

# ライフサイクルインベントリー分析における 非線形効果の影響

酒井 信介\*

Influence of Non-linearity of I/O Relation in Life Cycle Inventory Analysis

Shinsuke SAKAI

**Synopsis :** Life cycle assessment (LCA) has been widely used to evaluate the environmental load associated with products, materials and services from cradle to grave. Most of the effort in LCA so far has been devoted to construct the inventory database because collecting the related data is tremendously time-consuming process. On the other hand, problems of LCA as a evaluation tool also has to be considered. Typical LCI methods, such as I/O analysis and process analysis, assume that the relationships between the input and output for each process are linear. In fact, most of the relationship between the input and output for processes do not satisfy the linearity and so the influence of the non-linearity on the result has to be investigated to evaluate more accurate environmental load. This paper formulates the nonlinear analysis in LCA to extend the normal linearity-based LCA. In the formulation, a method to express the nonlinearity in the general format is newly proposed. Next, a general system for the evaluation of environmental load is developed using this formulation. It is shown that object-oriented approach is effective for the development. Using the developed system, influence of non-linearity on environmental load and the derived problems will be investigated. Finally, an effective method to modify nonlinear data, which is supposed to become important in the future, will be proposed.

**Key words:** life cycle assessment; non-linear analysis; inventory analysis; process analysis; steelmaking.

## 1. 緒言

ライフサイクルアセスメント(LCA)は、機械製品などの素材の採掘から運搬、製造プロセス、供用、廃棄、リサイクルなど全寿命を通して環境に与える負荷を評価するためのツールとして、その重要性が増している。特に、地球温暖化因子であるCO<sub>2</sub>の削減目標が数値として明確に示される今日、製造プロセスの比較によるよりよいプロセスの探索や、最も環境負荷の排出量に影響を与える因子を抽出して、改善の方向性を見いだすなどの重要な手法として期待されている。LCAの実行のためには、まず基本となるインベントリーデータを収集するためのインベントリー分析(LCI)が重要であり、これまでの努力の多くは、この種のデータベースの構築作業に向けられてきたものと考えられる。LCAを実用化するためには、データベースの構築作業が急務ではあるが、一方で手法としてのLCIの問題点も平行して検討しておく必要がある。

これまでのLCIにおいては、産業連関分析にせよ、プロセス分析にせよ、データの入力量と出力関係ならびに、排出される環境負荷量について線形性を基本的に仮定している。このような仮定は、LCIのためのデータ集積の効率化という観点からは有意義なことである。入力量、出力量、環境負荷量などのデータが得られたときに、出力原単位と

呼ばれる、単位出力量当たりの量を単純な除算によって評価しさえすれば、データベースへの追加が可能となるからである。実際には、線形性が成り立たないことも多いものと思われるが、そのような非線形のデータを得ることは、現状では多くの時間と労力を要することが考えられ、データ整備の緊急性の観点からは、現状では未だ積極的に取り組む努力は行われていない。しかし、本来非線形な入出力関係を線形化して評価するときにはどのような問題点が発生するのか、必ずしも十分な検討がされずにLCI評価が行われているきらいがある。また、将来的により精度の高い環境負荷評価を求められたときには、非線形性をも考慮した取扱いが不可欠であろう。

本論文では、このような観点から、従来専ら線形解析が行われてきたLCIを非線形領域にまで拡張するための定式化を行う。その際、解析の一般性が失われないよう、非線形関係の代表的なものとして二次曲線を取上げ、その基準化した表現方法を考案する。次にオブジェクト指向設計によって開発したシステムを用いて、現状のLCIで十分に考慮されていない非線形性効果がどのように環境負荷評価に影響を及ぼすのか、また現状のLCIにはどのような問題点が存在するのかを例題を用いて検討した結果について述べる。最後に、将来的にLCAでの非線形の取組みが必要となった場合に有用な知見を与えるよう、非線形データ集積

Table 1. Example of process data for mining coal.

Classification	Material	Process data
Input	Fuel	-0.22x
Input	Steel	-0.07x
Output	Coal	x
Load	CO <sub>2</sub>	0.02x
Load	SO <sub>x</sub>	0.08x

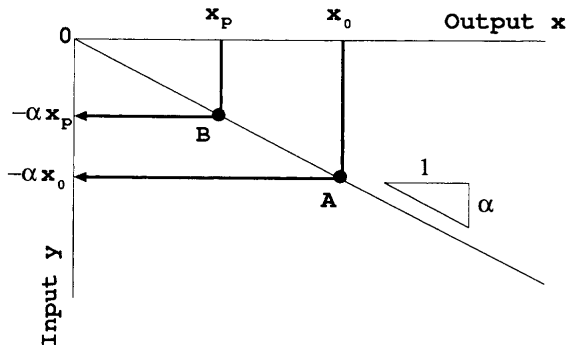


Fig. 1. I/O relation when linear property is assumed.

