

最適成長論による自然環境保全政策の経済評価

武藤慎一*・上田孝行**・高木朗義***・伊藤 匠****

ECONOMIC EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION POLICIES WITH THE OPTIMAL ECONOMIC GROWTH THEORY

By

Shinichi MUTO, Takayuki UEDA, Akiyoshi TAKAGI and Takumi ITO

ABSTRACT: It is necessary to examine the control plan of natural resources with considering even to activities of the future generation, in order to achieve the sustainable development that is becoming a key word in a recent environmental argument. In this paper, we evaluate the environmental protection policies that optimize from the point of both of the environmental effects and economic impacts in the future from the present, by the optimal growth theory. And we measured the effects of the forest protection policy, in that using tax of the forest resources is introduced and it invest its tax revenues to the removing pollutants or restoring the forests. We announced the optimal policy level where all of people are satisfied.

KEYWORDS: The Optimal Growth Theory, Environmental Protection Policies, Economic Evaluation

1. はじめに

現在の環境問題に対する議論では、現時点での過度の自然資源の利用が将来世代の諸活動を脅かすのではないかと懸念されている。そのため、将来世代まで含めた持続的な発展を可能とするための自然資源の管理方策について、早急な検討が必要とされている。

これに対し、経済学の分野では、長期的な経済状態を分析する手法として、最適成長論を用いた研究が進められてきた。そこでは、持続的な成長のために必要とされる物的資本の蓄積経路問題や、最適成長のための政府の役割についての検討がなされている。そして、最近になり、冒頭の環境問題に対し自然環境の変化が経済成長へ及ぼす影響や自然環境保全政策の効果について、最適成長論を適用した分析もなされるようになってきた^{1), 2)}。しかし、それらの研究では、理論的な観点からの分析にとどまっている。

本研究では、長期的に見て環境と経済の両者を同時に分析することが可能な最適成長モデルの構築を行う。そのモデルを用いて、諸経済活動にお

いて環境資源という制約が加わることにより、どのような影響が生じるのかを明らかにし、その上で自然環境保全政策の効果についての検討を行う。さらに、本研究では従来の最適成長論の研究において検討がなされてこなかった実証分析に対して最適成長論の適用を行い、実際に数値シミュレーションにより政策の有効性を明らかにする。

2. 既存の最適成長論

ここでは、経済学の分野で用いられてきた最適成長モデル³⁾を示し、その概要を説明する。説明が若干煩雑になる可能性があるが、まず、最適成長理論の全体像を明らかにする。

2.1 最適成長モデルの概要

そもそも、最適成長論とは、ある一国経済において、現在から無限の未来までどのような消費の経路を選択するのが最適であるのかを論じようとしたものである。ここで、何が「最適」となればよいのかということが問題となるが、その前にここでの説明に用いる経済モデルの仮定を示しておくことにする。

* 岐阜大学工学部土木工学科,

** 東京工業大学工学部開発システム工学科,

*** 中日本建設コンサルタント(株)計画本部,

**** 新潟県庁

- (1) 対象とする経済には、家計と企業が存在する。
 (2) 家計は、無限遠まで続くような一つの家計を考える。これは、家計を一つの連綿と続く家系と考え、ある時点の家計はそれ以降の子孫の効用を整合的に考慮し資産を残すと考えても良い。
 (3) (2)の仮定より、家計は現在から将来までの全ての満足度を最大とするよう行動するものと想定される。しかし、企業は各期ごとに利潤を最大とするよう行動するものとする。

以上の仮定の下で、家計と企業の行動モデルを構築する。

2.1.1 企業の行動モデル

企業は、ある時点 t において、労働と資本を投入し、技術制約の下で利潤を最大化するよう行動するものとする。なお、生産される財の価格は 1 としている。この企業の行動は、通常の静学モデルと同様に定式化ができる。

$$p(t) = \max_{y(t), L(t), K(t)} y(t) - w(t)L(t) - r(t)K(t) \quad (1.a)$$

$$\text{s.t. } y(t) = f(L(t), K(t)) \quad (1.b)$$

ただし、 t : 時点、 p : 企業利潤、 y : 生産量、 L : 労働投入量、 K : 資本投入量、 w : 賃金率、 r : 利子率、 $f(\cdot)$: 生産関数。

式(1)の最適化の一階条件は以下となる。

$$\frac{\partial f(L(t), K(t))}{\partial L(t)} = w(t), \quad \frac{\partial f(L(t), K(t))}{\partial K(t)} = r(t) \quad (2)$$

