

資源・物質利用の環境影響： 金属資源を対象として

田中 大介¹・Sebastien M.R. Dente²・栗生木 千佳³
村上 進亮⁴・橋本 征二⁵

¹非会員 立命館大学大学院 理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail:rv0029kx@ed.ritsumei.ac.jp

²非会員 立命館大学 総合科学技術研究機構（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail: sebdente@yahoo.fr

³非会員 立命館大学大学院 理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
地球環境戦略研究機関（〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口2108-11）
E-mail: aoki@iges.or.jp

⁴非会員 東京大学大学院 工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1）
E-mail: smurakam@sys.t.u-tokyo.ac.jp

⁵正会員 立命館大学 理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail:shashimo@fc.ritsumei.ac.jp

金属を対象として、その利用に伴う環境影響を1990年から2010年にわたり試算した。また、環境影響の大きい3金属について、その環境影響の時系列変化の要因を構造分解により分析した。その結果、以下の結論を得た。a) 金属の利用に伴う環境影響は増加傾向にあり、「粗鋼（転炉法）」「電気銅」「金地金」に関わる環境影響が大きかった。b) これら金属の環境影響の時系列変化は、その生産量の変化に大きく影響を受けていた。

Key Words : *eco-efficiency, resource productivity, life cycle assessment, material flow analysis, decomposition analysis*

1. はじめに

第四次環境基本計画では、「環境と社会経済の関係を端的に表す指標」として「環境効率性を示す指標」や「資源生産性を示す指標」が挙げられている。前者については、当面「二酸化炭素排出量÷GDP」を用いることとしているが、生産量ベースでの指標や他の環境負荷（大気環境、化学物質など）の環境効率性についての検討が課題となっている。また、後者についても、少量だが有害な物質の影響や希少金属の価値が過小評価されるなどの課題が指摘されている。一方、「資源生産性」を重要な指標の1つとして採用している第三次循環型社会形成推進基本計画では、今後の検討課題の一つとして、環境負荷と財・サービスの付加価値の間の効率性を測る環境効率指標の検討が挙げられている。

これに関して欧州では、「資源生産性（resource productivity: €/kg）」と「環境効率（eco-efficiency: €/impact）」の両者を「資源1単位あたりの環境影響（resource specific impact: impact/kg）」で関連づけて検討する方向にある。しかしながら、そうした手法の開発は未だ諸に着いたばかりである。数少ない既存研究¹²⁾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、各物質へ環境影響をどのように配分するか、製品使用時の環境影響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。

筆者らはこれまで、日本の資源・物質利用を対象としてその環境影響の推計手法の検討といくつかの事例研究を行ってきたが³⁴⁾⁵⁶⁾、本研究では、金属を対象として、その利用に伴う環境影響を推計し、各資源・物質利用の重要度を比較検討するとともに、環境影響の時系列変化

の要因を分析した。

2. 方法

(1) 対象資源・物質の選定

以下の手順で対象資源・物質を選定した。

- 2011年産業連関表⁷⁾において資源・物質関連部門を同定
- 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、その資源・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
- LCAデータベースIDEAv2⁸⁾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
- 上記の財のうちその生産額が上位半分の財と、それらの財を含む部門を選定
- 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
- 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

(2) システム境界の設定

本研究のシステム境界は図-1 に示す通り、対象国日本で発生する環境影響である。ただし、本研究では(1)で選定した対象資源・物質を中心に、その上流・下流の環境影響を考慮することから、上流側では対象資源・物質の原材料となる非対象物質の輸出入に関わる環境影響は考慮されず、下流側では対象資源・物質そのものや対象資源・物質が原材料となる非対象物質の輸出入分の環境影響が考慮されないことになる。

