

論文の内容の要旨

論文題目 世界の経済発展と産業構造の変化を考慮した素材循環分析モデルの構築

氏名 畑山 博樹

20 世紀後半より、様々な環境問題が時間的、空間的な境界を拡大しながら議論されてきた。その中で、各種資源の有限性が世界規模で考えるべき重要な課題として認識されるようになった。特に金属資源はエネルギー資源と並んで非再生資源であり、世界経済が拡大する中での持続可能な利用システムの構築がもとめられている。持続可能な利用システムの構築に不可欠とされているのが循環利用すなわち使用済み製品に含まれる素材のリサイクルである。循環利用をおこなうことで天然資源の消費速度を抑制することが可能であり、またいくつかの金属では、天然資源からの生産に比べエネルギーの優位性が示されている。そこで、各種金属について循環型の社会システムを構築していくために、社会における素材の流れを中長期的に分析することが必要とされている。そのための手法としては、一定の空間的、時間的境界の中での素材のフロー（流れ）とストック（蓄積）を分析するマテリアルフロー分析（Material flow analysis, MFA）が広く用いられてきた。マテリアルフロー分析は資源利用、廃棄物管理、環境保全など様々な場面での意思決定ツールとして活用されている。その一方で、既往の分析モデルは対象地域や対象時間が限定的であり、世界規模での資源循環を議論するモデルとしては不十分と考えられる。また、将来の金属素材の利用のほとんどが需要予測に基づいておこなわれているが、素材は製品として社会に存在している間その機能を持続するものである。近年では経済規模とストックの関係性を通したマテリアルフローの分析も試みられているが、その手法論は未だ確立されていない。さらに、既往の研究では、社会における素材の流れは量の情報として示されてきた。しかしながら、実際のリサイクルには、スクラップ中の合金元素や不純物の存在が大きく影響している。マクロな素材の流れの可視化にとどまらず、循環利用促進のための方策の提案に資するためには、素材の品位を考慮したマテリアルフロー分析がもとめられる。このような背景から、本研究では、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した、中長期的な素材循環の分析モデルを世界規模で構築することを目的とした。そして、構築したモデルを用いて、持続可能な社会の構築に向けた政策や技術開発について、その影響を評価した。

本論文は、5 章より構成されている。第 1 章に本研究の背景と目的を示した。第 2 章では、鉄鋼を対象として、2050 年までの素材循環の分析を世界規模でおこなった。第 3 章では、アルミニウムを対象として 2050 年までの素材循環の分析を世界規模でおこなった。第 4 章では、次世代自動車の導入がアルミニウムの素材循環に与える影響を評価した。最後に、

第 5 章において、本論文を結論づけた。

第 2 章では、世界 42 カ国を対象として鉄鋼のマテリアルフローを 2050 年まで推計した。中長期的な予測に際して、まず現状の鉄鋼の利用状況を明らかにするために 2005 年までを対象として動的マテリアルフロー分析をおこなった。その結果、2005 年の世界の鉄鋼蓄積量は 127 億トン（人口 1 人当たり 2.5 トン）であると推計され、それぞれの地域における用途ごとの鉄鋼の蓄積量、排出量を明らかにした。そして、推計された 1980 年から 2005 年までのマテリアルフローの推移を基に、2050 年までの予測をおこなった。将来予測では、素材サイクルの中の蓄積量の部分に着目して分析をおこない、その中で各国の人口密度や都市化度に応じた蓄積レベルの違いを考慮した。その結果、2050 年において土木、建築、自動車用途での鉄鋼蓄積量は 2005 年の 6 倍の 550 億トンに達すると推計された。また、消費量は 2025 年ごろに 18 億トンに達した後漸減し、2040 年ごろに再び増加すると推計された。蓄積量および消費量の増加はそのほとんどが中国、インドを抱えるアジアでのものであり、これら新興国では 2025 年までは土木、建築用途での需要が増加するものの、その後は自動車用途へとシフトする様子が示された。また、将来予測についてはその手法の健全性を検証し、経済成長速度が消費量予測に過剰に反映されることや、現時点で蓄積量が十分でない国に対する予測の不確かさについて議論した。このように第 2 章では、世界全体での鉄鋼サイクルを中長期的に分析し、2050 年までの蓄積量予測から需要量と排出量について推計することができた。しかしながら、単純に両者を比較することでは循環利用の評価は不十分である。例えば、解体時の不純物の混入が多い建築物の鉄スクラップは自動車向け鋼板には利用が困難となっている。このように、スクラップの品位と再生材に要求される品位についても考慮した循環利用の評価が素材循環の分析にはもとめられる。この点について、第 3 章でアルミニウムを対象として分析をおこなった。

