

(論文)

# LCAを用いた自動車用アルミ部品のGHG排出量評価

大久保安剛\*1・内藤純也\*1(博士(工学))・江崎澄代\*1・加嶋寛子\*2・吉野初美\*3

## Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Automotive Aluminum Parts

Yasutaka OKUBO・Dr. Junya NAITO・Sumiyu EZAKI・Hiroko KASHIMA・Hatsumi YOSHINO

### 要旨

2050年のCN(Carbon Neutral)の実現に向け、自動車の電動化(BEV化)が急速に拡大すると見込まれており、車体の軽量化ニーズはますます高まるものと考えられる。車体軽量化の手段の一つとして鉄鋼材からアルミ材への材料の置換があるが、アルミ材は新地金とスクラップの原料構成が製造時の環境負荷に非常に大きく影響することが知られている。そこで本稿では、自動車部品に鉄鋼材とアルミ材をそれぞれ適用したときのライフサイクルにおけるGHG(Greenhouse Gas)排出量を算出し、環境負荷への影響を評価した。その結果、アルミ材を適用した場合に、プレススクラップを活用することでGHG排出量を大幅に低減することができ、さらに低CO<sub>2</sub>地金や市中スクラップを適用することで、GHG排出量を鉄鋼材以下にすることが可能となる結果が得られた。

### Abstract

To achieve carbon neutrality by 2050, the electrification of automobiles (e.g., BEVs) is expected to expand rapidly, further increasing the need for weight reduction of vehicle bodies. One of the methods for vehicle body weight reduction is to replace steel with aluminum. Meanwhile, the raw material composition of aluminum (new ingot and scrap) is known to significantly impact the environmental load during manufacturing. Hence, this study has calculated greenhouse gas (GHG) emissions over the life cycle of automotive parts made of steel and aluminum to evaluate their impact on that load. The results indicate that, when aluminum is used, GHG emissions can be significantly reduced by utilizing stamping scraps. Utilizing low-CO<sub>2</sub> ingot or commercial-scrap aluminum enables further reduction of GHG emissions to below those of steel.

### 検索用キーワード

LCA自動車, アルミ, 環境負荷低減, 低CO<sub>2</sub>, 軽量化, スクラップ, クローズドループライフサイクル

ま え が き = 2050年のCNの実現に向け、自動車の電動化(BEV化)が急速に拡大すると見込まれている<sup>1)</sup>。従来のICEV(内燃機関自動車)と比較して、BEVでは走行中のGHG排出量を低減することが可能<sup>2)</sup>となるいっぽうで、電池を搭載することにより車両重量が大きくなる傾向にある<sup>3)</sup>。車両重量が大きくなると、電費や航続距離、運動性能の低下などの様々なデメリットがあるため、これまで以上に車体の軽量化のニーズが高まっている。

車体の軽量化の手段の一つとして、材料の置換が考えられる。一般的に車体に使われている材料の鉄鋼材に対し、軽量化を目的に使われる代表的な材料のひとつにアルミ材がある。適用する部品にもよるが、鉄鋼材からアルミ材に材料を置換することで、約40%の軽量化効果が見込めるため、車体へのアルミ材の適用は増加傾向<sup>4)</sup>となっている。

アルミはボーキサイトから製造したアルミナを電気分解することで得られ、これを塊状としたものを新地金と呼ぶ。アルミ新地金を製錬する際の電力消費量が非常に大きいため、エネルギーミックスを前提とした電力により製錬した通常地金を用いたアルミ材の材料製造時のGHG排出量は鉄鋼材よりも大きいことで知られている。しかし、製錬時に再生可能エネルギーを使用した低CO<sub>2</sub>

地金、プレススクラップや市中スクラップなどのリサイクル材を適用することにより、材料製造時のGHG排出量低減が可能である。また、軽量化による走行時の環境負荷低減効果も期待できるため、自動車のライフサイクルで考えたときに、従来の鉄鋼材と比較して、どちらの環境負荷が小さいかを定量的に評価したうえで、材料を選択する必要がある。

そこで、本稿では、LCAの観点で、自動車部品に鉄鋼材およびアルミ材を適用したときのGHG排出量を算出し、さらに、アルミ材に低CO<sub>2</sub>地金や各種スクラップ材を適用したときの環境負荷低減効果を定量的に評価し、鉄鋼材を適用した条件と比較した結果について報告する。

## 1. 部品製造時のGHG排出量評価

### 1.1 部品製造時のGHG排出量評価の対象

自動車部品の材料にアルミ材を適用したときの材料製造から車両組み立てまでのフローを図1<sup>5)</sup>に示す。ここでは、アルミ材に①プレススクラップを活用しない条件、②プレススクラップを活用する条件、③市中スクラップを活用する条件における部品製造時のGHG排出量を算出した。

