

線形計画法を用いた LCA 手法の検討†

吉岡理文*・石谷久*・松橋隆治*

ABSTRACT In recent years, overgrown human activities as well as industrial production level are seriously influencing local and global environments especially in developed countries. Under the circumstances, the study of Life Cycle Analysis (LCA) are actively being promoted. LCA is expected as one of powerful tools to evaluate impacts of those activities on environments leading to environmental improvement through this evaluation. However, LCA is not yet established methodologically and formulated systematically. In this study, we have developed novel procedures of LCA using Linear Programming and hierarchical Database, and investigated passenger cars as a example.

1. はじめに

近年、地球環境問題等を背景として、様々な生産物に対してその原料採取から廃棄物処理、リサイクルまでわたる一貫した環境負荷を評価するライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, 以下 LCA) が提案されている。従来、その評価手法としては生産物に関係する一連のプロセスに関して順次、各物量を定量、積算して行く積み上げ法が一般的に用いられてきたが、積み上げ法では各プロセスを詳細に検討して物流を追跡して行くため、各産業の連関・波及効果やリサイクルを考慮して算定を行うことは煩雑な作業を伴うものであった²⁾。筆者らはこれに対して、従来の算定手法の不備な点を補い、それらとは別に体系的な観点から評価を行う手法として線形計画法を用いた体系的な評価手法の検討を行った。さらに、実際の評価における煩雑さを軽減するため、算定の補助ツールとして、一連のプロセスデータベースをネットワーク内に分散したオブジェクトとみなしてオブジェクト指向的な概念を導入した連関検索システムの構築を行った。また、これらの手法とシステムを用いて自動車を例とした簡単な評価を行った。

2. 線形計画法を用いた LCA の枠組み

2.1 概要

前述のように、LCA においては製品に関連する一連のプロセスにおける各物量を過不足無く積み上げて算定することが重要となるが、多岐にわたる産業間の連関を考慮して一貫した算定を行うためには煩雑な作業が必要とされる。本研究においては、プロセス内部の物量関係と各プロセス間の物流を体系的に制約的に還元することによって線形計画法を用いた評価を検討した。また、一プロセス一生産品でリサイクルが無い場合については、逆行列を用いて一意に産業間の波及が算定できるため、産業連関分析において逆行列により間接波及を含めた投入が算定されることと、数学的に同等であることを示す。

2.2 制約式の生成

・プロセス内部の関係式

各プロセス内部においては以下の関係式が成り立つものとする。

・各変数は物質、エネルギーの量を表すものとし、非負値とする。

・プロセス i の投入ベクトル i_i と生産ベクトル o_i の関係は線形であると仮定し、一般的には線形関数 f_i を用いて、

$$f_i(i_i, o_i) = 0 \quad (1)$$

のように記述できるものとするが、ここでは単純化のために生産規模 s_i 、投入ベクトル P_i 、生産ベクトル P_{o_i} を用いて、

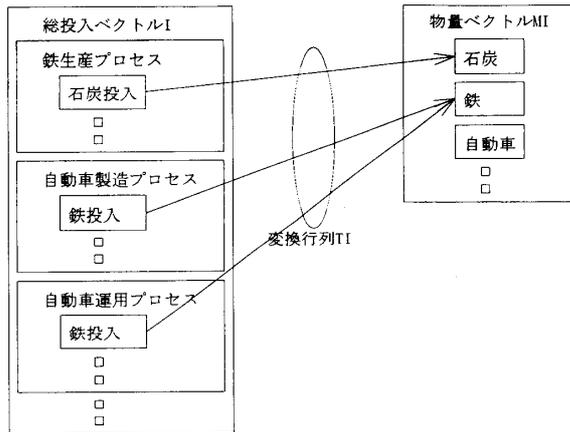
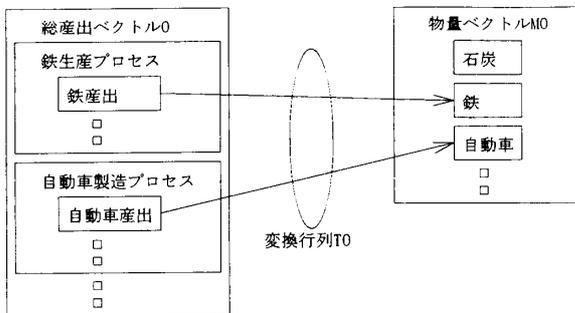
$$i_i = P_i s_i \quad (2)$$

