

技術論文

電動化に対応した先進鋼製車体のライフサイクルアセスメント (LCA) により定量化した環境性能

Environmental Performance Quantified by Life Cycle Assessment (LCA) of Advanced Steel Car Bodies Adapted for Electrification

久保 雅寛*
Masahiro KUBO

吉田 博司
Hiroshi YOSHIDA

井口 敬之助
Keinosuke IGUCHI

佐藤 浩一
Koichi SATO

抄 録

持続可能性を担保するためには、環境の観点からも製品や技術そのものの価値を定量化する必要がある。本報では、電動化に対応した先進ハイテン製車体コンセプトである NSafe[®]-AutoConcept (NSAC) -ECO³ および先進ハイテン部品を対象に、ライフサイクルアセスメント (LCA) により環境性能を定量化する手法とその結果を紹介し、カーボンニュートラル (CN) およびサーキュラーエコノミー (CE) の実現に向けた、先進ハイテンと鋼材ソリューションによる自動車軽量化の重要性と有効性について述べる。

Abstract

To ensure sustainability, it is necessary to quantify the value of products and technologies from an environmental perspective. In this paper, we introduce the methods and results of quantifying environmental performance through Life Cycle Assessment (LCA) for the advanced steel car body concept (NSafeTM-AutoConcept ECO³), which is compatible with electrification, and its components. We discuss the importance and effectiveness of vehicle weight reduction using Advanced High-Strength Steel (AHSS) and steel solutions for achieving Carbon Neutrality (CN) and Circular Economy (CE).

1. 緒 言

SDGs (Sustainable Development Goals, 持続可能な開発のための 2030 アジェンダ¹⁾) や 2050 年のカーボンニュートラル (CN) およびサーキュラーエコノミー (CE) の実現に向けた取り組みの重要性がより一層増している。技術開発の上で最も重要な課題である持続可能性を担保するためには、環境の観点からも製品や技術そのものの価値を定量化し、さらなる具体的な温室効果ガス (GHG) 排出削減や資源循環性向上の取り組みにつなげる必要がある。最近では、組織 (企業) 単位でのライフサイクルにおける GHG 排出量のモニタリングと開示の必要性も高まっている²⁾。

企業活動、さらには製品製造、開発技術の製品適用による環境に及ぼす影響の定量化には、ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, 以下 LCA) が有効な手段である。例えば、自動車業界においても、環境負荷の低減目標が設定され、LCA による自動車製品の評価^{例えは³⁾}が行わ

れ、製品設計にフィードバックされている。

製品のライフサイクル全体での環境影響に対し、素材選択による寄与は一般的に大きく⁴⁾、CN・CEを実現していくため、材料の選定は最も重要なポイントの1つである。材料そのものの採掘～製造出荷まで (いわゆるゆりかごからゲートまで (Cradle-to-gate)) の環境影響に関しては、電力・エネルギーなどの環境影響と共に、詳細に LCA に用いるインベントリ (LCI: Life Cycle Inventory) データの収集と開示が業界ごとに行われ^{例えは^{5,6)}}、さらには環境負荷の算定に利用可能なデータベース⁷⁻⁹⁾が整備され、環境影響の定量化とケーススタディの研究^{例えは¹⁰⁻¹²⁾}が盛んに行われている。

そこでまず、鉄鋼材料に着目し、鉄鋼材料の環境価値の観点からみた特筆すべき特徴を述べる。そして、1章以降において特に自動車に焦点を当て、自動車分野の取り組みを概説し、2章以降にハイテンの自動車部品への適用を例に、製品としての環境性能の定量化方法および結果に

* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部 主幹研究員 博士(エネルギー科学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

ついて紹介する。

※本報では、強度 340MPa 以上をハイテン、強度 980MPa 以上を先進ハイテン (AHSS : Advanced High-Strength Steel) と規定する。

1.1 環境観点での鉄鋼素材の特徴

鉄の環境観点での特筆すべき優位性として、主に“単位重量当たりの GHG 排出量の低さ”、“資源としての豊富さ”、“循環性”の3点が挙げられる。

図1は、代表的な金属元素ごとに鉱石の採掘から製品に使用されるまで (Cradle-to-gate) の地球温暖化係数 (GWP : Global Warming Potential) と TMR (Total Material Requirement) 原単位を整理したもの⁸⁾である。TMR とは、採鉱時の土砂などの隠れたフローと呼ばれる経済界のフローを含めた天然資源のフロー量¹³⁾であり資源の質を評価する指標である。鉄鋼材料の元素である Fe に着目すると他の金属元素に比べて GWP, TMR とも比較的低いことがわかる。Fe は、数ある元素の中で単位重量当たりの GHG 排出量は粗鋼生産ベースで約 2.0kg CO₂eq/kg- 素材程度と小さく^{4, 8, 10, 12)}、鉄は他の金属よりも比強度が高いため、製品としての同一の機能を果たす際の環境負荷を、他素材に比べて抑制できることが期待される。一方、アルミニウムの例では、電解精錬の電源構成などに応じて大きく異なるが、1次地金 1kg 当たり約 5 ~ 20kg-CO₂eq 超という値が報告されている^{6, 10, 12)}。

また、Fe の TMR も最小レベルに小さく、資源採掘活動の観点でも環境負荷が小さい特徴がわかる。これは Fe の特徴として、Fe は地球の重量の約 3分の1 を占めるほど“資源としての豊富さ”があり、地表近くに大量に存在するため採掘が容易であり、採掘時の環境負荷が比較的小さくなるためと考えられる。

循環性の観点で、重要となるリサイクルに関しては、Fe は磁力で容易に選別できる。さらに図2に示すように、精錬での除去が困難な不純物の種類が少なく¹⁴⁾、再生材の用途の制約が小さいという特徴もある。また、図3に示すよ

うにグローバルにサーキュラーエコノミーが発達しており¹⁵⁻¹⁹⁾、ほぼ 100% がリサイクルされ、何度も循環利用されている。この鉄鋼の特徴は、素材としての LCA において再生先を限定しないリサイクル効果の算定を可能とし、この方法は worldsteel methodology として確立され²⁰⁾、その後、国際規格 ISO 20915 や日本産業規格 JIS Q 20915 として利用されている²¹⁾。一方、リサイクルに課題が残る他の素材ではこの方法が適用できず、リサイクル効果の評価方法は依然として開発・議論中の状況である。

以上のように、Fe は重さ当たりの GHG 排出量が少なく、かつ省資源で、資源循環が図られている特徴を有している²⁰⁾。

日本製鉄(株)はこのような特徴を有する鉄鋼材料を用い、CN 実現に貢献する技術・ソリューションを総称するブランドとして、2022 年に“NSCarbolex[®]”を立ち上げた²²⁾。NSCarbolex は、鉄鋼製造プロセスにおける GHG 排出削減量を環境価値として具現化したグリーンスチール“NSCarbolex Neutral”と、社会における GHG 排出削減に寄与する高機能製品・ソリューション技術“NSCarbolex Solution”の2つのブランドで構成され、原材料の段階からユーザーの製造工程、製品の使用・廃棄に至るまでのあらゆる局面での GHG 排出量の削減へ貢献している。

