

Geochemical and grain composition analysis of embankment and debris flow deposits in the Izusan area, Atami City, Shizuoka Prefecture, central Japan.

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: 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 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00029315

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

北村晃寿^{1,2}・岡寄颯太³・近藤 満⁴・渡邊隆広⁵・中西利典⁶
堀 利栄⁷・池田昌之⁸・市村康治⁹・中川友紀⁸・森 英樹¹⁰

Geochemical and grain composition analysis of embankment and debris flow deposits in the Izusan area, Atami City, Shizuoka Prefecture, central Japan.

AKIHISA KITAMURA^{1,2}, SOTA OKAZAKI³, MITSURU KONDO⁴, TAKAHIRO WATANABE⁵,
TOSHIMICHI NAKANISHI⁶, RIE S. HORI⁷, MASAYUKI IKEDA⁸, KOJI ICHIMURA⁹,
YUKI NAKAGAWA⁸ and HIDEKI MORI¹⁰

Abstract On July 3 2021, a debris flow caused by a landslide from an embankment occurred along the Aizome River in the Izusan area of Atami City, Shizuoka Prefecture, central Japan, and destroyed numerous houses and flowed into Sagami Bay. In this study, two samples of embankment, three debris flow deposits and two soil samples from around the Aizome River valley were analyzed for grain size, and geochemistry and grain compositions for each mud and sand particles. The most important result was the discovery of radiolarian chert fragments in black embankment sediments and debris flow deposits. These chert fragments are useful as tracer material for black embankment sediments. Furthermore, the radiolarian chert was found to have been deposited near the Permian/Triassic boundary and later into the Jurassic and Early Cretaceous. This is an important finding for identifying the source of black embankment sediments.

2022年4月11日受付 2022年5月11日受理.

Received: 11 April 2022 Accepted: 11 May 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

⁴ 静岡大学理学部化学教室, 422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷836

⁵ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

⁶ 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

⁷ 愛媛大学大学院理工学研究科, 790-8577 愛媛県松山市文京町2-5

⁸ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, 113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

⁹ 東京大学大学院理学系研究科技術部, 113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

¹⁰ 静岡大学技術部教育研究支援系教育研究第二部門, 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.akihsa@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

⁴ Department of Science, Graduate School of Integrated Science and Technology, Research Institute of Green Science and Technology, and College of Science, Academic Institute, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan

⁵ Toki Geochronology Research Laboratory, Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, 959-31 Jorinj, Izumi, Toki, Gifu 509-5102, Japan

⁶ Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka, 5762 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka City, Shizuoka Prefecture, 422-8017, Japan

⁷ Department of Earth Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, Matsuyama City 790-8577, Japan

⁸ Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

⁹ Technical Division, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

¹⁰ Division of Technical Service, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan

Keywords: Atami, debris flow deposit, embankment, major and minor elements, mineral compositions, chert, provenance

はじめに

2021年7月3日午前10時30分頃、静岡県熱海市伊豆山地区の逢初川沿いで土石流が発生し、伊豆山港に至り相模湾へ流入した(図1)。流下経路の家屋は破壊され、死者・行方不明者は28人に及んだ。その後の調査で、逢初川の源頭部にあった盛土が大量に崩落していたことが判

明した(静岡県, 2021a)。国土地理院(2021)は、2009年と2019年の地形測量データを比較し、同期間に形成された盛土の体積量を約56,000m³と見積もっており、そのうちの約55,500m³が崩落したと静岡県(2021a)は報告している。

静岡県(2021b)は、源頭部の地山(試料No. 1)、尾根部(試料No. 2)、崩壊した崖面の左岸側に露出した褐色

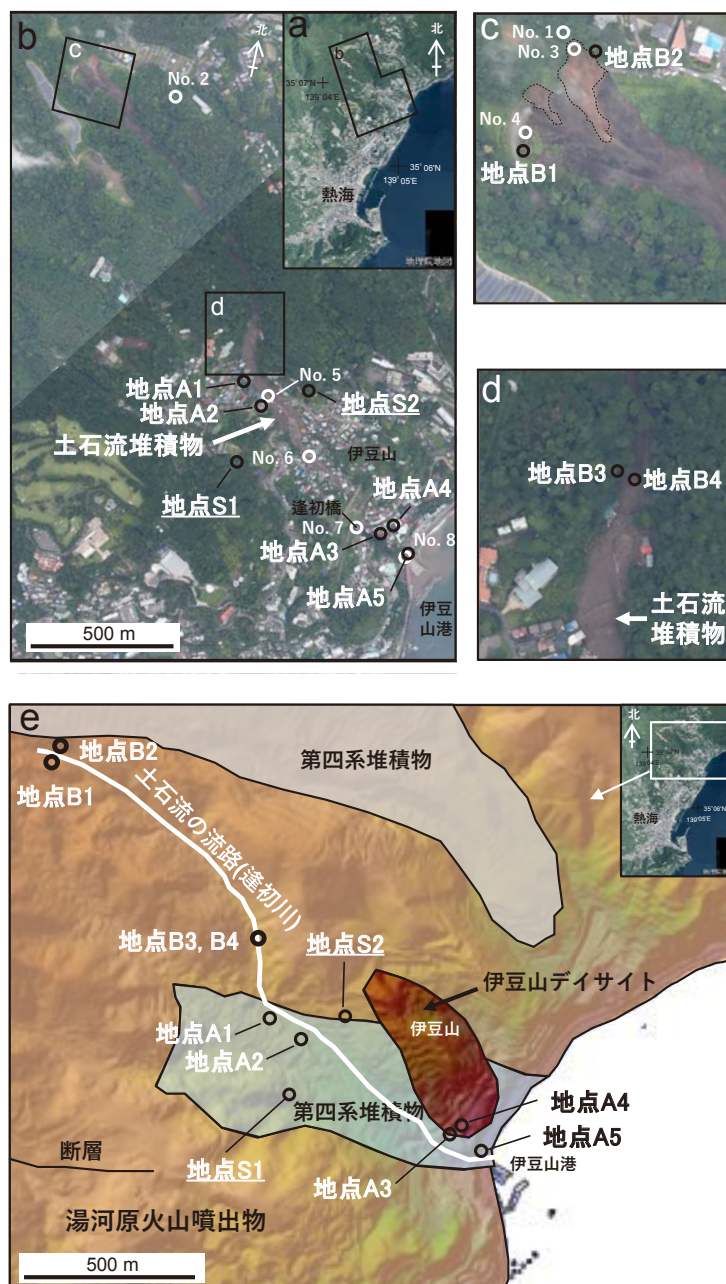


図1 熱海市伊豆山地区の土石流の流路と試料採取地点と地質。北村(2022)を一部改変。a-d: 土石流の流路と試料採取地点。e: 地質図。No. 1-8は静岡県(2021b)の試料採取地点。画像は地理院地図(2021)を使用。地質図は及川・石塚(2011)の地質図と産業技術総合研究所地質調査総合センター(2021)の地質図Naviのシームレス地質図v2に基づいて作成。

の土砂（試料No. 3）、右岸側に露出した黒色の土砂（試料No. 4）を採取した（図1c）。静岡県（2021b）は、さらに逢初川河口から上流に向かって、0.8km、0.5km、国道135号の逢初橋付近、逢初川河口付近の4地点で土石流堆積物（試料No. 5–8）を採取した（図1）。そして、静岡県（2021b）は、これらの試料の土質試験、偏光顕微鏡分析、蛍光X線分析を行い（表1）、構成粒子の組成に基づいた考察を公表したので、以下に原文のまま引用する。

（引用ここから）

- 土の粒度構成や顕微鏡分析の結果、元素の含有割合などから、源頭部から崩落し土石流となって流下し、中下流部に堆積した土砂（試料No. 5～No. 8の土砂）は、No. 3源頭部崖面（左岸側）褐色とNo. 4源頭部崖面（右岸側）黒色の土砂が混ざり合ったものと推測される。
- 土石流となって流下した土砂の混合割合を、蛍光エックス線分析で得られたCa（カルシウム）の含有率から試算した結果、15%～25%のNo. 3源頭部崖面（左岸側）褐色の土砂と、75%～85%のNo. 4源頭部崖面（右岸側）黒色の土砂が混ざり合ったものと推測される。
- 土石流となって流下した土砂の多くを占めるNo. 4源頭部崖面（右岸側）黒色の土砂は、源頭部付近に元々存在した地山（No. 1源頭部）の土質とは異なるため、他所から搬入された土砂（盛土）と推測される。
- これら今回の調査結果を踏まえると、源頭部から崩落し土石流となって流下した土砂の大部分は、他所から搬入された土砂（盛土）であったと推測される。

（引用ここまで）

これらの試料の分析は、さらに追加報告されると思われるが、盛土の崩落の原因を検討するには、盛土の力学

的性質に関するデータの取得が不可欠であり、それには盛土の採集地の特定は重要である。崩落した盛土の土砂は土石流堆積物となっており、流下時に混合しているので、土石流堆積物の分析結果からの崩落前の盛土の復元には限界がある。そこで、盛土の採集地に残された土砂を分析し、土石流堆積物の分析結果と合わせることで、崩落した盛土の土砂の力学的性質の推定の確度を向上できる。

