受理.

Received: 31 May 2022 Accepted: 15 June 2022

¹公益財団法人 深田地質研究所, 113-0021 東京都文京区本駒込2丁目13番12号

²静岡大学防災総合センター, 422-8529 静岡市駿河区大谷836

³静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市駿河区大谷836

⁴東京大学理学系研究科技術部, 113-0033 東京都文京区本郷7丁目3番1号

¹Fukada Geological Institute Public Interest Incorporated Foundation, 2-13-1 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0021 Japan

E-mail: chigira@fgi.or.jp

²Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

³Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

⁴Technical Division, School of Science, the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

沿いで行った(図1)。数値地形データの処理にはフリー地理情報システムのQGIS (version 3.22)を用いた。盛土崩壊地内の2地点から採取した植物片の放射性炭素年代測定をBeta-Analytic社に依頼し、加速器質量分析法により行なった。年代の暦年較正はINTCAL20 (Reimer *et al.*, 2020) をデータセットとして、OxCal4.4を使用して

計算した。

盛土崩壊地と周辺の地形図を図1a, bに示す。及川・石塚(2011)によれば、盛土周辺の基盤の地質は、第四紀の湯河原火山噴出物の城山溶岩類からなり、これは溶岩が卓越する地層で、玄武岩質安山岩から安山岩の溶岩・火砕岩からなり、緑色に変質している場合がある。

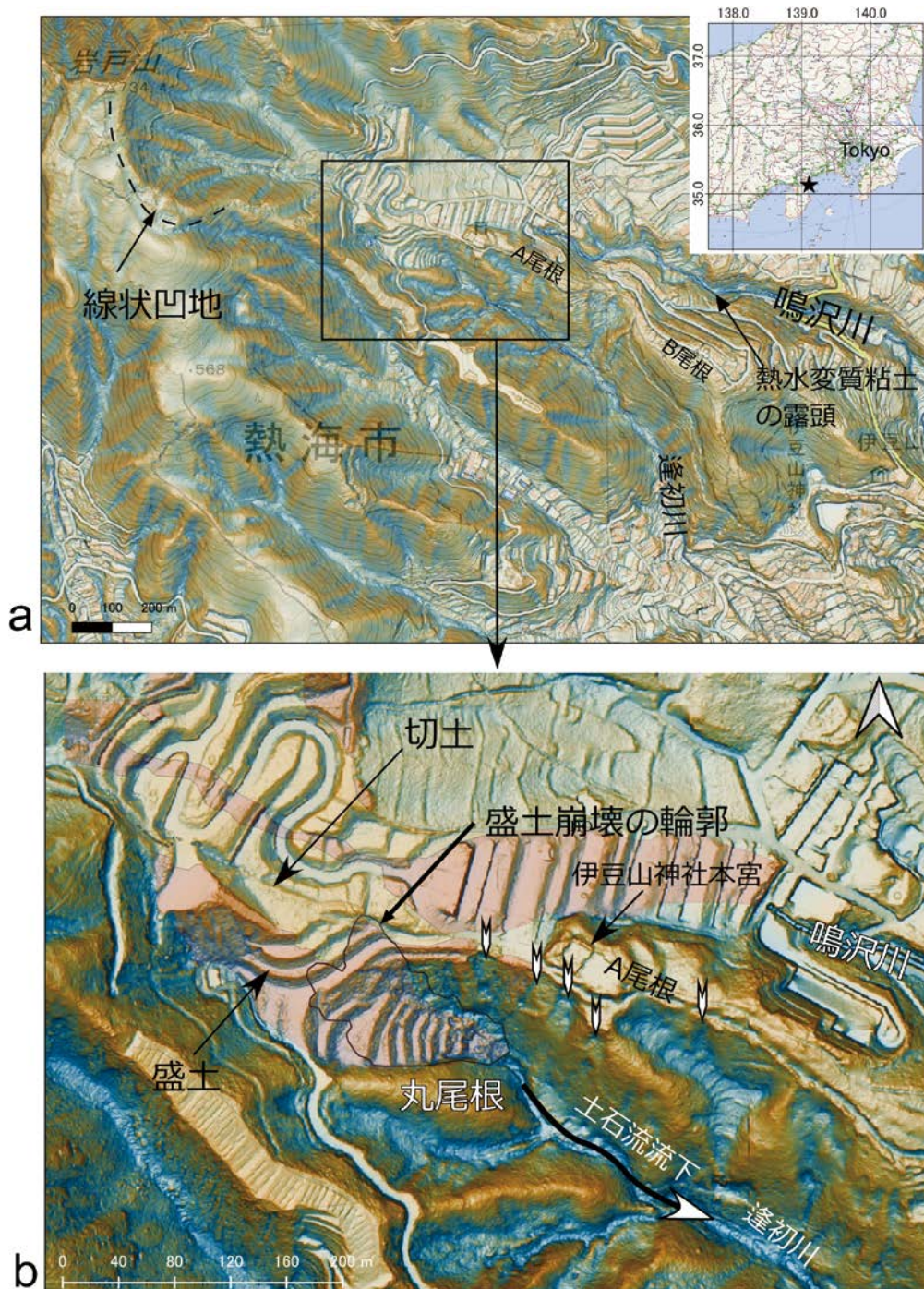


図1 盛土崩壊箇所周辺の盛土崩壊前の地形イメージ。a: 位置図(基図は、朝日航洋株式会社(2021))。挿入図の★がa図の位置。b: 盛土崩壊部近傍の拡大図。切土と盛土の分布は静岡県(2021a)による。白矢羽根印は植生の回復した小崩壊地形を示す。

Fig. 1 Topographic image around the landslide of the embankment before its failure. a: Index map (Base map is from Aero Asahi Corporation (2021)). The star in the inset shows the location of a. b: Enlarged map around the landslide of the embankment. Cut and fill areas are from Shizuoka Prefectural government (2021a). White feather arrows point small landslides now is vegetated.

2. 調査結果

2.1 崩壊地周辺の地形と地質

2.1.1 概要

崩壊地周辺には地質・岩石を観察できる露頭が極めて少ない。鳴沢川沿いには差し渡し最大2mの角礫が乱雑に堆積している。鳴沢川と逢初川間の尾根は、盛土崩壊地の東方600mまで東南東に伸びるが（A尾根、図1a）、そこで大きく屈曲し、南東方向に伸びる広いB尾根となる。A尾根は不規則な凹凸に富むが（図1b）、B尾根は滑らかな表面を呈す。また、A尾根では、熱水変質した安山岩と思われる粘土（熱水変質粘土と呼ぶ）が伊豆山神社本宮境内から道路沿いに点々と露出し、堅硬な岩盤の露出はない（図1b）。一方、その東側のB尾根では、熱水変質粘土の露出はほとんどなく、堅硬な安山岩の露頭が頻繁に認められた。これらのことから、A尾根は主に熱水変質粘土からなり、B尾根は未変質の安山岩からなると推定される。A尾根の南側斜面には小規模な崩壊跡地が多く認められる（図1b）。

崩壊した盛土は、東南東に流下する逢初川の最上流部に位置し（図1b）、その北東側には、A尾根を隔てて鳴沢川がやはり東南東に流下している。鳴沢川の上流はいくつかの支谷に分かれ、標高734mの岩戸山東面を構成している（図1a）。岩戸山東面は全体として東に開いた馬蹄形の尾根線をなし、その中央部に岩戸山山頂が位置している。岩戸山山頂の北西側は、北西に急傾斜する斜面、南西側は広い緩斜面となっている。この緩斜面上には、前述の馬蹄形の尾根線に沿って線状凹地がある（図1a）。これは、静岡県が公開している1mメッシュの数値標高データ（静岡県, 2020）によれば、幅20mから40m、深さ4m程度で、長さ550mにわたって尾根の縁沿いに連続している。このような線状凹地は、重力による斜面変形によって形成されたと考えられ、深層崩壊の前兆現象となることもある（Chigira *et al.*, 2013）。岩戸山の場合、馬蹄形の尾根線よりも東側の斜面が崩壊を繰り返してきたと推定され、その背後斜面が変形しているものと考えられる。

図1bには、人工的な地形改変を切土と盛土に分けて表示してある（静岡県, 2022）。逢初川最上流になされた盛土の内、図1bに輪郭を示した範囲が崩壊し、その土砂が逢初川沿いに流下した。盛土表面は階段状に成形されており、発生前後の1mDEMデータ（静岡県, 2020, 2021b）を比較したところ、崩壊した部分の最下部350mと最上部407mとの比高は57m、崩壊深の最大は約15mであった。2019年12月の空中写真によれば、この崩壊した盛土の下部と北側中部の盛土小段には小崩壊が発生していた（後述、静岡県, 2021a）。

2.1.2 人工的な地形改変前の地形と沖積錐

逢初川上流から鳴沢川上流の切土や盛土などの人工的な地形改変は、2002年に始まり、2011年には終了した（静岡県, 2022）。人工的な地形改変前の地形は、1962年に国土地理院が撮影した空中写真によって良く観察できる（図2）。その写真では、盛土がなされる以前の箇所は、滑らかな草地となっている。岩戸山東斜面の複数の谷は、

下流側で合流し、その下流側では河谷は埋積され、A尾根をまたいで、その両側の鳴沢川と逢初川の上流部を覆う変則的な沖積錐が形成されている（図2a, b）。1962年の空中写真で見ると、この二股に分かれた沖積錐の中央部を鳴沢川が侵食し小規模なV字型の谷を形成していたことがわかる（図2b, c）。重要な特徴として、逢初川上