(3) 対象資源・物質の環境影響の計算方法

対象資源・物質の環境影響は、上流側と下流側に分けて算出した。ただし、上流・下流の定義は対象資源・物質を基準として、IDEAv2で計算できる範囲内とする。

a) 対象資源・物質1単位あたりの上流側の環境影響

対象資源・物質1単位あたりの上流側の環境影響ベクトル (S_{up}) は、IDEAv2の投入係数行列 (A) とその環境負荷行列をLIME2⁹⁾を用いて統合した環境影響ベクトル (C) を用いて以下の通り算出した。Iは単位行列、*は行列の乗算を表す。

$$S_{up} = C * (I - A)^{-1} \quad (2a)$$

上述の通り、本研究の対象資源・物質はIDEAv2の項目となるが、対象資源・物質として選定したIDEAv2の項目と産業連関表の部門を対応させながら分析を行っていく。

b) 対象資源・物質の上流側の環境影響

対象資源・物質の上流側の環境影響を算出するにあたっては、ダブルカウントを考慮する必要がある。選定した対象資源・物質が他の対象資源・物質の原材料となっている場合があるからである。そこで、他の対象資源・物質の原材料となっている対象資源・物質の環境影響は当該資源・物質のそれから控除することとした。

以上の考え方にに基づき、a)で算出した S_{up} にそれぞれIDEAv2の生産量ベクトル (X) にダブルカウントを控除する係数ベクトル (k) を乗じたものを乗じて、対象資源・物質の上流側の環境影響 (E_{up}) を算出した。

$$E_{up} = S_{up} k X \quad (2b)$$

係数 k を算出するにあたり、投入係数行列 A を図-2のように4つのブロックに分割した。ここで、 t は対象資源・物質、 o は対象外の財・サービスであり、 A_{tt} は対象資源・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 k は以下で算出される。

$$(Id - k)X = (A_{tt} + A_{to} * (I - A_{oo})^{-1} * A_{ot}) * X \quad (2c)$$

ここで、 Id は単位ベクトルである。

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

図-2 投入係数行列Aの分割

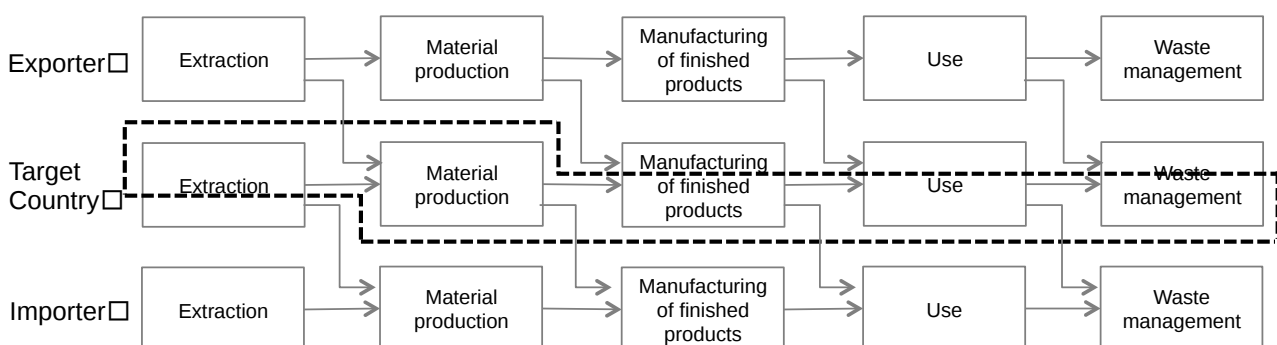


図-1 本研究におけるシステム境界

c) 対象資源・物質の下流側の環境影響

対象資源・物質の下流側の環境影響を算出するにあたっては、下流側で発生する環境影響の一部を対象資源・物質に割り当てる考え方が必要となる。本稿では、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資源・物質に割り当てた。この係数 (a_{to}) は、以下で表される。

$$a_{to} = A_{to} * (I - A_{oo})^{-1} \quad (2d)$$

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) を以下により対象資源・物質に割り当て、下流側の環境影響 (E_d) を算出した。

$$E_d = a_{to} * \text{diag}((I - A_{oo})^{-1} * P_o) * C_o \quad (2e)$$

ここで、 P_o は対象外の財・サービスの需要量である。

d) 対象資源・物質1単位あたりの下流側の環境影響

式(2e)を用いることにより、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 (S_d) を以下のように算出することが可能である。