に対する提案を行う。なお、本論文ではLCIを念頭において議論するが、よりグローバルな観点からとらえるLCAにおいても、各段階の連鎖をプロセスフローと等価と考えることによって、全く同様に取扱うことができる。

## 2. 非線形性を考慮することに伴う問題点

通常、あるプロセスの特性データは、Table 1に示すように投入されるマテリアルやエネルギー、生産される製品、およびこのプロセスで発生されるCO<sub>2</sub>などの環境負荷量で表される。データの分類としてプロセスへの入力(Input)、出力(Output)および環境負荷の出力(Load)の三種類を考える。データベースとして汎用化するためには、基準化が必要となることから、一般には出力原単位と呼ばれる単位出力量当たりの諸量として、値を保存することが行われる。表では、出力マテリアルである石炭(Coal)に比例することを明示的に示すために出力量を $x$ と記述し、他の入力量や環境負荷量はこれに係数がかかった量として表現する。このことは、プロセスへの各入出力の諸量が線形関係となっていることを仮定していることになる。符合が負である場合には当該プロセスへの入力であることを、正である場合には出力であることを示す。

非線形性を考慮するとどのような問題が生ずるかを検討する。まず、簡単のために特定の出力量 $x$ と入力量 $y$ の関係を考え、両者の線形性を仮定する場合、両者の比例係数は、Fig. 1のように、ある測定点A点における入力量を出力量 $x_0$ で除することによって得ることができる。 $\alpha$ は単位出力量当りの入力量としての意味を持ち、インベントリー

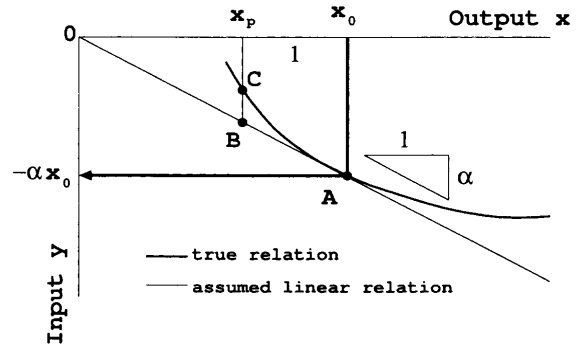


Fig. 2. I/O relation when non-linear property is considered.

データとしてはこの値が保持される。もしプロセスからの出力量(つまりCoal量)がその $x_p$ 倍である場合には、全ての入出力原単位データを $x_p$ 倍することによりプロセス内の全ての値は確定する。Fig. 1の場合には、 $x_p$ に対する $y$ の入力量は、 $-\alpha x_p$ と確定する。このとき、 $x_p$ のことをプロセス量、図中のB点を、計算点と呼ぶことにする。計算点と測定点は一般には一致することはないが、入出力関係の線形性が厳密に成り立っている限りにおいて、Fig. 1のように両者の関係は $x_p$ の値にかかわらず直線上にのっているため正確な入力値が評価され、問題を生ずることはない。

次に、実際の入出力関係がFig. 2のように非線形であるにもかかわらず、特定の測定点A点での線形化データ $\alpha$ を用いて解析する場合を考える。測定点近傍では近似的に線形性が成立している状況を想定していることから、非線形関係は測定点において、勾配が $-\alpha$ であり、かつ原点を通過する直線に接することになる。この場合、当該プロセスのプロセス量が $x_p$ であるとき、この評価量に対応する入出力関係上の点は図中のB点で示されるが、このB点はA点とは一般には異なる点である。ところがプロセス量 $x_p$ に対応して必要となる実際の入力量はB点ではなくC点であるから、このInput  $y$ に対する評価量の差は誤差となってしまふ。従って、線形性を仮定して評価されたプロセス量は、非線形性を満足するものとして評価される量に対して誤差を持ち、正しい評価量は繰り返し計算をしなければ得ることはできない。線形関係である場合には、入出力の比例係数はそのまま勾配値を意味し、勾配は $x_p$ の値にかかわらず一定であるから、入出力係数のデータとしては、比例係数のみを保存しておけばよい。ところが、非線形関係の場合には勾配が $x_p$ の関数として変化するので、入出力関係の勾配を評価するためには $x_p$ の絶対量の情報も必要である。

誤差の程度は、非線形性の程度、および測定点と計算点との距離に依存することになるが、ここでは非線形性を代表する曲線として二次曲線を取上げ、環境負荷評価に与える影響を系統的に調べる。

入出力関係の非線形性を示す尺度に一般性を持たせるため、Fig. 3のように $\beta$ というパラメータを定義する。つま

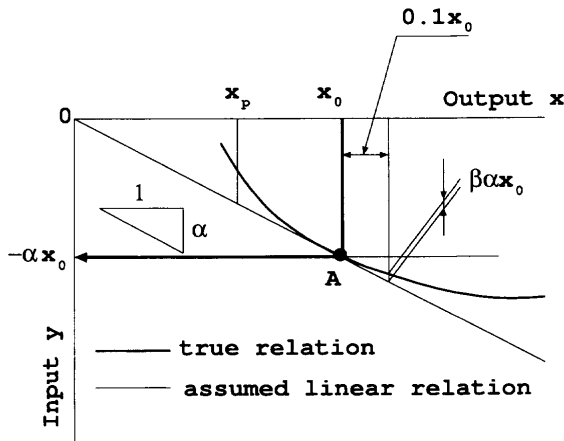


Fig. 3. Definition of degree of non-linearity.

