

特集記事・4

カーボンニュートラルに向けた日本の各産業の取り組み

材料のカーボンフットプリント

Carbon Footprint of Materials

東京大学大学院工学系研究科
マテリアル工学専攻
特任助教武山健太郎
Kentaro Takeyama東京大学
先端科学技術研究センター
准教授醍醐市朗
Ichiro Daigo東京大学大学院工学系研究科
マテリアル工学専攻
特任研究員劉 俊希
Junxi Liu

1 カーボンフットプリントの歴史

地球規模の気候変動がもたらす脅威は広く認識されており、世界の平均気温上昇を産業革命前の水準より2℃程度に抑えるための行動をとることが求められている¹⁾。これの達成のために、人間の経済活動によって排出される温室効果ガス (Greenhouse gas, GHG) の削減が求められている。消費者による GHG 排出量の小さな製品やサービスの選択を促進するために、製品やサービスの消費が誘発する GHG 排出量を評価する手法が必要とされており²⁾、その一つとしてカーボンフットプリント (Carbon Footprint, CF) が提案されている³⁾。

カーボンフットプリントは、エコロジカルフットプリント (Ecological Footprint) に始まる Footprint と呼ばれる指標の文脈で提案されている指標である³⁾。エコロジカルフットプリントは、対象とする製品を消費することによって環境に対して与える影響を製品のライフサイクル全体で把握する試みとして提案された⁴⁾。エコロジカルフットプリントは、「対象とする製品を生産するために、対象とする人口・経済活動を維持するために必要となる資源消費量を生み出す自然界の生産力、および廃棄物処理に必要とされる自然界の処理吸収能力を土地面積に置き換えて表現する指標」として定義されている⁴⁾。エコロジカルフットプリントが土地面積単位で表現されていたことから、エコロジカルフットプリントやそれから派生した指標であるカーボンフットプリントなどが「Footprint (足跡)」と呼ばれている⁴⁾。エコロジカルフットプリントにおいて GHG の排出量は「二酸化炭素吸収地」という指標で評価されている。二酸化炭素吸収地は、化石エネルギー使用などによる CO₂ を吸収するために必要な土地面積で定義され、算定された CO₂ の排出量から係数を用いて土

地面積に変換される。しかし、この CO₂ 排出量と土地面積の変換に用いられる係数に対して、大きな不確実性が指摘されている^{3,5)}。そのため、CO₂ の排出についての評価を単体として分離し、かつ排出重量で表す指標であるカーボンフットプリントが提案され、現在に至っている^{3,5)}。

CO₂ 排出重量で表すカーボンフットプリントは、カーボントラスト社がその利用を2006年に宣言し、イギリスにて2007年にウォーカー社のポテトチップスへ表示されたのが世界初の適用例とされる²⁾。2018年には、ISO 14067「温室効果ガス—製品のカーボンフットプリント—定量化のための要求事項及び指針」が策定された⁶⁾。日本においても、2009年から2011年に経済産業省・国土交通省・農林水産省・環境省の4省庁による「カーボンフットプリント制度試行事業」が実施され、それを引き継ぐ形で2012年に社団法人産業環境管理協会が運用する「カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム」が開始された。その後、2017年の「エコリーフ環境ラベル」プログラムとの統合や運営の移管、複数回の名称変更を経て2022年には一般社団法人サステナブル経営推進機構 (SuMPO) が運営する「SuMPO 環境ラベルプログラム」として継続されている⁷⁾。近年では、カーボンフットプリントの取り組みに対する関心の高まりを受けて、2023年に経済産業省、環境省が「カーボンフットプリントガイドライン」を公表した⁸⁾。近年、欧州での炭素国境調整措置 (Carbon Border Adjustment Measure, CBAM) など、製品のサプライチェーンにおける CO₂ 排出量の把握の必要性が高まっていると言えよう⁸⁾。

本稿では、材料を対象としたカーボンフットプリントについて、具体的な算定手法について解説し、手法における現在の課題について紹介する。

2 カーボンフットプリントの算定

2.1 カーボンフットプリントの定義

カーボンフットプリントは、一般に「商品・サービスの原材料調達から廃棄・リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通して排出されるGHG排出量」と定義される^{2,3,6,8)}。しかし、この「GHG」として評価するガス種の範囲には文献によって差異があり、「CO₂のみ」、「炭素を含むGHG種」、「全てのGHG種」の3つに大別される⁹⁾。

