

日本国内の効率的炭素排出削減施策の 評価のための長期多部門モデル

増井利彦¹・盛岡 通²

¹学生会員 工修 大阪大学大学院工学研究科 (〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 工博 大阪大学教授 工学部環境工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)

日本国内の産業を9部門に分割し、財の需給バランスを内生的に決定する最適化モデルを構築し、炭素排出量を削減するシナリオについて分析を行った。炭素排出量の削減により、現状推移と比較してすべての部門で粗生産額は減少する。なかでも素材型製造業と非製造業における炭素削減率に対する粗生産減少率が顕著である。2020年の炭素排出量を1990年排出量から20%削減するシナリオにおける炭素削減の限界費用は、炭素排出量安定化シナリオと比較して2020年で2.9倍となる。炭素排出量安定化シナリオにおいて、発電時の炭素排出量を各部門に割り振る(エンドユーザーに炭素税を課す)ことで、2020年の産業全体の粗生産額は1.3%回復する。これは、家計における電力需要の増大に伴う炭素排出量の増加に起因する。

Key Words: multi-sectoral linkage, dynamic optimization model, carbon reduction policy, marginal cost of carbon reduction

1. はじめに

気候変動枠組条約の締結など、地球温暖化問題に対する関心はますます高まると同時に、日本の行動が世界的に注目を集めている。我が国においては地球温暖化経済システム検討会報告書¹⁾にあるように、技術革新によっても炭素排出量の増大は避けられず、炭素税もしくは炭素税プラス炭素削減技術導入への補助金により、1990年レベルの炭素排出量の安定化が図られるとされている。こうした報告は、経済的手法と呼ばれる政策の導入により、産業構造自身を環境保全型に誘導していくものである。しかしながら、地球温暖化問題は我が国だけの問題ではなく、途上国を含めた世界的な問題であるため、途上国における対策も念頭に入れた対策が必要となる。国際排出権取引や共同実施といった施策もこうした背景のもとに生じた考え方であり、今後は各国内の対策だけでなく国家間での協調した環境対策・環境施策が増大するものと考えられ、実際にプロジェクトとして実現されているものもある。このとき、国家間の協調施策だけではなく、国家という枠組みを越えた産業間での協調といったよりミクロなレベルにおける協調施策も生まれる可能性がある。

こうした様々な協調施策を導入するにあたり、日本

の果たすべき役割は、各国の利害関係や生産構造等を考慮に入れ、各国・各産業が主体的に協調施策に参加できるように調整することである。本研究は、その第一歩として我が国において産業部門を9つに分割した多部門モデルを構築し、気候変動枠組条約で表明されている炭素排出量の1990年レベル安定化もしくはさらに削減するという目標を国内において実現するためには、産業構造をどのように誘導し、また産業間の炭素排出に対してどのような調整が望ましいかについて考察する(これは、炭素排出に関する我が国と周辺のアジアの発展途上国との間に共同実施のような協調施策がとられないシナリオに相当するものである)。

我が国においてこれまでに様々なモデル分析が行われているが、その多くは森²⁾や伴³⁾にみられるように産業を1つに集約させたモデルであり、産業部門を分割した多部門モデルでも後藤⁴⁾や筑井⁵⁾にみられるように産業間の関係を固定しており、産業連関構造が内生的に決定されるモデルは黒田・新保⁶⁾などわずかである。炭素排出量の制約が課される場合、さらには産業間において炭素排出量を調整する場合、各部門の生産構造の違いにより生じる影響は大きく異なるものと予想される。その結果、我が国の産業構造自身にも影響が波及するものと推測できる。このため、生産活動を分割し

て評価する場合には、産業間の連関構造を内生的に決定するモデルの構築が必要となる。本研究では、産業の投入産出構造を内部化したモデルを構築し、炭素排出削減を課したときに見られる各産業部門の炭素の排出削減と粗生産の減少を分析することで、効率的な炭素削減に向けた産業間の炭素排出削減の調整に関する考察を行う。

2. モデルの概要

(1) モデルの特性^(1,7,8)

国内産業を統合して表現した1部門モデルの場合、最適化の必要条件は資本の限界価値と消費の限界効用が等しいことである。これは、生産された財について、資本として来期以降の生産に供与することによる将来の効用の増分と消費による今期の効用の増分が等しいことを示している。これに対して、本研究のような産業を複数に分割したモデルについて、その最適構造を議論するために、国内産業が部門1、部門2、エネルギー転換部門（以下、部門E）の3部門から成る以下のような簡略モデルを考える。

$$\text{Max } U = \sum_{t=1}^T U(C_t, C_2) \cdot \exp(-rt) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } f_1(K_1, L_1, E_1, X_{11}, X_{21}) \\ = C_1 + F_{11} + F_{12} + F_{1E} + X_{11} + X_{12} + X_{1E} \quad (2)$$

$$f_2(K_2, L_2, E_2, X_{12}, X_{22}) \\ = C_2 + F_{21} + F_{22} + F_{2E} + X_{21} + X_{22} + X_{2E} \quad (3)$$

$$f_E(K_E) = E_1 + E_2 + E_E \quad (4)$$

$$K_1 = F_{11} + F_{21} - \delta_1 \cdot K_1 \quad (5)$$

$$K_2 = F_{12} + F_{22} - \delta_2 \cdot K_2 \quad (6)$$

$$K_E = F_{1E} + F_{2E} - \delta_E \cdot K_E \quad (7)$$

下付は各部門（ $i=1,2,E$ ）を示す。

期間 t は省略している。また T は最終期を表す。

パラメータ \dots : r : 時間選好率, δ : 減価償却率,

L : 労働。

変数 \dots : U : 効用, C : 最終消費, F : 資本形成,

K : 資本ストック, E : エネルギー需要,

X : 中間財（ X_{12} は部門1から部門2への中間財の移動を示す）。

以上の定式化において議論をさらに簡略化するために家計のエネルギー需要や部門Eの中間需要に関する定式化は省いている。また、資本形成についても部門間の移動が明確になるように記述している。

