環境資本と経済成長

柳　瀬　明　彦

1　はじめに

経済の成長・発展と自然環境の保全との関係については、かつては両者は対立するものであり両立は不可能であるという見方が大勢を占めていたが、1980年代の終わりからは、「持続可能な発展（sustainable development）」というキーワードに代表されるように[1)]、経済成長と環境保全をともに実現していこうという考え方が主流になりつつある。

経済成長とは、国民所得の長期的な増加として一般に定義されるが、それは国民所得のうちの一部が貯蓄され投資活動に用いられるという、資本蓄積の過程であるとも言える。このような資本蓄積の過程をモデル化したのが、いわゆる経済成長理論であり、既に多くの研究成果が発表され、学問上の共有財産となっている[2)]。

環境汚染や資源枯渇といった環境問題が経済成長モデルの枠組みで扱われるようになったのは、1970年代の初頭からである。柳瀬（2002）において詳しくサーベイされているように、その当時は、人口成長や技術進歩などの外生的な要因なしでは持続的な成長は不可能であるとする新古典派成長理論をベースにモデルが構築されていたが、この10年ほどの間は、経済的なメカニズムを通じて長期的な成長率が内生的に決定されるという内生的成長理論の研究成果を応用したモデルが主流となっている。

さて、経済成長モデルにおいて、自然環境はどのように扱われるだろうか。これに関しては、いくつかのモデル化の方法があるが、本稿では自然環境を一種の資本ストックとして定式化する。環境を考慮に入れない経済成長理論においては、資本ストックとは通常、機械や工場といった物的な資本設備、あるいは知識や技術、人的資本といった非物的な資本を指すが、これらはいずれも人工（man-made）の資本ストックであると解釈される。本稿では、このような人工の資本ストックに加えて、「環境資本（environmental capital）」という自然の資本ストックをモデルに導入する。いわば、環境と経済成長に関する問題を、人工資本と環境資本という2種類の資本ストックがどのように時間を通じて蓄積していくか、という問題として定式化する。このようなモデル設定の下、本稿では、人間の経済活動において自然環境の果たす役割や影響が大きい場合に、経済は安定的、持続的に成長できるのかどうかという問題を中心に検討する。

本稿の構成は以下のようになっている。第2節では、本稿で「環境資本」と呼ぶものの一般的な性質について論じる。第3節では、環境資本を導入した経済成長の基本モデルを提示し、経済が持続的に成長していくための条件を導出する。結論を先取りして述べれば、持続的な成長が可能か否かは、財・サービスの生産の資本に関する収穫の性質に依存する。収穫逓減の場合、持続的な成長は不可能であり、すべての経済変数は長期的に一定水準となる。第4節では、このような収穫逓減のケースにおける経済成長経路の性質について議論する。これに対し、資本に関する収穫不変が成立する場合、財・サービスの生産および消費は正の一定率で成長し続けることが

1）「持続可能な発展」の概念については、詳しくは森田（1995）を参照。

2）経済成長理論に関する代表的なテキストとしては、Barro and Sala-i-Martin (1995), Aghion and Howitt (1998), Solow (2000) などが挙げられる。

可能となる。第 5 節ではこのようなケースを想定し、長期的な成長率の導出およびその性質の検討を行う[3)]。第 6 節で本稿のまとめと結論を述べる。

2　環境資本の経済的役割

自然環境は、人間の経済活動にとって不可欠のものである。それは以下で述べるように、 2 つの重要な側面を持っている。

第 1 に、自然環境は、「自然資源・エネルギーの供給者」という、人間の経済活動へのインプット（経済の資源的基盤）としての働きを持っている。人間の経済活動には、労働という人的な資源の他に様々な資源やエネルギーが投入されているが、それらの多くは究極的には自然が生み出したものである。自然の資源・エネルギーは、化石燃料や鉱物資源のように一度消費されると自然に再生されないタイプのもの（再生不可能資源あるいは枯渇性資源と呼ばれる）と、森林や水産物、大気や水の質のような再生可能資源とに二分される。これらの資源・エネルギーは、そのままの形で、あるいは加工されて、経済活動に利用されている。

第 2 に、自然環境は、人間の生産・消費活動の結果として排出された経済からの残余物を処理するという、「廃物の同化・吸収」の機能を持っている。経済活動の結果、汚染された大気や水、ゴミといった廃物が大気中や水中、あるいは地中に排出される。これらの排出物が自然の同化・吸収作用によって処理されることにより、地球上に廃物が充満するような事態は避けられる。

自然環境の持つ、以上の 2 つの機能は、前者が人間の経済活動へのインプットに関するものであるのに対して、後者はその逆方向、すなわち経済活動からのアウトプットに関するものであるという違いはあるものの、いずれも人間の経済活動になくてはならないものである。しかし、だからといって、資源の採取や汚染の排出を際限なく行うことには問題がある。そのような自然の再生能力や処理能力を超えた自然環境の過剰な利用は、資源枯渇や環境汚染という形で深刻な被害をもたらすことになるからである。

自然環境が人間の経済活動において果たす役割は、上に述べた 2 つの側面だけにとどまらない。それはまた、インフラストラクチャー（infrastructure）、あるいは宇沢（2000）のいう「社会的共通資本（social overhead capital）」として[4)]、生産活動や消費生活において重要な機能を果たしている。生産活動における自然環境の役割とは、「生産性の向上」であり、例えば、大気汚染が原因で労働者の健康が悪化することによる人的資本の生産性の低下や、逆に海洋汚染の減少の結果として良質の水産資源がたくさん獲れることなどが挙げられる。また、消費生活においては、自然環境は「アメニティーの供給者」としての役割を果たしている。アメニティー（amenity）とは、日本語で言えば「生活を楽しく、快適に、便利にするもの」である。緑が多い、空気が澄んでいる、野生の生物と触れ合うことができる等といった自然環境の働きは、それ自体が消費者の効用を高めるものである。

このような生産基盤あるいは生活基盤としての自然環境の機能は、資源・エネルギーの供給や廃物の同化・吸収といった働きとともに、経済において極めて重要な役割を担っている。本稿では、こうした経済活動における自然環境の諸側面を「環境資本」と呼ぶことにし、次節以降において、経済成長モデルの枠組みで分析を行う。

---

3 ）経済成長理論の言葉で表現するならば、第 4 節は新古典派成長モデルに基づいた分析であり、第 5 節は内生的成長モデルの枠組みでの分析である。

4 ）「社会的共通資本」とは、「それぞれの地域に住む人々が豊かな経済生活を営み、人間的に魅力ある社会を安定的に維持することを可能にするような社会的装置」として定義される。宇沢（2000）は、大気・森林・水・土壌などの自然環境を、道路・交通機関・上下水道・電力などの社会的インフラ、教育・医療・金融などの制度資本とともに、このような社会的共通資本を形成するものとして位置づけている。

