

Title	技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みとその問題点：その2
Sub Title	
Author	松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	1998
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』 (KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-37
JaLC DOI	
Abstract	概要人類にとって地域規模や地球規模の環境の悪化は最も重要な問題の一つとなりつつある。現代文明は、地球から豊富な資源を採取し、これを加工して経済活動をおこない、同時にその廃棄物を地球に還元することにより成立している。各種資源の大量消費および大量廃棄は、科学技術の発展に支えられ、人類に素晴らしい豊かな生活をもたらした。このような文明が持続的に拡大していくためには、地球の資源と廃棄物を受け入れる容量が、人類の経済活動の規模と比べ十分に大きいことが必要である。しかし、前世紀のマルサスの人口論を引用するまでもなく、地球の有限性は人類の多くが認識するところである。この有限性は、地域規模では、ゴミの埋め立て処分場の不足や都市の大気汚染、水質汚濁などとなり、地球規模では、酸性雨やオゾン層の破壊、温室効果ガスによる気候変化などの問題となって顕在化しつつある。したがって、人類は経済活動を行う上で、資源の減少と環境に与える影響を考慮し、いわゆる文明の持続的発展を実現しなければならない。このような状況を反映し、あらゆる製品、技術、システムに関するライフサイクルアセスメントの必要性が高まってきた。ライフサイクルアセスメントとは、特定の製品や技術について、“ゆりかごから墓場まで”的なライフサイクルにおける諸問題、特に資源、環境問題を中心に社会に与える影響を総合的に分析する方法である。しかしながら、LCAは手法上いくつかの問題点を抱えており、またその技術評価への利用法も確立しているとはいひ難い。本報告では、前報告に続き、新たなLCAの基本的枠組みと技術評価に応用する際の問題点について述べる。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000037-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

技術評価のためのライフサイクル
アセスメント手法の基本的枠組みとその問題点
その2

松 橋 隆 治

No.G-37

学振未来 WG 2-15

技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の 基本的枠組みとその問題点 その2

松橋隆治

1998年12月

キーワード

ライフサイクルアセスメント (LCA) ; 廃棄物データ ; 産業連関表分析 ; 価格-物量変換 ; 限界配分指標 ; 限界改善指標 ; CO₂放出

概要

人類にとって地域規模や地球規模の環境の悪化は最も重要な問題の一つとなりつつある。現代文明は、地球から豊富な資源を採取し、これを加工して経済活動をおこない、同時にその廃棄物を地球に還元することにより成立している。各種資源の大量消費および大量廃棄は、科学技術の発展に支えられ、人類に素晴らしい豊かな生活をもたらした。このような文明が持続的に拡大していくためには、地球の資源と廃棄物を受け入れる容量が、人類の経済活動の規模と比べ十分に大きいことが必要である。しかし、前世紀のマルサスの人口論を引用するまでもなく、地球の有限性は人類の多くが認識するところである。この有限性は、地域規模では、ゴミの埋め立て処分場の不足や都市の大気汚染、水質汚濁などとなり、地球規模では、酸性雨やオゾン層の破壊、温室効果ガスによる気候変化などの問題となって顕在化しつつある。

したがって、人類は経済活動を行う上で、資源の減少と環境に与える影響を考慮し、いわゆる文明の持続的発展を実現しなければならない。このような状況を反映し、あらゆる製品、技術、システムに関するライフサイクルアセスメントの必要性が高まってきた。ライフサイクルアセスメントとは、特定の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、特に資源、環境問題を中心に社会に与える影響を総合的に分析する方法である。しかしながら、LCAは手法上いくつかの問題点を抱えており、またその技術評価への利用法も確立しているとはいひ難い。本報告では、前報告に続き、新たなLCAの基本的枠組みと技術評価に応用する際の問題点について述べる。

技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の 基本的枠組みとその問題点 その2*

松橋隆治†

1998年12月

1. はじめに

人類にとって地域規模や地球規模の環境の悪化は最も重要な問題の一つとなりつつある。現代文明は、地球から豊富な資源を採取し、これを加工して経済活動をおこない、同時にその廃棄物を地球に還元することにより成立している。各種資源の大量消費および大量廃棄は、科学技術の発展に支えられ、人類に素晴らしい豊かな生活をもたらした。このような文明が持続的に拡大していくためには、地球の資源と廃棄物を受け入れる容量が、人類の経済活動の規模と比べ十分に大きいことが必要である。しかし、前世紀のマルサスの人口論を引用するまでもなく、地球の有限性は人類の多くが認識するところである。この有限性は、地域規模では、ゴミの埋め立て処分場の不足や都市の大気汚染、水質汚濁などとなり、地球規模では、酸性雨やオゾン層の破壊、温室効果ガスによる気候変化などの問題となって顕在化しつつある。

したがって、人類は経済活動を行う上で、資源の減少と環境に与える影響を考慮し、いわゆる文明の持続的発展を実現しなければならない。このような状況を反映し、あらゆる製品、技術、システムに関するライフサイクルアセスメントの必要性が高まってきた。ライフサイクルアセスメントとは、特定の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、特に資源、環境問題を中心に社会に与える影響を総合的に分析する方法である。しかしながら、LCAは手法上いくつかの問題点を抱えており、またその技術評価への利用法も確立しているとはいひ難い。本報告では、前報告に引き続き新たなLCAの基本的枠組みとその位置づけ、および技術評価に応用する際の問題点について述べる。

