

特集記事・10

我が国のエネルギーを支える鉄鋼技術
【使う】

自動車リサイクルにおける鉄鋼合金のフロー解析

Material Flow Analysis on Steel Alloying Element Focusing on End of Life Vehicles Recycling

東北大学 大学院工学研究科
准教授

松八重一代

Kazuyo Matsubae

東北大学 大学院環境科学研究科
博士後期課程学生

大野 肇

Hajime Ohno

独立行政法人 国立環境研究所
主任研究員

中島謙一

Kenichi Nakajima

早稲田大学 政治経済学術院
教授

中村慎一郎

Shinichiro Nakamura

東北大学 大学院工学研究科
教授

長坂徹也

Tetsuya Nagasaka

1 はじめに

鉄鋼生産プロセスは合金元素としてマンガン、ニッケル、クロム、モリブデン、タンゲステン、バナジウム等の稀少資源国内需要の大半を消費している。マンガン、ニッケル、クロムをはじめとした、各種レアメタルを鉄鋼合金元素として多く含んだ特殊鋼は、メーカーの手を離れた段階からほとんど追跡不可能な状態になっている。二次、三次加工工程を経て複合系製品に加工されて使用され、ライフサイクルを終えた段階では、解体されてマグネットにつくつかつかないかという簡単な磁気分離選別で非鉄金属や非金属と分離され、ステンレス鋼を除いては、ほとんどが一般の鉄スクラップに紛れ込んでしまう。インフラ素材として鉄鋼が必要な国にとって、鉄スクラップは極めて貴重な資源であるにもかかわらず、鉄スクラップが深刻なレアメタル汚染にさらされているのが実情である。

自動車産業は我が国の基幹産業であることは疑いなく、中でも特殊鋼用途に目を向けると自動車に用いられる素材のうち特殊鋼比率は年々上昇傾向にある¹⁾。しかしながら一方で、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。しかし廃自動車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り、この時、廃自動車中の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、タンゲ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²⁻⁴⁾。これらの鉄鋼合金元素の循環利用効率を上げることは

1. 日本全体における稀少資源の利用効率を上げることに
つながる。

2. 鉄鋼材質の劣化を低減する。

という二点につながり、ライフサイクル視点から見た鉄鋼材、ならびにそれらを用いる製品の環境負荷低減への貢献は大きいと言える。

本稿では、鉄鋼合金元素のキャリアとしての自動車に着目し、鉄鋼資源循環における廃自動車スクラップ利用が引き起こす合金の拡散、散逸について解説する。

2 廃自動車の処理と
再資源化に関する国内外の動向

国内ではこれまでに様々な廃自動車の処理と、再資源化に係わる実態調査ならびにマテリアルフロー研究がなされてきた。たとえば特殊鋼倶楽部は自動車の技術変化に伴う特殊鋼使用実態調査を行い、特殊鋼及び自動車の市場動向の経年変化を追うと共に、特殊鋼の最大需要分野である自動車部門における特殊鋼の利用について、自動車の実解体及び成分分析によって各パーツの使用鋼種を断定し実態の把握を行っている⁵⁾。過去の調査との結果の比較も行い、自動車産業の技術変化に関して検討も行っている。また財団法人 機械システム振興協会は電気炉メーカーに対して自動車スクラップ (Aプレス) の利用状況に関するアンケートを行い、その現状や問題点についてまとめると共に、解体業者にもアンケートを行い、ガラス、バンパー、樹脂等の非金属部品の取り外しの有無やリサイクル方法に関してもまとめている。また、解体業者において自動車の解体も行い、実際の解体処理によって

電気炉へ向かうもの、取り外されるものを区別し更に電気炉での溶解とその成分分析も行っている。最終的に最適解体システムを検討し、自動車メーカーへの解体容易性を求める提言がなされている⁶⁾。他にも環境省事業として使用済み自動車再資源化の効率化に向けたいくつかの調査、研究報告が行われている^{7,8)}。