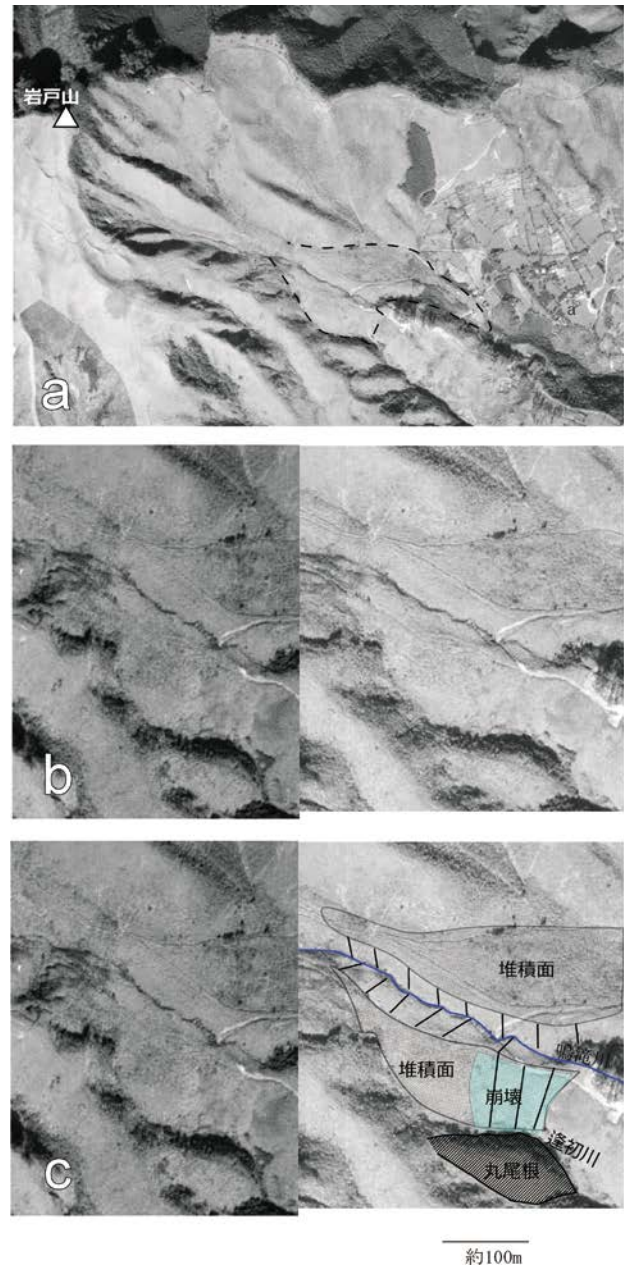


図2 逢初川および鳴沢川上流の人工改変前の地形。a：1962年撮影の空中写真（国土地理院撮影，MKT-62-8X C9-8）。破線は沖積錐の輪郭。b：盛土予定地付近の拡大ステレオペア（MKT-62-8X C9-8, C9-9）。c：同上（地形分類図）。

Fig. 2 Topography of the upstream of the Aizome River and the Nurusawa River before the artificial modification. a: Air photograph in 1962 (Geospatial Information Authority of Japan, MKT-62-8X C9-8). Dashed lines delineate a fluvial cone. b: Enlarged stereopairs around the planned embankment (MKT-62-8X C9-8, C9-9). c: Interpretation of figure b.

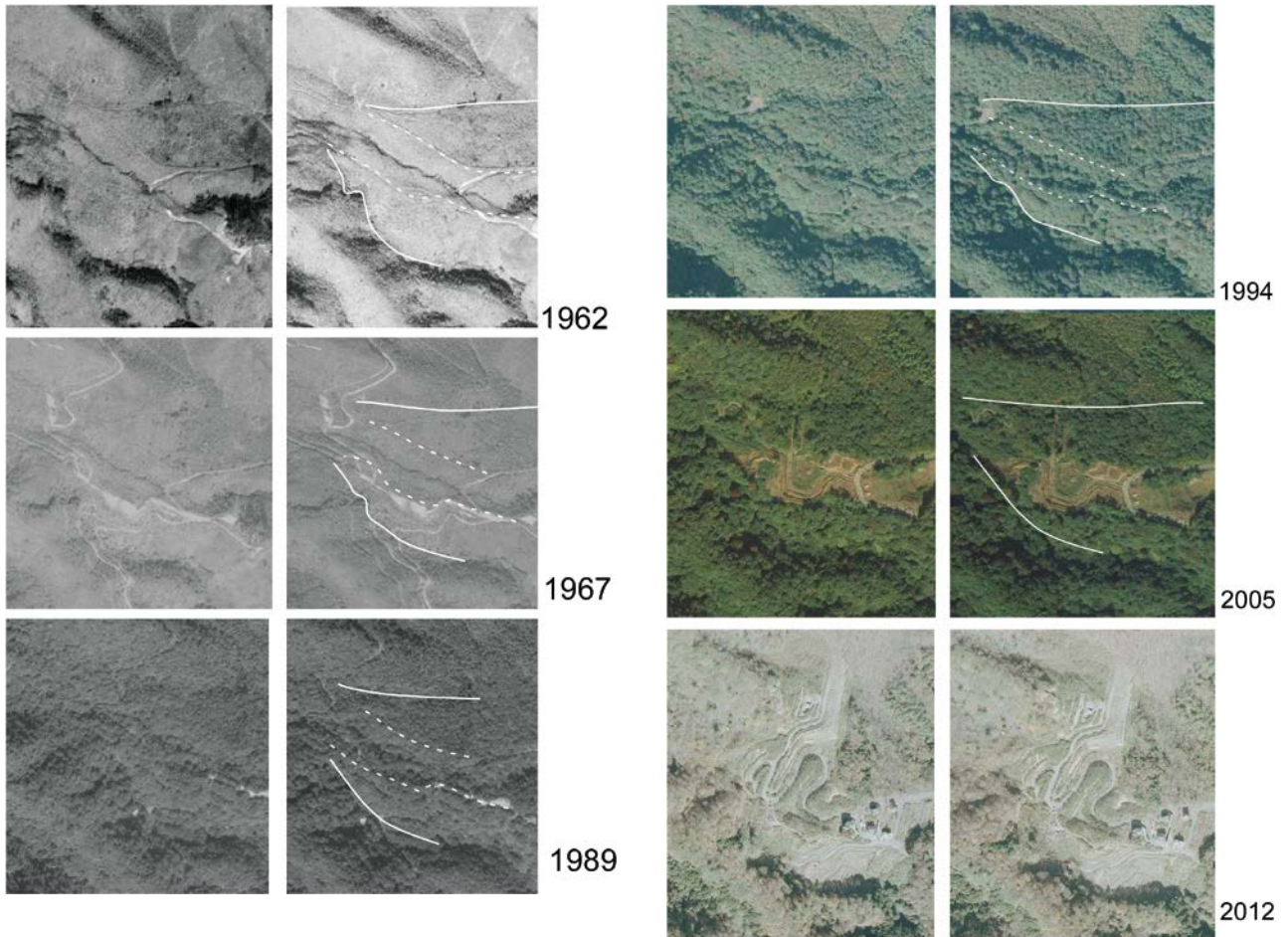


図3 調査地の経時的空中写真。a：1962年，1967年，1989年。b：1994年，2005年，2012年。白実線は沖積錘の縁，白破線はV字谷の肩を示す。

Fig. 3 Sequential aerial photographs in the study area. a: 1962, 1967 and 1989. b: 1994, 2005 and 2012. White solid lines show the rims of the fluvial cone and the white dashed lines show the shoulders of the V-shaped valley.

表1 観察に使用した空中写真一覧。

Table 1 List of aerial photographs used in the study.

撮影年	空中写真番号
1962	MKT623X C8,9
1967	CB-67-1X C6-14, 15
1989	CB894X C2-5, 6
1994	CCB941 C2-27, 28
2005	CCB-2005-3X C3-21, 22
2012	CCB-2012-1 C13, 28,29

流部を覆う沖積錘の東端は崩壊して元の堆積面を失っていることである（図2b, c）。この崩壊の西端は，南側の丸尾根の中央部よりもやや西側で逢初川の攻撃斜面側となっている（図2c）。

1962年以降の地形変化を空中写真のステレオペアとして図3に示す。使用した空中写真は，1962，1967，1989，1994，2005，2012年のものである（表1）。1967年には，鳴沢川流路の南側斜面の頂部尾根の南側が小規模に崩れ

ていることがわかる。また，1989年と1994年には沖積錘の上の植生は草原から森林に変化し，地形が見えにくくなっている。2005年には鳴沢川が埋め立てられ，また，その流路の両側のV字谷の肩が切り取られ，沖積錘の形が認められなくなっている。逢初川の盛土はこの後，2007年から開始された（静岡県，2021a）。

2.1.3 沖積錘とそれを構成する乱雑堆積物

地形的に認められたA尾根をまたいで広がる沖積錘の構成物は，盛土崩壊後に行われたボーリング調査によって確認された。調査のために5本のボーリングが掘削されている（#1, 2, 3, 4, 5, 図4）。これらのボーリング孔のいずれにおいても，褐色の砂質な基質と数mmから最大径1m程度のサイズと亜角礫状の安山岩片からなり，所々に円磨礫を含む砂礫層を薄く挟む堆積物（乱雑堆積物と呼称する）が表層部に確認されている。乱雑堆積物は，No. 1, 2孔ではほぼ孔口から確認されたが，No. 3, 4, 5孔では盛土に覆われていた。ただし，盛土層基底と乱雑堆積物との間に軟弱部は認められなかった。No. 3孔では，盛土直下の乱雑堆積物でボーリング掘削水が逸水しており，この乱雑堆積物が場所によって高透水であることを

