

1. はじめに

近年、2050年カーボンニュートラルという目標に向けて、ライフサイクルアセスメント（LCA：life cycle assessment）への注目度が増している。気候変動（地球温暖化）への影響について議論するためには、目の前のプロセスから排出される二酸化炭素（CO₂）などの温室効果ガス（GHG：greenhouse gas）だけではなく、その背後にあるプロセスを含めた「ライフサイクル」全体の排出を見る必要があることへの認識が広まっている。資源の採掘から製品の製造、使用、廃棄まで、全ての段階を考慮することを「ライフサイクル思考」という。資源の採掘を「ゆりかご」、廃棄を「墓場」に例え、「ゆりかごから墓場まで」製品の一生（ライフサイクル）を考慮する考え方である¹⁾。そして、その考え方に基づいて定量的に環境影響を評価する方法がLCAである。

分かりやすい事例として、ガソリン車と電気自動車（EV：electric vehicle）の比較がある。過去には、走行時に燃料の燃焼によってCO₂が排出されるガソリン車に対して、EVでは走行時にCO₂が排出されないことのみを見て、EVが「CO₂ゼロで走る」と喧伝されることもあった。しかし、燃料のライフサイクルで見れば、ガソリンの供給のためには石油の採掘や精製プロセスからの排出もある一方で、EVに電力を供給するための発電プロセスでもGHGが排出される。電力供給に伴うGHG排出量は、その地域における火力発電の割合に依存する。また、ガソリン車もEVも、素材生産から部品製造、組立、維持、廃棄まで、ライフサイクルの各プロセスでGHGが排出される。そのため、ガソリン車とEVの気候変動への影響を比較するためには、

それらのライフサイクル全体のGHG排出量を考慮する必要がある。

LCAは、初めて国際標準規格（ISO 14040：1997）が発行されてから四半世紀以上が経過しており、化学産業を含めた多くの分野で評価が実施され、事例や知見が蓄積してきた。現在では、国際標準規格はISO 14040：2006（原則および枠組み²⁾）とISO 14044：2006（要求事項および指針³⁾）に再編されている。特に現在の日本ではカーボンニュートラルへの対応が喫緊の課題とされていることから、LCAは製品のGHG排出量の算定ツールと同義のように扱われることもあるが、本来のLCAは気候変動に限らず、様々な環境影響や資源消費（総称して「環境フットプリント」とも呼ばれる）を評価できる方法である。一方で、LCAには様々な段階で評価者に判断が委ねられる要素が残されていることから、恣意性を排除した評価を担保するために指針の策定が求められている。化学産業でも、国際化学工業協会協議会（ICCA）が資源循環のLCAに関する文書^{4,5)}を公表しており、日本化学工業協会によって翻訳版が公表されている⁶⁾。さらに、ライフサイクル思考に基づく評価は、製品レベルのLCAから、GHGプロトコルによる「スコープ3」の算定・報告基準⁷⁾に代表される、組織レベルのサプライチェーンを対象とした環境影響の評価にも広がっている。

以上のような背景を踏まえ、本稿では、まずISO14040：2006に規定されたLCAの枠組みや用語の定義を解説する。その上で、様々な環境フットプリントについて概観し、その国際的な動向について述べる。

2. LCAの枠組みと定義

2.1 国際標準規格におけるLCAの枠組み

国際標準規格ISO 14040：2006には、図1のようなLCAの枠組みが示されている²⁾。図の左列に示された3つの段階ごとに「解釈」を加え、必要に応じて前の段階に戻ることも含め、これらの段階を繰り返すことでLCAが実施される。以下では、各段階で何を決定し、何を算定することが求められているか解説する。



Jun NAKATANI
2006年 東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 博士課程修了
現在 東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 准教授
連絡先；〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
E-mail nakatani@env.t.u-tokyo.ac.jp

2024年3月11日受理

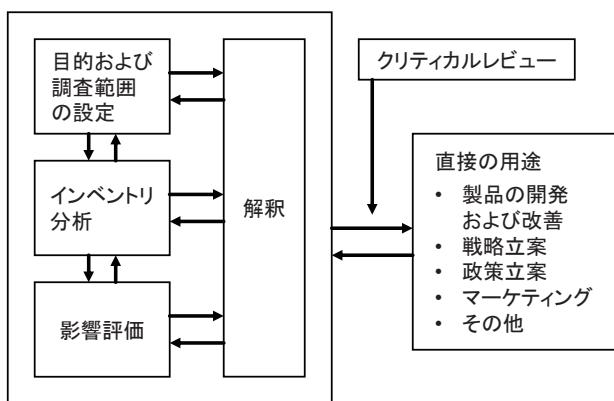


図1 ISO 14040：2006によるLCAの枠組み（文献²⁾をもとに著者作成）

2.2 目的および評価範囲の設定

まず、「目的および調査範囲の設定 (goal and scope definition)」ではLCAの評価対象と環境影響の評価範囲を定める。具体的には、「機能単位 (functional unit)」と「システム境界 (system boundary)」を決定する。ISO 14040：2006には、機能単位とシステム境界は以下のように定義されている²⁾。英語の原文のまま記載するが、特に斜体した単語に着目されたい。

