

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686131

研究課題名(和文) 随伴元素に着目した金属スクラップ循環分析

研究課題名(英文) Metal scrap recycling analysis focusing on alloying elements

研究代表者

松八重 一代(MATSUBAE, KAZUYO)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50374997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円、(間接経費) 3,840,000円

研究成果の概要(和文)：WIO-MFA LPモデルを用いて廃自動車スクラップの合金元素拡散最小化を志向したスクラップソーティングについて分析を行うと、合金元素含有量が比較的少ないボディ部品、ステアリング部品、ブレーキなどは普通鋼生産に投入されるのに対し、サスペンション部品、トランスミッション、排気系部品といった合金元素随伴量が多い部品は、特殊鋼の中でも合金元素濃度の高い構造用合金鋼や軸受け鋼、ステンレス鋼へとマッチングされた。このようなマッチングでスクラップを用いることで、ELV由来鉄スクラップに随伴する合金元素の内88%がリサイクル鋼材中の合金元素成分として再び有効利用されることが示された。

研究成果の概要(英文)：The demand of alloying steel materials for automobiles has been increasing due mainly to the rapid economic growth of BRICs countries. As a result of this, secondary steel resources has been contaminated by alloying elements including Mn, Cr and Ni, and significant amount of alloying elements has been dissipated during steel recycling process. This study evaluated the current end of life vehicles recycling by means of waste input-output material flow analysis (WIO-MFA) model extended for the detailed analysis for the automobile industry. Combination of WIO-MFA and linear programming method clarified appropriate matchings of sorted parts scrap can achieve 88% of alloying elements to be utilized as the source of them for secondary steelmaking process.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：廃自動車 スクラップソーティング 鉄鋼合金 リサイクル 稀少資源有効利用

1. 研究開始当初の背景

自動車には多様な素材の部品が組み込まれており、鉄やアルミ、銅といったベースメタル、プラスチックをはじめとし、基盤に用いられるレアメタル、モーターに用いられる磁石に付随するレアアース等、多種多様なエレメントが自動車部品に随伴して存在しており、さらに自動車に用いられる鋼材中の特殊鋼比率は年々上昇傾向にある。翻って廃自動車 (End of Life Vehicle: ELV) に目を向けると、現状では解体された後、再利用可能な部品は取り外し、主要素材である鉄鋼材については冷鉄源として再資源化するか、あるいは中古車、中古部品、鉄源として輸出されている。しかし ELV スクラップを冷鉄源として利用する実態の多くは、カープレスあるいはシュレッダー屑としての電炉投入である。いずれもステンレスやばね鋼、高抗張力鋼の区別はないまま ELV スクラップとして流通している。このような ELV スクラップの電炉リサイクルでは、ステンレスに含まれるクロムやニッケル、その他特殊鋼に含まれるマンガン、タングステン等のレアメタルは回収されることなくスラグに移行・拡散したり、あるいは鋼材に含まれる不純物質として蓄積したりしていることになる。現状では一部の特殊鋼生産においてこれらのうちの何割かが再資源化の際にフェロアロイ投入代替分として有効に循環しているが、大半は未利用のまま一部はスラグに向かって拡散、一部はコンタミ要因として銑鉄等によって成分調整をなされて同じく鋼材中に拡散していることになる。

資源の大半を海外からの輸入に頼る我が国において、国内で発生する加工スクラップや老廃スクラップの有効利用は資源管理の観点からも、LCA の視点から見た温室効果ガス削減の観点からも重要であると考え。国家備蓄 7 鉱種 (ニッケル、クロム、タングステン、コバルト、モリブデン、マンガン、バナジウム) の大半が鉄鋼業で消費され、製品中の特殊鋼比率が高まる自動車産業であることを鑑み、世界有数の鉄鋼生産ならびに自動車生産国である日本において、自動車生産、廃棄時に発生するベース材料に随伴するレアメタルの持続的かつ効率的な循環を目指すことは国内問題としてのみならず、世界的な意味でもその要請は十分にある。また今後、ハイブリッド車や電気自動車の普及によって随伴する希少資源の種類と量も変化することが予想され、それらを有効に循環させるためにどのようなシステムが必要とされるのか検討を行うことは重要である。

2. 研究の目的

本研究課題は金属スクラップ循環の中でもレアメタルのキャリアとして重要な位置を占める廃自動車 (End of Life Vehicle: ELV)