効用関数 U は、各財1, 2に対して2次微分可能で、限界効用が逓減するように、 $\partial U / \partial C_1 > 0$, $\partial^2 U / \partial C_1^2 < 0$, $\partial U / \partial C_2 > 0$, $\partial^2 U / \partial C_2^2 < 0$ が成り立つものと仮定する。

部門1, 部門2については、資本、労働、中間財、エネルギーを生産要素として粗生産を産出する。ここで、生産関数 f の産出として付加価値ではなく粗生産を用

いる理由は、各部門の中間投入-産出を通じた連関構造をとらえることと、各部門においては付加価値と最終需要が必ずしも一致しないことによる。生産関数は各要素に対して2次微分可能な一次同次関数で、各生産要素に対する限界生産が正であるが、その生産性は逓減するという一般的なものを仮定する。一方、部門Eは資本（設備）を制約としてエネルギー供給を仮定する。これは、電気、石油、石炭、ガスといった二次エネルギーの生産については、一次エネルギーの供給と一次エネルギーから二次エネルギーへの転換設備の影響が最も大きいと考えるためである。

各部門で t 期に産出された財は、中間投入財、固定資本形成、最終消費財の3つの用途がある（式(2)~式(4)）。ここで、各部門において生産された財は、他の部門とは異質のもの（heterogenous）として評価される。つまり、部門1で生産された最終消費財と部門2で生産された最終消費財は明確に区分される。なお、各部門内においては、生産された財は同質（homogenous）であるとする。つまり、部門1で生産された財は中間財、固定資本形成、最終消費財のいずれの用途にも代替が可能である。

各部門は、式(5)~式(7)により $t+1$ 期以後の生産を増大させるために投資を行う。一方、家計は式(1)で示された効用を最大化するように各財を消費する。なお、各部門における費用の分配は、オイラーの定理により各投入要素に振り分けられる。

式(1)~式(7)の最適化問題をラグランジュ乗数 λ, μ を用いて表すと以下ようになる。

$$H(t) = U(C_1, C_2) \\ + \lambda_1 \cdot (f_1 - C_1 - F_{11} - F_{12} - F_{1E} - X_{11} - X_{12} - X_{1E}) \\ + \lambda_2 \cdot (f_2 - C_2 - F_{21} - F_{22} - F_{2E} - X_{21} - X_{22} - X_{2E}) \\ + \lambda_E \cdot (f_E - E_1 - E_2) \\ + \mu_1 \cdot (F_{11} + F_{21} - \delta_1 \cdot K_1) \\ + \mu_2 \cdot (F_{12} + F_{22} - \delta_2 \cdot K_2) \\ + \mu_E \cdot (F_{1E} + F_{2E} - \delta_E \cdot K_E) \quad (8)$$

式(8)の λ は各部門で生産される財の効用単位で計測した価格、 μ は各部門における資本ストックの効用単位で計測したレントと解釈できる。このときの最適化の必要条件は、各制御変数の一次微分が0である。例えば、 C_1 と C_2 については、以下のように表せる。

$$\partial H / \partial C_1 = \partial U / \partial C_1 - \lambda_1 = 0 \quad (9)$$

$$\partial H / \partial C_2 = \partial U / \partial C_2 - \lambda_2 = 0 \quad (10)$$

式(9)と式(10)は、財1の消費の限界効用と財2の消費の限界効用は、各部門で産出される財の価格に等しくなることを示している。同様の操作を他の制御変数について行くと、自己部門の中間財に対する限界生産性は1に等しく、他の部門の中間財に対する限界生産物の価値はその中間財の価格に等しくなる。また、資本ストックの限界生産物の価値は資本ストックのレントに

等しくなることが明らかになる。これらのことから、財1の消費の限界効用と財2の消費の限界効用はともに等しくなる点で均衡するようになる。

一方、資本ストックのレントの時間変動は、次の式より表すことができる。

$$\begin{aligned} d\mu_1/dt &= r^* \mu_1 - \partial H / \partial K_1 \\ &= r^* \mu_1 - \lambda_1 * \partial f_1 / \partial K_1 + \mu_1 * \delta_1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} d\mu_2/dt &= r^* \mu_2 - \partial H / \partial K_2 \\ &= r^* \mu_2 - \lambda_2 * \partial f_2 / \partial K_2 + \mu_2 * \delta_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} d\mu_E/dt &= r^* \mu_E - \partial H / \partial K_E \\ &= r^* \mu_E - \lambda_E * \partial f_E / \partial K_E + \mu_E * \delta_E \end{aligned} \quad (13)$$