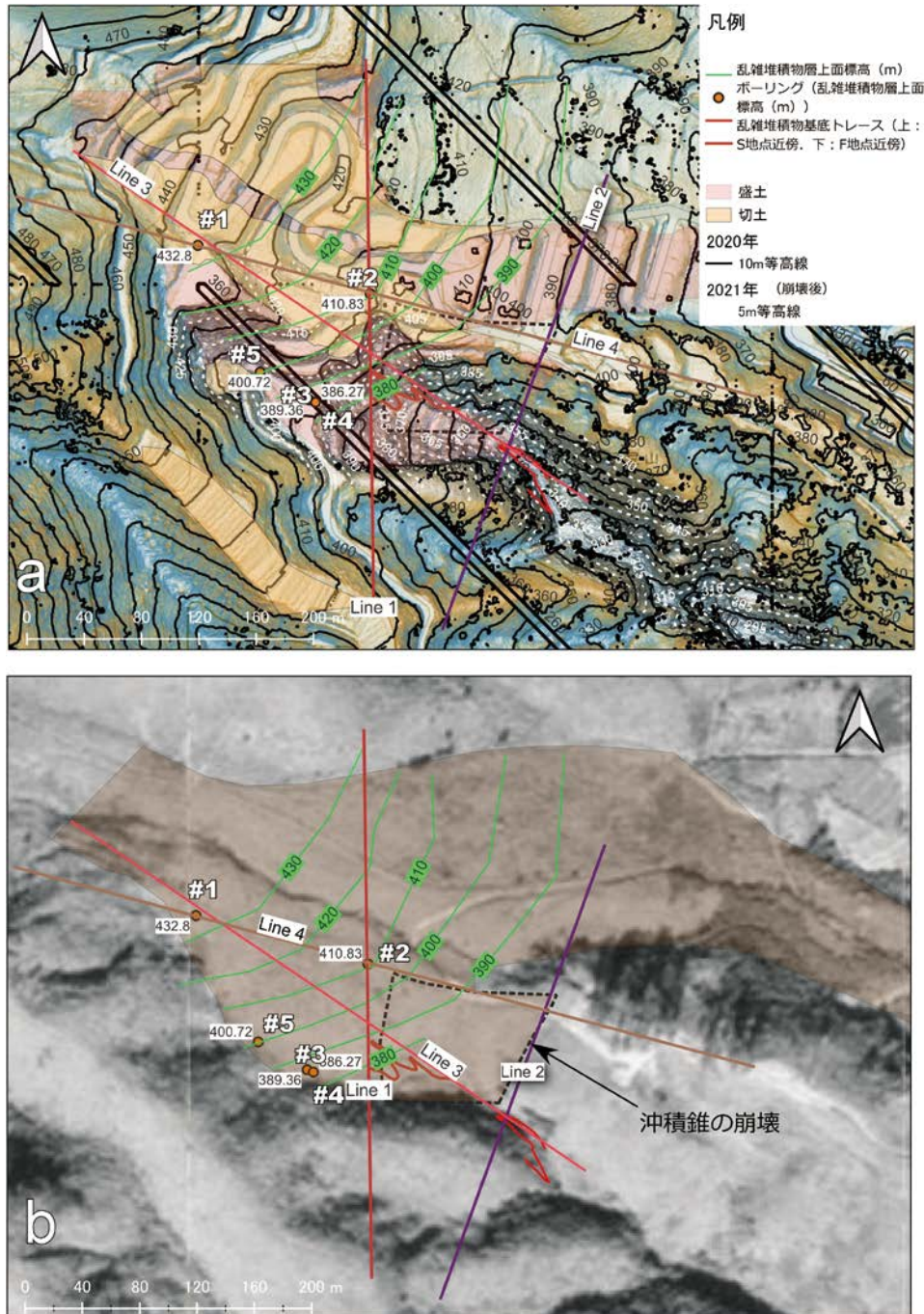


図4 乱雑堆積物層上面の等高線と地形との関係。a: 盛土崩壊発生前の地形イメージ (朝日航洋株式会社, 2021) と10m間隔等高線 (静岡県 (2020) から作成) に、乱雑堆積物層の上面の等高線、および崩壊発生後の崩壊地内と近傍の5m間隔等高線を重ね合わせたもの。乱雑堆積物層の上面の等高線は北部で地表の等高線に連続する。#1から#5はボーリング番号で、それに付随する数字はボーリングで確認された砂礫層の上面の標高 (m)。Line番号は、図5の断面に対応する断面線。上部に散在する黒い点は樹木によるノイズで、左上から右下に下がる黒2重線は、ソフトの不具合による。b: 1962年撮影の国土地理院の空中写真に乱雑堆積物層の上面の等高線を重ねたもの。空中写真はMKT623X C9をジオレファレンスして重ね合わせたため、ひずんでいる。切土と盛土の分布は静岡県 (2021a, 資料10-26による)

Fig. 4 The relationship between the top surface of the chaotic deposits and the topography. a: Topographic image before the landslide of the embankment (Asahi Aero Survey, 2021) with 10 m contours (Shizuoka Prefecture, 2020) overlain by the contours of the top surface of the chaotic deposits and the 5 m interval contours after the embankment landslide. The contours of the top surface of the sandy gravel layer merge the topographic contours in the north area where natural slope surface remains. Numbers #1 to #5 denote drillings, which are attached with the elevations of the top of the chaotic deposits in the drill holes. The four lines with numbers correspond to the profiles in Fig. 5. Black dots in the north are due to trees and the double lines from upper left to lower right are due to application bug. b: Aerial photographs taken in 1962 by the Geospatial Information Authority of Japan overlain by the contours of the top surface of the chaotic deposits. The aerial photograph was georeferenced but is distorted.

示している。乱雑堆積物の厚さは、No. 1から5の順で、9m、6m (12mの可能性あり)、2.55m、3.25m、6.75mである。ただし、これらの厚さは切り盛りあるいは二次的な崩壊の影響を受けている可能性もあり、必ずしも堆積時のままでない可能性はある。

図4には、ボーリング調査からわかった乱雑堆積物の上面の等高線を示す。これは、No. 1ボーリング近くで432.8mと最も高く、東から南東側に向かって低くなっている。このことは、1962年の空中写真から判読される沖積錐の傾斜方向とほぼ一致しており、これらの乱雑堆積物が鳴沢川上流から供給されたことを示唆している。逢初川上流部は人工改変されているが、鳴沢川の左岸の緩

斜面の内、宅地造成されていない北半分は元の地形面が残っていると推定される。そして、図4でボーリングデータから得られた乱雑堆積物上面の等高線は、鳴沢川北側の地形面の等高線に滑らかに接続することができる。

以上に述べた乱雑堆積物の構造的特徴や地形的な分布から、乱雑堆積物は、主に、鳴沢川上流から繰り返し流出した土石流の堆積物であり、それが前述した沖積錐の構成物であることがわかる。その中に挟まれる円磨された礫を含む砂礫層は土石流の流出の間の静かな時期に堆積したものと考えられる。

