

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H00632

研究課題名（和文）年縞を用いたASGMによる環境汚染の実態解明

研究課題名（英文）Interdisciplinary research on mercury pollution by the ASGM, using the varved lacustrine sediments

研究代表者

山田 和芳 (Yamada, Kazuyoshi)

早稲田大学・人間科学学術院・教授

研究者番号：60508167

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：2018年に国連環境計画にて発効した「水銀に関する水俣条約」の中で重点的な課題と定めているのが「零細および小規模金採掘（ASGM）」と呼ばれる途上国の乱掘である。同条約では、ASGMに対して行動計画を策定してすぐに実行に移すよう求めているものの、ASGM由来の水銀が周辺にもたらす影響は未知数であるという課題があった。そこで本科学研究では、かつて金採掘がおこなわれていた鹿児島県永野／山ヶ野金山跡、および現在ASGMが盛んなフィリピンルソン島を対象として、湖底堆積物中の水銀汚染の程度や時系列変化を明らかにして広域的な影響を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、大気を通じた広域にわたる過去200年間程度の水銀汚染の程度の把握に成功した。そして、その汚染レベルは健康リスクを害するレベルに達していないことが明らかになった。しかしながら、鉱山現場周辺には尾鉱とよばれる廃棄物が膨大な量で放置されており、そこに残留する水銀の発散・滲出が懸念されることがわかってきた。この問題を国連環境計画に対して提起したところ、事務局の認めるところとなり、初のガイド文書が発行された。

研究成果の概要（英文）：The Minamata Convention on Mercury, which entered into force at the United Nations Environment Programme in 2018, identifies over-mining in developing countries, known as “micro and small-scale gold mining (ASGM),” as a priority issue. Although the Convention calls for the formulation and immediate implementation of an action plan for ASGM, the impact of mercury from ASGM on the surrounding area is still unknown. Therefore, in this research, the extent of mercury contamination in lake sediments and its time-series changes were clarified in the former Nagano/Yamakeno gold mines in Kagoshima Prefecture, where gold mining was once conducted, and on Luzon Island in the Philippines, where ASGM is currently flourishing, in order to examine the impact on a wide area.

研究分野：地理学

キーワード：零細および小規模金採掘 水銀汚染 湖沼堆積物 さつま湖 蘭牟田池 フィリピン 永野／山ヶ野金山

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、発展途上国の鉱産地では、零細および小規模金採掘という採鉱形態が無視できなくなっている。英語で **artisanal/small-scale gold mining** (略称: **ASGM**) と称するこの業態は、発展途上国の貧困層が鉱産地に群がって乱掘と製錬を行うもので、多くの場合、登録も納税もしない違法操業である。現場では金の抽出に水銀を用いるため水銀汚染が進行している。**ASGM** は長年にわたって続く社会問題であり **2018** 年の「水俣条約」締結のきっかけとなった重要な事案でもある。

ASGM はタイを除く東南アジア全域に見られる。特に、浅熱水性金鉱床が多いフィリピンとインドネシアではそれぞれ **30** 万人が従事しているとされる。また、両国とも **ASGM** から出る金の量が鉱山会社から出る量を超え、国全体の年間産出量の半分以上を占めていると言われていた。金の抽出に使用される水銀の量も多いうえ、使用量の **95%** が自然環境に放出されるため、両国とも **ASGM** は最大の水銀汚染源となっている。そのことから、人体への健康被害も著しく大きな社会問題となっている。

これまで **ASGM** に随伴する水銀汚染は極めて深刻であるものの、その汚染地域は採掘・製錬現場周辺のみと考えられてきた。たとえば、現場周辺では人や魚類に水銀が蓄積していることや、製錬現場から排出される水銀の蒸気は一気に上昇し製錬所内には残留しないこと、大気から周辺に沈降した水銀は地下水レベルに達しないことなどが予察的に報告されてきた。しかしながら、製錬現場から離れた水銀が、いつの時期から、どのような様式で、どの程度広域的に拡散し、周辺地域にどの程度のリスクを与えるかについては、全く分かっていない。重大な健康リスクをもつ **ASGM** 起源の水銀の総合的挙動を把握することは、学術面からも国際協力の面からも喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、**1.** に示した課題克服を目的とした学際的研究体制を構築した。フィールドについてはコロナ禍ということもあり、かつて **ASGM** による金鉱山業をおこなっていた鹿児島県山ヶ野/永野金山地域および周辺湖沼(さつま湖、蘭牟田池)とともに、現在も **ASGM** がおこなわれているフィリピンルソン島に設定し、サンパブロ州セブンレークス湖沼域において、少なくとも過去 **100** 年間をカバーする湖沼堆積物を未かく乱のまま採取して、その中に含まれる水銀の挙動を時系列データとして取得することとした。これらのデータから、**ASGM** によって拡散した水銀が、いつの時期から、どのような様式で、どの程度(量など)存在しているのかを世界ではじめて検証して、広域拡散の程度やそのリスクについて議論した。

