

枯渇性資源と汚染：内生的成長モデルを用いた分析

谷, 晶紅

<https://doi.org/10.15017/3000424>

出版情報：経済論究. 130, pp.53-66, 2008-03. 九州大学大学院経済学会
バージョン：
権利関係：



枯渇性資源と汚染

—内生的成長モデルを用いた分析—

谷 晶 紅

目次

- 1 はじめに
- 2 モデル
 - 2.1 生産活動
 - 2.2 選好
- 3 社会的計画者の経済
 - 3.1 最適経路
 - 3.2 比較分析
 - 3.3 政策的含意
- 4 市場経済
 - 4.1 最適経路と市場均衡の比較
 - 4.2 環境政策
- 5 おわりに
- 6 補論

1 はじめに

近年、人々の生活水準が飛躍的に改善されているが、再生不可能資源の枯渇、地球温暖化、環境汚染など様々な環境問題が深刻化している。したがって、持続的経済成長を議論する際に、環境問題を考慮することが必要不可欠である。経済成長における環境に関わる問題は2つあり、1つは再生不可能資源の枯渇であり、もう1つは環境汚染である。

枯渇性資源の最適な利用についての研究が古くから行なわれてきた。1931年のホテリングの論文において、最適な利用条件として、利子率が枯渇性資源の価格の上昇率に等しくなるという、ホテリングの原理が提示された。その後、Scholz and Ziemes (1999), Groth and Schou (2002) は内生的成長モデルを用いて、市場の失敗と枯渇性資源採掘の相互関係に焦点を当てて、分析を行なった。

また、枯渇性資源は経済成長のエネルギーになるのみならず、汚染の排出源として生産あるいは個人の厚生に影響を与える。したがって、環境汚染の問題と枯渇性資源の問題は相互的に密接に関連しており、環境と経済成長に関する理論モデルに、環境制御と資源管理の両面を導入する形で展開されるべきである。Schou (2002), Grimaud and Rouge (2005) では、R&D活動を含む内生的成長モデルに、枯渇性資源を生産要素として導入し、同時にその利用に付随して生じる汚染が家計厚生に対して負の影響を与えると定式化された。

最後に、本論文の議論と最も密接に関連しているSchou (2000) のモデルを紹介する。彼が構築した

人的資本と枯渇性資源を含む内生的成長モデルでは、資源使用により生じる汚染は生産にマイナスの効果を及ぼす（構造的にはStiglitz (1974) とLucas (1988) を統合したものであると考えられる。）。この論文では、環境保全投資の効果が完全に無視されている。しかしながらSmulders and Gradus (1996) では、環境改善のためには排出削減技術の導入などの投資が必要であり、その結果、外部性を通じて生産性の向上につながると指摘された。したがって、本論文は、環境保全投資、枯渇性資源使用、環境汚染と経済成長の相互関係について検討してみたい。

分析に当たって、Schou (2000) にならい、資本ストック、人的資本と枯渇性資源を含む内生的成長モデルを構築し、汚染の外部性を導入する。ただし、汚染フローは生産における枯渇性資源使用量に依存するのみならず、環境保全活動への投資額の増大により減少する。さらに、汚染の外部性は生産活動ではなく、代表的な家計の厚生にマイナスの効果を与えると定式化する。そのような拡張したメカニズムのもとで、定常状態における成長率の特性を検討し、社会的計画者による経済と市場経済との比較を行い、政策的含意を提示する。以下、モデルが第2節で紹介される。第3節では社会的計画者の経済における定常状態の成長率を求め、持続成長経路の特性を検討し、政策的含意を提示する。第4節では、環境保全活動の外部効果が無視される場合の市場経済における分析を行い、同様に定常状態での各変数の成長率を求め、第3節で得られた結果と比較・検討する。さらに、市場の失敗を是正するために、政府が行うべき環境政策について分析する。そして、第5節では、モデルの拡張可能性を言及し、本論文のまとめを行うことにする。第6節の補論では、モデルの成長率の詳細な導出過程が示される。

2 モデル

本論文では、市場経済と社会的計画者のもとの経済をそれぞれ述べることにする。

2つの経済における汚染は最終財生産に用いられる枯渇性資源と環境保全活動に依存し、外部性と考えられる。経済における同質的な家計は測度1の区間に連続的に分布し、 t 時点において、家計 i が環境保全活動に $D_i(t)$ だけの投資を行ない、環境保全活動支出の総量（平均水準でもある）は $\bar{D}(t) = \int_0^1 D_i(t) di$ で示される¹⁾。以上をまとめて、汚染の外部性を考え、以下のように特定化する。

$$P(t) = \left(\frac{R(t)}{1 + \bar{D}(t)} \right)^\delta, \quad \delta > 0 \quad (1)$$

ただし、 P は汚染フローである、 δ は外部性のパラメータであり、定数とする。この定式化より、個々の家計の環境保全活動への投資が汚染を減少させる利益を、当該家計を含めて、社会全体は享受している。したがって、環境保全活動が排除不可能であり、準公共財的な性質を持つ。こうした準公共財の特質から、市場に任せるとその供給は非効率となる可能性がある。