* この研究は、学術振興会未来開拓技術研究推進事業「アジア地域の環境保全」Work Group2における共同研究としておこなわれた。

† 東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻

2. ライフサイクルインベントリ分析および改善分析の手法

2.1 ライフサイクルアセスメント手法の概要

ライフサイクルインベントリ（L C I）作成に当たり、最も基本的な手法は積み上げ法である。積み上げ法とは、評価対象となるシステム内の各々のプロセスにおける資源投入および生産物、副産物、排出物をリストアップし、プロセス間のリンクを考慮して文字通り積み上げる方法である。しかし、積み上げ法においては、プロセス間のリンクが複雑になった場合の波及の追跡が繁雑になるばかりでなく、結合生産やリサイクルが生じた場合の複数の産物に対する資源投入や排出の割り当てが適切に行われない可能性がある。すなわち、LCAによる製品間比較でCO₂排出の少ない製品が市場に普及した場合、却ってシステム全体のCO₂排出が増加する可能性がある。

また、LCAにおいては、産業連関表などにおいて順守されている One Process–One Product の原則を拡張が必要である。周知のように、実際の生産システムにおいては、一つのプロセスから、二つ以上の生産物が生み出されることも少なくない。これらの実例としては、石油精製プロセス（原油—ナフサ、ガソリン、灯油、ジェット燃料、軽油、重油 A, B, C、石油残さ）のようなものもあれば、自動車製造プロセスのように、主製品として自動車が生産され、副産物として鉄屑などの加工屑が出る場合もある。

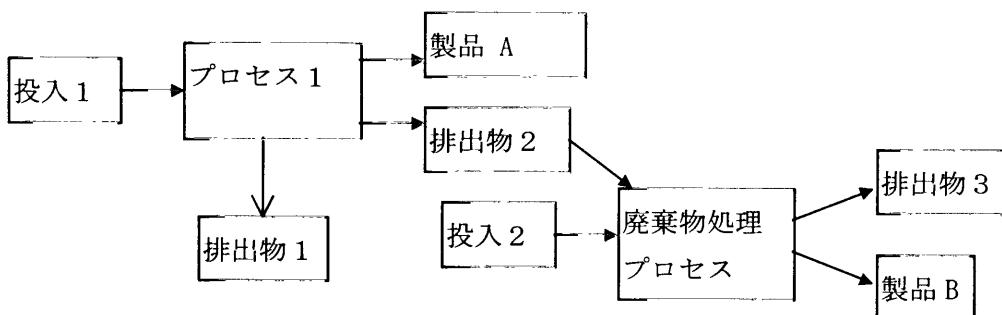


図 2-1. リサイクルがある場合のLCA配分

このような場合には One Process–One Product の原則では、システムのモデル化が困難である。（現行の産業連関表では、マイナス投入方式によりこの問題を回避している。）また、これを個別の製品の環境負荷を評価するライフサイクルアセスメント（LCA）の面からみると、（個別のプロセスの積み上げでは）LCAの配分が一意に定まらない場合がある。その例を以下に述べる。

いま、図 2-1 のようにリサイクルがある場合を考える。プロセス 1 が自動車の生産であるとすれば、製品 A が自動車で、排出物 2 が例えば生産工程からの鋼板の加工屑であると考えることができる。加工屑（排出物 2）は回収されて電気炉（廃棄物処理プロセス）に投入され、新たに建設用鋼材（製品 B）となる。このとき、自動車（製品 A）と加工屑（排出物 2）には、プロセス 1 における資源消費と環境排出をどのように配分すればよいのか、という問題が生じる。屑に配分された資源消費と環境排出は電気炉（廃棄物処理プロセス）を通して建設用鋼材（製品 B）に付加される。したがって、上の配分次第で、自動車およ

び建設鋼材のLCA指標が大きく変化する可能性がある。このことは、代替性がある場合はさらに複雑になる。図2-1で製品Bとほぼ同じ品質を持ち、そのために市場において、製品Bと代替性のある製品B'がプロセス3において製造されているとする。一般には屑を原料とした製品BがB'より低コストであるが、屑の供給量に限界があるため、残りはB'によって需要が満たされている。このとき、製品A一単位当りのLCA指標はどのように決定できるだろうか。

このようないわゆる結合生産を表現するためには、One Process-One Productの原則を拡張する必要がある。また、多様な排出物の製品への配分を求めるLCAにおいては、排出物も生産物と同じ枠組みで取り扱うことが望ましい。これにより、鉄屑や下水汚泥あるいはCO₂などの排出物がリサイクルされた場合においても同じモデルで評価することができる。

