

ライフサイクル分析

Life Cycle Analysis (LCA)

石谷 久*

Hisashi Ishitani

1. LCAの現状

LCA（ライフサイクル分析）とは、一つの製品がその原材料取得段階から最終的に廃棄処理されるまでの全生涯に及ぶ社会への影響、特に環境影響を総合的に評価して、少しでも環境負荷の少ない製品開発を進めるための手段として、提唱されたものである。近年の環境問題への関心の高まりと共に、特に過剰包装の規制に熱心な北部欧州を中心にその改善策へつなげる手法として期待されて脚光をあびている。

周知のようにLCAの起源は1969年、コカコーラ社の委託によりMRI（Midwest Research Institute, 現フランクリン研究所）における飲料容器に関する環境影響評価に始まると言われる。基本的概念は省エネを目的とする多くのエネルギー分析と通じるものが多いが、生産から消費の過程にわたって特に最終製品を対象にその生涯にわたる環境影響を考慮したという点でこれはライフサイクル分析の基礎と考えられている。その後も米国では各種の環境影響調査が行われて、EPA（米国環境庁）でREPA（Resource and Environmental Profile Analysis）としてまとめられ、更にLCAの研究者ネットワークとして79年には米国でSETAC（Society of Environmental Toxicology and Chemistry）が結成された。

EPAの文書によればこの時期、多くの研究が進められると共に各研究グループ間の主導権争いも生じ、中立的、且つ客観的評価が必要となったためにEPAがのりだしたと言っている。事実LCAの定義、対象範囲には自由度も多く、目的によってその数値、或いは結果を自己の主張に都合の良いように曲げることが可能なことはよく知られており、論理的妥当性、客観

性、或いはデータソース、データ処理プロセスが誰にでも理解できる透明性が最も必要であるという主張はこれらの文書を通じて強調されている。75年から80年のいわゆる石油危機後の経済的後退時期にはこの種の活動はやや鎮静化し、その代わりに注目を浴びたエネルギーの分析が中心となった。ECにおけるDGX 1（EC環境政令）などが挙げられる。

一方、ヨーロッパでも米国とほぼ同時期に、I. Boustead（英国）をはじめ、主として北欧の研究者によって同様な研究が開始された。80年代に入り、ヨーロッパに環境保護問題が起こり、その中で特に使い捨て飲料容器に関心が集中した。84年にスイス連邦内務省環境局（BUWAL）は研究報告書「包装材料のエコバランス」を発表し、この結果はスイス・生協ミグロスにおけるLCAの活動に発展した。85年にEC環境委員会は「液体食品容器政令」（EC Directive 85/339）を可決し、EC加盟各国の企業は容器に関する資源エネルギーの利用を監視することが義務づけられ、LCAの研究が活発に行われるようになった。

米国においても88年に固形廃棄物が大きな社会問題となり、その解決手段としてREPAが見直され、利用されるようになった。こうして環境問題とリンクしてLCA研究は少しずつ進展し、理論の構築と実施例の蓄積がなされ、研究者の裾野が広がり、水準も向上してきた。このような状況の中で、90年にEPA、WWFなどの主催により米国・ワシントンでLCAのフォーラムが開催され、また同年に米国・ベルギーでLCAシンポジウムがSETACとP&G社の主催により開催された。これには産官学・市民からの研究者が参加してLCAに関する定義・用語の明確化、手法の改善、適用の戦略などが議論され、さらにLCAの促進を目的としてSETAC財団が設立された。

90年にはAPME（欧州プラスチック製造者協会）／PWMI（APMEの環境部門）がプラスチックに関

* 東京大学工学部地球システム工学科教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

する研究グループを組織し、研究調査活動を開始し、包装材料に関してミグロスからエコベースが発表された。91年にはLCAの方法論、手法マニュアルがSETACやライデン大学から発表されている。更に92年に国際標準化機構 (ISO) が進めている環境管理システムに関する規格 (TC207) の中でLCA (SC-5) が議論されることになったことからLCAへの関心、データベース整備はいっそう活発になってきた。

現在、ヨーロッパを中心に化学会社内、公的環境研究機関、コンサルタントなどでLCA実施専門家が活動を始めており、SETACの枠組みに沿った各種製品のLCA、或いはLCIデータベース、分析プログラムなどの商品化にむけて活動している。又SETAC、PWMIなどはいわゆるCritical Review (審査) 実施機関を目指していると思われる。