3　モデル

3.1　基本設定

ある一国のマクロ経済を考える。この国における最終的な財・サービスの総生産量 Y は、次に示すようなマクロ生産関数に従って決定されるものとする：

$$Y = A(E)F(K,R). \tag{1}$$

ここでEは環境資本ストック、K は人工的な資本ストック[5)]、R は環境のフローの利用（自然資源の採取や環境汚染の排出）をそれぞれ表す。関数 $A(E)$ は環境資本が財・サービスの生産性に与える効果を表しており、$A(E)$ が微分可能であるならば、$A_E > 0$ が仮定される[6)]。

最終生産物 Y は、消費財としても、投資財としても利用可能であると仮定する[7)]。1 単位の最終生産物を投資に回すことにより 1 単位の新たな人工資本が生み出されるが、現存する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、人工資本ストックの蓄積は以下の微分方程式で表される[8)]：

$$\dot{K}(t) = Y(t) - C(t) - \delta K(t), \qquad K(0) = K_0. \tag{2}$$

ここで $K_0 > 0$ は人工資本ストックの初期水準、$\delta \geq 0$ は資本減耗率をそれぞれ表している。

環境資本のストックは、経済活動において自然資源の採取や環境汚染の排出という形で利用されることによって減少するが、自然は自らの再生能力によってストックを増加させることが可能である。このような性質を持つ環境資本ストックの蓄積を、Smulders (1995) に基づき、以下の微分方程式で表すことにする：

$$\dot{E}(t) = G(E(t)) - R(t), \qquad E(0) = E_0. \tag{3}$$

ここで $E_0 > 0$ は環境資本ストックの初期水準である。関数 $G(E)$ は 2 回連続微分可能で、再生可能資源モデルにおける資源成長関数と同様、以下の性質を満たすと仮定する：

$$G(0) = G(\overline{E}) = 0, \tag{4a}$$

$$G_E > (=, <)\, 0 \quad \text{for} \quad E < (=, >) E_M, \tag{4b}$$

$$G_{EE} < 0. \tag{4c}$$

ここで $\overline{E} > 0$ は、人間の経済活動による自然資源の採取や環境汚染の排出が存在しない場合に長期的に実現される環境資本ストックの水準、いわゆる「環境容量（carrying capacity）」である。また、E_M は環境資本の「最大持続可能収穫量（maximum sustainable yield）」の利用を可能にする環境資本ストックの水準である[9)]。仮定 (4a) は、環境資本ストックが $\overline{E}$ 以下のプラスの水準にあれば時間を通じて増加することを表している。仮定 (4b) および仮定 (4c) は、環境資本の増加率は現在のストックが少なければ大きいが、ストックが大きくなり $\overline{E}$ に近づくと

5）本稿における人工的資本ストックは、物的資本（physical capital）のみならず、知識資本（knowledge capital）や人的資本（human capital）のような非物的資本も含めた広義の概念として考えている。

6）関数の下付き添え字は、その変数による（偏）微分を表している。

7）あるいは、このモデルはマクロ経済モデルであるので、Y を集計化された最終的な財・サービスである国内総生産（GDP）と見なし、GDP の三面等価の関係が成立していると解釈することも可能である。

8）変数の上のドット記号は、時間に関する微分を表す。すなわち、$\dot{K}(t) \equiv dK(t)/dt$ である。

9）最大持続可能収穫量という言葉の意味は、次の通りである。いま、最大持続可能収穫量を R_M で表す。このとき、R_M を超える量の環境の利用は、毎期の環境資本の純増加分 $G(E) - R$ を負にするため、長期的には環境資本ストックの水準を 0 にしてしまう。したがって、R_M は環境の持続的な利用を可能にするような最大限の収穫量であるといえる。

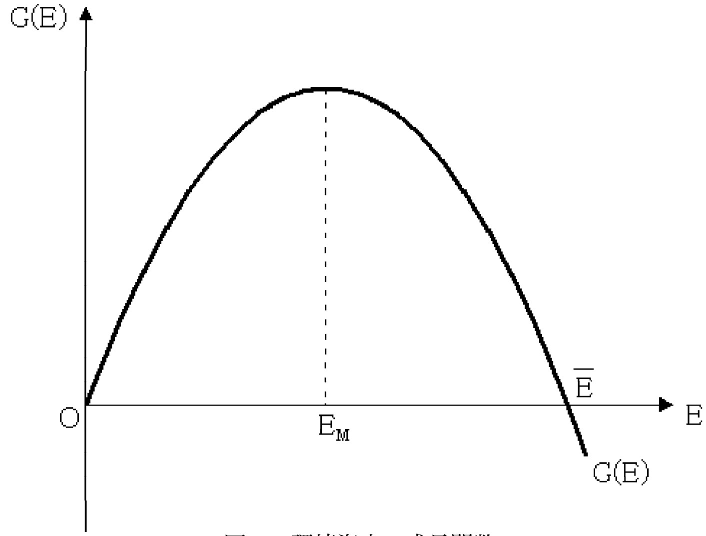


図１　環境資本の成長関数

小さくなることを意味している。以上に述べた環境資本の再生関数 $G(E)$ の性質を図で表したのが、図１である。

3.2　持続的な経済成長のための条件

環境資本が経済活動において重要な役割を果たしている場合、経済はいかなる条件の下で長期的に成長しつづけることができるだろうか。以下ではこの問題を検討しよう。

(１) 式および (２) 式より、人工資本ストックの成長率は

$$\frac{\dot{K}}{K}=\left(1-\frac{C}{Y}\right)\frac{A(E)F(K,R)}{K}-\delta \tag{5}$$

で表される。この値が正ならば、資本ストックの持続的な成長は可能となる。貯蓄率 $1-C/Y$ は 0 と 1 の間の値をとるので、$A(E)F(K, R)/K$ が資本ストックの成長に伴って低下しなければ、$\dot{K}/K$ は正の値をとりつづけることが可能である。反対に、$A(E)F(K, R)/K$ が資本ストックの成長に伴って低下していく場合には、$\dot{K}/K$ も低下しつづけて 0 になってしまうので、持続的な成長は不可能となる。$A(E)F(K, R)/K$ を K で偏微分すると、

$$\frac{\partial[A(E)F(K,R)/K]}{\partial K}=\frac{AF}{K^2}\left(\frac{F_K K}{F}-1\right) \tag{6}$$

となることから、持続的な経済成長のためには、生産の人工資本弾力性 $F_K K/F$ が 1 以上になる必要がある。すなわち、人工資本の収穫が逓減しないことが持続的な経済成長の条件となる。なお、生産の人工資本弾力性がちょうど 1 に等しい、すなわち財・サービスの生産が資本に関して収穫不変の性質を満たしている場合、K, Y, C はいずれも一定率で成長し、しかもこれら 3 つの経済変数の成長率はすべて等しくなる。

