

# LCA (ライフサイクルアセスメント) (その2)

LCA (Life Cycle Assessment) ・ Part 2



自動車塗料本部  
海外技術部  
杉崎勝久  
Katsuhisa  
Sugisaki



品質環境本部  
松井明  
Akira  
Matsui

## 1. まえがき

21世紀は環境の世紀といわれる。いよいよ地球存亡を賭けて直視し真剣に取り組まねばならない深刻な問題が山積してきた。かつて地域という狭い空間で処理し得た限定問題が、広範囲に拡大し、地球規模というグローバルな対応でしか処理できないという大きな展開を見せてきた。無限と思われた地球は、実はすぐそこに限界のある有限なものであることを人類に実感させる事象が次々に発生している。環境問題には国境がなくなってきた。地球の人口増加には歯止めがかからず、20世紀の間には50億人を突破し、人口は2050年には100億人に達するといわれる。温暖化と相まって食料危機などにより地球の存続を脅かす重要な要因である。環境問題の特徴は、加害者はたちまち被害者となることにある。BSE(狂牛病)問題に代表される複雑な食物連鎖、環境ホルモンに代表される遺伝子かくらんという生態系破壊など、ボーダーレスあるいは非可逆性という空間軸、時間軸を超えた諸問題が人類に突きつけられている。自然系の破壊は容易であるが、その復元には余りにも時間がかかる。1992年モントリオール議定書で全廃が決定された特定フロンによるオゾン層の破壊問題は、その後拡大し続け、今やオゾンホールは南極大陸の面積の2倍に達している。

地球温暖化問題はとりわけ深刻である。炭酸ガス濃度は、氷河期から温暖期までの1万年間に200ppmから280ppmに上昇した。ところが200年前の産業革命以来、活発化した人間活動により、その濃度は急激に増加し現在では360ppmを超えている。1997年京都で開催されたCOP3(気候変動枠組条約第3回締約国会議)で取り決めたCO<sub>2</sub>削減計画は、マラケッシュCOP7で基本大筋合意がなされた。いよいよワールドワイドな温暖化対

策がスタートする。

有限な地球を守りぬき持続ある発展(sustainable development)を達成するためには、あらゆるプロダクトについて、資源消費から環境負荷に係るライフサイクルすべての過程の環境影響を考慮し、対処する必要がある。LCA(ライフサイクルアセスメント)はこのような観点から開発されたツールである。(図1にその手法を示す)。1998年より5年計画で経済産業省主管のLCA国家プロジェクト「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発」が進行中である。そのプロジェクト推進体制を図2に示す<sup>1)</sup>。現在、プロジェクト研究会へ参加の22工業会とデータ提供協力工業会を含め、約60の工業会が参画している。当社は日本塗料工業会の活動に参加している。

