

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00641

研究課題名(和文) 多元物質フロー解析モデルの開発と随伴元素成分を考慮した鉄鋼リサイクルへの応用

研究課題名(英文) Material/substance flow analysis of multiple substances for efficient recycling of steel scrap and alloying elements

研究代表者

近藤 康之 (KONDO, Yasushi)

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号：80313584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：鉄鋼スクラップは、発生量のほぼ全量がリサイクルされているものの、鋼材に含まれる合金元素が有効利用されているとは言えない。合金元素を有効利用できるリサイクルを促進するために、多物質・多元素を同時に考慮できる物質フロー解析のための数理モデルを開発した。開発したモデルをシナリオ分析に応用して、スクラップの分別を徹底することによる合金元素リサイクルの可能性、および、それによって節約されるエネルギーを指標としてリサイクルの質を考慮することの重要性を指摘した。

研究成果の概要(英文)：While steel scrap is characterized by a high rate of recycling, alloying elements in steel are not necessarily utilized effectively. In order to promote effective utilization of alloying elements, we developed a new mathematical model of material/substance flow analysis that considers the simultaneous presence of multiple materials and multiple substances. Results of its application under alternative scenarios show the substantial potential of effectively utilizing alloying elements and the importance of paying due attention to qualitative aspects of recycling, which was made possible by an indicator based on the amount of energy saved by effective utilization of alloying elements.

研究分野：計量経済学、産業連関分析、産業エコロジー、環境経済学

キーワード：物質フロー解析 産業連関分析 鉄鋼スクラップ 合金元素

1. 研究開始当初の背景

金属鉱石などの天然資源の豊かでないわが国では、省資源・リサイクルが求められており、実際にそれが促進されてきた。例えば鉄鋼スクラップは、その発生量のほぼ全量がリサイクルされているから、この意味ではリサイクルの優等生と言える。しかし、合金元素が本来の目的で利用されない場合は、品質要件を満たすために銑鉄の投入による希釈が必要である。すなわち、合金元素も銑鉄も有効に、または効率的に利用されておらず、リサイクルにおいてロスが生じている。このような希釈とロスに関する議論は、マンガン、クロム、ニッケル、モリブデンといった合金元素だけでなく、銅などのトランプエレメントについても同様に成り立つ。したがって、合金元素（およびトランプエレメント）の有効利用を伴う鉄鋼スクラップリサイクルを促進するためには、合金元素の含有量と適切な用途を考慮する必要があるため、多物質・多元素を適切に同時に考慮した物質フロー解析の実施が、今後ますます求められると考えられる。このような背景から、新しい多元物質フロー解析モデルの開発と応用に関する研究を着想するに至った。

2. 研究の目的

使用済製品（建築物、自動車、家電など）の適正処理と素材リサイクルの促進に向けて具体的な施策を検討するために、方法論の開発と実証分析を行う。具体的には、産業連関分析を応用した物質フロー解析の手法を拡張することにより、多物質・多元素を適切に同時に考慮することのできる新しい物質フロー解析手法を開発する。また、開発した解析手法を使用済製品の適正処理と素材リサイクルについての実証分析に応用し、「適正な鉄鋼スクラップの分別回収」「随伴元素・合金元素を考慮した効率的リサイクルのための産業連携」を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

鉄鋼スクラップリサイクルを検討するためには、どの使用済製品から、どのような品質の鉄鋼スクラップが回収され、それがどのような製鋼プロセスを経て、どのような製品の生産に用いられるか、を明示的に考慮することが望ましい。とくに使用済製品の発生とスクラップ回収を考慮するためには、物質フローだけでなく、物質ストックに関する解析も必要となる。研究代表者と研究分担者は、複数の製品のストックとフロー、および使用済製品から回収される鉄鋼スクラップの品質を明示的に考慮する動的物質フロー・ストック解析手法 (MaTrace) を開発してきた。図1は MaTrace による解析結果を模式的にあらわしたものであり、当初は自動車を構成していた鋼材が、製品（自動車）が寿命を迎えて使用済製品になるために、その一部はスク

ラップとして回収されること、回収されたスクラップの僅かな割合だけが再び自動車を構成する素材となること（図の赤色の部分）、残りの大部分は土木・建築資材となって使用されること（図の黄色の部分）、回収されないロスや製錬過程でのロスが生じること（図の緑色・水色の部分）を示している。

