

二酸化炭素排出問題の動学一般均衡分析*

An Intertemporal General Equilibrium Analysis of CO₂ Emissions Problem*

宮田 譲**, 佐藤 浩基***

By Yuzuru MIYATA** and Hiroki SATO***

1. はじめに

筆者らは過去に廃棄物と経済活動との関係を表す廃棄物—経済会計行列を提案し、それに基づく北海道を対象とした動学一般均衡分析を行っている¹⁾。この研究では家庭廃棄物有料化やリサイクルの推進が経済にどのような影響を与えるのかを、動学数値シミュレーション分析によって詳細に調べている。

しかし、現在の環境経済学の中心的研究課題は地球温暖化問題であり、その元凶として最も重視されているのが二酸化炭素排出問題である。化石燃料の燃焼によって二酸化炭素の排出量が増えることにより、大気温室効果が高まり、地球の表面温度が上昇する傾向を示している。このまま地球温暖化が進行すれば、経済社会に重大な影響を及ぼすことは想像に難しくない。

従って、地球環境を維持、もしくは改善しながらどのような経済成長が可能なのか、諸外国および我が国で活発に研究されている（例えば Burniaux, Nicoletti, and Oliveria-Martins²⁾, Dornbusch and Poterba³⁾, Jorgenson and Wilcoxon⁴⁾, Manne, Mendosohn, and Richels⁵⁾, Rutherford⁶⁾, Kuroda and Shimpo⁷⁾, 増井・盛岡⁸⁾）。

本研究もこれらの研究の流れを受けたもので、筆者らの廃棄物—経済動学 CGE モデルに基本を置きつつ、日本経済を対象とした二酸化炭素抑制対策評価モデルを構築し、モデルの有効性をシミュレーション分析することを目的としている。

上記の既存研究は、地球環境問題のグローバル性を考慮し多国間モデルとしたり^{2) 3) 4)}、計量経済的手法を取り入れるなど^{4) 5) 8)}、何れも大がかりな作業を要している。しかし、地球環境問題では将来世代を考慮した、異時点間公平性を重視しなければならないことを考える時、その分析手法には必然的に動学一般均衡分析が必要

とされよう。

上記の既存研究は全て動学問題を扱っているものの、動学的最適化を取り入れているのは4), 5), 7), 8)に過ぎない。これはモデルが多部門かつシミュレーション期間が数十年という長期にわたり、動学一般均衡を安定的に求める計算量が膨大になることによるとと思われる。

本研究で提示するモデルは、Jorgenson モデル⁴⁾などに比べれば、その構造は簡略化されているが、後に詳述するように比較的小規模なデータセットに基づきつつも、二酸化炭素排出抑制策をミクロ整合的に評価することが可能である。実証的動学一般均衡分析の普及が遅れている現状を鑑みれば、本研究はこの分野での貴重な方法論を提供するものと位置づけられる。

本研究の構成は以下のようなものである。第2節では、我が国の経済会計行列の構造とその推計、ならびに CO₂ 発生量原単位について述べる。第3節では、CO₂ 排出量を内生化した動学 CGE モデルの構造と外生パラメータの設定についてまとめている。さらに第4節では、本研究の動学 CGE モデルを用いて、炭素税や排出権市場の経済的影響をシミュレーション分析し、その結果をまとめている。第5節では、シミュレーションで得られた結果をもとに、本研究の結論と今後の課題を述べる。

2. 我が国の経済会計行列と CO₂ 発生原単位

(1) 経済会計行列

経済会計行列とは、経済主体を行列の行と列に配置し、経済主体間の金銭的取引を表現したものである。本研究で作成した経済会計行列は、筆者らの既存研究で用いているものと同様であるため⁹⁾、ここではその構成を表1に示すに止め、詳細な説明は省略する。

本研究では1990年の産業連関表、国民経済計算に基づき、経済会計行列を推計した。経済主体は32産業部門、2制度部門（家計、政府）、2生産要素（資本、労働）、資本勘定（資本蓄積、資本調達）、海外部門の5区分から構成されている。

表2は推計された行列を、産業を1部門に集計した結果である。この表から1990年の我が国では産業部門で872兆2122億円の産出を行い、2億8866万t-CのCO₂を発生させ、264兆4593億円の家計消費に伴い5228万

*キーワード：持続的成長管理論，環境計画，地球環境問題，システム分析

**正会員，学博，豊橋技術科学大学人文・社会工学系（〒441-8122 豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1，TEL 0532-44-6955，FAX 0532-44-6947）

***学生会員，豊橋技術科学大学大学院工学研究科知識情報工学専攻（〒441-8122 豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1，TEL 0532-44-6955，FAX 0532-44-6947）

t-C のCO₂が発生し、141 兆 3472 億円の投資から 136 万 t-C のCO₂が発生し、合計で3 億 4230 万 t-C の発生があったことが分かる。

(2)CO₂発生原単位

CO₂ は炭素を燃焼させることによって発生するが、本研究では主として化石燃料による CO₂ 排出を対象とする。その原単位は表 3 の物質別 CO₂ 発生原単位と「1990 年産業連関表物量表」を組み合わせ、本研究の産業区分に合わせる形で、鉱業製品、石油・石炭製品、電力・ガス・熱供給の産出額百万円当たりの CO₂ 排出原単位を推計した。なお表 3 の原単位は参考文献 10)、11)のデータより計算したものである。

3. CO₂排出量を内生化した動学 CGE モデル

(1)モデルの前提条件

- ①経済主体は日本の家計、産業（3 2 産業分類）、政府、海外部門とする。
- ②市場は3 2 生産物市場、労働市場、資本市場の3 4 市場とする。
- ③生産物市場、労働市場、資本市場は完全競争的であり、各時点で均衡状態にあるものとする。
- ④家計、産業は将来について合理的期待形成(完全予見)を持つ。
- ⑤シミュレーション期間は1991 年から2010 年までの20 年間とする。

(2)モデルの概要

本研究のモデルの概要を簡単にまとめておこう。まず各家計は効用の現在価値総和を最大化するような異時点間

の消費と余暇（労働供給）を選択し、消費されない所得は貯蓄され、新たな資本ストックが形成される。

産業については、投資の調整費用を考慮しないため、産業のネットキャッシュフロー現在価値総和を最大化するような投資行動は、各時点での最適資本ストック投入という静学的な行動に帰着する¹⁾。このため産業の行動は静学的な利潤最適化行動のもとで、中間財、労働、資

表3 化石燃料等別の二酸化炭素排出原単位			
鉱業	石灰石	0.12	t-C/t
	原料炭	0.7423	t-C/t
	一般炭	0.6413	t-C/t
	原油	0.7225	t-C/kl
	天然ガス	0.5526	t-C/m ³
	その他鉱業	-	
石油・石炭製品	揮発油	0.6433	t-C/kl
	ジェット燃料油	0.6669	t-C/kl
	灯油	0.6896	t-C/kl
	軽油	0.7212	t-C/kl
	A重油	0.7357	t-C/kl
	B・C重油	0.8016	t-C/kl
	ナフサ	0.6084	t-C/kl
	液化石油ガス	0.82	t-C/t
	その他石油製品	-	
	コークス	0.8856	t-C/t
電力・ガス・熱供給	電力	-	
	都市ガス	0.5839	t-C/m ³
	熱供給	-	
水道・廃棄物処理	水道	-	
	一般廃棄物(焼却)	0.2392	t-C/t
	一般廃棄物(埋立)	0.0322	t-C/t
	汚泥(焼却)	0.3	t-C/t

