



レビュー

ミャンマーおよびその他の東南アジア諸国における人力および小規模の金採掘による水銀汚染

Pyae Sone Soe 1,2,* , Win Thiri Kyaw

³ 有園 浩二⁴ 石橋 康宏² あぐさてつろう²¹ 県立熊本大学大学院環境共生科学研究科 熊本県立大学環境共生科学部 yisibasi@pu-kumamoto.ac.jp (YI); te-agusa@pu-kumamoto.ac.jp (TA)²³ 総合地球環境学研究所, 京都 603-8047, 日本; thiri@chikyu.ac.jp⁴ 熊本大学大学院薬学研究所 arizono@kumamoto-u.ac.jp ※対応 : g2075002@pu-kumamoto.ac.jp

要約:水銀 (Hg) は最も有害な金属の 1 つであり、世界保健機関 (WHO) によると公衆衛生上の懸念となっています。職人による小規模金採掘 (ASGM) は、世界で最も急速に成長している Hg の供給源であり、Hg を大気、水圏、地圏に放出する可能性があります。Hg は、カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイを含む東南アジア諸国の ASGM 産業で広く使用されています。ここでは、「Hg」、「ASGM」、および関連する研究分野のキーワードを組み合わせて、PRISMA フローを実行することにより、関連する 16 の研究を体系的に検索しました。WHO および米国環境保護庁のガイドライン値を超える水銀濃度が、環境 (つまり、空気、水、および土壌) およびバイオモニタリングサンプル (つまり、植物、魚、および人間の毛髪) で報告されました。特にインドネシア、フィリピン、ミャンマーにおいて、鉱山労働者と非鉱山労働者に対する ASGM 関連の健康リスクも評価されました。調査結果は、ASGM プロセス、特に金アマルガム化段階周辺の深刻な Hg 汚染が非常に高いことを示していました。ある点では、観察されたすべての研究から、Hg の大気中濃度は、金の操業地域の近くで非常に高いことが示されました。公衆衛生上の懸念、特に ASGM 活動の近くに住む成人、妊婦、子供などの脆弱なグループに注意を払う必要があります。



引用 : Soe, P.S., Kyaw, W.T.; 有園 健一石

橋 由美; アグサ, T.

ミャンマーおよびその他の東南アジア諸国にお

ける職人による小規模金採掘による水銀汚染。

内外 J . エンビロン . 解像度公衆衛生 2022, 19, 6290. <https://doi.org/10.3390/ijerph19106290>

学術編集者: José

アンヘル・フェルナンデス

受領日: 2022 年 3 月 31 日

承認済み: 2022 年 5 月 16 日

公開日: 2022 年 5 月 22 日

発行者注: MDPI は、発行された地図および機関のア

ファイルにおける著作権の主張に関して中立を保ちま

す。

化。



著作権: © 2022 by the author.

ライセンス: MDPI, ベーセル, スイス。

この記事はオープンアクセス記事です

条件に基づいて配布され、

クリエイティブ・コモンズの条件

帰属 (CC BY) ライセンス ([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/

このレビューは、ミャンマーおよび他の東南アジア諸国における水銀の影響をまとめたものです。将来的には、現在および進化している状況を調査するために、より多くの研究と評価が必要になります。

ASGM コミュニティの状況。

キーワード: 水銀; 職人による小規模な金の採掘; 空気; 水; 土壌; 工場; 魚; 人間の髪の毛; 健康リスク; ミャンマー; 東南アジア

1. はじめに

1.1. 水銀水銀

(Hg) は、世界保健機関 (WHO) によって最も有害な金属トップ 10 にリストされており、その化学形態は公衆衛生上の懸念事項と見なされています[1]。

元素 (金属)、無機、有機を含むすべての一般的な形態は非常に有毒です。特に、メチル水銀 (MeHg) は、微生物に蓄積し、水生食物網の栄養レベルを生物濃縮または強化する可能性があるため、最も危険な形態です[2]。一方、水生堆積物では元素状 Hg を MeHg に変換できます。

職人による小規模金採掘 (ASGM) 部門での元素状 Hg の使用は、血液脳関門を容易に通過して神経毒性を誘発する Hg 蒸気の吸入のために危険である可能性があります[3]。1950 年代に、日本の水俣湾で、工場からの MeHg を含む工場廃水が不知火海に排出され、それを摂取した人々が中毒を起こした、有名な壊滅的な Hg の発生が発生しました。

汚染されたシーフード[3]。これは、工業用地による中毒の最初の、そして最も重大な事件の1つになりました。

内外 J. エンビロン. 解像度公衆衛生 2019; 62: 36

さまざまな形態の Hg が、化石燃料（石炭や石油など）の燃焼などの人間の活動の結果として、大気中、および LAN 全体に放出される可能性があります。意図的な使用による製品廃棄物（電子機器など）、歯科用アマルガムや汚染された魚介類を含む ASGM と自然のプロセス[3]。これは、Hg イオン、岩石の風化、および森林火災の最初の、そして最も重大な事件の1つになりました。したがって、Hg は工業用地に起因するHg中毒に世界中で排出されます。ロンドン。ASGM は、世界で最も急速に成長している産業活動の1つであり、Hg は主に排出された廃棄物や廃棄物から自然の風化、森林火災などの自然過程のアウトプット。したがって、Hg は世界中の環境に排出されます。

一方、ASGM は世界 70 か国以上で発生しており、推定 16 の ASGM は世界で最も急速に成長している（図 1）。年間の世界の金生産量の最大 20% を支払う余裕がある[4]。

2015 年の国連環境計画 (UNEP) のグローバルインベントリ[4]によると、2220 トンの Hg がすべての人為的発生源から大気中に放出されました。特に、Hg の 38% (838 トン) が ASGM ソースから放出されました (図 1)。

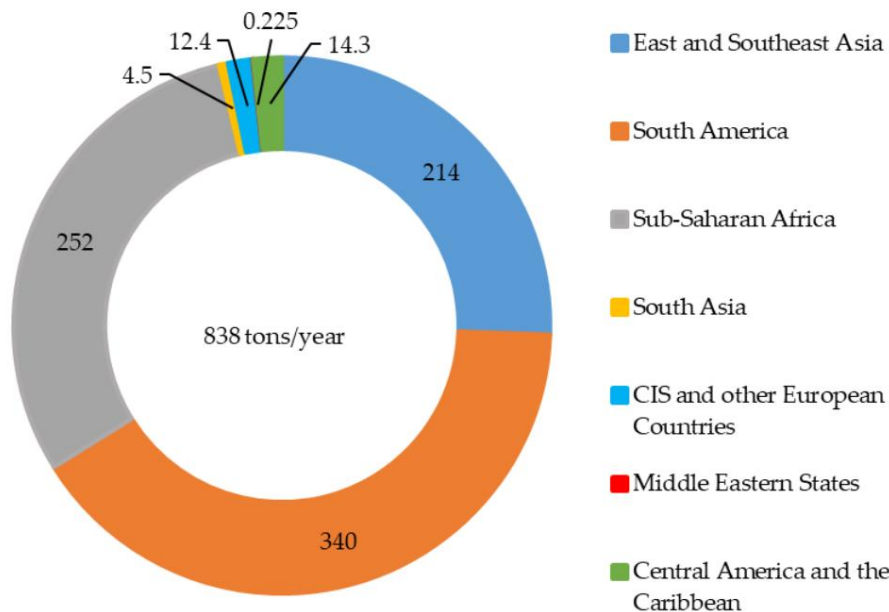


図 1. ASGM 発生源から大気中への世界の Hg 排出量の地域別結果。各値はトン/年を表します[4]。

図 1. ASGM 発生源から大気中への世界の Hg 排出量の地域別結果。各値はトン/年 [4] を送信します。土 2.7 ASGM コミュニティの東南アジアの使用国を含む使用国中の ASGM 部門で非常に一般的でま

1.2.

ASGM コミュニティでの Hg の使用 錬金術と融合における Hg の使用の最も初期の記録は、エジプトと中国からのものでした。Hg の使用は、3000 年以上前の南部を含む世界中の ASGM 部門で非常に一般的で、特に東南アジアの金産出量と職人の安全衛生管理の貢献による型

ブトが、錬金術と融合における Hg の使用の最も初期の記録は、ASGM での Hg の使用が存続し続けるため、エジプトと中国からのものでした。Hg の使用は、3000 年以上前の南部を含む世界中の ASGM 部門で非常に一般的で、特に東南アジアの金産出量と職人の安全衛生管理の貢献による型

国は、クエの州および地域全体で実施されています

バゴー、カチン、マンダレー、モン、サガイン、シャン、タニンタリ (図 2) [12]

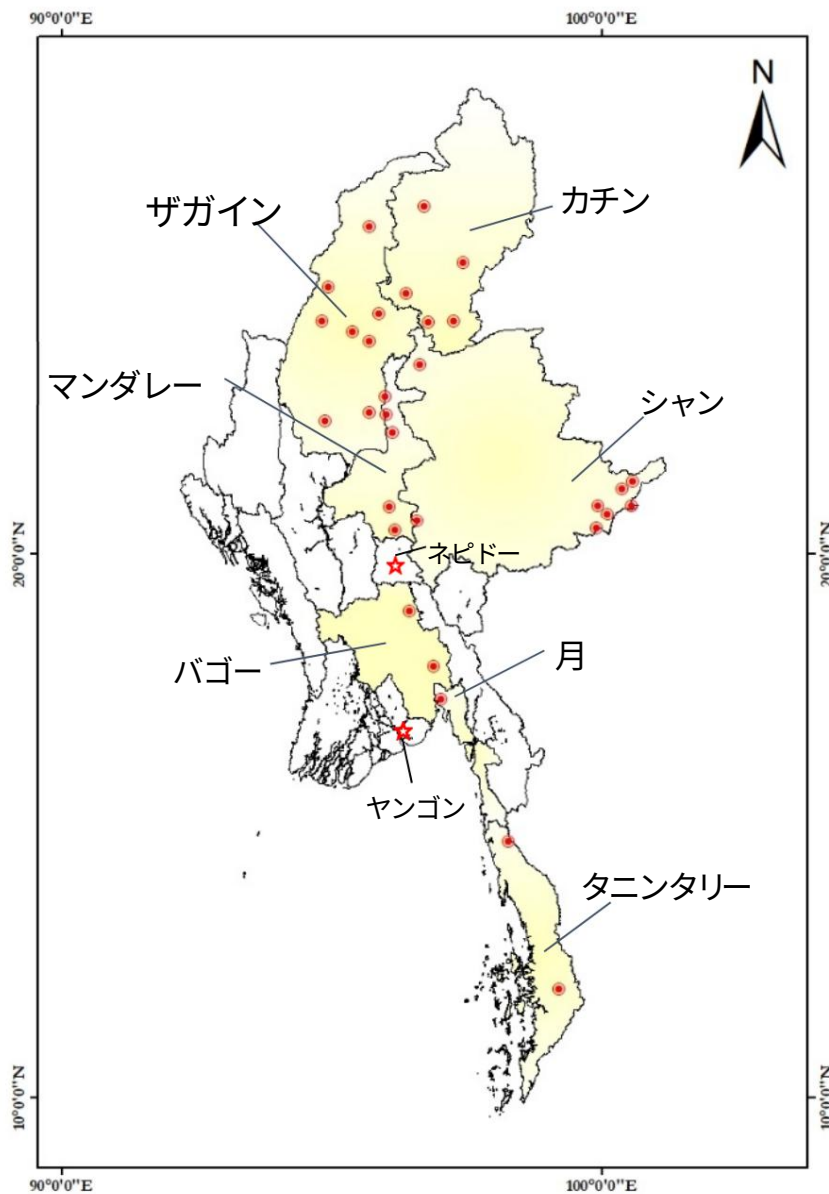


図 2 州における職人による小規模金採掘 (ASGM) 活動の分布と、図 2 ミャンマーの地域における職人による小規模金採掘 (ASGM) 活動のタウンシップ別の分布。タウンシップによるミャンマーの地域。

