

L C A 手法

Methodology of LCA

内 山 洋 司*

Yohji Uchiyama

1. はじめに

消費は文化のバロメータといわれるアメリカ的な生活様式は豊かさの憧れであり、多くの人々がそれを追い求めて生活している。しかし、その生活様式は同時に大量の物質消費と使い捨てによって成り立っており、深刻な環境汚染と廃棄物を発生している。世界人口の4分の3を占める途上国も、先進国の生活様式を急速に取入れ始めている。年間1億人ペースで増え続けている世界人口…大量生産と人々の生活様式を改めない限り、明るい未来が開けなくなっている。

資源とエネルギーを消費して成り立つ現在の産業社会は、その消費量が膨大であるため、環境の浄化機能を自然作用だけに頼れなくなっており、自分自身で浄化システムを構築しなければならない。また大量消費と大量廃棄を改めたスリムな社会を構築し、環境負荷をできるだけ許容範囲に抑える努力が望まれている。

地球が抱える問題群は、複雑にからまっており、あちらを立てれば、こちらが立たずといったジレンマ状態にある。ライフサイクルアセスメント (LCA: Life Cycle Assessment) とは、現代の複雑な技術社会が生み出した諸問題を取り扱うシステム分析法の一つである。それは、製品や技術について“ゆりかごから墓場まで”のライフサイクルにおける諸問題、特に環境問題を中心に社会に与えている影響を総合的に分析し、環境負荷を低減する方策を検討していくものである。

2. LCA手法

LCA手法は、次の3つのプロセスが基本になる。

- ①インベントリー分析 (Inventory analysis)
- ②影響分析 (Impact analysis)
- ③改善施策 (Improvement)

インベントリー分析とは、製品 (財、サービス) や技術について資源や環境負荷などがどのように投入、かつ産出されているかを明らかにするもので、ライフサイクルアセスメントの最も基本となる分析である。そのことからこれまでのLCA研究においても最も多くの研究が行われてきている。

影響分析は、対象製品等から産出する環境負荷が、社会や人にどのような影響を与えているかを明らかにするものである。一般にLCAの影響分析は、分類 (Classification)、特性分析 (Characterization)、価値評価 (Valuation) といった3段階の評価で検討する。影響分析の最初の集計作業となる分類 (Classification) でインベントリーデータはいくつかの環境因子に割り当てられる。環境因子の分け方にはいくつかの異なった方法がある。資源枯渇、健康影響、生態系影響といった3つの分類の他に、非再生可能エネルギー資源、地球温暖化、酸性雨、オゾン層破壊、砂漠化、光化学酸化物形成といった分類もある。さらに埋立て容量、景観破壊、有害物質、騒音、悪臭、従業員リスク、生物資源、過密化なども環境因子に付け加えることもある。

特性分析は、分類されたそれぞれの環境因子が社会へどのような影響を与えているかその影響の大きさ分析するものである。1つの環境因子に含まれる異なる化学物質は、それぞれ影響の大きさも異なることが多い。例えば地球温暖化に影響を与えるCO₂、CH₄、N₂O、CFCなどの温室効果ガスは異なる温暖化影響を持つ化学物質であり、その影響の大きさは温暖化ポテンシャル (GWP: Global Warming Potential) で評価される。GWPで示される温暖化影響は、さらに異常気象や海水面の上昇などが原因となって発生する人々や生態系への具体的な被害の大きさにして表わすこともある。いずれにせよ環境因子それぞれについて、GWPのような共通の評価指標を設定し、インベントリーの大きさを影響の大きさに表わすのが特性分

* 御電力中央研究所 経済社会研究所技術評価グループリーダー
東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム専攻客員教授
〒100 東京都千代田区大手町1-6-1

析である。

価値評価は、特性分析の結果として得られる異なる環境影響を重み付けして総合評価するものである。特性分析が、リスク・アセスメントと呼ばれる自然科学的手法であるのに対して、価値評価は社会としての優先度や価値観による社会科学的手法である。それは多目的意志決定問題であり、手法には評点法のような簡易手法の他に多属性効用理論を用いた統合化手法がある。しかし社会や人の評価は、もともと不確実性が大きく、場所や時間によってその評価が変わるといった基本的な問題がある。

