

<研究ノート>

LCA 手法の比較と今後の課題

Comparison of the methods of LCA, and review of the representative problems

疋 田 浩 一*

Koichi HIKITA

Abstract

I arranged the summary and history, Life-Cycle-Assessment which was the framework to perform an environmental assessment of industrial products, process. And I compared the methods of LCA, and reviewed the representative problems. In the standard pile-up method, problems include technical border, circulation, and multi-production. In the Input-Output table, problems include regional border, 1 commodity corresponding to 1 value, and multi-production. I showed the issues to develop the integrated LCA model.

キーワード：ライフサイクルアセスメント，積み上げ法，産業連関表

I. LCA とは

Life-Cycle-Assessment(以下, LCA)は, 「ゆりかごから墓場まで」と称される, 環境影響評価の一手法である. ある財(製品)について, それが土から生まれて製造され使用され, やがて寿命を迎えて廃棄されまた土にかえるまでの Life Cycle 全体を通じて, 環境への影響がどれほどのものになるのかを定量的に評価する手法である. また, こうした財を使用して提供されるサービスも分析の対象とされる.

特定の財に注目すると, その財を製造するためには原材料, 工場等の設備, 燃料が必要であり, その後の流通の際にも車や道路といった設備と燃料を利用(投入)して運搬が行われる. さらに使用段階でも燃料, メンテナンスが, 廃棄の段階でも運搬解体処理のための材料, 設備, 燃料が必要となる. これらは直接の投入要素である. そしてそれら一つずつの材料・設備・燃料に注目するとそれらを製造し提供するためにまた, それぞれ製造・流通・使用・廃棄のために材料・設備・燃料といった間接的な投入要素が必要とされる.

II. LCA の歴史

LCA の最初の試みは, 1969 年コカ・コーラ社による飲料容器の比較分析であった. 1975 年には英国で原子力発電所に関する分析が行われた(Chapman(1975)). その後, エネルギー, 素材,

*関西国際大学 現代社会学部

家電製品, 自動車, 建築物, 各種製造プロセス, サービスなど様々な分野で分析が行われてきた。

1997年, 様々な国や分野で手法を透明化し公正な評価を行うため, 国際標準化機構 (International Organization for Standardization :ISO)により ISO14040 シリーズとして LCA 手法の国際規格化が行われた。新規格は ISO14041~ISO14043 を ISO14044 として再編し, ISO14040 & ISO14044 として 2006 年に発行された。

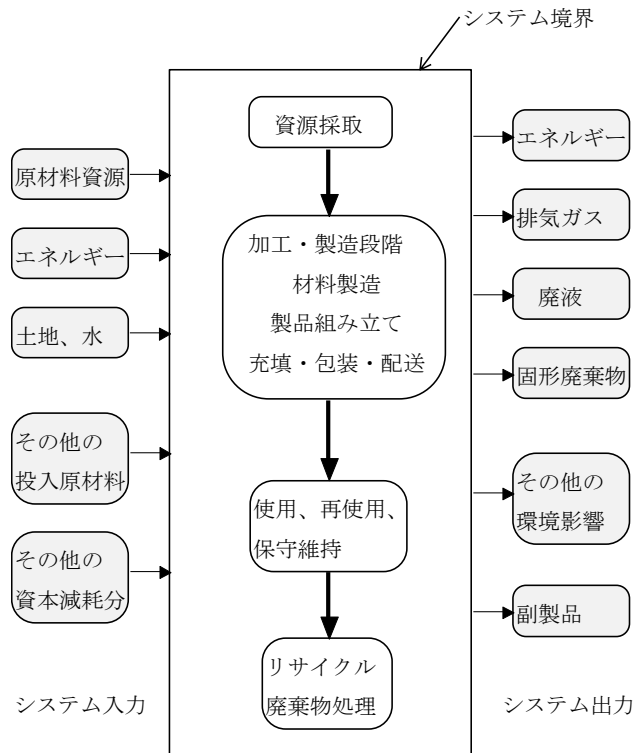


図 1. LCA の概念図(筆者作成)