さまざまな ASGM プロセスは、地域に基づいて分類でき、金鉱床の種類によって異なります。ASGM は、パニングなどのいくつかの方法を使用して分類できます。さまざまな ASGM プロセスは、地域に基づいて分類できます。パケツ浚漕、吸引浚漕、油圧採掘による河川採掘、金鉱床タイプの漂砂。ASGM は、いくつかの方法を使用して分類できます。suc 鉱床 (川の堆積物) と硬岩鉱床 (典型的には石英脈内の障地帯) の地層から採掘され、金と水銀の amalgam を形成して金を抽出し、布を通して手で絞ります。粉末化機を使用して乾燥および粉砕された金を amalgam 得られ、蓄積金を抽出する。

改善を監視し、Hg 排出削減の規制基準を確立するための ASGM セクターの Hg インベントリとベースライン。関係者は、政府、産業界、NGO、学界の関係者と協力しなければなりません。その後、当事者は、ASGM プロセスですべての Hg 化合物に関する認識を構築し、Hg 以外の代替手法を促進し、技術的および財政的支援を提供する必要があります。東南協会で水俣条約を批准していない国

アジア諸国 (ASEAN) には、ブルネイ、ラオス、ミャンマーが含まれます。しかし、ミャンマーでは、地球規模の環境施設によって資金提供されている水俣初期評価のための NAPが、国家の Hg インベントリを開始しました。表1は、ASEAN 諸国における水俣条約の状況をまとめたものです。

表 1. ASEAN 諸国における水俣条約の状況[14]。

参加者	署名日	ステータス	日付 (批准・加入・承認)
インドネシア	2013/10/10	批准	2017年9月22日
フィリピン	2013/10/10	批准	2020年8月7日
カンボジア	2013/10/10	批准	2021年8月4日
ベトナム	2013/11/10	承認	2017年6月26日
マレーシア	2014/09/24	サイン	
ラオス		加盟	2017年9月21日
タイ		加盟	2017年6月22日
ブルネイ	NA	NA	該当なし
ミャンマー-NA;	NA	NA	NA

利用不可。

1.4. 目的

水銀汚染は、特に ASGM 諸国で世界的な問題となっています。手掘り鉱山労働者の数は年々増加し、現在では合計 4,500 万人[15] に達しており、その半数以上が金の採掘に従事しており、少なくとも 70 개국で年間最大 450 トンの金を採掘しています[16]。ASGM の活動により、アフリカ (ガーナ、マリ、スーダン、タンザニア、ジンバブエなど)、ラテンアメリカ (ブラジル、コロンビア、ペルーなど)、アジア (中国、インドネシア、モンゴル、ミャンマー、フィリピン)。

この調査では、ASGM を実践しているミャンマーおよびその他の ASEAN 諸国に重点が置かれました。他の開発途上国と同様に、ミャンマーの環境問題は、天然資源が違法な手段によって採掘されているため、強く考慮されてきました。環境バランスを達成することは、そのような課題にとって重要な役割になっています。残念ながら、ミャンマーにはスキルを習得した専門的な労働者が不足しています。効果のない管理メカニズム。金の副産物、特に Hg の取引には透明性がない。そして最小限の研究活動。そのため、現在までにミャンマーでの水銀汚染に関する出版物は 6 つしかありません[17-22]。

このレビューでは、ミャンマーおよびその他の東南アジア諸国における重大な水銀汚染の問題を特定し、評価しました。この研究では、これらの国の市民にとって重大な関心事である水銀の問題について概説します。環境媒体中の水銀汚染と人間の健康に対する水銀曝露のリスクを評価し、水銀問題に関する適切な政策枠組みを提案します。

2. 材料と方法

2.1. 研究の選択この研

究では、PubMed、Web of Science、Springer、Science Direct、Google Scholar などのデータベースを使用して、2000 年から 2021 年の間に出版された関連文献を特定しました。検索時に使用されたキーワードは、「Hg」、「ASGM」、「ミャンマー」、「インドネシア」、「フィリピン」、および「マレーシア」でした。水銀問題に関連する国際的な規制、法律、手続きに関する研究資料も検討されました。この調査は、ミャンマーおよび他の ASEAN 諸国からの研究論文に焦点を当てています。スクリーニング研究を実施するために、

レビュアー (PSS および TA) は、表2に示す包含および除外基準に従って、研究のタイトルと要約を比較しました。

表 2.研究の包含および除外の基準。

インクルージョン	除外
ASGM コミュニティに関連する研究。 Hg 化合物、全 Hg、無機 Hg、および MeHg に関する研究。エチル水銀などの無関係な化合物。 環境媒体 (空気、水、土壌など) 中の Hg 濃度の強調	石炭火力発電所など他産業での研究。 他の環境媒体中の Hg の測定。
植物、魚、および人間の毛髪のバイオモニターにおける Hg 濃度の強調。	その他の生物学的指標における Hg の測定。
ASGM コミュニティにおける人間の健康リスク評価に関するレポート。	他の業界における人の健康リスク評価に関するレポート。

2.2.質の評価文献を選択

する際に、この研究は、同定とスクリーニングに関する系統的レビューとメタ分析 (PRISMA) ステートメント[23]の優先報告項目に焦点を当て、図5に示すように研究を含めました。環境科学、社会科学、公衆衛生における水銀関連の研究に関する文献。この研究は、元の研究論文と系統的レビューに焦点を当てていました。

評価の質を確保するために、重複は評価され、厳密にチェックされました。

除外基準では、出版年 (2000 ~ 2021 年)を研究論文で使用されている言語と見なしました。東南アジア諸国の研究地域から英語で発表された研究のみが含まれていました。Web サイト データのインポートとデータ スクリーニングには、サードパーティ ツール (Microsoft Excel や Mendeley など) が使用されました。

内外 J .エンviron .解像度公衆衛生2022, 19,

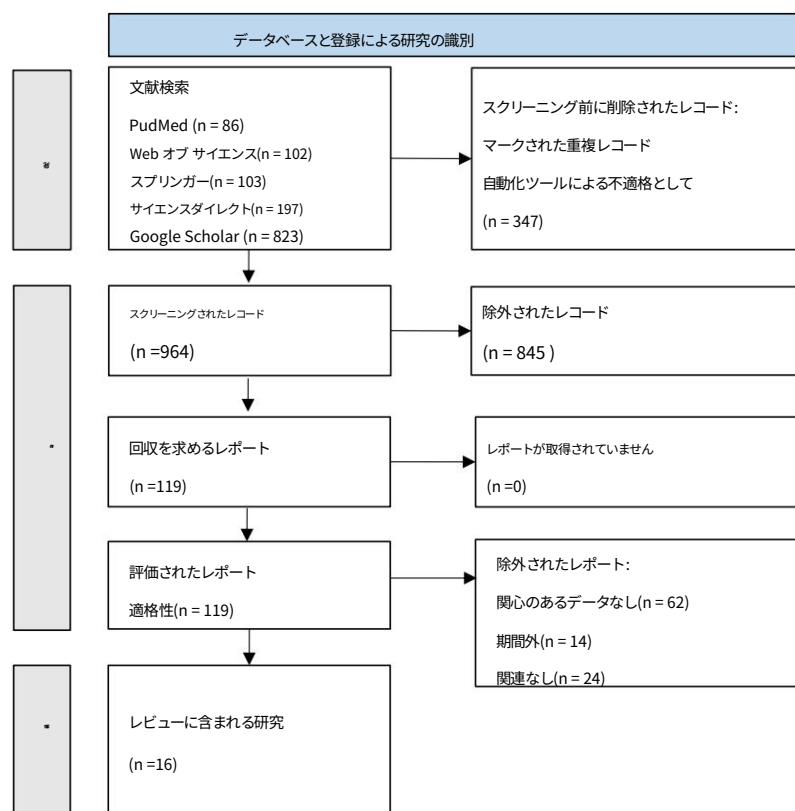


図 5.検索と選択のプロセスを示す PRISMA フロー図。図 5.検索と選択のプロセスを示す PRISMA フロー図。

3. 結果

3.1.空気中の水銀濃度

大気中の Hg は、主に 3 つの形態で発生します。つまり、元素状 Hg (Hg(0))、反応性気体 Hg (Hg(II))、および総粒子状 Hg (Hg(p)) の気体状態です [24]。

ASGM 活動からの Hg(0) 排出は、最高の Hg 排出源です。水銀蒸気 (主に元素 Hg(0) の化学形態) は、空气中を長距離移動し、森林の梢や葉に堆積または捕捉される [25]。2018年のグローバルによると

3. 結果3.1.