2.2. 静学LCAの基本的枠組み

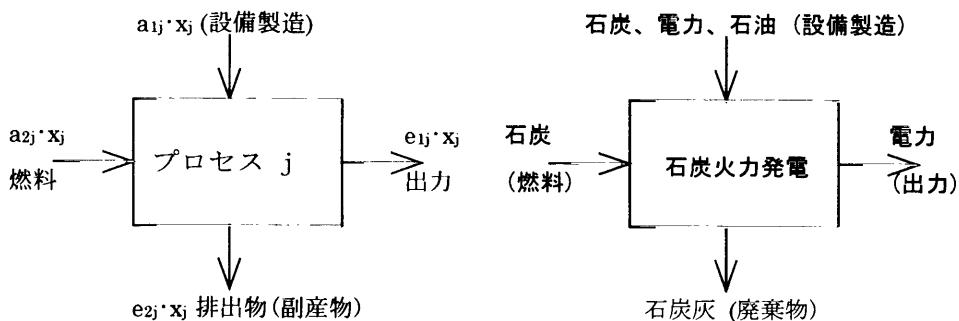


図2-2. プラントの入出力のモデル化の概念

図2-2よりプロセスjの活動X_jに必要な全ての入力は下のようなベクトル形式で表される。図示したように、投入財の例としては石炭、石油、電力などのエネルギーや、セメント、鉄鋼などの基礎素材その他が考えられる。これらの計測単位としては、kg(重量)、J・kWh(エネルギー)、円(価格)など任意の単位で差支えない。ただし、同一種の財には、同一の単位を用いなければならない。

$$x_j \alpha_j = x_j \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{nj} \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

したがって、全てのプラントの全ての出力に必要な全ての入力は次式のように表される。

$$\sum_{j=1}^n x_j a_j = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \vdots & a_{2j} & \vdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = Ax \quad (2-2)$$

一方、当該プロセス（プラント）からの排出物または副産物については、中間投入と同様に以下のような数学表現を取る。上記のように、LCAにおいては、单一のプロセスから生じる複数の産物および排出物を評価に含め、複数の産物間の資源投入や環境排出の配分をおこなう必要がある。ところが、産業連関分析は、One Process–One Product の原則で構成されており、副産物はマイナス投入方式による特殊な扱いを受けていた。多様なシステムに対応するLCA分析をおこなうためには、この原則を拡張することが必要である。そこで、(2-2), (2-3)式のベクトル \mathbf{x} は、物質ではなくプロセスであることを明示し、 $A\mathbf{x}$ および $E\mathbf{x}$ は各プロセスに投入もしくは産出されるプロダクトであることを明示する。これにより、(2-3)式に单一のプロセスからの複数の産出物または排出物 ($\text{CO}_2, \text{NO}_x, \text{SO}_x$ など) を含めることができる。

$$\sum_{j=1}^n x_j e_j = \begin{pmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1j} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & \vdots & e_{2j} & \vdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nj} & \cdots & e_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = Ex \quad (2-3)$$

ところで、一般的に LCA をおこなう場合は、数十～数百種類におよぶ排出物を列挙し、これをもって LCA とする傾向が見られる。これらの排出物の中には、地球環境関連の排出物だけでなく、重金属、有機塩素、その他の微量化学物質などが含まれる。こうした LCA においては、上述してきたプロセス間の無限波及が考慮されず、限られたプロセスにおいて多様な排出物のインベントリを作成する場合が多いため、インベントリの精度が問題となる。重金属やダイオキシンなどによる汚染が緊急かつ重要な問題であることは論を待たないが、同時に LCA によってこうした排出物を評価すべきか否かについては、慎重な議論が必要である。上述の微量化学物質の生態系に及ぼす影響は、排出のされ方や、周囲の地質、水環境などによって異なる。したがって、例えば飲料容器の LCA に上記の微量化学物質を含めることの意義が問題になるのである。我々は、こうした微量化学物質に対しては、LCA による最終製品毎の規制によるよりも、むしろ工場立地地点における規制などにより対処すべきであると考えている。プロセス間の複雑な波及を考慮して、新製品や新技术の環境評価をおこなう LCA の対象としては、排出地点や周囲の環境に影響されない温室効

果ガスや資源・エネルギー消費などが適している。我々は、LCA に含めるべき項目とその限界をよく吟味するべきである。

以上の結果をふまえ、経済学の分野でよく知られている Input-Output Model (入力-出力モデル) と類似した以下の方程式が得られる。

$$\begin{aligned} Ex &\geq Ax + f \\ (E - A)x &\geq f \end{aligned} \tag{2-4}$$

ここで、システム全体の状態、すなわち X を決定するには、現実のシステムに相当する最適化の評価基準、またはロジット関数などのシミュレーション原理が必要である。例えば、現実のシステムが総費用の最小化という原理で決定されている場合、 $cx \rightarrow \min.(\max.)$ を目的関数として最適化することにより、

解 X が一意に定まる。このときの最適基底を B_0 とすると、

$$x = (E - A)^{-1} f = B_0^{-1} f \tag{2-5}$$

(2-5) 式のように、システム内部に結合生産や代替性が存在する場合でもプロセスペクトル X を決定することができる。ただし、この場合、産業連関分析における非負解の検証のように Hawkins-Simon の条件によって非負解の存在を検証することはできない。それは、行列 E の要素いかんにより、 B_0 の対角成分以外にも、正の成分が存在する可能性があるからである。あえて検証しなければならない場合には、いわゆる クラメルの公式などを用いて、逐次検証するより他はない。

$$\begin{aligned} x &= B_0^{-1} f \\ x_j &= B_0^{-1} f_1 + B_0^{-1} f_2 + \cdots + B_0^{-1} f_i + \cdots + B_0^{-1} f_m \end{aligned} \tag{2-6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_j}{\partial f_i} &= B_0^{-1} f_i \\ \frac{\partial y_k}{\partial f_i} &= \sum_{j=1}^m (E_{kj} \times B_0^{-1} f_j) \end{aligned} \tag{2-7}$$

