

論 説

再生可能エネルギー導入の環境効果と経済効果

——シナリオ産業連関分析の応用——

藤 川 清 史*
王 嘉 陽†

もくじ

1. はじめに
2. 複数アクティビティモデル
3. 複数アクティビティモデルによるシミュレーション
4. まとめと今後の課題

参考文献

WEB情報

1. はじめに

伝統的な産業連関分析のフレームワークでは、1種類の生産物に1種類のアクティビティが対応している。言い換えると、生産物の数と産業（企業活動の種類）の数が等しいことを暗黙の前提として、生産量決定や価格決定の連立方程式が構成されている。

伝統的な産業連関分析のフレームワークでの「生産量決定モデル」は、次のように書かれる。

$$\mathbf{A}^d \mathbf{x} + \mathbf{f}^d + \mathbf{e} = \mathbf{x} \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}^d]^{-1} [\mathbf{f}^d + \mathbf{e}] \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{A} は投入係数行列、 \mathbf{x} , \mathbf{f} , \mathbf{e} , はそれぞれ、国内生産量、国内最終需要、輸出を表すベクトルである。右型の \mathbf{d} の添え字は国内財が対象であることを意味している。また伝統的な産業連関分析のフレームワークでの「価格決定モデル」は次のように書かれる。

$$\mathbf{p}^d \mathbf{A}^d + \mathbf{p}^m \mathbf{A}^m + \mathbf{v} = \mathbf{p}^d \quad (3)$$

$$\mathbf{p}^d = [\mathbf{p}^m \mathbf{A}^m + \mathbf{v}] [\mathbf{I} - \mathbf{A}^d]^{-1} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{p} , \mathbf{v} , はそれぞれ、価格、付加価値率を表すベクトルである。右型の \mathbf{m} の添え字は輸入財が対象であることを意味している。

* 名古屋大学大学院 国際開発研究科

† 名古屋大学大学院 国際開発研究科院生

このように生産量決定モデルも価格決定モデルも、正方形の投入係数行列（投入側と産出側が同数）を前提としているため、レオンチェフ逆行列が定義できている。しかし現実には、1つの生産物が複数のアクティビティから生産されることがある。電力産業がその典型であり、原子力発電・火力発電・水力発電・再生可能エネルギー発電などの発電方式は、その生産構造は随分と異なるのであるが、生産物は同一の「電力」である。このような場合、異なったアクティビティでどれだけの発電を行うかによって、エネルギー消費やCO₂排出などの環境負荷も異なる。近年温暖化防止対策の1つとして、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー¹⁾発電が注目されている。再生可能エネルギー発電によって火力発電を代替することの環境効果ならびに経済効果を試算することは、再生可能エネルギー発電の評価と今後の環境政策の策定に有用であると考えられる。

さて、早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所（2014）は『次世代エネルギーシステム分析用産業連関表』を発表した。『次世代エネルギーシステム分析用産業連関表』とは、総務省（2008）『2005年産業連関表』を基礎にして、「事業用電力部門」を「発電部門」と「送配電部門」に分離したうえ、さらに「発電部門」を原子力、火力、水力部門、再生可能エネルギー発電に分割したものである。加えて、再生可能エネルギー関連産業として電力施設建設を追加している。この産業連関データを利用することにより、再生可能エネルギー発電による火力発電を代替するときの環境効果・経済効果の分析が可能になった。

1つの生産物が複数のアクティビティで生産されることを前提としたモデル分析の先行研究としては、慶応義塾大学の一連の研究、吉岡・菅（1997）、石川他（1998）、疋田他（2000）等がある。そして、電力部門が複数のアクティビティで生産されることを前提としたモデル分析の先行研究は藤川（2011）、王（2016）などがある。本稿では、これらの先行研究にならい、電力部門の電源構成を変化させることで、どのように環境負荷と経済効果が異なるかを検討する。ただし、今回の検討は設備の運用時の環境効果と経済効果のみ焦点を当てており、設備建設段階の環境効果と経済効果は分析対象としない。

