

エネルギー需要構造の内部分解分析

加河茂美¹・稲村 肇²・Gloria P. GERILLA³

¹正会員 博(学) 国立環境研究所 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 東北大学教授 情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

³Member of JSCE, M. Eng., Graduate School of Information Sciences, University of Tohoku
(Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan)

本論文は、ハイブリッド型SNA産業連関モデルに基づき、構造階層化システムによる内部構造分解とI-O SDAによる外部構造分解とを結合させることによって、エネルギー需要構造の内部状態の変化がエネルギー供給産業起源の内包型エネルギー必要量に与える影響効果を推計するための分析手法を提案する。また同時に、本モデルの利用によって、エネルギー需要構造の解釈に一定の定義式を与える。実証分析の結果、1985年から1990年における日本経済の構造変化において、エネルギー需要構造の内部で機能する非エネルギー生産技術の変化は、商品循環を通して省エネルギーの方向に導いていることが示された。その一方で、エネルギー生産技術の変化はエネルギー利用増の方向に働いていることが明らかとなった。

Key Words : *hybrid rectangular input-output model, energy demand structure, hierarchical decomposition analysis, external I-O SDA*

1. はじめに

I-O SDA (Input-Output Structural Decomposition Analysis)は、「経済構造変化の主要な原因を識別するための比較静学分析」として定義付けられており¹⁾⁻²⁾、この方法論を環境分析の枠組みにまで拡張することによって、経済構造の変化が環境(例えば、二酸化炭素排出量、エネルギー必要量等)に与えるインパクトを定量的に評価することが可能となる。

I-O SDAの特徴は、環境へのインパクトの推計と同時に、そのインパクトが一体何のマクロ経済特性によって牽引されているのかを識別することが可能な点にある。

近年のSDAを応用した環境分析としては、Rose & Chen³⁾⁻⁴⁾、Rose & Casler⁵⁾、Gale⁶⁾、Wire⁷⁾の研究が挙げられる。これらの従来研究は、基本的には、産業連関システムの外側で独立変数として取り扱われる生産技術構造いわゆるレオンチェフインバースと最終需要構造の経時変化が環境に対してどのようなインパクトを与えるのかを相対評価するものである。

このような従来の環境分析を対象としたSDAを見ると、生産技術構造の内部構造分解にまで焦点を当てた研究は少ないように思われる。例えば、Lin & Polenske⁸⁾は中国経済における生産技術いわゆる投入係数行列をエネルギー投入係数行列(エネルギー投入構造)と非エネルギー投入係数行列(非エネルギー投入構造)とに分解し、それぞれの投入構造

の変化が内包型エネルギー必要量に与える影響効果を識別している。しかしながら、この研究の枠組みでは、生産技術構造自身がエネルギー需要構造と非エネルギー需要構造とに分解されていないため、エネルギー投入構造と非エネルギー投入構造の変化がどちらの需要構造に対して影響を与えているのか識別できない。ここで言うエネルギー需要構造、非エネルギー需要構造とは、ある産業が外生的な最終需要分を産出する結果、直接間接的に生産側に波及していくエネルギー商品循環及び非エネルギー商品循環をそれぞれ意味している。

今日の日覚ましい生産技術進歩は、経済システム全体を通して明らかに内包型エネルギー必要量を変動させているのだが、経済システムを構成するサブシステムの性格の違いというものがどの程度寄与しているのかということは明らかになっていない。特にそのサブシステムの代表的なものとしてエネルギー需要構造と非エネルギー需要構造とに着目し、そのような識別分析を行うことはエネルギーの変動要因を解明する上で有用なものとなるであろう。

Bullard & Herendeen⁹⁾⁻¹¹⁾に詳しいように、内包型エネルギー必要量は最終生産物の外生的な需要分を生産するために直接間接的に必要とされるエネルギー投入量を積み上げることによって得ることができる。このとき、この積み上げ過程の内部構造に着目すると、その迂回的な中間過程の段階で非エネルギー投入構造を内包化していることが分かる(図-1を参照

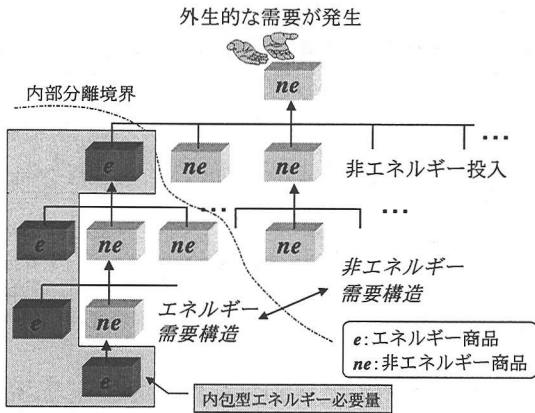


図-1 非エネルギー生産技術のフィードバックによって集積する内包型エネルギー必要量

されたい)。この図は、非エネルギー生産技術が、非エネルギー商品の生産のためだけでなく、エネルギー商品の生産のためにも間接的に使用されるという二重の性格を持っていることを明らかにしている。当然、エネルギー生産技術についてもこのような二重の性格を持っていることは言うまでもない。

ここで、Kagawa & Inamura^{12),13)}が、非エネルギー生産技術をフィードバックループに持つ構造階層化システムを SNA 産業連関モデルに適用することによって、この二重の性格を内部分離することに成功していることを述べておきたい。また最近の研究では、Gerilla et al.¹⁴⁾によって、非エネルギー生産技術自身も建設部門に関する技術とそれ以外の技術とに内部構造分解され、建設部門に関する産業連関サブシステムを通して直接間接的に誘発される二酸化排出量の推計するための分析手法が提案されている。

特に、本研究における内部分離法を SDA の方法論に拡張するとき、エネルギー需要構造の内部で機能する非エネルギー生産技術の変化が環境に対してどのような影響を与えるのか定量評価することができる。また同様に、エネルギー生産技術の変化によるインパクトも推計することが可能になる。これによって、エネルギー需要構造の内部状態の変化が内包型エネルギー必要量に与える影響効果を識別することが可能になる。以上を踏まえて、本研究では、エネルギー需要構造の内部構造分解分析を行うことを目的とする。また本研究は、構造階層化システムの導入による内部分離法と I-O SDA を接合することにより、新たな分析視座を提供するものであり、この一般化手法の開発という意味においては、基礎研究として位置付けられるであろう。

2. ハイブリッドモデルへの展開

(1) SNA の基本構造

商品技術仮定に基づくと、SNA 体系における生産均衡式は、下式(1)、(2)のように定式化することができる¹⁵⁾。この生産均衡式の導出については、紙面の都合上割愛させて頂く。

$$q = (I - BC^{-1})^{-1} f \quad (1)$$

$$g = (I - C^{-1}B)^{-1} C^{-1} f \quad (2)$$

ここで、

- q : 商品別国内総生産額列ベクトル
- g : 産業別国内総生産額列ベクトル
- f : 外生的な商品別最終需要列ベクトル
- B : SNA 体系における投入係数行列
- C : SNA 体系における産出係数行列
- I : 単位行列

上式(1)と(2)に示される SNA タイプのモデルと商品 × 商品の伝統的なレオンチェフモデルが異なる点は新たに産業という主体が追加されている点にある。従って、SNA 体系における投入係数行列 $B = [b_{ij}]$ とは、第 j 産業の総産出 1 単位当たり必要とされる第 i 商品の投入量を表しており、また産出係数行列 $C = [c_{ij}]$ とは第 j 産業の総産出 1 単位当たり生産された第 i 商品の産出量を表している。これ以降、これらの係数行列のことをそれぞれ投入構造及び産出構造と呼んでいるので注意されたい。式(1)、(2)を用いることにより、外生的な最終需要 f の発生に伴う商品別、産業別の生産波及効果を推計することが可能となる。

(2) ハイブリッドモデルの定式化

従来型の Ayres & Kneese モデル¹⁶⁾は、本来中間財として取り扱われるエネルギー資源を抜き出し、各産業の産出量に比例関係を持たせることにより、物量ベースでの生産均衡モデルを構築するものである。つまり、金銭ベースで評価された投入産出係数を用いて推計される均衡生産額ベクトルに、あらかじめ外生的に算定された生産額 1 単位当たりのエネルギー必要量を乗じることによって、内包型エネルギー必要量を決定するものである。実際にはこれは、均衡生産額ベクトルを平均的なエネルギー価格で割り戻す格好を取るようになる。産業連関分析上、同じ部門として取り扱われる同質なエネルギー商品の市

場価格に産業横断的な変動がない場合は推計上問題はない。しかしながら、産業横断的な変動がある場合は、Ayres モデルを利用することは適切ではない。この理由は、産業連関システムの間接波及の段階でエネルギー価格の違う同質なエネルギー商品が集積されてしまうことから、その結果得られる金銭ベースでの内包型エネルギー必要量を平均的なエネルギー価格で割り戻しても物量ベースでの内包型エネルギー必要量を正確に計測することはできないからである。

