

研究成果報告書（国土地理協会第 23 回学術研究助成）

『尾鉱の二次崩壊が地形形成に与える影響 – 鹿児島県永野／山ヶ野金鉱山を例に –』

研究代表者 山田和芳（早稲田大学人間科学学術院・教授）

共同研究者 村尾 智（NPO 日本地質汚染審査機構・理事）

高嶋 洋（第一工科大学工学部・教授）

冨安卓滋（鹿児島大学理工学域理学系 理工学研究科・教授）

布施正暁（広島大学大学院先進理工系科学研究科・准教授）

1. はじめに

本研究は、鹿児島県にて江戸時代初期から昭和時代中期まで栄えた金鉱山から排出された尾鉱が製錬所近隣にて堆積処分された後、堆積場の二次崩壊が下流部の地形形成プロセスにどの程度の影響を与えたかについて検証を試みた。

尾鉱とは、金属や鉱物の回収過程で生じる一般的な副産物のことである (ICMM, 2020)。具体的には採掘した鉱石から有用鉱物を採取・精錬する過程で生じる廃棄物のことである。通常は金属や鉱物の微細な粒子と水が混ざった液体のスラリー状になっており、採掘された鉱石が粉碎されて細くなる際に生じる (ICMM, 2020)。通常、鉱山で採掘行為が行われる際、目的となる鉱物が含まれている割合は非常に少ない。そのため、一般的に鉱山では効率的な運搬のために、目的とする鉱物だけを持ち出し、精錬所などの施設に運搬するようにオペレーションが設計される (Fair Finance Guide, 2020)。この際に多くの鉱山で使用される手段が浮遊選鉱という手段であり、非常に効率的に目的の鉱物を抽出できる一方、大量の水と粉碎された廃石の混ざったスラグや廃滓が生じ、尾鉱として廃棄処分されることとなる (Fair Finance Guide, 2020)。尾鉱は人工（的）地層であり、ヒ素や水銀に代表される有毒物質を多く含んでおり、環境中に直接放出することはできないため、尾鉱ダムや鉱滓ダムと言われる貯蔵施設で一般的に管理される。この尾鉱ダムには、廃石や廃石と選鉱に使われる薬品、大量の水などが溜められている (Fair Finance Guide, 2020)。したがって、適切な管理がされなければ、排水や粉塵による汚染によって環境や人の健康衛生に悪影響を及ぼす可能性がある (ICMM, 2020)。

これまで尾鉱はその堆積地において水質汚染、地盤沈下、健康被害をもたらす可能性が指摘されてきた (UNEP, 2021)。そして、2019 年にブラジル南東部ミナスジェライス州のジャルカンダ鉱山で尾鉱堆積ダムが決壊して土石流が発生した。この土砂災害によって、下流の村で 270 人以上が死亡し、数百人が行方不明となった。これを受けて、尾鉱堆積の二次崩壊による災害リスクについての議論の必要性が高まっている (Murao, 2021 など)。しかしながら、土石流の分布範囲や尾鉱の規模による頻度など、その実証的な研究は現在のところ進んでいない。日本では、主に中国地方において、かつて発展したたたら製鉄による鉄穴流しが地形改変と平野形成に寄与したことが報告されている (貞方, 1985 など)。尾鉱の二

次崩壊は鉄穴流しと同様に下流域への地形形成への寄与（影響）があることは予想される。しかし、その実態はわかっていない。尾鉱管理が不十分である途上国等では尾鉱に関する災害は喫緊の社会的問題となっている。本研究によって、かつての尾鉱堆積場からの二次崩壊による地形形成に与える影響を知ることは、人工改変による地形プロセスを明らかにするだけでなく、今後の災害リスクマネジメントの視点において、土砂災害の規模や頻度を解明する極めて重要なテーマとなる。

2. 調査地域

調査対象地域は鹿児島県北西部、川内川の支流である穴川流域の永野金山(さつま町)と山ヶ野金山(霧島市横川町)跡地から流下した川内川との合流地点の平坦面を中心とした地域である(図1)。永野金山(さつま町)と山ヶ野金山(霧島市横川町)跡地は本研究で実施した掘削地点から約15キロ上流にあたる。かつてこれら2つの金鉱山に近い河川部において河床を一部埋める形で尾鉱堆積場が存在していたことが明らかになっている(村尾・山田, 2022 など)。一方、穴川が川内川に合流する地点は、火砕流台地の開析が進まず狭窄部となっている。そのため、その合流部前面には旧河道の自然地形が残る平坦面が広がっている。一般的に山地丘陵部の平坦面は河川から運搬される碎屑物等の堆積場となっているため、尾鉱堆積場の二次崩壊が掘削地域の平坦面の堆積物として再構成されている可能性が極めて高い。次章では、まずは本研究の前提となる永野/山ヶ野金山の歴史やそれらから排出された尾鉱堆積物の特徴について説明する。

