

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費補助金 総合研究報告書

循環型社会形成に関わる新たな評価指標と指標体系

New Assessment Indicators and Indicator Framework for Establishing a
Sound Material-Cycle Society

(3K163001)

平成 28 年度～平成 30 年度

立命館大学 橋本 征二

2019 年 5 月

目 次

I. 成果の概要	1
1. はじめに	1
2. 研究目的	1
3. 研究方法	2
4. 結果及び考察	3
5. 本研究により得られた主な成果	11
6. 研究成果の主な発表状況	12
7. 研究者略歴	16
II. 成果の詳細	17
要旨	17
1. はじめに	17
2. 研究目的	18
3. 研究方法	18
4. 結果及び考察	33
5. 本研究により得られた成果	58
6. 国際共同研究等の状況	59
7. 研究成果の発表状況	60
8. 引用文献	67
III. 英文 Abstract	69

I. 成果の概要

補助事業名 環境研究総合推進費補助金 循環型社会形成推進研究事業（平成 28 年度～平成 30 年度）

所管 環境省 及び 独立行政法人 環境再生保全機構

研究課題名 循環型社会形成に関わる新たな評価指標と指標体系

課題番号 3K163001

研究代表者名 橋本 征二（立命館大学）

国庫補助金実績額 44,531 千円（うち平成 28 年度：14,458 千円、平成 29 年度：15,422 千円、平成 30 年度：14,651 千円）

研究期間 平成 28 年 6 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

本研究のキーワード 循環型社会形成推進基本計画、循環経済、物質フロー・ストック分析
産業連関分析、資源生産性、寿命、資源容量、環境容量
関与物質総量（Total Material Requirement: TMR）

研究分担者 小口 正弘（国立環境研究所）
森口 祐一（東京大学）
藤井 実（国立環境研究所）
山末 英嗣（立命館大学）
梅田 靖（東京大学）
小島 道一（日本貿易振興機構）

1. はじめに

循環型社会形成推進基本計画（以下、循環基本計画）においては、第 1 次循環基本計画において採用された「物質フロー指標」「取組指標」を発展させるとともに、これを補強・補足する形で、循環型社会への進展を計測する指標群が整備されてきた。これまでも様々な課題に対応して改訂が進められてきたが、本研究開始時点で下記のような改善点が指摘されていた。

まず、①指標の数が増え全体の構成が分かりにくくなっていることや、物質フロー指標と取組指標の関連づけが必ずしもなされていないことから、指標全体の整理・再構築が必要であるという指摘である。また、②ストックを有効に活用するストック型社会に向けた取り組みが益々重要となっているが、その進捗を計測する指標がないことが挙げられる。さらに、③個々の主体による資源生産性向上に向けた取り組み、我が国においてはとりわけ製造業における取り組みを評価していくことが重要であるが、そのための適切な指標がないこと、④低炭素と資源循環などの異なる分野の取り組みを統合ないしは両立していくことが求められているが、これについても適切な評価指標がないことも指摘されている。加えて、⑤間接的な資源消費も含めて資源に依存しない社会づくりを推進していくための指標が必要となっていることがある。

2. 研究目的

本研究では、第 4 次循環基本計画への反映や国際的な発信を行うことを視野に、上述した課題に対応する以下の検討を行った。すなわち、①循環型社会の指標群をいくつかの視点から整理して、既存の指標体系を

再構築するとともに、②社会における物質利用時間を計測する手法、③産業部門別に資源生産性を計測する指標、④低炭素と資源循環のシナジーやトレードオフを計測する統合指標等を新たに開発ないしは再検討し、⑤関与物質総量（TMR：Total Material Requirement）により国際的な資源の依存状況やリサイクルの効果を推計することを目的とした。

①では、指標を整理するための汎用性のある視点が提供されるとともに、再構築された基本計画の指標体系が代替案として提示される。②では、社会における物質の利用時間の計測手法が開発され、いくつかの物質に適用された結果が示される。③では、業種ごとの資源生産性の目標設定に適した産業部門別の資源生産性指標が提示され、これを適用した結果が示される。④においても、低炭素と資源循環の間でトレードオフが生じるケースを踏まえ、これらの統合的な評価が可能となる指標とそのケーススタディが示される。⑤では、各種物質・製品のTMR係数のデータベースが提供されるとともに、都市鉱山の有効利用によるTMRの削減効果等のケーススタディが示される。こうした成果は、個別指標としての新規性・独創性や、指標体系を検討する視点としての新規性を持っているだけでなく、循環基本計画における指標体系の代替案を示すものとして、第4次循環基本計画（2018年6月に策定済み）及びその後の計画策定における活用が期待されるものである。

3. 研究方法

（1）既存の指標体系の再構築

第3次循環基本計画における指標体系の主要な課題を、①政策と指標の関連づけ、②「物質フロー指標」と「取組指標」の関連づけ、③国際発信に対する留意、④「物質フロー指標」と「取組指標」の区別、⑤SDGsと国際比較への対応に整理した。また、指標体系を構築する際の視点を示すとともに、主に課題①②に対応することを視野に、a)ライフサイクルの段階、b)指標の種類、c)改善活動の種類、という3つの視点に基づく指標体系の代替案を提示した。さらに、第4次循環基本計画において示された「循環型社会形成に向けた取組の中長期的な方向性」の各項目に対応させて、提示した代替案の適用可能性を検討した。この際、課題③④⑤への対応も合わせて議論した。

（2）ストック指標としての物質利用時間の計測

社会における物質の長期利用の進捗を計測するための指標として、Hashimoto and Moriguchi（2004）は物質利用時間（material use time: MUT）を提案しているが、これまで適切な計測手法がなく、一意的に物質利用時間を計測できる手法の確立が必要であった。一方で、電気電子機器や自動車等の耐久消費財の製品寿命を計測する手法はこれまでにほぼ確立されており、Oguchi et al.（2010）の整理によれば、製品寿命分布の計測方法は4つに大別される。本研究では、このうちの1つの方法を援用した物質利用時間の計測手法を提案するとともに、提案手法によって計測される物質利用時間の定義を整理した。また、木材、プラスチック、鉄鋼を事例として、提案手法を用いた物質利用時間の計測を行い、その長期傾向と要因を分析した。

（3）産業部門別の資源生産性指標

第2次循環基本計画において推移をモニターする指標として導入された産業部門別の資源生産性指標について、計画の点検作業で指摘されてきた問題点を解決するため、時系列的な算定可能性を念頭におきつつ、その算定方法、基礎データを精査した。また、欧州委員会など、海外における資源効率性の指標の検討状況をレビューし、国際的な比較可能性における課題を整理した。これらをもとに、最終需要額ではなく国内生

産額や付加価値額を分子、直接物質投入量ではなく一次資源等価物質投入量を分母とする資源生産性を基本的な考え方として提案し、指標の経年変化の計算と変化の要因分析を行った。また、消費(需要)側よりも生産(供給)側に着目した考え方として、産業部門ごとの付加価値額に応じて資源需要量を再配分した指標を定式化した。さらに、産業連関表以外の情報源を用いた指標の算定可能性について検討した。

(4) 低炭素と資源循環の統合指標

Fujii et al. (2014) は、持続可能な社会の構築に関わる統合的な評価指標として「資源占有率指標」を提案しているが、本研究では、その改良や適用事例の拡充等を行って、「資源占有の時間フットプリント」指標 (Resource Time Footprint: RTF) を提案した。この指標が対象とするのは、物質、土地、労働、環境負荷の収容力という資源であり、全体の容量に対する占有の度合いを評価することで規格化を行い、項目間を比較可能にした。全体の容量には、存在量が重要である資源 (金属資源、土地、労働等) と、速度が重要である資源 (淡水、環境負荷の収容力等) があり、対象となる資源ごとに規格化を行う。本研究では、4 つの事例 (焼却熱の産業利用、ヒートポンプ給湯、再生可能な素材への転換、カーシェアリング) について、RTF による評価を行い、その有効性を検討した。

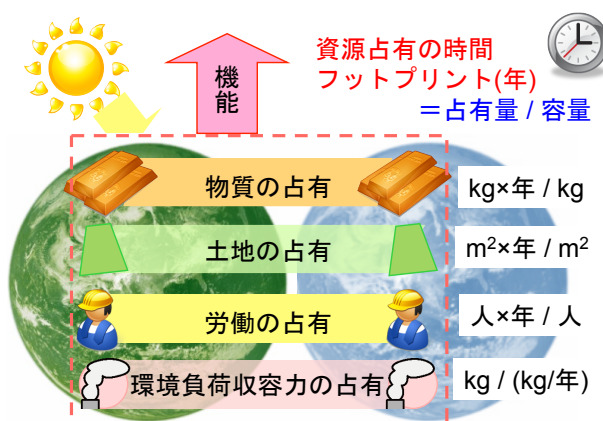


図 3-1 資源占有の時間フットプリントの概念図

(5) TMR 指標の新展開

関与物質総量 (TMR: Total Material Requirement) は、直接・間接の資源投入量だけでなく資源採掘に伴う岩石や土砂の移動量等の隠れたフローを含めた総物質需要量であり、第2次循環基本計画において推移をモニターする指標として採用されたが、データの精度・更新の課題が指摘されてきた。本研究では、Yamasue et al. (2009) の枠組みを用いて、およそ900種類の素材・製品のTMR係数を推計・整備した。また、日本の資源投入量のデータに、各資源 (石油、石炭、岩石、石灰石、食料等々) の平均的なTMR係数を乗じることで日本全体のTMRを推計し、国際的な資源の依存状況を検討した。さらに、主要な家電製品・普通乗用車・建築物を対象にリサイクルを行うことによるTMRの年間削減可能性を推計し、リサイクルの効果を評価した。

4. 結果及び考察

(1) 既存の指標体系の再構築

既存の指標体系と解決すべき課題を踏まえ、a)ライフサイクルの段階、b)指標の種類、c)政策の項目という3軸にもとづく指標体系を提案した (図 4-1)。a)ライフサイクルの段階は、第1～3次循環基本計画における

指標整理の方法に沿うものであり、「入口」「循環」「出口」で構成される。ストック型社会に向けて、ここに「蓄積」という観点を新たに組み込むかどうかは論点である。b)指標の種類は、「物質フロー指標」と「取組指標」で構成され、さらにそれぞれが「目標指標」と「観測指標」に分けられる。この分類も第3次循環基本計画における指標整理の方法に沿うものであるが、改善活動である「取組指標」とその帰結としての「物質フロー指標」の関連づけを行うことが本指標体系の新しい点であり、上述の課題②に対応するものである。c)政策の項目は、これらの指標を個々の政策に対応させて整理するというもので、これも本指標体系の特徴と言える。これにより、上述の課題①に対応でき、政策の評価が行いやすくなると考えられる。

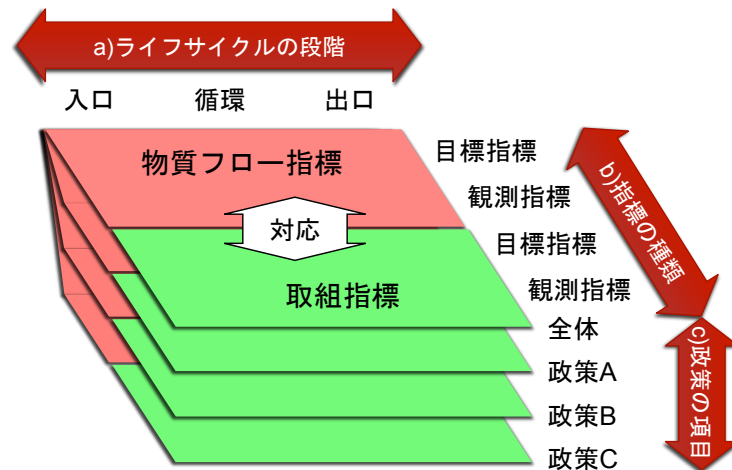


図 4-1 提案する指標体系

表 4-1 「持続可能な社会づくりとの統合的取組」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標			
	観測指標	✓化石系資源に関する資源生産性 ✓バイオマス系資源投入率 ○バイオマス系資源投入量・エネルギー利用量 ○天然資源利用の TMR	✓廃棄物部門による間接的な GHG 削減量 ○バイオマス系資源の出口側の循環利用率 △金属資源の入口側の TMR ベース循環利用率	✓廃棄物部門由来の GHG 排出量
取組指標	目標指標		○期間中に整備されたごみ焼却施設の平均発電効率[廃棄物処理施設整備計画]	
	観測指標	○FSC, MSC 等の認証取得数	✓廃棄物発電施設数 ✓廃棄物発電設備容量 ✓廃棄物発電量 ✓廃棄物熱利用施設数 ✓廃棄物熱利用量 ○廃棄物熱利用率	
		○その他プラ製容器包装の回収地方公共団体数・実施人口割合		
		○バイオマス活用推進計画の策定数		

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

また、以上の指標体系を第 4 次循環基本計画において示された「循環型社会形成に向けた取組の中長期的な方向性」、すなわち c) 政策の項目に対応させ、その適用可能性を検討した。表 4-1 は一例として「持続可能な社会づくりとの統合的取組」に関わる指標案である。「物質フロー指標」の「入口」については、第 3 次循環基本計画の「化石系資源に関する資源生産性」や「バイオマス資源投入率」が関係する指標として挙げられる。また、関与物質総量（TMR）を自然改変の指標と考え、「天然資源利用の TMR」を自然共生社会づくりに関係する指標候補として挙げた。「循環」については、第 3 次循環基本計画の「廃棄物部門による間接的な GHG 削減量」や「隠れたフローを考慮した金属資源の TMR ベースの循環利用率」が該当するものと考えられる。ここでは、「入口」の指標に対応させて「バイオマス系資源の出口側の循環利用率」を指標候補として記載した。「出口」については、現行計画の「廃棄物部門由来の GHG 排出量」が該当するものと考えられる。「取組指標」の「目標指標」については、「廃棄物処理施設整備計画」に示されている「期間中に整備されたごみ焼却施設の平均発電効」を再掲することが有益と考えられる。これは上述の課題③に対応するものである。さらに、廃棄物部門由来の GHG 排出の多くはプラスチックの燃焼に由来することから、その他プラ製容器包装を焼却ごみから除くとともに、リサイクルによる間接的な GHG 排出の削減を意図して「その他プラ製容器包装の回収地方公共団体数・実施人口割合」を「循環」と「出口」に関わる指標として提案している。「取組指標」の「入口」については、自然共生社会づくりに関連して、Forest Stewardship Council（FSC）や Marine Stewardship Council（MSC）などの持続可能な資源利用に関する認証制度があることから「FSC、MSC 等の認証取得数」を候補として挙げている。本研究で提案する指標体系を用いることで、各指標の位置づけが明確になると考えられる。

（２）ストック指標としての物質利用時間の計測

図 4-2 に、耐久消費財の製品寿命分布の推定方法の概要を示す。この手法は、製品の過去の販売台数の時系列データとワイブル分布等の統計分布関数でパラメトリックに表現した残存割合分布から計算した保有台数が、統計値等から外生的に与えられる保有台数と一致するように、残存割合分布のパラメータを推定するものである。未知の分布パラメータは 1 つである必要があるため、実務的には分散や形状パラメータを設定し、残存割合分布の平均値を最適化することになる。

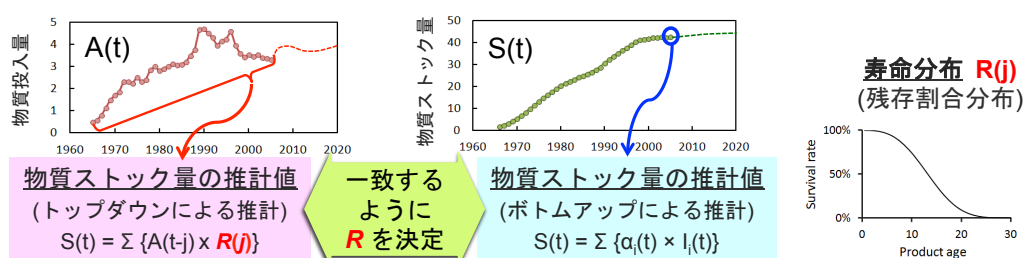


図 4-2 耐久消費財の製品寿命分布推定方法の概要

この手法を物質利用時間の計測に援用するには、製品の販売台数の代わりに物質投入量、保有台数の代わりに物質ストック量を用いればよい。物質投入量については長期の時系列データを用意する必要があるが、物質ストック量については最低 1 時点のデータがあればその時点における物質利用時間の計測が可能である。ただし、物質利用時間の変化を計測したければ複数時点の物質ストック量データが必要である。

この手法で計測される物質利用時間の定義は、計算に用いる物質投入量および物質ストック量データの定義によって決まる。例えば、物質投入量を新たな物質投入（新材投入）に限定した値とすれば、リサイクル

された再生材としての使用期間も含んだ物質利用時間を計測することになる。すなわちこの場合は、社会への新材の投入からリサイクルによる再生利用を経て最終的に廃棄物として排出されるまでの総物質利用時間を計測する。一方、新材および再生材の投入量を用いた場合には、新材か再生材かを問わず投入から排出までの1回使用の物質利用時間（新材・再生材の平均）を計測する。また、物質ストック量データを新材由来と再生材由来の量に分割できる場合には（実際には困難と予想されるが）、新材と再生材それぞれの物質投入量データを用いて新材および再生材の物質利用時間を計測することも方法論的には可能である。

本研究では、木材、プラスチック、鉄鋼を事例として、提案手法を用いた物質利用時間計測のケーススタディを行った。ストック量、新材および再生材の投入量のデータを用意し、社会における総物質利用時間と1回使用の物質利用時間を計測した。結果を図4-2に示す。計測期間（木材：1980～2015年、プラスチック：1995～2015年、鉄鋼：2000～2015年）において、新材投入から再生利用を経て最終的に処分されるまでの総物質利用時間の平均はいずれの物質についても延長傾向が観測された。木材については、提案手法によって計測された総物質利用時間は計測期間において約6年延びており（約7年→13年）、3つの事例のうち総物質利用時間の延長傾向が顕著であった。同じ期間において1回使用の物質利用時間も延びていたが、その延長の度合い（約3年の延長）は総物質利用時間よりも小さかった。このことから、木材のケースでは、1回使用の物質利用時間の延長と再生材利用の促進（再生材利用率の向上）の両方が総物質利用時間の延長に寄与していると考えられた。プラスチックについては、総物質利用時間は約1年延びていた（約6年→7年）。一方、同じ期間において1回使用の物質利用時間はほぼ横ばい（2000年以前はやや短期化）であったことから、プラスチックのケースでは、1回使用の物質利用時間に変化はなく、再生材利用の促進のみによって総物質利用時間が延びているものと考えられた。鉄鋼については、総物質利用時間は約3年延びていた（約53年→56年）。同じ期間において、1回使用の物質利用時間も延びており、その延長傾向は総物質利用時間のものと同様もしくは2010頃以降は総物質利用時間よりも延長の度合いが大きかった。このことから、鉄鋼のケースでは、1回使用の物質利用時間の延長が総物質利用時間の延長に寄与していると考えられた。

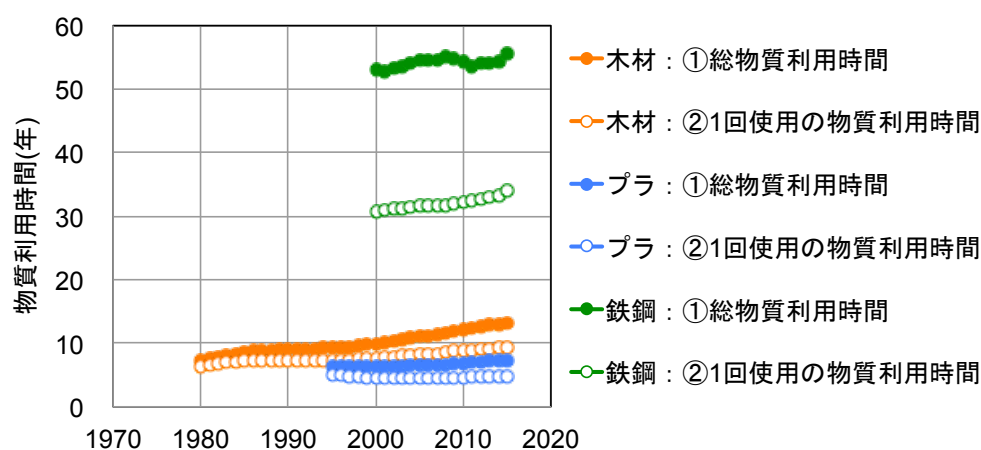


図4-3 本研究の提案手法による物質利用時間の計測結果

また、物質ストック量を同年の物質投入量で除した物質利用時間の簡易計算を行い、本研究の提案手法による計測結果と比較した。その結果、簡易計算値は年による変動はあるものの、長期傾向（長期化、横ばいなど）については本研究の提案手法による計測結果と同じ傾向を示し、木材と鉄鋼の総物質利用時間を除けば計測値のオーダーも概ね一致した。この結果より、物質ストック量や物質投入量がある程度安定的であれば物質利用時間の長期傾向を把握するための簡易指標として利用できると考えられた。ただし、簡易計算は

物質投入量の変化等を直接的に反映することから、本研究の提案手法による計測結果と乖離した結果が得られたケースもあった。簡易計算値を特に単年度での物質利用時間の指標として用いることは適切でないケースがあり、本研究で提案した手法がより適切であると考えられた。

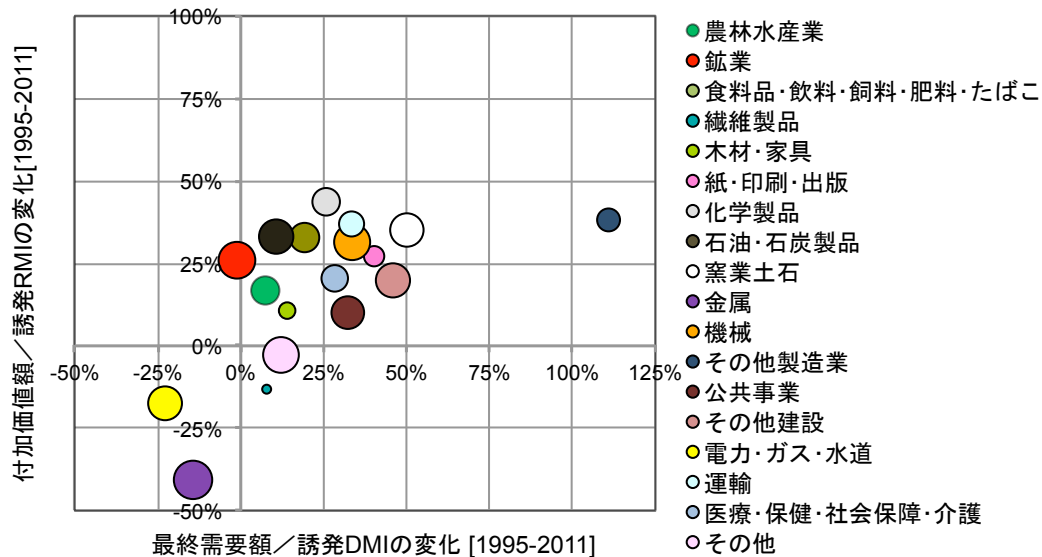
（３）産業部門別の資源生産性指標

第２次循環基本計画において導入された産業部門別（産業分野別）の資源生産性指標は、負値をとる場合があることが課題となっていた。具体的な算定手順と用いられたデータを精査した結果、現在の 18 部門別の資源生産性の算定には、その基礎データとして 49 部門の産業連関表が使われており、18 部門表の鉱業は 3 部門に分割され、輸入依存度が極めて高い部門が含まれる一方、重量あたりの単価が 3 部門間で大きく異なっていた。こうした部門の特殊性などから、主に国産の非金属鉱物の需要によるプラスの誘発 DMI と、輸入原油・天然ガスの在庫変動によるマイナスの需要金額の比、という解釈困難な指標が計算される結果となっていた。この問題には、産業連関表を環境分析に適用する際に留意すべき典型的な課題が複数関係している。これを教訓として、国レベルで利用可能な統計に依拠した計算方法ゆえの課題について、できる限り改善を図りながら、他の情報源に基づく指標算定の可能性を提案することを試みた。

まず、資源生産性指標の分母に用いている直接物質投入量（DMI）は、輸入される原材料や製品についてその実重量で算定するため、その背後にある資源投入量を過小評価する問題があり、関与物質総量（TMR: Total Material Requirement）がより適切と考えられる。しかし、TMR は統計値として報告するだけの熟度に至っていないため、欧州の資源効率性指標の検討においては、一次資源等価換算量（RME: Raw Material Equivalent）に主眼がおかれてきた。SDGs でも RME の考え方を適用した指標案が示されていること、わが国でも、RME ベースでの国の資源生産性が、推移をモニターする指標として第３次循環基本計画において採用されていることから、当面は、RME に基づく指標を用いつつ、TMR への拡張のための情報整備を進めることが適切と考えられる。次に、産業部門別の資源生産性指標の分子に用いてきた最終需要額は、「消費」側の視点からの分析には適しているが、最終財を生産しない資源採掘産業や原材料産業には適用しにくい。産業部門別の資源生産性指標において、「生産」側の視点をより明確にするには、生産の総量や生産によって生み出された価値をとらえることがより適切と考えられる。そこで、これまでの最終需要額に加え、産業連関表における部門別の国内生産額および付加価値額に着目し、各部門において資源の投入がどれだけの付加価値を生んだかを表現することを、新たな指標の考え方とした。以下の式が、本研究で提案する産業部門別資源生産性（RE: Resource Efficiency）指標であり、部門 i ごとに、その部門の国内生産のために直接・間接に消費される一次資源等価物質投入量（RMI: Raw Material Input）を分母、国内生産額（TO: Total Output）もしくは付加価値額（VA: Value Added）を分子におく。

$$RE^{TO}_i = \frac{TO_i}{RMI^{TO}_i} \quad RE^{VA}_i = \frac{VA_i}{RMI^{TO}_i}$$

以上の定式化をもとに、1995 年、2000 年、2005 年、2011 年の 4 時点について、産業連関表 18 部門表および 49 部門表を用いて指標値を計算した。図 4-4 は、従来の DMI ベースの資源生産性と本研究で提案する RMI ベースの資源生産性の 1995 年から 2011 年の変化を 18 の部門ごとにプロットしたものである。全体として正の相関がみられるが、部門によって傾向にかなりの違いがある。例えば、金属部門の資源生産性は、RMI ベースの新指標における低下傾向が顕著であるが、これは付加価値額の割合の低下が主因と考えられる。「ものづくり産業」の典型ともいえる機械部門は、新指標のほうが資源生産性指標の向上率がやや低いが、どちらの指標でみてもこの間約 30% 向上している。



※バブルの大きさは各産業部門の国内生産額が誘発する RMI の対数

図 4-4 DMI ベースの資源生産性と RMI ベースの資源生産性の経年変化の関係

さらに、国全体の RMI の合計値の変化の要因分析を行った結果、主に寄与していたのは GDP の変化と、付加価値額シェアの変化（建設など物質消費量の大きな部門のシェアの低下）であった。本研究が主眼をおく資源生産性の変化の寄与は、1995 年～2005 年では顕著ではなく、2005 年から 2011 年ではプラス、すなわち物質消費量をむしろ押し上げる方向に寄与したことが示された。今後、製造業はじめ部門ごとの資源生産性の変化傾向をより詳細に点検することの必要性を示唆する結果である。

なお、本研究で提案した指標では、同じ資源が複数回利用される状況をそのまま足し上げるため、国全体の資源消費量の純合計値を二重計上なしに部門に配分することはできない。ここで、何らかの計算方法に基づいて、資源消費量を過不足なく部門に配分すれば、分母の資源消費量の総和は国の RMI の総量と、分子の付加価値額の総和は国の GDP と一致し、その比は国全体の資源生産性と一致する。同じ資源が異なる部門で複数回利用され、その都度、利用された資源量に応じた付加価値を生み出すと考え、その付加価値額の比率に応じて按分する方法を、二重計上を回避できる具体的な算定手順の一例として示した（Ⅱ 成果の詳細を参照）。

（４）低炭素と資源循環の統合指標

容量として存在量が重要な項目についての RTF は下記前者の式で、速度が重要な項目についての RTF は後者の式で算出した。

$$RTF = \frac{M_O \times T}{M_A} \quad RTF = \frac{M_C}{R_A}$$

ここで、 M_O は 1 人または 1 グループ当たりの占有量（kg、 km^2 など）、 T は占有時間（年）、 M_A は存在容量（1 人または 1 グループ当たりの割り当て量）（kg、 km^2 など）、 M_C は 1 人または 1 グループ当たりの消費量または発生量（kg）、 R_A は速度容量（1 人またはグループ当たりの割り当て量）（kg/年）である。

本研究では、廃棄物からのエネルギー回収を高度化する「焼却熱の産業利用（事例 1）」、熱供給の省エネルギー化を可能にする「ヒートポンプ給湯（事例 2）」、鉄骨住宅から木造住宅への変更による「再生可能な素材への転換（事例 3）」、シェアリングエコノミーの推進事例としての「カーシェアリング（事例 4）」を RTF により評価したが、ここでは事例 3 の結果を示す。

