

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17918

研究課題名（和文）自動車軽量化に伴う新構造材料の動的循環解析及びリビルト導入効果の検証

研究課題名（英文）Dynamic circulation analysis of lightweight structural materials for automobiles and effect verification of remanufacturing

研究代表者

張 政陽（Zhang, Zhengyang）

東北大学・環境科学研究科・助教

研究者番号：40875465

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、世界的な自動車電動化や軽量化の進展に伴う金属資源循環構造変化及び技術政策選択による資源損失への回避効果の解明を目的として進めてきた。主な成果として、リサイクルを柱とした資源循環システムにリユース及びリマニュファクチャリングを導入することで、初回生産年から50年後に日本における鋼やニッケル、コバルトの損失を2～5%減らせることを明示した。また、新しく開発されたアルミニウム固体電解精製技術は、アルミニウムスクラップを純アルミニウムに再生できる先端技術として、世界的な電気自動車シフトによる従来のアルミニウム循環構造の破綻回避可能性やアップグレードリサイクル実現可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した動的なマテリアルフロー分析モデルは、リユースやリマニュファクチャリング、素材リサイクルによる多層な資源循環構造による日本の全産業部門における鋼及び合金元素の損失削減効果の評価、循環経済モデルに基づく国レベルでのリマニュファクチャリングの推進や異なる資源循環政策を検討する際の優先順位付けまたは組合せ最適化に利用できる。加えて、アルミニウムのサステナブルリサイクル新技術の開発により、アルミニウム再生時における質の低下を防ぎつつ、電気自動車や太陽光発電など低炭素技術を支える高純度アルミニウムの需要を満たし、持続可能なアルミニウム利用の実現に向けて一つの技術選択肢を提供した。

研究成果の概要（英文）：This research has investigated the changes in the circulatory pathways for metal resources associated with the global developments of vehicle electrification and light-weighting, as well as the impacts of technological and policy choices on mitigating resource loss to the environment. The key findings indicate that implementing reuse and remanufacturing in a recycling-centric resource circulation system can reduce the losses of steel, nickel, and cobalt to the environment in Japan by 2 to 5% after 50 years since the first year of production. Further, the newly developed solid-state electrolysis process for the upcycling of aluminium scrap is possible to produce aluminium with a purity of 99.9%, which is comparable to that of primary aluminium from aluminium scrap. This process has the potential to address the looming imbalance in global aluminium cycles due to the global shift to electric vehicles. With this technique, aluminium can be upgraded and utilized as primary aluminium.

研究分野：物質循環解析

キーワード：自動車 電動化 軽量化 金属資源 リサイクル リユース リマニュファクチャリング マテリアルフロー分析

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界的な電気自動車の普及に向けて車体の軽量化は重要課題の一つである。鋼材に代わる軽量化素材としてアルミニウムや樹脂、炭素繊維複合材料などの自動車への採用が拡大し続けている。また、自動車産業の脱炭素化には、リユースやリマニュファクチャリングを通じた使用済み製品の循環利用ないしアップグレードリサイクル技術の開発による資源の徹底的かつ高度な利用も不可欠である。こうした自動車構造及び材料の変化や科学技術政策の選択は、既存の資源循環構造を大きく変える可能性がある。しかしながら、自動車向け鋼材やアルミニウムなどの需要増減が製品のライフサイクルを通じて、自動車部門を含むあらゆる産業部門にわたる資源の流れに与える影響は依然不明である。また、循環経済モデルに基づくリマニュファクチャリングの導入やリサイクル技術の革新がこれら軽量化素材の損失をいかに抑えられるか解明されていない。これは電気自動車シフトと高度な資源循環の両立に資する新たな技術政策の導入効果を測る物差しを検討する機会を損ねる。

2. 研究の目的

本研究では、自動車の電動化及び軽量化に着目し、使用済み製品の循環利用による製品ライフサイクルの時間的遷移を通じて、あらゆる産業部門に跨る鋼、ニッケル、コバルト、及びアルミニウムの循環構造変化を解明する上で、リユースやリマニュファクチャリング、リサイクル先端技術の導入による資源の損失回避効果を定量的に分析する。これにより、日本または世界規模での電気自動車シフトを伴った循環経済アプローチ推進並びに技術選択の効果分析にツールと指標を与えると同時に、科学技術変革期に求められる自動車用鋼材及びアルミニウムの持続可能な循環利用枠組みづくりにエビデンスを添えることができる。

