

ライフサイクルアセスメントにおける寿命の扱い

伊藤 邦夫 (管理工学科)

1. はじめに

構造物を含む諸製品の設計・製造において、製品の環境への影響を小さくするように努力することが強く求められるようになった。これに対応して、製品の劣化過程をモニタリングして製品の信頼性を増すとともに結果的に製品の寿命を延ばす研究が行われている。製品のモニタリングあるいは製品の寿命を延ばすことの製品の環境への影響に及ぼす効果は、透明性のある手続きとデータに基づいて主張されなければならない。

本論文では、この手続きとしての製品のライフサイクルアセスメントについて、昨年よりも、より詳細に検討した。

2. ライフサイクルアセスメント (LCA) の定式化

2.1 ライフサイクルインベントリ分析の構成

製品のLCAとは、製品が、与えられた機能を果たすためのライフサイクルにおいて、消費する基本インプットと排出する基本アウトプットが環境に及ぼす影響を評価するものである(図1)。

基本インプットは、採取以前に“自然に(人工的処理を加えられずに)”存在した資源である。基本アウトプットは、放出の後“自然に(人工的処理を加えられずに)”放置される放出物である。

再生性資源の元は、太陽エネルギーである。枯渇性資源は、過去において蓄積された太陽エネルギー(化石燃料)または過去において太陽エネルギーの助けを受けて濃縮された物(鉱石・油)である。基本インプットには、再生性資源と枯渇性資源が含まれる。

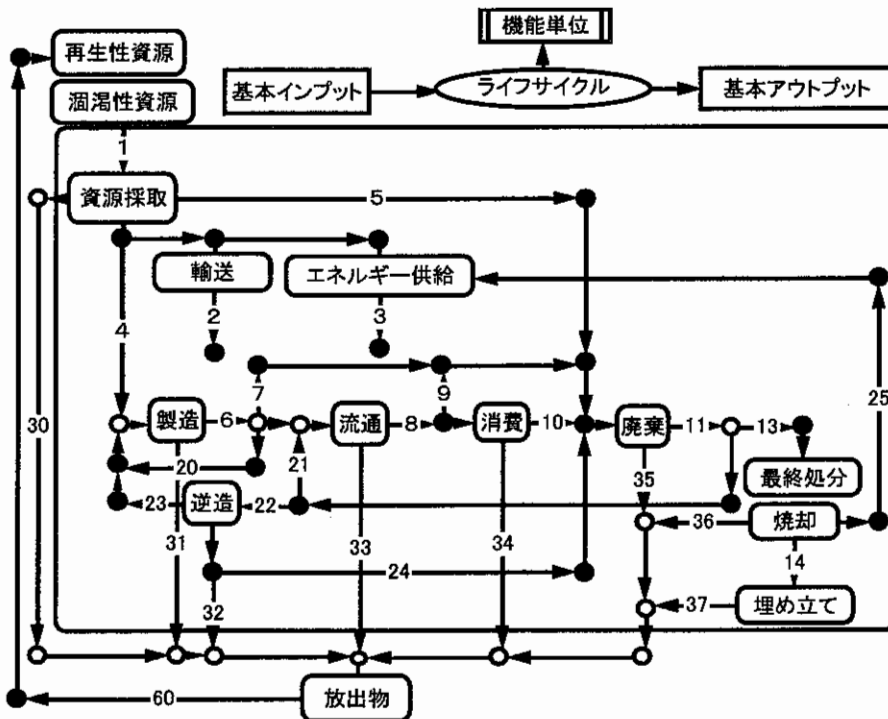


図1 LCAにおけるライフサイクルのモデル
— 資源消費, 放出物排出のルート

図1のルート番号に対する注は以下の通りである:

- 1 枯渇性資源が消費されること自体が環境負荷である。
- 2, 3 この輸送, エネルギー供給は, 資源採取-製造-流通-消費-廃棄-リサイクル-最終処分 の各段階で行われる輸送, エネルギー消費のための基本インプットに対応する。
- 4~14 上流から下流への物質の流れ。
- 11 廃棄から出てきた物質。
- 13 最終処分される物質。
- 14 埋め立てられる物質。
- 20~25 下流から上流への物質・エネルギーの還流。
- 20 製造段階での自工場内リサイクルされる物質。
- 21 廃棄後再使用される製

