

2. グローバル化時代への挑戦 — LCA と経済評価 —

石川 雅紀*

はじめに

近年世界的に、廃棄物処理に拡大製造者責任 (EPR) の概念が取り入れられ、廃棄物処理についても一部製造者に責任が課されてきている。わが国でも容器包装リサイクル法に続き、家電、建築廃材、食品廃棄物などについてもいわゆるリサイクル法が施行される。このときの処理手段としては従来型の焼却や埋め立てではなく、消費者が使用したあとの製品を何らかの形で、リサイクルするシステムが導入されている。諸外国でも個別の事情はあるが、おおむね共通する理由として、埋立処分地の不足と、環境意識の高まりによる焼却処分場の立地困難があげられる¹⁾。

これら各国で導入されているシステムは、それぞれ目標と制約条件が異なるため費用のみでは効率性を比較することはできないが、国毎にかなり費用が異なる^{2, 3)}。すでに多くの国で実績がある容器包装で見ると、スイスでは紙を除いて、国民一人当たり年間約 40 kg の容器包装を回収しているが、平均の費用は約 9 スイスフラン/人である。一方、ドイツでは、スイスと条件をそろえた推計値として約 34 スイスフラン/人かけて、約 49 kg/人回収している。この費用の違いの大部分はプラスチックのリサイクルに起因している。スイスでは、PET ボトルのみを対象としてマテリアルリサイクルを行い、その他のプラスチック容器はごみとして焼却熱回収しており、ドイツでは消費者向けのプラスチック包装全体を対象とし、一定比率以上のマテリアルリサイクルを課しているからである。これは、プラスチック廃棄物の処理手段と制約条件によって平均コストが大きく異なることを示している。

プラスチック廃棄物のリサイクルは他の素材と比較して歴史が浅く、多様な技術が開発されている段階であり、環境面、経済面での評価が重要である^{4, 5)}。

この問題に関して、これまでいくつかの研究がなされてきているが、その多くは環境影響評価もしくは経

済影響評価のみのものであった。多くの場合に環境影響と経済影響はトレードオフの関係にあり、環境影響 (文献 6) もしくは経済影響 (文献 7) の個別の評価結果は重要なものであるが、総合的判断材料という意味では限定的なものと言わざるを得ない。

近年、ヨーロッパを中心として、環境影響と経済影響を同じプロジェクトで評価しようとする動きが始まり、研究結果が発表されつつある^{8~12)}。本稿では、環境影響評価と経済影響評価の枠組みを説明し、論点を整理する。

1. 環境・経済影響評価の枠組み

環境・経済影響評価の枠組みは大きく分けると統合評価と多元評価に分類できる (表 1)。統合評価とは、環境影響と経済影響を最終的に統合して評価し、検討したオプションに単純な優先順位をつける。多元評価では、環境影響と経済影響を個別に評価し、独立な評価結果として与えられる。したがって、この結果だけでは単純な優先順位がつくとは限らない。

統合評価手法として費用便益分析があげられる。これは環境負荷を汚染物質排出量などについて物量ベースで各システム毎に集計し、これを金額評価し、環境影響全体を金額評価するものである。環境影響が金額表示されるので、部分均衡モデルに基づいた経済影響評価結果と合わせて、社会的費用を評価し、検討したオプションに対して優先順位をつけることができる。物量ベースの排出物質量などを金額換算する手法はいくつかあり、顕示選好法、表明選好法のような消費者 (市民) 側の行動や表明から推定する方法¹³⁾と、汚染物質が引き起こす環境影響を原状回復するための費用、汚染物質の排出を防ぐための費用のような技術的側面

表 1 環境・経済影響評価の枠組み

	総合評価	多元評価
環境影響評価	LCI + 金額評価	LCA (LCI + 重み付け)
経済影響評価	部分均衡モデル	部分均衡モデル Chain deficit

* Masaki ISHIKAWA; 東京水産大学食品生産学科 助教授

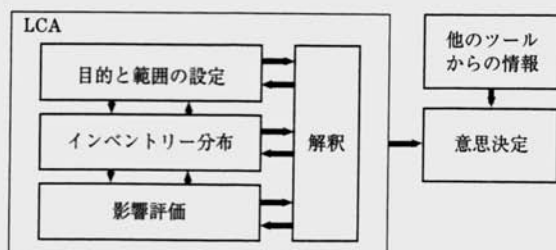


図1 LCAの枠組み

から推定する方法¹⁴⁾などが使われている。

多元評価手法としては、環境影響についてはLCAに基づいて重み付けを行い単一指標に集約し、部分均衡モデルに基づいた経済影響評価結果とともに提示する例が多い。

本稿では、多元評価手法に絞って以下に解説する。

2. LCA とは何か？

LCAとはLife Cycle Assessmentの略で、何かの選択をする場合に得られる便益と経済的費用だけでなく、全体として環境に与える影響に関する情報も評価してよりよい選択をするための道具である。たとえば毎日の買い物での製品の選択、製品を設計する際の部品、素材、容器包装等の選択、リサイクル手段（マテリアルリサイクル、原料リサイクル、エネルギー回収）の選択等さまざまな場合がある。この意味ではLCAの対象は人間の活動全体に及んでいる。