第一著者の北村は、逢初川の源頭部の崩落していない盛土の黒色の土砂から4個の海生二枚貝類の貝殻を採取し、また集落の最上流部にある家屋の直ぐ上流側の土石流堆積物から5個の海生二枚貝類の貝殻を採取した。これら貝殻の種組成、保存状態、年代値から、土石流堆積物の多くを占める盛土の黒色の土砂の採集地の一部は海浜で、さらに現世堆積物と中部完新統の2つの供給源がありうることを示した（北村, 2022）。

これらの知見を踏まえ、さらに盛土の採集地を追究するために、北村が伊豆山地区で採取した試料について、静岡県（2021b）の扱っていない砂粒子の組成分析、乾燥状態の泥粒子のX線回折とCNS元素分析を行った。また、静岡県（2021b）の蛍光X線分析の試料の記載には、前処理に「測定試料をφ30mm用ホルダーにセットし、分析を行った」とあり、測定条件に「水分が多いため、」と記されているが、試料の粒度組成の記述はない。そこで、本論では、乾燥状態の泥粒子の蛍光X線分析を行った。これらの分析結果をここに報告し、盛土の構成粒子の性状と採集地の特定に関して考察する。

なお、本論では、便宜的に図1cの点線で囲まれた褐色を呈する部分の土砂を褐色の土砂と定義し、他の黒色を呈する部分を黒色の土砂と定義する。

表1 静岡県（2021b）と本研究の分析項目。

	静岡県(2021b)	本研究
偏光顕微鏡観察による粒子組成	粒径0.0625mm以下の粒子を分析対象とする	粒径0.35-0.50mmの粒子を分析対象とする
蛍光X線分析(定性分析)による主要元素・微量元素濃度の分析	φ30mm用ホルダーに入れた堆積物試料で水分を含む。	乾燥させた粒径0.0625mm以下の堆積物
X線回折による鉱物同定	—	乾燥させた粒径0.0625mm以下の堆積物
CNS元素分析による全有機炭素量、全窒素量、全硫黄量の含有量の分析	—	乾燥させた粒径0.0625mm以下の堆積物

調査地域

土石流の発生源は、逢初川の源頭部（標高約390m）に位置する（図1c）。土石流は、ほぼ一定の勾配（平均勾配＝11.3°）を持つ経路に沿って、約2kmにわたって流下し、相模湾に流入した（図1e）。逢初川の上流域には、中期更新世の湯河原火山噴出物が分布し、主に玄武岩、安山岩、デイサイトからなる（及川・石塚, 2011）。

調査地点及び分析

調査地点

第一著者の北村は、2021年7月3日と7月9日に、合計5地点で土石流堆積物を観察し、それらのうち地点2と5から堆積物試料を採取し、含水率を報告した（北村・池田, 2021）。その後、2021年9月3日に熱海市の職員と同行の下で、逢初川の源頭部で崩落していない盛土を2か所（図1c: 地点B1, B2）で採取し、集落の最上流部にある家屋の直ぐ上流の2か所（図1d: 地点B3, B4）で土石流堆積物を採取した。また、7月3日に地点S1から、23日に地点S2から土壌を採取した（図1b）。北村（2022）は、北村・池田（2021）の5地点を地点A1–A5に変更し、9月3日の4地点を地点B1–B4とした（図1）。なお、地点B4の土石流堆積物は逢初川の河道内にあり、礫だけなので、本研究では研究対象から除外した。また、7月3日と7月9日の調査は、救助作業の妨げにならないように土石流堆積物の表層部から約200gの試料の採取のみを行った。また、9月3日の調査は安全確保のため、約500gの堆積物試料の採取のみを行った。

粒度分析

地点A2, A5, B1–3, S1–2で採取した堆積物試料の一部（約20g）を60°Cのオーブンで24時間乾燥後、8000µm以下の粒子について目開き63, 90, 125, 180, 250, 355, 500, 710, 1000, 2000, 4000µmのふるいで水洗し、残渣の乾燥重量を測定した。

泥粒子の分析方法

試料の一部（約10g）を60°Cのオーブンで24時間乾燥後、ふるいにかけて63µm以下の粒径のサブ試料を得た。試料はメノウ乳鉢で粉末化した。粉末試料の一部を用いて、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の携帯型蛍光X線分析装置（携帯型XRF；Niton XL3t-950S, Thermo Fisher Scientific社製）により、主要元素及び微量元素の定量分析を行った。

また、粉末試料の一部を使って、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）で全有機炭素（TOC）、全窒素（TN）及び全硫黄（TS）の含有量を測定した。さらに、静岡大学のX線回折（XRD）装置（MiniFlex, リガク社製）で、Cu-Kα線（ $\lambda = 1.5406\text{\AA}$ ）を用いて、電圧40kV、電流15mA、スキャン速度10°/分の測定条件で鉱物種を分析した。また、粉末化前のサブ試料を水簸分離した粘土試料をガラス板に塗布、乾燥させて、エチレングリコール処理前後のそれぞれで回折パターンの測定を行った。この測定には、東京大学地球惑星科学専攻のXRD装

置（RINT-2100, リガク社製）を使用し、Cu-Kα線（ $\lambda = 1.5406\text{\AA}$ ）を用いて、電圧40kV、電流30mA、スキャン速度2°/分の測定条件で行った。

砂粒子の分析方法

地点A2, A5, B1–3, S1–2の堆積物試料に含まれる200個以上の350–500µmサイズの粒子の鉱物種と岩石種を同定した。目開き350, 500µmのふるいで粒子を得た後、約60°Cで24時間乾燥させた。また、地点A2, A5, B3の土石流堆積物、B1の盛土の黒色の土砂の500–4000µmの粒子から、それぞれ21個、24個、14個、18個の堆積岩状の粒子を採取した。これらの粒子を、樹脂に包埋後、薄片を作成し、顕微鏡で観察した。その結果、放散虫の化石を含む灰色のチャート片と、その中に大きさ20–40µmの菱形や立方体の粒子が多数含まれることを見出した。そこで、この薄片を、東京大学地球惑星科学専攻のエネルギー分散型分光器（EDS, Thermo Fisher Scientific社製）を搭載した走査型電子顕微鏡（SEM；S-4500, 日立社製）を用いて観察した。

結果

粒度組成

盛土と土石流堆積物は淘汰の悪い泥質砂で、泥粒子の占有率は15–26%であり、土壌は泥粒子が41–60%を占める（図2）。

泥粒子の主要・微量元素組成

全試料で主要・微量元素の合計は100%にはならなかった（表2）。これは、本調査で使用した携帯型XRFではNaの測定が困難であることと、ガラスビードではなく粉末試料を測定したので、有機物や水などが含まれているためである。そこで、試料の比較をTiとのモル比で行った。Tiを用いたのは、試料間での値の差が最小（0.7–0.9%）だからである。Tiとの比に基づく、黒色の土砂と土石流堆積物の特徴的な元素として、主要元素ではCaとFeを、微量元素ではZnとCuを挙げることができる（表2, 図3）。

Ca/Ti比は黒色の土砂は5.4で、土石流堆積物は4.5–4.6の値をとるのに対して、土壌と褐色の土砂は2.4以下である。Fe/Ti比は、黒色の土砂と土石流堆積物は8.7–9.6の値をとり、土壌と褐色の土砂は10.2–11.3の値をとる。Zn/Ti比は黒色の土砂は0.050で、土石流堆積物は0.026–0.033の値をとるのに対して、土壌と褐色の土砂は0.009以下である。Cu/Ti比は黒色の土砂は0.020で、土石流堆積物は0.017–0.019の値をとるのに対して、土壌と褐色の土砂は0.012以下である（図3b, 表2）。Ca/Ti比とFe/Ti比の散布図並びにZn/Ti比とCu/Ti比の散布図は、黒色の土砂と褐色の土砂のプロットを結んだ直線の上ないし近い位置に土石流堆積物の泥粒子の値があることを示す（図3a, b）。一方、例えば、Si/Ti比やAl/Ti比は、土石流堆積物の値は褐色の土砂とほぼ同じ値をとり、両比の散布図では、黒色の土砂と褐色の土砂のプロットを結んだ直線から外れる（図3c）。

泥粒子のTOC, TN, TS濃度

盛土の黒色の土砂と褐色の土砂では、TOC, TN, TS

濃度は黒色の土砂のほうが高い(図4, 表3)。盛土と土壌を比較すると、地点S1の土壌のTOC・TN濃度は盛土より高く、TS濃度は黒色の土砂とほぼ同じであり、地点S2の土壌のTOC, TN, TS濃度は褐色の土壌とほぼ同じである。土石流堆積物と盛土を比較すると、前者のTOC, TN, TS濃度は褐色の土砂よりも黒色の土砂の値に近い。散布図では、黒色の土砂と褐色の土砂の値を結んだ直線上に地点B3の値があるが、地点A2とA5の値は外れている(図4c, d)。