これらの先行調査において、主に着目されているのはASRのような資源化困難物の最終処分量の最小化、自動車スクラップ全部利用における銅の混入、基盤に用いられている希少金属類の回収、資源化等である。構成重量として最も大きな位置を占める鉄鋼材、アルミ材については現行のリサイクルシステムにおいて循環利用が十分になされていると見なされている。しかしながらこれらのベースメタルに随伴する合金元素に目を向けると、「十分な循環」がなされているとはいえない⁹⁻¹¹⁾。アルミニウムについてはベースメタルの資源化の際に合金元素のコンタミが循環を阻害することが指摘されており¹²⁾、国内外で合金元素別のソーティング技術の開発と導入が進められつつある¹³⁾。鉄鋼資源に目を向けると、ステンレスについては磁選によりオーステナイト系ステンレスの回収とニッケルの活用はこれまでも行われてきていたものの、その他合金については選別技術ならびに市場が未発達であることから、老廃スクラップについてはほとんど行われていないのが現状である⁸⁻¹⁰⁾。

市場で取引されるスクラップは規格に基づき分類、選別が行われている。日本の場合、鉄スクラップ規格としては、スクラップ検収規格¹⁴⁾があるが、これは形状に基づく規格である。一方で、JISで不純物や合金成分に着目されている規格も存在している。国内ではJISに基づく鉄くず分類基準において合金鋼くずは15種類に分類されており¹⁵⁾、またEUにおいても銅、スズ、硫黄、リンの他にクロム、ニッケル、モリブデン含有率について規定したスクラップ分類がある¹⁶⁾。しかしながら合金種によるスクラップ分類に従った市場取引は限られた場所でのみ行われており、鉄鋼合金種別のソーティングとその取引は成熟しているとはいえない。このような現状を受け、UNEPの資源パネルにおいては、持続可能な資源管理の科学的推進力として、資源採掘や金属製造に伴う環境影響¹⁷⁾、金属リサイクルの未成熟度¹⁸⁾とリサイクルの高度化への期待¹⁹⁾等を発信している。

著者らは日本鉄鋼協会環境・エネルギー・社会工学部会の下、素材産業から見た自動車リサイクル研究会主査ならびに委員として平成23年度より活動しており、今年で最終年度を迎える。研究会ではこれまで鉄鋼資源循環を量から質の観点で見直すことをすすめ、研究会委員と議論を重ねてきた。次章で自動車に随伴する鉄鋼合金元素の量とリサイクルにおける散逸について述べる。

3 自動車に随伴する鉄鋼合金元素

3.1 WIO-MFAモデルを用いた推計

廃自動車循環システムには大きく分類して以下の4者が関わっている。

1. 素材産業（自動車鋼材、部品生産に関わる転炉業、鋳造業、非鉄産業）
2. 組み立て産業（自動車製造業）
3. 廃自動車処理業者（解体業者、破砕業者、スクラップ流通業者、中古車ディーラー）
4. 再資源化を担う産業（電炉鉄鋼業、加工スクラップを用いる鋳造業、非鉄産業）

従来はこれらの4者の間にベースマテリアルに随伴するエレメントに関わる情報が共有されることは一部の例外を除いてほとんどなかった。そのため自動車の単位あたりの合金元素随伴量についてよく整った統計は存在しない。しかしながら鉄鋼業におけるフェロアロイ使用量に関しては、統計資料がよく整備されており、製造鋼種別の組成規格情報を得ることができる²⁰⁾。また日本全体の経済構造を俯瞰する統計として国際的に比較しても高い精度をもった産業連関表が整備されている²²⁾。著者らはこれらを組み合わせて整備したトップダウン型のMFA手法として、WIO-MFAモデル (Waste Input-Output Material Flow Analysis Model)²³⁻²⁶⁾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^{10,27,28)}。WIO-MFAモデルは、国家統計データである産業連関表を拡張し、物量情報を組み合わせることで、各産業部門が生産する製品にどのようなマテリアルが、原材料、部品・中間製品等を経由して組み込まれているのかのフロー量情報を定量的に明らかにするモデルである。