LCAの特徴は製品やシステムの「揺りかごから墓場まで（ライフサイクル）」の環境影響全体を評価することである。ライフサイクルとは、製品を作るための資源の採取から始まり、寿命を終えた製品が廃棄され環境に戻るまでを指し、この間の環境に対する負荷を積算し、環境に対する全インパクト（影響）を評価する。環境影響全体とは、CO₂による地球温暖化やオゾン層破壊などの個別の環境問題ではなく、富栄養化、酸性化、生態系影響、資源枯渇等さまざまな環境問題を意味している。

ライフサイクルでの評価が必要な理由は、たとえば、電気自動車を考えてみるとよく分かる。電気自動車はエネルギー源が電力なので走行時にはCO₂を排出せず、ガソリン自動車よりも地球温暖化に対して「良い製品」と言われるが、発電する際にCO₂を多量に排出しており、走行時にCO₂を排出していないことだけでは、ガソリン自動車と比較して電気自動車を選択すべきだとはいえない。電気自動車とガソリン自動車を公平に比較するためにはライフサイクル全体にわたって評価しなければならないことが理解できるであろう。

また、全環境影響を評価する必要があるのは、電気自動車の場合、蓄電池が必要で、鉛酸電池の場合には廃棄する際に有害物の環境影響が重要だからである。電気自動車の方がガソリン自動車よりもライフサイクルで評価してCO₂の排出量が少ないとしても鉛酸蓄電池の廃棄段階での環境影響が大きければ、電気自動車を選択すべきだという結論にはならないかもしれない。

LCAはこのような問題に現状で利用可能な最善の情報を整理集約し選択を行う人に提供することができる。

3. LCAの手順

LCAは現在ISOの場で標準化の作業が進められており、おおむねの標準はすでに発刊されている。ここでは、原則的にISO14040シリーズで標準化された手順にしたがって、標準的なLCAの手順を述べる。LCAは、目的と範囲の設定、インベントリー分析¹⁾、影響評価²⁾、解釈の4つのステップからなる（図1）。LCAの目的と範囲を定義したあと、データを収集し、ユーザーにとって有用な情報に集約してゆく過程である。

目的と範囲の設定では、LCAの目的、情報の提供対象、実施者、委託者、地理的範囲、時間的範囲、機能単位³⁾、問題とする環境影響、クリティカルレビュー⁴⁾の有無等について記述する。

インベントリー分析では対象となる製品もしくはシステムに関するライフサイクルを通じての環境負荷を積算してインベントリー表を作成する。このため対象製品のライフサイクルを定義し、プロセスフロー図を作成する。同時に比較するシステムの境界を定義し、境界を出入りするフローを定義し、このフローに伴う資源消費、環境負荷物質の排出量を積算する（図1）。

影響分析では、インベントリー表から、地球温暖化、酸性化などの個別の影響領域に対する影響を評価し、

¹⁾ 製品のライフサイクルにわたっての資源消費、汚染物質の排出量を積算すること。結果はインベントリー表にまとめる。

²⁾ インベントリー表の結果から地球温暖化、酸性化、土壌生態系影響などの個別の影響領域への影響を評価し、単一尺度もしくは人間への影響、生態系への影響、資源消費のような少数の尺度へ集約する作業。影響領域毎の評価で終わる場合もある。

³⁾ ライフサイクルアセスメント調査において、基準単位として用いられる定量化された製品システムの性能（JIS Q 14040）。

⁴⁾ LCAの実施過程、データ、方法が標準規格と適合しているかどうかの審査。LCAの目的、応用の妥当性は審査対象ではない。

⁵⁾ ライフサイクルでの環境影響を影響領域毎に代表的な影響物質質量で表わした表。

環境プロフィールを作成し、重み付けを行う場合には個別の影響領域を重み付けして単一尺度に集約する(図2)。まず取り上げる影響領域を選択し、インベントリーデータと結びつける作業の分類化を行い、インベントリーデータと個別の影響領域の定量的な関係を定める特性化を行う。