４　資本の収穫逓減の下での成長経路の分析

本節では、資本の収穫が逓減する、すなわち $F_K K/F<1$ である状況を想定し、その下での経済成長経路の性質について検討する。前節で見たように、収穫逓減のケースにおいては、持続的な経済成長は不可能である。したがって、本節において経済の長期的な均衡状態とは、すべての経済変数が一定水準となる状態として特徴付けられる。

4.1　外生的貯蓄率のケース

ここではまず、貯蓄率 $1-C/Y$ が一定であると仮定した下での経済成長経路を考える。家計の最適消費行動を導入し、貯蓄率を内生化した場合の分析は、次項で行う。

本項では、生産関数を以下のようなレオンチェフ型に特定化する：

$$F(K,R)=\min\{f(K),R\}. \tag{7}$$

ここで関数 $f(K)$ は 2 回連続微分可能で、$f_K>0$ および $f_{KK}<0$ を満たすものと仮定する。この仮定は、資本の限界生産力逓減の仮定に他ならない。生産要素が効率的に利用されていると仮定すると、(7) 式より、$f(K)=R$ が成立する。

貯蓄率を $s\in(0,1)$ で表すことにすると、この経済の成長経路は、次の微分方程式体系で表現される：

$$\begin{cases}\dot{K}=sA(E)f(K)-\delta K, & K(0)=K_0\\ \dot{E}=G(E)-f(K), & E(0)=E_0\end{cases}. \tag{8}$$

動学体系（ 8 ）を満たす人工資本ストック K と環境資本ストック E がもはや変化せず一定の値を取る、すなわち $\dot{K}=\dot{E}=0$ が成立する場合、この経済は「定常状態（steady state）」にあると定義される。定常状態は、経済システムの長期的な均衡状態であると考えられるが、任意の初期状態 (K_0,E_0) から出発する動学経路が長期的に定常状態に到達するか否かは、必ずしも自明のことではなく、検討を要する問題である。以下では、このような定常状態の安定性について、$K-E$ 平面における位相図（phase diagram）を用いて検討する。

まず、$\dot{K}=0$ を満たす K と E の軌跡である、$\dot{K}=0$ 線の性質を調べよう。

$$\frac{\partial\dot{K}}{\partial K}=sAf_K-\delta,\qquad \frac{\partial\dot{K}}{\partial E}=sA_Ef>0\quad\Rightarrow\quad \left.\frac{dE}{dK}\right|_{\dot{K}=0}=-\frac{sAf_K-\delta}{sA_Ef}>0 \tag{9}$$

より[10)]、$\dot{K}=0$ 線の形状は、図 2 に描かれるように、右上がりとなる。また、$\partial\dot{K}/\partial E>0$ より、$\dot{K}=0$ 線の上側では $\dot{K}>0$ が、下側では $\dot{K}<0$ が、それぞれ成立する。

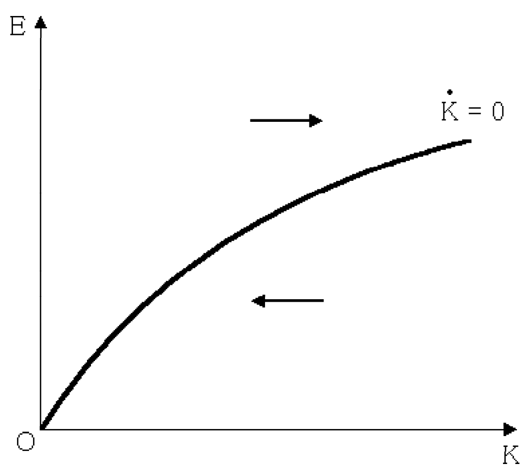


図 2　$\dot{K}=0$ 線

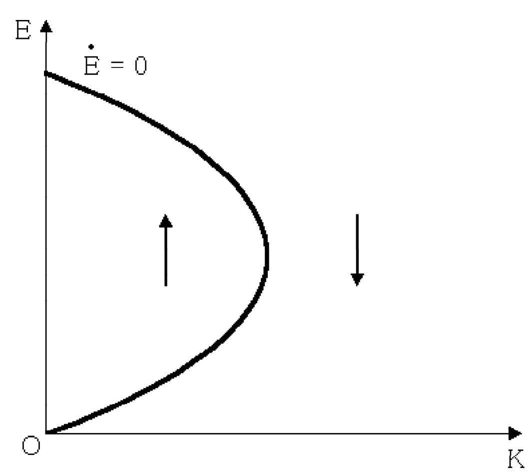


図 3　$\dot{E}=0$ 線

$\dot{E}=0$ を満たす K と E の軌跡である、$\dot{E}=0$ 線の性質も、同様に調べられる。

10）定常状態では $sA(E)f(K)-\delta K=0$ が成立しているため、$f_{KK}<0$ という仮定を考慮に入れると、$sAf_K-\delta<0$ となる。

$$\frac{\partial \dot{E}}{\partial K} = -f_K < 0, \qquad \frac{\partial \dot{E}}{\partial E} = G_E \quad \Rightarrow \quad \left.\frac{dE}{dK}\right|_{\dot{E}=0} = \frac{f_K}{G_E} \tag{10}$$

より、$\dot{E}=0$ 線の形状は、図 3 に描かれるように、E が小さいときには右上がり、E が大きいときには右下がりとなる。また、$\partial\dot{E}/\partial K>0$ より、$\dot{E}=0$ 線の左側では $\dot{E}>0$ が、右側では $\dot{E}<0$ が、それぞれ成立する。

この経済の定常状態は、$\dot{K}=0$ 線と $\dot{E}=0$ 線の交点 $(K^{\star}, E^{\star})$ で表される。動学経路（8）が $(K^{\star}, E^{\star})$ に収束するか否かについては、収束するケース（図 4）と収束しないケース（図 5）の両方の可能性が考えられる。前者においては、定常状態で $G_E<0$ が成立しているが、後者においては $G_E>0$ となっている[11)]。

