The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ポスター発表［技術・思想Ⅱ］ 世界小規模金採掘の実態並びに水銀ゼロ（ZeroMercury）を目指す実践研究への展望
Author(s)	姉崎, 正治; 三好, 恵真子
Citation	OUFCブックレット. 2015, 6, p. 203-215
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/51442
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

ポスター発表［技術・思想Ⅱ］

世界小規模金採掘の実態並びに水銀ゼロ（Zero Mercury）を目指す実践研究への展望

姉崎正治*，三好恵真子**

１．はじめに

2013 年 10 月，国連 UNEP は約 140 カ国・地域の政府関係者の他，国際機関，NGO 等，1000 人以上が出席する中，「水銀条約（水銀に関する水俣条約）」が全会一致で採択され, 92 カ国（含む EU）が署名した［環境省, 2013］。この UNEP の水銀条約の理念　に至るまでの長い間，水銀はその科学的性質が工業的に有用であったため，工業用資材として多くの分野で汎用されてきた。

図１［Hylander，2005］は，歴史的変遷における中世以降の水銀の消費量の推移を示したものである。産業革命以降の重化学工業時代の年間使用量は，約１万トンで

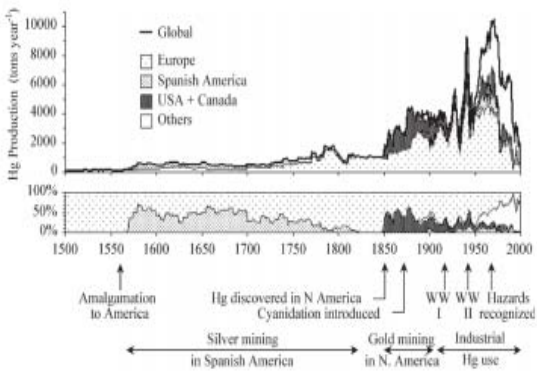

図１　16 世紀以降の水銀消費量の推移

* 大阪大学・人間科学研究科 DC
** 大阪大学・人間科学研究科

あるが，1956 年に水俣病が公式に確認されたことによって，国際的に水銀使用を抑制する対策が取られ，今日に至っている。しかし，現在なお年間約 2000 トン近い人為的消費が行われている。しかも，その約 37%が本研究で着目する小規模金採掘（ASGM;Artificial Small-scale and Gold Mining）からの排出となっている（図２）［環境省，2014］。

この度の水銀条約は，水銀が人の健康や環境に与えるリスクを低減するための包括的な規制を定める条約であり，その理念は水銀ゼロ「Zero Mercury」［UNEP, 2014］にある。また，小規模採掘（ASGM）に関しては，第 7 条に規定があり，主に次の二項になる。

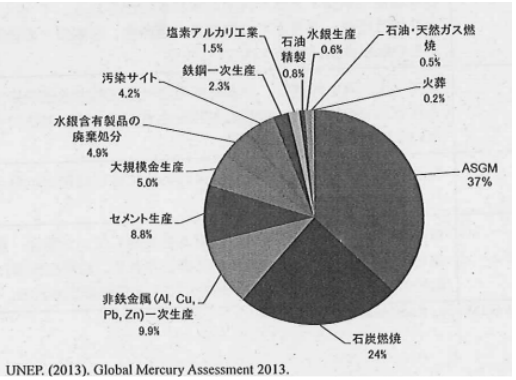

図 2　水銀排出量 1960 トン（2010）のインベントリー区分

i)国内の ASGM がわずかでない（more than insignificant）と判断する締結国は，国家行動計画を策定・実施すると共に，3 年ごとにレビューを実施する。