式(11)～式(13)は、各部門の資本ストックのレントの変動は時間選好率+資本減耗率-資本ストックの限界生産性に等しくなることを示している。

これに、炭素排出量の安定化という政策を導入すると、新たに次の制約条件が付け加わる。

$$\sum_i E_i * c_{E_i} \leq CO_2 \quad (14)$$

ce:炭素排出原単位, CO₂:炭素排出制約

式(14)に対するラグランジュ乗数をηとし、上記と同様の操作を行うと、各部門におけるエネルギー価格がce_i*ηだけ増大する。それに伴い、財1,2の価格も増大し、式(9)、式(10)より限界効用は増大する。限界効用は財の消費の増加に伴い減速すると仮定しているため、限界効用の増大は効用の低下を意味する。また、炭素排出量の削減に対する限界費用が各部門においてηに等しくなるように、各部門の炭素量が決定される。

(2) 日本モデルの設定

前節でみたように、本モデルは財の分配を中心にモデル化を行っており、各産業部門の費用や財の価格については、最適解におけるシャドウプライスとして計算される。つまり、社会全体が財の均衡価格をシャドウプライスに一致するように設定し、取引を行うという極めて規範的なモデルである。また、本研究ではいわゆる省エネ機器の導入については設定していない。このため、地球温暖化経済システム検討会報告書にあるような省エネ機器の導入によりGDPが増大する可能性を示唆するものではなく、炭素排出量の削減により生じる経済的な不効用をどのように緩和させることが可能かということを示すに止まっている。

モデルを定量的に評価するにあたり、モデルの細部については以下のa)～h)に説明するように設定している。なお、モデルの前提として、エネルギー転換に関する各種パラメータ（設備利用率や発電効率など）については、1990年の実績値及び長期エネルギー需給見通しをもとに外生的に与えている。モデル全体の構造を図-1に示す。

表-1 本研究の部門分割

記号	部門名	国民経済計算における分類区分
AGR	農林水産業	農林水産業
MIN	鉱業	鉱業
LIP	素材型軽工業	パルプ・紙・窯業・土石
LLA	加工型軽工業	食料品、繊維、その他製造業
HIP	素材型重工業	化学・一次金属・金属製品
HIA	加工型重工業	一般機械・電気機械・輸送機械・精密機械
CST	建設業	建設業
SEV	サービス業	電気・ガス・水道業を除く第三次産業
ENT	エネルギー転換部門	石油・石炭製品、電気・ガス・水道業

a) 対象期間

1990年を基準年とし、5年おきに2030年を最終期としている。

b) 部門分割

本研究では、国民経済計算をもとに産業部門を表-1のように9部門に分割している。

c) 効用関数

効用は、エネルギーを除く各部門の最終消費財をコブダグラス関数で結合した合成財で評価する⁹⁾。これにより、各財の最終消費について各最終消費財間の代替は可能であるが、その代替弾力性は1となる。各最終消費財のシェアパラメータは1990年の実績値をもとにしている。また、効用にエネルギー消費を含めない理由として、エネルギー消費は効用最大化の目的ではなく、むしろ他の財の消費に付随して生じる派生需要と考えるためである。

d) 生産関数

各部門はそれぞれ1種の財を生産するものとし、他の部門で生産される財を産出することはないとしている。ENTを除く8部門では、資本、労働、非エネルギー中間投入、エネルギーを投入要素とし、粗生産を生み出す生産関数を設定している。生産関数において付加価値要素と中間投入要素が各々弱分離可能であると仮定し、付加価値は資本と労働を投入要素とするCES生産関数により、中間投入は各部門からの非エネルギー中間投入とエネルギー投入を投入要素とするCES生産関数により産出される。中間投入のうち、各部門からの非エネルギー中間投入及び各二次エネルギー投入については代替弾力性が1のコブダグラス型生産関数でそれぞれ結合する。付加価値と中間財はCES生産関数により結合されて粗生産を産出する。なお、付加価値と中間財の結合に関して、代替弾力性の符号条件が一致しない部門(LIP, HIP, HIA)及び極めて0に近い部門(SEV)については付加価値と中間財の代替関係はないものとみなし、付加価値と中間財の結合についてはレオンチエフ型生産関数で評価を行う。なお、労働は後藤⁹⁾をもとにパラメータとして外生的に与えている。表-2に各部門における代替弾力性の推計結果を示す。