\*1 技術開発本部 ソリューション技術センター \*2 人事労政部 \*3 コベルコビジネスパートナーズ㈱ 産業情報部

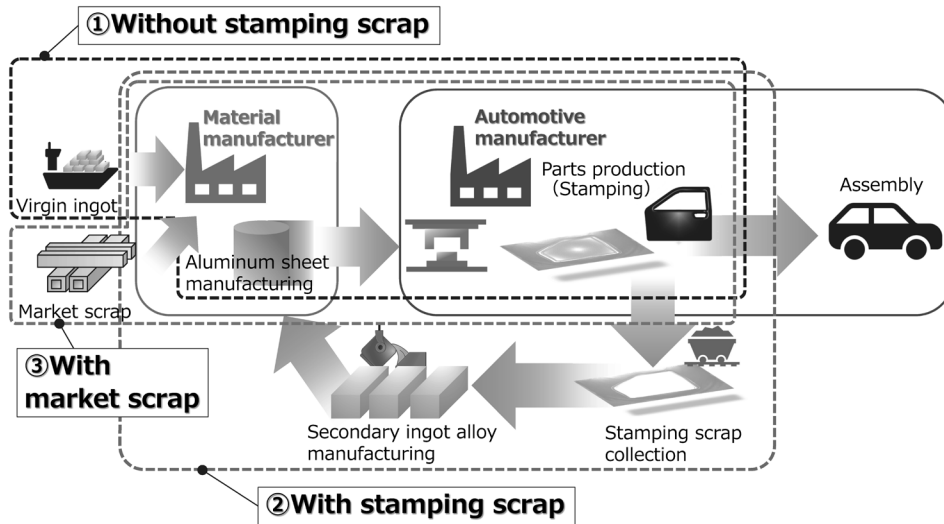


図1 材料製造から車両組み立てまでのフロー  
Fig.1 Flow from material production to vehicle assembly

## 1.2 部品製造時のGHG排出量の評価手法

### 1.2.1 新地金のみを使用した場合のGHG排出量評価方法

ここでは、エネルギーミックスを前提とした電力により製錬した通常地金および再生可能エネルギーで製錬した低CO<sub>2</sub>地金を原料とし、材料メーカで製造したアルミ板を部品メーカでプレス加工し、部品製造に至るまでのGHG排出量の算出を行った。その際、プレス工程で発生したスクラップのリサイクルは考慮しないこととした。GHG排出量 $X_{GHG}$ は、式(1)<sup>5)</sup>で表すことができ、プレスの加工歩留り $\beta$ は60%一定とし、プレス加工で製造する部品の重量は10kgとしたときのGHG排出量を算出した。材料製造やプレス加工におけるGHG排出原単位はIDEA<sup>6)</sup>を参照した。

$$X_{GHG} = 10 \times [GWP_{\text{新地金製造}} \cdot (1 - \varepsilon) / \alpha \beta + GWP_{\text{添加合金製造}} \cdot \varepsilon / \alpha \beta + GWP_{\text{溶解・圧延}} \cdot \frac{1}{\beta} + GWP_{\text{部品製造}}] \dots (1)$$

ここに、

$\alpha$  : 溶解・圧延歩留り

$\beta$  : プレス歩留り

$\varepsilon$  : アルミ材における添加元素の含有割合

$GWP$  : GHG排出原単位

### 1.2.2 新地金およびプレススクラップを使用した場合のGHG排出量評価方法

ここでは、新地金および低CO<sub>2</sub>地金を原料とし、材料メーカで製造したアルミ材を部品メーカでプレス加工し、発生したプレススクラップを再溶解して二次地金として材料メーカに戻し、アルミ材の製造に再利用するという、クローズドループリサイクルが成立すると仮定した。そのときの、部品製造に至るまでのGHG排出量 $X_{GHG}$ は、式(2)<sup>5)</sup>で表すことができる。

$$X_{GHG} = 10 \times [GWP_{\text{新地金製造}} \cdot (1 - \varepsilon) \{1 - \alpha \gamma \delta (1 - \beta)\} / \alpha \beta + GWP_{\text{添加合金製造}} \cdot \varepsilon \{1 - \alpha \gamma \delta (1 - \beta)\} / \alpha \beta + GWP_{\text{二次地金製造}} \cdot (1 - \beta) \delta \gamma / \beta + GWP_{\text{溶解・圧延}} \cdot \frac{1}{\beta} + GWP_{\text{部品製造}}] \dots (2)$$