空気中の水銀濃度

大気中の Hg は、主に 3 つの形態で発生します。つまり、元素状 Hg (Hg(0))、反応性気体 Hg (Hg(II))、および総粒子状 Hg (Hg(p))の気体状態です[24]。ASGM 活動からの Hg(0) 排出は、最高の Hg 排出源です。水銀蒸気 (主に元素 Hg(0) の化学形態) は、空気中を長距離移動し、森林の梢や葉に堆積または捕捉される[25]。2018 年の世界の Hg 評価レポートによると、2015 年の ASGM 発生源からの大気中への Hg の世界的な排出量は 838 トンで、東および東南アジア諸国は約 214 トンを占めています [4]。最近の研究では、インドネシアの中央スラウェシ[26]、フィリピンのカマリネス ノルテ[27]、およびミャンマーのマンダレー地域[21]での ASGM 活動の結果、大気中の非常に高い Hg 濃度が示されました。インドネシア、ミャンマー、フィリピンでの ASGM 活動による空気中の Hg 濃度を表3 にまとめます。

表 3.インドネシア、ミャンマー、フィリピンの空気中の Hg 濃度のまとめ。

場所	サンプルソース	n	水銀濃度 (ng/m ³) 参照[26]
パル市、スラウェシ、インドネシア	金加工場	21	9172 ± 16,422 (平均 ± SD)
	市北部		514 ± 420 (平均 ± SD)
	市の中心部		141 ± 141 (平均 ± 標準偏差)
	市西部		22 ± 15 (平均 ± 標準偏差)
	市南部エリア		116 ± 135 (平均 ± 標準偏差)
ミャンマー マンダレー管区	ASGM サイト	13	0~10,900 [21]
		19	0.66~74,000
カマリネス ノルテ フィリピン	ASGM サイト	4	7.8~314,000 [27]

NA;利用できません,SD;標準偏差。

インドネシア中部スラウェシでは、24 時間環境 Hg(0) の最高平均濃度 9172 ng/m³が、金を精錬する金加工エリア (Hg アマルガム燃焼の段階を含む) で発見された[26]。この合計値は、WHO ガイドラインの制限値である 1000 ng/m³ の 9 倍でした[28]。さらに、この研究では、Palu 市街地と Mangkahui 村の屋内外の空気 Hg(0) 濃度も考慮しました。

パル市の屋内と屋外の空気中の Hg(0) の最高濃度は、それぞれ 450 ng/m³ と 2250 ng/m³ でした。Mangkahui 村では、屋内と屋外の空気中の Hg(0) 濃度は、サイト A でそれぞれ 196 と 103 ng/m³ でした。一方、サイト B での値はそれぞれ 238 と 279 ng/m³ でした。

ある調査では、2 つの調査を通じて、ミャンマー中部のマンダレー地域にある ASGM サイトの大気中の Hg 濃度が調査されました[21]。1 回目と 2 回目の調査では、ASGM サイトの融合燃焼エリアで、それぞれ 10,900 ng/m³ と 74,000 ng/m³ の最高の Hg 濃度が記録されました。これらの値は、WHO ガイドラインの Hg 制限値の数倍でした[28]。さらに、この研究は、Hg が ASGM エリアだけでなく、近くの住宅地にも分散していることを示唆しました。

村尾らによって、フィリピンの北カマリネス州で大気中の水銀汚染が確認された。 [27]。著者らは、最近金のアマルガムを燃焼させた ASGM のロッドミル ステーションの領域に焦点を当てました。空気中の最高 Hg 濃度は 314,000 ng/m³ で、これはフィリピンのベニットにあるロッドミル ステーションでの WHO ガイドライン (1000 ng/m³) [27] よりもかなり高かった。一方、最も低い濃度は、焼却後 4 週間の同じ場所で

他の空気成分と比較して、気体の Hg(0) は比較的不活性です。人為的排出と自然排出の両方からの Hg(0) は、長距離を空輸され、大気中に 1 年間留まる可能性があります。したがって、Hg(0) は地球に沈着する可能性があります。

および水生生態系[29,30]。インドネシア、ミャンマー、およびフィリピンからの研究は、Hg の大気濃度が、金のアマルガムを燃やす ASGM 地域ではるかに高いことを明らかにしました。また、濃度は WHO のガイドラインよりも高かった[28]。したがって、ASGM 業界では Hg の回収方法を検討する必要があります。

3.2. 水域の水銀濃度

水資源は、採掘された鉱石のふるい分けや洗浄など、さまざまな ASGM 操作ステップによって影響を受ける可能性があります。ASGM セクターで使用される合併プロセスでは、通常、廃水が水域に排出されます。その後、水生生物は上昇した Hg レベルにさらされます。さらに、無機 Hg は有毒な MeHg に変換される可能性があります[31]。水生生物中の MeHg は、食物連鎖を通じて生物濃縮されます。特に、魚の摂取は、人間の水銀曝露の主な原因です[32]。インドネシア、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイの水域における水銀濃度を図6に示します。

インドネシアのボゴールにあるチカニキ川での調査では、河川水中の Hg 濃度が 0.4 ~ 9.4 µg/L の範囲であることが報告されました。最高濃度は、ASGM 村の近くで見つかりました。この研究では、MeHg 濃度が Hg(0) よりかなり低いため、Hg(0) と MeHg の間に有意な相関が観察されました。実際は、採掘廃棄物がチカニキ川の MeHg の直接的な供給源ではなかったことを前提としています[33]。それ以外の場合、河川水に堆積した Hg(0) はメチル化を受ける可能性があり、水系における Hg の化学形態の変化を将来的に行う必要があることを示唆しています。2009 年に実施された川の以前の研究では、Hg 濃度が 0.09 ~ 9.1 µg/L であることが報告され[34]、同様の結果が示され、チカニキ川の継続的な汚染が示されました。

ミャンマーのマンドレー地域で実施された調査では、5 つの ASGM 地域から 2 つの地下水サンプルが収集されました[21]。イラワジ川はミャンマーの主要河川の 1 つで、ASGM 地域の近くに位置しています。この川の上流域と下流域から地表水のサンプルが収集されました。近くの住宅地の地下水中の Hg 濃度も測定されました。サンプリングされた地下水の Hg 濃度は 0 ~ 0.04 µg/L の範囲でした。金採掘活動に最も近い地域 10/2 は、典型的には Hg 汚染を示した[35]。ASGM エリアの下流にあるイラワジ川で得られたサンプルは、0.05 µg/L Hg の Hg 濃度を示し、川の上流から採取されたサンプルには 0.004 µg/L Hg が含まれていました。報告されたイラワジ川の水銀濃度は、湖や川の典型的な水銀濃度 (0.001 ~ 0.003) よりわずかに高かった[36]が、例外的ではなかった。

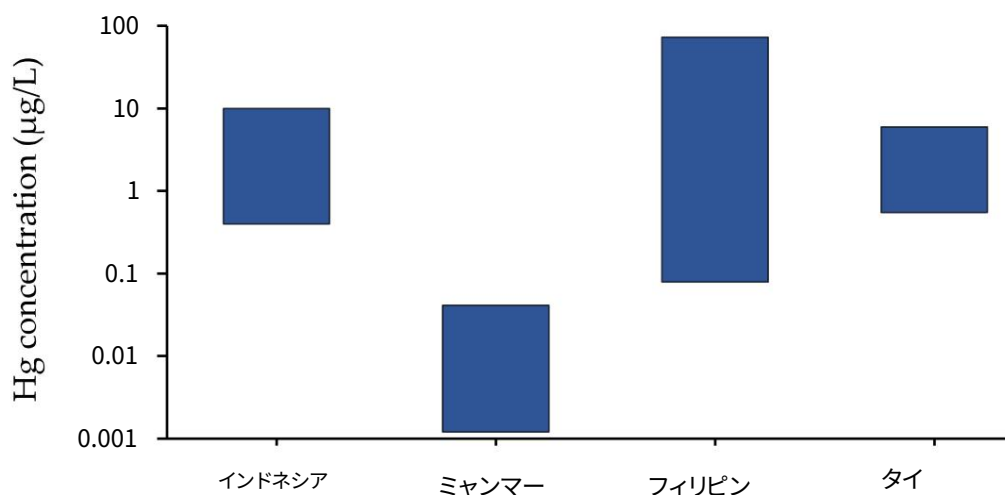


図 6. インドネシア[33]、ミャンマー[21]、フィリピン[37]、およびタイ[31]の水域の Hg 濃度。各データは、図 6. インドネシア [33]、ミャンマー [21]、フィリピン [37] からの水域における Hg 濃度の範囲値の Hg 濃度を表します。およびタイ[31]。各データは、1 回の研究で得られた範囲値の Hg 濃度を表します。

3.3. 土壌中の水銀濃度

土壌は、環境中の Hg 濃度を監視するための重要な指標です。

興味深いことに、フィリピンの比叻川は食糧安全保障を支えており、金の加工に参加する地元の人々の生活手段です。鉱山尾鉱からの水銀とシアン化物を含む廃水は、処理されずに川に放流される[36]。

さらに、フィリピンのナボック川は、採掘作業からの廃水を受け取ります。Hijo、Naboc、および Kingking 川で検出された Hg 濃度は、それぞれ 78.4、72.8、および 75.2 $\mu\text{g/L}$ でした[37]。これらのレベルは、フィリピンの国家基準値（つまり、1 $\mu\text{g/L}$ ）よりもはるかに高い[38,39]。

タイのピット県で行われた調査では、採鉱地域に接続されたクロン ダイ ナム クン運河とクロン サルアン運河の地表水に焦点が当てられました[31]。

上流、下流、貯水池、その他の水域を含む、水生息地を持つ 13 の場所が考慮されました。これには、金処理エリアと金鉱石の分離プロセスに使用される分離溝の近くが含まれます。この研究では、Hg 濃度レベルに関連する Hg 汚染サイトと ASGM サイトからの距離の評価が強調され、0.6 ~ 5.4 $\mu\text{g/L}$ の範囲の Hg 濃度が示されました。アマルガム プロセスがサンプリング場所の近くで行われたため、職場エリアは、上流および下流の距離が離れたエリアよりも高い Hg 濃度を示しました。

検討された研究では、インドネシア[33]、フィリピン[37]、およびタイ[31]からの研究サンプルは、Hg の 0.5 $\mu\text{g/L}$ の WHO ガイドライン制限[40] を超えました。ASGM エリアは Int である可能性があります。水生環境では、Hg が食物連鎖に移行する可能性があります。したがって、不適切に処理された廃水からの流出物は、海洋生物や魚介類を消費する人々に有害である可能性があります。60 ~ 150 g の金を抽出するために、1 日 7.8 時間の融合プロセスが行われるためです [31]。

3.3 土壌中の Hg 濃度 調査による

土壌中の Hg 濃度は通常 0.1 $\mu\text{g/g}$ を超えず、土壌中の正常レベルが報告されています。さらに、土壌中の Hg 濃度は、環境中の Hg 濃度を監視するための重要な指標です。これは、アマルガム 燃焼から大気中に放出された Hg の土壌の最上層に堆積する可能性があります。0.2 $\mu\text{g/g}$ よりも高い Hg レベルを示した土壌の水銀汚染を防ぐには、水銀濃度のレベルを把握する必要があります。表土のプロファイルについては、[45] 検出された Hg 濃度に大きく貢献しました。したがって、ASGM エリアの近くに住む人は、合併 Hg 濃度が表土よりも深い地層に向かって低下することがわかっています[42,43]。さらに、空気からの Hg 吸着は、リターの蓄積と分解を通じて、表層地層での Hg の蓄積に寄与する可能性があります。

土壌の水銀汚染源は、肥料、石灰、汚泥、および糞尿です[44]。インドネシア、ミャンマー、フィリピン、タイの ASGM サイトの土壌中の Hg レベルの概要を図 7 に示します。

