

Title	産業部門におけるエネルギー消費量の不確かさを考慮したLCA
Sub Title	
Author	吉田, 好邦(Yoshida, Yoshikuni) 石谷, 久(Ishitani, Hisashi) 松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji) 大熊, 裕之(Okuma, Hiroyuki)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	2000
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』 (KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-92
JaLC DOI	
Abstract	概要産業連関表の各部門へのエネルギー投入量に関する標本データに基づいてその分散を推定し、各部門のCO2排出原単位の不確かさを算出するとともに、自動車製造ステージにおけるLCAにこの手法を取り入れて、LCAで算定されるCO2排出量の不確かさについて信頼性評価を行った。LCAにおける上流プロセスの評価で対象となる素材により近い財に関するCO2原単位の変動係数は平均で0.8程度という結果が得られた。またケーススタディとして、実在のセダン型小型自動車(1500(°C))を対象として製造段階におけるライフサイクルCO2を算定し、1台あたり約1.27[t-C]と得られた。そのうち、素材製造プロセスが約0.62[t-C]と全体の48%を占め、次いで中間部品製造プロセス及び最終組立プロセスが約25%ずつとなっている。また、すべての投入係数に変動を仮定した場合の全体を通しての変動係数は0.126となり、産業連関表を用いた自動車LCAについて一定の信頼性を与えることが可能となった。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000092-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

産業部門におけるエネルギー消費量の 不確かさを考慮したLCA

吉 田 好 邦
石 谷 久
松 橋 隆 治
大 熊 裕 之

No.G-92

学振未来 WG2-30

産業部門におけるエネルギー消費量の不確かさを考慮した LCA

吉田 好邦, 石谷 久, 松橋 隆治, 大熊 裕之

2000年4月

キーワード

産業連関表, LCA, 変動係数, 不確かさ, CO₂ 原単位

概要

産業連関表の各部門へのエネルギー投入量に関する標本データに基づいてその分散を推定し、各部門の CO₂ 排出原単位の不確かさを算出するとともに、自動車製造ステージにおける LCA にこの手法を取り入れて、LCA で算定される CO₂ 排出量の不確かさについて信頼性評価を行った。

LCA における上流プロセスの評価で対象となる素材により近い財に関する CO₂ 原単位の変動係数は平均で 0.8 程度という結果が得られた。またケーススタディとして、実在のセダン型小型自動車(1500cc)を対象として製造段階におけるライフサイクル CO₂ を算定し、1 台あたり約 1.27[t-C]と得られた。そのうち、素材製造プロセスが約 0.62[t-C]と全体の 48%を占め、次いで中間部品製造プロセス及び最終組立プロセスが約 25%ずつとなっている。また、すべての投入係数に変動を仮定した場合の全体を通しての変動係数は 0.126 となり、産業連関表を用いた自動車 LCA について一定の信頼性を与えることが可能となった。

産業部門におけるエネルギー消費量の不確かさを考慮した LCA

吉田 好邦*、石谷 久*、松橋 隆治*、大熊 裕之*

1. はじめに

1990 年代半ばを過ぎて、地球温暖化等の地球規模の環境問題、大気汚染・水質汚濁等の地域の環境問題を危惧する声が高まり、製品・サービス・生産プロセスなどの環境負荷を知る手段として LCA が注目を集めている。LCA の分析手法は、環境負荷を製造プロセスごとに足し合わせるボトムアップ法（積み上げ法）と、産業連関表に代表されるようなプロセスの入出力関係を予めマトリックス上に表現したうえで、波及効果まで考慮して環境負荷を産出するトップダウン法（マトリックス法）に大別できる。

積み上げ法では選定したプロセスが、例えば一工場のデータのように特定の条件の下に選ばれていることが多く、必ずしもそのプロセスを代表するものではない。一方、産業連関表に集約されるプロセスは平均財についてのプロセスであり、特定の財の LCA に対して多くの異質のものが平均化され、その整合性を保持できない可能性がある。したがって感度分析の観点から見ると、データの幅を考慮した上で、LCA 結果の信頼性を高める必要がある。実際には特定製品の LCA をおこなう場合、製造プロセスが特定可能な部品については積み上げで環境負荷を積算し、性状や製造工程を特定できない部品やサービスについては産業連関表を用いて補うのが妥当だろう。しかし産業連関表の平均財としての数値こそ、データの幅を考慮されるべきであるが、過去の LCA においては産業連関表のデータのばらつきを定量的に考慮した例はなく、産業連関表を LCA に利用する際のネックになっていたともいえる。本稿では産業連関表の各部門へのエネルギー投入量について、標本データに基いてその分散を考慮して、各部門の CO₂ 排出原単位の不確かさを算出し、LCA の結果の信頼性を確保するためのデータを提供する。更にその適用例として、実在の自動車の詳細な部品データに基づいて、自動車製造時の CO₂ 排出量とその変動を推計した。