1) ここでは、各家計が自分以外のすべての家計の D に対する戦略を考慮しながら、自らの D を決定する状況が考えられる。

2.1 生産活動

生産活動は最終財生産部門、人的資本部門と枯渇性資源部門の3つの部門で行なわれるとする。

生産関数

最終財生産部門で資本ストック、枯渇性資源と人的資本に関する収穫一定性を持つ次のようなコブ＝ダグラス型の生産技術を用いて、同質財を生産すると仮定する。

$$Y(t) = A(t)K(t)^\alpha(u(t)h(t)L(t))^\beta R(t)^\gamma, \quad A, \alpha, \beta, \gamma > 0, \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (2)$$

ここで、 $Y(t)$ 、 $K(t)$ 、 $h(t)$ 、 $R(t)$ はそれぞれ最終財の生産量、資本ストック、一人当たりの人的資本、枯渇性資源フローである。労働力人口 L は便宜のために固定されており、1と標準化する。各期において個人は1単位の労働時間を所有しており、それを生産活動あるいは教育活動に振り向ける。 $u(t)$ は各個人が生産活動に割り振る時間であり、人的資本の蓄積に費やされる時間は $1-u(t)$ となる。また、 A 、 α 、 β 、 γ はそれぞれ外生的な技術生産性、弾力性を表すパラメータである。

最終財の分配

最終財は消費と資本ストックを増加させるための投資だけではなく、環境保全活動にも配分される。したがって、資本ストックの蓄積は次のように与えられる。

$$\dot{K}(t) = Y(t) - C(t) - D(t), \quad K(0) = K_0 \quad (3)$$

ただし、 $C(t)$ は消費である。ここでは、資本ストックの減耗は無視されている。

人的資本の蓄積

経済のエンジンである人的資本の蓄積を表す関数をLucas (1988)にしたがい、次のように定式化する。

$$\dot{h}(t) = B(1-u(t))h(t), \quad B > 0, \quad h(0) = h_0 \quad (4)$$

ただし、 B は教育部門における生産性を表すパラメータである。

枯渇性資源

資源採掘部門では、初期に一定量の枯渇性資源ストック S_0 が存在し、各時点において $R(t)$ が採掘され、生産に用いられ、残存量は $S(t)$ と仮定する。さらに、枯渇性資源の採掘に伴う不確実性や採掘コストは発生しないものとする。したがって、資源ストックの変動が次式で表される。

$$\dot{S}(t) = -R(t), \quad \int_0^\infty R(t)dt \leq S_0, \quad S(0) = S_0, \quad R(0) = R_0 \quad (5)$$

2.2 選好

代表的な家計の効用は消費と汚染フローの両方に依存する。目的関数を次のように設定する。

$$\int_0^\infty \frac{(C(t)P(t)^{-\lambda})^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} e^{-\rho t} dt, \quad 0 < \epsilon < 1, \quad \rho > 0, \quad \lambda \geq 0 \quad (6)$$

ただし、 ρ 、 ϵ はそれぞれ時間選好率、異時点間の代替の弾力性の逆数である。 ϵ が1に近づけると、この目的関数は $\int_0^\infty (\ln C(t) - \lambda \ln P(t)) e^{-\rho t} dt$ と表わされる。 λ は環境選好を表すパラメータである。

Bovenberg and Smulder (1995)にしたがい、この定式化のもとでは消費と汚染の限界効用の弾力性は一定であり、持続的成長経路が最適経路となるような必要条件である。さらに、以下では記号の簡

略化のために、(t) を省略する。

3 社会的計画者の経済

この節では、社会的計画者の経済での持続的成長経路に関する議論がなされる。持続的成長経路の存在を前提としたうえで、最適成長率を求め、その経路において成り立つ各経済変数の成長率に関する相互関係について見ていくことにする。ここで考えられている持続的成長経路とは、Y, K, C が同じプラスの率 g で成長するような経済成長の経路のことである²⁾。このとき、 h, R も一定率で成長する（必ずしも同率であるとはかぎらない）。

3.1 最適経路

社会的計画者による経済では、全知全能の社会計画者はすべての外部性を考慮して、生じ得る外部効果を完全に内部化することを目的にしており、(1)-(5)式の制約のもとで、(6)式によって表される社会的厚生を最大化しようとする。この動学最適化問題を解くために、経常価値ハミルトニアンを次のように設定する。

$$\mathcal{H} = \frac{(CP^{-\lambda})^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} + \mu_1(Y - C - D) - \mu_2 R + \mu_3 B(1-u)h \quad (7)$$

ただし、 μ_1, μ_2, μ_3 はそれぞれ資本ストック、枯渇性資源と人的資本のシャドー・プライスを表わしている。

社会的計画者による経済の最適経路では、任意の t 時点において $\bar{D}(t) = D(t)$ が成立する。したがって、(1)と(2)を(7)式に代入して、4つのコントロール変数 (C, D, R, u) と3つの状態変数 (K, S, h) に関しては、内点解を得るための一階条件は次のように求められる。

