

廃棄物循環に着目した構造分解分析*

Structural Decomposition Analysis focused on Waste disposal and Recycling

結城拓児**, 加河茂美***, 稲村肇****

By Takuji YUKI**, Shigemi KAGAWA***, Hajime INAMURA****

1. 背景

我が国は、国内外から手当てされた天然資源を活用して製品を大量生産し、それを内外の市場に供給する経済活動を通じて急速な発展を遂げる一方、国民生活においても、快適性、利便性を求めて大量廃棄を前提とするライフスタイルが定着している。この結果、国内的には大量の廃棄物が排出され続けることによる最終処分場の残余容量の逼迫や、その処理に伴う様々な環境負荷の高まりが顕在化し始めている。また、国際的に見ても化石燃料の消費に伴うCO₂の排出が主たる原因とされる地球温暖化が問題となっている。

これらの諸問題に対処するため、我が国では、リサイクルの促進や廃棄物の発生抑制への取り組みが行われてきた。しかし、リサイクルを行う上でもCO₂等の環境負荷の発生は避けられず、環境問題を考える上ではトータルシステムにおけるライフサイクル評価が重要であることが指摘されている¹⁾²⁾。このような要望に対して、トータルシステムで見た環境影響評価は数多くなされるようになってきた。しかし、我が国が行ってきたリサイクルへの取り組みの促進等、廃棄物循環（排出された廃棄物の処理・リサイクルに係る回収、解体、再生利用といったマクロ経済システム）の構造変化が、廃棄物の発生抑制、エネルギー節減、あるいはCO₂排出等の環境負荷削減にどれだけ貢献しているのかといったことが現在、定量的に評価されていない。これらを定量評価することは、今後環境問題にどのように取り組むべきかを考える上で、重要であると考えられる。

*Keywords : 環境計画, エネルギー計画

**学生員 東北大学大学院 情報科学研究科

***学生員 修(情報) 東北大学大学院 情報科学研究科

****F会員 工博 東北大学教授 情報科学研究科

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06

TEL 022-217-7497, FAX 022-217-7494

2. 従来研究

前述したようなマクロ経済全体を対象にトータルシステムを扱う問題に対して産業連関分析は、ある製品の製造から中間需要、最終需要として産業と家計に消費されてから廃棄処分、再生処分されるまでの無限の生産波及効果を定量評価できるため、その有用性が注目されている。産業連関分析を利用した環境影響評価に関する研究は、既往に数多くなされている。ところが、これら従来研究では、プロダクトミックスの仮定を用いているため、副産物や廃棄物といった結合生産物の波及過程を内生的に取り扱うことができなといった問題があった。

これに対し、中村³⁾は廃棄物循環再利用について回収/再利用/最終処理過程を内生化した明示的なモデルを提案している。しかしながら、中村のモデルではLeontief体系を採用しているため、家計部門に起因する廃棄物循環構造を内生化することは難しい。この問題に対し、加河⁴⁾は家計部門を内生化した環境対策SNA型産業連関分析を提案している。これらの研究は産業連関分析を環境問題に応用していく上で重要な切り口を与えた研究であると言える。しかし、これらの研究においては現実の経済を適切に表現できない技術仮定が用いられているだけでなく、また静学分析のみに焦点が当てられている。

3. 研究目的

本研究の目的を以下の2点とする。

- (1) 混合技術仮定に基づいて廃棄物循環構造が内生化された拡張SNA型産業連関モデルを提案する。
- (2) 廃棄物循環構造の時系列変化に着目した構造分解分析を行う。