ここに、

$\alpha$  : 溶解・圧延歩留り

$\beta$  : プレス歩留り

$\gamma$  : 二次地金製造歩留り

$\delta$  : プレス屑回収率

$\varepsilon$  : アルミ材における添加元素の含有割合

$GWP$  : GHG排出原単位

### 1.2.3 新地金および市中スクラップを使用した場合のGHG排出量評価方法

ここでは、新地金の代替として、市中スクラップを投入して製造したアルミ材を部品メーカでプレス加工し、部品製造に至るまでのGHG排出量 $X_{GHG}$ は、式(3)で表すことができる。その際、Cut-off approach<sup>7)</sup>を適用し、投入する市中スクラップのGHG排出量は考慮しないこととした。また、成分調整のためのアルミ新地金や添加元素の投入は不要と仮定し、プレス工程で発生したスクラップのリサイクルは考慮しないこととした。GHG排出量 $X_{GHG}$ は、以下の式で表すことができる。

$$X_{GHG} = 10 \times [GWP_{\text{新地金製造}} \cdot (1 - \varepsilon) (1 - \zeta) / \alpha \beta + GWP_{\text{添加合金製造}} \cdot \varepsilon (1 - \zeta) / \alpha \beta + GWP_{\text{溶解・圧延}} \cdot \frac{1}{\beta} + GWP_{\text{部品製造}}] \dots (3)$$

ここに、

$\alpha$  : 溶解・圧延歩留り

$\beta$  : プレス歩留り

$\varepsilon$  : アルミ材中添加合金比率

$\zeta$  : 市中スクラップ配合率

$GWP$  : GHG排出原単位

## 1.3 評価結果

ここでは、アルミ材の原料配合を変化させたときの部品製造時のGHG排出量算出結果を示す。算出に用いた式(1)～式(3)における各変数の値を表1に示す。溶解・圧延に関する歩留り、GHG排出原単位の値は、6000系自動車パネル材を想定した日本アルミニウム協会のLCIデータ<sup>8)</sup>を参考に決定した。また、プレス歩留り $\beta$ は、フードを製造したときの歩留りの値<sup>9)</sup>を参考に決定した。

表1 変数一覧  
Table 1 Parameter list

Parameter						
$\alpha$ (%)	$\beta$ (%)	$\gamma$ (%)	$\delta$ (%)	$\epsilon$ (%)	$\zeta$ (%)	GWP
97	60	95	98	6	0~100	IDEA <sup>6)</sup>

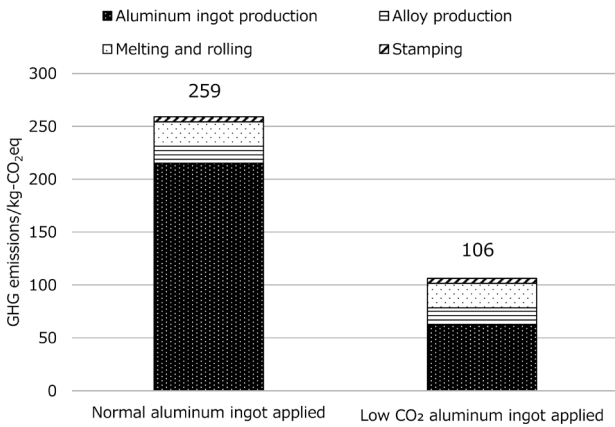


図2 プレススクラップを活用しない条件における部品製造時のGHG排出量

Fig.2 GHG emissions without stamping scrap

### 1.3.1 新地金のみを使用した場合のGHG排出量評価結果

GHG排出量評価結果を図2に示す。通常地金を適用した場合のGHG排出量は、259 kg-CO<sub>2</sub>eqとなった。いっぽう、低CO<sub>2</sub>地金を適用した場合は、109 kg-CO<sub>2</sub>eqとなり、約59%と大幅な環境負荷の低減が可能となる結果が得られた。本結果から、アルミ新地金製錬時のGHG排出量を低減することが、部品製造全体で見ても、環境負荷低減効果が大きいということが示された。

### 1.3.2 新地金およびプレススクラップを使用した場合のGHG排出量評価結果

GHG排出量評価結果を図3に示す。新地金およびプレススクラップを活用したときのGHG排出量は、177 kg-CO<sub>2</sub>eqとなり、低CO<sub>2</sub>地金を適用した場合は、80 kg-CO<sub>2</sub>eqとなった。それぞれ、プレススクラップを活用しない場合と比較すると、GHG排出量は小さくなっているため、環境負荷低減に効果的であることがわかった。

