

セメント産業におけるLCA ..... 1	耐久財の廃棄物発生とその環境負荷推定：廃棄物産業
スパイラル・デザインの提案 ..... 2	連関表の動学的拡張とその応用 ..... 10
ガラスびんの環境影響度を基準としたライフサイクル	環境影響評価としてのエクセルギー解析の可能性 14
コストのモデル構築 ..... 6	LCA インフォメーション ..... 18

## シリーズ：私の考えるLCA

### セメント産業におけるLCA

太平洋セメント株式会社  
中央研究所 第1研究部  
セメント技術グループ

佐野 奨

LCAという言葉を始め知ったのは今から5年前、第3回エコバランス国際会議の申し込み期限が迫っていた頃と記憶している。それまで環境負荷とは全く係わりのない（と当時は思っていた）業務に従事していたため縁がなかった。それがこの数年の間に一変したのは言うまでもない。今やあらゆる分野に環境は付きまとい、環境負荷を考慮することが必須となっている。それと共に環境負荷を定量的に表す手段としてLCAも急速に広がり、今ではLCA以外の環境負荷評価に係わる様々な概念が氾濫している。こうした最近の状況は企業でLCAに従事しているものにとって、いささか消化不良になっているように思う。ただし、こうした動きにより計算を行う上で最も重要かつ収集に時間の要するインベントリデータ（いわゆる原単位）が充実してきたのは非常にありがたいことである。5年前セメントもしくはコンクリートのLCAを検討しようとしても身近にデータがない。それもそのはずセメント産業自身が検討していないのだからあるはずもない。結局外部から公表された産業連関表ベースの原単位を手に入れ、なんとか形にしたのを覚えている。当然その時評価したのはCO<sub>2</sub>のみ。LCAというものとはばかれる範囲での評価であった。それが現在、CO<sub>2</sub>以外の環境負荷も比較的容易に手に入る状況にあり、多少の時間と労力を掛ければある程度ライフサイクルに近い評価も可能になりつつある。

セメント産業におけるLCAへの取組についても、積極的になったのはここ2～3年である。2度のオイルショックを経験した日本のセメント産業は、他の素材産業と同様省エネ努力を続けてきたおかげで他国と比べて

3～4割程度低いエネルギーで生産活動を行っている。しかしこうした努力により省エネ対策は既に限界に来つつあり、今では他産業や自治体から発生した廃棄物・副産物のリサイクルに注力している。現在のセメント産業におけるリサイクル量は年間2800万トンにも及び、国内のリサイクル活動の15%を担うまでになっている。また、他産業ではリサイクルが困難な都市ごみ（焼却灰）や塩ビを含んだ廃プラスチック等をセメント原燃料として活用する技術も積極的に開発し、エコセメントを代表として既にその多くが実用化されている。LCAは、こうした活動が環境へ与える影響を評価する手段としてセメント産業でも注目されており、評価の多くはこうしたリサイクル活動を取り上げたものである。また、業界としてもセメント協会内にLCAWGを設置し、製品ごとの環境負荷及び廃棄物副産物の利用に伴う環境負荷削減効果を検討してきた。ここで得られた成果の一部はLCAプロジェクトに提供され、平成15年度以降毎年最新データが公表されることになっている。

こうした検討がされる一方、現在のLCAでは気軽にリサイクル活動の評価を行い、企業がその実利を見出すことは難しい。既に多くの方がこのシリーズで述べている統合手法の未発達および環境負荷に対する統一した見解の不在がその理由の1つである。また、環境負荷低減技術を開発しその効果を確認しても法的な制約で実用化できないものもある。さらに、結局のところ最終的にはコストで判断されてしまうのが今の現実である。環境負荷低減に有効かつコストも低い技術が理想であるのは理解できるが、そうした考え方自体がリサイクル・環境負荷低減にそぐわない社会システムとも言えよう。

必ずしもセメント産業が進んでいる訳ではないが、既にLCAを単純に環境負荷の情報公開用のツールとして利用することは当たり前のものになりつつある。今後は、リサイクル・環境負荷低減に向けた社会システムの変革を促すような使われ方を目指し、最終的にはわざわざLCAと銘打って公表せずとも企業活動及び普段の生活に自然に溶け込み、環境負荷の低い技術・製品が選択されるようになることを望みたい。

## スパイラル・デザインの提案

日本アイ・ビー・エム(株)  
ユーザエクスペリエンス・デザインセンター  
東京大学 大学院新領域創成科学研究科 山崎 和彦

### 概要

本研究はネットワーク・コンピューティング時代における情報技術を利用した人工物のデザイン手法の方向性を示すことを目的としている。ここでは、まずデザインの役割を人工物という視点より再確認し、道具の製作者と使用者の関わりからみたデザインの流れを過去より分析している。そしてネットワーク・コンピューティング時代における情報技術を利用した人工物のデザインのために、従来の工業デザイン手法に代わるアプローチとしてスパイラル・デザインという概念を提案している。スパイラル・デザインは人工物のライフサイクルのすべてとすべての人をデザイン対象とし、人間中心にデザイナーが多く分野の専門家やユーザとコラボレーションをするデザイン・アプローチである。それは人工物のライフサイクルが上昇するスパイラルのような形であることから名付けられている。

ここではスパイラル・デザインを実現する方法として、すべてのユーザとすべてのライフサイクルに対応するために、関連するデザイン情報を整理する手法としてSD(Spiral Design)マトリックスを提案する。

### 1. はじめに

#### 1.1 背景

情報機器は従来の工業製品と異なり、使い方が分かりにくい、ハードウェアとソフトウェアが組み合わされている、ユーザがいろいろな目的に使う、使っているうちに目的や仕様に変化するなど従来のデザイン手法がその

まま適応できない場合が多い[1]。一方デザインとは、その人工物(もの)とその人工物と人間の関わり合い(こと)を対象に、その形を規定して、人工物の形を作り出すことである。人工物は物として存在することだけに価値があるのではなく、人と相互作用と持つことに存在意義がある。人工物を作り出すのに重要な役割を果たすのがその人工物を使用する使用者(ユーザ)とその人工物を制作する制作者(デザイナー)である。

表1に示したように、人工物の制作者と使用者の関わりを中心に、大量生産以前の古代の時代、大量生産の時代、ネットワーク・コンピューティングの時代を比較してみると、ネットワーク・コンピューティングの時代は設計、生産、購入、分解の繰り返しループが望まれる。そして、デザインの対象は設計、生産、使用、分解/再生までを繰り返すように考慮する必要がある。情報空間上の人工物は設計、生産ともに非常に短い場合も多い。そして、人と人工物のインターアクションが非常に多い場合は、その人工物に愛着がわく。ソフトウェアの変更などで役割が大きく変わる場合は変化する人工物と呼ぶことができる。また、この時代の人工物は特に情報機器を中心に環境に対して対応することができる機能が含まれ、知的な人工物とも呼ぶことができる。

#### 1.2 人工物のライフサイクル

人工物と人間の関わりは、変化していく。例えば、人工物をはじめて店頭で目にしてから、それを購入して使い始め、使い慣れると新しい使い方をしたり、分解したり廃棄する。人工物のライフサイクルを、人工物の認識、取得、使用、進化という4つの段階に分けて考えることができる。

- ①人工物の認識：人工物は人工物が社会に出現する前から人との関連が始まっている。人工物が社会に出現して、その姿を見ることができる。
- ②人工物の取得：ユーザは自分に適した人工物を選択して、人工物を取得し、使用できるまで準備する。
- ③人工物の使用：人工物が人によって成長していく。人も人工物によって成長する。情報機器などは購入してから使いこなすのに時間がかかる場合がある。
- ④人工物の進化：ユーザによって人工物が成長していく場合と、企業によって変えていく場合がある。その後、人工物はそのコンフィギュレーションに沿って分解、再生され新たな人工物に変わって行く人工物によって、その物質的な役割が分解、再生される場合とその情報的価値が分解、再生される場合がある。

表1 人工物の制作者と使用者

	大量生産の時代以前の古代の時代	大量生産の時代	ネットワーク・コンピューティングの時代
ループ	繰り返しのループ	切れたループ	繰り返しのループが必要
人工物	知的でない人工物	一部に知的な人工物	知的な人工物が主体、変化する人工物
使用者	人工物に愛着をもつ	人工物を使い捨てる	人工物に愛着が必要
制作者	使用者との協調による設計	協調は少ない	使用者との協調が必要
対象空間	現実空間	現実空間と一部情報空間	情報空間と現実空間の両方

### 1.3 人工物の進化

人工物と人間の関わり合いは、そのライフサイクルの中で変化していく。例えば、パソコンをワープロのように文字を清書する道具として使用を開始し、インターネットに興味を持ってインターネットを閲覧するための道具として変化させる。

また、一方人工物自身も変化している。例えば、携帯電話のデザインは、大きく、重いデザインからスタートして、表示画面が大きくなったり、携帯サイズが小さくなったり、軽くなったりとそのデザインは時間と共に変化している。

## 2. スパイラル・デザインの提案

前章で示された人工物のライフサイクルとその進化の考え方を総合化し、ネットワーク・コンピューティング時代のデザイン・アプローチとしてスパイラル・デザインを提案する。表2に示すように、従来の工業デザインと提案するスパイラル・デザインとはデザイン目標、デザイン対象、デザイン対象時期が異なり、デザイン手法も異なる。

### 2.1 従来のデザイン

従来の工業デザインは工業生産をしてそれを販売することを目標とし、それを効率的に、効果的に行うための手法であった。そして、デザインの対象としてきた切れたライフ・サイクルをデザイン対象としてきた。その背景には、人工物を固定された物として考える、現実空間上での人工物をおもに対象、人工物のデザインは専門家だけによってデザインすることなどが考えられる。

### 2.2 スパイラル・デザイン

人工物のライフサイクルのすべてをデザイン対象とし、人工物の進化を前提に考えることをスパイラル・デザインと提案する。図1に示すように、それは人工物の

表2 従来のデザインとスパイラル・デザインの比較

	従来の工業デザイン	スパイラル・デザイン
目標	工業生産と販売を効果的に実施	人工物と人間の共生
デザイン対象	現実空間の固定された人工物	現実空間及び仮想空間の変化する知的な人工物
デザイン対象時期	主に企画、設計から販売までの時期	ユーザが人工物と関わるすべての時期(ライフ・サイクル)
デザイン方法	デザイナーによるデザイン	ユーザとデザイナーの協調によるデザイン