2. LCA における産業連関表の利用

2.1 エネルギー消費の分布データ

LCA の分析手法は、環境負荷を製造プロセスごとに足し合わせるボトムアップ法（積み上げ法）と、プロセスの入出力関係を予めマトリックス上に表現したうえで、波及効果まで考慮して環境負荷を産出するトップダウン法（マトリックス法）に大別できる。前者は各プロセス技術を詳細にインベントリに記述できる一方で、調査できるプロセスも限られ、すべてのプロセスを網羅できないという欠点がある。後者のトップダウン法では産業連関表を使って、国内におけるすべての財とサービスのやり取りを網羅した推計をする手法がとられることが多いが、国内のすべての産業部門を網羅するがゆえに、個々の部門については、あくまで平均的な財を表すにすぎないことになり、特

* 東京大学大学院工学系研究科

定の製品についての LCA に適用するには限界がある。このように LCA は信頼できるデータを収集することが重要であるのはもとより、データを用いて環境負荷を推定する手法にも少なからぬ不確実性が伴うことを常に念頭におく必要がある。

製造業におけるエネルギー消費量の分析例として、吉岡 [1] らは 1990 年の工業統計調査と石油等消費構造調査の個票データから、4 桁産業分類の製造業（527 部門）についてエネルギー消費構造を統計的に分析している。表 2.1 に製造業を 2 桁分類に統合した場合の燃料使用額のばらつきを示す。エネルギー原単位の分布は変動係数が 1 から 1.5 と大きな値を示している。特に輸送用機械器具製造業では 4.8 を超える非常に大きな値である。他にはゴム製品製造業、化学工業の変動係数が大きくなっている。製造業の 4 桁分類は 1990 年の産業連関表における統合小分類（405 部門）に対応づけをすることが可能である。そして各産業へにおけるエネルギーの消費量のばらつきが定量的に示されているため、これを産業連関表のエネルギーに関する投入係数のばらつきに変換することができる。

2.2 投入係数の分散データの作成

前節で紹介したエネルギー消費量の分散のデータに基いて、産業連関表のエネルギーに関連する投入係数の分散を算出する。前述のデータは燃料消費量として与えられ、燃料の種別までは分類されていない。そこで、燃料を石炭、原油、天然ガス、石油製品、石炭製品、都市ガス、事業用発電の 6 種に分け、各燃料の各産業への投入係数を燃料の消費量の平均値とし、平均のまわりの分散については、燃料間で変動係数の差異がないとの仮定をおいて、上記 6 種の燃料の部門から、各製造業の部門への投入係数の分散を算出した。なお、自家発電については文献 [1] のデータソースである工業統計調査で除かれているため分散の評価対象から除外した。

また、産業連関表の部門分類と文献 [1] の部門分類は共に日本標準産業分類に基いており、部門の数の差は統合によって補い、全部で 393 部門の分類とし、うち 217 部門に統合した製造業について上記 6 種エネルギーの投入係数の分散を算出した。

表 2.1 2 桁製造業の生産額千円あたりの燃料使用額（円）1990 年

	標本平均	変動係数	標本数
食品	26.445	1.356	7032
飲料・飼料・たばこ	19.869	1.808	807
繊維	46.756	1.163	3247
衣服・その他の繊維製品	23.107	0.944	4180
木材・木製品	19.806	0.862	1143
家具・装備品	13.878	0.818	1222
パルプ・紙・紙加工品	30.294	1.264	1841
出版・印刷・同関連	16.586	1.358	2976
化学	33.368	1.917	2188
石油製品・石炭製品	41.399	1.173	126
プラスチック	33.077	0.859	2769
ゴム製品	34.348	2.979	831
なめし革・同製品・毛皮	13.354	1.256	411
窯業・土石製品	55.908	1.062	2863
鉄鋼	49.711	0.952	1423
非鉄金属	40.052	1.425	824
金属製品	25.866	1.207	4639
一般機械器具	16.65	1.469	6124
電気機械器具	20.936	1.35	9763
輸送用機械器具	22.387	4.891	3343
精密機械器具	18.223	0.995	1300
武器	12.757	0.688	12
その他製造業	16.852	1.736	1297

出所：吉岡 [1]

(注 1)変動係数は標準偏差／算術平均で与えられる。

(注 2)実際のデータはより詳細な 4 桁分類（527 部門）で構成されている。

2.3 エネルギー消費量の分布形状

前節までにエネルギー消費量の統計量として投入係数の平均と分散を算出したが、エネルギー消費量の分布自体の形状をここで紹介する。例として図 2.1 に食料品製造業のエネルギー消費量の標本分布を示す。データは非負であるから正規分布ではなく、正の方向に裾の長い分布となっている。