4. 混合技術モデルの定式化

(1) 混合技術仮定に基づく生産均衡式の導出

本研究では、技術仮定の選定において、T.GIGANTES⁵⁾により提案されている混合技術仮定を用いる。これは、SNA体系におけるV表を式(1)に示すように、主生産物と副次生産物のような商品技術仮定を適用するのが合理的と思われる部分 V_1 と屑・副産物のように産業技術仮定を適用するのが適切と思われる部分 V_2 とに分解し、生産均衡式を導出するものである。

$$V = V_1 + V_2 \quad \text{式 (1)}$$

このとき、 g_1, q_1 をそれぞれ産業別、商品別における主生産物と副次生産物の総生産額とし、 g_2, q_2 を産業別、商品別における屑・副産物の総生産額とすると仮定より下式(2)、(3)を導くことができる。

$$g_1 = V_1 i = C_1^{-1} q_1 \quad \text{式 (2)}$$

$$g_2 = V_2 i = D_2 q \quad \text{式 (3)}$$

ここで、 C_1, D_2 はそれぞれ SNA 体系における主生産物の産出係数行列、屑・副産物のマーケットシェア行列を表している。 q_1 と q_2 の関係式

$$q_1 = q - q_2 \quad \text{式 (4)}$$

を考えると、産業別総生産額 g は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} g &= g_1 + g_2 \\ &= C_1^{-1}(I - D_2' i q) + D_2 q \\ &= \{C_1^{-1}(I - D_2' i) + D_2\} q \end{aligned} \quad \text{式 (5)}$$

さらに上式(5)を用いると、 q についての生産均衡式は次のように得ることができる。

$$\begin{aligned} q &= B \{C_1^{-1}(I - D_2' i) + D_2\} q + f \\ &= [I - B \{C_1^{-1}(I - D_2' i) + D_2\}]^{-1} f \\ &= (I - BR)^{-1} f \end{aligned} \quad \text{式 (6)}$$

ここで、

$$R = \{C_1^{-1}(I - D_2' i) + D_2\} \quad \text{式 (7)}$$

また、式(5)、式(6)から混合技術仮定に基づいた g についての生産均衡式は

$$\begin{aligned} g &= R(I - BR)^{-1} f \\ &= (I - RB)^{-1} Rf \end{aligned} \quad \text{式 (8)}$$

として表すことができる。

(2) 家計部門の内生化

家計からも有価物の屑・副産物の発生があり、廃棄物循環構造を適切に評価するためには家計部門の内生化が必要である。そこで、家計を内生化した混合技術仮定による定式化を示す。

雇業者所得を内生化した X 表を用いることによって、所得の投入構造を内生化した通常商品に関する拡張投入係数行列を求める。これは、所得を内生化し、さらに屑・副産物の発生投入分を駆除した X 表から求められる Leontief 技術係数行列 A と V_1 から求められる産出係数行列 C_1 を用いることによって推計される。本研究では、家計部門の所得→消費のバランスを内生化するために、X 表の最終需要部門中に通常記載されている家計消費支出構造を前述の拡張投入係数行列に付け加えている。つまり、家計消費支出構造の部分は、家計部門の限界消費性向の形で表されることになる。この拡張された投入構造は

$$B_1^{ext} = \begin{bmatrix} B_{Cl} & B_{CH} \\ B_{Ll} & O \end{bmatrix} \quad \text{式 (9)}$$

として定式化されるであろう。ここで、 B_{Cl}, B_{Ll} はそれぞれ産業別総生産量 1 単位当たりの商品投入量、労働投入量を表し、 B_{CH} は家計部門の商品投入量を表している。また、 O は零行列を示す。

産業別の屑・副産物の投入構造 B_2^{ext} については、産業連関表の付帯表である屑・副産物投入発生表から直接的に求めることが可能である。

$$B_2^{ext} = \begin{bmatrix} B_{wl} & B_{wh} \\ O & O \end{bmatrix} \quad \text{式 (10)}$$

ここで、 B_{wl}, B_{wh} はそれぞれ産業別総生産量 1 単位当たりの屑・副産物投入量、家計部門の総消費量 1 単位当たりの屑・副産物投入量を表している。

屑・副産物の産出係数行列についても、

$$C_1^{ext} = \begin{bmatrix} C_{IC} & O \\ O & C_{HL} \end{bmatrix} \quad \text{式 (11)}$$

