

SNA 型産業連関表に基づく生産・消費・廃棄のライフサイクルアセスメント
 Life Cycle Assessment for Production, Consumption and Disposal
 by using SNA I-O Table

加河 茂美**, 稲村 肇***
 By Shigemi Kagawa**, Hajime Inamura***

1. 本研究の背景と目的

近年、国際的な傾向として“生産、消費、廃棄の環境への影響”に関心が集まり、生産段階、消費段階、廃棄段階における環境負荷の議論が数多くなされている。しかし、こうした議論はもっぱら有害物質の廃棄やリサイクルといった廃棄段階における環境負荷の低減方針に重点がおかれ、生産、消費、廃棄といった一連のライフサイクルを通しての議論は希薄になる傾向にある。その理由としては、ライフサイクルを議論する際の切り口が見えにくいことが考えられる。

例えば、ある製品の製造過程だけでなく、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になるまでのトータルシステムを考えた場合、原材料、エネルギーがどの産業に分配され環境にどのような影響を与えるのかという問題は、複雑な相互依存関係を持つ生産プロセスを1つずつ解明していかない限り、完全に把握することは困難であろう。しかし、産業連関分析では、こうした複雑な生産プロセス間の相互依存関係をあらかじめ投入係数行列として求めることにより、トータルシステムにおける生産波及効果を定量的に評価することができる。

本論文では、生産、消費、廃棄の各プロセスを同時に取り扱うことが可能である SNA 型産業連関表を用いて、新たなハイブリッド分析手法の提案を行い、本モデルを用いて日本のエネルギー消費構造を解明することを目的とする。最後に、本モデルにおいて提起される一般逆行列理論による廃棄物のライフサイクルアセスメント手法について説明する。

Key Word: エネルギー計画, 地球環境問題

**学生員 東北大学大学院 情報科学研究科

***F10-会員 工博 東北大学大学院教授 情報科学研究科

(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

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

2. 基本的な考え方

本モデルで用いる新 SNA 型産業連関形式を表-1 に示す。

表-1 新 SNA 型産業連関表の形式

	商品	産業	最終需要	合計
商品		U_{ij}	f_i	q_i
産業	V_{ij}			g_i
付加価値		y_j		
合計	q_j	g_j		

ここで、 V_{ij} , U_{ij} はそれぞれ産出行列と投入行列を示している。 q_i , g_i は、それぞれ商品別生産額ベクトルと産業別生産額ベクトルを示している。 f_i , y_j はそれぞれ最終需要ベクトルと付加価値ベクトルを示している。この新 SNA 型産業連関形式を用いることにより、本モデルの基本的な定式化が行われている。

まず、モデルの定式化にあたり議論の対象となるのが産業技術仮定と商品技術仮定の選択である。産業技術仮定とは、ある産業の生産物構成がどんなものであっても、各産業は主生産物で定まる生産技術に副生産物も従うことを意味する。一方、商品技術仮定とは、ある商品を主生産物として生産する産業もそれを副生産物として生産する産業も、同一の投入構造を持つとすることを意味する。この厳密な選定は非常に困難であるが、本研究ではある特定の商品に関する限りその生産に必要な諸原料の必要量は、産業主体の生産技術にあまり影響を受けないと想定し商品技術仮定を選定した。これ以降、商品技術仮定をもとに定式化を行う。

まず、商品技術仮定より、投入係数行列 B_{ij} , 産

出係数行列 C_{ij}^{-1} は以下のように求められる。

$$B_{ij} = U_{ij} / q_j \quad \dots (1)$$

$$C_{ij}^{-1} = V_{ij} / g_i \quad \dots (2)$$

次に、式(1)、(2)を用いると表1の需給バランス及び産出の二面性から最終需要ベクトル f と商品別総生産額ベクトル q 、産業別総生産額ベクトル g についての以下のような関係式を導出することができる。

$$q = (I - BC^{-1})^{-1} f \quad \dots (3)$$

$$g = C^{-1}(I - BC^{-1})^{-1} f \quad \dots (4)$$

この(3)、(4)式を用いると、最終需要 f の発生に伴う生産波及効果を分析することが可能となる。

3. ハイブリッドモデルへの展開

従来のライフサイクルアセスメントは、金銭ベースの産業連関表を基に構築されたモデルとなっており、同じ投入財であっても取引価格の違いによって、実際に取り扱われる物量が十分に反映されていないケースがある。特に、エネルギー財の投入価格のバラツキは、エネルギー必要量更には環境負荷の発生量に大きな誤差を与えることになる。そこで、本研究ではそのような誤差を極力なくするため、金銭ベースのみの I-0 モデルから金銭ベース、熱量ベースの両方をあわせもつハイブリッド I-0 モデルの展開を試みる。

