

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

資源価値を引き出す次世代マテリアルストックに関する研究
(1-1402)

平成26年度～平成28年度

Next-generation Material Stock that Realize the Full Potential of Resources

名古屋大学

平成29年5月

環境省
総合環境政策局総務課環境研究技術室
環境保健部環境安全課環境リスク評価室
地球環境局総務課研究調査室

資源価値を引き出す次世代マテリアルストックに関する研究

(1-1402)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに (研究背景等)		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
(1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング (名古屋大学)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	2
3. 研究開発方法	.....	3
4. 結果及び考察	.....	8
5. 本研究により得られた成果	.....	17
6. 国際共同研究等の状況	.....	18
7. 研究成果の発表状況	.....	18
8. 引用文献	.....	30
(2) 資源の社会蓄積量の推計と価値の評価 (東京大学)	.....	31
要旨	.....	31
1. はじめに	.....	32
2. 研究開発目的	.....	32
3. 研究開発方法	.....	32
4. 結果及び考察	.....	35
5. 本研究により得られた成果	.....	44
6. 国際共同研究等の状況	.....	45
7. 研究成果の発表状況	.....	45
8. 引用文献	.....	49
(3) ストック指標体系の構築 (立命館大学)	.....	50
要旨	.....	50
1. はじめに	.....	50
2. 研究開発目的	.....	51
3. 研究開発方法	.....	51
4. 結果及び考察	.....	53
5. 本研究により得られた成果	.....	61
6. 国際共同研究等の状況	.....	62
7. 研究成果の発表状況	.....	62
8. 引用文献	.....	65
(4) 国際ストック・フローデータベース拡充 (国立環境研究所)	.....	66
要旨	.....	66

1. はじめに	66
2. 研究開発目的	67
3. 研究開発方法	67
4. 結果及び考察	68
5. 本研究により得られた成果	71
6. 国際共同研究等の状況	72
7. 研究成果の発表状況	72
8. 引用文献	74
III. 英文Abstract	75

課題名 1-1402 資源価値を引き出す次世代マテリアルストックに関する研究

課題代表者名 谷川 寛樹（名古屋大学 大学院環境学研究科 教授）

研究実施期間 平成26～28年度

累計予算額 79,975千円（うち平成28年度：24,425千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 物質ストック・フロー分析、ストック指標、資源利用価値、二次資源、産業連関分析、建築物・土木構造物、国際ストック・フローデータベース

研究体制

- (1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング（名古屋大学）
- (2) 資源の社会蓄積量の推計と価値の評価（東京大学）
- (3) ストック指標体系の構築（立命館大学）
- (4) 国際ストック・フローデータベース拡充（独立行政法人 国立環境研究所）

研究協力機関

みずほ情報総研株式会社

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

人間社会が枯渇性資源を使う限り、その資源価値を最大限に引き出す“もの使い”を社会に根付かせることが重要である。この重要性は環境研究総合推進費（S-6、2009fy-2013fy）のサブグループ4でも指摘してきた。低炭素型、循環型、ストック型、持続可能型といった、次世代の社会像は全て有限な資源の有効利用と表裏一体である。すでに社会に蓄積されているものを長く使い、デザインによる軽量化や代替技術の活用により自然資源投入を低減化し、排出された資源の部材単位でのリユース、次世代リサイクル技術の活用といった、異なるフェーズでの方策を最適化することにより、資源価値の最大化を目指す必要がある。さらに今後予想される人口減少、高齢化、減災といった社会構造の変化やニーズを鑑みると、選択と集中といった戦略的資源利用の確立も急務である。日本は世界でも有数の資源生産性の高い国の一つである。これは低価格な資源を利用して高付加価値の製品を生み出す産業構造と、省エネをはじめとする企業努力によって成し得ている。このような社会を支えている社会基盤施設や建築物といったストックは高度成長期に急速に整備されたため、老朽化したストックが将来の負債ともなりかねない。加えて、今後のストック整備の行方が次世代社会の骨格を作り上げることから、ストックの戦略性は重要である。真に消費と豊かさとのデカップリングを目指すためには、蓄積した資源をも有効利用し、フローだけでなくストックに対する資源生産性を向上させることが肝要である。

本研究は、社会が活用する“動”と“静”の資源のうち、“動”を評価するマテリアルフロー分析に加えて、“動”を支える“静”に焦点を当てたマテリアルストック分析を行い社会に滞留する資源の価値について定量化および指標体系の構築を行う。

2. 研究開発目的

本研究は既存のマテリアルフロー分析に加えて、社会に滞留する資源を対象にするマテリアルストック分析に焦点を当て、蓄積された資源の価値を最大限に引き出せる社会のあり方を多面的に分析することを目的とした。

マテリアルストックは“静”の状態として資源価値を発揮し、同時に“動”であるフローを発生・効率化させ、“動”と“静”は表裏一体のシステムとして、資源を利用する社会を豊かにする。本研究では、その豊かさを生み出すマテリアルストックについて、経年的かつ地理的に定量化を行い、使用価値や資源化価値、低炭素性などに基づき整理した。日本の物質投入量の約半分を占める土木や建築のような構造物に投入される土石系資源をベースにトップダウン型・ボトムアップ型のデータベースを構築した。また、日本の網羅的な物質フロー・ストック管理に

資するために、固定資本の分析手法の開発とデータベースの構築を行った。循環資源の蓄積の一つの評価として、Criticalityの評価を用いることを検討した。指標の概念について、ストックの総量の計測に加え、ストックの利用価値、利用効率、資源価値を計測する指標の候補を整理し、体系化の素案を作成した。また、ニッケル(Ni)および銅(Cu)を対象に、アジア・アフリカ地域を含めた世界の231の国・地域における金属資源の需給構造の解析により、ロードマップ適応への基盤を築いた。

3. 研究開発の方法

(1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング

本研究では、日本の資源蓄積の大半を占める、建築物・社会基盤のマテリアルストックを定量化し、ストックデータベースの拡充を行った。ストックデータベースは、地理情報を基礎としたデータベースと生産統計を基盤とするデータベースに大別し、それぞれボトムアップ型とトップダウン型の推計として、“ストックを測る”点を主眼に整理を行った。特に、本研究では地理情報を用いたGISモデリングによる推計を独自に構築しており、田中ら(2013)により地理情報システムを用いた日本全国の建築物・社会基盤のデータベースを基に、以下の内容で拡充を行った。建築物について、(株)ゼンリンによるZ-map TOWN IIを基盤としてデータベースを整備・拡充した。Z-mapでは建築物をポリゴンとして格納しており、建築物の属性情報として建築種・用途・階数・建築面積を有している。階数と建築面積を乗じることで延床面積を推計し、建築物の規模を把握することが可能である。また、海岸構造物については、施設を港湾・漁港・海岸保全施設として、岸壁・防波堤・護岸・堤防・離岸堤・突堤・消波堤として、項目を改善・拡充した。さらに、地理情報を用いたボトムアップ型のデータベースと推計結果を比較するために、生産統計を用いたトップダウン型のデータベースを構築した。構築手法としては、S-6-4における中国のマテリアルストックデータベースを構築したみずほ情報総研株式会社について、再委託すると共に共同で日本全体の土石系資源ストック・フローデータベースを構築した。さらにトップダウン型のデータベースにおいて構造物の主要素である土石系資源について、生産統計を元に日本全国のマテリアルストックフローモデル(MSFモデル)を構築した。対象とした構造物種は、生産統計で分類可能な、建築物、道路、道路以外の土木構造物(以下、その他土木)の3種類の構造物である。土石系資源の出荷量とそれぞれの構造物のフロー量、投資金額の時系列データより原単位を作成し、推計された将来フロー量に原単位を用いることで将来の土石系資源フロー量を推計した。

また、GISモデリングによるボトムアップ型のデータベースでは、構造物の現況について規模を空間的に把握した物理量に資材投入原単位を乗じることで推計を行う。社会基盤構造物は規格に基づいて精緻な設計により施工・管理されているため、構造物の種類に応じた分類ごとに整理された資材投入原単位により、物質ストックの推計を行った。他方、建築物については多様な形態が存在し、建築基準法の更新に関連して経年で資材投入原単位の変遷が存在することが考えられる。そこで、国土交通省が公表している建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書による原単位を整理・比較を行った。原単位の比較・検討については、生コンクリート用セメント、骨材、鋼材、砂利、砕石、製材、合板の7材料を対象に行った。

以上により、物質ストック・フローデータベースを構築するにあたり、対象とする基盤情報を表(1)-1に整理した。また、サブテーマ3と関連して、物質ストック・フローデータベースより、物質フロー指標を追加して、物質ストック指標を整理・検討した。物質フロー指標は環境省の循環型社会形成基本計画にて達成目標として掲げられているが、本研究の目的でもある物質ストックは物質フローと密接に関わっている。そこで、(i)フローとストックの関係、(ii)ストックとGDPの関係、(iii)物質の入れ替わり、の3つの物質ストック・フロー指標の検討を行った。

表(1)-1 生産に関する建設資材データ概要

材料	出典	部門		範囲	単位
セメント	一般社団法人セメント協会 「需要部門別販売高」	建築(官公需), 建築(民需)		1990-2015	重量
砕石	経済産業省製造産業局住宅業建材課 「砕石統計年報」	天然資源	コンクリート用	1990-2015	重量
		再生骨材	コンクリート用		
砂利	経済産業省生産産業局住宅業建材課 「砂利砕石業務状況報告書」	なし 採取地別(河, 山, 海, 陸, 他) 種別(砂利, 砂, 玉石, 玉砕)のみ 記載		1990-2014	体積
鋼材	一般社団法人日本鉄鋼連盟 「鉄鋼統計要覧」	普通鋼材	建築	1990-2015	重量
木材	農林水産省生産流通消費統計課 「木材需給報告書」	製材品	建築	1990-2015	体積
		合板	建築		

(2) 資源の社会蓄積量の推計と価値の評価

物質フロー・ストック分析(material flow and stock analysis: MFSA)は、社会のモノの流れと蓄積を定量的に評価する手法である。資源の社会蓄積量の定量化において、MFSAは極めて有用であるが、これまでの適用範囲は、金属などの高価値資源に限られがちであった。そこで本研究では、日本の物質フロー・ストック管理に資するために、資本財(固定資本および耐久消費財)の網羅的な分析手法の開発とデータベースを構築した。産業連関表(input-output table: IOT)は、一国一年の全経済活動を記述している点で優れた情報源であるが、本研究では、固定資本を含む資本財の蓄積を分析するため、複数年のIOTを利用し時間軸を分析に組み入れ、さらに、固定資本マトリクスを利用することで、各資本財の蓄積先も分析に組み込んだ。これらの拡張を含め、本研究で用いた手法を時系列的物質フロー・ストック分析(TS-MFSA)と名づけ、資本財(固定資本および耐久消費財)の網羅的な分析手法を開発した。さらに、それに基づく蓄積先・資本財・部材・時間(投入時点および観察時点)の5次元構造を持つ資源ストックデータベースを構築した。

こうした網羅的・トップダウン的なストックデータベースの構築と並行して、東京都の木造住宅を事例研究対象として、着工床面積、滅失届面積などのフロー量と、床面積のストック量を、複数の統計資料から整合性をもって推計可能かどうかについての検討を行った。さらに、木造住宅に加えて非木造建築物についてもこの推計モデルを適用した。

また、MFSAを用いて、日本における鉄鋼材の耐久消費財や資本財の種類別に、それら鉄鋼材の社会蓄積量の時系列変化を推計した。鉄鋼材ストック量推計の結果を、それぞれの分野別に集計することにより、鉄鋼材ストック量/サービス量を導出し、7分野別の鉄鋼材のMIPS(material intensity per service)の変化を観察した。また、資本財の鉄鋼材ストック量の飽和傾向を観察し、耐久消費財と資本財の鉄鋼材需要量の変化を説明するモデルを構築した。

一方、発展途上国における蓄積量推計へ向けた準備段階として、バングラデシュにおけるEconomy Wide Material Flow Analysis (EW-MFA)の結果を改めて精査、整理し、資源生産性の推計と、一部建築物における物質蓄積の推計を試行した。資源生産性指標としてはDirect Material Consumption (DMC)/GDPを用いた。また建築物についてはボトムアップ的に調査した原単位を元に物質別のIn-Use Stockの推計を実施した。

また、蓄積された資源価値の評価として、[A]リサイクルによる供給リスク低減(供給源の多様化・国産化による安定的な資源供給)に寄与する価値、[B]社会に蓄積された素材が持つ潜在的な機能(直接的な利用価値)、および[C]資源消費による将来の追加費用の低減という価値、と3つに大別することで、各側面における資源価値を評価した。

まず[A]について、循環資源の蓄積の一つの評価として、昨今天然資源の供給に関してよく話題になるCriticalityの評価を用いることを検討した。Criticalityの評価については、供給リスクと、これが顕在化した際の経済の脆弱性を指標に考えることが多い。供給リスク軽減効果を定量化すべく、銅を事例として、一次・二次資源を含む供給構造を模擬するためのエージェントシミュレーションモデルを開発し、リスク情報を内包化することでその定量化を実施した。

[B]については、近年の素材の高機能化に鑑み、鉄鋼材(普通鋼)の材としての価値評価手法を開発した。鉄鋼材の価値は、材の提供する物理的あるいは工業的性能値によって評価した。示強性の性能値を示量性の機能量に変換し評価する手法を開発した。普通鋼の提供する物理的・工業的機能を網羅するため、普通鋼の品種ごとに、それを生産するメーカーのカタログ等を利用して対応する工業規格であるJIS番号ならびにJIS記号を特定し、各規格に記載の要求項目から品種別に提供している機能種別ならびにその値を特定した。また、異なる次元を有する主機能と補助機能を合わせた評価として、主機能を補助機能の次元に対して積分する手法を構築した。この再構築した評価手法において、鉄鋼材(普通鋼)の社会蓄積物質ストック量が構造材として提供している価値を、強度の尺度における機能量として評価した。

[C]に関しては、複数の既存の特性化モデルを基に二次資源の利用可能性を考慮に入れた評価方法を構築し、資源需要や二次資源利用量に関する将来シナリオ別の特性化係数を算定した。その上で、資源需要および二次資源利用量に関するシナリオ別の係数間比較と、それらの係数の感度のモデル間比較を通して、資源ストックの価値評価に応用可能な特性化モデルを選定した。その結果から、既存の特性化モデルのうち超過コストによる評価方法に着目し、Shared Socioeconomic Pathways (SSP)の5つのシナリオの下で、二次資源の利用可能性を考慮した世界の2100年までの鉄および銅の一次資源需要を予測した上で、将来の資源需要の変化を考慮した超過コスト(SCPC)を算定した。二次資源利用がないケースと二次資源利用があるケースの将来にわたる総超過コストの差分が資源ストックの価値(再生利用による将来の採掘費用増加の緩和)を表すものと定義して、現在の日本の資源ストックの価値を算定した。

(3)ストック指標体系の構築

本研究は、①ストック指標体系の提案と物質ストック推計モデルの構築を行うとともに、提案する指標体系のうち2つの指標を取り上げ、②建設物を対象とした「蓄積物質使用効率」の定義とその経年変化の試算・分析、③金属を対象とした「二次埋蔵量」の試算を行った。

まず①について、物質ストックの総量の計測に加え、物質ストックの使用価値、使用効率、資源価値などを計測することが重要と考え、これらを計測する指標の候補を整理し、体系の素案を作成した。また、②③の検討に用いることを視野に、ポピュレーションバランスモデルを用いた物質ストック推計モデルについては、サブ1と連携してシステムダイナミクスを用いたモデルを構築した。

次に②については、14の建設物を対象に「蓄積物質使用効率」指標を定義するとともに、道路、鉄道、下水道、住宅を対象にこれを適用した。蓄積物質使用効率(蓄積物質が発揮している機能/蓄積物質質量)を稼働率(蓄積物質が発揮している機能/蓄積物質がもつ潜在的な機能)と蓄積物質潜在使用効率(蓄積物質がもつ潜在的な機能/蓄積物質質量)のかけ算に分解し、14の建設物のそれぞれについて、蓄積物質が発揮している機能および蓄積物質がもつ潜在的な機能の定義を試みた。道路、鉄道、下水道については、上述のように稼働率(蓄積物質が発揮している機能/蓄積物質がもつ潜在的な機能)と蓄積物質潜在使用効率(蓄積物質がもつ潜在的な機能/蓄積物質質量)の変化が蓄積物質利用効率の変化に与える影響と分析した。また、住宅については、前者を「居住人口/総延床面積」で定義し、これをさらに3つの項「居住人口/使用住宅数」「使用住宅数/総住宅数」「総住宅数/総延床面積」に分解して時系列変化の要因を分析した。特に、住宅については、蓄積物質の滞留時間を考慮した「調整蓄積物質利用効率」を開発し、日諾の住宅に適用した。具体的には、住宅のライフサイクルで機能を発揮する蓄積物質をその期間の各年に配分することで、特定の年に存在する住宅に着目して「蓄積物質利用効率」を計測することを考えた。

③については、銅、アルミニウム等を対象に「二次埋蔵率」指標の推計を試みた。このため、経済社会に蓄積された金属のうち経済的に回収可能な二次資源の比率、すなわち、二次埋蔵率という概念を導入した。これは、二次資源として回収される老廃スクラップの量を推計される老廃スクラップ発生量で除すことで算出したものであり、年によって変化する値である。推計される蓄積物質質量にこの二次埋蔵率を乗じることで、二次埋蔵量を推計した。

(4) 国際ストック・フローデータベース拡充

資源の有効利用の観点から、グローバルサプライチェーンを考慮した国際ストック・フローデータベースの構築は有用である。特に、金属資源は、資源の賦存、製錬・精製等の技術、資源の需要に空間的な偏在性がある。二次的な利用を含め、各国・地域の消費量等の動態を把握することが持続可能な資源管理を進めるうえで重要である。本研究では、アジア・アフリカ地域を含めた世界の各国・地域における金属資源の需給構造の把握と課題抽出を目的として、(a)国際貿易統計等の統計情報をもとに、国際貿易に伴う各資源の移動量(グローバルマテリアルフロー)の推計・精緻化を実施した上で、(b)各国・地域ごとの資源の取引量(採掘量、輸出入量)、見かけ消費量、さらには、ストック量の推計を行った。本手法の特徴は、国際貿易統計を用いる事で、国家統計の整備が不十分な国・地域についても資源の移動量や見掛け消費量などの推計が可能な点である。対象とした資源は、世界で採掘される金属鉱物の約6割を占める鉄および銅、更には、急速な需要拡大が進むニッケルであり、整合的な貿易データの入手が可能な1995年～2010年を対象とした。

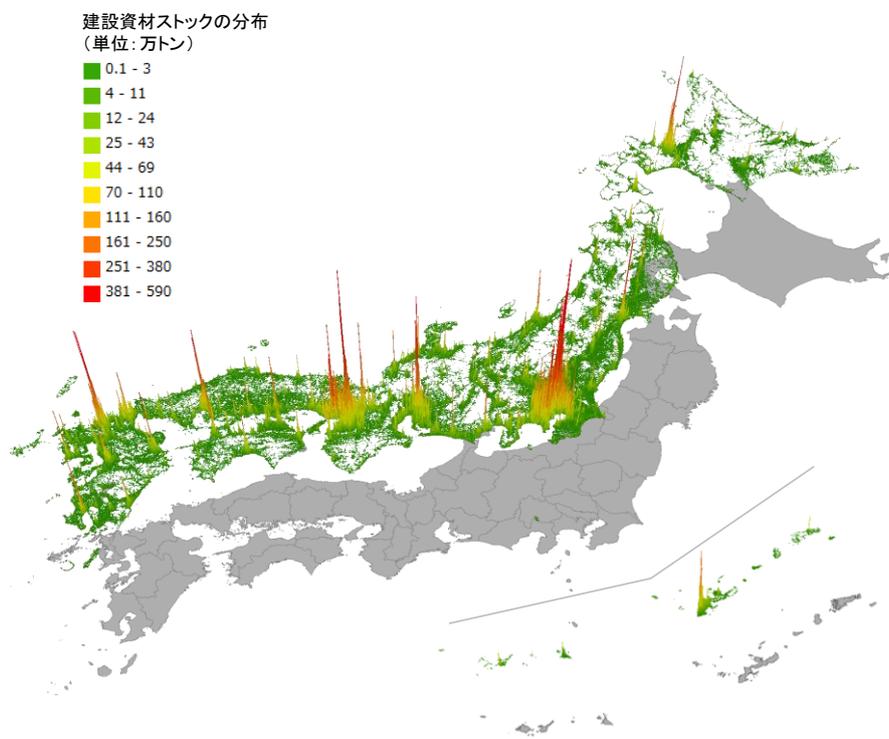
国際貿易量は、BACI (Base pour l'Analyse du Commerce International, CEPII)より、231の国・地域間を対象とした各品目群の輸出・輸入量を金額単位あるいは物量単位で抽出した。品目群については、HS codeに基づいて、6桁分類で掲載されている約6000品目群の中から、対象とする金属資源を含有する品目を選定した。しかしながら、6桁分類でのHSコードであっても、複数の異なる貿易商品が該当するコードがあり、対象とする金属資源を含有する商品はその一部である場合がある。本研究では、BACIから得た各商品の貿易量に対象元素を含む製品割合を考慮するための0から1の範囲を取るカットオフ値を設定し、これを貿易量に乗じることで、各種の元素含有商品の貿易量の推計精度を高めた。得られた貿易量から対象元素の移動量への換算には、各種の文献やWIO-MFA等から得られる各商品の元素含有率を乗じて推計を行った。

また、国際フローデータの推計として、1995年から2010年の16カ年を対象として実施すると共に、精緻化および不整合の解消に取り組んだ。更に、各元素別の国際フローデータをもとに、各国・地域の見掛け消費量(Apparent consumption)の推計を実施した。見掛け消費量は、国・地域ごとの資源採取量(二次資源を含む)と輸入量の和から輸出量を差し引くことで得られる。見掛け消費量については、1995年から2010年の16カ年を対象に推計を実施した。加えて、日本経済の寄与を把握するために、c)日本の経済活動が誘引する資源採掘量の推計を行った。推計には、GLIO(global link input-output model)を用い、2005年の国際貿易に伴う移動量を分析対象年とした。

4. 結果及び考察

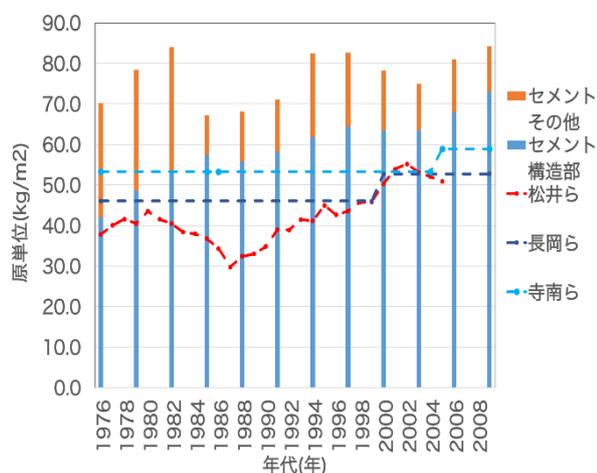
(1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング

本研究では、日本全体についてボトムアップ型およびトップダウン型のマテリアルストックデータベースを構築した。ストックデータベースのうち、拡充した建築物のストックGISデータベースを3次メッシュ(1km×1km格子)単位で集計した結果を図(1)-1に示す。建築物ストックは、札幌市・仙台市・東京都区部・名古屋市・大阪市・広島市・福岡市など政令指定都市の中心部において突出して多くの量が蓄積されていることがわかる。

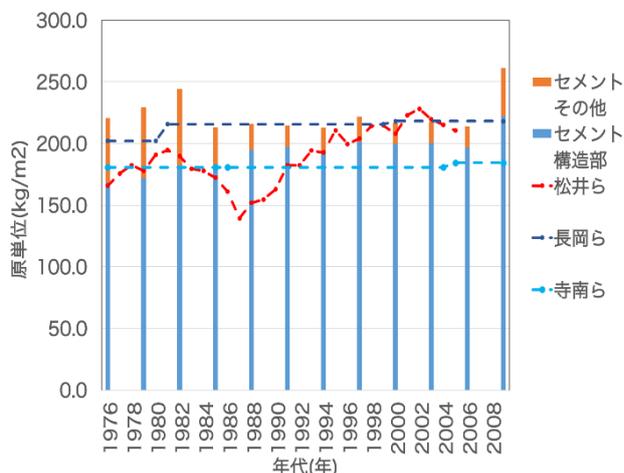


図(1)-1 建築物ストックの分布(3次メッシュ集計、2009年)

全国の建設資材・労働力需要実態調査のセメント投入原単位と、既往研究のそれとの比較・検討を行った。ここでは、既往研究のセメント投入原単位として、寺南ら、長岡ら、松井らの原単位を用いた。寺南らはセメント投入原単位を、木造・非木造といった2つの構造分類で算出しているため、長岡ら・松井らのセメント投入原単位もこれに合わせて整理した。具体的には、非木造のセメント投入原単位について、鉄骨造と鉄筋コンクリート造の2構造の投入量の和を2構造合計の着工面積で除して、整理を行った。また、長岡らでは、建築物を地下構造と地上構造に分けているため、地下・地上合わせてのセメント投入原単位に整理した。松井らは1年毎に算出されていたデータから、5年分の平均を取り、5年毎のデータとして示した。既往研究においては、生コンクリートとして建築物に投入されているセメントを対象としている。建設資材・労働力需要実態調査では、生コンクリートとして投入されているセメントをセメント構造部、生コンクリート以外の状態で投入されているセメントをセメントその他として、木造を図(1)-2、非木造を図(1)-3に示した。



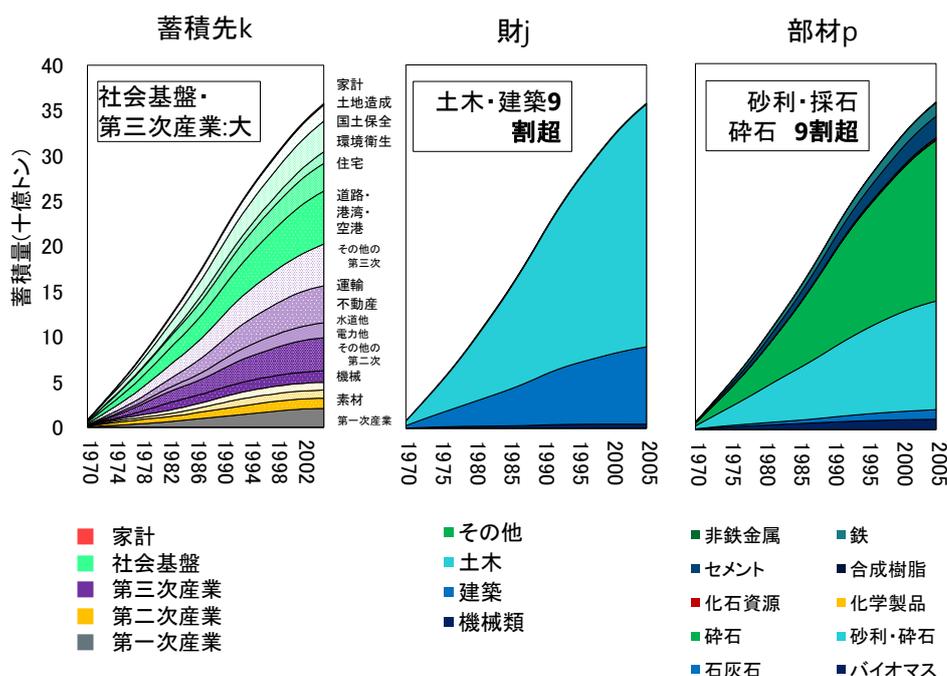
図(1)-2 木造居住専用セメント原単位



図(1)-3 非木造居住専用セメント原単位

(2) 資源の社会蓄積量の推計と価値の評価

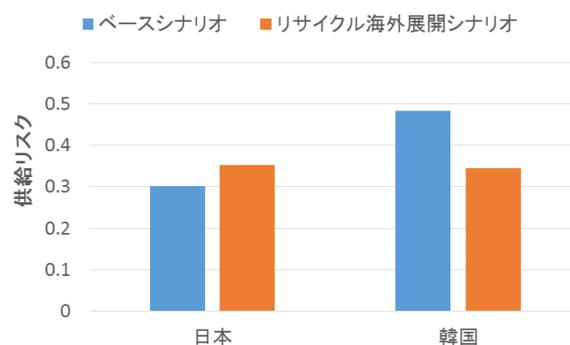
本研究では、資源の社会蓄積量を推計しており、主要な結果として日本全体の網羅的な分析結果を示す。TS-MFSAを用いて、資本形成への物質投入量、社会蓄積量、寿命に達した量(EoL量)を、資本形成がなされた蓄積先部門(k)別、資本財の種類(j)別、蓄積された部材(p)別に推計した。投入量についてみると、最大値は1990年であり、2005年は1970年よりもやや低い水準まで、新しい固定資本への投入が落ち込んでいる。図(2)-1に蓄積量の推計結果を示す。年とともに製造業の割合が下がり、一方でサービス産業の割合が上がっている。また発電、上下水道などの公共インフラは75～80年にかけて集中している様子が伺える。このようにその時代の産業構造に応じて、固定資本の投入先は異なることがわかる。蓄積された財の生産部門としては、土木、建築で9割を占め、また、蓄積の中に含まれる投入物では、非金属鉱物が大部分を占めている。



図(2)-1 蓄積先k, 財j, 部材p 別の物質蓄積量の内訳

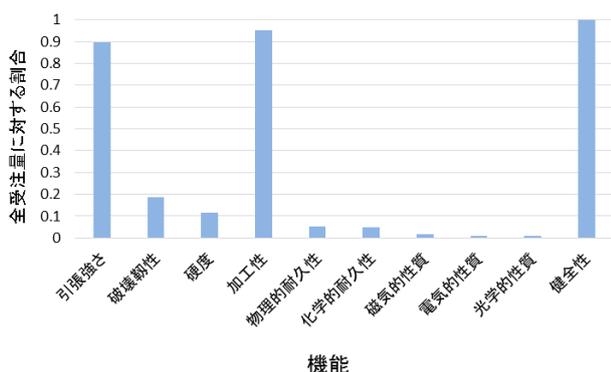
次に、資源価値の評価について大別した3つの結果を示す。

[A]のCriticalityについて、物質フローデータの整理からは、銅の天然資源に関する国際取引の中での我が国の相対的な立場が中国の台頭に伴い弱くなっていることを確認した。この分析の中に循環資源を取り入れることで、その効果を定量的に捕捉することとし、具体的には鉱物資源のリサイクルによる供給リスク低減効果の評価モデルとして、エージェントシミュレーションによるモデルを構築した。一つは日本が海外へのスクラップ流出などを止めるべく、国内低品位銅スクラップの積極利用を図るシナリオ(a)、もう一つはより積極的な促進策として、アジア諸国からのスクラップ輸入を図るシナリオ(b)の二つを用意した。シナリオを比較すると図(2)-2に示したように、我が国の銅資源供給リスクはむしろ高まってしまっており、韓国で供給リスクが下がっていることが分かる。これは、我が国がアジア地域のスクラップを積極的に回収したため、アジア地域のスクラップが不足気味になった一方、我が国が輸入を止めた低リスクのチリなどからの天然資源が韓国に流れたために、我が国では高リスクの循環資源をわざわざ輸入し、低リスクの天然資源を捨てたことを意味している。やや極端なシナリオではあるが、供給リスクという意味においては、過剰リサイクル促進は国内限定であっても意義は限定的であり、輸入については場合によっては逆効果であることを確認した。

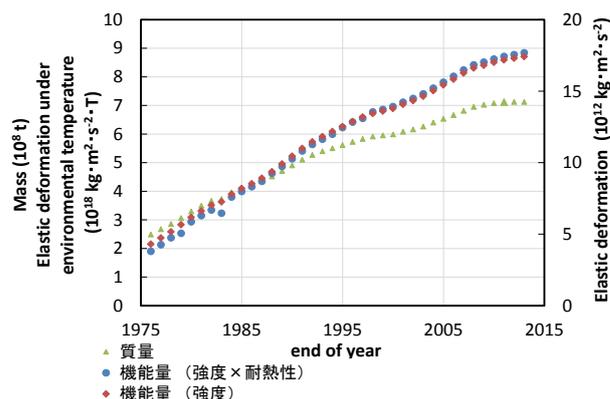


図(2)-2 リサイクル促進(シナリオb)が製錬所レベルの供給リスクに与える影響

[B]の鉄鋼材の財としての価値評価手法開発の成果として、普通鋼の提供する物理的・工業的機能を網羅した結果を図(2)-3に示す。鉄鋼材は、外観ならびに内部組織の健全性が全量に要求されるとともに、ほとんどの鋼材において加工性ならびに引張強さが要求されていることがわかった。構造材としての利用が多いことと整合の取れる結果と考えられる。他の鉄鋼材の財としての価値評価手法として、日本における鉄鋼材の社会蓄積量が提供する強度における機能量を、弾性変形域における最大吸収エネルギー量により評価した。その推移を推計した結果を図(2)-4に示す。2013年末時点の日本の社会において構造材として使用されている普通鋼が塑性変形せずに吸収できるエネルギー量は、 $1.7 \times 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} (= \text{J})$ と定量された。さらに、補助機能として耐熱性を考慮し、それぞれの環境温度における最大吸収エネルギー量を積分した結果も図(2)-4に示す。2013年末時点では、 $7.5 \times 10^{18} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{T}$ と定量された。従来のMFSAの結果と同様に、質量基準での鉄鋼材の社会蓄積量とともに推移を同図にプロットした。技術開発によって鉄鋼材の高強度化が進んでいることがわかり、耐熱性まで考慮すると、さらなる高機能化が進んでいることを示唆している。

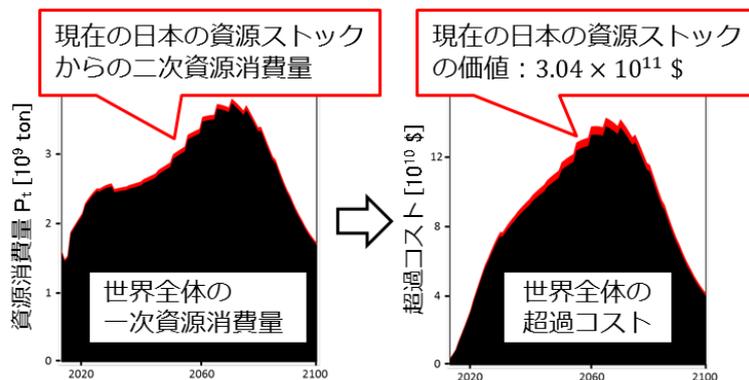


図(2)-3 普通鋼の提供する能種別受注割合



図(2)-4 日本における鉄鋼材の社会蓄積量が提供する強度ならびに耐熱性を複合した強度における機能量の推移

[C]の二次資源利用の側面からの価値評価については、まず既存のLCIAの特性化モデルとして、1)消費量・埋蔵量比、2)ユーザーコスト、3)超過コストの3つの手法を取り上げ、鉄および銅を対象として、二次資源利用可能量を考慮した一次資源消費量を用いて特性化係数を算定した。さらに、Shared Socioeconomic Pathways (SSP)の5つのシナリオごとに、2100年までの鉄および銅の一次資源消費量を推計した。将来の一次資源消費量に影響を与える要因として、平成27年度には経済発展と用途別需要との関係のモデリングに基づく資源需要を予測した。超過コストによる特性化係数の算定結果の応用から、資源ストックの価値(二次資源利用による将来の採掘費用増加の緩和)を算定した。まず、図(2)-5の左グラフは、鉄についてSSP2シナリオにおける世界全体の一次資源消費量の将来予測(黒部分)と、それに対して現在の日本の資源ストックからの二次資源利用があった場合(リサイクル率は現在と同水準と仮定)、どのくらい一次資源消費が削減されるか(赤部分)を示している。図(2)-5の右グラフは、二次資源利用がない黒部分+赤部分の総消費量をもとにした総超過コスト[\$]と、二次資源利用がある黒の総消費量をもとにした総採掘コスト[\$]を示している。これらの差分である赤部分が、現在の日本における鉄の資源ストックの価値を表しており、約30兆円(SSP2シナリオの場合)と試算された。



図(2)-5 世界全体の一次資源消費量の将来予測に対する日本の資源ストックからの二次資源消費量の寄与と超過コストの概念に基づく価値(鉄のSSP2シナリオの事例)

