

静岡県熱海市逢初川の源頭部の黒色盛土層の 放射性セシウム濃度と粒子組成の層位変化

北村晃寿^{1,2}・矢永誠人³・山下裕輝⁴・中西利典⁵

Stratigraphic distribution of radiocesium concentration and grain composition in embankment at the head of the Aizome River, Atami City, Shizuoka Prefecture, Japan.

AKIHISA KITAMURA^{1,2}, MAKOTO YANAGA³, YUKI YAMASHITA⁴
and TOSHIMICHI NAKANISHI⁵

はじめに

2021年7月3日に、静岡県熱海市伊豆山地区の逢初川沿いで、土石流（以下、熱海土石流）が発生し、家屋を壊し、伊豆山港から相模湾へ流入した（図1）。この土石流で、死者・行方不明者28人、全・半壊家屋64棟の被害が出た。その後、土石流は逢初川源頭部にあった盛土の崩壊によることが判明した（静岡県, 2021a）。国土地理院（2021）は、2009年と2019年の測量データの比較から、同期間に形成された盛土の体積を約56,000m³と算出し、静岡県（2021a）はそのうちの約55,500m³が崩壊したと推定した。このような盛土崩壊はフィリピン（Huvaj-Sarihan and Stark 2008）、インドネシア（Lavigne *et al.*, 2014）や中国（Peng *et al.*, 2016; Yin *et al.*, 2016）でも起きているが、高速鉄道の高架下の流下と海洋流出は世界初である。

国土交通省（2020）は2020年3月までの調査で、全国で51,306箇所の大規模盛土造成地の位置図を公表したが、今回の盛土は大規模盛土造成地ではないので、図には示されなかった（https://www.pref.shizuoka.jp/kenmin/km-320/bou_3/documents/moridoatami.pdf）。そのため、同省

は大規模盛土造成地に加えて、①土砂災害警戒区域（土石流）の上流域及び区域内（地すべり、急傾斜）と②山地災害危険地区の集水区域（崩壊土砂流出）及び地区内（地すべり、山腹崩壊）を調べ、2021年11月末の暫定集計で約36,000箇所の要点検箇所を報告した（<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001465744.pdf>）。さらに、政府は昨年（2022年）5月27日に「盛土規制法」を公布し、その第四条（基礎調査）に「(略)、宅地造成、特定盛土等又は土石の堆積に伴う崖崩れ又は土砂の流出のおそれがある土地に関する地形、地質の状況その他主務省令で定める事項に関する調査を行うものとする。」を設けた。だが、地形・地質の状況を評価する具体的基準は示されていない。

伊豆周辺では、2021年7月1日から大雨となっていたが、土砂災害は伊豆山地区の土石流だけである。これは、災害危険性としては、逢初川源頭部の盛土が最大であったことを示す。よって、その崩壊の原因究明から「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得ることができる。

静岡県は、土木学会・地盤工学会・砂防学会から選出された委員からなる「逢初川土石流の発生原因調査検証

2023年2月11日受付 2023年3月2日受理

Received: 11 February 2023 Accepted: 2 March 2023

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 静岡大学理学部放射科学教育研究推進センター, 422-8529 静岡県駿河区大谷836

⁴ 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

⁵ ふじのくに地球環境史ミュージアム, 422-8017 静岡県静岡市駿河区大谷5762

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 Center for Radioscience Education and Research, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

⁴ Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

⁵ Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka, 5762 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8017 Japan

委員会（以下、検証委員会）」を設置し、県が作成した報告書案の検証を依頼した。検証委員会は、2022年9月に最終報告書を公表し、「少なくとも7波の土石流が確認され、(中略)、多くの段波が発生した原因としては、源頭部の盛り土が幾度かに分かれて崩落するたびに段波が発生した可能性や、一旦停止した土石流堆積物の背後に渓流水が供給され貯蓄された後に崩落し、段波が発生した可能性が考えられる」と報告した。また、空気～水～土骨格連成有限変形解析コードGEOASIAを用いて、盛土崩壊に至る挙動の再現解析を行っている。この解析では、盛土を上部盛り土（褐色の土砂）、下部盛り土（黒色の土砂）の2層構造とし（図2）、各層内の飽和透水係数を均質と仮定して、2つのケースで行っている（表1）。その結果、盛土下端部・中間部・上部の3箇所に大きなひずみ（変形）が発生することから、数次にわたって崩壊した可能性を示唆するとした（静岡県、2022b）。

一方、第一著者や木村（2021）は静岡県と熱海市の協力の下ではあるが、静岡県とは独自に熱海土石流に関する地球科学的研究を行っており、以下の調査結果を公表している。

(1) 静岡県の報告書を基に、木村（2021）は、盛土は三層構造で、2009年6月期前の盛土層、褐色盛土層（静岡県（2021a）の褐色の土砂）、黒色盛土層（静岡県

（2021a）の黒色の土砂）の順に重なり、分布高度の位置は褐色盛土層よりも黒色盛土層のほうが低所にあるとした。そして、2021年7月3日の崩落崖は、褐色盛土層と黒色盛土層の境界付近にあたるとした。静岡県（2022b）の報告によると、崩落崖は黒色盛土層内にある（図2）。したがって、盛土崩落の原因の検討には、黒色盛土層の内部構造と盛土を構成した黒色の土砂の力学的性質の解明が最重要となる（北村ほか、2022c）。

(2) 静岡県（2021b）は未崩落の盛土の5地点でボーリングコアを掘削した。北村・山下（2022）は、黒色盛土層を掘削したNo.3ボーリングコアを解析し、淘汰の良い砂（粒度の揃った砂）からなる厚さ4–19cmの層を4層確認した（図2,3）。盛土・土石流堆積物の粒度組成と比べると、砂層の粒度組成は一峰性を示し（図3）、含泥率が低い点で異なるので、砂層の採取地は、他の盛土の採取地とは異なると推定される。また、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た可能性がある（新藤、1993）。静岡県（2022a）が報告した2019年の盛土の小崩落（図2a）は、大間隙の証拠である。これらのことから、北村・山下（2022）はこのような高透水性を有する砂層の存在が

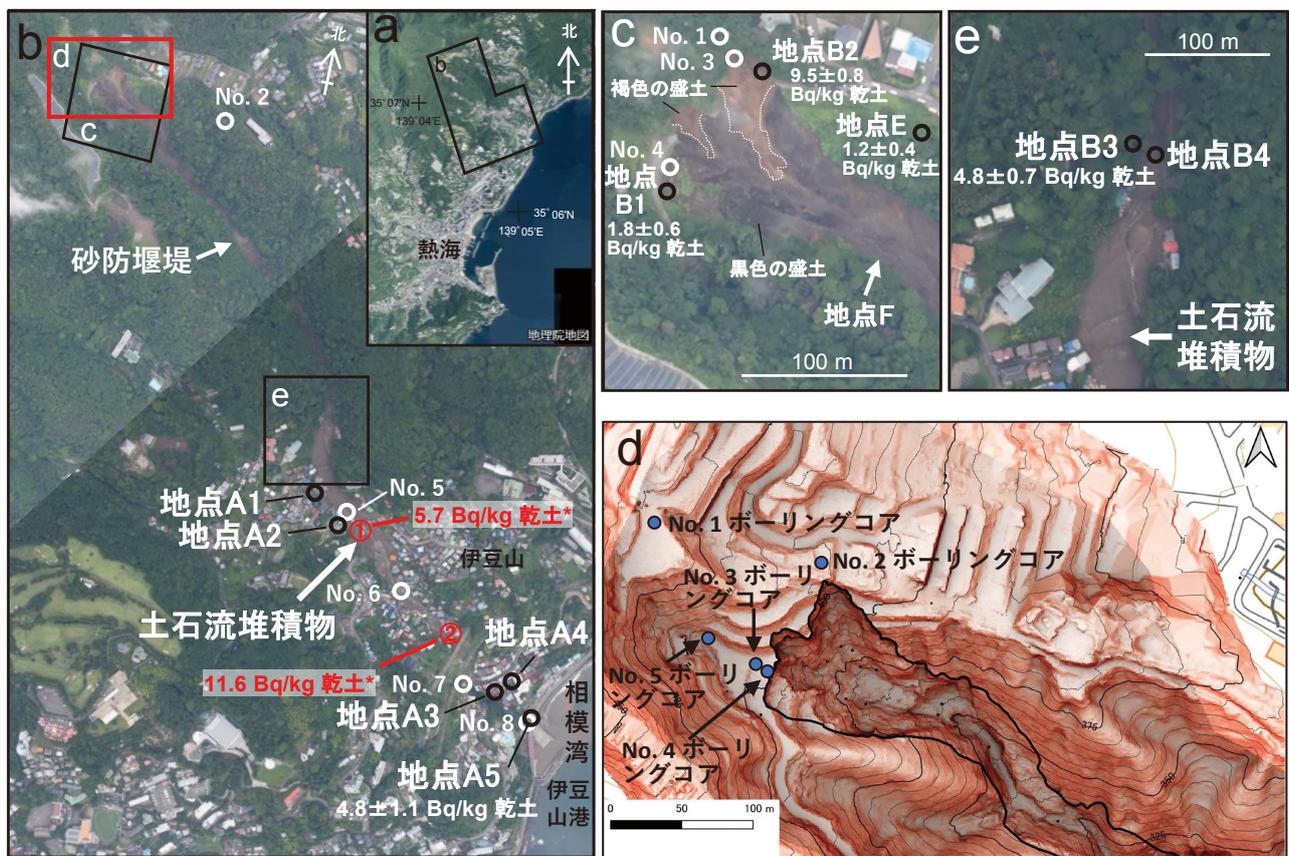


図1 熱海市伊豆山地区の土石流の流路と試料採取地点とボーリング掘削地点。a-c, e: 土石流の流路と試料採取地点である。数値は ^{137}Cs の測定値で、白色は北村ほか（2022d）の測定で、赤色は静岡県（2021c）の測定である。No. 1–8は静岡県（2021d）の試料採取地点。画像は地理院地図（2021）の写真番号48156と48158を使用 https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R3_0701_heavyrain.html, 2022年3月1日引用。d: 崩落後の盛土の赤色立体地図で静岡県（2022c）を一部改変。

盛土崩壊の発生の原因の一つになった可能性を指摘した。

(3) 盛土崩壊地の山側には未崩壊の盛土が露出しており、静岡県(2021a)は褐色の土砂と黒色の土砂を識別した(図1c)。前者は熱海周辺に分布する火山岩に由来すると考えられ、後者からは現世と完新世の沿岸性貝類(北村, 2022)、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, 2022e)が確認された。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、黒色盛土層の採取地の候補は、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

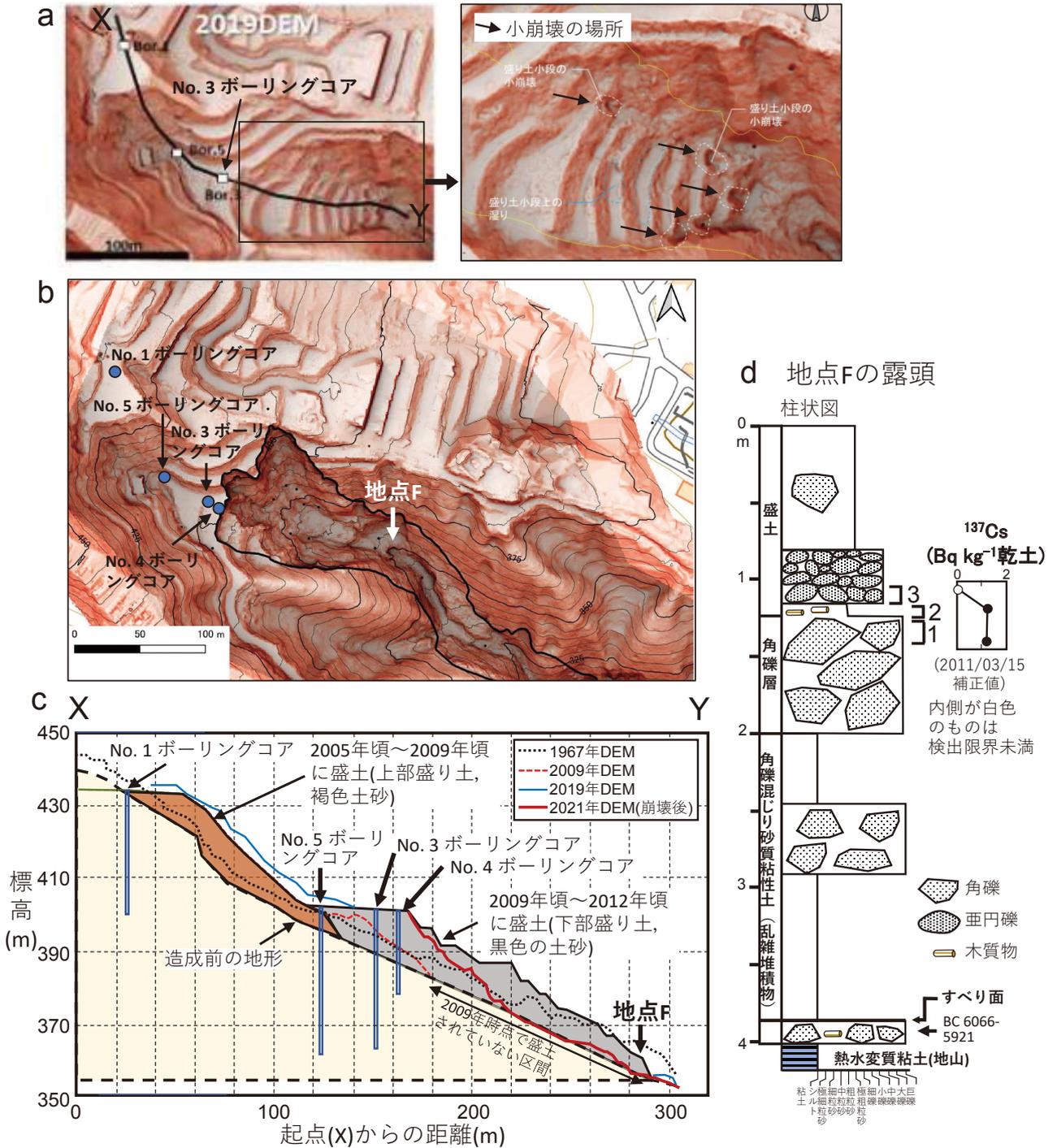


図2 熱海市逢初川源頭部の状況。 a: 2019年の盛土の状況。 XとYは盛土の断面線。 静岡県(2021b)を一部改変。 b: 崩壊した盛土の状況とボーリングコアと地点Fの位置図。 静岡県(2022b)を一部改変。 c: 盛土の断面、静岡県(2022b)を一部改変し、XとYはaに示した。 2022年11月21日引用。 d: 地点Fの露頭の柱状図。 北村ほか(2022b)を一部改変。

