

廃棄・副産物質の再利用を考慮した環境負荷量評価について

Evaluation of Environmental Loading Considering the Reuse of Waste and By-product

天野耕二* 伊藤昌隆** 柳沢幸雄***

Koji AMANO*, Masataka ITO** and Yukio YANAGISAWA***

ABSTRACT: In the recent environmental problems, reuse system of waste and by-product should be one of the most effective countermeasures. However, few evaluating method of environmental loading could indicate the advantage of reusable materials. We investigated on an evaluating method for the availability of effective utilization of some waste and by-product. Firstly, we expressed the allocation of the environmental loading by combining quantity of materials with their economic values. As a case study, we made a model for the material flow around the cement industry in 1990. In that model, the carbon dioxide emission and the drying up of limestone resources were considered as environmental loading. After the model analysis, we could estimate a reduction effect of the environmental loading by effective utilization of some waste and by-product in the cement industry.

KEYWORDS: reuse of waste and by-product, evaluation method of environmental loading, cement industry

1. はじめに

資源を有効利用し廃棄物量を削減することは、今日の環境問題の中でも重要な課題の一つである。また、廃棄物最終処分場不足などの問題からも、わが国における廃棄・副産物質の再利用は緊急の政策課題であるともいえる。ここ数年、国内法制度においても「再生資源利用促進法」（1991年）、「容器包装の分別回収・再商品化促進に関する法案」（1995年）などが制定され、社会全体でも廃棄・副産物質の再利用推進の気運が高まっている。

しかし、一般的な環境負荷量評価では、廃棄・副産物質の輸送や再資源化施設の建設にともなう新たな環境負荷などから、必ずしも廃棄・副産物質の再利用が環境負荷低減につながるとは評価されていない。すなわち、廃棄・副産物質の再利用の有効性を明確に示す指標が必要とされており、その有効性については、廃棄・副産物質を主に産出・投入する産業間における取引形態を客観的な評価基準とするべきであろう。

本研究では、各種の産業が産出した物質の背負う環境負荷量（この場合、対象物質の生産にともなって環境に排出する負荷を意味する）を正当に評価するため、物質量と経済的価値を組み合わせた環境負荷量評価手法を提案する。さらに、この評価手法を用いて廃棄・副産物質の再利用を考慮した環境負荷量について考察を行うことにより、環境負荷の合理的な責任分担を明確に判断できるツールの構築を目指している。事例としては、多くの廃棄・副産物質の有効利用を行い、静脈産業としての一面を持つセメント産業を中心とした物質収支モデルを扱う。なお、モデル作成の対象年は1990年とし、データは公的機関および関連各種業界団体発行の資料より用いた。

*立命館大学理工学部 Department of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

**立命館大学大学院理工学研究科 Department of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

***東京大学工学部地球環境工学寄付講座 Global Environmental Engineering Program, University of Tokyo

2. 物質量と経済的価値を組み合わせた環境負荷量の評価

本研究で提案する環境負荷量評価手法は、産業活動の結果環境中に排出した負荷量を、産出物質の量と経済的価値（物質単位あたり価格）の組み合わせにより、各産出物質に分配するというものである。この評価手法において、物質量は質量単位（t）、価格は円で表す。

ある種の産業が産業活動を行った結果、n 種類の物質が産出され、それとともなって任意の環境負荷が総量で L（unit）発生した場合を考える。この場合、各産出物質の背負う環境負荷量の割合（環境負荷量分担率）と環境負荷量および環境負荷量原単位の一般式は各々（式-1）、（式-2）、（式-3）に示すようになる。

$$r_i = \frac{M_i \times P_i}{\sum (M_i \times P_i)} \times 100 \quad (i=1,n) \quad \text{(式-1)}$$