『塗料の研究138号』では、LCAの概要について述べた。本稿では、LCAの実践事例を中心に紹介する。

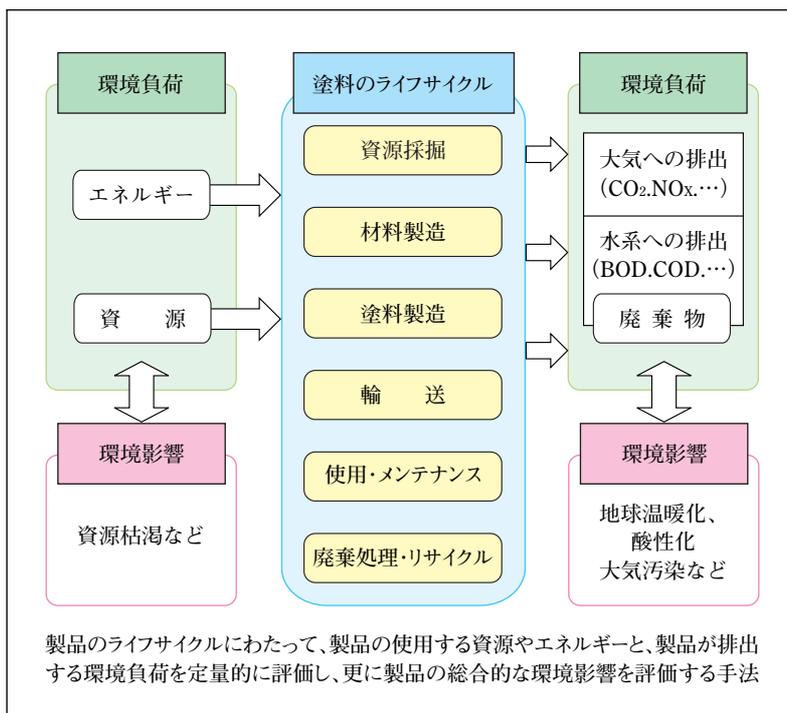


図1 LCAとは

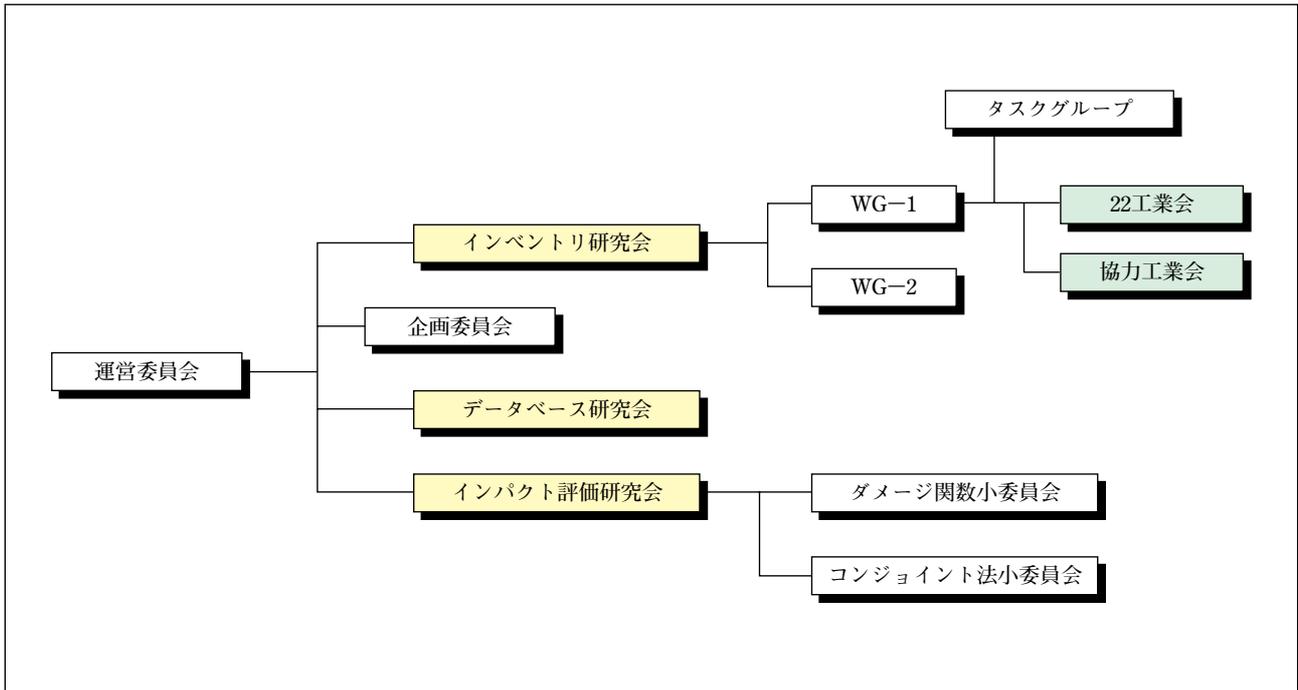


図2 LCA国家プロジェクト「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発」推進体制<sup>1)</sup>

## 2. LCAの構成

ISO14040で定めるLCAの構成とインベントリ、インパクト評価の流れを図3に示す。

### I) 目標と対象範囲の明確化

何のためにLCAを行うのかという目標や目的を明確にすることが重要である。それに基づき製品、ライフサイクルの範囲や評価項目を十分に検討して絞り込む。ま

た対象とする範囲も事前に明確しておかなければならない。

### II) インベントリ分析

対象とする製品を構成する原材料の原料インベントリ(資源採掘、製造、運搬などのエネルギー使用、環境への影響)、製品の製造、搬送、使用、廃棄など製品ライフの全てにおけるエネルギー使用、環境への影響を算出し合算する。これをLCI(ライフサイクルインベントリ)分析と呼ぶ。

資源採取には鉄鉱石、ボーキサイト、エネルギー用の石炭、原油、LNG等があり、環境への排出物には、大気中にはCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>やフロンなどであり、水質ではBOD、COD、SSなどがあげられる。計算精度は用いるデータ類の信頼性に影響されるため、用いたデータの根拠、出典などの明示が必要である。

### III) インパクト評価

インベントリ分析の結果を使って環境影響の重要性を評価する。インベントリデータを特定の環境影響と関連付けて各影響領域毎に割り振り、特性化係数を用いて共通単位に換算し集計する。これをLCIA(ライフサイクルインパクトアセスメント)と呼ぶ。

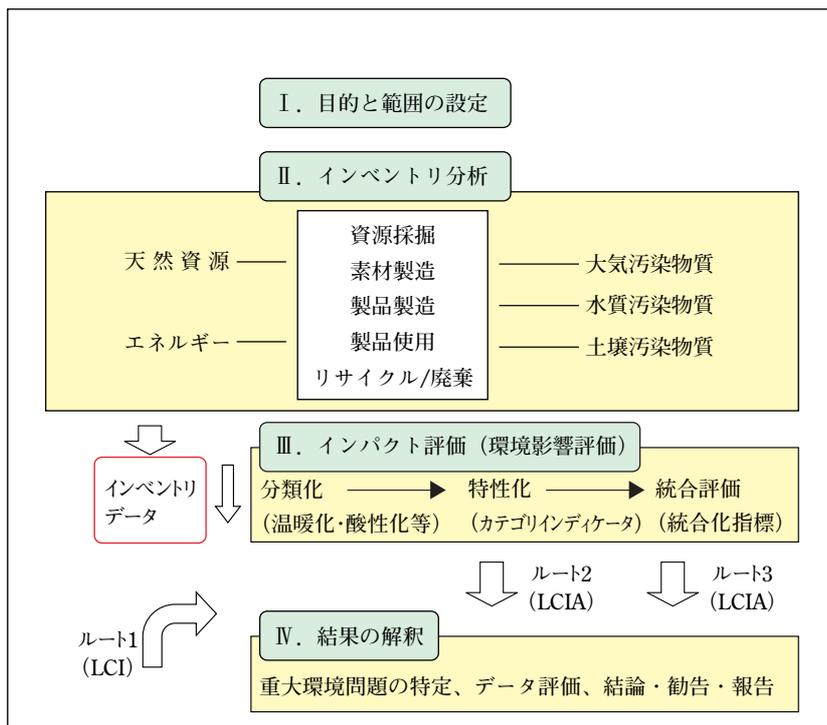


図3 LCAの構成とインベントリ、インパクト評価の流れ(ISO14040シリーズ)