2. 複数アクティビティモデル

まず、電力が1つのアクティビティから作られる場合から説明を始める。通常の産業連関表を通常部門と電力部門に分ける。図1はその状況を示している。

図中の上付きの添字が1の場合は通常部門、2の場合は電力部門を表わしている。また添え字が11の場合には通常部門から通常部門への投入、12の場合には通常部門から電力部門への投入を表わす。21、22の場合も同様である。この例は通常部門と電力部門とに分かれているが、以下に示すように分析の方法としては、通常生産量決定モデルと変わらない。通常部門の生産関数は次式で表わされる。

$$x_j^1 = \min \left[\frac{X_{ij}^{11}}{a_{ij}^{11}}, \frac{x_j^{21}}{a_j^{21}} \right] \quad (i, j=1, \dots, n) \quad (5)$$

図1 通常の産業連関表 (通常部門と電力部門に分割)

		通常部門	電力部門	最終需要	生産額
		1, 2, ..., n			
通常部門	1 2 ⋮ n	\mathbf{X}_{ij}^{11}	x_i^{12}	\mathbf{f}_i^1	\mathbf{x}_i^1
電力部門		\mathbf{x}_j^{21}	x^{22}	f^2	x^2
付加価値		\mathbf{v}_j^{21}	v^2		
生産額		\mathbf{x}_j^1	x^2		

出所：筆者作成

ただし、

- x_j^1 : 通常部門第 j 部門の生産量
- X_{ij}^{11} : 通常部門第 j 部門への通常部門第 i 財投入量
- x_j^{21} : 通常部門第 j 部門への電力投入量
- a_{ij}^{11} : 通常部門第 j 部門への通常部門第 i 財投入係数
- a_j^{21} : 通常部門第 j 部門への電力投入係数

である。

電力部門の生産関数は次式のように表される。

$$x^2 = \min \left[\frac{x_i^{12}}{a_i^{12}}, \frac{x^{22}}{a^{22}} \right] \quad (i=1, \dots, n) \quad (6)$$

ただし、

- x^2 : 電力部門の生産量
- x_i^{12} : 電力部門への通常部門第 i 財投入量
- x^{22} : 電力部門への電力投入量
- a_i^{12} : 電力部門への通常部門第 i 財投入係数
- a^{22} : 電力部門への電力投入係数

である。これらの生産関数より次の需給一致式が得られる。

$$[\mathbf{A}^{11} \mid \mathbf{a}^{12}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ x^2 \end{bmatrix} + \mathbf{f}^1 = \mathbf{x}^1 \quad (7)$$

$$[\mathbf{a}^{21} \mid a^{22}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ x^2 \end{bmatrix} + f^2 = x^2 \quad (8)$$

ただし、

- \mathbf{A}^{11} : a_{ij}^{11} を要素とする正方行列 ($n \times n$)
- \mathbf{a}^{12} : a_i^{12} を要素とするベクトル ($n \times 1$)
- \mathbf{a}^{21} : a_j^{21} を要素とするベクトル ($1 \times n$)
- \mathbf{f}^1 : 通常部門への最終需要ベクトル ($n \times 1$)

図2 電力部門のアクティビティの細分化

		通常部門	電力部門					最終需要	生産額
		1, 2, ..., n	e1	e2	e3	e4	e5		
通常部門	$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{matrix}$	X_{ij}^{11}	$X_{ik}^{12} \quad (k=1, \dots, 5)$					f^1	x^1
電力部門		x_j^{21}	$x_k^{22} \quad (k=1, \dots, 5)$					f^2	x^2
付加価値		v_j^1	$v_k^2 \quad (k=1, \dots, 5)$						
生産額		x_j^1	$z_k \quad (k=1, \dots, 5)$						

出所：筆者作成

f^2 ：電力への最終需要

x^1 ：通常部門の生産ベクトル ($n \times 1$)