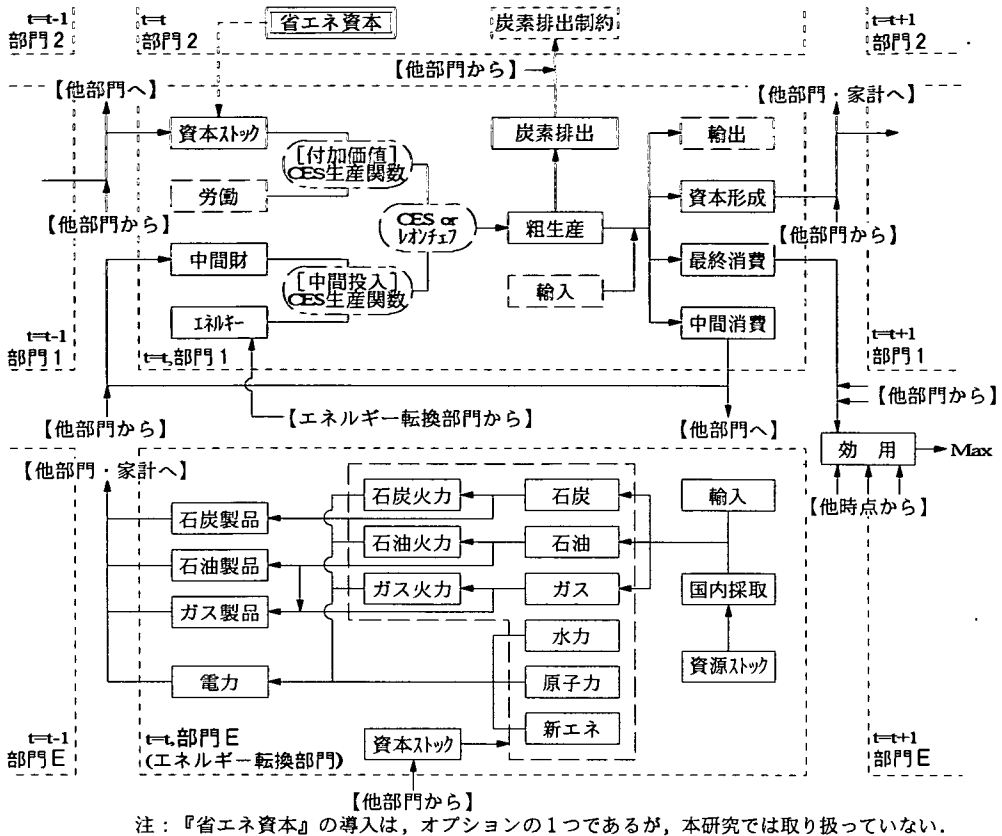


図-1 本分析におけるモデルのフロー

ENTでは、化石燃料と水力、原子力、太陽光などの一次エネルギーから石油、石炭、ガス、電力の二次エネルギーに転換される過程をモデル化している。発電は石炭火力、石油火力、ガス火力、水力、原子力、新エネルギー発電の6つの発電設備を設定している。モデル化においては、他の産業部門と異なり、生産関数による評価ではなく、転換設備による最大二次エネルギー生産量を規定し、さらに一次エネルギー供給量の制約下で各種二次エネルギーが各産業部門及び家計に供給されるものとしている。また、石油の一部はガスに転換されるものとしている。以上のことから、ENTについては投入要素は資本ストック以外に評価されるものはない。つまり、資本ストック以外の投入要素についての制約がない状況では、中間投入やエネルギー自己消費が最適解において0と評価される。そこで、ENTにおける非エネルギー中間投入に関しては初期年における中間消費の配分比で、エネルギー自己消費に関しては総一次エネルギー供給量に比例して需要されるもの

のとしている。また、各発電設備における電力供給量の変動は上限・下限とも2.5%/年と設定している。これは、各設備からの電力供給が不連続的に変動することを防ぐためである。表-3にエネルギーに関連するデータを示す。

e) 家計におけるエネルギー需要

家計におけるエネルギー需要は、最終消費支出を所得とみなして所得弾力性を推定し、最終消費支出を説明変数として決定している。各二次エネルギー種の需要は、電力に関しては下限値を、その他の二次エネルギーについては上限値を設定したうえで、各二次エネルギー需要の合計が家計全体のエネルギー需要を満たすように設定している。なお、家計における最終消費支出は、各財の最終需要を合計することで計算しているが、ENTからの最終需要の評価については物理量であるために価格を乗じる必要がある。この価格については外生的に設定しており、将来において不変であるとしている。

表-2 各部門の代替弾力性の推計結果

1. 資本-労働代替弾力性

	AGR	MIN	LIP	LIA	HIP	HIA	CST	SEV
代替弾力性	0.83	1.58	1.06	0.84	1.75	1.95	0.51	0.68
t 値	5.95	19.12	20.45	59.63	31.21	26.66	10.01	27.51
重相関係数	0.57	0.93	0.94	0.99	0.97	0.96	0.79	0.97

2. 非エネルギー中間財-エネルギー代替弾力性

	*AGR	MIN	LIP	**LIA	HIP	HIA	+CST	SEV
代替弾力性	0.60	0.14	0.23	0.35	0.25	0.37	0.08	0.09
t 値	3.78	3.01	9.06	2.97	9.75	12.66	3.91	2.93
重相関係数	0.54	0.25	0.75	0.34	0.78	0.86	0.47	0.24

3. 付加価値-中間投入代替弾力性

	AGR	++MIN	LIP	**LIA	HIP	HIA	CST	SEV
代替弾力性	0.17	0.15	-0.52	0.17	-3.12	-0.77	0.07	0.06
t 値	6.92	5.87	7.52	3.95	7.54	4.83	3.79	4.97
重相関係数	0.64	0.56	0.68	0.48	0.68	0.46	0.35	0.48

注：表中の値は1965年～1993年のデータの回帰から得たものである。

エネルギーデータは『総合エネルギー統計』，経済データは『国民経済計算』を利用。

資本-労働代替弾力性は $[\ln(\text{実質付加価値}/\text{就業者数})=a*\ln(\text{実質賃金})+b]$ のaに相当。

非エネルギー中間財-エネルギー代替弾力性は $[\ln(\text{実質中間投入}/\text{エネルギー需要})=a*\ln(\text{実質エネルギー価格})+b]$ のaに相当。

付加価値-中間投入代替弾力性は $[\ln(\text{実質粗生産}/\text{実質付加価値})=a*\ln(\text{実質付加価値価格})+b]$ のbに相当。

