経済論叢（京都大学）第 189 巻第 2 号，2015 年 6 月

査読付き論文

再生可能資源の動学的経済効果
――三部門成長モデルによる理論分析――

茹仙古麗　吾甫尔*・金江　亮**

1　はじめに

環境問題が引き起こされた背景の一つには自然資源が過度に消費されるという経済学的な要因が存在する。その一つは再生可能資源の大量の利用である。再生可能資源とは現在の利用を過度にしないかぎり，環境が整えば自ら再生可能である資源である。例えば，漁業資源や森林資源がその代表的なものである。近年，これらの資源は再生能力があるにも関わらず過度の乱獲や伐採により，資源ストックが減少の過程にある。どうすれば有限な資源を遠い将来世代まで使い残し，将来世代までの効用最大化を考えることができるかどうかは極めて興味のある問題である。このような問題に対しては，一つには，現時点での資源の最適利用や最適蓄積が必要となる。再生可能資源の総量は大きくなりすぎると自然治癒力や再生能力は落ちてくると考えられるから，資源を所有することから得る各期ごとの効用を最大にするような蓄積量が必要となる。もう一つは，もし生産活動に投入される資源財と他の生産要素（資本）の間で十分に代替可能な関係があって，資源財の減少による生産能力の低下を資本の増加で補うことができるならば，自然資源を節約することができ，最適水準まで蓄積することができるだろう。

本稿は山下・大西（2002）で定式化され，金江（2008）やロシャングリ・金江（2009）で拡張された「マルクス派最適成長論モデル」を資本と資源を持つ３部門モデルに拡張することによって，経済成長を資本財と自然資源財の蓄積過程として分析し，再生可能資源が経済に与える影響を理論的に分析する。

先行研究の基本モデルである「マルクス派最適成長論モデル」は産業革命による技術変化が資本蓄積を第一の課題とする社会資本主義をモデル化し，労働を唯一の本源的生産要素とした，消費財生産部門と資本財生産部門の２部門モデルである。具体的に言うと，社会には消費財生産部門と資本財生産部門があり，消費財部門では資本と労働を投入し，消費財を生産する。資本財部門では労働のみを投入し資本財を生産するが，定常状態では，すべての労働が消費財生産に回され，資本蓄積は停止すると論じている。そこで，資本財生産が労働のみによってなされるという仮定による非現実性を解消するために，金江（2010）は，資本財生産も資本と労働の投入によってなされるとし，「マルクス派最適成長論モデル」モデルの「拡張モデル」を論じている。

本稿では以上の文献を参考にしつつ，最適経済成長モデルの枠組みの中で，資本財に加え，再生可能資源をもう一つの投入財として考える三部門成長モデルを定式化し，再生可能資源が及ぼす動

受付日　2013 年 9 月 17 日，受理日　2015 年 1 月 8 日
＊　ロシャングリ　ウフル　　中国新疆師範大学講師　　＊＊　三重短期大学准教授

学的な経済効果を検証することを目的とする[1)]。

本稿の構成は以下のようになる。第二節では再生可能資源と経済成長についての新たな独自の理論モデルを構築し，物的資本と再生可能資源が時間を通じてどのように蓄積していくかという問題を定式化する。そしてこのようなモデル設定のもとで，最適な物的資本蓄積や最適な自然資源蓄積を求める。ここでいう最適な物的資本，自然資源蓄積とは，通時的効用を最大にするような蓄積水準である。言い換えると，物的資本や自然資源をどのように蓄積していけば，将来世代まで考えた効用最大化を可能にするかという問題を検討する。また，自然資源の生産性の上昇が長期均衡状態にどのように影響を与えるかを分析する。第三節は結論である。

2 理論分析

本節では，経済成長モデルの枠組みの中で，再生可能資源を導入した三部門成長モデルを構築する。経済成長理論では，資本ストックとは通常機械や工場といった物的資本を指すが，本稿ではこのような物的資本に加えて, 再生可能資源をもう一種の投入財としてモデルに導入する。すなわち，経済成長に関する問題を物的資本ストックと再生可能資源ストックの蓄積過程という問題として定式化する。