全産品あたりエネルギー消費量 (円) 1990年
 食料品製造業 $N=24$ $CV=1.26$ $MC(95\%)=14$ $N=100$

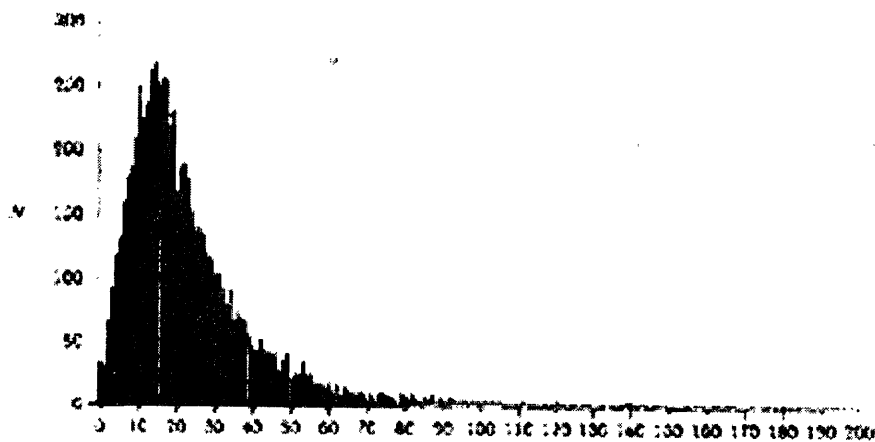
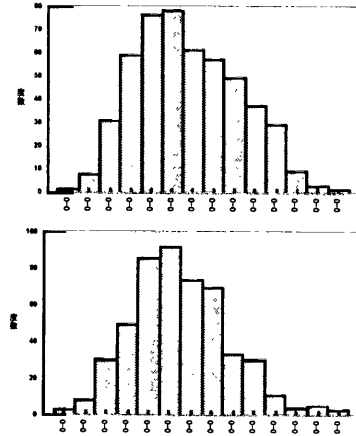


図 2.1 食料品製造業のエネルギー消費量の分布
 出所: 吉岡 [1]

3. CO₂ 排出原単位のばらつき

3.1 統計量のデータの分布形状への依存性

前節までに求められた投入係数とその分散を用いて、投入逆行列を算出し、各部門の最終需要 1 単位あたりの CO₂ 排出量を求める。ここでは $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 型の逆行列に基づいて生産者価格 100 万円あたりの CO₂ 排出量を算出する。また CO₂ 排出係数の分散については、投入係数について特定の確率分布を仮定した上で、前節までに求めた投入係数の分散に基づいて乱数を発生させ、モンテカルロシミュレーションにより CO₂ 排出係数の分散を求めることができる。したがって、投入係数についてある種の分布を想定することが必要となる。2.3 節で示したように実データは非負かつ裾の長い分布になることが多いため、対数正規分布によるフィッティングがおこなわれることが多い。ところが、本稿で示す CO₂ 排出係数の導出のように、多数の投入係数の組からなる確率変数を用いて、投入逆行列を求めて CO₂ 原単位を算出する一連のプロセスでは、確率変数同士で多くの演算が繰り返されることにより、目的の CO₂ 原単位の分布は投入係数の分布の形状によらず、多かれ少なかれ裾が短い分布に近づくことが予想される。ひとつの例として図 3.1 に 90 部門の産業連関表の投入係数を例として、投入係数の分布を一様分布と正規分布で与えた場合の逆行列係数の分布を示す。平均と分散は同一の値を与えている。結果は類似した形状を示しており、もとの投入係数の分布への依存が小さいことが分かる。ただし、もちろん分布の形状自体が漸近的に一致することではなく、行列のサイズによっては成分同士の相関が大きくなり、必ずしも類似した形状を示さない可能性もあることには注意しなければならない。それでもなお、両者の逆行列係数の平均、分散は全成分について実用上差のない値を示しており、平均、分散といった基本的な統計量を算出することにおいては、もとの投入係数の分布形状にこだわる必要はないという示唆が得られる。



横軸：投入逆行列係数の値，縦軸：度数

図 3.1 投入係数の分布の形状による投入逆行列係数の分布の差異の例（上：一様分布，下：正規分布）（91 部門連関表による計算例）

3.2 CO2 排出原単位の導出

CO2 排出原単位を求める場合の手順には次の 2 通りの方法がある。

(1)モンテカルロ法

投入係数を特定の確率分布に従う乱数として繰り返し発生させ、CO2 原単位とそのばらつきを標本値の平均および分散として求める手法である。考え方は極めて単純であるが、シミュレーションの繰り返し回数を多くすれば、行列のサイズが大きい場合に計算負荷が増大する問題もある。

(2)直接法

投入逆行列の分散を直接求めることにより CO2 原単位の分散を導出する方法である。投入逆行列を、

$$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \dots \quad (3.1)$$

と展開し、各べき乗の項の各成分についての平均と分散を直接計算する。

$$(\mathbf{A}^n)_{ij} = \sum_{k_1, \dots, k_{n-1}} a_{ik_1} a_{k_1 k_2} \dots a_{k_{n-1} j} \quad (3.2)$$