なお，付加価値価格は資本-労働代替弾力性の推計式の双対型より算出している。

実質付加価値価格，実質賃金は『国民経済計算』の国内総生産デフレーター(合計)により実質化している。

実質エネルギー価格は各エネルギー価格を卸売物価指数により実質化した後，各部門におけるエネルギー需要で重み付けしたもので定義している。

* 1980年以降のデータを回帰

+ 1983年までのデータを回帰

** 1975年以降のデータを回帰

++ 中間投入・中間投入価格と粗生産より推計

f) 資本形成

前節の簡略モデルにおいては，資本形成の部門間の経路も明確に記述したが，データ上の制約もあり，各部門の資本形成への需要は1つにまとめている。また，各部門の資本形成が，各部門の投資の総和と家計部門における所得から最終消費を差し引いた貯蓄との和と均衡するという制約条件を付加している。これは，国民経済計算の資本形成には家計における住宅投資も含まれているためであり，本研究では最終消費支出を説明変数として住宅投資を決定し，住宅投資と各産業部門における投資の和が各部門の資本形成の和と均衡するものとしている。

g) 貿易

ENTを除く産業部門の貿易は，1990年の粗生産に対する比率で推移するものと仮定している。ENTでは，長期エネルギー需給見通しをもとに化石燃料の輸入量の上限を外生的に設定し，その制約内で輸入量を内生的に決定する。また，石油製品や石炭製品の輸出については，他の産業部門の貿易と同様に，1990年の国内供給量に対する比率で推移するものと仮定している。

h) その他のパラメータ

ENTにおける資本ストックと二次エネルギーの関係（いわゆる資本係数），発電効率，発電設備の施設利用率，送電ロスに関する各パラメータは1990年の実績値もしくは想定値に基づき，表-3のように設定してい

る。なお，発電量の伸び率の上限及び発電量の上限は長期エネルギー需給見通しを参考に設定している。また，我が国の埋蔵化石燃料の新規発見分はないものとしている。

(3) シナリオの設定

本研究では上記の最適化モデルを計算するにあたり，炭素排出量に関して以下のシナリオを設定している。なお，本研究においては家計部門に対する炭素排出量の制約は課しておらず，産業部門だけに対する制約としている。

a) 標準シナリオ

炭素排出に関する対策をとらないシナリオで，他のシナリオの結果と比較する際の基準となるシナリオである。

b) 炭素排出削減シナリオ

産業部門全体の炭素排出量を抑制するシナリオ。標準シナリオに式(14)の制約条件を付加したシナリオ。炭素排出量を1990年の水準に安定化させるシナリオと2000年～2020年に炭素排出量を0.5%/年，1.0%/年，1.5%/年ずつ削減するという合計4つのシナリオを想定している。

c) 発電時の間接炭素排出量考慮シナリオ

a), b)の排出量は各部門の化石燃料の直接消費量に基づく炭素排出量であり，発電時の間接的な炭素排出

表-3 エネルギーに関する諸データ

	石炭火力 COAL	石油火力 OIL	ガス火力 GAS	水力 HYD	原子力 NUC	新エネ NEW
*既存容量[100万kW]	23.00	70.50	35.50	37.80	31.60	14.00
効率[%]	39	39	39	—	—	—
**設備単価[千円/kW]	300	190	200	600	310	650
***設備利用率[%]	75	40	60	30	75	25
送電ロス[%]	5.7					
+初期年投資[10億円]	822	821	628	1335	1164	461
設備寿命[年]	15	15	15	40	16	20
発電量増加率上限[%]	—	1.00	—	1.50	3.00	3.00
++最大発電量[100万kWh]	—	308790	—	134747	505693	—
	石炭 COAL	石油 OIL	ガス GAS			
輸入量[10 ¹⁴ kcal]	7.42	27.89	4.64			
国内産出量[10 ¹⁴ kcal]	0.63	0.06	0.21			
輸出量[10 ¹⁴ kcal]	0.13	1.42	0.00			
輸入増加率上限[%]	1.00	0.35	2.00			
埋蔵量[10 ¹⁴ kcal]	36.55	0.75	3.53			
炭素排出量[tC/10 ⁶ kcal]	0.10	0.08	0.06			

注：* 火力発電の既存容量については1990年の実績値をもとに、化石燃料の直接利用を含めた需給がバランスするように修正を加えている。また、新エネについては地熱・コージェネ等を含み、既存容量については1990年のエネルギー供給量と設備利用率から設定している。
 ** 新エネルギーの設備単価は2000年までは毎年10%ずつ安価になる(2000年で23万円/kW)が、それ以降は一定と仮定している。
 *** 石炭火力とガス火力は最大設備利用率が70%になるまで毎年2%ずつ上昇させる。
 水力発電についても最大設備利用率が45%になるまで毎年2%ずつ増大させる。
 + 初期年投資は施設単価と設備更新実績をもとに設定している。
 ++ 最大発電量は、石油火力については現状の1.25倍、水力については年間可能発電電力量、原子力については現状の2.5倍としている。

資料出典：総合エネルギー統計、電力需給の概要、世界の資源と環境1994-95

量は含まれない。このため、ENTの炭素排出量には発電時の炭素排出量も含まれる。このシナリオは、b)の各シナリオに対してENTの自己消費分を除く電力生産時の炭素排出量を、各部門の電力消費量に応じて配分したものであり、電力生産時の炭素税を各最終需要部門に負担させるものである。なお、b)のシナリオにおける炭素制約量には、家計の電力消費に伴う炭素排出分が含まれているが、c)のシナリオにおいては家計の電力消費に伴う間接炭素排出量は除いたものとなっている。このため、シナリオc)の制約量はb)と比較して2460万tC(総排出量の7.9%)だけ小さくなっている。

