The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	貴金属鉱業における金、銀、水銀に関する資源・環境問題の歴史的射程から未来へ連動する文理融合研究 ：ポトシ銀山技術の再評価および小規模金採掘の地域再生、都市鉱山の開発を包摂する持続可能性原理の討究
Author(s)	姉崎, 正治
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/54015
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

博士学位論文

貴金属鉱業における金、銀、水銀に関する資源・環境問題の歴史的射程から未来へ連動する文理融合研究

−ポトシ銀山技術の再評価および小規模金採掘の地域再生、
都市鉱山の開発を包摂する持続可能性原理の討究−

平成 27 年度

大阪大学大学院　人間科学研究科
グローバル人間学専攻

姉　崎　正　治

目　次

序　章
第１節　本研究の意義とその背景　・・・・・・・・1
第２節　本論文の構成、研究の目的および研究手法　・・・・・・・・3
本章の参考文献　・・・・・・・・4

第１章　鉱山開発と鉱害に関する基盤概念　・・・・・・・・7
第１節　金属資源開発の持続可能性と本論文における視座　・・・・・・・・7
1－1　「持続可能な開発」に関する歴史的経緯　・・・・・・・・7
1－2　金、銀の貴金属鉱業の持続可能性と本論文における着眼点　・・・・・・・・10
第２節　鉱業の持続可能性を評価する概念と三つの研究課題に対する包摂性　・・　13
2－1　鉱業の持続性と生産量推移の姿との関係　・・・・・・・・13
2－2　日本の金属鉱業の歴史から学ぶ持続可能性　・・・・・・・・14
2－3　関与物質総量（TMR；Total Material Resources）と質(含有成分；Ingredients)により評価する鉱害の新たな定義　・・・・・・・・16
2－4　Herman Daly の三原則と鉱山開発におけるオーバーシュート(鉱害の顕在化)　・・・・・・・・20
2－5　鉱山業の生産経緯と地域社会の持続性　・・・・・・・・21
2－6　持続可能な鉱山開発の形態と動態変化及び適正技術と適正規模・・・・・・23
第３節　金、銀、水銀の鉱山開発の歴史的射程のおける研究課題の位置付け・・・・24
3－1　金、銀の水銀による製錬(粗金・粗銀の製錬)技術史における研究課題の位置付け　・・・・・・・・24
3－2　金、銀の鉱山開発と生産の歴史的変遷から見た研究課題の位置付け・・・・27
3－3　金、銀の地下資源と地上資源の量的関係および転換点における研究課題の位置付け　・・・・・・・・32
本章の参考文献　・・・・・・・・36

第２章　16 世紀以降のスペイン植民地の銀鉱業とペルー副王領第五代副王 Frnsisco de Toledo の先進的鉱山業および現代に連動する水銀による環境課題　・・・・42
第１節　本章の研究目的と二つの論点　・・・・・・・・42
第２節　第五代副王 Toledo の鉱山業と現代のサステイナビリティ学の視点からの再評価　・・・・・・・・47
2－1　ポトシ銀山概史と本節の目的　・・・・・・・・47
2－2　副王 Toledo の鉱山業の概要とその実績　・・・・・・・・48
2－2－1　Toledo の鉱山業を成功させたペルー式水銀アマルガム法（カホネス法；cajones 法）
2－2－2 副王 Toledo の鉱山業の主要施策
2－3　帝都ポトシを描いた絵図から読み取る鉱山都市の構造　・・・・・・・・50
2－3－1　帝都の鳥瞰図と現在との比較

2－3－2　Arzans の製錬工場図から読み取る作業工程のシステム
2－4　ポトシ鉱山の地質学的特徴と銀鉱石および採掘技術　・・・・・・・・55
2－4－1　ポトシ鉱山の銀鉱石品位に関する記述
2－4－2　ポトシ鉱山の地質学的検討
2－4－3　ポトシ鉱山における採掘技術
2－5　副王 Toledo 治世下で進められたサステイナビリティに係る諸施策　・・・・58
2－5－1　赴任以前の廃鉱石（廃鉱・屑鉱・鉱滓等）を資源とした銀の回収
2－5－2　鉱泥処理と水銀回収
2－5－3　燃料用植物イチョの保護と熱効率改善
2－5－4　副王 Toledo の技術上の諸施策が今日に波及している影響（鉱山業の持続可能性の側面）
2－6　植民地時代の水銀被害に関する認識とトレドの対応策　・・・・・・・・61
第３節　スペイン植民地におけるストック水銀量の推定と今日に及ぶ水銀鉱害の諸相　・・・・・・・・65
3－1　中世のスペイン植民地における銀鉱山業におけるストック水銀量の推算・・66
3－2　ストック水銀の形態変化と水銀鉱害の現在への波及　・・・・・・・・69
3－3　廃鉱、尾鉱中の水銀による汚染　・・・・・・・・71
3－3－1　ストック水銀による鉱害
3－3－2　天災事変による水銀の流失事件[20-21]
3－3－3　ストック水銀の土壌中の存在形態
第４節　植民地時代の銀鉱業と今日の小規模金採掘（ASGM）を俯瞰する汚染地球規模の水銀汚染　・・・・・・・・75
第５節　本章のまとめ　・・・・・・・・76
本章の参考文献　・・・・・・・・77

第３章　現代の小規模金採掘（ASGM）の環境問題と持続可能な地域社会の創生
-乾式プロセスの提案と起点効果の発揮を目指して-　・・・・・・・・83
第１節　水銀条約と本論文の研究課題との関係および実践研究への背景　・・・・・83
1－1　水銀条約における ASGM の位置付け・　・・・・・・・・83
1－2　ASGM の定義　・・・・・・・・84
第２節　金鉱業の資源・環境問題　・・・・・・・・85
2－1　世界の金鉱業の動向と小規模金採掘の位置付け　・・・・・・・・85
2－2　ASGM の拡大とその地域の特徴　・・・・・・・・87
2－3　検討対象国の選定　・・・・・・・・88
第３節　モザンビークの小規模金採掘の実態と Zero Mercury 化への取り組み　・・・90
3－1　モザンビークの ASGM と鉱業ガバナンス　・・・・・・・・90
3－2　Zero Mercury の成功事例　・・・・・・・・91
3－3　ASGM 地域の再生を目指す新しい視点からの「乾式処理プロセス」の提案・・92
3－4　水銀汚染土壌の修復に関する予備実験　・・・・・・・・94
第４節　金の製錬技術と小規模金採掘現場の環境問題、健康被害および地域社会の持続

性に関する考察 ・・・・・・・・95
4－1 ASGM で生産される金「粗金」 ・・・・・・・・95
4－2 ASGM の鉱害性（TMR の量） ・・・・・・・・97
4－3 製錬法のよる有害性（TMR の質） ・・・・・・・・98
4－4 ASGM の地域社会の生計上の持続性 ・・・・・・・・99
第 5 節 本章のまとめ ・・・・・・・・100
本章の参考文献 ・・・・・・・・101

第 4 章 都市鉱山開発並びに使用済携帯電話のリサイクルシステムの構築・104
第 1 節 本章における研究の背景と目的 ・・・・・・・・104
1－1 金属のリサイクル史における小型家電リサイクル制度の位置付け ・・・104
1－2 地下資源から地上資源への資源の移動：携帯電話回収への挑戦 ・・・・・・・・106
1－3 実践研究の概要；内容と構成 ・・・・・・・・108
1－4 本章の構成 ・・・・・・・・110
第 2 節 「顧客接近型回収方法」の工夫と実践および結果の考察 ・・・・・・・・111
2－1 リサイクル制度の実施に際して官庁、自治体が実施した回収方式とその成果 ・・・・・・・・111
2－2 NPO による携帯回収と支援事業のジョイント効果 ・・・・・・・・112
2－3 本論文の「顧客接近型回収方法」の内容と実践試行の結果及び効果の考察 ・・・・・・・・112
2－3－1 イベント内容と回収結果の概要
2－3－2 回収携帯の製造年から見た都市鉱山の特徴
2－3－3 各種の回収方式の効果と各種要因の考察
2－3－4 顧客接近型回収方式の発展へ向けての課題
第 3 節 二段破砕法による貴金属元素の濃集・分離機の開発およびそのメカニズムの考察 ・・・・・・・・117
3－1 携帯電話の処理プロセスの先行研究と主な課題 ・・・・・・・・118
3－2 実験用破砕機、粉砕機の選択と予備実験 ・・・・・・・・120
3－2－1 一次破砕機（MS-Z5）の選択と特徴
3－2－2 二次破砕機（SC-01）の採用と特徴
3－2－3 ダストと付着した磁性物の量と成分
3－2－4 篩分け方法とそのばらつきの評価
3－2－5 金属成分の分析方法と問題点および評価用語（含有量，含有量比等）の定義
3－2－5－（1）本論文の分析方法と評価用語の定義
3－2－5－（2）携帯砕製物を一括分析する場合の課題と事前調査
3－3 二次破砕の高速回転ミルによる破砕の進行と貴金属濃集現象の発見・・・・128
3－3－1 粉砕過程の詳細実験
3－3－2 水平ブレード型高速カッティングミル（SC-01S）による破砕の進行と貴

金属の濃集現象
3－3－3　粉砕過程と濃集現象の関係
3－3－4　白金の粗粉側残留現象と随伴元素との関係
3－4　SC-01S による携帯砕片の粉砕過程の速度論的検討　・・・・・・・・135
3－4－1　携帯砕片の粉砕過程の速度論と相似性からの考察
3－4－2　粉砕中の循環流の意味と昇温現象との関係
3－4－3　先行研究に関する検討
3－5　携帯電話と籾米を砕料とした各種のブレード型高速カッティングミルの破砕特性の相似性　・・・・・・・・142
3－5－1　実験の目的と内容
3－5－2　鍋型と筒型の破砕機による携帯砕片と籾米の破砕過程の比較
3－6　鍋型，筒型破砕機の破砕特性に関する動力学的考察　・・・・・・・・146
3－7　SC-01S をスクリーンミルに改造した場合の連続分級・分離実験　・・・・・148
3－7－1　2 ㎜以下に濃集した金、銀を二次破砕中に分級する着想と装置の改造
3－7－2　分級スクリーン付き SC-01S による 2mm 以下の細粉の破砕中連続分級と金、銀の回収に関する実験
3－7－3 スクリーンミルの粉砕と貴金属濃集挙動の関係
3－8　粗金、粗銀の製品化に関する実験と一貫システムの評価及び事業性の検討・154
3－8－1　2 ㎜以下の金、銀濃縮粉体の金属濃縮と新製錬による 95％粗製品製造の可能性
3－8－2　物理的濃集方法の構想と予備実験
3－8－3　金、銀と水銀の反応の効率化と新しいプロセスの創造
3－8－3－（1）金箔、銀粉と水銀の直接反応
3－8－3－（2）反応側条件の工夫によるアマルガム化反応の促進
3－8－4　貴金属製錬と金プレートの製造
3－9　事業化構想の見通し　・・・・・・・・159
第 4 節　本章のまとめ　・・・・・・・・159
本章の参考文献　・・・・・・・・161

終　章　総括と今後の展望　・・・・・・・・165
本章の参考文献　・・・・・・・・169

謝辞　・・・・・・・・170

序章

第１節　本論文の意義とその背景

本論文は貴金属鉱業、とりわけ金、銀の鉱山開発とそれに伴う環境問題（本論文では鉱害と表記）と資源問題に焦点を当てている。また水銀は、金、銀の製錬において重要な抽出用金属であり、金、銀の鉱害問題に水銀が密接に関係していることから、「金」、「銀」、「水銀」三種類の金属を取り巻く資源・環境問題について、歴史学・製錬工学・人間環境学による文理融合研究の総体として論考を深めていく。さらに鉱山業の持続可能性を多次元的に描き出すことにより未来へと連動させることを目指した。

本論文における具体的な研究課題として、時間的および空間的に異質な三つの局面を取り上げ、共通する金属としての金、銀、水銀に注視しつつ、貴金属鉱山業の持続可能性について論究していく。すなわち三つの研究課題とは、一つ目が 16 世紀後半に開発された「ポトシ銀山（当時ペルー副王領内、現在はボリビア共和国内）」［研究課題 1］、そして二つ目が戦後から現在も拡大しつつある「小規模金採掘（Artificial Small-Size and Gold Mining；以降 ASGM と表記）」［研究課題２］および三つ目が、いままさに端緒に着いたばかりの「都市鉱山開発」（特に使用済携帯電話の貴金属回収）［研究課題３］であり、極めて多様・多次元である。しかし各論で導かれるように、時間的・空間的異質な資源・環境問題において、それらを包摂する原理の存在が明らかになるのである。

それを可能にするのは、近年の大規模鉱業を中心とした「持続可能な鉱山開発」とは異なる視点、つまり「適正規模」と「適正技術」を模索する立場から、現実社会における鉱業現場の持続性を加味しつつ、サステイナビリティ・サイエンス（以降サステイナビリティ学と表記）で議論される持続可能性指標との関係性を連動して議論するところにある。ここでは、上述の三つの研究課題に対して鉱山業の持続性を評価するための新たな考え方を導入することにより、それぞれに歴史過程と鉱業の異質性があるものの、小規模（適正規模）でありかつ人智の工夫（適正技術）により環境問題・資源問題を克服しうる持続可能性を有することが見えてきた。その指標と論点とは次の三項目である。

１）金属鉱業の鉱害の定量的評価として関与物質総量（Total Material Resources；以降 TMR と表記）を取り上げ、その量と質から鉱害の大きさと有害性を論じる。なお、大気汚染と森林破壊は個別指標として扱う。
２）Herman Daly の三原則を鉱業社会を動的に捉えた場合の速度論的基本原理、［鉱業（消費）と生態環境（供給）を結びつける原理］と考え、鉱業の持続可能な姿は両者のバランスの下に、定常状態の長期的な持続にあるとして考察する。
３）現実の鉱業の持続性は、地域社会の持続性および地下資源の埋蔵量と表裏一体であるという考えのもと、生産量推移の形（姿）を Hubbert のロジスティック曲線を応用して想定し、特にピーク以降の推移曲線を持続性の評価に用いる。

本論文の学究的優位性は、スペイン植民地時代の歴史資料を読み解き、技術的内容の抽出と評価を行い、また当時の環境問題の把握と現代との関係性を追求し、さらには金、銀の地下資源の成因と世界的分布、現代の小規模金採掘の分布と南北問題の必然性、鉱業規

模と持続性、地域社会の生計と経済並びに地下資源の減少と都市鉱山化する資源の循環性に至るまで、サステイナビリティ学の視座から過去・現在・未来の時空間を連動した文理融合研究に挑戦したことにある。つまり、歴史学・製錬工学・人間環境学の学融合による貴金属鉱業の持続可能性と包括システムの構築を討究するものであり、個人の中での文理融合を目指すサステイナビリティ学の学融合研究への新たな挑戦である。

上述の三つの研究課題を選択した時代背景として、二つ挙げられる。一つは、国際環境計画（以降 UNEP と表記）で 2013 年 10 月に採択・署名された水銀条約（水銀に関する水俣条約）[1)]を歴史的な節目として、世界的に水銀を削減していくことが打ち出され、現在本条約は 50 カ国・地域の批准待ちの状況下にあることである。そして二つ目が、2013 年 4 月に我国で使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律[2)]（以降、小型家電リサイクル制度と略称表記）が施行されたことにある。

前者の場合、1956 年 5 月 1 日の水俣病発見の正式発表に始まり、その後金属水銀はもとより有機水銀の猛毒性と自然界における生成機構が明らかになって、今日「Zero Mercury」[1]運動が世界規模に拡大した過程が背景にある。UNEP から提起された水銀の人工排出インベントリーの中で、ASGM の割合が 37.1%（2010）と最も高く、かつ年々増加してきた経緯が特徴的であった[3)]。これは、零細で小規模の金採掘に水銀が利用されていることを示しており、この解決への取り組みが、［研究課題２］に連動している。また、この問題を考察するにあたり、16 世紀後半以降スペインの植民地中南米において、銀山開発に水銀アマルガム法が適用され、大量の水銀を排出したこと、並びにその汚染が現在にも及んでいるという事実から、歴史過程を含めてこの水銀問題を論究する必要が生じた。その中心にあって象徴的存在であったポトシ銀山の技術評価と鉱害の波及性については、［研究課題１］で取り上げる。

一方、後者の問題の根源的要因は、金、銀が太古の昔から人間の至高かつ不動の価値に位置付けられ、絶えることなく採掘されてきたことに起因しており、現在もその傾向は変わらない。従って金、銀は地下資源の減少が最も早い金属であり、既に可採埋蔵量の 75%以上が採掘されたと言われている[4)]。しかしそれによって地上資源（以降人工資源または都市鉱山とも表記）に移行したことでもあり、その地上資源量において日本は世界に冠たる蓄積量を誇っている[5)]。地下資源の少ない日本にとっては、地上資源にある貴金属はもとよりレアメタルの回収が素材産業にとって、またそれの先端産業への波及性において喫緊の課題となっている。従来金属のリサイクルは、鉄鋼をはじめベースメタル（銅、アルミニウム、鉛等）が対象であり、使用済み製品からの貴金属、レアメタルの回収は、ほとんど行われてこなかった。そこには原因となるいくつかの障害があったのであるが、最大の障害は、製品の拡散性と総量が小規模であることにあり、その結果、回収事業が経済的に成立しにくかったのである。2008 年の尖閣列島事件を契機に、2009 年に日本政府は元素戦略を打ち出し小型電気・電子製品の回収に乗り出した[6)]。2013 年施行された小型家電リサイクル制度は、拡散性と経済性の障壁の克服を地方行政と市場の工夫に委ねての出発で

---

[1] 理念としての「Zero Mercury」；本論文では、2010 年 6 月の水銀に関する政府間交渉委員会第 1 回会合（ストックホルム）に参加した NGO『The Zero Mercury Working Group：ZMWG』（水銀問題に取り組む NGO の国際連合体）の名称から「Zero Mercury」を UNEP を含む全体の理念の総称として採用し用いることにした。

あり、ここに本論文の[研究課題 3]の位置付けと創造工夫の素地があったといえる。その工夫は次の二点に集約される。

1）回収対象として使用済携帯電話（以降携帯または携帯電話と表記）を選択した。携帯電話は拡散性の点から、新興国を含めて約 95%以上に普及[7]しており、研究成果の適用範囲が広いこと、および金の含有量が高く、かつ安定しているので、経済的価値が最も高い対象であり、規模の選択によっては事業性を生みだしやすいことに着眼した。
2）集荷・回収コストおよび貴金属濃集コストを削減するために、画期的な二段破砕方法を考案した。携帯電話はほとんど形状が同一であり、一次破砕機に整合性を持たせやすい。そこで、排出者のセキュリティが保証出来る機構を有し電源 100V の市販機を改造し、顧客接近型の回収方法を案出した。また二次破砕では、全く新しい粉砕機構を具備する粉砕機を見出し、貴金属の低コスト濃集法を開発した。これらの組合せによる安心・安全の回収システムが提供できると考えた。

これらの工夫と開発を織り込んだ社会実験と工学実験の成果を統合し、さらにそれを適正技術とする適正規模の事業性についての論究を試みたい。

第２節　本論文の構成、研究の目的および研究手法

上述の三つの研究対象を考察するに当たり、本論文を五つの章からなる構成とした。すなわちこの序章に続き、第１章から第４章までの各論、そして終章で帰結する。それぞれの研究課題に関する目的と研究手法を以下に概説する。

まず第１章では、持続可能な鉱業のあり方に関連して、サステイナビリティ学の見地から先行研究を精査した上で、持続可能性に関する概念もしくは指標について、その歴史的経緯を説明していく。同時に本研究における着眼点を概説し、それらと各研究課題との関連性を述べたい。1972 年のローマクラブが「成長の限界」を提起したことに始まった「Sustainability(持続可能性)」の国際的な議論は、1987 年の「環境と開発に関する世界委員会(World Commission on Environment and Development;WCED)」、いわゆるブルントラント委員会報告によって「Sustainable Development（持続可能な開発)」が世界の共通理念として定着するに至った[8]。しかしその解釈の多面性・多義性に関して、現在も議論が継続している。したがって鉱業に関しても、持続可能性の評価指標において定説があるとは言いがたい。そこで、第１章では、サステイナビリティ学の歴史的経緯を踏まえ、かつ本論文で取り上げた三つの研究課題を包摂する鉱業の持続可能性の概念について、先行事例を基礎に検討していく。その結果から、前述した三つの指標を根幹に据えながら、第 2 章から第４章までの各研究課題を議論する方針とした。その中で現実的な適正技術と適正規模を論じることにした。

第２章では、「研究課題１」としてポトシ銀山技術の再評価を行った[9-16]。特に第五代副王 Francisco de Toledo（1569－1581）（以降副王 Toledo と表記）が採用した鉱業システムをスペイン語で記述された歴史資料から読み解き、種々の新技術（特に銀の水銀アマルガム法）の導入、資源の循環使用、水力のカスケード利用等の先進的な技術の存在を明らかにしていく。さらにそれらの結果から、今日のサステイナビリティ学および循環型社

会の創生において議論されている諸施策が、既にこの時代に実施されていたことを示していく。しかしながら、当時の技術は必ずしも完璧でなかったために、今日あるいは未来にわたる鉱害源を残したのも事実である。この水銀鉱害は、第３章の ASGM の環境問題と連動しており、適正技術、適正規模の論議に重要な示唆を与えるものとなった。

第３章では、[研究課題２]としての小規模金採掘の再生について議論する[17-19]。戦後の 1970 年代以降急増しつづける ASGM の実態を把握した上で、UNEP 水銀条約の趣旨に従い、金採掘で用いる水銀排出を低減する技術の開発と、その技術をもとに持続可能な地域社会の創生・再生をめざす Zero Mercury 戦略を構想していく。ASGM の行われている地域は発展途上国の特に僻地に分散している。よってその採掘現場の数と採掘者および依存者の数は膨大であるため、起点・波及効果を発揮する国・地域を選択しつつ、優先的に成功事例の構築を目指すことにした。本論文では、最も新興の ASGM 地域であり最貧国地帯でもあるサブサハラ地域に着目し、政治的にも比較的安定しているモザンビーク共和国（以降モザンビークと表記）の ASGM を起点に考察することにした。技術的には水資源の節約と水銀使用量の削減を目指す「乾式処理プロセス」を考案し、その適用可能性についての検討を行う。基本的には、その技術や規模に関しては現地適用型のものが要求される。加えて、既に汚染されている土壌の修復に関しても若干の実験を踏まえ、地域産業との接点を持つバイオテクノロジーについて論究し、持続可能な地域社会の再生について言及していきたい。

第４章では、[研究課題３]としての都市鉱山開発の実践研究を扱う[20-26]。上述したように金と銀は地下資源の枯渇度合いが最も高い元素であること、その分地上資源に置き換わっていることに注目した。しかも日本は金、銀の地上ストック量は世界一位であり、資源国でもあるが、両金属は共に宝飾価値、資産価値がある他に、耐食性、電気伝導性、熱伝導性等で銅と並んで優秀な工業素材、電子部品の素材でもある。よって、日本の最先端技術を支えるビタミン剤と言われている現実を直視し、その有効な回収方法の開発に着手した。しかし用途が多種多様にわたるため、経済ベースでの使用済み製品の回収は非常に困難であり、特に小型電気・電子機器においてはその傾向が顕著であり、リサイクル制度の成功はコスト削減につながる斬新な技術とシステム上の工夫によるところが大きいと考えられた。そこで本論文ではこの点に鑑み、「顧客接近型回収方法」と「二段破砕法による貴金属元素の濃集方法」を開発し、回収から製品までの一連の社会実験を実施した過程を本章では述べていく。さらに結果を踏まえて、適正技術に立った適正規模の事業化の可能性を検討することが可能になった。

終章では、結論として、これら時間的および空間的に異質な研究課題における貴金属鉱業の持続可能性について、それを包摂できる体系として、本論文で取り上げた概念もしくは指標がほぼ妥当なものであることを導いていきたい。さらに諸処の課題を確認しつつ、今後の研究の展望を模索していきたい。

【参　考　文　献】

1）環境省：水銀に関する水俣条約（2013 年 10 月採択・署名）
http://www.env.go.jp/chemi/tmms/

閲覧日　2014 年 10 月 3 日
2) 環境省：使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律（平成 25 年 4 月 1 日施行）
https://www.env.go.jp/recycle/recycling/raremetals/law.html
閲覧日　2014 年 10 月 3 日
3) 環境省環境健康部環境安全課；水銀規制に向けた国際的取り組み「水銀に関する水俣条約」について、(2014)
4) Valero A. And Valero A. ：Physical Geonomics：Combining the energy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion, Resources, and Recycles, 54, pp. 1074-1083(2010)
5) （独行）物質・材料研究機構：元素戦略情報－都市鉱山関係データ
http://www.nims.go.jp/genso/data/urban_mine.html
閲覧日　2014 年 10 月 6 日
6) 経済産業省：「レアメタル確保戦略」の公表について（平成 21 年 7 月 28 日）
7) Garbage News.com：携帯電話普及率推移（～2014）
http://www.garbagenews.net/archives/1962432.html
閲覧日　2015 年 5 月 7 日
8) 矢口克也：「持続可能な発展」理念の実践課程と到達点、総合調査「持続可能な社会の構築」－2、国立国会図書館、(2010)
9) 姉崎正治：イスパノアメリカの植民地時代における銀鉱山での水銀汚染に関する地域動態的研究、 大阪大学大学院人間科学研究科、グローバル人間学紀要、 vol.1, pp.55-69 (2008)
10) 姉崎正治:ポトシ鉱山のカリカリ貯水池決壊事故に関する技術的論考－植民地時代のペルーにおける鉱山業の技術的側面、大阪大学大学院人間科学研究科、グローバル人間学紀要、vol.2, pp.19-35 (2009)
11) 姉崎正治：ペルー副王領における銀鉱業と水銀汚染－第五代副王 Toledo が推進した鉱山業を中心に－、大阪大学大学院人間科学研究科、修士論文 (2010)
12) 姉崎正治、三好恵真子：スペイン植民地時代のポトシ鉱山における銀製錬技術の再評価と今日的応用への可能性、大阪大学大学院人間科学研究科紀要、第 37 巻、頁 299-319 (2011)
13) 姉崎正治、三好恵真子：先人の知恵の結晶を生かす-独創的な文理融合研究による環境汚染改善への挑戦-、NewFoodIndustry,Vol.53,No.12, pp.69-79 (2011)
14) Shoji ANEZAKI, Emako MIYOSHI：Technical Aspects of Mining in Colonial Times of Peru described from the Collapse of Caricari Dam of Potosi Mine, BUMAⅧ, F-11 (2013)
15) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：副王トレドのポトシ銀山開発事業における屑鉱・鉱泥処理－歴史資料から読み解く現代への示唆－、廃棄物資源循環学会誌、Vol.25, No.6, pp.445-453(2014)
16) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：ポトシ銀山の先進的な鉱業システム－歴史資料から再評価する第五代副王 Toledo の環境諸施策等に関する新たな知見－、日本鉱業史研究会、No.68, p.63-82(2015)

17）姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：世界の小規模金採掘（ASGM）の実態と Zero Mercury に向けての実践研究、東アジア“生命健康圏”構築に向けてー大気汚染と健康問題を考える日中国際会議、ポスターセッション（2014）
18）姉崎正治、三好恵真子：世界の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、OUFC(Osaka University on China)ブックレット、No.6,pp.203-215(2015)
19）姉崎正治、三好恵真子：水銀条約における小規模金採掘を巡る課題と水銀低減に向けた提案、日本生活学会第 42 回研究発表会梗概集（2015 年 5 月 24 日）
20）姉崎正治,三好恵真子：都市鉱山に関する実践的研究ー使用済み携帯電話の破砕特性に関する基礎的検討、大阪大学大学院人間科学研究科紀要、第 38 巻、頁 131-153（2012）
21）姉崎正治,三好恵真子：先人の知恵の結晶を未来に生かすー独創的な文理融合研究による環境汚染改善への挑戦ー、Newfoodindustry,Vol.53,No.12, pp.69-79（2011）
22）姉崎正治,三好恵真子：使用済携帯電話からレアメタル回収技術開発と実践への展望ー先人の知恵の結晶を未来へ生かす挑戦ーNewFoodIndustry,Vol.55,No.6, pp.46-58 (2013)
23）三好恵真子、姉崎正治：独創的な文理融合研究によるレアメタル回収技術開発と実践的展開への挑戦、大阪大学大学院人間科学研究科紀要、第 39 巻、頁 153-174（2013）
24）姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：都市鉱山からの鉄鋼用レアメタルの回収技術の開発とシステム化の研究、（公財）鉄鋼環境基金　助成研究成果報告（2014）
25）姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：水平ブレード式高速カッティングミルによる一次破砕後の使用済携帯電話砕片の乾式粉砕過程に関する実験的検討、廃棄物資源循環学会論文誌、掲載決定（2015a）
26）姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：水平ブレード式高速カッティングミルによる使用済携帯電話の粉砕と貴金属成分の濃集現象、廃棄物資源循環学会論文誌、掲載決定（2015b）

第１章　鉱山開発と持続可能性に関する基盤概念

第１節　金属資源開発の持続可能性と本論文における視座

日本では、戦後の高度経済成長期以降大量生産、大量消費、大量廃棄という経済活動が行われてきた。その結果、先進国では前例のない種々の公害を経験しつつも、果敢に克服してきた[1)]。しかし、戦後の四大公害といわれる産業事件以前においても、明治時代の富国強兵策や殖産興業および日清・日露の戦争から第二次大戦に向けて重化学工業が著しく伸張したため、鉱山業[2]の拡大による煙害や鉱毒事件が発生していた[2-6)]。よって、このような「鉱山業」に起因する鉱害事件（鉱工業公害[1)]）を「鉱害」と呼ぶようになったのである。

本論文では、このような日本の鉱害の経験を振り返り、過去の鉱山開発はもとより、今日なお発展途上諸国を中心にして発生している各種の鉱山業に関係した環境問題を、サステイナビリティ学の包括的概念[7-10)]に照らし合わせながら論じることとしたい。すなわち本論文は、過去の経験を現代に生かしつつ、また新たに出現した課題にも挑戦しながら、主として「鉱業の持続可能性」と「金属資源の回収・循環」を切り口として討究する試みである。

1－1　「持続可能な開発」に関する歴史的経緯

本論文は、サステイナビリティ学を視座に置いて、貴金属鉱業の持続性を論じていく。その鉱業における範囲は、採掘から粗鉱を取り出し精鉱を得る段階あるいは、製錬においても粗製品（粗金等）の段階までを扱うことにしている。振り返って見れば、今日の日本においては金属採掘業がほとんどなく、精鉱の輸入国になっている。そのため鉱業の持続性と本論文の研究課題における持続性の議論との関係性を明確に位置づけておく必要がある。

持続可能性に関する概念の形成過程において、1972 年のローマクラブの『成長の限界』の警鐘を受けて、1972 年 6 月に開催された国連人間環境会議(ストックホルム会議)において、「Only One Earth」のスローガンのもと「人間環境宣言」が採択され、「国連環境計画」（UNEP）の設立が契機であると言われている。その後 1987 年 12 月国連総会において「環境と開発に関する世界委員会（ブルントラント委員会）報告書」が採択され、その冒頭序文に「持続可能な発展（Sustainable Development）とは、将来の世代が自らの欲求を充足する持続可能な能力を損なうことなく、今日の世代の欲求を満たすこと」と記され、持続的発展に関する定義が採択された。1992 年 6 月リオデジャネイロにおいて国連環境開発会議（地球サミット）が開催され、地球規模での持続可能な開発に向けた「リオ宣言」を採択し「アジェンダ 21」が合意された。その中には「持続可能性指標の開発」も謳われており、持続可能性に関する検討が深化していく[11-13)]。

その後 10 年を経て、2002 年 9 月に開催されたヨハネスブルク・サミット（World Summit on Sustainable Development）において、天然資源に関して「経済開発、社会開発を支え

---

[2] 鉱山業と鉱業；鉱山業は鉱山開発を伴う鉱業であり、本論文では鉱業と同義に扱っている。

る環境保護を地域を含めた世界レベルで推進することが基本的な目標とされ、環境保全と社会・経済開発が持続可能な開発の基本となる。その社会・経済開発の基礎となる天然資源の保護と管理は、持続的な開発の総体的目標であり、不可欠な条件である」と明記された。同時に各国の指針となる「ヨハネスブルグ実施計画」が採択され、持続可能性の概念が熟成・成立したとされている。その実施計画には、鉱業や金属産業に関する「パラグラフ 46」に以下の三項目が盛り込まれた[14-15]。

1）持続可能な鉱業と金属開発のための透明性と説明責任を促進するために、鉱業、鉱物、金属のライフサイクルを通じて、労働者の健康と安全を含む環境、経済、保険および社会的な影響と恩恵に対する取り組みを支援し、幅広いパートナーシップを利用し、関心を有する政府、政府間組織、鉱業各社および労働者並びにその利害関係者間の協力により、既存の国家レベルおよび国際的な行動をさらに前進させること。
2）各国法規制に従い、国境を超える重要な影響を考慮しつつ、土地の回復プロセスのための閉山後を含め、採鉱オペレーションのライフサイクルを通じた鉱物、金属および鉱業の発展に積極的な役割を果たすよう、地域および先住民コミュニティ、女性を含む利害関係者の参加を拡大すること。
3）小規模鉱業を含む鉱物の採鉱と加工のための資金、技術、キャパシティ・ビルディング支援を開発途上国および経済移行諸国に対し提供することで、持続可能な採鉱慣行を醸成し、また、可能かつ適切な場合において、付加価値を高める加工法を改善し、科学的情報と技術的情報の質を高め、劣化が進んだ土地を再生し、回復させること。

いずれの項目おいても、資源国は発展途上国に多く、金属の利用国は先進国に偏っている現実を克服していく理念が織り込まれている。１）と２）は、概してこれまでの大企業あるいは多国籍企業と鉱山現地の地域住民との間の長期にわたる対立と抗争[16]を克服し、環境を含めて持続可能な鉱業を目指すという意味合いが込められている。一方３）は、企業の採算性の低下により閉山したか、開発されていない鉱床を対象とし、それら小規模鉱業を生業とする零細な地域社会の雇用と生計を維持しつつ、現実の事態を改善することを目指す方向性が含まれている。

近年における持続可能な鉱山開発の評価方法を巡って、業界主導、政策主導を問わず多くの機関で検討されてきた[14-15][17]。例えば業界主導では、世界の先導的な鉱山企業 GMI（Global Mining Inisiative;日本の大手非金属会社も参加）が報告書をまとめている[15]。政策主導の場合、各国の鉱業の特殊性を反映して評価指標の内容は異なり、約 50 項目から 170 項目に上るものもある。概ね、物質・資源に関する物理的指標（Indicator）と地域社会・経営・労務等のソフトに関する項目（Indicator）に二分される[15]。その中で本論文に直接関係する物理的指標は、資源の埋蔵量、エネルギー投入量および気圏・水圏・地圏への排出量等の指標が該当する。

一方、同時代的に開発された製品のライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment;以降 LCA と表記）の手法を、資源から製品まで拡張して評価する試みも行われている。その分析過程（運命分析、曝露評価/特性化、被害評価）に上記の個別指標（Indicator）も適用される[18-19]。最終的に影響集約（Index 群）して総合評価と相互比

較のできる単一指標（Index）をアウトプットする。この Index 化においては各 Indicator に関するデータの標準化や精度が要求される。日本の場合は総務省が定めている「日本標準商品分類」および、経済産業省の「産業関連表」が利用される[20]。

持続可能性指標の例としては、地球規模から地域社会の幅広い対象のサステイナビリティ（持続性）を評価するため多くの指標が開発されている。特に、エコロジカル・フットプリント（Ecological Footprint；以降 EF と表記）やエコロジカル・キャリング・キャパシティ（Ecological Carring Capacity；以降 EC と表記）のような総合化された指標がよく利用されている。前者は人間活動の消費程度を示し、後者は自然環境の供給量であり、そのバランスから持続可能性を評価する。また、国民総生産 GDP や人間開発指標（ Human Development Index；以降 HDI と表記）なども利用されている。

なお経済学の分野では、上述した評価指標を持続可能性（Sustainability）の二つの概念[13)21)]で分類することも試みられている。一つはエコロジー中心主義に立つ「強い持続可能性」である。つまり自然資本の減少を人工資本の増加で一方的に代替することは不可能であるとする立場で、両資本は常に補完的であるとし、特に一定量の自然資本量を維持することが重要であるとする“コンスタントな自然資本ルール（自然資本ストックの物理的量が通時的に非減少である）”を主張する。これは自然保護と予防原則を戦略とする。

もう一つは、「弱い持続可能性」であり、技術中心主義の立場である。この概念は自然資本の減少を人工資本の増加で代替可能であるとする立場であり、自然資本と人工資本の総量を維持ないし増加させることを合理的とする“コンスタントな総資本ルール（総資本ストックのシャドウ・プライスによる評価額が通時的に非減少であること）”によって持続可能性を判断する。概して技術革新によって経済の発展を図ろうとする意図が含まれている。

持続可能性を測る指標には、上述したように単一の要素のみで持続可能性を測る個別指標群（Indicator）と、複数の尺度を統合した総合指標群（Index）がある[21]。これらの指標群は Sustainable Development の学術的解釈の経緯及び評価の対象によって、またそれを用いて政策課題に反映させようと試みる機関によって多種多様にある[13)21-24]。

また両概念の相違に関しては、自然資本と（無形資本を含む）人工資本の代替可能性に求められるが、いずれの概念もその境界には曖昧性がある。理論的には、熱力学第二法則（エントロピー増大則）に基づく概念は強い持続可能性指標に属する。また、人間の社会活動や経済活動要素を取り入れて、より総合的な評価、例えば幸福度指標や人間開発指標 HDI などの指標（Index）は概して弱い持続可能性指標に属する。つまりサステイナビリティの三要素、環境・経済・社会に対して、より環境に重点を置く指標が強い持続可能性指標と言える。

本論文において、序論で述べた三つの研究課題は、貴金属鉱業とりわけ金、銀と水銀に関わる鉱業に限定しており、また過去・現在に既に存在している対象であることから、それぞれの課題を包摂する持続可能性指標を検討することとした。第一には時間軸から見た持続性である。つまり総体としての鉱業の持続性を時間軸で見た生産量推移から評価する方法である。その生産量推移の中には様々な要因が含まれているが、環境との共生という面から理念的持続性概念として Herman Daly の三原則[7]を念頭に置く。その論拠は、現実の生産量推移を Hubbert のロジスティック曲線に照らして、長期間の持続的な推移が示唆

する環境との共生性に着目した考えである。一方、個別指標としては、環境破壊（以降鉱害と表記）の定量的指標として目的金属の関与物質総量（Ore-Total Materiales Requirment；以降 Ore-TMR または単に TMR と表記）の量と質を取り上げた。技術的には、貴金属鉱業は鉄や銅のようなベースメタルと異なり比較的に規模が小さいので、適正規模とそれを支える適正技術が重要になる。加えて地下資源の枯渇と地上資源への移行を取り上げ、貴金属の循環系にも注目した。

1－2　金、銀の貴金属鉱業の持続可能性と本論文における着眼点

鉱業の持続可能性を議論する立場には次の三つの立ち位置がある。

１）対象金属鉱種の地下資源埋蔵量に着目して、その可採年数や退蔵年数から持続年数を議論するもの[25-27]
２）地下資源の減少分が地上資源（人工資源ともいう）への移行分と捉えて、地上資源のリサイクルを視野に入れた循環型社会を目指して持続性を議論するもの[28]
３）対象金属資源の採掘から製錬までの LCA 分析によって、地域社会の持続性を議論するもので、インベント分析の環境影響因子に鉱害の程度を示す指標を含めて議論するもの[18-20]

１）の議論は、従来地質学や鉱床学を中心に地下資源の埋蔵量の研究がなされてきた経緯がある。現在では、クラーク数に基づく最大理論資源量に対して、理論回収可能量は 1%台にも満たないことが示された[20]。一方では技術的、経済的理由によって可採埋蔵量は年々増大しており、可採年数が減少していないことも明らかになっている[26]。最大の技術的課題は掘削深度であるが、露天掘りでは 800m から 1000m、坑内掘りでは 3000m から 4000m まで可能になりつつある。しかし地殻厚さ約 30km に対して 1%前後である。理論回収可能量がさらに伸びる可能性があるかに持続性が掛かっている。研究者によっては、今世紀中はほとんどの金属鉱種は持続可能性が高いと推定している[24-27]。

２）の議論は、総括的資源観に基づく都市鉱山開発論[28]が提示されて以来、日本では 21 世紀にはいって循環型社会形成推進基本法のもとに、3R の一環として使用済み製品の回収が俎上に乗り、各種製品・部品・素材のリサイクル制度および資源有効利用促進法によって一般廃棄物および産業廃棄物の両面からリサイクルが促進されてきた。そして最も困難と考えられていたレアメタルの回収が小型家電の回収に連動して、2013 年小型家電リサイクル制度が施行され、レアメタルや貴金属回収が結実した。しかし回収効果を上げるためには多くの課題を抱えている。本論文における［研究課題３］に対する試みは、その課題解決に向けた独創的なシステムと機器開発を含む実践研究である。

３）の議論では、採掘から製錬までの段階で対象金属を抽出するために採掘した粗鉱石以外に、表層土や坑道採掘土等の廃鉱や選鉱段階で発生する尾鉱等の隠れたフローに相当する厖大な量の関与物質総量 TMR とその含有物に着目した議論である。日本の鉱害の原因は、この関与物質総量 TMR の量と質によって引き起こされたと言って過言でない。つまり鉱山地域の環境破壊（鉱害）の第一義的な原因が、廃鉱や尾鉱の排出によるものであったのである。この点は前述のヨハネスブルグ実施計画「パラグラフ 46」の１）、２）に関連

して、鉱業の全ライフサイクル分析に立脚する本論文の［研究課題１］および［研究課題２］の論拠となっている。

本論文では、これらの廃鉱や尾鉱も人工資源と捉え、その回収システムの画期的な工夫を 16 世紀のポトシ銀山の技術から読み取って現代的意義を明らかにしていくが、これが[研究課題１]の核心部分になる。しかし、ポトシ銀山をはじめ、スペイン植民地時代の中南米で銀製錬に水銀を大量に利用した事に起因する環境影響が、数百年後にも及ぶ現代へ波及していることも事実である。そこで、その点にむしろ着目し、グローバルな水銀汚染問題に連動する問題として再検討した。この水銀問題は、現代の低開発国の僻地地域における小規模金採掘現場におけるものと同質であるとともに異質でもある。その異質性とは、まず水銀排出量に関して、その金製錬に消費される水銀量がスペイン植民地時代の銀製錬に年間利用された水銀量の約 2 倍に上ることに加えて、その小規模金採掘に従事する直接労働者と家族等の生活従属者の数が圧倒的に多いことである。また小規模金採掘現場の数と分布も地質学的な金の資源分布に従って世界中に分散しており、その多くが低開発国ないし開発途上国の僻地にあるということであり、これらの異質性が問題の解決を困難にしている。本論文ではそうした実態に即して、「Zero Mercury」への実践研究を企画するに当たり、起点・波及効果を重視することにした。本論文では[研究課題１]に連動して、小規模金採掘における水銀排出抑制を目指す目的で[研究課題２]を取り上げる。この点は前述の「パラグラフ 46」の３）の小規模鉱業の問題解決を目指す理念と合致するものである。

他方、本論文の軸心をサステイナビリティ学に置くため、それぞれの研究課題と「持続可能な鉱業」との関係を考察しておく必要がある。先行研究において、「持続可能な鉱業」について必ずしも明確には定義されていない[14-15)17)]。物理的な意味では、有限な地下資源と地上に移行した資源（都市鉱山）をトータルで捉える循環システムの構築が描かれてはいるが、現実の鉱業のあり方に関して多様な検討がなされている。しかし鉱業界において温度差はあるものの、ほぼ一致した捉え方として、「鉱業の持続可能性」は「企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility；以降 CSR と表記)」とほぼ同意義であると捉えており、その CSR 議論が主体のようである。単純化すれば、「鉱業の持続可能性は経済、環境、社会の三要因間の均衡を図ることであり、そのために社会的責任に立脚し透明性と説明責任を果たしつつ、未来適応型の競争力を付けていく」ということになる[14-17)]。

ここでいくつかの疑問が生じ、中でも最も重要と思われるのが、「持続」という概念の具体的な時間的尺度である。現在までサステイナビリティ学においても、持続可能な時間尺度に関してはほとんど議論がなされてこなかった[29-30)]。おそらく最も定義しづらい難問ではなかろうか。英英辞書における sustainable の意味は、“An action or process that is susutainable can continue or last for a long time”とされている。とにかく長続きするのがサステイナブルということになる[30)]。具体的な期間を提示している点で、民族文化人類学の視点から「サステイナブルな社会」とは、「人間の社会集団が三世代にわたって、自分の価値観とライフスタイルの重要な要素のいくつかを継承できるか」が問われ、それが出来る社会と定義している[10)]。本論文ではこの時間尺度に注目している。

そこで本論文では、この「持続期間」を鉱山業の採掘（採鉱から閉山までの）の期間として捉えることにした。この視点には二つの意味が含まれる。一つは、採掘期間は地域社会の存在期間でもあるということである。この間に閉山後の都市のあり方が議論され、閉

山後の社会建設を計画的に進めれば、生存を継続出来るという可能性を含んでいることである。あるいはこのような議論の有無にかかわらず、閉鉱後も地域社会が存続しているケースは枚挙に遑がないという事実がある。もう一つは、その社会の内実の実態である。鉱業の労働現場は過酷であるが故に、人権が軽視され奴隷や強制労働の対象とされてきた[1-6]。これと大同小異の実態は現在でも大企業や多国籍企業およびその傘下企業で行われてきた[16]。この裏返しとして、前述のヨハネスブルグ宣言の「パラグラフ 46」にその対応策の方向が盛り込まれたといえる。

本論文における鉱業の持続性を生産量推移の形（姿）で捉えようとする試みには、このようなマイナス要因を内包した持続性であることを明記しておく必要がある。それは過去の鉱山業において、労働者やその家族にとって常に負の圧力「苦」がしわ寄せされていたことは否めないからである[1-6]。しかし、多くの犠牲を伴いながらも今日それらの鉱山都市の多くが生きながらえ、中には「世界遺産」[31]の栄誉を得て観光都市や「銀の道」[32-33]等々として栄えている現実がある。そこには、地域社会・経済の持続があり雇用と生計の保証がある。このように見た時、鉱業の持続性の時間軸を大きくとる必要があると考えている。今日の多くの大企業の鉱業活動は、短期間に効率よく採掘して後閉山処理をする。一方で併行して新鉱山を開発し続けるパターンとなっている。問題は短期間操業であるとはいえ、採掘量に応じて廃棄物も大量になることである。この環境影響が見えないフローとして環境圧力を高め、地域社会の環境保全に弊害になっている。つまりそれまで地下に閉じ込められ嫌気勢雰囲気になっていたものが、開鉱後は好気性ないしは半好気性雰囲気の状態におかれ、その結果雨水、地下水による浸出水が酸性化し、半永久的に有害物質を溶かし込み続ける危険性を生み出すことになる。したがって閉山後とはいえ、廃水処理という課題が現地に残されることになる。

ここにHerman Dalyの三原則への回帰が想起される。環境の再生力の範囲内の開発が現実の課題になってくるのであるが、この視点は過去の鉱山業と比較する時、環境と調和して持続する鉱山業のあり方を再考する動機となっている。この点が本論文のサステイナビルティ学の一つの独創的視点であるといえる。図1-1は、日本の主要金属鉱山を金、銀系と銅その他系に分けて、その開発年度に対する閉鉱までの期間をまとめたものである[20]。合わせて中南米の植民地時代（16 世紀から 19 世紀初頭）に開発された主要銀山についても併記した。なお併記したデータは第 2 章の表 2－1 を引用している。いずれの地域の鉱山でも開鉱年と閉鉱までの期間（採鉱期間）との間には一つの直線関係が描かれ、古い鉱山の採鉱期間が長くなっている。しかも二つの直線は勾配がほぼ同じと言える。ここで日本と中南米の直線間には採鉱期間にして約200年の差があるが、それぞれのデータの採鉱期間のとり方に原因があると考えられる。つまり日本の場合のデータは、戦後の高度成長期まであらゆる鉱山で埋蔵量を掘り続けた経緯があり、ほぼ同時期に閉山に追い込まれたことを物語っている。一方中南米のデータは、開鉱年から 19 世紀初頭の独立期までの数値になっている。したがって両地域の時間差約200年は、独立期の時期から日本の鉱山の閉鉱時期までの差のほぼ200年に相当し、平行移動すると両地域のこの直線性は日本の直線にほぼ一致する。事実中南米の主要鉱山（例えばポトシ、グアナファト、タスコ等の銀山）は現在も採掘を継続している。したがってこの直線の意味するところが重要になってくる。それは単に古い時代に開鉱した鉱山の寿命は長かっただけでなく、この直線の勾配

が産業革命、つまり動力革命以前の鉱山業の律速段階を想起させるものであることである。具体的にはこの直線性と勾配は、労働集約型の鉱業時代の特徴を表していると考えられる。この点は第 2 節 2−2 でも言及するが、採掘速度の裏返しの結果であり、その生産速度と採掘規模が環境との共生を可能にする「持続的な鉱業」の基本的バランス論につながるものであるし、適正技術と適正規模を考える基盤であると考えている。

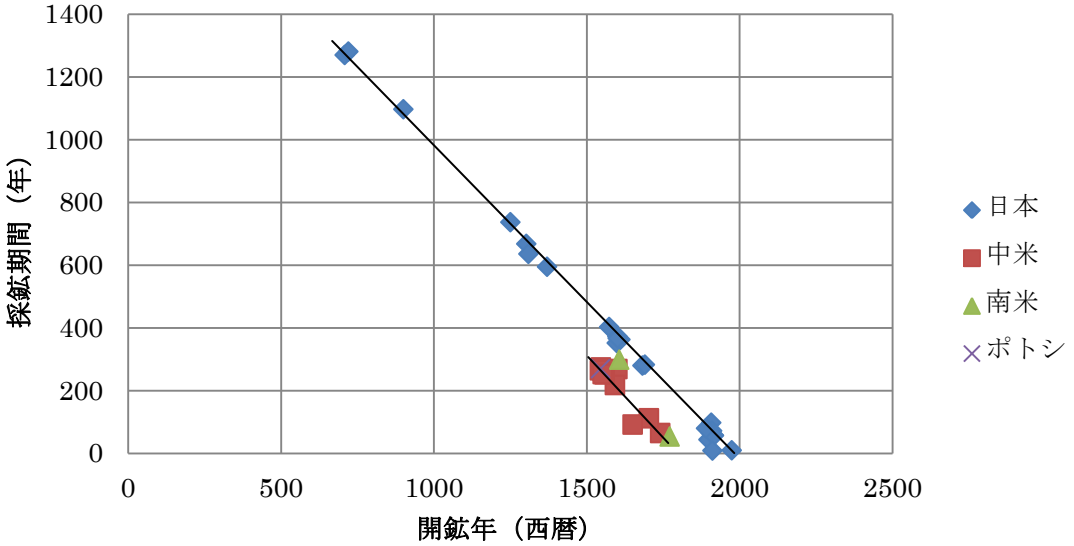


図 1−1　日本の主要金属鉱山と中南米の銀山（含む、ポトシ銀山）の開鉱年と採鉱期間[20]の関係（筆者作）

第２節　鉱業の持続可能性を評価する概念と三つの研究課題に対する包摂性

本論文において、貴金属鉱業の持続可能性を評価する概念・指標の考え方に関し、序章 1−1 と第 1 章 1−1 において六項目掲げていたが、ここで本節の論考に当たり、改めて整理しておく。つまり、１）Hubbert のロジスティック曲線、２）Herman Daly の三原則、３）関与物質総量 TMR、４）金属資源の循環、５）適正技術と適正規模および、６）持続性の時間尺度である。

本節では、これらの各指標の関係性を含め、本論文で取り上げる三つの研究課題とこれらの指標ないし概念を手掛かりとして、各研究課題を包摂する持続可能性原理として討究することにしている。

2−1　鉱業の持続性と生産量推移の姿の関係

図 1-1 で示したように、日本における金属鉱山の寿命は開鉱年代が古いほど長いことが明らかとなったが、一つ一つの鉱山の生産量推移は必ずしも同じではない。しかし、概して長期間採掘していた鉱山の場合、生産量は凹凸があってもほぼ一定と見られる。その凹凸の原因についてはここでは言及しないが、持続し得たという事実とその鉱業による自然環境への影響に注目してみたい。すなわち、生産量がある量を超すことによって周辺の環境、例えば森林破壊が激しくなり、地域社会の持続性に支障をきたすという大きな被害の

発生に接合する現象である。サステイナビリティ学では、このことを生産が環境容量をオーバーシュートし、場合によっては環境を崩壊に至らしめる現象として捉える[7)13)]。この時の閾値は現代のリスク論では「特定されない非知」、それから生まれる不可視のリスクへの対処方法として、新たなリスクコミュニケーションの必要性が議論されている[34)]。過去において鉱山業を取り巻くオーバーシュート現象は枚挙にいとまがないが、概して日本の古い鉱山においては、環境と共生する工夫がなされていたことも事実である[35)]。この点は[研究課題 1]の 16 世紀以降の中南米における銀鉱業においても検討する必要がある。つまり持続可能な鉱山業に内包されている技術、適正技術とその規模、適正規模が、持続性評価において重要であることを意味する。

2－2　日本の金属鉱業の歴史から学ぶ持続可能性

別子銅山の開発当初からの生産量の推移（図 1－2[4)]）を概観すると、江戸時代は長期にわたって約 500 トン/年の鉱石生産量を維持しており、明治の末期から大正にかけて急激な生産量の増大を実現した。また図 1－3[4)]は、日本の主要四大銅鉱山の明治時代以降の生産量推移を示しており、煙害の始まった時期（1890 年～1910 年代）も併記されているが、その発生は生産量がおよそ 150～300 万斤/年（約 900～1,800 トン/年）の時期に相当している。つまり当時の技術では、この程度の生産速度のレベルに達したところで、煙害が社会的問題として浮上したと推察される。原因は、硫化銅鉱の焙焼によって発生する亜硫酸ガスである。同じ時期に、足尾銅山はじめ多くの鉱山では鉱毒事件が併発し、社会問題として無視できない状態になっていた。これが関与物質総量 TMR の量と質の問題である。煙害と鉱毒事件が「鉱害の原点」と言われるゆえんである[4)]。

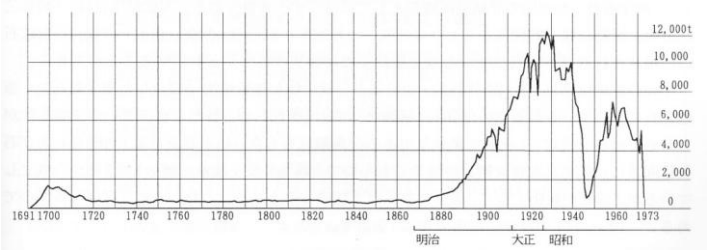


図１‐２　別子銅山の長期生産量（トン/年）の推移[4)]

図１－２および図１－３の生産量の推移の形態（姿）から判断して、ある程度長期間の持続可能な生産レベルというものが存在し、生産速度がある閾値を超えると環境問題が重大な局面に至るという構図が示唆されている。しかも、その内実が生産技術や生産規模に関係すると考えることもできる。しかし、鉱害は明治時代に始まったわけではなく、戦国時代以降多くの金属鉱山の開発が拡大されていく中で、別子銅山はもとより、その規模が概してそれより小さかったとはいえ、日立鉱山等においても、鉱毒水事件が記録されており、時の為政者の取り組みも記録されている。さらに坑内作業にいては、塵肺、鉱山よろけ等の健康被害も記録されているので、必ずしも健全な持続状態であったとはいえない[1-6)]。しかし、鉱山を中心とする地域の社会、経済が長期間維持されていたことは内実は別として評価でき、現在の小規模金採掘を考察する上では、この観点が重要になる。

したがって、本論文で議論すべき点は、環境や人間の持続可能性に関する許容量の評価、つまり持続可能性を図る指標を通して対象の鉱業の持続性を論究することである。そしてその方法論の確立をも目指すものであるが、現実には許容量の限界点でオーバーシュートする現象に繋がる臨界点や閾値等の問題も含めている。鉱害の問題には、環境の変化や身

体の異常が潜伏期間を経てある程度進行した後に被害が顕在化するというタイムラグが存在する。人類学の研究分野からは、災害が自然あるいは人為的な環境の「脆弱性」との関係性および「ハザード」との偶発的出会いによって発生し、場合によってカタストロフィックな事象に至ると論じられている[36]。本論文では、社会問題として重大化した鉱害発生時の生産量(生産速度)と技術が内包する脆弱性は、それにより影響を受ける適正規模や適正技術を論じる原点と位置付けている。したがって、ここでは日本の鉱業、特に金、銀等の貴金属鉱業の歴史的経緯を概観した上で、鉱害の原因に含まれる要素（量と質）を現代科学の視点で再評価し、過去・現在から未来にかけての鉱害に関する新しい概念を提起することを試みたい。

以上を前提として、本論文で取り上げる研究課題に内包されている環境問題(鉱害)を論究するにあたり、基本概念を 1－1 の三つの指標に関連付けると、以下の三点にまとめられた。

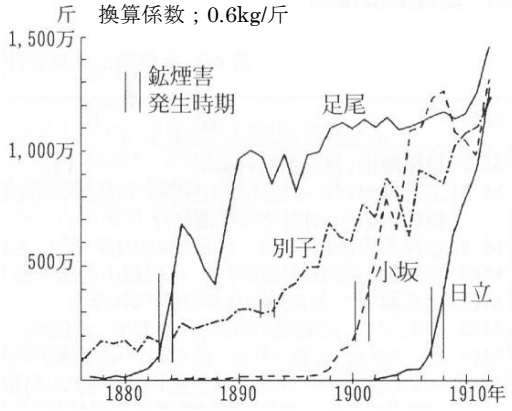


図１－３　明治以降の日本の４大銅鉱山の生産量推移と煙害発生時期[4]

１）過去の鉱業史研究の多くは、目的金属の生産量に注目していたため、鉱害については社会問題化した時期から内容ならびに解決への経緯という定性的研究が主体となっており、ともすれば定量的な視点を欠いていた。しかし鉱害の内実は、現代科学の視点に鑑みれば、「隠れたフロー」を含む「関与物質総量 TMR」[37]の大きさおよびその含有成分(質)の問題に帰結する。この物量と質から、鉱害の発生とそれを抑制する適正規模、適正技術が議論されるべきである。隠れたフローには、従来「ズリ」と言われていた剝土、廃鉱石やボタのような選鉱後の尾鉱(テーリング)や製錬後のスラグ等が含まれる[38]。

２）図 1－3 に示したように、明治時代において、ほぼ一定の生産速度に到達した後に煙害が著しく社会問題化した。この原因は、銅鉱石の焙焼に伴う亜硫酸ガスによるもので、農作物や森林に被害を及ぼした。つまり有害廃棄物の量が環境の許容量(環境容量)を越えた結果であるが、必ずしも、健康被害を含めたカタストロフィックな現象であったかは定かでない。しかし、これらの関係性に関して、Herman Daly の三原則[7]で提示されている速度論的な相対性を適応した。つまり、地下資源の採掘速度と隠れたフローの排出速度に対する環境の吸収速度（環境容量）との相対速度として捉えることができ、実際の現象を定量的に評価できるものと考えた。

３）図 1－2 が示す別子銅山史から、持続可能な鉱山業のあり方、生産量推移の姿（形態）を描き出すことが可能になると考えた。鉱山開発は一つの鉱脈の発見から採掘がはじまり、ピークを過ぎて衰退するというパターンをたどる。つまり新鉱脈の発見毎に重層されて全体として一定の生産量曲線で描かれるのであって、個々の鉱脈に関しては、Hubbert 曲線が概ね適用される。Hubbert 理論[39]は、元来石油資源の枯渇を問題にしてピークオイル説として誕生したのだが、近年各種金属鉱山の資源寿命予測への適用

が試みられている[40]。ここには初期の立ち上がり速度とそのピーク値および後退期の生産量をどのように描くかが、鉱山の持続性に関与すると言及されている。だたし、ここで重要なのはその時点における生産工程の律速段階がどこにあるかである。それを決定するためには、各工程の技術レベルやエネルギー供給が大きな要因となる。そこで本論文では、Hubbert 曲線をもとに、適正規模と適正技術および持続可能な鉱山開発のあり方を曲線の形状(姿)[41-42]を参考にして論じることとする。

以上本論文では、16 世紀以降の銀鉱山業を始点として、現代の小規模金採掘および都市鉱山開発までの三つの研究課題を展望する一連の試みに対して、上述の１）から３）の基本概念をもとに、各々の研究課題との関連性を検討しつつ論究することとする。次節ではその基本概念から見た研究課題との関係性を具体的に検討していく。

2－3　関与物質総量（TMR；Total Material Resources）と質（含有成分；Ingredients）により評価する鉱害の新たな定義

既存の公害の定義は日本独自の意味を含んでおり、先進諸外国とは別に、「本源的公害」と呼称されるほどである[1]。一般的には、「鉱工業を筆頭とする産業活動が物を作り出す過程で発生させる有害な物質を地域社会に排出したことによって、地域の住民の生活や健康、そして自然環境に悪影響を与える現象」のことを指す[43]。また鉱山業に起因する公害を特に「鉱害」と呼称している。本論文における「公害」は、これまでに述べてきた経緯に従い「鉱害」を扱うことになる。日本では四大公害の中でも、足尾銅山の煙害、鉱毒事件と水俣と新潟の水銀中毒事件は「公害の原点」としていわれる。この中で足尾銅山の公害は、明らかに「鉱害」であるが、水俣と新潟の水銀中国事件は、製品の水銀を化学工業で使用した結果である。しかしその後の水銀の動態変化の容態及び健康被害は、水銀鉱山やアマルガム製錬においても同じことから、本論文では鉱害として扱うこととする。

従来、鉱害の規模は、健康被害の病像や被害の大きさで評価される場合が多かった。しかし本研究では、近年開発された「関与物質総量（TMR；Total Materials Requirment)」[44]の概念と排出物質の「質（含有物質；Ingredients)」を用いて、新たに「鉱害」を定義しつつ定量的に比較検討することとした。まず、上述の関与物質総量は式（1－1）であらわされる[44]。特に目的金属鉱石を対象にして、間接投入された物質量とその隠れたフローを含まない場合は、式（1-1）左辺の TMR を Ore-TMR と定義している[37-38]。

$$（関与物質総量\ TMR）＝\Sigma（直接投入物質量）＋\Sigma（間接投入物質量）＋\Sigma（隠れた物質フロー量）\qquad (1-1)$$

ここで、直接投入物質及び間接投入物質は、人間の経済行為として、それぞれ直接、間接に投入された物質の量である。隠れた物質フロー（Hidden Materials Flow；以降 HMF と表記）の量は、直接、間接の経済行為に伴う物質以外に、その行為に伴って起きる物質の移動や攪乱の量である。本論文の鉱山開発における隠れた物質フローHMF には、採掘に伴う表土、岩石、土砂（全体を剝土）および廃鉱石の移動、選鉱後の尾鉱処理、森林の伐採、水の使用、変更された水系、さらには土地の再生や景観の保護のために必要な物質の

総量も含まれる。つまり隠れたフロー物質の量と質が鉱害の原因となり、その内容に関係する。ここで、「関与物質総量」は「資源端重量」とも表現されている。また、「隠れた物質フロー」は「エコ・リュックサック」と同義である[37-38]。

特に、本論文の研究対象が金属元素であるので、金属鉱石の関与物質総量とその隠れたフローが重要になる。この点について鉱山業に関連しては、上述したように、隠れたフロー物質を採掘に伴う土石類に限定して ore-TMR（鉱石分の関与物質総量）係数が定義されている[37-38]。すなわち、それぞれの金属に対して、1 単位（1 トン）分の金属を得るための精鉱の取得に関与する粗鉱、ズリ、剥土、脈石等の採掘土石の総量（採掘全量トン）である。ここで、粗鉱量とそれを含む採掘全量の比を Rock/ore-ratio として式（1－2）で定義されている[44]。

（Rock/ore-ratio）＝（ 採掘全量）/（粗鉱量）　　（1－2）

なお、粗鉱；目的鉱種を含む鉱石

精鉱；粗鉱を選鉱して製錬可能な濃度まで高めた鉱石、また輸出入対象の品位まで高めた鉱石

アメリカで公表されている各種金属の採掘全量と粗鉱量の関係を示した図 1－4 から、比（Rock/ore-ratio）はほぼ 2 であることが近似的に得られた[44]。したがって式（1－1）の単位量である ore-TMR 係数を粗鉱品位（%）との関係から式（1－3）が得られる。

（ore-TMR 係数）＝2.0/（粗鉱品位（%））/0.01　　（1－3）

このように多くの金属が一つの直線性に従う根拠として、鉱床の生成様式や鉱石中の金属成分の存在様式に、一定の法則性があることが推測される。他方、図 1－5[45]は現代の銅の産出における、精鉱に対する選鉱以前の廃鉱石類（剥土）と粗鉱から精鉱にするための

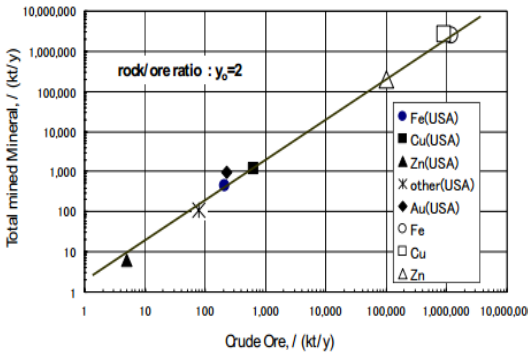


図 1－4　各種金属の採掘全量と粗鉱量の関係[44]

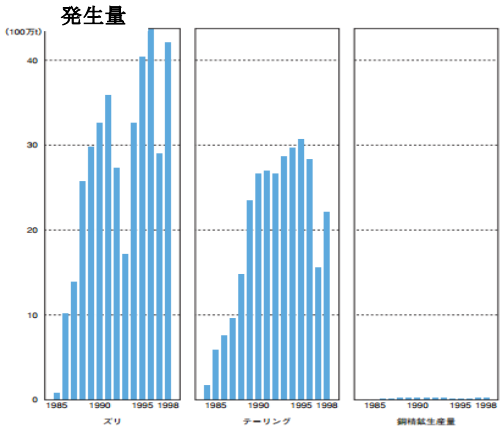


図 1－5　現代の銅鉱業における精鉱量に対する剥土（ズリ）と尾鉱（テーリング）の発生量の推移[45]

尾鉱の量を分けて示したものであるが、ore-TMR 係数の大きさは概ね粗鉱品位から求まる物質総量の約 2 倍に相当することを示している。つまり、式（1－3）を実証した内容と一致しており、式（1－3）の意義は、得られた係数から精鉱を得るための ore-TMR が求まり、精鉱段階までの隠れたフローが概算できることにある。

本論文に関係する金、銀、水銀に関する諸指標を抜粋し、必要事項を加えてまとめたものを表 1－1[20)37)47)49)]に示した。同表には比較のために銅、鉄、貴金属の白金およびパラジウムのデータも付記した。この表からも、金、銀は世界の全生産量が小さいにもかかわらず、世界の総 ore-TMR の量の値としては、鉄や銅と同等かそれ以上の大きさがあり、地球規模での環境インパクトが非常に大きいことが明確である。しかし随伴金、銀等の TMR はベースメタルの TMR に含まれており、精錬過程に発生するわずかな量しか評価されない。

加えて本論文の鉱害の定義には、資源の潜在資源性と合わせて、隠れたフロー物質中の随伴元素の種類と量及び環境毒性（潜在有害性）も含まれる。この随伴元素も上述の TMR 同様に鉱床や鉱脈、鉱石の成因機構と密接に関係している。

以上を踏まえ、本論文で論じる金、銀、水銀等の鉱床の成因と濃集機構に関して以下に概説していく。表 1－1 には、可採対象鉱床の地殻平均濃度に対する濃集率と地下資源枯渇率も併記している。また表 1－2[46-48)]は、金、銀、水銀に関する天然鉱石類、本論文に関係する鉱山における該当金属鉱床ないし鉱脈の生成機構および平均的含有率（粗鉱品位）と主な随伴元素をまとめたものである。ただし、人工鉱山の携帯電話に関しては、筆者が分析した結果に基づいている[48)]。

表 1－1　本論文に関係する金属の式（1－1）及び式（1－3）に関係する各種指標[20)37)47)49)]

鉱種（金属）	Ore-TMR (t/t)	世界の生産量(t/y)	世界の総 ore-TMR (Mt/y)	粗鉱品位（%）	地殻存在度 (ppm)	粗鉱の経済的濃集率（倍）	資源枯渇率（%）(2010)
金（Au）	1,800,000	2.445	4,400	0.00011	0.0033	2,000～2,266	76
銀（Ag）	160,000	17,900	2,900	0.0013	0.08	1,250～5,250	78
水銀 (Hg)	2,000	1,800	3.6	0.1	0.08		93
鉄（Fe）	5.1	571,000,000	2,900	25	70,700	8.62	27
銅（Cu）	300	12,900,000	3,900	0.84	75	1,333	50
白金 (Pt)	1,400,000	178	250	0.00014	0.005		15
パラジウム (Pd)	1,800,000	177	320	0.00011	0.001		15

出所；TMR 関係[20)37)]、経済的濃集率[47)]、資源枯渇率[49)]

本論文の対象である金、銀および水銀鉱山は、概して熱水鉱床であり、この熱水中に溶解される元素群は、その地域の地質活動と密接な関係があるといえる。金鉱床は砂金と山金に分類されることもあるが、砂金は風化堆積鉱床である場合が多く、化学的あるいは風化作用でその起源地域に堆積するか、海水、河川水、地下水で移動あるいは湖沼等に堆積したものである。対象の金属元素（金、銀、水銀）は、元来地殻濃度（クラーク数等）が小さいので、鉱床や鉱脈になっても微量成分であることには変わりがない。つまり周囲に比べて濃集度が高く、経済的に採掘に値することから鉱脈と評価されるのである。

一方、鉱害の量の面から見た場合、表 1－1 で示したように金、銀は世界の総需要は小さいにも拘らず、関与物質総量の量の大きさが鉄や銅の関与物質総量に匹敵するほど大規模であるので、鉱害という観点からは、たとえ貴金属の生産量が小規模であるといえ、地球全体の環境に与える負荷は大きいのである。さらに鉱害を質の面から見た場合、表 1－2 における随伴元素の種類とその含有量が問題になる。鉱山開発では、剝土、廃鉱等のズリおよび選鉱後の尾鉱、ボタ（テーリング）等は現地に貯鉱するのが一般的である。したがって、重金属類の洪水等による大量溶出や貯鉱漕、貯鉱ダムの崩壊による放出、および雨水、地下水への浸出が鉱害そのものになる。この種の鉱害事例は、日本はもとより現在の世界でも枚挙にいとまがない。この「質」の問題は都市鉱山についても同様に懸念される問題である[50]。

以上、関与物質総量並びにその含有成分の種類と濃度という二点が、本研究で新たに定義する鉱害原因の内容である。この両者によってその規模と被害の内容が関連付けられると考えている。

表 1－2　本論文の対象とする金、銀、水銀鉱山の生成機構、鉱石の種類および随伴元素（筆者作成）

天然/人口別の鉱山の種類	鉱種（金属）	概略の成因		主要鉱石（除；脈石成分）	有害な随伴金属元素等（等は・・・）	本論文の研究対象との関係
		鉱床	鉱脈			
天然鉱山	金	堆積鉱床（漂砂）	層状、レンズ状	自然金（砂金）等	Cu,Ag・・・	堆積砂金の ASGM
		熱水鉱床	貫入型	自然金、エレクトラム等	Cu,Pb,Ag・・・	山金等の ASGM
	銀	熱水鉱床	貫入型	輝銀鉱、濃紅銀鉱、淡紅銀鉱、脆銀鉱	Sn,Zn,As,Sb、Cu,Au・・・	ポトシ銀山他中南米の銀山
	水銀	熱水鉱床	貫入型	辰砂(HgS)	Pb,Sb・・・	ワンカベリカ鉱山
人工鉱山	貴金属（金、銀）	都市鉱山（人口密集地）	ごみ回収型集荷	準金属、合金の混合物	主要元素）Fe,Cu,Al,Ni・・その他）30 鉱種以上	
			顧客接近型回収			使用済携帯電話

