

卒業論文

感度解析機能を有する

LCA システムの開発

1p ~ 46p 完

平成 12 年 2 月 4 日 提出

指導教官 酒井 信介 教授

80225 瀬川 太郎

# 目次

記号表	5
第1章 序論	6
1.1 研究の背景	7
1.2 LCA手法の概要	7
1.3 インベントリ分析	8
1.4 LCAの現状	8
1.5 研究の目的	9
1.6 本論文の構成	10
第2章 マトリクス法を用いたLCA環境負担性評価	11
2.1 マトリクス法に基づくインベントリ解析	12
2.1.1 問題の定式化	12
2.2 感度解析	15
2.2.1 摂動法を用いたプロセス量の変動量の評価	15
2.2.2 環境負荷に対する感度解析	16
2.2.3 感度のマトリクス表示	16
2.3 要素変動に対する環境負荷の変動	17
2.3.1 単一要素の微小変動に伴う環境負荷変動の線形性	17
第3章 オブジェクト指向システム	20
3.1 オブジェクト指向を用いたツール開発	21
3.2 オブジェクト指向	21
3.2.1 カプセル化	21
3.2.2 抽象化	21

目次	2
3.2.3 オブジェクトとメッセージ . . . . .	22
3.3 本システムのプログラムの流れ . . . . .	22
3.3.1 プロセス法 . . . . .	22
3.3.2 産業関連法 . . . . .	23
<b>第4章 LCA ツール</b>	<b>24</b>
4.1 GUI 画面 . . . . .	25
4.2 解析の流れ . . . . .	27
<b>第5章 システムの検証</b>	<b>31</b>
5.1 例題 . . . . .	32
5.1.1 感度マトリクス . . . . .	33
5.2 単一要素の微小変動に伴う環境負荷の高精度近似評価 . . . . .	33
<b>第6章 解析</b>	<b>35</b>
6.1 リサイクルを含むモデルの解析 . . . . .	36
<b>第7章 結論及び将来の課題</b>	<b>41</b>
<b>あとがき</b>	<b>42</b>
著者近影 . . . . .	44

## 図目次

2.1	プロセスツリーの例	13
3.1	LCA オブジェクトの概念図	23
4.1	初期画面	25
4.2	メニュー画面	26
4.3	エラー画面	26
4.4	読み込み/書き込みファイル選択画面	27
4.5	プロセス単位の読み込み形式のファイル	28
4.6	一括読み込み形式のファイル	28
4.7	環境負荷項目選択画面	29
4.8	産業関連法画面	30
5.1	単純分岐モデルのインベントリフロー	32
5.2	単純分岐モデル	34
6.1	リサイクルを含むモデルのインベントリフロー	36
	著者近影	44

# 表目次

3.1	主なクラスとその機能 . . . . .	22
5.1	例題において設定されている数値 . . . . .	32
6.1	リサイクル型モデル統合 A マトリクス . . . . .	37
6.2	リサイクル型モデル統合環境負荷マトリクス . . . . .	37
6.3	リサイクル型モデル統合逆マトリクス . . . . .	38
6.4	リサイクル型モデル統合プロセス量 . . . . .	38
6.5	リサイクル型モデル統合一階感度マトリクス . . . . .	39
6.6	リサイクル型モデル統合感度マトリクス . . . . .	39

## 記号表

$A$	係数マトリクス
$a_{ij}$	係数マトリクス $A$ の $ij$ 要素
$a_{ij}^{-1}$	係数マトリクス $A$ の逆行列の $ij$ 要素
$B$	環境負荷マトリクス
$P$	プロセス量
$\beta$	環境負荷ベクトル
$\alpha$	マテリアルの総和
$S^k$	環境負荷 $k$ に対する感度マトリクス
$s_{ij}^k$	要素 $a_{ij}$ が $\Delta a_{ij}$ 変動したときの環境負荷 $k$ に及ぼす感度 感度マトリクス $S^k$ の $ij$ 要素
$P^I$	プロセス量の一次変動率
$\epsilon$	係数マトリクス $A$ の要素 $a_{ij}$ の微小変動
$\beta_{ij,k}^I$	要素 $a_{ij}$ が $\Delta a_{ij}$ 変動したときの環境負荷 $k$ に及ぼす一階感度

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 研究の背景

近年、持続的発展の実現に向けた環境影響評価手法の一つとして、LCA(ライフサイクルアセスメント)が注目を集め、ISO(国際標準化機構)においてその標準化作業が進められるとともに、日本でも国公立の研究機関や民間企業での調査・研究が活発になってきている。LCAとは、製品の原料採取から製造、使用、リサイクル、廃棄などのライフサイクルを通して環境に与える影響を定量的に分析評価する手法であり、循環型社会を実現する上で非常に有効な手段である。

## 1.2 LCA 手法の概要

ISO14040ではLCAの手順として以下の4項目を挙げ、それを経て目的とする製品の環境影響度を評価している。

### 1. 目的と範囲の設定

設定される目的とは、例えば基礎データ作成、環境改善要素の抽出、比較広告等をさす。それに対応してLCA調査の詳細さ・精度・信頼性等の範囲が設定される。LCAで得られる結果はここで設定した範囲でのみ有効なものであり、それを利用するにはこれらの前提条件を踏まえた上で行う必要がある。

### 2. インベントリ分析

LCAの対象となる製品に関して、投入される資源やエネルギー、産出される製品や環境負荷のデータを収集する。

### 3. 影響評価

インベントリ分析で得られた結果を、自然環境、人間の健康、資源などの環境影響項目と関連付けて、対象製品の環境影響度を評価する。分類化、特性化、正規化、重み付けの4段階から成る。

### 4. 結果の解釈

インベントリ分析や影響評価の結果を評価、解釈する。この解釈結果は、はじめに設定した目的と範囲に対応した結論とすることができる。



## 1.3 インベントリ分析

インベントリ分析には、2つの方法が基本的に考えられる。一つは、製品がどのようにつくられ廃棄されるかを製品毎に具体的に調べていく方法である。もう一つは、産業連関表と呼ばれる異なる産業の金額ベースの産出投入が詳細に調べられた表を利用する方法である。

前者は積み上げ法（Process Analysis）と呼ばれ、製品のライフサイクルをボトムアップで調査していく方法で、後者は産業連関分析法（Input-Output Analysis）と呼ばれており、すでに調べられた産業間のインベントリを利用して直接間接の投入エネルギーや環境負荷をトップダウンで求めていくものである。

### 1. 積み上げ法（プロセス分析）

積み上げ法とは、ライフサイクルをその各段階毎のプロセスに分解し、各プロセスにおける環境負荷を求めた上で、ライフサイクル内の全プロセスについて足しあわせを行うという手法である。現在、実用的に利用されている LCA ソフトウェアの大半は、積み上げ法によるものである。

### 2. 産業連関分析

産業連関法は、積み上げ法の欠点である限られた範囲をより大きくできるものである。それは、国の産業の全てを網羅する産業連関表（日本では、総務庁を中心に5年毎に調査）を利用しているため、もっとも複雑にプロセスである製造工程を統合的に分析することができる。すなわち、ある財のエネルギー消費や環境負荷について、産業部門からの直接・間接の影響を求めるものである。しかし、産業連関表を用いるので、調査対象となっていない分野に関しては、カバーすることはできない。また、産業連関表は原則的に素材の製造から販売までしかカバーしていないので、それ以外のプロセスに関しては、分析ができない。特に、リサイクルなどの分析は行うことができない。もっとも、重要な点は産業連関表はお金の取引を表した表であり、それを物量に換算しているにすぎないことである。

## 1.4 LCA の現状

通産省では98年にLCA手法の開発やLCAデータベースの構築を目的とした「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発」プロジェクト（通称LCAプロジェクト）を、5年計画でスタートさせた。

これを受けて、企業間でも消費者に直接、環境への良さを訴える「環境ラベル」が重要な販売ツールとして浮上してきた。環境ラベルには「タイプ I(第三者認定型)」「タイプ II(自己宣言型)」「タイプ III(LCA 型)」の3種類があり、ISO がその要件について基準づくりを進めている。

#### 1. タイプ I 環境ラベル

企業や消費者から独立した第三者機関が、企業の申請に基づいて製品分野ごとの判定基準をもとに認定するもの。日本では「エコマーク」がこれに当たる。

#### 2. タイプ II 環境ラベル

自社の製品がどのように環境に配慮しているのか「自己宣言」をするための規格。製品に貼るマーク以外の広告や宣伝にも適用される。

#### 3. タイプ III 環境ラベル

ライフサイクル全体での環境への影響を、実際のデータを使って定量的に示す表示方法を定める規格。LCA がまだ開発段階のため各国間で意見のバラツキが大きい。

現状ではタイプ II が主流だが日本のパブリックデータベースの構築に伴い、客観性や総合性で勝るタイプ III が将来の期待を集めている。

## 1.5 研究の目的

これまでの LCA ツールでは、リサイクルなどを含む複雑なライフサイクルを表現したり何らかのパラメータを分析時に与えて実行したりするのが困難である。そこで本研究ではそのようなフローにも対応可能な感度解析機能を有する LCA システムを開発することを目的とする。開発に際してはオブジェクト指向言語である VisualC++ を用いる。また、GUI(グラフィカル・ユーザー・インターフェイス)で直観的な操作環境を提供する。