従って本研究では、このようなエネルギー価格の産業横断的な変動が物量ベースの投入構造に与える影響を弱めるため、前節の式(1)、(2)に示される生産均衡式をハイブリッド化する。ここで言うハイブリッド化とは、物量ベースと金銭ベースの両方で評価された投入係数行列、産出係数行列を定義して生産均衡式を再定式化することを意味する。

今、SNA 形式における産業部門及び商品部門をそれぞれエネルギー部門(e)、非エネルギー部門(ne)とに分割し、投入係数行列 B 、産出係数行列 C を次式(3)、(4)のように再定義する。なお、これ以降評価単位である 100 万円を MY 、 $Tcal$ を TC と略記する。

$$B = \begin{matrix} e & ne \\ \left[\begin{array}{c|c} B_{11}(TC/TC) & B_{12}(TC/MY) \\ \hline B_{21}(MY/TC) & B_{22}(MY/MY) \end{array} \right] & \end{matrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{matrix} e & ne \\ \left[\begin{array}{c|c} C_{11}(TC/TC) & C_{12}(MY/TC) \\ \hline C_{21}(TC/MY) & C_{22}(MY/MY) \end{array} \right]^T & \end{matrix} \quad (4)$$

ここで、

- $B_{11}(TC/TC)$: 投入係数小行列
(エネルギー商品×エネルギー供給産業)
- $B_{12}(TC/MY)$: 投入係数小行列
(エネルギー商品×非エネルギー産業)
- $B_{21}(MY/TC)$: 投入係数小行列
(非エネルギー商品×エネルギー供給産業)
- $B_{22}(MY/MY)$: 投入係数小行列
(非エネルギー商品×非エネルギー産業)
- $C_{11}(TC/TC)$: 産出係数小行列
(エネルギー供給産業×エネルギー商品)
- $C_{12}(MY/TC)$: 産出係数小行列
(エネルギー供給産業×非エネルギー商品)
- $C_{21}(TC/MY)$: 産出係数小行列
(非エネルギー産業×エネルギー商品)
- $C_{22}(MY/MY)$: 産出係数小行列
(非エネルギー産業×非エネルギー商品)

T は転置を表す記号である。さらに、産業連関システムの整合上、最終需要 f もまたハイブリッド形式として表され、

$$f = [f_1(TC) : f_2(MY)]^T \quad (5)$$

が定式化される。ここで、 f_1 はエネルギー商品に関する最終需要行ベクトルを示しており、評価単位は $Tcal$ で表される。また、 f_2 は非エネルギー商品に関する最終需要行ベクトルを示しており、評価単位は 100 万円 で表される。特に、 f_1 の最終需要成分として家計消費支出項目について見ると、これは家計部門がエネルギー供給産業から直接購入する電力、ガス、灯油、ガソリンといった最終エネルギー必要量を表している。このとき、最終需要構造は

$$f = \underbrace{[f_1(TC) : 0]^T}_{f_e} + \underbrace{[0 : f_2(MY)]^T}_{f_{ne}} \quad (6)$$

として分解することも可能である。ここで、 0 は零ベクトルを表している。

式(3)、(4)、(5)を、それぞれ式(1)、(2)の右辺に代入することにより、外生的な最終需要 f の発生に伴って波及する商品別産出量 q 及び産業別産出量 g を推計することができる。このとき、商品別産出量と産業別産出量はそれぞれ

$$q = [q_1(TC) : q_2(MY)]^T \quad (7)$$

$$g = [g_1(TC) : g_2(MY)]^T \quad (8)$$

として表され、 $Tcal$ と 100 万円 という 2 つの次元を持って現れてくる。ここで、エネルギー部門の数を m とすると、 g_1 は m 次元行ベクトルとして表されることから、このベクトル成分を合計することによって、エネルギー供給産業起源の内包型エネルギー必要量を推計することが可能となる。

(3) エネルギー需要構造の内部構造分解

本研究では、非エネルギー生産技術構造が内包化されたエネルギー需要構造を導出するため、非エネルギー投入構造、非エネルギープロダクトミックスをフィードバックループに持つ構造階層化システムが適用されている。

まず、式(3)、(4)から与えられる B 、 C^{-1} を下式(9)、(10)のように分解する。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}}_B = \underbrace{\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & O \end{bmatrix}}_{B_e} + \underbrace{\begin{bmatrix} O & O \\ O & B_{22} \end{bmatrix}}_{B_{ne}} \quad (9)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} [C^{-1}]_{11} & [C^{-1}]_{12} \\ [C^{-1}]_{21} & [C^{-1}]_{22} \end{bmatrix}}_{C^{-1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} [C^{-1}]_{11} & [C^{-1}]_{12} \\ [C^{-1}]_{21} & O \end{bmatrix}}_{[C^{-1}]_e} + \underbrace{\begin{bmatrix} O & O \\ O & [C^{-1}]_{22} \end{bmatrix}}_{[C^{-1}]_{ne}} \quad (10)$$

ここで、 O は零行列を表している。また、 C^{-1} は商品技術仮定の基でマーケットシェア構造を表しており、以下のような小行列で構成されている。

$[C^{-1}]_{11}$: エネルギー供給産業によって生産されるエネルギー商品のマーケットシェア小行列
 $[C^{-1}]_{12}$: エネルギー供給産業によって生産される非エネルギー商品のマーケットシェア小行列
 $[C^{-1}]_{21}$: 非エネルギー産業によって生産されるエネルギー商品のマーケットシェア小行列
 $[C^{-1}]_{22}$: 非エネルギー産業によって生産される非エネルギー商品のマーケットシェア小行列

このとき本研究では、式(9)の右辺に示される B_e , B_{ne} をそれぞれエネルギー投入構造、非エネルギー投入構造と呼び、また式(10)の右辺に示される $[C^{-1}]_e$, $[C^{-1}]_{ne}$ をそれぞれエネルギープロダクトミックス、非エネルギープロダクトミックスと呼んでいる。式(9), (10)をそれぞれ式(1), (2)に代入し、非エネルギー投入構造、非エネルギープロダクトミックスをフィードバックループに持つ構造階層化システムを適用すると、下式(11), (12)あるいは(13), (14)に示されるような2つのタイプの等価な内部構造分解式を導出することができる(下式(11), (12)の導出については Kagawa & Inamura^{12),13)}を参照にされたい)。また、下式(13), (14)の導出については付録 I に示す。

$$q = (L_0 B [C^{-1}]_e + I) (L_1 B_e [C^{-1}]_{ne} + I) L_3 f \quad (11)$$

$$g = (L_2 B [C^{-1}]_e + C^{-1}) (L_1 B_e [C^{-1}]_{ne} + I) L_3 f \quad (12)$$

あるいは、

$$q = (L_0 B_e C^{-1} + I) (L_4 B_{ne} [C^{-1}]_e + I) L_3 f_{ne} \quad (13)$$

$$g = (L_2 B_e C^{-1} + C^{-1}) (L_4 B_{ne} [C^{-1}]_e + I) L_3 f_{ne} \quad (14)$$

ここで、

$$L_0 = (I - BC^{-1})^{-1} \quad (15)$$

$$L_1 = (I - B[C^{-1}]_{ne})^{-1} \quad (16)$$

$$L_2 = (I - C^{-1}B)^{-1} C^{-1} \quad (17)$$

$$L_3 = (I - B_{ne}[C^{-1}]_{ne})^{-1} \quad (18)$$

$$L_4 = (I - B_{ne}C^{-1})^{-1} \quad (19)$$

特に、式(11), (12)の右辺における $(L_1 B_e [C^{-1}]_{ne} + I)$ の項を考えると、

$$\begin{aligned} L_1 B_e [C^{-1}]_{ne} + I &= \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ (B[C^{-1}]_{ne})^k B_e [C^{-1}]_{ne} \right\} + I \\ &= \left\{ I + B[C^{-1}]_{ne} + (B[C^{-1}]_{ne})^2 + (B[C^{-1}]_{ne})^3 + \dots \right\} B_e [C^{-1}]_{ne} + I \end{aligned} \quad (20)$$

と級数展開できるので、式(6)の右辺第二項に示される非エネルギー最終需要 f_{ne} を考える上では、式(20)に示される $k=1$ 以降の級数項は恒等的に0に等しく無視することができる。従って、式(11), (12)は

$$q = (L_0 B [C^{-1}]_e + I) (B_e [C^{-1}]_{ne} + I) L_3 f_{ne} \quad (21)$$

$$g = (L_2 B [C^{-1}]_e + C^{-1}) (B_e [C^{-1}]_{ne} + I) L_3 f_{ne} \quad (22)$$

として再定式化される。同様に、式(13), (14)の右辺における $(L_4 B_{ne} [C^{-1}]_e + I)$ を

$$L_4 B_{ne} [C^{-1}]_e + I = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ (B_{ne} [C^{-1}]_e)^k B_{ne} [C^{-1}]_e \right\} + I \quad (23)$$

