

静岡県熱海市逢初川の源頭部の盛土中の淘汰の良い砂層

北村晃寿^{1,2}・山下裕輝³

Well-sorted sand layers in embankment at the head of the Aizome River, Atami City, Shizuoka Prefecture, Japan.

AKIHISA KITAMURA^{1,2} and YUKI YAMASHITA³

はじめに

2021年7月3日に、静岡県熱海市^{あいずめ}逢初川源頭部（標高390m、海岸から2km上流）にあった約56,000m³の盛土のうちの約55,500m³が崩壊して発生した土石流は、死者・行方不明者28人、全・半壊家屋64棟の被害を出した（図1）。同様の盛土崩壊は周辺では起きていないので、逢初川源頭部の盛土は災害危険性が最大だったことになる。よって、この盛土の性状の調査は、今年（2022年）5月27日に公布された盛土規制法の実効性の確保と既存の盛土の災害危険性の評価基準の策定に必須の情報を提供する。そこで、第一著者は共同研究者とともに、静岡県と熱海市の協力の下で、盛土・土石流堆積物の地球科学的研究を行い、次の知見を得た。

（1）逢初川源頭部の盛土最下端の基底部の露頭（図1cの地点F）の岩体・堆積物は、下位から、地山の熱水変質粘土、最大層厚10cmで膨縮・尖滅する砂礫層、角礫混じり砂質粘性土（乱雑堆積物；層厚2.0m）、巨礫サイズの角礫層（層厚0.7m）、木質物を含む含礫砂層（層厚0.1m）、中礫サイズの重円礫層（層厚0.4m）、砂層（層厚0.8m以上）の順に重なる（千木良ほか, 2022; 北村ほか, 2022c）。膨縮・尖滅する砂礫層の上面はすべり面である（千木良ほか, 2022）。巨礫サイズの角礫層はコンクリートなどの人工物を含まず、¹³⁷Csが検出されたので、1950年以降から盛土の形成以前の堆積物であり、静岡県（2021a）が報告した溪床堆積土砂であることが裏付けられた（北村ほか, 2022c）。木質物を含む含礫砂層の礫は火山岩の角礫で、コンクリートの付着した礫を含み、¹³⁷Csが検出され、木質物の¹⁴C値は109-116pMCである（北村ほか, 2022c）。したがって、含礫砂層は盛土である。重円礫層の礫は堆

積岩の重円礫で、礫支持であり、礫間の砂質堆積物は放散虫化石を含む泥岩岩片と有孔虫を含むので、供給源の一部は沿岸堆積物である（北村ほか, 2022c）。逢初川源頭部に海成層は分布しないことから、重円礫層は盛土で、後述の黒色の土砂に相当する。重円礫層の礫間の砂質堆積物の含泥率は10%程度なので、重円礫層の透水性は高いと推定される。この重円礫層の存在は、盛土内に成層構造があることを意味する。

（2）盛土最下端から約350m下流の堰堤を埋めた土石流堆積物は海綿骨針を含む泥岩岩片を産する（北村ほか, 2022b）。この産出は、堰堤を埋めた土石流堆積物の供給源が、上記の重円礫層（放散虫化石を含む泥岩岩片を産出）の可能性のあることを示し、言い換えると、盛土崩壊初期の土石流が盛土最下端に由来する可能性を示唆する。

（3）盛土には褐色の土砂と黒色の土砂があり、前者は熱海周辺の岩体に由来すると考えられ、後者は現世と中期完新世の沿岸性貝類（北村, 2022）、古生代末期-中生代の放散虫化石を含むチャート岩片（北村ほか, 2022a）、鮮新世末期-前期更新世の海成層由来の軟質泥岩礫（北村ほか, 印刷中）を産する。これらは、供給源の一部が、沿岸堆積物、中部完新統の海成層、鮮新統最上部-下部更新統の海成層で、また後背地にはチャート層が分布することを示す。神奈川県西部を対象とすると、盛土の採取地の候補は、神奈川県小田原市大磯丘陵の中村川下流域の完新統下原層、同丘陵南部と相模原市の相模川周辺に分布する海成鮮新・更新統が考えられる。この解釈は、盛土の崩土から神奈川県二宮町の指定ごみ袋が見つかったことで裏付けられた（静岡県, 2021b）。

（4）逢初川源頭部東側には未崩落の盛土があり、これ

2022年8月30日受付 2022年9月10日受理.

