

環境資源利用と持続的成長*

細谷 圭[†]

一橋大学大学院経済学研究科博士後期課程

熊本 尚雄[‡]

一橋大学大学院経済学研究科博士後期課程

2002年12月

概要

本論は、再生可能資源および枯渇性資源の双方の動学プロセスを考慮した内生的成長モデルを構築して、環境資源の利用に関連するさまざまな問題を持続的成長とのリンケージから分析するという「環境のマクロ経済分析」を展開する。選好パラメータや生産構造パラメータをはじめとした種々のパラメータが変化した場合の、マクロ経済の反応がさまざまな角度から検討される。こうした一連の分析によって、汚染物質を排出する化石燃料のようなエネルギーからクリーンエネルギーへのシフトが、結果的にはより高いレベルの持続的成長を生み出すことが明らかとなった。また、再生可能資源が存在している下で、汚染フローとその汚染を引き起こす有害な枯渇性資源との関係がある特定の関係に従うならば、市場経済における異時点間の動学的資源配分は環境外部性の影響を受けず、その意味で計画経済と分権経済の outcome は一致することになるという、非常に興味深い結論を得た。またこれらの分析で得られた結果を基礎に、主に技術の側面と資源代替の側面に力点を置き、環境政策へのインプリケーションが提示される。

Keywords: 再生可能資源; 枯渇性資源; 資源代替; 持続的成長

JEL classification numbers: O40, Q20, Q28, Q32, Q38

*本論の執筆に当たっては、鶴田忠彦教授、浅子和美教授（以上、一橋大学）から数多くの有益なコメントを頂いた。また、2002年10月28日に龍谷大学で開催された環境経済学研究会においては、参加者の諸先生方ならびに大学院生の方々から貴重なご意見を頂いた。改めて感謝の意を表したい。言うまでもなく、有り得べき誤謬の一切の責は筆者である我々に帰すものである。

[†]E-mail: ged0109@srv.cc.hit-u.ac.jp

[‡]E-mail: ged1103@srv.cc.hit-u.ac.jp

1 はじめに

環境問題に関連するさまざまなトピックスは、今やマクロ経済学の分野においてもその中心的な分析課題の1つとして認識されるようになった。¹ 環境に関する問題はそもそも、我々の身のまわりで起こる比較的小さな問題もさることながら、環境外部性によるボーダレスな問題であるという特性を有している。したがって、環境のマクロ経済学が必要とされるのは当然の趨勢であると言えよう。一方、現実の世界においても環境問題の重要性は、広く社会に知られるものとなってきており、日本においても、国、地方、市町村、企業、そして家庭といったあらゆる次元で環境問題への取り組みがなされている。すなわち、環境の改善やさまざまな環境問題の解決といった、我々人間に課せられる課題は、現実的にも、学問的にも、喫緊の課題である。このような問題を受けて、環境のマクロ分析は1970年代より徐々に研究の蓄積が進み、例えば、当該分野での先駆的な研究である Keeler *et al.* (1971) では、日々刻々と排出される汚染物質の管理問題を、最適経済成長のフレーム・ワークを用いて分析している。²

最近では環境問題の分析にも数多くのヴァリエーションがあるが、本論では特に、環境資源の利用とそのマクロ経済的インパクトを詳細に分析することを目的としている。分析上のキー・ファクターは2つ存在しており、1つは再生可能資源 (renewable resource) であり、もう1つは枯渇性資源 (non-renewable resource) である。従来、環境のマクロ経済分析においては、これらのうちどちらか1つの資源の存在を仮定して、それが生産関数や効用関数の中に導入されるフレーム・ワークの下で分析が試みられてきた。³ しかしながら、本来的にはこれら2つの資源利用に関する分析は、それらが同時に分析的フレーム・ワークの中に導入されるような下での検討が必要不可欠であると思われる。⁴ すなわち、時間流列の中のある遠点において、枯渇がほぼ運命づけられている枯渇性資源の存在を考慮した場合には、それ自体の延命への人間活動とともに、再生可能な代替的資源利用へのシフトというもう1つの人間活動が顕在化するものと考えられるからである。事実、現実世界はこのように動いている。

