

解 説

研究会成果報告 - 34

持続可能な社会に寄与する鉄鋼材料の 社会的価値の見える化

Visualizing the Social Value of Steel Contributing to
a Sustainable Society

醍醐市朗
Ichiro Daigo

東京大学
先端科学技術研究センター
准教授

1 はじめに

鉄鋼材料は、その高い機能性により多くの社会的価値を提供するとともに、生産プロセスにおける環境負荷を排出している。持続可能な材料使用を考えると、なるべく少ない環境負荷誘発により、なるべく高い機能を提供する材料使用システムが望まれる。標準化された環境負荷の評価技法であるLCA (life cycle assessment)¹⁾は、製品評価のための手法であり、材料に関するプロセスデータがインベントリデータ^{2,3)}として整備されている。鉄鋼業も子細なインベントリデータを提供してきた⁴⁾。鉄鋼材料は、そのライフサイクルにおいて多くの価値を提供しているにも関わらず、製品が主導してきた従来のLCA手法では、鉄鋼材料の持つ機能や価値を十分に表現できていない。そこで、後述する研究会メンバーも携わり、鉄鋼材料の特長である優れた循環性を考慮したインベントリ手法の標準化が大学を中心に検討され^{5,7)}、また鉄鋼業界においても検討されてきた⁸⁾。この検討の結果は、2018年11月に鉄鋼製品のライフサイクル環境負荷計算方法の国際規格 (ISO 20915)⁹⁾として結実され、2019年6月には国内版として鉄鋼製品のライフサイクルインベントリ計算方法 (JIS Q 20915)¹⁰⁾が制定された。これらは、従来の最終製品主体で評価手法が研究されてきたLCAにおいて、素材に焦点を当てた新しいライフサイクルインベントリ評価の枠組みの好事例と言える。しかしながら、この計算方法においても、鉄鋼材料が発揮する機能ではなく、重量単位での評価が慣例であるため、まだ材料の多様な機能を表現するには至っていない^{2,4)}。持続可能な社会に向けて、材料における高機能化は不可欠であるにも関わらず、今の枠組みでは素材における技術開発の効果を評価することは困難である。つまり、現行のLCA手法だけでは、持続可能な社会への材料

開発の筋道を描けないと言えよう。そこで、革新的LCAによる鉄鋼材料の社会的価値の見える化が必要であると考えられる。

とりわけ、鉄鋼材ならびにそれを提供する鉄鋼業における技術は、持続可能な社会に向けて必要不可欠な要素である。また、鉄鋼業で培われた要素技術等がもたらす社会への貢献先は、他の素材や他の産業と比較しても非常に幅広い。そこで日本鉄鋼協会では、2015年度より環境・エネルギー・社会工学部会 (現：サステナブルシステム部会) で「鉄鋼材の社会的価値評価の再考・発信フォーラム」(座長：醍醐市朗 (東大))を開始し、2017年度より研究会Iとして「革新的LCAによる鉄鋼材料の社会的価値の見える化」研究会を設立し、2019年度までの3年間活動した。本研究会では、鉄鋼材料の持つ機能や価値を、それらの社会との関わりを明確に再整理し、鉄鋼業における技術開発による効果が見える化できる革新的なLCAを確立することを目的として、筆者が研究会主査を務め、幹事には松八重一代氏 (東北大)ならびに山末英嗣氏 (立命館大)、加えて3名の学側委員と5名の産側委員、1名の産側の研究協力者の体制にて研究を進めた。また、本研究課題の特徴として、成果のアウトリーチも重要であるため、オブザーバとして日本鉄鋼連盟からも2名ご参加頂いた。本稿では、研究会によって得られた成果の一部を報告する。

2 鉄鋼材、鉄鋼技術、鉄鋼業により 創出される社会的価値を評価する 枠組みの開発

2.1 鉄鋼材が創出する社会的価値

先述のフォーラムならびに研究会活動を通して、鉄鋼が創出する社会的価値の認識を高めるために、その価値、貢

献先および両者の関係性を同定することをすすめた。例えば、GHG (greenhouse gases) の排出に関して、電力セクターに対しては、需要家である家庭や産業が自分の便益のために電力を消費していることを自覚しているため、需要家にもその排出責任の一端があるとの認識が強いように考えられる。これは、GHG protocol¹¹⁾において電力消費に伴うGHG排出量がscope 2として特別に扱われていることからもうかがえる。一方、素材に対してはどうであろうか。鉄鋼材を用いた自動車、建築物、土木構造物、機械類などの最終的な需要家である家庭や産業は、需要家にもその排出責任の一端があるとの認識は薄いと考えられる。1つの要因としては、消費者は自動車を購入したのであって、鉄鋼材を直接調達していないことや、消費者が使用材料を選択していないことが挙げられる。他の要因としては、鋼橋のような土木構造物を利用して便益を得ていたとしても、個人や法人の所有でも消費でもない公的なインフラであるため、その便益自体に対する認識も希薄であることが考えられる。さらなる要因としては、電力を含むエネルギーや食品が消費時に便益が得られるのに対して、鉄鋼材をはじめとする素材では消費財としての使用期間中は継続的に便益が得られるため、生産・消費の活動と、便益を享受する時期が異なることが考えられる。2010年の粗鋼生産量は世界全体で14.4億トンであるものの、2010年末時点において世界全体で使用されている鉄鋼材の量は240億トンと推計されている¹²⁾。加えて、エネルギーや食品は消費するとほぼ価値がなくなるのに対して、鉄鋼材はその高い循環性から、使用済みとなったあとリサイクル原料として高い価値を有している¹³⁻¹⁵⁾。このような違いが理解されていないことも手伝って、脱炭素の文脈において、一般消費者や他産業自体が、鉄鋼材が提供する大きな便益を享受しているにも関わらず、その便益と生産活動との関連を強くは認識できずに、生産時のGHG排出量の大きさだけが目立っているように考えられる。