- ・ Functional unit : quantified *performance of a product system* for use as a reference unit
- ・ System boundary : set of criteria specifying which *unit processes* are part of a product system

これらを意識すると、機能単位とは、評価対象の製品が持つパフォーマンス（機能）を明確にし、どれだけの機能に対する環境影響を評価するかを決定することである。例えば、自動車の評価において機能単位は台数では定義せず、走行距離で定義することが妥当である。複数の自動車を比較評価する際には、同じクラスの車種で、走行距離10万kmといった機能単位が考えられる。このとき、生涯走行距離が10万kmの車種なら1台、5万kmの車種なら2台のライフサイクルが評価対象となる。

システム境界とは、どの単位プロセスを評価範囲に含めるかの基準を決定することである。基本的には、対象とする製品のライフサイクルに関わる全ての単位プロセス（資源採掘、輸送、素材生産、加工、販売、使用、回収、廃棄物処理など）がシステム境界に含まれるが、その基準の設定に議論が分かれる場面として、プロセスからの副産物の利用と、製品の使用後のカスケード（オープンループ）リサイクルがある。いずれも機能単位（一次製品のパフォーマンス）とは別に、新たな機能を産み出すプロセスである。一般的には、あるプロセス（例えば、副産物の分離やリサイクル目的の回収または再生処理）までは一次製品のシステム境界に含め、そこから先は副産物やリサイクル原料を利用した二次製品のライフサイクルと見なすことが多い（「カットオフ法」と呼ばれる）。た

だし、石油精製プロセスからの連産品のように、主製品と副産物を区別できない場合など、「配分 (allocation)」と呼ばれる方法によって、何らかの基準で各プロセスからの環境影響を複数の製品に割り当てることもある。また、本稿の最後で言及するように、カスケードリサイクルを含む場合の評価にはカットオフ法の他にも様々な方法が開発されている。さらに、使用量が非常に少ない副原料などについて、何らかの基準（例えば、製品の産出量に対して投入量が1%に満たないなど）を設けて、その生産や供給に伴う環境影響を無視（カットオフ）することもある。いずれにせよ、LCAによる評価結果はシステム境界の設定に（大きく）依存することを認識し、図2における破線のような形で、システム境界を明確に示すことが透明性のある評価には不可欠である。

2.3 インベントリ分析とインパクト評価

次に、「インベントリ分析 (LCI: life cycle inventory analysis)」と「インパクト評価 (LCIA: life cycle impact assessment)」の段階で、対象とする製品のライフサイクル全体の環境影響を算定する。それぞれの段階で何を算定するかは、ISO 14040：2006に定義されている²⁾。LCAの定義とともに、着目されたい単語は斜体にして、英語の原文のまま以下に記載する。

- ・ LCA : compilation and evaluation of the *inputs, outputs* and the *potential environmental impacts* of a product system throughout its life cycle
- ・ LCI : phase of LCA involving the compilation and quantification of *inputs* and *outputs* for a product throughout its life cycle
- ・ LCIA : phase of LCA aimed at understanding and evaluating the magnitude and significance of the *potential environmental impacts* of a product system throughout the life cycle of the product

いずれも、最後に「製品のライフサイクルを通した」と明記されている。これらの違いは、インベントリ分析は「入力」と「出力」を定量化する段階、インパクト評価は「潜在的な環境影響」を評価する段階という点にあり、それらを合わせることでLCAになることが、これらの定義を見れば

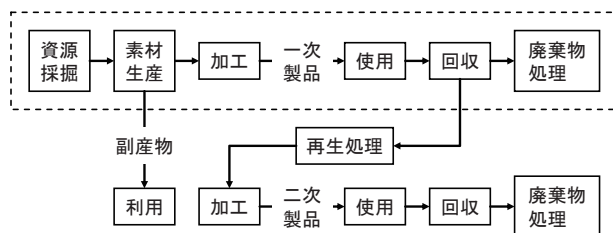


図2 システム境界を示す図の例（使用後のカスケードリサイクルをカットオフする場合）

容易に理解できる。

インベントリ分析では、対象製品のライフサイクルへ投入される天然資源や排出される環境負荷の量が算定される。どの程度の影響があるかは評価せず、ただ物質としての入出力を定量化する段階である。そのため、インベントリ分析だけでLCAは完結しないが、ここでの入出力の算定結果がLCAの評価の基盤となる。例えば、CO₂排出量を算定しただけでは気候変動への影響は分からないが、それを評価するためにはCO₂を含む温室効果を持つ様々な物質（メタンや亜酸化窒素など）の排出量が必要不可欠である。