泥粒子のXRD分析

盛土の黒色の土砂と褐色の土砂の回折パターンを比較すると、両試料とも石英、斜長石、スメクタイト、及び格子面間隔値が1.54–1.55nmのピークを含む点では共通する(図5, 図6)。石英は黒色の土砂では褐色の土砂より相対的に大きいピークとして確認され(図5)、格子面間隔値1.54–1.55nmのピークは黒色の土砂より褐色の土砂で相対的に大きいピークとして確認された(図6)。両地点の盛土の水簾分離した定方位試料では、カオリナイト

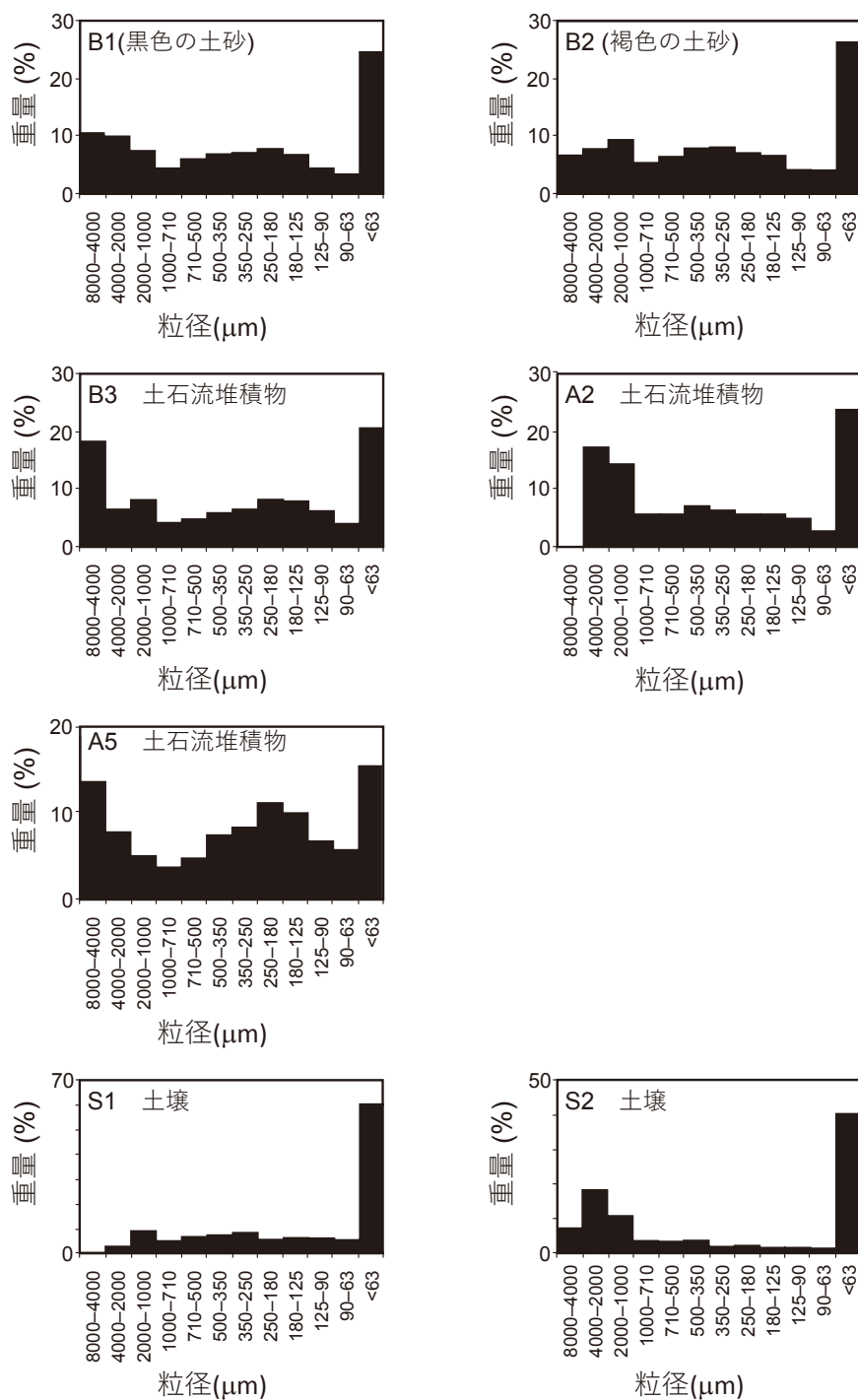


図2 各試料の粒度組成。

の特徴である0.70nmのピークはほとんど現れず1.00nmのピークが現れ、エチレングリコール処理で1.10nm付近にシフトしており、10Åハロサイトの特徴を示す(図6)。また、1.54–1.55nmのピークはエチレングリコール処理で1.70–1.72nmにシフトしており、ス멕タイトの特徴を示す(図6)。

地点S1の土壌試料の回折パターンは、石英、斜長石と格子面間隔値が0.74nmのピークを含み、地点S2の土壌は、石英、斜長石のピークは確認されず、0.73nm、1.01nmのピークとブロードなピークのみが検出された(図5, 図6)。両地点の土壌の水簸分離した定方位試料については0.73、0.74nmのピークがみられるが、1.40–1.50nmの位

表2 各試料の泥粒子の主要・微量元素組成の測定結果.

	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	N	K	P	S	Cl
地点B1 盛土・黒色の土砂	17.8	0.8	4.7	8.1	0.1	0.4	3.6	n.a.	0.6	0.1	<0.2	<0.1
地点B2 盛土・褐色の土砂	17.4	0.7	4.9	9.2	0.1	0.4	1.4	n.a.	0.3	0.1	<0.2	<0.1
地点B3 土石流堆積物	18.4	0.7	4.7	7.8	0.1	0.5	2.7	n.a.	0.5	0.1	<0.2	<0.1
地点A2 土石流堆積物	22.4	0.9	6.5	9.7	0.1	0.8	3.5	n.a.	0.7	0.1	<0.2	<0.1
地点A5 土石流堆積物	21.0	0.8	5.7	8.9	0.1	0.5	3.0	n.a.	0.6	0.1	<0.2	<0.1
地点S1 土壌	13.8	0.9	5.1	10.8	0.1	<0.3	0.1	n.a.	0.3	0.0	<0.2	<0.1
地点S2 土壌	17.2	0.7	5.7	8.3	0.4	0.4	0.5	n.a.	0.5	0.0	<0.2	<0.1

	Cu	Zn	As	V	Rb	Sr	Zr	Pb	Th	U
地点B1 盛土・黒色の土砂	217	547	<20	336	35	188	136	52	<20	<20
地点B2 盛土・褐色の土砂	110	65	<20	398	20	244	83	<20	<20	<20
地点B3 土石流堆積物	158	251	<20	330	29	209	128	31	<20	<20
地点A2 土石流堆積物	232	371	<20	307	37	249	129	53	<20	<20
地点A5 土石流堆積物	207	357	<20	314	35	229	123	44	<20	<20
地点S1 土壌	144	54	<20	433	20	37	99	<20	<20	<20
地点S2 土壌	53	83	<20	123	15	136	125	<20	<20	<20

n.a.:未分析

上段の濃度の単位は重量%, 下段はmg/kg.

	Si/Ti	Al/Ti	Fe/Ti	Mn/Ti	Mg/Ti	Ca/Ti	K/Ti	P/Ti
地点B1 盛土・黒色の土砂	37.9	10.4	8.7	0.1	1.0	5.4	0.9	0.2
地点B2 盛土・褐色の土砂	42.4	12.4	11.3	0.1	1.1	2.4	0.5	0.2
地点B3 土石流堆積物	44.8	11.9	9.6	0.1	1.4	4.6	0.9	0.2
地点A2 土石流堆積物	42.4	12.8	9.2	0.1	1.8	4.6	1.0	0.2
地点A5 土石流堆積物	44.7	12.6	9.5	0.1	1.2	4.5	0.9	0.2
地点S1 土壌	26.1	10.1	10.3	0.1	n.d.	0.1	0.4	n.d.
地点S2 土壌	41.9	14.4	10.2	0.5	1.1	0.9	0.9	n.d.

