

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04328

研究課題名（和文）希少合金元素の高効率リサイクルを目指した多元物質ストック・フロー解析モデルの開発

研究課題名（英文）Development of models for material stock and flow analysis toward advanced recycling of scarce 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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：高効率リサイクル（不純物の混入をできるだけ低減し、合金元素をできるだけ有効に活用するリサイクル）の実現に資する物質フロー・ストック解析を行うことを目指して、それに必要な数理モデルとデータベースを開発し、応用分析を行った。混入や合金元素の有効活用を明示した分析を可能とするため、数理モデル開発においては、金属元素と合金を明確に区別するとともに、多物質・多元素を同時に扱った。データベース開発においては、日本の産業連関表に基づく物質フローデータの精緻化を実施した。7種の金属元素を同時に考慮する全球規模の分析のためのモデル開発と応用分析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SDGsの達成や循環経済（サーキュラーエコノミー）の進展のためには、高効率リサイクルを実現することが重要である。高効率リサイクルを推進するためには、多物質・多元素を同時に考慮できる、かつ施策の事前評価に利用できる物質フロー・ストック解析の実施が求められる。本研究は、この社会的要請に応えられる数理モデルを、世界に先駆けて国際共同研究により開発し、7種の金属元素のフロー・ストックに関する全球規模の分析に応用して、その結果を示した。

研究成果の概要（英文）：We developed a mathematical model and databases for material flow and stock analysis (MFSA) and conducted an empirical analysis to promote efficient recycling, that is, to effectively use alloy elements and avoid mixing with contaminant. Elemental metals are differentiated from alloys, and multiple materials and elements are simultaneously considered in the developed model, by which we can quantitatively analyze effective use of alloy elements and mixing. Material flow databases which extended the Japanese input-output tables were elaborated. The empirical analysis showed a simultaneous flow and stock dynamics of seven metal species at a global scale.

研究分野：産業エコロジー、廃棄物資源循環分野における産業連関分析

キーワード：循環経済 サークュラーエコノミー 廃棄物産業連関 オープンループリサイクル 循環型社会

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

国際連合の持続可能な開発目標（SDGs）において取り上げられているように、持続可能な天然資源の管理および効率的な利用と、廃棄物の大幅な削減が世界的に求められている。廃棄物の削減に向けた取組として、最近では RRRDR（再製造（remanufacturing）、改修（refurbishment）、修理（repair）、直接再使用（direct reuse）の略）の重要性が国際的に再認識されており、また、日本の循環型社会形成推進基本法においても、3R のうち再生利用（リサイクル）よりも発生抑制（リデュース）と再使用（リユース）を優先すべきとされている。とは言え、高効率リサイクル実現の重要性は、依然として失われていない。例えば、金属スクラップの典型的なリサイクルはオープンサイクル（スクラップになる前と同じ製品に再生利用されるとは限らないもの）であり、リサイクルには量的なロスだけでなく、質的なロスも生じている（Graedel et al. 2011）。したがって、リサイクルを質的に改善するためには、鉄鋼スクラップを単純に「鉄」または「鉄鋼」と捉えるのではなく、Fe、Mn、Ni、Cr、Mo など複数の元素からなる多様な合金と捉えて、多物質・多元素を同時に考慮した物質フロー解析を実施することが必要不可欠である。さらに、製造業において発生する加工くずに関しては、比較的少数の工場で均質なスクラップが大量に発生することから、質の高いリサイクルを実現しやすい。他方、使用済製品から回収される老廃スクラップに関しては、多数の事業所や住居などで多様な使用済製品が少量ずつ発生することから、リサイクルの質的改善の余地が大きい。そのため、使用中の耐久財のストック、耐久財の使用年数の分布、フローとストックのあいだの関係、および、それらの経年変化を考慮できる、動的な物質ストック・フロー解析が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、合金元素の高効率リサイクルを目指したシナリオ分析のための数理モデルの開発、データベースの開発、および応用分析を行い、その結果（科学的エビデンス）に基づく提言を行うことである。数理モデルは、多物質・多元素を同時に考慮した物質フロー・ストック解析を実施可能なものとする。データベースは、鉄鋼合金元素を主な対象としつつ他の金属元素をも含み、日本の産業連関表を廃棄物産業連関分析に基づく物質フロー解析（waste input-output material flow analysis (WIO-MFA), Nakamura and Nakajima 2005, Nakamura et al. 2007）の枠組みに沿って拡張したものとする。