表1 経済会計行列の構成

		生産活動 1～32産業		制度部門		生産要素		資本蓄積	国外部門	合計
				政府	家計	資本	労働			
生産活動	1～32産業	中間投入	政府消費	家計消費	-	-	-	資本形成	移輸出	財総需要
制度部門	政府	純間接税	-	直接税	-	-	-	-	経常移転	政府所得
	家計	-	経常移転	-	資本所得	労働所得	-	-	経常移転	家計所得
生産要素	資本	営業剰余	-	-	-	-	-	-	資本所得移転	総資本所得
	労働	雇用者所得	-	-	-	-	-	-	労働所得移転	総労働所得
資本調達	固定資本減耗	政府貯蓄	政府貯蓄	-	-	-	-	-	資本移転	総資本調達
国外部門	移輸入	経常移転	経常移転	資本所得移転	労働所得移転	経済剰余	-	-	-	国外の受取
合計	財総供給	所得の処分	所得の処分	所得の処分	所得の処分	所得の処分	総資本蓄積	国外の支払	受取=支払	

表2 我が国の経済会計行列(1990年)

(単位:百万円)

		生産活動 1～32産業		制度		生産要素		資本蓄積	国外	合計
				政府	家計	資本	労働			
生産活動	1～32産業	426,055,252	38,302,061	264,459,316	0	0	0	141,347,159	47,881,754	918,045,542
制度	政府	23,415,106	0	101,529,200	0	0	0	0	11,200	124,955,506
	家計	0	49,585,000	0	112,744,113	249,951,102	0	0	139,300	412,419,515
生産要素	資本	110,090,713	0	0	0	0	0	0	18,329,200	128,419,913
	労働	249,831,202	0	0	0	0	0	0	435,800	250,267,002
資本調達	62,819,932	36,954,045	46,074,899	0	0	0	0	0	0	145,848,876
国外	45,833,337	114,400	356,100	15,675,800	315,900	4,501,717	0	0	66,797,254	
合計	918,045,542	124,955,506	412,419,515	128,419,913	250,267,002	145,848,876	66,797,254	2,046,753,608		
CO ₂ 発生量(単位:t-C)	288,661,021	0	52,279,049	-	-	1,357,009	-	-	-	342,297,079

本ストックを投入し、財を生産するものと定式化される。そのもとで各時点での財市場、労働市場、資本市場をクリアーする財価格、賃金率、資本収益率を求める。

CO₂は産業中間投入、及び最終需要段階でのエネルギー消費によって発生するものとする。以下では、経済主体の行動を、順を追って説明する。

(3) 経済主体の行動

(a) 産業

日本の産業は中間財、労働、資本を投入し、財を生産すると同時に、CO₂を発生させる。産業の技術は中間投入、及び資本と労働について *Cobb-Douglas* 型技術とし、中間投入と資本・労働投入との代替性は考慮しない。すなわち中間投入と資本・労働投入の関係は *Leontief* 型技術とする。また規模に関する収穫一定を仮定する。

筆者らの既存研究では中間投入に関して *Leontief* 型技術を仮定してきた。しかし、本研究で目的とする CO₂ 問題では、中間投入財の代替性がキーファクターとなるため、*Cobb-Douglas* 型を採用する。もちろん、より一般的な階層 CES 型¹²⁾の方が望ましいが、現在のところ代替弾力性の推定が困難であるため、本研究はその第一次近似として位置づけられる。

なお周知のように、*Cobb-Douglas* 型中間投入では全ての財・サービス間の代替弾力性が1となる。これより炭素税などの価格政策が、中間投入代替に与える影響を見ることができる。

さて産業の行動は、生産技術の一次同次性から、与えられた技術、価格のもとでの費用最小化と定式化される。

$$\min_{(x_{ij}, L_j, K_j)} \sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} + (1 + tp_j)(w \cdot L_j + r \cdot K_j) \quad (j=1, \dots, 32) \quad (1)$$

subject to

$$X_j = \min \left\{ \frac{1}{a_{0j}} f_j(L_j, K_j), \frac{1}{A_{2j}} \prod_{i=1}^{32} x_{ij}^{a_{ij}} \right\} \quad (2)$$

$$f_j(L_j, K_j) \equiv A_{1j} L_j^{\alpha_j} K_j^{(1-\alpha_j)} \quad (3)$$

ここで、

p_i : 産業 i の生産物価格

x_{ij} : 産業 j の i 財中間投入量

tp_j : 産業 j の純間接税率

w : 賃金率

r : 資本収益率

L_j : 産業 j の労働投入量

K_j : 産業 j の資本投入量

X_j : 産業 j の産出量

a_{0j} : 産業 j の付加価値率

a_{ij} : 産業 j の中間投入技術パラメータ

A_{1j}, A_{2j}, α_j : 産業 j の技術パラメータ

上式(1), (2), (3)の最適化問題から、生産量 X_j に伴う中間投入財、労働、資本ストックの派生需要関数を得る。

$$x_{ij} = A_{2j} \frac{a_{ij}}{p_i} \prod_{k=1}^{32} \left[\frac{p_k}{a_{kj}} \right]^{a_{kj}} X_j \quad (4)$$

$$LD_j = \left[\frac{(1-\alpha_j)r}{\alpha_j w} \right]^{a_j} \frac{a_{0j} X_j}{A_{1j}} \quad (5)$$

$$KD_j = \left[\frac{\alpha_j w}{(1-\alpha_j)r} \right]^{(1-\alpha_j)} \frac{a_{0j} X_j}{A_{1j}} \quad (6)$$

さらに完全競争下における各時点での瞬時均衡の仮定から、各時点で以下のゼロ利潤条件が成立する。

$$\text{利潤} = p_j X_j - \sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} - (1 + tp_j)(w \cdot LD_j + r \cdot KD_j) = 0 \quad (7)$$

(b) 家計

家計は全国で均質とし、代表的家計の効用関数を考える。総家計数 (= 総人口数) の変化は外生的とする。

家計は合成財消費と余暇需要に関して CES 型効用関数を持つとし、完全予見と異時点間予算制約のもとで、割引された効用総和を最大化するような合成財消費と余暇需要 (労働供給) を選択する。その後、合成財消費は生産財別消費に分解される。

家計の予算制約については、家計の全保有時間を労働供給した場合に得られる賃金所得、家計が保有する資本から得られる固定資本減耗控除後の資本所得、政府からの経常移転、海外からの雇用者所得、財産所得、その他経常移転を総所得とし、賃金所得、資本所得の一部については海外への移転所得とする。

移転所得控除後の総所得をタックスペースとして、税率一定の直接税を控除した所得を消費と余暇に配分するものとする。そして所得と支出の差額は貯蓄され、新たな資本ストックを形成する。