(3)ストック指標体系の構築

指標の概念整理については、ストック指標体系の素案を作成し、ストック量に関する指標が捉える範囲をまず、ストックの総量を計測する指標として、「採取資源総量」や「経済中物質蓄積量」が考えられた。前者は、採取した資源の総量を計測するものであり、使用後に環境中に「散逸した物質」も含まれる。これは、地球上に存在するストックのうち、人類が使用した総量を計測するものである。後者はこのうち、経済圏内に存在するストックである。これには、「管理された埋立地の廃棄物」も含まれる。なお、管理されなくなった埋立地に存在するストックは「散逸した物質」に分類される。次に、ストックの使用価値を計測する指標として、「使用中物質蓄積量」が考えられた。これは、経済圏内に存在するストックのうち、使用中のストックであり、その価値が使用されているストック量を計測するものである。さらに、ストックの使用効率を計測する指標として、「蓄積物質使用効率」や「蓄積物質寿命」が考えられた。前者は、使用されている単位物質あたりに発揮している機能を計測するものであり、その検討を後述する。また、後者は蓄積物質が平均的にどのくらいの期間使用されるかを計測するものであり、その期間が長いほどその物質が効率的に使用されていることを意味するものである。最後に、ストックの資源価値を計測する指標として、「二次埋蔵量」が考えられた。これは、「使用前・中・後の部品・製品」や「管理された埋立地の廃棄物」のうち、経済的に回収可能な物質ストックの量を計測するものであり、一次資源の埋蔵量（一次埋蔵量）に対比させた概念である。

蓄積物質使用効率の定義については、以下のとおりとした。

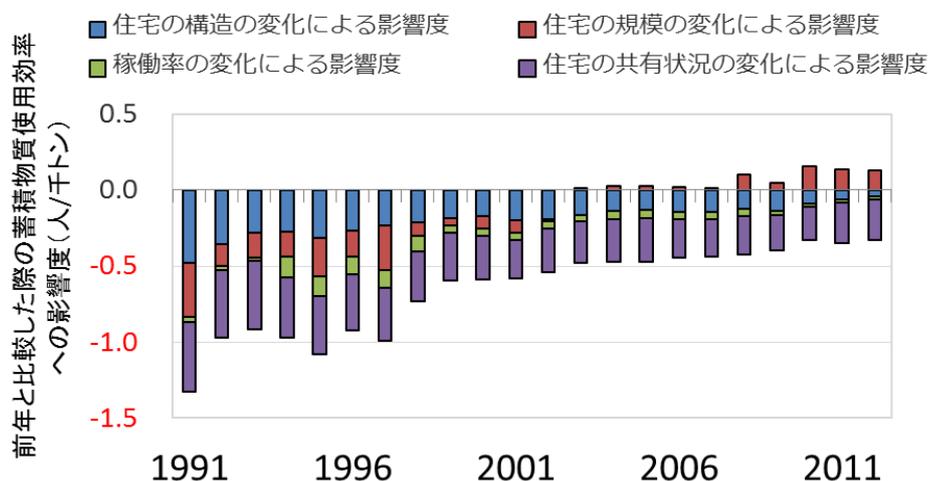
$$\text{蓄積物質使用効率} = \frac{\text{蓄積物質が発揮している機能}}{\text{蓄積物質質量}} = \frac{\text{蓄積物質が発揮している機能}}{\text{蓄積物質がもつ潜在的な機能}} \times \frac{\text{蓄積物質がもつ潜在的な機能}}{\text{蓄積物質質量}}$$

すなわち、蓄積物質が発揮している機能を蓄積物質質量で除したものを蓄積物質使用効率とする。

道路、鉄道、下水道、住宅を対象とした蓄積物質質量及び蓄積物質使用効率の試算について、住宅の結果を示す。1990年の蓄積物質質量は約33.9億トンであったが、2012年には約55.8億トンとなり、この20数年で約1.6倍に増加したと推計された。また、1990年の蓄積物質使用効率が37(人/千トン)であったのに対し、2012年には23(人/千トン)となり、約40%減少していることが示された。住宅については、先の構造分解式の第1項をさらに以下の3項に分解して蓄積物質使用効率の変化の要因を分析した。

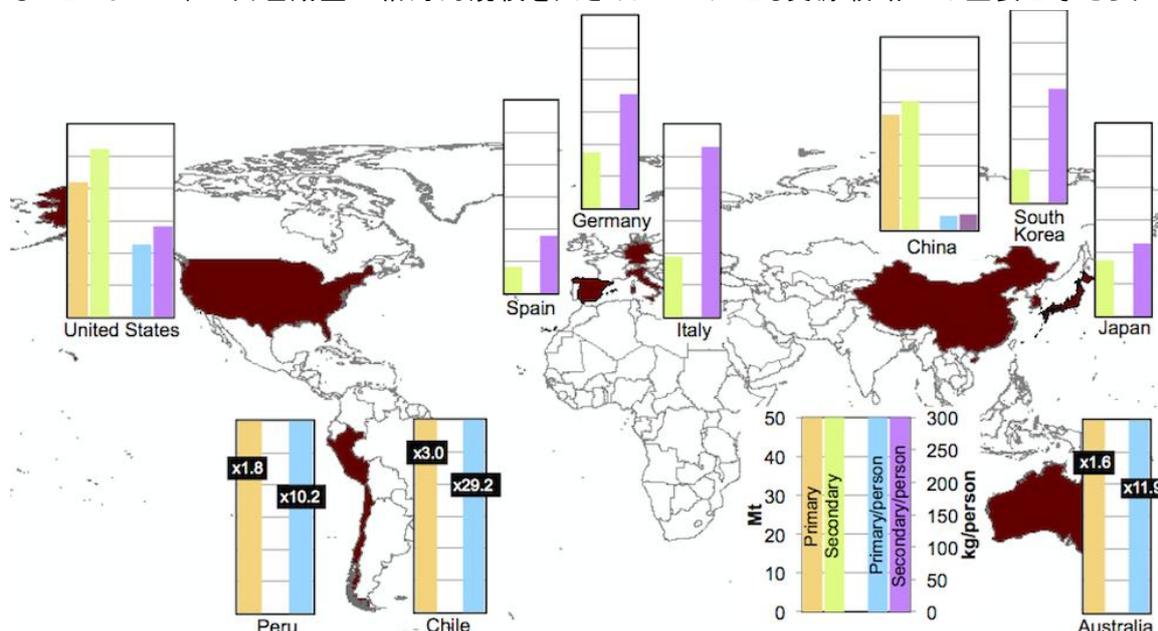
$$\text{住宅の蓄積物質使用効率} = \left(\frac{\text{居住人口}}{\text{使用住宅数}} \times \frac{\text{使用住宅数}}{\text{総住宅数}} \times \frac{\text{総住宅数}}{\text{総延床面積}} \right) \times \frac{\text{総延床面積}}{\text{蓄積物質質量}}$$

ここで、右辺第一項は住宅の共有状況（≒世帯人数）、第二項は住宅の稼働率、第三項は住宅の規模（の逆数）、第四項は住宅の構造（物質使用強度の逆数）を主に表すことになる。図(3)-1に示す通り、1990年以降一貫して住宅の共有状況（≒世帯人数）の変化が蓄積物質使用効率に負の影響を与えていると推計された。これは、一人暮らし等による世帯人数の減少が、蓄積物質の使用効率に大きな影響を与えてきたということである。また、住宅の構造の変化による影響が次に大きいと推計されたが、これは比較的軽量の木造の割合が減少し、重量なRC造やS造の割合が増加したことに起因する。一方、住宅の規模の変化は、1990年代は蓄積物質使用効率を減少させる方向に働いていたが、近年蓄積物質使用効率を増加させる方向に働いている。これは、マンションやアパートなどの増加により、平均的な住宅の規模が縮小傾向にあるためと考えられる。



図(3)-1 住宅の蓄積物質使用効率の変化に対する各要因の影響

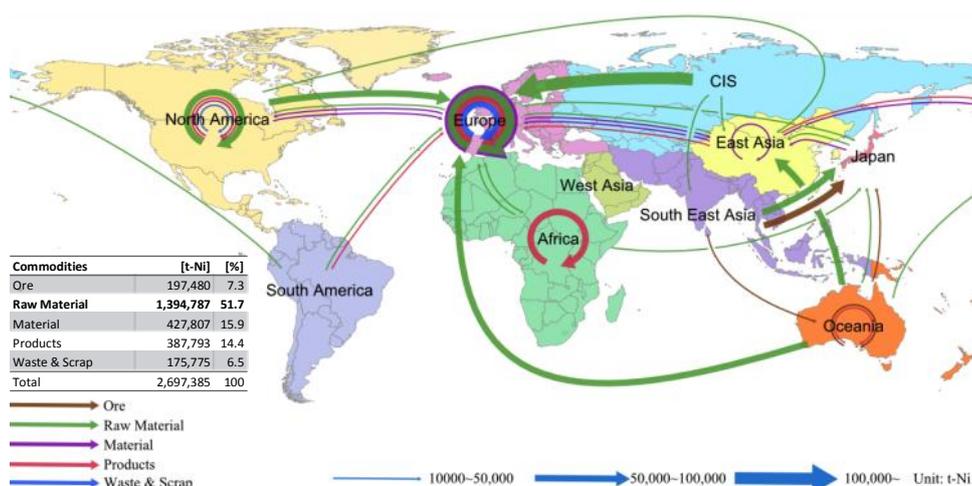
また、一次埋蔵量(天然資源の埋蔵量)と二次埋蔵量合わせて示したものが図(3)-2である。チリ、ペルー、オーストラリアにおいて銅の一次埋蔵量が大きく、それぞれ150Mt、90Mt、80Mtとなっている。一方、銅の二次埋蔵量では米国、中国が大きく、それぞれ44Mt、33Mtと推計された。両国については、両国が所有する一次埋蔵量より二次埋蔵量の方が大きいという推計結果であり、今後は二次埋蔵量の管理がより重要になるものと考えられる。世界全体で見ると、その二次埋蔵量は一次埋蔵量の約30%と推計され、現状の二次埋蔵量の規模は一次埋蔵量よりも小さいが、二次埋蔵率(すなわち使用済み製品の再資源化率)は高めることができる。再資源化率を高めることによって、二次埋蔵量の相対的規模を大きくしていくことも資源戦略上は重要と考えられる。



図(3)-2 銅の一次埋蔵量と二次埋蔵量の分布

(4) 国際ストック・フローデータベース拡充

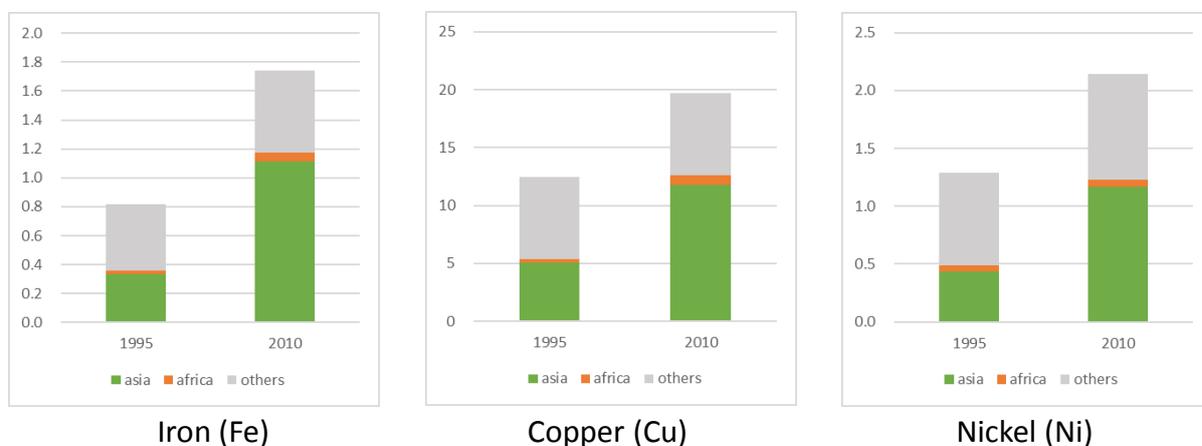
本研究では、国際ストック・フローデータベースの拡充を行った。図(4)-1により、グローバルマテリアルフローの品目別の内訳は、鉱石が7%、フェロニッケルや金属ニッケル等の中間素材が52%、ステンレス等の素材が16%、機械類や自動車などの高加工度製品が14%、スクラップ等が7%を占めると得られた。世界的には、フェロニッケルやニッケルマット等の中間材料を介しての移動量が多いのに対して、日本では中間材料の他、鉱石としての東南アジアやオセアニアからの輸入量が多い事が判る。



図(4)-1 国際貿易を介した品目群別・地域別のニッケルの移動量 (2005年)

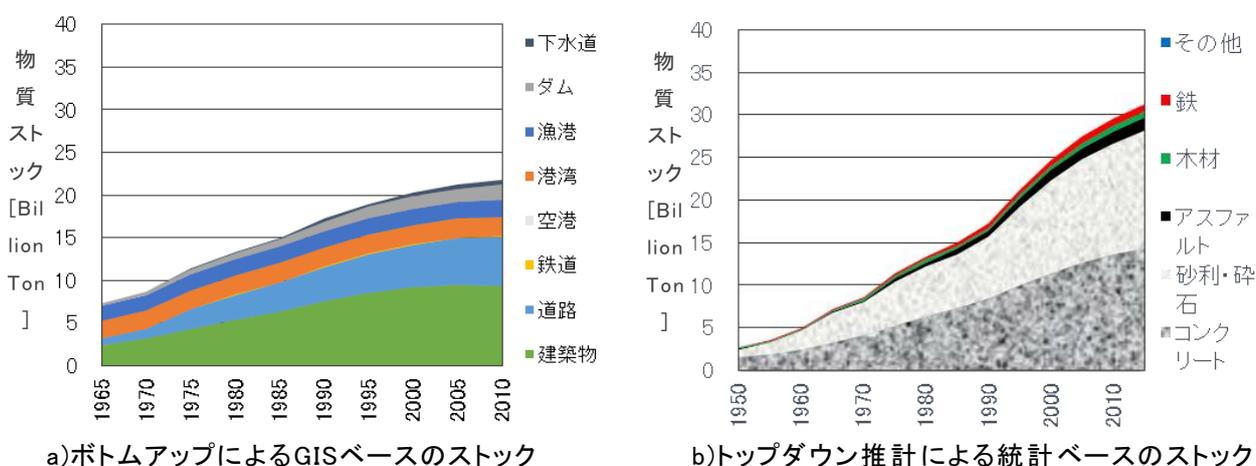
また、各資源について見掛け消費量の推計を実施した。図(4)-2に、鉄、銅、および、ニッケルの見掛け消費量の外観を示した。なお、現在も継続して、国際フローおよび見掛け消費量についての各年の推計結果をもとに不整合の検証や精緻化を進めており、より確度の高い推計結果の出力を目指している。各国の見掛け消費量の時系列分析の結果、1995年から2010年にかけて、いずれの物質(鉄、銅、ニッケル)についても全体的に見掛け消費量が急速に伸びている傾向があった。対象期間で世界全体の見掛け消費量は、鉄で2.1倍、銅で1.6倍、ニ

ッケルで1.7倍に増加した。特に、アジア地域における消費量が拡大している傾向が示された。世界全体の消費量に対するアジア地域の消費量が占める割合は、鉄が41%から64%に増加、銅が40%から60%に増加、ニッケルが34%から54%に増加した。一方、アフリカ地域の消費量が占める割合は、鉄が3.1%から3.3%に増加、銅が2.7%から4.3%に増加、ニッケルが3.8%から2.8%に減少に留まった。加えて、これらの情報をもとに、国・地域別のストック量を試算した。推計の結果、2010年の世界全体の鉄のストック量は、 $24 \times 10^9 \text{t-Fe}$ と得られた。同様に、銅およびニッケルのストック量は、 $38 \times 10^7 \text{t-Cu}$ および $29 \times 10^6 \text{t-Ni}$ と得られた。



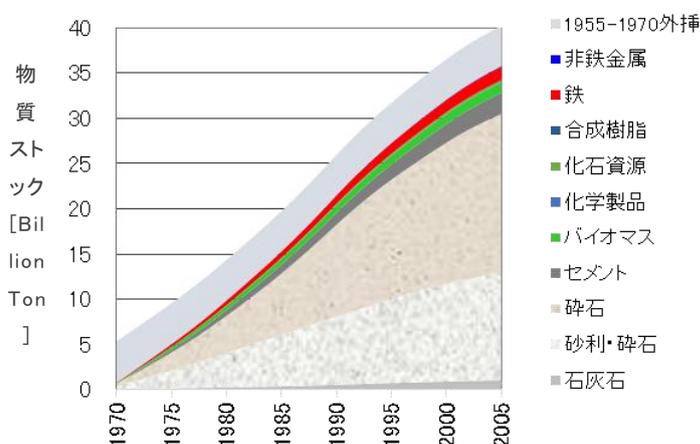
図(4)-2 アジア・アフリカ地域における消費量の変遷：1995年および2010年

(1)から(4)にて示したように、本研究では、様々なアプローチでマテリアルストックを推計し、蓄積された資源の価値を評価した。構築したストックデータベースには、a)ボトムアップ、b)トップダウン、c)産業連関分析による3種類の推計方法があり、図(5)-1にその比較結果を示す。



a)ボトムアップによるGISベースのストック

b)トップダウン推計による統計ベースのストック

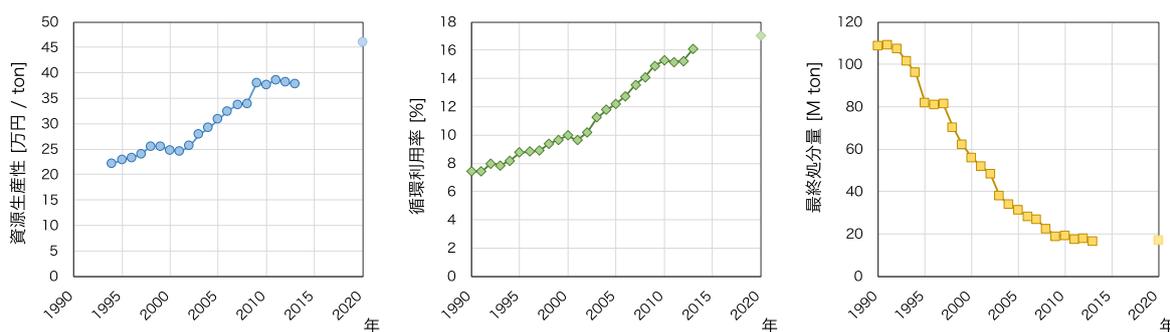


c)産業連関分析による物量表ベースのストック

図(5)-1 日本全体の物質ストック推計の比較結果

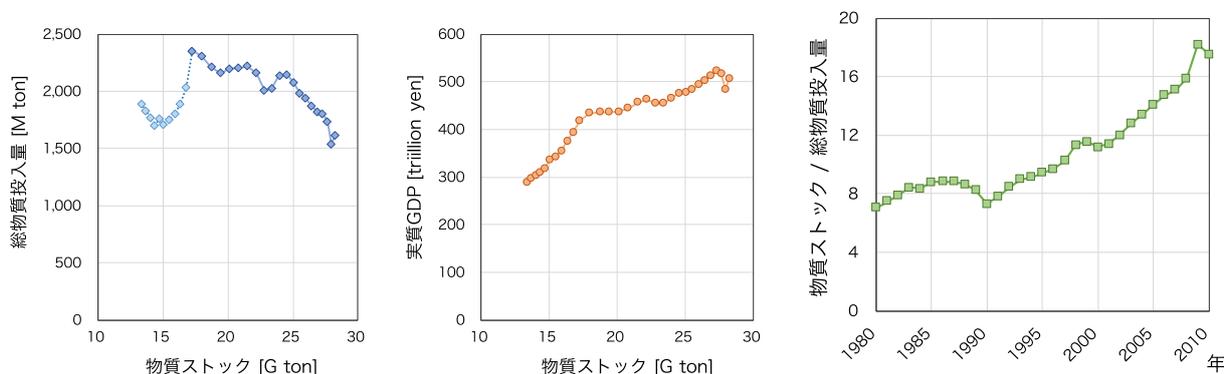
図より、共通して結果の得られた2005年の物質ストックを比較すると、a)ボトムアップ：212億トン、b)トップダウン：275億トン、c)産業連関分析：403億トン、である。ボトムアップ推計は構造物の現況規模量に資材投入原単位を乗じていることから、トップダウン型・産業連関分析と比較して過少となる結果となった。その原因として、GISデータにより補則可能な構造物が十分でない点、資材投入原単位の対象とする物質が不足する点などが挙げられる。しかし、空間的に物質ストックを把握できる点において優位性が高く、上記の点を改善することで今後の分析に利用できるポテンシャルの高さが示唆される。他方、産業連関分析による結果では網羅的に物質を集計しており、集計する種別を変更することで経済性評価などとの親和性が高い。これらの推計手法はそれぞれ長所・短所が異なっており、すべてにおいて有用な物質ストックに関わる統計は整備されていないため、より正確に把握するためにこれらの推計手法の比較・検討を継続的に行うことで、精緻なストックデータベース構築を進めるべきである。

また、構築されたストックデータベースより、物質フロー指標を支える物質ストック・フロー指標を整備した。「(i)フローとストックの関係」はストックの増大に伴うインフローの変化を表しており、3段階の変化が示される。インフローの急激な増大が示される経済成長の段階、その後の安定的なインフローが保たれる段階、インフローが減少し、蓄積量が飽和に向かう段階、の3段階が示された。今後の予想としては、インフローの減少が一定値に収束し、蓄積量も飽和することが望まれる。「(ii)ストックとGDPの関係」は、ストックの成長とGDPの増加の相関を表したものであり、インフローとGDPにのみ着目して資源の有効利用の表す「資源生産性」に物質ストックの視点を加える指標である。指標の傾きに大きな変化は現れないが、本指標により、物質ストックの充実によりGDPを生み出す関係性が示された。将来的にはストックが飽和した経済社会においてもGDPが成長するパスを示す指標となり得る。「(iii)物質の入れ替わり」では、インフローとストックの比を表しており、物質ストックが飽和した経済社会においては構造物の耐用年数と類似した指標となり得る。しかし、物質ストックには空き家等の効用を発揮していない構造物も含まれているため、現状において、一般的な耐用年数よりも大きな値を示す傾向がある。更新周期が長くなるほど、環境負荷は小さくなると考えられるため、今後の変化を注視する必要がある。



① 資源生産性 ② 循環利用率 ③ 最終処分量

図(5)-2 3つの物質フロー指標



(i)フローとストックの関係 (ii)ストックとGDPの関係 (iii)物質の入れ替わり

図(5)-3 物質ストック・フロー指標

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究課題では、既存のマテリアルフロー分析に加えて、社会に滞留する資源を対象にするマテリアルストック分析に焦点を当てると共に、蓄積された資源の価値を最大限に引き出せる社会のあり方について多面的に分析を行った。従来のマテリアルフロー分析における蓄積純増(NAS)はInflow、Outflow、Throughputの差分で計算していたが、本研究では、以下に示すいくつかの推計方法でストックを分析した。1) 地理情報を基盤としたボトムアップ型ストック推計、2) 生産統計を基盤としたトップダウン型ストック推計、3) 産業連関表を用いた網羅的なストック推計、により、多角的なマテリアルストック分析を行った。また、その枠組みをアジア・アフリカなど諸外国に適用する方策を進め、まずはグローバルサプライチェーンを通じた連関表モデルにおいて検討をした。ストック推計の精度検証を行い、統計や地理情報を用いた推計を対応させることで、広範に分析を行った点は科学的意義が高い。

指標体系については、既存の資源生産性や循環利用率に加え、ストックを基軸とした指標の検討を行い、ストック利用効率(蓄積物質利用効率)指標など、新たな知見を示した。また、ストックとフローの対応を評価することはこれまでのフローベースでの指標の評価に滞留される資源の評価を含めた点に新規性が認められる。このような検討は世界的にも例がなく、物質ストックに関わる指標自体があまり議論されていないことから、今後、各指標の適用研究を通じて世界に発信していく予定である。さらに、産業エコロジー国際学会や国際ワークショップを通じて他国の資源利用の専門家と議論を交えたことで、本研究が提示するストック指標について、世界における先駆的な事例として学術的に貢献することが期待される。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本研究は、第3次循環型社会形成推進基本計画の“今後の検討課題”に記載されている通り、我が国に蓄積されている資源のストックに関する指標に関してストック指標の重要性を検討した。環境省が2016年度に設置した「循環基本計画分析・新指標検討ワーキンググループ」では、(1)第3次循環基本計画の進捗状況の点検・分析、(2)次期基本計画に向けた指標の検討、(3)次期循環基本計画の目標検討のためのモデル及び2030年・2050年の循環型社会の検討を行っているが、本課題の研究担当者は当該ワーキンググループに座長(森口)や委員(谷川・橋本)として参画しており、研究プロジェクトで得られた知見や考え方を適時インプットした。第3回会合では、本研究プロジェクト及び関連する研究プロジェクトの進捗や得られた成果を各20分づつ合計40分ほど報告し、当該WGに物質ストックに関する重要な知見提供を行った。本研究の成果は引き続き次期循環型社会推進基本計画に資するよう環境省に情報提供を進めると共に、物質フロー指標を補完する物質ストック指標の構築に貢献している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究課題主催の国際ワークショップを3年間で3回開催しており、環境省を含めてストックの議論を深める機会を設け、国際的見地から環境政策に関する議論を行った成果のアウトカムとして取組を行っている。更に、本研究メンバーが主体となって行った平成27年度環境科学会大会におけるシンポジウムや国際学会であるISIE SEM-AP 2016でのスペシャルセッション、またUNEP国際資源パネルに関わる国際シンポジウムなど、成果報告の機会を設けており、国際的な環境政策への貢献に値すると考えられる。

また、次期循環基本計画の策定に向けて、2017年度に指標の議論も本格化することから、本課題が提案する物質ストック指標体系のうち、計測可能な指標については、経年的な取りまとめを進め、今後活用していくことが見込まれる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Tomer Fishman, Heinz Schandl, Hiroki Tanikawa, Paul Walker, Fridolin Krausmann, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.18, Issue3, pp.407-420, 2014.
“Accounting for the Material Stock of Nations”
- 2) H. TANIKAWA, T. FISHMAN, K. OKUOKA, K. SUGIMOYO: *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 19, No. 5, 778-791, DOI: 10.1111 / jiec.12284, (2015)
“The Weight of Society Over Time and Space: A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan, 1945-2010”
- 3) 小泉裕靖、中谷隼、森口祐一、*土木学会論文集G(環境)*, 72(6), II_249-256, 2016
“東京都における木造建築物のフロー・ストックの時系列的変化に関する研究”

- 4) K.Nansai, K.Nakajima, S.Kagawa, Y.Kondo, Y.Shigetomi, and S.Suh: "Global Mining Risk Footprint of Critical Metals Necessary for Low-Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum in Japan", *Environ. Sci. Technol.*, Vol.49, 2022-2031, 2015.
- 5) K.Nakajima, K.Nansai, K.Matsubae, M.Tomita, W.Takayanagi, T.Nagasaka, 586, 730-737, 2017. "Global land-use change hidden behind nickel consumption, *Science of The Total Environment*"
- 6) Ichiro Daigo, Leo Fujimura, Hideo Hayashi, Eiji Yamasue, Satoshi Ohta, Tran Duc Huy, Yoshikazu Goto. *ISIJ Int.* 57(2), 2017. "Quantifying the total amounts of tramp elements associated with carbon steel production in Japan"
- 7) Ichiro Daigo, Kohei Iwata, Masahiro Oguchi, Yoshikazu Goto. *Procedia CIRP* (in press) 2017. "Lifetime distribution of buildings decided by economic situation at demolition : D-based lifetime distribution"
- 8) Maung, K.N., S. Hashimoto, M. Mizukami, M. Morozumi, C.M. Lwin: *Environmental Science & Technology*, Vol.51, No.7, pp.3824-3832, 2017, DOI: 10.1021/acs.est.6b04331 "Assessment of the secondary copper reserves of nations "

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 森口祐一、谷川寛樹：環境科学会誌、27,6,402-406(2014)
物質フロー研究から物質ストック研究への展開（2014年学術賞記念シンポジウム）
- 2) 醍醐市朗：日本LCA学会誌、11, 1, 66-67（2015）
「今さら人に聞けないLCA講座(6) マテリアルフロー分析は何ができるの？」
- 3) Ichiro Daito: *Steel Construction: Today & Tomorrow* No.46, Dec. 2015, pp. 9-12, (2015)
"Material Stock and the End-of-life Recycling Rate of Steel"

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) 森口祐一：環境科学会2014年会、つくば、18-19 Sep. 2014.
「物質フロー研究の発展－国際的な相互作用と政策との相互作用」
- 2) Hiroki Tanikawa：ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 17-19.Nov.2014.
"Weight of Cities - Material Stock and Flow Analysis based on spatial database over time."
- 3) Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa：ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 17-19.Nov.2014.
"Regional Symbiosis and cyclical use of Construction Materials"
- 4) Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa, Heinz Schandl：ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 17-19.Nov.2014.
"What are the Drivers of Material Stock Accumulation?"
- 5) S. Murakami, T. Komatsu, H. Tanikawa, M. Hossain and R. Koide: 11th International Society for Industrial Ecology (ISIE), Socio-Economic Metabolism section conference and the 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, 17-19 November 2014
"Resource Decoupling in Developing Country -economy wide Material Flow Analysis of Bangladesh-
- 6) I. Daigo, K. Iwata, M. Oguchi, Y. Goto: 11th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 4th ISIE Asia-Pacific conference, Melbourne, Australia, 17-19 November 2014
"Characteristics of observation year based distributions - time-series change of building lifespan in Japan -"
- 7) S. Nakanishi, J. Nakatani and Y. Moriguchi: The 11th International Conference on EcoBalance, Tsukuba,
"Framework and Applications of Time-Series Material Flow and Stock Analysis"
- 8) A. Miatto, T. Fishman, H. Tanikawa, and H. Schandl: World Resources Forum 2015, Davos, Switzerland, 2015
"Intensity assessment and global accounting for non-metallic minerals used for construction"
- 9) H. Tanikawa: ISIE2015 8th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Guildford, U.K., 2015
"Weight of Cities -Material Stock and Flow Analysis based on spatial database overtime-

- 10) Moriguchi, Y. , Hashimoto, S. : International Society for Industrial Ecology 2015 Conference, Surry, 7-10 July 2015
“Material Flow Analysis and Waste Management”
- 11) Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo (2015) Dynamic changes in the global flows of critical metals, World Resources Forum Asia Pacific, June, Sydney, Australia.
- 12) 八柳有紗、谷川寛樹、橋本征二：第43回環境システム研究論文発表会、札幌、2015.
「ストック型社会に向けたストック使用効率の評価 - 建設物を対象としたケーススタディー - 」
- 13) Ichiro Daigo, Hiroki Hatayama, Kenichi Nakajima, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Yoshinao Kobayashi. Rome, Italy. 9-10 May, 2016
“Framework for expressing social value of TETSU”
- 14) Yuichi Moriguchi, ISIE AP/SEM 2016, Nagoya, Japan, 28-30 September 2016
“Science-policy interface in Material Flow Analysis - Lessons from Japanese and international activities -“
- 15) Alessio Miatto, Heinz Schandl, Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa, The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Lifespan modelling uncovers urban stock and flow behavior”
- 16) Maung, K.N., C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto : The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology、名古屋、2016.
「Classification of secondary aluminum resources of nations」
- 17) K.Nakajima, I.Daigo, K.Nansai, K.Matsubae, W.Takayanagi, M.Tomita, and Y.Matsuno, The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia Pasific conference (2016/09/28-30, Nagoya University) (2016/09/30) pp.73
“Recent global trends in flows and apparent consumptions of nickel copper and iron”

7. 研究者略歴

課題代表者：谷川 寛樹

九州大学大学院工学研究科 博士（工学）

現在 国立大学法人名古屋大学 環境学研究科 教授

研究分担者

1) 森口 祐一

京都大学大学院工学研究科 博士（工学）

現在 国立大学法人東京大学 工学系研究科 教授

2) 橋本 征二

京都大学大学院工学研究科 博士（工学）

現在、学校法人立命館大学 理工学研究科 教授

3) 中島 謙一

筑波大学大学院工学研究科 博士（工学）

現在（国研）国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 国際資源循環研究室 主任研究員

1-1402 資源価値を引き出す次世代マテリアルストックに関する研究

(1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング

名古屋大学

環境学研究科 都市環境学専攻 教授	谷川寛樹
環境学研究科 都市環境学専攻 助教	奥岡桂次郎
リーディング大学院推進機構本部 特任教授	Victor Muhandiki

〈研究協力者〉

みずほ情報総研株式会社

環境エネルギー第1部 持続型社会チーム	高木重定
---------------------	------

平成26～28年度累計予算額：36,285千円（うち平成28年度：10,825千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

循環型社会の構築に向けて、物質フローを支える物質ストックの定量化とその評価は重要である。本研究全体を通して、トップダウン型やボトムアップ型など多角的な物質ストックの定量化手法を検討することで、社会全体に蓄積された物質の総量を構造種別・物質種別に検討した。また、研究グループ内で整理してきた資材投入原単位について、国土交通省が公表している建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書により、整備・比較を行った。また、サブテーマ3と関連して、物質ストック・フローデータベースより、物質フロー指標に追加して、物質ストック指標を整理・検討した。検討した指標は、(i)フローとストックの関係、(ii)ストックとGDPの関係、(iii)物質の入れ替わり、の3つの物質ストック・フロー指標である。結果として、2005年の物質ストックを比較すると、a)ボトムアップ：212億トン、b)トップダウン：275億トンであり、一人当たりの物質ストックで比較すると、a)ボトムアップ：166トン/人、b)トップダウン：215トン/人、である。資材投入原単位の精緻化について、木造に関しては、需要実態調査による原単位は既往の原単位とおおよそ同じ挙動を示しているが、需要実態調査によるセメント構造部の原単位が5～20 kg/m²ほど大きくなった。非木造に関しては、需要実態調査によるセメント構造部の原単位は平均10 kg/m²程度の誤差となり、全体としておおよそ一致する結果となった。また、物質フロー指標を支える物質ストック・フロー指標では、「(i)フローとストックの関係」はストックの増大に伴うインフローの変化を表しており、インフローの急激な増大が示される経済成長の段階、その後の安定的なインフローが保たれる段階、インフローが減少し蓄積量が飽和に向かう段階、の3段階が示された。

[キーワード]

物質・エネルギー収支解析、物質循環システム、低炭素社会、ストック指標、資源価値

1. はじめに

人間活動に伴う資源消費は欠かすことができないため、その資源価値を最大限に引き出す“もの使い”を社会に根付かせることが重要である。社会を支えている社会基盤施設や建築物といったストックは高度成長期に急速に整備されたため、老朽化したストックが将来の負債ともなりかねない。しかし、既存の物質ストックが、いつ、どこに、どれだけ蓄積されているかについて、統一的なデータベースが存在しないのが現状である。加えて、今後のストック整備の行方が次世代社会の骨格を作り上げることから、ストックの戦略性は重要である。しかし、ストックデータベースの構築が不十分であるために、ストック資料に関わる将来の見通しが十分であるとは言い難い。蓄積した資源をも有効利用し、フローだけでなくストックに対する資源生産性を向上させることが肝要である。すなわち、これまでの物質フロー指標に対して、フローに対応したストックに関する指標を構築することで、社会全体のあり方について物質ストック・フローの関係から、過去・現在・将来の変遷を把握することが、持続可能性に資する。

本研究は、物質ストックの定量化を空間的に行い、ストックデータベースを構築する。また、定量化に伴い要となる資材投入原単位について、更新・精査を行う。統合的に推計されたデータベースより、フローとストックの関係性について考察を行う。

2. 研究開発目的

本研究課題は、マテリアルストックは“静”の状態として資源価値を発揮し、同時に“動”であるフローを発生・効率化させ、“動”と“静”は表裏一体のシステムとして、資源を利用する社会を豊かにするものとする。サブテーマ1では、その豊かさを生み出すマテリアルストックについて、経年的かつ地理的に定量化を行い、日本全体のストックデータベースを構築する。日本の物質投入量の約半分を占める土木や建築のような構造物に投入される土石系資源をベースに、トップダウン型・ボトムアップ型のデータベースを構築することを目的とした。地理情報システム(GIS)を基盤として、ボトムアップ型のデータベースを構築し、様々な空間解像度で物質ストックを集計することが可能な、汎用性の高いデータを構築した。また、生産統計などを用いて、トップダウン型のデータベースを構築し、毎年の物質投入量および排出量について実データにより現実に対応した更新性の高いデータを構築した。資材投入原単位について、国土交通省が公表している建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書による原単位を整理・比較を行った。原単位の比較・検討については、生コンクリート用セメント、骨材、鋼材、砂利、砕石、製材、合板の7材料を対象に行った。

また、物質ストック・フローデータベースより、物質フロー指標に追加して、物質ストック指標を整理・検討した。物質フロー指標は環境省の循環型社会形成基本計画にて達成目標として掲げられているが、本研究の目的でもある物質ストックは物質フローと密接に関わっている。そこで、(i)フローとストックの関係、(ii)ストックとGDPの関係、(iii)物質の入れ替わり、の3つの物質ストック・フロー指標の検討を行った。