2.1.4 地質構造

調査個所の4つの断面図を図5に示す。断面線は図4に

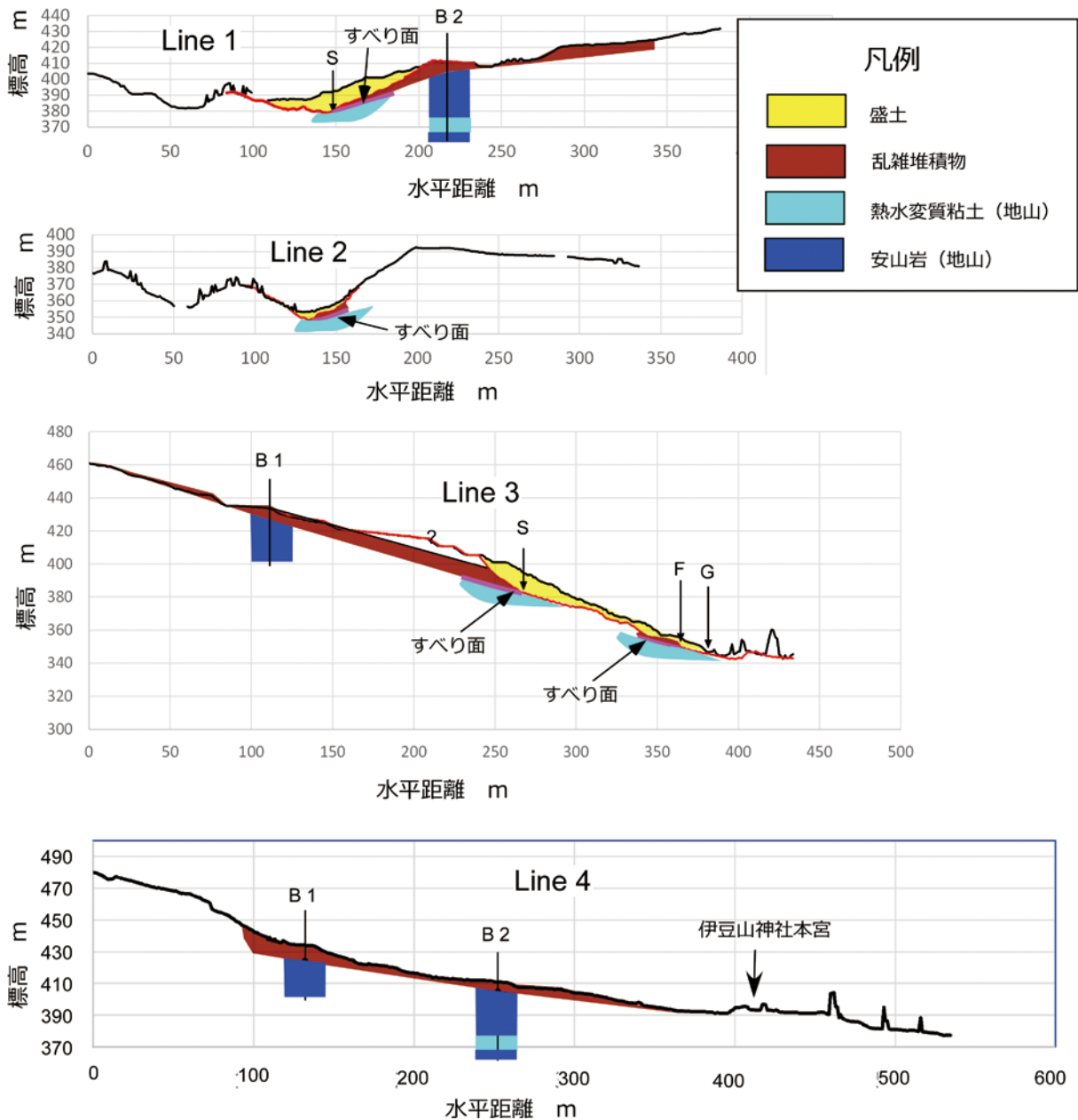


図5 地質断面図。黒線は崩壊前の地表面で、赤線は崩壊後の地表面。茶色は乱雑堆積物、黄色は盛土。ピンクはすべり面。
 Fig. 5 Geological cross sections. Black lines are the ground surface before the landslide of the embankment and the red lines are after the event. Brown: chaotic deposits. Yellow: embankment. Pink: sliding surface. See text for detail.

示してある。Line 1はNo. 2孔と後述のS地点を通る南北のライン、Line 2は後述のF地点を通る北北東-南南西のラインである。Line 3は鳴沢川上流部からNo. 1のボーリング孔を通り、逢初川の流心を通る北西-南東の断面である。Line 4は、No. 1とNo. 2のボーリング孔を通り、尾根Aに至る西北西-東南東の断面である。Line 1では、No. 2孔の孔口から深さ6m（あるいは12m）まで乱雑堆積物、その下は安山岩で、深さ約33mから41mつまり標高370mから380mの間は灰色に強く熱水変質し、黄鉄鉱を含み、頻りに鏡肌を有する。この範囲は、高角度な鏡肌も含まれ、断層破碎帯であると推定される。乱雑堆積物の層は、逢初川に向かって傾斜している。Line 3では、No. 1孔での乱雑堆積物の層は1mから9mの深さまであり、同様に逢初川に向かって傾斜している。断面図上では乱雑堆積物の下方延長は盛土崩壊面に現れることが、後述するように、崩壊面で確かめられた。鳴沢川では、広い範囲が沖積錐に覆われていることから、乱雑堆積物は厚いと考えられる。土砂に埋められた後の鳴沢川の盛土

上面標高はLine 2沿いで約390mであり、逢初川の350mよりも40mも高い。鳴沢川沿いの堆積物の厚さは不明であるが、いずれにしても、鳴沢川に表流水がある状態では逢初川に向けて大きな水位差があることになる。そして、鳴沢川の集水域からも、乱雑堆積物の層を通過して地下水が逢初川に流入していると推定される。Line 3上で、F地点は乱雑堆積物層の延長上にある。

2.2 崩壊地内の地質

2.2.1 概要

崩壊後の崩壊地の写真を図6に示す。崩壊地の上限の中央部に道路が部分的に残存しており、崩壊地はこの道路から南東に延びる高まり（中央尾根）によって北側と南側とに分かれる。北側崩壊地の中央部では盛土はほとんど失われ、その下の褐色の地山が露出している。この地山は、乱雑なサイズの強風化安山岩の岩片や硬質の安山岩の岩片を含む黄褐色土を主とし、所々にわずかに円磨された細礫から中礫が10cmから20cm程度の厚さでレ

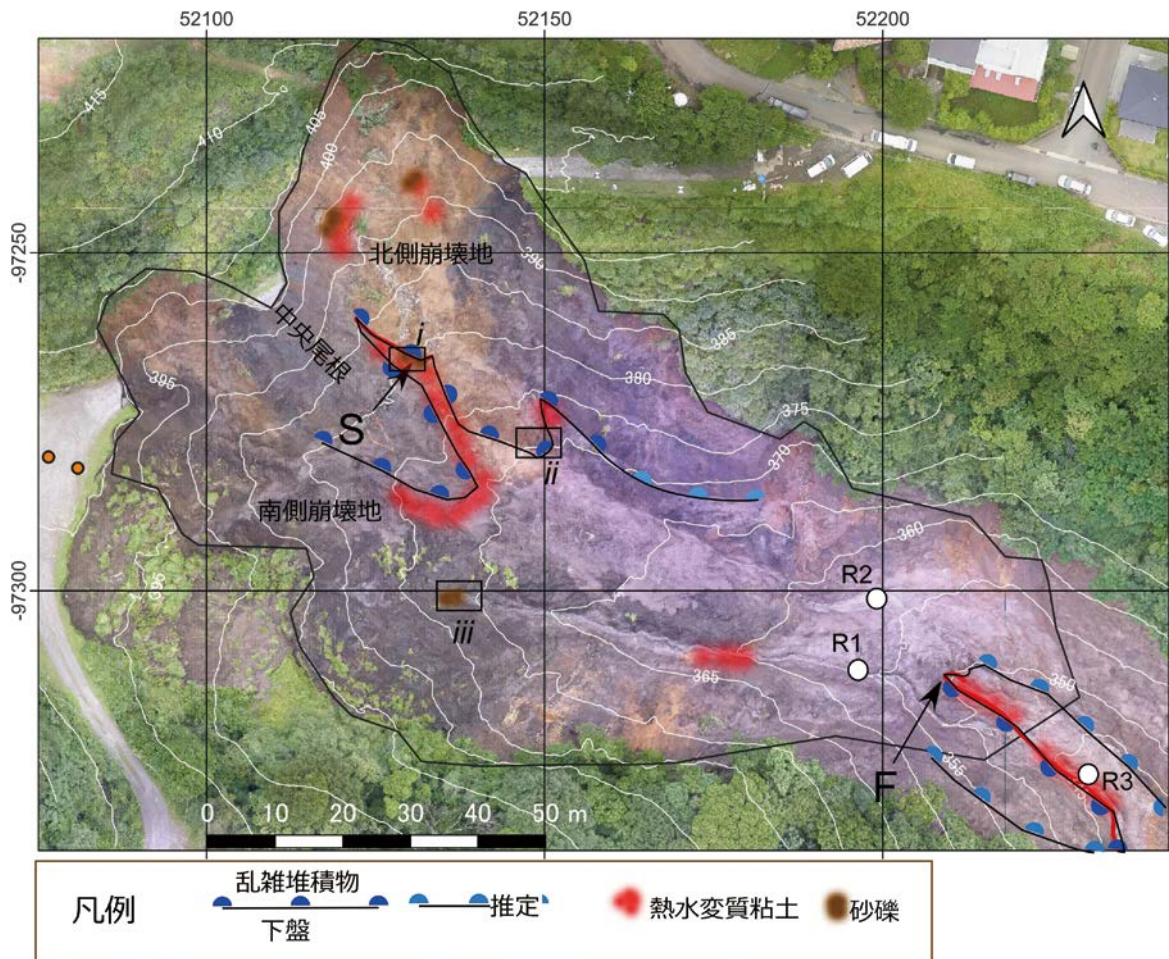


図6 盛土崩壊地の地質概略図。Sは地すべり1の基底部の観察箇所（図9）、Fは地すべり2の基底部の観察箇所（図11）。その他の記号は本文参照。基図は盛土崩壊地の2cm解像度オルソ画像に50cmのDEMデータから作成した傾斜図を重ね合わせたもの（静岡県（2021b）のデータから作成）。

Fig. 6 Geologic outline in the landslide of the embankment. S and F show the locations where the basal part of landslides 1 and 2 were observed respectively (Figs. 9 and 11). Refer to the text for the other symbols. The base map was made from orthophotographs with 2 cm resolution overlaid with a slope image from 50 cm DEMs, both data were obtained by Shizuoka Prefectural government (2021b).