WIO-MFA分析によって合金元素がどの経路で乗用車へ組み込まれたのかを遡及分析によって求めた結果を図1に示す。乗用車の平均重量は一台1050kgと推計され、鉄鋼合金元素としてのマンガン、クロム、ニッケルはそれぞれ4.19kg、6.34kg、1.50kgと推計された。合金元素成分に関しては、1台当りに数kgと非常に少量であるが、年間の国内における自動車生産台数が1千万台程度であることを考えると、自動車産業が相当量の合金元素を消費していることがわかる。

乗用車に合金元素が流入する経路としては自動車部品、自動車用内燃機関、自動車車体といった中間製品が多くを占めている (図2、3)。その他に、乗用車生産に直接投入される鉄鋼材に随伴して流入するものも存在し、特に、マンガンについては機械構造用炭素鋼、溶接用高張力鋼、クロム及びニッケルはステンレス鋼、構造用合金鋼に随伴して投入されていることが明らかとなった。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、あるいはシュレツ

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。

3.2 中古エンジンのフローと鉄鋼合金元素の流れ

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。

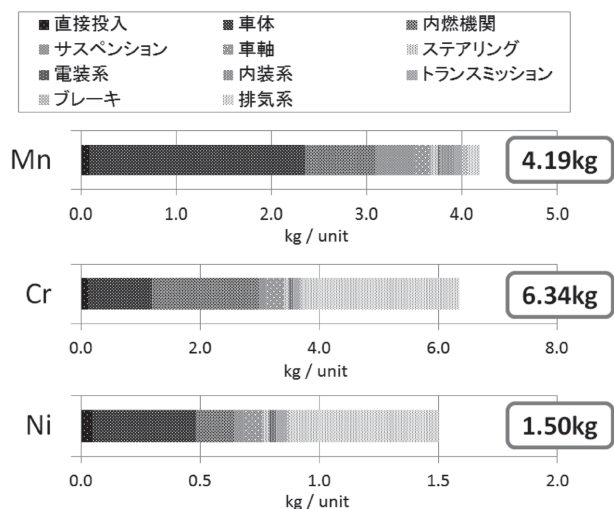


図1 WIO-MFAモデルによる自動車一台あたりに随伴する鉄鋼合金元素の選及分析

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1,1712万台、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^{29,30)}。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⁸⁾。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(図4)。

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シュレッターに投入 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