3. 研究開発方法

(1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング

地理情報を基礎としたストックデータベースの拡充を行った。田中ら(2013)により地理情報システムを用いた日本全国の建築物・社会基盤のデータベースを構築済みであり、以下の内容で拡充を行った。建築物について、(株)ゼンリンによるZ-map TOWN IIを基盤としてデータベースを整備・拡充した。Z-mapでは建築物をポリゴンとして格納しており、建築物の属性情報として建築種・用途・階数・建築面積を有している。階数と建築面積を乗じることで延床面積を推計し、建築物の規模を把握することが可能である。また、海岸構造物については、施設を港湾・漁港・海岸保全施設として、岸壁・防波堤・護岸・堤防・離岸堤・突堤・消波堤として、項目を改善・拡充した。さらに、地理情報を用いたボトムアップ型のデータベースと推計結果を比較するために、生産統計を用いたトップダウン型のデータベースを構築した。構築手法としては、S-6-4における中国のマテリアルストックデータベースを構築したみずほ情報総研株式会社について、再委託すると共に共同で日本全体の土石系資源ストック・フローデータベースを構築した。

①地理情報によるストックデータベースの拡充

田中ら(2013)では、統計情報と地理情報を組み合わせることで、建築物、道路、鉄道、空港、港湾、漁港、ダム、下水道を対象とし、各都道府県でのマテリアルストックの分布・集積傾向を経年的に推計している。本研究ではそれに倣い、地理情報で建築物、道路、鉄道、空港、港湾、漁港、海岸保全施設、ダムについて、データベース構築を行った。特に拡充を行った、建築物、港湾、漁港、海岸保全施設について以下に示す。

建築物では、株式会社ゼンリンが提供する「Zmap-TOWNII」を基データとして利用した。Zmap-TOWNIIはいわゆる住宅地図データベースであり、各建築物の形状（建築物ポリゴン）を空間データとして保存している。加えて、階数・用途区分・建築物名や表札名といった情報を属性情報として建築物ポリゴンに結び付けて保存している。建築物は14の建築物種に分類されており、本研究においては、建物構造の判別が可能である、主たる建物（戸建住宅、共同住宅、事務所、テナントビル、官公庁、学校、病院、公共施設、一般建物）を推計の対象とした。マテリアルストックの推計手法として原単位法を用い、各構造物の規模に単位規模当たり投入される建設資材量（資材投入原単位）を乗じることにより建設資材ストックを計算した。建築物に対して原単位法を利用するには、各建築物の延床面積と構造種別の情報が必要であるが、Zmap-TOWNIIには一部不備があるため、保存されているポリゴンの形状、階数、建築物種別などの情報や他の統計情報を利用して、各建築物の延床面積・構造種別の情報を設定した。また、建築物の建築物種別と階数の情報から建物構造を仮定した。2階建て以下のビル・アパート・マンションについては、まず住宅・土地統計調査より2階建て以下の共同住宅を対象に構造別(木造・鉄骨造)の割合を都道府県ごとに求め、その割合を利用して2階建て以下のビル・アパート・マンションの内の木造・鉄骨造のもの数を都道府県ごとに決定した。建築面積の小さなものから、算出された木造棟数に達するまでの建築物を木造とし、それ以上のものを鉄骨造とした。建築物ストック統計によると、日本全国の戸建・長屋住宅の約9割が木造であるため、2階建て以下の戸建住宅は全て木造と仮定した。3階建ての建物は全て鉄骨造とし、4階建て以上の建築物は全て鉄筋コンクリート造と仮定した。

港湾・漁港の推計対象は、外郭施設・係留施設共に主要な割合を占める岸壁・防波堤を対象と

した。外郭施設・係留施設における防波堤、岸壁の延長について以下のように設定した。外郭施設では、港湾の外郭施設延長における割合が公表されている広島県の港湾統計より、漁港の施設延長における割合を公表されている福井県の漁港統計より、外郭施設における防波堤の割合を抽出して、その割合を適用し防波堤延長とした。係留施設は、係留施設延長を岸壁であると仮定した。港湾では、国土交通省調べの建設年度別施設数の資料を用いて、各年代の施設存在割合を用いることにより着工年代を推計した。漁港では、三上(2014)より漁港施設の整備延長の推移を用いて、各年代の施設存在割合を設定し着港年代を推計した。延長に資材投入原単位を乗じることで、マテリアルストックを推計した。

また、海岸保全施設として、堤防・護岸・離岸堤・消波堤・突堤をマテリアルストック推計の対象とした。海岸統計に記載の海岸保全施設調を用いて、各年における海岸保全区域延長及び、施設種類別延長を抽出し、資材投入原単位を乗じることで、マテリアルストックを推計した。

②土石系マテリアルストックフローモデルの構築

土石系資源について生産統計を元に日本全国のマテリアルストックフローモデル（MSFモデル）を構築した。対象とした構造物種は、生産統計で分類可能な、建築物、道路、道路以外の土木構造物（以下、その他土木）の3種類の構造物である。土石系資源の出荷量とそれぞれの構造物のフロー量、投資金額の時系列データより原単位を作成し、推計された将来フロー量に原単位を用いることで将来の土石系資源フロー量を推計した。

MSFモデルの構築に際して用いた土石系資源の出荷量について、以下のように整理した。セメントについて、建築は建築(官公需)と建築(民需)の合計を、その他土木は鉄道、電力、港湾、土木の合計を出荷量とした。砕石はコンクリート用をセメントの出荷量の割合と同じ割合で配分されると仮定し按分することで、建築物、その他土木の出荷量とし、道路は道路用を出荷量として用いた。砂利に関しては、玉石、他に該当する量はコンクリート用・道路用に用いられないとし、除外した。また、データの単位が体積であるため、一般社団法人日本砂利協会へのヒアリングより得られた値(1m³=1.6t)を用いて重量への変換を行った。需要部門の記載がなかったため、同協会の参考資料の値をもとにどの年代もコンクリート用：道路・道床用=7：3とし、砕石と同様にコンクリート用をセメントの出荷量で按分し、道路・道床用を道路への投入とみなすことにより建築、道路、その他土木の出荷量とした。

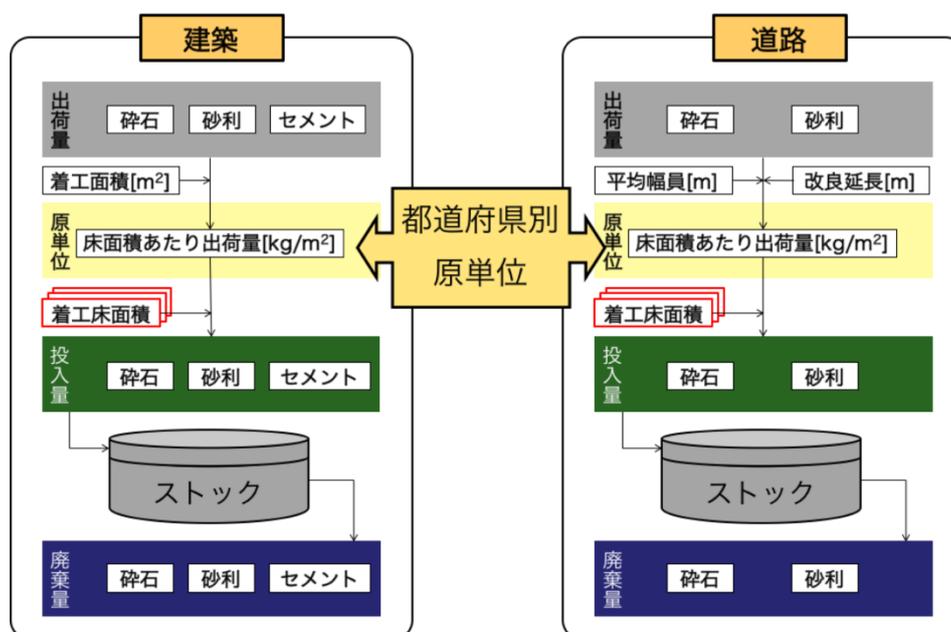
さらに、都道府県別に建築部門と道路部門を対象とした土石系資源の物質フロー・ストックモデルを構築した。

建築部門で対象とした土石系資源は「砕石」、「砂利」、「セメント」であり、道路部門で対象とした土石系資源は「砕石」、「砂利」（再生骨材も内数として推計）とした。

建築部門に関しては、土石系資源の出荷量を建設着工面積で除することで資材投入原単位を算出し、原単位に将来床面積を乗じることで将来の土石系資源の投入・廃棄量を推計した。また、着工面積は建築着工統計の時系列データを使用し、将来床面積は人口問題研究所のパラメータからコーホートモデルを組んで推計し、人口の将来推計値に世帯当たりの人口及び世帯当たりの床面積のデータを用いることで推計した。

道路部門に関しては、土石系資源の出荷量を道路面積で除することで資材投入原単位を算出し、原単位に将来道路面積を乗じることで投入・廃棄量を推計した。道路面積は道路統計年報の新規道路改良延長の時系列データを使用し、将来改良延長は将来人口より推計した。

なお、推計にあたっては、セメントに関しては一般社団法人セメント協会の需要部門別販売高、砕石に関しては経済産業省製造産業局住宅窯業建材課の砕石等統計年報、砂利は経済産業省製造産業局住宅窯業建材課の砂利採取業務状況報告書の値を用いた。なお、砂利の比重は 1.6t/m^3 と想定した。



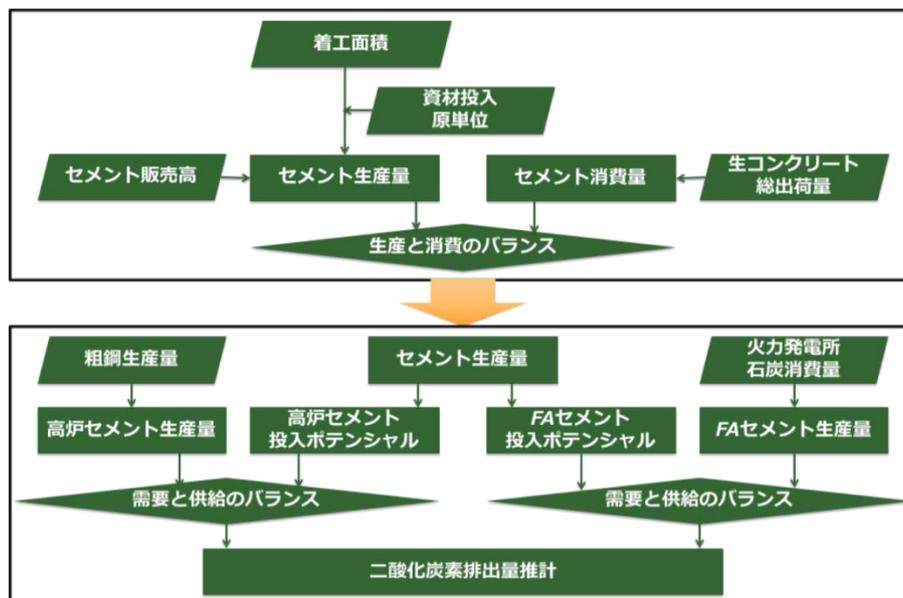
図(1)-1 土石系資源の物質フロー・ストックモデルの推計方法

②代替セメントの需給バランス検討

代替セメントの需給バランスを検討するためのフレームワークを検討した。代替セメントの需要側については、代替セメントの投入ポテンシャルは2010年のセメント生産量中の代替セメント生産量の割合を基準とし、2050年にシナリオ値を設定し、間を内挿した。ただし、2010年時点で既に2050年のシナリオを満たしているものについてはその割合が2050年まで一定であると仮定し、100%を超えたものはその年代以降も100%の割合を保つと仮定した。その割合にセメントの将来推計量を乗じることで代替セメント投入ポテンシャルを算出した。シナリオ設定についてはIEA(2009)を参考とした。また、都道府県別のシナリオについては製鉄所と石炭火力発電所からの移送距離を考慮し、代替セメント製造場所に近いほど代替セメントを優先的に供給するシナリオとした。

代替セメントの供給側について、高炉スラグの供給量は2010年の一人当たりの粗鋼生産量を元に、各製鉄所のシェアを乗じて各製鉄所の一人当たり粗鋼生産量を算出し、そこに将来人口を乗じることで製鉄所別の将来粗鋼生産量を推計した。なお、高炉スラグの量は鉄鋼スラグ協会の鉄鋼スラグ統計年報の高炉スラグ生産量及び利用量を参考に、品質保持のための骨材分を考慮しつつ粗鋼生産量あたりの高炉スラグ発生量から推計した。また、その結果から輸送距離を考慮した都道府県別の高炉セメント将来投入量を推計した。FAセメントについては火力発電所の石炭消費量からFAセメント生産量を算出し、投入ポテンシャルと生産量を比較して需要と供給の balan

を確認した。高炉セメントの需要量が供給量を上回っている都道府県については、FAセメントが高炉セメントの不足分を補うとし、FAセメント投入量と高炉セメント代替量の合計を都道府県別代替セメントの将来投入量とした。



図(1)-2 代替セメント推計フレームワーク

本研究では、次期循環型社会形成推進計画基本へのフィードバックを目的の一つとしており、中軸を担う物質フロー指標の一つである資源生産性と物質ストックの関連を考慮するにあたり、天然資源投入量についてより精緻に把握する必要がある。2010年の日本全体で、16.1億トンの総物質投入量があるが、このうちの5.4億トンが蓄積純増にあたり、建築物・社会基盤施設といった耐久財として社会に蓄積されている。物質フローに占める建設資材の割合は高く、天然資源投入量を考えるにあたって、建設分野における資材投入量を把握することが重要となる。建設分野での資材投入量は、着工面積と単位面積当たりの資材投入量である資材投入原単位の積で算出される。前述の世界の人口予測や経済発展の予測から、今後、人口成長・経済発展に伴って世界全体では、建築着工面積の増加が推測される。このような社会背景において、世界全体の資源生産性を考えるためには、建設分野の資材投入量についての考察に加え、単位面積あたりの資材投入量である資材投入原単位についての考察をすべきである。本研究では、日本の資材投入量と資材投入原単位(以下、原単位)について、生産統計による原単位と、建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書による原単位を用いて、算出方法による比較・考察を行った。セメント・骨材・砂利・碎石・鋼材・製材・合板については、全国を対象にした投入量と原単位、セメント・骨材に関してはより詳細な区分である地域別の投入量と原単位について比較・考察を行った。

利用するデータとして、生産統計により算出される原単位と、国土交通省が公表している建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書による原単位を用いた。全国を対象とする投入量、原単位の比較・検討については、生コンクリート用セメント、骨材、鋼材、砂利、碎石、製材、合板の7材料を対象に行った。日本の地域別の投入量、原単位の比較・検討については、生コ

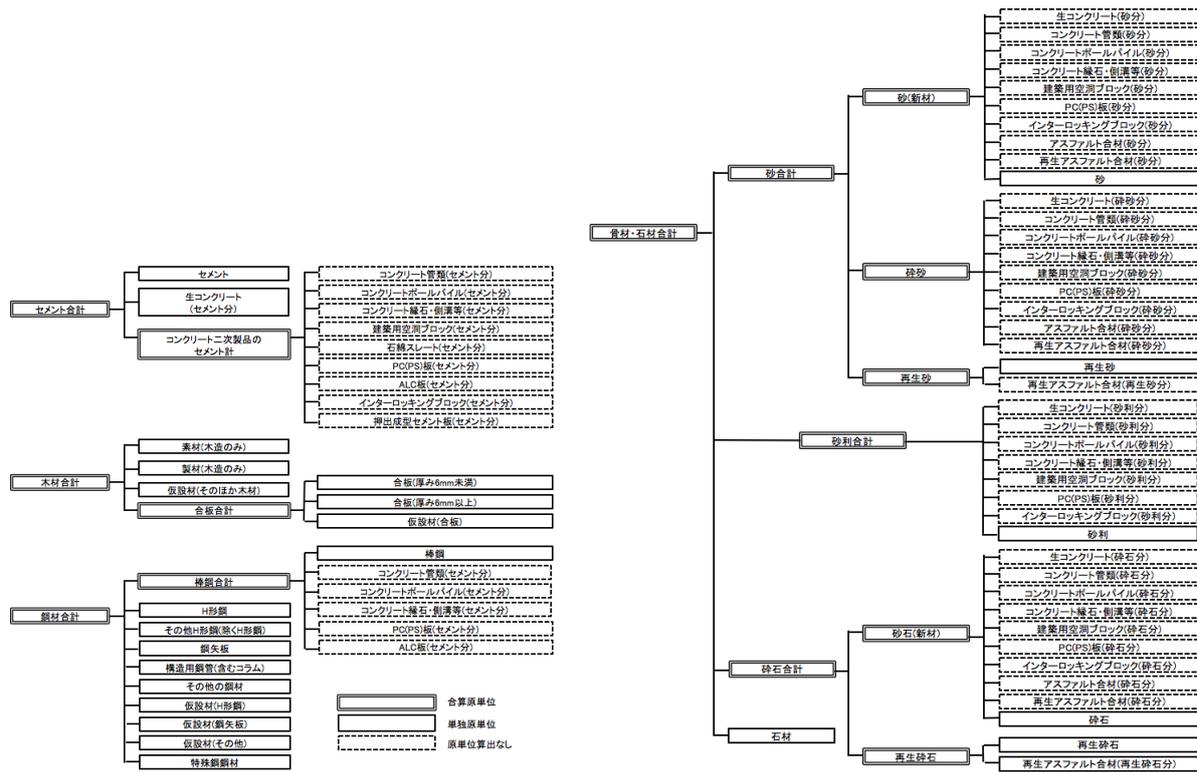
ンクリート用セメント、骨材の2材料を対象に行った。地域の分類に関しては、建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書の分類に基づき、地方整備局である北海道・東北・関東・北陸・中部・近畿・中国・四国・九州・沖縄の10地域を定めた。

生産統計からの資材投入量・資材投入原単位の算出に際して、用いたデータと出典を表(1)-1に示す。これらは、対象年における生産を示しており、全国での資材投入量に値する。資材投入原単位[kg/m²]は、資材投入量を着工面積で除して算出した。着工面積は建築着工統計の値を用いた。

表(1)-1 生産に関する建設資材データ概要

材料	出典	部門		範囲	単位
セメント	一般社団法人セメント協会 「需要部門別販売高」	建築(官公需), 建築(民需)		1990-2015	重量
砕石	経済産業省製造産業局住宅業建材課 「砕石統計年報」	天然資源	コンクリート用	1990-2015	重量
		再生骨材	コンクリート用		
砂利	経済産業省生業産業局住宅業建材課 「砂利砕石業務状況報告書」	なし 採取地別(河, 山, 海, 陸, 他) 種別(砂利, 砂, 玉石, 玉砕)のみ 記載		1990-2014	体積
鋼材	一般社団法人日本鉄鋼連盟 「鉄鋼統計要覧」	普通鋼材	建築	1990-2015	重量
木材	農林水産省生産流通消費統計課 「木材需給報告書」	製材品	建築	1990-2015	体積
		合板	建築		

サンプル調査に基づく資材投入量・資材投入原単位としては、国土交通省が発刊している建設資材・労働力需要実態調査(建築部門)業務報告書を用いて算出した。この報告書は、1985年から2009年まで、3年おきに、実際に該当年に行われた工事にヒアリング調査を行い、構造別・用途別に、対象については先述の地方別・全国で資材投入原単位を整理している。この報告書で算出する原単位には、調査対象資材を単独に算出する単独原単位と複数の資材をグループごとに合算して算出する合算原単位がある。ここでは、最新の合算原単位・単独原単位の構成である2000年以降の構成図を図(1)-3に示す。



図(1)-3 合算原単位の構成図 (2000年, 2003年, 2006年, 2009年)

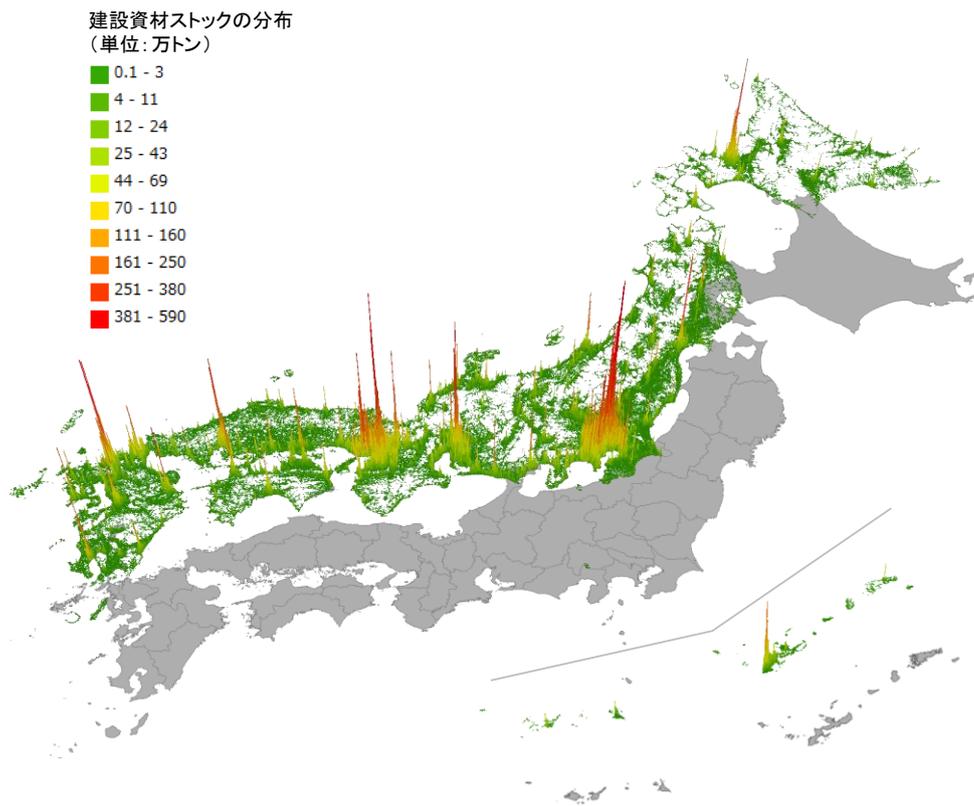
また、更新された物質ストック・フローデータベースより、物質フロー指標に追加して、物質ストック指標を整理・検討した。物質フロー指標は環境省の循環型社会形成基本計画にて達成目標として掲げられているが、本研究の目的でもある物質ストックは物質フローと密接に関わっている。そこで、(i)フローとストックの関係、(ii)ストックとGDPの関係、(iii)物質の入れ替わり、の3つの物質ストック・フロー指標の検討を行った。

4. 結果及び考察

(1) 社会資本・建築物のマテリアルストック分析・GISモデリング

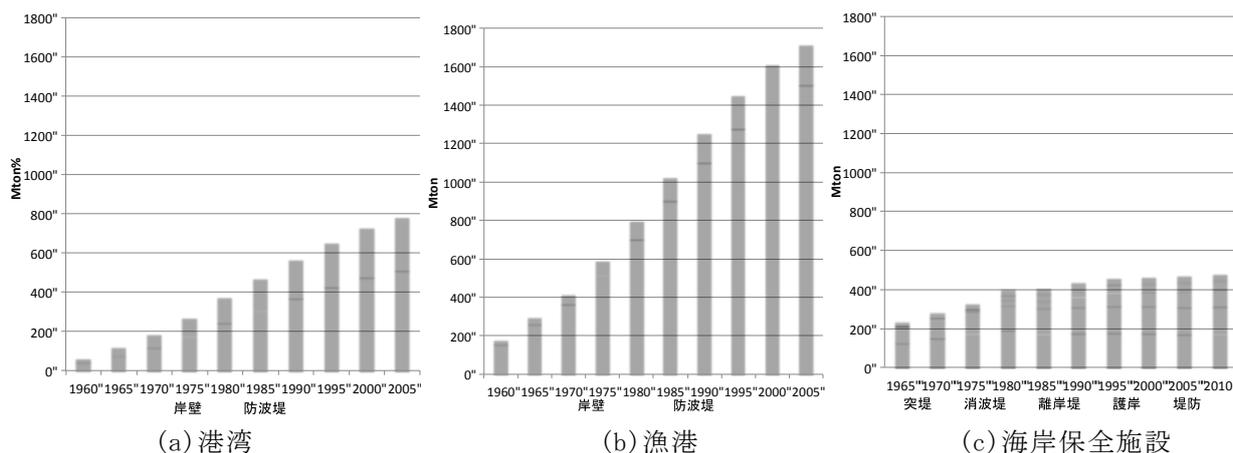
①地理情報によるストックデータベースの拡充

ストックデータベースのうち、拡充した建築物のストックGISデータベースを3次メッシュ(1km×1km格子)単位で集計した結果を図(1)-4に示す。建築物ストックは、札幌市・仙台市・東京都区部・名古屋市・大阪市・広島市・福岡市など政令指定都市の中心部において突出して多くの量が蓄積されていることがわかる。また、3次メッシュの建設資材ストックのヒストグラムはべき分布に似た形となることが示され、メッシュ内に建築物が存在する3次メッシュは日本全国に約20万メッシュあり、その多くは建設資材の蓄積量が2千トン以下と比較的少ないメッシュに占められている。その一方で蓄積量が多いメッシュは、数自体は少ないのだが蓄積量の幅は広く、ヒストグラムの右側はなだらかである。建設資材の蓄積量の順番で日本全国の建築物を含むメッシュを整理した結果、日本全国の建設資材ストックは、ストックの蓄積量順で上位20%のメッシュがストック全体の78%を占めることが示された。



図(1)-4 建築物ストックの分布 (3次メッシュ集計、2009年)

次に、港湾施設・漁港施設・海岸保全施設の材料ストック推計結果を施設種類別に図(1)-5に示した。1965年における材料ストックは港湾施設・漁港施設・海岸保全施設それぞれ、120Mton、297Mton、239Mtonであり、2005年には783Mton、1714Mton、472Mtonへと増加している。海岸保全施設が港湾施設・漁港施設と比べて小さいのは、施設や水域の安定した防護機能を確保する為である。他の原因としては原単位に構造部の消波ブロックを考慮できていないことが考えられる。海岸保全施設は1965年から2005年にかけて約2倍に増えており、中でも護岸・堤防・突堤は昔から多く存在しているが、離岸堤は1965年頃から増加し始めている。堤防・護岸は直接的に高潮や波から土地や人を守る施設であり、沖合に整備される離岸堤・消波堤・突堤よりも整備時期が早いことが明らかとなった。港湾施設、漁港施設は1965年から2005年にかけて約6.6倍、約5.8倍に増加している。共に年代を経るごとに増加が穏やかになっている。施設や機能の充実がストックの増加を緩めていることを示している。港湾施設の方が漁港施設よりも大きい岸壁の割合を示しており、規模や重量の大きい荷を輸送する施設が充実していることがわかる。漁港の材料ストックの方が大きい根拠としては、今回使用したデータ2005年時点で漁港が2872港、港湾が1021港であり、港数が約3倍であることが挙げられる。2005年時の材料ストックをそれぞれ港数で除してみると、漁港は0.60(Mton/港)、港湾は0.77(Mton/港)であり、港湾の方が1港当たりの材料ストックが約0.17Mton大きいことが明らかとなった。

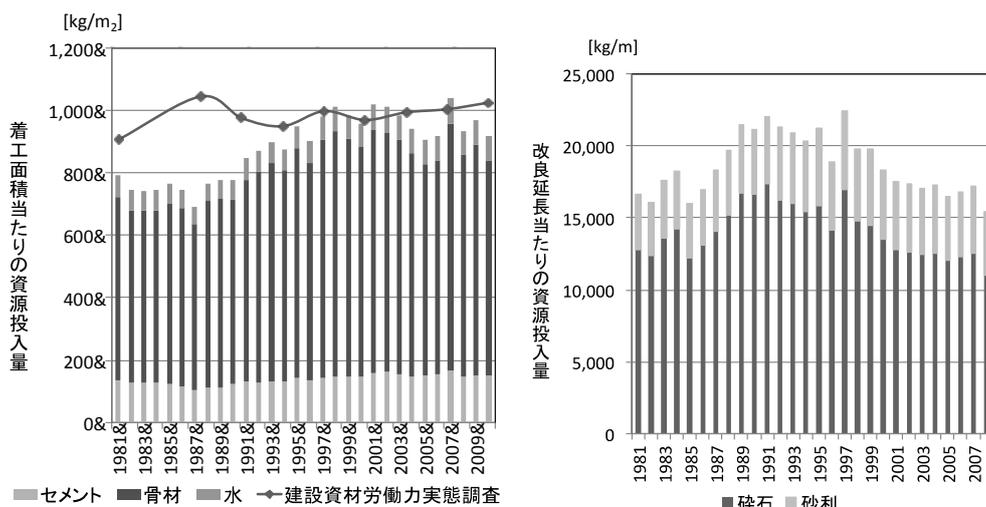


図(1)-5 港湾・漁港・海岸保全施設のマテリアルストック推計結果

②土石系マテリアルストックフローモデルの構築

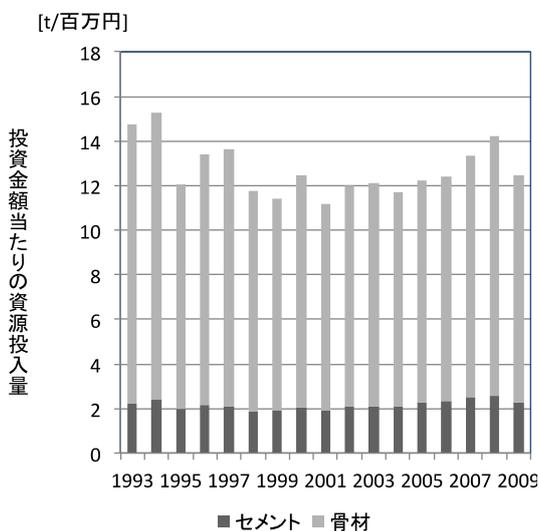
建築・道路・その他土木の土石系資源投入原単位について、出荷量を着工量で除した結果を図(1)-6に示す。図(1)-6(a)建築物では、コンクリートの配合をもとに水の原単位を足し合わせ、建築着工面積当たりのコンクリート投入量の原単位とし、建設資材労働力実態調査が公表する値と比較を行った。建設資材労働力需要実態調査によると、原単位は $1000[\text{kg}/\text{m}^2]$ 程度で推移するのに対して、本研究で推計した原単位は過小となっている。原因として、土石系資源の出荷量を按分する際にセメントの出荷量の建築(官公需)、建築(民需)部門を用いたことに対して、建築着工統計の包括範囲がセメント出荷量の建築部門より大きく、着工量が過剰であったことが考えられる。1980、1990年代における過小分はセメント、砕石の原単位の影響が大きく、統計の補足率に問題がある可能性が考えられる。

次に、図(1)-6(b)道路では、砕石は1990年頃から減少、砂利は全体を通じて増加の傾向が見られるが、建築の原単位と同様に近年は大きな変化が見られない。また、砕石の割合がおよそ8割を占める為、砕石・砂利の合計の原単位が砕石と同じような傾向が見られ、近年における大きな変化も見られない。図(1)-6(c)その他土木では、大きな傾向は見られないが、全体を通して約 $13[\text{t}/\text{百万円}]$ で推移しており、道路と同様の理由で骨材の傾向が合計の傾向として見られる。



(a) 建築

(b) 道路



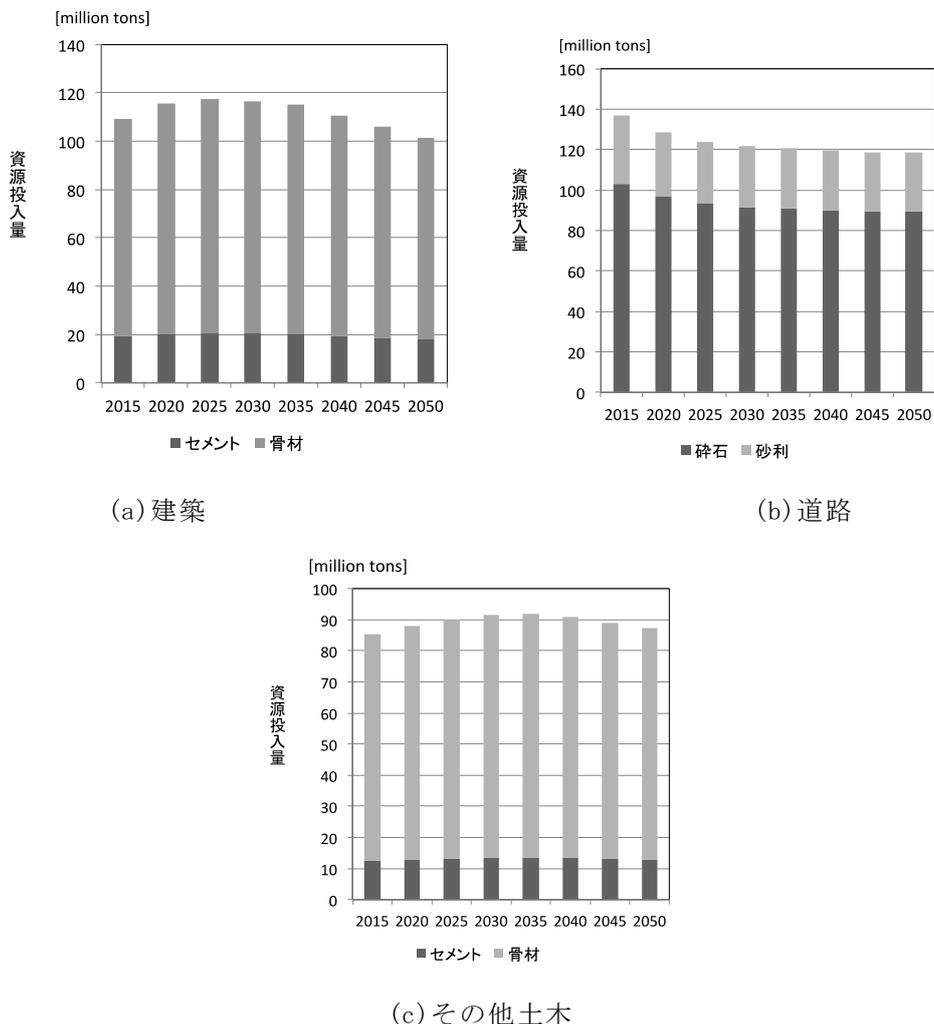
(c) その他土木

図(1)-6 土石系資源投入原単位

推計した原単位とMSFモデルによる将来資材投入量推計結果を図(1)-7に示す。将来推計に際して、将来原単位を設定し推計を行ったが、近年の傾向より土石系資源合計の原単位、それに占める土石系資源の割合が建築では2001-2010年、道路では2003-2007年、その他土木ではセメントは1993-2009年、骨材は1953-2009年の平均値が一定で継続すると仮定して推計を行った。

図(1)-7(a)建築では、2050年における資源投入量は約1億トンとなり、2015年の約1億1000万トンと比べて微減している。ピーク時には現在よりも多量の資源が投入される結果となった。次に、図(1)-7(b)道路では、2050年における砕石投入量は約8900万トン、砂利投入量は約2900万トンと推計された。傾向としては減少傾向が続くが、徐々に減少は緩やかになることが示された。図(1)-7(c)その他土木では、2050年におけるセメント投入量は約1300万トン、骨材投入量は約7400万トンと推計された。2030年頃を境に増加傾向が減少傾向へと転じる結果が示された。2030年までの増加傾向は高度経済成長期に着工された構造物の多くが廃棄されるために投入量が増加した

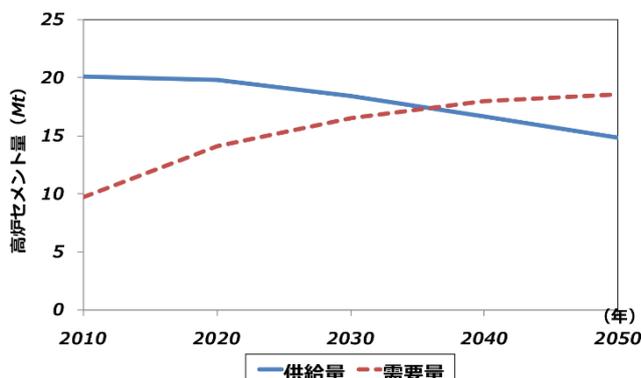
と考えられる。



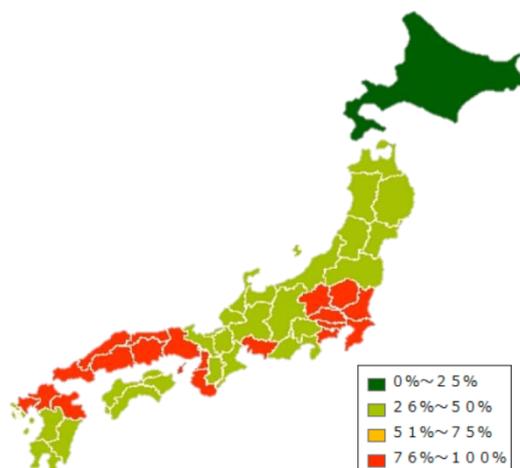
図(1)-7 土石系資源将来資材投入量推計結果

次に、都道府県別に建築部門と道路部門を対象とした土石系資源の物質フロー・ストックモデルを構築し、将来にかけて減少の傾向があることが示された。その主要因として、人口減少が大きく影響しているが、道路の需要量の減少により、砂利・砕石の減少の影響も大きい。都道府県別には、北海道が大きく減少しており、また愛知県・岐阜県などについても減少の傾向が大きい。