2－4　Herman Daly の三原則と鉱山開発におけるオーバーシュート（鉱害の顕在化）

持続可能で定常状態の経済活動を維持する原理として、Herman Daly は次の三原則を提示した[7]（英文も抜粋して併記した[51]）。

１）再生可能な資源の持続可能な利用速度は、再生速度を超えてはならない。
（For a renewable resource, the sustainable rate of use can be no greater than the rate of regeneration.）

２）再生不可能な資源の持続可能な利用速度は、再生可能な資源を持続可能なペースで利用することで代用できる程度を超えてはならない。
（For a nonrenewable resource, the sustainable rate of use can be no greater than the rate at which a renewable resource, used sustainably, can be substituted for it.）

３）汚染物質の持続可能な排出速度は、環境がそうした物質を循環し、吸収し、無害化できる速度を超えるものであってはならない。
（For pollutant, the sustainable rate of emission can be no greater than the rate at which the pollutant can be recycled, absorbed, or rendered harmless by the environment.）

この三原則は､エコロジー経済学の立場であり､｢強い持続可能性｣の一つの原理である。

Herman Daly の三原則を鉱山開発に当てはめてみると、開発速度と環境再生力（環境容量）との速度の差において、少なくとも後者の速度が大きいことが持続可能のための必要条件になっている。ここで、後者の評価方法として各種の環境容量の数量化が試みられている[11-13]ものの、本論文では、それぞれの絶対値の比較を意図していない。むしろ、開発初期の立ち上がりの採掘速度、ピーク時の年間生産量、その後の年間生産量とその継続期間での開発パターンを読み取り、瞬間の規模と長期の規模及び隠れたフローの量と質と実際の鉱害発生との相対比較によって鉱害および持続性を論じることにある。

持続的状況が崩壊する現象を模式化したものが、図 1－6 である[7][13][43]。つまり環境への圧力がその許容量をオーバーシュートすることにより、カタストロフィックな崩壊に至る過程が示されている。このような現象に対する本論文における基本的な認識として、環境公害史の中で明らかに公害事件として地域住民が立ち上がり激しい反公害闘争に至った現象は、鉱山周辺の生態系の異常や健康被害、森林破壊等がその地域社会をも崩壊に至らしめる事象を伴うという意味でカタストロフィックな現象と捉えている。

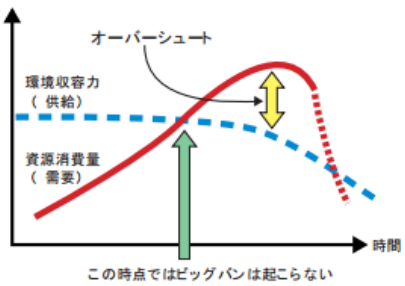


図１－６　環境容量とオーバーシュートおよびカタストロフィー現象の模式化[7][13][43]

本論文では、鉱山を中心とする地域社会がある一定の生産量の形態（姿）を定常的に持続していけるかどうか、すなわち地域社会を崩壊せしめるような大規模な鉱害が発生せずに、鉱山開発がどの程度長期的に維持できるかに論点を置くこととする。この

ような基本概念のもとに、長期の持続可能な鉱山開発を想定した要因抽出（適正規模や適正技術、環境対策等）を行うのが本論文の狙いである。もちろん付随する健康被害や森林破壊、生態変化についても包含して論究することには論をまたない。しかし、持続可能な生産量の形態に含まれる内実は時代によって異なるため、本論文では、中世のポトシ銀山と今日の小規模金採掘における、持続可能な開発の意味合いに差異が存在するという視点から論究を試みたい。

鉱業の「持続可能性」について、時間軸から評価する研究はほとんど行われていないのが現状である。そこで、１－１項における着眼点に加えて、鉱山に依存する社会の生活圏の維持可能な時間軸を想定し、技術的な進展や、生活圏の維持・回復への努力の積み重ねによって、適応柔軟性を発揮して、どの程度の世代にわたってその社会を持続可能にするかに着目し、評価することにした。具体的には、中世以降近代までは一代を 25 年、現代から未来にかけては一代を 30 年として、少なくとも 100 年（3～4 世代）以上にわたって地域社会を存続せしめる状態を「持続性のある鉱業社会」と想定した。この論拠は１－２項で述べた民族文化人類学の考え方[10]にある。さらにその持続性には以下の意味も含まれている。鉱山業に限ってみれば、鉱脈の枯渇で終焉となる一方、維持された社会の中で枯渇後の新しい社会のあり方を創造していく持続性も求められる。その一つが観光都市であり、世界遺産の登録はその戦力となっている[31]。

2－5　鉱山業の生産経緯と地域社会の持続性

近年、ようやく大規模開発において、企業の社会的責任が強く求められ、改善の方向に進みつつある[14-15][17]。しかし、発展途上国にある中小規模の採掘現場では、今なお、旧来通り環境への配慮がなされないまま操業している場合が多い[16]。本論文で取り上げる各地の小規模金採掘 ASGM は、まさにその状態にある。しかし長期にわたる金属生産の歴史的射程に鑑みると、図 1－7[4]で示すように産業革命以降、金属鉱業の開発は指数関数的な速度で成長をしており、過去の巨大鉱山と言われたポトシ銀山でさえ、今日の規模と比較してみると驚くに値しない規模である。それは関与物質総量（TMR）の面からも同様である。

しかし、スペイン植民地時代には、製錬用に水銀を用い、地域集中的にそれを排出していたことによって、量的にも質的な面において水銀汚染が定常化し、中毒の顕在化や生態系へ影響を及ぼしてきたことは間違いない事実であったと推察される。さらに、それらが現在にまで波及している問題としても捉えられ、過去を含めて健康被害等が懸念される由縁である[52-56]。この点について、上述の ASGM を含めて、歴史的な連続性の視座から、また水銀汚染密度（単年度人口当たりの水銀使用量）の考えから水銀汚染の問題を討究してゆく。

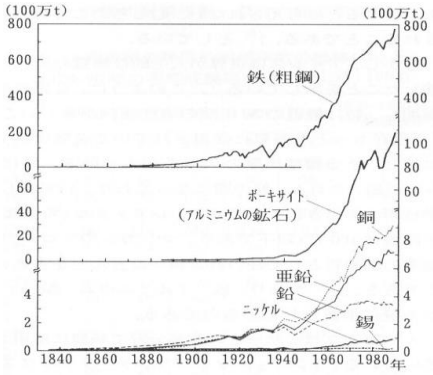


図１－７　主要金属の長期の生産量推移[5]

一般に物質移動論においては、その速度過程の律速段階が重要になる。この考えを鉱山業に当てはめてみる。その一般的な工程は、探査調査－試掘－フ

ュージビリティスタディー採鉱－運搬－（粗鉱）－破砕・粉砕－選鉱－（精鉱）－（輸送または輸出）－製錬－精錬－製品となる。本論文では、このプロセスの中で採鉱から製錬までを主に扱う。2－3 で述べてように、関与物質総量（TMR）の大半もこの工程の関与物質総量 ore-TMR によって決まるからである。

産業革命以前の鉱山業は労働集約的産業であったことから、その律速過程は概ね採鉱から選鉱までにあった。破砕・粉砕工程では、人力や畜力から出発し、中世以降には水力利用が行きわたり、その能力も向上していた経緯から、それ以前の採掘、運搬工程が律速段階であり、多くの労働力が投入された。しかもコスト縮減のためはもとより過酷な労働現場に対して、奴隷、先住民そして子女の駆り立てや強制労働等が権力者の意のままに、当然のように行われた経緯がある。例えばポトシ銀山の坑内運搬や製錬現場の混錬作業には、輪番制強制労働「ミタ」が植民地時代のほぼ全期間にわたって執行されていた[57]。

律速過程が生産量や生産速度を規定している中でも、生産を継続する一方で、地域によってはそれに関与する資材が市場を形成し、そこで得られる収入が生活を支えることになる。鉱山開発とその持続が地域経済を活性化していたことも事実である。長期の歴史過程においては現在においてもこの事実は見られる。よって古くからある多くの鉱山都市が UNESCO の世界遺産に認定され、観光都市としても生き続けている事例が多い[31]。これが生活圏の持続性として評価されるゆえんである。

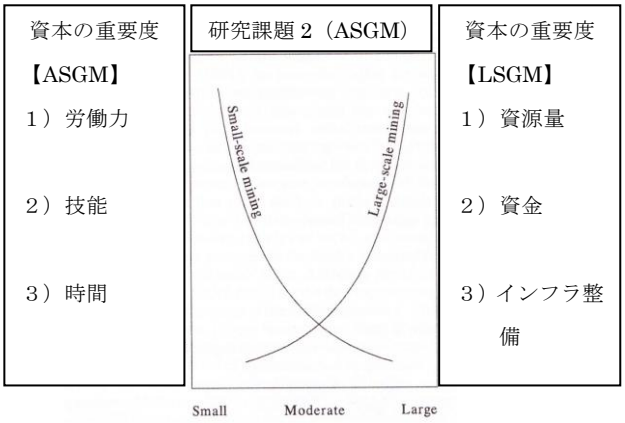


図１-８　現代の金鉱業の生産規模と諸資本の重要度との関係[58]

市場経済により金属価格が決定される現在において、発展途上国の貧困地域では、金、銀の生産は小規模であっても、地域経済にとっては必須の産業になっている。つまり家族を中心とする手工業にとって、設備投資は極力押さえ労働集約的な採掘によって、労働機会と収入の確保が可能となっている。一方では、市場経済原理に依存する大規模採掘ではその対極にあって、設備投資によって効率を重視した鉱業となり、利益最大化を図ることになる。したがって、後者における律速段階は、全工程の設備投資になる。図 1－8[58]に示すように、これら二律背反する生存原理が現存しており、環境問題も異質なものにしている。本論文では、小

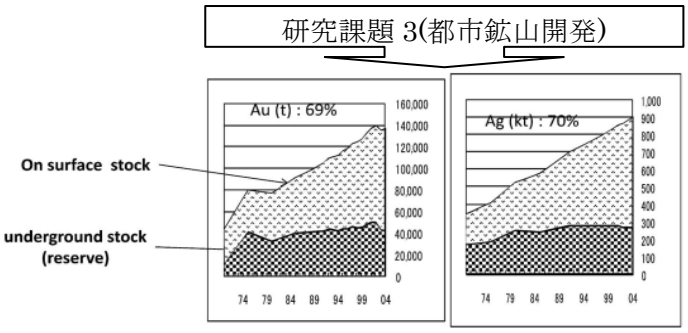


図１-９　金と銀の地下資源量と地上資源量の推移[59]

規模ないし比較的規模の小さい鉱業を対象に、中世の銀鉱山と現代の小規模金採掘（ASMG）および都市鉱山開発について、持続可能性の指標に照らして検討していく。

2－6　持続可能な鉱山開発の形態と動態変化および適正技術と適正規模

米国 Shell の地質学者ハバート（Marion King Hubbert）は、ピークオイルの基本概念の中で、石油のような枯渇資源の生産量の予測曲線を、ロジスティック方程式に従う左右対称なベル状曲線で描いた[39]。このピークオイル説は地下資源（石油、石炭、天然ガス等の枯渇資源あるいは再生不可能資源）がいずれは枯渇することを予言するツールとして提起された。しかし現実には未発見鉱山の発見と掘削技術の進展とコスト低減等の複雑な要因によって、再生不可能資源（枯渇資源）といわれる石油、石炭、天然ガス等はその寿命を延長し、生産量が拡大し続けている[26]。

近年、金属資源（再生可能資源）においても同様の理論で論じられている[40]。しかしこの場合、金や銀はその希少価値と宝物的存在のため古来採掘し続けられ、近年その経済的埋蔵量の枯渇が懸念されるに至った。図 1 - 9[59]で示したように、金と銀は天然資源よりも地上資源（人工資源または都市鉱山）の方が多くなっている（約 70%、ただし 2010 年の情報では約 75%[49]）上に、電気・電子機器の需要に関して、電気、熱の伝導性と耐食性の点で優れている金、銀の需要は増加の一途である。そのため、その他のレアメタルを含めて金、銀の人工鉱山（都市鉱山）からのリサイクルが喫緊の課題になっている。

そこで、次の二点に関し、本論文における金属資源の鉱山開発に対して、その持続性を論じる上で Hubbert 曲線が定性的な解釈に有効であると考え、ここで適用する意味を見出した。

(A) 生産量推移の形態（姿）；金、銀鉱山の成因上、金や銀は、熱水貫入型の鉱脈を形成している場合が多い。豊かな鉱山ではそれらの層が幾重にも併行して貫入していることを意味し、次々に鉱脈の発見が重なり、あたかも一つの曲線として描くことができる。よって、一つの鉱脈の採掘から枯渇までは一つの Hubbert 曲線で近似的に描くことが可能であり、新鉱脈を発見する毎に同様の曲線が描け、それらが重複ないし連続することで鉱山全体の生産量の推移（形態；姿）となっている[40][60]。図 1－10 は Hubbert 曲線のロジスティック曲線のピーク通過後の曲線が色々の形態（姿）を呈することを示しているが、このことが鉱脈の発見を含めた鉱山の動的姿となり、一見定常生産が長期的に持続する開発形態、つまり持続可能な鉱山開発という姿を呈する姿にもなる[41]。

(B) 適正技術、適正規模；ピーク以前の曲線は、鉱山共通の開発当初に現れる勢いのある姿、すなわち生産立ち上がりの状況を示しているが、ピーク後は持続可能な定常状態（プラトー型生産）を維持できる開発速度が選択可能なケースと、鉱山の閉鎖に向かう衰退型カーブを描くこともある。つまり

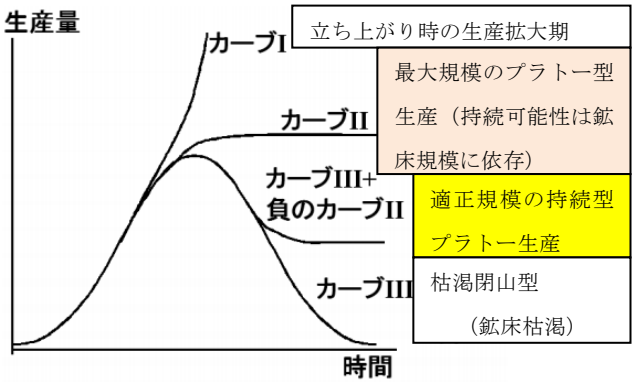


図 1-10　Hubbert 曲線によって示される鉱山業の各種形態[41]（筆者改作）

前提としての鉱山規模は鉱山の埋蔵量で決まるものであるが、ピークやその後の生産量の選択によっては長期にわたって持続可能なプラトー型生産を維持できる。この間の技術発展や新鉱脈の発見などによってはさらに長期間維持できる可能性も出てくるし、短期に閉山に追い込まれるケースも発生する。現実には平坦なプラトー型生産は稀有であるが、大小の凹凸を含みながらも長期にわたり持続し得たケースは多かった。しかし今日の大規模鉱業では概してカーブⅢの短期の枯渇閉山型が多い。この持続期間を採鉱期間と捉えて、既に図 1－1 において､過去の鉱山では開鉱時期に対して採掘期間の長さには一つの直線関係があることを示した。そこには、鉱山開発における適正規模と適正技術の重要性が含まれていることを示唆した。しかし具体的な検討はしていなかった。本論文の持続性に関する視座が Herman Daly の三原則にあることから、適正規模は自然の環境容量を超えない規模を想定しているおり、したがって適正規模はその最適規模[12)]を意味する。一方採鉱期間は採掘速度で決まるのでその場合の技術が律速過程となる。本論文ではこの場合の適正技術に関しては、過去の適正技術論の文脈の中で、技術の公正性と地域適合性に基ずく「適正技術」[61)]の考え方をとっている。その意味において、本論文における持続可能性指標としての適性規模と適正技術は強い持続可能性指標群に属すると考えている。

鉱業の生産量推移の姿がいずれの形態をとるにしても、地下資源は地上資源に移行していくことになる。つまり地上資源の累積量と地下に残存する埋蔵量との総和はほぼ一定という金属資源に関する質量保存則が成り立つということになる。しかし、資源の利用という観点からは､その総量の変動は地下資源の経済的可採量の変化と地上資源の拡散度合い、つまり回収率に依存して決まる。

以上の (A)、(B) の二点は、本論文の対象課題における相対的な形態比較の原理であり、また都市鉱山開発の必要性に連動している。

第 3 節　金、銀、水銀の鉱山開発の歴史的射程の中における研究課題の位置付け

3－1　金、銀の水銀による製錬（粗金・粗銀の製錬）技術史における研究課題の位置付け

本論文においては、製錬の対象（目的金属）は金と銀であり、水銀は金、銀を製錬するための手段材料(溶材)である。一般に金属元素の抽出は製錬(Smelting)と精錬(Refining)の二段階に分けられる。前者を粗精錬、後者は仕上げ精錬とも言われる。製錬の意義は、採掘後の鉱石（粗鉱）を破砕・粉砕し、物理的選鉱によって濃度が高められた（あるいは輸入された）精鉱を、製錬過程でおよそ 95％前後の純度まで上げて、関与物質総量を減らすことにあり、その後の仕上げ精錬におけるコスト改善を図るための常套手段になっている。前工程は主として資源国側で行われ、後工程は資源輸入国で行われる。つまり鉱害原因の大半は資源国側に残すことになっている。これが現在の資源フローの実態である。

次に製錬による濃集技術について本論文との関係で検討する。金の場合は、鉱石としては自然金が主であり純度は 80～95％である。また、多くは一次成因が熱水性であるため、主に銀、銅、鉛等に随伴される。中にはエレクトラム（金と銀等の自然合金）もある。古来銅や金、銀の製錬法として以下のような方法が発明工夫されてきた[4)62)]。

(A)銅などの非金属を含む鉱石から貴金属を分離する方法

a;灰吹き法（Cupellation)、b;鎔錬法（Liquation)、c;混汞法（Amalgamation）[3]

(B)金、銀のエレクトラムの分離法

a;塩化法（Salt　process)、b; 硝酸法（Vigor of fire)、c ; 硫化法（Sulfur process)

一方水銀の製錬は、自然水銀は別として、硫化水銀（HgS）を 300℃程度に加熱して、蒸発分離させて回収する方法が知られていた。プリニウスの博物誌にはすでにこれらの方法が記述されており、［研究課題１］および［研究課題２］の混汞法についても金の製錬および金箔のメッキ技術として記述されている。このように混汞法のための溶材である水銀の製造もすでに完成していた[63)]。これらの製錬技術は長い錬金術時代の経験と蓄積を経て、中世の文化革命期に次々と開示された[64)]。しかも、その技術的完成度は別としても、近代的な化学方程式さえ存在しなかった時代に、現代科学の解釈に準拠した工夫がなされていたことは驚嘆に値する。さらに、製錬法以外にも、含有量の評価方法として試金法や秤量技術も発達していた[65-69)]。

まず本論文の第２章において、［研究課題１］として取り上げる 16 世紀以降のポトシ銀山に関して、銀の製錬法として混汞法が適用され先進的技術を導入して鉱業化に成功した経緯から記述する[70-71)]。それは、1555 年メキシコにおいて初めて実用化に至って始まった。その後スペインの植民地中南米で銀製錬の主役を占め、産業革命までには北米に拡大していった。しかし 1886 年に青化法が発明され、ケミカルリーチングの時代に移行することにより衰退していく。日本では、佐渡金銀山で改良された混汞法が戦前まで生き続けた[72)]。中世の混汞法は一次製錬の位置付けであり、仕上げ精錬は灰吹き法によって純度を上げて鋳塊にしていた。青化法はシアン化ナトリウム溶液によって銀を錯塩として抽出し、その後析出分離する方法である。

一方、水銀の約 50%近くは回収され再利用されていたが、残りは水選洗浄中や混錬中、またアマルガムの分解中に河川や大気中へ排出された。この量はポトシ銀山を含めて、中南米全体の約 250 年間の排出量は約 20 万トンになると言われており、決して少ない量ではない[52-53)55)]。この銀鉱石の混汞法と環境問題を取り上げるために、排出水銀の今日までの動態とポトシ銀山の位置付け、および洪水による流出等を当時の記録から読み取り、技術の概要と水銀被害の防止に取り組んだ施策について考察した。この点が第 2 章で述べてゆく本課題の歴史的な位置付けである。なおスペイン植民地時代に利用された約 20 万トンは、20 世紀末までに人為的に排出した水銀量約 100 万トンの 20%に相当する[52)]。

次に［研究課題２］である現代の小規模金採掘に関しては、現代の金のアマルガム製錬法（本論文では混汞法または水銀法と表記）について検討する。この製錬法は、青化法が開発されて以降も、いわゆるゴールドラッシュが襲ったブラジル（18 初頭から世紀期間)、北米（1848 年～19 世紀中葉)、オーストラリア（1951 年～近年まで)、南アフリカ（1886 年～近年）へと波及した。この現象は近年、東南アジアから西アフリカや東アフリカに拡大し、低コスト製錬法として益々拡散している。本論文では、今日の小規模金採掘（ASGM）の現場に焦点を当てる。

---

[3] Amalgamation ; 水銀アマルガム法のことで、本論文では水銀法あるいは混汞法も同義として使用している。

金の鉱石は自然金の純度が 90%前後あるので、砂金は粗金ではあるものの、容易に製品として取り扱われる。一方、山金等は、岩石の中に存在する金鉱石の金の粒は 100μ以下の小粒であり、大半が 20μ以下なので、肉眼で見ることは困難である[73]。したがって、粗破砕後粉砕機を使って微粉にしてから混汞法や青化法等の化学的抽出法を適用するのが一般的である。つまり、微細化－混汞法－青化法の工程を連続させて採取率を確保する場合が多い。しかし小規模でも、微粉砕して後水選鉱等の物理的選別で高純度の金（粗金）を得ることも出来る。ASGM 現場においては、洗浄皿（pan）を使って砂金を水選鉱のみで採取しているケースが多い。この方法では採取率は低いが、装置が安く操作が簡単なので古代から今日まで広く普及している。この洗浄皿に水銀を入れてアマルガムを生成させ、水洗分離して後、加熱して水銀を蒸発分離して粗金を得る方法も簡便で安価なことから水選鉱のみの方法同様広く普及している。いずれの場合も panning と言われている。

近年、多くの河川における ASGM 現場では設備費をかけて、川底の砂金を浚渫しながら混汞法にかける方法が採用されており、その場合でも採取率は 60%前後である。一方、山金の場合は含まれる金粒の粒度が小さいので、採取率は粉砕度に依存する。古くからボールミルで微粉砕しつつ水銀または青化液で抽出する方法も工夫されている。この場合混汞法の段階では金の採取率は 50～70%であり、上記の青化法まで処理した場合、金の採収率は 90～95%、一方、銀の採収率は 70～90%と言われている[74]。混汞法のみでは 20～30%近い金、銀をロスするので、近年は青化法を併設する ASGM が登場してきた[75]。しかし、水銀の環境負荷の面からは、混汞後の青化法の採用によってシアン化水銀が排出されるので、毒性は一段と高くなると言われており、混汞法までに留まっている ASGM 地域以上に、その抑制への取り組みが重要視されている[74]。これらを中心に、[研究課題２] において、ASGM の今日的課題の解決への取り組み、特に最近増加しつつある東アフリカを中心に、持続可能な ASGM 地域の創生を目標に対応策を論じていく。この点は図 1 - 8[58]で論じられた生産規模による二律背反的な状況を視野にいれつつ、第３章にて詳述する。

最後に循環型社会構築における金、銀のリサイクルの問題に関しては、都市鉱山に着目する。金、銀は天然資源の枯渇度が最も高い金属である。現代は重厚長大型産業から軽薄短小の電気・電子産業の比重が増大しつつある時代である。その高度の技術を支えるのが貴金属，レアメタル及びレアアースである。いずれも資源的に偏在性があり、地下資源の少ない日本にとって、特にレアメタルの確保は資源戦略上、喫緊の課題となっている[76]。そのため循環型社会構築に向けて、製品ごとのリサイクル法が順次制定されてきた[77]。電子・電気機器（小型家電）の使用済製品を対象とした制度化では、2007 年以降、小型家電のリサイクル制度の法制化に向けて、各種のプロジェクトが実施され、2013 年 4 月に施行するに至っている[78]。しかし、小型家電は各製品の単品でみると貴重な金属鉱種が多種類高濃度に内包している良質の鉱石であるが、小型家電製品の総量で比較すると自動車や家電四品目の使用済総量に比べごく少量である。したがって経済的な回収ポテンシャルが低く、効率的な回収には未だ問題が残されており、その最大の課題の一つが、拡散している製品を集荷するところにある。さらに、多鉱種の金属類はそれぞれ精錬を経た純度の高いものであるので、再び溶解精錬の工程を必要とせずに分離できれば、エネルギー上もコスト的にも得策である[48)79-81]。

これらの二つの課題に対して「顧客接近型回収」と「水平ブレード型高速カッティング

ミルによる濃集方法」という新しい発想の下に、粗製錬までの純度を想定した一連のシステムを考案し、実践研究へと展開した[48)79-89)]。その社会的実験を含めて都市鉱山開発のあり方と、バッヅをグッヅに代える工夫との連動を実践的に検討する。この点が本論文の第４章に論究してゆく［研究課題３］である。

3－2　金、銀、水銀の鉱山開発と生産の歴史的変遷からみた研究課題の位置付け

金の生産の歴史は6千年前にさかのぼる[62)]。エジプト人にとって黄金は永遠の生命のシンボルであった。その源泉としてナイル川は砂金の宝庫であった。一方銀は、当時交易の中心であった都市国家メソポタミアにおいては金以外に銀が交換貨幣として価値を持っていた[82-83)]。金と銀の相対比価は交易の交換対価として多様に変遷していたが[82)]。その後流動しつつも、中世18世紀末に至るまで10～15の間にあった。この間18世紀初めからその末まで、ブラジルでゴールドラッシュ[83)]があり、一時的に世界の金流通量が増加したものの金銀比価は変わらなかった。この段階までは、それぞれの生産量との相対関係で比価が連動していたが、20世紀以降は金の価値が相対的に高くなった。つまり、資産的価値が高いことと不況等の影響を受けにくい金の価値が相対的に上昇していくことになった。この関係を図１-11に示した[82)84)]。

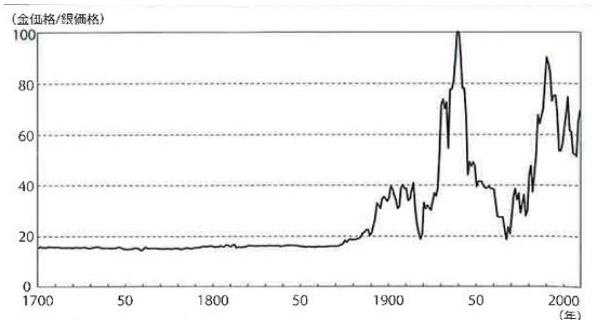


図１-11　18世紀以降の金・銀比価の推移[82)]

金と銀の生産の歴史的変遷の中で過去と現在に関して、本論文では第１節で述べた２つの研究課題に取り組む。まず［研究課題1］に関して、歴史的に16世紀以降の銀鉱業に関して取り上げた。その意義は、銀の工業的生産方式として水銀アマルガム法を開発し、適用拡大して約250年にわたる長期の鉱業の維持を可能にしたスペイン植民地の南北アメリカにおける銀鉱業にある[86-88)]。中でも種々の環境施策を実施したポトシ銀鉱山に照準した[70-71)]。次に、金の生産の歴史の中にあって、採取法としては最も古く採用されている砂金採取法が、［研究課題２］として、その水銀法が今日の小規模金採掘(ASGM)現場で生き続けている点に着目した。そこでも水銀アマルガム法は製錬法の主流であるが、環境対策が貧弱な中、家族を中心とする従事者の健康被害が懸念されている。2013年10月UNEPは水銀条約を採択[89)]しているが、その最も喫緊とする課題がこのASGM現場の水銀汚染対策である。本論文では特にサブサハラの東アフリカ

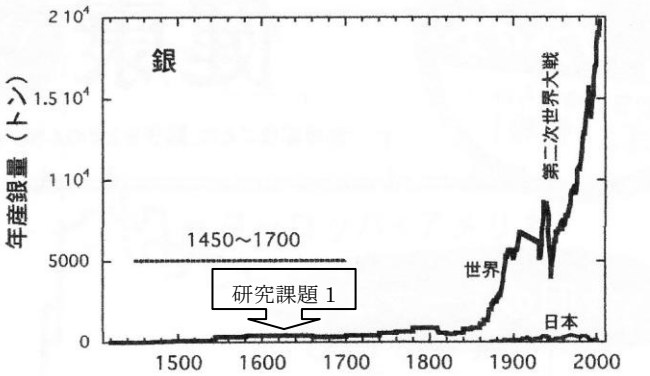


図1-12　16世紀以降における銀の生産量推移[85)]

における小規模金採掘（ASGM）現場に着目した。それは低 HDI の最貧国でかつ ASGM に関しては新興国が多いことによる。本論文では、ASGM 地域の持続可能な社会創生を目指した取り組みについて提案しその効用について考察する。

まずポトシ銀山に関連して、図１－12[85]に16世紀以降の世界の銀生産量の推移を示した。16 世紀中葉からに若干銀の増加が見られるが、主にスペインの植民地アメリカで生産された銀が寄与している。また 1850 年以降は金と同様に指数関数的に急増している。現在の銀生産量は約 2 万トン/年であり、金の生産量 2500 トン/年との生産量比は約 8 倍になっている。現在では、金の消費量の 60～70%は宝飾用であり、工業用材料としては約 10%に過ぎないのに対して、銀は工業材料需要だけで約 60%になり、宝飾用は 30%である。このように現代の金と銀とでは需要構成が全く異なるものになっている。一方、古代から現代までの金・銀比価に関しては、図１－11 で示したように、銀は決済用の本位的貨幣としての比重が大きかった。本論文では、上述した 16 世紀以降に増加したスペイン植民地アメリカにおける銀生産に焦点を当てる。その中で特に、ペルー副王領における第 5 代副王 Francisco de Toledo(1569-1581)のポトシ銀山の開発における鉱山施策について、歴史資料を読み解き、資源の再利用や燃料用資材の保護等、現代の持続可能な鉱山業を目指す施策に匹敵する試みについて論考する[69-71]。副王トレドの鉱業政策によってポトシ銀山は世界に冠たる存在になった。図１－13[86]に中世における世界各地の主要な地域とポトシ銀山の生産量推移を示した。この繁栄の反面、先住民社会を根底から覆すほどの負の遺産を残したことも事実である[53-54)57]。本論文では、当時廃棄物の再資源化を取り上げた画期的な施策について検討し、その中心的技術である水銀アマルガム法を中心に、当時の鉱山業の技術的側面に焦点を当てて論述することとしたい[69-71]。この点が、第 2 章の［研究課題 1］の背景である。

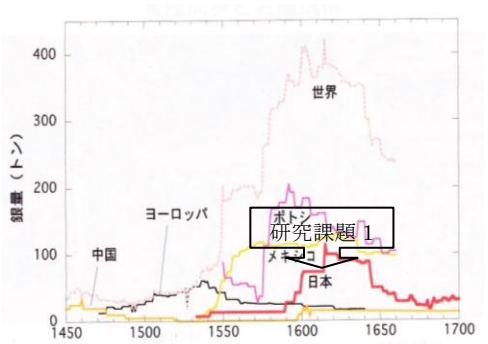


図１－13　15 世紀以降の世界各地およびポトシ銀山の銀生産量推移[86]

次に金の生産の歴史から［研究課題２］の位置付けを概観する。図１－14[90]に 1850 年以降の金の生産量の推移を示した。1850 年以前の金の生産量は、年間 40 トン以下の時代が長かったが、長期的には次の 6 段階に区分される[85]。

第 1 段階；紀元前 4500 年から 2100 年までは、世界年平均 0.35 トン
第 2 段階；紀元前 2100 年から 1200 年までは、世界年平均約 3 トン
第 3 段階；紀元前 1200 年から 50 年までは、世界年平均約 3.6 トン
第 4 段階；紀元前 50 年から紀元 500 年までは、世界年平均約 4.7 トン
第 5 段階；紀元 500 年から 1492 年までは、世界年平均は 2.4 トンに下落
第 6 段階；1493 年以降 1890 年までは、世界年平均が約 40 トンに急増

その後は、図１－14 の 1850 年以降の 150 トン/年のレベルに連動している。この間 18 世紀初頭から末期にかけて、ブラジルにおいてゴールドラッシュがあったが、この時のブラジルにおけるピーク値は年間約 15t であった[83]。

図１‐14によれば、19世紀中葉以降指数関数的に金が増産されてきた。ここには1-3で述べたHubbert理論に基づく4つの曲線群が面積表示されている。これは全体の推移の中でその生産量の凹凸に大きく寄与している大鉱山ないしは経済的な変化が内包されている。その変化の形態を模式化したのがHubbert理論に基づく相対曲線（sub-cycle cueve）である[90]。

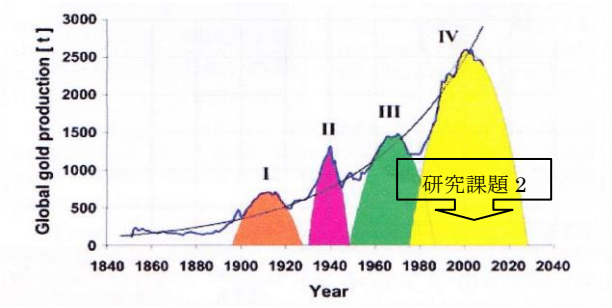


図１‐14　19世紀中葉以降の金の生産量の推移とピークを説明するSub-cycle(Hubbert curve)[90]

曲線Ⅰは18世紀のブラジル、19世紀中葉に始まる北米のゴールドラッシュ以降の南アフリカとオーストラリアにおける金鉱脈の発見による新たなゴールドラッシュ初期の寄与を反映している。しかし、第1次大戦によって一旦収束している。曲線Ⅱは1929年の世界恐慌以降のアメリカ大統領による金の価格政策によって、金鉱山に多くの人が流れ込んだ結果であるが、第二次大戦でこれも収束した。第Ⅲのピークは、南アフリカの高品位金鉱山が次々と開発されたことによる寄与が最も大きかった時期である。現在のピークⅣは、画期的な抽出法CIP（carbon-in-cyanidation process）の発明によって、低品位鉱の開発が可能になったことによる[91]。本論文では、図１－14の中の近年の南アフリカの鉱床で起こったゴールドラッシュ以降の、特に 1975 年以降に上述のCIP プロセスによる大規模生産とは別次元で、閉山した鉱山周辺や小規模鉱山、河川の砂金現場等世界各地で拡大してきた家族単位の小規模金採掘（ASGM）を対象とする。それは、現在の世界の金生産量 2500 トン/年の約 20～30％に相当する規模と言われている。UNEPのデータ[92]からは、直接従事者（miner）が1,300万人と多く、平均の生産性は27g/人・年である。仮に金の価格を3000円/gとして中間搾取がなければ約3ドル/人・日の収入になり、低開発国の低所得者層にとっては、生計を支える重要な収入源になる。問題は、金の抽出に水銀を用いていることである。UNEP[92]によれば、小規模金採掘現場からの水銀排出量は、世界の人為的排出量の37％に相当し、排出インベントリーとして最も大きいことと合わせて、直接従事者やその家族の健康被害が懸念されている。よって2013年に水銀条約が締結され、地域社会の持続性を維持しながら水銀を削減する目標（Zero Mercury）を掲げて世界的に取り組みつつある課題である。本論文の［研究課題２］では、研究の起点として東アフリカ地域を対象とし、地域社会の創成を目指したZero Mercury指向の取り組みについて論述する[93-94]。これらの記述は第３章の背景である。

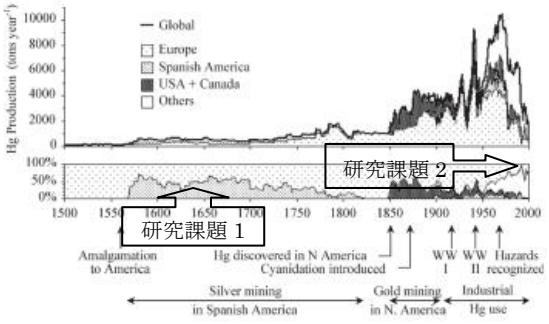


図 1 - 15　16 世紀以降今日までの水銀の生産と用途の量的推移[52)]

上述したように、16 世紀中葉以降のポトシ銀山の銀の製錬法としても、また今日の小規模金採掘現場における金の抽出法においても、その主幹技術は水銀を用いる水銀アマルガム法（混汞法または水銀法）である。水銀は常温で液体（融点－39℃）である上に、化学的活性度が高く金や銀と容易に低融点の金属間化合物（アマルガム）を形成する。この反応は常温でも起こるし、また分解蒸留する場合も 300℃前後の低温度で分解出来るので、エネルギー的に低コストの製錬法である。その一連の操作も簡単であり、高度な知識を必要としないので、低開発国の低所得層また僻地であっても手軽に処理できる長所を持っている。そのため前述したように、小規模の河川敷砂金採掘においても大規模企業が閉山した後の山金採掘においても、生計を維持する程度の生産が簡単にできることから、1975 年頃アマゾン流域のゴールドラッシュに始まり、それ以降世界各地に広がった[95)]。しかし、水銀の化学的活性が毒性を持つという面で人間にとっては有毒であり、水俣病の発生リスクを拡大してきたのである。

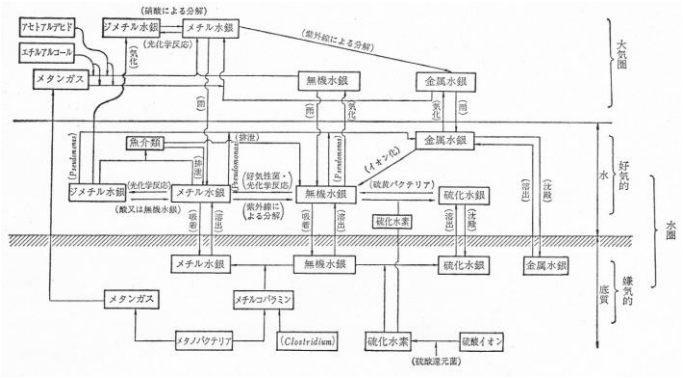


図 1－16　水銀の大気、水圏、土壌間の循環と動態変化[96)]

図 1 - 15[52)]は 16 世紀以降の水銀生産量の推移とその用途、使用地域を概観したものである。16 世紀以降の水銀は主に銀の製錬用に用いられていたが、1886 年に青化法（ケミカルリーチング法[4]）が発明されて後は次第に青化法に移行していった。一方で 1850 年代以降の、アメリカのゴールドラッシュ時には、水銀鉱山の発見も相まって金のアマルガム製錬が広く採用され、技術の改善もなされた。しかし、図 1－16[96)]に示すような水銀の蒸発や環境における循環とその動態変化に伴う健康被害に関しては、16 世紀以降の銀鉱業はもとより、今日の ASGM 現場においてもほとんど情報が行き渡っていないので、大気、河川、土壌への拡散が進み、健康上の問題も潜在的、顕在的に進行していることは否めない。また、図 1－17[97)]は 2010 年の人為的水銀排出量を地域別及びインベントリー別に示したものである。本論文の上述の二つの事例課題において、水銀鉱害に関連して、第２章で論じ

[4] Chemical Reaching；浸出液を使って鉱物から目的金属を浸出分離し回収する方法。金、銀の場合にはシアン化ナトリウム液を使う。これが 1886 年に発明された青化法であるが、その後鉱石粉砕方法と浸出液、浸出装置の組合せで多様な方式が開発された[105-106)]

る 16 世紀中葉以降のスペイン植民地では、年間約 500 トンの水銀が消費されていた[53]。したがって結果的に 100%近くが拡散したことになる。また、第３章で論じる金小規模採掘の場合は、人為的排出量の約 37%に相当する水銀が対象であるが、この量は年間約 800 トンに相当し、16 世紀から 19 世紀にかけて排出した量の約 1.6 倍になっている。この数値から水銀排出密度（mg/人・年）を求めその比較によって人的影響の予測が出来る。金、銀の生産に伴う水銀の消費は本論文の［研究課題１］および［研究課題２］において無視できない課題であるので、第 2 章および第 3 章の中で論じることにする。

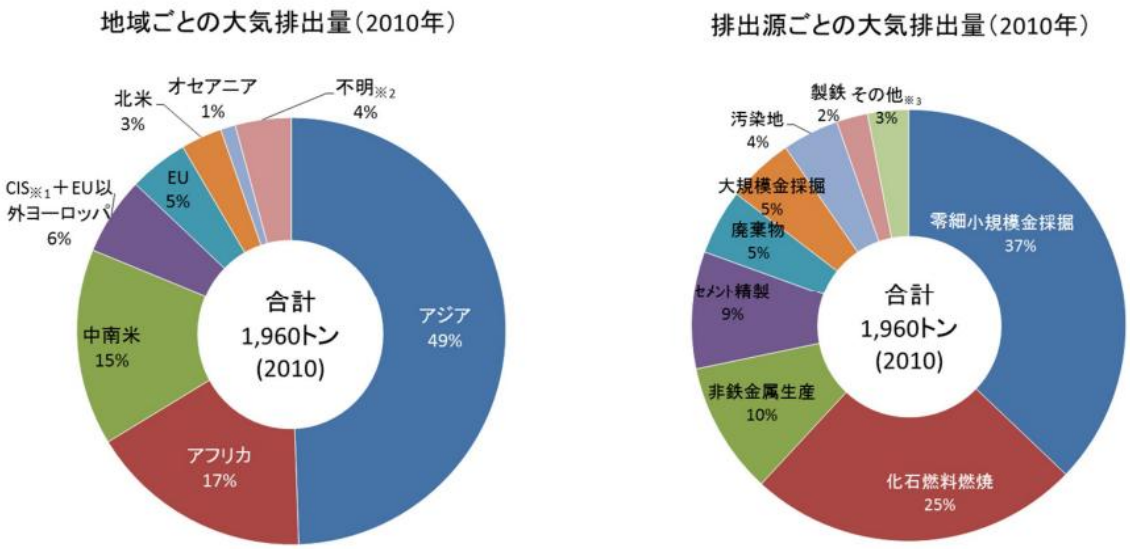


図１－17　2010 年度の水銀の人為的排出の地域別、インベントリー別比率[97]

3－3　金、銀の地下資源と地上資源の量的関係および転換点における研究課題の位置付け

金と銀の 20 世紀後半から現代までの間の積算産出量の推移を図 1 - 9[59]に示した。ここでは、既に地上に蓄積された量を地上資源（on surface stock）と経済的可採埋蔵量（地下資源；underground stock）を区分して示している。表 1－1 で示したように、金と銀は地上資源量が既に全資源量の約 75%を超えている[49]。このような資源バランスにあっては、地下資源の開発費用が上昇するのに反して、地上資源の再利用が注目するに値するようになった。南條らは、この地上資源を都市鉱山資源と捉え、循環システムを初めて提案した

表 1-3　使用済小型電気電子機器中の有用金属含有量と国内需要の比較[99]

		国内需要量（トン）	小型電気電子機器					
					携帯電話		パソコン	
			量（トン）	対内需	量（トン）	対内需	量（トン）	対内需
ベースメタル	鉄（Fe）	94,291,000	230,105	0.2%	418	0.0%	16,845	0.0%
	アルミニウム（Al）	4,002,000	24,708	0.6%	50	0.0%	3,914	0.1%
	銅（Cu）	1,763,000	22,789	1.3%	1,001	0.1%	2,730	0.2%
	鉛（Pb）	251,000	740	0.3%	19	0.0%	220	0.1%
	亜鉛（Zn）	489,000	649	0.1%	44	0.0%	70	0.0%
貴金属	銀（Ag）	1,870	68.9	3.7%	10.5	0.6%	21.1	1.1%
	金（Au）	166	10.6	6.4%	1.9	1.2%	4.5	2.7%
レアメタル	アンチモン（Sb）	7,666	117.5	1.5%	2.3	0.0%	43.5	0.6%
	タンタル（Ta）	360	33.8	9.4%	3.2	0.9%	14.9	4.1%
	タングステン（W）	4,000	33.0	0.8%	27.1	0.7%	1.1	0.0%
	ネオジム（Nd）	7,000	26.4	0.4%	18.9	0.3%	－	－
	コバルト（Co）	16,260	7.5	0.0%	2.2	0.0%	－	－
	ビスマス（Bi）	682	6.0	0.9%	0.7	0.1%	0.8	0.1%
	パラジウム（Pd）	131	4.0	3.1%	0.5	0.4%	2.1	1.6%

[28]。今日この基本的概念に基づいて循環型社会の構築の道が開けたと言っても過言ではない。2001 年日本の循環型社会推進法が制定され、金属資源対象としては自動車、大型家電製品、パソコン等のリサイクルシステムが構築された[98]。今世紀に入り、世界の電気・電子機器産業の急速な発展に伴い、レアメタル、レアアースといった希少金属の需要が益々急伸しつつある。このような社会的情勢に呼応して、貴金属も同様に需要が拡大している。特に金、銀は電気特性や熱伝導性の長所に加えて、耐食性が極めて高いために、小型電子電気機器の基板材料として欠かせない。しかも製品群は概して小型家電に集中しており、総重量は小さく、拡散度が極めて大きいという欠点があるため、リサイクルシステムの構築には経済性の面で弱点があった。2013 年 4 月に、日本の小型家電リサイクル制度が施行され[99]、そこには拡散性の高い製品の回収システムを自治体の一般廃棄物収集システムに合わせることで、回収段階に発生する経済的弱点を克服しようとする狙いがあった。

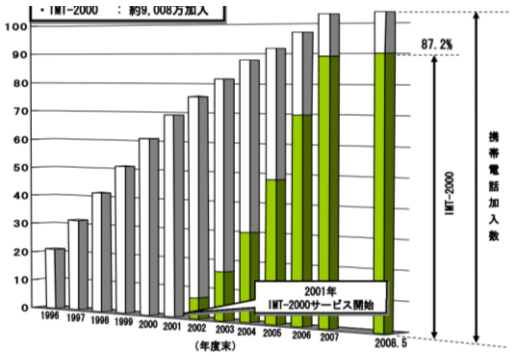


図 1－18　携帯電話の契約加入者数の推移[100]

本論文においては、この小型家電リサイクル法の弱点を克服する方策を案出するため、対象を使用済携帯電話に限定して、新しい回収方法とシステムの実践研究を試みた。

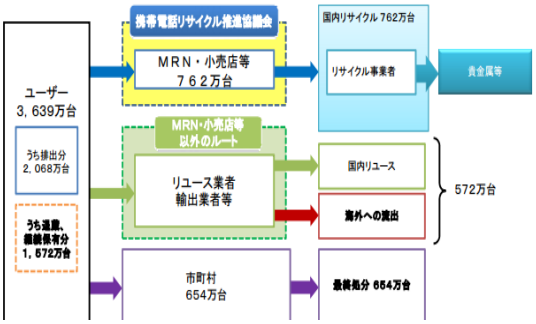


図１－19　使用済携帯電話の排出処分経路の実態[101]

［研究課題３］の使用済携帯電話は表１－3[100]に示すように、他の製品に比べて、その含有金属鉱種の多さと含有量、特に金銀等貴金属鉱種が多く、全ての小型家電の中でも最も高品位な人工鉱石と位置付けられているものである。ただし、図１-18[100]に示すように、携帯電話がほぼ国民全員に行きわたっている状況にあり、使用済携帯電話の排出傾向も「アンケートの集約」（図１-19[101]）によれば、公認されている回収系列である MRN（mobile recycle network）への排出は約 1/5 であり、個人的に退蔵している分が 60%近く存在する[102]。買い替えのタイミングがおよそ 2～3 年の間にあり、年々退蔵量が増加する傾向にある。さらに近年、アイフォンやスマートフォンへの移行が進み、今後も排出が減少することが予想される。したがって使用済携帯電話の都市鉱山とは、過去のフィーチャーフォン時代の退蔵品が主体であると考えられる。現在国内に蓄積されている携帯電話の総数は約 2 億台（重量では 20 万トン）と推定されている[102-103]。小型家電リサイクル法では、この分散して眠っている優良鉱石を人為的に集積させて、人工鉱山さらに鉱脈にして回収効率を上げる工夫をする必要がある。

本論文ではこの携帯回収システムを図１-20[48]のように描き、その中で集荷・鉱脈化を図る方法として「顧客接近型回収方法」を提示した。また、特に含有している金と銀の 95%以上濃集する技術「水平ブレード型高速カッティングミルによる濃集方法」を開発した。いずれも実践を通して実証し、国際標準の金塊を製造した。この結果システムとしての一貫性を実現した[48]。

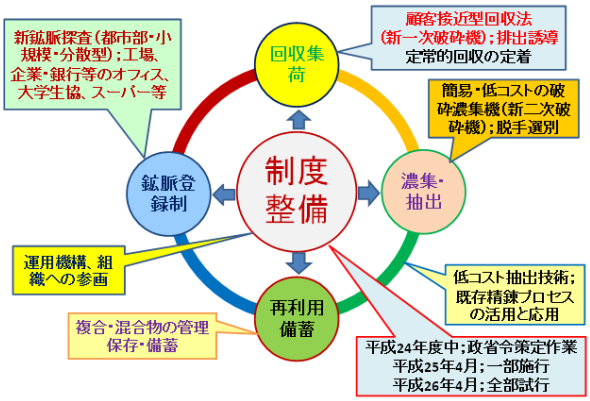


図１－20　携帯電話回収システム案（筆者作）[48]

しかし、この結果を小型家電回収システムに反映することは必ずしも容易ではない。そこで本論文では携帯電話の回収段階までの結果をもとに起業化の可能性を検討した。加えて、95%の粗金を製品とする製錬する方法に関して、適正規模、適正技術の考えで、簡単な実験も行った。このような試みを通して、都市鉱山開発を俯瞰しつつ、最適回収システムの在り方を討究してゆく。

図 1-21 は、現在の地上資源を模式化したものである。最下段部分と最上段の資源が、本論文における環境問題の対象になる。サステイナビリティ学の観点からは、潜在資源性は小さいが潜在汚染性の高い人為的地上資源（図 1－21）に対して、汚染対策と資源回収を連動させる画期的な技術、システムの開発が益々必要になると考えている。

その意味においても、過去から現在さらに未来へ続く、持続可能な資源活用においては循環型社会の構築が重要であり、都市鉱山開発が次世代のキーになることを言及してきた。

本論文の対象とする金属は金と銀であるが、過去・現在を通じてその製錬過程の必須金属である水銀を含めた三元素を中心に、上記の基本的概念に従って討究することを本論文の主題とした。

鉱山業の持続可能性に関しては主に操業中の鉱山業を対象としている。しかし鉱山開発においては閉山後の持続性も重要である[104-105]。この問題について、研究課題1のポトシ銀山の土壌中の蓄積水銀の問題と鉱山都市の世界遺産等としての持続性についても言及している。

次に本論文が対象とする金、銀、水銀の需要に対する供給構造の面から個々の研究課題の位置付けを整理しておく。表1－4には現在の三種類の金属鉱種の年生産量（供給量）と供給構造の関係を纏めてある。供給構造の内、新産量には一次（プライマリー）生産と随伴生産（銅、鉛、亜鉛等の新産金属の副産物）とがある。ASGMは金の新産量はプライマリーに属するものであるが、表 1－4 の数値範囲は新産量に対する概数である。つまりこの20～30％はASGMの金の新産量に対する寄与率を表している。その他ではリサイクル量が重要であり、全体の供給量の20～30％の寄与率である。なおこの他に、金、銀の供給には退蔵放出や政府売却等の量があるが、金に関しては近年ごく少量に限られているのでのここでは省いてあるが、銀に関しては政府売却が約4．5％ある。これらの供給構造の中で、研究課題1は銀の一次産量に相当し、水銀は一次産量とリサイクルが該当している。ただし表Ｉ－4の生産量と寄与率の数値は当時の値ではない。研究課題2のASGMは現代の金のプライマリー生産の一角を形成しており、今後拡大が予想されるものである。この間の水銀の供給量は現在では新産とリサイクルで構成されているが、リサイクル量を把握するのは困難であり、本表では需要量とそれに対する新産量の割合のみで供給を表している。今後水銀条約の進展により新産量の抑制が進むに従って、リサイクル量が増加することが予想されるし、ASGM現場での回収の努力が効果を上げることも予想される。研究課題3における金、銀の問題は表1－4のリサイクルそのものである。表1－1で示したように、地下資源の枯渇が進む中でこの比率も増大するものと予想される。本研究の各課題はこれらの金属資源の将来の供給構造に連動する課題であると位置付けている。

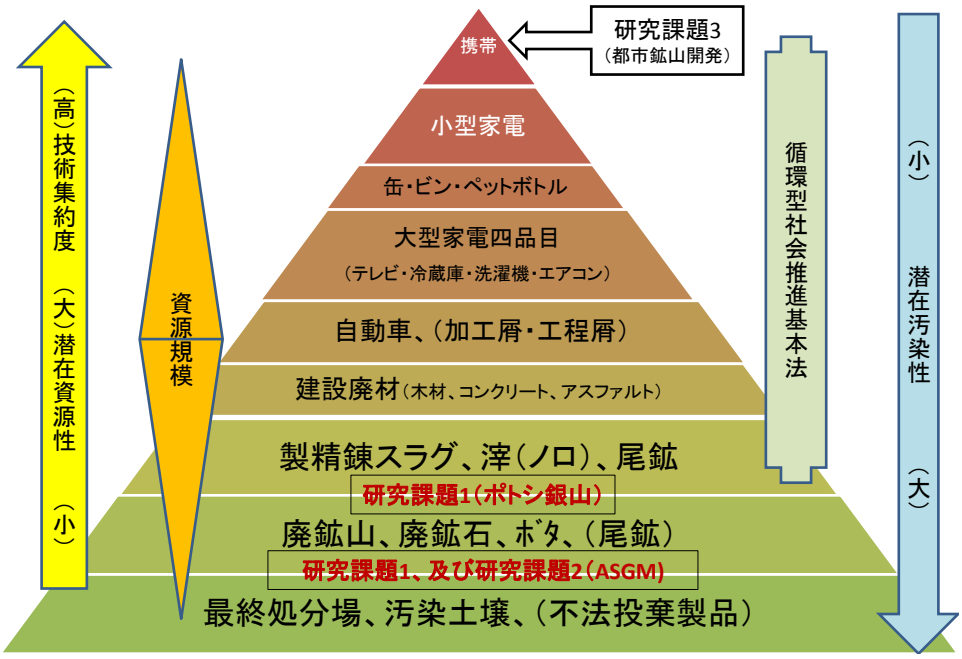


図１－21　各種地上資源の全体像と本論文における
鉱山開発対象の位置付け（筆者作）

表１－４　金、銀、水銀の年間供給量とその供給構造の概数（筆者作）

供給構造＼対象金属			金 (Au)	銀 (Ag)	水銀 (Hg)
年間供給量(t/Y)　【注】 （水銀のみ平均需要量を示す）			約 4,300	約 29,300	約 3500
供給構造 (%)	新産量 (%)	一次　（プライマリー）新産量(%)	約 60～70%	約 10～20%	約 60%
		随伴産量(%)	20%前後	約 60～70%	?
	リサイクル量(%) （他；政府売却等）		約 20～30%	25%前後 （内、政府売却 4.5%）	?
	新産量に占める ASGM 比率		20～30%	—	?

【注】生産量の平均値の産出データ（金；2009～2013 年の平均[106]、銀；2005～2010 年の平均[107]、水銀；2005～2010 年の平均需要量を示してある。これに対する供給側は、2009

～2012 年の平均新産量の約 2000t/y[108]を示してある。この他の水銀の供給源、随伴量とリサイクル量の把握は困難であるので示していない。)

【参　考　論　文】

1) 宮本憲一：戦後日本の鉱害言論、岩波書店（2014）

2) 飯島伸子編著：鉱害・労災・職業病年表、鉱害対策技術同友会、(1977)

3) 飯島伸子：環境問題の社会史、有斐閣アルマ（2000）

4) 畑明郎：金属産業の技術と公害、アグネ技術センター（1997）

5) 三浦豊彦:労働と健康の歴史(第一巻)－古代から幕末までー、労働科学出版部(1988)

6) 三浦豊彦:労働と健康の歴史(第七巻)－古典的金属中毒と粉塵の県境影響の歴史ー、労働科学出版部（1992）

7) サステイナビリティの科学的基礎の関する調査プロジェクト（RSBS）事務局編：RSBS サマリーレポート-サステイナビリティの科学的基礎に関する調査報告書 Science on Sustainability 2006、RSBS 事務局、pp.7-12（2006）

8) 三田村信男、伊藤哲司、田村誠、佐藤嘉則：サステイナビリティ学をつくる-持続可能な地球・社会・人間システムを目指して-新曜社（2008）

9)佐和隆光:サステイナビリティ学-循環経済と調和社会に向けて-ダイヤモンド社(2008)

10) 周瑋生編：サステイナビリティ学入門、法律文化社（2013）

11) 矢口克也：「持続可能な発展」理念の実践課程と到達点、総合調査「持続可能な社会の構築」－2、国立国会図書館、(2010)

12) 矢口克也：「持続可能な発展」理念の論点と持続可能性指標、レファレンス、国立国会図書館調査及び立法考査局、頁 1－27（2010 年 4 月号）

13) 高橋義文：発展途上地域における農業活動の持続性評価に関する研究、北大農研邦分紀要、27（1）pp.115-197(2005)

14) James M.Otto and John Cordes:鉱業投資の持続可能な開発とその将来、金属鉱業事業団、動向分析調査報告書、第 35 号（2001 年 3 月）

15)（独行）石油天然ガス・金属鉱物資源機構：鉱業の持続可能な開発に関する世界動向と主要な取り組み、平成 16 年度情報収集事業報告書、第 3 号（2005 年 6 月）

16) 栗田英幸：グローカルネットワークー資源開発のジレンマと開発暴力からの脱出を目指して、晃洋書房（2005）

17)（独行）石油天然ガス・金属鉱物資源機構：オーストラリア鉱山部門における企業の社会的責任と持続可能な開発の状況、平成 20 年度情報収集事業報告書、第 12 号（2009 年 11 月）

18）匂坂正幸：鉱業における持続性可能性評価と LCA、資源と素材、Vol.121,No.9,p.433-443(2005)

19) 松橋隆治：持続可能な発展のためのライフサイクルアセスメントの応用について、日本機械学会誌、Vol.100,No.947,p.1039-1044(1997)

20)原田孔明:「鉱物資源使用」カテゴリーの特性化係数、NIMS-EMC 材料環境情報データ No.8、(独行)物質・材料研究機構（2005）

21) 佐々木健吾：サステイナビリティはどのように評価されるのかー弱い持続可能性と強い持続可能性からの検討、名古屋学院大学論集　社会科学編、第 46 巻、第 3 号、pp.135-157(2010)
22) 国立大学法人　京都大学：幸福度指標の持続可能性面での指標のあり方に関する調査報告書、平成 24 年度内閣府経済社会総合研究所委託調査（平成 25 年 3 月）
23) 福原由美、松岡俊二：持続可能な都市と社会的環境管理能力の形成に関する研究-途上国における都市の持続可能性の向上を目指して-、広島大学 21 世紀 COE プログラム「社会的環境管理能力の形成と国際協力拠点」ディスカッションペーパ-、Vol.2006-8(2007)
24) 立見辰雄：鉱物資源を考える（4)、地質ニュース 378 号、p.16-37(1986)
25) 山内睦文：人類と資源-資源の立場から見た持続性、風媒社（2012）
26）山内睦文：地下資源の持続性と再生可能エネルギー、Journal of MMIJ,Vol.131,No.4(2015)
27) 立見辰雄：鉱物資源を考える（5)、地質ニュース 392 号、p.34-3755(1987)
28) 南條道夫；都市鉱山開発－包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け、東北大学選鉱製錬研究所彙報、第 43 巻、第 2 号、頁 239-251（1987）
29) 森岡正博：サステイナビリティ学において何がサステイナブルであるのか-持続可能性概念の批判的考察序説、大阪府立大学紀要、No.9,p.35-61(2014)31) フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia)』：Category”鉱山の世界遺産“(2014)
30) 味埜俊：サステイナビリティ学の挑戦－高等教育において『サステイナビリティ』の持つ多様性をどう扱うか、思沁夫編「多様性・持続性：サステイナビリティ学の挑戦」、大阪大学グローバルコラボレーション（GLOCOL)、p.9-29（2009）
31) フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia)』：Category”鉱山の世界遺産“(2014)
32) 阿部修二：「銀街道」紀行-メキシコ植民地散歩、未知谷（2010）
33) Miguel Angel y Angel Areces:Los caminos de la Plata, Rutas de globalizacion, Revista Ambienta(2009)
34) 三好恵真子：不可視のリスクに起因する不安のコミュニケーションをどう捉えるか-静かなる時限爆弾“ｱｽﾍﾞｽﾄ”に蝕まれた人々の叫び、檜垣辰哉編　バイオサイエンス時代から考える人間の未来、p.115-143(2015)
35) 井澤英二：中世鉱山都市・石見銀山に見る循環型社会－世界遺産「石見銀山遺跡とその文化的景観」、環境資源工学会（2010）
36) Susanna M. Hoffman and Anthony Oliver-Smith: CATASTROPHE and CULTURE, the School of American Research（2002）,若林佳史訳、災害の人類学-カタストロフィと文化、pp.7-28, 57-75、明石書店（2006）
37) 原田幸明、井島清、片桐望、大蔵隆彦：金属の関与物質総量の概算、日本金属学会誌、第 65 巻、第 7 号、頁 564 - 570（2001）
38) 田中いずみ：物質フローにおいての 輸入資源に隠れた環境負荷の算出に関する考察、東北大学大学院環境科学研究科 高度環境政策・技術マネジメント人材養成ユニット、OJT Term Paper：＃2007017（2007）
39) M. King Hubbert：M. King Hubbert on the Nature of Growth, Tecnocracy Incorporate (1974)

http://www.technocracy.org/articles/hub-gro.html
閲覧日　2014 年 10 月 28 日
40) Cris Vernon：Peak Minerals, The Oil Drum: Europe, pp.1-35(2007)
41) 大久保泰邦：ハバート理論が語るエネルギー・資源と経済のシナリオ
www.mottainaisociety.org/column/pdf/column7.pdf
閲覧日　2013 年 9 月 4 日
42) 井上正澄：石油の資源量と寿命－フラクタル理論とダブルタンクモデルが明かす真の姿、石油・天然ガスレビュー、Analysis,Vol.39,No.3,pp.1-11(2005)
43) 泉留維、三保学、室田武、和田喜彦：環境と公害－経済至上主義から命を育む経済へ－、日本評論社、頁 97-122 (2010)
44) 片桐望、中島謙一、原田幸明：概説　資源端重量 (Total Material Requirement; TMR)、NIMS-EMC 材料環境情報データ　No.18、(独) 物質・材料研究機構元素戦略クラスター (2009)
45) 河村宏明：実は日本は資源大国！？－都市鉱山の可能性を探る、経済レポート (2010)
www3.keizaireport.com/feature/850.html
閲覧日 2011 年 7 月 24 日
46) 地学団体研究会『新版地学教育講座』編集委員会編：岩石と地下資源　第 4 巻、東海大学出版会 (2002)
47) 鞠子正：鉱床地質学－金属資源の地球科学、古今書院 (2008)
48) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：都市鉱山からの鉄鋼用レアメタルの回収技術の開発とシステム化の研究、(公財) 鉄鋼環境基金　助成研究成果報告 (2014)
49) Valero A. And Valero A. : Physical Geonomics: Combining the energy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion, Resources, and Recycles,vol.54,pp.1074-1083(2010)
50) 中野加都子、宮部修一、尾崎平、和田安彦、中島謙一、長坂徹也：携帯電話に含有される微量有害物質のサブスタンス・フロー分析、日本金属学会誌、第 71 巻、第 9 号, pp.801-808(2007)
51) Meadows, D. et. al. Beyond the Limits, Post Mills, Vermont : "Towards Some Operational Principles of Sustainable Development," Ecological Economics 2,1-6,Chelsea Green Publishing Company,(1992)
52) Lars D. Hylander：水銀の利用を続けるのか、それとも中止するのか、水銀の功罪についての歴史的考察、地球環境、Vol13,No.2,pp.151-166(2008)
53) Nriagu,J.O. : Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas, The Science of the Total Envirnment,149,pp.167-181(1994)
54) Nicolas A. Robins : Mercury, Mining, and Empire, Indiana University Press(2011)
55) 姉崎正治：イスパノアメリカの植民地時代における銀鉱山での水銀汚染に関する地域動態的研究、大阪大学大学院グローバル人間学紀要、第 1 号、頁 55－69 (2008)
56) Luiz D. De Lacerda and Wim Salmons: Mercury from Gold and Silver Mining- A Chemical Time Bomb?, Springer(1998)
57) Bakewell,P. : Mineros de la Montaña Roja:el trabajo de los indios en

Potosí,1545-1650,versión española de Mario García Aldonato,Alianza Editorial.(1989)
58) Gavin Hilson and James McQuilken：Four decades of support for artificial and small-scale mining in sub-Sahara Africa- A critical review, The Extractive and Society,1,pp.104-118(2014)
59) 原田幸明、井島清、島田正典、片桐望：都市鉱山蓄積ポテンシャルの推定、日本金属学会誌、第73巻、第3号、頁151－160（2009）
60) 木村真澄、本田博己：ピークオイルの資源論的概念とその対応策について、石油・天然ガスレビュー、Vol.41,No.4,pp.17-30（2007）
61) 堀尾正靱：現代技術社会においてなぜ「適正技術」思考が必要か、人間科学研究、第26巻、第2号、頁163-17⑨（2013）
62) 立川昭二：古代鉱業史研究、創元社（1956）
63) 中野定雄、中野里美、中野美代：プリニウスの博物誌5、雄山閣（1986）
64) 山本義隆：16世紀文化革命－1、みすず書房、頁246－310(2007)
65) Vannoccio Biringuccio：The Pirotechnica of Vannoccio Bringuiccio, The Classic Sixteenth-Century Treatise on Metals and Metallurgy, translated by C. S. Smith and M. T. Gnudi, DOVER PUBLICATIONS INC.(2005)
66) 三枝博音著、山崎俊雄編：“デ・レ・メタリカ”－全訳とその研究－近世技術の集大成、岩崎学術出版社（1968）
67) Lazarus Ercker；Treatise on Ores and Assaying,translated from the German Edition of 1580 by Anneliese G. Sisco and Cyril Stanley Smith, Chicago（1951）
68) Alvaro Alonso Barba：Arte de los Metales, Editorial MAXTOR(2003)
69) Modesto Bargalló；La Mineria y la Metallurgia en la America Española durante la Epoca Colonial,FONDO DE CULTURA ECONÓMICA,Mexico Buenos Aires(1955)
70) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：ペルー第五代副王トレドのポトシ銀山開発事業における廃鉱石、鉱泥からの資源回収－歴史資料から読み解く現代社会への示唆、廃棄物資源循環学会誌、Vol.25、No6、p.445-453（2014）
71)姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：ポトシ銀山の先取的な鉱業システム－歴史資料から再評価する第五代副王Toledoの環境諸施策等に関する新たな知見、日本鉱業史研究、N0.68,p.63-82（2015）
72) 姉崎正治、三好恵真子：スペイン植民地時代のポトシ銀山における銀製錬技術の再評価と今日的応用開発への可能性、大阪大学大学院人間科学研究所紀要、第 37 号、頁299－320（2011）
73)松隈寿紀:鉱石中の金銀の腑存状況について、浮選(特別講演)、No.30、頁11－20(1991)
74) 日本金属学会：非鉄金属製錬法－新制金属講座新版製錬編（1964）
75) United Nations Environment Programme (UNEP)：A Practical Guide -Reducing Mercury Use in Artificial and Small-scale Gold Mining（2012）
76) 経済産業省：レアメタル確保戦略（2009）
77) 環境省大臣官房破棄物・リサイクル対策部：循環型社会への新たな挑戦－第2次循環型社会形成推進基本計画が始まりました、(2010)

78) 環境省－経産省：小型家電リサイクル制度（2014）
www.meti.go.jp/policy/recycle/main/admin_info/law/11/
閲覧日 2014 年 10 月 28 日
79) 姉崎正治,三好恵真子：都市鉱山に関する実践的研究－使用済み携帯電話の破砕特性に関する基礎的検討、大阪大学大学院人間科学研究科紀要、第 38 巻、頁 131-153（2012）
80) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：水平ブレード式高速カッティングミルによる使用済携帯電話の粉砕と貴金属成分の濃集現象、廃棄物資源循環学会論文誌、査読中(2014)
81) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：水平ブレード式高速カッティングミルによる一次破砕後の使用済携帯電話砕片の乾式粉砕過程に関する実験的検討、廃棄物資源循環学会論文誌、査読中（2014）
82) 湯浅赳夫：文明の血液－貨幣から見た世界史、新評論（1988）
83) 増田義郎：黄金の世界史、小学館（1997）
84) 増田悦佐：危機と金、東洋経済新報社（2011）
85) P. Vilar: A History of Gold and Silver 1450-1920, A Verso Modern Classic, pp. 351-352(19917)
86) 井澤英二：中世末期から近世初頭における世界の銀生産、日本鉱業史研究、No. 55, pp. 11-20(2008)
87) Peter Bakewell;：Mining in colonial Spanish America, The Cambridge History of Latin America, Cambridge University Press, Vol. Ⅱ, pp. 105-151(1984)
88) 近藤仁之：ラテンアメリカ銀と近世資本主義、行路社(2011)
89) 環境省；水銀条約について（2014）
www.env.go.jp/chemi/tmms/pdf/full.pd 閲覧日 2014 年 10 月 28 日
90) J. Müller and H. E. Frimmel：Numerical Analysis of Historic Gold Production Cycles and Implications for Future Sub-Cycles, The Open Geology Journal, No. 4, pp. 29-34(2010)
91) （独法）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）：新しい金回収技術 CIP（2005）
92) United Nations Environment Programme(UNEP) : Environment for Development Perspectives: Mercury Use in ASGM, Division of Industry, Trade and Environment(2011)
93) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：世界の小規模金採掘（ASGM）の実態と Zero Mercury に向けての実践研究、東アジア“生命健康圏”構築に向けて－大気汚染と健康問題を考える日中国際会議、ポスターセッション（2014）
94) 姉崎正治、三好恵真子：水銀条約における小規模金採掘を巡る課題と水銀低減に向けた提案、第 42 回日本生活学会研究発表会、投稿済み（2015 年 5 月）
95) 佐藤洋；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（2003）
96) 喜多村正次、近藤雅臣、滝沢行雄、藤井正美；水銀、講談社、頁 224-228（1977）
97) 環境省環境健康部環境安全課；水銀規制に向けた国際的取り組み「水銀に関する水俣条約」について、(2014)
98) 環境省報道発表資料：使用済み製品の有用金属の再生利用のあり方について（第二次

答申)、中央審議会廃棄物・リサイクル部会（2012）
99）環境省－経産省；小型家電リサイクル制度（2014）
www.meti.go.jp/policy/recycle/main/admin_info/law/11/
閲覧日 2014 年 10 月 28 日
100）　環境省、経済産業省：平成 21 年度　使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会　とりまとめ、(2010)
101）総務省：情報通信分野におけるエコロジー対応に関する研究会（第 1 回)、資料 2　検討の背景および方向性（2008）
102）村上進亮、大杉仁、村上理映、向田愛子、辻村洋則：携帯電話の寿命および退蔵動向の調査とストック量の推定、
Journal of Life Cycle Assessment, Japan, Vol. 5, No. 1, pp. 138-144(2009)
103）梅澤光希、増田悦夫：携帯電話端末の回収とその効率化に関する検討、流通経済大学
http://www.rku.ac.jp/~e-masuda/collectWCP.pdf
閲覧日　2011 年 6 月 16 日
104）(独行)石油天然ガス・金属鉱物資源機構：酸性坑廃水問題の対処動向について、金属資源情報（2003 年 03 号）
105）（独行）石油天然ガス・金属鉱物資源機構：特集「鉱害防止に挑む」、JOGMEC NEWS, Vol. 35(2013 年 12 月）
106）（株）東京工業品取引所（TOCOM）：検定試験テキスト－貴金属取引の基礎知識－、第 8 章参考データ集（2013）
http://www.tocom.or.jp/jp/nyumon/textbook/preciousmetals/index.html
閲覧日　2015 年 4 月 26 日
107）GFMS；The Silver Institute-World Silver（2011）
108）（独行）石油天然ガス・金属鉱物資源機構：43 水銀（Hg）（2012）
mric.jogmec.go.jp/public/report/2012-05/43.Hg_20120619.pdf
閲覧日　2015 年 4 月 26 日