ii）国家行動計画に含まれるべき事項（付属書 C）として，以下が挙げられる。

・目的と削減目標

・廃絶に向けた行動

・基礎（ベースライン）となる水銀の使用量の推定値

・排出削減や貿易管理，高感受性集団の保護のための方策等

つまり，概して，現状を容認するものの，水銀使用量を暫時減少させていく行動が要求されている。

また，水銀の供給源と貿易については，第 3 条に以下の点が条文化された。

i） 新規の水銀鉱山開発は条約発効後生産を禁止，既存の鉱山も発効後 15

年以内に閉山する。

ii）水銀の輸出入に関しても，厳しい制限が課せられる。

しかし重要な点は，小規模金採掘（ASGM）に限定して，水銀の使用が禁止されていないことである。それは貧困層の地域社会の持続性に配慮する利用を意図している。しかし，長期的視点に立てば水銀の供給が減少していくことになるので，その影響を受ける前に ASGM 現場における水銀使用を削減することと，その間の健康被害を最小限にしていく努力が国際社会に課せられていると言えよう。

したがって、本研究が着目するのが、ASGM 現場における Zero Mercury への展望である。これは UNEP 水銀条約の理念に沿うものであり，さらには世界の知恵を結集しなければならない課題であると位置づけられる。つまり，包括的な改善を目指しながら，出来るところから Zero Mercury を実現し，拡散していくことが実践として求められている。同時にそれらが地域社会の持続性を創造する方向で展開することが望まれている。

2．研究目的と対象地域

本研究は，水銀条約に鑑み，水銀ゼロ「Zero Mercury」を目指すための実践への検討を視座に置いている。よって，最初のステップとして，Zero Mercury の成功事例の分析から水銀削減や環境汚染の抑制に効果的な新プロセスを抽出し，まず実践可能な対象地域を選択することである。ここでは，水銀使用量の少ない ASGM 途上国における状況から順次分析してゆくが，ひいては，最大の水銀使用量と直接従事者数を抱える中国(1) における課題改善までを展望してゆくことが望まれる。

現在世界の小規模金採掘現場の分布（図 3）［環境省，2014］及び，小規模金採掘で消費している水銀量（図 4）［水銀に関する水俣条約の国内対応委員会，2014］に鑑み，本研究では，2005 年から 2010 年にかけて特に水銀使

用が急増しているアフリカ地域に着目した。

他方，小規模金採掘の直接従事者（miner と呼ばれている）は，世界の合計で約 1300 万人, その内アフリカの合計が 300～350 万人といわれている[2]（表 1）[3]［佐藤，2003］。さらに，もう一つ重要な事柄として，直接従事者以外に家族を含めて，約 10 倍の地域住民が金採掘に依存した生活をしているという点である。

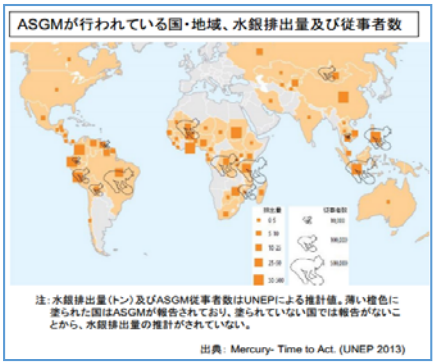

図 3　世界の小規模金採掘国の分布（2013）

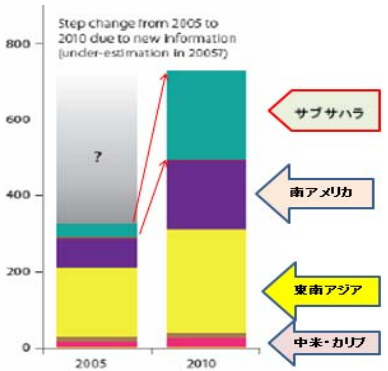

図 4　水銀の消費地域の変化（文献 3 に加筆）

国	直接雇用者数（人）
中国	430万
インド	100～110万
インドネシア	30～50万
パプアニューギニア	1.5～2.0万
フィリピン	20万
タイ	2.15万
ベトナム	3.5～4.5万
世界合計	1,300万人