2.1 モデルの設定：

社会的総生産は以下の三つの生産部門において行われるとする。第一部門は消費財生産部門であり，ここでは最終財，すなわち，消費財が生産される。第二部門は資本財生産部門であり，この部門では資本財（機械）が生産される。第三部門は再生可能資源部門であり，この部門では，再生可能資源の自己再生能力や労働による自然資源の回復が生成される。そして，こういった三つの生産部門の生産は以下のような生産関数によって行われるとする。

消費財生産部門：

消費財は，物的資本，自然資源，労働の投入によって生産されるとする。また，人口は成長せず一定規模 L を持つと仮定する。

ここで，再生可能自然資源を一つの投入財とした理由としては，以下のように考えられる。

今の世界では，人類は地球環境の保全，資源の確保など，その生存のための基本的な課題に直面している。たとえば，石油，石炭などの化石燃料に依存した現在の生産，生活様式を木材などの再生可能資源を基盤としたものに変換していくことは，こうした課題を解決する上で，有効な方法の一つと考えられる。ここで，再生可能資源として森林を取り上げると，森林から生産される木材の利用は，地域林業，木材産業の活性化に貢献するだけではなく，住宅建築，建設産業への波及効果も期待されている。木材の住宅への利用，教育施設，福祉施設，医療施設等の公共施設と公共土木事業への利用によって，造林，育林，伐採，利用の循環を通じて，二酸化炭素の吸収に大きく貢献する。木質バイオマスエネルギーへの利用によって，持続的な循環型の社会の形成に貢献する。教育，環境学習への利用によって，人間の生理面，健康面に良い影響を与えると考えられる。つまり，再生可能資源である木材の利用を促進することが地球温暖化の防止，循環型の社会の形成および経済の活性化につながると考えられる。

通常，経済成長という場合，資本蓄積や消費の増加が念頭にあるが，再生可能資源もこれに含めて考えられる。例えば，近年，マグロやうなぎといった水産資源が著しく減少し，保護の必要性が指摘されている。海の生態系が豊かになることが，人間にとってもより豊かな資源の供給先となりうる。機械のような物的な資本のみならず，木材や水産資源も，再生産を繰り返し蓄積が行なわれるある種の資本とみなすことができる。

以上のようなことから，自然資源を一つの投入財として生産に投入することは意味を持っていると考えられる。

したがって，消費財生産部門の生産関数を以下のコブ・ダグラス型の生産関数で表すことにする。

$$\begin{aligned} &Y=A(u_0K)^{\alpha_1}(\varepsilon R)^{\alpha_2}(s_0L)^{\alpha_3}(=F(u_0K, \varepsilon R, s_0L)) \\ &\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3=1,\ \alpha_1>0,\ \alpha_2>0,\ \alpha_3>0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

ここでは，Y は消費財，K は経済全体における総資本ストックであり，u_0 は総資本ストックのうち，消費財生産に回される資本ストックの割合である。R は自然資源ストック，ε は自然資源の使用による自然資源の減耗率であり，εR は自然資源使用量（フロー）である。L は経済全体における労働であり，s_0 はそのうち，消費財の生産に用いられる労働の割合を示す。A は生産性パラメータである。ここで，最終財は全部消費され，資本財生産は，資本と労働の投入によって生産されるとする[2)]。

物的資本財生産部門：

生産された資本財はある比率で再び資本財生産と消費財生産に回される。現存の資本ストックは一定率で減耗すると仮定する。したがって，物的資本ストックの蓄積は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} &\dot{K}=B(u_1K)^{\beta}(s_1L)^{1-\beta}-\delta K(=G(u_1K, s_1L)-\delta K) \\ &K(0)=K_0,\ 0<\beta<1,\ 0<\delta<1,\ B>0 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで，$\dot{K}(\equiv dK/dt)$ は資本の時間微分，$K_0>0$ は資本ストックの初期水準，u_1 は社会的総資本のうち，資本財生産に投入される資本の割合である。s_1 は経済全体での総労働のうち，資本の蓄積に用いられる労働の割合を示す。β は生産弾力性であり，δ は資本の減耗率で，一定であると仮定する。B は生産性パラメータである。