他の環境問題分析同様、再生可能資源および枯渇性資源に関する分析も、ここ最近急速に研究の蓄積が進みつつある。⁵ 環境と経済成長という観点からは、例えば、どのようなメカニズムの下で枯渇する資源のエンド・ポイントを延ばすことができるのか、

¹ 専門的な論文はもとより、例えば Romer (2001; Ch.1, pp.35-43) や Foley and Michl (1999; Ch.12) といった学部上級から大学院初級レベルの標準的なマクロ経済学のテキストにおいても、環境の問題が取り上げられるに至っている。また、現代における経済成長理論の1つのスタンダードを示している Aghion and Howitt (1998; Ch.5) でも、内生的成長と持続的発展との関係性が議論されている。

² 1980年代後半以降に起こった新しい成長理論 (内生的成長理論) のブームによって、環境のマクロ経済学もさまざまな方向でより一層の進展を遂げている。

³ 枯渇性資源を考慮した分析の嚆矢としては、Stiglitz (1974) が挙げられる。そこでは枯渇性資源のフローが財の生産への投入要素として定式化されている。また、Schou (2000) では生産関数に枯渇性資源が投入され、その利用によって生じる汚染物が同時に生産に対して負の影響を及ぼしている。Bovenberg and Smulders (1995; 1996) では、効用関数には消費に加えて再生可能資源が考慮され、生産関数には物的な資本の他に汚染物が投入されるようなセット・アップになっている。

⁴ 再生可能資源および枯渇性資源の双方を含んだ分析の数少ない例として、Tahvonen and Salo (2001) がある。しかしながら、彼らのモデルでは再生可能資源をフローの変数として取り扱っており、ストックとしての性質は捨象されている。再生可能資源の現実的対応の事例としては、地球上の大気や河川水、海水等が想起されるわけであり、これらはストックとして扱う方がより望ましいと考えられる。

⁵ ミクロ経済学的視点を重視し、自然資源の問題を論じているものとして柴田 (2002) を挙げておく。この第5章では再生可能資源の問題が、第6章では枯渇性資源の問題がそれぞれ詳細に論じられている。

地球環境を良好に保ちながらより高いレベルでの持続的成長を可能にするにはどうしたらよいか、といった問題について多種多様な議論がなされている。その中から我々の分析に直接関連する issue を検討するだけでも、その膨大さゆえに大きな困難を伴うが、以下では今後の我々の分析の布石として、再生可能資源、枯渇性資源それぞれについての最近の主な研究動向を簡単にレビューしておこう。

数ある中でも、再生可能資源を考慮した分析に関しては、Tahvonen and Kuuluvainen (1991)、Di Vita (2002) などをもておくのが適当であろう。⁶ Tahvonen らの論文は、最適成長のフレーム・ワークの中で環境の影響を検討するという、オーソドックスなアプローチをとっている。代表的経済主体の効用関数は Keeler *et al.* (1971) 等と同様に、消費と汚染ストックから構成される。⁷ 特徴的な点としては、状態変数 (state variable) として3種の生産要素が考慮されていることが挙げられよう。つまり、彼らのモデルでは、通常の物的な資本に加えて、第2、第3の生産要素として再生可能資源と汚染ストックが取り込まれている。⁸ 汚染ストックは、每期毎期の排出物フロー (emission) が蓄積したものである。このような比較的複雑なフレーム・ワークを基礎に、彼らは再生可能資源の最適管理、汚染物排出の最適管理、そして資本蓄積との間の3者の関係は、同時に分析すべき問題であることを主張し、中央計画経済における社会的最適解 (social optimal solution) と分権経済における市場均衡解 (market solution) との比較を試みている。枯渇性資源の取り扱い等、異なる点もあるが Tahvonen らの論文は我々の分析に比較的近いものとして位置づけられよう。