内、女性450万人
子供60万人

表 1　主要な ASGM 国の直接雇用者数

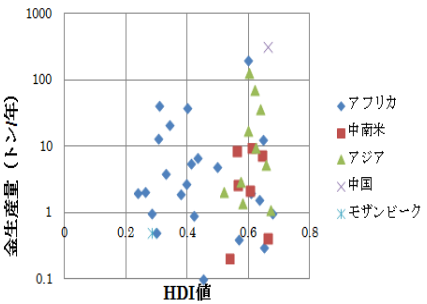

図 5　人間開発指数（HDI）が低い国の HDI と金生産量の関係（筆者作）

図 5 に，人間開発指数（HDI）と金生産量との関係性［UNEP，2011］を図示した。
アフリカ地域では，HDI が全体に低い中で金生産量のばらつきが大きい。その中で，東アフリカのモザンビークが金生産量と HDI において最も低い値を示すことが分かった。一方アジア地域おいては，中国は HDI が最も高く，かつ金生産量も圧倒的に多いことが分かった。

地質学的な観点からは，南アフリカ近隣諸国の金鉱床は，古い楯状地層周辺の鉱脈型金鉱床［地学団体研究会，2002］に関連しており，隣国であるジンバブエやモザンビークでは，近年開発が進み ASGM が急増する可能性あると考えられる。

本研究では，まず，モザンビークを起点として，Zero Mercury への実践的展望を基礎研究の成果も踏まえて検討した結果を報告する。モザンビークに関しては、2002 年に鉱山法が改正され，小規模金採掘に関して行政側の管理と支援機構が構築され，「採掘パス」の発給と資金援助を行っている等，行政の取り組みが進んでいる［Dondeyne,2009；（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構，2012；細井，2014；Hilson，2014］上に，実態を知る上での情報量が比較的多いことも選択の理由である。

Zero Mercury への取り組みにおいて，本研究の特徴は，採掘後の破砕工程に乾式破砕プロセスを適用することと，汚染されている土壌の修復に関する対策をも兼ね備えている点にある。

さらに，グローバルに視野を広げた場合，本研究の展望には，中国における小規模金採掘の問題の解決も射程に置いて工夫することが求められると考えている。

3．Zero Mercury に向けた乾式プロセスの考案

1）一般的な金抽出方法

一般に，小規模金採掘現場の従来の流れは，鉱脈情報の入手から始まる。そして，水銀を使用する場合は，次の工程を経てから，粗金，金鉱物[4] を得て，売買している。写真 1 は一般的な砂金製錬の工程の一部である。全体の流れの概略は以下のようになる［貴田,2012］。

写真 1　小規模金採掘現場で水銀使用の一般的な作業工程

採掘＋廃鉱石⇒粗破砕⇒微粉砕⇒選鉱（水洗選鉱、振動篩、遠心分離等々）⇒（含金）重量物＋水銀（panning）⇒水洗⇒アマルガム分離（選鉱）＋鉱泥⇒アマルガム加熱⇒金＋水銀蒸気（大気放散）⇒金回収⇒再溶解⇒金地金～純金

これらの工程の中で，微粉砕工程以降はほとんどが湿式処理であり，家族ないしは小集団で行っている。

環境や健康上の問題としては，以下の 5 点が考えられる。

(1）動かされる全物質量は関与総括物質総量（TMR; Total Material Requirement）と言われ、金の場合は約 2 万倍になることから，金 1g 当たり 2～3 トンの廃鉱石と大量の泥水が発生すること，およびアマルガムの選鉱時には泥水に水銀が懸濁して逸散することである。

(2）大量の水が必要である。そして，泥水の排出もさることながら，乾燥するためにはエネルギーと表面積が必要である。

(3）水銀と金を反応させる工程（panning），およびアマルガムをバーナー等で分解する工程では、直接作業者の身近な場所から大量の水銀ガスが発生し，それを吸引することになる。

(4）概して，ASGM 地域の大気中水銀濃度が高く，低濃度の長期間曝露を

受けることになる。さらに，この水銀が自然界で有機化する可能性があり，メチル水銀中毒（水俣病）が懸念されている。

(5）近年，アマルガム分離工程後の鉱泥や採掘後の廃鉱石中の金を回収する目的で，青化液を使って金を抽出する化学的抽出法が行われるようになり，猛毒なシアン化水銀の影響が懸念されるようになった。

