

(解説)

ライフサイクルアセスメントの最近の動向

尾上俊雄(工博)*・草道龍彦**

*神鋼リサーチ部 **技術開発本部・生産技術研究所

Recent Topics Related to Life Cycle Assessment

Dr. Toshio Onoye・Tatsuhiko Kusamichi

Life Cycle Assessment, LCA, has been attracting attention as an effective tool for environmental impact assessment. This paper, describes an aspect of LCA related to the ISO14000 series, a number of essential LCA features, and introduces related activities in Japan, especially the national LCA project. States of life cycle inventory methodology, impact assessment methodology, design for environment(DfE) and eco-labeling are also referred to. Finally, LCA R&D and its future prospects are reviewed.

まえばき = わが国の環境問題は産業公害の形で顕在化した。古くは 1880 年代の鉱毒問題に端を発するが、戦後の著しい工業の発展にともなって、1950 年代には大気汚染・水質汚濁など、工場周辺の地域的な公害問題として深刻化した。その後、1970~80 年代には高度経済成長の結果として自動車排ガスや都市ごみ問題など都市型/生活型環境公害へと拡大し、消費者をも巻き込んだ深刻な社会問題となった。一方、ローマクラブによる「成長の限界」の発表(1972 年)や「環境と開発に関する世界会議」における「持続可能な開発 (Sustainable Development)」の提言(1987 年)など、国際的な議論が始まるとともに、地球温暖化をはじめとした地球規模の問題に変化してきている。

このように、環境問題は時代とともに捉え方が変わってきているが、ISO14001 (JIS Q 14001)「環境マネジメント」によると、「環境」および「環境影響」について、次のように定義されている：

「環境」(Environment): 大気、水質、土地、天然資源、植物、動物、人およびそれらの相互関係を含む、組織の活動をとりまくもの。

「環境影響」(Environmental impact): 有害か有益かを問わず、全体的にまたは部分的に組織の活動、製品またはサービスから生じる、環境に対するあらゆる変化。

一方、わが国の環境基本法においては、「環境への負荷」: 人の活動により環境に加えられる影響と定義され、「環境影響」と同義と考えられる。

「環境影響評価」(Environmental impact assessment)とは、組織の活動、製品あるいはサービスについて、これらの影響を評価することであり^{注1)}、その手法の一つとして、ライフサイクルアセスメント(LCA)がある。

LCA が注目されるのは、製品(サービスを含む)の環境負荷を、資源採取から製品製造、使用、廃棄に至るライフサイクル、いわゆる「揺りかごから墓場まで」について、定量的に評価できるからである。したがって、LCA

により製品同士の比較、開発した新製品と旧製品の比較などが可能となる。また、ライフサイクルにおいて環境負荷を与えている段階や工程を特定することにより、従来とは違った観点で製品やプロセスの開発・改善指針がえられるのも特徴である。

1. ISO14000 シリーズにおける LCA

1.1 LCA の位置づけ

1990 年ごろの「持続可能な開発」の議論の中から、環境マネジメントに関する国際規格化の必要性が指摘され、1993 年には ISO (国際標準化機構) に技術委員会 (TC207) が設立された。5 つの分科会 (SC) で規格化作業を進め、2000 年には当初予定の作業は終了した。これらは順次そのまま翻訳されて JIS として制定されている。

- ・ SC1 (環境マネジメントシステム): ISO 14001, 04
- ・ SC2 (環境監査): ISO 14010-12
- ・ SC3 (環境ラベル): ISO 14020, 21, 24, 25 (Technical Report, 以下 TR)
- ・ SC4 (環境パフォーマンス評価): ISO 14030, 32 (TR)
- ・ SC5 (ライフサイクルアセスメント): ISO 14040-43, 49 (TR)

これら規格のうち、環境マネジメントシステム、環境監査および環境パフォーマンス評価は事業所の認証・評価にかかわるものであり、環境ラベルとライフサイクルアセスメントは製品にかかわるものである。

