

研究論文

産業連関表を用いて推計されたCO₂排出原単位の感度分析Sensitivity Analysis of CO₂ Emission Factors Estimated Using an Economic Input-Output Table

本 藤 祐 樹*・酒 井 信 介**・丹 野 史 郎***

Hiroki Hondo

Shinsuke Sakai

Shiro Tanno

(原稿受付日2000年8月2日, 受理日2001年2月9日)

Abstract

This study addresses the problem of uncertainty in estimating CO₂ emission factors using an input-output (I-O) table for life cycle inventory analysis. The validity of the CO₂ emission factors are discussed mainly because the amount of commodities is measured in monetary unit and plural commodities are produced in a sector on an actual I-O table. In this paper, sensitivity analysis of CO₂ emission factors estimated using Japanese I-O table is conducted in order to identify which elements significantly influence the CO₂ emission factors among all input coefficients (a_{ij}) and direct CO₂ emissions (e_i) in sectors. As a result, it was found that a_{ij} relevant to steel sectors and downstream sectors like processing and assembly as well as e_i of electricity and steel sectors are high influencing elements. If large dispersion of these elements exists, the dispersion of the CO₂ emission factors is also large. In conclusion, evaluation of the uncertainty using probability approach and improvement of the precision of a_{ij} and e_i by dividing sectors are important, focusing on high influencing elements.

1. はじめに

環境問題が顕在化しつつある現在, その解決の糸口を掴む手法としてライフサイクルアセスメント (LCA) が脚光を浴びつつある。LCAの土台となるインベントリ分析 (LCI) については様々な研究がなされており, それらの研究課題の一つとしてLCIへの産業連関表の利用が挙げられる。

LCIのケーススタディの多くでは, ライフサイクル内のプロセスをひとつずつ検討し, 環境負荷を積算していく積み上げ法が用いられている。他方, 産業連関表を用いることで, 各財・サービス (以下, 財と呼ぶ) の生産に伴い誘発される間接的な環境負荷を完全に捉えることが出来るため, その有効性が注目されている。ただし, 実際の我が国の産業連関表では, 社会に存在する極めて多種多様な財を約400種類に分類して, 円価値単位 (金額) というすべての財に共通の測定単位を採用することで, 複数種類の財をひとつの部門に統合している。その特性上, 産業連関表を用いて推計された環境負荷原単位は, 現実の財を評価する上で有効なのか否かについて議論がある。例えば, 複数の異なる財が生産されている部門の投入係数ベクトルや直接環境負荷は, その部門に含まれる複数の財の平均値である

とみなされ, 実際には幅を持っていると考えられる。それ故に, 推計された環境負荷原単位は, 仮想的な平均財の値, 言い換えれば, ばらつきを持った複数の値の代表値であると解釈できる。もちろん, 積み上げ法による推計でも結合生産における配分方法や生産規模の違い等の要因から値はばらつきを持つ。問題は, 産業連関表に特有の性質によって, それを用いて推計された環境負荷原単位がどの程度ばらつく可能性があるか, そして, そのばらつきの要因は何かを明らかにすることである。

本研究では, まず, 投入係数と部門別直接環境負荷にばらつきが生じる要因を整理した。その上で, 過去に推計されたCO₂排出原単位の結果¹⁾を基に感度分析を実施し, どの投入係数, そして, どの部門の直接CO₂排出量の変動が, CO₂排出原単位に大きな影響を及ぼすかを明らかにした。この特定された要素のばらつきが大きい場合, CO₂排出原単位の基準値も大きく振れることになる。後半では, これら影響度の高い要素にばらつきが生じる可能性, そして, それが基準値に与える影響について検討した。

2. CO₂排出原単位にばらつきが生じる要因

各財のCO₂排出原単位 (ε_i [g-CO₂/¥]) は, 産業連関表を用いて式 (1) にしたがって推計される。

$$\varepsilon = e^T (I - A)^{-1} \quad \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

ここで, A は投入係数行列, e は生産額あたりの直接CO₂排出量ベクトルである。また, T は転置行列を示す。式 (1) では, 輸入財もすべて国産であると仮定している。 A は産

* 財電力中央研究所 経済社会研究所主任研究員

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 大手町ビル7F

** 東京大学大学院工学系研究科教授

*** 〃 研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

業連関表から、 e は産業連関表や他の統計より別途推計される²⁾。 A 、 e の要素である a_{ij} [¥/¥]、 e_i [g-CO₂/¥] ($i, j=1 \sim n$) には、以下に示す要因による不確実性のためにばらつきが存在すると考えられ、その結果、CO₂排出原単位は幅を持つことになる。

(1) データの誤差

統計資料の記載値が、測定誤差や調査表の記入・集計ミスなどにより誤差を持つ可能性がある。

(2) 結合生産

実際の産業連関表では円価値単位で財の量を測っている。石油製品などのように、複数の製品が同じプロセスから同時に生産（結合生産）される場合、各部門へ投入される結合性産物の構成比率が異なるため、財の測定単位（重量や熱量など）に依存して a_{ij} と e_i は変動する。