2.1.2 家計の行動モデル

家計は、 $u(t)$ で表される時点 t の効用関数を有すると仮定する。ここで、効用関数とは、財消費量 $c(t)$ などに依存して決定される満足度を関数として表したものである。すなわち、 $c(t)$ という量の財消費が行われたとき、家計は $u(t)$ の効用を得ることを表している。そして、家計は主観的割引率 r によって割り引かれた $u(c(t), \dots)$ を、現時点から無限遠まで積分された通時的効用を最大化するよう行動することになる。

なお家計は、企業が投入する労働、資本を全て保有しており、それらを提供することにより所得を得ているとする。そして、これを財消費 c と余暇消費 s として貯蓄に充てる。

貯蓄についてはそのまま投資にまわされるものとし、資本の蓄積を生むとする。こうして、現在の消費をあきらめて貯蓄することにより、将来時点での資本が増加され、将来期により多くの消費を行えるというメカニズムが考慮される。そして、

家計がそのような将来期の消費量も考量に入れて、現時点での消費、貯蓄を決定することになる。

以上を定式化すると以下ようになる。

$$V = \max_{c(t), s(t)} \int_0^{\infty} u(c(t), s(t)) \exp(-rt) dt \quad (3.a)$$

$$\text{s.t. } \dot{K}(t) = w(t)l(t) + r(t)k(t) - c(t) - dK(t) \quad (3.b)$$

$$\Omega = l(t) + s(t) \quad (3.c)$$

ただし、 V : 無限期間にわたって割り引かれた効用の総和、 $u(\cdot)$: t 期における効用関数、 c : 財消費、 s : 余暇消費、 r : 主観的割引率、 $\dot{K} (= dK/dt)$: 資本の蓄積量、 l : 労働供給量、 k : 資本保有量、 d : 資本減耗率、 Ω : 総利用可能時間。

式(3.a)は、通時的効用の最大化を表している。式(3.b)は資本蓄積方程式であるが、賃金所得 $[wl]$ と配当所得 $[rk]$ からなる実所得から、財消費と余暇消費を差し引いた額が貯蓄にまわされ、次期の資本蓄積を生むことが定式化されている。式(3.c)は時間制約式であるが、式(3.b)と(3.c)より $l(t)$ を消去することが可能である。

2.1.3 市場均衡条件

本モデルでは、労働市場、資本市場、財市場が成立している。それらは、式(4)のように表される。

$$l(t) = L(t), \quad k(t) = K(t), \quad y(t) = c(t) \quad (4)$$

2.2 最適成長モデルの解法とその解釈

2.2.1 ハミルトン関数と最大値原理

続いて、式(3)にて定式化された動学的最適化問題を解くことを考える。その方法はいくつかあるが、ここでは最大値原理を用いることとする。

ハミルトン関数を以下のように定義する。なお、ここでは現在価値換算されたハミルトン関数に対する最大値原理の導出を示す。

$$H(t) = \left[u(c(t), s(t)) + l(t) \{ w(t)\Omega + r(t)K(t) - c(t) - w(t)s(t) - dK(t) \} \right] \exp(-rt) \quad (5)$$

ただし、 l : 資本蓄積方程式(3.b)に付随する共役変数。

ここでは、式(3.b)、(3.c)は一つにまとめ、また $k(t)$ は市場均衡条件より $K(t)$ に置き換えて表現した。

最大値原理とは、式(3)で定式化された動学的最適化問題を、巨大な非線形最適化問題と捉えることから出発する。すなわち、式(3)の最適化問題のキューン・タッカー条件を導出し、それを整理することにより動学的最適化問題の最大値原理が導出される[西村(1990)⁴⁾]。それが、以下に示すもの

である．

$$\frac{\nabla H(t)}{\nabla c(t)} = \frac{\nabla u(c(t), s(t))}{\nabla c(t)} - l(t) = 0 \quad (6.a)$$

$$\frac{\nabla H(t)}{\nabla s(t)} = \frac{\nabla u(c(t), s(t))}{\nabla s(t)} - l(t)w(t) = 0 \quad (6.b)$$

$$\begin{aligned} \dot{K}(t) &= \frac{\nabla H(t)}{\nabla l(t)} \\ &= w(t)\Omega + r(t)K(t) - c(t) - s(t) - dK(t) \end{aligned} \quad (6.c)$$

$$\begin{aligned} \dot{l}(t) - r l(t) &= -\frac{\nabla H(t)}{\nabla K(t)} \\ &= -l(t)[r - d] \end{aligned} \quad (6.d)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} l(t)K(t) \exp(-rt) = 0 \quad (6.e)$$

式(6.a)と(6.b)は，ハミルトン関数最大化の一階条件，式(6.c)と(6.d)はハミルトニアン・ダイナミクスと呼ばれる条件，式(6.e)は横断性条件を表している．