本システムでは日本の国家プロジェクトである LCA プロジェクトにおいてインベントリデータの収集に用いられているツール(LCA データ入力ツール)のデータ形式を採用しており、このツールによって入力されたデータをそのまま読み込み解析を行うことを可能にする。さらに、プロセス法だけでなく産業連関法についても感度解析を可能にする。

## 1.6 本論文の構成

第1章 序論 では、LCAにおける基礎的事項とLCAの現状と問題点について概説し、本研究の目的を示す。

第2章 マトリクス法を用いたLCA環境負担性評価 では、マトリクス法について説明し、摂動法によるLCAにおける感度解析の定式化を行う。

第3章 オブジェクト指向システム では、本システムを構築するにあたり、オブジェクト指向の概念が非常に良く適合することを示す。また、システムの概要を説明する。

第4章 LCA ツール では開発したツールを画像を交えながら解説する。

第5章 システムの検証 では、例題を用いてシステムが正しく働くことを確認する。直接計算して求めた感度と摂動法により求めた感度を値を比較する。

第6章 解析 では、開発したツールを用いて、実際に解析を行う。

第7章 結論及び将来の課題 では、本研究で得られた結論を総括する。

## 第 2 章

# マトリクス法を用いた LCA 環境負担性 評価

## 2.1 マトリクス法に基づくインベントリ解析

インベントリ分析手法において、積み上げ法は、各プロセスの環境負荷を積み上げ足しあわせるだけといった手法であるので、リサイクルなどを含む複雑なライフサイクルを表現したり、何らかのパラメータを分析時に与えて、実行したりすることが困難である。原田の提案するマトリクス法に基づくインベントリ分析手法 [8] は、プロセスの流れの中の基本要素として通常のプロセスデータに加えて、製品の出力や、マテリアルの分配等も含めた上で、要素としての定式化を行ない、解が求まるための境界条件の処理も含めて、より一般的な評価方法であり、リサイクルなどを含む複雑なライフサイクルにも容易に対応する非常に有効な手法である。Heijungs[6] は、マトリクス法を基本として感度解析を行なうことにより、各プロセス内の要素が環境負荷に与える感度を陽な形の式で提示した。ひとたび、とくべき代数方程式が陽な形で提示されれば、感度の計算が行なえるので非常に有効な方法である。さらに、Bellman の提案した摂動法 [7] を応用することにより、係数マトリクスの要素の微小変動に伴う環境負荷の変動を近似的に評価し、予測を容易にすることができる。

従来の研究により、マトリクス法及び、摂動法による感度解析は既に定式化されている。ここでは、マトリクス法の説明を簡単に行う。

### 2.1.1 問題の定式化

インベントリ解析を行う場合の手順は、まず最小要素単位であるプロセスに分解し、図 2.1 のようなプロセスツリーを構成する。図 2.1 では、プロセス  $i$  とプロセス  $j$  の 2 つのプロセスから構成されている。ここに、 $i, j$  はプロセス識別のためのインデックス、 $r, q$  は環境負荷のインデックス、 $k, l, m, n$  はマテリアル識別のためのインデックスである。プロセス  $i$  において、マテリアルやエネルギーの投入量の出力製品の単位量に対する割合を  $(a_{ki}, a_{li}, a_{mi})$  と表現し、これらを、マテリアル量と呼ぶ、また、同様に、プロセス  $i$  で発生する環境負荷の出力製品の単位量に対する割合を  $b_{ri}, b_{qi}$  と表現する。プロセスに投入される量であるとき負、プロセスから出力される量であるとき正であるものと約束する。このようなデータをインベントリデータといい、インベントリデータの要素  $a_{ki}$  や  $b_{ri}$  は出力製品 (プロセス  $i$  では  $a_{li}$ ) の単位の出力量に対して基準化した値 (出力原単位) で収集されている。LCA の評価により、各プロセスの絶対量  $p_i$  が計算される。 $p_i$  が求まると、各プロセス内のマテリアルの絶対流量はプロセスデータを  $p_i$  倍することにより得ることができる。同様に、環境負荷  $r$  に及ぼす

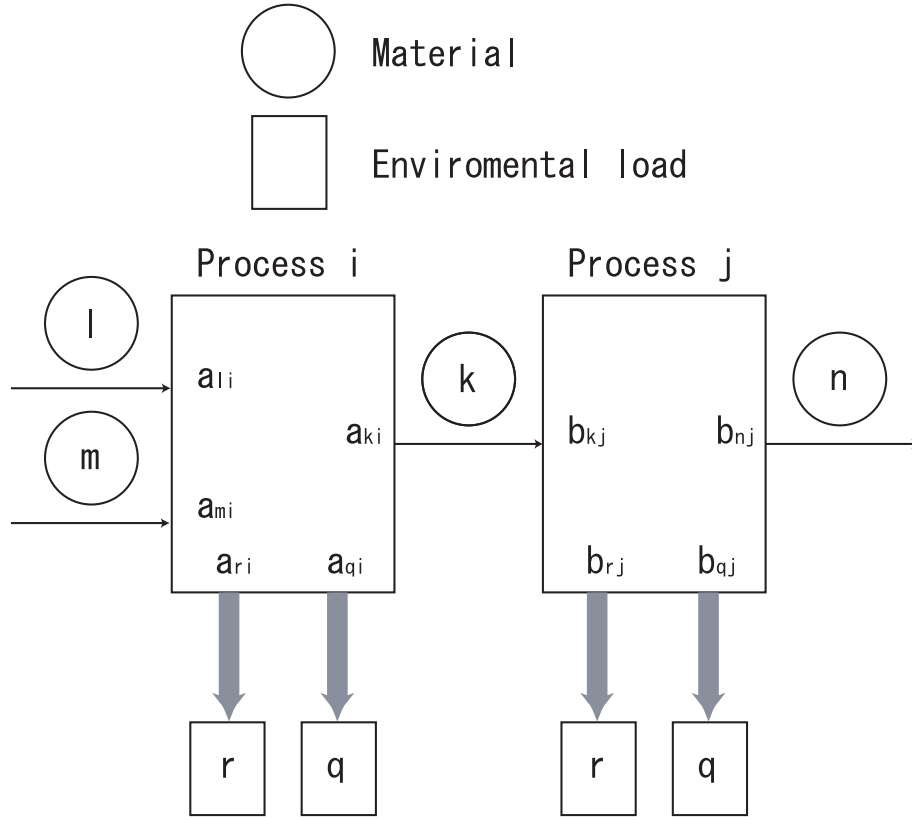


図 2.1: プロセスツリーの例

寄与は  $b_{ri}$  の  $p_i$  倍により計算される。従って、プロセスツリー全体から評価されるマテリアル  $k$  の総和  $\alpha_k$  は

$$\alpha_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} p_i \quad (2.1)$$

により評価される。同様に、環境負荷  $r$  の総和  $\beta_r$  は

$$\beta_r = \sum_{i=1}^n b_{ri} p_i \quad (2.2)$$

により評価できる。ここに  $n$  はプロセス数である。マテリアル  $k$  が系の中で閉じている場合には  $\alpha_k = 0$  となる。従って、 $\alpha_k (k = 1, 2, \dots, n)$  について境界条件が与えられた場合、

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

を解くことによりプロセス量を評価することができる。式 (2.3) を

$$AP = \alpha \quad (2.4)$$

と表現すると、 $P$ は

$$P = A^{-1}\alpha \quad (2.5)$$

により求め、環境負荷ベクトル $\beta$ は

$$\beta = BP \quad (2.6)$$

により求まる。ここに、

$$\beta = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{k1} & \cdots & b_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$k$  は環境負荷の数、 $B$ は環境負荷マトリクスである。

## 2.2 感度解析

感度解析とは、材料の流入・流出量が変化したときに環境負荷に与える影響度の解析である。ここでは、2.1で表した、マトリクス法によるマテリアルフロー、及び環境負荷の記述に基づいた感度解析の説明を行う。

