

産業連関表によるCO₂排出原単位の誤差と ライフサイクルインベントリ分析の信頼性評価

Uncertainty of the Embodied CO₂ Emission Intensity and Reliability of Life Cycle Inventory
Analysis by Input-Output Approach

南 齋 規 介* · 東 野 達** · 笠 原 三 紀 夫***
Keisuke Nansai Susumu Tohno Mikio Kasahara

(原稿受付日2000年6月1日, 受理日2001年4月11日)

Abstract

CO₂ emissions inventories were compiled using the input-output tables for 1990 and 1995. We estimated 22 fuels (including limestone) input to each sector and evaluated the deviations of the embodied CO₂ emission intensity induced by the difference of fuel consumptions among various statistical tables. It was assumed that the direct emission intensity by each sector had accidental and systematic errors. In the former error, fuel consumption was assumed to obey the normal distribution with its mean of our estimated value and the standard deviation was estimated from the data scattering of various statistical tables. In the latter error, 5% of fuel consumption was assumed to be burnt only for sectors of no burning usage (material conversion). Uncertainty of the embodied emission intensity was determined by the error propagation rule and the relative error of the intensity was less than 30% except for agriculture, mining and food sectors.

Estimated error of the embodied emission intensity was used to calculate the uncertainty of LCCO₂ for a passenger car production. It was found that the total CO₂ emission was 0.844 t-C with an error of -4 to 10 %.

1. はじめに

ライフサイクルアセスメント(LCA)による製品・技術評価に取り組む企業や団体が多くなり、環境評価にライフサイクル思考を採り入れる重要性が認められつつある。今のところ、ライフサイクルインベントリ分析(LCI)までの評価にとどまることが多いが、LCAの実施は、家電製品や乗用車に代表される最終消費財に加え、新技術や新システムに関する事前評価にも応用できる。LCAは任意の財の生産プロセスにおいて発生する環境負荷量について、客観的・定量的な評価を目的とすることから、経営者や実務者のみならず我々自身が低環境負荷となる商品の選択やライフスタイルを考える場合にも、より適切な方向性を示す指標となろう。

現在、LCIは欧州等で開発されたLCAソフトや、各業界や研究機関から公表されている“単位あたりの生産に対し、直接・間接に誘発される環境負荷の大きさを表す係数”(ここでは原単位とよぶ)を併用して行われていることが

多い¹⁾。原単位には積み上げ法によるものと産業連関分析によるものがある。後者の原単位は、理論上全ての生産工程を遡って誘発された環境負荷を表し、LCIに費やす労力や時間が軽減できることから、多くのLCI事例で用いられている¹⁾。

原単位の値は財の生産プロセスに対する環境負荷の配分方法や^{2,3)}、リサイクル材、副生成物の投入による負荷量のアロケーションに関する考え方によって大きく左右されることから⁴⁾、当然、原単位を利用するLCIの結果も算出手法の影響を受ける。しかし、公開されている原単位は、紙面の都合などから推計過程と算出根拠が詳細に解説されていることが少なく、その原単位の利用者は自らのLCI結果を真に解釈することが難しい。ゆえに、LCIの基礎となる原単位データの提供者は、その作成根拠を明確にし、自らのデータの性質について十分な説明をする義務があると言えよう。

原単位データの性質を表す指標の一つとして、その値の信頼性について議論されつつある。JIS Q 14041によれば、公表文献からデータ収集した場合には、その出典を明記しなければならない。調査の結論に対して重要なデータで、文献から収集されたものに関しては、関連データの収集の手順、データの収集時期、およびデータ品質指標を詳述している公表文献を示さなければならないと記されている。データの品質としては、精度、完全性、代表性、整合性、

* 京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程
(現在(独)国立環境研究所 環境ホルモン・ダイオキシン研究プロジェクト所属 〒305-8506 つくば市小野川16-2)

** 京都大学大学院エネルギー科学研究科助教授

*** 教授

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

再現性などが要求されている。加えて、LCIにおける入力やデータの不確実性の蓄積効果によって生ずるLCI結果に関する不確実性分析の実施が望ましいと記述がある⁵⁾。LCAにおいて最も基本となる原単位の“確からしさ”が不明であれば、特に、LCAの結果に判断を委ねるような決定にとって、大きな障害となるであろう。

産業連関分析による原単位の信頼性は、①原燃料種の各部門への配分方法、②平均財として取り扱うことによる投入係数のばらつき^{6,7)}、③負荷量の推計に用いる統計データの精度、などに関係している。我々はこれまで産業連関表による原単位を作成し、その推計過程を可能な限り公開し、これを利用した事例研究を報告してきた⁸⁻¹⁰⁾。しかし、原単位の性質や事例結果の確からしさについて多くを言及しておらず、原単位公表者としての責務を果たしていない。そこで本研究では、我々が産業連関分析法により算出した原単位の誤差について、負荷量の推計に用いる統計データの精度からの評価を加え、LCIの結果に対する信頼性の検討を行った。

2. CO₂排出原単位の推計

2.1 推計方法と諸条件

産業連関表による原単位は、各部門の単位生産額（百万円）あたりの直接環境負荷量にレオンチェフ逆行列を乗じて算出される。部門*i*における直接環境負荷量 D_i は特にCO₂の場合に式(1)から求めることができる。

$$D_i = \sum_k (f_k q_k t_k m_k) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 k はCO₂の排出と関連する原燃料の種類、 f_k はCO₂