まず，式(6.a)と(6.b)は，静学モデルと同様にして導かれ，財消費あるいは余暇消費に対する限界効用が，資本蓄積方程式に関する共役変数 $l(t)$ に価格を乗じたものと等しくなることを表す．ここで， $l(t)$ は資本蓄積を一単位増やしたときにどれだけ効用が増大するかを表しており，投資の帰属価値 (shadow price) を表すとされる．よって，式(6.a)と(6.b)は，各消費の限界効用が投資の帰属価値と各財の価格の積と等しくなることを要請していることになる．

式(6.c)は，資本蓄積方程式そのものであり，資本の時間的变化を規定している．

一方，式(6.d)は，資本の帰属価値の時間的变化を表す．式(6.d)の左辺第二項は， $l(t)$ を現在価値換算する上で導出された項であり，結局，式(6.d)は投資の帰属価値が資本ストック $K(t)$ のハミルトン関数 $H(t)$ に対する限界的な貢献を埋め合わせるよう下落していくことを意味している．この意味としては，まず，投資により資本が蓄積されれば次期の消費が増加するためハミルトン関数は高まるといえる．しかし，一方で資本市場では資本供給量が増加するため資本の価値自身は低下することになる．この資本価値の低下というものが，資本ストック増加によるハミルトン関数の限界的増分と一致するように変化していくことを，式(6.d)は表しているといえる．

式(6.e)は横断性条件と呼ばれるものである．これは，無限遠の資本の帰属現在価値がゼロとなることを要請したものである．もし，無限遠において

まだ資本の価値が残っているとしたら，それは，それまでの消費が効率的になされなかったことを示しており，そのような動学的不効率を排除するための条件である．

2.2.2 最適成長経路の導出

式(6)の最大値原理から， $c(t)$ と $K(t)$ の最適経路を導出することが可能である．

まず，式(6)の条件式を直接的に解くことを考える．しかし，この場合，有限期間に対し，その最終期の資本量を与えてやる必要がある．これより，最終期の資本の帰属価値 $l(T)$ が決定し，これを出発として逆時間的に式(6.d)より資本の帰属価値 $l(t)$ の最適経路が計算され，さらに，式(6.c)より資本蓄積の最適経路，式(6.a)より財消費の最適経路が求められる⁵⁾．これによれば，実際の最適成長経路を数値的に描くことも可能となる．しかし，最終期での残存資本量をどのように決定するのが課題として残されている．

これに対し，無限期間を考えた分析手法も開発されている．この場合には，時間とともに変化する変数の変化率が全てゼロとなった定常状態に着目して，最適消費および最適資本量についての検討がなされる場合がほとんどである．ただし，位相図を用いた方法では，定常状態での最適解についてだけでなく，そこに到達するまでの経路についても，初期状態に対応してどのような性質があるのかを分析しているものもある．

3 環境評価のための最適成長モデル

本章では，前章の最適成長モデルを，環境問題の分析に対して適用できるよう拡張する．

環境問題へ最適成長論を用いた研究としては，Johansson(1993)¹⁾が，環境状態変化や環境政策への便益評価に対し，最適成長論を適用した分析を行っている．また，Xepapadeas(1997)²⁾は，環境面も考慮した国内総生産として改めて定義された国民純生産 NNP(Net National Product)に対し，環境変化がどのような影響を及ぼすのかを最適成長論を用い明らかにしている．また，わが国でも井堀(1999)⁶⁾が最適成長論を用いて，自動車交通に起因する環境問題に対し，いくつかの税制策を組み合わせた複合政策の効果と影響分析を行っている．しかし，これらはいずれも理論分析の域にとどまっている．そこで，本章では，まず 2 章で示した最適成長モデルに環境要素を組み込んだ最適成長モデルを構築し，式(6)の最大値原理がどのように修正されるのかを明らかにする．

3.1 最適成長モデルの構造

3.1.1 モデルの仮定

本章で構築される最適成長モデルは、基本部分は前章のモデルと同様であるが、環境要素を組み込むため修正を行う。そこで、本章で改めて仮定されるモデルの仮定と、モデルの全体構成を示すこととする。

(1) 対象とする経済には、家計と企業に加え、政府と自然が存在する。

(2) 自然とは、次のようなものである。

自然は、企業に自然資源を提供する。

自然は、企業の生産活動に伴って排出される汚染物質を受け入れ、ある程度までは浄化させられるものとする。しかし、範囲を超えた汚染物質はそのまま残存し、それが家計の効用水準を低下させる。