表1 静岡県(2022b)の盛土崩壊に至る挙動の再現解析に用いた飽和透水係数

	ケース1 m/s	ケース2 m/s	使用した値の出所	備考
下部盛り土	5.31×10^{-8}	7.50×10^{-7}	ケース1はNo. 3ボーリング孔の 深度7.0-8.0 mの現場透水試験 結果の値	黒色の土砂(静岡県, 2021), 黒色盛土層(木村, 2021)
上部盛り土	1.02×10^{-5}	1.02×10^{-5}	No. 5 ボーリング孔の 深度5.7-7.0 m の現場透水試験結果の値	褐色の土砂(静岡県, 2021), 褐色盛土層(木村, 2021)
溪流堆積物	1.79×10^{-3}	1.79×10^{-3}	No. 3ボーリング孔の 現場透水試験結果の値	
斜面堆積物	2.50×10^{-5}	2.50×10^{-5}	No. 1ボーリング孔の 現場透水試験結果	
安山岩	8.40×10^{-7}	8.40×10^{-7}	No. 3ボーリング孔の 現場透水試験結果の値	

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) 盛土最下端の基底部の露頭(図1cと図2b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)、中礫サイズの亜円礫層(層厚0.4m)、砂層(層厚0.8m以上)の順に重なる(図2d)(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、 ^{137}Cs 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, 2022b)。この角礫層の上位の堆積物が盛土で、亜円礫層の砂質堆積物は放散虫化石を含む泥岩岩片と有孔虫が確認されたので、黒色盛土層である(北村ほか, 2022b)。これらの観察から黒色盛土層の基底部には成層構造が存在することが確認された。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。

(5) 盛土最下端から約350m下流にある砂防堰堤は、土石流堆積物で埋積された。この堆積物は、初期崩壊物質の性状を復元できる唯一の試料である。静岡県(2021c)は2021年8月に砂防堰堤で長さ13.1mのボーリングコア試料を採取した(図4)。その後、埋積土は除去されたので、埋積土の試料はこのコアだけである。北村ほか(2022d)は、同コア試料に関して、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の濃度の深度分布を測定した。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波による福島第一原子力発電所の事故で、 ^{134}Cs と ^{137}Cs が放出され(Momoshima *et al.*, 2012)、その $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比はほぼ1である(東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 2012)。同事故で放出され

た ^{134}Cs と ^{137}Cs は静岡県にも飛来したので、それらの濃度の深度分布から、2011年3月中旬の地表面を確定できる。つまり、熱海土石流堆積物は、この“地表面”より上にある。

測定の結果、深度3.88-3.85mの試料から ^{134}Cs と ^{137}Cs のピークが検出され(図4)、2011年3月時点で減衰補正後の放射能比がほぼ1であるので、熱海土石流堆積物はそれより上位にあることが判明した。そして、深度3.74mで埋積土は褐色粘土層から黒色粘土層に変化し、深度3.74-3.70mの黒色粘土層からは海綿骨針を含む泥岩岩片が確認され、深度3.70-3.67mと3.67-3.63mの試料からも含有孔虫堆積岩片と含放散虫チャート岩片が確認された(図4)。したがって、黒色盛土層に由来する土石流堆積物の堆積は深度3.74mから始まったこと、つまり初期の土石流の運んだ堆積物の主体は黒色盛土層を構成する土砂だったことが判明した(北村ほか, 2022d)。

(6) 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)の土石流堆積物からも古生代末期-中生代の放散虫化石を含むチャート岩片が確認されたので(北村ほか, 2022a)、土石流堆積物の主体は黒色盛土層に由来すると推定される。

(7) 逢初川源頭部東側の地点Eには未崩落の盛土があり(図1c)、これを分析した結果、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, 2022c)。以上のことから、この盛土は、黒色盛土層と同様に、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。

(8) 泥質物の全硫黄濃度から、源頭部の未崩落盛土、盛土最下端の黒色の土砂、土石流堆積物、隣接盛土(地点E)の黒色土砂は4タイプに分けられる(北村, 2023)。

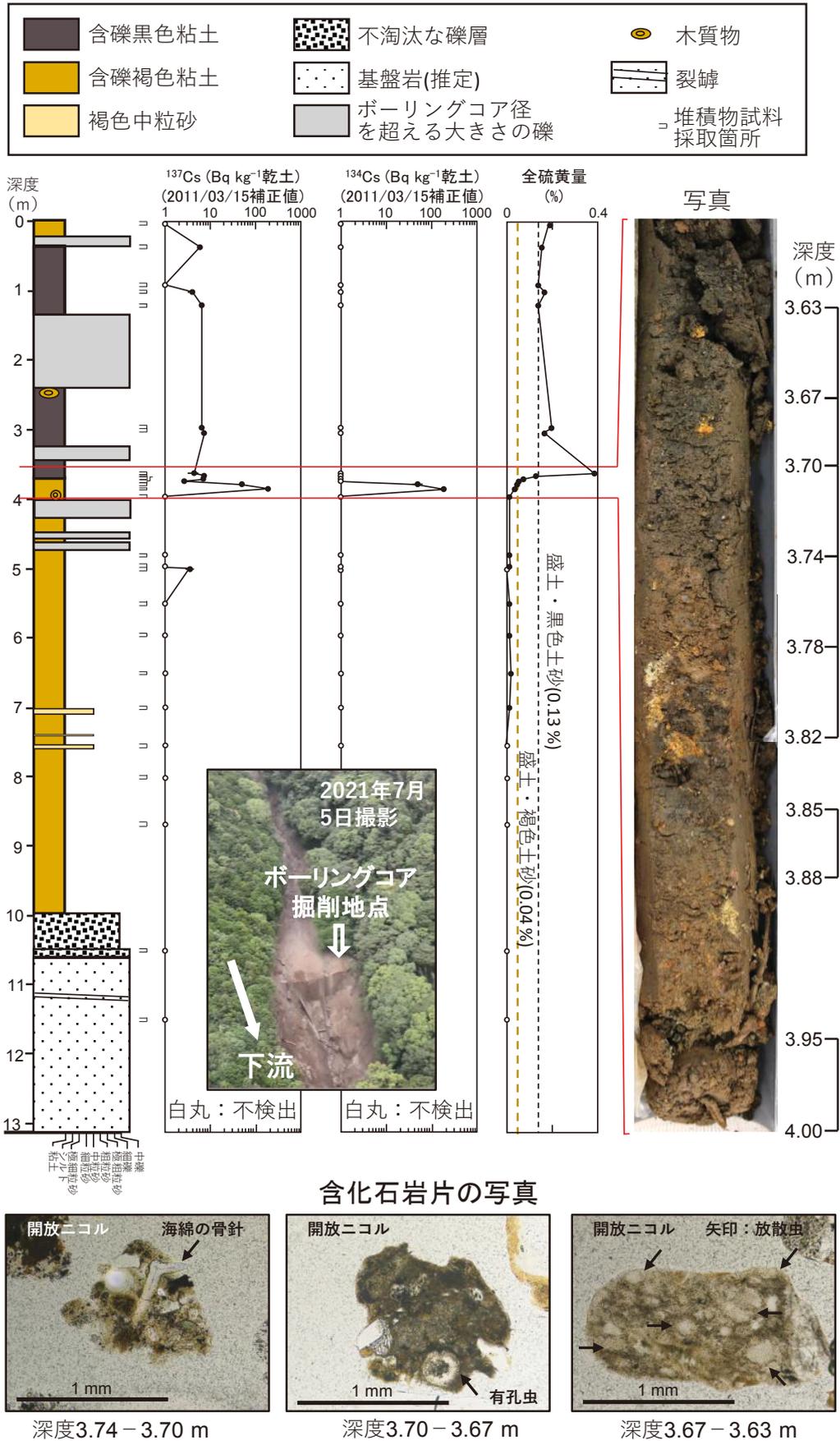


図4 砂防堰堤の埋積土のボーリングコアの柱状図と¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, 全硫黄量の層位変化, 含化石岩片の写真. 北村ほか (2022d) を一部改変. 放射性セシウム濃度の白丸は検出限界未満を示す.

1番目は0.06%以下の値をとる褐色の土砂（地点B2の源頭部の未崩落盛土）と周辺土壌と溪流堆積物（地点Fの盛土下端部の角礫層）である。2番目は0.1–0.2%の値をとる黒色の土砂（地点B1の源頭部の未崩落盛土）、盛土最下端の黒色の土砂（地点F）、砂防堰堤を埋積した第0波の土石流堆積物のほとんどの試料と集落到達した土石流堆積物（地点A2, A5）である。3番目は0.29%の隣接盛土の黒色土砂である。4番目は第0波の土石流堆積物の1つで0.39%である。

以上のように、これまでの調査で、土石流堆積物の主体は黒色盛土層を構成する黒色の土砂であることが裏付けられた。したがって、盛土崩落の原因の検討には、黒色の土砂の力学的性質と黒色盛土層の内部構造の解明が最重要である。そして、現在までに、黒色の土砂の採取地の候補には、神奈川県西部を対象とすると、相模湾の沿岸堆積物、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・更新統などがあることが判明した。さらに、未崩落の盛土から円礫層と淘汰の良い砂層が確認された。これらは、黒色盛土層の構成物と内部構造は不均質であることを明示する。したがって、盛土崩壊の再現解析を均質モデルから始めるのは妥当ではあるものの、さらに不均質モデルへ展開する必要がある。これは、静岡県の均質モデルから得た知見、例えば、「崩壊に必要な水量」が過大評価されている可能性があるからだ。もし、そうならば、今後の防災対策に悪影響を及ぼしかねない。

不均質モデルの実施には、未崩落の黒色盛土層の内部構造の情報は極めて重要である。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。これらのコアのうち、No. 3とNo. 4ボーリングコアは未崩落の黒色盛土層の最も崩落崖に近い位置にある。前述のように北村・山下（2022）はNo. 3ボーリングコアを調べ、4層の淘汰の良い砂からなる層を報告している。そこで、本論では、これらの砂層の分布を明らかにするために、No. 3ボーリングコアよりも9.6m海側に位置するNo. 4ボーリングコアと39.2m山側に位置するNo. 5ボーリングコアの解析を行った。さらに上記の3地点の山側の延長付近で掘削したNo. 1ボーリングコアの解析も行った。これらの解析結果を速報する。

試料及び分析

本研究で調査したコアは、未崩落の盛土の4地点で掘削したコア（No. 1, 3, 4, 5ボーリングコア）である。静岡県（2021b）によると、コア径は5cm、各コアの全長は、それぞれ35m, 38m, 21m, 40mである。各コアの盛土の下面深度はNo. 1が1.05m, No. 3が12.00m, No. 4が14.40m, No. 5が7.55mである。標準貫入試験のため、No. 4ボーリングコアは0.5m間隔で試料が抜けている。また、No. 5ボーリングコアの2.55m以深は礫からなるので、今回の調査からは除外した。

上記のコア試料のうち、砂質・泥質物からなる部分を研究室で半裁し、堆積相を記載して、断面を写真撮影し、

0.4–0.5mの間隔で堆積物を採取した。なお、後述するがNo. 4とNo. 5ボーリングコアの深度約2mで ^{134}Cs と ^{137}Cs が検出されたため、両コアの間に位置するNo. 3ボーリングコアの深度約2m付近については、0.05–0.1mの間隔で堆積物を採取した。

試料は、60°Cのオーブンで24時間乾燥後、約3–8gのサブ試料を粒度分析、約28–86gのサブ試料を放射性セシウム濃度の測定、約5gのサブ試料を全有機炭素（TOC）、全窒素（TN）及び全硫黄（TS）の含有量測定に供した。

粒度分析は、16,000 μm （16mm）以下の粒子について目聞き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。32 μm 以下の粒径を5.5 ϕ として、各試料の算術平均粒径と標準偏差と含泥率を算出した。これらの統計値は、No. 4ボーリングコアの砂礫互層と礫層に関しては基質を対象としたものになる。そのため、これらの砂礫互層と礫層については、16,000 μm （16mm）以上の粒子を対象に、重量、長軸、中軸、短軸を測定し、円磨度印象図（Krumbein, 1941）に基づき円磨度を記載した。

通常の堆積物から得たボーリングコア試料では、火山灰層などの鍵層を用いて、コア間を対比することで堆積相などの空間分布を解明する。一方、盛土層に関しては、 ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度に基づく2011年3月中旬の地表面が唯一の対比可能な同時期面である。そこで、各コア試料について次の方法で ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度を測定した。

上記で採取した堆積物試料から28–86gを分取し、U8容器に封入し、静岡大学理学部放射科学教育研究推進センターの所有する高純度ゲルマニウム半導体検出器（SEIKO EG&G社GMX25P4-70およびMCA-7a）を用いた γ 線スペクトロメトリーで、 ^{134}Cs と ^{137}Cs を測定した。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の値は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波による福島第一原子力発電所の事故で大気中に放射性セシウムが放出されたとされる2011年3月15日（Adachi *et al.*, 2013）を基準に減衰補正を行った。