### 2.2.1 摂動法を用いたプロセス量の変動量の評価

係数マトリクス  $A$  中の  $ij$  要素  $a_{ij}$  が  $\Delta a_{ij}$  だけ微小変動したとすると、プロセス値  $P$  も連動して  $\Delta P$  だけ変動する。このプロセス値の変動量は感度解析と密接な関係にあり、これまでの研究により摂動法の適用によって以下のことが分かっている。期待構造  $\bar{A}$  に対するプロセス値の解を  $P^0$  とするとき変動後のプロセス値の解は

$$P = P^0 + P^I \Delta a_{ij} + P^{II} \Delta a_{ij}^2 + \dots \quad (2.8)$$

と表せ、プロセス値の変動  $\Delta P$  は

$$\Delta P = P - P^0 \quad (2.9)$$

である。

ここで、摂動法の手順によって、確定項  $P^0$ 、一次変動率  $P^1$ 、二次変動率  $P^2$  は次式のように導くことができる。

$$P^0 = \bar{A}^{-1} \alpha \quad (2.10)$$

$$P^I = -\bar{A}^{-1} A^I P^0 \quad (2.11)$$

$$P^{II} = -\bar{A}^{-1} A^I P^I \quad (2.12)$$

$$(2.13)$$

従って、一度逆マトリクス  $\bar{A}^{-1}$  を求めて保存しておけば  $P$  の変動量は単純なマトリクスの積で得ることができる。 $\Delta P$  を用いて環境負荷ベクトルの変動  $\Delta \beta$  は

$$\Delta \beta = B \Delta P \quad (2.14)$$

を計算することによって得ることができる。よって、環境負荷の変動の一次近似解  $\Delta \beta$  は

$$\Delta \beta = -B \bar{A}^{-1} A^I P^0 \Delta a_{ij} \quad (2.15)$$

と表すことができる。



## 2.2.2 環境負荷に対する感度解析

係数マトリクス  $\bar{A}$  の要素  $a_{ij}$  が  $\Delta a_{ij}$  変動し、その変動によって  $k$  番目の環境負荷値が  $\beta_k$  から  $\Delta\beta_k$  だけ変動したとき、影響度評価の指標として次式の  $d_{ij}^k$  を用いる。

$$s_{ij}^k = \frac{\Delta\beta_k/\beta_k}{\Delta a_{ij}/a_{ij}} = -\frac{a_{ij}}{\beta_k} p_j^0 \sum_l b_{kl} a_{li}^{-1} \quad (2.16)$$

これにより、 $P^0$  と  $\bar{A}^{-1}$  を一度算出しておけば感度  $s_{ij}^k$  は容易に求めることができる。

## 2.2.3 感度のマトリクス表示

式 (2.16) より、 $k$  番目の環境負荷に対する感度を以下のように一括表示したマトリクス  $S_k$  を定義する。

$$S_k \equiv \begin{bmatrix} s_{11}^k & \cdots & s_{1n}^k \\ \vdots & & \vdots \\ s_{n1}^k & \cdots & s_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

式 (2.16) の表現は、 $B$  や  $\bar{A}^{-1}$  の成分から計算する形で表記されているため、式 (??) の  $S_k$  の全成分を計算するには多くの計算が必要になる。そこで、効率化のため、 $S_k$  を摂動法を用いて  $B$  や  $\bar{A}^{-1}$  の陽な形で表記すると以下の式を得る。

$$S^k = E^t e_k P^{0t} * A \quad (2.18)$$

このとき、

$$E = -\beta_{diag} B \bar{A}^{-1} \quad (2.19)$$

$$e_k = \{e_i\}, e_i = \begin{cases} 1 & \text{for } i = k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\beta_{diag} = \begin{bmatrix} 1/\beta_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1/\beta_n \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

である。また、 $*$  は次式で定義されるマトリクスの演算子である。

$$[z_{ij}] = [x_{ij}] * [y_{ij}] \quad (2.22)$$

$$z_{ij} = x_{ij} * y_{ij}$$

式 (2.18) で、環境負荷項目によって変化する部分は  $e_k$  のみであるから、各種負荷項目に対する影響度評価は、少ない計算回数で実施することができる。

## 2.3 要素変動に対する環境負荷の変動

マトリクス  $A$  の単一要素  $a_{ij}$  が  $\Delta a_{ij}$  だけ微小変動したときの、環境負荷変動の第一次近似  $\Delta\beta$  は式 (2.15) によって、簡便に評価できることを示したが、従来の研究により、さらに  $\Delta a_{ij}$  から  $\beta$  の高精度近似解も閉じた形式で表現できることがわかっている。ここでは、式の簡便性を優先するため、 $\Delta a_{ij}$  のことを  $\epsilon$  と記述する。

まず単一要素の変動の場合、

$$|a_{ji}^{-1}\epsilon| \ll 1 \quad (2.23)$$

の条件を満足する範囲において  $\Delta\beta$  は、

$$\Delta\beta = -\frac{p_j^0\epsilon}{1+a_{ji}^{-1}\epsilon}BA_i^{-1} \quad (2.24)$$

と閉じた形で解を求めることができる。式 (2.24) の計算は一次変動率を評価する式 (2.15) と比較しても特別に計算量が多くはなく、しかもより高精度の環境負荷変動値を評価できるという利点がある。

また、複数要素の変動の場合、

$$\Delta\beta = B\Delta P = B\sum_{k=1}^{\infty}(-\bar{A}^{-1}\Delta A)^k P^0 \quad (2.25)$$

という形で  $\Delta\beta$  は評価できる。

### 2.3.1 単一要素の微小変動に伴う環境負荷変動の線形性

マトリクス  $A$  の単一要素  $a_{ij}$  が  $\Delta a_{ij} = \epsilon$  だけ微小変動したときの高精度環境負荷変動近似式 (2.24) は、 $a_{ji}^{-1} = 0$  の時には、

$$\Delta\beta = -p_j^0\epsilon BA_i^{-1} \quad (2.26)$$

となり、線形となる。ここでは、実際の計算上においても、マトリクス  $A$  の単一要素  $a_{ij}$  が  $\Delta a_{ij} = \epsilon$  だけ微小変動したときに、 $a_{ji}^{-1} = 0$  ならば、環境負荷変動は線形性を有することを示す。

マトリクス  $A$  の単一要素  $a_{ij}$  が  $\Delta a_{ij} = \epsilon$  だけ微小変動したときの係数マトリクスを  $A^{(\epsilon)}$ 、その逆行列を  $(A^{(\epsilon)})^{-1}$  と表すものとする。

$A^{(\epsilon)}$  は、

$$A^{(\epsilon)} = \bar{A} + A^I\epsilon \quad (2.27)$$

となる。また、プロセス量  $P$  の 1 次近似式は、式 (2.15) より、

$$P = P^0 - \bar{A}^{-1} A^I P^0 \epsilon \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} &= (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) P^0 \\ &= (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) \bar{A}^{-1} \alpha \end{aligned} \quad (2.29)$$

となる。

ここで、 $F = (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) \bar{A}^{-1}$  とおき、 $F$  が  $A^{(\epsilon)}$  の逆行列となっていることを証明する。

(命題)  $a_{ji}^{-1} = 0$  であるとき、 $F = (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) \bar{A}^{-1}$  は、 $A^{(\epsilon)}$  の逆行列である。

(証明)

$$\begin{aligned} A^{(\epsilon)} F &= (\bar{A} + A^I \epsilon) (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) \bar{A}^{-1} \\ &= I + A^I \bar{A}^{-1} A^I \bar{A}^{-1} \epsilon^2 \\ &= I + a_{ji}^{-1} \epsilon^2 F_i \end{aligned} \quad (2.30)$$

となる。ただし、

$$F_i = [f_{lm}] \quad (2.31)$$

$$f_{lm} = \begin{cases} a_{jm}^{-1} & \text{if } l = im = 1 - n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.32)$$

とする。以上により、 $a_{ji}^{-1} = 0$  のとき、

$$A^{(\epsilon)} F = I \quad (2.33)$$

である。つまり、

$$A^{(\epsilon)} F = F A^{(\epsilon)} = I \quad (2.34)$$

であるので、 $F$  は、 $A^{(\epsilon)}$  の逆行列である。(証明終)

マトリクス  $A$  の単一要素  $a_{ij}$  が  $\epsilon$  だけ微小変動したとき、式 (2.4) より、プロセス量  $P$  は、

$$A^{(\epsilon)} P = \alpha \quad (2.35)$$

を満たす。 $A^{(\epsilon)}$  の逆行列  $(A^{(\epsilon)})^{-1}$  は、 $a_{ji}^{-1} = 0$  のとき、

$$(A^{(\epsilon)})^{-1} = F = (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) \bar{A}^{-1} \quad (2.36)$$

であるので、プロセス量  $P$  は、

$$\begin{aligned} P &= (A^{(\epsilon)})^{-1} \alpha \\ &= (I - \bar{A}^{-1} A^I \epsilon) \bar{A}^{-1} \alpha \\ &= \bar{A}^{-1} \alpha - \epsilon \bar{A}^{-1} A^I \bar{A}^{-1} \alpha \\ &= P^0 - \bar{A}^{-1} A^I P^0 \epsilon \end{aligned} \quad (2.37)$$

となり、式 (2.28) と一致する。

よって、 $a_{ji}^{-1} = 0$  であるときには、実際の環境負荷変動と環境負荷変動の 1 次近似式と一致し、線形となる。この時、変動範囲の制限はない。

