環境負荷評価としてのエクセルギー解析^{*1}

添野 良彦^{1,*2} 赤 司 豊^{1,*3} 井野 博 満¹
白 鳥 紀 一¹ 中 島 謙 一² 原 田 幸 明³

¹法政大学工学部

²筑波大学大学院工学研究科構造工学専攻

³独立行政法人 物質材料研究機構

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 9 (2002), pp. 885-888

© 2002 The Japan Institute of Metals

Exergy Analysis for the Integrated Evaluation of Environmental Impacts

Yoshihiko Soeno^{1,*2}, Yutaka Akashi^{1,*3}, Hiromitsu Ino¹,
Kiiti Siratori¹, Kenichi Nakajima² and Kohmei Halada³

¹College of Engineering, Hosei, University, Koganei 184-8584

²College of Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577

³National Institute for Materials science, Tsukuba 305-0047

It is important to assess environmental impacts of materials or products properly. But the typical method called Life Cycle Assessment has many problems. Above all, it is crucial that various kinds of environmental impacts cannot be integrated. We present an attempt to use the exergy concept to express environmental impacts. Exergy has been used to analyze thermal efficiency of the production process. However, to apply exergy to environmental problems, exergy of materials is important since chemical reaction of the wastes cause environmental problems. Exergy expresses gap of free energy between a given state and that of environment. Thus, the concept of exergy gives potential of environmental impacts. We analyzed impacts of life cycle of both steel and aluminum cans as an example. We have proposed a new diagram that represents exergy and mass flow in a system. The diagram consists of triangles and arrows. The three sides of triangle represent inputs, products and wastes of a unit process. The length and width of arrow express the magnitudes of exergy and mass, respectively. It was estimated that the total exergy of material wastes from life cycle of one thousand cans made of aluminum and steel are 540 MJ and 305 MJ, respectively. If the recycling rate is 100 per cent, the amounts of exergy are reduced to 49 MJ and 10 MJ. It is concluded that the present analysis based on exergy is useful to evaluate potential environmental impacts caused by mass discarding of materials. But it is still insufficient to evaluate impacts of trace toxic chemicals such as dioxin.

(Received April 25, 2002; Accepted June 13, 2002)

Keywords: exergy, environmental impacts, life cycle assessment (LCA), aluminum can, steel can, mass balance, wastes

1. は じ め に

適正な材料や製品の環境負荷評価は、環境問題を改善するためには不可欠である。現在、その代表例として、LCA (Life Cycle Assessment) という手法があるが、様々な問題を抱えている。その中でも、環境影響 (Impact) を統合する手法がないことが問題であると考えられる。本研究では、エクセルギーを環境負荷ポテンシャルとみて、LCA に組み込むことを試みる。

エクセルギーとは、1956 年 Rant¹⁾ によって提案されて以来、主に熱の有効利用の尺度として用いられてきた。また、それは、ある状態と環境との自由エネルギーの差であることから「働きかけ」の能力を意味する。したがって、廃棄物質

がエクセルギーをもっていれば、それだけ環境に対して働きかけるので、エクセルギーの廃棄を環境負荷ポテンシャルとしてみることもできる²⁾。また、環境問題を考える上で、廃棄物質によって引き起こされる問題が重要であるので、本研究は、化学エクセルギーなどを持つ物質の廃棄に注目する。

今回、アルミ缶およびスチール缶のライフサイクルを例として、システムの環境負荷の大きさおよびリサイクルの効果をエクセルギーによって表現し、環境負荷評価としてのエクセルギー解析の有用性を示す。

2. 解 析 対 象

今回、解析の対象としたのは以下の二つである。

- (1) アルミニウム缶 350 ml LD 缶 (アルミ胴 12.2 g, アルミ蓋 4 g)
- (2) スチール缶 350 ml LD 缶 (スチール胴 28 g, アルミ蓋 4 g)

^{*1} 2002 年 3 月 29 日日本金属学会春期大会において発表

^{*2} 法政大学大学院生 (Graduate Student Hosei University)

^{*3} 法政大学大学生 (Undergraduate Student Hosei University)

解析の対象とするシステムは、「資源採取」から「製造」、「使用」、「消費」、「リサイクル」、「廃棄」および「輸送」を含めた全体とする。本研究では、飲料容器本体のライフサイクルを中心としているため、内容物、資本設備、輸送時に消費される梱包材・パレット等は対象外とした。