鉄などの枯渇性の資源から、木材などの再生可能資源への転換は、持続可能性を高めるための 1 つの選択肢と考えられる。しかし、木材の生産には多くの土地や労働を占有する可能性があるため、留意が必要である。図 4-5 に、鉄骨住宅から木造住宅に変更した際の RTF 値の変化を示す。木造への変更による鉄の占有回避は 18 年と長い。社会全体としては、道路、鉄道、商業ビル、自動車、船舶など、様々なインフラや機械類に鉄が使用されていることを考えると、住宅の構造の変更だけでも鉄占有の回避効果が大きいことが分かる。一方で、木材の生産に伴う土地占有の RTF 値は 24 年あり、鉄の製造に伴う石炭消費の削減分や、木材を解体後に化石燃料の代替燃料として利用することによる土地占有の相殺を考慮しても、トータルでの土地の RTF 値の増加分は 18 年であり、鉄の RTF 値の改善と、土地の RTF 値の悪化は同程度の値となる。一方木材生産のための労働の RTF 値は 0.7 年の改善と、比較的軽微である。CO₂ 排出については、2030 年目標値に対して約 3 年、2050 年目標値に対しては 11 年の改善効果がある。住宅は 30 年で建て替えることを想定したが、長期使用すれば木材の投入を減らすことができる一方、鉄の占有回避という観点では同等の効果があるため、土地の占有の増加を押さえながら、鉄の占有を回避する観点では、住宅を木造化した上で長期使用することが有効と考えられる。

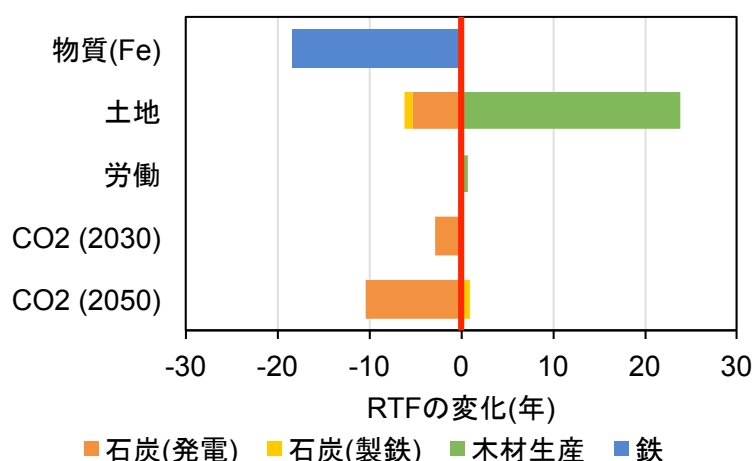


図 4-5 再生可能な素材への転換（事例 3）に伴う RTF 値の変化

このように、RTF は、様々な活動の変化がもたらす物質、土地、労働、環境負荷収容力の各項目への影響を、時間の単位に換算して絶対値として示すことが可能であり、項目間のバランスを取りながら政策を立案、遂行する上で有用な指標となることが期待される。

（５）TMR 指標の新展開

図 4-6 は、ボトムアップ型の手法で推算した種々の製品の TMR 係数を示した図である。本研究では、本研究開始前までに推計していた約 400 の素材・製品に加え、新たに約 500 の素材・製品について TMR 係数を推計した。この TMR 係数は、論文等で公表したものから順次「関与物質総量データベース」(<http://www.ritsume.ac.jp/~yamasue/tmr/index.html>) として公開している。

こうした TMR 係数を用いて、1990～2013 年の日本全体の TMR を推計した結果が図 4-6 である。図から分かるように、直接物質投入量（DMI: Direct Material Input）は 1990 年から 2013 年にかけて減少傾向にある一方、TMR は増加傾向にあると推計された。貿易に伴う間接的な資源消費や資源採掘時の物質の移動量等も含めると、日本経済は脱物質化の方向に向かっていないことを示す結果である。この間の TMR の増加に大きく影響していたのは、発電用石炭、液化天然ガス、鉄鉱石の増加であった。なお、環境省では 2006 年に

おける隠れたフローを 36 億トンと推計しており、2006 年における直接物質投入量 18 億トンと合わせると、計 54 億トンが 2006 年の日本の TMR と推定される。この値は本研究における推計値の約半分であり、その原因について検討した結果、2006 年の環境省の報告には、TMR 係数が乗じられていない物質があることが分かった。大きなものとして原油・粗油（約 16 億トン-TMR）、液化天然ガス（約 12.2 億トン-TMR）、液化石油ガス（約 1.7 億トン-TMR）が考慮されておらず、そのほか輸入素材（約 5 億トン-TMR）、輸入機械（約 3 億トン-TMR）、輸入食料（約 3.5 億トン-TMR）、国内食料（約 5 億トン-TMR）、銅とニッケル鉱石（併せて約 5 億トン-TMR）、木材（約 1 億トン-TMR）、再生資源（全て足すと 4-5 億トン-TMR）がある。

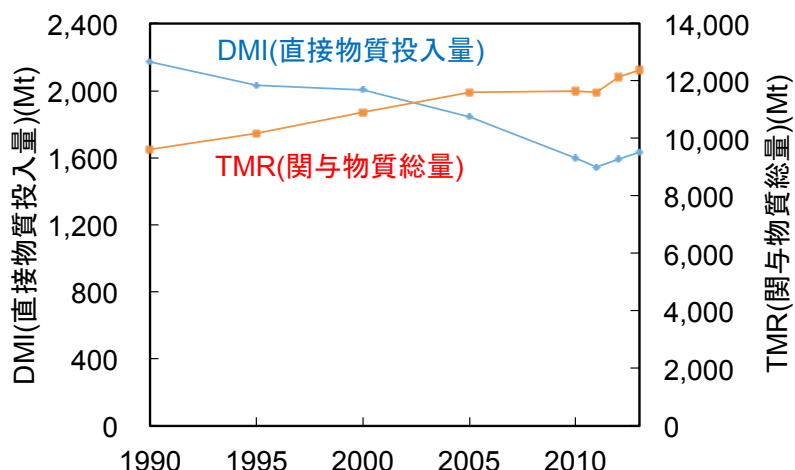


図 4-6 日本における直接物質投入量（DMI）と関与物質総量（TMR）の推移

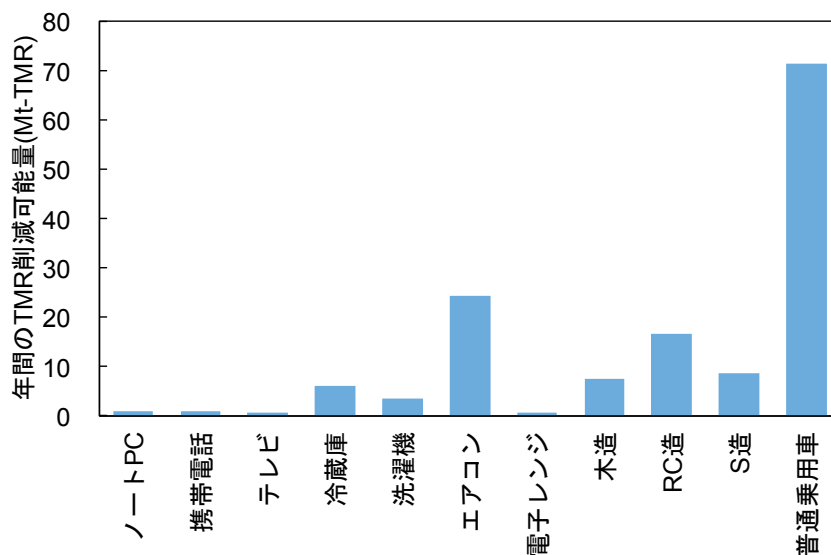


図 4-7 年間の TMR 削減可能量の推計結果

これらの数値から計算した日本全体としての TMR 係数について見ると、1990 年は 4.4kg-TMR/kg であったものが、2013 年には 7.6 kg-TMR/kg となり、約 1.7 倍に増加していた。すなわち、日本の直接物質投入量は減少し、一定の成果を得ていると言えるが、資源採掘段階まで考慮するとむしろ資源への依存度が増加しているということである。脱原子力や次世代自動車の普及等により TMR の高い資源への依存度はさらに高くなると考えられることから、注視が必要である。

ここで、TMR を減少させるための方策として、リサイクルが有効と考えられる。本研究で推計した TMR 係数には一次素材だけでなく二次素材の TMR 係数も含まれており、ある製品の構成素材に全て一次素材を使用する場合と、全て二次素材を使用する場合を比較することで、リサイクルによる TMR 削減可能性を算出できる。製品単位の TMR 削減可能性にその製品の年間生産量を乗じたものを「年間 TMR 削減可能性」と定義し、家電製品、自動車、建築物について比較した結果を図 4-7 に示す。図から分かるように、普通乗用車の年間 TMR 削減可能性が最も高く、次にエアコン、さらに RC 造建築物となった。したがって、これらの製品を二次素材から生産できるようにできれば、TMR を大きく削減できる。

最後に、TMR と他指標との差異について分析を行った。図 4-6 はその代表的な例であり、DMI は減少しているにもかかわらず TMR は増加する結果となっている。多くの低炭素化技術にも、温室効果ガスは削減できるが TMR が増加してしまうものがある。低炭素化に貢献するような元素代替のうち、約 60% が TMR の減少にも貢献するが、いくつかの場合においては TMR が増加する場合がある。TMR が増加する元素代替は、Al→Cu、Pt→Pd、W→Mo、Pt→Au、Ce→Se、Nb→Mo、Ce→La であり、このような代替を安易に行うことは TMR の観点からは望ましくない。直接的な資源消費量や温室効果ガスの削減効果だけでなく、TMR も含めた検討を行うことの重要性を示唆している。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・ 既存の指標体系の再構築：指標の整理法には、OECD/EEA の DPSIR (Driver、Pressure、State、Impact、Response) 等があるが、本研究ではこれ以外の視点も整理し、他の様々な行政計画にも役立てられるような視点のリストを作成した点が新しい。
- ・ スtock指標としての物質利用時間の計測：複数の製品に使用される物質の平均的な利用時間を把握することは、その物質が有効に使われているかどうかを理解することにつながる。これに対し、これまで適切な推計方法がなかった物質利用時間の推計手法を提案したこと、物質Stock量・物質利用時間・再生利用量の関係を定量的に分析することを可能としたことは、学術的に意義が高い。
- ・ 産業部門別の資源生産性指標：資源生産性、資源効率性の具体的な計量方法についての科学的検討については、国全体を対象としたものが主で、部門別・産業分野別の研究はまだ少ない。環境研究における産業連関表の応用は日本が国際的にリードしてきた分野であり、産業部門別の資源生産性の経年変化について実証的な結果を示したこと、産業連関表固有の問題点を確認したことに科学的意義がある。
- ・ 低炭素と資源循環の統合指標：資源占有の時間フットプリント (Resource Time Footprint: RTF) 指標自体が新しいものであり、存在量 (Stock) を占有する資源と、能力・速度 (フロー) を占有する資源の両者を同じ時間の単位で評価できるようにした点が学術的に意義深い。ただし、直感的に理解することが難しい面もあるため、今後の適用研究の積み重ねによって改善していく必要がある。
- ・ TMR 指標の新展開：TMR 係数に関するデータベースを構築し、他指標 (資源消費量や温室効果ガス排出量) との差異を明確化したことは学術的な視点からも意義が大きい。また、いわゆるビッグデータを環境影響 (TMR) のデータと接続して各種料理の TMR を推計した点も学術的な意義があると考えられる。

(2) 環境政策への貢献

< 行政が既に活用した成果 >

- ・ 環境省が 2016~2017 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たが、当該ワーキンググループには、本研究プロジェクトから 3 名が参画し（座長：森口祐一、委員：梅田靖、橋本征二）、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。具体的には以下のような成果が第 4 次循環基本計画において採用された。

- ・ 本研究で指摘した課題とそれへの対応のうち、①政策と指標の関連づけ、②「物質フロー指標」と「取組指標」の関連づけについては明確に第 4 次循環基本計画の指標体系に盛り込まれた。また、③国際発信に対する留意については、下位計画で定められている指標や目標が明確に記載され、⑤SDGs と国際比較への対応についても SDGs との関連を意識した指標がいくつか盛り込まれた。
- ・ 本研究では産業部門別の資源生産性の分母に一次資源等価物質投入量を使用することを提案したが、第 4 次循環基本計画において「産業分野別の資源生産性（一次資源等価換算）」が採用された。産業分野別の資源生産性は第 2 次循環基本計画以降すでに採用されていたが、本研究で提案した一次資源等価換算を採用したことで、「※：第四次循環基本計画で追加した新たな指標」に位置付けられている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ 第 4 次循環基本計画では、社会に蓄積されるストックの状況把握やストックの利用価値に関する指標の検討が今後の課題として示されているが、本研究では、物質ストックの利用時間を計測する手法を提案し、3 種の物質（木材、プラスチック、鉄鋼）についてその計測を行っており、次期循環基本計画策定時のインプットとなるものである。また、提案手法を用いた分析により、再生利用の促進による物質ストックの長期使用への寄与、物質ストックの長期使用による資源投入量や廃棄物発生量の削減への寄与等を定量的に把握することもできることから、各種対策の効果計測に貢献できると考えられる。
- ・ 第 4 次循環基本計画において、「産業分野別の資源生産性（一次資源等価換算）」の具体的な算定方法は明記されていないが、実際の指標値算定において、本研究の成果が活用されることが見込まれる。
- ・ 第 4 次循環基本計画においては、一次資源等価換算や TMR に関わる指標もいくつか採用されており、本研究において構築した関与物質総量データベース (<http://www.ritsumeit.ac.jp/~yamasue/tmr/index.html>) をこうした指標の算定に活用することが見込まれる。記載データは全てエビデンスに基づくものであり、また継続してデータをメンテナンスすることを予定している。

6. 研究成果の主な発表状況

（１）誌上発表

<査読付論文>

- 1) Maung, K.N., S. Hashimoto, M. Mizukami, M. Morozumi, and C.M. Lwin: Environmental Science & Technology, Vol.51, No.7, pp.3824–3832 (2017)
“Assessment of the secondary copper reserves of nations”
- 2) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto: International Review of Civil Engineering, Vol.8, No.3, pp.113–119 (2017)
“Classification of secondary copper resources in major countries”
- 3) Maung, K.N., T. Yoshida, G. Liu, C.M. Lwin, D.B. Muller, and S. Hashimoto: Resources, Conservation and Recycling, Vol.126, pp.34–41 (2017)

“Assessment of secondary aluminum reserves of nations”

- 4) Wang, T., F. Shi, Q. Zhang, X. Qian, and S. Hashimoto: Journal of Cleaner Production, Vol.181, pp.498-507 (2018)
“Exploring material stock efficiency of municipal water and sewage infrastructures in China”
- 5) Dou, Y., S. Ohnishi, M. Fujii., T. Togawa, T. Fujita, H. Tanikawa, and L. Dong: Journal of Cleaner Production, Vol.170, pp.548-558 (2018)
“Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in Cities: Case of Tokyo Metropolitan area”
- 6) Sun, L., Z. Li, M. Fujii, Y. Hijioka, and T. Fujita: Frontiers in Energy, Vol.12, No. 3, pp.400-410 (2018)
“Carbon footprint assessment for the waste management sector: A comparative analysis of China and Japan”
- 7) Sun, L., M. Fujii, T. Tasaki, H. Dong, S. Ohnishi: Resources, Conservation and Recycling, Vol. 136, pp.289-296 (2018)
“Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system”
- 8) Oyaizu, A., J. Cravioto, I. Daigo, and E. Yamasue: Matériaux et Techniques, Vol.105, No.5-6, 510 (2018)
“Data Envelopment Analysis for steel production with the use of Total Material Requirement”
- 9) Kosai, S., S. Hashimoto, K. Matsubae, B.C. McLellan, and E. Yamasue: Minerals, Vol.8, No.3, 114 (2018)
“Comprehensive analysis of external dependency in terms of material criticality by employing Total Material Requirement: Sulfuric acid production in Japan as a case study”
- 10) 山末英嗣、光斎翔貴、松八重一代、マクレランベンジャミン: 日本 LCA 学会誌、Vol.14、No.2、pp.146-157 (2018)
「食料生産における関与物質総量の枠組の提案と評価～国産食材の TMR 係数～」
- 11) Kosai, S., M. Nakanishi, and E. Yamasue: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol.65, pp.355-367 (2018)
“Vehicle Energy Efficiency Evaluation from Well-to Wheel Lifecycle Perspective”
- 12) Dente, S.M.R., C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, C. Kayo, S. Murakami, and S. Hashimoto: Resources, Conservation and Recycling, Vol.143, pp.273-281 (2019)
“Effects of a new supply chain decomposition framework on the material life cycle greenhouse gas emissions—the Japanese case”
- 13) 福谷大樹、M.J. Eckelman、橋本征二: エネルギー・資源、in press (2019)
「欧日米における白金族金属二次埋蔵量の将来推計: 次世代自動車の導入を考慮して」
- 14) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto: Journal of Industrial Ecology, in press (2019)
“Assessment of secondary zinc reserves of nations”
- 15) Kosai S. and E. Yamasue: Science of the Total Environment, Vol.651, pp.1764-1775 (2019)
“Global warming potential and Total Material Requirement in metal production: Identification of changes in environmental impact through metal substitution”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 森口祐一: 廃棄物資源循環学会誌、Vol.27、No.4、pp.260-268 (2016)
「UNEP 国際資源パネルの活動と資源効率性に関する評価報告書」

- 2) 森口祐一：廃棄物資源循環学会誌、Vol.28、No.6、pp.399-402（2017）
「指標・目標」特集のあたってー国内外の活動への参画経験からー」
- 3) 橋本征二：廃棄物資源循環学会誌、Vol.28、No.6、pp.463-473（2017）
「循環型社会形成に向けた新たな指標体系の提案」

（２）口頭発表（学会等）

- 1) K.N. Maung, C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016
“Classification of secondary aluminum resources of nations”
- 2) K.N. Maung, T. Yoshida, C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto: The 12th International Conference on Ecobalance, Kyoto, Japan, 2016
“Assessment of secondary aluminum reserves in major countries”
- 3) E. Yamasue, K. Matsubae, B. McLellan, K. Nakajima, S. Murakami and I. Daigo: The 12th International Conference on Ecobalance, Kyoto, Japan, 2016
“Bottom-up analysis of total material requirement for food production”
- 4) 小柳津顕、醍醐市朗、中島謙一、松八重一代、山末英嗣：エコデザイン・プロダクツ&サービス 2016 シンポジウム、2016
“関与物質総量から見た鉄基合金のパフォーマンス評価”
- 5) 福谷大樹、橋本征二：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“日本における白金族金属類二次埋蔵量評価”
- 6) 石井裕剛、Benjamin McLellan、山末英嗣：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“大規模料理レシピ解析による「食」に関わる関与物質総量の算定”
- 7) 山末英嗣、赤松玲華、J.C. Cravioto：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによるTMR削減ポテンシャル評価”
- 8) 小柳津顕、中島謙一、松八重一代、村上進亮、J.C. Cravioto、山末英嗣：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“関与物質総量を用いた日本の鋼材生産に関わる採掘活動量の定量化”
- 9) 小柳津顕、松八重一代、中島謙一、J.C. Cravioto、山末英嗣：日本鉄鋼協会春季講演大会、2017
“関与物質総量を用いた鉄鋼材料の再評価”
- 10) 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、2017
“白金族金属を対象とした二次資源の類型”
- 11) K.N. Maung, 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, USA, 2017
“Secondary zinc reserves of nations”
- 12) Y. Dou, M. Fujii, S. Ohnishi, T. Togawa, L. Sun, H. Tanikawa: The 9th Conference of International Society for Industrial Ecology and 25th Conference of International Symposium on Sustainable Systems, Chicago, USA, 2017
“Network planning and assessment system for multi-source waste heat exchange based on urban symbiosis: A case of Tokyo Metropolitan area “
- 13) A. Oyaizu, I. Daigo, J.C. Cravioto, E. Yamasue: EMECR2017 (1st International Conference on Energy

and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), Kobe, Japan, 2017

“Data envelopment analysis for steel productions with the use of Total Material Requirement for mining activities”

- 14) S. Kosai, S. Hashimoto, E. Yamasue: 4th International Conference on Final Sinks, Kyoto, Japan, 2017
“Diachronic comparison of material flow in Japan from perspective of both Direct Material Input and Total Material Requirement”
- 15) 小柳津顕、村上進亮、松八重一代、山末英嗣：日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会、2017
“リサイクルまでを考慮したステンレス鋼の関与物質総量”
- 16) 福谷大樹、橋本征二：第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2018
“日米欧における白金族金属の二次埋蔵量評価”
- 17) 平井満規、橋本征二：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“木質バイオマスの物質フローの推計と使用効率の評価”
- 18) 福谷大樹、橋本征二：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“日米欧を対象とした二次白金族金属資源の類型”
- 19) 藤井実、孫露、林希一郎、大場真：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“資源循環と気候変動などの統合的な評価に関する研究”
- 20) 小柳津顕、光斎翔貴、J.C. Cravioto、山末英嗣：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“感度分析を用いた鉄鋼材料の関与物質総量の評価”
- 21) D. Fukutani, M. Eckelman, and S. Hashimoto: ISIE 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China, 2018
“Secondary reserves of platinum group metals in the future: Considering penetration of next generation vehicles”
- 22) Y. Moriguchi : ISIE 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China, 2018
“Indicators for sound material-cycles and resource efficiency toward Sustainable Development Goals”
- 23) 平井満規、橋本征二、小口正弘：環境科学会2018年大会、2018
“木材の物質利用時間の推計”
- 24) 小口正弘、橋本征二、平井満規：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会、2018
“物質ストック指標としての物質利用時間の計測：木材を事例としたケーススタディ”
- 25) Q. Zhang, and Y. Moriguchi: The 13th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2018
“Sustainable Development Goals (SDGs) call for new indicator of resource efficiency for Japan”
- 26) E. Yamasue, S. Kosai, I. Daigo, K. Nakajima, B. McLellan, K. Matsubae, S. Murakami: The 13th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2018
“Revisiting Total Material Requirement estimation and evaluation”
- 27) Y. Dou, M. Fujii, S. Ohnishi, T. Fujita, and H. Tanikawa: 2018 Institute of Innovation and Circular Economy Conference, Taichung, Taiwan, 2018
“Enhanced waste heat utilization through symbiotic district energy systems considering long-term urban renewal: Cases in Japan “
- 28) 福谷大樹、M.J. Eckelman、橋本征二：第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2019
“主要地域における白金族金属二次埋蔵量の将来推計:次世代自動車の導入を考慮して”
- 29) 三俣陽太郎、福谷大樹、橋本征二：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“日本におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量の評価”

- 30) 山末英嗣、光斎翔貴、村上進亮、橋本征二、B. McLellan : 第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“関与物質総量で可視化される資源問題—直接重量・地球温暖化係数との比較を通じて—”
- 31) 中川奈那美、光斎翔貴、山末英嗣 : 第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“採掘活動から見た日本における将来電源構成の資源強度”
- 32) 山末英嗣 : 日本鉄鋼協会第177回春季講演大会、2019
“ステンレス鋼の関与物質総量およびその組成との関係性”
- 33) M. Oguchi, S. Hashimoto, M. Hirai, I. Daigo: The 10th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2019), Beijing, China, 2019
“Measurement of material use time as an indicator of efficient utilization of material stock”
- 34) N. Nakagawa, S. Kosai, E. Yamasue: 13th Conference of ISIE Socio-Economic Metabolism Section, Berlin, Germany, 2019
“TMR of Electricity”
- 35) E. Yamasue, S. Kosai, B.C McLellan, S. Murakami, S. Hashimoto: 13th Society And Materials, International Conference (SAM13), Pisa, Italy, 2019
“Resource paradox problem revealed by Total Material Requirement”

ほか 42 件

7. 研究者略歴

研究代表者：橋本 征二

京都大学大学院工学研究科博士課程後期修了、博士（工学）、現在、立命館大学理工学部教授

研究分担者

1) 小口 正弘

横浜国立大学大学院工学研究科博士課程前期修了、博士（工学）、現在、国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター主任研究員

2) 森口 祐一

京都大学工学部卒業、博士（工学）、現在、東京大学大学院工学系研究科教授

3) 藤井 実

東京大学大学院工学系研究科博士課程単位取得退学、博士（工学）、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター室長

4) 山末 英嗣

東京工業大学理工学研究科博士課程後期修了、博士（工学）、現在、立命館大学理工学部准教授

5) 梅田 靖

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、東京大学大学院工学系研究科教授

6) 小島 道一

カリフォルニア大学バークレー校農業・資源経済学科博士課程中退、修士（農業・資源経済学）、現在、日本貿易振興機構アジア経済研究所上席主任調査研究員

Ⅱ．成果の詳細

要旨

循環型社会形成推進基本計画(基本計画)においては、第1次基本計画において採用された「物質フロー指標」「取組指標」を発展させるとともに、これを補強・補足する形で、循環型社会への進展を計測する指標群が整備されてきた。本研究では、第4次基本計画策定前に指摘されていた主要な5つの課題を取り上げ、第4次基本計画への反映や国際的な発信を行うことを視野に、以下の検討を行った。すなわち、①既存の指標体系を再構築するとともに、②社会における物質利用時間を計測する手法、③産業部門別に資源生産性を計測する指標、④低炭素と資源循環のシナジーやトレードオフを計測する統合指標等を新たに開発ないしは再検討し、⑤関与物質総量（TMR：Total Material Requirement）により国際的な資源依存の状況やリサイクルの効果を推計した。その結果、①a)ライフサイクルの段階、b)指標の種類、c)政策の項目から構成される指標体系を提案し、政策効果の計測・評価を容易にするため、b)において「物質フロー指標」と「取組指標」の対応をとり、c)においてそれぞれの政策目的との対応をとることを提案した。②物質投入量と物質ストック量データから社会における物質の利用時間を計測する手法を提案するとともに、木材、プラスチック、鉄鋼材を事例に計測を行い、いずれの物質も社会における総物質利用時間は延長していることを示した。③産業部門別の資源生産性の算定方法を改善し、国内生産額または付加価値額と国内生産額によって誘発される一次資源等価換算した物質投入量を分子・分母とする指標を提案するとともに、産業部門別という視点をより明確にするため、資源の利用によって各部門が生み出した付加価値に着目した全く新しい指標を提案した。④様々な資源（物質、土地、労働、環境負荷の収容力）の占有状態を評価し、時間に換算してその影響の大きさを示す、資源占有の「時間フットプリント」指標を提案し、いくつかの適用事例をもとにその有効性を示した。⑤900を超える素材・製品のTMR係数を算出するとともに、この係数を用いて算出した日本全体のTMRについては1990年以降増加傾向にあること、家電や自動車のリサイクルの効果についてはエアコンや普通乗用車で大きなTMRの削減ポテンシャルがあること等を示した。

1. はじめに

循環型社会形成推進基本計画（以下、循環基本計画）においては、第1次循環基本計画において採用された「物質フロー指標」「取組指標」を発展させるとともに、これを補強・補足する形で、循環型社会への進展を計測する指標群が整備されてきた。これまでも様々な課題に対応して改訂が進められてきたが、本研究開始時点で下記のような改善点が指摘されていた。

まず、①指標の数が増え全体の構成が分かりにくくなっていることや、物質フロー指標と取組指標の関連づけが必ずしもなされていないことから、指標全体の整理・再構築が必要であるという指摘である。また、②ストックを有効に活用するストック型社会に向けた取り組みが益々重要となっているが、その進捗を計測する指標がないことが挙げられる。さらに、③個々の主体による資源生産性向上に向けた取り組み、我が国においてはとりわけ製造業における取り組みを評価していくことが重要であるが、そのための適切な指標がないこと、④低炭素と資源循環などの異なる分野の取り組みを統合ないしは両立していくことが求められているが、これについても適切な評価指標がないことも指摘されている。加えて、⑤間接的な資源消費も含めて資源に依存しない社会づくりを推進していくための指標が必要となっていることがある。

2. 研究目的

本研究では、第4次循環基本計画への反映や国際的な発信を行うことを視野に、上述した課題に対応する以下の検討を行った。すなわち、①既存の指標体系に本研究で新たに開発する指標等を加え、これをいくつかの視点から整理・再構築するとともに、②社会における物質利用時間を計測する手法、③産業部門別に資源生産性を計測する指標、④低炭素と資源循環のシナジーやトレードオフを計測する統合指標等を新たに開発ないしは再検討し、⑤関与物質総量（TMR：Total Material Requirement）により国際的な資源の依存状況やリサイクルの効果を推計することを目的とした。

①では、指標を整理するための汎用性のある視点が提供されるとともに、再構築された循環基本計画の指標体系が代替案として提示される。②では、社会における物質の利用時間の計測手法が開発され、いくつかの物質に適用された結果が示される。③では、業種ごとの資源生産性の目標設定に適した産業部門別の資源生産性指標が提示され、いくつかの産業に適用された結果が示される。④においても、低炭素と資源循環の間でトレードオフが生じるケースを踏まえ、これらの統合的な評価が可能となる指標体系とそのケーススタディが示される。⑤では、都市鉱山の有効利用とそれらを自然鉱山の利用と比較して正しく評価できるような枠組みとケーススタディが示される。こうした成果は、個別指標としての新規性・独創性や、指標体系を検討する視点としての新規性を持っているだけでなく、循環基本計画における指標体系の代替案を示すものとして、今後の循環基本計画策定における活用が期待されるものである。