今、表-1 に示した SNA のフレームにおいて産業部門及び商品部門をそれぞれエネルギー部門、非エネルギー部門とに分割し、それぞれの評価単位を金銭ベース(百万円)と熱量ベース(テラカロリー)によって表す。具体的な表し方については後述する。ここで求められた U 表、V 表を式(1)、(2)に代入すると、投入係数行列 B と産出係数行列 C を以下のように求めることができる。なお、これ以降評価単位である百万円を ME、テラカロリーを TC と略記する。

$$B = \begin{bmatrix} B_{11}(TC/TC) & B_{12}(TC/ME) \\ B_{21}(ME/TC) & B_{22}(ME/ME) \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11}(TC/TC) & C_{12}(ME/TC) \\ C_{21}(TC/ME) & C_{22}(ME/ME) \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

ここで、

$B_{11}(TC/TC)$: エネルギー部門間の投入係数行列

$B_{12}(TC/ME)$: エネルギー部門から非エネルギー部門への投入係数行列

$B_{21}(ME/TC)$: 非エネルギー部門からエネルギー部門への投入係数行列

$B_{22}(ME/ME)$: 非エネルギー部門間の投入係数行列

$C_{11}(TC/TC)$: エネルギー部門間の産出係数行列

$C_{12}(ME/TC)$: エネルギー部門から非エネルギー部門への産出係数行列

$C_{21}(TC/ME)$: 非エネルギー部門からエネルギー部門への産出係数行列

$C_{22}(ME/ME)$: 非エネルギー部門間の産出係数行列

式(5)、(6)を式(3)、(4)に代入することにより、生産波及に誘発されるエネルギー財、非エネルギー財の投入必要量を計算することができる。しかし、各波及段階におけるエネルギー消費を考えた場合、この分析手法ではある波及段階におけるエネルギー投入必要量を生産するために必要なエネルギー財のフローは、次の波及段階において示されることになる。エネルギー財の投入フローを考えると、ある商品の生産に必要な石油製品、電力、ガスといったエネルギー投入量を把握することは当然重要なことではあるが、その石油製品、電力、ガスを産出するために投入されたエネルギー財についても同時に考慮する必要がある。エネルギー消費については、こうした流れを1つの波及段階として取り扱うべきである。

本研究では、投入係数行列 B、マーケットシェア行列 C^{-1} をエネルギー部門と非エネルギー部門に分解し、商品技術仮定に基づき再定式化を行うことにより、前述した網羅的なエネルギー波及構造を定量的に評価する。まず、投入係数行列 B、マーケットシェア C^{-1} を下式(7)、(9)のように分解する。

$$B = B_E + B_{NE} \quad \dots (7)$$

$$B_E = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & O \end{bmatrix}, B_{NE} = \begin{bmatrix} O & O \\ O & B_{22} \end{bmatrix} \quad \dots (8)$$

$$C^{-1} = [C^{-1}]_E + [C^{-1}]_{NE} \quad \dots (9)$$

$$[C^{-1}]_E = \begin{bmatrix} [C^{-1}]_{11} & [C^{-1}]_{12} \\ [C^{-1}]_{21} & O \end{bmatrix}, [C^{-1}]_{NE} = \begin{bmatrix} O & O \\ O & [C^{-1}]_{22} \end{bmatrix}$$

・・・(10)

式(7)、(9)を式(3)、(4)に代入し式展開を行うと商品別生産ベクトル、産業別生産ベクトルについて以下のように分割された式を得ることができる。

$$q = (L_1 B_E C^{-1} + I)(L_2 B_{NE} [C^{-1}]_E + I)(I - B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^{-1} f \quad \dots (11)$$

$$g = C^{-1} q \\ = (L_1 B_E C^{-1} + I)(L_2 B_{NE} [C^{-1}]_E + I)(I - B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^{-1} f \quad \dots (12)$$

ここで、

$$L_1 = (I - BC^{-1})^{-1} \quad \dots (13)$$

$$L_2 = (I - B_{NE} C^{-1})^{-1} \quad \dots (14)$$

ここで、式(11)、(12)を非エネルギー部門のレオンテフ行列に相当する $B_{NE} [C^{-1}]_{NE}$ について級数展開すると下式(15)～(19)を求めることができる。

$$q = R_q + R_q B_{NE} [C^{-1}]_{NE} f + R_q (B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^2 f + \\ R_q (B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^3 f + R_q (B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^4 L_3 f \quad \dots (15)$$

$$g = R_g + R_g B_{NE} [C^{-1}]_{NE} f + R_g (B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^2 f + \\ R_g (B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^3 f + R_g (B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^4 L_3 f \quad \dots (16)$$