3. 解析方法

あるシステムのエクセルギー解析を行うには、システム内の各プロセスにおける熱および物質の入力・出力を把握しなければならない。アルミニウムやスチールといった主系列の物質は著者らによって行われた「飲料缶のライフサイクルアセスメント」³⁾により算出されている(元データの出所はその引用文献を参照)。しかし、このインベントリデータは、物質収支およびエネルギー収支の厳密な考慮がなされていない。そこで、システム全体における各プロセス内の主要な化学反応の知識を用いて、それぞれの収支を考慮し、データを補った。具体例として、アルミニウムの精錬プロセスにおける物質収支を Table 1 に示す。

また、システム内のプロセス全ての物質収支を考慮することは、LCA のインベントリデータの問題点を発見するための手段としても有効である²⁾。例えば、石灰石を焼成し、生石灰にするプロセス(アルミナ製造プロセスの前段階)の実測データがなかったため、文献 1) では、投入のエネルギーや環境負荷をゼロとして計算を行っている。本研究では、そのプロセスが「 CaCO_3 (石灰石) = CaO (生石灰) + CO_2 (二酸化炭素)」の反応に基づくことから、理論的に必要な最小限のエネルギーおよび物質の投入および算出を計算し、解析を行った。

各プロセスの物質収支が適切に考慮されているのであれば、入出力の関係は、各要素をそれぞれの物質質量とする入力ベクトル I と出力ベクトル O を用いて、

$$O = PI \quad (1)$$

と表現することができる。ここで、 P はプロセスを表す行列である。また、各物質の単位当りのエクセルギーを表すベク

トル e_u をそれぞれ対応する物質に掛け合わせれば、エクセルギーロス Δe を

$$\Delta e = e_u(O - I) \quad (2)$$

と表現することができる(ここで、電力は入力ベクトル I の一つの要素に加えてあり、そのエクセルギーへの変換係数は 1 である)。各物質の単位当りのエクセルギーは、JIS⁴⁾等によって示されており、それらのデータを用いて解析を行った。

解析結果の例として、アルミ精錬プロセスを Fig. 1 に示す。Fig. 1 は、エクセルギー解析の結果を表現するために、我々が提案する新しい表記方法である。それは、三角形によって一つのプロセスを表し、矢印によって質量(物質)およびエクセルギーの流れを表す。三角形の 3 辺がそれぞれ資源投入サイド、生産サイド、廃棄サイドを表し、矢印の幅が質量、長さがエクセルギーを表す。この表記方法を用いれば、エクセルギーと質量という基本情報を 1 つの図に表示することができ、三角形の大きさによってプロセスの大きさ(物質の流入・流出量)を図示できる。排熱および不可逆損失は、投入のエクセルギーから製品(副生物も含む)と物質廃棄のエクセルギーを差し引くことによって一括して算出した。両者を分けて求めることは、プロセスのエクセルギー効率改善という観点から重要である⁵⁾が、ここでは行っておらず、排熱は式(2)のエクセルギーロスに含まれる格好となっている。

4. 解析結果および考察

アルミ缶およびスチール缶 1000 缶のライフサイクルのリサイクル率や焼却の有無を変化させ、システム全体におけるエクセルギー解析を行った結果を Table 2 に示す。Table 3 は、アルミ缶のライフサイクルの各段階(製造・加工・廃棄・リサイクル)におけるエクセルギー収支を示したものである。

Fig. 2 にリサイクル率 0% の場合およびリサイクル率 100% の場合の解析結果(アルミ缶の場合)を示す。後述するが、それらの図はリサイクルの効果をより適正に表現しており、また、プロセス内の各段階におけるエクセルギーと物質

Table 1 Mass balances in Hall-Heroult process. The data are obtained from inventory data of LCA³⁾ and supplemented with calculations (*) based on the equations of the chemical reactions in the process.

