

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550104

研究課題名(和文)世界の231の国・地域を対象とした国際貿易に伴う金属資源の移動量と需給構造の解析

研究課題名(英文)Global material flow analysis of metals embedded in bilateral trades between 231 countries and regions

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：経済発展に伴う資源利用と環境影響の拡大が危惧されている。本研究では、全世界を対象としたグローバル規模でのマテリアルフロー分析により、資源(鉄、アルミニウム、銅、鉛、亜鉛、ニッケル等)の需給構造と共に、多地域産業連関分析の手法を応用することで、消費がサプライチェーンを通じて誘引する資源採掘量を明らかにした。更に、鉱山活動の影響の把握のために、衛星画像解析を用いた土地変化量の計量手法を提案すると共に、事例解析を通じて変化の要因の特定を進めた。資源管理方策としては、天然資源からの脱却をすすめるために、物質循環の閉ループ化による資源散逸の回避、更には、資源産出国における保全活動等を論じた。

研究成果の概要(英文)：Economic growth by human activity associates with rapid rise in the use of resources in our economy, and society has potential environmental impact. The study provides insight into the linkages between local consumption and global impacts, and linkages between local consumption and natural resource extraction (iron, copper, nickel etc.) far removed from the place of consumption was demonstrated. This study also introduces the challenge to identify the land use changes in nickel mining site by remote-sensing technique. The qualitative information of mine development/operation must be available in order to understand why the change occurs. We revealed the fundamental importance of metal recycling to avoid dissipations of resources. Avoiding the losses in its anthropogenic cycle and closing the loop for its material cycle would be expected to reduce the consumption of natural resources and contribute to the reduction of negative impacts on the land-use change.

研究分野：産業エコロジー

キーワード：物質フロー分析 リモートセンシング 資源 金属 土地変化

## 1. 研究開始当初の背景

経済発展に伴う資源利用と環境影響の拡大を背景に UNEP は持続可能な資源管理の推進力として資源パネルを設立して報告書<sup>1-2)</sup>を発行している。金属資源の需要増加の要因は、新興国の経済発展や人口増加だけではなく、温室効果ガス排出量の削減責務を果たす為に、導入が進められている環境適合技術の導入に伴う需要増加も要因の1つである<sup>3)</sup>。他方、各国の需要は、資源産出国での採掘等に伴って、生物多様性への影響や環境汚染などの環境問題<sup>1)</sup>を引き起こしている。ニッケルを含めて、生物多様性ホットスポット<sup>4)</sup>と鉱物資源の産出国が重複する場合は少なくない。経済と環境の両側面から持続可能な資源管理の促進が求められている。サプライチェーンを通じた資源利用の解析は、Lenzenら<sup>5)</sup>を含めて産業エコロジー分野で精力的に実施されており、提案者らはWIO-MFA(Waste Input-Output Material Flow Analysis model)<sup>6)</sup>や GLIO(Global Link Input-Output model)<sup>7)</sup>を提案して国内外のサプライチェーン分析に取り組んできた。

これに対して、本研究では、世界の231の国と地域を対象として国際貿易を介した金属資源の移動量を同定と市場集中度等の解析に加えて、産業連関分析の手法を応用する事により、サプライチェーンを通じた資源利用量の解析、更には、衛星画像解析と統計解析を組み合わせる事で採掘に伴う土地利用量の解析に取り組む。特に後者については、衛星画像や統計情報など一般的に入手可能な情報を活用する事で、採掘活動に伴う土地改変量を含めた土地利用状況の解明に取り組むものであり、本手法が確立されれば、世界の各種の露天掘り鉱山についてその情報の把握が期待できる。

## 2. 研究の目的

世界の各国・各地域を対象として a) 国際貿易を介した資源(鉄、アルミニウム、銅、鉛、亜鉛、ニッケル等)の移動量を同定する事で、各国間の繋がりを示すと共に、時系列変化を含めて需給構造の解析に取り組む。また、特徴的な資源(ニッケル等)を対象に取り上げて、衛星画像解析にて、資源採掘に伴う土地改変量(Land use, TMR)の推計に取り組む。更に、2つの解析結果を組み合わせる事により、持続可能な資源管理に向けたサプライチェーンの技術的・社会的課題の抽出に取り組む。