「CO₂のみ」の場合、対象とするガス種が少ないため、カーボンフットプリントを算定するために必要となるデータの入手が容易である一方で、他のガス種によって生じる温室効果を十分に把握できていないため、対象とする製品によっては、温室効果を過小評価してしまう可能性がある。表示するカーボンフットプリントの単位はkg-CO₂となる³⁾。

「炭素を含むGHG種」の場合、CO₂に加え、COやCH₄などの炭素を含むGHG種を対象とする。これはCの存在形態の変化が容易であり、それらの存在形態によって温室効果が異なることを考慮し、それに対応するために提案された定義である⁹⁾。一方、Cを含まないGHG種の温室効果を含まないため、温室効果を過小評価してしまう可能性がある。表示するカーボンフットプリントの単位はkg-Cとなる。

「全てのGHG種」の場合、温室効果を持つガスを全て対象とするため、温室効果を網羅的に把握することが可能である²⁾。一方、排出量を把握する必要があるガス種が非常に多くなるため、データの入手が困難になる。また、Cを含まないガス種を対象に含むために、カーボンフットプリントではなく、Climate Footprintとしてこの定義を提案している文献も存在する³⁾。表示するカーボンフットプリントの単位は対象とするGHG種の排出量を地球温暖化係数 (Global Warming Potential, GWP) を用いてCO₂等量に換算したkg-CO₂eqとなる。経済産業省・環境省のガイドラインでは、この定義を採用しており、IPCC第6次評価報告書において列挙されるGHGを対象にすることを推奨している⁸⁾。

2.2 カーボンフットプリント算定手法

カーボンフットプリントの算定には、主にライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, LCA) が用いられる^{2,8)}。LCAは、製品やサービスを評価対象として、対象のゆりかごから墓場まで (cradle to grave) の潜在的な環境影響を評価する技法の1つである。

製品のライフサイクルは、「原材料調達」「生産」「流通・販売」「使用・維持管理」「廃棄・リサイクル」の5つのライフサイクル段階から構成される⁸⁾。カーボンフットプリントでは、そのうちから算定対象とするライフサイクル段階を設定し、

それぞれのライフサイクル段階について投入ならびに排出される物質やエネルギーなどの目録であるインベントリを作成し、それを積み上げることによってライフサイクル全体でのインベントリを作成する。ここで、材料のカーボンフットプリントでは、最終製品の「流通・販売」「使用・維持管理」において材料起因のGHG排出があるとは考え難いため、「原材料調達」「生産」「廃棄・リサイクル」の3つのライフサイクル段階から構成されると考えて良い。「原材料調達」「生産」を対象とした分析はライフサイクルインベントリ (Life Cycle Inventory, LCI) 分析として、様々な材料を対象とした分析が行われている。カーボンフットプリントは対象が商品として販売される際に表示され、環境面からの比較を意図した指標である一方で、材料を対象とする場合には、素材メーカーから販売される時点においては、どのように最終製品として使用されるか不明瞭であるため、「廃棄・リサイクル」の段階におけるインベントリが一意に決まらない。そのため、経済産業省・環境省ガイドラインでは「廃棄・リサイクル」をカーボンフットプリントの算定に含めるかどうかは任意であると記述されている⁸⁾。一方、欧州では各種環境影響の製品フットプリントである製品環境フットプリントの実施ガイドダンス (Product Environmental Footprint Category Rules Guidance, PEFCR)¹⁰⁾において、中間製品である材料に対しても「廃棄・リサイクル」段階を含むことと明言されている。2.1で紹介したカーボンフットプリントの定義からは、「廃棄・リサイクル」段階を含むことが望ましいことがわかる。

ここで、材料のインベントリを作成する際に、留意すべき点を2つ解説する。

(1) データの収集

インベントリを作成する際に使用するデータは、分析実施者の管理下にあるプロセスのデータであるフォアグラウンドデータと、分析実施者の管理下でないプロセスのデータであるバックグラウンドデータの2種に大別される。インベントリの作成には、可能な限りフォアグラウンドデータもしくはそれと同等のデータをサプライヤから提供を受けて用いることが望ましい。フォアグラウンドデータが得られない場合には、一般に公開されているライフサイクルインベントリデータベースをバックグラウンドデータとして使用する。ここでは、対象とするプロセスが実施される地理的な条件や、その原料サプライヤの地理的な条件などに適合したバックグラウンドデータを選択する必要がある。これは、電力のGHG排出原単位のように地理的な条件 (電源構成) がカーボンフットプリントの算定結果に影響を与えるためである¹¹⁾。