2）Zero Mercury へ向けた取り組みの成功事例

Zero Mercury に向けた各種の試み［UNEP,2011］は何件かあるが，その中の一つとして，モザンビークの個人企業（Clean Tech mine 社）が水銀を使わずに 89～93％純度の製品金の生産に成功している事例がある［Drace,2012］。この場合の鍵となる技術はボールミルに（左 C）よる粉砕と遠心分離機（左 D）による選鉱および金含有重量物の乾燥と磁選（右 C）である。採石量は 1～2 トン/日とされており，TMR バランスから想定すると金の回収量は 1g/日以下ということになる。まさに家族労働そのものである。

写真 2 は Clean Tech Mine 社の作業の要所を示している［Drace,2012］。同社は水銀を使わないことによって，廃鉱石や尾鉱を備蓄する傍ら，建材等に活用している。

写真 2　Clean Tech Mine 社の Zero Mercury Process の作業

3）本研究における実践への検討

本研究では，上述の環境や健康上の課題解決の一つの視点として，水の浪

費と汚泥の発生を抑制するため，水を使わない乾式プロセスにすることである。同時に地域社会における破砕工程以降の共同化を視野に，破砕能力を 5～20 トン/時（金収量 2～10g）程度の規模を想定して工程を組み立てた。図 6 はそのプロセスの粗案である。ここで鍵となる点は，以下の 4 点である。

(1) 原料鉱石を粗破砕で 10 ㎜以下にした後，乾式の砕砂製造機で細骨材を作り，乾式振動篩機で軽量物，中級重量物，重量物に分離した後，重量物のみ磁選後，湿式処理をして金を濃縮し取り出す。この部分は前述の Clean Tech Mine 社と同様である。

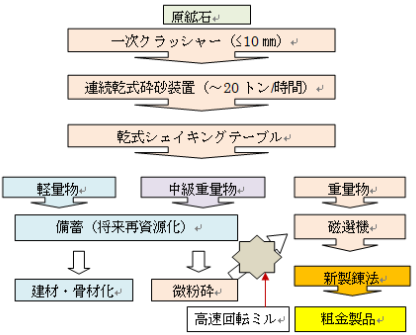

図 6　粗金抽出の Zero Mercury 型乾式プロセス（筆者作）

(2) あるいは最終の湿式処理の前に，ホウ素系のフラックスを使う新製錬法であり，脈石部分と金を分離することも可能である［UNEP，2011］。

(3) 軽量物と中重量物は再資源化のために備蓄するか，建材や細骨材としてもそのまま利用できる。

(4) 中級重量物には，金が残留していることも考えられるので，手持ちの微粉砕機か，高速回転ミルによる微粉砕化を経て，重量物と同様の金回収処理に乗せることも考えられる。

しかしこの方法の弱点は，破砕工程における粉塵の発生と予想している。そのために，本研究が注目している特殊粉砕機(5)　［晃立工業㈱，2014］を導入する意味があると考えている。この破砕機は硅石からコンクリート用細骨材を製造する破砕機（生産規模～20 トン/時）として開発されたものである。加えて粉塵発生を抑制する機構を内蔵している。

また，設備投資の負担を軽減するために共同化は欠かせないと考えている。次に，その規模を推定するため，モザンビーク鉱業法施行規則第 58 条の「小規模な鉱山業」の定義［(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構，2012］を

基準に考えることとした。この条項はアフリカ地域の実態を知る上で有用である。それによると，①主に沖積鉱床から鉱物資源を採掘する場合は，年間採取量が 6 万 m³未満，②非沖積鉱床から露天掘りで鉱物資源を採掘する場合は，年間採取量が 2 万 m³未満，③廃鉱や鉱滓から採取する場合や地表生産の場合は，年間採取量が 1 万 m³未満，④深度 20m 超の地下作業や，長さ 10m 超の坑道内での作業は行わない, ⑤毒性化学品ないしその他のいずれの試薬も使用しないとされている。

