

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02863

研究課題名(和文) 資源と製品から見た環境対策のプライオリティー

研究課題名(英文) Assigning priority to environmental programs from material and product perspectives

研究代表者

橋本 征二 (Hashimoto, Seiji)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30353543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：どのような資源・物質の利用、どのような製品・サービスの利用がそのライフサイクルを通じて環境に影響を与えているかを明らかにし、その総合的な評価に基づいて環境対策の優先分野を同定することを試みた。このため、資源・物質利用の環境影響評価手法を開発し、環境影響評価のためのデータベースを構築した。資源・物質利用の観点からは、生物資源利用の環境影響が大きく、金属鉱物資源、化石資源、非金属鉱物資源の順となった。製品・サービス利用の観点からは、例えば、淡水消費量について、食料品や飼料などの農作物の影響が大きかった。全体として、農産物を中心とする生物資源の環境影響を削減する優先度が高いと考えられた。

研究成果の概要(英文)：After assessing life-cycle environmental impacts from using resources and materials and from using products and services, we identified crucially important areas in environmental programs based on integrated analysis of those assessments. We developed an environmental impact assessment methodology for resource and material use and constructed a database for use in assessments. For resource and material perspective, environmental impacts of biomass use were estimated as the greatest, followed by those of metallic minerals, fossil fuels, and non-metallic minerals. For product and service perspective, for example, fresh water consumption for agricultural products such as food and feed had the greatest impact. Results suggest that priority should be assigned to reducing environmental impacts of biomass, including agricultural products.

研究分野：資源・廃棄物管理

キーワード：ライフサイクル評価 インベントリ分析 環境影響評価 産業エコロジー

1. 研究開始当初の背景

環境保全のための取り組みには様々なものがあるが、何を優先的に行えば良いか、について十分な議論がなされているとは言い難い。多くの課題がある中で、意思決定者・政策決定者にとって重要なのはその優先順位付けである。環境対策においても、何に対する対応を優先的に行っていくべきかを示すことが重要であり、このためには、人間活動がもたらす環境影響について総合的な評価を行うことが必要である。

物質代謝の観点からは、環境から採取された資源はいずれ形を変えて再び環境に廃棄されるものであるから、どのような資源・物質の利用がそのライフサイクルを通じて環境に大きな影響を与えているかを知ることが必要である。一方、我々は様々な製品・サービスが提供する機能を享受することで生活の質を維持・向上していることから、どのような製品・サービスの利用がそのライフサイクルを通じて環境に大きな影響を与えているかを知ることが重要である。

前者に関わって、資源・物質という観点からこれまで政策が対象としてきたのは有害物質・汚染物質の管理である。その意義は今後も変わらないが、その物質のライフサイクルのある段階（例えば、製品廃棄時）で発現する悪影響だけでなく、その物質がライフサイクルを通じてもたらす環境影響を評価することができれば、当該物質についてより幅広く網羅的な視点を提供することができる。これは有害物質に限らない。循環型社会形成推進基本計画で採用された「資源生産性指標」に対しても、資源を重量で合計していることに対する批判があり、様々な資源の環境影響をライフサイクルで考慮し重み付けすることが求められている。欧州においても、資源あたりの環境影響やそれをを用いて計算される環境効率が、デカップリング指標の枠組みの中で検討されている。しかしながら、そうした手法の開発は諸に着いたばかりであり、唯一の既存研究においても、資源のライフサイクルのどの段階で物質を定義するか（ダブルカウントをどう回避するか）、各物質へ環境負荷をどのように配分するか、製品使用時の環境負荷をどう考えるか等の課題があり、さらなる検討が必要な状況にある。一方、後者については、ライフサイクルアセスメント（LCA）に関する研究も含め、その手法開発や適用についてこれまでに多くの報告がなされているが、網羅的な検討という観点からは、対象とする環境負荷に限られている。

