

ハイブリット LCA 手法による洗濯機の環境負荷

Environmental life cycle analysis of washing machine with the hybrid LCA method

キーワード: ライフサイクル評価、製品、産業連関表、インベントリー分析、環境負荷

内山 洋司、西村 一彦、本藤 祐樹

本研究は、統合的かつ総合的なインベントリー分析が可能になる産業連関表の利点を生かし、調べようとする製品について構成素材を入力さえすれば、加工・組立といった製造時の複雑なプロセスのエネルギー消費や環境負荷が分析できるインベントリー手法を開発し、その手法を利用して耐久消費財である洗濯機の環境負荷を分析したものである。

開発した LCA 手法は、産業連関表を利用して複雑な製造工程のエネルギー消費や環境負荷を明らかにするものであるが、これまでのような製品の金額入力でなく、構成素材の入力により分析できるようにした点に特徴がある。

産業連関表の利用で複雑な製造段階の環境負荷の分析が容易になっただけでなく、これまでの積み上げ法を利用と廃棄の段階に適用していることから、ライフサイクルの各段階についてエネルギー消費や環境負荷の分析が可能である。利用時と廃棄時については、寿命期間、修理回数、エネルギー源などが自由に設定でき、その違いによる分析も可能である。また製品のリユース、素材のリサイクル（マテリアル、サーマル）による環境負荷の改善効果を明らかにすることもできる。

開発した手法を用いて、洗濯機のライフサイクルにわたるエネルギー消費、環境負荷（SO_x、NO_x、CO₂）、労働投入量を明らかにした。結果は、耐用期間中の利用頻度に大きく影響を受けるが、標準的な利用時間（電力消費量：30 kWh/年）で計算した場合、エネルギー消費と環境負荷は製造段階が最も大きくなることが分かった。

1. はじめに
2. ハイブリット LCA 手法
 2. 1 ハイブリット LCA 手法の概要
 2. 2 産業連関分析法による LCA
 2. 3 リサイクル計算
3. 洗濯機のライフサイクル分析
 3. 1 ソフトウエア「Quick-LCA」
 3. 2 洗濯機の環境負荷
4. おわりに

1. はじめに

資源とエネルギーを消費して成り立つ現在の産業社会は、その消費量が膨大であるため、環境の浄化機能を自然作用だけに頼れなくなっており、自分自身で浄化システムを構築しなければならない。21 世紀も社会が持続可能な発展を遂げていくには、大量消費と大量廃棄を改めたスリムな社会を構築し、環境負荷をできるだけ許容範囲に抑える努力が望まれている。

地球が抱える問題群は、複雑にからまっており、あちらを立てれば、こちらが立たずといったジレンマ状態にある。ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）とは、現代の複雑な技術社会が生み出した諸問題を取り扱うシステム分析法の一つである。それは、製品や技術について“ゆりかごから墓場まで”のライフサイクルにおける諸問題、特に環境問題を中心に社会に与えている影響を総合的に分析し、環境負荷を低減する方策を検討していくものである。す

なわち、製品およびサービスについて資源採掘、製造、流通、使用、廃棄のライフサイクルにわたる資源消費と環境負荷を定量的に分析し、それらの環境影響を推定し評価するものである。

LCA は、国際標準規格（ISO）の定義によると目的と範囲、インベントリー分析、影響評価の3つの主要プロセスから成っており、その中でインベントリー分析は、製品（財、サービス）や技術の製造、利用、廃棄の段階において、投入されている資源の種類と量、および発生する環境負荷のインベントリーを明らかにするもので、LCA の最も基本となるものである。そのことから LCA 研究においてこれまでに最も多く研究が行われてきている。

インベントリーの分析には2つの方法が基本的に考えられる。1つは製品がどのように作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1つは産業間の産出投入（金額ベース）が詳細に調べられた産業連関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にわたるインベントリーをボトムアップで調査していく方法で、製品に関する研究のほとんどはこの方法による^[1-4]。後者は産業連関分析法（Input-output Analysis）と呼ばれており、産業連関表と産業の生産に係わる統計資料、さらに環境負荷データを利用して、財の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（例えば文献5）。

産業連関分析法は、積み上げ法では追いつけない間接影響を統合的に分析する方法として有効であるが、現在の産業連関表では部門の数が400程度と少なく、具体的な製品のエネルギー消費や環境負荷を分析するには不十分である。産業連関分析法によって求まるあ

る部門の直接、間接のエネルギー消費や環境負荷は、具体的な製品の値でなくその部門で生産されたすべての製品の平均値になる。例えば産業連関表の「乗用車部門」から得られる乗用車のエネルギー消費や環境負荷は、トヨタや日産といった会社で造られたある特定の車種を対象にしたものではなく、ある年に日本全体で造られたすべての乗用車の平均値である。

具体的な製品のライフサイクル分析を産業連関表を用いてできるようにするには、産業連関表の部門を個々の製品レベルにまで詳細にしていかなければならない。それも企業毎に製造されているすべての製品にまで細分化することが理想で、しかも加工・組立て部門だけでなく、採掘、素材製造、輸送などすべての産業プロセスに対して詳細に分解していく必要がある。それは、詳細かつ膨大な積み上げ作業を行うことと同じで、実際に実行することは不可能である。

本研究では、産業連関表のもつ利点を生かし、かつその欠点を補う新しい手法を考案し、そのソフトウェア（Quick LCA）を開発した。新手法の特徴は、積み上げ法と産業連関分析法をハイブリットにしたことにあり、調べようとする製品の構成素材とその物理量をインプットすれば、加工・組立てなど製造段階の複雑な産業プロセスを容易にかつ整合的に分析できる点にある。また構成素材の変更や素材のリサイクルによる改善効果の分析も可能である。本研究では、新手法を使った分析として、洗濯機を対象にライフサイクル分析を行い、そのエネルギー消費と環境負荷（CO₂, SO_x, NO_x）を明らかにした。

2. ハイブリット LCA 手法

2.1 ハイブリット LCA 手法の概要

開発したハイブリット LCA 手法は、製品のエネルギー消費や環境負荷をライフサイクルにわたるプロセスである製造、利用、廃棄、リサイクルについて分析するものである。4つのプロセスのうち製造プロセスは産業連関分析法によって、そして他の3つのプロセスは積み上げ法による分析である。