第2章　スペイン植民地時代の銀鉱業とペルー副王領第五代副王Toledoの先進的鉱山業および現代に連動する水銀による環境課題

第1節　研究目的と二つの論点

本節では、図1－11の銀生産の歴史の中で、アマルガム製錬を大規模な工業化に採用し成功した、中南米のスペイン植民地時代における水銀アマルガム法の適用による環境問題に遡る。その中で、次節以降で論述する二つの論点を提起する。まず第2節では、スペイン植民地の中のペルー副王領で、第五代副王Francisico de Toldo(1569-1581、以下副王Toledo）が先進的な諸施策を敢行したことによって開花したポトシ銀山の銀鉱業について、特に持続的鉱業の観点から論究する。次いで第3節、第4節では、この銀鉱業によって植民地の銀鉱山周辺に蓄積した水銀が、今日の小規模金採掘（Artificial Small-scale and Gold Mining；以降ASGMと表記）で排出される水銀と同質の鉱害性を持っているとする見地から、現在と過去を連結して水銀汚染の問題を考察する。

図2-1　中世スペインの植民地アメリカの金、銀、水銀鉱山開発の位置と開発年度[1)]

スペイン植民地では16世紀中葉から19世紀初頭までの250年以上にわたって、中南米各地で大小さまざまの規模の銀鉱山が開発された。図 2-1[1)]は当時開発された主な銀鉱山の位置を示している。表2－1には、Bakewallの図[2)]から図式積分法[3)]で読み取って、生産規模毎に区分された主要銀鉱山の開発年次、生産年数と推定総生産量および年平均生産量（生産速度）の概数をまとめた。また、図2－2に総生産量と年生産量との関係をまとめた。研究対象のポトシ銀山が他に抜きん出て規模と生産速度が大きかったことが想定される。図1－13では、研究対象のポトシ銀山とメキシコ地域の全鉱山の生産量の比較であるが、ポトシ銀山の冠たる存在であったことが示された。また、表2-1の大中の区分にある銀鉱山は、いずれも約250年間という長期にわたって生産を継続してきたことも、現代の目から見て脅威的なことである。現代では銅、鉛、亜鉛鉱山における随伴銀が約70～80%であり、銀主体の鉱山は約 20～30%である[4)]。その中でも最大級のものはメキシコのFresnillo銀鉱山（サカテカス）とオーストラリアのCannington鉱山である。いずれも生産量は1000トン/年級の規模である。したがってポトシ銀山はそれらの1/10程度の規模に相当する。この鉱山の大小の論点は、第1章の図1-10に示した持続性から見たHubbert曲線で論じられる。表2-1に掲げた当時の大、中規模に区分された銀鉱山が250年前後生産を維持し、地域社会の持続性に主役を演じていたことが、図1－1で述べたと同様に持続可能な鉱山業を論じる視点になる。加えて本論文で取り上げる銀鉱業では、水銀アマルガ

ム法を大々的に利用したという点では、鉱害の視点からも中核的課題になる。

表 2－1　スペイン植民地時代の主要銀鉱山の開発期間、
生産量(図式積分値)及び年平均生産量の概数（筆者作）

地域	規模の区分	鉱山名	開発年次（西暦）（開発期間；年）	生産量（×万トン）【図式積分値】	年平均生産量（トン/年）
中米（メキシコ）	大	Zacatecas	1546（274）	1.22	89.0
		Guanajuato	1550（265）	0.94	71.0
		Durango	1600（269）	0.67	49.8
		San Luis Potosí	1592（218）	0.42	38.6
	中	Guadalajara	1543（265）	0.20	15.0
		Sombrerete	1558（252）	0.14	11.2
		Pachuca	1552（253）	0.12	9.4
	小	Zimapán	？（75）	0.04	10.6
		Bolaños	1740（65）	0.04	12.4
		Chihuahua	1703（112）	0.05	9.0
		Los Alamos, Rosario, Cosalá	1650（92）	0.10	21.8
	小計		－	3.94	－
南アメリカ	大	Potosí	1545（270）	2.80	103.7
	中	Oruro	1606（299）	0.81	27.1
	小	Lower Peru	1771（54）	0.34	63.0
		Chille	？（44）	0.01	2.3
	小計	－	－	3.96	－
上記銀山の銀総生産量			－	7.90	－

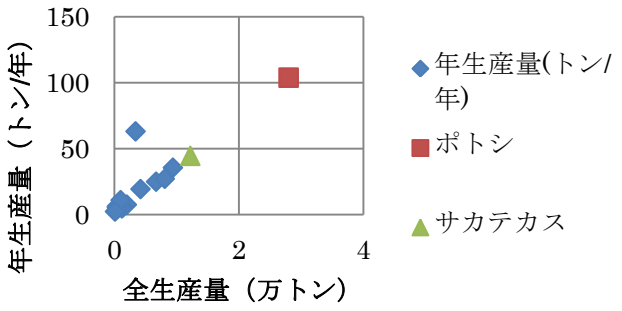


図 2-2　ポトシを含む主要銀鉱山の総生産量と年間生産量の関係（筆者作）

そこで第 2 章第 2 節では、植民地時代の水銀アマルガム法を概観した上で、ポトシ銀山を一躍有名にした、ペルー副王領第五代副王 Toledo の鉱山業を主にスペイン語で記述された歴史資料から読み取って論考する。副王 Toledo の鉱山施策においてはアマルガム製錬法の採用はもとより、銀の生産システムにおいても当時の技術を結晶させた先進的なものであった。

特に本論文が主題としている鉱害の最も大きい原因物質である水銀に関しては、尾鉱や鉱泥からの回収・再利用のシステム化においても、また労働者の健康管理上の法制化においても、当時の知識を結集していた形跡が読み取られ、今日的課題への取り組みとして再評価する価値があると判断した。しかし、技術的に完璧でないまま水銀を長期にわたって排出し続けたことは事実であり、このことは他の地域の銀鉱山においても同様であって、鉱害の観点からの検討も行うことにした。そこで、本章ではスペイン植民地時代の排出水銀量を「ストック水銀」と定義して、鉱山ごとのストック水銀を推算した。このストック水銀は現在の解釈によれば、図 1－16 で示したように、地圏・水圏・大気中の三相間において動態変化しつつ、グローバルな大気循環系を形成していると考えられる。重要な点は、アマルガム製錬によって排出された水銀の一部はこの循環系の過程で海洋や地圏に吸収・固定化されることである。それを環境許容量とすれば、閾値を超えた時点でそれらから再排出や再移動が始まると推察される。これが図 1－6 で示したオーバーシュート現象[5]である。図 2-3[6]は、近世以前の pre-inndustrial 時代と今日（current）における上記の各移動量を模式化したものである。この二つの時代の間には、図 1-15 のそれぞれの時代の消費量の違い、特に 16 世紀以降のスペイン植民地で排出された水銀が加わることによって、再排出・再移動量が明らかに変化することになり、今日の大気中の対流水銀量のレベルを著しく高めてしまったと言える。このようにみると、当時の銀製錬による水銀の排出が、一旦はストックされたと考えられるものの、再排出・再移動の形で今日の大気汚染にまで影響が及んでいるとみなすことが出来る。図 1 - 15 から推定される 16 世紀中葉以降にスペイン植民地の銀鉱山から排出された水銀の量は約 400～500 トン/年となり、pre-industrial 時代にあって、19 世紀初頭までの約 250 年間に排出された累計は約２０万トンとされている[7]。一方、今日の金の大規模金鉱業（LSGM）および小規模金採掘（ASGM）によって排出される水銀量は、図 1－17 から全排出量の約 40%、約 800 トン/年と言われ、その約 2 倍程の量に相当する。ただし、今日では、産業革命以降の重化学工業時代の累積排出量約 80 万トン[7]が加算されている状況が大きく異なっている。その結果が図 2-3（上）の pre-industrial と（下）の今日との差であるが、その間には、上記の約 400～500 トン/年の人為的排出が加算され、再排出・再移動の量が計上されているはずである。しかし、この点が環境容量を評価する場合に最も重要

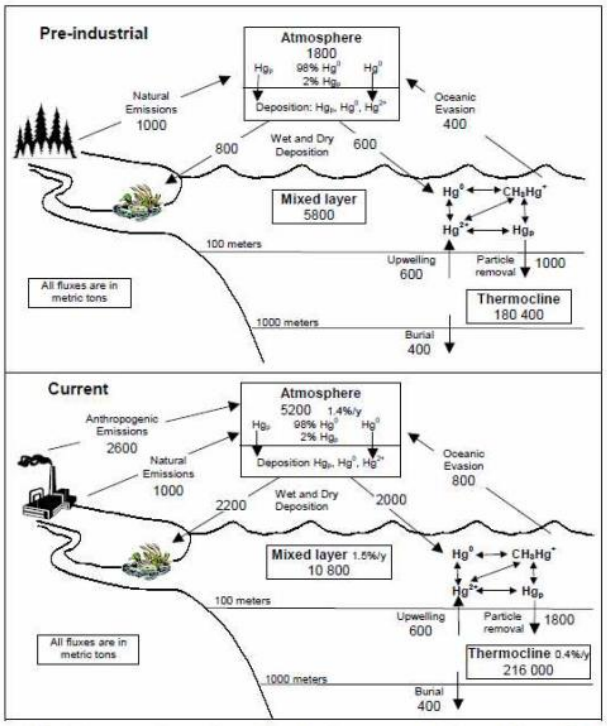


図 2-3　地球規模の水銀の移動に関する量的バランス図（pre-industrial と current の比較）[5]

な点である。以下に述べるとおり、地球規模で見た場合、大気中の水銀濃度（図 2 - 4[8]）においても、動物中の沈積水銀（図 2 - 5[8]）においても、16 世紀以降に排出された上述の水銀の影響はほとんど表れていない。つまり、地球規模では当時の銀鉱業で排出された量約 400～500 トン/年は環境が吸収し得たのではなかろうかと推察している。しかしローカルな視点で見れば、健康被害は厳然として存在していたはずである。その理由は、ポトシ銀山と現在の ASGM における一人当たりの水銀被曝密度で比較した場合、ポトシ銀山の人口を 15 万人として約 300 トン/年の被曝とするとその密度は約 2.0kg/年・人である[9]。一方 ASGM の場合、800 トン/年を少なくとも 1300 万人が被曝したとして、その被曝密度は約 62g/年・人（家族等を含むとこの数値は更に小さくなる）であり圧倒的にポトシ銀山の住民の水銀による被曝が大きかったと言える。

そこで第 3 節、第 4 節では、図 1－16 で示した水銀の循環図に基づき、水銀による環境汚染と健康被害の関係を当時と現在を同一テーブル上で考察する。そこでは現代科学の知識をもとに、水銀の形態変化の可能性とその毒性被害ついて考察する。特にそのためには、中南米の旧銀鉱山周辺における疫学的調査と合わせて、ミイラの毛髪調査が必要性であると考えている。

2013 年 10 月に締結された「水銀条約」の意義は、水銀による人類の健康被害を抑制して行こうとする決意の表明である。人類は、自然の濃集作用で硫化水銀（HgS）として安定に固定されていた水銀を、簡単な熱分解装置で金属水銀（Hg）を手に入れ、過去数千年にわたって利用してきた。その結果、大気圏、地圏、水圏へと再分散させ、それぞれの中の濃度を高めることはもとより、新たに化学的、生態学的動態変化を起こし、新たな有害物質を生み出す結果となった。図 1 - 15 で示したように、水銀は産業革命以降の重化学工業時代に多用され、“本源的公害”[10]の一つと言われる「水俣病」を発生させた。これは金属水銀の中毒に加えて、化学反応によって生じるメチル水銀を原因とする人為的毒物による被害であった。近年、有機水銀が魚介類のような自然界の生態系によっても生成する可能性が明らかにされ、水銀の抑制が世界共通の課題になった。地球規模で見た場合、図 2 - 4[8]は 18 世紀以降の大気中の金属水銀の濃度測定の結果である。近代の重化学工業時代に地球大気のベース濃度から大きく逸脱するレベルまで濃度に上昇した。また図 2－5[8]は動物の遺体の各部位に沈積し

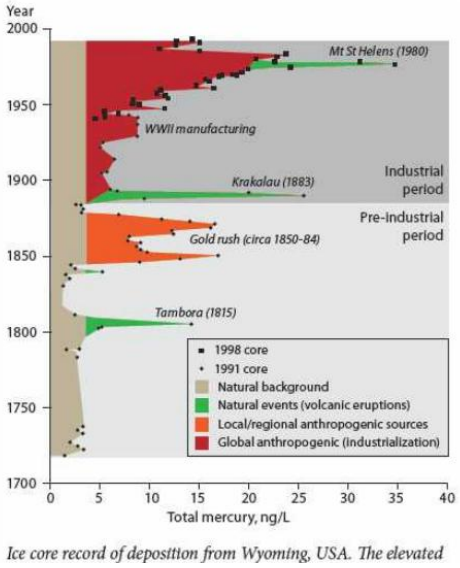


図 2-4　長期的視点から見た大気中水銀濃度の推移[8]

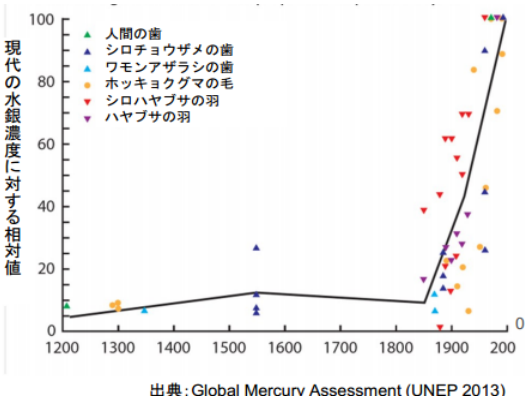


図 2-5　動物に取り込まれた水銀の経年変化[8]

た水銀濃度を調査した結果であるが、図 2－4 の変化と対応している。この中で、1550 年頃の値が若干凸になっている部分が第 2 章の研究課題 2 に該当する水銀アマルガム法の銀製錬への適用時代であろう。グローバルに見れば上述のような疑問に至るのであるが、ローカルな観点から見た場合、この当時ポトシ銀山では、大気中に蒸発した水銀が 4000m の高地特有の強風と風向によって広範囲に拡散し沈積した。モデル計算によれば、蒸発水銀の約 88.9%がプリコマヨ川の方向からパラグアイ川流域へ拡散したことになる[11]。また、ワンカベリカ水銀鉱山周辺の湖沼の底泥中に沈積した水銀を調査した結果が図 2 - 6[12]であるが、図から 16 世紀後半に大気中の水銀濃度が急増していたことが見出された。この他、南極基地における氷床コアの分析結果においても同様の変化が観測されている[13]。つまり水銀が重い気体であるために、大部分がローカルな沈積になるが、濃度が低下しても地球規模の大気循環現象で広範囲にも拡散することを意味している。水銀の大気中移動速度は数 1000km/日と言われており、図 2－7[8]には金属水銀と有機水銀に分けたグローバルモデルによる計算であるが、そこでも同様のことが窺える。

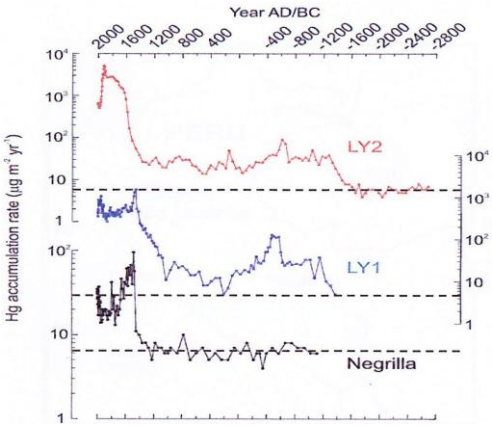
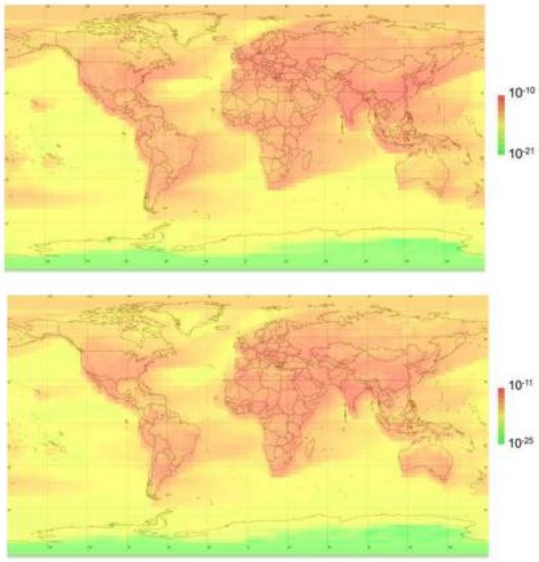


図 2 - 6 ワンカベリカ周辺の 2 つの湖沼（LY1、LY2）と 200km 以上遠方の Negrilla の長期間の水銀沈積量の推移[12]

図 2 - 3（下）は今日の地球規模の水銀の循環を模式化しており、ここでは 2010 年度のデータで各移動区分のバランスを示してあるが、排出源の一つが人為的排出量で 2000 トン/年であるのに対して、自然起因が 80～600 トン/年である。なお、再排出・再移動も人為的排出分が蓄積していたものであるので、源は人為的排出になる。持続的鉱業の観点からは図 2-3（上）のようなグローバルなバランスの下での循環であれば、図 2-5 で見られるような動物への沈積も少なく、自然の浄化力、土壌や海洋の吸収能の許容内で継続できることが考えられる。少なくとも 16 世紀以降の銀鉱業から排出された約 400～500 トン/年レベルではそれが実現していた可能性がある。副王 Toledo が水銀の回収事業を意図的に実施したことは、このような関連性から見れば、非常に先進的な取り組みであったと評価できるのである。



NIES多媒体モデル（G-CIEMS）による大気中水銀濃度の推定結果（Hg(0)の推定結果（上）、Hg(II)の推定結果（下））

図 2-7　モデル計算による金属水銀と有機水銀の地球規模における拡散状況[5]

本章では、第五代副王 Toledo が敢行した先進的な鉱山業を現代のサステイナビリティ学の見地から再評価することにしている

が、それとは別に、当時の技術が不完全であったこと、鉱害という概念がなかったことから生じた“ストック水銀”と、今日の小規模金採掘（ASGM）から排出される水銀による環境汚染、健康問題が時代を超えて同じ土俵上の問題であると捉えて論考することにしている。まさに、水銀は過去と現在の架け橋であって、地球規模であれローカルな問題であれ、鉱害問題が時空を連続している証しでもある。したがって、現在を論じることは過去を共有することになり、その知恵が未来との共進につながるという判断が本論文の立ち位置であり、独創的な試みである。

第 2 節　第五代副王 Toledo の鉱山業と現代のサステイナビリティ学の視点からの評価

2－1　ポトシ銀山概史と本節の目的

21 世紀に入り、科学技術の先鋭化とグローバル化の進展によって、地下資源の消費は益々拡大の一途をたどっている。他方で、地上資源（人工鉱山、都市鉱山とも言われる）の再資源化も循環型社会の構築を目指す上で注目が高まってきている。鉱業に関しては、地球環境の観点からは持続可能な鉱山開発[14]が志向されて久しいものの、世界各地における鉱害は後を絶たない[15]。概して鉱害は、第 1 章で述べたように、グローバル、ローカルに関わらず環境容量（環境収容力）から見て、事業規模並びに開発速度と採掘年数によってその影響の程度が規定される。

歴史的射程に鑑みると、産業革命以前の 16 世紀以降にスペインの植民地中南米で黄金期を迎えていた銀鉱山業について、現在の世界的な共通理念であるサステイナビリティ学の観点から、当時の鉱山業を捉えてみる試みは有益である。すなわち、その時代の技術においても、今日的な意義を持つ持続可能性に該当する各種の工夫をした形跡を見出すことが出来るからである。その一例として、16 世紀には世界に知れていた日本の石見銀山を取り上げ、持続可能性を導く工夫の一端を紹介した論考がある[16]。

そこで本章では表 2－1 で示したように、上記と同時代の 16 世紀後半以降スペイン植民地、中南米における金銀鉱山の開発に着目した。特にその時期は、銀山の発見並びに開発が急速に発展し、スペイン王室財政の立て直しが図られたことはもとより、貿易の拡大や経済の活性化によって価格革命といわれる現象にも影響を与えた[17]。本研究では、特に銀鉱山最盛期のペルー副王領のポトシ銀山（現在のボリビア）に焦点を当て、鉱山の持続可能な開発の観点から各種の試みや施策を再分析して、新たな知見を見出すことを目的とした。

1545 年に発見されたポトシ銀山の生産高は、第五代副王 Toledo（1569-1581）治世下で急速な成長を遂げた。それは水銀アマルガム法の適用だけでなく、数々の地理的・文化的条件に恵まれた結果とされるが、筆者等は、副王 Toledo の卓越した事業家としての組織的かつ戦略的判断と実行力に依拠したことが最も大きい要因ではないかと推察している。

図 1-13 は、15 世紀後半から 18 世紀にかけての中世の主要銀生産国・地域とポトシ銀山の生産量の推移である[16]。ポトシ銀山は 16 世紀後半に急速な生産量の増加を記録し、その後 200 年以上にわたって冠たる地位を維持した。この 1570 年代から 1580 年代の急激な成長期が第五代副王 Toledo の治世下で実現したのである。

副王 Toledo が実行した植民地政策や鉱山事業が急激な人口減少の原因になり、アンデス社会に壊滅的な被害を与えたことは深刻な史実[1)18]であり、そのマイナスのイメージから

か、Toledo の事業家としての評価や研究はほとんど見られない[19-20]。本章は以下の諸施策を歴史資料から読み取ることで、事業家トレドの類まれな能力を感取することにした。

筆者は、ポトシ銀山に導入された水銀アマルガム法の技術的変遷と水銀汚染の実態を調査し、スペイン植民地全体の水銀の蓄積量を推定してきた[3)21)]。またその過程で、ポトシ鉱山に置いて、1626 年に起こった動力用ダムの崩壊事故にも着目し、当時の土木技術や洪水被害および水銀の拡散等の実態について歴史資料をもとに検討を行った[3)9)21-23)]。

本章では、それらの結果を踏まえた上で、16 世紀中葉の鉱業においても、手工業から工場化へと形態が変化しつつある時代の中で、システムという概念が具現化した鉱業がポトシ銀山であると考えている。つまり、副王 Toledo がポトシ銀鉱業の大規模な改革を断行した中で、システム的発想による効率的プロセスや、廃棄物の回収等の近代的資源循環の発想と実践があったことに着目した。また、鉱山従事者の水銀曝露による毒性被害を抑制する措置や治療法を、トレドの鉱山法を含む各種の命令指示書[24-25)]の中に見出し、現代の科学的知見と照らし合わせて評価した。本章では、以上の諸施策の内実を歴史資料から読み取り、今日的な循環型社会論やサステイナビリティ学の視点から再評価を試みた。したがって、当時の絵図面や記述等の中の原典に近い資料を中心に論究することを心がけた。なお、当時の鉱山用語については Llanos[26)]の辞書を参考にした。

第 2 節で調査言及する主な内容は、以下の 5 項目である。

(1) 副王 Toledo の鉱山業と諸施策の概要
(2) 帝都ポトシの鳥瞰図と製錬工場の工程図の読み取りと解釈
(3) ポトシ鉱山の地質学的検討と採掘技術
(4) 尾鉱や鉱泥の資源化等の鉱山の持続的開発から見た諸施策と現代への波及
(5) 水銀中毒の防止及び治療に関する施策

2－2　副王 Toledo の鉱山業の概要と実績

2－2－1　Toledo の鉱山業を成功させたペルー式水銀アマルガム法（カホネス法；cajones 法）

ポトシ鉱山では、1545 年の発見当初から原住民の技術であるグァイラ法（Guaira 法；Pb 溶解法の一種）によって、露頭の富鉱から銀が抽出されていた。副王 Toledo の赴任時の 1569 年当時は、富鉱が減少して坑内掘りに移行ており、グァイラ法による生産高が低迷していた。同時に、鉱山周辺には大量の屑鉱石や廃鉱石が堆積していた。これらには相当量の銀は含まれていたが、グァイラ法では製錬できず、除外されたものであり、当時はこれらを低品位鉱もしくは屑鉱石（desmontes）と表現していた[27)]。

1555 年にはヌエバ・エスパーニア(現メキシコを中心とする中米地域、以下メキシコと表記)のパチューカ（Pachuca）鉱山で、Bartolome de Medina(1506-1575)が、水銀アマルガム法による銀鉱石の製錬法(パティオ法；Patio 法)の実用化に成功し、その活用が拡大していた[28)]。

パティオ法が、ペルーに導入され実験された形跡はあるものの、事業化には至っていなかった。副王 Toledo が 1572 年に、パチューカ鉱山の経験者である Fernandez de Velasco が持ち込んだ技術により秘密裏に実験を実施させており、その成功結果を受けて、後述する諸施策に打って出たとされている。その技術は秘密とされ、記述は残されていないが、

1640 年代の記録から箱型反応槽内の撹拌と槽(カホン;cajone)の加熱による反応促進法、つまりカホネス(Cajones)法であったことが明らかとなる[29]。このカホネス法によって、堆積していた廃鉱石から 5 年がかりで大量の銀を回収し、それが諸施策の資金源になったのである[30]。

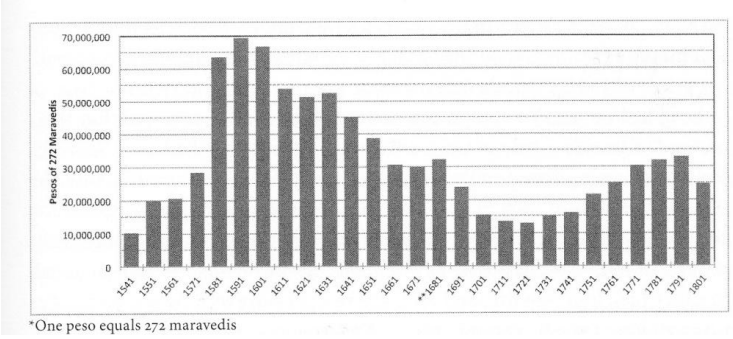


図 2 - 8　ポトシ銀山の銀生産高推移[2]

その前後を含めたポトシの銀生産高の経時変化をすでに図 1-13 に示した。ここからも明白なように、1572 年から 1590 年代にかけての急成長が副王 Toledo の鉱山業の効果（Toledo 効果；Toledo effect）である。なお図 2 - 8[2]は植民地時代全期間の 10 年毎の銀生産量推移を示している。これが 270 年間持続していたポトシ銀山の姿である。18 世紀はブルボン改革の行われた期間であるが、長期に持続した基盤が副王 Toledo によって構築されたと言って過言ではない。

2－2－2　副王 Toledo の鉱山業の主要施策

基本的な製錬技術を得た後に実行された副王 Toledo の諸施策の概要を以下にまとめた。

(1) 水力利用システムの構築

速度論的観点から、鉱石の粉砕度を上げることが必要である。その中心として、水車破砕機による効率的な粉砕強化を図るため、総合的な水力利用システムを構築した。ポトシ鉱山の東側に渓谷を持つカリカリ山塊に 6 基のダム群（最終的には 1621 年には 32 基；総貯水量 600～1000 万 m^3）を建設し、また破砕機用水路(ラ・リベラ；La Ribera)、水洗選鉱する水路、生活用水路（サンハ；Zanja）も建設した。ラ・リベラに沿った製錬工場の配列によって、限られた水をカスケード式に利用するシステムを実現した。

これは結果的には選鉱後の尾鉱や鉱泥を集約し、流出水銀の回収・再資源化を可能にしたといえる[27][31]。

(2)先住民の強制労働制度（ミタ）の実施

水銀鉱山および銀鉱山は、副王 Toledo の時代にはすでに坑内掘りに移行しており、鉱石搬出作業が律速段階になっていた。4000m以上の高地での重労働は、現地先住民以外不可能であったことから、インカ時代の輪番労働奉仕制度（ミタ）に、植民地政策の強制労働を複層させた形態で、広域から労働者を集めるミタ制度が実施された。この制度によって多くの犠牲者を出したため、幾度となく批判を受けた[32]ものの、その後 19 世紀初頭まで継続された[31][33]。

(3)水銀の国家専売制と生産管理

原料水銀の供給源は、ペルー副王領内で 1563 年に発見されていたワンカベリカ（Huancavelica）水銀鉱山であり、これは王室の専売鉱山として、その生産と収入が管理された。この生産量はポトシの銀生産にリンクした形となっていて、まさに“両鉱山の結婚”と言われるゆえんである。ワンカベリカ鉱山の 5 年ごとの水銀生産量推移を図 2-9[34]

に示した。同図には水銀鉱山として当時の三大鉱山であった、Almaden（スペイン）、Idoria（クライン公国）、Huancavelica（ペルー）の内訳も示してある。ペルーにおけるワンカベリカとポトシの間には量的には長期にわたって銀生産とバランスが取られており、余剰分はメキシコ方面へ供給され、需給調整が機能していたと考えられる[34]。公的には、1572年王室財政部局(Casa de la Moneda、Cajas de Reales)がポトシに設置された[35]。

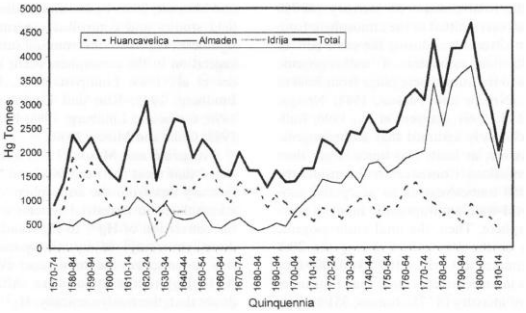


図 2-9　中世の三大水銀鉱山の 5 年間ごとの水銀生産高の推移[34]

(4)副王 Toledo の鉱山法

Toledo は両鉱山に鉱山法を含む各種の命令、指示書を発行しそれを施行している。その中で、鉱山主の責任を明確にしたこと、さらに実態は別にしても、水銀を扱う作業に関して、作業中の水銀ガス吸引を防止する上での注意を記述している。加えて、治療のための病院の建設および治療に要する休養日数や治療費等の補償等も法制化している[24-25]。

副王 Toledo のこれらの鉱業施策以外に幸運をもたらした特記的な条件は、4000m の高地における過酷な労働に耐えた先住民の存在以外に以下の事柄が考えられる。

①ポトシ鉱山もワンカベリカ鉱山も標高 4000m以上の高さである。この超高山地域（乾燥プマ）には、文化圏を形成していた先住民が居住し、荷役用動物(リャマ)が棲んでおり、インカ時代からの垂直統御による生活物資調達圏が存在していた[33][37]。

②先住民に伝わる活性化食品(コカ)の存在によって苦役を克服したこと、また荷役用のリャマの食料でもあり、家屋の材料でもある高山植物イチョ(icho；イネ科の草木植物)が豊富に存在し、それが低温度用燃料に適していた上に、2 年で成長することから輪作も可能であった[38]。

③地形上においても好条件があった。つまりポトシ鉱山の東側には 5000m近い山塊があり、氷河時代の峡谷には天然の池が点在しており、堰止めと連結によって巨大な水量のダム群が建設できた。また天然の川もあり、ポトシ市に向けた傾斜により急流を形成していたため、水車用水路ラ・リベラを幹流として、大きな落差が利用できるカスケード式の大型水車が導入できた。水路群の先にはピルコマヨ川（Rio Pilcomayo）があり、大西洋に排出されている。

これらの諸条件は個々の鉱山の持続性を評価する場合、地域特性として考慮しなければならない重要な要素である。

2－3　帝都ポトシを描いた絵図から読み取る鉱山都市の構造

2－3－1　帝都の鳥瞰図と現在の航空写真の比較

1562 年ポトシは帝都 Imperial Villa de Potosi になった。図 2-10 は、Gasper Miguel de Berrío (1706-1762)が 1758 年に描いた 18 世紀中葉のポトシの鳥瞰図である[39]。比較のために、現在のポトシの航空写真の一例を図 2-11[40]に示した。

図 2-10　帝都ポトシの鳥瞰図
（Gaspar1758）[37]

図 2-11　現在のポトシ鉱山地域の航空写真[38]

全体の構成をみると、ポトシ銀山(4820m)の北側前面に市街地が広がり、左上部(南東部)にカリカリ（CariCari;ほぼ 5000m クラスの）山塊があり、その峡谷にダム群が繋がって点在している(この図には 18 基のダムがある)。ダム群の西側の市街地上部から中央部にかけて水車用水路ラ・リベラが流れており、それに沿って製錬工場が連なっている。これらの部分を拡大した詳細図が、図 2-12[39]である。ここでは、製錬工場（ingenios あるいは azogeros）と鉱石破砕工場（haciendas あるいは molineros）において、水路が別々になって描かれており、いずれにおいても、カスケード式に水が利用されている様子が読み取れる。

ポトシ市中心の海抜は 2826.7m であり、中央広場（Plaza Principal）が 2900m、San Clemente 寺院はそれより低く 2700m とされており、図 2-11 からも窺えるように、ラ・リベラの市街地への入り口部から北西の端にかけて非常に急勾配になっている。このことが、各製錬工場において水流落差を確保するのに好都合であったと推察される。

T.S.Reynolds[42]によれば、ポトシの最大勾配は 594m/4.8km であった。また 1575 年当時河畔の水車利用の粉砕機は、48 工場で 74 基存在した[29]ことから、これらが一列に並んでいたとすれば、一基当たりの落差は約 8m になる。

一方、粉砕機の図面や寸法の詳細に関する情報として、次の 3 種の資料を例示したが、他にも多くのクロニスタの記録が残っている可能性はある[40]。

①落差は 8.3～11.1mで、水車の直径は一頭式で 6.1m、二頭式なら 7.2m、ピストンの直径は約 10.5cm、長さは 2.6～2. 9mであった[41]。なお、ピストン下の凹面の敷石をカベッサ（cabeza；頭）と表現していた。

②図 2-13 は一頭式のものであり、水車の直径は 43 フィート（約 12,9m）であった[2]。

③図 2-14 は一頭式と二頭式の図であるが、詳細の寸法は読み取れない[39]。しかし Luis Capoche（1548-1624）[29]によれば、水車の軸芯用の木材の長さは 21pies(5.88m)、断面は 2pies (56cm)であると記している。よってこの軸芯との比率から推定して、図 2-14 の水車の径は 6～8m と考えられる。

これらの情報から推察すると、計算上の最大落差は 13m近くと思われるが、平均落差は 8～10m 前後であったと考えられる。

図 2-10 の各部分の詳細図（図 2-12）からも、この落差を確保して、製錬工場も破砕工場も各工場が水路の水を順次カスケード式に使用している状況が描かれている。

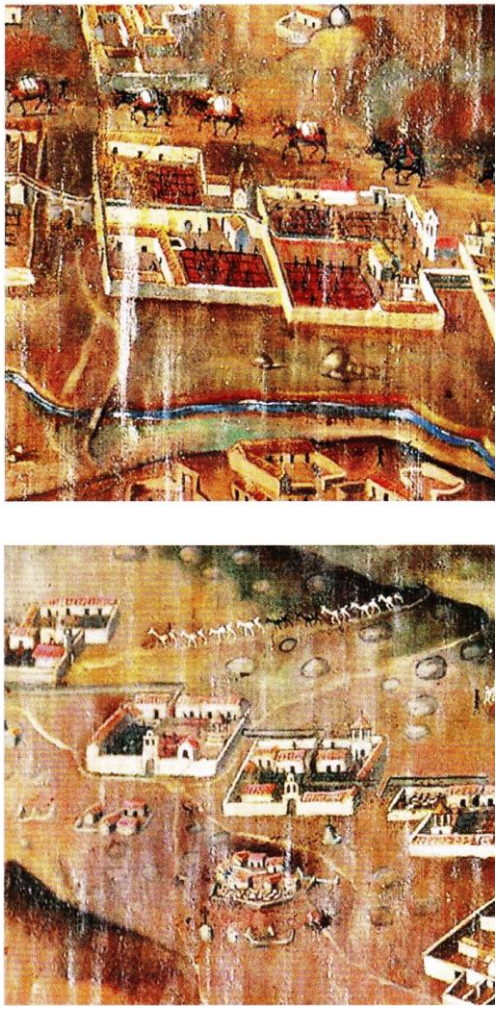


図 2-12　Gaspar の絵中の水力利用部分の詳細図[39)]

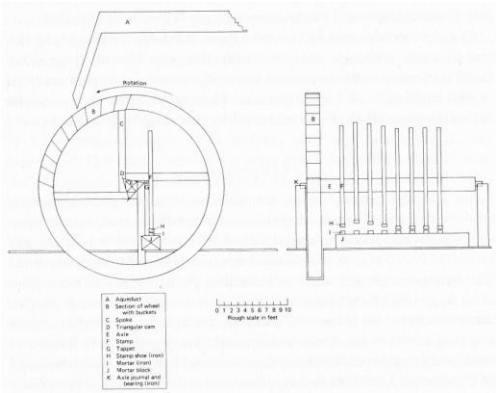


図 2-13　一頭式水車（ピストン 8 本）の図面[2)]

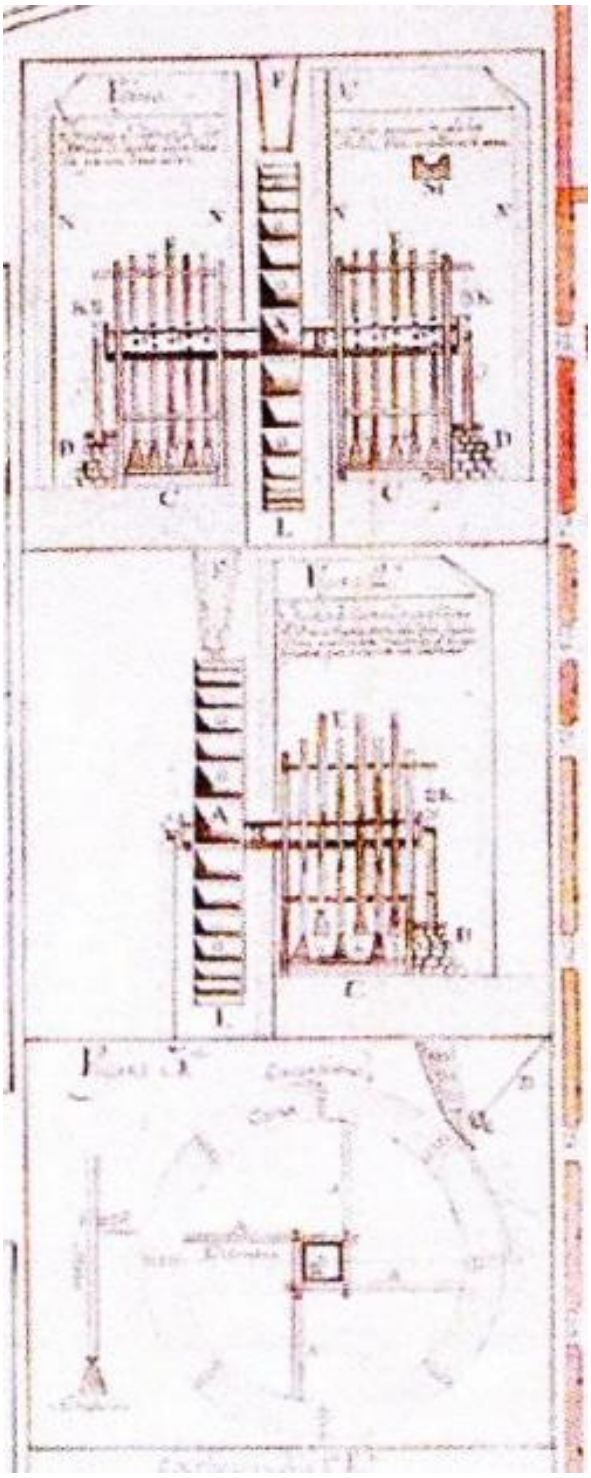


図 2-14　一頭式(ピストン 6 本)と二頭式(同 10 本)の水車の図面[39)]

このような水力の大規模複合利用は、ドイツのハルツ地方にある鉱山地帯で既に存在し

ていた。ポトシのこのシステムは、それに匹敵する規模であり、カスケード式に水力利用する点では、ポトシ独自のシステムでもある[39]。このため後述する鉱石水洗選鉱後の鉱泥処理やそれを再資源化するための鉱泥の集荷に有利な形態であったと考えられる[43-44]。

2－3－2　Arzans の製錬工場図から読み取る作業工程のシステム

Arzans(1662-1736)の報告の1577年の記述部分に図2-15の製錬工場図が挿入されている[31]。生存中の作品であることを考えると、図中の作業の様子は、副王 Toledo の時代より約 150 年後の 18 世紀初頭のものと思われるが、Acosta(1584)[27]や Capoche(1585)[29]の記述の内容と符合する部分が多いことから、作業工程や内容は 16 世紀後半時点とあまり変わってはいないものと推察される。

以下に、図 2-15 の各作業絵図の間に書き込まれているメモを読み解き、作業の具体像を描き出して見る。

この図は一つの製錬工場（ingenio）の全体を描いた外観図と推定される。工場全体は塀と建屋で囲まれており、周囲半分を水路（La Ribera）が流れている。破砕機の一部が塀の外にあるが、落差を確保して 2 機の水車を動かすための措置と考えられる。工場壁への出入りは、上部にある第二通用門が鉱石搬入に使われ、下部にある第一通用門は正門と思われる。そして、第二通用門側には、鉱石搬入監視所と見張り小屋、及び、製錬に必要な物資の管理所が並んでいて、そこには受け入れ用の取引窓口がある。また正門側には、工場主（アソゲーロ；azoguero）の住居、礼拝堂があり、また銀と水銀の保管倉庫がある。

設備としては、2 基の水車駆動式の粉砕機（1 基は敷地外のピストン 5 本の一頭式型、1 基は敷地内の同 12 本の二頭式）、中央付近に金網でできた篩装置が 2 枚ある。加熱炉（ブイトロン；buitrón）は 4 基ある。各炉に 6～9 面の反応槽（カホン；cajon、総称はカホネス；cajones）がある。粉砕した鉱石は秤量し、カホネスに挿入され、数人で足踏み混錬（レパッソ；repaso）する。4 基の加熱炉の内 1 基（下部の中央）で準備作業をしている。ここには秤量道具（トポ topo；重量は 2 アローバで約 23kg）が一つある。残りの 3 基は混錬中と思われる。buitrón 一基当たりの鉱石量は 50 キンタル（約 2.3 トン）である。中央左には分析小屋（ラマダ；ramada）があり各

図 2-15　Arzans が描いた製錬工場（Ingenio）の工程図[31]

カホネス中の鉱石の分析をする。これをもとに水銀量を決めていた。

ここで極めて特異な点は、当時富鉱とされたネグリージョ（negrillo；黒色系硫化銀の鉱石）の処理と思われる工程である。つまりネグリージョだけは、左側下部に集約されており、焙焼炉で焼成（例えば硫化鉱石の脱硫）し、その鉱石を第一通用門の左側で乾燥、冷却している。それをその上の専用加熱炉で混錬しながら製錬している。敷地の外にある粉砕機は、おそらくネグリージョス専用ではなかったかと思われる。

製錬後の処理に関しては、中央を横切る用水路を用いている。まず、上流から２個の大樽（ティナ；tina）を使って第１段目の洗浄をする。更に、２個の子樽で２段目の水洗をして粗アマルガム（ページャ；pella）を取り出す。尾鉱には１段目で分離される “ラマス”（lamas）と２段目で出る “レラベ”（relave）とがある。この図には描かれていないが、これらの尾鉱、とくにラマスは、小池（ポソ；pozo）に集められ、分析して水銀等の回収製錬されていたようである[26]。粗アマルガム（ページャ；pella）は中央左にある絞り小屋（ラマダ；ramada）で銀アマルガム（ピーニャ；piña）と水銀に分離される。最下段左には銀と水銀の保管倉庫（アルマセネス；almacenes）がある。

全体の敷地面積については述べられていないが、前述したように、一連の設備を収納するには、一工場当たり１ヘクタールは必要であったと言われている[39]。

全体の要員として描かれている人間を集計すると、合計 60 人である。最も多いのはカホンに関わっている要員で 31 人、物資受け入れ側には 12 人いる。工場に入ってくるリャマ隊には 13 頭が描かれている。鉱石粉砕には敷地内に 2 人おり、敷地外の粉砕機には人は描かれていない。その他、洗鉱要員が 6 人、待機と思われる者 3 人がみられる。これらの要員配分については、1603 年のポトシ全体の先住民配分の数値の中で、インヘニオス（ingenios）に配分された労働者（ミンガ；minga）は 4000 人とされている[45-46]ので、これをインヘニオスの数 132[29]で割ると、1 工場当たり約 30 人になる。この推算値は、Arzans の絵図[31]に描かれている 31 人とほぼ一致した。この推算や Acosta[27]、Capoche[29]らの記述との比較から、Arzans の絵図に示されている作業工程は、16 世紀末から 18 世紀初頭にかけての平均的なインヘニオのものであると考えられる。

他方で、1584 年頃のポトシの絵図（図 2-16）[46]の場合、Arzans の図（1736 年の作品）

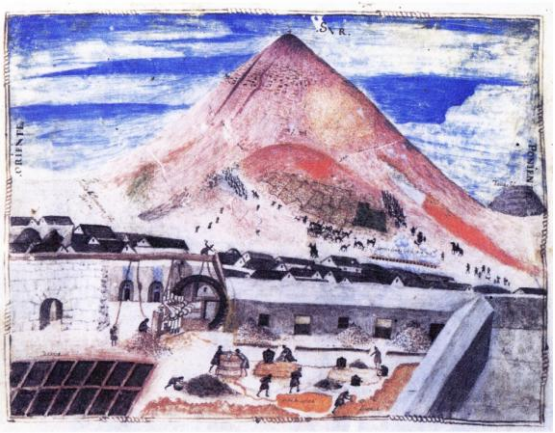


図 2-16　1584 年当時のポトシの製錬工場を含む光景（水彩画）[46]

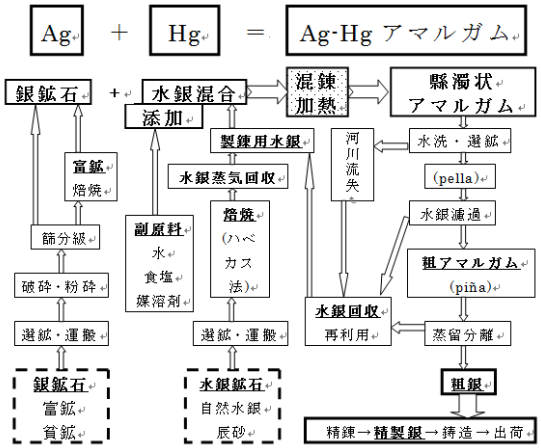


図 2-17　Arzans の Ingenio 図 2-15 および工程説明文の図式化（筆者作）

とは若干異なっている点もある。その一つは、反応槽として図 2-16 には 14 面のカホネスはあるが、混錬する要員が描かれていない。この違いは、混錬・加熱・熟成の一連の作業のタイミングにあるのではないかと想定している[29]。また、後者には水洗作業の後、樽から取り出された尾鉱（lamas）が敷地内に山積されおり、水銀回収の回収炉も図の中央左側（煙が出ている部分）に描かれていて、鉱泥からの水銀の回収は当初から実施されていたと考えられる。

さらに 1736 年時点と副王 Toledo の時代との違いと思われる理由として、次の点も挙げられる。1621 年に水力ネットワークが完成し、Arzans の時代には利用できる水量が多くなって、敷地内に水路を導入することが出来たと考えられる。また、その間にネグリージョを事前に焙焼する技術が導入されたことも考えられる[32]。さらに、Alvaro Alonso Barba（1569-1662）[47]によれば、目的や対象物によって各種の加熱炉があったことを示している。つまり、水銀鉱石や銀鉱石と、その形状が塊状かあるいは粉状か、またそれを焙焼（脱硫）するのか、仮焼（脱炭酸）するのか、さらには燃料や排気方法等が進歩し、一段と工夫が進んでいたことが記述から読み取れる。以上の一連の作業の流れを図 2 - 17 にフロー図として整理した。16 世紀末には、副王トレドの構想がほぼ完成し、図 2-12 のような工場が水路に沿って並んでいたことが想像される。

総じて、製錬業は製材，レンガ加工，坩堝製造，漆喰加工，石切りなど手工業の集合体でもあるので、それぞれに工夫が凝らされ、それを実現した技能と合わせて、資材の供給と流通基盤や商圏も発展し、地域社会も変容していったと考えられる[48-49]。

2－4　ポトシ鉱山の地質学的特徴と銀鉱石および採掘技術

2－4－1　ポトシ鉱山の銀鉱石品位に関する記述

銀鉱石の種類と品位に関して、16 世紀末の Acosta [27]および、Capoche [29]は次のように述べている。先住民がグァイラ法に供していた銀鉱石は、タカーナ（tacana）と言われ、銀収量は鉱石 1 キンタル当たり、30 から 50 ペソであった。しかし Acosta 自身は、200 から 250 ペソの収率を見聞し記録している。このような高品位の鉱石は、鉛（Pb）や硫黄（S）が高く、水銀による製錬（アマルガム法；amalgamation）には適さなかったと考えられる。一方、デスモンテ（desmonte；尾鉱、廃鉱石、貧鉱石等）は鉛や硫黄が低く、アマルガムによる銀の抽出が容易であったようである。

Arzans [31]は、多くの鉱石の種類を微細な色調等の差異から区別していたことを述べているが、結果的には品位の見定めは長年の経験を要することとしている。さらに Percy [46]は、Arzans の記述内容をさらに整理し、2 種類に区分している。第 1 種は、金属銀の他に、パコス（pacos）といわれるハロゲン化銀で、これは塩素（Cl）、硼素（B）、沃素（I）と結び付いたものであり、この内鉄（Fe）や銅（Cu）を含むパイライト（pyrite；硫化鉄 FeS_2）と結合するとムラトス（mulatos）と言われているものになる。パコスは、別名“metal calido”（熱い鉱石）と称され、アマルガム法が適用された。また、第 2 種はネグリージョス（negrillos）である。輝銀鉱石（Ag_2S）やこの硫化銀にアンチモン（Sb）や砒素（As）が入ったもの（前者は濃紅銀鉱石であり、後者は淡紅銀鉱石）がネグリージョスに入る。上述のパイライトが多くなると、アマルガム製錬の前に焙焼が必要である。第 2 種のものを“metal frío”（冷たい鉱石）と区別している。このネグリージョスが、Arzans の図 2-14

の左側のラインで処理されていたことに対応している。Percy によれば、鉱石品位は 1574 年には 4.5%、19 世紀初頭には 0.04%になっていた[50]。Capoche [29]によれば、製錬限界として 0.1～1.15%を目安としていた上で、銀の分析値に基づく水銀添加量の基準を設けていた。

近年 Bargalló [51]は、ポトシの鉱石品位について、1545 年は 40～45%、1574 年は 4～4.5%、1607 年は 0.75%、18 世紀末には 0.27%と報告している（%は筆者の換算値)。以上のことから、発見当初の鉱脈が露出していたころの鉱石品位は非常に高く、銀含有量は 40～50%であったと考えられる。しかし、Toledo の時代以降は、鉱石品位も低く、坑内掘りが主体となって、さらに 17 世紀以降には益々品位が低下し、上述のような状況になったと思われる。

現在では、鉱石品位 0.03%以上が銀専業鉱山のカット・オフに相当し、生産量の約 20%を占める。0.01%以下はベースメタルの随伴銀として約 40%が生産されている。中間の 0.01～0.03%の品位では、ベースメタルと銀の市場価格で採掘が決まっている。この生産量が約 40%に相当する[4]。

2－4－2　ポトシ鉱山の地質学的検討

Cieza de Leon（1518-1554）[52]は、1549 年にポトシ銀山の鉱脈について以下の 5 つの露頭を観ている。図 2-18 の絵図には、その当時の鉱脈(veta)が描かれている。ここで、以下の 5 点の補足を加えておく。

(1)veta Rica;ポルコ（Porco）の先住民 Gualpa が発見したもので通常 La Rica と言われている鉱脈である。

(2) veta de Centino;Gualpa の隣人 Ganca が発見したもので、主人 Villaroél と共に 1545 年 4 月 21 日登録し杭打ちした。

(3) veta del Estaño；Centino の後に発見したもので、錫(estaño)を含む鉱脈である。

(4)Veta de Mendieta；1545 年 8 月 31 日に登記した。

(5)veta de oñate；名前以外に何も記述が無い。

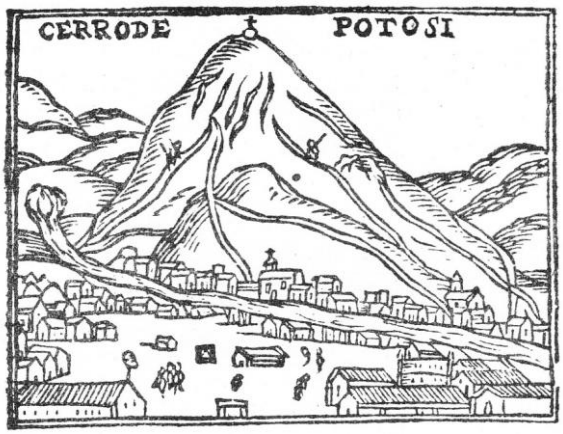


図 2-18　アマルガム法適用前のポトシの風景[52]

Acosta [27][53]は 1584 年の報告の中で、上記の鉱脈がポトシの山の東側の山肌に出ており、さらに①～③について次のように記述している。

①La Rica；風化によって岩のように突き出た大きな金属で、高さは槍の長さに相当する程あり、地表から鶏冠のように出ている。露頭の長さは 300pies(84m)、幅は 13pies（3.6m）あり、地下は 50～60estados(100m から 120m)の深さになる。銀の含有量は 50%ぐらいである。

②Centino；硬くて採掘するのが困難であるものの、銀の富鉱である。

③veta de Estaño；火打石のごとく硬く、採鉱は非常に難しい。しかし銀の富鉱である。

Acosta はこの他にも、ポトシの山の形状について、麓から頂上まで 1624varas (1.36km) あり、地上の周囲は円形に近く約 1 レグゥア (legua;5.6km) あると記している。この記述から傾斜角を計算すると、約 49 度となり、かなり急な勾配であったようであるが、馬で登れると記述している。

ポトシ銀山の北側（市街地側）にグァイナ・ポトシ（Guaina Potosí；若いポトシ)がある。Acosta は両鉱山の銀鉱石の特徴を、ポトシ銀山については veta fijas（固まった鉱脈)、そして Guaina Potosí については suerta（バラバラの鉱石、断片；銀は高いが量は少ない）と表現している。

次に、ポトシ鉱山に関する近年の地質学的研究から、上述のクロニスタ達の記述を検証してみる。

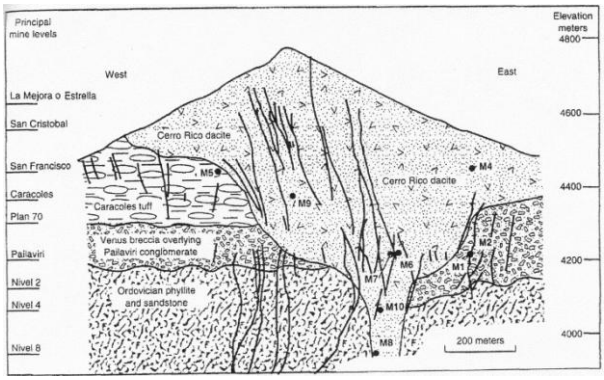


図 2-19　ポトシ鉱山の地質学的断面図[54)]

まず図 2-19 は、図 2-18 とは逆の面から見たポトシ鉱山の地質学的断面図である[54)]。鞠子によれば、鉱脈は主に南北方向に走っている状況が示されている[53)]。

図 2-19 から分かるポトシの地質学的外観は、オルドビス系粘板岩とパイラビリ層の石英安山岩質凝灰角礫岩の基盤に、下部はパイプ状で上部は漏斗状に貫入した石英安山岩からできており、強く熱水変質を受けている。その中を浅熱水マグマがほぼ南北方向に盤上に貫入して鉱脈を形成している[55)]。

鉱脈の金属成分の特徴は、造山作用に関係する。環太平洋鉱床生成環帯は巨大なアンデス底盤（長さ約 6000km）からなり、その貫入鉱床帯である。それは地質冶金学からは、外帯の鉱床生成域群（Sn,W,Sb,Bi）と太平洋側の内帯（Cu、Au,Ag,Pb,Zn）に区分される。ポトシ銀山は外帯の錫生成帯の中にあるものの、古第三期の若い世代の錫鉱床・錫-銀鉱床生成帯に属する浅成熱水錫鉱床であり、後述するような錫鉱山でもある[60)]。

Brading[36)]によれば、環太平洋鉱床帯の当初の熱水マグマは低品位硫化物であり、表層部では風化によって自然銀と酸化銀が分離され、これが赤みを帯びた柔らかい鉱物（colorados あるいは pacos）になった。その後の雨水による長期の浸出によって難透水

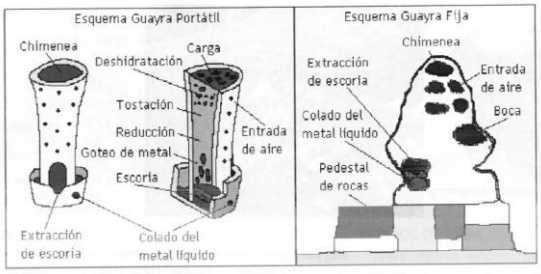


図 2-20　先住民の Guayra 法の種類
（左は持込型、右は定置型）[57)]

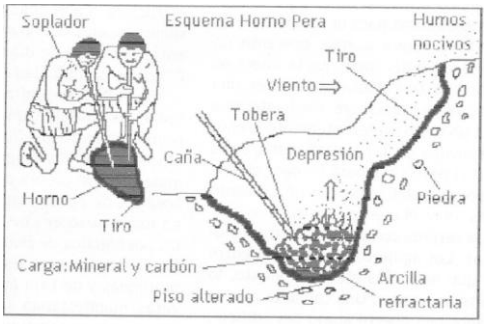


図 2 - 21　先住民の仕上げ吹錬法[57)]

層（water table）に析出して、初期の鉱石と反応して二次硫化物濃縮体を形成する。これは硬くて黒っぽい色をしておりネグリージョス（negrillos）と言われる。銀濃度は上述のパコス（pacos）に劣らず高い。この中間的な富鉱の下に低品位の大量の一次硫化物層がある。ポトシ鉱山では、コニカルな形状のため酸化が進行し易く、酸化物や塩化物を内包した層の形成が促進されて、鉱脈は深さ 250 ヤード（約 230m）まで達している。中間層には高品位の硫化物が層状にいりこんでいて、多様な成分の鉱脈を持つ鉱床を形成している[55]。

Acosta の記録[27][53]と照らし合わせてみると、先住民がグァイラ法（図 2-20 の Guayra）に適用していた銀鉱石は、富鉱（カシャリまたはタッカーナ tacana；Pb が多い鉱石）であり、さらに方鉛鉱（galena；現地語でソローチェ）を加えて製錬していた。この後、別の場所において、図 2-21 に例示するような小さい炉により、何度も Pb を用いて吹錬して純度を上げていた[57]。このようにすでにドイツのガイザー法に似た、独自の二段製錬法を持っていたようである。おそらく veta de Centino と veta de Estaño の鉱石が硬いのは、Pb が高かったためで、グァイラ法には適していたと思われる。

2－4－3　ポトシ鉱山における採掘技術

ポトシの採掘方法は、当初、図 2-18 に描かれている露頭を対象に、順次その周囲を地下に掘削し、1560 年代には深さ 200～250 ヤード（約 180～230m）に達していた。このころに最初の横抗（サカボン；sacavon）である Nicolas de Benino(頂上からの深さ 320 ヤード､横坑の長さ 250 ヤード)が建設された。当時この他にも 5 本の横抗が掘られていた[39]。これらの坑道の高さは 6 フィート×幅 5 フィートであって、二人が並行して通れる幅であった。その後も 1640 年には第 15 代副王指揮の下、400 ヤードの坑道が建設された。鉱山業の近代化には坑内掘りの技術、特に縦坑と横抗の整備が必須であった。そこで、17 世紀中葉の銀山の低迷期において、ブルボン朝の再興策の一つとして、18 世紀後半（1789-1810）に縦横 6 フィート、長さ 2200 フィートの坑道を完成させ、競争力を再興させた[50]。図 2-22[59]は、1779 年に描かれた縦坑と横抗の断面図である。ここには最後の事業の坑道は入っていないが、5 本（B,C,F,O,P）の所在が示されている。なお、図 2-19 と図 2-22 の整合性の検証は、今後の課題である。

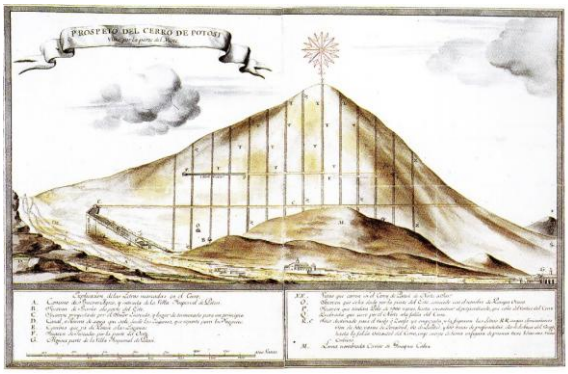


図 2-22　1779 年当時のポトシの坑道断面図（Sacavon 他）[58]

ポトシ鉱山は、地質的には砂岩や屑礫岩の層であり、コニカルな形状もあって排水の問題はなかったものの、落盤事故は多かった[31]

2－5　副王 Toledo 治世下で進められたサステイナビリティに係る諸施策[43-44]

2－5－1　赴任以前の廃鉱石（廃鉱・屑鉱・鉱滓等）を資源とした銀の回収

これまで述べてきたように、スペイン国王 FelipeⅡ世（1556-1598）が、副王 Toledo に

課した最重要の政策は、銀鉱山開発の促進による王室財政の再興にあった。その中で直接示唆されたと言われることが、水銀アマルガム法を適用して、ポトシ鉱山周辺に放棄されている desmontes（坑道内外の廃鉱石等）から銀を回収することであった[2)30)]。

ポトシ銀山は 1545 年に発見されて以来、銀の生産は先住民の抽出技術であるグァイラ法に依存していた。これは前述したように露頭の富鉱に適しており、1560 年代後半には品位が低下し、かつ坑内掘りが深化するに従い、生産量は落ち、1570 年初頭には低迷状態にあった。先住民は富鉱のみを選択使用していたので坑内や鉱口周辺に屑鉱石が山積していた[27)45)]。筆者等はこれにはグァイラ法の鉱滓も含まれると考えている[43-44)]

一方、水銀アマルガム法は、メキシコのパチューカに在住の鉱山主 Bartolomé de Medina(1504-1575) が銀の製錬法（パティオ法；Patio）として工業的にはじめて成功させた[27)]。これは従来先住民が対象にしていたものより低品位の鉱石にも適用でき、貧鉱処理法として期待されていた方法である。ペルーでも 1563 年ワンカベリカ（Huancavelica）で水銀鉱山が発見されたこともあり、水銀アマルガム法に期待が寄せられ何度か試みられていた[30)38)]。

パチューカ鉱山のあるメキシコ高原（約 2000m）とポトシ鉱山のあるアルトペルー（約 4000m）の地理的、気候的差異が大きく、気圧や酸素濃度、気温や降雨量なども大きく異なっている。また鉱脈や鉱石の種類にも違いがあって、これらは冶金学的にも鉱業の面からも影響することである。副王 Toledo はメキシコのパチューカ（Pachuca）出身の Velasco（Pedre Hernández de Velasco；出生等は不明）に秘密裏に実験させ、その成果をもとに、総巡視（visita general）の中、ポトシに長期間滞在（1572 年 12 月から翌年 5 月）し、鉱山政策を実施に移していった[31)]。中でも特に水銀による desmontes の製錬を推進し、併行して水力利用を中心とする鉱山都市計画を実行に移していった。前者に関しては、屑鉱石を王室管理下に置き、月 15 日間は優先的に製錬するように、日数を指定した命令書を出している[24)]。これによって坑内採掘の省略と破砕費も軽減できたので、ポトシ住民にインセンティブを与える効果があった。

一方、水力利用にはダム、水路、水車を使う破砕設備等の建設が進められ、在任中にほぼ構想が完成した。これらの一連の鉱業化政策を推進する中で、銀生産量は順調に増加し、1581 年には赴任当時の生産高の 6～7 倍に達し、副王としての使命を達成した。この副王 Toledo による増加効果（Toledo 効果）が図 1-13 に示されている。

副王 Toledo によるアマルガム法適用後、その 5 年間で、廃鉱石の製錬による銀回収量は約 200 万ペソと言われ、全生産高の約 30～40％に相当した[30)]。しかし対象とした廃鉱石の量の記述は無く、かつ未登録の銀が 1/3 から 1/2 はあった可能性もある[27)]ことから、筆者の計算では廃鉱石の量は約 1 万～数万トン程度と推定された[43)]。この廃鉱石の消化によって、坑内外が整理された効果も見逃せない。さらに、この廃鉱石の水銀アマルガム法製錬後の尾鉱の行方は、次の項の鉱泥処理に連動することになる。

2－5－2　鉱泥処理と水銀回収

副王 Toledo の鉱山都市計画の特徴の一つは、水源のダム群から都市を縦横に通る水路群および水車動力用水路（La Ribera）に沿って、図 2-12、図 2-15 で確認したように、カスケード式に工場群を配置したことである。

また図 2-15 で一工場内の物流を説明した中で、水銀アマルガム製錬後の水洗選鉱後、一段目の選鉱によって生じる鉱泥（ラマス lamas）と二段目の洗浄で発生する鉱泥（レラベ relaves）は同じ水路で流出して行くようになっていることを示した。ここではその下流のポッソ（pozo；窪みあるいは小池）にそれらの鉱泥が集められ、それを原料として水銀回収する工場が 50 程あり、年間 2000 キンタルの水銀を回収していた[27]こと、およびその鉱泥は成分分析を行いその値をもとに取引されていたことが記述されている[29]。

この 2000 キンタルの量(約 92 トン)は、当時ポトシ銀山で投入された年間の水銀量 7000 キンタル（約 322 トン）（図 2-9)[34]の約 30%に相当し、アマルガムの蒸留工程で回収される量と合わせてほぼ 50%が回収されていたことになる[21-22]。副王 Toledo が進めた水流のカスケード利用は、現代社会におけるエネルギーの効率的利用の面でも通用する高い技術であったと言える。

2－5－3　燃料用植物イチョの保護と熱効率改善

先住民のグァイラ法には高温を必要とし木炭が使用されていた。しかし、ワンカベルカの水銀鉱山における水銀抽出やポトシにおける鉱泥（lamas）製錬は比較的低温度でも可能である。そのためそれに適した燃料が探索されて、4000m の高原（乾燥プナ）に生息し、リャマの食料でもあるイチョが有効であることを見出した。これはイネ科の草木植物で、背丈が 60cm 位あり、2 年で成長することもあって、ワンカベルカでは熱効率の高い炉の開発と並行して、イチョの輪作も行われていた。副王 Toledo はイチュの保護命令も出している[24][38]。

ペルー副王領の銀鉱業と同時期に発展したメキシコ（2000m 級の高原）では、若干異なる事象が見られた。つまり深刻な森林破壊である。メキシコでは水銀アマルガム法と並行してヨーロッパから持ち込まれた鉛製錬法（ドイツのガイザー法）[2][35][57]が 40～60%適用されたため、燃料用木炭原料として鉱山周辺の森林が破壊され、自然の様相を一変させることになった[59]。

一方、ポトシ鉱山では、前述したように、水銀製錬や lamas 製錬用の燃料としてイチョが輪作栽培されていたとされるが、さらにカホネス法の弱火用の燃料としてもイチョが適用されていたようである[51]。

ペルーの鉱山業では 2－2－2 で述べたように、リャマ無くしてポトシ鉱山開発も困難であった上、イチョ無くして水銀も銀も製錬は難しかったと言える。つまりリャマとイチョの存在も副王 Toledo の鉱山政策推進上幸いしたと言える。

したがって、鉱山業のサステイナビリティを考える場合、このような地域的な特徴も考慮して比較検討しなければならない。

2－5－4　副王 Toledo の技術上の諸施策が今日に波及している影響（鉱山業の持続可能性の側面）

副王 Toledo の廃鉱石や鉱泥の再資源化促進は、その当時では功を奏していたといえる。しかしながら、技術的には完全なものではなかったが故に、植民地時代に端を発し、過去から今日までの射程の中で、現代的な鉱害と言われる環境被害が、ポトシ周辺を含めて大気，水圏，土壌に及ぼしている。それらの環境問題を概観すると、以下の 4 つの実態が浮

上してくる。

(1)ポトシ鉱山の鉱石は、当時から鉛、錫、亜鉛も多く含有していたが、それが注目されたのは19世紀後半に入ってからである。ポトシ鉱山は銀が枯渇した後も、それらの金属鉱山として採掘が行われている。植民地時代前から先住民はアドベで作った家屋に住んでおり，その素材として鉱泥が使われていたこともあり、錫の採掘時代には家屋も鉱石の対象になったと言われている。ちなみに、ポトシ鉱山の今日までの開発は、以下の三つの期間に大別される[60]。

①1544-1884年（340年間）；銀の時代（わずかに銅を含む）

②1885-1985年（約10年間）；錫全盛の時代（Sb,W,Pb,Bi,Cu,Ag,Auを含む）

③1986年－現在；銀－亜鉛－鉛の硫化物の時代

図2-19の鉱脈から分かるように、ポトシ鉱山の銀の埋蔵量は非常に大きく、鉱石量で7億7,800万トン（Ag150～250g/t）から9億8,500万トン（Ag116g/t）と推定されており、概算で銀約 100～200 トンに相当する[55]。現在では主要産出金属は銀と錫であるが、注目すべきは、その原料の中には植民地時代からの廃棄鉱石が含まれており、Mankiri 社が製錬を担っている[39-40]という事実である。

現在のポトシの人口は最盛期をしのぐ17万人(2013年)である。また1987年にはUNESCOの世界文化遺産に指定されて観光都市にもなっている[40]。

持続可能な鉱山開発という命題を論究するためには、このような事例に含まれる人間の営みを歴史的経緯の中から読み取る必要がある。

(2)ポトシ鉱山街を流れる水路網は、ポトシ市外にあるピルコマヨ川（Rio Pilcomayo）に集中する。その川はアルゼンチンを通り大西洋に出る。この間には支流を含めて，中世以降に開発された鉱山が点在し、河川の汚染源になっている。ポトシの鉱山開発からは約500年にわたる水銀や重金属類（Pb,Cd,Zn,Cu 等）が流出して、その主要原因物質と考えられており，2005年10月には環境調査プロジェクト（ Projecto Pilicomayo）を立ち上げて現在も調査を継続している[61]。モデル計算によっても、水銀蒸気の流れがPilcomayo川の方向に沈積したと考えられる[11]

(3)ポトシの水銀ロスの約50%分は、上記の河川の汚染に関連していると同時に、大気中に拡散して、上述の風下地域の土壌汚染[11]とグローバルな大気汚染につながっている[3][6]。第1節で述べたように、南極での観測[13]や近郊の湖沼の底泥分析[12]等の調査により、16世紀ごろから汚染が始まっている事実が明らかにされている。一方、ワンカベリカ水銀鉱山を起点とする水銀汚染についても研究[62]が進められており、現在の課題としては住民のアドベ式住居の素材(泥)中や地面そのものにも化学的に安定化した水銀が含まれており、身近な蓄積水銀が懸念されている[63]。