Received: 30 August 2022 Accepted: 10 September 2022

¹ 静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷836

² 静岡大学防災総合センター, 422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷836

³ 静岡大学大学院総合科学技術研究科, 422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷836

¹ Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: kitamura.akhisa@shizuoka.ac.jp

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

³ Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

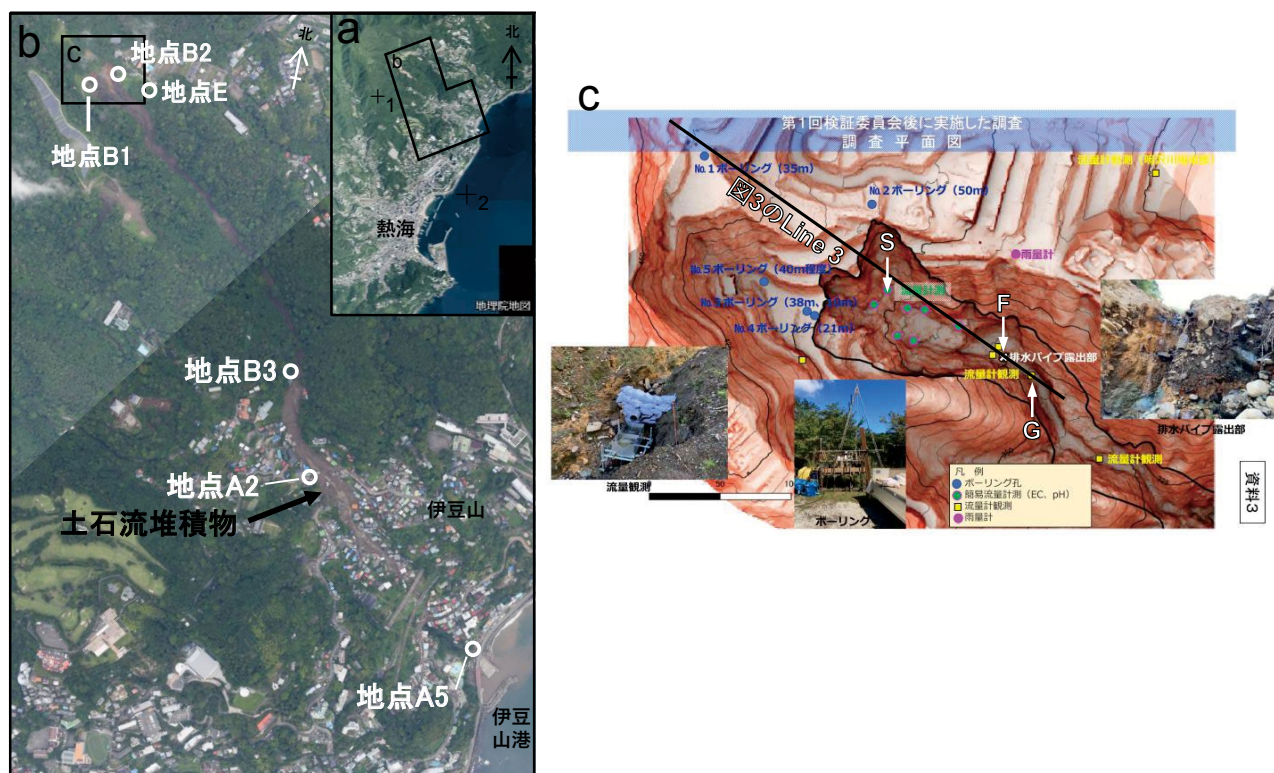


図1 熱海市伊豆山地区の土石流の流路と試料採取地点とボーリング掘削地点。a, b: 北村ほか（印刷中）を一部改変。c: 静岡県（2021b）を一部改変。画像は国土地理院（2021）の写真番号48156と48158を使用，https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R3_0701_heavyrain.html，2022年3月1日引用。

