

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 Emission 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、二酸化炭素排出問題であり、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が、国際的規模で研究されている²⁾。

本研究もそ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、その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する。

2. モデルの構造

最初に本研究のモデルの概要を簡単にまとめておこう。まず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。

産業は静学的な利潤最適化行動のもとで、労働と資本ストックを投入し、財を生産する。そのもとで財市場、労働市場、資本市場をクリアする財価格、賃金率、資本収益率を求める。

二酸化炭素(以下CO₂と略記)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、モデルの前提条件を述べた後、モデルの構造について順次説明を行う。

(1) モデルの前提条件

- ①経済主体は日本の家計、産業(32産業分類)、政府、外国部門とする。
- ②市場は32生産物市場、労働市場、資本市場の34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シミュレーション期間は1990年から2010年までの21年間とする。

(2) 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CES型の方が望ましいが、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付けられる。

生産技術の1次同次性から、産業の行動は与えられた技術、価格のもとで費用を最小化するものと定式化される。

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

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*i*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*の中間投入分配係数($\sum_{i=1}^{32} a_{ij} = 1$)、 A_{1j} 、 A_{2j} 、 α_j : 産業*j*の技術パラメータ

*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・社会学系

***学生員, 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 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, TEL 0532-44-6955, FAX 0532-44-6947)

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。

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

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

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

さらに完全競争下における長期均衡の仮定から、以下のゼロ利潤条件を得る。

$$\text{利潤} = p_j X_j - \sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} - (1+tp_j)\{wLD_j + rKD_j\} = 0 \quad (7)$$

(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、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、外国からの雇用者所得、財産所得、その他経常移転を総所得とする。ただし賃金所得、資本所得の一部については、外国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、代表的家計の行動は以下のように表現される。

$$\text{Max}_{C, F} \int_0^{\infty} \frac{\sigma}{\sigma-1} \{ [(1-\beta)^{1/\sigma} C^{(\sigma-1)/\sigma} + \beta^{1/\sigma} \cdot F^{(\sigma-1)/\sigma}]^{v/(v-1)} \}^{(\sigma-1)/\sigma} e^{-\eta(t)} dt \quad (8)$$

$$\text{subject to} \quad (8)$$

$$\dot{KS} = (1-ty)FI/p_1 - (p/p_1)C - (1-ty)(1-l_0)(w/p_1)F - (E/E)KS \quad (9)$$

$$FI \equiv (1-l_0)w + (1-k_0)(r/p_1 - \delta)KS + LI + KI + TrGH + TrOH \quad (10)$$

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

ここで、 σ : 異時点間代替弾力性 ($1 < \sigma$)、 β : 分配パラメータ、 v : 代替弾力性、 C : 消費合成財、 F : 余暇需要、 KS : 家計の資本ストック保有量、 ty : 直接税率、 FI : 完全所得、 p_1 : 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、 w : 賃金率、 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、 r : 資本収益率、 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、消費をせずに所得を残すことも可能としている。そして所得と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。

資本蓄積に必要な粗投資 Ip は $Ip = KS + \delta KS$ であり、 Ip は財別投資について Leontief 関数としよう。

$$Ip = \min\{Ip_1/b_1, \dots, Ip_{32}/b_{32}\} \quad (12)$$

ここで、 $b_i > 0$, $\sum_{i=1}^{32} b_i = 1$

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。

$$H(t) \equiv \frac{\sigma}{\sigma-1} \{ [(1-\beta)^{1/\sigma} C^{(\sigma-1)/\sigma} + \beta^{1/\sigma} F^{(\sigma-1)/\sigma}]^{v/(v-1)} \}^{(\sigma-1)/\sigma} + \lambda \{ (1-ty)(1-l_0)(w/p_1)(1-F) + (1-ty)\{(1-k_0)(r/p_1 - \delta)KS + (LI + KI + TrGH + TrOH)/p_1\} - (p/p_1)C - (E/E)KS \} \quad (13)$$

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。

$$\dot{KS} = (1-ty)FI/p_1 - (p/p_1)C - (1-ty)(1-l_0)(w/p_1)F - (E/E)KS \quad (9)$$

$$\dot{\lambda} = \lambda [\xi - (1-ty)(1-k_0)(r/p_1 - \delta) + E/E] \quad (14)$$

$$C = (1-\beta) \{ [(1-\beta)^{1/\sigma} C^{(\sigma-1)/\sigma} + \beta^{1/\sigma} F^{(\sigma-1)/\sigma}]^{v/(v-1)} \}^{(\sigma-1)/\sigma} + \beta \left(\frac{p}{(1-ty)(1-l_0)w} \right)^{v-1} \int^{(\sigma-1)/\sigma} \frac{1}{(p_1/\lambda p)^{\sigma/(\sigma-1)}} \quad (15)$$

$$F = \beta \{ [(1-\beta)^{1/\sigma} C^{(\sigma-1)/\sigma} + \beta^{1/\sigma} F^{(\sigma-1)/\sigma}]^{v/(v-1)} \}^{(\sigma-1)/\sigma} \left[p_1/\lambda (1-ty)(1-l_0)w \right]^{\sigma/(\sigma-1)} \quad (16)$$