3. 研究の方法

応用分析に用いる数理モデルに要求される特性（多物質・多元素を同時に考慮した物質フロー・ストック解析を実施可能なものであること）を考慮して、廃棄物産業連関（waste input-output (WIO), Nakamura 1999; Nakamura and Kondo 2002, 2018）および動的物質ストック・フロー解析モデル MaTrace（Nakamura et al. 2014, 2017）に基づいて、数理モデルを開発する。

データベースは、日本の平成 17 年（2005 年）産業連関表を拡張して開発された WIO-MFA データベース、および日本の平成 23 年（2011 年）、平成 27 年（2015 年）産業連関表を基礎資料として用いる。Fe、Cr、Ni 等の物質フローに関するデータを整備（電算化）したうえで、産業連関表推計のために不完全なデータしか得られない場合に利用される手法（データベース全体として、誤差をできるだけ小さくするような数値計算による最適化手法）を応用して、より精緻なデータベースを開発する。

4. 研究成果

多物質・多元素を同時に考慮した動的物質フロー・ストック解析に関するモデル開発と応用分析を、国際共同研究として実施した。その主な成果（Helbig et al. 2022）は次の通りである。分析対象地域は全球（世界全体）とした。対象とする元素は、分析の重要性とともにデータの利用可能性も考慮して、Al（アルミニウム）、Cr（クロム）、Fe（鉄）、Ni（ニッケル）、Cu（銅）、Zn（亜鉛）、Pb（鉛）の 7 種とした。これらの金属元素は、鉱石として採掘された後、（一次）金属素材の生産、製品等の生産、使用、回収、分別、（二次）金属素材の生産の各工程を経て、再び製品等の生産に利用される。7 種の金属元素が採掘されてから 200 年のあいだに、どのように使用され、どのように損失されるか、その動態をシミュレーションの方法により算定した結果を図 1 に示す。金属元素の種類ごとに描かれた各図について、縦軸の単位はすべて Mt で共通であるが、縦軸の数値の範囲が異なる点に注意していただきたい。図中の白色部分は使用中のストックの量をあらわす。灰色に網掛けされた部分は損失（採掘、生産、回収、分別、溶解の各工程における損失、および使用中の散逸）の累計された量をあらわす。また、白色部分に描かれた曲線は、使用中のストック量を製品別（建設 Construction work、自動車 Motor vehicles などの別）に分解して示したものである。

質量の最も大きい Fe（鉄）について詳しく見ると、初年度に 805 Mt が採掘され、そのうち 85% にあたる 687 Mt が製品等として使用される。使用に至らない 15% の大部分は採掘段階における損失（mining loss）である。この初年度に使用される 687 Mt のうち 48% にあたる 328 Mt は建設

物（建築物、道路、橋、ダムなど Construction work）として使用され、自動車 125 Mt を含む機械全体での使用量は建設とほぼ同量の 332 Mt である。時間の経過とともに使用中のストック量は減少し、30 年目には 608 Mt、100 年目には 323 Mt（95%区間は 200 Mt~450 Mt）まで減少する。また、機械として使用中のストックは時間の経過とともに減少するのに対して、建設物として使用中のストックは当初の 328 Mt から 30 年目には 544 Mt まで増加する。これは、リサイクルされる鉄鋼くずの大部分が建設用途に仕向けられることによる。

Fe（鉄）に次いで質量の大きい Al（アルミニウム）については、使用中のストックが展伸材から鑄造材へと徐々に変化していく傾向を見ることができる。初年度の採掘量は 54.9 Mt、そのうち 86%にあたる 47.2 Mt が製品等として使用される。そのうち建設物に 12.1 Mt、自動車に 9.18 Mt、自動車を含む機械全体に 27.4 Mt が使用される。建設物として使用中のストック量は、初年度の 12.1 Mt から 20 年目頃の 14.0 Mt までは若干増加するものの、その後は減少に転じる。他方、自動車として使用中のストック量は、初年度の 9.18 Mt から 13 年目頃の 9.65 Mt まではやや増加し、その後は建設物よりも緩やかに減少する。45 年目頃には建設物 8.69Mt、自動車 8.79 Mt となり、使用中のストック量は自動車よりも建設物の方が少なくなる。また、100 年目にも使用中のストック量は 10.3 Mt（95%区間は 4.1 Mt~20.0 Mt）である。長期間のシミュレーションにより得られる結果として、Al（アルミニウム）の損失全量のうち 73%は回収段階のロスである。