表1 原燃料種別発熱量とCO₂排出係数

原燃料種名	発熱量	単位	CO ₂ 排出係数	単位
石灰石	-	t-C/t	0.12	t-C/t
原料炭	0.76	10 ⁷ kcal/t	0.99	t-C/10 ⁷ kcal
一般炭・亜炭・無煙炭	0.62	10 ⁷ kcal/t	1.0344	t-C/10 ⁷ kcal
原油	0.925	10 ⁷ kcal/t	0.7811	t-C/10 ⁷ kcal
LNG・天然ガス	1.3	10 ⁷ kcal/t	0.5639	t-C/10 ⁷ kcal
揮発油	0.84	10 ⁷ kcal/t	0.7658	t-C/10 ⁷ kcal
ジェット燃料油	0.86	10 ⁷ kcal/t	0.7665	t-C/10 ⁷ kcal
灯油	0.89	10 ⁷ kcal/t	0.7748	t-C/10 ⁷ kcal
軽油	0.92	10 ⁷ kcal/t	0.7839	t-C/10 ⁷ kcal
A重油	0.93	10 ⁷ kcal/t	0.7911	t-C/10 ⁷ kcal
B重油・C重油	0.98	10 ⁷ kcal/t	0.818	t-C/10 ⁷ kcal
ナフサ	0.8	10 ⁷ kcal/t	0.7605	t-C/10 ⁷ kcal
LPG	1.2	10 ⁷ kcal/t	0.6833	t-C/10 ⁷ kcal
コークス	0.72	10 ⁷ kcal/t	1.23	t-C/10 ⁷ kcal
コークス炉ガス	0.48	10 ⁷ kcal/10 ³ Nm ³	0.46	t-C/10 ⁷ kcal
都市ガス(1995年)	1	10 ⁷ kcal/10 ³ m ³	0.5572	t-C/10 ⁷ kcal
都市ガス(1990年)	1	10 ⁷ kcal/10 ³ m ³	0.5655	t-C/10 ⁷ kcal
高炉ガス・転炉ガス	88.8	10 ⁷ kcal/10 ⁶ m ³	1.23	t-C/10 ⁷ kcal
石油系炭化水素ガス(含製油所ガス)	0.94	10 ⁷ kcal/10 ³ m ³	0.5924	t-C/10 ⁷ kcal
回収黒液 ⁹⁾	0.3	10 ⁷ kcal/総乾t	1.075	t-C/10 ⁷ kcal
廃材 ⁹⁾	0.3	10 ⁷ kcal/総乾t	1.075	t-C/10 ⁷ kcal
炭化水素油	0.98	10 ⁷ kcal/t	0.88	t-C/10 ⁷ kcal
石油コークス	0.85	10 ⁷ kcal/t	1.0612	t-C/10 ⁷ kcal

* バイオマス起源のためCO₂排出量としては含めない

排出係数 (t-C/10⁷kcal)、 q_k は発熱量 (10⁷kcal/単位物量)、 t_{ik} は原燃料の燃焼用途率 (石灰石の場合は非原料用率)、 m_k は原燃料種の投入物量である。部門*i*の原単位 e_i は、式(2)のように D_j を国内生産額 G_j で除した単位生産額あたりの直接排出量 d_j (t-C/百万円) から導かれる。ただし、 b_{ji} はレオンチェフ逆行列の要素を示す。

$$e_i = \sum_j b_{ji} D_j / G_j = \sum_j b_{ji} d_j \dots\dots\dots (2)$$

本研究では、原燃料種として石灰石を含む22種の物質を対象に産業連関表の各部門の投入量を推計した。基本的に物量表を中心に部門別投入量を決定したが、各種統計表と比較し物量表の値が大きく異なる場合は補正を行った。燃焼用途率 t_{ik} はエネルギー転換用や原料用と考えられる場合は0とし、他は全て1と設定した。原燃料種の部門別投入