(2) 「廃棄・リサイクル段階」の考慮

前述のように、材料のカーボンフットプリント算定では、「廃棄・リサイクル」段階を含む分析が求められる。しかしな

がら、「廃棄・リサイクル」段階を含む材料のライフサイクルインベントリ分析では、多くの材料で二次資源が回収されるため、次の製品ライフサイクルに提供される二次資源の「機能」を考慮した多機能な製品システムであると言える。この多機能性を反映した評価手法の1つとして、PEFCRではリサイクルによる環境負荷回避効果を考慮した手法が提案されている^{12,13)}。手法の詳細について次節において述べる。

2.3 二次資源の回収ならびに消費を考慮したLCI分析手法

材料種ごとのリサイクル可能性は、それぞれの材料特性や、(場合によっては地理的な要因も含み) 利用可能なリサイクル技術、二次資源の取引市場の状況によって異なる。例えば、金属材料は、リサイクルによって金属元素自体の劣化が生じないために、除去困難な不純物の混入を避ければ、複数回のリサイクルが可能である¹⁴⁾。一方、プラスチックは、高分子が必ずしも安定した分子状態ではなく、使用時に高分子が変性することもあるため、金属材料ほどマテリアルリサイクルされていない。このように、材料ごとに二次資源の回収・消費によるリサイクル効果は異なると考えられる。

二次資源によるリサイクル効果をどのように考えるかは、LCAにおけるモデリングならびにシステム境界の問題であり、様々な環境負荷の配分手法によって対応することが提案されている。現在までで提案されている手法は「カットオフ手法」、「代替法」、「分割手法」、「回避効果法」の4つに大別できる^{13,15)}。

「カットオフ手法」は、回収・消費された二次資源は環境負荷や環境負荷の便益を持たないと仮定した手法である。これは、Recycled content法としても知られる手法である。図1にカットオフ手法の概略図を示す。これは、二次資源の潜在的な機能や材料のリサイクル性を考慮しない手法であり、この手法はサプライチェーンにおける上流に存在する各製造拠点からの直接排出量を算定する際に使用する手法であると考えられる。

「代替法」は、二次資源が天然資源を代替すると仮定し、二次資源を原料として生産するプロセスにかかる環境負荷と天然資源を原料として生産するプロセスにかかる環境負荷の差をリサイクルによって得られる環境負荷の便益として、二次資源の回収時にその便益を与える手法である。これはEnd-

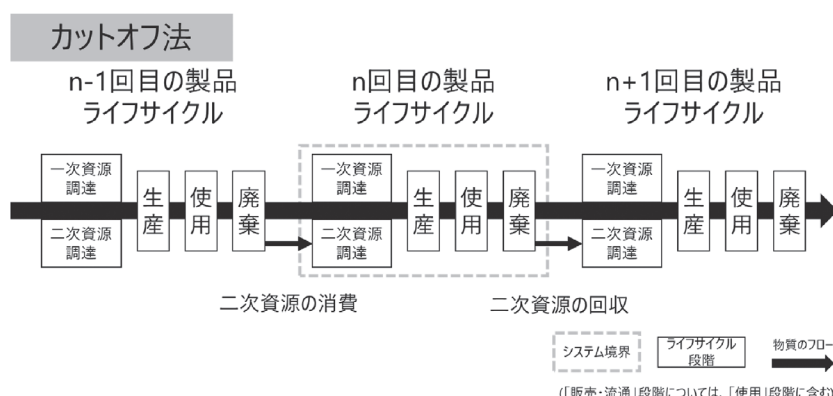


図1 カットオフ法の概略図

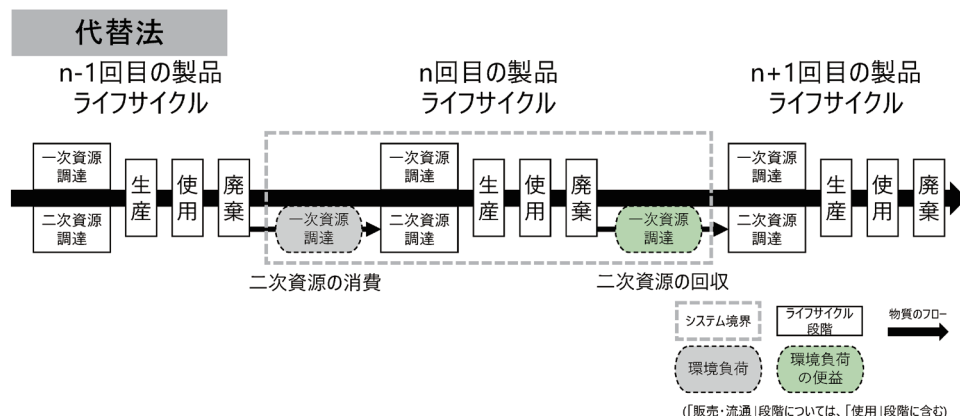


図2 代替法の概略図 (Online version in color.)