3. 研究の方法

本研究は、主にマテリアルフロー分析モデルの開発とシナリオ分析を用いて以下の手順で解析を進めることで目標達成を試みた。

- (1) 使用済み製品の多層な循環システムが分析可能な動的マテリアルフロー分析モデルの構築；まず、循環経済モデルに基づいて原材料生産から製品製造、使用、ストック、廃棄、回収、リユース、リマニュファクチャリング、リサイクルに至るまでのマテリアルフローを作成し、リユースとリマニュファクチャリングが複数回実施できるようフローを階層構造にした。
- (2) 異なる製品の寿命やプロセスごとの分配率または歩留まり率をパラメータ化した。
- (3) 手順(1)と(2)を統合し、日本における自動車エンジン中の鋼材、ニッケル、及びコバルトを事例として、リユースとリマニュファクチャリングの導入による資源循環構造の変化並びに資源損失削減効果を分析した；
- (4) 世界的な次世代自動車の普及率や自動車パワートレーン別アルミニウムの使用率、新型アルミニウム固体電解精製プロセスの歩留まり率を基に技術革新シナリオを想定し、アルミニウムのマテリアルフロー分析モデルに組み込むことで、将来の持続可能なアルミニウム循環への革新的リサイクル技術の貢献度を分析した。

4 . 研究成果

本研究では、以下に示す主に二つの成果が得られた。

- (1) リユース、リマニュファクチャリング、リサイクルによる複数素材の循環を同時にかつ動的に解析できるマテリアルフロー分析モデルを開発した。日本における自動車エンジンの事例研究を通じて、リサイクルを柱とした資源循環システムから多層な資源循環システムに転換した際に、最終製品における鋼、ニッケル、クロムの循環経路の経時変化及びこれら資源の拡散または散逸削減量の経時変化を明示した。資源循環における物量のみならず、質の向上に対する循環経済アプローチの有効性を系統的かつ定量的に評価できるモデルを提供した（図 1）。研究成果は環境科学分野の国際的トップジャーナル Resource, Conservation & Recycling に論文発表した。

- (2) アルミニウムのアップグレードリサイクル新技術の開発・応用が世界的な電気自動車シフトに伴うアルミニウムの循環構造の破綻回避に貢献できる可能性を明らかにした。現状では、再生アルミニウムの最終用途は、主に自動車用エンジンブロック等の鑄造・ダイカスト製品である。一方、世界で加速する電気自動車シフトに伴って展伸材の需要増加に対してエンジン向け鑄造材の需要が激減し、従来のダウングレードリサイクルによって構築されたアルミニウムの循環構造が破綻することが懸念される。このままでは、2040年に約360万トンも使えないアルミニウムが発生することをマテリアルフロー分析によって推計した（図 2d）。また、東北大学グループがアルミニウム新地金製造時の半分以下のエネルギー消費で銅やシリコン等の合金化元素を大量に含むアルミニウムスクラップを純アルミニウムに再生できる固体溶融塩電解技術の開発に成功した（図 2a - 2c）。本技術の応用により、アルミニウムの再生時における質の低下を防ぎ、アルミニウムの持続可能な循環利用の実現可能性を示唆した（図 2d）。研究成果は、世界トップクラスの総合科学誌 Nature に掲載され、2年間で環境・材料科学分野の学術論文で62回ほど参照されるに至っている。

