

人工物設計・生産研究連絡委員会  
生産システム学専門委員会報告

ライフサイクルデザイン(LCD)指標体系に  
基づく人工物設計・生産の評価指針  
LCD 戦略に向けた構造的評価方法

平成15年6月24日

日本学術会議  
人工物設計・生産研究連絡委員会  
生産システム学専門委員会

この報告は、第18期人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会の審議結果を取りまとめ報告するものである。

[ 人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会 ]

委員長 古川 勇二（東京都立大学）  
幹事 高田 祥三（早稲田大学）  
委員 岸田 俊二（日本電気株式会社）  
木村 文彦（東京大学）  
須賀 唯知（東京大学）  
福田 敏男（名古屋大学）

オブザーバー

梅田 靖（東京都立大学）  
圓川 隆夫（東京工業大学）  
大橋 敏二郎（新エネルギー・産業技術総合開発機構）  
山際 康之（ソニー株式会社）

## 目 次

1 . ライフサイクルデザインの重要性 .....	1
2 . 環境評価指標の現状と課題 .....	2
3 . ライフサイクルデザインのための指標体系 .....	4
4 . 提案した評価指針の位置づけ .....	6
5 . アクションプラン .....	8
6 . まとめ .....	9
補足：企業における環境影響評価事例 .....	10
(1) 企業環境戦略指標としての環境効率の検討	
(2) 循環指標としてのインバースリサイクル指数の提案	
(3) 企業戦略の策定事例	
(4) まとめ	

「ライフサイクルデザイン(LCD)指標体系に基づく人工物設計・生産の評価指針  
LCD 戦略に向けた構造的評価方法 」要旨

(1) 作成の背景

- 現代社会における人工物の設計・生産において、地球環境と資源の有限性を意識した「持続可能な発展 ( Sustainable Development )」が重要な概念となっている。
- 製造業の企業活動は、製品製造を通じた付加価値の向上のみによる利益の追求のみならず、環境調和性を利益の源泉とするように企業戦略の転換が求められている。
- 環境問題解決に向けた技術も、省エネルギー技術やリサイクル技術に代表されるように要素技術の高度化は急速に進んでいるものの、それらが総体として「持続可能性」にどの程度寄与しているかは必ずしも明確でなく、製品ライフサイクルをシステム化し、全体論的に持続性を達成するための技術戦略が求められている。
- これらの課題を解決する一つの鍵が、製品ライフサイクルを環境面、経済面などから統合的に評価し、さらに、ライフサイクル・シナリオや技術開発目標を明確化可能な「指標」を体系化することであると捉え、活動を行った。

(2) 現状及び問題点

- 既存の環境評価指標として、ファクター10のようなグローバルな指標、CO2排出量のようにライフサイクル全般を評価可能な指標(「目標指標」と呼ぶ)、リサイクル率のように個別のプロセスに関連する指標(「手段指標」と呼ぶ)が存在する。
- 目標指標は、具体的な対象に対する一般的な測定、評価方法が必ずしも明確でない。
- 目標指標と手段指標の関係性は個別的であり、一般的な関係として記述できない。
- ライフサイクルアセスメントや環境パフォーマンス指標などの既存の指標は、ライフサイクルデザインで主眼を置く人工物の循環(特に、リマニュファクチャリングやリユース)や寿命を直接的には表現していない。
- これらの課題が、循環生産を促進する上での障害となっている。

(3) 改善策、提言等の内容

- 製品ライフサイクル全体の持続可能性を総合的に評価するために、種々の指標を構造化した LCD 指標体系を提案する。この評価指標体系は、ライフサイクル全体としての目標を与える環境影響評価指標と環境問題解決のための個々の手段を評価する指標に二分され、その間をライフサイクルシミュレーションとライフサイクルアセスメントを統合的に使用することにより対応づけることを提案する。
- 個別の製品やサービスのライフサイクルデザインを実施する際に、解決すべき環境問題の構造化、明示化のために、この評価指標体系から対象に対応した指標系を導出する手順を示す。これは、ライフサイクルデザイン・プロセスの重要な 1 ステップである。この結果として、企業が、ライフサイクルデザインを実施する中で、循環生産に向けて企業戦略や製品戦略を明確化し、その実現方策を選定・開発することを促進する効果を持つと期待される。
- 今後、振興すべき LCD へ向けての基礎学術として、ライフサイクル指標体系の確立と標準化、LCD 評価指標のギャップを埋めるライフサイクルシミュレーション、および、ライフサイクルアセスメントとの統合化の研究、ライフサイクルデザイン時に、指標体系から指標系を導出する手順の標準化を提案する。これらを実施することにより、循環型製品ライフサイクル、および、それに対する企業戦略の客観的評価が可能となり、グリーン購入やエコファンドとの相乗効果により、製造業の循環生産化が大幅に促進される効果が期待できる。
- 補足として、実際に企業で実施、もしくは、検討している環境影響評価の事例を挙げ、上記のライフサイクルデザイン指標体系活用の可能性を検討した。

# ライフサイクルデザイン(LCD)指標体系に基づく 人工物設計・生産の評価指針 LCD戦略に向けた構造的評価方法

## 1. ライフサイクルデザインの重要性

我々は、自然環境を単純に利用するだけでなく、それを素材として作り変えることにより、我々の生活の質を向上させてきた。過去の発展過程では、自然界からは有用資源が必要なだけ獲得でき、また不要物は自然界へ放出すれば消滅する、という「無限大信仰」が暗黙のうちに受け入れられていた。科学的に正確な検証が必要であるが、現代の工業社会の発展は、この無限大信仰を許さない水準に達したようであり、地球環境の有限性を意識した持続可能性が重要な概念となってきた[1]。

このような人工物の設計・生産を取り巻く状況の変化の下で、製造業の企業活動は、製品製造を通じた付加価値の向上のみによる利益の追求のみならず、環境調和性を利益の源泉とするように企業戦略の転換が求められている。一方で、環境問題解決に向けた技術も、省エネルギー技術やリサイクル技術に代表されるように要素技術の高度化は急速に進んでいるものの、それらが総体として「持続可能性」にどの程度寄与しているかは必ずしも明確でなく、製品ライフサイクルをシステム化し、全体論的に持続性を達成するための技術戦略が求められている。