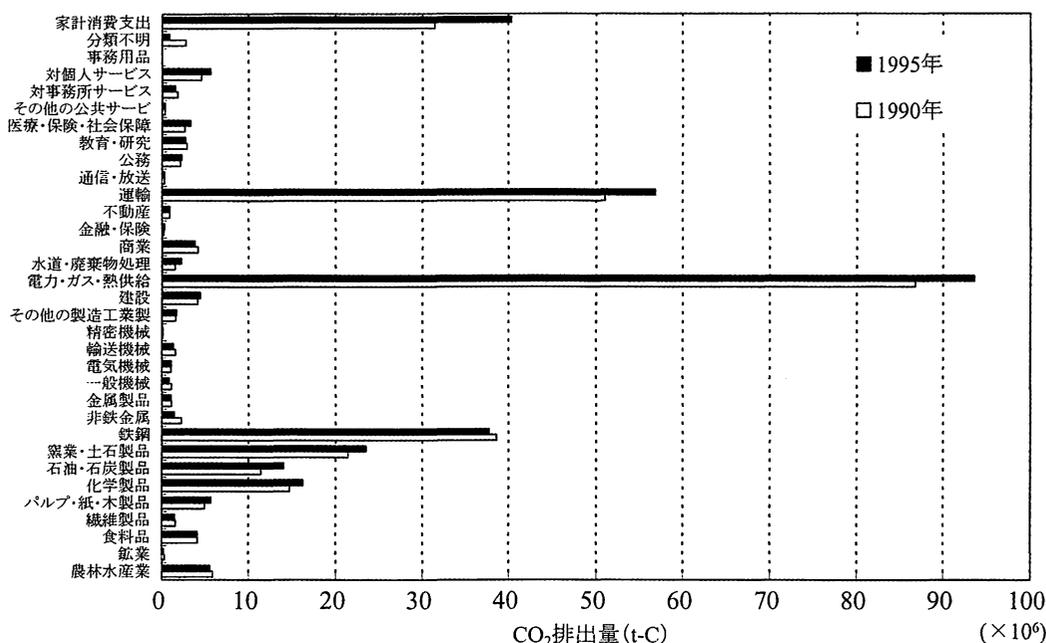


図1 部門別直接CO₂排出量の年次比較

表2 CO₂排出原単位の上位10部門の年次比較

1990年表			1995年表			
列コード	部門番号	部門名	列コード	部門番号	部門名	
		原単位 (t-C/百万円)			原単位 (t-C/百万円)	
252101	167	セメント	252101	157	セメント	
261101	176	鉄鉄	261101	166	鉄鉄	
511104	303	自家発電	511104	293	自家発電	
261103	178	粗鋼(転炉)	261103	168	粗鋼(転炉)	
201101	118	アンモニア	714101	316	外洋輸送	
111705	63	塩	201101	111	アンモニア	
714101	327	外洋輸送	261102	167	フェロアロイ	
261102	177	フェロアロイ	6.824	202903	116	塩
511101	302	事業用電力	6.330	262101	171	熱間圧延鋼材
262101	181	熱間圧延鋼材	6.182	252201	158	生コンクリート
		23.091			29.804	
		18.886			26.754	
		16.879			17.720	
		11.202			13.035	
		10.117			10.675	
		7.891			10.204	
		7.688			9.656	
		6.824			7.171	
		6.330			7.037	
		6.182			6.429	

量に関する詳細な記述は既報¹⁰⁾を参照されたい。

部門数は1995年表の基本分類を統合して399部門とし、CO₂排出量の算出には表1に示す値を使用した。ただし、高炉ガス(BFG)の排出係数は実際の組成に基づくものではなく、カスケード利用分を熱量に応じて按分するため²⁾、コークスと同じ値を用いた。また、式(2)における b_{ji} は $(I-A)^{-1}$ 型逆行列の各要素である場合、得られる原単位は輸入財に関する負荷を国内生産の場合と同等と仮定した値となる。以下に記述する原単位の値は全て $(I-A)^{-1}$ 型である。

2.2 部門別直接排出量と原単位

上述の手法により算出された部門別直接CO₂排出量を集計すると、1995年産業連関表における内生部門のCO₂排出量は2.94億t-Cとなり、家計消費での燃料消費による排出量は0.40億t-Cとなった。1990年産業連関表を用いて同手法で推計した場合、内生部門が2.77億t-C、家計消費は0.31億t-Cとなることから、総計で0.27億t-C、約8.6%の増加であったことが確認できた。原燃料種別に見ると、1995年は石油系燃料の寄与が55%を占め、石炭系が26%、天然ガス・都市ガスが15%となり、石灰石起源の影響は5%であった。また、図1に示すように、総排出量に対する部門別の寄与は32部門へ統合した場合、「電力・ガス・熱供給」部門が28%、「運輸」部門が17%、「鉄鋼」部門が11%を占め、1990年と比較し鉄鋼部門が減少し、家計消費が伸びている。

次に、原単位を値の大きい上位10部門を1990年、1995年について、それぞれ表2に示す。「セメント」、「鉄鉄」、「自家発電」、「粗鋼(転炉)」の上位4部門に入れ替わりはなく、全体としても順位の変動は小さい。

3. 排出量推計誤差とLCI結果

ここで、得られた原単位をLCIに利用することを踏まえ、数値の“確からしさ”について、一つの指標を示すことを考える。

原単位の不確実性に関する研究では、吉田ら⁶⁾が部門内での燃料使用額のばらつきを基に、6種の燃料に関する投入係数に分布を与え、原単位の変動係数を求めている。また、酒井ら⁷⁾は投入係数の不確実性の定量化に、投入係数の分布を必要としない摂動法を導入し、原単位の感度分析を行っている。これらの研究は図2に示すよう、特に投入

