



# 鋼材循環利用における環境負荷誘発量の解析— 自動車に易解体設計導入した場合の 間接環境負荷低減効果の評価

醍醐 市朗\*<sup>1,2</sup>・藤巻 大輔\*・松野 泰也\*・足立 芳寛\*

Assessing Environmental Impact Associated with Cyclic Use of Steels—Indirect Reduction Potential of Environmental Impacts by the Introduction of Easy Disassemble Design for Automobiles

Ichiro DAIGO, Daisuke FUJIMAKI, Yasunari MATSUNO and Yoshuhiro ADACHI

**Synopsis** : Promotion of recycling may cause the increase in concentration of undesirable tramp elements in steel scraps. In the future, some of the steel scraps may be unusable due to the high concentration of tramp element. So, the introduction of new technologies, such as easy disassembly design, that enhances the separation of tramp elements from steel scraps at the end-of-life of products could increase the maximum recyclable ratio of steel scraps. This could indirectly lead to the reduction of environmental impacts caused by crude steel production.

In this study, the indirect reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions by the introduction of easy disassembly design for automobiles was analyzed. The dynamic model that has been developed by the authors in the previous paper was used for assessing the reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions. It was found that the reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions by the introduction of easy disassembly design for automobiles in 2010 were up to 0.62 t-CO<sub>2</sub> and 0.98 t-CO<sub>2</sub> per automobile, depending on scenario. There was little reduction potential of CO<sub>2</sub> if the concentration of tramp element (Cu) in automobile scraps was more than 0.5 wt%.

**Key words**: CO<sub>2</sub>, design for environment (DfE), easy disassembly design, dynamic model, LCA, steel recycling

## 1. 緒言

鉄鋼材は、年間生産量が大きく、リサイクル率も高い材料であり、我が国における循環型社会構築の規範たる材料と位置づけられる。しかしながら、スクラップの再利用が促進されると、CuやSn等のトランプエレメントの濃化も促進され、再生鋼材に表面赤熱脆性等の悪影響が生じることが知られている<sup>1)</sup>。スクラップ中に銅が混入する原因は、使用済み製品から鉄スクラップを回収する際に、ハーネスやモーター等の銅を含有する部品がスクラップ塊中へ混入することにある。

易解体設計のようなリサイクル支援技術を製品に導入すれば、使用済み製品をリサイクルする際に、スクラップへの不純物質の混入が低減され、鉄鋼材の循環利用による品位劣化が抑制されると考えられる。それにより、将来、国内における鉄スクラップ利用可能量が增大し、間接的に粗鋼の生産により誘発される環境負荷が低減される効果があると考えられる<sup>2)</sup>。特に、自動車は、国内における鋼材消費量が大きく、老廃スクラップ排出量も大きい。しかしながら現状では、自動車の廃棄・リサイクルの際に、ハーネスやモーターに使われていた銅がスクラップ塊中へ混入す

る割合も相対的に大きい。

自動車に易解体設計を導入することで、自動車の老廃スクラップ中に混入する銅成分を低減することができれば、将来の各年における国内鉄スクラップ利用可能量が増大し、間接的に粗鋼の生産により誘発される環境負荷が低減される効果は大きいと考えられる。既存のライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, LCA) では、このようなスクラップに不純物が混入することを抑制することによる、環境負荷低減効果を評価することは困難であった<sup>3)</sup>。

そこで、本論文では、別報<sup>2,4)</sup>において構築した動態モデルを用い、自動車へ易解体設計が導入された場合の環境負荷削減ポテンシャルを解析した。そして、環境負荷削減の観点からの技術目標値の評価を行った。

## 2. 解析方法

### 2.1 動態モデル

本研究で用いた、別報<sup>2,4)</sup>において構築された動態モデルの概要を以下に記す。

まず、①過去から現在までに消費された鋼材量の経年データ、②過去から現在までに消費された鋼材の持つ品位

平成 16 年 5 月 6 日受付 平成 16 年 7 月 28 日受理 (Received on May 6, 2004, Accepted on July 28, 2004)

\* 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

\* 2 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Science, Kyoto University)

