

# マトリックス法を用いたマルチファンクションユニットシステム LCA

中島 謙<sup>1,\*</sup> 長坂 徹也<sup>1</sup> 原田 幸明<sup>2</sup> 井島 清<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東北大学大学院環境科学研究科

<sup>2</sup>物質・材料研究機構

J. Japan Inst. Metals, Vol. 69, No. 2 (2005), pp. 221-224

© 2005 The Japan Institute of Metals

## Multi-Function Units System LCA based on Matrix Method

Kenichi Nakajima<sup>1,\*</sup>, Tetsuya Nagasaka<sup>1</sup>, Kohmei Halada<sup>2</sup> and Kiyoshi Ijima<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai 980-8578

<sup>2</sup>National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047

LCA (life cycle assessment) is an environmental evaluation tool for a product system based on life cycle thinking. After ISO14040 established in 1997, seven years have passed, and LCA has begun to be used in business. However, it is difficult to evaluate an open-loop recycling system or a system which produces several kinds of products. It seems to be a cause that a conventional LCA is an evaluation tool for a product system with single function unit. In this study, a new LCA method for a system with multi-function units was developed, which was based on matrix LCA method.

(Received October 15, 2004; Accepted January 13, 2005)

**Keywords:** life cycle assessment(LCA), life cycle inventory(LCI), recycle, function unit, I/O table

## 1. はじめに

ライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)は、ライフサイクル思考を基礎として製品やサービスの環境側面を評価することに特化した手法である。ここで、ライフサイクル思考とは、ある製品システムに関わるプロセスの連鎖に沿って、地球圏から人間圏への資源の採取、人間圏での生産・消費活動、そして、人間圏の廃棄処理を経て地球圏に戻すまでのライフサイクル全体を一連のものとして捉える考え方である。1997年にライフサイクルアセスメント原則および枠組みが国際標準規格として発行<sup>1)</sup>され、その後7年間が経過して、既にLCAは産業界での実務の段階に達している。

しかしながら、リサイクルシステムや複数の製品システムが複合化したシステムの評価を実施する際には困難を極める。2次地金を利用したアルミ缶の製造システムの評価、エコセメント製造とごみ発電の複合システムの評価と言った場合である。そして現実の多くのシステムはワンウェイ型・単一製品の単純なシステムではなく、ループ型や複合製品の複雑なシステムである。Fig. 1にアルミ缶製造システムのインベントリツリーを示した。アルミ缶製造の際には、1次地金および2次地金が利用される。2次地金の原料には、Can to Can

リサイクルとして使用済み缶が利用される他に、他のシステムで発生したスクラップがリサイクル原料として利用される。このスクラップは外部のシステムからの入力となり、ここにアロケーションやシステム拡張の問題が生じてくる。これらの問題は、機能単位の設定やシステム境界の設定に関する問題である。

従来型のLCAは、単一の機能単位(ファンクションユニット)を有するシステムの評価であった。これが上記の問題の根源的な原因であると考えられる。この機能単位およびシステム境界の設定は、インベントリ分析(LCI: Life Cycle Inventory)における問題である。そこで本研究では、LCAの基礎であるLCIに立ち返りこの問題の解決を試みた。そして、新たなるLCAとして、複数の機能単位を有するシステム(マルチファンクションユニットシステム)を対象とするLCA手法の開発を目的とした。

## 2. インベントリ分析の基礎

LCIにおける積算の基本は、機能単位あたりでのシステム境界内部のプロセスから発生する環境負荷の総和である。Fig. 2にLCAにおけるシステムの概念図を示した。この時、ライフサイクル環境負荷 $X_j$ は、下記の単純な式により表すことができる。

$$X_j = \sum_{i=1}^n b_{ij} p_i \quad (n=1, 2, 3 \ A \in \text{system boundary}) \quad (1)$$

\* 科学技術振興機構研究員(Japan Science and Technology Agency)