すなわち、前者は企業の環境問題への取組み姿勢を示すものであるのに対し、後者は製品を通して直接、消費者につながる点で今後の企業の存続にかかわるといっても過言ではない。

1.2 LCA の枠組み

LCA については、ISO 14040 において原則と枠組みを定めている^{注2)}。

原則としては、

- ・ 原材料の採取から最終処分に至る製品システムの環境側面を体系的、かつ適切に取扱うこと
- ・ 調査範囲、前提条件、データ品質の記述、手法および結果に関して透明であること

脚注 1) 環境影響評価(環境アセス)法でいう公共事業などの開始前におこなう「環境影響評価」とは、意味合いが異なる。

- ・システム間の比較では、同一の機能単位，方法でおこなわなければならないこと
- ・結果を第三者に公表する場合にはインパクト評価（影響評価）^{注3)}とクリティカルレビューが必須の要件であること

である。

一方、枠組みについては、第1図のように、“目的および調査範囲の設定”，“インベントリ分析”，“インパクト評価（影響評価）”および“解釈”の各段階からなり、製品の開発・改善などの直接の用途は枠組みの外に置いている。これは、実際の用途がそれぞれ使用者側の問題であり、規格化すべきでないとの判断からである。なお、図の矢印で示されるように、各段階間で見直しをおこなうなど反復的におこなうことが特徴となっており、調査の過程で調査範囲を変更したり、データを収集し直すこともある。

解釈段階では、インベントリ分析あるいはインパクト評価の結果について分析し、結論を導き、提言をおこなう。ISO 14040では、前者をライフサイクルインベントリ調査（LCI Study）、後者をライフサイクル分析（LCA）と使い分けている。すなわち、LCAとはインパクト評価をおこなうものをいうが、厳密にインパクト評価を実施しているケースはまだ少ない。

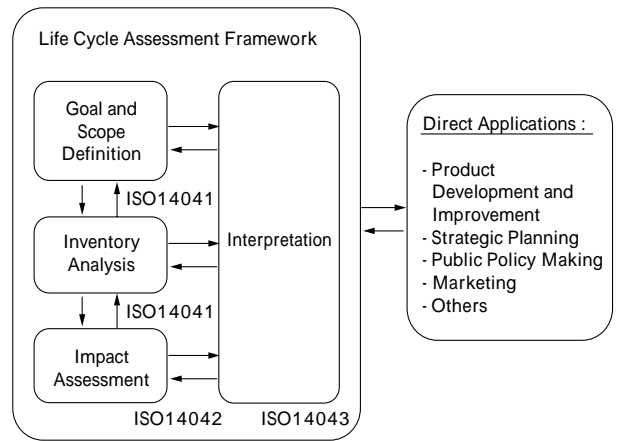
2. わが国における取組み

1981年に(社)化学経済研究所による「新規素材の導入にともなう省エネルギー効果の分析」が発表されて以来、1990年代に入ると国立研究所・大学・学協会を中心に各種研究会や調査研究がおこなわれた。その後、1995年には通産省（現経済産業省）の肝いりでLCA日本フォーラムが設立され、LCAの意義・手法・問題点などが検討される

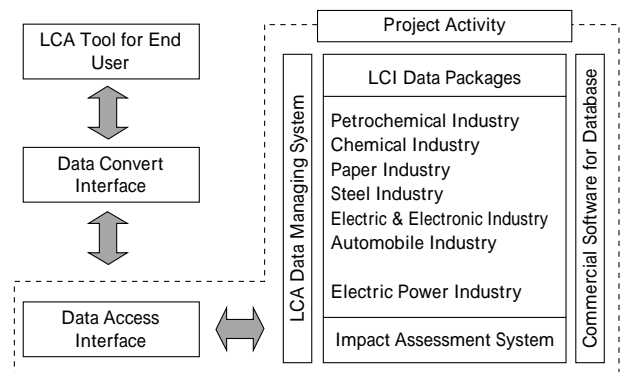
脚注2) ISO 14040には、LCA用語が定義されているが、本稿で使用するいくつかを以下に示す：