r：環境負荷量分担率（％）
M：物質の産出量（t）
P：物質の単位あたり価格（円/t）

$$l_i = \frac{r_i}{100} \times L \quad (i=1,n) \quad \text{(式-2)}$$

l：物質の背負う環境負荷量（unit）
L：環境負荷総量（unit）

$$b_i = \frac{l_i}{M_i} \quad (i=1,n) \quad \text{(式-3)}$$

b：環境負荷量原単位（unit/t）

仮定の産業プロセスを例に、このような物質量と経済的価値を組み合わせた評価手法について説明する。表-1は産業活動をおこなった結果、G1,G2,G3（添字は上式のiに対応）という3種類の物質が産出された場合を表している。なお、環境負荷はCO2排出量で表し、環境負荷総量、各物質の産出量、各物質の単位あたり価格の各数字は任意に与えている。

表-1 物質量と経済的価値を組み合わせた環境負荷量の分配モデル
環境負荷総量 L=100 (t-c：CO2炭素換算トン)

case	有価産出物質	産出量 (t)	単価 (円/t)	環境負荷量 分担率（％）	環境負荷量 (t-c)	環境負荷量 原単位 (t-c/t)
1	G ₁	50	10	25.00	25	0.500
	G ₂	10	30	15.00	15	1.500
	G ₃	20	60	60.00	60	3.000
	合計	80	-	-	100	-
2	G ₁	50	10	125.00	125	2.500
	G ₂	10	30	75.00	75	7.500
	G ₃	20	-20	-100.00	-100	-5.000
	合計	80	-	-	100	-
3	G ₁	50	10	100.00	100	2.000
	G ₂	10	30	60.00	60	6.000
	G ₃	15	-20	-60.00	-60	-4.000
	合計	75	-	-	100	-

case1：物質 G1,G2,G3が製品および中間製品として、他産業等にすべて有価物質として取引された場合を表す。環境負荷量は、物質量と経済的価値により各物質に割り振られている。

case2：物質 G3が、他産業に逆有価物質として取引された場合を表す。逆有価物質のマイナスの価格は、一般に再利用や処理・処分のコストが負の価格として反映されており、この場合はプラスの価格の付いた主生産物に余分に環境負荷排出の責任を分担させる意味を持つ。このため、物質 G3 は見かけ上マイナスの環境負荷量を背負い、物質 G1,G2は物質 G3のマイナス分の環境負荷量を背負うことになる。

case3： case2 において、静脈産業に逆有価物質として取引される物質 G3 を削減すれば、物質 G1,G2 の

背負う環境負荷量が削減されることを表している。

この評価手法では、無償で取引される物質については価格がゼロとなるため環境負荷量分担率を表現することができない。しかしながら、産業活動によって産出された物質が無償で扱われる事はほとんど無いと考えられ、見かけ上無償で扱われている場合でも実質的には何らかの間接的なコスト（輸送や処理の費用など）が計上される事が多い。また、産出された無価値の物質（有害物質など）そのものを環境負荷とみなして評価に加えることもできる。

3. セメント産業を中心とした物質収支モデルの作成

モデルの作成にあたり、セメント産業への廃棄・副産物投入プロセスフローを図-1 のように設定し、関連各産業の産出およびセメント産業への廃棄・副産物投入を集計した（表-2）。各物質投入量は、関連各種業界団体へのヒヤリングや公表されている資料より引用または推計したものである。

モデルを単純化するため、図-1 の点線で囲んだ部分にあたる中間処理産業などの存在は考慮せず、廃棄・副産物投入は各物質の産出産業からセメント産業に直接投入されると仮定した。例えば、タイヤについては、タイヤ産業や自動車産業の活動および一般消費者の利用による環境負荷量も考慮する必要があるが、廃タイヤはタイヤ産業よりセメント産業に直接投入されるとしている。タイヤから廃タイヤとなるまでのタイムラグについては、GRC（Gross Resources Consumption: 総資源消費）の概念⁹⁾に基づいて扱った。すなわち、廃タイヤはそのタイヤがいつ製造されたかとは無関係に、廃棄された時点を生産年とした。また、各産業の主要な産出物質およびセメント産業に有価物質として投入された廃棄・副産物は、表-2に示すものだけとし、高炉スラグおよびJIS FA（フライアッシュ）についてはともにセメント混合材として使用されたものとした。