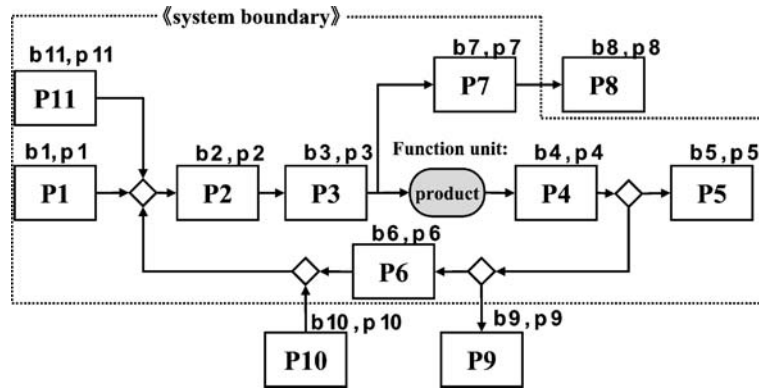


Fig. 1 Schematic Illustration of Inventory Tree in LCA.

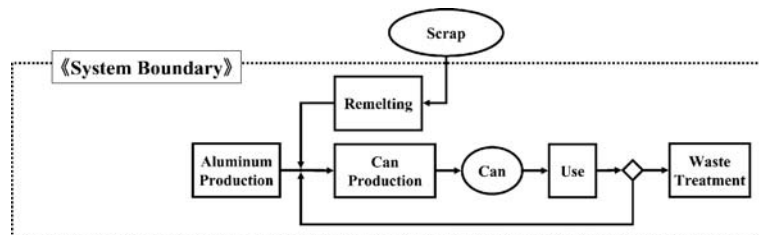


Fig. 2 Inventory Tree of Aluminum Can Production.

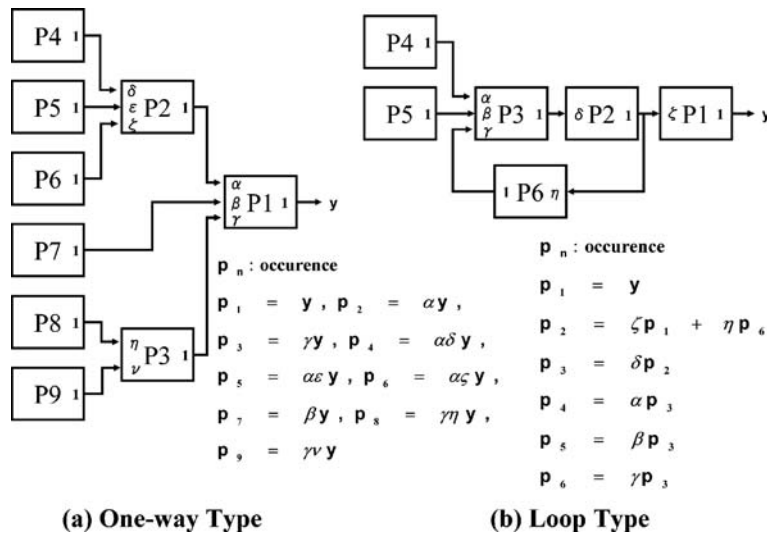


Fig. 3 Two Types of Inventory Tree.

ここで、 $b_{ij}$  は単位生産あたりの環境ストレス因子量、 $p_i$  はプロセス量を示す。また、添え字  $i$  は各プロセスを、 $j$  は各環境負荷項目を示す。

このインベントリ分析は、従来の原単位積み上げ型の LCA (ツリー型 LCA) では、煩雑な手続きとなる場合がある。なぜならば、環境ストレス因子  $b_{ij}$  は、対象システムのプロセスに基づく値であり、調査などによって得られる数値であるが、プロセス量  $p_i$  は、マテリアルおよびエネルギー、サービスを含むプロセスの入出力バランスに基づいて得られる数値である。したがって、LCA を実施する際には、マテリアルおよびエネルギー、サービスを含めた正確なフローを把握しなければならない。しかしながら、これらを