(3) 一部門多財

産業連関表では、社会に存在する膨大な種類の財を約400部門に分類しているため、ほとんどの部門で複数種類の財が生産されている（一部門多財）¹⁾。したがって、 a_{ij} や e_i は、複数異種の財を含む部門において生産される仮想的な平均財に対応するものであり、実際には、それらの値はばらつきを持つ。

(4) 一財多価

同一財であっても部門によって異なる単価で販売（一財多価）されることがある。実際の産業連関表では円価値単位で財の量を測っているが、それ以外の単位（重量や熱量など）を用いると、 a_{ij} や e_i は変化する。

(5) 一財多技術

同一財が複数の技術で生産（一財多技術）される場合がある。採用技術の違いにより、同一財であっても単位生産量あたりの原材料投入や廃棄物排出の量は異なる。

(6) 一財多事業所

同一技術によって同一財を生産する場合でも、事業所（生産者）が異なれば、生産規模などの違いにより歩留まりや運用に差異が存在し、単位生産量あたりの原材料投入や廃棄物排出の量は異なる。

いずれかの要因により a_{ij} と e_i にばらつきが存在する場合、これらの値は確定値でなく、不確実性を含んでいる基準値として解釈する方が妥当である。ところが、 a_{ij} と e_i あわせて十数万にのぼる値に対して、上述した各要因によって生じるばらつきがどの程度かを明らかにすることは現実的には極めて困難である。まずは、 a_{ij} と e_i の変動に対するCO₂排出原単位の感度を求めることによって影響度の高い要素を特定化し、その上で、それらの要素が上に述べた要

因によりどの程度ばらつきを持つかを明らかにすることが重要となる。

3. 感度分析手法

直接CO₂排出量 (e_i) および投入係数 (a_{ij}) のばらつきに関する情報（分散、確率密度関数）が得られない場合に、 e_i および a_{ij} の不確実性がCO₂排出原単位 (ε_k) にどの程度影響を与えるかを評価する指標として、変動率感度が有効である^{*2}文献³⁾⁴⁾ 参照。

変動率感度は、直接排出量の変動 (Δe_i) もしくは投入係数の変動 (Δa_{ij}) に伴い、財 k のCO₂排出原単位 (ε_k) が変動するとき、基準値における e_i もしくは a_{ij} の変動率に対する ε_k の変動率の比として定義され、式 (2)、式 (3) のように表現できる。

$$s_i^k = \lim_{\Delta e_i \rightarrow 0} \left(\frac{e_i^0}{\varepsilon_k^0} \right) \left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{\Delta e_i} \right)_{e_i^0} \quad (i, k = 1 \sim n) \dots \text{式 (2)}$$

$$s_{ij}^k = \lim_{\Delta a_{ij} \rightarrow 0} \left(\frac{\bar{a}_{ij}}{\varepsilon_k^0} \right) \left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{\Delta a_{ij}} \right)_{\bar{a}_{ij}} \quad (i, j, k = 1 \sim n) \dots \text{式 (3)}$$

ここで、 e_i^0 、 $\bar{a}_{ij}$ は基準値であり、それぞれ、基準となる直接CO₂排出量ベクトル (e^0) と投入係数行列 ($\bar{A}$) の要素である。また、それらに対応するCO₂排出原単位ベクトルをとする。

s_i^k もしくは s_{ij}^k が大きい要素は、財 k のCO₂排出原単位へ影響度が高く、その値を大きく変動させ得るといえる。

3.1 直接CO₂排出量の変動に対する感度

財 m の直接CO₂排出量の変動 (Δe_m) に対する財 k のCO₂排出原単位の変動 ($\Delta \varepsilon_k$) は、式 (4) にしたがって求めることができる。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_k &= \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ik} (e_i^0 + \Delta e_i) - \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ik} e_i^0 \\ &= \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ik} \Delta e_i \end{aligned} \dots \text{式 (4)}$$

ただし、

$$\bar{b}_{ij} = [\bar{B}]_{ij} = [I - \bar{A}]^{-1} \Big|_{ij} \dots \text{式 (5)}$$

$$\Delta e_i = \begin{cases} \Delta e_m & i = m \\ 0 & i \neq m \end{cases} \dots \text{式 (6)}$$

である。式 (4) を式 (2) に代入することで、変動率感度 (s_m^k) は、次式で表現できる。

$$s_m^k = \frac{\bar{b}_{mk} e_m^0}{\varepsilon_k^0} \dots \text{式 (7)}$$

注1) 一部門多財は、現実的には不可能であるが、理論的にはプロセスを十分に調査し一部門一財まで部門を分割すれば解消する問題である。したがって、一部門多財は見かけ上結合生産と同じ問題に帰結できるが、本質的には異なる。

注2) この指標の大小でもって、CO₂排出原単位のばらつきの大小を直ちに評価するものではない（第5章参照）。なお、変動率感度は影響度指数とも呼ばれる。

3.2 投入係数の変動に対する感度

まず、文献⁵⁾にしたがって、投入係数行列の ij 要素が Δa_{ij} だけ変動する場合の、CO₂排出原単位ベクトルの変動量 ($\Delta \varepsilon$) を誘導する。式 (1) から明らかなように式 (8) が成立する。

$$(\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^T \varepsilon^0 = \mathbf{e}^0 \quad \text{.....式 (8)}$$