- ・製品システム：一つまたはそれ以上の定義された機能を果たす、物質的およびエネルギー的に結合された単位プロセスの集合体。
- ・システム境界：製品システムと、環境（自然界）または他の製品システムとの境界。
- ・機能および機能単位：製品システムの有する機能・性能などでLCA実施にあたって明確に定めなければならない。また、製品の比較は同一の機能でおこなわなければならない。機能単位とはその定量的な尺度をいう。
- ・配分：単位プロセスの入力または出力のフローを調査対象の製品システムに振分けること。アロケーションともいう。複数の製品や副産物がある場合、リサイクルなどの扱いにおいて必要となる。物理量や経済的価値で振分けることがおこなわれる。
- ・インベントリ：「目録」「明細」などの訳語があるが、システム境界に含まれる各段階、各単位プロセスにおけるインプットおよびアウトプットをいう。
- ・インパクト・カテゴリ（影響領域）：懸念すべき環境課題を表す区分であり、LCI結果がこの区分に割振られる。地球温暖化、オゾン層破壊、富栄養化など。
- ・カテゴリ・エンドポイント（領域終点）：自然環境、人間の健康、または資源に関する特質または側面であり、懸念すべき環境課題を特定する。森林破壊、資源枯渇、呼吸器疾患など。

脚注3) ライフサイクルインパクト評価（Life cycle impact assessment）に対して、JISではライフサイクル影響評価の訳を当てている。



第1図 LCAの枠組み（ISO14040による）
Fig. 1 Phases of LCA (by ISO14040)



第2図 LCAデータベースの概念図¹⁾
Fig. 2 Concept of LCA database¹⁾

につれて、産業界でも具体的な活動が活発化した。1997年には、LCA日本フォーラムは、(1)わが国共通のLCA手法の確立、(2)パブリックデータベースの構築、(3)LCA適用ルールの確立、(4)一般市民、産業界などへの啓発・普及活動体制の確立、などの必要性を提言した。

1998年には、この提言を受けて、2002年までの5年間、約8.5億円の国家プロジェクト“LCAプロジェクト”がスタートした。下記の3つの研究会を設けて活動しており、現在、23の工業会が参画している¹⁾。

- (1)インベントリ研究会：積上げ法^{注4)}によるインベントリデータベースの構築、廃棄物処理・リサイクルなどの静脈産業部門のLCI方法論の確立とインベントリデータの整理を、各工業会を中心に、関連団体・調査機関などの協力のもとに推進している。
- (2)データベース研究会：使いやすいデータベースシステムの開発を目指しており、第2図のように一般からアクセスできるようなシステムが検討されている。
- (3)インパクト評価研究会：説得性の高いわが国に適用できるインパクト評価手法の開発を進めている。

脚注4) インベントリデータには、製品に関わる単位プロセスのデータを積上げて集計する「積上げ法」によるものと、約500項目からなる産業連関表をもちいて、CO₂排出原単位などを算出する「産業連関表による方法」がある。前者では、詳細な環境負荷の実態を明確にできるが、データ収集に労力がかかる。一方、後者はデータの品質からマクロな分析が主体となる。

3. LCA の現状と問題点

3.1 インベントリ (LCI) 分析

インベントリ分析では、製品の製造から使用、廃棄・リサイクルに至る各段階において、使用する原材料・中間製品、副資材、燃料、電力などを資源採取段階にまでさかのぼって集計し、一方で全ての段階で排出する大気・水域排出物、固形廃棄物などを積算する。したがって、ライフサイクルインベントリ分析の結果は、最終的には、資源やエネルギー消費量および環境への排出量として表されることになる。