自然はアメニティの提供機能を有するとする。この機能は、自然資源の総量に依存するものとし、自然資源が多く利用されればアメニティ供給機能が低下するものとする。

(3) 家計と企業の基本的な行動は、2章のそれと同様である。なお、政府は、環境政策を実施するものとする。

モデルの全体構成は、図-1のとおりである。

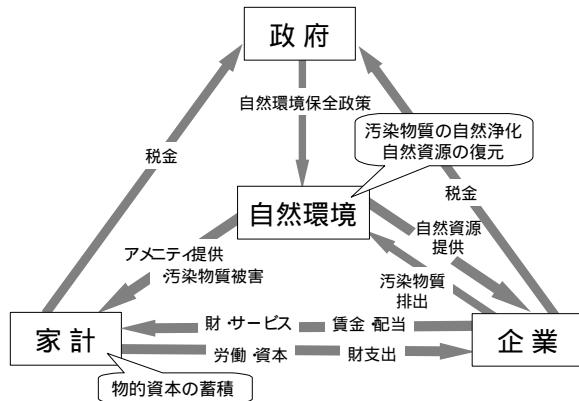


図-1 モデルの全体構成

3.1.2 企業の行動モデル

企業は、ある時点 t において利潤最大化行動をとる点では前章と同様であるが、ここでは、労働と資本に加え、自然資源も投入して合成財の生産を行うものとする。

$$p(t) = \max_{y, L, K, U} y(t) - w(t)L(t) - r(t)K(t) - p(t)U(t) \quad (7.a)$$

$$\text{s.t. } y(t) = f(L(t), K(t), U(t)) \quad (7.b)$$

記号は、式(1)で用いたものと同様である。ただし、 U ：自然資源投入量、 p ：自然資源価格。

式(7)の最適化問題の一階条件は以下となる。

$$f_L(t) = w(t), \quad f_K(t) = r(t), \quad f_U(t) = p(t) \quad (8)$$

ただし、 f_L ：生産関数の労働に対する偏微分($\partial f / \partial L$)。

3.1.3 家計の行動モデル

家計も、無限遠まで積分された形で表される通時的効用を最大化する点では、前章のモデルと同様である。しかし、ここでは、効用関数を財消費と余暇消費以外に、汚染物質ストック水準 S と自然資源ストック水準 R にも依存させた形で定式化する。 S が効用関数に入ってくるのは仮定(2)によるものである。また、 R は自然資源の総量を表すためアメニティ供給機能の水準を示すものと解釈し、仮定(2)に従い効用関数に組み入れた。

$$V = \max_{c(t), s(t)} \int_0^{\infty} u(c(t), s(t), S(t), R(t)) \exp(-rt) dt \quad (9.a)$$

$$\text{s.t. } \dot{K}(t) = w(t)l(t) + r(t)k(t) - c(t) - dK(t) \quad (9.b)$$

$$\Omega = l(t) + s(t) \quad (9.c)$$

記号は、式(3)で用いたものと同様である。ただし、 S ：汚染物質ストック水準、 R ：自然資源ストック水準。

S と R の時間的変化については、以下のように表されるものとする。

$$\dot{S}(t) = Vy(t) - xS(t) \quad (10.a)$$

$$\dot{R}(t) = zR(t) - U(t) \quad (10.b)$$

ただし、 V ：単位企業生産あたりの汚染排出量を表すパラメータ、 x ：汚染物質の自然浄化率、 z ：自然資源の自己再生率とし、これらは固定とする。

式(10.a)では、汚染物質は企業が排出していると考えているため、企業の生産量に依存した形で汚染物質が蓄積されるとした。また、式(10.b)の U は、自然資源の使用量である。

本章は、家計は式(9.b)と(9.c)の制約条件に加えて、式(10)の汚染物質ストックと自然資源ストックの変化式の制約下で通時的効用を最大化するよう行動をとるものと考えられる。

3.1.4 市場均衡条件

市場均衡条件については、前章と全く同様に表される。

$$l(t) = L(t), \quad k(t) = K(t), \quad y(t) = c(t) \quad (11)$$

3.2 環境を組み入れた最適成長モデルの 最大値原理

前節で構築した最適成長モデルを用いて、最大値原理を導出する。なお、ここでは、家計が環境を考慮せず行動する場合と環境を考慮して行動する場合とに分けて最大値原理を示すこととする。そして、最終的には、これらの二種類の最大値原理には乖離が生じることを明らかにする。

3.2.1 環境を考慮しない場合

家計が、環境を意識せず行動する場合とは、式(9.a)中の効用関数 $u(t)$ の中に S と R が含まれない場合と考えられる。このとき、ハミルトン関数は以下のように定義される。

$$H(t) = \left[u(c(t), s(t)) + l(t) \{ w(t)\Omega + r(t)K(t) - c(t) - s(t) - dK(t) \} + m_s(t) \{ Vc(t) - xS(t) \} + m_R(t) \{ zR(t) - U(t) \} \right] \exp(-rt) \quad (12)$$