主要な鉄鋼合金元素である Cr（クロム）と Ni（ニッケル）については、初年度の採掘量はそれぞれ 4.25 Mt、1.48 Mt である。初年度から 100 年目までの使用中のストック量の減少傾向について見ると、Cr は 3.12 Mt から 885 kt（564 kt~1305 kt）まで減少し、Ni は 1.14 Mt から 612 kt（420 kt~786 kt）まで減少する。また、長期間のシミュレーションにより得られる結果として、Cr は損失全量のうち回収段階のロス 22%を上回る 36%が溶解段階におけるロス（remelting loss）である。他方、Ni は損失全量のうち 49%は回収段階のロスである。

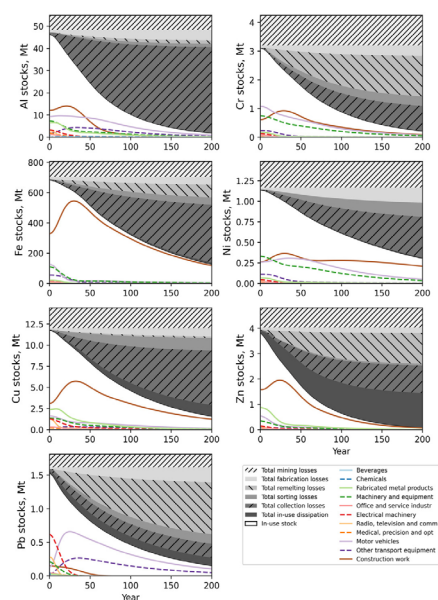


図1 使用中のストックと損失の動態
出所：Helbig et al. (2022, Figure 2)

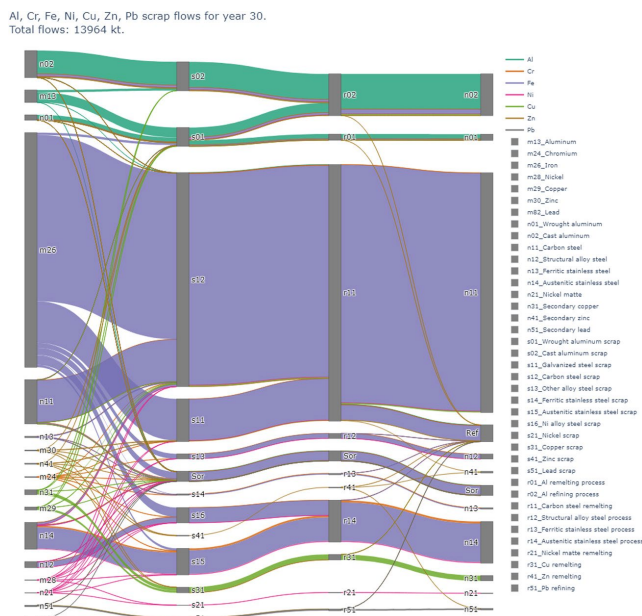


図2 分別・溶解工程で生じる混合と損失
出所：Helbig et al. (2022, Figure 3)

これら2つの図の使用と再配布は[クリエイティブ・コモンズ表示-非営利 4.0 国際 \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) により許可されている。

本研究においては、7種の金属元素のフロー・ストックの動態を同時に考慮しているため、使用済製品として回収された後に分別工程、分配工程、溶解工程において生じる混合と損失を定量的に分析することが可能である。これをシミュレーションの30年目について行った結果を図2に示す。図示された4つの断面は、左端から順に、回収された使用済製品に含まれる合金、解体・分別されたスクラップ、溶解工程へ配分されたスクラップ、そしてスクラップから生産された合金に対応する。ラベルの先頭に「m」とあるものは鉱石から生産された一次素材（primary materials）をあらわす。その他「n」「s」「r」はスクラップから生産された二次素材（secondary materials）、スクラップ、溶解工程をあらわす。また「Sor」は分別ロスを、「Ref」は溶解ロスをあらわす。曲線の幅はフローの大きさ（質量）をあらわし、図中のフローの総量は 14.0 Mt である。

ところで、図2に示した結果の解釈に際して、次のことに留意する必要がある。本研究の物質フロー・ストック解析は、初年度に採掘・生産された金属（それを含む製品等）がどのように使用され、損失されるか、その動態を追跡したものである。すなわち、実際の産業活動においては、スクラップの品質に応じて希釈（一次素材の追加）が行われるが、そこで追加された一次素材はシミュレーションの算定対象外である。そのため、図2に示された7種の金属ごとの曲線の幅の