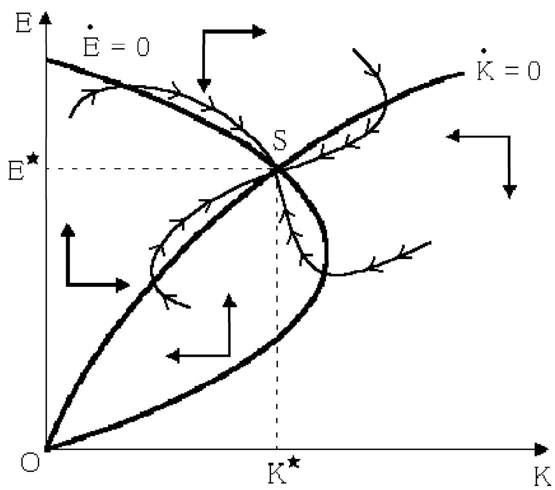


図 4　動学経路が定常状態に収束するケース

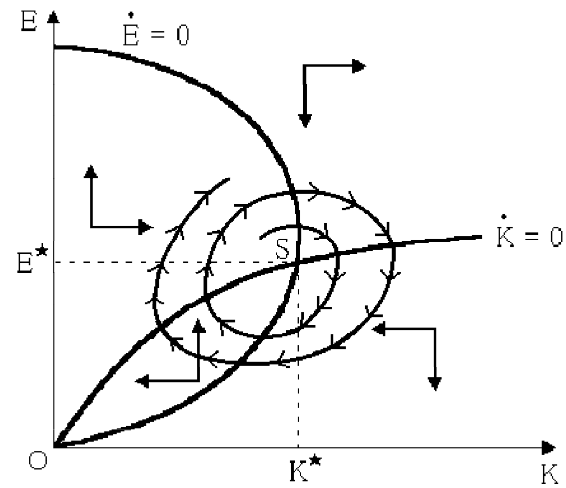


図 5　動学経路が定常状態に収束しないケース

4.2　貯蓄率の内生化：最適成長モデル

前項では、貯蓄率 s が一定であるという仮定の下での、いわば「実現可能な成長経路（feasible growth path）」の性質が検討された。このような実現可能な成長経路は、一般に資源配分の観点からは社会にとって最適なものとはならない。そこで、本項では、社会的な厚生（後で定義する）を最大にするような「最適な成長経路（optimal growth path）」を導出し、その性質について検討する。

このような社会的に最適な成長経路は、例えばこの経済（環境資本の蓄積の経路も含めた）の基本構造を正しく知っている「社会計画者（social planner）」が存在し、資源配分に関わる全ての決定を行う、と想定することで実現されうる。この想定は言うまでもなく非現実的なものであり、現実の市場経済システムにおいては自然環境に関わる問題は「外部性（externality）」として捉えられ、市場取引では適切に扱われないことが多い。ただ、このような市場の失敗も、各種の環境政策の実施によって環境資本の利用料が適切に設定されれば、解決することができる。したがって、ここで考える最適成長経路は、自然環境の存在に伴う諸々の外部性が完全に内部化され

11）数学的には次のように説明される。動学体系(8)を定常解の近傍で線形近似すると、

$$\begin{bmatrix}\dot{K}\\ \dot{E}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}sAf_K-\delta & sA_Ef\\ -f_K & G_E\end{bmatrix}\begin{bmatrix}K-K^{\star}\\ E-E^{\star}\end{bmatrix}$$

を得る。$G_E<0$ の場合、上の式におけるヤコビ行列の行列式とトレース（対角成分の和）の符号はそれぞれ正と負となり、したがって定常点は安定的であることが分かる。これに対して $G_E>0$ の場合は、ヤコビ行列式が負になる可能性やトレースが正になる可能性があるため、必ずしも定常点の安定性は保証されない。

た理想的な状況における、分権化された市場経済の成長経路としても解釈されうる。

この経済は同質的な消費者から構成され、代表的消費者の効用水準は財・サービスの消費水準 C と環境資本ストックの水準 E に依存すると仮定する。消費者の効用が環境資本にも依存するというのは、環境のアメニティーとしての機能を定式化したものである。ある時点における代表的消費者の効用関数を

$$U = U(C,E) \tag{11}$$

で表すことにする。効用関数 $U(C,\ E)$ は、以下の性質を満たすと仮定する：

$$U_C > 0,\quad U_{CC} < 0,\quad \lim_{C\to 0} U_C = \infty,\quad \lim_{C\to\infty} U_C = 0, \tag{12a}$$

$$U_E > 0,\quad U_{EE} < 0,\quad \lim_{E\to 0} U_E = \infty,\quad \lim_{E\to\infty} U_E = 0, \tag{12b}$$

$$U_{CC}U_{EE} - (U_{CE})^2 > 0. \tag{12c}$$

仮定 (12a) と仮定 (12b) はそれぞれ、消費と環境資本ストックの限界効用が逓減することを表している。仮定 (12c) は、効用関数が凹関数であることを表している。なお、交差偏微分 U_{CE} の符号に関しては、ここでは特に仮定を設けない。

生産関数については、(7) 式の代わりに、以下の性質を仮定する：

$$F_K > 0,\quad F_{KK} < 0,\quad \lim_{K\to 0} F_K > \rho + \delta,\quad \lim_{K\to\infty} F_K = 0, \tag{13a}$$

$$F_R > 0,\quad F_{RR} < 0,\quad \lim_{R\to 0} F_R = \infty,\quad \lim_{R\to\infty} F_R = 0, \tag{13b}$$

$$F_{KR} > 0,\quad F_{KK}F_{RR} - (F_{KR})^2 > 0. \tag{13c}$$

仮定 (13a) と仮定 (13b) はそれぞれ、人工資本ストックと環境資本のフロー投入量の限界生産力が逓減するという仮定を表している。仮定 (13c) は、人工資本と環境資本フローが代替的な生産要素であり、$F(K,\ R)$ が凹関数であることを表している。

最適成長理論の伝統に則り、社会的厚生を、代表的消費者の効用（瞬時的効用）の割引現在価値合計、すなわち

$$\int_0^\infty e^{-\rho t} U(C(t), E(t))dt \tag{14}$$

で定義する。社会的最適解は、社会的厚生 (14) を、(2) 式および (3) 式の制約の下で最大化することによって求められる。これは典型的な動学的最適化問題であり、その解法としては、変分法、最適制御理論、動的計画法があるが、何れの方法からも同じ最適条件が導かれる[12)]。ここでは、最適制御理論を用いて最適解を導出する。

経常価値ハミルトニアン（current value Hamiltonian）を

$$H = U(C,E) + m_K[A(E)F(K,R) - C - \delta K] + m_E[G(E) - R] \tag{15}$$

で定義する。ここで m_K と m_E はそれぞれ、人工資本と環境資本の社会的限界価値あるいはシャドープライスを表している。最適制御理論より、最適解の必要条件は

$$\frac{\partial H}{\partial C} = 0 \quad \Rightarrow \quad U_C(C,E) = m_K, \tag{16}$$

12）動学的最適化問題の解法については、例えば Kamien and Schwartz (1991) に詳しい解説がある。

$$\frac{\partial H}{\partial R}=0 \quad \Rightarrow \quad m_K A(E) F_R(K,R)=m_E, \tag{17}$$

$$\dot{m}_K=\rho m_K-\frac{\partial H}{\partial K}=m_K[\rho+\delta-A(E)F_K(K,R)], \tag{18}$$

$$\dot{m}_E=\rho m_E-\frac{\partial H}{\partial E}=m_E[\rho-G_E(E)]-U_E(C,E)-m_K A_E(E)F(K,R) \tag{19}$$