第 3 章では、日本、米国、欧州、中国を対象としてアルミニウムのマテリアルフローを 2050 年まで推計した。マテリアルフロー分析では、各用途に使用される合金の種類を推定することで、各フローでの素材品位を 4 種の合金元素の濃度として推計した。これにより、多元素ピンチ解析を用いての、素材の品位を考慮した循環利用の分析が可能となった。2005 年を対象とした多元素ピンチ解析では、アルミニウムスクラップの回収を促進することで、それぞれの地域での新地金消費量を現在の水準の 15-70%削減できるポテンシャルがあると推計された。また、地域ごとに異なる産業構造や製品の輸出入がアルミニウムの循環利用のしやすさに影響を与えていることを指摘した。2050 年では、4 地域全体でのアルミニウム需要量とスクラップ供給量はともに 5,800 万トンと推計されたが、地域間でスクラップの授受をおこないリサイクルフローを最適化することで、新地金消費量は 1,000 万トンまで削減できる可能性があると推計された。そして、さらなるスクラップの利用に向けた方策としては、合金元素の中でも特に Cu の濃化を回避することが有効であると本章のシナリオでは分析された。第 3 章でおこなった分析は、素材の蓄積量や排出量をリサイクルポテンシャルとみなしていた従来の研究では考慮されていなかった、リサイクルプロセスに

における実際的な制約を考慮したものであった。このような分析は、中長期的な視点から既存のリサイクルシステムに欠けている要素を検討する上で有用であり、想定される様々な社会の変化に対する方策の提案に資すると考えられる。そこで第 4 章では、中長期的な将来シナリオとして次世代自動車の導入を想定し、既存のリサイクルシステムで生じる課題と、その改善案の効果の評価をおこなった。

第 4 章では、第 3 章で構築した素材循環の分析モデルをもとに、次世代自動車の導入が循環利用に及ぼす影響を分析した。分析では、International Energy Agency の BLUE Map scenario をもとに、2050 年までのハイブリッド自動車と電気自動車の導入シナリオを設定した。さらに、高度なリサイクルシステムの構築のための方策として検討されているスクラップからの合金種別の回収について、自動車スクラップを対象に実施されたシナリオを設定した。それぞれのシナリオを対象としてマテリアルフロー分析に基づいた多元素ピンチ解析をおこなった結果、次世代自動車の導入は、2030 年ごろにアルミニウムを循環利用しにくい状況を生じることが示唆された。これは、他元素の許容濃度が高い鋳造品の使用量が少ない電気自動車の生産が拡大する一方で、鋳造品の使用量が多いガソリン自動車由来のスクラップが増加し続けていることが原因と考えられた。また、自動車スクラップからのアルミニウムの合金種別回収の実施は循環利用を促進することが示され、2030 年で 15%、2050 年で 25% 程度の新地金消費量の削減に貢献する可能性が示唆された。このように第 4 章では、政策や技術開発が資源循環に中長期的に及ぼす影響について、第 3 章で構築した素材循環の分析モデルを用いて定量的に評価できることを示した。循環型社会の形成に向けて、本研究のように世界全体を対象とした素材循環の分析モデルに基づいて様々な方策の効果の評価することは、その実現に大きく貢献すると考えられる。

以上のように本研究では、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可能とした。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が可能となった。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を分析したことで、本研究で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た。

本研究で構築した素材循環の分析モデルは、個々の素材の持続可能性の検討に大いに貢献するものであると考えられる。しかしながら、複雑な社会・産業システムにおいては、政策や技術開発は複数の素材サイクルに影響を及ぼす場合が多い。例えば、異なる素材による代替は、2 つの素材の持続可能性の間でトレードオフを生じる可能性がある。従って今後は、より多くの素材について分析モデルを構築し、包括的な持続可能性の評価を可能とするような取り組みがもとめられる。