このようなインベントリ分析の結果だけでも、どの段階で環境負荷を与えているかを知ることができる。わが国では、比較的精度の高いデータが揃っていること、インパクト評価の因果関係もはっきりしていることなどから、ライフサイクルエネルギー消費量およびライフサイクルCO₂排出量をもちいることが多い。

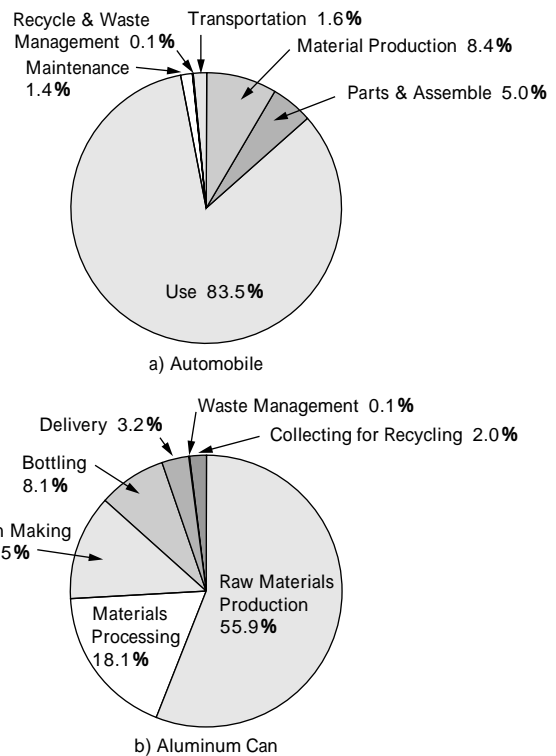
これまでの事例を見ると、環境負荷を与える段階が、主として製品の使用段階にあるものと原材料～製品製造段階にあるものに大別できる。第3図は自動車²⁾およびアルミ缶³⁾のライフサイクルエネルギーの一例を示すが、一般に家電製品や自動車など耐久消費財では、製造段階よりも使用段階の環境負荷が大きく、包装材や飲料容器などでは原材料の製造段階の寄与が大きい。各種インフラ設備や産業機械などは前者に属し、省エネや低燃費が重要課題になるのに対し、後者では製造時の省資源・省エネやスクラップの利用などが重要となる。

さらに、各段階を単位プロセス(工程)に分けてデータを収集・分析すれば、環境負荷を与えている工程を特定することができ、改善指針を見出すことも可能である。インベントリ算出に際して、副産物がある場合、あるいはシステム外へのリサイクルなどがある場合には、環境負荷の配分(アロケーション)という問題が起こる。たとえば、貴金属の金や銀は、銅鉱石の中に含まれ、銅鉱石から製錬して金属にするときに一緒に製造される。そのときのエネルギーや環境負荷をどのようにこれらの金属に振分けるかといった問題である。また、リサイクルの取扱いにも配分の問題が絡んでくる。ISO14041ではいくつかの解決法が示されている。

3.2 インパクト評価 (LCIA)

インパクト評価では、インベントリ分析の結果をもちいて環境に対してどのように影響しているかについて定量的に評価するが、何らかの形で指標化する必要がある。環境への影響といっても、第1表⁴⁾のように局所的なものから、地域的、地球規模的なものまで種々あり、一律に論ずることはできない。なお、LCAではこれらをインパクトカテゴリ(影響領域)と呼んでいる。

インパクトカテゴリに対する指標としては、地球温暖化ポテンシャル(GWP)、オゾン層破壊ポテンシャル(ODP)、酸性化ポテンシャル(AP)、非生物資源の枯渇といったような指標が提案されており、それぞれの物質についての重み付け係数から算出する。この中で、GWPとODPは科学的な根拠に基づいており、世界的に認知さ