$$S_d = E_d / kX \quad (2f)$$

e) 対象資源・物質の環境影響

以上をもとに、対象資源・物質 i または全対象資源・物質の環境影響 (e_i , e_{tot}) を算出した。これは、算出した環境影響ベクトルの成分 (e_{upi} , e_{di}) を合計したものである。

$$S_i = e_{upi} + e_{di} \quad (2g)$$

$$e_{tot} = \sum_i e_{upi} + \sum_i e_{di} \quad (2h)$$

(4) 環境影響の構造分解

対象資源・物質の環境影響の変化の要因を分析するため、(3)で算出される環境影響を以下により構造分解した。

$$e_i = (e_{upi} + e_{di})k_i x_i = s_i k_i x_i \quad (2i)$$

ここで、第1因子 ($e_{upi} + e_{di} = s_i$) は、対象資源・物質 i の上流・下流側を合わせた1単位あたりの環境影響を表しており、上流側の生産技術が改善されるか、下流側の需要構造が変化して、1単位あたりの環境影響が減少すれば、左辺の環境影響も減少することになる。第2因子 (k_i) は対象資源・物質 i のダブルカウント控除係数であり、対象資源・物質 i の需要構造が変化し、他の対象資源・物質の原材料として多く利用されるようになると、左辺の環境影響も小さくなるが、そうした需要構造の変化の影響を見る因子である。第3因子 (x_i) は対象資源・物質 i の生産量であり、生産量が減少すれば、左辺の環境影響も減少することになる。

2時点間の環境影響の差がこれらの3つの因子の和で説明できるとすると、

$$e_{i,y1} - e_{i,y2} = s_{effct} + k_{effct} + x_{effct} \quad (2j)$$

ここで、左辺は、 $y1$ 年における対象資源・物質 i の環境

影響 ($e_{i,y1}$) から、基準年となる $y2$ 年における対象資源・物質 i の環境影響 ($e_{i,y2}$) を差し引いた値である。右辺は、2時点間の環境影響の差分に対する構造分解式の第1因子 (s_{effct})、第2因子 (k_{effct})、第3因子 (x_{effct}) の影響の大きさを表す。各因子の大きさは、complete decomposition model¹⁰⁾を用いて計算することが出来る。例えば、 $y1$ 年と $y2$ 年の環境影響の差分に対する s_{effct} は、

$$\begin{aligned} s_{effct} = & \Delta s \times k_{i,y2} \times x_{i,y2} \\ & + \Delta s \times \Delta k \times x_{i,y2} / 2 \\ & + \Delta s \times k_{i,y2} \times \Delta x / 2 \\ & + \Delta s \times \Delta k \times \Delta x / 3 \end{aligned}$$

となり、 k_{effct} 、 x_{effct} も同様に計算を行う。

3. 結果と考察

(1) 対象資源・物質の選定結果

選定結果を図-3の凡例に示す。既存研究¹⁾と比較すると、生産額の小さい金属が対象外になったこと、日本の統計等で通常用いられる分類と異なる分類がなされている金属が対象外となったこと、IDEAv2で計算が出来ない金属が対象外となったこと等から、対象物質数としては本研究がやや少なくなっている。ただし、金、銀等、本研究で追加した金属もある。

(2) 対象資源・物質の環境影響の計算結果

対象資源・物質の環境影響の試算結果を図-3に示す。対象資源・物質全体としては増加傾向にあり、1990年から2010年にかけて約15%増加している。粗鋼(転炉法)、電気銅、金地金の順に環境影響が大きく、それぞれ50%、22%、14%を占めている。これらの物質の環境影響の傾向が、対象資源・物質全体の環境影響に大きく反映されると考えられる。

また、2009年に環境影響が減少しているのは、2008年のリーマンショックが大きな要因である。これにより、日本のみならず世界規模で景気が後退し、本研究の対象資源・物質である金属資源の国内生産量も減少した。試算した環境影響は生産量を乗算することにより算出されるため、環境影響も同じ傾向になったと考えられる。