分類化はたとえば、地球温暖化に影響を及ぼすインベントリー項目はCO₂、メタン、N₂O等と決めることであり、特性解析ではメタン、N₂Oの地球温暖化効果をCO₂換算で表わす作業である。重み付けは地球温暖化、酸性化などの個別の影響領域への影響に影響領域毎の重要度の重みをつけて平均し、単一の尺度で表わす作業である。影響分析の中でも重み付けに関しては議論が多く、ISOの場合でも特定の方法が標準と合意されているわけではない。例えば、単一尺度ではなく、人間への影響、生態系への影響、資源消費の3つの尺度への集約も可能である。

解釈のステップはそれ以外のステップでの結果に対する解釈、吟味を行うステップで、結果の解釈と、前提条件、データの精度などに関する吟味を行う。各ステップでの調査研究の結果として発見されたことを目的と範囲に結びつける部分である。具体的には感度分析、不確実性分析、優先度分析等が行われる。

全般に注意すべき点はLCAの場合、手順を進めるとともに結果を見て前の段階に戻って修正するような繰り返しが必要になることが多いことである。通常の場合に、調査を開始した段階で、目的と範囲の設定が最終的な内容で詳細に決まっていることは少なく、インベントリー分析、影響評価等の進行に伴って、明確になってくる利用可能な情報の限界や分析の結果から目的と範囲を修正し作業を続けることになる。もっとも重要なことは、最終的な報告書で得られた結論と目的と範囲が整合していることである。

4. LCAと意思決定

実際にLCAを行う場合には、さまざまな点を明確にしなければならない。このため、答えを求められている問いがあいまいなものである場合には、問いそのものを明確にするための作業が必要である。たとえば、「プラスチック廃棄物をマテリアルリサイクルするのと、エネルギー回収するのとどちらが環境面で優れているか?」という問いはこのままでは答えられない。プラスチック廃棄物とはどのようなプラスチック廃棄物なのか、マテリアルリサイクルの具体的な技術は何か、エネルギー回収の効率、環境面では具体的にどのような環境影響を重視するのか等が明らかでなければ

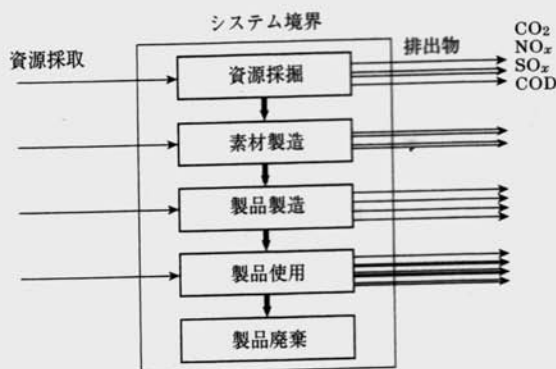


図2 インベントリー分析

ならない。

このようにLCAを実際に行うためには、さまざまな具体的な条件を想定する必要がある。これはLCAが定性的な評価ではなく、具体的なシステムに関して定量的な評価結果を与える道具だからである。

LCAは定義からして明らかなように環境面からのみの評価結果を与える道具であるから、この結果だけでは最終的な意思決定はできない。製品を選択する場合には、通常は性能、便益と価格を考慮せずに選択することはできないことから分かる通り、あくまでもこれまで得られなかった情報を補完するための道具である。

製品の場合には価格と性能は与えられている情報であるから、LCA評価結果を加味して判断すればよいことになるが、廃棄物処理システムのような社会的に意思決定する必要があるケースには、システム毎によって価格も性能も違った選択肢から選ぶことになる。このとき、環境影響を評価するLCAと価格と性能を評価するシステムで想定する条件が異なっているようでは、評価結果を単純に組み合わせることはできない。このような場合には最初から、環境影響と経済影響を評価する枠組みを首尾一貫したものにしておくことが必要である。