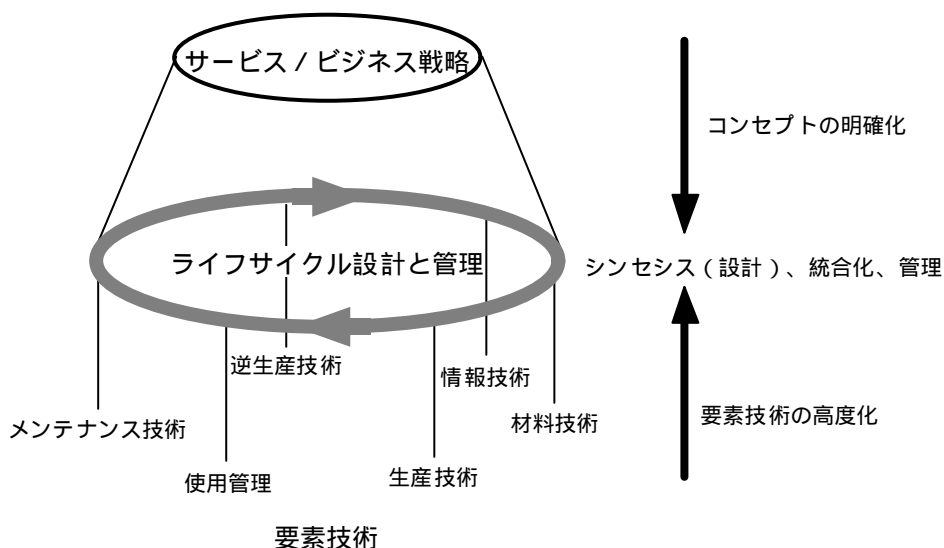


図1 ライフサイクルデザインの基本的視点[2]

生産システム学専門委員会では、このような環境問題への認識の下での製造業全体の在り方の検討を目的として活動を行っており、第 17 期の提言書では「ライフサイクルデザイン」を基本コンセプトに諸課題を整理した[2]。ここで言う「ライフサイクルデザイン」とは、製造業において適切な循環型製品ライフサイクルを構築するための、製品ライフサイクルの設計、管理、運用を統合的に行うことを指す広義の意味で使用している。このために必要な基本的視点は、以下の三点にまとめられる(図 1 参照)。

1. ものの提供からサービス提供によるビジネスへの転換
2. 単に人工物を作るだけでなく、人工物のライフサイクル全体の設計、管理
3. 循環型ライフサイクルを実現する種々の要素技術の高度化

現状では、3.の種々の要素技術の高度化が急速に進展している一方で、ライフサイクルデザインの基本戦略、基本方針の策定が困難であるという問題がある。すなわち、環境に調和した循環型製品ライフサイクルを経済的にも成立させるための、サービスやビジネス戦略、解決すべき環境目標、循環方法、および、ライフサイクル管理方法などを適切に決定する方法論が明らかではない。ここでは、ライフサイクルデザインの初期段階においてこれらの諸方針を策定する段階を「ライフサイクル・シナリオ」の策定段階と呼ぶことにする。さらに、現在の社会状況において一足跳びに理想的な循環型製品ライフサイクルを実現することは必ずしも容易ではなく、十年単位での循環型製品ライフサイクルへの移行戦略を適切に策定することにきわめて重要な意味がある。

本委員会では、これらの課題を解決する一つの鍵が、製品ライフサイクルを環境面、経済面などから統合的に評価し、さらに、ライフサイクル・シナリオや技術開発目標を明確化可能な「指標」を体系化することであると捉え、活動を行った。別の面から言えば、グリーン購入などのために製品の環境調和性を評価する場合や、エコファンドのように企業の環境調和性や環境問題解決への企業戦略を評価する場合にも環境評価指標体系は極めて重要な役割を担っている。

## 2. 環境評価指標の現状と課題

ライフサイクルデザインの目標である「持続可能性」は、例えば、地球生産性[1](式(1)参照)といった形で表現されるであろう。

$$\text{地球生産性} = \frac{\text{社会全体の満足度}}{\text{地球環境への総負荷}} \quad (1)$$

式(1)に類似の概念として、ファクター10[7]やファクター4[8]、エコ・エフィシエンシー[9]などがある。これらの指標は、式(1)を直接的に表現しているが、具体的な対象に対する一般的な測定、評価方法が必ずしも明確でないという問題点がある。

すなわち、

- 分子である「満足度」や「価値」に対する一般的かつ計測可能な形での定式化が現状技術では困難であり、合意された形での評価方法がない。
- 分母の「地球環境への総負荷」を単一尺度で表現することは、複雑な悪構造問題である「環境問題」の本質的構造とその重みを決定する問題に帰着する。この問題については、LCA のインパクト分析の専門家が議論を行っており、幾つかの方法が提案されているが、一般的な合意に至っていない。

一方で、環境問題解決に向けた種々の研究活動の活発化とともに、様々なより具体的な評価指標が提案されてきた。その中で、最も規格化され、実用化されているものは、ライフサイクルアセスメント(LCA) (例えば、[3]) であろう。この他にも、「環境パフォーマンス指標」[4]では、環境に関する種々の指標を広く整理している。「環境会計ガイドライン」[5]は、企業が支払った環境保全コストに対して得られた経済的、非経済的環境保全の効果を測定する手法である「環境会計」を実施するためのガイドラインを提供している。ただし、環境会計は、定義に則ると、本来的な企業活動以外の付加的な環境保全コストとその効果を測定するものであり、ここで提案している「必要とされるサービスをできるだけ環境面においても効率よく提供する」という考え方、例えば、製造業の生産形態を大量生産・大量販売から循環型製品のサービス販売へ転換する、といった基本的な構造転換の効果を直接的に計測することが困難である。また、「資源循環指標 策定ガイドライン」[6]は、いわゆるリサイクル率、リユース率といった資源循環に関わる指標を種々の法規制等の間の整合性の問題からより詳細に議論したものである。また、上記の「環境パフォーマンス」は、環境会計、資源循環指標を包含する概念である。