である。したがって、生産決定モデルは次の式で求められる。

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \left[\mathbf{I} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{11} & \mathbf{a}^{12} \\ \mathbf{a}^{21} & \mathbf{a}^{22} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} f^1 \\ f^2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

以上の分析では、電力部門は1つのアクティビティであったが、本稿は再生可能エネルギー発電の導入の効果を分析するため、ここで電力部門を1)原子力発電、2)火力発電、3)水力発電、4)太陽光発電、5)風力発電の5種類のアクティビティに細分化する。その様子を図2に示す。

それにより、電力部門の生産関数は次のように変更される。

$$z_k = \min \left[\frac{X_{ik}^{12}}{a_{ik}^{12}}, \frac{X_k^{22}}{a_k^{22}} \right] \quad (i, j=1, \dots, n, k=1, \dots, 5) \tag{10}$$

ただし、

z_k ：電力第 k 部門の生産量、($k=1$ ：原子力、 $k=2$ ：火力、 $k=3$ ：水力、 $k=4$ ：太陽光、 $k=5$ ：風力)

X_{ik}^{12} ：電力第 k 部門への通常部門第 i 財投入量

X_k^{22} ：電力第 k 部門への電力投入量

a_{ik}^{12} ：電力第 k 部門への通常部門第 i 財投入係数

a_k^{22} ：電力第 k 部門への電力投入係数

である。そして、販路構成の変更を行うと次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^{11} & \mathbf{A}^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ z \end{bmatrix} + f^1 = x^1, \text{ つまり} \tag{11}$$

$$\mathbf{A}^{11} x^1 + \mathbf{A}^{12} z + f^1 = x^1$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}^{21} & \mathbf{a}^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ z \end{bmatrix} + f^2 = x^2, \text{ つまり} \tag{12}$$

$$\mathbf{a}^{21} x^1 + \mathbf{a}^{22} z + f^2 = x^2$$

ただし、

\mathbf{A}^{11} : a_{ij}^{11} を要素とする正方行列 ($n \times n$)

\mathbf{A}^{12} : a_{ik}^{12} を要素とする行列 ($n \times 5$)

\mathbf{a}^{21} : a_j^{21} を要素とするベクトル ($1 \times n$)

\mathbf{a}^{22} : a_k^{22} を要素とするベクトル (1×5)

\mathbf{f}^1 : 通常財への最終需要ベクトル ($n \times 1$)

f^2 : 電力への最終需要

\mathbf{x}^1 : 通常財の生産ベクトル ($n \times 1$)

x^2 : 電力の生産 (電力供給)

\mathbf{z} : $z_1 \sim z_5$ を要素とするベクトル (5×1)

である。

すると、未知数は全部で、 x^1 が n 個、 x^2 が 1 個、そして z_k が 5 個となり、合計 $n+6$ 個となる。しかし方程式の数は $n+1$ 本である。このままでは、方程式数が未知数を下回り、解くことができない。そこでシナリオを表す式を追加して、方程式を解けるようにする。

$$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 = x^2$$

ただし、 z_1 : 原子力発電の生産量、 z_2 : 火力発電の生産量、 z_3 : 水力発電の生産量、 z_4 : 太陽光発電の生産量、 z_5 : 風力発電の生産量である。その上で電源構成をパラメータで与える。

$$z_1 = \alpha_1 x^2$$

$$z_2 = \alpha_2 x^2$$

$$z_3 = \alpha_3 x^2$$

$$z_4 = \alpha_4 x^2$$

$$z_5 = \alpha_5 x^2 = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) x^2$$

ただし、 α_1 : 原子力発電生産シェア、 α_2 : 火力発電生産シェア、 α_3 : 水力発電生産シェア、 α_4 : 太陽光発電生産シェア、 α_5 : 風力発電生産シェアを表す。

