

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5RF-1952 途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型
金精錬プロセスの適用と水銀排出の削減ポテンシャルの評価
(JPMEERF20195R52)

平成31年度～令和2年度

Application of Eco-friendly Gold Refining Process for the Developing Countries to Reduce
the Mercury Consumption and Evaluation of Reduction Potential of the Mercury Emission

〈研究代表機関〉

国立大学法人 千葉大学

令和3年7月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型金精錬プロセスの適用と 水銀排出の削減ポテンシャルの評価 (国立大学法人 千葉大学)	11
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
7.	
III. 研究成果の発表状況の詳細	30
IV. 英文Abstract	31

I. 成果の概要

課題名 5RF-1952 途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型金精錬プロセスの適用と水銀排出の削減ポテンシャルの評価

課題代表者名 吉村彰大 (国立大学法人 千葉大学 工学研究院 助教)

重点課題 主: 【重点課題⑭】化学物質等の包括的なリスク評価・管理の推進に係る研究

副: 【重点課題③】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (5-12) 気候変動の複合的影響を考慮した水俣条約の有効性評価のための全球規模での水銀動態の長期予測に関する研究

研究実施期間 平成31年度～令和2年度
但し、新型コロナウイルスの影響のため、令和3年5月まで延長

研究経費 (千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成 31 年度	6,000	6,000
令和 2 年度	5,855	5403.8
令和 3 年度 (～5月)	0	451.2
合計額	11,855	11,855

本研究のキーワード 小規模金採掘、水銀に関する水俣条約、アマルガム法、有機王水、物質フロー分析

研究体制

(サブテーマ1)

有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発 (千葉大学)

(サブテーマ2)

水銀排出の削減ポテンシャルの評価 (千葉大学)

研究協力機関

研究協力機関はない。

1. はじめに（研究背景等）

水銀による地球規模での環境汚染防止のため、2013年10月に「水銀に関する水俣条約」（以下「水俣条約」）が採択され、2017年8月に発効した。この条約は、世界での水銀使用や取引を抑制することを目的としているが、特に発展途上国で主に操業される小規模金採掘・製錬（Artisanal and small-scale gold mining, ASGM）については1章を割いて、重要な削減対象と位置づけている（環境省：“水銀に関する水俣条約”（2017））。

ASGMにおいては、鉱石と水銀を混合しアマルガムとして金を抽出するアマルガム法が、容易で安価な金の抽出法として利用され、人為的な水銀放出の1/3程度を占めると推測されている（UNEP：“Global Mercury Assessment 2013”（2013））。世界全体では1,000-1,500万人が従事するとされ（J. Seccatore et.al：“An estimation of the artisanal small-scale production of gold in the world”（2014））、健康被害や環境問題の要因となっているが、途上国にとっては重要な収入源であることなど、様々な社会的要因により水銀使用を削減できていないのが現状である（N. Steckling et.al：“Global Burden of Disease of Mercury Used in Artisanal Small-Scale Gold Mining”（2017）、S. J. Spiegel et.al：“Phasing Out Mercury? Ecological Economics and Indonesia’s Small-Scale Gold Mining Sector”（2018））。本問題に関しては、British Columbia大学のMarcello M. Veiga教授らが長年にわたり詳細な検討を行っており、短期的には対処療法的な水銀の使用量と排出の抑制、長期的にはアマルガム法を代替する金の精錬プロセスの開発が重要と指摘している（S. J. Spiegel et.al（再掲））。

上記のような状況に対し、本研究ではハロゲン化銅含有有機溶媒（「有機王水」と呼称）を用いた新精錬手法を提案する。本研究の代表者らは近年、この有機王水を用いることで金やパラジウムを溶解でき、また酸性水溶液を添加することで容易に回収できることを見出した（Akihiro Yoshimura, et.al：“A Novel Process for the Production of Gold Micrometer-Sized Particles from Secondary Sources”（2016））。また、この手法を使用済み電気・電子機器などの二次資源からの貴金属リサイクルへ適用し、低環境負荷・低コストのリサイクル手法の開発に大きな可能性を拓いた。本研究では、この「有機王水」によるリサイクル手法を鉱石に応用し、一次資源からの貴金属精錬プロセスに適用する。このプロセスは安全かつ環境負荷が小さく、また経済的であることから、新規プロセスの確立により、特に発展途上国で多く用いられるアマルガム法による精錬プロセスの代替が期待できる。

この代替による世界全体での水銀使用の抑制を通じて、大気・水圏への散逸のような環境問題の他、精錬作業従事者の健康被害のような人権問題、コスト増大などの経済面での問題も含め、広範な問題を解決も期待できる。

2. 研究開発目的

本研究の開発目的は、大きく以下の2点となる。

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

研究背景で既述した通り、代表者らは「有機王水」による使用済み機器からの貴金属の回収に成功している。使用済み機器には、有価金属とされる金の他に、ベースメタルである銅や鉄、また基板材料として樹脂が含有され、これらも有機王水と反応するため貴金属の回収を阻害する。しかし、炭化や酸化などの適切な事前処理で共存物と有機王水の反応を抑制し、効率よく金を回収可能であることを確認している。

使用済み機器と鉱石を比較すると、鉱石中にも鉱物の形でベースメタルが含有されている他、酸化物や硫化物が共存するなど共通点が多い。本研究ではこの共通点に着目した応用により、水銀フリーな精錬プロセスの開発を目指す。また、ASGMは基本的に途上国で操業される手法であることから、コスト面や法的規制も先進国と異なることが多い。本研究ではこの点も考慮して、これらの地域でも運用可能な条件で操業できる技術の開発を目的とした。

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

(1)で開発した新精錬法の適用により、従来利用されているアマルガム法の代替が期待できる。ただし、その代替ポテンシャルがどの程度あるかを把握するためには、ASGMにおける水銀の消費実態の把握が重要となる。しかし、ASGMは不正に操業されている事例が多いことに加え、金生産に関する一般公開データは、企業などが大規模に操業する大規模製錬 (Large scale gold mining, LSGM, または Conventional gold mining, CGM) に由来する生産量とASGMの双方を含めており、ASGMにおける金生産の実態は明らかではない。さらに、アマルガム法で鉱石を処理する場合も、全鉱石処理と精鉱処理に分類でき、それぞれ水銀の消費量が大きく異なること (Ban Toxics!: “The Price of Gold: Mercury Use and Current Issues Surrounding Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Philippines” (2011))、また全鉱石処理・精鉱処理の割合は国ごとに異なり、地域性もあることから、水銀の消費実態を検討する場合、この点の考慮も必要となる。加えて、UNEPの公表している資料 (Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018) でも、国別の水銀消費量には大幅な誤差が含まれた表現となっており、実態の把握は容易ではない。

そこで本研究では、一般公開データと商用データベースの併用を通じて、ASGM由来の金生産量を推計し、水銀の消費に関する統計データと比較することで各国の水銀消費実態を明らかにすること、また (1) で開発した新精錬法の導入による削減ポテンシャルを定量的に評価することを目的とした。

3. 研究目標

全体目標	現在、主に水銀を用いて金を精錬している小規模金採掘精錬 (Artisanal Small-scale Gold Mining, ASGM) に対して、「有機王水」による金のリサイクル手法を適用することで、安全かつ環境負荷が小さく、また経済的な新規プロセスを開発する。並行して物質フロー分析を行い、水銀消費の削減ポテンシャルを推計する。
サブテーマ 1	途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型金精錬プロセスの適用と水銀排出の削減ポテンシャルの評価
サブテーマリーダー /所属機関	吉村 彰大/千葉大学
目標	新プロセスの適用では、有機王水を用いた鉱石からの金の溶出、および溶出した金の回収実験を通じて、環境調和型プロセスの実用化を進め、水銀フリーなプロセスを構築する。このプロセスを通じて水銀の環境中への放出や労働者の曝露を抑制することで、環境負荷や健康被害の大幅な削減が期待できる。新プロセスの普及には経済的な合理性が重要となることから、従来のプロセスと比較してコスト、環境負荷が下回るような手法の確立を目標とする。 また、ASGMにおける水銀消費に関する統計は誤差が大きいことが知られており、上記プロセスの普及でどの程度水銀の放出や曝露を削減できるかは明らかではない。本研究では、物質フロー分析の手法を利用することでASGMでの水銀消費量や放出量を詳細に推計し、新プロセスによる消費削減のポテンシャルを評価する。従来の水銀消費量の推計には、上下75%程度の誤差があるとされていることから、これよりも誤差の幅を小さくすることを目標とする。

4. 研究開発内容

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

先述の通り、途上国におけるASGMでの水銀消費を削減するためには、水銀を用いない新しい精錬法の提供が必要となる。そこで本研究では、特に途上国での操業を想定した水銀フリーな精錬手法として、代表者がこれまでに開発を進めてきた「有機王水」を応用する手法を開発した。

具体的には、ハロゲン化銅(臭化銅、または塩化銅)を含有するジメチルスルホキシド(DMSO)を有機王水として利用し、図1に示すようなルートで鉱石からの金の溶出、および溶出後の溶媒に酸性水溶液を添加する金の回収プロセスを構築した。溶出に際しては、これまでに使用済み機器に対して効果が確認されてきた「高温・短時間処理」に加え、「低温・長時間処理」という条件を検討した。また、溶出した金の回収には従来硫酸や塩酸などを用いてきたが、麻薬の製造地域ではこれらに対する法的な規制が強いこともある。その点を考慮し、酢酸やレモン汁など、規制の緩やかな酸を利用した回収もあわせて検討した。以上の検討を通じて、途上国でも運用可能な操業も考慮した新精錬手法の確立を目指した。

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

本研究では、ASGMにおける金生産・水銀消費実態の把握、および水銀消費原単位の地域性の把握という2段階の検討を通じて、世界全体における水銀排出の削減ポテンシャルを評価した。

図2に示すような手法を用いて金の生産実態の検討を行い、さらにその結果を元に水銀や金の密輸ルートの可視化、および水銀の削減ポテンシャルの評価を行った。ASGM由来の金生産量については、一般公開データ(ASGM + LSGM)と商用データベース(LSGMのみ)の差分から推計した。このASGM由来の金生産量データ、および水銀の消費量から、単位量あたりの金生産に必要な水銀の消費量(消費原単位, U_{Hg})を推計した。得られた原単位は、その国における全鉱石処理/精鉱処理の割合と比較することで結果の信頼性を検討し、密輸ルートの可視化の可能性を検討した。例えば、極端に U_{Hg} が大きい国であれば水銀の消費量が過剰に、あるいは金の生産量が過小に推計されていることとなり、流入した水銀や金が密輸によって流出していることが示唆される。逆に、小さい国であれば流入が示唆される。これらの可能性について、文献調査を通じて検討を行い、アフリカやラテンアメリカ、アジアについて地域性を比較した。

上記の検討で得られた結果から、特に精鉱処理の普及の進むアフリカの結果を元に精鉱処理の U_{Hg} を設定し、全鉱石処理を実施する地域における精鉱処理の導入(精鉱処理の普及シナリオ)、および有機王水の導入(有機王水の普及シナリオ)による水銀排出の削減ポテンシャルを、地域別に検討した。

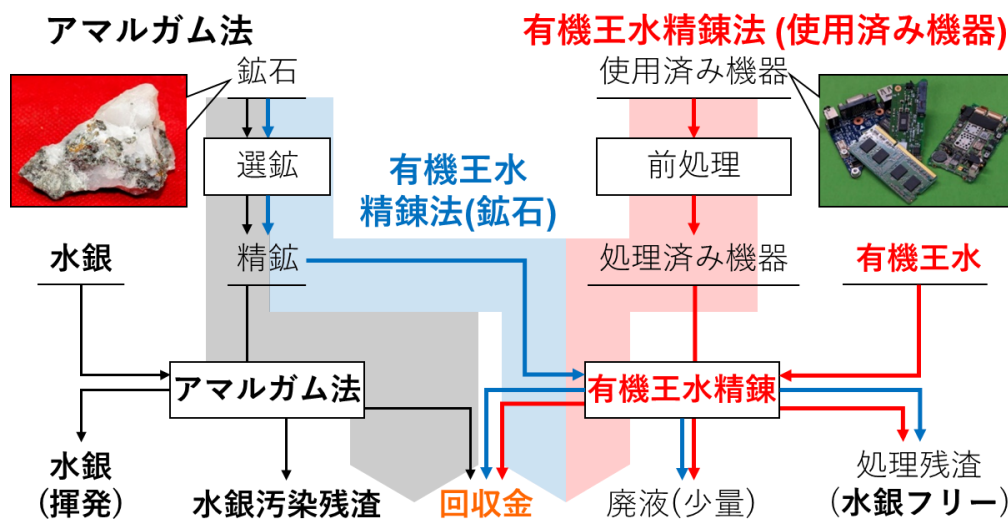


図1: 本研究における有機王水を応用した精鉱からの金精錬プロセス

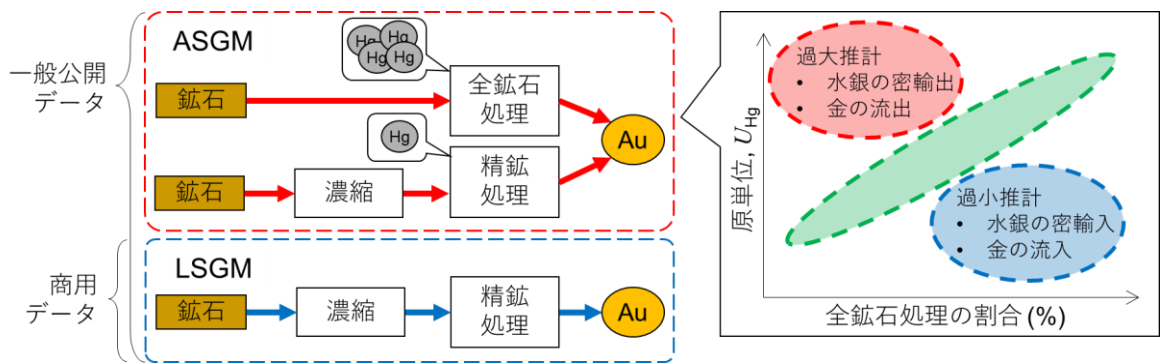


図2：本研究における水銀消費実態の検討手法

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本研究を通じて、以下のような成果が得られた。

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

大きく分けて、1年目に実施した模擬鉱石（金線と川砂を混合）への適用、および2年目に実施した実際の精鉱への適用に分けられる。なお、臭化銅を用いる有機王水はBr系、塩化銅を用いる場合はCl系と称する。