## 3. 研究の方法

### (1) 物質フロー・サプライチェーン

国際貿易量は、BACI (Base pour l'Analyse du Commerce International)<sup>8)</sup>より、231の国・地域間を対象とした各品目群の輸出・輸入量を抽出する。なお、6桁分類でのHS(Harmonized Commodity Description and Coding System)コードであっても、複数の異

なる貿易商品が該当するコードがあり、特定の元素を含有する商品はその一部である場合がある。本研究では、BACI から得た各商品の貿易量に0から1の範囲を取るカットオフ値を設定し、これを貿易量に乗じることで、貿易量の推計精度を高めた。得られた貿易量から対象元素の移動量への換算には、各種の文献やWIO-MFA等から得られる各商品の元素含有率を乗じて推計を行った。これらの結果を基に、市場の寡占化・集中化など需給構造の解析を進める。グローバルサプライチェーンの解析は1995年から2010年を対象年次とし、サプライチェーンを通じた誘発採掘量の解析は2005年を対象年次とした。なお、日本の最終需要が誘引するグローバルサプライチェーンを通じた物質の移動量と誘発採掘量の推計手法の詳細については既報(雑誌論文、 )を参照されたい。

### (2) 資源利用による土地改変

天然資源の利用、特に一部の金属鉱物においては鉱山開発に伴う大規模な土地改変を誘発することは不可避である。ここではニッケルを対象にその定量化と考察を行う。土地改変の定量化に際しては、直接的に操業者から情報を得ることが出来ないとしてもこれを実施することが出来る衛星画像解析を用い、これを実際の鉱山の生産等の操業データと組み合わせることで経時変化を把握、観測期間における技術の進歩が土地改変という環境影響に対してどのように影響してきたのかを考察する。解析に際しては、全世界を対象として153か所のニッケル鉱山を対象に、採掘量等の操業情報の入手の可否、更には、解析可能な衛星画像の有無を整理した。雪などの季節性の影響、雲などの気象の影響については、検索段階で被雲状況等を目安に目視で確認を行った。その上で、日本にとっての重要な鉱石輸入相手国でもあるニューカレドニアの鉱山を対象に、複数時点の衛星画像を取得、これを分析することでニッケル鉱山を開発することで生じた土地改変面積を定量化した。

## 4. 研究成果

### (1) 物質フロー・サプライチェーン

物質フロー・サプライチェーン分析の結果、いずれの物質(鉄・アルミニウム・銅・鉛・亜鉛・ニッケル)についても1995年から2010年にかけて貿易を介した物質の移動量(取引量)、そして、見掛け消費量が顕著に増加(世界全体で約2倍程度)していること、更には、需要の偏在化と集中化が進んでいることが明らかとなった。特に、アジア地域においては、輸入の増加に伴って、消費量の急増が確認され、これに伴って、世界全体の消費量に対するアジア地域の消費量が占める割合も顕著な増加が認められた。

特徴的な成果として、鉄・銅・ニッケルに注目すると、1995年から2010年にかけて、アジア地域においては輸出と比べて輸入の

増加が顕著であり、このことは、資源消費の集中が生じていることを示唆していると考えられる(図 1)。具体的には、世界全体の貿易量に対するアジア地域への移動量(輸入量)が占める割合は、鉄が38%から51%に拡大、銅が36%から45%に拡大、ニッケルが25%から41%に拡大した。一方、世界全体の貿易量に対するアジア地域からの移動量(輸出量)が占める割合は、鉄が17%から23%に拡大、銅が20%から27%に拡大、ニッケルが15%から31%に拡大した。また、対象期間で世界全体の見かけ消費量は、鉄で2.1倍、銅で1.6倍、ニッケルで1.7倍に増加しており、特に、アジア地域における消費量が拡大している傾向が示された。