り、測定点である出力量  $x_0$  に対応する入力量は上記定義より  $\alpha x_0$  であるが、 $x_0$  より 1 割増加した点に対応する入力量が、線形データの場合に比べて  $\alpha x_0$  の値の  $\beta$  倍小さくなっているものとして定義する。 $\beta$  は非線形の尺度を示す。この結果、二次曲線は  $\alpha, \beta, x_0$  を用いて以下のように記述される。

$$y = C_0 x^2 + C_1 x + C_2 \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{cases} C_0 = 100 \frac{\alpha \beta}{x_0} \\ C_1 = \alpha - 2C_0 x_0 \\ C_2 = 100 \alpha \beta x_0 \end{cases}$$

### 3. 非線形解析の定式化

原田は、Table 1 のような形で与えられるプロセスデータ群からマトリックスを構築した上で、与えられた出力製品量などの境界条件を満足するプロセス量の解を求めるための一般的方法を提案した<sup>1)</sup>。ここでは、原田の方法を非線形的取り扱いに拡張することを試み定式化する。

原田の方法では、Table 1 のような形で特性が与えられるプロセス要素に加えて、プロセス間の物質の流れの割合を定義するセレクト要素、物質の供給、排出を管理するマテリアル要素に分類し、等価な取扱いのもとに、マトリックスに組み立てることができる。これに、出力製品量などを境界条件として拘束することにより各プロセスのプロセス量  $p_i$  を求めることができる。つまり、プロセス数が  $n$  であるとき、解くべき線形方程式が以下のように導かれる。

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot p_j = z_i \dots \dots \dots (2)$$

ここで係数マトリックス  $a_{ij}$  の  $j$  列は一つのプロセス  $j$  に対応し、 $i$  行はプロセス間を流れるマテリアル、あるいは

投入するエネルギーなどに対応する。この値は単位プロセス量に対するマテリアル入力量、出力量などの係数を意味し、Table 1 中の Input や Output などの表示値の係数に他ならない。従って、右辺の  $z_i$  はマテリアルの総和を示し、もしマテリアルの収支が考えている系の中で閉じていれば 0 となる。外部に製品として出力する場合には境界条件としてその量を右辺に記述する。式(2)を以下のベクトル形式で記述すると、

$$A_0 \cdot p = z \dots \dots \dots (3)$$

プロセスベクトルは

$$p = A_0^{-1} \cdot z \dots \dots \dots (4)$$

により、また環境負荷ベクトルは

$$e = L \cdot p \dots \dots \dots (5)$$

により求めることができる。ここで  $L$  は各プロセスデータの環境負荷に対する係数から組み立てられる環境負荷マトリックスである。

このように、入出力関係が線形である場合には、式(2)の計算を一回行えばよいが、非線形である場合には、係数がプロセスベクトル  $p$  に依存するので収束するまで繰返し計算が必要になる。ここでは Newton Raphson 法を採用して収束値を求めた。つまり、非線形の場合には、係数マトリックス  $A$  はプロセスベクトル  $p$  の関数である。従って適当なプロセスベクトルの初期値  $p_0$  とそのときのマテリアルベクトル  $z_0, A_0$  から出発して、次のプロセスベクトル  $p_1$  を次式で評価すればよい。

$$p_1 = p_0 + A_0^{-1} (z - z_0) \dots \dots \dots (6)$$

これをさらに一般化して第  $n+1$  番目のプロセスベクトルを  $p_n$  から次式で評価できる。

$$p_{n+1} = p_n + A_n^{-1} (z - z_n) \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $A_n$  はプロセス量  $p_n$  に対応する係数行列である。この繰返し計算を  $p_n$  が収束するまで行えば、境界条件を満足する収束解を得ることができる。この原理を入出力関係がひとつずつである単純な場合について Fig. 4 に示す。図中黒丸印が収束点であることを示す。本計算が容易に行えるようオブジェクト指向型のシステム<sup>3)</sup>を開発し、パラメトリックに変数を変化させて計算した。

### 4. オブジェクト指向システム

上記の LCI 非線形効果をパラメトリックに検討するためには、多くの条件下での計算が必要となるため、処理の汎用化、効率化が必要である。手続き型言語を用いる場合には、実現できる機能には制約があるとともに、汎用化を実

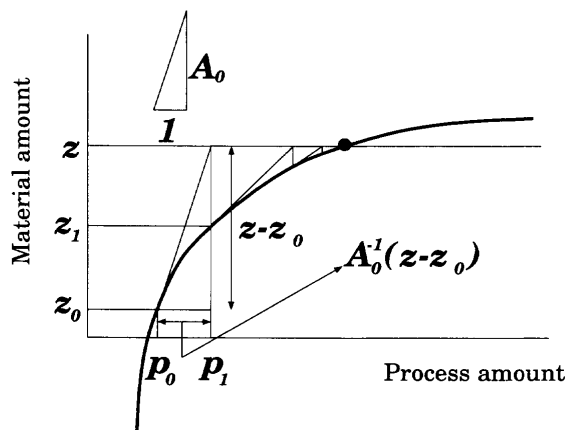


Fig. 4. Principle of Newton-Raphson method.