として級数展開し、非エネルギー最終需要の発生に伴う商品循環を考えると、式(23)に示される $k=0$ 以降の級数項は恒等的に完全に無視することができる。従って、式(13), (14)は明らかに、

$$q = (L_0 B_e C^{-1} + I) L_3 f_{ne} \quad (24)$$

$$g = (L_2 B_e C^{-1} + C^{-1}) L_3 f_{ne} \quad (25)$$

として再定式化される。

本研究では、プロダクトミックスの問題を勘案し、エネルギー供給産業起源の内包型エネルギー必要量を分析の対象とすることから、式(22), (25)に示される産業別生産均衡式に焦点を当てる。本来であれば、

式(22)あるいは式(25)のいずれかを選択して分析を進めていく必要があるが、この選択に関する経済学的な根拠を導き出せない状況下で、どちらかの内部構造分解式を最優先することは不適切であると考えられる。従って本研究では、*ad-hoc* な解を前提に両方の内部構造分解式を採用し、その平均的な内部状態を考慮することにより、この問題に対処している。ここでの平均的な内部状態とは、等価なフィードバックシステムの平均を取ることを意味している。以上を踏まえ、再度定式化に戻ろう。

式(22)と(25)の右辺を見比べても明らかのように、 $(L_2B[C^{-1}]_e + C^{-1})(B_e[C^{-1}]_e + I)$ と $(L_2B_eC^{-1} + C^{-1})$ のフィードバックシステムは等価であり、それぞれ R_{g1} 、 R_{g2} という記号で表すことができ、下式(26)、(27)に示されるような 4 つの小行列で表すことができる。

$$R_{g1} = \begin{bmatrix} (R_{g1})_{11} & (R_{g1})_{12} \\ (R_{g1})_{21} & (R_{g1})_{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$R_{g2} = \begin{bmatrix} (R_{g2})_{11} & (R_{g2})_{12} \\ (R_{g2})_{21} & (R_{g2})_{22} \end{bmatrix} \quad (27)$$

ここで、

$(R_{g1})_{11}$ 、 $(R_{g2})_{11}$: エネルギー部門の最終需要によって誘発するエネルギー供給産業起源のエネルギー産出小行列

$(R_{g1})_{12}$ 、 $(R_{g2})_{12}$: 非エネルギー部門間の経済取引によって誘発するエネルギー供給産業起源のエネルギー産出小行列

$(R_{g1})_{21}$ 、 $(R_{g2})_{21}$: エネルギー部門の最終需要によって誘発する非エネルギー産業起源の非エネルギー産出小行列

$(R_{g1})_{22}$ 、 $(R_{g2})_{22}$: 非エネルギー部門間の経済取引によって誘発する非エネルギー産業起源の非エネルギー産出小行列

エネルギー部門数を m 、全部門数を n とすると、 $(R_{g1})_{11}$ と $(R_{g2})_{11}$ は、 (m,m) 型行列として表される。また、 $(R_{g1})_{12}$ と $(R_{g2})_{12}$ は $(m,n-m)$ 型行列、 $(R_{g1})_{21}$ と $(R_{g2})_{21}$ は $(n-m,m)$ 型行列、 $(R_{g1})_{22}$ と $(R_{g2})_{22}$ は $(n-m,n-m)$ 型行列として表される。これらの小行列成分は、例えば、Anton¹⁷⁾や Lang¹⁸⁾の Linear Algebra を見れば、それぞれ行列展開できることが分かる。

Sonis & Hewings^{19)・22)}は、伝統的なアクティビティーベースの地域間産業連関モデルに対し構造階層化システムを導入し行列展開を行い、数学的な所見と地

域間産業連関構造との関係を詳細に検証しているの、詳しくはこちらを参照されたい。ここで、本研究で用いている SNA 体系に対し、この行列展開を適用しようとする、極めて複雑な式になってしまうことが確認されている。従って、本論文では、この複雑な行列展開については割愛している。この行列展開の導入の有無は、本質的な問題にはならず、むしろ導入回避の方が本モデルの枠組みを理解する上で手助けとなることを付け加えて述べておきたい。

本題に戻り、式(26)、(27)において、非エネルギー部門間の経済取引によって直接間接的に誘発されるエネルギー供給産業起源のエネルギー産出係数行列を表す $(R_{g1})_{12}$ 、 $(R_{g2})_{12}$ に焦点を当てると、非エネルギー部門に関するサブシステムをフィードバックループに持つエネルギー供給産業起源のエネルギー需要構造を得ることができる。

3. 内部構造分解と I-O SDA の接合

本節では、エネルギー需要構造の内部構造分解と I-O SDA の接合を図り、エネルギー生産技術、非エネルギー生産技術の変化がエネルギー需要構造の内部にフィードバックされることによる内包型エネルギー必要量への影響効果を推計する。この影響効果を推計するためには、再度ハイブリッドモデルの原形にまで立ち戻る必要がある。式(22)、(25)に示される生産均衡式にまで立ち戻り、それぞれ下式(28)、(29)のように再定式化する所から始める。

$$g = \gamma_1 \gamma_2 L_3 f_{ne} \quad (28)$$

$$g = \gamma_3 L_3 f_{ne} \quad (29)$$

ここで、

$$\gamma_1 = L_2 B [C^{-1}]_e + C^{-1} \quad (30)$$

$$\gamma_2 = B_e [C^{-1}]_{ne} + I \quad (31)$$

$$\gamma_3 = L_2 B_e C^{-1} + C^{-1} \quad (32)$$

今後の式の展開上、 $\gamma_1 \gamma_2$ 、 γ_3 がそれぞれ R_{g1} 、 R_{g2} に等しいことに注意されたい。これ以降、上式(28)~(32)の内部構造分解式に基づき I-O SDA への展開を行なっていく。

まず、式(28)に示される生産均衡式の離散的な構造分解を考える。今、 t_0 年(期間)から t_1 年(期間)

におけるタイムスパン($t_0 < t_1$)を考え、式(28)の時系列変化量を求めると、

$$\Delta g = \gamma_1^t \gamma_2^t L_3^t \hat{f}_{ne}^t - \gamma_1^{t_0} \gamma_2^{t_0} L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_0} \quad (33)$$

が成り立つ。ここで、 Δ は t_0 年から t_1 年における時系列変化量を表す記号である。また、 $\hat{f}_{ne}^{t_0}$ と $\hat{f}_{ne}^{t_1}$ はそれぞれ t_0 年、 t_1 年における非エネルギー最終需要を対角成分に持つ対角行列を表している。式(33)は外部決定要素が4つであり、合計で41本つまり24本の構造分解式を得ることができる。この合計で24本の構造分解式から *Polar* の構造分解式を導出すると、 γ_1 と γ_2 の変化が $g = G(\gamma_1, \gamma_2, L_3, \hat{f}_{ne})$ に与える影響効果は

$$\begin{aligned} \Delta g|_{\gamma_1} + \Delta g|_{\gamma_2} = & \\ & \frac{1}{24} (6\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_0} L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_0} + 2\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_0} L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_1} + 2\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_0} L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_0} \\ & + 2\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_0} L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_1} + 2\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_1} L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_0} + 2\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_1} L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_1} \\ & + 2\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_1} L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_1} + 6\Delta\gamma_1\gamma_2^{t_1} L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_0}) \\ & + \frac{1}{24} (6\gamma_1^{t_0} \Delta\gamma_2 L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_0} + 2\gamma_1^{t_0} \Delta\gamma_2 L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_1} + 2\gamma_1^{t_0} \Delta\gamma_2 L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_0} \\ & + 2\gamma_1^{t_0} \Delta\gamma_2 L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_1} + 2\gamma_1^{t_1} \Delta\gamma_2 L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_0} + 2\gamma_1^{t_1} \Delta\gamma_2 L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_1} \\ & + 2\gamma_1^{t_1} \Delta\gamma_2 L_3^{t_0} \hat{f}_{ne}^{t_1} + 6\gamma_1^{t_1} \Delta\gamma_2 L_3^{t_1} \hat{f}_{ne}^{t_0}) \end{aligned} \quad (34)$$

として定式化される (*Polar* の構造分解式の補足説明については付録IIを参照されたい)。ここでの G は、 $\gamma_1, \gamma_2, L_3, \hat{f}_{ne}$ という4つの変数を持つ関数形を表している。この関数形は式(28)に示される通りである。さらに、 γ_1 と γ_2 は、式(30)、(31)に示されるように、エネルギー部門の投入産出構造、非エネルギー部門の投入産出構造を有した形となっており、それぞれの構造変化に関する構造分解式を定式化することが可能である。

まず、構造分解式の展開を簡単にするため、 γ_1 を下式(35)のように変形する。

$$\gamma_1 = L_5 [C^{-1}]_e + C^{-1} - I \quad (35)$$

ここで、

$$L_5 = (I - C^{-1}B)^{-1} \quad (36)$$

上式(35)から、 γ_1 の構造分解式は

$$\Delta\gamma_1 = \Delta L_5 [C^{-1}]_e^{t_0} + L_5^t \Delta [C^{-1}]_e + \Delta [C^{-1}] \quad (37.a)$$

$$= L_5^0 \Delta [C^{-1}]_e + \Delta L_5 [C^{-1}]_e + \Delta [C^{-1}] \quad (37.b)$$