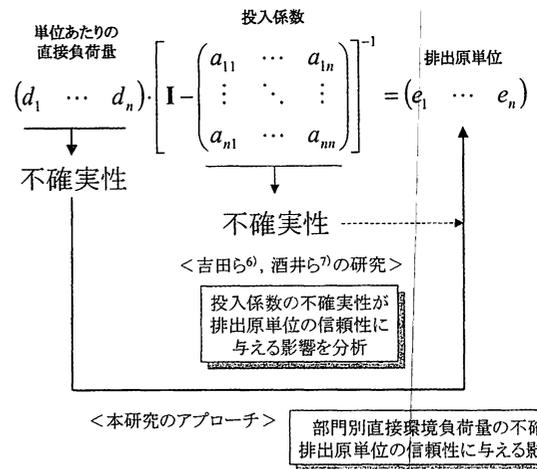


図2 本研究と先行研究における原単位誤差分析へのアプローチ

係数の不確実性に着目して分析している。

一方、本研究は各部門の直接排出量の推計に関する不確実性に立脚し、原単位の信頼性を考察した。直接排出量の不確実性は、厳密には排出量推計の基礎となる、各部門における原燃料関連の投入係数の不確実性に間接的に結びついている。しかし、各部門の原燃料種消費量のばらつきは、投入係数を形成する生産額の不確実性によるものよりも、LPGに代表されるような、部門内または部門間における購入単価の違いが強く影響を及ぼしていると考えられる。ゆえに、本研究では、各部門の原燃料消費量の不確実性を、同時に、投入係数、すなわち各部門の燃料消費に関する生産額に反映させることは行っていない。

また、原単位をLCIに応用する場合は、分析対象の構成素材などを積み上げ式的に調査し、各素材に該当する部門の原単位に素材量に相当する生産額を乗じる形で利用することが多い。すると、個々の原単位の誤差が集積され最終的なLCIの結果に影響する。そこで、本研究では、こうした積み上げ法によるLCIのインベントリデータとして、産業連関表による原単位を用いた場合、各々の原単位の誤差が与えるLCIへの影響を定量的に示すことを併せて試みた。

3.1 原単位の信頼性の尺度

データの質を表現する尺度として精度と確度の二つがあげられる。化学分析などの分野では、精度は偶然誤差の大きさ、または偏差の大きさを問題とし、確度は系統誤差をも含めた誤差全体の大きさを問題とする¹¹⁾。一般的に偶然誤差とは多数の微小な原因の効果の集積した結果として、不規則に生じる誤差を意味し、系統誤差とは何らかの原因によって、その値に偏りを与えるものをいう。

ここで、原単位の値に含まれ得る誤差の発生原因を確認し、誤差の種類を定義する。原単位は先の式(1)、式(2)より求められるが、原単位を平均財としての扱いに限定し、投入係数の変動要因を考えず、レオンチェフ逆行列 b_{ji} お

よび国内生産額 G_i は誤差を含まないと仮定すると、 D_i すなわち、式(1)において誤差が発生する。さらに、 f_i および q_k については、公表値により原燃料種によって-2~6%程度の違いが見られるが¹²⁾、理論的、実験的にも客観性の高い数値であり、他の変数と比較しその不確定性は無視できることから、 t_k および m_k の設定に伴って誤差が生ずる。

我々の原単位の推計では、燃焼用途率 t_k は0または1のどちらか一方の値を与えており、実態がこれらの中間的な値である場合には、単位あたりの直接排出量 d_i を過大または過小に推計する。一方、投入物量 m_k は各種統計表から推計されるが、統計表によってその値はばらついており、本研究では各統計表の性質等を考え、妥当と考える値を採用している。また、業種統計では産業連関表の基本分類である約400部門に応じた投入物量の記載はないため、 m_k のうち幾つかは業種統計より得られる大枠での投入量を参考に、国内総消費量との整合性を保ちながら約400部門への配分を行っている。こうした作業の結果、各部門における m_k の値は不規則な誤差を含むと考えられる。

これらの誤差の性質から、本研究では便宜上、投入物量 m_k による単位あたりの直接排出量 d_i への誤差を偶然誤差、 t_k により生ずる d_i の誤差を系統誤差と仮定して検討を進めた。

3.1.1 偶然誤差の性質

一般に、偶然誤差を含む値の分布は式(3)の正規分布で表すことができる¹³⁾。

$$f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right\} dx \dots\dots\dots(3)$$

本研究では、単位あたりの直接負荷量の偶然誤差に関する分布を推計するため、各種統計表等¹⁴⁻¹⁸⁾に掲載されている投入物量 m_k の相違から生ずる、幾つかの異なる単位あたりの直接排出量に関する母平均 \bar{x}_i および標本平均 \bar{x}_i が、我々の推計した d_i と等しいと仮定した。(実際には我々の