第3図 各段階におけるライフサイクルエネルギー²⁾³⁾
Fig. 3 Life cycle energy at each phases²⁾³⁾

第1表 SETAC(環境毒物化学学会)によるインパクトカテゴリ⁴⁾
Table 1 Impact categories by SETAC⁴⁾

	Category	Spatial Scale	Stage of Effect
Inputs	Abiotic Resources	Global	
	Biotic Resources	Global	
	Land Use	Local	
Outputs	Global Warming	Global	Early
	Ozone Layer Depletion	Global	Early
	Human Toxicity	Global / Continental / Regional / Local	Final
	Ecotoxicity	Global / Continental / Regional / Local	Early
	Photochemical Oxidant Creation	Continental / Regional / Local	Middle
	Acidification	Continental / Regional / Local	Early / Middle
	Eutrophication	Continental / Regional / Local	Early / Middle
	Odour	Local	Final
	Noise	Local	Early
	Radio Activity	Regional / Local	Early
	Direct Victims	Local	Final

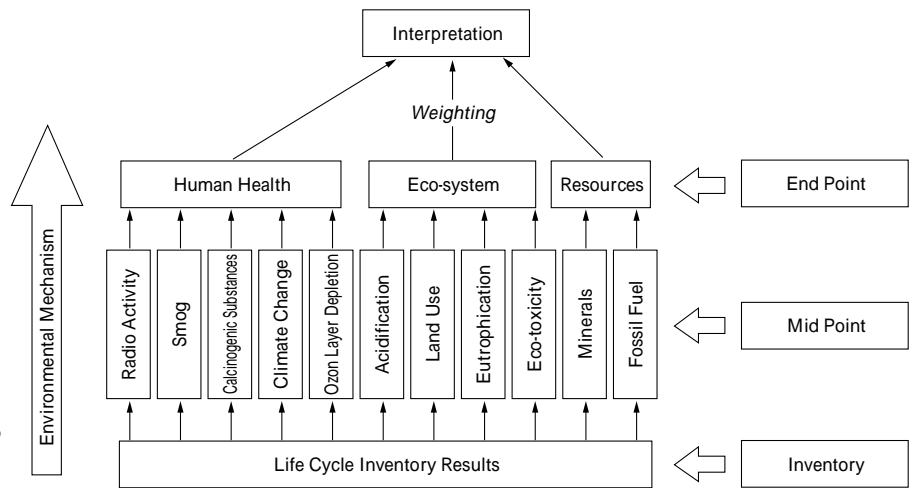
れている。

一方、インパクトカテゴリの指標だけでは製品の環境負荷を判断できず、これらを一つの数値で示そうとする統合化指標(モデル)が提案されている。

オランダで開発されたエコ・インディケータ⁹⁹⁵⁾では、第4図に示すように、インベントリをインパクトカテゴリに分類し、さらにこれらを人間の健康、生態系および資源の3つのカテゴリ・エンドポイントに関連付けている。これらのエンドポイントについて重み付けをおこなう、統合化指標としている。このほか、スイスのエコ・ポイント、スウェーデンの環境負荷値などがある⁶⁾。

わが国においても、いくつかの統合化手法が提案され

第4図 エコインディケータ 99 の概念⁵⁾
Fig. 4 Concept of Eco-indicator 99⁵⁾



ているが^{7)~10)},前記 LCA プロジェクトにおいても日本の実態にあった指標の開発がおこなわれている。エコ・インディケータと同様に,ダメージとして人間の健康の損失,生態系の衰退および資源の枯渇をあげ,自然科学的アプローチにより被害を定量化するダメージ関数を導入している。地球温暖化による植生への影響についてのダメージ関数導出手順の例を第5図に示す¹¹⁾。