	Cu/Ti	Zn/Ti	V/Ti	Rb/Ti	Sr/Ti	Zr/Ti	Pb/Ti
地点B1 盛土・黒色の土砂	0.020	0.050	0.039	0.002	0.013	0.009	0.002
地点B2 盛土・褐色の土砂	0.012	0.007	0.053	0.002	0.019	0.006	n.d.
地点B3 土石流堆積物	0.017	0.026	0.044	0.002	0.016	0.010	0.001
地点A2 土石流堆積物	0.019	0.030	0.032	0.002	0.015	0.008	0.001
地点A5 土石流堆積物	0.019	0.033	0.037	0.002	0.016	0.008	0.001
地点S1 土壌	0.012	0.004	0.045	0.001	0.002	0.006	n.d.
地点S2 土壌	0.006	0.009	0.017	0.001	0.011	0.009	n.d.

n.d.: 検出下限値未満

上・下段ともにモル比

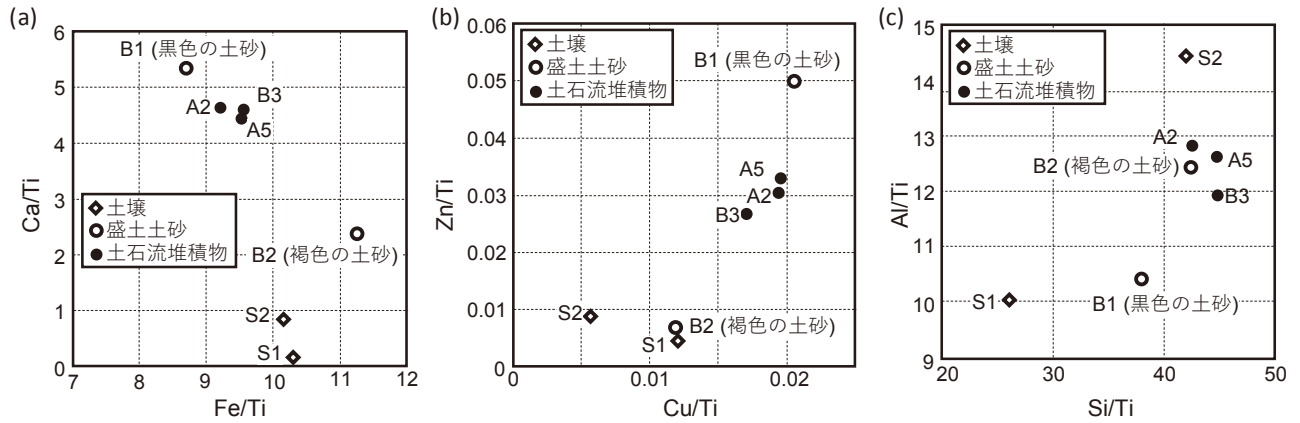


図3 各試料の泥粒子の主要元素・微量元素組成。(a) Ca/Ti比-Fe/Ti比の散布図。(b) Zn/Ti比-Cu/Ti比の散布図。(c) Al/Ti比-Si/Ti比の散布図。

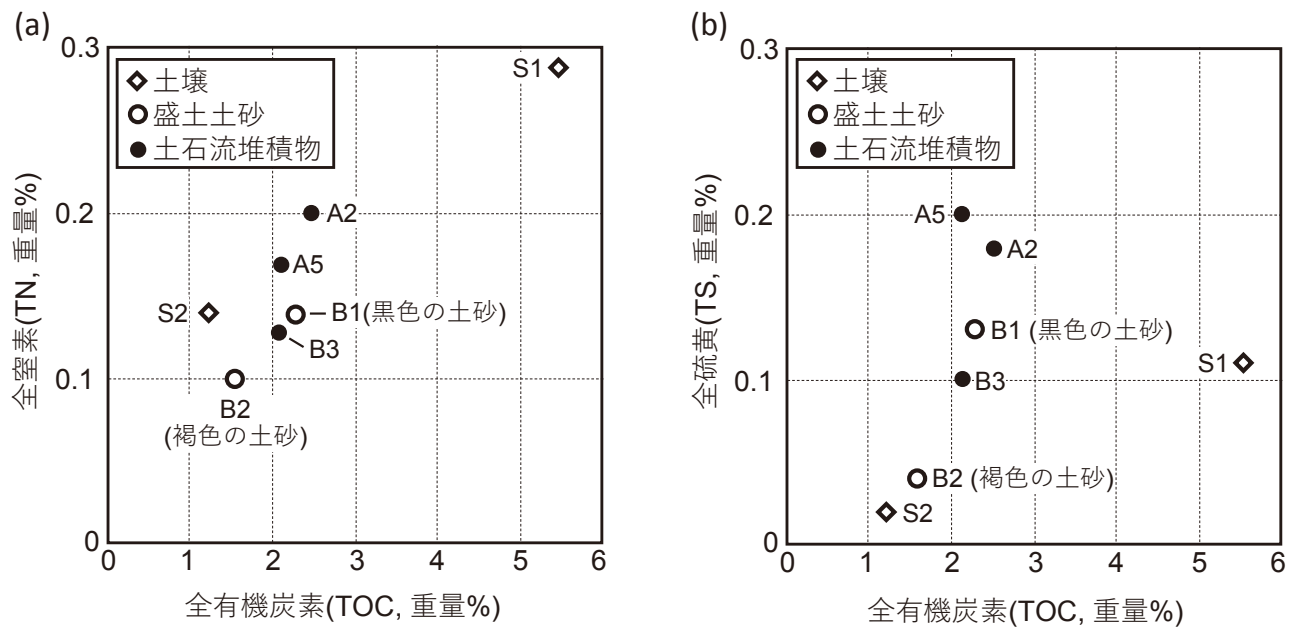


図4 各試料の泥粒子の全有機炭素量, 全窒素量, 全硫黄量の関係。(a) 全窒素量-全有機炭素量の散布図。(b) 全硫黄量-全有機炭素量の散布図。

表3 各試料の泥粒子のTOC, TN, TS濃度の測定結果。

	全有機炭素	全窒素	全硫黄
地点B1 盛土・黒色の土砂	2.27	0.14	0.13
地点B2 盛土・褐色の土砂	1.54	0.10	0.04
地点B3 土石流堆積物	2.09	0.13	0.10
地点A2 土石流堆積物	2.48	0.20	0.18
地点A5 土石流堆積物	2.12	0.17	0.20
地点S1 土壌	5.50	0.29	0.11
地点S2 土壌	1.20	0.14	0.02