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial C} = 0 \Rightarrow C^{-\epsilon} \left(\frac{R}{1+D} \right)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)} = \mu_1 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial D} = 0 \Rightarrow \frac{\lambda\delta C^{1-\epsilon} \left(\frac{R}{1+D} \right)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)}}{1+D} = \mu_1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial R} = 0 \Rightarrow \frac{-\lambda\delta C^{1-\epsilon} \left(\frac{R}{1+D} \right)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)}}{R} + \mu_1 \gamma \frac{Y}{R} = \mu_2 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial u} = 0 \Rightarrow \beta \frac{\mu_1 Y}{u} = \mu_3 B h \quad (11)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial K} = \dot{\mu}_1 - \rho \mu_1 \Rightarrow \frac{\dot{\mu}_1}{\mu_1} = \rho - \alpha \frac{Y}{K} \quad (12)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial S} = \dot{\mu}_2 - \rho \mu_2 \Rightarrow \frac{\dot{\mu}_2}{\mu_2} = \rho \quad (13)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial h} = \dot{\mu}_3 - \rho \mu_3 \Rightarrow \frac{\dot{\mu}_3}{\mu_3} = \rho - \beta \frac{\mu_1 Y}{\mu_3 h} - B(1-u) \quad (14)$$

2) この定義は、Hartwick (1977) などにしたがっている。

さらに、横断性条件が $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_1(t)K(t)e^{-\rho t} = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_2(t)S(t)e^{-\rho t} = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_3(t)h(t)e^{-\rho t} = 0$ のように表わされる。

ここで、(8)式右辺=(9)式右辺により、次の式を得る。

$$\frac{1+D}{C} = \lambda\delta \quad (15)$$

(15)式により、(1+環境保全支出)・消費の比率は汚染排出の弾力性と効用関数の特定パラメータの積に等しい。すなわち、経済成長率と(1+環境保全支出)の成長率は一致する。さらに、生産関数を時間に関して微分し、持続的成長経路の定義を利用すると、以下のような式が得られる。

$$g = \frac{\beta}{\beta+\gamma}g_h + \frac{\gamma}{\beta+\gamma}g_R \quad (16)$$

(16)式から、経済成長率 g が人的資本成長率 g_h と枯渇性資源使用の成長率 g_R の線形結合で表現されることがわかる。さらに、(15)、(16)式を用いると、経済成長率、人的資本成長率と枯渇性資源使用の成長率はそれぞれ(17)、(18)、(19)で示される³⁾。

$$g = \frac{\beta(1+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)B - (\beta+\gamma)\rho}{\epsilon(\beta+\gamma)} \quad (17)$$

$$g_h = \frac{[\beta + \epsilon\gamma + \beta\lambda\delta(1-\epsilon)]B - (\beta+\gamma)\rho}{\epsilon(\beta+\gamma)} \quad (18)$$

$$g_R = \frac{\beta(1+\lambda\delta)(1-\epsilon)B - (\beta+\gamma)\rho}{\epsilon(\beta+\gamma)} \quad (19)$$

以下での議論を進めるために、次の仮定を置くことにする。

仮定 1 最終財生産に占める枯渇性資源使用のシェアは、 $\frac{\gamma}{\beta+\gamma} > \lambda\delta$ という関係を満たす。すなわち、効用への枯渇性資源使用のプラスの効果が実質的なマイナスの効果を上回ると考えられる。

なお、次式の保証のもとで、プラスの持続的成長率が達成される。以下ではこの場合のみに焦点を当てることとする⁴⁾。

$$\beta(1+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)B > (\beta+\gamma)\rho \quad (20)$$

さらに、求められる解が内点解であるためには、それがこれまで求めてきた最適化の条件を満たすとともに、時間が生産活動と教育活動の両方に振り分けられることが必要となる(すなわち、 $0 < u < 1$ が要求される)。これは次式で表わされるパラメータの制約のもとで保証される⁵⁾。

$$0 < [\beta + \epsilon\gamma + \beta\lambda\delta(1-\epsilon)]B - (\beta+\gamma)\rho < \epsilon(\beta+\gamma)B \quad (21)$$

(21)式では、2番目の不等号を成立させるための条件は $\beta(1+\lambda\delta)(1-\epsilon)B < (\beta+\gamma)\rho$ である。この条件を考慮すると、(19)式では、(20)式により分母が正であり、分子が負であるため、持続的経済成長経路

3) (17)~(19)式の導出については、補論を参照せよ。

4) (17)式の分母は正であるため、分子もプラスであれば、経済成長率が正となる。なお、(20)式を成立させるために、 $1+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta$ が正でなければならない。

5) $0 < u < 1$ ならば、(4)式より、 $0 < g_h < B$ が成立する。さらに、(18)式を計算すると、(21)式が得られる。

において、枯渇性資源使用の成長率 g_R は、常に負であることが分かる。なお、持続的経済成長経路にそって、枯渇性資源が必ず使い尽くされるため、次式が得られる。

$$R_0 = -g_R S_0 \tag{22}$$

ただし、 R_0 は初期時点におけるフリーに選択される枯渇性資源の使用量である。この(22)式により、持続的経済成長経路において、資源採掘率 $\frac{R}{S}$ は、 $-g_R$ となる。

3.2 比較分析

(17), (18)および(19)式から明らかになるように、長期的な成長率は、パラメータ B , β , γ により規定された技術的要因とともに、 ρ , ϵ , λ といった選好パラメータにも依存している。本節では、特に、生産に用いられる枯渇性資源のシェア γ , 人的資本部門における生産性 B , 限界効用の弾力性 ϵ , 環境選好率 λ の変化が定常状態における経済成長率、人的資本成長率と枯渇性資源使用の成長率に及ぼす影響を検討する。