で与えられる。(16) 式と (17) 式はそれぞれ、各時点における消費水準 C と環境資本のフローの利用水準 R の最適な決定を表しており、(18) 式と (19) 式はそれぞれ、人工資本のシャドープライス m_K と環境資本のシャドープライス m_E が、最適経路上でどのように時間を通じて変化していくかを表している。

(16) 式より、最適な消費水準 C は E と m_K に依存するといえるので、これを $C(E, m_K)$ と表現しよう。(16) 式を全微分して整理すると、

$$C_E=-\frac{U_{CE}}{U_{CC}}, \quad C_{m_K}=\frac{1}{U_{CC}}<0 \tag{20}$$

を得る。同様に、(17) 式から、最適な環境の利用水準 R が $R(K, E, m_K, m_E)$ と表現される。(17) 式を全微分して整理すると、

$$\begin{gathered} R_K=-\frac{F_{RK}}{F_{RR}}>0, \quad R_E=-\frac{A_E F_R}{A F_{RR}}>0, \\ R_{m_K}=-\frac{F_R}{m_K F_{RR}}>0, \quad R_{m_E}=\frac{1}{m_K A F_{RR}}<0 \end{gathered} \tag{21}$$

を得る。

$C=C(E, m_K)$ および $R=R(K, E, m_K, m_E)$ を、２つの資本 K および E の蓄積方程式である（２）式と（３）式、そしてこれらのシャドープライスの時間変化を表す (18) 式と (19) 式に代入することにより、この経済の最適経路が (K, E, m_K, m_E) の４変数の微分方程式体系

$$\begin{cases} \dot{K}=A(E)F(K,R(K,E,m_K,m_E))-C(E,m_K)-\delta K, \\ \dot{E}=G(E)-R(K,E,m_K,m_E), \\ \dot{m}_K=m_K[\rho+\delta-A(E)F_K(K,R(K,E,m_K,m_E))], \\ \dot{m}_E=m_E[\rho-G_E(E)]-U_E(C(E,m_K),E)-m_K A_E(E)F(K,R(K,E,m_K,m_E)) \end{cases} \tag{22}$$

として特徴付けられる。

動学体系 (22) の定常状態は、$\dot{K}=\dot{E}=\dot{m}_K=\dot{m}_E=0$ を満たす (K^*, E^*, m_K^*, m_E^*) で定義される。動学経路がこの定常状態に収束するか否かは、定常状態で評価した (22) 式のヤコビ行列の特性根を調べれば分かる。貯蓄率が一定の場合、$G_E<0$ が成立していれば定常状態は安定的であることが前項において示されたが、貯蓄率が内生的に決定される場合には、成長経路が定常状態に収束するための条件はより複雑である。数学付録Ａで詳しく説明されるように、$G_E<0$ に加えて、環境資本が財・サービスの生産性にあまり大きな影響を与えず ($A_E\approx 0$, $A_{EE}\approx 0$)、また消費者にとって財・サービスの消費 C と環境資本ストック E は代替的 ($U_{CE}\geq 0$) であるならば、定常点へ向かう鞍点経路（saddle path）の存在が示される。すなわち、これらの条件が満たされるならば[13)]、消費と投資との間の配分および環境資本のフローの利用水準が最適に選択される経済において、初期時点の消費水準 $C(0)$ および環境の利用水準 $R(0)$ が資本ストックの初期水準 K_0 および E_0 の値に応じて適切に選ばれ、鞍点経路上を経済は動いていく。

13) ここで示したのは鞍点経路が存在するための十分条件であり、これらの条件が満たされなくても定常点が鞍点となる可能性は存在する。

5　資本の収穫一定の下での持続的な経済成長

3.2節で議論したように、この経済が持続的に成長していくための条件は、総生産の人工資本に関する収穫が（長期的に）逓減しないことであり、特に収穫不変のケースにおいては、各経済変数は一定の率で成長する[14)]。本節では、生産の人工資本弾力性 $Y_K K/Y = F_K K/F$ が 1 となる収穫不変のケースを想定し、4.2節で分析した最適成長経路が長期的に達成する成長率を求め、その性質を議論する。

5.1　ケインズ＝ラムゼイ・ルール

長期的な成長率を求める前に、最適な成長経路の性質について論じておこう。(16) 式および (18) 式より、最適な消費水準の成長率が

$$\frac{\dot{C}}{C}=\frac{1}{\sigma_C}\left[A(E)F_K(K,R)-\delta+\frac{U_{CE}\dot{E}}{U_C}-\rho\right] \tag{23}$$

と求められる。ここで $\sigma_C \equiv -U_{CC}C/U_C$ は、消費の限界効用の（消費）弾力性である。

(23) 式は、最適成長モデルにおける「ケインズ＝ラムゼイ・ルール（Keynes-Ramsey rule）」と呼ばれる条件に対応しているが、この式は、現在消費を我慢することによって得られる将来の効用に対する限界的な寄与の大きさである「社会的利子率（social rate of interest）」が時間選好率 ρ を上回れば消費は将来に先延ばしされる、ということを意味している。この社会的利子率は、以下の 2 つの要因から構成される。第 1 に、現在消費の減少はその分だけ所得が貯蓄に回ることを意味しているが、その貯蓄は人工資本の蓄積に充てられる。人工資本の純限界生産力 $AF_K-\delta$ は、資本蓄積により増加した資本ストックが将来の生産量をどれだけ増加させるかを表している。第 2 に、効用水準は財・サービスの消費のみならず環境資本ストックの水準 E にも依存するので、E が時間を通じて変化することにより消費の限界効用は影響を受け、したがって消費の成長率も変化しうる。$U_{CE}\dot{E}/U_C$ は、この効果を表している。

また、(23) 式における $1/\sigma_C$ は、異時点間の代替の弾力性を表している。その意味は、次のように説明される。(23) 式は、他の条件一定の下で、σ_C が大きいほど $\dot{C}/C$ が小さくなる、すなわち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。逆に言えば、$1/\sigma_C$ が大きいほど、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る。したがって、$1/\sigma_C$ は現在の消費と将来の消費とがどの程度代替されやすいのかを表す指標であると解釈される。

5.2　長期的な最適成長率の決定

3.2節で議論したように、生産の人工資本弾力性が 1 の場合、長期的な定常状態における成長経路は、K, Y, C が同率で成長する均斉成長経路（balanced growth path）として特徴付けられる。この共通の成長率を以下では経済成長率と呼び、g で表すことにするが、本項では成長率 g の長期的な水準がどのように決定されるのかを調べる。

均斉成長経路上では、環境資本のストック E とフロー R はともに一定の値をとり続ける。このことは、次のようにして示される。環境資本ストックの成長率は、(3) 式より

$$\frac{\dot{E}}{E}=\frac{G(E)}{E}-\frac{R}{E} \tag{24}$$

で表される。(24) 式は、環境資本ストックが一定率で成長する均斉成長経路上では R/E は一定、すなわち環境資

14）収穫逓増のケースにおいては、各経済変数の成長率は加速度的に上昇し続ける。

本のストック E とフロー R の成長率が等しくなることを意味している。しかし、環境資本ストックの成長関数 $G(E)$ の形状（図1を参照）より、E の増加は $G(E)/E$ の低下をもたらすので、長期的には $\dot{E}/E=0$ とならなければならない。したがって、均斉成長経路上では E と R はともに一定となる。