$a_{ji}^{-1} = 0$  であれば、線形であるので、感度解析の結果のみから環境負荷変動の予測を行なうことができる。一方、 $a_{ji}^{-1} \neq 0$  である時には、非線形であるので、環境負荷変動の様子を式 (2.24) を使って計算する必要がある。

また、単一要素  $i, j$  が微小変動するとき、環境負荷ベクトル  $\beta$  は式 (??) より、次のように表せる。

$$\Delta \beta = B \Delta P_{ij} = -B \bar{A}^{-1} A^I_{ij} P^0 \epsilon_{ij} + B (\bar{A}^{-1} A^I_{ij})^2 P^0 \epsilon_{ij}^2 - \dots \quad (2.38)$$

これより、第  $k$  番目成分を取り出すと、

$$\begin{aligned} \Delta \beta_k &= -p_j^0 \sum_l b_{kl} a_{li}^{-1} \epsilon_{ij} + a_{ji}^{-1} p_j^0 \sum_l b_{kl} a_{li}^{-1} \epsilon_{ij}^2 - \dots \\ &= \beta_{ij,k}^I \epsilon_{ij} - a_{ji}^{-1} \beta_{ij,k}^I \epsilon_{ij}^2 + (a_{ji}^{-1})^2 \beta_{ij,k}^I \epsilon_{ij}^3 - \dots \end{aligned} \quad (2.39)$$

が得られる。ここで、

$$-p_j^0 \sum_l b_{kl} a_{li}^{-1} = \beta_{ij,k}^I \quad (2.40)$$

とおいた。 $\beta_{ij}^I = -B \bar{A}^{-1} A^I_{ij}$  を  $\epsilon_{ij}$  における  $\beta_k$  に対する一階感度ベクトルとよび、 $\beta_{ij,k}^I$  を  $\epsilon_{ij}$  における  $\beta_k$  に対する一階感度ベクトルの第  $k$  成分とする。

式 (2.39) より、 $|a_{ji}^{-1}|$  と  $|\beta_{ij,k}^I|$  が大きいほど非線形性が強い。

## 第 3 章

# オブジェクト指向システム

## 3.1 オブジェクト指向を用いたツール開発

従来の手続き型プログラミングでは、必要とされる動作を順次列挙して行くことで目的の機能を得ようとしてきた。これに対してオブジェクト指向プログラミングは、計算機内に抽象化された「物」(これをオブジェクト呼ぶ)を必要な数だけ作り、これらの間の関係を記述することで目的の機能を得る。現実の世界で起こる現象は全て物と物の相互作用で生じるのであるから、オブジェクト指向はより直接的に現実世界を計算機内でシミュレートできる手法であると言える。

## 3.2 オブジェクト指向

### 3.2.1 カプセル化

手続き型言語では、モジュールの独立性はファイル単位、または関数単位といったレベルで実現されており、データと手続きの間には何の関係も定義できなかった。そのため、データ A 専用の手続きで、誤ってデータ B を操作してしまうといった危険性が常に存在した。

これに対してオブジェクト指向では、データとそれを操作する手続きをひとまとめにして、オブジェクトという単位でモジュールの独立性を実現することができる。

このためオブジェクト指向では、あるデータに対して誤った操作をする危険性を非常に小さくできる。例えば、誤ったデータ操作に対して自己の状態を自動的に回復するような手続きをオブジェクト内に用意しておくことなども可能である。このようなモジュールの独立機構をカプセル化という。

### 3.2.2 抽象化

抽象化とは、あるオブジェクトを定義するときその実体を隠し、外界とのやりとりをする部分のみで表現しようとする考え方である。実体は異なって見えても、抽象化すれば同じ物として表現できる物は多い。例えば、通信ケーブルとフロッピーディスクはともにデジタルデータを輸送する物という点で等しい。

高度に抽象化されたオブジェクト群は、実装の異なる複数のオブジェクトに対して共通のインターフェースを提供することができる。

Class Name	Function
Process	個々のプロセスのデータの管理
LCA	プロセスデータの入出力を含む LCA 評価の管理
Array	一次配列の管理
Matrix	行列のデータ及び計算の管理

表 3.1: 主なクラスとその機能

### 3.2.3 オブジェクトとメッセージ

手続き型言語のプログラミングは、データの集合に対する手続きを時系列に沿って並べていくことで行われる。この方法は一見わかりやすいように思えるが、実は CPU が仕事をするべき順番をわざわざ人間が決めてやっているということであり、「コンピュータは人間の指示がなければ何もできない」と言われることの結縁になっている。これに対してオブジェクト指向では、あらゆる機能はオブジェクトからオブジェクトへのメッセージとして実現される。いわばオブジェクト間の関係を記述することがオブジェクト指向プログラミングであり、より現実の思考に近い形でのプログラミングが可能である。

## 3.3 本システムのプログラムの流れ

### 3.3.1 プロセス法

表 3.1 に本システムの開発に使用したクラスのうち代表的なものを機能と共に挙げる。このうち、解析の中心部分であるクラス LCA のオブジェクトの概念図を図 3.1 に示す。図中の丸い枠が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の信号に対して、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。

本システムでは日本の国家プロジェクトである LCA プロジェクトにおいてインベントリデータの収集に用いられているツール (LCA データ入力ツール) のデータ形式を採用しており、このツールによって入力されたデータをそのまま読み込み解析を行うこと

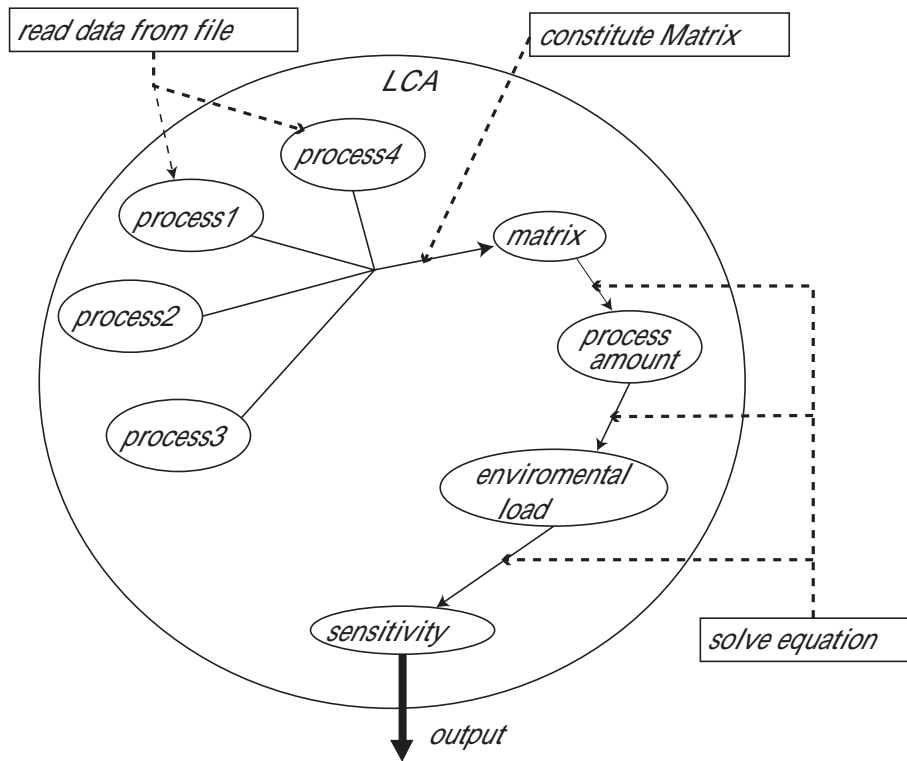


図 3.1: LCA オブジェクトの概念図

が可能となっている。

図 3.1において、各プロセスはこの形式で記述されたファイルから読み込まれ、同時に Process オブジェクトとして LCA オブジェクトの中に保有される。さらに、プロセスからマトリクスを組み立てるメソッドを呼び出し、Matix オブジェクトとして係数行列と環境負荷行列をつくる。境界条件をにユーザーに入力してもらい、プロセス量を得、環境負荷行列を乗じて環境負荷ベクトルを算出する。最後に感度マトリクスを導出する。計算が終了すると、結果だけでなく途中のプロセス量や環境負荷ベクトルも表示し、またファイルに出力することが可能である。

### 3.3.2 産業連関法

こちらは表 3.1のクラスのうち、クラス Array とクラス Matrix のみを用いる。生産高ベクトルと投入係数行列および直接排出強度ベクトルを決まった形式のファイルから読み込み、逆行列係数行列、排出原単位ベクトル、環境負荷ベクトル、感度マトリクスを順に算出する。