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

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

ここで、 LS : 1家計の労働供給量

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。

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

また合成財価格と財価格との関係は以下のようになる。

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

(c) 政府

政府は国内での直接税及び純間接税の税收と、外国からの経常移転を歳入とし、政府消費、家計への経常移転、外国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、政府から外国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。

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

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ものとする。この予算制約条件は以下のように記述される。

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

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、 LIO : 海外への雇用者所得の移転 ($= l \cdot w \cdot LS$)、 KIO : 海外への財産所得の移転 ($= k \cdot (r \cdot p \cdot \delta) \cdot KS$)

(e) 投資貯蓄バランス

本モデルでは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。

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

ここで、 I_i : その他投資による産業 i への財需要

(f) 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。

しかし、本研究の産業部門は必ずしも、エネルギー種類の部門とはなっていないため、表 1 に示す生産財 1 単位当たりの CO_2 排出原単位を用いて、産業別 CO_2 発生量を計算する。

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 化石燃料等別の二酸化炭素排出原単位

3. 均衡解の導出

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。そして各時点において以下の均衡条件を考えることができる。

財市場

$$X_i + EM_i = \sum_{j=1}^{32} a_{ij} X_j + C_i + CG_i + Ip_i + I_i + EX_i \quad (i=1, \dots, 32) \quad (26)$$

労働市場

$$LS = \sum_{j=1}^{32} LD_j \quad (27)$$

資本レンタル市場

$$KS = \sum_{j=1}^{32} KD_j \quad (28)$$

以上の均衡条件を満たす毎期の資本ストック、経済フロー変数を収束計算によって求めることにより、我が国の最適経済成長、及びその時の CO_2 発生量を見ることが可能となる。

4. シミュレーション分析の考え方³⁾

ここでは具体的な CO_2 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 CO_2 対策としては、予防策と適応策がある。予防策は言うまでもなく、 CO_2 発生を抑制を目的としたもので、 CO_2 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、 CO_2 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 CO_2 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。

本研究では炭素税と CO_2 排出権市場の影響に重点を置くが、モデルにおいてそれをどのように行うのかをまとめておこう。

(1) 炭素税の影響

炭素税は通常、化石燃料に含まれる炭素量をタックスベースとする。従って、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 CO_2 税としては、エネルギー単位当たりの課税や、化石燃料価格への課税も考

えられる。何れにせよ本研究では炭素税は化石燃料価格への転嫁として、以下の形式で表現される。

$$p_o = (1+t_o)p \quad (29)$$

ここで、 p_o : 炭素税込みの化石燃料価格、 t_o : 炭素税率、 p : 化石燃料生産者価格

これより、化石燃料需要者は生産者価格よりも $(1+t_o)$ 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シミュレーション分析する。

(2) CO_2 排出権市場の影響

CO_2 排出権市場は、経済全体に対して CO_2 排出総量を決めておき、その範囲内で CO_2 排出権を売買する市場である。

本研究では排出権の所有者を政府とし、それを産業にレンタルするものとする。従って、排出権の供給者は政府となり、その供給量 SC はある期間内は固定され、価格弾力性はゼロとする。

一方、排出権需要者は産業とし、その需要量は CO_2 発生量に比例的とする。 CO_2 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。

$$DC_j = \sum_{i=1}^{32} wc_i x_{ij} \quad (30)$$

ここで、 wc_i : 中間財 i の投入に伴う CO_2 発生原単位 (ただし x_{ij} が化石燃料系投入以外ではゼロ)

ここで排出権の賃貸価格を r_o 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。

$$\begin{aligned} \text{利潤} = & p_j X_j - \sum_{i=1}^{32} p_i x_{ij} - (1+tp_j)\{wLD_j \\ & + rKD_j\} - r_o DC_j = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

そして排出権市場の均衡条件、

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

を含めた形で、動学一般均衡シミュレーションを行う。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。

参考文献

- 1) Miyata, Y.: An Intertemporal General Equilibrium Analysis of the Waste-Economic System, Infrastructure Planning Review, No.14, pp.421-432, 1997
- 2) Dornbusch, R. and Poterba, J.M. ed.: Global Warming: Economic Responses, The MIT Press, 1993
- 3) 植田和弘, 岡敏弘, 新澤秀則編著: 環境政策の経済学, 日本評論社, 1997