品。

22 廃棄後逆製造（リサイクル）される物質。

25 最終処分としての焼却において回収されるエネルギー。

30～37 基本アウトプットを表す。

30, 31, 32, 33, 34 それぞれの段階で行われる輸送, エネルギー消費（2, 3の注に対応）によって生じる基本アウトプットである。

60 自然による循環。

2.2 インベントリの定式化

2.2.1 一つの主製品の一つのライフサイクル段階（図2）

2.2.1.1 輸送インベントリ（図2の“輸送インベントリ”および図3）

図3において，“エネルギー資源採取”は燃料（および電力）への変換プロセスを含む。放出ルート30はこの採取・変換（およびそこに含まれる輸送）過程でのエネルギー消費に伴う放出である。“輸送プロセス”の主体は燃料の燃焼である。放出ルート31の主体は燃料よりの排ガスである。

1-1 Ia 前段階から当該段階への輸送（図2の“前段よりの物質”）および当該段階内部での輸送の量に比例的に費やされる資源（図3の44, 基本インプット）。

1-1 Oa インプット 1-1 Ia のための資源採取に伴う副生物によって生じる放出物（基本アウトプット, 図3の 5→35, 5→13→36, 5→14→37）。

1-1 Ob 前段階から当該段階への輸送および当該段階内部での輸送の量に比例的に直接放出される放出物（図3の30, 31, 基本アウトプット）。

三者の和（図3の左の枠からのインベントリの和, =輸送比例インベントリ）を 1-1 PI/O と表記。

1-1 FI/O 当該段階での輸送に共使用される製品（資源採取機械, 船舶, 自動車, 列車, など）の1回のライフサイクル全体の基本インプット/アウトプット（=共使用品ライフサイクルインベントリ, 次節2.2.2参照）のうち, 当該製品の当該段階に割り当てられる分（図3の右の枠における45と53の和, =輸送共使用品インベントリ）。