### 1.3.3 新地金および市中スクラップを使用した場合のGHG排出量評価結果

GHG排出量評価結果を図4に示す。市中スクラップの配合率の増加にともなって、GHG排出量はほぼ線形に減少する結果が得られた。市中スクラップの配合率を100%とした場合、配合率0%に対して約89%のGHG排出量低減が可能となる。スクラップ配合率を大きくし、新地金の配合率を小さくすることが、環境負荷低減に効果的であることが明らかとなった。ただし実際には、新地金や合金元素添加による成分調整が必要となるため、アルミ材の要求仕様に合わせて配合率を考える必要がある。

### 1.3.4 各条件におけるGHG排出量評価結果比較

それぞれの条件における自動車の部品製造時のGHG

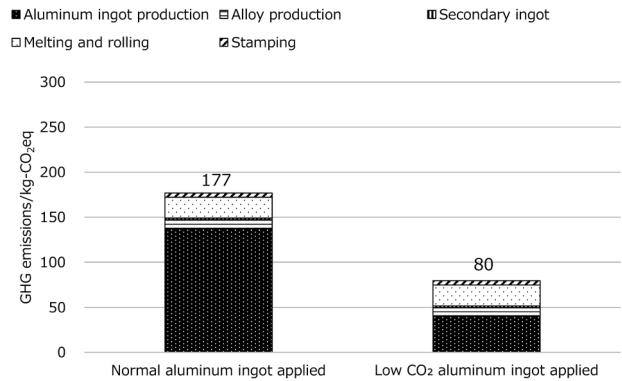


図3 プレススクラップを活用する条件における部品製造時のGHG排出量

Fig.3 GHG emissions with stamping scrap

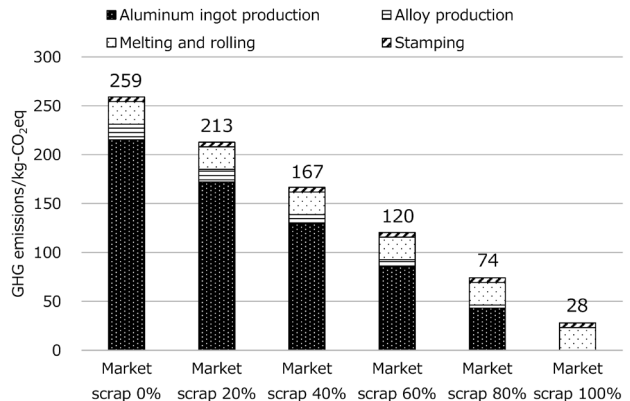


図4 市中スクラップを活用する条件におけるGHG排出量

Fig.4 GHG emissions with market scrap

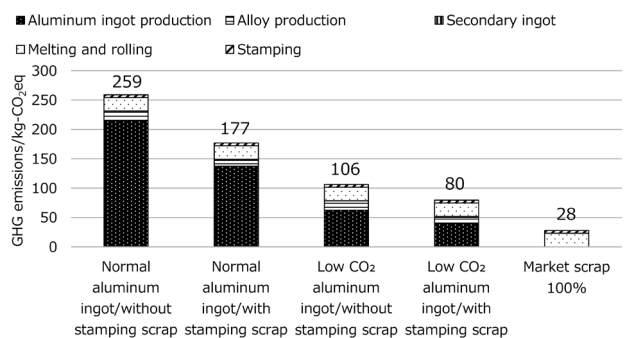


図5 アルミ部品製造時のGHG排出量

Fig.5 GHG emissions from aluminum part production

排出量評価結果を図5に示す。新地金を適用し、かつ、プレススクラップを活用しない条件を基準としたときに、新地金適用時にプレススクラップを活用すると、プレス歩留り60%のときに、GHG排出量を32%低減可能となる結果を得た。また、低CO<sub>2</sub>地金を適用すると、プレススクラップ活用しない場合で59%、プレススクラップを活用する場合で69%GHG排出量を低減可能とい

う結果を得た。低CO<sub>2</sub>地金を適用した場合、製錬時のGHG排出量の低減効果が大きくなることで、相対的にプレススクラップ活用によるGHG排出量の低減効果は小さくなっている。

## 2. 自動車部品に適用する材料ごとのLCA分析

### 2.1 部品製造時のGHG排出量評価の対象

自動車のライフサイクルにおけるGHG排出量の評価範囲を図6<sup>5)</sup>に示す。本稿では、「材料製造」、「部品製造」、「車両製造」、「電池製造」、「走行」までを考慮した。ただし、車両製造については、材料を変えることによる影響は無いものと仮定した。