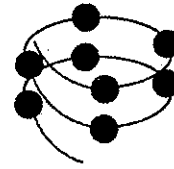


図1 スパイラル・デザインの概念イメージ

ライフ・サイクルが上昇するスパイラルのような形であることから名づけた。スパイラル・デザインでは、現実空間上での人工物と情報空間上での人工物をデザイン対象とする。そして、そのデザイン・プロセスはデザイナーとユーザとのコラボレーションによる人工物のデザインが基本となる。

### 2.3 スパイラル・デザインの詳細

人工物のライフサイクルのそれぞれのライフでのデザインについて考察する。

- ①認識の段階とはユーザが製品としての人工物を目にするまでのデザインである。例えば、ユーザとコラボレーションしながら、人工物の仕様を検討することである。
- ②購入の段階とは人工物が社会に出現して購入するまでの間のデザインである。どのように人工物を出現させ、どのように使用者に届けるかをデザインする。従来の商品デザインやマーケティングの目的とも近いが、異なる点は人工物の誕生を人工物の使用者や育成者の立場から見ていくことと、作り手の関係性に着目している点である。
- ③使用の段階とはユーザが購入して少しずつ慣れ、使用している時のデザインである。従来のデザインは購入

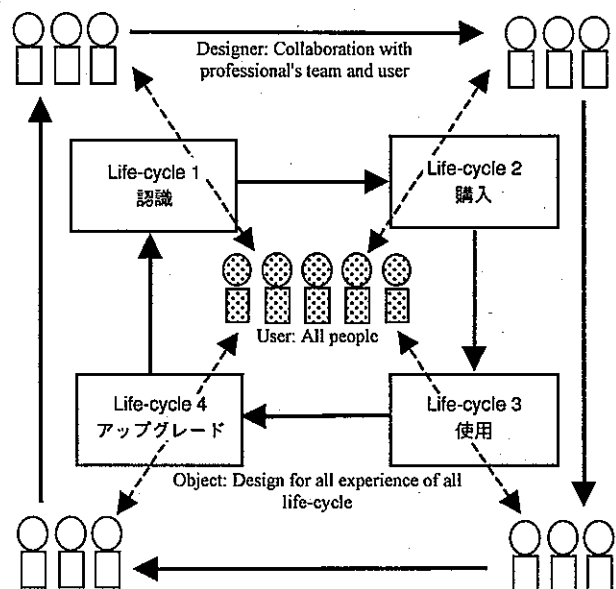


図2 スパイラル・デザインの構造

してもらうことを主な対象としているが、ユーザが購入してから使用している段階もデザインの領域としてとらえている。例えば、ユーザが使い方を分からない場合、それをサポートのためのデザインである。

- ④アップグレードの段階とはユーザが使用できるようになってから、新しい使い方をしたり、改造したりして、廃棄するまでのデザインである。例えば、アップグレードしたり、オプションを装着して新しい使い方をするためのデザインである。

### 3. スパイラル・デザインの実現

#### 3.1 スパイラル・デザインの構造

図2に示したように、スパイラル・デザインでは、対象とするユーザは限定された一部のユーザだけではなく、すべての人を対象ユーザとする。また、デザインの対象はライフサイクルのすべての段階でユーザの体験するものすべて対象とし、現実空間上と情報空間上の人工物の両方を含む。

スパイラル・デザインのデザイン・プロセスは、ライフサイクルのすべての段階において、すべてのユーザを対象としてユーザ情報を取得・整理、ユーザが体験するものに対してデザイン案を検討、各種の専門家チームの評価やユーザの評価、最終デザイン決定である。そして、ライフサイクルのそれぞれの段階において、他の段階も考慮に入れることが重要となる。

#### 3.2 スパイラル・デザインの課題

前記のような状況を考慮するとスパイラル・デザインでは下記の課題がある。

- 1) すべての人を対象とした場合、どのような手法でデザインを進めたらよいか。
- 2) すべてのライフサイクルをデザイン対象とした場合、どのようななどのような手法でデザインを進めたらよいか。
- 3) 多くの分野の専門家やユーザとどのようにしてコラボレーションするか。
- 4) 人間中心のデザイン・アプローチはどのようにするか。

### 4. スパイラル・デザインの実現化に向けて

#### 4.1 SDマトリックス

多くのユーザに関連するデザイン情報を整理する方法としてマトリックスの利用に着目した。ここでは、ユーザに関連するデザイン情報を整理するために、ユーザグループ、ユーザシナリオとユーザタスクに基づいたSD

マトリックスの概念を提案する。

図3に示すように、SDマトリックスはx軸にユーザグループをとり、y軸にユーザシナリオとz軸にユーザタスクをとる。そしてその3つの軸より特定のユーザタスクのSDマトリックス(xy軸)、特定のユーザのSDマトリックス(yz軸)と特定のユーザシナリオのSDマトリックス(zx軸)を制作することができる。それぞれのSDマトリックスのセルには要求事項、現在の製品やアイデアの評価、プライオリティや考慮すべき事項などを記入する。すべてのSDマトリックスを制作する必要はなく、対象とするプロジェクトに応じて必要となるSDマトリックスを制作する。制作したSDマトリックスは問題点の発見、デザインコンセプトの構築、デザイン案の制作及び評価に活用する。

特定のユーザタスクのSDマトリックス(xy軸)は特定のユーザタスクの段階でのユーザグループ全体の問題点

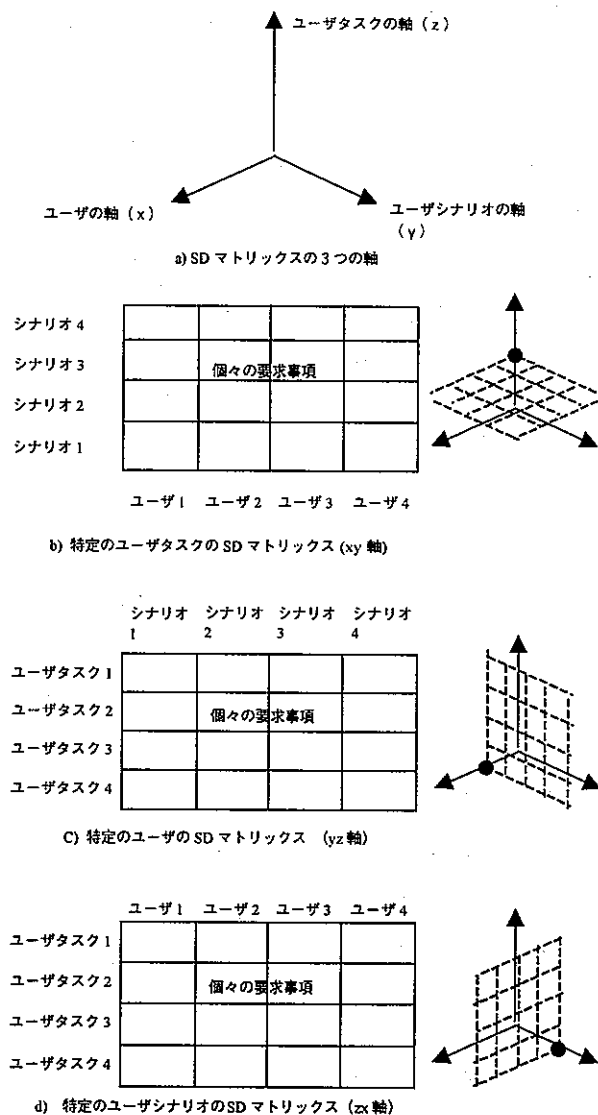


図3 SDマトリックスの概念  
1はユーザ対応されている、2はどちらでもない、3はユーザ対応されていない

や要求事項を整理することに活用できる。特定のユーザのSDマトリックス(yz軸)は特定のユーザグループのデザイン情報が一覧できるので、特定のユーザグループの問題点や要求事項を整理することに活用できる。そして、特定のユーザシナリオのSDマトリックス(zx軸)は特定のユーザシナリオの段階での詳細デザインについての問題点や要求事項を整理することに活用できる。この情報マトリックスは現在の製品デザイン・プロセスに最も簡単に利用できる可能性がある。

#### 4.2 SDマトリックスの事例

SDマトリックスの事例として、ノートブック・パソコンを題材に検討する。ここでは5つのユーザグループ、6つのユーザシナリオと6段階のユーザタスクを設定して情報マトリックスを制作する。

表3に示すように、ユーザグループを健常者の中より抽出し、パソコンの初心者、パソコンの経験者、小中学生、高齢者と言語の人の5つのユーザを対象ユーザグループとした。ユーザシナリオは情報機器とユーザの関わりをライフサイクルという視点より認識、購入、導入、使用、改造と再使用という6つの基本的なユーザシナリオを選択した。そしてこのノートブック・パソコンにその6つの基本的なユーザシナリオを適用して、(認識)商品を知る、(購入)インターネットで購入、(導入)セットアップする、(使用)使用する、(改造)アップデートする、(再使用)リサイクルするという6つのユーザシナリオとした。またユーザタスクは情報機器の共通のユーザタスクとして準備、開始、入力、確認、操作と終了という6つの基本的なユーザタスクを設定した。例えば、ノートブック・パソコンの導入段階でのユーザタスクでは、

表2 従来のデザインとスパイラル・デザインの比較

	ユーザ 1	ユーザ 2	ユーザ 3	ユーザ 4	ユーザ 5
シナリオ1	2	1	2	3	1
シナリオ2	3	1	3	3	2
シナリオ3	3	2	3	3	3
シナリオ4	2	1	3	2	1
シナリオ5	1	1	3	1	1
シナリオ6	2	1	3	2	3

ユーザ1: パソコンの初心者、ユーザ2: パソコンの経験者、ユーザ3: 小中学生、ユーザ4: 高齢者、ユーザ5: 他言語の人  
シナリオ1: (認識)商品を知る、シナリオ2: (購入)インターネットで購入  
シナリオ3: (導入)セットアップする、シナリオ4: (使用)使用する  
シナリオ5: (改造)アップデートする、シナリオ6: (再使用)リサイクルする

(準備)ディスプレイを開ける、(開始)電源を入れる、(入力)文字を入力する、(確認)表示を確認する、(操作)メールを送る、(終了)電源を切るという6つのユーザタスクになる。

#### 4.3 SDマトリックスの活用

SDマトリックスの活用方法は、SDマトリックスの一覧性を利用して問題を整理する方法とSDマトリックスのデータ化の容易性を生かして解析する方法がある。以下にそれぞれの活用の可能性について述べる。