5. 経済評価とEcoEfficiency

経済的影響評価にはChain deficitまたは部分均衡モデルが用いられるが、環境影響評価との一貫性、消費者セクターの取り扱いなどの点で混乱がある。

環境影響と経済影響を同じプロジェクトで評価する目的は、システムの範囲や、前提条件を統一した条件でトレードオフ関係を分析するためである^{10, 12)}。

Chain deficit⁸⁾とは、採掘から廃棄までの間のコストの積算値と補助金の和から付加価値の積算値を差し引いたものと定義されているが、実際の計算が行える

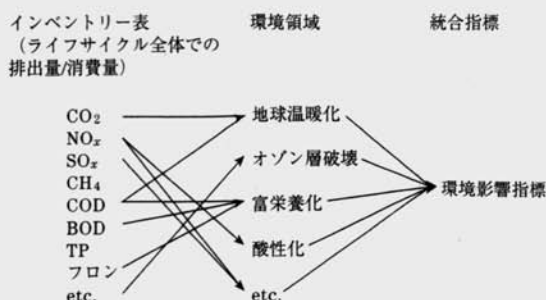


図3 影響評価

ような明確な定義は与えられていない。システム境界についても環境影響評価と経済影響評価で異なっている場合がある⁸⁾。

部分均衡モデルを用いると、前述のシステム境界外部で不変である点は整合するが、さらに、分析の対象となる最終製品の需要も一定と考えなければならない。この点では通常の部分均衡モデルよりもさらに強い制約条件である^{10, 12)}。著者等は部分均衡モデルを適用し、システム拡張を用いたときの経済影響評価モデルを開発し、消費者セクターをシステム境界内に含めることによって、結果的にはChain deficitと類似の表現となることを示した^{10, 12)}。

6. 環境経済評価の例

文献8は、プラスチック廃棄物の処理方法の選択について、環境影響だけでなく経済的影響も同じ研究のなかで評価したという意味で先駆的なものである。この研究は、CE (Centre for energy conservation and environmental technology) が中心となり、University of Delft, De Straat Environmental Consultancy の協力により行われた。委託者はDow Benelux, DSM Polymers, Dutch Ministry of Economic Affairs, Dutch Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Shell Nederland Chemie である。

目的は、廃棄物処理システムの環境影響と経済的影響の明確な比較方法の開発と、オランダの一般家庭から排出される混合プラスチック廃棄物への適用である。

評価手法としては、環境影響と経済影響の多元評価によっている。環境影響評価手法としてはLCAを用いており、経済的影響評価手法としては“Chain Deficit”という概念を提案している。

プラスチック廃棄物の処理手法は手法毎にさまざまな副産物を生じるため、システム拡張^{15, 16, 17)} もしくは“Basket of Products Method⁶⁾”と言われる方法が用いられることが多い。この研究では、数学的にはシステム拡張と厳密に同じであるが、表現法が異なる手法

(代替法) が用いられている。代替法では、副産物を通常の生産システムで生産した場合の環境負荷が回避されたと考えて、相当する環境負荷をシステムの環境負荷から差し引いている。

環境問題としては、地球温暖化、酸性化、富栄養化、毒性物質による汚染、光化学スモッグの生成、廃棄物の最終処分地の消費を取り上げ、環境負荷を統合化して環境影響指標を求める重みを決める手法としては、オランダの環境政策目標を目標とした目標距離法¹⁸⁾を用いている。したがって、厳密には環境影響評価結果はオランダにしか適用できないが、感度解析の結果から重みの違いの影響は小さいことが示されている。

経済的影響の評価尺度として、“Chain Deficit”を用いている。“Chain Deficit”は収集・処理・最終処分（もしくは再商品化）における積算費用と政府補助金の和から副産物の売却益を差し引いたものと定義しているが、適用しているシステム境界の範囲は環境影響よりも狭く、廃棄物処理部分のみである。また、再生樹脂、電力などの副産物を生じることから、既存の石油化学産業、電力産業等も経済的影響をうけると考えられるが、これらに対する影響は考慮されていない。

検討したシステムモデルは以下の5つである。

1. 参照システム。2000年まで政策変更なし。分別せず、すべて焼却。焼却施設では、主に電力を回収し、熱も回収する。
 2. 収集後分別システム。家計からの廃棄物とともに収集し、収集後分別する。ボトルと大きなフィルムをマテリアルリサイクルし、その他の分別されたプラスチックは原料リサイクルし、残りは焼却。
 3. 収集後分別+ボトルの拠点回収システム。ボトルを拠点回収 (bring system) で収集する以外は2と同じ。
 4. PMD 収集システム (Plastics, Metals and Drink bottles)。プラスチック+金属+飲料用紙容器の混合分別収集とその後の分別、その他は2と同じ。
 5. プラスチックの簡易分別収集+原料リサイクルシステム。拠点回収によるプラスチック廃棄物の収集と簡単な前処理を行って原料リサイクル。残りは焼却。
- 分析の結果 (図3)、Model 2,3が、Model 4,5と比較して、環境面、経済面ともに優位にあり、参照システムは経済的面では優位であるが、環境面では劣ることが明らかにされた。

一般的な結論として、(1)マテリアルリサイクルがもっとも環境影響が少ない、(2)油化、ガス化は、エネルギー回収を伴う焼却と比較して、環境面で有意差がないが、コストが高い、(3)分別排出は収集後分別システム、拠点回収システムより劣る、(4)いずれの