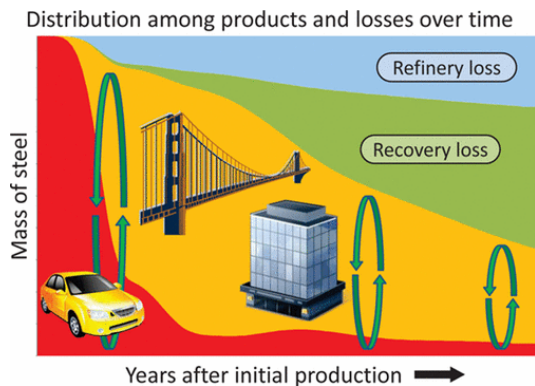


図1 鋼材の使用とロスの経年変化：MaTrace による解析結果。出所：Nakamura et al. (2014) *Environ. Sci. Technol.* 48, 7207-7214.

MaTrace モデルは、製品ごとの寿命(分布)、回収段階でのロス、回収されたスクラップの各種製錬プロセスへの配分、製錬段階でのロス、鋼材の各種製品製造プロセスへの配分、製品製造段階でのロスをパラメータとして持っている。したがって、将来のシナリオをこれらのパラメータとして表現することにより、施策の物質フロー・ストックへの効果をシナリオ分析の方法によって定量評価することに活用できる。MaTrace モデルを本課題の目的に合わせて拡張することにより、合金元素に関する物質フロー・ストック解析モデルを開発する。

4. 研究成果

(1) MaTrace global の開発と応用

MaTrace モデルを多地域産業連関表に基づいて全球規模に拡張したモデル (MaTrace global) を開発し、それを適用してオープンリサイクルを含む鉄鋼フロー・ストックに関する実証分析を行った。得られた成果を論文として *Resources, Conservation and Recycling* 誌 (インパクトファクター2016年 3.313) に発表した。その概要は以下の通りである。

図2は初期時点として設定した2015年に米国において生産された自動車と中国において生産された一般機械を構成していた鋼材について、その使用状況の2100年までの経年変化を評価した結果である。上段の3つの図は米国の自動車、下段の3つの図は中国の一般機械の結果をあらわす。オレンジ色、淡い黄色、濃い青色の部分は、それぞれ自動車、建築物、一般機械として使用されている割合を示す。また、黒色または灰色の部分は、使用済製品となったままスクラップが回収されないことによるロス、回収段階における

ロス、製錬段階におけるロス、製品製造段階におけるロスとして失われたために、製品として使用されていない割合を示す。左端の2つの図は現状シナリオ、中央の2つの図は現状では電炉鋼生産に用いられるスクラップが転炉鋼生産に用いられるクローズドループシナリオ、右端の2つの図はクローズドループシナリオに加えて、製品寿命の延長とスクラップ回収率の向上を実現したシナリオの結果をあらわす。

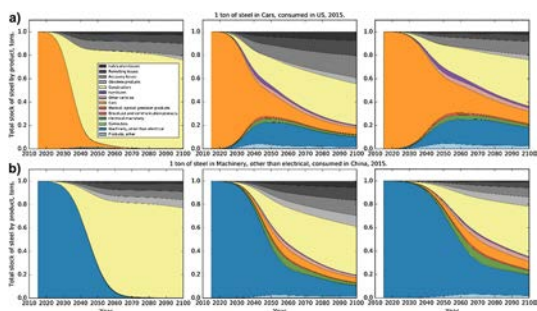


図2 鋼材の使用とロスの経年変化: MaTrace global による解析結果。出所: Pauliuk et al. (2017) *Resources, Conservation and Recycling* 116, 84-93.