1. ISO-LCA

国際規格 ISO14040 & ISO14044 で示される LCA の手順は以下の 4 段階に分類される。

- (1) 目的及び調査範囲の設定
 - 調査の目的 (実施の背景, 報告対象者, 結果の用途)
 - 調査範囲の設定(調査の対象, 機能, システム境界, 環境負荷などの前提条件)
- (2) インベントリ分析(ISO14041⇒ISO14044)
 - ライフサイクル全体にわたる資源消費量と環境負荷量を具体的に推定算出する。
- (3) 環境影響評価(ISO14042⇒ISO14044)
 - インベントリ分析の結果より環境へのインパクトを評価する
- (4) 解釈(ISO14043⇒ISO14044)

構成要素ごとに感度分析等を行って結果をチェックし、政策提言を策定する。

2. インベントリ分析

インベントリとは各種製品の製造プロセス、素材の製造時環境負荷原単位など膨大なデータの集積である。これらを適宜ピックアップし組み合わせて評価対象の製品や製造プロセスを定量的に表現する。以下に主要なデータベースを示す。

汎用型

- LCA 日本フォーラム (2010), JLCA-LCA データベース
- 国立環境研究所 (2006), 環境負荷原単位データブック (Embodied Energy and Emission Intensity Data, 3EID)
- 産業環境管理協会 (2006) JEMAI-LCA Pro データベース
- スイスエコインベントセンター (2003), ecoinvent

特定分野特化型

- 日本建築学会 (2006), 建築の LCA
- 農業環境技術研究所 (2003), 「環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法」研究成果報告書
- 松藤敬彦 (2005), 都市ごみ処理システムの分析・計画・評価

3. 環境影響評価 (インパクト評価, Lifecycle Impact assessment : LCIA)

ISO14044 における LCIA にかかる規定を以下に示す。

- ① 影響領域, 影響領域の指標及び特性化モデルの選択
- ② 分類化: 評価すべき環境負荷物質を環境影響領域に分類する
例) CO₂, フロン類, 煤塵, ベンゼン etc.
- ③ 特性化: 環境負荷物質の物量に, ①から得られる特性化係数を乗じて, 環境影響領域に対する影響量を計算する
例) 地球温暖化, オゾン層破壊, 酸性化, 資源枯渇 etc.
- ④ 正規化: 計算された影響量が, 特定の地域・期間の領域に対してどの程度の寄与を与えるかについて検討する
- ⑤ 統合化: 前項結果に重み付けをして統合し単一指標を推計し, 総合的評価を行う

ISO14044 では①～③を必須としており, ④～⑤は主観的判断が含まれるため任意としている。これまで LCIA の研究では主に欧州が先行してきた。外的環境条件に大きく影響を受けるため海外の評価指標をそのまま日本国内に適用するのは適切とはいえない。例えば, 典型的な材料は天然ガスである。欧州では主にロシアなどからパイプラインで輸送されるためガス自体の成

分はほぼ採掘時の状況に依存し、パイプ輸送時の輸送ロスが発生する。これに対し日本の場合は全て海外拠点にて採掘ガス自体を一部消費して冷却液化（LNG）され 10%程度のロスが発生するが、その際に不純物が除去されるため品質は一定で高い。また、輸送は全て LNG として専用の輸送船で行われる。これらを反映させると CO2 排出原単位やコストなど単位量当たりの環境影響指標に少なくない違いが生じる。

そのため日本国内向けの LCIA 手法として提案されたのが LIME：「日本版被害算定型影響評価手法」（Lifecycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）である。カテゴリ毎の特性化(上記③)までは ISO14044 と同様に行い、④正規化～⑤統合化の段階で各影響項目（カテゴリエンドポイント、例えば熱/寒冷ストレス、感染症、呼吸器疾患、皮膚がん、漁業生産、ユーザーコスト、生態系など）に対する被害評価を算定し、さらに「人間健康・社会資産・生物多様性・一次生産量」という 4 つの保護対象領域に分類集約し金額として統合化を行う。その後全面的な見直しが行われ 2010 年に LIME2、2018 年には世界の環境条件の違いを考慮しつつ評価体系を一つにまとめることを目指した LIME3 が発行されている。