1-1 PI/O と 1-1 FI/O の和（図2の43と52の和に相当）を 1-1 I/O 輸送インベントリと呼ぶ（図2の右端の枠）。

2.2.1.2 エネルギーインベントリ（図2の“エネルギーインベントリ”）

図3の“輸送プロセス”, “輸送共使用品”を“エネルギー供給プロセス”, “エネルギー供給共使用品”に読み替えると, エネルギーインベントリの説明図となる。

1-2 Ia 当該段階でのエネルギー消費の量に比例的に費やされる資源（基本インプット）。

1-2 Oa インプット 1-2 Ia のための資源採取に伴う副生物によって生じる放出物（基本アウトプット）。

1-2 Ob 当該段階でのエネルギー消費の量に比例的に直接放出される放出物（基本アウトプット）。

三者の和（=エネルギー比例インベントリ）を 1-2 PI/O と表記。

1-2 FI/O 当該段階へのエネルギー供給に共使用される製品（資源採取機械,

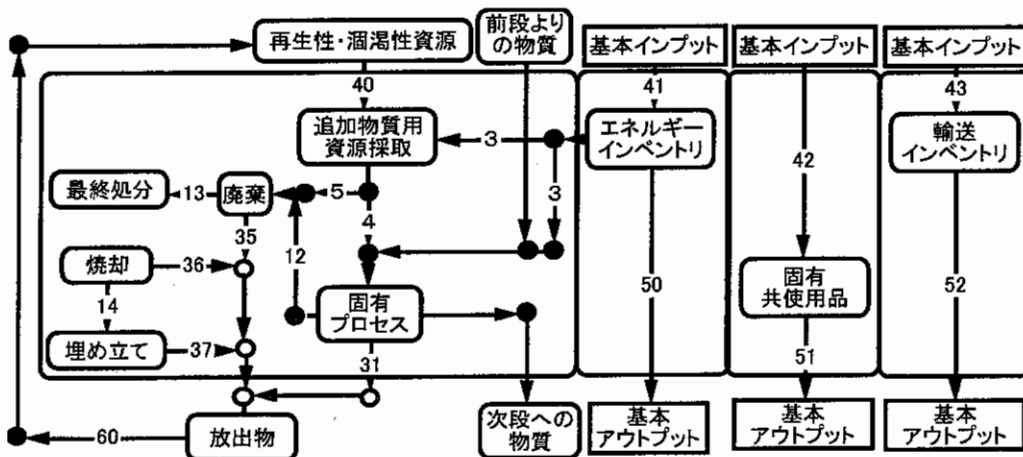


図2 LCAにおける1段階のモデル

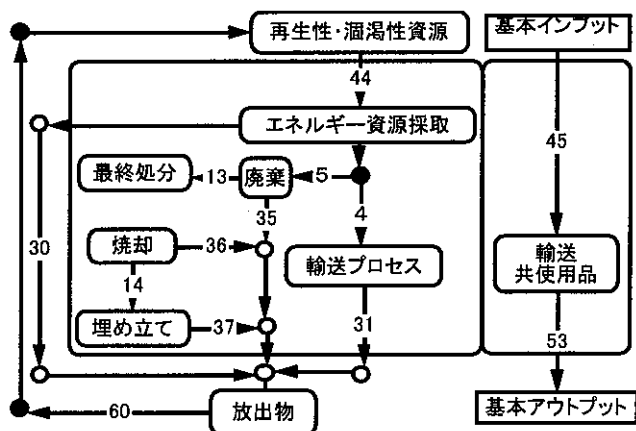


図3 LCAにおける輸送のモデル

発・送電機械、など)の共使用品ライフサイクルインベントリのうち、当該製品の当該段階に割り当てられる分(=エネルギー共使用品インベントリ)。

1-2 PI/O と 1-2 FI/O の和(図2の41と50の和に相当)を 1-2 I/O エネルギーインベントリと呼ぶ。

2.2.1.3 固有インベントリ(図2の左端の枠)

1-3 Ia 当該段階で新たに投入される物質のために費やされる資源(基本インプット、図2の40)。

1-3 Oa インプット 1-3 Ia のための資源採取に伴う副生物によって生じる放出物(基本アウトプット、図2の5→35, 5→13→36, 5→14→37)および固有プロセスの副生物によって生じる放出物(基本アウトプット、図2の4→12→35, 4→12→13→36, 4→12→14→37)。

図2の“固有プロセス”が消費するエネルギー、使用する機械、必要とする輸送に因るインベントリ(図1の30に相当)は図2の中のエネルギーインベントリ、“固有共使用品”のインベントリ、輸送インベントリがそれぞれ受け持つ。図2の31は“漏洩”を表す。図2のエネルギー供給ルート3は図1のエネルギー供給ルート3の具体的例である。

両者(1-3 Ia, 1-3 Oa)の和+“漏洩”(=図2の左端の枠からのインベントリの和、固有インベントリ)を 1-3 I/O と表記。

2.2.1.4 固有共使用品インベントリ(図2の“固有共使用品”のインベントリ)

当該段階に固有に共使用される製品(各種プロセス機械など)の共使用品ライフサイクルインベントリ(次節2.2.2参照)のうち、当該製品の当該段階に割り当てられる分。

1-4 I/O (図2の42と51の和に相当、=固有共使用品インベントリ)と表記。

2.2.2. 共使用品ライフサイクルインベントリ

1つの共使用品の1回のライフサイクル(図1)において、資源採取、製造、流通、廃棄、逆造、最終処分のそれぞれの段階におけるインベントリの算出は、主製品の場合と同じ扱いとする。消費の段階においては(図2参照)、固有インベントリ、“固有共使用品”のインベントリおよび輸送インベントリについては、主製品の場合と同じ扱いとする。エネルギーインベントリは、主製品の消費の段階のエネルギーインベントリの一部であるとみなして、共使用品についてはこれを計算しない。