自然資源生産部門：

自然資源は採取によって減少するが，自らの再生能力や自然資源の回復活動によってそのストックが増加すると仮定する。このように定式化することによって，定常状態における最適な一人当たり資源ストックを求めることができる。

$$\begin{aligned} &\dot{R}=DR^{\gamma}(s_2L)^{1-\gamma}-\varepsilon R(=Q(R, s_2L)-\varepsilon R) \\ &R(0)=R_0,\ 0<\gamma<1,\ \varepsilon>0,\ D>0 \end{aligned} \tag{2.3}$$

ここでは，$\dot{R}(\equiv dR/dt)$ は自然資源の時間微分を表す。$R_0>0$ は自然資源ストックの初期水準，s_2 は経済全体での総労働のうち自然資源の回復のために費やされる労働の割合である。ε は自然資源の使用による自然資源の減少率を表す。γ は弾力性，D は生産性パラメータである。

均衡条件：

総資本 K は消費財生産部門，資本財生産部門に配分され，総労働 L は，消費財生産部門，資本財生産部門，自然資源生産部門に配分されるとしていることから，資本財と労働の資源制約は以下のようになる。

資本財の資源制約：$u_0+u_1=1$　　　$0\leq u_0, u_1\leq 1$

労働の資源制約：　$s_0+s_1+s_2=1$　　　$0\leq s_0, s_1\leq 1$

次に，この経済は同質的な消費者から構成されると仮定し，代表的な個人の目的関数を無限時間視野にわたる効用の現在価値の総和である以下のような効用関数で表すことにする。

$$U=\int_0^{\infty} e^{-\rho t}\log Y dt \tag{2.4}$$

ただし，$\rho>0$ は主観的割引率（時間選好率）である。

この最大化問題の経常価値ハミルトニアン H は以下のようになる。

$$\begin{aligned} H=&\log Y+\lambda_k[G(u_1K, s_1L)-\delta K]+\lambda_R[Q(R, s_2L)-\varepsilon R] \\ &+\mu_1(1-u_0-u_1)+\mu_2(1-s_0-s_1-s_2) \end{aligned} \tag{2.5}$$

ただし，λ_K と λ_R は資本蓄積式と自然資源蓄積式に付随する共役変数であり，資本蓄積と自然資源蓄積を一単位増やしたときに，どれだけの効用が増大するかを表しており，資本と自然資源の帰属価格（shadow price）を表している。また，μ_1 と史 μ_2 は資本財と労働の資源制約式に付随するラグランジュ乗数である。

最適化の一階条件は次のようになる[3)]。

$$\frac{\partial H}{\partial s_0}=0, \frac{\partial H}{\partial s_1}=0, \frac{\partial H}{\partial s_2}=0 \Leftrightarrow \frac{F_L}{F}=\lambda_K G_L=\lambda_R Q_L \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_0}=0, \frac{\partial H}{\partial u_1}=0 \Leftrightarrow \frac{F_K}{F}=\lambda_K G_K \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \varepsilon}=0 \Leftrightarrow \frac{\alpha_2}{\varepsilon R+M}=\lambda_R \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial H}{\partial K}=-\dot{\lambda}_K+\rho\lambda_K \Leftrightarrow \frac{F_K}{F}u_0+\lambda_K(G_K u_1-\delta)=-\dot{\lambda}_K+\rho\lambda_K \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial H}{\partial R}=-\dot{\lambda}_R+\rho\lambda_R \Leftrightarrow \frac{F_R}{F}\varepsilon+\lambda_R(Q_R-\varepsilon)=-\dot{\lambda}_R+\rho\lambda_R \tag{2.10}$$

さらに，横断性条件は以下のようになる。

$$\begin{aligned} &\lim_{t\to\infty} e^{-\rho t}\mu(t)K(t)=0 \\ &\lim_{t\to\infty} e^{-\rho t}\lambda(t)R(t)=0 \end{aligned} \tag{2.11}$$