として定式化される。また、 ΔL_5 が

$$\Delta L_5 = L_5^0 \Delta [C^{-1}] B^{t_0} L_3^t + L_5^t [C^{-1}]^0 \Delta B L_3^t \quad (38.a)$$

$$= L_5^t [C^{-1}]^0 \Delta B L_3^t + L_5^t \Delta [C^{-1}] B^{t_0} L_3^t \quad (38.b)$$

$$= L_5^t [C^{-1}]^0 \Delta B L_3^0 + L_5^t \Delta [C^{-1}] B^{t_0} L_3^0 \quad (38.c)$$

$$= L_5^t [C^{-1}]^0 \Delta B L_3^0 + L_5^t \Delta [C^{-1}] B^{t_0} L_3^0 \quad (38.d)$$

として分解されることを考えると、式(37.a)~(37.b)は合計で8本の構造分解式を持つことが分かる。本来であるならば、式(38.a)~(38.d)の等価な4つの構造分解式を用いて分析がなされるべきであるが、実証分析の結果幸いにも、式(38.a)~(38.b)と式(38.c)~(38.d)はほとんど同じ感度を示していた。ゆえに、本研究では式(38.a)~(38.b)の分解式を利用することによって、最終的な *Polar* の構造分解式を導出している。

次に、 γ_2 の構造分解式は

$$\Delta\gamma_2 = \Delta B_e [C^{-1}]_{ne}^0 + B_e^0 \Delta [C^{-1}]_{ne} \quad (39.a)$$

$$= B_e^0 \Delta [C^{-1}]_{ne} + \Delta B_e [C^{-1}]_{ne} \quad (39.b)$$

として定式化される。式(37.a)、(37.b)及び式(38.a)、(38.b)から得られる γ_1 に関する合計で4本の構造分解式と式(39.a)、(39.b)に示される γ_2 に関する2本の構造分解式を式(34)に代入することによって、非エネルギー生産技術変化に関する *Polar* の構造分解式を得ることができる。ここで、投入構造の変化 ΔB とプロダクトミックスの変化 $\Delta [C^{-1}]_e$ が、それぞれエネルギー成分と非エネルギー成分とに分解されることを考えると、非エネルギー投入構造変化 ΔB_{ne} 及び非エネルギープロダクトミックス変化 $\Delta [C^{-1}]_{ne}$ のフィードバック (下式(40)の下線部分) が

$$\begin{aligned} g &= G(\gamma_1, \gamma_2, L_3, \hat{f}_{ne}) \\ &= G(R_{g1}(B_e, \underline{B_{ne}}, [C^{-1}]_e, \underline{[C^{-1}]_{ne}}), L_3, \hat{f}_{ne}) \end{aligned} \quad (40)$$

に与える影響効果 $\Delta g|_{R_{g1}(B_{ne})}$ 、 $\Delta g|_{R_{g1}([C^{-1}]_{ne})}$ を推計することができる。ここで、 $\Delta g|_{R_{g1}(B_{ne})}$ は R_{g1} の内部で非エネルギー投入構造が変化することによる産業別産出量への影響効果を表している。同様に、 $\Delta g|_{R_{g1}([C^{-1}]_{ne})}$ は R_{g1} の内部で非エネルギープロダク

トミックスが変化することによる産業別産出量への影響効果を表している。これらの影響効果は、 R_{g1} と同じ次元を有しており、特に $(R_{g1})_{12}$ と同じ小行列成分に焦点を当てれば、非エネルギー投入構造、非エネルギープロダクトミックスの変化がエネルギー需要構造の内部にフィードバックされることによる影響効果を推計することが可能となる。

次に、式(28)と等価な式(29)のPolarの構造分解式を導出してみよう。今、 t_0 年から t_1 年におけるタイムスパン($t_0 < t_1$)を考え、式(29)の時系列変化量を求めると、

$$\Delta g = \gamma_3^1 L_3^1 \hat{f}_{ne}^{t_1} - \gamma_3^0 L_3^0 \hat{f}_{ne}^{t_0} \quad (41)$$

が成り立つ。上式(41)から、Polarの構造分解式を求めると、 γ_3 の変化が g に与える影響効果として

$$\Delta g|_{\gamma_3} = \frac{1}{6} (2\Delta\gamma_3 L_3^0 \hat{f}_{ne}^{t_0} + \Delta\gamma_3 L_3^1 \hat{f}_{ne}^{t_1} + \Delta\gamma_3 L_3^1 \hat{f}_{ne}^{t_0} + 2\Delta\gamma_3 L_3^1 \hat{f}_{ne}^{t_1}) \quad (42)$$

を得ることができる。また、 γ_3 は式(32)のように表されることから、その構造分解式として

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_3 = & \frac{1}{6} (2\Delta L_2 B_e^0 [C^{-1}]^0 + \Delta L_2 B_e^1 [C^{-1}]^0 + \Delta L_2 B_e^0 [C^{-1}]^1 + 2\Delta L_2 B_e^1 [C^{-1}]^1) \\ & + \frac{1}{6} (2L_2^0 \Delta B_e [C^{-1}]^0 + L_2^0 \Delta B_e [C^{-1}]^1 + L_2^1 \Delta B_e [C^{-1}]^0 + 2L_2^1 \Delta B_e [C^{-1}]^1) \\ & + \frac{1}{6} (2L_2^0 B_e^0 \Delta [C^{-1}] + L_2^0 B_e^1 \Delta [C^{-1}] + L_2^1 B_e^0 \Delta [C^{-1}] + 2L_2^1 B_e^1 \Delta [C^{-1}]) \\ & + \Delta [C^{-1}] \end{aligned} \quad (43)$$

を得ることができる。ここで、 $L_2 = L_5 C^{-1}$ が成り立つことを考えると、 ΔL_2 は

$$\Delta L_2 = \Delta L_5 [C^{-1}]^0 + L_5^1 \Delta [C^{-1}] \quad (44.a)$$

$$= L_5^0 \Delta [C^{-1}] + \Delta L_5 [C^{-1}]^1 \quad (44.b)$$

として分解できる。従って、式(38.a)、(38.b)を上式(44.a)、(44.b)に代入することによって得られる非エネルギー成分に関する4本の構造分解式から、

$$\begin{aligned} \Delta L_2 = & \frac{1}{4} (L_5^0 \Delta [C^{-1}]_{ne} B^{t_0} L_3^1 + L_5^0 \Delta [C^{-1}]_{ne} B^{t_1} L_3^1) ([C^{-1}]^0 + [C^{-1}]^1) \\ & + \frac{1}{4} (L_5^0 [C^{-1}]^0 \Delta B_{ne} L_3^1 + L_5^0 [C^{-1}]^1 \Delta B_{ne} L_3^1) ([C^{-1}]^0 + [C^{-1}]^1) \\ & + \frac{1}{2} (L_5^0 + L_5^1) \Delta [C^{-1}]_{ne} \end{aligned} \quad (45)$$

を定式化することができる。上式(45)を式(43)の右辺第一項に代入することによって得られる $\Delta\gamma_3$ の分解式を、更に式(42)に代入することにより、非エネルギー投入構造変化及び非エネルギープロダクトミックス変化のフィードバック(下式(45)の下線部分)が

$$\begin{aligned} g = & G(\gamma_3, L_3, \hat{f}_{ne}) \\ = & G(R_{g2}(B_e, B_{ne}, [C^{-1}]_e, [C^{-1}]_{ne}), L_3, \hat{f}_{ne}) \end{aligned} \quad (45)$$

に与える影響効果 $\Delta g|_{R_{g2}(B_{ne})}$ 、 $\Delta g|_{R_{g2}([C^{-1}]_{ne})}$ を推計することができる。ここで、 $\Delta g|_{R_{g2}(B_{ne})}$ は R_{g2} の内部で非エネルギー投入構造が変化することによる産業別産出量への影響効果を表している。同様に、 $\Delta g|_{R_{g2}([C^{-1}]_{ne})}$ は R_{g2} の内部で非エネルギープロダクトミックスが変化することによる産業別産出量への影響効果を表している。