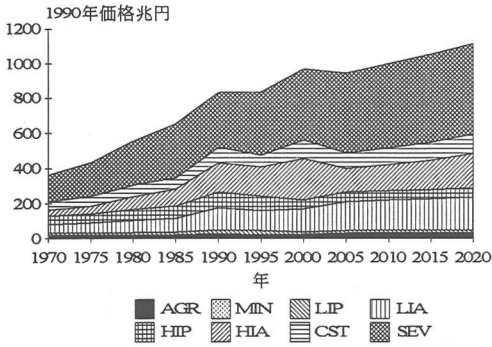
3. 計算結果とその分析

前章に示したモデルの計算結果を以下に示す。前節でも述べたように、最適化は1990年～2030年までを対象としているが、以下に示す結果の分析においては1990年から2020年までを対象としている。これは、2025年以降の最適解が、モデルに設定されている終端条件の影響を受けて非連続的に大きく変動しており、こうした終端効果に関する解釈を避けるためである。また、ENTにおける生産は物量単位で定式化しているため、粗生産やGDPなど貨幣単位で評価すべき項目については除外している。

(1) 標準シナリオ

まずは標準シナリオの結果について考察する。全体の粗生産は平均0.98%/年ずつ増大するのに対して全体のGDPは2.0%/年ずつ増大する。このことから、全体的に付加価値化が進むといえる。これと関連して、素材型の産業(MIN,LIP,HIP)の粗生産が減少する結果となった(図-2)。炭素排出量は年平均0.66%/年で増大し、2020年には38億tCとなった。こうした結果は、既存研究と比較すると低い値となっている(図-5)。部門別ではHIA、LIAといった加工型の産業部門とSEV、ENT、CST、そして家計部門での増大が目立つ。それ以外の部門では、減少傾向がみられた。産業部門全体の排出量は2000年までほぼ横ばいで推移する(図-3)。エネルギー需要面から考察すると、需要自身は1.0%/年ずつ増大するが、ガスや電力の需要が大幅に増大するのに対して石炭や石油の需要はほとんど増大しない。なお、発電の内訳では新エネルギーや原子力の伸び率が高く、ガス火力は直接需要が増大するために伸び率はそれほど高くない。図-4に一次エネルギー供給量の推移の結果を示す。

これらの結果から、エネルギーを含む中間財から付加価値への移行が進み、また、標準シナリオにおいても炭素排出量の少ないエネルギーへの代替が進展するが、家計を含む2000年以降の炭素排出量を1990年レベ



注：1970年～1990年は実績値，1990年以降が計算値。
以下の図-3，図-4とも同じ。

図-2 標準シナリオにおける粗生産の推移

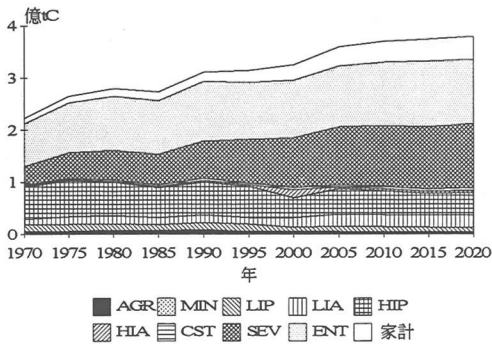


図-3 標準シナリオにおける炭素排出量の推移

ルに安定化させることは不可能である。

(2) 炭素制約シナリオ

各部門の直接排出量だけを対象とするシナリオをカテゴリD、発電時の炭素排出量を電力需要に応じて各部門に配分するシナリオをカテゴリEと以下で略す。

標準シナリオと比較して、産業全体の粗生産はいずれのシナリオにおいても減少する。特に、LIPやLIA、HIP、CST、SEVにおける粗生産の減少が著しい。各部門の粗生産全体に占める割合は、炭素排出量の削減率が大きくなるほど大きく変動し、炭素排出量の制約により、産業構造に変化が生じることが確認できる。また、2020年における炭素削減の限界費用すなわち炭素税は、炭素排出量安定化シナリオから炭素排出量削減シナリオへ移行することにより、2.3～3.1倍となる(図-6)。炭素排出量安定化シナリオにおける炭素税率は、10万円/tCで安定化する結果となっている。天野¹¹⁾に従

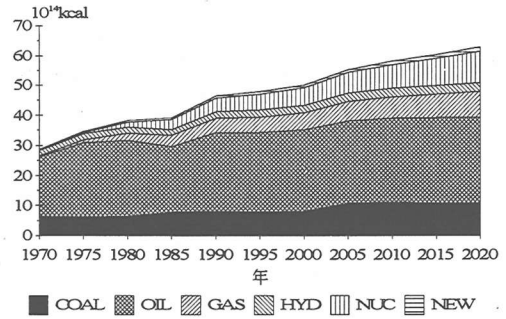
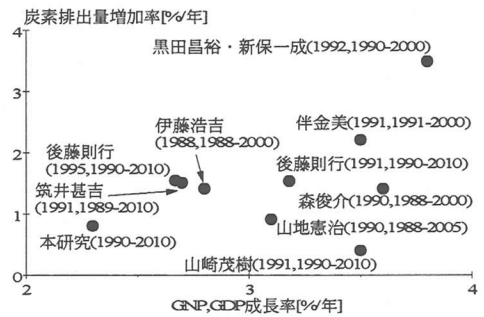