従前のLCAでは、主に環境への負荷を評価結果としており、素材の利用に伴う負の側面に焦点があてられてきた。一方、素材の機能は、暗黙的に質量で評価されており、正の側面としての素材の社会的価値は、評価されてこなかった。この素材の社会的価値に関して、欧州では、十数年前より、SOVAMAT Initiative¹⁶⁾を中心に議論が進められているものの、社会的価値の定義、評価の枠組み、更には、指標等は十分には整っていない。これに対して、本研究会では、素材の社会的価値、とりわけ、鉄鋼により創出される社会的価値 (Social value of “Tetsue” : SovaTetsu)¹⁷⁾に着目して、各種技術開発の社会への貢献を含めて、鉄鋼材の社会における価値の視覚化および評価に取り組んだ。

鉄鋼により創出される社会的価値を評価する上で求められる視点の整理のために、価値と貢献先を抽出するためのラウンドテーブル形式でのグループワークを以下のように開催した¹⁸⁾。

鉄鋼の専門家；2015年7月13日 (11人)

鉄鋼の専門家；2015年8月19日 (6人)

鉄鋼の専門家；2015年9月18日 (7人および8人)

鉄鋼の専門家；2018年6月25日 (13人)

LCAの専門家；2016年3月 (10人以上)

大学院生等；2017年11月11日 (7人)

各グループワークでは、鉄鋼材料・鉄鋼製品、あるいは、鉄鋼業が創出・提供する価値を抽出・類型化した上で、価値と貢献先である社会との関係性の整理を実施した。その結果、上述のグループワークでの議論から、特徴的な価値・貢献先として、6分類の価値 (素材としての価値、循環の基軸としての価値、プラントが存在する価値、他産業への波及的価値 (貢献と牽引)、文化的価値、知識体系に及ぼす価値) および6分類の貢献先 (低炭素社会、循環型社会、安心・安全、経済発展、イノベーション、豊かさ) が同定された。

さらに、鉄鋼の専門家によるグループワークの結果と、それ以外のグループワークの結果を比較することで、鉄鋼の専門家が認識する価値・貢献と他者が認識している価値・貢献には大きな隔たりがあることが課題として見えてきた。これは、まさに上述のような鉄鋼材の便益について、一般にはあまり認識されていないことの証左でもあると考えられる。そこで次に、鉄鋼が創出する社会的価値の認識を高めるために、価値、貢献先および両者の関係性の視覚化に取り組んだ。視覚化に際しては、先述の6分類の価値ならびに6分類の貢献先を取り上げた。価値と貢献先の関係性を要素として、表形式 (6行6列) にて整理した。要素とした関係性は、グループワークの議論を踏まえて約80項目を抽出した。視覚化に際しては、頻度の高い項目や消費者の認識が十分ではないと思われる項目を選定した。

鉄鋼が創出する社会的価値について、価値、貢献先および両者の関係性をFig.1に示した¹⁹⁾。図中の6色は上述の価値に対応している。また、中央を取り囲む6つの領域は上述の貢献先に対応している。例えば、循環型社会への貢献は、素材としての価値 (e.g. 長寿命、高強度、リサイクル性) が省資源を支える製品の長寿命化や資源の高い循環性に貢献していること、更には、循環の基軸としての価値 (鉄、プラスチック、タイヤ等のリサイクル、スラグの有効利用) が省資源化および廃棄物の削減などに貢献していることを表現している。また、経済発展への貢献には、高機能な素材としての価値が経済発展を支える社会基盤の整備に貢献すると共に、製鉄・製鋼プラントが存在する事により、上流・下流側および周辺地