以上に述べた種々の環境指標をライフサイクルデザインに適用する場合、以下の二つの課題がある。

#### 1. LCD 評価指標のギャップ

上記の種々の指標は、単純化すれば二種類に分類できる。すなわち、式(1)やライフサイクル全体の総 CO<sub>2</sub> 排出量などのような、企業の経営戦略、環境解決目標、技術開発戦略、製品開発戦略に関わる解決すべき「目標」を表現する指標（これをここでは、「目標指標」と呼ぶ）と、リサイクル率、リユース率といった、種々のライフサイクル・オプション（リデュース、アップグレード、リユース、リサイクル、メンテナンスなど広い意味での循環方法）に関わる指標（これをここでは、「手段指標」と呼ぶ）である。ライフサイクルデザインにおいて問題となるのは、この目標指標と手段指標間の関係性が明確に記述できないことである。例えば、リサイクル率の向上は、最終廃棄物量の削減に対しては明確な効果を持つが、総 CO<sub>2</sub> 排出量に関してはリサイクルの実現方法に依



存し、一般的な関係としては記述できない。この問題は、リサイクルやリユースが総体として持続性に寄与するか否かは個別的に議論せざるを得ないという環境問題の本質的困難性と深く関連しており、ライフサイクルデザインの際に、どのような循環戦略を採るかを決定するために大きな課題となる。

## 2. 循環の評価

上記に挙げた指標は、ライフサイクルデザインで主眼を置く人工物の循環や寿命を十分に評価することが困難である。これは、閉ループのリマニュファクチャリング、部品リユース、材料リサイクルなどを行うと、製品ライフサイクル内に複雑、かつ、長期の時間に依存したフィードバックループが形成されるためである。例えば、ライフサイクルアセスメントでこのような動的なメカニズムを通常扱ってはならず、環境パフォーマンス指標でも循環を前提とした指標は記載されていない。一方で、資源循環指標はリサイクル率、リサイクル可能率、再商品化率などの既存の指標の整理を中心に循環の指標指標化を行っているが、主として材料リサイクルを前提としており、リユース率などに関する議論不足は否めない。

## 3. ライフサイクルデザインのための指標体系

以上の議論に基づき、本研究で提案すべき指標体系の要求項目を以下のように設定した。

1. 今後の技術開発の方向性、あるべき姿が見える指標体系
2. 環境に良い循環生産の在り方（ライフサイクルデザインのコンセプト）が見える指標体系
3. 開発すべき技術の優先順位付けができる指標体系
4. 企業戦略と使用すべき指標の関係が明示的に示される指標体系

また、「指標」一般の要求項目として以下の点が挙げられる。

5. 汎用的で、広く利用することができる
6. 評価ができるだけ容易
7. 測定可能

これらの目的を実現するため、ここでは以下のアプローチをとることを提案する。

1. 目標指標を、曖昧な単一指標で表すのではなく、環境負荷、経済性、顧客満足度を含むより具体的な指標の組み合わせとして表現する。
2. 手段指標を、循環を前提とした場合に重要となるライフサイクル・オプション毎に分類整理して提示する。
3. 適切な目標指標、手段指標は、企業戦略、対象製品、循環戦略などに依存するため、種々の目標指標と手段指標をリストアップした一般的な形の「指標体

系」と、個々の製品、サービスを表現するための「指標系」の二段階表記法を採る。すなわち、個々の製品、サービスなどのライフサイクルデザインの実施時には、一般的な指標体系から、各種の指標を適宜、取捨選択し、個別の設計対象の製品ライフサイクルを最も適切に表現、計測、評価可能なように指標系を構築する。

4. 目標指標と手段指標の関係は、一般的、演繹的な形で記述することは困難であるため、動的にモノ、情報、お金などの流れのシミュレーションを行うライフサイクルシミュレーション（例えば、[10]）、および、ライフサイクルアセスメントを用いて対応づける[11]ものとする。

すなわち、式(1)の一般解に相当する指標を策定することは現状の技術レベルでは困難であるという認識の下で、個別の対象に合わせて構造化された指標系を構築することが、第1.節で述べた、ライフサイクル・シナリオを策定する作業と表裏一体を成す、ライフサイクルデザインの重要なステップであるという考え方である。このアプローチの課題として、極めて異なる製品・サービス間の比較、例えば、製鉄プロセスと電話の使用の比較、が困難になるが、ここでは、この課題よりも、産業界のライフサイクルデザインへ向けてのドライビングフォースとしての役割、すなわち、要求項目1.~4.を優先することとする。

以上から、図2に示すライフサイクルデザインのための指標体系を提案する。図2において、図の上半分には、企業の経営戦略、環境解決目標、技術開発戦略、製品開発戦略に関わる目標指標を資源、廃棄物、エネルギーなど評価項目毎に分類して提示し、図の下半分には、ライフサイクル・オプション毎に分類整理した手段指標を提示する。目標指標と手段指標の関係は、ライフサイクルシミュレーション、および、ライフサイクルアセスメントを用いて対応づける。

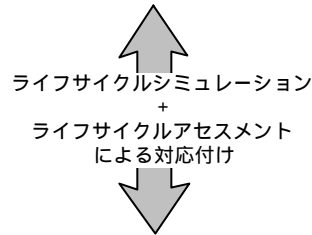
図中に示した指標は代表例であるが、これらは出来るだけ基本的、一次的指標とし、ここから使用目的に応じて、複合指標、比率、相対値などを派生させる。また、各指標は、それぞれ、Plan 段階（企画、ライフサイクル設計、製品・プロセス設計）における計画値と実施後の評価値の二面性を持たせる。

図2の指標体系を特定企業の特定製品ライフサイクルに適用した際の指標系の例を図3に示す。この一般的な図2から図3を導出するプロセスは以下の通りである。このプロセスを、ライフサイクルデザイン作業の重要な1ステップとして位置づける。

1. 図2の上半分を用いて企業の環境戦略（解決すべき環境目標の重み付けなど）を決定し、環境戦略に応じた複合評価指標を作成する。
2. 1.の企業環境戦略に基づき、対象製品のライフサイクル目標を決定し、製品に対する複合指標を作成する。