以上から、代表的 1 家計の行動は以下のように表現される。

$$\max_{C, F} \int_0^{\infty} \frac{\sigma}{\sigma-1} [(1-\beta)^{1/\nu} C^{(\nu-1)/\nu} + \beta^{1/\nu} F^{(\nu-1)/\nu}]^{(\sigma-1)/\sigma} e^{-\eta(t)} dt \quad (8)$$

subject to

$$\dot{K}S = (1-ty)FI/p_l - (p/p_l)C - (1-ty) \cdot (1-l_0)(w/p_l)F - (\dot{E}/E)KS \quad (9)$$

$$FI \equiv (1-l_0)w + (1-k_0)(r - p_l \delta)KS + LI + KI + TrGH + TrOH \quad (10)$$

$$\eta(t) \equiv \int_0^t \xi(s) ds \quad (11)$$

ここで,

σ : 異時点間代替弾力性 ($1 < \sigma$)

β : 分配パラメータ

ν : 代替弾力性

C : 消費合成財

F : 余暇需要

KS : 1 家計の資本ストック保有量

ty : 直接税率

FI : 完全所得

p_I : 投資財価格

p : 消費合成財価格

l_0 : 海外への雇用者所得移転率

E : 全家計の労働時間賦存量 (=人口総数)

k_0 : 海外への財産所得移転率

δ : 資本減耗率

LI : 海外からの雇用者所得

KI : 海外からの財産所得

$TrGH$: 政府から家計への経常移転

$TrOH$: 海外から家計への経常移転

$\xi(s)$: 時点 s における主観的割引率

以上の定式化は、1 家計の効用最大化は現在から無限遠の将来までに得られる所得を消費と余暇に配分してなされることを意味する。すなわち、一時点のみでは所得以上の消費も可能であり、消費せずに所得を残すことも可能としている。そして所得を消費との差額が貯蓄となり、家計の富=資本ストックを増減させるのである。

資本蓄積に必要となる粗投資 I_p は $I_p = \dot{K}S + \delta KS$ であり、 I_p は財別投資について *Leontief* 関数とする。

$$I_p = \min\{I_{p1}/b_1, \dots, I_{p32}/b_{32}\} \quad (12)$$

ここで、 b_i は投資 I とその財別需要をつなぐ技術パラメータで $b_i > 0$, $\sum_{i=1}^{32} b_i = 1$ を満たす。

式(8)の効用総和最大化問題を解くために、以下の *current value Hamiltonian* を導入する。

$$\begin{aligned} H(t) = & \frac{\sigma}{\sigma-1} \left[\{(1-\beta)^{1/\nu} C^{(\nu-1)/\nu} \right. \\ & + \beta^{1/\nu} F^{(\nu-1)/\nu} \}^{\nu/(\nu-1)} \big]^{\sigma-1/\sigma} \\ & + \lambda \{ (1-ty)(1-l_0)(w/p_I)(1-F) \\ & + (1-ty)\{(1-k_0)(r/p_I - \delta)KS \\ & + (LI + KI + TrGH + TrOH)/p_I\} \\ & - (p/p_I)C - (\dot{E}/E)KS \} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 λ : KS の随伴変数

各種変数が式(8)を最大化するための必要十分条件は以下のようなものである。

式(9)及び $\dot{\lambda} = -\partial H / \partial KS + \xi \lambda$, C 及び F が各時点で *Hamiltonian* を最大化すること、及び横断性条件。

これらは以下のように記述される。

$$\dot{K}S = (1-ty)FI/p_I - (p/p_I)C - (1-ty) \cdot (1-l_0)(w/p_I)F - (\dot{E}/E)KS \quad (9)$$

$$\dot{\lambda} = \lambda[\xi - (1-ty)(1-k_0)(r/p_I - \delta) + \dot{E}/E] \quad (14)$$

$$C = (1-\beta)p^{-\nu} \Omega \left[(\dot{E}/E)p_I / \lambda p \right]^\nu \quad (15)$$

$$F = \beta \left[(1-ty)(1-l_0)w \right]^\nu \Omega \cdot \left[(\dot{E}/E)p_I / \lambda(1-ty)(1-l_0)w \right]^\sigma \quad (16)$$

$$LS = 1 - F \quad (17)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda \cdot KS \cdot e^{-\eta(t)} = 0 \quad (18)$$

ここで,

LS : 1 家計の労働供給量

$$\Omega \equiv \left[(1-\beta)p^{1-\nu} + \beta \{ (1-ty)(1-l_0)w \}^{1-\nu} \right]^{\sigma-\nu/(\nu-1)}$$

さらに合成財消費は財別消費に関する *Cobb-Douglas* 型効用関数の最大化を通じて、財別消費に分解される。

$$\text{Max} \prod_{j=1}^{32} C_j^{\alpha_j} \quad \left(\sum_{j=1}^{32} \alpha_j = 1 \right) \quad (19)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{32} p_j \cdot C_j = p \cdot C \quad (20)$$

ここで,

C_j : 家計の j 財消費量

p_j : j 財の価格

これより、財別消費需要関数を得る。

$$C_j = \frac{\alpha_j}{p_j} p \cdot C \quad (j=1, \dots, 32) \quad (21)$$

合成財価格と財価格の関係は、以下のようである。

$$p = \prod_{j=1}^{32} \left[\frac{p_j}{\alpha_j} \right]^{\alpha_j} \quad (22)$$

(c) 政府

政府は国内での直接税及び純間接税の税収と、海外からの経常移転を歳入とし、政府消費、家計への経常移転、海外への経常移転を歳出とし、歳入と歳出の差額は貯蓄されるものとする。政府名目消費総額、政府から家計への経常移転、政府から海外への経常移転は歳入総額に比例し、政府消費支出額財別構成比は固定的とする。これらは以下の予算制約条件として表現される。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{32} p_i CG_i + TrGH + TrGO + SG \\ & = ty \cdot Y + \sum_{i=1}^{32} tp_i (w \cdot LD_i + r \cdot KD_i) + TrOG \end{aligned} \quad (23)$$

ここで,

CG_i : 政府消費 j 財の需要

$TrGH$: 政府から家計への経常移転

TrGO : 政府から海外への経常移転
 SG : 政府貯蓄
 Y : 家計所得
 TrOG : 海外から政府への経常移転

(d) 海外部門

海外部門は日本の輸入、政府から海外への経常移転、海外への雇用者所得、海外への財産所得を所得とし、日本の輸出、家計への経常移転、政府への経常移転、日本への雇用者所得、日本への財産所得を支出し、所得と支出との差額は貯蓄される。日本の財別輸出は外生的に与えられ、財別輸入は国内の財別需要量に比例するものとする。これらは以下の予算制約条件として記述される。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{32} p_i EX_i + TrOH + TrOG + KI + LI + SO \\ &= \sum_{i=1}^{32} p_i EM_i + TrGO + LIO + KIO \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、

EX_i : 日本の i 財の輸出量

EM_i : 日本の i 財の輸入量

SO : 海外部門の貯蓄 (= - 国民経済余剰)

LIO : 海外への雇用者所得の移転 ($= l_0 \cdot w \cdot LS$)

KIO : 海外への財産所得の移転 ($= k_0(r - p_i \delta)KS$)

(e) 投資貯蓄バランス

本モデルでは生産資本ストックの蓄積は家計効用の現在価値総和を最大化する形で内生化されている。一方、現実の経済においては、設備投資以外に公的投資や住宅投資などもあり、それらを考慮する必要がある。本研究では設備投資以外の投資をその他投資として、政府及び海外部門の貯蓄をその原資とする。従って以下の投資貯蓄バランスが成立する。

$$\sum_{i=1}^{32} p_i I_i = SG + SO \quad (25)$$

ここで、 I_i : その他投資による産業 i への財需要

(f) 価格

本モデルでは均衡状態において、賃金率、資本収益率、生産物価格はいくつかの価格方程式を満たす。まず均衡状態における産業 j の生産物価格と生産費用の関係は以下のように表現される。

$$p_j X_j = \sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} + (1 + tp_j)(w \cdot LD_j + r \cdot KD_j) \quad (26)$$