ケースも、約半分のプラスチック廃棄物が焼却されるとしている。

その後 Texaco ガス化プロセスについて検討し、環境影響、コストともかなり改善されることを示し⁹⁾、収集後分別システムとマテリアルリサイクル、Texaco ガス化プロセスの組み合わせが優れているとの結論を得ている⁹⁾。

LCA を廃棄物処理システムの選択のような社会的な意思決定に用いる場合には、経済評価と共通の枠組みで評価しなければならない。

本稿は資源環境対策 2000 年 1 月、2 月に掲載した「プラスチック廃棄物処理システムの環境・経済影響の評価 (上、下)、石川雅紀」を要約し、大幅に加筆したものである。

参考文献

- 1) 石川雅紀 (1999a); 容器包装リサイクルと規制 (上) - 法律に基づくシステムと自主的規制 -, 資源環境対策 vol.35 (11), 1089-1092 (1999)
- 2) 石川雅紀 (1999b); 容器包装リサイクルと規制 (下) - 欧州のシステム -, 資源環境対策 vol.35 (12), 1199-1202 (1999)
- 3) 石川雅紀 (1999c); 自主協定と法的規制, 包装技術, 1999 年 12 月号
- 4) 石川雅紀 (1997a); プラスチックリサイクルの LCA, 化学工業, 303-307 (1997)
- 5) 石川雅紀 (1997b); ライフサイクルアセスメント (LCA), 計測と制御, vol.36 (10), 718-722 (1997)
- 6) APME (ed.); Life-Cycle Analysis of Recycling and Recovery of Households Plastics Waste Packaging Materials (Summary Report), APME Brussels (1996)

- 7) クリーンジャパンセンター, 廃棄物減量化のための社会システムに関する調査研究, クリーンジャパンセンター, 東京 (1995)
- 8) Sas, H.; Disposal of plastics household waste; analysis of environmental impacts and costs. CE, Delft (1994)
- 9) Croezen, H. and H. Sas; Evaluation of the Texaco-gasification process for treatment of mixed plastics household waste. Final report of phase 1 & 2, CE, Delft, (1997)
- 10) Ishikawa, M., R. Förster and P. Wäger; Methodologies for Ecological and Economic Assessment of Plastics Waste Management Options, Proceedings of the 3rd International EcoBalance Conference, 21-23 Feb. 1998, Tsukuba, Japan
- 11) Hutterer, H. and H. Pilz; Kosten-Nutzen-Analyse der Kunststoffverwertung, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und familie, Wien, Österreich (1998)
- 12) Förster, R. and M. Ishikawa; The Methodologies for Impact Assessment of Plastics Waste Management Options; How to handle economic and ecological impacts? The Proceedings of R'99, 2-5 Feb. 1999, Geneva, Switzerland (1999)
- 13) 栗山浩一; 環境の価値と評価手法, 北海道大学図書刊行会 (1998)
- 14) Hanley, N. and C. L. Spash; Cost-Benefit Analysis and the Environment, Edward Elgar, Cheltenham, UK (1993)
- 15) 包装廃棄物のリサイクルに関する研究会・株式会社野村総合研究所: 包装廃棄物のリサイクルに関する定量的分析 (1995)
- 16) 石川雅紀; 資源環境対策, 800-810 (1995)
- 17) Masanobu Ishikawa; Life Cycle Assessment and Treatment of Solid Waste (AFR-Report 98), 203-213 (1995)
- 18) 石川雅紀, 実践 LCA, サイエンスフォーラム, 東京 (1999)

プロダクトデザインの広がり —比較デザイン文化論—

磯貝 恵三十筑波大学生産デザイン編

A 5・296頁 定価(本体2,500円+税) ¥310

「モノをデザインする」には、どのような考え方を培っていけばよいのかを示した一冊。三部形式からなっており、一部では「比較デザイン文化論」を展開し、生活の中からデザインを発見していくこと、モノのかたちをもつ意味を、優しい言葉で解説している。二部ではデザインの現場で活躍する人々の声を、三部では4つの演習をまとめる。

主要目次

第一部 比較デザイン文化論
(デザインの発見、デザインの心とかたち、他) / 第二部
デザインの広がり (工業デザインの行方、統合化技術としてのデザイン、モノづくり、人づくり、街づくり、他) /
第三部 デザインを学ぶ



7693-7092-X

工業調査会

〒113-8466 東京都文京区本郷 2-14-7 TEL 03-3817-4706・FAX 03-3817-4709
工業調査会ホームページ URL: <http://www.ijnet.or.jp/kocho/>