以上より、求められた $\Delta g|_{R_{g1}(B_{ne})}$ 、 $\Delta g|_{R_{g1}([C^{-1}]_{ne})}$ 、 $\Delta g|_{R_{g2}(B_{ne})}$ 、 $\Delta g|_{R_{g2}([C^{-1}]_{ne})}$ は、当然 R_g と同じ次元を有しており、特に前節における式(26)、(27)の右辺に示される $(R_g)_{12}$ と同じ小行列成分に焦点を当てれば、非エネルギー投入構造変化 ΔB_{ne} 、非エネルギープロダクトミックス構造変化 $\Delta [C^{-1}]_{ne}$ のエネルギー需要構造へのフィードバックに伴う影響効果を推計することが可能となる。特に、本研究では、等価なフィードバックシステムによって表現されるエネルギー需要構造の平均的な内部状態を前提としていることから、このフィードバック効果として

$$\Delta g|_{R_g(B_{ne})} = \frac{1}{2} (\Delta g|_{R_{g1}(B_{ne})} + \Delta g|_{R_{g2}(B_{ne})}) \quad (47)$$

$$\Delta g|_{R_g([C^{-1}]_{ne})} = \frac{1}{2} (\Delta g|_{R_{g1}([C^{-1}]_{ne})} + \Delta g|_{R_{g2}([C^{-1}]_{ne})}) \quad (48)$$

を用いている。上式(47)、(48)から、エネルギー供給産業起源の内包型エネルギー必要量への影響効果を表す $(R_g)_{12}$ と同じ小行列成分を抜き出すことによって、非エネルギー投入構造変化及び非エネルギープロダクトミックス変化の影響効果を推計することが可能となる。

これらのエネルギー需要構造全体の変化による影響効果は、本ハイブリッドモデルのI-O SDAを連続時間軸上で考えると理解しやすい。本節で実行された内部構造分解とI-O SDAの接合とは、つまりエネルギー需要構造を表す $(R_g)_{12}$ の単位時間変化量に関して、

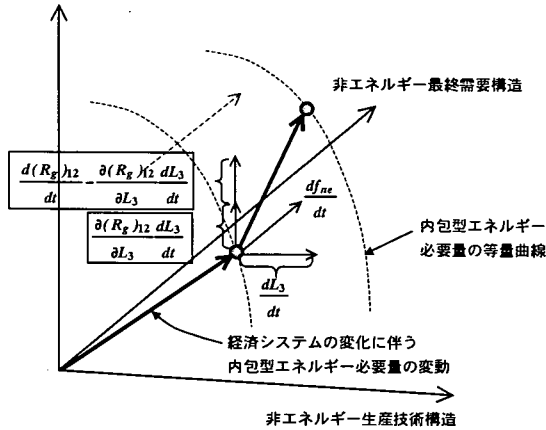


図-2 非エネルギー生産技術変化のフィードバックによる影響効果

$$\frac{\partial(R_g)_{12}}{\partial L_3} \frac{dL_3}{dt} =$$

$$\frac{\partial(R_g)_{12}}{\partial L_3} \frac{\partial L_3}{\partial B_{ne}} \frac{dB_{ne}}{dt} + \frac{\partial(R_g)_{12}}{\partial L_3} \frac{\partial L_3}{\partial [C^{-1}]_{ne}} \frac{d[C^{-1}]_{ne}}{dt} \quad (49)$$

非エネルギー投入構造の変化による影響効果 非エネルギープロダクトミックスの変化による影響効果

となる構造分解式を導出することに対応する。また、エネルギー需要構造全体の変化による影響効果から上式(49)に示される非エネルギー生産技術の変化による影響効果分を差し引くことによって、エネルギー生産技術の変化による影響効果を

$$\frac{d(E_g)_{12}}{dt} = \frac{d(R_g)_{12}}{dt} - \frac{\partial(R_g)_{12}}{\partial L_3} \frac{dL_3}{dt} \quad (50)$$

エネルギー生産技術の変化による影響効果

として求めることもできるであろう。ここで、上式(50)の左辺に示される $d(E_g)_{12}/dt$ は、エネルギー需要構造の内部でエネルギー生産技術が変化することによる影響効果を表している。この概念図として、図-2が描けるであろう。図中の囲み線で示されたものが非エネルギー投入構造変化及び非エネルギープロダクトミックス変化の影響効果を足しあわせたフィードバック効果を示している。

Polar の構造分解式を利用した理由は、式(49)、(50)を離散近似し、I-O SDA の枠組みにのせるためであった。

4. 実証分析：1985-1990

(1) 基本データの適用

本研究で用いた主な基本データは以下に示す通りである。

- ① 1985年、1990年産業連関表 X 表(列 527×行 411)
- ② 1985年、1990年産業連関表 V 表(列 108×行 108)
- ③ 1985年、1990年産業連関表物量表
- ④ 1985年、1990年産業連関表屑・副産物発生表
- ⑤ 産業連関表による二酸化炭素排出原単位(環境庁, 国立環境研究所作成)

これらの基本データより、1985年、1990年におけるハイブリッド型 SNA 産業連関表を作成している。なお、基準年価格としては1990年価格指数を用いている。具体的な作成手順については、加河・稲村²³⁾を参考にされたい。

(2) エネルギー生産技術変化・非エネルギー生産技術変化のフィードバック効果の計測

本研究で取り扱うエネルギー需要構造は、非エネルギー生産技術をフィードバックループに持つ構造階層化システムを適用することによって集積される内包型エネルギー必要量を表している。従って、エネルギー需要構造の変化に伴う影響効果は、非エネルギー投入構造の変化分 $\Delta g|_{R_g(B_{ne})}$ 、非エネルギープロダクトミックスの変化分 $\Delta g|_{R_g([C^{-1}]_{ne})}$ 、そしてエネルギー生産技術の変化分とに分解することが可能となる。特に、エネルギー生産技術の変化による影響効果は、式(50)に示されるようにエネルギー需要構造全体の変化による影響効果から非エネルギー生産技術の変化に伴う影響効果 $\Delta g|_{R_g(B_{ne})} + \Delta g|_{R_g([C^{-1}]_{ne})}$ を差し引くことによって推計することができる。この分析対象の概念は、ある外生的な需要に伴う商品循環を考えると見れば容易に理解できよう。本推計結果の理解のために、ここで少し言及しておく。

例えば、外生的なセメント需要に伴うセメント供給産業の生産を考えて見ると、セメント製品を生産するためには「石炭供給産業からの石炭」だけでなく、その石炭を運搬するために投入される「輸送機械製造業からの輸送機械、特殊産業機械、重電機器等」が必要である。さらに、輸送機械製造業がこれらの商品を生産するために必要とする「鋼材製造業からの鋼材」は石炭を生産要素として持つであろう。つまり、外生的なセメント需要の結果得られる直接間接的な石炭投入量は、輸送機械製造業によって必要とされる鋼材の投入構造の変化だけでなく、同時に輸送機械製造業における輸送機械、特殊産業機械、重電機器等のプロダクトミックスの変化によっても

影響を受けることになる。この前者の構造変化がまさに非エネルギー投入構造変化に相当し、後者の構造変化が非エネルギープロダクトミックスの変化に相当している。また、これら以外の影響効果があるとすれば、それは石炭生産に関する生産技術変化によるものであり、これがつまり前述のエネルギー生産技術の変化に相当している。

表-1は、実際に前節で開発された分析手法に1985年と1990年におけるハイブリッド型SNA産業連関表を適用することによって推計された各非エネルギー商品別の内包型エネルギー必要量に与える影響効果を示している。ここで、表-1の(e)に示されている ΔW は、エネルギー供給産業起源の内包型エネルギー産出行列(R_g)₁₂と零行列 O を小行列成分として持つ行列の変化を表している。つまり、この行列はエネルギー需要構造全体を表しており、この変化による影響効果についてはKagawa & Inamura¹²⁾によって既に推計されている。(a)と(b)の推計値は、それぞれ非エネルギー投入構造、非エネルギープロダクトミックスの変化による影響効果を表しており、式(47)と(48)を用いることによって計算されたものである。(c)の推計値は非エネルギー生産技術変化による影響効果を表しており、(a)+(b)によって計算されたものである。(d)の推計値はエネルギー生産技術変化に伴う影響効果を表しており、前述のように(e)-(c)あるいは(e)-(a)-(b)によって計算されたものである。

表-1から、例えば、水産食料品(No.16)の推計結果について見てみると、エネルギー需要構造全体の変化によって内包型エネルギー必要量が13,388Tcalも増加しているのが分かる((5)の列を参照されたい)。ここで、(3)の列から、エネルギー需要構造の内部で非エネルギー生産技術が変化したことによる影響効果を見てみると、その値は11,620Tcalであり、全影響分の約87%にも相当することが分かる。(2)の列から、この主要な要因が非エネルギープロダクトミックスの変化であることは明らかである。また、エネルギー生産技術の変化による影響効果分は残りの約13%ということになる。その一方で、建築(No.63)について見てみると、(3)の列から、エネルギー需要構造の内部で非エネルギー生産技術が変化したことによる影響は-9,258Tcalであり、非エネルギー生産技術の進歩が大きく省エネルギーの方向に働いていることが分かる。また、これらの商品とは対照的に、エネルギー生産技術の変化によって内包型エネルギー必要量が大きく増減した商品もある。(4)の最大値、最小値から、大きく増加した商品が非鉄金属精錬・精製(No.46)、大きく減少した商品が電子・通信機器(No.55)であることが分かる。同様に、他の商品につ