Cl系有機王水を模擬鉱石に対して適用の結果、鉱石の中に広く存在する酸化物は金線の溶出、および回収に大きな影響を与えないという結果が得られた。同様の結果は、Br系有機王水でも確認された。また、溶解速度はBr系がCl系を上回る結果となった。

Br系有機王水を実際の精鉱へ適用した場合、80-100℃の高温で処理では高速で溶出が進行した一方、図2-10に示す回収物には精鉱中に共存する黄銅鉱などに起因すると考えられる不純物が含有された。ただし、回収率はほぼ100%となり、系外への金の逸失はないことが示唆された。今回処理した精鉱は、従来のアマルガム法では処理が難しいとされていたことから、有機王水による処理が効果的であることが示された。

また、途上国での操業を想定して様々な条件で実験を行った結果、図2-11に示すように、低温の処理でも長時間適用することで、鉱石中に含有される金を全量溶出できることが確認された。また、模擬鉱石と同様酸性水溶液の添加による析出処理で全量回収できることも確認した。析出に際しても、レモン汁など制約の小さな溶媒を利用で100%の回収率となったことから、「有機王水」を用い、かつ途上国でも操業が可能な水銀フリーの金精錬法を提供可能であることが確認された。

なお、共同研究先ではCl系有機王水を用い、同様に低温・長時間の処理で溶出できることが確認されている。

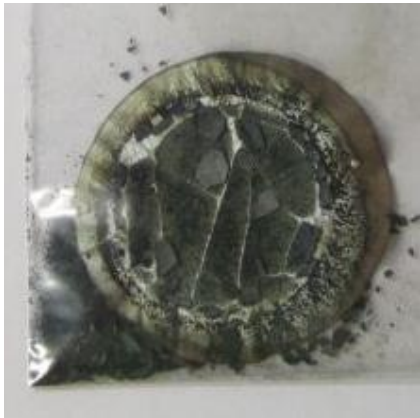


図2-10：80℃処理での回収物

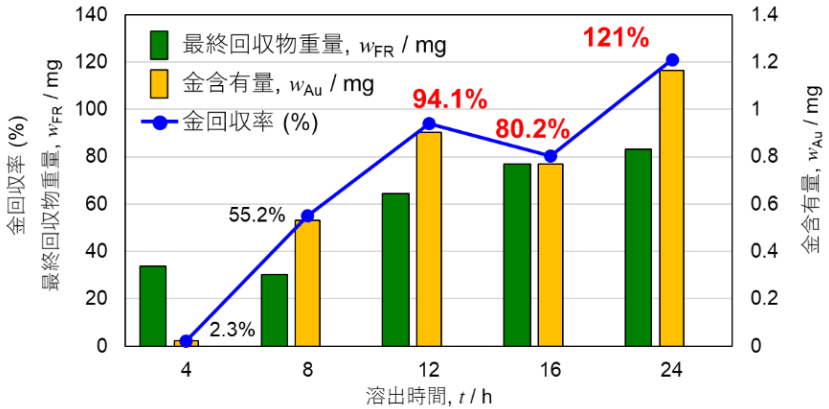


図2-11：低温で処理した際の金回収率変化

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

水銀消費原単位と全鉱石の処理割合を比較した結果、全鉱石処理の割合が小さいほど原単位も小さい、という傾向は確認された。ただし、この傾向から極端に外れる事例も多く確認された。アフリカでは、大半の国で精鉱のみを処理しているにも関わらず、極端に水銀消費原単位が大きい国が多く見られた。一方ラテンアメリカやアジアの場合、全鉱石を処理する国が多く、水銀消費原単位のばらつきも多く見られた。また、地域レベルで原単位を比較すると、極端に大きな国と小さな国同士が隣接するという傾向が確認された。そのような国々、および包摂する地域について文献調査を行った結果、原単位の極端に大きい国では密輸による水銀や金の流出が、極端に小さな国では逆に密輸による流入が指摘された。

図2-16に示す南米のギアナ地方を例にとると、この地域で唯一水銀を自由に輸入できるスリナムに流入した水銀は、規制の厳しい隣国のガイアナ、仏領ギアナへ流出しているとされる。この流出は統計上に現れないことから、スリナムでは水銀の消費量が過大に、逆にガイアナと仏領ギアナでは過小に推計されており、これが水銀消費原単位の大きな差として可視化されたことになる。この傾向は、経済的・政治的な結びつきの大きい西アフリカでも確認されたことから、本研究で用いた手法を利用することで、比較的容易に密輸ルートを把握できる可能性が示された。

また、水銀排出削減ポテンシャルでは、比較的ハードルが低いと考えられる精鉱処理の普及と、有機王水の導入による検討を実施した。精鉱処理の普及シナリオでは、現在全鉱石処理を行っている国が全量精鉱処理に移行すると仮定した。有機王水の普及シナリオでは、それに加えて現在精鉱処理のみを行っている国が有機王水を導入すると仮定した。推計に際しては、特に精鉱処理の普及が既に進んでいるアフリカの U_{Hg} (1.96)を精鉱処理における基準として適用した。以上の結果を図2-17に示す。現状の1,800 t程度の消費量に対し、精鉱処理の普及では660 t程度の、有機王水の導入では1,300 t以上の削減ポテンシャルがあると推計された。

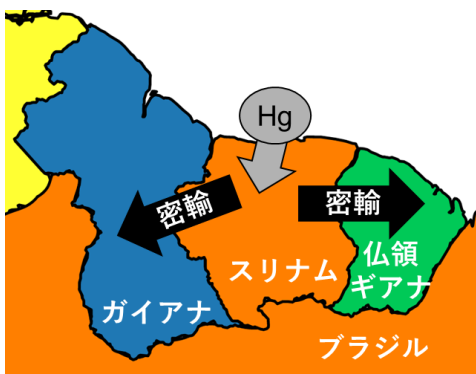


図2-16:
ギアナ地方での水銀の密輸ルートと
ASGMにおける水銀消費原単位

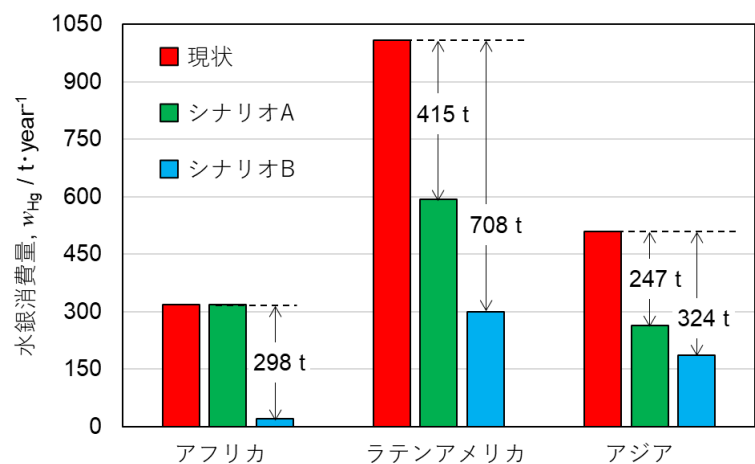


図2-17: 水銀排出の削減ポテンシャルの比較

5－2．環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

本研究の成果は、以下の2点について活用が見込まれる。

(1) 新精錬手法の提供による途上国での環境負荷・健康被害軽減

本研究最大の特長は、途上国における重要な現金収入の手段を確保しつつ、環境汚染・健康被害の抑制を達成できる点にある。具体的には、有機王水による金精錬法の導入により、従来ASGMサイトで利用されていたアマルガム法を代替することで、水銀の放出や利用を防ぎつつ金の採掘・精錬は操業できる。金の生産や水銀の利用に際しては、いわゆる反社会勢力の関与が指摘されており、特に水銀の利用を抑制することはこのような勢力への資金の流れを断つことへも寄与できる。

総じて、この技術提供により途上国における鉱山労働者の生活を維持しつつ、環境汚染・健康被害の抑制に加え、反社会勢力の弱体化に寄与することができ、資源消費の大きい先進国として、資源生産を担う途上国に対する責任を果たすことが可能となる。

(2) 水銀フローの明確化による水俣条約の実効性向上

水俣条約では、ASGMを含めて水銀の輸出入管理の厳格化が求められている。しかし、実際には水銀の使用は減少せず、むしろ密輸が増えたという事例も報告されている(Gonzalez: “Treaty Does Not Stop Illicit Mercury Trade in South America” Yale Global Online (2018))。この要因として、公的データのみでは密輸フローを追跡できないこと、また歯科用途などとして輸入された水銀がASGMに転用される事例などがある(Veiga, et.al, “Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining” (2006)) ことから、従来の統計情報を利用したフロー分析では実態把握が困難である。

一方、本研究で用いた手法では、ASGM由来の金生産量、その際の全鉱石処理割合、および統計上の水銀消費量を比較することで、金生産時の水銀消費原単位を推計した。その結果、国レベルでは極端に大きな国や小さい国が発生した一方、地域レベルでは比較的よく平準化される結果が多く見られた。このことから、例えば原単位の大きい国から小さい国への密輸が強く示唆され、実際に文献調査との比較によりこの点が確認されている。

このことから、本研究の手法で示された手法を広く適用することで、密輸の恐れが高い地域の効率的な抽出が可能となる。例えば、原単位が極端に大きい国と小さい国が隣接する国境では密輸が強く示唆されることから、この地点におけるモノやヒトの移動に関する調査を重点的に行うことで、効率よく実態の把握が可能になると考えられる。この把握を通じて、水俣条約の実効性を向上させることができ、発案国としての責任遂行に対して大きく寄与できる。

5－3．研究目標の達成状況

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

本研究では、初年度に金線と川砂を混合した模擬鉱石の処理を、次年度には実際の精鉱を利用した実施し、それぞれ以下の通りの結果が得られた。

(a) 模擬鉱石への適用

酸化物を主体とする鉱物と金が共存する鉱石を想定し、金線と川砂を混合した模擬鉱石を、塩化銅と塩化ナトリウムを含有する有機王水で処理した。金線単体を処理した既存研究(A. Yoshimura, et.al (再掲))での結果と比較すると、2,500 ppm相当までは溶出速度は極端に低下せず、500 ppm相当であっても溶解速度の極端な低下は見られなかった。

また、このような形で溶出させた金について、溶媒へ酸性水溶液を添加することで回収を

試みた結果、単体を処理した既存研究での結果同様、不純物を含まない高純度な金を、75-90%程度の高収率で回収できることが確認された。以上の結果から、溶出、析出のいずれにおいても、共存する酸化物が大きな影響を及ぼさないと考えられることから、有機王水による鉱石からの金の溶出、および溶出した金の析出処理が可能であることが強く示唆された。

(b) 実際の精鉱への適用

上記の結果を元に、金を48 ppm含有する精鉱に対して臭化銅と臭化カリウムを含有する有機王水を適用したところ、模擬鉱石に対して適用した時と同様含有されている金の溶出が確認された。また、溶媒に対して酸性水溶液を添加することで、溶出した金の回収が可能であることも併せて確認された。

溶出については、80-100 °Cの高温、および40 °Cの低温のいずれでも進行し、前者では4時間程度、後者では12-24時間程度で全量溶出することが確認されている。また、析出に用いる酸性水溶液についても、硫酸に加えて調達が容易で法的な制約の緩やかなレモン汁が利用可能であることが確認されている。これらの条件下であれば、設備やコスト、あるいは法的な制約の厳しい途上国でも操業可能であることから、ASGMが主に運用されている地域での有機王水を用いた手法の操業が可能であることが確認された。

また、共同研究先においても、塩化銅と塩化ナトリウムを含有する有機王水による溶出が確認されている。臭化銅と臭化カリウムを利用する場合と比較すると、溶解速度は遅いものの薬品のコストが低いことから、人件費などとあわせて考慮することで、ASGMサイトごとに最適な有機王水の選択肢を提供できる可能性が示唆された。

コストについて具体的に検討したところ、Br系、Cl系のいずれも、固形試薬の費用は実操業プロセスの費用と大きく変わらないものの、DMSOの消費量、価格ともに大きく、これを考慮すると大幅に上回る結果となった。しかし、本研究は実験室スケールであること、さらに既存研究においてDMSOの再利用可能性が指摘されていることから、プロセスの最適化によって実プロセスとして操業しうる可能性が示された。

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

ASGM由来の金生産量の推計、および各国の水銀消費量データから、水銀消費原単位を国別に推計した。原単位を地域別に比較すると、精鉱処理の割合が大きいアフリカでは小さくなった一方、全鉱石処理の割合が大きいラテンアメリカでは大きくなった。実際に、精鉱処理に対して全鉱石処理では水銀を多く必要とすることから、本研究の手法の妥当性が確認された。一方、ラテンアメリカ同様全鉱石処理の割合が大きいアジアでは、中国の影響が大きく出たため原単位がアフリカを下回った。これは、金生産量の大きい中国での水銀消費量が過小に見積もられていることに起因する。

上記の推計結果を国別、および地域レベルで検討し、水銀や金の密輸に関する文献と比較したところ、原単位が大きい国からは水銀や金が流出し、逆に原単位の小さな国へは流入しているという傾向が共通して確認された。従来の密輸ルートの把握には、現地調査が必須であることから、本研究の手法を用いることで重点的に調査すべき地域の検討や、密輸ルートの可視化が可能であることが示唆された。また、水銀消費量に関するデータ精度を地域別に比較したところ、アフリカやラテンアメリカでは高い一方、アジアでは低い可能性が示された。これは、アジアの水銀消費量、金生産量で多くを占める中国で、データの信頼性が低いことに起因すると考えられる。よって今後世界全体を検討する場合、中国について重点的に検討する必要性が示唆された。

得られた地位別の原単位を元に、現在全鉱石を処理している国への精鉱処理の導入、また有機王水による処理の導入によって、現状の消費量である1,836 tに対し、精鉱処理の導入によって661 t、有機王水の導入によって1,329 tの削減ポテンシャルがあるという推計結果が得られ、(1)で開発した手法による水銀排出の削減ポテンシャルが定量的に推計された。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

1件

<主な査読付き論文>

- 1) Akihiro Yoshimura, Koyo Suemasu, Marcello M. Veiga: Journal of Sustainable Metallurgy, vol. 7 (2021) (IF: 2.347)
 Estimation of mercury losses and gold production by artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in countries with major consumption of mercury
<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00394-8>

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	1件
その他誌上発表（査読なし）	0件
口頭発表（学会等）	3件
「国民との科学・技術対話」の実施	0件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	0件

7. 国際共同研究等の状況

1. においても研究を引用した、ブリティッシュコロンビア大学（カナダ）のMarcello M. Veiga教授、および同教授の主宰する研究室と共同研究を実施した。当該研究室は、特に途上国におけるASGMに関する研究を長年実施しており、先方では鉱石に対する新しい精錬手法を模索していた。