Ⅲ. LCA 手法の問題点

1. 積み上げ分析法

前章で見てきた LCA の分析手法は、各種素材原単位データと製造輸送等プロセスの技術データを緻密に集積してインベントリを積み上げることで定量化し、環境影響評価を行う方法である。検討すべき課題について以下に挙げる。

1.1 境界(バウンダリー)

検討対象とする製品・プロセスと外部環境を分けているのは技術的な境界である。インベントリを構成する際、マイナーとみなされる項目はこの段階で影響が小さいものとして除外されている。こうした境界設定を適切に設定するためにはデータベースを精緻化し、客観的評価を加えて更新してゆく必要がある。

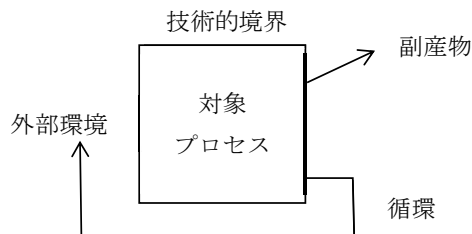


図 2. 積み上げ法の問題点(筆者作成)

1.2 循環

検討対象とする製品・プロセスが外部環境を構成する際にも使用されている場合に循環構造

が発生する。例えば発電所の場合、そこで得られる電力は当該対象プロセスで内部利用されるだけでなく、外部環境の製造・運用にも必須の要素である。1 回だけ遡るワンステップバックルールなどが提案されているが、こうした循環を含む連関構造は非常に複雑であり、無限の波及効果を生むことが多い。

1.3 結合生産(副産物の算出)

検討対象が製品(コモディティ)である場合、その製造プロセスからは廃棄物だけでなく経済的価値を持つ有用な副産物が産出されることがあり、結合生産とも呼ばれる。例えば、石油精製プロセスではガソリンや灯油の他、ナフサ、ジェット燃料、軽油、重油などの複数の製品が結合生産される。その際に、製造プロセスにおける投入(原油)や廃棄物(CO2 など)の負担を配分しなければならぬが、結合生産される製品によって経済的価値が異なり、副産物と廃棄物の区別が難しい場合も少なくないため、配分の重みづけを公正公平に行うことはとても難しい問題となる。

2. 産業連関分析法

積み上げ法の技術的境界と循環の問題に対して一定の解決策を与えるのが産業連関分析である。産業連関表は、一国(あるいは地域)全体の財(コモディティ)と産業(アクティビティ)を 4~500 部門に統合し、その間で財・サービスを相互に投入しながら生産活動を行う連関構造を価額(金額)による行列形式で表現したデータセットである。全ての産業と製品を包括するため技術的境界の問題はなく、循環構造による無限の連関(波及)を以下のレオンチェフ逆行列を利用した演算によって数学的に求めることができる。また、雇用者所得を含む付加価値への波及効果の総量、つまりは GDP の変化を推計することが可能である。

	中間需要 (アクティビティ)	最終需要		輸入	総生産
		国内 最終需要	輸出		
(コモディティ) 中間投入	A·X	F		-M	X
		Y	E		
付加価値	V				
総生産	X				

図 3. 産業連関表

(「平成 27 年産業連関表 総合解説編」などより筆者作成)

<バランス式> $X = A \cdot X + F - M$ (1)

$$X = [I - A]^{-1}(F - M) \quad (2)$$

$[I - A]^{-1}$: レオンチェフ逆行列

このモデルでは輸入が外生的に決定されているが、一般的には国内の生産活動によって誘発されるものとするのが自然なため、一般的には $[I - (I - \hat{M})A]^{-1}$ 型を利用するが多い。

競争輸入 $[I - (I - \hat{M})A]^{-1}$ 型

<バランス式> $X = A \cdot X + Y + E - M$ (3)