以上 2 つの仮定によりシナリオ行列を作成すると、次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 \end{bmatrix} x^2$$

ここで、行列を記号で書き換えると次のようになる。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 \end{bmatrix}$$

とすると、次のようになる。

$$\mathbf{Bz} - \mathbf{cx}^2 = \mathbf{0} \tag{13}$$

この式が加わることにより方程式の数が5本増えるので、未知数の個数と方程式の数が一致する。これで解を得ることができる。ここで、(11)式、(12)式、(13)式を行列形式で表すと、次のようになる。

$$\left[\begin{array}{ccc|c} \mathbf{I} - \mathbf{A}^{11} & -\mathbf{A}^{12} & \mathbf{0} & \mathbf{x}^1 \\ -\mathbf{a}^{21} & -\mathbf{a}^{22} & 1 & \mathbf{z} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} & -\mathbf{c} & \mathbf{0} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \mathbf{z} \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ \mathbf{f}^2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

この式から、最終需要 \mathbf{f}_1 , f_2 を与えると \mathbf{x}^1 , x^2 , \mathbf{z} を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \mathbf{z} \\ x_2 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} \mathbf{I} - \mathbf{A}^{11} & -\mathbf{A}^{12} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{a}^{21} & -\mathbf{a}^{22} & 1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} & -\mathbf{c} \end{array} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ \mathbf{f}^2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{14}$$

ここでシナリオを表す式(13)式を次のように書き換える。

$$\mathbf{z} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} x^2 \tag{15}$$

これを、(11)式、(12)式に代入すると次の式が得られる。

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}^{11} \mid \mathbf{A}^{12}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} x^2 \end{bmatrix} + \mathbf{f}^1 &= \mathbf{x}^1 \\ [\mathbf{a}^{21} \mid \mathbf{a}^{22}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} x^2 \end{bmatrix} + f^2 &= x^2 \end{aligned}$$

したがって、次の式を得る。

$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{cc|c} \mathbf{A}^{11} & \mathbf{A}^{12} \\ \mathbf{a}^{21} & \mathbf{a}^{22} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} x^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ f^2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ x^2 \end{bmatrix} \\ \left[\begin{array}{cc|c} \mathbf{A}^{11} & \mathbf{A}^{12} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} \\ \mathbf{a}^{21} & \mathbf{a}^{22} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ x^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ f^2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ x^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

これより、最終的に次の式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \left[\mathbf{I} - \left[\begin{array}{cc|c} \mathbf{A}^{11} & \mathbf{A}^{12} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} \\ \mathbf{a}^{21} & \mathbf{a}^{22} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{c} \end{array} \right] \right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ f^2 \end{bmatrix} \tag{16}$$

本稿のシナリオはきわめて単純であり、行列 \mathbf{B} は単位行列 \mathbf{I} である。したがって、モデルは次のように簡単な式であらわされる。ここでは、電力産業の異なる 5 つのアクティビティの加重平均として電力の投入係数が計算されていることになる。

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \left[\mathbf{I} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{11} & \mathbf{A}^{12} \mathbf{c} \\ \mathbf{a}^{21} & \mathbf{a}^{22} \mathbf{c} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ f^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

この式の右辺の最終需要 \mathbf{f}_1 , f_2 を与えると x^1 , x^2 が求められる。そして、求められた x^2 を (15) 式に代入すると異なる電源ごとの生産量が求められる。

電力は多くのアクティビティで 1 つの財を生産しているが、そのアクティビティの構成 (電源の構成) を現実のものとするれば産業連関表の集計と同じ結果が導かれる。そして、電源構成比を現実とは異なる比率に想定すれば、その電源構成比に対応した各産業への生産波及効果 (経済効果) が計算できる。