3. 研究方法

（1）既存の指標体系の再構築

（1.1）既存の指標体系

循環基本計画においては、第1次計画において採用された指標・目標を随時補強・補足しながら、循環型社会への進展を計測する指標群が整備されてきた。これらの指標は、計画の進捗管理に利用されているほか、地方公共団体の計画策定においても参考にされており、循環型社会形成に向けた各主体の向かうべき方向や努力が適切に反映されるように、慎重に選定することが必要である。国際的には、中国の循環経済促進法の進捗管理に用いられている指標群が日本の指標群を参考にしているほか、欧州の循環経済に向けた行動計画のモニタリング指標の議論においても日本の指標群が参考とされた。本研究開始時の第3次循環基本計画においては、まず、指標を「物質フロー指標」と「取組指標」に分類し、さらに「目標を設定する指標」「目標を設定する補助指標」「推移をモニターする指標」に分け、物質のライフサイクルの段階として「入口」「循環」「出口」を設定する体系をとっていた。

（1.2）既存の指標体系の課題

この指標体系・指標群については以下のような課題が主要な課題として指摘できる。

- ① 政策と指標の関連づけ：第1～3次循環基本計画では、その第2章において循環型社会の中長期のイメージが示され、第3章において循環型社会形成のための指標及び数値目標、第4・5章に各主体の役割および国の取組が示される構成となっており、必ずしも第3章の指標・数値目標と第4・5章の政策が明確に対応していなかった。このため、第3章の指標を用いて、各政策の達成状況进行评估することもなされてこなかった。このようなことから、政策と指標の関連づけを行って、各政策の評価を行いやすくしていくことが必要と考えられる。

- ② 「物質フロー指標」と「取組指標」の関連づけ：環境と経済社会の関係を表した DPSIR の枠組み¹⁾に当てはめれば、「物質フロー指標」は P (pressure) ないしは S (state)、「取組指標」は R (response) に相当するものである。R (response) が D (driver) や P (pressure) に影響を与え、それぞれ P (pressure) や S (state) を変化させることになるが、この「物質フロー指標」と「取組指標」の対応がこれまで明確となっていなかった。「取組指標」の変化が「物質フロー指標」の変化に与える影響を定量的に説明するには詳細な研究が必要となるが、まずは定性的な関連づけを行っていくことが必要と考えられる。
- ③ 国際発信に対する留意：上述のように、日本の循環型社会に対する取組は世界的にも注目を浴びており、取組の上位計画として循環基本計画や同計画における指標と目標が紹介されることが増えている（例えば、OECD²⁾³⁾ や UNEP⁴⁾⁵⁾）。しかしながら、日本における取組は循環基本法の下位法にあたる廃棄物処理法や資源有効利用促進法、各種リサイクル法により支えられている。循環基本計画と同計画における指標と目標のみが前面に出て国際的に発信されることは、日本の取組の全体像を正確に伝達できていないことを意味する。特に、指標による進捗管理は関心を持たれる部分でもあり、下位計画で採用されている指標を適切に循環基本計画の中に位置づけ、国際的にも発信していくことが有益と考えられる。
- ④ 「物質フロー指標」と「取組指標」の区別：現行計画において「取組指標」として整理されているものの中には、物質フローを表すものが少なからずある。例えば、「国民一人当たりの資源消費量」「1 人 1 日当たりの家庭系ごみ排出量」「一般廃棄物のリサイクル率」などである。「国民 1 人当たりの資源消費量」は、第 2 次計画において「物質フロー指標」として採用された「総物質消費量」を国民 1 人あたりにして第 3 次計画において「取組指標」に位置づけたものであり、国民 1 人あたりとしたことで「取組指標」との立場をとったものである。「1 人 1 日当たりの家庭系ごみ排出量」「一般廃棄物のリサイクル率」も 1 人あたりという国民の取組の視点と、地方公共団体の取組の視点が考慮されていると考えられる。しかしながら、「取組指標」は DPSIR の枠組みにおける R (response) の指標として位置づけ、これらは取組の帰結としての「物質フロー指標」(P (pressure) ないしは S (state)) とは明確に区別すべきと考えられる。
- ⑤ SDGs と国際比較への対応：SDGs の中には、我が国の循環型社会形成に関連する目標が散見される。特に「目標 12. 持続可能な生産消費形態を確保する」に示されている目標、例えば「目標 12.2. 2030 年までに天然資源の持続可能な管理及び効率的な利用を達成する」「目標 12.3. 2030 年までに小売・消費レベルにおける世界全体の一人当たりの食料の廃棄を半減させ、収穫後損失などの生産・サプライチェーンにおける食品ロスを減少させる」などは非常に関連が深いことから、これらのうち主要な指標を循環基本計画の中にも位置づけることで、SDGs に向けた取組も合わせて観測・評価することが可能になると考えられる。また、現行計画においても指標に関する今後の検討課題として、国際比較可能な物質フロー指標の検討が挙げられているように、国際比較可能性を高めていくことも必要であり、代替できる指標については、SDGs で示されたような指標に代替していくことが考えられる。

(1.3) 指標体系を構築する際の視点

指標体系を構築する際の視点としては、表 3-1 に示すようなものが考えられる。①対象システムは、国、地方公共団体、産業など対象となるシステムのことであり、これをもとに指標を整理するということであるが、循環基本計画は国が策定する国の計画であるため、基本的には国が対象システムとなる。②ライフサイクルの段階は、第 1～3 次循環基本計画でも用いられている指標整理の視点であり、「入口」「循環」「出口」がこれに相当する。③DPSIR の段階は、環境と経済社会の関係を表した DPSIR の枠組み¹⁾の各段階をもとに指標を整理するということであるが、循環型社会の形成に関わる指標は、この枠組みにはやや当てはめにくい。特に、I (Impact) の指標を設定しにくく、上述のように「物質フロー指標」は P (Pressure) と S (State)

とも位置づけられることから、この視点を用いるメリットはあまりない。④改善活動の種類は、政策の項目や改善活動の項目をもとに指標を整理するということであるが、上述の課題①に対応するにはこの視点を導入する必要があると考えられる。⑤改善活動の主体は、実際に改善活動を行う主体をもとに指標を整理するということであるが、循環基本計画の主体は国であることから、国の活動に対する指標のみで構成されることになる。⑥指標の種類は、目標指標や観測指標などの指標の種類をもとに整理するということであり、第3次循環基本計画の「物質フロー指標」「取組指標」や「目標を設定する指標」「推移をモニターする指標」などによる整理はこの視点に基づくものである。

表 3-1 指標体系構築の視点

視点	説明
①対象システム	国，地方公共団体，産業，企業，製品など
②ライフサイクルの段階	資源採取，製品製造，製品使用，製品廃棄
③DPSIR の段階	Driving forces, Pressures, State, Impacts, Responses
④改善活動の種類	政策の項目，改善活動の項目
⑤改善活動の主体	国，地方公共団体，事業者，国民など
⑥指標の種類	目標指標，観測指標，ヘッドライン指標など

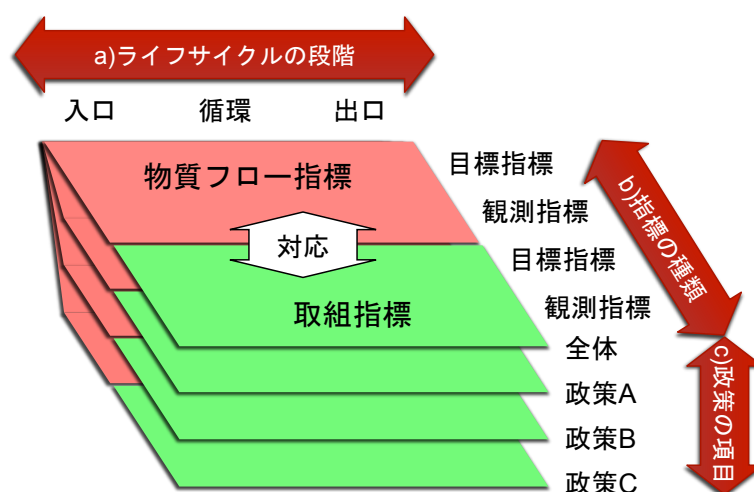


図 3-1 提案する指標体系

（1.4）新たな指標体系の提案と適用

上述のように、指標体系構築の視点②及び⑥は第3次循環基本計画においてすでに用いられており、さらに④の視点が求められているといえる。このため、本稿では、a)ライフサイクルの段階、b)指標の種類、c)政策の項目という3軸を用いた指標体系を提案する。具体的には、図3-1に示すようなイメージである。a)ライフサイクルの段階は、第1～3次循環基本計画における指標整理の方法に沿うものであり、「入口」「循環」「出口」で構成される。ストック型社会に向けて、ここに「蓄積」という観点を新たに組み込むかどうかは論点である。b)指標の種類は、「物質フロー指標」と「取組指標」で構成され、さらにそれぞれが「目標指標」と「観測指標」に分けられる。この分類も第3次循環基本計画における指標整理の方法に沿うものであるが、改善活動である「取組指標」とその帰結としての「物質フロー指標」の関連づけを行うことが本指標体系の新しい点であり、上述の課題②に対応するものである。c)政策の項目は、これらの指標を個々の政策に対応

させて整理するというもので、これも本指標体系の特徴と言える。これにより、上述の課題①に対応でき、政策の評価が行いやすくなると考えられる。ここでは、第4次循環基本計画において示された「循環型社会形成に向けた取組の中長期的な方向性」の各項目をc)政策の項目に位置づけ、図3-1に示す指標体系の適用可能性を検討した。この際、課題③④⑤への対応も合わせて議論した。

(2) スtock指標としての物質利用時間の計測

近年、物質Stockを有効に活用するStock型社会に向けた取り組みが益々重要となっているが、その進捗を計測する指標がないことが課題となっている。物質を社会の中でできるだけ長く利用することで、一次資源の採取、消費および廃棄のフローを減らすことが重要であるが、その進捗を計測するためには、社会における物質利用時間の計測手法の確立が必要である。本研究では、耐久消費財の製品寿命の計測手法を援用した物質利用時間の計測手法を提案し、木材、プラスチック、鉄鋼を事例としたケーススタディによってその適用可能性を検討した。

社会における物質の長期利用の進捗を計測するための指標として、Hashimoto and Moriguchi⁶⁾はStock量を同年の投入量で除した「物質利用時間」(material use time: MUT)を提案している。しかし、Hashimoto et al.⁷⁾ではこれを木材に適用した上で、この定義式による計算方法ではMUTが長期化しているか短期化しているかを判断することができないとしており、一意的に物質利用時間を計測できる手法の確立が必要である。一方で、電気電子機器や自動車等の耐久消費財の製品寿命を計測する手法はこれまでにほぼ確立されており、Oguchi et al.⁸⁾において文献レビューに基づく体系的な整理がなされている。その整理によれば、製品寿命分布の計測方法は以下の4つに大別される。

- 1) 排出製品の使用年数データからある期間における排出割合分布を推定する方法
- 2) 保有製品の使用年数データからある時点における残存割合分布を推定する方法
- 3) 保有製品の使用年数データからある期間における残存割合分布を推定する方法
- 4) 製品の販売台数と残存割合分布から計算した保有台数が保有台数の統計値等と一致するようにある時点における残存割合分布を推定する方法

本研究ではこれらのうち、しばしばポピュレーションバランスモデルと呼ばれる4)の方法を援用した物質利用時間の計測手法を検討、提案し、その適用可能性を評価した。

図3-2にポピュレーションバランスモデルを用いた耐久消費財の製品寿命分布の推定方法の概要を示す。この手法は、製品の過去($t-i$ 年)の販売台数(S_{t-i})とワイブル分布等の統計分布関数でパラメトリックに表現した t 年時点における使用年数 i 年の製品の残存割合の分布($R_t(i)$)から計算した t 年時点の保有台数((3-1)式)が、統計値等から外生的に与えられる保有台数と一致するように残存割合分布のパラメータを推定するものである。未知の分布パラメータは1つである必要があるため、実務的には分散や形状パラメータを設定し、残存割合分布の平均値を最適化する。詳細はOguchi and Fuse⁹⁾を参照されたい。

$$N_t = \sum_i \{S_{t-i} \times R_t(i)\} \quad (3-1)$$

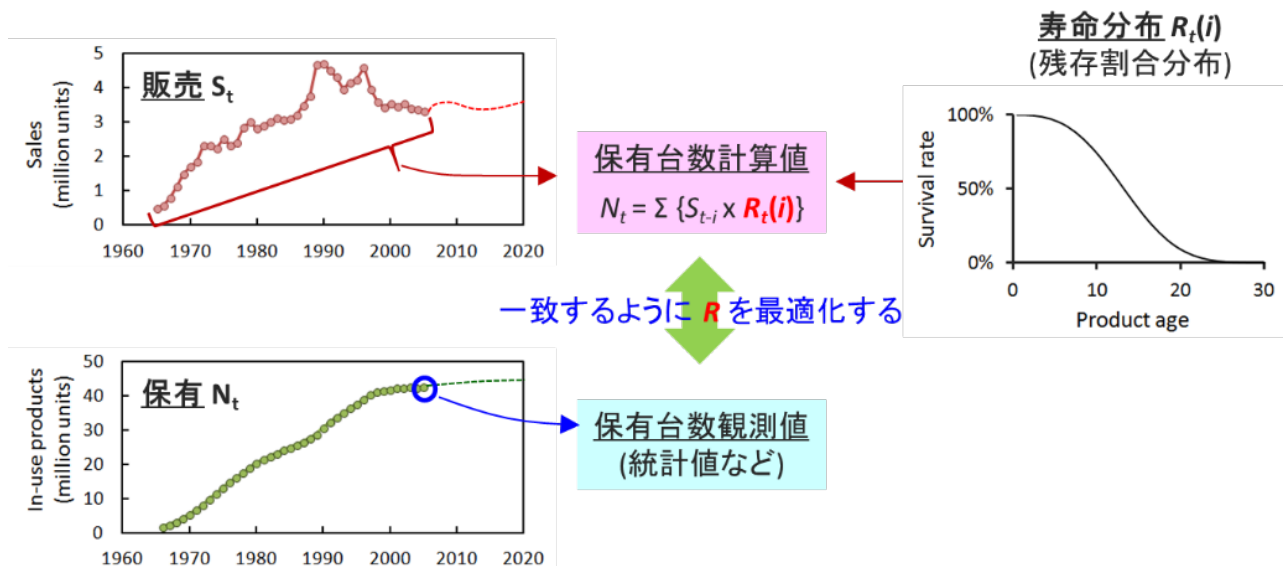


図 3-2 ポピュレーションバランスモデルを用いた製品寿命分布の推定方法の概要

表 3-2 計測される物質利用時間の定義

		物質投入量		
		新材のみ	再生材のみ	新材・再生材の合計
物質 ストック 量	新材・再生材由来の合計	①新材投入から再生利用を経て最終的に廃棄物として排出されるまでの総物質利用時間		②投入から排出までの 1 回使用の物質利用時間 (新材・再生材の平均)
	新材由来のみ	③新材としての物質利用時間		
	再生材由来のみ		④再生材としての物質利用時間	

この手法を物質利用時間の計測に援用するには、製品の販売台数の代わりに物質投入量、保有台数の代わりに物質ストック量を用いればよい。物質投入量については長期の時系列データを用意する必要があるが、物質ストック量については最低 1 時点のデータがあればその時点における物質利用時間の計測が可能である。ただし、物質利用時間の経年的な変化を計測したければ複数時点の物質ストック量データが必要である。また、データの単位については、物質投入量と物質ストック量の単位が揃ってさえいけばよいので、物質量（質量）だけでなく、建築物の延べ床面積、道路の総延長などで整備されたデータも使用可能である。

この手法で計測される「物質利用時間」の定義は、計算に用いる物質投入量および物質ストック量データの定義によって決まる（表 3-2）。例えば、物質投入量を新たな物質投入（新材投入）に限定した値とすれば、社会への新材の投入からリサイクルによる再生利用を経て最終的に廃棄物として排出されるまでの時間（総利用時間）が計測される。一方、新材および再生材の投入量を用いた場合には、新材か再生材かを問わず投入から排出までの 1 回使用の物質利用時間（新材・再生材の平均）が計測される。また、（実際には困難と予想されるが）物質ストック量データを新材由来と再生材由来の量に分割できる場合には、新材と再生材それぞれの物質投入量データを用いて新材および再生材の物質利用時間を計測することも方法論的には可能であ

る。また、物質ストック量を利用中のものに限定すれば社会で実際に利用される時間（狭義の物質利用時間）が計測されるが、利用されていないものまでを含めた場合には利用されない時間も含めた社会における存在時間（物質滞留時間などと呼ぶことができる）が計測される。

上記で提案した手法を用いて、木材、プラスチック、鉄鋼を事例とした物質利用時間の計測を試行した。物質利用時間の分布は製品寿命の近似によく用いられているワイブル分布 ((3-2)式) に従うものと仮定した。

$$R_i(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\mu} \right)^m \times \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right\}^m \right] \quad (3-2)$$

ここで、 μ はワイブル分布関数の平均値（平均物質利用時間）、 m は形状パラメータである。形状パラメータ m は耐久消費財の代表的な値を参考に 3.0 と仮定した。なお、分布形状や推定される平均値に対する形状パラメータの感度は高くはなく（乗用車の事例では、形状母数が現実に取り得ると考えられる値の範囲において平均使用年数推定値は最大でも 5%程度しか変わらないことが分かっている）、推定される平均物質利用時間への影響は小さいと考えられる。

計測の試行においては、物質投入量、ストック量ともに用途を区別しない総量のデータを用い、全用途を含めた全体の物質利用時間を計測した。投入量は新材のみ、新材と再生材の合計の両方を用意し、表 3-2 の①総物質利用時間と②投入から排出までの 1 回使用の物質利用時間（新材・再生材の平均）の両方を計算した。また、同じデータを用い、Hashimoto and Moriguchi⁶⁾の定義式 ((3-3)式) による物質利用時間の計算も行い、物質利用時間の簡易指標としての利用可能性も検討した。

$$\text{Hashimoto and Moriguchi}^{6)} \text{による物質利用時間} = N_t / S_t \quad (3-3)$$

各事例において計測に使用した物質投入量、物質ストック量データは以下に示すとおりである。

a) 木材

木材の投入量・ストック量データは橋本・森口¹⁰⁾による 1960 年から 2000 年までの推計値を同じ手法で 2015 年まで更新したものを用いた。なお、用いたストック量データには概念的には空き家等の未利用のものも含まれていることから、厳密には計算した物質利用時間は未利用のまま存在する期間を含めた時間（「物質滞留時間」などと呼ばれる）となっていることに留意されたい。なお、再生材の投入量には使用済み製品由来の再利用分のみを含め、加工ロスの再利用分は含めなかった。

b) プラスチック

プラスチックの投入量・ストック量データは、プラスチック循環利用協会¹¹⁾および金子¹²⁾のデータをもとに作成した。具体的には、投入量はプラスチック循環利用協会¹¹⁾における国内樹脂製品消費量、生産・加工ロス量、再生樹脂投入量、ケミカル／サーマルリサイクル量のデータから以下の通り計算した。

$$\text{新材投入量} = \text{国内樹脂製品消費量} + \text{生産・加工ロス量} - \text{国内再生樹脂投入量} \quad (3-4)$$

$$\text{再生材投入量} = \text{再生樹脂投入量} + \text{ケミカル／サーマルリサイクル量} \quad (3-5)$$

プラスチック循環利用協会¹¹⁾のデータでは、国内再生樹脂投入量は国内樹脂製品消費量及び生産・加工ロス量の内数として扱われているため、新材投入量の計算ではこれらから差し引いた。また、ケミカル／サーマルリサイクル量には新材投入量は含まれないとした。なお、この計算では、生産・加工ロス由来の再生投

入量が再生材投入量に含まれており、木材のデータと異なる整理となっているが、プラスチック循環利用協会¹¹⁾のデータでは再生樹脂投入量が使用済み製品由来と生産・加工ロス由来に分かれていないため、このような扱いにせざるをえなかった。

なお、1974年以前については国内樹脂製品消費量が得られなかったため、1975年以降の国内樹脂製品消費量と樹脂生産量の比を参考に、樹脂生産量の60%を投入量として設定した。また、1990年以前については国内樹脂製品消費量、樹脂生産量ともに5年おきのデータのみ得られたため、その間の値は線形補間によって作成した。ストック量データは、蓄積増分法（Net addition to stock: NAS法）によって作成した。すなわち、ストック量の初期値を0とし、毎年のストック純増量を累積することで各年におけるストック量データを作成した。毎年のストック純増量は国内樹脂製品消費量から廃プラスチック総排出量を差し引いたものとした。ただし、1974年以前については廃プラスチック総排出量のデータが得られなかったため、1975年以降の国内樹脂製品消費量と廃プラスチック総排出量の比を参考に、国内樹脂製品消費量の60%が廃プラスチックとして排出されるものとして設定した。また、1990年以前については5年おきのデータのみ得られたため、その間の値は線形補間によって作成した。

なお、1974年以前についてはいくつかの仮定を置いているが、後述の通り、プラスチックの物質利用時間は10年未満と短いため、この期間の投入量、ストック量データの設定は物質利用時間の計測結果に大きく影響しないと考えられる。

c) 鉄鋼

鉄鋼の投入量・ストック量データは、Daigo et al.¹³⁾およびHatayama et al.¹⁴⁾のデータを2015年まで更新したものをを用いた。ストック量データは退蔵物を含まないものとした。

（3）産業部門別の資源生産性指標

（3.1）概要

わが国では、国レベルの物質フローに基づく資源生産性指標と数値目標が、世界に先駆けて第1次循環基本計画に導入され、第2次循環基本計画からは、産業分野別の資源生産性指標が推移をモニターする指標として導入された。従来、循環基本計画の点検で用いられてきた産業部門別（循環基本計画上の用語は産業「分野」別）資源生産性指標は、部門*i*の最終需要*F_i*により誘発される直接物質投入量(DMI)と、最終需要額との比として算定されてきたが、計画の点検作業で報告された指標の算定結果において、一部の部門の資源生産性が負値をとる場合があることが課題となっていた。また、直接物質投入量は、輸入される原材料や製品について、その実重量で算定するため、背後にある資源投入量を過小評価する問題があった。一方、資源生産性の向上のためには、個々の主体による取り組み、とりわけ製造業における取り組みが重要であり、国レベルの資源生産性指標と個々の主体による取り組みの関係をより明確にしていくことが課題である。本研究では、欧州委員会等における資源効率性指標の国際的な動向や、業種ごとの資源生産性の目標設定の可能性も念頭におきながら、資源効率性・資源生産性を産業部門別に評価するためにより適した指標の検討を行った。ここで、資源効率性（Resource efficiency）という語は、資源生産性（Resource Productivity）という語よりも広義で用いられる場合があるが、ここでは以後、わが国で用いられてきた資源生産性という語を基本に用い、海外の動向を参照する際に、これと同義で用いられる前提で資源効率性という語を必要に応じて参照している。

（3.2）従来の産業分野別資源生産性指標の算定方法の精査

循環基本計画の点検でこれまで用いられてきた産業分野別資源生産性指標は、第1次計画以来、資源生産性の変化の要因分析¹⁵⁾に適用されてきた以下の(3-6)式（ここで、DMIは直接物質投入量、Rは再生資源量、

F は最終需要、i は部門、k は物質の種類）との整合性を考慮して、部門 i の最終需要 F_i により誘発される物質投入量と、最終需要額との比として算定されてきた。なお、ここで用いる DMI_{ki} は部門 i に直接投入される物質質量だけではなく、部門 i の最終需要に対して直接、間接に必要な物質投入量を表すが、国レベルの物質フロー分析で定義される DMI の量（国内で採取される物質の重量と輸入される財の重量の和）の範囲で算定されるものであって、間接的な物質フローを網羅したものではない。この点については後述の（3.3）で論じる。

$$\frac{DMI}{GDP} = \sum_k \sum_i \frac{DMI_k}{(DMI_k + R_k)} \times \frac{(DMI_{k,i} + R_{k,i})}{F_i} \times \frac{F_i}{F} \times \frac{F}{GDP} \quad (3-6)$$

この定義による指標を採用することで、資源生産性の変化を、最終需要の産業部門別(産業分野別)構成比の変化と産業部門(産業分野)ごとの資源生産性の変化から考察することが可能となる。基本計画のこれまでの点検作業で報告された指標の算定結果においては、産業部門別(産業分野別)の資源生産性が負値をとる場合があることが課題となっていた。具体的には鉱業について、複数の年次で負値となっていたが、鉱業の生産物は主に他産業への投入物であり、最終需要に計上されるのは主に在庫変動で、これが負値となる場合があることが原因と考えられていた。

具体的な算定手順と用いられたデータを精査した結果、現在の 18 部門別の資源生産性の算定には、その基礎データとして 49 部門の産業連関表が使われており、18 部門表の鉱業は 49 部門表では金属鉱物、非金属鉱物、石炭・原油・天然ガスの 3 部門に分割されているが、これらには輸入依存度が極めて高い部門が含まれる一方、重量あたりの単価が 3 部門間で大きく異なる。金額でみた在庫変動に大きく影響するのは輸入される原油、天然ガスであり、仮に最終需要額が負の値でも、それに見合った負の値の DMI が誘発される計算になっていれば、指標は正になる。しかし、従来の計算法では、石炭・原油・天然ガスの 3 燃料種が 1 部門に括られることの問題を回避するため、原油の資源投入量を石油精製部門に計上しており、そこからの DMI の誘発計算の際に国産率が乗じられていた。このため誘発される DMI のマイナスの値が小さく、他の非金属鉱物などの鉱業のプラスの最終需要に伴うプラスの誘発 DMI と合算された結果、鉱業部門の誘発 DMI は正の値となり、主に国産の非金属鉱物の需要によるプラスの誘発 DMI と、輸入原油・天然ガスの在庫変動によるマイナスの需要金額の比、という解釈困難な指標が計算される結果となっていた。

この問題には、産業連関表を環境分析に適用する際に留意すべき典型的な課題が複数関係している。第 1 に部門分解能の粗さによる部門内の不均一性、第 2 に輸入と国産の区別であり、加えて、資源の投入量をどの部門に紐付けるか、という課題がある。概念上は、自然から資源を採取した部門に投入量を計上すべきであるが、単価が大きく異なる鉱物を全て鉱業に計上すると、鉱業から各産業への金額のフローに応じた物量が計算されてしまうため、鉱業から最初に資源が投入された部門が自ら採掘したような便宜的な扱いがされていた。分析の枠組みとしては、いわゆる「ハイブリッド法」を適用して鉱業部門を分割することで整合的な扱いが可能となるが、これは上述の部門分解能の粗さによる部門内の不均一性、という問題に帰着する。これを教訓として、こうした国レベルで利用可能な統計に依拠した計算方法ゆえの課題について、できる限り改善を図りながら、他の情報源に基づく指標算定の可能性を提案することを試みた。

（3.3）資源や製品の輸入に伴う資源消費量の指標

鉱業部門の資源生産性指標の歪みの要因として、輸入依存度の極めて高い部門の存在を挙げたが、資源生産性指標の算定に用いている直接物質投入量（DMI）は、輸入される原材料や製品についてその実重量で算定するため、その背後にある資源投入量を過小評価する問題がある。この問題は 3 段階に大別され、①製品

として輸入される財の生産段階に間接的に投入される原材料を計上していないこと、②原材料として輸入される財であっても、精鉱のように、輸入相手国で変換・加工され、実際に自然から採取された資源量が輸入量より大きいこと、③環境への影響の観点からは、統計として記述される資源採掘量だけでなく、採掘時に発生する覆土、捨石なども考慮すべきこと、が挙げられる。③までを含めた関与物質総量（TMR: Total Material Requirement）については、1990年代後半に実施された日米欧の国際共同研究¹⁶⁾で既に試算が行われていた。また、わが国の循環基本計画でも、第2次計画以降、輸入される金属資源量や、金属資源のリサイクル率の算定にTMRの考え方が適用されており、本課題のサブテーマ5でも、金属以外の資源にも算定対象を広げて算定手法の開発を行っている。しかし、TMRは統計値として報告するだけの熟度に至っていないため、欧州の資源効率性指標の検討においては、①と②までを考慮した一次資源等価換算量（RME: Raw Material Equivalent）に主眼がおかれてきた。SDGsのターゲット8.4、12.2でもRMEの考え方を適用した指標案が示されていること、わが国でも、RMEベースでの国の資源生産性が、推移をモニターする指標として第3次循環基本計画から加えられてきたことから、当面は、RMEに基づく指標を用いつつ、TMRへの拡張のための情報整備を進めることが適切と考えられる。

（3.4）産業部門別資源生産性指標の代替案の提案

先に(3.2)で述べたとおり、これまでの分野別資源生産性指標では、最終需要額が分子に用いられてきた。これは「消費」側の視点からの分析には適しているが、最終財を生産しない資源採掘産業や原材料産業には適用しにくい。産業部門別の資源生産性指標において、「生産」側の視点をより明確にするには、生産の総量や生産によって生み出された価値をとらえることがより適切と考えられる。そこで、これまでの最終需要額に加え、産業連関表における部門別の国内生産額および付加価値額に着目し、各部門において、資源の投入がどれだけの付加価値を生んだかを表現することを、新たな指標の考え方とした。なお、国内生産額は、産業連関表ではDomestic Production(DP)と訳されているが、GDPとの混同を避けるため、ここでは、TO（Total Output）という略語を併用し、付加価値額にはVA（Value Added）という略語を充てた。