全体評価指標（一次）

評価範囲	評価項目					
	投入資源	廃棄物	エネルギー	エミッション	価値、機能	経済性
企業	資源使用量 寿命効率	廃棄物量	エネルギー消費量	CO2排出量 フロン使用量 鉛使用量 BOD排出量 COD排出量 SOX排出量 NOX排出量		売上高 付加価値 利益
消費者	消耗品使用量	廃棄物量	エネルギー消費量 待機電力量	CO2排出量	価値 寿命 効用	購入価格 ランニングコスト
社会	上記の合計	上記の合計	上記の合計	上記の合計	上記の合計	上記の合計



ライフサイクルオプションに応じて選択される指標

リデュース	リユース	メンテナンス	リサイクル	最終処分
素材種類数 製品重量 部品点数 部品点数削減率 消耗品使用量 リデュース率 省エネ率 有害物質使用量 パージン資源投入量	限界リユース率 リユース部品利用率 リユース率 部品リユース回数 総リユース率 分解時間 部品モジュール化率 部品共通化率 部品固定化率 回収率	使用時間 稼働時間 物理寿命 信頼性 機能回復率 分解時間 部品モジュール化率 部品共通化率 部品固定化率 回収率	リサイクル材利用率 工場内リサイクル率 リサイクル率 総リサイクル率 分解時間 回収率	減容化率 工場廃棄物排出量 分解時間 サーマルリサイクル率 埋処分量 回収率

図2 ライフサイクルデザイン指標体系

3. 2.に製品ライフサイクル目標を達成するために、ライフサイクルシミュレーション、ライフサイクルアセスメントを用いながら、ライフサイクル・オプションを選択し、ライフサイクル・シナリオを作成する。
4. 作成したライフサイクル・シナリオに基づき、製品設計、プロセス設計を行い、設計結果が製品ライフサイクル目標、企業環境戦略を達成可能であることを確認する。同時に、必要に応じて、技術開発目標を設定し、技術開発を行う。
5. 設計した製品ライフサイクルを実施する。
6. 実施した製品ライフサイクルに関するデータ収集を行い、製品ライフサイクル目標、企業環境戦略が実現されているか確認する。実現されていない場合は、問題点を明らかにし、改良、再設計、技術開発を行い、問題を解決する。

4. 提案した評価指針の位置づけ

第2.節で述べたように、既存の環境評価指標として、グローバルな指標、CO2排出量のようにライフサイクル全般を評価する指標、リサイクル率のように個別のプロセスに関連する指標が存在する。本委員会の一つの結論は、製品ライフサイクル全体の持続可能性を総合的に評価することは、いずれの指標を一つ使用しても困

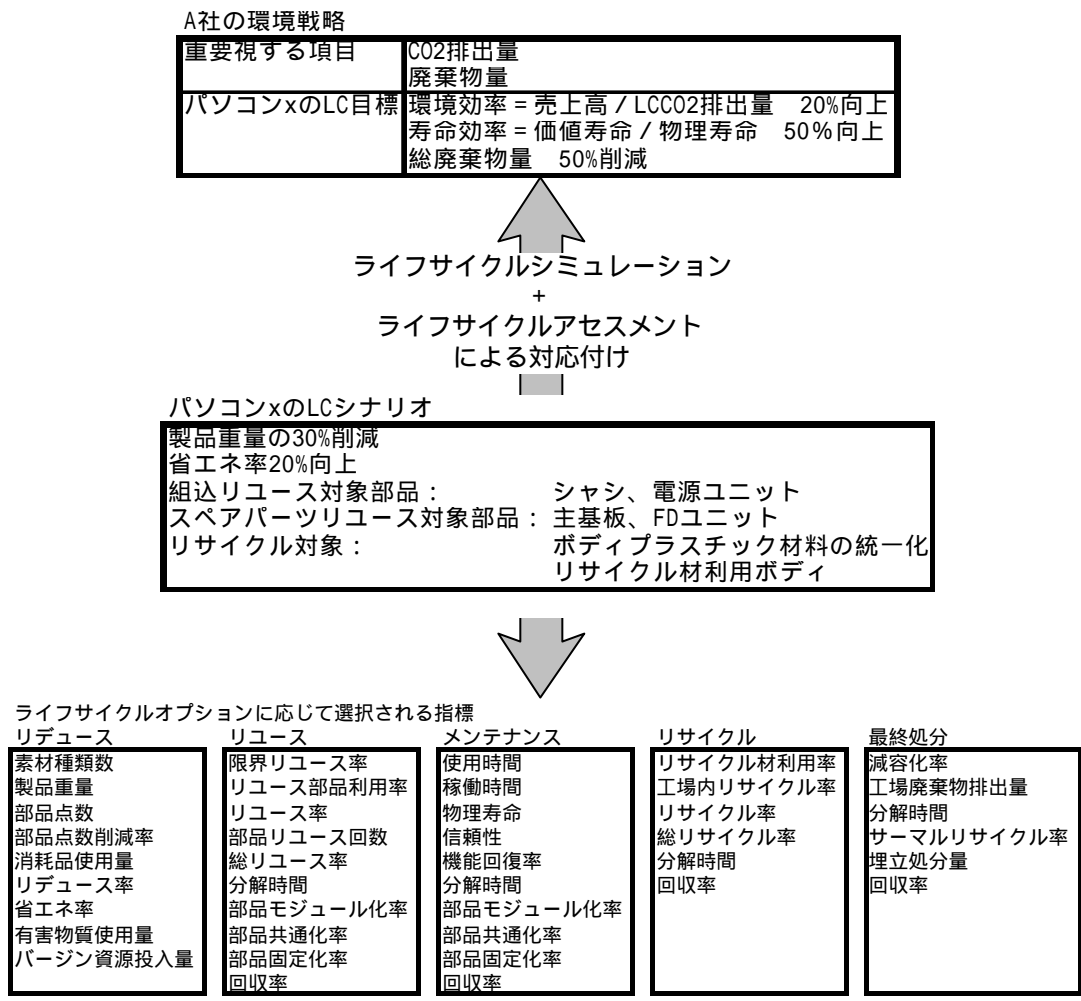


図3 A社のパソコンxのライフサイクルデザイン指標系

難であり、その代案として、図2に示すような指標の構造化、体系化を提案することであった。すなわち、製品ライフサイクルの評価指標を、目標指標（図2の上半分）と手段指標（図2の下半分）の二つに分類する。