わが国ではSETACへ個別に参加してきた研究者を除いて組織的な対応が遅れており、個人的、或いは各社における試行的なLCAを除くと91年に (社) プラスチック処理促進協会においてプラスチック製品のLCA評価、日本生活協同組合連合会が容器・包装材について研究したのが本格的なLCAとして知られている最初の試みと見られる。92年には環境庁が日本エコライフセンターに委託し「環境への負荷の評価に関する予備的検討」を実施した。又 (社) 化学経済研究所が前年のプラスチック製品LCAの見直しに着手、化学工学会でもその作業を継続してデータベース化を進めた。以後プラスチック処理促進協会、石油化学協会、塩ビ協会などがLCAデータベースの構築を目指した研究会を発足させている。93年にはエコマテリアル研究会が発足し、科学技術庁・エコマテリアル研究プロジェクトで発電プラントや家電製品などの材料に関するエコバランス研究を開始した。

なおこれとは独立に電力中央研究所などではこの10年位の間、発電システムに関するエネルギー収支分析を進めており、これを更に大気排出物の評価に拡張した研究も進めている。環境研究所ではかなり粗い形ながら自動車のエネルギー消費に関するLCA的な検討を進めており、その他、各種の産業においてLCA的な発想による個別の研究が進められている。

これらの日本の動きは、欧州の一部で既にLCAを対象としたコンサルタントが成立して組織的にデータベース、分析経験を蓄積しているのに比べて、一般に試行的な研究段階のデータ検討が多く、これを実施する側も研究プロジェクト的な色彩があり、現実的なL

CAへの対応は遅れていると考えざるを得ない。

これらのLCAの起源、内外の動向をみると次の特徴が見られる。

1) 元来化学関係製品のリスク分析に関与してきた研究者が中心となっており、対象も毒物、化工品が主要な対象であった。化学関係のプロセスは伝統的に排出物のリスクが高く、その管理、防除に神経を使っている。

2) LCAの対象が容器など直接の使用目的を補助するものであるため、ライフサイクルの意味も流通段階から消費者にわたった時点でその使命を終え、直ちに最終の処理段階に入る。容器類は本来の使命がその内容輸送にあってその改善は廃棄物の削減に直結し、その交換、改善に機能面での変化が少ないので同一機能を持つ製品を相互比較分析するというLCAの基本原則、或いは分析枠組みにのりやすい。

3) 化学プロセスでは組立産業と異なり設計時に物質収支、energy 収支等を十分に検討する。また外部からの材料投入が少なく、直接原料から最終製品に至るまでの製造が同一のプロセスや組織内で完結している場合が多く、その実態が把握しやすい。

この様に化学製品を主な対象としたLCAが現在の主流であり、これが他の産業、製品にそのまま利用できるかどうかについては検討が必要である。

2. LCAの基本的な概念と手法

2.1 概要

上記の経緯でEPA、SETACが推進してきた基本概念が現在LCAとして広く認識されているが、現実には多くの技術的問題も抱えた未成熟な部分を含み、これを現実に実施するには多くの問題を抱えている。本章にその基本概念と構成を要約して示し、実施上の諸問題、適用上の限界、或いは手法自体に内在している論理的問題点などを指摘する。

まず基本の枠組みとしてLCAの実施サイクルを以下の4要素に分類する。

1. 目標設定と対象範囲の特定 : Goal Definition and Scope
2. 生涯サイクルインベントリ : LCI (Life Cycle Inventory)
3. 影響分析 : Impact Analysis
4. 改善評価 : Improvement Assessment

各ステップはその名称が示す様に問題設定、製品の生涯サイクルに及ぶ資源利用 (インプット)、及び環

境排出（アウトプット）のテーブル作製，その結果としての影響の分析，更に各種改善策の環境面での改善効果の評価といった順で行われる。その目的と分析対象範囲は理想的に広げられているが，インプットとしては各種の資源，原材料と自然資源，或いは現状を破壊するような痕跡を残すような現状変更までを含むことを理想としている。アウトプットとしても理想的には環境へ排出する可能性のあるすべての排出物をまず挙げて，分析し，その上で現実環境影響のある部分に制限して行く。その影響評価に付いては多くの議論と研究が存在するが，単純に説明しきれものではなく，この部分に現実的な障害が存在するのは明白である。現在のLCAの手法は，特に環境影響の部分は分析体系のあり方に関する検討が先行し，具体的な手法に関しては利用可能な手段のサーベイ，或いは関連手法を評価中という状況にある。