($j = 1, \dots, 32$)

規模に関して収穫一定の仮定から、限界費用と平均費用は等しく、中間投入における Cobb-Douglas 型技術の仮定より生産物価格方程式は以下のように表現される。

$$\begin{aligned} p_j &= \left[\sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} + (1 + tp_j)(w \cdot LD_j + r \cdot KD_j) \right] / X_j \\ &= \sum_{i=1}^{32} p_i a_{ij}(\mathbf{P}) + (1 + tp_j)(w \cdot ld_j + r \cdot kd_j) \end{aligned} \quad (27)$$

($j = 1, \dots, 32$)

ここで、

$$a_{ij}(\mathbf{P}) \equiv x_{ij} / X_j, \quad ld_j \equiv LD_j / X_j, \quad kd_j \equiv KD_j / X_j$$

これより賃金率と資本収益率を所与とすれば、生産物価格は形式的に式(28)のように表現される。式(28)は右辺の $\mathbf{A}(\mathbf{P})$ にも生産物価格が含まれるため、このまま直接的に生産物価格を計算することはできないが、本研究では均衡収束計算において式(28)を用いている。

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}'(\mathbf{P}))^{-1}[(1 + tp_j)(w \cdot ld_j + r \cdot kd_j)] \quad (28)$$

ここで、

$\mathbf{P}$: 生産物価格ベクトル

$\mathbf{A}'(\mathbf{P})$: 単位生産量当たり中間需要転置行列

(g) 二酸化炭素排出量

以上において、主としてエネルギー消費に係わる部分から CO_2 が発生し、 CO_2 発生量はエネルギー消費量に比例するものとする、 CO_2 発生量は以下のように表現される。

$$EC_{ij} = REC_i z_{ij} \quad (i = 2, 7, 18) \quad (29)$$

ここで、

EC_{ij} : j 部門における CO_2 発生物質 i による CO_2 発生量 (j 部門は中間投入及び最終需要含む)

REC_i : CO_2 発生物質 i の CO_2 限界排出量

z_{ij} : j 部門における CO_2 発生物質 i の使用量

(h) 均衡条件

以上のモデルにおいて、均衡解の考え方を簡単に述べておこう。まず家計が保有する資本ストック初期値 $KS(0)$ が与えられている時、式(9)の資本蓄積過程により各時点の資本ストックが決定される。また全家計数 $E(t)$ を与件とする時、式(15)、(16)、(17)により各時点の消費量と労働供給が決定される。さらに輸出量は外生的に与えられるため、政府消費、輸入量、その他投資は予算制約条件(23)、(24)、(25)により内生的に決定される。

これより異時点間、及び瞬時的均衡条件が以下のように記述される。なおここでは変数として同じ記号を用いているが、異時点間均衡条件では1家計の変数を表し、瞬時的市場均衡条件では社会的集計量を表している。

異時点間均衡条件

$$\dot{KS} = (1 - ty)FI / p_I - (p / p_I)C - (1 - ty) \cdot (1 - l_0)(w / p_I)F - (\dot{E} / E)KS \quad (9)$$

$$\dot{\lambda} = \lambda[\xi - (1 - ty)(1 - k_0)(r / p_I - \delta) + \dot{E} / E] \quad (14)$$

$$C = (1 - \beta)p^{-\nu} \Omega[(\dot{E} / E)p_I / \lambda p]^\nu \quad (15)$$

$$F = \beta[(1 - \tau_y)(1 - l_0)w]^\nu \Omega \cdot \left[(\dot{E}/E)p_I / \lambda(1 - \tau_y)(1 - l_0)w \right]^\sigma \quad (16)$$

$$LS = 1 - F \quad (17)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda \cdot KS \cdot e^{-\eta(t)} = 0 \quad (18)$$

財市場瞬時的均衡条件

$$X_i + EM_i = \sum_{j=1}^{32} a_{ij} X_j + C_i + CG_i + Ip_i + I_i + EX_i, \quad (i = 1, \dots, 32) \quad (30)$$

労働市場瞬時的均衡条件

$$LS = \sum_{i=1}^{32} LD_i \quad (31)$$

資本レンタル市場瞬時的均衡条件

$$KS = \sum_{i=1}^{32} KD_i \quad (32)$$

以上の均衡条件を満たす毎期の随伴変数、資本ストック、経済フロー変数を Fair-Taylor 法⁹⁾、Newton-Raphson 法を用いて求め、我が国の最適経済成長、及びその時の CO₂ 発生量を見ることが可能となる。

なお本研究では家計、産業は将来に対し合理的期待形成を持つと仮定している。そのためモデルの数値解法では将来価格を与件として、そのもとで異時点間および瞬時的均衡条件を満たす均衡解を求めることからスタートする。

動学的均衡状態では家計、産業が予想する価格は、実現した市場均衡価格と一致し、もはや期待形成を変える誘因を持たない。このような理論的背景から、本研究では計算 iteration 中の暫定価格系列を期待価格として与え、その系列が iteration によって変化しなくなる状態をもって、動学的均衡解としている。このアルゴリズムについては参考文献 9)、12) が詳しい。

(4) モデルの離散化とパラメータ設定

数値計算はモデルを離散化すると同時に、1991 年から 2010 年までの有限期間について行う。このため目的関数(8)、資本蓄積過程(9)、随伴方程式(14)は以下のように離散化される。

$$\begin{aligned} \max_{C, F} \sum_{t=1991}^{2010} \frac{\sigma}{\sigma-1} \left\{ \left[(1-\beta)^{1/\nu} C^{(\nu-1)/\nu} + \beta^{1/\nu} F^{(\nu-1)/\nu} \right]^{(\sigma-1)/\sigma} / \eta(t) \right. \\ \left. + \theta KS(2011) / \eta(2011) \right\} \quad (33) \end{aligned}$$

$$\eta(t) = \prod_{s=1991}^t [1 + \xi(s)]^{(s-1991)} \quad (34)$$

$$KS(t+1) = [KS(t) + (1 - \tau_y)FI / p_I - (p / p_I)C - (1 - \tau_y)(1 - l_0)(w / p_I)F]E(t) / E(t+1) \quad (35)$$

$$\lambda(t) = \lambda(t+1)(1 - \tau_y)(1 - k_0)(r / p_I - \delta) \cdot E(t) / E(t+1) \quad (36)$$

$$\lambda(2011) = \theta / \eta(2011) \quad (37)$$

ここで、 θ ：目標時点における家計資産(資本ストック)の評価パラメータ

目的関数(33)の最終項は、目標年次における家計の資産評価を表すと同時に、随伴方程式(36)の終端条件を与えるものでもある。

またモデルの Cobb-Douglas 型生産関数、CES 型効用関数を始めとするいくつかの関数については、パラメータを設定する必要がある。本モデルのパラメータは 1990 年日本の実績データにより設定した。