(4)メキシコのサカテカス銀鉱山は、中世植民地時代には、ポトシ銀山に匹敵する規模の鉱山であり大量の水銀を消費していた。ここでは水銀アマルガム製錬後の鉱泥が周辺一帯に蓄積されており、水銀の他に金，銀，鉛の存在が明らかになった[64]。近年その鉱泥や廃鉱から銀のアマルガムを回収する事業が始まり注目されている[65-66]。同様のことは、水銀製錬を利用した他の鉱山においても，金，銀の回収事業と水銀汚染土壌の修復とを複合させることで検討に値する対象になると考えられる。

2－6　植民地時代の水銀被害に関する認識と副王 Toledo の対応策

水銀の毒性に関しては、紀元前からすでに知られており、Plinius（23－79）はじめ、中世以前の錬金術の時代を通して周知の事実であった[67]。

15 世紀中葉、印刷技術が発明されて、それ以降出版物が急増し、知識の拡大の時代を迎えた。特に鉱山や金属、またそれに関わる職業病の研究で著しい進展があった。例えば、ウルリヒ・エレンボーグ（1440-1499；医師）の『毒性のある悪い蒸気と金属フューム』（1524）は銀、水銀、鉛のフュームの影響とその防ぎ方についての研究書である[68]。Agricola（1494-1555；医師、鉱山学者）の『デ・レ・メタリカ』（1556）では粉塵による肺疾患（アストス）や坑内での亜硫酸ガスによる黒煙症、火掘り法による一酸化炭素中毒についても述べている[69]。Paracelsus（1493-1541；医学、化学、錬金術）の『鉱夫肺労とその他の鉱山病』（1567）では鉱山病の本質と治療方法、肺労を起こす物質として硫黄、水銀、塩類があり、それらが粘液を生じ、肺の中に粘着物として沈着すると述べている。また、水銀による鉱山病についても言及している[15]。Ramazzini（1633-1714；医学、法律）は『工人の病気』（1700、改定版 1713）で鉱山病を含む 54 種類の職業病について述べている[15]。

一方、植民地アメリカにおける記録としては、Acosta が“水銀の驚くべき性質”という記述の中で述べている[52]。Guaman Poma（1550？－1616？）は、ワンカベリカ水銀鉱山での鉱山病が水銀中毒であり、医療体制の確立が必要であると訴えている[70]。

スペインの有名な水銀鉱山アルマデン（Almadén）は、1524 年からフッガー家によるマエストラスゴ（地代請負）下にあったが、何度かの再契約の後 1563 年以降の請負では、植民地アメリカでの水銀需要の増大によって莫大な利益を得ている。水銀鉱山における労働力不足を補うため、1566 年には王室とガレオン船送りの囚人使用の契約を結び、最も過酷な揚水作業に配属させていた。Mateo Alemán（1547-1615；王室異端審問所勤務）はカラトラバ騎士修道会の依頼に基づき、1593 年アルマデン水銀鉱山で強制労働の実態調査を行った。この中で、水銀中毒の実態も記録されている[71]。

そのような時代背景の中で、副王 Toledo とその側近は水銀中毒や鉱山病に関する知識は十分把握していたものと考えられる。そのことは 1572 年のワンカベリカ鉱山法、1574 年のポトシ鉱山法及び 1575 年の病院に関する法令の中に、製錬を含む鉱山労働における安全や健康にかかわる条項が含まれていることからも窺える[24-25]。

以下、副王 Toledo が発令した各鉱山関連の法令から要点を抜粋して、表 2-2、表 2-3 に示した。特に水銀中毒に対する注意条項は Acosta の記述[53]と酷似しており、Acosta が重要な役割を果たしていたことが窺われる。技術的に重要なことは、高温の水銀蒸気が非常に危険であることが認識されていたことである。そのことが焙焼後の蓋の開放に対する注意条項に反映されている。辰砂はおよそ 250～350°C で分解が起こる。操業温度は、アルマデンでは 500～700°C であった[72]ので分解反応は十分進んだであろうが、イドリアの場合のように 500℃でも分解しにくい組成もあって、長時間を要していた[73]。一方、アマルガムは平衡状態図[74]の上では分解温度は 127℃であることから、若干低温で分解が始まるが、当時の操業温度は不明である。イネ科のイチョや藁、薪を燃やしていたことから、150～350℃はあったと思われる。いずれの場合も、製錬直後に蓋を開放することは非常に危険であったのはいうまでもない。

一方、ポトシ鉱山の法令では、水銀中毒患者に対する鉱山主の責任が決められている。水銀中毒に罹患した場合 3 ヶ月間（90 日）休養を与えるという条項は、体内水銀の排泄に関係し、現代では水銀の生物学的半減期で表現される。人体での半減期は金属水銀や無機水銀では約 42 日、メチル水銀では約 70 日とされている[75]。トレドの条例にある 90 日という日数値は当時の経験値と考えられるが、現代科学からみても注目に値する。しかし同時に現代では、微量濃度でも長期間暴露すれば、生体内の平衡関係から体内蓄積は増加していくとされており、９０日の休養が守られたとしても、第 1 節で述べて用に高濃度で繰り返し暴露すれば、排泄よりも蓄積が大きくなって、体内の濃度が高くなっていくこともあり得る。

しかし、病院建設や聖職者の役割が法令の条項に入っている一方で、水銀中毒の治療法として有効な処方はなかったと思われ、Guaman Poma は決められたミタの規則を順守することや、治療医の配置を訴えている[70]。

水銀という異物の侵入による健康被害に関しては、体内に取り込む水銀の形態が議論されているが、それを取り込む経路（肺、消化器系及び皮膚の 3 つの経路）や、壁膜を通過する割合及び血液中での反応、さらに堆積臓器での滞留期間と糞尿への排出性等の体内の動態も重要である。

両鉱山での人間の被曝期間は異なり、鉱山法の規則に基づく計算上では、ワンカベリカの水銀鉱山では、ミターヨは 2 カ月交替で、日中の作業と規定されてはいたが、高濃度で他の重金属を含む蒸気を 2 ヶ月間吸引していたことになり、その後 2 ヶ月間職場を離れたとしても、高濃度被曝のために累積していったと考えられる。ポトシの場合は、製錬所の労働者は契約労働者（ミンガ；minga）であるので、曝露期間は評価できない。しかし、長期間の混錬作業やアマルガム蒸留に従事することで、呼吸器系を通して蓄積していく危険性は高い。それと共に、ワンカベリカ水銀鉱山でもポトシ銀山でも街中の大気中水銀濃度は常時高かったと推定され、鉱山都市全域で高濃度の被曝が日常化していたと考えられる[63]。この状況は、現在の小規模金採掘の現場とも共通の環境であると考えている。

日本の化学物質管理促進法（化学物質安全性評価シート 2001）によれば、経口曝露の場合の消化管粘膜からの吸収は微量である。しかし胃酸や腸内細菌による化学反応で化学種を変えることで吸収が促進される。また無機水銀（辰砂等）は 5%以下ではあるが吸収される。呼吸器系からは肺胞から約 80%が吸収される。しかし、皮膚からは被爆濃度の約 1%程度の吸収である。一方、目の角膜や結膜からも吸収される。このように見ると、両鉱山とも肺呼吸器系からの吸引が最も危険である。

次に有機水銀中毒に関して考察する。図 1-16 からも、自然界におけるメチル水銀の生成の可能性が示されている。しかしその病像は植民地時代には未知のもので、クロニカ等でそれを識別できる情報はない。今後その事実を捜索するに際して、考慮しておかなければならない事は、両鉱山とも金属水銀中毒が重症でありかつ、ワンカベリカの場合は重金属が複合していたことも考えられるので、それらの病像の中に埋もれてしまった可能性も否定できない。また、寿命が短く、有機水銀中毒の重症化まで至らなかったのか、銀鉱石に付随して微量のセレン（Se）を取り入れることで、緩和作用があったのか[76]等など他の要因に対する検討が必要である。特に、母親が有機水銀中毒にかかった場合は、母子間移動があり、先天的な脳性麻痺や中枢、末梢神経症の発生が一つの証拠になると考えられる。

また、日本の水俣病発見の経緯と同様、奇病や風土病扱いされて曖昧になってしまった可能性も考えられる。

表 2-2　ワンカベリカとポトシに関する鉱山関連の労働法令の抜粋（筆者作）

鉱山区分	ワンカベリカ水銀鉱山	ポトシ銀鉱山
法令発行年（場所）	1570 年 12 月（ワマンガ）	1574 年 7 月（ラ・プラタ） 1573 年 4 月、1575 年 10 月、1578 年(ポトシ)
ミタ制度関連	3000 人、2 カ月交替制 対象；15 地区	1573 年 3738 人/週 1575 年 3615 人/週 1578 年 4426 人/週 勤務；1 年/7 年交代 対象；16 地区
勤務時間等	労働時間；日の出から日没まで(昼食後休憩 30 分)	労働時間；日の出 1 時間後から日没まで(昼食含め 1 時間休憩)
水銀中毒防止関係	１）鞴作業は時間毎の交替 ２）焙焼後の蓋の開放は火止めから 24 時間後。イチョの場合は 8 時間後 ３）分解炉の煙突高さ；約 6m(鉛の場合 8m)	１）鉱石洗浄作業；5 月から 8 月の間、10 時～16 時 ２）煙突高さ；約 6m ３）アマルガム蒸留後の蓋の開放作業は先住民は中止。藁の場合火止めから 14 時間後。まきの場合 24 時間後
医療関係	聖職者は医療器具を持参義務	水銀中毒患者は 3 ヶ月間休養。鉱山主は 50 ペソ支給
運搬制限	法令は無いが、3～4 アローバ(75～100kg/日)	重量；2 アローバ(約 50kg/回)　回数；2 回/日以下

表 2-3　病院建設に関する副王トレドの命令・指示書の抜粋（筆者作）

発行年(場所)	1574 年 12 月(ラ・プラタ)、1575 年(ポトシ)
病院の所有、管理	１）所有者；大聖堂主任司祭と聖堂参事会員 ２）運営母体；信徒団体(エルマンデス) ３）勤務；会員 86 人で、2 人/週×2 回/年・人 ４）病人用贈り物準備；養鶏、薬草・野菜の栽培
財政条項	１）国庫支給；病院維持費 500 ペソ/年 ２）常勤者；財務管理者(助手；黒人 2 人は採用可) ３）給与；医師と外科医は 200 ペソ/年
建設支援	作業者割当；1000 人/住民 14000 人

現在の小規模金採掘現場においても、金属水銀による慢性中毒章の事例は多いが、メチル水銀による被害については必ずしも一定の評価には達していない[77]。植民地時代の銀鉱

山の状態を推察する上でも、地理的、気候的条件の多様な現在の小規模金採掘における低濃度長期曝露の閾値が重要である。しかし現在でも、魚類多食地域以外の閾値が議論されており、小規模金採掘現場の調査に当たっては、詳細な病像調査が必要である。

Kendall[78]はワンカベリカの鉱山病について、歴史的背景、クロニカにおける健康被害の記述を詳細に分析し、スペインのアルマデン水銀鉱山での記録と対比しながら、システマティックに論述しており、眞鍋[62]も同様の試みをしている。本研究では、特に Kendall の研究成果はワンカベリカの水銀問題を研究する上で現在欠かせない論考である。

以上のように、歴史資料から読み取れるこれらの事象はわずかであるが、鉱害に係る課題はスペインの植民地時代に端を発して現在に尾を引いていることが認識できる。他方で、ポトシ銀山に見られるように、鉱害や環境汚染といった概念すらなかった時代に、第五代副王 Toledo が実行した諸施策の中には、現代の循環型社会形成に必須の資源回収や種々のテクノロジーおよび持続可能性に配慮した施策が講じられていたことは驚くべき事実である。それらの技術は必ずしも完全ではなかったものの、その時代の先人達の知恵と工夫が抽出されてくる。ともすれば、先端技術に目を向けがちな昨今であるが、考古学的調査の結果はもとより文化革命[79]と言われた中世に、しかも化学方程式の誕生する以前における工夫や新技術の開発の中には、今なお改めて学ぶべき事柄がある。

16 世紀後半に、副王 Toledo はポトシ銀山を世界に冠たる鉱山業に仕上げた。本論文は、その諸施策について、主に技術論から見たサステイナビリティを基本に置いて考察を行った。しかし、水銀中毒の抑制と治療について、今日の科学知識と同程度の知識を持っていたことは、一定の評価は可能であろう。つまり、このような施策は今日の小規模金採掘現場で、同程度の知識さえ普及していない現実が対比されるからである。

Kendall[78]は、「このような事態に至った原因を、現代の科学者は暴きださなければならない。中でも、開発当初の鉱山主の無教養と技術レベルの低さ、副王 Toledo の強奪的なミタ制度および、インディオを人間と見なかった偏見を強く指摘することや、当時の政府官僚当局は水銀の毒作用は重々承知していたにも拘らず抜本的な手を打たなかったこと、更には国も鉱山主も病院の建設はしたが、副王付きの医師でさえ、処方箋は持っていなかった」と告発している。この指摘は、副王トレドの命令、指示とは裏腹に、現実の姿を如実に物語っていると推察される。同様のことが現代の小規模金採掘現場の実態にも当てはまる。またアフリカのサブサハラ地域では、貧困という圧力によって追い込まれている結果とは言え、深刻な水銀汚染の真っただ中で作業が行われている。このことは過去、現在を通して共通の事態が起こっていると言える。Kendall のこの言葉は、この実態に対する厳しい警鐘と受け止めることが出来る。

第 3 節　スペイン植民地におけるストック水銀量の推定と今日に及ぶ水銀鉱害の諸相

本節では、第 2 節で描き出した水銀を使用するプロセスから、環境へ排出される水銀の量的、質的分析を行った。第 3 節では、その量的問題として、銀の製錬に消費され排出された大量の水銀が、鉱害源になると考え、これを水銀によるストック鉱害と位置付けて、そのストック水銀量を推算した。次いで、水銀の化学的活性と循環性について考察し、過去のストック水銀が動態変化を経て現在のストック水銀となり、現在も影響を及ぼしていることを想定した。つまり第 1 節で述べた過去・現在・未来にまたがる水銀鉱害の現実、

およびストック水銀が図 2-3（上）（下）に見られる地球の水銀循環系の動態に関与しているとして、現在の水銀の存在形態を論じ、その中からアンデス高地においても有機水銀が発生していた可能性についても論究する。この趣旨に沿って本節では以下の 4 項目を検討する。

（1）スペイン植民地における銀鉱山業におけるストック水銀量の推算
（2）ストック水銀の形態変化と水銀鉱害の現在への波及
（3）廃鉱、尾鉱中の水銀による鉱害
（4）ストック水銀の土壌中の存在形態

3−1　スペイン植民地における銀鉱山業におけるストック水銀量の推算

鉱山開発に伴う鉱害源は、目的とする製錬から発生するもの以外に、採鉱・選別で除かれた廃鉱（ボタ、ズリ）と製錬の後に除去される尾鉱及び廃水、排ガス等がある。いわゆる第 1 章で述べた隠れたフローに相当する関与物質総量である。

本節では、水銀アマルガム法による鉱石製錬と、その後の銀と水銀の分離工程において回収されずに廃棄された水銀を鉱害源として扱い、それを“ストック水銀”と定義した。ここでは大気中、河川、土壌中に逸散した水銀を想定している。全体としては循環型の鉱害に括られる。本章では鉱害源としての水銀のストックに 2 種類を想定した。一つは水銀製錬やアマルガム製錬過程で大気中に放散される水銀蒸気によるもので、これを“広域型ストック”と定義する。もう一つは、銀製錬後の水洗作業中に河川に流出する水銀と尾鉱中の水銀で、これを“底泥型ストック”とした[3)9)]。それぞれの拡散形態は異なり、前者は大気拡散が主体で、図 2-8 で示したように拡散領域が広い。後者は河川による移動が主体で、地勢的、気候的に底泥化ないしは堆積する地域は限定される。

以上の検討に従い、まず、水銀鉱山における水銀製錬工程で発生する広域型ストック水銀の量を推定する。これは単純に辰砂からの水銀回収率で決まる。つまり未回収の水銀、いわゆるロスした量がそれに相当する。このロス量は、ワンカベリカについては、Bargalló[80)]の推定では約 40～60%である。イドリア（Idria）鉱山でも 50%であった[73)]。一方、アルマデン（Almadén）では改良が加えられたことで 25%と言われていた[72)]。これらの数値から本稿では簡単のため 50%と仮定した。つまり、少なくとも登録生産量とほぼ同量の水銀がロスし、周辺にストックされたと仮定した。

一方、銀製錬の場合にはそのロスは 2 種類になる。そのストック状態の 1 つが、銀アマルガム製錬後の水洗分離作業中に、河川へ流出して底泥化する底泥型ストック水銀である。もうひとつは、カホネスでの加熱混錬中、またアマルガムの蒸留作業中に大気中へ逸散する水銀蒸気である。これは水銀製錬の場合と同様広域型ストックである。現在両者を区分して量的比較をすることは出来ないので、本章では両者を合わせて投入水銀量の半量がロスしたと仮定することとした。その論拠は以下の当時の製錬技術を精査した結果に因っている。すなわち、混錬現場での水銀添加量は銀の分析値の約 4 倍であった[29)]こと、登録された銀生産高と水銀供給量との長期間の統計的な量の比（コレスポンデンシア；correspondencia）が約 1 ： 2 であった[81)]ことによる。このことは投入量の半量が回収され、それと同量がロスしたことになり、その分だけ新たに供給されていたことを物語っている。つまり、投入水銀量の 50%がロスしたと考えることができる。このコレスポンデン

シアに関して、Nriagu [1]は 18 世紀中頃の数値として、富鉱の場合は１：4.5、貧鉱の場合は１：0.85。更に、製錬のバラツキによっては１：0.3～3.0 であったとしている。ポトシの場合、閉山までの銀生産高と水銀供給量の合計数値は、ほぼ 1：2 であった[1]。

以上の検討から、銀鉱山では、蒸発と鉱泥ロス合わせて銀生産高の 2 倍量、つまり、新規に供給される水銀量に相当する量が、製錬ごとに鉱山周辺にストックされたことになると推算した。しかしこの統計的コレスポンデンシアは変動の幅が大きく、その時代の製錬技術、回収技術のレベルを示しているともいえる。

以上の仮定のもとで鉱害源としてのストック水銀量をワンカベリカについて求めた結果、“広域型ストック”としての水銀量は、Bargalló [80]の登録水銀生産量（約 110 万キンタル）に相当する約 5.2 万トンとなり、ポトシでは、広域型ストックと底泥型ストックの両方を合わせて、水銀ストック量は銀の総生産量 2.8 万トン[80]の 2 倍量、約 5.6 万トンと推算された[2]。

同様の考えで、スペイン植民地の全銀鉱山についてもストック水銀量を推定した。ただし、メキシコでは、アマルガム法の開発以前にはヨーロッパで採用されていた鉛による鎔錬法(ガイザー法)が先行していたので、鉱山によっては二者の併用もあった[2][35]。メキシコは水銀鉱山を持たず、本国のアルマデン水銀鉱山やイドリア鉱山からの供給に頼っていたこともあり、概していずれにも対応していたようである。しかし、各鉱山でのアマルガム法と溶錬法との製錬法の適用比率に関しては､植民地時代全期間に対応する記録は無い。そこで短期間の特定鉱山の情報から仮定することとした。たとえば、Bakewell[2][81]によればサカテカスに関する 1670 年から 1719 年までの比率は､アマルガム法が大体 40～60%であった。またグアナファトの 1798 年から 1802 年まで[80]の比較では、65%～83%がそれであった。一方近藤[35]によれば、18 世紀のメキシコでは溶錬法とアマルガム法との比はほぼ１：３．５（アマルガム法が 78%)、また Richard[82]によっても、 18 世紀後半のアマルガム法比率は 80～90%であったといわれている。しかし本論文では、メキシコの主要鉱山はサカテカスであるので、その事例から約 50%をアマルガム法と仮定した。一方、ペルーでは、1574 年のトレドの鉱山業が始まって以降は、アマルガム法がほぼ 100%であった。

以上の検討から、ストック水銀量を推算する方法として、次の手順をとった。結果は誤差を含む水銀消費量であるが、この結果を水銀のストック量とした。

（１） 各鉱山の水銀消費量を特定することは困難であるので、まず、当該鉱山の銀生産高の概数を公刊資料にある数値や図から図式積分によって求める。

（２） アマルガム法の比率を、メキシコでは全体の 50%、ペルーでは 100%とした。

（３） 統計指標の標準的な銀と水銀の重量比（correspondencia）１：２を使って、(1)で求めた銀の生産高から水銀消費量に換算する。

これを水銀ストック量とした。この方法で得られる水銀量はあくまでも概数であり、今後精査すべきであると考えている。計算対象の鉱山は、表 2-1 で取り上げたメキシコ、ペルーの比較的大規模の４鉱山である。用いた図と数値は、Bakewell の図[2]を用い、その他は Bargalló[85]の数値を引用した。なお表 2-1 の銀の生産量がこの計算と連動している。

計算結果を表 2-4 にまとめた[2]。各鉱山の水銀ストック量の合計は 18.47 万トンになった。この量は Hylander[7]の 1500 年から 1900 年までの水銀生産量の推定値 20 万トン、一

方 Nriagu[1]は、1556 年から 1900 年までの推定水銀消費量を約 19.6 万トンとした。また Julio[3 4]もほぼ 20 万トンと推定しており、筆者の推定値はこれらの値とほぼ一致した。つまり、図式積分と correspondencia を用いる本推算方法の有効性が証明された。以上のことから、副王領内の主要銀鉱山周辺には稼働中に、一鉱山当たり、0.5 万トンから 5～6 万トンの水銀が周辺にストックされた。特にポトシ鉱山には 5.6 万トン、ワンカベリカ水銀鉱山でも 5.2 万トン前後がストックされたものと推定された。また、この方法の有効性が得られたことから、表 2-1 の銀の生産量も概数とはいえ意味を持っていることを確認できた。

表 2-4　主要銀鉱山、水銀鉱山における水銀のストック量（×10^4トン）の推定値(筆者作)

鉱種	ヌエバ・エスパーニア副王領（メキシコ）		ペルー副王領		両副王領のストック量合計
	主要鉱山	ストック量	主要鉱山	ストック量	
銀	サカテカス グアナファト デュランゴ サン・ルイス・ポトシ	1.22 0.97 0.67 0.42	ポトシ セロ・デ・パスコ ワルガジョグ ワンタハヤ	5.6 1.64 0.98 1.8	
	メキシコ合計	3.25	ペルー合計	10.02	13.27
水銀	無		ワンカベリカ	5.2	5.2
イスパノアメリカのストック水銀量の合計					18.47

ワンカベリカについては、図 2-6 から平均沈降速度を求めて、各湖沼までの距離を半径とする円内の沈積水銀量を計算した結果が表 2-5 である。これによると半径 12km 以内の総沈積量は 5～6 万トンになり、上述の推算値とほぼ一致した。ただしここでは風向による影響[9]は加味していない。

表 2-5　3 つの湖沼底泥の水銀濃度、蓄積速度、総蓄積量(筆者作)

湖沼までの距離(km)	湖沼面積(km^2)	蓄積速度範囲(μg/m^2年)	平均蓄積速度(同左)	240 年間の蓄積量(kg)	半径円内蓄積量(万トン)	土壌中水銀濃度(ppm)
6km 地点	0.05	1～3×10^3	2×10^3	24	5.4	20～30
12km 地点	0.03	0.2～1×10^3	6×10^2	7.2	6.45	1～1.5
225km 地点	0.06	15～60	30	0.36	114.4	0.3～0.6

3－2　ストック水銀の形態変化と水銀鉱害の現在への波及

植民地時代に使用されたストック水銀が、その当時すでに有機化してメチル水銀中毒が発生していた可能性はNriagu[1]、Kendall[78]、真鍋[62]によって指摘されてはいるが、それを実証する手立ては今のところ無い。しかも、現在もその反応過程が継続していると考えられるが、調査はされていない。これは今後の研究を待たなければならないが、その場合の手掛かりとして、

（1）　ストック水銀を発生源とする300～500年間の汚染地域を推察する。

（2）　大気中、水圏（河川、湖沼、海洋）、土壌中での水銀の循環に基づく滞留時間、形態変換、生態濃縮などを地域動態的に調査する。

（3）　人間の健康被害の時系列な変化と、複層化した要因分析に基づき、ストック水銀との因果関係を究明する。

等があるが、非常に広範囲で、かつ、多方面の学際的協力が必要である。

(1) に関しては、小川他[10]、山浦他[83]が画期的な手法で水銀汚染源からの拡散地域を推定した。つまり、ポトシ銀山を中心とする地形図を、リモートセンシングを利用して、人工衛星のデータから割り出す。一方水銀の行方を、大気中拡散方程式に気象条件を入れて解く方法である。この結果、ポトシ銀山では、南方のリオ・プルコマヨ川流域に、蒸発水銀の90%が、北方のアマゾン川流域に10%が拡散する結果となった。そしてその影響範囲は200ｋｍに及んでいる。この手法で得られた結果は、フィールドワークする上で、効果的にポイント選択できる点非常に有益である。今後期待の持てる研究分野である。

(2) の滞留時間に関して、6～18ヶ月[1]とする場合や、大気中の水銀は90～95%が金属状態で、滞留時間は約1年と非常に長く、沈着するまでに数千ｋｍ輸送される[84]とする研究もある。近年は越境汚染やグローバルな汚染の懸念からこの部分の研究が盛んである。その一つの例が図2-7[8]である。このように計算と実測との間にはまだかなりの開きがあり、今後の研究に期待したい。

図1-16で示したように、自然界に放散された水銀は形態変換し、循環現象を起こしている。その反応は金属水銀の酸化反応と還元反応とが、その時の環境条件によって、順逆いづれの方向にも進み、無機水銀、有機水銀との間でサイクル現象を呈する[84]。この時有機化条件として、微生物や腐食物質の存在、生態濃縮あるいは光化学反応や環境の酸性度、有機物の存在などが関与してくる。概して、高温多湿地帯ではこの循環が活発で、低温乾燥地帯では遅い[85]。また微生物がある種の触媒を持つことで、水銀のメチル化と脱メチル化の両作用を持つ[86]こと等が明らかになっている。これらの微生物反応を積極的に利用しようとする技術がバイオレメディエーシオンである。水銀の除去技術としても研究が行われている。この点は第3章で具体的に検討する。

ここでの問題は、植民地時代にストックされた大量の水銀が、これらの諸反応を通じて、当時を問わず現在もなお、生態系ひいては人間に被害を与えている可能性がある。その一つがワンカベリカ水銀鉱山とポトシ銀山の土壌中に土質成分と結合した水銀である[63]。また蒸発性金属水銀が、ローカルな汚染からグローバルな汚染へ拡大し、現在へも波及していると想定されることである。

このことを再認識させた現実的課題が、世界各地の低開発国で現在なお行われている水銀を使った小規模金採掘である。佐藤[87]は河川や大気中へ放散された水銀のメチル化現象が常態化していることを示している。また、吉田[77]は小規模の金採取鉱山における水銀汚染による健康被害の状況を取りまとめている。最大の問題は、健康被害の実態調査がほとんど進んでいないこと、水銀の回収対策が実施されていないこと、更には、鉱夫が環境汚染や健康被害について十分な認識を持っていないことにあると指摘している。このような事態に鑑み UNEP 水銀条約では様々な角度から実施項目を分析し、段階的な取り組みバージョンを提示している[88]。本論文でも第 3 章に小規模金採掘に関して、具体的実施対象を掲げて実践研究する構想を纏めることにしている。

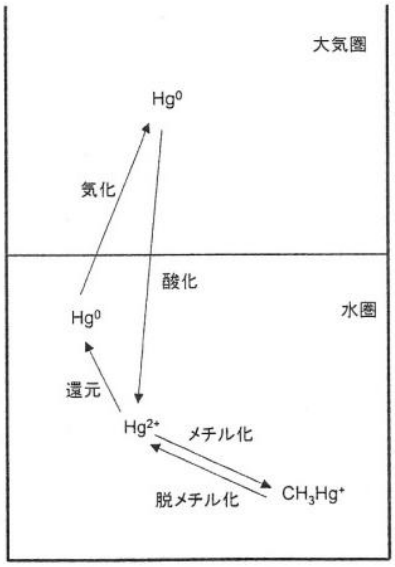


図 2-23　地球環境における水銀の科学形態の変化[89]

本論文では、アンデス高地という特殊な地理的環境の中でもメチル水銀が生成しうるかどうかに関心を持っている。図 1-16 は化学反応を含めた水銀の三相間循環図である。この図の中で有機水銀化反応は、大気中にあっては紫外線による光化学反応であり、土壌中や水圏にあっては反応系の条件（pH、温度、成分等）による自発的反応と微生物が関与する反応になっている。

自然界における水銀の基本となる反応は次の 3 種類である[89]。

①酸化還元反応　　$Hg^0 \rightleftarrows Hg^{+2}$　　(2-1)

②イオン化反応　　$Hg^{+2} \rightleftarrows$ 無機/有機化合物　　(2-2)

③無機/有機反応　　無機化合物 $\rightleftarrows$ 有機化合物　　(2-3)

式（2-1）～式（2-3）において、Hg^0は金属水銀（液体、蒸気）であり、無機水銀には辰砂（HgS）、甘汞（HgCl）等を含む多くのものがある。また、有機水銀にもメチル水銀（CH_3HgCl 等）やジメチル水銀　（$(CH_3)_2Hg$）など多数がある。Hg^{+2}はイオン化状態（化学反応の待機状態）にあり、周辺の環境条件によっていずれの方向へも反応が進行する。更に、複雑な錯イオンを形成していることも考えられている。図 2-23 にこれらの関係の要点を示した[89]。

1956 年に水俣病が公式に認定されて以降、有機水銀の発生メカニズムの研究が飛躍的に進んだ。アセトアルデヒド製造工程の触媒反応でメチル水銀が生成していたことが、水俣病の原因であると突き止められた[90]が、水俣病の原因究明の研究の過程で自然界においても有機水銀が生成することにも目が向けられた。現在では、食物連鎖していく中で水銀が濃縮し、生体内で有機化する可能性も明らかにされてきた。しかし関与する条件が重要であることも明らかである[91]。

20 世紀末から、グローバルな循環系における科学形態変化、特にメチル水銀の生物活動や環境条件によって自然界で生成するメカニズムが明らかにされ、そのことによって水俣病の脅威が増幅された。さらに現実に小規模金採掘が増加し、その被害の拡大防止が世界的に喫緊の課題となった。2013 年締結された水銀条約の重要な政策目標の一つとなってい

る。

以上の検討から、本論文の対象地域ポトシ銀山やワンカベリカ水銀鉱山のような寒冷な高地においても、メチル水銀が発生し、人体に蓄積されていた可能性は十分考えられる。

問題の有機水銀による健康被害は水俣病として総称化され、その病像や動態も明らかになっている[92)]。しかし現在のアンデス高地において、過去にさかのぼって水俣病の存在を実証することは不可能である。そこで、上述の（1）から（3）の基本的な調査方法の中で特に（3）に関して、アンデス特有の条件下での過去の有機水銀の存在や水俣病の症例を抽出するために以下の工夫を提起したい。一つは、現地調査の対象として教会や診療所、病院を選び、病例・症例調査を通じて母子間移行による先天的な異常児、奇形児等の発生状況を調べることである。次に伝説、風評あるいは健康上の異常現象等の情報も重要なソースになると考えられる。更には、16 世紀以降のミイラの毛髪や骨中の水銀分析を実施することで、地域的かつ動態的な証拠を把握することも可能であろう。例えばメキシコのグアナファトにあるミイラ館には鉱山開発以降のミイラも陳列されている。毛髪中の水銀濃度は人体の水銀汚染の実態を知る有力なものであることは、現在では周知のことである[87)]。このような調査を通じて、現在の小規模金採掘現場との整合性が得られれば、歴史学においても有益である。

3－3　廃鉱、尾鉱中の水銀による汚染

3－3－1　ストック水銀による鉱害

ストック水銀として算定対象に入ってはいないが、鉱害という面から大きい対象が ore-TMR に相当する廃鉱石や尾鉱である。ワンカベリカ水銀鉱山周辺には、選別過程で投棄された廃鉱石があり、その中の辰砂や自然水銀が雨水等で浸出し、鉱害源になる可能性は十分ある。また、水銀を抽出した後の尾鉱中にも未分解の辰砂や回収できなかった水銀が含まれており、これらは同様に鉱害源となる。

ポトシ銀山においても、アマルガム製錬後の水洗過程で鉱泥として堆積した中に、また水銀回収製錬をした後の尾鉱中にも水銀が残留して汚染源となったことも考えられる。これらの総量を定量化するのは不可能であるが、それぞれの地域での土壌や河川の底泥の水銀濃度やその形態を知ることは可能である。ワンカベリカとポトシに関して、近年これらの調査が行われ、実態が明らかにされつつある。両地域とも古来アドベ煉瓦で家屋を作っており、その原料が河川の底泥や粘土であるため、吸着固定化した水銀の粉塵による被曝が懸念されている[63)]。

スロベニアのイドリア（Idria）水銀鉱山（1490 年代から生産、1995 年閉山、過去 500 年以上の生産量は約 5 万トン）の河川周辺に堆積した鉱泥の調査では、全水銀分析と熱分析による形態判別が行われている。鉱山出口近傍では総水銀が 1000ppm 以上のケースもあり、70%以上が金属水銀、20%近い辰砂と約 5%がその他の化合物水銀として検出されている。30～40km 下流でも 200～500ppm の総水銀が検出されている[73)]。

また、アメリカ、カリフォルニア州のニュー・イドリア（New Idria）水銀鉱山（操業 1854 年から 1972 年まで操業）の坑口、廃鉱（ズリ、ボタ）、焙焼後の尾鉱、廃水が流れ込む河川で調査している。ただしこの調査では流出してくる排水中の水銀分析である。坑口と尾鉱からの排水中にはそれぞれ 40μg/L 前後、400μg/L 前後が含まれているのに対

し、廃鉱からの滲出を受けた河川下流1.2km地点では3000～12000μg/Lに増加していた。なお、2.9km上流の汚染されていない川では約10μg/Lであるので、廃鉱、尾鉱中の水銀が非常に高いということになる[93]。

スペインのアルマデン水銀鉱山（2002年5月閉山、過去2000年間に約28.5万トン生産）でも廃鉱と河川の土壌および水中濃度を測定している。前者の総水銀量は160～34000μg/g（この内1850年に閉山したアルマデネホス（Almadenejos）では11000～34000μg/g）であった。一方、鉱山近くの河川の水銀濃度は13000ng/L（上流では2.4ng/L）でありいずれもニュー・イドリアの場合と同様のことになっている[72]。

さらに、これら３者で共通していることは数世紀を経た今日も、廃鉱、尾鉱から大量の水銀が滲出しており、かつ、総水銀の相当量が有機化していることである。しかも有機水銀は、発生源から地理的に遠方ほどその比率が高いということである。特にアルマデンでは総水銀の濃度が高いアルマデネホス側に有機水銀（メチル水銀）が高く2700～3100ng/gあり、いずれも有機化反応は嫌気性の微生物によるものと考えられている[73][93]。以上の事から、当時ワンカベリカ周辺でも現在では科学的に解明されている水銀の有機化が起こっていた可能性が高いと推察された。

ポトシ鉱山に関しては1998年にプロジェクト・ピルコマヨ（Project Pilcomayo）[61]が立ち上がっており、ポトシの下流で、アルゼンチンの国境から670km手前のプリコマヨ川の土壌調査から始まった。しかし結果はまだ公表されていない。

旧スペイン植民地時代のメキシコでも水銀アマルガム法は広く利用されたので同様の環境汚染が懸念されている。UNAM（国立メキシコ自治大学）とUNEP（国連環境計画）との共同調査によって旧銀鉱山（主にパチューカ；Pachuca、サカテカス；Zacatecas）および周辺地域の土壌中の水銀分析が行われた。その結果、旧パチューカ鉱山で30～660mg/kg、旧サカテカス鉱山では50～100mg/kgであった。メキシコでは鉛を用いた灰吹法も併用されていたので旧鉱山周辺では鉛の濃度も400～3000mg/kgと非常に高いことが分かった[64]。

ポトシ銀山では、アマルガム法以前に先住民が実施していたグアイラ法は、方鉛鉱や銀鉱石中の鉛を利用して製錬していたが、17世紀初頭には鉱石が貧鉱化したことによって消滅したので、Pb汚染はメキシコほどではないと考えられるが、ポトシ鉱山の廃鉱や尾鉱、鉱泥中の水銀、鉛の量や形態を調査する必要がある。ペルーでは小規模銀鉱山Cerro de Pasco近郊の湖沼で底泥調査を行い、鉛の上昇時期と水銀のそれとが異なっており、Porcoの鉱山業の歴史と関係していることが分かった[94]。

3－3－2　天災事変による水銀の流失事件[9][23]

ストック水銀の推算結果をもとに実地調査する場合、注意すべき点の一つは天災事変による状況変化である。ここではその一例としてポトシ銀山で起こったダム崩壊について内容を分析した。

ペルーのポトシ銀鉱山では、17世紀初頭の最盛期に、山間部に32基の貯水池を持ち、その水を巨大な疎水リベラに集合して、ポトシ市街地の製錬工場へ導いていた。その貯水池の中で最大級のカリカリ貯水池が１６２６年３月15日（日）に決壊した。

この事故についてAlzans[31]は次のように記述している。「1626年３月15日（日）四旬

節最後の日曜日の昼過ぎ、人々が最も寛いでいた午後１時から２時の時間帯に、カリカリ貯水池が決壊した。その貯水池の２／３の水量が土石流となって、人口１２万人のポトシ市街地を襲った」。また、数日後に集計された被害の状況は以下のようであった。

死者の数：インディオ 2000 人、スペイン人 1000 人

家屋の崩壊：インディオ側 800 戸、スペイン人側 360 戸

インヘニオス（粉砕・製錬工場）：全壊 79、半壊 47（後日復旧）、無傷 6

水銀ロス：3000 キンタル（約 138 トン、34 万ペソ相当）

被害総額：1200 万ペソ

Alzans 自身は事故の原因や影響についての技術的な見解は示していない。この事故で失った 3000 キンタルもの水銀の量は、当時のポトシでの年間消費量、4000～6000 キンタルの 50%以上に相当し、その年の銀の生産量に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

前述したようにポトシ銀山の 250 年間のストック水銀量として約 5.6 万トンと推算した[3)]。ただし、アマルガム法が 1574 年に適用されて以来の約 50 年間のストック量はその 1/5 の約 1.1 万トンであり、この時の流出ロスは 1．2%程であったが、ストック水銀の観点から見れば、合計約 1.4 万トンの水銀がこの洪水によって、ストックの状態が変り広く拡散したことになる。このことから、ストック水銀による長期的な汚染問題を考える場合には考慮しておくべき事実である。

ワンカベリカにおいても洪水事故が 1609 年にあった。一方ペルー西海岸像は地震多発地帯である。リマでは都市の建設が始まって以来 1746 年までの間に 211 回の地震があり、うち 14 回は大地震であった。中でも 1687 年と 1746 年の大地震の時は各地で長期にわたり余震があった。また 1609 年のワンカベリカの洪水時には、リマでも大地震があったと記録されている。しかしこれらの被害については記述されていない[95-96)]。Arzans[31)]の記録にも地震についての記録は散見するが、上記のような重大事故の記述は他に見当たらない。

3－3－3　ストック水銀の土壌中の存在形態

ストック水銀の公害性を論じる場合、その存在形態が重要である。そこで現在の先行研究から土壌中の水銀の存在形態を調べ、ワンカベリカ水銀鉱山およびポトシ銀山におけるストック水銀の現在の存在状態を推定することにした。

図 2-24[97)]は千葉大学による、日本国内の特定個所での存在形態調査の結果である。これは熱分析装置で昇温中の加熱分解曲線の挙動から判断するもので、まず標準試料について分析し、その加熱分解曲線の形をベースとする。そして、対象土壌の応答曲線と比較して存在形態を推定する方法である。まず標準試料の図から、金属水銀（80～100℃）、無機水銀（150～300℃）、有機水銀（250～350℃）をかなり明確に識別できることが分かった。すなわち、それぞれの熱分解曲線は無機水銀の場合若干ブロードであるが、全体にシャープな凸型であり、最大分解温度が明瞭に識別できる。そこで各地の実際の土壌サンプルを熱分析した結果、奈良市では無機水銀（辰砂）のそれと類似していた。また、都会地と大学医学部周辺では有機系水銀の分解曲線に類似しており、化合物水銀が主体であることが推定された。

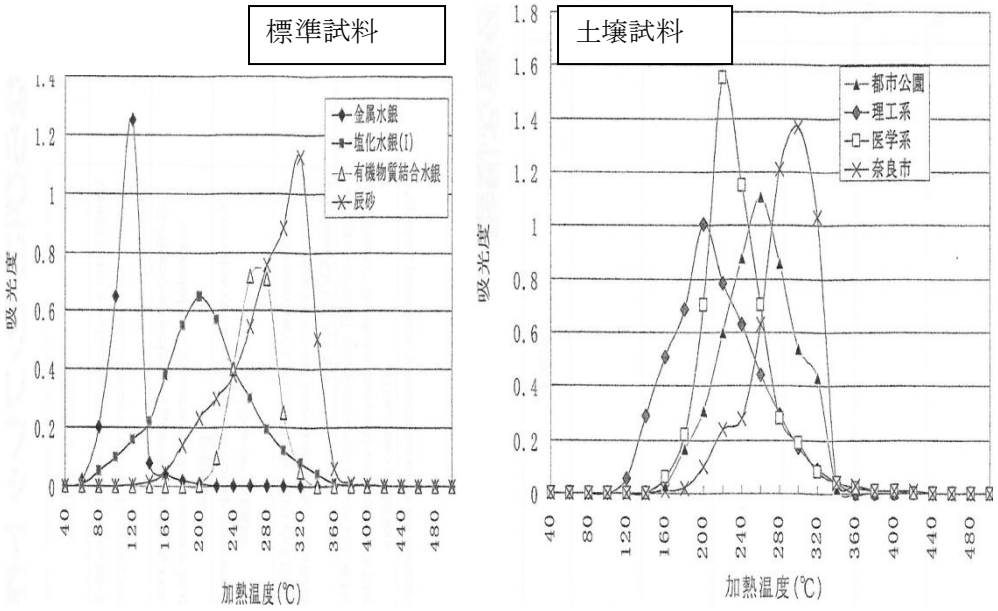


図 2-24　土壌中の水銀の形態分析例[97)]

この方法を使って、ワンカベリカ[12)]、および、イドリア水銀鉱山[73)]についても調査されており、その結果から鉱山からの距離や、時間の経過による動態変化が明らかになりつつある。この方法を用いれば、第一義的に存在形態が判別できるし、有機水銀化の可能性を知る上でも重要な手掛かりとなる。更に、このコアのボーリング調査によって、時代判別もできるので、過去にさかのぼって水銀の動態挙動を議論することが可能になる。

ワンカベリカの場合、Cooke 他[12)]が 6km（LY2）、10km（LY1）および 225km（Negrilla）離れた湖沼のボーリング調査を行ない、土壌コアの水銀分析を行っている。その結果図 2-25 に示したように、6km 地点の湖沼（LY2）の土壌の熱分析による形態分析によって、水銀（Hg^0）、辰砂（cinnabar）の分解温度と異なる matrixed-bound phases の存在を明らかにした。それが植民地時代（colonial）から今日（modern）までのストック水銀の形態の一部と考えられた。また、16 世紀以降は辰砂の割合が 40～50%の高い比率で存在していることを報告している。

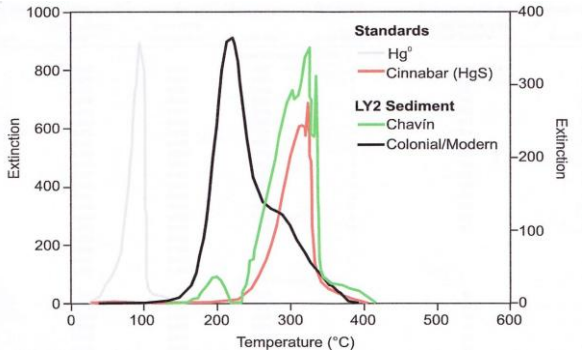


図 2-25　ワンカベリカより約 6km の湖沼土壌中の水銀の形態[12)]

スロベニアのイドリア水銀鉱山[70)]においては、水銀の形態として硫酸水銀、ドロマイトとの結合などの無機水銀の存在が確認されている。また、イドリア鉱山から下流へ向かって河川の底泥中の形態分析も行っており、それによると鉱山の排出口（effluent）から 30km 地点までは水銀濃度も辰砂以外の化合水銀（non-cinnabar）の割合が大きく、この形態は有機水銀化し易いと述べている。また、その地点より下流では河口（90km）地点まで辰砂の比率が高い。加えて、河口の総水銀は 20ppm 前後あり、水圏での動態変化が懸念されている。有機水銀の存在を裏付ける調査と

して、アルマデン水銀鉱山での調査事例も見逃せない[72]。

このようにして、旧水銀鉱山周辺では水銀公害の調査が進行中であり、過去、現在の実態が解明されつつある。更に、この研究対象は未来の問題に繋がっていくものと考えている。

本章では、このような形態分析の中で注目しているものの一つが有機水銀である。特に、メチル水銀の痕跡は水俣病の存在を知る足がかりとして意義が大きい。このほか、水銀の汚染された土壌の修復や水銀の回収を行う場合、合わせてストックされた水銀と他の金属（貴金属やレアメタル）とアマルガムの存在を調査することも重要である。特に後者に関して、アマルガム法の適用地域の金・銀鉱山の尾鉱中には、残留した微量の金・銀が長期間に水銀と結合して、アマルガムを形成している可能性であることである。旧佐渡銀鉱山でもアマルガム法が 17 世紀初頭と、大正から昭和初期にかけて短期間ではあるが利用された[22][98]。地球化学的測定によって、相川町の日本海沖の土壌調査では、金や銀がアマルガム化していることが確認されている[99]。

メキシコの旧サカテカス鉱山周辺においては、銀と水銀のアマルガム回収事業がすでに実施されている。旧サカテカス鉱山の尾鉱中の水銀を分析した一つの事例では、全水銀中約 40～70%がアマルガム化した水銀であったと報告されている[100]。また、金・銀の回収を織り込んだ汚染土壌からの水銀除去プロセスも実施されている[65]。サカテカスにはこの種の工場が 4 基稼働しており、経済ベースで、銀と金をそれぞれ年産 6t、3t 回収している[66]。

本章で目論んでいる土壌の修復方法としては、貴金属等の回収を織り込んだメキシコ方式に類した土壌復元を想定している。この考えを発展させることで、ストック水銀の現在の状態に応じた土壌改質や鉱害源の除去を可能にすることにある。この点は次章で述べる現代の小規模金採掘現場の水銀汚染問題への実践研究としての取り組みに連動している。

第 4 節　植民地時代の銀鉱業と今日の小規模金採掘（ASGM）を俯瞰する地球規模の水銀汚染

水俣病は高濃度の有機水銀曝露による典型的な病像である。その後水銀のリスク回避の面から、低濃度曝露による健康影響に関心が絞られ、ASGM 現場や水銀鉱山現場の直接作業者や家族及び地域住民の健康調査が行われている[91][101]。定性的には ASGM のアマルガム燃焼作業者や水銀鉱山坑内作業者に典型的な慢性水銀中毒が見られるが、メチル水銀による健康影響は魚介類の多食地域で懸念されているにも拘らず、低濃度曝露の影響に関しては結論に至っていない[86]。図 2-26[101]は毛髪水銀値を指標とした水銀中毒症状の発現閾値を示している。しかし無影響濃度は各国、国際機関で異なっており、人に有害影響の現れるメチル水銀の閾値レベルは、図 2-27[102]に示すように、科学論文が発表される毎に、年々低下する傾向にある。いずれにしても低濃度曝露による病像の発現は、単に水銀のみでは決まらず、その他の要因が関与していることが議論されている。

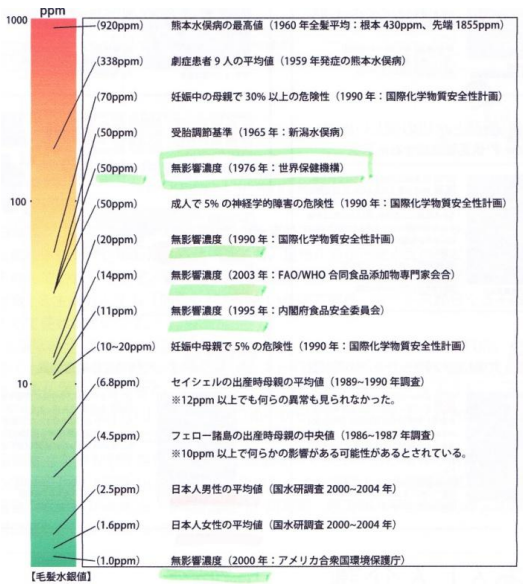


図 2-26　毛髪中の水銀濃度レベルと健康被害の関係[101]

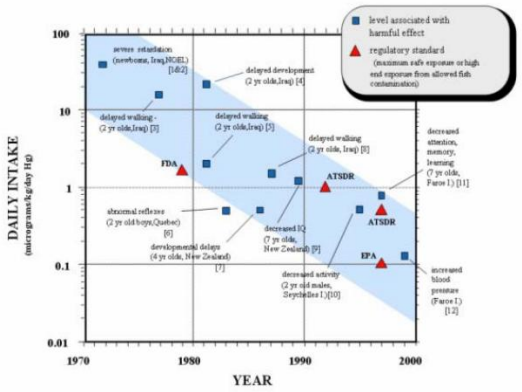


図 2-27　メチル水銀曝露による有害影響の発現閾値の年次傾向[102]

本章では、第 2 章で中世スペインの植民地アメリカで、銀鉱山の水銀アマルガム法適用によって、250 年以上の長期にわたって排出された水銀はストック水銀として評価したが、再排出・再移動の工程を経て新たな発生源として、今日の環境汚染に関与していることを述べた。第 2 章との関連において、第 3 章では現代の小規模金採掘（ASGM）における金のアマルガム製錬からも同様に排出される水銀による環境汚染を取り上げる。上述の閾値の問題は現代の問題でもあるし、中世の銀鉱山地域の問題でもある。現在なお低濃度曝露の影響に結論が出ていないことから、中世の人間の寿命が短かった時代に慢性水銀中毒以外に、有機水銀被害が起こっていたかを推定することは難しい。手掛かりとしては、当時のミイラの毛髪調査を行うことで、有機水銀の存在を明かにすることがその第一歩になると考えている。この点が残された課題の一つである。

第 5 節　本章のまとめ

ポトシ銀山においては、鉱害や汚染といった概念すらなかった時代に、第五代副王トレドが実行した諸施策の中には、現代の循環型社会形成に必須の資源回収といったテクノロジーが大々的に実施されていたことは驚嘆すべき事実である。その技術が必ずしも完全ではなかったために、植民地時代に端を発した鉱害が今日までの歴史的射程の中で、ポトシ鉱山周辺を含めて大気、水圏、土壌に影響を及ぼし、今日の課題として依然として現存している実態を浮上させた。

一方本章では、副王 Toledo の時代に実現していた、システム的な廃鉱石や鉱泥の再資源化処理について明らかにした。このことは今日目指している資源循環の観点から見て先取的な施策であったと評価した。また，現在の環境経済学で求められているバッズをグッズに変えるための工夫、すなわち新技術開発や費用捻出の工夫等を取り入れた回収工程の活性化策は現代的な施策であり非常に示唆に富むものであると評価することができた。

水銀アマルガム法による銀の製錬法は、1886 年に青化法が開発されて以後、次第にケミカルリーチングの時代に移行し 1930 年代までには消滅した。日本の佐渡の金銀鉱山においても、1930 年代後半まで改良されたアマルガム法が貧鉱処理技術として併用されていた[21]。その技術は水俣病の発現によって影をひそめる結果となったが、低コストで簡単に操作できることから現在の小規模金採掘現場では、むしろ採掘地域も採掘人口も拡大し水銀を多用する方向にある[6]。

以上のような技術上の革新性は鉱業の持続性にとっての一面である。ポトシ銀山はじめスペイン植民地時代のほとんどの鉱山の寿命が 250 年前後と長く、その生産量推移の姿からは持続可能な規模（適正規模）と適正技術であったとみなすことができる。しかし為政者の権力のみでは達成できないことも 2-2-2 で明らかにされた。また負の側面として、当時の高濃度被曝の影響や、過去から現在に引き継がれてきた銀鉱山や水銀鉱山周辺の水銀汚染が生態系にどのような影響を及ぼしてきたか等不明な点も多い。その実態を明らかにすることにより、それが現在の課題であると共に、小規模金採掘地域等における水銀使用の削減と地域社会の創生という未来の持続可能性に連動させていくことが求められる。

【参　考　文　献】

1)Nriagu, J.O.：Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the America, Sci. Tol. Environ. 149:167-181(1994)

2)Bakewell P.J.：Mining in colonial Spanish America, The Cambridge History of Latin America, Vol.Ⅱ, Colonial Latin America, ed. Leslie Bethell, pp.105-151 (1984)

3)姉崎正治：イスパノアメリカの植民地時代における銀鉱山での水銀汚染に関する地域動態的研究,、大阪大学大学院人間科学研究科、 グローバル人間学紀要、vol.1,pp.55-69 (2008)

4) （株）東京工業品取引所：検定試験テキスト-貴金属取引の基礎知識、TOCOM（2010年10月）
http://www.tocom.or.jp/jp/nyumon/textbook/preciousmetals/preciousmetals02.html
閲覧日　2015年4月26日

5) サステイナビリティの科学的基礎の関する調査プロジェクト（RSBS）事務局編：調査報告書、pp.7-12（2006）

6) UNEP 2008; The Global Atmospheric Mercury Assessment-Sources, Emissions and Transport(2008)

7) Hylander L.D.：500 years of mercury pollution-global annual inventory by region until 2000 and associated emissions,The Science of the Total Environmet,No.304,pp.13-27(2003)

8) UNEP 2013：Global Mercury Assessment(2013)

9) 姉崎正治：ポトシ鉱山のカリカリ貯水池決壊事故に関する技術的論考－植民地時代のペルーにおける鉱山業の技術的側面、大阪大学大学院人間科学研究科、グローバル人間学紀

要、vol.2,pp.19-35 (2009)
10) 宮本憲一：戦後日本の鉱害言論、岩波書店 (2014)
11) 小川進,岡田尚樹,柴崎亮介:南米ポトシ銀山開発による水銀汚染の推定、日本写真学会秋季講演会、K-6,pp.155-158(2008)
12) Cooke C.A.,Balcom P.H.,Biester H.et al.: Over three millennia of mercury pollution in the Peruvian Andes, PNAS, vol.106,pp.8830-8834(2009)
13) 吉田由利子・室住正世:みずほ氷床の水銀の立体分布、南極資料、59,pp.26-29(1977)
14) (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構：鉱業の持続可能性に関する世界動向と主要な取り組み、H16 年度情報収集事業報告書　第 3 号 (2005)
15) 畑明郎：金属産業の技術と公害、アグネ技術センター (1997)
16) 井澤英二：中世鉱山都市・石見銀山に見る循環型社会-世界遺産「石見銀山遺跡とその文化的景観」、資源環境工学会学術講演会 (北九州市)、(2010 年 11 月 4 日)
17) 湯浅赳夫：文明の「血液」-貨幣から見た世界史、新評論、pp.260-322(1988)
18) 染田秀藤編：ラテンアメリカ史－植民地時代の実像―、世界思想社 (1990)
19) Roberto Levillier:Don Francisco de Toledo-Suprimo Organizador del Peru-Su Vida, su Obra(1515-1582), Biblioteca del Congreso Argentino, (Buenos Aires)(1935)
20) Franklin Zimmermann: Francisco de Toledo-Fifth Viceroy of Peru(1569-1582), Greenwood Press(New York)(1968)
21)姉崎正治：ペルー副王領における銀鉱業と水銀汚染－第五代副王 Toledo が推進した鉱山業を中心に－、大阪大学大学院人間科学研究科、修士論文 (2010)
22) 姉崎正治、三好恵真子：スペイン植民地時代のポトシ鉱山における銀製錬技術の再評価と今日的応用への可能性、大阪大学大学院人間科学研究科紀要、第 37 巻、頁 299-319 (2011)
23) Shoji ANEZAKI, Emako MIYOSHI：Technical Aspects of Mining in Colonial Times of Peru described from the Collapse of Caricari Dam of Potosi Mine, BUMAⅧ, F-11 (2013)
24)Guillermo L.V.：Francisco de Toledo-Disposiciones Gubernativas para el Virreinato del Perú, 1569-1574, Escuela de Estudios Hispano-Americanos, Sevilla, pp.352-354(1986)
25) Guillermo L.V.: Francisco de Toledo- Disposiciones Gubernativas para el Virreinato del Perú, 1575-1580, Escuela de Estudios Hispano-Americanos, Sevilla,pp.299-300(1989)
26) Garcia de Llanos: Diccionario y Maneras de Hablar que se usan en las Minas y sus Labores en los Ingenios y Beneficios de los Metales(1609), ed. de Ramiro Molina Barrios, Museo Nacional de Etnografía y Folklore(La Paz Bolivia), (1983)
27) Acosta P.J.:Historía Natural y Moral de las Indias, Casa de Fuan de León, Sevilla (1894)
28) Probert A.: Bartollomé de Medina-The Patio Process and the Sixteenth Century Silver Crisis, An Expanding World-The European Impact on World History 1450-1800,vol.19,Ed.Bakewell P.J., VARIORUM, pp.96-129(1997)
29) Capoche L.: Relación general de Villa Imperial de Potoí,ed.Hanke L.,Madrid

(1959)
30) Bakewell P.J.: Technical change in Potosi-The silver boom of the 1570's, An Expanding World-The European Impact of Silver and Gold in the Americas, vol.19, Ed.Bakewell P.J. , VARIORUM, pp.75-95(1997)
31) Arzáns de Orsúa y Vela, Bartolomé: Historia de La Villa Imperial de Potosí, eds. Lewis Hanke and Gunner Mendoza, Brown University Press, Tomo Ⅱ, pp.1-23(1965)
32) 青木康征：南米ポトシ銀山、中公新書（2000）
33) 網野徹哉：興亡の世界史 12ーインカとスペイン帝国の交錯、講談社(2008)
34) Julio A. Camarga: Contribution of Spanish-America silver mines (1570-1820) to the present high mercury concentrations in the Global environment:a review, Chemopher 48, pp.51-57(2002)
35) 近藤仁之：ラテンアメリカ銀と近世資本主義、行路社（2011）
36) D.A.Brading and Harry E. Cross: Colonial Silver Mining-Mexco and Peru, An Expanding World- The European Impact on World History-11, Colonial Silver Mining; Mexico and Peru, 1450-1800, VARIORUM, pp.227-261(1996)
37) 山本紀夫：アンデス高地、京都大学出版会、(2007)
38) Guillermó L.V.:Las Huancavelica en los siglos ⅩⅥ yⅩⅦ, Lima, PONTIFICIA UNIVERCIDAD CATORICO del PERÚ, pp136-142(1999)
39) Ríos L. P., Soro F. P. (Selec.) and Potosí(Honorable Gobierno Municipal de Potosí) /Madrid(Agencia Española de Cooperación Internacional) / Sevilla(Junta de Andalucía - Consejería de Obras Públicas y Transportes - Dirección General de Arquitectura y Vivienda), (Ed.) Potosí, Bolivia Junta de Andalucía - Consejería de Obras Pública y Transporte / Honorable Gobierno Municipal de Potosí: Potosí Guía de Arquitecutura, pp.16-51(2004)
40) Potosí de Wikipedia, la Enciclopedia libre(2013)
41) 末尾至行、細川よし延、藤原良樹訳（Terry S. Reynolds, 1983）:水車の歴史ー西洋の工業化と水力利用、平凡社（1989）
42)Carlos Serrano Bravo:Hisoriá de la Minería Andina Boliviana(Siglos ⅩⅥ-ⅩⅩ)(2004)
www.unesco.org.uy/phi/biblioteca/archivo/files/370d6afed30afdca14156f9b55e6a15e.pdf
閲覧日　2011年10月5日
43)姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：副王トレドのポトシ銀山開発事業における屑鉱・鉱泥処理ー歴史資料から読み解く現代への示唆ー、廃棄物資源循環学会誌、Vol.25, No.6, pp.445-453 (2014)
44) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：ポトシ銀山の先取的な鉱業システム-歴史資料から再評価する第五代副王 Toledo の環境諸施策に関する新たな知見、日本鉱業史研究、No.68, p.63-82(2015)
45) Cole A.J.:The Potosí Mita 1573-1700, Stanford University Press, California, p.7(1985)

46) Bakewell P.:Mineros de la Montaña Roja-el trabajo de los indios en Potosí 1545-1650,versión española de Mario García Aldonato,Alianza Editorial(1989)
47) Alvaro Alfonso Barba:Arte de los Metales-1639, Editional MAXTOR(2003)
48) 真鍋周三：銀山をめぐる社会経済史研究ーポトシ市場経済圏の形成（前編)、京都ラテンアメリカ研究所紀要、11 号（2012)
49) 真鍋周三：銀山をめぐる社会経済史研究ーポトシ市場経済圏の形成（後編)、京都ラテンアメリカ研究所紀要、12 号（2013)
50) Percy J.：Metallurgy-Silver and Gold-1, John Murray, London,pp.649-666（1880)
51) Bargalló M.:La Minería y la Metallúrgia en la América Español durante la época colonial, Fondo de Cultura Economía,Mexico,pp.107-195(1955)
52) 増田義郎訳：インカ帝国地誌（Cieza de Leon,1553)、岩波文庫、pp.545-558（2007)
53) 増田義郎訳：新大陸自然文化史(下)（Jose de Acosta,1590)、岩波書店(1966)
54)C.G.Cunningham,R.E.Zartman,E.H.Mackee et al:The age and thermal history of Cerro Rico de Potosi,Bolivia,Mineral Deposita,vol.31,pp374-385(1996)
55)鞠子正：鉱床地質学ー金属資源の鉱床学ー、pp.226-231(2008)
56)岸本文男：金属資源鉱床の生成ー鉱床の広域分布法則ー、現代工業社(1979)
57) Mario R. De Nigris, Octavio Puche Riart: El Uso de Hornos y Guaira para la Fundación en los Andes, De Re Metallica, 16, pp.21-31(2011)
58) 布野修司、Juan Ramon Jimenez Verdejo：グリッド都市ースペイン植民都市の起源、形成、変容、転生、京都大学出版会、pp.388-397 と口絵 6（2013)
59) Daviken Studnicki-Gizbert and David Schecter: The Environmental Dynamics of a Colonial Fuel-Rush;Silver Mining and Deforestation in New Spain 1522-1810,Environmental History,Vol.15,pp.94-119(2010)
60) Carlos Serrano Bravo:Ejenplos de Contaminación Sostenida,Segundo Congreso Internacional sobre Geología y Minería en la Ordenación del Territorio y en el Desarrollo,P.09,pp.115-124(2009)
61)Project Pilcomayo : Selected Results, http://paws.wcu.edu/jmiller/Results_Pilcomayo.htm Accessed at October 5,2009.（閲覧日　2009 年 8 月 18 日)
62) 真鍋周三：植民地時代ペルーにおけるワンカベリカ水銀鉱山と水銀汚染問題ー植民地時代前半期ー、京都ラテンアメリカ研究会誌、No.6, pp.19-55(2006)
63) Nicholas A. Robins : Mercury, Mining, and Empire, Indiana University Press,1-12(2011)
64)UNEP and UNUM: Sequential Chemical Specification of Mercury in Contaminated Sites of Mexico, MC/4030-01-02 Project（2008)
65) Ogura T., Ramirez-Ortis J., Martinéz S.H.et al.：Zacatecas (Mexico) Campanies Extraction Hg from surface soil contaminated by ancient mining industries,Water,Air,and Soil Pollution,Vol.148,pp.167-177(2003)
66)J. A. Raminez Álvarez y R. A. Eden Wynter: Status of Mercury in Mexico, Fiest Draft (2000)

67)中野定雄、中野里美、中野美代:プリニウスの博物誌(第Ⅲ巻),雄山閣出版(1986)
68)三浦豊彦:労働と健康の歴史(第1巻)－古代から幕末まで、労働科学研究所出版部(1988)
69) 三枝博音訳著、山崎俊雄編（Agricola G.(1556), De re metallica）：デ・レ・メタリカ―全訳とその研究、岩崎学術出版社 (1968)
70)染田秀藤、友枝啓泰:アンデスの記録者ワマンポマ、平凡社(1992)
71) German Bleiberg: El “Informe Secreto” de Mateo Alemán sobre el trabajo forzoso en las Minas de Almadén, TAMESIS Books Lim’t(London)(1985)
72)Gray,J.E.,Hines,M.E.,Higueras,P.L.,et al.:Mercury Specification and Microbial Transformations in Mine Wastes, Stream Sediments, and Surface Waters at the Almaden Mining District, Spain,Environ.Sci.Technol.,38,pp.4285-4292(2004)
73)Biester,H.,Gosar,M.,Covelli,S.:Mercury Specification in Sediments Affected by Dumped Mining Residues in the Drainage Area of the Idria Mercury Mine,Slovenia,Environ.Sci.Technol.,34,pp.3330-3336(2000)
74) 平林眞、長崎誠三：二元合金状態図、アグネ技術センター (2008)
75)関邦博、坂本和義、山崎昌廣:人間の許容限界ハンドブック,朝倉書店(1990)
76)鈴木継美、大井玄、井村伸正編:水銀とセレン,藤原出版(1977)
77) 吉田稔:小規模の金採決鉱山における水銀汚染による健康影響の現状、平成18年度研究評価Ⅲ－3－１、国立水俣病総合研究センター(2007)
78)Kendall,W.B.:Workers’ Health and Colonial Mercury Mining at Huancavelica,Peru,The Americas,57,pp.467-496(2001)
79) 山本義隆：一六世紀文化革命－1、みすず書房(2007),
80)Bargalló,M.:La Mineria y la Metalúrgia en la América Español durante la época colonial,Mexico:Fondo de Cultura Economía(1955)
81)Bakewell,P.:Silver Mining and Society in Colonial Mexico, Zacatecas 1546-1700,UK:Cambridge University Press(1971)
82)Richard L. Garner:Long Team Silver Mining Trends in Spanish America- A Comparative Analysis of Peru and Mexico, An Expanding World, The Eurpean Impact on World History 1450-1800,Vol.19,Mines of Silver and Gold in the Americas, Edited by P. Bakewell, VARIORUM,pp.225-262(1997)
83)山浦大和、小川進:南米ポトシ銀山の水銀リスク解析、日本写真測量学会年次学術講演会、ｐｐ. 187－188(2007)
84)丸本幸治、坂田晶弘:大気中の水銀に関する研究の現状、地球化学、vol.34:59－75(2008)
85)鈴木継美、佐藤洋:水銀汚染－局地的問題とグローバルな問題、公衆衛生、vol.59,pp.300－302(1995)
86)赤木洋勝:水圏における水銀の動態に関する研究第1回合同ワークショップ、水俣市：国立水俣病総合研究センター、pp.35－38(1984)
87)佐藤洋:水銀による環境汚染問題の現状と今後の対応に関する－メチル水銀を中心とした水銀の健康影響と国際的水銀汚染問題に関する研究レビュー、国立水俣病総合研究セ

ンター年次報告書、pp.1-61 (2006)
88) UNEP (1972-2012) : A Practical Guide : Reducing Mercury Use in Artificial and Small-scale Gold Mining(2012)
89) 吉村悦郎:水銀の化学形態変化と生物活動、地球環境、vol.13,pp.211-218 (2008)
90)西村肇、岡本達郎：水俣病の科学、日本評論社 (2006)
91)水銀の環境変化,喜多村正次、近藤正臣、藤井正美他共著：水銀、講談社サイエンティフィク (1977)
92) 原田正純:水俣病、岩波書店(1989)
93)Ganguli,P.M.,Mason,R.P.,Abu-Sabu,K.E.,et al.:Mercury Specification in Drainage from the New Idria Mercury
Mine,California,Environ.Sci.Technol.,34,pp.4773-4779(2000)
94)Cooke C.A., A.P. Wolfe and W. O. Hobbs: Lake-sediment geochemistry reveals 1400 years of evolving extractive metallurgy at Cerro de Pasco,Peruvian Andes,GEOLOGY 11,pp.1019-1022(2009)
95)Smith,A.O.:El terremoto de 1746 de Lima:El modelo colonial,el desarrollo urbano y los peligros naturales,Historia y desastres en América Latina,
La RED,vol.2,Panamápp.pp.102-124(1997)
96)Rivera,S.A.¿Ocurrencias de tiempo?Fenomenos naturales y sociedad en el Perú colonial,Historia y Desastres en America Latina,La
RED,vol.1,Panamá.pp.123-145(1996)
97)中川良蔵:環境土壌中の残留水銀の形態及び動態、地球環境、vol.13,245-252(2008)
98)佐渡市教育委員会世界遺産・文化振興会、新潟県教育庁文化行政課編著、黄金の島を歩くー佐渡銀金山の歴史と文化ー、新潟日報事業者(2008)
99)寺島滋、片山肇、中島健他:新潟沿岸日本海堆積物における水銀の地球化学的挙動、地球化学、vol.29,pp.25-36(1995)
100)Ogura,T.,Ramirez-Ortis,J.,Martinez,S.H.,et al.:Zacatecas (Mexico) Campanies Extraction Hg from surface soil contaminated by ancient mining
industries,Water,Air,and Soil Pollution,148,pp.167-177(2003)
101)水俣病センター相思社：世界から水銀をなくそう、水俣・芦北地域振興基金助成事業 (2013)
102)村田勝敬、獄石美和子、岩田豊人：フェロー諸島のおける出生コホート研究、環境化学会誌、第17巻、No.3,pp.169-180(2004)

第３章　現代の小規模金採掘（ASGM）の環境問題と持続可能な地域社会の創生
－乾式処理プロセスの提案と起点効果の発揮を目指して－

第１節　水銀条約と第３章の研究課題との関係および実践研究への背景

1－1　水銀条約[1)]における ASGM の位置付け

2013 年 10 月、国連 UNEP は 139 カ国の参加により「水銀条約（水銀に関する水俣条約）」を採択し、92 カ国が署名した。その後の過程は、50 カ国・地域の批准後 90 日目から効力が発効することになっており、現時点での批准国は数カ国である。日本は 2016 年の批准を目指して、その準備段階にある。

「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「Zero Mercury」[5]（技術的は、Mercury-free processing）にある。また、本章が研究課題とする小規模採掘（Artificial Small-scale and Gold Mining;以降 ASGM と表記）に関しては、第 7 条に規定があり、要約すると次の二項になる。つまり、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[1)]。

１）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。

２）国家行動計画に含まれるべき事項（付属書 C）として、以下を挙げている。

・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

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。

（１）新規鉱山の開発は条約発効後禁止、既存の鉱山も発行後 15 年以内に閉山する。

（２）水銀の輸出入に関しても、厳しい制限が課せられる。

さらに、汚染サイトの解決については第 12 条に「水銀等によって汚染された場所を特定し、評価するための適当な戦略の策定」と記されている。そこでは汚染部分の修復に関して「環境上適正な方法」の選択と具体的な評価・検証の取り組み方法が含まれている。

ASGM にとって重要な点は、一つには小規模金採掘（ASGM）に関する限り、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したことによる。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に加え、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いう点である。つまり「Zero Mercury」を目指

---

[5] 「Zero Mercury」の由来；2010 年 6 月 UNEP 水銀に関する政府間交渉委員会第 1 回会合（INC1）が、多くの NGO の参加の下ストックホルムで開催された。代表的 NGO の一つが、The Zero Mercury Working Group(ZMWG)であり、世界 49 カ国 90 以上の主に水銀問題に取り組む NGO の国際連合体。この理念は「Zero Mercury」であり、これは UNEP 水銀条約の理念でもある。