を分析した結果，①盛土からは ^{137}Cs が検出され，②砂粒子は，黒色の土砂や土石流堆積物よりも，石英は少なく，生物源石灰砕屑物を多く含み，黒雲母をわずかに含み，③黒色の土砂や土石流堆積物から未産出の海生貝類（ハマグリやイボキサゴ）を産することが分かった（北村ほか，2022d）。以上のことから，この盛土は，黒色の土砂と同様に，供給源の一部が沿岸堆積物だが，採取地は異なることが判明した。

（5）源頭部から約1km下流（図1bの地点A2）と2km下流（図1bの地点A5）の土石流堆積物の含水率を測定し，31.0%と36.2%の値を得た（北村・池田，2021）。通常の土石流の含水率は約10～25%で，38%を超えると泥流になるので，今回の土石流は泥流に近い。

以上のように，これまでの調査で，盛土の最下端の基底部の成層構造と土石流堆積物の成分に関するデータを得たが，盛土の崩壊の原因究明に必要な盛土の内部構造については，最下端の基底部を除けば情報が得られていない。そこで，我々は，逢初川源頭部の未崩落の盛土で静岡県が行ったボーリングコア試料の調査を開始し，4層の淘汰の良い砂からなる層厚4～19cmの薄層を発見した。これらの砂層は盛土に成層構造があったことを意味し，盛土の崩壊の原因の解釈と未崩落の盛土の動態の予測に役立つと思われるので，ここに速報する。

試料及び分析

静岡県は2021年8月下旬に未崩落の盛土とその周辺の5カ所でボーリングコアを鉛直方向に掘削した。本研究で調査したコアは，未崩落の盛土の地点3で掘削したコアである。静岡県によると，コアの全長・コア径は38mと5cmで，ボーリングコア試料の深度0～12mは主に礫，砂，泥の混じった盛土であり，12m以深は火山岩の基盤岩である。盛土にはコア径より大きい礫が複数あるが，礫層か否かは判定できない。

上記のコア試料のうち，盛土の部分（深度0～12m）を研究室で半裁後，堆積相を記載し，断面を写真撮影し，その際に4層の淘汰の良い砂層（上位から砂層1～4とする）を発見した。各砂層の深度と層厚は，砂層1は3.23–3.34mで11cm，砂層2は5.00–5.08mで8cm，砂層3は8.46–8.65mで19cm，砂層4は9.00–9.04mで4cmである（図2，表1）。これらの堆積物試料から3–8gを分取し，60℃のオープンで24時間乾燥後，重量を測定した。そして，16,000 μm （16mm）以下の粒子について目開き32，63，90，125，180，250，355，500，710，1,000，2,000，4,000，8,000 μm のふるいで水洗し，残渣の乾燥重量を測定した。また，砂層1と3については直上・直下の堆積物の粒度分析も行った。砂層2と4についてはコアの連結部直下に位置するので，砂層直下の堆積物の粒度分析も行った。32 μm 以下の粒径を5.5 ϕ として，砂層1～4とその上下の堆積物の算術平均粒径と標準偏差と含泥率を

算出した(表1)。図2に、砂層1～4の写真と粒度組成を示すとともに、盛土と土石流堆積物の粒度組成のデータ(北村ほか, 2022a, d)を記した。なお、コア試料は定方位で採取したものではなく、さらに静岡県を観察・記載時に回転している可能性もあるので、砂層の基底面・上面の層理面の走向・傾斜は測定していない。

結果と考察

淘汰の良い砂層の平均粒径・標準偏差・含泥率の範囲は、0.37–1.68 ϕ 、1.34–2.25 ϕ 、3.0–11.4%である(表1)。直下の堆積物に比べると、平均粒径は砂層3を除けば、若干大きくなり、標準偏差は0.2–0.5 ϕ 小さく、含泥率は2/5～3/5となる。また、砂層1は上方細粒化を示し、砂層3は上方粗粒化を示す(表1, 図2)。

盛土・土石流堆積物の粒度組成と比較すると、砂層1～4の粒度組成は一峰性を示し、含泥率が低い点で異なる(図2)。このことから、これらの砂層の採取地は盛土の採取地とは異なる可能性がある。