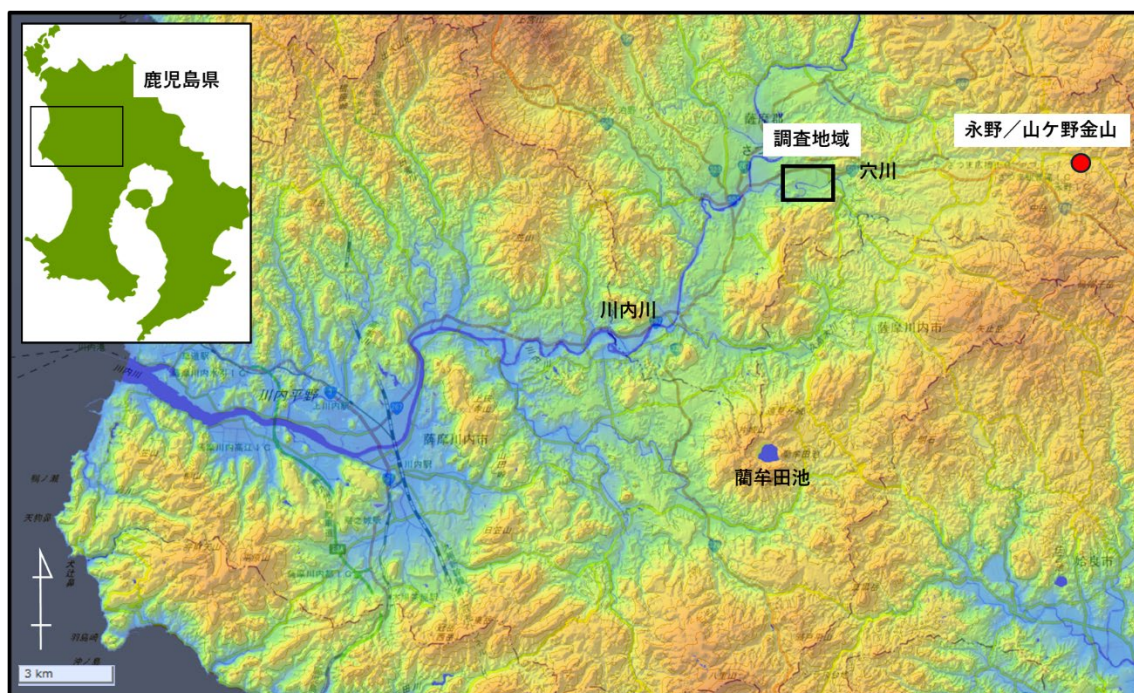


図1 調査対象地域 黒枠部分が図2に対応している

3. 永野／山ヶ野金山について

3.1 鉱山史

永野／山ヶ野金山は、鹿児島県北部のさつま町と霧島市の境界付近に位置する金山である。『山ヶ野金山鉱業誌』（五代，1910）によると、旧山ヶ野・永野金山は1640年に宮之城領主の島津久通によって発見され、1642年から採掘が開始された。全国の農作不良という理由のほか、薩摩藩を警戒した幕府からの圧力などにより、1644年に一度閉山されるが、1656年に採掘が再開されると金山周辺に多くの人が集まり、町が形成され、その後、約10年の間、全盛期を迎え、薩摩藩の重要な資金源となっていた。表層部の金が枯渇し、1700年代に一度は衰えるものの、1800年代に入ると再び盛んになった。特に1804年の産金量は佐渡金山を遥かに上回っていたという（浦島，2004）。明治期に入ると、フランス人技師のコワニエを招き、金鉱山の近代化が始められた。1876年には水銀を用いて精錬するアマルガム法が、1903年にはシアン化カリウムを用いた青化法が導入されたほか、水力・蒸気機関やトロッコの導入など、電力化も推し進められた。その結果、産金は好調となり、明治後期には初期と比べ産金量が4倍にまで増加したが、その後は太平洋戦争の激化に伴い金鉱山整備令が発令され、閉山へ向かっていくこととなる。なお、『黄金の郷 山ヶ野』によると、開山以来の約300年間で産出した金量は約80tであり、これは日本の金山では第3位の産金量となっている。

1640年から1965年まで続いた永野／山ヶ野金山では、明治時代に近代化が図られ、水銀やシアンを使用した金の増産が推し進められた（村尾・山田，2020）。これに伴い、大量の尾鉱が排出され、精錬所の脇を流れる穴川沿いの山峰地区に3つ、仕明地区に1つ設けられた堆積場で、鉱山の三番滝精錬所より木の桶によるスラリー輸送で堆積処分が行われた（高嶋ほか，2022）。また、過去には堆積場で決壊と尾鉱の流出が発生していたことが今回と同様の共同研究者との文献および聞き取り調査によって判明している（村尾・山田，2022など）。2022年に申請者らはこの尾鉱堆積場にて掘削科学調査を実施して、後述するように尾鉱堆積物の特徴を把握することができている。