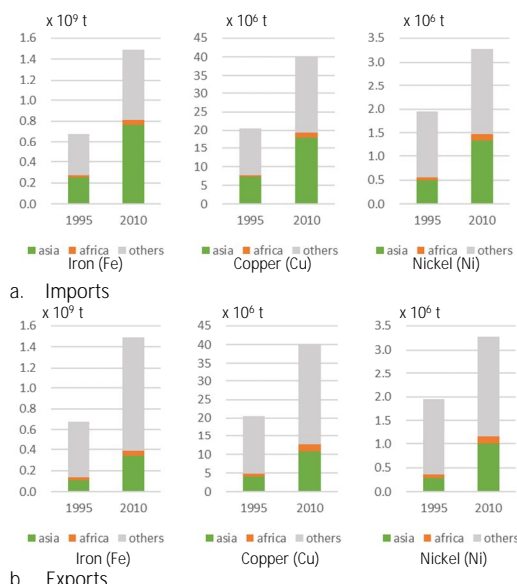


図 1. 国際貿易に伴う鉄・銅・ニッケルの移動量 (1995年、2010年)

また GLIO による解析の結果、日本の最終需要に伴う誘発資源採掘量は、鉄が  $84 \times 10^6$  t-Fe であり、主要な採掘国はブラジル(58%)、オーストラリア(24%)、インド(6.8%)であると得られた。また、銅の誘発資源採掘量は  $1.7 \times 10^6$  t-Cu であり、主要な採掘国はチリ(47%)、フィリピン(17%)、オーストラリア(9.0%)であると得られた。そして、ニッケルの誘発採掘量は  $0.23 \times 10^6$  t-Ni であり、主要な採掘国はインドネシア(42%)、ニューカレドニア(13%)、カナダ(8%)と得られた。特に、ニッケルについては、世界全体の需給構造との差異が確認された(図 2)。

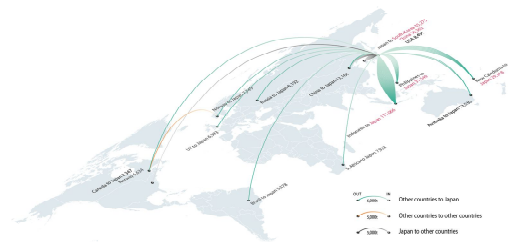


図 2. 日本の最終需要が誘引するニッケルの国際マテリアルフロー (2005年)

(2) 資源利用による土地改変

ニューカレドニアの主要な鉱山を対象に、複数時点の衛星画像を取得、これを分析することでニッケル鉱山を開発することで生じた土地改変面積を定量化した。その結果を図 3 に示した。ここで分析対象としている鉱山はすべてニッケルの酸化鉱床を露天掘によって採掘している現場である。地質学的な特徴も比較的似通っており、用いられている技術もほぼ同じであることから、規模の大小はあれども、単位ニッケル生産量あたりの土地改変面積には大きな違いはないものと想定された。

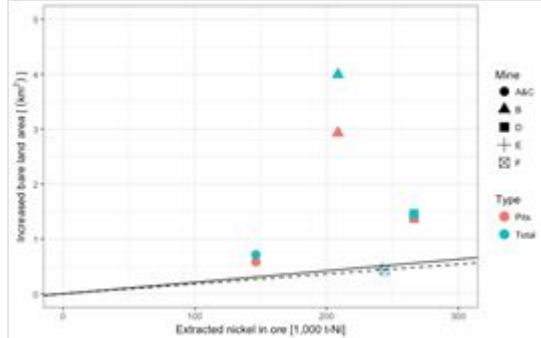


図 3 ニッケル採掘量と土地改変面積

図は横軸にニッケルの生産量(純分)、縦軸に土地改変面積を示しており、よって原点と各点を結んだ線の傾きが、単位ニッケル量あたりの土地改変面積を意味する。これから分かるように、実際には鉱山採掘現場ごとに単位ニッケル量あたりの土地改変面積は大きく異なることが明らかになった。さらに、採掘による土地改変と言えば採掘現場(図中の Pits)で起きる印象が大きいですが、図中の総改変面積(Total)と採掘現場を比較すれば、それ以外の関連施設の建設等によって引き起こされる土地改変面積が無視できないこともまた明らかである。