Recycling-advanced system

Remanufacturing-advanced system

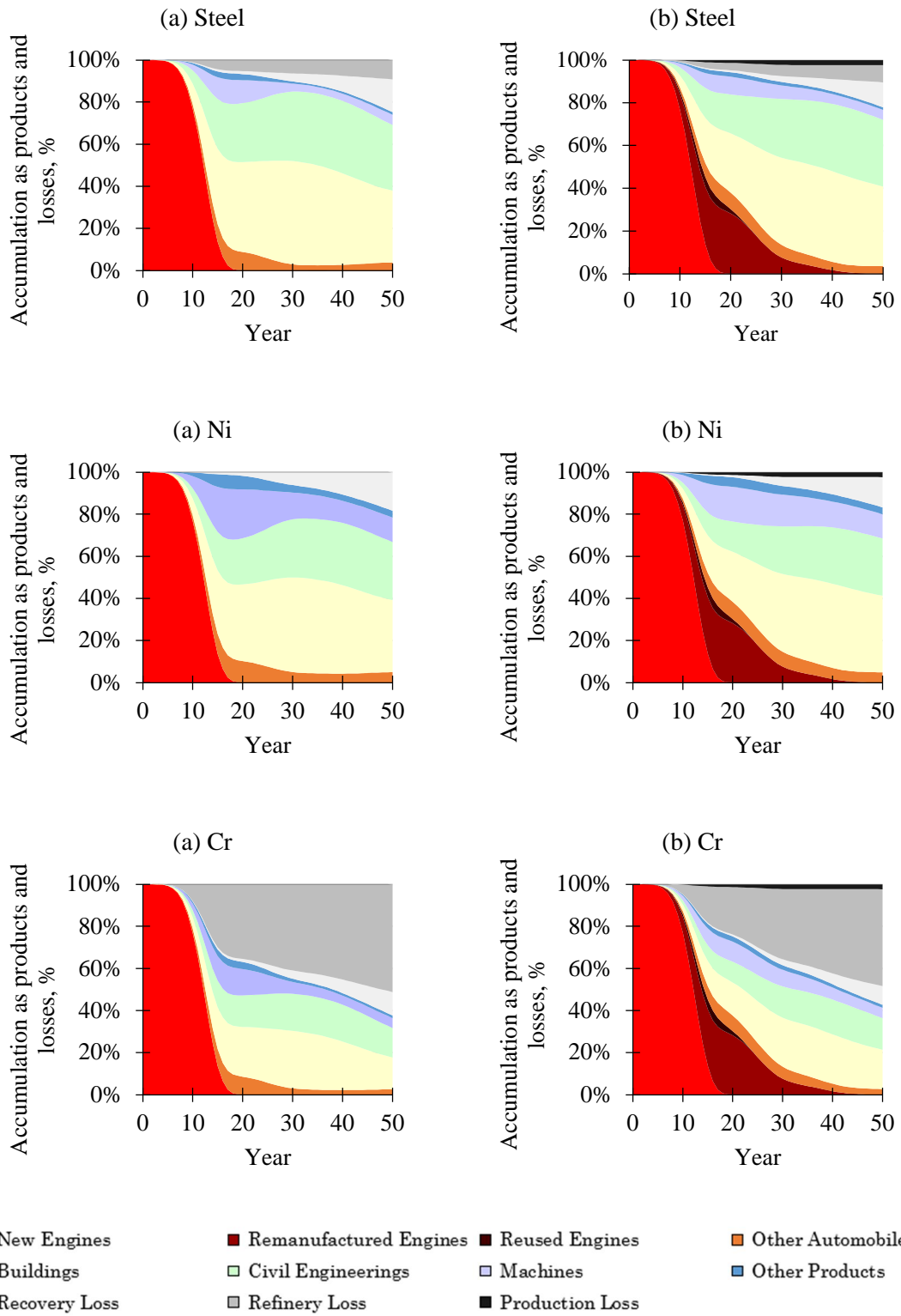


Figure 1. Transition of materials originally used for vehicle engines across products during the modeling period. Breakdown of the materials into 8 types of products and 3 types of losses.

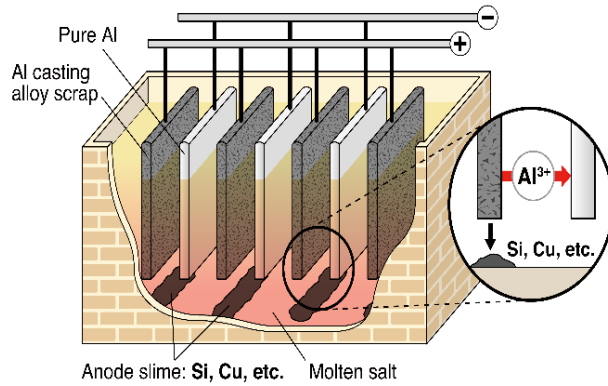


Figure 2a. The schematic and the electrochemical principle of the solid-state electrolysis process. Aluminium is dissolved from aluminium scrap and deposited on the cathode, whereas the typical alloying elements are removed as anode slime.