各段階のインベントリの共使用品の1回のライフサイクル全体に関する和(複数の共使用品がある場合には、さらに全共使用品について和をとる)を 2 I/O (=共使用品ライフサイクルインベントリ)と表記。

原理的には、一つの共使用品ライフサイクルインベントリ(例えば、トラックのライフサイクルインベントリ)が複数の製品の複数の段階(の、例えば輸送インベントリ)に配分(allocation)されなければならない場合がある。

2.2.3. 一つの主製品の1回のライフサイクルにおける各段階の寄与(図1)

以下、各段階の特徴的なインベントリについて説明する。

2.2.3.1 資源採取

3-1-1 I/O 輸送インベントリ 資源をその存在場所から採取処理場所に輸送することによる。

3-1-2 I/O エネルギーインベントリ 固有プロセスによるエネルギー消費による。

3-1-3 I/O 固有インベントリ 製品の構成材料となる物質のために費やされる資源による。放出ルート

図1の5は図2の5と12の和である。固有プロセスは、探鉱、採掘、採取処理場所での選別。

3-1-4 I/O 固有共使用品インベントリ 固有プロセスで使用される機械に因る。

2.2.3.2 製造

3-2-1 I/O 輸送インベントリ 物質を採取処理場所(または逆製造場所)から製造場所に輸送することに因る。

3-2-2 I/O エネルギーインベントリ

3-2-3 I/O 固有インベントリ 固有プロセスは、精錬・精製、素材製造、加工、組み立て、など。この段階で製品が完成する。製造の段階は、固有プロセスに応じてさらに複数の段階に細分化される。費やされる資源は補助剤以外にはない。一方、固有プロセスにおいて発生した副生品(図1の7、図2の12)が“回収されない”ならば、これによる放出はここで扱う。

3-2-4 I/O 固有共使用品インベントリ

3-2-5 I/O 製造段階内部でのリサイクルの効果 リサイクルする物質の量(図1の20)に応じて、資源採取段階の4種のインベントリすべて、および製造段階の3-2-1 I/O は減少する。一方、製造段階内部でのリサイクル物質輸送に因る3-2-1 I/O が生じる。正味の減少量(減少が起きたとき正になるように符号を定義して)3-2-5 I/O と表記。

この段階で生成した副生品が別の製品の原料として用いられるときには、資源採取と製造の段階で生じたインベントリは、主製品と副生品の間で配分されなければならない。対応して、別の製品の製造の段階で生じた副生品を、当該製品の原料として用いるときには、その副生品は自己に配分されたインベントリを背負って当該製品のライフサイクルに入ってくる。

2.2.3.3 流通

3-3-1 I/O 輸送インベントリ 製品を製造場所(または再使用される製品を回収場所)から消費場所に輸送することに因る(この段階の主たる項目である)。

3-3-2 I/O エネルギーインベントリ 非常にわずかである。

3-3-3 I/O 固有インベントリ 固有プロセスは、従って費やされる資源も、非常にわずかである。消費されないまま廃棄される製品(図1の9)が“回収されない”ならば、これによる放出はここで扱う。

3-3-4 I/O 固有共使用品インベントリ 非常にわずかである。

2.2.3.4 消費

3-4-1 I/O 輸送インベントリ この項目は存在しない。製品の消費場所への輸送は流通に割り付けてある。

3-4-2 I/O エネルギーインベントリ 製品の使用に伴うエネルギー消費に因る(この段階の主たる項目である)。

3-4-3 I/O 固有インベントリ 固有プロセスは存在しないと考える。廃棄される使用済み製品が“回収されない”ならば、これによる放出はここで扱う。

3-4-4 I/O 固有共使用品インベントリ 固有共使用品(当該製品とともに使用される消耗品など、当該製品の保守は別に扱う3.1節参照)に因る。

2.2.3.5 廃棄

3-5-1 I/O 輸送インベントリ 製造において発生して“回収された”副生品(図1の7)および流通において消費されないまま廃棄されて“回収された”未使用品(図1の9)の最終処分場への輸送、および消費場所から最終処分場への“回収された”使用済み製品、すなわち、“回収された”廃棄物の輸送に因る。