北村ほか(2022c)は、源頭部の盛土下端部の盛土基底部が、木質物を含む含礫砂層(層厚0.1m)、中礫サイズの亜円礫層(層厚0.4m)、砂層(層厚0.8m以上)の順に重なることを報告している。この観察から盛土基底部に成層構造が存在することが判明した。なお、亜円礫層は、排水用の吸水渠の埋戻し材あるいはサンドマットの可能性もある。本研究で見つかった砂層1～4も吸水渠の埋戻し材あるいはサンドマットの可能性はあるが、成層構造が盛土基底部より上位に広く存在する可能性もあり、その場合の砂層の分布予想を図3に示した。砂層の層理面の傾斜のデータは得られなかったので、砂層の傾斜は盛土表面の傾斜と同じと仮定した。

図3の地点Fは土石流発生時に形成された洗堀箇所(木村, 2021)、地点Gは2019年12月期の盛土下端であり(木村, 2021)、地点Sは千木良ほか(2022)が報告した地す

べり1の基底部の観察場所である。地点B1は静岡県が基盤岩の場所を掘削したボーリングコアであり(千木良ほか, 2022)、本研究の対象外である。

成層構造は堆積物内の水の流動に重大な影響を与えることが知られており、例えば、新藤(1993)は、斜面災害の発生原因として、斜面地中水の役割が大きいとし、そのプロセスとして次の3点を挙げている。

(引用ここから)

①繰り返し発生する集中流による、いわゆる“斜面の疲労現象”

②山体の各部位に常在する(あるいは発達しうる)地下水体の豪雨時の連結によって発生する高い水理水頭

③パイプなどの大間隙の閉塞によって生じる間隙水圧の急上昇

①は、集中流によって効果的に進行する地下侵食に起因するものである。地山材料の洗い出しや溶解によって地山の排水機能が増大する一方では、斜面の“緩み”を来したり、時には地下侵食によって生じた空洞が陥没して斜面の不安定性を高めていることも事実である。これをここでは“斜面の疲労現象”と呼ぶことにする。

中略

②、③は崩壊発生の直接的要因となる。

(引用ここまで)

新藤(1993)によると、透水性の異なる地層の境界には、斜面地中水が集中し、粒子を排出することにより、パイプなどの大間隙の発達をもたらすという。本研究で発見した4層の淘汰の良い砂層は上下の堆積物よりも低含泥率(3.0–11.4%)で淘汰が良いので、より高い透水性を有する。したがって、これらの砂層にも斜面地中水が集中し、部分的にパイプなどの大間隙が形成されていた可能性がある。静岡県(2022)は2019年に盛土の小段で小崩落が起きたことを報告しているが、この小崩落は大間隙の形成を示唆するかもしれない。

以上のことから、本研究で確認された4層の淘汰の良

表1 堆積物試料の平均粒径、標準偏差、含泥率。

堆積物	深度 (m)	層厚 (cm)	上部・下部	平均粒径 (ϕ)	標準偏差 (ϕ)	含泥率 (%)
淘汰の悪い砂質堆積物	3.17-3.22	5		2.07	2.30	23.1
淘汰の良い砂層1	3.23-3.34	11	上部(3.23-3.29 m)	1.68	1.56	11.4
			下部(3.30-3.34 m)	1.12	1.34	5.4
淘汰の悪い砂質堆積物	3.35-3.40	5		1.77	1.90	13.0
淘汰の良い砂層2	5.00-5.08	8	—	1.05	1.83	6.5
淘汰の悪い砂質堆積物	5.09-5.13	4		1.32	2.03	10.4
淘汰の悪い砂質堆積物	8.41-8.46	5		0.53	3.21	18.8
淘汰の良い砂層3	8.46-8.65	19	上部(8.46-8.54 m)	0.37	2.25	3.0
			下部(8.56-8.65 m)	1.02	1.87	6.5
淘汰の悪い砂質堆積物	8.65-8.70	5		0.97	2.26	11.8
淘汰の良い砂層4	9.00-9.04	4	—	1.04	1.88	10.5
淘汰の悪い砂質堆積物	9.05-9.10	5		1.90	2.10	17.8