ンズ状に含まれていた。この堆積物は、その特徴と位置から考えて、前述の沖積錐を構成する乱雑堆積物である。北側崩壊地の北側側面には黒色盛土が薄く残っている。南側崩壊地、特にその中央の沢部の南側には黒色盛土がかなり残存している。図6で南側崩壊地の縁よりも南西側にも地肌が見えるが、崩壊発生前後の地形標高データを比較すると、これらは小段表面が薄く崩れたもので、小段自体はずり下がりではないことがわかる。

北側崩壊地および中央尾根下部には、地山と判断される熱水変質粘土が露出していた(図6)。これは、灰色と

黄白色のまだら模様を呈しており、もともと灰色をしていたものが、酸化によって部分的に褐色化または黄白色化したものと推定される。

中央尾根には、割れ目に富む安山岩の岩塊が露出していた(図7a, b, c)。この安山岩の割れ目には、褐色の土が詰まっている所と、それが失われて最大幅10cmの隙間となっている所とがあった(図7b)。

2.2.2 粘土と粘土鉱物

北側崩壊地(図6)に露出する灰色粘土と黄白色粘土に含まれている鉱物種の分析を粉末エックス線回折法

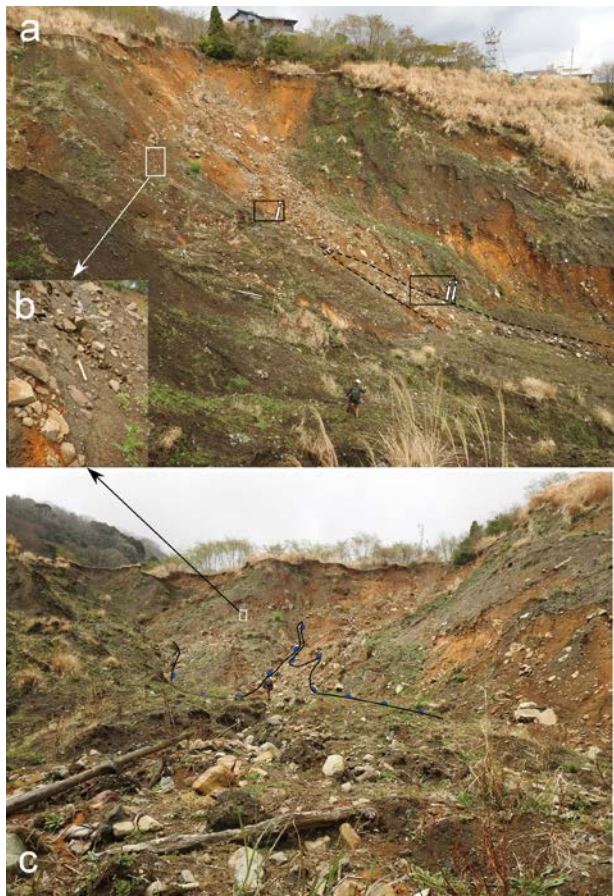


図7 盛土崩壊地内部の状況。a: 南側から中央尾根(左側)と北側崩壊地を望む。iは地すべり1のすべり面観察位置(図6)。iiは地すべり1基底部付近の安山岩塊の位置(図6)。破線は下流方向に開いた扇状の窪みで、地下水の流出によって土砂が洗い流された部分と推定される。b: 中央尾根に位置する亀裂の発達した安山岩塊。c: 盛土崩壊地を下部から見上げた写真。ハッチのついた線は乱雑堆積物底面のトレース。

Fig. 7 Photographs showing the inside of the landslide. a: A view of the central ridge (left) and northern landslide area, looking from the south. i is the location where landslide 1 was observed (Fig. 6). ii is the location of the andesite block near the base of the landslide (Fig. 6). Dashed line shows a fan-like depression widening downslope, which is assumed to be made by the washing out of debris by the gushing out of groundwater. b: Cracked andesite block in the middle of the central ridge. c: A view of the landslide looking from its lower portion. Lines with hatches delineate the base of landslide 1.

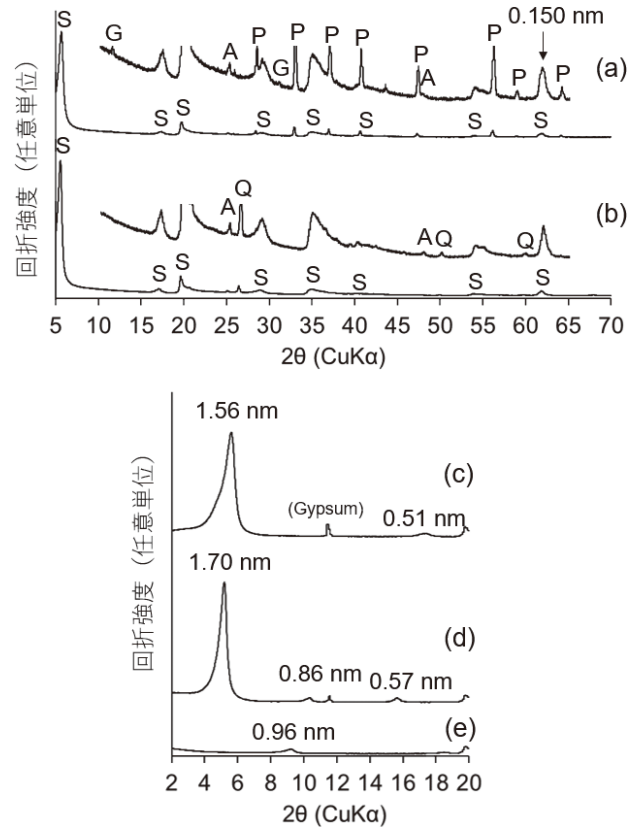


図8 北側崩壊地に露出する粘土のX線回折図。灰色粘土(a)及び黄白色粘土(b): $5-70^\circ$ (2θ), 特に $10-65^\circ$ (2θ)の範囲は強調して示している。灰色粘土試料の $<2\mu\text{m}$ 分画試料の風乾(c)、エチレングリコール処理(d)、 500°C で1時間の加熱処理(e)の後の不定方位試料。S = スメクタイト, P = 黄鉄鉱, G = 石膏, A = 鋭錐石, Q = 石英。

Fig. 8 X-ray diffraction patterns of clay samples exposed in the northern collapsed area: (a) gray clay and (b) pale-yellow clay. The range is $5-70^\circ$ (2θ) and exaggerated scale at $10-65^\circ$ (2θ). Oriented $<2\mu\text{m}$ fraction of sample gray clay after (c) air-drying, (d) ethylene glycol treatment, (e) heating at 500°C for 1h. S = smectite; P = pyrite; G = gypsum; A = anatase; Q = quartz.

(XRD) により行った。いずれも同じ粘土鉱物に由来する全体的に似たパターンとなる (図8a, b)。灰色粘土は黄鉄鉱を含み (図8a)、熱水変質により形成されたと考えられる。わずかに含まれる石膏は、黄鉄鉱の酸化と分解によって発生する硫酸と鉱物中に含まれるカルシウムの反応によると思われる。黄白色粘土は、黄鉄鉱および石膏を含んでおらず、わずかに石英を含んでいた (図8b)。これらのことから、黄白色粘土は灰色粘土を起源とし、酸化風化の過程で黄鉄鉱を失ったものと解される。水簸による2 μm 以下の粘土の定方位試料のパターンからは、

風乾後に1.56, 0.51nm (図8c)、エチレングリコール処理後に1.70, 0.86, 0.57nm (図8d)、500°Cで1時間の加熱処理後に0.96nmのピークが現れており (図8e)、これらの特徴から含まれている粘土鉱物の種類はスメクタイトと判別できる。0.150nmの060反射 (図8a, b) からは2八面体型のスメクタイトであることが分かる。

2.2.3 古い地すべり

地すべり1

北側崩壊地の乱雑堆積物の下位には、植物片の濃集したゾーンが観察され (図6のS, i, 図7aのi, 図9)、ここで



図9 地すべり1の基底部 (位置は図6のS)。a: 乱雑堆積物 (黄褐色部)。表面には崩壊土石が載っている。破線はその下底面。b: 地すべり直下の植物片濃集層と、その下の砂礫とさらに下の熱水変質粘土。植物片濃集層は右側で非対称に変形しており、地すべりが左から右に向かって移動したことを示唆している。スケールの鎌の柄は長さ30cm。c: 植物片濃集層。炭化した草や根のついた細い木が認められる。

Fig. 9 Basal portion of landslide 1 (located as S in Fig. 6). a: Landslide body (yellowish brown), which is partially covered by debris. Dashed line is the base of the landslide. b: Plant fragments-rich layer below the landslide underlain by sandy gravel layer, which in turn underlain by hydrothermal alteration clay. The plant fragments-rich layer is asymmetrically deformed in the left, which suggests that the landslide displaced from the left to the right in this figure. The handle of the sickle is 30 cm long. c: plant fragments-rich layer, which has carbonized grass and rooted thin wood.



図10 崩壊地内部の安山岩ブロックと湧水状況。a: 差し渡し2mの安山岩ブロック (図6のii)。小ブロックに割れていて、間に土砂が詰まっていることから、地すべり1の一部と推定される。スケールは2m。b: 盛土下からの湧水 (図6のiii)。亜円礫が認められることから、おそらく背後に砂礫層があるものと推定される (2022年5月2日撮影)。

Fig. 10 Andesite blocks and spring water in the landslide of embankment. Two-meter across andesite block, which is separated to smaller blocks with soil in between (ii in Fig. 6). This suggests that this block is a part of landslide 1. The scale is 2 m long. b: Water spring coming out below the embankment (iii in Fig. 6). Subrounded pebbles are seen with the water, which suggests that the sandy gravel layer is beneath the embankment. Photograph taken 2 May, 2022.