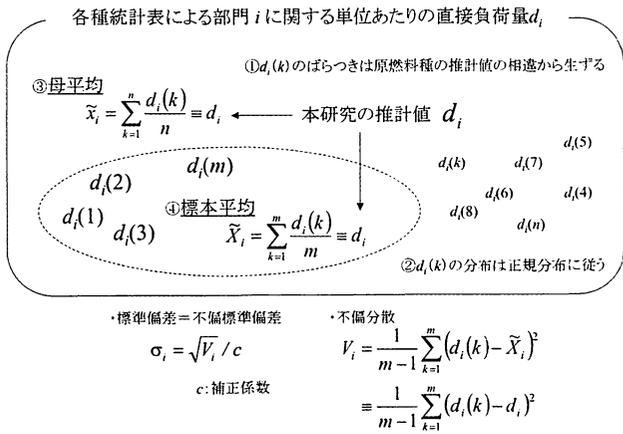


図3 本研究で設定した偶然誤差の推計に関する仮定

表3 部門別CO₂排出量の相対誤差

部門名	本推計値 ^{*)} (t-C)	調査した統計との相対誤差	
		過大	過小
農林水産業	5,496,883	74.6%	-
鉱業	296,745	149.1%	-
食料品	4,262,594	-	-29.7%
繊維製品	1,465,840	43.7%	-
パルプ・紙・木製品	8,089,911	-	-30.9%
化学製品	19,964,459	-	-19.5%
石油・石炭製品	14,600,065	12.5%	-
窯業・土石製品	24,126,130	-	-3.5%
鉄鋼	39,633,622	12.5%	-4.8%
非鉄金属	1,665,651	32.4%	-
金属製品	1,059,437	-	-18.2%
一般機械	850,768	-	-16.8%
電気機械	1,113,095	14.2%	-4.0%
輸送機械	1,379,007	42.7%	-4.8%
精密機械	118,608	-	-8.2%
その他の製造工業製品	1,797,188	-	-7.2%
建設	4,390,167	19.1%	-
電力・ガス・熱供給	82,911,060	7.9%	-

*自家発電分を含む

推計値は各種統計表の平均値ではない) 標準偏差 σ_i は式(4)のように不偏標準偏差を代用し、不偏分散 V_i は本研究で調査した統計表で記載されている m_k を採用した場合に取りうる単位あたりの直接排出量と本推計値 d_i とのばらつきから定めた。

$$\sigma_i = \sqrt{V_i} / c \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$c = \sqrt{2/(n-1)} \cdot [\Gamma(n/2) / \Gamma((n-1)/2)] \dots\dots\dots(5)$$

Γ はガンマ関数である。本研究における偶然誤差の推計に関する仮定を図3にまとめる。また、表3に本推計による部門別直接排出量 D_i を大分類に統合した値が、調査した統計のばらつきを考慮した場合に取りうる相対誤差について、過大側および過小側の値を示す。

3.1.2 系統誤差の性質

系統誤差は、結果にある一定のかたよりを与え、その程度が判明すれば修正可能な誤差である¹⁹⁾。原単位の推計過程において、原燃料種の燃焼用途率 t_k を正確に設定することは非常に困難である。本研究で用いた0または1のいずれかの値を設定する方法では特に、 t_k を0とした原燃料種が投入されている石油製品、化学製品部門において、原材料から製品への転換効率を過大に評価する。ゆえに、当該部門の単位あたりの直接排出量 d_i は、真の t_k 値を与えた場合の d_i^{real} より若干過小側へ傾斜する。本稿では我々の推計値 d_i と d_i^{real} の差を系統誤差 Δd_i として扱った。

$$\Delta d_i = d_i^{real} - d_i \dots\dots\dots(6)$$

ここでは、公表統計¹⁴⁾における原燃料種のエネルギー転換部門自家消費量を参考に、燃料種の燃焼用途率 $t_k = 0$ としている箇所において、5%を最大誤差と見積もり、 $t_k = 0.05$ とした場合を d_i^{real} と仮定した。

3.2 原単位への誤差伝播¹⁹⁾

3.2.1 偶然誤差と原単位との関係

単位あたりの直接排出量 d_i の含む誤差は、式(2)より原

単位 e_i へと伝わる。ここでは、 e_i の誤差はGaussの誤差伝播法則に従うとする。誤差伝播法則によれば直接測定される x_1, x_2, \dots, x_n がそれぞれ、分散 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$ の互いに独立な偶然誤差を持つ場合、式(7)の関数関係にある間接測定値 X の偶然誤差の分散 σ_x^2 は式(8)となる。

$$X = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_i (\partial g / \partial x_i)^2 \sigma_i^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、直接排出量 d_i についての σ_i^2 と σ_j^2 は互いに独立と仮定すると、式(2)から原単位 e_i の誤差の分散 $\sigma [e_i]^2$ は式(9)となる。

$$\sigma [e_i]^2 = \sum_j b_{ij}^2 \sigma_j^2 \dots\dots\dots (9)$$

3.2.2 系統誤差と原単位の関係

直接測定値の系統誤差を $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ とするとき、間接測定値 X の系統誤差 ΔX は、式(10)から求めることができる。

$$\Delta X = \sum_i (\partial g / \partial x_i) \Delta x_i \dots\dots\dots (10)$$

先と同様に、式(2)より原単位 e_i の系統誤差 Δe_i は式(11)から決定される。

$$\Delta e_i = \sum_j b_{ij} \Delta d_j \dots\dots\dots (11)$$

3.2.3 誤差の合成

本稿では、偶然誤差と系統誤差を含めた誤差範囲を最大誤差（信頼係数99%）の形で示す。原単位の偶然誤差が正規分布に従い、系統誤差が正と判断できることから、原単位の真値 e_i^{real} は式(12)の領域（信頼領域とよぶ）に存在すると考えられる。ここで領域の境界をそれぞれ、 $Min(e_i)$ 、 $Max(e_i)$ とする。

$$e_i - 2.58 \sigma [e_i] + \Delta e_i < e_i^{real} < e_i + 2.58 \sigma [e_i] + \Delta e_i \dots\dots (12)$$