現状シナリオにおいては、当初は自動車または一般機械を構成していた鋼材が、使用済製品となった後はスクラップとして回収され、電炉鋼生産に用いられ、もっぱら建築資材として使用される。これに対して、クローズドループシナリオにおいては、スクラップの一部が自動車または一般機械としても使用される。ただし、主として自動車と一般機械の寿命が建築物のそれよりも短いことにより、クローズドループシナリオにおいては、現状シナリオよりも多くの物質ロスが生じる。物質ロスを現状シナリオと同程度に抑えるためには、クローズドループシナリオに、製品寿命の延長とスクラップ回収率の向上を組み合わせる必要がある。

以上の結果は、物質ロスの大小だけを指標として、クローズドループシナリオよりも現状シナリオの方が優れていると解釈すべきではない。クローズドループシナリオにおいては、より質の高いリサイクルが実現されているからである。

(2) MaTrace alloy の開発と応用

MaTrace モデルを拡張することにより、多数の物質、多数の元素を適切に考慮し得るモデルを開発した。さらに、オープンループリサイクルにおいて生じるロスを適切に考慮した循環性の指標を用いて合金元素のリサイクルを評価した。得られた成果を論文として *Environmental Science & Technology* 誌 (インパクトファクター2016年 6.198) に発表した。その概要は以下の通りである。

実証分析の対象は鉄鋼素材全般であり、合金元素はクロムとニッケルを対象とした。製品は、建築・土木を含む最終製品すべてを対

象とした。図3は、使用済製品から回収されるスクラップの分別に関する3つのシナリオごとに、鋼材の合金元素としてのクロムとニッケルの使用状況の初期時点から100年間の経年変化を評価した結果である。左側の3つの図はクロムについて、右側の3つの図はニッケルについて評価した結果をあらわす。黒色または灰色の部分、ロスとして失われたために、製品として使用されていない割合を示す。

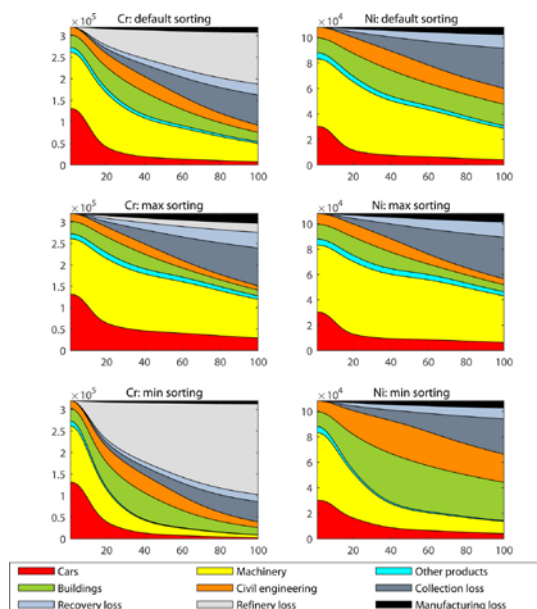


図3 合金元素の使用とロスの経年変化: MaTrace alloy による解析結果。出所: Nakamura et al. (2017) *Environ. Sci. Technol.* 51, 9469-9476.

上段の図が示す分別の現状シナリオにおいては、クロムは40%が50年後までに、70%が100年後までにロスとして失われる。ロスに占める割合は、製鋼スラグへと散逸する製錬ロスが大きい。クロムよりもニッケルの方がロスは小さく、20%が50年後までに、45%が100年後までにロスとして失われる。ロスに占める割合は、使用済製品の回収段階におけるロスが大きい。

中段の図は、分別の徹底により、クロムとニッケルを含む鉄鋼スクラップが、普通鋼生産プロセスではなく、それらの合金元素を必要とする特殊鋼生産プロセスに配分されるシナリオにおける評価結果をあらわす。これによってクロムのロスをニッケルと同程度まで低く抑えられる。

下段の図は、クロムとニッケルを含むスクラップがすべて普通鋼生産に用いられるシナリオ (以下では「不分別シナリオ」と言う) をあらわす。クロムについては製錬ロスの占める割合が大きく、他のロスも含めると90%が100年後までに失われる。それに対して、ニッケルについては、普通鋼を構成する元素として土木・建築資材として使用され、それらの製品は機械よりも寿命が長いために、現状シナリオよりも僅かではあるがロスの割

合が減少する。

以上の議論においては、ロスの質量のみに着目していた。したがって、質の異なるリサイクルは区別しなかった。それを区別して機能ロスを考慮するため、失われた合金元素の質量に着目した評価に加えて、失われた合金元素に内包されるエネルギーに着目した評価も実施した。図4はその結果を示す。