of-life recycling (EoLR) 法としても知られる手法である。図2に代替法の概略図を示す。これは、二次資源のリサイクル性を判断することなく、二次資源の回収に対して環境負荷の便益が付加される手法となる。

「分割手法」は、システム境界を材料が地球環境から採掘されてから最終処分されるまでの複数の製品ライフサイクルに拡張し、複数回使用分の環境影響総量から、1回の使用分に割り当てる手法である。図3に分割手法の概略図を示す。この手法においては、評価が複数の製品ライフサイクルにわたるため、評価対象となる期間が長期になることと、将来のリサイクルを想定することになり、評価に関するパラメータに不確定要素が多くなることが避けられない。

ここまで3つの手法は、attributionalモデリングに基づいた評価手法であったのに対し、consequentialモデリングに基づいた「回避効果法」がある。「回避効果法」は、システム境界を二次資源の回収にかかる製品ライフサイクルと二次資源の消費にかかる製品ライフサイクルの2つの製品ライフサイクルに拡張することで、リサイクルによる環境負荷回避効果をリサイクルの前後の製品ライフサイクルにそれぞれに一定の割合で配分をする手法である。その二次資源の追加的な回収がリサイクルを促進するのかどうかによって

配分係数の値が決定される。代表的な配分手法としては、回避効果を全て二次資源の回収（供給）側に配分するEoLR法、回避効果を全て二次資源の消費（需要）側へ配分するWaste Mining (WM) 法、半分ずつ配分する50:50法がある¹³⁾。先述のPEFCRも回避効果法を採用し、当手法に基づいた循環フットプリント式 (Circular Footprint Formula, CFF) を提案している¹⁰⁾。このCFFでは、配分係数はAファクターと呼ばれており、0.2、0.5、0.8の3つの係数を選択肢としている。その他、鉄鋼材に対するインベントリ分析手法としても回避効果法を採用しており¹⁶⁾、配分手法はEoLR法が採用され、規格化¹⁷⁾されている。材料ごとにその二次資源の需給構造やリサイクルプロセスの特性の差異を考慮して、材料ごとに配分係数を客観的に決定する手法の開発が待たれる¹³⁾。

3 カーボンフットプリントと材料間比較

カーボンフットプリントの定義で記したように、材料のカーボンフットプリントとしてコミュニケーションするのであれば、その材料のリサイクル性も考慮したりリサイクル効果を加味した算定であるべきと言える。近年の各事業者の

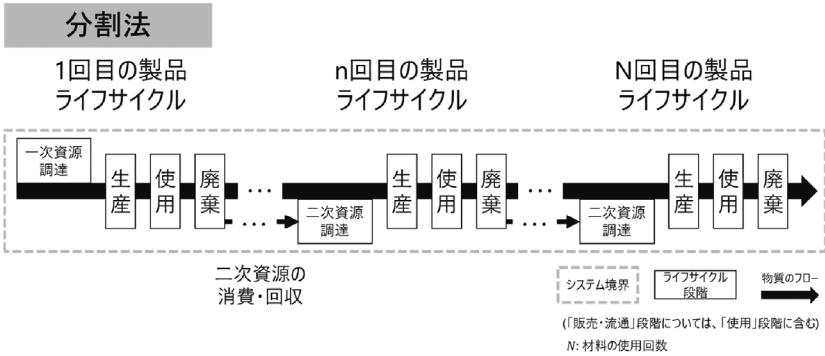


図3 分割法の概略図

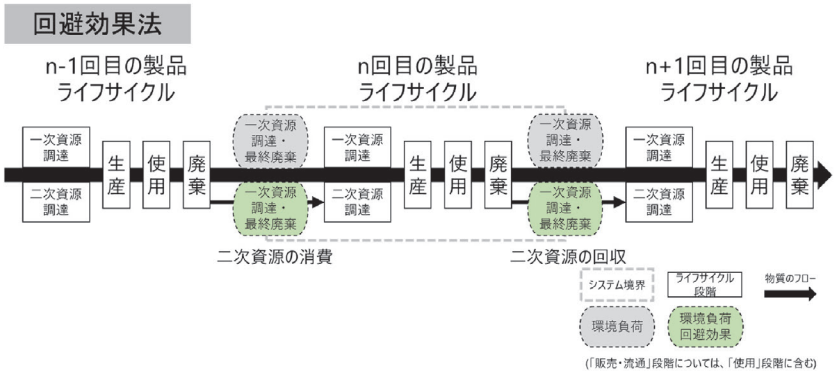


図4 回避法の概略図 (Online version in color.)