## 第 4 章

### LCA ツール

## 4.1 GUI画面

本 LCA ツールの動作画面を示す。

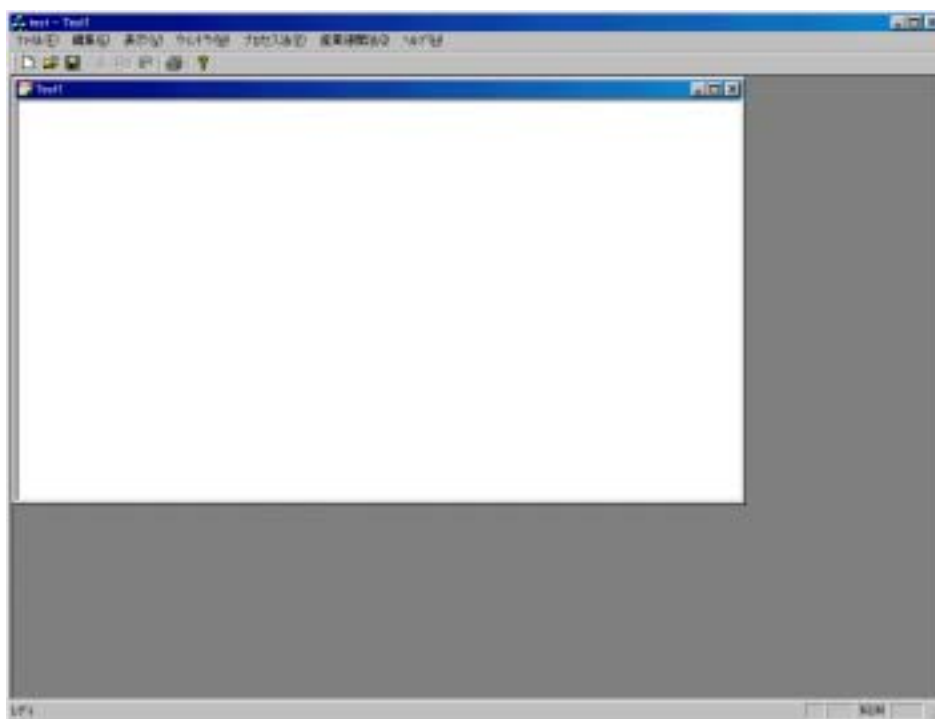


図 4.1: 初期画面

図 (4.1) は解析ツールを起動した直後の画面である。昨年度開発された解析ツールは全てコマンドを打ち込んで、作業を進めていくものだったが、メニューを選ぶことにより、対話的に処理をすることができる (図 (4.2))

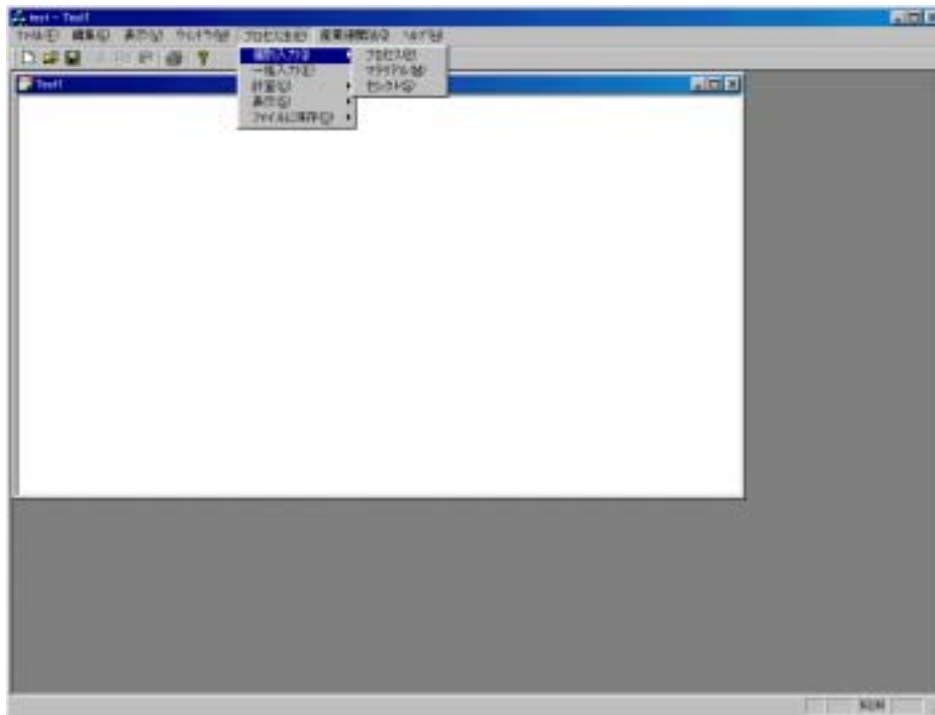


図 4.2: メニュー画面

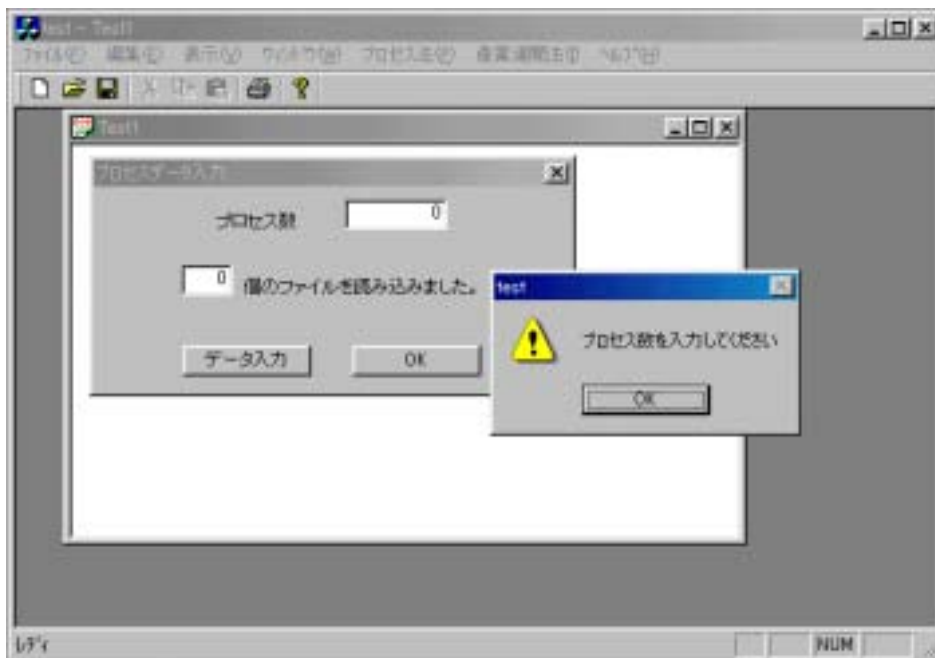


図 4.3: エラー画面

また、手順に従わない操作をしようとする、図 (4.3) のようにダイアログボックスを表示して、方向を修正する。

## 4.2 解析の流れ

本 LCA ツールの操作手順を簡単に示す。プロセス解析をするならば、まずメニューからプロセス法を選び (図 (4.2)) データファイルを読み込む。

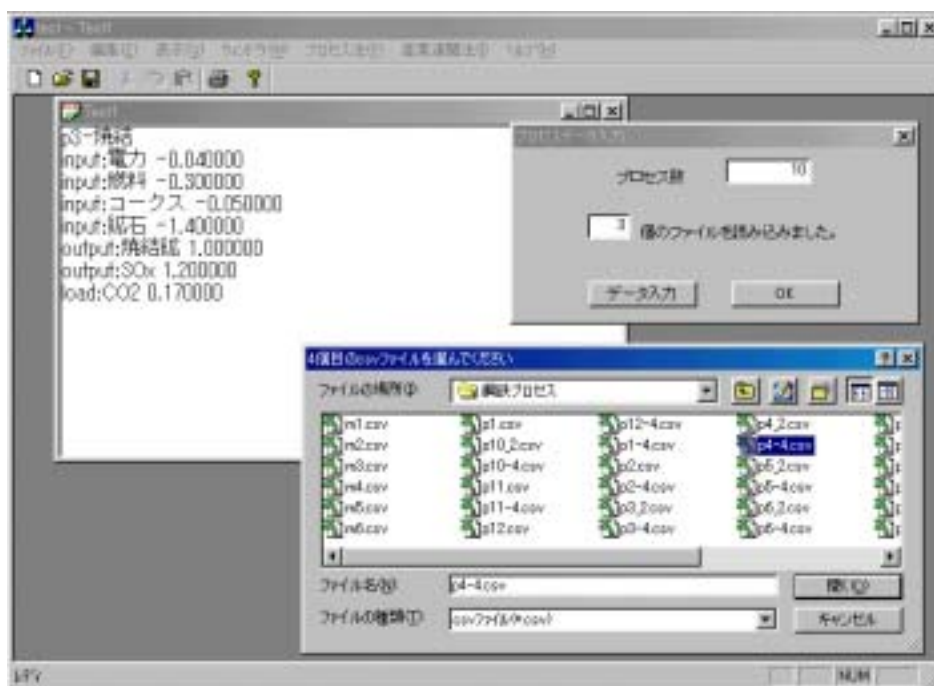


図 4.4: 読み込み/書き込みファイル選択画面

このように、読み込む、あるいは書き出すファイルを指定する際にも、グラフィカルなインターフェースのため、直感的な操作が可能である。図 (4.5) は第 (3) 章で説明した LCA プロジェクトで用いられるフォーマットのデータである。