例えば生産関数については労働分配率を計算することにより α_i は求まり、中間投入技術係数 a_{ij} は産業連関表の投入係数そのものとなる。これらのパラメータは推定が容易であり、その数も多いためここでは推定結果は省略する。

効用関数の代替弾力性は賃金率に対する労働供給弾力性から求まる¹³⁾。異時点間代替弾力性は 2 とし¹²⁾、各時点での主観的割引率は、我が国の長期利子率に基づき設定した。最後に外生的に与えられる全国人口数は、厚生省による中位推計値を用いている。これらのパラメータは表 4、表 5 にまとめられる。

表 4 効用関数のパラメータおよび最終年次の資本ストック評価パラメータ

異時点間代替弾力性	σ	2
代替弾力性	ν	0.49079
分配パラメータ	β	0.65943
資本ストック評価パラメータ	θ	0.46512

表 5 人口および主観的割引率の設定
(人口 E の単位：千人、主観的割引率 ξ の単位：%)

年次	'91	'92	'93	'94	'95
人口 E	124,043	124,452	124,764	125,034	125,570
割引率 ξ	6.989	5.552	4.414	4.047	2.788
年次	'96	'97	'98	'99	'00
人口 E	125,869	126,156	126,420	126,665	126,892
割引率 ξ	2.533	2.367	2.367	2.367	2.367
年次	'01	'02	'03	'04	'05
人口 E	127,100	127,286	127,447	127,581	127,684
割引率 ξ	2.367	2.367	2.367	2.367	2.367
年次	'06	'07	'08	'09	'10
人口 E	127,752	127,782	127,772	127,719	127,623
割引率 ξ	2.367	2.367	2.367	2.367	2.367

4. シミュレーション分析

(1) シミュレーション分析の考え方

ここでは具体的な CO₂ 対策の経済的影響分析の考え方を述べておこう。現在、有力な CO₂ 対策としては、予防策と適応策がある¹⁴⁾。予防策は言うまでもなく、CO₂ 発生抑制を目的としたもので、CO₂ をより発生させないような技術開発、ライフスタイルへの移行を目指した、様々な社会経済的対策が対象となる。経済学的には炭素税導入や、CO₂ 排出権市場の創設などが注目を集めている。

一方、適応策は CO₂ 増大に伴う地球温暖化を前提として、それに社会経済システムをどのように適応させていくのかを考えるものである。しかし、地球温暖化の影響が極めて深刻になるという予測も多く、現在のところ予防策に重点が置かれている。従って本研究においても予防策に焦点を当て、特に炭素税と CO₂ 排出権市場の影響を考察する。

(2) 炭素税と排出権市場

炭素税は環境税の一種であり、CO₂ 排出を削減するために、化石燃料に対して含まれている炭素量に対して課税するものである。1990 年以降、北欧等 5 カ国で相次いで導入され、EC（欧州共同体）でも導入に向けた作業が進んでいる¹⁵⁾。

一方、排出権市場は汚染物質排出者に一定の排出量を割り当て（排出権）、それを取引きする市場である。割当量以下の排出量で操業が可能な企業は、余った分を市場で売却し利益を上げることができるため、汚染対策のインセンティブになるとされている。

(3) シミュレーションケースとモデルの対応

本研究では、政策的要因を加味しないケース（基準ケース）と、炭素税導入、二酸化炭素排出権市場導入の 3 ケースをシミュレーション分析する。これらは表 6 にまとめられる。

表 6 シミュレーションケース

ケース	ケースの内容
基準ケース	政策的要因を加味しない。
ケース 1	全産業における CO ₂ 発生原料の中間投入に対して 2 万円/t-C の炭素税を課す。
ケース 2	CO ₂ 排出権は政府より発行され、排出権量はケース 1 における目標年次の産業による排出量と同じになるように、年率一定の増加率を設定する。CO ₂ 排出権市場は産業の中間投入にのみ導入される。

さらにこれらのケースをシミュレーションするためには、適宜モデルを変更する必要がある、以下にそれを説明する。

(a) ケース 1 炭素税の導入

炭素税は上記のように、化石燃料に含まれる炭素量をタックスベースとする従量税方式が一般的である。このため化石燃料の種類により炭素含有量が異なることから、化石燃料種類ごとに差別化された課税となる。さらにより広く CO₂ 税としては、エネルギー単位当りの課税や、化石燃料価格への課税も考えられている。

しかし本研究では財価格が内生化され、相対価格体系が時間とともに変化するため、炭素税の影響を最も客観的に見られる従価税方式として定式化する。すなわち本研究の炭素税は、以下の形式で表現される。

$$p_e = (1 + tc_i REC_i) p_i \quad (i = 2, 7, 18) \quad (38)$$

ここで、

p_e : 炭素税込みの化石燃料価格

tc_i : 炭素税率

p_i : 化石燃料生産者価格

tc_i は基準年での税率が 2 万円/t-C と等価であるように、従価税率として設定される。これより価格方程式(28)は以下のように修正される。

$$P = (I - A'(P) - A'(P) \cdot DEC)^{-1} \cdot [(1 + tp_j)(w \cdot ld_j + r \cdot kd_j)] \quad (39)$$

ここで、

DEC : $i=2, 7, 18$ において $(1 + tc_i) REC_i$ が対角要素、

その他がゼロとなる対角行列

[$\cdot$] : カッコ内を要素とする列ベクトル

式(38)より、化石燃料需要者は生産者価格よりも $(1 + tc_i REC_i)$ だけ高い価格を支払わなければならない、化石燃料を節約するインセンティブが働く。本研究ではこの影響をケース 1 としてシミュレーション分析する。

(b) ケース 2 CO₂ 排出権市場の影響

CO₂ 排出権市場は、経済全体に対して CO₂ 排出総量を決めておき、その範囲内で CO₂ 排出権を売買する市場である。

本研究では排出権の発行者を政府とし、排出権の有効期間を 1 年とするスポット市場と設定する。これより排出権市場はレンタル市場のように定式化できる。

現実的には排出権市場を売買市場とすることが必要であるが、そのためには資産売買市場を想定し、その中で排出権市場を取り扱わなければならない。

本研究の枠組みでは、モデルの構造を根本的に拡張する必要があり、排出権売買市場の考察は今後の課題とする。

以上から、排出権の供給者は政府となり、その供給量 SC は毎期なされ、その期間内は固定され、価格弾力

性はゼロと設定する。

一方、排出権需要者は産業とし、その需要量は CO₂ 発生量に比例的とする。CO₂ 発生量は化石燃料系の中間投入に起因するものであるから、産業 j の排出権需要量 DC_j は以下となる。

$$DC_j = \sum_{i=1}^{32} wc_i x_{ij} \quad (40)$$

ここで、

wc_i : 中間財 i の投入に伴う CO₂ 発生原単位 (ただし x_{ij} が化石燃料系投入以外ではゼロ)

ここで排出権価格を r_c とすれば、産業 j では各期において以下のゼロ利潤条件が成立する。

$$\text{利潤} = p_j X_j - \sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} - (1 - t_c)(w \cdot LD_j + r \cdot KD_j) - r_c DC_j = 0 \quad (41)$$