正確に把握した LCA は、数少ない。

このプロセス量は、Fig. 3(a) に示すようにプロセスツリーが一方向に流れている場合 (一方向型ツリー) には、それぞれのプロセスに要するインプットの原単位を積算することで全てのプロセス量が得られる。しかしながら、Fig. 3(b) に示すようなループを含む場合 (ループ型ツリー) には物質の保存則を満たすために連立方程式を解く必要がある。実際に存在する多くのシステムは、リサイクルなどの循環や再帰的因子を含む Fig. 3(b) に示すような複雑なシステムとなり、単純な一方向型ツリー構造となる場合は少ない。

### 3. マトリックス法によるマルチファンクションユニットシステム LCA

#### 3.1 マトリックス型 LCA

プロセスの入出力バランスを反映するべく、Heijungs は、マトリックスを用いたインベントリ手法<sup>2)</sup>を提案した。また、同様の手法を著者の 1 人である原田も提案した。原田は、ツリー型 LCA が、本質的には連立方程式を用いた積算方法と同義であることを示すと共に、有効な手法として、マトリックスを用いた LCI の記述方法(マトリックス型 LCA)を提案<sup>3)</sup>した。2 つの手法は、いずれも、プロセスの数とフローの数に基づいてマトリックスを作成して、これを解くことにより、プロセスの入出力バランスを反映したインベントリを実施する手法である。ここで、フローの数とは、生産物や廃棄物等のプロセスからの入出力の数を示す。

マトリックス型 LCA の特徴は、複雑なループのあるシステムの場合でも、行列を用いてシステムを表記することで、連立方程式を解き容易にプロセス量を得ることができる事にある。すなわち、システムの環境負荷は、システムの設定と調査により得られた数値のみで表すことができる。以下にこの事を検証する。

LCI における積算の基本である上記の式(1)は、マトリックスを用いることで以下の式により表すことができる。

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ \vdots \\ b_{s1} \end{bmatrix} p_1 + A + \begin{bmatrix} b_{1k} \\ \vdots \\ b_{sk} \end{bmatrix} p_k + A + \begin{bmatrix} b_{1n} \\ \vdots \\ b_{sn} \end{bmatrix} p_n = [B]P \quad (2)$$

ここで、 $X$  は単位量あたりのライフサイクル環境負荷量を示すベクトル、 $[B]$  は  $b$  を要素に持つ行列、 $P$  は  $p$  を要素に持つベクトルである。一方、プロセスおよびシステムの入出力バランスは、下式により得られる。

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_k \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{k1} \\ \vdots \\ a_{n1} \end{bmatrix} p_1 + A + \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \vdots \\ a_{kk} \\ \vdots \\ a_{nk} \end{bmatrix} p_k + A + \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{kn} \\ \vdots \\ a_{nn} \end{bmatrix} p_n = [A]P \quad (3)$$

ここで、 $f$  はシステムへの要求量である最終需要を示す。また、 $a$  は 1 単位生産あたりの各プロセスの入出力であり、技術により決定される。言い換えるならば、マテリアルおよびエネルギー、サービスを含めたプロセスの入出力バランスにより決定される。また、 $F$  は  $f$  を要素に持つベクトル、 $[A]$  は  $a$  を要素に持つ行列である。なお、プロセスへの入力マイナスで、出力はプラスで記述する。

上記の  $[A]$  および  $[B]$  は、対象システム中のプロセスに基づく数値であり、調査により得られる。一方、プロセス量ベクトル  $P$  は、技術によって決まる係数  $a$  に基づいて決まる数値である。したがって、プロセス量を得るためには、システムの入出力バランスを表す上記式(3)を解かなければならない。上記の式(3)から  $P$  は  $P = [A]^{-1}F$  により求まり、環境負荷ベクトル  $X$  は以下の式により与えられる。

$$X = [B][A]^{-1}F \quad (4)$$

上記式(4)は、社会構造を反映した一義の解を得るため

には、 $[A]$  が正則であるように行列を記述しなければならない事を意味している。したがって、社会構造を反映した LCA を実施する際において最も重要なことは、フローを正確に把握することである。言い換えるならば、このように行列を用いて記述できない LCA は、煩雑な LCA であると言える。しかしながら、従来型 LCA では、この点が着目されていなかった。