このように、システム内部に結合生産や代替性が存在する場合でも、システムの状態が一意に決定されれば、このときの逆行列を用いて、ライフサイクルにおける資源消費、環境排出を各製品に配分することが

できる。(2-7) 式による配分原理を限界配分指標とよぶことにする。

また、あるプロセスから他のプロセスに代替した場合の改善量については以下のように考えられる。いま、新プロセス b_j を微少単位 θ だけ導入する場合を想定する。プロセス b_j に対する排出行列 E の j 列目の列ベクトルを e_j とする。このときの、元のプロセスベクトル X とプロダクトベクトル Y の変化量は以下のようになる。

$$\begin{aligned} B_0 x &= f \\ B_0(x + \Delta x) + \theta b_j &= f \end{aligned} \tag{2-8}$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= -\theta B_0^{-1} b_j \\ \Delta y &= -\theta E B_0^{-1} b_j + \theta e_j \end{aligned} \tag{2-9}$$

したがって、新プロセス b_j を単位当たり導入したときの、改善量は $EB_0^{-1}b_j + e_j$ で表される。これを限界改善指標と呼ぶこととする。

これらをまとめると LCA における指標を以下のように分類できる。

限界配分指標とは、ある製品を一単位消費したときの環境排出を表したもので、当該製品の需要の増加や節約による環境排出の増減を知りたいときに有効な指標である。また、限界配分と平均配分は二つの点で違いがある。一つは対象とするシステムに非線形性がある場合で、この場合限界配分は現時点での生産量からの微量の増加に対する環境排出の増加の割合を表す。(経済学で限界～というと一般に～の微分値を意味する) しかし、ここではモデルが線形であるため、この問題を取り扱うことはできない。限界配分と平均配分が異なる値を取るもう一つの場合は、経済学でいうところのサンクされた資本設備を評価に含めるか否かである。これは例えば、自動車 1 台の製造に関する LCA をおこなおうとした場合に、自動車製造工場のロボットや工場建屋までを評価に含めるべきであろうか。我々が限界配分指標の立場を取り、しかも一台の生産増加のために、既に導入されているロボットや工場建屋を増設する必要がないとすれば、これらはサンクされた資本設備であり、評価に含める必要はない。これに対し、平均配分指標では、そこで、生産される全ての自動車の平均環境負荷を考えるために、サンクされた資本設備の製造から生じる環境負荷も考慮に入れる必要がある。ただし、限界配分においても(設備が更新される)長期の影響をみると、資本設備の製造を考慮に入れる場合がある。なぜなら、長期においてはサンクされた資本設備は存在せず、全ての資本設備は更新され得るからである。これに対し、限界改善指標とは新しいワームズや新しい製品をシステム(社会)に導入した場合の環境排出の増減を表している。例えば、新しい自動車のワーカーが開発された場合、これを導入することによる社会システム全体への影響は、限界改善指標によって見

ることができる。限界改善指標においては、新しいプロセスを導入するのであるから、資本設備の製造まで考慮に入れるのが一般的である。

現在では、さまざまな製品やプロセスのLCAがおこなわれ、各種刊行物や論文誌などに掲載されている。しかし、内容を吟味すると上の単純な区別が十分されておらず、誤った評価をしている例も少なくないので、注意が必要である。