4つのプロセスの中で分析が最も複雑なのは製造プロセスである。製品は、一般に多くの部品から構成されており、それぞれの部品は様々な素材によって造られている。また製品は、出来上がるまでに複雑な加工・組立工程や輸送工程を経ている。

本研究は、この最も複雑な製造プロセスを産業連関分析法によって製品の直接間接のエネルギー消費や環境負荷を分析している。しかし、その分析法は、従来のような製品の金額に比例して求めるものではなく、製品の構成素材から求めている。製品の構成素材によるエネルギー消費や環境負荷の算定は、積み上げ法の基本であって、本手法の開発によって産業連関分析法が積み上げ法の基本データにより分析可能となった。手法の詳細は次節で述べる。

利用時と廃棄・リサイクル時のエネルギー消費や環境負荷は、製品毎に異なるため積み上げ法によって分析することが望ましい。本研究では、製品の利用時は運転保守と部品のリユースから成っている。運転には、製品の寿命と利用時のエネルギー消費のデータが、保守にはユーティリティとして潤滑油、水などのデータが必要になる。リユースは、部品交換で表わしており、その分析には年間の交換回数と交換品を構成する素材量が必要になる。廃棄時のプロセスは、輸送、分別、解体、処理、処分に分かれており、それぞれの工程でエネルギー、環境負荷、労働量をデータとして収集しなければならない。

ハイブリット LCA 手法は、リサイクルによるエネルギー消費や環境負荷の改善効果も分析できる特徴をもっている。リサイクルは、マテリアルとサーマルに分けて分析することができる。マテリアルリサイクルは、寿命後に廃棄された製品から素材としてリサイクルできるものを選び、そのリサイクル率による影響を分析するものである。それに対してサーマルリサイクルは、廃棄素材から可燃性廃棄物を選び出し、それをエネルギー（電気あるいは熱）として利用した時の影響を分析するものである。

2. 2 産業連関分析法による LCA

産業連関表を利用する LCA 分析は、ある財の生産過程における直接間接のインベントリーを理論的に算出できる利点がある。各産業部門では生産に伴いエネルギーが消費され、また環境影響物質が排出される。産業連関分析法で得られるインベントリーは、任意の財の生産において直接に消費あるいは排出されるものだけでなく、他の部門で間接的に発生する誘発分も含まれる。各財・サービスについて、直接間接のインベントリーの大きさは、次式によって求めることができる。

$$E = e(I - A)^{-1}F \quad \dots (1)$$

E : 最終財の直接間接のインベントリー

e : 各部門での単位生産額当たりのエネルギー消費あるいは環境負荷

I : 単位行列

A : 産業連関表の投入係数行列

F : 最終需要

(1) 式で $e(I - A)^{-1}$ は、最終需要 1 単位当たりのインベントリーの大きさを表わし、対象がエネルギー消費量であれば、その値はエネルギー濃度になり、環境負荷であれば環境負荷濃度になる。最終財の生産に伴い直接間接に消費するエネルギー量は、最終財のエネ

ルギー濃度にその金額を掛けて求めることができる。また環境負荷の大きさも最終財の環境負荷濃度にその金額を掛けて求まる^[6]。

この分析から求まるインベントリーは、ある部門における平均財の金額当たりの値である。産業連関表で分類されている部門数は400程度であることから、それぞれの部門の平均財としてのLCA分析はできても、同一部門で製造されている異なる種類の製品のインベントリーは金額に比例した値になる。そのため値引きされた製品や同一部門で製造される安価な製品は、金額に比例してエネルギー消費や環境負荷が小さくなるといった問題が生じる。

それに対して、製品のインベントリー分析として一般に使われている積み上げ法は、製品の構成部品についてエネルギー消費と環境負荷を素材と製造の原単位から積み上げで算出する方法である。この方法は、分析が構成素材を基本にしているため、製品の金額の違いによりインベントリーの結果が変わるといったことはない。しかし積み上げ法の欠点は、検討プロセスを詳細に分析しなければならず、分析作業に時間がかかることである。実際には、製品の製造に関係するプロセスをすべて網羅することは不可能であり、ある範囲で打ち切らざるを得ない。

積み上げ法で調べた製品の構成素材を基に複雑な生産プロセスを産業連関分析法を用いて分析できれば、整合ある分析が短時間に行えることになる。すなわち産業連関表の最終財について直接に投入された素材が算出できれば、それが財の構成素材とみなすことができる。そして、その直接分の素材が産業連関分析法から求まる直接間接の素材と整合できれば、製品製造時の直接間接のエネルギー消費や環境負荷が製品の構成素材から推計できることになる。

各財に投入される素材量は、産業連関分析によりエネルギー濃度や環境負荷濃度と同様に(1)式から算定できる。しかしその値は、任意の財を生産するために直接間接に消費される素材量であって構成素材ではない。

財の構成素材を求めるために、本研究では、産業連関表の各財を、素材財、中間財、最終財、エネルギー財、サービス財の5集合に大きく分類している。そのうち、構成素材を持つ財は、素材財、中間財、最終財の集合だけで、サービス財とエネルギー財は間接的に素材が消費されていても財を構成する素材はない。

素材財、中間財、最終財について構成素材の種類と量を求めるには、産業連関表の財についてすべての素材の投入・廃棄関係を調べなければならない。構成素材の算定には、次のような仮定が必要になる。

①素材財と中間財以外の財からは財の構成要素となる素材の投入はない。

②構成素材量はどの部門においても物質保存則が成り立ち、屑を差し引いた投入と産出の値は同じになる。

(物質保存則)

$$C_X^i = C_X^i - W_X^i \quad \dots (2)$$

X: 5集合の財

素材財 (Mi: i=1, I)

中間財 (Tj: j=1, J)

エネルギー財 (Ek: k=1, K)

サービス財 (Sl: l=1, L)

最終財 (Fm: m=1, M)

C_X^i : 集合 X の各財の単位生産額当たりの i 素材産出金額 [円 (素材)/円 (財)]

C_X^i : 各財の単位生産額当りの i 素材投入金額 [円 (素材)/円 (財)]

W_X^i : 各財の単位生産額当りの i 素材の廃棄金額 [円 (素材)/円 (財)]