の観察から、この部分の乱雑堆積物は、過去に熱水変質粘土の上で地すべりを起こしていたことがわかった(地すべり1)。植物片は、炭化した草および根のついた直径2cm程度の木片からなり、厚さ10-20cmの黒味を帯びた土の上部に濃集していた(図9)。この産状から、この植物片濃集ゾーンは、元の地表面であったことがわかる。後述するように、この植物片は ^{14}C 年代測定の結果、約700年前(西暦1950年を基準とする)のものであることがわかった。この露頭の旧地表面は、著しく変形しており、その非対称構造から、旧地表面の上を乱雑堆積物が北から南(図9bの左から右)に移動したことが示唆される。旧表土の下には厚さ最大30cmの砂礫層があり、それは円磨された中礫を含み、やはり変形していた。この砂礫層の下には熱水変質粘土があり、砂礫層との境界から20cm下まで酸化によるまだら模様が扁平化しており、上述の地すべりによって変形したものと推定される。この熱水変質粘土には鏡肌が認められた。それは、N14°E/28°SEの走向傾斜を有し、またS24°E/18°の条線を有していた。この条線と上述の非対称構造から、地すべり1は、熱水変質粘土上面をすべり面とし、その移動方向は南南東で

あることが示唆される。

図6のS地点では、上述のように古い地すべりがあることが示唆される。図6のS地点では、上述のように古い地すべりがその下底面でのせん断構造によって認定されたが、その延長を横方向に追跡すると、特にせん断構造なしに、下位の熱水変質粘土の上に乱雑堆積物が載る個所も認められた。つまり、乱雑堆積物は熱水変質粘土の上に載り、その一部が地すべりしたことが示唆される。中央尾根にある前述の安山岩の岩塊の露頭は、位置的に見て乱雑堆積物に含まれる。北側崩壊地の下部には(図6と図7aのii)、盛土の下に差し渡し2m程度の安山岩ブロックも含まれていた(図10a)。この安山岩ブロックは、さらに小ブロックに分かれていて、その中に土砂が入り込んでいる部分があったので、おそらくこれも乱雑堆積物の一部であり、S地点との相対関係からおそらく基底部に位置すると推定される(図10a)。乱雑堆積物の上には盛土が載っていたことになるが、両者の境界は詳細には追跡していない。

すべり面の観察されたS地点よりも斜面下方は緩斜面となっており、それは下流方向に開く平滑斜面となっていた(図6, 7a, c)。この地形は、乱雑堆積物基底、特にすべり面付近から突出した地下水によって土砂が洗い流

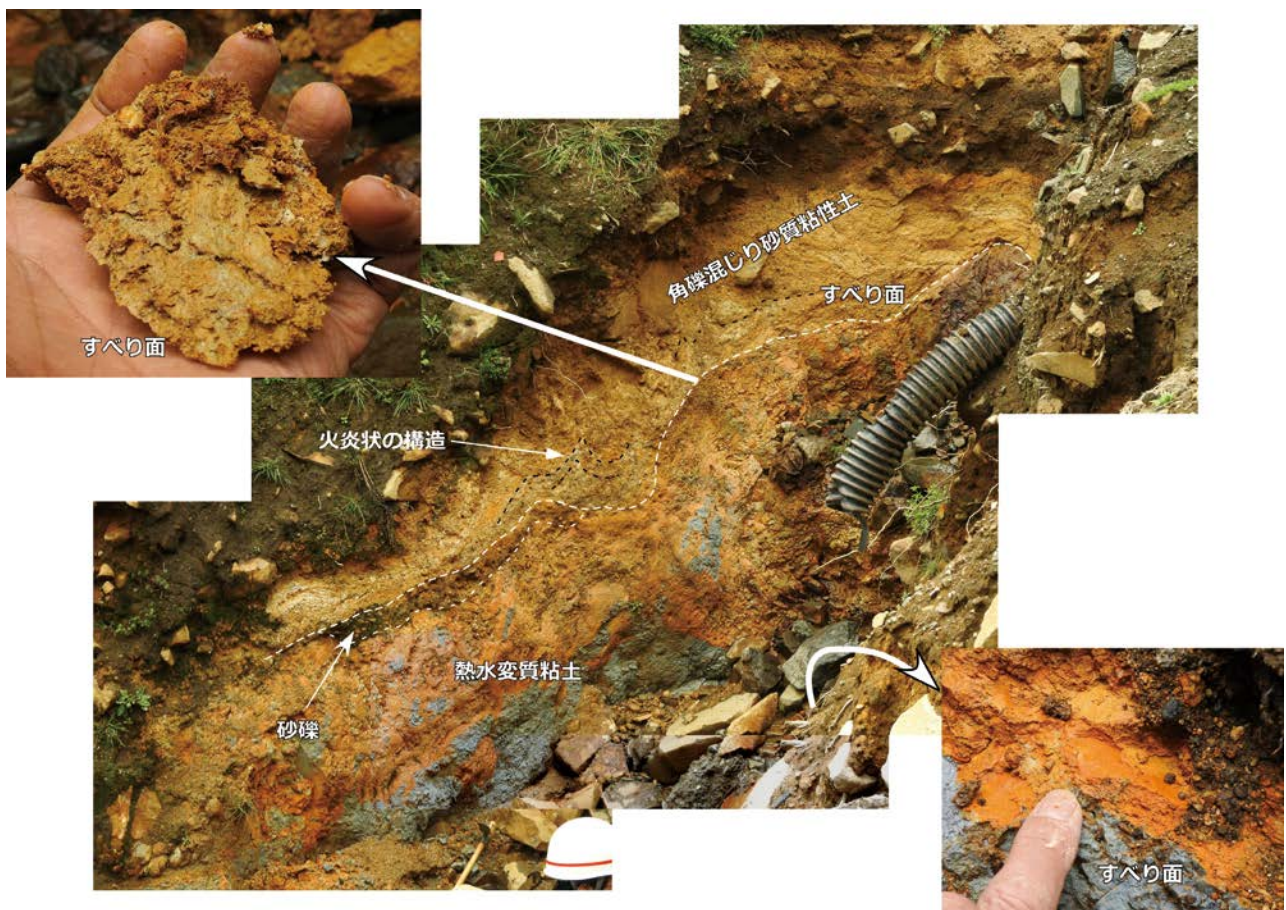


図11 地すべり2の基底部の構造(図6のF地点の窪みの右岸側)。下部に地山の熱水変質粘土があり、その上に防縮する砂礫層があり、その上にせん断された角礫混じり砂質粘性土が載っている。この粘土には鏡肌が認められ(左上挿入写真)、また、左岸側の地山の熱水変質粘土にも鏡肌が認められた(右下挿入写真)。

Fig. 11 Structure of the basal part of landslide on the right bank of the gully at F in Fig. 6. The bottom is a basement of hydrothermal alteration clay overlain by sandy gravel with laterally variable thickness, which in turn is overlain by sheared sandy clay with rock fragments. The sandy clay is sheared with slickenside (upper left inset). Clay is also exposed on the left bank with slickenside (lower right inset).

されて形成されたことを示唆している。また、乱雑堆積物内部の、亀裂に富む安山岩の塊は、亀裂に沿って地下水が流れやすいため高透水ゾーンを形成すると考えられる。

地すべり2

盛土崩壊地下端付近の谷底には高さ3m程度の滝状の窪みが形成され、そこから下流側はガリーとなっていた(図6のF)。これは、木村(2021)が洗堀箇所Fとした所である。この窪みの側面で地質構造が観察でき、それは、ここが古い地すべりの基底部であることを示唆していた。窪みの南側側面(右岸側)では、図11に示すように、下部に黄褐色と灰色がまだら模様をなす熱水変質粘土が露出し、その上に最大厚さ10cmで膨縮・尖滅する砂礫層が載り、さらにその上に黄褐色で角礫を含む砂質の粘性土が約1mの厚さで載っていた。この角礫を含む砂質粘性土は、断面的に考えて乱雑堆積物層の延長上にあり、特徴も類似していることから(図5, Line 3)、その一部であると推定される。また、この黄褐色粘性土は、火炎状の構造を呈し、一部に鏡肌を伴う個所がある(図11)。このような構造から、この角礫混じり黄褐色粘性

土はせん断されており、地すべりの基底部であることがわかる(地すべり2)。つまり、S地点と同様に、ここでも乱雑堆積物が熱水変質粘土との境界をすべり面として過去に地すべりを起こしていたことがわかった。

窪地の北側では、地すべりの基底部は下流側に高さを減じている。この基底部には安山岩岩片に富む部分もあり、そこでは基質の褐色土が失われ、隙間となっている部分が認められた(図12a)。一部の隙間からは褐色の沈殿物を伴う湧水が認められた。後述するように、ボーリングコアの熱水変質粘土には一般的に黄鉄鉱が認められたことから、この褐色の沈殿物は黄鉄鉱の酸化・分解によって生じた鉄含有の二次鉱物の可能性がある。私たちの現地調査時には、これらの隙間から少ないながらも湧水が認められ、盛土崩壊時には水の噴出があった可能性がある。実際、この窪地から下流は、ゴルジュ状の谷となっており、噴出した水によって土砂が洗い流された可能性が高い。この岩塊の集積部の上にコルゲートパイプを含む盛土が認められた(図12a)。

北側側面の向かって右下部では、地山の熱水変質粘土の上に砂礫が厚さ10-20cmの層として載り、さらにその



図12 地すべり2の基底部の構造(図6のF地点の窪みの左岸側)。a: 地すべり2とその上に載る盛土および今回の崩積土。盛土の右端の中にコルゲートパイプが見える。地すべり2の下部には角礫が多く、その間の細粒分が流失して隙間になっている。b: F地点の窪みを下流側から見た状況。約3mの深さの窪みになっており、その下部に地すべり2があり、その上に盛土および今回の崩積土となっている。c: 地すべり2とその下の砂礫層、さらにその下の熱水変質粘土。砂礫層は変形しており、また、木片を含んでいる。この木片を¹⁴C年代測定に供した。

Fig. 12 Structure of the basal part of landslide 2 on the left bank of the gully at F in Fig. 6. a: Landslide body 2 overlain by embankment, which in turn is overlain by the new debris. A corrugated pipe is seen in the embankment in the upper right. The lower portion of the landslide body 2 is rich in angular rock fragments, of which matrix finer materials were removed to leave openings. b: Overview of the gully at F seen from the downstream. It is approximately 3 m deep and its upper side exposes the landslide body 2 in the bottom and embankment and new debris on it. c: The bottom of landslide body 2 on sandy gravels, which is on hydrothermal alteration clay. The sandy gravel layer is deformed and has a wood fragment, which was dated by ¹⁴C.