ただし、 l , m_s , m_R : それぞれ、資本蓄積方程式(9.b)、汚染物質ストック変化式(10.a)、自然資源ストック変化式(10.b)に付随する共役変数。

式(12)から導かれる最大値原理は以下のようになる。

$$\frac{\partial H(t)}{\partial c(t)} = \frac{\partial u(c(t), s(t), S(t), R(t))}{\partial c(t)} - m_s(t)V - l(t) = 0 \quad (13.a)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial s(t)} = \frac{\partial u(c(t), s(t), S(t), R(t))}{\partial s(t)} - l(t)w(t) = 0 \quad (13.b)$$

$$\dot{K}(t) = w(t)\Omega + r(t)K(t) - c(t) - s(t) - dK(t) \quad (13.c)$$

$$\dot{S}(t) = Vy(t) - xS(t) \quad (13.d)$$

$$\dot{R}(t) = zR(t) - U(t) \quad (13.e)$$

$$\dot{l}(t) - rl(t) = -l(t)[r - d] \quad (13.f)$$

$$\dot{m}_s(t) - rm_s(t) = m_s(t)x \quad (13.g)$$

$$\dot{m}_R(t) - rm_R(t) = -m_R(t)z \quad (13.h)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} l(t)K(t) \exp(-rt) = 0 \quad (13.i)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m_s(t)S(t) \exp(-rt) = 0 \quad (13.j)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m_R(t)R(t) \exp(-rt) = 0 \quad (13.k)$$

まず、式(13)の最大値原理と式(6)のそれとを比較してみる。式(13.b),(13.c),(13.f)および(13.i)は、式(6)と全く同じである。また、式(13.d),(13.e)は式(10)の条件式であり、最後の式(13.j),(13.k)は、環境ストックに対する横断性条件を表している。よって、

実質的に式(6)の最大値原理と異なるのは、式(13.a)と式(13.g),(13.h)ということになる。

式(13.a)は、財消費の限界効用から、単位財消費に対する汚染物質排出の被害費用分を差し引いたものが、投資の帰属価格と等しいという条件に修正されている。これは、家計にとって財を消費することによって効用が上昇する一方で、それが汚染物質の増加を招くためそれらの両者を考慮して消費の最適経路が決定されるべきであることを示している。

式(13.g)と(13.h)は、式(10)より S と R に関する制約式が加わったことによって新たに導出された条件式である。すなわち、汚染物質ストックの共役変数 $m_s(t)$ と自然資源ストックの共役変数 $m_R(t)$ の時間的变化を規定している。

まず、式(13.g)について、 $m_s(t)$ は汚染物質ストックの増加に対する価値を表すといえる。また、式(13.g)の右辺は、単位汚染物質あたりの自然浄化量の価値額を表しており、よって、式(13.g)は汚染物質ストックの価値が、自然浄化される汚染物質の価値分だけ増加していくことを表している。これは、本モデルにおいて汚染物質ストック量 $S(t)$ に依存して自浄作用が働くものとしたためであり、 $S(t)$ が増加した場合には浄化される汚染物質の量が増加するため、 $m_s(t)$ が上昇していくことを示している。

式(13.h)は、式(6.d)での解釈をそのまま持ち込めばよい。すなわち、自然資源ストックの増加がハミルトン関数に及ぼす貢献を埋め合わせるように、自然資源ストックの価値 $m_R(t)$ が減少していくことを表している。これは、自然資源ストックが増加していくことは、それだけ自然資源が希少でなくなっていくことを意味していると解釈できる。

3.2.2 環境を考慮する場合

続いて、家計が環境を意識して行動する場合を考える。このときには、式(9.a)中の効用関数 $u(t)$ に S と R が含まれるものとして考えればよい。このとき、ハミルトン関数は以下ようになる。

$$H(t) = \left[u(c(t), s(t), S(t), R(t)) + l(t) \{ w(t)\Omega + r(t)K(t) - c(t) - s(t) - dK(t) \} - m_s(t) \{ Vc(t) - xS(t) \} + m_R(t) \{ zR(t) - U(t) \} \right] \exp(-rt) \quad (14)$$

式(14)から導かれる最大値原理は、式(13)と重複する部分が多いため、異なるものについてののみ改

めて示すこととする。

$$\dot{m}_S(t) - r m_S(t) = m_S(t)x + \frac{\P u(t)}{\P S(t)} \quad (13'.g)$$

$$\dot{m}_R(t) - r m_R(t) = -m_R(t)z - \frac{\P u(t)}{\P R(t)} \quad (13'.h)$$

以上に加え，式(13.a)から(13.f)および式(13.i)から(13.k)が最大値原理となる。

式(13'.g)では，汚染物質の増加が家計に対して不効用を与える点に加わって，汚染物質ストックの価値額の変化が規定されている。

また，式(13'.h)では，自然資源の増加がアメニティ機能の強化を介して及ぼす家計の効用増加分をさらに加えた分について，埋め合わせるように自然資源ストックの価値 $m_R(t)$ が減少していくことを表している。