CO₂ の総排出量を E 、非電力部門の生産量当たりの排出係数を \mathbf{e}_x 、電力部門の排出係数を \mathbf{e}_z とすると、CO₂ の総排出量は次の式で求められる。ここでも、電源の構成を現実のものとするれば現状の CO₂ 排出量が計算され、電源構成比が現実とは異なると比率に想定すれば、その電源構成比に対応した、各産業の CO₂ 排出量 (環境効果) が計算できる。

$$E = [\mathbf{e}_x | \mathbf{e}_z] \begin{bmatrix} x^1 \\ z \end{bmatrix} \quad (18)$$

3. 複数アクティビティモデルによるシミュレーション

電源構成を変化させると、CO₂ の排出量が大きく変化する。2005年の数字 (手元の計算) では、エネルギー起源の CO₂ 排出は 1,240.9 (100万 t)、そのうち発電部門は 307.0 (100万 t) であるから、約 4 分の 1 が発電部門 (ほとんどが火力発電) で排出されている。火力発電からの発電を再生可能エネルギー発電で代替すると、発電設備の稼働時のみを対象にしているが、日本の CO₂ 排出は劇的に減少する。

本稿では、既に述べたように、早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所 (2014) 『次世帯エネルギーシステム分析用産業連関表』を用いて、発電の電源構成の変化が各産業の生産量 (経済効果) および CO₂ の排出量 (環境負荷) にどのような影響があるかを分析する。²⁾

シナリオの設定 (つまり、電源構成の設定) について、原子力と水力発電は短期間に建設し稼働させるのは困難なため、原子力と水力発電の発電比率は固定する。現在使用されている再生可能エネルギー発電は太陽光発電と風力発電であるから、この 2 種類の再生可能エネルギー発電による火力発電を代替する場合の環境効果と経済効果を検討する。

表 1 には、発電の電源構成と CO₂ 排出絶対量の変化の割合 (%) を示した。表 1a が住宅用太陽光発電の、表 1b が事業用太陽光発電の分析結果である。表頭は風力発電比率、表側は太陽光発電比率を表している。³⁾ 2005年現在では、原子力発電が 30.9%、火力発電が 60.1%、水力発電が

表 1a 電源構成の変化による CO₂ 排出量の現状からの乖離率（%）（住宅用太陽光を用いる場合）

風力(α_5) 太陽光(α_4)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.0	0.5%	-5.0%	-10.5%	-16.0%	-21.5%	-26.9%	-32.3%
0.1	-5.0%	-10.5%	-16.0%	-21.4%	-26.9%	-32.3%	
0.2	-10.5%	-15.9%	-21.4%	-26.8%	-32.2%		
0.3	-15.9%	-21.3%	-26.7%	-32.1%			
0.4	-21.3%	-26.7%	-32.1%				
0.5	-26.6%	-32.0%					
0.6	-31.9%						

出所：筆者作成

表 1b 電源構成の変化による CO₂ 排出量の現状からの乖離率（%）（事業用太陽光を用いる場合）

風力(α_5) 太陽光(α_4)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.0	0.5%	-5.0%	-10.5%	-16.0%	-21.5%	-26.9%	-32.3%
0.1	-4.9%	-10.4%	-15.9%	-21.4%	-26.9%	-32.3%	
0.2	-10.4%	-15.9%	-21.3%	-26.8%	-32.2%		
0.3	-15.8%	-21.3%	-26.7%	-32.2%			
0.4	-21.2%	-26.7%	-32.2%				
0.5	-26.6%	-32.1%					
0.6	-32.1%						

出所：筆者作成

8%，再生可能エネルギー発電約1.0%である。表の中で太枠のセル目がほぼ現状（2005年時点）ということになる。表中の数字はほとんどがマイナスであるが、これは CO₂ 排出量が減少することを意味する。⁴⁾