以上の結果をまとめると、均斉成長経路上では

$$\frac{\dot{K}}{K}=\frac{\dot{Y}}{Y}=\frac{\dot{C}}{C}=g, \qquad \dot{E}=\dot{R}=0 \tag{25}$$

が成立することが分かる。

以下では、生産関数に関して、$A(E)=E^{\alpha}$, $F(K,R)=KR^{\beta}$, $\alpha,\ \beta\in(0,1)$ という特定化を行う。このとき、

$$Y=E^{\alpha}KR^{\beta} \quad \Rightarrow \quad \frac{Y}{K}=AF_K=E^{\alpha}R^{\beta} \tag{26}$$

より、人工資本の限界生産力と平均生産力は等しくなる。それはまた、長期的に一定となることが (25) 式より明らかである。効用関数に関しても、以下の分析では次の形に特定化する：

$$U(C,E)=\ln C+\chi\ln E. \tag{27}$$

ここでχは正のパラメータである。χは、環境に対する消費者の選好の強さを表すパラメータであると解釈される。

(16) 式、(17) 式、(19) 式、(25) 式、(26) 式、(27) 式を用いて、資本ストックの成長率を表す (5) 式を書き換えると、

$$g=\left\{\frac{\chi+\alpha}{\chi}-\frac{\beta[\rho-G_E(E)]E}{\chi G(E)}\right\}E^{\alpha}G(E)^{\beta}-\delta \tag{28}$$

を得る[15]。また、(25) 式、(26) 式、そして (27) 式を用いると、最適消費水準の成長率を表す (23) 式は、

$$g=E^{\alpha}G(E)^{\beta}-\delta-\rho \tag{29}$$

と書き換えられる。(28) 式は、各時点で消費および環境資本のフロー投入量が最適に選択されるような実現可能な成長経路における、経済成長率 g と環境資本ストック E の組み合わせを表している。一方、(29) 式は、異時点間の最適消費配分条件であるケインズ＝ラムゼイ・ルールが満たされる下での g と E の組み合わせを表している。(28) 式と (29) 式を同時に解くことにより、最適な成長率 g と環境資本ストック E の長期均衡水準が求められる。

(28) 式と (29) 式はいずれも非線型の方程式であるので、一般に明示的な解を求めるのは困難である。そこで、以下では図解により g と E の長期均衡水準の決定について述べる。(28) 式を満たす g と E の関係を表す曲線を ss 線、(29) 式を満たす g と E の関係を表す曲線を dd 線とそれぞれ名付けよう。言うまでもなく、dd 線と ss 線の交点がこのモデルの長期均衡点である。

(28) 式と (29) 式をそれぞれ E で偏微分すると、

$$\left.\frac{\partial g}{\partial E}\right|_{ss}=\left\{\frac{\chi+\alpha}{\chi}-\frac{\beta[\rho-G_E(E)]E}{\chi G(E)}\right\}\frac{\partial[E^{\alpha}G(E)^{\beta}]}{\partial E}-\Gamma(E), \tag{30}$$

$$\left.\frac{\partial g}{\partial E}\right|_{dd}=\frac{\partial[E^{\alpha}G(E)^{\beta}]}{\partial E}=E^{\alpha}G(E)^{\beta}\left[\frac{\alpha}{E}+\frac{\beta G_E(E)}{G(E)}\right] \tag{31}$$

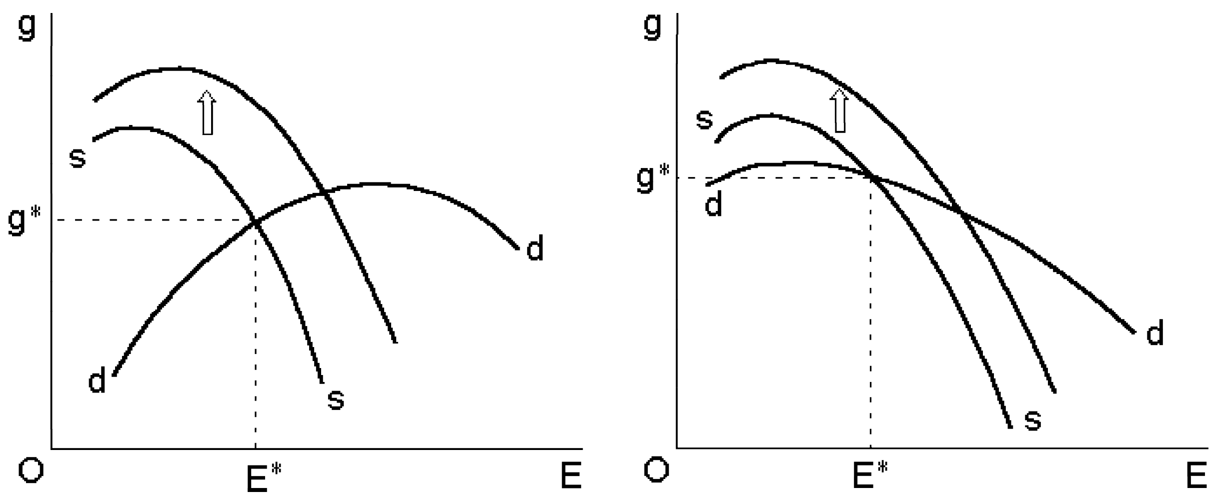
を得る。ここで

$$\Gamma(E)\equiv\frac{\beta\{[G(E)-G_E(E)E][\rho-G_E(E)]-G_E(E)G_{EE}(E)E\}}{\chi[G(E)]^2}E^{\alpha}G(E)^{\beta}\geq 0$$

15）(28)式の導出に関しては、詳しくは数学付録 B を参照。

である[16)]。(31) 式の符号は、E が小さいときには $G_E(E)>0$ より正だが、E が大きい場合には負となる。また、(31) 式を $E=E_M$ で評価すると、$G_E(E_M)=0$ より正となる。したがって、$g-E$ 平面における dd 線の形状は逆 U 字型で、その頂点となる E の水準は E_M よりも右側に位置する。ss 線も dd 線と同様に逆 U 字型となるが、曲線が右上がりから右下がりに転ずる点は dd 線よりも左側に位置する。なぜならば、(30) 式の右辺第 1 項は (31) 式と同様、E の増加に伴ってはじめは増加するが、やがて減少し、また第 2 項は非正となるからである。

ss 線と dd 線に関する以上の準備的考察を基にして、長期的に実現される経済成長率と環境資本ストックの組み合わせを図示したものが、図 6 である。図 6 に描かれているように、長期均衡点の可能性としては、2 つのケースが考えられる。図6 (a) においては、dd 線の右上がりの部分で ss 線と dd 線が交わり、図6 (b) においては、dd 線の右下がりの部分で ss 線と dd 線が交わる。