い砂層は、盛土崩壊の発生の原因の一つになっていた可能性がある。また、盛土崩壊によるパイプなどの大間隙が閉塞した場合には、その後の間隙水圧の急上昇で盛土崩壊が起きる可能性がある（新藤, 1993）。淘汰の良い砂層は土石流の複数回の発生の原因の一つになっていた可能性がある。

謝辞

静岡県からはボーリングコア試料を提供いただき、株式会社ジーベックにはボーリングコア試料の調査に協力いただいた。本稿にコメントをいただいた東京大学大学院理学系研究科の池田昌之博士と静岡大学理学部のJulien

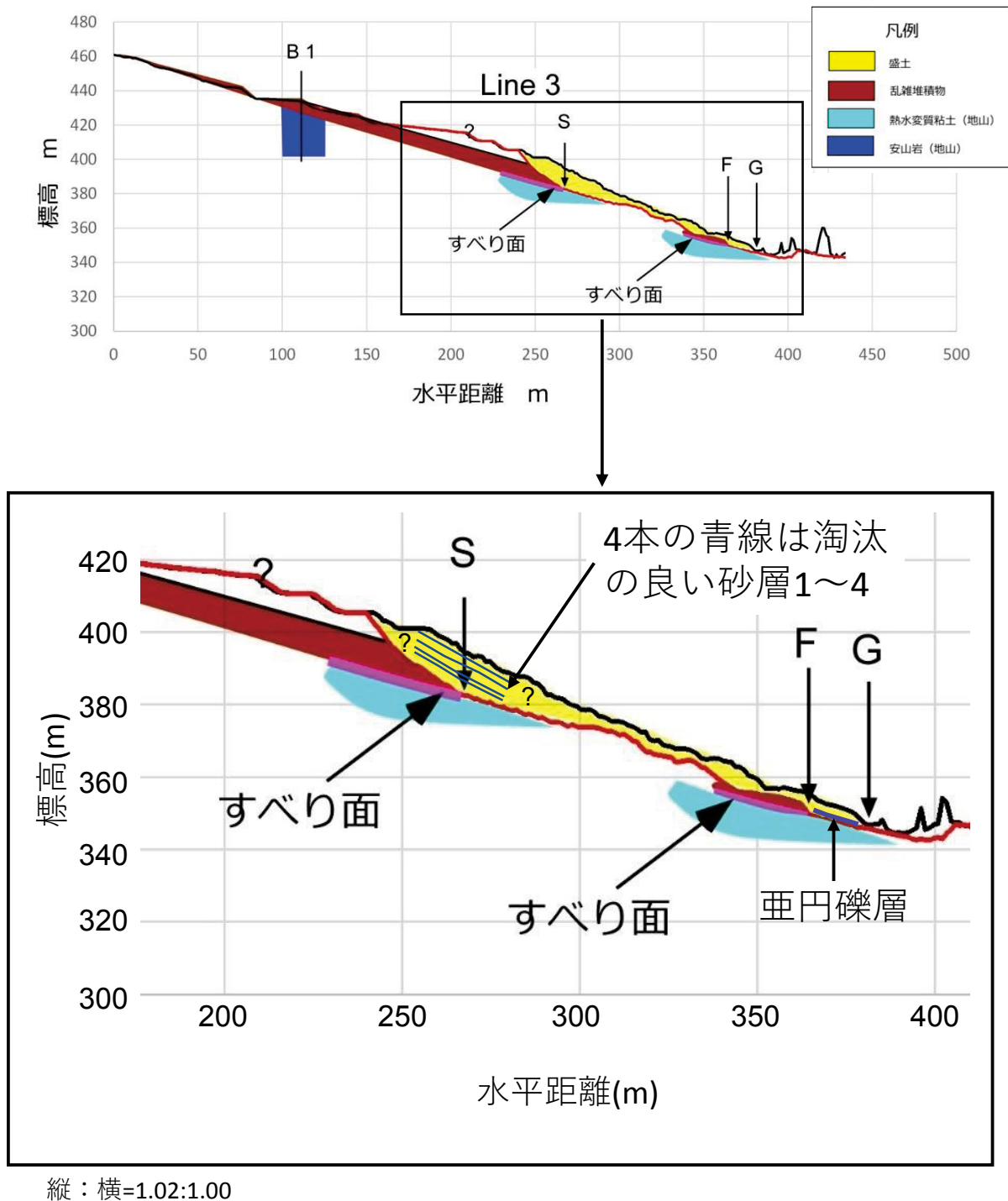


図3 盛土の成層構造の概念図。千木良ほか（2022）を一部改変。

地点B1は静岡県が掘削したボーリングコアの掘削地点（千木良ほか, 2022）。地点Fは2021年7月3日の土石流発生時に形成された洗堀箇所（木村, 2021）。地点Gは2019年12月期の盛土下端（木村, 2021）。地点Sは千木良ほか（2022）が報告した地すべり1の基底部の観察場所。

Legrand博士による査読コメントによって、本稿は改善された。これらの方に感謝申し上げる。本研究の経費は静岡大学防災総合センターと未来社会デザイン機構の予算を使用した。

引用文献

- 千木良雅弘・北村晃寿・木村克己・市村康治 (2022), 熱海市逢初川盛土崩壊の地質的原因について, 静岡大学地球科学研究報告, 49, 45–60.
- 地理院地図 (2021), <https://www.gsi.go.jp/tizu-kutyu.html> 2021年7月4日引用.
- 北村晃寿 (2022), 静岡県熱海市伊豆山地区の土砂災害現場の盛土の崩壊斜面と土石流堆積物から見つかった海生二枚貝の貝殻, 第四紀研究, 61, 109–117. doi: 10.4116/jaqua.61.2114.
- 北村晃寿・池田昌之 (2021), 2021年7月3日に静岡県熱海市伊豆山地区で発生した土石流の速報, 静岡大学地球科学研究報告, 48, 63–71.
- 北村晃寿・亀尾浩司・本山 功・守屋和佳・齊藤 毅・渡辺真人・森 英樹 (印刷中), 静岡県熱海市伊豆山地区の土砂災害現場の盛土に含まれる軟質泥岩礫, 第四紀研究.
- 北村晃寿・岡寄颯太・近藤 満・渡邊隆広・中西利典・堀 利栄・池田昌之・市村康治・中川友紀・森英樹 (2022a), 静岡県熱海市伊豆山地区の土砂災害現場の盛土と土石流堆積物の地球化学・粒子組成分析, 静岡大学地球科学研究報告, 49, 73–86.