ここで、

$$R_q = (L_1 B_E C^{-1} + I)(L_2 B_{NE} [C^{-1}]_E + I) \quad \dots (17)$$

$$R_g = C^{-1} (L_1 B_E C^{-1} + I)(L_2 B_{NE} [C^{-1}]_E + I) \quad \dots (18)$$

$$L_3 = (I - B_{NE} [C^{-1}]_{NE})^{-1} \quad \dots (19)$$

この上式(15)～(19)を用いると、最終需要に伴う商品別、産業別の生産波及効果だけでなく、エネルギー部門と非エネルギー部門の取引関係をより明確に把握することが可能となる。本研究では、実際に上式に産業連関表等の基本データを適用して各生産波及段階における非エネルギー産業部門のエネルギー消費量を計算した。次にその計算結果及び考察について述べる。

4. 実証分析

(1) 基本データの適用

まず、平成2年産業連関表投入表及び物量表より、下表-2に示すエネルギー部門の投入量を金銭単位(ME)から物量単位(t, kl, 100m³)に変換した。得られたエネルギー投入量に、環境分析用産業連関表の中で用いられているエネルギー品目別熱量係数を乗じることによって最終的な熱量単位(Tcal)のエネルギー必要量を計算した。ただし、天然ガスについては、物量表に表されていないため、部門別品目別国内生産額表に示されている取引単価(37,435円/1000m³)を用いて物量単位に割り戻した。以上の作業より金銭・物量両方を併せ持つ産業連関表投入表を得ることができる。

産業連関表V表の熱量変換については、V表そのものが108部門のデータしかないため、基本分類(411×527)に沿った詳細な換算ができない。そこで、本研究ではモデルの有用性を確認するため、若干乱暴なやり方ではあるが品目別構成表に示されている物量と取引単価の関係から加重平均して得られる値をエネルギー財の平均的な取引単価とし、また熱量係数についても同様に求めた。得られた平均的な取引単価、熱量係数を用いて前述した天然ガスと同様な手法で産業別エネルギー産出量を求めた。

以上より求められた投入表(411×527)、V表(108×108)をそれぞれ中分類に集約化させることによって97部門のSNA型産業連関表を求めた。

表-2 エネルギー部門の設定

基本分類 (411×527)	エネルギー部門	
原料炭	石炭・亜炭	
一般炭・亜炭・無煙炭		
原油	原油・天然ガス	
天然ガス		
揮発油	石油製品	
ジェット燃料油		
灯油		
軽油		
A重油		
B・C重油		
ナフサ		
液化石油ガス		
コークス		石炭製品
事業用電力		
自家発電		
都市ガス	ガス・熱供給	
熱供給		

(2) 分析結果

ここでは、非エネルギー部門のエネルギー消費構造を分析した結果を示す。標準的なエネルギー消費

構造は、最終需要1単位の生産波及過程を得て、エネルギー部門から直接間接的に投入された必要量を求めることによって計算することができる。本モデルを用いて定式化すると下式のように表される。

$$EC_k^E = \sum_{l \in E} \left\{ R_g(B_{NE}[C^{-1}]_{NE})^l f_{k,l} \right\} \quad \dots (20)$$

$$EC_k^q = \sum_{l \in E} \left\{ R_q(B_{NE}[C^{-1}]_{NE})^l f_{k,l} \right\} \quad \dots (21)$$

ここで、

$f_k = {}^t(0 \dots 1_k \dots 0)$: 第k商品のみを1とした最終需要

EC_k^E : 第k商品の最終需要1単位の伴うエネルギー産業の誘発生産量(Tcal)

EC_k^q : 第k商品の最終需要1単位の伴うエネルギー商品の誘発生産量(Tcal)

式(20)を用いて各非エネルギー商品の最終需要1単位が誘発するエネルギー産業部門の生産量(Tcal)を計算した結果が下表-3である。この結果の全波及効果(L=0~∞)を見ると、鉄鉄・粗鋼商品の波及効果が約1.566Tcalと最も大きいことが分かる。次いで、有機化学基礎・中間製品(約0.15Tcal)、合成樹脂(約0.094Tcal)、化学肥料(約0.081Tcal)の順となっており、基礎化学系の産業が上位を占めていることが分かる。