本研究で提案する部門別資源生産性指標の代替案を以下の一連の式で定式化した。

$$DMI^{FD} = DM(I - A^*)^{-1}f^* \quad (3-7)$$

$$RMI^{FD} = RM(I - A^*)^{-1}f^* \quad (3-8)$$

$$RMI^{TO} = RM(I - A^*)^{-1}TO \quad (3-9)$$

$$RE^{TO}_i = \frac{TO_i}{RMI^{TO}_i} \quad (3-10a)$$

$$RE^{VA}_i = \frac{VA_i}{RMI^{TO}_i} \quad (3-10b)$$

$$RMI^{FD} = \sum_i GDP * \frac{VA_i}{GDP} * \frac{RMI^{FD}_i}{VA_i} \quad (3-11)$$

$$\frac{RMI^{FD}_i}{VA_i} = RMI^{TO}_i \frac{FD_i}{TO_i} \frac{1}{VA_i} = \frac{RMI^{TO}_i}{VA_i} \frac{FD_i}{TO_i} \quad (3-12)$$

ここで、 DM は各部門の国内生産額あたりの直接物質投入量、 RM は各部門の国内生産額あたりの物質投入量の一次資源等価換算量、 A^* は輸入分を除いた投入係数行列（ $A^* = (I - M)A$ ）、 f^* は国産品に対する最終需要、 TO は国内生産額である。生産額あたりの物質投入量は、英語では *intensity* と表現され、資源生産性、資源効率性の逆数にあたる。

(3-7)式は、先に(3-6)式で示した第2次、第3次循環基本計画で適用されてきた指標と同様に、DMIと最終需要に基づく定式化である。(3-8)式は、上記の項目「資源や製品の輸入に伴う資源消費量の指標」で論じた考え方をもとに、物質投入量を一次資源量に換算する係数を乗じて、(3-7)式のDMIを一次資源等価物質投入量RMI(Raw Material(-equivalent) Input)に置き換えたものである。なお、(3-8)式にSPA(Structural Path Analysis)を適用することで、最終需要を満たすための資源の投入経路を分析することもできるが、本報告では定性的な考察にとどめる。ここで、RMIの計算に際して、第3次循環基本計画の点検で用いられてきたデータベースでは、輸入される資源や製品に対しては、欧州連合統計機関EUROSTATが提供する係数を適用し、国産品については、国内の産業構造に基づく波及計算が行われてきた。国際産業連関表を適用すれば、RMIをより整合的に求めることができるが、部門分解能の粗さに起因する誤差の影響が大きいことから、先に(3.2)で述べたハイブリッド法の併用なしには、かえって不正確な算定となる可能性がある。

(3-9)式は、これまで用いられてきた最終需要に基づく式を、国内生産額に基づく式に置き換えたものである。右辺の $RM(I - A^*)^{-1}$ が、単位生産（ないし需要）金額あたり直接、間接に消費される一次資源等価での物質投入量である点は(3-8)式と共通であるが、先に(3.2)で示したとおり、「鉱業部門の最終需要」のような、解釈が困難な項目を回避すること、最終需要や消費の視点だけでなく、中間需要も含めた生産量全体をとらえるために国内生産額計をベースに計算するように書き改めたものである。(3-8)式では、部門ごとの最終需要で誘発されるRMI（式中では RMI^{FD} と表記）が計算されるので、その総和はDMIの一次資源等価換算量として求めた国全体のRMIと一致するのに対し、国内生産額計を用いた(3-9)式では、同じ資源が形を変えながら複数の部門で複数回利用される状況をそのまま足し上げるため、総和（ RMI^{TO} ）は国全体のRMIよりも大きくなる。

(3-10a)式、(3-10b)式が本研究で提案する部門別資源生産性指標の候補であり、部門*i*ごとに、その部門の国内生産のために直接・間接に消費される一次資源等価物質投入量を分母におく。国内生産額 TO_i を分子とした(3-10a)式は、(3-9)式を変形したものでもあり、(3-8)式と共通する $RM(I - A^*)^{-1}$ の逆数が、資源生産性指標 RE^{TO}_i である。一方、(3-10b)式は、部門*i*が生み出す付加価値額 VA_i を分子にとったものである。同じ資源消費量に対してより大きな価値を生み出すという資源生産性の概念に照らせば、付加価値額をとることで、指標はより鋭敏に反応する利点がある。但し、付加価値額は為替レートや市場での需給バランスの変動などによる原材料費の変動に大きく影響されるため、資源生産性の向上のための取り組みを計測しようとしているにもかかわらず外的な要因の影響を受けやすい点には注意が必要である。

(3-10b)式の定義による部門別資源生産性指標を用いて、一次資源等価物質投入量の国全体の純合計値を構造分解するための式が(3-11)式である。右辺の第2項はGDPに占める部門*i*の付加価値額のシェアを示す。第3項は(3-12)式のようにさらに分解され、(3-10b)式で提案した付加価値額を用いた部門別資源生産性指標の逆数(intensity)に部門*i*の最終需要額と国内生産額の比 FD_i/TO_i を乗じたものである。

本研究では、以上の定式化をもとに、1995年、2000年、2005年、2011年の4時点について、産業連関表18部門表および49部門表を用いて産業部門別の資源生産性を算出した。

(4) 低炭素と資源循環の統合指標

社会や自然生態系の持続可能性を高めるには、多面的な側面の考慮が必要である。持続可能な開発目標(SDGs)において17のゴールが設定されているのはその一例である。経済、社会、環境がそれぞれ項目間のバランスを考えることが必要である。本研究において、17の総てを明示的に取り扱うことはできないことから、重要な項目である物質・エネルギー・環境の面で持続可能性を高めることに着目する。その総合的かつ有力な解決策の1つとして、フロー型経済からストック型経済に移行することが挙げられるが、ストック

型経済への移行は、先進国と途上国の間の格差の解消には貢献しない。一部の先進国における資源の抱え込みは、その他の国の資源採掘を誘発する可能性もある。世界の持続可能な発展のためには、依然としてフローとストックの両者を適切に捉えて評価し、望ましい発展の経路、すなわち様々な資源の使い方を選択する必要がある。このような評価に資する指標として、資源占有の時間フットプリント (Resources Time Footprint: RTF) を提案し、その意義について考察する。本指標の基礎的な枠組みは、分担者らが先行研究¹⁷⁾¹⁸⁾で提案したものであるが、本研究においてその定義や使用方法、説明方法を改善し、ケーススタディを蓄積してその意義についての理解を深めることを通して、その有効性を検証した。

本研究で提案する RTP は、広義の資源に対して、その占有時間を 1 人あたりに規格化して示す指標である。「消費」という捉え方ではなく、「占有」について計測することが大きな特徴である。人の一生に近い 100 年間の製品やサービスとしての機能の提供、または利用について、1 人あたりの各種資源の割り当てのうち何年分を占有することになるかを示す (図 3-3、図 3-4)。対象とするのは、物質、土地、労働、環境負荷の収容力である。物質は、枯渇する可能性のある物質を対象とする。すなわち生産・使用量に対して相対的に社会での蓄積量や可採埋蔵量が十分ではない鉱物資源が対象となる。土地は、人類が占有している土地をこれ以上拡大せず、自然生態系のための土地が保存されることを基準に指標化する。農地や人工林のように、人類と生態系との間で土地を共有するケースでは、土地の配分を行う。労働は、ここでは環境や資源対策が、過重な労働負荷を与えていないかという観点で評価する。富の配分を公平に行う観点での課題はあるが、少ない労働で同等の機能を提供できる方が望ましいと考えられ、空いた時間を余暇や他の有意義な機能の提供のために振り向けることができる。環境負荷の収容力は、温室効果ガスや大気、水質の汚染物質の排出許容量を対象にして評価する。

これら広義の資源について、全体の容量に対する占有の度合いを評価することで、規格化を行い、項目間を比較可能にする。全体の容量には、存在量が重要である資源と、速度が重要である資源とが存在する。金属資源、土地、労働は、地球上における (あるいは地域における) その存在量が重要である。淡水、環境負荷の収容力は、存在量よりも速度がより重要である。例えば淡水は消費するものであるが、それに伴って占有する淡水の供給能力との比較によって評価する。また、化石燃料のように燃焼すると消費されてしまう資源については、代替資源の供給に必要な資源の占有を評価する。化石燃料の場合には、同等量のエネルギーを再生可能エネルギーで得るために必要な、将来の土地の占有に換算して評価する。容量として存在量が重要な項目についての RTF は(3-13)式で、速度が重要な項目についての RTF は(3-14)式で表される。

$$\text{RTF (year)} = \frac{M_O \times T}{M_A} \quad (3-13)$$

$$\text{RTF (year)} = \frac{M_C}{R_A} \quad (3-14)$$

ここで、 M_O は 1 人または 1 グループあたりの占有量 (kg、 km^2 など)、 T は占有時間 (年)、 M_A は存在容量 (1 人または 1 グループあたりの割り当て量) (kg、 km^2 など)、 M_C は 1 人または 1 グループあたりの消費量または発生量 (kg/年)、 R_A は速度容量 (1 人または 1 グループあたりの割り当て量) (kg) である。

従来の指標として重要なエコロジカルフットプリント、カーボンフットプリント、ウォーターフットプリントなどは、いずれも速度が基準になっていると考えられる。生態系の生産速度、 CO_2 の排出速度、淡水の供給速度等に対する消費量の大小を測ることが目的である。一方、資源占有の時間フットプリントでは、各

資源の特徴を最も表すものとして、量と速度のいずれかを扱い、それらを占有する時間に規格化して評価することで、性質が大きく異なる項目の統合的な評価を可能にしている。

新たな指標体系の構築：Resources Time Footprint (RTF)

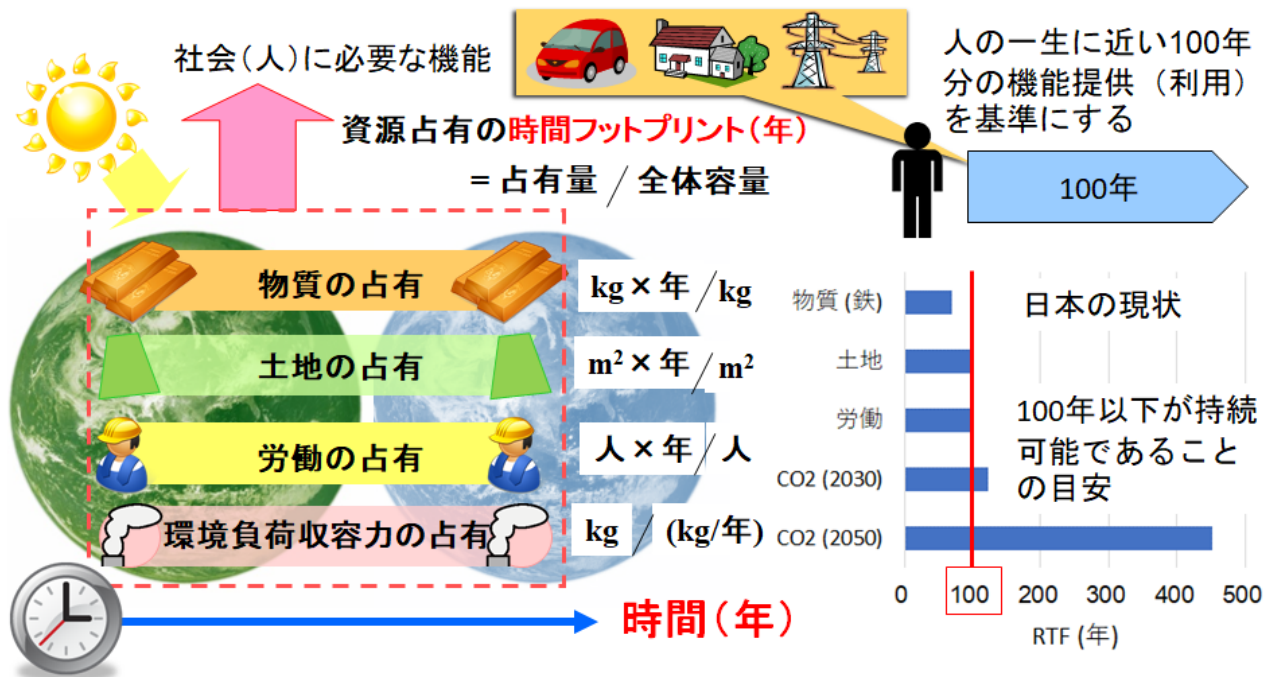


図 3-3 資源占有の時間フットプリントの概念図

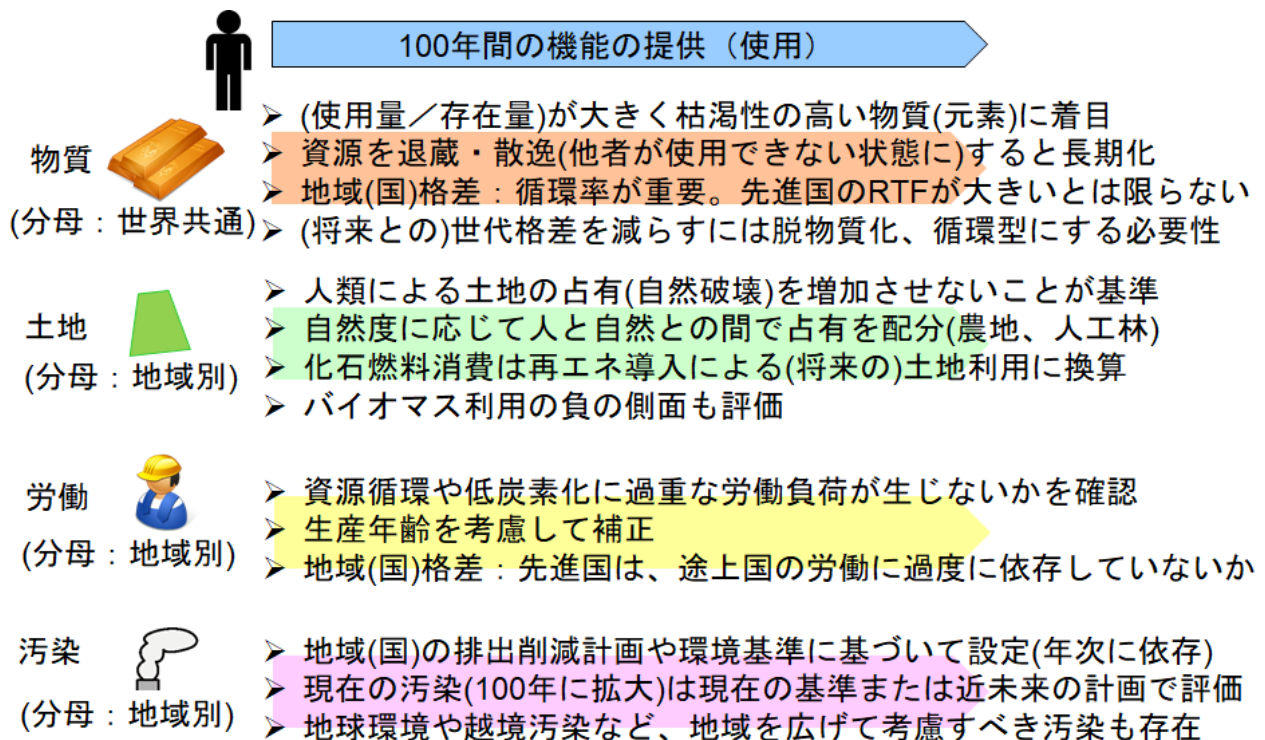


図 3-4 広義の資源の占有についての評価の概略

金属資源については、新たな採掘に伴う各種環境負荷が大きな問題であるが、金属資源は化石燃料のように消費されて失われてしまう訳ではない。むしろ、製品等に使用された後に散逸して利用できなくなることや、リサイクルの過程で生じる異物の混入等によって、品質が低下して次の用途が限定されることの方が、より大きな問題となるかもしれない。従って、新規に採掘する資源と、社会の既存ストック、そして使用後に第三者が使用できない形で保管、あるいは放置するケースを総て同等に、占有状態にあるものとして評価する。ただし、新規採掘に伴う環境負荷や労働については、それぞれの資源占有の項目で評価する。このような取扱いによって、フローとストックの両面についての総合的な評価が可能となる。例えば、金塊を長年金庫に保管していることは、新たに金を採掘して占有することと、物質の占有という観点では同等の負荷を与えていると評価する。鉱物資源のストックが市場に出回れば、新たに採掘する必要性は低下すると考えられるため、このような前提は、ストックが効率的に利用されていることを評価する上でも合理的である。

RTF の算出は、従来のライフサイクルアセスメントや、マテリアルフロー分析などで行われてきた分析結果を活用する形で、簡便に実施することができるため、広く活用されることが期待される。RTF の特徴や課題について、表 3-3 にまとめる。また、RTF を具体的なケーススタディに適用して、その有効性について検証する。

表 3-3 資源占有の時間フットプリント (RTF) の特徴と課題

RTF の特徴
- 異なる種類の広義の資源への依存度を、時間に換算して評価できる。 - 人の一生に近い、100 年間の製品やサービスの利用（提供）に関わる、資源占有の時間の長さは、将来世代につけを回すことや、地域間、集団間の資源占有の格差などを把握することにも役立つ。 - フローとストックの統合的な評価が可能で、持続可能性の評価指標となる。 - 従来の LCA や MFA のために収集されたデータを用いて、比較的容易に分析が可能であるため、適用できる場面が多い。
RTF の課題
100 年間の製品やサービスの利用（提供）に関わる評価を行うが、実際には 100 年後を予測することは困難である。従って、現時点の傾向が継続した場合や、想定するシナリオが実現した際に、それがどの程度の影響をもたらすのかを評価することになる。 - 土地の占有については、農地や植林地のように、自然生態系と人類が共存している領域がある。これらの共存地域において、人類の土地の占有割合を定義して土地のアロケーションを行う方法には課題が残る。

本研究では、ケーススタディとして、廃棄物からのエネルギー回収を高度化する「焼却熱の産業利用（事例 1）」、熱供給の省エネルギー化を可能にする「ヒートポンプ給湯（事例 2）」、鉄骨住宅から木造住宅への変更による「再生可能な素材への転換（事例 3）」、シェアリングエコノミーの推進事例としての「カーシェアリング（事例 4）」を RTF により評価した。基本的な評価方法は、Fujii et al.,¹⁸⁾をベースとし、追加的に必要なパラメータ等は表 3-4 に記載の文献等を利用した。

表 3-4 ケーススタディで用いるパラメータ（追加分・抜粋）

	項目	出典・推計方法
事例 1	ステンレス鋼材の金属構成	19)
	必要な配管径、長さ	火力発電所、焼却炉（仮想）、工場の位置及び、各工場の蒸気需要量に基づいて配管径及び長さを設定
	削減される化石燃料消費、CO ₂ 排出量	20)
事例 2	家庭用ヒートポンプ中の銅の重量割合	メーカーカタログ値記載重量及びヒートポンプの素材重量構成比から推計
	家庭用ヒートポンプによるエネルギー消費削減効果	メーカーカタログ値
事例 4	小型乗用車の重量	メーカーカタログ値
	乗用車中の鉄の重量割合	21)
	個人所有の自動車の稼働率	22)
	カーシェアリングにおける自動車稼働率	23)

（５）TMR 指標の新展開

関与物質総量（Total Material Requirement: TMR）は、LCA のライフサイクル思考に基づくより簡便な手法としての物質集約度（Material Intensity: MIT）²⁴⁾やエコリュックサック（Ecological Rucksack）²⁵⁾と同一のコンセプトを持つ指標である。これらの指標は潜在的な環境影響を評価するための簡易代理指標として期待されており、直接・間接投入量だけでなく隠れたフローも考慮していることが特徴である。日本においては、第 2 次循環基本計画において、TMR が推移をモニターする指標のひとつとして採用された。ここで TMR は以下のように表すことができる。

$$\text{TMR} = \text{直接投入量} + \text{間接投入量} + \text{隠れたフロー} \quad (3-15)$$

上述の MIT と TMR はほぼ同一の指標と考えることができ、それぞれの報告値はだいたい同じ値であることが分かっている²⁶⁾²⁷⁾。また、エコリュックサックはそれらから自分自身の重量を除外した物と考えることができる。これらの指標において注目すべきが「隠れたフロー」である。隠れたフローとは、直接および間接的な経済活動に伴う物質以外にその活動に伴って起こる物質の移動や攪乱量であり、採掘に伴う岩石や土砂の移動量がその代表である。TMR は資源採取に関わる全採掘廃棄物を重量として加算していることから、採掘活動量を最も広範囲に定量化する指標と見なすことができる。しかし、これまで大きく以下のような問題が指摘されてきた。

- 1) データの精度・網羅性・メンテナンス
- 2) 他指標との差異

まず 1)については、これまでも比較的多くの研究者が隠れたフローに関する分析を行ってきたが、そのほとんどがトップダウン型、すなわち国レベルでの推計と言ったエコノミーワイドな分析に終始していた。例えば、Adriaanse et al.¹⁶⁾はドイツ、アメリカ、オランダ、日本を対象とした国民経済活動に伴う TMR を示しているほか、Bringezu et al.²⁸⁾は世界各国の経済成長と TMR の変化を比較している。一方で、ボトムアップ

型、すなわち個々の素材や製品に注目し、それらを積み上げていく分析例は少ない。例えば、Halada et al.²⁹⁾は60種類以上の元素について自然鉱石から製錬する際に必要なTMRを推計しているが、鋼材に関しても「鉄」という項目で1つデータが提供されているのみであり、鋼材の種類ごとのTMRは提供されていなかった。また、その鉄に関しても鉱山における鉱石品位や剥土比の差までは考慮できていなかった。また、Wuppertal InstituteではMIPS (Material Intensity per Service、サービスあたりの物質強度)に関するデータベースをwebsiteで公開しているが³⁰⁾、その算出根拠が提示されていないという問題がある。さらに、TMRに関するデータが論文ベースでしか手に入らず、データベースとして整理されていなかった。そのため、データの更新もほとんど無く、行政等への利用が困難であった。

2)については、1)にも起因してTMRのデータ精度が低かったため、例えばライフサイクルCO₂といった他の指標と比べて差異が得られるほどの分解能がなかった。例えば、アルミニウムから銅の代替など、CO₂排出量という視点では明らかに効果がある一方で、枯渇性の高い資源への代替が許容されてしまうというミスリードが起こりうることは容易に想像できるが、このような問題を扱えるほど精度の高いTMRデータが存在していなかった。

以上の問題を解決すべく、本研究では、データの精度、網羅性、メンテナンス性を担保したTMRに関するデータベースを構築した。また、得られたデータを基に日本全体のTMRの推計やリサイクルによるTMRの削減可能性の検討を行った。

すでに述べたようにTMRでは、ある素材や製品を得るために必要な全採掘活動に関わる隠れたフローの重量を素材や製品の重量に加算したものである。隠れたフローは鉱石中の脈石成分、必要となる鉱床に到達するまでの剥土等が含まれる。既存の類似指標とシステム境界を一致させるため、閉山後の処理（地下水の処理等）はシステムに含めていない。なお、TMRの単位は重量でありSI単位系ではkgを用いるが、通常重量との違いを明確化するため本研究ではkg-TMRを用いた。

次に、ある素材・製品を一単位得るために関わるTMRを「TMR係数」と定義する。単位は評価対象に依存する。多くの素材では単位はkg-TMR/kgとなるが、電力の場合kg-TMR/kWhとなり、製品あたりではkg-TMR/unitとなることに注意しなければならない。

ここで、TMR係数について2つの種類がある。一つは、対象を全て天然資源から得る場合で、これを「自然鉱石TMR (Natural-ore TMR, NO-TMR)」と呼び、以下のように定義する。

自然鉱石TMR = ある素材・製品 1単位を自然鉱石から得るために必要なTMR

一方、使用済み製品を「都市鉱石」と考え、自然鉱石とのアナロジーを考慮して、「都市鉱石TMR (Urban-ore TMR, UO-TMR)」を以下のように定義した。

都市鉱石TMR = ある素材・製品 1単位を都市鉱石からリサイクルするために必要なTMR

都市鉱石TMRのフレームワークでは、TMRのカウントは対象製品が使用済みになった時点から開始され、目的の製品が得られるまでに関わるTMRを加算する。なお、使用済み製品においてリサイクルされない部分は、自然鉱石におけるずりや脈石に相当すると見なし、「都市鉱石ずり」として隠れたフローと見なした。ただし、一次資源とリサイクル材から生産される素材も比較的多く存在する。このような場合は、自然鉱石TMRと都市鉱石TMRとの区別が難しいため、単にTMR係数と呼称した。

多くの素材は鉱石品位やその剥土比が一定ではない。本研究ではこのような問題に対応するため、粗鋼と銅に関しては鉱山毎の品位及び剥土比のばらつきを考慮し、モンテカルロシミュレーションを用いたシミュレーションを行った。TMRの推計において、主産物とともに副産物が併産される場合がある。このような場合においては、価格比でアロケーションを行った。

また、ボトムアップ型では、種々の金属（合金を含む）、プラスチック類、食料、酸・アルカリ等、既に推計済みのものも併せおよそ 900 種類の素材・製品についての TMR 係数を整備した。なお、ボトムアップ型の TMR 係数の推計では、山末らによる TMR 推計の枠組み²⁷⁾を用いており、都市鉱石 TMR の場合、製品が使用済みとなった段階をエネルギー・物質投入のスタートと見なしている。すなわち、製品の生産・使用段階のエネルギー・物質投入は考慮しない。なお、得られた TMR 係数は直接物質投入量あるいは二酸化炭素排出量原単位（または温暖化係数）と比較し、指標としての特徴、他指標との差異を定量的に確認した。

4. 結果及び考察

（１）既存の指標体系の再構築

最初に、表 4-1 は図 3-1 における c)政策の項目の軸の一番上「全体」に関わる指標案である。これは循環型社会形成の最上位となる指標であることから、様々な取組の帰結としての「物質フロー指標」のみで構成される。「目標を設定する指標（目標指標）」については、破線より上がヘッドライン指標とでも言うべきものである。第 3 次循環基本計画における「資源生産性」「（入口側の）循環利用率」「最終処分量」が相当するが、ここではこの 3 つの指標に加え、「出口側の循環利用率」を現行計画の「目標を設定する補助指標」から格上げしている。これは入口側（原材料の投入量に占める再生資源量の比率）と出口側（廃棄物の排出量に占める再資源化量の比率）を同列に見ること、両者を併記することで現行計画における「循環利用率」の意味を明確にすることを意図している。そこで現行計画の「循環利用率」を「入口側の循環利用率」に名称変更している。また、破線以下の指標については、廃棄物処理法のもと策定されている「廃棄物の減量その他その適正な処理に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な方針」（廃棄物処理基本方針）や「廃棄物処理施設整備計画」の数値目標をここに再掲し、3.（１）の課題③に対応した。これらは出口側の循環利用率であることに留意する必要があるが、表 4-1 ではもとの標記のまま記載している。また、「国民一人当たりの資源消費量」については、第 3 次循環基本計画では「取組指標」に整理されていたが、これを「物質フロー指標」として整理し、3.（１）の課題④に対応した。さらに、SDGs では「目標 12.2. 2030 年までに天然資源の持続可能な管理及び効率的な利用を達成する」や「目標 8.4. 2030 年までに、世界の消費と生産における資源効率を漸進的に改善させ、先進国主導の下、持続可能な消費と生産に関する 10 年計画枠組みに従い、経済成長と環境悪化の分断を図る」の指標として、マテリアルフットプリント（Material Footprint）や国内物質消費量（Domestic Material Consumption: DMC）が挙げられているが³¹⁾、前者については一次資源等価換算した資源消費量が内容的には同義であり、第 3 次循環基本計画においてすでに「一次資源等価換算した資源生産性」や一次資源等価換算した資源消費量で求めた「国民一人あたりの資源消費量」が採用されている。「国民一人あたりの資源消費量」は正確には「国民一人あたりの一次資源等価換算資源消費量」であり、表 4-1 ではそのように名称変更している。後者に相当する指標は現行計画にないが、我が国の資源生産性の算定において直接物質投入量（Direct Material Input: DMI）が用いられているのに対し、欧州では DMC が主流となっていることから、表 4-1 では「国内物質消費量による資源生産性」を「観測指標」に含めている。また、SDGs の「目標 12.5. 2030 年までに、廃棄物の発生防止、削減、再生利用及び再利用により、廃棄物の発生を大幅に削減する」については、各国の再生利用率が指標として挙げられているが³¹⁾、これは上述の通り目標指標に盛り込んでおり、3.（１）の課題⑤に対応できる形としている。

表 4-1 全体の指標案

		入口	循環	出口
物質 フロー 指標	目標 指標	✓資源生産性	△入口側の循環利用率 ✓出口側の循環利用率*	✓最終処分量
		✓土石系資源投入量を除いた 資源生産性	○一般廃棄物の再生利用率[廃 棄物処理基本方針・廃棄物処理 施設整備計画] ○産業廃棄物の再生利用率[廃 棄物処理基本方針]	○一般廃棄物の最終処分量[廃 棄物処理基本方針] ○産業廃棄物の最終処分量[廃 棄物処理基本方針]
	観測 指標	✓一次資源等価換算した資源 生産性 ○国内物質消費量による資源 生産性[SDGs] △国民一人当たりの一次資源 等価換算資源消費量**		
取組 指標	目標 指標			
	観測 指標			