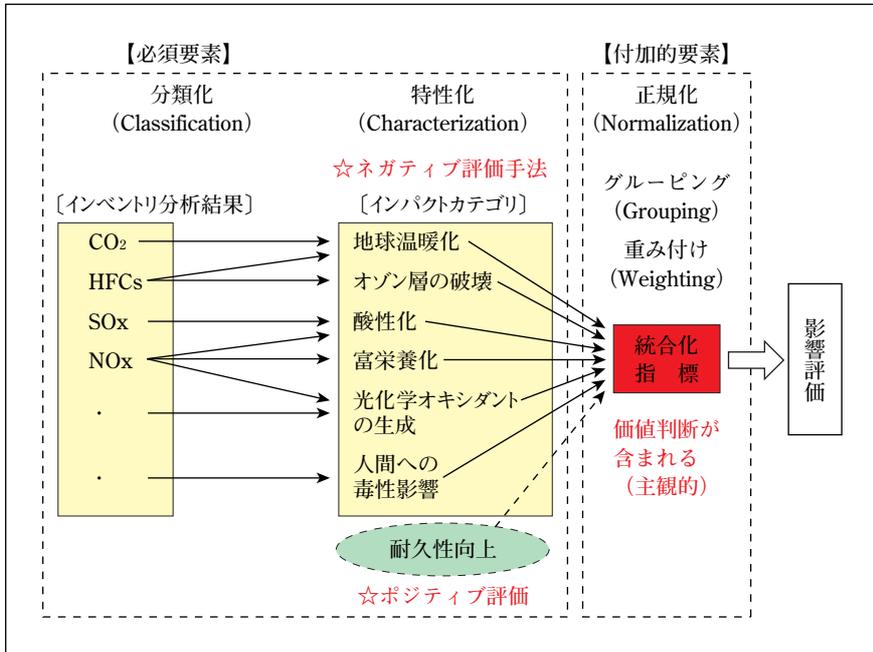


図4 ライフサイクル影響評価

ISO14020によればLCIAは以下の構成からなる。必須要素としては、分類化[環境負荷物質をインベントリカテゴリに振り分ける]、特性化[特性化係数を用いてインパクトカテゴリごとに影響を評価する]がある。付加要素としては正規化[製品システムが引き起こすカテゴリを特定範囲内の寄与として算出する]、統合化[インパクトカテゴリ間の重みづけにより統合指標で表すこと]がある。図4には、ライフサイクルの影響評価を示す。影響評価は目的に応じて段階を決めればよい。

IV) 結果の解釈

当初の目的、範囲と十分に照らし合わせ、インベントリ分析やインパクト評価の結果を単独または総合して評価、解釈することが肝要である。それ以外のデータのひとりがり、一人歩きは危険であり避けるべきである。

3. LCAの実践(ケース・スタディ)

以下の章では、LCAの目指すところを理解していただくために、実際のLCIA事例を紹介する。前述のように国家プロジェクトとしてインベントリデータを収集中であるが、残念ながら塗料原料に関するデータの認定化が遅れている。従って、以下に示すケース・スタディの中には大胆な仮定に基づいている原料データもある。データが不十分な状況での今回のような定量化はフラッシングであるかも知れないが、LCAの考え方をより理解していただくためには数値を含んだシミュレーションが好ましいと判断した。そういう前提の了解をお願いしたい。なお計算ソフトはJEMAI(産業環境管理協会)を使用した。

3.1 ケース・スタディ(1) [生産活動に伴う環境影響評価]

地球温暖化防止条約京都議定書に沿った国内対策は、既にスタートした。政府は温暖化ガスの排出を減らすための対策を定めた新しい地球温暖化対策推進大綱を決定した。やがて産業界へ削減内容が割り振られる。

I) 目的と対象範囲:

当社の5工場における2001年度の生産活動に伴う環境影響を地球温暖化という観点から明確にするとともに、5工場の比較解析を行うことにより、今後の個々の改善基礎データを作ることを目的とする。

II) インベントリ分析、インパクト評価:

当社の5工場の生産活動に伴う電力、重油、灯油、ガスの2001年度の消費総エネルギーを解析した結果を表1に示す。図5には5工場のインベントリ分析結果(CO<sub>2</sub>)、図6には5工場の地球温暖化のカテゴリインディケータ、図7には5工場の酸性化カテゴリインディケータをそれぞれ示す。この結果、製品1kg当り、約0.11~0.18kgのCO<sub>2</sub>排出となる。

表1 5工場消費エネルギーのLCA解析結果 [2001年度/原単位]

	インベントリ (CO <sub>2</sub> : kg)	インパクト評価 (※K.I.)	
		地球温暖化	酸性化
小野工場	0.153	0.157	2.46E-04
尼崎工場	0.178	0.200	2.39E-04
名古屋工場	0.157	0.173	2.01E-04
平塚工場	0.132	0.151	1.71E-04
鹿沼工場	0.118	0.120	1.83E-04

※K.I.; カテゴリインディケータ  
地球温暖化GWP (CO<sub>2</sub>=1) Eco95  
酸性化AP (SO<sub>2</sub>=1)

III) まとめ:

工場間に若干の差異が見られるのは、使用エネルギーの内訳および生産構成の違いによるものと考えられる。今後詳細解析し温暖化防止施策に反映させたい。

3.2 ケース・スタディ(2) [再生PETの塗料利用への環境影響シミュレーション]

容器包装リサイクル法の施行(H12.4)以降、PETボトルの回収が急増している。2000年度の回収量は12.5万トン

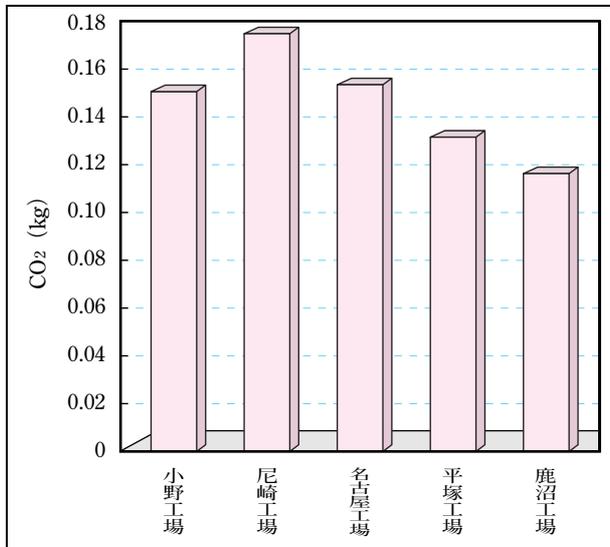


図5 5工場のインベントリ分析結果 (CO<sub>2</sub>)