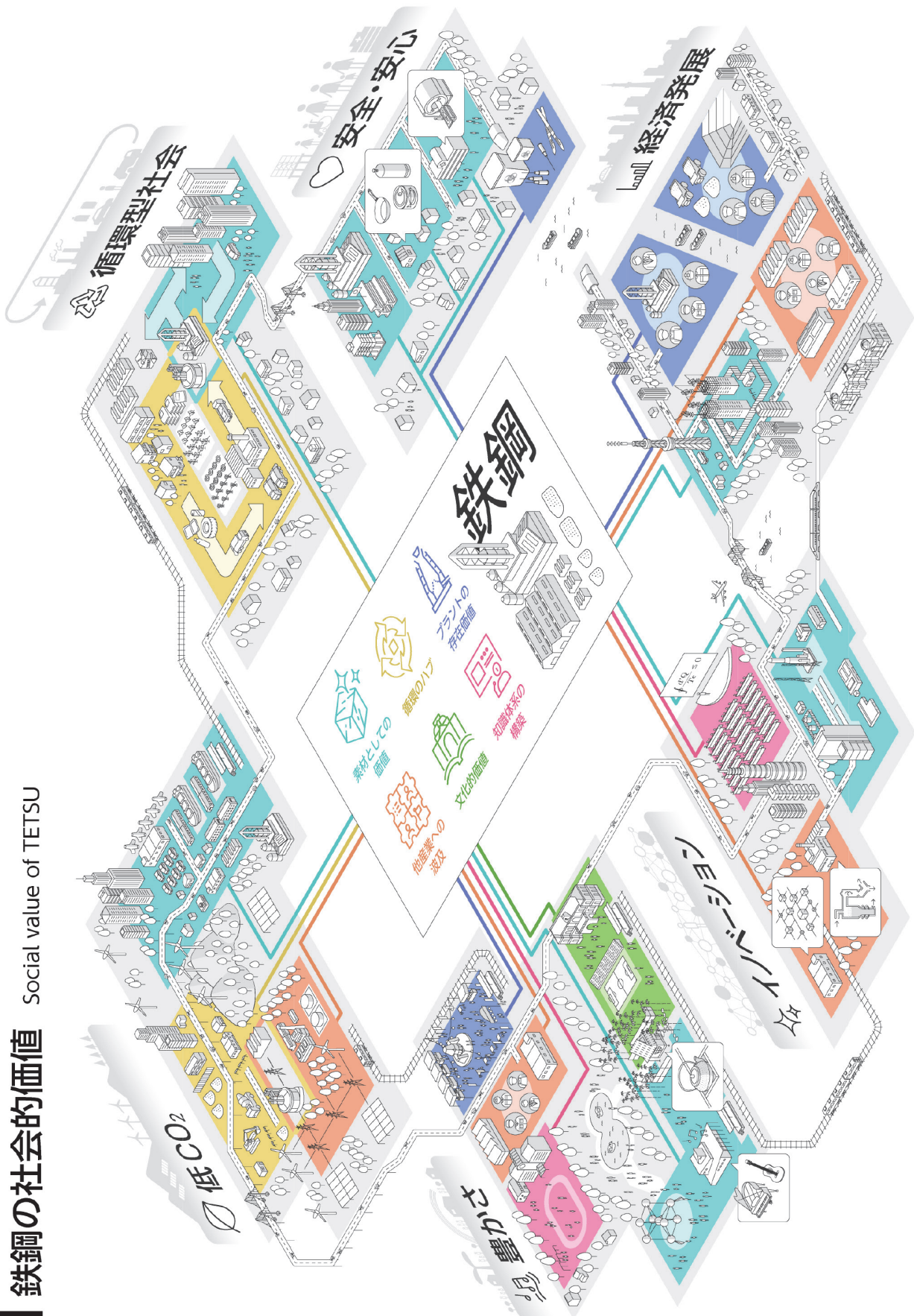


Fig.1 Illustration of 'Social value of TETSU'. (Online version in color.)

域の経済活性化や雇用の創生に貢献していること、加えて、同様に他産業にも波及的な効果を生み出していることを表現している。2018年10月22－23日に横浜で開催された世界循環経済フォーラム（World Circular Economy Forum）にて、日本鉄鋼連盟の展示ブースにおいて、この図（英語版）を大きく掲げるとともに、来場者に配布したことは、本研究会活動の大きなアウトリーチ活動の1つとなった。

2.2 金属素材産業におけるSDGs（sustainable development goals）を通した価値創出²⁰⁾

ESG投資の拡大により、自社の活動が環境、経済、社会に及ぼす影響をバリューチェーン全体で把握することが企業にもとめられている。特に2015年に採択された持続可能な開発目標（SDGs）に沿った投資枠組みの構築が広がっており、企業報告書等の中で自社の活動がどのようにSDGs達成に貢献するかを示すSDG報告の必要性が高まっている。とりわけ金属産業では、資源開発に付随するESG課題が資源の利用可能性に直結しており、これらの課題への対応をSDG報告等によって市場に示すことが重要である。その一方、金属産業のようなBtoB企業ではSDG報告が進んでいないことが指摘されている。そこで、国内外の材料製造事業者61社の報告書を分析することで、金属産業とSDGsの関係性を検証した。SDGsに関連する活動の数を代理指標として採用し、企業とSDGs17項目との関連性の強さを測定した結果をFig.2に示す。金属業界はSDGsの目標8、目標3、目標12に関連する価値創出に重点を置いているものの、目標14、目標2、目標1との関連性を強く示せていない現状が明らか

になった。また、これらの関係性は企業の生産金属によって異なる傾向を示した。鉄鋼産業は原料である鉄鉱石を資源開発企業から購入して調達しており、原料の安定供給に向けた取り組みや意識が目標12と紐づけられている。その反面、様々なESG課題が生じている資源開発のローカルコミュニティに関しては、直接的なステークホルダーと捉えられていない。それに対して銅産業では、資源開発企業が同時に材料製造者としての役割を担っている。従って、ローカルコミュニティにおける目標1、目標2の達成は材料製造者が直面する課題と位置付けられており、関係が強く意識されていると考えられる。すなわち、現状のSDG報告は各企業が直接的に関与している環境やステークホルダーの影響が強く、バリューチェーン全体を通した影響をSDG報告に反映できていない可能性が示唆された。金属産業は、前節で俯瞰したような自社の製品や産業活動が社会で生み出している価値を考慮することで、SDGsへの貢献のさらなる機会を見出すことが可能である。

3 材料機能を評価する手法の構築

材料が提供する価値の中でも直接的な価値が、それら材料が発揮する機能である。持続可能な発展のためにも、材料の高機能化が欠かせない。天然資源やエネルギーを消費して生産される材料にとって、資源効率の向上には、リサイクルの促進だけでなく、材料あたりの供する機能量の向上が望まれる。鉄鋼材をはじめとする金属素材では、高い特性を得るために、合金元素の添加や複雑な熱処理による組織制御が実