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

* 第3次循環基本計画では「物質フロー指標」の「目標を設定する補助指標」

** 第3次循環基本計画では「取組指標」の「推移をモニターする指標」

表 4-2 は「1. 持続可能な社会づくりとの統合的取組」に関わる指標案である。「物質フロー指標」の「入口」については、第3次循環基本計画の「化石系資源に関する資源生産性」や「バイオマス資源投入率」が関係する指標として挙げられる。ただし、「バイオマス系資源投入率」については、土石系資源投入量が下がれば自然と増加するため、ここでは「バイオマス系資源投入量・エネルギー利用量」を代替案として示している。また、総物質需要量（Total Material Requirement: TMR）を自然改変の指標と考え、「天然資源利用の TMR」を自然共生社会づくりに関係する指標候補として挙げた。「循環」については、第3次循環基本計画の「廃棄物部門による間接的な GHG 削減量」や「隠れたフローを考慮した金属資源の TMR ベースの循環利用率」が該当するものと考えられる。後者については、入口側の循環利用率であることを追記し、短くして名称変更している。ここでは、「入口」の指標に対応させて「バイオマス系資源の出口側の循環利用率」を指標候補として記載した。「出口」については、現行計画の「廃棄物部門由来の GHG 排出量」が該当するものと考えられる。「取組指標」の「目標指標」については、「廃棄物処理施設整備計画」に示されている「期間中に整備されたごみ焼却施設の平均発電効」を再掲することが有益と考えられる。また、「循環」について、第3次循環基本計画の「廃棄物発電施設数」や「廃棄物熱利用施設数」は、処理施設の統合を受けて減少する可能性があることから、不要な指標として提案している。さらに、「期間中に整備されたごみ焼却施設の平均発電効率」に対応させて、「廃棄物熱利用率」を指標候補としているほか、廃棄物部門由来の GHG 排出の多くはプラスチックの燃焼に由来することから、その他プラ製容器包装を焼却ごみから除くとともに、リサイクルに

よる間接的な GHG 排出の削減を意図して「その他プラ製容器包装の回収地方公共団体数・実施人口割合」を「循環」と「出口」に関わる指標として提案している。「取組指標」の「入口」については、自然共生社会づくりに関連して、Forest Stewardship Council (FSC) や Marine Stewardship Council (MSC) などの持続可能な資源利用に関する認証制度があることから「FSC, MSC 等の認証取得数」を候補として挙げている。また、「バイオマス活用推進計画の策定数」なども候補となりうるものである。

表 4-2 「1. 持続可能な社会づくりとの統合的取組」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標			
	観測指標	✓化石系資源に関する資源生産性 ✓バイオマス系資源投入率 ○バイオマス系資源投入量・エネルギー利用量 ○天然資源利用の TMR	✓廃棄物部門による間接的な GHG 削減量 ○バイオマス系資源の出口側の循環利用率 △金属資源の入口側の TMR ベース循環利用率	✓廃棄物部門由来の GHG 排出量
取組指標	目標指標		○期間中に整備されたごみ焼却施設の平均発電効率[廃棄物処理施設整備計画]	
	観測指標	○FSC, MSC 等の認証取得数	✓廃棄物発電施設数 ✓廃棄物発電設備容量 ✓廃棄物発電量 ✓廃棄物熱利用施設数 ✓廃棄物熱利用量 ○廃棄物熱利用率	
			○その他プラ製容器包装の回収地方公共団体数・実施人口割合	
		○バイオマス活用推進計画の策定数		

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

表 4-3 は「2. 多種多様な地域循環共生圏形成による地域活性化」に関わる指標案である。「物質フロー指標」の「入口」については、地域レベルの資源消費量を何らかの統計で直接把握することは困難なことから記載していない。「循環」については、最も典型的なのが出口側の循環利用率であり、ここでは表 4-1 に示したものを再掲している。「出口」については、「廃棄物処理基本方針」に「一般廃棄物の排出量」「産業廃棄物の排出量」が目標として掲げられており、これを含めることを提案するものである。これにより、3. (1) の課題③に対応できる。また、第 3 次循環基本計画において「1 人 1 日あたりの一般廃棄物排出量」「1 人 1 日あたりの家庭系一般廃棄物排出量」「事業系一般廃棄物排出量」は「取組指標」の「目標を設定する指標」であったが、これらはいずれも物質フローを表現するものであることから、「物質フロー指標」に整理した上で、「1 人 1 日あたりの一般廃棄物排出量」は「一般廃棄物の排出量」と同じ趣旨になることから削除し、他の 2 つは地域循環共生圏ごとに見る「観測指標」に改変するとともに、「地域循環共生圏ごとの産業廃棄物の排出量」を加えた。これに合わせ、「循環」についても地域循環共生圏ごとの再生利用率を「観測指標」に含め

た。いずれも出口側の循環利用率である。「取組指標」については、表 4-3 に示す 3 つの既存指標が該当すると思われるほか、ここでは「地方公共団体における一般廃棄物会計の実施率」を加えている。地域の計画を策定する上でも重要なことだからである。なお、第 3 次循環基本計画の「地域循環圏」は「地域循環共生圏」に名称変更している。この他、地域の課題としては高齢化への対応等があるが、こうした状況に関する指標なども含めることが考えられる。

表 4-3 「2. 多種多様な地域循環共生圏形成による地域活性化」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標		○一般廃棄物の再生利用率[廃棄物処理基本方針・廃棄物処理施設整備計画][再掲] ○産業廃棄物の再生利用率[廃棄物処理基本方針][再掲]	○一般廃棄物の排出量[廃棄物処理基本方針] ✓1人1日あたりの一般廃棄物排出量* ○産業廃棄物の排出量[廃棄物処理基本方針]
	観測指標		○地域循環共生圏ごとの一般廃棄物の再生利用率 ○地域循環共生圏ごとの産業廃棄物の再生利用率 ○産業廃棄物の広域移動量	✓1人1日あたりの家庭系一般廃棄物排出量* ○地域循環共生圏ごとの1人1日あたりの家庭系一般廃棄物の排出量 ✓事業系一般廃棄物排出量* ○地域循環共生圏ごとの事業系一般廃棄物の排出量 ○地域循環共生圏ごとの産業廃棄物の排出量
取組指標	目標指標			
	観測指標	✓地方公共団体による循環基本計画の策定数 △地域循環共生圏形成のための取組数 ✓生活系ごみ処理の有料化実施地方公共団体率 ○地方公共団体における一般廃棄物会計の実施率		

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

* 第 3 次循環基本計画では「取組指標」の「目標を設定する補助指標」

表 4-4 は「3. ライフサイクル全体での徹底的な資源循環」に関わる指標案である。「物質フロー指標」の「目標指標」については、各種リサイクル法で定められている目標をここに併記することで 3. (1) の課題③に対応する形とした。これらは、第 3 次循環基本計画の「取組指標」における「各種リサイクル法の目標達成状況」を個別に示したものである。「観測指標」の「入口」については、現行計画における「化石系資源に関する資源生産性」に加え、金属系、土石系、バイオマス系資源についての資源生産性を計測することが考えられる。また、表 4-1 において DMI による「資源生産性」と「一次資源等価換算した資源生産性」の両方を計測していることに整合させ、ここでも「産業分野別の一次資源等価換算した資源生産性」を採用することも考えられる。「循環」については、「入口」の指標に対応させて「資源別の出口側の循環利用率」「産業分野別の出口側の循環利用率」のほか、「製品・素材別の入口側もしくは出口側の循環利用率・循環利用量」が候

補として挙げられる。「資源別の入口側・出口側の循環利用率」は、4 資源（化石系、金属系、土石系、バイオマス系）別を想定している。また、製品についてはリユース率・リユース量等も含むものとし、第 3 次循環基本計画において「取組指標」である「びんのリユース率」は「製品・素材別の入口側もしくは出口側の循環利用率・循環利用量」の一部として整理した。「出口」についても、資源別および産業分野別の廃棄物排出量、最終処分量を計測することで「入口」「循環」「出口」を資源別・産業分野別に一貫して計測できることとなる。また、SDGs の「目標 12.3. 2030 年までに小売・消費レベルにおける世界全体の一人当たりの食料の廃棄を半減させ、収穫後損失などの生産・サプライチェーンにおける食品ロスを減少させる」に関連して、「食品ロス率」を別に設定している。「取組指標」については、現行計画において「2R の取組状況」として挙げられている 4 つの指標のうち「物質フロー指標」として整理した「びんのリユース率」を除く 3 指標を個別に標記した。また、「循環」について、「容器包装廃棄物の回収地方公共団体数・実施人口割合」を追加した。

表 4-4 「3. ライフサイクル全体での徹底的な資源循環」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標		○特定家庭用機器再商品化率 [家電リ法] ○特定建設資材再資源化等率 [建設リ法] ○使用済自動車指定回収物品再資源化率[自動車リ法] ○使用済小型家電回収量[小型家電リ法]	
	観測指標	○資源別の資源生産性 ✓産業分野別の資源生産性 ○産業分野別の一次資源等価値した資源生産性 ✓ものづくりの資源生産性	○資源別の入口側・出口側の循環利用率 △金属資源の入口側の TMR ベース循環利用率[再掲] ○産業分野別の出口側の循環利用率 ○製品・素材別の入口側もしくは出口側の循環利用率・循環利用量*	○資源別の廃棄物排出量 ○資源別の最終処分量 ○産業分野別の廃棄物排出量 ○産業分野別の最終処分量 ○製品・素材別の廃棄物排出量 ○製品・素材別の最終処分量 ○食品ロス率[SDGs]
取組指標	目標指標		○食品廃棄物等再生利用等実施率[食品リ法]	
	観測指標	✓耐久消費財の平均使用年数（家電製品・パソコン・携帯電話） △レジ袋辞退率（マイバッグ持参率） △詰替・付替製品の出荷率 △リユース・シェアリング市場規模		
			○容器包装廃棄物の回収地方公共団体数・実施人口割合 △使用済小型家電の回収地方公共団体数・実施人口割合	○「30・10 運動」の実施数

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

* 製品の例：容器包装・食品・繊維製品・パソコン・二次電池・太陽光パネル・CFRP 等、素材の例：プラスチック・ガラス・紙等、製品については「びんのリユース率」**等のリユース率・リユース量を含む

** 第 3 次循環基本計画では「取組指標」の「推移をモニターする指標」

表 4-5 は「4. 適正処理の更なる推進と環境再生」に関わる指標案である。本項目は「出口」に関わるものであることから、「出口」の指標のみで構成される。「物質フロー指標」については、「不法投棄の量」「不適正処理の量」等が考えられるが、前者は第 3 次循環基本計画において「取組指標」であったものを「物質フロー指標」として整理したものである。また、有害廃棄物の管理も重要なことから、「有害廃棄物の発生量」を加えている。これは、SDGs の「目標 12.4. 2020 年までに、合意された国際的な枠組みに従い、製品ライフサイクルを通じ、環境上適正な化学物質やすべての廃棄物の管理を実現し、人の健康や環境への悪影響を最小化するため、化学物質や廃棄物の大気、水、土壌への放出を大幅に削減する」の指標として「有害廃棄物の一人あたり発生量」が示されていること³¹⁾に対応したものである。「取組指標」については、「電子マニフェストの普及率」が現行計画において「目標指標」となっているほか、「一般廃棄物処分場の残余年数」の目標が「廃棄物処理施設整備計画」に記されていることからここに記載している。これに合わせて「産業廃棄物処分場の残余年数」も「目標指標」として記載しているが、「観測指標」として整理することもあり得る。このほか、「浄化槽処理人口普及率」の目標が「廃棄物処理施設整備計画」に記載されている。「観測指標」については、第 3 次循環基本計画の指標に「不適正処理の発生件数」を追加した。このほか、東日本大震災からの環境再生に関わる指標等も検討していく必要があると考えられる。

表 4-5 「4. 適正処理の更なる推進と環境再生」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標			
	観測指標			✓不法投棄の量* ○不適正処理の量 ○有害廃棄物の発生量
取組指標	目標指標			✓電子マニフェストの普及率 ○一般廃棄物処分場の残余年数[廃棄物処理施設整備計画] ○産業廃棄物処分場の残余年数 ○浄化槽処理人口普及率[廃棄物処理施設整備計画]
	観測指標			✓不法投棄の発生件数 ○不適正処理の発生件数 ✓優良認定された産業廃棄物処理業者数

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

* 第 3 次計画では「取組指標」

表 4-6 は指針「5. 万全な災害廃棄物処理体制の構築」に関わる指標案である。本政策は災害廃棄物処理体制の構築に関わるものであることから、「物質フロー指標」はなく「取組指標」のみで構成される。また、「循

環」及び「出口」に関する政策である。これについては、「災害廃棄物処理計画を策定した地方公共団体数」「有害物質の存在を把握している地方公共団体の比率」「防災拠点となる廃棄物処理施設数」等の指標が候補として考えられる。

表 4-6 「5. 万全な災害廃棄物処理体制の構築」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標			
	観測指標			
取組指標	目標指標			
	観測指標		○災害廃棄物処理計画を策定した地方公共団体の比率 ○有害物質の存在を把握している地方公共団体の比率 ○防災拠点となる廃棄物処理施設数	

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

表 4-7 「6. 適正な国際資源循環体制の構築と循環産業の海外展開の推進」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標			
	観測指標	✓循環資源の輸出入量 ○中古品の輸出入量		
取組指標	目標指標			
	観測指標	✓海外の都市と循環型社会形成に関して連携している地方公共団体数 ○循環産業海外展開事業化促進事業数		

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

表 4-7 は「6. 適正な国際資源循環体制の構築と循環産業の海外展開の推進」に関わる指標案である。第 3 次循環基本計画の「循環資源の輸出入量」は、我が国にとっては「入口」と「出口」の量を捉えたものであ

るが、地球規模では循環されている量でもあり、ここでは「入口」「循環」「出口」の全ての断面に関係する指標として整理している。これに加え、把握可能な範囲で「中古品の輸出入量」も観測することが考えられる。また、「取組指標」については、第3次循環基本計画の「海外の都市と循環型社会形成に関して連携している地方公共団体数」のほか、「循環産業海外展開事業化促進事業数」なども候補である。

表4-8は指針「7. 循環分野における基盤整備」に関わる指標案である。本項目は、基盤的な取組であることから「入口」「循環」「出口」のどれかに特定されるようなものではなく、また、基本的に「取組指標」で把握する類の政策であることから、該当する「物質フロー指標」はないものと考えられる。第3次循環基本計画における「取組指標」のほか、「支援研究件数、支援研究費」「地方公共団体における一般廃棄物会計の実施率」を加えている。

表4-8 「7. 循環分野における技術開発、人材育成、情報発信等」に関わる指標案

		入口	循環	出口
物質フロー指標	目標指標			
	観測指標			
取組指標	目標指標	✓廃棄物の減量化や循環利用・グリーン購入の意識 ✓具体的な3R行動の実施率 ✓循環型社会ビジネスの市場規模		
	観測指標	○支援研究件数、支援研究費 ✓企業における環境マネジメントシステムの認証取得件数 ✓企業における環境報告書の公表率・環境会計の実施率 ✓企業におけるグリーン購入実施率 ✓業界における製品アセスメントのガイドラインの整備状況 ✓資源生産性の向上等に向けた目標を設定している事業者数 ○地方公共団体における一般廃棄物会計の実施率[再掲]		

注)「目標指標」は「目標を設定する指標」、「観測指標」は「推移をモニターする指標」

✓は既存指標、△は既存指標の名称変更、○は新規指標

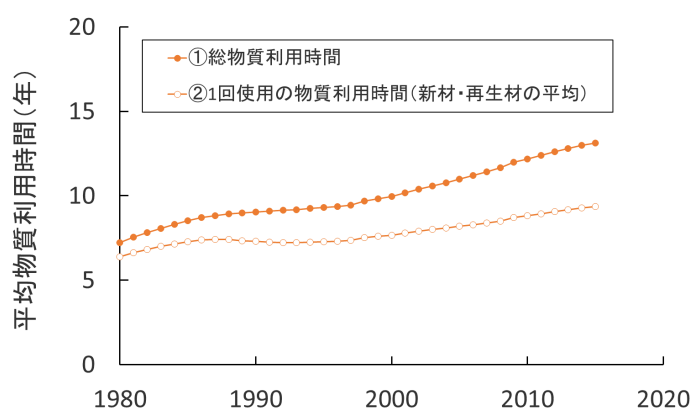
(2) ストック指標としての物質利用時間の計測

図4-1に、提案した手法による木材、プラスチック、鉄鋼の物質利用時間の計測結果を示す。

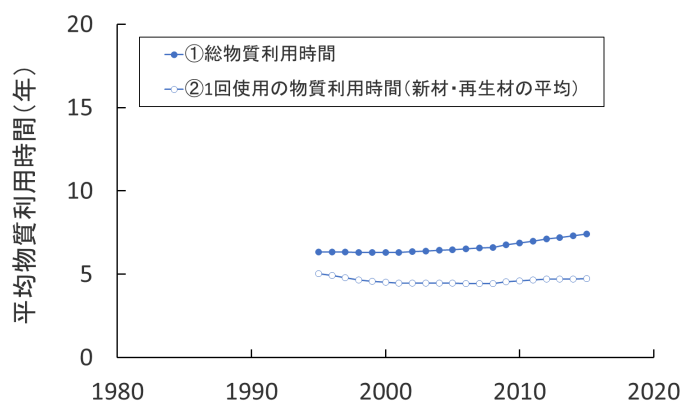
計測を試行した期間(木材:1980~2015年、プラスチック:1995~2015年、鉄鋼:2000~2015年)において、新材投入から再生利用を経て最終的に処分されるまでの総物質利用時間の平均はいずれの物質についても延長傾向が観測された。

木材については、提案手法によって計測された総物質利用時間は1980~2015年において約6年延びており(約7年→13年)、3つの事例のうち総物質利用時間の延長傾向が顕著であった。一方、同じ期間において1回使用の物質利用時間も延びていた。ただし、その延長の度合い(約3年の延長)は総物質利用時間よりも小さかった。このことから、木材のケースでは、1回使用の物質利用時間の延長と再生材利用の促進(再生

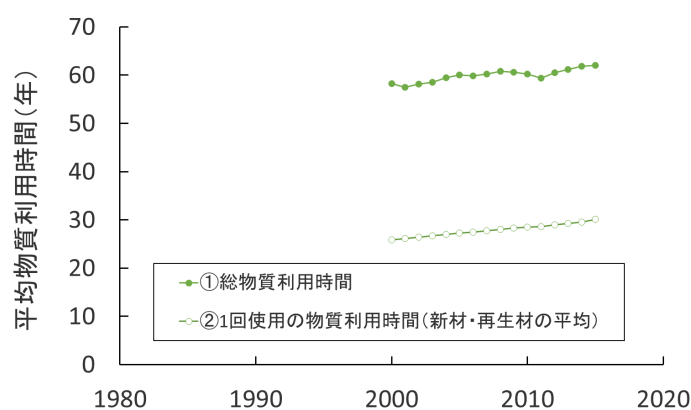
材利用率の向上) の両方が総物質利用時間の延長に寄与していると考えられた。なお、今回用いたデータから、計測期間において木材の再生材利用率が向上していることを確認した。



(a) 木材



(b) プラスチック



(c) 鉄鋼

図 4-1 本研究の提案手法による物質利用時間の計測結果

プラスチックについては、総物質利用時間は 1995～2015 年において約 1 年延びていた（約 6 年→7 年）。一方、同じ期間において 1 回使用の物質利用時間はほぼ横ばい（2000 年以前はやや短期化）であった。この

ことから、プラスチックのケースでは、1 回使用の物質利用時間に変化はなく、再生材利用の促進のみによって総物質利用時間が延びているものと考えられた。投入量データを見ると、2000 年以前はサーマルリサイクルへの投入が増えており、これが 1 回使用の物質利用時間の短期化に寄与していると考えられた。ただし、近年はマテリアルリサイクルへの投入も増えており、これによる 1 回使用の物質利用時間の延長効果により、全体としては若干の延長傾向にあると考えられた。

鉄鋼については、総物質利用時間は 2000～2015 年において約 3 年延びていた（約 53 年→56 年）。一方、同じ期間において、1 回使用の物質利用時間も延びており、その延長傾向は総物質利用時間のものと同様、もしくは 2010 頃以降は総物質利用時間よりも延長の度合いが大きかった。このことから、鉄鋼のケースでは、1 回使用の物質利用時間の延長が総物質利用時間の延長に寄与していると考えられた。鉄鋼の物質利用時間が延びている要因については、投入量データの用途内訳をみるとその構成に大きな変化は見られなかったことから、全体または特定の用途での利用時間が延びているためではないかと考えられた。

ここで、総物質利用時間を 1 回使用の利用時間で除することで、社会における物質の平均的な使用回数（使用サイクル数）を求めることができる。図 4-2 にその計算結果を示す。

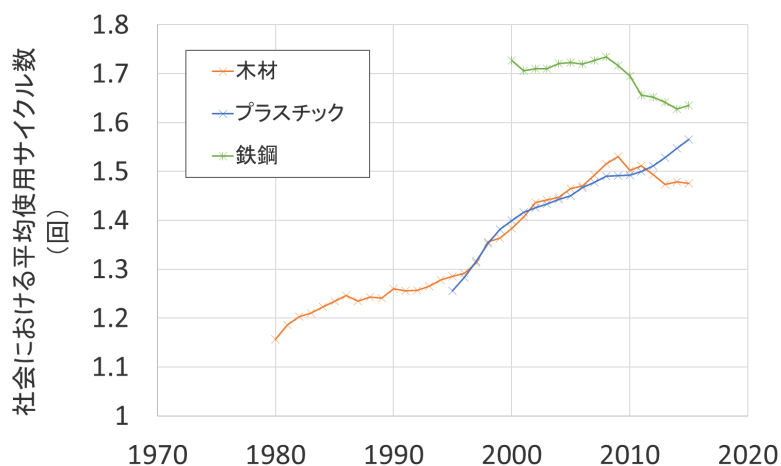
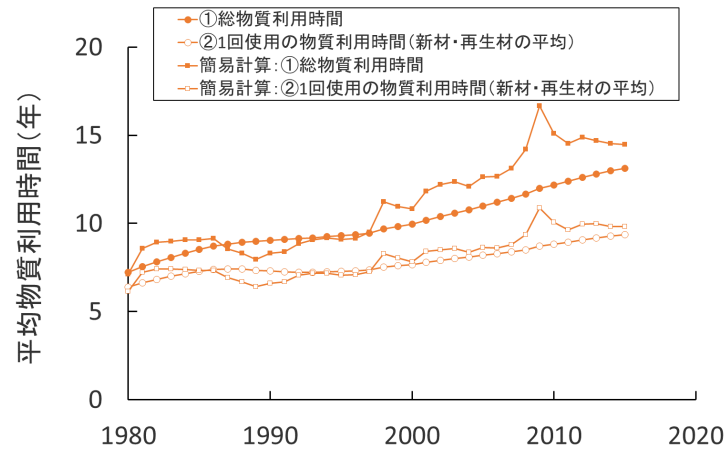


図 4-2 社会における平均的な使用回数（使用サイクル数）の計算結果

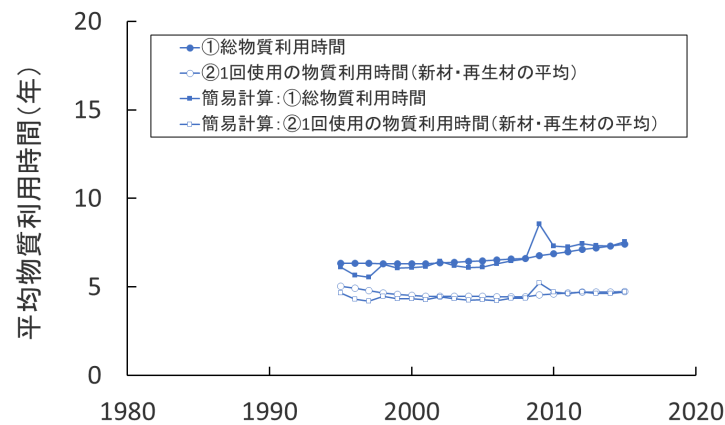
木材、プラスチックについては、社会における平均的な利用回数がそれぞれ約 1.2 回から 1.5 回、約 1.3 回から 1.6 回へと増加していた。この結果は、前述した再生利用の促進（再生材利用率の向上）が総物質利用時間の延長に寄与していることを示している。一方、鉄鋼については、社会における平均的な利用回数が 2010 年頃まではほぼ横ばい、それ以降は 0.1 回程度減少していた。これは、再生材利用率（投入量に占める再生材の割合）が下がっていることによる。使用済みとなって排出される量を分母としたリサイクル率は向上しているものの、需要量との関係で再生材利用率が下がることもあり、この影響ではないかと考えられる。

次に、Hashimoto and Moriguchi⁶⁾の定義式による簡易計算と本研究の提案手法による計測結果の比較を図 4-3 に示す。簡易計算値については、年による変動はあるものの、長期傾向（長期化、横ばいなど）については本研究の提案手法による計測結果と同じ傾向を示した。また、木材と鉄鋼の総物質利用時間を除けば、計測値のオーダーは概ね一致した。この結果より、ストック量や投入量がある程度安定的であれば物質利用時間の長期傾向を把握するための簡易指標として利用できると考えられた。ただし、木材と鉄鋼のケースでは、総物質利用時間の計測結果において両者に乖離が見られた。これは、投入量における新材と再生材の比率、ストック量データの変動などが簡易計算値には直接影響するためと考えられる。同じ理由で、2009 年にはリ

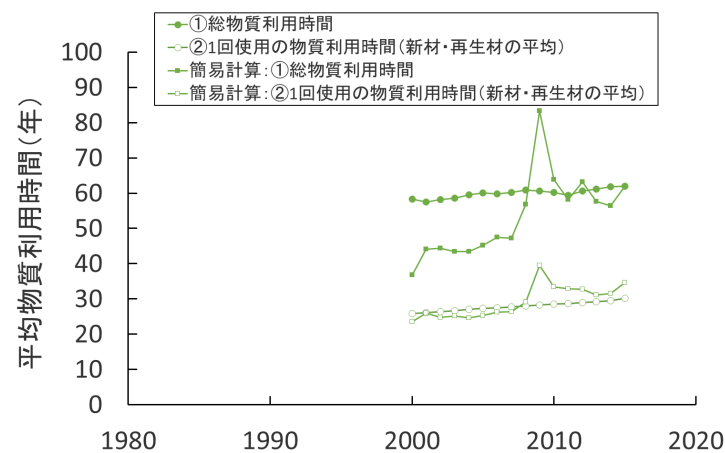
一マンショックの影響で投入量が一時的に大きく減少したこと、簡易計算値が極端に大きくなっている。このように、特に投入量は景気等の社会情勢や使用済み製品の排出状況等によって大きく変動することもあるため、簡易計算値を特に単年度での物質利用時間の指標として用いることは適切でないケースがあり、本研究で提案した手法がより適切であると考えられた。



(a) 木材



(b) プラスチック



(c) 鉄鋼

図 4-3 簡易計算と本研究の提案手法による平均物質利用時間の比較

(3) 産業部門別の資源生産性指標

(3.1) 提案手法による産業部門別資源生産性の経年変化の算出結果と変化の要因分析

1995 年、2000 年、2005 年、2011 年の 4 時点について、産業連関表 18 部門表および 49 部門表を用いて産業部門別資源生産性を算出した結果を以下に示す。

図 4-4 は、部門 i に対する最終需要を満たすために直接・間接に必要な物質投入量を 18 部門別に示したもので、横軸が当初から用いられてきた直接物質投入量、縦軸が一次資源等価物質投入量である。先に行った定式化の(3-7)式と(3-8)式の関係に相当する。1995 年から 2011 年の間に建設部門は公共事業、その他建設事業ともに物質需要量が大幅に減少したのに対し、機械部門は絶対値でみてこれらの部門の 2011 年時点の値とほぼ同水準で、とくに RMI でみると微増傾向にある。金属（鉄鋼および非鉄金属）は、他の部門に比べて、RMI と DMI の差異が大きいこと、いずれでみても大幅な増加傾向にあることが読み取れる。この図から、物質消費量の絶対値の大きな産業とその規模の増減傾向を読み取ることができる。