として拡張される。ここで、 C_{IC} は通常商品の産出係数行列を表しており、 C_{HL} は家計部門による労働供給係数（スカラー量）を表している。産業の商品生産を通して受け取る所得分をそのまま完全に消費にまわすと仮定すれば、 C_{HL} は 1 に等しくなるであろう。通常は受け取った所得は貯蓄や投資にまわされるのでこの値は 1 より小さな値で設定しなければならない。

式(11)に合わせて、屑・副産物のマーケットシェア行列は

$$D_2^{ext} = \begin{bmatrix} D_{IW} & O \\ D_{HW} & O \end{bmatrix} \quad \text{式 (12)}$$

として拡張される。ここで、 D_{IW} 、 D_{HW} はそれぞれ産業部門と家計部門が屑・副産物を占有するマーケットシェア行列を表している。上式(9)から(12)の拡張された係数行列は(1)で定式化された混合技術モデルに適用可能であり、拡張された生産均衡式は

$$q^{ext} = (I - B^{ext} R^{ext})^{-1} f^{ext} \quad \text{式 (13)}$$

$$g^{ext} = (I - R^{ext} B^{ext})^{-1} R^{ext} f^{ext} \quad \text{式 (14)}$$

ここで、

$$R^{ext} = \left\{ C_1^{ext} \right\}^{-1} (I - (D_2^{ext})_i) + D_2^{ext} \quad \text{式 (15)}$$

として定式化される。

5. 構造分解分析手法の提案

式(13)をもとにして、廃棄物循環構造に着目した構造分解分析を行う。 t_0 年の経済構造の状態を 0、 t_1 年の状態を 1 として定式化を行っていく。この二時点間においては産業構造全体において投入産出構造の変化が起きている。この構造変化に起因する商品別生産額の変化量を求める。式(13)において、 $B^{ext} R^{ext}$ を

$$M = B^{ext} R^{ext} \quad \text{式 (16)}$$

とおくと、

$$q^{ext} = (I - M)^{-1} f^{ext} \quad \text{式 (17)}$$

となる。なおこれ以降、上付記号 ext は省略する。上式(17)の時系列変化量を求め、構造分解することにより、

$$\Delta q = (I - M^1)^{-1} \Delta M (I - M^0)^{-1} f^0 + (I - M^1)^{-1} \Delta f \quad \text{式 (18)}$$

$$\Delta q = (I - M^0)^{-1} \Delta M (I - M^1)^{-1} f^1 + (I - M^0)^{-1} \Delta f \quad \text{式 (19)}$$

が得られる。ここでさらに、式中の ΔM について構造分解すると、

$$\Delta M = \Delta B R^0 + B^1 \Delta R \quad \text{式 (20)}$$

$$\Delta M = B^0 \Delta R + \Delta B R^1 \quad \text{式 (21)}$$

の 2 式が得られる。さらに、式 (20)、(21) 中の ΔR について離散近似を用いれば次の 2 式を得ることができる。

$$\Delta R = \Delta C_1^{-1} + \Delta D_2 - \left\{ \Delta C_1^{-1} (D_2^i)^0 + (C_1^{-1})^1 \Delta (D_2^i)^1 \right\} \quad \text{式 (22)}$$

$$\Delta R = \Delta C_1^{-1} + \Delta D_2 - \left\{ (C_1^{-1})^0 \Delta (D_2^i)^1 + \Delta (C_1^{-1})^1 (D_2^i)^1 \right\} \quad \text{式 (23)}$$