そこで、本研究で検討を進めている有機王水を用いた精錬法を共有し、先方から精鉱の提供を受ける形で共同研究を開始することとなった。詳細はが、適切な役割分担や積極的な情報共有を通じて、効率的に新製錬法の開発を行った。

加えて、ASGMにおける水銀の消費実態の把握に際しては、当研究室がこれまで実施してきた物質フロー分析を応用した手法を提案し、共同研究先から途上国特有の事情などの助言などを受けつつ研究を進め、一定の成果を得た。こちらも「II. 成果の詳細」にて詳述する。

得られた結果については、論文として外部に発表したほか、研究代表者が国際学会において主宰したオーガナイズドセッションにおいても発表を行った。その際、Marcello M. Veiga教授に対してキーノートスピーチを依頼し、またセッション後の質疑応答を通じて、特にASGMに関わる研究者同士のネットワークづくりにも貢献した。

今後は、パイロットプラントでの有機王水を用いた新製錬法に関する実証実験に対し、技術的な助言を行っていく予定である。なお、この実証実験は同研究室の卒業生が経営するベンチャー企業が実施を予定している。

8. 研究者略歴

研究代表者

吉村 彰大

東京大学 工学系研究科 博士課程 (2013/4-2016/3)

↓

東京大学 生産技術研究所 (2016/4 - 2017/3)

岡部研究室 特任研究員

↓

千葉大学 大学院 工学研究科 (- 2017/3)

千葉大学 大学院 工学研究院 (2017/3 - 2019/3)

松野研究室 特任助教

↓

千葉大学 大学院 工学研究院 (2019/4 -)

松野研究室 助教

研究分担者

記載事項なし

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１ 途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型金精錬プロセスの適用と

水銀排出の削減ポテンシャルの評価

国立大学法人千葉大学 工学研究院

吉村 彰大

【要旨】

本研究は、研究代表者らがこれまでに使用済みの電気・電子機器からの金リサイクルに用いてきた「有機王水」を金鉱石からの精錬に応用することで、環境負荷が小さく、またコスト的にも途上国で操業可能な精錬手法を開発する「有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発」と、上記の成果で得られた新手法の適用により、アマルガム法で現在消費されている水銀の排出量をどれだけ削減できるかについて、定量的に評価する「水銀排出の削減ポテンシャルの評価」に大きく分けられる。

新精錬法の開発では、有機王水を利用した金鉱石からの金(Au)の抽出・回収プロセスの構築を試みた。具体的には、ハロゲン化銅(CuX_2 , $\text{X} = \text{Br}, \text{Cl}$)およびハロゲン化物(KBr , NaCl)を含有するジメチルスルホキシド(DMSO)を用い、金鉱石に対して溶出処理を施した。また、金を溶出させた溶媒に対して析出処理を施すことで回収を試みた。1年目は、川砂に金線を投入した模擬鉱石に対して処理を行い、模擬鉱石中の金濃度や共存する酸化物などが金の溶解・回収に与える影響を評価した。2年目は、共同研究先より提供された実際の鉱石に対して処理を行い、処理条件による溶出率や回収率の変化を評価した。

上記で開発された新精錬法によってアマルガム法を代替することで、ASGMにおける水銀排出の抑制が期待される。しかし、ASGMで利用される水銀や生産される金は、密輸やASGMに限定した統計情報の欠落などにより実態が明らかでない事が多いため、どの程度削減できるかについての定量的な評価は難しい。以上を踏まえ、水銀排出の削減ポテンシャルの評価では、商用データベースと一般に公開されている統計情報を元に、ASGMでの金生産量の推計を実施し、水銀消費量と比較することで、ASGMにおける水銀消費に関する地域性や、近隣国との関係の可視化を試みた。また、アマルガム法での精錬処理の導入や、有機王水を用いた新精錬法を適用した場合の水銀排出の削減ポテンシャルを推計した。

有機王水を用いた模擬鉱石の処理においては、塩素系・臭素系有機王水のいずれにおいても、川砂の共存は溶出に影響を及ぼさず、また500 ppm程度までであれば溶解速度への影響は小さいという結果が得られた。加えて、適切な回収処理によって、溶解した金を高効率に回収できることも確認された。一方、有機王水により実際の鉱石を処理した場合、臭素系・塩素系のいずれにおいても、適切な条件下で鉱石に含有される金が全量溶出するという結果が得られた。特に、比較的低い温度であっても長時間溶出処理を行うことで、全量を溶出可能であることが確認されており、施設やエネルギー消費の観点から途上国での運用にも適した操業条件であると考えられる。また、臭素系有機王水を用いた実験では、残渣を除去した溶媒へ酸性水溶液を添加することで、溶解した金を全量回収可能であることが確認されている。この酸性水溶液には硫酸が利用可能な他、途上国でも入手が容易なレモン汁も利用できるということが確認された。ただし、模擬鉱石の段階では高純度の金が回収できた手法であっても、鉱石として共存する硫化物に由来すると考えられる不純物が回収物に含有されたことから、回収手法については検討の余地があると考えられる。

ASGMにおける水銀の消費実態の検討結果では、精錬からの精錬が広く行われているアフリカでは、金生産量あたりの水銀消費原単位が比較的少なくなった一方、全鉱石からの精錬が多くを占めるアジアや南米では、原単位が大きくなる傾向が確認された。また、単一の国のみを検討した場合は大きな外れ値を示す国が見られた一方、地域レベルでは比較的まとまった値を示した。加えて、極端に大きい原単位を取る国と、小さい値を取る国が隣接している事例が多く見られた。これらの国について、既存文献などと比較した結果、水銀、または金の密輸が行われていることが確認されたことから、本研究の手法は密輸ルートの可視化が可能であることが示唆された。

水銀排出の削減ポテンシャルは、精錬処理の導入した場合はラテンアメリカやアジアで、有機王水の導入した場合はアフリカで、それぞれ大幅な削減が期待でき、世界全体では現状の1,800 t程度に対し、それぞれ660 t程度、1,300 t程度の削減が見込めるという結果が得られた。

本研究の全体を通じて、「有機王水」による従来のアマルガム法の代替は、実操業に必要な基礎的な検討を実施できた。また、上記の新精錬法の適用による水銀排出の削減ポテンシャルについて、定量的な評価を実施できた。

1. 研究開発目的

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

金は、その価格の高さから積極的に採掘が行われている。特に途上国では、重要な現金収入であるため積極的に操業されている。このような地域では大規模な設備を用いずに採掘することが多いことから、小規模金採掘・精錬（Artisanal and small-scale gold mining：以下ASGM）と呼ばれる形態で操業されることが多い¹⁾。多くの採掘サイトでは、アマルガム法が金の抽出法として用いられる。そのプロセスフローを図2-1に示す。このプロセスでは、水銀が金と合金（アマルガム）を形成することを利用する。鉱石と水銀を混合すると、含有される金が水銀中へ抽出され、アマルガムを形成する。このアマルガムを鉱石から分離した後、焼却することで沸点の低い水銀は蒸発・除去でき、後に残された金を回収する¹⁾。

このプロセスの内、特にアマルガムを焼却する際、蒸発した水銀が大気中に放出される。レトルトと呼ばれる設備で回収されることもあるが、多くの場合は特別な回収処理も行われず、全量が放出される。また、アマルガム化に寄与しなかった水銀が残渣側に残留し、尾鉱を汚染する事例も多く、大地・水系への汚染も報告されている²⁾。加えて、実際にはアマルガム法で回収できる金は30%程度に留まる場合もあり、そのプロセスから排出された尾鉱に対し、シアン化法の適用による金抽出が実施されることもある³⁾。最終的には、シアン化水銀に汚染された尾鉱が排出されることになり、極めて環境負荷の大きな手法となる他、従事者やその家族に対する健康被害も指摘されている⁴⁾。

上記を鑑み、2013年には「水銀に関する水俣条約」が締結され、2021年1月現在、128カ国が批准している⁵⁾。この条約では、国家間の水銀の移動について厳格な管理が要求されるとともに、特にASGMについては1章を割いて将来的な廃絶、あるいは消費量の削減の必要性について言及されている。

ただし、途上国における金採掘は前述した通り貴重な現金収入であること、また現状ではアマルガム法を代替しうる手法が提供されていないことから、採掘そのものの安易な禁止は実質不可能である。加えて、使用する水銀や生産した金の密輸も指摘されており⁶⁾、反社会勢力にとっても重要な収入源となっている。そのため、本問題の解決には水銀を用いない、アマルガム法に代わる新たな手法の提案が重要となる。なお、上記の密輸などについては、II-2にて詳述する。

以上の観点から、本研究ではアマルガム法を代替しうる手法の開発を目的とした。具体的には、代表者らがこれまでに開発してきた「有機王水」による貴金属リサイクルの手法を、金鉱石からの精錬に応用することで、水銀を用いない精錬法を途上国のASGM従事者に提供することを目標とする。

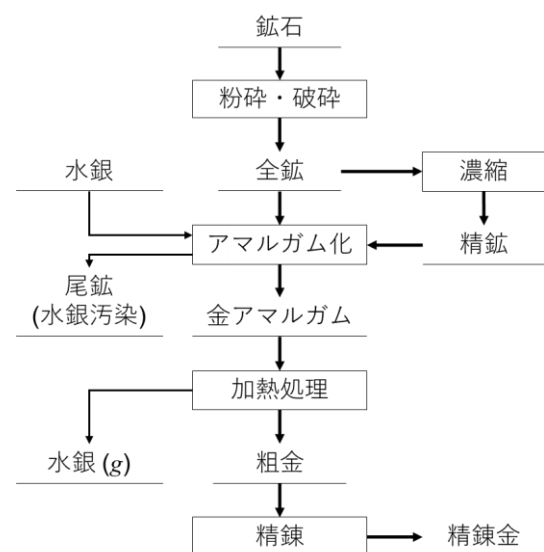


図2-1: アマルガム法のプロセスフロー

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

上記で開発した水銀フリーの金精錬法を用いることで、特に途上国での水銀消費の抑制が期待される。一方で、これらの国々における水銀の消費実態は必ずしも明らかではない。例えばUNEPの公開している資料⁷⁾では、ASGMを操業している国の水銀消費量をリスト化しているが、データ精度は4段階に分類されている。最も精度の高いとされるグループ（ボリビアやスリナム）ではエラー幅が±30%とされている一方、その次のグループでは±50%、さらにその次のグループでは±75%となっており、最も精度の低いグループでは±100%とされている。この内、最も精度が低いとされるグループは消費量が極端に少ないとされるため影響は小さいが、±75%のグループにはスーダンや中国など、金生産量・水銀消費量の大きな国が含まれていることから、実態把握への影響が大きい。

この要因として、ASGMで利用される水銀消費量、およびASGMに限定した金生産量に関する情報が不確実であることが挙げられる。水銀消費量については、密輸などによって統計情報に現れないルートがあ

ると考えられ、水俣条約の発効後、かえって密輸が増えた事例⁸⁾が指摘されている。加えて、金生産量については、一般に公開されている情報はASGM、および企業などが実施する大規模精錬 (Large Scale Gold Mining: LSGM, またはConventional Gold Mining: CGM) を含めた総生産量であることが多く、区別をつけた情報はスリナムやジンバブエ^{9, 10)}などに限られており、ASGMに由来する金生産量の把握も困難である。

上記のような理由から、ASGMにおける水銀の消費実態は極めて不透明であり、仮に(1)で示した新精錬法を途上国において操業したとしても、どの程度のインパクトを与えうかの評価が困難である。そのため本研究では、既存の一般公開情報のほか、商用データベースなども利用した新たな手法を開発し、国別・地域別などの様々なレベルで水銀消費の実態を把握することを目的とした。また、有機王水の導入による水銀排出の削減ポテンシャルを定量的に評価することを目的とした。

2. 研究目標

新プロセスの適用では、有機王水を用いた鉱石からの金の溶出、および溶出した金の回収実験を通じて、環境調和型プロセスの実用化を進め、水銀フリーなプロセスを構築する。このプロセスを通じて水銀の環境中への放出や労働者の曝露を抑制することで、環境負荷や健康被害の大幅な削減が期待できる。新プロセスの普及には経済的な合理性が重要となることから、従来のプロセスと比較してコスト、環境負荷が下回るような手法の確立を目標とする。

また、ASGMにおける水銀消費に関する統計は誤差が大きいことが知られており、上記プロセスの普及でどの程度水銀の放出や曝露を削減できるかは明らかではない。本研究では、物質フロー分析の手法を利用することでASGMでの水銀消費量や放出量を詳細に推計し、新プロセスによる消費削減のポテンシャルを評価する。従来の水銀消費量の推計には、上下75%程度の誤差があるとされていることから、これよりも誤差の幅を小さくすることを目標とする。

3. 研究開発内容

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

本研究ではアマルガム法に代わる手法として、有機王水を利用する新しい精錬法を開発することを目標とした。

本研究における有機王水には、ハロゲン化銅 (CuX_2 , $\text{X} = \text{Br}, \text{Cl}$) を含有するジメチルスルホキシド (DMSO) を利用した。本処理法は、この有機王水中に鉱石に投入することで含有される金を溶出させる「溶出処理」と、溶出した金を含有する溶媒に酸性水溶液を添加することで、再度金として回収する「回収処理」からなる。これまでに、金線単体については高効率の溶出・回収が確認されている¹¹⁾。また、使用する溶媒の種類は異なるものの、適切な前処理により、使用済みの電機・電子機器からの金の高効率な溶出、および選択的な回収が確認されている¹²⁾。この前処理は、共存する樹脂や金属元素を、炭化や酸化によって有機王水に対して不活性とさせるものであり、本研究で対象とする金鉱石と比較すると、酸化物や硫化物の共存という点で近似している。

ただし、特にDMSOを用いたケースでは、あくまで純粋な金線への適用に限って確認されており、共存する鉱物に起因する影響は検討されていない。そこで本研究では、以下の2段階の検討を通じて、有機王水による精錬法について、鉱石への適用可能性を検討した。なお、有機王水には臭化銅 (CuBr_2) および臭化カリウム (KBr) を含有するものと、塩化銅 (CuCl_2) および塩化ナトリウム (NaCl) を含有するものがあるが、本報告書では前者をBr系、後者をCl系と呼称する。

(a) 模擬鉱石への適用

川砂と金線を混合したものを模擬鉱石として利用し、このサンプルに対して有機王水による処理を適用することで、酸化物の共存が金の溶出、および回収に与える影響を評価した。川砂には、主に二酸化ケイ素 (SiO_2) などを含有するものを使用した。製造元より提供された組成を表2-1に示す。