以上の結果，家計が環境について考慮しない場合とする場合とでは，環境ストックの価値の時間変化に乖離が生じることになり，それを通して消費経路や資本の蓄積経路にも影響が及ぼされる。普通は，家計は環境について考慮しない場合が多く，その時には何らかの形でその部分を内部化する必要があるといえる。

4. 定量分析への最適成長モデルの適用

前章では，家計が環境を考慮せず行動した場合には，環境を考慮した場合での最適成長経路とは乖離が生じること示した。これを修正するための一つの方法は，政府が環境保全政策を実施することである。本章では，そのような環境保全政策に対し，最適成長論を用いてその効果の定量評価を行うこととする。

4.1 政策の設定とモデルの修正

ここでは，森林資源を対象として分析を行う。もちろん，森林資源以外でも，水産資源や農産物資源あるいは大気なども環境資源として分析対象とすることも可能である。

森林資源を対象とした場合，式(10.a)の汚染物質は二酸化炭素を考えればよい。森林は二酸化炭素を吸収するからである。また，式(10.b)の自然資源は林業に対する森林資源の提供が考えられるし，それ以上に家計へのアメニティ供給としての役割が重要といえる。

この森林資源を管理するため，政府はまず森林資源使用税 e の導入を行う。さらに，その税収を汚染物質である二酸化炭素の除去に充てるか，森林資源の再生として植林事業に充てるか，その配分率 k を決定する。これら汚染物質除去活動および自然資源再生活動の実施に伴い，式(10)の制約式は

以下のように修正される。

$$\dot{S}(t) = V y(t) - G(a(t)) - x S(t) \quad (15.a)$$

$$a(t) = k(t)e(t)U(t) \quad (15.b)$$

$$\dot{R}(t) = z R(t) + Z(d(t)) - U(t) \quad (16.a)$$

$$d(t) = \{1 - k(t)\}e(t)U(t) \quad (16.b)$$

ただし， G ：汚染物質除去活動により除去された汚染物質質量， a ：汚染物質除去への投資費用， Z ：自然資源再生活動により再生された自然資源量， d ：自然資源再生活動への投資費用。

式(15.a)と(16.a)では，それぞれ汚染物質除去活動と自然資源再生活動による環境の向上が考慮されている。そして，それぞれの投資費用の調達が式(15.b)と(16.b)によって規定されている。

さらに，森林資源使用税 e の導入に伴い，式(7)の企業の行動も修正される。

$$p(t) = \max_{y, L, K, U} \left[y(t) - w(t)L(t) - r(t)K(t) - \{p(t) + e(t)\}U(t) \right] \quad (17.a)$$

$$\text{s.t. } y(t) = f(L(t), K(t), U(t)) \quad (17.b)$$

e の導入は企業の生産費用を上昇させる。そして，式(11)の市場均衡条件を介し，家計がその費用を負担することになる。すなわち，森林資源使用税 e の導入は，家計を含めた社会経済システムには不効用を与える。しかし， e からの税収により自然環境の保全活動がなされ，汚染物質ストック水準は下がり自然資源ストック水準は上がるため，家計の効用を高めることとなる。以上の結果を総合して，政策の有効性の評価がなされることとなる。ここでは，数値シミュレーションを行うことにより，政策の効果を定量評価して，その有効性について検討を行う。

4.2 定常状態での最適成長モデル

最適成長モデルの解法については，2章にて簡単に述べたが，本研究では数値シミュレーションを行うにあたり，全ての状態変数の時間変化率がゼロとなる定常状態に着目する。定常状態に着目することにより，3章で構築された最適成長モデルの中の時点 t という変数は意味を持たなくなる。このことと，状態変数の時間変化率がゼロとなることを考慮すると，家計の行動モデルは以下のように修正される。

$$V = \max_{c, s} u(c, s, S, R) \quad (18.a)$$

$$\text{s.t. } c + ws + dK = w\Omega + rk \quad (18.b)$$

式(18)での諸変数は，いずれも定常状態における消費量，供給量，環境水準を表している。

企業の行動モデルは、式(17)にて定式化したものと同様となる。ただし、添字 t は削除される。

また、式(15),(16)の汚染物質ストック変化式、自然資源ストック変化式において、時間変化率をゼロと置くと、定常状態での汚染物質ストック水準、自然資源ストック水準が求められる。