INPUT (Resources)		OUTPUT (Products and wastes)	
Alumina/kg	1.8889	Al/kg	1.0000
Synthetic cryolite*/kg	0.0300	Alumina*/kg	0.0182
Aluminum fluoride/kg	0.0180	HF*/kg	0.0214
Carbon anodes/kg	0.4300	CO ₂ */kg	1.2222
water*/kg	0.0096	NaF*/kg	0.0180
		Waste solids*/kg	0.0967
fuel/kg	0.1771	CO ₂ /kg	0.5910
O ₂ */kg	0.5290	NO ₂ /kg	0.0015
N ₂ */kg	0.0005	SO ₂ /kg	0.0084
Total/kg	3.0831	Water*/kg	0.1057
Electricity/MJ	57.535	Total/kg	3.0831

Fig. 1 Exergy analysis of a Hall-Heroult process. Three sides of triangle represent resources, products, and wastes of the process. The length and width of an arrow express the magnitudes of exergy and mass, respectively.

Table 2 Calculated exergy per 1000 cans.

(a) Aluminum cans

	INPUT			
	Electricity	Fuel	Feedstock	Total
	E/MJ	E/MJ	E/MJ	E/MJ
Recycling: 0%	2105	1455	321	3881
Recycling: 100%	1016	876	137	2029
Recycling: 75%	1289	1021	183	2493
Recycling: 75% Incineration: 15%	1354	1020	182	2556

	OUTPUT			
	Byproducts	Material wastes	Wasted heat and exergy loss	Total
	E/MJ	E/MJ	E/MJ	E/MJ
Recycling: 0%	373	540	2968	3881
Recycling: 100%	343	49	1637	2029
Recycling: 75%	351	172	1970	2493
Recycling: 75% Incineration: 15%	420	92	2045	2557

(b) Steel cans

	INPUT (MJ)			
	Electricity	Fuel	Feedstock	Total
	E/MJ	E/MJ	E/MJ	E/MJ
Recycling: 0%	305	371	561	1237
Recycling: 100%	178	213	40	431

	OUTPUT			
	Byproducts	Material wastes	Wasted heat and exergy loss	Total
	E/MJ	E/MJ	E/MJ	E/MJ
Recycling: 0%	387	304	545	1236
Recycling: 100%	47	10	374	431

という基本情報の入力・出力の様子を一目で把握することができる。なお、リサイクル率 100% の場合においても、アルミニウム一次地金の製造量がゼロとならないのは、加工プロセスにおいてアルミスクラップが発生するためであり、そのスクラップは有効に使われるものと仮定し、副生物として取り扱って解析を行った。

リサイクルの効果を厳密に表現するためには、比較対象であるリサイクルプロセスを導入しない場合の環境負荷、特に「廃棄」段階における環境負荷の見積もりが十分でなければならない。つまり、文献 1) における「廃棄」段階の環境負荷とは、運搬、埋め立てという安易な廃棄プロセスにおける CO_2 、 NO_x 、 SO_x の排出であり、それらの排出量の見積もりも不十分であり、廃棄プロセスの環境負荷として十分なものではない。一方、本研究において、環境負荷とは物質のエクセルギー、つまり環境負荷ポテンシャルの廃棄であり、廃棄の環境負荷評価に新しい視点を提供するとともに、リサイクルの効果をより明確に示すものとなっている。

Fig. 3 に廃棄されたエクセルギーと質量によって表現されたアルミ缶のリサイクルおよび焼却の効果を示す。縦軸にラ

Table 3 Exergy balances in each phase in life cycle of 1000 aluminum cans. Mass of 1000 Aluminum cans is 16.2 kg.

Material production of 27 kilogram of aluminum			
INPUT	E/MJ	OUTPUT	E/MJ
Electricity	1853	Aluminun	791
Fuel	1123	Red mud	0
Alumina	0	Material wastes	62
Carbon anodes	303	Others	50
Aluminum flouride	0	Exegry loss and wasted heat	2391
Others	15		
Total	3294	Total	3294

Manufacturing of 16.2 kilogram of aluminum cans			
INPUT	E/MJ	OUTPUT	E/MJ
Alminun	791	Aluminum can	469
Electricity	252	Aluminum scrap	322
Fuel	331	Material wastes	9
Others	2	Exegry loss and wasted heat	576
Ttal	585		
Total			1376

Discarding of 16.2 kilogram of aluminum cans			
INPUT	E/MJ	OUTPUT	E/MJ
Electricity	0	Aluminun	469
Fuel	1	Material wastes	0
Aluminum can	469	Exegry loss and wasted heat	1
Others	0		
Total	470	Total	470