2.2 LCAの目標定義と領域設定

目標設定と全体の領域設定はLCAの目標，対象範囲を限定するものであって，わざわざ特記する必要もない自明な段階であるが，これはLCAを実施する際，その目的によって対象システムの境界，以後のデータ収集，解析手順などが異なり，これを最初に明確にすることが極めて重要な事を示している。その意味では社会学のシステム定義のようなニュアンスがある。そもそもLCAの目的は対象製品の生涯にわたる環境負荷を算出し，その代替製品，代替プロセスを考慮したときいずれが環境の見地から望ましいかを明確にすることである。効率的に分析するためには分析範囲を比較対象によって差の範囲に限定する事が必要となる。その結果LCA，特にLCIで要求されるデータの範囲と精度，分析の精密さが結局その目的，境界に依存する事になる。例えば製品の包装手段を議論するときには製品は分析対象にならないが，代替製品自体の優劣を比較するときには製品自身のインベントリーも重要な要素となる。更に地域差を考慮してA地，B地で製造する事の是非を考える場合にはその環境影響，輸送段階，或いはそれぞれの地域のインフラまで考慮した分析が必要となる。この様にLCAの問題設定を最初に明確に定義して，全体の検討範囲がどこまで広がるかを定義するのが，この最初の段階であるが，これも前述のようにある段階まで進んだ時点でその情報によって更に修正を行う事の必要性も強調されている。

2.3 インベントリー

インベントリーとは名の示す如く一つの製品の全て

の資源投入と環境影響などのある排出物，ならびに副産物を含む本来の産出製品をまとめて出力とみなし，その全体の入出力を収支表の形で整理する事を示す。製品のライフサイクルの各段階は一般に，地球から取出して地球に還すまでという標語にあるように，

- 1) 資源採取，
- 2) 製造工程，
- 3) 使用（活動）／再使用／維持，
- 4) リサイクル，廃棄物処理

の4段階に分けて各段階毎にそのインプット，アウトプットを算出する。この内，EPAの解説書では2)の製造工程を更に材料製造，製品組立，充填／包装／配送に分けて記述する。これは過剰な包装材料利用などによって本質的でない資源の消費とその後処理でいかに大きな負担が生じているかを反映するものであって，この部分がLCAの動機をよく示しているといえる。

その各段階で標準的なテンプレートを用意し，これに入出力量を当てはめるという形で全体のプロセス構成に従ってデータをまとめる。各段階内で必要な場合は更にこれを細分化して，そのサブプロセス毎に同一のテンプレートに従って更に各細分段階毎の入出力を算出することになる。

その対象分類（一般にはカテゴリーと呼ばれる）は対象とする製品，プロセスによって異なるが，基本的な入力として各種資源，或いは中間投入材，エネルギー，大気，土地，水等の自然資源をとる。他方で出力としては各段階における各種廃棄物（大気排出，液体廃棄物，固形廃棄物，各種の微量有害物など），途中，或いは最終段階の副産物，副製品，主製品をリストアップする。

このうち，インプットとして直接投入材以外に最終製品の配送とサービスによる負荷を重視しているが，全産業を一律に考えればこれらは単なる中間投入とみて一貫性を保つことが出来る。

この様なすべての入出力項目から現実の分析でどの項目を採用するかはLCAの目的，対象によって当然異なるが，一般的には次のステップの環境評価に影響を与える各項目をはっきりさせる事，ならびに全ての資源消費，産出，排出を明確に把握する事，しかも製品の生涯にわたって影響を及ぼす全排出を示すために直接，間接的な排出まで含んで収支を明らかにする事が理想である。他方で全ての入出力を完全にトレースすることはその精度，費用などを考えると不可能に近いので，当然，必要なものに限定して取り入れる事に