(a) β が大きい場合や χ が小さい場合　　(b) β が小さい場合や χ が大きい場合

図 6　長期的な経済成長率と環境資本ストック水準の決定

5.3　環境に対する選好の高まりと長期成長率

(28) 式および (29) 式より明らかなように、長期的な成長率は、パラメータ α および β の値や関数 $G(E)$ の形状に規定される技術的要因とともに、ρ や χ といった選好パラメータにも依存して決定される。Solow（2000）によって詳しく解説されているように、内生的成長理論においては、長期的な成長率が選好パラメータに依存することが大きな特徴である。特にここでは、環境に対する選好を特徴付けるパラメータである χ の存在が興味深い。そこで、χ 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のか、以下で検討しよう。

(28) 式を χ で微分して整理すると、

$$\left.\frac{\partial g}{\partial \chi}\right|_{ss}=-\frac{1}{\chi}\left\{\frac{\alpha}{\chi}-\frac{\beta[\rho-G_E(E)]E}{\chi G(E)}\right\}E^{\alpha}G(E)^{\beta}>0 \tag{32}$$

となることから[17)]、ss 線は χ の上昇によって上方にシフトすることが分かる。一方、dd 線は、(29) 式を見れば明

16) $C/Y\in(0,1)$ のためには、$\rho-G_E(E)>0$ でなければならない。また、関数 $G(E)$ の性質から $G_{EE}(E)<0$ である。さらに、$G(E)-G_E(E)E$ は $E=0$ のときに $0, E=\overline{E}$ のときに $-G_E(\overline{E})\overline{E}>0$ であり、E について単調増加なので、$E\in[0,\overline{E}]$ に対して非負である。

17) (28)式より、(32)式の大括弧の中は $-C/Y$ に等しいことが分かる。

らかなように、環境に対する選好の変化によって影響を受けない。

χ の上昇が長期的な成長率を高めるか否かは、ss 線が dd 線のどの部分で交わるかに依存する。dd 線の傾きを、定常均衡点 (g^*, E^*) で評価すると、

$$\left.\frac{\partial g}{\partial E}\right|_{(g^*,E^*)}=\rho\left[\beta E^{*\alpha}G(E^*)^{\beta-1}-\frac{\chi}{E^*}\right] \tag{33}$$

を得るが、この式の符号は β が大きい場合や χ が小さい場合には正になり、反対の場合には負になると考えられる。したがって、β が大きい場合や χ が小さい場合には、定常均衡点において dd 線が右上がりになっているため (図6 (a) のケース)、環境に対する意識の高まりによって ss 線が上方にシフトする結果、長期的な成長率は上昇する。反対に β が小さい場合や χ が大きい場合には（図6 (b) のケース)、環境に対する意識の高まりは長期的な成長率を低下させることになる。

上に述べた結果は、直観的には次のように説明される。環境に対する選好の高まりは、経済活動がより低環境負荷型になることを要求するが、これは経済成長への妨げとなりうる。しかし、環境資本フローの生産弾力性 β が大きければ、あまり環境資本の利用に依存することなく最終財を生産することが可能なので、環境に対する負荷は小さく済むだろう。また、環境は消費者にとってのアメニティーという消費財としての機能と財・サービスの生産性を高める生産要素としての機能を持っているが、環境に対する選好を表すパラメータ χ は言うまでもなく消費財としての環境の価値を表すので、χ の値が小さい場合、χ の上昇による環境改善の努力の結果は生産性の上昇という形で経済に便益をもたらす。一方、χ の値が大きい場合は、環境改善の便益は生産性の上昇よりもむしろ消費者の効用を高める方に働くことになる。

5.4 政策的含意

前項で述べた、環境に対する選好の高まりが長期的な成長率に及ぼす影響は、環境政策と経済成長に関する議論においても重要なインプリケーションを持つ。環境に対する選好の高まりは、環境汚染の排出や自然資源の利用を抑えるような経済活動を要求することにつながるが、分権化された市場経済においては、政策当局が環境税率を引き上げたり環境規制を強化することで、これらの要求への対応が行われるからである。したがって、前項の議論を応用することで、次のことが言える。すなわち、環境資本フローの生産弾力性 β が大きく、環境資本の利用にあまり依存することなく最終財を生産することが可能な場合や、環境に対する選好を表すパラメータ χ が小さく、この経済において環境資本が消費財（消費者にとってのアメニティー）としてよりも生産要素（財・サービスの生産性を高める）として重要な役割を果たしている場合、環境政策の強化は長期的な成長率を高めることになる。

より厳しい環境政策の実施は、景気を悪化させ経済の停滞をもたらす恐れがあるとの理由で、産業界からの反発を受けることがしばしばある。しかし、ここで得られた結果によると、環境政策を強化することが必ずしも経済成長を鈍化させるわけではなく、場合によっては経済成長率を高める可能性も見出される。環境保全を進めつつ、さらなる経済成長を達成することは、経済の持続可能な発展の一つのあり方であるといえるが、以上の議論から、それは理論的には十分可能なことであると言える。問題は、現実の経済において、そのような環境保全と経済成長との両立を実現していくためには具体的に何をどうするべきか、という点であるが、これに関しては今後さらに突きつめて議論していく必要があるのは言うまでもない。

6 まとめと結論

本稿では、自然環境が一種の資本ストックとして人工的な資本とともに重要な役割を果たすような経済におけ

る、長期的な成長経路の性質について検討してきた。環境資本は再生可能資源と同様、そのストック水準が小さいときには自然に増加していくが、ある程度の水準に達するとその成長が止まるという性質を持つものと本稿では仮定した。この仮定の下では、環境資本ストックは長期的に一定水準となるが、人工資本の蓄積が持続的に行われるならば、財・サービスの生産および消費が成長し続けることは可能となる。このような人工資本の持続的な蓄積は、財・サービスの生産関数が人工資本に関して収穫逓減の場合には不可能であるが、収穫不変あるいは収穫逓増の場合には可能となる。本稿ではこの結果をまず示した後、収穫逓減のケースと収穫不変のケースのそれぞれについて、長期的な成長経路の性質を議論した。

人工資本に関する収穫逓減が成立するケースにおいては、環境資本ストックに加えて人工資本ストックも長期的に一定水準となるが、そこで重要な論点となるのが、経済成長経路がそのような定常状態に収束するか否かという問題である。本稿では、貯蓄率が外生的に与えられている場合と経済主体の最適化行動から内生的に決定される場合の両方のケースについて、成長経路が定常状態に収束するための条件を導出した。