- (1) SDマトリックスの一覧性を利用して問題を整理  
SDマトリックスの一覧性を生かして問題点の把握、デザインコンセプトのまとめやアイデアの評価を実施する。以下に利用の可能性について述べる。
  - 1) 問題点の把握: デザインコンセプトをまとめる前の段階で複雑な要求事項の整理、プライオリティの確認や現在の製品の問題点の把握などがSDマトリックスを見ることにより全体像の把握ができたり、漏れがないかチェックできる。またその一覧性によって問題解決の糸口が発見し易いことが予想される。
  - 2) デザインコンセプトのまとめ: デザインコンセプトをまとめる場合にSDマトリックスの一覧性は要求事項のプライオリティ付けの参考になり、コンセプトを制作し易い。
  - 3) アイデアの評価: デザイン案の評価の段階でSDマトリックスをチェックリストとして利用できる。またアイデアを多角的に評価することによって、より正しい評価が期待できる。

- (2) SDマトリックスのデータを利用して解析  
SDマトリックスのデータ化の容易性を生かして全体の問題点の把握、部分と部分の関連について数値的に把握する。以下に利用の可能性について述べる。

- 1) 全体の問題点の把握 (平均値の活用): SDマトリックスは多くの視点のマトリックスを制作できるが、多くのマトリックスができると全体の把握が難しくなる。そのような場合、全体を把握する方法としてマトリックスのデータを利用して平均値をとり複数のマトリックスより一つのマトリックスを制作して全体を把握することができる。例えば、ユーザシナリオごとに複数のSDマトリックスができるが、それぞれのセルの平均値をとりすべてのユーザシナリオのSDマトリックスを制作して、このマトリックスより全体の問題点を把握することができる。

2) ある部分とある部分の関連性の把握(相関係数の活用): SDマトリックスのある面とある面の関連性を相関係数を活用して数値的把握することにより、問題点の把握や解析の可能性がある。

## 5. まとめ

ここではスパイラル・デザインを実現する方法として、すべてのユーザとすべてのライフサイクルに対応するために、関連するデザイン情報を整理する手法としてSD(Spiral Design)マトリックスを提案した。今後は、提案したデザイン手法を実際のデザインに利用することによりこの手法を評価していく予定である。

## 注・参考文献

- [1] 原田悦子:人の視点からみた人工物研究、共立出版、1997
- [2] 三木光範:進化する人工物、オーム社、1999
- [3] 吉武泰水:芸術工学概論、九州大学出版会、1-16、1990
- [4] 山崎和彦:スパイラル・デザインの提案(1)、デザイン学会秋季大会論文集、2000
- [5] 山崎和彦:携帯型パソコンに対するユニバーサル・デザイン・アプローチ、情報処理学会HI研究会、2000
- [6] 山崎和彦:スパイラル・デザインの提案(2) —スパイラル・デザインの実現にむけて、デザイン学会秋季大会論文集、2001

## ガラスびんの環境影響度を基準とした ライフサイクルコストのモデル構築

サッポロビール株式会社 門奈 哲也、鳥羽 正春  
産能大学大学院 寺坪 修

### 1 本研究の目的

本研究はガラスびんのライフサイクル(製造・使用・廃棄)で発生する環境影響度を基準としたライフサイクルコスト(以降LCC)のモデルを構築した。本研究は環境会計の内部機能を目的としており、環境配慮型製品の開発ツールとして企業内部を支援するものである。

### 2 本研究の特徴

- ・ガラスびんは操業コストが一定である点に着目し、経済性工学の手法でLCCのモデルを構築した。
- ・LCAの項目でコスト発生要因のみを用いた。本モデル

によって算出された環境コストは、社会的コストを含まず製品を製造する際に関わった企業が支払った環境コストのみの合計を示す。本環境コストは原価の一部から算出するため、企業は本環境コストを下げるように努力すれば、環境コストと製造原価の両方を下げることができる。

- ・本研究は既存のライフサイクルインベントリ(LCI)データを使って容易にコスト換算できる。

### 3 本研究の会計としての位置付け

環境会計に期待される機能として内部機能と外部機能がある。内部機能は企業が環境保全活動に投資することで企業の利益に貢献するように機能させることであり、環境会計を経営管理ツールとして捉えることである。

外部機能は企業での環境保全への取り組みを定量的に公表するシステムとして、消費者や投資家など利害関係者の意思決定に影響を与える機能を果たす。内部機能と外部機能は別ものではなく、環境保全への取り組み姿勢、すなわち内部管理のあり方こそが企業外部に評価されるべきである。

本研究の環境会計における位置付けは、主に内部機能を目的とした。本研究の目的である製品の環境に対するLCCを算出することで、環境配慮型製品の開発ツールとして企業内部を支援することができるからである。

本研究は以下のとおり管理会計公準と同様の機能を持つ<sup>1)</sup>。

- ・実体概念:ビール用ガラスびん1本を製品実体とした。
- ・会計期間概念:1本の容器が製造されてから廃棄されるまでとした。
- ・貨幣評価概念:LCAで得られた環境負荷という物量単位を、調査で得た係数を物量単位に乗じて算出した貨幣単位を評価概念とした。
- ・要請的公準:会計情報を要請するのは、主に企業の経営者と製品の購入者である。要請者の意思は個々の公準における重点の置き方に差はあるとしても環境負荷が低く、コストも低くという意味で一致する。

### 4 本研究の方法

#### (1) LCCのモデル構築

ガラスびんのライフサイクルで発生するコストの流れを、経済性工学の視点でキャッシュフローとして作成した。次に一般に設備で用いるLCCのモデル式を基にガ

ラスびんの事例を当てはめガラスびんのモデル式を構築した。

## (2) 環境負荷の定義

環境負荷の定義は視点によって様々である。日本の環境省やアメリカの環境保護庁(以降EPA)の事例を調査することによって環境負荷として取り上げるべき項目を決め、会計上のコスト項目を経済性工学の立場から取り上げる項目を決めた。

## (3) モデル式の有効性の検証

ガラスびんについての既報LCIデータを用い、モデルに当てはめLCCを算出した。

## 5 本研究における環境コスト

### (1) 本研究における環境コストの定義

本研究では環境に対して支払う広義の意味でのコストを環境コストと呼び、特に本研究において取り扱う狭義の意味での環境コストを環境負荷コストと呼ぶ。環境負荷コストのことを「地球環境に対して与える環境負荷を利用するに当たって支払う費用」と定義した。

### (2) 本研究における環境コストの範囲

環境省が定義する環境コストは、ある対象のために回復や予防などの環境保全を行うコストを指し機能別分類である<sup>2)</sup>。EPAが定義する環境コストは、何らかの行為で発生したすべての環境負荷のコストを指し形態別分類である。

本研究で定義する環境負荷コストは図1に示すように、水道光熱費や原材料のほか、義務付けられている環境保全に対するコストである。なお本研究ではモデルの検証において原材料費のデータが収集できなかったため除外している。

本研究で定義する環境負荷コストは、現在目に見える

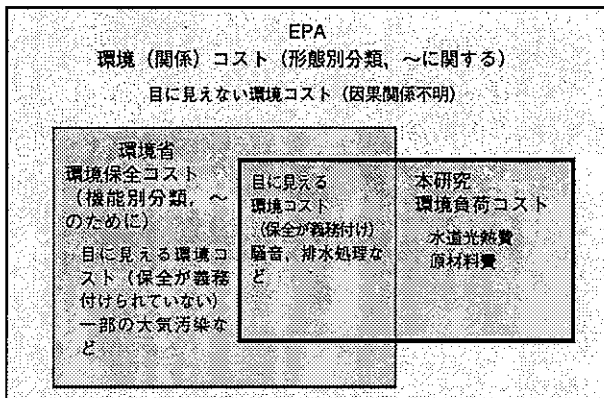
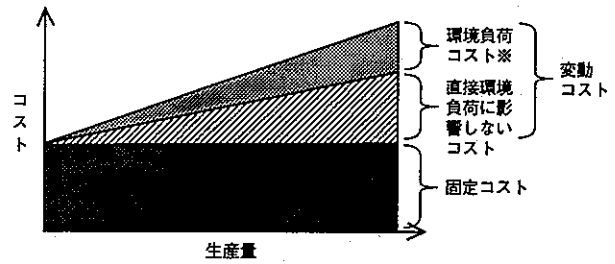


図1 環境コストの定義



※本研究事例では、環境負荷コスト中の原材料費は除外した。

図2 コストの変動要因

部分で実際に支払いが行われるコストで、客観的に明確なものである。仮に企業が環境保全が義務付けられている設備等があった場合には、それらを維持するためのコストは、価格に上乗せされていると考えることができる。またこのコストにはエネルギー会社の利益が含まれているが本研究ではコストの一部として考える。

## 6 本研究におけるコストのとりえ方

本研究では、主に光熱費などの環境負荷を対象とし、変動コストを環境負荷コストとする。

固定コストは、すでに意思決定され支払われた埋没コスト<sup>3)</sup>でありコミットド・コストに分類できる。本研究は以後の意思決定に影響が少ないことから固定コストを除外した。固定コストは数値が把握できれば含んだ方がより正確であるが、本研究のようにリターナブル容器とワンウェイ容器の比較の事例では、ほぼ同一の設備を使うため固定コストは同一であり除外できる。

## 7 ガラスびんのLCCのモデル構築

### (1) ガラスびんのライフサイクルフロー

ガラスびんのライフサイクルフローは5つの工程から成る(図3)<sup>4)</sup>。ガラスびんは、「原料製造工程」で採掘されたバージン原料に対し約50~70%のカレット(ガラスの破片)を使用し「びん製造工程」でびんが製造される。次にびんがビール工場へ運ばれ「充填工程」で、洗びん、

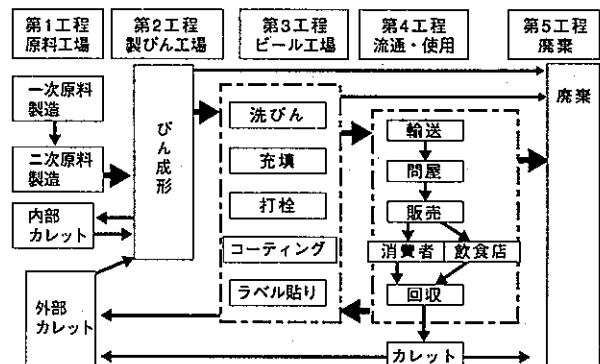


図3 ガラスびんのライフサイクルフロー<sup>4)</sup>

ビール充填、王冠で打栓、ラベルが貼られプラスチック箱等に入れられ出荷される。次に「流通、使用工程」で問屋及び酒販店等を経由して消費者又は飲食店に渡り飲用される。飲用後の空びんはリターナブル(再使用可能)びんはビール工場へ戻され、ワンウェイ(1回使用のみ)びんはカレットとして回収されるほか、一部は「廃棄工程」で埋め立てなどの廃棄処理がされる。