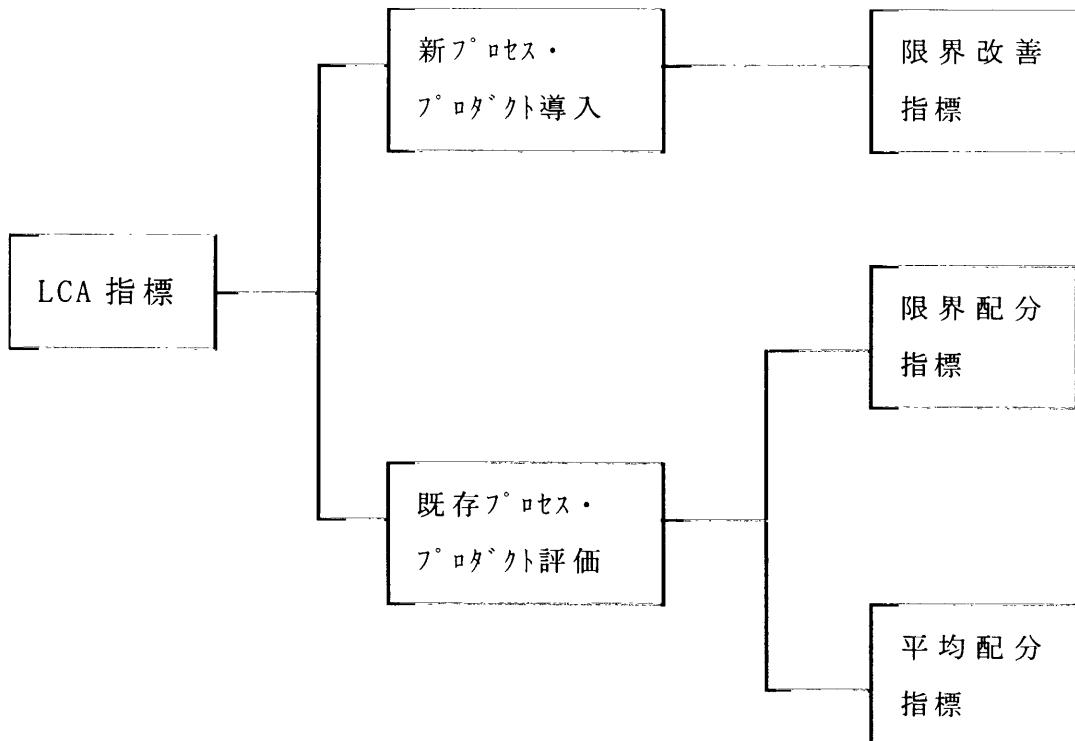


図2-3. LCA指標の分類

2.3 静学LCAにおける実データの取り扱いについて

前節においては、静学LCAの基本的枠組みについて述べたが、本節では前節の基本的枠組みに基づきLCAをおこなうための実データ取り扱いについて示す。前節の基本的枠組みは産業連関分析のOne process-one productの原則を拡張したものであった。しかし、実際に一国の包括的な財の流れを十分な統計的信頼性をもって表したデータベースとしては産業連関表に勝るものはない。例えば、日本の産業連関表で取り扱われている財の項目の中で、特に結合生産がLCA上問題となりそうなものは、石油精製とその産物である各種石油製品、マイナス投入方式により副産物として扱いを受けていたる鉄屑、非鉄金属屑などの屑であろう。これらの中、石油精製については、技術データを用いた補正が可能である。リサイクルや熱の多段利用がLCAの中心課題の一つとなりつつあることを考えると、屑・廃棄物の問題が重要と考えられる。実際には、屑・廃棄物・副産物の中には、現在の産業連関表に含まれていないものもあり、これらの財がリサイクルされて有用な財に転換されることが今後徐々に増加していくと考えられる。これらの考察から、

従来の財項目については、石油精製などの例外を除いて基本的に産業連関表の分類に従い、屑・廃棄物・副産物については結合生産を含む取り扱いを適用するのが現実的であろう。そこで、まず、屑・廃棄物・副産物としてどのような項目を挙げるべきかを次項で考察する。

2.3.1 廃棄物排出行列Eの作成について

前節の廃棄物排出行列に含める屑・廃棄物・副産物としては、まず、産業連関表で既にマイナス投入方式により扱われている鉄屑・非鉄金属屑などが挙げられる。これらは既に連関表中にデータが含まれている。次に未来開拓プロジェクトの中心的課題の一つであるCO2などの温室効果ガスが挙げられる。CO2については、産業連関表項目分類毎の精度の高い推計が吉岡らによってなされている¹⁴⁾ため、これに添うかたちが望ましい。CO2以外の温室効果ガス、特にメタンや亜酸化窒素などは農業のLCAをおこなう上では重要であり、空調機器などを対象としたフロンの評価も重要になると考えられるが、これらについては今後の課題とする。

これ以外の廃棄物で含めるべき物としては、今後リサイクルが促進されるか、または廃棄物の管理自体が環境負荷を生じる恐れのあるものが挙げられる。こうした廃棄物については、厚生省より、以下のような業種分類と廃棄物分類において、データが得られている。本研究では、これを産業連関表と整合性が取れるように調整した。

表1. 業種分類

1	農林水産業	17	建設
2	鉱業	18	電力・ガス・熱供給
3	食料品	19	水道・廃棄物処理
4	繊維製品	20	商業
5	パルプ・紙・木製品	21	金融・保険
6	化学製品	22	不動産
7	石油・石炭製品	23	運輸
8	窯業・土石製品	24	通信・放送
9	鉄鋼	25	公務
10	非鉄金属	26	教育・研究
11	金属製品	27	医療・保健・社会保障
12	一般機械	28	その他の公共サービス
13	電気機械	29	対事業所サービス
14	輸送機械	30	対個人サービス
15	精密機械	31	事務用品
16	その他の製造工業製品	32	分類不明

表2. 廃棄物分類

1	燃え殻
2	汚泥
3	廃油
4	廃酸
5	廃アルカリ
6	廃プラスチック
7	紙くず
8	木くず
9	繊維くず
10	動物性残渣
11	ゴムくず
12	金属くず
13	ガラスくず及び陶磁器くず
14	鉱さい
15	建設廃材
16	動物のふん尿
17	動物の死体
18	ばいじん