### 2.2 評価に使用した車両モデル

本評価には、Cセグメントの車両を想定した独自モデルを使用した。諸元を表2<sup>5)</sup>に、車両モデルを図7に示す。フード、フェンダ、サイドドア、ルーフ、バックドアの外板部品を鉄鋼材からアルミ材に置換するものとした。合計の重量は、鉄鋼材適用時は114.3 kg、アルミ材適用時は73.1 kgとなり、アルミ材適用により車両全体で36%軽量化できるものと仮定して評価を行った。

### 2.3 各フェーズにおけるGHG排出量の評価手法

#### 2.3.1 材料製造および部品製造

材料製造および部品製造時のGHG排出量の計算には、

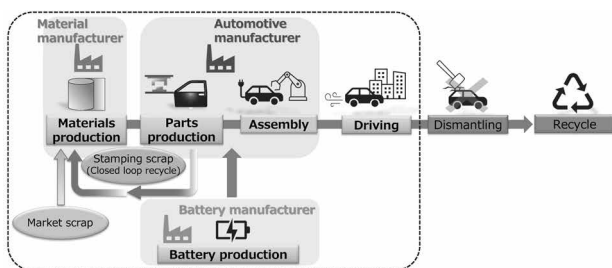


図6 自動車のライフサイクルにおける評価範囲  
Fig.6 Scope of evaluation during the life cycle of a vehicle

表2 評価対象とした車両の諸元  
Table 2 Specifications of the vehicle evaluated

Vehicle type	BEV
Vehicle weight	2,020 kg
Segment	C
Battery capacity	66 kWh

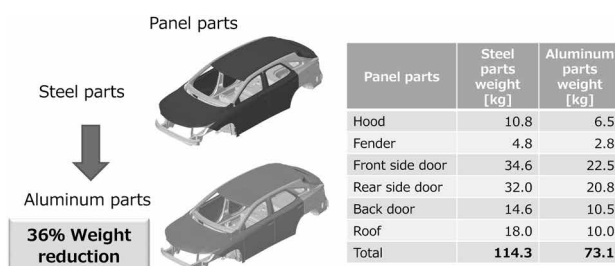


図7 評価した車両モデルと材料変更した部品  
Fig.7 Evaluated vehicle models and material-change parts

IDEA<sup>6)</sup> および日本アルミニウム協会<sup>8)</sup>の排出原単位の値を用いた。プレス加工は、いずれも冷間プレスとし、部品製造時のプレス歩留りは60%一定とした。GHG排出量の差分 $\Delta S_{材料と部品}$ は式(4)で表すことができる。

$$\Delta S_{材料と部品} = \left( \frac{C_{Al} W_{Al}}{\beta} - \frac{C_{St} W_{St}}{\beta} \right) + (T W_{Al} - T W_{St}) \dots (4)$$

ここに、

- $C_{St}$ : 鋼板のGHG排出原単位
- $C_{Al}$ : アルミ板のGHG排出原単位
- $W_{St}$ : 鉄鋼部品の重量
- $W_{Al}$ : アルミ部品の重量
- $T$ : 冷間プレスのGHG排出原単位

#### 2.3.2 電池製造

電池製造時のGHG排出量は、UCSB Model<sup>10)</sup>を用いて算出した。このとき、GHG排出量を算出する各条件における車両の航続距離は一定とし、部品の材料にアルミパネルを適用したときの軽量化効果は、図8<sup>11)</sup>に示すように、電池容量の削減に寄与すると仮定した。電池製造におけるGHG排出量の差分 $\Delta S_{電池製造}$ は、式(5)で表すことができる。

$$\Delta S_{電池製造} = P E_{Al} - P E_{St} \dots (5)$$

ここに、

- $P$ : 電池製造のGHG排出原単位
- $P E_{St}$ : 鉄鋼部品適用を想定した車両の搭載電池製造時のGHG排出量
- $P E_{Al}$ : アルミ部品適用を想定した車両の搭載電池製造時のGHG排出量

#### 2.3.3 走行

走行時のGHG排出量は、UCSB Modelを走行部分にのみ適用し、評価した。UCSB Modelにおける車両重量とエネルギー消費量の関係が線形であることを前提条件に、評価対象の車両が日本国内において、10万kmおよび20万km走行したときのGHG排出量を算出した。GHG排出量の材料間の差分 $\Delta S_{走行}$ は、式(6)で表すことができる。

$$\Delta S_{走行} = G S_{Al} - G S_{St} \dots (6)$$

ここに、

- $G S_{St}$ : 鉄鋼部品適用を想定した車両の走行時におけるGHG排出量
- $G S_{Al}$ : アルミ部品適用を想定した車両の走行時におけるGHG排出量