模擬鉱石中の金成分には、重量を100 mg程度に揃えた直径0.25 mmの金線を用いた。これに対し、川砂の重量を変化させることで鉱石としての金品位を変化させ、この差が溶出に与える影響を評価した。なお、模擬鉱石を処理する場合、CuCl₂を3 mol, NaClを2 mol含有するDMSOを有機王水として利用した。DMSO量については、川砂との固液比を考慮し10-80 mLと変化させた。

本研究における処理フローを図2-2に示す。鉱石を有機王水中に投入し、含有される金を溶出させる。濾過によって残渣と金を含有する有機王水に分離し、液相に酸性水溶液を添加することで含有される金を析出、回収する。なお、Cl系有機王水を用いた場合は塩酸(HCl)を添加することで、溶解した金の回収を実施した。

この実験を通じて、鉱石を処理する場合に共存する酸化物の影響を評価した。

(b) Br系有機王水による実際の精鉱からの金溶出および回収

(a)で得られた結果を元に、実際の精鉱への適用を検討した。本研究では、図2-3に示す共同研究先から提供された精鉱を利用した。この精鉱は、コロンビアのLa Mariaで産出されたものであり、金を48 ppm含有する¹⁴⁾。また、その他に含まれる鉱物などを表2-2に示す。(a)で用いた模擬鉱石との大きな差として、硫化物系の鉱物である黄鉄鉱(FeS₂)、および黄銅鉱(CuFeS₂)の共存が挙げられる。この内、黄銅鉱については有機王水で溶出することが既存研究において確認されており¹⁵⁾、本研究においても溶出による硫黄系化合物の影響が想定される。また、この鉱石の特徴として、従来のアマルガム法や青化法による処理が難しいことが指摘されている。

この鉱石に対して、有機王水による処理の可否の検討を通じて、代替手法としての適性を評価した。なお、精鉱を処理する場合、研究代表者は溶解速度に優れるCuBr₂および(KBrを含有する有機王水)を利用した。基本的には、模擬鉱石での処理結果を元に20 gの精鉱に対し、15 mmolのCuBr₂、および10 mmolのKBrを溶解させた100 mLのDMSOを適用した。また、処理温度は80-100 °Cとした。ただし、特に途上国での操業の場合、溶媒を高温で維持することがコスト的に難しいことが共同研究先より指摘されている。そこで本研究では、高温・短時間で処理するパターンと、低温・長時間で処理するパターンに分けて溶出処理を行った。溶媒を80-100 °Cに維持して4時間の処理を行った前者に対し、後者では溶媒を40 °Cに保ち、最長で24時間の処理を行った。さらに上記に加え、実プロセスにおける操業を考慮した場合、溶媒や溶質の量を少なくする必要がある。そこで、上記条件での回収率が得られた後、溶媒や溶質を減らした実験も併せて行った。

いずれの条件でも、溶出率はICP発光分光分析装置(ICP-AES)により分析した。ただし、処理後の鉱石残渣中の金については全条件で検出下限を下回ったことから、後述の回収率から溶出率を推計した。

回収実験では、模擬鉱石に対する処理時と同様、残渣を除去した溶媒に対する酸添加を利用した。添加する酸性水溶液には、主に硫酸(H₂SO₄)を用いた。ただし、実際に操業が想定される地域ではH₂SO₄が違法性を有する可能性がある、という指摘を共同研究先より受けたこと、また価格や入手性を考

表2-1: 川砂の組成

Compound	%
SiO ₂	73.75
CaO	2.03
MgO	0.89
K ₂ O	2.85

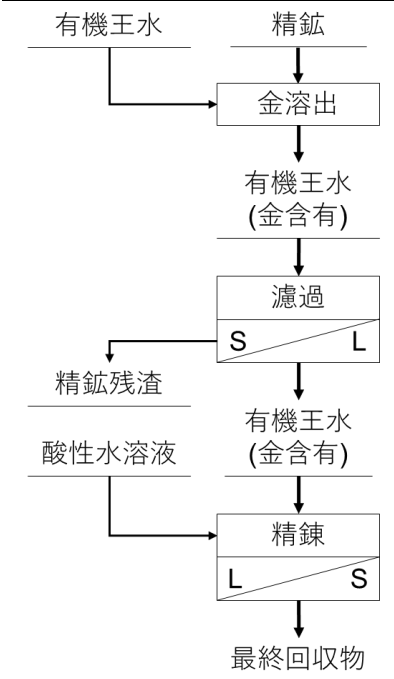


図2-2: 有機王水による処理フロー



図2-3: 本研究で利用した精鉱

表2-2: 精鉱の組成¹⁴⁾

Compound	%
SiO ₂ (石英)	77.90
FeS ₂ (黄鉄鉱)	11.10
MgO (マグネシア)	3.30
CuFeS ₂ (黄銅鉱)	7.70

慮し、酢酸(CH_3COOH)、およびレモン汁も利用した。析出処理後、溶媒から析出物を分離・回収し、ICP-AESによる成分分析によって含有される金の成分を測定し、鉱石中の含有量と比較することで回収率を評価した。

(c) Cl系有機王水による実際の精鉱からの金溶出

共同研究先であるUBCでは、取り扱いの容易なCl系有機王水を用いた精鉱(10 g)からの溶出実験を行っている。溶質には、酸化剤として CuCl_2 を、ハロゲンの供給源として NaCl を利用し、それぞれ10 mmolずつ、もしくは20 mmolずつ投入し、溶媒量については、DMSOを25 mL、または90 mLとして、固液比による影響を評価している。また、処理時間を8時間、または24時間として処理時間による影響も検討している。なおいずれの条件においても、途上国での操業を想定して処理温度は室温としている。溶出率については、原子吸光分析(AAS)を残渣に対して適用することで評価している。

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

本研究ではASGMにおける金生産量の把握と水銀消費原単位の推計、および国別・地域別での検討を通じた水銀消費の実態把握を目標とした。

ASGMにおけるプロセスイメージを図2-4に示す。処理に際しては、採掘した鉱石をそのまま利用する場合と、濃縮して精鉱とする場合があり¹⁾、水銀消費原単位を比較すると後者のほうがより小さくなる。処理場における手法によって一定の幅はあるが、原単位はそれぞれ前者で1-3、後方で10-25程度とされ¹⁶⁾、基本的には前者が後者を上回り、また精鉱を処理する割合と原単位の間に一定の相関があると想定される。逆に、想定される原単位に対して極端な外れ値を取る場合、水銀の消費量や金の生産量のデータが不正確であると考えられる。

また、ASGMにおける水銀消費原単位の把握には、ASGMに由来する金生産量が必要となる。しかし、一般に公開されている金生産量のデータは、スリナムなどの一部事例を除いて大半がASGMとLSGMが区別されていない。そのため、一般に公開されている情報をもとに、単位量あたりの金生産に必要な水銀消費原単位を推計したとしても、実態は反映されない。

以上を踏まえ、本研究では、一般公開情報と商用データを併用することで、ASGMにおける水銀消費実態を把握することを目指した。加えて、その結果から水銀や金の密輸ルートの可視化を試みたほか、アマルガム法の最適化や新製錬法の適用による水銀消費量の軽減ポテンシャルについても検討を行った。

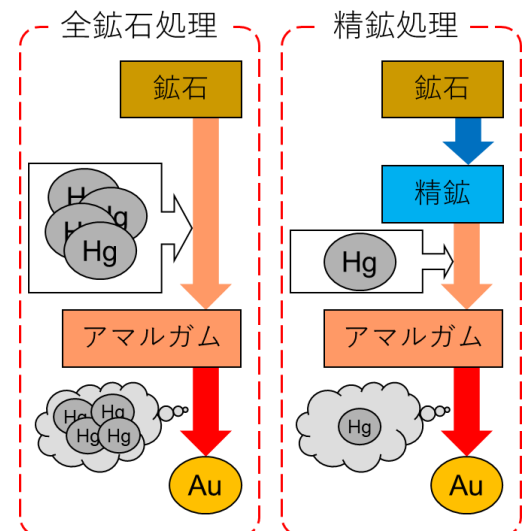


図2-4: ASGMでの水銀利用のイメージ

(a) 商用データベースを利用したASGMによる金生産量の抽出と水銀消費原単位の推計

既述したとおり、一般に公開されている金生産量は総生産量であり、ASGMに由来する金生産量とLSGMは区別されていないことが多い。仮に信頼できる水銀消費量のデータを入手できたとしても、それらを単純に利用しただけでは正確な原単位は得られない。

そこで本研究では、特にLSGMに関する統計をとっているWood Mackenzie (WM) 社より商用データベースを購入し、各国のASGM由来の金生産量を推計した。推計は下記の計算で行った。なお、ここで P_{Total} はGFMS¹⁷⁾またはUSGS¹⁸⁾より引用した金の総生産量を、 P_{LSGM} はWM社¹⁹⁾より引用したLSGMに由来する金生産量を指す。

$$P_{ASGM} = P_{Total} - P_{LSGM} \quad (2-1)$$

UNEPより引用した水銀消費量⁷⁾ (Hg_{ASGM})を上記で得られたASGM由来の金生産量で除することで、単位量の金を生産する際に消費される水銀原単位 (U_{Hg})を推計した。この結果と、精鉱・全鉱石処理の割合とあわせて検討することで、得られた U_{Hg} について地域別の傾向を評価した。

$$U_{Hg} = \frac{Hg_{ASGM}}{P_{ASGM}} \quad (2-2)$$

対象とした国は、水銀消費量に関するUNEPの公開している資料⁷⁾より選択した。当該資料中では、情報の信頼性は4段階に分類されているが、本研究では信頼性が上位2段階に分類された国、および3段階目と分類された内で水銀消費量の大きな国を選択した。上記の条件によって対象となった国とそれぞれの信頼性、およびそれらの国の水銀消費量を表2-3に示す。地域としては、アフリカ、中南米(ラテンアメリカ)、および東南アジアに分布した。また、対象とした国の水銀消費量は、最小値、中央値、最大値がそれぞれ954 t, 1,933 t, 2,912 tとなり、誤差の幅は50%となった。

表2-3: 本研究で対象とした国の情報の精度、および水銀消費量⁷⁾

地域	データ精度	国名	ASGMにおける水銀消費 (中央値), C_{Hg} / t・year ⁻¹	全鉱石処理の割合 (%)
アフリカ	4 (±30%)	ギニア	19.1	0
		セネガル	3.0	0
	3 (±50%)	ブルキナファソ	35.1	0
		ガーナ	70.0	0
		マリ	12.5	0
		モザンビーク	4.0	0
		ナイジェリア	20.0	0
		シエラレオネ	11.0	0
		ジンバブエ	25.0	80
	2 (±75%)	スーダン	83.0	0
		タンザニア	35.0	0
ラテン アメリカ	4 (±30%)	ボリビア	120.0	75
		ニカラグア	3.5	100
		ペルー	327.0	75
		スリナム	63.0	95
	3 (±50%)	ブラジル	105.0	50
		コロンビア	175.0	83.3
		エクアドル	85.0	80
		仏領ギアナ	7.5	0
		ガイアナ	15.0	0
		ホンジュラス	5.0	50
		ベネズエラ	102.0	75
アジア	3 (±50%)	インド	6.0	0
		インドネシア	420.0	83.3
		モンゴル	11.5	50
		フィリピン	70.0	75
	2 (±75%)	中国	100.0	75

(b) 水銀消費実態の把握および密輸ルートの把握

結果及び考察の項で詳述するが、(1)の手法で得られた U_{Hg} は極端な値を示す事例が複数確認された。既述した通り、ASGMで利用する水銀や生産された金が密輸されることで、実態を反映していない事例が多いためと考えられる。

先述の通り、精鉱を処理する場合の水銀消費原単位は1-3程度、全鉱石を処理する場合で10-25程度

とされる¹⁶⁾。この範囲に対して、極端に大きい値、あるいは小さな値を取る場合は、水銀の消費量、または金の生産量に関する統計情報の不確実さ、すなわちこれらの密輸が想定される。

U_{Hg} の外れ値には、図2-5に示すように過大なパターンと過小なパターンが考えられる。例えば過大に推計される要因には、水銀消費量、あるいは金生産量の過大評価が挙げられる。水銀消費量については、本研究で利用したデータを当該国での消費量として扱っていることから、密輸の有無によって他の国へ流出している可能性を検討できない。また、生産された金が密輸によって別の国での生産量と扱われた場合、その国での生産量が過小に推計される。 U_{Hg} が過小に評価される場合は、上記と逆の現象が想定される。

本研究では、検討対象とした国の内、 U_{Hg} が明らかに過大、または過小に推計された国を抽出し、既存文献との比較を通じてその理由を検討することで、水銀や金の密輸の有無を検討した。この検討を通じ、密輸の有無も含めたASGMにおける水銀の消費実態を地域レベルで把握した。

(c) 水銀排出の削減ポテンシャルの検討

II-1において開発した有機王水を用いることで、水銀フリーな金製錬が可能となる。一方で、従来の設備をそのまま使うことは難しく、導入には一定のハードルがある。一方全鉱石を濃縮して精鉱を得るプロセスは、人力によるパンニングなどの比較的容易な手法であること²⁰⁾から、導入のハードルは比較的低いと考えられる。以上を踏まえ本研究では、以下の2シナリオについて検討を行った。

シナリオA: 対象国全体における精鉱利用の普及

本研究で対象とした国の内、全鉱石を処理している事例の全てで「全量を精鉱から精錬する」と仮定した場合、原単位の変化でどの程度削減が可能かを評価した。原単位変化は、精鉱処理が最も普及しているアフリカを基準とし、全量を精鉱から製錬している国の原単位の平均値(1.96)を用いた。また、有機王水による精錬は行わないものとした。

シナリオB: 有機王水の導入と精鉱処理の普及の併用

既に精鉱を処理しているサイトにおいては有機王水を導入し、全鉱石を処理しているサイトではまず精鉱処理を導入する、というシナリオを想定し、有機王水による削減ポテンシャルの推計を行った。有機王水を用いた場合の水銀消費原単位は0とし、精鉱処理の場合の原単位は上記同様とした。

各シナリオの模式図を図2-6に示す。それぞれのシナリオについて検討を実施し、水銀排出の削減ポテンシャルを検討した。なお結果にて詳述するが、中国については U_{Hg} が極端に過小評価されたことから、シナリオAでは評価対象から除外した。