す方向を謳っていることである。二つ目は、ASGM 地域社会にとっては、既に汚染されている場所の修復対策や今後予想される汚染への対処は、持続可能な地域社会の創生にとっても喫緊の課題であるとして、資金・技術支援（第 13 条、第 14 条）が約束されている。

第 3 章で目指す研究課題は、上記の「Zero Mercury」に向けての取り組みと、汚染土壌の修復に視野を置いている。したがって、まず世界の ASGM を俯瞰した上で ASGM 地域社会の再生に向けた取り組みについて具体的に考察していく。このように本章は UNEP 水銀条約の理念に沿う研究として位置付けている。

1－2　ASGM の定義

小規模金採掘（ASGM）の定義は、必ずしも統一した概念として示されているわけではない。OECD のガイダンス[2)]の定義によれば、ASGM は極めて単純な形式の探索、採鉱、加工、製錬及び輸送を行う、公式、非公式の鉱山事業であり、通常、資本集約性が低く、労働集約性の高い技術を用いている（図 1－8）。集団としては個人グループや家族単位、30～300 人の組織を形成し共同事業としている場合もある。なおこのガイダンスでは、紛争国および高リスク地域からの、特に金の取引に関するデュー・ディリジェンスを確保するための方策を示しており、ASGM の合法化、正式化を要請している。

また UNEP の資料[3)]によれば、大規模金鉱山と小規模金採掘との区別には次の(A)、(B)のような差異と共通性があると考えられている。

(A) 大規模金鉱山（large-scale gold mining；以降 LSGM と表記）は、概して資源メジャーによって開発されており、大深度坑内掘り（南アフリカの場合）や大規模露天掘りが該当する。その環境破壊も規模が大きい。例えば、面積 3.2km^{2}の露天掘りでは、ore-TMR に換算すると 2,700,000t/t(Au)に相当する[3)]。これは表 1－1 の値の約 1.5 倍に相当する巨大な量である。また図 1－4 で示した銅鉱山における銅との随伴金では、15 万トンの銅精鉱に対して ore-TMR は約 5,500 万トンになる[4)]が、同時に 16 トンの金が採掘される。このような随伴金には ore-TMR は計上されない。この種の大規模企業は主にケミカルリーチングを利用するため水銀使用量は少なく、世界の水銀排出インベントリーに占める割合は約 5%である[5)]。

(B)小規模金採掘 ASGM は LSGM に依存している部分も多く、操業中や閉山後の廃鉱石や尾鉱の二次採掘あるいは傘下の処理代理店の役割等をしている。特に 2011 年当初、アフリカの発展途上国の多くは LSGM と共存関係にあることが指摘されている[3)]。技術的には水銀アマルガム法は低コストで簡便であるため、ASGM が拡大する要因であり、しかも miner のスキルが低いこともあって金の含有量に対して水銀の使用量が多く、インベントリーとしての水銀排出量は約 37%を占めている[5)]。この他、図 1-8 で示した LSGM と ASGM の間にある事業構造の差異も見逃しにできない。

ASGM の具体的な定義については、モザンビーク共和国（以降モザンビークと表記）の鉱業法[6)]に規定されている内容が参考になる。その定義によれば、①～⑤に示すように、鉱床の種類に関する三項目（①～③）と坑内掘りの安全基準および水銀やシアン等の薬品の使用禁止を規制した内容（④と⑤）からなっている。

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 m^{3}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 m^{3}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 m^3 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

これらの具体的数値は、多様な地域にある ASGM の実態に即して、対策を講じるために重要な内容を含んでいる。つまり、①は山金、②は砂金、③は廃鉱等を金の資源対象としている。この①～③の項は、金の含有量（鉱石品位）にも対応しており、概して金含有量は山金<砂金<尾鉱の順で高いので、品位が高い順位に鉱石土石の年間採取量は小さく見積もられている。このことは第 1 章 3－1 で述べたように、金の回収率にも反映される。後者ほど ASGM の miner にとって収率が高いことになる。

第 2 節　金鉱業の資源・環境問題

2－1　世界の金鉱業の動向と小規模金採掘の位置付け

第 1 章 3－2 において、18 世紀以降のゴールドラッシュの変遷を概説した。また地下資源の約 75%が採掘され枯渇度が最も高い金属の一つになっていることを述べた。しかし確認埋蔵量は年々加算されており枯渇する気配を見せていないのも事実である[7]。新産金量（鉱山採掘金）の伸びと今後の予想を図 3－1 に示した[8]。2030 年代までは新産金は右肩上がりの増加が予想されている。しかし現実には、鉱石品位の低下して行く中、技術革新と市場価格のバランスによって新産金の量が変動しているが、金の需要の伸びは今後も衰えることはないと予想されている[8]。このような情勢の中で小規模金採掘がどういう方向性を持つのか把握しておく必要がある。

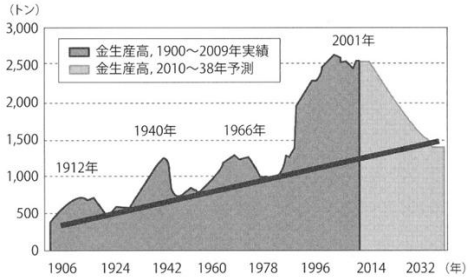


図 3－1　金生産高実績と予測[8]

まず地下資源の側から見ると、新産金に占める随伴金は約 5～10%と言われ、ほとんどプライマリーの金鉱山からの産金になる[9]。現在までのおおよその金品位の変化は、1830～1920 年代は 22g/t・鉱石であったが、1980 年代で 3～5g/t、2000 年代は平均 2.2g/t 迄採掘可能になっている。図 3－2[10]は世界最大級の金鉱床、南アフリカ Witwatersrand の平均金含有率であり、2008 年時には 5g/t 以下になっている。既に地下約 4000m の大深度掘削を行っており、コストの面からも限界に近くなっている。一方、アメリカでは探査・掘削技術と製錬技術の革新によって、経済的カット・オフといわれる 1g/t 近くになっている[10]。このように大規模生産企業は、技術革新によって経済的カット・オフを下げてきた。図 3－3[11]は、採掘法別に金品位と確認埋蔵量および鉱山数の比率を示したものである。金品位は圧倒的に 10g/t 以下であり、採掘法では露天掘り（SF）はより低品位側にあり、坑内掘り（UG）は高品位側に採用されている。なお両者の組み合わせ採掘法（S/U）は中間品位に分布してい

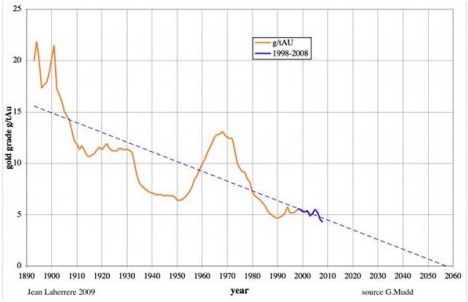


図 3－2　南アフリカ Witwatersrand 金鉱山の開発当初からの粗鉱品位（g/tAu）の推移[10]

る。後者 UG では高度の技術が必要であるので採掘コストが高いことと対応している。現在の開発鉱山の 50%平均値が 4.78g/t である。図 3－3 において日本の菱刈金山は品位、埋蔵量共に優良な金鉱山に位置付けられている。

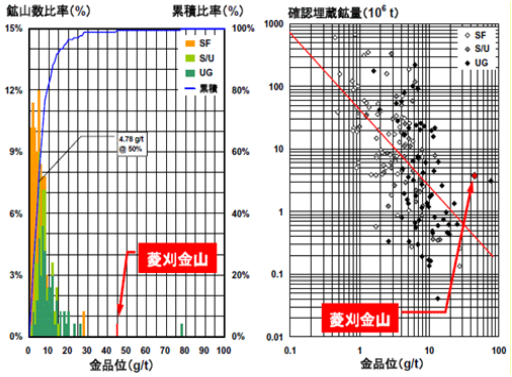


図 3－3　金鉱山の金品位と鉱山数比率および確認埋蔵量[11]

金の年間新産金の供給量約 2500t/年の内、主に低 HDI 国の金生産は約 13.4%であり、中位の HDI 国を含めると約 48%に上る。全てが ASGM に該当するわけではないが、少なくとも 20%前後が ASGM と考えられる。近年は特にサブサハラ、ラテンアメリカ、東南アジアで拡大する傾向にある[3]。ASGM にとっては、大企業の廃鉱や尾鉱を原料とする場合以外に、品位に関わらず小規模鉱床を採掘対象にできることから、図 3－3 で示したように、低品位鉱床も含めれば確認埋蔵量は非常に多いと言える。したがって ASGM は今後も増加すれこそ減少はしないものと推察できる。

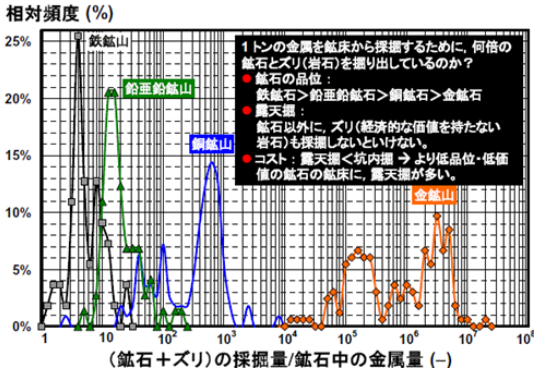


図 3 - 4　金と主要金属の ore-TMR と鉱山開発の相対頻度[11]

一方環境の面からは、鉱石品位の低下は関与物質総量 TMR の増加になり、環境負荷を増加することになる。第 1 章の表 1－1 で示したように、巨大な量の TMR 処理、つまり 1g の金に対して約 1.8 トンの鉱石を処理する労力に対する報酬への期待効果や、一攫千金を狙う大衆心理や意欲等から、結果的に目標とされる品位は、5g/t 以上が対象になっているところもある[12]。しかし TMR とその発生頻度の関係では図 3－4[11]で示すように、金の場合は横軸 TMR の値が大きい上にばらつきの幅も大きい特徴がある。この横軸と縦軸に囲まれた面積がその金属全体の総 TMR になり、表 1－1 の総 ore-TMR に相当する。金鉱石には随伴する有害元素は少ない反面、鉄鉱石に相当する厖大な量の TMR 処理が問題である。加えて、金の抽出に水銀アマルガム法や青化法を利用するため、選鉱用に水資源を多用すること、TMR の構成鉱物（鉱石＋ズリ）が水銀やシアン化液を含む鉱泥となって水環境や土壌汚染さらには水銀による大気汚染等の原因となって農漁業や健康被害につながることが危惧されている。

三点目の課題として、主要な ASGM 実施国は低開発国ないし発展途上国の僻地に存在する場合が多く雇用機会がないため、金採掘は ASGM 地域社会の雇用と生活圏の経済的持続可能性と深い関係がある。しかも ASGM は 70 カ国以上に拡大しており、その直接採掘者は 1300 万人と言われている。家族や間接従事者を含めると 10 倍に上る人口を抱えていることになる。つまり ASGM 地域の再生持続共通の課題になる。しかも、ASGM の対象鉱床は当面豊富にあることが確認されたことから、ASGM の問題は環境負荷を低減する適正技術の開発に負うところが大きいことが確認された。

2－2　ASGM の拡大その地域の特徴

第 1 章の図 1－17 では、2010 年度の人為的水銀排出量 1960t の内、ASGM 起因が 37%あることが示された。この排出量を地域別に 2005 年から 2010 年にかけての変化で示したのが図 3 - 5 である[13]。この 5 年間で急増した地域は、アジア、中南米およびアフリカである。これらの地域は概して低開発国あるいは開発途上国であり、国連の人間開発指数 HDI も低い国が多い。これらの国の HDI と金生産量との関係を図 3－6 に示した。上述の 3 地域の内アフリカ地区は同じ金生産量でも HDI 値はかなり低いレベルに分布しているのが特徴である。ここには現在世界 1 位の生産量の中国も入れてある。中南米とアジア地域は HDI 値では中位レベルとされている[3]。

図 3 - 5 と図 3－6 から、アフリカ地域が特に低い HDI 値にあって、金生産量の少ない国が多いこと、および ASGM から排出される水銀の過去 5 年間の増加量が最も大きい地域であることが明らかとなった。

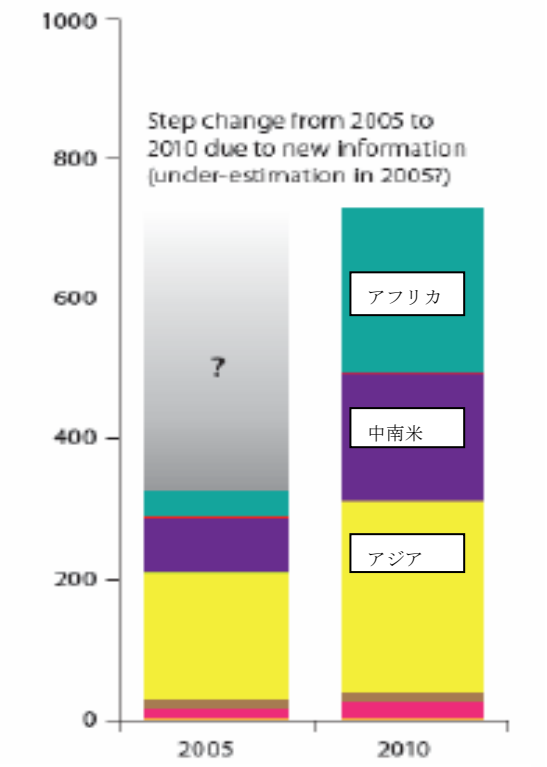


図 3 - 5　ASGM による水銀排出量の変化（2005 年から 2009 年）[13]

一方地域別の ASGM 従事者数と水銀排出量の分布を図 3 - 7[3][14]に示したが、いずれにおいてもアフリカ地域では広範囲に拡大している。中でもサブサハラの最貧国に分布して

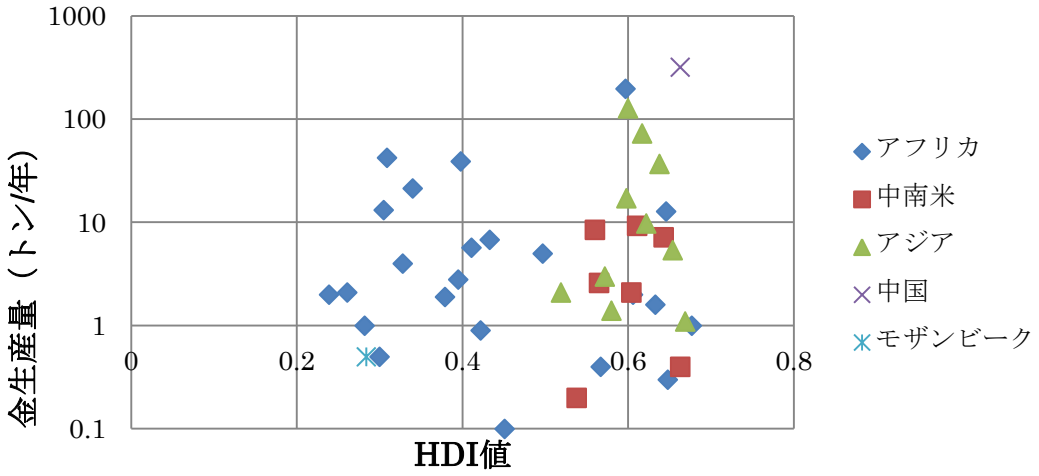


図 3－6　国連の人間開発指数（HDI）が低い国の金生産量と HDI の関係（筆者作）

いる。表 3－1[3)15)]はサブサハラの ASGM 直接従事者（miner）とその依存者の数をまとめたものである。それぞれ約 821 万人、4580 万人であり、全世界の ASGM 直接従事者 1300 万人の約 63%がサブサハラ地域に集中している。

本章では以上の金鉱業の動向と ASGM の現状分析から、振興著しいサブサハラの ASGM に照準して、サブサハラ特有の ASGM 地域社会の再生を目指すことを基礎として、低コストで簡便な Zero Mercury 技術を考案することを第一義とした。そしてその適用先の選択とその条件について考察することにした。なお中国は世界の水銀生産量の 70%以上を占めており、また ASGM 従事者が 450 万人とされている等抜きん出た存在になっている。水銀削減を目指す視座から注目しておく必要がある[14)16)]。

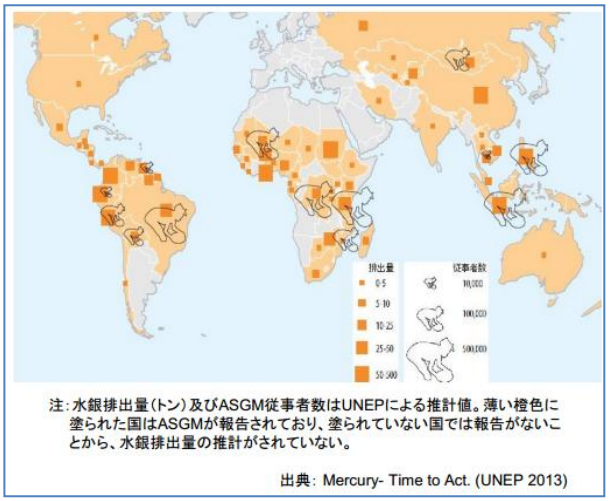


図 3－7　ASGM が行われている国・地域の金生産量と従事者数[3)14)]

表 3－1　サブサハラ地域の ASGM における直接従事者（miner）と生活依存者の概数[3)15)]

	in ASM	of dependents
Angola	150,000	900,000
Burkina Faso	200,000	1,000,000
Central African Republic	400,000	2,400,000
Chad	100,000	600,000
Côte d'Ivoire	100,000	600,000
Democratic Republic of the Congo	200,000	1,200,000
Eritrea	400,000	2,400,000
Ethiopia	500,000	3,000,000
Ghana	1,100,000	4,400,000
Guinea	300,000	1,500,000
Liberia	100,000	600,000
Madagascar	500,000	2,500,000
Malawi	40,000	–
Mali	400,000	2,400,000
Mozambique	100,000	1,200,000
Niger	450,000	2,700,000
Nigeria	500,000	2,500,000
South Africa	20,000	–
Sierra Leone	300,000	1,800,000
Sudan	200,000	1,200,000
Tanzania	1,500,000	9,000,000
Uganda	150,000	900,000
Zimbabwe	500,000	3,000,000

2－3　検討対象国の選定

適用先の選択に関して重視した視点は以下の三点である。

1）政治的安定性；サブサハラの最貧国の中で、ある程度長期にわたって政治的に安定な国、かつ鉱業に関するガバメントに透明性のあること

2）資源的成長性；地下資源がある程度豊富で、経済的な成長が期待できる国、したがって持続可能性の評価において成長の選択肢の幅があること

3）ASGM の情報量；公表された情報が多く、UNEP において評価されている国

まず 1）に関して、世界銀行の行ったガバナンス評価がある[17)]。ここでは中東、アフリカの紛争影響国 20 カ国における国家建設の進展度合いを二つの指標で評価している。この評価指標は、思想言論の自由度を示す Voice and Accountability（以下 VA と表記）と、国家の治安維持能力、政治的安定度を表す Political Stability and Absence of Violence/Terrorism である。その結果は、20 各国の紛争影響国の内グループ 2（政治的安定化の改善が民主化の進展より顕著に進んでいる国群）に属している国 7 カ国にサブサハラではモザンビークが該当すると評価されている。モザンビークは 1992 年に紛争終了後政

治的安定が継続している[6)18)]。
２）の論点に関して、近年南アフリカの成長ベルトとして資源回廊[19)]が注目されている中で、未開発鉱山が多数確認されており、金に関しても例外ではない。しかし現在のところ図3－1で示したようにアフリカ諸国の多くは低HDI側にあって、金の年間生産量も小さい。金資源の埋蔵地帯が過去の長い資源獲得の経緯の結果、東南アジアやアフリカ、特に現在ではサブサハラへの比重が増加しつつある。
上記の資源回廊地域は、近年金以外でもダイヤモンド、白金等で圧倒的な供給源と位置付けられている[18)]。特に金とダイヤモンドは市場価格が高い上に、簡単に表層部からの採掘が可能なこと、さらには山岳部や僻地のアクセスの困難な地域に分散していることもあり、小規模採掘者が収入を求めて集まりやすい。しかも、行政機関の資源や環境に対するガバナンスの整備が遅れていることもあり、資源開発や小規模採掘現場における地域社会の管理には多くの問題を抱える結果となっている[2)]。
ダイヤモンドは採石の評価と加工技術によって価値が高められるので、採掘者にその知識がない場合は買いたたかれ易い資源である[20)]。一方金の場合は、採掘後の水洗選鉱や簡単な水銀との反応処理によって金そのものを得ることが出来るので、直接市場価格と連動して収入を計算できる対象である。しかし現実には、採掘地へのアクセスや、資材特に水銀の入手や処理技術の指導および物流関係者による諸経費が加算される等で、末端の作業者（miner）には不利な条件が幾重にもあり、ダイヤモンドの場合と同様に正当な収入が得られていないのが実情である[2-3)]。この点は１）との関連しており、OECD ガイダンスは小規模鉱業の公式化・正式化を支援する道筋をガイドしている[2)]。
一方地下資源が豊富なことは潜在的な発展要素であり、弱い持続可能性の面では選択肢の幅があることを意味している。この点はサステイナビリティ学における「持続的発展」に関する世代間衡平性と世代内衡平性に関わる重要な点である。ここで一つの検討事例[21)]を参考にしたい。そこでは、環境に関する強い持続可能性指標である EF(エコロジカル・フットプリント)と弱い持続性指標として将来世代に関する GS（Genuine Saving）を一次指標とし、111 か国を分析対象国として、各国の経済指標に一人当たりの GDP、社会指標に人間開発指数 HDI および制度指標に発言権と説明責任の指標 Voice and Accountability(VA)と５歳以下の死亡率（u5mort）の６つの二次指標を変数として関係式と寄与率を統計的に求めている。分析結果は持続性評価基準を（GS≧0 および EF<1.8）とする、それぞれ GS を横軸、EF を縦軸とした四象限上の分布から、持続可能性を評価している。注目のサブサハラ地域の国々のほとんどが、二次指標が低い上に強い持続可能性指標と弱い持続可能性指標のいずれもが小さい第３象限の部類に入っている。また一次指標同士はトレードオフの関係にあって、先進国と同じ道を希求すれば強い持続可能性指標を犠牲にすることが読み取れる。結論としては、地下資源の潜在価値を持つサブサハラ諸国が、追加的に生態系への圧力を高めることなく経済、社会、制度パフォーマンスを高めていくには、先進国とは異なった発展パターンを探求する必要があることを示唆している[21)]。
３）の ASGM に関する情報としては、UNEP が Zero Mercury プロセスの成功事例として取り上げている中で、モザンビークの粉砕・磁選のみで粗金を回収している方法に注目した。加えて、1－2 で述べた鉱業法とそのガバナンスに関する文献情報からも、検討する価値があると判断した。本章では、したがって ASGM 地域の再生を図る構想はモザンビークの情報

をもとに構築することとした。

第3節　モザンビークの小規模金採掘の実態とZero Mercury化への取り組み

3−1　モザンビークのASGMと鉱業ガバナンス

ここでは多様なASGMに適合する適正技術と汚染地の修復および地域産業の持続性に向けた提案を検討する。そのためまずモザンビークで実施されている諸施策を検討する。

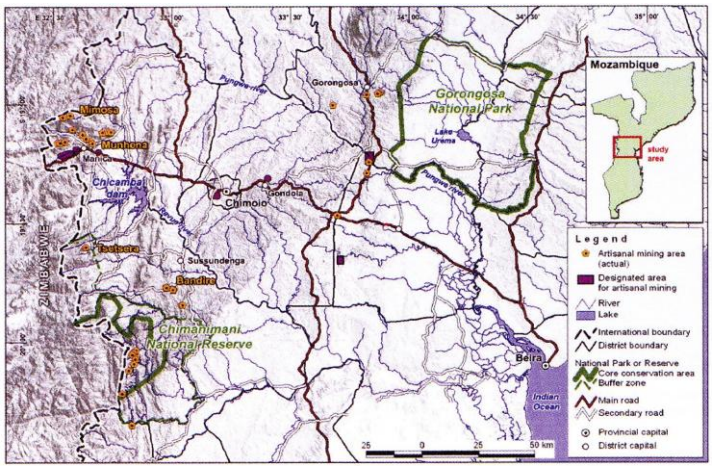


図3−8　モザンビーク内のASGMの所在地の分布[22]

モザンビークは金採掘に関しては歴史が浅く、20世紀末以降の開発になる。2009年度の生産量は480〜600kgと小さい[22]。近年新たに鉱床が発見され、2010年から2015年までは30%以上の伸び率が期待されている。全体で1.5トン/年までの成長が見込まれている。しかし一方では、現在minerは10万人、その関係者は120万人といわれている。また、乾季の季節労働が主体であるともされており、その実態が徐々に明らかにされつつある[15)22)]ものの、個々のASGM地域の内実は必ずしも分かっていない。今後モザンビークは鉱業の発展が見込まれており、政府の行政機能も周辺諸国より進んでいる[15)18)]国の一つと言われているので、水銀抑制や地域社会の創生を進めるにあたって、アフリカにおける起点効果になると考えられる。

図3−8はモザンビークのASGMの所在地を示している[22]。主には、①Manica、Munhena地域、②Sussundenga地域、③Chimanimani地域の三地域に分けられ、いずれも山岳地帯である。なお③Chimanimani 地域は国家管理地区に指定されており、採掘者が限定されている。①と③地域はManica州にあってZimbabweとの国境近くの山岳地に分散しているため、不法侵入や不法採掘も多い。また使用言語も43種はあると言われている。

モザンビークでは2002年に改正鉱業法、2003年に同規則が制定施行され、資源開発が加速している。特に石炭、天然ガス等エネルギー資源が豊かなことに加え、レアメタルの資源も豊かである。しかし金に関しては今世紀に入ってようやくゴールドラッシュを迎えることになった。

モザンビークは図 3−9[22]に示すように生産量の規模は小さく、企業ベースの開発が2005年に閉山した後、近年ではほぼ100%ASGMの生産が主になっている。図3−6でも示したように、モザンビークの年間生産量は1トン/年弱で小さいが、関与するminerが10万人、依存者が120万人と多く[15]、表3−1の中の依存者比率（dependents/miners）が多くの国で5〜6であるのに対して、モザンビークのみが12倍と極端に高いことが特徴である。

2009年政府はASGMの地域社会と地域経済の発展のために、田園部に開発拠点を作ること、特定指定区域を設け同国人の金採掘者のみに採掘パス（零細・小規模鉱業者ライセン

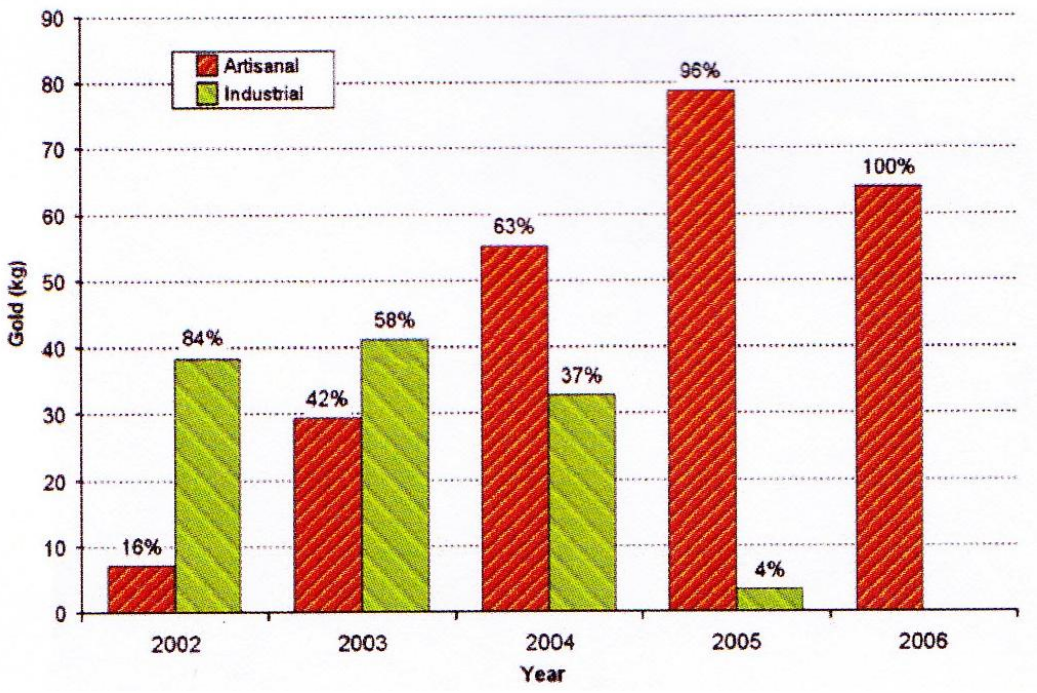


図３－９　モザンビーク Monica 地区の金鉱業様態の
2002 年から 2006 年の間の変化[22)]

ス；12 か月ごとの更新）を発行した上、資金の上でも鉱業基金を設置して支援することを政府目標としている[6)18)]。図３－10 は同国の小規模鉱業を管理支援する行政組織を抜粋してまとめたものである[22)]。現在 10 州に 62 の指定区域が設けられ、174 の採掘パスが公布されている。また登録鉱業者組合の数は 57 になり、6127 名が加盟している。このような中で環境測定や Zero Mercury に向けた取り組みも実践されている。鉱業基金はモザンビーク中部の零細・小規模鉱業の約 30%を支援していると言われている[6)18)]。モザンビーク政府の積極的な政策は功を奏しつつあるが、山岳部や国境近くの採掘現場は隣国ザンビアからの越境採掘者や違法採掘者が多く[22)]、管理が行き届いていない可能性が高い。

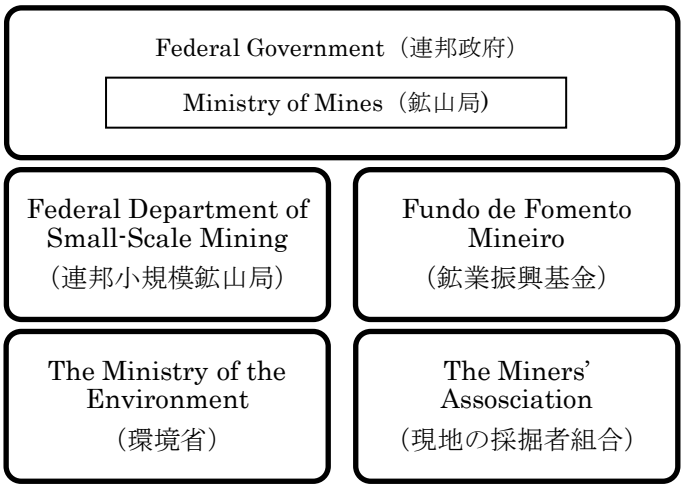


図３－10　モザンビークの ASGM に関する管理・支援機構[22)]（筆者作）

3－2　Zero Mercury の成功事例[3)23－24)]

モザンビーク行政当局のこのような取り組みは周辺諸国へも波及しているとみられている[3)]。そのため Zero Mercury に向けた取り組みも実現しやすく、その中にあって特に、Manica 地区にある

Clean Tech Mine の取り組みは単に金の採掘に限らず、鉱山地域の持続可能な社会造りの面でも際立ったケースであると言える[24]。UNEP でもこれを成功事例として扱っている[3][25]。その金の抽出の工程図を図 3 - 11[24]に示した。特徴は破砕・粉砕後の水洗鉱泥を遠心分離器とパン（pan；平鍋状のもの）によって重量物を分離し、乾燥後に磁選して鉄分を除去する方法で、最後に直接製錬法[25]により、硼砂で溶かして金と脈石を分離する。この方法で 89～93%純度の金が得られている。この純度が得られれば政府が買い取る仕組みになっている[24]。現在の生産規模は 1～2 トン/日の採石量であり、バッチ当たり 2～5kg をハンマーで砕き、ジョークラッシャー、ボールミルの順に粉砕されていく。この工程ではボールミルの粉砕が金の抽出に最も重要である。Clean Tech Mine 社の方式によって、採掘量トン当たり 30～33g の金が得られている。この値は、表 3－1 で示した日本の菱刈金鉱山の粗鉱品位に匹敵するほど高品位な鉱脈を持っていることになる。鉱石の分析も実施し、高品位の鉱脈を採掘するポリシーがあって、効率的な ASGM を実現していると言える。このプロセスが成功した理由として次の 3 点が挙げられている[24]。

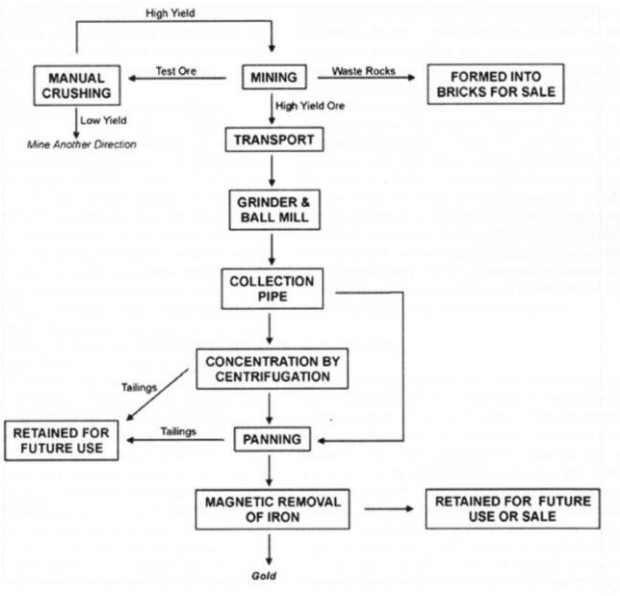


図 3－11　Clean Tech Mine 社の Zero Mercury プロセスの工程図[24]

１）鉱石品位に関して、この地域の鉱石は磁選し易い脈石が多く、高品位が得やすい。
２）miner 自身が所有する鉱山であり管理し易い。
３）古くからの善良な ASGM 事業者と言われており、周辺との独特の信頼関係が出来ている。

これらのことから、人間関係が最も重要な要素になることが推察される。なお、今日の Clean Tech Mine 社の操業の様子はビデオで見ることが出来る[26]。

3－3　ASGM 地域の再生を目指す新しい視点からの「乾式処理プロセス」の提案

本章では以上のようなモザンビークの実態を考慮した上に、次の視点から新たな「Zero Mercury」 への取り組みと、地元産業の雇用機会を考慮した地域創生のプログラムを検討した。方向としては世界各地の成功事例を参考にし、現地の詳細な調査と ASGM 従事者とのコミュニケーションを図りつつ、国際協力という次元で実践するものと考えている。そのためにもまず現地の徹底調査が必要である。そこで鍵となるのは適正規模とコストに見合う適正技術である。具体的には、政府、現地生産者等の中のキーマンと共有、共進する関係を築くことが最も重要である。まず人を得ることが先決であり、その上で地域内での共に考える教育活動を通じて共同化を進め、設備投資や分配の平等化を図るシステムの構築を目指す。ここでは適正規模が議論される。また、技術的な枠組みとしては、汚染土壌の修復、Zero Mercury の処理技術、地域産業の育成の 3 点である。

まず、従来の水銀汚染土壌の修復とその際の未回収で逸散した金と水銀の回収の可能性を検討する。このため現地の分析事例[27]等を参考にし、さらに当該地域の土壌の水銀、金分析を行いケミカルプロセスまたはバイオテクノロジーの適用性を検討する。

次に、乾式処理を前提として Zero Mercury の金採取方法を検討する。アフリカの乾燥地域の水資源の保護の観点から、乾式処理を新しいコンセプトとする。金の存在は概して硅石を主とする包摂鉱物の状態であるので、砕砂製造技術[28]を応用することを想起した。これは日本におけるコンクリート用細骨材である川砂の枯渇を打開する技術として開発されたものであって、良好な粗粒率を確保することを前提にしており、粉塵発生を抑制した機構になっている。しかし金抽出には細粉化が必要なことから簡単な比重分離ないしは気流分離方式と連動したシステムの「乾式処理プロセス」を提案する。

具体案の基本フローを図 3－14[16][29]に示した。一次クラッシャーで 10 ㎜以下にした後、この砕砂製造装置で微細化し、乾式のシェイキングテーブルで軽量物、中級重量物、重量物の 3 種類（軽、中、重）の鉱石粉に比重分離する。金の多い最重量物のみを磁選・水洗分離して、その沈殿物にホウ素酸化物を混合して溶解し、脈石と金を分離する方法（直接製錬法）で金を抽出する。上述のシェイキング分離工程には気流分級方式を導入するプロセスも考えられる。

一方、破砕機の能力は、Clean Tech Mine 社の処理能力 1～2 トン/日である[24]が、地域再生を目指す上では共同事業化が欠かせないと考えているので、共同化を目論んで最大 5 トン/時間とし、7～8 時間の昼間操業を前提に 30～40 トン/日の規模を考えた。

Clea Tech Mine 社の湿式処理との違いは、乾式の砕砂製造装置を使いシェイキングテーブルで乾式分離するところである。それぞれ一長一短あるが、乾式法ではまず水が節約さ

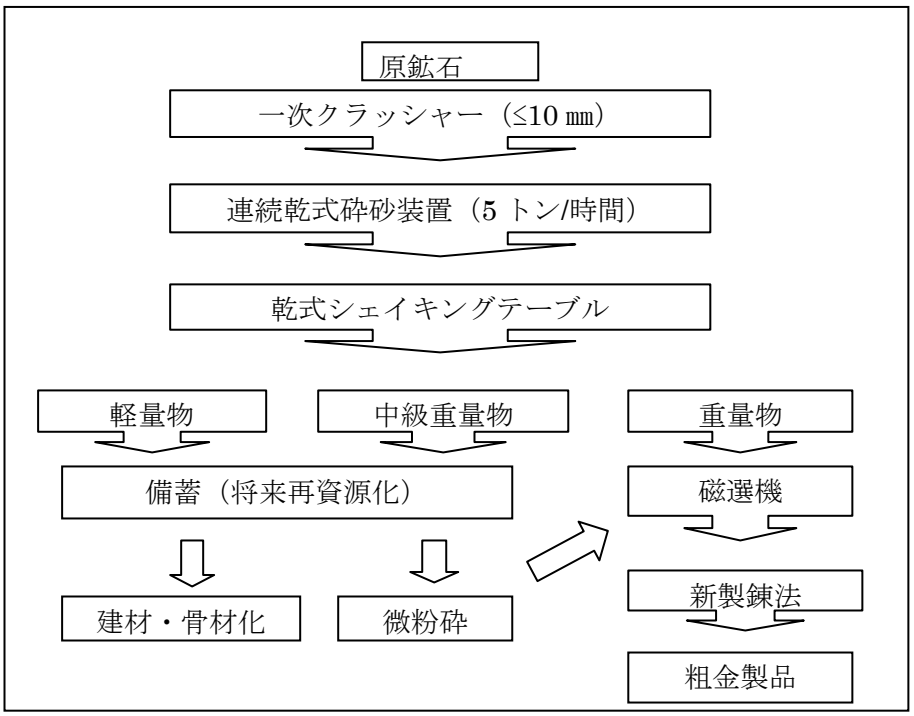


図 3－11　サブサハラの乾燥地域への提案プロセス（筆者作）

れること、および軽量物、中級重量物に分別された尾鉱を乾燥したまま保管できることに特徴がある。乾式の欠点である粉塵に関しては、砕砂製造装置そのものが微粉発生を抑制できる構造の粉砕方法であるので、発生量を抑えることが出来ると期待している。また資金的に可能であれば、気流分級との組合せによって循環型乾式プロセスに改造して、共同化による規模の拡大と収益の向上が期待される。いずれにしても、現地の多様な地質、気候の差異、水源との距離等金の生産に必要な諸元の入手のし易さ等を考慮して決めなければならない。さらに、共同化を進めるためには、ASGM の従事者の参画と理解が重要である。そのため、新しい施策の導入による新たな雇用を生み出し、収入源を補償出来る産業に育成して行く視点が肝要である。

この乾式分級処理で金を含む比重の大きい鉱石部分の量を少なくした後に、水洗選鉱および磁選を行う。この方式によって金粒の濃集を図るのが目標であるが、基本的には事前のパイロット実験が必要である。金粒を濃集した後、硼砂系フラックスによる直接製錬法[6]と組合せ、80～95%前後の純度の金（粗金）を得るのが乾式プロセスの目標である。なお、直接製錬法の代わりに水銀を用いないシアン化液によるケミカルリーチングも選択肢にある[30-31]。鉱床によっては水選鉱と磁選のみで金粒を採取することもできる[24]。

最後に、過去の尾鉱や「新プロセス」によって分別された廃鉱や軽比重物中の未回収の金を抽出することも視野に置いて、一時的に備蓄し回収用原料として保管しておく。その際分析手段を導入することは重要である。また抽出方法あるいは汚染土壌の修復のためにも、各種のバイオ、ファイトテクノロジーを応用することも検討に値する。したがって、廃鉱石の保管方法もその後の処理工程によって選択肢となる。

3－4　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，水銀の拡散形態によって，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[32-34]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。実践研究においては、現地の実態を調査してから具体案を検討することになる。ASGM 地域社会の持続性を確保する意味でも、汚染地の状況（山岳、河川、面積と水銀濃度）を把握することが重要な要素であり、バイオ、ファイトレメディエーションが適正技術と考えられれば、低コストで長期の雇用が可能な方法として推奨できる。現在水銀を吸収するファイトレメディエーションで有効とされるのは、葉タバコ[34]とトウモロコシ[35]等が研究ある。しかしいずれも遺伝子組み換え植物であり適用は簡単ではない。しかし先進国はじめたばこ規制[36]が拡大していく中、

---

[6] 直接製錬法；1970 年代にフィリピン北部ルソンの ASGM で発明された、Borax（硼砂）の金属酸化物を溶解する性質を利用する方法[3)25)]。

長期的に見てアフリカ地域のタバコ生産技術[37]の産業ノウハウを維持しつつ、それを応用、転用していく。収穫後はバイオエネルギーへの活用も視野に入れたプロセスを描き提案にする構想である。

（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 社[24]の場合も，本研究の乾式プロセスの場合も，廃鉱石を備蓄しておき、その後製錬するという視点に立てば検討するに値する。また前述したように、メキシコの旧サカテカス銀鉱山で実施しているケミカルリーチングによる水銀と銀のアマルガム回収方法が参考になる[38]。この方法は大量処理に適する。モザンビークのような産金量が少なく小規模の地域では、金回収を主目的とする低コストのバイオ抽出法が適していると考えられる。この方面の基礎研究は各方面で実施され、成果が得られつつある段階である[39]。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[40]

一部の水銀汚染土壌の処理方法として，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[41]。本論文では，こ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[42]の規定には，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[42]。

本章の目指す ASGM の適正技術、適正規模を論じる際に重要な点の一つは、次節（第 4 節）で取り上げる TMR の量と質である。大量の粗鉱石中のわずかな金粒子を肉眼で分離抽出する安価な技術を工夫することである。二点目は、第 1 章図 1－8 で議論した小規模事業における人的資源の活用である。つまり適正技術、適正規模を工夫できる知恵が必要である。三点目は適正規模を左右する地域社会の共同化であろう。そこで、その地域の持続性を考える場合に基本的に考慮すべき ASGM を取り巻く技術･環境問題について次に考察しておくことにした。

第 4 節　金の製錬技術と小規模金採掘現場の環境問題、健康被害および地域社会の持続性に関する考察

4－1　ASGM で生産される金「粗金」の価値

金の鉱石種や品位、粒度および製錬法と採収率に関しては第 1 章第 2 節で概説した。ここではまず、ASGM における製錬法を論じる前に、製品としての金の品位について現在の規格をまとめておく。従来から、金製品には純金および純金と純銀、純銅との組合せによる合金があり、それぞれ名称がつけられていた。例えば、24K は金純度が 99.99%以上のものであるし、この他に、金－銀―銅の合金として、宝飾品や電気・電子製品の素材として利

用されている。ただし金の含有量は、18K は 75.00％以上、14K は 58.33％以上とされていた。平成 24 年 4 月以降に受理した製品からは貴金属合金の品位（純度）を定める国際標準規格（ISO9202）および日本工業規格（JIS H6309）に従った表示となっている[43]。表 3－2 に従来の表示法と新しい表示法を要約して表示してある。ここでは純金は 99.99％以上の FINE GOLD を意味する。

一方、日本の金管理法[44]の定義によれば、「粗金」は金鉱物の製錬又は採取により得られる金を含有する地金（粗銅又は粗鉛からの電解澱物、青化澱物、混汞澱物及び貴船を「金鉱物」と言いこれらを除く。）であって、金の品位が千分中一以上九百九十九未満のものをいうことになっている。また「金地金」は、粗金の製錬によって得られる地金であって、金の品位が千分の九百九十九以上のものをいう。24K はこの中の 99.99％以上の品位のものを指し、これが「純金」であり電解製錬によって得られる。表 3－3 の各金製品は、金地金や純金と各種の純金属の合金である。

一般に ASGM における金の抽出方法は次の三種類に分けられる。①物理的方法のみで自然金を得る。②金含有鉱石を粉砕した後あるいは同時に、または尾鉱中の残存金をさらに採収するために、水銀あるいは青化液を使って化学的に金を抽出する。③ ②の方法の後半部分で、水銀法と青化法を連結して二段で採取する。

日本の金管理法の定義[44]では、①で得られる製品は「粗金」であり、②、③で得られるものは「金鉱物」になる。しかし本論文では、①から③の方法で得られるもの全て「粗金」と定義して論究している。そして、この粗金を電解精錬等の仕上げ精錬をして高純度（例えば 99.9％以上）の金地金にする工程を想定している。通常は ASGM で採取した金の品位は①では、80～95％であり、②と③の工程を経て、95％以上が得られる。そこで本論文では 95％前後の金採取物を「粗金」として、それを得る方法を念頭に置いて議論した。

本章 1－2 で議論した山金、砂金、尾鉱等に対して、上述の①～③の製錬法の組合せが工夫されて適用される。それぞれ金資源中の金の存在形態を知った上で「Zero Mercury」のプロセスを描かなければならない。その前提となる金の回収率は第 1 章 2－1 で既に議論したが、ここでは地質学の面から抽出製錬の方法を考察する。

まず、山金の金粒は粒小さく包摂鉱物中に分散しているので、事前に微粉にすることが必要である。このためボールミルを用いる場合が多いし、水銀法だけでなく青化法の組合せの製錬法が選択される。しかし得られる金粒の金品位は概して低い。つまり自然金やエレクトラムでは銀等の随伴元素の割合が高いのが普通である。企業による大規模金鉱山や随伴金の鉱業ではケミカルリーチング法の改良（例 CIP 法等）によって高い収率を上げられるようになってきたが、ASGM ではスキルと資金力が低いため金の回収率は最も低いものになっている。

一方砂金は、長期間の風化作用を受け山金がその二次濃集によって堆積または集積したもので、この間に不純物が溶出して金品位が高くなり、かつ金粒が大きくなっているケースが多い。古来砂金採取に鍋型の水選方法（panning）が用いられてきたのはそのためであるが、中には金塊（ナゲット）として回収されるものもある。

尾鉱等には大規模開発の廃鉱も含まれ、採掘費用が軽減されるので ASGM の対象資源になりやすい。砂金や尾鉱等から金を抽出する方法は湿式処理が一般的である。

世界の金資源の分布は、地質学的には山金は古代地層を起点としており、大規模な鉱床

は大深度鉱床として北米、ブラジル、南アフリカ等に偏在している。砂金は山金鉱床が風化して堆積したケースが多く、概して熱帯雨林地帯等の風化作用の強い地域に分散し、レアメタルの中では比較的偏在性が低い金属である。ASGM が世界各地に多く分散しているのはこのためである。サブサハラの ASGM は山金も砂金も対象になっている。

本章では、地質学的見地からはサブサハラの山金が対象であるが、技術的にはいずれの資源にも対応可能である。鍵は「乾式プロセス」の有効性に掛かっている。

表 3－3　金製品の名称と品位及び合金元素（筆者作）

製品名	新品に表示	従来の呼称	純金（%）	純銀	純銅
純金	999	24K	99.99%	－	－
金箔		23K	94.43%	4.90%	0.66%
	917	22K			
イエローゴールド	750	18K	75.00%	1	10.00%
ピンクゴールド	750	18K	75.00%	1	15.00%
グリーンゴールド	750	18K	75.00K	25.00%	－
レッドゴールド	750	18K	75.00%	－	25.00%
ホワイトゴールド	585	14K	58.33%	41.67%	－
その他	417	10K	41.60%	－	－
その他	375	9K	37.5%	－	－

4－2　ASGM の鉱害性（TMR の量）

上述の金採取工程で発生する環境影響について、先ず TMR の量の面から考察する。ASGM による環境負荷には、廃石や尾鉱といった ore-TMR の量と質に起因するものと、化学的抽出に用いた水銀や青化液の排出に起因するものがあげられる。前者に関しては山金の場合は現地で選鉱する場合と作業場へ運搬して後選鉱する場合がある。その際乾式か湿式かによって影響が異なる。いずれにしても土石の山になるか、河川の鉱泥として懸濁現象と底泥汚染に繋がる。結果として景観破壊や河川の生態系の劣化に影響する。表 1－1 から ore-TMR は金の含有量の 1.8×10^{6}倍と推定されるが、第 2 節で述べたように ASGM の miner が採掘する鉱石としては、金含有量が結果的に 5g/トン以上になるような高品位の鉱脈を狙って採掘すると想像されるが、測定技術を持たない miner の試掘量は大企業の場合より多いことも推察される。いずれにしても、ore-TMR は表 1－1 の推定値の金 1g に対して、全鉱石量は最低でも約 1.8 トン前後は見積もられることになる。

ここで、モザンビークの鉱業法[6)]にある ASGM に関する前述の条項に示されている数値から、現実的な TMR について考察する。この鉱業法では、第 1 章の 1－2 で定義した ore-TMR

に相当する土石量に関して、(1)～(3)の各条項では鉱床の種類に応じて最大の採掘(土石)量を規定している。そこで、土石の比重を2t/m³として(1)から(3)の採掘量を算出すると、それぞれ、3万トン/年、1万トン/年及び5000トン/年になる。また、作業日を雨季は除いて乾季のみの150日/年と仮定すると、日間採掘量は200トン、67トン及び35トンになる。モザンビークの現在の金の生産量は約1.5トンと推定されるので、表1－1から推定される年間総ore-TMRは270万トンになる。なお、直接作業者が10万人とされているので一人当たりでは、27トン/人・年の採掘量になって、上記の鉱業法に規定された採掘土石量内に保たれていることになる。表1－1から、粗鉱品位を1g/トンとするとore-TMRは1.8トンになるので、この制限内で10g/日以上の金を入手することが計算上は可能である。

4－3　製錬法のよる有害性(TMRの質)

もう一つはTMRの質(Ingredient)の問題である。前述の図3－5から求められるサブサハラの水銀を排出量は約229トン/年(2010年度)になる。この水銀はほとんど回収されることなく大気中や水圏に排出されている。水圏と土壌に関しては、水洗選鉱後の尾鉱に混じって排出された後、河川、水源、田畑の汚染に繋がっている。また、アマルガムの分解時には水銀蒸気の高い中で作業が行われている。さらにこの種の作業の多くが婦女子の労働に依存しており、健康被害が懸念されていることである。

次に、抽出用溶剤として用いる水銀や青化液の環境問題は、水銀そのものやその蒸気の吸引による直接被害に加えて、自然界の作用によって有機水銀に変化して、作業者や周囲の人の水銀中毒あるいは有機水銀中毒を誘発し、世代間障害にもつながる恐れがある点である。近年水銀法と青化法を連結した方法[30-31]で、金の採収を徹底する方法が拡大しつつある中、さらに有毒なシアン化水銀による汚染が重大な関心事になってきている[25]。

一方、水銀の添加量を決める分析手段がないため、過剰の水銀を混合する可能性がある。理論的な金アマルガム化合物はAu_2Hgであり、重量比はおよそAu：Hg＝2：1になるが、実際には水銀添加量は予想金量の数倍～10数倍添加されておりばらつきも大きい。一例を図3-13に示したが、最適添加量は3倍と言われている[45]。従って測定技術がない状況下では、常に過剰の水銀が使用されるのが現実である。水銀は各工程の工夫によって回収されリサイクル利用されている場合もあるが、回収水銀中の不純物の増加によって化学的活性が劣化して反応

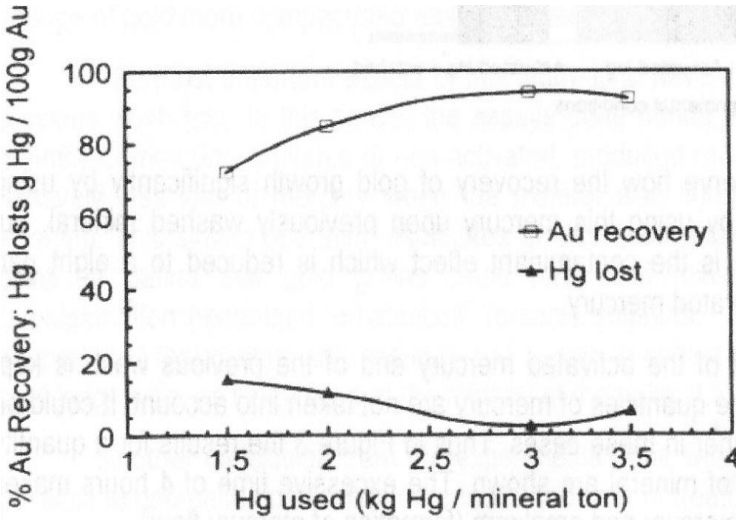


図3－13　金鉱石からの金の回収率、水銀ロスの及ぼす水銀添加量(Hg/Au)の影響[45)]

効率を低下させることも懸念されており、簡単な甦生技術も開発されている[45-46]。一方、各工程の排出水銀や青化液、またその反応生成物等が尾鉱と共に土壌汚染や河川汚染の原因となり、その中の有毒物質として危惧されているのである。このような環境汚染や健康被害の調査には、きめ細かいアプローチが欠かせない。

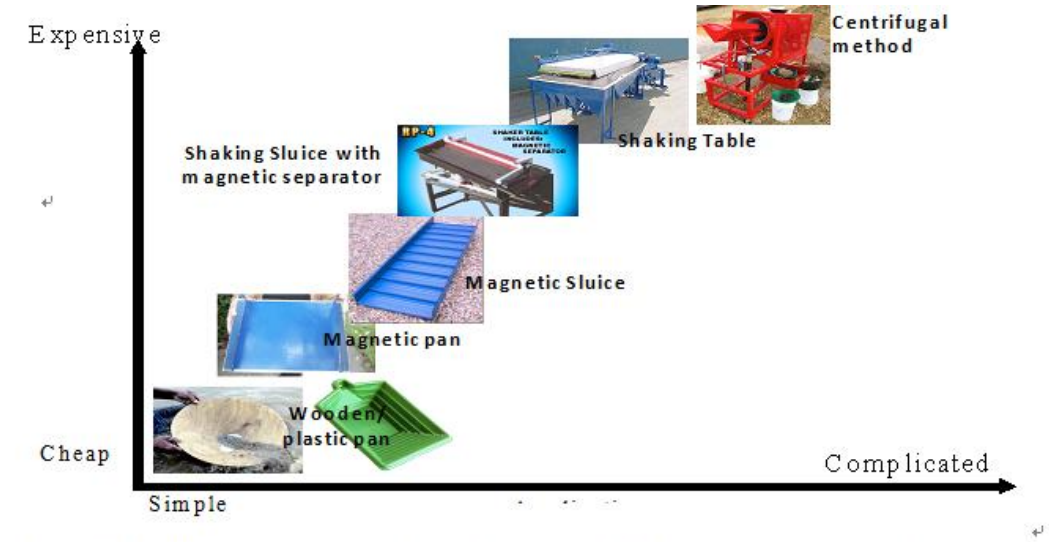
水銀に起因する健康被害の中で最も危惧されるのは、水俣病の原因でもあったメチル水銀による曝露と胎盤を介した乳幼児への影響である[47]。世界の小規模金採掘現場や魚を主用食材とする地域の住民の毛髪水銀調査が継続的かつ広範囲に実施されてきた。その結果魚を多食する地域においては、メチル水銀曝露による人への有害影響の現れる閾値が 1970 年当時から 2000 年にかけて二桁下がってきたことが報告されている[48]。一方小規模金採掘地域においても、人体の金属水銀濃度やメチル水銀の測定は行われており、高い数値を示す地域が多いが、水銀中毒による病像は多様であり、人体内の濃度と病状との関係性は必ずしも明白にはなっていない[49]。

加えて、土壌汚染や河川の汚染等による生態系の異変に関してはほとんど情報がない。これらの環境問題は、地域社会の生活圏の持続性を図る上で、事態の改善に向けての推進力にもなるので、現地調査に当たっては精密な観測が必要である。

4－4　ASGM の地域社会の生計上の持続性

次に、社会科学から ASGM の課題を考察する。表 3－1 で示した人々の地域社会において、ASGM は雇用と収入へのアクセス、および地域の社会経済との共生関係、行政や国の施策へのアクセス等の実態を把握する必要がある。図 1 - 8 で示したように、小規模採掘の資本構成は概して労働集約的であり、手作りによって設備投資を抑え、より簡素な工程で粗金を採取することが一般的である。図 3－14[3]に Zero Mercury プロセスの設備の技術レベルと設備費の関係を簡単に示したが、採収率をより向上させるためには、設備投資が必要になる。これらの支援を含めて、当該国の ASGM に対する鉱山法や行政府の取り組みが重要になる。さらに社会構造よっても地域社会の創生へのアプローチも異なる。鉱山従事者から見れば、採取した金の評価と収入の関係、それを左右する元請け企業と政府（税率）、採掘現場のパトロンの存在が最も重要な社会構造である。

ここでは一つの計算例を示して検証してみる[3]。その事例では、金 5kg を 1000 人の直接従事者（miner）が一週間で採掘した場合の miner の取り分（収入）を試算している。また、金の市場価格を 200,000 ドル/kg としており、バイヤーが 25,000 ドル、5 人のフィールドショップに 35,000 ドル、サイトボス（100 人）に 70,000 ドルが支払われる。残りの 70,000 ドルを 1000 人の miner で分配することになっており、miner 一人当たりの収入は 70 ドル/週（10 ドル/日・人）になる。これから水銀等の諸費用を引いたものが実質的な所得となる[3]。この試算の最大の問題は miner が 1000 人で 5kg/週の金を採掘するという仮定にある。5kg/週の金の採掘量は単純計算では 240kg/年になり、これはモザンビークの生産量の約半年分に相当する。また表 3-1 のモザンビークの直接採掘者 10 万人の半分の 5 万人が直接関与すること相当する。つまり ASGM 依存者が上記の計算前提の 50 倍になるので、実質収入が 1.4 ドル/日・人にしかならない。このように金による収入に対する分配構造と関わる人数が問題である。この点が実際の現場の実態調査を必要とする由縁である[12][22]。



Source: Ismawati, Y. (2011). Presentation: Technical Aspect. Conclusion Workshop National Strategic Planning on Artisanal and small-scale gold mining, Siem Reap, 22-24 March 2011.

図３－14　Zero Mercury プロセスの設備の技術レベルとコストの関係[3)]

第５節　本章のまとめ

本章では水銀条約の UNEP における採択を前後して、第 2 章のアマルガム法の現代版である ASGM における水銀使用量の削減と健康被害のリスクの低減を図りつつ、ASGM 地域の生活基盤の持続性を維持する方策について検討した。

まず ASGM の定義に基づいて、世界の金鉱業における ASGM に実態を把握し、近年の動向とサステイナビリティ学の視点から本研究の実践を目論む対象地域を導いた。その結果、ASGM の最新興国であるサブサハラ地域の、特に低 HDI 活最貧国における ASGM に注目し、モザンビークを起点とする案を構想した。

具体的には、モザンビークを含めたサブサハラの乾燥地域ないしは乾季に実施される ASGM に対して、水源確保と水量削減の目的を目論んで「乾式処理プロセス」を提起した。その特徴は、採鉱から分級までを乾式とし、その粉砕機に日本製の「砕砂製造装置」を適用することである。さらに分級工程を工夫することにより適正規模の選択も可能と考えている。粉砕・分級した金品位の高い部分のみ水洗選鉱し、その後磁選し、ホウ酸フラックスで直接製錬して金を分離する方法である。この乾式プロセスに関して、パイロット実験を実施して、分級工程を含めたシステムとして完成した上で、Zero Mercury への適用へ進める考えである。

次に、既に汚染された土壌の修復について、色々の角度から検討した。バイオ・ファイトレメヂエーションの適用の可能性も見えてきたが、遺伝子組み換え植物の利用の面で制約がある。一方、セメント系固化材の使用は技術的には可能であるが、適用する土壌、地盤の事前調査が必要である。

本章の論考は、第 2 章の水銀アマルガム法による銀製錬における鉱害性の文脈の延長線上にあって、ASGM を極めて現代的な水銀汚染源と捉えて論考した。そして実践に向けての予備調査から具体的提案として「乾式処理プロセス」を描く時点にきた。つまり、本論文では現代の ASGM の問題を避けて通れない課題であると位置付け、現在 ASGM 地域の Zero

Mercyry と地域社会の再生と持続性に向けて、実践への道筋を明らかにした。また、2－2で指摘したように、中国の ASGM[50]の実態と水銀生産の動向は今後注視していく必要がある。

【参　考　文　献】

1) 環境省：「水銀に関する水俣条約」の概要（平成 25 年 9 月）

2) OECD：紛争地域および高リスク地域からの鉱物の責任あるサプライチェーンのためのデュー・ディリジェンス・ガイダンスー金に関する補足書（仮訳）(2012)
www.oecd.org/daf/investment/mining
閲覧日　2014 年 12 月 20 日

3) United Nations Environment Programme(UNEP); Environment for Development Perspectives: Mercury Use in ASGM, Division of Industory, Trade and Environment(2011)

4) 谷口正次;メタル・ウオーズー中国が世界の鉱物資源を支配する、東洋経済新報社(2008)

5) Grid Arendal; Mercury Time to ACT, UNEP(2013)

6) (独法) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構；モザンビークの投資環境調査、(2012)

7) 山内睦文：地下資源の持続性と再生可能エネルギー、Journal of MMIJ,Vol.131,No.4(2015)

8) 増田悦佐：危機と金、東洋経済新報社 (2011)

9) Wong Wai Leong Eugene and Arun S. Mujumdar: Gold Extraction and Recovery Process, M3TC, National University of Singapor(2009)

10) Luis de Sousa; Peak Gold- Easier to Model than Peak Oil?- Part Ⅰ,The Oil Drum: Europe(2009)

12) 杉本有朋；ガリンペイロ（採金夫）体験記ーアマゾンのゴールドラッシュに飛び込んだ日本人移民、近代文芸社 (2010)

13) 鈴木規之；水銀条約の今後に関わる科学的知見、国立環境研究所 (2013)
www.env.go.jp/chemi/tmms/seminar/20130326/mat04.pdf
閲覧日 2014 年 11 月 3 日

14) 環境省：参考資料
www.env.go.jp/council/05hoken/y0512-05b/ref01_1.pdf
閲覧日　2015 年 3 月 15 日

15) Gavin Hilson; Four Decades of support for artificial and small-scale mining in sub-Saharan Africa: A critical review, The Extractive Industories and Society, 1,pp.104-118(2014)

16) 姉崎正治、三好恵真子：世界の小規模金採掘の実態並びに水銀ゼロ (Zero Mercury) を目指す自選研究への展望、OUFC(Osaka University on China)ブックレット、No.6,pp.203-215(2015)

17) 武内進一：紛争影響国にける国家建設ー「能力の罠」と「正当性の罠」、国際問題、

No.616,pp.19-31(2012 年 11 月)
18) 細井義隆；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 (2014)
19) (独) 国際協力機構 (JICA)：南アフリカ成長ベルト広域協力プログラム準備調査(ファイナルレポート)、(2010)
20) 清水裕末；アフリカのダイヤモンドと小規模採掘者の発展－紛争ダイヤモンドからの脱却と発展への挑戦、上智大学卒業論文 (2010)
21) 佐々木健吾：サステイナビリティはどのように評価されるのか－弱い持続可能性と強い持続可能性からの検討、名古屋学院大学論集　社会科学編、第 46 巻、第 3 号、pp.135-157(2010)
22) S.Dondeyne,E.Ndunguru et al:Artisanal mining in central Mozambique-Policy and environmental issues of concern,Resources Policy,34,pp.45-50(2009)
23)J.A.Shandro,M.M.VeigaR.Chouinaed:Reducing mercury pollution from ASGM in Munhena,Mozambique,J.of Cleaner Production,17,pp.525-532(2009)
24)K.Drace,A.M.Kiefer et al:Mercury free ASGM in Mozambique-Utilization of magnets to isolate gold at clean tec mine,J.of Cleaner Production,32,pp.88-95(2012)
25)UNEP: A Practical Guide-Reducing Mercury use in Artisanial and Small-gold Mining(2012)
26)Proserity: Illegal to Legal Gold Mining.
www.artisanalgold.org
閲覧日 2014 年 11 月 8 日
27)A.M.Kiefer,K.Drace et al:Evaluation of mercury content in amalgams from Munhena mine,Mozambique,J. of Cleaner Production ,33,pp.1-382013)
28)晃立工業(株)パンフレット;想像は破壊から始まる－乾式砕砂ユニット SUN(Sand Unit Novel)
http://www.koritsu.com/html/sun.html
閲覧日　2014 年 11 月 9 日
29) 姉崎正治、三好恵真子：水銀条約における小規模金採掘を巡る課題と水銀低減に向けた提案、第 42 回日本生活学会研究発表会、投稿済み (2015 年 5 月)
30) Marcello M. Veiga, Denise Nunes, Bern Klein et al.: Mill leaching- a valiable substitute for mercury amalgamation in the artificial gold mining sector? J. of Cleaner Production,vol.17,pp.1373-1381(2009)
31)Lars D. Hylander, David Plath, Conrado R. Miranda et al. ：Comparison of Different Gold Recovery Methods with Regard to Pollution Control and Efficiency, Clean,vol.35,No.1,pp.52-61(2007)
32) 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.
33) 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.
34) 芳生秀光；水銀耐性遺伝子の水銀浄化への応用、YAKYGAKU

ZASSHI,Vol.130,No.9,pp.1143-1156(2010)
35) S.TAKAHI, I. D. PRIHANBADA and D. UTAI; Research on recovery of soil pollution by mercury in gold mining by Sweet Sorghum in Wonogiri, Central Java, Indonesia, Memories Faculty of Education and Human Studies Akita University (National Science),No.66,pp.37-40(2013)
36)田中敏；たばこ規制をめぐる内外の動向、国立国会図書館　ISSUE,No.426 (2003)
37)日本たばこ産業株式会社；アフリカにおける JT グループのビジネス展開、JT グループ AFRICA (2013)
38)T. Ogura, J. Ramirez-Ortiz, Z. M. Arroyo-Villasenor et al; Zacatecas(Mexico) Companies Extract Hg From Surface Soil Contaminated by Ancient Mining Industries, Water, Air, and Soil Pollution,No.148,pp.167-177(2003)
39) 宮田直幸；微生物利用による資源金属回収技術の研究開発、
40) 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)』.
41) (独行) 日本学術振興会産業協力研究委員会鉱物新活用第 111 委員会、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：重金属類汚染対策のための鉱物材料ガイドブック、星雲社 (2012)
42) 環境省水・大気環境局：土壌汚染対策法の特定有害物質と基準値、土壌汚染対策法に基づく調査および措置に関するガイドライン改訂版 (2011)
43) (独法) 造幣局；貴金属製品の品位区分と証明記号 (2012)
44)　法務省；金管理法第 2 条(定義)、(2002)
45)Freddy Pantoja T., Ramon AlvarezR.；Decrease of Pollution by Mercury in Gold Mining in Latinamerica, Model Ⅳ Tecnology and Mine Closure, MineClrsure: Iberoamerican Experiences, Villas Boas & Maria Baretto, Editores, pp.178-190.
46) Gold Amalganation; (GMP)- Manual for Training Artificial and Small-scale Gold Miners,(Webpage)
www.artisanalmining.org/..../Pg53-89Ch5GoldAmalgamation.org/casn
閲覧日 2014 年 10 月 10 日
47) 佐藤洋；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 (2003)
48) 村田勝敏、嶽石美和子、岩田豊人：フェロー等における出生コホート研究、環境科学学会誌、vol.17,No.3,pp.169-180(2004)
49) 吉田稔、亀尾聡美、佐藤洋；小規模の金採掘鉱山における水銀汚染による健康影響の現状、八戸大学紀要、第 35 号、頁 81－86 (2007)
50) 金属鉱業事業団資源情報センター；中国の地質鉱床資料集 (3) －金・レアメタル (2)、地質解析委員会資料 (1990)

第４章　都市鉱山開発並びに使用済携帯電話のリサイクルシステムの構築

第１節　本章における研究の背景と目的

1−1　金属のリサイクル史における小型家電リサイクル制度の位置付け

第２章､第３章では地下資源の開発を扱ったが､本章では地上資源の開発が対象である。地上資源すなわちスクラップ回収は、戦後の鉄屑や銅屑の回収から重要性が増し、静脈産業を形成してきた。日本の高度成長期は自動車、大型家電を中心とする３Ｃの時代であり、コモンメタルの需要が急速に伸び、その商品開発速度が増大することで、商品サイクルが短縮された結果、使用済み製品の大量発生の時代になった。いわゆる大量生産、大量消費、大量廃棄の時代の始まりであり、現在もその渦中にある。ただし、20 世紀末になって最終処分場の確保が困難になりつつある中、循環型社会構築への政策転換が図られ、2001 年 1 月に日本版「循環型社会形成推進基本法」が施行された[1)]。次いで金属資源関連では、家電、自動車のリサイクルの法制化が整備された。併行して 2001 年 4 月から資源有効利用促進法が制定され、小型二次電池とパソコンが特定再資源化製品に指定され回収対象になったのである[2)]。その法体系の仕組みを図 4−1 にまとめた。ここには 2013 年 4 月に施行された「小型家電リサイクル制度」も含まれている。本課題に対する筆者の研究は 2009 年から開始しているが、同法の成立過程の各種調査段階から、国策と同時並行的に研究活動を行うことができたため、社会的要請のプロセスを踏まえることができ、実践的展開においても非常に重要なものとなった。

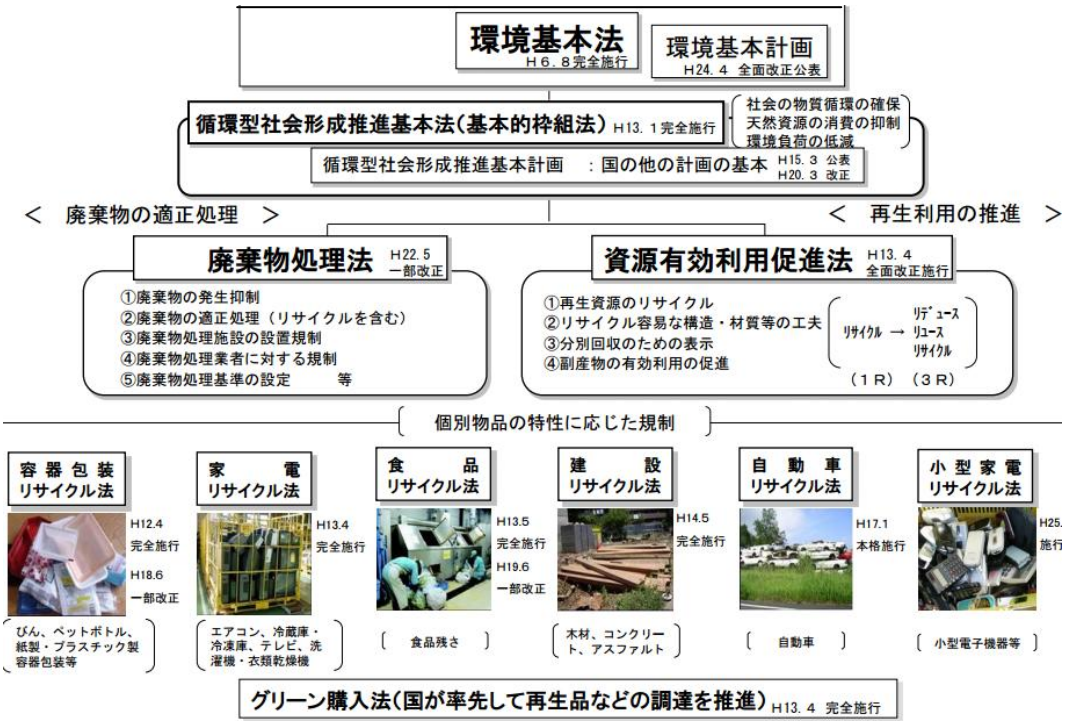


図 4−1　日本の資源循環型社会形成の法体系（環境省　2014）[1)]