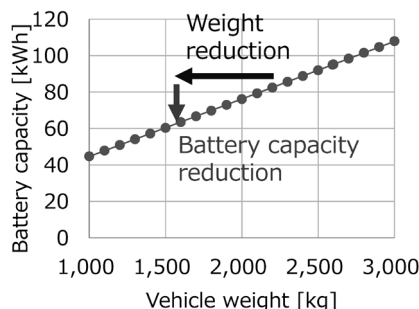


図8 車両重量と電池容量の関係  
Fig.8 Relationship between vehicle weight and battery capacity

表3 変数一覧  
Table 3 Parameter list

Parameter			
$C_{St}, C_{Al}, T$	$W_{St}$ (kg)	$W_{Al}$ (kg)	$P, PE_{St}, PE_{Al}, GS_{St}, GS_{Al}$
IDEA <sup>6)</sup>	114.3	73.1	UCSB Model <sup>10)</sup>

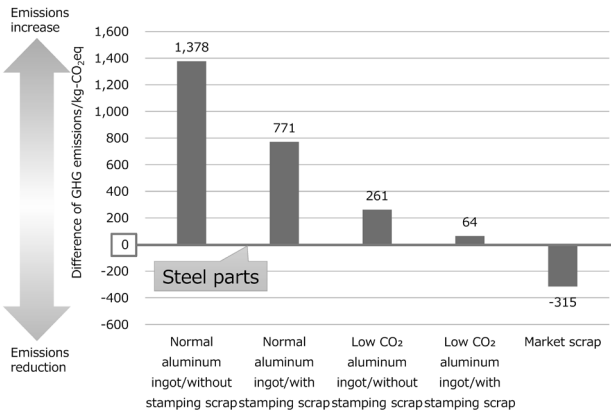


図9 材料製造および部品製造時のGHG排出量の差  
Fig.9 Difference of GHG emissions in material production and parts production

## 2.4 ライフサイクル全体のGHG排出量評価結果

ここでは、各工程におけるGHG排出量を算出した結果を示す。算出の際に用いた式(4)～式(6)における各変数の値を表3に示す。 $W_{St}$ 、 $W_{Al}$ は、図7の評価車両モデルの値とした。また、 $E_{St}$ 、 $E_{Al}$ は、Malen-Geyer Powertrain Model<sup>12)</sup>を用いて、各材料適用時に、同じ航続距離となるときの電池容量を算出した。

### 2.4.1 リサイクルを含む材料製造および部品製造

GHG排出量評価結果を図9に示す。グラフの縦軸は、鉄鋼部品からアルミ部品に置換したときのGHG排出量の差分を示す。低CO<sub>2</sub>地金を適用し、プレススクラップを活用することで、鋼板部品と同等のGHG排出量となる。また、市中スクラップを100%配合した場合は、材料製造および部品製造の段階で、鋼板部品以下のGHG排出量となる結果が得られた。以上のことから、材料および部品製造の段階では、鉄鋼部品に対し、環境負荷が高いとされているアルミ部品においても、適用する地金や各種スクラップの活用によって、鉄鋼部品と同等以下の環境負荷にできる可能性があることが示された。

### 2.4.2 電池製造

GHG排出量評価結果を図10に示す。グラフの縦軸は、図9と同様に、鉄鋼部品からアルミ部品に置換したときのGHG排出量の差分を示す。式(5)からもわかるように、電池製造時のGHG排出量の差分において、材料製造時のGHG排出量は影響せず、搭載電池容量、つまり、材料置換時の車両重量に比例するので、アルミ材を適用した各条件における電池製造時のGHG排出量は同じ値となる。また、航続距離が一定という条件で、鋼板部品に対し、軽量化した分の電池容量を削減しているため、GHG排出量としては、171 kg-CO<sub>2</sub>eq小さくなるという結果が得られた。