相対的な大きさは、各合金の組成をそのまま示すものではない。とは言え、多種の金属が不完全に分別され、溶解工程に混入する、という物質フローの様子を示している。

ここに概要を示した分析結果は、我々の知る限り、7種の金属元素を同時に考慮した全球規模の物質フロー・ストック解析として世界初の研究成果である。SDGsの達成や循環経済の進展のためには、高効率リサイクルの実現が重要であり、多物質・多元素を同時に考慮した物質フロー・ストック解析の実施が求められる。さらに、その解析を通して、リサイクルの量的および質的なロス等を定量的に（指標を用いて）把握するとともに、各種のシナリオの変化に対するロス指標の反応を検討することが肝要である。この要請に応えられる数理モデルを世界に先駆けて開発し、応用分析結果を示した本研究の学術的貢献は大きいと言えよう。今後の展望としては、対象物質の範囲を広げること、および最終製品の分類をより詳細にすることが考えられる。

<引用文献>

- Graedel TE, Allwood J, Birat JP, Buchert M, Hagelüken C, Reck BK, Sibley SF, Sonnemann G (2011) What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology* 15(3), 355–366, <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>
- Helbig C, Kondo Y, Nakamura S (2022) Simultaneously tracing the fate of seven metals at a global level with MaTrace-multi. *Journal of Industrial Ecology* 26(3), 923–936, <https://doi.org/10.1111/jiec.13219>
- Nakamura S (1999). Input-output analysis of waste cycles. In *Proceedings: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*. IEEE Computer Society, pp. 475–480.
- Nakamura S, Kondo Y (2002) Input–output analysis of waste management. *Journal of Industrial Ecology* 6(1), 39–63, <https://doi.org/10.1162/108819802320971632>
- Nakamura S, Kondo Y (2018) Toward an integrated model of the circular economy: Dynamic waste input–output. *Resources, Conservation and Recycling* 139, 326–332, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.016>
- Nakamura S, Kondo Y, Kagawa S, Matsubae K, Nakajima K, Nagasaka T (2014) MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling. *Environmental Science & Technology* 48(13), 7207–7214, <https://doi.org/10.1021/es500820h>
- Nakamura S, Kondo Y, Nakajima K, Ohno H, Pauliuk S (2017) Quantifying recycling and losses of Cr and Ni in steel throughout multiple life cycles using MaTrace-alloy. *Environmental Science & Technology* 51(17), 9469–9476, <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01683>
- Nakamura S, Nakajima K (2005) Waste input–output material flow analysis of metals in the Japanese economy. *Materials Transactions* 46(12), 2550–2553, <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.2550>
- Nakamura S, Nakajima K, Kondo Y, Nagasaka T (2007) The waste input–output approach to materials flow analysis. *Journal of Industrial Ecology* 11(4), 50–63, <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1290>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Christoph Helbig, Yasushi Kondo, Shinichiro Nakamura	4. 巻 26
2. 論文標題 Simultaneously tracing the fate of seven metals at a global level with MaTrace multi	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Industrial Ecology	6. 最初と最後の頁 923-936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/jiec.13219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhengyang Zhang, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima	4. 巻 170
2. 論文標題 Impact of remanufacturing on the reduction of metal losses through the life cycles of vehicle engines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 105614
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.resconrec.2021.105614	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Sho Hata, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima
2. 発表標題 Detecting carbon-intensive material footprints including fixed-capital effects
3. 学会等名 International Industrial Ecology Day 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sho Hata, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima
2. 発表標題 Revealing carbon-intensive material footprints including fixed-capital effects
3. 学会等名 World Resources Forum '21（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichiro Nakamura
2. 発表標題 Waste, input-output analysis, and industrial ecology
3. 学会等名 ISIE 2021 Awards Ceremony (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村慎一郎
2. 発表標題 産業連関表を用いた鉄鋼マテリアルフロー分析とエネルギーフローへの含意
3. 学会等名 日本エネルギー学会大会基調講演 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Takeyama, Hajime Ohno, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Yasushi Kondo, Tetsuya Nagasaka, Ichiro Daigo, Takeo Hoshino
2. 発表標題 Estimation of Cr and Ni content in carbon steel scrap by using dynamic material flow analysis model
3. 学会等名 EcoBalance 2020 (14th The International Conference on EcoBalance) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中村 慎一郎 (NAKAMURA Shinichiro) (20180367)	早稲田大学・政治経済学術院・教授 (32689)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中島 謙一 (NAKAJIMA Kenichi) (90400457)	国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環領域・主幹研究員 (82101)	
研究分担者	大野 肇 (OHNO Hajime) (20769749)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	武山 健太郎 (TAKEYAMA Kentaro) (10882649)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任研究員 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	アウグスブルク大学			