本モデルでは、環境負荷としてCO₂排出量と石灰石資源枯渇指数の2項目を対象とした。CO₂排出量は、化石燃料起源と石灰石起源のものを考慮し、各産業の化石燃料および石灰石消費量にCO₂排出係数を乗じて表現した。石灰石資源枯渇指数とは、石灰石資源の枯渇寄与度を表したもので、各産業の石灰石消費量を石灰石可採量（評価対象年の前年にあたる1989年の4月時点）で除した無次元数¹⁰⁾によって表している。この石灰石資源枯渇指数は、厳密な意味で環境負荷とは言えないが、資源枯渇をも考慮したいわば環境資源負荷として広い意味で環境負荷と同列に扱う。環境負荷総量の算定結果を各産業ごとに表-3に示す。

4. モデルによる環境負荷量評価の結果と考察

セメント産業を中心としたモデルにおける環境負荷量評価の結果を表-4に、廃棄・副産物投入を考慮したセメント産業における環境負荷量を表-5に示す。セメント産業に投入された廃棄・副産物の背負う環境負荷量の合計は、表-4に示すように、CO₂排出量が583×10³（t-c）、石灰石資源枯渇指数が2.72×10⁻⁶となった。これらの環境負荷量は、表-5に示すように、セメント産業の産出物質であるセメントに背負わされていくことになる。粘土代替用石灰灰および廃タイヤが逆有価物質として扱われているため、表-4の環境負

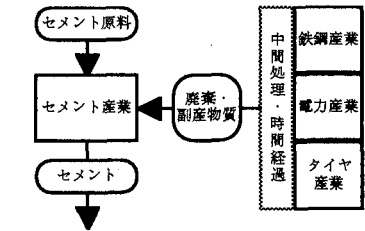


図-1 セメント産業への廃棄・副産物投入プロセスフロー

表-2 関連各産業の産出およびセメント産業への廃棄・副産物投入（単位：10³ t/a）

産出産業	有価産出物質	産出量（10 ³ t/a）	単価（10 ³ 円/t）
鉄鋼産業	粗鋼	110,339	46.0
	スラグ 高炉スラグ	15,401	3.0
	転炉スラグ	754	0.5
電力産業	電力	274,933	53.9
	石炭灰 JIS FA	171	60.0
	粘土代替用	891	-5.0
タイヤ産業	排煙脱硫石こう	987	2.0
	自動車タイヤ	1,479	665.7
	廃タイヤ	111	-4.5

※産出量において「○」を付けた項は、セメント産業に投入された廃棄・副産物質量を示す。また、電力については単位発熱量2,250(kcal/kwh)で熱量換算したものを、石灰石の単位発熱量6,200(kcal/kg)で除して石灰石質量に換算した。

表-3 各産業の環境負荷総量（1）7） 11） 12） 13） 14）

環境負荷 産出産業	環境負荷総量	
	CO ₂ 排出量 (10 ³ t-c)	石灰石資源 枯渇指数
鉄鋼産業	69,009	2.98×10 ⁻⁴
電力産業	85,019	1.56×10 ⁻⁵
タイヤ産業	257	-
セメント産業	17,215	2.42×10 ⁻³