3.2 尾鉱堆積物の特徴

掘削調査は穴川沿いに4つあった堆積場のうち、規模が大きく最も高い堆積高を有する山峰地区の堆積場にて2022年秋に行われた。ロータリー式ボーリングによるオールコアボーリング調査の結果、尾鉱堆積物は母岩（段丘構成堆積物）までの深度14～17mの堆積厚となっていた。表層1メートル付近まではローム質粘土の盛り土であり、尾鉱堆積物の処分完了後、植林のために施行されたものである。それ以深の層相は無機質な砂礫～シルト層が発達している。また地層の側方連続性に乏しく、鍵層も認められない。ゆえにボーリングコア同士の層序対比はできなかった。この理由は、過去にこの人工地層が繰り返し崩壊を起こしたことがあるからであると考えられる。自然地層と人工地層ではその成り立ちに大きな違いがある。自然地層は運搬された土砂や岩石が数千万年かけて堆積し、押し固められるこ

とで作られるため、非常に強固なものとなっている。一方、人工地層は自然地層と比べると、非常に短期間で作られる。そのため、自然地層とは異なる点も多く、非常に脆弱なものとなっている。今回調査した人工地層は、深度 10m より浅い砂層では粒子間隙が多く、液状化が容易に発生し得る地層であり、浸水に弱い構造になっていることが判明している（高嶋ほか、2022）。以上のことから、この尾鉱堆積物（人工地層）が過去に崩壊を起こした可能性は非常に高いと考えられる。

3.3 金製錬と水銀

永野／山ヶ野金鉱山では、水銀を用いて精錬するアマルガム法によって金製錬が行われていた。そのため、尾鉱堆積物に水銀が残存する可能性がある。申請者らによって尾鉱の残留水銀量を測定した結果、環境基準には満たないものの金製錬に関連する水銀が検出できている（Murao et al., submitted）。また、水銀は昇華して大気中に放出され水成堆積物中にも残存する。これについても申請者らの予察的な研究によって鹿児島県内の蘭牟田池やさつま湖において同時期に堆積した湖沼堆積物中に水銀量の増大ピークがあることが判明している（山田ほか、2023）。これらのことから、本調査で取り扱うボーリングコアにおいても、水銀量変動を尾鉱堆積物の二次被害を想定するためのトレーサーとして極めて有効であることが示唆される。

4. 研究方法

本研究では、鹿児島県永野／山ヶ野金鉱山によって排出された尾鉱堆積物の二次崩壊が下流域の地形形成に与える影響を解明するために、鉱山脇から下流約 15 キロ離れたさつま町山地間の谷底平野（平坦）面の 2 か所にてボーリング掘削を実施した。掘削調査は予備調査および関係者調整を経て 2025 年 6 月に実施した。採取したボーリングコアについては、第一工科大学にて搬入後、人工地層に着眼しながら岩相記載や写真撮影をおこなった。その後、サブサンプリングを実施して堆積年代を推定するために放射性炭素年代測定、尾鉱堆積物を推定するために総水銀量の測定をそれぞれ実施した。これらの結果を総合的に解釈して尾鉱の混入度（二次崩壊の程度）の検討をおこなった。

5. 微地形解析

図 2 に地理院地図にて作成した微地形図を示す。掘削地点は、川内川の支流である穴川と南方川の合流地点に広がる谷底平野である。東西約 2 キロ、南北約 1.5 キロの広さを持ち、北西に向かってやや低くなる標高 50～45 メートル前後の平坦面である。穴川の旧河道や氾濫原であることが推定されるが、狭窄部を経て本流の川内川と合流する地点の標高より約 10～20m 程度高い。近隣の支流と本流の合流地点の河床高度を比較すると、この地点の標高（高度）が高いことが予想される。これは、穴川上流にかつて存在した尾鉱の二次崩壊の影響ではないかと考えている。そのため、この影響をみるため、平坦部の最も低い標高地点

(R06-1 地点) と、中央部 (R06-2) 地点にて掘削調査を実施することとした。R06-1 地点は休耕田となっている場所であり、現在は資材保管場所となっており、盛土が認められる。現在の川筋から遠い地点かつ、平坦部で最も低い場所である。ここにおいて尾鉾の堆積の影響を認めることは広域での影響を容易に推定できる場所である。一方、R06-2 地点は、かつて国鉄宮之城線佐志駅が存在していた付近の線路が敷設されていた場所である。本流から用水路がひかれている場所である。