リターナブルびんのライフサイクルは、第1・2工程でびんが製造され、第3・4工程を何度か回転した後使用できなくなるとカレットとして第1工程へ戻り、一部は第5工程へ流れ廃棄される。

ワンウェイびんのライフサイクルは、第1～4工程までを1回流れ、その後カレットとして第1工程へ戻り、一部は第5工程で廃棄される。

## 8 LCCのモデル

### (1) LCCの一般式

いま取得コスト $C_0$ 、毎期末の操業コスト $E_1, E_2, \dots, E_n$ という製品を考える。その製品を $n$ 年使用した後の処分コスト(残存価値)を $L_n$ とする。このとき金利 $i\%$ で取得した時点での現在価値 $P$ (Net Present Value)を次式で表せる<sup>3)</sup>。

$$P = C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+i)^j} - \frac{L_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

このとき本研究では年価として次式であらわす。

$$M_n = \left( C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+i)^j} - \frac{L_n}{(1+i)^n} \right) \times [P \rightarrow M]_{n年}^{i\%} \quad (2)$$

ここに

$$[P \rightarrow M]_{n年}^{i\%} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{資本回収係数}) \quad (3)$$

### (2) ガラスびんのLCC

びんの場合の操業コストは、使用年数が多いほどダメージを受けるため、本来は使用年数に比例してメンテナンス(補修)をするのが良い。現実にはびん個々の使用頻度の識別が困難なため、すべてのびんが一定以上の品質にある前提で、再使用回数に無関係に一定のメンテナンスを行う。したがって操業コストが毎年一定額と仮定できる。

ガラスびんを1年間に3回再使用し8年間で計24回再使用するキャッシュフローを図4に示す。縦軸はコストを表し、びんの場合はすべて支払いのため、下向きのキャッシュフローとなる。aはびん製造時に発生する取

得コスト、bは充填・流通・使用時に発生する操業コスト、cはびんを廃棄するときに発生する廃棄コストである。びんは点線矢印のように年に3回再使用されるが、計算を簡便にするために、個々のコストを期末に発生したとして再使用3回分のコストを期末に金利を無視して合計し年価 $b$ として表した。また、びんはいったん設計してしまえば設計変更がほとんどないため、設計開発のコストは除外した。製造の期間は使用期間に比べれば短いと、製造にかかわる期間は瞬時に終わるとした。

ガラスびんのキャッシュフローを図4のようになっている前提(操業コストが一定で廃棄が費用となる)で、式(2)を変形すると、次式の通りとなる。aはびん製造時に発生するコスト、cはびんを廃棄する時に発生するコストで、いずれも年価に換算する。bは充填・流通・使用時に発生するコストで、すでに年価になっている。

$$M_n = b + a \times [P \rightarrow M]_{n年}^{i\%} + c \times [S \rightarrow M]_{n年}^{i\%}$$

### (4) リターナブルびんのモデル式

ここに

$$[S \rightarrow M]_{n年}^{i\%} = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{減債基金係数}) \quad (5)$$

1度使用しただけで使用を終えるワンウェイびんのモデルは次式のように、すべて同時に費用が発生すると考え。コストはa、b、cの費用すべてをそのまま合計する。次式はリターナブルびんと比較できるように、ワンウェイびんが1年間に3回出荷されたとして仮定した。したがって年価は、出荷1回分のコストを3倍した。

$$M_1 = 3 \times (b + a + c) \quad (6)$$

### ワンウェイびんのモデル式

## 9 ガラスびんのライフサイクルコスト

### 9.1 ガラスびんのLCA

ガラスびんの既報LCIデータを利用した<sup>5)</sup>。

#### (1) LCAの目的

ガラスびんの製造工程および回収システムを同一とした場合の、容量633mlビール大びんについて、次に示す

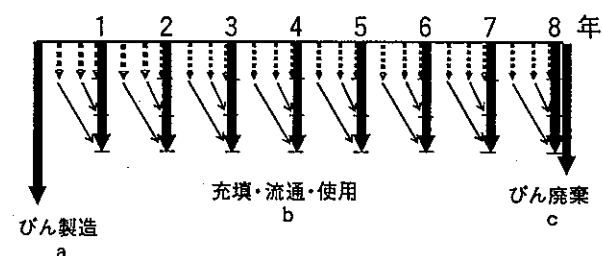


図4 8年間使用(24回再使用)時のキャッシュフロー<sup>4)</sup>



表1

環境負荷	びんの種類	第1工程 原料製造	第2工程 びん製造	第3工程 充填	第4工程 使用流通	第5工程 廃棄	合計	単価	費用 [円]
排水 [l]	リターナブル標準びん	3.0	0.4	2.5	0.0	0.0	5.9	345 [円/kL]	2.02
	リターナブル軽量びん	2.4	0.4	2.5	0.0	0.0	5.3		1.81
	ワンウェイびん	1.8	0.3	2.5	0.0	0.0	4.5		1.56
固形廃棄物 [g]	リターナブル標準びん	31.0	1.0	0.7	0.0	0.0	32.7	80 [円/kg]	2.62
	リターナブル軽量びん	24.2	0.8	0.7	0.0	0.0	25.7		2.06
	ワンウェイびん	17.4	0.6	0.7	0.0	0.0	18.8		1.50
電力 [wh]	リターナブル標準びん	27.8	164.8	18.7	0.0	0.0	211.3	15 [円/kwh]	3.17
	リターナブル軽量びん	21.8	129.4	18.7	0.0	0.0	169.9		2.55
	ワンウェイびん	15.7	92.7	18.7	0.0	0.0	127.1		1.91
軽油 [mL]	リターナブル標準びん	0.8	9.4	3.0	2.4	0.0	15.6	26750 [円/kL]	0.42
	リターナブル軽量びん	0.6	7.2	2.3	2.1	0.0	12.3		0.33
	ワンウェイびん	0.5	5.3	1.7	1.9	0.0	9.3		0.25
重油 [g]	リターナブル標準びん	3.6	82.4	0.0	0.0	0.0	86.0	19625 [円/KL]	1.69
	リターナブル軽量びん	2.8	64.8	0.0	0.0	0.0	67.6		1.33
	ワンウェイびん	2.1	46.4	0.0	0.0	0.0	48.5		0.95
合計 [円]	リターナブル標準びん	4.0	4.6	1.3	0.1	0.0			
	リターナブル軽量びん	3.2	3.6	1.2	0.1	0.0			
	ワンウェイびん	2.3	2.6	1.2	0.1	0.0			

びんの環境負荷を比較した。

- ・リターナブル標準びん：現在使用されている一般のビールびんで、飲用後回収し再使用する。
- ・リターナブル軽量びん：強化ガラスを用いることでガラスの肉を薄くし軽量化をはかったびん。
- ・ワンウェイびん：国内流通はしていないが輸出など回収に困難な時に用いる再使用しないびん。

(2) LCAの対象

機能単位はびん1本を1回充填使用したとした。既報LCIデータは容器のみを対象とした。

9.2 環境影響度のコスト換算

ガラスびんのライフサイクルフロー(図3)に基づいて算出されたLCIデータとコスト換算値を表1に示す。表中の環境負荷は既報LCIデータによるもので、コストに換算された値は本研究による数値である。環境負荷は、各環境負荷項目について各工程で発生又は消費した量を示している。コスト換算値は工程で発生した環境負荷量に本研究で調査した東京地区(2000年)の環境負荷の単価を掛け合わせて算出したものである。

表1の下段に示したコスト合計は、各工程における環境負荷の合計をコスト指標に統合化して示したものである。各工程で発生した環境負荷量は単位が異なり単純に合計できないが、コスト指標に統一することで、各工程で発生した環境負荷量を単純に統合化することができる。

本研究で扱ったLCIデータのほかにCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の大気廃棄物があるが、これらは社会的コストに分類さ

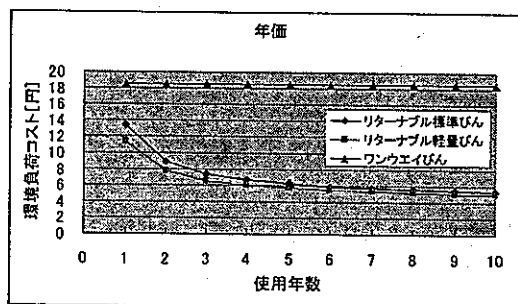


図5 ライフサイクルコストング結果(年価)

れ、これらは現在のところ企業にとって直接的に処理費用がかからないため除外した。今回除外した物質は本来除外すべきものではないが、現状では本物質をコスト換算する適当なデータが無かったため除外した。

9.3 ガラスびんのライフサイクルコストング

表1のデータをもとにLCCを算出した。算出は第1工程と第2工程の合計をa項、第3工程と第4工程の合計をb項、第5工程をc項とし、算出式をリターナブル標準びんとリターナブル軽量びんは式(4)を用い、ワンウェイ

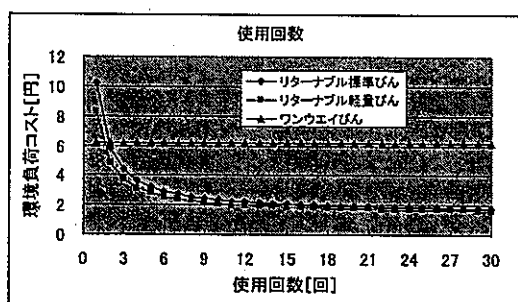


図6 ライフサイクルコストング結果(回数)

いびんは式(6)を用いた。この時金利(資本コスト)は10%とした。

使用年数ごとの算出結果を図5に示す。ワンウェイびんの年価は一定である。リターナブルびんは使用年数が増すほど年価が下がる。ワンウェイびんよりもリターナブルびんのLCCが低い。またリターナブル軽量びんは、リターナブル標準びんよりもコストが低かった。これは原料の使用量が少なく、重量が軽いため輸送時の負担が低いからである。

#### 9.4 使用回数による影響

使用回数で年価として算出した結果を図6に示す。2回使用で交差(優劣分岐点)している。この結果は1回の使用だけで廃棄してしまう場合には、ワンウェイびんのほうが環境負荷が低く、3回以上使用すればリターナブルびんのほうが環境負荷が低い。これはリターナブルびんは何度も使えるように耐久性があり製造コストが高く、ワンウェイびんは1回使用にだけ耐えればよく製造コストは低い。使用回数が増せばワンウェイびんよりもリターナブルびんの方がコストが低い。