であるから、投入係数のべき乗の期待値すなわち n 次のモーメント $E[a_{ij}^n]$ ($n = 1, 2, \dots$) を求めれば、平均、分散をととも算出することができる。一般に n 次のモーメントを求めるのは容易でないが、特に a_{ij} の従う分布が例えば一様分布のような単純な分布の場合、 $E[a_{ij}^n]$ は比較的容易に求めることができる。前節で述べたように、平均、分散といった基本的な統計量については a_{ij} の分布形状に実用上依存しないとみなせることから、単純な分布を仮定して直接 CO2 原単位の分散を近似的に算出することが可能である。

3.3 計算結果

以上の考え方により 393 部門の投入逆行列に基づいた CO2 排出原単位を算出した結果を以下に示す。既述のように、変動係数のデータは製造業で消費される燃料製品の消費量であるので、その他の部門における投入係数は未考慮である。そこで、以下の計算では次の 2 ケースを想定してそれ

それぞれについて CO2 排出量とその変動を計算した。

ケース 1：製造業における燃料の消費量の変動係数のみを考慮。

ケース 2：製造業以外の部門における燃料以外の製品の消費量についての変動係数についてもケース 1 と同程度の変動を仮定する。

ケース 1 は、得られているデータのみに基づいた計算になるため、CO2 排出量の変動の最小限度を推計するという位置づけになり、ケース 2 ではデータの抜け落ちている部分にも概算の推定値を当てはめることによって、CO2 排出量の変動についての実際の概算値を推計するという位置づけになる。ケース 2 においてその他の部門の変動係数は以下のように仮定した。物理的投入に関する変動係数の 0.5 は、複数の自動車の素材構成データから推定した概算値であり、その他の変動係数 1.0 は、製造業における燃料消費の変動係数と同程度の水準値として与えている。

- 非製造業における燃料消費量：変動係数を 1.0 と仮定。
- 全部門における物理的投入（素材、中間財等）：変動係数を 0.5 と仮定。
- 全部門における燃料以外の非物理的投入（サービス等）：変動係数を 1.0 と仮定。

また、投入係数の分布には正規分布を仮定した場合の結果をここで示すが、一様分布によっても同様な手順で同様な結果を得ており、CO2 排出原単位とその分散が元分布に依存しないことは確認済である。また投入係数間の相関は考慮していないが、これは燃料間の代替関係を考慮すれば異なる燃料間の投入関係に負の相関が考えられ、同時に事業所の規模による燃料消費量を考慮すれば、大規模の事業所ほど高い燃料消費効率の傾向から、燃料間の消費量に正の相関が想定されることによる。なお、ここで示される CO2 原単位は当該財の生産に伴う直接間接の波及を含めた CO2 排出量を表しており、当該部門における産業としての排出量ではないことに留意されたい。CO2 原単位を算出する際に、各部門における燃料消費量を CO2 に換算するにあたっては、環境分析用産業連関表 [2] の中で示される CO2 換算係数を用いた。（これによって原料用途の石油製品等の未燃炭素が除かれる。）結果は紙面の制約により 393 部門のすべてについて掲載できないが、全部門を通じた変動係数の平均値は、ケース 1 において 0.26、ケース 2 において 0.95 である。これにより変動の約 1/4 が製造業のエネルギー消費によって説明できることがわかる。

表 3.1 にケース 1 における変動係数の上位 20 部門、表 3.2 に下位 20 部門を示す。変動係数の大きい部門は主に食料品製造業である。これは食料品製造業内において多くの食料品の取引があり、食料品製造部門である程度閉じた生産構造になっていることにより、分散が増幅された結果と考えられる。全体において、加工度の大きい製品を製造する業種で変動係数が大きく、逆に素材・原料に近い業種やサービス業では変動係数が小さい傾向がみられる。

次に、実際の LCA においてデータを得るのが困難になりやすい、部品や素材加工品などの中間財についての CO2 原単位をピックアップして表 3.3 に示す。LCA における上流プロセスの評価では専ら素材により近い財の評価が必要となることを考慮すれば、全体を通しての変動係数はケース 1 で 0.2 程度、ケース 2 で 0.8 で比較的小さいといえる。

表 3.1 ケース 1 における CO2 排出原単位の変動係数（上位 20 部門）

連関表分類	CO2原単位 (t-C/百万円)	変動係数
精穀	0.445	2.198
パン類	0.617	2.048
菓子類	0.658	1.728
その他の一般機械器具 及び部品	1.125	1.719
その他の食料品	0.686	1.718
そう菜	0.647	1.645
肉加工品	0.571	1.619
冷凍調理食品	0.756	1.600
農産保存食料品 (除びん・かん詰)	0.594	1.559
酪農品	0.771	1.531
めん類	0.678	1.501
植物油脂	0.901	1.474
畜産びん・かん詰	0.760	1.455
筆記具・文具	0.723	1.436
製粉	0.624	1.429
でん粉	1.025	1.429
自動車用内燃機関・同部分品, 自動 車部品	0.959	1.388
動物油脂	1.349	1.378
医薬品	0.708	1.326
ねり製品	0.962	1.217