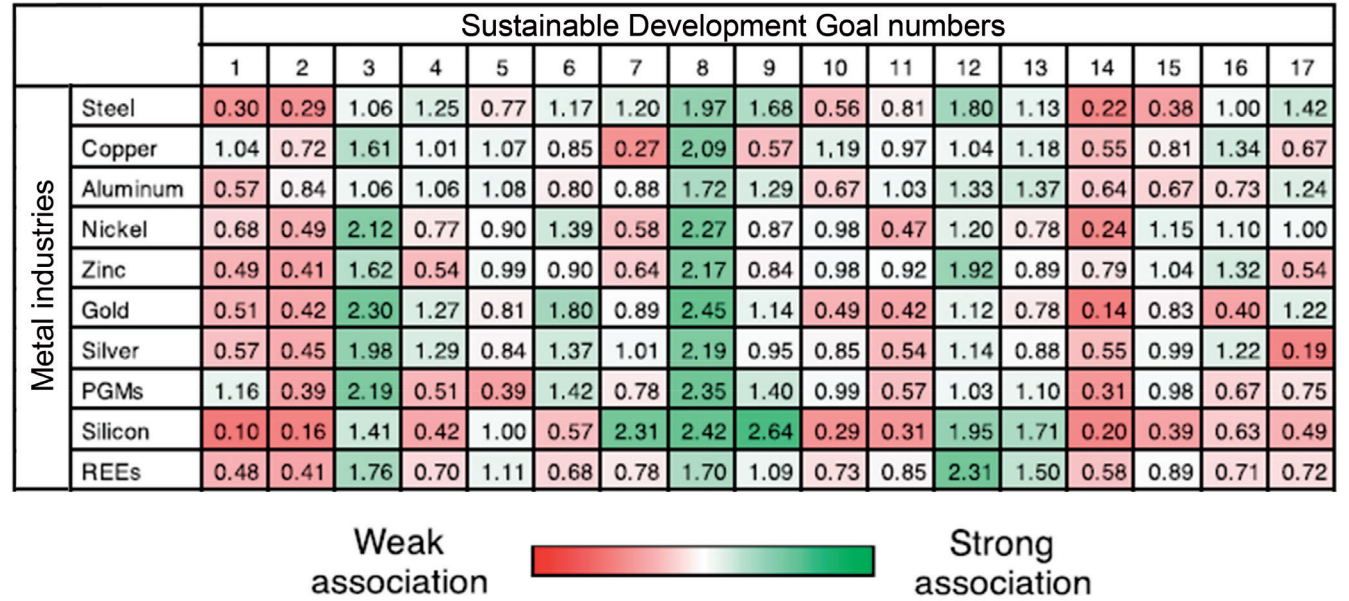


Fig.2 Intensity of association between 10 metals industries and 17 SDGs by the metals industry. (Online version in color.)

施される。一方、このようなプロセスは、二酸化炭素排出やエネルギー消費量の増加ならびに、資源量やひいてはtotal material requirement (TMR) の増加につながると考えられる。つまり、材料の高機能化のためには、追加的な環境負荷が誘発されることも多い。ここで、材料機能を定量することを考えると、材料ごとに提供する特性は1つに限定できるものではなく多様であり、それぞれに異なる次元を有するため、それら異なる機能量の向上を総合的に定量評価することは容易ではない。いままで材料間や特性が異なる合金間の環境影響の比較においては、一般に単位重量あたりの環境影響が用いられており、便益である特性を合金間で等価にする手法は提案されてこなかった。そこで、異なる特性を有する異なる金属材料に対して、機能量あたりによって誘発される環境負荷を比較する手法を開発した。

多様で異なる特性を等価とする手法として、包絡分析法 (Data Envelopment Analysis, DEA) を用いることが考えられる。複数の指標を集計することができ、パフォーマンスを比較評価するオペレーションズ・リサーチの手法である DEA は、フロンティア (production frontier) に対する生産効率性 (productive efficiency) の比較に基づくアプローチであり^{21,22)}、複数項目の総合評価に際して、評価対象相互間の関係において、項目間の重み係数が得られる点、評価対象ごとに重み係数が異なる点が特徴的である。評価軸が2つの場合の概念図を Fig.3 (a) に示すように、それぞれの評価値において最も高い出力値を持つ対象 (図中 #1 と #2) と、そのバランスにおいて最も優れる対象 (#3) の3つが全て最も優れていると評価される。また、それらを頂点として描かれた線がフロンティアとなる。その他の評価対象は、原点からフロンティアまでの距離に対しての対象までの距離の比が生産効率となり、Fig.3 (a) の例では、#4 が 0.4、#5 が 0.8 と評価される。評価軸は、分析の意図に従った decision making unit

(DMU) として設定され、得られた効率は、すべての DMU について個別に定式化された線形計画モデルにより計算される²³⁾。DEA の最大の利点は、単位の違いに関係なく、複数のインプットとアウトプットを考慮することができる点である。したがって、本評価の対象となる異なる次元を有する多様な材料特性に対して指標の正規化は不要である。

ケーススタディとして、様々なステンレス鋼を対象として評価した。評価に用いた DEA モデルは、インプットの増加に伴いアウトプットの規模に対する収穫が変動すると仮定したもので、文献上では Bank Copper and Charnes (BCC) モデルとも呼ばれる²³⁾。ステンレス鋼は、合金元素の添加や複雑な熱処理による組織制御によって、高い特性を得ることができる。そこで、環境影響の指標として TMR を入力、降伏応力と引張強度を2つの機械的特性、耐孔食指標を1つの化学的特性とした。これら3つの特性を出力とすることで、TMR あたりの特性の効率性を定量することに成功した²⁴⁾。

さらに、従来の DEA では、複数項目の評価が独立であることが前提になっている一方、材料の特性は、伸びと強度のように独立に技術開発できるものではない点で、単純に DEA を材料特性の評価に適用することは妥当でない場合もあると考えられた。そこで、本研究では、材料の特性評価のために、従属スコアによる包絡分析法を開発した²⁵⁾。

頂点間を直線で結んだフロンティアは、出力値がお互いに独立であることが前提になっていた。しかし、材料特性においては、2つの特性の向上が相反することがあるため、従属した出力値に適用可能な手法を開発することが求められる。そこで、Fig.3 (b) に Fig.3 (a) と同じプロットに対する概念図を示す。Fig.3 (b) は新しく開発したフロンティアの概念である。全ての評価軸において高い評価値のものが無い限り、それがフロンティアとなる。そのため、Fig.3 (a) でフロンティアであった3点に加え、Fig.3 (a) ではフロンティアで

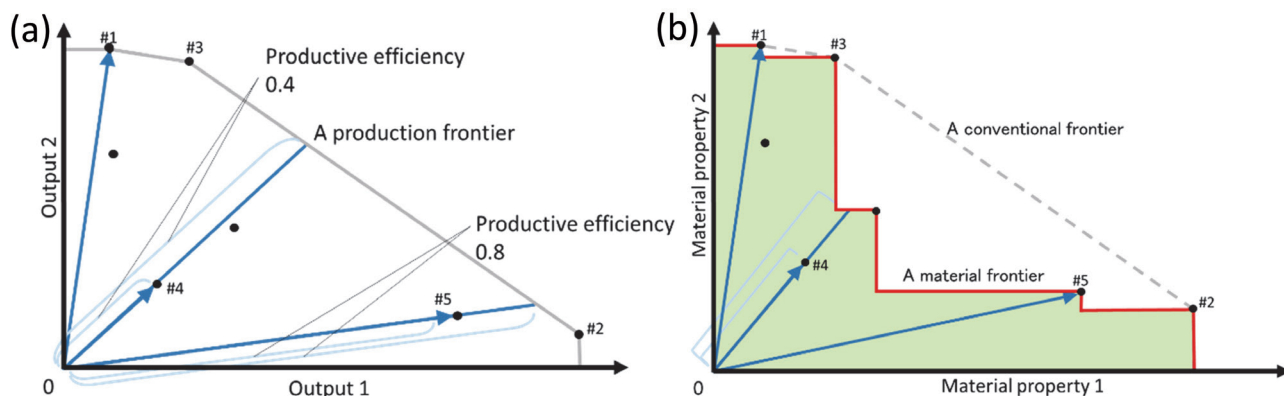


Fig.3 Schematic illustration of (a) conventional data envelopment analysis and (b) free disposal hull analysis for materials.(Online version in color.)