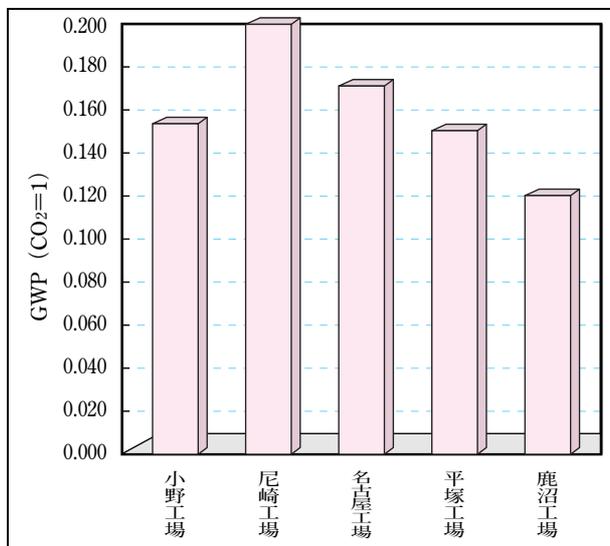


図6 5工場の地球温暖化カテゴリインディケータ

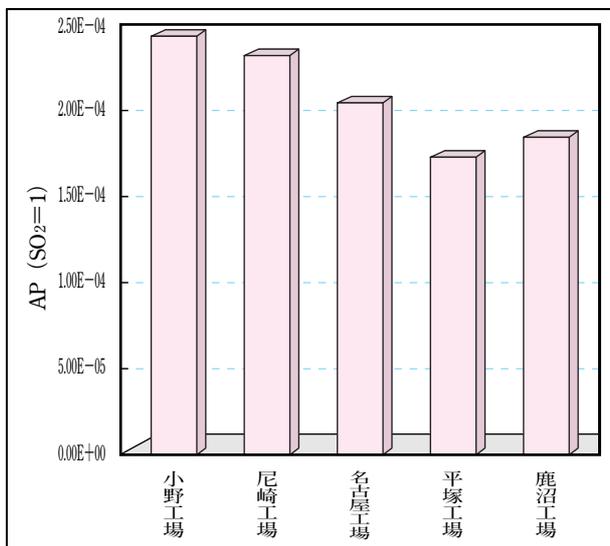


図7 5工場の酸性化カテゴリインディケータ

であり、リサイクル率は35%である。再生PETのリサイクルは全産業への大きな期待事項である。当社は、アルキド樹脂に再生PETを解重合させるという、いわばケミカルリサイクル技術を確認し、H12年秋に再生PETを組み込んだ塗料の販売を開始した。

PETボトルの再生についてはいくつかのLCA解析事例が報告されている。ここでは「ライフサイクルアセスメントの実践(化学工業日報社)」<sup>2)</sup>で紹介されているPETボトルのケミカルリサイクルのLCIデータを引用し、それを基にしてデータを追加作成して解析した。

I) 目的と対象範囲：

PETボトルをスタートとし、A:使用後廃棄するケースと、B:PETボトルをリサイクルし、再生したPETを塗料に再利用するケースの事例についてLCAシミュレーションを行う。対象となるポイントは、廃棄とリサイクルという極端な対比の比較解析および解釈である。

II) インベントリ分析、インパクト評価：

PET樹脂からPETボトルが製造され消費者により使用される。図8に一連のフローを示す。通常は一部サーマルリサイクルされて廃棄される。廃棄PETに関するインベントリは、図8に示すように、PETボトル製造分と廃棄に要する分の合計[廃棄PET]となる。なお、見かけの数値は省略しているが、PETボトルの総インベントリはPET樹脂のインベントリも含めて計算している。

一方、PETボトルのケミカルリサイクルの場合、PETボトルは消費、廃棄のあと「減容、フレック、解重合」の過程を経て再生される。当社の再生PETの利用は、再生業者によってフレックにされたものをアルキド樹脂の解重合に供し、その樹脂を塗料に再利用している。そこでLCAのシミュレーションは図9に示すフローに従った。PET再生のインベントリは前述文献のデータを引用した。再PETの塗料への利用は、塗料中5%としその塗料の製造インベントリを計測算出した。PETボトルの廃棄と塗料利用のインベントリ結果を表2に示す。各々の数字の意味するところは、PET樹脂製造に要する資源採掘というゆりかごから、最終段階(廃棄または塗料利用)に至るまでの総環境負荷である。CO<sub>2</sub>量でいえば、PETボトル1kg当り、11.0kgおよび15.9kgということになる。

インパクト評価して特性化したカテゴリインディケータを表3に示す。地球に大きな影響を与えるとして採用されているインパクトカテゴリーごとに定められた係数をかけたものが、カテゴリインディケータである。