表 3.2 ケース 1 における CO2 排出原単位の変動係数（下位 20 部門）

連関表分類	CO2原単位 (t-C/百万円)	変動係数
自家発電	23.319	0.001
事業用発電	6.698	0.002
廃棄物処理(公営)	5.794	0.002
熱供給業	2.920	0.003
外洋輸送	4.186	0.003
廃棄物処理(産業)	2.362	0.004
塩	8.170	0.005
沿海・内水面輸送	3.400	0.005
航空輸送	2.545	0.006
天然ガス	0.782	0.012
石炭	1.874	0.012
鉄道貨物輸送	0.932	0.013
その他の教育訓練機関 (国公立)	0.852	0.013
浴場業	1.316	0.013
鉄道旅客輸送	0.684	0.013
不動産賃貸業	0.196	0.014
非鉄金属鉱物	1.242	0.015
沿岸・沖合・遠洋漁業	2.353	0.015
ハイヤー・タクシー	1.381	0.015
自然科学研究機関(国公立)	0.516	0.015

表 3.3 主な中間財の CO2 原単位と変動係数 (その 1)

連関表分類	CO2原単位 (t-C/百万円)	変動係数 (ケース1)	変動係数 (ケース2)
製材	0.454	0.240	0.702
合板	0.739	0.355	0.724
木材チップ	0.490	0.240	0.627
木製建具	0.636	0.121	0.475
洋紙・和紙	4.504	0.059	0.343
板紙	3.395	0.071	0.345
段ボール	2.209	0.065	0.645
塗工紙・建設用加工紙	2.082	0.105	0.460
複合肥料	1.956	0.171	0.483
ソーダ工業製品	5.800	0.124	0.355
硫酸	1.456	0.032	0.372
圧縮ガス・液化ガス	3.336	0.590	0.628
石油化学基礎製品	2.404	0.044	0.193
石油化学系芳香族製品	3.289	0.024	0.226
脂肪族中間物	2.877	0.126	0.509
環式中間物	3.046	0.082	0.353
合成ゴム	2.927	0.112	0.388
プラスチック製品	1.257	0.800	1.222
タイヤ・チューブ	1.594	0.119	0.449
板ガラス・安全ガラス	1.628	0.122	0.320
ガラス繊維・同製品	1.852	0.173	0.373
生コンクリート	6.156	0.036	0.547
セメント製品	2.652	0.107	0.536
炭素・黒鉛製品	2.961	0.285	0.498
研磨材	1.508	0.246	0.600
熱間圧延鋼材	6.013	0.096	0.658
鋼管	3.740	0.114	0.773
冷間仕上鋼材	4.142	0.095	0.739
めっき鋼材	3.018	0.173	0.761
鑄鍛鋼	2.779	0.213	0.610
鑄鉄管	3.279	0.128	0.375
鑄鉄品及び鍛工品(鉄)	4.222	0.202	0.369
銅	1.620	0.433	0.792
鉛(含再生)	4.847	0.052	0.156

表 3.3 主な中間財の CO2 原単位と変動係数 (その 2)

連関表分類	CO2原単位 (t-C/百万円)	変動係数 (ケース1)	変動係数 (ケース2)
亜鉛(含再生)	3.560	0.589	0.709
アルミニウム(含再生)	2.243	0.414	0.767
電線・ケーブル	0.999	0.311	0.679
伸銅品	1.317	0.229	0.617
アルミ圧延製品	1.629	0.332	0.825
非鉄金属鑄鍛造品	1.500	0.400	0.796
建設用金属製品	1.556	0.130	0.704
建築用金属製品	1.175	0.137	0.660
ガス・石油機器及び暖厨房機器	1.359	0.153	0.659
ボルト・ナット・リベット 及びスプリング	1.665	0.147	0.683
金属製容器及び製缶板金製品	1.426	0.190	0.721
配管工事付属品・ 粉末冶金製品・道具類	1.151	0.483	0.884
ボイラ	0.927	0.177	0.633
タービン	0.975	0.417	0.823