改善施策とは、インベントリーや影響の分析で明らかになった問題点を改善するための具体策を検討するものである。目的により改善施策は異なるが、目指すところは環境への影響が小さい製品やシステムへの改善である。例えば家電製品の場合、使用時の省エネルギー化と構成素材の軽量化とリサイクル化が改善効果が大きい。施策には、製品開発、製品設計のように機器や製造ラインを改善する技術的な改善だけでなく、製品へのラベリング、制度の改善、規制の強化、あるいは税制や資金援助といった方策も考えられる。

3. インベントリー手法

3.1 積み上げ法

製品や技術のLCA研究で最も基本となるのが対象プロセスへのインベントリーである。ここでは、インベントリーについて分析法を説明することにする。インベントリー分析は、まず最初に対象となる製品あるいは技術をインベントリーデータが入手可能な要素にまで分解する必要がある。例えば発電プラントについて説明すると、ライフサイクルの評価は単に発電設備だけでなく、国外も含めた燃料の採掘から輸送、精製、そして廃棄物の処理処分に至る関係するすべてのプロセスが対象となる。

分析は、分解された各プロセスについてインベント

リーを調べ、最終的にはそれらを足し合わせて評価することになる。インベントリーには、対象プロセスに投入している原料、素材、エネルギー（労働と金額を含めることもある）とアウトプットである製品、環境負担因子が含まれる。ライフサイクルのインベントリーは、鉱石やエネルギーの採掘から精練、製造、加工、組み立て、さらに利用と廃棄、いわば“ゆりかご”から“墓場”までトータルシステムについて分析する。図-1は、ライフサイクル分析に必要なプロセス連鎖を示したもので、基本的には生産、消費、リサイクルの3つの部門から構成されている。

一般にプロセスは製品を生産するためのもので、インプットである原料とエネルギー、それにアウトプットの環境負荷（廃棄物）はすべてその製品のために必要なもの、あるいは発生したものである。もし製品が単一製品であれば、製品の原料、エネルギー、および環境負荷の原単位は、それぞれの総量を製品の生産量で割ることで求めることができる。しかし、問題は複数の製品、あるいは副製品（原料、エネルギー）が生産物として同時に産み出される場合である。

複数生産物への投入量や環境負荷の配分は、プロセスを分解することで個々の生産物のインベントリーを明らかにすれば可能である。しかし、実際のプロセスにおいては連続的な製造工程で複数の生産物が製造されるものが多く、生産物は必ずしも分離可能ではない。生産物相互の因果関係も不明確で、インベントリーを製品別に求めることが難しくなっている。

このことからインベントリーは、通常、分解できないものや共有して使っているものに関しては、生産量あるいは生産額に比例してそれぞれの製品に配分する。特にエネルギーのように、プロセス全体で共通に利用しているものは、製品のエネルギー原単位と環境負荷原単位（エネルギー消費分）はそれぞれの生産量あるいは生産額に比例配分して求めている。

インベントリーの分析には2つの方法が基本的に考

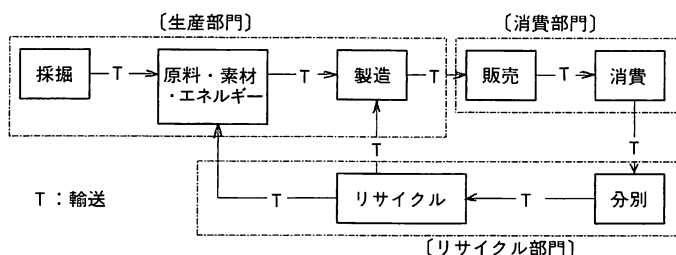


図-1 ライフサイクル分析のプロセス連鎖

えられる。1つは製品がどのように作られ廃棄されるかを製品毎に具体的に調べていく方法である。もう1つは産業連関表と呼ばれる異なる産業の産出投入（金額ベース）が詳細に調べられた表を利用する方法である。前者は積み上げ法（Process Analysis）と呼ばれ、製品のライフサイクルをボトムアップで調査していく方法で、後者は産業連関分析法（Input-output Analysis）と呼ばれており、すでに調べられた産業間のインベントリーを利用して直接間接の投入エネルギーや環境負荷をトップダウンで求めていくものである。