表-4 モデルにおける環境負荷量の分配結果

産出産業	有価産出物質	環境負荷量 分担率 (%)	環境負荷量		環境負荷量原単位	
			CO2排出量 (10 ³ t-c)	石灰石資源 枯渇指数	CO ₂ 排出量 (t-c/t)	石灰石資源 枯渇指数 (t)
鉄鋼産業	粗鋼	99.09	-	-	6.20×10^{-1}	2.67×10^{-12}
	スラグ	0.90	623	2.69×10^{-6}	4.04×10^{-2}	1.74×10^{-13}
	高炉スラグ	0.01	5	2.19×10^{-8}	0.67×10^{-2}	2.91×10^{-14}
電力産業	転炉スラグ	0.01	-	-	3.09×10^{-1}	5.65×10^{-14}
	電力	99.95	-	-	-	-
	石炭灰	JIS FA	0.07	59	1.08×10^{-8}	3.44×10^{-1}
		粘土代替用	-0.03	-26	-4.68×10^{-9}	-2.87×10^{-2}
タイヤ産業	排煙脱硫石こう	0.01	11	2.07×10^{-9}	1.15×10^{-1}	2.10×10^{-15}
	自動車タイヤ	100.05	-	-	1.74×10^{-1}	-
	廃タイヤ	-0.05	-89	-	-8.01×10^{-1}	-
合計		-	583	2.72×10^{-6}	-	-

※環境負荷量はセメント産業に投入された廃棄・副産物質についてのみを示す。

荷量分担率に示すように、電力産業で粘土代替用石炭灰により-0.03(%)、タイヤ産業で廃タイヤにより-0.05(%)のマイナスの環境負荷量分担率が表現され、このマイナス分は電力およびタイヤ産業の主たる有価産出物質が責任分担する形となっている。また、粘土代替用石炭灰および廃タイヤがセメント産業に投入された結果は、粘土代替用石炭灰はCO₂排出量に関して 26×10^3

表-5 廃棄・副産物質投入を考慮したセメント産業における環境負荷量

環境負荷の起源		環境負荷量原単位	
		CO2排出量 (t-c)	石灰石資源 枯渇指数
廃棄・副産物質投入 による環境負荷	有価物質	698	2.72×10^{-6}
	逆有価物質	-115	-4.68×10^{-9}
	小計	583	2.72×10^{-6}
その他産業活動による環境負荷		17,215	2.42×10^{-3}
合計		17,798	2.42×10^{-3}

(t-c) と石灰石資源枯渇指数に関して 4.68×10^{-9} 、廃タイヤはCO₂排出量に関して 89×10^3 (t-c) の環境負荷量の削減効果を、それぞれの背負うマイナスの環境負荷量によってセメント産業が背負う環境負荷総量に反映されている(表-5)。これらのマイナスの環境負荷量については、逆有価物質を産出した元の産業プロセスにおける主生産物の環境負荷量として上乗せされている。このような、本来処理・埋立処分などを必要とする逆有価物質の投入部分に注目することにより、セメント産業に代表される静脈産業型の産業プロセスが背負う環境負荷総量を合理的に評価できることがわかる。

次に、セメントの混合材として投入される高炉スラグおよびJIS FA(フライアッシュ)について、各々の背負う環境負荷排出原単位(表-4)をみると、CO₂排出量に関しては 4.04×10^{-2} (t-c/t)と 3.44×10^{-1} (t-c/t)、石灰石資源枯渇指数に関しては 1.74×10^{-13} (t)と 6.29×10^{-14} (t)となっている。仮に、高炉セメントまたはFAセメントを生産する際、セメント単位量あたりに混入する高炉スラグ(高炉セメント用)の量およびJIS FA(FAセメント用)の量が同じで、かつ、いずれの混合セメントも単価が同じであったとする。この場合、環境への負荷の少ないセメントを生産するための投入物質は、環境負荷としてCO₂排出量で比較した場合は高炉スラグ、石灰石資源枯渇指数で比較した場合はJIS FAであると評価することができる。したがって、CO₂排出量による評価の場合、JIS FAの産出産業(電力産業)としては(1)単価を下げるために再資源化効率を上げる。(2)セメント産業利用以外の用途を開拓する。(3)マイナスの負荷量を発生する逆有価物質(粘土代替用石炭灰)の産出を抑制、もしくは付加価値を与え市場で有価物質として取引されるようにする。などの対策が必要となる。一方、石灰石資源枯渇指数による評価の場合では、高炉スラグの産出産業(鉄鋼産業)による前述同様の対策が必要となる。