いてもその影響効果を考察することができる。

さらに、表-1の最後の行に示されている合計の欄を見てみると、(3)の列から、エネルギー需要構造内部の非エネルギー生産技術の変化による総効果は-48,406Tcalと大きなマイナスの値を示しており、総エネルギー必要量を低減方向に作用させていることが分かる。また、商品全体を通して、非エネルギープロダクトミックスの変化が大きく省エネルギーの方向に導いていることが認識できる。その一方で、エネルギー生産技術の変化による総効果は151,483Tcalと実に大きい。これらの推計結果から言えることは、非エネルギー生産技術の進歩がエネルギー需要構造の内部で省エネルギー効果を生みだしているのだが、エネルギー生産技術の変化に伴うエネルギー利用増加分の方が絶対的に大きいため、その結果として省エネルギー効果が完全に打ち消されてしまっているということである。

5. 政策的な含意

前述したエネルギー生産技術の変化に伴うエネルギー利用増加の主な要因について考えて見ると、特に電力生産及び石油製品生産のために必要とされる原油・天然ガスの投入構造の変化が内包型エネルギー必要量の著しい増加を引き起こしており、これによってエネルギー需要構造の内部で省エネルギー効果が大きく打ち消されてしまっていることが分かった。この経験的事実は、極めて限定されたエネルギー生産技術の変化によってもたらされるエネルギー利用増加量が、非エネルギー部門全体における生産技術の進歩によって達成されるエネルギー節減量を容易に上回るということを指し示している。近年においては、鉄鋼業、セメント業をはじめとする非エネルギー多消費産業における省エネルギー対策(例えば、鉄鋼業における高温鋳片連続式鋳造設備の導入やセメント業における中低温廃熱利用発電装置の導入など)に重点がおかれ、実際にその十分な成果を上げている。本研究全体を通して言えることは、これらの成果がある極めて限定されたエネルギー生産技術の変化によって一瞬にして無駄になってしまう危険性が高いということである。またそれは逆に、その限定されたエネルギー生産技術の変化によって、非エネルギー生産技術進歩による効果と同等以上の成果が一気に上がるということも意味している。

以上より、非エネルギー多消費産業の省エネルギー対策を継続することは当然重要なことではあるが、むしろエネルギー供給産業自身の生産技術進歩に重

表-1 エネルギー需要構造の内部状態変化に伴う内包型エネルギー必要量への影響効果 (単位:Tcal)

非エネルギー商品 Non-energy Commodity (No.7~No.94)	エネルギー需要構造の変化による影響効果				
	(a) ΔB_{ec}	(b) $\Delta[C^{-1}]_{ec}$	(c) ΔL_3	(d) $\Delta(E_g)_{12}$	(e) ΔW
7. 耕種農業	2	-122	-120	1,800	1,680
8. 畜産・蚕養	1	7	8	246	254
9. 農業サービス	0	-6	-6	346	340
10. 林業	-1	222	220	-2,548	-2,328
11. 漁業	2	2,567	2,569	-783	1,786
12. 金属鉱物	-11	-2,329	-2,340	5,331	2,991
13. 非金属鉱物	-1	25	24	-358	-334
14. と畜	2	-2	1	217	218
15. 畜産食料品	10	-298	-288	6,674	6,386
16. 水産食料品	20	11,601	11,620	1,768	13,388
17. 精穀・製粉	10	53	63	4,770	4,833
18. 農産保存食料品	25	-1,461	-1,436	12,438	11,002
19. その他の食料品	17	2,177	2,195	11,286	13,481
20. 飲料	20	-2,053	-2,033	1,700	-333
21. 飼料・有機質肥料	0	5	5	179	184
22. たばこ	3	-11	-8	547	539
23. 繊維工業製品	20	-670	-650	1,566	916
24. 衣服・その他の織	28	-836	-808	-5,812	-6,620
25. 製材・木製品	-2	139	137	-1,763	-1,626
26. 家具・装飾品	8	-579	-572	1,012	440
27. ハルブ・紙	11	-338	-327	-2,437	-2,764
28. 紙加工品	1	-47	-46	-1,503	-1,549
29. 出版・印刷	8	-236	-229	16	-213
30. 化学肥料	0	5	6	61	67
31. 無機化学基礎製品	-1	154	153	-176	-23
32. 有機化学基礎・中	0	-65	-65	174	109
33. 合成樹脂	5	-990	-985	146	-839
34. 化学繊維	4	-30	-26	854	828
35. 化学最終製品	24	-3,078	-3,055	-1,331	-4,386
36. プラスチック製品	8	-885	-877	479	-398
37. ゴム製品	9	-686	-677	2,455	1,778
38. なめし革・毛皮	3	-122	-119	622	503
39. ガラス・ガラス製	2	-296	-294	-123	-417
40. セメント・セメン	0	-10	-10	-76	-86
41. 陶磁器	2	60	62	13	75
42. その他の窯業・土	3	-39	-36	-1,131	-1,167
43. 鉄鉄・粗鋼	0	-589	-589	1,384	795
44. 鋼材	11	-4,044	-4,033	11,279	7,246
45. 鋳造品・その他	0	-37	-37	-45	-82
46. 非鉄金属製錬・精	-21	-1,496	-1,518	48,940	47,422
47. 非鉄金属加工製品	6	107	113	-6,962	-6,849
48. 建設・建築用金属	1	-107	-106	-46	-152
49. その他の金属製品	8	-730	-722	-139	-861
50. 一般産業機械	21	-1,853	-1,832	-2,777	-4,609
51. 特殊産業機械	33	-1,332	-1,298	-11,759	-13,057
52. その他の一般機器	9	-775	-766	3,209	2,443
53. 事務用機器	10	-484	-474	-3,817	-4,291
54. 民生用電気機械	37	3,268	3,305	-13,817	-10,512
55. 電子・通信機器	57	-6,778	-6,721	-53,802	-60,523
56. 重電機器	15	-1,142	-1,127	-3,775	-4,902
57. その他の電気機器	14	-1,318	-1,304	-1,917	-3,221
58. 自動車	92	-6,005	-5,914	-21,150	-27,064
59. 船舶・同修理	8	-702	-695	1,144	449
60. その他の輸送機械	5	-261	-255	885	630
61. 精密機械	11	-644	-633	-373	-1,006
62. その他の製造工業製	16	-466	-450	-2,028	-2,478
63. 建築	113	-9,371	-9,258	458	-8,800
64. 建設補修	0	-6	-6	21	15
65. 土木	76	-5,613	-5,538	23,124	17,586
66. 水道	18	-267	-249	5,983	5,734
67. 廃棄物処理	3	-60	-56	819	763
68. 商業	96	374	470	28,283	28,753
69. 金融・保険	7	-155	-148	2,478	2,330
70. 不動産仲介及び賃貸	1	-12	-11	1,913	1,902
71. 住宅賃貸料	15	-739	-724	7,942	7,218
72. 鉄道輸送	23	-2,025	-2,002	-1,073	-3,075
73. 道路輸送	26	-6,362	-6,336	25,126	18,790
74. 水運	27	-1,368	-1,341	18,593	17,252
75. 航空輸送	10	451	461	13,068	13,529
76. 倉庫	2	-153	-151	545	394
77. 運送付帯サービス	4	-102	-98	1,247	1,149
78. 通信	5	-81	-76	117	41
79. 放送	1	-23	-22	-272	-294
80. 教育	35	-333	-298	-7,148	-7,446
81. 研究	2	-49	-47	1,029	982
82. 医療・保健	116	-4,854	-4,739	11,257	6,518
83. その他の公共サービ	5	-366	-361	1,952	1,591
84. 広告	-1	18	17	-8	9
85. 調査・情報サービス	0	3	3	5	8
86. 物品賃貸サービス	0	-99	-99	256	157
87. 自動車・機械修理	7	-638	-631	1,821	1,190
88. その他の対事業所サ	2	-58	-56	-1,610	-1,666
89. 娯楽サービス	39	1,209	1,249	1,501	2,750
90. 飲食店	68	1,868	1,936	3,234	5,170
91. 旅館・その他の宿泊	22	2,129	2,151	4,332	6,483
92. その他の対個人サー	24	1,602	1,626	1,369	2,995
93. 分類不明	-1	43	42	552	594
94. 公務	49	-1,163	-1,114	23,475	22,361
最大値	116	11,601	11,620	48,940	47,422
最小値	-21	-9,371	-9,258	-53,802	-60,523
合計	1,359	-49,762	-48,406	151,482	103,076

注) 部門番号 No.1~No.6 が抜けていることに注意された。この No.1~No.6 はエネルギー商品を表しており、本研究においては石炭・亜炭(No.1)、原油・天然ガス(No.2)、石油製品(No.3)、石炭製品(No.4)、電力(No.5)、ガス・熱供給(No.6)として設定されている。