このとき、この両者の間の関係の非記述可能性、すなわち、「LCD評価指標のギャップ」は、現在の評価技術では解決されていない問題であり、現状では対象製品、対象製品ライフサイクルに依存して個別的に記述せざるを得ない。そのため、本委員会は、このLCD評価指標のギャップを埋めるための評価指標に関する研究、特に、ライフサイクルシミュレーションとライフサイクルアセスメントを統合的に利用する研究の振興を提言するものである。このギャップを埋める手段として、ライフサイクルアセスメント単独でも相応の効果があると考えられるが、ライフサイクルアセスメントは循環に関して静的な表現であり、また、結果として用いる値はある種の平均値である。このため、例えば部品リユースに関する循環のバランスなどより動的な表現が循環生産のために必要不可欠であることから、ライフサイクルシミュ

レーションを併せて利用することを提案するものである。

さらに、製品やサービスのライフサイクルデザインを実施する際には、図 2 の指標体系から、個別の製品やサービスに対応して、指標を抽出、合成し、ライフサイクルシミュレーション、ライフサイクルアセスメントのための対象に関するモデルを記述し、指標を対応づけることにより、図 3 に示すような個別の LCD 指標系を導出する。本報告書はその手順も提案した。これは、対象とする製品やサービスに対応して解決すべき環境問題を明示的に記述、構造化する作業に相当し、ライフサイクルデザインの必要不可欠な作業である。この結果として、企業が、ライフサイクルデザインを実施する中で、循環生産に向けて企業戦略や製品戦略を明確化し、その実現方策を選定・開発することを促進する効果を持つと期待される。

## 5 . アクションプラン

本報告書で提案した振興すべき研究課題は、以下の三点である。これらを実施することにより、循環型製品ライフサイクル、および、それに対する企業戦略の客観的評価が可能となり、グリーン購入やエコファンドとの相乗効果により、製造業の循環生産化が大幅に促進される効果が期待できる。

課題 1 : ライフサイクル指標体系の確立と標準化

課題 2 : LCD 評価指標のギャップを埋めるライフサイクルシミュレーション、および、ライフサイクルアセスメントとの統合化の研究

課題 3 : ライフサイクルデザイン時に、指標体系から指標系を導出する手順の標準化

これらの課題を促進するため、本委員会のメンバーが中心となり、以下の活動を開始した。

- 課題 1 に対応して、ライフサイクルデザインに関する国内最大の学術講演会「エコデザイン 2002 ジャパン」において、評価指標に関するオーガナイズド・セッションを実施し、各企業の企業評価、および、ライフサイクル評価の実際について講演を実施し、さらに、今後のライフサイクル評価指標の在り方について、パネルディスカッションを実施した。
- 課題 2 に対応して、精密工学会において、ライフサイクルシミュレーションに関する研究会を立ち上げた。

今後は、第 17 期の本委員会が立ち上げた「エコデザイン学会連合」や上記の研究会を中心として、これらの課題に対して、ケーススタディの実施、種々の評価指標の収集と整理、ライフサイクル指標体系と指標系導出手順の確立、標準化、ガイドライン作成などの活動を広く産官学の枠組みなどで振興する必要がある。

## 6. まとめ

本報告では、ライフサイクルデザインのための指標体系に関する基本的な考え方を提案した。すなわち、本委員会の提言は以下のようにまとめられる。

- 1) 製品ライフサイクル全体の持続可能性を総合的に評価するために、図 2 に示すような指標の構造化、体系化を提案した。この評価指標体系は、ライフサイクル全体の環境影響や経済性などを評価する「目標指標」と環境問題解決のための個々の手段を評価する「手段指標」に二分され、その間をライフサイクルシミュレーションとライフサイクルアセスメントを統合的に使用することにより対応づけることを提案する。
- 2) 個別の製品やサービスのライフサイクルデザインを実施する際には、解決すべき環境問題の構造化、明示化のために、この評価指標体系から対象に対応した指標系（図 3 参照）を導出する手順を示した。この結果として、企業が、ライフサイクルデザインを実施する中で、循環生産に向けて企業戦略や製品戦略を明確化し、その実現方策を選定・開発することを促進する効果を持つと期待される。
- 3) 今後、振興すべき LCD へ向けての基礎学術として、  
課題 1：ライフサイクル指標体系の確立と標準化  
課題 2：LCD 評価指標のギャップを埋めるためのライフサイクルシミュレーションと、ライフサイクルアセスメントとの統合化の研究  
課題 3：ライフサイクルデザイン時に、指標体系から指標系を導出する手順の標準化  
を提案する。これらを実施することにより、循環型製品ライフサイクル、および、それに対する企業戦略の客観的評価が可能となり、グリーン購入やエコファンドとの相乗効果により、製造業の循環生産化が大幅に促進される効果が期待できる。

## 補足：企業における環境影響評価事例

本委員会では、実際に企業で実施、もしくは、検討している環境影響評価の事例を挙げ、上記のライフサイクルデザイン指標体系活用の可能性を検討した。補足としてその概要を述べる。まず、第(1)節では、ライフサイクルデザイン指標系の企業戦略指標の一つとして位置づけられる「環境効率」を取り上げ、その意義と定量評価可能性について議論する。また、CO<sub>2</sub> 排出量と売上高を用いた環境効率の計算について述べる。第(2)節では、ライフサイクルデザイン指標系のうち、循環方法に関わる指標と位置付けられる「インバースリサイクル指数」について検討を行う。さらに、第(3)節では、ライフサイクルデザイン指標系の構築の事例として、る企業環境戦略の策定事例を検討する。

### (1) 企業環境戦略指標としての環境効率の検討

本節では、企業の環境効率の意味を付加価値の定義から考察した結果を述べる。また、企業間取引を含む事業のライフサイクル全体の環境効率や、社会全体の環境効率との関係、企業の環境効率を客観評価する可能性、等についても議論する。