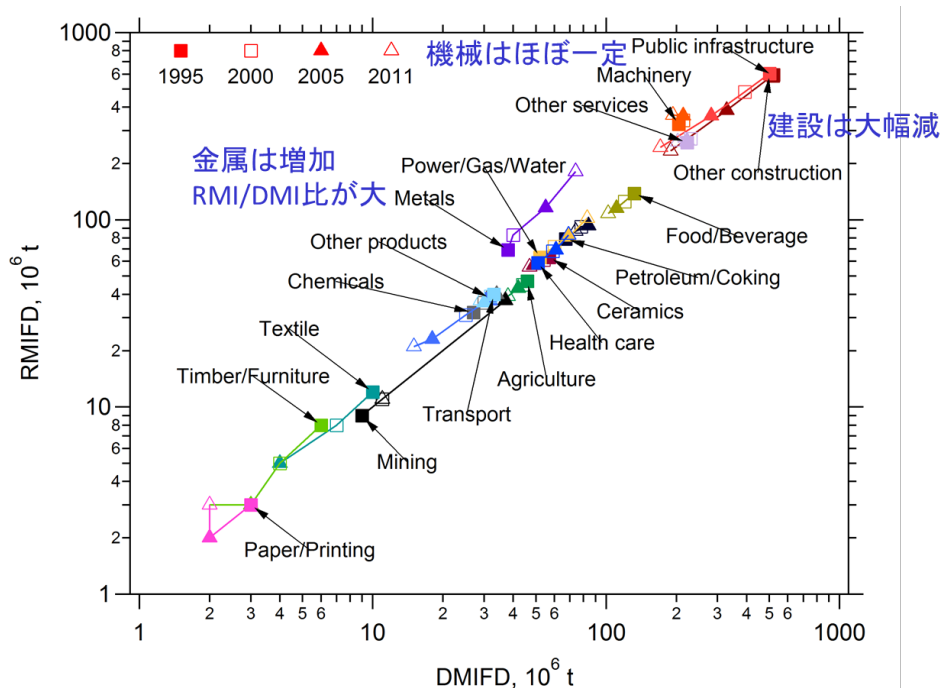
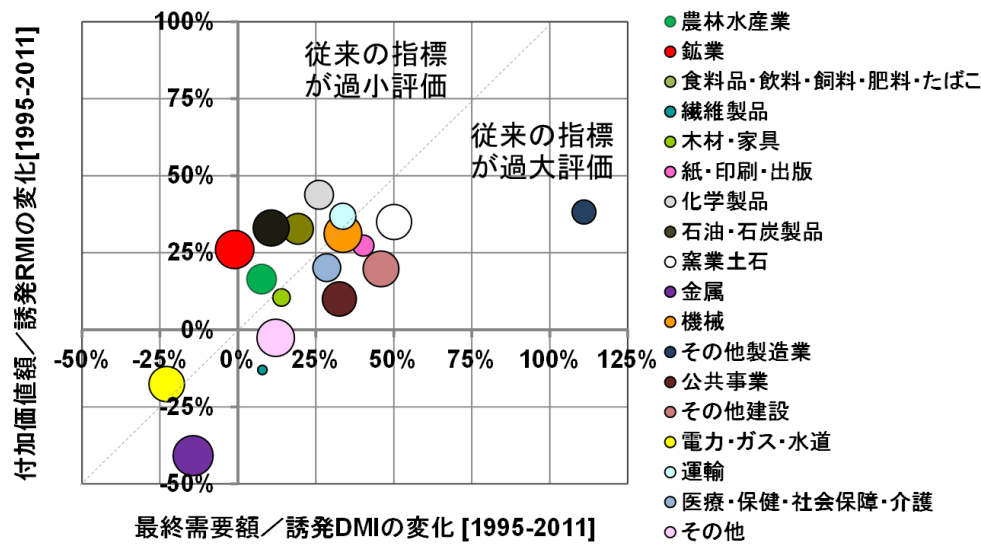


図 4-4 直接物質投入量（DMI）と一次資源等価物質投入量（RMI）の部門別需要量の経年変化

こうした部門別物質投入量の規模感と、DMI、RMI でみた資源生産性指標の傾向を表現したものが図 4-5 である。図 4-5 では、部門ごとの RMI の絶対量の対数値を円の大きさに表現し、1995 年から 2011 年にかけての増減傾向について、図 4-4 と同じく、横軸に DMI、縦軸に RMI をとってプロットしたものである。全体としてみれば正の相関がみられるが、部門によって傾向にかなりの違いが見られる。図 4-4 で金属部門は物質投入量の増加が顕著であることを示したが、資源生産性でみると低下傾向で、とくに縦軸にとった新たな指標での低下傾向が顕著である。図 4-4 で、DMI と RMI の関係には大きな変化は見られなかったことから、これは付加価値額の割合の低下が主因と考えられる。従来の指標が過少評価、すなわち新たな指標でみたほうが、1995 年から 2011 年にかけて改善傾向がみられた部門は 18 部門中 6 部門で、農林水産業、鉱業、石油・石炭製品、化学製品など原材料産業が多いが、食料品産業もここに位置する。一方、「ものづくり産業」の典型ともいえる機械部門は、新指標のほうが資源生産性指標の向上率がやや低い、どちらの指標でみてもこ

の間約 30%向上している。その他製造業は従来の指標の過大評価傾向が顕著であるが、この部門には多様な製造業が括られているため、より詳細にみる必要がある。



バブルの大きさは各産業の国内生産額が誘発するRMI(一次資源等価換算物質量)の対数を表現

図 4-5 DMI ベースの資源生産性と RMI ベースの資源生産性の経年変化の関係

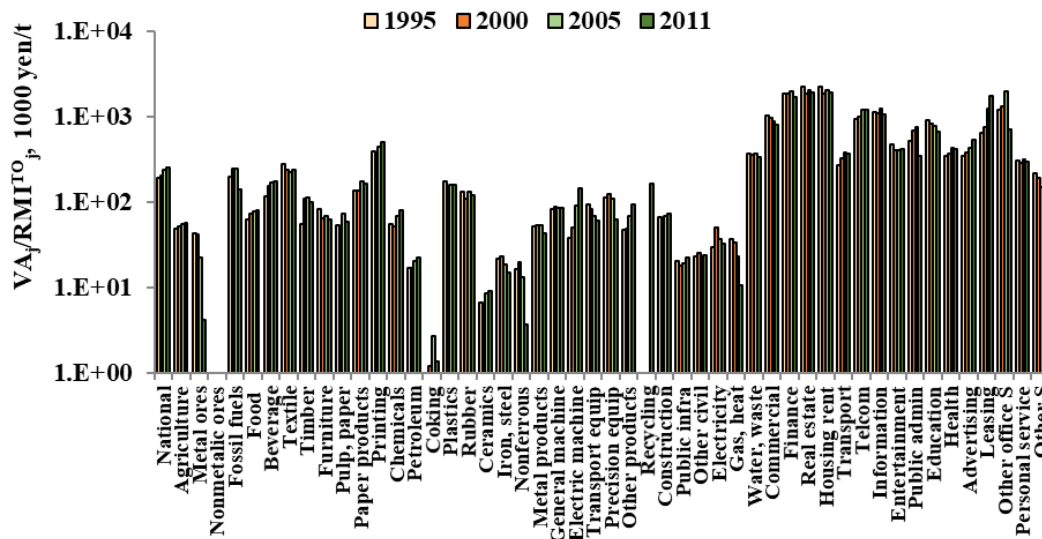


図 4-6 一次資源換算物質投入量あたり付加価値額でみた部門別資源生産性指標の経年変化

一方、図 4-6 は、部門別資源生産性指標の 49 部門別の経年変化である。生産活動と物質資源の消費の関係が部門によって大きく異なるため、指標値の大小自身について部門を超えて比較することは適切ではなく、部門ごとに指標値の変化の傾向を読み取るべきものである。機械産業の中でも、一般機械は横ばい、電気機械は指標値が上昇傾向、輸送機械は低下傾向など、先に「機械部門」として括られていた 18 部門の分析では表現されていなかった傾向を読み取ることができる。

さらに、図 4-7 は、式(3-11)で示した要因分解式によって、国全体の RMI の合計値の変化の要因を 3 期間に区切って示したものである。この間、RMI の合計値は減少傾向にあったが、主に寄与していたのは GDP の変化と、付加価値額シェアの変化（建設など物質消費量の大きな部門のシェアの低下）である。本研究が主眼をおく資源生産性指標は、intensity として表現されており、その寄与は最初の 2 期では絶対値が小さく、2005 年から 2011 年はプラス、すなわち物質消費量をむしろ押し上げる方向に寄与している。

1 次計画当初から循環基本計画の点検に用いられてきた DMI に基づく資源生産性指標は、建設部門の原材料投入に大きく影響されることから、2 次計画以降では、建設用鉱物を除外した指標も点検に用いられ、この指標でみた資源生産性の向上が停滞気味であることが既に知られていた。また、RME での資源生産性指標の試算値も、DMI による指標に比べて向上が小さかった。部門構成の変化のために、国全体でみれば資源生産性はやや向上傾向にあったが、今後、製造業はじめ部門ごとの資源生産性の変化傾向をより詳細に点検することの必要性を示唆する結果である。

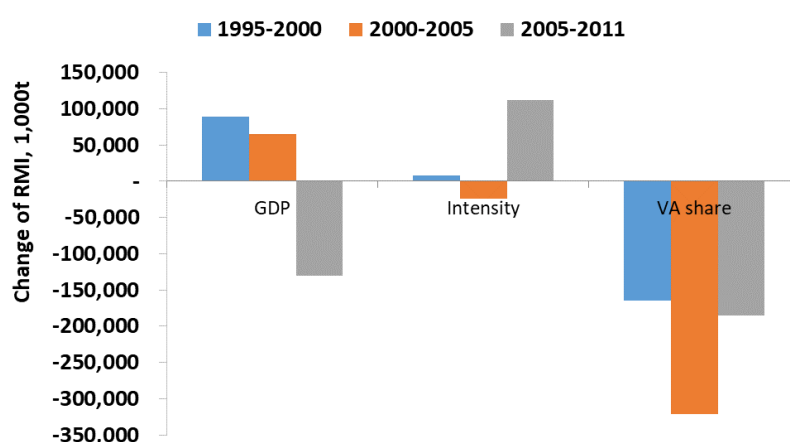


図 4-7 一次資源等価物質投入量の変化の要因分解分析結果

(3.2) 付加価値に応じた再配分に基づく産業部門別資源生産性指標の算定の枠組み

先に(3-9)式について解説したとおり、本研究で提案した指標では、同じ資源が複数回利用される状況をそのまま足し上げるため、従来の最終需要ベースでの計算とは異なり、国全体の資源消費量の純合計値を二重計上なしに部門に配分することはできない。ここで、何らかの計算方法に基づいて、資源消費量を過不足なく部門に配分すれば、分母の資源消費量の総和は国の RMI の総量と、分子の付加価値額の総和は国の GDP と一致し、その比は国全体の資源生産性と一致する。

一例として、同じ資源が異なる部門で複数回利用され、その都度、利用された資源量（ここでは一次資源等価換算重量）に応じた付加価値を生み出すと考えて、その付加価値額の比率に応じて按分すれば、二重計上は回避できる。その場合の具体的な算定手順は、以下のとおりである。

- ①部門 j について、間接波及を含む資源種 k の一次資源等価換算投入量 $RMI'_{j(k)}$ を求め
- ②部門 j の付加価値額を資源種 k の投入量に応じて按分する。
- ③こうして按分された資源 k による付加価値の総和 $VA'(k)$ を求め
- ④さらにこの資源 k から部門 j が得た付加価値の全部門に対する比を用いて、資源 k の一次資源等価換算投入量を部門 j に再配分する。
- ⑤再配分された複数の資源種 k の量の総和を部門 j ごとに求め、
- ⑥最後にこれと部門 j の付加価値額から、部門 j の資源生産性を求める。

この算定法では、部門 j の側からみると、生み出される付加価値額の源泉は、その部門に投入されるさまざまな種類の資源であり、資源の種類にかかわらずその量（ここでは一次資源等価換算）に比例すると考えている。一方、資源種 k の側から見ると、上流の採掘・原材料産業から下流の最終製品・サービス産業に至るまでのバリューチェーンにおいて同じ資源が複数回利用される状況について、その資源が生み出した付加価値に比例して資源消費量を利用した部門に再配分している。この再配分は、下流側で高い付加価値を生む産業が上流側の産業からの原材料供給に依拠していることを考慮して、下流側の産業の資源生産性の向上への上流側産業の貢献を評価する試みであるが、そうした意図とは無関係に、部門間の指標値をならす効果が生じることが改善すべき課題である。

(3.3) 資源生産性指標の一般化と産業連関表以外の情報源による算定可能性

産業連関表が国の全産業を網羅していることは、部門別指標の算定にとって大きな利点であるが、約 400 の部門から構成される基本表は対象年から公表まで 5 年程度を要する。このため、速報性の観点から、循環基本計画の点検では、本報告で示した 18 部門表や 49 部門表が利用されてきたが、部門分解能が粗いことが課題である。産業連関表以外の情報源の利用も念頭におきながら、国全体、産業部門別、さらに詳細な業種別、個別企業別など、さまざまなレベルでより一般化された資源生産性指標の算定可能性について検討した。結果のまとめを表 4-9 に示す。

表 4-9 さまざまなレベルでの資源生産性指標に用いる変数と情報源・手法

	国全体の指標 (時系列変化重視)	産業部門別指標 (部門別分解能重視)	企業レベルの 指標	製品レベルの 指標
分子	国内生産額(TO) GDP ($=\sum VA_j$)	国内生産額(TO) _{j} 付加価値額(VA) _{j} 最終需要額(FD) _{j}	生産・出荷額 企業単位の 付加価値額	LCAで用いる 機能単位など
分母	DMI,RMI,TMR 輸出分を除いた DMC,RMC,TMC	上記に誘発される DMI,RMI,TMR	原材料使用量、 RMI換算量	LCIAによる 環境影響の 統合指標
情報源 ・ 手法	産業連関表延長表 (従来の情報源)+ RME,TMRの係数	産業連関(IO)表、 IO表と積み上げデー タのハイブリッド	マテリアル フローコスト 会計 (MFCA)	ライフサイクル アセスメント (LCA)

まず、資源生産性指標の一般的な形式は、資源により生み出される価値／資源利用に関する物的フロー量である。分子の価値は、金銭単位だけでなく物理量や機能単位でも構わない。分母は、投入、消費される資源の質量をとるのが最も簡便であるが、質量は環境影響の近似指標として不十分であるとして、資源利用に伴う環境影響を指標化する考え方もある。こうした中から、適用するレベルに応じて、分子・分母の定量的表現のために利用可能な情報を考慮して、実際の指標の定式化が行われる。本研究では、表の第 1 列を出発点としており、基本計画の点検に要する速報性から、時系列変化を追えるが部門分解能の粗い統計を利用せざるを得ないことを先に述べた。部門分解能を重視して、より詳細な業種単位で指標を算定する場合には、産業連関表基本表の利用や、これと個別の積み上げデータを組み合わせたハイブリッド法によることが適切である。基本表を利用すれば、自動車など主要な製品は単独の部門として取り出すことができるが、日本全体の集計値であることには変わりはなく、業種全体としての指標算定にとどまる。企業における取組の成果を評価するような目的では、個社や事業所単位での物質フローの情報が必要となる。温室効果ガス排出量や廃棄物排出量については、自主行動計画などの一環として、企業でもデータ整備が進んでいるのに対し、資源生産性指標の基礎となる物質フロー全体の把握への取り組みは一般的ではない。そうした中では、環境管

理の一手法として ISO 化もなされた物質フローコスト会計（MFCA : Material Flow Cost Accounting）が、企業レベルや事業所レベルの資源生産性指標算定のための情報源として有望である。MFCA では、原材料の無駄や廃棄物排出の削減によるコスト低減に主眼があり、それを可能とするために工程単位のきめ細かな情報が必要となるために MFCA の整備自身のコストが課題となる。資源生産性指標の算定のためには、事業所ないし企業全体での物質収支が把握できれば十分であり、主要な原材料の調達量などをもとにした指標算定への自主的な取り組みが望まれる。

（４）低炭素と資源循環の統合指標

（４.１）焼却熱の産業利用（事例 1）

低炭素化の推進には、廃棄物からのエネルギー回収を効率化することが重要である。焼却炉ボイラーで製造される蒸気を近隣の製造業の工場で活用することができれば、蒸気を発電に利用する場合（発電効率約 20 数%）と比較して、2 倍程度多くの化石燃料消費削減効果が期待できる。ここでは、工業団地単位で蒸気配管のネットワークを構築し、低炭素化することを想定して、火力発電所からの抽気蒸気及び、焼却炉で製造した蒸気を、近隣の蒸気を需要する工場で利用するケースを設定する（図 4-8）。蒸気の工場での利用によって、化石燃料消費が削減され（RTF では、将来の土地占有の減少として評価）、それに伴う CO₂ 排出も削減されるが、蒸気配管網の構築のために、ステンレス鋼材を占有することになる。RTF では国、地域、集団、個人などの 1 人当たりの値を表示するが、この種の対策は、関与する集団を特定することが難しい。ここでは、想定した廃棄物焼却量に対応する人数を設定した。



図 4-8 焼却熱の産業利用の概略図（事例 1）

図 4-9 に事例 1 の対策実施による RTF の変化量を示す。これは、対策実施後の RTF 値から、蒸気配管網構築以前（火力発電、焼却炉は発電のみ実施、工場は独自のボイラーで蒸気製造）の RTF 値を引き算した値であり、値がマイナスの項目は RTF が向上（より持続可能）、プラスの項目は悪化したことを意味する。対策による化石燃料消費の削減効果が大きいため、これと等価なエネルギーを再生可能エネルギーで得るための将来の土地占有（エネルギーの安定供給を考慮して、50%を太陽光発電、50%を森林バイオマスで供給する想定）を回避する効果が、40 年以上と大きい。また、それに伴う CO₂ 排出の削減効果は、2030 年の排出削減目標で 5 年、2050 年の目標で 18 年分の改善となる。先進国の CO₂ 排出については、将来的には排出量をゼロにすることが求められており、今後 100 年間の排出可能総量を RTF の分母にとってもよいが、ここでは目標値の取り方によって RTF 値が変化することを明確にするため、2 つの年次の目標値に対応する RTF 値をそれぞれ表示した。土地と CO₂ の占有についての削減効果が大きい一方、蒸気配管網に必要なステンレス鋼に含まれる、鉄とクロムの RTF 値はそれぞれ、0.02 年、1.2 年と軽微である。蒸気の需給間の距離が遠く、配管距離が長くなる場合には、クロムの RTF 値が大きくなる可能性もあるが、本事例においては物質占有の影響は

軽微であることから、本対策が持続可能性の向上にとって総合的に有効な対策であると判断することができる。

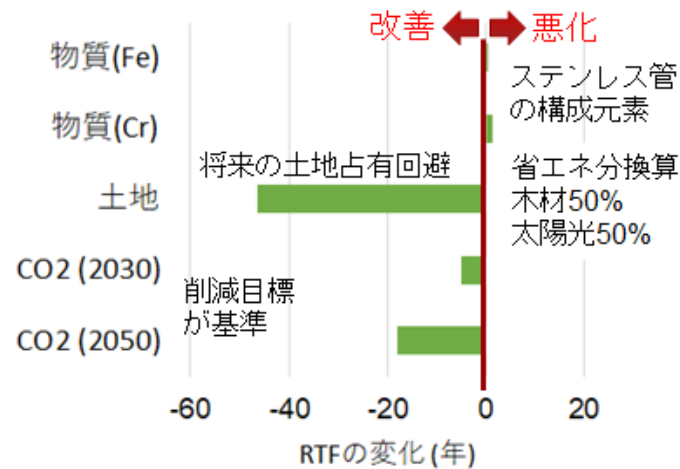


図 4-9 焼却熱の産業利用（事例 1）に伴う RTF 値の変化

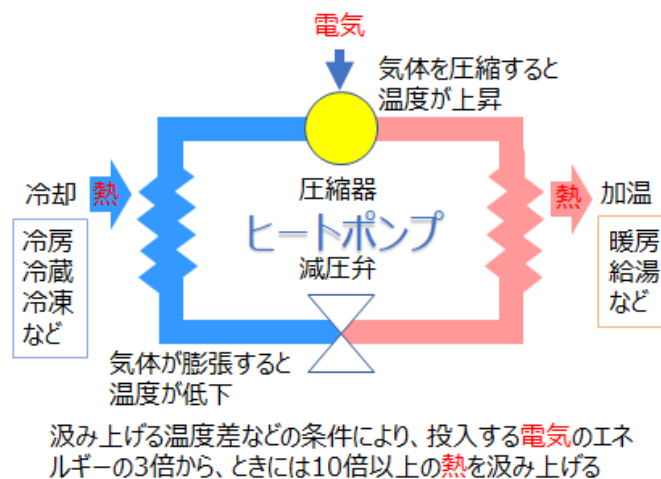


図 4-10 ヒートポンプの原理の概略（事例 2）

（4.2）ヒートポンプ給湯（事例 2）

暖房や給湯など、比較的低温の熱供給については、消費する電力の 3～7 倍程度、条件次第では 10 倍以上の熱を供給することのできる、ヒートポンプの活用が効率的である（図 4-10）。比較対象となるのはガスや石油を直接燃焼させて熱を作るボイラーであるが、火力発電所で化石燃料から電力を製造する際のエネルギーロス（40～60%）を加味しても、ボイラーよりも多くの熱を供給することができる。また、電力で駆動することと、低温の熱は蓄熱が容易であることから、太陽光発電の日中の余剰電力を活用して熱を製造し、この熱を他の時間帯で使用することで、自然エネルギーの出力変動にも対応しながら、カーボンフリーの熱供給システムを構築することもできる。ヒートポンプの問題点は、駆動時の騒音、冷媒の種類によってはその漏洩時の温室効果などが挙げられるが、ここではコンプレッサー（モーター）に使用される希少な金属資源である銅に着目して、その RTF 値を評価する。

図 4-11 に、ボイラー給湯からヒートポンプ給湯に変更した際の、RTF 値の変化を示す。給湯のみを対象とした事例であるが、その省エネによる将来の土地占有の回避効果は 10 年程度と大きい。CO₂ 排出削減も、2030 年目標値に対して 1.7 年、2050 年目標値に対しては 6 年の改善効果がある。それに対して銅の占有による RTF は、1.7 年である。総合的に判断すると、有効な対策であると考えられるが、銅の占有の影響も相対的にある程度大きいと、注意して進める必要があると考えられる。

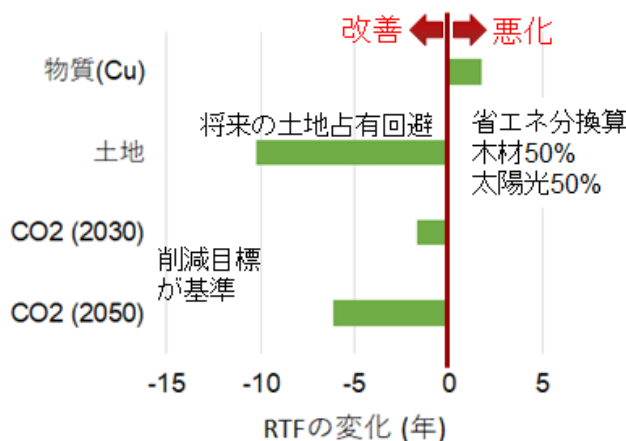


図 4-11 ヒートポンプ給湯（事例 2）に伴う RTF 値の変化

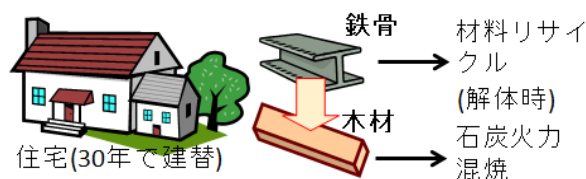


図 4-12 再生可能な素材への転換の概要（事例 3）

(4.3) 再生可能な素材への転換（事例 3）

鉄などの枯渇性の資源から、木材などの再生可能資源への転換は、持続可能性を高めるための 1 つの選択肢であると考えられる。しかし、木材の生産には多くの土地や労働を占有する可能性があるため、留意が必要である。ここでは、鉄骨住宅から木造住宅に変更するケースに RTF 指標を適用してその影響の大きさを検討する（図 4-12）。

図 4-13 に、鉄骨住宅から木造住宅に変更した際の RTF 値の変化を示す。木造への変更による鉄の占有回避は 18 年と長い。社会全体としては、道路、鉄道、商業ビル、自動車、船舶など、様々なインフラや機械類に鉄が使用されていることを考えると、住宅の構造の変更だけでも鉄占有の回避効果が大きいことが分かる。一方で、木材の生産に伴う土地占有の RTF 値は 24 年あり、鉄の製造に伴う石炭消費の削減分や、木材を解体後に化石燃料の代替燃料として利用することによる土地占有の相殺を考慮しても、トータルでの土地の RTF 値の増加分は 18 年であり、鉄の RTF 値の改善と、土地の RTF 値の悪化は同程度の値となる。一方木材生産のための労働の RTF 値は 0.7 年と、比較的軽微である。CO₂ 排出削減は、2030 年目標値に対して約 3 年、2050 年目標値に対しては 11 年の改善効果がある。住宅は 30 年で建て替えることを想定したが、長期使用すれば木材の投入を減らすことができる一方、鉄の占有回避という観点では同等の効果があるため、土地の占

有の増加を押さえながら、鉄の占有を回避する観点では、住宅を木造化した上で長期使用することが有効である。

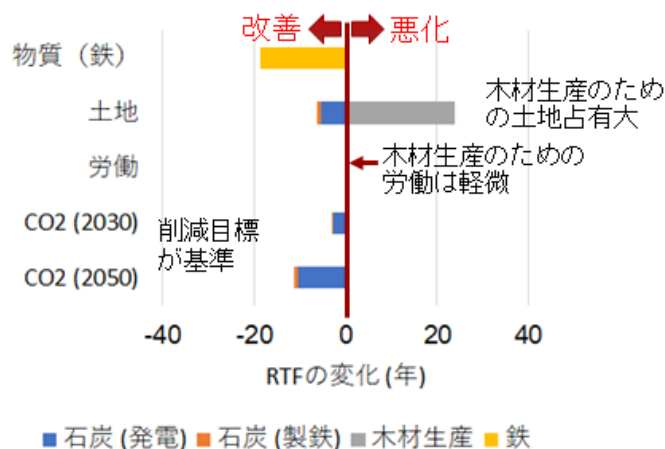


図 4-13 再生可能な素材への転換（事例 3）における対策実施に伴う RTF 値の変化



図 4-14 カーシェアリングの概要（事例 3）

（4.4）カーシェアリング（事例 4）

シェアリングエコノミーは、脱物質化を進めるための重要な対策の 1 つである。ここでは、カーシェアリングに RTF 指標を適用する。個人所有の自家用車は、ほとんどの時間が駐車場に停められた状況（稼働率 2.5%）となるが、シェアによって稼働率が 4 倍に向上するケース（稼働率 10%）を想定する（図 4-14）。電気自動車や燃料電池車などでは、物質占有の RTF 値の観点からは、鉄以外の金属類がむしろ重要になる可能性が高いが、ここでは通常のカソリン車をシェアリングするケースを想定して、自動車中の鉄に着目する。

図 4-15 に自動車の個人所有から、シェアリングに変更した際の RTF 値の変化を示す。事例 1～事例 3 では、項目間にトレードオフが存在したのに対して、シェアリングの場合には総ての項目の RTF 値が改善されるのが特徴である。ただし、自動車のシェアリングだけでは、最も RTF 値の改善効果が大きな鉄の占有についても、その改善効果は約 3 年であり、社会全体で本質的な改善を目指すのであれば、様々な製品に対してシェアリングを進める必要があると考えられる。本事例において、労働の占有については評価していないが、シェアリングエコノミーの推進は、製品の製造に伴う労働の占有を低減させることはできると考えられる。シェアする仕組みにも、自動決済等による自動化を進めることができれば、全体として労働の占有を低減させられる可能性は高いと考えられる。これは、雇用の機会を奪うことにもなり得るが、本サブテーマで検討したいずれの事例も、対策実施前後で機能（製品やサービス）は同水準に保たれることを条件にしておき、同等量の機能を享受できることは、理論的には可能である。削減できた労働を、その他の項目の RTF の大幅な増加に結び付かないかに配慮しながら、福祉や教育など、生活の質をより豊かにする機能提供に振り向けることで、より持続可能な社会に近付くことができると考えられる。

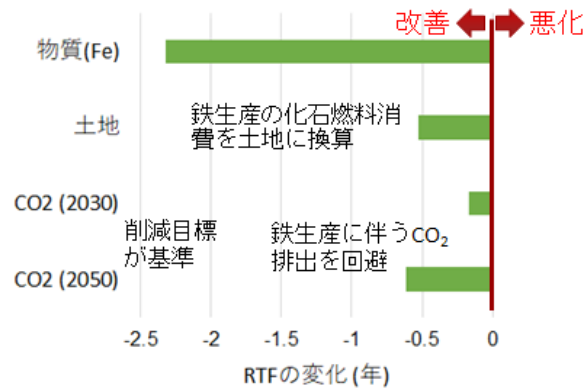


図 4-15 カーシェアリング（事例 4）における対策実施に伴う RTF 値の変化

このように、資源占有の「時間フットプリント」を、廃棄物のエネルギーとしての高度な有効利用、省エネルギー装置の利用、再生可能な素材への転換、シェアリングエコノミーの推進の各事例に適用して、その有用性を示した。ストックとフローの両面の対策や効果について、物質、土地、労働、環境の各項目への影響を、時間の単位に換算して絶対値として示すことが可能であり、項目間のバランスを取りながら政策を立案、遂行する上で有用な指標となることが期待される。

（５）TMR 指標の新展開

図 4-16 は、鉄鉱石、石炭、石灰石の剥土比、銑鉄価格、粗鋼価格、スラグ価格をパラメータとしてモンテカルロシミュレーションを行うことで得られた粗鋼の TMR 係数の分布である。なお推定にあたっては鋼材生産プロセスモデルを構築した。剥土比に関しては、Halada et al.の報告値²⁹⁾から対数正規分布を仮定し、重み付き平均値、重み付き標準偏差を用いた。図から分かるように、対数正規分布における粗鋼の TMR 係数の平均値は 12.0 kg-TMR/kg であり、最頻値は 9.1 kg-TMR/kg であった。どちらの数値を代表値として用いるかは使用目的によるが、本研究では最頻値(=9.1 kg-TMR/kg)を今後の推算の基準値とした。