はなかった2点が、Fig.3 (b) ではフロンティアとなった。これは、Free Disposal Hull (FDH) 分析とも呼ばれる手法であり²⁶⁾、DEA手法の前身の手法として知られる。つまり、複数の材料機能の統合においては、それら材料機能間の関係性に応じたDEAならびにFDHの場合によって併用したモデルが必要であると考えられた。

FDH分析を用いて、全く異なる機械的特性(強度)と電気的特性(導電性)が求められるバスバーに代表されるようなアルミニウム素材をケーススタディの対象として、材料機能の時系列での機能向上を評価した²⁵⁾。評価尺度には、引張強度/MPaと導電率/ $S \cdot m^{-1}$ を採用した。この尺度は、ともに機能向上と、同一機能を提供するために必要な材料量が反比例する。ただし、形状等の一部の設計上の条件は仮定する必要がある。過去からの各年に消費された材料の特性を、その時点のJISの要求値とした。2015年に使用されている強度と導電性を要求するアルミニウム素材を、1967年のフロンティア材で供給された場合と比較したところ、1967年当時の材料量の80%の使用量で、同一機能を再現できることがわかった。材料開発による高機能化を、従来のLCA評価の機能単位である材料重量に換算することに成功した。

本研究会では、多様な特性を有する材料の特性評価手法に先鞭をつけたと言えよう。評価尺度の選択によっては、材料の高機能化による使用効率の向上を評価できることがわかった。ただ、評価の対象とする材料機能間においては、それら特性変化の独立性を明らかにしなければ、評価モデルが選択できないこともわかった。

4 材料のためのLCA手法の確立

4.1 リサイクルによる機能の変化²⁶⁾

製品LCAにおいて、構成材料の使用に伴って誘発される環境負荷は、インベントリデータとして整備されている²³⁾。このインベントリデータは、前章でも言及したように単位重量である1 kgの材料が提供されるまでに、そのCtoG (cradle to gate) で誘発する環境負荷として提供されている。ここで、前章の「機能あたり」の他にも課題がある。素材は、製品のライフサイクルの最後において、有用な二次資源(金属素材では金属スクラップ)を産出するポテンシャルを有しているものの、二次資源の回収による効果が評価に反映されていないということである。二次資源の供給は、consequentialアプローチ^{6,7)}で考えると、使用済み材料の最終処分ならびに、天然資源からの材料生産にかかる環境負荷を回避することとなる。これは、リサイクルによる回避効果あるいはリサイクル効果と呼ばれる^{6,7,28-30)}。しかし、この回避効果に対して、リサイクル材の提供する機能が、天然資源を原料とした材料の提

供する機能を、等価に代替するかどうか議論されている³¹⁾。金属素材に関しては、material flow analysis (MFA) が有用である。例えば鉄鋼材では、MFAによって、既に将来の需要量や、スクラップの供給量が推計されており、2100年においても世界全体での需要量を賄うためには天然資源を原料とした生産が必要であると考えられている³²⁾。これより、素材の需要全体を考えた際には、必ずしもリサイクル材の機能は、天然資源を原料とした材料の機能と等価である必要はなく、リサイクル材の機能で満たされる需要先に天然資源が消費されている限り、回避効果の主張は問題ないと言えよう。しかしながら、リサイクル材の機能が天然資源由来の材料と等価である必要はなくとも、やはりその機能劣化があるとすれば、明らかにする必要がある。

そこで、材料学に基づき、リサイクルされた普通鋼であっても、鉄鉄から製鋼した普通鋼と同じ機能性であることを①精錬上の元素の出し入れのしやすさ、②組織形成上の優位性、③材料特性上の安定性、という観点から論じた。①については、各元素についての周知の挙動を概括した。①普通鋼の主要添加元素として、C, Mn, Siなどが挙げられる。これらは炭材、合金鉄により容易に添加可能であり、酸化精錬により容易に除去可能である。後者について、鉄は酸化物が単体より融点が低いということも重要である。さらに、使用済み製品から金属スクラップを回収する際に、解体・選別プロセスを通じて完全に単体分離することは困難であり、意図しない成分が混入する³³⁾。日本で流通する棒鋼184点の不純物成分を発光分光分析によって計測し、混入する可能性のある不純物元素を特定した。リサイクル鋼材中の23元素(Si, Mn, P, S, Ni, Cr, Cu, Mo, V, Ti, Al, Nb, W, As, Sn, Co, Pb, B, Sb, Zr, Bi, Ce, Mg)を分析し、Fig.4に示す結果を得た¹⁵⁾。ここに示す15元素が、代表的な混入元素ならびにその濃度と考えられる。鉄鋼材では、表面赤熱脆性を回避するために許容できるCu濃度やSn濃度の上限が知られている³⁴⁾が、この上限は現行の最適化された商用プロセスにおけるコスト制約上の上限であり、材料学的な制約ではないと考えられる。他方、生産プロセスではなく材料特性への影響は、炭素濃度や熱処理によって組織を選択すれば軽減できる場合もあるが、その不純物の固溶、偏析、介在物等により不可避な影響となる場合もある。しかし、多くの研究では、元素の添加によって材料の特性向上を目指しており、特性への負の影響は必ずしも整理されてこなかった。そこで、次節において普通鋼のリサイクル時に混入する上述15の不純物元素による特性への影響に関して、既存研究から得られる情報を集約した。