の経年データ、③将来に消費される鋼材量の予測値、④将来に消費される鋼材が要求する品位、⑤スクラップ中への銅成分の巻込率の経年データ、の5つのデータを収集する。次に、将来のある時点に発生するスクラップの量と品位を①、②、③、⑤を用いて推計し、④から得られる当該時点に必要とされると想定された鋼材の量と品位との間で、需給マッチングをおこなう。これより、当該時点におけるスクラップの最大利用可能量とヴァージン材である銑鉄の必要生産量が導出される。最後に、スクラップの最大利用可能量と銑鉄生産必要量から、当該時点における鋼材生産により誘発される環境負荷量が算出される。なお、本研究で用いたデータは、別報<sup>2)</sup>にて採用した値を用い、①と②はそれぞれ統計データと既往研究から得て、③と④はシナリオごとに想定し、⑤は過去から将来に渡って一定と仮定し、推計値と既往研究の値が合致するように算出した。

この動態モデルは、将来の各時点でのスクラップと鋼材需要の量と質の両面での需給バランスを解析するため、スクラップ中への銅成分の巻込率が変化したときの、リサイクル量の増加分ならびに、銑鉄生産必要量の回避分を算出できる。よって、スクラップ中への銅成分の巻込率が変化した際の、環境負荷削減ポテンシャルを導出することができる。

## 2.2 基準（ベースライン）の設定

上記動態モデルを用い、2000～2030年における我が国の各年におけるスクラップの最大利用可能量と銑鉄生産必要量、そして我が国における全粗鋼生産により誘発される環境負荷量の経年変化を解析した。この、基準（ベースライン）となる将来の各年における環境負荷誘発量は、別報<sup>2)</sup>で設定した以下の2つのシナリオに基づいて解析を行った。

### (A) 高品位なスクラップが輸出されるシナリオ

2000年以降の鋼材の消費量は、2000年の消費量のまま推移する。近年の中国における鉄源需要の急激な増大から、中国における高品位なスクラップの需要を見込み、2001年以降の輸出スクラップは、社内リターンスクラップなどの品位の高いものから順に輸出される。

### (B) 鉄鋼材の需要が減少するシナリオ

1999年以降の建設物の寿命が3倍に長寿命化されると仮定し<sup>5)</sup>、建設用鋼材の需要が縮小する。建設用鋼材の需要は、人口変動も考慮した上で、一人当たりの建築床面積が一定となるようにする。

## 2.3 自動車へ易解体設計技術を導入した場合の環境負荷低減量の解析

続いて、上記のシナリオA、Bにおいて、将来のある年に自動車に易解体設計を導入した場合の、我が国の粗鋼生産により誘発される環境負荷量の経年変化を解析した。

自動車は、新規に製造され社会に投入された後、ある程度の時間を経て廃棄される。したがって、ある年に自動車

に易解体設計が導入された場合でも、自動車の老廃スクラップ中に銅が混入されるのが抑制され、鉄スクラップ利用可能量が増大し、粗鋼生産により誘発される環境負荷が低減される効果が現れるのは、易解体設計の導入年から数年経った後である。そこで、将来のある年に、パルスの自動車に易解体設計が導入されたと仮定し、その後の各年における鉄スクラップ利用可能量、粗鋼生産により誘発される環境負荷量の経年変化を解析した。そして、基準となる環境負荷誘発量（ベースライン）と比較することにより、易解体設計による環境負荷低減効果を算出した。このような解析をすることにより、ある年に自動車に易解体設計を導入した場合の、自動車一台あたりの環境負荷低減効果を定量的に把握することが可能になる。なお、本論文では、環境負荷としてCO<sub>2</sub>排出量を検討した。

将来の各年において日本国内で新規投入される乗用車は、2000年の台数に等しいとし、毎年462万台の新規登録台数があると仮定した<sup>6)</sup>。そして、新規に投入される乗用車は、一定の寿命分布に従って廃棄されるとした。なお、寿命分布は、過去の統計データ<sup>6)</sup>を用い新規投入台数、存在台数、廃棄台数が合致するように分布関数のパラメータを推計することにより得た。

本論文では、自動車に易解体設計を導入する年を2010年とした。2010年に社会に投入された自動車は、Fig. 1に示すように2011年以降の各年において寿命分布に応じて廃棄される。2030年には96%が廃棄されることとなる。

廃棄される自動車は、現行の廃自動車中間処理される割合に応じて、プレス処理、シュレッダー処理されることにした。現行の処理での、A-プレスおよびA-シュレッダーの平均銅含有濃度を、Table 1に示す。それに対して、易解体設計の導入により、中間処理前にハーネスなどの銅含有部品が容易に除去され、A-プレスの平均銅含有濃度が減少するものとした。最も高い分離能を有する場合には、銅含有部品が完全に除去され、銅含有濃度に関しては製造された鋼材の品位のままスクラップが回収される。その場合、スクラップのCu含有濃度は0.03%となる<sup>2)</sup>。本論文で