まず、規模に関して収穫一定性という仮定の下では、 γ の上昇により、各変数の成長率の変化は以下のように求められる。

$$\frac{\partial g}{\partial \gamma} = \frac{-\epsilon\beta(1+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)B}{\Delta^2} < 0 \tag{23}$$

$$\frac{\partial g_h}{\partial \gamma} = \frac{-\epsilon[\beta + \epsilon\gamma + \beta\lambda\delta(1-\epsilon)]B}{\Delta^2} < 0 \tag{24}$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \gamma} = \frac{-\epsilon\beta(1+\lambda\delta)(1-\epsilon)B}{\Delta^2} \tag{25}$$

ただし、 $\Delta = \epsilon(\beta + \gamma)$ である。また、(23)式の符号決定には、(20)式を、(24)式の符号決定には(21)式を用いた。(25)の符号は ϵ に依存し、 $\epsilon > 1$ ($\epsilon < 1$) であるならば、 $\frac{\partial g_R}{\partial \gamma} > 0$ ($\frac{\partial g_R}{\partial \gamma} < 0$) となる。

γ の増加は生産に利用される枯渇性資源のシェアが上昇するという状況である。生産における枯渇性資源の重要性の上昇は、人的資本の相対的評価が低下することを意味しており、社会的計画者にとって、時間を教育活動に振り分けるより生産活動に投資するほうが望まれることになるため、人的資本の成長率が低下する。また、他の条件が一定の下で、 $\epsilon > 1$ の場合に、経済主体にとって、消費を平準化させようとする動機が強くなることを意味しているため、当然の結果として、枯渇性資源の使用量は増加する。したがって、この場合、経済成長率も低下する。逆に、効用の限界弾力性が1より小さい場合に、消費の平準化よりもむしろ将来への消費の先延ばしが好まれることになり、生産の枯渇性資源への依存度が上昇するにもかかわらず、経済成長経路に即して、枯渇性資源を節約していく。しかしながら、枯渇性資源の節約は人的資本成長率の低下を相殺することできず、経済成長率を減少させる。

次に、人的資本部門における効率性パラメータ B の増加は各成長率への効果を考察する。(17), (18), (19)式を B で微分して整理すると、

$$\frac{\partial g}{\partial B} = \frac{-\epsilon\beta(1+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)}{\Delta} > 0 \tag{26}$$

$$\frac{\partial g_h}{\partial B} = \frac{-\epsilon[\beta + \epsilon\gamma + \beta\lambda\delta(1-\epsilon)]}{\Delta} > 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial B} = \frac{\epsilon\beta(1+\lambda\delta)(1-\epsilon)}{\Delta} \quad (28)$$

が得られる。 B の上昇は教育活動へ投資される時間をより効率的に人的資本の蓄積のために活用できるような状況となるということを意味する。それゆえに、人的資本の成長率が向上する。非常に直感的であるが、 $\epsilon < 1$ のとき、人的資本部門におけるプラスの生産性ショックは汚染に与える効果の影響が上昇し、当然、枯渇性資源の使用を控えるようになる。その後、長期において、枯渇性資源のフローが生産性ショックなしの経路より一段と減少するもとで、経済成長率は上昇することになる。 $\epsilon > 1$ のケースにおいて、家計が現在消費を上昇させるために、枯渇性資源の使用量を増加する。長期において、人的資本成長率の増加は枯渇性資源使用の減少を上回り、経済成長率は上昇する。さらに、枯渇性資源による汚染排出も一層減少する。したがって、この場合において、人的資本の効率性の上昇が win-win 状況を生み出す：最初の高い汚染水準に関わらず、人的資本効率性の向上は経済成長率を増加させるのみではなく、環境質も改善する。

続いて、限界効用の弾力性 ϵ が大きくなると、各成長率がどのように変化するかを検討する。(17), (18), (19)式を ϵ について微分して、その結果は

$$\frac{\partial g}{\partial \epsilon} = \frac{(\beta + \gamma)[- \lambda\delta\beta B - (\beta(1 + \lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)B - (\beta + \gamma)\rho)]}{\Delta^2} < 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial g_h}{\partial \epsilon} = \frac{(\beta + \gamma)[- \beta(1 + \lambda\delta)B + (\beta + \gamma)\rho]}{\Delta^2} < 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \epsilon} = \frac{- (\beta + \gamma)[\beta(1 + \lambda\delta)B - (\beta + \gamma)\rho]}{\Delta^2} > 0 \quad (31)$$

となる。(29), (30), (31)式の符号の決定にはいずれも(20)式を用いた。限界効用の弾力性とは、利子率に対して投資率がどのぐらい反応するかを示す指標である。 ϵ の上昇は、限界効用弾力性の低下を意味しており、家計は投資リターンへの期待が減少し、現在消費を増加させる。このことは、教育活動への時間配分を減らし、枯渇性資源フローを使おうとするということの意味する。したがって、人的資本成長率は低下し、枯渇性資源使用の成長率は増加する。なお、(17)式で示されたように、経済成長率 g は枯渇性資源フローの成長率 g_R と、人的資本成長率 g_h に線形関係にあるため、持続的経済成長経路にそって、異時点間の代替の弾力性の上昇によって、経済成長率も減少する。