(2.7) 式と (2.9) 式より

$$u_1{}^*=\frac{\beta\delta}{\rho+\delta} \tag{2.12}$$

が求められる。また，資本財の資源制約条件 $u_0+u_1=1$ より

$$u_0{}^*=\frac{\rho+\delta-\beta\delta}{\rho+\delta} \tag{2.13}$$

が得られる。(2.12) 式と (2.13) 式は，定常状態における資本財部門と消費財部門に配分される最適な資本割合である。

次に，(2.8) 式と (2.10) 式より

$$\varepsilon^* = \frac{\rho}{\gamma} \tag{2.14}$$

が得られる。これは，定常状態における最適な資源減耗率である。

また，(2.6), (2.7) 式より

$$s_0^* = \frac{\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)}{\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)} \tag{2.15}$$

$$s_2^* = \frac{\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)}{\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)} \tag{2.16}$$

が得られ，また，労働の資源制約条件 $s_0+s_1+s_2=1$ より

$$s_1^* = \frac{\alpha_1\delta(1-\beta)}{\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)} \tag{2.17}$$

が得られる。

定常状態において，$\dot{K}=0$，$\dot{R}=0$ となり，これらの条件を満たした (2.2) 式と (2.3) 式の資本財生産関数や自然資源生産関数と (2.12) 式や (2.16)，(2.17) 式から，定常状態における最適な資本労働比率や最適な自然資源労働比率が求まる。

$$\left(\frac{K}{L}\right)^* = \frac{\alpha_1(1-\beta)(\rho+\delta)}{\beta[\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)]}\left(\frac{B\beta}{\rho+\delta}\right)^{\frac{1}{1-\beta}} \tag{2.18}$$

$$\left(\frac{R}{L}\right)^* = \frac{\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)}{\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)}\left(\frac{D\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \tag{2.19}$$

また，定常状態における最適な資本・資源比率を求めると以下のようになる。

$$\left(\frac{K}{R}\right)^* = \frac{\alpha_1(1-\beta)(\rho+\delta)}{\alpha_2\beta(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)}\left(\frac{B\beta}{\rho+\delta}\right)^{\frac{1}{1-\beta}}\left(\frac{D\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \tag{2.20}$$

(2.18) と (2.19) 式から明らかになるように，定常状態において，資本と自然資源の一人当たりの最適蓄積量はいずれも再生可能資源の生産弾性値 (α_2) に依存することが分かる。つまり，このパラメータの変化に対して影響を受けることが分かる[4)]。

以下，環境パラメータ α_2 の変化が定常状態におけるこの二つの最適比率に及ぼす影響を検討する。

ここでまず，時間選好率は極めて 0 に近い値をとると仮定する。時間選好率が十分小さい場合，動学体系は定常状態に収束することを示すことができる[5)]。

そのために Sorger（1989）の系 2(c) を用いる。これは柳瀬（2002）に簡潔にまとめられている。

Sorger（1989）の系 2(c)（柳瀬（2002））[6)]

n 個の状態変数を持つ動学的最適化問題を想定し，$x\in\mathbb{R}^n$, $p\in\mathbb{R}^n$, $\bar{H}(x, p)$ をそれぞれ状態変数のベクトル，共状態変数のベクトル，最大化されたハミルトニアンとする。このとき微分方程式体系

$$\dot{p} = \rho p - \bar{H}x(x, p)$$
$$\dot{x} = \bar{H}p(x, p)$$

の有界な解は，行列

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{xx}+\gamma[\bar{H}_{xp}+\bar{H}_{px}] & -\frac{\rho}{2}I+\gamma\bar{H}_{pp} \\ -\frac{\rho}{2}I+\gamma\bar{H}_{pp} & -\bar{H}_{pp} \end{bmatrix}$$

がすべての $(x, p)\in\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}^n$ に関して負値定符号を持つような定数 γ が存在するならば，$\rho p^*-\bar{H}x(x^*, p^*)=\bar{H}p(x^*, p^*)=0$ を満たす定常状態 (x^*, p^*) に漸近的に収束する。