このように、本研究で検討した環境負荷の分配・評価手法を活用することによって、多くの産業が環境負荷の総量削減について具体的な動機づけを行うことができる。産出側の産業は、逆有価の廃棄・副産物質を有価物質として取引できるように再生資源化することにより、主生産物である有価物質が背負う環境負荷量を削減することができる。さらに、再生資源化する際、多用途化するなどして経済的価値を上げることにより、主生産物質の背負う環境負荷量をさらに削減することができる。また、廃棄・副産物質が投入される側

の産業としては、環境負荷量のより小さい物質を選択するツールとして本研究の評価手法を活用することができる。特に、逆有償物質が投入されると逆有償物質が背負うマイナスの環境負荷量によって、環境負荷総量の削減効果をアピールすることができる。

一方、この評価手法の問題点として次のようなことが考えられる。例えば、産出産業が廃棄・副産物質の処理コストを削減すると、逆有償物質の削減を行った場合と同様の効果が現れる。つまり、不法投棄などを含めて環境に対して負荷を増大させるような処理を行なった場合でも処理費が安価であれば環境負荷量分担率は小さくなる。また、現実には廃棄・副産物質の取引価格はケースバイケースであり、今回のように産出産業の設定範囲を大きくした上で正確な算定することは困難な場合が多い。

5. おわりに

本研究では、物質量と経済的価値を組み合わせた環境負荷量評価手法を提案することにより、廃棄・副産物質の再利用を考慮した環境負荷総量の合理的な分配・評価を試みた。その結果、セメント産業における逆有償物質の投入がCO₂排出量に関して 115×10^3 (t-c)、石灰石資源枯渇指数に関して 4.68×10^{-9} の環境負荷量削減効果をもたらすことを評価することができた。一方で、この評価手法には逆有償物質の取り扱いについていくつかの問題点を残し、廃棄・副産物質の発生・処理・再資源化・処分などに関するさらに正確なデータ整備の必要性和あわせて検討・改善の余地が残されている。

多くの産業活動は今日の環境問題の根源である大量生産・大量消費型の経済社会システムにおける上流側に位置しており、一般消費者以上に環境負荷全体の増減に大きな影響力を持っている。このような上流側の産業界においても、環境ISOなどの登場により総合的な環境管理や環境負荷削減への関心を高めており、生産活動における廃棄・副産物質の有効利用は主要な課題のひとつである。本研究で提案したような、廃棄・副産物質の経済的な位置づけを環境負荷の責任分担に反映させる評価手法が各種産業の環境管理システムにおける有効な評価ツールとして活用されることを期待したい。

最後に、詳細なデータ公開に関してご協力いただいた関連各種業界団体の方々に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 通商産業省：平成2年鉄鋼統計年報 1990
- 2) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報, 24p, 1995
- 3) 省エネルギーセンター：'96年版エネルギー経済統計要覧, 1996
- 4) 日本フライアッシュ協会資料
- 5) 通商産業省：平成2年ゴム製品統計年報, 1990
- 6) 日本自動車タイヤ協会：タイヤリサイクルハンドブック, 125p, 1996
- 7) 総務庁：1990年産業連関表<計数編(2)>, 1066p, 1990
- 8) CMC：96エコインダストリー年鑑, 1996
- 9) 柳沢幸雄・外岡豊・稲葉敦：GRCによる人間活動の環境基礎負荷量の評価, 第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, p261~266, 1994
- 10) 未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会編：LCAのすべて, 工業調査会, 1995
- 11) 環境庁：二酸化炭素排出量調査報告書, 105p, 1992
- 12) 通商産業省：平成2年本邦鉱業の趨勢, 1990
- 13) 通商産業省：平成3年度電力受給の概要, 1991
- 14) 通商産業省：平成2年窯業・建材統計年報, 1990