#### 企業の環境効率と付加価値

付加価値の定義を考えれば、企業の代表的な環境指標である、

$$\text{環境効率} = \text{付加価値} / \text{環境負荷} \quad (2)$$

は、指標としての納得性は高い。即ち、企業は経済活動を通じて、

$$\begin{aligned} \text{付加価値} &= \text{売上購入費用} \\ &= \text{人件費} + \text{減価償却費} + \text{税金} + \text{利益} \quad (3) \end{aligned}$$

を生み、これが雇用と再投資をもたらし、社会を維持・発展させる。従って自社の付加価値を最大化し、環境負荷を極小化する式(2)の指標の改善は、経営目標としてふさわしい。この指標は一般的に経済活動の単位ごとに定義でき、複数の経済活動単位の集合体についても

$$\text{環境効率} = \text{付加価値の総和} / \text{環境負荷の総和} \quad (4)$$

と、加算的な定義ができるので、拡張性に富む。

#### 事業全体、社会の環境効率

企業は、多数の取引の連鎖を通じて事業（製品・サービス）を遂行しているので、事業に係わる全取引を含むバリューチェーン全体の環境効率を上記の加算的評価で算出し、取引企業の寄与も含めた事業全体の環境効率を主体的に評価・改善することが期待される。

また、社会全体の環境効率は、同様に、最終消費やリサイクルの段階まで含めて、経済活動単位ごとの付加価値と環境負荷のそれぞれの総和の比で表わせる。国の環境効率における付加価値の総和は GDP となる。

#### 環境効率の定量評価の可能性

企業間の比較に環境効率を用いるには、その客観的な定量評価が必須である。環境負荷は、環境報告書による公開が浸透・拡大しているが、各企業の付加価値は、決算の財務諸表からは不明であり、社外費用明細書などを開示している場合に評価可能となる。GDP 統計用に各事業場の付加価値データが政府に集計されており、公開される仕組みが望まれる。

異なる業種、業態や、国ごとに環境効率の平均値は異なるので、企業間の定量比較には配慮が必要である。

#### 環境効率と売上の関係

付加価値の代わりに売上を用いると、客観評価は容易になるが、購入費用が取引企業の双方で付加価値として重複計上される。一方、売上高は販売時点までの全取引企業の付加価値の総和となるので、環境負荷にも販売までの全取引先の累計値を用いれば、販売時点までの事業の環境効率を示す一定の指標にはなる。

#### 使用、3R 段階の環境効率の評価可能性

販売後の使用、3R 段階での環境効率評価には付加価値の定義、評価が課題となる。環境負荷は LCA により定量評価できるが、販売後の付加価値の取扱いについて定説はない。しかし、以下のように使用、3R の段階でも付加価値は発生する。消費者による使用は利便が大きくても経済的な付加価値を生まないが、法人による使用は一般にその法人に付加価値を生む。さらに、使用や保守に伴う費用が、その便宜を提供する業界に付加価値を生む。使用に伴うエネルギー消費には省エネや長寿命の環境配慮が反映される（単独データでは逆のケースと区別できないが）。3R 段階での再利用や素材回収の連鎖が長ければ、これら付加価値の総和も大きくなる。企業内の部品の再利用は、購入費用減や再生業務増を通じて付加価値増と、環境負荷減とを生み、環境効率が増大する。このように、販売後の付加価値には製品の環境配慮度が結果としてかなり反映されると考えられる。

#### 評価事例

実際、社内外との取引に基づく経理データからモノの流れを把握し、LCA データを用いて CO<sub>2</sub> 排出量に換算して総環境負荷データを試算している企業もあり[12]、



売り上げとの比を環境指標として公表されている。CO<sub>2</sub> は資源消費や温暖化の指標として有用である。

#### 今後の課題

環境効率は、企業の環境改善努力の全てに強い指針を直接与える万能の指標ではないが、努力の成果を結果的に広く反映する比較的良い指標と考えられる。その定量評価には付加価値の公開が必要で、実現すれば企業ごとに加え、製品・サービスごとの事業全体の環境パフォーマンスを精度良く評価、比較できると期待される。売上高による代用にはさらに工夫が必要である。

### (2) 循環指標としてのインバースリサイクル指数の提案

#### 検討の背景

従来、リサイクルにおける再利用性の評価は単に「リサイクル可か否か」のディスクリットな判定であって、リサイクルの質には無関係であった。資源の再利用性の面から、質の高いリサイクルへの努力が積極的に評価できる定量的尺度の実現を目指し、新指標の可能性を検討した。

製品のリサイクルループを図 4 のように示し、内側のループを辿るほど、資源再利用の観点から望ましく、環境負荷の点でも一般に望ましいとの考え方が提案されている[13]。この考え方はわかりやすく、インバースマニュファクチャリングの定義にも取り入れられている[14]。この考え方を活かし、製品が資源再利用性の観点からどの程度望ましいループを辿るように設計されているかを簡単、かつ詳しく表示できる指標を提案する。

#### インバース度の考え方

##### 単純インバース度の検討

製品が寿命を終えてリサイクル処理されるとき、個々の構成部品がどのリサイクルループを辿るかにより図 5 のような評点をつけ、重量に応じた重みを掛けて集計し、これを全体または部組品の重量で除し平均値を求め、インバースリサイクル指数（略称インバース度）と呼び、当該製品等の平均的なリサイクルの質の高低を表す。