$$S = \frac{V y - G(a)}{x}, \quad R = \frac{U - Z(d)}{z} \quad (19)$$

以上の結果、まず式(17),(18)および市場均衡式(11)より、家計消費、企業生産量、生産要素投入量そして価格変数が求められる。また、式(19)より汚染物質ストック水準、自然資源ストック水準も求められるので、家計の効用水準 V を導出することが可能となる。ただし、森林資源使用税 e 、投資配分率 k については、一連のモデル体系からは決定されないため、家計の効用水準 V は e と k の関数として表される。そして、政府は e と k を操作することにより、家計の効用水準が最大となるような政策の組み合わせを考えるものとする。これを定式化すると以下のように表される。

$$\max_{e,k} V(e,k) \quad (20.a)$$

$$\text{s.t. 式(11), (17), (18), (19)} \quad (20.b)$$

4.3 数値シミュレーション

4.3.1 関数の特定化とパラメータの設定

続いて、式(20)に基づき環境税の導入とその税収による環境投資による効果を数値シミュレーションを通して明らかにする。そのためには各関数の特定化を行い、それらのパラメータを設定する必要がある。

まず、関数を特定化したものを表-1 に示す。この中で、生産関数は Leontief 型と Cobb-Douglas 型の二段階での特定化を行った。

表-1 関数の特定化

関数名	関数形
生産関数[式(18.b)]	$y = \min \left[\frac{VA}{a^0}, \frac{U}{a^U} \right] : a^0 + a^U = 1$ $VA = A \cdot L^{a_L} K^{a_K} : a_L + a_K = 1$
効用関数[式(19.a)]	$u = c^{f_c} \{ R^{s_R} \cdot s \}^{f_s} - q_s \ln S$ $: f_c + f_s = 1$
汚染物質蓄積関数 [式(20)]	$S = \frac{V y - e_g \ln a}{x}$
自然資源再生関数 [式(21)]	$R = \frac{U - e_z d}{z}$

ただし、 $a^0, a^U, A, a_L, a_K, f_c, f_s, s_R, q_s, e_g, e_z$: パラメータ。

パラメータ設定は、基準年のデータセットを作成し、それを厳密に再現するようパラメータを決定するキャリブレーション手法により設定した。ここでは、1994 年を基準年としており、その基準年データセットを表-2 に示す。

表-2.1 データセット(企業) 表-2.2 データセット(家計)

労働投入量	1,298	総所得	12,284,300
資本投入量	1,091,685	財消費量	4,390,549
自然資源投入量	21,918	余暇消費量	1,811
生産量	4,390,549	労働供給量	1,298

(単位：労働投入・供給、余暇=億時間、その他=億円)

表-2.3 価格変数

表-2.4 環境水準

賃金率	2,539(円/時間)	汚染ストック量	1,407,227
利子率	1	資源ストック量	1,130,098

(単位：億円)

表-2.1, 2, 3 の経済データは、「日本統計年鑑(総務庁)⁷⁾」に基づいている。また、表-2.4 の汚染ストック水準は二酸化炭素量の総量により、資源ストック水準は総森林面積により表すこととし、それぞれ Duraipah(1995)⁸⁾、「林業白書(林野庁)⁹⁾」からデータを作成した。

続いて、キャリブレーションにより求められたパラメータの値を表-3 に示す。なお、環境要素に関わるパラメータ値については、一部仮想的に与えている。

表-3 パラメータ設定の結果

生産関数	a^0	0.095	効用関数	f_c	0.488
	a^U	0.005		f_s	0.512
	a_L	0.751		s_R	0.180
	a_K	0.249		q_s	17,000
	h	462	資本減耗率	d	0.005
汚染物質蓄積方程式	V	0.025	自然資源再生方程式	z	0.019
	e_g	200		e_z	0.1
	x	0.078			

4.3.2 数値シミュレーション結果

表-3 にて設定したパラメータの下、森林資源使用税 e 、投資配分率 k の組み合わせに対し、 e を 10 ~ 80 まで 10 刻みずつ、 k を 0 ~ 1.0 まで 0.1 刻みずつ変化させてシミュレーション分析を行った。なお、ここでは、政策による便益を等価的偏差 EV の概念を用いて定義し、その計測結果を持って各政策の効果・影響の結果として表す(図-2)。また、EV の定義式は次式による。