Δa_{ij} の変動が与えられた時、変動後の投入係数行列 $\mathbf{A}$ は式 (9) のように表現できる。

$$\mathbf{A} = \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{A}' \Delta a_{ij} \quad \text{.....式 (9)}$$

ここで、 $\mathbf{A}'$ は、 $\mathbf{A}$ の a_{ij} に対する一階微分で式 (10) で定義される。

$$\mathbf{A}' = \frac{\partial}{\partial a_{ij}} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} & & \\ & a_{lm} & \\ & & \end{bmatrix} \quad \text{.....式 (10)}$$

ここで、

$$a_{lm} = \begin{cases} 1 & \text{if } l=i \text{ and } m=j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{.....式 (11)}$$

である。したがって、変動後の投入係数行列に対応するCO₂排出原単位ベクトル ε は、

$$(\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}} - \mathbf{A}' \Delta a_{ij})^T \varepsilon = \mathbf{e}^0 \quad \text{.....式 (12)}$$

を解くことにより得られる。 ε が Δa_{ij} のべき級数近似解として

$$\varepsilon = \varepsilon^0 + \varepsilon' \Delta a_{ij} + \varepsilon'' \Delta a_{ij}^2 + \cdots + \varepsilon^N \Delta a_{ij}^N + \cdots \quad \text{.....式 (13)}$$

と表現できると仮定して式 (12) を解く。式 (13) を式 (12) に代入し、両辺にある Δa_{ij} の0次項、1次項、2次項…の係数がそれぞれ一致することを要求すると、

$$0 \text{ 次項 } (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^T \varepsilon^0 = \mathbf{e}^0 \quad \text{.....式 (14)}$$

$$1 \text{ 次項 } -(\mathbf{A}')^T \varepsilon^0 + (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^T \varepsilon' = \mathbf{0} \quad \text{.....式 (15)}$$

$$2 \text{ 次項 } -(\mathbf{A}')^T \varepsilon' + (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^T \varepsilon'' = \mathbf{0}$$

$$\vdots$$

$$n \text{ 次項 } -(\mathbf{A}')^T \varepsilon^{N-1} + (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^T \varepsilon^N = \mathbf{0}$$

を得る。ここで求めるべき変動率感度は、上述のように、評価点である基準値 ($\bar{\mathbf{A}}$) における a_{ij} の変動率に対する ε_k の変動率の比であり、2次項以上は意味を持たず、1次項のみで評価される。 ε^0 とは既知であり式 (14) と式 (15) より、 ε' は、

$$\varepsilon' = ((\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^T)^{-1} (\mathbf{A}')^T \varepsilon^0 \quad \text{.....式 (16)}$$

から算出される。したがって、求めるべきCO₂排出原単位ベクトルの変動量 ($\Delta \varepsilon$) は、

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon &= \varepsilon' \Delta a_{ij} \\ &= \bar{\mathbf{B}}^T (\mathbf{A}')^T \varepsilon^0 \Delta a_{ij} \end{aligned} \quad \text{.....式 (17)}$$

と表される。ここで、

$$\bar{\mathbf{B}} = (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}})^{-1} \quad \text{.....式 (18)}$$

である。

以上で導出された式 (17) より、投入係数 a_{lm} に変動 (Δa_{lm}) が与えられたとき、財 k のCO₂排出原単位の変動 ($\Delta \varepsilon_k$) は、

$$\Delta \varepsilon_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_i^0 q_{ij} \bar{b}_{jk} \Delta a_{lm} \quad \text{.....式 (19)}$$

と表現できる。ただし、

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 & i=l, j=m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{.....式 (20)}$$

である。式 (19) を式 (3) に代入して整理すると次式が得られる。

$$s_{lm}^k = \frac{\bar{a}_{lm} \varepsilon_l^0 \bar{b}_{mk}}{\varepsilon_k^0} \quad \text{.....式 (21)}$$

摂動法を利用しなくても、各要素に個別に変動を与えて数値計算によって感度を求めることは可能であるが、変動を与えた a_{ij} の数と少なくとも同じだけの逆行列の計算が必要となり、計算量が膨大となる*3。

上記のように、基準となる部門別直接CO₂排出量と投入係数行列が与えられれば、すべての要素の変動に対するすべての財の感度を計算することが可能である。なお、ここでは、すべての要素は独立であると仮定して定式化を行っているが、変動の要因によっては要素間の従属関係を考慮する必要がある。本研究では、様々な要因から生じる変動に対する感度を明らかにするという点から、全ての要素の変動は独立であると仮定して感度分析を実施した*4。

4. 感度分析結果

我が国の平成2年の産業連関表を利用して求められるCO₂排出原単位に対して感度分析を実施した。投入係数行列を作成する際の特種コードの取り扱いおよび部門の統廃合、そして、部門別直接CO₂排出量については文献¹⁾を利用した。以下では、素材とそれ以外の工業製品に分けて、そのCO₂排出原単位について感度分析を実施した結果を示す。