また、都道府県ごとの地域性を加味した代替セメントの需給バランスを検討するためのフレームワークを検討した。2010年から2050年までの高炉セメントの需要量と供給量を以下に示す（図(1)-8）。2010年の時点では供給量が需要量を大きく上回っているが、2035年頃を境に供給量と需要量が逆転し、2050年には製鉄所付近の都道府県に関しては供給量が需要量を上回った。なお、FAセメントは2010年から2050年まで供給量が需要量を大きく上回っているため、高炉セメントの不足分はFAセメントで補うことができる。その結果として、高炉セメントが2035年に不足し、2030年から2050年にかけてFAセメント投入量は大きく増加する結果となった。また、都道府県別の結果として、図(1)-9に示す通り 需給バランスには地域差が存在する。



図(1)-8 高炉セメントの将来需要量と供給量



図(1)-9 都道府県別の高炉セメントの導入シナリオの推計結果(2050時点の需給バランス)

本研究では、建設資材・労働力需要実態調査から資材投入原単位の算出を行った。この調査では、地域別に実際の工事へのヒアリングに基づいて資材投入原単位を整理しており、約50の資材、10地域別と全国といった対象範囲、5構造種、9用途別に関して合算・単独原単位が整理されている。利用頻度の高い合算原単位について、全国の構造別・時系列での居住専用用途の資材投入原単位を表(1)-2に示す。

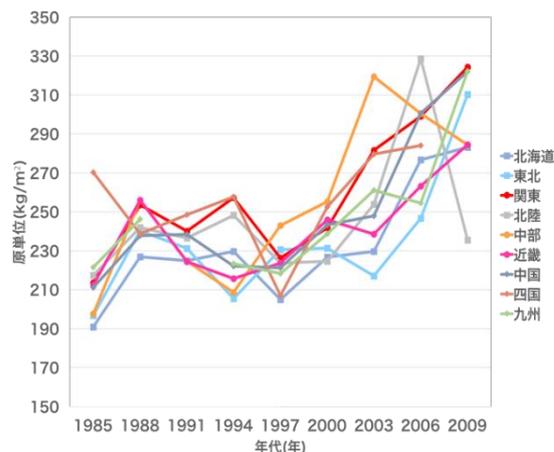
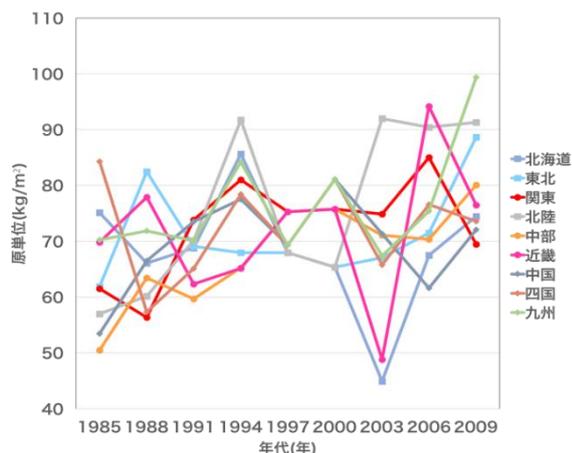
ここで、地方別の木造居住専用セメント投入原単位を図(1)-10に示す。また、鉄骨造と鉄筋コンクリート造の居住専用セメント投入原単位に、それぞれの構造の該当年の地域別着工面積を乗じ、その和を、各構造地域別着工面積の和で除した地域別の非木造居住専用セメント投入原単位を図(1)-11に示す。その他の構造についての地域別資材投入原単位については付録にまとめて示す。沖縄に関しては、報告書の中で原単位を算出していない年が複数あったため、グラフ作成時に除外した。

木造のセメント原単位は、1985年では、平均64.9kg/m²に対して、2009年では平均で80.6 kg/m²であり、全体として増加傾向を示した。これは、建築基準法の改正による建物強度の変化が影響と考えられる。同年内においての地域ごとの差は、約20~40kg/m²であった。主に、木造で用いられるセメントは、建築物の基礎部分に用いられている、このため、地域により地形の違いから、基礎部分に投入されるコンクリート量が異なることが関係しているといえる。しかし、年によって、原単位の大きい地域は変化している。木造のセメント原単位の地域差には地形の差以外の要因も予想される。

非木造のセメント投入原単位については、1985年の全国平均が214.6kg/m²であるのに対し、2009年では平均295.8 kg/m²となった。セメント投入原単位の全体の傾向としては、1985年から1991年にかけて増加し、1991年から1997年に減少、その後増加している。同年内における地域差は、約20~70kg/m²であり、木造よりも大きい。総量に対する地域差の割合は、非木造の方が木造よりも小さい。地域差の原因には、木造同様に基礎部分へ投入されるコンクリート量が地形により異なることに加え、地域の中での都市の大きさが影響していると考えられる。この調査では、

表(1)-2 全国主要材料の構造別資材投入原単位一覧

年	材料名	単位	木造	SRC造	RC造	S造	CB造
1991	セメント計	t/m ²	0.071	0.294	0.297	0.133	0.191
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.318	1.095	1.130	0.580	0.835
	木材計	m ³ /m ²	0.209	0.029	0.040	0.023	0.063
	鋼材計	t/m ²	0.013	0.167	0.110	0.134	0.055
	棒鋼合計	t/m ²	0.010	0.094	0.102	0.034	0.048
1994	セメント計	t/m ²	0.082	0.287	0.284	0.142	0.257
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.346	1.082	1.105	0.604	1.124
	木材計	m ³ /m ²	0.224	-	-	-	-
	鋼材計	t/m ²	0.014	0.161	0.105	0.134	0.058
	棒鋼合計	t/m ²	0.011	0.090	0.096	0.031	0.058
1997	セメント計	t/m ²	0.083	0.275	0.299	0.145	0.123
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.342	1.036	1.148	0.581	0.533
	木材計	m ³ /m ²	0.222	-	-	-	-
	鋼材計	t/m ²	0.014	0.150	0.112	0.133	0.048
	棒鋼合計	t/m ²	0.011	0.090	0.100	0.032	0.038
2000	セメント計	t/m ²	0.078	0.285	0.294	0.139	0.143
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.363	1.085	1.157	0.599	0.624
	木材計	m ³ /m ²	0.200	0.021	0.028	0.010	0.020
	鋼材計	t/m ²	0.011	0.160	0.109	0.134	0.059
	棒鋼合計	t/m ²	0.010	0.090	0.100	0.027	0.037
2003	セメント計	t/m ²	0.075	0.287	0.300	0.136	0.162
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.370	1.050	1.152	0.670	0.646
	木材計	m ³ /m ²	0.232	0.020	0.023	0.009	0.033
	鋼材計	t/m ²	0.012	0.170	0.116	0.129	0.066
	棒鋼合計	t/m ²	0.010	0.100	0.102	0.031	0.045
2006	セメント計	t/m ²	0.081	0.276	0.287	0.141	0.150
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.391	1.045	1.128	0.659	0.985
	木材計	m ³ /m ²	0.220	0.012	0.028	0.007	0.009
	鋼材計	t/m ²	0.014	0.183	0.116	0.129	0.050
	棒鋼合計	t/m ²	0.012	0.080	0.103	0.029	0.033
2009	セメント計	t/m ²	0.084	0.277	0.353	0.170	0.221
	骨材・石材計	m ³ /m ²	0.399	1.003	1.253	0.832	0.915
	木材計	m ³ /m ²	0.201	0.008	0.016	0.006	0.005
	鋼材計	t/m ²	0.016	0.221	0.131	0.139	0.203
	棒鋼合計	t/m ²	0.014	0.092	0.113	0.030	0.046



図(1)-10 地域別居住専用木造セメント原単位 図(1)-11 地域別居住専用非木造セメント原単位

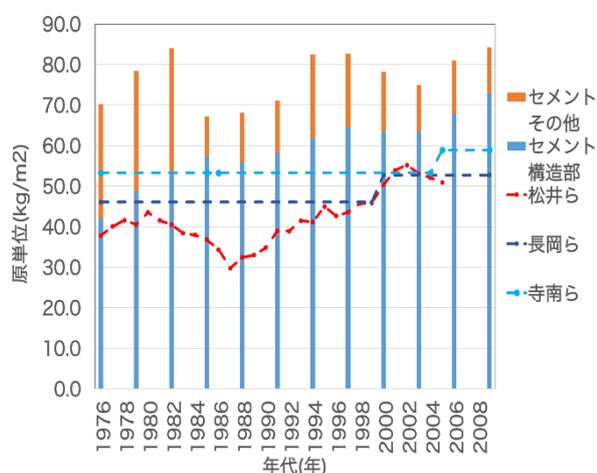
地方整備局で地域を分類しており、対象都道府県に占める大都市の割合が大きな関東・中部に関して、どの年代でも他地域に比べて原単位が大きな値を示しているためである。

全国の建設資材・労働力需要実態調査のセメント投入原単位と、既往研究のそれとの比較・検討を行った。ここでは、既往研究のセメント投入原単位として、寺南ら、長岡ら、松井らの原単位を用いた。寺南らはセメント投入原単位を、木造・非木造といった2つの構造分類で算出しているため、長岡ら・松井らのセメント投入原単位もこれに合わせて整理した。具体的には、非木造のセメント投入原単位について、鉄骨造と鉄筋コンクリート造の2構造の投入量の和を2構造合計の着工面積で除して、整理を行った。また、長岡らでは、建築物を地下構造と地上構造に分けているため、地下・地上合わせてのセメント投入原単位に整理した。松井らは1年毎に算出されていたデータから、5年分の平均を取り、5年毎のデータとして示した。既往研究においては、生コンクリートとして建築物に投入されているセメントを対象としている。建設資材・労働力需要実態調査では、生コンクリートとして投入されているセメントをセメント構造部、生コンクリート以外の状態で投入されているセメントをセメントその他として、木造を図(1)-12、非木造を図(1)-13に示した。

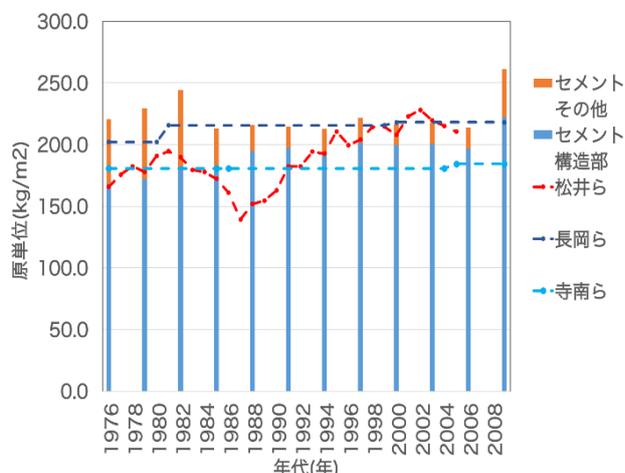
設計図面から資材を、ボトムアップ型で原単位を算出した長岡ら、寺南らのセメント原単位は、木造・非木造のどちらについても、大規模な法改正があったとみられる年の前後でのみ変化をしている。このため、年代変化に伴う資材投入原単位の推移を実態に基づいた形で示すことができていない。需要実態調査による原単位と生産統計による原単位に比較して、経年的に変化がみられないことから、この傾向は明らかである。

松井らでは、生産統計からトップダウン型の算出方法で原単位の算出を行っている。木造に関しては、需要実態調査による原単位とおよそ同じ挙動を示しているが、松井らの原単位は需要実態調査によるセメント構造部の原単位を、約5~20 kg/m²ほど下回っている。需要実態調査に関しては、サンプル調査で原単位を算出しているが、全国での原単位にすると、地域ごとの差をならすことになり、地域別で見た際の精緻な値に比べて、多少の誤差が生じると考えられる。全国の平均的な原単位をみるといった統計的な処理によって生じる誤差が、生産統計による原単位との間に差を生じさせている原因と予測できる。非木造に関しては、松井らの原単位と、需要実態調査によるセメント構造部の原単位は平均10 kg/m²ほどの差で推移しており、1985年から1991年に見

られる大きな差以外は、おおよそ一致している。需要実態調査による原単位は、いずれの年もおよそ対象のサンプルの75～85%の回収率で回収しているが、サンプル抽出によって算出をしているため、誤差が生じた可能性がある。



図(1)-12 木造居住専用セメント原単位



図(1)-13 非木造居住専用セメント原単位

また、本研究では、物質ストックは物質フローと密接に関わりを評価するため、3つの物質ストック・フロー指標の検討を行った。「(i)フローとストックの関係」はストックの増大に伴うインフローの変化を表しており、3段階の変化が示される。インフローの急激な増大が示される経済成長の段階、その後の安定的なインフローが保たれる段階、インフローが減少し、蓄積量が飽和に向かう段階、の3段階が示された。今後の予想としては、インフローの減少が一定値に収束し、蓄積量も飽和することが望まれる。「(ii)ストックとGDPの関係」は、ストックの成長とGDPの増加の相関を表したものであり、インフローとGDPにのみ着目して資源の有効利用を表す「資源生産性」に物質ストックの視点を加える指標である。指標の傾きに大きな変化は現れないが、本指標により、物質ストックの充実によりGDPを生み出す関係性が示された。将来的にはストックが飽和した経済社会においてもGDPが成長するパスを示す指標となり得る。「(iii)物質の入れ替わり」では、インフローとストックの比を表しており、物質ストックが飽和した経済社会においては構造物の耐用年数と類似した指標となり得る。しかし、物質ストックには空き家等の効用を発揮していない構造物も含まれているため、現状において、一般的な耐用年数よりも大きな値を示す傾向がある。更新周期が長くなるほど、環境負荷は小さくなると考えられるため、今後の変化を注視する必要がある。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本研究は、第3次循環型社会形成推進基本計画の“今後の検討課題”に記載されている通り、我が国に蓄積されている資源のストックに関する指標に関してストック指標の重要性を検討している。本研究の成果は次期循環型社会推進基本計画に資するよう進めると共に、社会がストックの持つ資源価値を引き出せているかを計測する仕組みについて検討している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究課題主催の国際ワークショップを3年間で4回開催しており、環境省を含めてストックの議論を深める機会を設け、国際的見地から環境政策に関する議論を行った成果のアウトカムとして取組を行っている。更に、本研究メンバーが主体となって行ったシンポジウムや学会内でのスペシャルセッション、またUNEP資源パネルに関わる国際シンポジウムなど、成果報告の機会を設けており、環境政策への貢献に値すると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

本研究課題では、資源勘定研究と最先端を担う国際学会International Society for Industrial Ecologyにおけるネットワークを中心に、共同研究を進めている。ヨーロッパではオーストリア国クラゲンフルト大学ソーシャルエコロジー研究所所属のFridolin Krausmann教授と「Global Material Inputs, Stocks and Outputs database project」を進めており、オーストリア科学基金により2国間共同研究を2014年より遂行している。また、オーストラリア連邦科学産業機構(CSIRO) Ecology Science所属のSenior Science LeaderのDr. Heinz Schandl氏とは、共著論文の執筆をしており、期間中に開催した3回の国際ワークショップに参加して資源利用に関する異なる視点の意見交流を行った。また、同ワークショップには国際連合地域開発センター(UNCRD)所長の高瀬千賀子氏が参加し、途上国の3Rに関する資源戦略について討論を行った。

7. 研究成果の発表状況 (※別添.報告書作成要領参照)

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Hanwei Liang, Hiroki Tanikawa : Multi-scale assessment of floor area disparity using spatial database : An empirical study in Japan, Journal of International Review of Civil Engineering (I. RE. C. E), Vol.5, No.2, pp.48-55, 2014.
- 2) Tomer Fishman, Heinz Schandl, Hiroki Tanikawa, Paul Walker, Fridolin Krausmann : Accounting for the Material Stock of Nations, Journal of Industrial Ecology, Vol.18, Issue 3, pp.407-420, 2014.
- 3) Hiroki Tanikawa, Shunsuke Managi, Cherry Myo Lwin : Estimates of Lost Material Stock of Buildings and Roads Due to the Great East Japan Earthquake and Tsunami, Journal of Industrial Ecology, Vol.18, Issue 3, pp.421-431, 2014.
- 4) Hanwei Liang, Hiroki Tanikawa, Yasunari Matsuno, Liang Dong : Modeling In-Use Steel Stock

in China's Buildings and Civil Engineering Infrastructure Using Time-Series of DMSP/OLS Nighttime Lights, *Remote Sensing*, 6(6), pp.4780-4800, 2014.

- 5) 杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：合成開口レーダと建築物面積との相関性評価、土木学会論文集G(環境)、Vol.70, No.5, pp. I 79- I 85、2014.
- 6) 長谷川正利、大西暁生、戸川卓哉、奥岡桂次郎、谷川寛樹：都道府県別CO2排出量推計モデルの構築及び太陽光発電の導入効果の検討、土木学会論文集G(環境)、Vol.70, No.5, p. I_157-I_165、2014.
- 7) 黒田将平、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：衛星夜間光と合成開口レーダを用いた建物延床面積の推計モデルの開発、土木学会論文集G(環境)、Vol.70, No.6, pp. II_97-106、2014.
- 8) 吉田圭介、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：人為的攪拌による土石移動量の推計に関する研究、環境情報科学論文集、Vol.28, pp.89-94、2014.
- 9) H. TANIKAWA, T. FISHMAN, K. OKUOKA, K. SUGIMOYO: *Journal of Industrial Ecology*, Vol.19, No.5, 778-791, DOI: 10.1111 / jiec.12284, 2015.

“The Weight of Society Over Time and Space: A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan, 1945-2010”

- 10) T. FISHMAN, H. SCHANDL, and H. TANIKAWA: *Journal of Industrial Ecology*, DOI: 10.1021 / acs.est.5b05790, 2016.

“Stochastic Analysis and Forecasts of the Patterns of Speed, Acceleration, and Levels of Material Stock Accumulation in Society”

- 11) 松井健吾、長谷川正利、高木重定、奥岡桂次郎、谷川寛樹：土木学会論文集G(環境)、Vol.71, No.6, II_309-II_317, 2015.

「低炭素化に向けた日本全国の土石系資源ストックフローの将来シナリオ分析」

- 12) 山下剛弥、奥岡桂次郎、谷川寛樹：土木学会論文集G(環境)、Vol.71, No.6, II_319-II_327, 2015.

「マテリアルストックデータベースの拡充とストック利用効率の検討」

- 13) 青柳淳之介、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：土木学会論文集G(環境)、Vol.71, No.6, II_467-II_474, 2015.

「名古屋市中心部における4d-GISを用いた都市の経年変化によるMSFAに関する研究」

- 14) 木下卓大、奥岡桂次郎、谷川寛樹：土木学会論文集G(環境)、Vol.71, No.6, II_133-II_138, 2015.

「福島県北部沿岸地域におけるフライアッシュのクリンカー代替利用に関する地域循環圏の検討」

- 15) Alessio Miatto, Heinz Schandl, Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa, *Journal of Industrial Ecology*, DOI:10.1111/jiec.12471, 2016.

“Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめること。発表年順（古→新）に並べること。

- 1) 奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成26年度廃棄物資源循環学会 春の研究発表会、川崎、29. May. 2014.
「建設副産物の循環利用効率と地域循環圏の検討」
- 2) 青柳淳之介、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：平成26年度廃棄物資源循環学会 春の研究発表会、川崎、29. May. 2014.
「4d-GISを用いた名古屋市中心部の建築物における物質フロー推計」
- 3) 高木溪太、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：平成26年度廃棄物資源循環学会 春の研究発表会、川崎、29. May. 2014.
「自然災害に伴う建築物可視化と情報配信システムの構築」
- 4) 青柳淳之介、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：第10回GISコミュニティフォーラム、東京、29-30. May. 2014.
「4d-GISを用いた名古屋中心部の建築物における物質フロー推計分析」
- 5) 高木溪太、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：第10回GISコミュニティフォーラム、東京、29-30. May. 2014.
「自然災害の被害を受ける建設資材量の可視化」
- 6) 高木溪太、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：第48回土木計画学研究発表会、仙台、7-8. Jun. 2014.
「南海トラフ地震における津波被害Lost Stockの推計」
- 7) Tomer Fishman, Keijio Okuoka, Hiroki Taniakwa : Gordon Research Conference Industrial Ecology, Lucca, Italy, 1-6. Jun. 2014.
”The Weight of Society Over Time and Space”
- 8) Martinico-Perez Marianne Faith Gauran, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa : The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2014, Osaka, Japan, 12-15. Jun. 2014.
”Resource Consumption, Material Flow and Economic Growth : The Case of the Philippines”
- 9) Chidammodzi Clara Limbitso : The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2014, Osaka, Japan, 12-15. Jun. 2014.
”Waste Management and Pollution Control in the Lake Malawi Basin: Harnessing Synergies from Various Sectors for Sustainable Lake Basin Management”
- 10) Chidammodzi Clara Limbitso : 15th World Lake Conference, Perugia, Italy, 1-5. Sep. 2014.
”Current IWRM Practices in Malawi and their Implications on Lake Basin Management”
- 11) 長谷川正利、大西暁生、戸川卓哉、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第22回地球環境シンポジウム、東京、3-5. Sep. 2014.
「都道府県別CO2排出量推計モデルの構築及び太陽光発電の導入効果の検討」
- 12) 岡崎奈津子、谷川寛樹、奥岡桂次郎、深堀秀俊：環境科学会2014年会、つくば、18-19. Sep. 2014.
「超寿命住宅導入を想定した木質循環圏における炭素ストックのシナリオ分析」

- 13) 長谷川正利、奥岡桂次郎、大西暁生、谷川寛樹：環境科学会2014年会、つくば、18-19. Sep. 2014.
「道路の維持管理を考慮したマテリアルフローの空間分析」
- 14) 木下卓大、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2014年会、つくば、18-19. Sep. 2014.
「建設資材投入に関する地域循環圏の検討ー福島県沿岸地域におけるケーススタディー」
- 15) 陳暢、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2014年会、つくば、18-19. Sep. 2014.
「中国瀋陽市を対象とした4D-GISを用いた都市のメタボリズムに関する研究」
- 16) 岡崎奈津子、谷川寛樹、奥岡桂次郎、深堀秀俊：日本環境共生学会第17回(2014年度)学術大会、徳島、27-28. Sep. 2014.
「木質循環圏における炭素ストックのシナリオ分析-北九州市周辺を対象としたケーススタディー」
- 17) 黒田将平、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：日本環境共生学会第17回(2014年度)学術大会、徳島、27-28. Sep. 2014.
「リモートセンシングを用いた建築ストックの空間分析の推計」
- 18) 高木溪太、奥岡桂次郎、谷川寛樹：日本環境共生学会第17回(2014年度)学術大会、徳島、27-28. Sep. 2014.
「適切な廃棄物処理にむけた災害廃棄物の発生予測」
- 19) 奥岡桂次郎、大西暁生、谷川寛樹：第42回環境システム研究論文発表会、つくば、4-5. Oct. 2014.
「名古屋都市圏における木質系建設副産物の地域循環圏に関する研究」
- 20) 青柳淳之介、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第42回環境システム研究論文発表会、つくば、4-5. Oct. 2014.
「名古屋市中心部の4d-GISによる用途地域ごとのマテリアル・ストックフロー分析」
- 21) Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa：EcoBalance2014, つくば, 27-30. Oct. 2014.
“Evaluation of the Recyclability of Concrete Rubble Using Total Material requirement Index”
- 22) Keisuke Yoshida, Kenji Sugimoto, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa：EcoBalance2014, つくば, 27-30. Oct. 2014.
”Anthropogenic Earth Movement Analysis Based on Geomorphological Change by digital Elevation Model”
- 23) 吉田圭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹：G空間エキスポ2014 学生フォーラム2014, 東京, 13-15. Nov. 2014.
”Estimation of the Earth Movement Anthropogenic Disturbance of by Using Digital Elevation Model”
- 24) 青柳淳之介、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：G空間エキスポ2014 学生フォーラム2014、東京、13-15. Nov. 2014.
「4d-GISによる名古屋市中心部における用途地域ごとのマテリアルストック・フロー分析」
- 25) 高木溪太、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：G空間エキスポ2014 学生フォーラム2014、東京、13-15. Nov. 2014.
「南海トラフ地震における災害廃棄物の発生予測」
- 26) Hiroki Tanikawa：ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 17-19. Nov. 2014.

- “Weight of Cities – Material Stock and Flow Analysis based on spatial database over time.”
- 27) Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa : ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 17-19. Nov. 2014.
“Regional Symbiosis and cyclical use of Construction Materials”
- 28) Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa, Heinz Schandl : ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 17-19. Nov. 2014.
”What are the Drivers of Material Stock Accumulation?”
- 29) Keisuke Yoshida, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa : ISIE SEM2014, Melbourne, Australia, 13-15. Nov. 2014.
”Dynamic Analysis of Hidden Material Flow and Anthropogenic Disturbance Based on Digital Elevation Models”
- 30) 吉田圭介、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹 : 第28回環境情報科学 学術研究論文発表会(第11回環境情報科学ポスターセッション)、東京、16. Dec. 2014.
「人為的攪拌による土石移動量の推計に関する研究」
- 31) 吉田圭介、奥岡桂次郎、谷川寛樹 :平成26年度土木学会中部支部研究発表会、豊橋、6. Mar. 2015.
「地形変化を伴う人為的攪拌の定量化」
- 32) 舘文人、奥岡桂次郎、谷川寛樹 :平成26年度土木学会中部支部研究発表会、豊橋、6. Mar. 2015.
「ストック型社会の形成に向けた建設系マテリアルストック評価体系に関する基礎的研究」
- 33) 青柳淳之介、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹 :平成26年度土木学会中部支部研究発表会、豊橋、6. Mar. 2015.
「4d-GISを用いた名古屋市中心部の用途地域別マテリアルストック・フロー分析」
- 34) 木下卓大、奥岡桂次郎、谷川寛樹 :平成26年度土木学会中部支部研究発表会、豊橋、6. Mar. 2015.
「福島県沿岸地域におけるフライアッシュの建築資材利用に関する地域循環圏の検討」
- 35) A. Miatto, T. Fishman, H. Tanikawa, and H. Schandl: World Resources Forum 2015, Davos, Switzerland, 2015
“Intensity assessment and global accounting for non-metallic minerals used for construction”
- 36) H. Tanikawa: ISIE2015 8th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Guildford, U.K., 2015
“Weight of Cities –Material Stock and Flow Analysis based on spatial database overtime–”
- 37) K. Okuoka, and H. Tanikawa: ISIE2015 8th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Guildford, U.K., 2015
“Analyzing the optimal size and shape of Japanese cities for material and carbon intensity”
- 38) T. Fishman, H. Tanikawa, H. Schandl, and P. Walker: ISIE2015 8th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Guildford, U.K., 2015
“Using Econometrics and Systems Dynamics to Investigate Material Stock Accumulation”
- 39) A. Miatto, T. Fishman, H. Tanikawa, and H. Schandl: ISIE2015 8th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Guildford, U.K., 2015
“Assessing the intensity of non-metallic minerals used for construction”

- 40) K. Yoshida, K. Okuoka, and H. Tanikawa: ISIE2015 8th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Guildford, U.K., 2015
“Anthropogenic Disturbance of Nations with Geomorphologic Change”
- 41) T. Fishman, H. Tanikawa, and H. Schandl: 11th International Conference of the European Society for Ecological Economics 2015, Leeds, U.K., 2015
“The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan”
- 42) A. Miatto, T. Fishman, H. Tanikawa, and H. Schandl: 11th International Conference of the European Society for Ecological Economics 2015, Leeds, U.K., 2015
“Aggregate consumption and economic development: a cross-country comparison”
- 43) K. Yoshida, K. Okuoka, and H. Tanikawa: 11th International Conference of the European Society for Ecological Economics 2015, Leeds, U.K., 2015
“Estimation of Anthropogenic Disturbance with Geomorphologic Change”
- 44) 黒田将平、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「衛星夜間光を用いた都市域の抽出と空間活動量に基づく建設ストックの推計」
- 45) 舘文人、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「ストック型社会の形成に向けた建設系マテリアルストック評価指標に関する研究」
- 46) Castillon Mitchell Cua, 吉田圭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「Calculation of Mining Anthropogenic Disturbance Using Remote Sensing in Caraga Region, Philippines」
- 47) 佐藤大起、奥岡桂次郎、谷川寛樹、深掘秀敏：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「北九州市における地域特徴と建築物平均年齢との関係性」
- 48) 金城鐘頭、吉田圭介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「一都四県の鉄軌道輸送システムを支えるマテリアルストックの推計」
- 49) 稲垣空、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「土石系資源の都道府県別循環利用と二酸化炭素排出量の推計」
- 50) 小野聡、宮川結衣、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「高速道路整備事業に関わる草木資源の処理方法と再資源化の有効利用評価」
- 51) 野中一鴻、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成28年度土木学会中部支部研究発表会、2016.
「土用途地域の経年変化による都市構造物の物質蓄積量・物質代謝の定量化」
- 52) 稲垣空、：第29回環境情報科学学術研究論文発表会第12回環境情報科学ポスターセッション、2015.
「土石系資源を対象とした物質ストック・フローチャートの構築」
- 53) 小野聡、：第29回環境情報科学学術研究論文発表会第12回環境情報科学ポスターセッション、2015.
「高速道路整備事業に関わる草木資源の処理方法と再資源化の有効利用評価」
- 54) 野中一鴻、：第29回環境情報科学学術研究論文発表会第12回環境情報科学ポスターセッション、2015.
「用途地域の変遷に伴う都市構造物の物質代謝の定量化」

- 55) 木下卓大、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第43回環境システム研究論文発表会、2015.
「福島県北部沿岸地域におけるフライアッシュのクリンカー代替利用に関する地域循環圏の検討」
- 56) 青柳淳之介、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第43回環境システム研究論文発表会、2015.
「名古屋市中心部における4d-GISを用いた都市の経年変化によるMSFAに関する研究」
- 57) 松井健吾、長谷川正利、高木重定、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第43回環境システム研究論文発表会、2015.
「低酸素化に向けた日本全国の土石系資源ストックフローの将来シナリオ分析」
- 58) 山下剛弥、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第43回環境システム研究論文発表会、2015.
「マテリアルストックデータベースの拡充とストック利用効率の検討」
- 59) 谷川寛樹、森口祐一、橋本征二、南斎規介：環境科学会2015年会、2015.
「資源価値を引き出す次世代マテリアルストックに関する研究」
- 60) 奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「居住密度に応じた都市圏の建築物需要量と二酸化炭素排出量の将来推計」
- 61) 吉田圭介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「地形変化を伴う人為的攪拌に関する研究」
- 62) 木下卓大、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「建設資材の地域循環圏形成に関わるフライアッシュの多様な地域循環利用オプションの検討」
- 63) 黒田将平、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「リモートセンシングを用いたアジア都市の空間活動量の変遷に関する指標化」
- 64) 松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「低物質・低炭素化に向けた都道府県別土石系ストック・フローの将来シナリオ分析」
- 65) 山下剛弥、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「一都三県を対象とした建築物・インフラストラクチャーの変遷に関する基礎的研究」
- 66) 佐藤大起、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹、深堀秀俊：環境科学会2015年会、2015.
「都市計画の変遷と建設系マテリアルストック・フローとの関係性」
- 67) 金城鐘頭、吉田圭介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「鉄軌道輸送システム整備に関わる経年マテリアルストック・フロー分析」
- 68) 野中一鴻、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「用途地域の違いによる都市構造物の物質代謝特性に関する基礎的研究 -4d-GISを用いた和歌山市中心部におけるケーススタディ-」
- 69) 小野聡、宮川結衣、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「高速道路整備事業に関する草本資源の有効利用ポテンシャル評価」
- 70) 稲垣空、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会2015年会、2015.
「建設部門の低物質・低炭素化に向けたセメントのマテリアルストック・フロー分析」
- 71) 野中一鴻、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015.
「和歌山市中心部をケーススタディとした用途地域別の耐用年数とマテリアルストック・フロ

一の推計」

- 72) 小野聡、宮川結衣、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015.
「道路整備事業に関わる草本資源の有効利用ポテンシャル評価」
- 73) 朱雀健司、黒田将平、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015.
「リモートセンシングを用いたマテリアルストック推計の手法の検討」
- 74) 稲垣空、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015.
「都道府県における土石系資源のマテリアルストックフロー分析」
- 75) 金城鐘頭、吉田圭介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第11回GISコミュニティフォーラム、2015.
「DEMを用いた鉄道整備に関わるマテリアルストック・フローの3D解析」
- 76) 山下剛弥、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第11回GISコミュニティフォーラム、2015.
「マルチスケール型の経年マテリアルストック推計」
- 77) 佐藤大起、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度廃棄物資源循環学会、2015.
「北九州市における4次元型建物詳細データを用いた将来廃棄物量の推計」
- 78) 松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度廃棄物資源循環学会、2015.
「日本全国を対象とした建設廃棄物の道路用再生骨材利用に関するシナリオ分析」
- 79) Keisuke Yoshida, Keiji Ookuoka, Hiroki Tanikawa: The 12th Biennial International Conference of EcoBalance, 2016.10.3-6, Kyoto, Japan
“Study of Anthropogenic Disturbance with Geomorphologic Change”
- 80) Ikko Nonaka, Keiji Ookuoka, Hiroki Tanikawa : The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Analyzing the influence of zoning on urban metabolism, using 4d-GIS”
- 81) Satoshi Ono, Keiji Ookuoka, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan.
“An evaluation of efficient usage of herbaceous biomass using the road network”
- 82) Marianne Faith G. Martinico-Perez, Tomer Fishman, Eme Tan, Keiji Ookuoka, Hiroki Tanikawa, Anthony Sf Chiu: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan.
“Material Flow and Stock Accounts in the Philippines: Drivers and Impacts to the Environment”
- 83) Keisuke Yoshida, Tomer Fishman, Ookuoka Keiji, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Automatic spatial detection and estimation of domestic extraction and hidden material flows”

- 84) Alessio Miatto, Heinz Schandl, Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Lifespan modelling uncovers urban stock and flow behavior”
- 85) Tomer Fishman, Shohei Kuroda, Keijiro Okuoka, Kenji Sugimoto, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Shedding light on material stocks: towards a global database of the built environment using satellite imagery”
- 86) Yi Dou, Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Liang Dong, Takuya Togawa, Hiroki Tanikawa, Tsuyoshi Fujita: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Regional Planning and Assessment System for Heat Exchange Network between Incineration Facilities and Industries: Case of Tokyo Metropolis”
- 87) Cuc Thi Nguyen, Hiroki Tanikawa, Keijiro Okuoka, Tomer Fishman: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Evaluation Material Stock of Roadways: The Case Study of Vietnam”
- 88) Dong Yang, Chang Chen, Feng Shi, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa, Yiling Guo: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“A Study on Metabolism of Urban Buildings by Using 4D-GIS in Hubei Province, China”
- 89) Serika Akiyama, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Analysis of amount and age of material stock in building in Nagoya”
- 90) Kengo Matsui, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Construction minerals for a low-carbon society: stocks and flows analysis”
- 91) Takaya Yamashita, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Material stock and flow in the “Greater Tokyo” ”

- 92) Hiroki Sato, Hiroki Tanikawa, Keijiro Okuoka: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference、2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Spatial Analysis of Building Lifespan and 19 Distribution of Building Age in Kitakyushu City with Geo-information”
- 93) Kenji Sugimoto, Shohei Kuroda, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference、2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Material stock estimation using nighttime lights data”
- 94) Chansopheak Cheak, Hiroki Tanikawa, Keijiro Okuoka, Tomer Fishman, Suguru Suzugaki: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference、2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Material and Energy Flow of Electricity Generation in Cambodia”
- 95) Mitchell Cua Castillon, Tanikawa Hiroki, Okuoka Keijiro, Yoshida Keisuke: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference、2016.9.28-30, Nagoya, Japan
“Calculation of Mining Anthropogenic 17 Disturbance Using Remote Sensing in Caraga Region, Philippines”
- 96) A. Miatto, T. Fisherman, H. Schandl, H. Tanikawa: Industrial Ecology Gordon Research Conference、2016.6.19-24, Vermont, United States of America
“Lifespan Modeling Uncovers Urban Stock Accumulation and Outflow Forecast Behaviour”
- 97) T. Fisherman, H. Schandl, H. Tanikawa: Industrial Ecology Gordon Research Conference、2016.6.19-24, Vermont, United States of America
“Do Countries Reach a Saturation of Material Stock?”
- 98) 鈴垣優、奥岡桂次郎、谷川寛樹: 第30回環境情報科学 学術研究論文発表会 第13回環境情報科学ポスターセッション、2016.12.5、日本大学会館
「地域別建設資材投入原単位と社会条件・自然条件の比較考察」
- 99) 藤田恭介、奥岡桂次郎、谷川寛樹: 第30回環境情報科学 学術研究論文発表会 第13回環境情報科学ポスターセッション、2016.12.5、日本大学会館
「建設に関わる排出フローを考慮した建設資材の物質ストックの定量化」
- 100) 西尾文吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹: 第30回環境情報科学 学術研究論文発表会 第13回環境情報科学ポスターセッション、2016.12.5、日本大学会館
「ハイダイナミックレンジ合成衛星夜間光データの光強度補正と都市活動量の時空間分析」
- 101) 朱雀健司、奥岡桂次郎、谷川寛樹: 第30回環境情報科学 学術研究論文発表会 第13回環境情報科学ポスターセッション、2016.12.5、日本大学会館
「LiDAR を用いた構造物ストック推計のための建築物データの構築」

- 102) 鈴垣優、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：公益社団法人環境科学会 2016 年会、ポスター発表、2016. 9. 8-9、東京都市大学 横浜キャンパス
「地域特性と社会経済の状況に応じた建設資材投入原単位」
- 103) 杉本賢二、奥岡桂次郎、秋山祐樹、谷川寛樹：公益社団法人環境科学会 2016 年会、ポスター発表、2016. 9. 8-9、東京都市大学 横浜キャンパス
「用途地域における利用容積率の実態と物質蓄積ポテンシャルの把握」
- 104) 小野聡、奥岡桂次郎、谷川寛樹：公益社団法人環境科学会 2016 年会、ポスター発表、2016. 9. 8-9、東京都市大学 横浜キャンパス
「愛知県の木材ストック・フローと炭素固定量の定量化に関する研究」
- 105) 野中一鴻、奥岡桂次郎、谷川寛樹：公益社団法人環境科学会 2016 年会、ポスター発表、2016. 9. 8-9、東京都市大学 横浜キャンパス
「人口推移を考慮した建造物の物質蓄積量と更新に伴う物質フローの比較」
- 106) 西尾文吾、杉本賢二、奥岡桂次郎、谷川寛樹：公益社団法人環境科学会 2016 年会、ポスター発表、2016. 9. 8-9、東京都市大学 横浜キャンパス
「衛生夜間光データを用いたアジア諸都市の空間分布と都市動態の定量化」
- 107) 藤田恭介、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：公益社団法人環境科学会 2016 年会、ポスター発表、2016. 9. 8-9、東京都市大学 横浜キャンパス
「生産統計に基づく社会基盤・建築物に投入・蓄積された建設資材量の推計」
- 108) 鈴垣優、稲垣空、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成 28 年度 土木学会関西支部年次学術講演会、口頭発表、2016. 6. 11 立命館大学 BKC
「建築物の資材投入原単位における構造別・資材別の比較分析」
- 109) 西尾文吾、黒田将平、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成 28 年度 土木学会関西支部年次学術講演会、口頭発表、2016. 6. 11 立命館大学 BKC
「衛星夜間光を用いた東南アジアの都市の動態評価」
- 110) 藤田恭介、稲垣空、松井健吾、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成 28 年度 土木学会関西支部年次学術講演会、口頭発表、2016. 6. 11 立命館大学 BKC
「社会基盤施設・建築物における素材別物質ストック・フロー分析」
- 111) 吉田圭介、金城鐘顯、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第 12 回 GIS コミュニティフォーラム マップギャラリー、ポスター発表、2016. 5. 26-27、東京ミッドタウン
「マテリアルストックに関わる環境負荷～人為的攪拌と隠れたフロー～」
- 112) 野中一鴻、佐藤大起、青柳純之助、黒田将平、奥岡桂次郎、谷川寛樹：第 12 回 GIS コミュニティフォーラム マップギャラリー、ポスター発表、2016. 5. 26-27、東京ミッドタウン
「持続可能な未来をつくるMISOプロジェクト～蓄積された資源を有効活用するために～」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国際ワークショップ：Implementation of Material Stock and Flow Indicators, 2. Mar. 2015,

東京.