上式(20)~(23)をそれぞれ先の式(18)、(19)に代入することによって、合計で 8 本の構造分解式が得られる。この 8 本の構造分解式から Polar の構造分解式を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta q = & 1/4 \{ P^1 \Delta B (R^0 + R^1) P^0 f^0 + P^0 \Delta B (R^0 + R^1) P^1 f^1 \} \\ & + 1/4 \{ P^1 (B^0 + B^1) \Delta D_2 P^0 f^0 + P^0 (B^0 + B^1) \Delta D_2 P^1 f^1 \} \\ & + 1/8 \{ P^1 (B^0 + B^1) \Delta C_1^{-1} \{ I - (D_2^i)^0 + (D_2^i)^1 \} P^0 f^0 \\ & + P^0 (B^0 + B^1) \Delta C_1^{-1} \{ I - \{ (D_2^i)^0 + (D_2^i)^1 \} \} P^1 f^1 \} \\ & - 1/8 \{ P^1 (B^0 + B^1) \{ (C_1^0)^{-1} + (C_1^1)^{-1} \} \Delta (D_2^i) P^0 f^0 \\ & + P^0 (B^0 + B^1) \{ (C_1^0)^{-1} + (C_1^1)^{-1} \} \Delta (D_2^i) P^1 f^1 \} \\ & + 1/2 (P^0 + P^1) \Delta f \end{aligned} \quad \text{式 (24)}$$

ここで、

$$P_0 = (I - B_0 R_0)^{-1} \quad \text{式 (25)}$$

$$P_1 = (I - B_1 R_1)^{-1} \quad \text{式 (26)}$$

として表すことができる。式(24)の右辺第一項は、投入構造の変化が商品別総生産量に与える影響効果を表しており、第二項は屑・副産物のマーケットシェア構造の変化による影響効果を表している。第三項は通常商品の産出構造の変化による影響効果を示しており、第四項は商品別生産量に対する屑・副産物発生割合の変化による影響効果を表している。第五項が最終需要構造の変化による影響効果を表している。特に、第一項の B の変化については、通常商品と屑・副産物の投入構造とに分解が可能であることから

$$\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 \quad \text{式 (27)}$$

が成り立つ。従って、 B の変化に伴う影響効果は、通常商品に関する投入構造 B_1 の変化と屑・副産物の投入構造 B_2 の変化に伴う影響効果とに分解することが可能である。

ここで、 Δq は

$$\Delta q = \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \vdots \\ \Delta q_m \\ \Delta q_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta q_{m+n} \end{bmatrix} \quad \text{式 (28)}$$

m : エネルギー部門の数

n : 非エネルギー部門の数

として列ベクトルとして表されることから、特にエネルギー部門に関する成分要素を合計することにより、各構造変化に伴う内包型エネルギー必要量への影響効果を推計することができるであろう。特に、 B_2 、 D_2 の構造変化に着目することによって、屑・副産物の投入・産出構造の変化に伴う影響を定量的に識別することが可能となる。

5. おわりに

本研究では混合技術仮定に基づき廃棄物循環構造に着目した構造分解分析手法を提案することができた。これにより、ある二時点間における内包型エネルギー必要量の変化分について、どのような産業構造の変化が最も影響を及ぼしているのか等の比較検討を行うことができる。今後は、本モデルに実際の基本データを適用し実証分析を行っていく。

《参考文献》

- 1) 森口祐一・近藤美則・清水浩・石谷久 (1993):自動車による CO₂ 排出のライフサイクルエネルギー経済, 第 19 巻第 4 号
- 2) 乙間末広・森保文・中條寛・萩原一仁 (1994): 飲料容器のライフサイクル消費エネルギーとリサイクル効果, エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, Vol.15 No.5
- 3) 中村慎一郎 (1997): 廃棄物循環再利用の経済・環境効果の産業連関分析, 第 8 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.100-102.
- 4) 加河茂美 (1997): SNA 型産業連関表による環境保全政策の評価, 土木計画学研究・論文集, No.14
- 5) T.GIGANTES (1970): The representation of technology in input-output systems
- 6) 森口祐一 (1999): エネルギー・二酸化炭素排出原単位'95 (β版), 国立環境研究所, 環境庁
- 7) 総務庁 (1999): 平成 7 年(1995 年)産業連関表-係数編 (1), (2)
- 8) 総務庁 (1999): 平成 7 年(1995 年)産業連関表-総合解説編