この定理を $n=2, \gamma=0$ として適用する。$\bar{H}$ を最大化されたハミルトニアンとすると，

$$A\equiv\begin{bmatrix} \bar{H}_{KK} & \bar{H}_{KR} & -\frac{\rho}{2} & 0 \\ \bar{H}_{RK} & \bar{H}_{RR} & 0 & -\frac{\rho}{2} \\ -\frac{\rho}{2} & 0 & -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_R} \\ 0 & -\frac{\rho}{2} & -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_R} \end{bmatrix}$$

がすべての $K, R, \lambda_K, \lambda_R$ に対して負値定符号となるならば，定常状態に漸近的に収束することが定理より従う。本モデルの場合，log, F, G, Q すべてが凹関数であることから，$\bar{H}$ は状態変数 K, R に関して凹，共役状態変数 λ_K, λ_R に関して凸となることから，$\begin{bmatrix} \bar{H}_{KK} & \bar{H}_{KR} \\ \bar{H}_{RK} & \bar{H}_{RR} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_R} \\ -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_R} \end{bmatrix}$ が負値定符号となる。このことから，A の r 次首座小行列式を A_r で表わすと，$A_1<0, A_2>0$ は明らかである。また

$$\begin{aligned} A_3 &= -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_K}(\bar{H}_{KK}\bar{H}_{RR}-\bar{H}_{KR}\bar{H}_{RK})-\frac{\rho^2}{4}\bar{H}_{RR} \\ &= -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_K}A_2-\frac{\rho^2}{4}\bar{H}_{RR}<0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_4 &= \begin{vmatrix} \bar{H}_{KK} & \bar{H}_{KR} \\ \bar{H}_{RK} & \bar{H}_{RR} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_R} \\ -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_R} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} -\frac{\rho}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\rho}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -\frac{\rho}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\rho}{2} \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} \bar{H}_{KK} & \bar{H}_{KR} \\ \bar{H}_{RK} & \bar{H}_{RR} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_K\lambda_R} \\ -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_K} & -\bar{H}_{\lambda_R\lambda_R} \end{vmatrix} - \frac{\rho^4}{16} \end{aligned}$$

前項は正だから，$\rho>0$ が十分 0 に近い場合，$A_4>0$ となり，A は負値定符号となり定理の条件が満たされることになる。

次に，定常状態での分析を行なう。式を簡単に表すために $\left(\frac{K}{L}\right)^*=k^*$ $\left(\frac{R}{L}\right)^*=r^*$ とおく。

まず，再生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇による最適比率の変化を見てみる[7)]。

$$\frac{\partial k^*}{\partial\alpha_2}=-\frac{\alpha_1\beta(1-\beta)(1-\gamma)(\rho+\delta)(\rho+\delta-\beta\delta)}{\Delta_1^2}\left(\frac{B\beta}{\rho+\delta}\right)^{\frac{1}{1-\beta}}<0 \tag{2.21}$$

$$\frac{\partial r^*}{\partial\alpha_2}=\frac{(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)[\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)]}{\Delta^2}\left(\frac{D\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}>0 \tag{2.22}$$

ただし，

$$\Delta=\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_2(1-\gamma)(\rho+\delta-\beta\delta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)$$

$\Delta_1=\beta\Delta$ である。

上の式から分かるように，(2.21) 式は負となり，(2.22) 式は正となっている。したがって，資本蓄積は減少し再生可能資源の蓄積は増加する。生産量は労働の配分で決まるため，資本財生産よりも再生可能資源の生産の方に労働が多く配分されることになる。

α_2 の増加は，消費財生産に用いる自然資源のシェアが上昇する状況を表す。これは，消費財生産に相対的により多くの再生可能資源を用いなければならないことを意味するため，資本から再生可能資源への移行が生じていると理解することができる。例えば，資本を機械と考えてみれば，機械を動かすには枯渇性資源である石油・石炭・ガスを用いなければならないが，資源節約のため，あるいは環境保全のため，とうもろこしを利用したバイオエタノールなどの再生可能資源を用いる技術に移行せざるを得ない状況などがこのケースに当たる。