現在、実用的に利用されているLCAソフトウェアの大半は積み上げ法によるものである。表1にこれまでに開発されてきた主なソフトウェアの概要を紹介する。

積み上げ法の場合、各プロセスとそのインベントリーはできるだけ詳細に調べなければならない。その利点

は、具体的なプロセス技術を検討していることから、インベントリーの作成根拠を明確にでき、また対策の検討も容易になる。積み上げ法の問題点は、調査できるプロセスに限界があり、すべてのプロセスを網羅できないことである。また選定したプロセスも、ある特定の条件のもとに選ばれていることが多く、必ずしもそのプロセスを代表する客観的なものではない。

3.2 産業連関法

産業連関法は、積み上げ法の欠点を補うものである。それは、産業連関表を利用して最も複雑な製造工程を中心に整合的に分析するものである。すなわち、ある財貨のエネルギー消費や環境負荷について、産業部門からの直接、間接の影響を詳細に求めるものである。

産業連関表は、ある特定地域のすべての産業が製品やサービスを作るプロセスにおいて投入、産出した財貨を網羅的に調査した表である。わが国の産業連関表は、通商産業省と経済企画庁が1955年に公表したのが

表1 海外で開発されているLCAソフトウェア

- ①BOUSTED：ヨーロッパで最も知られているソフトウェア。1972年に英国のDr. Ian Bousteadにより開発されたもので、約2,000の産業データを網羅した最も包括的なLCAシステムである。もともとは燃料やエネルギーに焦点を当てていたが、最近では素材やプロセスなど広範囲に分析できるようになっている。
- ②ECOLOGIC：スウェーデンのシャルマス工科大学で開発されたソフトウェア。主にスウェーデンにおける包装についてのインベントリー分析を扱っている。
- ③IDEA (International Databases for Ecoprofile Analysis)：もともとはオーストリアのIIASA (the International Institute for Applied Systems Analysis) で開発されたソフトウェアであるが、現在は、フィンランドのVTT技術研究所の管理されている。西ヨーロッパの平均的なデータが整備されており、特に素材製造、エネルギー、輸送を中心に包括的に分析することができる。
- ④PEMS (PIRA Environmental Management System)：包装産業協会により開発されたインベントリー分析と影響分析ができる2つの機能を持ったソフトウェア。もともとはBUWALとPIRAのデータを利用して包装製品の分析のために開発されたものである。
- ⑤TEMIS：ドイツのDarmstadtにあるOkoinstituteにより開発されたシステム。エネルギーと輸送に焦点が当てられており、エネルギー政策の立案のための支援ソフトである。
- ⑥SIMAPRO：プロセスと材料システムについての設計を支援するソフトウェア。もともとライデン大学のCMLで開発されたシステムで、その後、更新され現在はスイスで開発した影響分析が含まれている。
- ⑦ECOPACK2000：ソフトウェアは英国のLandbank Agencyで開発されたもので、BUWALとBousteadのシステムから成っている。主に包装製品を対象としており、影響分析も可能である。
- ⑧TEAM (Tools for Environmental Analysis and Management)：フランスのEcobilanにより開発されたもので、スプレッドシートでデータベースが作成されPCで計算できる。データはDEAMSと呼ばれる標準的なEcobilanのデータベースが整備されており、エネルギー、輸送、素材について詳細な分析ができる。
- ⑨OfE (Okoinventare fur Energiesysteme)：スイスのETHで開発された発電システムに関するソフトウェア。石油、ガス、石炭、原子力、水力、バイオマス、地熱、太陽熱、太陽光などについて、放射性物質を含めた広範囲の環境負荷が分析できる。
- ⑩LIFEWAY：デンマーク工科大学で開発された教育システム。範囲は限られているが価値評価も検討できる特徴がある。