濃度の単位は重量%

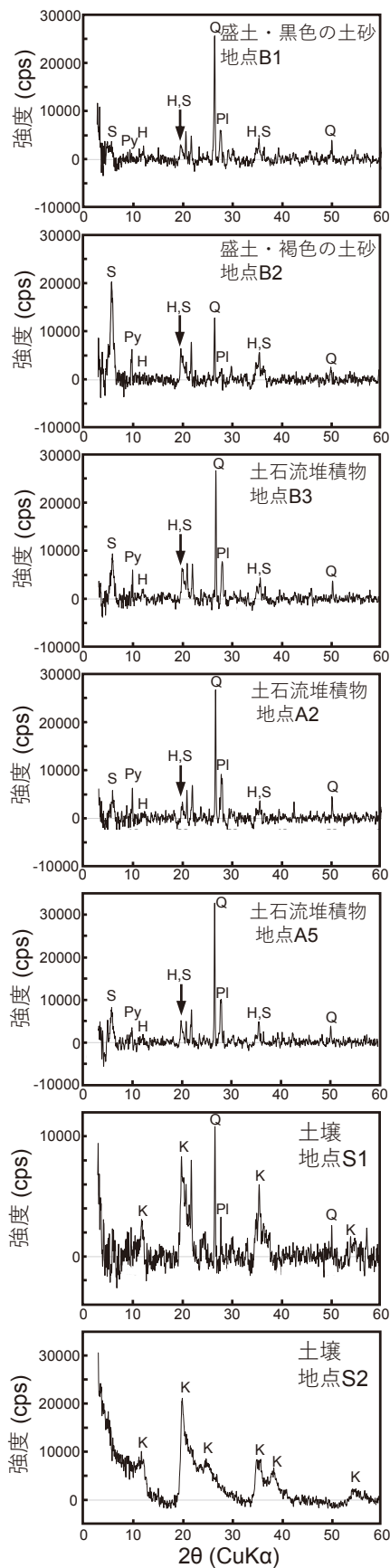


図5 各試料の泥粒子のX線回折パターン。K：カオリン，Q：石英，Pl：斜長石，S：スメクタイト，Py：パイロフィライト，H：ハロイサイト。

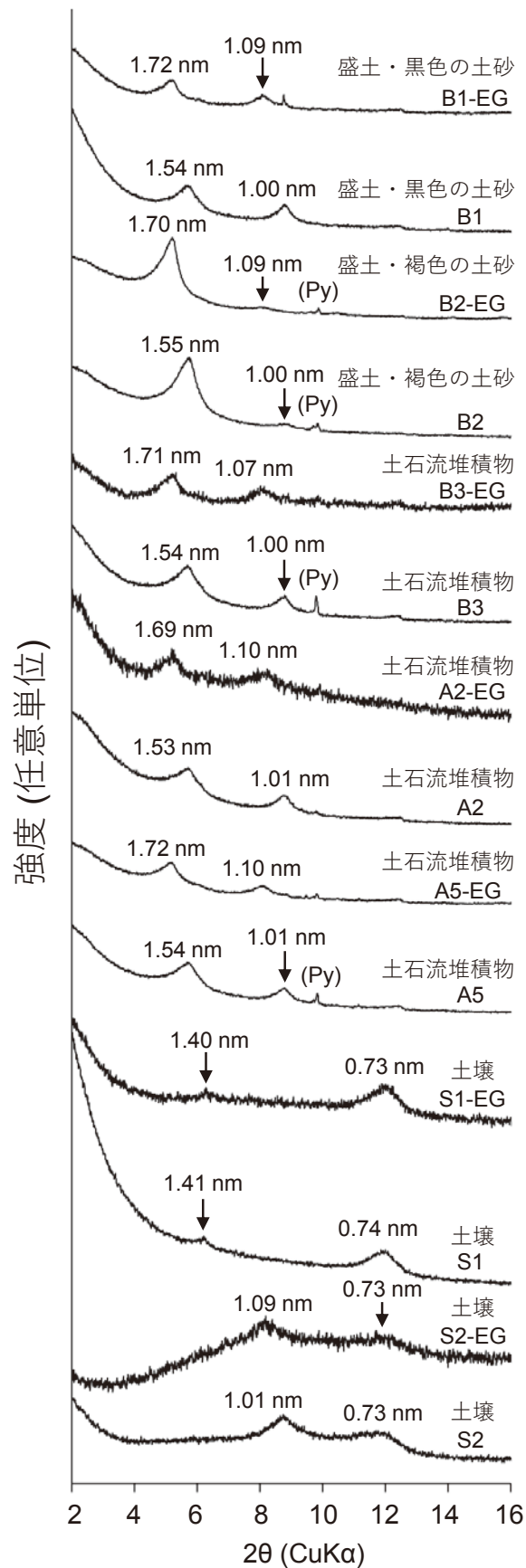


図6 各試料の泥粒子のエチレングリコール処理前後のX線回折パターン。EGと記されているグラフがエチレングリコール処理後である。

置には地点S1で微小なピークが検出されるだけで、地点S2では検出されない。

地点A2, A5, B3の土石流堆積物の回折パターンは、石英、斜長石、格子面間隔値が1.00–1.01, 1.53–1.54nmのピークを含み、石英のピークが相対的に大きい点では黒色の土砂と同じ傾向にある(図5, 図6)。これらの土石流堆積物の水簸分離した定方位試料については、0.70nmのピークはほとんど現れず1.00nmのピークが現れ、エチレングリコール処理で1.10nm付近にシフトするため、10Åハロイサイトの特徴を示す(図6)。

地点B2の盛土・褐色の土砂、地点B3, A5の土石流堆積物の回折パターンには0.90nm付近にピークが確認され、このピークは輝石やパイロフィライトの特徴である。後述の通り、0.35–0.50mmサイズの粒子の顕微鏡観察結果からは輝石が確認されているが、パイロフィライトの可能性も否定できないため、両者は本論では区別しない。この0.90nmのピークは黒色の土砂には確認されず、褐色の土砂には確認される(図5)。

砂粒子の粒子組成

盛土、土石流堆積物と土壌試料の中で優占する粒子は褐色で非晶質かつ不均質な物質からなり、内部に細かく不規則な割れ目を持ち、しばしば細粒の鉱物粒子を含む。また、薄片作成時に粒子の一部が脱落することもあり、これは粒子が脆弱なことを示唆する。これらの特徴から、我々は粒子を土壌の団粒と同定した。団粒は、土壌中の有機物と鉱物粒子が結合したもので、内部には大小さまざまな孔隙が形成される(和穎, 2016)。盛土と土石流堆積物は岩片を多く含む(表4)。

鉱物粒子では石英、斜長石、輝石を多く含み、これら

3つの鉱物粒子の量比を図7の三角ダイヤグラムにまとめた。盛土の黒色の土砂と褐色の土砂を比較すると、石英と斜長石粒子の占有率は黒色の土砂のほうが高く、輝石粒子は褐色の土砂のほうが高い。盛土と土壌を比較すると、盛土のほうが石英、斜長石粒子の占有率は高い。土石流堆積物は、石英、斜長石、輝石粒子を含み、三角ダイヤグラムでは、黒色の土砂、褐色の土砂、土壌よりも中央に分布する(図7)。

地点B1の盛土・黒色の土砂、地点B3と地点A5の土

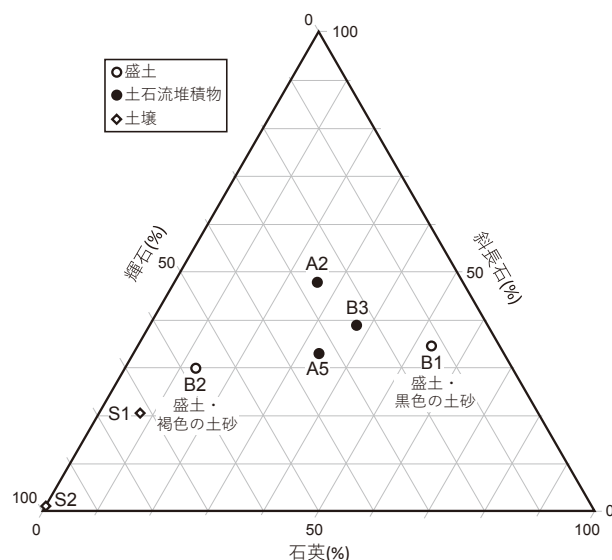


図7 0.35–0.50mmサイズの石英、斜長石、輝石の量比を示す三角ダイヤグラム。

表4 各試料の0.35–0.50mmの粒子の組成。

	石英	斜長石	輝石	岩片	凝集物	その他・不明	計
地点B1 盛土・黒色の土砂	67 (14.8%)	43 (9.5%)	16 (3.5%)	181 (40.0%)	127 (28.1%)	18 (4.1%)	452
地点B2 盛土・褐色の土砂	10 (2.8%)	24 (6.7%)	47 (13.2%)	54 (15.2%)	198 (55.6%)	23 (6.5%)	356
地点B3 土石流堆積物	47 (8.7%)	46 (8.6%)	28 (5.2%)	143 (26.6%)	252 (46.8%)	22 (4.1%)	538
地点A2 土石流堆積物	14 (3.4%)	24 (5.8%)	14 (3.4%)	78 (18.8%)	257 (61.8%)	29 (7.0%)	416
地点A5 土石流堆積物	24 (5.5%)	23 (5.3%)	23 (5.3%)	57 (13.0%)	297 (67.1%)	14 (3.2%)	438
地点S1 土壌	4 (1.9%)	9 (4.2%)	33 (15.4%)	4 (1.9%)	134 (62.6%)	30 (14.0%)	214
地点S2 土壌	0 (0%)	1 (0.2%)	65 (14.9%)	23 (5.3%)	323 (74.1%)	24 (5.5%)	436

石流堆積物から350–500 μ mサイズのチャート岩片を発見し(図8-a-f, j, k), 地点A2の土石流堆積物から長径約3500 μ mの灰色チャート岩片を1個発見した(図8-g)。地点B1のチャート試料1から, Williriedellacea上科に属する放散虫化石が確認できる(図8-a, b)。断面構造では胸部殻室(thorax)が腹部殻室(abdomen)に埋没している特徴的な構造を示す団子型断面であることから, 本化石は, 白亜紀型の放散虫化石個体である可能性がある(O'Dogherty *et al.*, 2009)。また, チャート試料2からは, 釣鐘状の断面を示す多節塔状Nassellaria目に属する放散虫化石が確認されると共に, スポンジ状のSpumellariaの放散虫殻断面も確認できる(図8-c, d)。チャート試料3については, 放散虫化石である透明のスポットは見られるが, 同定は困難である(図8-e)。地点B3のチャートに

は, やや変形した球状Spumellariaが多数含有されているのが確認できるが, 種名等の同定はできない(図8-f)。

地点A2の土石流堆積物中の灰色チャート片には, 放散虫化石に加えて, 20–40 μ mの菱形や立方体の粒子が多数含まれ, 濃灰色と淡灰色の帯状模様が観察された(図8-g, h)。菱形粒子は開放ニコルで無色を示し, 直交ニコルで高次の干渉色を示し, 非常に高い複屈折を持つ(図8-h, i)。SEM-EDS分析により, 菱形粒子はCaとMgを多く含むことが確認された(図9-a, b)。これらの形状, 光学特徴, 化学組成から, 菱形粒子はドロマイトと推定される。立方体の粒子は黒色で不透明で, それらの中には, 風化した外観と高い鉄分を持つものがあり, ゲーサイトと思われる鉄分を多く含む結晶の沈殿物も見られた(図9-c, d)。