なる。

一方直接的な投入、出力以外には前記の交通サービスを除き、間接投入に関して明確に示された例は少なく、現在確立された手法というものは見あたらない。SETACの枠組みは化学分野の製品、プロセスを対象とした分析が多く、殆どが原材料としての直接的な投入、出力のみが第一義的である。間接的な入出力よりもむしろ有毒物質、有害物や直接の廃棄物に注目した検討が主となることが多い。当然ながら、エネルギー消費の勘定も行われるが、これもプロセスが直接消費した部分を中心に間接的なエネルギー部門や、更にその設備資本や間接投入などはあまり明確に把握されていない。

2.4 影響評価

影響評価は、LCIで算定される各排出物が及ぼす現実の環境への影響を定性的、定量的に評価しようというものであって、LCAの最も重要な段階である反面、科学的に妥当な結果を得るのは最も困難と見られる段階である。一般にこの影響評価分析は更に以下の3段階に分割される。

- 1) 分類 (Classification),
- 2) 特性化 (Characterization),
- 3) 価値付け (Valuation)

このうち、分類は定性的な作業であって、LCI等で得られた各種の排出分類項目を、環境影響の類似、或いは等しいものに分類するもので、必ずしも定量的な評価基準を必要としない段階である。

影響評価においては環境影響を次の範疇にわけて分類するのが普通である。即ち

- 1) 健康影響：人間への健康影響,
- 2) エコロジー的影響：自然、植生への影響,
- 3) 資源影響：枯渇性資源の使用とその評価,
- 4) 社会福祉 (社会的健全性)。

これらはいずれも定義は簡単であるが、定量化は極めて議論が多く、しかもその影響程度は厳密にはその周囲条件、環境条件、発生のタイミングなど非常に複雑な要因に支配され、しかも非線形的な限界条件でその影響力が突然変化することも多い。いわゆる複合汚染なども効果の単なる重畳ではなく非線形的にその組み合わせで影響が変化する。また過去の履歴、蓄積など時間的な進行過程も大きな影響を持つので、現在議論されている程度のLCIの項目 (これでも現実にデータを整備するには著しく多量の作業を要するが) ではとても十分な説明は不可能である。

但し、このような分類の目的は、たとえ定性的にしろ、各種の環境影響への因果関係のパスを探り、一つの製品がどのような範疇の環境影響を及ぼす可能性があるかを見きわめて以後の分析の必要データ、或いは分析対象を確定する事にあるとしている。環境影響は環境への影響を表すストレス因子 (stressor) と呼ばれる要因を新たに定義して、各種の環境影響を分類する事を考えている。即ち、LCIカテゴリーと環境影響を結び付ける次の分類として環境へのインパクトのより明確な因子を分類して、LCIの出力として挙げられているカテゴリーとの対応を定性的に整理する段階である。

次の段階の特性化とは各々のストレス因子が現実の環境影響、即ち健康、自然環境、資源保存へどの様なレベルで影響するかを定量的に示すものと定義される。但し、詳細な地域条件に依存する特定のケース、微量の毒物排出による影響など特殊な確率的状況に依存する影響評価はリスク分析など他の手法が適切であり、あくまでも一般的、平均的な影響評価を対象とする立場をとっている。具体的手順策定以前の段階で議論が行われておりその概念に対するコンセンサスも得られていないのが現状である。

最後の価値付けとは以上の異なる分類 (カテゴリー) 間の影響力を一つの総合評価指標に統合して対象システム、製品の全体的な環境影響を評価しようという野心的な試みであり、いわば多次元的効用 (一般に環境の場合には負の効用が多い) を統合指標にまとめることを目的としている。前項の特性化でも既に多くの議論があるが、この段階は更に異なる環境影響にいわば優劣、或いは等価変換値を定量化しようというもので、その基本理念に遡ってその是非、妥当性、実現可能性には多くの異論、疑義が示されている。例えば資源枯渇と健康影響、或いはエネルギー効率と地球環境が矛盾した場合にどちらがどれだけ優先すべきかはその目的、周囲地域条件はもとより、その時期、状況、対応する技術水準などにより全く正反対の意見も有り得る。現段階ではまずLCAの影響評価として利用可能な既存の手法のサーベイが必要と考えられている。但しこの影響評価手法、手順は必要な基礎データとしてのLCIの仕様に係わるので、LCA全体の実現可能性、データ取得のコスト、以後の分析可能性などを左右する。全体の整合性を維持したLCAの枠組み決定が必要とされる。この段階は特に評価の最終段階でもあり現実性を充分考慮した仕様、手順の議論が尽くされる必要がある。