3-5-2 I/O エネルギーインベントリ この項目は存在しないと考える(あったとすれば最終処分に含める)。

3-5-3 I/O 固有インベントリ 固有プロセスは存在しないと考える(あれば最終処分に含める)。廃棄の輸送中に回収されないように投棄された物質・製品があれば、これによる放出はここで扱う。

3-5-4 I/O 固有共使用品インベントリ この項目は存在しないと考える(あったとすれば最終処分に含める)。

3-5-5 I/O 製品の再使用の効果 再使用される製品の量(図1の21)に応じて、資源採取および

製造段階のインベントリは減少する。一方、製品の再流通の場所までの輸送に因る 3-3-1 I/O が生じる。正味の減少量を（減少が起きたとき正になるように符号を定義して）3-5-5 I/O と表記。

2.2.3.6 逆製造

3-6-1 I/O 輸送インベントリ 廃棄された物質・製品を廃棄場所から逆製造場所に輸送すること
に因る。

3-6-2 I/O エネルギーインベントリ

3-6-3 I/O 固有インベントリ

3-6-4 I/O 固有共使用品インベントリ

3-6-5 I/O 逆製造の効果 逆製造された物質の量（図1の23）に応じて、資源採取のインベ
ントリおよび対応する製造の輸送インベントリ 3-2-1 I/O は減少する。一方、逆製造された物質の輸送
に因る 3-2-1 I/O および逆製造の4種のインベントリが生じる。正味の減少量を（減少が起きたとき
正になるように符号を定義して）3-6-5 I/O と表記。

2.2.3.7 最終処分

3-7-1 I/O 輸送インベントリ この項目は存在しない。製品の消費場所への輸送は廃棄に割り
付けてある。

3-7-2 I/O エネルギーインベントリ

3-7-3 I/O 固有インベントリ 固有プロセスは焼却と埋め立てである。費やされる資源は補助剤以外
にはない。“回収された”廃棄物の最終処分後の物質に因る放出物はすべてこの項目の対象である。

3-7-4 I/O 固有共使用品インベントリ

3. LCA における製品の寿命と保守の扱い

一つの製品のLCAにおけるインベントリ分析データは、前節 2.2.3 の各段階のインベントリの総和である。このデータの内容を環境に対する影響領域に分類して（分類化）、数値で表した影響の程度を影響領域ごとに小計して（特性化）、小計値に影響領域の重要度を表す係数を乗じて（重み付け）、合計した値が環境影響評価値である。

LCAの実施において、対象の製品に要求する機能としての“寿命”を要求期間とし、製品が技術的理由によって有する“寿命”を耐用期間とする。“寿命”としては、“事故”が起こる“時間”間隔としての“無事故寿命”と製品が廃棄されるまでの“時間”としての“総寿命”が考えられる。この“時間”の概念の中には、文字通りの時間の他に、プリンターの印刷枚数や自動車の走行距離のような累積稼働量とでもいうべきものも含まれる。

3.1 保守のLCAにおける位置づけ

保守はモニタリングと修理の二つの製品から成り立っていると考える。これらの二つの製品のそれぞれに対して“主製品”としてのインベントリ分析（2.2.3. 節）を行い、それに基づいてそれぞれの環境影響評価値を求める。このインベントリ分析において、これらの二つの製品に要求する機能としての“総寿命”は、物理的時間として、検討対象製品に要求する“総寿命”に一致していなければならない。これらの二つの環境影響評価値と検討対象製品の環境影響評価値との三者の合計が“検討対象製品システム”の環境影響評価値である。

耐用期間に関してモニタリングと修理はトレードオフの関係にある。すなわち、モニタリングの量を多くすれば、耐用期間は長くなり、必要な修理の量は小さくなる。LCAの原理としては、モニタリングの量をどの程度にすべきかは、製品システムの環境影響評価値が最小になるように決めるということになる。