そして排出権市場の均衡条件、

$$SC = \sum_{j=1}^{32} DC_j \quad (42)$$

を含めた形でこれをケース 2 とし、動学一般均衡シミュレーションを行う。

(4) シミュレーション結果

以上の 3 ケースについてシミュレーションを行った結果を図 1 から図 16 に示す。

図 1 から図 4 はそれぞれ CO₂ 総排出量、産業による CO₂ 総排出量、最終需要による CO₂ 総排出量、CO₂ 排出権価格を示している。図 1 の CO₂ 総排出量を見ると、基準ケースでは 1991 年において 3 億 7600 万トン、2010 年では 7 億 3900 万トンであり、成長率は 3.6% と推計された。ケース 1 とケース 2 では、1991 年において 3 億 4500 万トンと 3 億 7900 万トン、2010 年にはそれぞれ 6 億 3200 万トン、6 億 3800 万トンとなっている。2010 年における CO₂ 総排出量を基準ケースを基準にとると、ケース 1 の CO₂ 削減率は 14.5%、ケース 2 では 13.7% であり、ケース 1 の方が若干削減率が大きい。

次に、図 2 で産業による CO₂ 総排出量を見ると、1991 年において基準ケースでは 3 億 3400 万トン、ケース 1 では 3 億 700 万トン、ケース 2 では 3 億 3400 万トンとなっており、2010 年ではそれぞれ、6 億 5500 万トン、5 億 5600 万トン、5 億 5600 万トンとなっている。

2010 年における CO₂ 削減率は基準ケースと比較して、ケース 1、2 とともに、15.2% となっている。ケース 1 とケース 2 で同値となるのは、ケース 2 の仮定によるものである。

次に図 3 の最終需要による CO₂ 総排出量を見ると、1991 年の基準ケースは 4180 万トン、ケース 1 が 3760 万トン、ケース 2 が 4470 万トンであり、2010 年ではそれぞれ 8360 万トン、7600 万トン、8210 万トンとなっている。2010 年におけるケース 1、2 の CO₂ 削減率はそ

れぞれ、9.2%、1.9% で、ケース 1 の削減効果の方が、かなり大きい。

最終需要による CO₂ と産業による CO₂ のに対する削減率を比較すると、CO₂ 抑制政策が産業間の中間取引にのみ課せられることから、産業による場合の方がより大きい削減率を達成していることが示されている。

図 4 の CO₂ 排出権価格を見ると、1991 年では仮定により産業の CO₂ 排出必要量と、排出権発行量がちょうど等しいため、排出権価格はゼロとなっている。その後価格は上昇し、1996 年で 22,588 円/トンのピークとなり、その後徐々に下降する傾向を見せている。

これは産業の中間投入の組み合わせを、比較的早い段階に適応させ、シミュレーション期間後半では、やや緩やかな適応により CO₂ 排出を抑制していることを反映した結果である。

次に図 5 の GDP 総額を見ると、1991 年では 3 ケースともに約 490 兆円であり、2010 年では基準ケースが 1004 兆円、ケース 1 が 936 兆円、ケース 2 が 924 兆円である。また、年平均成長率はそれぞれ 3.83%、3.44%、3.39% と計算される。

図 6 の合成財消費では 2010 年において、基準ケースが 284 万単位、ケース 1 が 292 万単位、ケース 2 が 289 万単位であり、ケース 1、ケース 2 とともに基準ケースよりわずかに大きい。これは産業による CO₂ 排出量が抑制されるために、経済全体での財需要が中間需要から最終需要へとシフトし、その結果家計消費量が高まったものと考えられる。

図 7 の労働供給ではケース 1、ケース 2 とともに GDP の成長パターンを反映して、基準ケースを下回る結果となっている。図 8 の資本蓄積においても、ケース 1、ケース 2 とともに基準ケースを下回っている。

これより、家計は将来消費 (貯蓄) を減らして、財消費と余暇の合成財である現在消費を選好する傾向が確認できる。

本モデルは動学モデルであると同時に、中間投入係数が内生化されているため、それぞれの産業における CO₂ 抑制策の影響は、極めて複雑な因果関係を経由して起こっている。主要な産業について CO₂ 抑制策の GDP への影響をまとめると、以下のようである。

鉱業 (図 9)、石油・石炭製品 (図 10)、電力・ガス・熱供給 (図 15) のようにエネルギー消費に関わる産業が、CO₂ 発生物質の投入削減の影響を受ける。これらの産業の GDP を基準ケースとケース 1、2 で比較すると、2010 年において、鉱業ではそれぞれ 14.5%、13.4% 減、石油・石炭製品では 16.1%、18.3% 減、電力・ガス・熱供給では 9.7%、12.6% 減となっている。

また、製造業の多くは炭素税及び CO₂ 排出権市場導入による価格上昇の影響を受けている。サービス業では運輸を除いて、影響は製造業より比較的少ない。また、産業 GDP に対しては CO₂ 排出権市場導入の影響は炭素

税導入より、より大きな影響を与えていることが示されている。

最後に家計効用への影響をまとめると、家計の総効用値(33)は、当然のことながら基準ケースが最も大きく、次いでケース1、ケース2の順番であった。しかし目標年次での資産評価値を除くと、瞬時的効用値はシミュレーション期間を通して、基準ケースの値が小さいという結果であった。これは上述したように、家計の現在消費への選好が強まることが反映されたものである。

しかし現在消費の拡大は、将来消費である貯蓄を犠牲にすることであり、実際、資本蓄積の成長抑制からGDPの成長鈍化につながっている。

5. おわりに

本研究は日本経済を対象としてCO₂排出量を内生化した動学CGEモデルを構築し、1991年から2010年までの20年間についてシミュレーション分析を行ったものである。本研究では炭素税、CO₂排出権市場導入の影響に焦点を置き、分析を行った。シミュレーションの結果、2つのケースでは目標年次で、同程度のCO₂抑制を産業全体に課しているにも関わらず、異時点間一般均衡効果は個別の産業ではかなり異なることが判明した。

また本研究の枠組みでは、炭素税導入の方がCO₂排出権市場導入よりも、社会的厚生水準を下げないことが示された。今後の課題としては、モデルへの技術進歩の導入、CO₂排出量増加に伴う外部性の考慮、国際間モデルへの拡張などが挙げられる。

なお本研究は特定領域研究(A)(1)(課題番号09247104)、基盤研究(C)(2)(課題番号09680547)、基盤研究(A)(1)(課題番号09303001)の研究成果に基づいている。

補注

(1)この命題は異なる産業が雇用する資本財が同質かつ可塑的であり、資本市場がレンタル市場であることを前提としている。資本財の同質性は、第3節の家計行動の中で、生産財によるLeontief型資本ストックとして表現されている。これらの仮定と投資理論に関しては文献16)が詳しい。

(2)異時点間代替弾力性 σ は動的最適解の存在を保証する重要なパラメータである。 $\sigma=2$ とすれば、効用関数の平方根を積分することになる。これは限界効用が逓減することを意味しており、これが動的最適解の存在を保証する。限界効用が逓減すれば、 σ の値は任意に取れるが、その違いによって経済成長経路は大きな影響を受ける。しかし、その実証的計測は極めて困難であるため、本研究では文献5)などを参考に設定した。