3. 研究の方法

本研究は『年縞』班と『水銀』班の大きく2つの研究グループが並行・協働しながら研究を遂行した。『年縞』班は、研究代表者の山田を中心として、研究分担者として奥野、中西、瀬戸、香月が湖沼堆積物を用いた環境史の研究を遂行した。一方、『水銀』班は、研究分担者の村尾を中心として、**ASGM** 由来の水銀汚染史の研究を遂行した。

4. 研究成果

(1) 山ヶ野/永野金山

江戸時代から昭和 **40** 年まで続いた鹿児島県の旧山ヶ野・永野金山では、明治時代に近代化がはかられ、水銀やシアンを使用し、金の増産が推し進められた。これに伴い、大量の尾鉱が排出され、鉱山の三番滝精錬所より木の樋によるスラリー輸送で堆積処分が行われた。処分地は精錬所の脇を流れる穴川沿いの山峯地区に **3** つ、仕明地区に1つ堆積場が設けられた。こうした堆積物には金が残留する可能性があり、実際、**ASGM** の尾鉱では最大 **7 ppm** の金が報告されている。一方、この場所は、**2019** 年にブラジル・ミナスジェライス州のブルマジーニョ近郊で発生した尾鉱堆積ダム決壊事故のような崩壊の危険性が想定される人工地層でもある。人工地層の形成過程は、人によって作成された情報により、形成機構の解析が可能であるが、当該尾鉱堆積場は形成年代も古く、また、過去の記録も多くが失われているほか、これまで直接調査が行われた事例もなく、地質構造や地下水流動は不明である。さらに、過去には、同地の堆積場の一つで決壊と尾鉱の流出が発生していることから、ボーリング調査による堆積構造の解析と地下水の賦存状況調査を実施した。

調査地で、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を実施した。掘削口径は **86 mm** で、コアはトリプルコアサンプラーを使用し、試料を慎重に回収した。調査深度は尾鉱堆積物の底部までとし、**B-1** が **14 m**、**B-3** が **17 m** まで掘削した。

ボーリング調査で得られた **2** 本の柱状図を図 **1** に示す。尾鉱堆積場の基底は風化した安山岩の垂円巨礫を含む段丘堆積物が両方で確認された。礫間は土壌化した褐色有機質の砂質粘土

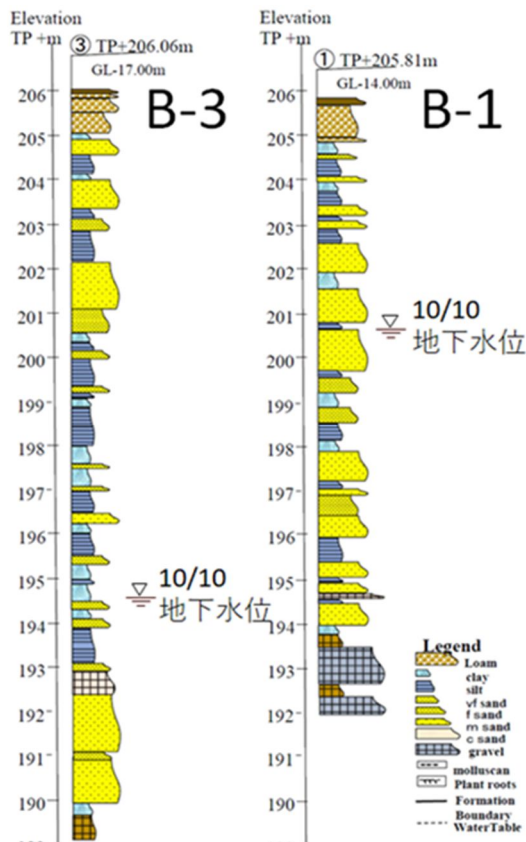


図1 柱状図

するものの、いずれの砂層も層相に特徴はなく、鍵層も認められないため、連続性は確認できない。こうした尾鉾堆積物の岩相と層序を記載したが、こうした尾鉾堆積物の層相が確認されるのは、きわめて珍しい。また、水銀を測定したところ

(2) 蘭牟田池、さつま湖堆積物

(1)のような、かつての山ヶ野や水野鉾山から飛散された水銀汚染の影響を検討するため、本研究チームは、降下範囲とされる南西方向に約20km離れている蘭牟田池(薩摩川内市)、約50km離れているさつま湖(日置市吹上町)にてフィールド調査を行い、採取した湖沼堆積物試料を用いて水銀量分析を実施した。