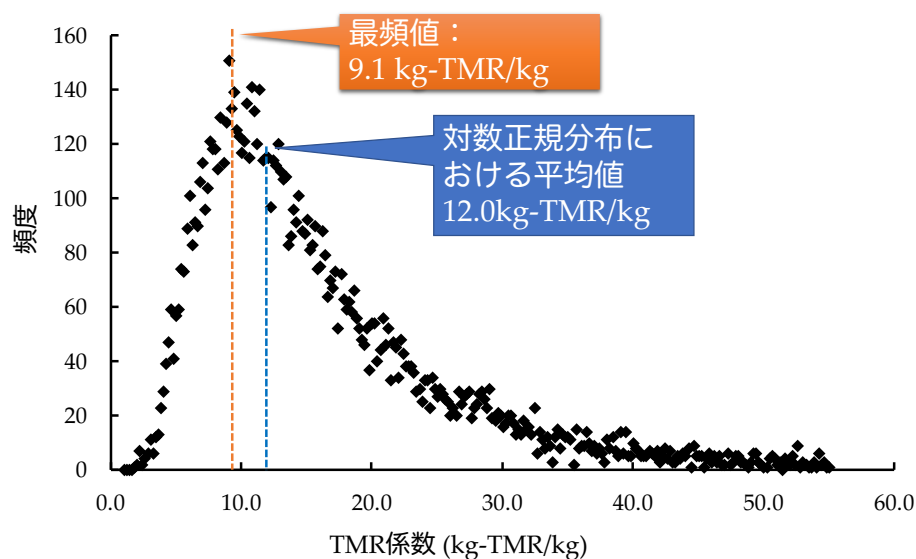


図 4-16 粗鋼の TMR 係数分布

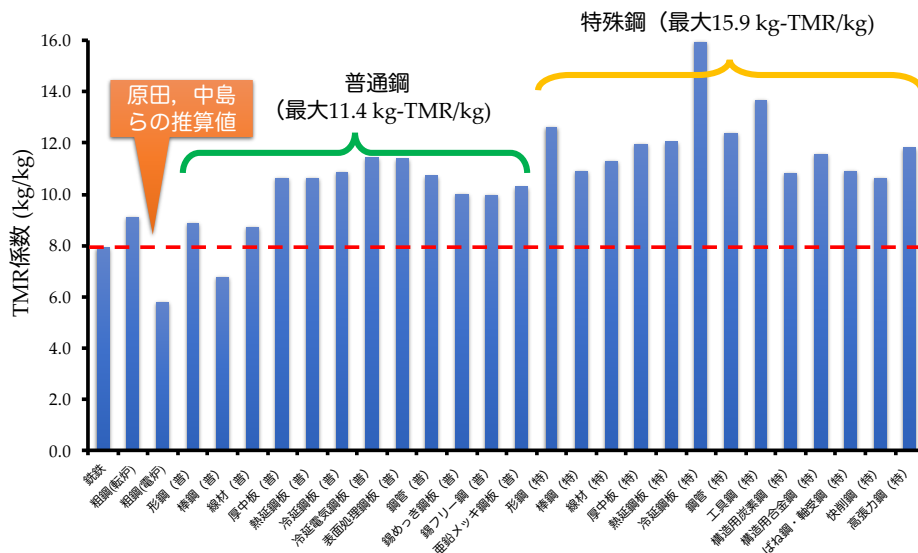


図 4-17 種々の鋼材の TMR 係数

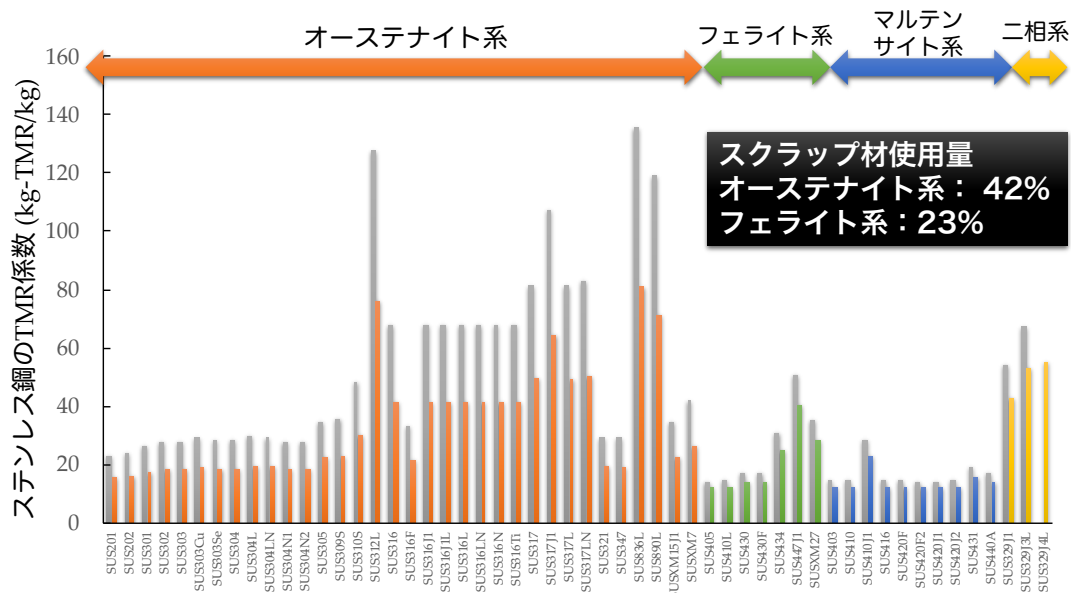


図 4-18 ステンレス鋼の TMR 係数

次に、このようにして得られた粗鋼の TMR 係数を元に、種々の鋼材の TMR 係数を推計した結果を図 4-17 に示す。銑鉄の TMR 係数は 7.9 kg-TMR/kg となっており、これは 2000 年代に報告された Halada et al.²⁹⁾や中島ら²⁶⁾の推計値とよく一致する。普通鋼の TMR 係数は概ね 9~11 kg-TMR/kg の間に位置しており、特殊鋼は 11~16 kg-TMR/kg であった。

さらに図 4-18 はステンレス鋼の TMR 係数である。灰色はリサイクルを考慮しない場合、色つきはリサイクルを考慮した場合の TMR 係数である。なお、推計はフェロアロイの TMR 係数を用いて行った。図から、オーステナイト系は Ni を用いているため TMR 係数が高いことが分かる。その中でも Mo を使うような鋼材はさらに高い値を示した。一方で、フェライト系やマルテンサイト系は Ni を含まないため TMR 係数は小さい。しかし、リサイクルを考慮した場合、オーステナイト系は磁性がなく鋼材との分離性が高いことから、リサイクルが容易であり、結果としてスクラップ材の使用量が高くなる。その結果、一部の鋼種ではフェライト系に迫るほど TMR 係数が減少していることが分かった。

図 4-19 は、全てについてモンテカルロシミュレーションは行っていないが、ボトムアップ型の手法で推計した種々の製品の TMR 係数を示したものである。本研究においては、研究開始までに推計していた 400 種の素材・製品に加え、さらに 500 種程度の素材・製品について TMR 係数を推計した。この成果は、論文等で公表したものから順次「関与物質総量データベース」(<http://www.ritsumeai.ac.jp/~yamasue/tmr/index.html>)に掲載している。

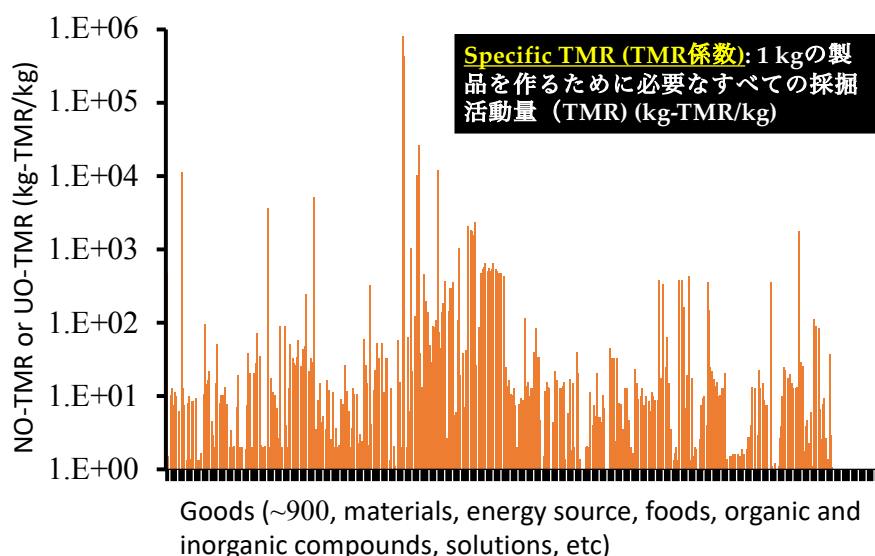


図 4-19 ボトムアップ型で推計した種々の素材・製品の TMR 係数

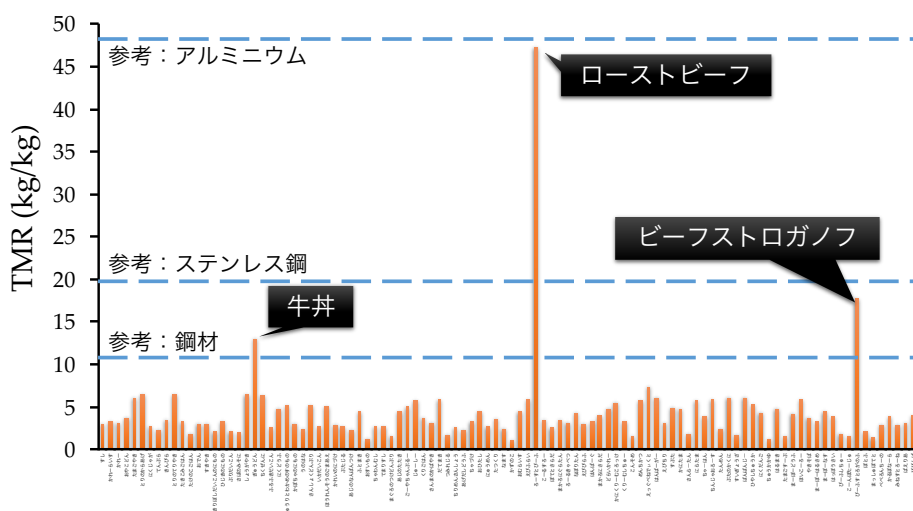


図 4-20 種々のレシピにおける TMR 係数

本データベースは、金属製品だけでなく、プラスチックといった有機材料、酸・アルカリといった溶液系、肥料、食料関係についてもデータがそろっている。なお、クックパッド社との連携により 170 万件以上の料理レシピに関するビッグデータを解析し、それを上記 TMR 係数データベースと接続することで、日本における代表的な料理の TMR を統計的に評価することができた。図 4-20 は代表的なレシピの TMR 係数の推計結果である。図から分かるように、牛肉を含むレシピの TMR 係数が高いことが分かる。これは、牛肉が他の肉類あるいは野菜等と比べ高い TMR 係数を持っていることに起因する。図 4-20 は kg あたりの TMR であるが、食品の場合、カロリーや栄養素も重要な機能単位になるため、それらを考慮した評価が今後の課題である。

このようにして得られたボトムアップ型の TMR 係数データベースを用い、トップダウン型の分析例として日本における年間の TMR の推移を算出した。具体的には、日本のマテリアルバランス 2013³²⁾より、投入された資源量のデータを得て、各資源（石油、石炭、岩石、石灰石、食料等々）の平均的な TMR 係数を乗じることで全体量の把握を行った。トップダウン型の手法で推計した 1990～2013 年の日本における TMR を図 4-21 に示す。図から分かるように、直接投入量は 1990 年から 2013 年度にかけて減少傾向にある一方で、TMR は増加傾向にあることが分かった。感度分析の結果、特にインパクトの大きい項目は、輸入資源では一般炭、原料炭、原油および粗油、石油製品、液化天然ガス、液化石油ガス、食料、鉄鉱石、銅鉱石、ニッケル鉱石、輸入製品では原料別製品（鉄鋼、木製品、非金属鉱物製品）、化学製品、一般機械・電気機器、国内資源では砂利、砕骨材、食料、石灰石、再生資源では再生鉄スクラップであることが分かった。そのうち、直接物質投入の減少に寄与している項目は、砂利、砕骨材であった。一方、TMR の増加要因は発電用石炭、液化天然ガス、鉄鉱石であった。ここで、環境省では、2006 年における隠れたフローを 36 億トンと推計している。2006 年における直接資源投入量は 18 億トンであり、これらの合計の 54 億トンが 2006 年の日本の TMR と推定される。この値は本研究の推計値の約半分であり、その原因について検討した結果、2006 年の報告には、TMR 係数が乗じられていない投入があることが分かった。大きなものとして原油・粗油（約 16 億トン-TMR）、液化天然ガス（約 12.2 億トン-TMR）、液化石油ガス（約 1.7 億トン-TMR）が考慮されておらず、そのほか輸入素材（約 5 億トン-TMR）、輸入機械（約 3 億トン-TMR）、輸入食料（約 3.5 億トン-TMR）、国内食料（約 5 億トン-TMR）、銅とニッケル鉱石（併せて約 5 億トン-TMR）、木材（約 1 億トン-TMR）、再生資源（全て足すと 4-5 億トン-TMR）が想定される。

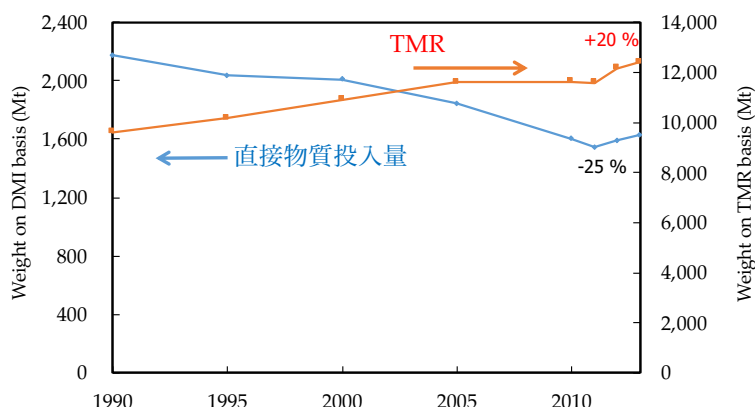


図 4-21 日本における直接物質投入量（DMI）と TMR の推移

これらの数値から推定した日本全体として TMR 係数を図 4-22 に示す。1990 年は 4.4kg-TMR/kg であったが、2013 年には 7.6 kg-TMR/kg となっており、約 1.7 倍に増加している。これらの結果より、日本は直接物質投入量の減少についてはある一定の成果を得ていると考えられるが、採掘活動まで考慮するとむしろ資源への依存度が増加していることが分かる。今後の脱原子力、あるいは次世代自動車の普及等により TMR の高い資源への依存度はさらに高くなると思われ、注視が必要と考えられる。

TMR を減少させるための方策として、リサイクルが有効である。そこで対象とする製品について、構成素材を全て一次素材と二次素材で作成した場合の TMR の差に年間生産量を乗じたものを「年間 TMR 削減量」と定義し、自動車、建築物、家電製品について比較した。その結果を図 4-23 に示す。図から分かるように、乗用車の年間 TMR 削減量が最も高く、次にエアコン、さらに RC 造建築物となった。したがってこれらの製品を如何に二次素材から生産できるようにできるかが課題の一つである。

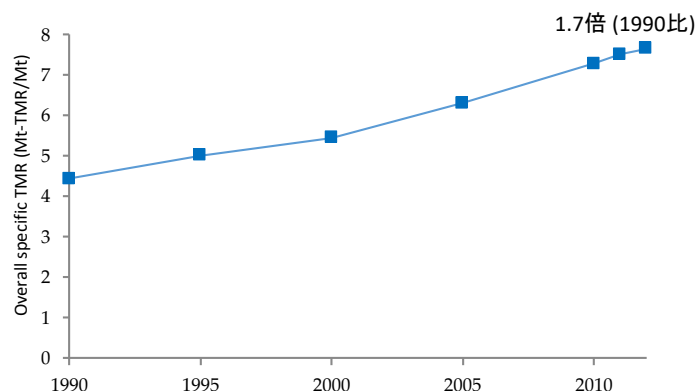


図 4-22 日本全体としての平均 TMR 係数の推移

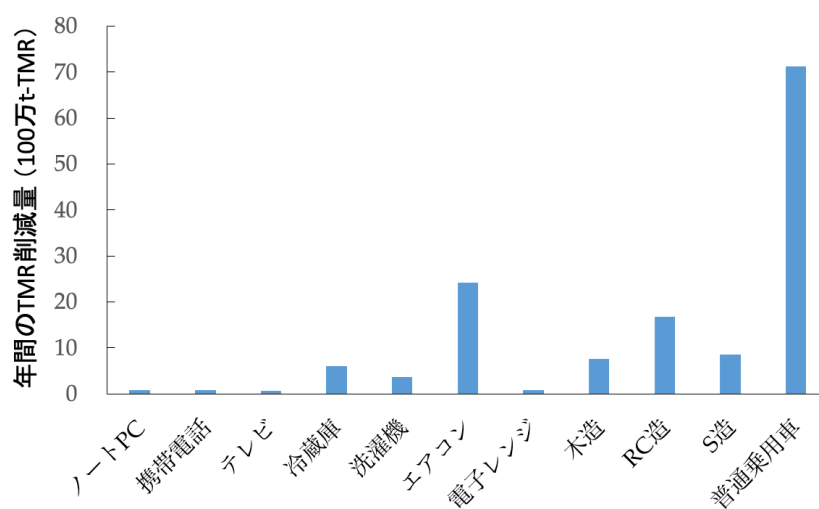


図 4-23 年間の TMR 削減可能量の推計結果

最後に、TMR と他指標との差異について分析を行った。TMR は採掘活動量あるいは採掘廃棄物を重量として定量化する指標であるが、国レベル（日本）、製品レベル（自動車、家電製品）、素材レベル（金属元素）の多くの場合について、直接物質投入量（DMI）や地球温暖化係数（GWP）と異なる傾向が得られた。

図 4-21 は国レベルにおける比較の代表的な例であり、直接物質投入量は減少しているにもかかわらず TMR は増加している。

図 4-24 は製品レベルの代表的な結果として、種々の自動車について 1 台あたりの関与物質総量を推計した結果である。図から分かるように従来型の自動車は 1 台を生産するためにおよそ 21 t-TMR の採掘活動が必要であるが、次世代自動車ではニッケル水素電池を使うハイブリッド車で 53 t-TMR、リチウムイオン電池を使うハイブリッドで 62 t-TMR、電気自動車で 74 t-TMR、燃料電池車で 68 t-TMR となった。一般的に次世代自動車は燃費が良好であることが特徴であるが、その生産にあたって従来型の 2.5～3 倍以上の採掘活動が必要であることが分かる。図 4-25 はその走行段階まで含めて評価した結果である。なお、電池は 10 万 km で交換する必要があると仮定している。図から分かるように、電気自動車やハイブリッド車は燃費が良いため、走行段階における傾きは従来型の自動車に比べ小さいものの、初期段階及びバッテリー交換における TMR が大きく、総じてリッター10km の従来型自動車と大差ない。仮に途中のバッテリー交換をしないと仮定せず、し

かも動力源として全て太陽電池由来の電力を用いたとしても、リッター15kmのガソリン自動車の TMR より小さい TMR とするためには約 12-13 万 km を走行する必要があることが分かる。

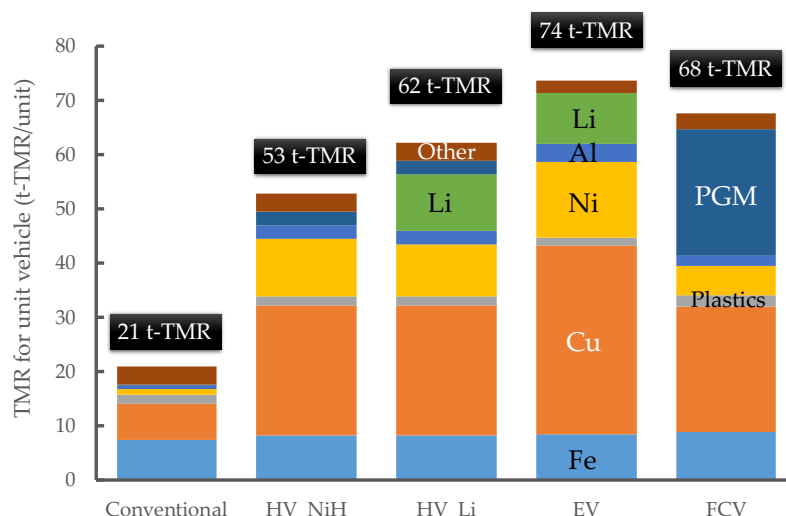


図 4-24 種々の次世代自動車の 1 台あたりの TMR

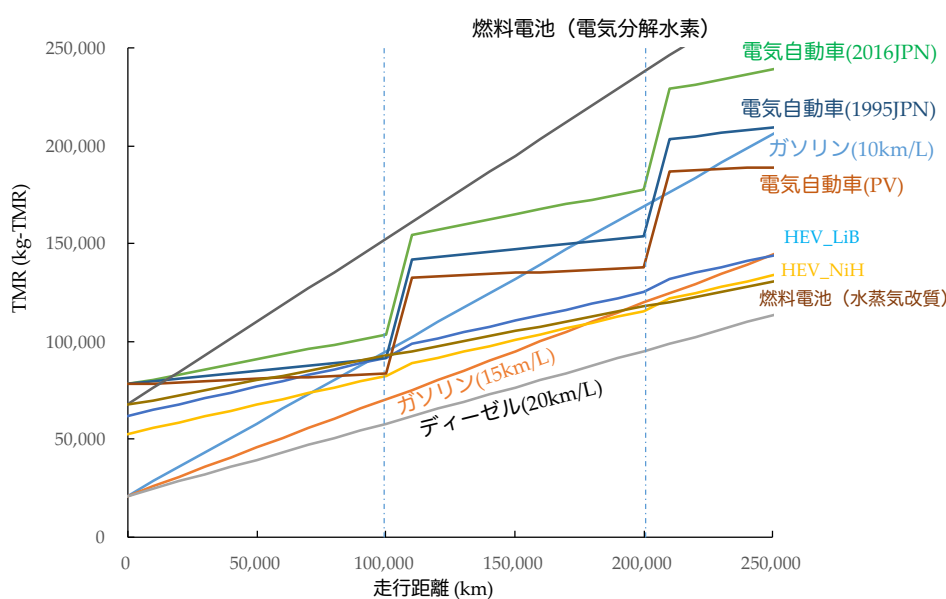


図 4-25 種々の次世代自動車の走行距離に応じた TMR 係数の推移

図 4-26 は種々の元素について、80 種以上の元素代替に伴う GWP と TMR の増減を 4 象限に分けてプロットした結果である。図から分かるように、GWP を減少させるように元素代替を選択した場合、前代替候補のうち約 60%が TMR も減少するが、いくつかの場合においては TMR が増加する場合が分かった。TMR が増加する代替は、Al→Cu、Pt→Pd、W→Mo、Pt→Au、Ce→Se、Nb→Mo、Ce→La であり、このような代替を安易に行うことは TMR の資源からは望ましくない。多くのグリーンイノベーションは DMI や GWP を軸にしたものが多かったが、その背後に TMR（採掘廃棄物）が増加する場合があることは一種のパラドックス（資源パラドックス問題）であり、資源採取に関わる指標を組み込むことの重要性を示唆している。

以上より、TMR は直接物質投入量や地球温暖化係数とは異なる環境に対する作用を可視化している指標であることが分かる。指標間に優越はなく、どれが良い・悪いという議論ではなく、どの指標が何を可視化し

ているのかという情報が必要である。TMR は採掘活動量あるいは採掘廃棄物を可視化できる指標であり、持続可能な社会構築のためには直接物質投入量、地球温暖化係数だけでなく TMR も低減できるようなシステムの構築が重要である。

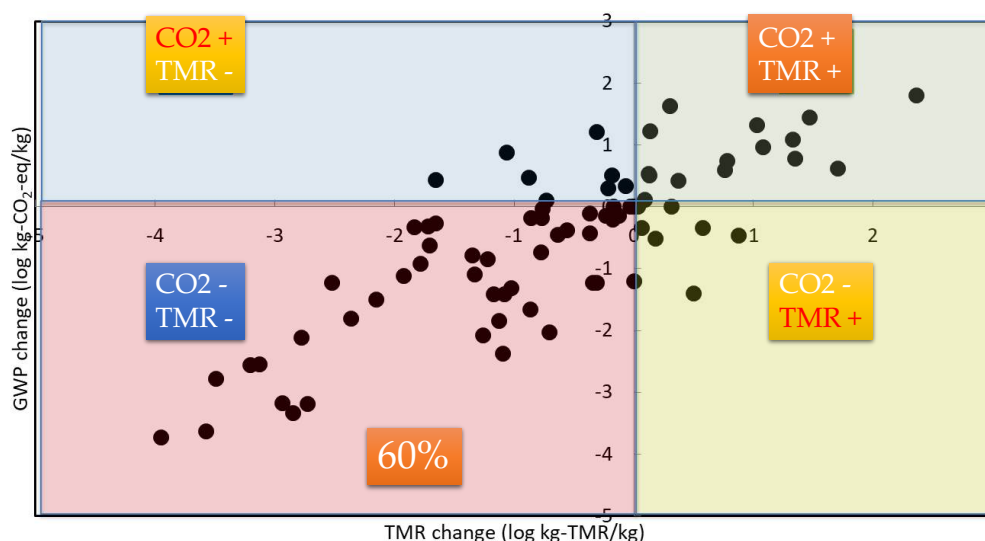


図 4-26 元素代替による地球温暖化係数と TMR の変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 既存の指標体系の再構築：指標の整理法には、OECD/EEA の DPSIR (Driver、Pressure、State、Impact、Response) 等があるが、本研究ではこれ以外の視点も整理し、他の様々な行政計画にも役立てられるような視点のリストを作成した点が新しい。
- ・ スtock指標としての物質利用時間の計測：複数の製品に使用される物質の平均的な利用時間を把握することは、その物質が有効に使われているかどうかを理解することにつながる。これに対し、これまで適切な推計方法がなかった物質利用時間の推計手法を提案したこと、物質ストック量・物質利用時間・再生利用量の関係を定量的に分析することを可能としたことは、学術的に意義が高い。
- ・ 産業部門別の資源生産性指標：資源生産性、資源効率性の具体的な計量方法についての科学的検討については、国全体を対象としたものが主で、部門別・産業分野別の研究はまだ少ない。環境研究における産業連関表の応用は日本が国際的にリードしてきた分野であり、産業部門別の資源生産性の経年変化について実証的な結果を示したこと、産業連関表固有の問題点を確認したことに科学的意義がある。
- ・ 低炭素と資源循環の統合指標：資源占有の時間フットプリント (Resource Time Footprint: RTF) 指標自体が新しいものであり、存在量 (ストック) を占有する資源と、能力・速度 (フロー) を占有する資源の両者を同じ時間の単位で評価できるようにした点が学術的に意義深い。ただし、直感的に理解することが難しい面もあるため、今後の適用研究の積み重ねによって改善していく必要がある。
- ・ TMR 指標の新展開：TMR 係数に関するデータベースを構築し、他指標 (資源消費量や温室効果ガス排出量) との差異を明確化したことは学術的な視点からも意義が大きい。また、いわゆるビッグデータを環境影響(TMR)のデータと接続して各種料理の TMR を推計した点も学術的な意義があると考えられる。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

- ・ 環境省が 2016～2017 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たが、当該ワーキンググループには、本研究プロジェクトから 3 名が参画し（座長：森口祐一、委員：梅田靖、橋本征二）、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 分を行い、質疑応答を行った。具体的には以下のような成果が第 4 次循環基本計画において採用された。
- ・ 本研究で指摘した課題とそれへの対応のうち、①政策と指標の関連づけ、②「物質フロー指標」と「取組指標」の関連づけについては明確に第 4 次循環基本計画の指標体系に盛り込まれた。また、③国際発信に対する留意については、下位計画で定められている指標や目標が明確に記載され、⑤SDGs と国際比較への対応についても SDGs との関連を意識した指標がいくつか盛り込まれた。
- ・ 本研究では産業部門別の資源生産性の分母に一次資源等価物質投入量を使用することを提案したが、第 4 次循環基本計画において「産業分野別の資源生産性（一次資源等価換算）」が採用された。産業分野別の資源生産性は第 2 次循環基本計画以降すでに採用されていたが、本研究で提案した一次資源等価換算を採用したことで、「※：第四次循環基本計画で追加した新たな指標」に位置付けられている。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

- ・ 第 4 次循環基本計画では、社会に蓄積されるストックの状況把握やストックの利用価値に関する指標の検討が今後の課題として示されているが、本研究では、物質ストックの利用時間を計測する手法を提案し、3 種の物質（木材、プラスチック、鉄鋼）についてその計測を行っており、次期循環基本計画策定時のインプットとなるものである。また、提案手法を用いた分析により、再生利用の促進による物質ストックの長期使用への寄与、物質ストックの長期使用による資源投入量や廃棄物発生量の削減への寄与等を定量的に把握することもできることから、各種対策の効果計測に貢献できると考えられる。
- ・ 第 4 次循環基本計画において、「産業分野別の資源生産性（一次資源等価換算）」の具体的な算定方法は明記されていないが、実際の指標値算定において、本研究の成果が活用されることが見込まれる。
- ・ 第 4 次循環基本計画においては、一次資源等価換算や TMR に関わる指標もいくつか採用されており、本研究において構築した関与物質総量データベース(<http://www.ritsumei.ac.jp/~yamasue/tmr/index.html>)をこうした指標の算定に活用することが見込まれる。記載データは全てエビデンスに基づくものであり、また継続してデータをメンテナンスすることを予定している。