点を置くことの方が、我が国のエネルギー利用構造を適切に変革する上でより有効となるであろう。

6. おわりに

本研究では、構造階層化システムの導入による内部構造分解と従来の I-O SDA による外部構造分解を結び付けることによって、エネルギー需要構造の内部変化が内包型エネルギー必要量に与える影響効果を識別するための分析手法を提案することができた。本分析手法による実証分析の結果、商品全体を通し

て、非エネルギー生産技術の変化がエネルギー需要構造の内部で省エネルギーの方向に導いていることが明らかとなった。その一方で、エネルギー生産技術の変化は内包型エネルギーの観点から、エネルギー利用増の方向に働いていることが示された。なお、この分析結果は、1985 年と 1990 年の間の経済構造変化が内包型エネルギー必要量に与えた影響の特徴を表しているに過ぎず、これを持って過去における日本のエネルギー利用構造変化の特徴を規定したとすることはできない。

また従来の研究では、エネルギー需要構造自身の解釈が曖昧であったが、本研究では、非エネルギー生産技術をフィードバックループに持つ構造階層化システムと I-O SDA を接合させることにより、エネ

ルギー需要構造の解釈に一定の定義式を与えることに成功した。

最後に、本モデルの限界と今後の課題を述べて本論文の総括とする。

提案された分析手法は極めて限定されたものであり、これを持って、内部構造分解と I-O SDA による外部構造分解の一般的な接合法とすることはできない。今後の課題としては、フィードバックループ構造を持つ構造階層化システムと I-O SDA のより一般化された接合法を導出することが上げられよう。この接合法は、既に Gerilla et al.¹⁴⁾によって実行されているように、特定化された建設技術（例えば、道路建設技術や橋梁建設技術など）の進歩が二酸化炭素排出構造の内部でどのような働きをしているのかを調べるのにも役に立つであろう。また、将来的には、現在開発途中のハイブリッド型結合生産モデルにこの接合法を適用することによって、例えば、エネルギー需要構造の内部に当然有するべき建設副産物の再利用技術の進歩が内包型エネルギー必要量に与える影響効果を識別することも可能となる。本研究の対象はマクロ的なエネルギー需要ではあったが、その限定された接合法に関してある程度の有用性を示せたことは今後の展開においては大きな成果であると考えている。

また、ハイブリッド型産業連関モデル自身が持つ限界についても今後の課題としなければいけないであろう。その一つがエネルギー変換についての記述についてである。ハイブリッド型産業連関モデルはある期間に生産された財・サービスの量とその利用量がバランスするように物量ベースと価値ベースで表現された連立方程式体系を作り、その均衡解を導出するものであり、そこで想定される生産関数は線形型となっている。従って、例えば、エネルギー変換効率の向上が商品循環を通して経済・環境にどのような影響を及ぼすのかということを議論するにはこのままのフレームワークでは難しい。これを議論するためには、財・サービス間の代替性・補完性を記述した工学的な生産関数を個別に求め、ハイブリッド型産業連関モデルに帰着させる必要があると考えている。特に、本モデルと工学的生産関数との帰着は今後の課題としたい。

謝辞：本論文を纏めるにあたり、数多くの方々から貴重なコメントを頂きました。第 13 回国際産業連関分析学会の発表の場では、Karen R. Polenske (MIT), Francis C. McMichael (Carnegie Mellon University), Joyashree Roy (Jadavpur University) の各先生方から貴

重なコメントを頂きました。ここに心より謝意を表します。また、第 23 回土木計画学研究発表会の場でも、武藤慎一(岐阜大学)、加藤博和(名古屋大学)の各先生方から貴重なコメントを頂きました。ここに心より謝意を表します。

付録 I 構造階層化システムの導入

式(1)の生産均衡式を変形すると、

$$\begin{aligned} q &= (I - BC^{-1})^{-1} f \\ &= (I - BC^{-1})^{-1} (I - B_{ne}C^{-1})(I - B_{ne}C^{-1})^{-1} f \\ &= (I - BC^{-1})^{-1} \{I - (B - B_e)C^{-1}\} (I - B_{ne}C^{-1})^{-1} f \end{aligned} \quad (a-1)$$

となる。ここで、 $(I - BC^{-1})^{-1}$ を L_0 で表し、さらに変形していくと、

$$\begin{aligned} q &= (L_0 B_e C^{-1} + I)(I - B_{ne}C^{-1})^{-1} f \\ &= (L_0 B_e C^{-1} + I)(I - B_{ne}C^{-1})^{-1} \cdot \\ &\quad (I - B_{ne}[C^{-1}]_{ne})(I - B_{ne}[C^{-1}]_{ne})^{-1} f \\ &= (L_0 B_e C^{-1} + I)(I - B_{ne}C^{-1})^{-1} \{I - B_{ne}(C^{-1} - [C^{-1}]_e)\} \cdot \\ &\quad (I - B_{ne}[C^{-1}]_{ne})^{-1} f \end{aligned} \quad (a-2)$$

を得ることができる。 $(I - B_{ne}C^{-1})^{-1}$ を L_4 で表し、式(a-2)を整理すると、最終的に、

$$q = (L_0 B_e C^{-1} + I)(L_4 B_{ne}[C^{-1}]_e + I)(I - B_{ne}[C^{-1}]_{ne})^{-1} f \quad (a-3)$$

が成り立つ。また、産出の二面性より、

$$g = (L_2 B_e C^{-1} + C^{-1})(L_4 B_{ne}[C^{-1}]_e + I)(I - B_{ne}[C^{-1}]_{ne})^{-1} f \quad (a-4)$$

が成り立つ。ここで、 L_2 は $(I - C^{-1}B)^{-1}C^{-1}$ に等しい。

付録 II Polar の構造分解式の補足説明

今、I-O SDA の基本構造を理解するために、オープンレオンチェフ体系に基づく単純な所得分配モデルについて考えてみよう。 n 次元オープンレオンチェフ体系下での所得分配モデルは、

$$y = w(I - A)^{-1} f \quad (a-5)$$

として良く知られている。ここで、 w は総産出量 1 単位当たりの雇用者所得を成分要素に持つ n 次元行ベクトルを表しており、 f は外生的な最終需要を成分要素に持つ n 次元列ベクトルを表している。また、 A は (n, n) 型の投入産出係数行列を表しており、 $(I - A)^{-1}$ はレオンチェフインパースと呼ばれている。式(a-5)から、外生的な最終需要 f を生産するために直接間接的に必要とされる雇用者所得 y を推計することが可能となる。ここで、後述する I-O SDA の一

般形の記述と式(a-5)から導かれる I-O SDA の記述との対応関係を分かり易くするため、式(a-5)の各変数 $w, (I-A)^{-1}f$ をそれぞれ x_1, x_2, x_3 と書き直す。つまり、式(a-5)は

$$y = x_1 x_2 x_3 = \prod_{i=1}^3 x_i \quad (\text{a-6})$$

と書き表される。上式(a-6)に基づき I-O SDA モデルの簡単な説明及び定式化を行なう。 y, x_1, x_2, x_3 が時間あるいは期間 t に関する連続関数であると考え、あるタイムスパンにおける y の変化量を求めると、

$$\Delta y = \int \prod_{i=1}^3 x_i \quad (\text{a-7})$$

が定式化されるであろう。時間 t に関する線積分経路が特定化されている場合は、上式(a-7)より、 Δy の値を推計することが可能であり、また例えば、 $(\partial y / \partial x_2)(dx_2 / dt)$ を求めることによって、レオンチェフ行列つまり生産技術の変化が雇用者所得に与える影響効果を推計することも可能となる。同様に、 $(\partial y / \partial x_1)(dx_1 / dt), (\partial y / \partial x_3)(dx_3 / dt)$ を求めることによって、それぞれ労働投入構造、最終需要構造の変化が雇用者所得に与える影響効果を推計することもできるであろう。しかしながら、実際は、 x_1, x_2, x_3 の時間に関する真なる線積分経路を特定化することは難しく、この問題については何らかの成長経路を想定して近似する方法を取らざるを得ない。そこで、本研究では、*Polar* の構造分解と呼ばれている接近法を試みる。*Polar* の構造分解とは、 t_0 年における所得分配の状態 $y(x_1^0, x_2^0, x_3^0)$ から t_1 年における所得分配の状態 $y(x_1^1, x_2^1, x_3^1)$ への移行に関して、

$$\Delta y = \Delta x_1 x_2^0 x_3^0 + x_1^1 \Delta x_2 x_3^0 + x_1^1 x_2^1 \Delta x_3 \quad (\text{a-8})$$

$$= \Delta x_1 x_2^0 x_3^0 + x_1^1 x_2^0 \Delta x_3 + x_1^1 \Delta x_2 x_3^0 \quad (\text{a-9})$$

$$= x_1^0 \Delta x_2 x_3^0 + \Delta x_1 x_2^1 x_3^0 + x_1^1 x_2^1 \Delta x_3 \quad (\text{a-10})$$

$$= x_1^0 \Delta x_2 x_3^0 + x_1^0 x_2^1 \Delta x_3 + \Delta x_1 x_2^1 x_3^0 \quad (\text{a-11})$$

$$= x_1^0 x_2^0 \Delta x_3 + \Delta x_1 x_2^0 x_3^1 + x_1^1 \Delta x_2 x_3^0 \quad (\text{a-12})$$

$$= x_1^0 x_2^0 \Delta x_3 + x_1^0 \Delta x_2 x_3^1 + \Delta x_1 x_2^1 x_3^0 \quad (\text{a-13})$$