②について純鉄と極低炭素鋼のas-cast組織観察から、鉄鋼に組織形成上の炭素添加敏感性およびロバスト性につい

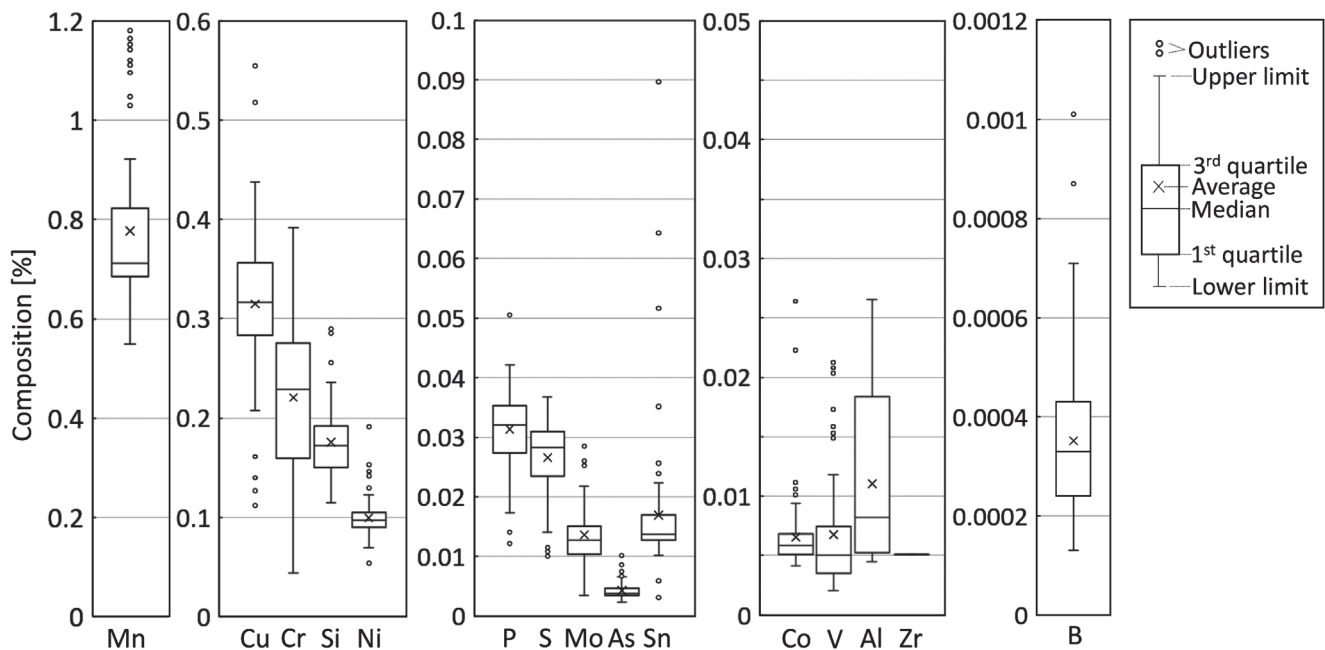


Fig.4 Box and whisker chart of the impurity element content in the samples, where only samples containing the impurity were considered.

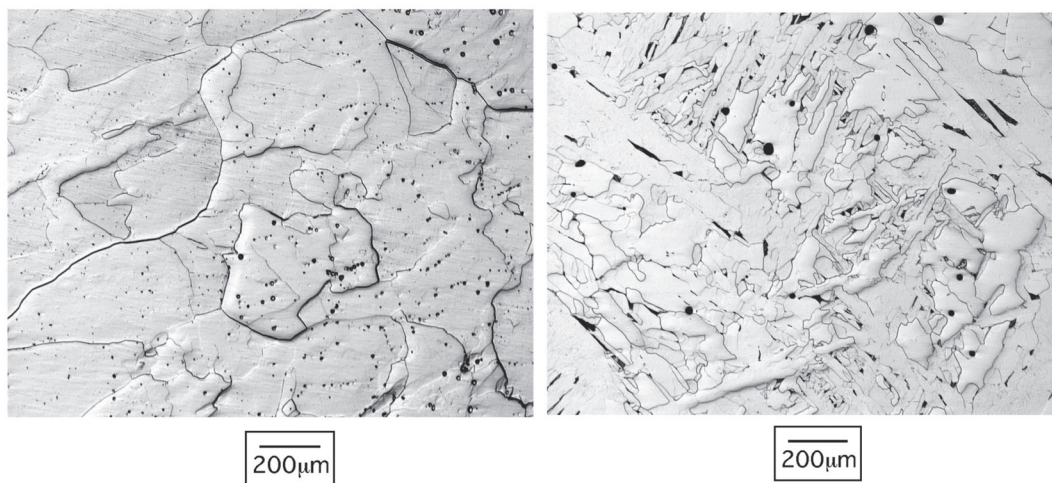


Fig.5 Microstructure of rapidly solidified as-cast sample of pure iron (left) and 500ppmC iron (right).

て検討した。高純度電解鉄およびそれに炭素を500ppmになるように添加したものを清浄に1700℃で溶解し、急冷凝固させた試料の断面組織観察写真をFig.5に示す。極低炭素濃度域でも結晶粒が微細化し、組織の敏感性が確認された。一方で、亜共晶鋼に分類される0.02~0.76mass%の炭素濃度範囲では、基本的に同じ組織形成機構が働き、ロバスト性があると考えられ、基本的特性の維持制御が可能な鉄の利点が、組織形成の観点から確認された。さらに、③材料特性上の安定性について、組織に反映された炭素の効果を、機械的特性の観点から考察した。具体的には、高純度電解鉄と500ppm炭

素添加鉄から採取し、鍛造および温間溝ロール圧延を施した試験片に対して、引っ張り試験を行った。通常の機械的特性の性質からは、強度と延性はトレードオフの関係にあることが一般的だが、500ppmの炭素の添加によって、降伏強度、最大引張強度の増大に加え、伸びも向上し、強度・延性バランスが著しく向上することがわかった。すなわち、炭素という最も出し入れしやすい元素において、組織上の特性のみならず、パーライト組織の形成による機能性における鋭敏な応答性が見られ、前述のようなロバスト性が期待されることがわかった。