前記の通り、盛土の褐色の土砂、黒色の土砂、土石流堆積物の識別に全硫黄濃度が有効である。そこで、TOC, TN, TSの含有量測定試料については、ふるいにかけて63 μm 以下の粒径の試料を得た後、メノウ乳鉢で粉末化し、ふじのくに地球環境史ミュージアムのCHNS分析装置（Flash 2000, Thermo Fisher Scientific社製）で測定した。

結果

No. 1ボーリングコア

No. 1ボーリングコアは、深度0–6mはコア径より大きいコンクリートと火山岩礫が主体で、深度6m以深では礫層が主体をなす（図5）。16,000 μm （16mm）以下の粒子については、含泥率が50–70%であるので、不淘汰の礫層である（表2）。全硫黄濃度は0.01–0.37%であり、深度6m以深で高い値を示す（図5）。 ^{137}Cs は、深度0.00–0.05mで $3.7 \pm 0.7\text{Bq/kg}$ 乾土の値をとり、他の部分は検出限界未満である（図5）。

No. 1ボーリングコア

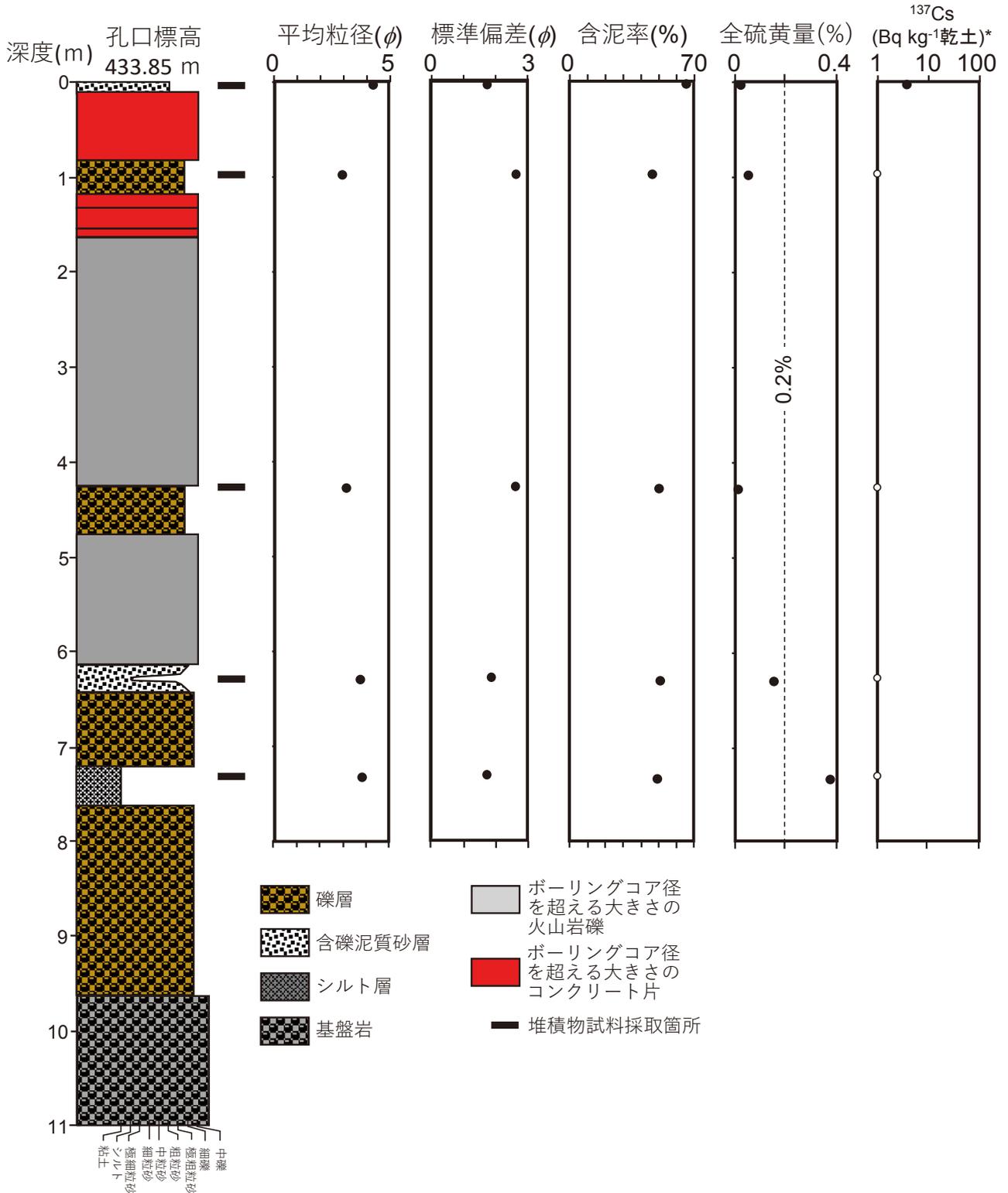


図5 No. 1ボーリングコアの柱状図，堆積物の平均粒径，標準偏差，含泥率，全硫黄濃度， ^{137}Cs の層位変化．放射性セシウム濃度の白丸は検出限界未達を示す．

表2 No. 1ボーリングコアの堆積物試料の粒度組成, 平均粒径, 標準偏差, 含泥率, 全有機炭素濃度, 全窒素濃度, 全硫黄濃度, ^{137}Cs , ^{134}Cs 濃度

試料深度(m)	0.00–	0.95–	4.25–	6.27–	7.30–
粒径(mm)	0.05	1.00	4.30	6.32	7.35
16–8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8–4	0.0	3.5	2.3	0.0	0.0
4–2	0.0	10.5	8.7	0.8	0.0
2–1.5	0.9	3.3	4.7	0.6	0.9
1.5–1	0.6	2.8	3.7	1.4	2.0
1–0.75	1.8	2.7	3.0	3.7	2.8
0.75–0.5	7.1	2.9	3.6	4.4	3.9
0.5–0.37	1.6	3.0	2.9	6.5	3.3
0.37–0.25	2.3	3.2	3.2	4.8	3.9
0.25–0.16	2.9	3.6	2.5	4.7	6.4
0.16–0.125	4.4	4.6	3.1	5.1	3.5
0.125–0.094	4.9	5.1	4.3	7.2	11.4
0.094–0.063	7.8	8.2	7.9	9.9	12.6
0.063–0.032	8.5	12.4	9.9	11.7	12.6
<0.032	57.1	34.1	40.2	39.2	36.7
平均粒径(ϕ)	4.27	2.95	3.12	3.71	3.79
標準偏差(ϕ)	1.73	2.64	2.62	1.86	1.73
含泥率(%)	65.5	46.5	50.2	50.9	49.3
全有機炭素(%)	2.64	1.65	0.31	5.29	0.83
全窒素(%)	0.15	0.08	0.02	0.10	0.04
全硫黄(%)	0.02	0.05	0.01	0.15	0.37
Cs-137(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	3.7 ± 0.7	ND (< 2.0)	ND (< 2.7)	ND (< 5.7)	ND (< 2.7)
Cs-134(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	ND (< 72)	ND (< 70)	ND (< 95)	ND (< 208)	ND (< 95)

No. 3 ボーリングコア

No. 3 ボーリングコアの深度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(図6). 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. 北村・山下(2022)は4層の粒度組成と砂層の直上直下の堆積物の粒度組成を報告した. 本研究では, 含礫泥質砂層の粒度組成が追加され, それらの平均粒径は1.2–2.9 ϕ (0.35–0.22mm), 標準偏差は2.1–2.6 ϕ , 含泥率は15–45%である(表3, 図6). 全硫黄濃度は0.07–2.37%の値をとり, 深度1.95–3.52mは0.4–2.37%の高い値を示す(表3, 図6).

^{137}Cs は, 深度11.47–11.52mで $10.2 \pm 1.0\text{Bq/kg}$, 深度10.42–10.47mで $5.3 \pm 0.7\text{Bq/kg}$, 深度0.00–0.05mで $4.1 \pm 0.8\text{Bq/kg}$ の値をとり, 他の部分は検出限界未満である. すべての試料に関して, ^{134}Cs は検出限界未満である(表3, 図6).

No. 4 ボーリングコア

No. 4 ボーリングコアは主に含礫泥質砂からなり, 深度10.80–10.57mと4.72–4.60mに淘汰の良い砂層と礫層の互層(以下では砂礫互層)があり, 深度7.00–6.80mに礫層がある(図7). 砂礫互層は上位からI, IIとする. 砂礫互層I, IIの淘汰の良い砂層の平均粒径は0.6–1.9 ϕ (0.66–0.27mm), 標準偏差は1.2–2.8 ϕ , 含泥率は1.8–8.5%であり, 粒度組成は一峰性を示す(表4, 5, 図8). 含礫泥質砂層の平均粒径は0.0–3.3 ϕ (1.00–0.10mm), 標準偏差は2.0–3.6 ϕ , 含泥率は8.0–41.0%である(表4, 図7). 砂礫互層I, IIと礫層の礫径は4cm以下で, 円磨度は0.1–0.5である(表6). なお, 多くの礫にコンクリートが付着していた. 全硫黄濃度は0.05–0.9%の値をとり, 深度8.40–11.00mは0.23–0.72%の高い値を示す(表4, 図7).

^{137}Cs は, 深度13.30–13.35mで $2.1 \pm 0.3\text{Bq/kg}$ 乾土, 深度4.45–4.50mで $16.1 \pm 0.5\text{Bq/kg}$, 深度1.95–2.00mで223.1

No. 3ボーリングコア

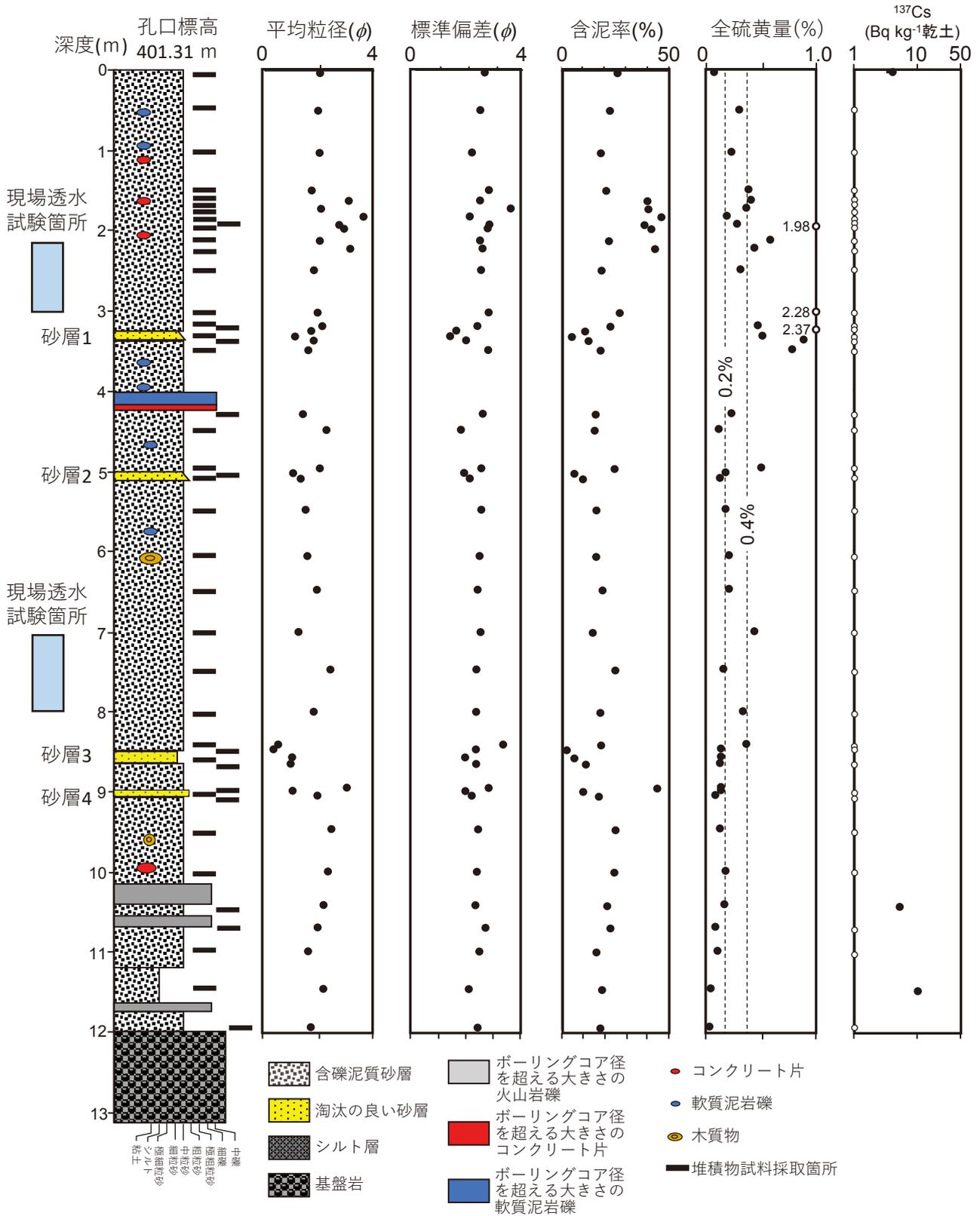


図6 No. 3ボーリングコアの柱状図, 堆積物の平均粒径, 標準偏差, 含泥率, 全硫黄濃度, ^{137}Cs の層位変化. 放射性セシウム濃度の白丸は検出限界未満を示す.