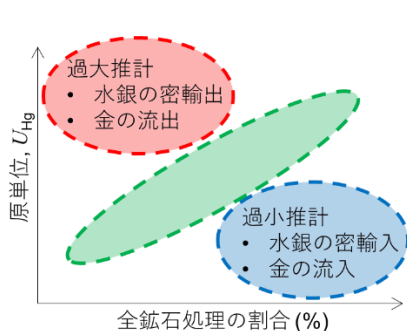


図2-5: 水銀消費原単位の過大・過小推計のイメージ

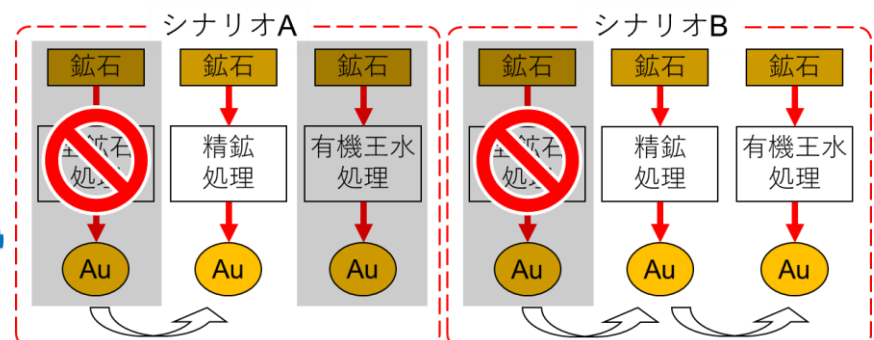


図2-6: ASGMにおける水銀消費量削減のイメージ

4. 結果及び考察

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

(a) 模擬鉱石への適用

(ア) 金線の溶出

模擬鉱石中の金品位を変化させ、Cl系有機王水による溶出処理を行った際の結果を図2-7に示す。また、比較対象として金線のみの溶出速度も併せて評価した。その結果、赤色で示される金線単体の溶解速度に対し、2,500 ppm相当以上の濃度であれば、溶解速度そのものは低下するものの、6時間の処理で含有される金線の全量が溶出することが確認された。また、500 ppm相当の条件でも、6時間で80%程度の溶出量に達したことから、十分な処理時間を適用することで全量溶解することが示唆された。

また、500 ppm相当の模擬鉱石に対してBr系有機王水を用いた場合の溶出速度を、Cl系と比較した結果を図2-8に示す。この結果から、Cl系に対してBr系有機王水は高速で金を溶出可能であることが確認された。ただし、Br系に用いる溶質は、いずれもCl系に用いるものよりも高額であることから、途上国での利用を考慮した場合、溶媒としては不向きである可能性が考えられる。

(イ) 溶解した金の析出

Cl系有機溶媒による溶解後、川砂とサンプル残渣を除去した溶媒に対して塩酸添加による回収処理を適用して得られた回収物を図2-9に、回収率変化を表2-4に、それぞれ示す。この形状は、純粋な金線を処理した既存研究¹²⁾とほぼ同様であり、また模擬鉱石中の品位によらず高い回収率となったことから、共存していた川砂(酸化物)が析出処理へ与える影響は小さいことが示唆された。

模擬鉱石に対する適用結果から、以下の点が確認された。

- ・品位の低下による溶解速度の低下は確認されたものの、2,500 ppm程度までは大きな影響を与えることはなく、また500 ppmの条件であっても、十分な速度で溶解が可能であることが確認された。また、Cl系有機王水とBr系有機王水の比較では、後者がより高速でAuを溶解することが可能なことが確認された。
- ・処理後の溶媒に対して塩酸による析出処理を施すことで、溶解した金が回収できることが確認された。また、析出物中には不純物がほぼ含有されず、高純度な金を回収できることが確認された。

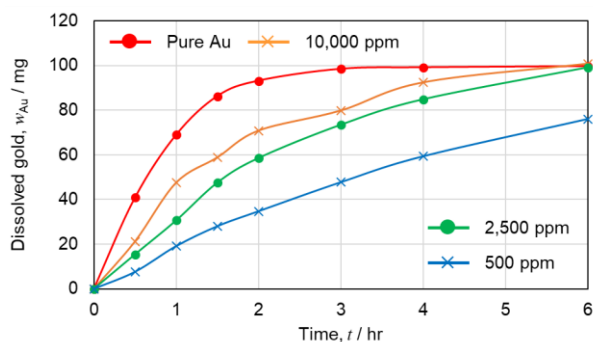


図2-7: 模擬鉱石の金品位と溶解速度 (Cl系)

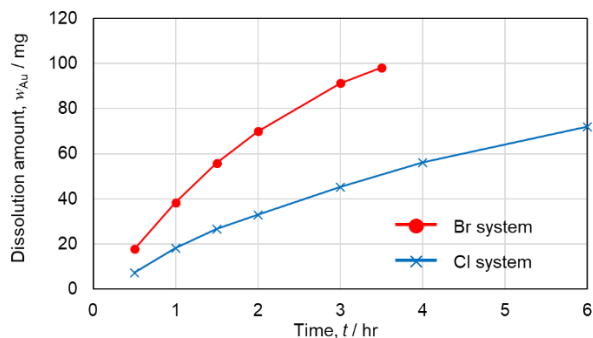


図2-8: 模擬鉱石 (500 ppm) の溶解速度比較

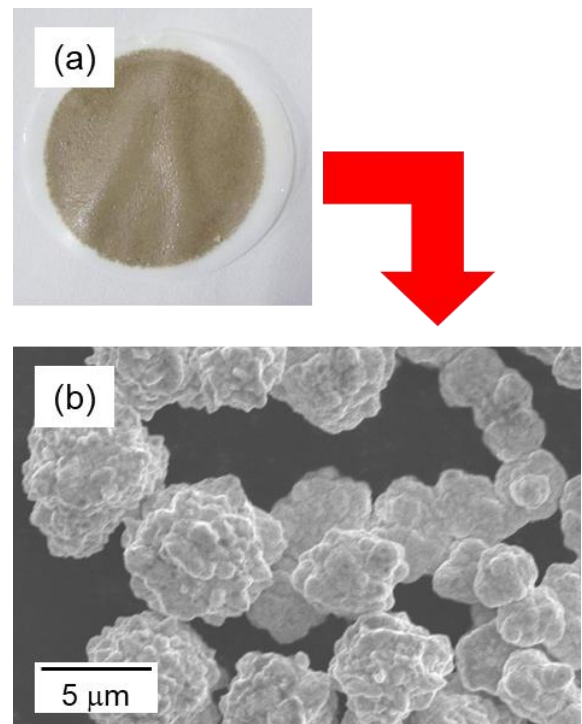


図2-9: 模擬鉱石からの回収物とSEM画像

表2-4: 各条件における回収率変化

模擬鉱石品位 (ppm)	金線重量, w_{Au} / mg	溶出量, w_{Au} / mg	溶出率 (%)	回収量, w_{Au} / mg	回収率 (%)
金線のみ	100.5	99.6	99.1	93.6	94.0
10,000	100.8	100.8	100	74.8	74.2
2,500	104.6	99.1	94.7	86.6	87.4
500	105.6	76.0	72.0	66.7	87.8

これらの結果から、実際の鉱石に対して適用した場合も、鉱物の共存による有機王水への影響は小さいと考えられ、水銀フリーな精錬法の構築が可能であることが示された。

(b) 実際の精鉱からの金溶出および回収

80 °CのBr系有機王水で4時間処理した後、 H_2SO_4 による析出処理を行って得られた回収物を図2-10に示す。同様の化合物は、100 °Cでの処理でも得られた。この化合物中には、処理を行った精鉱に含有されていた金とほぼ同量の金が含まれていたことから、この条件で処理することで金を全量溶出し、また酸添加により回収可能であることが確認された。先述の通り、この鉱石はアマルガム法では溶出が困難であることが指摘されており¹⁴⁾、有機王水による処理が効果的であることが示された。

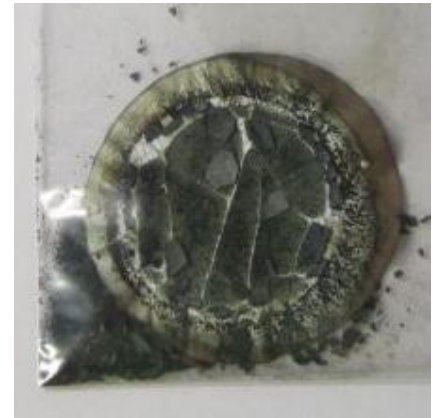


図2-10: 80 °C処理での回収物

析出量はいずれも250 mg程度であったことから、析出物中の金品位は0.4%程度となった。処理前の精鉱品位が48 ppmであったことから、大幅な濃縮が可能であることは確認されたが、模擬鉱石を処理した場合のような、選択的な金の析出・回収は難しかった。金以外の成分としては、ほぼ等モルの硫黄と銅が確認されたことから、不純物として硫化銅(II) (CuS) が共存していることが考えられる。先述の通り、精鉱中には黄銅鉱と黄鉄鉱が共存していることから、特に黄銅鉱から溶出した銅と硫黄、および酸化剤として投入していた $CuBr_2$ が析出時に反応し、 CuS として混入したと考えられる。

途上国での処理を想定して実施した40 °Cでの処理結果を図2-11に示す。精鉱中に含有される金は、4時間の処理ではほとんど溶出・回収されなかったが、12時間以上の処理で全量溶出すること、また酸性水溶液の添加で回収可能という結果となった。なお、ICP-AESを用いて分析した回収率の内、24時間処理後のものが121%となったが、これは精鉱中の金含有量が1 mg程度と少なかったため、測定誤差が大きく影響したこと要因と考えられ、12時間、16時間の結果から考えると全量溶出したと考えられる。

金が全量溶出した条件での最終回収物の重量は60-80 mg程度となり、金品位は1.3-1.5%程度となった。処理時間が長くなるとともに最終回収物の重量が増加し、金以外の成分が増加していったことから、12時間以上処理を行った場合、共存する鉱物の溶出が進行することが示唆された。高温で処理した場合と同様に、銅と硫黄がほぼ等モルで共存していたことから、析出処理によって硫化銅(II)として混入したと考えられる。

以上の結果から、本研究で用いた系における最適な操業時間は12時間であるという結果が得られた。また、高温で処理した場合と比較すると、最終回収物中の金濃度は大幅に向上しており、精鉱からの濃縮・回収は高温での処理よりも進展する結果となった。

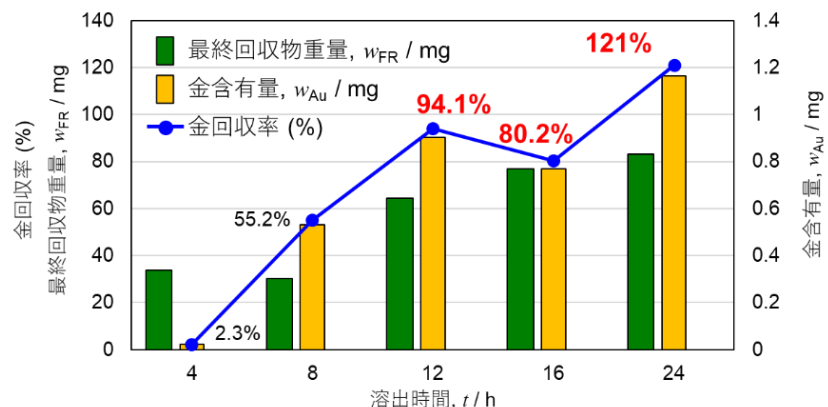


図2-11: 低温で処理した際の金回収率変化

溶媒や溶質量、また析出に利用する酸を変化させて行った実験について、回収率を表2-5に示す。なお、15 mmolのCuBr₂、および10 mmolのKBrを溶解させた100 mLのDMSOを利用した実験条件を基準として、溶質や溶媒量を記載している。酸化剤であるCuBr₂、およびハロゲンの供給源であるKBrについては、1/4程度まで削減しても極端な溶解度の低下は見られなかった。一方、溶媒量を1/2とした場合、大幅に回収率が低下した。溶媒中の溶質濃度は基準となる条件と変わらないことから、溶媒と精鉱の比率、すなわち固液比が溶出に強く影響していることが確認された。また、析出に用いる酸に酢酸(CH₃COOH)を用いた場合も、回収率が大幅に低下したが、レモン汁を用いた析出では、原液、希釈した場合のいずれも、回収率は100%となった。先述の通り、硫酸は途上国では使用に強い制限がかかる²¹⁾ことがあるため、回収に利用する酸としてレモン汁は有力な候補となる。

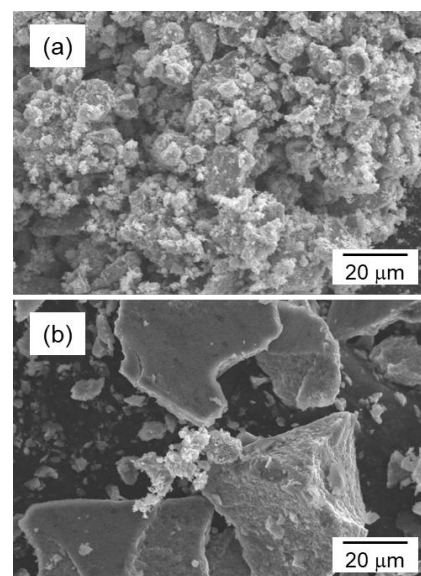


図2-12：最終回収物比較

(a)：硫酸、(b) レモン汁（原液）

ただし、レモン汁(原液)を用いた条件で析出物と溶媒を分離しようとすると、濾過に極端に長い時間が必要となった。図2-12に、硫酸、およびレモン汁を用いて得られた析出物のSEM画像を示す。硫酸による析出では、比較的小さな粒子が凝集しているのに対し、レモン汁による析出では板状の析出物が多く見られた。このような形状の差が、濾過時間に強く影響したと考えられる。今後、途上国で本手法を操業する場合、処理にかかる時間が短くなるような処理法が必要であることが示唆された。

以上の結果から、高温・短時間、あるいは低温・長時間の両パターンで、含有される金を十分溶出できることが示された。特に、後者については途上国での操業に向けた条件であることから、有機王水を用いた精錬法の運用可能性が強く示唆された。

表2-5: 溶質・溶媒量や添加する酸などを変化させた際の回収率変化

	変化させた条件			回収率 (%)
	溶質 (CuBr ₂ , KBrとも)	溶媒, v_{DMSO} / mL	添加した酸	
#1	1/2	100	H ₂ SO ₄	100
#2	1/4	100	H ₂ SO ₄	89.6
#3	1/2	50	H ₂ SO ₄	41.7
#4	等倍	100	CH ₃ COOH	25.0
#5	1/2	100	レモン汁 (原液)	100
#6	1/2	100	レモン汁 (半分に希釈)	100