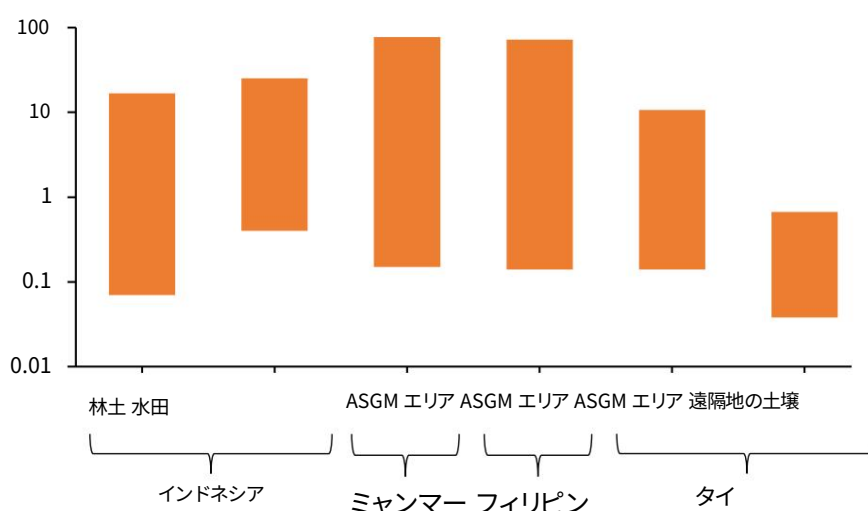


図 7.インドネシア[33]、ミャンマー[17]、フィリピン[27]の土壌中の Hg 濃度 図 7.インドネシア [33]、ミャンマー [17]、フィリピン [27] の土壌中の Hg 濃度を表します。単一の研究からの範囲値の Hg 濃度を表します[31]。各データは、単一の研究から得られた

3.4. 植物中の水銀濃度

植物は、環境の Hg を監視するためのバイオモニターとして広く使用されています [46]。Ras mussen 等、栄養構造の中で、葉が最高の Hg 濃度を含んでいることがわかりました[47]。主に土壌から水銀を吸収する植物では、水銀含有量は根の方が高いことがわかりました。逆に、主に水銀を吸収する植物の場合

インドネシアの研究では、ASGM 活動によって影響を受ける森林と水田の土壌が分類されました[33]。森林土壌および水田土壌で分析された Hg 濃度は、それぞれ 0.07 ~ 16.7 および 0.4 ~ 24.9 $\mu\text{g/g}$ でした。さらに、MeHgの濃度は、森林土壌で 0.07 ~ 2 $\mu\text{g/kg}$ 、水田土壌で 0.07 ~ 56.3 $\mu\text{g/kg}$ の範囲でした。これらのデータは、水田の土壌が ASGM 活動によって特に影響を受けることを示しています[33]。

ASGM の活動は、ミャンマーのザガイン州バンマウク タウンシップの上部で広く行われています。ある研究では、砂金堆積地域からの土壌サンプルを調査し、鉱石処理、水冷、選別、融合などの ASGM 操作プロセスに基づいて土壌マトリックスを特定しました[17]。合併プロセスからの土壌マトリックスは、77.44 $\mu\text{g/g}$ の最高の Hg 濃度を示したのに対し、土壌鉱石処理、水通し、パンニング段階 (金融融合段階) 中の Hg 濃度は、それぞれ 0.68、0.51、および 4.86 $\mu\text{g/g}$ [17]。

フィリピンで実施された調査では、潜在的に汚染されたホットスポットとそのようなスポットから離れた地域から得られた土壌中の Hg 濃度が決定されました。観測された最高の Hg 濃度は、アマルガム燃焼作業場のロッドミルステーションからのサンプルで 71.75 $\mu\text{g/g}$ でした。対照的に、観察された最低濃度は、非採掘地域からのサンプルで 0.15 $\mu\text{g/g}$ であり、より高い Hg 濃度が ASGM 地域の近くを汚染したことを示しています[27]。

タイのピチット地域での ASGM 操作の研究では、採掘および遠隔地からの表層土壌 (深さ 0 ~ 5 cm) が考慮されました。採掘地域と遠隔地の Hg 濃度は、それぞれ 0.14 ~ 10.56 および 0.038 ~ 0.632 $\mu\text{g/g}$ の範囲でした。採掘エリアで観測されたより高い Hg 濃度は、大気中に放出された Hg 蒸気が燃焼ストープ近くの土壌表面に堆積した可能性が高いことを示していました。これは、60 ~ 150 g の金を抽出するために、1 日あたり 7.8 時間の融合プロセスが行われるためです[31]。

ある研究では、土壌中の Hg 濃度は通常 0.1 $\mu\text{g/g}$ を超えず、土壌中の正常レベルが報告されていると報告されています。さらに、土壌中の通常の Hg レベルは 0.05 ~ 0.08 $\mu\text{g/g}$ でした [36]。ミャンマー、フィリピン、タイのデータは、米国環境保護庁 (US EPA) の一般的な土壌ガイドライン値 (0 ~ 0.2 $\mu\text{g/g}$) よりも高い Hg レベルを示しました [45]。検出された Hg 濃度に大きく影響します。したがって、ASGM エリアの近くに住む人々は、合併プロセス中に水銀曝露の影響を受ける可能性があります。

3.4. 植物中の水銀濃度

植物は、環境の Hg を監視するためのバイオモニターとして広く使用されています[46]。Ras mussen 等。栄養構造の中で、葉が最高の Hg 濃度を含んでいることがわかりました[47]。主に土壌から水銀を吸収する植物では、水銀含有量は根の方が高いことがわかりました。逆に、主に空気から Hg を吸収する植物では、新芽と葉の組織で Hg 含有量が高いことがわかった[48]。いくつかの研究では、野菜などの作物が、Hg 採掘地域に住む人々の Hg 暴露源であることが報告されています[49]。インドネシア、ミャンマー、フィリピン、タイの植物サンプルに含まれる Hg 含有量を図8に示します。

インドネシアの最近の研究では、ASGM の場所の近くで生育した植物の葉に 1.4 $\mu\text{g/g}$ 乾燥重量 (dw) という高い Hg 濃度が報告されています[50]。同様に、汚染された飼料用植物 (食用動物の飼料) が、インドネシアの南東スラウェシ州の金採掘現場で発見されました[51]。ボンバナの Rarowatu 地区と North Rarowatu 地区からの新鮮な飼料植物のサンプルが調査されました[51]。サンプリング場所は、リファレンス、マイニング コマーシャル、および ASGM に分けられました。9.9 \pm 14 $\mu\text{g/g}$ dw の最高の Hg 含有量は、ASGM エリアで見つかりました。商業鉱業および参照地域の値は、それぞれ 3.20 \pm 3.50 および 2.70 \pm 2.80 $\mu\text{g/g}$ dw でした。

植物への生態毒性影響に関連する Hg の臨界限界に従って、飼料植物の Hg レベルは、高 (>3 $\mu\text{g/g}$)、低〜中 (0.1 ~ 3.0 $\mu\text{g/g}$)、および低の3つのカテゴリに分類できます。(0.1 $\mu\text{g/g}$) [51]。

3.5. インドネシア、ミャンマー、フィリ

インドネシア、ミャンマー、フィリピン、およびタイで得られた魚の植物中の水銀濃度は、FAO/WHO ガイドライン値の人間を超える水銀濃度を含むことが判明した水銀の摂取に寄与する最も重要な要因の 1 つである。魚の組織中の水銀濃度は、年齢、体長、および体重の影響を受ける可能性があります (0.5 $\mu\text{g/g ww}$) [54,55]。魚 [56] の淡水生物相は、自然および人為起源の両方から Hg を蓄積します。3.5. 魚源の水銀濃度。ほとんどの魚の自然水銀レベルは 0.02 ~ 0.3 $\mu\text{g/g}$ 湿重量 (ww) です。ただし、魚の消費は、人間の水銀摂取に寄与する最も重要な要因の 1 つです。魚の組織中の水銀濃度は、魚の水銀レベルが 0.01 の小型で短命の草食魚種の年齢、体長、および重量の影響を受

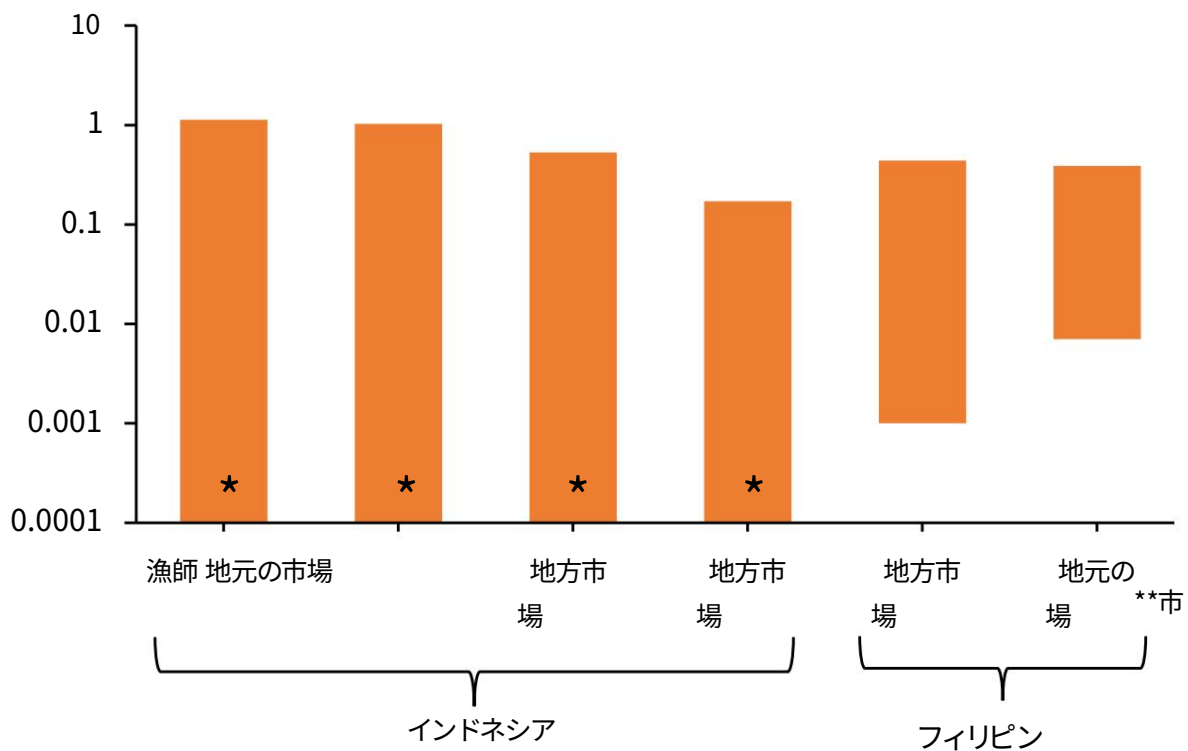


図 9. インドネシア [59] とフィリピン [37] の魚の Hg 濃度。各データは、単一の研究から得られた範囲値の Hg 濃度を表します。*。最小値「0」、MeHg 濃度。