上に岩片と黄白色から褐色の粘性土の混合した層が載っている様子が観察できた(図12c)。この砂礫層は、変形して入り組んだ形態をしており、また、直径約2cm、長さ約7cmの木片を含んでいた。このような産状から、ここでは、砂礫層とその下の熱水変質粘土の間にすべり面を持って地すべりが起こり、その滑動に伴って砂礫層に木片が巻き込まれたものと推定される。後述するように、この木片は、¹⁴C年代測定の結果、約8,000年前(西暦1950年を基準とする)のものであることがわかった。窪み北側の熱水変質粘土には、乱雑堆積物との境界から20cm程度の範囲まで所々で鏡肌と条線とが認められた。N7°E/38°Eの鏡肌面上にS8°Eに12°傾斜する条線が認められ、これは、地すべりの移動方向が南南東方向であったことを示唆している。これは、地すべり1の移動方向とほぼ同じである。上述の砂礫層の高さは右岸側(南側)で左岸側(北側)よりも約2m高いが、これは、おそらく地すべりが北側から南側に移動し、そこで対岸に乗り上げているためであると考えられる。

窪地で認められた砂礫とその上に載る乱雑堆積物は、その下流方向の右岸側に点々と認めることができた。ただし、F地点以外ではせん断構造は認められず、地すべりは生じていないと推定される。さらに、窪地の下流780mよりもさらに下流には、熱水変質粘土は認められず、安山岩の凝灰角礫岩と塊状の安山岩が河床に露出している。¹⁴C年代測定結果

結果を図13と表2に示す。地すべり1の直下の植物片の¹⁴C年代値は暦年代で西暦1224~1291年(西暦1950年から726~659年前)(95.4%)である。一方、地すべ

り2の直下の砂礫からの木片試料の¹⁴C年代値は暦年代で紀元前6066~5978年(西暦1950年から8,015~7,927年前)(82.7%)、紀元前5946~5921年(西暦1950年から7,895~7,870年前)(12.7%)である。

3. 考察

人工的な地形改変のなされる前の1962年の空中写真観察から、鳴沢川上流と逢初川上流とは、岩戸山東面から流出した土石流によって埋積され、下流側で2つに分かれる変則的な形の沖積錐を形成していたことがわかった。そして、この沖積錐を構成する地層は、ボーリングコア観察から、所々に円磨礫を含む砂礫層を挟み、褐色の砂質な基質と不淘汰な粒径と形態の安山岩片からなる堆積物からなり(乱雑堆積物)、土石流の堆積物であると推定される。乱雑堆積物層は、現在地形的に鳴沢川の流域となっている範囲の南部では逢初川に向かって傾斜している。したがって、尾根Aの西方延長よりも北側部分からも地下水が逢初川方向に流れると推定される。

断面的に見た地質構造とその特徴から、盛土崩壊地の崩壊面に広く露出する地層は、この乱雑堆積物である。そして、この乱雑堆積物は熱水変質粘土の上に載っており、地点Sと地点Fでは、それぞれ北側から南側に向かって地すべりを起こしていた。この熱水変質粘土は、軟弱かつ難透水性で、主にスメクタイトからなる。S地点で年代測定した植物片は、炭化した草および根のついた直径2cm程度の木片の集合したもので、現地性産状とみなせることから、地すべりで急速に埋没したと解釈される。

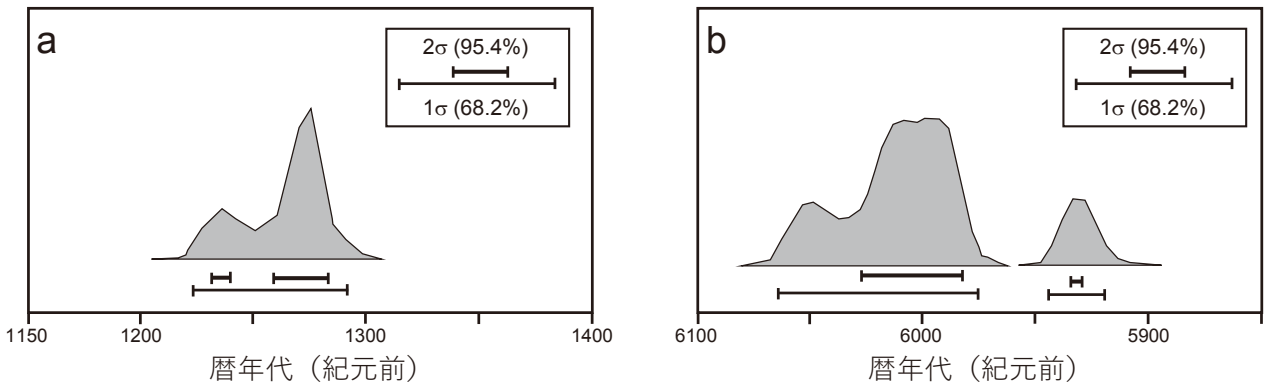


図13 確率密度分布で表示した年代モデル。
Fig. 13 ¹⁴C dating results presented as probability density distributions.

表2 放射性炭素年代測定結果.

Table 2 Results of radiocarbon dating.

地点	種名	δ ¹³ C (‰)	¹⁴ C age (yr BP)	暦年代 (2σ) (cal yr) (95.4%)	暦年代 (2σ) (cal yr BP) (95.4%)	ラボナンバー
地すべり1の直下	植物片	-23.1	750 ± 30	1,224—1,291 cal yr AD	726—659 cal BP	Beta-65684
地すべり2の直下	木片	-25.1	7,130 ± 30	6,066—5,978 cal yr BC (82.7%) 5,946—5,921 cal yr BC (12.7%)	8,015—7,927 cal BP (82.7%) 7,895—7,870 cal BP (12.7%)	Beta-65683