Table 2. Typical developed classes for object oriented system.

Class name	Function
Process	Management of data for each process
LCA	Management of LCA evaluation including I/O of process data, Calculation of inverse matrix and evaluation of process value, Nonlinearization of specific I/O relation of specific process
Array	Management of one-dimensional array data
Term	Management of nonlinear relation including calculation of value and its differential value
Matrix	Management of matrix data and matrix operation
Curve	Management of parabolic curve including specifying measuring point and calculation point

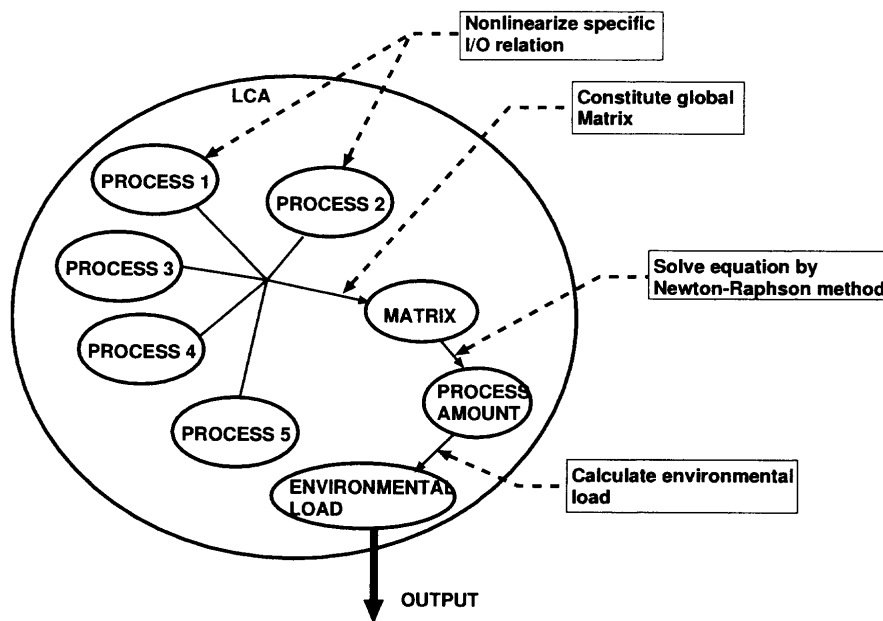


Fig. 5. Schematic drawing of LCA object.

現するためには多くの手間と労力を要する。一方、オブジェクト指向方式を採用する場合には、その優れた柔軟性によって汎用化の実現が容易であり、機能上の制約も少ない。そこで、ここではオブジェクト指向プログラミングのLCI解析への適用性について検討するとともに、システム構築を試みた。

Table 2に開発したクラスのうち代表的なものを機能と共に一覧にして示す。このうち、解析の中心部分であるクラスLCAのオブジェクトの主たる機能を概念的に表現したものがFig. 5である。図中丸い枠は生成されたオブジェクトを、破線は外部から作用される指令信号の流れを、また四角の枠内にその指令内容を示す。各オブジェクトは外部信号に対して、オブジェクト内のメソッドを通じて機能を実現する。このようにオブジェクト指向プログラムでは、オブジェクトに対して次々に外部からの指令信号を作用させることにより作業を進行していく。

プロセスネットワーク内の各プロセスは、Table 1の形式

で記述されたファイルから読み込まれ、同時にオブジェクトPROCESSとなってLCAオブジェクトの中に保有される。オブジェクト生成時には、線形データのみを保有しているが、必要に応じて任意のプロセスの任意の入出力関係に非線形関係を設定することができる。この機能により、計算途中で非線形性を動的に変更してゆくことが可能となり、計算効率が向上する。LCAオブジェクトの一つに、非線形計算の収束解を求めるためのメソッドを有し、この繰返し計算の過程で各プロセス内の入出力関係の現在値に対する微係数を計算して取り出し、マトリックスを組み立てるメソッドを呼び出す。プロセス量の収束解が得られた後は、これに環境負荷係数を乗じて、環境負荷を算出し、外部からこの値を呼び出して作業を終了する。

Fig. 6は、オブジェクトPROCESSの機能をより詳細に表現したものである。オブジェクトPROCESSの中には、入力、出力、環境負荷についてプロセスへの入出力関係を管理するオブジェクトを持つ。各オブジェクトの中には入出