図 9. インドネシア [59] とフィリピン [37] の魚の Hg 濃度。各データは、単一の研究から得られた範囲値の Hg 濃度を表します。*。最小値「0」、MeHg 濃度。

カンボジアでの研究では、Tonle Sap 流域の近くにある Kraie 近くの Kampi プールで、地元の漁師の男性/漁師の女性から 82 種の魚を収集しました [60]。収集された魚のサンプル (n = 160) の Hg 濃度は、0.008 から 0.64 $\mu\text{g/g}$ の範囲でした。さらに、この研究では魚のサイズを「小さいサイズ」としてグループ化し、毎週、通常の量よりも多くの魚を消費するカンボジア人は「大きなサイズ」を摂取します。大型の魚の平均 Hg 含有量は 0.128 $\mu\text{g/g}$ 、魚は 100 g の割合で消費され、健康リスクを高くします [60]。小型魚の平均 Hg 含有量は 0.008 $\mu\text{g/g}$ 、魚は 100 g の割合で消費され、健康リスクを高くします [60]。カンボジア人は平均 1.26 kg の魚を消費します。したがって、通常の量よりも多くの魚を消費するカンボジア人は、より高い Hg レベルを摂取し、健康リスクが高くなります [60]。

インドネシアからの最近の研究では、2007年から2011年にかけて、インドネシアの北スラウェシ州ラタトゥク サブディストリクトで魚のサンプリングが実施されました。漁業経済が盛んな調査対象地域の地元住民は、活発な採掘の時期に健康問題に直面していました。この研究には、漁師/漁師の女性と地元の市場からの魚のサンプルの収集が含まれていました[59]。Buyat Pantaiの漁師からの魚のサンプルは、0.00 ~ 1.13 µg/gのHgレベルを示しました。それぞれ[59]。したがって、マナドの魚市場を除いて、他のソースからの魚サンプルはWHOの標準ガイドラインを超えていました[58]。それにもかかわらず、報告された魚の平均水銀濃度は、消費の標準制限内でした。

フィリピンのマニラの南にあるダバオ デル ノルテの海洋サンプル中のHg濃度を決定するために、調査が行われました。タグムのアポコンの地元の市場で、魚の17標本と1つの海藻サンプルを調べて、HgとMeHgの濃度を測定しました。濃度は、それぞれ0.001 ~ 0.44 µg/g wwと0.007 ~ 0.38 µg/g wwの範囲でした[37]。

考慮された研究は、カンボジア、インドネシア、およびフィリピンからの魚で見つかったHgの最大濃度が、それぞれ1.13 µg/g、0.44 µg/g ww、および0.64 µg/g wwであることを明らかにしました。ブラジル(1.04–2.84 µg/g ww)、コロンビア(1.60–4.50 µg/g ww)、ボリビア(1.08–2.86 µg/g ww)、エクアドル(1.39–1.6 µg/g)などのラテンアメリカの研究との比較(g ww) [62]、東南アジアで報告されたHg濃度は比較的低かった。

3.6. 人毛中の水銀濃度

毛髪は、MeHg曝露を特徴付けるための一般的なバイオマーカーです[63]。低水銀濃度は、胎児の神経症(50 µg/g)および健康問題(11 µg/g)のリスクと考えられてきた[64]。さらに、毛髪のHgレベルが低いことは、Hg蒸気に対する毛髪の感受性が低いこととも関連しています。カンボジア、インドネシア、ミャンマー、フィリピン、およびタイからの人毛で測定されたHg濃度を表4にまとめます。

カンボジアでの調査では、世界の主要河川の1つであるメコン川周辺で人間の毛髪サンプルを収集しました[60]。髪は、O Tron 金鉱山の地域とメコン川沿いの上流と下流に住む鉱山労働者を含む人々から採取されました。これらの結果は、男性(n = 32)の毛髪サンプルの平均Hg濃度(5.21 µg/g)が女性(3.08 µg/g)(n = 46)よりも高いことを明らかにしました。女性の毛髪サンプルをサンプル地域別に分類すると、地雷の影響を受けた地域に近いラタナキリ州の女性は、対照群(2.7 µg/g)(n = 23) [60]。カンボジアの毛髪サンプルのHgレベルは、フィリピンの金鉱山の近くで観察された値を超えており、そこでは人間の健康障害とHg濃度との関連が観察されました[37]。

研究では、インドネシアのレバクシトゥで20年以上活動しているアクティブなASGMエリアからの人間の毛髪サンプルの収集が含まれていました[65]。Hgホットスポットの村(Lebak-1)と下流の村(Lebak-2)は、それぞれ高リスク地域と低リスク地域と見なされました。両方の村からの人間の毛髪サンプルは、0.847 ~ 9.015 µg/gの範囲で、3.2 µg/gの平均Hg含有量を示しました[65]。Lebak-1居住者からのサンプルは、他の居住者よりもかなり高い平均MeHg値(2.12 µg/g)を示しました。これは、Lebak-1居住者がLebak-2居住者よりもMeHgにさらされていることを示しています。コロンビアの水銀影響地域に関する他の研究[66]と比較すると、インドネシアの毛髪におけるMeHgの蓄積は、主に魚や米などの食物の消費が原因であった[65]。

ミャンマーのマングレー地域では、ASGM地域周辺に住む鉱山労働者と非鉱山労働者を対象に、人毛調査が実施されました。鉱夫と非鉱夫の毛髪サンプルの最大Hg濃度は、それぞれ5.7と2.9 µg/gでした[21]。胎児に神経症や健康問題を引き起こす可能性のあるHgのおおよその最低レベルはそれぞれ50および11 µg/gであるため、この事実は、考慮された研究から得られた人間の毛髪中のHg濃度が、人間の健康に悪影響を与えるレベルではなかったことを示しています。 [64,67]。

表 4.カンボジア、インドネシア、ミャンマー、フィリピン、およびタイからの人毛中の Hg 濃度のまとめ。

位置	サンプルソース	の数 サンプル	THg 集中 ($\mu\text{g/g}$)	MeHg 集中 ($\mu\text{g/g}$)	参照
カンボジア、メコン川 (オトロン金 鉱付近)	Tonle Srepok	25	4.54 *	NA	[60]
	Tonle Kong	17	4.22 *		
	Mekong N. Stung Treng	16	3.36 *		
	Mekong Kratie 全ての男	20	3.47 *		
	性 全ての女性 全ての大人	32	5.21 *		
	人 全てのの子供 (13 歳未満)	46	3.08 *		
		59	4.01 *		
		19	3.38 *		
	女性 Ratanakirri (地雷の影響)	23	3.47 *		
	女性メコン	23	2.7 *		
レバク県レバクントゥ ジャワ島、インドネシア	ASGMエリア	41	0.847–9.015	0.37–4.33	[65]
マンダレー 領域、 ミャンマー	ASGM エリア (マイナーおよび 非マイナー)	50	0.4–5.7	NA	[21]
アキュバン地域、ベンゲット、 フィリピン	ASGMエリア	70	0–26.6	NA	[68]
ワン ノン プラ サブディストリクト サイ プーン地区、ピチット 州、 タイ	金鉱夫	79	1.17 \pm 0.05 (平均 \pm SD) 0.93 \pm 0.01 (平 均 \pm SD)	NA	[69]
	学童	59			

NA:未分析、SD:標準偏差、*:平均濃度。

フィリピン北部のベンゲットにあるアキュバンの住民 70 人から人間の毛髪サンプルが入手されました[68]。調査対象の大規模な ASGM コミュニティでは、参加者の年齢は 8 ~ 66 歳の範囲でした。結果は、住民の平均 Hg 含有量が 3.47 $\mu\text{g/g}$ であることを示しました。インタビュー対象者 9 人の Hg 濃度は、人間のバイオモニターの限界である 5 $\mu\text{g/g}$ よりも高かった[68]。さらに、最高の Hg 濃度は 26.6 $\mu\text{g/g}$ で、これは、アマルガム燃焼に積極的に関与し、ASGM の場所からわずか 5 m 離れた場所に住んでいた 46 歳の男性参加者で見つかりました。

髪サンプルは、タイのピチット県、ワン サイ プーン地区、ノン プラ地区にあるパノム ファ金鉱地域の鉱山労働者、学童、および対照群から得られました[69]。この研究では、アマルガム化プロセスに関与し、鉱石準備エリアで作業する鉱山労働者を、それぞれグループ I および II と見なしました。

学童たちは、金採掘活動に携わるグループに所属していました。鉱山労働者の毛髪サンプルは、平均 Hg 濃度 1.17 ($\mu\text{g/g}$) を示し、これは参照グループの Hg 濃度範囲内でした[69]。グループ I および II の学童の毛髪サンプルの平均 Hg 含有量は、それぞれ 0.95 $\mu\text{g/g}$ および 0.90 $\mu\text{g/g}$ でした。

両方の学童グループは、対照の範囲内の水銀濃度を示した[69]。この事実は、Hg への曝露は主に無機 Hg (すなわち、Hg 蒸気) によるものであるため、毛髪ではより低い Hg 濃度が予想されることを示唆しています [69]。

3.7. ASGM コミュニティの健康リスク評価

インドネシア中部スラウェシでの研究では、パル市の住宅地にあるポボヤ ASGM サイトによって引き起こされる Hg 曝露による健康リスクが調査されました[26]。この研究は、鉱山労働者やその他の居住者に焦点を当て、彼らの健康リスクへの曝露を推定しました。調査した 5 つの場所のそれぞれで、ガス状の Hg(0) 吸入リスクからの各危険指数 (HQ) 比 (HQ 比 ≥ 1) の頻度が決定されました[26]。日中の Hg (0) 濃度に基づくと、金処理エリアで 1.5% のみが 1 未満の HQ 比を示しました。

ノーリスク。しかし、サンプル集団の 93% が危険にさらされていることがわかりました。調査地域での ASGM 活動を介して放出された Hg を吸入する可能性が高いです。水銀曝露による人の健康へのリスクは、ポボヤの金処理地域とパル市に近い地域で特に高くなります。さらに、ポボヤ地域のサンプル人口の 93% は、HQ 比率が 1 を超えるリスクなしの値を超えていました。水銀蒸気の吸入に。

ミャンマーのマダレー地域のタベッキーヒン地区の ASGM 地域で実施された予備的な健康調査では、男性 (n = 18) と女性 (n = 11) [19] の健康検査が行われ、神経系と呼吸機能の健康状態が判断されました。