$$V(w^A, e^A, k^A, I^A + EV) = V^B(w, e, k, I) \quad (21)$$

ただし、 I : 総所得 (= $w\Omega + rk$)。

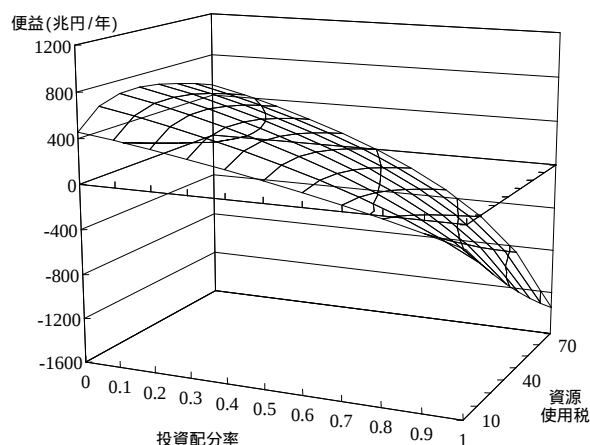


図-2 便益計測結果

図-2 では、自然資源利用税 $e = 40$ ，投資配分率 $k = 0$ のとき便益最大の 689(兆円/年)となる結果を得た。ここで、投資配分率 $k = 0$ とは資源利用税収を全て自然資源再生投資にまわした場合を意味している。

便益が最大となる政策の組み合わせについては、環境水準に関わるパラメータ値に大きく依存するため、パラメータの一部を仮想的に設定した本モデルの結果は修正される可能性があるが、便益が最大となる政策の組み合わせが存在することを示せた点が、本研究における成果といえる。

4.3.3 便益帰着分析

前項では、森林資源使用税の導入と、その税収による環境投資による政策に対し、便益の計測を行った。本項では、その便益の帰着構造についてさらに詳細に分析するため便益帰着構成表の作成を行う。便益帰着構成表の説明については、他の文献[例えば上田ら(1999)¹⁰]に譲るとして、ここでは $e = 30$ ， $k = 0.5$ のケースについて作成した便益帰着構成表を示す。

表-4 便益帰着構成表($e = 30, k = 0.5$ の場合)

	家計	企業	政府	合計
合成財価格変化	-613.94	657.55	-43.61	0
環境税率(e)変化		-657.55	657.55	0
環境投資量の変化			-613.94	-613.94
賃金率変化	0	0		0
利子率変化	0	0		0
汚染ストック変化	9.71			9.71
自然資源ストック変化	889.43			889.43
合計	285.19	0	0	285.19

(兆円/年)

表-4 によれば、政府の環境投資量が減少することによる不便益と汚染ストックが減少し、自然資源ストックが増加することによる便益とが最終的に残っており、それらの総和として純便益が正の

値となっている。この中の不便益、すなわち政府の環境投資が減少するという部分は、まず本シミュレーションでは環境投資のため、政府は合成財を購入していると仮定した。また、表-4 では合成財価格が上昇していることがわかる。よって、合成財価格が上昇したことにより、政府にとっては、税収分をそのまま投資にまわしたても、投資量は減少することとなり、それが不便益として現れたものと解釈できる。

5. まとめ

本研究では、自然環境と経済活動との両者を扱った最適成長モデルの構築を行い、成長過程に着目して環境問題の分析を行った。さらに、定常状態に着目し、森林資源を取り上げて、自然環境保全政策の有効性について定量評価を行った。

その中で、まず環境要素について家計が考慮する場合と考慮しない場合とでは、成長経路に乖離が生じることを明らかにし、その乖離分を内部化するために政府の介入が必要となることを示した。これは、静学分析における結論を動学的に拡張したものとも解釈できる。さらに、森林資源を取り上げた環境政策の定量評価では、資源利用税の導入とその税収による環境投資の効果について便益計測を行ったところ、便益が最大となる政策の組み合わせが存在することを明らかにすることができた。

今後は、政策のタイミングなどについても検討するため定常状態に到達するまでの成長経路に着目した分析が必要と思われる。

【参考文献】

- 1) Johansson, P-O (1993) : *Cost-Benefit Analysis of Environmental Change*, Cambridge University Press, pp.90-112.
- 2) Xepapadeas, A (1997) : *Advanced Principles in Environmental Policy*, Edward Elgar Publishing.
- 3) 岩井克人(1994): 経済成長論, 岩井克人・伊藤元重編, 現代の経済理論, 第7章, pp.265-324.
- 4) 西村清彦(1990): 経済学のための最適化理論入門, 東京大学出版会, pp.170-173.
- 5) 吉田和男(1993): 経済学に最低限必要な数学, 日本評論社, pp.180-187.
- 6) 井堀利宏(1999): 自動車交通による環境問題の経済分析, 日交研シリーズ A-255, 日本交通政策研究会.
- 7) 総務庁統計局(1994): 日本統計年鑑(平成6年), 統計情報研究開発センター.
- 8) Duraiappah, A.K.(1993): *Global Warming and Economic Development*, Kluwer Academic Publishers B.V..
- 9) 林野庁(1997): 林業白書, 日本林業協会.
- 10) 上田孝行・高木朗義・森杉壽芳・小池淳司(1999): 便益帰着構成表アプローチの現状と発展方向について, 運輸政策研究, Vol. 2, No. 2, pp. 2-12.