$$o_i = P_{o_i} s_i \quad (3)$$

Life Cycle Assessment using Liner Programming. By Michifumi Yoshioka, Hisashi Ishitani and Ryuji Matsuhashi (Dept. of Geosystem Engineering, Faculty of Engineering, The Univ. of Tokyo).

*東京大学工学部地球システム工学科

†1995年5月8日受付 1995年9月13日再受付

図1 T_I による変換図2 T_0 による変換

とし、投入ベクトル P_i 、生産ベクトル P_o_i はインベントリデータベースより生成する。

・プロセス間の関係式

評価するシステム全体に含まれる各プロセスの投入、生産ベクトル i_i, o_i を全プロセスについて並べたベクトルを I, O 、システム外部からの入出力ベクトルを X とし、生産の分配を表す変換行列を T_I (図1)、リサイクル等による複数の生産から同一の投入への変換行列を T_0 (図2) とすると、システムが定常状態のとき、システム全体の物流バランスから、物質の投入、産出ベクトル $M_I = T_I I, M_0 = T_0 O$ の間に

$$M_I \leq M_0 + X \quad (4)$$

が成り立つ。よって I, O 間に、

$$T_I I \leq T_0 O + X \quad (5)$$

の関係式が成り立つ。

・一般には以上の関係式のみではシステム内の各変数が定まらないため、以上の関係式と評価する製品の物量を制約とし、適当な目的関数を最適化することによってシステム内の各変数を決定する。

2.3 LCA としての評価指標

以上の枠組みによってシステムと目的関数からシステム内部の各物流が導出される。物量から各製品毎の評価を行う方法は様々考えられるが、ここでは先の線形計画法によって得られた最適基底行列を利用する方法を検討する。

標準形の線形計画問題を

$$\begin{pmatrix} A & 0 \\ -c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$x \geq 0$$

$$z \rightarrow \min$$

A : 制約式の係数行列

c : 目的関数の係数ベクトル

d : 制約式の右辺値ベクトル

x : 未知変数ベクトル

z : 目的関数

とし、その最適基底形式を

$$\begin{pmatrix} B^{-1}A & 0 \\ c_K B^{-1}A - c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B^{-1}d \\ c_K B^{-1}d \end{pmatrix} \quad (7)$$

B : 基底行列

c_K : 基底に対応する目的関数の係数ベクトルとすると、基底解 x_d は基底逆行列 B^{-1} を用いて

$$x_d = B^{-1}d \quad (8)$$

と表せる。

ここで、先に述べたように手法の前提として、例えば、“自動車生産=1単位”の様な評価対象の製品に対する制約が必ず含まれているため、その制約行を i 行目とすれば、 B^{-1} の i 列目はその制約に対する解の微分値となっている。例えば、式(8)から物質 j の量を表す変数 x_j の行について取り出し、

$$x_j = B_{j1}^{-1}d_1 + B_{j2}^{-1}d_2 + \dots + B_{ji}^{-1}d_i + \dots + B_{jm}^{-1}d_m \quad (9)$$

d_i で微分すると、

$$\partial x_j / \partial d_i = B_{ji}^{-1} \quad (10)$$

となり、 B^{-1} の j 行 i 列目が製品 i の量 d_i による物質 j の量 x_j の微分を表している。よって、最適基底形式の基底逆行列 B^{-1} を用いて、複数の製品があった場合においても各製品が一単位増加したときの各物質量の増加分を分解して表示する指標とすることができ