人工資本に関する収穫不変が成立するケースにおいては、財・サービスの生産および消費が人工資本ストックと同じ率で成長し続けることになるが、これらの変数の成長率が長期的にどのような水準に決定されるのか、また選好や技術、制度および政策といった要因によって経済成長率がどのような影響を受けるのかは、極めて興味深い問題である。本稿では、長期的な成長率の決定について検討した後、環境に対する選好の高まりや環境政策の強化といった、より環境保護的な社会の変化が、長期的な成長率に対してどのような影響をもたらすのかを議論した。その結果、環境保全を進めつつ、さらなる経済成長を達成することは理論的に可能であることが示された。この結果は、環境保全と経済成長を両立し、持続可能な発展を現実のものとするための理論的な礎となるものであるが、重要なのはこの結果を今後の具体的な政策論議にいかに発展させるかという点であり、それは今後の課題として残されている。

数学付録

A　最適成長経路 (22) の性質

最適成長経路を特徴付ける動学体系 (22) を定常解 $(K^*, E^*, m_K{}^*, m_E{}^*)$ の近傍で線形近似すると、

$$\begin{bmatrix} \dot{K} \\ \dot{E} \\ \dot{m}_K \\ \dot{m}_E \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} K - K^* \\ E - E^* \\ m_K - m_K^* \\ m_E - m_E^* \end{bmatrix} \tag{A.1}$$

を得る。ここで J は体系 (22) のヤコビ行列であり、

$$J \equiv \begin{bmatrix} \rho + AF_R R_K & B_1 & AF_R R_{m_K} - C_{m_K} & AF_R R_{m_E} \\ -R_K & G_E - R_E & -R_{m_K} & -R_{m_E} \\ B_2 & -m_K(A_E + AF_{KR}R_E) & -m_K AF_{KR} R_{m_K} & -m_K AF_{KR} R_{m_E} \\ -m_K A_E(F_K + F_R R_K) & B_3 & B_4 & B_5 \end{bmatrix}, \tag{A.2}$$

$$B_1 \equiv A_E F + AF_R R_E - C_E,$$
$$B_2 \equiv -m_K A(F_{KK} + F_{KR} R_K),$$
$$B_3 \equiv -m_E G_{EE} - U_{EC} C_E - U_{EE} - m_K A_{EE} F - m_K A_E F_R R_E,$$
$$B_4 \equiv -U_{EC} C_{m_K} - A_E F - m_K A_E F_R R_{m_K},$$
$$B_5 \equiv \rho - G_E - m_K A_E F_R R_{m_E}$$

で表される。

$\mathrm{tr}\,J$, Ψ_2, Ψ_3, Δ をそれぞれ、(A. 2) 式で与えられたヤコビ行列 J のトレース（対角要素の和）、２次の主小行列式の合計、３次の主小行列式の合計、行列式とすると、線形連立微分方程式 (A. 1) の特性根は、特性方程式

$$\xi^4 - \mathrm{tr}\,J\xi^3 + \Psi_2 \xi^2 - \Psi_3 \xi + \Delta = 0 \tag{A.3}$$

の解 ξ_i, $i=1, 2, 3, 4$ である。Dockner (1985) の Theorem 1 を適用することにより、４つの特性根は

$$\xi_{1,2,3,4} = \frac{\rho}{2} \pm \sqrt{\frac{\rho^2}{4} - \frac{\Omega}{2} \pm \frac{\sqrt{\Omega^2 - 4\Delta}}{2}} \tag{A.4}$$

と求められる $(\Omega \equiv \Psi_2 - \rho^2)$。$\Delta > 0$ かつ $\Omega < 0$ ならば、４つの特性根のうち２つが負の実部、２つが正の実部を持つので、定常点は鞍点となることが、Tahvonen（1991）によって示されている。ヤコビ行列 (A. 2) より、A_E および A_{EE} が十分小さく、$U_{CE} \geq 0$ かつ $G_E < 0$ ならば、$\Delta > 0$ および $\Omega < 0$ が成立することが、計算によって確かめられる。したがって、A_E および A_{EE} が十分小さく、$U_{CE} \geq 0$ かつ $G_E < 0$ ならば、定常点は鞍点となる。

B　(28) 式の導出

(16) 式と (17) 式より、C/Y は

$$\frac{C}{Y} = \frac{U_C C}{m_E E} \frac{F_R R}{F} \frac{E}{R} \tag{B.1}$$

と求められる。一方、(16) 式と (19) 式より、

$$\frac{\dot{m}_E}{m_E} = \rho - G_E - \frac{U_C C}{m_E E}\left(\frac{U_E E}{U_C C} + \frac{Y}{C}\frac{A_E E}{A}\right) \tag{B.2}$$

が成立する。均斉成長経路上では $\dot{m}_E/m_E$ は一定になっていなければならないが、生産関数や効用関数についての特定化である (26) 式および (27) 式より、そのためには $U_C C/(m_E E)$ が一定になる必要がある。ところが、(25) 式と (27) 式より、結局

$$\frac{\dot{m}_E}{m_E} = 0 \tag{B.3}$$

が長期的に成立する。したがって、(B. 2) 式と (B. 3) 式、および生産関数と効用関数についての特定化より、

$$\frac{U_C C}{m_E E} = \frac{\rho - G_E}{\chi + \alpha Y/C} \tag{B.4}$$

を得る。(B. 4) 式を (B. 1) 式に代入したものを、さらに (26) 式とともに (5) 式に代入し、$\dot{K}/K = g$ と置くことにより、(28) 式が導かれる。

参考文献

[1] Aghion, P. and P. Howitt (1998), *Endogenous Growth Theory*, MIT Press, Cambridge.

[2] Barro, R. J. and X. Sala-i-Martin (1995), *Economic Growth*, McGraw-Hill, New York.

[3] Dockner, E. J. (1985), Local Stability Analysis in Optimal Control Problems with Two State Variables, in G. Feichtinger (ed.), *Optimal Control Theory and Economic Analysis 2*, North-Holland, Amsterdam.

[4] Kamien, M.I. and N.L. Schwartz (1991), *Dynamic Optimization: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management*, North Holland, Amsterdam.

[5] 森田恒幸（1995）「持続可能な発展論」慶應義塾大学経済学部環境プロジェクト編『地球環境経済論［下］』慶應義塾大学出版会.

[6] Solow, R. M. (2000), *Growth Theory: An Exposition*, Second Edition, Oxford University Press, New York.［福岡正夫訳『成長理論』第 2 版, 岩波書店, 2000 年］

[7] Smulders, S. (1995), Environmental Policy and Sustainable Economic Growth, *De Economist* **143**, 163–195.

[8] Tahvonen, O. (1991), On the Dynamics of Renewable Resource Harvesting and Pollution Control, *Environmental and Resource Economics* **1**, 97–117.

[9] 宇沢弘文（2000）『社会的共通資本』岩波書店.

[10] 柳瀬明彦（2002）『環境問題と経済成長理論』三菱経済研究所.