参考文献

- 1) Miyata, Y. : An Intertemporal General Equilibrium Analysis of the Waste-Economic System, Infrastructure Planning Review 14, pp.421-432, 1997
- 2) Burniaux, J.-M. Nicoletti, G. and Oliveria-Martins, J. : Green: A Global Model for Quantifying the Costs of Policies to Curb CO₂ Emissions, OECD Economic Studies 19, pp.49-92, 1992
- 3) Dornbusch, R. and Poterba, J. M. ed. : Global Warming: Economic Responses, The MIT Press, 1993
- 4) Jorgenson, D.W. and Wilcoxon, P.J. : Environmental Regulation and U.S. Economic Growth, RAND Journal of Economics 21(2), pp.314-340, 1990
- 5) Manne, A. S., Mendosohn, R. and Richels, R. : MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies, Energy Policy 23, pp.17-34, 1993
- 6) Rutherford, T. : The Welfare Effects of Fossil Carbon Restriction: Results from a Recursively Dynamic Trade Model, OECD Economics Department Working Paper 112, 1992
- 7) Kuroda, M. and Shimpō, 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
- 8) 増井利彦・盛岡 通 : 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, 土木学会論文集 No.573, pp.71-80, 1997
- 9) 宮田 譲 : 廃棄物対策の評価, 土木計画学ワンデーセミナー「応用一般均衡モデルの公共投資評価への適用」, シリーズ15, pp.98-113, 1998
- 10) 環境庁地球環境部編 : 温暖化する地球・日本の取り組み, 大蔵省印刷局, 1994
- 11) 資源エネルギー庁編 : 総合エネルギー統計平成9年度版, 通商産業研究社, 1998
- 12) Dixon, P.B., Parmenter, B.R., Powell, A.A. and Wilcoxon, P.J. : Notes and Problems in Applied General Equilibrium Economics, North-Holland, 1992
- 13) 市岡 修 : 応用一般均衡分析, 有斐閣, 1991
- 14) 西岡秀三, 諸住 哲 編 : 地球環境破壊とは?, 東京教育情報センター, 1997
- 15) 環境庁地球環境部 編 : 地球環境キーワード事典, 中央法規, 1997
- 16) 吉川 洋 : マクロ経済研究, 東京大学出版会, 1984

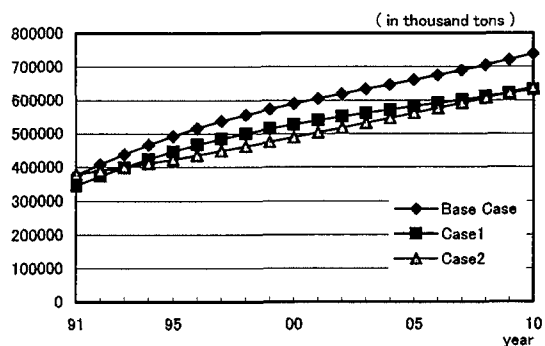


図1 CO₂総排出量

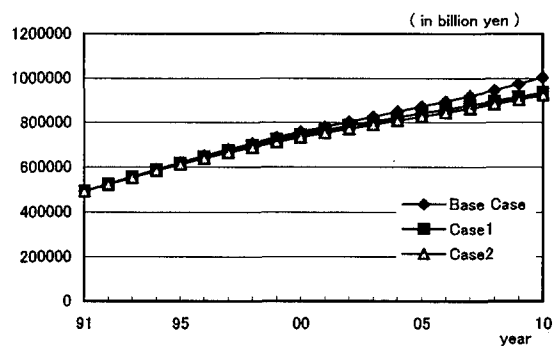


図5 GDP

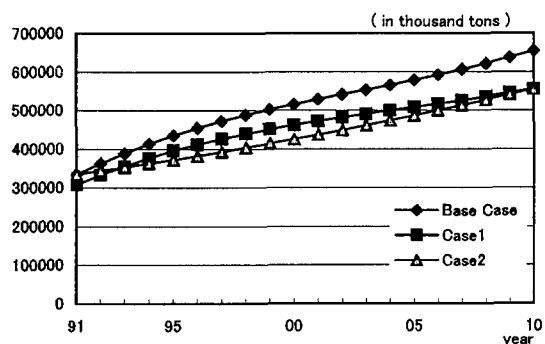


図2 産業によるCO₂総排出量

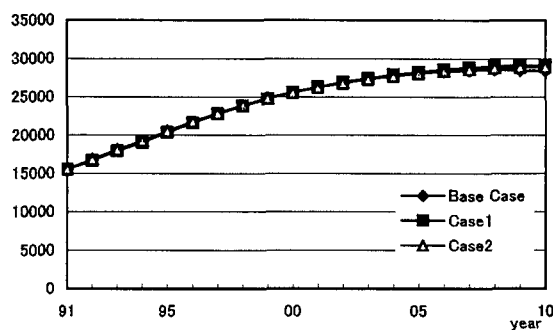


図6 消費合成財

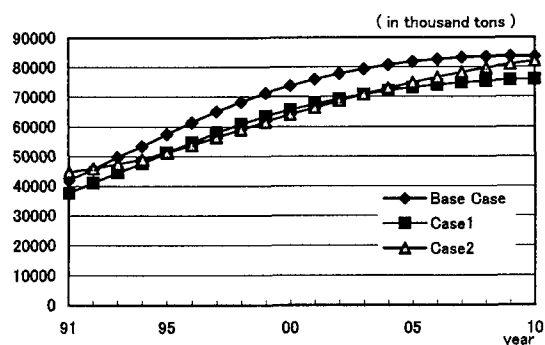


図3 最終需要によるCO₂総排出量

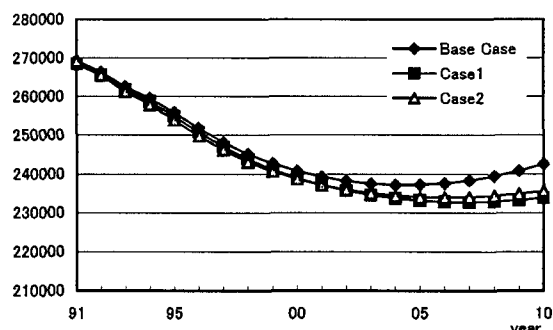


図7 労働供給

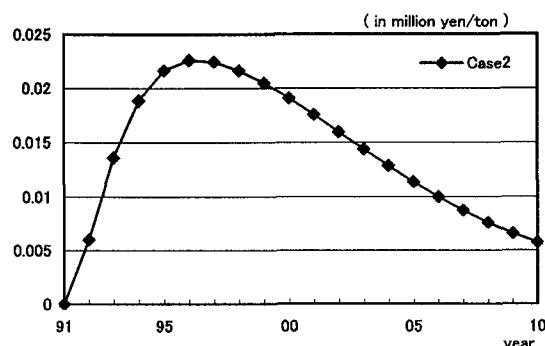


図4 CO₂排出権価格

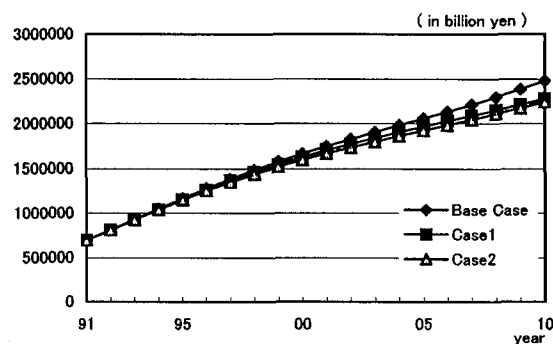


図8 資本蓄積

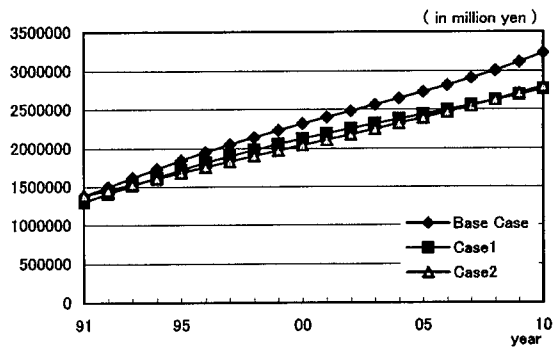


図9 GDP(鉱業)