2. 研究の目的

以上のようなことから、本研究では、どのような資源・物質の利用、どのような製品・サービスの利用がそのライフサイクルを通

じて環境に影響を与えているかを明らかにし、その総合的な評価に基づいて、環境対策の優先分野を同定することを試みた。このため、以下を実施した。

- (1) 資源・物質利用の環境影響評価手法の開発：1単位の資源・物質の利用がそのライフサイクルを通じてどれだけの環境影響をもたらすかを評価する手法を開発する。
- (2) 資源・物質利用および製品・サービス利用の環境影響評価のためのデータベースの構築：資源・物質の利用および製品・サービスの利用の両面から網羅的に環境影響を評価するための環境負荷データベースを構築する。
- (3) 資源・物質利用および製品・サービス利用の環境影響評価と環境対策優先度の検討：上記をもとに、資源・物質利用および製品・サービス利用の両面から網羅的な環境影響評価を行い、環境対策を実施する優先分野、すなわち注力して管理すべき対象を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 資源・物質利用の環境影響評価手法の開発
 - ① 資源・物質利用の環境影響を評価する上では、対象資源・物質の選定方法が重要である。例えば、セメントを対象物質に選定した状況で、その原材料の石灰石を対象資源として選定すれば、石灰石という資源の環境影響がダブルカウントされることになる。また、金属を元素で選定すれば、ダブルカウントは生じないが、様々な元素を含む鉱石で対象資源を選定すると、何を見ようとしているのか分からなくなる。既存研究におけるこのような課題を解決する選定方法を開発した。
 - ② 選定した対象資源・物質を生産する上流側の各プロセスで発生する環境負荷については、通常のLCAの考え方で算出できるが、一部上記のダブルカウントが生じることから、これを控除する方法を開発した。一方、選定した資源・物質が原材料となる下流側の各プロセスで発生する環境負荷については、既存研究でも考慮されていないことから、産業連関分析におけるsupply-driven型のモデルを援用して算出する手法を開発した。
- (2) 資源・物質利用および製品・サービス利用の環境影響評価のためのデータベースの構築
 - ① 産業連関表をもとに作成された環境負荷原単位データ3EID（Embodied Energy and Emission Intensity Data）は、製品・サービスの網羅性が高いが、検討できる環境負荷に限られる。そこで、重要性およびデータの利用可能性の両面から、新たな環境負荷を選定し、環境負荷データベースを作成し

- た。
- ② ライフサイクルインベントリ (LCI) データベース IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) は製造業についてより詳細な部門でのデータを整備しているが、データ間の整合性に課題がある。そこで、IDEA を行列標記した際の行方向 (産業連関表における供給) の情報について整合が取れるように大幅な修正を行った。また、国全体の需要を用いて国全体の環境負荷量を推計した場合に、その結果が国全体の統計とどの程度整合するかを検証した。
- (3) 資源・物質利用および製品・サービス利用の環境影響評価と環境対策優先度の検討
- ① (1)で開発した手法をもとに、対象資源・物質を選定し、1単位の資源・物質のライフサイクル環境影響を算出するとともに、資源・物質の生産量や消費量、ダブルカウント控除率を乗じて、資源・物質利用の環境影響評価を行った。具体的には、どの資源・物質の環境影響が大きいか、各資源・物質の環境影響についてどの環境影響分野の比率が大きいか、各環境影響の分野においてどの資源・物質による影響の比率が大きいか、等について検討した。また、循環型社会形成推進基本計画における資源生産性指標 (GDP/天然資源等投入量) について、分母を環境影響に置き換えた環境効率の推移についても考察した。計算には、(2)で構築した IDEA 更新版を用い、各種環境負荷・環境影響の重み付けについては、日本版被害算定型影響評価手法 (LIME: Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) を使用した。対象とする環境影響の分野は、地球温暖化のほか、オゾン層破壊、酸性化、生態毒性、人間毒性等多岐にわたる。
- ② (2)で構築した 3EID 更新版を用い、製品・サービス利用の環境影響評価を行った。具体的には、どの製品・サービスの環境影響が大きいか、各製品・サービスの環境影響についてどの環境影響分野の比率が大きいか、各環境影響の分野においてどの製品・サービスによる影響の比率が大きいか、等について検討した。
- ③ 上記をもとに、環境対策を実施する優先分野、すなわち注力して管理すべき対象を議論した。

4. 研究成果

- (1) 資源・物質利用の環境影響評価手法の開発
- ① 対象資源・物質の選定方法として、以下の手順を開発した。なお、本手順に産業連関表の部門を導入したのは、環境効率の分母となる付加価値の推計と結びつけるためである。手順 d、e は対象物質数をデータ

の収集が実施可能な 200 程度にするためのものであり、統計データの整備が進めば対象物質数を拡張することは可能である。また、() 内に各ステップで選定された数を示す。