No. 4ボーリングコア

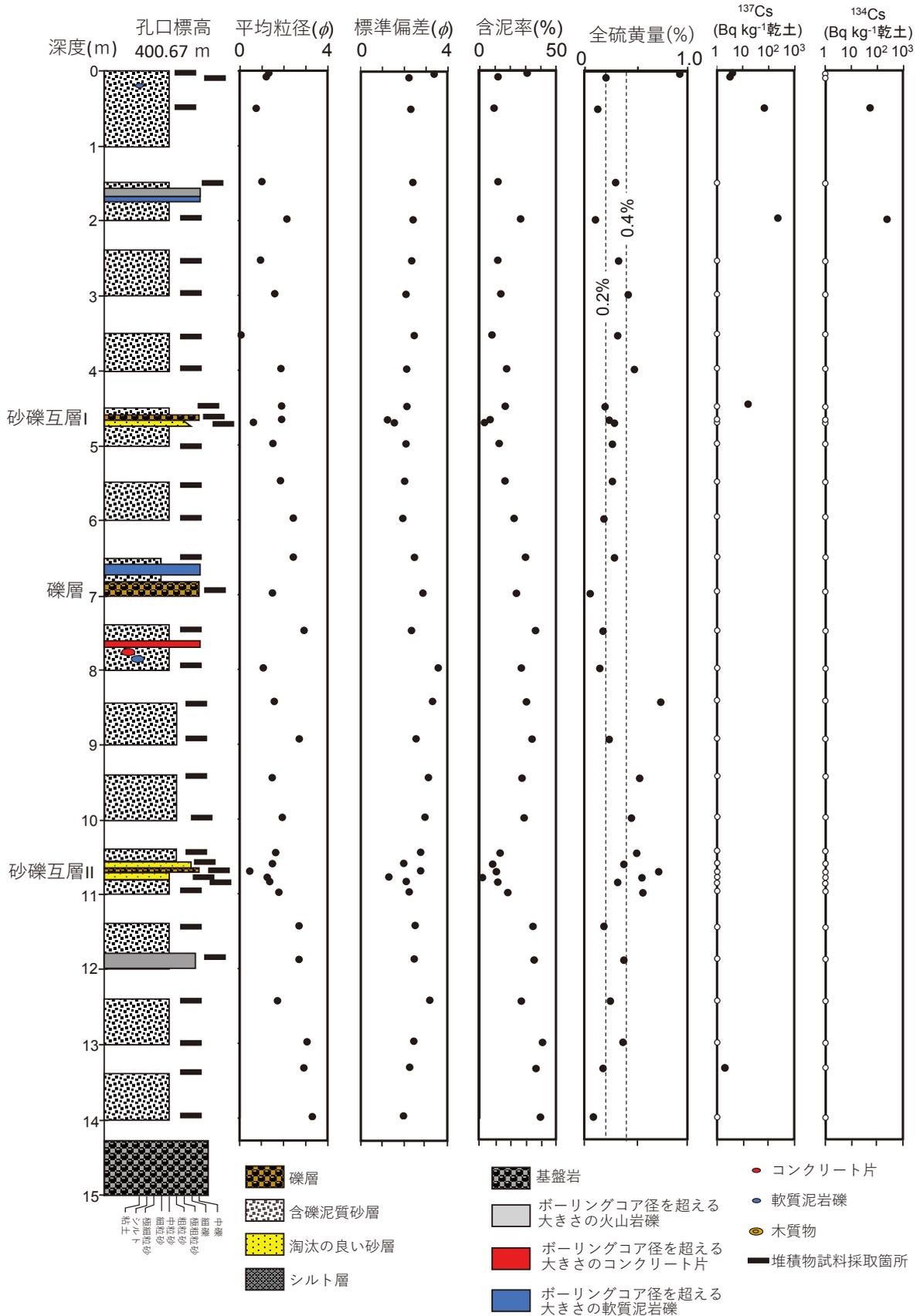


図7 No. 4ボーリングコアの柱状図，堆積物の平均粒径，標準偏差，含泥率，全硫黄濃度， ^{137}Cs ， ^{134}Cs の層位変化．放射性セシウム濃度の白丸は検出限界未満を示す．

表4 No. 4 ボーリングコアの堆積物試料の粒度組成, 平均粒径, 標準偏差, 含泥率, 全有機炭素濃度, 全窒素濃度, 全硫黄濃度, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs濃度.

試料深度(m)	0.00-	0.05-	0.47-	1.45-	1.95-	2.50-	2.95-	3.50-	3.95-	4.45-	4.64-	4.67-	4.95-	5.45-	5.95-	6.47-	6.95-	7.45-
粒径(mm)	0.05	0.10	0.52	1.50	2.00	2.55	3.00	3.55	4.00	4.50	4.67	4.72	5.00	5.50	6.00	6.52	7.00	7.50
16-8	15.9	3.1	7.8	6.3	0.0	5.1	0.0	11.4	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8-4	7.2	4.3	4.2	6.6	4.5	5.3	5.3	11.1	0.0	5.4	0.9	4.6	5.2	0.0	0.8	5.6	15.5	4.1
4-2	9.5	8.6	9.0	6.0	6.4	8.9	5.7	15.4	2.5	4.2	0.4	7.2	8.1	8.1	2.4	8.8	16.4	5.0
2-1.5	4.6	5.8	7.2	7.0	5.0	7.3	4.3	7.5	4.6	3.4	0.6	7.7	3.9	4.3	3.2	3.3	2.6	2.5
1.5-1	3.6	6.6	9.0	7.7	6.1	9.0	5.5	6.2	5.5	4.4	1.0	14.5	4.9	5.6	3.5	2.9	2.8	2.7
1-0.75	3.1	6.8	8.6	6.6	5.7	9.1	6.4	7.7	7.8	5.9	3.3	15.1	7.0	7.9	3.6	2.9	2.4	2.6
0.75-0.5	3.4	10.8	9.8	9.7	6.4	8.4	12.1	7.8	12.4	8.4	6.5	13.3	11.2	9.5	10.1	3.6	3.0	3.1
0.5-0.37	3.5	13.2	8.3	9.5	7.2	9.0	11.1	6.8	10.7	10.2	16.4	9.8	11.3	11.4	10.3	4.4	4.8	4.1
0.37-0.25	3.4	9.1	8.6	8.5	6.8	7.9	10.6	5.6	10.7	11.0	39.4	13.5	10.7	10.7	10.9	5.3	4.3	5.6
0.25-0.16	3.3	7.4	6.7	7.8	6.9	6.1	9.2	4.7	8.6	10.4	16.8	6.8	9.3	9.7	9.2	7.1	5.6	6.8
0.16-0.125	3.8	4.3	5.1	5.6	6.9	5.3	7.1	3.5	7.3	8.9	5.0	2.3	7.2	7.4	10.3	10.4	5.7	8.5
0.125-0.094	4.0	4.8	3.9	3.8	6.0	4.0	5.3	2.6	5.4	6.8	2.0	1.2	5.2	5.3	7.9	9.4	7.5	8.8
0.094-0.063	3.5	3.3	2.3	3.0	5.4	2.6	3.4	1.7	3.6	4.2	1.0	0.7	3.3	3.6	5.3	6.3	5.3	9.4
0.063-0.032	5.9	3.6	3.3	3.6	8.2	3.3	4.2	2.1	4.4	4.9	1.1	0.8	4.1	4.4	7.1	9.7	7.6	10.1
<0.032	25.3	8.4	6.1	8.4	18.6	8.6	9.7	5.9	13.2	11.9	5.7	2.3	8.7	12.2	15.4	20.3	16.5	26.6
平均粒径(φ)	1.30	1.19	0.73	0.99	2.13	0.93	1.58	0.04	1.86	1.89	1.89	0.60	1.49	1.84	2.42	2.42	1.47	2.91
標準偏差(φ)	3.37	2.22	2.31	2.40	2.41	2.35	2.09	2.46	2.12	2.13	1.24	1.55	2.09	2.02	1.94	2.47	2.86	2.34
含泥率(%)	31.2	12.0	9.4	12.0	26.8	11.9	13.9	8.0	17.6	16.8	6.8	3.1	12.8	16.6	22.5	30.0	24.1	36.7
全有機炭素(%)	2.35	1.63	1.83	2.20	1.78	2.27	2.32	1.86	2.43	1.55	2.22	2.22	2.16	2.01	1.26	1.53	1.26	1.73
全窒素(%)	0.04	0.09	0.11	0.12	0.10	0.13	0.13	0.10	0.14	0.09	0.14	0.19	0.13	0.12	0.08	0.10	0.09	0.11
全硫黄(%)	0.90	0.20	0.12	0.29	0.10	0.32	0.41	0.31	0.47	0.19	0.23	0.28	0.26	0.26	0.18	0.28	0.05	0.17
Cs-137(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	4.1 ± 0.8	3.3 ± 0.7	68.4 ± 0.8	ND (<2.7)	223.1 ± 1.8	ND (<2.7)	ND (<2.6)	ND (<2.5)	ND (<2.5)	16.1 ± 0.5	-	-	ND (<2.5)	ND (<2.7)	ND (<2.6)	ND (<2.8)	ND (<2.7)	ND (<2.3)
Cs-134(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	ND (<88)	ND (<78)	52.8 ± 15.4	ND (<105)	235.4 ± 23.3	ND (<102)	ND (<89)	ND (<87)	ND (<98)	ND (<49)	-	-	ND (<94)	ND (<99)	ND (<99)	ND (<101)	ND (<99)	ND (<88)

試料深度(m)	7.95-	8.40-	8.90-	9.42-	9.95-	10.42-	10.57-	10.67-	10.75-	10.81-	10.95-	11.40-	11.85-	12.40-	12.95-	13.30-	13.95-
粒径(mm)	8.00	8.45	8.95	9.47	10.00	10.47	10.64	10.74	10.80	10.86	11.00	11.45	11.90	12.45	13.00	13.35	14.00
16-8	29.1	14.2	0.0	12.2	8.9	17.5	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	18.2	4.9	0.0	0.0
8-4	1.6	10.8	11.4	4.6	7.1	0.6	9.7	16.1	5.7	6.7	3.7	0.6	7.7	3.7	0.0	2.2	0.0
4-2	8.0	4.5	2.1	11.9	5.1	1.7	2.6	8.6	1.9	7.6	9.3	5.9	2.4	2.3	3.9	3.3	1.9
2-1.5	2.0	2.4	1.3	4.4	2.3	1.1	2.4	2.9	0.8	4.3	3.5	2.0	2.9	1.8	0.8	3.7	3.1
1.5-1	1.0	2.0	1.6	3.1	2.6	1.1	2.6	2.7	1.4	5.9	4.4	2.6	2.3	2.0	1.4	4.1	3.0
1-0.75	1.0	2.1	2.2	2.5	3.4	1.7	5.4	3.7	3.6	6.5	6.5	3.3	3.1	2.2	2.2	4.5	3.4
0.75-0.5	1.5	2.9	2.4	4.8	4.0	2.6	10.6	5.3	11.7	11.4	10.0	4.1	4.9	2.8	3.2	4.2	4.0
0.5-0.37	2.1	4.2	3.5	4.5	5.8	4.5	13.0	7.4	27.7	11.9	10.2	5.3	5.4	4.3	4.5	4.9	4.4
0.37-0.25	2.2	4.5	5.4	4.6	6.4	8.2	14.0	9.1	29.2	11.2	9.6	6.3	7.6	5.6	6.7	4.7	5.0
0.25-0.16	4.4	5.3	8.3	4.8	6.2	13.7	13.3	8.5	13.9	9.3	9.1	7.6	8.0	8.1	8.2	8.2	6.4
0.16-0.125	6.1	6.7	10.7	4.9	6.4	17.4	9.7	5.7	1.8	6.0	6.5	6.5	6.7	8.8	8.1	8.5	6.1
0.125-0.094	8.3	4.3	8.4	4.5	5.9	10.8	5.6	3.9	0.3	4.5	5.0	8.0	5.1	7.5	6.7	6.5	12.9
0.094-0.063	5.5	5.4	8.2	5.5	6.8	5.8	2.5	2.6	0.1	2.9	3.6	8.8	8.3	5.6	8.1	8.2	9.9
0.063-0.032	7.5	7.3	9.2	7.4	7.7	4.3	2.4	3.2	0.1	3.7	4.9	11.0	7.7	10.3	10.6	11.6	11.6
<0.032	19.8	23.4	25.2	20.3	21.5	9.1	6.1	7.8	1.7	8.1	13.6	23.9	24.7	19.6	30.9	26.4	28.2
平均粒径(φ)	1.05	1.56	2.69	1.46	1.92	1.62	1.47	0.44	1.23	1.35	1.76	2.68	2.68	1.70	3.05	2.90	3.29
標準偏差(φ)	3.56	3.30	2.55	3.11	2.95	2.76	1.98	2.76	1.30	2.10	2.23	2.50	2.46	3.17	2.44	2.25	1.97
含泥率(%)	27.3	30.7	34.4	27.7	29.2	13.4	8.5	11.0	1.8	11.8	18.5	34.9	35.7	27.3	41.2	37.0	39.8
全有機炭素(%)	1.14	2.21	1.99	2.91	2.05	1.85	1.62	2.20	1.68	1.32	1.67	1.32	1.57	1.58	1.84	2.77	3.21
全窒素(%)	0.07	0.12	0.12	0.15	0.12	0.10	0.08	0.12	0.08	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.10	0.21	0.24
全硫黄(%)	0.14	0.72	0.23	0.52	0.44	0.49	0.37	0.70	0.54	0.31	0.55	0.18	0.37	0.24	0.36	0.17	0.08
Cs-137(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	ND (<3.2)	ND (<2.8)	ND (<3.0)	ND (<2.8)	ND (<2.6)	ND (<2.2)	-	ND (<2.2)	-	ND (<2.5)	ND (<2.5)	ND (<2.7)	ND (<3.1)	ND (<2.8)	ND (<3.1)	2.1 ± 0.3	ND (<4.1)
Cs-134(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	ND (<118)	ND (<99)	ND (<122)	ND (<99)	ND (<103)	ND (<88)	-	ND (<86)	-	ND (<92)	ND (<98)	ND (<106)	ND (<116)	ND (<107)	ND (<113)	ND (<46)	ND (<158)

表5 No. 3, 4のボーリングコアの砂層と砂礫互層の平均粒径, 標準偏差, 含泥率. No. 3のボーリングコアのデータは北村・山下(2022)に基づく.