表-3 各波及段階における誘発エネルギー消費量

(単位:Tcal)

	商品部門	波及過程					
		L=0~∞	L=0	L=1	L=2	L=3	L=4~
1	鉄鉄・粗鋼	0.15660	0.10319	0.03465	0.01201	0.00413	0.00263
2	有機化学基礎・	0.15027	0.09190	0.03565	0.01358	0.00529	0.00385
3	合成樹脂	0.09376	0.01246	0.04936	0.01926	0.00746	0.00526
4	化学肥料	0.08091	0.05574	0.01620	0.00519	0.00199	0.00179
5	鋼材	0.08024	0.00633	0.03633	0.02116	0.00965	0.00677
6	水運	0.07897	0.05434	0.01614	0.00507	0.00184	0.00159
7	道路輸送	0.07211	0.06612	0.00290	0.00153	0.00069	0.00087
8	化学繊維	0.07182	0.02156	0.02721	0.01359	0.00542	0.00404
9	無機化学基礎製	0.06905	0.04662	0.01349	0.00493	0.00207	0.00194
10	航空輸送	0.06771	0.06265	0.00203	0.00104	0.00077	0.00122
11	鋳造品・その	0.05271	0.01375	0.00936	0.01486	0.00824	0.00651
12	漁業	0.05130	0.04193	0.00472	0.00213	0.00115	0.00139
13	パルプ・紙	0.04979	0.02568	0.01245	0.00593	0.00286	0.00288
14	ゴム製品	0.04131	0.00554	0.01913	0.00879	0.00420	0.00365
15	非鉄金属製錬・	0.04043	0.02089	0.01027	0.00533	0.00207	0.00187
16	プラスチック製	0.03890	0.00357	0.00727	0.01367	0.00781	0.00658
17	その他の窯業・	0.03788	0.02267	0.00731	0.00423	0.00177	0.00191
18	ガラス・ガラス	0.03650	0.02297	0.00694	0.00338	0.00154	0.00167
19	繊維工業製品	0.03002	0.00654	0.00809	0.00672	0.00417	0.00450
20	水産食料品	0.02942	0.00237	0.01806	0.00487	0.00196	0.00216

注) この結果は、全波及効果(L=0~∞)の1位20番を示している。

5. 一般逆行列理論を用いた廃棄物のLCA

表-1のSNAフレームにおける産業部門に家計部門、商品部門に廃棄物部門をとり入れることによって拡張された(n, m)型投入係数行列B', (m, n)型産出係数行列C'を求めることができる。しかし、これらの行列は長方形列となっているため、通常の線形理論では逆行列を持たない。ゆえに、レオンテフ行列に相当するBC'は存在しないことになる。

ところが、一般逆行列理論のムーアペンローズ行列を用いると数学的に尤もらしい逆行列が一意に定まることが知られている。ムーアペンローズ一般逆行列とは行列Gが方程式Cx=yのノルム最小の最小2乗解Gyを与えるG(C')によって定義される。このムーアペンローズ一般逆行列の必要十分条件は、

$$CC^+C = C, (CC^+)^{\#} = CC^+ \\ C^+CC^+ = C^+, (C^+C)^{\#} = C^+C \quad \dots (22)$$

である。この新たに定義されるマーケットシェア行列C'を本モデルに適用することにより、廃棄物循環とエネルギー消費の関係を定量的に評価することが可能になると考えられる。

6. おわりに

- (1) 本論文によって、SNA型産業連関表においてもハイブリッド型のモデル構築が可能であることが確かめられた。
- (2) また、本モデルを用いて各商品別の最終需要に伴うエネルギー誘発量を計算した所、鉄鉄・粗鋼部門が約0.157tcalと最も大きく、次いで、有機化学基礎・中間製品(約0.15Tcal)、合成樹脂(約0.094Tcal)、化学肥料(約0.081Tcal)の順となっていることが分かった。
- (3) 本モデルに一般逆行列理論を適用する廃棄物のライフサイクルアセスメント手法を提起することができた。

[参考文献]

- 1) 池田明由, 森崎美貴, 管幹雄, 早見均, 藤原浩一, 吉岡完治(1996): 環境分析用産業連関表, 慶應義塾大学産業研究所。
- 2) Christoph Weber & Hermann Schnabl(1998): Environmental Important Intersectoral Flows: Insights from Main Contributions Identification and Minimal Flow Analysis, Economic Systems Research, Vol.10, No.4, pp.337-355.