2.4 産業連関表による分析との関係

最後に同様の算定に用いられる産業連関分析との関係を示す。

式(2)、(3)のように、各プロセスの投入、産出がプロセス毎に単一の指標(生産規模) s_i で表される時、この s_i を全プロセス並べたベクトル S と、 P_i, P_o_i を

全プロセス並べた行列 P_i, P_0 を用いて式(2), (3)を表すと,

$$I = P_i S \quad (11)$$

$$O = P_0 S \quad (12)$$

となり, 式(5)は

$$T_i P_i S \leq T_0 P_0 S + X \quad (13)$$

となる. この時, S は一プロセス一成分からなり, また, リサイクルがない場合には各プロセスからの産出は重複しないため, M_0 と一対一に対応する. 定義より, $M_0 = T_0 O = T_0 P_0 S$ であるから, $T_0 P_0$ は適当な変換行列 A によって単位行列にできる.

$$AT_i P_i S \leq S + AX \quad (14)$$

これによって, $AT_i P_i S$ はプロセス数 X プロセス数の正方行列に変換され, 不等号を等号とみなすことにより,

$$AT_i P_i S = S + AX \quad (15)$$

$$(AT_i P_i - E)S = AX$$

$$S = (AT_i P_i - E)^{-1} AX$$

E : 単位行列

となる. ここで, $AT_i P_i, S, -AX$ をそれぞれ産業連関分析の A, X, F と見なせば式(15)は

$$X = (E - A)^{-1} F \quad (16)$$

の様に産業連関分析と同様, 逆行列によって一意に決定される形式で表すことができる. ただし, 各変数の意味付けは必ずしも産業連関分析と等価ではない.

3. プロセスデータベースと連関検索システムの構成

3.1 概要

2節で述べた評価手法に則って実際の評価を行うためには, 膨大なプロセスデータベース群から着目する生産品に関連する物流, プロセスデータをプロセス相互の生産投入情報から検索, 抽出し, 各物量ベクトル (I, O, X) プロセス内, プロセス間の関係を表す行列 (P_i, P_0, T_i, T_0) を生成する必要がある. これらの検索, 生成を自動化し, 線形計画法による LCA 算定を補助するツールとして, 本研究では以下に述べる様なネットワーク上の階層的データベース群を前提とした検索システムを構築した. ただし, 本研究においては同一コンピュータ内での実装によって評価を行った.

3.2 プロセスデータベースの構成

各プロセスに関するデータベースは階層構造を持ち, 最小単位のデータベースは以下のデータと機能を持つ.

- ・プロセスの入出力物質・エネルギーリスト

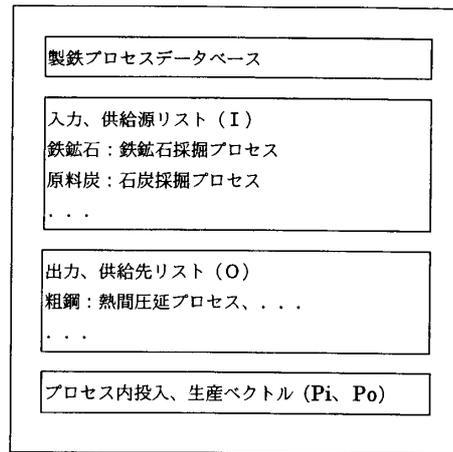


図3 最小単位のプロセスデータベース例

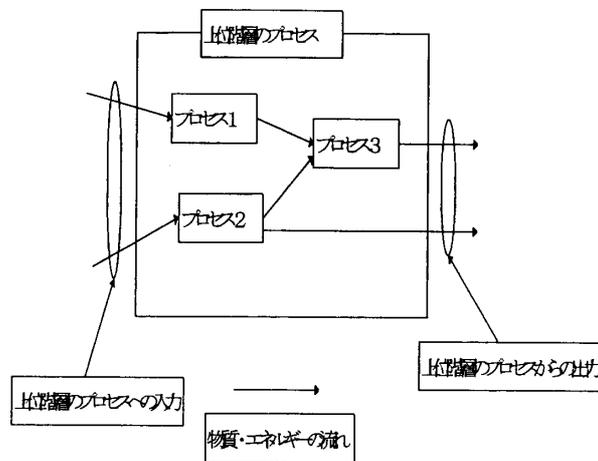


図4 複数のプロセスからなるプロセスデータベースの例

- ・プロセス内の入出力バランスを表すベクトルデータ.
- ・各入出力物質・エネルギーに関する供給元あるいは供給先プロセスへのリンク. (図3)