最初といわれている。その後、行政管理庁（後の総務庁）を中心に、各省庁共同で5年毎に調査が行われるようになり、最新のものは1990年表である。

産業連関表をライフサイクル分析に用いる利点は、ある製品の直接、間接のインベントリーを理論的に算出できる点にある。産業連関表によるインベントリーの算定方法について簡単に説明すると、製品を含めた財貨の投入・産出バランスは式（1）で表わされる。

$$x = A \cdot x + f \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、A：投入係数行列、x：国内生産額ベクトル、f：最終需要額ベクトル、式（1）をXについて解くと式（2）となる。

$$x = L \cdot f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、L：レオンチェフ逆行列、

$$L = (I - A)^{-1} \quad I: \text{単位行列} \\ = I + A + A^2 + A^3 + \dots\dots$$

逆行列係数Lは、個々の財に対する需要が、直接、間接に誘発する各財・サービスの生産量を示している。j財に1単位（百万円）の国内最終需要が生じた場合、誘発されるすべての生産は $(I - A)^{-1}$ のj列によって示される。つまり、j財1単位の需要に対し、i財の生産が lij だけ誘発されるということである。

（1）式に輸出と輸入を含めて定式化すると次のようになる。

$$x^m = A \cdot x + y + e - m \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、y：国内需要ベクトル、e：輸出額ベクトル、m：輸入額ベクトル

ここで、輸入係数を対角要素とし、非対角要素を0とする対角行列をMとすると

$$x^m = \{I - (I - M)A\}^{-1} f \\ = \{I - (I - M)A\}^{-1} \{(I - M)f + e\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、国内需要yと輸出eを与えることにより、国内生産額xを求めることができる。

ここでj財を1単位生産するのに必要なインベントリーの係数を対角要素、非対角要素を0とする行列をVとすると、j財を1単位生産するのに直接、間接に誘発するインベントリー量は、式（5）、（6）で表すことができる

$$V \cdot x_j = V \cdot (I - A)^{-1} f_j \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V \cdot x_j^m = V \cdot \{I - (I - M)A\}^{-1} f_j \quad \dots\dots\dots (6)$$

産業連関表は、インベントリーに関して直接、間接の分析を行える利点があるが、問題点として以下の項目が上げられる。

・産業連関表は多くても500程度の部門にしか分れて

いないため、世の中にある多種多様な製品や技術を分析するには不十分である。評価はあくまでも部門の平均財についてであって、個々の製品の分析に産業連関表を利用することは難しい。

・財やサービスのエネルギー濃度や素材濃度は、部門毎に物量表と産業連関表を対応させて求めているため正確な物量フローになっていない。素材やエネルギーの単価は、実際には大口と小口で異なっており、平均単価で素材やエネルギーを比例配分すると単価の安い大口への配分が過小評価になる。

・産業連関表では、各産業で自給しているエネルギーのように分析に現れない要因も存在する。例えば紙パルプ産業ではエネルギーの自給率は1/3程度になっており、廃物燃焼のボイラによる蒸気の利用などは産業連関表に扱われていない。

・エネルギーや環境負荷の分析に産業連関表を使うためには1部門1製品が条件になるが、実際には産業連関表のどの部門も多種の製品を生産している。ある部門で製造されるそれぞれの製品は、エネルギーや素材を同じように消費し、かつ同じ環境負荷を出しているとは限らないため、金額の大きさに比例して単純に配分することには問題がある。

また副産物が発生している場合は、その配分方法にも工夫がいる。

・産業連関表の取引基本表では、単価10万円以上耐用年数1年以上の財貨は固定資本形成費として計算され内生部門には計上されない。逆行列係数を用いて直接、間接に誘発する財のエネルギー消費には、固定資本形成を作るためのエネルギー消費は含まれない。資本形成は昭和60年の日本における最終需要の27%を占めており無視できない値である。