最後に、環境に対する選好率の高まりと長期成長率の関係を分析する。Solow (2000)により、選好パラメータが内生的成長経路における長期的な成長率に大きな影響を及ぼす。そこで、 λ の変化が長期的な最適成長率にどのような影響を及ぼすか、以下で検討する。

(17), (18), (19)式を λ で微分して整理すると、

$$\frac{\partial g}{\partial \lambda} = \frac{\partial g_h}{\partial \lambda} = \frac{\partial g_R}{\partial \lambda} = \frac{\beta\delta(1-\epsilon)B}{\Delta} \quad (32)$$

となることから、環境選好率 λ が同じ方向で各成長率に影響を及ぼす。 λ 値が大きいほど、代表的家計がよりきれいな環境に関心を持つということとなる。ここで、二つのケースに分けて、検討する。まず、 $\lambda = 0$ のとき、社会的計画者が2種類の手段を通して、効用を最大化しようとする：第1に、より

多い時間を教育活動に振り向け、将来消費を増加させる；第 2 に、枯渇性資源の減少に歯止めをかける。 $\lambda > 0$ の場合、 $\lambda = 0$ の場合よりも、資源の採掘・使用により生じる汚染の効用へのマイナスの効果は、資源採掘を減少するという手段の効率性を低下させる。同時に、環境保全活動のプラスの効果により、第 1 の手段はより効率的になる。さらに、汚染が必ず減少していくため(汚染の成長率 $g_P = \delta(g_R - g) < 0$)、 λ の上昇による汚染の短期経済に及ぼす影響は長期へのそれより大きい。したがって、社会計画者が短期と長期のトレード・オフを調整せざるを得ない。したがって、前述の第 1 の手段はより効率的であり、より多くの時間を教育活動に配分する。しかしながら、短期における資源採掘を減少する手段の弊害が長期のそれより強いならば、より多くの時間を労働活動に割り振る。このトレード・オフの大小関係が ϵ に依存する。もし、時間視野にわたる効用の配分が重要ではないならば、社会的計画者が教育時間と経済成長率を増加させる。しかしながら、もし、 $\epsilon > 1$ ならば、時間視野にわたる効用の配分が重要となり、社会計画者が人的資本と最終財の成長率を低下させ、短期における消費を増加する⁶⁾。

3.3 政策的含意

ここでは持続的成長の観点から、3.2 節の分析結果を要約し、資源代替、環境政策と経済成長に関する議論における重要なインプリケーションを提示する。

経済主体に対して、生産に用いられる枯渇性資源のシェアの下落は教育活動への時間を増加させる。それは人的資本の蓄積を促進し、経済の持続的成長率を上昇させる。

枯渇性資源のシェアの増加に伴い経済成長率が減少するということは生産に用いられる枯渇性資源のシェアを減少する方がより効率的に生産活動を行なえるようになることを意味する。したがって、経済成長経路に即して、最終的に資源の完全枯渇を避けるために、逡増的に枯渇性資源を節約せざるをえない。すなわち、枯渇性資源に依存する経済からの脱却を目指し、資本ストックや人的資本への資源の代替を進めるべきである。なお、(26)式から分かるように、人的資本の蓄積効率が高いほど長期の経済成長率は高い。これは、学校教育制度など経済主体が教育投資活動を行なうための制度的前提や環境の整備・充実が、経済の長期的な経済成長のパフォーマンスを規定する上で重要であることを意味している。しかしながら、少なくとも経済発展の初期から中期段階において、枯渇性資源への大幅の依頼は不可避と予想される。枯渇性資源などの自然資本から所得の多くを得ている開発途上国では、速やかな経済成長が求められる。もし政府が不適切な政策を採用し、経済成長が足踏みを続けるならば、人々を貧困に留めるばかりか、環境に対する負荷もより深刻なものとなるだろう。技術水準が低い、資金不足の途上国に持続的成長を実現させるために、開発途上国の自身の努力のほかに、先進国および国際機関などの技術移転や資金援助などが必要不可欠である。その際に、最も重要なことは、途上国の政策決定者に対する環境教育を推進して、教育投資活動を重視した、クリーンな資源へ移行できるような環境を形成することであろう。

6) ここでの分析が Schou (2002) を参考している。

4 市場経済

市場経済における代表的な家計にとっては、環境を保全することから得られる利益は経済全体の得る利益のわずかの割合を占めるにすぎない。したがって、個々の家計が環境保全活動をしようとするインセンティブは社会的に必要な水準に比べてきわめて少なくなる。さらに、(1)式の定式化で示されたように、環境保全活動の排除不可能性により、ある家計にとって、当該家計が環境保全活動を行わないとしても、他の家計による環境保全投資の汚染減少の利益を享受できるため、資源配分を考慮する際に、最終財の一部を環境保全支出に投資するより、資本ストックの蓄積に振り分けるという経済活動をとるほうが有利である。したがって、環境保全のインパクトを無視して最適化行動をとるものとする。さらに、汚染の生態学的方程式は次式で与えられる。

$$P = R^{\delta} \quad (33)$$

市場経済において、家計にとって環境保全活動は行われぬものとする。したがって、汚染が枯渇性資源使用量の増加に伴い上昇することになる。そして、定常状態において、代表的な家計は(2), (3), (4), (5)と(33)式の制約のもとで、無限時間視野での効用を最大化しようとする。3節での最適化の手続きが適用するから、経常価値ハミルトニアン関数を次のように設定する。

$$\mathcal{H} = \frac{(CP^{-\lambda})^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} + \zeta_1(Y-C) - \zeta_2 R + \zeta_3 B(1-u)h \quad (34)$$

ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 はそれぞれこのケースにおける資本ストック、枯渇性資源と人的資本のシャドー・プライスである。そこで、(2)式と(33)式を(34)式に代入して、次の一階条件を得る。

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial C} = 0 \Rightarrow C^{-\epsilon}(R)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)} = \zeta_1 \quad (35)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial R} = 0 \Rightarrow \frac{-\lambda\delta C^{1-\epsilon}(R)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)}}{R} + \zeta_1 \gamma \frac{Y}{R} = \zeta_2 \quad (36)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial u} = 0 \Rightarrow \beta \frac{\zeta_1 Y}{u} = \zeta_3 B h \quad (37)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial K} = \dot{\zeta}_1 - \rho \zeta_1 \Rightarrow \frac{\dot{\zeta}_1}{\zeta_1} = \rho - \alpha \frac{Y}{K} \quad (38)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial S} = \dot{\zeta}_2 - \rho \zeta_2 \Rightarrow \frac{\dot{\zeta}_2}{\zeta_2} = \rho \quad (39)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial h} = \dot{\zeta}_3 - \rho \zeta_3 \Rightarrow \frac{\dot{\zeta}_3}{\zeta_3} = \rho - \beta \frac{\zeta_1 Y}{\zeta_3 h} - B(1-u) \quad (40)$$

この最適化問題に付随する横断性条件は社会的計画者による経済の場合と同様である。さらに、(35)~(40)を用いて、市場経済における定常状態での経済成長率、人的資本成長率と枯渇性資源使用の成長率 \hat{g} , \hat{g}_h , \hat{g}_R はそれぞれ(41), (42), (43)式で表わされる。

$$\hat{g} = \frac{\beta(1+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)B - (\beta+\gamma)\rho}{(\beta+\gamma)(\epsilon+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)} \quad (41)$$

$$\hat{g}_h = \frac{[\beta + \epsilon\gamma + \gamma\lambda\delta(1-\epsilon)]B - (\beta+\gamma)\rho}{(\beta+\gamma)(\epsilon+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)} \quad (42)$$

$$\hat{g}_R = \frac{\beta(1-\epsilon)B - (\beta+\gamma)\rho}{(\beta+\gamma)(\epsilon+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)} \quad (43)$$

なお、以下のパラメータ制約のもとで、求められる解が内点解であるということが保証される。

$$0 < (\beta+\theta)[(\beta+\epsilon\gamma+(\beta+\gamma)\lambda\delta(1-\epsilon))B - \beta(\beta+\gamma)\rho] < (\beta+\theta)(\beta+\gamma)(\epsilon+\lambda\delta - \epsilon\lambda\delta)B \quad (44)$$

$(1-\epsilon)B < (\beta+\gamma)\rho$ はこの(44)式の二番目の不等号を満足させる条件であり、 $\hat{g}_R < 0$ を明示させる。なお、経済成長率がプラスとなるための条件は社会的計画者におけるその条件とまったく同じである⁷⁾。

4.1 最適経路と市場均衡の比較

この節では、上述の分析結果に基づいて、最適経路解と市場均衡解を比較し、市場経済における環境保全活動の外部性の影響を考察する。

命題 1 環境保全活動の外部性が認識されていない市場経済において、社会的最適状態と比較して、 $\epsilon > 1$ ($\epsilon < 1$) の場合に、経済成長率はより低い (高い)、枯渇性資源使用はより多い (少ない) ということとなる。

証明：(17)と(41), (19)と(43)を比較して、命題 1 が明らかとなる。命題 1 の内容は図 1 と図 2 にまとめられている。

さらに、汚染フローの水準を検討しよう。最適経路における汚染フローの成長率を g_P とすると、(1)式により、 $g_P = \delta(g - g_R)$ となる。(33)式から、市場経済における定常状態での汚染フロー成長率は $\hat{g}_P = \delta\hat{g}_R$ である。初期汚染フロー水準が与えられるとしたら、市場均衡における汚染フロー水準が社会的計