堆積物	コア番号	深度(m)	層厚(cm)	上部・下部	平均粒径(φ)	標準偏差(φ)	含泥率(%)
淘汰の良い砂層1	3	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
淘汰の良い砂層2	3	5.00-5.08	8	—	1.05	1.83	6.5
淘汰の良い砂層3	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
淘汰の良い砂層4	3	9.00-9.04	4	—	1.04	1.88	10.5
砂礫互層I	4	4.72-4.64	8	上部(4.64-4.67 m)	1.89	1.24	6.8
				下部(4.67-4.72 m)	0.60	1.55	3.1
砂礫互層II	4	10.80-10.58	22	砂層(10.57-10.64 m)	1.47	1.98	8.5
				礫層(10.67-10.74 m)	0.44	2.76	11.0
				砂層(10.75-10.80 m)	1.23	1.30	1.8

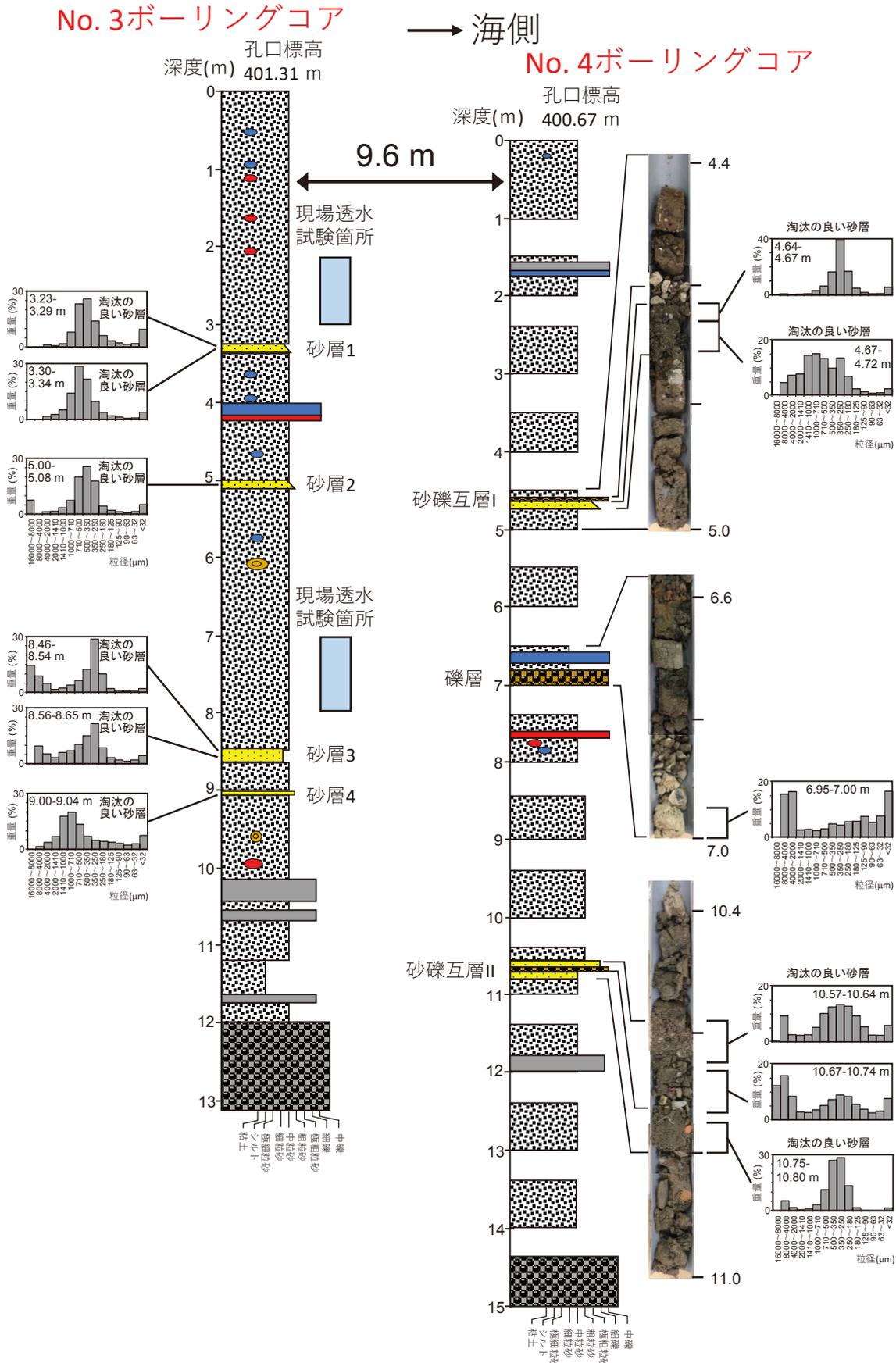


図8 No. 3, 4のボーリングコアの柱状図と砂層, 砂礫互層, 礫層の粒度組成. No. 3のボーリングコアの粒徑組成は北村・山下 (2022) に基づく.

表6 礫の重量, 大きさ, 円磨度, 礫種. 赤字はコンクリートが付着した礫.

砂礫互層I(深度4.58-4.64 m)

重量 (g)	長軸	中軸	短軸	円磨度
11.57	29.7	24.3	16.8	0.3
8.86	29.7	19.2	17.7	0.2
4.04	27.6	19.9	10.9	0.1
6.04	27.0	16.6	11.6	0.3
5.83	24.9	19.7	10.4	0.3
4.33	23.2	14.3	13.4	0.1
3.44	22.2	12.1	9.7	0.4
2.31	22.1	11.2	10.1	0.2
8.12	21.5	20.6	15.2	0.3
3.81	19.0	18.5	14.4	0.4

礫層(6.95-7.00 m)

重量 (g)	長軸	中軸	短軸	円磨度
10.80	35.3	20.3	16.0	0.3
3.35	26.5	14.8	8.0	0.5
2.39	18.2	13.1	10.2	0.3

砂礫互層I(10.67-10.74 m)

重量 (g)	長軸	中軸	短軸	円磨度
20.11	34.6	25.7	21.3	0.2
8.71	29.5	21.3	17.6	0.2
6.28	25.1	19.1	12.1	0.3
1.41	17.5	12.4	6.5	0.4
2.48	17.5	13.9	9.4	0.2
1.35	16.6	11.2	5.1	0.3

合理的である。

No. 5 ボーリングコアの深度 1.92–1.97m から ^{134}Cs と ^{137}Cs が検出され, その $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ は 1.43 である. この値は, 福島第一原子力発電所の事故で放出された ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比の値の範囲内であり, ^{134}Cs の供給源は福島第一原子力発電所の事故以外には該当する事象はない. この $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ (1.43) は, No. 4 ボーリングコアの下位の ^{134}Cs 含有層の値 (1.05) のほうが上位 ^{134}Cs 含有層の値 (0.77) よりも近いので, 我々は No. 5 ボーリングコアの ^{134}Cs 含有層を No. 4 ボーリングコアの下位の ^{134}Cs 含有層に対応すると考えた. この解釈が正しいとすると, No. 4 と No. 5 ボーリングコアでは, 深度約 2m より上の土砂は 2011 年 3 月中旬以降に盛られたものと推定される (図 12).

静岡県 (2022b) の報告書の「第 7 章 盛り土が崩壊に至る挙動の再現解析」の図 7-4 解析断面と図 7-5 水理境界条件を比べると, No. 5 ボーリングコアは上部盛り土 (褐色盛土層) に対応する (図 13). そうすると, 本研究の結

果と合わせると, 2011 年 3 月中旬以降に下部盛り土 (黒色盛土層) と上部盛り土 (褐色盛土層) がともに埋め立てられたことになり, 部分的かもしれないが, 従来の見解—上部盛り土 (褐色盛土層) を下部盛り土 (黒色盛土層) が覆う—とは異なることとなる. この場合, 両者の境界線は単純な曲線ではなく, 指交関係 (互いに舌状部をはり出していること) になる (図 13).

No. 4 と No. 5 ボーリングコアの深度約 2m から ^{134}Cs が検出されたが, No. 3 ボーリングコアに関しては同深度から細かく試料を採取・測定したものの, ^{134}Cs は検出されなかった (図 6). したがって, No. 3 と 4 ボーリングコアに見られる淘汰の良い砂層を No. 5 ボーリングコアへ対比できない. だが, No. 4 ボーリングコアにも砂層が確認されたことは (図 8), 砂層が水平距離で 9.6m 連続する可能性のあることを示す. また, No. 4 ボーリングコアでは砂層に随伴した礫層があることから, 海側に向かうと粗粒化する可能性がある. この傾向は, 前記の No. 4 と No. 5 ボーリングコアの間の土砂の側方変化の傾向と同じである.

なお, 礫層が確認されたので, 黒色盛土層の構成物の多様性がまた一つ増えることとなる.

放射性セシウム濃度に基づく土砂の分類区分

^{137}Cs は, 1950 年代以降の核実験や原子力発電所の事故で大気中に放出され, ^{134}Cs は原子力発電所の事故で大気中に放出され, 半減期は ^{137}Cs が 30.1 年で, ^{134}Cs が 2.07 年である. この半減期の違いを使うことで, 堆積物の堆積年代を推定できる. すなわち, ^{134}Cs と ^{137}Cs が検出限界未満の試料 (以下, タイプ I) は 1950 年代以前の可能性が高く, ^{137}Cs は検出されるが ^{134}Cs は検出限界未満の試料 (以下, タイプ II) の堆積期間は 1950 年代から 2011 年 3 月初旬までとなり, ^{134}Cs と ^{137}Cs を含む試料 (以下, タイプ III) の堆積期間は 2011 年 3 月中旬以降となる (図 13). このタイプ分けを土石流堆積物に適用すると, 砂防堰堤を埋めた土石流堆積物では, 2 試料だけがタイプ I で, 残りのすべてはタイプ II に分類される (図 4, 11). また, 集落到達した土石流堆積物については, 放射性セシウム濃度を測定した 4 試料のすべてがタイプ II に分類される (図 4, 11). つまり, 土石流堆積物のほぼすべてがタイプ II であることから, 崩壊した黒色盛土層の大部分はタイプ II の土砂となる. そして, 崩壊した黒色盛土層の ^{137}Cs 濃度は, 土石流堆積物の測定値から求めた平均値・標準偏差と中央値から, $5.3 \pm 2.9\text{Bq/kg}$ 乾土と 5.7Bq/kg 乾土と推測される.

未崩落の黒色盛土層でタイプ II の黒色の土砂は, 崩落崖の地点 B1 から採取した試料 (北村ほか, 2022d), No. 5 ボーリングコアの黒色の土砂の 9 試料中の 8 試料が該当する. 一方, No. 3 と No. 4 ボーリングコアの黒色の土砂のほとんどの試料はタイプ I に分類され, タイプ II に分類される試料は No. 3 ボーリングコアでは 33 試料中の 3 試料, No. 4 ボーリングコアでは 31 試料中の 4 試料のみである. そして, 前記の崩壊した黒色盛土層の ^{137}Cs 濃度の推測値に同等もしくはそれより高い値の試料は, No. 3 ボーリングコアの深度 10.42–10.47m と 11.47–11.52m の試料

表7 No. 5 ボーリングコアの堆積物試料の粒度組成, 平均粒径, 標準偏差, 含泥率, 全有機炭素濃度, 全窒素濃度, 全硫黄濃度, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs濃度.

試料深度(m)	0.00-	0.05-	0.47-	1.00-	1.12-	1.54-	1.59-	1.92-	1.97-	2.00-	2.50-
粒径(mm)	0.05	0.10	0.52	1.05	1.17	1.56	1.64	1.97	2.00	2.05	2.55
16-8	0.0	3.4	0.0	6.8	13.3	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8-4	0.0	1.9	3.7	2.0	2.9	5.9	6.6	0.0	0.0	4.7	12.7
4-2	5.1	4.6	3.8	4.5	3.4	5.5	7.0	7.5	6.0	7.6	7.9
2-1.5	1.9	2.7	2.5	3.1	2.5	2.8	2.7	2.6	3.2	2.2	5.7
1.5-1	3.2	1.8	2.7	3.1	1.9	2.7	5.1	4.2	3.0	2.5	3.9
1-0.75	5.1	2.3	2.3	3.3	2.1	3.0	4.5	2.9	3.1	2.6	3.2
0.75-0.5	5.4	3.4	3.4	4.2	2.9	3.0	5.8	3.4	3.8	3.3	3.4
0.5-0.37	6.2	4.0	4.1	5.6	3.5	3.8	5.4	4.8	4.5	3.9	3.6
0.37-0.25	6.1	4.5	4.3	5.2	3.9	4.1	5.6	4.7	4.2	4.1	3.3
0.25-0.16	5.7	4.5	4.9	4.7	3.5	4.1	6.5	5.6	4.4	4.6	3.2
0.16-0.125	4.0	5.3	6.0	6.0	3.9	4.6	4.9	5.0	4.4	4.6	3.6
0.125-0.094	4.9	4.7	4.8	5.9	4.4	5.2	4.9	4.8	3.9	4.5	3.8
0.094-0.063	7.2	7.1	8.6	6.8	5.9	6.4	7.1	7.6	4.9	6.4	7.2
0.063-0.032	8.1	9.7	10.9	9.0	8.7	9.3	7.4	9.4	7.6	9.7	8.5
<0.032	37.1	40.0	38.0	29.9	37.2	38.2	26.4	37.6	47.1	39.4	30.1
平均粒径(φ)	3.20	3.20	3.32	2.57	2.51	2.99	2.40	3.22	3.50	3.12	2.24
標準偏差(φ)	2.27	2.61	2.38	2.80	3.25	2.72	2.61	2.36	2.36	2.61	2.97
含泥率(%)	45.2	49.7	49.0	38.9	45.8	47.5	33.8	47.0	54.6	49.2	38.6
全有機炭素(%)	2.25	1.98	1.77	1.97	1.81	1.97	2.19	1.87	2.06	1.86	1.98
全窒素(%)	0.13	0.09	0.08	0.11	0.09	0.10	0.13	0.11	0.11	0.10	0.10
全硫黄(%)	0.05	0.07	0.07	0.11	0.26	0.32	0.11	0.10	0.15	0.29	0.11
Cs-137(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	4.7 ± 0.9	3.1 ± 0.8	2.9 ± 0.4	-	2.3 ± 0.7	5.3 ± 0.7	37.6 ± 1.1	112.0 ± 1.6	-	2.0 ± 0.6	22.1 ± 1.2
Cs-134(Bq/kg乾土) (2011/03/15補正值)	ND (< 94)	ND (< 97)	ND (< 73)	-	ND (< 76)	ND (< 76)	ND (< 94)	160.8 ± 32.1	-	ND (< 76)	ND (< 100)

表8 放射性セシウム濃度と全硫黄濃度に基づく土砂の分類区分.