- 2) 国際ワークショップ：Material Stock and Flow Analysis for Regional Development, 4. Mar. 2015, 名古屋
- 3) 国際ワークショップ：Academic Workshop about Material Stock Analysis, 7. Mar. 2016, 東京.
- 4) 国内シンポジウム：環境科学会2015年会、シンポジウム-4、2015年9月7日、大阪大学
「資源価値を考慮したストック・フロー指標体系の構築」
- 5) The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecologyにおけるスペシャルセッション「Special session: Nextgeneration Material Stocks that Realize the Full Potential of Resources」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) Tomer Fishman, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa: 2014 Gordon Research Conference, Industrial Ecology, 1st Poster Presentation Prize Gordon Research Conference, 2014. 6.
- 2) 奥岡桂次郎、谷川寛樹：環境科学会 優秀研究企画賞(富士電機賞)、環境科学会、2014. 9.
- 3) 佐藤大起、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹、深堀秀敏：環境科学会2014年会 学部生・高専生・高校生等の部 優秀発表賞(富士電機賞)、環境科学会、2014. 9.
- 4) 奥岡桂次郎、大西暁生、谷川寛樹：平成27年度全国大会第70回年次学術講演会優秀研究講演者賞、土木学会、2015. 9.
- 5) 佐藤大起、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹、深堀秀敏：環境科学会2015年会 修士課程の部 優秀発表賞(富士電機賞)、環境科学会、2015. 9.
- 6) 野中一鴻、青柳淳之介、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会第Ⅶ部門 優秀発表賞、土木学会、2015. 5.
- 7) The 12th Biennial International Conference of EcoBalance, Outstanding Presentation Prize, Keisuke Yoshida, Keijiro Okuoka, Hiroki Taniakwa (2016.10), Study of Anthropogenic Disturbance with Geomorphologic Change
- 8) The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, 1st Poster Presentation Prize, Ikko Nonaka, Analyzing the influence of zoning on urban metabolism, using 4d-GIS
- 9) 舘文人、奥岡桂次郎、谷川寛樹：平成27年度土木学会中部支部研究発表会 優秀研究発表賞(2016. 3), ストック型社会の形成に向けた建設系マテリアルストック評価指標に関する研究

8. 引用文献

- 1) 田中健介、早川容平、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究、土木学会論文集G(環境)、Vol. 69、No. 6、環境システム研究論文集第41巻、Ⅱ_25-Ⅱ_34、2013.
- 2) 三上信雄：漁港施設のストックマネジメントについて、寒地土木研究所月報、No. 735、pp36-44.

(2) 資源の社会蓄積量の推計と価値の評価

東京大学

工学系研究科	都市工学専攻	森口 祐一
		中谷 隼
	マテリアル工学専攻	醍醐 市朗
	システム創成学専攻	村上 進亮

平成26～28年度累計予算額：16,160千円（うち平成28年度：4,950千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

社会に蓄積された資源は多様な形態で存在しており、その価値は利用により発揮される機能から、二次的に利用可能な資源など様々である。本研究では、産業連関表を用いた時系列的物質フロー・ストック分析（TS-MFSA）による資源ストック（固定資本および耐久消費財）の網羅的な分析手法を開発した。さらに、それに基づく蓄積先・資本財・部材（資源種）・時間（投入時点および観察時点）の5次元構造を持つ資源ストックデータベースを構築することで、任意の蓄積先・資本財・部材別の時系列的な分析を行いやすくするなど、本研究の成果の活用のための環境整備を行った。鉄鋼材を事例として、93の用途区分別の需要量統計から、それらの社会蓄積量の推計結果を用いることで、用途を耐久消費財と資本財に判別する手法を提案した。過去からの需要量を、耐久消費財と資本財に区別すると、経済発展に従って、資本財への需要から耐久消費財への需要にシフトしてきた様子が明らかになった。バングラデシュを対象として、非金属鉱物を中心に社会蓄積量の推計を試行した。特にレンガや泥など、先進国では用いられる量の少ないような素材がその大部分を占めることを定量的に把握、その環境影響等を踏まえこれらの推計の重要性を改めて確認した。一方、資源ストック価値の分類について検討し、[A] リサイクルによる供給リスク低減（供給源の多様化・国産化による安定的な資源供給）に寄与する価値、[B] 社会に蓄積された素材が持つ潜在的な機能（直接的な利用価値）、および[C] 資源消費による将来の追加費用の低減という価値、という側面に整理した。それぞれについて、[A] 銅を事例として、社会ネットワーク分析の手法を用いて需要構造を把握したのち、エージェントシミュレーションモデルを用い供給リスク低減効果を定量化した。[B] 鉄鋼材を対象として、示強性の性能値を示量性の機能量に変換し評価する手法を開発した。[C] ライフサイクル影響評価の特性化モデルを応用して、二次資源の利用可能性の観点からの資源ストックの価値を定量化した。

[キーワード]

時系列的物質フロー・ストック分析、固定資本マトリクス、資源ストック価値、供給リスク、二次資源利用

1. はじめに

社会に蓄積された資源は、かつては国富統計により、現在は日本の社会資本ストックとして内閣府により調査が行われているが、経年的に利用可能なデータベースとしては不十分である。特に、資源ストックの価値としては金銭的な評価額に留まっており、資源利用の観点から物質ベースの定量化が求められる。また蓄積された資源が有する価値を多面的に評価した研究は少なく、統合的な価値評価が求められる。物質フロー・ストック分析では、社会のモノの流れと蓄積を定量的に評価することが可能であるため、経年的に物質ストックを把握するとともに、各物質の資源ストックの価値評価につながる。また、資源ストックの価値は、利用の段階から排出・循環利用など価値評価として多岐にわたるため、それぞれのフェーズに応じた価値の評価が求められる。

2. 研究開発目的

物質フロー・ストック分析 (material flow and stock analysis: MFSA) は、社会のモノの流れと蓄積を定量的に評価する手法である。資源の社会蓄積量の定量化において、MFSA は極めて有用であるが、これまでの適用範囲は、金属などの高価値資源に限られがちであった。そこで本研究では、日本の物質フロー・ストック管理に資するために、資本財（固定資本および耐久消費財）の網羅的な分析手法の開発とデータベースの構築を目的とした。また、蓄積された資源価値の評価として、[A] リサイクルによる供給リスク低減（供給源の多様化・国産化による安定的な資源供給）に寄与する価値、[B] 社会に蓄積された素材が持つ潜在的な機能（直接的な利用価値）、および [C] 資源消費による将来の追加費用の低減という価値、と3つに大別することで、各側面における資源価値を評価することを目的とした。

3. 研究開発方法

(1) 資源の社会蓄積量の推計

産業連関表 (input-output table: IOT) は、一国一年の全経済活動を記述している点で優れた情報源であるが、本研究では、固定資本を含む資本財の蓄積を分析するため、複数年のIOTを利用し時間軸を分析に組み入れ、さらに、固定資本マトリクスを利用することで、各資本財の蓄積先も分析に組み込んだ。これらの拡張を含め、本研究で用いた手法を時系列的物質フロー・ストック分析 (TS-MFSA) と名づけ、資本財（固定資本および耐久消費財）の網羅的な分析手法を開発した。さらに、それに基づく蓄積先・資本財・部材・時間（投入時点および観察時点）の5次元構造を持つ資源ストックデータベースを構築した。

データの整備においては、1970年から2005年のIOTを基礎資料とした。各年のIOTは、部門分類が異なるので、取引基本表を369行×369列に統一し、同様に物量表、固定資本マトリクスも部門統一を行った。各年の取引基本表を投入係数化し、投入係数行列 (A) とした。物量係数行列 (C) を作成するにあたり、まず物量表の行部門のうち、ダブルカウントを避けることとデータの信憑性を考慮し、バイオマス6部門、非金属鉱物9部門、化石資源21部門、金属鉱物4部門、計40部門を部材 (p) として選択した。また物量表を他の資料と比較し、著しく値が異なる場合は修正を行った。部材 (p) が物量表行部門に無い年は、投入表を物価統計で実質化したうえで直前の物量表の値から補った。上の処理を行った物量表を列の国内総生産で除すことで投入係数化し、物量係数行列 (C) とした。また、固定資本マトリクスと家計消費支出の最終需要（ただし、固定資本マト

リクスに記載された資本財のみを対象とする)を合わせて最終需要行列(F)とした。寿命関数行列は、既往研究を参考に5分類(機械類、木造建築、非木造建築、土木構造物、その他)で作成した。整備したデータベースは、本研究と共通の分析対象である人工資本に関する他の外部資金の支援を得て、最新年次(2011年)のデータの追加整備、データベースの構造改良を行い、本研究の研究期間終了後にも成果を活用しやすくする環境整備を行った。

さらに、各種統計を用いて日本全国の蓄積量を市区町村別に配分することで、6次元の社会蓄積量の推計へ拡張した。配分基準となる統計は、蓄積先および資本財ごとに検討した。基本的に、蓄積先が産業部門の場合は産業中分類別従業員数、家計消費部門の場合は人口を基準として市区町村に配分した。ただし、資本財が住宅建築の場合は所有別(住宅・不動産)および構造別(木造・非木造)の住宅延床面積、資本財が大型機械類の場合は工業統計の従業員数を基準とした。

こうした網羅的・トップダウン的なストックデータベースの構築と並行して、東京都の木造住宅を事例研究対象として、着工床面積、滅失届面積などのフロー量と、床面積のストック量を、複数の統計資料から整合性をもって推計可能かどうかについての検討を行った。さらに、木造住宅に加えて非木造建築物についてもこの推計モデルを適用した。

また、MFSAを用いて、日本における鉄鋼材の耐久消費財や資本財の種類別に、それら鉄鋼材の社会蓄積量の時系列変化を推計した。一方で、産業区分を参考に、社会におけるサービス分野のうち、運輸、電機・ガス、水道、電気通信、農林水産業、鉱工業、商業の7分野について、消費サービス量を時系列で把握した。7分野のサービス量は、それぞれ輸送トンキロ(トンキロ)、最終消費エネルギー量(J)、有効水量(m^3)、消費情報量(bit)、農林水産業GDP(円)、鉱工業GDP(円)、商業GDP(円)と設定した。鉄鋼材ストック量推計の結果を、それぞれの分野別に集計することにより、鉄鋼材ストック量/サービス量を導出し、7分野別の鉄鋼材のMIPS(material intensity per service)の変化を観察した。耐久消費財と資本財の用途区分については、主成分分析を用いることで、判別した。1958年から2012年の鉄鋼材ストック量を観察した。鉄鋼材の需要量の変化において、資本財の鉄鋼材ストック量の推移を説明変数とする回帰分析を行った。また、資本財の鉄鋼材ストック量の飽和傾向を観察し、耐久消費財と資本財の鉄鋼材需要量の変化を説明するモデルを構築した。

一方、発展途上国における蓄積量推計へ向けた準備段階として、研究分担者がこれまでに行ってきたバングラデシュにおけるEconomy Wide Material Flow Analysis(EW-MFA)の結果を改めて精査、整理し、資源生産性の推計と、一部建築物における物質蓄積の推計を試行した。資源生産性指標としてはDirect Material Consumption(DMC)/GDPを用いた。また建築物についてはボトムアップ的に調査した原単位を元に物質別のIn-Use Stockの推計を実施した。更に比較対象として、ラオスのEW-MFAを簡易的に試行した。

(2) 資源の価値の評価手法

資源ストックの価値は必ずしも一意に決まるものではなく、それは様々な側面の価値を持つものとする。すなわち、[A] リサイクルによる供給リスク低減(供給源の多様化・国産化による安定的な資源供給)に寄与する価値、[B] 社会に蓄積された素材が持つ潜在的な機能(直接的な利用価値)、および[C] 資源消費による将来の追加費用の低減という価値である。これらは、[A] 非定常的なショックに備える価値、[B] 定常的・普遍的に資源ストックから発揮されている価値、および[C] 将来的なストレスに備える価値と位置付けることができると考えた。

まず [A] については、循環資源の蓄積の一つの評価として、昨今天然資源の供給に関してよく話題になるCriticalityの評価を用いることを検討した。Criticalityの評価については、供給リスクと、これが顕在化した際の経済の脆弱性を指標に考えることが多い。その供給リスクについて、循環資源の供給量の増加によるリスク軽減効果を計ること、そしてその結果としてCriticalityがどの程度減少するのかを定量的に把握することを目的として設定した。具体的には供給リスク軽減効果を定量化すべく、銅を事例として、一次・二次資源を含む供給構造を模擬するためのエージェントシミュレーションモデルを開発し、リスク情報を内包化することでその定量化を実施した。また、銅を題材に表面上取引量として現れるマテリアルフローだけでなく、その背後に存在する天然資源の保有関係、すなわち鉱山の所有関係等を整理、社会ネットワーク分析の手法を用い分析した。

また、実施したケーススタディから、リスク低減という目的においては最適なりサイクルの規模があることが示唆されたためにその結果を再度精査した。そこからの示唆としては、当然ながらリサイクルにも資源供給としてのリスクは存在していること、それ故に天然資源からの供給の方がリサイクルよりもリスクが相対的に小さいケースもありえることが改めて示唆された。これらの結果から、最終的にはリサイクルの供給にかかるリスクと天然資源供給のリスクを整理することで改めて供給リスク低減の意味におけるリサイクルの最適な規模を示し、最適規模におけるリスク低減効果そのものを定量化することを目的とし、天然資源と循環資源の供給リスクを並列で検討できる評価の枠組を構築した。リサイクル由来の供給リスクはこれまで無視されがちだったものでありリサイクルの供給リスク削減効果を過大評価してきた理由でもある。

次に、[B] については、近年の素材の高機能化に鑑み、鉄鋼材（普通鋼）の材としての価値評価手法を開発した。いわば、従来のライフサイクル評価における材料の機能単位を質量単位から再考したとも言える。鉄鋼材の価値は、材の提供する物理的あるいは工業的性能値によって評価した。しかし、性能値のほとんどは加算性のない示強性の指標であり、需要量やストック量として社会全体の総量を表現するには不適切であった。そこで、示強性の性能値を示量性の機能量に変換し評価する手法を開発した。普通鋼の提供する物理的・工業的性能を網羅するため、普通鋼の品種ごとに、それを生産するメーカーのカタログ等を利用して対応する工業規格であるJIS番号ならびにJIS記号を特定し、各規格に記載の要求項目から品種別に提供している機能種別ならびにその値を特定した。なお、化学成分については、各機能を発現するための必要条件であり機能そのものではないと考えた。ほとんどの品種において複数の機能が求められており、それらは重複して計上することとした。人工資本は、その有する機能によってwell-beingに寄与すると考え、人工資本の価値はwell-beingに寄与する機能であるとした。機能の種類は、7つの基本単位を組み合わせた国際単位系に準拠し、その次元により区別することとした。同じ次元を有する機能は同じ機能と整理した。それら機能の中では、直接寄与する主機能と、主機能を通じて発現される補助機能に区分されると考えた。例えば、鋼管杭に用いられる鉄鋼材の特性には、強度、耐食性、外観などの様々な特性があるものの、使用時に地中にある鋼管杭にとって外観はwell-beingに寄与しない。特性のうち、価値として計上すべき機能と、そうでない機能があると整理した。一方、使用時に地中にある鋼管杭にとって外観はwell-beingに寄与しないため、価値とは評価されない。異なる次元を有する主機能と補助機能を合わせた評価として、主機能を補助機能の次元に対して積分する手法を構築した。この再構築した評価手法において、鉄鋼材（普通鋼）の社会蓄積物質

ストック量が構造材として提供している価値を、強度の尺度における機能量として評価した。これは、従来のライフサイクル評価における材料の機能単位を質量単位から再考したとも言える。

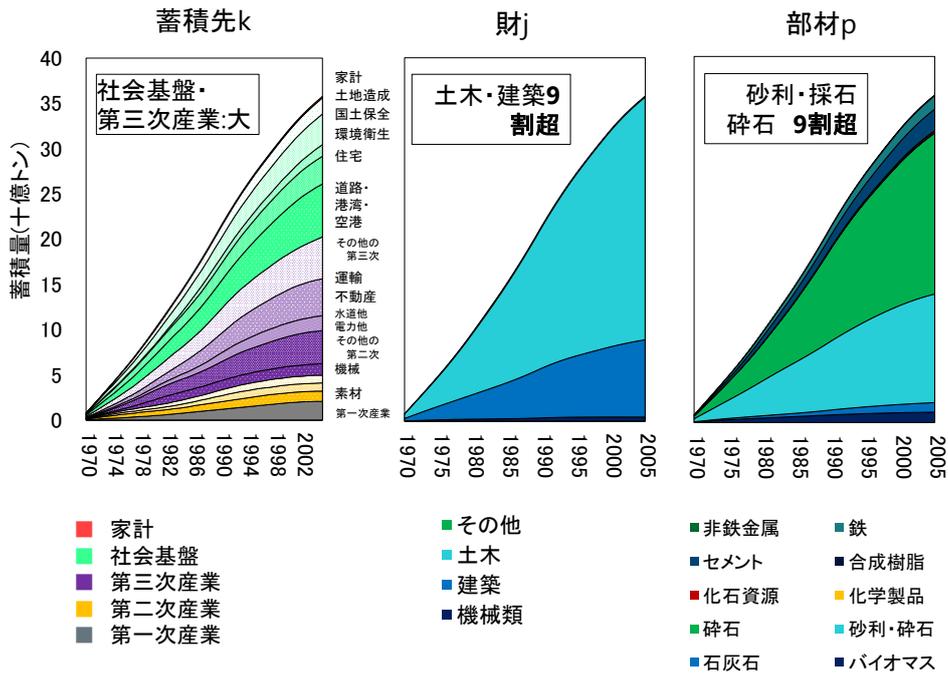
一方 [C] に関しては、社会に蓄積している二次資源の利用可能性は、資源ストックの価値評価において考慮すべき側面である。資源消費はライフサイクル影響評価 (LCIA) においても頻繁に議論される影響領域の一つであり、様々な特性化モデルが提案されている。こうした評価方法は資源ストックの価値評価にも応用可能であると考えられるが、将来における二次資源の利用可能性を考慮した評価 (特性化) は、世界的にも十分に確立されていない。そこで、複数の既存の特性化モデルを基に二次資源の利用可能性を考慮に入れた評価方法を構築し、資源需要や二次資源利用量に関する将来シナリオ別の特性化係数を算定した。その上で、資源需要および二次資源利用量に関するシナリオ別の係数間比較と、それらの係数の感度のモデル間比較を通して、資源ストックの価値評価に応用可能な特性化モデルを選定した。その結果から、既存の特性化モデルのうち超過コストによる評価方法に着目し、Shared Socioeconomic Pathways (SSP) の5つのシナリオの下で、二次資源の利用可能性を考慮した世界の2100年までの鉄および銅の一次資源需要を予測した上で、将来の資源需要の変化を考慮した超過コスト (SCPC) を算定した。超過コストが「現在、ある一次資源を 1 kg 追加的に消費 (採掘) することで、将来にわたって、一次資源を 1 kg 採掘するためのコストが MCI [(\$/kg)/kg] ずつ増加する。将来にわたる一次資源の総消費量 [kg] に MCI を乗じることで、現在、一次資源を 1 kg 消費することの影響 [\$/kg] が求められる」という概念であることから、二次資源利用がないケースと二次資源利用があるケースの将来にわたる総超過コストの差分が資源ストックの価値 (再生利用による将来の採掘費用増加の緩和) を表すものと定義して、現在の日本の資源ストックの価値を算定した。

4. 結果及び考察

(1) 資源の社会蓄積量の推計

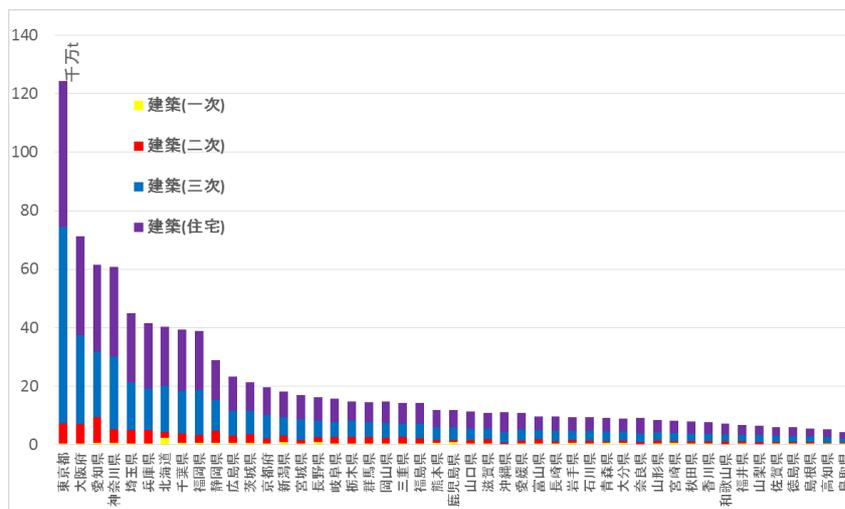
TS-MFSAを用いて、資本形成への物質投入量、社会蓄積量、寿命に達した量 (EoL量) を、資本形成がなされた蓄積先部門 (k) 別、資本財の種類 (j) 別、蓄積された部材 (p) 別に推計した。投入量についてみると、最大値は1990年であり、2005 年は1970 年よりもやや低い水準まで、新しい固定資本への投入が落ち込んでいる。

図(2)-1に蓄積量の推計結果を示す。年とともに製造業の割合が下がり、一方でサービス産業の割合が上がっている。また発電、上下水道などの公共インフラは75~80 年にかけて集中している様子が伺える。このようにその時代の産業構造に応じて、固定資本の投入先は異なることがわかる。蓄積された財の生産部門としては、土木、建築で9割を占め、また、蓄積の中に含まれる投入物では、非金属鉱物が大部分を占めている。EoL量は、投入量や蓄積量と比較すると、バイオマスや金属鉱物の比率が高くなっている。これは、非金属鉱物が多く用いられている土木構造物は寿命が長く、現時点の分析対象期間内ではEoL を迎えないのに対し、金属が多く用いられている機械類などは相対的に短寿命であるためと考えられる。

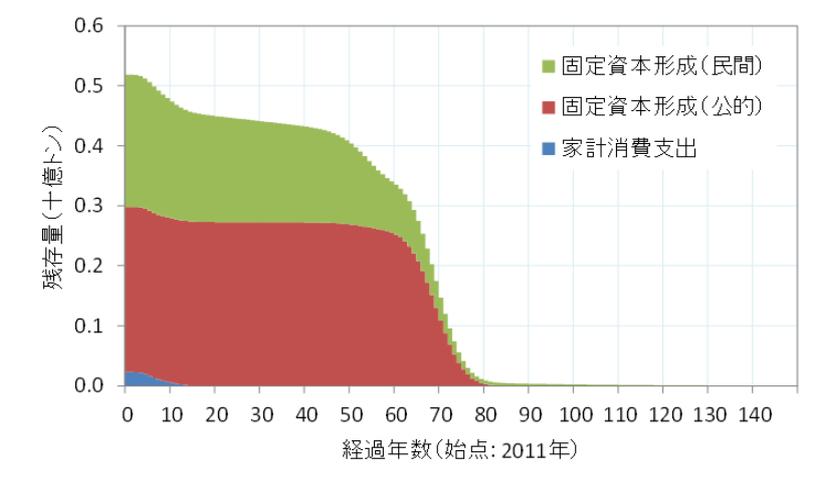


蓄積先k, 財j, 部材p 別の物質蓄積量の内訳

さらに、上記の蓄積先・資本財・部材別の蓄積量を、各種統計を基準として市区町村別に配分した。その結果を都道府県別に集約して比較すると、東京都の13.3億tを筆頭に太平洋ベルト地帯に多くの社会蓄積量が存在していることが確認された。各都道府県の資本財別の蓄積量では、いずれの都道府県でも建築が90%以上を占めているが、その蓄積先の内訳は都道府県間で差異が見られた(図(2)-2)。すなわち、北海道や九州の各県では第一次産業への蓄積の割合が比較的高く、北関東や中部の各県では第二次産業の割合が比較的高い。また、東京都では第三次産業への建築の割合が、社会蓄積量の50%を超えると推計された。



図(2)-2 都道府県別の社会蓄積量の蓄積先・資本財の内訳

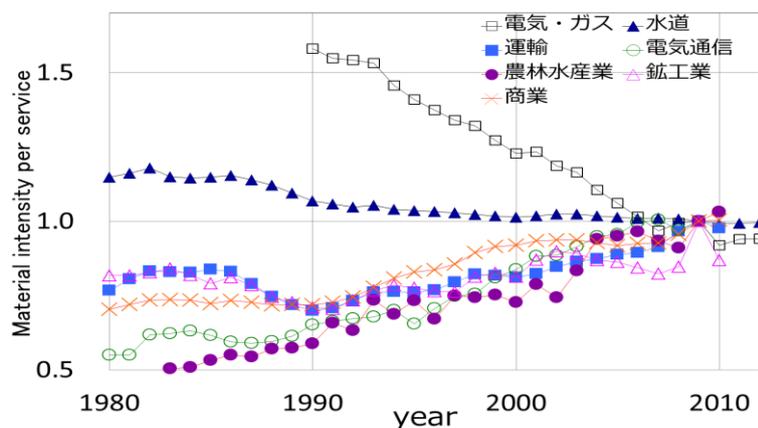


図(2)-3 2011年に投入された物質の残存(ストック)量

また、関連する他の外部資金の支援も得て追加整備した、最新年次のデータのうち、2011年に投入された資源の残存量の推計結果を図(2)-3に示す。

一方、東京都の木造住宅に関する事例分析では、着工面積と着工からの年数に応じた残存率をベースに、大規模災害などの外的要因による滅失の影響を加味することで、ストック床面積、滅失床面積を時系列的に推計するモデルを構築し、これらの統計値と比較したところ、概ねトレンドを再現することができた一方で、フロー量とストック量の不整合があることを確認し、建築分野のリサイクル制度の整備の副次的影響が、滅失量の統計的把握に及んでいる可能性を指摘した。非木造建築物も含めた建築物のフロー・ストックの体系的な把握によって、高度成長期以来蓄積されてきた建築物に由来する解体廃棄物発生量の将来予測が可能となったことで、本研究の着眼点である資源蓄積量としての正の価値だけでなく、解体、廃棄コストや災害時の影響など、物質ストックの負の側面にも着目した建築物ストックの管理施策の提案の検討のための情報基盤として活用可能と考えられる。

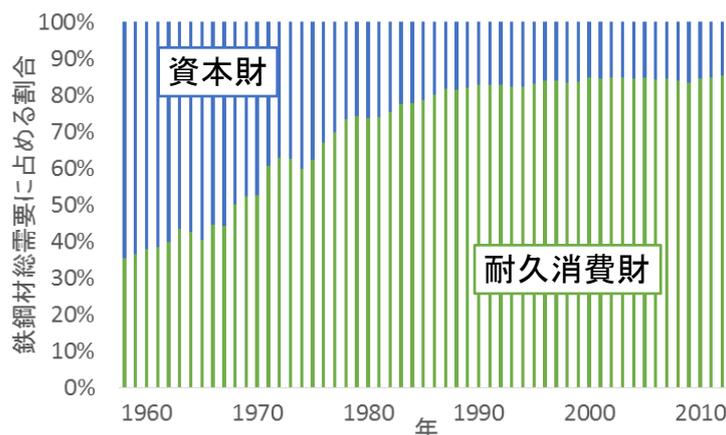
次に、運輸、電機・ガス、水道、電気通信、農林水産業、鉱工業、商業の7分野の鉄鋼材ストックによるMIPSの変化を観察した結果を図(2)-4に示す。MIPSが減少傾向を示した電気・ガスならび



図(2)-4 日本における7分野サービス別鉄鋼材ストックのMIPSの時系列変化
(2009年を1と規格化)

に水道についてのみ、時系列での鉄鋼材ストック量が飽和傾向を示した。他の用途では、サービス量は飽和傾向を示しながらも鉄鋼材ストック量は増加傾向を示した。これは、サービス量として設定した尺度以外の尺度での機能向上に寄与するために鉄鋼材が更に蓄積しているものと考えられた。

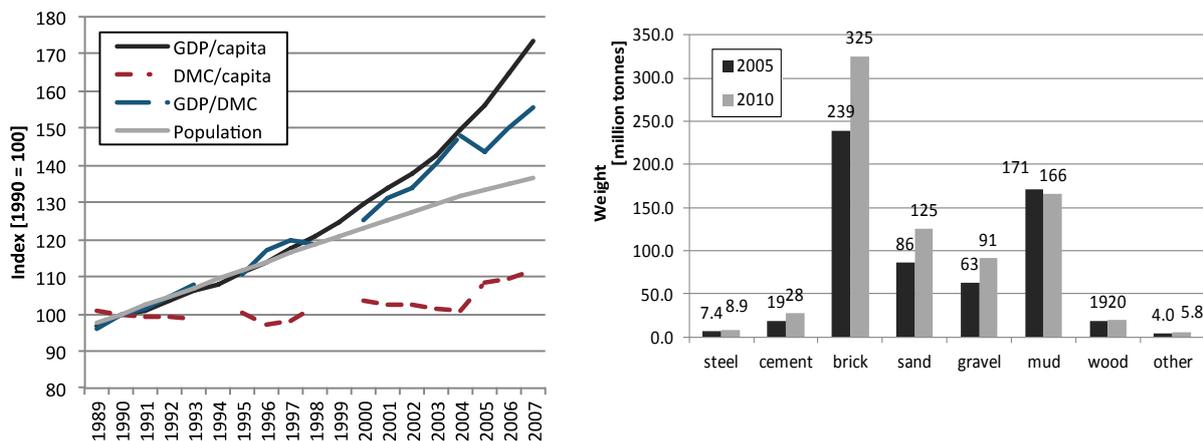
また、93用途に区分された鉄鋼材の需要量を主成分分析により解析したところ、第二主成分の結果から、鉄鋼材の用途を耐久消費財や資本財の用途に判別できた。1958年から2012年の資本財用途の鉄鋼材ストック量を説明変数とすることで、1991年までの耐久消費財用途の鉄鋼材の需要量を線形式で説明できた。これは、公共インフラ等の整備が先行し、その整備に伴い耐久消費財の需要量が高まる様を示したと考えられた。また、資本財用途の鉄鋼材ストック量には1991年以降に飽和傾向が観察され、耐久消費財用途の鉄鋼材の需要量変化は、資本財用途の鉄鋼材ストック量では説明されず、景気変動（GDP成長率）によって良く説明された。時系列での耐久消費財や資本財の用途の鉄鋼材需要量を、その割合で図(2)-5に示した。資本財用途の鉄鋼材ストック量の飽和により、鉄鋼材総需要量に占める資本財用途の割合は、15%程度でほぼ一定となっていることが分かった。これは、資本財用途の鉄鋼材需要は、資本財が一通り整備された後の更新等による限定的な需要であるためと考えられた。



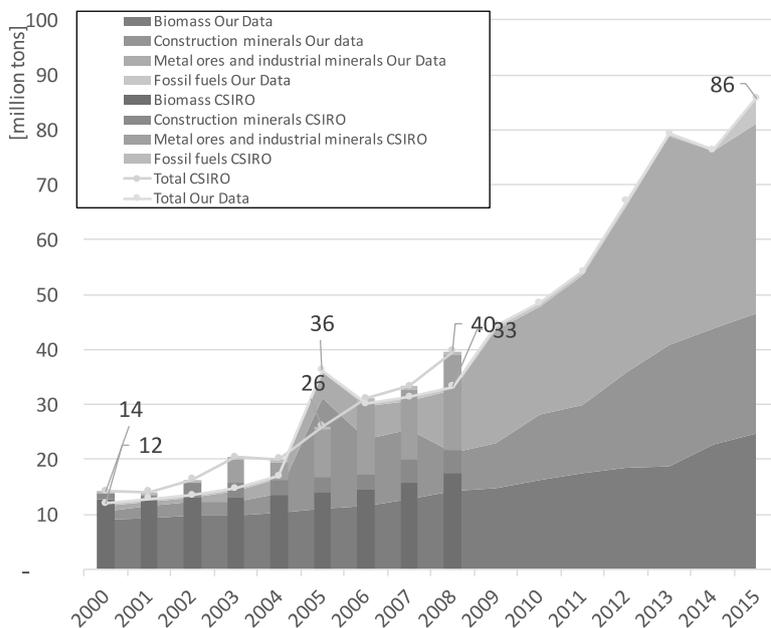
図(2)-5 鉄鋼材の総需要量に占める耐久消費財と資本財の割合の時系列変化

発展途上国の物質フロー・ストック分析の事例として、バングラデシュの資源生産性を評価した結果を図(2)-6(左)に示す。GDP/DMCの推移からわかるように大きく改善している。ただし、一人当たり資源消費量(DMC/capita)が減少しているわけではなく、あくまでその伸びを上回る経済成長を実現していることによるものである。そこで、物質別の変化を追うと、物質使用強度では金属が大きく増加していることなどがわかるが、量として非常に大きなバイオマス資源と非金属鉱物資源についてみると、非金属鉱物資源について非常に大きな量の消費が続いていることがわかる。実際にどの程度の非金属鉱物資源が蓄積されているのかを、これまで研究担当者が蓄積してきたデータをもとに積み上げ推計、その結果を図(2)-6(右)に示した。ここでは2005, 2010の2年について建築資材としての物質蓄積量を示している。やはりレンガについては(brick)大きく

その値が伸びていることがわかる。他方で、泥についてのみかすかに減少していることもわかる。現地調査からもこうした資材を用いた壁を持つ建築物は減少していることは把握しており。それに整合的な結果であると言えるが、鉄筋コンクリート造が少ないことなどは、蓄積量の推計結果からも明らかである。さらにラオスについてEW-MFAの簡易試行を実施したが、図(2)-7からも分かるように国際プロジェクトの推計(CSIRO:図中の棒グラフ)と比較して、現地データに基づく我々の推計結果(図中面グラフ)は変化がより多く、経済発展の初期段階、すなわち物質ストックを