ここで、インベントリ分析において最終的に何を算定するかについては、しばしば誤解があるようである。それを正しく理解するためには、「基本フロー (elementary flow)」についても解説する必要がある。ISO 14040:2006において、基本フローは以下のように定義されている²⁾。

- ・ Elementary flow : material or energy entering the system that has been drawn from the environment without previous human transformation, or material or energy that is released into the environment without subsequent human transformation

インベントリ分析の算定対象は、ここで定義されている基本フローである。すなわち、それ以前に人為的な変換を施されていない物質やエネルギーを「環境から引き出した」量と、それ以後に人為的な変換を施されない物質やエネルギーを「環境に放出した」量である。これらは、それぞれ天然資源の採取量（化石資源の採掘量など）と環境負荷の放出量（大気や水圏、土壌への汚染物質の排出量）に相当する。人為的な発電プロセスを経ている電力や、焼却などの人為的な処理プロセスを経る廃棄物は、この定義に従えば基本フローではない。そのため、インベントリ分析において電力消費量や廃棄物発生量の計測は重要であるが、それら自体が最終的な算定結果にはならないことに注意されたい。

次に、インベントリ分析の算定結果をもとに、インパクト評価によって潜在的な環境影響を評価する。ISO 14040:2006では、その手順は以下のように定められている。これらのうち特性化までは「必須要素」、正規化から重み付けは「任意要素」とされている。

- ・ 影響領域 (impact category), 領域指標 (impact category indicator), 特性化モデル (characterization model) の選定
- ・ 分類化 (classification)
- ・ 特性化 (characterization)
- ・ 正規化 (normalization)
- ・ グルーピング (grouping)
- ・ 重み付け (weighting)

分類化では、インベントリ分析で算定した環境負荷の排出量を関連する影響領域（例えば、CO₂排出量は気候変動）に

割り当てる。特性化では領域指標を算定するが、気候変動や酸性化、人間毒性、生体毒性、土地利用、水利用、化石資源利用といった影響領域ごとの評価までの「ミッドポイント型」のモデルと、それぞれの影響領域が人間健康や生態系、資源利用可能性に及ぼす被害まで評価する「エンドポイント型」のモデルがある。ミッドポイント型またはエンドポイント型の特性化モデル、または両者によって構成されるインパクト評価の手法は、2000年ごろから2010年ごろまでの間に世界各国で開発が進められた。それらの特徴や比較については、拙著⁸⁾を参照されたい。日本においてもLIME 2という手法が開発され⁹⁾、国内で広く利用されてきた。現在では、後継のLIME 3が利用可能である¹⁰⁾。

ここで、様々な環境影響の評価結果を容易に解釈するためには、異なる環境影響を重み付けして単一指標化することが実務的には有用とされる^{9,11)}。ただし、重み付けには主観的な価値判断が避けられず、その要否は意見が分かれてきた。このことが、ISO 14040:2006において重み付けが任意要素とされていることの背景にあるものと考えられる。

3. 環境フットプリント

LCAによる製品の環境影響や資源消費の算定結果は、環境フットプリントと呼ばれることがある。代表的なものとして、CO₂を含むGHG排出量（気候変動への影響）は「製品のカーボンフットプリント (CFP: carbon footprint of products)」, 水の消費量（しばしば水質汚濁を含む）は「ウォーターフットプリント (WF: water footprint)」, 資源の占有（消費）は「マテリアルフットプリント (MF: material footprint)」と呼ばれる。他にも、活性窒素の損失 (nitrogen footprint), リン資源の占有 (phosphorous footprint), 土地資源の占有 (land footprint), 生態系への脅威 (biodiversity footprint) などがある¹²⁾。これらのうち、CFPとWFは国際標準規格も発行されている^{13,14)}。

このように様々な環境フットプリントが開発される中で、欧州委員会は2013年に「製品の環境フットプリント (PEF: Product Environmental Footprint)」および「組織の環境フットプリント (OEF: Organisation Environmental Footprint)」についての勧告¹⁵⁾（以下、これらを合わせて「欧州・環境フットプリント」と記す）を公表した。2013年から2018年の試行事業を経て、2021年には勧告が改訂された。欧州・環境フットプリントでは、あらゆる環境問題を含むインパクト評価が求められており、表1のように影響領域ごとに推奨される特性モデルが提示されている。