以上の仮定から集合で分類した財の構成素

材ベクトルを求めると (3)~(7) 式で表わされる。

■素材財

$$C_{Mi} = [0 \cdots 1 \cdots 0]$$

(i 番目が 1) $i=1, I \quad \cdots (3)$

■中間財

$$C_{Tj} = [C_{Tj}^1 \cdots C_{Tj}^i \cdots C_{Tj}^I]$$

$j=1, J \quad \cdots (4)$

■エネルギー財

$$C_{Ek} = [0 \cdots 0 \cdots 0]$$

$k=1, K \quad \cdots (5)$

■サービス

$$C_{Sl} = [0 \cdots 0 \cdots 0]$$

$l=1, L \quad \cdots (6)$

■最終財

$$C_{Fm} = [C_{Fm}^1 \cdots C_{Fm}^i \cdots C_{Fm}^I]$$

$m=1, M \quad \cdots (7)$

(4) 式と (7) 式は、中間財と最終財の構成素材の要素を示しているが、その未知数の数と同じ数の方程式をたてることができる。中間財と最終財の構成素材を導出する方程式は、以下の式で表すことができる。

◆中間財

部門 j の財 1 単位の構成素材量

$$C_{Tj} = (C_{Tj}^1 \cdots C_{Tj}^i \cdots C_{Tj}^I)$$

$$C_{Tj} = \sum_i C_{Mi} a_{ij} + \sum_j C_{Tj} a_{jj} - W_{Tj}$$

$\cdots (8)$

a_{ij} : 産出投入係数

◆最終財

部門 m の財 1 単位の構成素材

$$C_{Fm} = (C_{Fm}^1 \cdots C_{Fm}^i \cdots C_{Fm}^I)$$

$$C_{Fm} = \sum_i C_{Mi} a_{im} + \sum_j C_{Tj} a_{jm} - W_{Fm}$$

$\cdots (9)$

(8) 式と (9) 式に示す未知数と方程式の数は $(J+M) \cdot I$ で、それらの方程式を解いた答えが中間財と最終財の構成素材となる^[7]。

最終財の平均的な構成素材が産業連関表から求めると、その値を基にして、任意の製品

のインベントリーを求めることができる。図 1 は、ある特定の製品について生産時のインベントリーを産出する方法を示したものである。

算出方法は、産業連関表の産出投入のマトリックスを利用して、素材と最終財金額、およびインベントリーと最終財金額との関係をあらかじめ解いておき、その結果から任意の製品のインベントリーを算出するものである。すなわち、ある対象製品が産業連関表のどの最終財に属しているかを特定し、そしてその製品の構成素材を調べれば、製品製造時の直接間接のエネルギー消費量と環境負荷の大きさを最終財の平均的な値から明らかにできる。

まず最初に、産業連関表で特定された最終財について、直接間接に投入される素材 T_{Fm}^i [円 (素材)/円 (財)] を (1) 式から、構成素材 C_{Fm}^i [円 (素材)/円 (財)] を (9) 式から求め、その比 (T_{Fm}^i/C_{Fm}^i) を算定する。この値は、最終財の構成素材が、生産に必要なとなる直接間接の素材の何倍になるかを、素材毎に示したものである。

次に対象製品の構成素材量 CW_{Fm}^i [kg] を調べる。通常、構成素材量は、積み上げ法の基本的な作業である。それは、製品を構成する部品を分解することで求まる。素材毎に得られた対象製品の構成素材量に最終財の平均的な素材比 (T_{Fm}^i/C_{Fm}^i) をかければ、対象製品の直接間接の素材必要量 TW_{Fm}^i [kg] が求まる。

産業連関表で評価される対象製品の金額 PN_{Fm} [円] は、次式に示すように TW_{Fm}^i に i 素材重量当りの最終財の金額 P_{Fm}^i [円 (財)/kg] を掛け、その総和で表わされる。

$$PN_{Fm} = \sum_i (TW_{Fm}^i \cdot P_{Fm}^i) \quad \cdots (10)$$

対象製品の金額が産業連関表の特定された最終財について求めれば、あらかじめ (1) 式により得られている最終財 1 単位当たりの

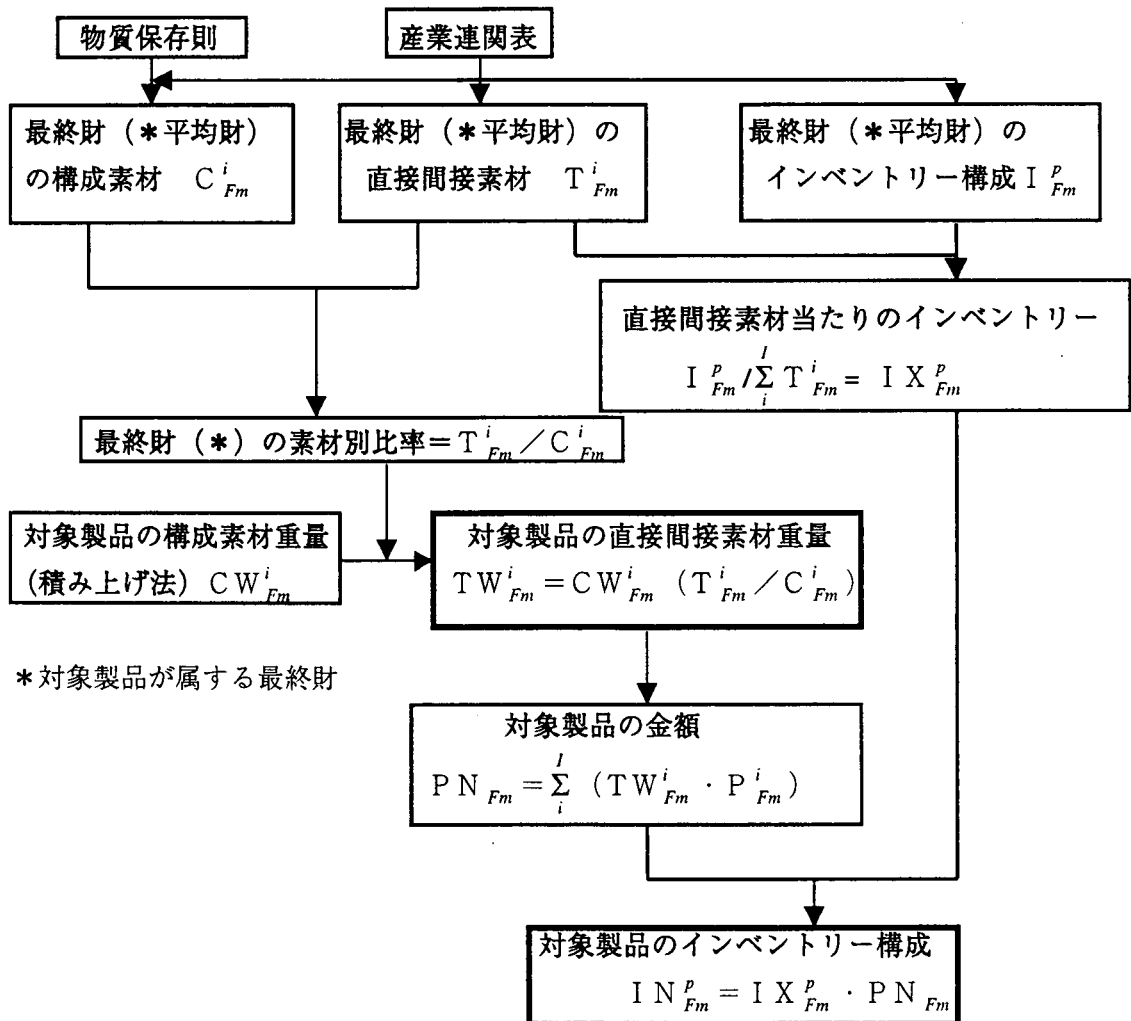
インベントリ I_{Fm}^p [* /円 (財)] から、次式により対象製品のインベントリを求めることができる (* : エネルギー消費や環境負荷、 P はインベントリの種類)。