また、上のような廃棄物以外に各産業のプロセスからの排熱も行列 E に含めることにより、革新的エネルギー技術として期待される熱の多段利用を LCA 評価することができる。排熱については、著者らによる Discussion paper 34 「日本の製造業における排熱利用可能性の評価」にあるように工場の未利用エネルギー実態調査としてのアンケート結果が分析されている。これを産業連関表の項目分類に合わせるように調整することで、排熱を上記項目に加えることができる。

本研究では、上記のように産業連関表に元来含まれていた屑・副産物に加え、温室効果ガスとしての CO₂、厚生省データに基づくその他の屑・廃棄物、および排熱を取り扱うことを考慮している。

2.3.2 LCA 評価のための投入係数行列の変換

前項では LCA 分析に含めるべき財の項目について検討した。本項では、LCA 評価のための投入係数行列の変換について述べる。LCA をおこなう上で、投入係数行列を変換する必要性が出てくるのは次の二つの場合である。一つは 2.2 節で述べたフレームワーク上にデータベースを構築する際、物量単位のデータと（産業連関表の）円価値単位のデータを結合する場合がでてくると考えられる。この場合には物量単位から円価値単位に、また円価値単位から物量単位への単位変換が必要となる。

もう一つは、技術移転による環境負荷削減を評価したい場合である。例えば、Clean Development Mechanism などの制度により、日本から中国に技術移転をおこなうことによる CO₂ 削減効果を算定しようとすると、日本と中国の財の相対価格の比を考慮した投入係数の変換が必要となる。そこで、本項では、上の二つの

場合を想定した投入係数の変換について述べる。

まず、円価値単位に基づくある国の産業連関表の投入係数行列 A を一端物量ベースに基づく投入係数行列 A' に変換する。ある国の円価値単位に基づく投入係数行列と物量単位に基づく投入係数行列の第 i 成分をそれぞれ a_{ij}, a'_{ij} とする。 a_{ij}, a'_{ij} は i 行と j 列に相当するプロダクトの単位物理量当たりの価格で関係づけられる。

$$a_{ij} \times \frac{p_j}{p_j} = a'_{ij} \quad (2-10)$$

すなわち、(2-11)式のような単価行列 P を定義すると A と A' は(12)式のように関係づけられる。

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & p_n \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

$$A' = PAP^{-1} \quad (2-12)$$

(2-12)式を用いて円価値単位と物量単位の変換を相互におこなうことができるので、LCA におけるデータベースの融合には単価行列 P を整備することが重要である。

さらに、この変換方式を利用して、国毎の財の相対価格を考慮した投入係数行列の変換について述べる。いま、円価値単位による 1 国と 2 国の産業連関表を A_1, A_2 とし、財の種類、数は同一であったとする。両国における財の相対価格が一般に異なるので、以下のように変換する。この場合、1 国と 2 国における単価行列 ((2-11)式で定義した行列) を P_1, P_2 とすると、 A_1, A_2 を比較するには、(2-13)式を利用した変換をおこなえば良い。

$A_1 \rightarrow P_2 P_1^{-1} A_1 P_1 P_2^{-1}$ と変換し、 A_2 と比較する。

(2-13)

すなわち、技術の国際比較をおこなう場合や技術移転による環境改善効果を産業連関表によって評価する場合には、相対価格の相違を考慮した(2-13)式による投入係数の変換が必要であることがわかる。著者らによる論文 5)では、日中の産業連関表における投入係数の変換をおこなっているが、これは文献 6)に基づいている。この文献では、日中の主要製品の相対価格を比較して、その比を評価している。この意味では(13)式の $P_2 P_1^{-1}$ が直接得られている訳で日本→中国または、その逆の変換は容易におこなうことができる。

3. 動学LCAの基本的枠組み

3.1 入力ー出力モデルの動学化

2.2で述べた入力ー出力モデルの枠組みでは、無限の波及効果を一回の逆行列計算の中で行っており、その意味で時間の進行を無視した静学モデルであった。各プロセスからの生産と消費を、時間の推移を考慮しておこなう、いわゆる動学LCA分析が本節の主題である。

LCAをおこなうにあたって、動学分析が本質となるのは次の二つの場合である。一つは、資本設備を製造するための資源・環境負荷が、燃料として投入される財の資源・環境負荷に比較して大きい場合で、太陽光発電システムがこのような場合に該当する。太陽光発電システムでは、CO₂負荷の殆どはシステムを製造する際に生じる。通常の静学分析では、この製造負荷を耐用年数で除して一年当たりの負荷を算定し、さらに年間発電量で除して kWh 当りの CO₂ 負荷を算定する。このような算定法は、設備量の長期にわたる変動が小さい場合には適切な評価となりうるが、急速に設備を増強する場合には不適切な評価となりかねない。例えば、2010 年までの温室効果ガス削減目標に応えるため、静学分析で kWh 当りの CO₂ 負荷が少ないと判定された太陽光発電システムを大量に導入したとする。このときの太陽光発電システムの製造・運転に起因する CO₂ は静学LCAを基にした評価（上記の kWh 当りの CO₂ 負荷に発電量 kWh を乗じた値）よりおおきくなり、結果的に削減目標を達成できない場合が生じる。このような矛盾を避けるためには、動学的な扱いが必要である。