実際のプロセスデータを扱う際には、膨大な数のファイル・データを読み込む必要があるが、各ファイル一つ一つ手作業で読み込んでいくのは非効率である。そのため、あらかじめ読み込む手順をファイルに書いておき、一括処理をする機能も有するシステムを開発した。(図 (4.6))

ファイルの読み込みが完了したら、「計算」ボタンをクリックすると自動的に係数マトリクス  $A$ 、環境負荷マトリクス  $B$  とマテリアルの総和のマトリクス  $\alpha$  を形成し、第

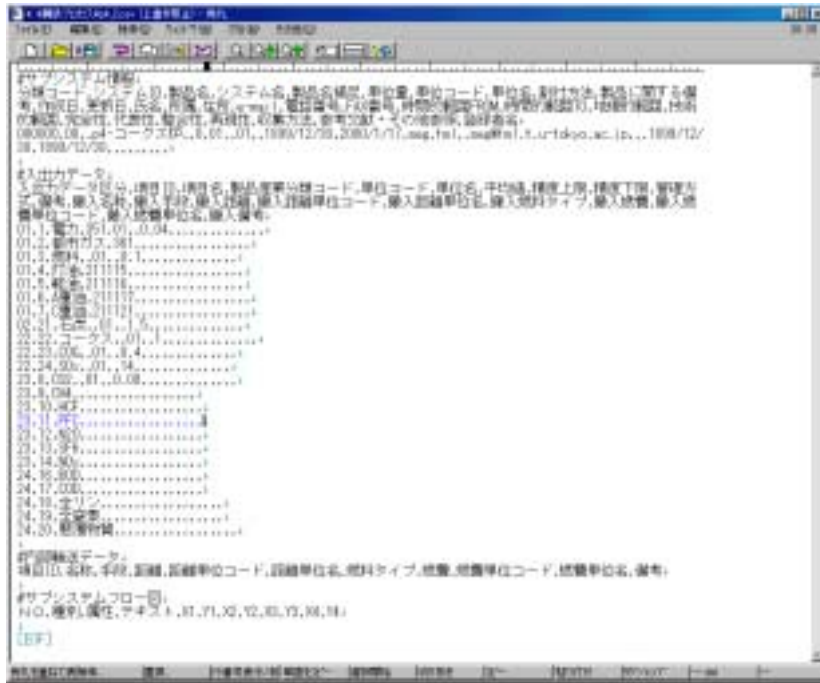


図 4.5: プロセス単位の読み込み形式のファイル

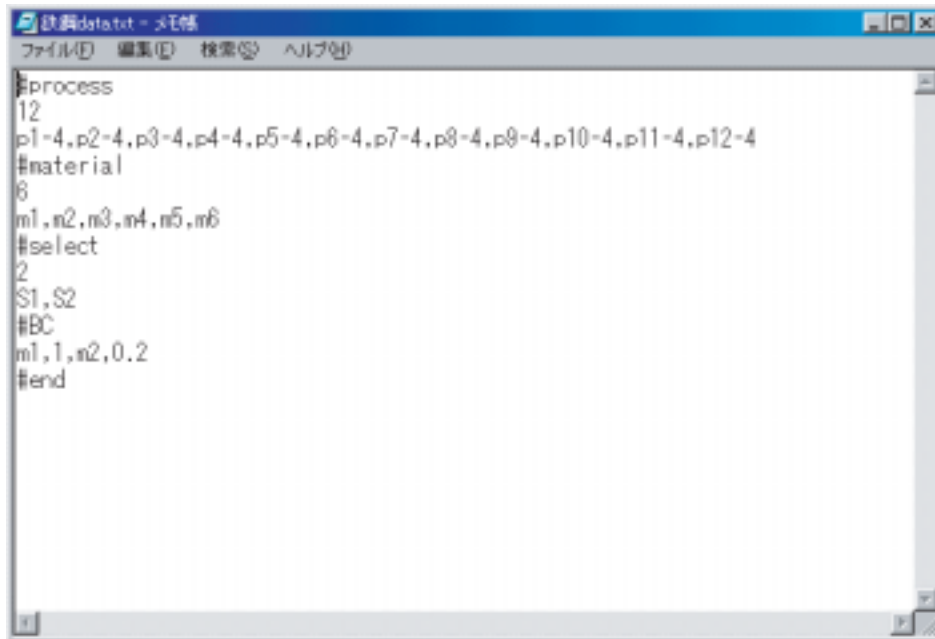


図 4.6: 一括読み込み形式のファイル

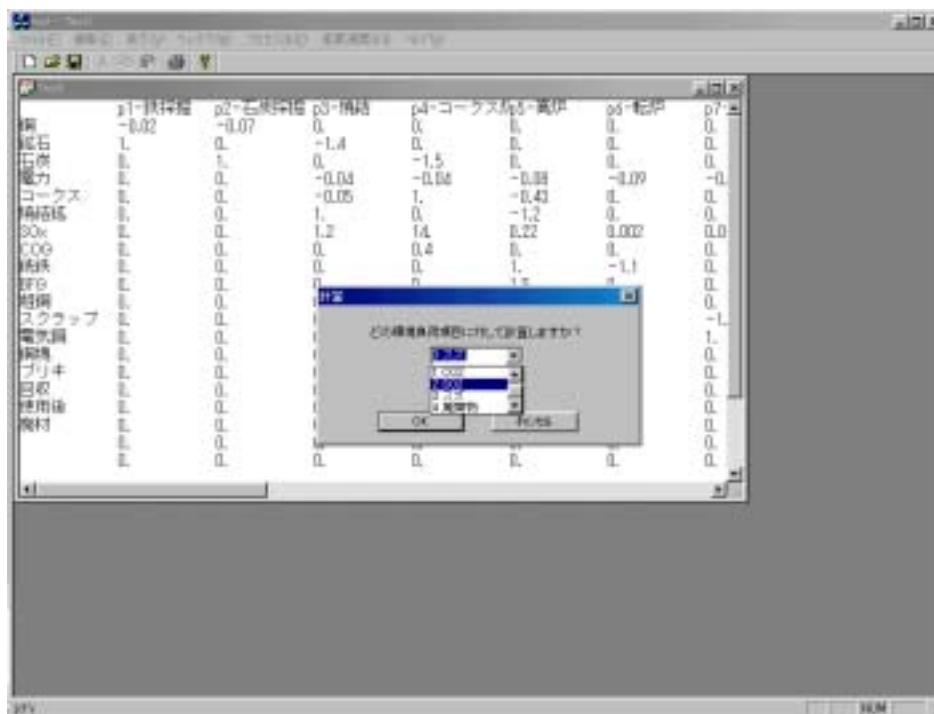


図 4.7: 環境負荷項目選択画面

2章に沿って、図(4.7)のダイアログで選択した環境負荷に対する感度マトリクス  $S_j$  を導出する。



図 4.8: 産業連関法画面

また、産業連関法についても感度マトリクスを求め、解析を行うことが可能である。具体的には生産高ベクトル、投入係数行列、直接排出強度ベクトルを読み込み、逆行行列係数行列、排出原単位ベクトル、環境負荷ベクトルを順に計算し、感度マトリクスを導出する。

## 第 5 章

### システムの検証



## 5.1 例題

図 5.1 の様なインベントリーフローを例題のモデルとして採用し、直接法及び、摂動法を用いて感度をそれぞれ求め比較することで、(2.16) の妥当性を示すとともに、システムが正しく感度マトリクスを求めていることを確認する。