さらに図中に実線、点線で示したものは、業界団体が公表しているニッケル単位生産量あたりの土地改変面積の原単位と LCA ツールによって求めた値になる。いずれも本研究が求めた値と比べると最も小さい鉱山とはほぼ同じ、土地改変の大きな鉱山と比べると非常に大きな開きがあることが分かる。よって、同種の鉱床に同種の技術を用いたとしても、この種の数値はかなりの幅を持つことが明らかであり、可能な限りは個別の事例に対して細かい定量化の作業が必要になることが改めて明らかになった。

また、ニッケルの生産においては、1990 年代後半における技術革新によって、それまで利用が難しかった低品位鉱石の利用が可能になったことが知られている。この影響を検証すべく、単位ニッケル量あたりの土地改変面積について、1995 年以前と以降について比較を行ったところ、41%もの減少が見られた。こうしたことを定量化することを可能にし

たことは本研究の成果であると言える。

なお、既に、153か所の鉱山について、解析に必要な操業情報と衛星画像の有無に関する検索結果を整備しており、画像購入のための費用は安価ではないものの解析対象を拡大することで、全球を対象とした精緻な土地改変面積の解析が期待できる。

#### <引用文献>

- 1) UNEP: Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles (2013)
- 2) UNEP: Metal Recycling (2013)
- 3) Elshkaki et al., J. Cleaner Prod., 59(2013),
- 4) Myers et al., Nature, 403(2000)
- 5) M.Lenzen et al., Nature, 486(2012)
- 6) S.Nakamura et al., Journal of Industrial Ecology, 11(2007)
- 7) K.Nansai et al., Econ. Syst. Res. 21(2009)
- 8) CEPIL: Base pour l'Analyse du Commerce International  
<http://www.cepii.fr/anglaisgraph/bdd/baci.htm>,

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計2件)

Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W., Nagasaka T. (2017) Global land-use change hidden behind nickel consumption. Science of the Total Environment, 586, 730-737 (査読有)  
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.049  
Nakajima K., Otsuka Y., Iwatsuki Y., Nansai K., Yamano H., Matsubae K., Murakami S., Nagasaka T. (2014) Global supply chain analysis of nickel: importance and possibility of controlling the resource logistics. Metallurgical Research and Technology, 111, 339-346 (査読有)  
DOI: 10.1051/metal/2014036

##### [学会発表](計14件)

Murakami S., Iwatsuki Y., Nakajima K., Yamano H. (2016) Historic nickel mining activities in New Caledonia detected by satellite data: a comparison with operation data. The 12th Biennial International Conference on Ecobalance (Ecobalance 2016), Abstracts book, 150, 05/10/2016, Kyoto Terrsa (Kyoto, Japan)  
Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M.,

Matsuno Y. (2016) Global distribution of material consumption: Nickel, Copper, and Iron. The 12th Biennial International Conference on Ecobalance (Ecobalance 2016), Abstracts book, 151, 05/10/2016, Kyoto Terrsa (Kyoto, Japan)

Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2016) Recent global trends in flows and apparent consumptions of nickel copper and iron. The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia Pasific conference, Abstracts, 73, 30/09/2016, Nagoya univ. (Nagoya, Japan)  
Nakajima K., Nansai K., Daigo I., Murakami S., Matsubae K. (2015) Linking the local consumption of nickel to global supply Chain. The 7th International Conference on Life Cycle Management, 01/09/2015, Bordeaux Convention Centre (Bordeaux, France)  
Nakajima K., Nansai K., Daigo I., Murakami S., Matsubae K. (2015) Local Consumption of Nickel Accelerates Global Land Use Change. World Resources Forum Asia Pacific 2015, 02/06/2015, Aerial UTS Centre (Sydney, Australia)

##### [図書](計1件)

Yamano, H. and Watanabe, T. (2016), Coupling remote sensing and coral annual band data to investigate the history of catchment land use and coral reef status. In: Kayanne, H. (ed) Coral Reef Science., Springer, 47-53

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

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

##### (2)研究分担者

村上 進亮 (MURAKAMI, Shinsuke)  
国立大学法人東京大学大学院・工学系研究科・准教授  
研究者番号: 40414388

##### (3)研究協力者

山野 博哉 (YAMANO, Hiroya)  
国立研究開発法人国立環境研究所・生物・生態系環境研究センター・センター長  
研究者番号: 60332243