に着目し、随伴するレアメタルフローの推計を行い、鉄鋼あるいは非鉄製錬で ELV がリサイクルされる際にどのようなエレメントが回収可能で、どのようなエレメントが回収不可能 (拡散) するのかを定量的に明らかにすると同時に、ELV 随伴レアメタルのさらなる有効利用に向けたシステム提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本申請課題は現状把握、分析、システム提案の 3 つのステップで研究を推進した。

現状把握においては、ELV スクラップに随伴するレアメタルに関して部品別、素材別に実測調査を踏まえた現状把握を行う。ELV スクラップの部品別各組成については携帯型組成分析計による実測調査を持って統計情報を補完する。またハイブリッド車や電気自動車将来、廃自動車として排出される際にどのようなエレメントがどの部品に随伴して資源化のルートにどれほど回るのかを調査、推計する。分析では ELV スクラップ再資源化に伴い再資源化工程で拡散、希釈によって回収不能になるレアメタル量の推定を行う。この際、積み上げ型のマテリアルフロー分析と並行して、鉄鋼資源循環分析用 WIO-MFA モデル 2) を用いたトップダウン型の分析の双方から自動車部品における各素材蓄積を推定する。さらに再資源化工程に入った際の製品への歩留まり、ダスト、ドロス、スラグといった廃棄物、副産物に向かうレアメタル量については熱力学的見地からの推定ならびに業界団体へのヒアリング調査、スラグやダスト等の組成分析を通じて解析を行う。ここではシナリオとして将来、廃棄されるであろうハイブリッド車や電気自動車についても考察を加えることができるようにモデルを整備する。

システム提案のステップでは随伴するレアメタルの組成別にスクラップの最適な区分と、再資源化工程のマッチング提案、金属資源リサイクルのシステム設計を行った

4. 研究成果

本研究担当者は WIO-MFA モデル (Waste Input-Output Material Flow Analysis Model) ¹⁾ を用いて乗用車に随伴する鉄鋼合金元素としてのマンガン、ニッケル、クロムの量を推計した ²⁻⁴⁾。

WIO-MFA 分析によって廃自動車解体処理に伴う鋼材の流れを推計した結果、2005 年に我が国では 405 万トンの鉄鋼材を含む廃自動車排出されたことが示された (Fig.1)。

通常の自動車解体プロセスでは、フロンガス、エアバッグ処理を行った後、国内外のリユース市場に向けたリユースパーツを取りのぞき、エンジン除去、触媒回収のための排気系

部品除去を行い、足回り部品の取り外しを行う。さらにハーネス、基盤、等の非鉄部品除去を行った上で、シュレッダーあるいはプレス処理を行い、電炉での再資源化が行われる。ここでは廃自動車解体処理過程において、エンジンは100%取り外しをされるものと仮定しており、それ以外の部品については車体、内装品について25%はリユースに向かうものとして推計を行った。

この仮定のもと、推計をおこなった結果、75万トンの鉄鋼材がエンジン除去プロセスで取り外されることになるが、これに随伴する合金元素フローについては後述する。自動車の構成素材のうち、最も大きな重量を占めるのはボディに用いられている鉄鋼材であり、およそ130万トンである。

Fig.1 で示した鉄鋼材の流れに随伴するマンガン、クロム、ニッケル、モリブデンの流れを推計したものを Fig.2 に示す。Fig.1 で示した405万トンの鉄鋼材に随伴してそれぞれおおよそマンガンが1.5万トン、クロムが2.7万トン、ニッケルが6千トン、モリブデンが800トン流れていることが推計された。合金の流れに着目すると、マンガンを除く合金の最も大きな流れは排気系部品、次いでエンジンパーツに付随しており、マンガンを着目するとその多くはボディに随伴して流れていることが示される。

これらの合金元素を付随する廃自動車スクラップは、現状ではプレス屑、あるいはシュレッダー屑として主に普通鋼電炉原料として再資源化されており、特に合金元素別の鉄源としての循環は行われていない。現行の資源化経路では有用な合金元素をロスする危険性があり、今後の鉄鋼合金元素有効利用及び持続可能な生産を行なっていくためには、より効率的な自動車スクラップの処理システムが必要とされることが示唆された。

またエンジンに着目した合金元素のフロー解析も行った。通常の廃自動車解体処理において、部品取りのプロセスでエンジン部品を外して、別ルートで処理を行う場合が多い。エンジンはその重量のうち約四分の一程度特殊鋼が用いられているが、これらに随伴する合金元素がどのように社会中に循環、拡散が行われているのか十分な調査はこれまでにない。ここでは使用済みエンジンのフローに着目し、エンジン部品に用いられている特殊鋼ならびにその随伴元素の流れについて概観する。