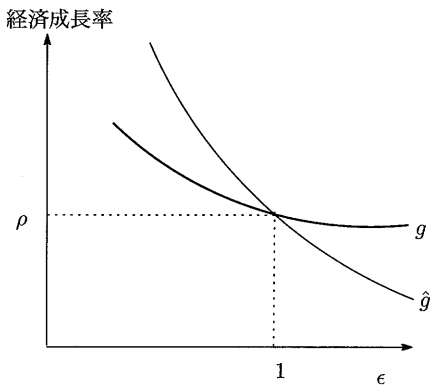


図 1：限界効用の弾力性と経済成長率

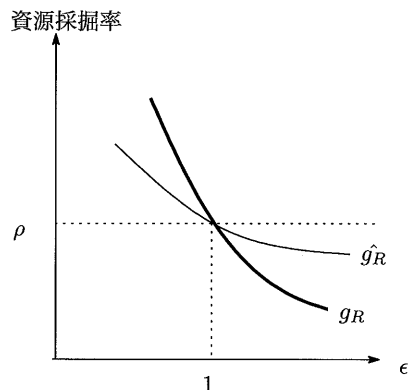


図 2：限界効用の弾力性と資源採掘率

7) 仮定 1 により、(41)式の分母は正であり、分子は(17)式と同様であるため、(21)式のパラメータの制約のもとで、市場経済成長率がプラスとなる。

画者による経済でのそれより高いことが明らかである。したがって、 $\epsilon > 1$ の場合に、市場経済に比べて、社会的計画者の経済において、環境保全と経済成長の両立を実現したのである。環境保全投資の増加は、家計の消費シェアを低下させる。このとき、他の条件が一定の下で、家計は効用最大化条件を維持するために、生産活動に振り分ける時間を減らして教育投資を増加させる。すでに3節の最初で述べたように、人的資本モデルにおいては教育投資の増加が成長の原動力であるため、結果として環境政策の強化は経済成長を加速する。

4.2 環境政策

最適成長を達成するためには、政府はどのような対策をとるべきであろうか。もっとも望ましい対策は汚染の機能を正しく評価することである。この節では、市場経済における歪みを是正するような環境政策について考察する。

政府は1単位の枯渇性資源使用に対して、 τ の税率を課し、その中の $\tau R - 1$ を環境保全の資金として使用し、残った1単位は家計に戻すことにしよう。このとき、汚染の排出過程を表わす関数を次のように定式化し直される。

$$P = \left(\frac{\bar{R}}{\tau R} \right)^\delta = \left(\frac{1}{\tau} \right)^\delta \quad (45)$$

このケースにおいて、経常価値ハミルトニアンは次のようになる。

$$\mathcal{H} = \frac{(CP^{-\lambda})^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} + v_1(Y - C - \tau R) - v_2R + v_3B(1-u)h \quad (46)$$

ただし、 v_1, v_2, v_3 はそれぞれこのケースにおける資本ストック、枯渇性資源と人的資本のシャドー・プライスである。

(2)式と(45)式を(46)に代入し、最大化のための条件として、次の式が成立する。

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial C} = 0 \Rightarrow C^{-\epsilon} \left(\frac{1}{\tau} \right)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)} = v_1 \quad (47)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \tau} = 0 \Rightarrow C^{1-\epsilon} \left(\frac{1}{\tau} \right)^{-\lambda\delta(1-\epsilon)-1} = v_1 \quad (48)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial R} = 0 \Rightarrow v_1 \gamma \frac{Y}{R} = v_2 \quad (49)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial u} = 0 \Rightarrow \beta \frac{v_1 Y}{u} = v_3 B h \quad (50)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial K} = \dot{v}_1 - \rho v_1 \Rightarrow \frac{\dot{v}_1}{v_1} = \rho - \alpha \frac{Y}{K} \quad (51)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial S} = \dot{v}_2 - \rho v_2 \Rightarrow \frac{\dot{v}_2}{v_2} = \rho \quad (52)$$

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial h} = \dot{v}_3 - \rho v_3 \Rightarrow \frac{\dot{v}_3}{v_3} = \rho - \beta \frac{v_1 Y}{v_3 h} - B(1-u) \quad (53)$$

横断性条件は社会的計画者問題のときと同様である。各家計は政府が1単位枯渇性資源の使用に τ の税率を徴収し、 $\tau R - 1$ だけを環境保全活動に用いられることを考慮に入れながら自らの行動を決定する。明らかに、 $1 + D = \tau R$ であるため、最適経済成長率を達成するために、任意の時点において、税率

の増加率は次式で設定される⁸⁾。

$$g_{\tau} = g - g_R = \frac{(\beta + \theta)B}{\beta + \gamma} \quad (54)$$

したがって、定常状態において、税率が $\tau = z_0 e^{g_{\tau} t}$ (z_0 は t_0 時点における税率である) で書かれる。環境保全投資の外部性が無視されている市場経済において、環境政策の実施によって完全に内部化されて、最適経路の達成は可能となる。しかしながら、驚くことに、Grimaud and Rouge (2005) における税率がゼロに近づいて行くという結論と異なり、本モデルでは、成長経路に即して、税率の成長率 g_{τ} が正であるため、税率は増加していく。このような帰結の要因はいったいどこにあるのだろうか。直感的には次のように解釈される。まず、本論文での枯渇性資源使用に対する課税は、枯渇性資源がもたらす社会的限界価値と私的限界価値のギャップを埋める資源税ではなく、環境保全活動に投資するため利用される税である。したがって、環境保全活動投資は枯渇性資源使用の成長率が低下していくにもかかわらず、経済成長とともに、増加していく。次に、(15)式により、消費・(1 + 環境保全支出)の比率一定であり、すなわち、この経済において、最終財を普通の消費財、と環境というアメニティーとしての両方に一定の比率で配分しなければならない。

5 おわりに

本文では、Uzawa (1965) と Lucas (1988) で展開されている人的資本を含む内生的成長モデルに、枯渇性資源とフローの汚染を導入することによって、枯渇性資源、環境保全投資、経済成長の相互関係を分析した。本論文で得られた帰結は次のとおりである：