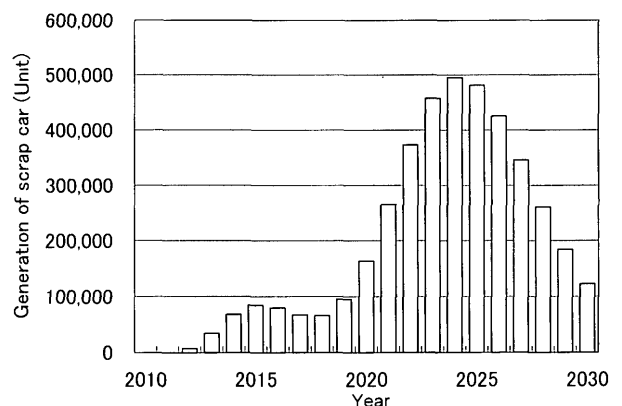


Fig. 1. Lifetime distribution of automobiles produced in 2010.

Table 1. Average Cu concentration (wt%) in each scrap from automobiles

	Average concentration (wt%)
A-Press	2.80 <sup>7)</sup>
A-Shredder	0.425-0.430 <sup>*</sup>

\* This value is calculated by the weight of ordinal steel and special steel in automobiles produced in the past

は、易解体設計が導入された自動車由来のA-プレスの平均銅含有濃度を、0.03~2.8%とした。また、自動車をシュレッダー処理すると、現行の処理においても、A-シュレッダーの平均銅含有濃度は0.43%まで低減される。易解体設計を自動車に導入することにより、A-プレスの平均銅含有濃度が0.43%以下まで低減される場合には、A-シュレッダーの平均銅含有濃度も同等に低減されるものとした。そして、A-プレスの平均銅含有濃度が0.43%以上である場合は、A-シュレッダーの平均銅含有濃度は、現行と同じ濃度(0.43%)になるとした。

以上の前提条件のもと、将来の各年における国内の粗鋼生産により誘発されるCO<sub>2</sub>重量の経年変化を解析し、易解体設計導入による環境負荷低減効果を算出した。なお、易解体設計の導入による、自動車製造および廃車処理段階での新たなCO<sub>2</sub>誘発量はないものとする。なお、インベントリデータは既往研究<sup>8)</sup>を参照した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 易解体設計導入による環境負荷低減効果の算出

Fig. 2, 3に、シナリオAおよびBにおける、ベースラインおよび2010年単年に易解体設計を導入した場合(DfE (Design for Environment) case)の、国内粗鋼製造により誘発されるCO<sub>2</sub>重量を比較して示す。ここでは、易解体設計により廃自動車から銅含有部品が完全に除去され、製造された鋼材の品位のままスクラップが回収される場合の結果を示している。両シナリオとも、易解体設計導入によるCO<sub>2</sub>誘発量低減効果が現れるのが2015年以降であったため、2015年から2030年までの結果を示した。また、2つのシナリオ間では、将来の鋼材の需要量が異なるため、粗鋼の総生産量も異なり、座標軸のスケールが異なっている。ともに、2020年前後からCO<sub>2</sub>誘発量低減効果が大きくなりはじめ、易解体設計を導入した場合、2030年においてもCO<sub>2</sub>誘発量はベースラインよりも低減されている。

次に、これら各年のCO<sub>2</sub>誘発量削減効果を2030年まで積算した結果を、Table 2に示す。総量で比較すると、シナリオAでは265万トン、Bでは418万トンの削減効果となる。この効果量を、易解体設計を導入した自動車台数(462万台)で除すことにより、乗用車1台あたりの効果量

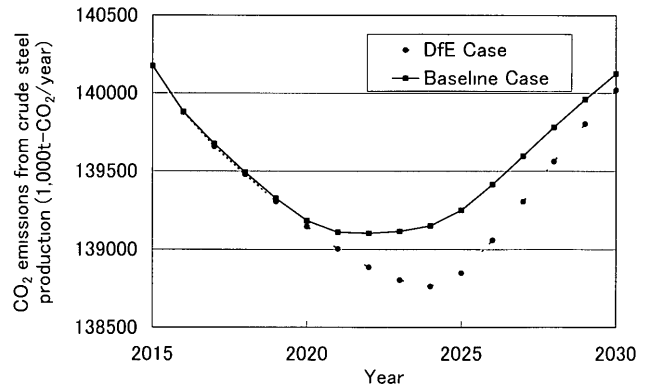


Fig. 2. CO<sub>2</sub> emissions by crude steel production during 2015 to 2030 in scenario A