また、2021年の改訂版では、ISO 14040:2006では任意要素とされていた正規化および重み付けが必須要素とされた。各影響領域の正規化および重み付けの係数も提示されており¹⁷⁾、対象製品について最も重要な影響領域、ラ

表1 欧州・環境フットプリント(改訂版)における影響領域と推奨される特性化モデル(文献¹⁶⁾をもとに著者作成)

影響領域	特性化モデル
気候変動	IPCC(2013)による地球温暖化係数(評価期間100年)
オゾン層破壊	オゾン破壊係数に基づくEDIPモデル
人間毒性(発癌)	USEtoxモデル(2.1版)
人間毒性(非発癌)	
粒子状物質	PMモデル(疾病発生数)
イオン化放射線	人間健康影響モデル
光化学オゾン生成	LOTOS-EUROSモデル(ReCiPe 2008)
酸性化	Accumulate Exceedanceモデル
陸域富栄養化	
淡水富栄養化	
海洋富栄養化	EUTRENDモデル(ReCiPe 2008)
土地利用	LANCAモデルに基づく土壌質指数
淡水生態毒性	USEtoxモデル(2.1版)
水利用	AWAREモデル(不足している水)
鉱物・金属資源利用	CML 2002モデル(4.8版)による非生物資源枯渇係数
化石資源利用	

ライフサイクルの段階やプロセスを特定することができるようになった。さらに、分類別基準(PEFCR: PEF Category Rule)を策定すれば代表製品と比較できることになった¹⁶⁾。例えば、「代表製品と比べて30%改善」といった表示が可能である。これは、特に重み付けについては何が科学的に正しいか判断することはできないことを認識しつつも、評価結果の解釈や製品間の比較を容易にすることで、意思決定やコミュニケーションの支援を優先したためであると考えられる。

4. おわりに

本稿では詳述できなかったが、リサイクルを含む資源循

環のLCAについても、様々な評価方法(カットオフ法、製品バスケット法、負荷回避法など)が提案および実践されている。ただし、適用する方法によって評価結果が大きく変わることもある。これに対して、2021年に改訂された欧州・環境フットプリントでは、インベントリ分析において「正確に、かつ一貫して廃棄物と再生原料のフローをモデル化し、それらのフローの利用者と供給者に環境負荷および代替効果を配分する」ことを目的として、サーキュラーフットプリント式(CFF)」という方法が提案された¹⁶⁾。これらの資源循環の評価方法についてはICCAの文書⁵⁾にも整理されているが、それらの特徴や比較については拙稿^{1, 18)}の解説も参照されたい。

参考文献

- 1) 稲葉敦・中谷隼: プラスチックリサイクルとLCA, 廃プラスチックの現在と未来—持続可能な社会におけるプラスチック資源循環—, コロナ社(2023)
- 2) ISO 14040: 2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
- 3) ISO 14044: 2006, Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines
- 4) International Council of Chemical Associations (ICCA): Life Cycle Assessment of circular systems - Approach and methodology (2020)
- 5) International Council of Chemical Associations (ICCA): Life Cycle Assessment of circular systems - Guide & case studies (2020)
- 6) 日本化学工業協会(<https://www.nikkakyo.org/node/1004>)
- 7) Greenhouse Gas(GHG) Protocol: Corporate Value Chain(Scope 3) Accounting and Reporting Standard(2011)
- 8) 伊坪徳宏・稲葉敦: LIME 2: 意思決定を支援する環境影響評価手法, 産業環境管理協会(2010)
- 9) 伊坪徳宏・稲葉敦: LIME 3: グローバルスケールのLCAを実現する環境影響評価手法, 丸善出版(2018)
- 10) 中谷隼・本下晶晴: 日本LCA学会誌9(3), 189-205(2013)
- 11) 伊坪徳宏ら: LCA概論, 産業環境管理協会(2007)
- 12) Hoekstra, A.Y. & Wiedmann, T.O.: *Science* 344(6188), 1114-1117(2014)
- 13) ISO 14067: 2018, Greenhouse gases - Carbon footprint of products: Requirements and guidelines for quantification
- 14) ISO 14046: 2014, Environmental management - Water footprint: Principles, requirements and guidelines
- 15) European Commission: Commission Recommendation of 16.12.2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations(2021)
- 16) Damiani, M. et al.: Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods, Luxembourg(2022)
- 17) European Platform on LCA | EPLCA (<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EFtransition.html>)
- 18) 中谷隼: 日本LCA学会誌19(3), 106-116(2023)