### 10 考察

#### (1) ガラスびんと設備のLCCの違い

びんのメンテナンス(補修)は使用回数と無関係に再使用ごとに実施しているため、ガラスびんのLCCは設備の場合と異なり<sup>6)</sup>、使用年数が増しても上昇しない特徴がある。設備は年数に比例して補修などのメンテナンスが増すため操業コストが年々増し、伴って総コストも増加する。

#### (2) 社会的コストに対する考え方

社会的コストを含むと、製品が地域住民や地球などに対する外部不経済を含んで環境負荷をコスト換算することになる。社会的コストの有無は議論が残るが、環境会計の内部性として管理会計の手法として使うには、本研究のように社会的コストを除き環境負荷コストを算出したほうがコストが正確になる。もし環境会計の外部性が目的ならば、社会的コストを含んで自社の環境に対する波及効果を大きな金額として表した方がよい。

#### 11 まとめ

本研究はLCAで得られた環境負荷データをコスト換算し、構築したモデル式でガラスびんの環境負荷を基にしたLCCを算出した。本研究で構築したモデル式を用いることで環境負荷の推定ができ、環境配慮型製品の開

発に利用できると考えられる。

LCCは環境コストと会計コストの定義が重要である。本研究では社会的コストを除外することで数値を正確に捕えた。そのため環境負荷コストを低減すれば原価と環境コストの両方を下げ、企業において効果的な手法であると考えている。

企業はすべての利害関係者に対し環境負荷を低減する活動することが必要であることは言うまでもないが、環境会計を内部機能として機能させるためには短期的又は局部的であれば目標を絞り込んで検討する必要があるのではないかと考えている。

本研究に当たって千葉工業大学小野修一郎教授、放送大学東千秋助教授に数々のご助言をいただきました。お礼申し上げます。

以上

#### 参考文献

- 1) 寺坪修、「会社会計論」、創成社、2000年3月
- 2) 環境庁、「環境会計ガイドブック」、2000年3月
- 3) 千住鎮雄、伏見多美雄、藤田精一、山口俊和、「経済性分析」、1999年11月、pp.122-132
- 4) 門奈哲也、「包装技術」、社団法人日本包装技術協会、2001年9月号、pp.28-34
- 5) LCA実務入門編集委員会編、「LCA実務入門」、社団法人産業環境管理協会、1998年8月
- 6) B.S.プランチャード、訳 宮内一郎、「ライフサイクル・コスト計算の実際」、日本能率協会、昭和54年、7月

### 耐久財の廃棄物発生とその環境負荷推定： 廃棄物産業連関表の動的拡張とその応用

早稲田大学大学院経済学研究科  
横山一代  
E-mail:kazuyoy@suou.waseda.jp

#### 1. 研究の背景と目的

##### 1.1 建設廃棄物とリサイクル

建設産業は全産業における資源利用量の約半分を建設資材として利用しており、建設工事に伴い排出される建設廃棄物は、全産業廃棄物排出量の2割、最終処分量の4割を占めているといわれる。(建築解体廃棄物対策研究会(1998))一方ではセメント等の建築・土木資材には鉱滓や焼却灰などの多くの廃棄物が使用されており、建設産業は廃棄物処理部門において処理された廃棄物のもっとも大きな受け入れ先となっている。このことは現在に

においては、我が国において希少資源である最終処分場の節約を促すことになる。しかしこのことは見方を変えれば、廃棄物を資本ストックとして将来にわたって固定していることに他ならない。

建設廃棄物の発生抑制と建設資源のリサイクルについて2001年より『建設工事に係る資材の再資源化に関する法律(建設リサイクル法)』によって規制されている。中でもセメントはリサイクル率が95%と高いものとなっており、現状においてもコンクリート塊は高いリサイクル率を達成している。しかし再資源化原材料を使用した建設原材料についても規制のリサイクル率を将来にわたって達成できるかという点について疑問視する声もある。

そのため耐久財が廃棄解体される際に、分離技術の伴わない再資源化原材料の使用がリサイクルに及ぼす影響と、将来にわたった環境負荷低減の効果について分析を行う必要があると考える。

## 1.2 廃棄物産業連関分析と動学レオンチェフモデル

廃棄物は産業の生産活動と家計の消費活動に伴い発生し、動脈部門で発生した廃棄物を静脈部門において処理する。一方、静脈部門の活動には動脈部門からの中間投入が不可欠である。廃棄物処理を介して動脈部門と静脈部門の間には相互依存関係があり、このような相互依存関係を分析したものとして廃棄物産業連関表(WIO)がある。廃棄物産業連関表はNakamura(1999)によって開発されたモデルであり、「財と廃棄物の間の生産・排出・再資源化・処理を巡る連関関係を定量的に表示しようとするものである」(中村(2000))。一般に廃棄物と廃棄物処理の間に1対1の対応関係が無く、前者の種類の方が後者よりもはるかに多い。これを線形連立方程式体系として通常の産業連関モデルと同様に扱うためには、廃棄物と廃棄物処理との間に1対1対応が必要である。ここで特徴的なのは、配分行列Sによって廃棄物を廃棄物処理過程に対応させたことであり、これによって勘定体系のみならず、分析的なモデルとして用いることを可能にした。

しかし建築物のような数十年の寿命を持つ耐久財は、生産された期において資本ストックとして固定され、寿命を終えた後に廃棄物に変換される。このような財についてはWIOのような静学モデルにおいて分析には不向きな点がある。時間についての変化分を考慮に入れたものとして動学レオンチェフモデルがある。動学レオンチェフモデルは部門間の相互依存関係について、時間についての変化分を考慮に入れ静学モデルを拡張したもの

である。しかし動学レオンチェフモデルは資本ストックの産出原材料としてリサイクル原料を用いることを想定しておらず、時間を通じた廃棄物の流れを示すには不十分である。

このことを踏まえて、本研究は動脈部門と静脈部門との間の財と廃棄物の時間差を持った循環について考え、中村(2000)の廃棄物産業連関表の動学的な拡張を試み、建築物のような数十年の寿命を持つ耐久財の流れがもたらす経済・環境負荷の大きさを試算する方法の一提案を行うものである。

## 2 モデル

動脈部門については産業部門数を $N$ とし、それぞれ $t$ 期における産業部門 $j$ に投入される産業部門 $i$ の産出物を $X_{0,t} = \{X_{0,ij,t}\}^1$ 、 $t$ 期における産業部門 $j$ に投入される廃棄物 $i$ を $X_{z,t} = \{X_{z,ij,t}\}$ 、 $t$ 期における最終需要部門 $j$ に投入される産業部門 $i$ の産出物を $X_{f,t} = \{X_{f,ij,t}\}$ とし、産業部門総和を $X_t = \{X_{i,t}\}$ とする。

静脈部門については廃棄物種類数を $M$ 、廃棄物処理部門数を $K$ とし、 $t$ 期における産業部門 $j$ で発生する廃棄物 $i$ の純発生量 $W_{0,t} = \{W_{0,ij,t}\}$ 、 $t$ 期における廃棄物処理部門 $j$ で発生する廃棄物 $i$ を $W_{z,t} = \{W_{z,ij,t}\}$ 、 $t$ 期における最終需要部門 $j$ で発生する廃棄物 $i$ を $W_f = \{W_f,ij,t\}$ 、廃棄物処理部門総和を $W_t = \{W_{i,t}\}$ とする。

本モデルでは廃棄物産業連関表において最終需要部門に含まれていた資本形成部門を明示的にしている。 $t$ 期に資本ストックとして固定される産業部門 $i$ の産出物を $C_{0,t} = \{C_{0,ii,t}\}$ とし、 $t$ 期に資本ストックとして固定される廃棄物 $i$ を $C_{z,t} = \{C_{z,ii,t}\}$ とする。

拡張固定資本マトリックス 部門間の相互依存関係について、時間についての変化分を考慮に入れ静学モデルを拡張したものとして動学レオンチェフモデルがある。しかしこの動学モデルにおいては、静脈部門の活動、すなわち資本の除却と廃棄物の再資源化が考慮されていない。本論では、資本ストックとして固定された耐久財が除却されて廃棄物となる、動脈部門と静脈部門との間の財と廃棄物の時間差を持った循環について考えたい。

総務庁産業連関表付属表は $N \times N$ の固定資本マトリックス $K_t = \{K_{ij,t}\}$ をもつ。しかし $t-1$ 期に産出された財の一部を資本として蓄積するということは、 $t-1$ 期における $j$ 財産出の際に投入された $i$ 廃棄物もまた蓄積されるということである。そのため $t$ 期の固定資本形成中、

1) 以下では太字は{}内を要素とする行列、 $X$ は $X$ の対角化行列、 $X^T$ は $X$ の転置をそれぞれ表すものとする。

例1:  $T_z$  完全回収

	焼却灰	金属屑	建築廃棄物
焼却灰	1	0	0
金属屑	0	1	0
建築廃棄物	0	0	1

例2:  $T_z$  部分的回収

	焼却灰	金属屑	建築廃棄物
焼却灰	0	0	1
金属屑	0	0.5	0.5
建築廃棄物	0	0	1

固定された廃棄物量を考慮しなくてはならない。よって  $N \times N$  の固定資本マトリックスを  $(N+M) \times N$  の拡張固定資本マトリックス  $\bar{K} = [K_{0:t}, K_{z:t}]^T$  を作成する必要がある。  $K_{0:t} = \{K_{0:ij:t}\}$  は  $t$  期における産業部門  $j$  への資本財  $i$  の蓄積であり、  $K_{z:t} = \{K_{z:ij:t}\}$  は  $t$  期における産業部門  $j$  への廃棄物  $i$  の蓄積とする。拡張固定資本マトリックス  $\bar{K}_0$  は  $\bar{K}_t = [X_{0:t}, W_{0:t}^-]^T \bar{K}_t^{-1} K_t$  のように定義されるものとする。  $W_{0:t}^-$  は  $t$  期において産業部門  $j$  に投入される廃棄物  $i$  であり、  $M \times N$  の行列とする。拡張固定資本マトリックスは資本形成される量で表記されているので、分析のために産出された財がどれだけの割合で固定されるかを示す拡張固定資本係数  $\bar{B}t$  を