Cs濃度		タイプ I	タイプ II	タイプ III
全硫黄濃度		¹³⁴ Csと ¹³⁷ Csが検出限界未満		¹³⁴ Csは検出限界未満で, ¹³⁷ Csは検出
				¹³⁴ Csと ¹³⁷ Csがともに検出
サブタイプ A	0.06%未満	No. 1の2試料, No. 4の1試料	地点B2(褐色の土砂), No. 1の1試料, No. 5の1試料	
サブタイプ B	0.06-0.2%	No. 1の1試料, No. 3の13試料, No. 4の9試料, 地点F(黒色の土砂)の1試料, 砂防堰堤の土石流堆積物の2試料	No. 3の3試料, No. 4の2試料, No. 5の4試料, 地点B1(黒色の土砂), 地点B3(土石流堆積物), 地点F(盛り土)の1試料, 砂防堰堤の土石流堆積物の8試料	No. 4の2試料, No. 5の1試料
サブタイプ C	0.2-0.4%	No. 1の1試料, No. 3の14試料, No. 4の15試料	No. 4の1試料, No. 5の3試料, 地点E(黒色の土砂), 地点A5(土石流堆積物)	
サブタイプ D	0.4-2.4%	No. 3の11試料, No. 4の9試料	No. 4の1試料	

とNo. 5ボーリングコアの深度1.54-1.56m, 1.59-1.64m, 2.50-2.55mの試料となる。

全硫黄濃度に基づく土砂の分類区分

前記の通り、泥質物の全硫黄濃度に基づくと、源頭部の未崩落盛土、盛土最下端の黒色の土砂、土石流堆積物、隣接盛土（地点E）の黒色土砂の濃度はいずれも0.4%未満で、北村（2023）は4タイプに分けた。一方、No. 3とNo. 4ボーリングコアでは全硫黄濃度が0.4%以上の試料が複数見られた（図6, 7, 11）。そこで、本論では、泥質物の全硫黄濃度に基づく分類区分を新たに設定した。すなわち、サブタイプAは0.06%未満、サブタイプBは0.06-0.2%未満、サブタイプCは0.2-0.4%未満、サブタイプDは0.4-2.4%である。上記の放射性セシウム濃度に基づく土砂の分類区分は堆積年代の相違に基づくので、そちらを全硫黄濃度の区分より上位の区分とし、全硫黄濃度の分類区分はサブタイプという名称を使用した。放射性セシウム濃度の区分と組み合わせた分類に基づいた試料の内訳を表8に記した。例えば、¹³⁴Csと¹³⁷Csが検出限界未満で、全硫黄濃度の0.06%未満のNo. 1の2試料とNo. 4の1試料は、タイプ「I-A」と表記する。この分類では、土石流堆積物はタイプI-B, II-B, II-Cの3つがあり、主にタイプII-Bである。地点B1の未崩落の黒色盛土層の崩落崖から採取した試料もタイプII-Bである。一方、No. 3とNo. 4ボーリングコアの土砂の多くはタイプI-B, I-C, I-Dに分類されるので、これらは崩落した盛土の土砂とは異なる採取場所からもたらされたと考えられる。なお、硫黄の起源については、有機物、黄鉄鉱、石膏などが考えられるが、北村ほか（2022a）によると、地点B1の未崩落の黒色盛土層や土石流堆積物の泥質物のXRD分析では、黄鉄鉱や石膏などの硫黄を含む鉱物は検出されていない。また、図11では全有機炭素と全硫黄濃度との間には関係が見られない。したがって、現段階では硫黄

の起源は不明であり、さらなる調査が必要である。

静岡県の盛土崩壊に至る挙動の再現解析について

静岡県（2022b）は、盛土崩壊に至る挙動の再現解析を行った際に、黒色盛土層の飽和透水係数をNo. 3ボーリング孔の深度7.00-8.00mにおける現場透水試験結果（ 5.31×10^{-8} m/s）を採用している。同深度内の深度7.00-7.05mと7.47-7.52mおよび直下の8.00-8.05mの3試料は、それぞれタイプI-D, I-B, I-Cである。これらのタイプでは、タイプI-Bだけが砂防堰堤の2試料の土石流堆積物を含むだけである。したがって、崩壊した黒色盛土層の土砂とは採取地が異なると考えられる。しかし、飽和透水係数は物理量であるから、採取地よりも、粒度組成の影響のほうが強い可能性は十分ある。そこで、上記の3試料と土石流堆積物の粒度組成を比較した。具体的には、図15に示すように、平均粒径と標準偏差の散布図ならびに平均粒径と含泥率の散布図にプロットした。その結果、両群は重なり、区別できない。したがって、粒度組成の観点から、静岡県の採用した飽和透水係数（ 5.31×10^{-8} m/s）は適当でないと言えないことになる。なお、図15ではNo. 3ボーリングコアの全試料の散布図も示した。

まとめ

2021年7月3日に静岡県熱海市伊豆山地区の逢初川を流下した土石流の発生原因は、逢初川源頭部にあった盛土の黒色盛土層の部分崩壊による。静岡県が未崩落の盛土層で掘削した4本のボーリングコア試料（No. 1, 3-5）について、堆積物の記載、粒度分析、放射性セシウム濃度と全硫黄濃度を測定した。その結果、次の知見を得た。

1. No. 3と4のボーリングコアともに複数枚の淘汰の良い砂層を確認できた。このことから、砂層が水平距離で少なくとも9.6m連続する可能性がある。また、No. 4

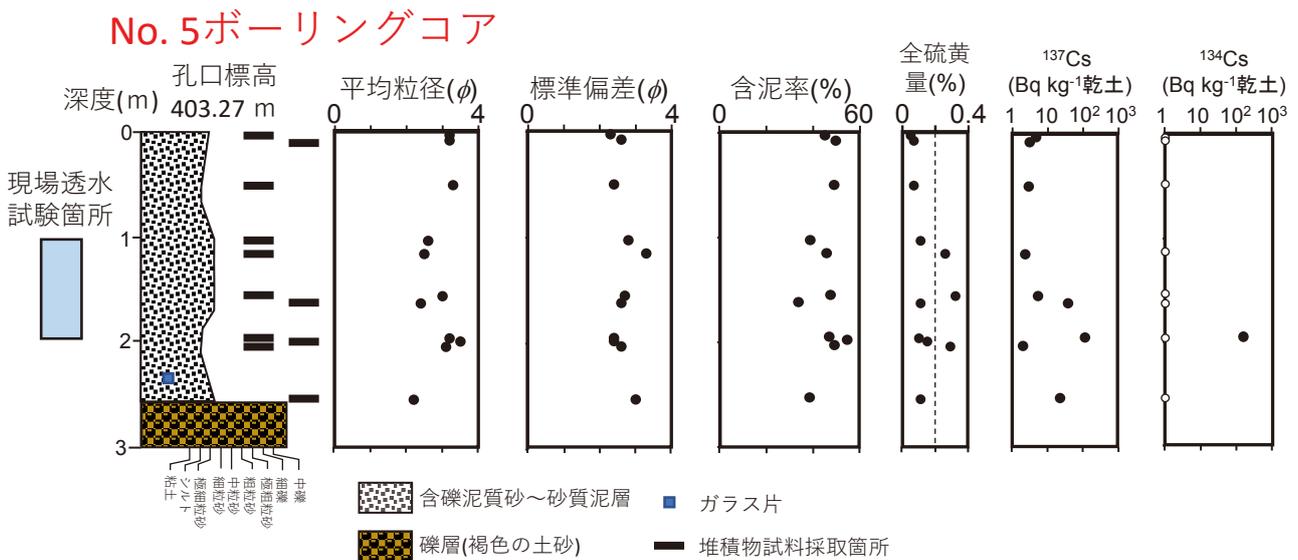


図9 No. 5ボーリングコアの柱状図、堆積物の平均粒径、標準偏差、含泥率、全硫黄濃度、¹³⁷Cs、¹³⁴Csの層位変化。放射性セシウム濃度の白丸は検出限界未満を示す。

砂防堰堤の埋積土

No. 3ボーリングコア

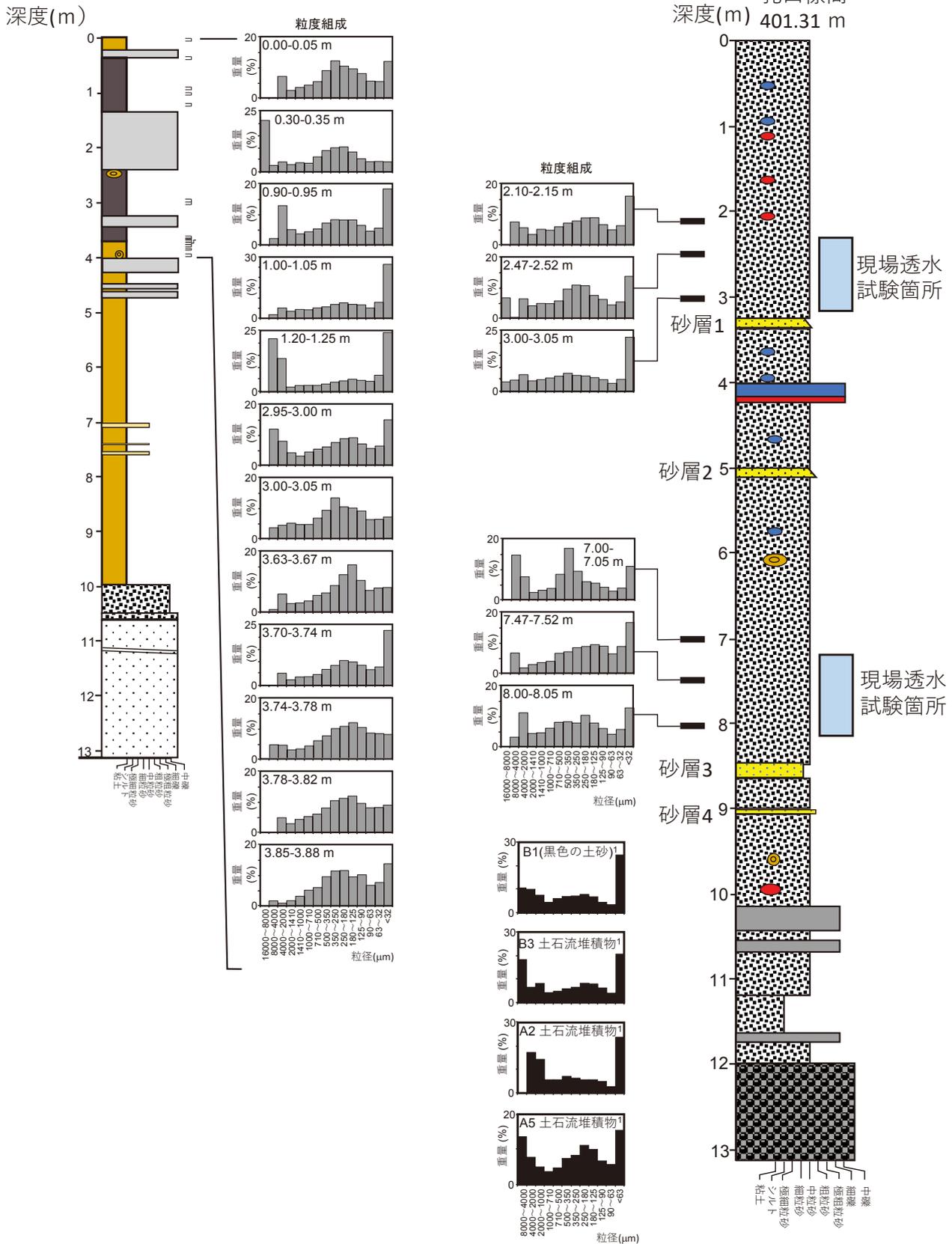


図10 No. 3のボーリングコアの現場透水試験を行った部分の土砂の粒度組成, 地点B1の未崩落の盛土の粒度組成 (北村ほか, 2022a), 砂防堰堤を埋めた土石流堆積物の粒度組成 (北村ほか, 2022d), 集落到達した土石流堆積物の粒度組成 (北村ほか, 2022a).