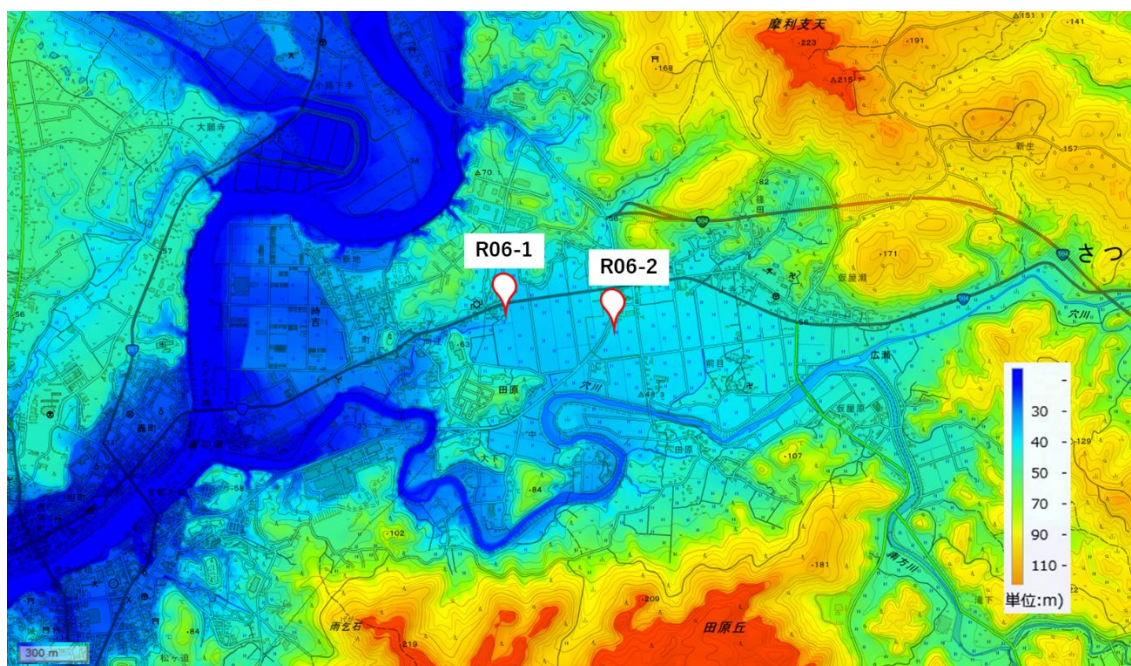


図2 掘削地点の詳細微地形図 地理院地図にて作成

6. 結果

6.1 ボーリングコア

採取されたボーリングコアは、R06-1 (標高 45.85m、掘削深度 10.0m)、R06-2 (標高 47.84m、掘削深度 7.0m) である。機械ボーリングを実施して口径 86 ミリのオールコアサンプリングである。図3、4にそれぞれの地質柱状図を示す。またコア写真を図5、6にそれぞれ示す。