21 世紀に入り商品が軽薄短小化すると共に、通信機器や電子・電気製品の機能の高度化に伴い、レアメタルの需要が急増することとなった。しかし、レアメタルを主軸とするリサイクルは、製品の拡散度合いが大きいことと、製品 1 個当たりの経済価値が小さいこと等から、リサイクルの採算性には難点があった。従来、廃自動車と使用済家電の回収においても、主には鉄、銅、鉛のベースメタルないしはコモンメタルの回収が主であり、その他のレアメタルの回収には消極的であった。それはスクラップ市場が形成されている鉄や銅とは異なり、レアメタルの製錬抽出過程において経済性が見出せなかったからである。これらの製品回収においては処理費として、図 4‐1 の制度上の対策は、廃自動車の場合は、前払い制であり、重量による新車価格の 1%程度、約 1.5 万円～2.5 万円が新車購入時に上乗せされる。廃家電製品の場合は、排出時に処理費（小物の約 3000 円代～大物の 6000 円代/台）が後払い制で請求される仕組みになっている。つまり外部費用の内部化が図られているのであるが、この費用ではレアメタルの回収にまで網羅するまでに至っていないのが実情である。したがって、上述以外の金属鉱種は焼却減量化後に産業廃棄物として最終処分場に送られていたため、最終処分場に低濃度で備蓄されているのが実態であるともいえる。さらに近年この最終処分場からの有害金属の溶出が懸念され、最終処分場の資源化も検討の俎上に乗りつつある[1)]。

一方、パソコンは平成 15 年月までは、同様に排出時に処理料（3000～4000 円/台）が請求されるシステムになっていたが、平成 15 年 10 月の改正によって、排出先を指定する条件のもとに無料化された。よって、その後の排出品の処理ルートは特化され、既存の非鉄製錬業で金属回収のために製錬される仕組みになっており、レアメタル回収ルートが確立している対象である。既存の製錬業では主に銅、亜鉛、鉛の精錬を行っているが、従来からそれぞれの製錬工程には鉱石中の随伴金属の処理、回収工程が開発されてきた上に、新資源に対する工程上のミスマッチの改善が行われ、微量の有用金属の抽出が可能になってきている。ただし、付加的費用の発生によって経済性の確保は課題として残っている。

そうした経緯を経て 2013 年 4 月に施行された小型家電リサイクル制度においては､回収費用の請求は含まれていない。この制度の主旨は「誰かに義務を課するのではなく、関係者の協力によって自主的に回収方法やリサイクルの実施方法を工夫しながら、それぞれの事情に合わせた形でリサイクルを実施する促進型の制度を目指す」とし、その将来展望は「出来るところから取り組みを開始し、回収率の向上を図りつつ徐々に品目、鉱種、地域を拡大させることが望ましい」とされている[3)]。従来の義務型とは異なり、人々の環境意識にゆだねるものであるがゆえに、制度の開始時点から、小型家電の回収が困難であることも予測されたため、促進上の仕掛けや工夫が求められ、各種実施されてきた。その最大の壁は、原田・醍醐[4)]によれば、①分散の壁、②廃棄物の壁、③コストの壁、④時代の壁の 4 つの壁があるとされている。①については、1 つ 1 つの製品は小さく、それが広く消費者に分散しており､集荷して価値のある鉱脈にすることへの困難である｡②については、製品中の金属鉱種が多いが、含有量が小さい上に、有害元素も含まれており、抽出後の廃棄物が有害物質になる可能性がある。③については、製品 1 個中の有価物の量が少なく、回収個数を確保しない限り事業化は困難である点である。④に関しては、易解体設計の時代にほど遠く、同一品位を前提とする大量処理のシステム化が困難である。

しかし、これらの分析課題には、逆に開発へのヒントも含まれている。細田[5)]の環境経

済学に従えば、バッズをグッズに変える仕組みやシステム上の工夫である。それは外部費用の内部化の問題であり、一方では税による公平負担の道（隠れたフロー化）に進もうとすることに対して、全く別な視点、例えば日常的に観察されながら、事象と目的が結びついていない現象を見出すことも一つである。本論文の意図もこの点にあって、営業や研究開発の「千三つの法則」の渦中における一つの挑戦でもある。このような取り組みも、小型家電の鉱脈が小規模鉱山であることに対するオルタナティブな選択肢と考えている。この考えは、第 3 章で考察してきた小規模金採掘における Zero Mercury への工夫と同じ次元の論理（第 1 章図 1 - 7）の小規模生産）として相通じるものである。

小型家電リサイクル法の制定に際し、環境省、経済産業省は各種の事前調査を行っているが、その中で幾通りかの費用効果のケーススタディも行っている[3)]。その結論を表 4－1 に示したが、回収工程は常に費用発生の工程であり、金属回収便益を小さくする結果となっている。この制度では、上述したようにこのような費用構成の打開策は示しておらず、実行者に委ねる形になっている。したがって、最大の壁は回収工程のマイナスの吸収の仕方にかかっており、その克服が本章の課題の一つでもある。なお製錬工程にはパソコン同様、既存の非鉄製錬業に金属回収を集約する姿が描かれている[3)]。

表 4 - 1　小型家電全体の回収率 30%想定時の収益・費用分析結果[3)]（筆者再集計）

ケース	ケース 1；貴金属回収＋その他副産物			ケース 2；基板、部品の分離設備投入		
工程区分	収益(B)円	費用(C)円	収益/費用	収益(B)円	費用(C)円	収益/費用
回収工程	313	528	0.59	313	528	0.59
中間処理	3,903	3,093	1.26	4,065	3,738	1.09
金属回収	3,949	3,732	1.06	5,032	4,755	1.06
合計	8,165	7,353	1.11	9,410	9,021	1.04

【注】中間処理の成果物の売却；鉄、Al 等。　金属回収；既存の非鉄製錬業者引取

1－2　地下資源から地上資源への資源の移動：携帯電話回収への挑戦

本章での研究では、前述のような「小型家電の回収における壁」の存在を前提とした上で、小規模鉱山からの金属回収業の実現の可能性の追求という方向付けを明確にし、その検討の中でいくつか逆転の発想を試みたものである。そこで小型家電の中にあって最も金属鉱種が多く、しかも貴金属でも高品位である使用済携帯電話（以後、携帯電話または携帯と略称）を研究対象として選定した。い

表 4 - 2　日本の各鉱種毎の総需要量と小型家電中の鉱種が占めるリサイクル規模および携帯電話とパソコンの寄与[6)]

		国内需要量（トン）	小型電気電子機器					
					携帯電話		パソコン	
			量(トン)	対内需	量(トン)	対内需	量(トン)	対内需
ベースメタル	鉄(Fe)	94,291,000	230,105	0.2%	418	0.0%	16,845	0.0%
	アルミニウム(Al)	4,002,000	24,708	0.6%	50	0.0%	3,914	0.1%
	銅(Cu)	1,763,000	22,789	1.3%	1,001	0.1%	2,730	0.2%
	鉛(Pb)	251,000	740	0.3%	19	0.0%	220	0.1%
	亜鉛(Zn)	489,000	649	0.1%	44	0.0%	70	0.0%
貴金属	銀(Ag)	1,870	68.9	3.7%	10.5	0.6%	21.1	1.1%
	金(Au)	166	10.6	6.4%	1.9	1.2%	4.5	2.7%
レアメタル	アンチモン(Sb)	7,666	117.5	1.5%	2.3	0.0%	43.5	0.6%
	タンタル(Ta)	360	33.8	9.4%	3.2	0.9%	14.9	4.1%
	タングステン(W)	4,000	33.0	0.8%	27.1	0.7%	1.1	0.0%
	ネオジム(Nd)	7,000	26.4	0.4%	18.9	0.3%	－	－
	コバルト(Co)	16,260	7.5	0.0%	2.2	0.0%	－	－
	ビスマス(Bi)	682	6.0	0.9%	0.7	0.1%	0.8	0.1%
	パラジウム(Pd)	131	4.0	3.1%	0.5	0.4%	2.1	1.6%

わば都市鉱山における小規模貴金属回収であり、これに成功すれば、その他の小型家電の回収の道が開けるという波及効果も主眼を置きつつ研究開発を進めた。

表 4－2[6]は日本の金属リサイクルにおける各種鉱種の量を示している。そのうち小型家電および携帯電話の占める割合も示している。全鉱種でその影響度は非常に小さいが、携帯電話に関しては、貴金属特に金、銀の寄与率は無視できない。図 4 - 2[7]は携帯電話の構造部品とその重量割合を示したものである。これからも明らかなように、およそ 60～70%がプラスチックであり、30～40%が金属類である。また金属の使用部位の一例を図 4 - 3[8]に示した。なお、図 4 - 4[9]に示すように、含有金属の価値構成では金が 95%を占めている。これらのことから、携帯電話の回収について事業化の見通しを立てることは重要な意義を持つと考え、それぞれの工程に独自の工夫を織り込んだ実践研究を行うことにした。

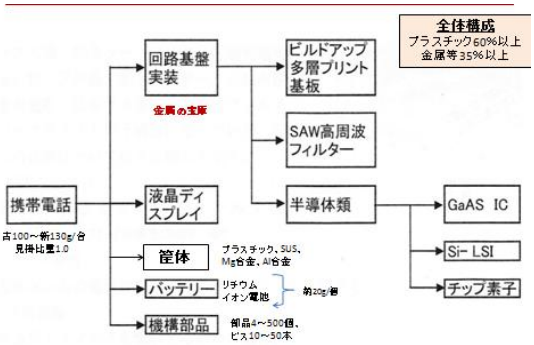


図 4 - 2　携帯電話の構造と構成[7]
者加筆）

携帯電話は人工鉱石の中で最も優良な鉱石であり、その中で「金」の回収を第一優先に捉えて収益性を確保することを目指した。その他の貴金属元素（銀、パラジウム、白金）は金の濃集化工程の中で回収率の確保を検討することにした。

ここで、携帯電話を事業性からみた場合の特徴を以下に整理する。

①1 個当たりの貴金属特に金の含有量が高く、採算源が得られやすい。

②固体としてプラスチックが構造母体であり、柔構造体である上に、金属類は半田、点溶接、装填等の方式であり破砕・分離し易い。

③形状と重量がほぼ一定であり、破砕機の設計がし易い。つまり形状と内部構成がほぼ世界共通であるということであり、一種の被破砕物における互換性要素を持っていると言える。

④国民に広く行き渡っており、鉱脈が人口密度に比例すると推定できる。そのため、回収率を上げる方法が描きやすい。日本の登録台数は 2010 年には 1 億台を超えている。このことは発展途上国、特に、地上電話のインフラが整備されていない国でさえ普及率が高く、本論文が狙っている技術の世界共通性の論拠となっ

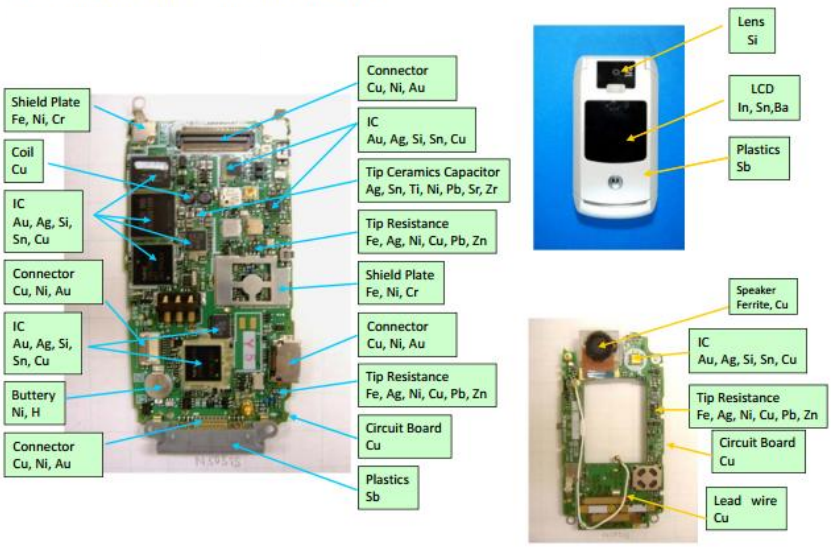


図 4 - 3　携帯電話の中の金属の使用部位の一例[8]

ている。

⑤鉱山規模の将来性は必ずしも楽観を許さない。携帯電話は商品開発のテンポが速く、急速に端末機能化が進んでいる結果、将来リサイクル向けの使用済製品の排出量が増加しない可能性が出てきている。つまり、スマートフォンやアイフォン等の端末化が急速に進んでいることから、携帯電話の回収事業に不安定な要素となる可能性がある。

⑥退蔵者へのアンケート(第1章図1－19)からは、携帯電話の都市鉱山は放置しておけば、退蔵から廃棄物化へ向かいやすい。つまり有害元素の溶出という環境問題につながる恐れがある。

⑦小型家電の中で、携帯電話のみが個人情報保護が必要かつ重要であり、回収工程の簡素化・単純化を阻害している。

これらの点は、本章での研究の独自性を生み出す上での論拠となっている。そこでまず、使用済携帯電話の都市鉱山規模を想定した。現在国内にあると推定されている退蔵携帯電話総数は2～3億台[10-11]とされ、金の含有率を 0.03%とした場合金の蓄積量は6トン～9トンで約30億円前後の価値があると評価されている。

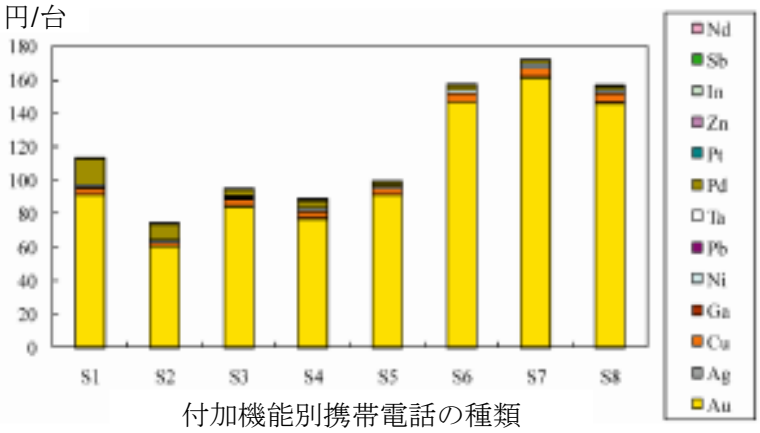


図4-4　各種機能付与別携帯電話の金属価値の累計[9]
(ただしAu2,300円/g、Ag30円/g;2009)

上記の量が採掘可能埋蔵量に相当する。そのため旧式で退蔵されているフィーチャーフォンが一般ごみ化し、廃棄される以前に回収することが、日本のレアメタル戦略上意味があると考え、回収を加速する方策に焦点を絞った。またその際、貴金属抽出後の残存金属は備蓄化し、その備蓄量の増加を図っておく方向が妥当であるとした。このため本章の目的を、処理費用を極小に抑制する回収方法と貴金属抽出技術を工夫し、バッズをグッズに変えていく仕組み（回収システム）を構築し、社会実証していくこととした。

1－3　実践研究の概要；内容と構成

本項では、以下の四点の課題に対する工夫と実践を掲げ、上述の使用済携帯電話の回収事業化の見通しと課題を整理した。

１）回収率の向上

最大の課題である回収率を上げる方法に関して、上述の④の考えに基づき、リサイクル制度において謳われている、実施方法の工夫による促進型回収に呼応するものとして、まず passive（待ちの）回収ではなく、active（攻めの）回収方法を実行することにした。具体的には「顧客接近型回収方法」と命名し、装置における工夫として、⑦の懸念を「安心」に変える足元、目の前破壊を前提に可搬式の破砕機を選択し、これを一次破砕工程と

位置付けた。また鉱脈としての人口密度を高めるために、各種の事前 PR を含めたイベント型回収を選択した。この方式で、大阪大学の学内で２回にわたり各１週間イベント回収を試行した。

２）金属抽出

第１章で述べた ore-TMR の観点から見て、使用済携帯電話は図４－5[9]に示すように、圧倒的に TMR は少なく、そのための処理コストは少なくて済むことを重視した。しかし、多

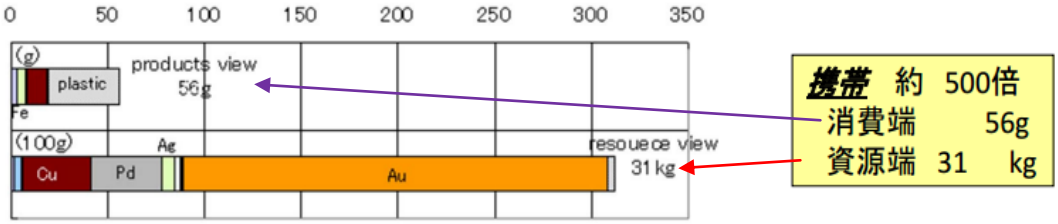


図４－5　携帯電話の消費端 TMR と資源端 TMR の比較[9]

数の鉱種（３０数元素）の混合物であるために目的金属の物理的濃集には高度な技術が必要となる。本章では第２章、第３章と同様に、金を第一優先とし、また銀等その他も 95%の粗製品までを前提として、物理的濃集と分離のみによる方法の限界を見定めることにし、上述の①、②、③に立脚した簡単な破砕機による濃集方法を開発した。これは従来ほとんど目を向けることがなかった家庭用ジューサーやミキサーでもあるカッティングブレードによる高速回転ミルに注目し、乾燥粉体の粉砕機の粉砕原理を応用したものである。本論文ではこのような粉砕機を、その機能に注目して「水平ブレード型高速カッティングミル」と呼称して、それを粉砕・濃集過程の二次破砕工程に位置付けた。なおこれと並行して、各種の破砕機器の組合せ実験を行い、ブレード型高速カッティングミルの粉砕原理を明らかにする実験を行った。

二次破砕の後、「鉄鋼環境基金」の支援に基づきシステムの一貫実証実験を行った[12]。図４－6 は、このような工夫を織り込んで本章の研究で描き出した回収システムの全体像である。ここでは小型家電全体を俯瞰するシステムを考慮しているが、本章の研究段階では、使用済携帯電話において実現性を主眼に置いている。

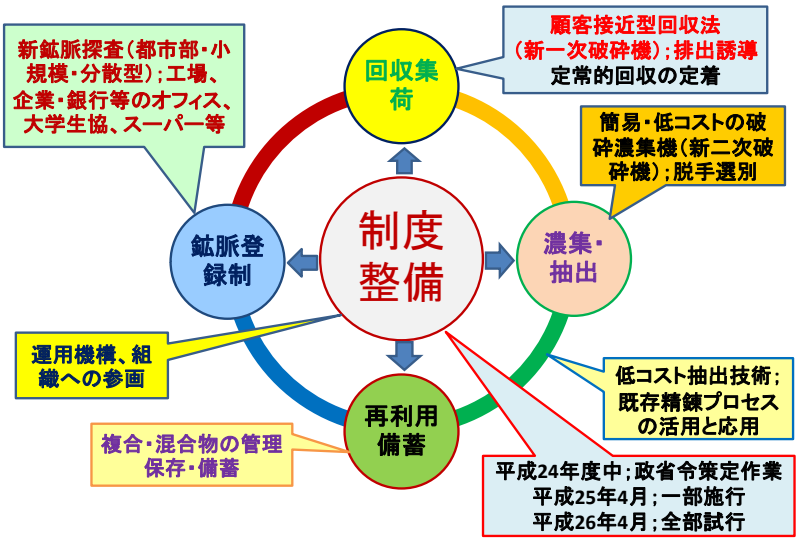


図４－6　使用済携帯電話リサイクルシステムの構想図[12]（筆者作）

３）システム化

図４－6 のシステムに基づき、一連の方法を一貫して実施し、国際規格品（英国 LBMA 認定、99.99%）の金の鋳塊を製造することにした。その上で、最適規模の事業化の可能性を検討する。また、本方式の持続可能性についても考察し、今後の取り組み内容をまとめた。

４）製錬法

本論文で問題にしている製錬法が Au-Ag-Hg 三元系を視野に置いている趣旨に従い、都市鉱山からの金、銀の回収における水銀法の可能性について予備実験を行っている。しかし、水銀条約の趣旨に即して、技術的には評価は封印することにした。

以上を踏まえ、上述した使用済携帯電話の回収システムの工程（以降、本研究プロセスと表記）の流れを図４-７に示している。これらを含めて、本章では次の内容に区分して社会科学的アプローチと工学的実験研究との両面から文理融合型の討究を詳述する。

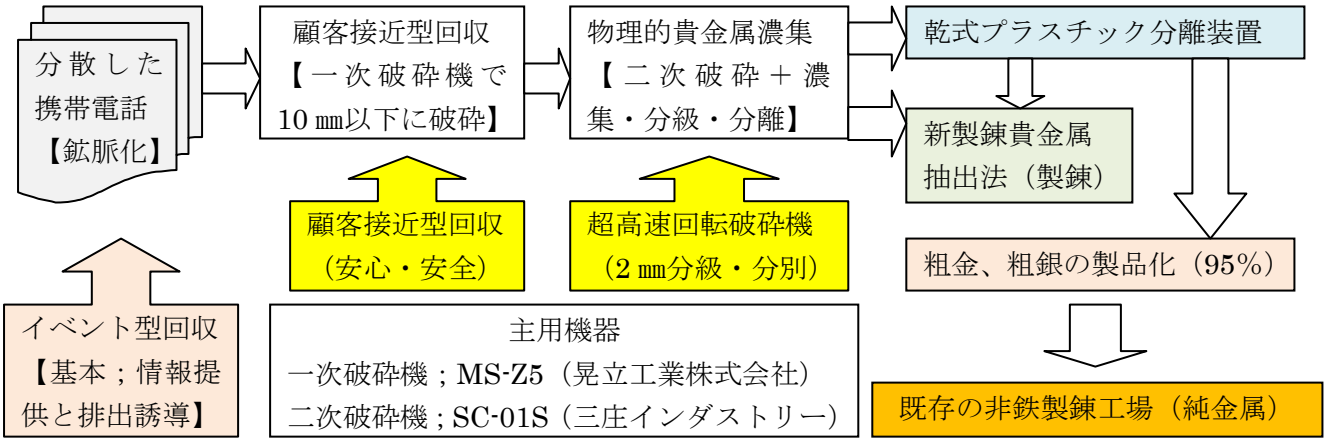


図４－7　本論文の第４章で想定している回収工程図（筆者作）

1－4　本章の構成

上述の中心的課題に関して次の３点に分けて第２節以降で論述する。

１）第２節；「顧客接近型回収方法」の工夫と実践

２回の学内回収イベント（『顧客接近型回収（アクティブ回収）』）を実施し、独自の回収効率向上策を展開する。

２）第３節；物理的破砕方法の組合せによる、貴金属濃集方法の開発と考察

一次および二次破砕機の組合せによる二段破砕法によって各種金属の濃集現象を発見し、設備の高度化を実現した。両破砕機の原理は高速回転のカッティングミルであるが、前者は連続式の水平軸方式、後者は回分式（バッチ式）の垂直軸方式である。ここでは粉砕と濃集の併進現象、粉砕の速度論、濃集金属の分離技術に関して実験と考察を行う。

３）第４節；貴金属の粗金・粗銀抽出までの一貫システムの実験と評価及び事業性の検討

貴金属を抽出する最終工程には、貴金属の回収を実施している貴金属専業精錬業者

と連動して、回収システムの一貫テストを試行、合わせて本システムのコスト試算を実施して事業化の可能性を検討する。

最終的には、本章の研究の成果を通じて、レアメタル全体の回収率を高めると共に、静脈産業の活性化に繋がる 技術の開発を目論んでいる。

第 2 節　「顧客接近型回収方法」の工夫と実践および結果の考察

本章で検討対象とした使用済携帯電話の回収方法を整理すると表 4 - 3 のようにまとめられる。分類上の最大の特徴の一つは、待ちの回収（passive）か、攻めの回収(active)かということになる。後者の要素はインセンティブの有無と個人情報の扱いに関係する。試行された各種のイベントの頻度は非常に多い。そこで、それらを集計して回収率（台/日・所）で整理することで差異を比較検討し、回収率を向上させる工夫へ繋げることにした。以下に表 4 - 3 の各方式の区分に従って回収結果について考察した。

表 4－3　使用済携帯電話の回収方法の本研究の意図を考慮した分類

区分（記号）	主体	記号	工夫の施策		協力団体	主な個人情報保護
			インセンティブ	広報		
待ちの回収（P）	官庁･自治体	P-1	無	有（大）	MRN	常設 BOX
	NPO－1	P-2	無	有（小）	契約店舗	常設 BOX
攻めの回収（A）	官庁･自治体	A-1	有（560 円/台）	有（大）	MRN	常設 BOX
	NPO－2	A-2	無	有（大）	催事場	持込 BOX
	本研究	A-3	有（100 円/台）	有（中）	生協、学生	破砕機

【注】記号 P;passive,A;active　広報；大、中、章の区分は影響範囲の相対比較

2－1　リサイクル制度の実施に際して官庁、自治体が実施した回収方式とその成果

環境省・経済産業省は本制度の制定前後で、表 4 - 3 に掲げるような各種の回収実験を行っている。自治体と MRN（Mobile Recycle Network）との協力事業では、携帯回収量は 1～2 台/日・所であった[13]。以後、回収率を台/日・所と定義して論議する。

一方、経済産業省が行った「たんすケータイあつめタイ」キャンペーン（H21 年 11 月 21 日から H22 年 2 月 28 日の約 3 ヵ月間）[14]では、全国の家電量販店 1886 店舗の協力の下に実施し、回収率は 3.02 台/日・店舗になったが、結果的に事業費は 560 円/台のインセンティブを提供していたことになった。これらの方法では、事前に広報を流し、特定場所に持参して BOX 回収をするもので、個人情報破壊への配慮としては販売店舗の管理に委ねられるものであった。この方法での費用対効果は、1 台当たりの資源価値は 138 円（内、金が 121.7 円、金価格は 3,150 円/g)、回収処理コストが 101.7 円（内、店頭人件費が 66.7 円、加工費 50 円）となり、それを差し引きして金属売却益が 36.3 円になった。しかし、損益分岐点を上回るには､携帯販売店約 13,000 店舗の内約 80%の参加を前提に､年間 1085 万台の回収が必要となる。その上で、シミュレーション上は事業に継続性の可能性はあると結論している[14]。ただし、この成果について 560 円/台のインセンティブ効果は言及さ

れていない。

2－2　NPOによる携帯回収と支援事業のジョイント効果

回収携帯電話の売却益を寄付の財源とする二つのNPOについて、その方法と成果の違いを分析した。前述の表4－3のP-2とA-2の比較である。それぞれパッシブとアクティブの事例である。

P-2[15]は京都市内の書店、医院と廃棄物処理工場の共同事業として、書店、医院に BOXを常設しておき、各種のイベントや広報を通して協力を呼び掛け、活動を広げている。主な活動拠点を京都市内において回収している。H22年からの4年間の各年毎の集約では、回収率は0.03～0.23台/日・所であった。

一方A-2[16]のNPOは、各種企業、国際支援団体等との共同事業として、年20数回場所を変えて、それぞれ1～2日間の短期間回収を実施している。H20年～H25年の催事1回あたりの回収率は20数台～80台/日・所で、非常に大きい回収率になっている。さらに、サッカー会場で行った2回の回収では、それぞれ281台と658台/日・所となった。いずれも金銭としてのインセンティブは無い条件下であった。

この二つのNPOの結果から、支援事業への協賛効果よりも、観客を狙ったイベント効果が大きいことが分かった。しかし、この二つのNPOは元来支援事業として各種のイベントを企画しており、このベースにある協賛効果は無視できない。むしろ、新たな価値観を生み出す可能性がある。つまり低開発国で行われているレアメタルの資源開発や小規模金採掘現場の、劣悪で貧困な状況改善への眼差しを、携帯電話の回収を通して醸成することの持つ意味が重要である。そして、「低開発国の資源とその貧困の上にたっての、先進国側の現在の文明の享受である」ことへの分析的関心を携帯電話回収への誘発にどのように繋げるかがカギになると考えている。本章の研究ではその可能性を求めて、現在 NPO　(P-2)との共同事業に着手しており、今後の展望に期待したい。

2－3　本論文の「顧客接近型回収方法」の内容と実践試行の結果及び効果の考察

顧客接近型回収方法の最も特徴とするところは、個人情報の保護のために、提供者の目の前、足元で10㎜以下に砕粉化することにある。これは各種のアンケートで明らかになっている退蔵理由の約60％が個人情報への不安にあったからである[13]。そこで、各種イベント会場へ可搬可能な小型破砕機を共同で開発した。これは晃立工業（株）が2009年に開発市販した、マルチメディア・クラッシャー：MS-Z5 を本章の研究用に一部改良した機種である。回収工程は基本的には期間限定のイベント回収である。これは使用済携帯電話の鉱脈に対する考えに基づくものである。つまり小型家電が既に鉱脈化しているのは、大規模企業や公官庁のオフィスであるし、新たな鉱脈化には大学構内やスーパーなど拡散したものが集中し易い場所になる。積極的な携帯電話回収はこのように鉱脈を作りながら、小さい鉱脈を掘り繋いでいくことになるとの見通しをもっている。

2－3－1　イベント内容と回収結果の概要

大阪大学学内2箇所（吹田キャンパス、豊中キャンパス）でH22年11月とH25年6月に各1週間、計2回イベント型回収を行った。ただし回収時間帯は吹田の場合10時～17

時であったが、豊中の場合は 10 時～15 時であった。2 回の回収の内容を比較して表 4－4 にまとめた。2 回のイベント回収の結果、平均回収率は吹田では 66 台/日・所、豊中では 22 台/日・所であった。これらは会場へのアクセス人口で見ると、2 か所とも約 1 台/10 人となり、事前広報の内容に関わらず、同じような排出傾向であった。このイベントのもう一つの特徴は、事業に協力した学生の積極的な現場宣伝力と説明力にあった。この中には口コミ効果も含まれている。この現場宣伝力は期間の後半になるほど回収率が向上したことで実証された。最終日の 5 日目にはそれぞれ 111 台/日、80 台/日の回収となった。この値は 2－2 項で述べた NPO （A-2）の回収力に迫るものであった。

この他大学特有の時間帯や冬と夏の季節要因等も影響していると考えられるが、本格的に事業化する場合には検討する必要がある。

表 4 - 4　大阪大学構内での携帯電話回収イベントの地域特性と広報、支援体制

回収イベント会場		吹田キャンパス	豊中キャンパス
回収期間		H22 年 11 月末(1 週間)	H25 年 6 月中旬（1 週間）
地区の特徴(日間人口動態)		工学部地区(9,000 人)	学部学生地区(10,000 人)
会場アクセス人口（人/日）		3000～3500	1000～1300
回収イベント開催場所		学生生協食堂前	福利会館生協前
開催時間		10 時～17 時	10 時～15 時
事前及び期間内広報		①Web 配信　②パンフレット 200 部教員へ配布　③授業時間前に公開実験(学生 130 名）　④関連授業内で講義（2 回、計 156 名）　⑤ポスター掲示(期間内)　⑥ゼミ学生の広報活動　⑦生協協力他	①Web 配信　②パンフレット 200 部生協展示　③関連授業内で講義(2 回、計 181 名)　④阪大学生環境サークル（GECS）での講演(学生 70 名)と協力要請　⑤ポスター掲示(事前、期間内)　⑥ゼミ学生の広報活動　⑦生協協力他
実行スタッフ		①研究室ゼミ学生　②授業学科、関連学部応援他	①研究室ゼミ学生　②学生環境サークル（GECS）所属学生　③関連学部応援他
景品提供(インセンティブ)		1 台 100 円相当品(生協対応)	1 台 100 円相当品(生協対応)
回収台数	合計	331 台	108 台
	平均	66 台	22 台
	最大回収	111 台	80 台

2－3－2　回収携帯の製造年から見た都市鉱山の特徴

写真 4 - 1 は、回収携帯をおよその形状別に分けたものと、破砕前に取り外した電池を並べて示したものである。製造年月は、装填されていた電池の記号から読み取った。読み取り率は 95%程であった。2 回のイベントと先行研究の 1 例[17]を含めて、図 4 - 8 に製造年

の分布を示した。3 例ともに分布のピークは回収時点の 4～6 年前になるベル形の分布をしている。回収場所、鉱山位置が異なるものの、Hubbert 曲線に近い鉱山形態（姿）を示したことになる。図4－8の結果から、第1節の携帯電話の選択理由の中の⑥項から推定して、排出可能な退蔵携帯電話の鉱山は、2007 年以前のフィーチャーフォン時代のものが対象になるものと推察された。これは 2－1 項で紹介した我が国のリサイクル制度が、既存の携帯電話販売店での買い替え時の回収を目論んでいる視点とは全く異なり、退蔵冬眠中の携帯電話の掘り起こしが急務であるとする本論文の論拠にもなっている。

なお、本章の研究で行った 2 回の回収イベントで回収された携帯電話の中には、スマートフォンは 1 台であり、その他の全てがフィーチャーフォンであった。

写真 4 - 1　大学内イベント回収で提供された各種の使用済携帯電話と内装の各種電池

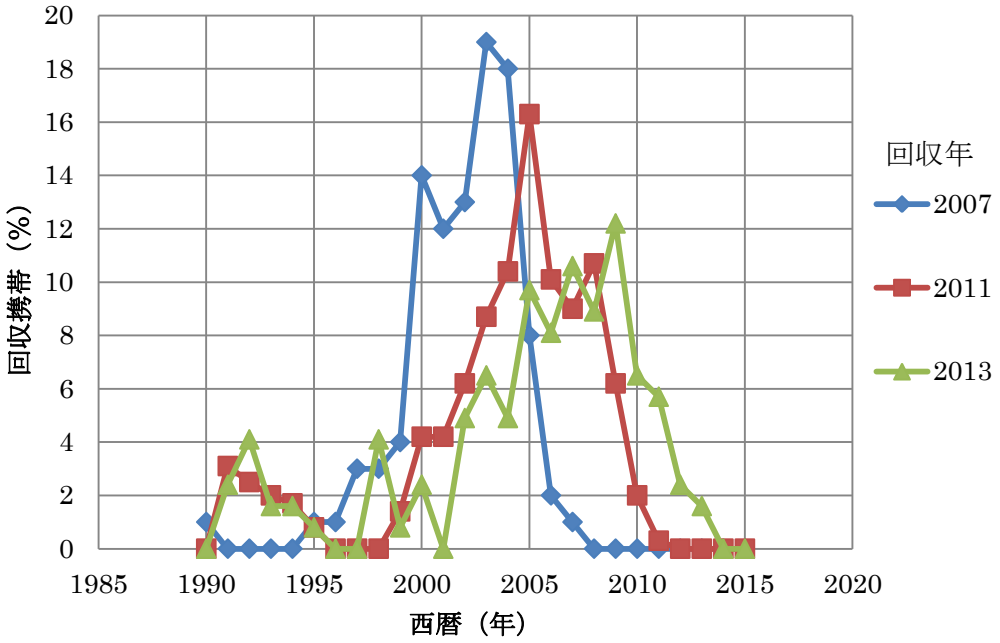


図４-８　３例の回収電話の製造年の分布（筆者作）

2－3－3　各種の回収方式の効果と各種要因の考察

図 4－9 は、これらの各種回収方式の回収率を図示したものである。ここでは、攻めの回収（active）と待ちの回収（passive）の他に、各種回収事業を詳細に精査して、インセンティブがある場合や、小型家電全体の回収の一部としての集計されたものか等の要素を入れて、再区分した結果である。また、学内回収の結果には平均値と最大値を入れてある。これは回収現場を通過した者の口コミ効果が大きかったと判断したからである。

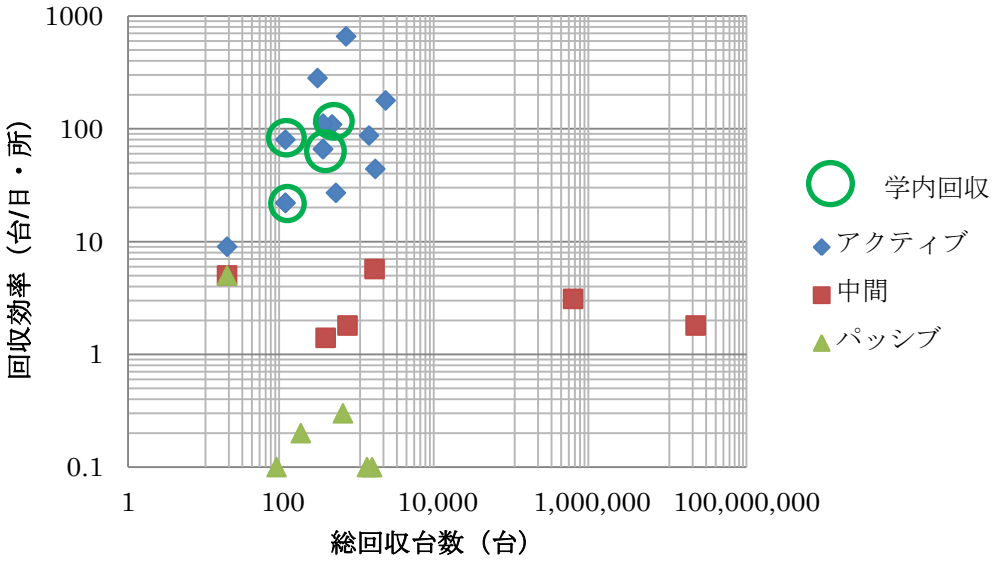


図４-９　各種回収方式と本研究方式による総回収台数と回収率の関係（筆者作成）

インセンティブ効果については、NPO（A-2）のイベント効果から必ずしも必要ではないものと考えられた。それは、経産省主催の A-1 では、560 円/台の投資の割に回収効率は中間のレベルにしか向上しなかったことにも関係している。本研究の 100 円/台のインセンティブ効果は、口コミ効果に作用していたと考えられる。したがって、インセンティブの大きさや内容に因らない可能性がある。現在検討している回収事業は、NPO（P-2）との共同事業であり、ここでは大々的なイベントと金属回収業との共同実験を想定し、NPO（P-2）自身の主目的であるアフリカ支援事業の企画要素を取り入れた内容を考えている。そのことで、NPO（P-2）の従来のやり方以上の成果が期待できるものと考えている。

なお本章の研究では、上記の 2 回のイベントで回収したものと、その他の協力提供を受けた携帯を合わせて約 550 台を第 3 節以降の実験に供した。

学内回収に先立ち、大学内での関連授業で都市鉱山開発関係の紹介や講義を実施し、授業後に半構造型のアンケートを実施した。主な項目を表 4－5 にまとめた。重要なことは、理工系と文系学生を満遍なく対象にしていたにも拘らず、都市鉱山開発や小型家電回収制度についての認知度が低かったことである。また、退蔵携帯保有数は一人当たり約 3 台であり、その 70%以上は排出に協力的な意向を持っていた点である。一方、回収に当たってインセンティブが必要との意向が強かった点および、退蔵携帯の排出時には約 70%の学生は個人情報処理がある方式を希望している点は重要な課題である。これらの結果をもとに、「顧客接近型回収方式」に協力できる採掘可能人口を推定したところ、約 50%の学生の排出協力が得られると評価した。しかし現実には、表 4 - 4 の学内イベントの結果から、アク

表 4 - 5　携帯回収の紹介授業時のアンケートおよび感想（筆者作成）

項目＼授業	リサイクル制度施行後		リサイクル制度施行前	
	H26年5月21日A	H25年10月23日B	H22年12月8日B	H22年11月9日B
解答学生合計;（系）男:女比	合計;65 （理系65）62:3	合計;111名 （文系20、理系91） 79:39	合計;45名 （文系34、理系11） 25:20	合計;101名 （理系）58:43
都市鉱山認知者（%）	27% （テレビ等で）	0 （初めて）	0 （初めて）	2% （初めて）
授業後の関心度（排出協力）	50～70% 回収に協力意志	17% 啓発された	78% 関心高めた	22% 関心高めた
小型家電リサイクル法認知学生（%）	18.5% （テレビ等で）	0.9% 低回収率へのリサイクル意識化		
退蔵携帯（台） 上;本人 中;知人 下;合計	67			
	117			
	184（2.8台/人）			
回収上インセンティブは必要	64.6% （廃携帯は作品！）		200円/台位	
重要意見	①リサイクル法は政治への無関心と同様、伝達が重要 ②積極的でない限り情報は入らない	①関心の誘発が必要	①広報と定期回収 ②回収目的明確化 ③MRNの熱意低い	①関心の誘発が必要

セス人口の約 10%が排出したことになり、排出誘導、誘発の動機づけが不足していたことが判明した。比較のため、図 4－9 で最も回収率の高かった、サッカーの試合と協賛したイベントでの回収率が 658 台/日・所であったことを精査した。
その結果、当日の入場者を約 1．5 万人に見積もっても、アクセス人口当たりの回収協力者は約 4.4%であり、動機づけ効果としては、本章の研究の学内回収の方が高かったことになった。この様な回収事業においても、営業や開発研究の経験的確率「千三つ」的工夫の重要性と不確かさが存在する。

2－3－4　顧客接近型回収方式の発展へ向けての課題

以上の結果を総括すると、短期間で回収効率を上げるための処方は、以下の４点にまとめられる。

１）排出誘導、誘発の動機づけは、最も重要な課題である。
２）携帯授受の場で行った個人情報処理に配慮する試み、「目の前、足元破砕」は有効である。
３）イベント会場でフェース・トゥ・フェースのコミュニケーションと、これによる口コミ効果が大きい。
４）期間中の活性化の工夫と常にアクティブな態度、営業・開発の経験則「千三つの法則」の壁を超える工夫が必要である。隠れたフローを集中的に顕在化することが重要である。

以上の諸点から、小型家電なかんずく携帯電話の回収における外部費用を低減し、かつ回収効率を上げて採算性のある事業化を可能にする道筋になると考察された。

第 3 節　二段破砕法による貴金属元素の濃集・分離機の開発およびそのメカニズムの考察

本節では、回収された携帯電話から、貴金属特に、金、銀を抽出するプロセスを論述する。それは図 4 - 7 に示した工程の中で、物理的破砕・分級工程で金、銀の 95%以上を濃集するという従来にない独創的な研究を目指すものである。そのため、ここでは 95%純度の粗金、粗銀製品までの工程を技術面および理論面から幅広く描くことにしている。そして第 4 節では、高純度の純金、純銀への一貫プロセス（本研究方式と命名）の実践研究とその成果を纏めている。

本節では、2009 年以来の研究および実験の成果[12)18-22)]を以下のように再構成しつつまとめた。

１）携帯電話の処理プロセスに関する同時進行中の研究（図 4－10）の評価、特に大和田方式[23)]と原田方式[4)]（両方式の内容の比較は 3－1）との比較
２）実用破砕機、粉砕機の選択と予備実験および市場の本研究目的に合致する開発機器への改造
３）本研究方式の核心技術である一次、二次破砕機との連動による粉砕中の金属鉱種の挙動と貴金属の濃集現象および粉砕の動力学的考察
４）濃縮部分の分離に関する 2～3 の実験的試み（同時分級、重液分級、飽和食塩水による分離等）とその意義

これらの結果を踏まえて、小規模携帯回収の事業性の検討とシステムの一貫実証実験に繋げていく。

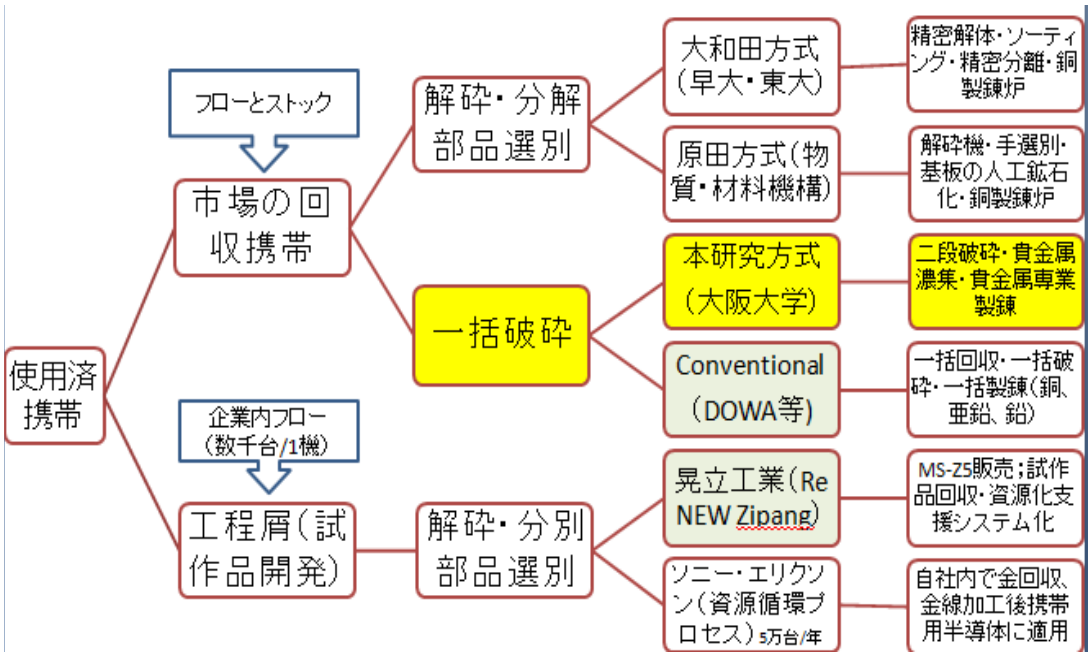


図 4－10　携帯電話から金属を回収する各種システムの分類（筆者作）

3－1　携帯電話の処理プロセスの先行研究と主な課題

本章の研究とほぼ時期を同じくして、使用済携帯電話を対象として金属回収プロセスの研究が多数行われていた。それを整理したものが図 4－10 であるが、ここでは図 4－7 で示した本研究方式と早稲田大学における研究（大和田方式と仮称）および（独行）物質・材料研究機構で行われている方法（原田方式と仮称）の三つのプロセスについて比較検討する。この三種の方式の主な要点を表 4 - 6 にまとめた。

本研究方式と他二つの方式との最も大きい違いとして、他は主要内装部品の回収を念頭に置いて、第 1 段階で解体分離する工程を入れ、その後分離した一部の部品（特に基板）を粉砕するという工程を取っている。これに対して、本研究では一括破砕・一括粉砕で貴金属を濃集させることを目指すものである。2－1 項で考察したように、携帯電話の回収事業の採算性にとって、加工費、人件費を縮減することがカギである。そのため本研究方式では、簡素、簡単な機器でかつ、再現性を重視した工程を想定した。なお、各プロセス共に、破砕前には蓄電池は除去することが原則である。

表４－６　携帯電話の破砕から金属回収までの主要プロセスの比較（筆者作成）

プロセスの仮称	研究開発母体	プロセスフローの概要
本研究方式	本研究（大阪大学）	携帯⇒一次破砕（10 ㎜>）⇒二次破砕（2 ㎜分級）⇒（2 ㎜>）⇒プラスチック分離⇒粗製錬⇒委託【仕上げ精錬】。　二次破砕（2 ㎜≤）⇒銅製錬又は備蓄
大和田方式	早稲田大学＋JOGMEC	携帯⇒一段パーツセパレーター（解砕）⇒二段パーツセパレーター（粉砕）⇒分別（2 ㎜>）、（2 ㎜～8 ㎜）、（8 ㎜～32 ㎜）⇒各粒度別磁選、静電、エディカレント等で選別⇒部品選別後⇒銅製錬
原田方式	物質・材料研究機構	携帯⇒小型電子機器破壊機（解砕）⇒手選別で部品回収⇒基板を三次元ボールミル破砕⇒躯体分離、粉体人工鉱石⇒湿式製錬（Co,Au,Cu 回収）

大和田方式[23]は、（独行）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（以降 JOGMEC と表記）を中心とする、小型家電からレアメタルを回収することを目的としたプロジェクト[17]の中にあって、より原形に近い部品の回収を目論んでいる。したがって、解砕工程に独自の解砕機を考案し、さらにその延長線上に電磁パルス粉砕等の開発導入の展望を視野においている。これは構成部品の単体分離を目指した「部品選別」を柱とするもので、インバース・マニファクチャリング時代に視点が置かれている点は評価される。しかし、高度なソーティングの設備投資が求められることが現時点では難点である。金属抽出に関しては、携帯中の含有元素を①特定機能素材部品への「濃集型元素」(W,Nd,Dy,Ta)、②少種類の構造素材への「濃集型元素」(Zn,Pd,Cr,Fe,Co)、③多種類の構造素材あるいは部品類の接点部に使用される「分散型元素」(Cu,Au,Pb,Ni,Ag) の 3 種類に分類した上で、③の「分散型元素」は「部品選別」というコンセプトには適さないことと、最終的に銅製錬で回収が可能であるとの考えから対象外とされている。この部品選別方式の狙いは、①の「濃集型元素」の回収に向けられている。部品の中では特に、タンタルコンデンサーの分別回収技術の開発を進めている。この大和田方式については、本研究方式の基礎的実験結果を論じる中で比較検討する。

一方、原田方式[4]は、小型電子機器をまず独自に開発した破壊機で同様に解砕した後、手選別で部品分別を行い、基板のみを新開発した三次元ボールミルで粉砕し、プラスチック等構造躯体を分離した後、粉の部分を人工鉱石として、湿式製錬によって金属（Co、Au、Cu 等）を抽出する工程を想定している。上述の破解機は本研究と同様に、可搬式の目の前、足元破砕機である。すでに茨城県つくば市においてこの方式を採用し実施している[4]。

本研究方式の独自のプロセスにおいては、一括破砕・粉砕の後、粉体側に貴金属特に金、銀、パラジウムが濃集する現象の発見に基づいて、粉砕中に連続分級して 2 ㎜以下を分離した後、プラスチック類を静電分離し、金属を更に濃化する。その後、Au-Ag-Hg 三元系の製錬を念頭にして 95％程度の粗金、粗銀までの製品にする工程の予備実験を行った。しかし実際には濃縮分離した後、貴金属専業において仕上げ精錬を委託し、国際基準の純金等に精錬する簡素な一貫システムを目論んでいる。この際便益の中心は金の回収にあると考

え、金の濃集、回収、製品化に重点を置いている。

なお、携帯電話の一括回収、一括破砕、一括既存製錬法で処理する方式は、環境省、経済産業省はじめ最も汎用されているシステムであるが、本章の研究では図 4－10 に示したように晃立工業（株）の「Re New Jipang」システム[24]とソニー・エリクソン・モーバイルコミュニケーション（株）の「資源循環プロセス」[25]に注目している。前者は工程内屑の回収システムとして現在も実施されているが、後者は 2008 年以降実験を行っていたが、2013 年 3 月以降事業性の検討に入っている。

3－2　実験用破砕機、粉砕機の選択と予備実験

本章の研究の主眼は、①顧客接近型で安心安全を保証すること、および②低コストプロセスで貴金属（第一優先は金、第二優先は銀、パラジウム、白金)、濃集を図ることの 2 点にある。①に関しては、携帯提供者の個人情報を保護する上で、それに適した破砕機の選択を行った。②に関しては、食品加工用のカッティングブレード型の高速回転ミルに着目し、全く新しい貴金属濃集装置の開発を目指した。

表 4 - 7 に予備実験を含めて用いた全ての破砕機をまとた。これらの中から、本研究に適する機器の原器として、一次破砕機には MS-Z5（晃立工業（株）製の連続式衝撃カッティングミル、以降 MS-Z5 と表記）を、また二次破砕機には SC-01（三庄インダストリー（株）製の回分式水平ブレード型高速カッティングミル）を採用した。なお後者に関しては、研究目的の条件を確保するため以下に述べる改造を施し、SC-01S（以降 SC-01S と表記）とした。

3－2－1　一次破砕機（MS-Z5）の選択と特徴

晃立工業（株）が 2009 年に開発発売した「マルチメディア・クラッシャー：MS-Z5」[24]は、小型家電の破壊を目論んだ連続式の破砕機で、主に工程屑を対象に前述の「Re New Jipang プロセス」と連動して発売を開始した。この場合、ロストル径は 35 ㎜φで解砕して、そのまま非鉄製錬の銅製錬工場に持ち込む方式の事業化を展開してきたものである。

表４－７　　予備実験を含めて実験に供した各種破砕機、粉砕機の仕様（筆者作）

実験区分	通称	製品名	製造会社	処理形式	回転数(rpm)	容器容量(ml)	羽及びブレードの形状他
一次破砕実験	マルチメディアクラッシャー	MS-Z5	晃立工業(株)	連続	非公開	非公開	非公開
二次破砕実験	ハンマークラッシャー	NH-34I	三圧インダストリー(株)	連続	3450	1940	ハンマー２本
	サニタリークラッシャー	SC-01	同上	バッチ	25000	1830	長短２枚クロスブレード
	遊星回転ポットミル	LP-01	（株）伊藤製作所	バッチ	Max460	525（1ポット式）	15φ鋼球30個内装
予備実験	調理用コンパクトミキサー	KC-4055	ツインバード工業（株）	バッチ	16700	500	クロスブレード
	コーヒーミル	MK-51M	National	バッチ	25500	90	シングルブレード
	調理用ジューサー	Magic Bullet	輸入品	バッチ	21500	750	クロスブレード

本章の研究ではＭＳ－Ｚ５を予備実験機に採用し、またロストル径を５㎜φと 10 ㎜φに変更して携帯電話の破砕を行い、破砕時間と金属の回収性及び再現性をテストした。その結果、10 ㎜φロストルの場合、携帯電話１台当たり 15 秒以内で安定して破砕できたが、5 ㎜φでは破砕室からの排出がスムーズにいかなかった。他方、電源が 100V でありかつ可搬式である上に、この MS-Z5 は米国のコンピュータセキュリティに関する「媒体のサニタイズに関するガイドライン」[26]の検査に適合した機種であるという利点も有している。よって 10 ㎜以下に破砕することで安全性は保証されるものとして、「顧客接近型回収」の足元破砕機に最適な機種と判断し、本実験で採用した。装置の外観は写真４－２の通りであり、縦 700㎜、横 500㎜、高さ 960㎜ で重量は約 150kg で車輪付きである。改造した点は、顧客の携帯投入口の安全性の確保およびロストルの交換と破砕中に磁性物を連続分離する機構等機械部分の改造、および磁性物の分離装置である。これは MS-Z5 原器の破砕室ロストル(面積の 1/4)を SUS304 化と、排出落下空間に磁石の吸着装置（金網と針金を吊るした簡易な付着装置）を取り付けたものである。なお本機器はダスト抑制型機構（同社のノーハウ）に基づく機器であるので、顧客接近型回収を行う場合のために小型集塵機を併設した。

写真４－２　晃立工業（株）製　MS-Z5

MS-Z5 による予備実験では、1 台当たり 15 秒程度で通過する破砕では、金属元素の鉱種ごとに特徴ある分布は発生しなかった。また、図 4 - 11 に示す通り、その粒度分布は再現性も非常に良かった。つまり粒度分布と成分の面でばらつきの発生しにくい破砕機であることが判明した。このようにして得られた MS-Z5 による一次破砕後の砕料は、二次破砕以降の各種の実験に適した性状の安定した砕料として扱うことが出来た。そこで写真 4 - 3 で示すように 10 ㎜以下の砕片を縮分分割操作を行った上で、二次破砕機の供試砕料とした。

なお、採用した一次、二次破砕機の粉砕と成分のばらつきに関しては 3－2－3 でまとめている。

写真 4 - 3　一次破砕砕片を二次破砕の試料にする縮分分割操作
（200g×10 個の試料を作る操作の例）

3－2－2　二次破砕機（SC-01）の採用と特徴

二次破砕機に関しては、次の二つの情報からの発想で、高速回転の水平ブレード式粉砕機の破砕機構に着目した。一つは古屋仲ら[27]の高速回転羽根と基板の衝突中の、金属剥離現象の観察結果から衝撃力の有効性に示唆を受けたこと、および 2 点目は、家庭用の湿式のジューサーやミキサーのような食品の裁断や流動現象の観察と乾燥食品にも適用されていることから、携帯電話のような柔軟構造物でも、簡単な乾式ブレードの高速回転によっても破砕が進行するものと想像できたことによる。つまり従来ほとんど研究されていなかった高速回転ブレードの効果に注目した。機器を調査した結

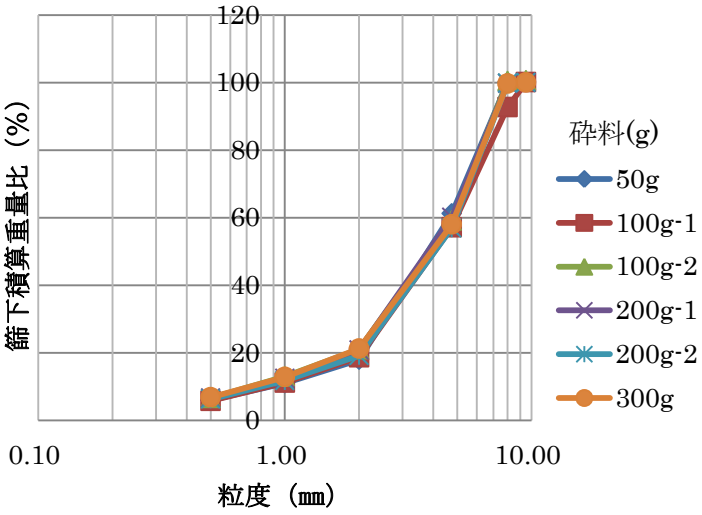


図 4－11　MS-Z5 の砕製物の粒度分析後の篩下積算重量比の分布曲線

果、三庄インダストリー（株）製SC-01（回転速度 25,000rpm）[28]で予備実験を行い、10秒以内の破砕で2㎜以下の粒度に金､銀が100%近く濃集できることを見出した。この発見に基づき、回転速度を可変型に改造した高速回転ミル（SC-01S）として採用した（写真4-4)。

この粉砕実験では､SC-01Sの軸回転速度を 25000rpm、19500rpm、10250rpm の三水準に固定して行った。以後H,M,Lの記号で示している場合は、上記の軸回転速度を表記しているものとする。なお、本実験で用いた全てのブレード式の粉砕機の軸回転速度は、デジタルタコメーター（電子通商社製ST-6234B）を用いて、無負荷状態で測定した値を表記し用いている。

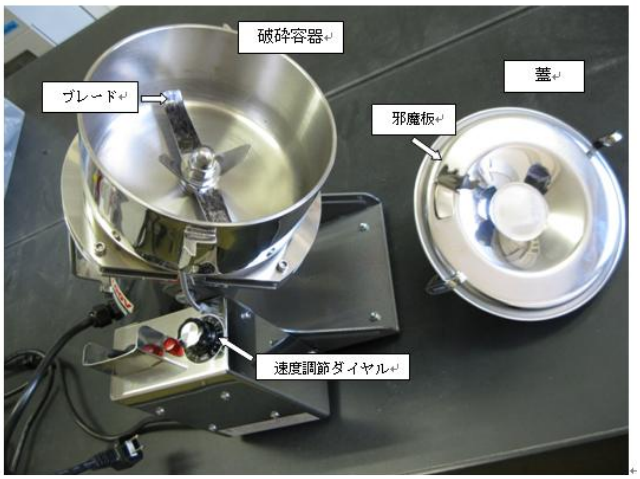


写真4-4　三庄インダストリー（株）製
SC-01S（内径168㎜φ）

3－2－3　ダストと付着した磁性物の量と成分

MS-Z5の集塵機ダストの量は破砕携帯台数26台の測定結果では0.4～0.7%であり､それぞれのICP分析の結果を表4-8に示した。金属成分は10%以下で、その他はプラスチックと考えられる。次に、破砕室の排出口下に設置した簡易磁性物付着除去装置に付着したものを磁性物として計量し、タンマン炉中アルゴン雰囲気下1550℃で溶解維持した後、るつぼ中で自然冷却し、その試料断面のEPMA分析した結果を表4-9にまとめた。なお、磁性物の量は約100台破砕後で1.11%であった。以上の結果からMS-Z5ではダスト発生抑制機構が有効に作用していたことおよび、磁性物は1%前後であり、その磁性物はFe-Nd-Pr系のものと推察された。

磁性物の除去は、リサイクル処理工程上必要であるし、本実験における篩分け作業に支障がなかったことにおいても必要であった。

表4－8　MS-Z5の破砕中のダスト発生量とその主要成分

破砕数	ダスト	Fe	Al	Cr	Ni	Cu	Ag	Au	合計(%)
6台	0.4%	4.13			0.38	1.62	0.095	0.003	6.23
20台	0.7%	4.04	3.03	0.16	0.27	1.81	0.0044	0.016	9.32

表 4-9　2 回の回収イベント中に磁性物除去装置に付着した磁性物の成分

イベント	Fe(%)	Cu(%)	Ni(%)	Cr(%)	C(%)	Co(%)	Mn(%)	Dy
豊中	87.1	2.0	2.4	2.6	1.09	1.4	0.22	-
吹田	86.9	2.3	2.8	2.0	0.90	1.9	0.19	-
イベント	Nd	Pr	B	Au	Pt	Ag	Pd	合計(%)
豊中	240	730	270	-	-	120	-	96.2
吹田	10	440	700	-	140	180	-	96.2

3－2－4　篩分け方法とそのばらつきの評価

MS-Z5 で一次破砕した砕製物の篩下積算重量比の粒度分布をすでに図 4－11 に示した。供試量は写真 4－3 の縮分方法で採取した 50～300gr の重量の砕片試料であるが,複数回の粉砕実験によっても粒度の偏析はほとんどなく、再現性が極めて高かった。粒度分析は JIS-Z 8801-1（試験用ふるい－第 1 部金属性網篩）の SUS 製篩 200φ×45h（0.5, 1.0, 2.0, 4.75, 8.0, 9.5mm）を用い、全て手篩で行った。なお、動力学的考察のために 0.25,0.15 mmを追加した。

本章では、粒度分布の表示は特に断りがない限り、篩下積算重量比（%）で表記した。また, 図 4－11 と同様に 17 回行った粒度分析調査の結果をもとに、篩作業までの実験のばらつきを統計的に計算して表 4－10 にまとめた。この結果、ばらつきの評価を積算重量の平均値、標準偏差および平均値に対する標準偏差の比で判断することにした。表 4－10 によれば、8 mm以上の粒度の大きい砕製物ではばらつきは大きいが、それ以下の粒度では平均値に対する標準偏差の比は 7～28%（n＝17）であった。このようなばらつき性状を持った砕料が二次破砕機 SC-01S の供試砕料である。

一方, SC-01S の粉砕後の粒度分析精度に関しては、供試砕料 100g を軸回転速度 25000 回/min で 60 秒間の粉砕実験を 4 回行い、大半が 4.75mm 以下の砕製物の粒度間の平均値に対する標準偏差を求め、その比を計算した。その結果、表 4－11 にまとめたように 4～5%（n＝4）であった。表 4－10 の砕製物のばらつきの比べ、SC-01S の粒度分析上のばらつきは小さく、積算重量比の時間変化等実験条件による差異が峻別された。

本章では、携帯の破砕実験を広義の粉砕操作として扱うが、砕製物を粒度の範囲ごとに以下の三区分に分けて呼称を統一した。

2 mm以上；粗粉（ただし, 最大寸法は 9.5mm である）

2 mm以下；細粉（ここには 0.5mm 以下の微粉も含まれる）

0.5mm 以下；微粉

表 4－10　MS-Z5 の破砕（50～400ｇ/回×17 回）後の砕製物の粒度別平均重量比と標準偏差

粒度範囲(mm)	9.5～8	8～4.75	4.75～2	2～1	1～0.5	0.5>
n数	17	17	17	17	17	17
平均重量比(%)	0.214	41.22	38.74	7.81	5.89	6.44
標準偏差(%)	0.203	4.23	2.71	1.14	1.54	1.78
標準偏差/平均値	0.949	0.103	0.070	0.146	0.262	0.276

表 4－11　SC-01S の粉砕（100g/回×4 回）の 60 秒後の砕製物粒度別平均値と標準偏差

粒度範囲(mm)		9.5～8	8～4.75	4.75～2	2～1	1～0.50	0.5>
実験番号	1	0	0.27	31.25	24.49	12.81	31.17
	2	0	3.21	33.48	20.67	10.72	31.39
	3	0	1.2	35.5	24	12	27.3
	4	0	1.74	34.03	20.92	12.08	31.23
平均値(%)		0	1.61	33.57	22.52	11.90	30.27
標準偏差(%)		0	1.07	1.53	1.74	0.75	1.72
標準偏差/平均値		―	0.664	0.045	0.077	0.063	0.057

3－2－5　金属成分の分析方法と問題点および評価用語（含有量，含有量比等）の定義

本章の研究では、貴金属の濃集挙動を調査することが目的である。しかし、携帯電話が多くの部品や素材の混合物であり、かつ複数のメーカーのものが混ざっている関係で、金属成分のばらつきが懸念された。そこで（１）では、本章で一貫して用いた金属の分析方法とその評価方法をまとめたが、分析上の諸問題については事前に検討し（２）にまとめた。

3－2－5－（1）　本論文の分析方法と評価用語の定義

MS-Z5 および SC-01S の砕製物は、粒度分析後粒度区分ごとに分析に供した。ここで、2mm 以下のものは粒度区分ごとにそのまま分析用試料とした。しかし、 2mm 以上の粗粉の場合は、粒度区分ごとにその量に応じて、 SC-01S で 1 分～3 分間再粉砕して 3mm 以下の粉体にしたものを分析に供した。一方、粒度分析をした砕製物の全量を分析用に供した。つまり得られた分析値は、電池を除去した後の携帯電話本体の含有率と同義である。

金属成分の分析は、大阪大学産業科学研究所リノベーションセンターに依頼した。検液の抽出には王水の塩酸 1M 過剰液（HNO_3 5ml＋HCl 15ml+HCl 15ml）を用い、140℃×60～90 分溶解後、ろ液を IPC 分析法（IPC 発光分光分析法；島津製作所 ICP－8100、以降 ICP 分析法と表記）で分析した。分析の供試量は 1 回あたり 0.5～5g であり、2～3 回

繰り返し分析をした上で、それらの平均値を分析値（%または ppm）とした。

本章では、2.3.2 で述べる事前検討の結果を踏まえて、上述の分析手順を一貫して用いることにした。

次に、粒度分析と成分分析の結果から粉砕性と成分の挙動を評価する指標として、粒度分布を篩下積算重量比（%）で示し、個々の粒度区間の重量比（%）は全積算重量との比（%）で評価した。一方貴金属成分については、各破砕条件での粒度区間ごとの分析値（%または ppm）とその重量（g）の積から、対象粒度区間の含有量（mg/kg）を求め、全粒度区間を合計した値をその砕料の全含有量（mg/kg）とした。濃集率や回収率は、全含有量（mg/kg）に対する対象粒度間の含有量の比（含有量比%）で定義される。なお銅の含有量（mg/kg）も比較のために同様に求めた。いずれも分析供試料の量を分母にした値である。したがって含有量（mg/kg）は携帯砕片全量に対する量を示している。

図 4-12 はこのようにして求めた銅の含有量（mg/kg×10^4）に対する金、銀、白金の含有量（mg/kg）を示したものである。パラジウムは分析数が少なく図示していないものを含めて 18 点の平均値は 41mg/kg であった。銅を含めて 5 元素ともに含有量のばらつきは大きかった。なお、表 4－12 に図 4-12 の貴金属四元素の平均値と標準偏差および標準偏差/平均値（－）の数値をまとめ、ばらつきを評価した。

また表 4-13 は、本章の各種に実験で得られた携帯一台当たりの各種金属鉱種の含有量の平均値（%）を纏めたものである。これらの値は JOGMEC の調査結果[17]のばらつきの範囲内にある。

表 4－12　MS-Z5 砕製物の貴金属四元素の含有量とばらつき評価（n＝18～29）

貴金属鉱種		Au（mg/kg）	Ag（mg/kg）	Pd（mg/kg）	Pt（mg/kg）
計算結果	平均値	236	458	41	156
	（n）	(29)	(28)	(18)	(29)
	標準偏差σ	111	139	20	56
	σ/平均値	0.470	0.303	0.49	0.359

表 4 - 13　回収携帯電話の各種実験後の 1 台当たり金属元素の平均含有率（筆者作）

Li	Be	Mg	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Al
0.0006	0.0044	3.75	0.15	0.0085	1.47	9.61	0.0293	0.77	17.02	1.20	0.0928	1.02
Ca	**Sr**	**Y**	**Zr**	**Nb**	**Mo**	**Pd**	**Ag**	**Cd**	**In**	**Sn**	**Sb**	**Si**
0.54	0.0231	0.0043	0.0020	(0.387)	0.0323	0.0043	0.0327	0.0001 >	-	1.08	0.0209	0.0590
Ba	**La**	**Bi**	**Ir**	**Dy**	**Ta**	**W**	**Pt**	**Au**	**Hg**	**Pb**	**Ru**	**As**
0.3675	0.0300	(0.015)		0.0023	(0.259)	0.0468	0.0155	0.0414	0.0001 >	0.1875	(0.005)	0.0030

3－2－5－4（2）　携帯砕製物を一括分析する場合の課題と事前調査

同じ電子機器でも、パソコンの場合は事前に解体して、小部品にしてから分析操作に入り、それらを積算する方法が取られる。一方、携帯電話のような小さな複合体であっても砕料を分析する場合、一括して分析することは難しく、それなりの工程が必要であると言われている[29]。本章では、以下の懸念される点に関して事前検討し、分析上の課題を整理した[22]。

（a）粒度の大きい砕製物の分析前の再粉砕は、SC-01S の H 条件下で粉砕時間を変えた実験後の元素分析の結果に基づき、粒度区分とその量によって再粉砕時間を 1～3 分とした。

（b）量的に多いプラスチックの弊害に対する処置として、分析試料の採取前にマスコット除電器（理研精工（株）製）で静電気除去の処理を行った。また、酸溶解中は、王水の比重に対してプラスチックは比重が小さく浮上し易いので適時撹拌した。一方、このことによって､金属粉が付着浮上して酸不溶解残渣側に移行することが懸念さられた｡そこで、二次破砕後の砕料 100g を軸回転速度 H で 30 秒粉砕した後の粗粉側の大小 2 つの粒度区分（8 ㎜－5 ㎜，5 ㎜－2 ㎜）の砕製物を、SC-01S で 60 秒から 150 秒の間、時間を変えて再粉砕し、その砕製物の全量を分析試料として白金他の ICP 分析を行った。しかし、白金を含めて特に変わった挙動は観察されなかった。

さらに、プラスチックの量に関して、上述の酸不溶解残渣を定量し、分析供試料に対する比（%）として評価した。これは 100～400g の砕料を軸回転速度 H の条件で 6～50 秒粉砕した後、0.5mm 以下、0.5～2 ㎜、2 ㎜～9.5 ㎜の三粒度区分に分けて、酸不溶解残渣を測定し、それぞれ約 67%、60%、50%の値を得た[12]。概して SC-01S 粉砕後の微粉側に酸不溶解残渣の量が多かった。これらは粉砕速度過程を考える場合重要な要因であると考えている。

(c) 本実験で採用している王水の塩酸 1M 過剰抽出液と貴金属四元素の溶解性について事前検討した。まず、経済的観点から金が最も重要な元素であるが、図 4-12 の金の全含有量の値 350～650mg/kg は、高橋ら[8]の携帯 136 台分の分析結果である金の平均 0.04%（400mg/kg）と大きく異なっていない事、およびそのばらつきについても、装填されている機能や部品の種類・量により、また、製造年による装填部品によるばらつきが大きいことも指摘されている。したがって、本実験で得られた含有量とそのばらつきは、前述の図 4-8 で示したように回収携帯の製造年月の幅が大きいことから、図 4-12 の値およびばらつ