4.1 工業製品 (素材を除く)

表1～8に、産業機械から精密機械まで代表的な工業製品を取り上げて、CO₂排出原単位の感度値が0.05以上となる要素を大きい順に並べている。表題の () 内の数字は産業連関表の部門コードである。表中の「直」は直接CO₂

注3) 文献⁶⁾では、摂動法を用いることで計算時間が極めて短縮されることを示している。

注4) 我が国の産業連関表は円価値単位という一種の物量単位を用いた物量表示の表であると解釈できる。円価値単位という物量単位で表現された産業連関表を、均衡産出高モデルとして利用する場合には、投入係数の列和=1は制約条件とならない。

排出量を、「投」は投入係数を意味する。例えば、複写機では、電力部門の直接排出量の変動に対する感度が0.315と最も大きい。これは、事業用電力からの直接排出量が1%変化した場合、複写機のCO₂排出原単位が0.315%変化するということを意味している。上位には、複写機部門への電力や素材の投入係数、複写機から複写機への自部門投入係数などが並んでおり、これらの変動が、複写機のCO₂排出原単位に大きな影響を与えることを示している。また、テレビについては電子製品関連の投入係数が、乗用車については自動車関連の投入係数が、影響度の高い要素である。このように、財によって、CO₂排出原単位に大きな影響を与える要素は異なる。

ただし、共通点も観察できる。第1に、いくつかの要素は、幅広くほとんどの財のCO₂排出原単位に大きな影響を与えている。いずれの財にも共通して、事業用電力、自家発、鉄鉄の各直接CO₂排出量、そして、粗鋼(転炉)→熱間圧延鋼、熱間圧延鋼→冷間仕上鋼の各投入係数のあわせて5要素の変動に対する感度が大きい。図1は、これら5要素の変動が、工業製品のCO₂排出原単位に与える影響を示している。横軸は工業製品の種類(産業連関表の2811-01～3919-09の88部門)を、縦軸は感度を示している。電力の直接排出量はいずれの財においても影響度が大きく、特

に、電子製品や精密機械などでは0.4前後と感度値が高い。鉄鋼関連の投入係数の変動に対する感度は、各財の鉄鋼依存度によって異なり、産業機械や自動車などでは感度が高い一方、電子製品や精密機械などでは感度が低い。

第2に、電力および鉄の直接排出量を除くと、直接排出量よりも投入係数の変動が結果に大きな影響を及ぼす傾向がある。特に、部品製造工程以降の自部門投入係数、そして、対象とする財を生産する部門への部品やエネルギーなどの投入係数の影響が大きいことが注目される(表3～8)。例えば、乗用車では、部品→乗用車が0.385、部品の自部門投入が0.228という結果となっている(表7)。このことは、精密な加工が要求される電気・電子機械や精密機械において顕著であり、電力や半導体に関わる投入係数の影響度が大きい。例えば、時計では、時計→時計が0.250、電力→時計が0.155、半導体→時計が0.068という結果になっている(表8)。ただし、ボイラなどの大型産業機械では、自部門投入などより鉄鋼に関わる投入係数の影響が大きい(表1, 2)。

これらのことから、産業連関表を用いて工業製品のCO₂排出原単位を推計する際には、電力および鉄鋼の生産における直接排出量の正確な把握が重要であることが理解できる。加えて、鉄鋼のフローそして部品製造から加工組立などの下流部門における物質のフローが実態を反映しているかが鍵となる。

表1 ボイラ(3011-01)

要素	感度値
投 粗鋼(転炉)→熱圧鋼	0.284
投 鉄鉄→粗鋼(転炉)	0.278
直 鉄鉄	0.243
直 事業用電力	0.228
投 鋼管→ボイラ	0.225
投 熱圧鋼→鋼管	0.182
投 ボイラ→ボイラ	0.148
直 自家発電	0.116
投 他一般産業機械→ボイラ	0.101
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.094
投 冷仕上鋼→ボイラ	0.077
投 粗鋼(電気炉)→熱圧鋼	0.067
投 他一般機械器具→ボイラ	0.059
直 ボイラ	0.059
投 鉄鉄製品→ボイラ	0.056
投 熱圧鋼→ボイラ	0.056
投 石炭製品→鉄鉄	0.053
投 事業用電力→ボイラ	0.051

表2 ポンプ・圧縮機(3019-01)

要素	感度値
投 鉄鉄製品→ポンプ・圧縮機	0.314
直 事業用電力	0.213
投 粗鋼(転炉)→熱圧鋼	0.210
直 鉄鉄	0.209
投 鉄鉄→粗鋼(転炉)	0.206
投 鉄鉄製品	0.177
直 自家発電	0.103
投 熱圧鋼→ポンプ・圧縮機	0.101
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.091
投 ポンプ・圧縮機→ポンプ・圧縮機	0.086
投 事業用電力→ポンプ・圧縮機	0.063
投 鉄鋼シャワーポンプ・圧縮機	0.057
投 冷仕上鋼→ポンプ・圧縮機	0.054