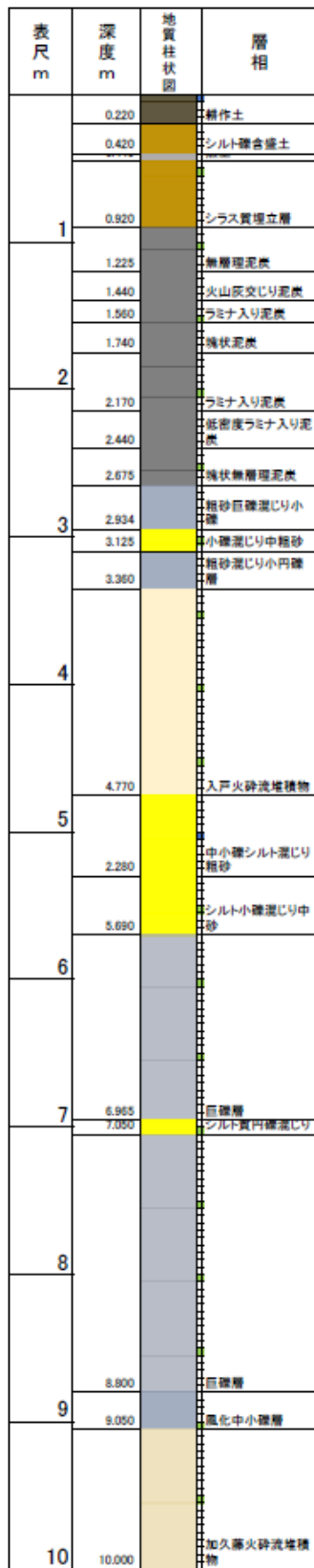


図3 R06-1の地質柱状図

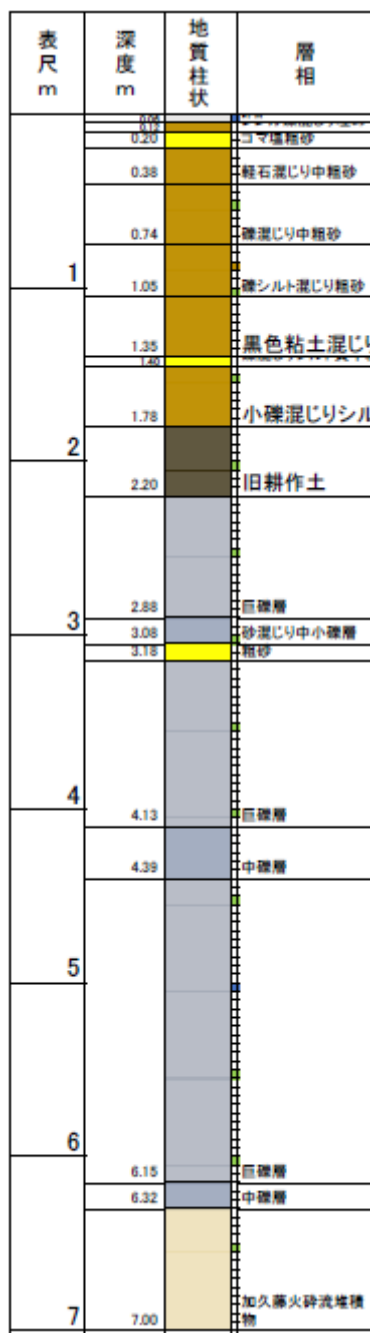


図4 R06-2の地質柱状図

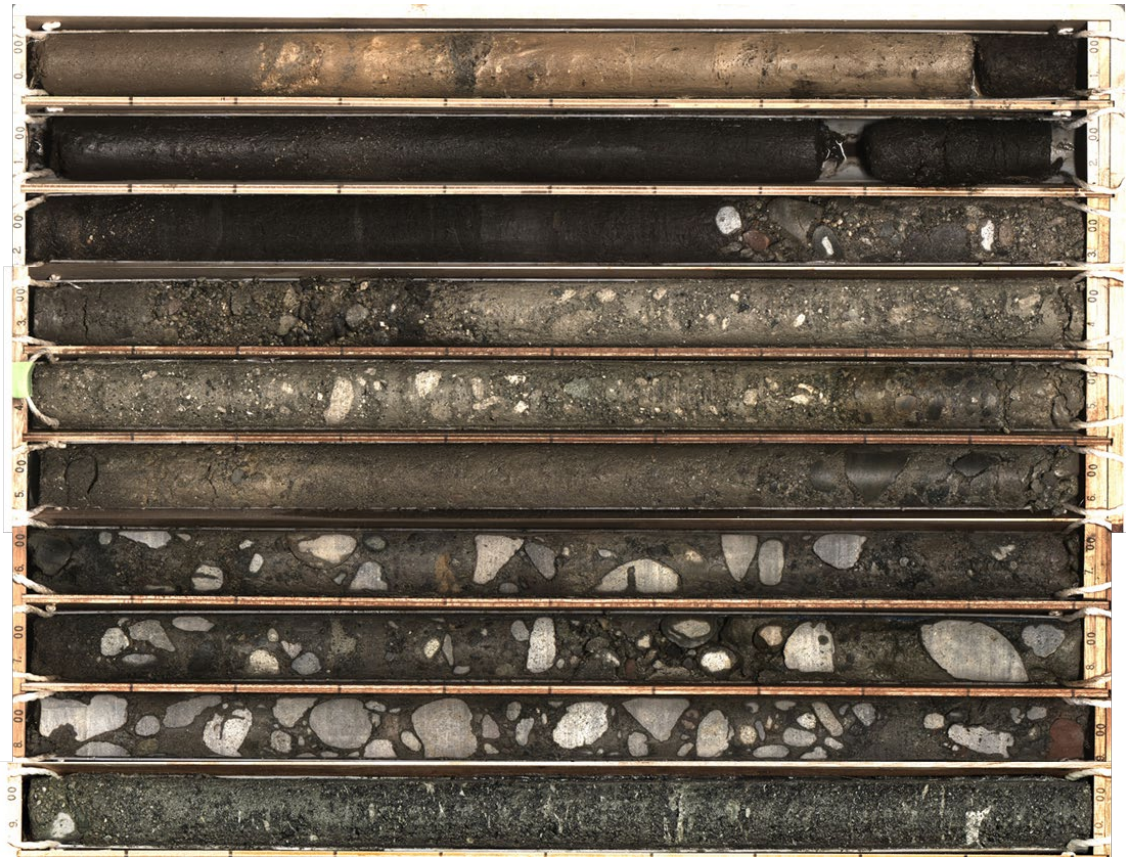


図5 R06-1 コア写真



図6 R06-2 コア写真

R06-1 コアの層相は以下のとおりである。

深度 0.00-0.22m 耕作土
深度 0.22-0.42m 盛り土
深度 0.42-0.92m 埋立土
深度 0.92-1.23m 泥炭
深度 1.23-1.44m 火山灰混じり泥炭
深度 1.44-2.68m 泥炭
深度 2.68-2.93m 礫層
深度 2.93-3.36m 中砂～円礫層
深度 3.36-4.77m 入戸火砕流堆積物
深度 4.77-5.69m 礫・シルト混じり中砂
深度 5.69-8.80m 巨礫層
深度 8.80-9.05m 風化した中礫層
深度 9.05-10.00m 加久藤火砕流堆積物

R06-2 コアの層相は以下のとおりである。

深度 0.00-0.06m シルト混じり碎石
深度 0.06-0.12m レンガ礫・シルト混埋め土
深度 0.12-0.20m ゴマ塩粗砂（購入土？）
深度 0.20-0.38m レンガ礫・シルト混り中粗砂（埋土）
深度 0.38-0.74m 軽石・シルト混り中粗砂（埋土）
深度 0.74-1.05m シルト・青灰、赤色礫混り粗中砂（埋土）
深度 1.05-1.35m 暗灰礫・ローム質中粗砂（埋土）
深度 1.35-1.40m 粘土混り粗砂
深度 1.40-1.78m シルト・細礫混り中粗砂
深度 1.78-2.20m シルト質中砂
深度 2.20-2.88m 巨礫層