さらに、2010年の対象資源・物質の環境影響を影響領域別に見たものが図-4である。対象資源・物質においては地球温暖化の影響が占める割合が全体的に大きい。これは、精錬や成型のプロセスにおいて多量の化石燃料を使用するためである。粗鋼、電気銅に関しては生体毒性(大気、水圏)が大きく、金地金は資源消費の割合が大

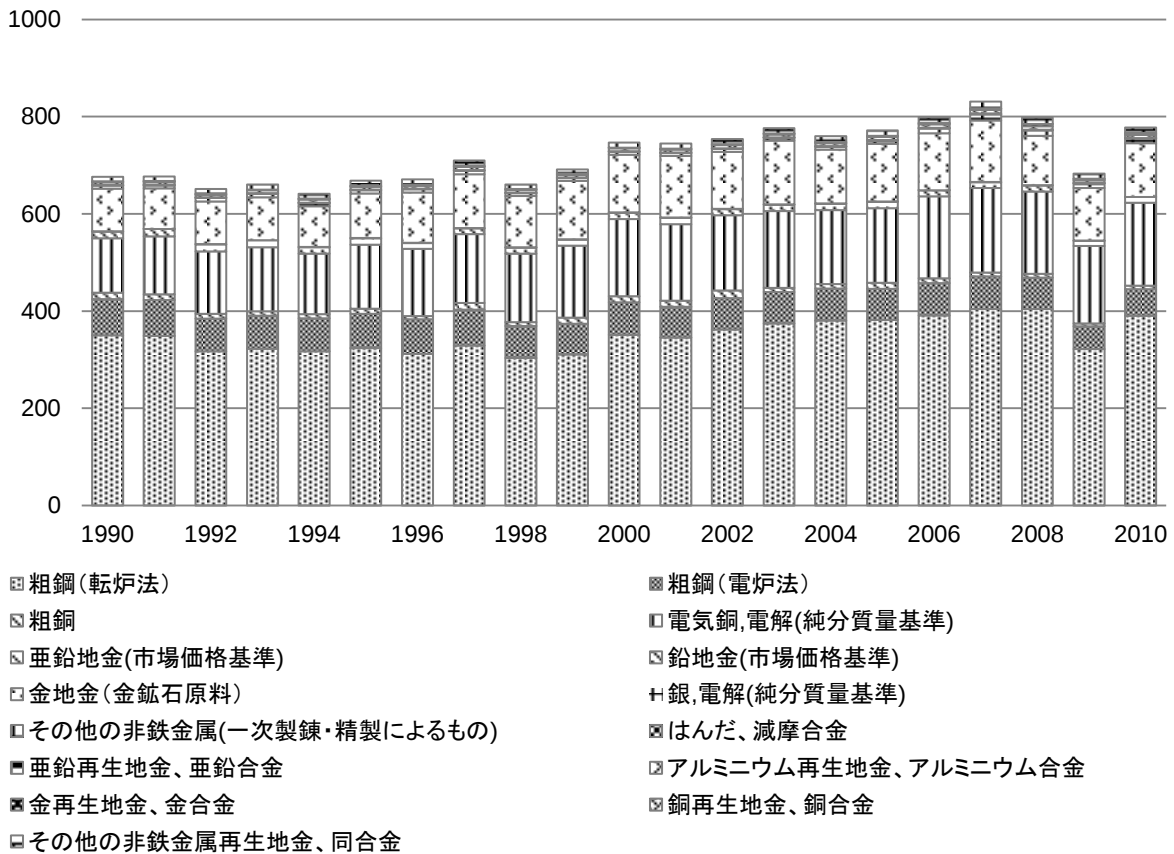


図-3 1990～2010年における対象資源・物質の環境影響