2010年のエンジン総生産量は1,926万台であり、うち自動車エンジン1,171万台、二輪自動車64万台、航空機27万台、ボイラ・原動機のうちの内燃機関664万台であり、自動車エンジンが全体の61%を占める。エンジンを構成する素材は全体重量177Kg/台のうち鉄系計は70%、非鉄(アルミ)は27%、ゴムなどの非金属3%となり、鉄系素材の内、特殊鋼は25%、普通鋼4%、鋳鉄40%である(14)。コンロッド、クランクシャフトに用い

られる快削鋼が特殊鋼の約6割を占め、他は機械構造用炭素鋼10%、ステンレス4%、耐熱鋼1%、クロム・モリブデン鋼6%、クロム鋼3%等である。

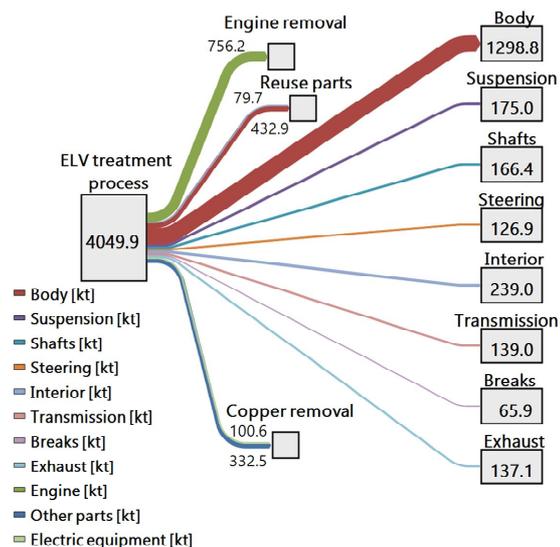


Fig.1 廃自動車解体処理に随伴する鉄鋼材の流れ

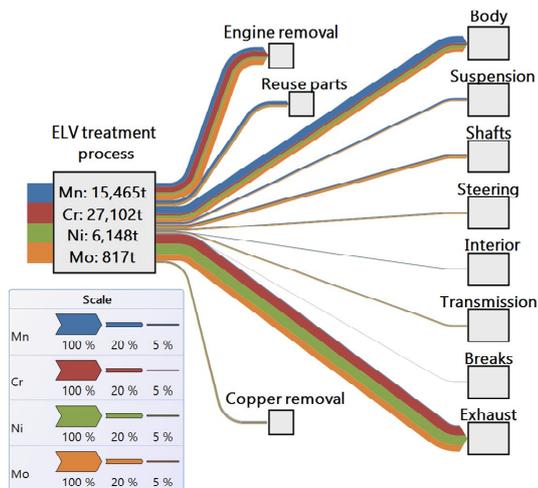


Fig.2 自動車スクラップに随伴する鉄鋼合金の流れ

廃自動車エンジンは自動車解体業者により、フロン収集、エアバッグ開放、液抜きの後、部品取り外し作業とハーネスの除去を行い、解体ガラが作成される。多くの場合、解体プロセスではニブラ等の重機を使用するが、一部ではすべて手作業で精緻に解体する事業者もある。一般的に自動車解体業ではエンジンは取り外すのみで解体作業は行っておらず、取り外したエンジンは、4~5割は中古エンジンあるいはスクラップとして海外に輸出、わずかに国内で中古エンジンとして流通するものもあるが、残りは材料リサイクルのルートに乗る。解体事業所で取り外したエンジンで再使用困難なものは、アルミと鉄を分

離してそれぞれをリサイクルされており、(1)アルミ溶解炉に投入 (2)シュレッダーに投入 (3)手解体で分離後スクラップとして売却の3つであり、主に(1)の方法がとられている。アルミ溶解プロセスでは700~800でアルミブロックを溶解しインゴットを作成し、アルミ合金メーカーに売却される。溶解プロセスではエンジンに内在するクランクシャフト、歯車、カムシャフトなどの鉄鋼部材が残存し、これらは電炉メーカーに売却されている。しかしながら随伴する合金元素を循環利用する取り組みは数社にとどまり、その量もごくわずかであった。今後、廃自動車に随伴する合金元素利用を促進するためには、エンジン部品に関わる鋼材についても循環利用する仕組み作りが重要であろう。

最後に WIO-MFA LP によって電気炉で生産される鋼材とのマッチング最適化を行った結果を Fig.3 に示す。合金元素含有量が比較的少ないボディ部品、ステアリング部品、ブレーキなどは普通鋼生産に投入されるのに対し、サスペンション部品、トランスミッション、排気系部品といった合金元素随伴量が多い部品は、特殊鋼の中でも合金元素濃度の高い構造用合金鋼や軸受け鋼、ステンレス鋼へとマッチングされた。このようなマッチングでスクラップを用いることで、ELV 由来鉄スクラップに随伴する合金元素の内 88%がリサイクル鋼材中の合金元素成分として再び有効利用されることが示された。