表3 複写機(3111-01)

要素	感度値
直 事業用電力	0.315
投 複写機→複写機	0.227
直 自家発電力	0.137
投 半導体→複写機	0.085
投 電力→複写機	0.081
投 鉄鉄製品→複写機	0.078
投 粗鋼(転)→熱圧鋼	0.075
投 鉄鉄→粗鋼(転)	0.073
直 鉄鉄	0.070
投 他化学製品→複写機	0.065
投 他電子部品→複写機	0.064
投 卸売→複写機	0.062
投 プラ製品→複写機	0.061
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.055

表4 ラジオ・テレビ(3211-02)

要素	感度値
直 事業用電力	0.333
投 他電子部品→テレビ	0.161
投 電子管→テレビ	0.150
直 自家発電	0.146
投 プラ製品→テレビ	0.127
投 粗鋼(転炉)→熱圧鋼	0.078
投 鉄鉄→粗鋼(転炉)	0.076
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.075
投 半導体→テレビ	0.072
投 他電子部品→他電子部品	0.072
直 鉄鉄	0.064
投 冷仕上鋼→テレビ	0.060
投 他ガラス→電子管	0.054
投 熱可塑性→プラスチック	0.054

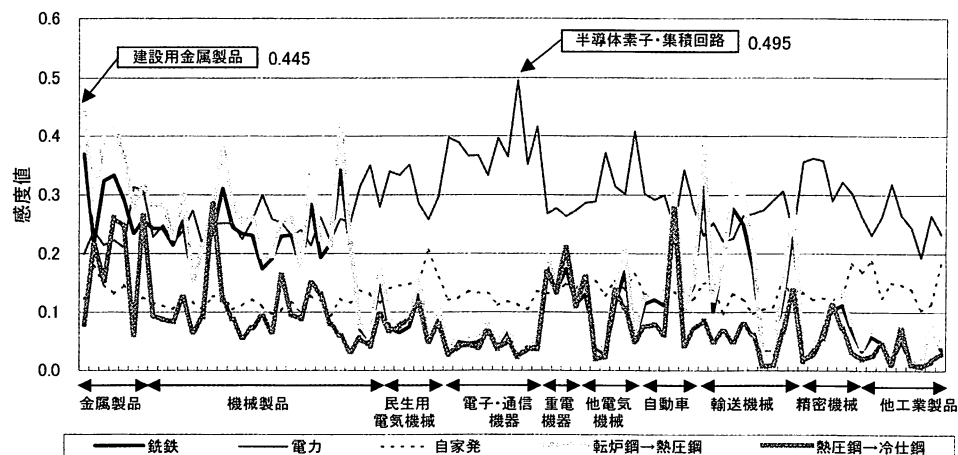


図1 影響度の高い5つ要素の変動に対する各工業製品の感度

表 5 民生用電気機器(3211-04)

要素	感度値
直 事業用電力	0.285
投 民生電気機器→民生電気機器	0.210
投 粗鋼(転炉)→熱圧鋼	0.157
投 銑鉄→粗鋼(転炉)	0.152
直 自家発電	0.151
直 銑鉄	0.129
投 鉄鋼シャ→民生電気機器	0.123
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.115
投 プラ製品→民生電気機器	0.090
投 事業用電力→民生電気機器	0.076
投 熱圧鋼→鉄鋼シャ	0.074
投 研究開発→民生電気機器	0.055

表 6 電子計算機(3311-01)

要素	感度値
直 事業用電力	0.397
投 研究開発→電子計算機	0.239
投 半導体→電子計算機	0.208
投 電子計算機→電子計算機	0.191
直 自家発電	0.120
投 他電子部品→電子計算機	0.112
投 事業用電力→研究開発	0.093
投 事業用電力→電子計算機	0.070
投 事業用電力→半導体	0.061
直 企業内研究開発	0.056
投 他電子部品→他電子部品	0.055

表 7 乗用車(3511-01)

要素	感度値
投 自動車部品→乗用車	0.385
直 事業用電力	0.302
投 自動車部品→自動車部品	0.228
直 内燃機関→乗用車	0.163
直 自家発電	0.131
投 粗鋼(転炉)→熱圧鋼	0.124
投 銑鉄→粗鋼(転炉)	0.122
直 銑鉄	0.114
投 自動車車体→乗用車	0.092
投 鋳鉄品→自動車部品	0.076
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.074
投 内燃機関→内燃機関	0.070
直 鋳鉄品	0.061

表 8 時計(3712-01)

要素	感度値
直 事業用電力	0.358
投 時計→時計	0.250
投 事業用電力→時計	0.155
直 自家発電	0.124
投 身辺細貨品→時計	0.089
投 粗鋼(転炉)→熱圧鋼	0.082
投 銑鉄→粗鋼(転炉)	0.080
投 半導体→時計	0.068
直 銑鉄	0.068
投 プラ製品→時計	0.064
投 熱圧鋼→冷仕上鋼	0.055