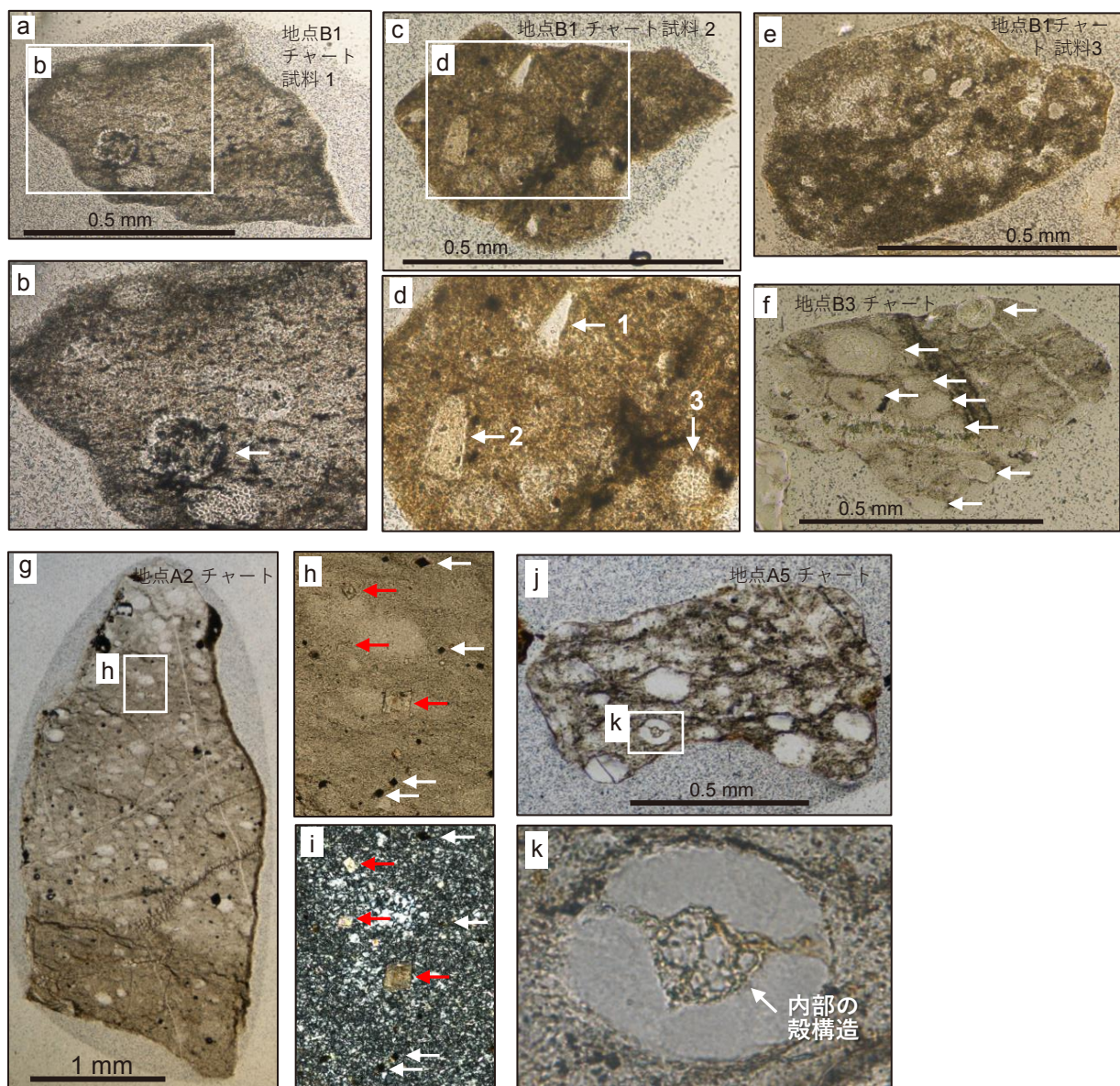


図8 放散虫を含むチャート岩片の写真。iは直交ニコルでの顕微鏡写真であり, 他は開放ニコルでの顕微鏡写真。bの矢印はWilliriedellacea上科に属する放散虫化石。dの矢印1は多節塔状Nassellaria目放散虫類化石, 矢印2は頭部に丸みを帯びたNassellaria, 矢印3はSpumellaria。fの矢印はSpumellaria。hとiの赤矢印は菱形を呈するドロマイト結晶で, 白矢印は立方体を呈する不透明粒子。

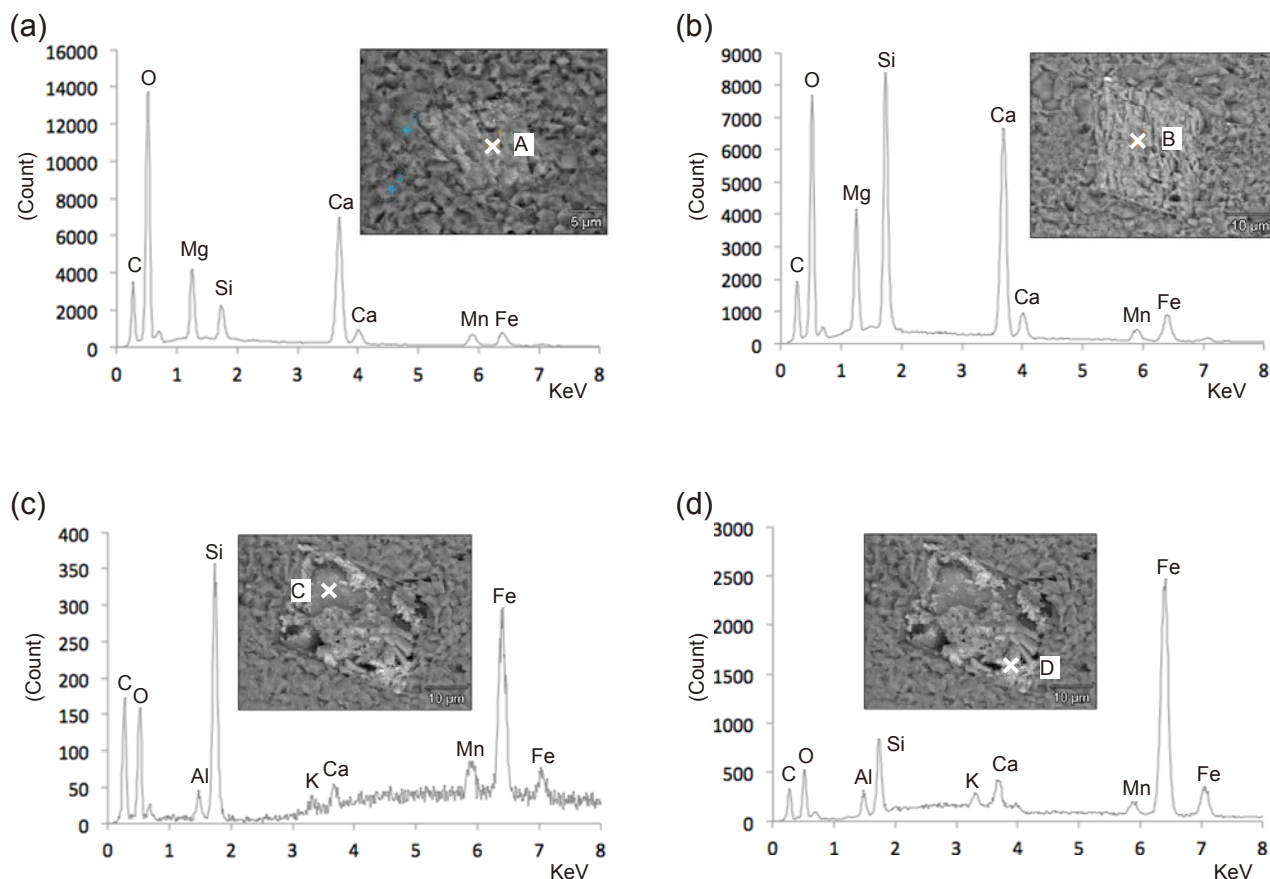


図9 地点A2の土石流堆積物から産した0.50–4.00mmサイズの灰色チャートのSEM-EDS分析の結果。aとbは菱形粒子の結果で、cとdは立方体粒子の結果。

地点A5の土石流堆積物中の褐色チャートに含まれる内部骨格構造を持つ保存状態の良い球状の放散虫化石（図8-j, k）は、*Entactinaria?* gen. et sp. indet. と推定される。

考察

本論の試料は土石流堆積物の表層部分のみを採取したもので、測定値が土石流堆積物を代表しない可能性があることに考慮して、以下の考察を行う。

土石流堆積物の供給源としての盛土とその組成

本研究では盛土の黒色の土砂からチャート岩片を発見した。調査地域周辺にはチャート岩体は分布しないので、黒色の土砂は他地域からもたらされたことは確実である。一方、石英・斜長石・輝石の量比やXRD分析などの結果から、褐色の土砂は地点S1の土壤に類似する性質を持つものの、粘土鉱物の組成は地点S1とS2のいずれの土壤とも異なっていることが分かった（図10）。

上述の通り、静岡県（2021b）は、Ca含有率から土石流堆積物中の黒色の土砂と褐色の土砂の混合比を75–85%、15–25%と算出した。これは、土石流堆積物は黒色の土砂と褐色の土砂の二成分の混合物であることを前提とする。

本論の測定の結果、泥粒子のCa/Ti比、Fe/Ti比、Cu/Ti比、Zn/Ti比については、土石流堆積物の泥粒子の値

は黒色の土砂と褐色の土砂の混合で説明でき、さらに黒色の土砂に近い値をとることが明らかとなった（図3, 図4）。しかし、例えば、Si/Ti比とAl/Ti比に関しては、土石流堆積物の値を黒色の土砂と褐色の土砂の混合では説明できず、また褐色の土砂に近い値をとる（図3c）。一方、泥粒子のTOC、TN、TS濃度については、黒色の土砂と褐色の土砂のプロットを結んだ直線上に地点B3の値はあるが、地点A2とA5の値は外れている（図4）。