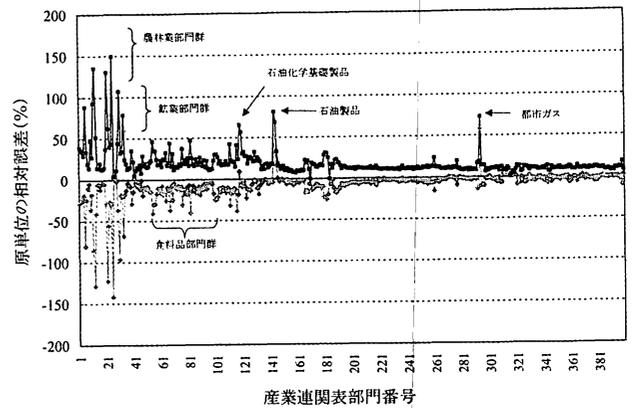


図4 信頼領域内におけるCO₂排出原単位の相対誤差

$$Min(e_i) < e_i^{real} < Max(e_i) \dots\dots\dots (13)$$

3.3 LCI結果への誤差伝播

産業連関表による原単位を用いたLCI手法の一つに、分析対象財 T の生産者価格を財の素材構成や生産プロセスを考慮し、産業連関表の部門 i に関する投入価格 p_i の総和として求め、それぞれ対応する e_i を乗じる方法がある。製品を対象とした分析では、投入価格 p_i が既知であることが多いため、この作業は比較的容易である。このとき、直接、間接に発生する環境負荷量を含む原単位の性質から、財 T に関する環境負荷量 L_T は式(14)より求められる。

$$L_T = \sum_i p_i e_i \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 e_i の誤差の分散 $\sigma [e_i]^2$ がそれぞれ独立であると仮定すると、環境負荷量 L_T の系統誤差 ΔL_T と分散 $\sigma [L_T]^2$ は、先と同様に式(15)、式(16)からそれぞれ決定される。

$$\Delta L_T = \sum_i p_i \Delta e_i \dots\dots\dots (15)$$

$$\sigma [L_T]^2 = \sum_i p_i^2 \sigma [e_i]^2 \dots\dots\dots (16)$$

表4 1995年CO₂排出原単位の信頼領域における相対誤差(一部抜粋)

列コード	部門番号	部門名	原単位 (t-C/百万円)	相対誤差 (%)	$\sigma [e]$	Δe
181101	99	パルプ	2.738	-17.4 ~ 22.7	0.212	0.073
181201	100	洋紙・和紙	3.040	-25.0 ~ 29.5	0.321	0.069
181202	101	板紙	3.249	-25.1 ~ 30.1	0.347	0.082
201101	111	アンモニア	10.204	-31.8 ~ 42.3	1.467	0.534
201102	112	化学肥料	2.221	-15.1 ~ 22.6	0.162	0.083
202101	113	ソーダ工業製品	4.793	-16.6 ~ 20.9	0.349	0.104
203101	118	石油化学基礎製品	5.100	9.1 ~ 65.6	0.558	1.904
203102	119	石油化学系芳香族製品	5.093	-6.6 ~ 57.0	0.628	1.284
203201	120	脂肪族中間物	3.908	-9.3 ~ 30.9	0.304	0.422
203202	121	環式中間物	3.606	-2.9 ~ 32.8	0.250	0.539
261101	166	銑鉄	26.754	-17.5 ~ 22.6	2.076	0.686
261102	167	フェロアロイ	9.656	-14.7 ~ 19.2	0.633	0.217
261103	168	粗鋼(転炉)	13.035	-16.9 ~ 21.7	0.975	0.314
261104	169	粗鋼(電気炉)	3.835	-6.5 ~ 11.5	0.134	0.096
262101	171	熱間圧延鋼材	7.037	-13.5 ~ 18.9	0.442	0.188
262201	172	鋼管	3.992	-10.9 ~ 17.4	0.219	0.129
262301	173	冷間仕上鋼材	4.270	-10.8 ~ 16.9	0.229	0.129
262302	174	めっき鋼材	2.661	-7.2 ~ 14.4	0.111	0.096
263101	175	鑄鉄鋼	3.420	-7.0 ~ 13.9	0.139	0.119
263102	176	鑄鉄管	2.823	-8.8 ~ 15.2	0.131	0.091
263103	177	鑄鉄品及び鍛工品(鉄)	4.525	-9.3 ~ 16.7	0.228	0.166
264901	178	鉄鋼シャースリット業	3.252	-11.4 ~ 17.2	0.181	0.094

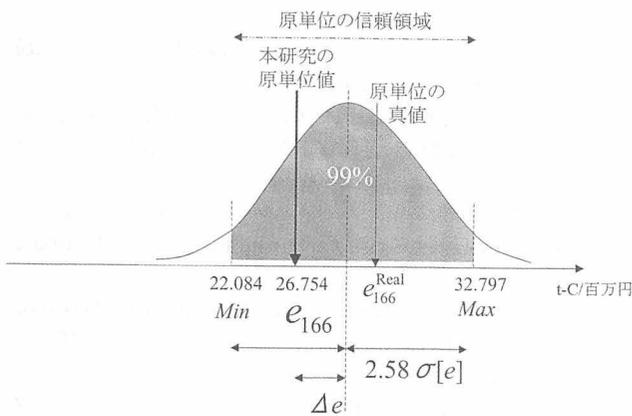


図5 「鉄鉄」部門のCO₂排出原単位と信頼領域の関係

4. 結果と考察

4.1 原単位の信頼領域

図4に1995年の産業連関表399部門について、我々が算出した原単位 e_i の信頼領域における相対誤差を示す。また、表4に主な部門のCO₂排出原単位に関する標準偏差 $\sigma[e]$ 、系統誤差 Δe_i および相対誤差を記す。