$$IN_{Fm}^p = IX_{Fm}^p \cdot PN_{Fm} \quad \dots (11)$$

(11) 式の製品のインベントリは、製品製造時の全体のインベントリだけでなく、産業連関表に含まれている採掘、素材製造、加工組立て、輸送、サービスといった工程別の値としても求めることができる。また、電気、ガス、石油、石炭など燃料種別のインベントリも求まる。

産業連関表は、生産額が大きい財だけを対象にしているため、産業連関表で扱うことが

できる素材は、30 種類程度の代表的な素材に限定される。それだけの限られた素材で、製品を構成する素材を表現することは不十分である。特に稀少金属、合金、あるいは複合材料といった素材のインベントリは産業連関表の財として明記されていないため、それらの素材のインベントリは、別途、積み上げ法によって算出しておかなければならない。積み上げ法で求めた特殊な素材のインベントリは、それが製造されている素材財の平均的なインベントリに置き換え、間接影響については産業連関表の平均的な素材と同じであると仮定すれば、特殊素材の間接分のインベントリを近似的に求めることができる。



* 対象製品が属する最終財

図 1 製品の構成素材量からのインベントリ算出法

2.3 リサイクル計算

廃棄物のリサイクル (recycling) は、社会の環境負荷を低減する対策の1つである。リサイクルには、製品のリユース、マテリアルリサイクル、そしてサーマルリサイクルとがある。リサイクルによる製品の製造に係わる環境負荷の低減効果を調べると以下のように計算できる。

1) リユース

製品の一部を n 回だけリユースするプロセスについて検討する。 X_p は製品の生産量 [kg] で、リユース部分の生産量を含めた値である。製品を利用している時に製品の一部がリユースされた場合、リユースのために製品へ新たに投入する必要がある消耗品以外に製品への新たな生産品の投入はないことになる。 n 回のリユースが行われた場合、 X_r を消耗品の生産量とすると、図2に示すプロセスの生産量のバランス式は、ライフサイクルで見た製品の投入素材を X_w とすると、以下の式で表される。

$$X_w = X_p + n \cdot X_r \quad \dots (12)$$

リユース部分のエネルギー消費や環境負荷は、初期の段階では考慮すべきものであるが、再利用される時にはその値をゼロとみなすことができる。図のプロセスで製品の投入素材量当たりのエネルギー原単位 [kcal/kg]、あるいは環境負荷の原単位 a_p [* /kg] は以下の式で表される (* は環境負荷の単位)。

$$a_w = (a_p \cdot X_p + n \cdot a_r \cdot X_r) / X_w \quad \dots (13)$$

ここで、 a_w はライフサイクルで見た製品の生産量当たりの原単位、 a_p はリユース品を含めた製品 X_p の生産量当たりの原単位、 a_r は消耗品 X_r の生産量当たりの原単位である。リユースの際には、消耗品の新規購入の他に、リユース製品を運搬したり新しく製品に

するための加工に要するエネルギーの消費、あるいは環境への負荷が発生する。前者の原単位を a_{rv} とし後者の原単位を a_{rr} とすると、

$$a_r = a_{rv} + a_{rr} \quad \dots (14)$$

となる。リユース製品は、製品の寿命後には製品とともに廃棄されることになり、それまでに廃棄した物理量は X が重量であれば、 $X_p + n \cdot X_r$ で表される。ここで $n \cdot X_r$ は、リユースで消費した消耗品の累積量である。

2) リサイクル (素材)

素材のリサイクルには、製品の製造中に発生する素材屑などをリサイクルする場合と寿命まで使った製品の廃棄物から素材を取り出してリサイクルする場合とがある。

投入したエネルギー消費量や環境負荷はすべて製品に配分し、屑になった素材には配分しないと仮定すると、リサイクル材に対するエネルギー消費量や環境負荷は、リサイクル工程で要したものだけになる。