神経学的評価に基づいて、5 年以上 ASGM のパニングと合併プロセスに参加した 3 人の女性鉱山労働者は、軽度の振戦と運動失調と診断されました。鉱夫のスパイロメトリーによる呼吸評価では、38.9% が正常、27.8% が軽度、27.8% が中程度、5.6% が重度であることが示されました。一方、非マイナーグループは、27.3% が正常、27.3% が軽度、45.5% が中等度の影響状態を示しました[19]。

さらに、この研究では、採掘活動の期間が長くなるにつれて、FEC と FEV1 の値が低下することがわかりました。これは、登録された採掘者の呼吸機能が慢性的に損傷していることを示しています。したがって、ミャンマーの ASGM コミュニティの健康検査を集中的に実施する必要があります。

フィリピンの北ダバオ州ダバオデルノルテ州タグムのアポコンにある ASGM 採掘場周辺の鉱山労働者と子供たちに対する Hg の健康への影響が研究された[37]。発見された神経学的効果は、主に脳神経 (17.1%)、反射 (5.1%)、感覚 (5.1%)、小脳 (3.89%)、および運動神経 (1.2%) に位置していました。神経学的影響は次のように特徴付けられた：脳神経VIIIの異常 (6.87%)、遠位の振動感覚の低下 (2.69%)、手掌反射欠損 (2.4%)、脳神経I (2.40%)、視力低下。 J.エンviron. 解像度公衆衛生2022, 19, x (2.10%)、バビンスキー (1.50%)。身体検査に基づいて、研究に登録された 163 人の子供全員に異常が見つ

かり、次の 5 つの主な異常が見られました。

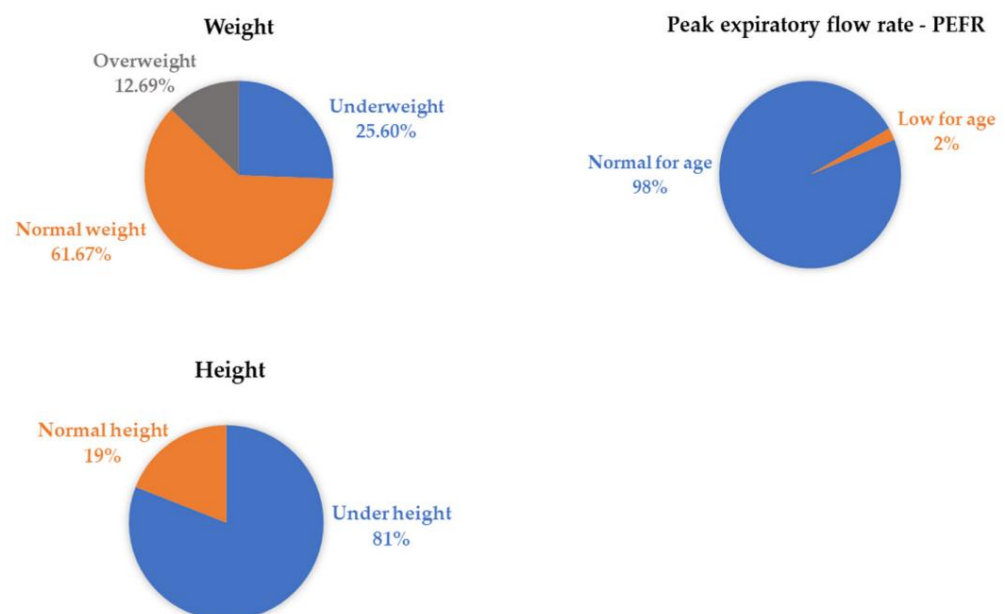


図 10. フィリピン、ダバオ デル ノルテ、アポコン、タグム、ダバオ デル ノルテの学童に見られる主な異常[36]。

図 10. フィリピン、ダバオ デル ノルテ、アポコン、タグム、ダバオ デル ノルテの学童に見られる主な異常 [36]。タイのパノムパ金鉱地域で研究が行われました[69]。鉱夫と学童の 2 つのグループがグループ I (鉱業活動への関

与しない)と II (採掘活動に関与する)に分けられました。個人健康リスクを推定するための 2 および II (採掘活動に関与しない)に分けられました。米国 EPA によると、参考用量は 0.0003 mg/kg/日 [70] であり、HQ 比は推定暴露摂取量を表します。のグループで水銀蒸気への曝露が少ない

米国 EPA では、参考用量は 0.0003 mg/kg/日[70] であり、HQ 比は推定暴露摂取量を表します。鉱夫のグループにおける水銀蒸気への曝露が少ないことは、空気中の水銀の範囲が 0.005 ~ 0.021 mg/m³ であることによって証明されました。グループ II の HQ 比率はリスクを示さなかった [69]。しかし、グループ I の HQ 比は 16 から 218 の範囲であり、グループ II の HQ 値よりもはるかに高かった。学童のグループに関しては、グループ II は 0.02 ~ 0.23 と低い HQ 値を示し、グループ II は 0.01 ~ 0.02 とさらに低い HQ 値を示した[69]。

グループ I の高い HQ 値は、アマルガム露天燃焼の近くでの金採掘からの Hg 暴露に起因する可能性があります。これは、合併プロセスで働く鉱山労働者が Hg 蒸気を吸入するリスクが最も高いことを示唆しています。したがって、合併プロセスで働く鉱夫は、Hg 蒸気吸入の最大のリスクにさらされています。職場での水銀汚染を低減する緩和戦略を検討する必要があります。

4. 討議

この論文では、ミャンマーおよび他の東南アジア諸国の ASGM 地域からの Hg 汚染を概説しました。環境指標 (空気、水、土壌など) とバイオモニター (植物、魚、人間の髪の毛など) が検討対象の研究で使用されました。インドネシア、ミャンマー、フィリピンのさまざまな地域で見つかった空気中の Hg の濃度は、WHO のガイドラインで示されている標準限界値よりも高かった[28]。空気中の高い Hg 濃度は、主に調査地域での金のアマルガムの燃焼によるものでした。対照的に、スロベニアのイドリア (<10 ng/m³) [71]と中国の貴州省 (17.8 ng/m³) [72] の ASGM 地域周辺の空気中の Hg の報告された濃度は低かった。

さらに、辰砂を溶かして Hg を生成したスペインのアルマデンでは、報告された Hg レベルは 100 ~ 14,000 ng/m³ の範囲であり[73]、ミャンマーとフィリピンの ASGM 地域の Hg レベルよりも低かった。

ASGM 地域では、水は地元の人々の飲用や家庭用に不可欠です。さらに、ASGM エリアでは、鉱山廃水が直接水域に排出される可能性があるため、水の浄化が重要です。したがって、レビューされた研究では、ASGM 地域周辺の河川水と地下水の Hg 濃度が考慮されています。インドネシア、フィリピン、タイからの水サンプル中の水銀濃度は、WHO 基準 (0.5 µg/L) を超えました[40]。ミャンマーの水サンプル中の Hg 濃度は、インドネシア、フィリピン、タイの水サンプルに比べて比較的低かった。

大気中の沈着は、遠隔環境における Hg の主な発生源です。さらに、土壌は、陸上生態系における大気中の水銀沈着のもう 1 つの主要な受け手です。さらに、Hg は、その元素不純物のために長期間にわたって土壌に保持される可能性があります[17]。ミャンマーとフィリピンのサンプルで検出された Hg 含有量は、米国 (カリフォルニア) では 1 µg/g、カナダでは 6.6 µg/g、欧州連合 (オランダ) では 0.83 µg/g の標準制限を超えていました[74]。

植物はその幼根システムを使用して有機および無機の Hg フォームを吸収し、それが葉に届けられます[75]。テマーマン等。 [76]は、Hg への土壌曝露レベルに応じて、植物の根からも Hg 吸収が起こることを発見しました。もう 1 つの理論は、大気中の Hg がほとんどの植物に蓄積する可能性があるというものです[77]。この考慮された研究では、フィリピンからサンプリングされた植物の Hg 含有量が最高値を示しました。これにインドネシア、ミャンマー、タイが続く。このレビューの調査結果に基づくと、調査地域で見つかった Hg レベルは、中国貴州省の Lanmuchang Hg 採鉱地域で報告されたものよりも高かった (0.175 µg/g ww) [78]。一方、スロベニアの Idrija Hg 採鉱地域で収集された野菜サンプル中の報告された Hg 濃度は、<0.215 µg/g ww [71] でした。コロンビアのアラクラン鉱山での研究[79] では、葉に含まれる Hg の最大値が 2.78 µg/g dw であったのに比べて、レビューされた研究で報告された値はより高かった。さらに、スペインのアルマデン鉱山地区の植物サンプルで見つかった Hg レベルは、葉で 0.16 ~ 1278 µg/g の範囲で非常に高い値を示しました[80]。

汚染された水域の魚は、Hg によって汚染される可能性があります。レビューされた研究では、ASGM 地域内の地元の市場や漁師から入手した魚種を調査しました。一部の魚サンプルの Hg レベルは WHO 基準を下回っていましたが、

制限 (0.5 µg/g ww) [58]、インドネシアとカンボジアの漁師からの魚の Hg レベルは非常に高かった。一方、フィリピンの魚サンプルは、魚組織の米国 EPA 基準である 0.3 µg/g を超えていました[62]。一般に、淡水魚の筋肉組織に蓄積された Hg の 75% 以上が MeHg の有機形態である[81]。

さらに、調査地域にはさまざまな水生生物の生息地があり、季節変動の影響を受けるため、降水量などの季節変動を考慮する必要があります。

例えば、洪水は、システムの生物地球化学的構成要素 (例えば、酸素含有量、pH、餌の入手可能性) を一時的に変化させる可能性があります。このように、季節 (例: 乾季または雨季) に対する魚の採集条件が重要である[82,83]。したがって、ASGM 地域の近くに住んでいる人は、魚を食べる際に注意を払う必要があることをお勧めします。

ヒトの毛髪中の水銀濃度は、Hg 種によって汚染された食品の消費による内因性の Hg 汚染と、元素状の Hg がヒトの毛髪に付着する可能性があるため、空気中の Hg 濃度の両方に関連しています[71,84]。