表 1a で CO₂ 排出量の変化をみよう。表中の数値を縦に読むと、火力と太陽光の発電比率を変化させた結果を表している。表中の各列の数値は上から下に向かって、その絶対値が大きくなっていることがわかる。この結果から、風力発電の発電比率を一定として、太陽光発電で以って火力発電を代替する場合は、（当然のことながら）CO₂ 総排出量が削減されることがわかる。一方、各行の数値を左から右に見ると、同様に数字の絶対値が大きくなっていることがわかる。この結果から、太陽光発電の発電比率を一定として、風力発電で以って火力発電を代替する場合も、CO₂ 総排出量が削減されることがわかる。風力発電を利用して、すべての火力発電を代替する場合、最大で現状から約32.3%の CO₂ 排出量が削減される。一方、太陽光発電を利用して、すべての火力発電を代替する場合も、最大で現状から約31.9%の CO₂ 排出量が削減される。つまり、風力発電と太陽光発電の環境効果を比較すると、前者の効果がわずかに大きいものの、両者の効果はほぼ同じである。

表 1b では太陽光発電として「事業用太陽光発電（集中型）」を採用している。表 1a と表 1b を比べてみるとわかるが、事業用と住宅用太陽光発電の環境効果はほぼ同じである。

表 2a 電源構成の変化による国内生産額の現状からの乖離率（%）（住宅用太陽光を用いる場合）

風力(α_5) 太陽光(α_4)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.0	0.01%	-0.11%	-0.24%	-0.36%	-0.49%	-0.61%	-0.73%
0.1	-0.02%	-0.14%	-0.27%	-0.39%	-0.51%	-0.64%	
0.2	-0.05%	-0.18%	-0.30%	-0.42%	-0.54%		
0.3	-0.08%	-0.21%	-0.33%	-0.45%			
0.4	-0.11%	-0.24%	-0.36%				
0.5	-0.14%	-0.27%					
0.6	-0.17%						

出所：筆者作成

表 2b 電源構成の変化による国内生産額の現状からの乖離率（%）（事業用太陽光を用いる場合）

風力(α_5) 太陽光(α_4)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.0	0.01%	-0.11%	-0.24%	-0.36%	-0.49%	-0.61%	-0.73%
0.1	-0.04%	-0.17%	-0.29%	-0.41%	-0.54%	-0.66%	
0.2	-0.09%	-0.22%	-0.34%	-0.46%	-0.59%		
0.3	-0.14%	-0.27%	-0.39%	-0.52%			
0.4	-0.19%	-0.32%	-0.44%				
0.5	-0.25%	-0.37%					
0.6	-0.30%						

出所：筆者作成

再生可能エネルギー発電はほとんどCO₂を排出しないことから、こうした結果が出ることは自明であるが、本稿の分析からも火力発電を代替すればCO₂排出量を大幅に削減できることがわかる。

ただ、炭素税の導入などの環境政策が火力発電比率を低下させ、大幅なCO₂削減を実現するとしても、例えば、雇用が激減するなどの経済的な影響が大きい場合には、そういう政策は採用されにくい。そこで次に、最終需要が2005年の現状と同額であると仮定して、電源構成を変化させた場合に国内生産額がどの程度変化するかを試算する。表2にその結果を示す。

表2には発電の電源構成と国内生産額の変化の割合（%）を示した。表2aが住宅用太陽光発電の、表2bが事業用太陽光発電の分析結果である。表頭は風力発電比率、表側は太陽光発電比率を表している。表中には示されないが、同時に火力発電の発電比率も整合的に変化していることに注意されたい。表中の数字は現状と電源構成を変化させた場合の差であり、マイナスの数字は、国内生産量が現状より減少することを意味している。⁵⁾

表1と同様に、表中の各列の数値を上から下に見ると、マイナス数字の絶対値が大きくなっていることがわかる。この結果から、風力発電の発電比率を一定として、太陽光発電でもって火力発電を代替する場合は、国内総生産量が減少する（経済にはマイナスの効果がある）ことがわかる。一方、各行の数値を左から右に見ると、同様にマイナス数字の絶対値が大きくなっている。この