これらの元素組成における異質性は、黒色の土砂と褐色の土砂の成分の不均質性を示唆する。したがって、本論では、採取した黒色の土砂と褐色の土砂の成分を使って、土石流堆積物中の混合比を算出することは行わないこととした。

盛土と土石流堆積物中のチャートによる採集地の推定

地点B1の盛土・黒色の土砂中のチャート試料1の放散虫化石Williriedellacea上科は、大きさの異なる団子が重なった球形殻を特徴的に持つ放散虫グループであり、ジュラ紀前期後半から出現する（例えば、De Wever *et al.*, 2001）。よって、チャート試料1の堆積年代はジュラ紀前期後半以降と判断できる。チャート試料2の多節塔状Nassellariaは三疊紀に出現し、頭部に丸みを帯びたNassellariaは白亜紀の*Dictyomitra*属によく見られる特徴だが、表面装飾情報のない断面のみでは明確な同定はできない。これらの放散虫化石の含有から、チャート試料2

の堆積年代は三畳紀以降と判断できる。地点A5の土石流堆積物中の褐色チャートのEntactinaria?は古生代に出現し、現世の海にも生息する（例えば、Kozur and Mostler, 1982; Nakamura *et al.*, 2020; Suzuki *et al.*, 2021）。

地点A2の土石流堆積物中の灰色チャート片は、放散虫化石に加えて、ドロマイトの結晶と、ゲーサイトと推定される結晶を多く含む。日本の放散虫チャートの産地には、秋吉帯、四万十帯、秩父帯、美濃・丹波・足尾帯、北上・大島帯、神居古潭帯がある（図11）（Isozaki *et al.*, 2010; Wallis *et al.*, 2020）。

これらのうちで、海山性の碎屑性ドロマイトを含むチャートが報告されているのは秋吉帯、美濃・丹波・足尾帯、秩父帯であり（Hattori, 1984; Sano, 1984, 1988; 佐野・小嶋, 2000; 中島・佐野, 2005; 松岡, 2019 など）、ペルム系から三畳系に見られるが、ペルム系／三畳系境界付近の砥石層に特徴的に産することが報告されている（Kakuwa, 1996; 八尾・桑原, 1997; Muto *et al.*, 2020）。ペルム系／三畳系境界付近の灰色チャートは、一般的に、還元状態で形成された黄鉄鉱を含み（中尾・磯崎, 1994）、黄鉄鉱はゲーサイトなどの他の鉄鉱物に変質することがある（例えば、Soliman and Goresy, 2012）。黄鉄鉱の結晶は立方晶系であり、立方体や正八面体をなす。これらのことから、地点A2の灰色チャート片のゲーサイトと推定される結晶は、黄鉄鉱が変質した可能性が高い。灰色チャート片の帯状模様については、ペルム系／三畳系境界付近の灰色チャートにも同様の葉理構造が見られ、酸素に乏しい底層水環境下での生物攪拌の欠如による初期堆積構造が保存されたものと考えられている（例えば、Isozaki, 1997; Kakuwa, 2008）。以上の含有物と葉理構造から、地点A2の灰色チャート片は、秋吉帯、美濃・丹

波・足尾帯、秩父帯のペルム系／三畳系境界付近から供給されたと推定される。

土石流堆積物及び盛土のチャート片が全て同一起源という仮定に立つと、ペルム系／三畳系境界付近とそれ以降のジュラ紀、ないし前期白亜紀まで及ぶ時代のチャートが報告されているのは秩父帯だけである（Wallis *et al.*, 2020）。秩父帯は関東地方では関東山地に分布するので（図11）、盛土の黒色の土砂の一部の採集地は、関東山地の秩父帯の下流域である可能性がある。また、チャート片を含有することから、土石流堆積物は盛土の黒色の土砂を含むと考えるのは自然であることから、チャート岩片は黒色の土砂の有効なトレーサー物質となるであろう。

なお、木村（2021）は、盛土は三層構造で、2009年6月期前の盛土層、褐色の土砂、黒色の土砂の順に重なり、2021年7月3日の崩落崖は、褐色の土砂、黒色の土砂の境界付近にあたるとした。この解釈が正しいのならば、黒色の土砂は褐色の土砂よりも崩落しやすい性質を有していた可能性があり、これが崩落の原因の一つになりうる。そうすると、熱海周辺の盛土では、黒色の土砂からなる盛土は崩落の危険性が相対的に高いことになる。このような危険性の高い盛土の検出に、本論で得た知見—黒色の土砂のトレーサー物質としてのチャート岩片の有用性—は非常に役立つ。

まとめ

本研究では盛土の黒色の土砂と褐色の土砂、土石流堆積物、土壌について、粒度組成、泥粒子の主要・微量元素分析、鉱物組成、砂粒子の鉱物種・岩石種の同定、チャート岩片中の放散虫化石等の分析を行った。その結果、以