両ケースの典型的な差は、単なる廃棄の場合にはPETボトル製造以降、余分な環境負荷を出さない(一部のサーマルリサイクル分は除く)が、埋立という別の意

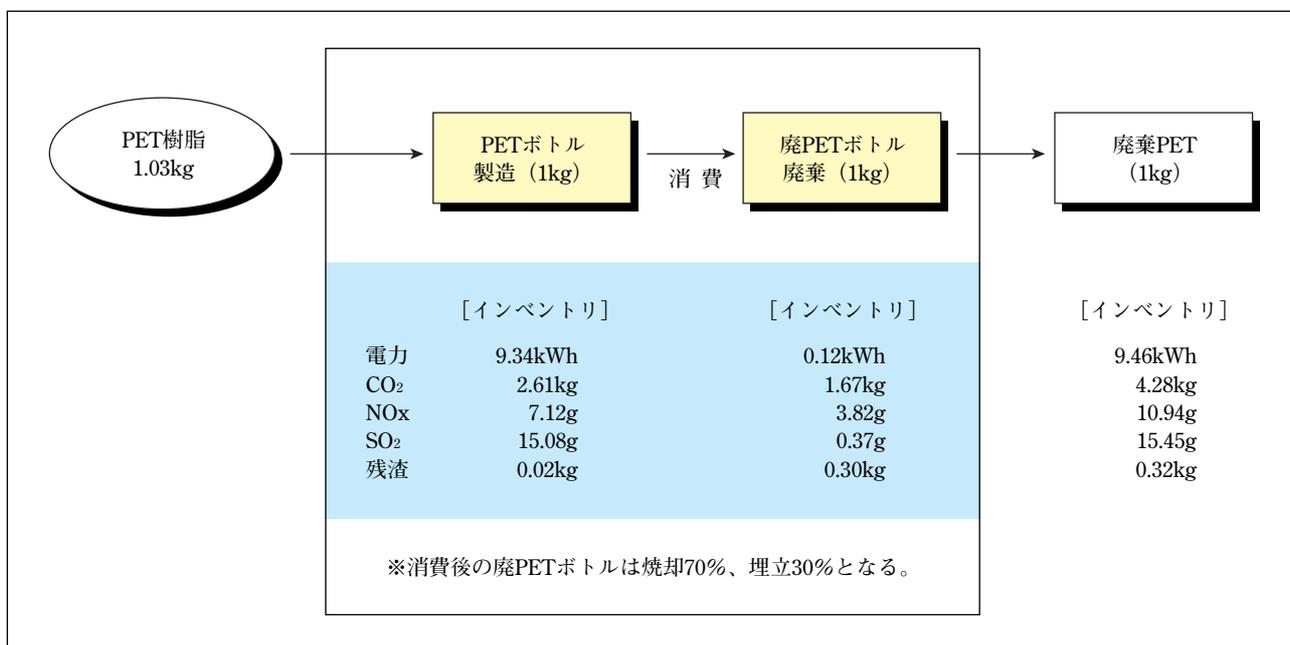


図8 PETボトルをリサイクルなしで使用後廃棄する場合のインベントリ<sup>2)</sup>  
(一部サーマルリサイクル) (LCA対象はPETボトル製造以降)

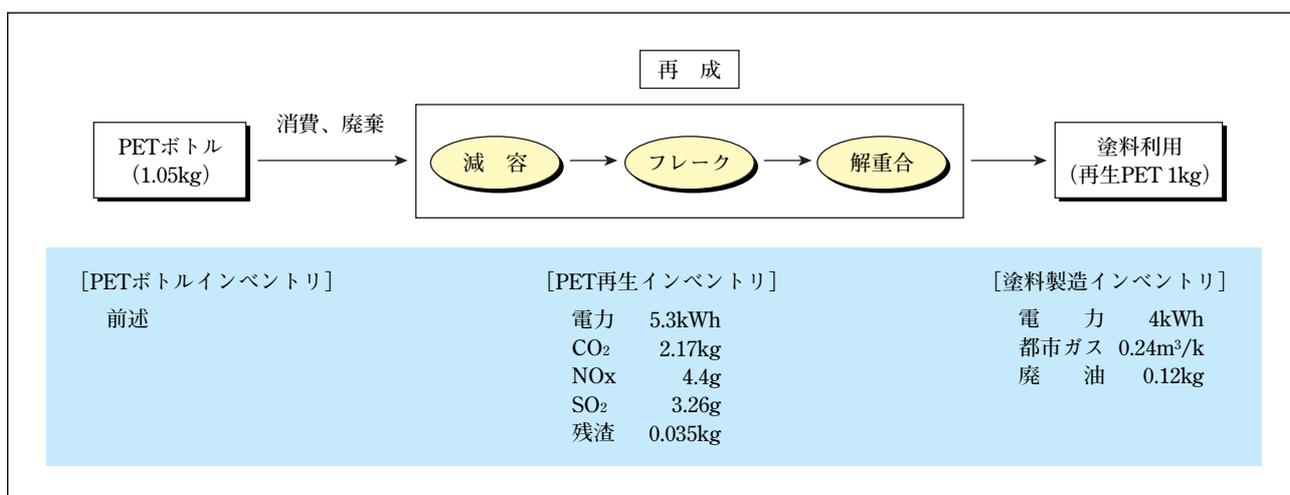


図9 PETボトルを (1)ケミカルリサイクルしたあと、(2)再生PETを塗料に利用する場合のインベントリのフロー<sup>2)</sup>  
(LCA対象はPETボトル製造以降)

表2 PETボトルの廃棄と塗料利用の場合のインベントリ結果 [単位 ; kg]

名前	PET廃棄の場合	塗料利用の場合
coal for elect. reserves	0.5752	1.0963
LNG reserves kg	0.4239	0.8805
oil reserves	2.3448	3.0394
water hydro	0.0142	0.0152
CH <sub>4</sub>	1.04E-04	1.98E-04
CO <sub>2</sub>	11.0092	15.9026
N <sub>2</sub> O	5.39E-04	6.74E-04
NOx	0.018	0.0218
SO <sub>2</sub>	0.0216	0.0291
SOx	5.34E-05	5.29E-05
埋め立て重量kg	0.32	0.056