表 3a CO₂削減の限界削減費用（トン当たり円）（住宅用太陽光発電を用いる場合）

風力(α_5) 太陽光(α_4)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.0		17,097	17,097	17,097	17,097	17,097	17,097
0.1	3,127	10,486	12,750	13,850	14,500	14,929	
0.2	3,773	8,373	10,593	11,901	12,763		
0.3	3,963	7,325	9,300	10,599			
0.4	4,047	6,696	8,435				
0.5	4,089	6,273					
0.6	4,112						

出所：筆者作成

表 3b CO₂削減の限界削減費用（トン当たり円）（事業用太陽光発電用いる場合）

風力(α_5) 太陽光(α_4)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.0		17,097	17,097	17,097	17,097	17,097	17,097
0.1	6,148	11,944	13,728	14,594	15,106	15,444	
0.2	6,669	10,307	12,063	13,097	13,779		
0.3	6,832	9,502	11,070	12,101			
0.4	6,911	9,024	10,410				
0.5	6,959	8,707					
0.6	6,990						

出所：筆者作成

結果から、太陽光発電の発電比率を一定として、風力発電でもって火力発電を代替する場合も国内総生産量が減少する（経済にはマイナスの効果がある）ことがわかる。

以上の分析結果から、再生可能エネルギー発電で火力発電を代替すると国内生産額が減少することが分かる。火力発電は、石炭・天然ガス等のエネルギー産業や運輸産業の関連産業への後方関連効果が大きいため、火力発電の削減は国内総生産額の減少を招くのである。本稿の試算では、CO₂の排出削減のために火力発電の比率を0%までに削減すれば、最大0.73%程度の経済規模の縮小がありうることを示している。

そして、火力発電を代替する再生可能エネルギーとして、風力発電と太陽光発電を比較すると、経済規模の縮小は最大でそれぞれ、0.73%（風力）と0.17%（住宅用太陽光）・0.30%（事業用太陽光）である。つまり、風力発電を採用する場合は太陽光発電を採用する場合より経済のマイナス効果が大きいことがわかる。さらに、表 1a と表 1b を比べてみると、事業用太陽光発電を用いる場合の経済マイナス効果は住宅用太陽光発電を用いる場合より大きい。

この結果の読み方については、慎重であるべきだろう。本稿の試算は、「最終需要額が不変であれば」という想定で行っているので、GDPは不変と想定していることになる。ただ、既にみたように、中間投入構造の変化によって国内の生産額総量が変化する。国内の雇用量やGDPが国内生産額に比例して決まるとすれば、国内生産額の減少は費用と言える。

この表3に、CO₂を1トンを削減するために、マクロでの総生産がどの程度減少するかを試算した。表3aが住宅用太陽光発電を用いた場合であり、表3bが事業用太陽光発電を用いた場合である。この数字は「CO₂の限界削減費用」と読み替えることができる。本稿の試算の結果では、再生可能エネルギーで火力発電を代替する場合のCO₂の限界削減費用は、トン当たりで3,000円から17,000円ということになった。

4. まとめと今後の課題

本稿では「複数のアクティビティで同一生産物を生産する」という従来の産業連関分析では扱えなかった課題の解決を試みている。分析の対象とした産業は電力産業である。産業連関分析に「電力産業内の複数発電アクティビティの生産比率を変化させる」というシナリオを設定することにした。そのうえで、シナリオによって経済効果と環境効果にどのような差異が生じるかについて分析した。シナリオの具体的な設定については、原子力と水力の発電比率を固定し、火力・太陽光・風力の各発電比率を調整することにした。

本稿の分析では、再エネ発電で火力発電を代替する場合CO₂排出の削減効果を確認できた。風力発電にて火力発電を代替し火力発電を極限まで削減する場合、CO₂排出を32.3%程度削減できる一方で生産額の縮小は0.73%程度に過ぎないことが分かった。また、太陽発電で火力発電を代替し、火力発電を極限まで削減していけば、風力発電の場合と同じく3割程度のCO₂排出削減効果を持つ一方で生産額の縮小は0.30%~0.17%程度に過ぎないことがわかった。住宅用太陽光発電と事業用太陽光発電の比較では、前者の生産額縮小効果が小さい。