- 北村晃寿・山下裕輝・本山 功・中西利典・森 英樹 (2022c), 静岡県熱海市逢初川の源頭部の盛土下端部の露頭調査, 静岡大学地球科学研究報告, 49, 61–72.

北村晃寿・山下裕輝・矢永誠人・中西利典・森 英樹 (2022d), 静岡県熱海市逢初川源頭部の東側地点の盛土に関する調査速報, 静岡大学地球科学研究報告, 49, 97–104.

北村晃寿・矢永誠人・岡寄颯太・片桐 悟・中西利典・森 英樹 (2022b) 静岡県熱海市逢初川の砂防堰堤の埋積土の放射性セシウム濃度と粒子組成の層位変化—2021年7月3日の土石流堆積物の識別—. 静岡大学地球科学研究報告, 49, 87–96.

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, No. 22, 185–202.

新藤静夫 (1993), 斜面災害における地中水の集中流現象, 第四紀研究, 32, 315–322.

静岡県 (2021a), 第1回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会配布資料 (1～17), 2021年9月7日開催 <http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/r3hasseigenninnncyousakennsyouiinnkai.html> 2022年4月24日引用.

静岡県 (2021b), 第2回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会 <http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/documents/2kennsyouiinnshiryou1-5.pdf> 2022年8月15日引用.

静岡県 (2022), 第4回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会 https://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/documents/06_3syous.pdf 2022年9月9日引用.

著者貢献

北村晃寿：堆積物記載, 全体総括, 論文執筆を担当. 山下裕輝：堆積物記載, 粒度分析を担当.