階層構造内の上位プロセスは複数の下位プロセスを含み検索条件によって, 単一プロセス, あるいはプロセスの集合として振る舞う. (図4)

4. 自動車による評価の一例

4.1 評価の概略

上述の手法とシステムを用いて実際に評価を行うにあたり, 本研究では多様なプロセスからなり, 大規模な生産システムを持つ自動車を例として取り上げ, LCA において重要となるリサイクル評価の第一段階として, 自動車から回収される鉄屑を電気炉によって建築用鉄材として再利用するケースを設定した. これ

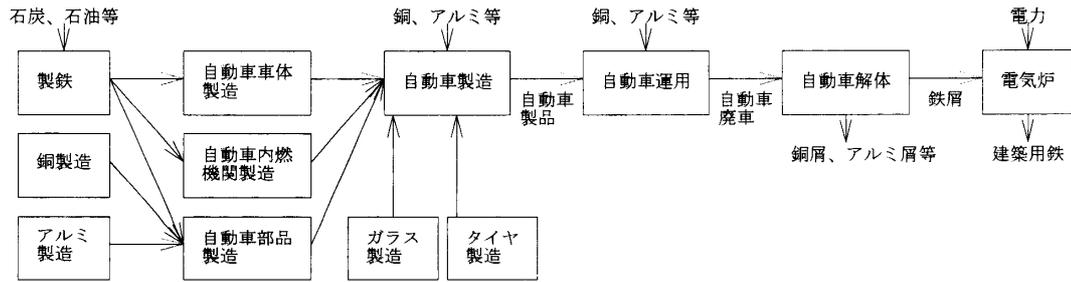


図5 自動車のLCA概念図

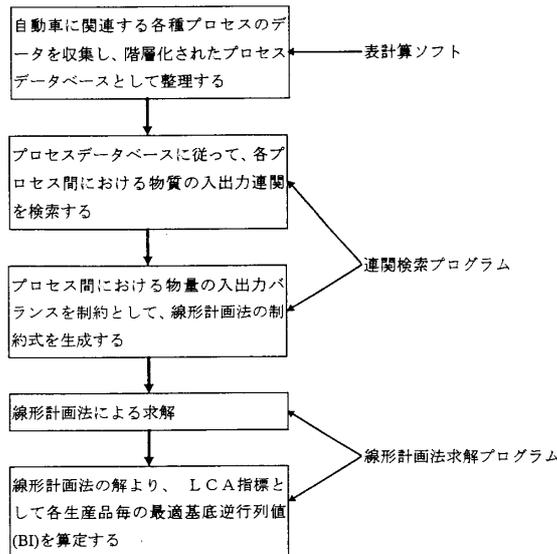


図6 線形計画法を用いたLCAの算定フロー

によって鉄資源の再利用が自動車の原単位に与える影響と、一つの生産システムから複数の生産品が産出される場合の負荷分配について検討した。実際に評価に用いた一連のプロセスは図5に概略を示すものであり、このプロセス群から前述の手法とシステムによって線形計画法の拡大係数行列を作成し、総消費エネルギー量を目的関数として最適化を行った。一連の算定手順を図6に、使用した自動車の素材構成比、転炉鋼、電炉鋼の原単位を表1、表2に示す。ここで、自動車の需要は1tとし、建設用鉄材の需要は200kgから1tまで可変とした。なお、本生産システムは前述のように、線形計画法を用いたLCA手法の算定例として自動車とそのスクラップから建設用鉄材が生産されるシステムを想定し、配分問題等の検討に必要な最低限の範囲について算定を行ったものであり、自動車の厳密なLCA算定を行うことが本来の主旨ではないため、自動車部品の加工エネルギー、自動車廃車の解体