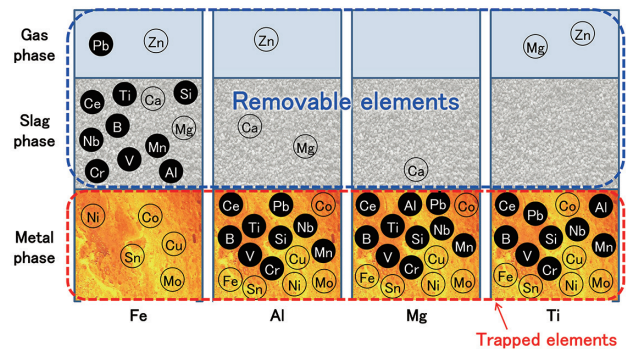


図2 リサイクル時に除去可能な元素の比較 (14) を改変
Comparison of removable impure elements when recycling

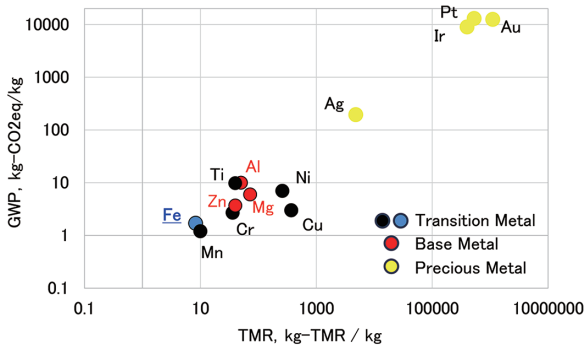


図1 種々の金属材料の地球温暖化および TMR 係数 (11) より主要金属元素を抜粋)

Global warming potential and total material requirement in metal production (Excerpt of major metals from 11))

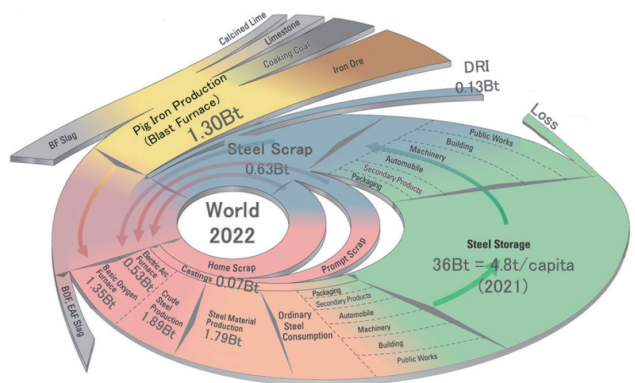


図3 世界の鉄鋼の資源循環図 (出典：一般社団法人日本鉄鋼連盟¹⁵⁻¹⁹⁾
Circularity of steel material in the world (Source: The Japan Iron and Steel Federation¹⁵⁻¹⁹⁾)

特に“NSCarbolex Solution”技術としては、各環境性能をLCAによる定量評価手法の開発により可視化し、環境性能の向上・社会全体でのGHG排出量削減に寄与する高性能鉄鋼製品とそのソリューション技術の提案を行っている²²⁾。自動車分野の事例として、ハイテンをはじめとするエコプロダクトとそのソリューション技術の最適利用²³⁾による、GHG排出量低減などの環境性能の向上効果については、後ほど詳しく紹介する。

1.2 自動車分野のCN/CE実現に向けた取り組み

CN/CE実現に向けて、大量のエネルギー・素材を使用している自動車（運輸）部門での対策は特に重要である。自動車の環境規制は、転換期を迎えており、枠組みが変化しつつある。今日では、単なる走行時の環境負荷だけでなく、車両の素材製造から廃棄までを含めたライフサイクルにおけるGHG排出量を規制対象とする動きが始まっている²⁴⁾。走行時の環境負荷低減の観点で、グリーン電力化と自動車の電動化によるGHG低減対策が進展しつつある。それに加え、車両製造時の環境負荷低減の観点で、自動車素材として主に使用される、鉄鋼、アルミ（板、押し出し、ダイカスト）、樹脂、銅、電池・電極材（Ni, Cr, Mn, Li）と多岐にわたる材料でのCN・CEの実現に向け、製造プロセスの変革によるGHG排出低減^{例えば25)}、リサイクル時の分別の容易化、クローズドループリサイクル実現に向けた取り組み^{例えば26)}が進められている。

鉄鋼材料でのGHG削減のための代表的な取り組みとしては、自動車鋼板のハイテン化による部品の軽量化が推進されている。冷間成形用での部品強度は1470MPa級、ホットスタンプ（HS）用鋼板では2.0GPa級に達している。それぞれ、一般的な270MPa級の鋼板の約5倍、約7倍の強度である。素材の軽量化ポテンシャルを示す指標に強度を比重で除した比強度があるが、これら先進ハイテンは車体用軽金属のそれを大きく上回っている。

日本製鉄では、これらハイテンを活用し、薄肉化と高強度化の両立により、アルミ車体同等の車体軽量化を可能とし、ライフサイクルでのGHG排出量削減にも貢献する²⁷⁾次世代自動車コンセプト“NSafe®-AutoConcept（NSAC）”²³⁾を構築している。

図4は、従来鋼製車体および上記技術群を適用した、新たな提案コンセプトNSAC-ECO³軽量鋼製車体の素材強度分布であり、マルチマテリアル車体との対比で示した。従来、鉄を利用した自動車は重いものと想定され、ケーススタディが行われていた²⁸⁾。一方、新しい提案コンセプトNSAC-ECO³は、NSafe-AutoConceptで提案してきたハイテンを用いてアルミ適用車体同等に軽量化する技術をさらに進化させ、電動化に伴う車両製造コスト上昇や工程・工数増等の課題にも対応し、CO₂をはじめとするGHG排出削減・環境負荷低減（Ecology）、コスト低減（Economy）、最適生

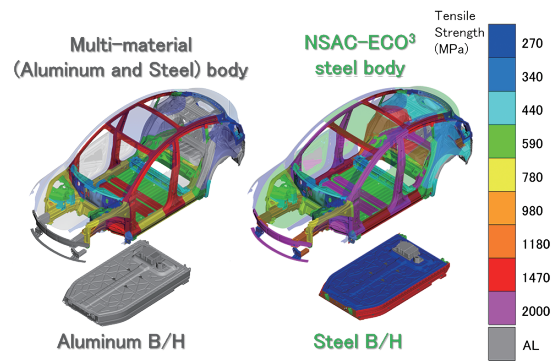


図4 車体への適用材料分布（マルチマテリアル車体とNSAC-ECO³車体の比較）

Comparison of material distribution between multi-material body and NSAC-ECO³ steel body