$\bar{B}t = [B_{0:t}, B_{z:t}]^T = [X_{0:t}, W_{0:t}^-]^T \bar{X}_t^{-1} K_t \bar{X}_t^{-1}$  のように定義する。産業部門  $i$  に投入され、固定される産業部門  $j$  の産出物の割合を  $B_{0:t} = \{B_{0:ij:t}\}$  とし、  $B_{z:t} = \{B_{z:ij:t}\}$  を産業部門  $i$  に投入され、固定される廃棄物  $j$  の割合とする。

### 廃棄物化変換行列

次に資本ストックとして固定された最終財が、寿命を終えた後にどのように廃棄物に変換されるのかを示した廃棄物化変換行列  $T = [T_{0:t}, T_{z:t}]^T$  について定義する。廃棄物化変換行列は(産業部門数プラス廃棄物部門数)かける廃棄物の形で示され、  $T_{0:t}$  は耐久財が廃棄される際に排出される廃棄物の割合を示し、  $T_{z:t}$  は耐久財に含まれる再資源化原材料の回収率を示すものとする。この行列は時間ごとに異なる行列を設定することが可能であり、易分解設計などにより、ある産業の産出物の廃棄物への変換割合が変わった場合は、  $T_{0:t}$  が変化する。また  $T_{z:t}$  は分離技術に依存するものとする。

建設部門に焼却灰を原材料とするエコセメントが使われる場合、焼却灰が資本ストックとして固定されることを意味する。この資本ストックが廃棄される際に、エコセメントが用いられたコンクリートを建設混合廃棄物として処理する場合、焼却灰かける建設混合廃棄物の割合

が高いものになる。例として再資源化原材料として焼却灰、金属屑を用いる耐久財が廃棄される際に、再資源化原材料として用いられた焼却灰、金属屑がそのままそっくり回収できる場合、  $T_{z:t}$  は例1のような形で表される。

しかしエコセメントが用いられたコンクリートがすべて建設混合廃棄物として処理される場合、焼却灰×建築廃棄物の割合は1となる。また耐久財に用いられた再資源化原料としての金属屑が半分は回収でき、残りは建築廃棄物として処理される場合は金属屑×金属屑が0.5、金属屑×建築廃棄物が0.5となり、  $T_{z:t}$  は例2のように表される。

再資源化原材料の使用は現段階においては最終処分量を減少させる。しかし再資源化原料を用いたことによって、廃耐久財から排出される廃棄物を再資源化することが困難になることがあり得る。この行列はそのような一回きりのリサイクルが将来にわたってどのような経済、環境への影響を及ぼすかについての分析を可能にさせるものである。

### 各産業から排出される廃棄物

各産業から排出される廃棄物  $W_{0:t}$  は  $t$  期の生産を行うために出力される廃棄物  $W_{0n:t}$  と寿命を迎えて排出される資本ストック  $W_{0k:t}$  の和とし、以下のように表される。

$$W_{0:t} = W_{0n:t} + W_{0k:t} \\ = \beta_t \bar{X}_t - B_z \Delta \bar{X}_{t+1} + T^T \bar{B} \delta_{t-1,t} \Delta \bar{X}_t + T^T \bar{B} \delta_{t-2,t} \Delta \bar{X}_{t-1} + T^T \bar{B} \delta_{t-3,t} \Delta \bar{X}_{t-2} + \dots$$

ここで廃棄物を廃棄物処理過程に対応させる  $K \times M$  の配分行列  $S$  は、処理過程  $i$  で処理される廃棄物  $j$  の割合  $S_{ij}$  を要素とする。  $S$  の要素は当該時点における技術や制度によって規定されていると考えられる。以下、廃棄物処理部門の能力が制約条件にならないものとして、  $S$  の各要素は廃棄物処理部門から独立なパラメータと仮定する。  $\delta_{t-i}$  は  $t-1$  期に固定された資本が  $t$  期に廃棄される割合を示す  $N \times 1$  の寿命行列とする。

### 2.1 モデルの行列表記

本論では  $t$  期以前に固定された資本ストックが  $t$  期に廃棄物として発生するため、生産と廃棄物処理についての需給均等式は以下のように時間を通じた連立方程式となる。

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_0 & 0 & \dots & A_z & 0 & \dots \\ \bar{A}_0 & \bar{A}_0 & \dots & 0 & A_z & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \bar{W}_{0:1} & \bar{W}_{0:2} & \dots & SG_z & 0 & \dots \\ -SB_z & \bar{W}_{0:1} & \dots & 0 & SG_z & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t \\ X_{t-1} \\ \vdots \\ Z_t \\ Z_{t-1} \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{f:t} \\ X_{f:t-1} \\ \vdots \\ SW_{f:t} \\ SW_{f:t-1} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_t \\ X_{t-1} \\ \vdots \\ Z_t \\ Z_{t-1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで  $\bar{A}_0 = A_0 + B_0$ ,  $\bar{W}_{0,1} = S\beta + SB_2 + ST^T \bar{B} \delta_{t-1}$ ,  $\bar{W}_{0,1} = ST^T \bar{B} [\delta_{t-2,t} - \delta_{t-1,t}]$  とする。

期間を通じた技術、固定資本係数、最終需要が所与であるとして上式を  $t$  期から  $t-2$  期の動脈部門の産出、静脈部門の排出について解くと以下を得る。ここで(1)式左辺第一項を  $A_i^*$  とし、左辺第二項を  $X_i^*$ , 右辺を  $X_i^*$  とする。

$$[I - A_i^*]^{-1} X_i^* = X_i^* = X_i^* \quad (2)$$

上式の右辺第一項は所与の技術・制度の基で最終需要部門の財需要  $X_f$  と廃棄物排出  $W_f$  の  $t$  期から  $t-1$  期にかけてのパスを実現させるための技術を示す。このようなパスを実現させる動脈部門の産出、静脈部門の排出に対応する環境負荷因子排出量を以下のように求めることができる。ここで  $e^* = [e_0, e_z]$  は環境負荷因子排出ベクトルとする。

$$Et = e^{*T} [I - A_i^*]^{-1} X_f t \quad (3)$$

### 3. シナリオ分析

本論では動脈部門のうち、建設産業についてのみ1年以上の寿命設定を行い、それぞれのシナリオについての経済への影響および環境負荷についての試算を行った。まず第1に可燃廃棄物と不燃廃棄物を完全分別するシナリオ、分別(1)を想定する。これは廃棄物を廃棄物処理過程に対応させる配分行列にかかわるシナリオであり、現状では建設廃棄物は100パーセント埋立されるが、完全分別シナリオでは100%焼却を想定する。

次に建築廃棄物の分別に関するシナリオ、分別(2)を想定する。これは廃棄物化変換行列にかかわるシナリオであり、建設物から出力する再資源化原材料をどの程度回収できるかに依存するものである。建築解体廃棄物のうちガラスくず及び陶器くず、廃プラスチック類については、現状においては分別解体を行っても技術的・経済的に再資源化が困難であり、高度に分別を行わない場合は、管理型処分場での処分が必要となっている。また建築解体廃棄物は、異物が混入し易く、再資源化の技術が確立されている品目についても再資源化過程における品質管理の面で十分な留意が必要とされる。主に土木工事から排出されるアスファルト・コンクリート塊等のリサイクル率は向上しているものの、主に建築工事から排出される建設混合廃棄物、建設発生木材等のリサイクル率が低迷している。建築物を解体した場合に発生する主な廃棄物は、コンクリート塊、木屑、金属屑、ガラス屑及び陶磁器屑、廃プラスチック類が混合されて排出される建設混合廃棄物となっている。これらのうち、分別解体された場合には、コンクリート塊、木屑、金属屑は、基

本的にリサイクルされているが、低コストのミンチ解体により分別されない建設混合廃棄物が大量に排出され最終処分されている。これらの建設混合廃棄物が完全分別されて、リサイクルされる場合と、現状での分別シナリオについて比較を行う。

### 3.1 結果とまとめ

主な計算結果を現状シナリオの下で得られた基準値に対する変化率として表したのが、表1である。○はシナリオを構成する各項目が該当すること、×は該当しないことを示す。可燃分と不燃分についての分別を行う場合の結果、すなわちシナリオAとシナリオBの比較を見ることにする。二酸化炭素排出についてシナリオBは基準値と比べて0.016%増大するが、埋立重量、埋立容積についてはともにシナリオBの方がそれぞれ0.36%、0.41%減少が観察される。雇用についてはシナリオ間の格差はほとんど見られないが、シナリオDについては基準値と比較して若干の増大が見られる。

建設廃棄物の分別についてのシナリオ分析結果を比較すると、可燃分と不燃分についての分別を行い、かつ建設廃棄物からの再資源化原材料の回収も完全に行える場合、すなわちシナリオDにおいて埋立重量、埋立容積ともに最も大きな減少を観察することができる。しかしシナリオBとシナリオCを比較したとき、再資源化原材料の回収が不完全である場合、将来にわたって埋立容積を減少させる効果は、可燃分と不燃分についての分別を行う場合の効果よりも小さいことが観察される。これは再資源化原材料の回収が不完全である場合、バージン材のみからなる財と同様のリサイクル率を保つことは不可能であるという想定のもとでの分析結果である。このことから分離技術の伴わない再資源化原材料の使用は、将来にわたって分析を行った場合、その効果について留意が必要であると考えられる。

### 4. 結語

本論では、廃棄物産業連関表の動的な拡張を試み、

表1 シナリオ分析結果

	A(control)	B	C	D
分別(1)	×	○	×	○
分別(2)	×	×	○	○
粗生産	0	-0.0168	-0.0011	0.0109
雇用	0	-0.0056	-0.0042	0.0425
埋立重量	0	-0.3616	-0.8194	-0.9726
埋立容積	0	-0.4116	-1.0834	-1.4283
二酸化炭素	0	0.0155	-0.5852	-0.3005

建築物のような数十年の寿命を持つ耐久財の流れがもたらす経済・環境負荷の大きさを試算するモデルの提示と、分別と建築物について再資源化原材料の回収効果についての試算を行った。

本稿のモデルでは技術に関する係数、資本ストック係数、投入係数について時間に対して一定とし、また寿命を持つ耐久資本財として建設部門の最終財のみを仮定している。その他の耐久資本財としては建設部門以外にも自動車、農業部門における果樹などが考えられる。今回、試算の対象としなかった資本財部門についても今後、考慮していく必要があると考えられる。

#### 参考文献

- Nakamura, Shinichiro, "An Interindustry Approach to Analyzing Economic and Environmental Effects of the Recycling of Waste," *Ecological Economics*, 1999, 28 (1), 133-145.
- 青井・河原・小野・谷口(1999)「住宅解体時における建設廃棄物量の推定」第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集 pp.408-410.
- 漆崎昇・水野稔・下田吉之・酒井寛二(2001)「産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定」日本建築学会計画系論文集 no.549 pp.75-82.
- 建設省建設経済局調査情報課「建設部門分析用産業連関表」各年度版財団法人建設物価調査会
- 建設解体廃棄物対策研究会編(1998)『解体・リサイクル制度研究会報告-自立と提携によるリサイクル社会の構築と環境産業の創造を目指して-』大成出版社.
- 田崎智宏・小口正浩・亀屋隆志・浦野紘平(2001)「使用済み耐久消費財の発生台数の予測方法」廃棄物学会論文誌 Vol.12 no.2 pp.49-58.
- 清水貴雄・大佛俊泰(2000)「建築物の除却要因と残存率の推定」日本建築学会大会学術講演便概集 F-1,7402.
- 中村慎一郎(2000)「廃棄物処理と再資源化の産業連関分析」廃棄物学会論文誌 Vol.11no.2 pp.84-93.
- 中村慎一郎編(2002)『廃棄物経済学をめざして』早稲田大学現代政治経済研究叢書16,早稲田大学出版部.
- 中山裕文・小宮哲・松本亨・井村秀文(2001)「長寿命建築物普及シナリオの環境経済評価シミュレーション」第12回廃棄物学会研究発表会論文集 pp.44-46.
- 野城智也・加藤裕久・吉田倬郎・小松幸夫(1990)「東京都中央区における事務所建築の寿命実態-非木造建築物の寿命実態に関する調査研究」日本建築学会計画系論文報告集 no.413 139-149.