図3から加工屑 X_w を割合 r だけリサイクルする場合、ライフサイクルで見た製品の物理量のバランス式は次式で表される。

$$X_w = X_p + (1-r) \cdot X_w' \quad \dots (15)$$

また製品のエネルギー消費あるいは環境負荷の原単位は、次式で示される。

$$a_w = (a_p \cdot X_p + a_r \cdot r \cdot X_w') / X_w \quad \dots (16)$$

a_p : 製品の原単位

X_p : 製品の生産量

a_r : リサイクル材の原単位

X_w' : 加工屑量

r : 加工屑のリサイクル率

製品の寿命後に素材がリサイクルされる場合は、そのリサイクル率を r とすると、製品の物理量バランスは次式で表わされる (図4)。

$$X_p = X_v - r \cdot X_w' \quad \dots (17)$$

製品の生産に要するエネルギー消費あるいは環境負荷の原単位は、次式で表わされる。

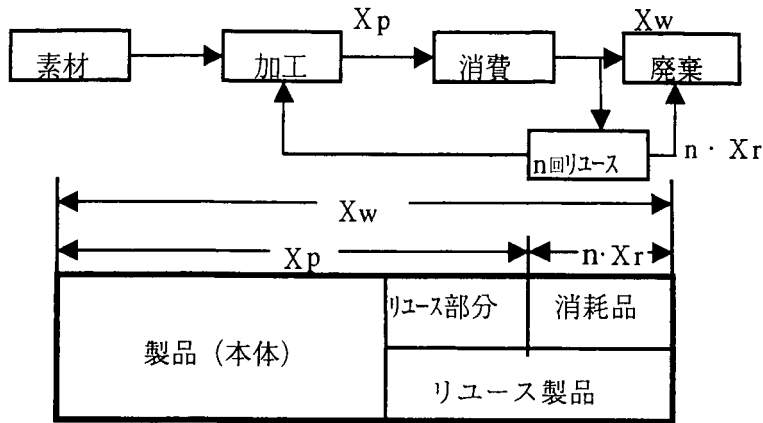


図2 製品のリユース

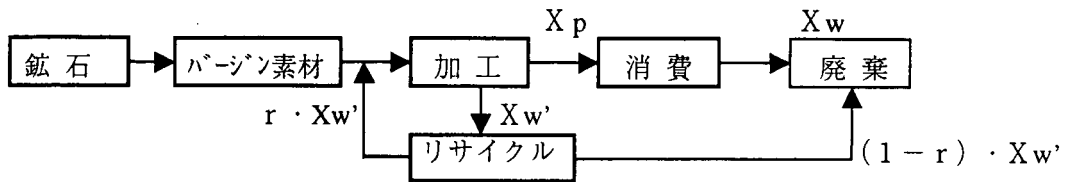


図3 加工屑のリサイクル

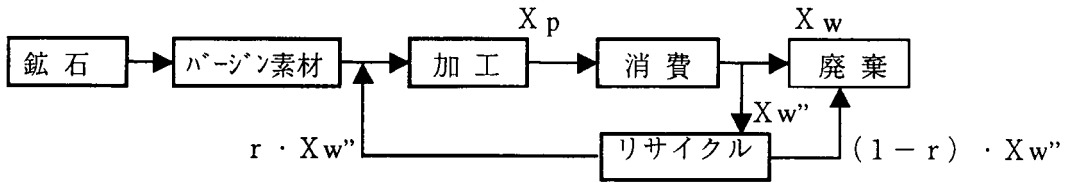


図4 寿命後のマテリアルリサイクル

$$a_w = (a_p \cdot X_p + a_r \cdot r \cdot X_w'') / X_w \quad \dots (18)$$

X_w'' : リサイクル部門への投入素材量

3. 洗濯機のライフサイクル分析

3.1 ソフトウェア「Quick LCA」

ハイブリット LCA 手法のソフトウェア (Quick LCA) を開発した。ソフトウェアは、単に製品の製造時だけでなく、利用、廃棄、リサイクルの4つのプロセスで、製品のエネルギー消費、環境負荷、労働投入量が分析できる (図5)。

分析できるエネルギーの種類は、電気、ガ

ス、石油、石炭で、環境負荷は、 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 である。また労働者の種類は、産業連関表の労働区分に従ったもので、有給役員、常用雇用者、個人業種、家族従業者、臨時・日雇いである。

分析は最初に、対象となる製品がどの製造部門で生産されたものかを産業連関表の部門分類で特定する。対象製品が、複数の製品から成り立っている場合は、それぞれの製品が造られた製造部門を産業連関表から選ぶことになる。図6は、その選択画面を表示したものである。図に示される製造部門は、大きく12の業種に分れているが、それぞれの業種をクリックするとさらに詳細な部門が表示される。全体の業種数は120部門で、製品の構

成品はそのどれかに対応させることになる。

次に、製品の構成素材を入力する。複数の構成材からできている製品は、それぞれの構成材について構成素材を調べる。構成材の構成素材は、通常、積み上げデータを入力することになるが、データの作成には産業連関分

析法によってあらかじめ求めた平均財のデフォルト値^[7]を参考にすることができる。構成材の入力だけで、複雑な製造プロセスのエネルギー消費や環境負荷の値が、工程別あるいは燃料種別に整合的に求まることになる。利用時のプロセスは、運転保守と部品のリユ