ここで①～③の数値から規模の上限を推定することが出来る。単純計算では，1 鉱山主当たり，1 万～6 万 m³は日産 27.4～164.4m³（365 日/年），乾季のみとすればその 1 /2 として，せいぜい 10～40 トン/日（180 日/年）の規模に相当する。したがって上述の破砕機 1 機で～20 トン/時の破砕能力があるので，鉱床形態の①から③に合わせて，破砕時間を調整すれることで，実現可能な共同化の集団規模が見えてくる。

本研究では本案に対する基礎実験を踏まえた上で, 実用化の可能性を把握しなければならないと考えている。

４．水銀汚染土壌の修復に関する予備実験

小規模金採掘現場における，水銀の放散形態によって，低濃度であっても土壌汚染は広範囲にわたっていると予想される。そこで本研究では、先行研究にある各種の方法を次のように区分して評価を行った。

１）ファイトレメディエーション，バイオレメディエーション

低濃度の汚染で広範囲の場合には，一般にファイトレメディエーションやバイオレメディエーションが推奨される。しかし必要とする機能，機作はアキュムレイションにあるので，水銀を蓄積した植物や生物の後処理まで工程に組み入れる必要がある。さらに，水銀を効率よく蓄積させるためには遺伝子組み換え技術の応用［芳生他，2002；芳生，2010］が不可欠で

あり，ASGM を対象とする場合，実用化までの道のりが長いと予想される。

２）水銀を含む鉱泥や底泥の処理

これは金の含有量と総量によっては金回収を目的に新たな金回収プロセスとして成り立つ。この方式は，Clean Tech Mine の場合も，本研究の乾式プロセスの場合も，備蓄廃鉱石の製錬と同様な視点に立てば，検討するに値する。いずれの場合も回収される金の量と採算性に依存する。

３）セメント系固化材による固定法

一部の水銀濃厚土壌の処理の方法として, セメント系固化材による固定法も選択肢としてある。この方法は日本のセメント協会［セメント協会, 2003］によって標準化されており, 技術的には有効であるが, 現地の土壌の性質（成分，酸性度，水分，気温等）と水銀含有量との関係性を基礎的に研究しておく必要がある。この方法によってカドミウム，鉛，ホウ素，フッ素，砒素等の固定にも有効であることが知られている［セメント協会，2003］ 。

以上の中で本研究では，３）のセメント系固化材による固定法について, 水銀 1%濃度の模擬汚染土壌のコンクリート封じ込め実験を行った。各種条件の 5 検体を固化 1 年後に溶出試験を行った結果, 溶出基準値（0.0005mg/L）以下の結果は得られなかった。なお日本の改正土壌汚染対策法［（社）全国地質調査業協同連合会他,2011]においては, 第 2 種特定有害物質（重金属類）には含有量規制（水銀は 15mg/kg）もある。したがって日本の場合は，有効性は確認されているものの, 処理を実施するに当たっては事前のトータビリティ試験や, 地盤の土質特性等の確認を行う等十分な配慮が必要であるとされている［（独）日本学術振興会，2012］。

５．まとめと展望

世界の人為的水銀排出量の 37%を占める小規模金採掘における，Zero

Mercury に向けた取り組みは世界共通の課題として捉える必要がある。

本研究では，その一環として乾式の Zero Mercury プロセスを提案した。また，水銀汚染土壌の修復に向けてセメント系固化材の基礎実験も試みた。いずれも実用化までには綿密な基礎研究とパイロット試験が必要であることは自明である。

以上のように本研究は未だ構想段階であるにすぎない。しかし，有史以来水銀アマルガム法は利用し続けられてきた現状に鑑みると，その長い歴史の中で，水銀ゼロ「Zero Mercury」への研究は避けて通れない一つの通過点として捉えることができるのではないだろうか。