- (1) 正の持続的成長の達成のためには、枯渇性資源使用の節約が必要不可欠である。
- (2) 環境保全投資の外部効果が認識されないケースにおいては、市場経済と社会的計画者問題の成長率の大小関係が一概に言えないが、限界効用の弾力性 ϵ が 1 より大きい場合、社会的計画者の経済成長率が市場経済の成長率を上回ることが明らかにされた。これは、地球的規模で取り組まれている環境保全投資活動が重要であることを示唆している。
- (3) 環境保全投資活動を行なうための環境政策として、枯渇性資源使用に対する税率の増加率が正となるという結論が導かれた。

最後に、本論文に関する今後の研究課題をあげて、本論文を結びたい。汚染削減活動のための環境保全投資を増やすと、経済全体の資源配分を変化させる。一般的にこの変化は、経済成長を加速するような投資活動への支出を削減し、経済成長にマイナスの方向に働くと考えられている。しかしながら、現実の状況では、それほど単純ではない。環境保全投資の持つ外部性がいかに生産性の向上を促すのか、さらに市場均衡成長経路における環境政策の効果に関して、一層の議論が必要であろう。また、枯渇性資源使用とそれに付随して発生する汚染物の関係について、より一般性を持つ定式化の下で検討する必要もあろう。

8) ここでは、(15)式により得られる $g = g_{1+d}$ という結果を利用する。

6 補論：社会計画者の経済における各成長率の導出

持続経済成長経路の定義と(15)式より、持続的経済成長経路に沿って、 Y , K , C , $1+D$ は必ず同様な率で成長する。さらに、 $\frac{\dot{\mu}_i}{\mu_i}$ を g_{μ_i} で示すことにする。なお、 h が一定の率で成長するならば、(4)式により、 u は必ず一定である。よって、(8)式、(11)式を t に関して微分すると、それぞれ次式を得る。

$$-\epsilon g - \lambda\delta(1-\epsilon)g_R + \lambda\delta(1-\epsilon)g = g_{\mu_1} \quad (55)$$

$$g_{\mu_1} + g = g_{\mu_3} + g_h \quad (56)$$

(8)式を(10)に代入し、両方を t に関して微分すると、

$$g_{\mu_1} - g_R + g = g_{\mu_2} \quad (57)$$

が得られる。(11)式と(4)式を(14)式に代入して、次式を得る。

$$g_{\mu_3} = \rho - B \quad (58)$$

方程式系(13), (15), (55), (56), (57), (58)から、 g_{μ_1} , g_{μ_2} , g_{μ_3} を消去して、経済成長率、人的資本成長率および枯渇性資源使用の成長率はそれぞれ(17), (18), (19)で示される。

参 考 文 献

- [1] Bovenberg, A. L. and S. Smulders (1995), "Environmental Quality and Pollution-augmenting Technological Change in a Two-sector Edogenous Growth Model", *Journal of Public Economics* 57, 369-391.
- [2] Farzin, Y. H. and O. Tahvonen (1996), "Global Carbon Cycle and the Optimal Time Path of a Carbon Tax", *Oxford Economic Papers* 48, 515-536.
- [3] Grimaud, A. and L. Rouge (2003), "Non-Renewable Resources and Growth with Vertical Innovations: Optimum, Equilibrium and Economic Policies", *Journal of Environmental Economics and Management* 45, 433-453.
- [4] Grimaud, A. and L. Rouge (2005), "Polluting Non-Renewable Resources, Innovation and Growth: Welfare and Environmental Policy", *Resource and Energy Economics* 27, 109-129.
- [5] Groth, C. and P. Schou (2002), "Can Non-Renewable Resources alleviate the Knife-edge Character of Endogenous Growth?", *Oxford Economic Papers* 54, 386-411.
- [6] Halkin, H. (1974), "Necessary Conditions for Optimal Control Problems with Infinite Horizons", *Econometrica* 42, 267-272.
- [7] Hartwick, J. M. (1977), "Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources", *American Economic Review* 67, 972-974.
- [8] Hotelling, H. (1931), "The Economics of Exhaustible Resources", *The Journal of Political Economy* 39, 137-175.
- [9] Kolstad, C. D. and J. A. Krautkraemer (1993), "Natural Resource Use and the Environment", in Kneese, A. V. and J. L. Sweeney, *Handbook of Natural Resource and Energy Economics* 3. Elsevier.
- [10] Lucas, R. E. (1988), "On the Mechanics of Economic Development", *Journal of Monetary Economics* 22, 3-42.
- [11] Scholz, C. M., and G. Ziemes (1999), "Exhaustible Resources, Monopolistic Competition and Endogeneous Growth", *Environmental and Resource Economics* 13, 169-185.
- [12] Schou, P. (2000), "Polluting Non-Renewable Resources and Growth", *Environmental and Resource Economics* 16, 211-227.

- [13] Schou, P. (2002), “When Environmental Policy is Superfluous: Growth and Pollution Resources”, *Scandinavian Journal of Economics* 104, 605-620.
- [14] Smulders, S. and R. Gradus (1996), “Pollution Abatement and Long-term Growth”, *European Journal of Political Economy* 12, 502-532.
- [15] Stiglitz, J. (1974), “Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths”, *Review of Economic Studies, Symposium*, 123-137.
- [16] Uzawa, H. (1965), “Optimum Technical Change in an Aggregative Model of Economic Growth”, *International Economic Review* 6, 18-31.
- [17] 柳瀬明彦 (2002) 『環境問題と経済成長理論』三菱経済研究所。