

審査委員会報告書

〔課程博士用〕

報告番号	甲 第 号	授与年月日	令和 年 月 日
学位記番号	第 号	研究科名	環境共生学研究科
学位（専攻分野）	博 士（環境共生学）	専攻名	専攻
ふりがな 氏 名	あーめつど えるわりーど あーめつど いぶらひむ Ahmed Elwaleed Ahmed Ibrahim	生年月日	1990年6月23日生
		国 籍	スーダン共和国 (外国人のみ)
論文課題	<p>「Mercury Pollution in River Nile State, Sudan: Evaluating Process Efficiency and Health Risks in Artisanal Small-Scale Gold Mining (ASGM)」 (スーダン・ナイル川州における水銀汚染：小模金採掘 (ASGM) のプロセス効率と健康リスクの評価)</p>		
主論文の冊数	3 冊		
審 査 委 員 会 委 員	(職 名)		(氏 名)
	主査	熊本県立大学 教授	石橋 康弘
	副査	熊本県立大学 教授	阿草 哲郎
	副査	熊本大学 客員教授 熊本県立大学 名誉教授	有蘭 幸司
審査の結果の要旨	別 紙	1	
最終試験の結果の要旨	別 紙	2	
審査委員会の意見	審査の結果、博士（環境共生学）の学位を授与できると認める。		

- 【注】 1 報告番号は、事務局（学生課）において記入する。
 2 学位記番号は、授与年月日は、研究科教育会議の審議後に研究科において記入する。
 3 国籍は、外国人のみ記入する。

論文審査の結果の要旨

申請者氏名 Ahmed Elwaleed Ahmed Ibrahim

本論文は、スーダンのナイル川流域に位置するアラベディア採掘市場、アブ・ハマド採掘市場、ダルマリ地域を中心に、ASGM 地域における水銀汚染を調査することで、汚染の程度と関連する危険について包括的な洞察を提供するものである。この調査では、特に次のことを追求した：

1. ドーアが生成されるまでのアマルガムプロセスの様々な段階における水銀損失を評価することにより、水銀のマスバランスを調査し、スーダンで最も広く使用されているアマルガムミル（湿式パンミル）における水銀の投入、回収、損失を評価した。
2. US EPA（米国環境保護庁）のリスクアセスメント手法を適用して、スーダンの正式な ASGM 地域、特にアブハマド採掘市場の汚染土壌と水サンプルによる健康リスクを評価した。
3. 多様な土地利用から採取した土壌と水のサンプルを活用し、米国環境保護庁（EPA）のリスクモデルを用いて、インフォーマルな ASGM 地域、ダルマリ地域、近隣の村落におけるヒトの健康被害を評価した。

アマルガム処理過程における水銀マスバランス調査から、重要な知見が得られた。異なる段階において、アマルガム処理に添加された水銀の **94.19%** は回収できることが明らかになった。しかし、残留分は滓として、あるいはアマルガムの燃焼後に大気中に放出される。回収された水銀の割合は **94%** と一定であったが、大気中に放出された水銀の量は変化した。回収される金の量は、このばらつきと強い相関関係を示した。ASGM 事業で使用される水銀と金の比率に関する正確なデータを提供することで、これまでの実証的仮定に挑戦している点で意義深い。ASGM 活動における水銀の使用量と排出量をより正確に理解できることから、この研究結果は科学界にとって最も重要な意義を持つ。この研究はまた、特にアマルガムを燃焼させる際により良い安全予防措置の緊急の必要性を強調している。ASGM 地域の人々が浴びる水銀蒸気量を減らし、環境破壊を軽減するために、この手順を通してレトルトを使用することが強く推奨される。このことは、ASGM 地域社会の環境と公衆衛生を守るために、実行可能な解決策を実施することの重要性を強調している。

スーダンの正式な ASGM 地域では、ASGM 採掘市場から採取したすべての土壌と水のサンプルで水銀濃度が高いことが判明した。アマルガムが焼却された場所から採取されたサンプルは、土壌で **34.8 mg/kg**、水で **3.26 µg/L** と、水銀含有量が最も高かった。距離が離れるにつれて濃度は低下したが、焼却場所に近い土壌サンプル (**34.8 mg/kg**) は、尾鉱に近いサンプル (**19.0 mg/kg**) よりも依然として高濃度であった。ASGM 区域内で採取されたすべての水試料 ($n = 3$) は、総水銀に関する日本の水質基準値 (**0.5 µg/L**) を超えていた。しかし、ASGM 区域外で採取された水試料は、この基準値を下回った。この地域で利用されている水はすべてナイル川の水であるため、これはナイル川の水が汚染されていないことを示していることに注意することが重要である。さらに、ASGM 地域の土壌サンプルからは、**1mg/kg** を超える濃度が検出された。ハザード指数は、土壌からの水銀蒸気の吸入が主な暴露経路であることを示している。アマルガム焼却場付近の成人のハザード指数値は **5.34** に達する可能性があり、子供のハザード指数値は **33.4** に達する可能性がある。ほとんどの水試料は低リスクであるが、アマルガム焼却場付近の試料は例外である可能性が高く、そこでは子供が摂取によるリスクにさらされる可能性がある ($HI = 1.74$)。水銀で汚染された土壌や水を摂取すると、リスクは著しく増加する。しかし、浮遊粒子の吸入は、他の暴露経路に比べ、本質的に無視できると考えられている。これらの調査結果は、水銀排出を削減し、ASGM の住民を保護するために、環境に優しい慣行と対策を確立することが極めて重要であることを示している。