(c) Cl系有機王水を用いたによる実際の精鉱からの金溶出

UBC側から提供された提供された試験結果を図2-13に示す。なお、図ではCuCl₂の投入量を横軸に、溶出率を縦軸に取り、NaCl量についてはマーカーの形状により示す。処理時間を変化させた場合、およびDMSO量を変化させた場合について、それぞれ検討した。

処理時間を変化させた場合、8時間では溶出率が75-85%にとどまった一方、24時間の処理では90-95%に達した。溶媒量を変化させた場合、10 gの精鉱に対して25 mLのDMSOでは十分溶出しないという結果が得られた。また、十分な時間、十分な量の溶媒がある条件下では、CuCl₂の投入量は溶出率に極端な影響を及ぼさなかったことから、10 gの精鉱に対して10 mmolのCuCl₂は、酸化剤としては十分な量であることが確認された。

上記の傾向は(b)で詳述したBr系有機王水との結果とも共通したことから、有機王水により精鉱から金を効果的に溶出させるには、十分な量のDMSOが必要なことが示された。また、低温で処理する場合、十分な時間をかけて処理することでほぼ全量を溶出可能なことも示された。

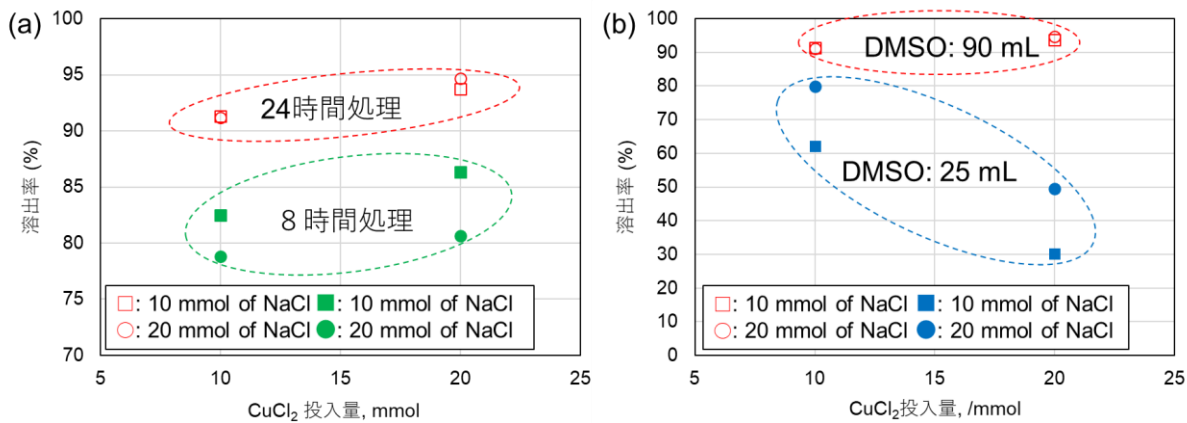


図2-13: Cl系有機王水による溶出率, (a) 処理時間による変化, (b) DMSO量による変化

$\text{CuCl}_2 + \text{NaCl}$ の組み合わせを $\text{CuBr}_2 + \text{KBr}$ の組み合わせと比較すると、前者では溶解速度は遅いものの薬品のコストが低い。このことから、従事する労働者の人件費などとあわせて、ASGMサイトごとに最適な組み合わせの有機王水を提供できる可能性が示唆された。

なお、本研究で金の溶出に用いた試薬について、金1 gの処理に必要な量と、その価格の積算結果を表2-6に示す。試薬単価については工業用グレードを調査し、代表的な値を利用した。金1 gに対してBr系で177ドル、Cl系で290ドルとなった。一方、エクアドルで操業されている水銀とシアンを併用するASGMのコストは、金1 gあたり16.5ドル程度(2015年)とされており²²⁾、必要な試薬価格のみでこれを大幅に上回った。ただし、コストの大半はDMSOに起因するものであり、DMSOを再利用¹¹⁾すると仮定して固体試薬のみを積算した場合、金1 gに対してそれぞれ27ドル、20ドルとなり、人件費などは含まれないものの、工業プロセスに近い値となった。また、本研究では少量の鉱石のみを処理する実験室スケールで検討したことから、各操作におけるロスの割合なども大きいと考えられるため、スケールアップメリットも大きいと考えられる。

以上の検討より、本手法を実際に操業する場合は、DMSOの再利用やスケールアップなど、プロセスの最適化が重要であることが示唆された。

表2-6: 1 gの金の処理に必要な試薬量と価格

	試薬名	必要量	単価	価格
Br系	CuBr_2	1,675 g	15 USD / kg	25.1 USD
	KBr	595 g	3.8 USD / kg	2.26 USD
	DMSO	10 L	1.5 USD / L	150 USD
	Total	-	-	177 USD
Cl系	CuCl_2	2,689 g	7.5 USD / kg	20.2 USD
	NaCl	1,169 g	50 USD / t	0.05 USD
	DMSO	18 L	1.5 USD / L	270 USD
	Total	-	-	290 USD

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

(a) 商用データベースを利用したASGMによる金生産量の抽出と水銀消費原単位の推計

3. (2) (a)で示した手法に基づいて得られた結果を表2-6に示す。なお、逆算による商用データの推測を防ぐため、金生産量、 U_{Hg} ともに、一定の幅を持つ形で記載している。また、全鉱石処理の割合と原単位をグラフ上にプロットしたもの、および国別に U_{Hg} で色分けした世界地図を図2-14 (a)-(c)に示す。なお、極端な値による影響を排除するため、グラフの縦軸は最大値を30までとした。

アフリカで今回の検討対象とした国は、ジンバブエを除きの全ての国で精鉱のみから製錬しているとされている。しかし、ナイジェリアの U_{Hg} が6000を、シエラレオネの U_{Hg} が100を、セネガルとモザンビークの U_{Hg} が25を超えるなど不自然な事例が複数確認された。これらの国については、金の生産量が数kg~100 kg程度と極端に少なく推計されており、実態と乖離していると考えられる。一方、ジンバブエでは全鉱石処理の割合が80%とされる一方、 U_{Hg} は2未満と過小に推測された。これらの結果については、(b)において詳述する。全鉱石処理の割合と U_{Hg} に関するアフリカ地域全体の平均値は、それぞれ6.3 %, 1.96となった。

ラテンアメリカでは、仏領ギアナとガイアナ以外の国で全鉱石処理が主流となっており、特にニカラグアやスリナムではほぼ全量が、コロンビアとエクアドルでは80%以上が、それぞれ全鉱石に由来するとされている。これらの国の内、ホンジュラスの U_{Hg} が2000を、ボリビアの U_{Hg} が20をそれぞれ超えており、過大な推計と考えられる。ホンジュラスについては、アフリカでの事例同様金の生産量が極端に少なく見積もられたことが要因と考えられる。全鉱石処理の割合と U_{Hg} に関するラテンアメリカ地域全体の平均値は、それぞれ73.8 %, 4.63となった。

アジアでは、インドを除いて全鉱石処理が主流となっているとされている。特に中国については、全鉱石の処理割合が75%と高い一方、 U_{Hg} が1未満と極めて小さくなったが、これは水銀消費量が過小に報告されていることに起因すると考えられる。全鉱石処理の割合と U_{Hg} に関するアジア地域全体の平均値は、それぞれ79 %, 1.23となった。

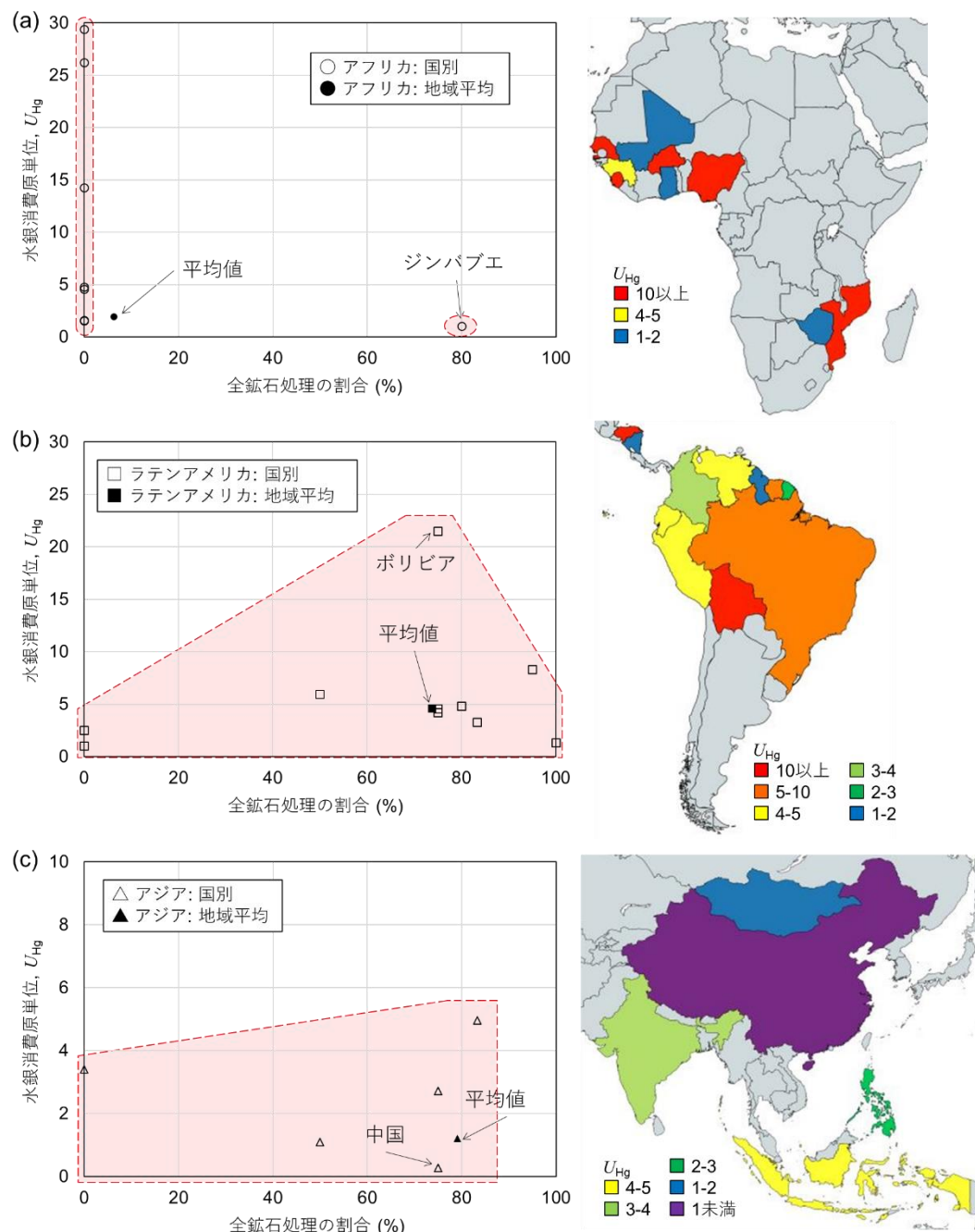
表2-7: 本研究で対象とした国の情報の精度、および水銀消費量⁷⁾

地域	国名	ASGM由来金生産量, $P_{Au} / t \cdot year^{-1}$	水銀消費 原単位, U_{Hg}	全鉱石処理の 割合 (%)	判定
アフリカ	ギニア	3- 5	4- 5	0	
	セネガル	1 未満	20-30	0	過大
	ブルキナファソ	1- 3	10-20	0	過大
	ガーナ	30- 50	1- 2	0	
	マリ	5- 10	1- 2	0	
	モザンビーク	1 未満	20-30	0	過大
	ナイジェリア	1 未満	1000 以上	0	過大
	シエラレオネ	1 未満	100 以上	0	過大
	ジンバブエ	10- 30	1- 2	80	
	スーダン	50-100	1- 2	0	
	タンザニア	5- 10	4- 5	0	
ラテン アメリカ	ボリビア	5- 10	20-30	75	過大
	ニカラグア	1- 3	1- 2	100	過小
	ペルー	50-100	4- 5	75	
	スリナム	5- 10	5-10	95	
	ブラジル	10- 30	5-10	50	
	コロンビア	50-100	3- 4	83.3	
	エクアドル	10- 30	4- 5	80	
	仏領ギアナ	1- 3	2- 3	0	
	ガイアナ	10- 30	1- 2	0	
	ホンジュラス	1 未満	1000 以上	50	過大
	ベネズエラ	10- 30	4- 5	75	
	インド	1- 3	3- 4	0	
アジア	インドネシア	50-100	4- 5	83.3	
	モンゴル	10- 30	1- 2	50	
	フィリピン	10- 30	2- 3	75	
	中国	300以上	1 未満	75	過小

図2-14に示す地域ごとの傾向を比較すると、アフリカは他の地域と比較して、精鉱を利用する国が多く分布する結果となった。極端に大きな U_{Hg} を示す国も複数あったが、大半で金生産量が極端に小さいことなどから、地域平均の U_{Hg} も小さくなった。逆にラテンアメリカでは、全鉱石を処理する国も多く存在しており、 U_{Hg} も比較的大きくなった。

一方、アジアでも同様に全鉱石を処理する国が多く存在したが、 U_{Hg} はアフリカよりも小さくなった。先述の通り、これは生産量の多くを占める中国の過小評価に起因する。

国別の結果については、(b)において詳述する。

図2-14: 地域別傾向と国別 U_{Hg} (a) アフリカ (b) ラテンアメリカ (c) アジア

(b) 水銀消費実態の把握および密輸ルートの把握

図2-14に示した結果をもとに、外れ値を取った国について地域別に検討を行った。

(ア) アフリカ

・ナイジェリア、シエラレオネ、セネガル、モザンビーク

アフリカ西部に位置する上記の4カ国に関しては、ASGM由来の金生産量が数kg～100 kg程度と極端に少なく推計されている。しかし、例えばナイジェリアの場合は4-8 tの生産があること²³⁾が報告されており、本研究で用いた金生産量が過小な値であったことから U_{Hg} が極端に大きくなったと考えられる。同様の事例は、モザンビークでも確認されている²⁴⁾。また、シエラレオネとセネガルについては、他国への金の流出が指摘されている^{25, 26)}ことから、これらの国については金生産量の過小推計が過大な U_{Hg} につながったと考えられる。

- ・ブルキナファソ

ブルキナファソにおけるASGM由来の金生産量は、本研究では年間3 t未満という結果が得られたが、南に隣接するトーゴへの密輸量は年間7 tを超えると指摘されている²⁷⁾。さらに、ガーナなどへの密輸も指摘されていることから、ブルキナファソでは生産された金の密輸、および金生産量の過小推計が強く示唆された。加えて、トーゴを起点とする水銀の密輸のハブとなっている指摘もあることから、極端に大きな U_{Hg} が得られたと考えられる。