次に，α_2 の増加が総効用に及ぼす影響を調べる。資本・資源は蓄積されるため，初期時点から定常状態に至るまでの総効用を計算で求めるのは困難であるが，定常状態が十分に長く続いた状態を考えるならば，総効用は定常資本ストック・定常資源ストックのまま初期時点から続いたとみなしたもので近似できる[8]。

$$\begin{aligned} U^*&=\int_0^\infty e^{-\rho t}\log Y^* dt=\frac{1}{\rho}\log Y^* \\ &=\frac{1}{\rho}(\log A+\alpha_1\log u_0{}^*+\alpha_1\log K^*+\alpha_2\log\varepsilon+\alpha_2\log R^*+\alpha_3\log s_0{}^*+\alpha_3\log L) \end{aligned} \tag{2.23}$$

このとき

$$\begin{aligned} \frac{\partial U^*}{\partial\alpha_2}&=\frac{1}{\rho}\left(\alpha_1\frac{K^*_{\alpha_2}}{K^*}+\log\varepsilon+\log R^*+\alpha_2\frac{R^*_{\alpha_2}}{R^*}+\alpha_3\frac{s_0{}^*_{\alpha_2}}{s_0{}^*}\right) \\ &=\frac{1}{\rho}\left[\log\varepsilon+\log R^*+\frac{\Delta_{\alpha_2}}{\Delta}\left\{\alpha_2\left(\frac{D\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}-(\alpha_1+\alpha_2R+\alpha_3)\right\}\right] \\ &=\frac{1}{\rho}\left[\log\varepsilon+\log R^*+\frac{\Delta_{\alpha_2}}{\Delta}\left\{\alpha_2\left(\frac{D\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}\frac{\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)}{\Delta}-(\alpha_1+\alpha_3)\right\}\right] \\ &=\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}\frac{\alpha_2\Delta_{\alpha_2}\{\alpha_1\delta(1-\beta)+\alpha_3(\rho+\delta-\beta\delta)\}}{\rho\Delta^2}D^{\frac{1}{1-\gamma}}+\frac{1}{\rho}\left[\log\varepsilon+\log R^*-\frac{\Delta_{\alpha_2}}{\Delta}(\alpha_1+\alpha_3)\right] \end{aligned} \tag{2.24}$$

となる。ただし α_2 に関する偏微分を添字で表わしている。

一概に正負を判別することは難しいが，前項において $D^{\frac{1}{1-\gamma}}$ の係数は正であるから，$\frac{\partial U^*}{\partial\alpha_2}$ はD について単調増加となり，次のことが分かる。

(i) 再生可能資源の生産性 D が大きければ $\frac{\partial U^*}{\partial\alpha_2}>0$ となり，生産弾力性 α_2 の上昇は総効用に正の影響を与える。

(ii) 再生可能資源の生産性 D が小さければ $\frac{\partial U^*}{\partial\alpha_2}<0$ となり，生産弾力性 α_2 の上昇は総効用に負の影響を与える。

つまり，総効用が増加するためには，再生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇だけでは不十分であ

り，生産性 D が大きいことが必要である。

2.2　要素間代替

有限な資源量の使用を遠い将来にまで引き伸ばし，妥当な最低生活水準を維持させるためには，資本と自然資源の間に妥当な代替が可能であることが必要である[9]。

もし，資本が自然資源に対して十分代替可能であって，自然資源の減少による生産能力の低下を資本増加で補うことができるならば，資本の生産弾力性 α_1 が大きく，自然資源の生産弾力性 α_2 が小さくなる必要がある[10]。これは，(2.20) 式で α_2 が小さいほど資本・資源比率 $\left(\frac{K}{R}\right)^*$ が大きくなることからも分かる。この時，資本の生産に対する重要性の高まりによって，自然資源への依存度が減り，生産に投入される自然資源を節約することができ，自然資源ストックを増加させることも可能となる。

3　結論および今後の課題

本稿では，物的資本と同様，再生可能資源を一種の投入要素として生産関数に導入し，三部門経済成長モデルを提示した。経済成長を資本と再生可能資源の蓄積過程として定式化し，最適資本，資源蓄積を資源パラメータを含めた形で導出した。それらは，(2.18)，(2.19) 式である。