scope 3まで考慮したカーボンニュートラルに向けた取組みの1つとして、材料の環境情報としてのGHG排出量を、材料選択のために参照することも考えられる。その評価で参照すべき環境情報としては、本稿で紹介したカーボンフットプリントが適していると考えられる。

一方、ライフサイクルインベントリデータベースから得られるCO₂排出原単位やGHG排出原単位を材料の環境情報として参照することも考えられる。しかしながら、これら排出原単位と言われる環境情報は、先述の「カットオフ手法」に基づいており、材料のリサイクル性の違いが評価に反映されておらず、材料間比較で用いる環境情報ではないと考えられる。これは、材料製造事業者がフォアグラウンドデータをCO₂排出原単位として提供した際も同じことである。このデータは、cradle to gate (CtoG) のインベントリデータとも言われ、サプライチェーンの最上流であるゆりかご (cradle) から当該材料の出荷ゲート (gate) までのattributionalモデリングに基づいたデータと言える。先述のように、事業者がscope 3を算定するに際して、サプライチェーンにおける上流に存在する各製造拠点からの直接排出量を算定する際に使用するには適した情報である。あるいは、製品のLCAを実施する際に、あるいは製品のカーボンフットプリントを算定する際に、GHG排出原単位を用いた上で、当該製品の廃棄・リサイクル段階の環境負荷を独自に評価するのであれば、適切な環境情報の利用であると言える。

このように、CtoGのインベントリデータであるCO₂排出原単位と、ライフサイクルを通した算定であるカーボンフットプリントは、異なる情報であり、異なる用途に用いられるべきものである。そのためにも、特に材料のカーボンフットプリントとしての環境情報の流通に際しては、廃棄・リサイクル段階を除外することなく算定対象に含めた算定結果を提供することが望まれるとともに、材料間比較において、CtoGのインベントリデータで比較することがないように留意が必要である。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change : Climate Change 2023 : AR6 Synthesis Report, IPCC, Geneva, (2023), 184.
- 2) 稲葉敦 : カーボンフットプリント-LCA評価手法でつくる、製品別「CO₂排出量見える化」の仕組み, 工業調査会, 東京, (2009), 185.
- 3) T.Wiedmann and J.Minx : Ecological Economics Research Trends, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, (2008), 1.
- 4) M.Wackernagel and W.E.Rees : Our Ecological Footprint : Reducing Human Impact on the Earth, New Society Publishers, Gabriola Island, (1996), 160.
- 5) 和田喜彦 : 日本LCA学会誌, 6 (2010) 3, 201. <https://doi.org/10.3370/lca.6.201>
- 6) ISO 14067 : 2018. Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.
- 7) 一般社団法人サステナブル経営推進機構 (SuMPO) : SuMPO環境ラベルプログラム プログラムの歴史, <https://ecoleaf-label.jp/about/history.html>, (accessed 2023-08-29)
- 8) 経済産業省, 環境省 : カーボンフットプリント ガイドライン, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_footprint/pdf/20230526_3_1.pdf, (accessed 2023-08-29)
- 9) L.A.Wright, S.Kemp and I.Williams : Carbon Management, 2 (2011) 1, 61, <https://doi.org/10.4155/cmt.10.39>
- 10) European Commission : Product Environmental Footprint Category Rules Guidance version 6.3, 2018, 238
- 11) T.Wiedmann : Ecological Economics, 69 (2009), 211, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.08.026>
- 12) 醍醐市朗 : 鉄と鋼, 108 (2022) 11, 811, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2022-058>
- 13) 醍醐市朗 : 日本LCA学会誌, 19 (2023) 2, 64, <https://doi.org/10.3370/lca.19.64>
- 14) S.Pauliuk : Resources, Conservation and Recycling, 129 (2018), 81, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
- 15) C.Koffler and M.Finkbeiner : Journal of Life Cycle Assessment, 23 (2018) 1, 181. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1404-x>
- 16) World Steel Association : Life Cycle Assessment Methodology Report - Life Cycle Inventory Study for Steel Products, (2011).
- 17) ISO 20915 : 2018. Life cycle inventory calculation methodology for steel products.

(2023年8月31日受付)