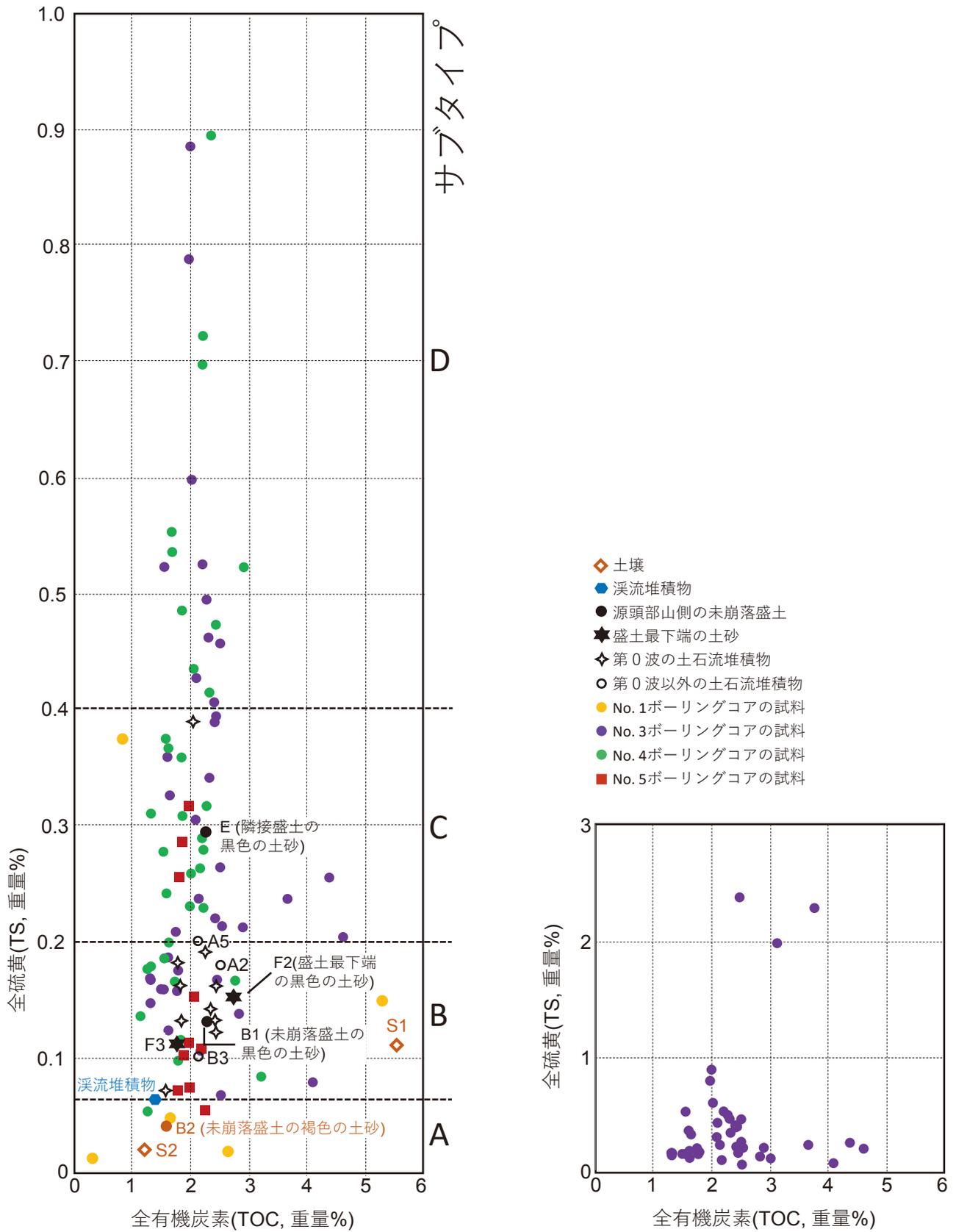


図11 熱海土石流堆積物，盛土，溪流堆積物，周辺土壌の全有機炭素濃度と全硫黄濃度の散布図。

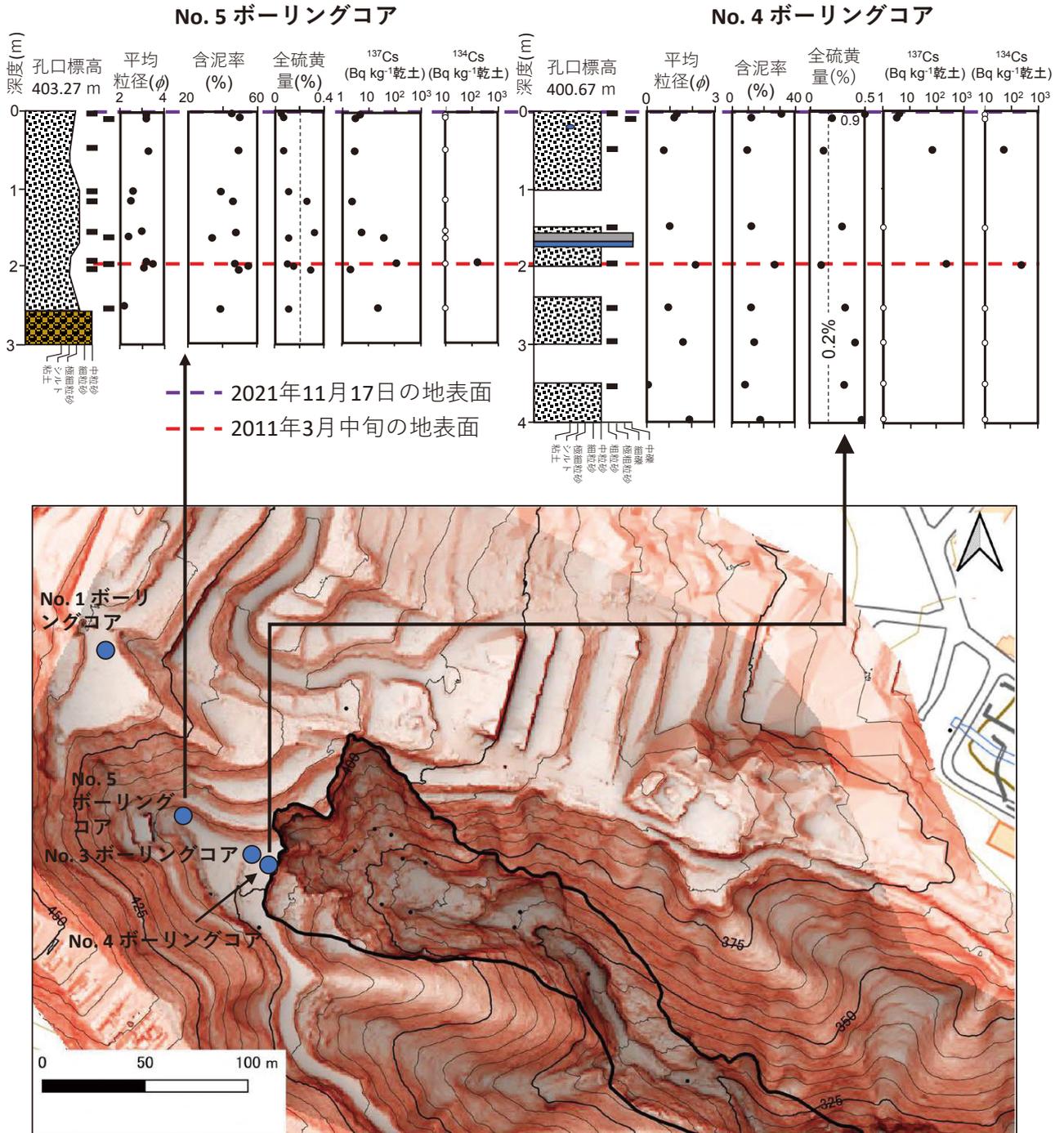


図12 放射性セシウム濃度に基づくNo. 4ボーリングコアとNo. 5ボーリングコア試料の対比。静岡県(2022b)を一部改変。

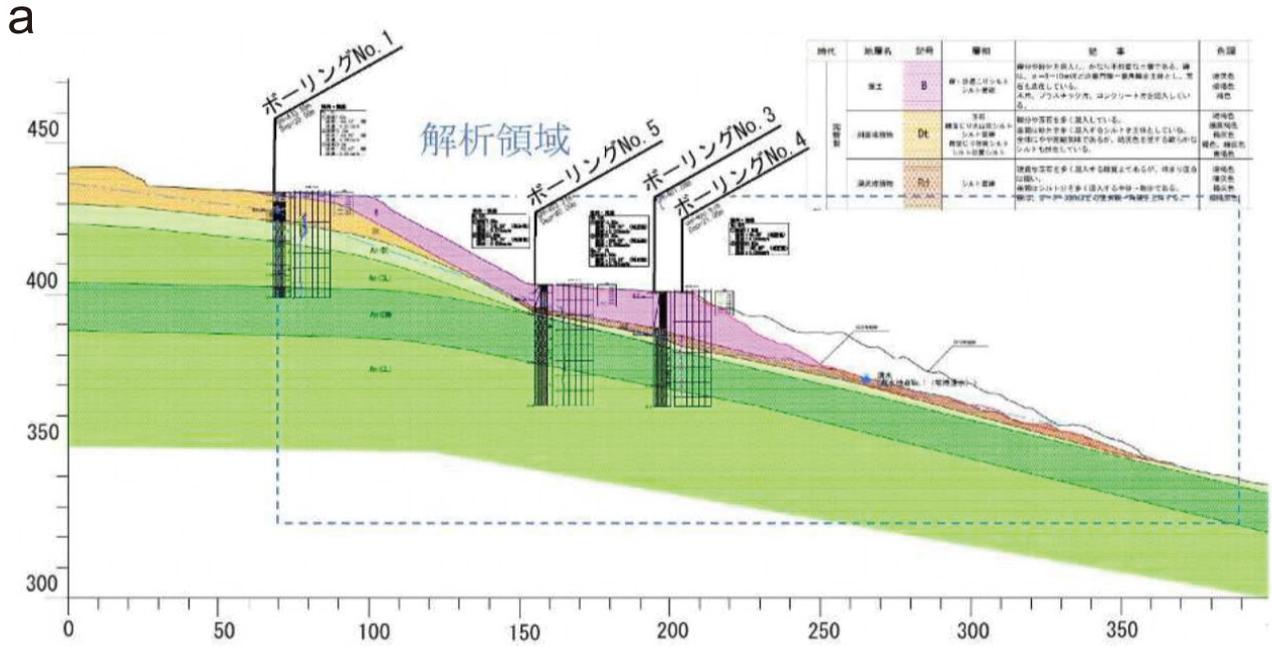


図 7-4 解析断面 (C断面)

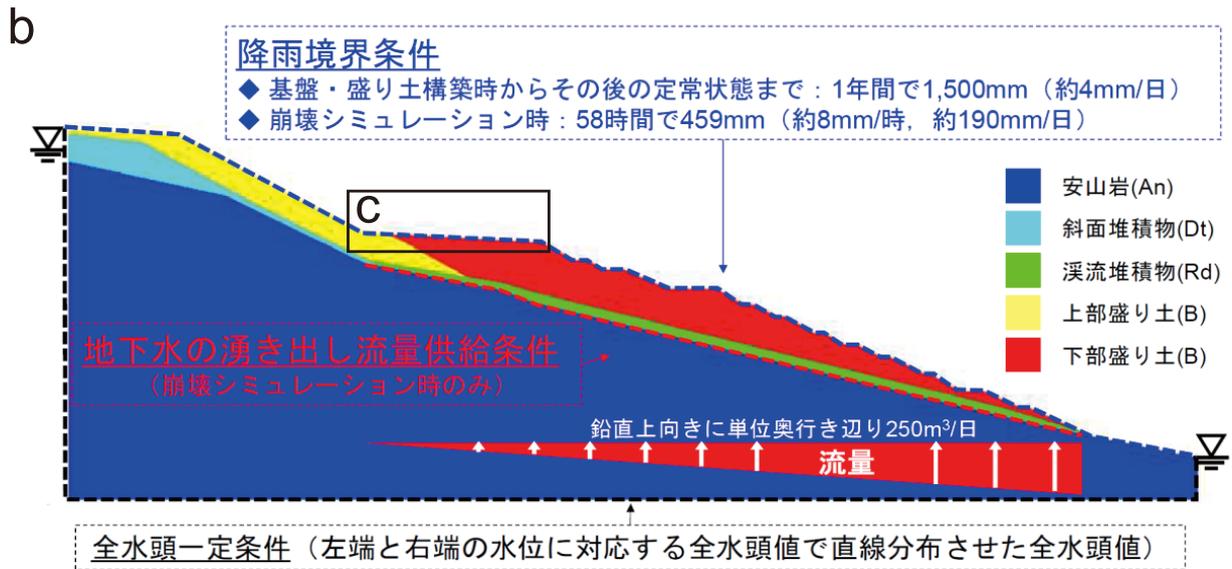


図 7-5 水理境界条件

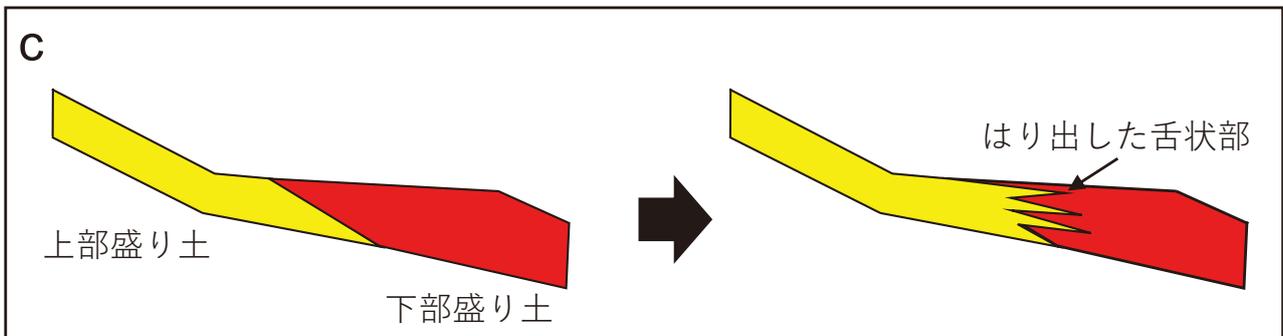


図 13 静岡県（2022b）と本研究の盛り土断面図の黒色盛り土層と褐色盛り土層の境界の概念図。 a：静岡県（2022b）の図7-4解析断面（解像度は元図のまま），b：静岡県（2022b）の図7-5水理境界条件（cの領域を追加）。 c：本研究で示唆した黒色盛り土層と褐色盛り土層の境界（指交関係）の概念図。