深度 2.88-3.08m 砂混り中小礫層
深度 3.08-3.18m 中粗砂
深度 3.18-4.13m 巨礫層
深度 4.13-4.39m 中円礫層
深度 4.39-6.15m 巨礫層
深度 6.15-6.32m シルト混じり中礫層
深度 6.32-7.00m 加久藤火砕流堆積物

6.2 堆積年代

本研究では、R06-1 コアの5層準にて採取した植物片を用いて放射性炭素年代測定を実施した。年代測定はカーボンアナリシスラボラトリー社（韓国）に委託してAMS（加速器質量分析計）による放射性炭素(^{14}C)年代測定をおこなった。測定された ^{14}C 年代は、IntCal20データセット（Reimer et al., 2020）による暦年較正を行い、 1σ の確率分布の中央値を堆積年代とした。その結果は以下のとおりである。

深度 0.92m	6,280-6,500 calBP
深度 1.30m	7,420-7,670 calBP
深度 1.74m	13,090-13,410 calBP
深度 2.10m	13,460-13,810 calBP
深度 2.55m	14,120-14,920 calBP

6.3 総水銀量

R06-1 コアでは深度 1.00m まで、R06-2 コアでは深度 2.25m までについて堆積物中に残存する総水銀量を測定した（図7）。その結果、R06-1 コアでは、表層から深度 0.35m までは $0.1\sim 0.2\mu\text{g/g}$ と、下位の層と比べて高値を示す。一方、R06-2 コアでは、深度 1.30~1.80m の層準で最大 $1.1\mu\text{g/g}$ の値を示し、上下と比較して相対的に増大する層準があることが明らかになった。加えて、深度 1.80m は急増していることが明らかになった。