産システム（Eco-System）を両立できる。

図1に示したように、鉄鋼材料は製造時の環境負荷が他の金属素材に比べ小さいことを鑑みると、先進ハイテンの適用により上記のように大幅な車体部品軽量化を図った場合、ライフサイクルでの環境性能に優れると想定されるが、その効果は十分に定量化されていない。また、自動車部品へのハイテン適用による軽量化による、資源・採掘活動への影響について定量的な評価はなされていないのが現状である。

本報では、ISO 14040/44におけるLCA評価手法に則り、電動化に対応した先進ハイテンを多用した車体や部品を対象に、ライフサイクルでのGHG排出量やTMRの定量化を行うことで、先進ハイテンを用いた車体軽量化による環境性能向上について紹介する。

※LCAによるGHG排出量の本算定方法・結果については社外レビュー済である。

2. LCAによる環境性能定量化方法と評価対象

2.1 評価手法および評価対象車両、車体、部品の設定

図5に今回評価に採用したライフサイクルでのGHG排出量評価のシステム境界²⁹⁾を示す。このシステム境界は、カリフォルニア大学サンタバーバラ校（University of California, Santa Barbara）が開発した、自動車のLCAを行うための評価モデル（UCSBモデル）を引用して設定した。図5上側が、車両のライフサイクルのシステム境界であり、当モデルを用いることで、一連のライフサイクル（上流工程を含めた車両製造時、車両走行時）におけるGHG排出量とTMRの評価を実施した。さらに、今回評価で対象外としたが、図5の下側に示すスクラップの再利用についてもシステム境界に含めることは可能である。

本評価において、自動車工業会（JAMA）の自動車のCFP（カーボンフットプリント）算定ガイドライン³⁰⁾を参考に、自動車の機能単位は1車両による安全な13万6000km（16年、8500km/年）輸送に必要とされる1車体もしくは1部品とした。

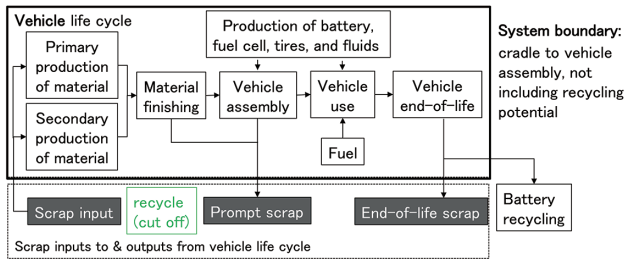


図5 UCSBモデル Ver.5²⁹⁾の自動車LCAのシステム境界 System boundary for vehicle LCA in UCSB GHG Comparison Model Version 5²⁹⁾

表1 評価対象 車体および車両モデルの仕様 Specification of vehicles and body to be evaluated

	Multi-material body vehicle	Conventional steel body vehicle	NSAC-ECO ³ steel body vehicle
Vehicle type	C-class Battery Electric Vehicle (BEV)		
Vehicle weight	1674 kg	1829 kg	1668 kg
Electric vehicle efficiency (WLTP 3b)	5.67 km/kWh	5.35 km/kWh	5.67 km/kWh
EV battery specification	NMC622, 55 kWh	NMC622, 58 kWh	NMC622, 55 kWh
Body* weight	568.5 kg	701.4 kg	563.0 kg
Body* main material	Aluminum + Steel	Steel	AHSS + Steel

* Including battery housing (B/H), chassis, panels, and lids

表1に今回の評価対象の車両および車体の諸元を示す。評価対象車両は、実際のCクラスのBEVをベースとしたアルミと鋼のマルチマテリアル車体を持つベースモデル車両(ベース条件)、ベース条件の車体のアルミを性能同等条件で従来の鋼材へ置換した車両と、それに対し、先進ハイテンを駆使した軽量鋼製車体コンセプトNSAC-ECO³の車両を設定した。コンピューターシミュレーションによる評価ではあるが、鋼製軽量車両は、衝突安全性能はベース条件と同等以上であることも確認した。

これに加えて、LCAによる評価対象として、表2に示すバンパーレインフォースメント(R/F)部品、表3に示すサイドモジュール(ドアリング)を設定した。バンパーR/F部品は、冷間ハイテンとHS、アルミ押し出し材のケースを評価した。バンパーR/F部品は、各ケースの長さを1200mmに統一し、衝突変形時の反力が同等となる断面形状を設定した。サイドモジュールは図6に示すように、冷間ハイテンのみとHSを併用した分割構造と、HSにより大規模一体化を図ったケースを評価した。サイドモジュールは、車体に組付けられた状態での側面衝突時に、Bピラーの侵入量が同等となるように、各モデルでの部品重量・材料強度を設定した。

LCAの算定は、UCSB model 5²⁹⁾およびLCAデータベース、TMRのデータベースを活用し、表1に示した車両質

表2 評価対象 バンパー R/F モデルの仕様 Specification of bumper R/F module to be evaluated

	Conventional bumper R/F	HS 2.0 GPa bumper R/F	Aluminum bumper R/F
Vehicle type	C-class BEV		
Part weight	4.50 kg	3.35 kg	3.35 kg
Part main material	1470 MPa cold rolled steel	2.0 GPa HS steel	Extruded aluminum
Production process	Cold forming	Hot stamping	Bending and machining
Process yield of part	80%	80%	80%

表3 評価対象 サイドモジュール(ドアリング)の仕様 Specification of side (door-ring) module to be evaluated

	Conventional side R/F module	HS AHSS side R/F module	Integrated HS AHSS door-ring (R/F) module
Vehicle type	C-class BEV		
Module weight/ vehicle	31.7 kg	30.0 kg	27.7 kg
Module main material	~1470 MPa cold rolled steel	~2.0 GPa HS steel and AHSS	~2.0 GPa HS steel
Production process	Cold forming	Hot stamping	Integrated hot stamping
Process yield of module	62%	62%	67%

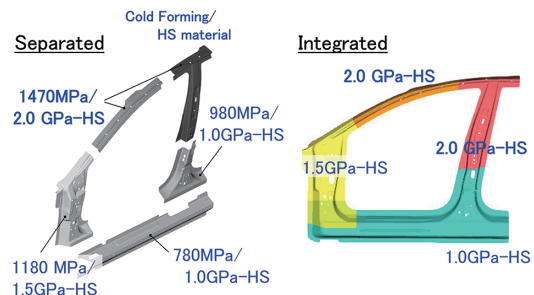


図6 サイドモジュール(ドアリング)の材料と構造比較 Comparison of material distribution between separated and integrated side module (door-ring)

量と、生涯走行距離をWLTP 3b (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure mode Class 3b)の走行パターンで136000km、車両寿命16年として入力し、16年分のメンテナンスおよび必要な交換部品を考慮して環境負荷をそれぞれ計算した。今回の評価では、世界平均の乗用車重量データを参考に、自動車の走行パターンはBEV C-classのWLTP 3bモードの設定とした。