いずれにしても,インパクト評価はまだ開発段階にあり,指標に対する十分な科学的根拠とコンセンサスが求められている。

4. LCA の活用

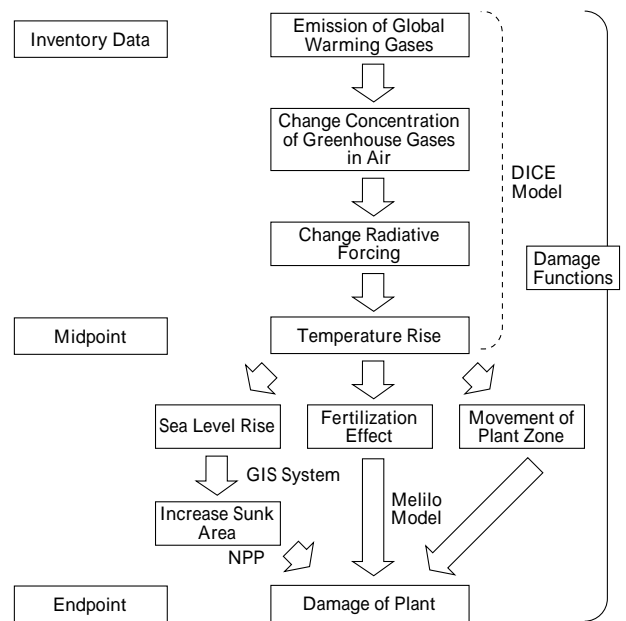
4.1 環境適合設計

これまでもリサイクル材を多用した種々の環境配慮製品があったが,最近,これらを一步進めてライフサイクルを通じての環境負荷低減を製品設計に織込む動きがある。エコデザイン,環境適合設計(Design for Environment, DfE)などと呼ばれ,家電製品を中心に市場に出回るようになった。

その思想は,3R (Reduce, Reuse, Recycle) にあると思われるが,これまでの品質・性能,コスト本位の設計から,環境影響を設計に反映させることである。使用段階以降,とくに廃棄段階を考慮することが重要で,材料の選択,設計の幅を広げて考えねばならない。製品製造時に環境負荷がかかったとしても,使用段階でのエネルギー消費削減,耐久寿命の向上はもちろんのこと,分解・解体し易い設計とすることにより部品リユースや材料リサイクルが可能となれば,結果的に環境負荷低減につながることになる。

家電・OA 機器メーカーなどでは,設計者が簡単に扱えるような LCI データを組込んだ設計支援システムや LCA ツールを開発している。また,建築物についても,建物の種類,建設地,使用される建築材料および部材,居住者の生活様式,事務所ビルの形態,建設および解体の方法,資材の輸送などをモデルに組み込み,ライフサイクルエネルギーおよび CO₂ 排出量を評価するようなプログラムが開発されている¹²⁾。

いずれにしても,製品の評価はその設計に大きく支配される。性能,コストに対する要求に加え,環境に対す



第5図 温室効果ガスの移出による植生への影響に関するダメージ関数¹¹⁾

Fig. 5 Cause effect chain of the damage of plant by greenhouse gases¹¹⁾

る要求をいかにバランスさせるかが,大きな課題となる。

なお,DfE については,ISO においてもガイドラインとしてのテクニカルレポート (TR 14062) のとりまとめがおこなわれている。

4.2 環境ラベル

製品の環境側面を主張するために,環境情報をラベルの形で表示したものが環境ラベルである。

ISO によれば,

- (1) 「第三者認証による環境ラベル」(タイプ)
- (2) 「自己宣言による環境主張」(タイプ)
- (3) 「定量的環境情報」(タイプ)

に分類されている。

このうち,タイプ は LCA などによる定量的情報に基づくもので,消費者に環境負荷情報を開示することにより,消費者自らの判断による環境調和型製品の選択・購買を促そうとするものである。ISO では,時期尚早として規格化は見送られ,テクニカルレポート (TR14025) として発行された。いずれ規格化されるが,わが国では

Principal environmental attributes (per a unit of product)						
Data category		Life cycle	unit	Supplier	Production	Disposal
Input	Energy use	Electricity	kWh			
		Fossil fuel	MJ			
	Water use	City water	L			
		Industrial water	L			
Material use	Iron and its alloys	kg				
	Aluminum and its alloys	kg				
Output	Air emission	SOx	g			
		NOx	g			
		Green house gas CO ₂	kg-C			
	Water effluent	Total effluent	L			
		COD	g			
	Solid waste	Discharge	kg			
		Land filled	%			
	Hazardous chemicals	Treatment/ discharge	g			