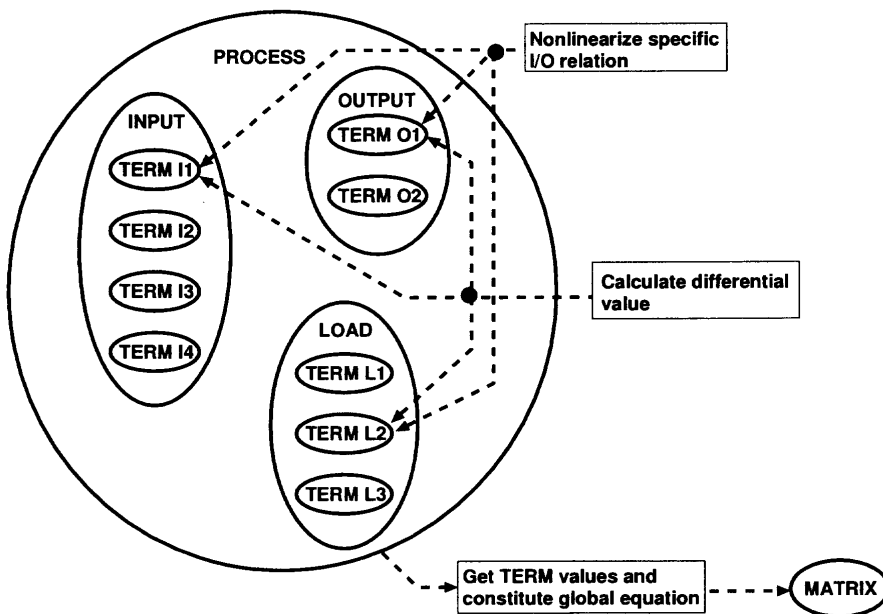


Fig. 6. Schematic drawing of PROCESS object.

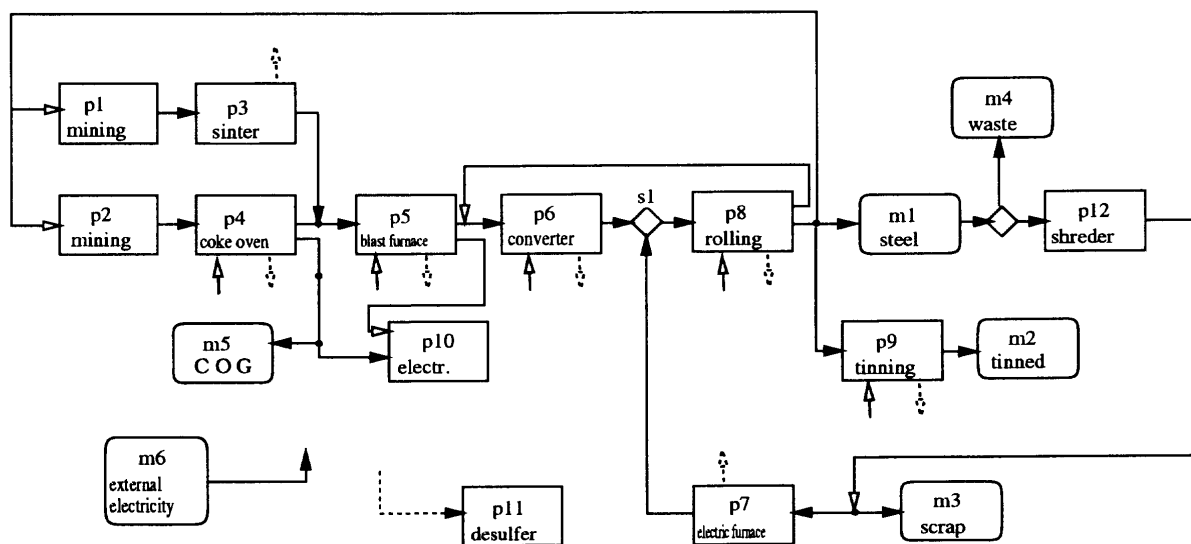


Fig. 7. Process tree used in calculation.

力されるマテリアルや環境負荷ごとに入出力関係がTERM型のオブジェクトとして保有される。オブジェクトTERMはTable 2にあるように、二次曲線の係数管理、値の計算、微係数の計算を行う。非線形性の設定は、このTERMオブジェクトに対して実行される。各TERMで計算される値や微係数はオブジェクトMATRIXに渡されて解くべき方程式の組み立てが行われる。この結果、任意の項目の入出力関係に動的に非線形性を与えることが容易に実現できるようになった。

## 5. 非線形解析

### 5.1 解析条件

原田が文献<sup>2)</sup>で用いた製鉄をイメージしたプロセスフロ

ーを用いて、非線形効果を調べる。Fig. 7にプロセスツリーを示す。図中のプロセス名の横には、記号を付し、以後はプロセス名の代わりにこの記号を用いて表現する。詳細なインベントリーデータは文献<sup>2)</sup>に譲るが、12個のプロセス、5種類のマテリアルの外部への入出力、マテリアルのフローを所定の比率で配分する一つのセレクト要素から構成される。まず、初期のインベントリーデータに対して線形解析を実施したところ、文献<sup>2)</sup>と同一の解が得られることを確認し、以下各プロセスへのマテリアルの入出力関係を非線形化することによりどのような影響があるかを系統的に調べる。Fig. 2の $x_p/x_0$ を $R$ と定義し、 $R$ と $\beta$ をパラメトリックに変動させることにより検討を行う。