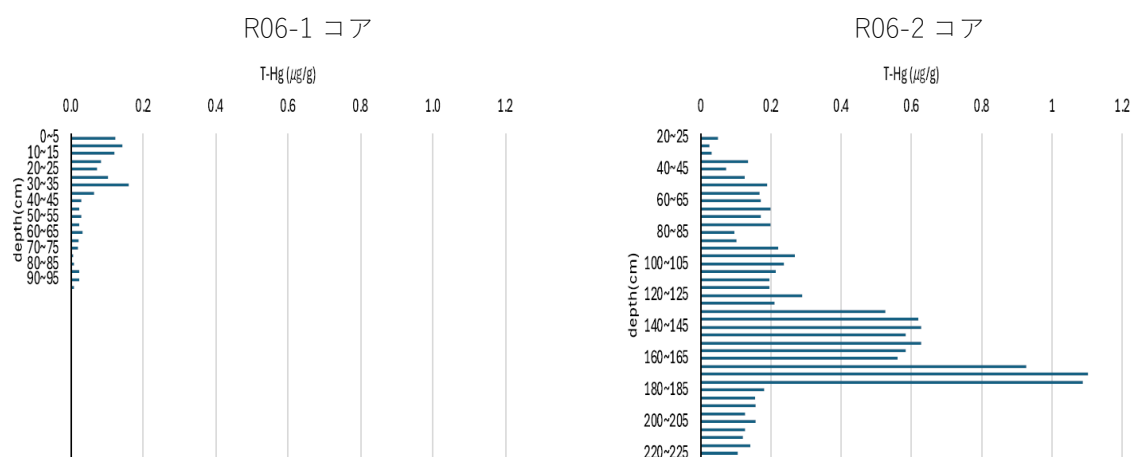


図7 R06-1 および 2 コア表層部の総水銀濃度（富安、私信）

7. 考察

7.1 ボーリングコア解析による平坦地の成り立ち

両ボーリングコアの基底は、軽石を含みながら溶結した火砕流堆積物であり、マトリックスは火山ガラスが透明度を失い、境界も不明瞭で一体化している。また安山岩礫が散見される特徴を有する。この岩石学的特徴と周辺の地質の状況も考慮に入れると更新世中期（約 34

万年前)の加久藤火砕流堆積物と考えられる。この火砕流は現在の宮崎県えびの市と鹿児島県湧水町吉松地区にまたがる加久藤カルデラを誕生させた際に南九州一帯に溶出したものである。本地域においても谷を埋めながら平坦面をつくっていたことが予想される。その後、現在まで続く河川環境になり、堆積、侵食(削剥)作用を繰り返しながら形成されてきた。そして、最終氷期後期に相当する約3万年前の始良カルデラの大噴火で発生した入戸火砕流堆積物が不整合で、その上位を覆っている。また、層相と年代測定結果、泥炭の堆積がはじまる時期は、約15,000年前であり、汎世界的な後氷期の温暖化(ベーリング/アレレード温暖期)の開始時期と同調する。このことは、温暖化にともない、周辺地域においても気温や降水量増加に伴う気候温暖湿潤化が生じたことが考えられる。少なくともこのような泥炭の堆積は完新世中期まで進行していたことが示唆される。泥炭中に含まれていた火山灰層は、年代層序的に鬼界-アカホヤ(K-Ah)火山灰に相当するものと考えられる。最終氷期後期から完新世中期にかけての上述した一連の堆積物はR06-1コアには認められるが、R06-2コアには認められない。この理由はR06-2コア採取地点が、R06-1コア採取地点と比較して本流河道の近くに位置するため、近年の土石流など河川氾濫によって当該する層準が侵食されたためと推定できる。実際、土石流と考えられる巨礫層の形成が認められる。

特筆する点として、本地域において最終氷期末期から泥炭の形成があったことは、近隣の藺牟田池での泥炭形成開始時期とも一致している。南九州における最終氷期から完新世にかけての環境変化を論じる上で重要な知見と考えられる。

7.2 尾鉱の二次崩壊の特定方法

本研究では、穴川上流でかつて操業していた金鉱山業によって排出された尾鉱の二次崩壊の存在やその影響程度を下流側で検出することである。本研究によって、穴川下流の平坦面で採取した2地点のボーリングコア中から微量の水銀を含む地層が確認された。これはバックグラウンドとなる自然界に存在する火山由来の水銀とは挙動が異なり、年代層序的に鹿児島県永野/山ヶ野金鉱山の尾鉱由来と考えられる。一般的に尾鉱は人工地層であり、岩石学的あるいは堆積学的な特徴を有しない。今回検討したボーリングコアにおいても埋土や盛土とした地層中に相対的に水銀量が多くなっていることがわかる。水銀をトレーサーとして尾鉱の二次崩壊の影響を解明できた世界初の研究事例となった。

7.3 尾鉱の二次崩壊が地形形成に与えた影響

本研究対象地域は、狭窄部をつくる小高い山地の影響はあるものの、川内川に注ぐ支流において最も平坦面を有する区域になっている。明らかに他の支流域とは異なる地形環境が成立していたため、この平坦面をつくる土砂供給に尾鉱の二次崩壊の寄与は少なくなかったと考えられる。しかしながら、環境汚染と判断されるような水銀量は存在していないため、耕作等土地利用上の問題もないことが示された。

8. まとめと今後の課題

本研究の結果、鹿児島県永野／山ヶ野金鉱山で生じた尾鉱は過去に崩壊していた可能性が高く、その一部が下流側の平坦地に流下・堆積しており、平野形成に寄与していたことが示された。そのため、本研究は、国内外において他の尾鉱堆積場についても同様のことが生じていたことを示唆するものである。今回の調査地である鹿児島県永野／山ヶ野金鉱山にて、明治期以降に水銀やシアンを大量に使用した金の精錬が行われたように、金鉱山から排出された尾鉱には有毒物質が含まれている可能性が非常に多い。そして、水銀とシアンが共存すると水銀が可溶性の錯体となり、雨水などと共に流出する可能性があることも想定される(村尾・山田,2022)。そのため、鉱山周辺の環境を守り、ブルマジーニョ尾鉱ダム決壊事故のような人災を防ぐためにも、尾鉱の管理について、より厳格な基準を国際的に設定することが重要であると考えられる。