図(2)-6 バングラデシュの資源生産性(左)と建築向けIn-Use Stock の変化(右) 図(2)-1



図(2)-7 ラオスのDomestic Extractionの推移

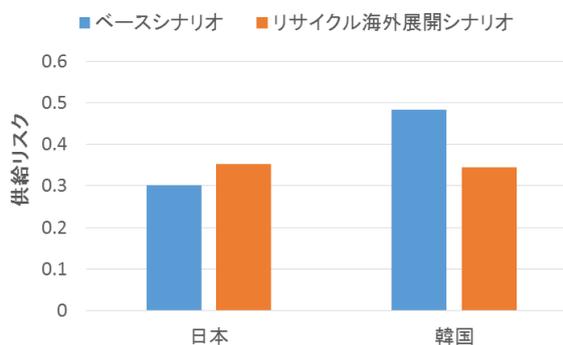
積み上げる段階にある国家については、詳細な勘定をかなりの頻度で行うべきであることを改めて確認した。

(2) 資源の価値の評価手法

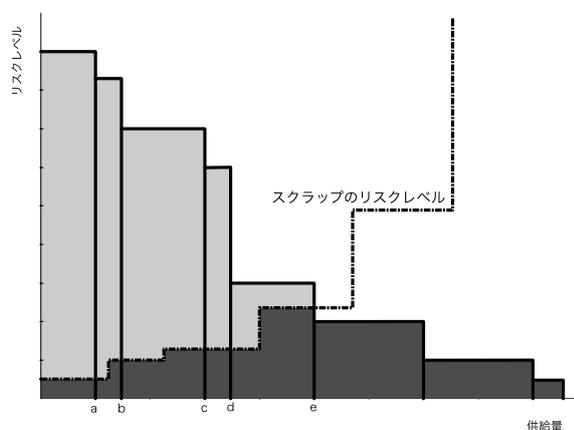
[A]のCriticalityについて、物質フローデータの整理からは、銅の天然資源に関する国際取引の中での我が国の相対的な立場が中国の台頭に伴い弱くなっていることを確認した。ただし、鉱山の保有関係など、供給リスクに大きく影響する部分を検討すると、実際には我が国のサプライチェーンは複数鉱山に対する権益の保有などによってある程度改善していることも明らかになった。これは我が国の資源政策と整合的なものである。この分析の中に循環資源を取り入れることで、その効果を定量的に捕捉することとし、具体的には鉱物資源のリサイクルによる供給リスク低減効果の評価モデルとして、エージェントシミュレーションによるモデルを構築した。このモデルでは2012年初の供給構造を初期状態とし、まず標準的なパラメータを用いて2年間のシミュレーションを実施、現実が反映できることを確認したのち、2つのシナリオ分析を実施した。一つは日本が海外へのスクラップ流出などを止めるべく、国内低品位銅スクラップの積極利用を図るシナリオ(a)、もう一つはより積極的な促進策として、アジア諸国からのスクラップ輸入を図るシナリオ(b)の二つを用意した。まずシナリオ(a)においては、低品位スクラップの国内消費規模を徐々に変化させたところ、リスク低減効果の非常に大きい規模があることが分かった。その理由は、非常にリスクの高い輸入天然資源が二次資源によって代替されるまでの規模であれば、リサイクル促進は非常に効果的であることがわかった。これ以降は、天然資源のリスクがさほど高くないために、効果は薄まる。ある意味これをよりわかりやすく示したのがシナリオ(b)である。図(2)-8

に示したように、我が国の銅資源供給リスクはむしろ高まってしまっている。他方で、韓国で供給リスクが下がっていることが分かる。これは、我が国がアジア地域のスクラップを積極的に回収したため、アジア地域のスクラップが不足気味になった一方、我が国が輸入を止めた低リスクのチリなどからの天然資源が韓国に流れたために、我が国では高リスクの循環資源をわざわざ輸入し、低リスクの天然資源を捨てたことを意味している。やや極端なシナリオではあるが、供給リスクという意味においては、過剰なリサイクル促進は国内限定であっても意義は限定的であり、輸入については場合によっては逆効果であることを確認した。ストックの価値評価に反映するべき示唆としては、リサイクルの促進の効果はその規模に対して収穫一定ではなく、ある程度以上のレベルを超えれば必ずしも大きな価値は生まないことを示したことになる。

これを基に構築した枠組の概念図を図(2)-9に示す。天然資源を供給リスクの高い



図(2)-8 リサイクル促進(シナリオb)が製錬所レベルの供給リスクに与える影響

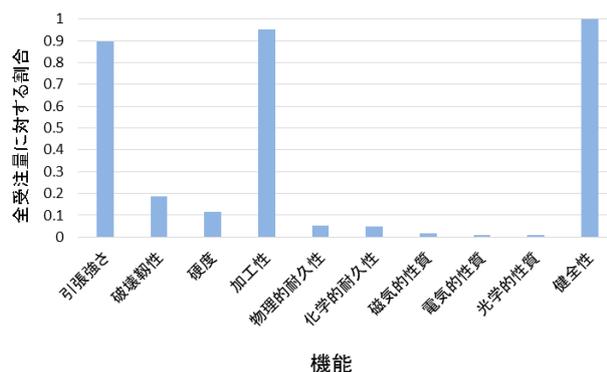


図(2)-9 リサイクルによるリスク削減効果

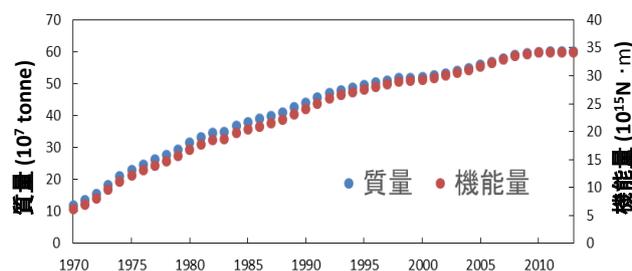
順に、スクラップをその逆に、それぞれ供給量を積み上げたある種のコスト曲線のようなものを描く。ここから天然資源を循環資源で代替して供給リスクを削減できる可能性は供給量eまでであること、また削減されたリスク量は図中の淡色部分であることが分かる。これを我が国の銅について2014年のデータを基に試算した結果、現状に対し更にリサイクル量を40%増加することで総供給リスクが9.02%削減されることが示された。つまり現状15.6万トンの銅スクラップが製錬所に投入されていることから、これに対して追加的に6.2万トンのスクラップを供給することの価値が9.02%のリスク削減であることが定量化された。

[B]の鉄鋼材の財としての価値評価手法開発の成果として、普通鋼の提供する物理的・工業的機能を網羅した結果を図(2)-10に示す。鉄鋼材は、外観ならびに内部組織の健全性が全量に要求されるとともに、ほとんどの鋼材において加工性ならびに引張強さが要求されていることがわかった。構造材としての利用が多いことと整合の取れる結果と考えられる。

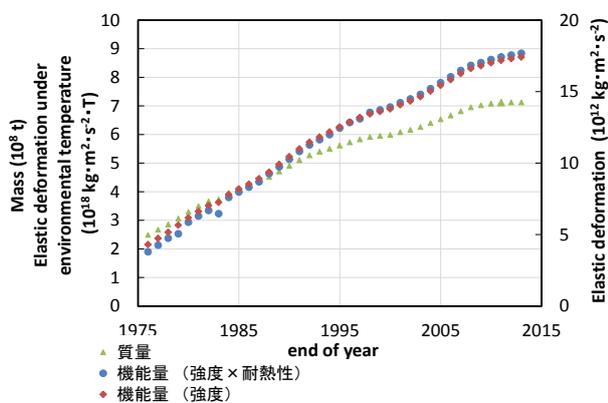
鉄鋼材の財としての価値評価手法の1つとして、示強性の指標である引張強さについて、材の体積を乗じることで示量性の機能量（引張機能量）に変換した。2013年の日本での普通鋼受注量 3.0×10^{13} gは、 1.5×10^{15} N・mと機能量により定量できた。日本における普通鋼ストック量が提供する引張強度における機能量の推移を推計した結果を図(2)-11に示す。2013年末時点の日本の社会において構造材として使用されている普通鋼が支持することができる力は、力の作用する方向での材の厚みが1mとすると、 3.4×10^{16} Nと定量された。これは、日本の国土全てに約10mの深さの水を貯めたときの水の荷重を支える機能に匹敵する。従来のMFSAの結果と同様に、質量基準での鉄鋼材ストック量とともに推移を同図にプロットした。これらは、技術開発によって鉄鋼材の高機能化は進んでいる一方で、汎用材として社会で用いられている鉄鋼材の強度は、大きく変わってこなかったことを示唆している。



図(2)-10 普通鋼の提供する機能種別受注割合



図(2)-11 日本における普通鋼の社会蓄積量が提供する引張強度における機能量の推移



図(2)-12 日本における鉄鋼材の社会蓄積量が提供する強度ならびに耐熱性を複合した強度における機能量の推移

他の鉄鋼材の財としての価値評価手法として、日本における鉄鋼材の社会蓄積量が提供する強度における機能量を、弾性変形域における最大吸収エネルギー量により評価した。その推移を推計した結果を図(2)-12に示す。2013年末時点の日本の社会において構造材として使用されている普通鋼が塑性変形せずに吸収できるエネルギー量は、 $1.7 \times 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} (= \text{J})$ と定量された。さらに、補助機能として耐熱性を考慮し、それぞれの環境温度における最大吸収エネルギー量を積分した結果も図(2)-12に示す。2013年末時点では、 $7.5 \times 10^{18} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{T}$ と定量された。従来のMFSAの結果と同様に、質量基準での鉄鋼材の社会蓄積量とともに推移を同図にプロットした。技術開発によって鉄鋼材の高強度化が進んでいることがわかり、耐熱性まで考慮すると、さらなる高機能化が進んでいることを示唆している。

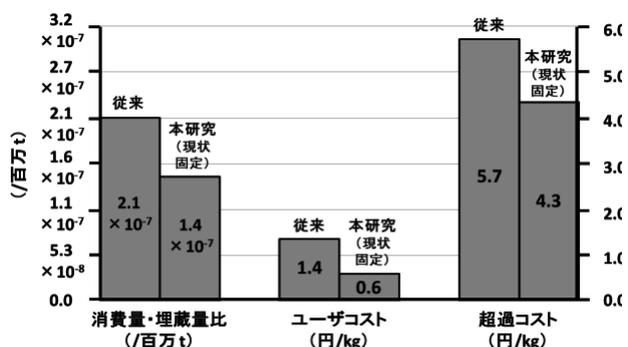
素材の価値評価手法は、同じ機能に対しても異なるアプローチがあることが確認できた。一方で、どの手法においても材料技術の開発によって社会で使用されている材が高機能化している様態が明らかにできることもわかった。

[C]の二次資源利用の側面からの価値評価については、まず既存のLCIAの特性化モデルとして、1)消費量・埋蔵量比、2)ユーザーコスト、3)超過コストの3つの手法を取り上げ、鉄および銅を対象として、二次資源

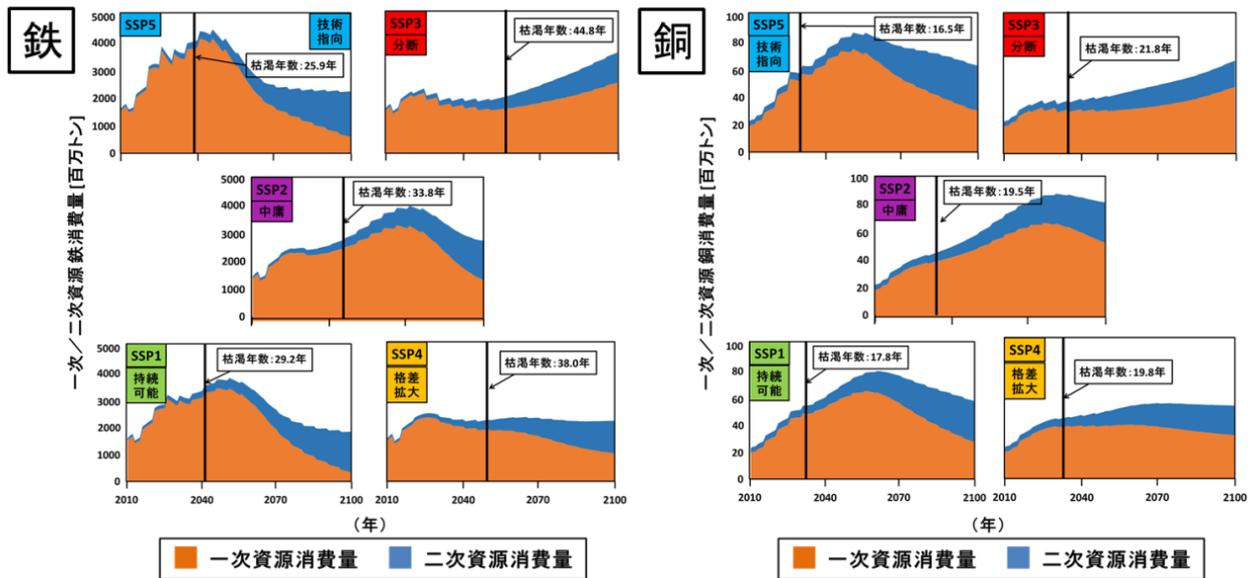
利用可能量を考慮した一次資源消費量を用いて特性化係数を算定した。二次資源の利用可能性の考慮による特性化係数の変化を見るために、将来需要およびリサイクル率を2012年の値で一定とし、一次生産と二次生産における歩留り率も一定とした現状固定シナリオにおける、鉄の特性化係数を算定した。鉄についての結果を図(2)-13に示す。

さらに、Shared Socioeconomic Pathways (SSP) の5つのシナリオごとに、2100年までの鉄および銅の一次資源消費量を推計した。その結果を図(2)-14に示す。それらのシナリオにおける鉄および銅の特性化係数を、上記の3手法で算定した結果を図(2)-15に示す。将来の一次資源消費量に影響を与える要因として、平成27年度には経済発展と用途別需要との関係のモデリングに基づく資源需要を予測した。

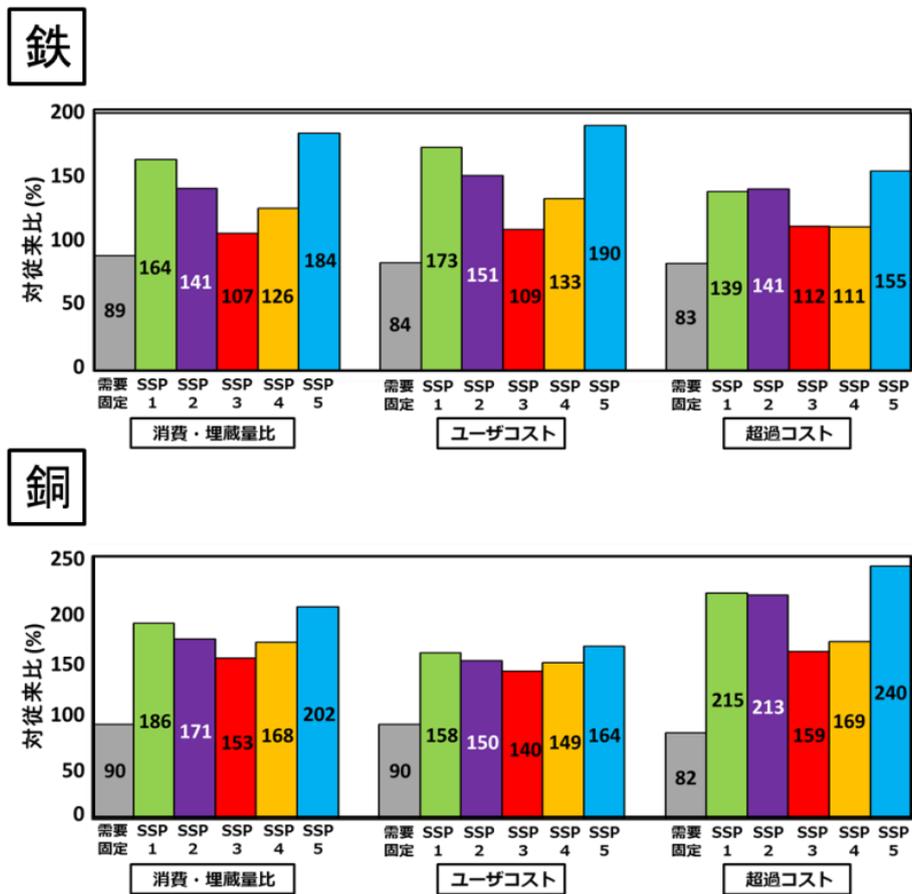
上記の超過コストによる特性化係数の算定結果の応用から、資源ストックの価値（二次資源利用による将来の採掘費用増加の緩和）を算定した。まず、図(2)-16の左グラフは、鉄についてSSP2シナリオにおける世界全体の一次資源消費量の将来予測（黒部分）と、それに対して現在の日本の資源ストックからの二次資源利用があった場合（リサイクル率は現在と同水準と仮定）、どのくらい一次資源消費が削減されるか（赤部分）を示している。図(2)-16の右グラフは、二次資源利用がない黒部分+赤部分の総消費量をもとにした総超過コスト[\$]と、二次資源利用がある黒の総消費量をもとにした総採掘コスト[\$]を示している。これらの差分である赤部分が、現在の日本における鉄の資源ストックの価値を表しており、約30兆円（SSP2シナリオの場合）と試算された。



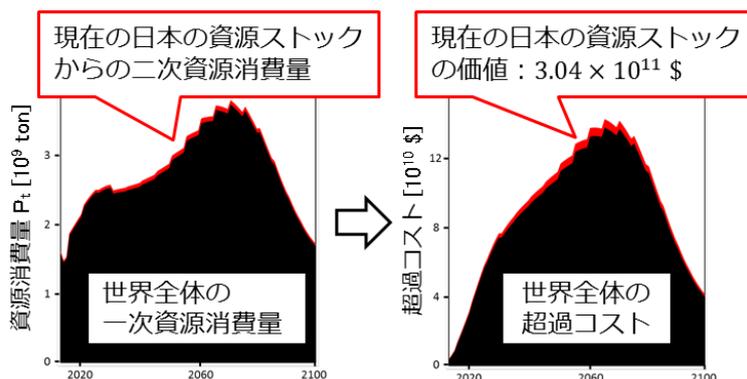
図(2)-13 従来法と本研究による鉄の特性化係数の比較（現状固定シナリオ）



図(2)-14 世界全体（2100年まで）の鉄および銅の一次資源消費量の推計結果



図(2)-15 3つの手法による鉄および銅の特性化係数の算定結果



図(2)-16 世界全体の一次資源消費量の将来予測に対する日本の資源ストックからの二次資源消費量の寄与と超過コストの概念に基づく価値（鉄のSSP2シナリオの事例）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

産業連関表を活用した物質フロー・ストック分析研究は国内外で盛んであるが、他国ではほとんど整備されていない固定資本形成マトリクスに着目し、これを活用して物的資源の時系列的な社会蓄積量を定量化したことは、世界的にも前例のない成果であり、科学的にも大きな意義を持つものと言える。バングラデシュにおける資源蓄積の定量化の試みは、余り先進国では対象とされない物質種（レンガや泥）などを対象とするという意味で新しいものであり、今後マテリアルフロー分析を発展途上国に展開する上でのベンチマークとなり得る。基盤材料に関して、その消費先用途を耐久消費財と資本財に区別する1つの手法を提案した。資源ストックの価値について複数の側面から整理し、供給リスク低減効果および構造材料の提供する機能量の定量化手法と、二次資源の利用可能性に基づく価値評価手法を提案した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

物質フロー・ストック分析による蓄積先・資本財・部材別の社会蓄積量の推計結果は、潜在的な二次資源および廃棄物としての正負両面から、資源循環政策のための基盤となる情報として有用であると言える。とりわけ、第3次循環型社会形成推進基本計画における指標の今後の検討課題として、物質のフローに加え、社会に蓄積されるストックの状況を把握していくことが重要であることが謳われており、第4次計画への改訂に際しての活用が見込まれる。

資源の安定供給に資すると言う意味においてリサイクルを促進すべき程度を定量化したことは、資源政策と廃棄物・リサイクル政策を繋ぐ一つの重要な成果になると言える。G7エルマウサミットを契機として、資源効率性の向上が世界的な重要課題として認識され、その評価手法の開発が急務である中、素材が持つ機能の観点からの価値評価の手法や成果は、資源効率性を評価する際の、資源の供する便益（分子）の定量化に貢献することが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 舟田享史、醍醐市朗、後藤芳一：開発技術，21，1-13，（2015）
「鉄鋼材ストック・フローに着目した日本の高度経済成長期における需要量変遷の分析」
- 2) 進藤暁俊，村上進亮，山富二郎：Journal of MMIJ, Vol. 131 (10,11), 559-566, (2015).
「銅供給構造の変遷の分析-企業ネットワークからのアプローチ」
- 3) 小泉裕靖、中谷隼、森口祐一，土木学会論文集G（環境），72（6），II_249-256，2016
“東京都における木造建築物のフロー・ストックの時系列的変化に関する研究”
- 4) 醍醐市朗、大木慧、後藤芳一．開発技術 22，89-100，2016.
“主成分分析による経済の発展に伴う鉄鋼材の需要変遷モデルの構築”
- 5) Ichiro Daigo, Leo Fujimura, Hideo Hayashi, Eiji Yamasue, Satoshi Ohta, Tran Duc Huy, Yoshikazu Goto. ISIJ Int. 57(2), 2017.
“Quantifying the total amounts of tramp elements associated with carbon steel production in Japan”
- 6) Ichiro Daigo, Kohei Iwata, Masahiro Oguchi, Yoshikazu Goto. Procedia CIRP (in press) 2017.
“Lifetime distribution of buildings decided by economic situation at demolition : D-based lifetime distribution”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 森口祐一、谷川寛樹：環境科学会誌、27, 6, 402-406(2014)
物質フロー研究から物質ストック研究への展開（2014年学術賞記念シンポジウム）
- 2) 醍醐市朗：日本LCA学会誌、11, 1, 66-67（2015）
「今さら人に聞けないLCA講座(6) マテリアルフロー分析は何ができるの？」
- 3) Ichiro Daito: Steel Construction: Today & Tomorrow No. 46, Dec. 2015, pp. 9-12, (2015)
“Material Stock and the End-of-life Recycling Rate of Steel”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 醍醐市朗：環境科学会2014年会，つくば，18-19 Sep. 2014.
「物質ストック分析の意義と鉄鋼材のフロー・ストック分析」
- 2) 村上進亮：環境科学会2014年会，つくば，18-19 Sep. 2014.
「クリティカリティ：地下と地上の資源ストックの評価」

- 3) 森口祐一：環境科学会2014年会、つくば、18-19 Sep. 2014.
「物質フロー研究の発展－国際的な相互作用と政策との相互作用」
- 4) 醍醐市朗：日本鉄鋼協会 第168回秋季講演大会，名古屋， 24-26.Sep. 2014.
「素材による環境負荷削減貢献量の評価」
- 5) 松橋諒、醍醐市朗、後藤芳一：日本鉄鋼協会 第168回秋季講演大会，名古屋， 24-26.Sep. 2014.
「持続可能な素材の用途シェア最適化」
- 6) S. Murakami, T. Komatsu, H. Tanikawa, M. Hossain and R. Koide: 11th International Society for Industrial Ecology (ISIE), Socio-Economic Metabolism section conference and the 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, 17-19 November 2014
“Resource Decoupling in Developing Country –economy wide Material Flow Analysis of Bangladesh–“
- 7) I. Daigo, K. Iwata, M. Oguchi, Y. Goto: 11th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 4th ISIE Asia-Pacific conference, Melbourne, Australia, 17-19 November 2014
“Characteristics of observation year based distributions – time-series change of building lifespan in Japan –“
- 8) S. Nakanishi, J. Nakatani and Y. Moriguchi: The 11th International Conference on EcoBalance, Tsukuba,
”Framework and Applications of Time-Series Material Flow and Stock Analysis”
- 9) I. Daigo, K. Iwata and Y. Goto : EcoBalance 2014, Tsukuba, Japan , 28-30 October 2014
“Comparison of End-of-Life Recycling Rates of Common Metals in Japan.”
- 10) 横井峻佑、中谷隼、森口祐一：第10回日本LCA学会研究発表会、神戸、9-11. Mar. 2015.
「二次資源の利用可能性を考慮した鉱物資源消費の将来シナリオ別特性化係数の算定」
- 11) 中西翔太郎、中谷隼、森口祐一：第10回日本LCA学会研究発表会、神戸、9-11. Mar. 2015.
「固定資本・耐久消費財の適正管理に向けた時系列的物質フロー・ストック分析」
- 12) 松井大輔、醍醐市朗、後藤芳一：第10回日本LCA学会研究発表会、神戸、9-11. Mar. 2015.
「機能に着目した材料使用量の評価手法の構築」
- 13) 舟田享史、醍醐市朗、後藤芳一：第10回日本LCA学会研究発表会、神戸、9-11. Mar. 2015.
「鉄鋼材ストック・フローに着目した需要量の変遷する要因の分析」
- 14) 松橋諒、醍醐市朗、後藤芳一：第10回日本LCA学会研究発表会、神戸、9-11. Mar. 2015.
「循環型社会を目指した鉄鋼材リサイクルシステムの構築」
- 15) 藤村怜央、醍醐市朗、後藤芳一：第10回日本LCA学会研究発表会、神戸、9-11. Mar. 2015.
「鉄鋼材のストック量と提供するサービス量の時系列分析」
- 16) I. Daigo: The 9th conference on society and materials. Luxembourg. 11-12 May, 2015
“Resource conservation and material recycling. “
- 17) Moriguchi, Y. , Hashimoto, S.: International Society for Industrial Ecology 2015 Conference, Surry, 7-10 July 2015
“Material Flow Analysis and Waste Management”

- 18) I. Daigo, N. Sekine and Y. Goto: International Society for Industrial Ecology 2015 Conference, . Surry, . 7-10 July 2015
 “Structure of conditions for recycling from urban mine.”
- 19) I. Daigo : Workshop on steel stock, Shenyang, Liaoning, China, 24 Oct. 2015
 “Dynamic change of material flow and cyclic use of steel.”
- 20) 松井大輔、醍醐市朗、後藤芳一：日本鉄鋼協会 第170回秋季講演大会，福岡，16-18. Sep. 2015, PS-18
 「引張機能量による普通鋼需要量の評価手法の構築」
- 21) 醍醐市朗：日本鉄鋼協会 第170回秋季講演大会，福岡，16-18. Sep. 2015
 「ライフサイクル思考に基づく鉄鋼材料の社会的価値を高める10の方策」
- 22) 小西紘平、村上進亮：環境科学会2015年会、シンポジウム-4（2015年9月）
 「リサイクルの拡大が資源の供給構造全体に及ぼす影響」
- 23) 松井大輔、醍醐市朗：環境科学会2015年会、シンポジウム-4（2015年9月）
 「引張機能量による普通鋼ストック量の評価手法の構築」
- 24) 横井峻佑、中谷隼、森口祐一：環境科学会2015年会、シンポジウム-4（2015年9月）
 「将来需要と二次資源の利用可能性を考慮した鉱物資源消費の特性化」
- 25) 横井峻佑、中谷隼、森口祐一：第11回日本LCA学会研究発表会、柏，千葉，D2-19. Mar. 2016.
 「将来の需給変化を考慮した鉱物資源消費の特性化係数の算定－鉄と銅の比較分析」
- 26) 鶴房佑樹、中谷隼、森口祐一：第11回日本LCA学会研究発表会、柏，千葉，B2-07. Mar. 2016.
 「災害廃棄物の発生量推計のための地域別物質ストック分析」
- 27) 松井大輔、醍醐市朗、後藤芳一：第11回日本LCA学会研究発表会、柏，千葉，B2-02, 2-4. Mar. 2016.
 「物質のライフサイクルを通じた機能と機能量の評価手法の構築」
- 28) 大木慧、醍醐市朗、後藤芳一：第11回日本LCA学会研究発表会、柏，千葉，D2-09, 2-4. Mar. 2016.
 「主成分分析による用途別鉄鋼材需要量の時系列変化の分析」
- 29) 醍醐市朗、畑山博樹、中島謙一、山末英嗣、松八重一代、小林能直：第11回日本LCA学会研究発表会、柏，千葉，P2-32, 2-4. Mar. 2016.
 「素材の社会的価値評価のための枠組みの検討」
- 30) Ichiro Daigo, Hiroki Hatayama, Kenichi Nakajima, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Yoshinao Kobayashi. Rome, Italy. 9-10 May, 2016
 “Framework for expressing social value of TETSU”
- 31) 松井大輔、醍醐市朗、後藤芳一．日本鉄鋼協会 第 171 回春季講演大会 ， 2016 年 3 月 23-25 日，東京， PS-36
 「持続可能な開発に向けた普通鋼が提供する機能に着目した指標開発」
- 32) 吾妻優美、醍醐市朗、後藤芳一．日本鉄鋼協会第 172 回秋季講演大会，2016 年 9 月 21-23 日，大阪， PS-12
 「金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築」
- 33) 河村洋佑、醍醐市朗、後藤芳一．日本鉄鋼協会第 172 回秋季講演大会，2016 年 9 月 21-23 日，大阪， PS-15

- 「材料需要量の時系列変遷モデルの構築」
- 34) 木村将志、醍醐市朗、後藤芳一、日本鉄鋼協会第172回秋季講演大会，2016年9月21-23日，大阪，PS-16
「鉄鋼スラグを含めた酸化物系セラミックスからグラスウールへの循環利用システムの構築。」
- 35) 中駄将人、醍醐市朗、後藤芳一、畑山博樹。日本鉄鋼協会第172回秋季講演大会，2016年9月21-23日，大阪，PS-
「資源のクリティカリティ評価手法の構築」
- 36) 松井大輔、醍醐市朗、後藤芳一。日本鉄鋼協会第172回秋季講演大会，2016年9月21-23日，大阪，PS-74
「機能量による鉄鋼材料の資本評価手法の構築」
- 37) Ohta S., Daigo I., Sato Y., Nakajima K. and Goto Y.. ISIE AP-SEM 2016, Nagoya, Japan, 28-30 September 2016
“Identifying unintentionally mixed impurities in EAF steel using WIO-MFA”
- 38) Oguchi M., Tasaki T., Daigo I., Cooper T., Cole C. and Gnanapragasam A.. ISIE AP-SEM 2016, Nagoya, Japan, 28-30 September 2016
“Expected product lifetimes of consumer durables –Do product lifetimes meet consumers’ expectations?”
- 39) Matsui D., Daigo I. and Goto Y.. EcoBalance 2016, Kyoto, Japan, 3-6 October 2016, 83
“Evaluation method of function and functionality-wise quantity performed by materials thorough their life cycle”
- 40) Ohta S., Daigo I. and Goto Y., EcoBalance 2016, Kyoto, Japan, 3-6 October 2016, 83
“Functionality-wise evaluation method based on MIPS: A case study on frame structures”
- 41) Daigo I. Okada T., Okamoto D. and Goto Y., EcoBalance 2016, Kyoto, Japan, 3-6 October 2016
“An Element-Based Optimization for Recycling of Waste Glass and Ceramic Materials”
- 42) 中駄将人、醍醐市朗、後藤芳一、畑山博樹、第12回日本LCA学会研究発表会，2017年3月1-3日，つくば
「生産資源の安定的供給に向けたクリティカリティ評価手法の構築」
- 43) 吾妻優美、醍醐市朗、後藤芳一、第12回日本LCA学会研究発表会，2017年3月1-3日，つくば
「金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築」
- 44) 河村洋佑、醍醐市朗、後藤芳一、第12回日本LCA学会研究発表会，2017年3月1-3日，つくば
「提供サービスに基づいた物質ストック変遷の分析」
- 45) Yamamoto H. and Shinsuke M., ISIE AP-SEM 2016, Nagoya, Japan, 28-30 September 2016
“Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal”
- 46) Xaysackda V. and Shinsuke M., ISIE AP-SEM 2016, Nagoya, Japan, 28-30 September 2016
“Material Flow Analysis for Sustainable Resource Use in Lao PDR: the Potentials and

Challenges”

- 47) 高橋裕也、村上進亮、第12回日本LCA学会研究発表会、2017年3月1-3日、つくば
「供給障害事象に基づく鉱物資源の供給リスク指標開発」
- 48) Yuichi Moriguchi, ISIE AP/SEM 2016, Nagoya, Japan, 28-30 September 2016
“Science-policy interface in Material Flow Analysis – Lessons from Japanese and international activities –“
- 49) Ryosuke Yokoi, Jun Nakatani, and Yuichi Moriguchi, EcoBalance 2016, Kyoto, Japan, 3-6 October 2016
“Calculation of Characterization Factors of Mineral Resource Consumption Considering Future Supply and Demand Changes –A Comparison between Iron and Copper–“

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 醍醐市朗「鉄鋼材の社会的価値の再考」日刊産業新聞 2015年9月7日(月)3面
- 2) 醍醐市朗「鉄鋼材の社会的価値評価の再考」日刊産業新聞 2015年9月24日(木)2面
- 3) 醍醐市朗「鉄鋼材はリサイクル優等生 第1回 鉄鋼材の蓄積量」日刊産業新聞 2015年10月20日(火)4面
- 4) 日刊産業新聞 2016.10.24(8面) 醍醐市朗: MONDAY INTERVIEW 『鉄スクラップの在り方』

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない

(3) ストック指標体系の構築

立命館大学

理工学部

環境システム工学科

橋本 征二

平成26～28年度累計予算額：13,970千円（うち平成28年度：4,500千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究は、①ストック指標体系の提案と物質ストック推計モデルの構築を行うとともに、提案する指標体系のうち2つの指標を取り上げ、②建設物を対象とした「蓄積物質使用効率」の定義とその経年変化の試算・分析、③金属を対象とした「二次埋蔵量」の試算を行った。①については、物質ストックの総量の計測に加え、物質ストックの使用価値、使用効率、資源価値などを計測することが重要と考え、これらを計測する指標の候補を整理し、体系の素案を作成した。また、②③の検討に用いることを視野に、ポピュレーションバランスモデルを用いた物質ストック推計モデルを構築した。②については、14の建設物を対象に「蓄積物質使用効率」指標を定義するとともに、道路、鉄道、下水道、住宅を対象にこれを適用した。その結果、例えば、住宅の蓄積物質使用効率は一貫して減少していること、その原因が世帯人数の減少や住宅の非木造化に起因すること等を示した。また、ノルウェーの住宅と比較すると、世帯人数や住宅の規模は日本の住宅の蓄積物質使用効率を良くする方向に寄与していること、住宅の寿命が日本の住宅の蓄積物質使用効率を大きく下げていること等を示した。③については、銅、アルミニウム等を対象に「二次埋蔵率」指標の推計を試みた。このため、経済社会に蓄積された金属のうち経済的に回収可能な二次資源の比率、すなわち、二次埋蔵率という概念を導入した。推計の結果、例えば、銅の二次埋蔵量は米国、中国が大きく、それぞれ44Mt、33Mtと推計された。両国については、両国が所有する一次埋蔵量より二次埋蔵量の方が大きいという推計結果であり、今後は二次埋蔵量の管理がより重要になるものと考えられた。また、世界全体で見ると、銅の二次埋蔵量は一次埋蔵量の約30%と推計された。①②③を通じて、ストック指標体系の素案を提案し、2つの指標の適用可能性を示した。

[キーワード]

ストック型社会、物質フロー・ストックモデル、指標、効率指標、埋蔵量

1. はじめに

物質フローに関する指標は、これまで産業エコロジー等の分野でその開発・標準化が行われてきた。日本の循環型社会形成推進基本計画においても、日本の物質フローをもとにした物質フロー指標が採用され、計画の進捗評価に活用されている。しかし、物質フロー指標では、経済社会に蓄積する物質ストックの活用状況を表現できず、ストック型社会へ向けた評価が行いにくいと

いった指摘がある。第三次循環型社会形成推進基本計画においても、「我が国に蓄積されている資源のストックに関する指標」が今後の検討課題の一つとして挙げられおり、「今後、ストック型社会の形成を促していく観点から、ストックの区分に係る整理を進めるとともに、我が国に蓄積されているストックの種類毎の蓄積量、その利用価値等に関する指標について、検討を進める。」としている。

2. 研究開発目的

本研究では、上記の研究背景を受け、ストック指標体系の提案を行うとともに、いくつかの新しい指標についてその適用を行うことを目的とする。具体的には、①ストック指標体系の提案とストック推計モデルの構築を行うとともに、提案する指標体系のうち2つの指標を取り上げ、②建設物を対象とした蓄積物質使用効率の定義とその経年変化の試算・分析、③金属を対象とした二次埋蔵量の試算を行った。なお、①のモデル構築は、サブテーマ1と連携して行った。

3. 研究開発方法

(1) ストック指標体系の提案と物質ストック推計モデルの構築

ストック指標体系の提案については、物質ストックの総量の計測に加え、物質ストックの使用価値、使用効率、資源価値などを計測することが重要と考え、これらを計測する指標の候補を整理し、体系の素案を作成した。