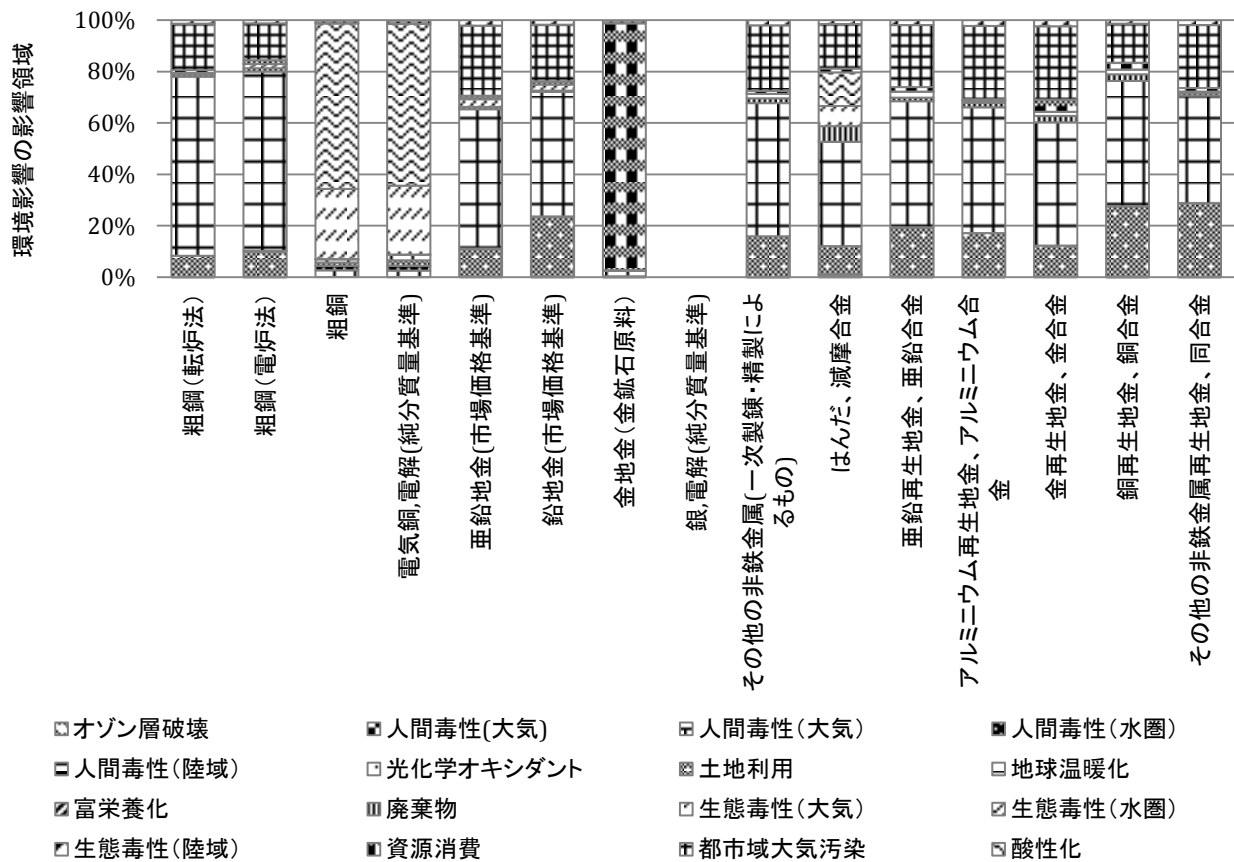


図-4 2010年の対象資源・物質の環境影響における各影響領域割合

きい。前者は、銅山での採掘時に排出される抗排水中に存在するヒ素が主な要因であると考えられた。後者はIDEAv2で設定されている金地金の原材料が金鉱石であることが大きな要因である。金鉱石における金そのものの含有率は非常に小さく、一定量を確保するためには相応の資源を採掘することになる。