表1 自動車の素材構成比

素材	重量(kg)
鉄	949.2
アルミ	55.9
銅	17.8
ステンレス	4.3
樹脂	55.7
ゴム	44.0
ガラス	30.6
合計	1157.5

出典：普通・小型乗用車における原材料構成比（日本自動車工業会，1992）等

表2 転炉鋼，電炉鋼の原単位

Mcal/t	電力	石油	石炭
転炉鋼	1130	370	3580
電炉鋼	1160	0	0

出典：地球温暖化防止対策ハンドブック2（環境庁企画調整局地球環境部，1992）ただし、電力は2250kcal/kWh換算

処理エネルギー、各種輸送エネルギー等や、さらにそれらからの間接波及分については算定が省略されている。以下に算定結果として、エネルギー消費量に関する最適基底逆行列による指標（以下BI）と、それによって自動車、建設用鉄材に各エネルギー消費量、CO₂排出量を分配したもの、さらに、比較のために重量配分によって分配した結果について詳細を述べる。

4.2 BIを用いたエネルギー原単位の変化

以上の前提のもとで、BIを石炭、石油、電力のエネルギー資源について建設用鉄材の需要変化を变化に従って算定した結果を図7、8に示す。この場合、BIは、具体的には自動車、建設用鉄の各々需要一単位増加当たりの石油、石炭、電力消費増加量を表しているが、算定結果をみると、建設用鉄の需要が相対的に増加し、自動車からの屑鉄が全て利用できる量を境にして値が変化している。これは、石炭、石油については、屑鉄が余る場合、自動車の需要を増やすと屑鉄が無駄になるため建設用鉄の需要が増加する側で自動

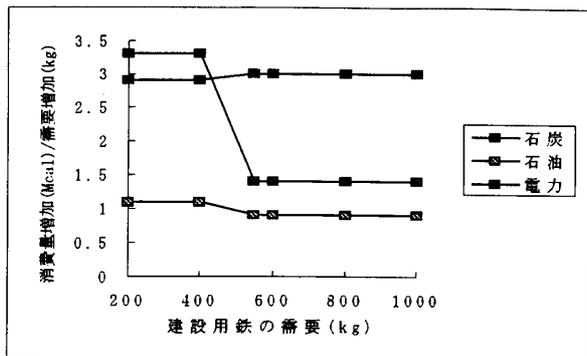


図7 自動車需要1単位毎の資源消費量

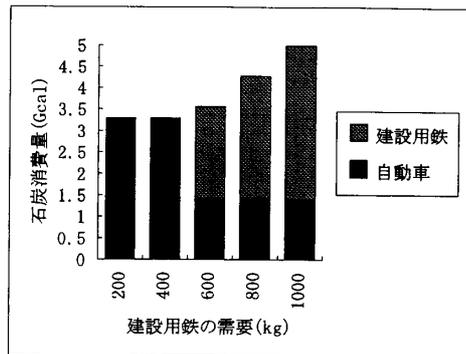


図9 石炭消費量 (BI)

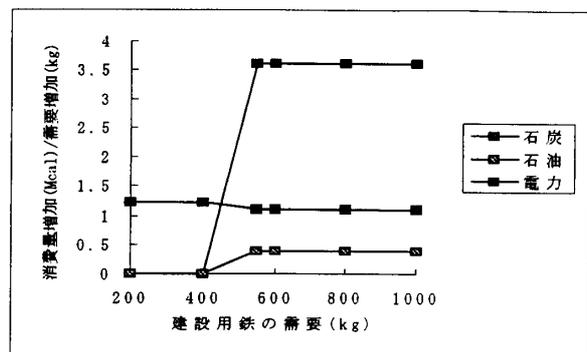


図8 建設用鉄需要1単位毎の資源消費量

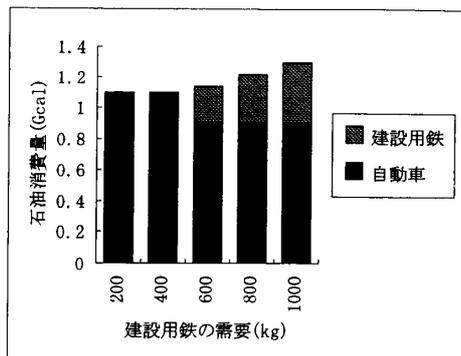


図10 石油消費量 (BI)