物質ストック推計モデルの構築については、サブ1と連携してシステムダイナミクスを用いたモデルを構築した。具体的には、ポピュレーションバランスモデルを用いて物質ストックを推計するモデルであり、永久構造物や散逸的利用物、すなわち、寿命を持たない物質（廃棄されることがない物質）を区別したモデルとなっている。これを(2)においていくつかの建設物、(3)においていくつかの金属に適用した。

(2) 建設物を対象とした蓄積物質使用効率の定義とその経年変化の試算・分析

(1)で整理した指標のうち、蓄積物質使用効率について、建設物を対象に指標の定義を行った。具体的には、建設工事着工統計調査、公共工事着工統計調査、建設工事受注動態統計調査等の調査分類を参考に、建設物を14のグループに分類し、これらの建設物を対象とした。蓄積物質使用効率（蓄積物質が発揮している機能／蓄積物質質量）を稼働率（蓄積物質が発揮している機能／蓄積物質がもつ潜在的な機能）と蓄積物質潜在使用効率（蓄積物質がもつ潜在的な機能／蓄積物質質量）のかけ算に分解し、14の建設物のそれぞれについて、蓄積物質が発揮している機能および蓄積物質がもつ潜在的な機能の定義を試みた。

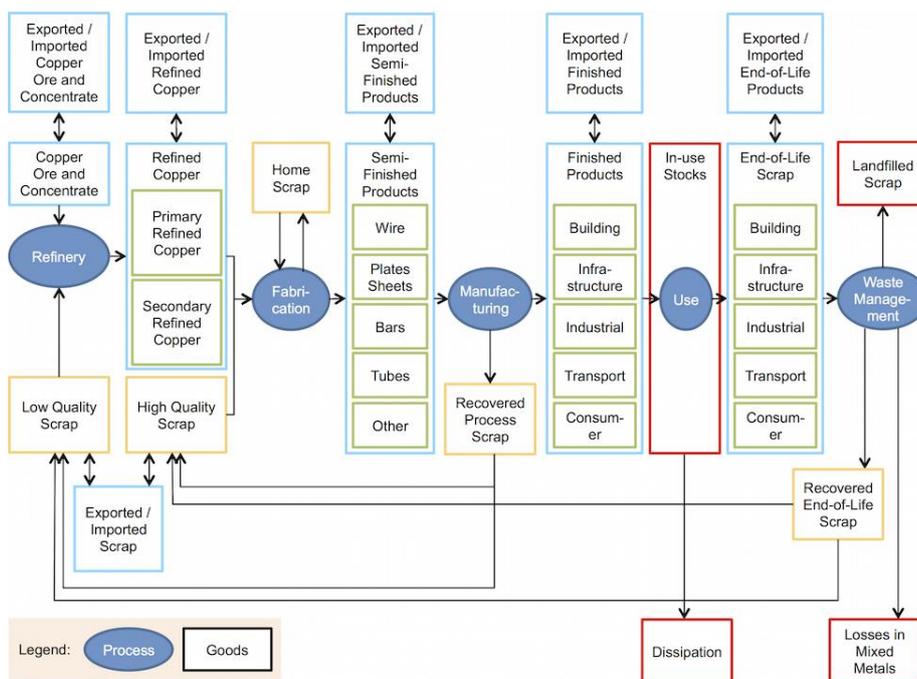
また、道路、鉄道、下水道、住宅を対象に蓄積物質質量及び蓄積物質使用効率を時系列で試算し、蓄積物質利用効率の時系列変化の要因について分析した。道路、鉄道、下水道については、上述のように稼働率（蓄積物質が発揮している機能／蓄積物質がもつ潜在的な機能）と蓄積物質潜在使用効率（蓄積物質がもつ潜在的な機能／蓄積物質質量）の変化が蓄積物質利用効率の変化に与える影響と分析した。また、住宅については、前者を「居住人口／総延床面積」で定義し、これを

さらに3つの項「居住人口／使用住宅数」「使用住宅数／総住宅数」「総住宅数／総延床面積」に分解して時系列変化の要因を分析した。なお、これらの項はそれぞれ、住宅の共有状況（≒世帯人数）、住宅の稼働率、住宅の規模（の逆数）を表している。

住宅については、そのインプリケーションをさらに議論するため、日諾間の比較検討を行った。また、既存の分析では蓄積物質を長期間利用しようが短期間で更新しようが「蓄積物質利用効率」は影響を受けないなど、ストック利用における時間の概念を含まなかったことから、蓄積物質の滞留時間を考慮した「調整蓄積物質利用効率」を開発し、日諾の住宅に適用した。具体的には、住宅のライフサイクルで機能を発揮する蓄積物質をその期間の各年に配分することで、特定の年に存在する住宅に着目して「蓄積物質利用効率」を計測することを考えた。

(3) 金属を対象とした二次埋蔵量の試算

(1) で整理した指標のうち、二次埋蔵量について、銅、アルミニウム等を対象とした推計を試みた。具体的には、二次埋蔵量を推計するための係数として、経済社会に蓄積された金属のうち経済的に回収可能な二次資源の比率、すなわち、二次埋蔵率という概念を導入した。これは、二次資源として回収される老廃スクラップの量を推計される老廃スクラップ発生量で除すことで算出したものであり、年によって変化する値である。推計される蓄積物質質量にこの二次埋蔵率を乗じることで、二次埋蔵量を推計した。対象金属の蓄積物質質量及び二次埋蔵率を推計するために構築したモデルの概要は、図(3)-1のようなものである(図は銅の例)。なお、銅の推計には、ICSG(International Copper Study Group)、IWCC(International Wrought Copper Council)や国連貿易統計のデータ、また、アルミニウムの推計には、WBMS(World Bureau of Metal Statistics)や国連貿易統計、Liu and Muller(2013)のデータを用いた。

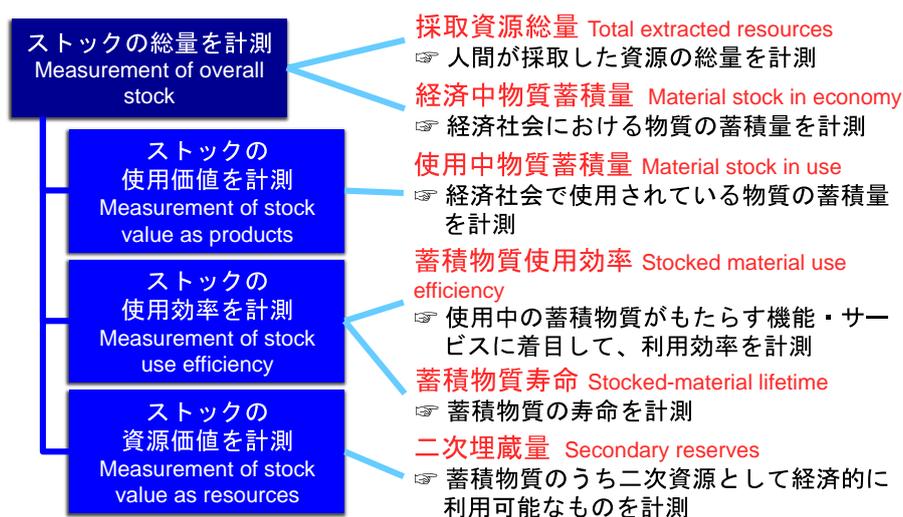


図(3)-1 銅の物質フロー・ストック推計モデルの構造

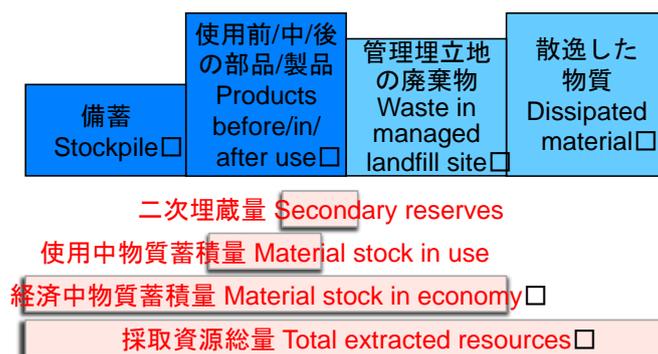
4. 結果及び考察

(1) ストック指標体系の提案と物質ストック推計モデルの構築

指標の概念整理については、図(3)-2に示すようなストック指標体系の素案を作成した。このうち、ストック量に関する指標が捉える範囲を示したものが図(3)-3である。まず、ストックの総量を計測する指標として、「採取資源総量」や「経済中物質蓄積量」が考えられた。前者は、採取した資源の総量を計測するものであり、図(3)-3に示すように使用後に環境中に「散逸した物質」も含まれる。これは、地球上に存在するストックのうち、人類が使用した総量を計測するものである。後者はこのうち、経済圏内に存在するストックである。これには、「管理された埋立地の廃棄物」も含まれる。なお、管理されなくなった埋立地に存在するストックは「散逸した物質」に分類される。次に、ストックの使用価値を計測する指標として、「使用中物質蓄積量」が考えられた。これは、経済圏内に存在するストックのうち、使用中のストックであり、その価値が使用されているストック量を計測するものである。したがって、図(3)-3に示される「使用前・使用後の部品・製品」は使用中ではないためこの量には含まれない。さらに、ストックの使用効率を計測する指標として、「蓄積物質使用効率」や「蓄積物質寿命」が考えられた。前者は、使用されている単位物質あたりに発揮している機能を計測するものであり、詳細は(2)において検討を行った。また、後者は蓄積物質が平均的にどのくらいの期間使用されるかを計測するものであり、その期間が長いほどその物質が効率的に使用されていることを意味するものである。最後に、ストックの資源価値を計測する指標として、「二次埋蔵量」が考えられた。これは、「使用前・中・後の部品・製品」や「管理された埋立地の廃棄物」のうち、経済的に回収可能な物質ストックの量を計測するものであり、一次資源の埋蔵量(一次埋蔵量)に対比させた概念である。詳細は(3)において検討を行った。



図(3)-2 ストック指標体系の素案



図(3)-3 各ストックの対象範囲

ストック推計モデルの構築については、研究開発方法に記したように、ポピュレーションバランスモデルを用いたモデルを構築した。永久構造物や散逸的利用物、すなわち、寿命を持たない物質（廃棄されることがない物質）を区別したモデルとなっている点が特徴である。ここでは詳述しないが、このモデルを以下の（２）（３）の推計に用いた。

（２）建設物を対象とした蓄積物質使用効率の定義とその経年変化の試算・分析

蓄積物質使用効率の定義については、以下のとおりとした。

$$\text{蓄積物質使用効率} = \frac{\text{蓄積物質が発揮している機能}}{\text{蓄積物質質量}} = \frac{\text{蓄積物質が発揮している機能}}{\text{蓄積物質がもつ潜在的な機能}} \times \frac{\text{蓄積物質がもつ潜在的な機能}}{\text{蓄積物質質量}}$$

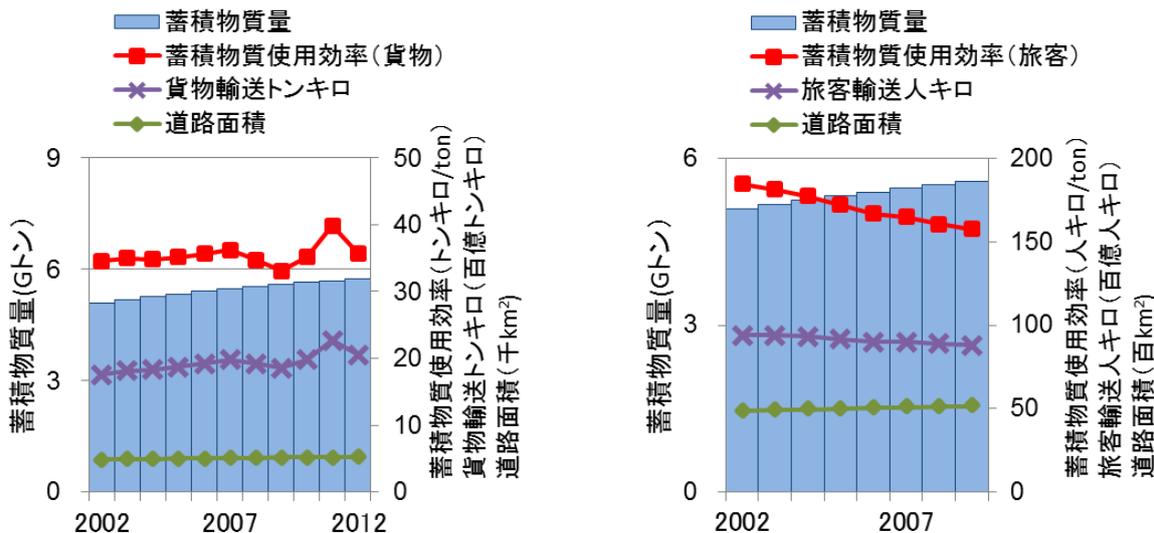
すなわち、蓄積物質が発揮している機能を蓄積物質質量で除したものを蓄積物質使用効率とする。これは、上式のように2項に構造分解できる。ここで、「蓄積物質が発揮している機能」とは、その蓄積物質が実際にどのくらいの機能を発揮しているかという値であり、「蓄積物質がもつ潜在的な機能」とは、その蓄積物質が潜在的にどのくらいの機能を持っているかという値である。2項の前者は、発揮している機能を潜在的な機能で除していることから、蓄積物質の稼働率を表現する項であり、後者は、潜在的な機能を蓄積物質質量で除していることから、蓄積物質の潜在的な使用効率を表現する項と考えられる。後者の逆数は、潜在的な機能あたりの蓄積物質質量であることから、機能あたりの物質使用強度を表すことになる。表(3)-1は、建設物を対象に発揮している機能、潜在的な機能の指標例をとりまとめたものである。例えば、住宅に使用されている蓄積物質がもつ潜在的な機能を表現するものとしては「延床面積」、蓄積物質が発揮している機能を表現するものとしては「居住人口」や「使用延床面積」が考えられる。後者が居住人口の場合は、稼働率（発揮している機能／潜在的な機能）の定義としては通常のものとは異なるが、ここでは、延床面積という潜在的な機能に対して、どれだけの人が居住しているかをもって稼働率と考えることとする。また、土地造成などは、機能を同定できていないが、これらについては、ケースバイケースで考える必要がある。

表(3)-1 建設物を対象とした機能指標の例

建設物		潜在的な機能	発揮している機能
建築物	住宅	延床面積(m ²)	居住人口(人)、使用延床面積(m ²)
	商業用等その他	延床面積(m ²)	売上(円)、使用延床面積(m ²)
土木構造物	治山・治水	災害被害削減予想額(円)	災害被害削減予想額(円)
	農林水産		売上(円)
	道路	輸送容量(台/日)、道路面積(km ²)	貨物輸送量(ton・km)、旅客輸送量(人・km)
	港湾・空港	輸送容量	貨物輸送量(ton)、旅客輸送量(人)
	下水道	処理能力(m ³)	処理量(m ³)
	公園・運動場	総面積(km ²)	利用者数(人)
	土地造成		
	鉄道軌道	輸送容量、総延長(km)	貨物輸送量(ton・km)、旅客輸送量(人・km)
	電気・ガス	発電能力(kW)、ガス供給能力(J)	発電量(kWh)、ガス供給量(J)
	郵政事業用施設		
	上・工業用水道	給水能力(ton)	給水量(ton)
	廃棄物処理	処理能力(ton)	処理量(ton)

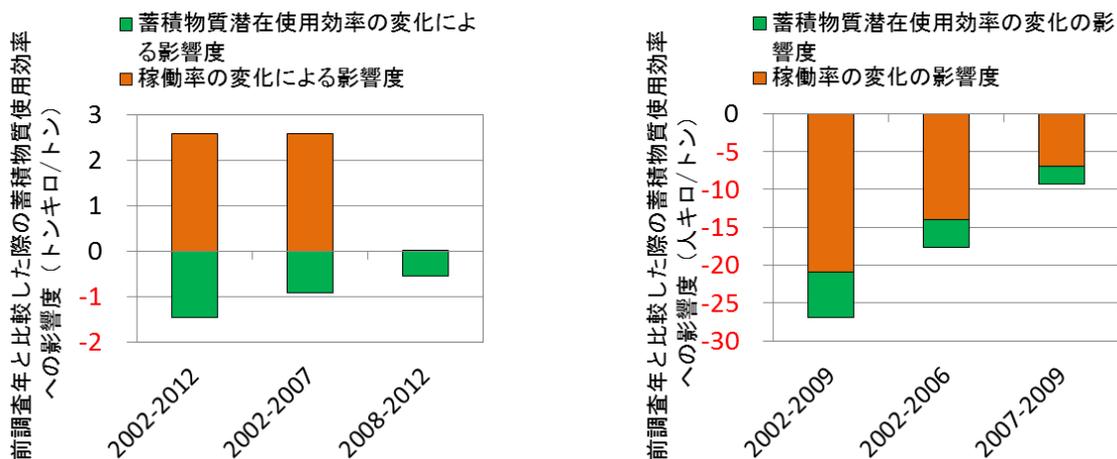
以下では、道路、鉄道、下水道、住宅を対象に蓄積物質量及び蓄積物質使用効率を試算した結果を示す。

道路については、図(3)-4に示す通り、蓄積物質量は増加傾向にあり、2012年には約57億トンと推計された。また、この蓄積物質量を元に蓄積物質使用効率を試算すると、図(3)-4に示す通り、発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合(a)には、2002年と2012年でそれぞれ34.6(トンキロ/トン)、35.7(トンキロ/トン)となり全体としてやや増加傾向、発揮している機能を旅客輸送人キロとした場合(b)には、2002年と2009年でそれぞれ185.0(人キロ/トン)、157.8(人キロ/トン)であり減少傾向となった。この要因を考察するため、蓄積物質の潜在使用効率及び稼働率の変化の影響を推計したものが図(3)-5である。ここで、道路の潜在的な機能は道路面積としている。また、図において各因子の影響が正の値を示す場合は、その因子の変化が蓄積物質使用効率を増加させることに貢献していることを意味し、逆に負の値を示す場合は、減少させることに貢献していることを意味する。発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合(a)には、稼働率の変化が蓄積物質使用効率を増加させることに、蓄積物質の潜在使用効率の変化が減少させることに貢献してきたと推計された。対象期間の前半(2002-2007)と後半(2008-2012)で見ると、後半期には稼働率の変化の影響がほとんどないと推計され、前半期の影響が大きかったと考えられる。稼働率の正の影響は、道路面積に対する貨物輸送トンキロが増加したということであり、道路の使用方法が効率的になったことが示唆される。逆に、蓄積物質の潜在使用効率の負の影響は、高速道路や橋梁等の増加によって、道路構造が重量化していることが原因と考えられる。また、発揮している機能を旅客輸送トンキロとした場合(b)には、蓄積物質の潜在使用効率の変化、稼働率の変化ともに蓄積物質使用効率を減少させることに貢献してきたと推計された。特に、稼働率の減少が蓄積物質使用効率の減少に大きく寄与しているが、これは図(3)-4に示すように、道路面積が増加する中で旅客輸送人キロが減少していることに起因する。



(a) 発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合 (b) 発揮している機能を旅客輸送トンキロとした場合

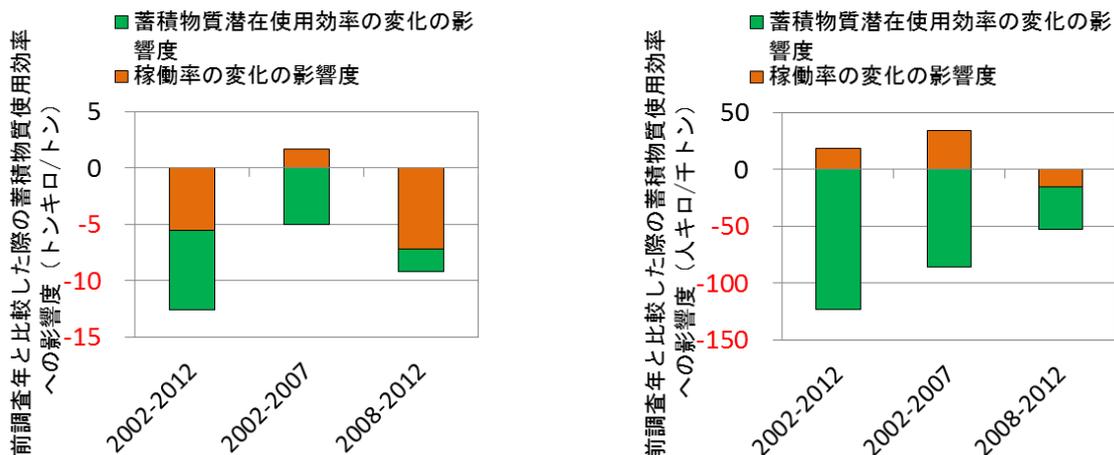
図(3)-4 道路の蓄積物質質量と蓄積物質使用効率



(a) 発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合 (b) 発揮している機能を旅客輸送人キロとした場合

図(3)-5 道路の蓄積物質使用効率の変化に対する各要因の影響

鉄道については、蓄積物質量は蓄積傾向にあり、2012年には約4.5億トンと推計された。また、発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合 (a)、旅客輸送人キロとした場合 (b) のいずれも、近年の蓄積物質使用効率は減少傾向にあると推計され、図(3)-6に示す通り、2002年から2012年の間の変化に対しては、蓄積物質の潜在使用効率の変化が負の影響を与えていると推計された。これについては、新幹線などに用いられる高架構造物や複線・複々線の増加などが要因として考えられる。また、発揮している機能を貨物輸送トンキロとした場合 (a) は、稼働率の変化が負に影響しているのに対し、発揮している機能を旅客輸送人キロとした場合 (b) は、正に影響していた。この間、貨物輸送トンキロは減少しているのに対し、旅客輸送人キロは増加しているためであるが、これを道路の結果と比較すると、逆の傾向となっている。



(a) 発揮している機能を貨物輸送トンキロとし (b) 発揮している機能を旅客輸送人キロとした場合

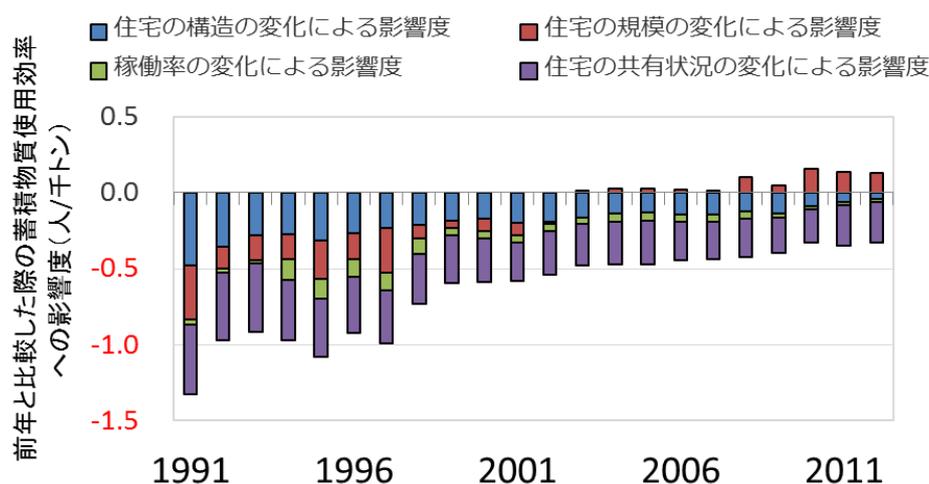
図(3)-6 鉄道の蓄積物質使用効率の変化に対する各要因の影響

下水道については、蓄積物質量は近年飽和傾向にあり、2012年には約7.7億トンと推計された。また、蓄積物質使用効率は2002年と2012年でそれぞれ17.7 (m³/トン)、16.9 (m³/トン) であり、やや減少傾向であった。対象期間内では、蓄積物質の潜在使用効率の変化が蓄積物質使用効率の減少に貢献していたが、これは下水道の管路延長によって、蓄積物質量あたりの処理能力が下がってきているためと考えられる。

住宅については、1990年の蓄積物質量は約33.9億トンであったが、2012年には約55.8億トンとなり、この20数年で約1.6倍に増加したと推計された。また、1990年の蓄積物質使用効率が37 (人/千トン) であったのに対し、2012年には23 (人/千トン) となり、約40%減少していることが示された。住宅については、先の構造分解式の第1項をさらに以下の3項に分解して蓄積物質使用効率の変化の要因を分析した。

$$\text{住宅の蓄積物質使用効率} = \left(\frac{\text{居住人口}}{\text{使用住宅数}} \times \frac{\text{使用住宅数}}{\text{総住宅数}} \times \frac{\text{総住宅数}}{\text{総延床面積}} \right) \times \frac{\text{総延床面積}}{\text{蓄積物質量}}$$

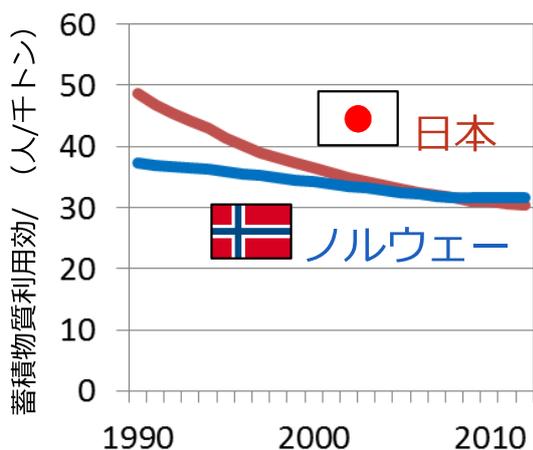
ここで、右辺第一項は住宅の共有状況 (≒世帯人数)、第二項は住宅の稼働率、第三項は住宅の規模 (の逆数)、第四項は住宅の構造 (物質使用強度の逆数) を主に表すことになる。図(3)-7に示す通り、1990年以降一貫して住宅の共有状況 (≒世帯人数) の変化が蓄積物質使用効率に負の影響を与えていると推計された。これは、一人暮らし等による世帯人数の減少が、蓄積物質の使用効率に大きな影響を与えてきたということである。また、住宅の構造の変化による影響が次に大きいと推計されたが、これは比較的軽量の木造の割合が減少し、重量なRC造やS造の割合が増加したことに起因する。一方、住宅の規模の変化は、1990年代は蓄積物質使用効率を減少させる方向に働いていたが、近年蓄積物質使用効率を増加させる方向に働いている。これは、マンションやアパートなどの増加により、平均的な住宅の規模が縮小傾向にあるためと考えられる。



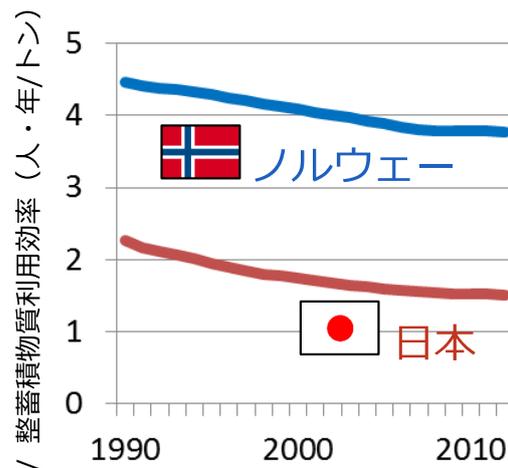
図(3)-7 住宅の蓄積物質使用効率の変化に対する各要因の影響

さらに、日諾における住宅の蓄積物質使用効率の推計結果を図(3)-8に示す。1990年の蓄積物質使用効率は日本がノルウェーよりも高い結果となったが、近年になるにつれてその差は小さくなり、2012年ではほぼ同値であると推計された。日諾ともに蓄積物質使用効率は減少しているものの、日本の減少率の方が高い結果となった。次に日諾間の蓄積物質使用効率の差の要因を分析するために、上述の各因子の日諾差が、蓄積物質使用効率の日諾差にどのように影響を与えているかを分析した結果を図(3)-9に示す。図より、ノルウェーと比較して日本の蓄積物質使用効率を増加させる要因は、住宅の共有状況および住宅の規模の違いであると推計された。日本の蓄積物質使用効率の時系列での減少要因は主に住宅の共有状況の減少であったが、ノルウェーと比較した場合、日本の共有状況はとむしろ高いと考えられる。しかし、住宅の共有状況の違いによる影響は近年小さくなってきており、これは日諾の平均的な世帯人数が近づいていることを示している。一方、ノルウェーと比較して日本の蓄積物質使用効率を減少させる要因は、住宅の構造および住宅の稼働率の違いであると推計された。ノルウェーは住宅の構造に関する統計情報が整備されていないが、総蓄積物質量に占める木材の割合はノルウェーの方が大きく、木造の比率が多いことが推察できる。

また、図(3)-10に日諾における住宅の調整蓄積物質使用効率の推計結果を示す。調整蓄積物質使用効率は、ノルウェーの方が日本よりも高い結果となり、ライフサイクルで見たときノルウェーの方が蓄積物質から長くサービスを引き出せていると考えられた。日諾とも調整蓄積物質使用効率は減少傾向にあるが、その相対的な差は開きつつあることも示唆された。

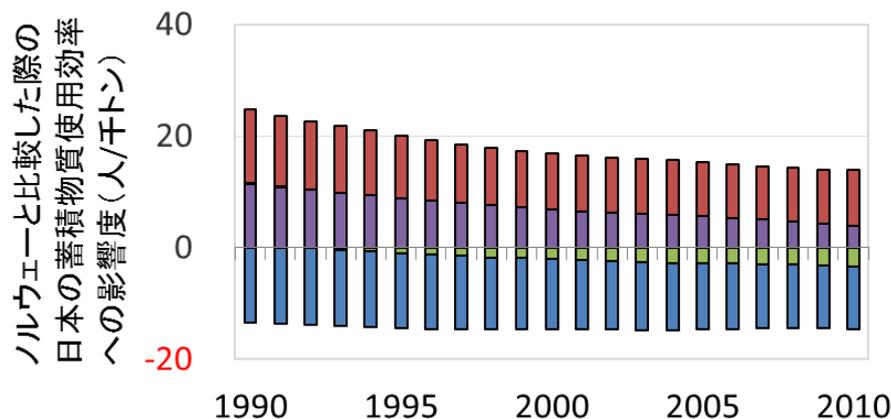


図(3)-8 日諾における住宅の蓄積物質使用効率の推移



図(3)-10 日諾における住宅の調整蓄積物質使用効率の推移

- 住宅の構造の差による影響度
- 住宅の規模の差による影響度
- 稼働率の差による影響度
- 住宅の共有状況の差による影響度

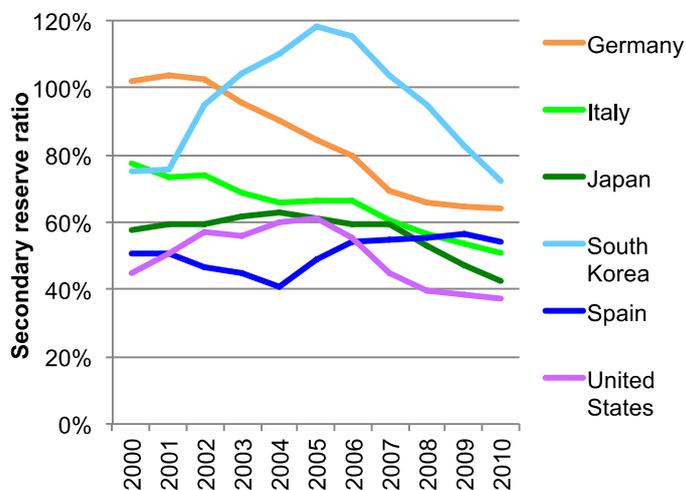


図(3)-9 日諾における住宅の蓄積物質使用効率の差の要因

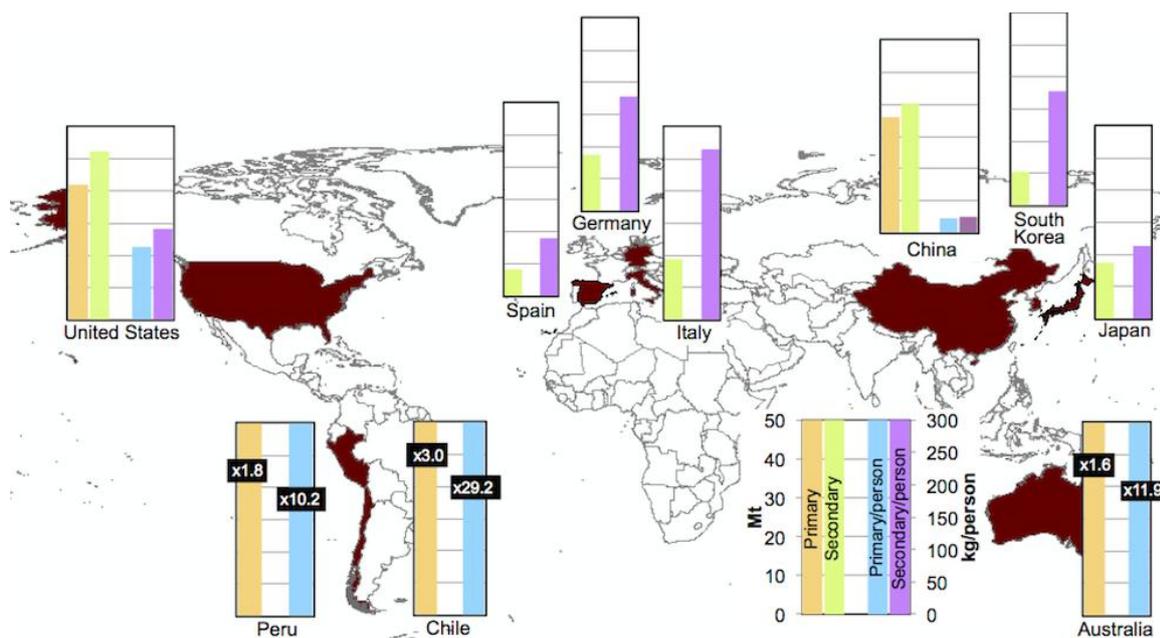
③金属を対象とした二次埋蔵量の試算

経済社会における銅の蓄積量(2010年)は、米国と中国が約70Mt)、日本、ドイツ、イタリアが約20Mtと推計された。特に、中国における蓄積量が1990年代から顕著に増加していることが示された。また、推計された二次埋蔵率の結果は年によってかなり変動する結果となったが、図(3)-11に示す3年移動平均値は既存研究と比較して概ね妥当な範囲になったことから、本研究では、二次埋蔵率についてこの値を用いて二次埋蔵量を推計した(100%を越える部分は80%と仮定)。これを一次埋蔵量(天然資源の埋蔵量)と合わせて示したものが図(3)-12である。チリ、ペルー、オーストラリアにおいて銅の一次埋蔵量が大きく、それぞれ150Mt、90Mt、80Mtとなっている。一方、銅の二次埋蔵量では米国、中国が大きく、それぞれ44Mt、33Mtと推計された。両国については、両国が所有する一次埋蔵量より二次埋蔵量の方が大きいという推計結果であり、今後は二次埋蔵量の管理がより重要になるものと考えられる。世界全体で見ると、その二次埋蔵量は一次埋蔵量の約30%と推計され、現状の二次埋蔵量の規模は一次埋蔵量よりも小さいが、二次埋蔵率(すな

わち使用済み製品の再資源化率)は高めることができる。再資源化率を高めることによって、二次埋蔵量の相対的規模を大きくしていくことも資源戦略上は重要と考えられる。



図(3)-11 銅の二次埋蔵率の推計結果



図(3)-12 銅の一次埋蔵量と二次埋蔵量の分布

経済社会におけるアルミニウムの蓄積量は、米国で約150Mt、中国で約95Mt、日本で約40Mt、また、その二次埋蔵量は、米国で約80Mt、中国で65Mt、日本で約30Mtと推計された。米国では、二次埋蔵量が一次埋蔵量を上まわっており、二次資源の活用も重要な資源政策として位置づける必要があると考えられる。銅に比べると、世界の一次埋蔵量に対する二次埋蔵量は僅かしかないが、二次アルミニウムは一次アルミニウムに比べてその生産に要するエネルギーがはるかに少ないことから、現状40~60%程度の二次埋蔵率をさらに高めていくことが求められる。

また、白金族について、データの利用制約から日本を対象とした推計を行った。白金族のうち

Pt、Pd、Rh(PPR)を対象として蓄積量を推計した結果、2000年をピークに減少傾向にあると推計された。これは、電子材に用いられるPdが2000年を機に他金属に代替されたためと考えられる。2015年におけるPPR蓄積量はPtで540t、Pdで375t、Rhで22tと推計された。また、一人当たりのPPR蓄積量は7.4g/人となった。さらに、過去10年のPPR二次埋蔵率の平均はPtとRhで32%、Pdで57%と推計された。Pdの二次埋蔵率の近年における上昇は、1990年代に多く生産されたPd触媒搭載の自動車がかここ数年で大量に廃棄されたためと考えられる。また、過去10年間の平均的な二次埋蔵率を用いて推計した2015年の二次埋蔵量はPtで174t、Pdで212t、Rhで7.1t、PPR合計で393tとなった。また、一人当たりの二次埋蔵量は3.1g/人と推計された。この二次埋蔵量は、2015年におけるPPRの国内総需要量85トンに約4年分賄える程度の量である。