- ・マリ

既存の調査²⁸⁾において、マリはこの地域における金密輸の窓口として機能していると指摘されている。実際に、マリからアラブ首長国連邦(UAE)への輸出量がマリでの生産量を上回るという指摘もある。これは、金の輸出時に課される3%の輸出税が、他国では全量を対象なのに対し、マリでは最大で50 kgまでにしか課されないことに起因するとされる。

なお、上記の国々は西アフリカ経済共同体(Economic Community of West African States: ECOWAS)と呼ばれる準地域機関を形成しており、経済的な結び付きが強い。

この地域における U_{Hg} と、今回の研究における文献調査を通じて確認された金の密輸ルートを、原単位と比較したものを図2-15に示す。先述したとおり、この地域においては、生産された金の全量が精鉱由来とされているが、 U_{Hg} は極端に大きい国と小さい国が隣接するという傾向が得られた。文献調査の結果、 U_{Hg} の極端に大きいブルキナファソやセネガル、シエラレオネから、特にマリへ金が密輸されていることが確認された。

(イ) ラテンアメリカ

- ・ホンジュラス、ニカラグア

中米のホンジュラスでは、2000年代に入って以降従事者が急激に増加している一方、金の総生産量は減少傾向にあるという矛盾した報告^{17, 29)}がされている。従事者の増加を考慮すれば金生産量も同様に増加していると想定されることから、金生産量の過小評価が過大な U_{Hg} の要因になったと考えられる。

逆にニカラグアでは、全量を全鉱石から精錬している一方 U_{Hg} は小さくなった。ニカラグアでは「ラストラ」と呼ばれる機材で全鉱石を処理しており、この場合の U_{Hg} は6を超えるとされる³⁰⁾。しかし、並行して浚渫で得られた鉱石を処理する事例もあり、こちらでは水銀はほとんど用いられない³¹⁾。これらのことから、ニカラグアの U_{Hg} が比較的小さな値を示したと考えられる。

- ・ボリビア

ボリビアについては、金の密輸出による生産量の過小推計、および輸入した水銀の近傍国への密輸出による消費量の過大推計が指摘されている^{32, 33)}。このいずれも、 U_{Hg} の過大推計の要因であることから、実際の原単位はより小さいと考えられる。

- ・ガイアナ地方

ガイアナ、スリナム、および仏領ガイアナの3カ国を総称してガイアナ地方と呼ばれる。これらの国々について U_{Hg} を比較すると、スリナムが8.29と大きく、仏領ガイアナが2.50、ガイアナが1.03と小さくなった。文献や既存報告を調査すると、この地域ではスリナムのみが公的に水銀を輸入できる一方、仏領ガイアナやガイアナでは輸入要件が極端に厳しいか、あるいは禁止されている³⁴⁾。

この地域について、原単位で色分けした地図を図2-16に示す。上記の検討結果から、原単位の大きいスリナムから、不適切な形で近傍のガイアナや仏領ガイアナへ水銀が流出しているということが強く示唆された。また、本研究の手法で得られた結果を利用することで、地域レベルの密輸を可視化できる可能性が示唆された。

なお、上記推計にはUNEPの公表する水銀消費量⁷⁾の中央値を用いており、国毎のデータ精度差は考慮されていない。ただし、誤差率と水銀消費量がともに大きいとされるスーダンの U_{Hg} 、およびアフリカとラテンアメリカにおける地域レベルの U_{Hg} のいずれも蓋然性の高い推計結果となったことから、これらの地域に関する統計値は実態をよく反映していることが示唆された。

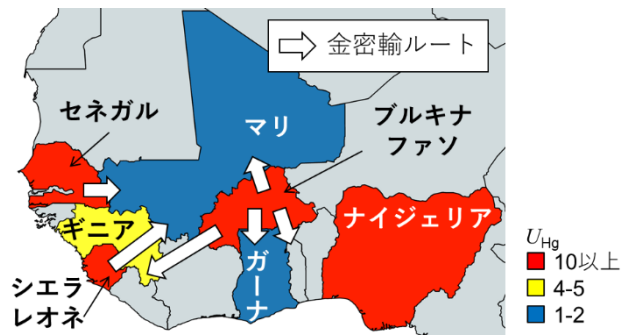


図2-15: 西アフリカ地域での金密輸ルートとASGMの水銀消費原単位

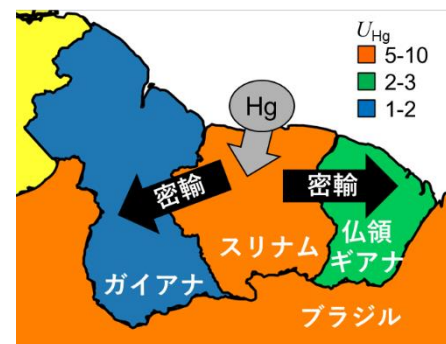


図2-16: ギアナ地方での水銀密輸ルートとASGMの水銀消費原単位

(ウ) アジア (中国)

中国については、全鉱石処理の割合が75%と高い一方、 U_{Hg} は1未満と極端に小さいことから、水銀消費量または金生産量、あるいは双方に関する情報が不確実である可能性が高い。例えば、中国では1995年以降の急激な経済成長を背景に水銀排出量が増加傾向にあり、2005年には825 tが排出され、その大半がASGMに起因するとされている³⁵⁾。これを受けて、2010年には中国国内でのASGMによる金生産が禁止され、それ以降水銀消費量の減少が報告されている。2015年には水銀消費量が720 tまで減少し、ASGMに由来する排出量はこの内の1-3%とされている³⁵⁾ことから、10年で数百tのASGM向け水銀消費が消失したことになるが、これは不自然である。他国では、医療用途向けに輸入された水銀がASGMに転用された事例が報告されており³⁶⁾、中国国内でも同様の事例が発生していると考えられる。加えて、2005年に230 tとされていた中国の金生産量は、2015年には458 tまで増加したとされている¹⁷⁾が、同時期のLSGMに由来する生産量の変化は6.56 tから79.6 tとされている¹⁹⁾。先述のASGMの禁止を考慮すると、明らかにLSGMの増分が少ないことから、LSGMによる生産量が統計上正確に反映されていない可能性が強く示唆されている。

そこで、公的にASGMが禁止される以前の2004年の状況について検討した。Gunsonらは、中国におけるASGMについて、従事者数を元に生産量と水銀排出量の推計を行っており、2001年にはASGM由来の金生産量を全体の29%、61 tと推計している³⁷⁾。現状ではこの情報が最新であるため、2004年の金生産量にこの割合を援用すると、ASGM由来の金生産量は63 tと推計される。また、2004年の中国におけるASGMで水銀消費量は444.5 tとされており³⁸⁾、これらから U_{Hg} は7.06と推計される。全鉱石処理の割合が75%とされていることから、この原単位は比較的蓋然性が高いと考えられる。

中国におけるASGMでは、2015年においても全鉱石処理の割合が75%とされており、この原単位を2015年の水銀消費量である100 tに適用した場合、ASGM由来の金生産量が14.2 tとなり、逆にLSGM由来の生産量が400 tを超え、今回引用した商用データベースとの差が極端に大きくなる。逆に、ASGMの生産量から推計すると水銀消費量は2,500 tを超えることとなり、一国で世界全体の水銀消費量を上回り、いずれも不自然である。先述の通り、2010年に公的にASGMが禁止されているが、実際には統計上現れない形で操業されている可能性が高く、水銀消費量、金生産量のいずれも実態と異なる統計が示されている可能性が高い。上記の検討より、ASGMにおける水銀消費の過小推計、およびASGM由来の金生産量を過大に推計している可能性を定性的に示すことができた。

なお、地域レベルでの U_{Hg} の検討結果から、UNEPの資料⁷⁾が実態をよく反映していることが示唆された。アフリカ・ラテンアメリカに対し、アジアでは全鉱石処理の割合を考慮すると U_{Hg} が過小に推計されている可能性が示唆された。今回の検討ではアジアにおいて対象とできた国が少なかったため、地域全体の水銀消費量、金生産量に対して中国が占める割合が大きくなった。上記の通り、中国の統計値はそのいずれも信頼性が低いことから、その誤差が非常に強く影響したと考えられる。よって、水銀消費量の推計精度向上にはアジア、特に中国について別途詳細な検討が必要であることが示唆された。

(c) 水銀排出の削減ポテンシャルの検討

全鉱石処理の精鉱処理への置き換え(シナリオA)、および有機王水による製錬の導入(シナリオB)で削減可能となる量を、それぞれ図2-17に示す。

アフリカについては、もともと大半の国で全量を精鉱から精錬していること、またジンバブエの消費原単位が小さく推計されていることから、シナリオAによる削減ポテンシャルはないと推計された。一方、シナリオBでは大半の国で有機王水が導入されることから、水銀をほとんど消費しなくなるという推計結果が得られた。

ラテンアメリカについては、1,000 tを超える現状の消費量に対し、もともと全鉱石処理の割合が大きいことからシナリオAでも415 tと大きな削減効果を期待できるという結果が得られた。有機王水の導入によってさらに300 t程度の削減効果が期待されるが、精鉱処理の割合が低いことから有機王水の導入割合が小さく、アフリカに比べて削減効果が小さくなったと考えられる。

アジアについては、ラテンアメリカ同様全鉱石処理の割合が大きいことから、精鉱処理の導入による効果大きいという結果が得られた。一方、現状の精鉱処理の割合が小さいことから、有機王水の導入による削減ポテンシャルは相対的に小さくなった。

全体としては、現状の1,836 tに対し、精鉱処理の導入によって661 t、有機王水の導入によって1,329 tの削減ポテンシャルがあるという推計結果が得られた。

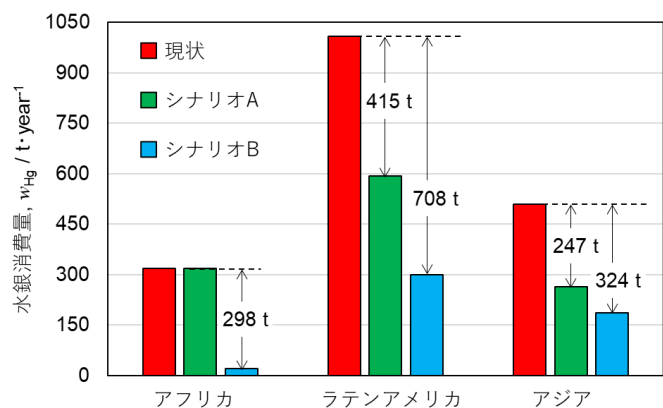


図2-17: 水銀排出の削減ポテンシャルの比較

5. 研究目標の達成状況

本研究で得られた結果、および研究目標の達成状況について、トピックごとに以下に示す。

(1) 有機王水を用いた環境調和型金精錬プロセスの開発

(a) 模擬鉱石への適用

金線、および川砂を混合して作製した模擬鉱石に対して、Cl系有機王水による溶出処理、および溶媒からの金の回収を行った結果、500 ppm程度までは高速に溶出すること、溶出した金は高純度で回収できることが示された。これらの結果から、酸化物が共存している場合、溶出や析出に大きな影響を及ぼさず、有機王水が有効に作用することが確認された。

(b) 実際の精鉱からの金溶出および回収

共同研究先から提供された精鉱を利用した実験を通じて、Br系/Cl系有機王水によって含有されている金の溶出、および溶出した金を化合物に含有させる形で回収する実験を実施した。

その結果、溶出に際しては、(a)の基礎的な検討に基づく高温・短時間(80-100 °C、4時間程度)での条件下で全量溶出することが確認された。これに加え、途上国で操業することを念頭に、低温・長時間(室温-40 °C、12-24時間程度)での処理も合わせて実施した結果、こちらの条件でも含有されていた金が全量溶出したことから、途上国での操業にも適した条件で利用できることが示された。同様の結果は、共同研究先で行われたCl系有機王水を用いた場合でも確認された。

また、溶出した金の回収についても、溶媒へ酸性水溶液を添加するという簡便な手法で可能であることが確認された。特に、途上国でも容易に調達可能なレモン汁でも全量回収可能と確認されたことから、エネルギー消費や法規制による制約を回避できる形での回収が確認された。

金溶出に必要な試薬価格を積算し既存手法の操業コストと比較すると、固形試薬のみであれば既存手法に近い値を示したが、DMSOを考慮すると大幅に上回った。ただし、本研究は実験室スケールの検討であり、またDMSOは再利用が可能であることから、プロセスの最適化でコスト的にも利用しうることが確認された。

上記検討を通じて、途上国における有機王水を用いた金精錬の操業可能性が実験的に確認された。

(2) 水銀排出の削減ポテンシャルの評価

(a) 商用データベースを利用したASGMによる金生産量の抽出と水銀消費原単位の推計

明らかになっていないASGM由来の金生産量を、一般公開データと商用データベースを併用することで推計し、水銀消費量と比較することで水銀消費原単位(U_{Hg})を得た。この U_{Hg} を、精錬時に利用する精鉱と全鉱石を処理するプロセスの割合と比較することで、過大、あるいは過小推計の検討を行った。

その結果、全量を精鉱から精錬する国が多くあるアフリカでは、対象国における U_{Hg} の平均値が1.96と比較的小さくなった。また、全鉱石を処理する割合の高いラテンアメリカでは、 U_{Hg} の平均値が4.63と大きくなった。金生産量に対する水銀消費原単位は、精鉱処理では1-3、全鉱石処理で10-25程度とされていることから、本研究の推計でもこの傾向に沿った結果が得られた。

一方、ラテンアメリカ同様全鉱石処理の割合が大きいアジアについては、 U_{Hg} の平均値が1.23とアフリカを下回る結果となった。これは、金生産量の多くを占める中国について、水銀消費量を過小に、またASGMによる金生産量を過大に推計したことによる。

上記検討の結果、ASGM由来の金生産量を推計し、不自然な推計結果を示した国を抽出できた。

(b) 水銀消費実態の把握および密輸ルートの把握

(a)で既述したとおり、 U_{Hg} と精鉱処理の割合を比較すると、外れ値を取る国が複数あること、また U_{Hg} の極端に大きな国と小さな国が隣接する傾向もあわせて確認された。 U_{Hg} が大きくなる要因としては水銀や金の密輸による流出が、逆に小さくなる要因としては流入がそれぞれ考えられ、 U_{Hg} の検討によりこれらを容易に把握できる可能性が期待される。そこで、これらの国の水銀や金の密輸ルートに関する文献調査を行い、その結果と U_{Hg} の推計結果を比較することで、地域レベルでの密輸ルートの把握・可視化、またデータ精度の評価を行った。