アマルガム処理後、アマルガム滓の再処理は深刻な環境・人体リスクをもたらす。スーダン

の ASGM セクターでは、職人的な採掘者がこのプロセスを非公式に実施しているため、この問題はより大きくなっている。ダルマリ地域とその周辺の住民は、再処理されたアマルガム銻滓にさらされており、それらは農業地域や住宅地に散在している。この曝露が特に問題なのは、曝露される集団が主に成人男性で構成されている正式な ASGM の環境とは異なり、影響を受ける集団に高齢者や妊婦、その他の弱い立場の人々など、より幅広いコミュニティ・グループが含まれているためである。しかし、ダルマリ地域で生産される銻滓は、平均水銀含有量が 19mg/kg である正式な ASGM 環境で見られる銻滓に比べ、水銀含有量が低い (5.1mg/kg~12.6mg/kg)。本研究では、ASGM 活動によるヒトの健康リスクを評価し、調査地域内の汚染レベルを評価するために、土壌と銻滓サンプル、水道水と地下水の水銀含有量を評価した。土壌と水のサンプルは、ナイル川の地下水と水道水だけでなく、農業用地、住宅用地、銻滓用地など様々な場所から採取された。水銀分析のほか、地中蓄積指数分析を用いて汚染レベルを評価した結果、銻滓のある地域では極端な汚染レベルが、農業地域や住宅地では中程度の汚染レベルが明らかになった。健康リスクを評価するためにハザード指数が適用され、水銀蒸気の吸入が主な曝露経路であることが確認された。その結果、銻滓は特に子どもにとって重大な健康リスクをもたらすが、農業地域や住宅地帯の水サンプルや土壌は重大なリスクをもたらさないことが示された。これらの調査結果は、健康リスクを軽減するために、影響を受けた地域から銻滓を除去・処理することによって水銀汚染に対処する当局と地域社会の緊急の必要性を強調している。

本研究は途上国であるスーダン共和国における小規模金銻山 (ASGM) における水銀のマテリアルバランスと水銀汚染による人の健康リスクを評価したものであり、上記のような成果を得られており、本成果は水銀による途上国の水銀汚染とその健康影響評価に関する研究分野への貢献が高いと考えられるので、博士 (環境共生学) の学位に値するものと認めた。

主 査 熊本県立大学・教授 石橋 康弘

〔別紙 2〕

最終試験の結果の要旨

申請者氏名 Ahmed Elwaleed Ahmed Ibrahim

成績・合格

審査委員一同は、令和6年7月24日、本論文申請者に対し論文の内容および関連事項について試験を行った結果、博士（環境共生学）の学位を受けるに必要な学識を有する者と認め、合格と判定した。

主査 熊本県立大学・教授 石橋 康弘



副査 熊本県立大学・教授 阿草 哲郎



副査 熊本大学・客員教授 有菌 幸司
(熊本県立大学・名誉教授)



○ 「審査の結果の要旨」電子データの提出について

- | | |
|----------------|---|
| 1. 課程・論文博士の別 | 課程博士 |
| 2. 申請者氏名（ふりがな） | Ahmed Elwaleed Ahmed Ibrahim（あーめっど
えるわりーど あーめっど いぶらひむ） |
| 3. 学位の種類 | 博士（環境共生学） |
| 4. 学位記番号 | 第〇〇〇〇〇号 |
| 5. 学位授与年月日 | 令和〇〇年〇〇月〇〇日 |
| 6. 論文題目 | Mercury Pollution in River Nile State, Sudan:
Evaluating Process Efficiency and Health
Risks in Artisanal Small-Scale Gold Mining
(ASGM)
スーダン・ナイル川州における水銀汚染：小模
金採掘（ASGM）のプロセス効率と健康リスク
の評価 |
| 7. 審査委員会委員 | 主査 県立大学 教授 石橋 康弘
副査 県立大学 教授 阿草 哲郎
副査 熊本大学 客員教授 有蘭 幸司
(熊本県立大学 名誉教授) |