カンボジア、ミャンマー、タイで調査された ASGM 地域からの人毛サンプル中の Hg 濃度は、中国の Wuchuan Hg 採鉱地域の居住者よりも低かった(平均値と範囲は 34 および 7.6 ~ 93.1 µg/g、それぞれ) [78]。低い Hg レベルは、Hg 蒸気に対する人間の毛髪への感受性が低いことに起因する可能性があります[21]。さらに、中国中部の貴州省と陝西省南部の谷にある Hg 採鉱地域では、平均値が 4.3 µg/g (1.6 ~ 12.6 µg/g) の Hg レベルが示されました[85]。しかし、インドネシアのレバクシトゥの ASGM 地域とフィリピンのアキュパン地域の毛髪サンプルに見られる Hg 含有量は、それぞれ 0.84 ~ 9.015 µg/g と 0 ~ 26.6 µg/g の濃度を示した[65, 68]。これらの値は、WHO のガイドライン[67]による許容限界を超えていました。一方、カンボジア、ミャンマー、タイで検出された Hg 濃度は、推奨限度内でした。さらに、ある研究では、魚の大量消費と人間の毛髪中の高レベルの水銀への燃焼金アマルガム曝露との関連性が報告されている[86]。

ASGM プロセスでは、鉱夫がアマルガム燃焼中に Hg 蒸気にさらされるため、Hg 吸入の最終段階が最も重要です。インドネシアのパル市の空気中の平均 Hg 濃度は 12,782 ng/m³ でした[26]。この研究では、人口の 93% がリスクのない HQ 比率を上回っていることが示されました。したがって、鉱山労働者と近隣住民の両方が、Hg 蒸気の吸入による健康への悪影響のリスクにさらされていました[26]。

ミャンマーでの調査では、マンダレー地域の ASGM エリア周辺で健康検査を実施しました。ヒューマン バイオモニタリング委員会の基準に基づくと、7 人の鉱山労働者が警告状態の範囲内にありました。さらに、この研究では、鉱夫の 16% が神経系の損傷などの Hg 中毒の兆候を示したのに対し、非鉱夫は異常な症状を示さなかったことが強調されました[19]。

フィリピンでの調査では、163 人の子供の健康診断が行われました[37]。すべての子供は、次の共通の異常を示しました: 平均より低い身長、歯肉の変色、平均より低い体重、アデノパシー、および皮膚の異常。

WHO によると、1 日あたり 200 mg の水銀 (魚などから) を摂取した成人は、感覚異常の症状を経験する可能性がそれぞれ 0.3% と 8% です[87]。

タイのパノム ファ金鉱地域で、ASGM 活動後の鉱山労働者と学童の水銀曝露が調査されました。参照投与量 (0.0003 mg/kg/日) に対する HQ は、鉱夫に対する好ましくない健康影響が予測されるべきレベルを下回っていた[69]。高曝露の鉱山労働者グループと学童は、それぞれ 16 ~ 218 および 0.02 ~ 0.23 の HQ 比を示しました。金アマルガム蒸気を吸入すると、脳や腎臓に蓄積する可能性があります [69]。実際、ある研究では、Hg レトルトを使用せずに露天燃焼法を使用したブラジルの鉱山労働者が、Hg レトルトを使用した尿中の通常の Hg 濃度よりも高い Hg レベルを示したことが報告されています[69]。

5. 結論

このレビューでは、ミャンマーおよびその他の関連する東南アジア諸国の ASGM 地域における Hg 汚染を評価し、特定しました。研究は、調査対象国およびその他の地域における ASGM 活動の現状に引き続き焦点を当てる必要があります。

Hg が ASGM 地域から放出されるため、ASGM 活動を許可する世界。これは、大気を通じて輸送され、陸上および水生生態系に堆積する可能性のある持続的で有毒な地球規模の汚染物質です。Hg は ASGM 活動でまだ使用されているため、この研究は、ASGM 領域からの健康検査や Hg 管理などのさらなる研究活動に貢献することを目的としています。たとえば、ミャンマーは国の水銀インベントリを認識しておらず、その研究活動はまだ限られています。さらに、ミャンマーはまだ水俣条約の一部ではありません。インドネシアなどの国々が水俣条約を批准しているにもかかわらず、金価格は依然として高いままであるため、ASGM 活動における Hg 需要は依然として高いままです。

これらの再検討された調査によると、Hg が近くの住宅地を含む ASGM エリアの近くで汚染を引き起こし続けていることは明らかです。ASGM 地域では、Hg 関連疾患に関するヒトの疫学的評価を定期的に行う必要があります。水銀汚染区域は、合理的な規制、方針、および枠組みを使用して管理する必要があります。さらに、革新的な Hg フリー処理技術と代替経済を導入して、ASGM コミュニティが Hg 排出量を削減するのを支援する必要があります。その結果、水銀の問題を認識することで、ASGM コミュニティの水銀汚染を効果的に減らすことができます。

著者の貢献: KA と YI が調査を監督しました。TA は原稿を監修し、編集しました。WTK は、原稿をサポートし、資金を提供しました。PSS、この原稿を書きました。すべての著者は、原稿の公開版を読み、同意しました。

資金提供: この研究は総合地球環境学研究所 (RIHN; NIHU の構成メンバー)、プロジェクト番号 RIHN 14200102 によって資金提供されました。

治験審査委員会の声明: 該当なし。

インフォームド コンセント ステートメント: 該当なし。

データ利用可能性声明: 該当なし。

謝辞: 著者は、この原稿を完成させるために親切なサポート、コメント、および提案を提供してくれたあぐさ哲郎に心から感謝したいと思います。本研究は、総合地球環境学研究所 (RIHN: NIHU の構成メンバー) プロジェクト番号 RIHN 14200102 および日本学術振興会 (JSPS) の二国間パートナーシップ共同研究プロジェクト (JPJSBP 120209934) によって支援されました。

利益相反: 著者は利益相反を宣言していません。

参考文献

1. マクナット、M. マーキュリーと健康。サイエンス2013, 341, 14–30. オンラインで入手可能: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/> 詳細/水銀と健康(2022年3月30日にアクセス)。【相互参照】 [PubMed]
2. Moreno-Brush, M.; マクラガン、DS; Biester, H. 熱帯河川での職人的および小規模な金採掘からの水銀の運命: 水文学的および生物地球化学的制御。批判的なレビュー。クリティカル。Rev. Environ. 科学。技術。2020, 50, 437–475。【相互参照】
3. 原田正治 水俣病 : 日本における環境汚染によるメチル水銀中毒。クリティカル。Rev. Toxicol. 1995, 25, 1–24。【相互参照】 [PubMed]
4. 国連環境計画 (UNEP)。グローバル水銀評価 2018; 国連: ニューヨーク、ニューヨーク、米国、2019 年。
5. ハイランダー、LD. Meili, M. 水銀生産の 500 年: 2000 年までの地域別の世界的な年間インベントリと関連する排出量。科学。トータルエンviron. 2003, 304, 13–27。【相互参照】
6. UNEP。職人および小規模での水銀使用の削減; 国連環境計画、国連: ニューヨーク、ニューヨーク、米国、2012年。p. 76。
7. Hilson, G. 小規模金採掘産業における水銀汚染の軽減: 政策と研究課題の再構築。科学。トータルエンviron. 2006, 362, 1–14。【相互参照】
8. クリフォード、MJ 職人による金採掘部門における水銀汚染に取り組むための将来の戦略: 水俣条約を機能させる。先物2014, 62, 106–112。【相互参照】
9. スーザ、R.; ヴェイガ、M. van Zyl, D.; テルマー、K.; シュピーゲル、S.; Selder, J. ブラジルの手掘り金採掘部門の政策と規制: 分析と推奨事項。J. クリーン。製品2011, 19, 742–750。【相互参照】
10. Htun, K. ミャンマーの持続可能な鉱業。アプリケーション環境。解像度2014, 36, 25–35。【相互参照】
11. マクファーレン、D. Villalobos, R. ミャンマーの手掘り採掘の状況。2019. オンラインで入手可能: <https://delvedatabase.org/uploads/resources/The-State-of-Artisanal-Mining-in-Myanmar-Report-PACT-May28.2019.pdf> (2021年11月4日にアクセス)。