例えば、経済的な結びつきが強いとされる西アフリカ地域では、ブルキナファソで生産された金が各地へ流出し、逆にマリへは各国からの金が密輸されていることが指摘されている。一方、本研究の U_{Hg} はブルキナファソで極端に大きく、マリでは小さくなり、上記の傾向と一致した。また、ギアナ地方と呼ばれる地域では、スリナムに流入した水銀が隣国のガイアナ、仏領ギアナへ流出しているとされており、本研究で推計した U_{Hg} もスリナムで大きく、ガイアナや仏領ギアナでは小さくなり、やはり同様の結果となった。上記の比較を通じ、本研究で用いた手法は、密輸ルートの把握・可視化に有効であることが示唆された。

水銀消費量のデータ精度を地域レベルで検討したところ、アフリカやラテンアメリカでは比較的精度が高いと考えられた一方、アジアでは精度が低いと考えられた。アジアでは水銀消費量、金生産量とも中国の占める割合が大きく、このデータ精度の低さが地域全体にも大きく影響したと考えられる。よって水銀消費量の推計精度の向上には、アジア、特に中国について個別の検討が必要であることが示唆された。

(c) 水銀排出の削減ポテンシャルの検討

(a)において得られた結果を元に、ASGMにおける水銀消費量の削減ポテンシャルを推計した。II-1にて開発した有機王水を用いる手法は、アマルガム法を代替しうる有望な手法ではあるが、コスト面などですぐに代替可能とはならない。そこで、現在全鉱石を処理している国が、ハードルが低い精鉱処理を導入することによる効果、および現在精鉱を処理している国が有機王水を導入することによる効果を、それぞれ検討した。

その結果、既に精鉱処理が普及しているアフリカでは、有機王水の処理を導入しなければ消費量削減が期待しづらいこと、逆にラテンアメリカやアジアでは精鉱処理による削減効果が大きく期待できるという推計結果が得られた。今回対象とした国については、現状の消費量である1,836 tに対する削減ポテンシャルは、精鉱処理の導入によって661 t、有機王水の導入によって1,329 tであるという推計結果が得られた。

上記検討を通じて、有機王水による水銀排出の削減ポテンシャルを定量的に評価できた。

以上の結果を通じ、「有機王水」を利用することで、途上国での運用に適した操業条件で精鉱から金を溶出でき、水銀フリーな精錬プロセスを提供できることが見いだされた。また、この技術の普及による水銀排出の削減ポテンシャルを定量的に評価できた。

6. 引用文献

- 1) Jennifer D. O' Neill, Kevin H. Telmer: Estimating Mercury Use and Documenting Practices in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM), United Nations Environment Programme.
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22894/estimating_mercury_use.pdf (2017)
- 2) United Nations Environment Programme: Artisanal and small-scale gold mining. global mercury partnership. UNEP. <https://web.unep.org/globalmercurypartnership/our-work/artisanal-and-small-scale-gold-mining-asgm> (2020)
- 3) Marcello M. Veiga, Gustavo Angeloci, Michael Hitch, Patricio Colon Velasquez-Lopez: Processing Centers in Artisanal Gold Mining, J. Clean Prod., doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.015 (2014)
- 4) Keegan H. Moody, Kazi M. Hasan, Sumeja Aljic, Victoria M. Blakeman, L. Perry Hicks, Danielle C. Loving, Matthew E. Moore, B. Spencer Hammett, Mónica Silva-González, Caryn S. Seney, Adam M. Kiefer: Mercury emissions from Peruvian gold shops: Potential ramifications for Minamata compliance in artisanal and small-scale gold mining communities. Environ. Res., doi: 10.1016/j.envres.2019.109042 (2020)
- 5) United Nations Environment Programme: Minamata Convention on Mercury, UNEP.
<http://www.mercuryconvention.org/Convention/Text/tabid/3426/language/en-US/Default.aspx> (2020)
- 6) Marcello M. Veiga, Bruce G. Marshall: The Colombian Artisanal Mining Sector: Where Formalization is a Heavy Burden. The Extractive Industries and Soc., doi: 10.1016/j.exis.2018.11.001 (2019)
- 7) ARCTIC MONITORING & ASSESSMENT PROGRAMME, UN Environment Programme: Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018 technical report electronic annex. UNEP/AMAP.
<https://www.amap.no/documents/download/3411/inline> (2019)
- 8) David J. X. Gonzalez: Treaty Does Not Stop Illicit Mercury Trade in South America, Yale Global Online.
<https://yaleglobal.yale.edu/content/treaty-does-not-stop-illicit-mercury-trade-south-america> (2018)
- 9) Marieke Heemskerk, Eric Negulic, Celine Duijves: Reducing the Use and Release of Mercury by Artisanal and Small Scale Gold Miners in Suriname, http://social-solutions.net/data/images/reports/Suriname_ASGM_Sector_Report_Final.pdf (2016)
- 10) R. Ndamba, L. Mlambo and G. Musvovi: The Contribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining to Zimbabwe's Economic Growth and Development (2017)
- 11) 吉村 彰大, 梅原 佳那, 高井 まどか, 松野 泰也, 臭化銅含有 DMSO 溶媒を用いた貴金属・レアメタル回収手法の開発, 日本金属学会誌, doi: 10.2320/jinstmet.J2014047 (2015)
- 12) Akihiro Yoshimura, Yasunari Matsuno, A Novel Process for the Production of Gold Micrometer-Sized Particles from Secondary Sources, Material Transactions, doi: 10.2320/matertrans.M2015266 (2016)
- 13) 鷹取 孝太, 峯尾 知子, 長瀬 優希, 名古屋 隆司, 櫻井 憲一, 佐々木 文雄, 小田部 和美, 松野 泰也: 有機王水を用いた使用済み電気・電子機器からの金回収プロセスの開発, 日本金属学会誌, doi: 10.2320/jinstmet.J2018029
- 14) UBC: LA MARIA PROJECT METALLURGICAL TESTWORK
- 15) Kota Takatori, Hidekazu Kato, Akihiro Yoshimura, Yasunari Matsuno: Chalcopyrite Leaching in a Dimethyl Sulfoxide Solution Containing Copper Chloride. Mining, Metallurgy & Exploration, doi: 10.1007/s42461-021-00400-3 (2021)
- 16) Ban Toxics!: The Price of Gold: Mercury Use and Current Issues Surrounding Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Philippines, http://www.takagifund.org/admin/img/sup/rpt_file20152.pdf (2011)
- 17) Refinitiv Metals Research: Gold Production 2019. Refinitiv.
<http://solutions.refinitiv.com/MetalsResearch> (2020)
- 18) United States Geological Survey (2020) USGS. <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-gold-adv.xlsx>
- 19) Wood Mackenzie Ltd.: Gold Research Suite. Wood Mackenzie Ltd.
<https://www.woodmac.com/research/products/metals-and-mining/gold-research-suite/> (2019)

- 20) Janis A. Shandro, Marcello M. Veiga, Rebecca Chouinard: Reducing Mercury Pollution from Artisanal Gold Mining in Munhena, Mozambique. *J Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.09.005 (2009)
- 21) The World: Colombia's Latest Tack Against Drug Production, <https://www.pri.org/stories/2011-06-02/colombias-latest-tack-against-drug-production> (2011)
- 22) Adriana de O. Gonçalves: Analysis of gold extraction processes of artisanal and small-scale gold mining in Portovelo-Zaruma, Ecuador, University of British Columbia Library, doi: 10.14288/1.0308783 (2016)
- 23) Bertrand Laporte, Céline D. Quatrebarbes, Yannick Bouterige: Mining taxation in Africa: the gold mining industry in 14 countries from 1980 to 2015. *FERDi*. doi: 10.13140/RG.2.2.18562.99529 (2017)
- 24) United States Geological Survey (USGS): Gold Statistics and Information, <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-gold-adv.xlsx> (2020)
- 25) Simon Akam: Sierra Leone's "cheap gold" entices the gullible. Reuters. <https://www.reuters.com/article/uk-sierraleone-fraud/sierra-leones-cheap-gold-entices-the-gullible-idUKTRE7112F920110202> (2011)
- 26) Yves B. Alvarez, Baptiste Coué, Patrick Schein: ANALYSIS REPORT Supply chains of artisanal gold in West Africa. UNIDO. https://www.responsiblemines.org/wp-content/uploads/2018/04/Publication-supply-chains-artisanal-gold-west-africa_ENGL_-baja.pdf (2016)
- 27) Alan Martin, Hélène HBalzac: The West African El Dorado: Mapping the Illicit Trade of Gold in Côte d'Ivoire, Mali and Burkina Faso. AFRICA PORTAL. https://media.africaportal.org/documents/PAC_El_Dorado_Jan_2016_EN.pdf (2017)
- 28) Marcena Hunter: Curbing Illicit Mercury and Gold Flows in West Africa: Options for a Regional Approach. UNIDO. <https://globalinitiative.net/wp-content/uploads/2018/11/Final-UNIDO-ECOWAS-gold-and-mercury-report-English.pdf> (2018)
- 29) Eric D. Harlow, Kathleen Hurley, Ashley Fox, Andrea Vargas-Guerra, Jesse Gibson: SMALL-SCALE & ARTISANAL MINING IMPACTS ON BIODIVERSITY IN LATIN AMERICA. USAID. https://www.land-links.org/wp-content/uploads/2019/10/ASM_White-Paper_USAID_FINAL_21March2019Final.pdf (2019)
- 30) Oseas García, Marcello M. Veiga, Paul Cordy, Osvaldo E. Suescún, Jorge M. Molina, Monika Roeser: Artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: a successful case of mercury reduction, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.032 (2015)
- 31) Marcello M. Veiga, Randy F. Baker: Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners, <https://iwelearn.net/resolveuid/617e8a7184a7ec1e292a61c2319dc30f> (2004)
- 32) Leontien Cremers, Judith Kolen, Marjo d. Theije: Small-scale Gold Mining in the Amazon. The cases of Bolivia, Brazil, Colombia, Peru and Suriname. CEDRA, <https://www.gomiam.org/wp-content/uploads/2014/11/20130312-Cuaderno-Small-Scale-Gold-Mining-in-the-Amazon.pdf> (2013)
- 33) Bruce G. Marshall, Arlette A. Camacho, Gabriel Jimenez, Marcello M. Veiga: The Mercury Reality Challenges in Mexico: Regulatory and Environmental Impacts. *Atmosphere*. doi: 10.3390/atmos12010057 (2021)
- 34) IAN G Sutherland: The Political Ecology of Mercury within the Small-Scale Gold Sector GUYANA REPORT, https://www.iucn.nl/files/groene_economie/regional_mercury_report_guyana.pdf (2019)
- 35) Xinyu Jiang, Fei Wang: Mercury emissions in China: a general review, *Waste Disposal & Sustainable Energy*, doi: 10.1007/s42768-019-00012-0 (2019)
- 36) Marcello M. Veiga, Peter A. Maxson, Lars D. Hylander: Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining, *J Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.08.010 (2006)
- 37) Aaron J. Gunson, Marcello M. Veiga: Mercury and Artisanal and Small-scale Gold Miners in China, Master thesis of UBC, doi: 10.14288/1.0081074 (2004)
- 38) ARCTIC MONITORING & ASSESSMENT PROGRAMME, UN Environment Programme: Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013, <https://www.amap.no/documents/download/1265/inline> (2013)

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型金精錬プロセスの適用と水銀排出の削減ポテンシャルの評価

- 1) Akihiro Yoshimura, Koyo Suemasu, Marcello M. Veiga: Journal of Sustainable Metallurgy, vol. 7 (2021) (IF: 2.347)
Estimation of mercury losses and gold production by artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in countries with major consumption of mercury
<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00394-8>

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】途上国での水銀使用抑制へ向けた環境調和型金精錬プロセスの適用と水銀排出の削減ポテンシャルの評価

- 1) Akihiro Yoshimura, Takumasa Suzuki, Omotayo Fadina, Pariya Torkaman, Yasunari Matsuno, Marcello M. Veiga: Ecobalance 2020
“Novel Refining Process of Gold from Ore Using “Organic Aqua Regia” as An Alternative Procedure of The Amalgamation in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)”
- 2) Koyo Suemasu, Akihiro Yoshimura, Marcello M. Veiga: Ecobalance 2020
“Estimation of Mercury Use and Lost in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)”

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等>

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Application of Eco-friendly Gold Refining Process for the Developing Countries to Reduce the Mercury Consumption and Evaluation of Reduction Potential of the Mercury Emission

Principal Investigator: Akihiro YOSHIMURA

Institution: Department of Urban Environment Systems, Chiba University

1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, -shi, Chiba, JAPAN

Tel, Fax: +81-43-290-3496

E-mail: a.yoshimura@chiba-u.jp

[Abstract]

Key Words: Artisanal mining, Minamata Convention on Mercury, Amalgamation, Organic aqua regia, Substance flow analysis

Artisanal small-scale gold mining (ASGM) is one of the gold production procedures especially used in developing countries. In this procedure, mercury is mixed with the ore to extract gold by the process of amalgamation. The extracted gold is recovered by burning the amalgam and mercury is not recovered in most cases. This process is the predominant source of mercury emission, which can cause a negative environmental impact and health hazard. In particular, ASGM workers, including women and children, face these risks. To address this issue, the Minamata Convention on Mercury was enforced in 2017 to reduce the trade and use of mercury, especially in ASGM. However, ASGM is also an important income for the workers and it is impossible to ban the amalgamation technique without providing alternative procedures. In addition, mercury as well as gold are often smuggled among different countries and this renders it difficult to understand the actual situation of mercury in ASGM industry.

In the present study, organic aqua regia, which is composed of dimethyl sulfoxide (DMSO) containing copper halide, was utilized for extracting gold from the ore, and thus a mercury-free gold production procedure was established. In addition, the actual situation of the use and loss of mercury in ASGM was revealed by estimating the mercury use intensity using both open data and commercial databases for conducting the impact evaluation of organic aqua regia.

As a result, the extraction of gold from the ore using organic aqua regia and the recovery of the extracted gold by addition of an acidic solution to organic aqua regia were confirmed. The extraction and recovery of gold can be carried out under mild conditions, for example, at a low temperature and by adding lemon juice to the regia. This shows that the procedure of using organic aqua regia is easy to perform in developing countries.

By estimating the mercury use intensity, exaggerated results were confirmed in some countries, which suggested the smuggling routes of mercury and gold. In addition, it is confirmed that the alternation of the whole-ore amalgamation by the concentrate amalgamation and organic aqua regia can reduce the mercury use and loss drastically.

Through this research, the investigators confirmed the availability of organic aqua regia for performing the process of refining gold in the developing countries and quantitatively evaluated its impact on the use and loss of mercury in ASGM.