### 5.2 非線形化による影響

Fig. 8に、圧延プロセスp8への鋼の入力に対する係数を

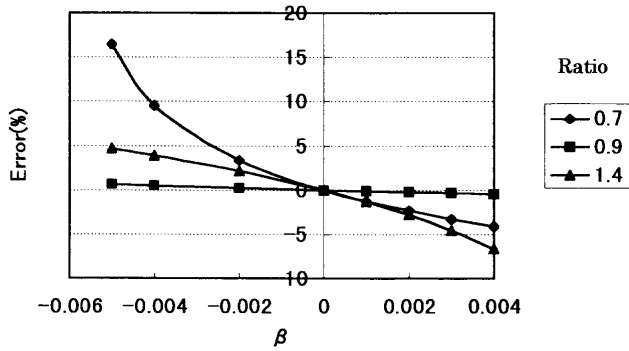


Fig. 8. Relation between  $\beta$  and evaluated error for maximum sensitivity case.

非線形化したときに評価されるCO<sub>2</sub>量について、線形解析から得られる量からの誤差の計算結果を示す。R=0.7, 0.9, 1.4の3通りについて、 $\beta = -0.005 \sim 0.004$ の間で計算している。このように、 $\beta$ の絶対値が小さい、つまり非線形化の程度が小さい場合であってもCO<sub>2</sub>の評価量は線形解に比べて相対的に大きな誤差をもち得ることがわかる。誤差は、Rが1から離れるほど、また $\beta$ が0からはずれて非線形化の程度が大きくなるほど増大することがわかる。

5.3 非線形性がCO<sub>2</sub>評価に及ぼす影響の指標

どのプロセスのどの入出力データを非線形化することによりCO<sub>2</sub>評価量の結果が大きく影響を受けるのかという指標について検討する。一つの候補として考えられる量は、考察対象とする係数が含まれるプロセスから排出されるCO<sub>2</sub>量の大きさである。このことを確認するために、ある特定プロセスの特定の入出力係数についてR=0.7,  $\beta = -0.005$ の条件のもとに非線形化し、そとのきの収束解と線形解との誤差をまず計算する。次にこのプロセスのCO<sub>2</sub>排出割合の%を求める。このような評価誤差とプロセスのCO<sub>2</sub>排出割合の関係を多くのプロセスの係数データについて順番に非線形化して求めて、一括して表示したものがFig. 9である。各プロセスのCO<sub>2</sub>排出割合と線形解からの誤差との間には相関は見られない。つまり、非線形化したプロセスのCO<sub>2</sub>排出割合が大きいからといって、CO<sub>2</sub>積算量が大きな影響を受けるわけではないことがわかる。そこで、もう一つの指標の候補として次式で定義される感度<sup>4)</sup>を考える。

$$s = \frac{\Delta e/e}{\Delta a/a} \dots\dots\dots (8)$$

ここにeはCO<sub>2</sub>などの環境負荷量、aはプロセスデータにおいて特定のプロセスへのマテリアルの入出力に対する係数を示す。このsは、係数aの変動率に対する環境負荷量eの変動率の比を示す量であるが、この感度量を効率的に評価する手法を著者は提案している<sup>5)</sup>。Fig.10はFig. 9を誤差と感度sの関係で表示し直したものである。この場合には、誤差と感度との間には明瞭な相関が認められ、非線

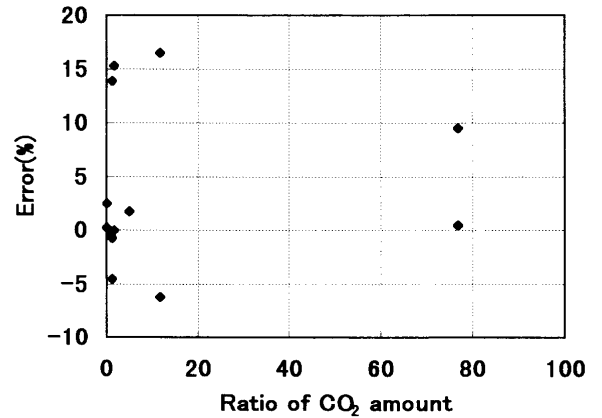


Fig. 9. Relation between CO<sub>2</sub> ratio and evaluated error (R=0.7,  $\beta = -0.005$ ).