続いて最近の新しい試みとして、Di Vita (2002) は注目に値する。彼は再生可能資源を含んだ興味深い分析を展開しているが、そこでは、自然資源と廃棄物リサイクル (waste recycling) の問題を持続的成長との関係から分析することに主眼が置かれている。⁹ 廃棄物のリサイクル活動は、我々のまわりでも一般的に定着してきており、このことを資源利用と経済的パフォーマンスの観点からフォーマルに分析することは非常に興味深いものと考えられる。分析に使用されるモデルは、再生可能資源と廃棄物リサイクルの間の長期的関係を明らかにすることができるような内生的成長モデルである。生産部門は3部門から成り立っている。それらは、最終財部門、人的資本部門、そして廃棄物リサイクル部門である。またこれらに関連して、再生可能資源および廃棄物の動学プロセスが規定されている。¹⁰ このようなモデルを基礎として、廃棄物リサイクルが経済成長に与える影響やリサイクルによる再生資源の生産 (secondary materials production) が個人の効用に及ぼす影響などが一般均衡体系の中で議論されている。¹¹ この論文で

⁶この他にも例えば、研究・開発による内生的技術進歩と再生可能資源の問題を分析している比較的最近の研究として Bretschger (1998) などがある。

⁷もちろん、消費水準が正の効用を生み出す一方で、汚染ストック水準が上昇すると、それは人の効用水準に負の影響を与えることになる。つまり、汚染ストックの蓄積によって悪化した環境からダメージを被ることになる。

⁸汚染フローは、最終財の生産にはプラスの影響を与え、汚染ストックは再生可能資源の遷移にはマイナスの影響を与える。このことは財の生産水準を高めようとすれば不可避免的に汚染排出物を増やさざるを得ないということを表す一方で、良好な自然環境の維持にとって汚染物は阻害要因となるということを表している。

⁹事実として、世界全体で廃棄物の排出量は増加傾向にある。

¹⁰効用関数は Keeler *et al.* (1971) タイプのものであり、汚染ストックとして具体的に廃棄物ストックが効用を形成している。

¹¹重要な仮定として、最終財の生産において、インプットとなる再生可能資源とリサイクルによる再生資源は完全に代替的である。

は、課税や補助金の問題も含めて、数々の有用なインプリケーションが提示されているが、上で示した観点との直接的な関係からまとめるならば、資源リサイクルがより活発に行われれば、それは自然資源（再生可能資源）の利用を節約し、経済をより持続的な成長経路に向かわせることが可能になる。

次に枯渇性資源と成長に関する最近の研究をみておこう。¹² この問題についても、経済学はさまざまな角度から分析を展開しているが、1つの有用な視点と考えられるのが技術進歩との関係性であろう。stableな経済運営を前提とした場合に、果たして技術の向上が資源の枯渇を克服するか否か、という論点は非常に興味深くもあり、また社会経済システムの sustainability という観点から極めて重要である。このラインで最近のものとしては、Barbier (1999) が、ローマー・タイプ (Romer, 1990) の内生的技術進歩モデルに枯渇性資源を導入して分析を展開している。モデル構造は、2部門モデルとなっており、最終財の生産と知識 (knowledge) の生産がともに skilled labor の投入によって営まれる。¹³ Romer (1990) と異なって、独占的競争性を有する中間財部門の存在はモデル化されていない。それに代わって、枯渇性資源のダイナミクスが持ち込まれ、その自然資源フローが最終財の生産に投入される。¹⁴ Barbier はこのような設定の下で、まずベースライン・モデルの分析を行い、その後で成長のエンジンとなる研究・開発活動 (R&D 活動) が自然資源の制約に服するようなケースを分析している。その結果、枯渇性資源の制約が R&D 活動を制約するような状況においても、資源利用や R&D プロセスについての適当な仮定の下で、持続的成長が達成可能であることを示している。この帰結より、彼のモデルでは内生的成長が資源の枯渇を凌駕することになる。

また、数理的側面からは、Groth and Schou (2002) が、ジョーンズ・タイプ (Jones, 1995) の準内生的成長モデル (semi-endogenous growth model) に枯渇性資源を導入した下での興味深い分析を展開している。¹⁵ 枯渇性資源のダイナミクスが考慮され、それが財の生産関数に投入されるという点において、このモデルは Stiglitz と同じであるが、極めて特徴的な点として生産関数の収穫一定性は仮定していない。こうした中で、マクロ経済全体での収穫逓増性といった特異な仮定に依存せずとも1人あたり消費の長期的成長が達成され、且つ従来の準内生的成長モデルの分析で得られてきた長期的成長率の、選好パラメータからの独立性という weak point が改善されることが示される。¹⁶ 以上を要約するならば、Stiglitz 流の生産関数の収穫一定性という仮定をはずし