Recycling of 16.2 kilogram of aluminum cans			
INPUT	E/MJ	OUTPUT	E/MJ
Aluminum can	469	Aluminun	469
Electricity	9	Material wastes	3
Fuel	88	Exegry loss and wasted heat	95.4
Others	1		
Total	567	Total	567

イフサイクルにおける合計の廃棄物質のエクセルギーをとり、横軸にその質量をとる。また、円の大きさがライフサイクルに投入されたエクセルギーの大きさを表し、円グラフの中の割合がその内訳を表す。Fig. 3 より、リサイクルの増加とともに、廃棄物質のエクセルギーは減少することが分かる。更に、Fig. 3 の矢印によって示されるように、リサイクル率 75% のプロセスに使用済み缶 15% の焼却プロセスを加えたことにより、80 MJ の廃棄物質(アルミ缶)のエクセルギーの低減が生じる。ここで、焼却プロセスとは、アルミ缶のアルミを酸化させ、エクセルギーをゼロにし、そのときに生じる熱(アルミニウムとアルミナの自由エネルギーの差分)を回収するプロセスである。

本研究には次のような問題点がある。1 つは電力という 2 次エネルギーを 1 次エネルギーまで遡って解析していない点である。つまり、電力の生産に伴うプロセスのエクセル

Fig. 2 Integrated exergy and mass flows in the processes of life cycle of one thousand aluminum cans in cases of (a) recycling: 0% and (b) recycling: 100%.

Fig. 3 Effect of recycling and incineration presented by wastes in the processes of life cycle of one thousand aluminum cans. Size of circle is the amount of input exergy. The numbers in this figure mean the percentage of recycling and that of additional incineration.

ギー廃棄を除外している。現状において、火力・水力・原子力発電に伴う廃棄のエクセルギーを計算するに至らなかった。これは今後の課題である。

2 つは、エクセルギーと毒性の関係である。エクセルギーがゼロであれば毒性はゼロであるので、エクセルギーを統合的な環境影響の 1 つの指標とみることは有用であると考えられるが、エクセルギーの大きさと毒性との間に比例的な関係があるわけではないので、毒性の絶対的尺度としてみることは困難である。例えば、ダイオキシンのような微量物質が挙げられる。エクセルギー解析は、このような微量で強い環境影響を及ぼす物質の解析には十分ではなく、本研究が対象としたような多量の物質の廃棄が問題となるような場合に有効性を発揮すると考えられる。微量物質の扱い方も今後の課題である。

5. ま と め

本研究は、エクセルギーを環境負荷ポテンシャルとみてアルミ缶およびスチール缶の環境負荷評価を行い、Table 2 や Fig. 2 に示すように新しい視点でリサイクルの効果を明らかにし、多量物質の廃棄が問題となるような場合のエクセルギー解析の有用性を示した。この結果は LCA のそれとは異なる。本研究によって行われたエクセルギー解析において、リサイクルの効果とは、物質のエクセルギー廃棄、つまり環境負荷ポテンシャルの低減であり、「廃棄」段階の環境負荷の見積もりが不十分な LCA に比べ、より適正なリサイクルの評価を提供するものと考えられる。今後、LCA を行う場合は全てエクセルギー解析も併せて行うべきである、と提案する。

また、本研究では、エクセルギー解析を行うための新しい表記方法を提案した。それは、Fig. 1, Fig. 2 に示したように、三角形によってプロセスを表し、矢印の長さによってエクセルギーと質量という基本情報を表すもので、視覚的にシステムの流れを一目で把握できる。

今後の課題として、様々な応用事例を積み重ねるとともに、電力の生産活動に伴う廃棄物質(放射性廃棄物質など)や、ダイオキシンのような非常に毒性の高い微量物質のエクセルギーの評価方法の確立が挙げられる。

文 献

- 1) Z. Rant: Exergie, Ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit, *Forsch. Ing.-Wes* **22**(1956) 36-37.
- 2) Robert U. Ayres and Leslie W. Ayres: *Accounting for Resources*, 2, (Edward Elgar Pub., 1999) pp. 1-61.
- 3) K. Nakajima, H. Ino and K. Halada: *J. Japan Inst. Metals* **64**(2000) 591-596 (in Japanese).
- 4) Japanese Industrial standards Committee: JIS Z 9204 (1991) pp. 1-33.
- 5) T. Akiyama: *Kinzoku* **71**(2001) 10-13. (in Japanese)