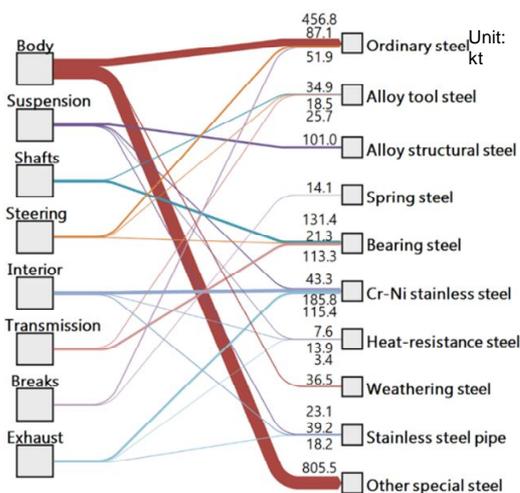


Fig.3 合金元素拡散最小化を目的関数とした時のスクラップソーティング

ELV スクラップの選別回収及び適切なリサイクル鋼材生産への投入によって、無視できない量の合金元素を有効にリサイクル可能であることが明らかとなった。資源小国である我が国においては、限りある資源の有効利用が求められ、ELV スクラップは有用な都市鉱山であることが示唆された。また、世界における自動車保有台数の急激な増加からも、今後のELV 発生量増加が予想されることから、

適切なELV 処理を行うことで、世界的にも合金元素の有効利用可能性が期待される。

参考文献:

- 1) S. Nakamura and K. Nakajima: Materials Transactions 46(12): 2550-2553 (2005)
- 2) H. Ohno, K. Matsubae, K. Nakajima, S. Nakamura, and T. Nagasaka, Journal of Industrial Ecology, 2014, In press
- 3) S. Nakamura, Y. Kondo, K. Matsubae, K. Nakajima, T. Tasaki, and Tetsuya Nagasaka, Environmental Science and Technology, Vol.46(17) pp. 9266-9273, (2012)
- 4) K. Nakajima, H. Ohno, Y. Kondo, K. Matsubae, O. Takeda, T. Miki, S. Nakamura, and T. Nagasaka, Environmental Science & Technology, 2013, 47, 4653-4660

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12件)

1. 山末英嗣, 松八重一代, 中島謙一, 醍醐市朗, 石原慶一: 「使用済み自動車から得られる鉄スクラップの関与物質総量」, 鉄と鋼, Vol.100, No.6, (2014), pp.774-783 掲載決定 査読有
2. 中島謙一, 南斉規介, 松八重一代, 長坂徹也: "グローバルサプライチェーンを通じた鉄の国際移動量", 鉄と鋼, 6(100), 2014 掲載決定 査読有
3. 松八重一代, 飯塚陽祐, 長村弘樹, 大野肇, 中島謙一, 長坂徹也, 廃自動車由来の鉄鋼スクラップソーティングのコストベネフィット解析, 鉄と鋼, Vol.100 No.6 (2014) 掲載決定 査読有
4. 松八重一代, 飯塚陽祐, 大野肇, 平木岳人, 三木貴博, 中島謙一, 長坂徹也, 自動車由来鉄鋼スクラップ再資源化における鉄鋼合金元素分配傾向, 鉄と鋼, Vol.100 No.6 (2014) 掲載決定 査読有
5. H. Ohno, K. Matsubae, K. Nakajima, S. Nakamura, and T. Nagasaka, Unintentional Flow of Alloying Elements in Steel during Recycling of End-of-Life Vehicles, Journal of Industrial Ecology, 2014, In press, DOI: 10.1111/jieec.12095 査読有
6. 松八重一代, 大野肇, 中島謙一, 中村慎一郎, 長坂徹也, 自動車リサイクルにおける鉄鋼合金のフロー解析, ふえらむ, 18(12), pp.65-69, (2013) 査読無
7. Kenichi Nakajima, Hajime Ohno, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Osamu Takeda, Takahiro Miki, Shinichiro Nakamura, and Tetsuya Nagasaka, Simultaneous MFA of nickel, chromium and molybdenum used in alloy steel by means of input-output analysis, Environmental Science & Technology,