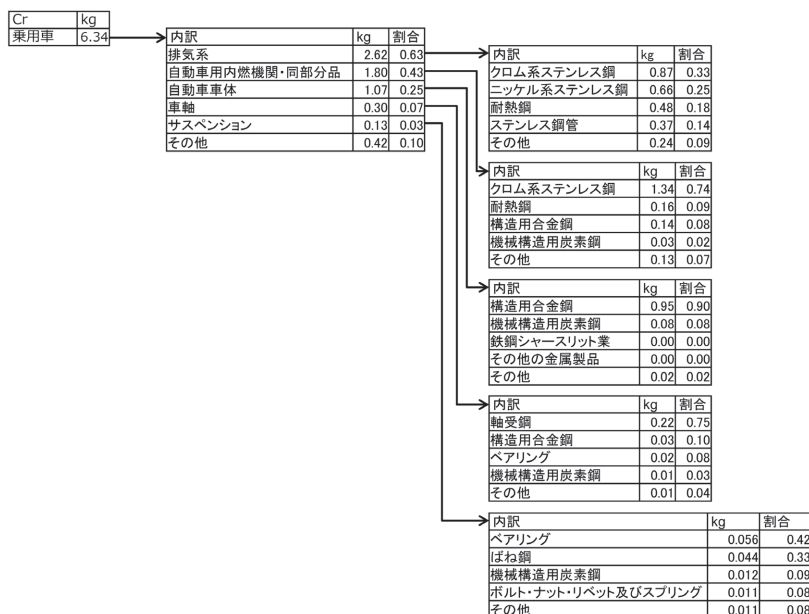


図2 WIO-MFAモデルによる自動車一台あたりに随伴するクロムの選及分析



図3 WIO-MFAモデルによる自動車一台あたりに随伴するニッケルの選及分析

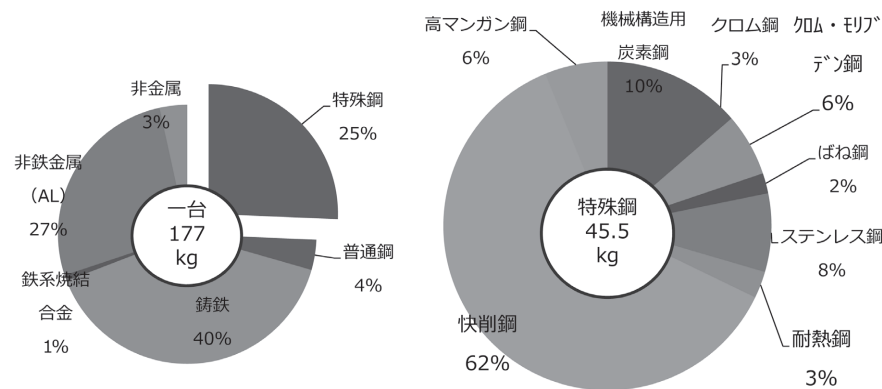


図4 自動車エンジンに用いられる素材ならびに特殊鋼内訳

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。

廃自動車リサイクルにおいて、随伴する合金元素を鉄鋼資源循環の中で有効に利用する比率を上げようとする場合は、エンジン解体業者の一部でも行われているように手選別によるターゲット素材の取り外し、当該合金元素を有効に活用できる需要家への売却が求められる。ただし手選別による人件費コスト増が懸念されることから、大型シュレッダーによりエンジン周り、排気処理装置周辺の鉄鋼材についても併せて処理後、合金元素ごとの機械選別処理により合金組成別のソーティングを行うことが提案される。しかしながらこれを

行うには鉄鋼合金元素毎の機械選別処理技術の開発、ならびにソーティング後の鉄鋼スクラップを適切に取引するマーケットの構築が望まれる。

4 おわりに

ベースマテリアルに随伴するレアメタルが再資源化の際のコンタミやトラップエレメントとしてリサイクルの際の阻害要因となったり、あるいはものによっては無視できない量のレアメタルがスラグや非鉄製錬鉱滓に向かうことで拡散したりする事象は我が国の特殊鋼生産や高機能性材料生産に傾斜する産業構造から引き起こされるものであり、世界的にはまだ類のないものであろう。しかしながら欧米諸国ならびにBRICS諸国が今後、技術進歩や需要構造の変化に伴い現在の我が国で抱えるベースマテリアルの随伴元素によるコンタミや汚染等の問題が近い将来に起こる可能性は十分にある。そ

の際に先駆的にそのような随伴元素管理をどのようにするべきか、モデルケースとなるシステム提案を行うべきである。我が国の自動車リサイクル事業において求められるのは、廃自動車スクラップからの鉄鋼合金元素の「抽出」ではなく、循環ループの中でのスクラップの発生と各種再資源化プロセスのマッチングを行うことで、資源の拡散を防ぎ、持続的な資源循環を促すシステムであろう。

我が国基幹産業である自動車ならびに鉄鋼業での資源のさらなる有効利用率の向上、社会全体の環境負荷低減に寄与するシステム構築に向けて本稿がわずかでも貢献できれば望外である。

謝 辞

本稿の一部は環境省平成23年度自動車リサイクル連携高度化等支援事業、科研費若手研究A (23686131)、JST-RISTEXの助成支援を受けております。サンプル採取、ならびに溶解実験、エンジン部品フロー調査で、西日本オートリサイクル株式会社、株式会社大同キャスティングス、株式会社青南商事、鉄リサイクリングリサーチ株式会社 林誠一氏にお世話になりました。

ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟, 鉄鋼統計要覧
- 2) 松八重(横山) 一代, 中島謙一, 小野恭平, 中村慎一郎, 長坂徹也: 鑄造工学, 80 (2008) 6, 330.
- 3) 横山一代, 中島謙一, 中村慎一郎, 長坂徹也: 日本エネルギー学会誌, 87 (2008) 4, 243.
- 4) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae and T.Nagasaka: Environmental Science and Technology, 45 (2011) , 4929.
- 5) 平成13年度自動車の技術変化に伴う特殊鋼使用実態調査結果報告書, 社団法人 特殊鋼倶楽部 調査委員会, (2002)
- 6) 自動車リサイクルに係る最適解体システム等に関する調査研究報告書, 財団法人 機械システム振興協会, (2005)
- 7) 平成20年度環境省請負業務結果報告書 使用済み自動車再資源化の効率化及び合理化等推進調査, 財団法人 日本環境衛生センター, (2009)
- 8) 平成23年度先進的金属リサイクル技術開発等事業 使用済み自動車由来のスクラップの高度有効利用に関する調査事業業務報告書, 東北大学, (2012)
- 9) I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: Substance Flow Analysis of Chromium and Nickel in the Material Flow of Stainless Steel in Japan, Resources Conservation and Recycling, 54 (2010) 11, 851.
- 10) H.Ohno, K.Matsubae, K.Nakajima, S.Nakamura and T.Nagasaka: Journal of Industrial Ecology, Accepted.
- 11) H-W.Ma, K.Matsubae, K.Nakajima, M-S.Tsai, K-H. Shao, P-C.Chen, C-H.Lee and T.Nagasaka: Resources, Conservation and Recycling, 56 (2011) , 134.
- 12) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae, S.Nakamura and T.Nagasaka: Environ. Sci. Technol., 44 (2010) 14, 5594.
- 13) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成22年度～24年度成果報告書 省エネルギー革新技術開発事業実用化開発フェーズ アルミニウム資源循環の次世代プロセス, (2013)
- 14) スクラップ検収規格,
<http://www.tetsugen.gol.com/kikaku/>
- 15) 日本工業規格 鉄くず分類基準,
<http://kikakurui.com/g2/G2401-1979-01.html>
- 16) European Steel Scrap Specification, <http://www.eurofer.org/eurofer/docs/EurSteelScrapSpec.pdf>
- 17) Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, UNEP, (2013)
- 18) Recycling Rates of Metals, UNEP, (2011)
- 19) Metal Recycling, UNEP, (2013)
- 20) フェロアロイ・ハンドブック, 日本フェロアロイ協会, (2012)
- 21) JISハンドブック 鉄鋼, 日本工業規格会, (2012)
- 22) 平成12年産業連関表, 総務省, (2005)
- 23) S.Nakamura and K.Nakajima: Materials Transactions, 46 (2005) 12, 2550.
- 24) K.Nakajima and S.Nakamura: Journal of the Japan Institute of Metals, 70 (2006) 8, 618.
- 25) S.Nakamura, K.Nakajima, Y.Kondo and T.Nagasaka: Journal of Industrial Ecology, 11 (2007) 4, 50.
- 26) S.Nakamura, S.Murakami, E.Nakajima and T.Nagasaka: Environmental Science & Technology, 42 (2008) 10, 3843.
- 27) S.Nakamura, Y.Kondo, K.Matsubae, K.Nakajima, T.Tasaki and T.Nagasaka: Environmental Science and Technology, 46 (2012) 17, 9266.
- 28) K.Nakajima, H.Ohno, Y.Kondo, K.Matsubae, O.Takeda, T.Miki, S.Nakamura and T.Nagasaka: Environmental Science & Technology, 47 (2013) , 4653.
- 29) 経済産業省, 機械統計年報
- 30) 一般社団法人 日本自動車工業会, 自動車統計月報 (2013年9月2日受付)