ブルマジーニョでの事件後、ICMM、UNEP、PRIの3機関によって「尾鉱管理に関する国際業界規格」が策定され、安全な尾鉱施設管理のための枠組みが提供されたが、管理方式の選択は未だ事業者に一任されている。そのため、経済的なコストがかからない方式を優先し、地域特性に合わない管理方式が選択され、ダムが決壊してしまう可能性も十分に考えられる。第2のブルマジーニョ尾鉱ダム決壊事故を防ぐためにも、ICMMのような国際的機関が中心となって、尾鉱管理に関する基準をより厳格に改定し、各地域の管理施設が正しく運用されるように取り締まることが今後重要になってくるのではないだろうか。その際に、本研究助成による研究成果が参考になることを願ってやまない。

謝辞

本研究を進めるにあたり以下の関係機関、関係者にお世話になりました。記してお礼申し上げます。

さつま町役場、アーステクノ株式会社、さなぼり会、原口 強氏、徳永晃輝氏、池田陽大氏、萩原一樹氏

引用文献

Fair Finance Guide Japan (2020) 殺人ダムの建設を止めるために
(https://fairfinance.jp/media/495531/ffg2020_mining_casestudy.pdf)

五代龍作(1910)『山ヶ野金山鉱業誌』山ヶ野金山鉱業館, 71p.

Hartta, R.L. (1982) Grain-size dependence of initial susceptibility and saturation magnetization related parameters of four natural magnetites in the PSD-MD range. Geophys. J. R. aster. Soc., 71, 477-495.

ICMM「尾鉱について」<https://www.icmm.com/ja/environment/tailings/about-tailings>

石井一郎・平舘亮一・東畑郁生・中井正一・関口 徹・澤田俊一・濱田善弘(2016) 2011年東北地方太平洋沖地震で液状化被害を受けた浦安市の地盤特性. 地盤工学ジャーナル,

- 12-1, 91-107.
- 金谷 弘(1987) 岩石帯磁率についての 2-3 の問題－測定における問題点と表示方法－. 地質調査所月報, 38-4, 203-216.
- 霧島市ホームページ (2021) 黄金の郷山ヶ野 (<https://www.city-kirishima.jp/kirikan/kanko/bunka/yamaganokinzan.html>).
- Murao,S.,Futatsugawa,S.,Sera,K., and Maglambayan,V.B.(2002) Trace element analysis of tailing from indigenous mining community, Benguet, Philippines. International Journal of PIXE, 12, 61-69.
- 村尾 智・山田和芳(2022) 鹿児島県の旧山ヶ野および永野金山における鉱石処理過程. 第 32 回社会地質学シンポジウム論文集, 32, 68-74.
- Nirei,H., Furuno,K., Osamu,K., Marker,B. and Satkunas,J. (2012) Classification of man made strata for assessment of geopollution. Episodes, 35, 333-336.
- Sustainable Japan(2019) 「 ICMM、UNEP、PRI、鉱滓ダム国際基準の策定作業開始。ブラジル・ダム事件で関心高く (<https://sustainablejapan.jp/2019/04/02/mine-tailings-storage-facilities/38600>).
- Sustainable Japan(2020) 「ICMM、UNEP、PRI、尾鉱ダムの国際基準発表。ブラジル事故で問題意識高まる (<https://sustainablejapan.jp/2020/08/09/international-tailings-standard/52714>).
- 高嶋 洋・山田和芳・富安卓滋・村尾 智(2022) 鹿児島県旧山ヶ野・永野金山における尾鉱の人工地層. 第 32 回社会地質学シンポジウム論文集, 32, 121-124.
- 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所報告, 49, 45-59.
- 浦島幸世 (2004) 山ヶ野, 串木野, 大口金山－1975 頃までの金鉱探し－. 地質ニュース, 599, 20-30.
- Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., Palmer, J. G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Turney, C. S. M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S. M., Fogtmann-Schultz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A. and Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55cal kBP), Radiocarbon, 62(4), 725-757.
- 山田和芳・佐々木亮太郎・瀬戸浩二・香月興太・中西利典・奥野 充・藤木利之・富安卓滋・村尾 智 (2023) 鹿児島県内の湖沼堆積物を用いた ASGM による水銀汚染史の解明. 第 33 回社会地質学シンポジウム論文・要旨集, 33, 35-36.