味で大きな負荷を発生する。一方、再生して塗料に利用する場合には、再生に要するエネルギー使用と塗料製造時のエネルギー使用(CO<sub>2</sub>など発生~地球温暖化寄与)がオンされることになる。塗料利用の場合には、廃棄に比較して1.4倍の地球温暖化寄与となる。廃棄物という点に着目した場合、塗料利用の場合は廃棄の場合の約6分の1となる。

表3 PETボトルの廃棄と塗料利用の場合のインパクト評価結果 [カテゴリインディケータ]

インパクトカテゴリ	特性化係数名	PET廃棄の場合	塗料利用の場合
資源の消費	資源の消費	2.68E-02	4.06E-02
地球温暖化	GWP (CO <sub>2</sub> =1) Eco95	11.156	16.08688
酸性化	AP (SO <sub>2</sub> =1)	3.43E-02	4.44E-02
湖沼の富栄養化	NP (PO <sub>4</sub> =1)	2.34E-03	2.84E-03
光化学オキシダント	POCP (ethylene=1)	4.83E-04	6.54E-04
人間への毒性	HCA,HCW	4.07E-02	0.0532354
エネルギーの消費	MJ	157.7547	240.2838
固形排出物	kg	0.32	0.056

表4 PETボトルの廃棄と塗料利用の場合の統合化結果

重み付け手法	PET廃棄の場合	塗料利用の場合
エコインディケータ(*1)	1.43E-02	1.97E-02
EPS(*2)	1.97E+00	2.70E+00

- (\*1) ; インパクトをインパクトカテゴリとして集約し、カテゴリ間の重み付けをして統合するもの。「人間の健康」「エコシステム」への損害を及ぼしうるカテゴリを考慮。  
 (\*2) ; Environmental Priority Strategies in product design  
 インパクトをすべて貨幣価値で評価し加算して単一指標に統合するもの。

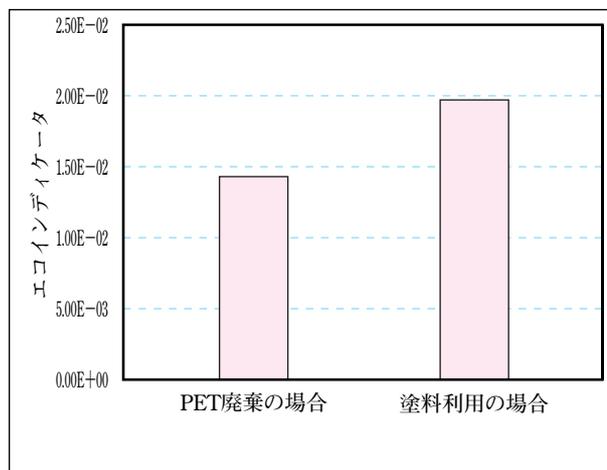


図10 PET廃棄した場合と塗料に再利用した場合のエコインディケータ比較

Ⅲ)まとめ:

多くのインパクトカテゴリを総合して、廃棄と再利用のどちらのケースが総環境負荷が大きいかを比較する目的で設定されているのが、統合化指標である。PETボトルの廃棄と塗料利用の統合化結果を、表4に示す。図10にはそのエコインディケータの比較を示し、図11にはそのEPSの比較を示す。「エコインディケータ」は、インパクトをインパクトカテゴリとして集約し、カテゴリ間の重み付けをして統合するものである。「EPS」とはインパクトをすべて貨幣価値で評価し加算して単一指標に統合したものである。

2つの指標とも廃棄に比較して再利用の方が数値が大きくなっている。つまり塗料再利用の方が環境負荷が大きいという結果である。これは、PET再生時のエネルギー使用および塗料製造時のエネルギー使用の環境負荷加算分が影響しているものである。しかし日本は国土が狭く廃棄物の処理スペースの余地に限界を迎えようとしている。インパクトカテゴリの中で固形排出物の重

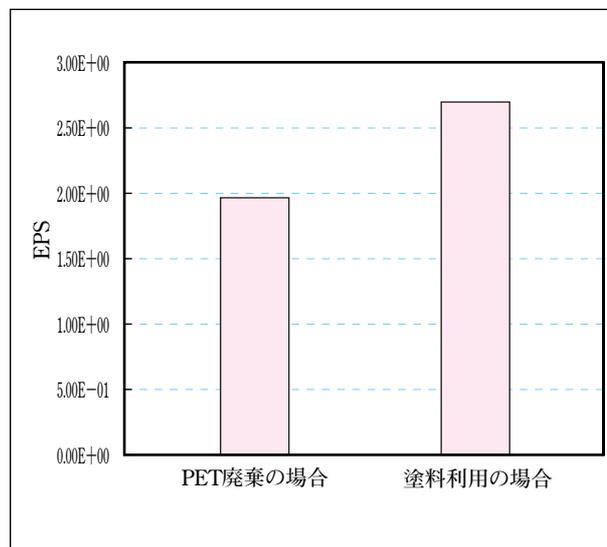


図11 PET廃棄した場合と塗料に再利用した場合のEPS比較

<b>配合モデル</b>	アクリルワニス；MMA/スチレン/キシレン=25/25/50 アルキドワニス；TPA/EG/キシレン=50/15/35 アクリルエマルジョン；MMA/スチレン/水=25/25/50  白エナメル；ワニス/酸化チタン/シンナー配合でアクリル：NV=50% アルキド：NV=60%とした  ※素材のみのLCA解析とした。 酸化チタン；JEMAIソフトを利用した大胆な仮定を取り入れた。
<b>インベントリモデル</b>	塗料の製造データ；電力、重油などの実測をベースにした。 原料のデータ；上記配合でJEMAIソフトおよび仮定値を取り入れた。