4.2 不純物元素による鉄鋼材機能への影響¹⁵⁾

日本での鉄リサイクルにおいて普通鋼に混入する可能性のある15元素を対象に、それらの元素が普通鋼に要求される特性に与える影響を既存研究から集約した。普通鋼に要求される特性は、JISを参照し、普通鋼に対する規格(番号別記号別形状・質・寸法別に2742規格)に要求されている特性を列挙した。規格には試験による要求項目もあり、場合によっては温度や試験片等の試験環境の違いで複数の項目があるため、いくつかの特性は統合した。また、表面処理に対する要求特性もあるため、それらは除外し、22の要求特性を抽出した。これら特性の中でも、100以上の規格に要求される引張強度、伸び、降伏応力(耐力)、溶接健全性、破壊靱性の5つに対する各不純物の影響を、書籍(例えば文献35)ならびに当該特性と元素名のキーワード検索による文献調査から収集した。なお、曲げ特性も多くの規格で要求されていたものの、試験の多様さから、一意に不純物元素の影響を考察できないため除外した。文献調査の結果をTable1に示す。

強度や応力に関する特性は、ほとんどすべての不純物の存在によって向上することがわかった。その一方、伸びや溶接健全性は、これら不純物によって機能が損なわれることがわかった。ただ、本整理では、単一元素による影響を整理しており、複数の元素による影響は無視している。前節のようにCによる組織形成により、その機能低下を無害化できる可能性や、反対に特定の元素の組合せにより機能低下が著しくなる可能性があることに留意が必要である。また、一部の不純

物元素については、特性に与える負の影響については、まだ明らかになっていないこともうかがえた。これは、従来の研究において特性向上のための報告は多くなされているものの³⁵⁾、特性低下に関して積極的に報告されてきていないためではないかと考えられる。今後のリサイクル促進による意図しない不純物の混入を考えた際には、不純物元素の内部組織形成へのメカニズム的理解など、特性の向上だけでなく低下に関する知見の集約が必要であると考えられた。

不純物による機能低下が危惧される加工性や溶接性に及ぼす悪影響は、製鋼、鋳造、熱処理などの工程を調整したり、製品設計や製造工程を見直したりすることで最小限に抑えることが可能であると考えられる。また、これら鋼材機能への影響の観点から、混入が望ましくない不純物元素が特定されれば、使用済み製品から鉄スクラップを回収する際に、当該不純物の混入を防ぐことも可能であると考えられた。

4.3 リサイクル性を考慮したライフサイクルインベントリ手法論の構築

前項までで論じたように、鉄鋼材においては、リサイクル材料が天然資源由来の材料を回避すると主張することができよう。先述のISO20915におけるライフサイクルインベントリ分析の手法論を、回避効果を用いて説明するならば、回避効果EIは式(1)により定義される。ただし、ここで、鉄鋼材が意図して最終処分されることがないため、他の素材では計上される最終処分に関わる負荷回避分が計上されていないこ

Table1 Influence of impurity elements on steel properties based on a review of literature.

Property	Mn	Cu	Cr	Si	Ni	P	S	Mo	As	Sn	Co	B	V	Ca	Al
Tensile strength	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+/-	+	No	+
Elongation	-	-	-	No	-	-	-	No		-		+	+	No	+
Yield point or proof stress	+	+	+	+	+			+				+/-	+	No	+
Soundness in the welding area	-	-	-	-	-	-	-	-				+/-	-		
Fracture toughness	+/-	-	+/-	+	+	-	-	+/-	-			-	+	+	+/-

+: positive influence; -: negative influence; No: no influence; ·
+/-: positive or negative influence depending on type of steel; Empty cells: no information available.

とに留意が必要である。

$$EI = (x_{pr} - x_{re}) \times Y \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x_{pr} は天然資源100%によるCtoGのインベントリ、 x_{re} はスクラップ100%によるCtoGのインベントリ、 Y はスクラップ投入量に対する製品の歩留である。

スクラップリサイクルを反映した鉄鋼製品LCIは、式(2)で表現できる。

$$\begin{aligned} X_{LCI} &= X + A \times EI \times S - A \times EI \times RR \\ &= x_{pr} - A \times EI \times RR \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 X はスクラップリサイクル効果を考慮しないCtoGインベントリ、 $EI \times S$ はスクラップ利用に伴う負荷で、 S は単位鉄鋼製品あたりのスクラップ利用量(スクラップ利用率)である。 $EI \times RR$ はスクラップ回収に伴うクレジットで、 RR は使用済み回収率である。 A は配分係数であり、ISO20915では A を1と仮定しているため表現されていない変数である。なお、 A を1としたとき、 X に $EI \times S$ を加えたものが x_{pr} になる。

式(2)を他の配分係数 A でも適用可能な手法論として、式(3)を提案した³⁶⁾。また、他の材料に適用する場合は、先述のように式(1)で示した EI に対して最終処分の回避効果も加えることが望ましい。

$$X_{LCI} = x_{pr} - (1-A) \times EI \times S - A \times EI \times RR \dots\dots\dots (3)$$

様々な素材に適用可能な手法論という点では、この配分係数 A の同定が、現行の残った課題である。欧州の製品環境フットプリントの製品カテゴリールールガイドンス³⁷⁾においても、リサイクルによる回避効果は考慮することとなっているものの、配分係数については、 A ファクターとして、係数の定量に関する十分な説明もなく、材料種・製品種ごとに数値が与えられている。国際的にもLCAの適用が普及してきている中で、この配分係数の決定の方法論が、喫緊の課題であると言える。