6. 国際共同研究等の状況

- ・ 資源占有の時間フットプリント（RTF）指標の適用に関する共同研究：上海交通大学、香港城市大学・中国、情報共有とデータ収集（経済規模、CO₂ 排出量がともに巨大な中国を対象に、RTF 指標を用いた評価を実施する準備を行っている）
- ・ オーストラリアにおける資源強度に関わる共同研究：Damien Gieuco・シドニー工科大学・オーストラリア、年に 1-2 回のシンポジウム開催（オーストラリアは日本との関係も深いだけでなく、世界にとっても重要な資源供給国である）

- ・ 東南アジア地域における SDGs に関わる国際資源循環プロジェクト：Nguyen Duc Quang、Tran Duc Huy ・ ハノイ工科大学・ベトナム、年に 1-2 回の共同研究打合せ（ベトナムは途上国から新興国に発展しつつある国家の一つであり、東南アジアの SDGs において鍵となる国家である）
- ・ 中国における家電リサイクルの資源強度に関わる共同研究：石峰・南京大学・中国、年に 1 回程度の共同研究打合せ（中国は GDP、環境汚染、資源利用の全てにおいて世界トップレベルの国家であり、今後資源利用に関してどのように舵取りをするかで世界の資源利用に大きな影響を与える、2019 年度より本格化）
- ・ セルビアを中心とする金属資源強度に関する共同研究：Stanisavljevic Nemanja ・ Nobi Sado 大学・セルビア、年に 1 回程度現地における鉱山調査及び剥土比調査（セルビアは東欧において有数の銅資源国家、銅は枯渇性が高い一方で今後の需要がますます増加する材料の一つであり、今後の注視が重要である）

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Maung, K.N., S. Hashimoto, M. Mizukami, M. Morozumi, and C.M. Lwin: Environmental Science & Technology, Vol.51, No.7, pp.3824–3832 (2017)
“Assessment of the secondary copper reserves of nations”
- 2) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto: International Review of Civil Engineering, Vol.8, No.3, pp.113–119 (2017)
“Classification of secondary copper resources in major countries”
- 3) Maung, K.N., T. Yoshida, G. Liu, C.M. Lwin, D.B. Muller, and S. Hashimoto: Resources, Conservation and Recycling, Vol.126, pp.34–41 (2017)
“Assessment of secondary aluminum reserves of nations”
- 4) Wang, T., F. Shi, Q. Zhang, X. Qian, and S. Hashimoto: Journal of Cleaner Production, Vol.181, pp.498-507 (2018)
“Exploring material stock efficiency of municipal water and sewage infrastructures in China”
- 5) Dou, Y., S. Ohnishi, M. Fujii, T. Togawa, T. Fujita, H. Tanikawa, and L. Dong: Journal of Cleaner Production, Vol.170, pp.548-558 (2018)
“Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in Cities: Case of Tokyo Metropolitan area”
- 6) Sun, L., Z. Li, M. Fujii, Y. Hijioka, and T. Fujita: Frontiers in Energy, Vol.12, No. 3, pp.400-410 (2018)
“Carbon footprint assessment for the waste management sector: A comparative analysis of China and Japan”
- 7) Sun, L., M. Fujii, T. Tasaki, H. Dong, S. Ohnishi: Resources, Conservation and Recycling, Vol. 136, pp.289-296 (2018)
“Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system”
- 8) Oyaizu, A., J. Cravioto, I. Daigo, and E. Yamasue: Matériaux et Techniques, Vol.105, No.5-6, 510 (2018)
“Data Envelopment Analysis for steel production with the use of Total Material Requirement”
- 9) Kosai, S., S. Hashimoto, K. Matsubae, B.C. McLellan, and E. Yamasue: Minerals, Vol.8, No.3, 114 (2018)

“Comprehensive analysis of external dependency in terms of material criticality by employing Total Material Requirement: Sulfuric acid production in Japan as a case study”

- 10) 山末英嗣、光斎翔貴、松八重一代、マクレランベンジャミン：日本 LCA 学会誌、Vol.14、No.2、pp.146-157 (2018)

「食料生産における関与物質総量の枠組の提案と評価～国産食材の TMR 係数～」

- 11) Kosai, S., M. Nakanishi, and E. Yamasue: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol.65, pp.355-367 (2018)

“Vehicle Energy Efficiency Evaluation from Well-to Wheel Lifecycle Perspective”

- 12) Dente, S.M.R., C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, C. Kayo, S. Murakami, and S. Hashimoto: Resources, Conservation and Recycling, Vol.143, pp.273-281 (2019)

“Effects of a new supply chain decomposition framework on the material life cycle greenhouse gas emissions—the Japanese case”

- 13) 福谷大樹、M.J. Eckelman、橋本征二：エネルギー・資源、in press (2019)

「欧日米における白金族金属二次埋蔵量の将来推計：次世代自動車の導入を考慮して」

- 14) Maung, K.N., C.M. Lwin, and S. Hashimoto: Journal of Industrial Ecology, in press (2019)

“Assessment of secondary zinc reserves of nations”

- 15) Kosai S. and E. Yamasue: Science of the Total Environment, Vol.651, pp.1764-1775 (2019)

“Global warming potential and Total Material Requirement in metal production: Identification of changes in environmental impact through metal substitution”

<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：廃棄物資源循環学会誌、Vol.27、No.4、pp.260-268 (2016)

「UNEP 国際資源パネルの活動と資源効率性に関する評価報告書」

- 2) 森口祐一：廃棄物資源循環学会誌、Vol.28、No.6、pp.399-402 (2017)

「「指標・目標」特集のあたってー国内外の活動への参画経験からー」

- 3) 橋本征二：廃棄物資源循環学会誌、Vol.28、No.6、pp.463-473 (2017)

「循環型社会形成に向けた新たな指標体系の提案」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, S.M.R. Dente, and S. Hashimoto: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016

“Estimating environmental impacts of resources and materials use in Japan: a case of fossil resources”

- 2) S.M.R. Dente, C. Kayo, C. Aoki-Suzuki, and S. Hashimoto: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016

“Converting weight of resources into environmental impact: A case study of biomass”

- 3) K.N. Maung, C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016

“Classification of secondary aluminum resources of nations”

- 4) D. Tanaka, C. Aoki-Suzuki, S.M.R. Dente, and S. Hashimoto: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section

- & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016
 “Environmental impact of resources and materials use: A case study of non-metallic minerals”
- 5) E. Yamasue, J.C. Cravioto, B. McLellan, K. Nakajima, K. Matsubae and I. Daigo: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016
 “What are key factors of nickel and Ni-based stainless steel productions for decoupling?”
 - 6) J.C. Cravioto and E. Yamasue: The Joint ISIE Socio-economic Metabolism Section & Asia-Pacific Conference, Nagoya, Japan, 2016
 “Variations from the use of economic, subjective and objective well-being indices in a holistic assessment of the energy-well-being link?”
 - 7) C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, S.M.R. Dente, S. Murakami, C. Kayo, and S. Hashimoto: The 12th International Conference on Ecobalance, Kyoto, Japan, 2016
 “Developing methodology to evaluate decoupling economic growth from environmental impacts of resources and materials use in Japan – preliminary comparison”
 - 8) S.M.R. Dente, C. Kayo, C. Aoki-Suzuki, and S. Hashimoto: The 12th International Conference on Ecobalance, Kyoto, Japan, 2016
 “Environmental impacts of resources and materials use: A case study of biomass including time-series and decomposition analysis”
 - 9) K.N. Maung, T. Yoshida, C.M. Lwin, G. Liu, D.B. Muller, and S. Hashimoto: The 12th International Conference on Ecobalance, Kyoto, Japan, 2016
 “Assessment of secondary aluminum reserves in major countries”
 - 10) E. Yamasue, K. Matsubae, B. McLellan, K. Nakajima, S. Murakami and I. Daigo: The 12th International Conference on Ecobalance, Kyoto, Japan, 2016
 “Bottom-up analysis of total material requirement for food production”
 - 11) 小柳津顕、醍醐市朗、中島謙一、松八重一代、山末英嗣：エコデザイン・プロダクツ&サービス 2016 シンポジウム、2016
 “関与物質総量から見た鉄基合金のパフォーマンス評価”
 - 12) 山末英嗣：第22回日本LCA学会講演会、2016（依頼講演）
 “SCPにおける循環生産の役割”
 - 13) 山末英嗣：日本MRS2016年年会、2016（基調講演）
 “東南アジアにおける効率かつ健全な国際資源循環”
 - 14) 谷畑佑典、橋本征二：第26回日本エネルギー学会大会、2017
 “農業系バイオマスの物質フローの推計とエネルギー利用の検討”
 - 15) 谷畑佑典、橋本征二：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
 “農業系バイオマスの物質フローと循環利用率”
 - 16) 福谷大樹、橋本征二：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
 “日本における白金族金属類二次埋蔵量評価”
 - 17) 渡辺梓、橋本征二：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
 “人口減少社会における一般廃棄物処理施設のマネジメント”
 - 18) 孫露、田崎智宏、藤井実、大西悟：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
 “廃棄物マネジメントと統合した都市共生システムの低炭素評価及び費用便益分析”

- 19) 石井裕剛、Benjamin McLellan、山末英嗣：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“大規模料理レシピ解析による「食」に関わる関与物質総量の算定”
- 20) 山末英嗣、赤松玲華、J.C. Cravioto：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによるTMR削減ポテンシャル評価”
- 21) 小柳津顕、中島謙一、松八重一代、村上進亮、J.C. Cravioto、山末英嗣：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“関与物質総量を用いた日本の鋼材生産に関わる採掘活動量の定量化”
- 22) 安永玲華、J.C. Cravioto、山末英嗣：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによるTMR削減ポテンシャル評価”
- 23) J.C. Cravioto、山末英嗣：第12回日本LCA学会研究発表会、2017
“Comparative efficiency of mechanical properties, material and energy requirements, and environmental impact in steel production: A DEA perspective”
- 24) 小柳津顕、松八重一代、中島謙一、J.C. Cravioto、山末英嗣：日本鉄鋼協会春季講演大会、2017
“関与物質総量を用いた鉄鋼材料の再評価”
- 25) 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、2017
“白金族金属を対象とした二次資源の類型”
- 26) E. Yamasue, K. J.C. Cravioto, N.D. Quang, M. Oguchi, I. Daigo: The 24th CIRP Conferene on Life Cycle Engineering, Kamakura, Japan, 2017
“Lifetime analysis for electronic devices in Vietnam by means of Markov Chain model”,
- 27) J.C. Cravioto, R. Akamatsu, E. Yamasue: The 24th CIRP Conferene on Life Cycle Engineering, Kamakura, Japan, 2017
“Home appliances penetration and average time of use in developing and newly rising nations. (Case study of South-East Asian Countries and Mexico)”
- 28) K.N. Maung, 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, USA, 2017
“Secondary zinc reserves of nations”
- 29) Q. Zhang, J. Nakatani, and Y. Moriguchi: The 9th Conference of International Society for Industrial Ecology and 25th Conference of International Symposium on Sustainable Systems, Chicago, USA, 2017
“Impacts of urban configuration on resource and energy efficiency of water infrastructure in China”
- 30) Y. Dou, K. Okuoka, M. Fujii, H. Tanikawa, T. Fujita, and T. Togawa: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, Nagoya, Japan, 2017
“Diffusion of low-carbon district heating systems considering urban renewal strategies: Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan “
- 31) Y. Dou, M. Fujii, H. Tanikawa, K. Okuoka, T. Fujita, T. Togawa: 3rd Annual IIES Science and Policy Workshop and GlobalTech International Conference on Low-Carbon Development, Shanghai, China, 2017
“Deep decarbonization in urban energy supply through urban renewal strategy and symbiosis design “
- 32) L. Sun, M. Fujii, and T. Tasaki: 3rd Annual IIES Science and Policy Workshop and GlobalTech International Conference on Low-Carbon Development, Shanghai, China, 2017
“Achieving a low carbon city through urban symbiosis: A case of Tokyo Metropolis “
- 33) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, S. Ohnishi, Y. Dou, H. Dong, Y. Hijioka, and T. Fujita: The 9th Conference of

International Society for Industrial Ecology and 25th Conference of International Symposium on Sustainable Systems, Chicago, USA, 2017

“Assessment of urban symbiosis effect on urban metabolism based on energy flows analysis and life cycle assessment “

- 34) Y. Dou, M. Fujii, S. Ohnishi, T. Togawa, L. Sun, H. Tanikawa: The 9th Conference of International Society for Industrial Ecology and 25th Conference of International Symposium on Sustainable Systems, Chicago, USA, 2017
“Network planning and assessment system for multi-source waste heat exchange based on urban symbiosis: A case of Tokyo Metropolitan area “
- 35) D.-Q. Nguyen, V.-H. Ha, E. Yamasue, T.-H. Huynh: The 24th CIRP Conferene on Life Cycle Engineering, Kamakura, Japan, 2017
“Material flows from electronic waste: Understanding the shortages for Extended Producer Responsibility implementation in Vietnam”
- 36) A. Oyaizu, I. Daigo, J.C. Cravioto, E. Yamasue: EMECR2017 (1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), Kobe, Japan, 2017
“Data envelopment analysis for steel productions with the use of Total Material Requirement for mining activities”
- 37) S. Kosai, S. Hashimoto, E. Yamasue: 4th International Conference on Final Sinks, Kyoto, Japan, 2017
“Diachronic comparison of material flow in Japan from perspective of both Direct Material Input and Total Material Requirement”
- 38) 渡辺梓、橋本征二：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会、2017
“人口減少社会における廃棄物焼却需要と焼却施設のマネジメント”
- 39) 小柳津顕、村上進亮、松八重一代、山末英嗣：日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会、2017
“リサイクルまでを考慮したステンレス鋼の関与物質総量”
- 40) 山末英嗣：第23回日本LCA学会講演会、2017（招待講演）
“LCAとしてのTMRからみたサーキュラーエコノミー”
- 41) 福谷大樹、橋本征二：第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2018
“日米欧における白金族金属の二次埋蔵量評価”
- 42) 大神正史、橋本征二：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“木材チップ・ペレットの適正なエネルギー・マテリアル利用の検討”
- 43) 立石雄太、橋本征二：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“厨芥類リサイクルと社会システム・地域特性の関係”
- 44) 平井満規、橋本征二：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“木質バイオマスの物質フローの推計と使用効率の評価”
- 45) 福谷大樹、橋本征二：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“日米欧を対象とした二次白金族金属資源の類型”
- 46) 藤井実、孫露、林希一郎、大場真：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“資源循環と気候変動などの統合的な評価に関する研究”
- 47) 小柳津顕、光斎翔貴、J.C. Cravioto、山末英嗣：第13回日本LCA学会研究発表会、2018
“感度分析を用いた鉄鋼材料の関与物質総量の評価”
- 48) E. Yamasue, S. Kosai, K. Nakajima, K. Matsubae, S. Murakami, and B.C. McLellan: RFG2018 (Resources for

Fugure Generations), Vancouver, Canada, 2018

“Criticality analysis of rare earth elements based on Total Material Requirement“,

- 49) S.M.R. Dente, C. Aoki-Suzuki, K. Nansai, and S. Hashimoto: International Conference on Resource Sustainability, 2018

“Revealing the trade effects on the life cycle greenhouse gas of materials: The Japanese case”

- 50) D. Fukutani, M. Eckelman, and S. Hashimoto: ISIE 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China, 2018

“Secondary reserves of platinum group metals in the future: Considering penetration of next generation vehicles”

- 51) Y. Moriguchi : ISIE 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China, 2018

“Indicators for sound material-cycles and resource efficiency toward Sustainable Development Goals”

- 52) L. Sun, M. Fujii, H. Dong, T. Tasaki, and T. Fujita: ISIE 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China, 2018

“Low carbon city transition through urban - industrial symbiosis application - a case of Shenyang “

- 53) Y. Dou, H. Tanikawa, M. Fujii, K. Okuoka, and T. Fujita: ISIE 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China, 2018

“Strategic built environment management toward stock-based low energy cities: Case of Kitakyushu, Japan”

- 54) 平井満規、橋本征二、小口正弘：環境科学会2018年大会、2018

“木材の物質利用時間の推計”

- 55) 小口正弘、橋本征二、平井満規：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会、2018

“物質ストック指標としての物質利用時間の計測：木材を事例としたケーススタディ”

- 56) S.M.R.Dente, C. Aoki-Suzuki, C. Kayo, D. Tanaka, S. Murakami, and S. Hashimoto: The 13th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2018

“Life cycle environmental Impact Assessment of biomass materials in Japan: A 1990 – 2010 perspective”

- 57) Q. Zhang, and Y. Moriguchi: The 13th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2018

“Sustainable Development Goals (SDGs) call for new indicator of resource efficiency for Japan”

- 58) E. Yamasue, S. Kosai, I. Daigo, K. Nakajima, B. McLellan, K. Matsubae, S. Murakami: The 13th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2018

“Revisiting Total Material Requirement estimation and evaluation”

- 59) E. Yamasue, I. Daigo, J. Cravioto, S. Kosai, N.D. Quang, T.D. Huy, Y. Kishita, Y. Umeda: The 13th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2018

“Estimation of generated E-wastes in Vietnam considering lifetime transition”

- 60) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, and T. Fujita: Global Cities Forum, Shanghai, China, 2018

“Circular economy in Tokyo Metropolis and its indication on climate change mitigation and environmental benefit “

- 61) Y. Dou, M. Fujii, S. Ohnishi, T. Fujita, and H. Tanikawa: 2018 Institute of Innovation and Circular Economy Conference, Taichung, Taiwan, 2018

“Enhanced waste heat utilization through symbiotic district energy systems considering long-term urban renewal: Cases in Japan “

- 62) L. Sun, M. Fujii, T. Tasaki, and Y. Geng: 2018 Institute of Innovation and Circular Economy Conference, Taichung, Taiwan, 2018

“Assessment of energy saving and environmental benefit through urban-industrial symbiosis system “

- 63) 山末英嗣、J.C. Cravioto：日本鉄鋼協会第176回秋期講演大会、2018

“DEAによる複数機能の統合化手法”

- 64) 福谷大樹、M.J. Eckelman、橋本征二：第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2019
“主要地域における白金族金属二次埋蔵量の将来推計:次世代自動車の導入を考慮して”
- 65) 大神正史、S.M.R. Dente、橋本征二：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“木材がそのライフサイクルで提供する価値の推計”
- 66) 平井満規、P.B. Navarro、橋本征二：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“カスケードリサイクルと製品の長寿命化が日本の木材炭素フローに与える影響評価”
- 67) 福谷大樹、橋本征二：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“日本における白金族金属のフロー・ストックの時系列分析”
- 68) 三俣陽太郎、福谷大樹、橋本征二：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“日本におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量の評価”
- 69) S.M.R. Dente and S. Hashimoto: 第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“Life cycle thinking in the circular and functional economy: Tracking materials through their multiple lives”
- 70) 山末英嗣、光斎翔貴、村上進亮、橋本征二、B. McLellan：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“関与物質総量で可視化される資源問題—直接重量・地球温暖化係数との比較を通じて—”
- 71) 鷹田祐京、光斎翔貴、山末英嗣：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“自動車用リチウムイオン電池の資源強度低減に向けた評価とリサイクルシナリオ”
- 72) 中川奈那美、光斎翔貴、山末英嗣：第14回日本LCA学会研究発表会、2019
“採掘活動から見た日本における将来電源構成の資源強度”
- 73) 山末英嗣：日本鉄鋼協会第177回春季講演大会、2019
“ステンレス鋼の関与物質総量およびその組成との関係性”
- 74) M. Oguchi, S. Hashimoto, M. Hirai, I. Daigo: The 10th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2019), Beijing, China, 2019
“Measurement of material use time as an indicator of efficient utilization of material stock”
- 75) U. Takata, S. Kosai, E. Yamasue: 13th Conference of ISIE Socio-Economic Metabolism Section, Berlin, Germany, 2019
“TMR of LIB”
- 76) N. Nakagawa, S. Kosai, E. Yamasue: 13th Conference of ISIE Socio-Economic Metabolism Section, Berlin, Germany, 2019
“TMR of Electricity”
- 77) E. Yamasue, S. Kosai, B.C McLellan, S. Murakami, S. Hashimoto: 13th Society And Materials, International Conference (SAM13), Pisa, Italy, 2019
“Resource paradox problem revealed by Total Material Requirement”

(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) 山末英嗣：「隠れたフロー（環境背後霊）から見えるもの」、第2回連続自治体特別企画セミナー（KIRPセミナー）、京都府立大学、2017年9月14日（招待講演）（聴講者およそ50名）

- 2) 山末英嗣：「関与物質総量を通じた「食」に関する資源強度の可視化」、東北大学大学院環境科学研究科第109回コロキウム環境「環境問題解決に向けた超学際科学の方法論とエビデンス提示」、東北大学環境科学研究科本館、2017年9月19日（招待講演）（聴講者およそ30名）
- 3) 山末英嗣：「LCAとしてのTMRからみたサーキュラーエコノミー」、第23回日本LCA学会講演会、全日通霞が関ビル、2017年12月14日（招待講演）（聴講者およそ100名）

（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) 環境科学会 2018 年大会における下記発表が最優秀発表賞（富士電機賞）を受賞（平井満規、小口正弘、橋本征二：「木材の物質利用時間の推計」）
- 2) 日本学術振興会において資源ロジスティクスに関する研究開発専門委員会を設立し、2018 年 10 月に第 1 回委員会、2019 年 3 月に第 2 回委員会を開催
- 3) 日本 LCA 学会において「資源強度評価手法研究会」を設置準備中

8. 引用文献

- 1) National Institute of Public Health and Environment (RIVM): A general strategy for integrated environmental assessment at the European Environment Agency, RIVM, 1995
- 2) OECD: Sustainable Materials Management: Making Better Use of Resources, OECD Publishing, 2012
- 3) OECD: Policy Guidance on Resource Efficiency, OECD Publishing, 2016
- 4) UNEP: Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel, 2011
- 5) UNEP: Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel, 2017
- 6) Hashimoto S., Moriguchi Y.: Proposal of six indicators of material cycles for describing society's metabolism: From the viewpoint of material flow analysis, Resources Conservation and Recycling, 40(3), 185-200, 2004
- 7) Hashimoto S., Moriguchi Y., Saito, A., Ono T.: Six indicators of material cycles for describing society's metabolism: application to wood resources in Japan, Resources Conservation and Recycling, 40(3), 201-223, 2004
- 8) Oguchi M., Murakami S., Tasaki T., Daigo I., Hashimoto S.: Lifespan of commodities, part II: Methodologies for estimating lifespan distribution of commodities. Journal of Industrial Ecology, 14(4), 613-626, 2010
- 9) Oguchi M., Fuse M.: Regional and longitudinal estimation of product lifespan distribution: A case study for automobiles and a simplified estimation method. Environmental Science and Technology, 49, 1738-1743, 2015
- 10) 橋本征二、森口祐一：日本における伐採木材のマテリアルフロー・炭素フローデータブック、CGER-REPORT D034、国立環境研究所、2004
- 11) プラスチック循環利用協会：プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況、1998-2017
- 12) 金子勇雄：数字で見るプラスチック産業の現状、高分子、56(1)、28-33、2007
- 13) Daigo, I., Iwata, K., Ohkata, I., Goto, Y.: Macroscopic evidence for the hibernating behavior of materials stock, Environmental Science and Technology, 49(14), 8691-8696, 2015

- 14) Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y., Adachi, Y.: Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics, *Environmental Science and Technology*, 44(16), 6457-6463, 2010
- 15) Hashimoto S., Matsui S., Matsuno Y., Nansai K., Murakami S., Moriguchi Y.: What factors have changed Japanese resource productivity?: A decomposition analysis for 1995-2002, *Journal of Industrial Ecology*, 12(5/6), 657-668, 2008
- 16) Adriaanse A., Bringezu S., Hammond A., Moriguchi Y., Rodenburg E., Rogich D., and Schutz H.: *Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, World Resources Institute, Washington D.C., 66pp, 1997
- 17) 藤井実、林希一郎、伊東英幸：有限性を考慮した資源・環境評価に関するエコトピア社会評価手法開発、*環境科学会誌*、23(5)、410-419、2010
- 18) Fujii M., Hayashi K., Ito H., Ooba M.: The resource occupancy to capacity ratio indicator—a common unit to measure sustainability, *Ecological Indicators*, 46, 52-58, 2014
- 19) ステンレス鋼専門情報サイト：SUS304 とは | ステンレス鋼 SUS304 の成分、用途、規格、強度、板厚、硬度の一覧、<https://www.susjis.info/austenitic/sus304.html>
- 20) JFE テクノリサーチ株式会社：廃棄物の地域熱利用による低炭素エネルギーシステムの検討と評価業務報告書、2019
- 21) 高行男：自動車を構成する 3 大材料とボディ、*JAMAGAZINE*、2013 年 3 月号 (<http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/201303/01.html>)
- 22) 国土交通省：都市における人の動きー平成 22 年全国都市交通特性調査集計結果
- 23) ユーピーアール株式会社：Web サイト掲載記事 (<http://www.upr-carshare.jp/business/universities.html>)
- 24) Schmidt-Bleek F.: *ファクター10〜エコ効率革命を実現する、シュプリンガー・フェアラーク*、東京、1997
- 25) Schmidt-Bleek F., 佐々木健 (編)、花房恵子 (訳)：*エコリユクサックー環境負荷を示すもう一つの「重さ」*、(財) 省エネルギーセンター、東京、2006
- 26) 中島謙一、原田幸明、井島清、長坂徹也：関与物質総量(TMR)の算定〜エネルギー資源および工業材料の TMR、*日本 LCA 学会誌*、2(2)、152-158、2006
- 27) Yamasue E., Minamino R., Numata T., Nakajima K., Murakami S., Daigo I., Hashimoto S., Okumura H., and Ishihara K.N.: Novel evaluation method of elemental recyclability from urban mine, ~Concept of urban-ore TMR~, *Materials Transactions*, 50(6), 1536-1540, 2009
- 28) Bringezu S., Schutz H., Steger S., and Baudisch J.: International comparison of resource use and its relation to economic growth: The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR, *Ecological Economics*, 51, 97-124, 2004
- 29) Halada K., Ijima K., Katagiri N., and Okura T.: An approximate estimation of Total Materials Requirement of metals, *Journal of Japanese Institute Metals*, 65, 564-570, 2001
- 30) Wuppertal Institute: *Material Intensity Factors: Overview on materials, fuels, transport services and food*, Wuppertal Institute (http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2014.pdf)
- 31) United Nations: *SDG Indicators* (<https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>)
- 32) 産業環境管理協会：リサイクルデータブック 2016、2016

III. 英文 Abstract

New Assessment Indicators and Indicator Framework for Establishing a Sound Material-Cycle Society

Principal Investigator: Seiji HASHIMOTO

Institution: College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577 Japan

Tel: +81-77-561-4945 / Fax: +81-77-561-4945

E-mail: shashimo@fc.ritsumei.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Study, The University of Tokyo, Japan
External Trade Organization

[Abstract]

Key Words: Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society, Circular Economy, Material Flow and Stock Analysis, Input-Output Analysis, Resource Productivity, Lifetime, Resource Capacity, Environmental Capacity, Total Material Requirement (TMR)

Indicators of progress toward a Sound Material-Cycle Society have been developed under the Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society (Fundamental Plan), through revision, reinforcement, and complementing “material flow indicators” and “effort indicators” adopted in the First Fundamental Plan. This study specifically examines five major issues pointed out before the adoption of the Fourth Fundamental Plan, and contributes to development of the Fourth Fundamental Plan and international dispatch of Japanese activities. The study 1) reconstructs the existing indicator framework, 2) develops a methodology to measure material use time in a society, 3) improves the methodology to measure resource productivity by industry, 4) develops an index to measure synergy and tradeoff of resource circulation and low carbonization, and 5) assesses dependence on other countries’ resources and the effectiveness of recycling using Total Material Requirement (TMR). As study results, the following were achieved. 1) An indicator framework composed of a) material life-cycle stage, b) indicator type, and c) policy item was proposed. It is important to connect “material flow indicator” and “effort indicator” under b) above, corresponding to policy objectives under c) above. 2) A methodology to measure material use time in a society based on material input and stock data was proposed. Case studies demonstrated that the material use time for wood, plastics, and steel had increased. 3) An indicator with domestic production or value added in the numerator and raw material input induced by domestic production in the denominator was proposed by improving the existing calculation methodology for resource productivity by industry. A new indicator was developed to highlight the viewpoint of industrial sector, particularly addressing the amount of value added by each industry through resource use. 4)

A “Resource Time Footprint (RTF)” was proposed which reflects the occupation state of various resources (material, land, labor, and environmental carrying capacity), converts it to the time dimension, and indicates the scale of impact. Some case studies demonstrated the usefulness of RFT. 5) TMR factors were estimated for more than 900 materials and products. Some calculations using these factors indicated that TMR of Japan had increased since 1990. Regarding recycling of home appliances and automobiles, air conditioners and passenger cars exhibit high reduction potential of TMR.