PEIDS (for inventory analysis)										
Data category		Life cycle	Unit	Production		Distrib.	Use	Disposal	Recycle	Total
				Materials	Product		Consump.			
Consumption	Energy resources	Crude oil	kg							
		Coal	kg							
	Water resources	Surface water	L							
		Underground water	L							
Mineral resources	Crude oil	kg								
	Iron ore	kg								
Emission	Air emission	CO ₂	g							
		SOx	g							
	Water effluent	COD	g							
Solid waste	Discharge	kg								
	Land filled	%								
Hazardous chemicals	Treatment/ discharge	g								

Information data (for impact assessment)					
Data category		Life cycle stage	Unit	Production	
				Material	Product
Consumer	Resources depletion	Energy resources	Mcal		
		Water resources			
		Mineral resources			
Emission	Air emission	Global warming			
		Acidification			
	Water effluent	Eutrophication			
Emission	Solid waste		kg		
			g		
Emission	Hazardous chemicals		g		

第 6 図 JEMAI プログラムによる環境情報シート¹⁴⁾

Fig. 6 Proposed product environmental information data sheet (PEIDS) by JEMAI program¹⁴⁾

1998 年から「新たな環境ラベル協議会」および「定量的環境情報ラベル技術委員会」が設置され、環境ラベルの検討、開発がおこなわれている¹³⁾。

この環境ラベルは“JEMAI プログラム”と呼ばれ、検討段階にあるが、基本的には第 6 図に示すような環境情報シートからなっている¹⁴⁾。

各企業は、これらのシートを外部の検証機関に提出し、データの検証を受けた後、製品に表示あるいはインターネットなどで公開する。具体的な実施方法については引き続き試行、検討されるが、利用者はこれらの情報をもとに評価、判断することになる。

グリーン購入、グリーン調達が進む中で、今後、ますますその重要性は高まってこよう。

4.3 環境報告書

環境報告書は、企業の環境に対する取り組みおよびパフォーマンスを投資家、顧客および社会に示す重要な手段である。報告書において、製造業の 6 割近くが何らかの形で LCA について言及しており、LCA 結果の報告も増えている¹⁵⁾。

5. 今後の展開

5.1 エコバランス国際会議

1994 年、わが国・つくばにおいて第 1 回エコバランス国際会議が開催された。現在のように LCA が慣用される前であるにもかかわらず、18 ヶ国から約 300 人の研究者、技術者らが参加し、材料および製品開発のための鍵を握る LCA の可能性が議論された。その後、隔年ごとにつくばにおいて開催され、第 4 回(2000 年)には、発表件数約 200 件、参加者約 500 名と、LCA の発展に寄与している。

第 4 回の発表内訳を第 2 表に示すが、前述の LCA プロジェクトで進めてきた手法の開発、とくにインパクト評価に関する発表があり、議論された。製品事例では企業サイドからの発表が多いが、農業を含めて広範な分野に

第 2 表 第 4 回エコバランス国際会議(2000. 11)での発表論文内訳
Table 2 Papers presented at the Fourth International Conference on EcoBalance (Nov., 2000)

Category	University	National Labo. etc.	Company	Total
General	2 (2)	3 (1)	2 (0)	7 (3)
Methodologies	LCA	5 (1)	1 (1)	6 (4)
	LCI	6 (4)	4 (0)	1 (0)
	LCIA	4 (3)	16 (0)	0 (0)
Data Base	0 (0)	6 (2)	7 (3)	13 (5)
Products	Resources, Materials	5 (1)	6 (2)	5 (2)
	Packaging Materials	1 (0)	1 (1)	4 (0)
	Electric & Electronics	4 (3)	0 (0)	11 (0)
	Transportation	1 (1)	4 (1)	5 (1)
	Civil Engineering	7 (1)	3 (2)	4 (1)
Agriculture & Foods	2 (1)	12 (2)	0 (0)	
Recycling & Waste Manag.	9 (1)	2 (0)	3 (0)	
LCA Applications	6 (1)	4 (2)	3 (2)	13 (5)
Eco-efficiency, Eco-rating	5 (0)	8 (5)	3 (0)	16 (5)
Eco-design, Eco-Material	6 (5)	3 (2)	11 (2)	20 (9)
Total	63(24)	73(21)	65(15)	201(60)