なお、これらの結果は一次的な試算であり、値の確定には計算に用いたパラメータ等の改善を行っていく必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 本研究では、物質ストックの指標体系の素案を構築したが、このような検討は世界的にも例がない。物質ストックに関わる指標自体があまり議論されていないことから、今後、各指標の適用研究を通じて世界に発信していく予定である。
- ・ 本研究で事例として検討した「蓄積物質使用効率」は、物質フロー指標の「資源生産性」に対応させたものである。こうした検討事例は世界でも報告がなく、指標値の変化の要因の分析まで行った本研究は非常に先進的なものである。
- ・ 本研究で事例として検討した「二次埋蔵量」も、近年議論が活発になっている都市鉱山の考え方を反映したものであり、その適用は世界でも報告がない。後述する7. 研究成果の発表状況(1) 誌上発表の3番目の論文の査読過程でもその点が高く評価された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ・ 環境省が2016年度に設置した「循環基本計画分析・新指標検討ワーキンググループ」では、(1)第3次循環基本計画の進捗状況の点検・分析、(2)次期基本計画に向けた指標の検討、(3)次期循環基本計画の目標検討のためのモデル及び2030年・2050年の循環型社会の検討を行っているが、本サブ課題の研究担当者(橋本)は当該ワーキンググループに参画しており、研究プロジェクトで得られた知見や考え方を適時インプットした。第3回会合では、本研究プロジェクト及び関連する研究プロジェクトの進捗報告を20分行い、質疑応答を行った。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ 次期循環基本計画の策定に向けて、2017年度に指標の議論も本格化する。次期循環基本計画において、本サブテーマで提案する指標体系の全てを採用することは難しいとしても、いくつかの計測が不可能でない指標については、計測に向けた取り組みを進め、活用していくことが望ましいと考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 【協力案件名】住宅を対象とした蓄積物質使用効率の評価
 【カウンターパート氏名・所属・国名】 Daniel Muller教授・ノルウェー工科大学・ノルウェー、Havard Bergsdal研究員・Asplan Viak・ノルウェー
 【参加・連携状況】ノルウェーにおける住宅の物質ストックや使用効率評価に関わるデータを提供いただきつつ、住宅を対象とした蓄積物質使用効率の日諾比較に関する共同研究を行った。
 【国際的な位置づけ】ノルウェーは、欧州において、住宅の物質ストックに関するモデルが存在する国であり、その活用を意図した。
- 2) 【協力案件名】銅の二次埋蔵量の推計
 【カウンターパート氏名・所属・国名】 Mark Loveitt会長・International Wrought Copper Council (IWCC)・英国
 【参加・連携状況】銅の最終需要用途に関わるデータを提供いただくとともに、銅の二次埋蔵量の推計について共同研究を行った。
 【国際的な位置づけ】カウンターパートは銅の最終需要用途に関わる各国のデータを所有する唯一の機関である。
- 3) 【協力案件名】アルミニウムの二次埋蔵量の推計
 【カウンターパート氏名・所属・国名】 Daniel Muller教授・ノルウェー工科大学・ノルウェー、Gang Liu准教授・南デンマーク大学・デンマーク
 【参加・連携状況】アルミニウムの物質フローに関わるデータを提供いただくとともに、アルミニウムの二次埋蔵量の推計について共同研究を進めている。
 【国際的な位置づけ】カウンターパートは世界のアルミニウムの物質フローに関する研究の第一人者である。

7. 研究成果の発表状況（※別添.報告書作成要領参照）

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Wang, T., X. Tian, S. Hashimoto, H. Tanikawa: Resources, Conservation and Recycling, Vol.103, pp.205–215, 2015, DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.021
 “Concrete transformation of buildings in China and implications for the steel cycle”
- 2) Wang, T., J. Zhou, Y. Yue, J. Yang, S. Hashimoto: Journal of Industrial Ecology, Vol.20, No.6, pp.1349–1359, 2016, DOI: 10.1111/jiec.12383
 “Weight under steel wheels: Material stock and flow analysis of high-speed rail in China”
- 3) Maung, K.N., S. Hashimoto, M. Mizukami, M. Morozumi, C.M. Lwin: Environmental Science & Technology, Vol.51, No.7, pp.3824–3832, 2017, DOI: 10.1021/acs.est.6b04331
 “Assessment of the secondary copper reserves of nations ”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 橋本征二、両角昌高：環境科学会2014年大会、つくば、2014.
「世界各国の銅蓄積量・二次銅埋蔵量の推計」
- 2) T. Wang and S. Hashimoto: Joint 11th ISIE Socio-Economic Metabolism Section Conference and 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, 2014.
“The ferrous find - Counting iron and steel stocks in China”
- 3) 八柳有紗、橋本征二：日本LCA学会第10回研究発表会、神戸、2015.
「ストック型社会形成に向けたストック使用効率の評価」
- 4) 水上瑞樹、橋本征二：日本LCA学会第10回研究発表会、神戸、2015.
「世界における二次銅埋蔵量の推計とそのシナリオ分析」
- 5) Maung, K.N., M. Mizukami, T. Wang, C.M. Lwin, and S. Hashimoto: The 8th Conference of International Society for Industrial Ecology, Guildford, UK, 2015.
“Assessment of secondary copper reserves in the anthroposphere”
- 6) 八柳有紗、谷川寛樹、橋本征二：第43回環境システム研究論文発表会、札幌、2015.
「ストック型社会に向けたストック使用効率の評価 - 建設物を対象としたケーススタディ - 」
- 7) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto : 環境科学会2015年大会、吹田、2015.
「Validation of estimation for secondary copper reserves of nations using sensitivity analysis」
- 8) 八柳有紗、谷川寛樹、橋本征二：第43回環境システム研究論文発表会、札幌、2015.
「ストック型社会に向けたストック使用効率の評価～建設物を対象としたケーススタディ～」
- 9) 八柳有紗、C.M. Lwin、谷川寛樹、橋本征二：日本LCA学会第11回研究発表会、柏、2016.
「建築物を対象とした蓄積物質使用効率の評価」
- 10) 高柳達、中島謙一、村上進亮、橋本征二：日本LCA学会第11回研究発表会、柏、2016.
「太陽電池に用いられる元素の2050年までのグローバルな需給バランス」
- 11) 吉田友晴、K.N. Maung、橋本征二：日本LCA学会第11回研究発表会、柏、2016.
「世界における二次アルミニウム埋蔵量の推計」
- 12) Maung, K.N., T. Yoshida, C.M. Lwin, and S. Hashimoto : 日本LCA学会第11回研究発表会、柏、2016.
「Classification of secondary aluminum resources in major countries」
- 13) Lwin, C.M., S.M.R. Dente, T. Shimizu, T. Wang, and S. Hashimoto : 日本LCA学会第11回研究発表会、柏、2016.
「Measuring stocked material use efficiencies: Case study of sewage pipelines in Japan」

- 14) 八柳有紗、H. Bergsdal、D.B. Mueller、谷川寛樹、橋本征二：環境科学会 2016 年大会、横浜、2017
「住宅における蓄積物質使用効率の日諾比較」
- 15) Maung, K.N., C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto : The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology、名古屋、2016.
「Classification of secondary aluminum resources of nations」
- 16) Yatsuyanagi, A., H. Bergsdal, D.B. Muller, H. Tanikawa, and S. Hashimoto : The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology、名古屋、2016.
「Stocked material use efficiency of housing: Comparison of Japan and Norway」
- 17) Maung, K.N., T. Yoshida, C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto: The 12th International Conference on EcoBalance, 京都, 2016.
「Assessment of secondary aluminum reserves in major countries」
- 18) 福谷大樹、橋本征二：第 12 回日本 LCA 学会研究発表会、つくば、2017.
「日本における白金族金属類二次埋蔵量評価」
- 19) 八柳有紗、谷川寛樹、橋本征二：第 12 回日本 LCA 学会研究発表会、つくば、2017.
「社会における物質の滞留時間を考慮した蓄積物質使用効率指標の提案」
- 20) 福谷大樹、橋本征二：平成 29 年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会、川崎、2016.
「白金族金属を対象とした二次資源の類型」
- 21) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto: 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会、つくば、2017.
「Classification of secondary zinc resources in major countries」
- 22) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto: The 9th Conference of International Society for Industrial Ecology and 25th Conference of International Symposium on Sustainable Systems, Chicago, 2017.
「Secondary zinc reserves of nations」
- 23) Tanikawa, H., Y. Moriguchi, S. Hashimoto, I. Daigo, J. Nakatani, S. Murakami, K. Nakajima, K. Nansai, K. Okuoka, T. Fishman, S. Takagi: The 9th Conference of International Society for Industrial Ecology and 25th Conference of International Symposium on Sustainable Systems, Chicago, 2017.
「Next-generation material stock that realize the full potential of resources」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 八柳有紗、C.M. Lwin、谷川寛樹、橋本征二：学生優秀ポスター発表賞、日本LCA学会第11回研究発表会、日本LCA学会、2016.3

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(4) 国際ストック・フローデータベース拡充

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 国際資源循環研究室 中島 謙一
南齋 規介

平成26～28年度累計予算額：13,560千円（うち平成28年度：4,150千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、アジア・アフリカ地域を含めた世界の各国・地域における金属資源の需給構造の把握と課題抽出を目的として、(a)国際貿易統計等の統計情報をもとに、国際貿易に伴う各資源の移動量(グローバルマテリアルフロー)の推計・精緻化を実施した上で、(b)各国・地域ごとの資源の取引量(採掘量、輸出入量)、見かけ消費量、さらには、ストック量の推計を行った。本手法の特徴は、国際貿易統計を用いる事で、国家統計の整備が不十分な国・地域についても資源の移動量や見掛け消費量などの推計が可能な点である。対象とした資源は、世界で採掘される金属鉱物の約6割を占める鉄および銅、更には、急速な需要拡大が進むニッケルであり、統合的な貿易データの入手が可能な1995年～2010年を対象とした。解析の結果、資源需要の拡大および需要の偏在化と手中化の進行が確認された。1995年から2010年にかけて、アジア市場の拡大により、いずれの物質(鉄、銅、ニッケル)についても国際的な取引量、消費量、更には、そのストック量が約2倍程度に拡大している傾向が明らかとなった。特に、アジア地域においては、輸入の増加に伴って、消費量の急増が確認され、これに伴って、世界全体の消費量に対するアジア地域の消費量が占める割合も顕著な増加が認められた。アフリカ地域への移動量およびアジア地域への移動量は、1995年から2010年にかけておいても増加傾向にある事が分かった。しかしながら、世界全体の移動量に占める割合は、依然として数%程度であると得られた。アフリカ地域の消費量についても増加の傾向を確認したが、アジア地域での消費の拡大が顕著であるため、世界全体の消費量に対するアフリカ地域の寄与は依然として限定的であった。

[キーワード]

国際ストック・フローデータベース、産業連関分析、グローバルサプライチェーン、資源

1. はじめに

資源の有効利用の観点から、グローバルサプライチェーンを考慮した国際ストック・フローデータベースの構築は有用である。特に、金属資源は、資源の賦存、製錬・精製等の技術、資源の需要に空間的な偏在性がある。二次的な利用を含め、各国・地域の消費量等の動態を把握することが持続可能な資源管理を進めるうえで重要である。そこで、本研究では、世界で採掘される金属鉱物の約6割を占める鉄および銅、更には、急速な需要拡大が進むニッケルを対象とし、統合的な貿易データの入手が可能な1995年～2010年を対象に需給構造の解析を実施した。なお、国際貿

易統計 (UNcomtrade など) で把握可能な貿易量情報には各種の不整合がこれまでも確認されており、本研究で得られる解析結果にも実際の消費との乖離等が確認されることがあり、それらの精緻化を含めてデータベースの拡充をおよび金属資源のストック・フローについて検討を行った。

2. 研究開発目的

アジア・アフリカ地域を含めた世界の231の国・地域における金属資源の需給構造の把握と課題抽出を目的として、国際貿易統計等の統計情報をもとに、国際貿易に伴う各資源の移動量 (グローバルマテリアルフロー) の推計・精緻化を実施した上で、各国・地域ごとの資源の取引量、見かけ消費量、さらには、ストック量の同定と解釈を目指した。

3. 研究開発方法

(4) 国際ストック・フローデータベース拡充

本研究では、国際貿易量は、BACI (Base pour l'Analyse du Commerce International, CEPII) より、231の国・地域間を対象とした各品目群の輸出・輸入量を金額単位あるいは物量単位で抽出した。品目群については、HS (Harmonized Commodity Description and Coding System) codeに基づいて、6桁分類で掲載されている約6000品目群の中から、対象とする金属資源を含有する品目を選定した。しかしながら、6桁分類でのHSコードであっても、複数の異なる貿易商品が該当するコードがあり、対象とする金属資源を含有する商品はその一部である場合がある。本研究では、既報[1]と同様にBACIから得た各商品の貿易量に対象元素を含む製品割合を考慮するための0から1の範囲を取るカットオフ値を設定し、これを貿易量に乗じることで、各種の元素含有商品の貿易量の推計精度を高めた。得られた貿易量から対象元素の移動量への換算には、各種の文献やWIO-MFA等から得られる各商品の元素含有率を乗じて推計を行った。加えて、各国と地域の採掘量および再生量を推計し、それらと輸出入量とのマテリアルバランスを検証した。マテリアルバランスに不整合が確認された国や地域については、二次計画に基づく最適化計算によりフローを修正し、不整合を解消した。なお、日本の最終需要が誘引するグローバルサプライチェーンを通じた物質の移動量の推計手法については既報[2]を応用した。

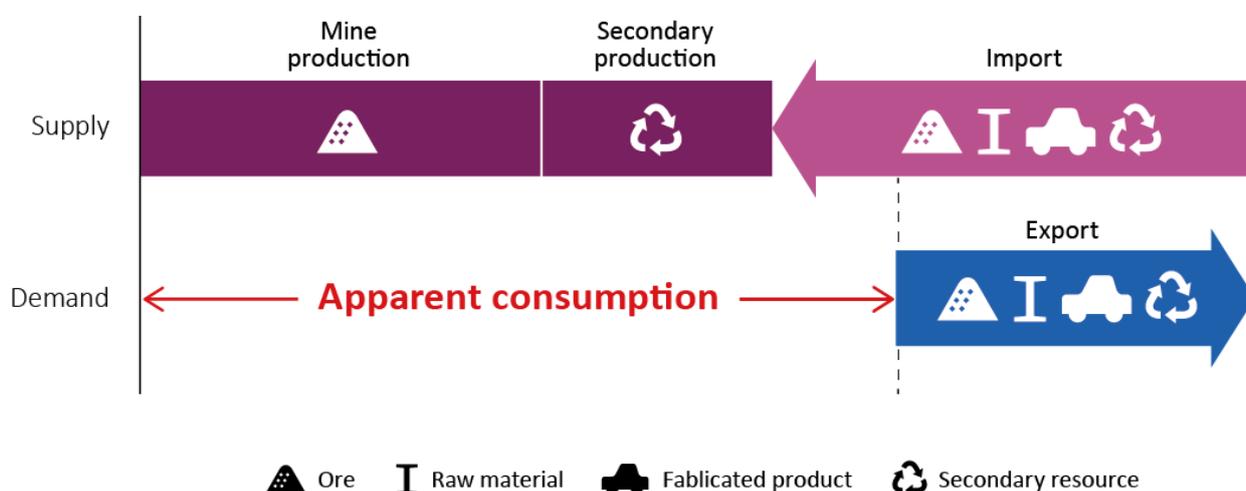
鉄 (Fe)、銅 (Cu)、および、ニッケル (Ni) を対象に、アジア・アフリカ地域を含めた世界の231の国・地域における金属資源の需給構造の解析を実施するに際して、国際貿易統計等の統計情報をもとに、国際貿易に伴う各資源の移動量の推計・精緻化を実施した。本手法の特徴は、国際貿易統計を用いる事で、統計の整備が不十分な国・地域についても資源の移動量や見掛け消費量などの推計が可能な点に有る。

国際貿易量は、BACIより、231の国・地域間を対象とした各品目群の輸出・輸入量を金額単位あるいは物量単位で抽出した。品目群については、HS codeに基づいて、6桁分類で掲載されている約6000品目群の中から、対象とする金属資源を含有する品目を選定した。しかしながら、6桁分類でのHSコードであっても、複数の異なる貿易商品が該当するコードがあり、対象とする金属資源を含有する商品はその一部である場合がある。本研究では、既報1, 2)と同様にBACIから得た各商品の貿易量に対象元素を含む製品割合を考慮するための0から1の範囲を取るカットオフ値を設定し、これを貿易量に乗じることで、各種の元素含有商品の貿易量の推計精度を高めた。得られた貿易量から対象元素の移動量への換算には、各種の文献やWIO-MFA等から得られる各商品の元素含

有率を乗じて推計を行った。加えて、各国と地域の採掘量および再生量を推計し、それらと輸出入量とのマテリアルバランスを検証した。マテリアルバランスに不整合が確認された国や地域については、二次計画に基づく最適化計算におりフローを修正し、不整合を解消した。

国際フローデータの推計として、1995年から2010年の16カ年を対象として実施すると共に、精緻化および不整合の解消に取り組んだ。更に、各元素別の国際フローデータをもとに、各国・地域の見掛け消費量(Apparent consumption)の推計を実施した。見掛け消費量は、国・地域ごとの資源採取量(二次資源を含む)と輸入量の和から輸出量を差し引くことで得られる(図(4)-1)。見掛け消費量については、1995年から2010年の16カ年を対象に推計を実施した。

加えて、日本経済の寄与を把握するために、c)日本の経済活動が誘引する資源採掘量の推計3)を行った。推計には、GLIO(global link input-output model)4)を用い、2005年の国際貿易に伴う移動量を分析対象年とした。

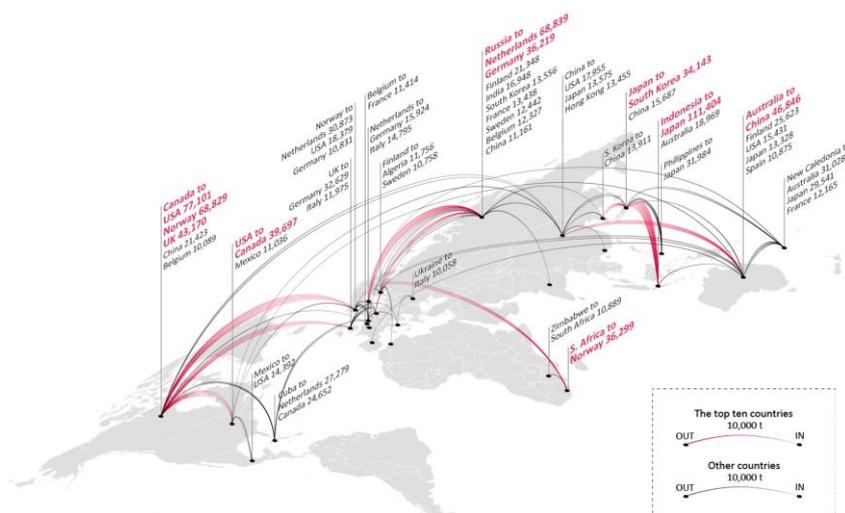


図(4)-1 各国の見かけ消費量(Apparent consumption)の定義の概略図

4. 結果及び考察

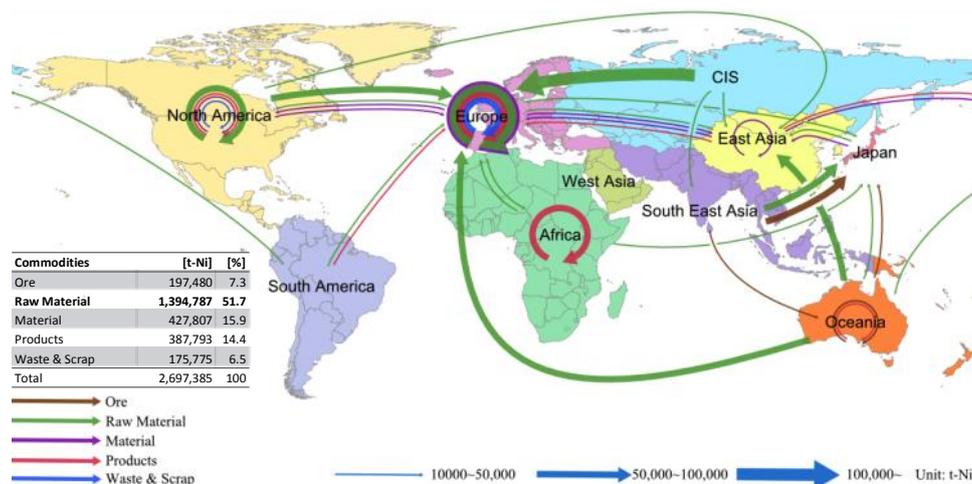
(4) 国際ストック・フローデータベース拡充

以下、特徴的な解析結果として、主にニッケルの解析事例を取り上げて、結果と考察を示す。2005年のニッケル鉱石の採掘量は、 1.5×10^6 t-Niであり国際貿易を介した世界全体の総ニッケル移動量は、 2.7×10^6 t-Niであった。231の国・地域間のニッケルの移動量のうち上位の10カ国が占める移動量の割合は約21%に達し、上位の50位までを含むと移動量が占める割合は約47%であった(図(4)-2)。特に、インドネシア、オーストラリア、ロシア、カナダ等の資源産出国から日本、アメリカ、そして北米への移動量が多く、資源の移動が特定の国・地域に集中している。特筆すべきは、世界における資源の流れに対してBRICSおよびN-11(韓国, フィリピン, パキスタン, イラン, インドネシア, エジプト, トルコ, ナイジェリア, バングラデシュ, ベトナム, メキシコ)の諸国が占める割合である。世界の資源輸入量に対する中国を除いたBRICS諸国が占める割合は約5%であり、N-11を加えた15か国を見ても僅かに11%に留まると得られた。



図(4)-2 国際貿易を介した国別のニッケルの移動量（2005年，Top50）³⁾

グローバルマテリアルフローの品目別の内訳は、鉍石が7%、フェロニッケルや金属ニッケル等の中間素材が52%、ステンレス等の素材が16%、機械類や自動車などの高加工度製品が14%、スクラップ等が7%を占めると得られた(図(4)-3)。世界的には、フェロニッケルやニッケルマット等の中間材料を介しての移動量が多いのに対して、日本では中間材料の他、鉍石としての東南アジアやオセアニアからの輸入量が多い事が判る。カナダやロシアでは硫化鉍を原料とする生産技術が主流であるのに対して、日本においては埋蔵量が豊富と知られている酸化鉍を原料とする生産技術が確立されており、東南アジアやオセアニアからの輸入量が多い事はこれに起因している。なお、日本の経済活動が誘引するグローバルマテリアルフローを同定するために、2005年の推計結果にGLIO(Global link Input-Output model)を適用した結果、日本の国内最終需要が誘引するニッケルフロー量は、 0.23×10^6 t-Niであり、これは、世界全体のニッケルの国際フロー量(2.7×10^6 t-Ni)の約8%に相当すると得られた。更に、日本の国内最終需要が誘発する鉍石採掘量(マテリアルフットプリント)は、 0.14×10^6 t-Niであったと得られた。これは、世界の鉍石採掘量(1.5×10^6 t-Ni)に対して約9%に相当しており、日本の経済活動が誘引しているニッケル鉍石の採掘は、インドネシア(40.3%)、ニューカレドニア(12.4%)などの生物多様性が豊かな地域に集中している事が明らかとなった(表(4)-1)。



図(4)-3 国際貿易を介した品目群別・地域別のニッケルの移動量 (2005年)¹⁾

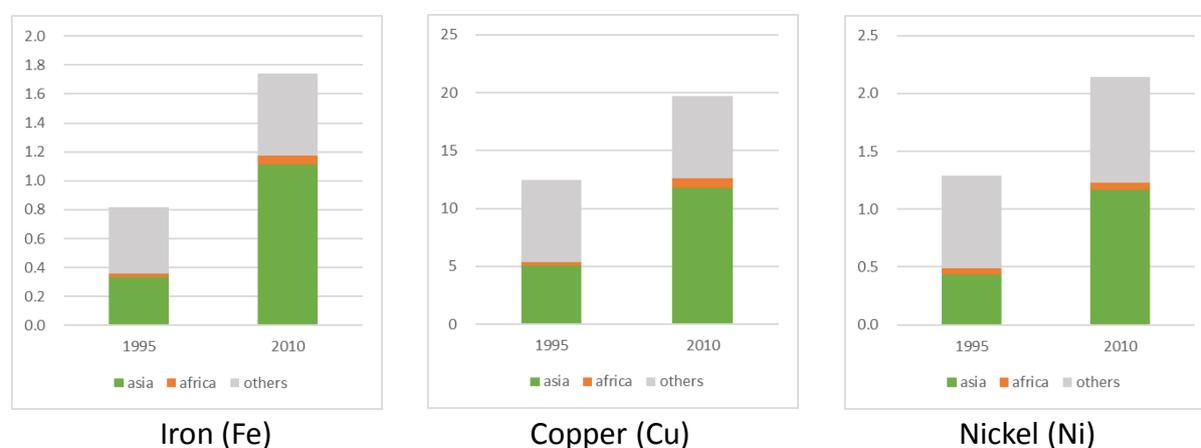
表(4)-1 日本の最終需要が誘引するニッケルの資源採掘量(2005年)³⁾

(a) Final demand category			(b) Countries and regions	
Num.	Final demand category for Japan	Material footprint [t-Ni/year]	Countries and regions	Material footprint [t-Ni/year]
[1]	Household consumption	32,229	Republic of Indonesia	98,780
[2]	Governmental expenditure	5,617	New Caledonia (France)	33,571
[3]	Public fixed-capital investment	18,761	Australia	20,608
[4]	Private fixed-capital investment	69,371	Canada	20,547
[5]	Other	9,750	Russia	18,254
[6]	Export	111,297	Others	55,265
Total domestic final demand (sum of [1] to [5])		135,728	Total	247,025
Total final demand (sum of [1] to [6])		247,025		

加えて、時系列での解析により、需給量の顕著な拡大が確認できた。1995年から2010年にかけて、アジア地域での取引量の拡大により、いずれの物質(鉄、銅、ニッケル)についても国際的な取引量が約2倍程度に拡大していると得られた。特に、アジア地域においては輸出と比べて輸入の増加が顕著であり、このことは、資源消費の集中が生じていることを示唆していると考えられる。具体的には、世界全体の貿易量に対するアジア地域への移動量(輸入量)が占める割合は、鉄が38%から51%に拡大、銅が36%から45%に拡大、ニッケルが25%から41%に拡大した。同じくアフリカ地域への移動量が占める割合は、鉄が2.2%から3.6%に拡大、銅が1.7%から3.4に拡大、ニッケルが3.1%から4.0%に拡大したと得られた。一方、世界全体の貿易量に対するアジア地域からの移動量(輸出量)が占める割合は、鉄が17%から23%に拡大、銅が20%から27%に拡大、ニッケルが15%から31%に拡大した。同じくアフリカ地域からの移動量が占める割合は、鉄が3.5%から3.3%に縮小、銅が3.1%から4.6に拡大、ニッケルが3.8%から4.6%に拡大したと得られた。

更に、各資源について見掛け消費量の推計を実施した。図(4)-4に、鉄、銅、および、ニッケルの見かけ消費量の外観を示した。なお、現在も継続して、国際フローおよび見掛け消費量についての各年の推計結果をもとに不整合の検証や精緻化を進めており、より確度の高い推計結果の出

力を目指している。各国の見掛け消費量の時系列分析の結果、1995年から2010年にかけて、いずれの物質(鉄、銅、ニッケル)についても全体的に見掛け消費量が急速に伸びている傾向があった。対象期間で世界全体の見掛け消費量は、鉄で2.1倍、銅で1.6倍、ニッケルで1.7倍に増加した。特に、アジア地域における消費量が拡大している傾向が示された。世界全体の消費量に対するアジア地域の消費量が占める割合は、鉄が41%から64%に増加、銅が40%から60%に増加、ニッケルが34%から54%に増加した。一方、アフリカ地域の消費量が占める割合は、鉄が3.1%から3.3%に増加、銅が2.7%から4.3%に増加、ニッケルが3.8%から2.8%に減少に留まった。加えて、これらの情報をもとに、国・地域別のストック量を試算した。推計の結果、2010年の世界全体の鉄のストック量は、 $24 \times 10^9 \text{t-Fe}$ と得られた。同様に、銅およびニッケルのストック量は、 $38 \times 10^7 \text{t-Cu}$ および $29 \times 10^6 \text{t-Ni}$ と得られた。



図(4)-4 アジア・アフリカ地域における消費量の変遷：1995年および2010年

なお、アジア地域における鉄の一人当たり消費量は、中国の消費量の拡大(1995年：0.08t/人、2010年：0.6t/人)にけん引されて、北米や西欧と同水準に達した。また、銅やニッケルの一人当たり消費量も急速に増加していると得られた。一方、アフリカ地域における一人当たり消費量については、各資源について大きな変化は確認できなかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本手法の特徴は、国際貿易統計を用いる事で、統計の整備が不十分な国・地域についても資源の移動量や見掛け消費量などの推計が可能な点であり、これにより、新興国を含めて全世界を対象とした需給構造の解析が可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

国際貿易統計に基づく金属資源の見掛け消費量の推計結果は、新興国も含めた全世界を対象とした需給構造を明らかにするため、国際的な資源消費の取り決めに向けて各国が比較可能なデータベースとして利用可能である。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) K.Nansai, K.Nakajima, S.Kagawa, Y.Kondo, Y.Shigetomi, and S.Suh: “Global Mining Risk Footprint of Critical Metals Necessary for Low-Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum in Japan”, Environ. Sci. Technol., Vol.49, 2022–2031, 2015.
- 2) K.Nakajima, K.Nansai, K.Matsubae, M.Tomita, W.Takayanagi, T.Nagasaka, 586, 730–737, 2017.
“Global land-use change hidden behind nickel consumption, Science of The Total Environment”
- 3) Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Sangwon Suh, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Wataru Takayanagi and Yosuke Shigetomi, Economic Systems Research, forthcoming, 2017.
“The role of primary processing in the supply risks of critical metals”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中島謙一, 南斉規介, 大塚祐登, 松八重一代, 長坂徹也, 環境科学会2014 年会、つくば、18-19, Sep. 2014
「グローバルサプライチェーンを通じたニッケルの国際移動量」
- 2) Y. Ohtsuka, H. Ohno, K. Matsubae, K. Nakajima, K. Nansai, and T. Nagasaka, The 11th International Conference on EcoBalance (Eco Balance 2014), Tsukuba, Japan, 27–30 October 2014
” Global supply chain analysis for sustainable utilization of nickel”

- 3) K.Nakajima, K.Nansai, H.Yamano, K.Matsubae, S.Murakami, Y.Ohtsuka, Y.Iwatsuki, and T.Nagasaka, The 11th International Conference on EcoBalance (Eco Balance 2014), Tsukuba, Japan, 27–30 October 2014 “Global flow of nickel: Identifying its supply chain and implication for sustainable resource management”
- 4) K.Nansai, K.Nakajima, S.Kagawa, and Y.Kondo, The 11th International Conference on EcoBalance (Eco Balance 2014), Tsukuba, Japan, 27–30 October 2014
“Measuring supply risk footprints of critical metals for Japanese goods and services”
- 5) K.Nakajima, K.Nansai, I.Daigo, S.Murakami, and K.Matsubae, Local Consumption of Nickel Accelerates Global Land Use Change, World Resources Forum Asia Pacific 2015, Sydney, Australia, 1-3 June 2015 (2015/06/02)
- 6) K.Nakajima, K.Nansai, I.Daigo, S.Murakami, and K.Matsubae, Linking the local consumption of nickel to global supply Chain, LCM 2015, Bordeaux, France, 30 August - 2 September 2015, (2015/09/01)
- 7) Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo (2015) Mining risk footprints of critical metals; integration of political risks for mining countries and material footprints, LCM2015, August, Bordeaux, France.
- 8) Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo (2015) Dynamic changes in the global flows of critical metals, World Resources Forum Asia Pacific, June, Sydney, Australia.
- 9) Takayanagi, S., K. Nakajima, S. Murakami, and S. Hashimoto : The 12th International Conference on EcoBalance、京都 (2016)
「Analysis of supply and demand balance of elements related to solar panels toward their recycling」
- 10) Maung, K.N., T. Yoshida, C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto : The 12th International Conference on EcoBalance、京都 (2016)
「Assessment of secondary aluminum reserves in major countries」
- 11) 高柳達、中島謙一、村上進亮、橋本征二 : 日本 LCA 学会第 12 回研究発表会、つくば (2017)
「インジウムのバランスから見た太陽光パネルリサイクルの意義」
- 12) K.Nakajima, I.Daigo, K.Nansai, K.Matsubae, W.Takayanagi, M.Tomita, and Y.Matsuno, The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia Pasific conference (2016/09/28-30, Nagoya University) (2016/09/30) pp. 73
“Recent global trends in flows and apparent consumptions of nickel copper and iron”
- 13) K.Nakajima, I.Daigo, K.Nansai, K.Matsubae, W.Takayanagi, M.Tomita, and Y.Matsuno, The 12th Biennial International Conference on Ecobalance (Ecobalance 2016) (2016/10/03-06, Kyoto Terrsa) (2016/10/05) pp.151
“Global distribution of material consumption: Nickel, Copper, and Iron”

- 14) K. Nansai, S. Sangwon, K. Nakajima, S. Kagawa, Y. Kondo, and Y. Shigetomi, The 12th Biennial International Conference on Ecobalance (Ecobalance 2016) (2016/10/03-06, Kyoto Terrsa) (2016/10/04) pp. 78

“Supply risk assessments of low-carbon energy technologies with Hybrid LCA ”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) K. Nakajima, K. Nansai, K. Matsubae, and T. Nagaska: “Material Flow of Iron in Global Supply Chain”, ISIJ International, Vol. 54 No. 11, (2014), pp. 2657-2662
- 2) Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo, Sangwon Suh, Kenichi Nakajima, Rokuta Inaba, Yuko Oshita, Takashi Morimoto, Kazumasa Kawashima, Takuji Terakawa, and Susumu Tohno (2012) Characterization of economic requirements for a “carbon-debt-free country”, Environmental Science & Technology, 46(1), 155-163.
- 3) Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W., Nagasaka T. (2017) Global land-use change hidden behind nickel consumption, Science of The Total Environment, 586, 730-737
- 4) Nansai K., Nakajima K., Kagawa S., Kondo Y., Shigetomi Y., Suh S. (2015) Global Mining Risk Footprint of Critical Metals Necessary for Low- Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum in Japan. Environmental Science & Technology, 49 (4), 2022-2031

Next-generation Material Stock that Realize the Full Potential of Resources

Principal Investigator: Hiroki TANIKAWA

Institution: Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies
D2-1(510), Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi, 464-8601, JAPAN
Tel: +81-52-789-3840 / Fax: +81-52-789-3840
E-mail: tanikawa@nagoya-u.jp

Cooperated by: University of Tokyo, Ritsumeikan University, National Institute of environmental Studies

[Abstract]

Key Words: Material stock and flow analysis, Stock indicator, Resource efficiency, Secondary resource, Global material stock and flow databases

This research named “Next-generation Material Stock that Realize the Full Potential of Resources” aims to assess the material stock of societies, explicitly identifying its chronological and spatial distribution, considering its functional value and its recyclability potential. We discovered how infrastructures and buildings, contributing to over half of the material stock of Japan, should be evaluated as a functional system which supports anthropogenic activities, and at the same time plays a pivotal role to support the growth of the Japanese economy. Quantifying and qualifying the materials stocked in Japan, this project provides a fine tool for the strategical promotion of urban mining as a way to limit the consumption of natural resources, especially in sight of the recent concerns about global warming and the risk of depletion of primary resources. Our goal is to propose a road map to enable a technological leapfrog towards a sound material cycle society, which will serve as a strategic roadmap for our future generations, and for all those countries which are now rapidly industrialising such as Asian and African countries.

In the past three years, we focused our research on the creation of a model which quickly estimates the total amount of construction materials stocked in a nation using Economy-Wide Material Flow Analysis (EW-MFA) data, and probability distributions to simulate demolitions. These parameters have been calculated through some case studies which applied the 4D-GIS methodology introduced in 2009. Moreover, using an IPAT analysis, we have been able to understand the longitudinal evolution of the material stock in Japan in correlation to its changes in population, economy, and technological advancements. This work culminated in the calculation of the whole material stock of Japan using both a 4D-GIS and a EW-MFA, which was then published in the Journal of

Industrial Ecology.

Our research goals are shared with three other illustrious Japanese institutions: The University of Tokyo, Ritsumeikan University, and the National Institute of Environmental Studies. Our joint efforts have produced a further account of the material stock of Japan using Input / Output (IO) tables discerning it into typology, construction style, and material content, and then producing a comparison of different kind of accounts (GIS, EW-MFA, and IO). Moreover, we inquired the recyclability potential of construction materials, the distribution of secondary copper resources in the world, and the apparent consumptions of metallic minerals – which showed a surge of consumption of these materials in Asia in the past 15 years.