自然資源の生産性に変化があった場合，最適な資本蓄積量および最適な自然資源蓄積量がどのように変化するかといった問題を分析し，以下のような結果が得られた。

1．再生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇は，定常状態における最適資本蓄積を減少させるが，資本蓄積の減少はそれほど著しくない。
2．再生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇は，定常状態における最適資源蓄積を増加させる。
3．再生可能資源の生産性 D が大きければ正となり，生産弾力性 α_2 の上昇は総効用に正の影響を与える。
4．再生可能資源の生産性 D が小さければ負になり，生産弾力性 α_2 の上昇は総効用に負の影響を与える。

本稿では再生可能資源の増加も経済成長であると考えているため，再生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇による資本蓄積の減少は経済成長にマイナスであり，再生可能資源の増加は経済成長にプラスである。資本蓄積が減少し，一方で再生可能資源の増加が起こっている場合には，それが経済にとって望ましいかどうかは総効用の観点から判断しなければならない。

そして総効用が増加するためには，再生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇と生産性 D が大きいことが必要である。生産性 D が小さければ，生産弾力性 α_2 の上昇が逆に総効用を減らしてしまう。つまり，再生可能資源の生産弾力性 α_2 を上昇させる技術は，それだけでは経済に望ましいとも望ましくないとも言えず，それは生産性 D に依存しているというのが本稿の結果である。生産性 D が大きければ，資本蓄積水準が低下していても総効用は増加しているため，この場合には経済は拡大している，と考えられる。

一例として，本文中にも挙げた枯渇性資源とバイオエタノールの例で考えてみる。石油・石炭・ガスが次第に枯渇し，再生可能資源であるバイオエタノールを多く用いる生産に移行したとする（再

生可能資源の生産弾力性 α_2 の上昇)。これは技術的な問題だけでなく，法律で規制されそういう生産様式に移行を強制されることもあり得よう。その結果，資本蓄積は減少し再生可能資源ストックは増加する。ただし総効用が増加するか減少するかは確定しない。それは再生可能資源たるバイオエタノールの生産性に依存する。

最後に，今後の課題としては，本稿のモデルをもとに再生可能資源が経済成長に与える影響を生産関数を推定することによって実証的に検証する必要がある。また，生産関数に自然資源の外部効果を導入することが残っている。自然資源は過度な利用により，自浄能力が低下し，環境汚染が生じ，それが最終財生産に負の影響を与えると考えられるから，自然資源の外部性を分析する必要がある。また，物的資本と自然資源の代替関係を実証的に検証する必要がある。これらを今後の課題としたい。

（本稿の作成には日本学術振興会「アジア・コア」資金の支援を受けた。）

注

1）再生可能資源を考慮した成長モデル，例えば代表的な Tahvonen and Kuuluvainen（1991）など数多くあるが，本モデルでは労働を主軸にしたモデルという点が特徴である。消費財は資本と労働と天然資源で生産され，資本財は資本と労働で生産され，再生可能資源は再生可能資源と労働で生産される。また，生産関数にコブ・ダグラス型を仮定することから，労働投入が 0 の場合は資本財・再生可能資源の生産は行なわれない。つまり本源的生産要素が労働のみとなり，広義の労働価値説の立場に立ったモデルである。いかなる経済であれ，労働の投入のない部門は存在しないことを明示的に組み入れたモデルともいえる。

2）物的資本財生産は，資本，労働，自然資源の投入によって生産されるというケースもあるが，ここでは，モデルを単純化するために，資源の資本財生産への投入を考慮しない。

3）(2.6)～(2.10) 式中，F, G, Q の右下の添え字で偏微分を表している。すなわち，$F_K=A\alpha_1(u_0K)^{\alpha_1-1}(\varepsilon R)^{\alpha_2}(s_0L)^{\alpha_3}$, $F_L=A\alpha_3(u_0K)^{\alpha_1}(\varepsilon R)^{\alpha_2}(s_0L)^{\alpha_3-1}$, $F_R=A\alpha_2(u_0K)^{\alpha_1}(\varepsilon R)^{\alpha_2-1}(s_0L)^{\alpha_3}$, $G_K=B\beta(u_1K)^{\beta-1}(s_1L)^{1-\beta}$，$G_L=B(1-\beta)(u_1K)^{\beta}(s_1L)^{-\beta}$, $Q_L=(1-\gamma)DR^{\gamma}(s_2L)^{-\gamma}$ である。