5 おわりに

本報告で成果のすべては報告できなかったが、2017年度から2019年度に研究会I「革新的LCAによる鉄鋼材料の社会的価値の見える化」として活動した主要な成果を解説した。持続可能な材料使用に向けて、材料が誘発する負の影響としての環境影響だけでなく、正の影響としての創出価値が見える化することができた。定量評価という点では、材料が提供する機能あたりでの評価手法の可能性を示したとともに、リサイクル性の高さが反映されるライフサイクルインベントリ手

法論を材料学の知見も融合したことにより構築できた。ただし、現在の社会ニーズの変遷が早く、そのすべてに対応した手法としては不十分であり、引き続きの研究が望まれる。

参考文献

- 1) ISO 14044 : 2006 Environmental management -Life cycle assessment- Requirements and guidelines.
- 2) IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) version 3.0, (2022).
- 3) Ecoinvent version 3.8, (2022).
- 4) 日本鉄鋼連盟ホームページ：鉄鋼業界の取り組み:LCIデータコレクション, <https://www.jisf.or.jp/business/lca/data/index.html>, (参照日：2022-01-23).
- 5) T.Ekval : Resour. Conserv. Recycl., 29 (2000) 91.
- 6) B.Weidema : J. Ind. Ecol., 4 (2000), 11.
- 7) D.L.Schrijvers, P.Loubet and G.Sonnemann : Int. J. Life Cycle Assess., 21 (2016), 976.
- 8) C.Broadbent : Int. J. Life Cycle Assess., 21 (2016), 1658.
- 9) ISO 20915 : 2018 Life cycle inventory calculation methodology for steel products.
- 10) JIS Q 20915 : 2019 鉄鋼製品のライフサイクルインベントリ計算方法.
- 11) World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development : The Greenhouse Gas Protocol -A Corporate Accounting and Reporting Standard [Revised edition], WRI Hopkins Fulfillment Service, USA., (March 2004), 112.
- 12) K.Nakajima I.Daigo, K.Nansai, K.Matsubae, W.Takayanagi, M.Tomita and Y.Matsuno : Matériaux & Techniques, 105 (2017), 511.
- 13) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae and T.Nagasaka : Environ. Sci. Technol., 45 (2011), 4929.
- 14) I.Daigo, K.Iwata, I.Ohkata and Y.Goto : Environ. Sci. Technol., 49 (2015), 8691.
- 15) I.Daigo, K.Tajima, H.Hayashi, D.Panasiuk, K.Takeyama, H.Ono, Y.Kobayashi, K.Nakajima and T.Hoshino : ISIJ Int., 61 (2021), 498.
- 16) J.-P.Birat : Revue de Métallurgie, 109 (2012), 271.
- 17) 醍醐市朗：鉄鋼材の社会的価値評価の再考，日刊産業新聞，2015年9月24日（木），2面。
- 18) I.Daigo, K.Nakajima, E.Yamasue, K.Matsubae, H.Hatayama and Y.Kobayashi : 1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EMECCR2017), Proceedings, 408.

- 19) 中島謙一, 高柳航, 醍醐市朗 : 日本鉄鋼協会第176回秋期講演大会シンポジウム「鉄鋼材料の負荷の評価から価値の評価へ」(中間報告会), 宮城, 2018年9月19日.
- 20) H.Hatayama : *Resour Conserv Recycl*, 178 (2022), 106081.
- 21) A.Charnes, W.Cooper and E.Rhodes : *Eur. J. Oper. Res.*, 2 (1978), 429.
- 22) J.Cravioto, E.Yamasue, H.Okumura and K.N.Ishihara : Performance Analysis between Well-being, Energy and Environmental Indicators Using Data Envelopment Analysis, in : *Zero-carbon energy Kyoto 2010*, Springer, Tokyo, (2011), 49.
- 23) A.Charnes, W.W.Cooper, A.Y.Lewin, L.M.Seiford (Eds.), *Data Envelopment Analysis : Theory, Methodology and Applications*, Springer Science & Business Media, New York, (2013), 23.
- 24) A.Oyaizu, J.Cravioto, E.Yamasue and I.Daigo : *Matériaux & Techniques*, 105 (2017), 510.
- 25) 醍醐市朗, 河村洋佑, 榎学 : *CAMP-ISIJ*, 31 (2018), 221, CD-ROM.
- 26) D.Deprins, L.Simar and H.Tulkens : *Measuring Labor Inefficiency in Post Offices. In The Performance of Public Enterprises : Concepts and Measurements*, ed.by M.Marchand, P.Pestieau and H.Tulkens, Amsterdam : North-Holland, (1984), 243.
- 27) 小林能直, 醍醐市朗 : *CAMP-ISIJ*, 31 (2018), 223, CD-ROM.
- 28) T.Hottle, C.Caffrey, J.McDonald and R.Dodder : *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 56 (2017), 241.
- 29) H.C.Kim and T.J.Wallington : *Environ. Sci. Technol.*, 50 (2016), 11226.
- 30) P.Dunuwila, K.Hamada, K.Takeyama, D.Panasiuk, T.Hoshino, S.Morimoto, K.Tahara and I.Daigo : *Sustainability*, 13 (2021), 13935, <https://doi.org/10.3390/su132413935>
- 31) C.A.McMillan, S.J.Skerlos and G.A.Keoleian : *J. Ind. Ecol.*, 16 (2012), 324.
- 32) S.Pauliuk, R.L.Milford, D.B.Müller and J.M.Allwood : *Environ. Sci. Technol.*, 47 (2013), 3448.
- 33) I.Daigo, L.Fujimura, H.Hayashi, E.Yamasue, S.Ohta, T.D.Huy and Y.Goto : *ISIJ Int.*, 57 (2017), 388.
- 34) K.E.Daehn, A.Cabrera Serrenho and J.M.Allwood : *Environ. Sci. Technol.*, 51 (2017), 6599.
- 35) 鉄鋼材料と合金元素, 日本鉄鋼協会, 東京, (2015), 1076.
- 36) P.Dunuwila, K.Hamada, K.Takeyama, D.Panasiuk, T.Hoshino, S.Morimoto, K.Tahara and I.Daigo : *Sustainability*, 13 (2021), 13935.
- 37) European Commission, *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance*, (2018).

(2022年1月31日受付)