2.5 改善評価

SETACの枠組みではLCAの最終目標となっているが、これはLCAを行う以上自明な目的である。即ち、対象のプロセス、製品、或いは技術の変更、改善を念頭において、LCIデータの収集、影響評価を行って、改善効果を定性的、且つ可能な限り定量的に分析、評価して、その他の現実的制約も加味した上で最適な改善決定を行うことに他ならない。但し、LCAは経済性、経済効果、或いは各種の資源制約（労働、資本）などで考慮されにくい環境面の評価であるから、そののみで意志決定が行われるわけではないが、その環境面への効果をあらかじめ考慮、分析して定量的に把握しておく事は極めて重要である。更にこの結果をいかに上手にPRするかといった公表、提示方法がむしろ主要なテーマになるものと考えられる。

2.6 LCAの手法、実現における各種の課題

前述の様にLCAはその基本概念は単純明白であるが、これを実現する具体的な手法に関してはデータ制約から多くの技術的問題をかかえており、多くの現実的な対応手法が試行錯誤的に試みられているがまだ議論も残り確立したものとはいえない。紙面の制約からここでは単に主要な問題点のみを項目毎に列挙する。

1) 手法上の問題点

インパクトや原単位など線形過程の妥当性

製品vs製造過程の対応の任意性：配分、複合利用、分業製造、供給ミックス等の扱い

消費段階の把握、多様性と不安定性、

リサイクル、廃棄物回収処理の扱い

海外生産材料、消費、廃棄処理などの取扱い

2) 応用上の問題点

動的不安定性：範囲、時間的変化、稼働率

流動性：分業、移動、国際流通

データ管理の問題：社内データの機密保持と公開時の信憑性の確保の両立

再処理、再利用などの不安定性、データ取得、非存在産業の取扱い

全体のシステムの整合性の維持

システム変化への対応

3) LCAの一部としてのエネルギー収支分析における諸問題

現在のLCAでは中間投入の概念が欠落しているが、例外的にエネルギー投入と輸送（包装容器に関連して）、廃棄物処理サービスは列挙している。ここでは特に関連の深いエネルギー収支分析における従来からの問題

点を示す。但し、LCAでは化石燃料自体のエネルギーも資源投入として算定するので、この部分は伝統的な収支分析よりも明白であるが1次、2次エネルギーの差の扱いなどには議論がある。

a) 輸送コストや内部損失、或いは初段の変換処理（LNGの液化など）：他の有効利用可能性と比較することを基本とする場合には現地からの移動に伴う処理の取扱いを明確にする必要がある。

b) 高位、低位発熱量、或いは電力エネルギーと熱エネルギーの区別と評価方法：利用可能性を議論する際、比較対象と技術水準に依存する。例えばヒートポンプ、電気自動車など将来型の高効率機器の利用可能性により比較対象が際限もなく広がる。

c) 排熱の扱い：温度、物理的状態などの区別と利用可能性

d) エネルギーミックスの扱い：投入エネルギーの質

e) 原子力の扱い：長期の廃棄物処理、事故影響などの評価

f) 将来技術の取り込み：基本的には現状分析にとどまる

3. ISO、環境管理システム（TC207）におけるLCAの位置づけ

前述のようにTC207の中ではSC3（環境ラベル）、SC4（環境パフォーマンス評価）がそれぞれ製品と企業活動の環境影響評価の標準化を目的としているが、LCAはその論理的根拠を与え得るものとして期待され、第5分科会SC5がその標準化を進めている。TC207の準備段階でLCAに関してはSETACが深く関わっていたことから現在標準化を目指しているLCAの概念もほぼ上記の枠組みに沿って検討されている。SC5の第1回委員会は93年11月に幹事国フランスで開催された。ここでは本来ライフサイクル分析（Analysis）と呼ばれていた分科会名をライフサイクル評価（Assessment）と改め、LCA標準化の対象を手法以上に手順、評価などを含む広い範囲に広げたのが特徴的であった。