図4では農林業関連部門のうち、いくつかの部門の原単位が非常に大きな相対誤差を含む可能性を示しているが、これは農林業関連における単位あたりの直接排出量 d_i の分散が非常に大きいためであり、各種統計表における軽油、灯油の消費量の違いが主な原因である。活動ベースの産業連関部門分類に対し、他統計は業種分類であることから、実際は家計消費であった燃料分を農林業として含んでいる疑いもあり、我々の推計値とのずれが拡大している。したがって、業種統計における燃料消費先の区分を明確にすれば、本推計値の信頼領域は縮小すると考えられ、今後見直しを図る必要がある。

鉱業関連部門では、軽油および重油の消費量に関して統計表間の違いがあり、原単位の相対誤差が大きい。産業連関表では、自家用貨物輸送等の運輸関連部門に含まれる産

業活動に関する消費量の一部が、他統計では鉱業部門に計上されていることが要因の一つと考えられる。

また、食料品関連部門も比較的誤差の大きい部門が存在する。農林業の誤差が大きいことから、経済的連関の強い食料品部門へ、その誤差が伝播している。しかし、他の工業部門への投入は小さいため、工業関連部門の原単位の相対誤差は30%程度に収まっている。

d_i に系統誤差を有する部門は、偶然誤差の影響より、系統誤差による誤差の拡大が確認できた。例えば、ナフサからエチレンの生産を行う「石油化学基礎製品」、原油からの石油製品へ転換する「石油製品」部門では、燃焼用途率 t_{ik} の5%過小評価により生ずる系統誤差が、伝播による系統誤差の影響を含めてそれぞれ、原単位の約38%、65%に相当する誤差を生じた。

表4から個々の原単位を考察する。我々の推計による単位あたりの直接排出量 d_i を母平均および標本平均とした場合、「鉄鉄」部門の原単位 e_{166} は、図5のように22.084 (t-C/百万円) から32.797 (t-C/百万円) の間に真の値 e_{166}^{Real} が99%の信頼確率で存在すると解釈できる。換言すれば、原単位26.754 (t-C/百万円) は-17%~23%の誤差を含む値と理解することができる。しかし、「石油化学基礎製品」のように系統誤差が大きいものは原単位が5.100 (t-C/百万円) に対して、信頼領域が5.564~8.444 (t-C/百万円) となっており、燃焼用途率 t_{ik} の実態反映が原単位精度の向上に不可欠であると言える。

4.2 LCI結果の誤差（乗用車生産を例として）

各原単位を利用しLCIを行った場合、分析結果が含み得る誤差を乗用車の生産を例に検討した。乗用車の平均的な構成素材²⁰⁾と産業連関表の部門対応をとり、該当する原単位に、構成素材重量に相当する生産額を乗じてCO₂排出量を求め、素材の加工、組み立てに関する負荷を別途加算した。なお、乗用車の車重を1,000kgとし、素材重量を定めた。構成素材と対応した原単位 e_i に関する諸数値および生

表5 乗用車の構成素材該当部門の諸値

列コード	部門名	生産額 (百万円)	原単位 (t-C/百万円)	相対誤差(%)	$\sigma[e]$	Δe
151102	紡績糸	0.0057	1.104	-11.5 ~ 19.4	0.066	0.044
161102	合板	0.0000	0.675	-3.5 ~ 14.9	0.024	0.039
204101	熱硬化性樹脂	0.0039	2.407	-4.2 ~ 21.3	0.119	0.206
204102	熱可塑性樹脂	0.0076	3.438	-0.9 ~ 32.8	0.225	0.548
204109	その他の合成樹脂	0.0008	3.488	-11.2 ~ 26.2	0.253	0.263
207201	塗料	0.0053	1.359	-0.3 ~ 17.5	0.047	0.117
231101	タイヤ・チューブ	0.0155	1.440	-3.0 ~ 15.5	0.052	0.090
251101	板ガラス・安全ガラス	0.0283	1.512	-3.7 ~ 9.0	0.037	0.040
261101	鉄鉄	0.0003	26.754	-17.5 ~ 22.6	2.076	0.686
262101	熱間圧延鋼材	0.0462	7.037	-13.5 ~ 18.9	0.442	0.188
262201	鋼管	0.0017	3.992	-10.9 ~ 17.4	0.219	0.129
262301	冷間仕上鋼材	0.0079	4.270	-10.8 ~ 16.9	0.229	0.129
262302	めっき鋼材	0.0177	2.661	-7.2 ~ 14.4	0.111	0.096
271101	銅	0.0035	1.383	-22.3 ~ 28.4	0.136	0.042
271102	鉛・亜鉛(含再生)	0.0007	2.555	-23.7 ~ 31.2	0.272	0.095
271103	アルミニウム(含再生)	0.0352	1.643	-25.3 ~ 30.5	0.178	0.043
271109	その他の非鉄金属地金	0.0005	1.268	-19.3 ~ 25.3	0.110	0.038