2.2 車体・部品の算定および環境負荷の配分方法²⁷⁾

評価対象は車体または部品であるため、図5の上側に示すUCSB model 5の車両全体のシステム境界を利用し、車体または評価対象の部品がない場合とある場合のケースを設定し、図7に示すように、減算評価により目的の車体・部品の寄与分を抽出²⁷⁾して環境性能評価を実施した。

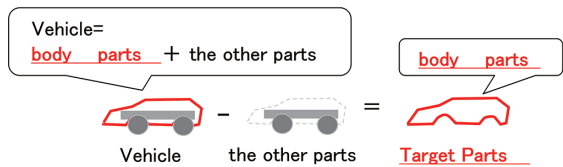


図7 車体・部品の環境負荷の抽出方法²⁷⁾
Extraction method for automobile body and parts LCA²⁷⁾

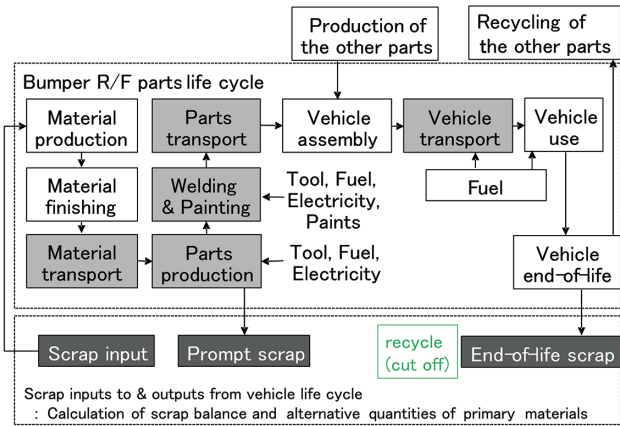


図8 自動車部品のLCAのシステム境界
System boundary for automotive parts LCA

車体のLCAによる評価において、車両製造工程における溶接・塗装は主に車体が対象のプロセスであるため、溶接・塗装工程の環境負荷は車体にすべて配分した。その他工場のユーティリティによる環境負荷は、車体と車体以外の重量比で配分した。

図8には部品評価のシステム境界を示す。灰色で表示した部品製造工程について追加で詳細な評価を行った。素材・部品・車両の輸送、各設備およびインフラの消費エネルギー、金型・治具製造負荷、塗料の製造負荷を考慮した。バンパー R/F 部品、サイドモジュールの評価において、素材製造、走行の部品寄与分は図7に示す手法で配分した。

2.3 LCA による影響領域の選択と影響評価の方法

今回の評価においては、地球温暖化の影響領域に関して、IPCC6 次の 100 年の地球温暖化係数を用いた地球温暖化ポテンシャル (GWP)、資源に関する指標として TMR^{8, 13, 31)} を用いて、車体/部品単位で LCA を行い、環境影響・性能分析を行った。

2.4 その他の前提条件

リサイクル効果を評価する手法については様々なものが提案されており、またリサイクルの実情は素材によって異なっている。鉄鋼素材については、ほぼ全量が特性を失うことなく何度でも様々な鉄鋼製品に再生される閉(クローズド)ループリサイクルによる資源循環を形成しているという特徴を踏まえ、冒頭で述べたようにリサイクル効果を含めた LCI 評価手法が規格化²¹⁾ されている。一方、その

他の素材については、カスケードリサイクルや埋め立て廃棄に依存しているものも多く、種々のリサイクル効果評価モデルが提案されているが、明確に定まっていない状況である。そのため本報では、リサイクル効果は考慮しない条件で評価した。

3. 車体部品のインベントリデータ収集と計算方法

3.1 車両/部品素材構成データ

図9にNSAC-ECO³ 車体の車両と他の評価ケース車両の素材の重量構成 (Bill of Material) を示す。車両構成データは、実際の車両の分解調査結果をもとに、車両の素材構成を推計し、衝突シミュレーションなどを用いて、耐衝突性能が同等となる各条件のモデル車体を設定した。環境性能評価において寄与度を抽出するため、車体およびそれ以外の重量を分けて表示した。マルチマテリアル車体・従来の鋼製車体に対し、下段のNSAC-ECO³ 車体車両は先進ハイテン (AHSS) をさらに適用しており、衝突性能を担保しながら車体軽量化を図っている。

3.2 部品のインベントリデータ収集

バンパー R/F 部品、サイドモジュールに関しては、現在実用化されている技術水準と著者らのグループの検討³²⁾ を踏まえ、性能が等価となる各素材での条件を検討し、表2, 3に示した部品重量を設定した。

これら部品の製造時の環境負荷の算定においては、それぞれの部品製造時のインベントリデータを収集・推計し、積み上げによる評価を行った。当該部品の生涯生産数は60万台を仮定した。

バンパー R/F 部品においては素材生産後、近郊50kmへの素材輸送を想定した。製造加工条件として、1470MPa級鋼製バンパー R/F はプレス成形による4工程の冷間加工を、2.0GPa-HS 製バンパー R/F は1工程のHSによる加工のちレーザー加工を想定した。アルミニウム押し出し材のバンパー R/F は、バンダーによる曲げ加工のち、機械加工を想定した。

サイドモジュールにおいても同様に素材生産後、近郊

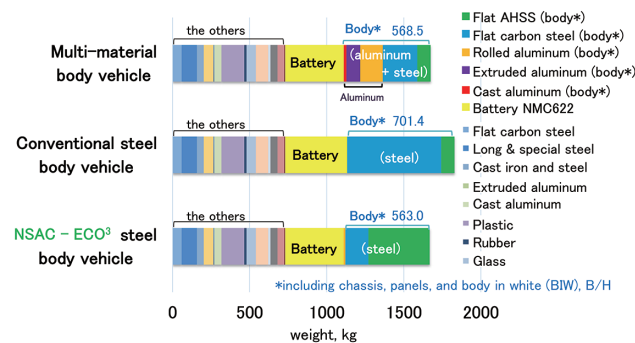


図9 評価対象車両の素材の重量構成
Bill of material of the vehicle

50km への素材輸送を想定した。製造加工条件として、従来の自動車構造に見られる一般的な冷間ハイテンによる構造、HS 鋼板を用いて高強度化とさらなる軽量化を図った構造 (図 6 左)、HS 大規模部品一体化によりさらに軽量化を図った構造 (図 6 右) を想定した。それぞれの構造において、製造工程の各工程のプレス機、金型、加熱炉、ロボット、その他付随設備の消費エネルギーを考慮した。

各ケースの部品製造工程のうち、溶接 (一体化部品の場合は省略) ・電着塗装を想定した。車両の組立て時も近郊での部品輸送を想定した。

車両完成後は、日本国内のカーキャリアでの車両輸送とし、輸送距離は 500km を想定した。廃車時の回収での走行距離は 50km、スクラップの処理施設までの輸送距離は 500km を想定した。