実際に標準化の原案を作成する作業委員会（Working Group）はSETACの概念に対応して以下の5委員会（幹事国）が構成された。

WG1（USA:SETAC）：総論・概念

WG2（ドイツ）、WG3（Jpn）：LCI（ライフサイクルインベントリ）（各基本概念、個別処理）

WG 4(スウェーデン): 影響分析

WG 5(フランス): 改善評価

本来TC207はEMASとの関連もあってヨーロッパ諸国がその推進に熱心で米国、日本が慎重な態度を取っているのが一般的傾向であるが、LCAに関してはSETACを代表する米国の幹事が極めて熱心であり、その準備段階のSAGEの段階からSETACが中心に準備を進めてきた。WGも自然にその基本概念に対応する構成となっている。

具体的な標準化作業はまずWG 1で全体の基本概念をまとめる事を先行し、94年3月から既に4回の会合を開催して、本年2月には一応ドラフト案作成を完了した。その内容は極めて一般的な概念を示すに留まっており、詳細な手法についてはこれに引き続き、或いは並列に検討を進めているLCI、インパクト分析のWGが詳細部分を標準化することを予定している。具体的にはその概要部分も各々対応する他のWGが担当して出来るだけコンセンサスをとりながら粗案を作成するという形態を取ってきた。しかし対象が完全にソフト的な手法であるということ、現実に確立した手法、手順が存在しない内に標準化を進めるというISOでは例の少ない状況のために基本的な構成要素、対象の範囲、言葉の定義などかなり根本的、概念的な議論が多く、具体例のない標準化の困難な事を反映している。

繰り返して示しているように基本的な構成、概念はSETACの概念に従っているが、現実にLCAを実行するには問題点も多く、特にこれを実施する事になる産業界からは実現可能なLCAの標準化を望む声強い。他方でLCAの運用を厳密に定義してその安易な利用を防止しようと言う動きもあり、その結論の妥当性、正当性、或いは審査方法などで標準化の対象に含める事も議論されている。このような審査手順までを標準化の中に含める事は現実的なLCAが存在しない現時点では議論が拡散する可能性も高いが、現実の利用を考えるとその安易な実施、利用はLCAの信用を失わせるばかりでなく、誤った結論を導くことになり極

めて危険でもある。他方であまりにも複雑で特定の業界、グループを利するような標準化はLCAの実施コストを徒に上げるばかりでなく最終的にはその結論の信憑性をも疑わせる事に成りかねず、その現実的な妥協点の模索が最も困難な論点となっている。現時点の案はLCAの実施の程度を複数の段階に分けて、企業等の内部で自己改善のために実施する場合(内部利用)と、その結果を公表して宣伝、広告、或いは政策・規制策定などに利用する場合(外部利用)に分類し、後者に対しては適正な審査をへる事を義務づけるという形でまとまりつつある。TC207では他の分野でも同様な議論が常に生じており、環境改善を目的とした企業の自己努力が、外部にその結果或いはその努力を訴えることにより、企業・製品のイメージアップを狙った宣伝・広告や競争相手の攻撃に利用される可能性の高い事を示している。また一部ヨーロッパの国では根拠の不明確なLCAが政策、規制に安易に利用される事を恐れる風潮も見受けられ、それぞれの立場の違いが複雑にISOの場に反映している事を感じさせられる。

もう一つの論点はSETACが主張する最終段階の改善評価段階の意義に関する議論で、大勢が標準化は不要との意見に傾いているが、米国SETACのグループがその存続を強く希望するなどかなり観念的議論が続いたが、結局標準構成としては考えずLCAの応用の一つという形で妥協した。ISOにおける標準化という次元での議論が整理されずに徒に主導権争いをしていると言う印象を受ける。現実にはインパクト分析も現実的な手法を確立するにはまだほど遠い段階にあり、今後同様の議論が続く事と考えられる。これに対してLCIは既に多くの実例が存在し、具体的な手法としてはそのデータ取得手法、配分手法、概念、或いはその妥当性の確保とその表示方法などに多くの論点もあるが、比較的まとめる事の容易な部分と考えられている。実際にWG案をまとめつつあり、早ければ今年中にもその概念部分を粗案としてまとめる事が期待されている。