この最小化においては、起こる“事故”の性質も考慮しなければならない。“事故”には、人命が失われるというような修理不可能なものもあり、その影響が修理を待つ間に消費者が感じる精神的ストレスというような数値化し難いものもある。このようなことを考慮するには、LCAの枠組みの中に人間影響評価値とでもいうべき側面（観点）を取り入れる必要がある。

すなわち、**モニタリング**という製品に対して**事故インベントリ**を導入する。内容としては、検討対象の主製品のライフサイクルの各段階において(2.2.1節)その段階の“固有プロセス”がもたらす可能性のある“事故”を列挙して、それらを主製品のライフサイクル全体についてまとめる。環境に対する**影響領域**の中に**人間影響**という領域を構える。対象システム全体のインベントリの総和を**分類化**にさいして、**事故インベントリ**の中には**人間影響**という領域に分類されるものがある。特性化にさいして、“事故”の起こる確率および被害額が数値化される。この数値化において、**モニタリング**の量の影響が考慮される。**重み付け**の過程で、**人間影響**という領域と他の**影響領域**の重大性が比較評価される。このモデルを一言で表せば、LCAとリスクマネジメントの統合化(LCA枠組みのリスクマネジメントへの適用)である。

3.2 現に使用されている製品に対する検討

この場合には、**耐用期間** >> **要求期間** かつ**保守作業**を行っていたときにのみ、その**保守**を減少させて**環境影響評価値**を下げるができるかを検討するという課題が生じる。

3.3 今後製造される製品に対する検討

この場合には、以下の四つの場合を比較する必要がある。

(1) 耐用期間 ごとに製品を作り直す - 1

製品の設計としては、**耐用期間** << **要求期間** とする。**保守**は行わない。

製品システムの**環境影響評価値** = この条件下での主製品の評価値 × 作り直し回数。

(2) 耐用期間 ごとに製品を作り直す - 2

製品の設計としては、**耐用期間** << **要求期間** とする。**保守**を行う。

製品システムの**環境影響評価値** = この条件下での主製品の評価値 × 作り直し回数 + **保守**の評価値。

(3) 要求期間 を満たす製品を作る - 1

製品の設計としては、**耐用期間** = **要求期間** とする。**保守**は行わない。

製品システムの**環境影響評価値** = この条件下での主製品の評価値。

(4) 要求期間 を満たす製品を作る - 2

製品の設計としては、**耐用期間** = **要求期間** とする。**保守**を行う。

製品システムの**環境影響評価値** = この条件下での主製品の評価値 + **保守**の評価値。

原理としては、これらの四つの**環境影響評価値**中で最小のものをもたらし場合を採用すればよい。今後製造される製品に対してLCAを行うときの課題は、製造後の技術的状況変化によって(特に**最終処分**の)インベントリおよびいずれかの**影響領域**における**特性化**の係数が、また社会的状況変化によって**特性化**の係数および**重み付け**の係数が**影響領域**のどこかににおいて、現状の予想と変わってしまう可能性のあることにある。

4. まとめ

製品のライフサイクルアセスメントの手続きについて、製品の寿命および**モニタリング**の取り入れを含めて、詳細に検討した。

最初に、一つの製品のライフサイクルアセスメントの手続きを示した。寿命および**モニタリング**を取り入れるために、“**モニタリング**”と“**修理**”という二つの製品を導入し、さらにこれらの二つの製品をサブシステムとして含む“**保守**”という製品を定義した。

この“**保守**”と主製品から成る“**製品システム**”のライフサイクルアセスメントによって、製品に**保守作業**を行うことの製品のライフサイクルアセスメントに及ぼす効果を表現した。

製品の社会的・人間的側面を表すために、製品の影響の中に“**人間影響**”という領域を考えること、および製品の放出物として“**事故インベントリ**”という項目を建てることを提案した。

長期間にわたって使用される製品に対して、設計時にライフサイクルアセスメントを行うときの問題点についても指摘した。