4. 自動車の製造段階の LCA

4.1 LCA 手法

本分析においては、自動車製造工程に投入されるものを大きく「物理的投入」と「非物理的投入」の2種類に分けて評価する。ここで「物理的投入」とは各種素材や各種部品の投入を指し、「非物理的投入」とは加工組立、輸送、サービスの投入を指す。対象とする自動車は大手自動車会社 A 社のセダン型小型自動車(1500cc)であり、2000 余の部品データを用いて製造ステージにおける LCA をおこなう。物理的投入による CO2 排出量の推計においては、2000 余の部品の各々と産業連関表の各素材部門との対応づけをおこなって、それらの素材としての必要量をベクトル F に格納する。その後、投入逆行行列 $(I - A)^{-1}$ 、CO2 排出原単位行列 C を掛けて、

$$C(I - A)^{-1}F \quad (4.1)$$

によって、素材製造時の CO2 排出量が求められる。また非物理的投入に伴う CO2 排出量は内山[3]を参考に、産業連関表によって求められる平均財に関する非物理的投入負荷の値を利用して求めている。具体的な手法は次のようである。

最終財 f 、サービス s 、エネルギー h 等の非物理的投入は、生産される財の物理量（例：構成素材の重量和、体積和）に依存するものと考えられる。これは例えば、財の生産に必要な輸送サービスの量は、生産する財の重量和もしくは体積和に比例して増大すると考えられることが根拠となる。非物理的投入が生産財の構成素材の重量和に比例するとした場合、エネルギーの波及効果も考慮し

て部門 f から部門 k への非物理的投入は次のように表せる.

$$(\text{部門 } f \text{ から部門 } k \text{ への非物理的投入}) = \frac{w_k}{w_{ave}} a_{fk} \quad (4.2)$$

同様に,

$$(\text{部門 } s \text{ から部門 } k \text{ への非物理的投入}) = \frac{w_k}{w_{ave}} a_{sk} \quad (4.3)$$

$$(\text{部門 } h \text{ から部門 } k \text{ への非物理的投入}) = \frac{w_k}{w_{ave}} a_{hk} \quad (4.4)$$

a_{ij} : 投入係数行列の ij 成分

w_k : k 部門に投入される自動車部品重量 (実データ)

w_{ave} : 産業連関表から求められる平均的自動車の重量

と表せる. これら式 (4.2), (4.3), (4.4) を最終需要ベクトル F と考えて, 式(4.1)に代入すれば非物理的投入分による CO_2 排出量及びその変動係数を算定することができる. なお w_{ave} は産業連関表の投入係数行列 A において, 物理的投入だけの波及を考え, 物理的な投入量以外の成分を 0 とおくような加工を施し, 改めて投入逆行列を計算することにより, 物理的な投入の波及だけの行列を考えて構成素材量を算定する.

4.2 プロセスの分解

部品製造プロセスは, 1) 車体, 2) 内燃機関, 部品, 3) タイヤ, 4) ガラス, 5) 電池, 6) 電気音響機器, 7) 電球類の 7 プロセスとし, 図 4.1 のように部品を分類して各プロセス毎の CO_2 排出量を算定する.

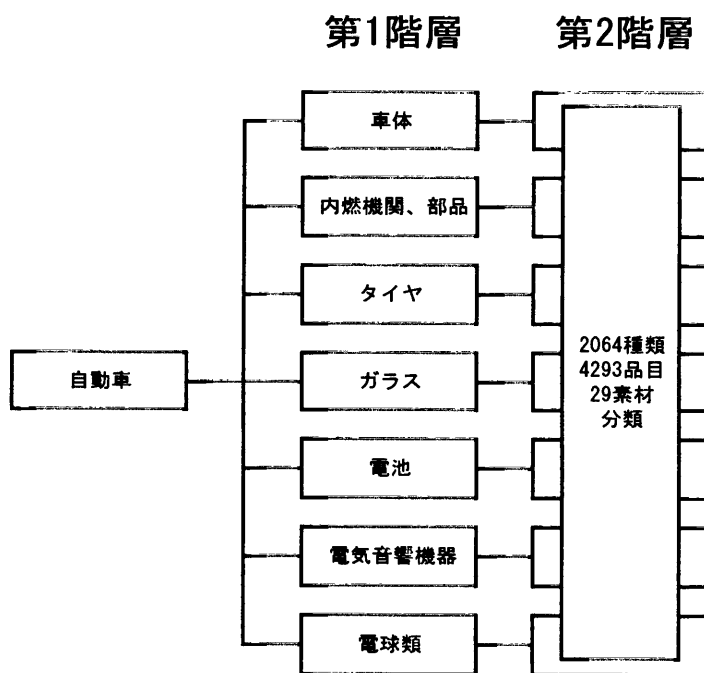


図 4.1 部品別素材データベース構成図

2000 余の部品を上記 7 カテゴリに分類し、それぞれの部品を産業連関の部門に対応づける。その結果、対象とする小型自動車の素材構成は表 4.2 のようにまとめられた。