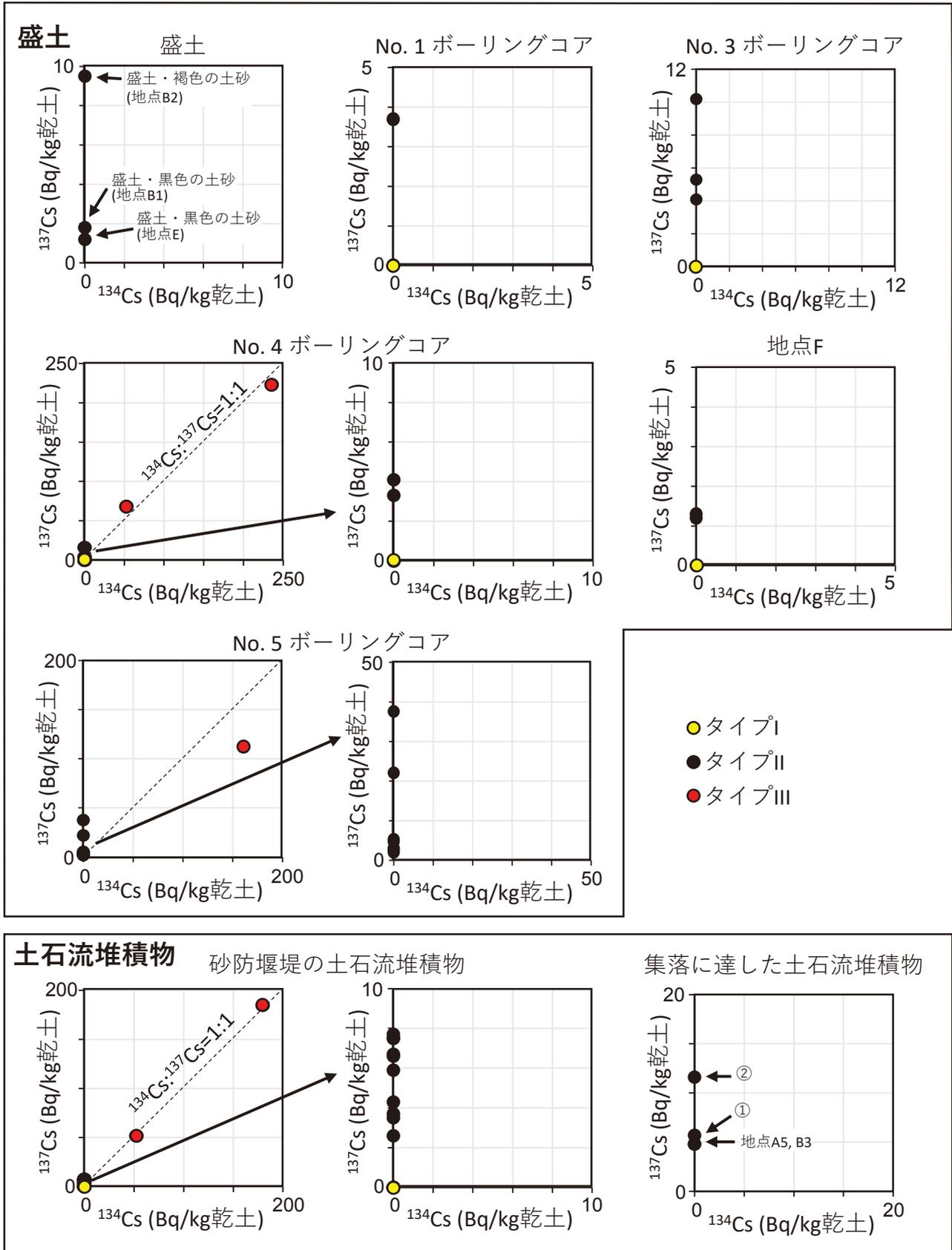


図14 盛土と土石流堆積物の¹³⁷Cs, ¹³⁴Csの散布図. 北村ほか (2022c, d) と本研究のデータに基づく.

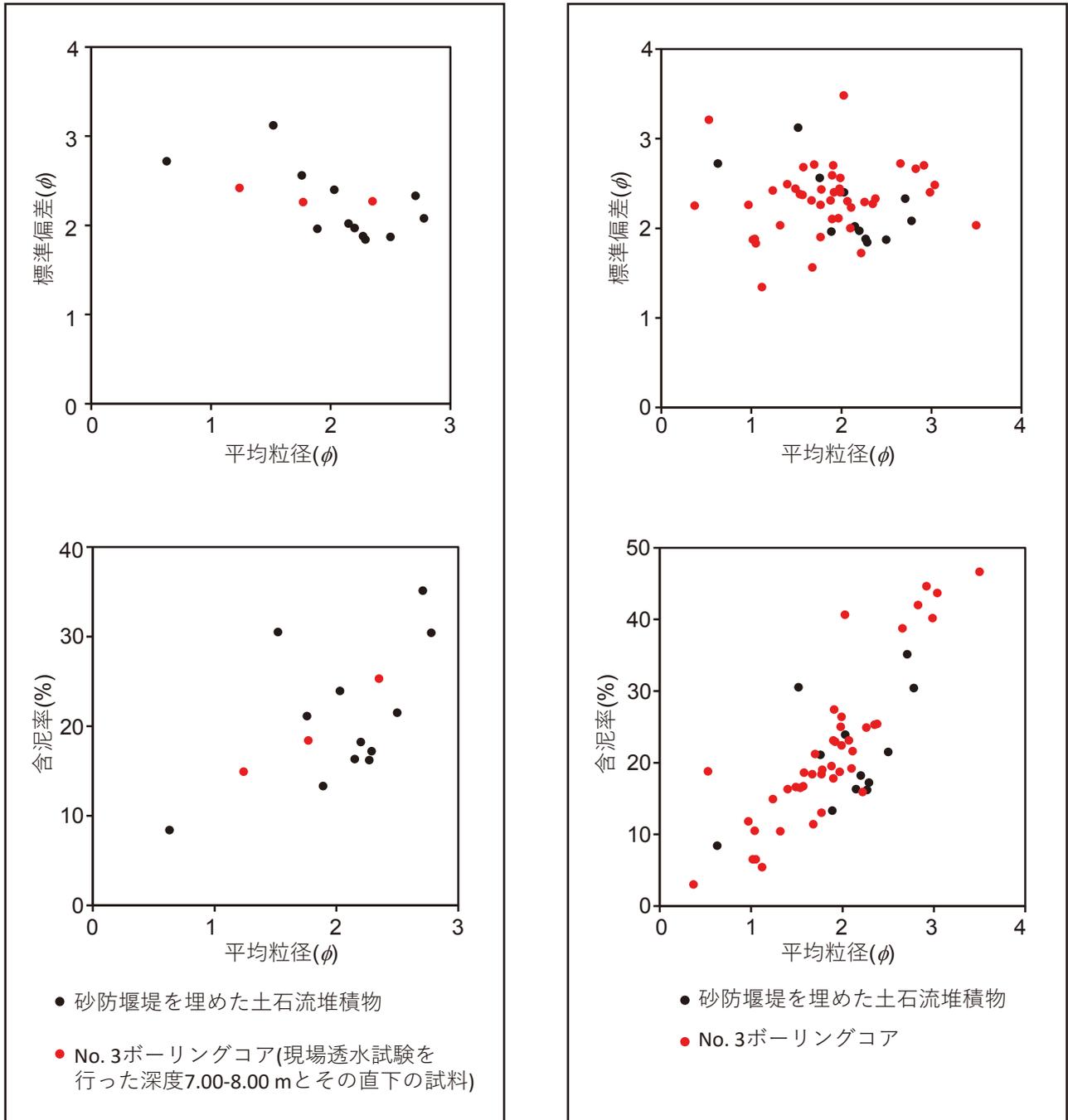


図15 砂防堰堤を埋積した土石流堆積物とNo.3ボーリングコアの飽和透水係数を測定した深度とその直下の試料の平均粒径と標準偏差の散布図と平均粒径と含泥率の散布図。No.3ボーリングコアの全試料のデータも示す。

ボーリングコアから砂層に随伴した礫層を確認したので、海側に向かうと粗粒化する可能性がある。

2. No. 4 ボーリングコアの深度 1.95–2.00m と 0.47–0.52m から ^{134}Cs と ^{137}Cs が検出され、No. 5 ボーリングコアの深度 1.92–1.97m から ^{134}Cs と ^{137}Cs が検出された。盛土の形成過程の観点と $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比から、No. 4 ボーリングコアの深度 1.95–2.00m と No. 5 ボーリングコアの深度 1.92–1.97m が 2011 年 3 月中旬の地表面と考えられ、これらの地点では表層約 2m の土砂は 2011 年 3 月中旬以降に盛られたと解釈される。また、両コアの土砂は黒色盛土層と褐色盛土層に区分されているので、両層は指交関係（互いに舌状部をはり出していること）にある。

3. 放射性セシウム濃度から、盛土と土石流堆積物は、タイプ I の ^{134}Cs と ^{137}Cs が検出限界未満の試料、タイプ II の ^{137}Cs は検出されるが ^{134}Cs は検出限界未満の試料、タイプ III の ^{134}Cs と ^{137}Cs を含む試料に区分できる。各タイプの土砂の採取場所における堆積時期は、タイプ I は 1950 年代以前の可能性が高く、タイプ II は 1950 年代から 2011 年 3 月初旬まで、タイプ III は 2011 年 3 月中旬以降となる。

4. 泥質物の全硫黄濃度から、盛土、土石流堆積物を 4 つのサブタイプ (A–D) に区分する方法を提案した。放射性セシウム濃度のタイプ区分と組み合わせると、No. 3 と No. 4 ボーリングコアの盛土のほとんどの試料は、土石流堆積物や崩壊面に露出する黒色土砂とは異なるタイプに区分される。したがって、盛土の土砂の採取場所はさらに増える可能性がある。

謝辞

静岡県からはボーリングコア試料を提供いただき、株式会社ジーバ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 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ます。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

- Adachi, K., Kajino, M., Zaizen, Y. & Igarashi, Y. (2013), Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*, **3**, 2554.
- 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.
- Huvaj-Sarihan, N. & Stark, T. D. (2008), Back analyses of landfill slope failures. In: *Proceedings of 6th International Case Histories Conference*. Arlington, VA, 11–16.
- 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 (2023), 熱海土石流に関する地球科学的研究. 環境と測定技術, **50**, 33–42.
- 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 (2022e), 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, **61**, 143–155.
- 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 (2022), 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. 静岡大学地球科学研究報告, **50**, 1–6.
- 北村晃寿・山下裕輝・矢永誠人・本山 功・中西利典・森 英樹 (2022b), 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 (2022c), 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 (2022d), 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.
- 国土地理院 (2021), <https://www.gsi.go.jp/tizu-kutyu.html> 2021 年 7 月 4 日引用.
- 国土交通省 (2020), 全国に 51,306 カ所の大規模盛土造成地の存在が明らかに！～全国すべてで大規模盛土造成地マップが公表されました～ https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi06_hh_000049.html 2022 年 12 月 14 日引用.
- Lavigne, F., Wassmer, P., Gomez, C., Davies, T. A., Hadmoko, D. S., Iskandarsyah T. Y. W. M. *et al.* (2014), The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, **1**, 10. <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0010-5>
- Krumbein, W. C. (1941), Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, **11**, 64–72.
- Momoshima, N., Sugihara, S., Ichikawa, R. & Tokoyama, H. (2012), Atmospheric radionuclides transported to Fukuoka, Japan remote from the Fukushima Dai-ichi nuclear power complex following the nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **111**, 28–32.
- Peng, R., Hou, Y., Zhan, L. & Yao, Y. (2016), Back-analyses

- of landfill instability induced by high water level: Case study of Shenzhen landfill. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **13**(1), 126.
- 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/r3hasseigeninnncyousakennsyouiinnkai.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 (2021c), 熱海市伊豆山地区土砂災害現場の土壌の放射能調査結果. <https://www.pref.shizuoka.jp/kinkyu/genshiryoku/atamishiizusanhoukyasen.html> 2022年3月24日引用.
- 静岡県 (2021d), 熱海市伊豆山地区土石流土質調査結果(速報) <https://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/documents/kisyateikyoudoshitucyousakekka.pdf> 2021年9月9日引用.
- 静岡県 (2022a), 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_3syou.pdf 2022年9月9日引用.
- 静岡県 (2022b), 第5回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会配布資料 (3, 4, 7). https://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/5_aizomegawakennsyouiinnkaikaisai.html 2022年11月21日引用.
- 静岡県 (2022c), 逢初川土石流の発生原因調査結果について. http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/aizome_dosekiryuugeninkyuumei_rist.html 2022年12月14日引用.
- 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会 (2012), 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会報告書. https://www.mhmjapan.com/content/files/00001736/naiic_honpen2_0.pdf
- Yin, Y., Li, B., Wang, W., Zhan, L., Xue, Q., Gao, Y. *et al.* (2016), Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen Landfill and controlling geotechnical risks of urbanization. *Engineering*, **2**, 230–249.

著者貢献

北村晃寿：堆積物記載，全体総括，論文執筆を担当。矢永誠人：放射性セシウム濃度の測定，論文執筆を担当。山下裕輝：堆積物記載，粒度分析，CNS分析を担当。中西利典：CNS分析を担当。