また本稿では生産額の減少額をCO₂削減費用と考えて、生産額の減少額とCO₂削減量の比率を「CO₂の限界削減費用」と定義した。本稿の試算では、CO₂の限界削減費用は、トン当たりで3,000円から17,000円ということになった。

最後に、今後の研究の方向性について述べる。本稿では電力産業の電源構成に焦点を絞り、「複数アクティビティで1種類の生産物」のケースを扱った。今後のこの種の研究の発展の方向性は次の3点になろう。

1) 再生可能エネルギー発電の建設段階の考慮

本稿は再エネ発電設備の運転時の効果のみ分析したが、再エネ発電の建設時も経済と環境に様々な影響を与えるため、今後建設段階の経済効果と環境効果を検討する必要性がある。

2) 副産物モデルへの応用

「複数アクティビティで1種類の生産物」の逆のパターンとして「1種類のアクティビティで複数の生産物」というものがある。これは主産物の生産によって副産物が生産されるという事象であるが、その扱いもシナリオ産業連関分析で可能であるか検討する。

3) 価格モデルへの応用

電力産業内の電源構成を変化させれば（つまり、アクティビティの構成比を変化させれば）、それは電力価格へも影響するであろう。アクティビティの構成比変化と価格の変化の関係を検討することができる。

注

- 1) 本稿でいう環境効果とはCO₂排出の削減効果のことをさす。
- 2) 『次世代エネルギーシステム分析用産業連関表』のオリジナルの表では、発電方式ごとに投入部門が設けられている。しかし、投入部門を発電方式ごとに分けるのはあまり意味がないと判断される。そこで本稿では、電力の投入部門は分割していない。
- 3) 表中には示されないが、同時に火力発電の発電比率も整合的に変化していることに注意されたい。
- 4) 2005年現在の再生可能エネルギー発電のシェアは1%であるので、再生可能エネルギー発電を0%にすると火力発電を増やすこととなる。したがって、わずかではあるがCO₂排出量が増加することになる。
- 5) 表の中で太枠のセルがほぼ現状であり、前述したと同様の理由で火力発電量の増加分により、わずかにプラスの数値となっている。

参考文献

- 石川雅紀・藤井美文・高橋邦雄・中野諭・吉岡完治（1998）「リサイクルを含む場合の環境負荷の産業連関表による分析方法：シナリオ・レオンティエフ逆行列の構想」應義塾大学産業研究所 未来開拓プロジェクト Discussion Paper No18 (WG2-7)。
- 王嘉陽（2016）「シナリオ産業連関分析による中国の再生可能エネルギー発電導入の経済効果と環境効果の分析」『産業連関』24(1), pp.35-48。
- 疋田浩一・石谷久・松橋隆治・吉田好邦・大橋永樹（2000）「ライフサイクルアセスメント分析に基づく環境評価システムの開発」應義塾大学産業研究所 未来開拓プロジェクト Discussion Paper No115 (WG2-42)。
- 藤川清史（2011）「シナリオ付レオンチエフ逆行列の考え方：電力産業を例にとりて」、伴金美編『平成23年度環境経済の政策研究 日本における環境政策と経済の関係を統合的に分析・評価するための経済モデルの作成 最終報告書』pp.246-253。
(http://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/F_research/f-01-03.pdf)
- 吉岡完治・菅幹雄（1997）「環境分析用産業連関表の活用—シナリオ・レオンティエフ行列の構想—」経済企画庁経済研究所編『経済分析』第154号所収。

Web 情報

- 次世代科学技術経済分析研究所『次世代エネルギーシステム分析用産業連関表』
(<http://www.f.waseda.jp/washizu/table.html>)（最終閲覧：2016年5月21日）