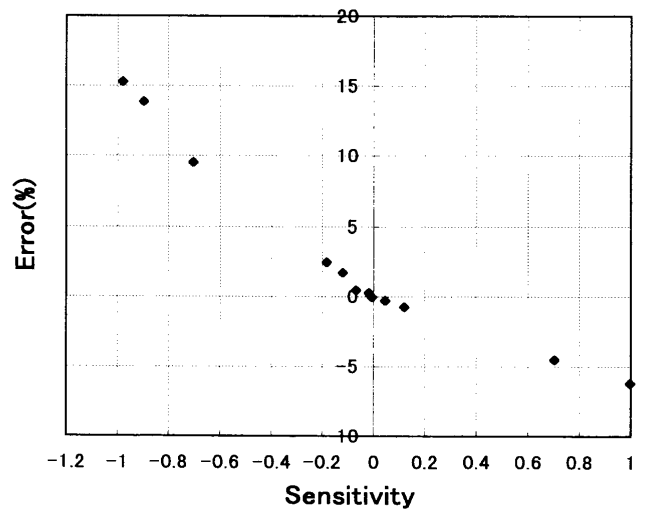


Fig. 10. Relation between sensitivity and evaluated error (R=0.7,  $\beta = -0.005$ ).

形化の効果を調べるためには、感度が有効な指標となり得ることがわかる。つまり、入出力関係の非線形性に対する配慮が必要なデータは感度の絶対値の大きな係数であるということが言える。

さらに、RとCO<sub>2</sub>積算値との関係を感度をパラメータとして調べたものがFig.11である。 $\beta = -0.005$ と固定してあり、感度の値は図中に示してある。感度が0に近い場合には、非線形化をしてもRの値にかかわらず、評価されるCO<sub>2</sub>量はほとんど影響を受けない。一方、感度が0より小さくなるにつれて評価されるCO<sub>2</sub>量は大きくなってゆき、逆に感度が0より大きくなると、CO<sub>2</sub>の評価量は小さくなってゆく。また、Rの影響としては1の場合の線形解に比べ、R=1から離れるほど線形解から離れることがわかる。このように、非線形化に伴う環境負荷量の影響を調べる場合に式(8)の感度は有効な指標となり得ることがわかる。

5.4 感度の符合と非線形化の影響

$\beta$ は非線形化の程度を示すが、Fig.12のようにその符合に応じて非線形曲線の形状が変化する。線形を仮定して導

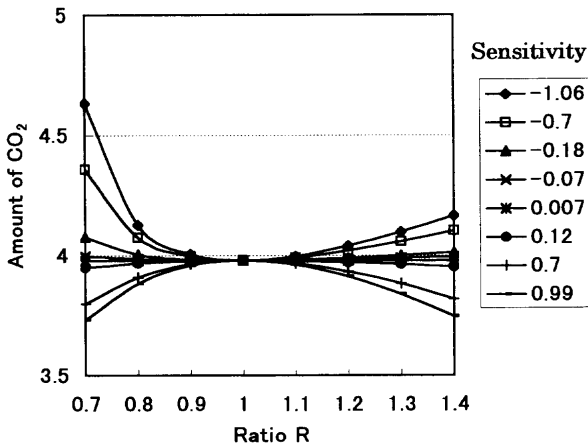


Fig. 11. Relation between  $R$  and amount of  $CO_2$  for  $\beta = -0.005$ .

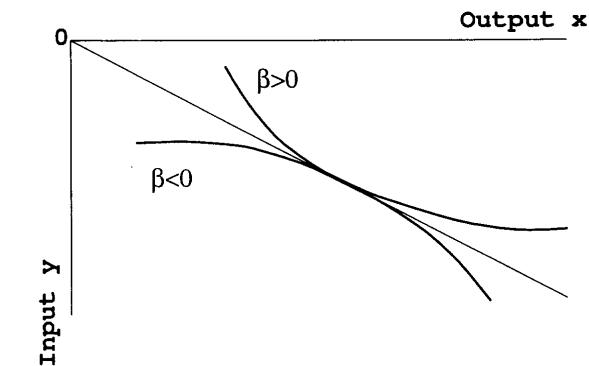


Fig. 12. Influence of sign of beta on geometry of input-output curve.

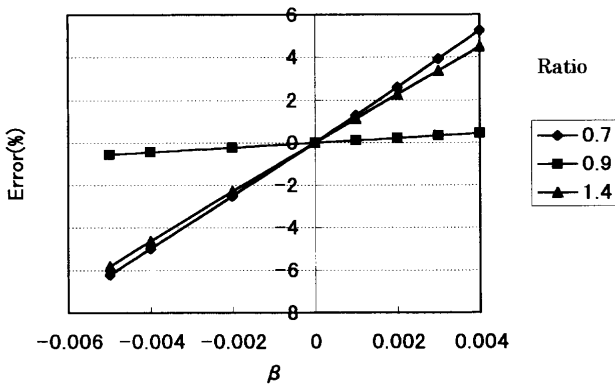


Fig. 13. Relation between  $\beta$  and evaluated error for minimum sensitivity case.