4）本稿では人口成長を考えていないため，定常状態では成長は止まることになる。本源的生産要素が労働のみであり，その労働量が一定であることと，その労働によってすべての財が迂回的に生産されていることからも自然である。ただし，人口成長率を外生的に正 $\left(\frac{\dot{L}}{L}=n>0\right)$ と仮定しても，一人当たりの資本・再生可能資源の水準は本稿と同一となる。その場合は一人当たりの資本・再生可能資源の量と人口との積が総量となるため，経済全体の資本・再生可能資源の量は人口成長率と同じ成長率 n で増加し続けることになる。

5）時間選好率が低いということは，将来に得られる効用が高く評価されるということを意味しているが，そのような場合には成長経路は定常状態に到達可能となる。逆に，時間選好率が大きい，すなわち，将来の効用が大きく割り引かれるような経済では，定常状態は不安定になる可能性が高くなる。

6）本論文に合わせて少し記号の表記を変えてあるが，柳瀬（2002）p. 147 の引用である。

7）厳密に言うと，一次同次を仮定しているため，再生可能資源の生産弾力性 α_2 が上昇すると資本の生産弾力性 α_1 と労働の生産弾力性 α_3 はどちらかあるいは両方が共に減少しなくてはならない。ただし，ここでは偏微分つまり極限で調べているので，α_2 の微小変化に応じて α_1, α_3 が微小変化したとしても，符号の正負に対して影響はなく，比較静学分析上は無視してもよい。

8）直観的に説明すると以下のようになる。例えば資本蓄積，再生可能資源の蓄積が 99% なされた時点を $t=100$ だとする。そのとき総効用の積分は $\int_0^\infty e^{-\rho t}\log Y dt=\int_0^{100} e^{-\rho t}\log Y dt+\int_{100}^\infty e^{-\rho t}\log Y dt$ となるため，総効用の値は第一項よりも第二項の方に影響される。よって定常状態における総効用の比較静学を考える上では，最初から

定常状態にあるとみなして総効用を計算してもよい。

9）コブ・ダグラス型生産関数を仮定しているので代替の弾力性は 1 である。本節での議論は，一般的な代替の弾力性の議論ではない。

10）時政（1993）を参考にした。本書では自然資源として枯渇資源が扱われ，コブ・ダグラス型生産関数を持つ経済において，固定資本の産出弾性値が資源の産出弾性値より大きいならば，固定資本が生産において十分重要であり，枯渇資源の利用可能量の減少にもかかわらず，ある正の消費水準が維持可能となるということが証明されている。

参考文献

［1］金江亮（2008）「マルクス派最適成長論の現実性と価値・価格問題」京都大学『経済論叢』第 182 券第 5・6 号，pp. 133-144。

［2］金江亮（2010）「線型効用最適成長 2 部門モデルにおける価値・価格の動学」，京都大学『経済論叢』，第 184 巻第 4 号，pp. 37-43。

［3］ロシャングリ　ウフル・金江亮（2010），「3 部門「マルクス派最適成長論モデル」と強蓄積期間」，京都大学『経済論叢』第 183 巻・第 1 号，pp. 79-87。

［4］時政勗（1993）『枯渇資源の経済分析』牧野書店。

［5］柳瀬明彦（2002）『環境問題と経済成長理論』三菱経済研究所。

［6］山下裕歩・大西広（2002）「マルクス理論の最適成長論的解釈―最適迂回生産システムとしての資本主義の数学モデル―」『政経研究』第 78 号，pp. 25-33。

［7］Sorger, G.（1989）, On the Optimality and Stability of Competitive Paths in Continuous Time Growth Models, Journal of Economic Theory 48, 526-547.

［8］Tahvonen, O. and Kuuluvainen, J.（1991）“Optimal growth with renewable resources and pollution,” European Economic Review 35(2-3), pp. 650-651.