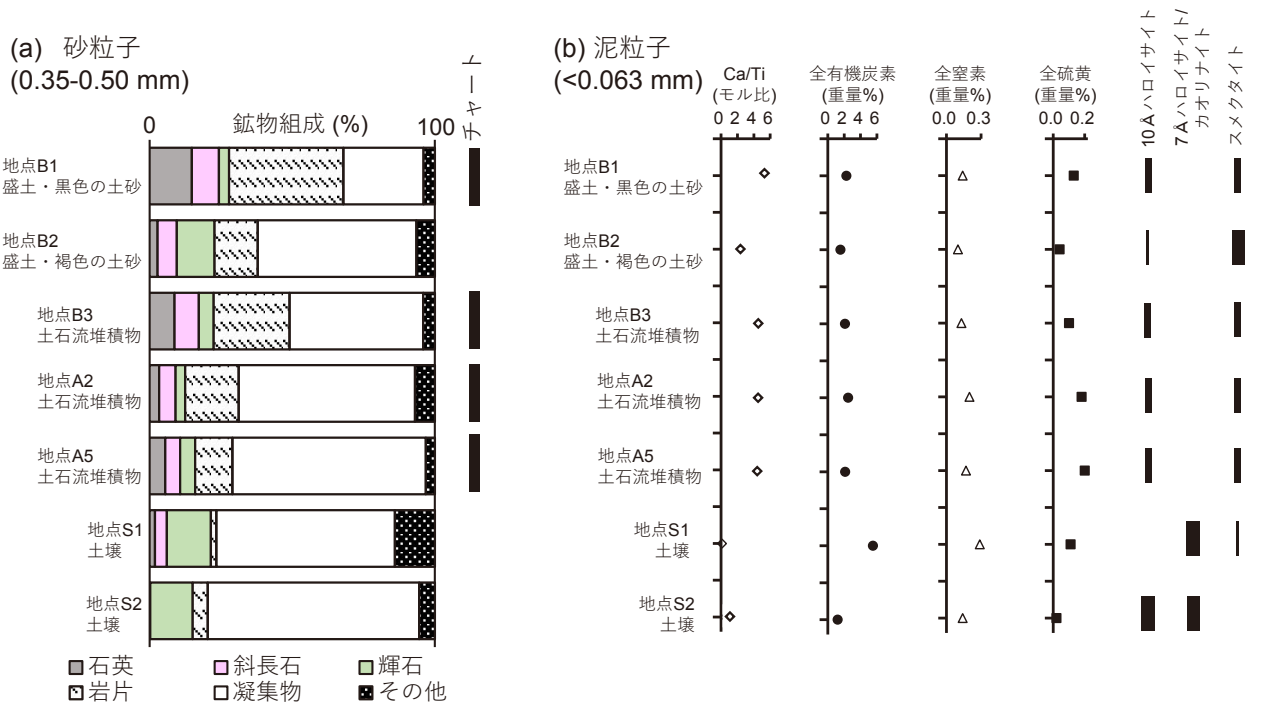


図10 各試料のCa/Ti比、TOC・TN・TS濃度、粘土鉱物組成、石英・斜長石・輝石の量比、チャート岩片の有無の比較。

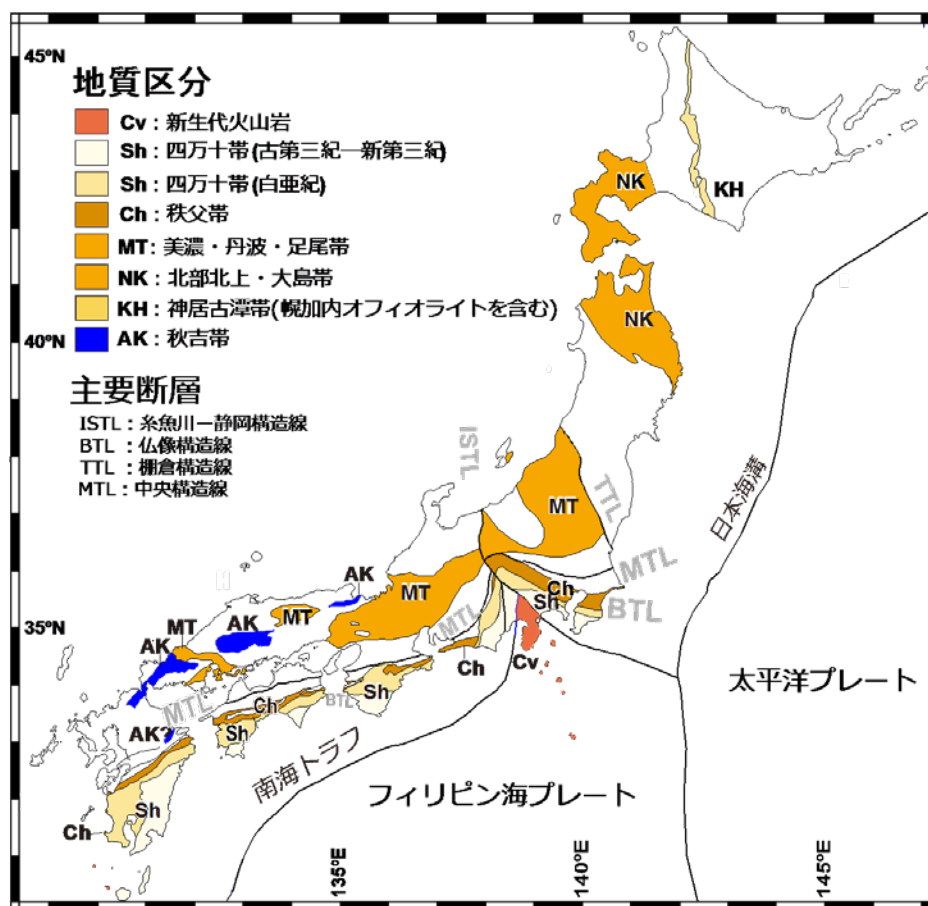


図 11 日本の地質区分。但し、琉球列島を除く。Wallis *et al.* (2020) を改変。

下の知見を得た。

1. 盛土の黒色の土砂は他所から搬入されたものである。
2. 本論で採取した黒色の土砂と褐色の土砂の二成分混合では、土石流堆積物の泥粒子の成分を説明できないことが分かった。
3. 黒色の土砂と土石流堆積物からチャート岩片を発見し、含有する放射虫化石とドロマイト粒子から、ペルム系／三畳系境界付近とそれ以降のジュラ紀、ないし前期白亜紀まで及ぶ時代のチャート層に由来する岩片であることが判明した。
4. チャート岩片は盛土の黒色の土砂の有効なトレーサー物質となる可能性があり、さらに黒色の土砂の採集地の特定に重要な鍵となる。

謝辞

立ち入り禁止区域内の調査には熱海市市民生活部危機管理課に協力いただいた。静岡大学の石橋秀巳博士には薄片観察に関して助言をいただいた。静岡大学理学部の佐藤慎一教授と 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。これらの方々に感謝申し上げる。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

- 地理院地図 (2021), <https://www.gsi.go.jp/tizu-kutyu.html>
2021年7月4日引用。
- De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J. P., Nigrini, C. & Caridoit, M. (2001), Radiolarians in the sedimentary record. 533p, Gordon and Breach Science Publishers.
- Hattori, I. (1984), Alternating clastic limestone and red chert as olistolith in the Mino terrane, central Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, **90**, 43–54.
- Isozaki, Y. (1997), Permo-Triassic boundary superanoxia and stratified superocean: records from lost deep sea. *Science*, **276**, 235–238.
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T. & Yanai, S. (2010), New insight into a subduction-related orogen: a reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese islands. *Gondwana Research*, **18**, 82–105.
- Kakuwa, Y. (1996), Permian-Triassic mass extinction event recorded in bedded chert sequence in southwest Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **121**, 35–51.

- Kakuwa, Y. (2008), Evaluation of palaeo-oxygenation of the ocean bottom across the Permian-Triassic boundary. *Global and Planetary Change*, **63**, 40–56.
- 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.
- 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** (印刷中), 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.
- 国土地理院 (2021), 崩壊地等分布図及び土砂堆積範囲図 (7月6日第3報公開) https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R3_0701_heavyrain.html#4 2021年7月8日にダウンロード
- Kozur, H. & Mostler, H. (1982), Entactinaria subordo Nov., a new radiolarian suborder. *Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **11**(1), 399–414.
- 松岡喜久次 (2019), 関東山地, 秩父帯北帯の碎屑性炭酸塩岩の層序・岩相と堆積環境. 地球科学, **73**, 5–14.
- Muto, S., Takahashi, S., Yamakita, S. & Onoue, T. (2020), Scarcity of chert in upper Lower Triassic Panthalassic deep-sea successions of Japan records elevated clastic inputs rather than depressed biogenic silica burial flux following the end-Permian extinction. *Global and Planetary Change*, 103330.
- 中島浩一・佐野弘好 (2005), 秋吉帯石炭系海綿骨針チャート中の碎屑性石灰岩. 日本地質学会第112年学術大会講演要旨, 78.
- Nakamura, Y., Sandin, M. M., Suzuki, N., Tuji, A. & Fabrice, N. (2020), Phylogenetic Revision of the Order Entactinaria Paleozoic Relict Radiolaria (Rhizaria, SAR). *Protist*, **171**, 125712. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2019.125712>
- 中尾京子・磯崎行雄 (1994), 美濃帯犬山地域の遠洋性チャート中に記録されたP/T境界深海anoxiaからの回復過程. 地質学雑誌, **100**, 505–508.
- O'Dogherty, L., Carter, E. S., Dumitrica, P., Gorican, S., De Wever, P., Bandini, A. N., Baumgartner, P. & Matsuoka, A. (2009), Catalogue of Mesozoic radiolarian genera. Part 2: Jurassic-Cretaceous. *Geodiversitas*, **31**, 271–356.
- 及川輝樹・石塚 治 (2011), 熱海地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1 地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 61p.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2021), 地質図Navi. <https://gbank.gsj.jp/geonavi/#disclaimer> 2021年10月6日引用.
- Sano, H. (1984), Displaced dolomites in radiolarian cherts of the Chichibu Belt on Shikoku Island, Southwest Japan. *Sedimentary Geology*, **137**, 20–23.
- Sano, H. (1988), Permian oceanic-rocks of Mino terrane, central Japan. Part I. chert facies. *Journal of Geological Society of Japan*, **94**, 697–709.
- 佐野弘好・小嶋 智 (2000), 美濃－丹波－足尾テレーンの石炭～ジュラ系海洋性岩石. 地質学論集 **55**, 123–144.
- 静岡県 (2021a), 難波副知事記者会見 令和3年7月8日 <https://www.youtube.com/watch?v=ihq8hpwGA0w> 2021年7月9日引用.
- 静岡県 (2021b), 熱海市伊豆山地区土石流土質調査結果 (速報) <http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-350/sabouka/documents/doshitucyousakekka.pdf> 2021年9月9日引用.
- Soliman, M. F. & Goresy, A. E. I. (2012), Framboidal and idiomorphic pyrite in the upper Maastrichtian sedimentary rocks at Gabal Oweina, Nile Valley, Egypt: Formation processes, oxidation products and genetic implications to the origin of framboidal pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **90**, 195–220.
- Suzuki, N., O'Dogherty, L., Caulet, J-P. & Dumitrica, P. (2021), A new integrated morpho- and molecular systematic classification of Cenozoic radiolarians (Class Polycystinea) suprageneric taxonomy. O'Dogherty, L. (ed.) Catalog of Cenozoic radiolarians. *Geodiversitas*, **43**(15), 405–573.
- 和穎朗太 (2016), 陸域最大の炭素・窒素プールを制御する土壌微生物と土壌団粒構造. 土と微生物, **70**, 3–9.
- Wallis, S. R., Yamaoka, K., Mori, H., Ishiwatari, A., Miyazaki, K. & Ueda, H. (2020), The basement geology of Japan from A to Z. *Island Arc*, **29**, e12339, doi:10.1111/iar.12339
- 八尾 昭・桑原希世子 (1997), P/T境界を通じての放散虫群集の変遷 (その4). 第104年学術大会日本地質学会学術大会講演要旨, 78.

著者貢献

北村晃寿：試料採取, 粒度組成, 砂粒子の鉱物種・岩石種の同定, 全体総括, 論文執筆を担当. 岡崎颯太：泥粒子のCNS分析を担当. 近藤 満：鉱物組成分析を担当. 渡邊隆広：泥粒子の主要・微量元素分析と論文執筆を担当. 中西利典：泥粒子のCNS分析を担当. 堀 利栄：放散虫化石の同定と論文執筆を担当. 池田昌之：チャート中の微粒子の分析と論文執筆を担当. 市村康治：鉱物組成の分析と論文執筆を担当. 中川友紀：鉱物組成の分析を担当. 森 英樹：薄片作成を担当.