図-4 標準シナリオにおける一次エネルギー供給の推移



注：森田他¹⁰⁾をもとに作成。

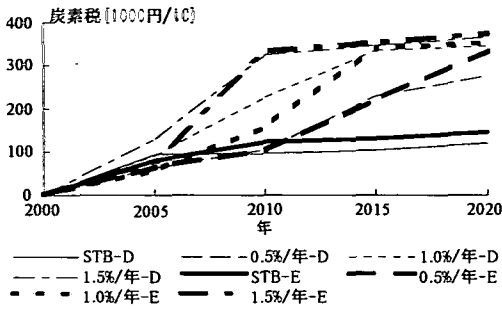
図中の凡例は、モデル作成者(作成年、GNP、GDP成長率・炭素排出量増加率計算期間)を示す。

図-5 標準シナリオにおける経済成長率・炭素排出増加率の結果と既存研究との比較

い、GNP、GDP減少率(炭素排出量に対するGNP、GDPの弾力性)と炭素税比率(炭素排出量1%削減するのに必要な炭素税)の関係を示したものが図-7である。図-7より、本研究では炭素税比率がかなり高い結果となっている。その理由として、生産関数においてエネルギー投入を中間財の1つとして扱ったためにエネルギー投入に対する弾力性が小さく評価されたことが挙げられる。

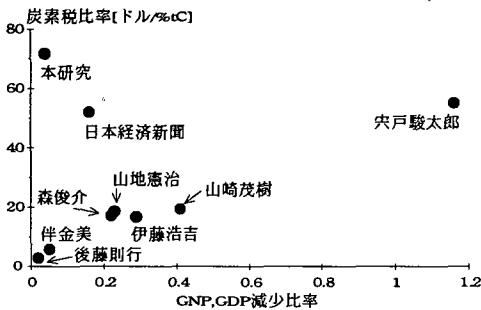
同じ炭素削減率の場合、カテゴリEでみられる2020年の粗生産の落ち込みは、カテゴリDのそれと比較して0.13～1.3%回復する。これは、カテゴリDにおいては、家計の電力需要増に伴う炭素排出量の増大が産業部門により大きな排出削減を強いるのに対して、カテゴリEでは、こうした家計の電力需要増による炭素排出量の増加が産業部門に転嫁されなくなることによる。

図-8にENTを除く産業各部門の標準シナリオに対する炭素排出削減率と粗生産変化率の推移を示す。この



注：凡例の「STB」は安定化シナリオ，「数字%/年」は削減シナリオ(数値は2000年以降の削減率を示す)，「英字」はカテゴリーを示す。

図-6 炭素削減の限界費用(炭素税)の推移

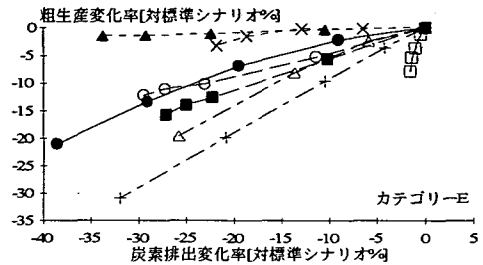
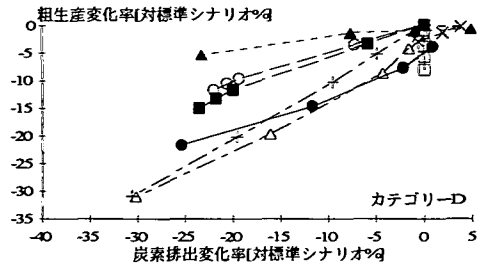


注：本研究は1ドル=145円で換算している。

図-7 GNP,GDP減少比率と炭素税率

グラフの傾きが炭素排出削減1%あたりの粗生産の変化率，つまり粗生産の炭素削減弾力性を示す。この図においてもカテゴリーDとカテゴリーEで結果が大きく異なることが明らかになる。また，素材型製造業(LIP, HIP)と加工型製造業(LIA, HIA)を比較すると，素材型製造業において粗生産の減少率が大きく，特にHIAでは粗生産をほとんど減少させることなく炭素排出量の削減が可能になる。このほかCSTとSEVにおいては弾力性が大きく，炭素排出量削減施策により，素材型製造業と同等もしくはそれ以上の影響を受けることが明らかになった。

なお，標準シナリオにおいては，各化石燃料とも上限まで輸入される，すなわち輸入の制約を受ける結果となる。これに対して，炭素排出量安定化シナリオにおいては，炭素排出原単位の最も高い石炭の輸入が減少する。さらに炭素排出量を削減するシナリオにおいては，ガス，石油の順に輸入の制約から解放される。



注：各部門とも原点が標準シナリオ。原点から離れるに従って，安定化，10%削減，20%削減，30%削減の各シナリオでの結果を示す。

図-8 産業全体の炭素排出削減率の変化に伴う各部門の粗生産，炭素排出量の標準シナリオに対する変化率の推移(2020年)

炭素排出原単位の最も小さいガスの輸入が石油の輸入より早く減少する理由として，エネルギー間の代替弾力性が1であるという生産関数及び外生的に与えた化石燃料の輸入上限によるものと推測できる。

4. 結論

本研究では産業部門を9つに分割した多部門モデルを構築し，経済活動の推移と様々な炭素排出量の制約を課した場合の影響について分析を行った。以下に本研究で明らかになったことを挙げる。

1) 炭素排出量の1990年安定化と2020年までにさらに20%削減する政策では，炭素税に最高で3.2倍の差がみられ，さらに炭素排出量を削減する施策の導入により，限界費用は増大する。