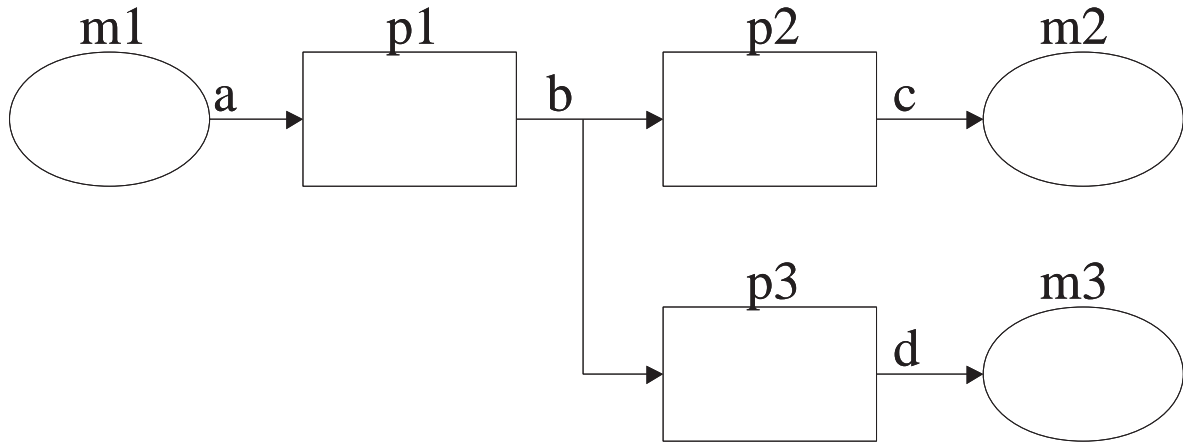


図 5.1: 単純分岐モデルのインベントリーフロー

表 5.1: 例題において設定されている数値

マテリアル	process				の総和
	process1	process2	process3	m1	
a	-1	0	0	1	0
b	1	-1	-1	0	0
c	0	1	0	0	1
d	0	0	1	0	1
環境負荷					
load	1	0.1	0.4	0	

表 (5.1) における諸数値を使って、本論文で定義した  $\bar{A}$ 、 $\alpha$ 、および  $B$  を表すと、

以下の値となる。

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 & 0.4 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$\bar{\mathbf{A}}$  の逆行列  $\bar{\mathbf{A}}^{-1}$ 、および、これらの値から計算される環境負荷  $\beta$  は、

$$\bar{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

となる。

### 5.1.1 感度マトリクス

直接法で  $\bar{\mathbf{A}}$  の要素の数だけ逆行列を計算して求めた感度を  $S_0^{load}$  とする。一方、摂動法を適用したシステムを用いて感度を求めこれを  $S_1^{load}$  とすると、

$$S_0^{load} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.857 & 0.571 & 0.285 & 0 \\ 0 & -0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.4 & 0 \end{bmatrix}, S_1^{load} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.857 & 0.571 & 0.285 & 0 \\ 0 & -0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.4 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

となり、二つの結果が一致しており、式 (2.16) の妥当性を示すものである。 $(\mathbf{A})$  の要素を直接変動させ、その都度逆行列を求める直接法と比較して、少ない計算回数ですむ。

## 5.2 単一要素の微小変動に伴う環境負荷の高精度近似評価

式 (2.24) の妥当性を検証するため、 $a_{23}$ 、 $a_{32}$ 、 $a_{43}$  が微小変動するときの  $\beta_1$  (*load*) の変動の評価精度を調べる。計算結果を図 (5.2) に示す。実線が、式 (2.24) による評価 (*Perturbation Method*) であり、それぞれ、 $a_{23}$ 、 $a_{32}$ 、 $a_{43}$  が微小変動するときの  $\beta_1$  の変動を示す。●、○、及び、△ は、直接計算に基づく結果 (*Direct Method*) を表し、それぞれ  $a_{23}$ 、 $a_{32}$ 、 $a_{43}$  が微小変動するときの  $\beta_1$  の変動を示す。両手法での計算結果が良く一致していることから、 $\epsilon$  が十分小さい範囲 (条件  $|a_{12}^{-1}\epsilon| \ll 1$  を満足する範囲)

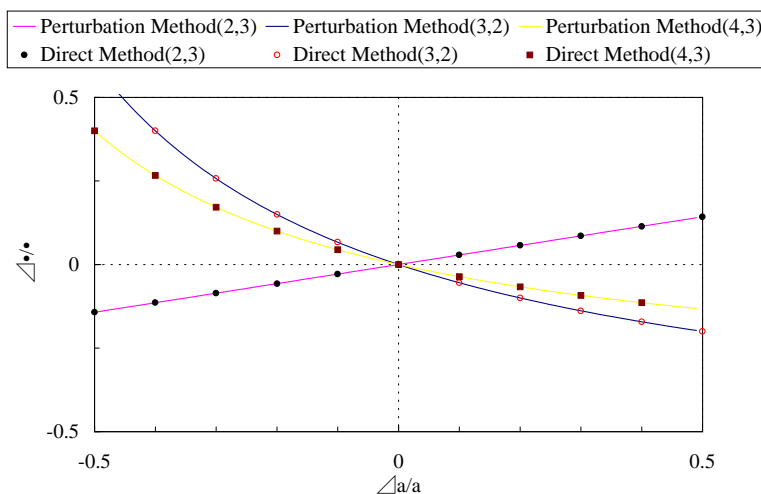


図 5.2: 単純分岐モデル

では、式 (2.24) は、かなり高精度な近似解を得ることが分かる。これにより、摂動法による感度解析を行う本システムの妥当性が検証された。また、各要素の  $a_{ji}^{-1}$  と一階感度ベクトルの第 1 成分の値  $\beta_{ij,1}^I$  は以下のようなものである。

要素	2, 3	3, 2	4, 3
$a_{ij}$	-1	1	1
$a_{ji}^{-1}$	0	1	1
$\beta_{ij,4}^I$	-1	-2.1	-1.4

$a_{23}$  が微小変動するときの  $\beta_1$  の変動は、 $a_{32}^{-1} = 0$  であるので、線形となっている。また、 $a_{32}$ 、 $a_{43}$  のそれぞれが微小変動するときの  $\beta_1$  の変動は、 $a_{23}^{-1} = a_{34}^{-1} = 1$  かつ  $|\beta_{32,1}^I| = 2.1 > |\beta_{43,1}^I| = 1.4$  であるので、 $a_{32}$  が微小変動するときの  $\beta_1$  の変動の方が、 $a_{43}$  が微小変動するときの  $\beta_1$  の変動より非線形性が強い。

## 第 6 章

### 解析

## 6.1 リサイクルを含むモデルの解析

ここでは開発したシステムを用いて実際に解析を行う。

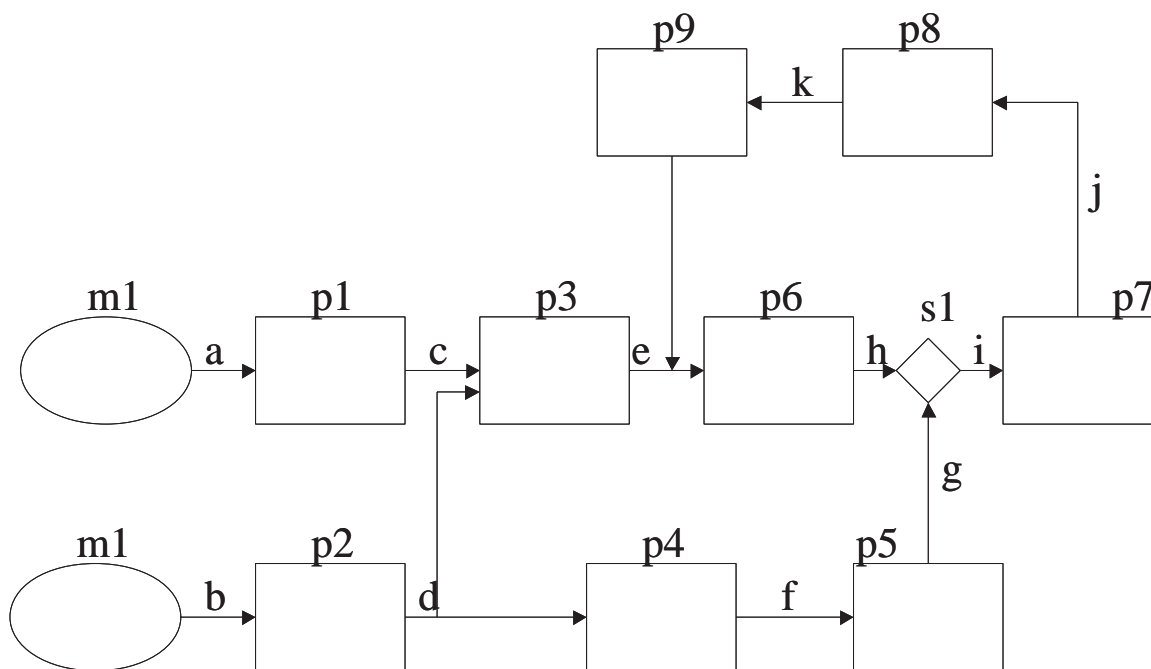


図 6.1: リサイクルを含むモデルのインベントリフロー

このフロー [10] は日本電気株式会社の開発した LCA ソフト、LCA サポートの適用例の説明において、計算が難しいとされていたリサイクル型モデルである。本章ではこのモデルについて感度解析を行う。環境負荷  $L1$  について解析を行うものとする。

以下の図の統合マトリクスの見方であるが、例えば、表 (6.1) の  $p3$  以下の列を見ると、プロセス  $p3$  において、材料  $b$  が 1.2、 $d$  が 1.5 入力され、材料  $e$  を 1 出力していることを意味する。同様に、表 (6.2) から、環境負荷  $L1$  を 3、 $L2$  を 2.2 排出していることを意味する。