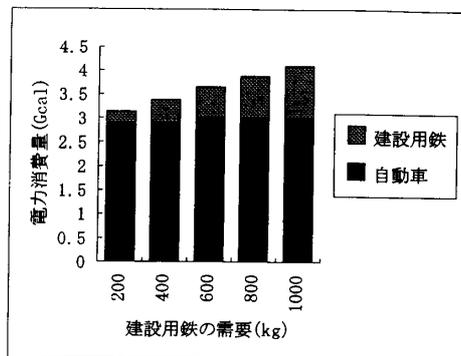


図11 電力消費量 (BI)

車が有利となり、建設用鉄の方では屑鉄が利用できなくなる側で負担が増加するためである。また、電力については電炉によって建設用鉄のみにかかる電力があるため、逆に、自動車一単位当たりの消費量が増大し、建設用鉄一単位当たりの消費量が減少している。

4.3 BIと重量配分によるエネルギー資源消費量の分配

前節の結果を用いて、石炭、石油、電力の総消費量とCO₂排出量を自動車と建設用鉄に分配したものを図9～12に示す。また、比較のために積み上げによる重量配分の結果を図13～16に示す。積み上げによって計算する場合、仮定によって様々な結果が得られるが、ここではリサイクルされた鉄に関する資源消費を自動車と建設用鉄材で消費される鉄の重量配分に応じて分配することとした。具体的には式(17)、(18)で算定される。また、参考として鉄の生産量変化を図17に示す。

以上の算定結果をみると、BIによる配分は重量配分による配分に比べて需要の変動による影響を端的に表しており、システムの需給バランスが原単位に与え

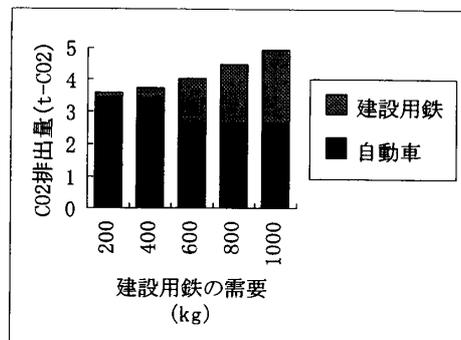


図12 CO₂排出量 (BI)

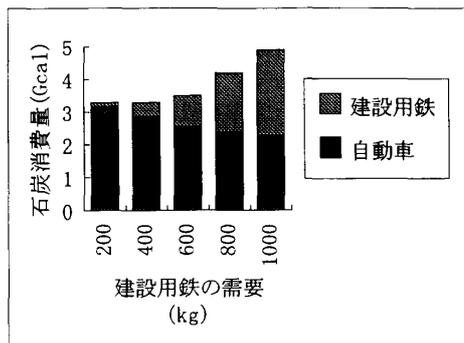


図13 石炭消費量 (重量配分)

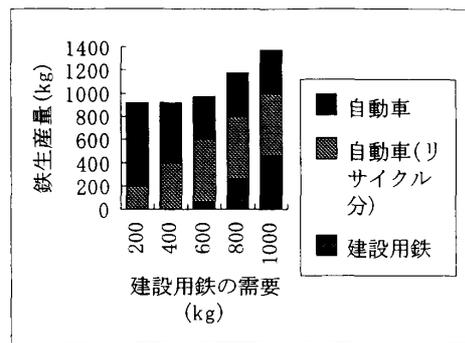


図17 鉄生産量

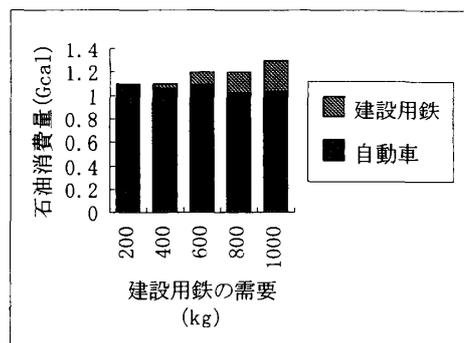


図14 石油消費量 (重量配分)