橋本征二・寺島泰(1999)「建築物解体廃棄物の原単位設定」廃棄物学会論文誌 vol.10no.1 pp.35-44

#### 環境影響評価としてのエクセルギー解析の可能性

法政大学

機械工学専攻 添野 良彦

私は2年前、機械工学科の修士として法政大学大学院に入学してからLife Cycle Assessment (LCA)の研究を始めました。機械工学科で環境負荷の評価方法を研究するのは珍しいようで、就職活動で研究内容について聞かれるとほとんどの場合、私の所属学科を疑われました。しかしながら事実は事実。機械工学科の修士でも環境の勉強を真剣に取り組み、また環境問題改善のための研究を行うようになってきた、ということはそれだけ社会の流れが「環境」を軸とした流れに進んでいる証拠なのではないでしょうか。

さて、材料や製品の環境負荷評価方法の代表例としてLCAという手法があり、様々な問題を抱えていることは周知の事実です。その中でも我々は、環境影響の統合評価に問題があると考えていました。既に環境影響の統合評価として有名なものにエコインディケータ95、EPS、エコポイント法などありますが、いずれも主観的な要素が含まれるため“厳密な意味で”科学的な手法と言えるものではありません。これらの研究もたいへん有意義なものではあると思いますが、LCAがより広く社会に受け入れられ、環境負荷評価方法として確立するためには、より科学的な環境影響の「ものさし」も必要であると考えられます。

我々の研究は、環境影響の尺度としてエクセルギーを用い、LCAに組み込んでその有用性を議論するものです。研究のきっかけとなったのは、「Accounting for Resources 2」<sup>1)</sup>というAyresの本です。この本の中で、エクセルギーの廃棄を環境影響の尺度としてみるのが提案されています。これは、環境中に廃棄されるエクセルギーを計算し、その大きさを環境負荷ポテンシャルを評価しようとするものです。エクセルギーは仕事として取り出し得るエネルギーの大きさを表す量で、通常、どれくらいエネルギーを有効利用できているのかの指標として用いるものですが、Ayresの提案は、それを逆からみて、「エクセルギーの大きな物質の廃棄はそれだけ環境へ負荷を与える危険性持つ。」という新たな視点を提供するものでした。実際、物質の廃棄、特に化学エクセルギーを持つ廃棄物質の化学反応が主に環境問題を引き起こすので、化学エクセルギーの廃棄に注目してAyres

の提案を活用することは非常に有用であると思われます。

そこで我々の研究が始まった訳ですが、具体例として飲料容器のライフサイクルと発電プロセスを取り上げました。飲料容器を取り上げた理由はそれまでに我々の研究室で蓄積してきた研究結果を活用することができたからです。以下に今まで研究を行って分かったことを述べたいと思います。

### 1. 飲料容器のエクセルギー解析

今までに我々の研究室でアルミ缶、スチール缶、PETボトル、ガラスびんのライフサイクルのエクセルギー解析を行いました。ここでは、アルミ缶の解析結果を紹介したいと思います。

アルミ缶1000缶のライフサイクルを解析した結果をFigure 1に示します。この図は、第5回エコバランス国際会議でも紹介させて頂きました<sup>2)</sup>。正三角形がプロセスを表し、矢印の長さがエクセルギー、幅が質量を表します。三角形の各辺がそれぞれ、投入、出力、廃棄を表します。この図を用いることで、質量とエクセルギーという基本的な量を同時に表すことができます。(a)はリサイクルを行わず、使用済みアルミ缶を廃棄した場合で、(b)は、使用済み缶を100%リサイクルした場合です。リサイクルを行うことによって、製造及び廃棄段階が消えることが分かります。我々の解析結果によれば、投入のエクセルギーは、2513MJから674MJへ削減すること

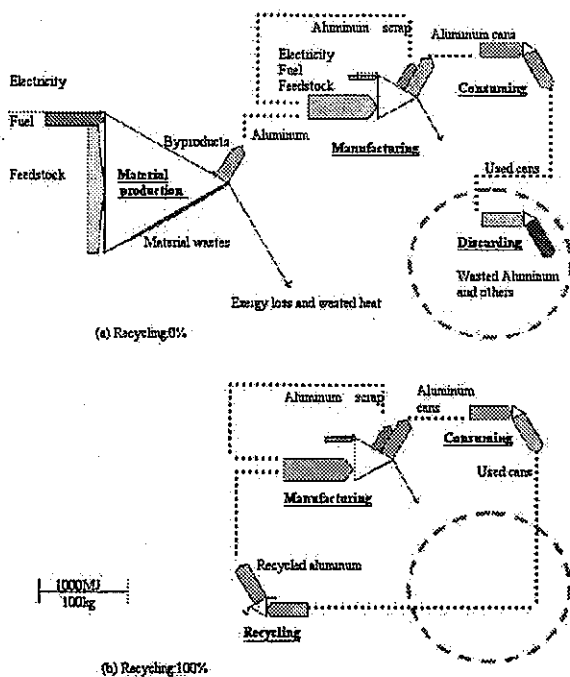


Figure 1 Integrated exergy and mass flows in the processes of life cycle of one thousand aluminum cans in the cases of (a) recycling:0% and (b) recycling:100%.

ができ、廃棄物質に関しては513MJから11MJへと劇的に減少しました<sup>3)</sup>。

この結果から、廃棄物質のエクセルギーに注目することで廃棄の評価に新たな視点を提供したと言えます。また、従来のLCAでは廃棄の評価が甘いので、リサイクルの効果は投入資源の減少によって表現されますが、エクセルギーを用いると、リサイクルの効果を①廃棄エクセルギーの減少(環境負荷の低減) ②投入エクセルギーの減少(資源消費の低減)という2つの側面から定量的に示すことが可能となりリサイクルの効果をより明確に示すことが可能となります。

### 2. 電力のエクセルギー解析

発電プロセスに関しては、今までに火力、水力、原子力、自然発電などの解析を行いました。まず火力、原子力発電の解析結果を紹介したいと思います。

その結果をFigure 2に示します。この結果は発電の運用のみを解析したものであり、発電所の建設、廃棄時の評価は今後の課題として残されています。この解析結果から同じ1000MJ発電するにも火力発電に比べ、原子力発電の方が投入の質量及び物質廃棄のエクセルギー双方が小さいので、環境負荷低減に対して有効に見えます。

そこで、物質廃棄の詳細についてFigure 3に示します。これは先ほどの電力の解析結果について物質廃棄の詳細を示したものです。この結果から火力ではほとんどが

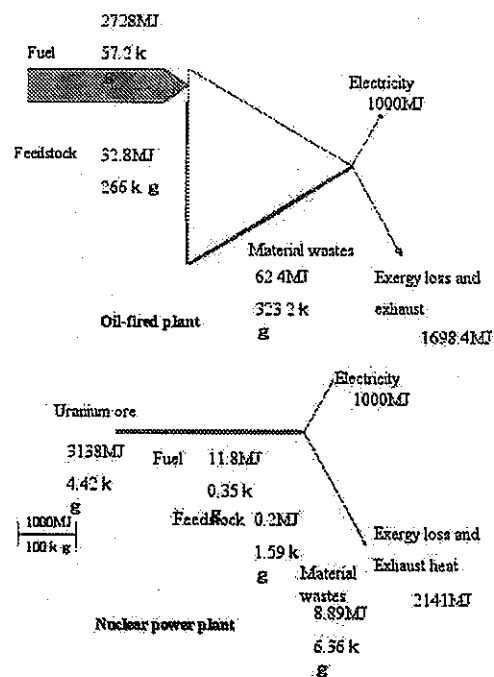


Figure 2 Production Processes of Electricity

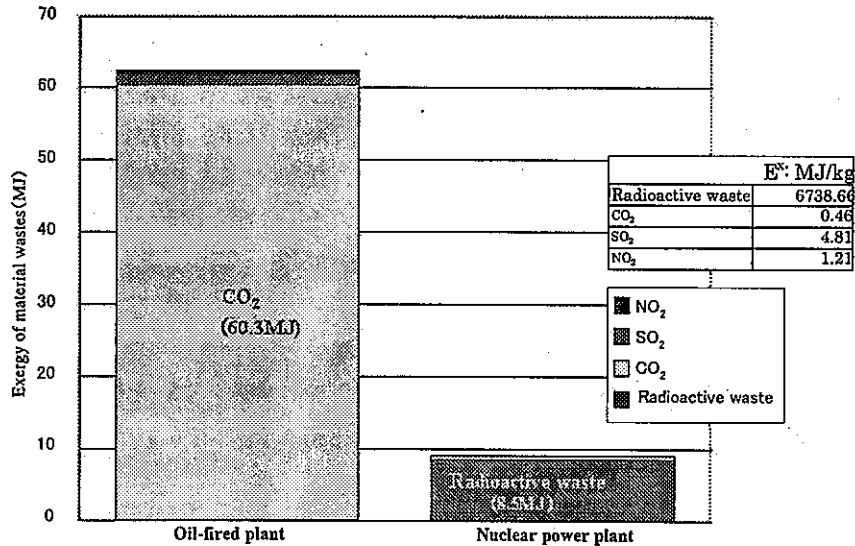


Figure 3 Details of material wastes

CO<sub>2</sub>、原子力では放射性廃棄物であることが分かります。放射性廃棄物についてはアメリカ原子力学会が提案した「ANSの式」を用いて崩壊熱を計算した値をエクセルギーとしました。単位質量当りで比較すると放射性廃棄物のエクセルギーは非常に大きいのですが排出されるCO<sub>2</sub>に比べ非常に質量が小さいので今回はこのような結果となりました。