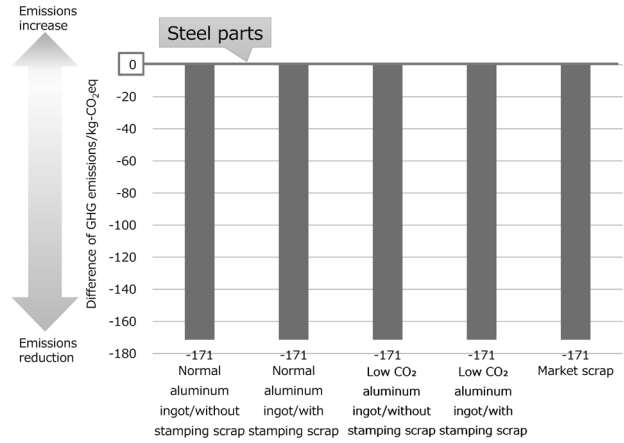


図10 電池製造時のGHG排出量の差  
Fig.10 Difference of GHG emissions in battery production

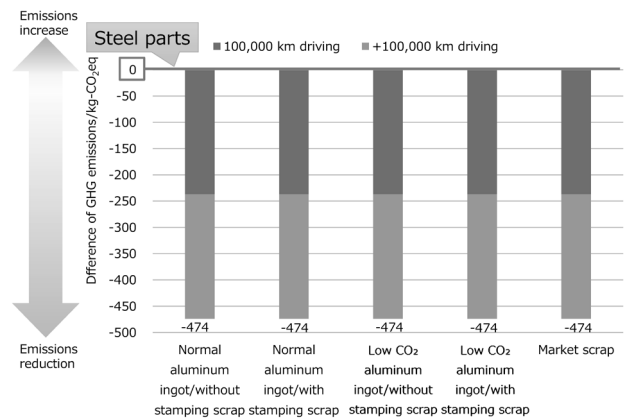


図11 走行時のGHG排出量の差  
Fig.11 Difference of GHG emissions in running

### 2.4.3 走行

GHG排出量評価結果を図11に示す。グラフの縦軸は、図9と同様に、鉄鋼部品からアルミ部品に置換したときのGHG排出量の差分を示す。式(6)からもわかるように、前項2.4.2と同様、走行時のGHG排出量の差分において、材料製造時のGHG排出量は影響せず、アルミ材を適用した各条件における走行時のGHG排出量は同じ値となる。

### 2.4.4 ライフサイクルにおけるGHG排出量評価結果比較

これまで試算してきたリサイクルを含む材料製造、部品製造、電池製造、走行までのGHG排出量について、鋼板部品を基準としたときの各工程における差を図12、図13に示す。グラフの縦軸は、図9と同様に、鉄鋼部品からアルミ部品に置換したときのGHG排出量の差分を示す。ライフサイクル全体で考えた場合に、プレススクラップを活用しない条件においては、新地金を適用すると、鋼板に対し、GHG排出量が733 kg-CO<sub>2</sub>eqと大幅に大きくなるが、低CO<sub>2</sub>地金を適用すると、-384 kg-CO<sub>2</sub>eqと小さくなり、市中スクラップを適用すると、-961 kg-CO<sub>2</sub>eqと、大幅に小さくなる結果が得られた。また、プレススクラップを活用する条件においても、新地金を適用すると、鋼板に対し、GHG排出量が126 kg-CO<sub>2</sub>eq大きくなり、低CO<sub>2</sub>地金を適用すると、-581 kg-CO<sub>2</sub>eqと大幅に小さくなる結果が得られた。

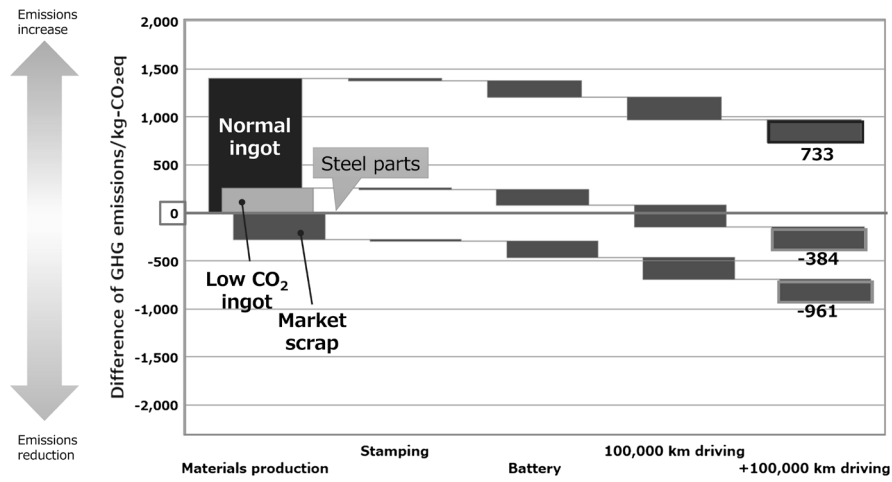


図12 プレススクラップを活用しない条件における各工程のGHG排出量の差  
Fig.12 Difference of GHG emissions for each process without pressed scrap