() From Oversea (Incl.)

及んでおり、また、従来と違ってなんらかの形でインパクト評価まで踏込んだものも多い。さらに、環境適合設計、環境情報の開示など、LCA を実務面で活用した例も発表されており、LCA が手法として定着しつつあることが伺われる。

5.2 新しい動き

インパクト評価においては、影響の経時変化や自然界の自浄作用が考慮されるが、技術の変化は考慮されない。技術の変化は目覚ましく、これを考慮して将来のインパクト評価をおこなうといった試みもおこなわれており、ソーシャル LCA とか、ダイナミック LCA と呼ばれて注

目されている。寿命の長い製品開発などにおいては、このような検討も必要である。

一方、LCA を企業経営のツールとして意思決定に使えないかということがいわれている。ライフサイクルマネジメント(LCM)と呼ばれ、SETAC の世界会議(2000.5)でも議論されている¹⁶⁾。ライフサイクルコストを評価する LCC 分析は古くから知られているが、さらに、製品の機能・性能の指標化、リスクアセスメントなど他の手法とのリンケージが必要となろう。

むすび=環境影響評価法としての LCA の動向について述べた。LCA は未だ手法として完成されていないが、'ライフサイクル'でものを考えることの重要性を示唆している。LCA を活用した環境適合製品やプロセスの開発により、「限りある資源」を有効に利用し、「持続的発展」を目指すとともに、企業活動を通じて消費者のライフスタイルの変革を求めていくことも肝要で、そのときに企業の繁栄がついてくる、21 世紀はそのような時代になると思われる。

参 考 文 献

- 1) (社)産業環境管理協会:「LCA 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)」リーフレット(1998)
- 2) 小林紀:材料とプロセス, Vol.10, No.1(1997) p.258.
- 3) 坂村博康ほか:「第3回エコバランス国際会議・講演集」(日本語版),(1998) p.421.

- 4) 伊坪徳宏:環境管理, Vol.35(1999) p.897.
- 5) PRé Consultants:"Eco-Indicator 99",
<http://www.pre.nl/eco-indicator99/default.htm>
- 6) LCA 日本フォーラム,(社)産業環境管理協会:「LCA 日本フォーラム報告書」,(1997) p.85.
- 7) 永田勝也ほか:「第2回エコバランス国際会議・講演集」(日本語版),(1996) p.147.
- 8) 安井至:「第2回エコバランス国際会議・講演集」(日本語版),(1996) p.151.
- 9) 安井至:「第3回エコバランス国際会議・講演集」(日本語版),(1998) p.89.
- 10) 伊坪徳宏ほか:「第3回エコバランス国際会議・講演集」(日本語版),(1998) p.375.
- 11) 伊坪徳宏ほか:「第4回エコバランス国際会議・講演集」(日本語版),(2000) p.221.
- 12) 建設省建築研究所:「建築研究資料」, No.91(1997).
- 13) 上原春夫:環境管理, 36(2000) p.372.
- 14) (社)産業環境管理協会:「環境ラベル手法の標準化調査研究成果報告書」,(2000.3)
- 15) (社)日本機械工業連合会,(社)日本産業機械工業会:「平成11年度LCA手法による産業機械の環境負荷低減化に関する調査研究報告書」,(2000.5) p.23.
- 16) 伊坪徳宏:LCA 日本フォーラムニュース, No.19(2000) p.8.