表 4.2 部門別重量構成比

産業連関表分類	重量[kg]	構成比
その他の非食用耕種作物	1.387	0.13%
綿糸	0.075	0.01%
洋紙・和紙	0.140	0.01%
脂肪族中間物	7.098	0.66%
合成ゴム	13.517	1.25%
熱硬化性樹脂, 熱可塑性樹脂, 高機能性樹脂, その他の合成樹脂	99.035	9.16%
合成繊維	2.881	0.27%
塗料	4.705	0.44%
石油製品	16.733	1.55%
プラスチック製品	0.007	0.00%
タイヤ・チューブ	28.333	2.62%
板ガラス・安全ガラス	32.965	3.05%
炭素・黒鉛製品	0.112	0.01%
熱間圧延鋼材	406.237	37.57%
鋼管	8.899	0.82%
冷間仕上鋼材	169.756	15.70%
めっき鋼材	92.725	8.58%
鋳鉄品及び鍛工品(鉄)	110.547	10.22%
銅	12.180	1.13%
鉛(含再生)	8.300	0.77%
アルミニウム(含再生)	1.713	0.16%
その他の非鉄金属地金	0.235	0.02%
電線・ケーブル	1.739	0.16%
伸銅品	0.854	0.08%
非鉄金属鋳鍛造品	54.116	5.01%
その他の非鉄金属製品	0.265	0.02%
不明	6.609	0.61%
合計	1081.161	100%

4.3 ライフサイクル CO₂ 排出量の算定結果

ライフサイクル CO₂ 排出量の推計値を図 4.2 に示す。自動車製造ステージ全体を通しての CO₂ 排出量は約 1.27[t-C]と算定された。そのうち、物理的投入の素材製造プロセスが約 0.62[t-C]と全

体の 48%を占め、次いで非物理的投入の中間部品製造プロセス及び最終組立プロセスが約 25%ずつとなっている。7 部品の製造プロセス間で比較すると、「内燃機関、部品」製造プロセスが 0.68[t-C]と群を抜いているが、これは「内燃機関、部品」に分類される部品が、重量にして全体の約 75%、金額にして全体の約 59%と大部分を占めていることによると考えられる。自動車の製造ステージにおける CO₂ 排出量はその約半分が素材製造プロセスに起因しており、残りが加工組立時に投入される非物理的なエネルギーに起因している。自動車の製造ステージの中で、素材製造プロセスは自動車メーカーの直接的な範疇にはなく、その下請けの中小工場でのプロセスにあたる。つまり、自動車メーカーが製造ステージにおける CO₂ 排出量の削減を考えるのであれば、自社工場での省エネルギー政策も必要ではあるだろうが、それ以上に各部品の調達に関して細心の注意を払わなければならないということがわかる。