・産業連関表は特定の年の投入、産出を調査した表である。過去から構築されてきた現時点の社会インフラによるフローの分析のため、過去のインフラ整備に要したインベントリーの影響は無視されている。その結果、インベントリーの過小評価と、産業の発展段階や産業構造が異なる国の産業連関表を用いると、異なった結果になってしまう。特に、途上国のようにまだ産業のインフラが整備されていない国での分析は乖離が大きくなる。

・新技術やライフサイクルのように、まだ産業連関表に入れられていないものに関する分析ができない。また在来技術でも途上国のようにまだ製造インフラが無いところでは分析できない。

・輸入品に関する分析は、輸入国の産業連関表が必要になるが、必ずしもすべての国で詳細に連関表が整備されているとは限らない。

・建設期間のある技術や製品に関しては、産業連関表の分類品目が直接結びつかない。ダイナミックな分析には無力である。

3.3 ハイブリッド法

産業連関法は、積み上げ法では追いつけない間接影響を整合的に分析する方法として有効であるが、エネルギー消費や環境負荷を分析するには現在の連関表では不十分な点が多いため、産業連関法で求まるある部門の直接、間接のエネルギー消費や環境負荷はその部門で生産されたすべての財の平均値である。例えば「乗用車」部門から得られる乗用車のエネルギー消費や環境負荷は、トヨタや日産といった会社で造られたある特定の乗用車を対象にしたものではなく、ある年に日本全体で造られたすべての乗用車の平均値である。このことから、産業連関表からはある会社の特定車種のエネルギー消費や環境負荷を計算することはできない。

具体的な製品のライフサイクル分析を産業連関表を用いてできるようにするには、産業連関表の部門を個々の製品レベルにまで詳細にしていかなければならない。それも企業毎に製造されているすべての製品にまで細分化することが理想である。しかも加工・組立て部門だけでなく、採掘、素材製造、輸送などすべての産業プロセスに対して詳細に分解する必要がある。それは、詳細かつ膨大な積み上げ作業を行うこととならならず、実際には不可能なことである。

煩わしい作業を回避し精度を高めるには工夫がいる。既存の産業連関表を生かして解析の精度を高めるには、エネルギー消費や環境負荷の大きい産業である素材、エネルギー、化学といった部門に絞って産出投入を詳細に調べればよい。また大衆消費財である最終財を生産する加工・組立て部門も、産出より投入が対象製品レベルにまで詳細に分れば分析の精度が向上する。

産業連関表の最大の課題は、部門間のエネルギー消費や環境負荷の遣り取りが金額の大きさに比例していることである。当然、最終財の直接、間接のエネルギー消費と環境負荷も金額に比例することになる。すなわち金額が2倍になる乗用車の製造時の環境負荷は2倍になる。これは一部門一財生産であれば問題はないが、実際には多財生産であるため誤差の原因となる。この問題は産業連関表を使う限り解決することはできない。

最終財である製品のエネルギー消費と環境負荷を金額比例でなく素材構成から求める方法がある¹⁾。もし最終財の素材構成とその環境負荷原単位がそれぞれの部門で求められれば、社会の製品の環境負荷は製品が属する部門と製品の素材構成を知ることによって計算できることになる。それは産業連関表の財を素材財、中間財、最終財、その他財（サービス財、エネルギー財）に区分し、それぞれの財について構成素材としての投入関係を調べ、最終財に投入される構成素材を調べるものである。産業連関表から最終財の構成素材を求めるためには次のような仮定が必要になる。すなわち、素材財と中間財以外の財からは財の構成要素となる素材の投入はない。構成素材量はどの部門においても物質保存の法則が成り立ち、屑を差し引いた投入と産出の値が同じになる。中間財と最終財の生産は多財生産であり、それは構成素材が異なる製品の集まりとする。中間財あるいは最終財を構成するm素材量に対するm素材部門からの投入量の比率はすべての生産財で変わらないものとする。最終財、サービス財、エネルギー財からの投入は、生産財の物理量（例：構成素材の重量和または体積和）に比例して増大する。生産財あるいは最終財のある特定の財に直接、間接に投入されるエネルギー量は、レオンチェフ逆行行列から求める各財の直接間接エネルギー量と特定財に投入される各財の投入量を掛けて求めることができる。以上の前提により方程式を解けば、最終財に投入される直接、間接のエネルギー量は、財を構成する素材毎に計算できることになる。