なお、正則性を失わせるケースは、フローの数  $q$  とプロセスの数  $r$  が一致していない場合である。Heijungs の手法では、この場合に解を導く事ができなかったのに対し、原田はこの問題点を解決した。以下に解決方法の概略を記述する。この方法の詳細に関しては、文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

行列の正則性を保つために、マテリアル列  $m_j (j=r+1, \dots, r+s)$  とセクション列  $s_j (j=r+s+1, \dots, r+s+t)$  を設け、下記式(5)の関係を作ることで、行列を  $(q+1) \times (q+1)$  の行列にする。さらに、それに対応するように、マテリアル量  $m_j$  と  $s_j$  を設け、ベクトル  $P$  を  $q+1$  に拡張する。

$$q+1 = r+s+1 \quad (5)$$

マテリアル列は、 $-1$  の入力か  $1$  の出力、もしくはその両者のみを要素として持つ列である。このマテリアル列が必要とされるケースは、フローがシステム内で次のプロセスに引き渡されない場合、もしくは、先行するプロセスがシステム内に無い場合である。一方、セクション列は、分岐や合流のある場合に設定される。このセクション列では、分岐や合流による配分比を、列の要素の合計がゼロとなるように記述する。

#### 3.2 複数の機能単位を有するシステムの評価への適用

原田の提案したマトリックス型 LCA は、単一製品システムの評価にのみ着目した手法であった。これに対して、本研究では、マトリックス型 LCA を用いた複数の機能単位を有するシステムのための LCA 手法(マルチファンクションユニットシステム LCA)の開発を目指した。

本手法では、あらかじめ複数の機能単位をシステムの機能単位として設定し、比較の場合には、これを一定に設定する。具体的には、上記式(4)における最終需要ベクトル  $F$  を同一に設定する。

マトリックス型 LCA の最大の特徴は、マトリックスを用いることにより、プロセス間の波及構造を反映した評価が容易に実施可能な事にある。本手法を用いる事で、産業システム全体の環境負荷に対して、技術や製品システムの導入による環境負荷がどの程度の大きさかを容易に評価する事が可能となる。以下にこの事を検証する。マルチファンクションユニットシステム LCA の場合、上記の式(2)は、以下の式により表される。

$$X = [B_1 | B_2] \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $[B]$  は各プロセスにおける単位生産あたりの環境ストレス因子量サブマトリックスを、 $P$  は各プロセスのプロセス量サブベクトルを示す。また、添え字 1 は着目している製品システムを、添え字 2 は産業システム全体を示す。同様に、上記の式(3)は、以下の式により表される。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $F_1$  および  $F_2$  は、それぞれ製品システムおよび産業システム全体の最終需要量サブベクトルを示す。また、 $A_{11}$  は製品システム内部での入出力を、 $A_{12}$  は産業システム全体における製品システムからの入出力を、 $A_{21}$  は製品システムにおける産業システム全体からの入出力を、 $A_{22}$  は産業システム内部での入出力を、それぞれ示すサブマトリックスである。したがって、式(5)および式(6)よりシステムの環境負荷は以下の式により与えられる。

$$X = [B_1 | B_2] \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで問題となるのは、産業システム全体の入出力バランスマトリックスおよび環境ストレス因子マトリックスをどのように記述するかである。産業システム全体を記述する際、最も理想的なものは、ドイツにおける物量単位での産業連関表(PIOT)<sup>4)</sup>にみられるような、物質とプロセスの関係を示す表を用いる事である。PIOTに関する研究は、ドイツをはじめ欧州において先進的な取り組みが実施<sup>5,6)</sup>されている。一方、我が国においても、国立環境研究所の森口らの提案する多次元物量投入産出表の研究<sup>7)</sup>が進められているものの未だ研究段階にあると言える。そこで、これに代わるものとして、我が国においては、公的な産業連関表をベースに作成されている環境分析用産業連関表等の利用が可能であると考えられる。なお、既に対応する産業もしくは転換の対象となる産業が産業連関表に存在する場合、マテリアルフロー調査に基づく、行列成分の分離および削除が必要となる。