図12 LCA解析の配合モデルとインベントリモデル

み付けをもっと大きくしなければならぬ国内事情となっている。統合指標は今なお研究中であり今後の課題である。

3.3 ケース・スタディ(3) [塗料の環境影響シミュレーション]

I) 目的と範囲:

我々の取り扱っている塗料をLCA面でどのように扱うかがこの項でのシミュレーションである。但し現状では原料のインベントリデータが極端に不足している。従ってここで示すデータは大まかな目安である。国家公認データが充実してくればLCAは有用なツールとなる。設計段階で、その製品のライフを通じた環境影響を定量把握できることになる。代替配合の環境影響を予測することができるなど。

シミュレーションに用いた代表的なワニス、白エナメルなどの配合モデルとインベントリモデルを図12に示す。

II) インベントリ分析、インパクト評価:

各種ワニスのインベントリ(CO<sub>2</sub>)結果を表5に示す。ワニスの環境負荷は、その素材(原料部分とそれを作るまでに要した総環境負荷とワニスの製造に要した環境負荷に分けられる。両者の合計がワニスの総環境負荷(CO<sub>2</sub>)となる。素材と製造部分の比率は、素材部分の寄与が圧倒的に大きい。10~20倍見当のようである。アクリルエマルジョンは、水を多く含むためインベントリが小さくなることは当然予測される場所である。

白エナメルのインベントリ(CO<sub>2</sub>)比較結果を表6および、

表5 各種ワニスのインベントリ(CO<sub>2</sub>)結果 [素材、製造の比較]

種類	素材 (kg)	製造 (kg)	合計 (kg)	素材/製造比
アクリルワニス	1.558	0.0665	1.6249	23.4
アルキドワニス	1.478	0.1524	1.6307	9.7
アクリルEM	1.050	0.1178	1.1678	8.9

表6 各種白エナメルのインベントリ(CO<sub>2</sub>)の比較結果

種類	素材 (kg)
アクリル白	1.397
アルキド白	1.404
アクリルEM白	0.92

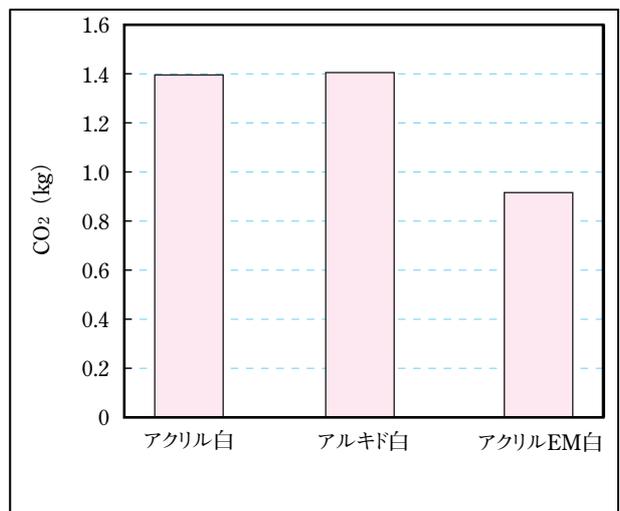


図13 白エナメルインベントリ素材(CO<sub>2</sub>)比較

図13に比較を示す。図13の単純解釈は、白エナメル1kg当りの環境負荷物、CO<sub>2</sub>の排出量はアクリルEM白が最も小さく、0.92kgである。表7にはアクリル白エナメルのインベントリ結果の詳細を示す。表8には白エナメルのカテゴリインディケーターと比較を示す。

III) まとめ

近い将来塗料原料のインベントリデータが公認されてくれば、このシミュレーションの内容が公認データとして活用できるようになる。一般的な塗料のライフと環境負荷は図14の通りである。これらの各過程におけるインベントリが利用できるようになると、メンテナンスを含めた塗料の全ライフのLCAが可能となる。

表7 アクリル白エナメルのインベントリ結果

形態	No	名 前	単位	全 体
raw	1	coal for elect. reserves	kg	0.0079
	2	LNG reserves kg	kg	0.0214
	3	oil reserves	kg	1.1354
	4	Ti reserves	kg	0.2
	5	U reserves	kg	5.33E-07
	6	water hydro	kg	0.0083
air	1	CH <sub>4</sub>	kg	1.42E-06
	2	CO <sub>2</sub>	kg	1.3972
	3	methane	kg	5.40E-04
	4	N <sub>2</sub> O	kg	1.92E-04
	5	NO <sub>x</sub>	kg	0.002
	6	SO <sub>2</sub>	kg	0.0012
	7	SO <sub>x</sub>	kg	7.60E-04
	8	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	kg	8.85E-05
	9	dust	kg	2.35E-04
	10	NMVOOC	kg	2.79E-06
	11	As	kg	2.93E-10
	12	Cd	kg	1.47E-11
	13	CO	kg	0.0016
	14	Cr	kg	2.93E-10
	15	Hg	kg	2.93E-10
	16	Ni	kg	1.32E-08
	17	Pb	kg	8.80E-10
	18	V	kg	7.33E-09
	19	Zn	kg	1.47E-09
solid	1	廃PP	kg	3.00E-04

#### 4. LCA今後の課題:

LCAはいろいろな業界で活用され実用化段階寸前といわれる。またLCAの研究も引き続き進んでおり、優秀な手法が提案されることが考えられる。塗料業界では原料のインベントリが不足しているため、現段階では実用化レベルとはいえない。

現時点のLCAは、プロダクツの環境負荷というマイナス面はかなり評価できるが、プロダクツの持続ある発展性への貢献度を数値表現するためのライフサイクルパラメーターは課題として多く残されている。プロダクツの有用性、社会寄与部分もライフサイクルで組みこまねばならないだろう。例えば、塗装することによる資材(被塗物)の消費防止(腐食防止など)、耐久性向上などがあげられる。コスト側面の配慮も不十分である。稲葉氏は企業内の環境対応コスト増を使用およびライフサイクルや廃棄の段階で吸収することを示すライフサイクルコストングの手法開発の必要性を説いている<sup>3)</sup>。最近、話題の多い化学物質の有害性側面も評価に組み入れる必要がある。