- 38.環境天然資源省.飲料水のフィリピン国家基準。1993。オンラインで入手可能: http://www.wepa-db.net/policies/law/philippines/1993std_drinking.htm (2021年11月2日にアクセス)。
- 39.環境天然資源省。DENR 行政命令 No. 2016-08: 水質ガイドラインおよび一般排水基準。2016。オンラインで入手可能: <https://server2.denr.gov.ph/uploads/rmdd/dao-2019-12.pdf> (2021年11月2日にアクセス)。
- 40.誰.飲料水の品質に関するガイドライン,第4版。WHO: ジュネーブ,スイス。オンラインで入手可能: <https://www.who.int/publications/item/9789241549950> (2021年11月2日にアクセス)。
- 41.バンドル,GM,メイソン,RP。 Fitzgerald, WF 温帯湖における揮発性水銀のサイクリング。水 空気 土壌汚染。1991, 56, 791-803。【相互参照】
- 42.王, S。 Zhong, T.; チェン, D.; Zhang, X。 農業用土壌中の水銀 (Hg) 濃度の空間分布とそのリスク中国における食品安全性に関する評価。サステナビリティ2016, 8, 795。【CrossRef】
43. Santos-Francés, F.; ガルシア・サンチェス, A。 Alonso-Rojo, P。 コントレラス, F。 Adams, M。 土壌中の水銀の分布と移動金鉱地域、クニ川流域、ベネズエラ。 J .エンviron. 管理します。2011, 92, 1268-1276。【相互参照】
- 44.アゼベド, R。 ロドリゲス, E。 植物中の水銀の植物毒性: レビュー。 J .ポット。2012, 2012, 848614。【CrossRef】
45. EPA. 土壌スクリーニングガイダンス: 技術的背景文書 土壌; EPA: フランクフルト、ドイツ、1996年。
46. Lodenius, M。 汚染地域における空気中の水銀のバイオモニタリングのための植物の使用。環境。解像度2013, 125, 113-123。【相互参照】【PubMed】
47. ラスマツセン, PE; Mierle, G.; Nriagu, JO 総水銀に関する植生の分析。水 空気 土壌汚染。1991, 56, 379-390。【相互参照】
48. リー, R。 ウー, H。 イング, JD; フー, W。 ガン, L。 Li, Y。 石炭火力発電所周辺地域からの野菜、穀物、土壌の水銀汚染。科学。Rep. 2017, 7, 46545。【CrossRef】【PubMed】
49. チャン, H。 Feng, X。 ラーセン, T。 Qiu, G.; Vogt, RD 中国内陸部では、魚ではなく米がメチル水銀の主な経路である暴露。環境。健康の視点。2010, 118, 1183-1188。【相互参照】
50. マフムード, M。 リハワ, F.; サレ, Y.; Desei, F。 Banteng, B。 伝統的なブラドゥーゴールドにおける植物中の水銀濃度の研究鉱業。IOP会議サー。地球環境。科学。2019, 314, 12018。【CrossRef】
51. 神原正Sera, K。 ボンバナ地域の職人的および小規模な金採掘からの土壌および飼料植物中の水銀、インドネシア。Toxics 2020, 8, 15。【CrossRef】
52. ブラウン, CL。 Fang, SC 小麦による水銀蒸気の吸収。植物生理。1978, 61, 430-433。【相互参照】
53. Peralta-Videa, JR; ロペス, ML。 ナラヤン, M。 Saupe, G.; Gardea-Torresdey, J。 植物による環境中の重金属の取り込みの生化学: 食物連鎖への影響。内外 J . Biochem。細胞生物。2009, 41, 1665-1677。【相互参照】
54. Rajaei, M。 小毘, S.; グリーン, A。 ロング, R.; コビーナ, SJ。 ナーティ, V.; バック, D。 アントウィ, E。 Basu, N。 ガーナにおける職人による小規模金採掘の統合評価 - パート 2: 自然科学レビュー。内外 J .エンviron. 解像度公衆衛生2015, 12, 8971-9011。【相互参照】
55. FAO; WHO. 食品および飼料中の汚染物質および毒素に関するコーデックス一般基準。WHO: 2013年、スイス、ジュネーブ。pp.1-48。
56. カスティロス, ZC; Rodriguez-Filho, S.; ロドリゲス, APC。 ヴィラポアス, RC; シーゲル, S。 ベイガ, MM; Beinhoff, C。 インドネシアの金採掘地域からの魚の水銀汚染と人間の健康リスク評価。科学。トータルエンviron。2006, 368, 320-325。【相互参照】
57. Suckcharoen, S.; Nuorteva, P。 ハサネン, E。 タイの淡水域における水銀汚染の驚くべき兆候。アンビオ1978年7月113-116。
58. FAO. 魚の消費のリスクと利点に関する FAO/WHO 合同専門家会議の報告。FAO: ローマ、イタリア、2015年。pp. 25-29。オンラインで入手可能: <http://www.fao.org/docrep/014/ba0136e/ba0136e00.pdf> (2021年11月2日にアクセス)。
59. ベントレー, K。 Soebandrio, A。 インドネシア、北スラウェシ、ラタトク準地区の地雷の影響を受けたコミュニティの地元の漁師と魚市場から供給された海産魚のヒ素と水銀の濃度。3月汚染。ブル。2017, 120, 75-81。【相互参照】【PubMed】
60. マーフィー, TP。 アーバイン, KN; サンブソン, M。 郭, J。 Parr, T。 カンボジア、メコン川沿いの水銀汚染。アジア J。水環境。汚染。2008, 6, 1-9。
61. バラン, E。 Jantunen, T。 Kieok, CC メコン川流域における内陸漁業の価値; WorldFish センター: プノンペン、カンボジア、2007年。p. 76。オンラインで入手可能: https://digitalarchive.worldfishcenter.org/bitstream/handle/20.500.12348/1671/WF_895.pdf?シーケンス=1&isAllowed=y (2021年11月2日にアクセス)。
62. Canham, R.; ゴンザレス・プリエト, 午前。 Elliott, JE ラテンアメリカの人為的活動による魚および魚を食べる野生生物における水銀曝露と毒性学的影響。積分。環境。評価。管理します。2021, 17, 13-26。【相互参照】
63. 環境衛生の展望。水銀曝露によるリスクのある集団を特定するためのガイダンス。露出2008, 113, 1381-1385。【相互参照】
64. ロイ, VD。 ジャイアン, T。 アン, L.; Duc, T。 ホイ, T。 月, P。 は, T.; Mineshi, S。 NIMD Forum 2006 II - アジア太平洋地域における水銀汚染に関する現在の問題 - ベトナムの金採掘および電池工場の労働者への水銀曝露。2006。オンラインで入手可能: http://nimd.env.go.jp/english/kenkyu/nimd_forum/nimd_forum_2006_II.html (2021年11月4日にアクセス)。
65. ノビルサ, R。 デイン, QP。 ジョン, H。 Addai-Arhin, S.; ヌグラハ, WC; 広田直子; ウィスプリヨノ, B。 石橋 由美; Arizono, K。 インドネシアの職人による小規模金採掘地域における米からの水銀の食事摂取と人間の健康リスク。ネット販売: https://www.jstage.jst.go.jp/article/fts/7/5/7_215/_article-/char/ja/ (2021年11月4日にアクセス)。

66. サラザール・カマチョ, C.; Salas-Moreno, M. Marrugo-Madrid, S.; Marrugo-Negrete, J.; Díez, S. コロンビア北西部の 2 つの職人による小規模金採掘コミュニティにおける水銀への人間の食事暴露。環境。内外2017, 107, 47–54. [【相互参照】](#)
67. 国立水俣病研究所 (NMID). 環境省, 日本. 水銀と健康; 2013. オンラインで入手可能: http://nimd.env.go.jp/english/kenkyu/docs/Mercury_and_health.pdf (2021 年 11 月 2 日にアクセス)。
68. クレメンテ, E.; セラ, K.; ニツ川 慎二; Murao, S. Acupan 地域, ベンゲット, フィリピンの手掘り鉱山コミュニティからの毛髪サンプルの PIXE 分析。核。計器。メソッド物理。解像度宗派。B ビームインタラクト。メートル。アトム2004, 219–220, 161–165。
[【相互参照】](#)
69. Umbangtalad, S.; パークピアン, P. Visvanathan, C.; ドローヌ, RD. Jugsujinda, A. タイの小規模な金採掘および回収作業における Hg 汚染と鉱山労働者および学童への暴露の評価。 J .エンviron .科学。健康 パート A 毒性/危険。代用。環境。英文2007, 42, 2071–2079. [【相互参照】](#)
70. 米国環境保護庁。統合リスク情報システム (IRIS); 国立環境評価センター, 研究開発局: ワシントン DC, 米国, 1999 年。
71. コーバル, AB. トラトニク, JS. マゼジ, D.; ファジョン, V. ジビカー, D.; Miklavcic, A. コックマン, D. コトニク, J.; プリスキ, AS; Osredkar, J.; ら。スロベニアの旧水銀採掘の町イドリアに住む影響を受けやすい集団の水銀への曝露。環境。解像度2017, 152, 434–445. [【相互参照】](#)
72. 王, S. Feng, X. Qiu, G.; フー, X. Wei, Z. 重度の大气汚染における土壌と空気間の水銀交換フラックスの特性エリア, 東部貴州省, 中国。アトモス。環境。2007, 41, 5584–5594. [【相互参照】](#)
73. イゲラス, P. Oyarzun, R. コトニク, J.; Esbri, JM. Martinez-Coronado, A.; ホーバット, M. マサチューセッツ州ロクス-ベルドンセス; Llanos, W.; ヴァセリ, O. Nisi, B. ら。ヨーロッパ, 南アメリカ, 南アフリカ, 中国の対照的な環境設定からのガス状元素水銀 (GEM) に関するフィールド調査の編集。内外 J .エンviron .解像度公衆衛生2016, 13, 160. [\[CrossRef\]](#)
74. Guney, M.; Akimzhanova, Z. Kumisbek, A. ベイソバ, K. Kismelyeva, S. Satayeva, A. イングルザキス, V. Karaca, F. カザフスタンの水銀 (HG) 汚染サイト: 現在の事例とサイト修復対応のレビュー。内外 J .エンviron .解像度公衆衛生2020, 17, 8936. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
75. ハンソン, PJ. リンドバーク, SE; タベラー, TA; オーエンズ, JG. Kim, KH 水銀蒸気の葉面交換: 補償点の証拠。水 空気 土壌汚染。1995, 1, 373–382. [【相互参照】](#)
76. De Temmerman, L.; Waegeneers, N. クレイズ, N. Roekens, E. 大気中の水銀濃度と葉物野菜による蓄積量の比較: 陸生食物連鎖分析における重要なステップ。環境。汚染。2009, 157, 1337–1341。
[【相互参照】](#) [\[PubMed\]](#)
77. バトラ, M. Sharma, A. 植物における水銀毒性。ボット。Rev. 2000, 66, 379–422. [【相互参照】](#)
78. 風水, X. Qiu, G. 中国南西部, 貴州省における水銀汚染—概要。科学。トータルエンviron . 2008, 400, 227–237。
[【相互参照】](#)
79. Marrugo-Negrete, J.; Marrugo-Madrid, S.; Pinedo-Hernández, J.; Durango-Hernández, J.; Díez, S. 水銀汚染された採掘現場でのファイトレメディエーションの可能性に関する在来植物種のスクリーニング。科学。トータルエンviron . 2016, 542, 809–816. [【相互参照】](#)
80. モリナ, ジャフ。Oyarzun, R. エスプリ, JM. Higuera, P. スペイン, アルマデン鉱山地区の土壌と植物における水銀の蓄積: 地球上で最も汚染された場所の 1 つ。環境。ジオケム。健康2006, 28, 487–498. [【相互参照】](#)
81. 張, L. Wong, MH 中国における環境水銀汚染: 発生源と影響。環境。内外2007, 33, 108–121。
[【相互参照】](#)
82. ゲドロン, S. ポイント, D. アチャ, D.; ブーシェ, S.; ペンシルベニア州バヤ; Tessier, E. モンベルス, M. モリーナ, CI; グロロー, A. ショーヴォー, L.; ら。チチカカ湖とウルル湖 (ボリビア) の水銀汚染レベルと種分化インベントリ: 現在の状態と将来の傾向。環境。汚染。2017, 231, 262–270. [【相互参照】](#)
83. オプリスト, D. カーク, JL. チャン, L.; サンダーランド, EM; ジスクラー, M. ネブラスカ州セリン人間と自然の摂動に対応する地球環境の水銀プロセスのレビュー: 排出, 気候, および土地利用の変化。アンビオ2018, 47, 116–140. [【相互参照】](#)
[\[PubMed\]](#)
84. リー, P. Feng, X. Qiu, G.; シャン, L. Wang, S. 貴州省の Wuchuan 水銀採掘地域からの集団における水銀暴露, 中国。科学。トータルエンviron . 2008, 395, 72–79. [【相互参照】](#) [\[PubMed\]](#)
85. ジア, Q. 朱, X. ハオ, Y.; ヤン, Z. ワン, Q. フー, H. Yu, H. の典型的な採掘地域の土壌, 野菜, および人間の毛髪中の水銀中国: ヒトへの曝露への影響。 J .エンviron .科学。2017, 8, 73–82. [【相互参照】](#) [\[PubMed\]](#)
86. アラバマ州ランゲランド。ハーディン, RD; Neitzel, RL ペルーのマドレ・デ・ディオス川流域にある職人的および小規模な金採掘コミュニティの近くの人間の髪のと養殖魚の水銀レベル。内外 J .エンviron .解像度公衆衛生2017, 14, 302. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
87. WHO. 無機水銀 (環境衛生基準), 化学安全に関する国際プログラム, Vol. 118. WHO. 1991 年。
オンラインで入手可能: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/40626> (2021 年 11 月 4 日にアクセス)。