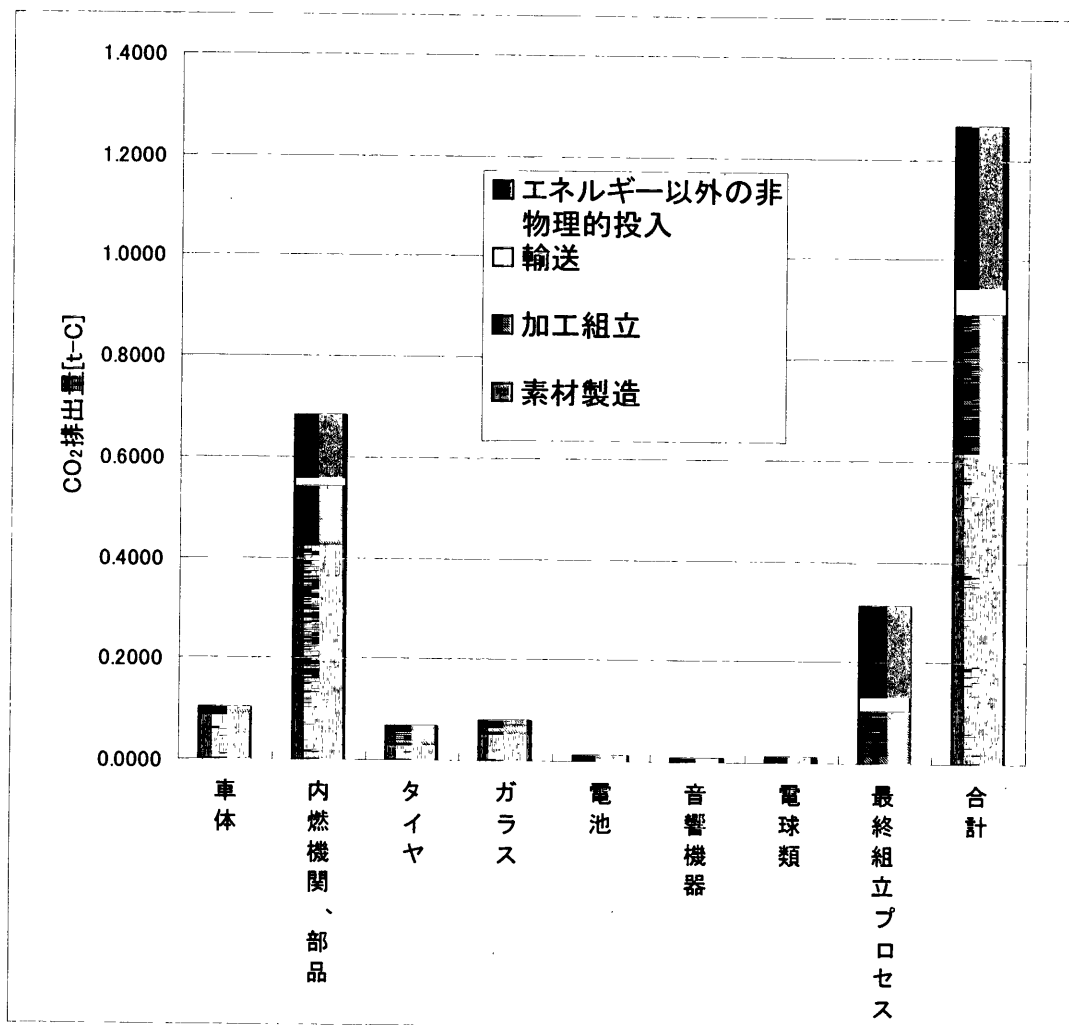


図 4.2 部品別・プロセス別 CO₂ 排出量

4.4 ライフサイクル CO₂ 排出量の変動係数

表 4.3 に部品別 CO₂ 排出量の変動係数を示す。ケース 1 における全体を通しての変動係数は

0.037 と非常に小さい数値が算定された。最も変動係数の大きく出た素材製造プロセスの音響機器部品でも 0.16 と、全体的に小さい。ケース 2 の全体を通しての変動係数は 0.126，中間部品製造プロセスでは平均して 0.212，最終組立プロセスでは 0.123 である。

表 4.3 中間部品・プロセス別 CO₂ 排出変動係数

	ケース 1	ケース 2
車体	0.041	0.231
内燃機関, 部品	0.063	0.196
タイヤ	0.055	0.188
ガラス	0.089	0.235
電池	0.039	0.106
音響機器	0.156	0.317
電球	0.062	0.210
最終組立プロセス	0.032	0.123
全体	0.037	0.126

製造ステージ全体を通しての変動係数が 0.126 であるということは、自動車製造ステージにおける CO₂ 排出量の母集団分布を簡単のため仮に正規分布であるとするならば、平均値に対して幅±12.6%の間に、約 68%の確率で値が存在するということになる。つまり、変動係数がこの程度に抑えられるならば、産業連関表を用いた自動車 LCA からもたらされる算定結果は一定の信頼性をもたらすものと評価できるであろう。ここで、変動係数の 0.126 は、ケース 2 において中間財の CO₂ 原単位の変動係数がおよそ 0.8 程度であったことから考えると、非常に小さい値である。この理由は自動車が多数の構成部品から組み立てられており、それら個別の部品についての CO₂ 原単位の変動は大きくても、全体としての自動車についての CO₂ 排出量の変動は小さくなることによる。したがって仮に構成部品の少ない財について、同様に産業連関表を利用して CO₂ 排出量を推計する場合には、逆に変動係数は自動車に比べてかなり大きくなる可能性があることに注意しなければならない。

5. おわりに

LCA において製品の環境負荷を求めるときに製造プロセスに沿って遡って環境負荷を評価する場合、上流に遡るほどデータの取得が困難であるため、国全体のマクロなデータである産業連関表が上流部分の評価にしばしば用いられている。他方において産業連関表に集約されるプロセスは平均財についてのプロセスであり、特定の財の LCA に対して多くの異質のものが平均化されている点で、LCA に産業連関表を用いることへの批判もある。このような背景から本稿では産業連関表のエネルギー投入に関する標本分布のデータを利用して、最終需要各財に誘発する CO₂ 原単位ならびにその標準偏差を推定した。LCA における上流プロセスの評価で対象となる素材により近い財ではケース 1 で 0.2 程度、ケース 2 で 0.8 程度である。

またケーススタディとして、実在のセダン型小型自動車(1500cc)を対象として製造段階におけるラ

ライフサイクル CO₂ を算定した。自動車製造ステージ全体を通しての CO₂ 排出量は約 1.27[t-C]と算定された。そのうち、素材製造プロセスが約 0.62[t-C]と全体の 48%を占め、次いで中間部品製造プロセス及び最終組立プロセスが約 25%ずつとなっている。また、すべての投入係数に変動を仮定した場合の全体を通しての変動係数は 0.126 となり、産業連関表を用いた自動車 LCA について一定の信頼性を与えることが可能となった。

参考文献

- [1]吉岡完治ほか、「産業におけるエネルギー消費構造の分析」, 科学研究費重点領域 A3 公募班報告書 (1998)
- [2]慶應義塾大学産業研究所, 「環境分析用産業連関表」(1996)
- [3]内山洋司「LCA 手法」, エネルギー・資源, Vol.17, No.6(1996)