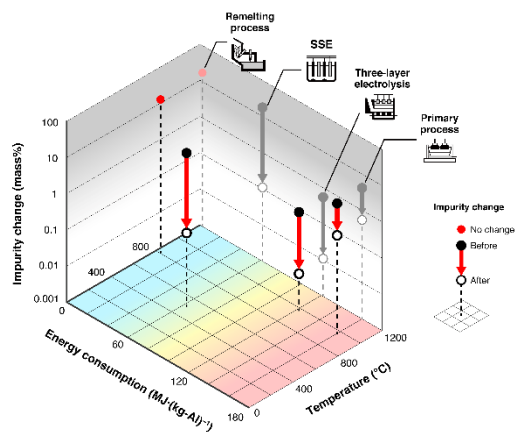
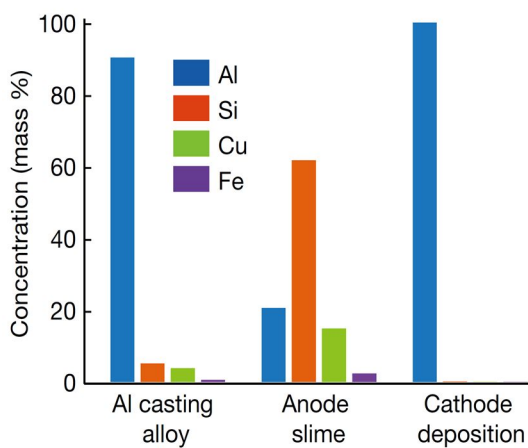


Figure 2b. The composition of electrolytic deposit, showing that the typical alloying elements were separated into the anode slim.

Figure 2c. Comparison of the solid-state electrolysis process and the industrial processes for primary aluminium production (Hall-Héroult process), purification (three-layer electrolysis) and the currently used remelting process.

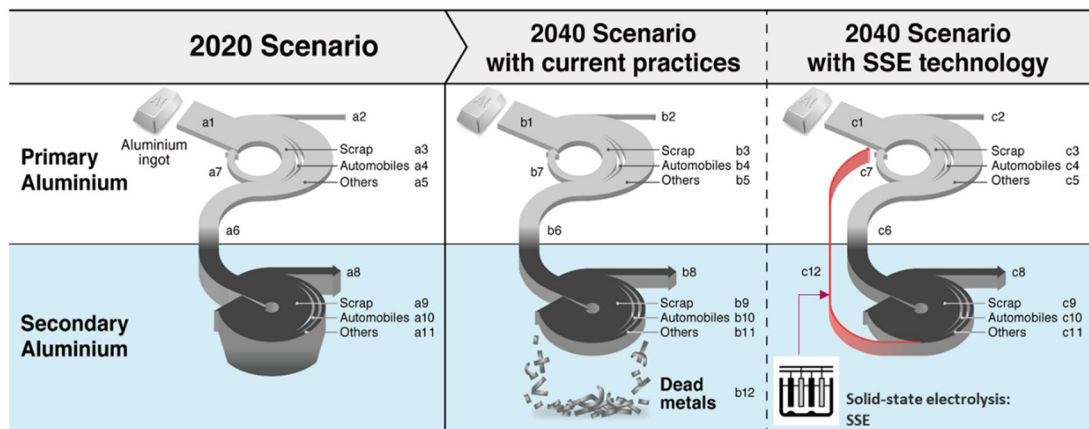


Figure 2d. Global aluminium cycle in 2020 and 2040. The diameter of the circle represents the total flow, and the height of the circle represents the volume of in-use stock. The labels a1–c12 represent numerical values of amounts for different categories.

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 Lu Xin, Zhang Zhengyang, Hiraki Takehito, Takeda Osamu, Zhu Hongmin, Matsubae Kazuyo, Nagasaka Tetsuya	4. 巻 606
2. 論文標題 A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 511 ~ 515
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-022-04748-4	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 Zhang Zhengyang, Matsubae Kazuyo, Nakajima Kenichi	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 ~ 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2件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 張政陽
2. 発表標題 物質フロー分析の発展と応用
3. 学会等名 清華大学環境学院物質フロー解析講義（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張政陽
2. 発表標題 持続可能な資源循環の実現に向けた評価指標の再考
3. 学会等名 第580回清華大学の環境科学サロン（招待講演）
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
研究協力者	松八重 一代 (Matsubae Kazuyo)	東北大学・環境科学研究科・教授 (11301)	
研究協力者	長坂 徹也 (Nagasaka Tetsuya)	東北大学・未来科学技術共同研究センター未来科学技術共同研究センター開発企画部・教授 (11301)	
研究協力者	中島 謙一 (Nakajima Kenichi)	国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環領域(国際資源持続性研究室)・主幹研究員 (82101)	
研究協力者	武山 健太郎 (Takeyama Kentaro)	東京大学・工学系研究科・特任助教 (12601)	
研究協力者	朱 鴻民 (Zhu Hongmin)	東北大学・工学研究科・工学部・教授 (11301)	

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
---------	---------

中国	清华大学	北京科技大学		
----	------	--------	--	--