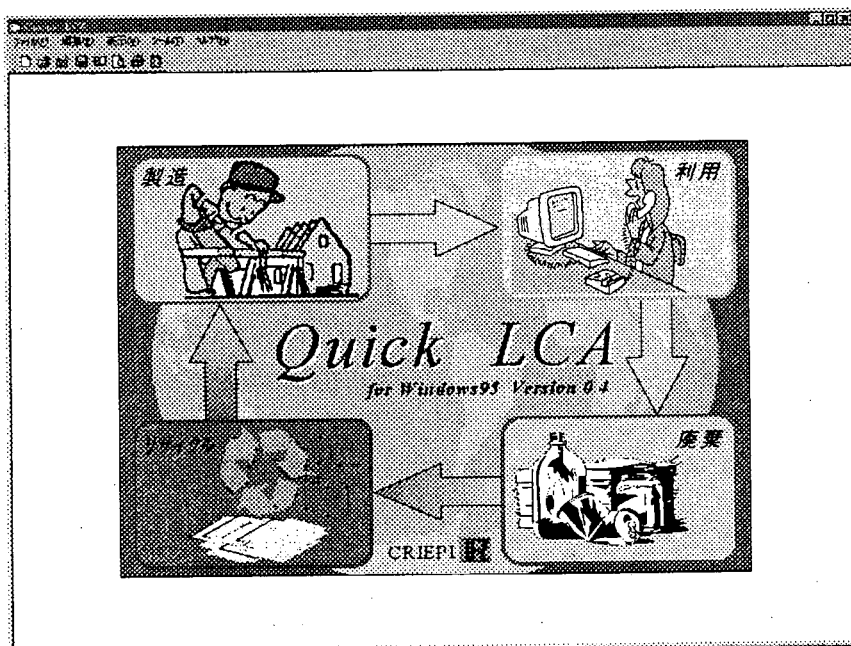


図5 “QuickLCA” ソフトウェアの画面

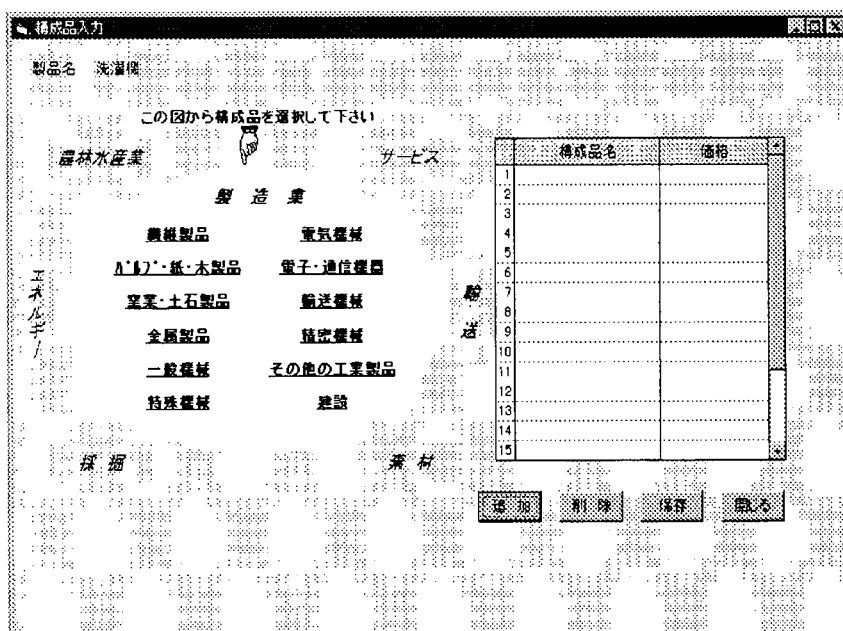


図6 製品の構成材入力画面

ースから成っている。運転時の分析には、製品寿命と利用時のエネルギー消費を入力する必要がある。選択できるエネルギーの種類は、電気、都市ガス、ガソリン、軽油など 15 種類の二次エネルギーである。電気は、さらに環境負荷の原単位が異なる昼間と夜間の電力、および季節別の電気を選ぶことができる。保守は、潤滑油や水などユーティリティのデータを入力することで分析できる。

リユースは製品の部品交換で、その分析には年間の交換回数と交換品を構成素材量で入力する必要がある。廃棄プロセスは、輸送、分別、解体、処理、処分の工程に分かれており、それぞれの工程についてエネルギー、環境負荷、労働量の積み上げデータを入力する。リサイクルは、マテリアルとサーマルに分か

れている。マテリアルリサイクルは、寿命後の廃棄物となった製品を素材としてリサイクルするもので、その分析にはリサイクル素材、リサイクル率を入力する必要がある。サーマルリサイクルは、入力した製品の構成素材の中から可燃性廃棄物の量が画面上に表示されるので、電気として利用するか熱として利用するかを決め、そのリサイクル率を入力する。

3. 2 洗濯機のライフサイクル分析

開発したソフトウェアにより、洗濯機のライフサイクル分析を行った。表 1 は、積み上げ法で調べた洗濯機の構成素材を産業連関表から得られた標準値（デフォルト）と比較して示したものである。

ユーザーは標準値を参考にして、洗濯機を

表 1 洗濯機（45 リットル）の構成素材量

素材		数量 [kg]	標準値 [kg/百万円]
木材	素材	0.163	0.163
鉄	フェロアロイ	0.002	0.002
詳細あり	熱間圧延鋼材	18.300	19.360
	鍛造鋼	4.600	0.056
非鉄	銅	0.800	1.760
	鉛（含再生）	0.194	0.194
	亜鉛（含再生）	0.853	0.853
	アルミニウム（含再生）	0.850	2.323
	その他の非鉄金属地金	0.074	0.074
有機	合成ゴム	0.230	0.230
	熱硬化性樹脂	0.023	0.023
	熱可塑性樹脂	0.262	0.262
	その他の合成樹脂	8.900	8.900
無機	舗装材料	0.257	0.257
	板ガラス・安全ガラス	3.560	3.560
	ガラス繊維・同製品	0.000	0.000
	その他のガラス製品	0.155	0.155
	生コンクリート	0.000	0.000
	陶磁器	0.030	0.030
	耐火物	0.000	0.000
	その他の建設用土石製品	0.000	0.000
	炭素・黒鉛製品	0.090	0.090
その他	製糸	0.000	0.000
	綿糸	0.001	0.001
	化学繊維紡績糸	0.001	0.001
	毛糸	0.000	0.000
	その他の紡績糸	0.001	0.001
	製革・毛皮	0.000	0.000

構成している素材量を入力することができる。本研究は、容量が45リットルの冷蔵庫を例に、鉄、銅、アルミニウム、樹脂については実際に洗濯機を構成している素材量を入力し、他の素材については標準値をそのまま入力した。製品の加工・組立段階で消費するエネルギーの一部として、本ソフトウェアでは構成素材と同様に、企業の独自の製造ラインで消費する製造エネルギーを標準値の代りに入力することができる。この工場における直接の消費エネルギーや環境負荷を入力すると、洗濯機が造られている産業連関表の加工組立工程の平均的なエネルギー消費や環境負荷が、設定した入力値に置き換わることになる。今回、検討した洗濯機では、製造エネルギーとして事業用電力、A重油、液化石油ガスが必要であることがわかり、洗濯機1台当たりでそれぞれ16kWh、0.47リットル、0.23kgの値を入力した。入力した事業用電力によって加工組立時にNO_xとSO_xが、それぞれ0.006kgと0.005kgだけ排出することになる。