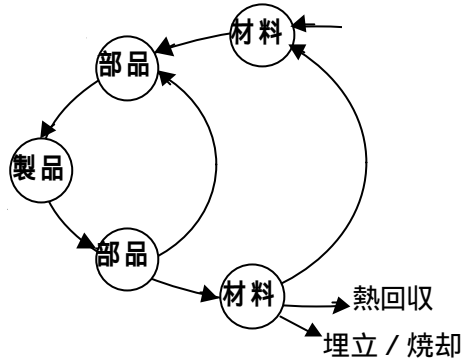


図 4 各種リサイクルループ

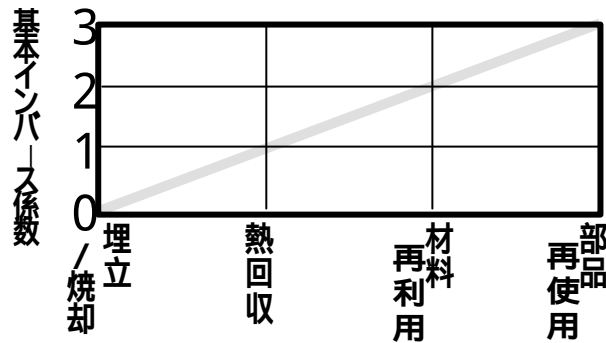


図 5 基本インバース係数

第 1 種インバース度 ( 3 点満点法 ) :

$$\begin{aligned} \text{インバース度} &= (\text{部品インバース係数}) \times M_i / M \quad (5) \\ &= (\text{部品インバース係数}) \times (\text{部品の重量比率}) \end{aligned}$$

ここで、

部品インバース係数 : 部品再使用 : 3

材料再利用 : 2

熱回収 : 1

焼却、埋立 : 0

$M_i$  : 部品重量

$M$  : 製品重量

部品重量比率 =  $M_i / M$

### 製品の寿命を考慮に入れたインバース度

製品・部品が寿命を終えて使用されなくなるケースには次の 2 つのケースがある :

( a ) 機能・性能の陳腐化により寿命を迎える場合

( b ) 機能・性能の劣化によって寿命を迎える場合

前者において製品は、陳腐化や性能劣化により製品、部品の物理的機能・性能はあまり低下していないにもかかわらず、製品全体として使用しなくなるもので、陳腐化する部分以外の再使用可能性は一般に大きい。一方、後者は長期間使用された後に寿命を迎えるため、使用される全ての構成部品が損耗、材質劣化して、一般に再利用性は低い。ただし、長期間使用されるので、資源として有効に利用されたと言う面もある。以上を考慮し、( a ) ( b ) の使用期間を考慮に入れた設計のリサイクル配慮度合を次のように表現する：

(第1種インバース度) × (想定製品寿命倍率)

この指標は使用期間を考慮に入れたリサイクル水準の高低を示しており、第2種のインバース度と呼ぶ。

ここで製品の製品寿命倍率は自動車や家電品のような耐久消費財の平均的な寿命である10年の場合を1とする。製品寿命が5年なら寿命倍率は0.5、15年なら1.5とする。以上から、

$$\text{第2種インバース度} = (\text{部品インバース係数}) \times (\text{部品重量比率} \times (\text{想定製品寿命倍率})) \quad (6)$$

以上のような指標の設定には次のような点を考慮した。

- 再使用、再利用は点数を高く、廃棄を0点とする。
- 材料としての再利用も、水平再利用はカスケード利用よりも高い係数を設定する。
- 廃棄プラスチックの還元剤としての使用は、熱回収と材料再利用の間をとってインバース係数1.5とする。
- 2回、3回と使用することを予定して設計された部品は、繰り返し再利用性が高い指数になるようにした。例えば、部品を再使用し、その後、熱回収するものは  
(部品インバース係数) = 3 + 1 = 4  
のように計算する。

表1 インバース度の評価計算例

部品名	材質	重量	重量比	リサイクル方針	インバース係数	第1種インバース度	寿命	第2種インバース度
カバー	プラ	200	0.2	材料再利用	2+1	3 × 0.2 = 0.6	5年 × 2	2 × 0.2 × 5 / 10 + 1 × 0.2 × 5 / 10 = 0.3
基板	複合	300	0.3	破碎	0	0	5年	0
ブラケット	プラ	100	0.1	材料再利用	2+1	3 × 0.1 = 0.3	5年 × 2	2 × 0.1 × 5 / 10 + 1 × 0.1 × 5 / 10 = 0.15
ベース	金属	400	0.4	部品再使用	3+2	5 × 0.4 = 2	5年 × 2	3 × 0.4 × 5 / 10 + 2 × 0.4 × 5 / 10 = 1
合計		1000	1			2.9		1.45

5年使用後にリサイクルする。ベースは再使用し、10年後、材料として再利用。プラは水平再利用後に熱回収。

## 評価計算例

表 1 に想定使用期間を反映させた評価計算の例を示す。製品全体の第 2 種インバース度は 1.45 となり、再使用効果と 10 年使用の効果が示されている。

### (3) 企業環境戦略の策定事例

持続可能な社会の実現に向けて、企業が環境ビジョンを制定し、公開している例も多くなってきた（例えば、[15]）。

その一例を図 6 に示すが、ある企業の環境ビジョンは、理念、コミットメント、そして、3つの原動力、目標・指標の構造から成る。理念は、環境ビジョンの最上位に位置し、地球環境への根本的な考え方を表している。コミットメントは、持続可能な社会へ向けての決意表明であり、地球環境に配慮してどのように行動するか、また、企業活動を展開するうえでどのように配慮を行うかについての姿勢を表している。3つの原動力は、理念とコミットメントを推進するためのもので、技術、教育、ビジネスモデルから成り、相互に連動しながら活動を前進させるものである。目標・指標は、これらの活動の目標及び、その結果を表すものであり、ミクロ的な指標である環境中期行動計画(Green Management2005)と、マクロ的な指標である環境効率がある。

ミクロ的な指標である環境中期行動計画の指標には、2005 年度までに製品重量または部品点数 20%削減、再生材使用率 20%増加 (2000 年度比)などがあり、製品設計をはじめとする実業務における目標となっている。

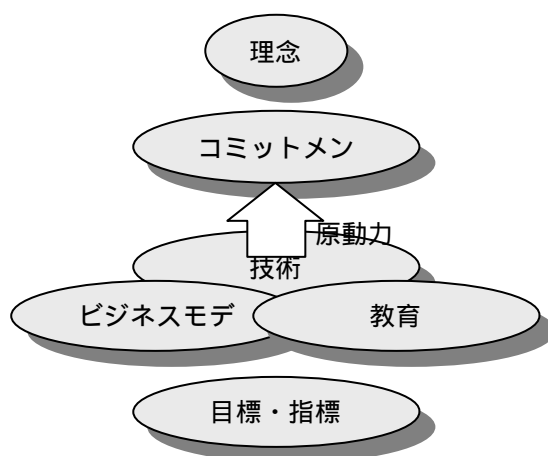


図 6 環境ビジョンの例[15]

