

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 安達 毅

論文提出者は、鉱物資源開発の持続可能性について、経済理論に基づいた枯渇の可能性、長期的な需給関係、リサイクリングと代替による需給環境の変化、リサイクリングによる最終廃棄物処分場の減容化の可能性など、いくつかの複眼的視点から研究を行った。さらに、環境制約による鉱物資源開発の持続可能性を評価するために、鉱物資源開発に関連したCO₂排出のLCI(ライフサイクルインベントリ)を実際の鉱山の調査に基づいて作成し、LCIを簡易的に評価できるソフトウェアの開発を行った。データが整っていない鉱物資源生産時に排出されるCO₂量の評価を行ったことが特に注目される。

序論では、鉱物資源開発あるいは資源問題について、大量消費時代の幕が上がった1960年代から、石油危機によって資源枯渇が注目された1970年代、原油・鉱産物価格低迷によって資源枯渇に対する危機意識が薄れた1980年代、地球環境問題がクローズアップされ始めた1990年代に至るまでの過程を振り返り、大量生産・大量消費・大量廃棄に依存する資源浪費型社会から脱却し、持続可能な発展を目指す潮流の中で、鉱物資源開発の持続可能性を評価する重要性を明らかにした。

第2章では、先行研究のレビューを行っている。枯渇性資源の経済学をホテリングの理論を中心に整理し、枯渇性資源を扱った経済モデルについて、これまでの研究成果をまとめた。先行研究では計量経済モデルによる研究が多いが、シミュレーション手法と最適化手法を用いた最近の先行研究についても注目し、本研究で作成したモデルの位置付けを明らかにしている。

第3章では、鉱物資源開発の経済的特徴を把握するために、鉱物資源の生産量・消費量・埋蔵量などの基礎データをまとめ、主要鉱物資源について、その経済的な特長を明らかにした。また、世界の鉱山の現状を見るために、鉱山データベースを用いた分析を行っている。コスト、品位、生産容量などの動向を明らかにし、4章以降の研究に必要な基礎データを得ている。

第4章から第6章では、鉱物資源の持続性を議論するための3種のモデルを提案している。同じ枯渇性資源に分類されるエネルギー資源と鉱物資源は、いくつかの点で異なっている。すなわち、1)耐久財としての性格を持ち合わせているためにリサイクリングが可能なこと、2)供給可能量が大きい代替物が比較的安価に存在すること、3)多種多様な金属種と合金が存在することなどである。そのため、鉱物資源が有するこれらの特性を考慮したモデルの構築を行っている。

第4章では、銅・鉛・亜鉛のベースメタル3種について、供給構造を詳細に記述した超

長期鉱物資源供給グローバルモデルを作成した。この中には、金属の生産からリサイクル・廃棄までの一連の流れが組み込まれ、資源の枯渇パターンのシミュレートが可能となっている。その結果、現状の生産量・リサイクル率の増加では、銅と亜鉛については供給が需要を満たせなくなる時期が来るとの結果が得られている。供給不足を回避する対策として、銅では、リサイクルを促進させて二次供給によって総供給を安定させることが必要であること。亜鉛では、リサイクル率の伸びが期待できないため、早期に代替物の技術開発が必要であるとの提言を行っている。また鉛では、蓄電池以外での用途での需要量を減少させることが、持続的な供給に必要な条件であるとの結果が得られている。

第5章では、金属間あるいは非金属材料との代替関係を扱った最適化モデルの提案を行っている。これは、非鉄金属の生産費用が上昇することで、利用用途ごとに代替材料がその金属の用途に変わって使用される推移を表現する非鉄金属代替モデルである。被代替材の対象とした金属は銅・鉛・亜鉛で、線形計画法を用いた計算から全体の生産費用が最小になるように各材料の消費量の最適化を試みた。50年を期間とした計算の結果、銅・亜鉛については、プラスチック・アルミニウム・鉄が将来的にも有効な代替物として需要されることが示された。また、需要の伸び率が現在の半分程度まで減少するとした感度分析では、代替物が必要のないレベルとなった。鉛については、資源量が少ないことと有効な代替物が少ないためリサイクルを充実させる必要があるとの結果が得られている。

第6章では、わが国の一般廃棄物を対象として、リサイクルによる最終処分量の減量効果と国内経済への影響を評価し、目標とする基準に対して産業間にどのようにリサイクル義務を課するのが最適な配分となるのかを明らかにするリサイクル負担配分モデルを開発している。このモデルを用いることで、あるリサイクル量を目標としたとき、どの産業からリサイクルを負担するのが効率的かの判断材料を提供することができ、費用対効果に優れた負担配分が行われることが確かめられた。

第7章と第8章では、鉱物資源開発による環境負荷(CO₂排出)が取り上げられている。最終製品や基礎素材に関するLCIの研究事例がここ数年増加してきているが、ライフサイクルの出発点である資源の採掘や選鉱といった鉱山内で発生するCO₂排出量までを計算に含んでいる事例は少ない。しかし、鉱物資源は多くの製品の原材料となることから、より正確で現実的なLCAのためには、採掘時のLCIから系統的に整える必要がある。

第7章では、鉱物資源生産時に排出されるCO₂量を調査した結果が報告されている。海外の大規模露天掘銅鉱山と国内の石灰石露天掘鉱山での聞き取り調査および統計資料調査からCO₂排出量の算定を行った。

第8章では、鉱山開発のフィージビリティスタディの際に用いられる既存の費用算出式をデータベースにまとめ、これを応用することで簡易的に鉱山でのCO₂排出量が推定できるアプリケーションを開発した。精度を検証するために、実際のLCI調査結果と比較を行

ったところ、データベースからの推定結果は3%程度の誤差であることがわかった。また、坑内掘銅鉍山でのケーススタディを行い、採鉍法を変更した際のCO₂排出量を推定するような使い方もできることが示されている。

本論文では、鉍物資源開発の持続可能性を、枯渇資源の特性だけではなく、リサイクルリングや代替、環境制約も含めた複眼的な評価を可能とするモデル開発が行われており、従来の研究と一線を画す知見を得ている。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。