これら、部品製造における素材輸送、部品加工、部品輸送から車両製造、廃棄までの一連の工程のインベントリデータは、社内開発での実績調査および社外調査を用いて収集した。

3.3 バックグラウンドデータおよび計算方法

地球温暖化の影響領域に関して、GHG 排出量の原単位として単位物質・工程当たりの単位重量当たりの GHG 排出原単位である GWP、資源強度に係る単位物質・工程当たりの原単位である TMR 係数を用いた。

鉄鋼素材の GWP は、2022 年の世界平均値³³⁾を算定して使用した。アルミニウム新地金の GWP は、2022 年の世界平均値³⁴⁾を使用した。

部品評価は、図 8 に示したように工程ごとのエネルギー・使用物質について、別途積み上げにより評価した。評価の算定式については、公知文献²⁷⁾で開示しているものを使用した。車体評価における部品加工の平均歩留まりは 55% を使用した。バンパー R/F 部品、サイドモジュールの加工歩留まりは、工法検討により推計した準 1 次的な数値データとして、バンパー R/F は鋼板部品、アルミ押し出し部品とも 80%、サイドモジュールは部品加工の歩留まりとして 50% ~ 90% を各々の部品で設定した。

車両製造の原単位は、1 台当たりの数値の 2 次データ²⁹⁾を利用し、その車体寄与分を重量で配分した。部品製造に入力される輸送、燃料、電力エネルギー、金型・治具、塗料に関する原単位は、LCA データベース³⁵⁾の 2 次データを用いた。電力の原単位は、日本での製造を仮定し、2022 年の日本平均の数値を使用した。

走行段階の電力原単位は、日本での走行を仮定し、2022 年の日本平均の電源構成の電力として、同様の LCA データベース³⁵⁾の数値を使用した。走行距離は、JAMA のガイドライン³⁰⁾を参照し、年間 8500km、車両寿命 16 年を仮定し、生涯走行距離として 136000km を仮定した。自動車の走行パターンについては、BEV C-class の WLTP 3b モー

ドの設定とした。交換部品として、バッテリー・タイヤ・エンジンオイルなどを考慮したが、車体・部品の寄与を抽出した本評価においては、差分で評価されるため、結果的にカットオフ評価される。

廃棄・リサイクル段階については、廃車輸送、解体・破碎処理、素材回収による負荷を考慮した。本報では、上述のように素材リサイクル効果は考慮しない設定で評価した。

4. LCA による GHG 排出量評価結果

4.1 NSAC-ECO³ 車体

図 10 に先進ハイテンを多用し、大幅な軽量化を図った提案コンセプト NSAC-ECO³ の車体でのライフサイクルでの GHG 排出量評価結果を、マルチマテリアル車体、従来鋼製車体と比較して示す。今回のケースの中で、NSAC-ECO³ の車体は素材製造時の GHG 排出量が最小で、走行時負荷はマルチマテリアル車体と同様に GHG 排出量が従来鋼製車体より少なく、ライフサイクルでの GHG 排出量も少ないことがわかる。NSAC-ECO³ 車体は、マルチマテリアル車体に対し、GHG 排出量が半分以下という優れた環境性能を示している。

ハイテンを用いて車体軽量化を図ることで、走行時のみではなく、製造時の GHG 削減が両立できることがわかる。製造時の GHG 削減は、使用素材の“Reduce (削減)”と GHG 排出原単位が小さい鉄鋼材料の活用による効果である。また、走行時の排出量低減には車体質量がアルミを多用したマルチマテリアル車体に同等まで軽量化されたことが反映されている。さらに、車体の軽量化は、電池容量の削減などの副次的な効果も想定される。また、鉄のモノマテリアル構造化とすることで、分別回収の容易化・リサイクル性の向上が見込まれ、先進ハイテンによる軽量化は資源循環の観点でもメリットがあると考えられる。

4.2 バンパー R/F

図 11 にライフサイクルでのバンパー R/F の GHG 排出量の評価結果を示す。素材・部品・車両の輸送、各設備およびインフラの消費エネルギー、金型・治具製造負荷、塗料の製造負荷を追加評価により考慮した結果である。前述

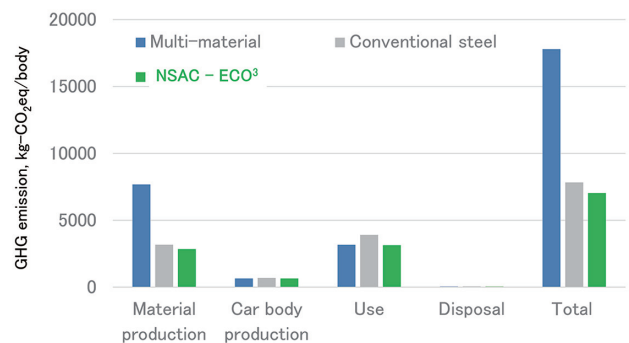


図 10 自動車車体の LCA による GHG 排出量評価結果
LCA result of life cycle GHG emissions of car body

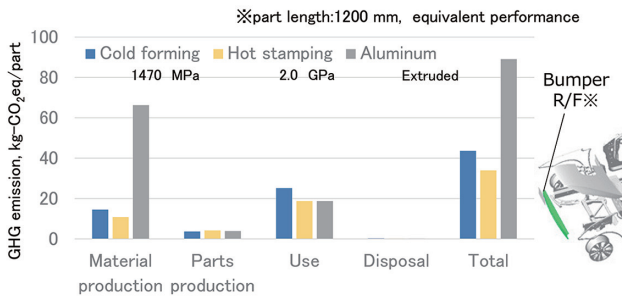


図 11 バンパー R/F の LCA による GHG 排出量評価結果
LCA result of life cycle GHG emissions of bumper R/F

のように部品単体の製造工程について別途積み上げ評価を行っているが、図 10 に示した車体の製造工程の GHG 排出量の結果と、その他の工程との GHG 排出量の相対的な関係は同様の傾向であり、素材製造時、走行時の GHG 排出量に対し、車体部品製造時の GHG 排出量は小さい。

HS-2.0GPa 級の AHSS を用い軽量化を図ったバンパー R/F のライフサイクルでの GHG 排出量が最も少ない。本結果からも、先進ハイテンを用いた軽量化によって、GHG 削減に大きく貢献できると考えられる。

HS の部品加工においては、他の加工方法よりも GHG 排出量は若干多いものの、素材製造時、走行時の GHG 排出低減効果に比べると、これら加工工程の GHG 排出量の影響は小さい。

4.3 サイドモジュール (ドアリング)