産業連関表のLCAへの適用は、シナリオレオンティエフ<sup>4)</sup>やハイブリッドLCA手法<sup>5,6)</sup>等の各種の手法として既に定着しており、その有効性も検証されている。

#### 4. 考 察

マルチファンクションユニットLCAを提案した。ここでは、その妥当性の検証といった視点から考察を行う。

はじめに、LCAにおける歴史的な計算手法を継承しているかについてである。前述のように、エネルギーアナリシスに起源を持つLCAの基本は、「システム境界内部のプロセスから発生する環境負荷の積算」である。そして、既上記式(2)に示されるように、マトリックス型LCAは、この計算手法を正確に継承している。

つぎに、金額表示の産業連関表との接続についてである。金額表示である産業連関表との接続は、変換係数を用いる事により対応する。産業連関表との接続を考えた場合、上記式(7)は、以下の式により表される。

$$X = [B_1 | B_2] \begin{bmatrix} A_{11} & C \\ D & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $C$  は着目している製品システムから産業システムへの金額表示の投入を変換計数(物量単位/金額単位)を乗じて物量表示へと換算した値を示す。また  $D$  は着目している製

品システムへの産業システムへの物量表示の投入を変換計数(金額単位/物量単位)を乗じて金額表示へと換算した値を示す。

そして、最後に、現在他の手法が抱える問題点を解決しているかについてである。本手法は、評価対象システムの産業構造を反映したインベントリの記述および分析手法として提案されているマトリックス型LCAの発展的手法である。一方で、ハイブリッドLCAは、初期の原単位型のインベントリデータとしての利用から、シナリオレオンティエフモデルやマトリックス法を適用した手法へと発展した。しかしながら、これらの手法では、社会の産業構造を反映した評価ができない。ハイブリッドLCAは、産業連関表を利用することで、より包括的な産業構造を反映したシステムの記述を目指した。ところが、着目している主系列のプロセス群におけるフローの記述に対しては、注目してこなかった。これこそが、社会の産業構造を反映しきれない原因である。したがって、ハイブリッドLCAにおいても、マトリックス型LCAを適用することで更なる発展が可能であると考えられる。

#### 5. お わ り に

従来のツリー型LCAでは、マルチシステムの評価が困難であった。本研究では、LCIの基礎に立ち返ることにより、一般化したLCI手法の確立を目指した。その結果として、以下の成果を得ることができた。

- 一般化したインベントリ分析手法としてのマトリックス型LCA有効性の提示
- マトリックス法を用いたマルチファンクションユニットシステムLCAの開発

本研究は、科学技術振興機構(JST)の社会技術研究事業(RISTEX)の研究において得られた研究成果である。

#### 文 献

- 1) ISO14040, "Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework" (1997).
- 2) R. Heijungs: *Ecological Economics* **10**(1994) 69–81.
- 3) Materials Science Society of Japan: *Global Environment And Materials*, (Shokabo, Tokyo, 1999) pp. 129–137.
- 4) *A Physical Input-Output Table for Germany 1995*, (Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, 2001).
- 5) *Handbook of Physical Accounting Measuring bio-physical dimensions of socio-economic activities*, (Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Waste management, 2002).
- 6) *Industrial Ecology* **5**(2002) 69–93.
- 7) Y. Moriguchi: *Comparison of different metrics and system boundaries for environmental denominator of eco-efficiency analysis*, (International Eco-Efficiency Conference, 2004).
- 8) M. Ishikawa, Y. Fujii, K. Takahashi, S. Nakano and K. Yoshioka: Keio Economic Observatory Discussion Paper, no. G-18.
- 9) Y. Uchiyama, K. Nishimura and H. Hondo: Socio-economic Research Center, Rep. No. Y97015.
- 10) S. Suh and G. Huppes: *Methods for Life Cycle Inventory of a product*, (Journal of Cleaner Production, In Press, Corrected Proof, Available online 1 July 2004).