(3) ダブルカウント控除による影響

算出した2010年の各対象資源・物質の係数 k を表-1に示す。ほとんどの物質が1に近い値となった。これは、2.(1)で述べた通り、対象資源・物質の選定において、あらかじめ関係の深い資源・物質を排除したためである。ただし、粗銅は他の対象資源・物質と比較して非常に小さい値となった。これは、粗銅が同じく対象資源・物質である電気銅の主原材料であるためである。なお、粗銅および電気銅はいずれも産業連関表の同じ部門に属するため、2.(1)の手順により両方対象資源・物質に選定されたものである。

また、2010年を対象にダブルカウント控除を行わなかった場合の環境影響を推計すると、ダブルカウント控除を行った場合の環境影響より約1,700億円過大に評価されると推計された。これは、2010年の環境影響の20%程度に相当する量である。

(4) 環境影響の構造分解の結果

対象資源・物質の環境影響の上位3物質（粗銅（転炉法）、電気銅、金地金）を対象に、1990年～2010年の環

境影響の変化の要因を分析した結果を図-5に示す。どの金属も x_{effect} 、すなわち生産量の変化の影響が大きな割合を占めた。粗銅（転炉法）については、これに加え s_{effect} の影響が見られ、 x_{effect} と正負が逆の挙動を示している。この説明には更なる詳細な検討を要するが、本分析において1単位あたりの環境影響が変化するのは、下流側の需要構造の変化によるものである（上流側の生産技術はIDEAver2のまま変化しない）。また、 k_{effect} の影響は見られなかったが、これは k が上流側の生産技術で決定されることから変化しないためである。

表-1 2010年における対象資源・物質の係数 k

対象資源・物質	k
粗銅（転炉法）	0.999
粗銅（電炉法）	9.96.E-010.996
粗銅	3.89.E-020.038
電気銅,電解(純分質量基準)	9.98.E-010.998
亜鉛地金(市場価格基準)	9.73.E-010.973
鉛地金(市場価格基準)	9.18.E-010.918
金地金（金鉱石原料）	1.00.E+001.00
銀,電解(純分質量基準)	0.00.E+000.00
その他の非鉄金属(一次製錬・精製によるもの)	7.98.E-010.798
はんだ、減摩合金	1.00.E+001.00
亜鉛再生地金、亜鉛合金	9.94.E-010.994
アルミニウム再生地金、アルミニウム合金	1.00.E+001.00
金再生地金、金合金	1.00.E+00
銅再生地金、銅合金	1.00.E+001.00
その他の非鉄金属再生地金、同合金	1.00.E+001.00