$$M = \hat{M} \cdot (A \cdot X + Y) \quad (4)$$

$$X = [I - (I - \hat{M})A]^{-1}[(I - \hat{M})Y + E] \quad (5)$$

\hat{M} : 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

Y : 国内最終需要

E : 輸出

品目毎（コモディティ別）の輸入比率（輸入係数）が全ての産出部門（アクティビティ）に同一と仮定した場合の競争輸入型モデルである。

産業連関分析を LCA に適用する際の問題点を以下に示す。

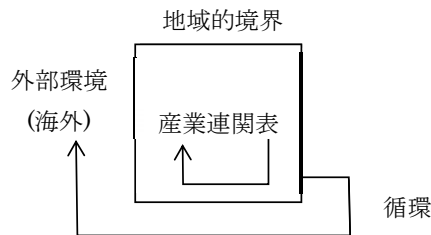


図 4. 産業連関表の問題点（筆者作成）

2.1 地域的境界

産業連関表は対象とする国や地域内部の産業構造を網羅しているが、その外部(海外)との輸出入については外生的に与えなければならない。同じ財であってもどの地域から輸入するかによって環境負荷には違いがあるはずである。この点は上述した競争モデルでは解決できず、輸入先を地域別に分離する非競争モデルの拡張を検討しなければならない。

また、例えばアルミニウムの精錬プロセスや天然ガスの液化プロセスのようにそもそも国内にほとんど存在しないアクティビティは含まれてない。この点に関しては、技術的連関だけをたどる積み上げ法であれば地域的境界に縛られないため問題にはならない。他に、外部における循環構造（A 国の輸出品を投入して B 国で生産した製品を A 国が輸入する）は現状の枠組みでは

表現されていない。

これらの問題は産業連関法のモデル自体を地球全体の貿易構造を表現できるよう拡張する必要があり、大変な作業が求められることが予想される。

2.2 一物一価の原則

ある産業で産出される財・サービスの生産額は対象地域全体の集計値であるため、LCA で求められる詳細な技術的情報が抜け落ちてしまう。産業連関表を用いて推計される環境負荷指標は標準的財の平均値となる。この制約から、積み上げ法による技術的境界を、インベントリの各種素材やプロセスが産業連関表における平均的財・産業と同等と見なせるか否かという点に着目して適切に設定することで、個別詳細なインベントリ分析の外部環境を補う情報として産業連関法における包括性を取り入れることが可能になるだろう。

2.3 結合生産・代替生産

産業連関表においても結合生産による屑・副産物の扱いは難しい。産業連関表では ONE ACTIVITY-ONE COMMODITY（一つの産業から一種類の財が生産される）の原則があり、結合生産を認めていない。現状、主生産物を一つ定めて他の屑副産物はマイナスで計上するマイナス投入方式と、副産物を一旦主生産物として生産する専門部門に産出して改めて当該主生産物を産出するトランスファー方式が採用されているが、経済的価値を有する複数の副産物の扱い方として適当であるのか検討する必要がある。

同じ理由から、一つの財を複数の産業が競合して生産する代替生産を認めておらず、シェアを固定しなければならない。このため、技術的な代替が進んでいる産業については時代や地域の違いによる影響を強く受けることになる。

IV. 今後の課題

LCA で一般に採用されている積み上げ法と産業連関表について問題点を整理してきたが、それぞれに一長一短がある。これらの手法を組み合わせる方法も提案されているが、いまだ決定的な統合モデルが確立したとは言えない状況にある。積み上げ法の技術的境界の外側を産業連関表で補完し、さらにその地域的境界の外側を補完する方法を開発する必要があるが、これは産業連関表自体を国際間産業連関表に拡張することを意味する。この作業は大変な時間を要することになると考えられるが、まずは LIME3 で採用された世界の地域別評価指標によって補完することができるだろう。今後は具体的な分析環境の構築と、統合モデルの開発を進めていきたい。

参考文献

- ・ 足立芳寛他(2004), 環境システム工学 循環型社会のためのライフサイクルアセスメント, 東京大学出版会, ISBN978-4-13-062808-2
- ・ Chapman P.F. (1975), Energy Policy, 3(4), pp. 285-298

- ・ M. Finkbeiner, 稲葉敦(2007), ライフサイクルアセスメントの新規格: ISO14040 および ISO14044 について, *Journal of LCA, Japan*, Vol.3 (No.1) , pp.58-64
- ・ 玄地裕, 稲葉敦他(2010), 地域環境マネジメント入門 ―LCA による解析と対策, 東京大学出版会, ISBN978-4-13-062829-7
- ・ 伊坪徳宏, 稲葉敦編(2018), LIME3 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
- ・ 総務省、「平成 27 年産業連関表 総合解説編」、令和 2 年 1 月