- a) 2011 年産業連関表において物質に関連する部門を同定(84 部門)
- b) 上記の部門のうち、ある部門の財が 50%以上別の部門の投入財(原材料)となっている場合は、その物質のライフサイクルを考慮し、上流側もしくは下流側のいずれかの部門を選定(64 部門)
- c) IDEA における財・サービスのうち、上記の部門に対応する財を同定(446 財)
- d) 上記の財のうちその生産額が上位半分(105 財)と、それらの財を含む部門を選定(61 部門)
- e) 上記の選定部門における選定財の生産額の合計がその部門の生産額の半分に満たない場合は、半分以上となるように財を追加し、対象候補財を選定(213 財)
- f) 上記の対象候補財について、生産量等の統計データが利用可能な財を対象物質として決定(213 財)
- ② ダブルカウントを控除し、下流側の環境影響を算出する以下の手法を構築した。
- a) 上流側の環境影響 (E_{up}) については、対象物質 1 単位の上流側の環境影響ベクトル (UE_{up}) に、生産量ベクトル (X) とダブルカウントを控除する係数ベクトル (k) を乗じて算出した。

$$E_{up} = UE_{up} k X$$

係数ベクトル(k)を算出するにあたり、IDEA の投入係数行列 A を図 1 のように 4 つのブロックに分割した。ここで、 t は対象物質、 o は対象外の財・サービスであり、 A_{tt} は対象物質に対する対象資源・物質の投入係数行列を、 A_{oo} は対象外の財・サービスに対する対象外の財・サービスの投入係数行列を、 A_{to} は対象外の財・サービスに対する対象資源・物質の投入係数行列を表す。このとき、係数ベクトル k は以下の等式より算出される。ここで、 I_d は単位ベクトルである。

$$(I_d - k) X = (A_{tt} + A_{to} (I - A_{oo})^{-1} A_{ot}) X$$

A_{tt}	A_{to}
A_{ot}	A_{oo}

図 1 投入係数行列 A の分割

- b) 下流側の環境影響については、下流側のプロセスの投入係数の比によって、そのプロセスで発生する環境影響を上流側の対象物質に割り当てることとした。この係数 (a_{to}) は、以下で表される。

$$\alpha_{to} = A_{ot} (I - A_{oo})^{-1}$$

この割り当てを繰り返し、対象外の財・サービスの生産プロセスで発生する環境影響 (C_o) を下式により対象資源・物質に割り当て、下流側の環境影響ベクトル (E_d) を算出した。

$$E_d = \alpha_{to} \text{diag} (C_o X_o^d)$$

ここで、 X_o^d は下流側の対象外の財・サービスの生産量ベクトルであり、下記で算出される。

$$X_o^d = X_o - X_o^{up} = X_o - L_o k X$$

上記を用いて、対象資源・物質 1 単位あたりの下流側の環境影響ベクトル (UE_d) を算出することができる。

$$UE_d = E_d / k X$$

(2) 資源・物質利用および製品・サービス利用の環境影響評価のためのデータベースの構築

- ① 3EID については、重要性の高い環境負荷として、Planetary Boundaries において対象となっている窒素・リン循環の変化、淡水の利用、土地利用の変化、生物多様性の減少を対象としてデータベースを構築した。ただし、現時点では改善すべき点も多い。
- ② IDEA については、行方向（産業連関表における供給）の情報について整合が取れるように大幅な修正を行った。

(3) 資源・物質利用および製品・サービス利用の環境影響評価と環境対策優先度の検討

- ① 4(1)①に示した 213 資源・物質について環境影響評価を行った。対象資源・物質を 4 つのカテゴリに分類して総環境影響を示したものが図 2 である。1990～2010 年における総環境影響は、この間ほぼ横ばいで推移していると推計された。図 3 に示すように、日本の天然資源等消費量はこの間約 40% 減少したが、環境影響の観点からは必ずしも減少の傾向が見られないことが示唆された。最も大きな環境影響を示した資源の種類は生物資源であり、金属鉱物資源、化石資源、非金属鉱物資源の順となった。生物資源の環境影響は、おおよそ 50% を占め、その割合はやや減少傾向、金属鉱物資源利用の環境影響は微増傾向を示し、全体の約 20% を占める結果となった。化石資源の環境影響は、全体の 15% 程度であったものの、2010 年には 20% 程度まで増加し、非金属鉱物資源は、全体として占める割合も絶対量についてもやや減少傾向がみられた。この間の天然資源等消費量の大幅な減少は砂利・砕石の減少によるものであるが、これらの非金属鉱物資源の利用による環境影響は小さく、天然資源等消費量の減少が環境影響の減少に直接的に貢献していないことが示された。