図 12 に HS による大規模一体成形技術を適用し、大幅な軽量化と生産工程の効率化を図った HS 一体化ドアリングの GHG 排出量評価結果を、従来の分割構造の冷間サイドモジュール、HS サイドモジュールとの比較で示す。HS 一体化ドアリングは、従来構造と比較し、GHG 排出量の大幅な低減が可能であることがわかる。HS によりさらなる高強度化による軽量化と、構造と工程のシンプル化による効果であると推定される。モジュールの軽量化によって、素材製造時および走行時の GHG 排出量が大幅に低減されており、HS 一体化構造の部品製造時の GHG 排出量は、一体成形による工程シンプル化により、冷間分割構造での部品製造時に迫る程度まで低減されている。

本結果からも HS 技術の適用はライフサイクルでの GHG 排出低減に有効であり、HS による部品一体化によりさらなる GHG 排出削減も可能であると考えられる。

HS 適用による軽量化はライフサイクル全体での GHG 排出量低減に有効な手段である。

4.4 ハイテンによる LC-GHG 削減貢献量

ここまで示してきたように、ハイテン適用による自動車軽量化によって、製造時および走行時の GHG 排出量削減を通じて、ライフサイクルでの GHG 排出削減への貢献が

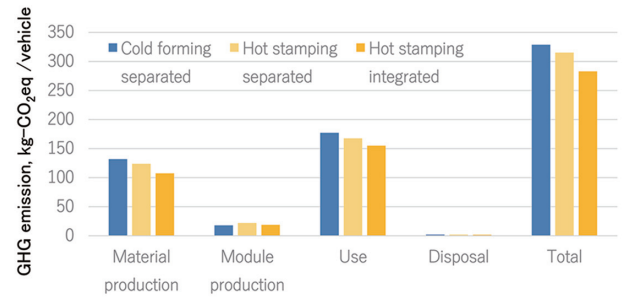


図 12 サイドモジュール (ドアリング) の LCA による GHG 排出量評価結果

LCA result of life cycle GHG emissions of side module (door-ring)

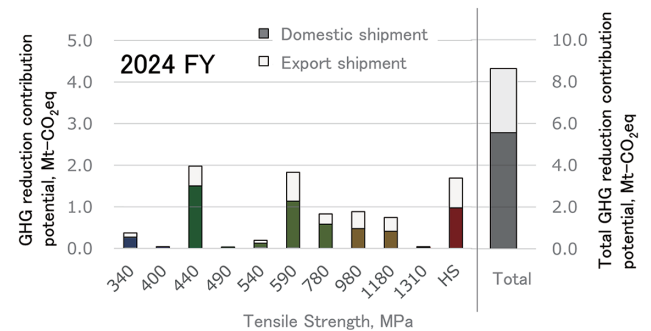


図 13 ハイテンの GHG 削減貢献量の推計結果
Contribution of high-tensile steel to GHG reduction

可能である。そこで、日本製鉄のハイテン鋼板による GHG 削減貢献量を定量化した。

推計においては、ハイテンが存在しなかった場合の一般鋼板 (SPCC) での車体重量、部品重量を、部材の材料強度・板厚の性能等価式³⁰⁾を用いて換算・推計し、ベースラインとして設定した。LCA のシステム境界は図 8 のものを用い、表 1 に示したバッテリー EV 車両モデル、および既報²⁷⁾のガソリン車両モデルを用いて、ベースラインとの比較で、軽量化による材料使用量減分の製造時の GHG 排出削減量と、部品軽量化による 13 万 6000km 走行時の GHG 排出削減量を推計した。2024 年度のハイテンの国内/海外出荷量のデータを用いて、国内・海外での EV 比率を考慮して評価した。

図 13 は、ハイテンによる GHG 削減貢献量の試算結果である。ハイテンの強度ごとと全体の GHG 削減貢献量を表しており、全体の削減貢献量は 800 万 t 超/年と見積もられる。今後のハイテンの車両へのさらなる適用拡大により、素材の“Reduce”と、走行時の環境低減が図れ、GHG 排出をはじめとする環境負荷のさらなる削減が期待される。

5. LCA による TMR と CE 指標の評価

5.1 NSAC-ECO³ 車体の TMR 評価

図 14 には、図 9 に示した各車体のケースで、バッテリーの重量変化も考慮に入れ、ライフサイクルでの総 TMR を評価した結果を示す。TMR の指標においても GHG 排出量

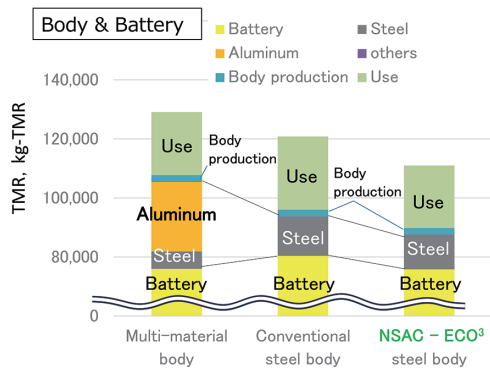


図 14 車体およびバッテリーの LCA による TMR の評価結果
Result of life cycle TMR of car body & battery

と同様の結果が得られ、車体の鋼製化・軽量化を推進することにより、資源の観点からも環境負荷の低減が期待される結果である。車体が軽量であるマルチマテリアル車体や NSAC-ECO³ 車体は、バッテリーの TMR は比較的小さいことがわかる。また、ケースごとの TMR の差異は、車体の素材製造による TMR の差異が主な要因であることがわかる。航続距離一定を仮定すると、車体の軽量化によって、表 1 に記載のとおり電費改善が図れるため、バッテリーの“Reduce”が図れる。本試算結果においては、車体の 1kg の軽量化当たり、30kg-TMR 超のバッテリー製造における TMR の低減が可能な結果である。

5.2 NSAC-ECO³ 車体の CE 指標³⁷⁾ 評価

代表的な CE 指標としては、例えば総合的な指標として CTI (Circular Transition Indicators)³⁸⁾、MCI (Material Circularity Indicator)³⁹⁾ が挙げられるが、部材と材料種類の違いの差を考慮できないことや、循環の質を考慮できないという課題が指摘されている³⁷⁾。そこで、岩田ら³⁷⁾が自動車向けに提案している、材料の種類と循環の質を定量的に考慮が可能な、以下式 (1) ~ (3) に示す CE 指標³⁷⁾を用いて、表 1 に示した車体構造における CE 性能のケーススタディと分析を行った。

$$InFlowTMR = \sum TMR \times Mass_{in} \times MatValue_{in} \quad (1)$$

$$OutFlowTMR = \sum TMR \times Mass_{out} \times MatValue_{out} \quad (2)$$

$$MatValueDissipation = InFlowTMR - OutFlowTMR \quad (3)$$

ここで *InflowTMR* はインフロー (材料投入時) の資源の価値、*OutflowTMR* はアウトフロー (廃棄・リサイクル時) の資源の価値、TMR は各素材の TMR 係数、*Mass_{in/out}* はイン/アウトフローの各素材の質量、*MatValue_{in/out}* はイン/アウトフローの各素材の資源の質 (0 ~ 1 の数値)、*MatValueDissipation* は製品のライフサイクルの資源価値の散逸量であり³⁷⁾、この値が小さいほど、CE 性能に優れることを示している³⁷⁾。本試算では、*MatValue_{in}* はバージン材を仮定し、1 と仮定した。*MatValue_{out}* は定量値が不明なため、変数として扱った。