2) 1)と同様の20%炭素排出削減施策において，発電に伴う炭素排出量を電力需要に応じて各部門に割り振る，すなわち発電時の炭素税を各最終需要に負担させることにより，各年の粗生産の減少は標準シナリオの粗生産と比較して0.79~2.3%緩和される。この傾向は，いずれの炭素削減率においてもみられ，期間平均で0.68~1.6%の粗生産が回復する。発電による炭素排出量を割り振ることで，産業全体の炭素排出量は2000年

において2460万tC低く抑える必要があるにもかかわらず、経済的に効率的な結果が得られた背景には、家計部門の電力需要の増大に伴う炭素排出量の増大がある。こうした結果から、効率的な炭素削減施策を議論する際に、産業部門と家計部門を区分する必要があるといえる。

3) 炭素排出削減施策の導入による各部門の影響は一樣ではなく、炭素削減率、粗生産減少率とも素材型製造業や建設業、サービス業において大きな影響が及ぶ。

今後のモデル及び分析の拡張に関する課題として、以下のことが挙げられる。

1) 今回のモデル化では家計のエネルギー需要については所得のみに依存するという非常に簡略化したものを用いたが、その結果、家計部門のエネルギー消費及び炭素排出量が、生産の拡大に伴い常に増大する傾向にあり、その結果、炭素削減の限界費用の増大という形で産業部門に影響が生じることが確認された。こうした点から、価格のような家計のエネルギー需要を抑制させる要因を取り入れ、家計も含めた炭素抑制施策の検討が課題である。

2) 本研究では、炭素排出量の制約を満足させるための選択肢として、生産規模の縮小もしくはエネルギー投入の他の投入要素への代替を対象とした。実際には、このほかに省エネルギーを実現するための資本投資や技術開発などの選択が重要視されている。そこで、省エネルギーへの投資を表現するサブモデルを構築し、その結果が、本研究の結果とどのように異なるかについて検討し、省エネルギーへの投資の有効性を評価する必要がある。

3) 本研究の分析においては、最適解より得られた炭素削減の限界費用を課税することにより、最も効率的な各産業部門の炭素排出量の配分が決定される。この議論を各部門間の排出権取引制度に拡張するには、排出権の初期配分が問題となる。本研究からも明らかのように、炭素削減施策の導入による各部門の影響は大きく異なる。このため、効率性だけではなく、いかに公平に排出権を各部門に配分するかという問題が生じる。そのためには、現状の財の配分モデルに加え、排出権の売買による利得をサブモデル化して評価する必

要がある。

4) 3)で示した課題に加え、本モデルを他国、他地域に拡張することで、国際排出権取引や共同実施といったより広い枠組みでの議論が可能になる。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京大学後藤則行助教授より貴重なご示唆とご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。後藤先生からいただいたご助言のうち、家計のエネルギー需要や生産関数の構造については十分に反映されていないが、これらは今後の課題ととらえている。

参考文献

- 1) 環境庁地球温暖化経済システム検討会：地球温暖化経済システム検討会報告書（第3回報告）、1996年。
- 2) Mori, S.: An Energy/Economy Model for the Evaluation of Energy Technologies and Policy Options in Japan, Amano, A.(ed.), *Global Warming and Economic Growth*, CGER-I001-92, pp.46-68, 1992.
- 3) Ban, K.: Economics Development and CO2 Emissions, Amano, A.(ed.), *Global Warming, Carbon Limitation and Economic Development*, CGER-I019-96, pp.61-70, 1996.
- 4) 後藤則行：CO2排出量安定化のマクロおよび部門別経済的影響分析、金沢大学経済論集、第32号、pp.47-75, 1995.
- 5) 経済企画庁総合計画局編：シミュレーション2010年の産業経済、大蔵省印刷局、pp.109-146, 1991.
- 6) Kuroda, M. and Shimpo, K.: Reducing CO2 Emissions and Long Run Growth of the Japanese Economy, *Journal of Applied Input-Output Analysis*, Vol.1, No.2, pp.1-28, 1993.
- 7) ドーフマン, サミュエルソン, ソロー (安井琢磨, 福岡正夫, 渡部経彦, 小山昭雄共訳)：線形計画と経済分析II, 岩波書店, pp.387-390, 1959.
- 8) 室田泰弘：エネルギーの経済学, 日本経済新聞社, pp.57-104, 1984.
- 9) 市岡修：応用一般均衡分析, 有斐閣, pp.72-77, 1991.
- 10) 森田恒幸, 増井利彦, 松岡譲：環境政策の経済への影響, 環境情報科学, 第23巻, 第4号, pp.20-27, 1994.
- 11) 天野明弘：世界経済研究, 有斐閣, pp.249-255, 1994.

(1996.10.17受付)

LONG-TERM MULTI-SECTORAL MODEL FOR EVALUATING EFFICIENT CARBON REDUCTION PROGRAM IN JAPAN

Toshihiko MASUI and Tohru MORIOKA

The dynamic optimization model with 9 industrial sectors determines the efficient route of the sectoral production by introducing carbon reduction strategies. Under the condition of carbon reduction policy, all sectors diminish gross total products, and the raw material industries and non-manufacturing industries show the high value of elasticity of products respect to the unit carbon reduction. Marginal costs of carbon reduction grow in proportion to the carbon reduction rate. When the indirect carbon emissions in the stage of power generations are counted to be attributable to endusers' responsibilities, total productions in 2020 are recovered by 1.3% compared with those without endusers' charge. These differences of marginal costs are enhanced by the increase of electric demands in the household sector.