

## 審査の結果の要旨

氏名 渡 卓磨

本論文は気候変動対策が世界規模の金属資源循環システムに与える影響を定量的に解析することで、持続可能な金属資源利用と調和した気候変動対策の要件を提示することを目的としている。本論文は全8章から構成される。

第1章では、金属資源の利用と環境問題の歴史的変遷を概説すると共に、気候変動対策と金属資源循環システムを統合的に検討することの必要性を主張している。

第2章では、「脱炭素技術の大量導入」および「産業活動における炭素制約」という2つの気候変動対策と金属資源循環システムの関係性に着目し、約150報の既存研究を体系的にレビューしている。これにより、既存研究の現状と課題を指摘し、本論文の位置づけを明確化している。

第3-4章では、脱炭素技術の大量導入に着目したシステムモデルの開発と適用を行っている。国際エネルギー機関が提示するエネルギーシナリオを対象とした解析に基づき、発電部門と自動車部門における脱炭素技術導入は、金属生産に伴う物質採掘を2050年にかけて7倍以上増加させようことを指摘している。また物質採掘増加の主要因は、太陽光発電およびバッテリー電気自動車に利用されるFe, Cu, Ni, Ag, Te, Li, Coであること、物質採掘の40%近くがコンゴやグアテマラ、マダガスカルを含む資源ガバナンスが貧弱な国で実施されようことを示している。長寿命化やサービス化を含む一連の循環経済戦略は物質採掘増加の抑制に貢献するものの、相当量の鉱山開発は避けられないことも定量的に示されている。ここでの一連の成果は、脱炭素技術導入の背後で急増する採掘物質の適切な管理の必要性を定量的に示すと共に、適切な管理に向けて特に注視すべき金属・技術・国の特定に貢献するものである。

第5-7章では、産業活動における炭素制約に着目したシステムモデルの開発と適用を行っている。まず第5章では、全金属の生産活動に伴う炭素排出量の約95%を占める主要6金属(Fe, Al, Cu, Zn, Pb, Ni)を対象に、世界231ヵ国・地域における過去110年間の利用実態を解析している。解析の結果、主要金属の蓄積量は世界に極めて不均衡に配分されており、その不均衡性はエネルギー消費等の他の環境指標と比較して最大であることを指摘している。また、成長主導の不均衡性解消は21世紀にかけて2-3倍の金属需要増大を誘発することを示している。第5章の結果を踏まえ、第6-7章では炭素制約が将来の主要金属の利用に与える影響を検討している。これは数理計画法を応用した新規システムモデルによって実施され、2030年までに主要金属の天然鉱石からの生産量はピークに達し、スクラップからの生産量が2050年までに天然鉱石からの生産量を凌駕しうることを指摘している。また、利用可能なスクラップの量的限界によって、炭素制約下における世界的な金属蓄積量は現在の高所得国(約12 t/capita)よりも低い約7 t/capitaにシナリオ平均で収束することを示している。この際、高所得国は既存の金属蓄積をより高強度かつ長期間利用することで“蓄積交換需要”を、中・低所得国は物質効率の高い都市開

発によって“蓄積拡大需要”を抑制する機会を有していることも定量的に提示している。これら一連の成果は、より少ない金属蓄積で同量の財・サービス需要を充足するための物質効率性向上の必要性を喚起すると共に、その具体的な規模と時期の特定に貢献するものである。

第8章では、以上の結果・考察を踏まえて論文全体の結言を示している。また、物質循環システムに関する研究の今後の発展可能性を述べている。

以上、要するに本論文は、気候変動対策が世界規模の金属資源循環に与える影響に着目し、その定量的評価を可能とするモデル開発を達成した上で、事例研究を通じて持続可能な金属資源利用への転換に向けた意思決定および施策立案を支援する知見を得ている。なお、本論文を構成する要素は、7報の査読付き論文として全て筆頭著者として国際誌に掲載済みである。したがって、本論文は、研究の質および世界への発信の双方において環境学の発展に十分に寄与する内容を備えているものと評価できる。

よって、本論文は博士（環境学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1699 文字