Osaka University 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	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　姉　崎　正　治　）	
論文題名	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に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再生、都市鉱山の開発を包摂する持続可能性原理の討究－

論文内容の要旨

本論文は、サステイナビリティ学に立脚し、「金」、「銀」の鉱山開発とその製錬媒体である「水銀」の三元素を取り巻く資源・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し、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的とした。具体的な研究アプローチとしては、金、銀、水銀の鉱山開発に伴う次の三点の特徴を手掛かりにしつつ、貴金属鉱業に収斂した持続可能性を論究している。一つ目の特徴は、金、銀はクラーク数が小さいことから採掘時に不要な土石類を大量に発生させることである。そして二つ目は、古代から現代に至るまで、水銀が金、銀の製錬における抽出溶媒として用いられてきたことである。さらに三つ目は、金、銀が至上の価値として、太古の昔から需要が旺盛であり、常に採掘されてきた結果、現在地下資源の約75％が枯渇し、地上資源に移行してしまったことである。これら三つの特徴から貴金属鉱業の持続可能性とサステイナビリティ学を連動する概念あるいは指標として次の三項目に類別しつつ、後述する研究課題に対しそれぞれを適用させながら論考を深めた。

- 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た。ここで水銀は、量並びに質の面で貴金属のTMRと同様に扱い、また大気汚染と森林破壊は、個別指標として扱った。
- 鉱業社会を動的に捉えた場合の速度論的基本理念であるはHerman Dalyの三原則［鉱業（消費）と生態環境（供給）を結びつける原理］を用いることにより、鉱業の持続可能な姿とは、定常状態の長期的持続にあると考察した。そして持続性の時間的評価の一つの方法として、人為的な鉱山開発の大きさが環境容量の閾値をオーバーシュートした場合に起こる崩壊（重大な鉱害）を持続性疎外事件と捉えた。
- 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た。そして、それぞれの曲線形状（姿）が内包している持続可能な適正技術および適正規模の観点からの考察を示した。さらにこの延長線上に循環型社会があるため、廃棄物や都市鉱山からの資源回収を射程に置いた。

これら本論の根幹を踏まえ、具体的な研究課題として、時間的および空間的に異質な次の三つの局面を取り上げ、上記の概念もしくは指標による貴金属鉱業の持続性の命題に対する討究を試みた。

［研究課題１］16世紀以降のスペイン植民地における銀鉱山開発、特に第五代副王Francisco de Toledo（以降副王Toledoと表記）による水銀アマルガム製錬法を軸とする先進的な鉱山技術の再評価

［研究課題２］戦前から現代にかけての小規模金採掘（Artificial and Small-scale Gold Mining；以降ASGMと表記）における、水銀アマルガム製錬法による金製錬に起因する環境問題の現状分析並びに水銀条約（2013年10月UNEP採択）の推進に連動した水銀削減と地域再生への具体的な提案

［研究課題３］21世紀以降の都市鉱山開発、特に、2013年4月に施行された小型家電リサイクル制度に関連して、使用済携帯電話（以降携帯電話と表記）からの貴金属（金、銀、パラジウム、白金）の濃集・分離技術の開発とリサイクルシステム構築の実践

本論文の構成は、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。以下、各論の概要をまとめる。

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た。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まとめた。その結果、金属鉱業による鉱害の定量的評価方法として、上述した関与物質総量（TMR）の有用性が明らかになり、独自性のある新しい評価方法として位置付けることが可能となった。

第２章では、副王Toledoが採用した鉱業システムと技術をスペイン語で記述された歴史資料から読み取り、その先進性を評価した。その結果、水力のカスケード利用、それに組み込まれた水銀回収システムならびに水銀の弊害を熟知した保護法令等が明らかにされた。しかし、技術的に完成度が低かったこと、さらに先住民の強制労働に依拠した鉱山業であったため、内実として持続可能性に課題があったと考えられる。しかしながら、Hubbert曲線による持続性の知見に立つと、約270年間におよび生産し続けたことが、ポトシ銀鉱山とワンカベリカ水銀鉱山を結ぶ大商圏の形成に寄与し、総括的には鉱山都市のみならず地域社会の存続と繁栄を包摂した持続性として評価できると結論づけた。これらを含めスペイン植民地における銀鉱業の多くは、200年から300年の長寿命の鉱山であったことは特筆すべきである。その中には現在世界遺産の鉱山都市として維持・発展している銀鉱山も多くあり、こうした事実も持続可能な鉱山業の姿として捉えることへの論拠につながる。同様に日本の鉱山業を振り返ると、中世以前も含めると開発された鉱山寿命は300年から1000年の寿命を誇っている。当時の各種鉱業の生産量は、現代の大規模鉱山開発に比べて桁違いに小規模であるものの、これらにはHerman Dalyの三原則から導かれる環境との調和が示唆され、適正規模であることが浮かび上がってきた。