洗濯機は、利用段階で電力と水を消費する。

その消費量は個人差が大きく、客観的な値を求めることは難しい。ここでは、年間の洗濯回数を730回とし、一回当たりの洗濯時間を40分、水使用量を175リットル/回、消費電力を150Wh/回と仮定して計算した。洗濯機の寿命は9年間とした。利用時の電気と水の消費により、NO_xとSO_xがそれぞれ0.036kgと0.029kgだけ、毎年、間接的に排出することになる。

今回の検討では、利用時の保守修繕は不要と考え、部品のリユースを無視した。廃棄段階では、処理業者がトラックで廃棄された洗濯機を運び、その輸送エネルギーとして軽油を0.224リットル、さらに解体作業に軽油を0.044リットル消費するとした。

図7は、洗濯機の分析結果を示したもので、製造、利用、廃棄の各段階でエネルギー消費量、CO₂排出量、労働投入量の大きさを比較している。図からエネルギー消費量は、製造段階が利用段階よりわずかに多く、全体の53%であることがわかる。ライフサイクルにわたるCO₂排出量は227kg(炭素)で、その値は洗濯機の重量の約6倍にもなっている。

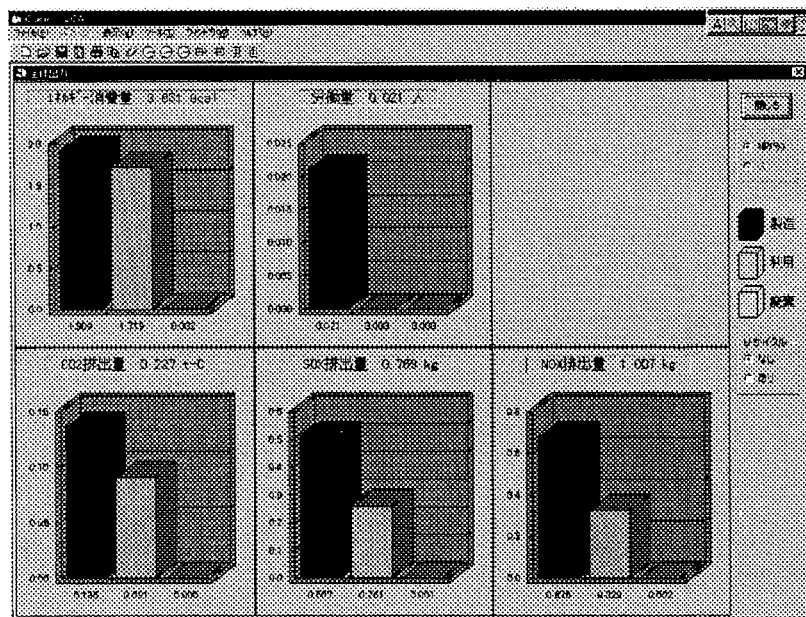


図7 洗濯機のライフサイクル分析の結果 (リサイクルなし)

そのうち、製造段階で全体の 60% が排出されている。SO_x と NO_x の排出量は、それぞれ 0.77kg と 1.01kg で、CO₂ 排出量に対して 200~300 分の 1 の量である。やはり製造時の排出量が最も多く、その割合は 3 分の 2 にもなっている。労働量は、製造以外のプロセスではほとんど無視できる値である。洗濯機 1 台製造するために投入された労働量は、

0.021 人である。

図 8 は、製造時のエネルギー消費量を採掘、素材、加工・組立、輸送などの工程別に求めたものである。工程別にみると素材製造工程のエネルギー消費量が最も多く、全体の 52% を占めている。中でも鉄の製造に消費するエネルギー量は全体の 27% にもなる。素材製造の次に多いのが加工組立工程のエネルギ

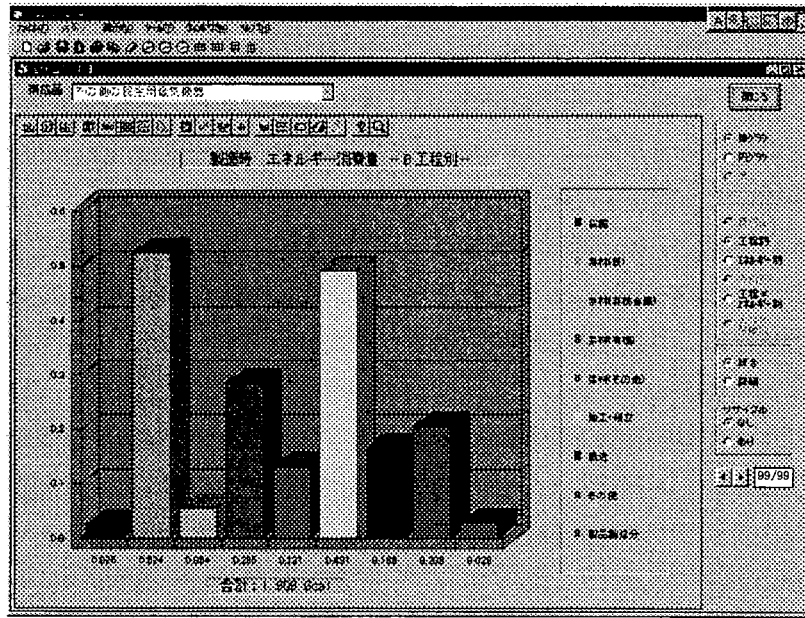


図 8 製造時のエネルギー消費量の内訳 (リサイクルなし)

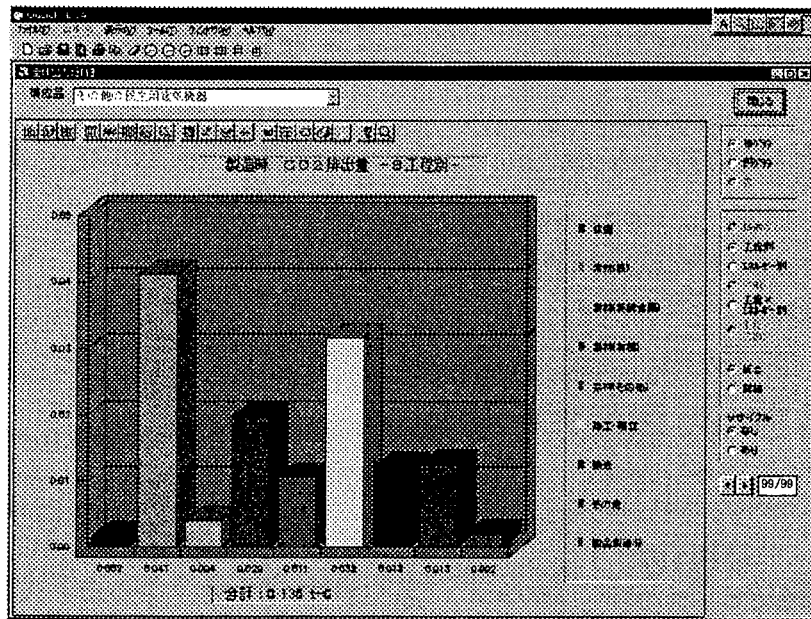


図 9 エネルギー源別にみた製造時のエネルギー消費量 (リサイクルなし)