この結果から、エクセルギー解析ではCO<sub>2</sub>のように多少単位質量当たりのエクセルギーが小さくても大量に排出される物質は、結果に与える影響が大きいことが分かります。また、放射性廃棄物やダイオキシンのような微量物質の毒性を適正に評価することは難しいと言えま

す。

その理由はエクセルギーの“働きかけ”の違いによって説明できると考えています。環境影響の観点からエクセルギーをみると、その振る舞いは次の2つに大別できると考えられます。

- タイプ1：エクセルギーが生態系の「構造」を壊す場合
  - タイプ2：エクセルギーが生命の「情報」を壊す場合
- SO<sub>x</sub>、HFなどは、タイプ1の例であり、それらの物質の化学エクセルギーは、森林、人体などの「構造」に働きかけるものと考えられます。また、放射性廃棄物やダイオキシンといったものはタイプ2であり、それらは生命の「情報」を壊したり、阻害したりすることで生態系や

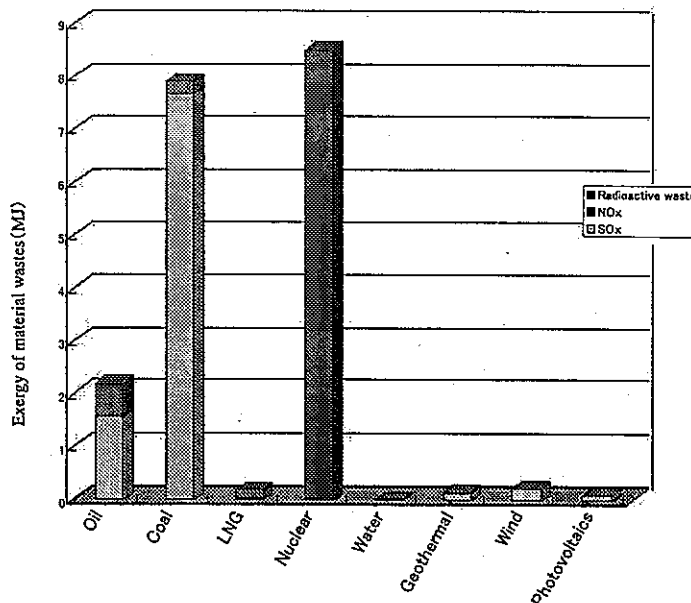


Figure 4 Comparison of electrical power plants



人体に対して影響を及ぼします。放射線による遺伝子の破壊はその典型的な例です。タイプ1の場合、エクセルギーを環境影響の尺度としてみることは有効であります。タイプ2の場合、放射線の遺伝子破壊によって引き起こされるような影響の増幅をエクセルギーによって測ることはできません。我々が行った原子力発電の解析結果は十分なものとはいえませんが、その原因は放射性廃棄物がタイプ2に属するものであるからと考えられます。

したがって、エクセルギー解析の結果を検討するにはエクセルギーの中身に踏み込んだ議論が必要であるといえます。ではエクセルギーの中身とは何でしょうか。先日、大学の修士論文の発表会で、ある教授から「CO<sub>2</sub>にエクセルギーはあるのか。」という質問を受けました。CO<sub>2</sub>のエクセルギーは、SO<sub>x</sub>やNO<sub>x</sub>と違って濃度差エクセルギーです。つまり、濃度100%のCO<sub>2</sub>が大気濃度300ppmとなるまでの拡散によってなすことのできる最大仕事です。ですから、物質の持つ化学エクセルギーに注目するという我々の観点からすれば、分離して考える必要があります。そこでCO<sub>2</sub>を除いて計算した結果がFigure 4となります。Figure 4において、今までに我々が解析を行ってきた発電のシステムの比較を行っていますが、原子力発電所の物質廃棄が一番大きいものとなっています。このようにエクセルギーの“種類”や“働きかけ”を考察することよりエクセルギー解析の結果を実際の問題に即してみることが出来ます。

### 3. まとめと今後の課題

今までに分かったことをまとめてみます。

- (1) エクセルギーを用いて環境負荷物質を統合し、環境影響の尺度としてみることで、廃棄のプロセスに新たな視点を提供し、リサイクルの効果をより明確に表現できるようになりました。
- (2) 化学エクセルギーもしくは放射性物質のエクセルギーが零であれば毒性が零とみなせるので、エクセルギーを環境影響の尺度としてみることは有用です。しかしながら微量物質の毒性評価は困難であり、特にエクセルギーが生命の「情報」を壊す場合は影響の増幅があるので非常に難しいことが分かりました。その場合にはエクセルギーの中身を“種類”や“働きかけ”を考慮して議論する必要があると言えます。

エクセルギー解析の今後も大いに期待できるのではないのでしょうか。また、研究を進めてきた中で問題も数多く見えてきました。ここで1つ紹介します。

エクセルギーは、一定の環境とみなせる中にある系については非常に役に立つ概念ですが、環境が変わればエクセルギーの値は変化します。しかし、環境には循環があるので常に変動し、一義的に「環境状態」、つまりエクセルギーのゼロポイントを決めることは原理的にはできません。本研究では、JIS Z 9204<sup>4)</sup>の手法に基づいてエクセルギーを計算しましたが、それはAyresの提案する手法とは異なります。一例として、JISの手法では、アルミナのエクセルギーは零ですが、Ayresの場合は、1.97MJ/kgです。今後、環境負荷評価の観点からエクセルギーのゼロポイントをどうやって設定するのかという議論が必要になると思います。

私は残念ながら今年度でこの研究は終わりとなり、環境評価とは直接的にはほとんど無縁の人になりますが、いつの日かエクセルギーを用いた環境負荷評価が研究室レベルを越えて社会の役に立つ手法として確立することを願っています。最後に、研究を進めるに当たり、法政大学の井野博満教授、白鳥紀一教授、物質・材料研究機構のエコマテリアル研究センターの原田幸明センター長からこの2年間本当に丁寧なご指導や貴重なご助言を賜りました。ありがとうございました。

### 参考文献

- 1) Robert U. Ayres and Leslie W. Ayres : *Accounting for Resources, 2*, (Edward Elgar Pub., 1999) pp. 1-61.
- 2) Y. Soeno, H. Ino, K. Siratori, K. Nakajima, K. Halada : Proc. 5th Int. Conf. on Ecobalance (2002), pp. 837-840.
- 3) Y. Soeno, H. Ino, K. Siratori, K. Halada : *Exergy analysis to evaluate integrated environmental impacts*, (Submitted to Materials Transaction).
- 4) Japanese Industrial standards Committee : JIS Z 9204 (1991), pp. 1-33.

LCA日本フォーラムではご加入申込みを随時受付しております。詳しくは産業環境管理協会ホームページをご覧ください。  
<http://www.jemai.or.jp/lca/3-2lca-forum.html>

お問合せ先:

社団法人産業環境管理協会  
LCA日本フォーラム事務局 安井  
TEL : 03-3832-7085  
E-mail : yasui@jemai.or.jp

## LCAインフォメーション

### ◆関連行事カレンダー

行事名称	開催日	開催場所	主催者／問合せ先
SETAC Europe 13 <sup>th</sup> Annual Meeting Understanding the Complexity of Environmental Issues: A way to sustain- ability	2003.4.27～5.1	Hamburg / Germany	<a href="http://www.setac.org">http://www.setac.org</a> TEL : +32-2-772.72.81 E-mail : setac@setaceu.org
環境広場さっぽろ2003	2003.8.1～3	アクセスサッポロ	札幌市環境局環境計画部 環境活動推進課内実行委員会 TEL : 011-272-1282 E-mail : kankyohiroba@city.sapporo.jp
Environmental Health Risk 2003	2003.9.17～19	Catania / Italy	WESSEX INSTITUTE OF TECHNOLOGY <a href="http://www.wessex.ac.uk/conferences/2003/healthrisk03/">http://www.wessex.ac.uk/conferences/2003/healthrisk03/</a> E-mail : adarcy-burt@wessex.ac.uk
InLCA / LCM2003	2003.9.23～25	Seattle / USA	The American Center for Life Cycle Assessment, UNEP, etc <a href="http://www.lcacenter.org/InLCA-LCM03/index.html">http://www.lcacenter.org/InLCA-LCM03/index.html</a>
4 <sup>th</sup> International Conference on : Life Cycle Assessment in the Agri-food sector	2003.10.6～8	Horsens / Denmark	Department of Agricultural Science Research Centre Foulum <a href="http://www.lcafood.dk/lca_conf/">http://www.lcafood.dk/lca_conf/</a> E-mail : birgit.sorensen@agrsci.dk
Sustainable Innovation 03 Creating Sustainable Products, Services and Product-Service Systems	2003.10.27～28	Stockholm / Sweden	The Centre for Sustainable Design The Surrey Institute of Art & Design, University College <a href="http://www.cfsd.org.uk">http://www.cfsd.org.uk</a> E-mail : mcharter@surrart.ac.uk

#### 〔編集後記〕

当協会の近くには上野公園や不忍池など桜の名所も多くこれからの季節は連日賑わいを見せることだろう。日本人は桜に対して格別の思い入れがある。祝いの席では桜を添えた桜湯を飲み、花見の席では花を愛で飲み歌い交流を深める。入学、卒業など人生の節目にも桜の花が風情を添えている。

さて、春は出会いと別れの季節であるが、去る人、来る人それぞれであろう。桜の満開は年に僅かに10日間ほどで、その時期を逃せば来年までもう見ることはできない。時間は誰にも均等に流れるが、密度はどうだろうか。毎年桜を眺めながら「一期一会」の言葉が思い出されるものである。(MY)

#### 何でもご意見番

ご意見お聞かせ下さい。(FAX返信)  
また、記事の投稿を歓迎致します。

発行 LCA日本フォーラム/(社)産業環境管理協会  
〒110-8535 東京都台東区上野1-17-6 広小路ビル  
電話 03-3832-7085 FAX 03-3832-2774  
URL <http://www.jemai.or.jp>