注

(1) 東南アジアの消費量の約半量は中国となっている。

(2) 中国の小規模金採掘の直接従事者の場合は，約 430 万人であり，その大きさに注目しておかなければならない。

(3) 表 1 には女性と子供の概数も併記した。

(4) 日本の金管理法第 2 条では，i） 物理的方法のみで得た自然金を「粗金」（80～95%），ii）水銀法あるいは青化法で得たものおよび，iii） 水銀法と青化法を連結して得たものを「金鉱物」（95%以上 99.9%以下）という。その後の仕上げ精錬によって得られるものを「金地金」（99.9%以上）および「純金」（99.99%以上）と規定されている。

(5) 晃立工業㈱が独自に開発機した砕砂製造機。

参考文献

環境省（平成 25 年 9 月）「水銀に関する水俣条約の概要」.

環境省（参考資料），
http://www.env.go.jp/council/05hoken/y0512/ref05_3.pdf
閲覧日　2014 年 12 月 8 日.

貴田晶子（2012 年 1 月 27 日）「我が国及び世界の水銀使用・排出状況」水銀条約に関する公開セミナー資料,
http://www.env.go.jp/chemi/tmms/seminar/kokusai/mat02.pdf
閲覧日　2012 年 6 月 10.

晃立工業㈱「粉砕機・破砕機」,
http://www.koritsu.com/html/refiner.html

閲覧日 2014 年 11 月 9 日.
佐藤洋（2003）「国際的水銀汚染問題への対応に関する研究－有機水銀の健康影響に関する研究のレビュー」国立水俣某総合研究センター.
（社）全国地質調査業協会連合会,（協）地盤環境技術研究センター共編（2011）『土壌汚染調査技術管理者試験完全対策』
水銀に関する水俣条約の国内対応検討委員会（参考資料）（2014 年 3 月）,「水銀に関する国内外の状況等について」,
www.jwma-tokyo.or.jp/asp/info/html/pdf/20140530_AtomosphereDischargeMesuresMercury-01_reference01.pdf
閲覧日　2014 年 10 月 4 日.
セメント協会編（2003）『セメント系固化材による地番改良マニュアル（第 3 版）』.
地学団体研究会編（2002）『新版地学教育講座④岩石と地下資源』東海大学出版会,158-163.
Dondeyne S.and Ndunguru E.et al（2009） Artisanal mining in central Mozambique-Policy and environmental issues of concern, *Resources Policy*,34, 45-50.
（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（2012）「モザンビークの投資環境調査」.
（独）日本学術振興会,重金属類と鉱物の相互作用に関するワーキンググループ編（2012）『重金属類汚染対策のための鉱物材料ガイドブック』（独）日本学術振興会　産学協力研究委員会,鉱物新活用第 111 委員会,星雲社.
Drace K., Kiefer A. M. et al（2012） Mercury free ASGM in Mozambique-Utilization of magnets to isolate gold at Clean Tech Mine, *J. of Cleaner Production*,32,88-95.
Hylander L.D.and Meili M. （2005） The Rise and Fall of Mercury: Converting a Resource to Refuse After 500 Years of Mining and Pollution. *Critical Reviews Environmental Science and Technology*,34,1-36.
Hilson G.（2014） Four Decades of support for artificial and small-scale mining in sub-Saharan Africa: A critical review, *The Extractive Industries and Society*, 1,104-118.
芳生秀光,清野正子（2002）「水銀汚染浄化のための新規バイオテクノロジー」, *Journal of Environmental Biotechnology*, Vol.2,No.2, 95-102.
芳生秀光（2010）「水銀耐性遺伝子の水銀浄化への利用」*The Pharmaceutical Society of Japan*, 130, 1143-1156.
細井義隆（2014）『成長する資源大陸アフリカを掘り起こせ－鉱業技術者が

説く資源開発のポテンシャルとビジネスチャンス』B&T ブックス日刊工業新聞社.
UNEP（2011） Environment for Development Perspectives: Mercury Use in ASGM, Division of Industry, Trade and Environment.
UNEP（2012） A Practical Guide-Reducing Mercury use in Artisanal and Small-scale Gold Mining.