

## 審査の結果の要旨

氏名 畑山 博樹

持続可能な社会への転換に向けて、循環型社会の構築に向けた様々な技術開発や法令の整備が進められている。社会・産業システムにおいては、複数の素材のライフサイクルが関わり合って存在しており、その関係性は経済の発展とともに変化している。この複雑なシステムにおいて、循環型社会の構築に向けた各種方策の効果を定量的に評価するために、本論文では中長期的な素材循環の分析モデルを世界規模で構築している。分析モデルは、従来の時間的、空間的に限定された動的マテリアルフロー分析を拡張すると同時に、素材の量だけでなく品位を考慮した循環利用可能性の評価を可能としている。また、この分析モデルを用いて、次世代自動車の導入がアルミニウムの循環利用に与える影響について世界規模での評価をおこなっている。

第1章では、金属資源の持続可能性の検討において、現在用いられている素材循環の分析手法は不十分であることを示している。非再生資源であるエネルギー資源と金属資源について、そのライフサイクルの相違点を整理し、金属の持続可能性を分析するシステムモデルにもとめられる要素を示している。一方で、現在素材循環の分析に広く用いられているマテリアルフロー分析についてその現状を示し、分析対象の時間的、空間的な拡張と、素材の品位を考慮した循環利用の可能性の評価が必要とされていることを述べている。

第2章と第3章ではそれぞれ鉄鋼とアルミニウムを対象として、素材循環の分析モデルを構築している。第2章では、42カ国を対象として、2050年までの鉄鋼蓄積量、需要量、排出量を動的マテリアルフロー分析によって推計している。前半では2005年までのマテリアルフローの推移を分析し、2005年での地域ごとの鉄鋼の使用状況を人口1人当りの用途別蓄積量として示している。後半では、土木、建築、自動車の3つの用途を対象として2050年までのマテリアルフロー分析をおこなっている。ここでは各国の人口密度や都市化度に応じた蓄積量の推計をおこない、推計された2050年までの蓄積量から需要量、排出量を算出する将来予測手法を開発している。結果としては、中国やインドを含むアジアにおける蓄積量、需要量の顕著な増加が予測されている。また、アジア

における鉄鋼需要は 2025 年ごろにピークを迎え、それを境に土木、建築用途から自動車用途へとシフトする様子が示されている。この予測手法および結果については、再現性や GDP 成長率の感度を解析することで、その健全性の検証がなされている。

第 3 章の前半では、日本、米国、欧州、中国の 4 地域を対象として、2050 年までのアルミニウムのマテリアルフローとその素材品位を推計している。ここでは従来の動的分析のように用途ごとの投入量を考慮するだけでなく、使用合金種の特長をおこなうことで、各フローの品位を成分組成として考慮している。後半では多元素ピンチ解析を用いて、スクラップの利用可能量に関する評価をおこなっている。評価ではまず 2005 年の状態における循環利用について、スクラップの回収の促進によるそれぞれの地域での新地金消費量の削減ポテンシャルを示している。削減ポテンシャルは地域ごとの産業構造や製品の輸出入の状況などによって異なり、実際の消費量の 15-70%と推計されている。また、2050 年での 4 地域全体の最適なりサイクルフローを導出した結果、5,800 万トンの需要に対して新地金消費量は 1,000 万トンまで削減可能であること、そしてさらなるスクラップの循環利用のためには合金元素の中でも Cu の濃化を回避する取り組みが有効であるとの提案をおこなっている。

第 4 章では、第 3 章で構築したアルミニウムの素材循環の分析モデルを用いて、2050 年に向けて次世代自動車の導入が進むシナリオについて分析をなっている。その結果、次世代自動車への転換期においては、電気自動車の生産の拡大に伴う鋳造品需要の縮小によって素材品位の制約によって循環利用できないスクラップの割合が高くなる可能性を示している。また、自動車スクラップを対象とした合金種別の回収によって、従来のカスケードリサイクルが回避され、4 地域全体で 15-25%程度の新地金消費量の削減効果が得られると推計している。

以上のように本論文では、従来の時間的、空間的に限定されたマテリアルフロー分析を拡張することで、世界規模での資源利用の分析をおこなっている。また、素材サイクルについて、量だけでなく品位の側面についての理解を可能としたことで、従来に比べて実際的な循環利用可能性の評価を可能としている。そして、実際に導入が検討されている政策や技術開発を例として素材循環に与える影響の分析をおこない、構築した分析モデルが循環利用を促進するための政策や技術開発などの提案に資する可能性を示している。

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。