蘭牟田池は飯盛山や愛宕岳などの外輪山に囲まれた火口湖で、直径約1km、周囲約3.3kmのほぼ円形をした池である。湖面の標高は海拔295mで、平均水深は2mである。今回、2011年に採取されたボーリングコアの湖底表層から50cmを用いて、1cm間隔にて総水銀量を測定した。その結果、深度50cmまでの全層準において水銀の混入は認められるものの、その量は0.1mg/kg以下と環境基準以下となっていることが明らかになった(図2)。全体的な傾向としてASGMが行われていた時期に相当する深度15-25cmにおいてスパイク状の高濃度層準が認められた。なお、鉾山脇における尾鉾堆積物中の水銀測定結果とも調和的であり、大気を通じての水銀の広域拡散の程度を知る重要な研究になっている。

薩摩湖は吹上浜の砂丘の発達により、南シナ海から区切られて取り残された海跡湖である。2021年12月における水深調査では最深部は12m前後である。また、水質・底質調査の結果、全水域を通じて塩分濃度は限りなく小さい淡水環境であるものの、底質は汽水湖のような黒色を呈している。同調査では、最深部を含め2地点から全長1.35m、0.90mのコアをそれぞれ採取できた。その後の本コアの放射性炭素年代測定や古環境分析結果からは、過去800年間に及ぶ安定した堆積環境であったことが示された。同コアについても、総水銀量を測定した。その結果、江戸時代に相当する層準で総水銀濃度が高いことが明らかになった。

層が隙間なく充填し、難透水性を示すが、礫が卓越するB-1の深度12.3m以深では、掘削水の完全逸水が確認された。

尾鉾堆積物は微細砂~シルトサイズの堆積物を主体とし、透水性のある中砂を挟む。青灰色の堆積層で、微細な黄鉄鉱を各所に含み、砂層には並行ラミナが発達する。深度10m以深に発達する砂層は締まっているが、浅部の砂層は粒子間隙が多く、容易に液状化する。深部砂層には、ラミナが残されているが、一部消滅している。浅部はコア採取後の運搬で液状化し、多くの地層でラミナが不明瞭となった。シルトから微細砂が卓越する地層には、厚さ数mmの細かな互層が発達し、上位面の境界が明瞭で下位が不鮮明な逆級化様の構造を示す。また、微細砂層は時に上下の境界が不明瞭な1cm内外の厚みを持つ雲状の堆積構造を示す。表層はいずれも層厚約1mのローム質粘土の盛り土で、最表層は0.1-0.2mが土壌化する。これらは尾鉾堆積物の処分完了後、植林のために施工されたものである。

尾鉾堆積場内では、B-1はB-3より上流側に位置し、尾鉾スラリーの供給源に近い。砂層が卓越する傾向が強い一方、B-3はシルト質の地層が発達する。B-1、B-3は共にほとんど同じ標高を示すが、透水性の高い中砂の砂層はB-1の深度3-6m、8-12m付近にやや多く、B-3は深度4-5m、13-16mに多く認められる。共に深度5m付近に砂層が卓越する特徴は類似