図 15 は本 CE 指標の各車体での評価結果である。縦軸

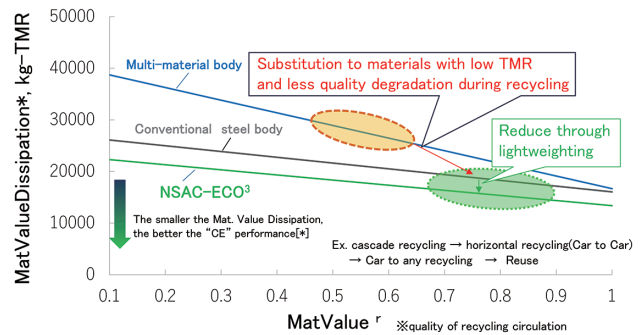


図 15 自動車車体の CE 指標³⁷⁾ の評価結果
Results of CE indicator³⁷⁾ for car body

に素材としての資源価値の散逸量、横軸には *MatValue* を設定し、各 *MatValue* 値、各車体のケースでの資源価値の散逸量を算定した。いずれの *MatValue* 値においても、先進ハイテンを適用した軽量鋼製車体である NSAC-ECO³ 車体は、資源価値の散逸量が小さく、CE の観点でも環境性能に優れる結果である。本結果から、CE 性能の向上のためには、リサイクルの質の向上だけではなく、TMR が低く資源採掘の観点で環境負荷の少ない素材の代替利用と、軽量化による使用材料の“Reduce”が重要であると考えられる。

6. 自動車の環境性能向上に向けた考察

図 16 はここまでで算定した自動車車体の GHG 排出量と TMR の関係を示したものである。自動車のライフサイクルでの環境負荷低減、環境性能向上のためには、EV においても鉄主体構造ボディに対し、超ハイテンによる軽量化を図ることで製造時と走行時の環境負荷軽減の両立を追求することが有効であると考えられる。

図 17 は、廃棄物の取り扱いに関するヒエラルキー⁴⁰⁾を示したものである。この考え方を、今回の評価対象の自動車へ適用すると、単なる廃棄 (Car to None) から、エネルギーヘリカバリーするサーマルリサイクル (Recovery)、カスケードリサイクル、Car to Car の水平リサイクル、Car to Any の無限リサイクル (鉄鋼材)、Reuse、Reduce の順で、廃棄物の取り扱い方が進化し、より好ましい取り扱い方になると考えられる。自動車の軽量化・素材の“Reduce”を行うことは、より好ましい取り組みとして解釈できる。この観点で、CN と CE 実現の点で優れる先進ハイテンを用いて、車体の軽量化を図ることは、“Reduce”の取り組みであり、合理的であると考えられる。

本手法を用いた自動車部品の LCA による環境負荷評価システムを開発・構築済みであり、特定ケースにおける環境負荷の算定や、具体的な環境負荷低減のためハイテンと利用技術の総合ソリューション提案も可能である。

CE の実現に向けては、自動車分野では Car to Car のリサイクルの取り組みが進められている。スクラップを通じた

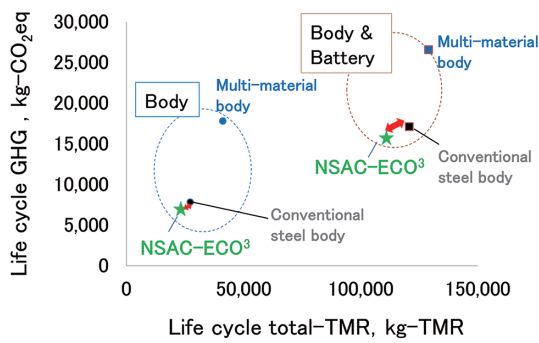


図 16 自動車車体の GHG 排出量と TMR の関係
Results of GHG emission and TMR of car body & battery

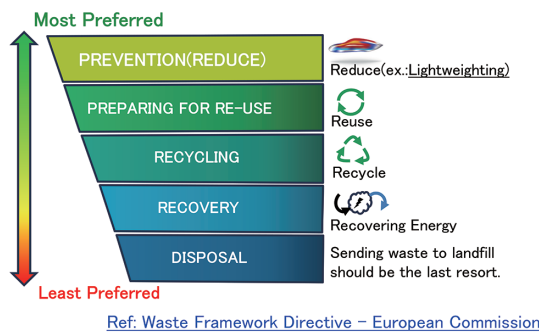


図 17 廃棄物の取り扱いに関するヒエラルキー⁴⁰⁾
Hierarchy of waste management⁴⁰⁾

循環プロセスのみで社会が必要とする自動車製品が十分に供給されることが理想的ではあるものの、スクラップだけでは需要を満たすことはできない。そのため、鉄鋼材料においては、全体としての環境負荷低減を考慮し、高炉材と電炉材を最適に組み合わせることも重要であると考える。CN の実現に向けては、自動車用鋼板の原料であり、不可欠な OBM (Ore-based Metallics (primary steel)) の生産の脱炭素が本質的課題であるため、日本製鉄は OBM 生産プロセスの脱炭素化にも取り組んでいる²⁵⁾。温室効果ガス排出削減の具体的な技術として、“①高炉水素還元”、“②水素による直接還元鉄製造”、“③大型電炉での高級鋼製造”等の超革新技術の開発・実装を行っている²⁵⁾。

本報では、主に環境価値の定量化技術とそれにより定量化したハイテン適用車体の環境性能について述べたが、このような環境価値を社会全体で経済価値に転換していくことは鉄以外の素材・加工・製品にも共通する今後の課題である。

7. 結 言

先進ハイテンを活用した車体および部品を対象に LCA により環境性能を評価し、鋼製の軽量車体は、GHG のみでなく資源循環の観点でも優位な結果が得られた。先進ハイテンとその利用技術などのソリューション技術の蓄積を総合することにより、環境負荷を最大限低減した車体が可能で、鋼材による自動車軽量化は、CN-CE を両立する最

も有効な手段となることが期待できる。

素材製造時の GHG 排出量が低く、豊富に存在するため採掘時の環境負荷が小さく、かつリサイクルによる資源循環が高度に機能している鉄鋼材料を車体部品に適用すること、さらに先進ハイテンを活用した軽量化検討を通じ、製造時と走行時の環境負荷の低減を両立することが、廃棄物の“Reduce”にもつながり、循環型社会を実現するために有効であると考えられる。