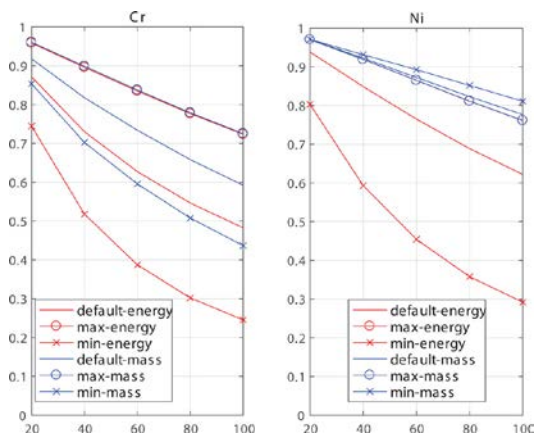


図4 物質ロスと機能ロスを考慮した合金元素の提供する累計サービスの経年変化：MaTrace alloyによる解析結果。出所：Nakamura et al. (2017) *Environ. Sci. Technol.* 51, 9469–9476.

左側の図はクロム、右側の図はニッケルについての評価結果である。青い線は、上で述べた質量に着目した評価結果であり、ニッケルについては、現状シナリオ（マーカの無い線）よりも、不分別シナリオ（マーカ「×」の付いた線）の方が、少しだけ値が大きい。これは、ニッケルの提供するサービスの累計を質量で測った場合には、不分別シナリオの方が現状シナリオよりも僅かではあるがニッケルのロスの割合が小さく、100年後でもロスが20%程度であることを示している。他方、ニッケルの提供するサービスの累計を内包されたエネルギーで測った場合の結果（赤い線で示されている）は、100年後のニッケルのロスが現状シナリオにおいては40%程度、不分別シナリオにおいては70%程度である。この結果は、物質ロスだけでなく、機能ロスを適切に考慮すべきであることを示している。

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）

- ① Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kenichi Nakajima, Hajime Ohno, Stefan Pauliuk. Quantifying recycling and losses of Cr and Ni in steel throughout multiple life cycles using MaTrace-alloy. *Environmental Science & Technology* 51, 9469–9476, 2017. 査読有. DOI: 10.1021/acs.est.7b01683
- ② Stefan Pauliuk, Yasushi Kondo, Shinichiro

Nakamura, Kenichi Nakajima. Regional distribution and losses of end-of-life steel throughout multiple product life cycles: Insights from the global multiregional MaTrace model. *Resources, Conservation and Recycling* 116, 84–93, 2017. 査読有. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.029

〔学会発表〕（計5件）

- ① Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kenichi Nakajima, Hajime Ohno, Stefan Pauliuk. MaTrace-alloy: Input-output based integration of dynamic MFA and SFA with application to Cr and Ni in steel alloys. The 9th Biennial Conference of the International Society for Industrial Ecology, Chicago, Illinois, USA. June 25–29, 2017.
- ② Yasushi Kondo, Stefan Pauliuk, Shinichiro Nakamura, Kenichi Nakajima. Tradeoff between material loss and closed-loop recycling in the global steel cycle: An application of MaTrace Global. Joint Scio-economic Metabolism Conference and Asia-Pacific Conference of International Society for Industrial Ecology, Nagoya, Japan. September 28–30, 2016.
- ③ Yasushi Kondo, Stefan Pauliuk, Shinichiro Nakamura, Kenichi Nakajima. MaTrace Global: Tracing the fate of materials across regions over time in open-loop recycling. Circular Materials Conference 2016, Gothenburg, Sweden. May 11–12, 2016.
- ④ Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Tetsuya Nagasaka. Tracing the fate of industrial materials over time and across space: A contribution to dynamic MFA based on input-output analysis. ISWA Beacon, 3rd International Conference on Final Sinks, Taipei, Taiwan. August 23–26, 2015.
- ⑤ Yasushi Kondo, Kenichi Nakajima, Shinichiro Nakamura. Simultaneous material flow analysis: An extension of WIO-MFA and its application to effective recycling of steel alloys. World Resources Forum Asia-Pacific, Sydney, Australia. June 1–3, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 康之 (KONDO, Yasushi)

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号：80313584

(2) 研究分担者

中村 慎一郎 (NAKAMURA, Shinichiro)

早稲田大学・政治経済学術院・教授

研究者番号：20180367