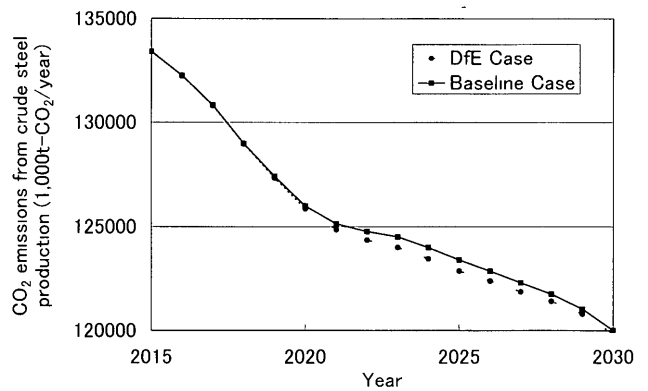


Fig. 3 CO<sub>2</sub> emissions by crude steel production during 2015 to 2030 in scenario B

Table 2. Reduction of CO<sub>2</sub> emissions affected by introduction of DfE

	Unit	Scenario A	Scenario B
Total reduction of CO <sub>2</sub> emissions by crude steel production during 2011 to	1,000t-CO <sub>2</sub>	2,654	4,182
Reduction of CO <sub>2</sub> emissions per car	t-CO <sub>2</sub> /car	0.623	0.982

を算出すると、それぞれ0.62t-CO<sub>2</sub>、0.98t-CO<sub>2</sub>の効果となる。

シナリオA、Bにおいて、易解体設計の導入によるCO<sub>2</sub>誘発量の削減効果が現れるのはそれぞれ2016年、2017年であった。これは、Fig. 4に示すように、2016年、2017年がそれぞれのシナリオの基準ケースにおいて、土木・建設用電炉鋼材の銅含有濃度が許容限界に達し、有効利用されないスクラップが発生しはじめる年であることがわかる。2010年に易解体設計を自動車に導入することで、両シナリオとも銅含有濃度の濃化が緩和される。これにより、利用されないスクラップが発生しはじめる年が遅れるとともに、利用できるスクラップ量が増加することにより、CO<sub>2</sub>誘発量が削減される。

本研究で捉える新技術導入による環境負荷誘発量の削減効果は、利用されないスクラップが発生する状態において顕在化する効果であり、当該技術の導入時期に依存する。

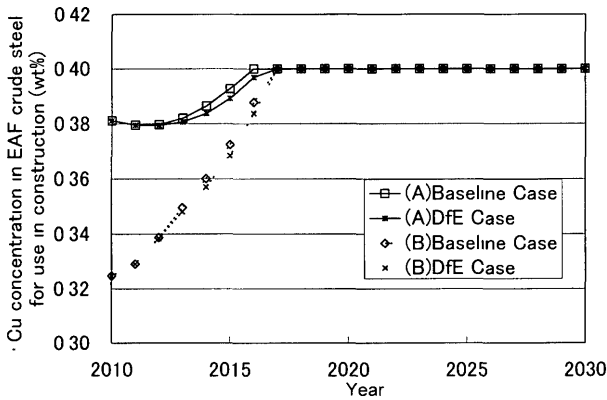


Fig. 4. Cu concentration in EAF steel for construction.

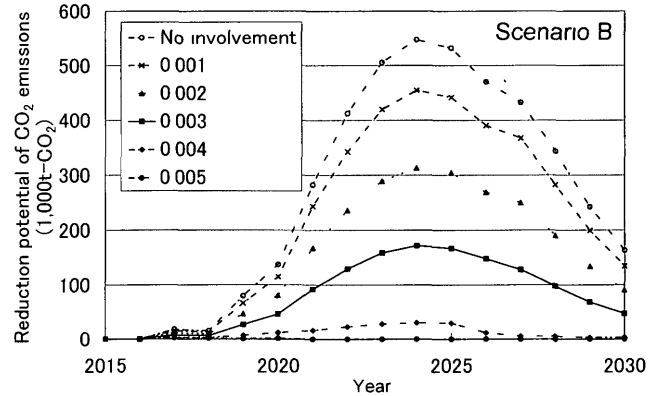


Fig. 6. Effect of Cu concentration in automobile scrap on the reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions in scenario B.