各々のプロセスを統合して統合マトリクス及び統合環境負荷マトリクスを形成した後、順に逆マトリクス、プロセス量、一階感度マトリクス、そして感度マトリクスを算出する。

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	m1	m2	s1
a	-1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
b	1	0	-1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c	0	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
d	0	1	-1.5	-1.4	0	0	0	0	0	0	0	0
e	0	0	1	0	0	-2	0	0	1	0	0	0
f	0	0	0	1	-0.9	0	0	0	0	0	0	0
g	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.4
h	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-0.6
i	0	0	0	0	0	0	-1.2	0	0	0	0	1
j	0	0	0	0	0	0	1	-1.2	0	0	0	0
k	0	0	0	0	0	0	0	1	-0.7	0	0	0
m2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

表 6.1: リサイクル型モデル統合 A マトリクス

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	m1	m2	s1
L1	2	0.2	3	0	0.1	1.2	0.4	0	1.1	0	0	0
L2	0	1	2.2	1.3	0.3	0.7	1.1	4	1.5	0	0	0

表 6.2: リサイクル型モデル統合環境負荷マトリクス

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	m1	m2	s1
a	0	1	-0.61	-0.31	0.74	-0.43	-0.39	1.48	0.74	0.88	1.06	0.61
b	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
c	0	0	-0.51	-0.25	0.62	-0.36	-0.32	1.24	0.61	0.74	0.88	0.51
d	0	0	-0.88	-0.44	-0.66	0.38	0.34	-1.32	-0.66	-0.79	-0.95	0.88
e	0	0	-0.98	-0.49	-0.74	-0.69	0.38	-1.47	-0.73	-0.88	-1.05	0.98
f	0	0	-1.47	-0.74	-1.1	-1.03	-0.93	-1.21	-1.09	-1.31	-1.58	1.47
g	0	0	-2.04	-1.02	-1.53	-1.43	-1.29	-3.06	-2.35	-1.82	-2.19	2.04
h	0	0	-1.7	-0.85	-1.28	-1.19	-1.07	-2.55	-1.96	-2.35	-1.82	1.7
i	0	0	-2.43	-1.22	-1.82	-1.7	-1.53	-3.65	-2.8	-3.36	-4.03	2.43
j	1	1.2	-0.73	-0.37	0.89	-0.51	-0.46	1.78	0.88	1.06	1.27	0.73
k	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
L1	0	0	-2.45	-1.23	-1.84	-1.72	-1.54	-3.68	-1.82	-2.19	-2.63	2.45

表 6.3: リサイクル型モデル統合逆マトリクス

0.61  
2  
0.51  
0.88  
0.98  
1.47  
2.04  
1.7  
2.43  
0.73  
1  
2.45

表 6.4: リサイクル型モデル統合プロセス量

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	m1	m2	s1
a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b	-1.22	-4	-1.02	-1.76	-1.96	-2.94	-4.09	-3.4	-4.86	-1.47	-2	-4.9
c	5.2	17.01	4.34	7.51	8.34	12.51	17.38	14.48	20.69	6.24	8.51	20.85
d	2.48	8.11	2.07	3.58	3.97	5.96	8.28	6.9	9.86	2.98	4.05	9.94
e	0.42	1.36	0.35	0.6	0.67	1	1.39	1.16	1.66	0.5	0.68	1.67
f	3.47	11.35	2.89	5.01	5.56	8.35	11.59	9.66	13.8	4.17	5.68	13.91
g	3.06	10.02	2.55	4.42	4.91	7.37	10.23	8.52	12.18	3.68	5.01	12.28
h	0.1	0.32	0.08	0.14	0.16	0.24	0.33	0.27	0.39	0.12	0.16	0.4
i	1.28	4.2	1.07	1.85	2.06	3.09	4.29	3.57	5.11	1.54	2.1	5.15
j	1.3	4.24	1.08	1.87	2.08	3.12	4.33	3.61	5.15	1.56	2.12	5.2
k	1.56	5.09	1.3	2.24	2.49	3.74	5.2	4.33	6.19	1.87	2.54	6.24
m2	-5.2	-17.01	-4.34	-7.51	-8.34	-12.51	-17.38	-14.48	-20.69	-6.24	-8.51	-20.85

表 6.5: リサイクル型モデル統合一階感度マトリクス

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	m1	m2	s1
a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b	-0.14	0	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
d	0	0.95	-0.36	-0.59	0	0	0	0	0	0	0	0
e	0	0	0.04	0	0	-0.24	0	0	0.19	0	0	0
f	0	0	0	0.59	-0.59	0	0	0	0	0	0	0
g	0	0	0	0	0.58	0	0	0	0	0	0	-0.58
h	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0	0	-0.03
i	0	0	0	0	0	0	-0.61	0	0	0	0	0.61
j	0	0	0	0	0	0	0.51	-0.51	0	0	0	0
k	0	0	0	0	0	0	0	0.51	-0.51	0	0	0
m2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0

表 6.6: リサイクル型モデル統合感度マトリクス



感度マトリクスのなかで絶対値の大きい要素は順に  $s^k_{32}$ 、 $s^k_{42}$ 、 $s^k_{97}$  である。これらの要素のプロセスにおけるマテリアルの変動が環境負荷  $L1$  の排出に関してが最も影響が大きいと言える。つまり、このリサイクル型モデルフローにおいて環境負荷  $L1$  に対して環境負荷改善を考えると、以上の項目の改善を考えるのが最も効果的であると言える。

## 第 7 章

### 結論及び将来の課題

本研究では、開発したシステムの利点は以下にあることを示した。

- 感度解析機能を有することで、容易に定量的な環境影響度の評価が可能になった。
- LCA プロジェクトの規格にあったファイルを読み込めるようにし、パブリックデータベースへのアクセスを容易にした。
- 摂動法を応用して環境負荷排出量の算出の際に求まる逆行列を用いて評価することで、大きく計算負荷を減らした。
- GUI インターフェースで開発を行ったので直観的な操作が可能である。

一方今後の課題だが、ライフサイクルにおいて環境負荷を評価するためには幅広い範囲での精度の高いデータをそろえることが必要である。LCA プロジェクトがその目的の一つとして掲げているパブリックデータベースの構築がいち早く望まれる。また、本システムはまだまだ完成には程遠く、改善の余地が多くある。オブジェクト指向という汎用性のある開発システムであるので、今後プログラムの改善を望むものである。

# あとがき

## 謝辞

研究室に配属されて以来、酒井教授には多大な迷惑をお掛けし、卒論提出間際には毎晩遅くまでご指導頂き本当にありがとうございました。

助手の泉さんには、最後の最後で論文の方向性を示して頂き、大変助かりました。ありがとうございました。

M 2の山際さんには、計算機環境をはじめ、プログラムのことなど自分が無知なせいで本当にご迷惑をお掛けしました。また、研究以外のことで大変お世話になりました。ありがとうございました。

M 2の丹野さん、なかなかお会いする機会は少なかったけれど、同じLCAに関する研究においていろいろとアドバイスを頂いて、またプログラミングに関しても基本的なことから教えて頂き本当にありがとうございました。

ここに名前を挙げることの出来なかった方々を含め、酒井研究室にいる間にお世話になった方々に、改めてお礼を申し上げ、これを持って謝辞に返させていただきます。

著者近影



著者近影

## 参考文献

- [1] 依田 誠 , オブジェクト指向による環境負担性評価システムの開発, Master's thesis, 東京大学大学院, 平成八年度,
- [2] 横山 晃治, ライフサイクルアセスメントにおける感度及び不確定性解析, Master's thesis, 東京大学大学院, 平成十一年度,
- [3] 津本 篤, LCA を用いたプラスチック製造プロセスの環境負担性評価, 卒業論文, 東京大学大学院, 平成十一年度,
- [4] 酒井 信介, 日本鉄鋼協会, 鉄と鋼, vol.84, pp.67-74, 1998,
- [5] LCA 実務入門編集委員会, editor, LCA 実務入門, (社) 産業環境管理協会, 1998,
- [6] R. Heijungs, *A Generic Method for the Identification of Options for Cleaner Products*, *Ecological Economics*, 10, p.69-81(1994)
- [7] Bellman, R, *Perturbation Techniques in Mathematics, Physics, and Engineering*, Holt, Rinehart and Winston(1964).
- [8] 原田幸明, 「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」調査報告書, Technical report, (社) 未踏科学技術協会, 3 1996,
- [9] 原田幸明, エコマテリアルの評価手法としての LCA
- [10] 宮本 重幸・天川 雅文, LCA ソフトウェア : LCA サポートの開発と ISO14040 に準拠した LCA への適用, pp981-985,

以上

1～46 ページ 完

卒業論文

平成12年 2月4日 提出

80225 瀬川 太郎