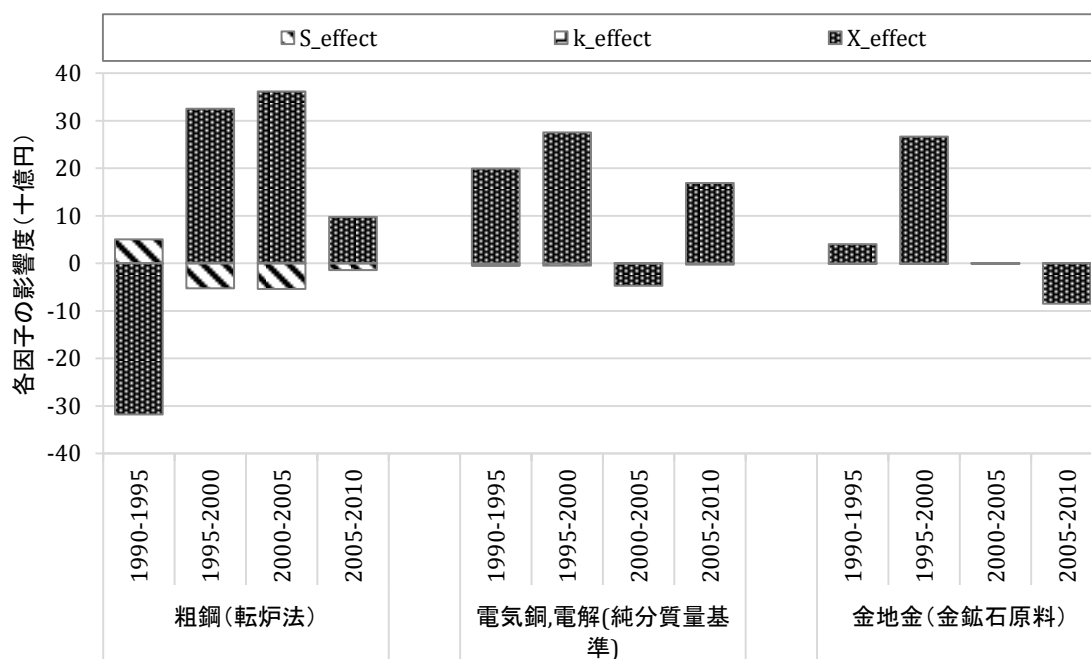


図-5 1990～2010年の対象資源・物質の環境影響の変化の要因

4. 結論

本稿では、金属を対象として、その利用に伴う環境影響を1990年から2010年にわたり試算した。また、環境影響の大きい3金属について、その環境影響の時系列変化の要因を構造分解により分析した。その結果、以下の結論を得た。

- a) 金属の利用に伴う環境影響は増加傾向にあり、「粗鋼（転炉法）」「電気銅」「金地金」に関わる環境影響が大きかった。
- b) 上記金属の環境影響の時系列変化は、その生産量の変化に大きく影響を受けていた。

なお、本研究ではIDEAv2を用いて環境影響を試算しているため、下流側における網羅性が欠けている。今後、現段階で計上されていない部分を考慮するとともに、システム境界の再検討等を行う予定である。

謝辞：本研究は、第Ⅲ期環境経済の政策研究及び科学研究費補助金(15H02863)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) van der Voet, E., et al.: Dematerialization: Not just a matter of weight, CML report 160, 2003
- 2) van der Voet, E., et al.: Dematerialization: Not just a matter of weight, Journal of Industrial Ecology, Vol.8, pp.121-137, 2004
- 3) 田中太介, 栗生木千佳, S.M.R. Dente, 橋本征二: 資源・物質利用の環境影響: 建設用非金属鉱物を対象として, 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.244-245, 2016
- 4) 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, Proceedings of the Joint Socio-Economic Metabolism Conference and Asia-Pacific Conference of the International Society for Industrial Ecology, p.91, 2016
- 5) Aoki-Suzuki, C., D. Tanaka, S.M.R. Dente, S. Murakami, C. Kayo, and S. Hashimoto: Developing methodology to evaluate decoupling economic growth from environmental impacts of resources and materials use in Japan – preliminary comparison, The 12th International Conference on EcoBalance Abstract Book, p.94, 2016
- 6) Dente, S.M.R., C. Kayo, C. Aoki-Suzuki, and S. Hashimoto: Environmental impacts of resources and materials use: A case study of biomass including time-series and decomposition analysis, The 12th International Conference on EcoBalance Abstract Book, p.94, 2016
- 7) 総務省: 産業連関表, http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/10/, 2017年8月アクセス
- 8) 産業技術総合研究所: IDEAv2, <https://www.aist-riss.jp/software/40166/>, 2017年8月アクセス
- 9) 伊坪徳宏, 稲葉敦編著: LIME2(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling), 産業環境管理協会, 2010
- 10) Sun, J. W.: Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model. Energy Economics, Vol.20, pp.58-100, 1998

(2017. 8. ?受付)

ENVIRONMENTAL IMPACT OF RESOURCES AND MATERIALS USE: A CASE STUDY OF METALLIC MINERALS

Daisuke Tanaka, Chika Aoki-Suzuki, Sebastien M.R. Dente, Shinsuke Murakami and Seiji Hashimoto

Environmental impact of our metal use during 1990-2010 were calculated. For three metals with high environmental impact, the trends in their environmental impacts were analyzed to identify reasons of changes by using decomposition analysis. We draw the following conclusions. a) Environmental impact of our metal use was estimated to be increasing. Environmental impacts related to crude steel, electrolytic copper, and gold were large. b) The changes in environmental impact of these metals were largely influenced by changes in their production amount.