動学分析が重要となるもう一つの場合は、プロセス間で投入・産出される中間財にタイムラグがある場合である。エネルギー変換技術の例としては核燃料サイクルが挙げられる。核燃料サイクルにおいては、まず軽水炉でウラン燃料が使用された後、再処理を経てプルトニウムを含むいわゆる MOX 燃料が生成され、これが高速増殖炉やプルサーマル軽水炉の燃料となる。軽水炉における燃料使用や再処理に要する時間の後れを経て MOX 燃料ができるため、動学的な枠組みにおいて始めてシステム全体の LCA が可能となる。また、システムの成長率に応じて異なる LCA 指標が得られる。ここでは上記二点を考慮した動学LCAの基本的枠組みを紹介する。

まず、設備投資の扱いを簡単に説明しよう。投資は二つの側面を持っており、一つは当期の需要としての側面ともう一つは次期の生産能力の増強という側面である。この意味から、いま、次期に期待される j 部門の生産額 $x_j(t+1)$ と $x_j(t)$ に対し、今期の i 部門の投資を、資本係数 k_{ij} を用いて、

$k_{ij} \{x_j(t+1) - x_j(t)\}$ と表すことができる。これに、生産と需要（最終需要、中間需要を含む）のタイムラグを加味して、入力ー出力モデルの第 i 品目需給バランスは、次式のように表される。

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(t+1) + \sum_{j=1}^n [k_{ij} \{x_j(t+1) - x_j(t)\}] + f_i(t+1) \quad (3-1)$$

これを行列を用いて表現すれば、

$$x(t) = Ax(t+1) + K\{x(t+1) - x(t)\} + f(t+1) \quad (3-2)$$

A : 投入係数行列

K : 資本係数行列

$f(t)$: t 期における設備投資を除く最終需要ベクトル

2.2 で述べた結合生産を含む一般的な形式で表すと、

$$Ex(t) = Ax(t+1) + K\{x(t+1) - x(t)\} + f(t+1) \quad (3-2')$$

E : 生産(排出)係数行列

3.2 斎一成長解の存在条件と動学的ライサイクルアセメント指標

(3-2)式より、毎期において、次期の最終需要 $f(t+1)$ と決定された今期の生産 $x(t)$ が与えられれば、次期の生産 $x(t)$ を決定することができる。しかし、このような手続きに基づく解の導出は、システム自体が持つ性質を必ずしも明らかにするものではない。そこで、以下では、斎一成長解の概念に基づき、動学システムの性質に迫ることとする。

いわゆる斎一成長解においては、ベクトル x および f が一定率で成長することを仮定する。すなわち、以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} x(t+1) &= \alpha x(t) \\ f(t+1) &= \alpha f(t) \end{aligned} \quad (3-3)$$

これを(3-2)式に代入すると、(3-4)式が得られる。

$$\begin{aligned} x(t) &= \alpha Ax(t) + (\alpha - 1)Kx(t) + \alpha f(t) \\ \frac{1}{\alpha} &= \beta \text{とおくと、} \\ \{\beta I - A - (1 - \beta)K\}x(t) &= f(t) \end{aligned} \quad (3-4)$$

ここで、資本係数行列Kが0行列である場合を考えると、(3-5)式のような単純な方程式が得られる。

$$(\beta I - A)x(t) = f(t) \quad (3-5)$$

この方程式は、行列 $(\beta I - A)$ が Hawkins-Simon の条件を満たす限り、任意の f に対して非負解 x を与えることが知られている。実は、この条件は、以下の行列の固有値とも関連していることが知られている。すなわち、 β と行列 A の固有値の最大の実固有値との間に以下の関係があれば、任意の非負ベクトル f に対して x は非負解を持つ。

$\beta > \lambda$; ただし、 λ は行列 A の固有値の内、実数で最大のものを意味する。

このとき、齊一成長解から得られる以下の逆行列の要素により決定される指標を、動学における限界配分指標と呼ぶことにする。

$$x(t) = (\beta I - A)^{-1} f(t) = B(\beta) f(t) \quad (3-6)$$

また、(3-6)式のような関係を持つシステムにおいて、齊一成長率 α を大きくする (β を小さくするほど) ほど、逆行列の要素が大きくなることが証明できる。すなわち、

$$\beta_1 > \beta_2 > \lambda \text{ のとき、} B(\beta_2) > B(\beta_1) > 0 \quad (3-7)$$

(ここで、 $B(\beta_2) > B(\beta_1)$ とは、 $B(\beta_2)$ の全ての要素が $B(\beta_1)$ の対応する要素より大きいことを意味している。)

すなわち、システムには、技術関係が固定している限りにおいて、これ以上の速度で成長できないという、成長率の上限 ($1/\lambda$) が存在する。また、上限を超えない範囲で成長する場合においても、システムの成長率が高いほど、その限界配分による LCA 指標は悪化する (大きくなる)。この示唆は、設備の製造、すなわち資本係数行列を導入した場合にも通じる。