第３章では、現在の金の供給源として鉱山生産金（新産金）の割合は70～80％であり、その約1/3はが小規模金採掘に依存している点に着目した。ここでの重要な問題は、小規模金採掘の直接従事者（miner）の数が1300万人にも達し、さらにASGMに依存する人口数はこの10倍に及ぶとされること、また金の抽出に水銀を用いていることであり、健康被害が懸念されていることである。現在の人為的水銀排出量（約2000トン/年）の約37％がASGMからの排出となっている。この他に金のTMRが膨大であり、小規模金採掘といえどもその廃棄土石量は金1g当たり1.8トンに上る。またその水洗選鉱で利用される水の量も膨大になる上に水銀も同時に排出されるため、深刻な鉱害源となっている。本論文では、水銀の削減と水資源の保護および廃棄土石の再資源化を想定した「乾式処理システム」を考案し、特にアフリカのサブサハラ地域を起点としてその波及効果を狙う戦略の下、モザンビークを対象に山金からの金抽出に適用することを提起した。ここで鍵となる事柄は、これ自体を適正技術とする小規模金採掘の共同化であり、現地の詳細調査を踏まえて適正規模について検討する意義があると考えられた。

第４章では、都市鉱山開発に焦点をあてた。枯渇度合いの最も高い金および銀の地下資源に対して、地上資源の蓄積量では日本が世界で最も豊富な国になっている。しかしこれまで鉄鋼、銅、アルミニウム、鉛等のベースメタルのリサイクルは実施されているものの、貴金属やレアメタルは回収メリットがないと見なされてきた。2013年4月に施行された小型家電リサイクル制度は、地方自治体と市場の工夫を期待した形で始動したが、小型家電の分散性と1個当たりおよび総量としての経済価値・規模が小さく、回収動機に結び付いていかなかった。他方で、小型家電に含まれている金属は精錬を完了したものであるために純度が高いという特徴も存在する。そこで本研究では、その中でも使用済携帯電話に着目し、回収作業の工夫、破砕・粉砕過程における貴金属濃集技術の開発によって、低コストの回収システムを提起した。さらに使用済携帯から純金プレートの作成までに到達する連続実験プロセスのシステムを構築した。この結果から「顧客接近型回収方法」と「機械的貴金属濃集分離法」を実現し、さらにこれらを適正技術とする適正規模の事業化を想定することも可能となった。

以上３つの研究課題に対する論究を通して、サステイナビリティ学に基づく持続可能な鉱山業の方向性を確立することに成功した。つまり、鉱害の定量的評価指標として関与物質総量TMRの量と質が新しい評価指標になり得ること、また採掘生産量が環境容量を超えてオーバーシュートした場合には深刻な鉱害事件につながることが明らかとなった。しかしその場合、健康被害に対する閾値が金、銀と水銀の関与する３元系金属において必ずしも明白になっていない現実があること等が示された。一方、循環型社会を想起するために、廃棄物（含む汚染土壌）もしくは使用済み製品からの貴金属リサイクルの低コスト化と適正規模を導きだし、開拓すべき道筋とその創意工夫を示した。

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が導かれた。現在、鉄・非鉄金属のベースメタル（鉄、銅、亜鉛、鉛等）の大規模鉱業の持続可能性は、企業の社会的責任論に帰結されているが、小規模採掘においては、むしろ地域社会の経済性や採掘者の雇用と生計の保証と同時に水銀の健康被害のリスクを低減することが、その鉱業の持続性に繋がることから重要であることを示すことができた。さらに３つの研究課題から得られた各々の結果を統合することにより、時間的・空間的異質な資源・環境問題を包摂する原理の存在をも描き出すことができた。