- 2013, Publication Date (Web): March 25, 2013 (Article) DOI: 10.1021/es3043559is, 査読有
8. Kondo, Y., Nakajima, K., Matsubae, K. and Nakamura, S.: The anatomy of capital stock: input-output material flow analysis (MFA) of the material composition of physical stocks and its evolution over time, *Revue de Metallurgie* 109, 293-298, 2012, <http://dx.doi.org/10.1051/metal/2012022> 査読有
 9. Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Tasaki Tomohiro and Tetsuya Nagasaka,: Quality- and dilution losses in the recycling of ferrous materials from end-of-life passenger cars: input-output analysis under explicit consideration of scrap quality, *Environmental Science & Technology*, 2012, 46 (17), 9266-9273 <http://dx.doi.org/10.1021/es3013529> 査読有
 10. Lu X., Hiraki T., Nakajima K., Takeda O., Matsubae K., Zhu H.M., Nakamura S., Nagasaka T. (2012) Thermodynamic analysis of separation of alloying elements in recycling of end-of-life titanium products. *Separation and Purification Technology*, 89, 135-141 査読有
 11. Lu X., Nakajima K., Sakanakura H., Matsubae K., Bai H., Nagasaka T. (2012) Thermodynamic estimation of minor element distribution between immiscible liquids in Fe-Cu-based metal phase generated in melting treatment of municipal solid wastes. *Waste management*, 32, 1148-1155 査読有
 12. 松八重一代, 都市鉱山としての自動車スクラップと随伴合金フロー, *金属*, 82(7), pp.47-50, (2012) 査読無
〔学会発表〕(計 9 件)
 1. 山末英嗣, 中島謙一, 松八重一代, 村上進亮, 石原慶一: 「日本におけるニッケルおよびステンレス鋼生産の資源端重量」, 日本 LCA 学会春季大会, 東京, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 2014 年 3 月 4-6 日
 2. 中村哲也, 松八重一代, 大野肇, 平木岳人, 中島謙一, 中村慎一郎, 長坂徹也: 動的 WIO-MFA (MaTrace) を用いたアルミニウム新地金消費量の削減ポテンシャルの評価, 日本 LCA 学会春季大会, 東京, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 2014 年 3 月 4-6 日
 3. 大野肇, 松八重一代, 中島謙一, 近藤康之, 中村慎一郎, 長坂徹也: WIO-MFA モデルによる鉄鋼合金元素有効利用に向けた鉄スクラップリサイクルシステムの構築, 日本 LCA 学会春季大会, 東京, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 2014 年 3 月 4-6 日
 4. 大塚祐登, 大野肇, 松八重一代, 中島謙一, 南齋規介, 長坂徹也: ニッケルの持続可能な資源利用に向けた国際サプライチェーン分析, 日本 LCA 学会春季大会, 東京, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 2014 年 3 月 4-6 日
 5. 松八重一代, 大野肇, 長坂徹也, 中島謙一, 中村慎一郎: 自動車リサイクルにおける鉄鋼合金のマテリアルフロー解析, 2013 年金研ワークショップ 「金属材料の高度利用, 省資源化, 及び循環利用に資する分析・解析技術」 2013 年 12 月 16 日, 東北大学金属材料研究所, 仙台
 6. 山末英嗣, 中島謙一, 醍醐市朗, 松八重一代, 石原慶一: 「自動車から得られる鉄スクラップの関与物質総量」, 日本鉄鋼協会秋季大会, 金沢大学, 2013 年 9 月 17-19 日
 7. Eiji Yamasue, Shinsuke Murakami, Ichiro Daigo, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae and Keiichi N Ishihara: "Evaluation of environmental conscious materials in terms of TMR", *Ecomaterials Conference & Exhibition 2013 (ICEM11)*, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam, 11-14 Sep. 2013
 8. Hajime Ohno, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Shinichiro Nakamura and Tetsuya Nagasaka, *Input-Output Approach for Development of Appropriate Recycling System of End of Life Vehicles Aimed at Efficient Utilization of Steel Alloying Elements*, 21st International Input-Output Conference, Kitakyusyu, Japan, (7-12, July, 2013)
 9. K.Nakajima, K.Nansai, K.Matsubae, E.Yamasue, and Y.Kondo: "Global flow of metals and phosphorus: Supply chain analysis for sound resource logistics", 2013 ISIE conference, Ulsan, Korea, (2013/6/21-24, University of Ulsan, June 25~28, 2013)
- 〔図書〕(計 1 件)
- UNEP (2013) *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van

Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.;
Hagelüken, C. (Contributors: Kazuyo
Matsubae, Shinsuke Murakami, Kenichi
Nakajima) [208 ページ]

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松八重 一代 (Matsubae, Kazuyo)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50374997