参考文献

産額 p_i を表 5 に示す。

式(15), (16)より乗用車の素材に関する $\sigma [L_i]$, ΔL_i を求めると、共に0.022となった。CO₂排出量は0.603t-Cとなり、この信頼領域は式(12)から0.569t-Cから0.681t-Cと計算できる。また、素材の加工や組み立てに関する排出量は0.282t-Cであり、その信頼領域は0.261t-Cから0.313t-Cとなった。すなわち、乗用車生産に関するLCIを行った場合、原単位の誤差によってCO₂排出量0.884t-Cは、信頼領域を考慮すると0.850t-Cから0.974t-Cの幅を持ち、相対誤差を-4%から10%有すると考えられる。産業連関表の「乗用車」部門原単位の相対誤差は-3%から11%であり、おおよそ一致する結果となった。

5. おわりに

本研究では産業連関表による原単位の“確からしさ”を考慮し、原単位を利用したLCI結果の信頼性を検証した。しかし、原単位誤差の試算にあたり、偶然誤差と系統誤差の定義、我々の推計値を平均することに加え、各部門の排出量の変動が部門間で無相関であるなど多くの仮定を設けた。今後は仮定の妥当性を検討するとともに、より客観かつ包括的な評価手法へと改良することが必要である。そのためには、部門別直接環境負荷量の誤差と、各部門における原燃料種に関する投入係数の不確実性との関連性を定量的に明らかにし、両者の相乗的な原単位への影響を分析することが不可欠であろう。また、本研究では原単位を全て小数第3位まで記したが、有効数字の検討も原単位の信頼性において取り組むべく課題といえる。

LCIを目的とした産業連関表による原単位は燃料消費量等の推計や産業連関表の構造上の問題から原単位の不確実性は避けられない。現在、複数の機関から原単位が公表されているが、用いるものによってLCIの結果が異なるのが実状である。一方で原単位の利用は積み上げ法と比較しLCIに要する労力を軽減することができるため、積極的に利用したいものである。原単位の表記方法にある一定の書式を整え、いかなる機関から公表されている原単位を用いても、普遍的なLCI結果の解釈が行えるよう整備しなければならないと考える。

謝辞 本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「環境負荷低減を目的とした自律分散型都市エネルギーシステム」プロジェクト (JSPS-RFTF97P01002) の研究費によって実施された。なお、本論文をまとめるにあたり、査読者の方々はもとより、独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究領域資源管理研究室長 森口祐一博士に貴重なコメントを頂いたことを付記する。

- 1) 森口祐一, インベントリ分析のための環境負荷原単位, 水環境学会誌, 23 (2000), pp.63-72
- 2) 森口祐一・近藤美則, 資源輸入に伴う環境負荷の定量化と負荷の配分方法がLCIに与える影響の分析, 日本エネルギー学会誌, 77 (1998), pp.1062-1069
- 3) Edgar Furuholt, Life cycle assessment of gasoline and diesel, Resources, Conservation and Recycling, 14 (1995), pp.251-263
- 4) Seungdo Kim・Taeyaun Hwang, Kun M. Lee, Allocation for Cascade Recycling System, Int.J.LCA 2-4 (1997), pp.217-222
- 5) 平河喜美男, JIS Q 14041環境マネジメント・ライフサイクルアセスメント-目的及び調査範囲の設定並びにインベントリ分析, 財団法人 日本規格協会 (2000)
- 6) 吉田好邦・石谷 久・松橋隆治・大熊裕之, LCAの感度分析-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て-, 第16回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2000), pp.61-66
- 7) 酒井信介・丹野史朗・本藤祐樹, 摂動法の導入による産業連関分析の感度分析, 第16回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2000), pp.67-72
- 8) 南齋規介・東野 達・笠原三紀夫・森口祐一, 産業連関表によるエネルギー消費と大気環境負荷から見たインベントリ分析, 第14回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (1998), pp.203-208
- 9) 南齋規介・森口祐一・東野 達・笠原三紀夫, 平成7年産業連関表によるCO₂排出強度の算出と平成2年値との比較解析, 第16回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2000), pp.339-344
- 10) 森口祐一・南齋規介編集, 産業連関表によるエネルギー・二酸化炭素排出原単位'95 (β版) (2000), <http://aerosolenergy.kyoto-u.ac.jp/lca/I-Otable/public.html>
- 11) 社団法人 日本化学会, 新実験化学講座1-基本操作II, 丸善株式会社 (1975), pp.903-908
- 12) 近藤美則, 二酸化炭素の排出構造の分析と排出抑制対策の評価に関する研究, 神戸大学博士論文 (1996)
- 13) 社団法人 日本化学会, 化学総説-NO.10-化学における精密測定, 株式会社 学会出版センター (1976)
- 14) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編, 総合エネルギー統計 (平成11年度版) (2000)
- 15) 通商産業大臣官房調査統計部編, 平成7年石油等消費構造統計年報 (1996)
- 16) 通商産業大臣官房調査統計部編, 平成7年エネルギー生産・需給統計年報 (1996)
- 17) 通商産業大臣官房調査統計部編, 平成7年鉄鋼統計年報 (1996)
- 18) 運輸省運輸政策局情報管理部編, 平成10年版運輸関係エネルギー要覧 (1998)
- 19) 吉澤康和, 新しい誤差論 実験データ解析法, 共立出版株式会社 (1989)
- 20) 日本自動車工業会資料