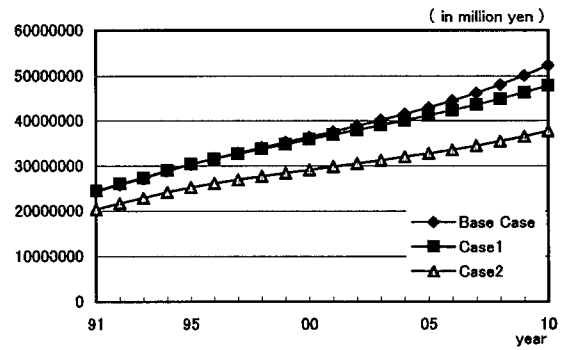


図13 GDP(電気機械)

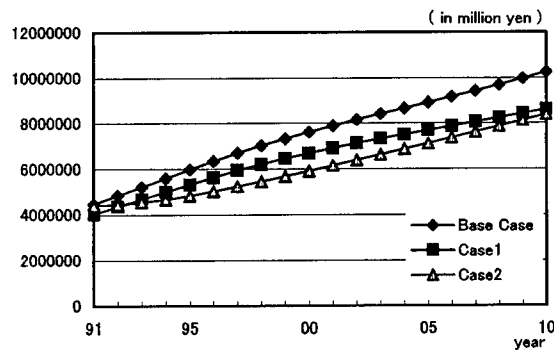


図10 GDP(石油・石炭製品)

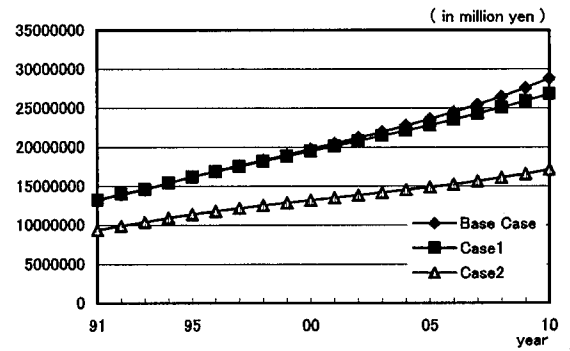


図14 GDP(輸送機械)

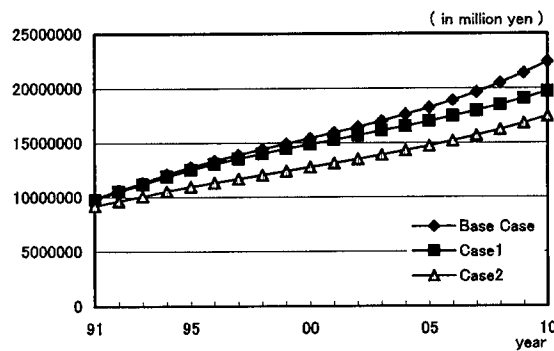


図11 GDP(鉄鋼)

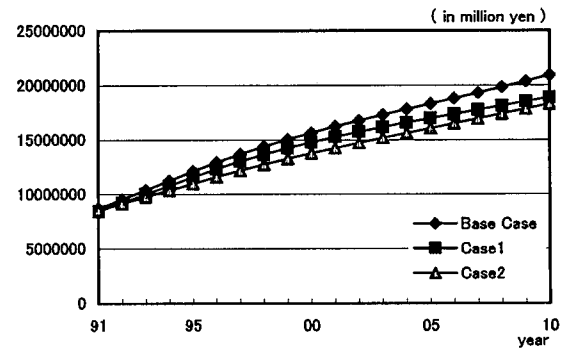


図15 GDP(電力・ガス・熱供給)

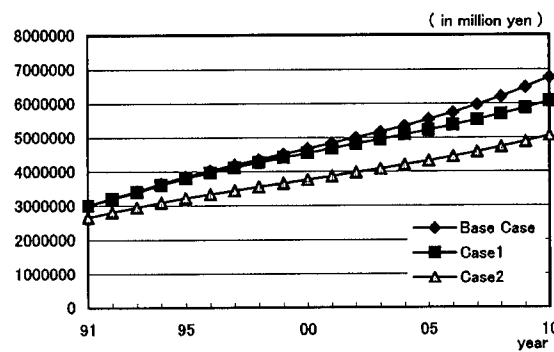


図12 GDP(非鉄金属)

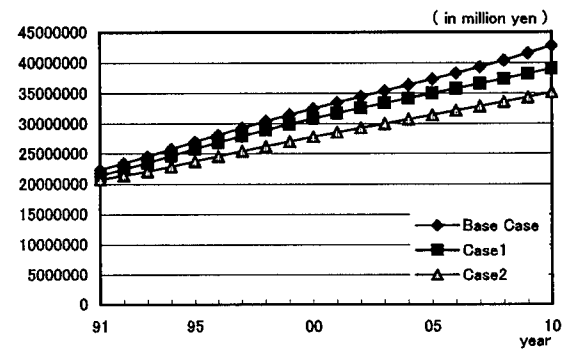


図16 GDP(運輸)

二酸化炭素排出問題の動学一般均衡分析

宮田 譲**, 佐藤 浩基***

現在の環境経済学の中心的研究課題は地球温暖化問題であり、その元凶として最も重視されているのが二酸化炭素排出問題である。このまま地球温暖化が進行すれば、経済社会に重大な影響を及ぼすことが予想される。本研究では筆者らの廃棄物－経済動学 CGE モデルに基本を置きつつ、日本経済を対象とした二酸化炭素抑制対策評価モデルを構築し、環境保全のための経済的手段として炭素税及び CO₂ 排出権市場を導入した場合の経済的影響をシミュレーション分析した。その結果、炭素税と CO₂ 排出権市場では目標年次において同程度の CO₂ 抑制を産業全体に課しているにも関わらず異時点間一般均衡効果は個別の産業ではかなり異なることが判明した。

AN INTERTEMPORAL GENERAL EQUILIBRIUM ANALYSIS OF CO₂ EMISSIONS PROBLEM IN JAPAN

By Yuzuru MIYATA**, Hiroki SATO***

The current most important subject in the environmental economics has been the carbon dioxide (CO₂) emissions problem. This study aims to construct an economic accounting matrix for Japan's 1990 economy. And then, we estimate the volume of CO₂ generation. Furthermore, we construct an intertemporal computable general equilibrium model of the CO₂ emissions examining effects of carbon tax (Case1) and introduction of CO₂ emissions permit trading market (Case2) on Japan's economy. Finally, despite the fact that the same quantitative CO₂ restraint is imposed on industries in the target year in Cases1 and 2, intertemporal general equilibrium effects largely differ across industries and households.