最終財のエネルギー原単位を素材計と素材別に求めた値を表2に示す。図から加工・組立て工程が複雑である付加価値の高い製品になるほど素材計の原単位が大きくなっており、素材別に見た重量当りのエネルギー原単位は木材と粗鋼の値が小さいのに対して繊維、ゴム、ガラス、その他金属の値が大きいことがわかる。表で求めた原単位を調べようとする任意の製品の構成素材量にかけて足し合わせれば、その製品の製造に要した直接・間接のエネルギー消費量を求めることができる。またエネルギーの代りに環境負荷についても同じ考え方で解けば、製品毎の環境負荷を求めることが可能になる。

4. おわりに

世界の人口爆発、経済成長、物的豊かさの追及は、資源の消費や環境に対する負荷を増大し、地球規模の様々な環境問題を顕在化しつつある。21世紀も世界が

表2 最終財の構成素材別に求めたエネルギー原単位 [Mcal-素材/kg-素材]

	素材計	木材	繊維	ゴム	樹脂	硝・陶	粗鋼	銅	アルミ	他金属
木製家具	2	1	62	74	40	9	12	40	40	509
住宅新建築（非木造）	6	2	273	400	53	80	10	50	45	632
金属製家具	8	2	141	74	46	66	10	39	35	589
運搬機械	13	7	181	141	57	547	10	48	41	507
鉄道車両	14	2	202	121	52	87	13	55	44	551
乗用車	17	3	188	82	43	46	12	40	43	393
トラック・バス	18	4	190	76	45	56	11	44	42	360
電気照明器具	21	3	164	133	31	167	10	33	28	311
産業用ロボット	24	11	314	174	118	3866	19	102	82	1206
サービス用機器	24	4	362	193	116	605	21	131	97	1422
ラジオ・テレビ	27	6	150	83	34	46	9	39	40	345
玩具	34	4	300	149	81	87	19	90	70	969
事務用機械	38	8	254	137	71	178	16	104	81	918
電気計測器	38	8	262	137	69	77	12	83	62	628
VTR	41	8	216	126	55	107	12	58	50	410
時計	41	3	294	145	89	49	20	129	80	911
航空機	49	3	129	129	78	24	23	82	62	545
電気音響機器	52	4	330	166	91	191	19	109	87	1154
カメラ	76	7	318	125	73	113	21	82	69	556
電子計算機本体	87	10	419	224	116	95	22	123	92	1034
素材エネルギー原単位	—	0.1	28.6	24.1	17.4	5.9	3.3	8.6	11.7	20.1

持続可能な発展をしていくには、環境負荷を許容範囲に抑えるように、無駄な資源消費を改める社会システムの構築が必要である。それは現在の大量消費と大量廃棄を改めたスリムな社会である。

LCA手法は、持続可能な社会の発展を分析するツールである。すなわち、将来に懸念される社会問題を様々なプロセスのアクティビティーを通して総合的な視点から分析し、問題の大きさとその解決方法を明らかにすることができる。地球規模の環境問題は、技術だけで解決できるものではない。産業の発展のあり方や人々の暮らし方など経済や社会とも密接に関係している。

LCA研究は、これまで独自に発展してきた自然科学と社会科学とを融合する新しい学際研究である。それは環境問題を中心にまだ研究の緒についたばかりである。21世紀の新しい学際研究として、これから本格的に発展していく可能性がある。

文 献

- 1) 西村一彦, 本藤裕樹, 内山洋司, 「産業連関表を用いた製品のエネルギー消費量の推定」電力中央研究所研究報告Y95007 (1996年3月)