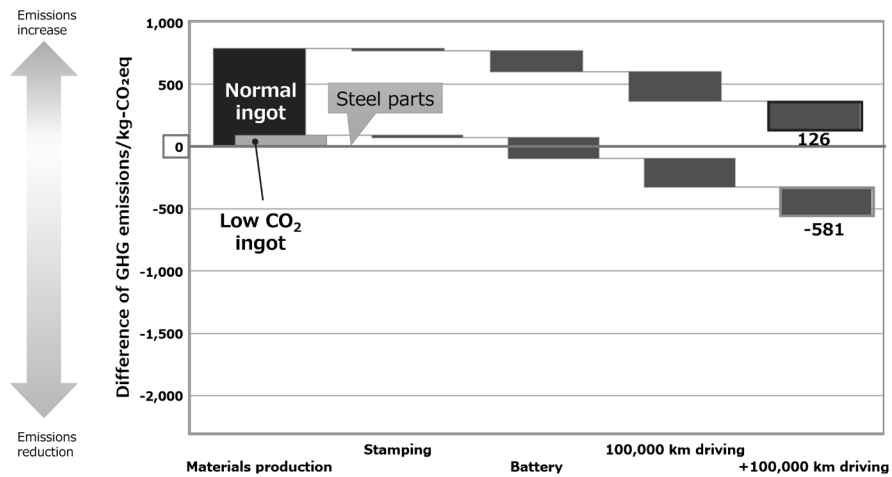


図13 プレススクラップを活用する条件における各工程のGHG排出量の差  
Fig.13 Difference of GHG emissions for each process with pressed scrap

むすび=本稿では、LCAの観点で、自動車部品に鉄鋼材およびアルミ材を適用したときのGHG排出量を算出し、各材料の環境負荷に関する評価を行った。アルミ材を適用した自動車部品において、プレススクラップを活用することで、大幅にGHG排出量を低減することが可能となる結果が得られた。さらに、低CO<sub>2</sub>地金や市中スクラップを適用することにより、GHG排出量を鋼板部品以下にすることが可能となる結果も得られた。

いっぽう、今回の評価では、鋼板のリサイクル、低CO<sub>2</sub>鉄鋼材<sup>13)</sup>、および、自動車の解体は考慮せず、また、市中スクラップ活用時の成分調整も不要という、実工程とは異なる条件としている。今後は、より実工程に近い評価や廃車スクラップの活用などを考慮した検討を行い、環境負荷低減につながる材料選択に貢献していきたい。

#### 参考文献

- 1) 日本自動車工業会. 2050年カーボンニュートラルに向けた自動車業界の課題と取組み. 2022-12-15. [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/transition\\_finance\\_suishin/pdf/009\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance_suishin/pdf/009_05_00.pdf) (参照2024-05-29).
- 2) 一般財団法人中央電力研究所 社会経済研究所, 電力中央研究所 研究資料. 2021, No.Y21503, p.4.

- 3) 溝端幹雄. あまり語られない電気自動車の普及を阻む盲点. [https://www.dir.co.jp/report/column/20230113\\_010985.html](https://www.dir.co.jp/report/column/20230113_010985.html), (参照2024-05-29).
- 4) 廣澤渉一. 工業材料. 2017, Vol.65, No.12, p.26-30.
- 5) 加嶋寛子ほか. 自動車技術会 2024年春季大会学術講演会予稿集(春). 公益社団法人自動車技術会. 講演番号293.
- 6) LCIデータベース IDEA version 3.3 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEAラボ.
- 7) 醍醐市朗. 鉄と鋼. 2022, Vol.108, No.11, p.811-822.
- 8) 一般社団法人日本アルミニウム協会. 各種アルミニウム圧延製品のLCIデータの概要～アルミニウム板材～. 2006-02-10. <https://www.aluminum.or.jp/environment/pdf/1-2-2.pdf>, (参照2024-05-29).
- 9) 経済産業省. アルミニウム産業の現状と課題. [https://www.meti.go.jp/policy/nonferrous\\_metal/strategy/aluminium02.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/strategy/aluminium02.pdf), (参照2024-06-05).
- 10) Geyer R. User Guide for Version 5 of the UCSB Automotive Energy and GHG Model, 2017-03-06.
- 11) 江崎澄代ほか. 自動車部品の材料選択・構造設計への環境負荷評価の適用. 第18回日本LCA学会研究発表会 要旨. 2023年3月, No.2-B3-02.
- 12) Geyer R. User Guide for the 30NOV2017 Version of the PHEV-BEV Power Train Model, 2018-06.
- 13) 神戸製鋼所. プレスリリース. 2022-05-17. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1210184\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1210184_15541.html), (参照2024-06-07).