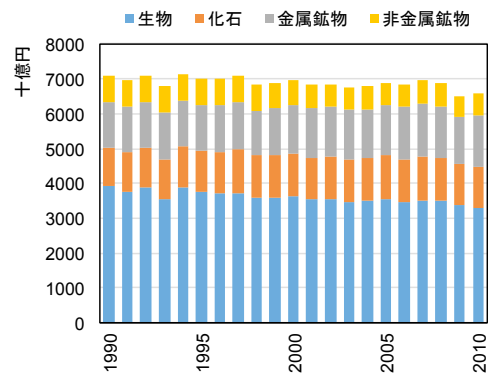


図 2 日本の資源・物質利用に伴う総環境影響の推移

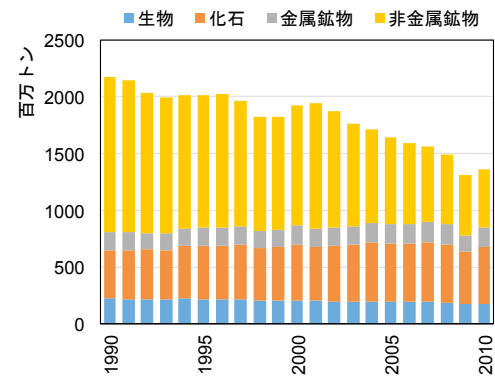


図 3 日本の天然資源等消費量の推移

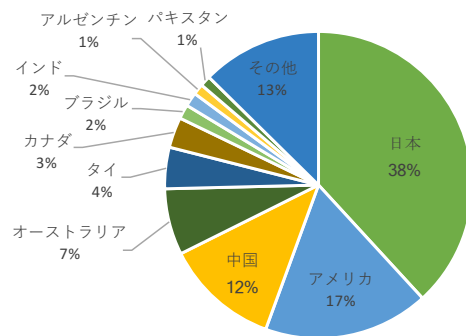


図 4 日本の家計消費に起因する淡水消費の国別内訳

- ② ここでは良好な結果が得られた淡水の利用について述べる。日本の家計消費（製品・サービスの利用）に起因する淡水消費量の合計は、62,186 百万 m^3 と推計され、その国別内訳は図 4 に示すような構成となった。日本の家計消費に起因する淡水消費量のうち、日本で消費されているものは 38% であり、62% は海外で消費されていると推計された。中でもアメリカ、中国、オーストラリアといった貿易面でのつながりが強い国での消費量が多くなった。また、淡水消費量の多い品目は、「上水道・簡易水道」「一般飲食店（除喫茶店）」「と畜（含肉鶏処理）」「精穀」「飼料」等であり、これら上位 11 品目で全体の淡水消費量の約 50% を占めた。「上水道・簡易水道」は家庭で水道から直接消費される水であり、当

然ながら国内での消費がほとんどである。それ以外の品目については、「精穀」以外はほとんどが海外での消費となった。「一般飲食店（除喫茶店）」も含めていずれも食料品あるいは飼料などの農作物に関わる品目であり、海外で生産された農作物を輸入して消費していることで間接的に海外での淡水消費につながっている。「精穀」では米の消費が多く、国産米の消費が多いため、他の食料品関連の項目とは違う傾向が見られたものと考えられる。なお、輸入品に伴う淡水消費量の多いアメリカ、オーストラリアについては、食料品に関わる品目での淡水消費量が大きかった。一方、中国については衣服（輸入品）に関わる淡水消費量が多く、また、食料品の淡水消費量も多いがアメリカ、オーストラリアとは異なり加工食品が相対的に大きかった。

- ③ 資源・物質利用の側面からは、天然資源等消費量の減少が環境影響の減少に寄与していない状況が示唆された。これまで、非金属鉱物資源の消費量の減少が日本の資源生産性を上昇させてきたと言えるが、より生物資源、金属鉱物資源、化石資源に焦点を当ててその環境影響を削減する政策が求められる。製品・サービス利用の側面からは、淡水の利用に関わる結果を示したが、その分析においても食料品（生物資源）の影響が大きかった。同様のことは窒素・リン循環の変化、土地利用の変化についてもあてはまる。以上を勘案すると生物資源に関わる環境影響の削減についての優先度が高いと考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計9件）

- ① Kayo, C., S.M.R. Dente, C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, S. Murakami, and S. Hashimoto: Environmental impact assessment of wood use in Japan through 2050 using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment, *Journal of Industrial Ecology*, in press (DOI: 10.1111/jiec.12766、査読有)
- ② Dente, S.M.R., C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, and S. Hashimoto: Revealing the life cycle greenhouse gas emissions of materials - The Japanese case, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.133, pp.395-403, 2018 (DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.011、査読有)
- ③ Tang L., K. Hayashi, K. Kohyama, and A. Leon: Reconciling Life Cycle Environmental Impacts with ecosystem services: A management perspective on agricultural land use, *Sustainability*, Vol.10, No.4, 630, 2018 (DOI: 10.3390/su10030630、査読有)
- ④ Tang L., M. Higa, N. Tanaka, and N. Itsubo: Assessment of global warming impact on biodiversity using the extinction risk index in