かれた $CO_2$ の積算値に対し、このような非線形曲線の $\beta$ による形状の変化がどのような影響を及ぼすかを調べてみる。Fig.13では、感度 $s$ が負で絶対値が最大となった係数について非線形性の尺度 $\beta$ と線形であるとして評価した値からの誤差の関係を求めた。Fig. 8と比較すると誤差の符号が反対となっていることがわかる。このことから非線形性の尺度である $\beta$ の増加に伴って、 $CO_2$ の積算値の線形を仮定して評価した値からの誤差が増加するか減少するかは感度 $s$ の符号と強い相関を持つことが予測される。このこ

Table 3. Relation between sign of slope and sensitivity.

process name	material	$\alpha$	sensitivity	sign of slope
rolling	steel	1.0	-1.065	-
rolling	mass of steel	-1.05	0.996	+
tinning	tin plate	1.0	-0.182	-
blast furnace	BFG	1.5	0.703	+
sinter	sinter ore	1.0	-0.119	-
generation of electr. power	BFG	-1.6	-0.703	-

Table 4. Sign of error as a matrix of  $\beta$  signs of and sensitivity.

sign of $\beta$	sign of sensitivity	
	+	-
+	+	-
-	-	+

とを確認するために、プロセスのデータ入出力を非線形化する場合の誤差の増減符号との関係を多くの場合について検証した結果をTable 3に示す。ここで、誤差の増減符号は、 $\beta$ の増加に伴って誤差が増加するときに正と定義している。ここでの調査の範囲では、感度の符号と誤差の増減の符号とは完全に一致している。この結果 $\beta$ の符号と感度の符号、線形解からの誤差の符号の関係をマトリックス形式に要約するとTable 4となる。

この符号間の相関については、プロセスネットワークの構造にも依存することが考えられ、あらゆる場合に相関があると結論づけることは困難であると考えられる。しかし、本論文の例題で見限りにおいて、少なくとも $\beta$ の増加に伴う誤差の増減の方向を予測するにあたり、感度の符号が重要な手掛かりを与えることは明らかであり、有用な情報であることを示している。

### 5.5 効率的データ収集法の提言

将来的にLCIの高精度化が求められると各プロセスのプロセスデータの非線形関係を表現するデータの収集が必要となるが、全ての非線形関係を求めることは、膨大な時間と労力が必要とされ、現実的でない。本論文での検討結果より、以下の手順で非線形データを集積してゆくことが効率的であるといえる。

1. 線形性を仮定したプロセスデータを収集する
2. 線形データに対してLCAを実施する
3. 各係数の感度解析を実施する
4. 感度の大きな係数から順番に非線形データを集積してゆく

### 6. 結言

これまでLCIにおいて前提条件とすることの多かった各プロセス内のマテリアルの入出力関係の線形関係について、実際の関係が非線形であった場合の影響について系統

的に検討した。本論文で得られた成果を要約すると下記のようにまとめられる。

(1) 実際の入出力関係が非線形であるにもかかわらず、測定点で線形化してしまう場合の問題点を明らかにするため、非線形性関係が二次関数である場合の一般性の表現法を提案した。

(2) LCIにおいて、プロセス内の入出力関係に非線形性が導入された場合の環境負荷評価の方法を定式化した。

(3) オブジェクト指向システムの導入により、非線形効果のパラメータスタディが容易に実現できることを示し、システム化する方法を提示した。

(4) 開発したシステムによりパラメータスタディを実行したところ、非線形性の影響と感度(式(8))の間には強い相関があることを明らかにし、感度の大きな部分について、非線形性のチェックを行うことが重要であることを示した。

LCAを有効な手段とするためには、LCIを行うためのデータ収集が重要であるが、この作業には膨大な手間と労力を要する。本論文の結果、感度という指標を手がかりに、データ収集を行ってゆけば、精度の高い解により早く到達できることが示された。

おわりに、本研究の遂行にあたって金属材料技術研究所、

原田幸明氏、八木晃一氏には貴重なご助言をいただきました。また、本研究の一部は、科学技術振興調整費「材料のエコマテリアル化のための評価・設計技術の確立に関する研究」の助成により行ったことを付記し、謝意を表します。

## 記号

- $\alpha$  : 入出力関係の比例係数
- $\beta$  : 入出力関係における非線形性の尺度
- $R$  : 入出力関係におけるプロセス値の測定値に対する比率
- $p_i$  : プロセス*i*の量
- $a_{ij}$  : プロセス*j*の単位出力量当たりの入力マテリアル*i*の量
- $A$  : 係数マトリックス
- $p$  : プロセスベクトル
- $e$  : 環境負荷ベクトル
- $z_i$  : 材料*i*の総和
- $s$  : 感度係数

## 文 献

- 1) 原田幸明: Proc. 2nd International Conf. EcoBalance, The Society of Non-Traditional Technology, Tokyo, (1996), 188.
- 2) 環境負担性評価システムの構築のための基礎調査研究調査報告書, 未踏科学技術協会, 東京, (1996), 59.
- 3) <http://irwin.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/LCA/lca.html>に公開
- 4) R.Heijungs: Ecological Economics, **10** (1994), 69.
- 5) 酒井信介: 第75期通常総会講演会資料集(VI), 日本機械学会, 東京, (1998), 84.