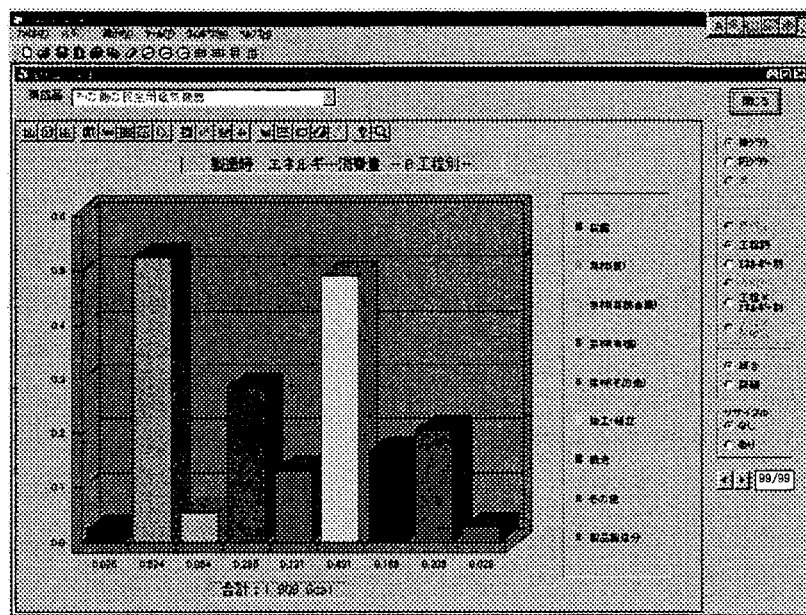


図10 製造工程別にみた製造時のCO₂排出量 (リサイクルなし)

一消費で全体の26%になっている。

図9は、製造時のエネルギー消費量をエネルギー源別に熱量で示したものである。最も多く消費しているのが石油で次いで電気、石炭、ガスの順である。石油の消費は電気の1.4倍になっているが、主に輸送用に使われているものである。石炭は大半が鉄鋼の生産に消費されたものである。洗濯機の加工組立時に直接消費する電気は、全体の電力消費量の6.1%程度でそれほど大きくはない。

図10は、環境影響物質としてCO₂を例に製造時の排出量を製造プロセス別に示したものである。製造時のCO₂排出量は136kg(炭素)で、そのうち使用した素材からの排出が55%と最も多く、中でも鉄の製造により30%のCO₂が排出されている。次に大きいのが加工組立工程の電力から排出するCO₂量で全体の24%を占めている。

リユースやリサイクルは、製品の製造時の環境負荷を低減する効果がある。洗濯機を例にして、素材のリサイクル率を変えてCO₂排出量の削減効果を調べてみた。マテリアルリサイクルとして鉄系金属(フェロアロイ、

熱間圧延鋼、鋳鍛鋼)を対象にリサイクル率を50%、樹脂系素材については100%サーマルリサイクルを行うと仮定した。設定したリサイクル率によって、全体のエネルギー消費を6%、CO₂排出量を7%削減する効果があることがわかった。その削減効果の大半はマテリアルリサイクルによるものであることも明らかになった。

4. おわりに

インベントリー分析で最も複雑な工程は製造段階である。製造段階のインベントリー分析は、産業の複雑な工程で排出されている環境負荷を個々の製品レベルに配分しなければならない。通常、その方法には積み上げ法が使われているが、社会全体の環境負荷を整合的に扱う産業連関法を使えば“木を見て森を見ず”に陥らなくて済む。

本研究で開発した新しいLCA手法は、産業連関法と積み上げ法のハイブリット手法で、それぞれの利点を生かすことで具体的な製品のライフサイクルにわたるインベントリーを明らかにできるようにしたものである。製品

のインベントリーをライフサイクルにわたり完全に明らかにする手法は存在しない。しかし、開発したソフトウェアは、社会のマクロの環境負荷を概略ではあるが個々の製品に整合的に配分することを可能にした。これによって、これまでの煩わしかったインベントリー分析を容易にかつ迅速に行えるようにした。

【参考文献】

- [1] Environmental Protection Agency, "Life Cycle Assessment Inventory Guidelines and Principles", EPA/600/R-92/245, Battelle and Franklin Associates, Ltd. Cincinnati, OH, Feb. 1993
- [2] SETAC, "Foundation for Environmental Education, A Technical Framework for Life-Cycle Assessment", Pensacola, FL, 1991.
- [3] 内山洋司、山本博巳「発電プラントの温暖

- 化影響分析」電力中央研究所研究報告、Y91005 (1991年)
- [4] 内山洋司「発電プラントのライフサイクル分析」電力中央研究所研究報告 Y94009、(1995年)
- [5] 本藤裕樹、西村一彦、内山洋司「産業連関分析による財・サービス生産時のエネルギー消費量と CO₂ 排出量」電力中央研究所研究報告 Y95013、(1996)
- [6] Nishimura, K., Hondo, H., Uchiyama, Y., "Derivation of Energy - Embodiment Functions to Estimate the Embodied Energy from the Material Content," Energy 21-12, 1247-1256. (1996)
- [7] 内山洋司、本藤裕樹、西村一彦「製品の新型 LCA ソフトウェアの開発」第 2 回エコバランス国際会議予稿集 (1996年 11月)

(うちやま ようじ
 にしむら かずひこ
 ほんどう ひろき
 電力中央研究所 経済社会研究所)