LCIA: A case study of Japanese plant species, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.23, No.2, pp.314-323, 2018 (DOI: 10.1007/s11367-017-1319-6、査読有)

- ⑤ Lwin, C.M., A. Nogi, and S. Hashimoto: Eco-efficiency assessment of material use: The case of phosphorus fertilizer usage in Japan's rice sector, *Sustainability*, Vol.9, No.9, 1562, 2017 (DOI: 10.3390/su9091562、査読有)
- ⑥ Lwin, C.M., K.N. Maung, M. Murakami, and S. Hashimoto: Scenarios of phosphorus flow from agriculture and domestic wastewater in Myanmar (2010-2100), *Sustainability*, Vol.9, No.8, 1377, 2017 (DOI: 10.3390/su9081377、査読有)
- ⑦ Miatto, A., H. Schandl, T. Fishman, and H. Tanikawa: Global patterns and trends for non-metallic minerals used for construction, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.21, No.4, pp.924-937, 2017 (DOI: 10.1111/jiec.12471、査読有)
- ⑧ Kayo, C., Y. Tsunetsugu, and M. Tonosaki: Climate change mitigation effect of harvested wood products in regions of Japan, *Carbon Balance and Management*, Vol.10, No.1, pp.10-24, 2015 (DOI: 10.1186/s13021-015-0036-3、査読有)
- ⑨ 松井健吾、長谷川正利、高木重定、奥岡桂次郎、谷川寛樹：低炭素化に向けた日本全国の土石系資源ストック・フローの将来シナリオ分析、*土木学会論文集(G)*、Vol.71、No.6、pp.II_309-II_317、2015 (DOI: 10.2208/jsejer.71.II_309、査読有)

〔学会発表〕（計37件）

- ① 佐々木貴央、南斉規介、橋本征二：家計消費とプラネタリー・バウンダリー～土地利用の変化について、第13回日本LCA学会研究発表会、2018
- ② 馬場亮輔、佐々木貴央、南斉規介、橋本征二：家計消費が窒素循環のプラネタリー・バウンダリーに与える影響、第13回日本LCA学会研究発表会、2018
- ③ Dente, S.M.R., C. Aoki-Suzuki, and S. Hashimoto: Assessing the eco-efficiency of materials: Methodology development and Japanese case study, *The 9th Biennial Conference of the International Society for Industrial Ecology*, 2017
- ④ 佐々木貴央、本下晶晴、南斉規介、橋本征二：家計消費とプラネタリー・バウンダリー～淡水利用について、第12回日本LCA学会研究発表会、2017
- ⑤ Tanaka, D., C. Aoki-Suzuki, S.M.R. Dente, and S. Hashimoto: Environmental impact of resources and materials use: A case study of non-metallic minerals, *The Joint Socio-Economic Metabolism Conference and Asia-Pacific Conference of the International*

- Society for Industrial Ecology, 2016
- ⑥ Nakamura S., Y. Kondo, K. Matsubae, K. Nakajima: Dynamic Waste IO and the mechanics of material flow, The Joint Socio-Economic Metabolism Conference and Asia-Pacific Conference of the International Society for Industrial Ecology, 2016
- ⑦ Dente, S.M.R., C. Kayo, C. Aoki-Suzuki, and S. Hashimoto: Environmental impacts of resources and materials use: A case study of biomass, 第11回日本LCA学会研究発表会, 2016

ほか 30 件

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本 征二 (HASHIMOTO, Seiji)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：30353543

(2)研究分担者

南齋 規介 (NANSAI, Seisuke)
国立研究開発法人国立環境研究所・資源
循環・廃棄物研究センター・室長
研究者番号：80391134

中島 謙一 (NAKAJIMA, Kenichi)
国立研究開発法人国立環境研究所・資源
循環・廃棄物研究センター・主任研究員
研究者番号：90400457

谷川 寛樹 (TANIKAWA, Hiroki)
名古屋大学・環境学研究科・教授
研究者番号：90304188

加用 千裕 (KAYO, Chihiro)
東京農工大学・農学研究院・准教授
研究者番号：50550183

湯 龍龍 (TANG, Longlong)
国立研究開発法人農業・食品産業技術総
合研究機構・農業環境変動研究センタ
ー・研究員
研究者番号：30737359