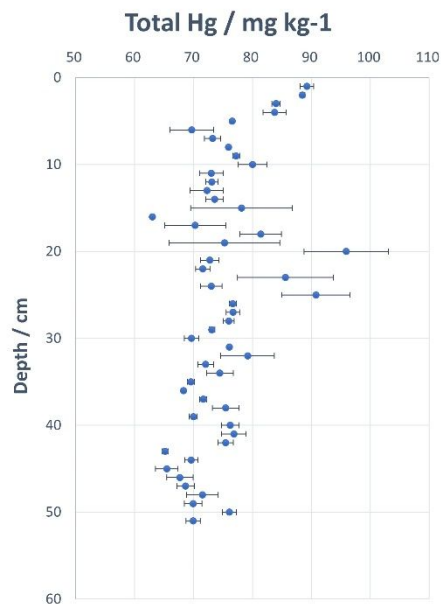


図2 蘭牟田池の総水銀量変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Seto Koji, Katsuki Kota, Tsujimoto Akira, Kitagawa Junko, Yamada Kazuyoshi, Suzuki Yoshiaki	4. 巻 68
2. 論文標題 Records of environmental and ecological changes related to excavation in varve sediment from Lake Hiruga in central Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Paleolimnology	6. 最初と最後の頁 329 ~ 343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10933-022-00251-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto Masanobu, Wang Fangxian, Irino Tomohisa, Yamada Kazuyoshi, Haraguchi Tsuyoshi, Nakamura Hideto, Gotanda Katsuya, Yonenobu Hitoshi, Leipe Christian, Chen Xuan-Yu, Tarasov Pavel E.	4. 巻 623
2. 論文標題 Environmental evolution and fire history of Rebun Island (Northern Japan) during the past 17,000 years based on biomarkers and pyrogenic compound records from Lake Kushu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Quaternary International	6. 最初と最後の頁 8 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quaint.2021.09.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Otake Yurie, Innan Hideki, Ohtsuki Hajime, Urabe Jotaro, Yamada Kazuyoshi, Yoshida Takehito	4. 巻 67
2. 論文標題 Population genetic dynamics during colonisation and establishment of an obligate parthenogenetic <i>Daphnia pulex</i> population in a small lake of a continental archipelago	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Freshwater Biology	6. 最初と最後の頁 1428 ~ 1438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/fwb.13951	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nara Fumiko Watanabe, Watanabe Takahiro, Matsunaka Tetsuya, Yamasaki Shin-ichi, Tsuchiya Noriyoshi, Seto Koji, Yamada Kazuyoshi, Yasuda Yoshinori	4. 巻 592
2. 論文標題 Late-Holocene salinity changes in Lake Ogawara, Pacific coast of northeast Japan, related to sea-level fall inferred from sedimentary geochemical signatures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	6. 最初と最後の頁 11097 ~ 11097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.palaeo.2022.110907	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 奥野充, 黒木貴一, 藤木利之, 中西利典, 山田和芳	4. 巻 44
2. 論文標題 「基礎データから考える第四紀の新展開 - 火山の地形・地質・年代」について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊地球	6. 最初と最後の頁 127 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山田和芳, 村尾 智, 富安卓滋, 奥野 充, 瀬戸浩二, 香月興太, 中西利典, 加田 渉	4. 巻 71
2. 論文標題 ASGM (人力小規模金採掘) に関連した環境汚染研究における湖沼掘削科学の貢献と役割	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 号外地球	6. 最初と最後の頁 70 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 井上和道, 富安卓滋, 高嶋洋, 村尾智, 山田和芳
2. 発表標題 鹿児島県旧山ヶ野金山尾鉱堆積物中水銀濃度の鉛直変動
3. 学会等名 第32回社会地質学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西利典, 北川浩之, 山田和芳
2. 発表標題 尾鉱堆積物に含まれる木片の放射性炭素年代
3. 学会等名 第32回社会地質学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高嶋洋, 山田和芳, 富安卓滋, 村尾智
2. 発表標題 鹿児島県旧山ヶ野・永野金山における尾鉱の人工地層
3. 学会等名 第32回社会地質学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村尾智, 山田和芳
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第32回社会地質学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田和芳
2. 発表標題 ASGM (零細および小規模金採掘) に関連した環境汚染研究における湖沼掘削科学の貢献と役割
3. 学会等名 島根大学 エスチュアリー研究センター (EsReC) 第 29 回汽水域研究発表会 汽水域研究会第 10 回例会 汽水域合同研究発表会 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyoshi yamada
2. 発表標題 Sedimentary science to access mercury in 'varves'
3. 学会等名 Online Seminar on Geological and Environmental Research Methodology for ASGM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田和芳
2. 発表標題 ASGM（零細および小規模金採掘）に関連した環境汚染研究における湖沼掘削科学の貢献と役割
3. 学会等名 汽水域研究会第 10 回例会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 日本古生物学会、西 弘嗣	4. 発行年 2023年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 790
3. 書名 古生物学の百科事典	

1. 著者名 渋川 浩一, 中西 利典, 日下 宗一郎, 山田 和芳, 菅原 大助, 岡本 一利, 橋本 正洋, 印南 敏秀, 渡邊 眞一郎, 後藤 義正	4. 発行年 2022年
2. 出版社 ことのは社	5. 総ページ数 244
3. 書名 うつりゆく駿河湾(しずおかの文化4)人と自然の関わりから見た過去、現在、そして未来	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村尾 智 (Murao Satoshi) (10358145)	第一工科大学・工学部・教授 (37702)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中西 利典 (Nakanishi Toshimichi) (10462582)	ふじのくに地球環境史ミュージアム・学芸課・准教授 (83811)	
研究分担者	香月 興太 (Katsuki Kota) (20423270)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・講師 (15201)	
研究分担者	奥野 充 (Okuno Mitsuru) (50309887)	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授 (24405)	
研究分担者	富安 卓滋 (Tomiyasu Takashi) (60217552)	鹿児島大学・理工学域理学系・教授 (17701)	
研究分担者	瀬戸 浩二 (Seto koji) (60252897)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・准教授 (15201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フィリピン	PHIVOLCS		