4.2 素材

表 9～14には、代表的な素材を取り上げて、CO₂排出原単位⁵⁾の感度値が0.05以上となる要素を大きい順に並べている。素材では、上述した工業製品とは異なり、投入係数よりむしろ直接排出量の変動の影響が大きい。例えば、洋紙・和紙では、自家発が0.407、洋紙・和紙が0.219、パルプが0.217である。また、影響の大きな投入係数は、パルプ→洋紙・和紙や自家発→洋紙・和紙など対象となる素材に直接関わるものに限られている。加えて、感度値が0.05以上の要素の数は比較的少なく、上位いくつかの要素の変動に対する感度が非常に高いという結果が得られた。

以上の結果は、素材は生産工程の上流に位置しており、物質の流れが比較的単純であることに起因している。それ故に、素材のCO₂排出原単位を推計する際には、幹となるプロセスにおける素材の流れと直接CO₂排出量を捉えることが重要であることが理解される。

なお、ここでは、各要素は独立であるとした場合の感度を示しているが、実際には従属関係にある場合もある。例えば、表12において、石炭製品→銑鉄の投入係数の変動は、銑鉄の直接排出量も同時に変化させると考えられ、これらの変動による感度は表12に示す値より高いと予想される。

5. 工業製品のCO₂排出原単位がばらつく可能性の検討

感度分析によって特定された影響度の高い要素が大きくばらつく場合、CO₂排出原単位は基準値から大きく乖離することになる。感度分析では影響を及ぼす程度を評価できるが、不確実性の評価にあたっては、ばらつきの絶対値に関する評価も重要である。そこで、感度値を応用してばらつきに関して考察する。上述の感度値をもとにCO₂排出原単位のばらつきを評価する場合、大きなばらつきを有する要素に対する評価では誤差を伴うものの、定性的な傾向は把握することが可能である。以下では、影響度が高いと特定された要素を取り出し、それらの要素がどの程度ばらつくか、そして、その結果、工業製品のCO₂排出原単位は基準値からどの程度振れるかについて、定性的評価を試みる。

(1) 事業用電力の直接排出量

表 9 洋紙・和紙(1812-01)

要素	感度値
直 自家発電	0.407
投 パルプ→洋紙・和紙	0.399
投 自家発電→洋紙・和紙	0.286
直 洋紙・和紙	0.219
直 パルプ	0.217
投 自家発電→パルプ	0.105
直 事業用電力	0.092

表10 熱可塑性樹脂(2041-01)

要素	感度値
直 自家発電	0.314
投 石化基礎製品→熱可塑性樹脂	0.310
直 石化基礎製品	0.179
投 自家発電→熱可塑性樹脂	0.173
投 環式中間物→熱可塑性樹脂	0.173
直 事業用電力	0.144
直 熱可塑性樹脂	0.114
投 脂肪族中間物→熱可塑性樹脂	0.100
投 石油製品→石化基礎製品	0.096
直 石油製品	0.056
投 芳香族→環式中間物	0.051

表11 板ガラス・安全ガラス(2511-01)

要素	感度値
直 板・安全ガラス	0.351
直 事業用電力	0.272
投 板・安全ガラス→板・安全ガラス	0.200
投 事業用電力→板・安全ガラス	0.178
直 自家発電	0.139
投 ソーダ工業製品→板・安全ガラス	0.109

表12 粗鋼(転炉)(2611-03)

要素	感度値
投 銑鉄→粗鋼(転炉)	0.965
直 銑鉄	0.717
投 石炭製品→銑鉄	0.156
直 自家発電	0.131
直 石炭製品	0.096
直 事業用電力	0.080
投 自家発電→粗鋼(転炉)	0.060
投 石炭→石炭製品	0.057

表13 鉛(2711-02)

要素	感度値
直 鉛	0.602
投 非鉄金属→鉛	0.166
直 事業用電力	0.145
直 自家発電	0.081
投 石炭製品→鉛	0.080
投 事業用電力→鉛	0.070
投 事業用電力→非鉄金属	0.055

表14 アルミニウム(2711-04)

要素	感度値
直 自家発電	0.425
投 自家発電→アルミ	0.361
投 アルミ→アルミ	0.270
直 アルミ	0.235
直 事業用電力	0.195
投 事業用電力→アルミ	0.122
投 非鉄金属→アルミ	0.105

発電技術は複数存在するが、産業連関表では1年間の平均の電源構成に基づく平均的な技術を採用しているとみなされる。電力は一財多技術の典型であり、時間帯によって採用される発電技術の組み合わせが異なるため、事業用電力部門の直接排出量には、ばらつきが生じる。例えば、東京電力では、年間平均のkWhあたりCO₂排出量は315g-CO₂/kWhであるが、昼間および夜間のそれらは、それぞれ、341g-CO₂/kWh、260g-CO₂/kWhとなる⁷⁾。つまり、基準値から7～8%の変動があり得る。他方、ほとんどの工業製品において、事業用電力の直接排出量の変動に対する感度値は0.2～0.4の間に収まっており、最も大きな場合で半導体素子・集積回路の0.495である(図1)。したがって、各部門の昼夜間別電力消費量を考慮してCO₂排出原単