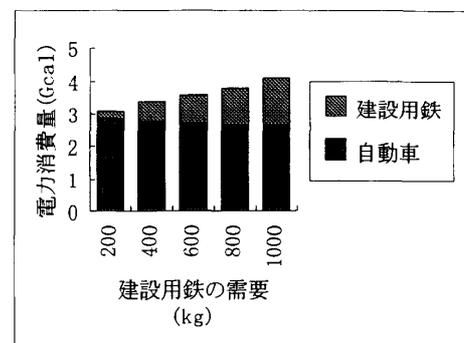


図15 電力消費量 (重量配分)

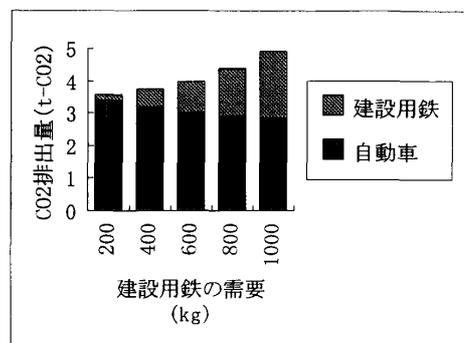


図16 CO₂ 排出量 (重量配分)

る影響を評価する上で有用であると考えられる。

自動車への配分 = 製鉄 (A) への投入 + 製鉄 (B) への投入 × (A+B) / (A+2B+C) + 製鉄以外の自動車への投入 (17)

建設用鉄への配分 = 製鉄 (C) への投入 + 製鉄 (B) への投入 × (B+C) / (A+2B+C) + 電炉への投入 (18)

ここで、

A: 自動車へ投入される鉄の生産量 (リサイクルされない分)

B: 自動車へ投入される鉄の生産量 (リサイクル分)

C: 建設用鉄へ直接投入される鉄の生産量

5. ま と め

本研究においては LCA における体系的評価手法と実際の評価システム構築を行い、自動車を例とした基礎的な評価までを行ったが、結果として以下の点が明らかとなった。

・線形計画法を用いた体系的な評価手法と連関検索システムの整備により、自動車に代表されるような複雑・多岐にわたる製造工程を持つ生産品についても、データの集計、インベントリの作成が比較的容易となった。

・線形計画法の最適基底逆行列を用いた指標により、従来の重量配分による LCA 算定等に比して、一つの生産システムが複数の生産品を持つ時にも、各々生産品の需要によって原材料、エネルギー、環境負荷等の分配を客観的に決定することができる。

・上記の指標によって、需給バランスの影響を含めた生産システム全体の原単位を重量配分による場合より端的に評価できる。

以上のような結果を踏まえ、今後の課題としては

プロセスや、物資の代替性情報等の関連情報と簡単なパターンマッチング機構を用いたデータベース検索システムの拡充や、自動車による評価例における各プロセス間の素材リサイクルを含めた静的、動的な詳細検討を行う。

参 考 文 献

- 1) 古林 隆：線形計画法入門，産業図書（1980）
- 2) LIFE-CYCLE ASSESSMENT INVENTORY GUIDELINES AND PRINCIPLES, U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1992)
- 3) 本藤祐樹，内山洋司：産業連関表を用いた製品の素材消費量に関する分析，エネルギー・資源学会第13回研究発表会講演論文集，85/90（1994）
- 4) ライフサイクル影響評価のための概念的枠組み（インパクトアセスメント），(株)産業環境管理協会（1995）
- 5) 宮沢健一：産業連関分析入門，日本経済新聞社（1975）