本報で述べた自動車部品の LCA による評価手法による環境負荷定量化システムを活用し、ハイテンと利用技術の総合ソリューション提案を通じ、具体的な環境負荷低減の取り組みを推進していく。

謝 辞

GHG 排出量の算定において、原単位選定の支援および計算のレビューをいただいた日鉄テクノロジー(株)の田中陽子氏、北口久継氏、TMR の算定において、自動車関連の TMR のデータベースをご提供いただいた立命館大学の山末英嗣教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省地球環境局国際連携課：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ/SDGs, 2015 年 11 月, <https://www.env.go.jp/earth/sdgs/>
- 2) サステナビリティ基準委員会：サステナビリティ開示基準, 2025 年 3 月, https://www.ssb-j.jp/jp/ssbj_standards.html (国内のみ参照可)
- 3) トヨタ自動車(株)：The Mirai LCA レポート for communication, 2015 年 6 月, https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/esg/challenge2050/challenge2/life_cycle_assessment_report_jp.pdf
- 4) WorldAutoSteel: Life Cycle Assessment: Good for the Planet, Good for the Auto Industry, http://www.worldautosteel.org/download_files/Communication/Communication%20-%20Car%20Manufacturers%205.0_USLTR_20130404.pdf
- 5) Worldsteel Association: GHG chain of custody approaches in the steel industry, worldsteel Association, <https://worldsteel.org/climate-action/chain-of-custody/> (参照：2024.12.1)
- 6) International Aluminium Institute: Life Cycle Inventory Data and Environmental Metrics for the Primary Aluminium Industry, 2022
- 7) 環境省：排出原単位データベース (Ver 3.4), 環境省, https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate_05.html
- 8) 国立研究開発法人国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出データ, <https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>
- 9) 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 一般社団法人産業環境管理協会：LCI データベース IDEA version 3.4., 2024
- 10) 醍醐市朗：材料を評価対象とする LCA. 鉄と鋼, 108 (11), 811-

- 822 (2022), <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2022-058>
- 11) Kosai, S., Yamasue, E.: Global warming potential and total material requirement in metal production: Identification of changes in environmental impact through metal substitution, *Science of The Total Environment*. 651 (2), 1764-1775 (2019)
 - 12) Geyer, R.: Parametric Assessment of Climate Change Impacts of Automotive Material Substitution, *Environ. Sci. Technol.* 42, 6973-6979 (2008)
 - 13) 中島謙一, 原田幸明, 井島清, 長坂徹也: 関与物質総量 (TMR) の算定 - エネルギー資源および工業材料の TMR -. *J. LCA, Japan*. 2 (2), 152-158 (2006)
 - 14) 平木岳人, Xin Lu, 中島謙一, 松八重一代, 中村慎一郎, 長坂徹也: 軽金属のリサイクル性に関する熱力学的検討. 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, 23, 2691, 2012
 - 15) 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼製品のライフサイクルとリサイクル, https://www.jisf.or.jp/business/lca/material_flow/index.html
 - 16) worldsteel: *Steel Statistical Yearbook 2023*. 2023
 - 17) Bureau of International Recycling: *World Steel Recycling in Figures 2023 update*, 2023
 - 18) 鉄リサイクリング・リサーチ: 21年末の世界鉄鋼蓄積量推計と電炉シェア. 調査レポート. No.68
 - 19) United Nations: *World Population Prospects*, 2023
 - 20) 磯原豊司雄: 日本鉄鋼協会第233・234回西山記念技術講座「鉄鋼のLCA」, 日本鉄鋼連盟, https://www.jisf.or.jp/business/lca/reference/documents/201805_nishiyamakinen_jisf.pdf (参照日 2021年9月1日)
 - 21) ISO/JISC: ISO 20915/JIS Q 20915:2019 (鉄鋼製品のLCI計算方法の規格). 2019, p.28
 - 22) 日本製鉄(株): NSCarbolexR [エヌエスカーボレックス] | 社会全体のCO2排出削減に貢献する技術・ブランド, 2022
 - 23) 日本製鉄(株): プレスリリース 2021年5月25日, https://www.nipponsteel.com/news/20210525_100.html
 - 24) 欧州議会理事会: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-66-2022-INIT/en/pdf>
 - 25) 日本製鉄(株): 「カーボンニュートラルビジョン2050」の推進, 2024, <https://www.nipponsteel.com/csr/env/warming/zerocarbon.html>
 - 26) トヨタ自動車(株): 循環型社会・システム構築チャレンジ, トヨタ自動車株式会社公式企業サイト, https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/esg/challenge2050/ms5-18_fij_jp.pdf
 - 27) 久保雅寛 ほか: 鋼製軽量車体および部品のライフサイクルでの温室効果ガス排出量評価. 自動車技術会 2022年春季大会学術講演会講演予稿集. 文献番号 20225281, 2022
 - 28) 日本アルミニウム協会: 自動車用材料のアルミ化によるCO₂削減貢献定量化調査報告書. 2022, https://www.aluminum.or.jp/wp-content/themes/dp-colors/img/en_20211013.pdf
 - 29) WorldAutoSteel: UCSB Energy & GHG Model, 2024, <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/ucsb-energy-ghg-model/>
 - 30) (一社)日本自動車工業会: JAMA CFP ガイドライン 2024版(本編). 2024, <https://www.jama.or.jp/operation/ecology/LCA/index.html>
 - 31) Kosai, S., Matsui, K., Matsubae, K., Yamasue, E., Nagasaka, T.: Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances. *Resources, Conservation and Recycling*. 166, (2021)
 - 32) 木本野樹 ほか: 日本製鉄技報. (425), 31 (2025)
 - 33) World Steel Association: *Life cycle inventory (LCI) report*, 2023
 - 34) International Aluminium Institute: *Greenhouse Gas Emissions Intensity Primary Aluminium*, 2024
 - 35) Sphera Solutions: *LCA for Experts (LCA FE) software*, 2024
 - 36) 中澤嘉明 ほか: 自動車技術会論文集, 37 (3), 43 (2006)
 - 37) 岩田隆道 ほか: 自動車のサーキュラーエコノミー指標の提案 - 持続可能な社会に貢献するクルマの評価手法 -. 自動車技術会論文集, 56 (3), 607-612 (2025)
 - 38) *Circular Transition Indicators*, World Business Council for Sustainable Development, 2020
 - 39) *Circular Indicators: an approach to measuring circularity Methodology*, Ellen MacArther Foundation, 2015
 - 40) European Commission: *Waste Framework Directive*, 2023, https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en



久保雅寛 Masahiro KUBO
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主幹研究員 博士(エネルギー科学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



井口敬之助 Keinosuke IGUCHI
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
室長 博士(エネルギー科学)



吉田博司 Hiroshi YOSHIDA
鉄鋼研究所 接合研究部長 博士(工学)



佐藤浩一 Koichi SATO
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部長
博士(情報科学)