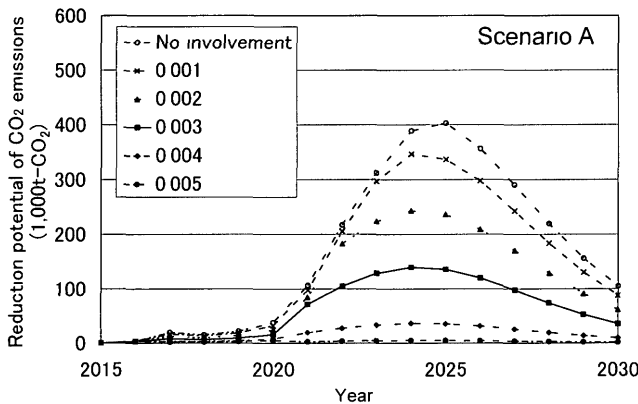


Fig. 5. Effect of Cu concentration in automobile scrap on the reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions in scenario A.

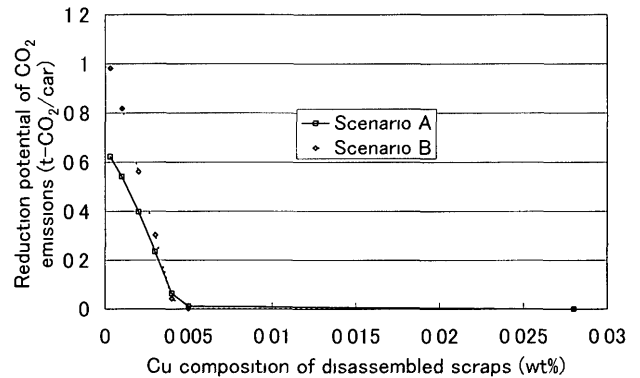


Fig. 7. Effect of Cu concentration in automobile scrap on the reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions per unit car.

### 3.2 易解体設計の分離能によるCO<sub>2</sub>誘発量の違い

易解体設計の導入により、自動車由来の老廃スクラップの銅含有濃度が、完全分離される場合(0.03 wt%)、細かな部品等は分離されずにスクラップ中に残留することで銅含有濃度が0.1 wt%、0.2 wt%、0.3 wt%、0.4 wt%、0.5 wt%となる場合について、CO<sub>2</sub>誘発量を解析した。シナリオA、Bにおける解析結果をFig. 5, 6に示す。なお、これらの図は、ベースラインと比較したときの、易解体設計導入時のCO<sub>2</sub>誘発量の削減量を示している。両シナリオとも、分離能の上昇とともに各年の削減量も増大しており、完全分離される場合が最も大きな削減効果を示している。しかしながら、0.5 wt%の分離能の場合、ほとんど効果が見られない。これは、易解体設計の導入による効果は、A-プレスに代替されたものの効果しかなく、相対的に微量であるからである。

易解体設計の分離能を横軸に、自動車一台あたりのCO<sub>2</sub>誘発量削減効果を縦軸に表した結果をFig. 7に示す。本論文での前提条件においては、易解体設計による分離能が、シュレッダー処理による銅含有量(0.43 wt%)よりも低減できなければ、CO<sub>2</sub>誘発量の削減効果は小さいことが示された。

## 4. 結言

本論文では、自動車に易解体設計を導入することにより、老廃スクラップに含有されるトランプエレメント(Cu)を回避することによる、環境負荷誘発削減効果を定量的に示すことができた。さらに、環境負荷削減の観点からの易解体設計における分離能の技術的目標値に対して示唆を与えることができた。

2010年に、ハーネスなど銅を使用する部品を完全に分離することが可能になる技術を自動車に導入することにより、各シナリオにおいて、CO<sub>2</sub>誘発量の削減効果は265万トン、418万トンとなった。自動車1台あたりに換算すると、約0.62 t-CO<sub>2</sub>、約0.98 t-CO<sub>2</sub>の削減効果となる。スクラップに含有されるCu濃度が増大するに従い、この削減効果は減少し、0.5 wt%になると削減効果はほとんどあらわれない。

## 文 献

- 1) K Kakudate, Y Adachi and T Suzuki *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 837
- 2) I Daigo, D Fujimaki, Y Matsuno and Y Adachi *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 171

- 3) 足立芳寛, 松野泰也, 醍醐市朗, 瀧口博明: 環境システム工学, 東京大学出版会, 東京, (2004), 109
- 4) Y Matsuno, I Daigo, and Y Adachi *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 127
- 5) T Ikaga, S Murakami, S Kato and Y Shiraiishi *J Aecht Plann Environ Eng, AIJ*, **535** (2000), 53
- 6) 自動車検査登録協会の: 昭和62年版—平成12年版 わが国の自動車保有動向, 東京, (1987—2000)
- 7) (株)日鉄技術情報センター: 私信.
- 8) A Toi and J Sato *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 534