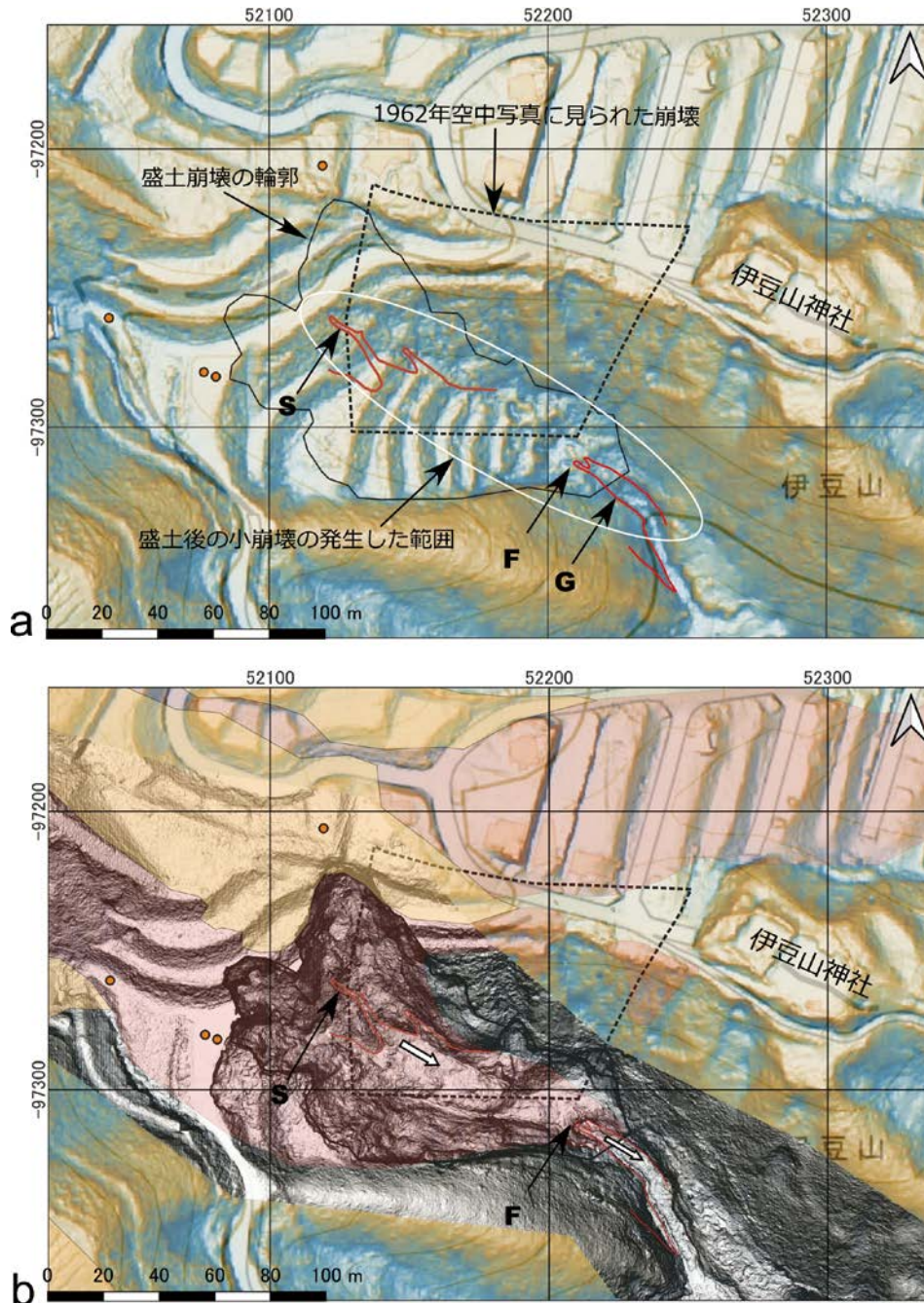


図14 盛土崩壊発生前後の地形と1962年以前の沖積錐の崩壊と今回の崩壊、および乱雑堆積物下面（一部地すべり面）のトレースの関係。
 a：盛土崩壊前。基図は朝日航洋株式会社（2021）の陰陽図。白楕円で囲んだ範囲内の盛土小段に数m大の小崩壊が複数見える。この範囲は盛土崩壊後に乱雑堆積物下面のトレースが露出した位置に符合する。また、1962年以前の沖積錐の崩壊斜面の下部ともほぼ重なる。b：盛土崩壊後の傾斜図を発生前の陰陽図に重ねた図。盛土崩壊範囲の最下部にF地点、つまり地すべり2の基底部が露出した窪みが位置する。この窪みは盛土崩壊前にa図のG地点にあったガリー頭部が後退したものと考えられる。F地点よりも下流は周辺部分よりも数m低いガリーになっており、また、S地点の下流部には平滑な扇型斜面があり、これらの地形は、それぞれ地すべり2および地すべり1の基底部からの地下水の突出によって形成されたものと考えられる。

Fig. 14 Relationship among the topography before the landslide of the fluvial cone before 1962, landslide of the embankment in 2021, and the traces of the old landslide bases. a: Before the landslide of the embankment. Base map is a topographic image by the Aero Asahi Corporation (2021). There are small failures on the embankment in the area encircled with a white ellipse. This area coincides with the area where the base of landslide bodies 1 and 2 appeared as well as the area of the bottom of the landslide of the fluvial cone before 1962. b: Overlapped maps of a slope image after the landslide of the embankment and a topographic image before the event. The gully head F where the base of landslide 2 was exposed likely used to be at G in fig. a and retreated to F. The gully downstream of F is several meters lower than the surroundings (yellow dashed line) and the downslope of S where the base of landslide 1 was exposed is a fan-like smooth slope (yellow dashed line); both topographic features are assumed to be the results of washing away of debris by the water from the basal parts of the landslides 1 and 2.

したがって、我々は植物片の¹⁴C年代値から、地すべり発生年代を約700年前と推定した。

F地点の木片の¹⁴C年代値は約8000年前であるが、異地性産状を呈する。したがって、その直上の地すべりの発生年代は約8000年前より新しいことは確実だが、それより詳しい発生年代を推定することはできない。そのため、本論では、暫定的にF地点の地すべりの発生年代を約8000年前とすることとした。

上述の沖積錐は、米軍空中写真が撮影された1947年までには、逢初川上流で東側が崩壊し、その堆積面が失われていた。この崩壊範囲を盛土崩壊前の地形と重ね合わせると、その下部が盛土表面に水の滲出による小崩壊と思われる孔が形成された範囲と重なっていることがわかる(図14a)。また、この孔の形成範囲は、盛土崩壊後に見いだされた乱雑堆積物基底部の位置とも符合している。これらのことは、沖積錐の崩壊のメカニズムと盛土崩壊とのメカニズムとの間に関連性があることを示唆している。

盛土崩壊後の地形からは、大きく2か所から出水があり、それが土砂を洗い流したことが示唆される。一つは、F地点、もう一つはS地点である。前者は、地すべり基底部で細粒分が地中侵食された岩塊集積部からの出水であると推定され、盛土の末端付近で生じた。乱雑堆積物内の水位が上昇して、ある限界を超えたところで急激に出水したことも考えられる。後者も、古い地すべり基底部からの出水であり、盛土の厚い部分の下の出水であった。ただし、乱雑堆積物基底部は崩土に覆われている所もあり、S地点やF地点のすべり面がどの程度まで広がっているのかは、不明確である。

盛土崩壊に伴う土石流は複数回の段波からなり、そのうち特に第2波と第3波が大量の出水を伴ったことがわかっている(静岡県, 2022)。この2回の土石流は、上述の地すべり2基底からの出水および地すべり1基底からの出水が引き金となった可能性がある。

静岡県は、崩壊地内の3か所で流量観測を行っている(図6のR1, R2, R3)。静岡県(2021a, 資料9-5)に示された流量観測によると、F地点より上流側のR1とR2の合計よりもF地点下流側のR3の流量が大きいことから、R2～R3間(地点Fを含む)で地下水が滲出していることが示唆されている。また、R2の流量と、R2～R3間での滲出量は降雨後数日して増加したことから、流動距離の長い地下水が左岸側から流入していることが示唆されている。これらのことと、地点Fでの地質性状から、乱雑堆積物基底のすべり面近傍で左岸側から地山中を流れる地下水が滲出していると推定される。

一方、南側崩壊地から湧出する流量はR1で計測されており、これは降雨に速やかに応答する。南側崩壊地では、図6のiii地点からの湧水が継続的に見られ(図10b)、これは沖積錐の砂礫層からの出水と見られる。盛土崩壊は、南側崩壊地では、上述の地すべり1の基底部からの出水とともに、この出水も関連していると考えられる。

4. おわりに

2021年7月に熱海市逢初川で発生した土石流は、盛土の崩壊に起因するものであり、一般には盛土そのもの原因があると考えられてきた。しかしながら、その後注意深く地質調査を行った結果、盛土の下に、沖積錐が存在しており、それを構成する乱雑堆積物を通して隣接する鳴戸川の流域からも地下水が流入していたと推定された。特に、乱雑堆積物の下には難透水性の熱水変質粘土があり、乱雑堆積物の一部はそれとの境界をすべり面として、過去に地すべりを起こしていたことがわかった。崩壊地の崩壊後の地形と地下水観測結果から、破壊的な土石流の段波を生じた盛土崩壊には、古い地すべりの基底部からの出水が引き金となった可能性が高いと推定される。ただし、これらの地すべりは西暦1950年から約700年前および約8,000年前と古いもので、今回の盛土崩壊時には活動していない。

2022年5月27日に公布された盛土規制法には、盛土個所の地質・地形を考慮することが謳われているが、今回のような複雑な地質構造が隠れている可能性を考慮して、十分な地質調査を行う必要があるといえる。

謝辞

公益財団法人深田地質研究所の金子 誠氏には、現地での議論していただき、また、調査に協力いただいた。立ち入り禁止区域内の調査に協力いただいた静岡県交通基盤部河川砂防局砂防課、熱海市市民生活部危機管理課、本稿にコメントをいただいた2名の匿名査読者と編集委員会委員に感謝申し上げます。本研究の経費は静岡大学防災総合センターの予算および深田地質研究所の経費を使用した。粉末X線回折分析は東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻の装置を使用した。

引用文献

- 朝日航洋株式会社(2021), 静岡県熱海市伊豆山付近の陰陽図(被災前)(CC-BY) <https://www.aeroasahi.co.jp/news/detail.php?id=391> 2022年4月21日にダウンロード。
- Chigira, M., Tsou, C. Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N. & Matsuzawa, M. (2013), Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. *Geomorphology*, **201**, 479–493. doi:10.1016/j.geomorph.2013.07.020
- 木村克己(2021), 熱海市の逢初川土石流災害の地形・地質的背景. 深田地質研究所年報, **22**, 185–202.
- 及川輝樹・石塚 治(2011), 熱海地域の地質(5万分の1地質図幅東京8 第92号). 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 61p.
- Reimer P. J., Austin W. E. N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P., Bronk Ramsey C. *et al.* (2020), The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*,

62(4), 725–757. doi: 10.1017/RDC.2020.41

静岡県 (2020), 静岡県 富士山南東部・伊豆東部 点群データ. G空間情報センター. <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/shizuoka-2019-pointcloud>.

静岡県 (2021a), 第2回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会配布資料 (1～15), 11月26日開催. http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/r3hasseigenninncyousakennsyouiinnkai_2.html

静岡県 (2021b), 2021年7月3日静岡県熱海市土石流災害ドローンレーザー計測データ. G空間情報センター. <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/20210703-atami-dronelazer> 2022年4月21日にダウンロード.

静岡県 (2022), 逢初川土石流の発生原因調査 中間報告書. vol. 1–7. https://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/r3hasseigenninncyousakennsyouiinnkai_3.html

著者貢献

千木良雅弘：現地調査，地質・地形の検討，論文執筆を担当。北村晃寿：試料採取，論文執筆を担当。

木村克己：現地調査，論文を改善。

市村康治：粘土鉱物分析を担当。