きをほぼ妥当なものと捉えることとした。このことは、本実験の含有量の値が JOGMEC の測定値[06]のばらつきの範囲内であることからも妥当な値であると考えている。

一方、銀は王水に対する過剰塩酸の量によっては、塩化銀として不溶解残渣中に入る可能性も指摘されており、銀の分析方法に関しては工夫が必要である[29-30]と言われている。そこで、得られた含有量 250～600mg/kg に対する不溶解残渣中の残存量の比率を推定する実験を行った。その検液抽出法は四ホウ酸リチウム（以下 Li2B4O7 と表記）による融解法[31]である。予備実験では、SC-01S の砕製物の二例について、塩酸を 2 倍量以上にした強酸（HNO_3 3.5ml+HCl 30ml+HCl 30ml）で溶解し、ICP 分析で銀（sol.Ag）を得た後，濾過残渣を乾燥後炭・灰化して $Li_2B_4O_7$ で溶融し、その後温硝酸水で検液を抽出して ICP 分析に供し、残渣中の銀（insol.Ag）を定量して全銀含有量（total.Ag）を求めた。その結果この方法による total.Ag に対して残渣中の insol.Ag はほぼ 10%であった。このことから、本実験の統一法による銀分析値に対しては少なくとも total.Ag は約 10%以上前後高い値になる可能性も推察された。しかしこの銀の分析上の問題はあるものの塩酸 1M 過剰の王水で抽出する方法に統一した。

白金とパラジウムに関しては、上述のような温王水には容易に溶解すると言われているので、前述の王水の 1M 過剰塩酸水で検液を抽出する方法の値を用いた。

一方、分析試料を王水で溶解する際、白金がプラスチック類に付着して浮上することが懸念されたので、H の条件で 100g を 30 秒粉砕した砕製物の粗粉側の大小 2 つの粒度区分（8 ㎜～4.75 ㎜，4.75 ㎜～2 ㎜）の砕片を、SC-01S で 60～150 秒間再粉砕し、その砕製物の全量を分析試料として白金他の ICP 分析を行った。しかし，前述のとおり白金の含有量は再粉砕前後で変化しなかった。

この他、携帯砕料の中にはパラジウムを全く含有していないものもあったので、濃集現象の評価には含有していたケースのみを対象とした。そのため n 数が他の元素より少なくなった。

3－3　二次破砕の高速回転ミルによる破砕の進行と貴金属濃集現象の発見[21-22]

3－3－1　粉砕過程の詳細実験

SC-01S を用いて携帯砕片の供試量 100g を、3 水準の軸回転速度 H、M、L で実験を行った。回分式であるため、供試砕料と粉砕時間 5 秒、15 秒、30 秒、45 秒、60 秒、75 秒、180 秒、300 秒、480 秒毎の実験後に粒度分析を行った。また、60 秒までの全数および 480 秒後の砕製物の粒度毎の金属分析を行った。なお、携

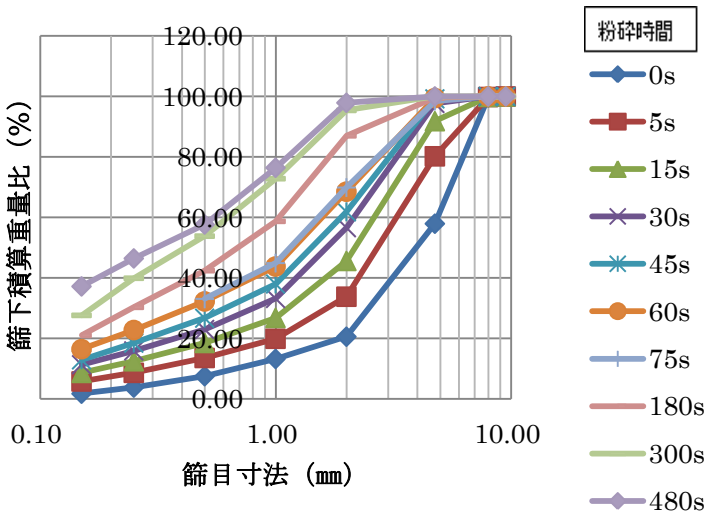
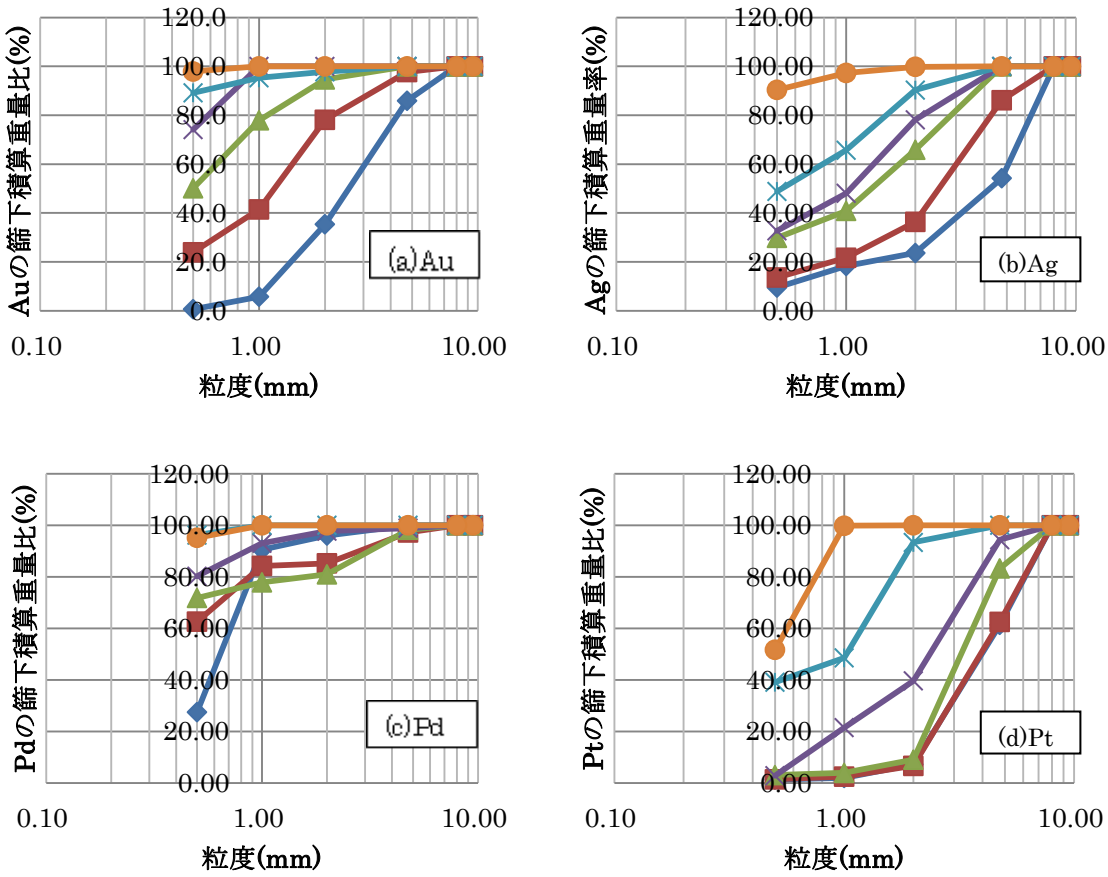


図 4-13　携帯砕料 100g の SC-01S（軸回転速度 H）の粉砕過程における篩下積算重量比の粒度分布の変化

帯砕片の充填密度は実測により 1.85cc/g であり、携帯砕片 100g を SC-01S に装填した時の砕料の上面は長いカッティングブレードの下面位置にあった。



粉砕時間（s）別記号；◆0　□5　▲15　╳30　✳60　●480

図 4－14　図 4－13 の条件で粉砕した時の金（a）、銀（b）、パラジウム（c）、白金（d）の篩下積算重量比の時間変化（供試砕料 100g、軸回転速度 H、粉砕時間 0～480 秒）

図 4－13 に上記実験の粉砕時間毎の粒度分布の時間変化を示した。上述したとおり携帯電話は各種の部品や素材の混合物であり、その一次破砕後や二次破砕後の砕製物中にはそれらの砕片が必ずしも均一には分散されておらずばらつきがあることは否めないが、砕片の粒度分布曲線は粉砕時間に対して矛盾なく説明できている。またこの時の貴金属四元素の篩下積分含有量の挙動も図 4－14 に示した。図 4－14 では貴金属四元素（Au,Ag,Pd,Pt）の区分を(a)、(b)、(c)、(d)で示してある。図中では成分挙動が粉砕と共進していることが峻別されている。この粉砕と濃集の証左から、データ間の峻別性がよく、本実験における篩分け作業と分析方法が妥当性であり、速度論的考察が十分可能であると考えた。

本章では、前述の学内で回収した携帯を砕料として， SC-01S の機能の範囲で各種の粉砕実験と、主に貴金属四元素（金、銀の他に白金、パラジウム）の挙動を調査した。その条件として、SC-01S の軸回転速度を L、M、H（ブレード先端の周速度はそれぞれ 83m/s、158m/s、203m/s）の 3 段階、供試携帯の砕料量を 50g および 100g～400g の間 100g 単位で 5 段階、粉砕時間は 4 分（最大 8 分）以内の条件で粉砕の進行と成分挙動を追跡した。なお、カタログ[28]によれば、破砕室の容量は 1500cm³であり、供試量が 500g の場合には充填率が大きく、過負荷のため 5 秒以上の粉砕を継続することはできなかった。

3－3－2　高速カッティングミル（SC-01S）による破砕の進行と貴金属の濃集現象

以上のことから、速度論的検討を行いその結果に基づいて、SC-01S の 3 水準の軸回転数 H、M、L かつ 50g～400g の砕料の実験から得た結果から粉砕過程を考察する。

図 4－13 は砕料 100g を軸回転速度 H で 5 秒～480 秒間破砕を行った時の篩下積算重量比、つまり粒度分布の時間変化である。なお、軸回転速度 H の場合、5 秒の粉砕で急激に細粉化が進行するのに対して、L の場合では、240 秒の粉砕でもその進行は小さかった。M の場合は、H の状況に近い細粉化の進行が見られた。ここでは H の結果について論考する。

次に図 4－14 の結果から、軸回転速度が H では 15 秒以内に 2mm 以下の細粉に金、銀、パラジウムが共に濃集する傾向が見られた。一方逆に、白金は 2 ㎜以下への集積が遅延し、2 ㎜以上に残留し易い現象も観察された。この図 4－14 からは、分級点に 2 ㎜の篩目を選び、2mm 以下の細粉側に金、銀、パラジウムを回収し、白金は 2 ㎜以上の粗粉側に残留させる回収方法の可能性が読み取れる。さらに、粉砕の進行と貴金属四元素の関係を論じる時、2 ㎜以下への粉砕過程がプロセス設計上も重要であると考えた。そこで，2mm 以下の細粉の篩下積算重量比（%）を一つの指標と考えた。一方本研究では最も小さい篩目が 0.5mm であることから、この 0.5mm 以下の微粉の重量比（%）の挙動も追跡することにした。

まず、図 4－14 の各金属含有量比のばらつきを検討した。その方法として、粉砕時間毎に粒度間重量比を求め、積分した値をその時間の全含有量（mg/kg）とした。それを 480 秒まで個々に計算し、それらの平均値と標準偏差を出して評価する方法を取った。その結果が表 4-14 である。つまり SC-01S についての表 4-14 の各元素の標準偏差/平均値の値は、MS-Z5 についての表 4－12 のそれぞれの値と同等かそれ以下であった。粒度分析のばらつきに比べ貴金属含有量のばらつきはかなり大きかったが、本研究では，3－2－4 で述べた粒度分析と同様、成分分析のばらつきについても、成分の分布曲線（成分挙動）が条件の違いにも関わらず峻別出来ていることから、粒度分析方法と同様この含有量評価の方法を一貫して採用した。

表 4 - 14　図 4 - 13 の実験における、破砕前後の貴金属四元素の含有率と図 4 - 12 との関係

試料区分		Au（ppm）	Ag（ppm）	Pd（ppm）	Pt(ppm)
破砕前		227	433	30	160
破砕後	5 秒	420	499	43	199
	15 秒	347	284	43	190
	30 秒	250	268	35	165
	60 秒	317	269	48	128
	480 秒	468	265	19	108
図 4 - 13 の平均値		338	336	36	158
図 4 - 12 との関係	平均値 (n)	236 (29)	458 (28)	41 (18)	156 (29)
	標準偏差	111	139	20	56

3－3－3　粉砕過程と濃集現象の関係

ここでは 3－2－4 の結果に基づいて、2 ㎜以下の細粉量と 0.5 ㎜以下の微粉量を SC-01S の粉砕過程の指標として検討する。まずそれらの関係を、供試砕料の量を 50g～400g、軸回転速度を 3 水準（L、M、H）で行った主要な実験の粒度分析の結果をもとに図 4－15 にまとめた。この図からは、実験条件の範囲が広いにもかかわらず、2 ㎜以下の細粉量の 80%までは 0.5 ㎜以下の微粉量との間に直線関係があることが分かった。さらに前者が 100%に収斂する過程で、後者は約 60%に収斂していく傾向が読み取れ、粉砕の全過程で一定の比率関係を維持して進行することが分かった。そこで本論文では図 4－15 の関係性を SC-0S の粉砕特性（以下単に粉砕特性とも表記）と定義した。この現象から実験に採用した SC-01S の粉砕限界も想起される。加えて、図 4－15 の関係を粉砕時間との関係で捉えると、明らかに粉砕が一次反応で進行することが推察された。この点に関しては 3－4 の項で速度論の観点から考察する。

ここでは、貴金属の濃集現象と粉砕過程との関係を 2 ㎜以下の細粉量（mg/kg）との関係で考察する。そこで図 4－14 を含めて、細粉側に濃集する三元素について濃集率を図 4－16 にまとめた。図中の斜線より上側にあれば、砕料の細粉化より金属の剥離・微粉化が進行し,細粉側への移行が先行していること、つまり濃集が進んでいることを表している。図 4－16 では、金の濃集率については 50g～400g の砕料の結果を軸回転速度（H、M、L）別に示してある。銀は濃集率の高かった軸回転速度 H の条件の結果のみである。パラジウムに関しては 100g～400g の砕料を軸回転速度 H で得られた濃集率をまとめて示してある。この図から金を 90%以上回収するためには、軸回転速度を H にした上で、細粉量を 40%以上確保することが必要となる。しかし図 4－13 から、この条件で砕料を 100g 以下にすれば金、銀、パラジウムの三元素が 95%以上に濃集する可能性が得られた。したがって,２ｍｍで分級・分離することを前提にして貴金属三元素の回収をするとすれば、図 4－13

からは約 10 秒の粉砕で 2 ㎜以下の積算重量比は 40%となり、ここで分級・分離すれば、その後の抽出工程における全処理量は約 60%縮減され、効率の良い回収方法が期待される。

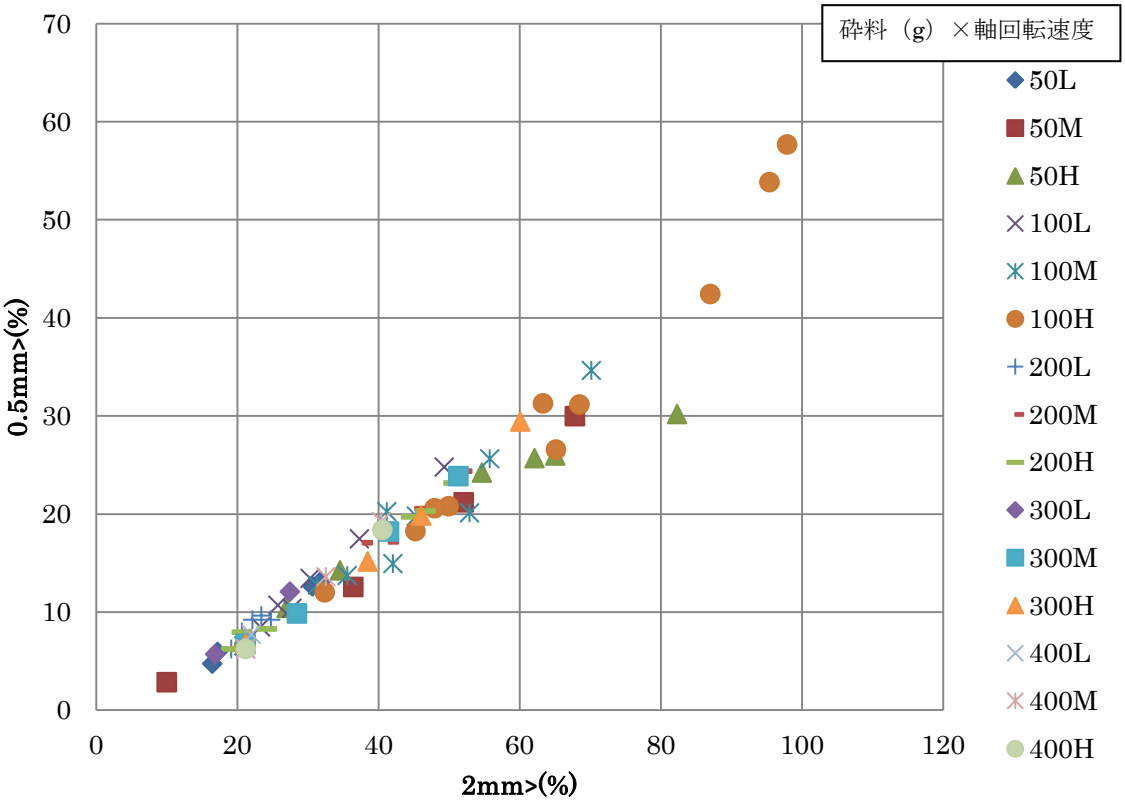


図 4-15　SC-01S による供試砕料の量と軸回転速度を変えた実験における 2 ㎜以下と 0.5mm 以下の積算重量比の関係

一方、図 4－17 で示したように白金は細粉側への移行速度が小さく、粗粉側に残留し易い傾向がある。図 4－17 には軸回転速度別（L、M、H）、処理時間は 5 秒～480 秒の範囲のデータを含んでいる。仮に上述のように、2mm 篩で細粉量を 40%点で分級した場合、白金は 2mm 以上の粗粉側に少なくとも 80%以上回収できる可能性があることが示された。このように本実験で得られた濃集率は、実プロセスで完全に分級・分離できた場合の回収率に相当する。しかし、貴金属四元素を同時に高効率で回収する場合、ニュートン選別効率[7]を勘案した最適分離装置の設計と操作条件の選択が必要である。

いずれにしても、SC-01S を使って貴金属四元素を高率で回収するには、2mm で分級・分離するプロセスが提唱される。この場合、SC-01S の粉砕特性に従って、図 4－15 の関係性から細粉量あるいは微粉量を制御項目として選択できる。実際の貴金属の製錬形態と

[7] ニュートン選抜効率 ν ；分級スクリーンの内外で異なる対象（1、2）の回収効率を同時に評価して、分級装置の性能を評価する場合に用いられ、それぞれの回収率を σ_1、σ_2 とすると、ニュートン選別効率は $\nu = \sigma_1 + \sigma_2 - 1$ となる。

しては金、銀を主体にして白金とパラジウムを含むか、あるいはいずれかを選択するケースが考えられるので、本章の研究が描くプロセスは 2mm で分級・分離する方式になる。この際，細粉量 40%（あるいは微粉量 17%）が設計上の目安となる。

以上のような SC-01S の粉砕過程における細粉量と微粉量との直線関係性は SC-01S を採用するプロセスの設計上重要な知見であると考えている。

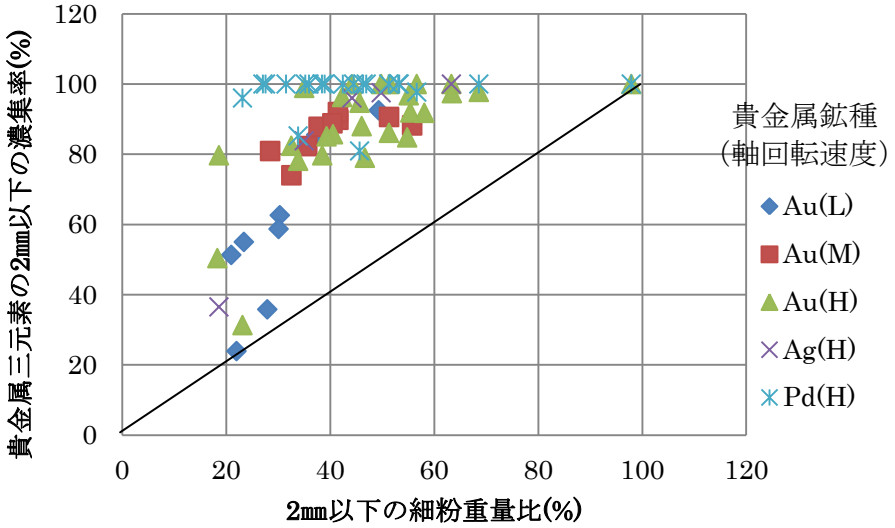


図 4-16　2mm 以下に濃集し易い貴金属（金、銀、パラジウム）の濃集率と細粉重量比の関係（軸回転速度；L、M、H）

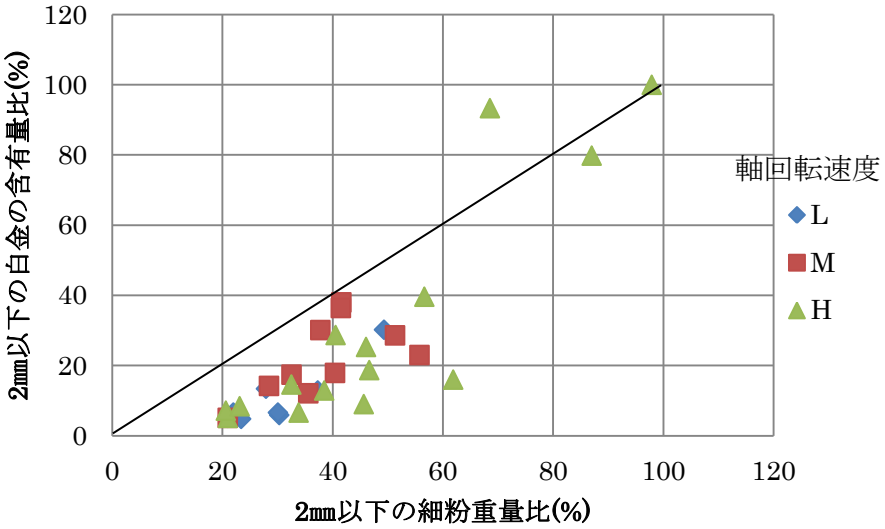


図 4-17　2mm 以下の細粉重量比と白金の含有量比の関係（軸回転速度；L、M、H）

3－3－4　白金の粗粉側残留現象と随伴元素との関係

上述したように，貴金属四元素の濃集挙動には特異性があった。つまり、図 4－16 と図 4－17 の対比から細粉側に濃集が急速に進む金、銀、パラジウムと細粉側への移行が遅く、粗粉側に残存し易い白金とに二分される。この原因は、単にこれら貴金属元素のみで考えることはできない。著者ら[19]によって、携帯電話に含まれる数十鉱種の金属元素の内、砕製物を 2mm で分級・分離した場合、金、銀と同様に細粉側に簡単に濃集する元素と、白金のように粗粉側に残留し易い元素および粒度に関係無く分散する三種類に大別された。携帯の構成物質ではプラスチック部品の占める容量が大きいこともあり、人工鉱石を異質物質の集合粉砕[36-38]と捉えて各部品やモジュールの破壊と内包している金属の分離や剥離について系統的な検討が必要である。

小室ら[29]は廃電子基板を砕料として、8 種類の破砕機を使ってその破砕性と剥離性を調べている。その結果、それらの関係が破砕方式によって差異が生じることを報告している。さらに大和田ら[23]によれば、二段階のパーツセパレーターによる部品選別と粉砕選別の特徴を調査した中で、本実験と同様に各元素の粒度間の重量比を従来法の破砕・粉砕と比較しており、各種元素の分布形態が明確に分かれる現象を明らかにしている。報告では銅、金、銀、白金、パラジウム等は既存の銅製錬で回収することを前提にしているためか言及されていない。しかしその中で、白金が最も分散度の高い元素であると指摘している点は本論文と異なる結果である。本実験の SC-01S による各種金属の粒度別分布は図 4-14 の通りであり、大和田らの分布形態と類似点と相違点とがあった。粉砕方法が同じバッチ式ではあるものの、粉砕条件が大きく異なる（特に，構造と傾斜破砕，粉砕機構等）ことに加えて、対象の砕料が携帯本体の解体品である電子基板を中心としていることが異なっている。これらの差異を考慮すると携帯を一括破砕したことで金属の移動現象を複雑にしていることは否めない。特に大量に存在するプラスチックとの同時破砕においては帯電付着や流動状況の変化が考えられ、部品等の破砕と金属部分の剥離、濃集に影響することが推察される。特に、白金が 2mm 以上の粗粉側に残留し易い現象は、粗粉側に分布する他の元素、主には Fe、Cr、W、Ga、Mo、V 等との随伴現象も考えられる[19)21]。

そこで白金とこれらの元素間の相関係数が最も高い鉄（Pt と Fe との相関係数＝0.875、n 数=68）との随伴挙動を調査した。図 4－18 は、図 4－17 の白金（Pt）に加えて、鉄（Fe）の積算重量比を求めて細粉重量比との関係で示したものである。同図からも白金と鉄との強い関係性が認められ、相関係数が高いことと併せて結合力の強い両者間の合金、例えば磁気記録媒体[33]材料としての金属間化合物やステンレス素材の電着塗装などが考えられるが、それらとの関係性を

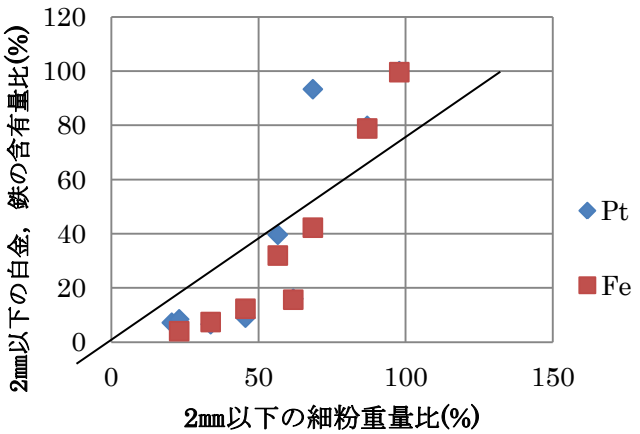


図 4－18　図 4－13 の条件における白金と鉄の随伴挙動と細粉重量比の関係

特定するまでに至っていない。加えて，白金のこの現象の再現性が高いのも事実であったので、白金が鉄と随伴しながら粗粉側に残留し易い元素であることは明白であると考えるに至った。

3－4　SC-01S による携帯砕片の粉砕過程の速度論的検討

3－4－1　携帯砕片の粉砕過程の速度論と相似性からの考察

図 4－19 は図 4－13 における粒度範囲を粗粉部分（9.50～4.75 ㎜）、中間粒度部分（4.75～2.0 ㎜）および微粉部分（2.0 ㎜以下および 0.50 ㎜以下）に分けて、それぞれの 480 秒までの時間変化を示したものである。粗粉部分は短時間で減少するが、中間粒度部分は一旦増加した後 30 秒前後で減少に転じて、300 秒以降ゼロに収斂する曲線（凸面状）を描く。これに対して微粉部分は上に凸の曲線で増加する。その中で 2.0 ㎜以下の部分は 480 秒では 100%近傍に収斂していく。一方 0.50 ㎜以下の曲線はこの時間では 60%まで粉砕され，一定値になる傾向を示している。図 4－20 では、0.5 ㎜以下を更に細かい粒度まで分析して示したものであるが、特に 0.5 ㎜以下の粒度構成が 0.15 ㎜以下の増加に置き換わっていく過程が見られた。重要な点は 2.0 ㎜以下と 0.50 ㎜以下の積算重量費の関係をまとめた図 4－15 で述べたように、0.50 ㎜以下が 60%までの粉砕時間内では、2.0 ㎜以下の粉砕過程との間に一定の関係があり，それ以上の粉砕では前者が 100%に、後者は 60%に漸近する現象が示された。前述したようにこの現象は SC-01S の粉砕限界粒度の存在を想起させる[37-38]ものであり、以下の速度論的検討においては、この現象を有効に使うことで一次速度式の仮定が成立すると考えた。 SC-01S のこの現象は、粉砕の限界粒度の存在を示唆している点である。粉砕時間を延長した場合の 0.15 ㎜以下の挙動については今後の課題である。

そこで、上述の 2.0 ㎜以下と 0.50 ㎜以下の関係について、まず、供試砕料量を 50 g～400 g で行ったすべての実験の 2.0 ㎜以下の時間変化を図 4－21－a、b、c にまとめた。粉砕の進行が図 4－20 の場合と同様な曲線を描くことがわかった。なお 0.50 ㎜以下についても同様の結果であった。

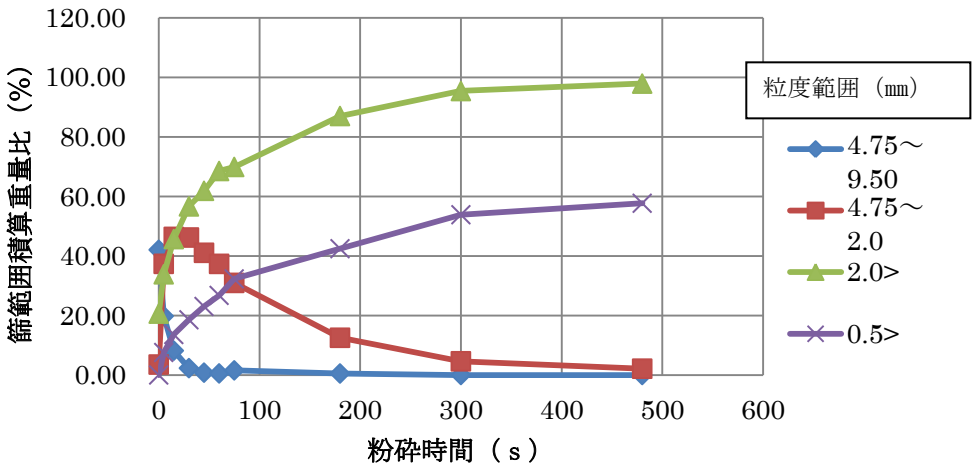


図 4－19　集合粉砕として見た場合の図 4－13 に対応する携帯砕料の粉砕過程

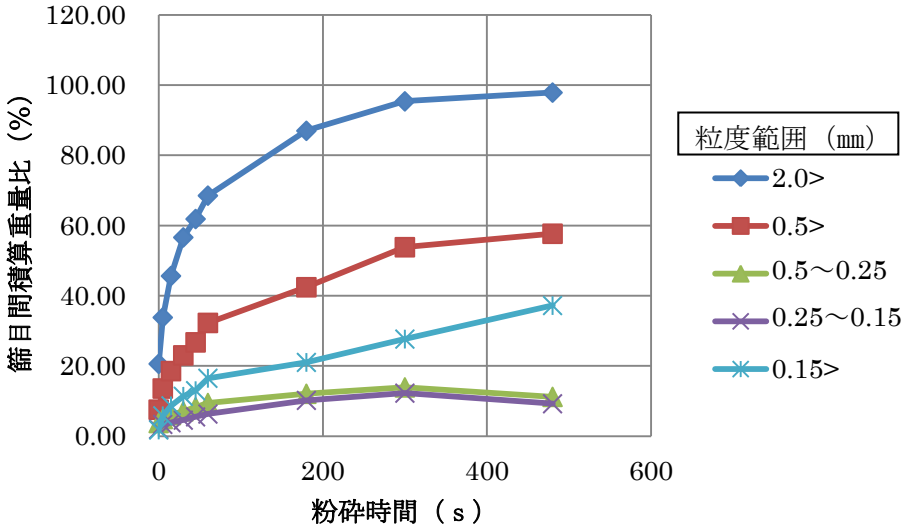


図 4－20　図 4－19 に対応する 2.0 ㎜以下の微粉部分の粉砕過程

本実験では、この 2.0 ㎜以下と 0.50 ㎜以下の関係を SC-01S の携帯砕片粉砕における重要な指標であると捉えているので、図 4－15、図 4－19、図 4－20、図 4－21 の各図の関係は速度論的解析をする上で重要な手がかりであるとともに、設備設計上の基本的現象として意義があると考えている。

動力学的考察を行う上で、 480 秒までの 2.0 ㎜以下、0.50 ㎜以下の粉体量の増加が粉砕時間に対して上に凸の曲線になっていることから、粉砕過程の質量変化が一次の粉砕速度で進行していると考えることが出来る。

なお，30 秒以内の速度過程では軸回転速度が H、M の場合には上に凸の曲線であるが､L では直線関係にもとれる｡同様のことは供試砕料が 300g や 400g に増加すると、直線関係に近い速度線図になる。これらの現象は図 4－21－a、b、c においても読み取れる。この現象は移動速度論の観点からは、一次反応では粉砕場への物質移動が律速段階である証左になるが、軸回転速度の低下や、破砕砕料の増加によってその過程が変化していくことを示唆している。また、筆者等の想定している SC-01S を使った貴金属濃集プロセスでは、高々30 秒以内の粉砕時間で処理することを想定としているので、粉砕の初期段階の現象の解明も重要であると考えている。

次に、SC-01S のカバーを透明ガラス製に新作して、粉砕中の携帯砕片あるいは砕製物の挙動を観察した。本実験の範囲では気相側のレイノルズ数は 10^6 の大きさであり完全に乱流領域にある。しかも、携帯砕片を含む固気混相流としては固体の慣性力が大きいので乱流の程度はより大きいものと考えられる。透明ガラス蓋を通した観察では、SC-01S の粉砕室内の流動現象は渦状の循環流として捉えられた。この点、翼型撹拌装置では、同じレイノルズ数でも流速が小さいので流れを肉眼観察でき、後者の循環流から前者における粉砕中の流動現象を推察することができる。これらの結果をもとに、上述の相似性の根拠とした。

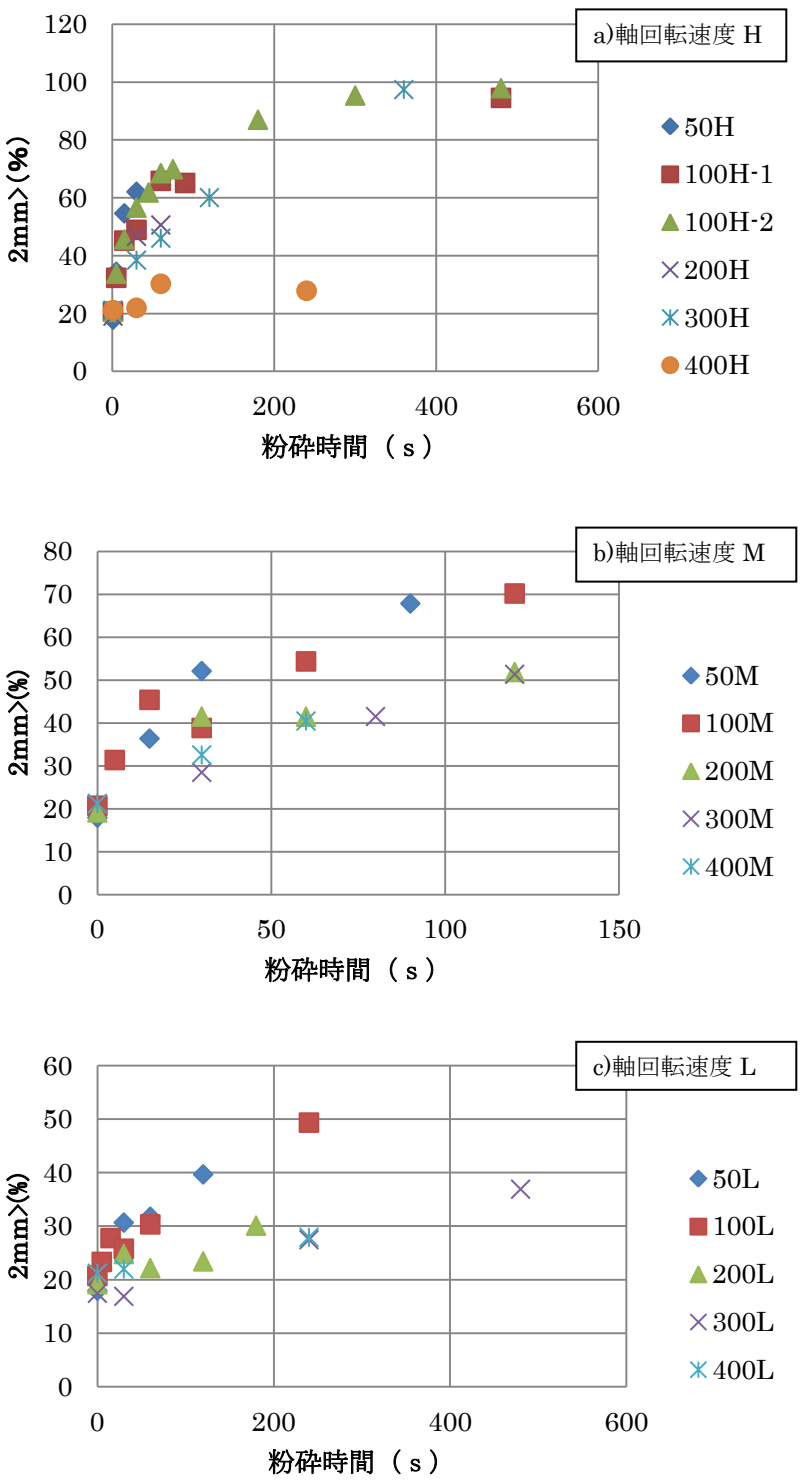


図 4－21　50～400g/回の SC-01S 粉砕（軸回転速度 H～L）による
2 ㎜以下の積算重量比速度過程（記号説明；数値は重量 g）

結論として、両装置において上記の速度過程は物質移動律速過程、つまり粉砕機の場合

はブレードによって誘起される粉砕場への被粉砕砕片の移動が律速する過程として表現される。そこでまず、この過程を式（4－1）の一次の速度式で定義した。

$$dXt / dt = k (X_0 - Xt) \qquad (4-1)$$

ここで，k；速度定数(1/s)

Xt；時間 t における反応生成物（砕製物）の無次元重量比(－)

X_0；破砕時間無限大時の反応生成物（砕製物）の無次元重量比(－)

t；混合または粉砕時間(s)

式（4－1）の粉砕速度定数と軸回転速度や供試砕料の量との関係は，SC-01S の最適操作条件を求める場合重要である。そこで、SC-01S の構造が翼型撹拌装置に酷似していること，および SC-01S のブレード先端の周速度から得られる破砕室内の気相の流動状態はレイノルズ数が（1.0～2.5）×10^4であり乱流領域にあると考えられることから，両装置の相似性に基づく検討を想起した[18-19]。

円筒型翼型撹拌装置の撹拌所要動力 P（W＝kg・m^2/s^3）に関与する物理量に関して，次元解析することのより三つの無次元数、動力数 Np は撹拌レイノルズ数 Re、フルード数 Fr との間に式(4－2)の関係が成立する[34]。

$$Np = C \times Re^{-a} \times Fr^{-n} \qquad (4-2)$$

ここで、C；定数

a，n；整数

また，動力数 Np は本実験の SC-01S の諸元に合わせれば,

$$Np = P/\rho \times Lb^5 \times n^3 = P/\rho \times Lb^2 \times v^3 \qquad (4-3)$$

それぞれ，ρ；気相密度（g/m^3）

Lb；ブレードの長さ(m)

n；軸回転速度（1/s）

V；ブレード先端の周速度（m/s）

Re 数が十分大きく乱流領域にある場合は動力数 Np はほぼ一定になる[34]。この場合撹拌動力 P は次式の関係になる[34]。密度ρも一定であるので、

$$P \propto Lb^2 \times v^3 \qquad (4-4)$$

この撹拌動力 P の単位は（J/s）である。したがって、エネルギー消散密度εは,

$$\varepsilon = P/W \qquad (4-5)$$

ここで，W；供試砕料の量(g)

ε；エネルギー消散密度（J/s・g）

となる。混合槽の場合、反応の速度定数とエネルギー消散密度εに一定の関係があるので、本論文では両装置で相似則が成立すると仮定して、SC-01S の粉砕過程におけるエネルギー消散密度εを同様に式(4－4)、式(4－5)と考えると、粉砕時間 t(s)に投入されるエネルギーによって特定粒度以下の積算重量比 Xt(%)は式(4－6)から得られる。

$$Xt = f(\varepsilon \times t) \qquad (4-6)$$

ここで、t；粉砕時間（s）

以上の考察から本論文では、式（4－6）のカッコ内の値をエネルギー消散密度指標と定義した。そこで図 4－21 で示した実験結果から式（8）右辺の値を供試量毎に算出し、細粉量比（ここでは%表示）との関係で図 4－22 に示した。供試砕料が 50～400g に対して、

細粉量比が 20～70（%）の広い範囲で同じ勾配の直線で近似されることが分かった。この結果，広い範囲で粉砕の進行過程が軸回転速度ないしはブレード先端の周速度の 3 乗値と粉砕時間との積（エネルギー消散密度指標）の値に従っていることが示された。図 4－22 における供試砕料別の横軸方向の偏差は投入したエネルギーの消散形態が、粉砕室の充填率や邪魔板との距離等による影響に起因していると思われる。

そこで、図 4－21 の中の供試砕料 100g の一連の実験に関して，軸回転速度別に三乗値と時間の積の関係を図 4－23 に示した。この結果，軸回転速度が L から H に 大幅に変化しても、一本の直線に沿って粉砕が進行することが示された。この事実が一次反応の速度定数の物理的な意味を示唆している。まさに粉砕が軸回転速度の三乗値で決まる投入エネルギーと時間の積で進行していることを示している。これは新しい知見であるといえる。

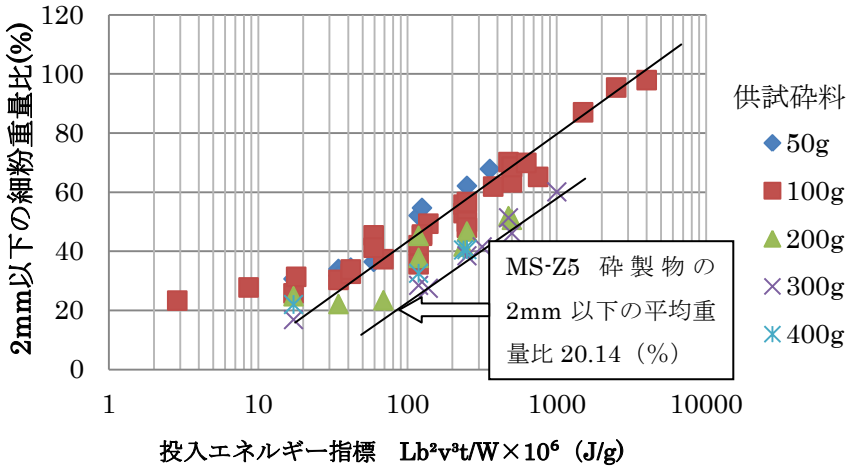


図 4－22　供試砕料別の投入エネルギー指標（Lb^2v^3t/W）と細粉重量比の関係

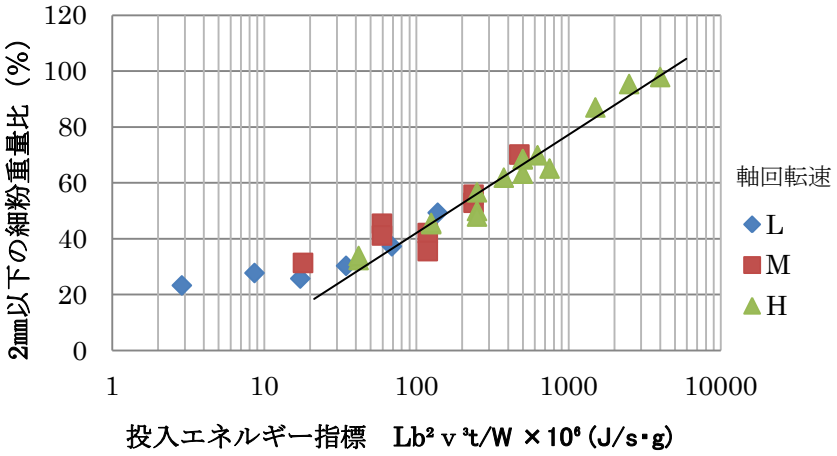


図 4－23　供試砕料 100g の場合の軸回転速度別の投入エネルギー指標（Lb^2v^3t/W）と細粉重量比の関係

一般に集合粉砕の速度過程は、個々の粒子の砕製物の粒度分布とこれらの粒子が破砕さ

れる確率の組み合わせで議論される。つまり粉砕過程は分布関数と選択関数を含む物質収支式で表現される。この中で、本実験のような回分式粉砕で、かつ選択関数が粉砕過程で一定の場合は、質量変化が一次速度で進行するという解が得られている[12-13]。選択関数の次元は（1/s）であり、粉砕速度定数の次元と一致している。このことから上述の一次速度式の仮定は妥当と考えられ、物理的根拠も示唆された。しかし，図 4－15 と図 4－20 の関係から一次反応と捉えられた点は、SC-01S の粉砕現象を把握して装置設計する上で意味があると考えている。

なお、図 4－22 の縦軸の 20%点は、表 4-10 の 2 ㎜以下の積算重量比であり、破砕時間ｔ＝0 における原料砕料の 2 ㎜以下の重量比である。したがって、粉砕の初期の時点から式（8）と図 4－22、図 4－23 の直線関係が成り立っていることが読み取れる。図 4－15 の関係から微粉重量比（%）についても同様の関係性が認められている。

この他､翼型撹拌装置では邪魔板が混合に有効である[33]ことと同様に､相似性によって、SC-01S のような粉砕機においても邪魔板は重要であると考えている。この点も実用機を設計する場合検討を要する点である。

一方、図 5－15 と図 4－16 を照合すると、粉砕過程における金、銀、パラジウムの濃集の進行は 2 ㎜以下の細粉重量比が 40%以上でほぼ完了するか横ばいになるのに対して､砕料の微粉化はなおも進行していくことを示している。一見この二つの過程が乖離しているように思われるが、2 ㎜以下における両者の挙動、つまり上述の濃集挙動と粉砕過程の関係について以下のように推察した。まず，粉砕が進行して細粉量が増加するに従って、粒子間の衝突による作用力の寄与が大きくなって微粉化が促進され、その中で貴金属の剥離・微粉化が進行していくと推察された。中でも SC-01S のブレード厚みは 1.2mm 程度であるので、衝撃や裁断の効果は小さく，むしろ強力な固気混相の粉流体から成る渦状循環流によって粒子間衝突や摩砕作用の寄与が大きくなるものと考えている。図 4－22，図 4－23 で示したように広い範囲で直線性が成り立っている事実が、撹拌装置と同様に、渦状循環流の中の粒子運動（衝突・摩耗・摩砕等）にエネルギーが消散しており、その結果金属の剥離と微粉化が進むものと推察された。

3－4－2　粉砕中の循環流の意味と昇温現象との関係

本実験では、粉砕が一次反応速度過程で扱われる物理化学的な意味が、粉砕場への砕片の物質移動に依存していると考えられたことから､携帯砕片の粉砕過程に対して、砕片全体の破砕室内における流動状態（以下渦状循環流と表記）が重要な役割を担っていると推察し、次の 2 点の実験を行った。

一つは、この固気混相の粉流の存在の重要性を把握するため、温度計を破砕室蓋に固定して粉砕中の破砕室内の温度変化を測定した。砕料重量を変えた場合の測温結果を図 4－24 に示した。この図では、初期段階を除けば時間と共に温度は直線的に増加している。その勾配つまり昇温速度は供試砕料の量と軸回転速度の増加によって直線的に大きくなる。これは粒子間の衝突や摩擦が大きくなることを意味していると考えている。この昇温現象が粉砕室内の粉粒子の運動に関係していると考えている。またこのような温度上昇は、実用機の設計には考慮すべき案件でもある。

二つ目は、SC-01S の粉砕室壁をスクリーンに改造して、細粉・微粉部分を粉砕中に取

り除く実験を行った。この結果は3-4-5のスクリーンミルに改造した実験で詳述するが、そこではスクリーンの開口比を変えて粉砕中に微粉部分を除去した場合の粉砕過程をトレースしている。このことは 3-2-5-（2）で述べたように、微粉中に 70%近く存在するプラスチックを抜き取ることになり、粉砕中の流動状況を大きく変えることや、粒子間の衝突や摩砕・摩耗・磨滅作用の現象を誘発すること、さらに破砕室壁への衝突に影響することになどが考えられる。破砕室壁の温度に反映されると考えている。

この昇温現象は金属元素の回収を効率的に行う装置設計上重要な着眼点でもある。また，ブレードの摩耗と粉砕特性への影響も問題であるが、実施ベースでは材質の検討や交換基準を設定することで対応する必要がある。

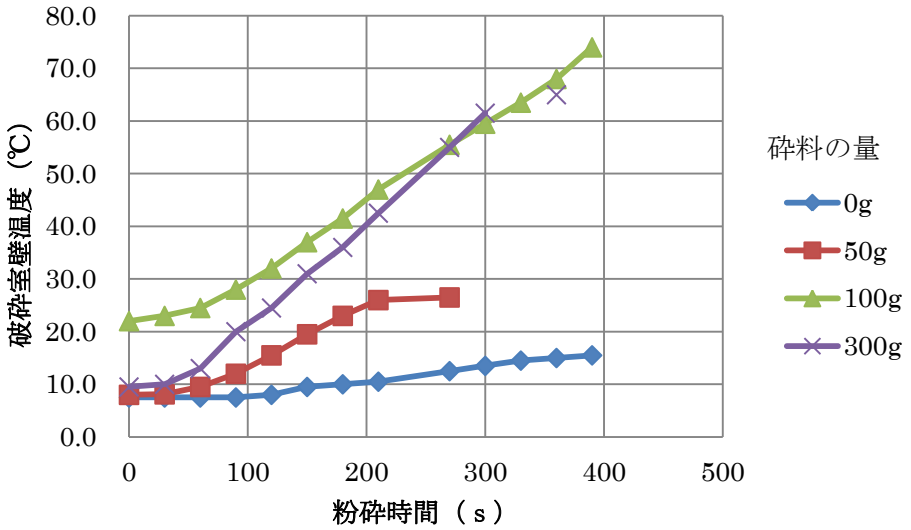


図 4－24　SC-01S の運転中の破砕室壁面の温度変化

3－4－3　先行研究に関する検討

使用済み小型家電から有用金属を回収するプロセスは、一般にはそれらの混合回収物を一括して一次処理段階で破砕した上、既存の非鉄製錬炉で製・精錬する方法がとられる。しかし、レアメタルを回収する場合は既存の非鉄金属の製・精錬工程で分離することが困難なことから、一次処理段階から物理的方法で当該部品を分別回収するプロセスの研究が行われている。つまり、第一段階で手解体ないし粗解砕して重要部品、たとえば基板や磁石、コンデンサー等を分別して、その部分からレアメタルを取り出すプロセスが検討されている[17]。

一方、貴金属や銅等の有用金属の回収は既存の製錬工程で取り出すことが出来るので、本章の研究で意図しているような使用済み製品を一括して物理的破砕・粉砕して貴金属を濃集し分離しようとするプロセスの研究は少ない。このような中で、各種基板が衝撃力によって初期過程で銅や金がプレートから剥離し微粉化する過程を直接観察によって捉えた成果[27]は、本実験の粉砕初期の状況を考える上で非常に有益であった。さらに、特定金属の回収を目的に，各種の粉砕機の選択や開発をする中で、基板や焼却処理後のリチウムイオン電池の粉砕中の金属元素の選択的分布に関する研究は、

著者らの研究と同様に、各種素材と金属鉱種の混合物を同時粉砕した場合の金属元素の挙動を考える上で示唆に富んでいる[23)32)]。

一方、回分式粉砕機の速度論に関しては、従来からボールミルに関する研究は多い[35-38)]。しかし、本章の実験で取り上げた水平ブレード式カッティングミルの研究はほとんど行われていない。このような中で、本実験を含めて携帯砕片を使った粉砕過程について多くの新事実が見出された。今後実用化に向けて装置のスケールアップや改良に対して、示唆に富んだ情報を提供していると考えている。

3－5　携帯電話と籾米を砕料とした各種のブレード式高速回転ミルの破砕特性の相似性

3－5－1　実験の目的と内容

3 - 4 項で明らかにした動力学的考察の結果を、さらに普遍的に捉えるために一次破砕した携帯砕片を対象に、市販の各種食品用ブレードミルを採用し、砕料として携帯砕片だけでなく、相似性を想定して種籾米を用いて、破砕中の粒度の変化を追跡した。

その結果、ブレードミルによる二次破砕の過程を 3 - 4 項では集合破砕を化学反応と捉えて、さらに相似性という観点を取り入れて、動力学的な裏付けを明らかにした。

本項では、表 4-7 で示した水平ブレード構造の各種市販のカッティングミルの内 4 種類を選び、3-4 項と同様の実験を行った。実験装置の詳細諸元を改めて表 4 - 15 にまとめた。

本稿の実験の特徴は、一点目は、破砕室の形状によって鍋型と筒型に分け、形状による差異を考察することである。表 4-12 で示したように回転速度が大きく、ブレード先端の周速度は 40m/sec～200m/sec である。なお、ブレードの厚みは 0.5～2mm である。

第二点目は、携帯砕片の他に乾燥食品の中から籾米を採用し、品質の一定な複層破砕物を比較実験したことである。写真 4 - 5 には、SC-01S の場合の携帯砕片と籾米の 200g を装入した時のブレードとの位置関係を示した。籾米は農協より入手した種籾である。この籾米を比較砕料に選んだ理由は、実測充填密度が携帯砕片の 1.85cc/cm^3 に対し、1.56cc/cm^3 と近いことと、多層構造になっているため、携帯砕片と同様に剥離と破砕等の複合した挙動をすると推定したからである。ただし形状は、携帯砕料は 10mm 以下で、図 4 - 11 の粒度分布を持つものであるのに対して、籾米の平均粒度は短片が 3～3.5mm、長辺が 6～6.5mm、厚みが 2～2.5mm で、10 ㎜以下の携帯砕片とは異なる。

なお、籾米は SC-01S の場合軸回転速度は主に 10250rpm（L ; 先端周速度 83m/s）とし、携帯砕片の場合は H,M,L の三水準で行った。また、相似性の整理のため、破砕後の粒度範囲を 0.5mm 以下の割合を微粉重量比とし、携帯砕料の場合は 2mm 以下を、また籾米の場合は強度が低いので 1mm 以下を細粉重量比として記述している。

表４－15　　実験に使用した水平ブレード型高速カッティングミルと主要諸元

区分	通称	破砕機の記号 （製造元）	a)軸回転速度（rpm） ［周速度（m/s）］ b)ブレード （長さ mm×枚数） c)容器容量（cm³） d)邪魔板	実験に供した砕料
鍋型	サニタリークラッシャー	SC-01S （三庄インダストリー）	a)可変速 L;10250rpm[83m/s], M;19500rpm[158m/s], H;25000rpm[203m/s] b)155mm×長短２枚 c)1500cm³ d)上蓋に設置	籾米 携帯
	コーヒーミル	COF-ML または COF （ナショナル）	a)25500rpm[87m/s] b)65mm×１枚 c)240cm³ d)上蓋に設置	籾米 携帯
筒型	ファイバーミキサー	FIB-MX または FIB （TESCOM）	a)17300rpm[54m/s] b)60mm×2 枚 c)1150cm³ d)壁面に４列の突起	籾米
	コンパクトミキサー	TWN-BD または TWN （ツインバード）	a)16700rpm[39m/s] b)45mm×2 枚 c)740cm³ d)邪魔板は無い	籾米 携帯

写真４－５　SC-01S に携帯砕片と籾米の 200g を装填した時の
ブレードとの相対位置関係

3－5－2　鍋型と筒型の破砕機による携帯砕片と籾米の破砕過程の比較

携帯砕片の場合、粉砕機の構造（鍋型、筒型）を変えても図 4-15 の関係は変わらなかった。一方、SC-01S による籾米の粉砕の場合、200g 砕料で 10250rpm の粉砕粒度分布曲線は図 4－25 に示す通り、時間と共に微粉化が進む様子が明白に示された。また粉砕特性に関係では、1 ㎜以下の細粉重量比と 0.5mm 以下の微粉重量比の関係で示したのが、鍋型の図 4－26 と筒型の図 4 - 27 である。ここで両者の関係直線の勾配が筒型の 1/1 に対して、鍋型では約 1/2 になっている点が特徴的に表れた。このことは、籾米の場合は筒型に対して粉砕化効果が大きく、0.5mm 以下になりやすいことを意味している。しかし、鍋型の場合はその効果が小さいことを示唆している。しかも鍋型では、1 ㎜以下の細粉重量比が 80%以上になって以降 0.5mm 以下への微粉化が進行する現象を示している。この点は図 4-20 で示した携帯砕片の 2 ㎜以下と 0.5 ㎜以下との関係と全く同じ挙動をしていることであり、鍋型形状の特徴といえる。本論文では筒型粉砕機の貴金属濃集現象について確認するまでに至っていないが、金等の濃集分離を目論んだ機器設計をする場合、非常に重要なファクターになると考えている。さらには単に充填率の差異のみでなく、破砕室の形状や邪魔板の存在が破砕中の渦状循環流の形成に関与しており、そのことが貴金属の剥離や微粉化に重要な役割を果たすとも考えている。

ここではいずれの機種でも容器形状・構造が最も大きい要因であることが示唆された。

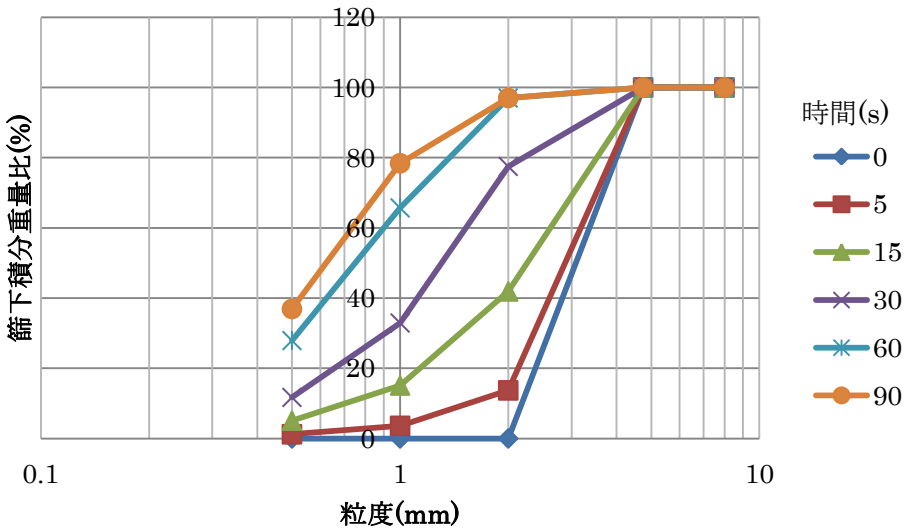


図 4 - 25　SC-01S の 10250rpm での籾米 200g の破砕の進行過程

流動現象の観察から得られた両者の差異は、携帯砕片の場合は、含有している金属部分とプラスチック部分の比重差が大きく、かつ微粉化の困難な部品もあるため、細粉化過程において上下の脈動が激しく、筒型と鍋型の機種の差異が生じにくいものと考えられた。これに対して、籾米の場合はスムーズな循環流動が形成し易く、鍋型と筒型とでは渦状循環流におけるブレード部分への流れ込みの様子が破砕室の形状によ

って明らかに違いが見られたので、この現象が関係していると考えている。

いずれの場合も、機種や砕料の違いにもかかわらず実験の再現性が良く、同一直線に沿う破砕特性を持って挙動することが示された。このような再現性は、水平ブレードによる粉砕機の特徴とも考えられる。さらに携帯砕片中の大量の「プラスチックの粉末」や籾米から出る「籾殻の粉末」が、粉砕の進行上大きな役割を果たしているものと考えている。この点は粉砕機の設計、スケールアップを図る場合有力な情報になると考えている。

しかし、実験の軸回転数（先端周速度）は 40m/s～200m/s であったので、投入エネルギーの寄与について検討する必要がある。この点を 3-5 の項で考察する。

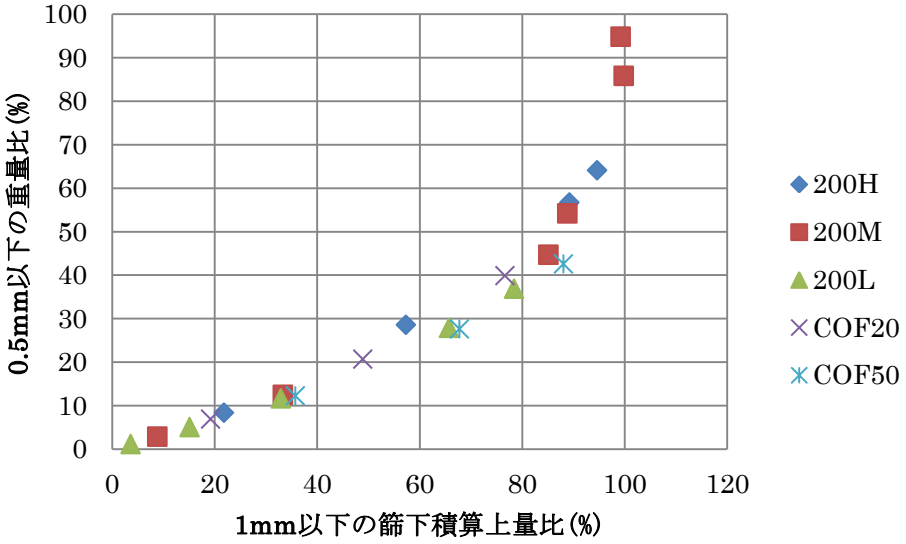


図 4 - 26　鍋型破砕機 SC-01S と COF-ML の籾米の破砕特性の関係

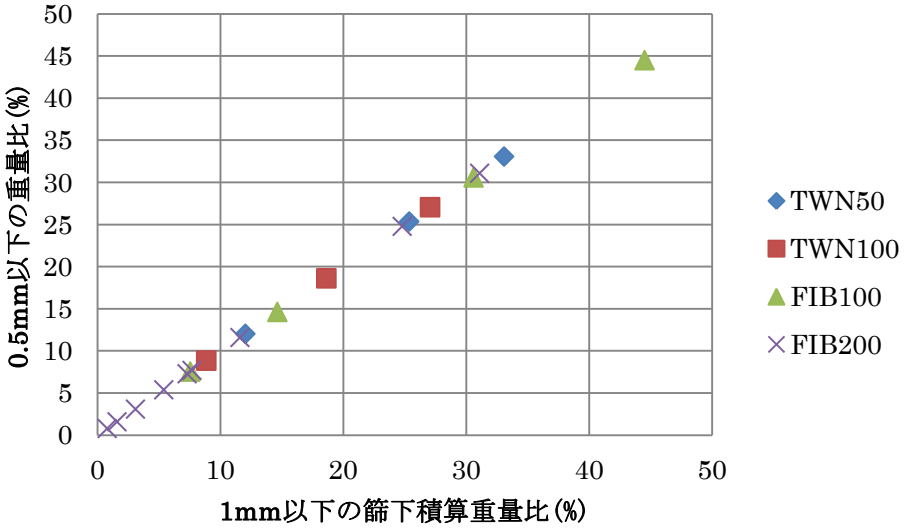


図 4 - 27　筒型破砕機による籾米の破砕特性

3－6　鍋型、筒型破砕機の破砕特性に関する動力学的考察

3－5　項で言及したように、鍋型粉砕機の粉砕現象と翼型撹拌装置と間に相似性が成り立つと考えられ、2 ㎜以下の積算重量比の時間変化を化学反応過程とし、その反応の律速過程を物質移動律速と仮定し、3－4 で式（4-1）が定義された。

$$dXt/dt = k(X_0 - Xt) \qquad (4-1)$$

ここで，k；粉砕速度定数(%/s)

Xt；破砕時間 t における 2mm 以下の重量比(%)

X_0；破砕時間無限大時の 2mm 以下の重量比(%)

t；破砕時間(s)

さらに速度定数 k は消散エネルギー密度 ε との関係から式（4－5）が導かれている。

$$\varepsilon = P/W \propto v^3 \times Lb^2 / W \qquad (4-5)$$

ただし，P；投入エネルギー（$kg/m^2/s^3$）

Lb；ブレードの長さ（m）

v；ブレード先端の周速度（m/s）

W；破砕重量　（g）

さらに，破砕機に投入されたエネルギーE(J) は次式に相当するので、

$$E \propto \varepsilon \times t \qquad (4-7)$$

ここで、t；破砕時間（s）

なお、式（4－7）の右辺の値を本論文ではエネルギー消散密度指標と定義している。

本項では、籾米の破砕特性との比較のため、式（4－1）の重量比 X を 0.5 ㎜以下の重量比にして計算した。その結果、携帯砕片の場合は、図 4－22 の縦軸 X を 2 ㎜以下に対し 0.5mm 以下の重量比に置き換えた計算結果と破砕室形状に因らず全く同じ勾配で一定の幅の中に集約された。この関係が図 4－28 である。

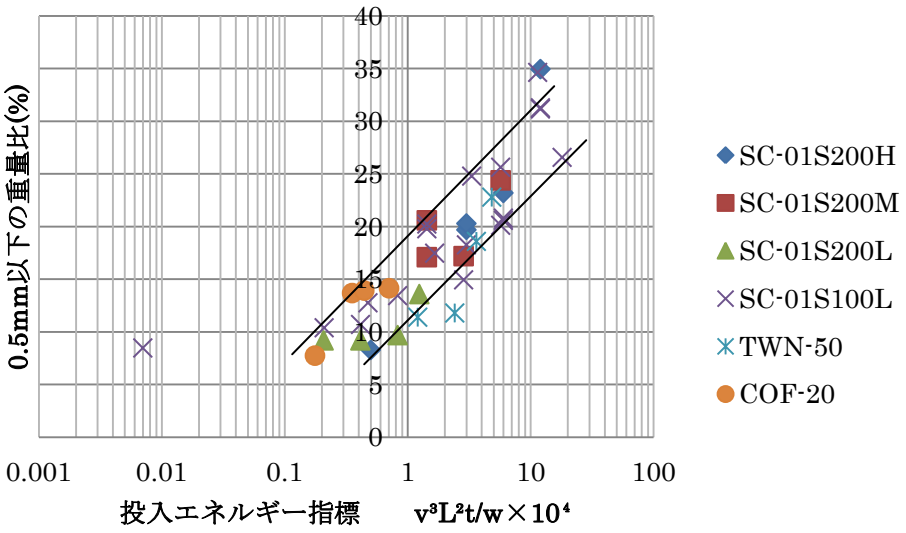


図 4 - 28　　携帯砕片の破砕時の投入エネルギー指標と機種および破砕量による微粉化指標との関係

一方籾米の場合について、各種の実験を対象に式（4－5），式（4－7）を適用し、その計算結果を図 4 - 29 にまとめた。図は鍋型の 2 機種と筒型の 1 機種に類別した結果であり、砕料の量で区分した記号で表記した。機器の記号の後の数値が砕料の重量を表している。砕料量による横軸の位置は各機種の砕料量による差は無いが、機種の違いによる差は明白で、0.5 ㎜以下の微粉重量比に対するエネルギー消散密度指標の寄与が異なっていることが明らかになった。

つまり、同じエネルギー消散密度でも機種によって得られる微粉重量比や積算重量比が異なり，投入エネルギーの粉砕への寄与の仕方が異なり、機種すなわち構造によっては、さらに高い細粉化率を得ることのヒントがあることが認識された。

以上のことから、ブレード型高速カッティングミルに共通の課題として、砕料と粉砕過程の機種・構造依存性やその機構についてさらに明らかにする必要がある。

従来ボールミルに関しては、この種の研究は多い[35-38]が、近年異なった機種の実験や解析も報告[27)39-41)]されるようになった。しかしながら、水平ブレード型の粉砕機についての研究はほとんど行われていない。他方撹拌装置のインペラーやプロペラ等の翼型構造や角度による反応や混合に関する研究[42-44]、また液中固体粒子の衝突に関する報告[45-46]等が散見され、それらは貴重な示唆を与えるものである。

本実験で扱った市販の代表的な食品用ジューサー等については、経験的知見に基づいた情報はあるものの、ブレード構造や流体挙動に関した基礎的研究の報告は皆無である。その理由として、これらの機器では，水平ブレードの衝撃による破砕作用はほとんど期待されておらず、もっぱら食品の切削や裁断に配慮が施されていると思われ、ブレード先端に付けた微妙な角度や複式ブレードによって被破砕物の循環流を良好に維持し、ミキシング機能に工夫の重点が置かれていることが窺える。

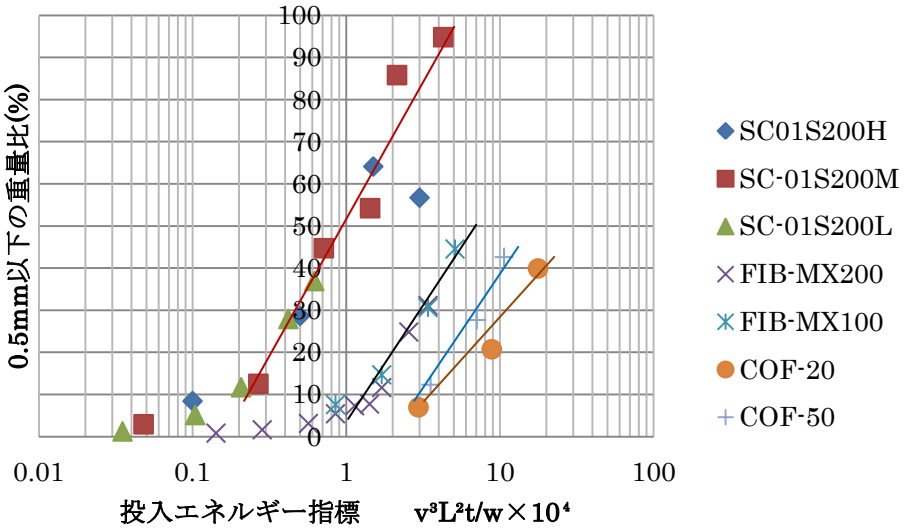


図 4 - 29　籾米破砕時の投入エネルギー指標と機種および破砕量による微粉化指標との関係

以上述べてきたように、本実験で採用した各破砕機種において、水平ブレードによる強い渦状循環流の形成が重要な役割を持っていること、さらにそれには薄板ブレードとの衝突・裁断による破砕・粉砕が相互作用しているものと推察された。またその衝突頻度と渦状循環流は、ブレード形状や破砕室形状及び邪魔板の存在により影響を受けていることが示唆された。

なお、渦状循環流の駆動力ともなるブレードの形状も重要であるが、携帯砕片のような金属固形物の粉砕には摩耗の進行が懸念される。粉砕場を推定する上で、使用後のブレードの磨耗状態も重要な情報源である。写真 4-6 は合計約 10kg(携帯電話約 100 台分)を 1 回の砕料を 100g として、各 60 秒間 100 回粉砕した後のブレードを示している。この結果先端部に向かって弓なりに摩耗が進んでおり、主要な粉砕場がブレードの先端部にあることがわかった。このことは SC-01S の改良設計に重要な情報を提起している。

なお本実験で用いた範囲では、この程度の摩耗でも実験結果に大きなばらつきは出なかったが、微妙な角度を持っている先端部の摩耗は上述のような弊害も懸念される。したがって、事業化に当たっては、摩耗対策や取り換え頻度が重要になるであろう。