注5) 直接排出量に対する感度に比べて、電力から各部門への投入係数に対する感度は小さい。しかし、これら投入係数は、電力が一財多価であるため、測定単位をkWhと円価値単位のいずれかにするかによってばらつきを持つ。このばらつきのために、財によってはCO₂排出原単位は基準値の3割近い差が生じることが報告されている⁸⁾。

位を推計した場合、基準値からの振れは4%程度に留まると予想される*5。

(2) 自家発電の直接排出量

自家発は産業連関表では一部門に集約されているが、実際には、特定の部門で実施されている。したがって、鉄鋼や紙・パルプなど各部門での自家発電力は異なる財とみなす方が合理的であり、自家発部門の直接排出量には一部門多財によるばらつきが存在するといえる。文献¹¹⁾に示される方法に従って、紙パルプ関連部門および鉄鋼関連部門における自家発電のkWhあたりの直接CO₂排出量を求めると、使用燃料や発電効率の違いのために、それぞれ、827g-CO₂/kWh、1374g-CO₂/kWhとなる。また、自家発全体の値は887g-CO₂/kWh¹¹⁾であるので、7～55%の幅を持っていると言える。他方、図1に示すほぼすべての製品において、自家発電力の直接排出量の変動に対する感度値は0.1～0.2の間に収まっている。したがって、自家発電の直接CO₂排出量のばらつきによって、CO₂排出原単位は基準値から1～10%ほどばらつくことが予想される*6。

(3) 粗鋼から熱圧鋼への投入係数

一例として粗鋼から熱圧鋼への投入係数について考える。熱圧鋼には、様々な用途の鉄鋼が含まれており、普通鋼と特殊鋼の違い、転炉鋼と電炉鋼の違い、形状の違いがある。つまり、粗鋼から熱圧鋼への投入係数には、一部門多財と一部門多技術によるばらつきが存在する。例えば、熱圧鋼部門で生産される財のひとつである普通鋼小棒の9割以上は建設・土木用へ産出されており、普通鋼小棒の生産における粗鋼（転炉）の投入量は少ないと予想される。仮に普通鋼小棒に投入されている全粗鋼の1～2割が転炉鋼とするならば、粗鋼（転炉）部門から熱圧鋼部門への投入係数は下方へ大きく幅をもつことになる。鋼材の単価の違いを考慮しても、その投入係数は、基準値の2分の1以下まで振れる可能性は十分にある。他方、一部の財では、投入係数（粗鋼（転炉）→熱圧鋼）の変動に対する感度値は0.3～0.4ほどであり、建設用金属製品では0.445に達する（図1）。したがって、CO₂排出原単位は20%を超える幅を持つ可能性がある。

ここでは、各要素のばらつきの情報と第4章で求めた変動率感度から、CO₂排出原単位のばらつきについて考察した。しかしながら、その解釈においては以下のことが十分に留意される必要がある。

- (a) 前述したように、 a_{ij} と e_i が同時に変化する場合があり、それによって感度値は異なる可能性がある。
- (b) 本章では、 a_{ij} と e_i の代表的なばらつき要因を取り上げ

たが、それら以外のばらつき要因が存在する。例えば、電力の直接CO₂排出量は、事業者による違い、つまり、一財多事業所によるばらつきが存在するとも言える*7。

- (c) 投入係数のばらつきに伴うCO₂排出原単位の幅は、 $b_{mk} \Delta a_{lm} \ll 1$ が満たされる場合には、妥当な結果となる。しかし、各要素のばらつきが大きい場合*8、すなわち、 $b_{mk} \Delta a_{lm} \ll 1$ が満たされない場合には、結果は異なる可能性がある。例えば、上記(3)の検討において、建設用金属製品のCO₂排出原単位が大きく触れる可能性を指摘しているが、 $b_{mk} \Delta a_{lm} \ll 1$ は約0.1であり十分に小さいとは言えない*9。

6. おわりに

産業連関表を用いたCO₂排出原単位の推計では、投入係数と部門別直接CO₂排出量が基礎となる。本研究では、それら各要素が変動した場合のCO₂排出原単位への影響度を、変動率感度という概念を導入し横並びで定量的に評価したことに意義がある。過去にもCO₂排出原単位に影響を与える要因に関する分析は部分的に実施されてきたが¹¹⁾、本研究では、極力全体を見渡せるように体系的な説明を試みた。その結果、工業製品に関しては、電力や自家発の直接CO₂排出量が鍵であるという従来の知見を定量的に確認した。さらに、鉄鋼関連部門や下流部門の投入係数の変動はCO₂排出原単位に大きな影響を及ぼし、それら投入係数のばらつき具合によってはCO₂排出原単位が大きく振れる可能性があるという新たな知見を得た。

なお、本研究では、各要素はすべて独立であるとして感度分析を実施したが、従属関係にある場合には結果は異なる可能性がある。また、ばらつきが大きい要素*10を取り扱う場合には、基準点の傾きで評価するという変動率感度が、感度指標として有効に利用できる範囲について議論の余地がある。これらを考慮した指標の定量化については、今後の課題である。