ともあれ、すべてのモードを地球規模に切り替えることが必須となってきた。ライフサイクル視点で発想するという基本概念は崩れることはないだろう。我々塗料産業にもサステイナブル・グリーン・ケミストリーという考え方の適用が必要となっている。少しずつ前進しながらLCAは進歩～完成していくものと考えられる。

表8 白エナメルのカテゴリインディケーター比較

インパクトカテゴリ	特性化係数名	アクリル白	アルキド白	アクリルEM白
資源の消費	資源の消費	1.969177	1.970561	1.964341
地球温暖化	GWP (CO <sub>2</sub> =1) Eco95	1.454908	1.461141	0.9467713
酸性化	AP (SO <sub>2</sub> =1)	3.34E-03	3.87E-03	1.93E-03
湖沼の富栄養化	NP (PO <sub>4</sub> =1)	2.54E-04	2.91E-04	1.30E-04
光化学オキシダント	POCP (ethylene=1)	1.38E-04	1.53E-04	6.19E-05
人間への毒性	HCA,HCW	3.92E-03	4.54E-03	2.29E-03
エネルギーの消費	MJ	52.6591	62.71744	22.04386

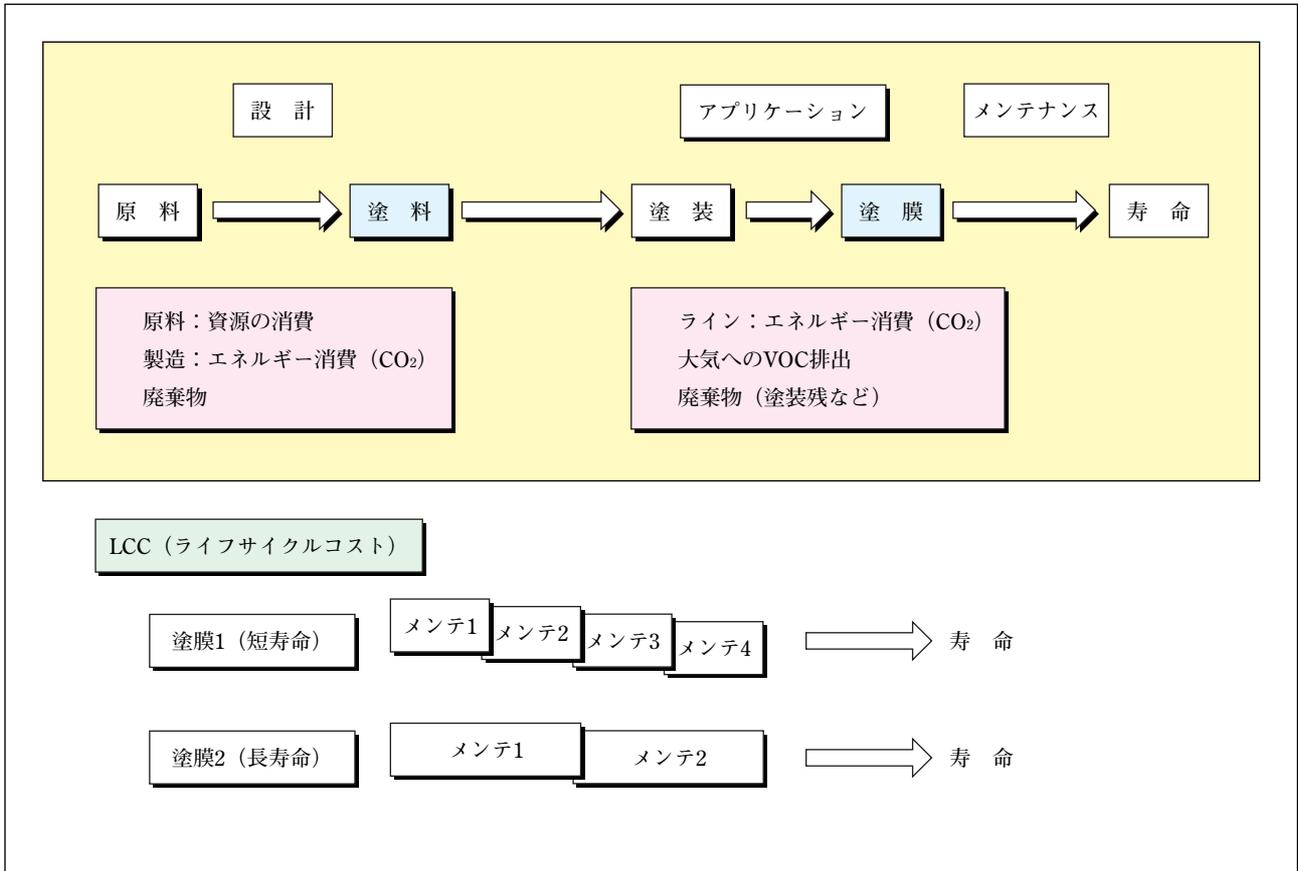


図14 塗料のライフと環境負荷との関係

引用文献

- 1) 青木良輔：“実用段階間近のLCAナショナルプロジェクトの現状” 産業管理、Vol.38, No.4(2002)
- 2) “ライフサイクルアセスメントの実践”：環境情報科学センター編 化学工業日報社(1996)
- 3) 稲葉敦：“多様化する環境影響評価手法とLCA” 産業管理、Vol.38, No 4(2002)

参考文献

社団法人産業環境管理協会：“LCA教育プログラムテキスト”