以上のように、本論文は、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、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し具象化に挑戦した第一歩と位置付けている。今後も、高みを目指して精進を重ねたい。　(以上)

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　　姉崎　正治　　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　　准教授	三好　恵真子
	副 査　　教　授	河森　正人
	副 査　　教　授	千葉　泉
	副 査　　准教授	小林　清治

論文審査の結果の要旨

本論文は、サステイナビリティ学に立脚し、金、銀、水銀の鉱山開発に伴う共通の特徴を手掛かりにしつつ、貴金属鉱山業の持続可能性を描き出し、基礎研究のみならず社会的要請に呼応した課題解決をも目指すものであり、その方法論は極めて独自性が高く、人文社会科学から自然科学まで包摂する野心的な論考である。

論文は、序章および第１章から第４章までの各論、そして終章から構成されている。序章では、対象課題を金と銀並びにその製錬媒体である水銀の三元素の金属に関わる資源・環境問題として位置づけ、それらについて持続可能性指標を通じて論考していくとしている。具体的対象として「16世紀以降のポトシ銀山」、「現代の小規模金採掘」を取り上げ、さら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」にも着目するとし、それぞれにおける研究目的とその手法を概説している。他方で、これら時間的・空間的に異質な三つの具体的研究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膨大な隠れたフロー（関与物質総量 TMR: Total Material Resources）の量と質から鉱害を論じることも言及している。続く各論において、それぞれの研究対象の詳細が検討され、終章にて全ての結果を包摂しつつ、指標の実証性を再確認している。

第１章では、鉱山の持続性を検討するにあたり、サステイナビリティ学に関する先行研究を精査した上で、三つの異なる対象課題に精通する独自の持続可能性指標を考案するに至っている。すなわち、「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、抽出した各種指標（Harman Daly，適正規模，適正技術，TMR，地下資源埋蔵量，Hubbert Model, 循環系リサイクル，持続性期間(地域社会)）を同軸に総合的に検討している。その結果、それぞれの対象課題が特殊性を持っているにも関わらず、持続可能な未来の鉱業の姿として、地域適正型技術を基盤とする小規模自立共生社会を描き出すことができる点を押さえている。また鉱山業に限ってみると、鉱脈の枯渇により終焉を迎える一方で、観光都市を一例としながら維持された地域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が存在することを提起している。

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、特にポトシ銀山におけるペルー副王領第五代副王トレドの先進的な銀鉱業に関して、当時の歴史資料の読解と現代科学の融合により、その知恵の集積を具現化している。特に先進的な水力利用システムやポトシ銀山の資源回収技術に着目し、再資源化量も推定しながら公害の端緒も紹介している。さらにサステイナビリティの視座から、270年間産銀し続けてきたことが、ポトシ鉱山とワンカベリカ水銀鉱山を結ぶ大商圏形成に寄与したと捉え直し、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点を評価している。16世紀後半に世界最大の産銀を記録した鉱山史の中に秘められた（製錬に関する化学式の存在していなかった時代の）科学的経験知を明確化した本論考のオリジナリティと貴重性は極めて高い。

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: Artificial Small-size and Gold Mining) 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 に向けた道筋を示している。またそれ自体を適正規模と捉えつつ、呼応する適正技術として、水銀削減と環境保護を目論む「乾式処理システム」を考案している。

第４章では、地上資源としての都市鉱山に着目しており、「資源大国を目指した資源エネルギー供給革命」を実現することを目指す国家的戦略とも連動してくる。中でも着目した使用済携帯電話は、複数のレアメタルが純度の高い状態で混合している高価値の資源であるものの、その回収率が低いことが問題となっており、この課題を解決すべく、回収率の向上に直結する設計を目指した一貫性のある実践的システムの構築に至っている。具体的には、「顧客接近型回収方法」と「機械的貴金属濃集分離方法」という2つの開発が主軸にあり、またこれらを適正技術とした適正規模の事業化の可能性も検討に加えている。

このように本論文は、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、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、個人の中で文理融合を果たしているもののみに許される貴重な論考となり、基礎・応用・実践を網羅した追従を許さぬ前人未踏の実績となり得るであろう。以上のことから、本論文は、博士（人間科学）の学位授与に相応しいものと判断するに至った。