また、結合生産を含むシステムにおいては、(3-7)式は以下のようになる。

$$x(t) = (\beta E - A)^{-1} f(t) = B'(\beta) f(t) \quad (3-7')$$

この場合には、(3-7)式のような関係を証明することはできないが、一般的な数値例においては、やはり成長率が高いほど、LCA指標が悪化する傾向が見られる。また、システムの性質によっては（例えば核燃料サイクルのような本質的に増殖を含むシステムにおいては）成長率の上限のみでなく、下限が存在する場合もある。すなわち、(2-14')式で表されるものの中には、一定以上の速度で成長しなければ斎一成長が不可能なシステムが存在する。この場合においても、成長率が高いほどLCA指標が悪化する傾向は変わらない。

4. おわりに

本報告では、ライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みについて述べた。本報告で述べられたライフサイクルアセスメントの基本的枠組みは、既存の産業連関分析を拡張したものと解釈できる。すなわち、吉岡らによって開発された環境分析用産業連関表¹⁾とは基本概念を同じくするものである。したがって、本報告では、今後の環境分析用産業連関表を想定した発展の方向とその問題点を検討した。

その一つは、結合生産を認めるものとして導入した生産（排出）行列に、いかなるプロダクトを含めるかという点であった。今後、さまざまな形でのリサイクルやヒートカスケーディングなどの技術の重要性が増すにつれて、これらに関連する副産物などの把握が重要となるが、この中、何を含めるべきであるか。本報告では厚生省データに基づく屑・廃棄物および全国一万余事業所へのアンケート調査に基づく業種毎の排熱データを加えることを想定した。また、従来の環境分析用産業連関表に含まれていたCO₂は勿論であるが、CO₂以外の温室効果ガスをどこまで含めるか。これは、データ入手の必要性と可能性の面から慎重に検討しなければならない問題である。今回検討された廃棄物や排熱データを従来のCO₂データと比較すると、業種分類が粗い（数十業種に統合されている）ことが分かる。したがって、従来の環境分析用産業連関表を発展させるに当たり、従来のCO₂を中心とした業種分類の細かいAバージョンと、上述した廃棄物・排熱データを含むが業種分類の粗いBバージョンを開発することも一案である。どちらを利用するかは、分析の目的によって決定すれば良い。

次に、LCA評価に必要とされる投入係数行列の物理量単位／円価値単位間の変換について述べた。LCAを想定した投入係数行列は物量単位であるべきとする議論がしばしばなされる。円価値単位の投入係数行列は、財の流れを貨幣単位で表しているのであり、その物理量と貨幣の量が比例している限りにおいては、両者は全く同一であり、どちらを用いてLCAをおこなっても本質的な相違はない。ただし、物理量と貨幣の量が比例しない場合、例えはある中間素材が大手メーカーには低価格で販売され、中小メーカーには高価格で販売されているような場合には両者は異なる。こうした場合のLCAについては今後の課題とする。

本報告では、財の相対価格の比を考慮した二国間の投入係数行列の変換についても述べた。未来開拓プロジェクトの中心課題がアジア諸国の持続可能な発展にあることから、技術移転とそれに伴う環境負荷削減のLCAは非常に重要である。この点のさらに詳細な分析については、文献5)を参照されたい。

次に、動学LCAの基本的枠組みに関して資本設備の考慮が重要であることを述べた。資本設備の考慮は時間の問題と密接に関連しており、厳密なLCAをおこなうには、時間の考慮を避けて通れないことを意味

している。これまでの LCA は、定常状態を仮定した静学的分析か、新プロセスの微少な導入を仮定した微分（限界）的分析が主体であり、時間の推移におけるシステムの成長やそれに伴う資本設備の変化は考慮されていないもののが多かった。本報告では、動学 LCA のための予備的解説を加えたが、甚だ不十分である。この点を具体例を含めてどのように考慮するかは今後の課題である。

また本報告ではふれなかつたが、一国の産業連関表を用いて LCA をおこなう場合には、財の輸出入に伴う資源・環境負荷を評価することが困難である。特に、日本のように、資源や基礎素材を主に輸入に依存している国では、輸入に伴う負荷を正しく評価することは重要である。したがって、この部分は船舶輸送に関する基礎データなど積み上げ評価によって補う必要があろう。⁴⁾

以上述べたような課題をふまえ、LCA 評価のためのデータベースおよびツールを今後約一年間をめどに開発する予定である。

参考文献

- 1) 池田明由, 篠崎美貴, 菅幹雄, 早見均, 藤原浩一, 吉岡完治, 環境分析用産業連関表, 慶應義塾大学産業研究所, 1996.
- 2) 社団法人産業環境管理協会, 生涯環境影響調査手法の開発報告書, 1995, 1996, 1997.
- 3) 松橋隆治, 石谷久, 持続可能なシステム実現のためのエネルギー技術の評価, 電気学会論文誌B-118, p775-780.
- 4) 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団, 平成3年度船舶排ガスの環境への影響と防止技術の調査報告書, 平成4年3月.
- 5) 松橋隆治, 張末, 吉田好邦, 石谷久CO2削減のための先進国・途上国間クリーン開発メカニズム方策の研究, 第15回エネルギー・システム・経済・コンファレンス講演論文集(1998)
- 6) 篠崎美貴, 趙晋平, 吉岡完治, 日中購買力平価の測定 一日中産業連関表実質化のためにー, Keio Economic Observatory Occasional Paper, 1994