写真 4－6　破砕前と
約 100 台×100 分
破砕後のブレードの形状

3－7　SC-01S をスクリーンミルに改造した場合の連続分級・分離実験

3－7－1　2 ㎜以下に濃集した金、銀を二次破砕中に分級する着想と装置の改造

本章の研究では、市販の家庭用精米機、山本電機（株）製の「匠味米」を購入し、その糠分離機構を応用して，使用済み携帯電話の破砕中の分離特性を調査し、貴金属濃集部分を破砕中に同時分級・分離する機器の開発を目指した。「匠味米」の結果を受けて、ブレード式高速回転ミル SC-01S の破砕室壁をスクリーンに改造して，破砕中の同時分級・分離の実験を行った。表 4 - 16 は「匠味米」とスクリーン付きの SC-01S の主な実験上の諸元をまとめた。また、それぞれの外観を写真 4 - 7 と写真 4 - 8 に示した。

写真 4－7　精米機“匠味米”の装置構成

写真４－８　スクリーン付き SC-01S の概観

写真４－９　携帯砕片 200g を 30 秒破砕した後の 3mmφスクリーンによる分級・分離状況

開発機の SC-01S では、主にはブレード周速度が 200m/s（軸回転速度 25000rpm）の破砕中に，3mmφのスクリーンを通過する 2mm 以下の通過率で評価した。その結果，2mm 以下の貴金属濃集部分を 95%以上回収できる見通しが得られた。これは通過率がスクリーン孔径に大きく依存する現象に基づいていることが分かった。

3－7－2　分級スクリーン付き SC-01S による 2㎜ 以下の細粉の破砕中連続分級と　金、銀の回収に関する実験

ここではまず、家庭用精米機に内蔵されているスクリーンの分離機構を携帯電話の二次破砕機に適用し、携帯砕片の分離機能を把握することにした。同様の原理と構造を利用する機器には、気固系では強制撹拌式篩機[47-48]やスクリーンミル等の連続式分離装置[49-51]、あるいは一般的に遠心分離方式の固液分離装置等で見られるものの、バッチ式では家庭用の精米機が最適であった。このバッチ式分離の原理を携帯の破砕機に応用する場合、破砕中の各砕片の運動が必ずしも明らかになっていないことから、渦を伴う循環流の中から所定の粒度（例えば本研究の目的である 2㎜ 以下）の細粉がスクリーンの開孔部から効率よく通過出来るかが最大の課題である。

SC-01S を改造したスクリーンミルの外観を写真 4-7 に示したが、そのスクリーンの内径は改造前の破砕室内径 167㎜ に合わせた。また、改造後の破砕室の外壁内径は 262 ㎜φである。スクリーンの開口部は 60°千鳥抜きの孔径（2 種類；2 ㎜φ、3 ㎜φ）でピッチは孔径+1 ㎜である。それぞれの開口面積率は 29.6%と 32.6%である。

SC-01S のこのような改造の目的は、スクリーン孔径を通過して外側に分離された細粉の重量比とスクリーン外での貴金属三元素（Au, Ag, Pd）の回収率を求めること、さらに白金を含めた場合の、最適のニュートン効率を得るためのスクリーンの構造や操作条件を求めることである。本章の研究では、SC-01S の粉砕による 2 ㎜以下の細粉量と貴金属濃集について論述してきた経緯から、スクリーン外へ排出・分離される細粉重量を調査し、携帯砕片の粉砕中におけるスクリーンの分級・分離機能を検討した。なお、スクリーンミルに

した場合の貴金属回収率については今後検討していくべき課題と考えている。

実験では、MS-Z5 の携帯砕製物 200g を上記のスクリーンミルにおいて、軸回転速度 H で、15 秒、30 秒、60 秒粉砕した後、スクリーン外への全通過重量と 2 ㎜以下細粉重量および 0.5㎜ 以下の微粉重量を調べた。ここでは主に、2 ㎜以下の回収率について述べる。写真 4－9 は 30 秒粉砕後の分離状況を示している。

図 4－30 は、孔径が 2㎜φの場合のスクリーン内外の全砕製物に対する篩下積算重量比の分布を示したもので、同図には同一条件でのスクリーン無の場合の粒度分布も併記した。図 4－31 に、スクリーンミルでの 2 ㎜以下の回収率と粉砕時間との関係を示した。孔径 2 ㎜φでは、回収率を 80%以上確保することは難しいこと、一方 3 ㎜φの場合は、60 秒でようやく 100%近くなることが分かった。ここで図 4－15 の粉砕特性と比較するため、全砕製物中の 2 ㎜以下の細粉重量を全細粉重量比、0.5㎜ 以下の微粉重量を全微粉重量比として、それらの関係を図 4－32 に示した。ここには図 4－13 の砕料 200g の結果も比較のために入れてあるが、スクリーン無の SC-01S の粉砕特性に対して、スクリーンミルの場合は同一細粉重量比に対して微粉重量比が小さくなる方向に偏奇することが判明した。そこでスクリーン無の場合の実験で得られた 0.5㎜ 以下の微粉中の金の含有量比（0.5㎜ 以下への濃集率）を図 4－33 に示したが、金の濃集現象は 0.5㎜ 以下の微粉重量比と軸回転速度に大きく依存しており、スクリーンミルにおける粉砕中における 0.5㎜ 以下の微粉重量比の減少は金の回収に対して，効果的ではない事が推察された。したがって、金を高い効率で回収するためには、2 ㎜以下の砕粉重量比を 40%以上、同時に 0.5㎜ 以下の微粉重量比を 17%以上確保する機器の工夫が必要であると結論した。

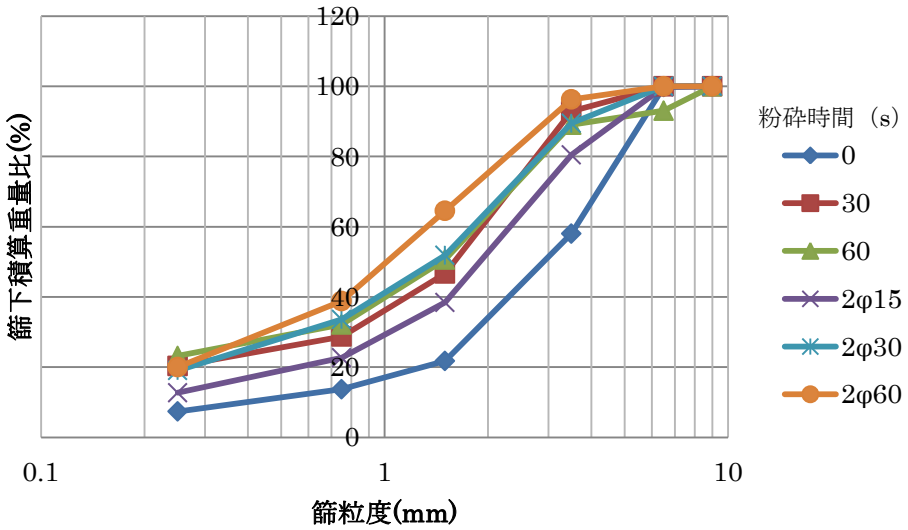


図 4－30　スクリーンの有無における篩下積算重量比の時間変化
（供試砕料 200g、軸回転速度 H、粉砕時間 0～60 秒、スクリーン孔径 2 ㎜φ）

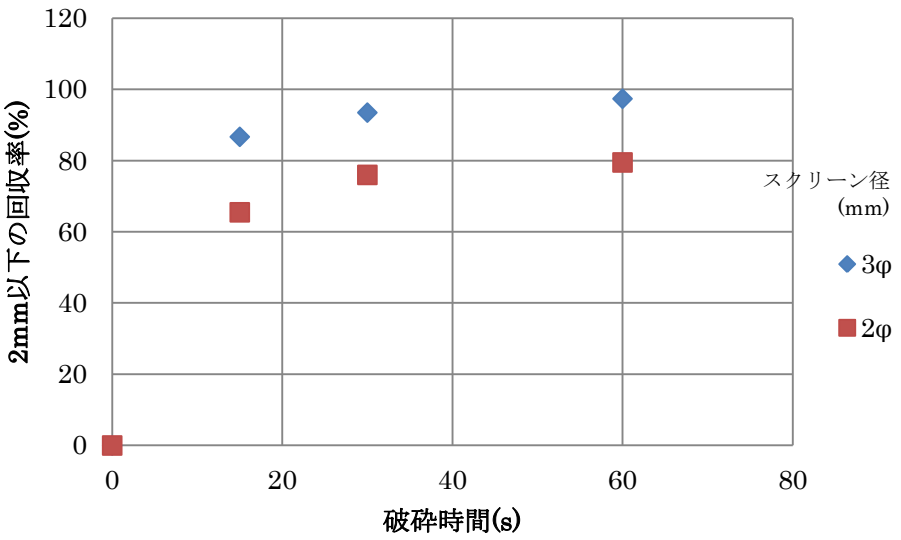


図 4 - 31　2mm φ、3mm φ スクリーン使用時の 2mm 以下の
細粉の通過率（回収率）

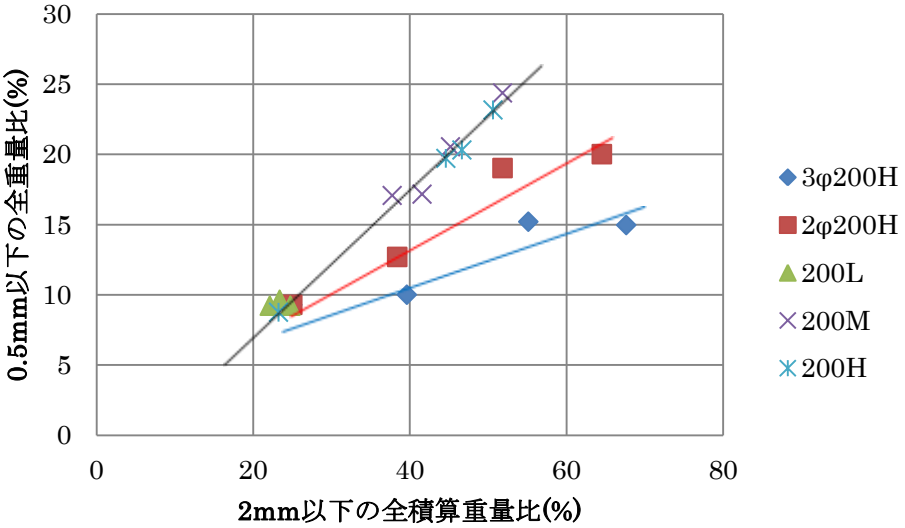


図 4－32　スクリーンの有無による 2 ㎜以下の全積算重量比と
0.5 ㎜以下の全重量比の関係
（供試砕料 200g，軸回転速度 L，M，H，
スクリーン孔径 2 ㎜ φ，3 ㎜ φ）

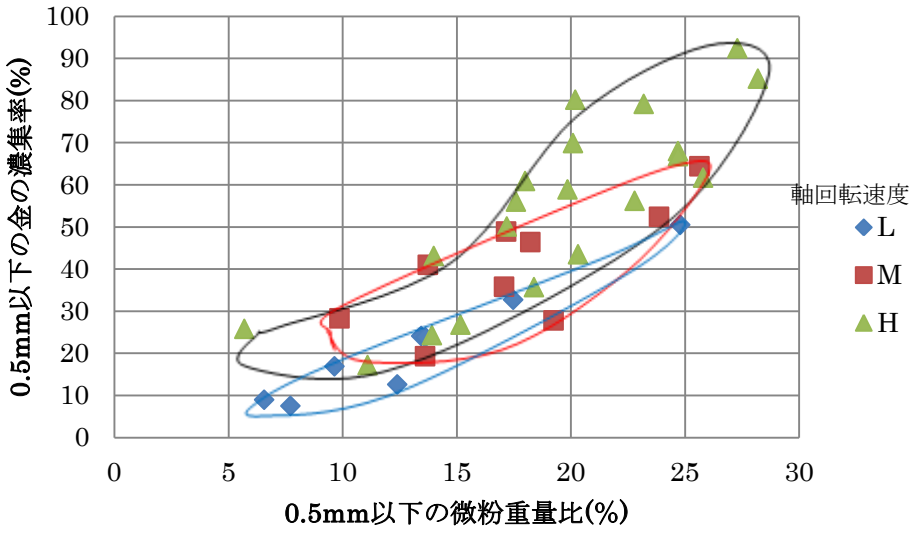


図 4 - 33　0.5 ㎜以下の微粉中への金の濃集と軸回転速度の関係

3−7−3　スクリーンミルの粉砕と貴金属濃集挙動の関係

図 4−32 にから、二つの現象が読み取れる。一つは、スクリーンがあることによって，0.5㎜ 以下の細粉の発生が抑制されること、二つ目は，孔径の大きい方に抑制傾向が大きいことである。このことは図 4 - 30 に示した通過率と合わせて、ブレード式高速回転ミルによる破砕過程の特徴的な現象であると推察される。

先に、筆者はブレード式回転ミル SC-01S を高速底部撹拌式の粉体混合装置[52]として、同じ鍋型の破砕現象が翼型撹拌装置と相似性を持つと考え、そのエネルギー消散密度[53]と破砕の進行を関連づけた。その結果，0.5㎜ 以下の重量比が軸回転速度の三乗則で整理されることを示した。

ここでは上記のマクロな見方に対して、具体的に破砕の機構について若干考察する。ブレードミルの破砕機構に関して、携帯砕片とブレードとの相互作用の関係から、次の三つの作用が考えられる。

（1）砕片とブレードとの衝突
（2）ブレードの接線力で加速された砕片の破砕室内壁への衝突
（3）ブレードにより誘導された渦型循環流中における砕片粒子同士の衝突と磨滅・磨砕

SC-01S のブレードは水平な薄板でありかつ、ブレードの先端線速度が 200m/s である本実験では、（1）や（2）による作用は少ないと考えられるため、粗粒側の初期段階では破砕の進行には有効であるが、破砕が進行するに従って、0.5㎜ 以下がスクリーンから抜き取られ細片側の絶対数量が減少して（3）の粉体同士の衝突による寄与が低下することになる。その結果 0.5㎜ 以下の発生量が増えなかったものと考えられる。

本実験のような携帯砕片群の集合破砕の場合には、この現象が基板に装着されている各種の金属の剥離・分離・破砕にも関係すると考えられる。網澤ら[54]は、DEM シミュレーションによって、ドラム型衝撃式破砕機による基板からの部品剥離を向上させ

る条件について論じている。筆者等と研究目的は異なるとはいえ、基板破壊と部品剥離を分離して評価し、部品の剥離性と軸回転速度および原料基板の供給速度との関係を論じている。

また，古屋仲ら[55]は、電子基板の砕片を衝撃式高速ハンマーミルによって、最大周速度 90m/s の破砕時の高速カメラ観察を行い、銅箔の剥離に先行して基板の粉砕化が起こっている現象を視覚的に捉えた。

さらに西川ら[56]は、基板のパウダージェット加工の過程で、粒子衝突による基板表面の破壊から付着加工への遷移条件を検討する中で、単一粒子の基板衝突速度が 400m/s 以上で基板の破壊と加工との遷移現象が生じることをシミュレーションによって明らかにした。実験は 200m/s 以上の領域について行っており、300m/s を超すと表面破壊体積が急激に増加する傾向を示した。

これらの研究成果は、携帯砕片の破壊と貴金属剥離・分離に周速度が重要であることを示唆している。SC-01S の最大周速度は 203m/s であったので，細粉化の促進と貴金属（特に金）の濃集を更に高めるためには、粉砕の速度論的解析[57-58]およびシミュレーション手法[59]を使うことによって、前述の三つの作用はもとより、投入したエネルギーの各作用への寄与についても把握できるものと考えている。

図 4 - 32 には、本章の研究で実施した各種の実験から得られた 0.5mm 以下の細粉量とその粒度域に含まれる金の含有量との関係を纏めたものである。つまり、携帯砕片からの金属部品の剥離状況の結果を示している。この図からは、同じ 0.5mm 以下の量でも、軸回転数が大きい場合には概して金の濃集率が高くなることが分かる。図 4－31 と図 4 - 32 の関係から、携帯砕片中の各部品の破壊と装填されている金属類の剥離・分離に対する軸回転速度やブレード構造が重要な役割をしていることが示唆されている。

このように、本実験対象である水平ブレード式高速カッティングミルによる破砕と分級・分離には、単一物質の破砕には見られない複雑性を含んでおり、実験的に証明することはもとより、数値解析やシミュレーションモデルによる解析とが必要である。

この他に、スクリーン構造とその通過現象に関して，本実験では市販の機器を用いたが，開孔率を増大する加工は可能であるし、通過現象についても、篩方式の選択[47)60]、目開きの影響[61]、粒子形状の問題[62]等も関与する。また、篩現象の速度論的解析[63]も装置の開発上重要なアイテムであると考えている。開孔率を大きくするには、丸孔 60° 千鳥抜きの孔構造を角孔並列抜きにすることも可能と考えられる。しかし、スクリーンの強度や寿命、交換方法等が実用上の課題になる。

これらの諸点は、本章の研究で描いている粉砕中の連続分級・分離システムを具体化していく中でこの結果は重要な意味を持っていると考えている。つまり SC-01S の粉砕過程で貴金属を分離抽出する方法として、単純なスクリーンミル方式への改造は、必ずしも得策ではないことは分かった。今後 3.4 で述べた破砕室の構造・形状の課題と合わせて、更に実験検討していく予定である。

3－8　粗金、粗銀の製品化に関する実験と一貫システムの評価及び事業性の検討

3－8－1　2㎜以下の金、銀濃縮粉体の金属濃縮と新製錬による 95%粗製品製造の可能性

本章の研究における初期の構想では、破砕工程で得られた貴金属濃集部分を、先ず粗製錬して金を 95%程度に濃化した上で、貴金属専業精錬業者に引き継ぐ工程を描いていた。具体的には、SC-01S 後の 2ｍｍ以下の微粉化部分からまず、プラスチック部分を分離し、金属部分を濃縮した後さらに、金、銀等の貴金属を簡単な物理的手法で濃縮して、更なる高濃度の貴金属原料にする工程を最終工程とした。この場合の金、銀濃度の目標を 95%前後とした。

ここでは適用可能性の有無にかかわらず各種の基礎実験を行っている。その目的の一つに、第 3 章で述べた現在の小規模金採掘における、水銀使用量の低減や Zero Mercury 化へのアプローチへの応用を視野に置いているからである。その内容は次の二つに区分される。

１）物理的濃集方法の構想と予備実験

２）金、銀と水銀との反応の効率化と新しいプロセスの創造への予備実験

3－8－2　物理的濃集方法の構想と予備実験

本項では次の三種類の濃集方法を検討した。第一には、磁選工程を経るものとして、その次に、プラスチックの分離工程があり、そこでは乾式プロセスと湿式プロセスおよびそれらの複合プロセスを含めた三種類の方法について予備実験を行った。

なお、携帯電話に含まれるプラスチックの比率は、3－2－3 項で示したように、SC-01S 破砕後の 2 ㎜分級点から見ると 2 ㎜以下の微粉と 2 ㎜以上の細粉とでは、粒度範囲によってプラスチックの比率が大きく異なることが明らかになっている。金を主体とする回収プロセスでは、原料は 2 ㎜以下の微粉であるので 60～70%がプラスチックである。その中でも微粉側ほどプラスチックの比率が高い反面、少ない金属類の中に貴金属（金、銀、パラジウム）が凝縮されているという特徴を見逃すことはできない。いずれにしても、プラスチックを除去出来れば、2 ㎜以下における金属部分の各金属の濃度は 2～3 倍に濃化することになる。3－2 - 2 の結果を用いて各工程を概説すると、以下のようになる。

１）第一段階（磁選工程）；携帯電話中の磁石は 3－2 項で述べたように、破砕中に磁石類を連続的に付着除去する仕組みを内蔵している。しかし、鉄を含め弱磁性体の金属類は上述の微粉原料にもわずか（約 2～3%）含まれている。そこで第一段階で簡単な磁選工程を設けて弱磁性金属の除去を行う。

２）第二段階－1（プラスチックの乾式除去工程）；ここでは気流分級方法[64]と静電気除去方法[65]を取り上げた。前者は、プラスチック（第一工程後で約 70%）の比重が金属類に比較して 1.2 以下と非常に小さいことを利用するものである。後者は、プラスチックの静電容量が大きいことの着目したものである。いずれも実用化されているものであり、事業規模と分離目標によって選択することになる。本章の研究では、低コスト化を図る上でも、簡素で低価格の機種を選択し、出来るだけ濃度を高めて最終工程に引き渡すことを想定している。

３）第二段階－2（湿式比重分離工程）；各種の比重を持つ液体として、蒸留水、飽和食塩水（比重 1．2）及び重液選鉱（比重 3.11）を選び浮遊部分と沈殿部分を実測して、浮遊部分をプラスチック選鉱の指標とした。また、ICP 分析（王水＋1mol 過剰塩酸で溶解）後の濾過残渣をプラスチックと仮定してその重量比を計算して、上述の指標との比較を行った。

これらを含めて湿式選鉱の選鉱指標を図 4 - 34 にまとめた。粒度範囲を 0.5 ㎜以下、0.5～2.0 ㎜、2～10 ㎜の 3 水準とし、それぞれの試行数は、蒸留水が 3、飽和食塩水が 3、ICP 濾過残渣が 4 であった。濾過残渣をほぼプラスチックとすれば、0.5mm 以下の場合プラスチック指標は約 67%であるのに対して、飽和食塩水の場合は 68%であり、選鉱機能としての有効性はあると言える。しかし粒度範囲が 0.5～2.0 ㎜になると、濾過残渣が約 60%であるのに対し飽和食塩水では 70%になって、指標にはならないことと、食塩水の浮選では金属とプラスチックが完全に分離されないことが示されたことになる。一方蒸留水の場合は、プラスチックの選鉱には不適当であることは明瞭であった。携帯電話に使用されているプラスチックは、主には躯体用の熱可塑性 ABS（比重 1.0～1.2）[66]であり、その他わずかに基板用の熱硬化性 PF 等（比重 1.3 以上）[67]がある。したがって、0.5 ㎜以下での粗い選鉱方法としては飽和食塩水は有効であるが、分離プロセス全体の構成手段としては適さないことが判明した。このことは今後、比重の大きいエンジニアリングプラスチックの発展[68]により、新しい材料が増加する可能性があることから、本章の研究では、乾式分離方式の検討が妥当であると結論した。なお、重液選鉱の場合、重液の洗浄とその付着による分析時の溶解が困難という課題があるため、更なる工夫が必要である。また、用いた重液である Na-W 系重液（ポリタングステン酸ナトリウム SPT、比重 3.11）は、粘性も高いので本研究の基礎研究には適さないと判断した。

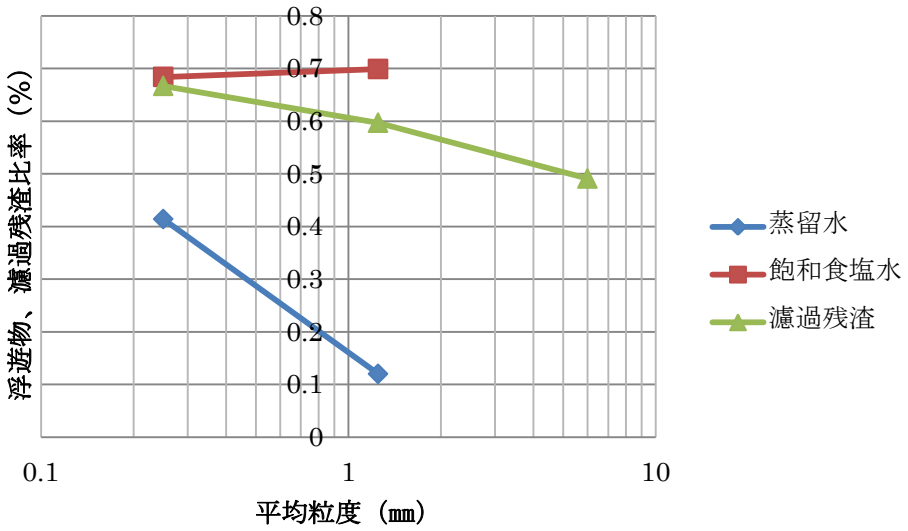


図 4 - 34　携帯砕片の各種湿式選鉱によるプラスチック指標の比較

3－8－3　金、銀と水銀の反応の効率化と新しいプロセスへの試み

水銀は第 3 章で論究したとおり、2013 年採択された水銀条約により小規模金採掘(ASGM)を除いて使用の制限が厳しくなることになった。しかし、ASGM においては段階的に削減しつつ生活圏の持続性を図っていく方向が示されており、当面は水銀の使用は維持されると考えられる。本論文では Zero Mercury に向けて、第 3 章で検討しているが、第 4 章のこの項では、水銀との反応効率を高めることで、使用量の抑制を図る方法を基礎実験に基づいて論考する。なお小規模金採掘の場合の金鉱石や砂金中の金と水銀の反応は、携帯電話中

の金、銀との直接反応に近い反応場であると推察されることから、本章では第 3 章との関連から、都市鉱山の回収資源に関しても Au-Ag-Hg 三元系の反応について基礎検討を行い、以下の項目について予備実験の結果を要約した。

１）金箔、銀粉と水銀の反応性の確認

２）反応側条件の工夫によるアマルガム化反応の促進

①加圧状態での反応促進；水銀ポロシメータによる高圧反応の確認

②メカノケミストリー[69]による反応促進；ボールミルによる粉砕と反応の同期化

③高温高圧下の蒸気による反応促進；オートクレーブによる確認

なお、飽和食塩水による比重選鉱後に、湿式反応として食塩水中でアマルガム反応を実現するプロセスも考えられる。この場合の着眼点は食塩効果[70]による反応の促進であり、プラスチック分離の工程と連結プロセスを想定することが可能である。しかし、洗浄処理に難点もあり、本章の研究では取り扱わないことにした。

上記のいずれの実験においても、アマルガム反応の進行は示唆熱分析で確認した。

3－8－3－（1）　金箔、銀粉と水銀の直接反応

表 4－17 は水銀と各種金属との反応を形態別に区分[71-72]してまとめたものである。また、図 4－34、図 4 - 35 はそれぞれ Au-Hg、Ag-Hg の二元状態図[73]である。金と銀と水銀のアマルガム反応はタイプ C 型であり、Li を含めて特異なものに属する。本論文の対象である金と銀の溶融点はそれぞれ 1064.43℃、961.93℃であるが、水銀は－38.836℃で常温において唯一液体である。C 型の特徴の一つは、金、銀は融点が高くかつ常温では水銀に溶解度をほとんど持たないにも拘らず、金アマルガム（金属間化合物γ－Au_2Hg）が 122℃以下で生成し、同様に銀アマルガム（γ－Ag_4Hg_5）は 127℃以下で生成して過剰の水銀中に懸濁することである。試みに、水銀量をアマルガム合金の当量以上に添加した状況で接触させると、金箔や銀粉の溶け込み反応は非常に早く、ほぼ瞬間に完了することが直接観察された。しかし、塩化銀との直接反応は常温の密閉容器内では非常に緩慢で、4～5 日以

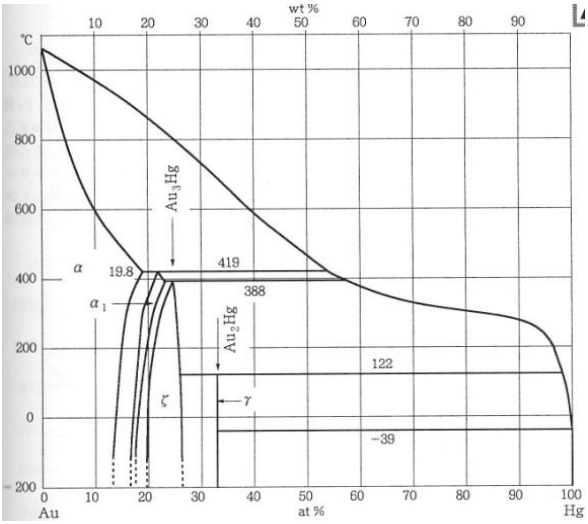


図 4 - 34　金－水銀二元状態図

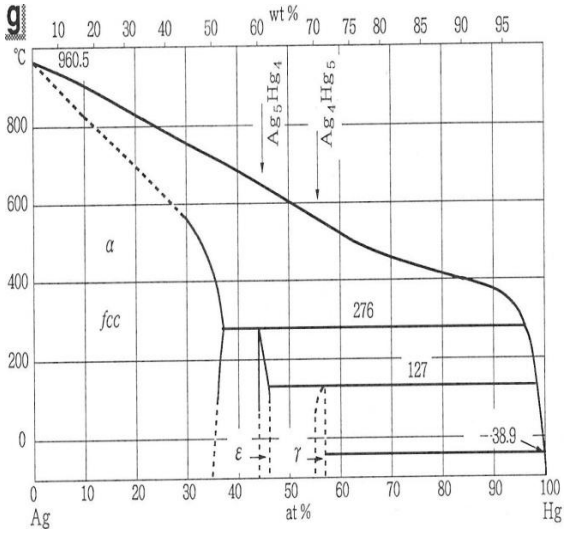


図 4 - 35　銀－水銀二元状態図

降4カ月後の観察においても、固体粒子が散在してはいるものの、アマルガム当量の反応までには至らなかった。

これらの諸現象から、第2章の銀鉱山における銀の抽出においては、16世紀以降に工夫されていた加熱や混錬方法等が必須の促進法であったことが推察された。しかし金箔や銀粉との反応は常温でも瞬間反応であると観察されたことから、ポトシ銀山での自然銀の抽出や、第3章の小規模金採掘における砂金等の自然金の抽出が非常に簡単であることも結論することが出来る。そして、抽出の段階では全く燃料を必要としない方法であることも容易に使用される原因であることも確認された。

表4－17　水銀と各種金属との反応の携帯（筆者作）

タイプ	反応の形態（M；金属、Hg；水銀）	代表的金属	特徴
A型	xM（n＋）＋xne＋yHg＝MxHgy 水銀柱で、化合物MxHgyを生成	①金属間化合物 ②比較的安定化合物	Na,K,Rb,Ca,Cs Sr,Ba,Mg
B型	M（n＋）＋ne＋Hg＝M（Hg） 水銀中への金属の単純溶解	溶解度が大きい	50%≤;In,Tl 10-50%;Cd,Zn,Bi,Sn 1-10%;Pb,Rb
C型	xM（n＋）＋（y＋m）Hg＝ MxHgy＋mHg 化合物MxHgy；アマルガム	弱い結合の金属間化合物が過剰Hg中に懸濁	Au,Ag,Li 【研究課題の アマルガム反応】
D型		①水銀中の溶解度が非常に小さい ②全く溶解しない	Fe,Co,Ni,Cr,Ga,Mn,Al Cu,Ge,Be,Ti,V,W

注；①（n＋）はn＋乗の意味　②A～C型反応の吸熱・発熱の区分は不明

3－8－3－（2）　反応側条件の工夫によるアマルガム化反応の促進

アマルガム反応の促進には、まず微粉にして、金、銀鉱石を脈石やプラスチックから分離することが前提になる。次に、その粉体中の金、銀鉱石と水銀との会合確率を高めるための混錬作業が重要である。これらに関しては古代から工夫されてきたことは明白である。16世紀以降のスペインに植民地において第2章で詳述したように、各種の銀鉱石と水銀との反応の面での促進の工夫がなされた。その結果がメキシコのパティオ法であり、ペルーのカホネス法である。本章では現代の科学的視点から3－7－3で掲げた（２）の①～③の反応場の条件を変えて予備実験を試みた。

先ず①の加圧の効果について、簡単のため気孔率測定用水銀ポロシメーター（圧力100MP×1時間＋200MP×1時間）で、銀粉、2㎜以下の携帯砕片について通常の気孔率測定方法に従って加圧実験した。試料はその後示唆熱分析（TG/DTA）を実施し、定性的なアマルガム生成の確認を行った。その結果、銀粉では290℃以上でシャープなピークが観察された。一方、携帯砕片の場合は270～320℃の範囲にブロードな凸曲線になった。次に②について、2㎜以下の携帯砕片と水銀をボールミルに入れてメカノケミカルな反応を期待して行った

実験後の砕片について同様に示唆熱分析を行った。その結果 TG/TDA では 320℃にシャープなピークを持つ曲線が得られた。これらの 3 種類の実験から、いずれにおいても化学反応が進行していたことが確認された。しかし、生成物が金属間化合物やアマルガムであるかの同定および各種の促進条件の差異に関する比較実験は行っていない。また、③のオートクレーブによる水銀との反応については、突沸現象があり評価は行っていない。

なお、これらの加圧、同定の実験は、住友金属テクノロジー（株）試作試験部（兵庫県尼崎市）に依頼して行ったものである。しかしこれらの水銀アマルガム反応に関する実験結果は、小規模金採掘現場の抽出技術の改善に生かしていくことの外は、2013 年締結された水銀条約の理念に従い、封印することを決定した。

日本における水銀と金属との物理化学的研究は 1956 年水俣病事故の発覚を機に低迷し、終息してしまった。それ以前には、一連の基礎的研究が行われていた[71]し、事業規模での開発研究もイトムカ製錬所で続けられていた。常温の地上で唯一の液体金属でその化学的活性によってそれまでの重化学工業に多方面に利用されてきた。まさに Clean and Poison な金属[74]であったし、今でも研究室の片隅で眠っているかもしれない[75]。しかし、第 1 章で言及したように、水銀も地下資源は枯渇寸前でありかつ、蒸発性の金属であるため製品として地上資源になることはなく、地球表面のほとんどの地域に拡散してしまい、人工資源としての価値は全くなくなる宿命の金属でもある。つまり産業としての活用の可能性はほとんど失われてしまったと言える。

水銀条約の発効後は、新規の水銀鉱山の開発は禁止される。したがって鉱業に関して残された課題は、第 2 章、第 3 章で論究した過去の水銀および水銀使用の産業と ASGM に起因する局所的な利用の抑制と土壌汚染、河川汚染の修復である。

3－8－4　貴金属製錬と金プレートの製造

前項 3－8－2 で言及したような破砕分離後の物理的方法による貴金属の更なる濃縮方法に関しては今後の課題とするが、本章で描いた一貫プロセスの実証のため、純金プレートの製造を目指に、既存の製錬業者に委託精錬をすることにした。なお、この工程は各種の選択肢の中の一つでもある。

選択した企業は、すでに携帯電話の集荷、破砕、精錬、製品化で実績のあるアサヒプリテック(株)である。同社はメッキ廃液中の金を約 95%（液種により変動）に濃集する機器を開発、提供しており、その後湿式製錬、電解製錬でフォーナイン（99.99%）の金（英国 LBMA 認定)を製品としている(ASAHI HOLDINGS 2013）[76]。このプロセスは研究構想にある粗製錬後の後工程として有力であると考えている。

写真 4 - 10　使用済携帯電話から回収した純金のプレート

写真 4 - 10 は、2 回の学内イベントで回収した携帯電話の各種実験後のほぼ全量（約 400 台分 32kg）を原料として、アサヒプリテック（株）の精錬プロセスにおいて製造した、40mm 幅の金プレートである。なお、原料携帯

電話の工程分析では、Au 648gr/t、Ag 2500gr/t、Pd 50g/トンであった。

3－9　事業化構想の見通し

ここでは、これまでの研究成果を取り入れた携帯電話のリサイクル事業(回収から粗製錬までの事業)に関する粗検討を行った。結果を図 4 - 36 に示した。ここでは作業要員は 3 人程度で構成した場合の想定規模と粗便益を提示している。設備費は一次、二次破砕設備の購入価格である 300 万円程度とした一方、粗製錬の費用は含んでいない。

また、本プロセスで想定される主なランニングコストには、顧客接近型回収に要する費用、二次破砕機の摩耗対策また、一次・二次破砕機の連続排出の装置投資で必要であろう。携帯電話の金の含有率を 500、400、300mg/kg にし、回収率 90%で試算すると、少なくとも回収量が月間 1 万台以上でなければ事業化は難しいと考えている。この点採算性を十分考慮したシステムの構築が重要である。携帯電話は今やフィーチャー型からスマート型に急速に変化しつつある。しかも端末機能の高度化によって排出行動に変化が予想される。そのため有力な鉱山は既に退蔵してある携帯（タンス携帯等）が考えられ、それが廃棄物になる前に集荷回収することが急がれる。そのためには待ち型回収に加えて、攻め型回収（アクティブ型回収；本章の顧客接近型回収もその一つ）も必要であると考えている。いずれにしても、金（Au）を採算源としたシステム設計が基本になると考えている。

今後は、小型家電のリサイクル制度が本格化する過程で、自治体、リサイクル業者あるいは、第 2 節で述べた NPO 等の別の視点からの発想を取り入れた種々の回収手段を応用して、本章で描いたシステムを取り入れた適正技術、適正規模の事業化の可能性を継続して検討していく。

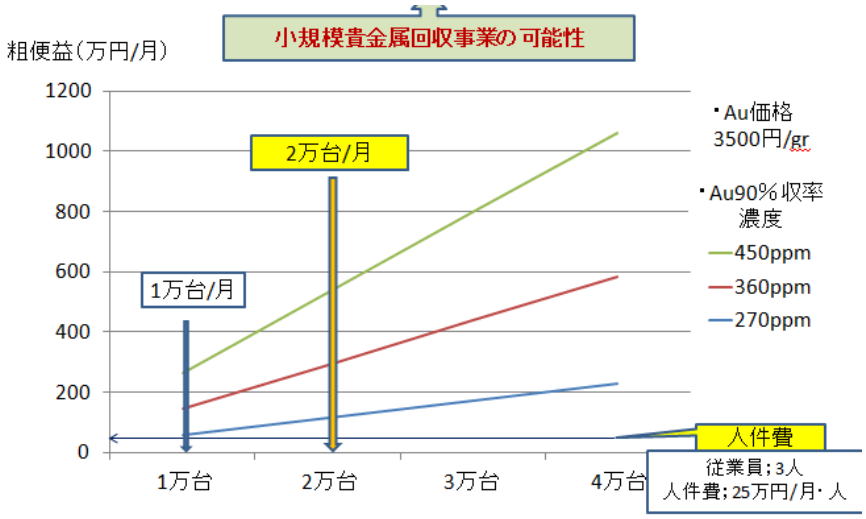


図 4 - 36　金の 90%収率濃度と月間回収台数に対する粗便益(筆者作)

第 4 節　本章のまとめ

最初に掲げた 4 点の目的に対し、本実験を通じて、以下の結果を得ることができた。

1）顧客接近型回収を意図した鉱脈設定と安心・安全を趣旨とする MS-Z5 の使用は適切で

あった。つまり大阪大学構内での回収キャンペーンの結果から、大学生協組合を中心に鉱脈が形成されると考えられた。そして先行実施された各種回収方法に対して、10 倍以上の日間回収台数となった。また目前・足元破砕の方法は、個人情報を内蔵する携帯電話の回収には必須である。実際の運営に当たってはこの回収作業の経費を抑える工夫が必要である。この点では、各種の NPO 支援事業との連携協賛方式は選択肢の一つと位置付けられる。

２）一次破砕機（MS-Z5）に磁性物を破砕中に取り除く簡単な改造を行ったことで、破砕室内付着物量が減少し、磁性物排出量の約 2/3 を捕捉できた。これらの結果から、簡単な捕捉装置により連続的に磁性体を分離することは可能である結果を得た。

３）二次破砕機（SC-01S）の破砕室内をフィルターで二分して、破砕中に目的粒度のフィルターを通して分別分離する方法が可能でることを確認した。今後はフィルター内外の粗片、細片を連続的に排出する方法と大型化の工夫をする必要がある。これによって破砕工程の効率化と低コスト化が可能になる。

４）二次破砕後の 2 ㎜分級砕片中のプラスチックと金属分の評価をした結果、2 ㎜以下の細片では金属分の重量は約 40％、2 ㎜以上の粗片側では金属分が重量比で約 60％と見積もられた。前者には貴金属三元素（Au、Ag、Ｐｄ）が濃集し、後者の粗片側には、鉄鋼用レアメタルの Cr、V、W、Mo の大半が濃集した。さらに Ni、Al、Ti、Si、Mn、Zr は 50％以上が含有されるが分かった。

５）金、銀と水銀の反応に関して各種の基礎実験を行った。常温における金、銀と水銀の直接接触反応は瞬間反応に近いことが分かった。このことが小規模金採掘において燃料不要の最も簡素な製錬法として広く用いられている原因である。また各種の反応条件の効果も定性的に確認できた。今後小規模金採掘現場における水銀抑制や Zero Mercury への取り組みに生かしてして行くことにしている。

６）小型家電の中にあって貴金属元素の多い携帯電話の精錬においては、貴金属専業精錬業者との連携が必要である。その際、本プロセスでは金を主体に、その他の貴金属（Ag、Pd）の回収も同時に行うプロセス構成が要求される。本章ではこの構想の下に、専業精錬業者に金抽出と金プレート製造を委託し、システムの一貫試行を完了した。

７）図 4－6 に掲げた本研究の意図するシステム設計において、鍵と考えていた「顧客接近型回収」の社会実験と、「二段破砕法による貴金属濃集技術の開発」の完成によって、目的とする低コスト回収と簡便で低価格の破砕機の構成から成る低コストシステムの見通しが立ったと考えられる。また、事業化に当たっては、月間最低１万台以上の回収が必要であることを示した。これによって適正規模と適正技術を考慮した使用済携帯電話回収の一貫システムへの展望が可能になった。

以上、第 4 章における都市鉱山開発の研究は、貴金属の地下資源の枯渇に対する地上資源の開発の重要性に注力した。地球上で最も拡散性の高い携帯電話をその開発対象にし、日常的に用いられている身近な粉砕機を用いるという着想から、貴金属なかんずく金の濃集を簡単な操作によって低コストで実現でき、事業化の可能性が見えた。本章の研究によって、この技術が高度な理論的裏付けを持ち、かつ普遍性的技術としてグローバル性を網羅した成果を持つことが実証できた。

【参　考　文　献】

1) 環境省：循環型社会形成推進基本法の法体系(2014)

2) 経済産業省：３R 政策－資源有効利用促進法－パソコンリサイクル
http://www.meti.go.jp/recycle/main/admin_info/law/02/index04.html
閲覧日　2014 年 11 月 22 日

3) 森下哲：使用済み電子機器等リサイクル制度の概要と今後の取り組みに関する考察、廃棄物資源循環学会誌、Vl.23,pp.280-294(2012)

4) 原田幸明,醍醐市朗:よくわかる「都市鉱山」開発、日刊工業新聞社（2011）

5) 細田衛士：グッズとバッズの経済学－循環型社会の基本原理、東洋経済新報社（2012）

6) 中央環境審議会：小型電気電子機器リサイクル制度の在り方について（第一次答申）、小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済み製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（第 10 回）（2012）

7) 竹嶋厚美、藤波岳史、山田妃佐子：携帯電話の LCA 分析、武蔵の鉱業大学（2005）
http://www.yc.tcu.ac.jp/～itsubo-lab/reports/cs2005-c.pdf#search
閲覧日　2012 年 10 月 4 日

8) 高橋和枝、中村二朗、小和田和美、鶴岡正顯、松野泰也、足立芳寛：携帯電話からの資源回収とその経済効果および環境負荷、日本金属学会誌、第 73 巻、第 9 号、pp.747-751（2009）

9) 中島謙一、山本圭介、中野佳代子、黒田光太郎、原田幸明、長坂徹也：関与物質総量(TMR)に基づく使用済携帯電話リサイクルフロー解析、日本 LCA 学会誌、Vol.2,No.4（2006）

10) 梅澤光希、増田悦夫：携帯電話端末の回収とその効率化に関する検討、orijinal report(2009)

11) 村上進亮、大杉仁、村上（鈴木）理映、向田愛子、辻村博則：携帯電話の寿命及び退蔵動向の調査とストック量の推計、日本 LCA 学会誌、Vol.5,No.1,pp.138-145(2009)

12) 姉崎正治，山本高，三好恵真子：(公財）鉄鋼環境基金、助成研究成果報告書、(2014 年 4 月 1 日)

13) 環境省報道発表資料：「使用済携帯電話回収促進キャンペーン」結果報告及び使用済携帯電話回収に関する意識等に関する調査結果(お知らせ)、(2009 年 9 月 4 日)

14) ECO JAPAN：経済産業省、「たんすケイタイあつめタイ」で 57 万台の携帯電話を回収、(2010 年 6 月 24 日)

15) ケイタイ for コンゴ:テラ・ルネッサンス　　閲覧日 2014 年 11 月 22 日
http://www.terra-r.jp/congo/

16) 国際環境 NGO　A SEED JAPAN：ケイタイゴリラ　閲覧日 2014 年 11 月 22 日
http://keitai-gorilla.org/blog/

17) (独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC)：希少金属等高効率回収システム開発－廃小型電子・電気機器からのレアメタル等の回収、H21 年 1 月 21 日（2009）

18) 姉崎正治,三好恵真子：都市鉱山に関する実践的研究－使用済み携帯電話の破砕特性に

関する基礎的検討、大阪大学大学院人間科学研究科紀要、第 38 巻,頁 131-153. (2012)
19) 姉崎正治,山本高郁,三好恵真子：使用済み携帯電話の破砕過程における各種金属の分離・濃集現象、日本鉄鋼協会第 164 回講演大会（愛媛大学)、環境・エネルギー社会工学学会資源循環フォーラム「パイロリサイクル 2」、頁 14-22(2012)
20) 三好恵真子,姉崎正治：使用済携帯電話からレアメタル回収技術と実践への展望－先人たちの知恵の結晶を未来に生かす挑戦、New Food Industry、vol.55.No.9,pp.31-48 (2013)
21) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：水平ブレード式高速カッティングミルによる一次破砕後の使用済携帯電話砕片の乾式粉砕過程に関する実験的検討、廃棄物資源循環学会論文誌、掲載決定（2015a)
22) 姉崎正治、山本高郁、三好恵真子：水平ブレード式高速カッティングミルによる使用済携帯電話の粉砕と貴金属成分の濃集現象、廃棄物資源循環学会論文誌、査読中(2015b)
23) 大和田秀二、古賀千香子、影山創、所千晴、白鳥寿一、湯本徹也：新規粉砕と部品・粉体選別による廃携帯電話中のレアメタル濃縮、
Journal of MMIJ,Vol.128,No.12,pp.626-632(2012)
24) 晃立工業（株)：パンフレット（Multi Media Crusher マイティセキュリティ MS-Z5)
25) Itmedia Mobile：試作機から金を抽出－ソニー・エリクソンの“資源循環プロセス”とは－、(2009 年 9 月 11 日)
http://www.itmedia.co.jp/promobile/articles/0909/11/news083.html#l_st_se-04.jpg
閲覧日　2015 年 4 月 3 日
26) （独行）情報処理推進機構翻訳監修：媒体のサニタイズに関するガイドライン－米国国立標準技術研究所による勧告－コンピュータセキュリティ、NIST Special Publication 800-88(2006.09)
27) 古屋仲繁樹、遠藤茂寿、松田聡：廃電気・電子機器リサイクルのための選択粉砕・容易分離技術の開発、(独行）産業技術総合研究所成果報告書、平成 16 年度研究助成事業報告会資料、G-02, プロジェクト ID:02B67005c (2005)
www.nedo.jp/itd/teian/ann-mtg/fy16/seikahoukokukai/pdf/g/g-02y.pdf
（参照 2010 年 12 月 11 日）
28) 三庄インダストリー（株)：会社案内（Campany Guide)
29) 貴田晶子、宮崎徹、倉持秀敏：製品中のレアメタルを含む多元素分析法、廃棄物資源循環学会誌、Vol.22,No.1,pp.19-27(2011)
30) 湯本徹也、白鳥寿一：WEEE 中の金属リサイクルに関する研究－金属含有量インベントリー作成のための調査、Journal of MMIJ.Vol.125,No.2,pp.75-80(2009)
31) 松本健：難溶解性物質の分解法、ぶんせき、頁 60－66（2002 年 2 月号)
32) 小室隆将、鈴木涼、小野龍幸、大和田秀二、所千晴：廃電子基板中のレアメタルの濃縮における各種破砕機の粉砕挙動比較、資源・素材学会、資源・資材 2012（春季大会)、No.2515,pp.210-211(2012)
33) (独) 物質・材料研究機構：熱アシスト磁気記録可能な FePt ナノ粒子媒体構造を実現、NIMS 報道資料（平成 22 年 8 月 2 日)
34) 永田進治：新化学工学講座Ⅶ-2　撹拌機の所要動力、日刊工業新聞社（1956)

35) 齋藤文良編:粉砕・分級と表面改質、(有)エヌジーティー、pp.53－57,90-97 (2001)
36) 八嶋三郎編：粉体と粉体物性、培風館、pp.150-184 (1986)
37) 粉体工業会編：粉体工学叢書第2巻　粉体の生成、pp.26-41 (2005)
38) 椿淳一郎、鈴木道隆、神田良照：入門　粒子・粉体工学、日刊工業新聞社、pp.63-73 (2002)
39) 岩崎英二・中野忠・古賀博昭・宇都宮彬：「金属含有量調査のためのプリント基板の粉砕方法」、『日環セ所報』、No.37,77 - 78 頁 (2010)
40) 綱澤有輝、所千晴、大和田秀二、酒井幹夫、村上進亮：ドラム型衝撃破砕機による基板からの部品剥離機構の検討及びDEMシミュレーション、J.Soc.Powder Technical,Japan,Vol.49,No.3,pp.201-209 (2012)
41) 林健太郎、綱澤有機、所千晴、大和田秀二、飯塚秀明、石川修：DEMシミュレーションによる湿式媒体撹拌型ミルの最適化設計、*Journel of MMIJ*,Vol.130,pp.53-59 (2014)
42) 徳岡洋由：撹拌におけるバッフル効果，神鋼ファウドラー技法，第36巻，第3号，pp.5 - 9 (1992)
43) 菊池雅彦：撹拌技術の進歩と展望、神鋼パンティック技報、Vol.34,No.1,pp.1-7 (1990)
44) 岡本幸道：傾斜翼と後退翼との撹拌特性の比較、神鋼ファウドラー技報、Vol.28,No.3,pp.13-16 (1984)
45) 深谷実央、大河原真一、小川浩平：固液撹拌層における粒子とインペラーおよび槽壁との衝突頻度、化学工学論文集、第29巻、第5号、pp.685-691 (2003)
46) 伊佐治実央、大河原真一、小川浩平：固液撹拌層における粒子とインペラーの衝突頻度相関式、化学工学論文集、第32巻、第4号、pp.315-326 (2006)
47) 命尾晃利、堀合誠：粉流体の篩分け機及び混合機、日本海水学会誌、第37巻、第3号、pp.183 - 196 (1983)
48) 高橋主人、林政克、篠崎正、内田昭就：トロンメルによるプラスチック廃棄物の篩分け、粉体工学会誌、Vol.15,No.4,pp.205-212(1978)
49) 古閑二郎、空閑良寿、山口賢治：スクリーンミルの破砕生成物の粒度分布、化学工学論文集、第8巻、第6号、pp. 750-752 (1982)
50) 古閑二郎、空閑良寿、山口賢治：スクリーンミルによる粉砕の速度論的解析、化学工学論文集、第10巻、第2号、pp. 204-210 (1984)
51) 古閑二郎、空閑良寿、山口賢治：スクリーンミル粉砕過程解析のための衝撃粉砕実験、化学工学論文集、第11巻、第1号、pp. 13 - 19 (1984)
52) (社) 日本粉体工学技術協会編：粉体の混合技術、日刊工業新聞社 (2001)
53) 加藤禎人，平岡節郎，亀井登，多田豊：撹拌層の設計・操作における撹拌所要動力の重要性，化学工学論文集，第35巻，第2号，pp. 211-215 (2009)
54) 綱澤有輝、所千晴、大和田秀二、酒井幹夫、村上進亮：ドラム型衝撃破砕機による基板からの部品剥離機構の検討及び DEM シミュレーション、粉体工学会誌、Vol.49,No.3,pp.201-209(2012)

55) Koyanaka S., Endoh S. and Ohya H. :Effect of impact velocity control on selective grinding of waste printed circuit boards, Advanced Powder Technol., Vol.17, No.1, pp.113-126(2006)
56) 西川智弘、佐藤慧、萩原隆行他：粒子衝突による基板破壊ーパウダージェット加工における加工メカニズム、砥粒加工学会誌、Vol.57, No.3, pp.174-180(2013)
57) 新井豊、八嶋三郎編：粉砕と粉体物性、集合粉砕、149-203 頁、培風館（1982）
58) 粉体工業会編;粉体工学叢書第 2 巻、粉体の生成、日刊工業新聞社、頁 27 - 33(2005)
59) 酒井幹夫編：粉体の数値シミュレーション、丸善出版（2012）
60) 山田昌治：粉体工業会編粉体工学叢書第 3 巻、気相中の粒子分散・分離操作、第 5 章分級、103-134 頁（2006）
61) 石川敏、下坂厚子、白川善幸他：試験用篩の分離特性に及ぼす目開き分布の影響、化学工学論文集、第 28 巻、第 1 号、pp. 82－87（2002）
62) 柴田俊春、仲山伸二、山口賢治：篩分け速度に及ぼす粒子形状の効果、粉体工学会誌、Vol.25, No.9, pp.615－620（1988）
63) 下坂厚子、東原茂徳、日高重助：コンピューターシュミレーションにもとづく篩分け速度の推算、粉体工学会誌、Vol.35, No.4, pp.242-249(1998)
64) 菊池直樹：固気流動による廃プラスチック連続比重分別装置、神戸製鋼技報、Vol.57, No.2, p109（2007）
65) 平秀春、宮城雄二、花城可英：廃自動車・廃家電のシュレッダーダストのリサイクル技術開発、沖縄県工業技術センター研究報告書、第 5 号、頁 1 - 4（2003）
66) 宮本潤一郎、廣澤克彦、青木修一：植物プラスチックを利用した携帯電話、NTT 技術ジャーナル、12、pp.23-27(2006)
67) 近藤宏司、上村力也：熱可塑性フィルムを用いる多層プリント基板とその材料リサイクルシステムの開発、デンソーテクニカルレビュー、Vol.7, No.1, pp.91-95(2002)
68) プラスチック循環利用協会：プラスチックリサイクルの基礎知識（2013）
69) 齋藤文良：無機材料のメカノケミストリーと素材プロセッシング、資源と素材、Vol.111, pp.515-522(1995)
70) 真嶋宏、田村秀樹、大野丈博：方鉛鉱の酸浸出反応における塩化ナトリウム添加の効果、日本鉱業会誌、93－1077、pp.895-900(1977)
71) 向正夫、小浦延幸：アマルガムの物性とアマルガム製錬、日本鉱業会誌、Vol.82, No.933, pp.35-51(1966)
72) H. Hohn: Mercury in Chemical Metallurgy, Research：a journal of science and its applications, Vol.1, No.12(1947)
73) 平林眞、長崎誠三：二元合金状態図集、アグネ技術センター（2008）
74) 金丸敝：イトムカ鉱業所における水銀製錬、日本鉱業会誌、vol.97, pp.758-761(1981)
75) 原田孔明、河西純一：動き出したレアメタル代替戦略、B&T ブックス日刊工業新聞社、頁 98（2010）
76) ASAHI HOLDING: Corporate Report 2013

終章　総括と今後の展望

本論文では、金、銀の貴金属鉱業に関する三つの具体的な研究課題を選択した。すなわち16世紀以降今日までの長期の歴史射程の中で、水銀を抽出媒体とする製錬に起因する資源・環境問題として、ポトシ銀山および小規模金採掘の二件、並びに地下資源の枯渇に直面する金、銀のリサイクルに照準した都市鉱山の開発の一件を取り上げた。これらの三件の資源・環境問題を包括する共通の学術的基盤概念として、20世紀後半に萌芽したサステイナビリティ学の視点から時間的・空間的に異質な資源・環境問題を包摂する持続可能性の原理を探求し、実践研究へと発展させた。本論文における特に独創的着眼点と研究視座、さらにその成果を以下に整理していく。

まず本論文の総括的所観として、サステイナビリティ学から考察する鉱山業のあり方を導いている。つまり大量生産、大量消費、大量廃棄の時代から循環型社会を構築していく過程で、持続的鉱山開発の問題をどうとらえるかに関わっている。その際、何を持続させるのかの論点において、そのための適正技術と適正規模の考え方をどう描くのかに行きつく。グローバルに生産拠点や経済の発展度合いが移動・変化していく現状においては、その地域に根づいている文化や生活環境に即して、持続可能性に配慮していく対応が必要である。さらに科学技術の研究の立場からは、臨機応変に対応できる柔軟性が求められる。サステイナビリティ学は、その柔軟性の幅を広げる原理を内包していると考えられる。

本論文で取り上げた、金、銀および水銀は古来より馴染みの深い金属であり、鉱害性という観点から、1950年代の水俣病の発覚以前には水銀でさえ特別には注意が払われてこなかった。さらに金、銀に至っては、希少元素であるために厖大な関与物質総量（TMR）を排出することや併存元素の有害性に関しては、製錬用の水銀と比較してもあまり問題にされてこなかった。本論文は、そのTMRの鉱害性および、枯渇寸前の金、銀の地下資源に代わって地上資源（都市鉱山）の回収の重要性に立脚した論考である。ここでは単なる廃棄物の資源化に留まらず、特に小型家電製品の資源化には、一段の工夫が必要であることに実践を通じて強調した。使用済携帯電話の回収と貴金属回収技術の開発はその足掛かりとなった。

次に各章ごとの独創的な取り組みと成果について概要をまとめておく。

序章では、本論文の対象課題を貴金属金と銀に加えて、製錬媒体である水銀を含む三種類の金属に関わる資源・環境問題について「鉱業の持続可能性」を通して論考することにし、三件の具体的対象に通底する貴金属鉱業の持続可能な開発として、貴金属を軸とした希少金属の採掘による厖大な隠れたフロー（関与物質総量 TMR）の量と質から鉱害を論じることを提起した。また地下資源の枯渇性が最も高い金、銀の地上資源の回収におけるコスト改善を目指す画期的な回収方法と技術開発を目指した。

第１章では、これらの具体的研究対象を論究するための俯瞰的な基盤概念を整理し、独創的な指標を取り上げた。次に、サステイナビリティ学で議論される「鉱業の持続可能性」の先行研究を把握した上で、本論文の三件の異なる研究課題の持続可能性の評価方法を考案した。その指標と論考の経緯を以下のように整理し、選択した六点の指標に関して貴金属鉱業の持続可能性の議論を包摂するひとつのストーリィ性を描くことができた。つまり、１）鉱業の持続期間は採掘期間であり、埋蔵量と採掘速度で決まる。サステイナビリティ

の側面からは適正規模と適正技術がその持続性を左右することになる。

２）鉱害の定量的評価は、関与総括物質総量（TMR；total materials requirment）の大きさ（量）とその質（含有物質；Ingredients）の両方から評価する必要がある。

３）適正規模と適正技術はHerman Dalyの三原則と対比される。生産規模あるいは生産速度が地域の環境容量の閾値を越えた（オーバーシュートした）場合大規模鉱害が発生する。

４）鉱山の開発過程は生産量推移の形態（姿）であると仮定し、その姿の形状を Hubbert 理論のロジスティック曲線に照らして、ピーク以降の鉱業施策（規模や採掘技術等）と環境とのバランスが内包されていると捉えた。これはまた上述の持続可能な適正技術および適正規模に関連している。

５）地下資源の枯渇は地上資源への移行であり、金、銀の枯渇度が最も高い状況において、循環型社会を想定したリサイクル率が指標として重要である。

６）持続の時間尺度は最も定義することが困難な指標であるが、本論文では民族文化人類学において定義されている三世代の持続をその尺度の目安として着目した。また閉山後の地域社会の持続に関して世界遺産認定や観光都市として存在し続けることをも含んでいる。

なお、本論文では上記の持続可能性指標の強い、弱いの区分を次のように考えた。

A)強い持続可能性指標；Herman Daly の三原則、適正規模、適正技術、関与物質総量（量と質）、地下資源埋蔵量

B)弱い持続可能性指標；Hubbert Model、循環系とリサイクル、持続期間

以上のストーリィ性に従い、各研究課題を討究した。その結果を以下に要約する。

第２章では、16 世紀以降のスペイン植民地における銀鉱業、特にペルー副王領第五代副王トレドの先進的な銀鉱業を構築したポトシ銀山に関して、当時の歴史資料の読解から具像化し、さらに現代の資源・環境論から再評価した。特に先進的な水力利用システム、廃棄物の資源化施策等を明らかにした。ポトシ銀山を世界に冠たる地位にし、その後約 250 年にわたって持続する基盤を築いたトレドの鉱山業を評価した。当時の歴史的遺産は今日 UNESCO の世界遺産に指定され、鉱山都市として現在も地域社会の持続性に寄与している。一方では、水銀汚染等の環境問題が現代に連動している実態をも明確化した。その一つが鉱山地域に推定される膨大な蓄積水銀量であるが、当時の健康被害の情報はほとんどない。今日の技術による調査の鍵は、旧鉱山地域のミイラの毛髪調査である。毛髪中の全水銀、有機水銀の含有量から、水俣病の存在とその動態が推定できると考え今後の課題として提起した。

第３章では、国連水銀条約(2013 年締結)第７条に規定されている、小規模金採掘(ASGM)の水銀使用の削減と健康被害の防止を喫緊の課題として取り上げ、ASGM 地域社会の生活や経済社会基盤の持続性を確保する段階的な Zero Mercury に向けた道筋を案出した。その鍵となるのは一連の「乾式処理プロセス」であり、それを適正技術として織り込んだ方式を提起した。この中心として日本の高度技術である砕砂製造機を据えたモデルを組み立てた。また実践現場には、人間開発指数の低いサブサハラ地区の ASGM に着目した。それには起点効果を見極めつつ拡大し、最大の水銀排出国である中国への波及効果を展望してい

る。拡大し続ける ASGM の課題は、その開発途上国全般にわたる分散性、小規模性と採掘地域の生計と経済の基盤であることにおいて、喫緊度の高い課題であるものの実践には多くの課題が伴う。本論文の立ち位置は、起点・波及効果を有効に発揮できる地域の選定と具体的技術として「乾式処理プロセス」を提起したものであり、乾式化は水資源の保全に対して鍵になる技術であると考えている。

第４章では、2013 年４月に施行された、日本の小型家電リサイクル制度の推進活動に併行して、使用済携帯電話の回収と貴金属回収について、独自の粉砕システムを確立した。その中で、大阪大学内における２回のイベント型回収という社会実験を通して、約 550 台の携帯電話を回収したことに加えて、都市鉱山開発の普及に寄与した。一方工学実験を通して、携帯電話を原料として簡単な二段破砕方式によって、携帯の排出に伴うセキュリティを保証出来ることと、貴金属４元素（金、銀、パラジウム、白金）の濃集挙動を明らかにし、装置化に成功した。この技術によって回収携帯から純金への一貫製造プロセスの見通しが立ち、上記の回収携帯電話から国際品質基準の金プレートを製造した。鍵となった事柄は「顧客接近型回収」方式によって、効率よく大量の携帯電話を回収できる見通しが立ったこと、および簡単な構造の水平ブレード式高速カッティングミルによって、95％以上の貴金属（金、銀、パラジウム）の回収が可能であることを実験実証出来た点である。この「顧客接近型回収方法」と「機械的貴金属濃集分離法」は、適正規模の事業化を可能にする適正技術として研究開発の価値があった。この成果を適正技術とした適正規模の事業化の可能性も検討した。

以上を総括すると、三件の研究課題が時間的・空間的にバウンダリーが異なることを前提としつつ、「鉱業の持続可能性」を金、銀、水銀の三種類の金属の資源・環境問題として捉えることによって、それらを包摂する持続可能なあり方を導くことが可能となった。

しかし、サステイナビリティ学の多様性・多義性はともすれば議論の精査を求める視点からは曖昧さが残る。本論文は、その弊害を超克するため特定の持続可能性指標ないし概念を選択し、貴金属鉱業問題としては異質な三件の研究課題を包摂する議論の展開を試みたものであり、一定の成果を得ることができた。

上述の成果を、先に整理した六点の持続可能性指標を縦軸、各研究課題を横軸として、本論文で討究した結果の要点をキーワードに簡単化して下記の表に纏めた。それぞれの課題は異なる特殊性を持っているにも関わらず、これらの指標を用いて包括的に持続性を論じることができた。その結果、持続可能な未来の鉱業の姿として、地域適合型技術を基盤とする小規模自立共生社会を描くことができた。

本論文の研究は、16 世紀以降に水銀を使用したポトシ銀山の鉱業による環境汚染や健康被害はもとより、資源循環という先進的取り組みの技術的再評価から始まった。そして現在の小規模金採掘における水銀使用の実態の改善と都市鉱山開発を通して金、銀の鉱業の資源循環と鉱害性に到達し、過去・現在・未来を俯瞰する鉱業の持続可能性を討究するに至った。今後は、貴金属需給と鉱山開発の動向に注目しつつ、小規模金採掘現場の再生と都市鉱山開発の資源・環境問題に関与し、貴金属鉱業の持続可能な未来の姿を目指して、研究成果の実践を通して貢献していく考えである。

2002年9月ヨハネスブルグ・サミットで採択された鉱業や金属産業に関する実施計画「パラグラフ46」の三項目（第1章1－1）の第3項は小規模採掘を対象とした指針であった。国際連合工業開発機構（UNIDO；United Nations Industrial Developmen Organization）は GFE(Global Environmental Facility)および UNDP(UN Development Program)と共に『Global Mercury Project』を立ち上げ、2002～2007年の間、6カ国のASGMの水銀対策を支援した[1)]。具体的目標は、水資源の保全、cleaner technique の導入、環境と健康のmonitering および現地の capacity building である。結果は順次報告されている[2)]。

UNIDOはまた、2013年12月2日国連リマ会議において、「包摂的で持続可能な工業開発（ISID；Inclusive Sustainable Industrial Development)」を宣言し採択された。これはポストMDGsである次期開発アジェンダ2015年の策定・達成を目指すものである。そこでは「貧困の削減」の有効な手段は経済力をつけることを目的に、永続的な繁栄に工業が貢献する可能性を最大限に活用するISIDを推進することを謳っている[3)]。本論文の「小規模金採掘の地域再生」や過去からの遺産「水銀汚染土壌の修復」に向け、今後も動向に注目していきたい。

本論文は、異質研究課題を包摂する論考であるが、その基盤の学問はサステイナビリティ学である。サステイナビリティ学は、概して一人学際、個人学融合を目指す学問[4-6)]であるともいえ、学び前進する研究者が多角的に視野を広めながら個人学融合の力量を高めていくところにその鍵があると考えられる。本論文は筆者自身、浅学浅識を承知で挑戦したものであるが、そのため自己評価に曖昧さがあり、忸怩した感は否めない。しかし、短期間の成果としては、急進であり、今後の研究への糧になっていることは確かである。

表　選択した持続可能性指標と各研究課題の討究を通じて得られた要点

区分	選択した指標	ポトシ銀山	ASGM	都市鉱山
強い持続可能性	Herman Daly	水力の徹底活用 高地の自然と文化の利用	欠落;自然環境の保全、健康被害の危惧	循環系指向の必然性と リサイクル限界
	適正規模	律速過程は掘削と鉱石破砕	家族労働力⇒地域の共同化	回収方法とシステムの工夫
	適正技術	人智を尽くした技術と法整備	無秩序⇒地域適合型技術	簡単・身近な技術の開発
	関与物質総量（量と質）	現在に波及する廃棄物と汚染	小規模でも大量(水銀含む鉱泥)	プラスチック処理 有用元素の備蓄
	地下資源埋蔵量	埋蔵量数100トン 大量の廃鉱石	ほぼ無尽蔵 （有利な点）	世界に冠たる日本の蓄積量
弱い持続可能性	Hubbert Model	長期間の持続 （270年）	過去からの持続と未来性	小鉱山、イベント式の移動鉱山
	循環系 リサイクル	廃鉱石の銀抽出 水銀回収	水銀回収と甦生法の普及	携帯回収技術のグローバル化
	持続性期間 （地域社会）	270年間商業圏の拡大と世界遺産	家族・地域の持続性の確保	小規模の事業援助協賛事業

【参　考　文　献】

1) Global Mercury Project: Protect for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by ASGM Miners(2004)
www.globalmercury.org　　閲覧日　2015 年 5 月 5 日

2) Marcello M. Veiga, Denise Nunes, Bern Klein et al.: Mill leaching- a valiable substitute for mercury amalgamation in the artificial gold mining sector? J. of Cleaner Production, vol.17, pp.1373-1381(2009)

3) UNIDO：包摂的で持続可能な鉱業開発－共通の繁栄の創造/環境保護－、NIDO パンフレット（2014 年 2 月）

4) 森岡正博：サステイナビリティ学において何がサステイナブルであるのか-持続可能性概念の批判的考察序説、大阪府立大学紀要、No.9, p.35-61(2014)31）フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia)』: Category”鉱山の世界遺産“(2014)

5) 味埜俊：サステイナビリティ学の挑戦－高等教育において『サステイナビリティ』の持つ多様性をどう扱うか、思沁夫編「多様性・持続性：サステイナビリティ学の挑戦」、大阪大学グローバルコラボレーション（GLOCOL)、p.9-29（2009)

6) 上田和弘：環境学からサステイナビリティ学へ、サステイナビリティ学連携研究機構、「サステナ」2010 年特別号、p.110-115(2010)

【 謝 辞 】

本論文の執筆に当たり、指導教員である三好恵真子准教授（大阪大学大学院人間科学研究科）、河森正人教授（大阪大学大学院人間科学研究科）、千葉泉教授（大阪大学大学院人間科学研究科）、小林清治准教授（大阪大学大学院人間科学研究科）には、構想段階から最終段階に至るまで終始多大なるご指導とご鞭撻を頂戴いたしました。まず心から御礼申し上げます。特に、文理融合型の人間環境論という新鮮な学究の場を提供し、叱咤激励して下さいました三好准教授および小林准教授には、ご期待に応えることができたかどうか疑問ではありますが、感謝を持って一区切りにしたいと思います。

本論文に含まれている研究課題の展開において、染田秀藤大阪大学名誉教授（元関西外国語大学教授）および山本高郁氏（元大阪大学工学部招聘教授、現独立行政法人科学技術振興機構プログラムマネージャー）、大阪大学 GLOCOL 思沁夫特任准教授との出会いとご支援がなければ育むことはできなかった。ここにお三方の先生に深く感謝申し上げます。

本論文は文理融合型の討究として、歴史学や環境論の論考と並行して各種の工学実験を含めた論文になっている。その工学実験の実施に当たって、各般からご支援を頂いた。そのお陰で論文を完成させることができた。特に、大阪大学大学院人間科学研究科 Human Science Project の支援で実験機器の大半を調達できたこと、また（公財）鉄鋼環境基金、晃立工業株式会社、住友金属工業株式会社（現新日鉄住金株式会社）、ブラジル徳島県人会長原田昇氏等のご援助がなければ都市鉱山開発の研究は遂行できなかった。個人的には、研究を継続する上で（独行）日本学生支援機構、大阪大学拠点形成支援および機能強化支援によるリサーチ・アシスタント等の支援の機会に恵まれたことを忘れることはできない。合わせて心より御礼申し上げます。

本論文では社会実験として、研究用の携帯電話の回収イベントを 2 回大阪大学の二カ所のキャンパスで行った。いずれも研究の一貫として成功裏に終えることができた。ひとえに三好准教授、小林准教授はじめ人間環境論ゼミの学生およびの大阪大学大学院工学研究科中本将嗣助教と元工学研究科鉄鋼元素循環工学共同研究講座の学生のご協力がなければ出来なかった。また、大阪大学学生環境サークル（GECS）と大阪大学生活協同組合の御支援があったことを記し、加えて、大阪大学科学教育機器リノベーションセンター特任技術員藤崎充氏には、ICP 金属元素分析における経験に裏打ちされた技術によって、無理な要望にこたえて頂きました。ここに関係各位に対して、あらためて感謝申し上げます。

最後に、本論文は定年退職後 12 年間にわたる学部課程、博士前期課程および博士後期課程の研究を継続し得たことによって完成させることができた。この長い期間公私にわたってご支援くださった親友原田昇氏、および忍耐強く支えてくれた家族と妻に対し、本論文の完成を持ってお礼としたい。感謝の意を込めてここに記録いたします。

末尾に至って改めて本論文は、指導教員三好恵真子准教授の研究指導に対する卓見とご執念がなかったならば完成はしていなかった。ご尊敬の念を込め、九拝して御礼申し上げます。

（以上）