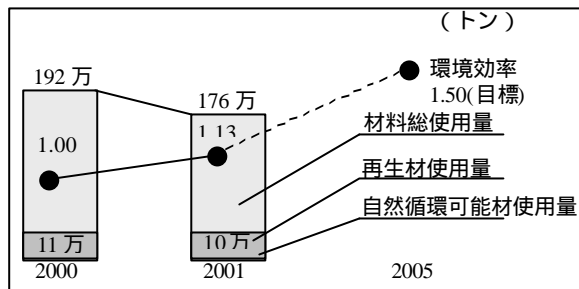
表 2 に示す通り、マクロ的な指標である環境効率は、環境負荷と売上高から定義されている。環境負荷は、地球温暖化、資源リサイクル、化学物質のリスクの観点から、企業が直接的に把握、コントロールが可能な、温室効果ガス、資源投入、資源排出、水、化学物質の5つの指標がある。

環境効率のうち、温室効果ガス、資源投入、資源排出は、2005 年度に 1.5 倍、2010 年度に 2 倍(2000 年度比)を目標としている。これに対して、2001 年度の環境効率の実績は、図 7 (a)(b)に示す通り、資源投入は 1.13 倍、資源排出 1.13 倍の向上がなされた。資源投入における再生材使用量の多くは包装材であり、特筆すべき点といえる。また、温室効果ガスでは、1.08 倍に向上した。この背景には、製品在庫の削減による最適出荷や製品設計による効果がある。

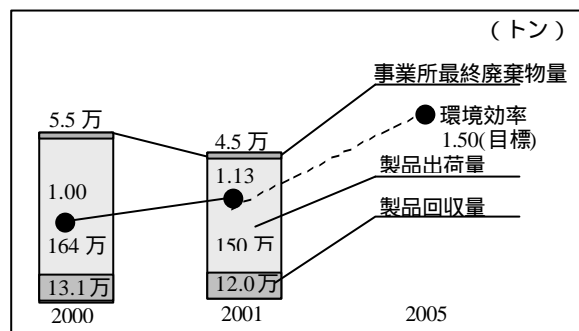
今後、ビジネス領域がハードからソフトへ移行するなどの変化に伴い、環境効率の定義も詳細に検討していくことが重要である。また、現時点では、ミクロ的な指標である S 社環境中期行動計画と、マクロ的な指標である環境効率の整合性ははかられていないが、各指標をリンクさせることで指標の一層の充実がなされるといえる。

表 2 環境効率の定義例[15]

環境効率 = 売上高 / 環境負荷	
{	温室効果ガス指標
	= 事業所温暖効果ガス総排出量
	+ 製品使用時 CO2 総排出量
	- 温暖化ガス排出削減貢献量
	資源投入指標
	= 材料総使用量 - 再生材使用量
	- 自然循環可能材使用量
	資源排出指標
	= 事業所最終廃棄物量 + 製品総出荷量
	- 製品等回収量
水指標	
= 水の購入量 + 地下水汲み上げ量	
化学物質指標	
= 大気・水域・土壌への排出量	
+ 廃棄物としての移動量 + 製品含有量	
- 回収製品含有量	



(a) 資源投入指標による環境効率



(b) 資源排出指標による環境効率

図 7 2001 年度の環境効率の評価結果例[15]

#### (4) まとめ

以上、補足では本文の議論を受けて、いくつかの企業で検討されている試みを述べた。これらの事例からは、企業全体の環境戦略と個々の製品、および、製品ライフサイクルの指標との間の関連づけが十分に進んでいないことが窺える。今後、環境戦略に対応させた具体的な施策を推進していくためには、本文で述べたようなエコデザイン指標の体系化を促進する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 吉川弘之: テクノグローブ, 工業調査会, 1993.
- [2] 日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会: 人工物のライフサイクルデザイン(LCD)のために振興すべき基礎学術, 日本学術会議, 2000.
- [3] 石谷久, 赤井誠: ライフサイクルアセスメント, 産業環境管理協会, 2001.
- [4] 事業者の環境パフォーマンス指標 2000 年度版, 環境省, <http://www.env.go.jp/policy/report/h12-01/>, 2001.

- [5] 環境会計ガイドライン 2002年度版, 環境省, <http://www.env.go.jp/policy/kaikei/book2002/index.html>, 2002.
- [6] 資源循環指標 策定ガイドライン, 資源循環指標調査検討委員会(経産省), [http://www.meti.go.jp/policy/closed\\_loop/junkan\\_index/houkokusho\\_honbun.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/closed_loop/junkan_index/houkokusho_honbun.pdf), 2002.
- [7] F. シュミット=ブレイク (佐々木建訳): ファクター10, シュプリング・フェアーク東京, 1999.
- [8] E. ワイツゼッカー, E. ロビンス, L. ロビンス (佐々木建訳): ファクター4, 省エネルギーセンター, 1998.
- [9] 山本良一監訳: エコ・エフィシエンシーへの挑戦, 日科技連, 1998.
- [10] Y. Umeda, A. Nonomura, and T. Tomiyama: "Study on life-cycle design for the post mass production paradigm," AIEDAM, Cambridge University Press, Vol. 14, No. 2, pp. 149-161, 2000.
- [11] 稲村知哉, 梅田靖, 近藤伸介: 「LCAとライフサイクルシミュレーションを用いた製品ライフサイクル評価手法の開発」, エコデザイン 2002 ジャパンシンポジウム論文集, pp. 142-145, 2002.
- [12] 天川雅文ほか: 「経理データを利用した事業活動の環境負荷評価」, エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム講演論文集, エコデザイン学会連合, pp. 222-223, 2002.
- [13] 谷達雄: 「リサイクルしやすい設計の事例」, 日本機械学会誌 Vol.101 No.954 pp.49-54, 1998.
- [14] 製造科学技術センター: 平成11年度「インバースマニュファクチャリングの開発」成果報告書, 1999.
- [15] ソニー株式会社: 社会・環境報告書 2002, ソニー株式会社, 2002.