本論文の後半では、変動率感度の結果を利用して、影響度の高いいくつかの要素のばらつきに起因するCO₂排出原単位のばらつきについて定性的に検討した。その結果、鉄鋼関連部門の投入係数は、一部門多財と一財多技術のために大きくばらつく可能性が高く、それは工業製品のCO₂排出原単位に大きな不確実性を生じさせ得ることが明らかになった。今後、産業連関表をLCIへ実用的に活用するため

注7) 例えば文献¹⁰⁾。

注8) 各部門におけるエネルギー財の投入係数が大きくなばらつきを持っていることが報告されている^{11), 12)}。

注9) 電子計算機や無線通信機器などでは、投入係数（粗鋼（転炉）→熱間圧延鋼）の変動に対する $b_{mk} \Delta a_{lm}$ は0.01未満である。

注10) 例えば、各部門へのエネルギー財の投入係数が、一財多事業所によって変動係数（標準偏差／平均値）が1を超える大きなばらつきを持つ可能性があることが指摘されている¹²⁾。

注6) 自家発部門の直接排出量を各部門へ割り当て、自家発部門の直接排出量をゼロとしてCO₂排出原単位を求めると、基準値と3.8%の差が生じるという報告¹¹⁾にはば一致する。

には、部門分割などによる精度の向上、そして、確率的なアプローチによる信頼性の把握、という2方向が有り、そのバランスが重要であると考えられる。

ばらつきがあることは、産業連関表の有効性を否定するものではない。むしろ、そのばらつきを適切に制御することで、平均的な財の結果であるという特徴を有効に利用することが可能である。本研究は、感度分析や誤差分析により、基準値の信頼性を踏まえた上で積極的に活用を幅を広げようという試みのひとつである。

なお、本論文では詳しくは述べなかったが、今回の感度分析の結果は、積み上げ法でLCIを実施する前のPre-LCIに活用できる。直感や経験ではなく客観的かつ定量的な情報により影響度の高いプロセスを特定でき、限られた時間や費用に影響度の高い部分のプロセスの検討に投入することで、費用対効果の高い分析が可能となる。

謝辞

査読者の方々にはもちろんのこと、国立環境研究所の森口祐一博士そして東京大学工学研究科の吉田好邦博士にはドラフトの段階で貴重なコメントを頂いたことに謝意を示したい。

参考文献

- 1) 本藤祐樹, 外岡豊, 内山洋司「産業連関表を用いた我が国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析」電力中央研究所報告 Y97017 (1998)
- 2) 本藤祐樹, 外岡豊, 内山洋司「産業連関表による実態を反映した環境分析－部門別直接燃料消費量の推計と輸入財の取り扱い－」エネルギー・資源, 第20巻, 第1号, pp.93-99 (1999)
- 3) 酒井信介「機械製品の環境負荷評価への感度解析技術の応用(1)」機械の研究, 第52巻, 第6号, pp.619-624 (2000)
- 4) M. Shinozuka, "Development of Reliability- based Aircraft Safety Criteria", AFFDL-TR- 76-36, Wright-Patterson Air Force Base, 1976
- 5) 酒井信介, 丹野史朗, 本藤祐樹「振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 (2000.1 東京)
- 6) 丹野史朗「振動法を用いた産業連関分析の感度分析」東京大学大学院工学系研究科修士論文 (2000)
- 7) 東京電力「東京電力環境行動レポート1999」(pp.121)
- 8) 本藤祐樹, 内山洋司「産業連関表を用いた実用的なインベントリー分析手法の確立－財多価による配分問題および積み上げ法との融合方法－」日本エネルギー学会誌, 第78巻, 第10号, pp.861-868 (1999)
- 9) 南齊規介, 東野達, 笠原三紀夫, 森口祐一「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 (2000.1 東京)
- 10) 松野泰也, 稲葉敦「我が国における電力10社の受電端基準電力のライフサイクルインベントリ」日本エネルギー学会誌, 第77巻, 第12号, pp.1162-1176 (1998)
- 11) 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 (2000.1 東京)
- 12) 吉岡完治 (研究代表)「産業におけるエネルギー消費構造の分析」平成8, 9年度科学研究費補助金重点領域研究 (2) 研究成果報告書 (1998)

協賛行事ごあんない

「超高温材料国際シンポジウム2001 in たじみ」実施計画

主 催: 超高温材料国際シンポジウム実行委員会
構成: 岐阜県, 多治見市, (社)中部経済連合会, 名古屋大学高温エネルギー変換研究センター, (株)超高温材料研究センター, (株)超高温材料研究所
開催日時: 平成13年9月6日(木), 7日(金)
場 所: シンポジウム 多治見市文化会館 小ホール (多治見市十九田町2-8)
 交流会 オースタット国際ホテル (多治見市白山町4-14-1)

参加人数: 予定 250名 (会場 400席)
参加登録料: 5,000円 交流会費 1,000円
問 合 先: (株)超高温材料研究所 岐阜研究所
 岐阜県多治見市東町3-1-8
 総務部 肥田
 電話: 0572-25-5380 FAX: 0572-21-1045