が成立する成長経路を想定し、それらの等価な構造分解式の平均を取ることによって得られる分解式のことを言う。従って、この *Polar* の構造分解式から、労働投入構造、生産技術構造、最終需要構造の変化が雇用者所得に与えるインパクトを離散近似することができる。ここまでは、外生的な決定要因の数が3個である単純な所得分配モデルを例にとり、I-O SDA について概説してきた。次に、決定要因の数が n 個である一般的な乗数モデルについて考えてみよう。このとき、乗数モデルは、

$$y = x_1 x_2 x_3 \cdots x_{n-1} x_n = \prod_{i=1}^n x_i \quad (\text{a-14})$$

と定式化されるであろう。一般に決定要因の数が n 個の時、複数の等価な構造分解式の数は $n!$ 本存在する。これは、下式(a-15)のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta y &= (\Delta x_1) x_2^0 x_3^0 \cdots x_{n-1}^0 x_n^0 + x_1^1 (\Delta x_2) x_3^0 \cdots x_{n-1}^0 x_n^0 \\ &+ \cdots + x_1^1 x_2^1 x_3^0 \cdots (\Delta x_{n-1}) x_n^0 + x_1^1 x_2^1 x_3^0 \cdots x_{n-1}^1 (\Delta x_n) \\ &= (\Delta x_1) x_2^0 x_3^0 \cdots x_{n-1}^0 x_n^0 + x_1^1 x_2^0 (\Delta x_3) \cdots x_{n-1}^0 x_n^0 \\ &+ \cdots + x_1^1 x_2^1 x_3^0 \cdots (\Delta x_{n-1}) x_n^0 + x_1^1 x_2^1 x_3^0 \cdots x_{n-1}^1 (\Delta x_n) \\ &\quad \vdots \\ &= x_1^0 x_2^0 x_3^0 \cdots x_{n-1}^0 (\Delta x_n) + x_1^0 x_2^0 x_3^0 \cdots (\Delta x_{n-1}) x_n^1 \\ &+ \cdots + x_1^0 (\Delta x_2) x_3^0 \cdots x_{n-1}^0 x_n^1 + (\Delta x_1) x_2^1 x_3^0 \cdots x_{n-1}^1 x_n^1 \end{aligned} \quad (\text{a-15})$$

上式(a-15)に示される $n!$ 本の構造分解式の平均を取ることによって、一般的な乗数モデルの *Polar* の構造分解式を得ることができる。最後に、*Polar* の構造分解式が持つ問題点を指摘して補足説明を終わりにしたい。この構造分解式が抱える問題としては、決定要因の数が多くなればなるほど、等価な構造分解式の数が増えてしまい、構造分解式の選択可能性に伴う解の変動が指摘されている。これに関しては、産業連関モデルが抱える部門統合の問題、タイムスパンの問題を勘案した上で感度分析を実行し、I-O SDA が実証分析の接近法として相応しいかどうか別途議論していく必要があると考えている。この経験的議論については、対象地域が日本ではないが、Dietzenbacher & Los^{(24) (25)} に詳しいので参照されたい。

参考文献

- 1) Carter, A.: Structural Change in the American Economy, Cambridge, MA, Harvard University Press, 1970.
- 2) Skolka, J.: Input-Output Structural Decomposition Analysis for Austria, *Journal of Policy Modeling*, Vol.11, pp.45-66, 1989.
- 3) Chen, C. Y. & Rose, A.: A Structural decomposition analysis of energy demand in Taiwan, *The Energy Journal*, Vol.11, pp.127-146, 1990.
- 4) Rose, A. & Chen, C. Y.: Sources of changes in energy use in the U.S economy, 1972-1982, *Resources and Energy*, Vol.13, pp.1-21, 1991.
- 5) Rose, A. & Casler, S.: Input-Output Structural Decomposition Analysis: A Critical Appraisal, *Economic Systems Research*, Vol.8, No.1, pp.33-62, 1996.
- 6) Gale, L. R.: Trade Liberalization and Pollution: An Input-Output Study of Carbon Dioxide Emissions in Mexico, *Economic Systems Research*, Vol.7, No.3, pp.309-320, 1995.
- 7) Wier, M.: Sources of Change in Emissions from Energy: A Structural Decomposition Analysis, *Economic Systems Research*, Vol.10, No.2, pp.99-111, 1998.
- 8) Lin, X. & Polenske, K. R.: Input-Output Anatomy of China's Energy Use Changes in the 1980s, *Economic Systems Research*, Vol.7, No.1, pp.67-84, 1995.

- 9) Bullard, C. W. & Herendeen, R. A.: The energy cost of goods and services, *Energy Policy*, Vol.3, pp.268-278, 1975.
- 10) Bullard, C. W. & Herendeen, R. A.: Energy Impact of Consumption Decisions, *Proceedings of The IEEE*, Vol.63, No.3, pp.484-493, 1975.
- 11) Bullard, C. W., Penner, P. S. & Pilati, D. A.: Net energy analysis handbook for combining process and input-output analysis, *Resources and Energy*, Vol.1, pp.267-313, 1978.
- 12) Kagawa, S. & Inamura, H.: A Structural Decomposition of Energy Consumption Based on a Hybrid Rectangular Input-Output Framework: Japan's Case, *Economic Systems Research*, Vol.13, pp.339-363, 2001.
- 13) 加河茂美, 稲村肇: ハイブリッド型 SNA 産業連関モデルに基づくエネルギー利用構造の分解分析, 土木学会論文集, No.674/IV-51, pp.17-33, 2001.
- 14) Gerilla, G. P., Kagawa, S. & Inamura, H.: Environmental Effects due to Changes in Construction Technology, *Proceedings of Pan Pacific Association of Input-Output Studies: The 11th Conference*, pp.69-73, 2000.
- 15) U. N. Statistical Office: *A System of National Accounts, Studies in Method*, Series F, No.2, Rev. 3, 1968.
- 16) Ayres, R. U. & Kneese, A. V.: Production, Consumption, and Externalities, *American Economic Review*, Vol.59, pp.282-297, 1969.
- 17) Anton, H.: *Elementary Linear Algebra*, 5th ed., Wiley & Sons, 1987.
- 18) Lang, H.: *Linear Algebra*, 3rd ed., Addison-Wesley, 1987.
- 19) Sonis, M. & Hewings, G. J. D.: Hierarchies of regional sub-structure and their multipliers within input-output systems, Miyazawa revised., *Hitotsubashi Journal of Economics*, Vol.34, pp.33-44, 1993.
- 20) Sonis, M. & Hewings, G. J. D.: Matrix sensitivity, error analysis and internal/external multiregional multipliers., *Hitotsubashi Journal of Economics*, Vol.36, pp.61-70, 1995.
- 21) Sonis, M. & Miyazawa, K.: Synergetic interactions within the pair-wise hierarchy of economic linkages sub-systems, *Hitotsubashi Journal of Economics*, Vol.38, pp.183-199, 1997.
- 22) Sonis, M., Hewings, G. J. D., Guo, J. & Hulu, E.: Interpreting spatial economic structure: feedback loops in the Indonesian interregional economy, 1980, 1985, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.27, pp.325-342, 1997.
- 23) 加河茂美, 稲村肇: ハイブリッド型 SNA 産業連関表に基づくライフサイクルエネルギーの実証分析, 土木計画学研究・論文集, No.17, pp.461-470, 2000.
- 24) Dietzenbacher, E. & Los, B.: Analyzing Decomposition Analysis, in: A. Simonovits & A. E. Steenge(eds), *Prices, Growth and Cycles*, pp.108-131(London, Macmillan), 1997.
- 25) Dietzenbacher, E. & Los, B.: Structural Decomposition Techniques: Sense and Sensitivity, *Economic Systems Research*, Vol.10, No.4, pp.307-323, 1998.

(2001. 1. 19 受付)

INTERNAL DECOMPOSITION ANALYSIS OF ENERGY DEMAND STRUCTURE

Shigemi KAGAWA, Hajime INAMURA and Gloria P. GERILLA

This paper proposes an analytical tool, based on a hybrid rectangular input-output model, to estimate the impacts of the dynamic changes in the internal state of energy demand structure on the embodied energy requirements. The model contains a key feature that is to connect a hierarchical decomposition analysis with a traditional input-output structural decomposition analysis.

The empirical results between 1985 and 1990 show that the changes in the non-energy production technology within the energy demand structure have negative impacts, that is, saving of energy, while the changes in the energy production technology have reverse impacts.