¹² 枯渇性資源に関するマクロ分析の先駆的研究は、先にも述べた Stiglitz (1974) である。尚、数理的側面を重視し、Stiglitz モデルに内生的人口成長を取り入れた重要な拡張として Cigno (1981) がある。またこのトピックスに関する最近までの発展を包括的に議論しているものとして、Krautkraemer (1998) は非常に有益である。さらには、異なる世代間での利害調整という観点から、「資源枯渇」の問題と「環境悪化」の問題を明確に峻別し、経済の持続的成長という課題に対して豊かなインプリケーションを提示している展望論文として浅子他 (2002) が挙げられる。

¹³ このモデルでは、Romer (1990) 同様、人的資本の蓄積プロセスは捨象されている。したがって、skilled labor を通常どおり raw labor と解釈しても、定性的な結論に影響は生じない。

¹⁴ 異時点間にわたる効用の流れは、ラムゼー・キャス・クープマンズモデルと同じく、消費の流利からのみ構成される。

¹⁵ 準内生的成長モデルに関する議論については、Eicher and Turnovsky (1999) を参照されたい。

¹⁶ Solow (2000, pp.134) に依れば、内生的成長理論にとって選好パラメータは極めて重要な意味を持つという。The significance is that the rate of growth of consumption per head, the key rate of growth in terms of which all other rates of growth can be expressed, depends among other things on ρ and σ . So the preference parameters affect the rate of growth, and that is what is generally meant by saying that the rate of growth is endogenous. ただし、このソローの文章中における ρ と σ は、それぞれ時間選好率と異時点間の代替弾力性の逆数を意味している。

でも持続的成長が可能になり、且つその均衡は安定的で、また選好パラメータが成長率決定要因として復活するため、一般的な内生的成長モデル同様、政府の政策介入の余地も復活することになる。この彼らの議論が示しているように、自然資源の考慮は純理論的な考察に対しても有益な示唆を与える可能性があるのである。

最後に、本論の議論と最も密接に関わると考えられる Schou (2000) の分析に言及しておこう。彼の分析は、自然資源として枯渇性資源を採用するタイプのものに分類される。モデルは人的資本蓄積を含んだ内生的成長モデルであり、枯渇性資源の利用が汚染物質を生み出し、それが最終財の生産に負の影響を及ぼすという構造になっている。したがってこのモデルは、構造的に Stiglitz (1974) と Lucas (1988) を統合した体系になっていると考えられる。こうしたセットアップの背景には、現実には起きている多くの環境汚染問題は主に枯渇性資源の利用に端を発しているという事実認識がある。¹⁷ Schou の議論において、最も特徴的且つ重要なインプリケーションと考えられるのが、汚染ストックがもたらす負の外部性、つまり環境外部性が存在しているにもかかわらず、分権経済の解が計画経済の解に一致するという点であろう。これは非常に強い結論であり大変興味深い結果であるが、その原因は、枯渇性資源自身もつ特性と、ここで考えられている環境外部性の形態が異時点間にわたる最適資源配分行動に全く影響を及ぼさないような定式化になっているという2点に求められる。以下では、ここまで行ってきたレビューを基礎に、特に Schou (2000) の分析に留意しながら我々の本論での分析内容を概観していく。

本論の議論が目標とするのは、先にも述べたように、環境資源利用にまつわる問題を長期のマクロ経済問題との関連から捉え、「資源の枯渇」、「資源の再生産」、「資源代替」、そしてそれらの間の相互影響関係の延長上にある「持続的成長」といった問題を包括的に分析することである。この所期の目標に対して、我々は再生可能資源、枯渇性資源を含んだ内生的成長モデルを構築する。モデルの骨格を形成するのは、4種類のインプットによって財の生産を行う最終財部門、2種類のインプットによって再生可能な資源を生み出す再生可能資源部門、そして枯渇性資源部門である。また、経済には代表的家計が存在している。まず第1の特徴は、2タイプの資源の動学プロセスが明示的に考慮され、それらがインプットとして財の生産に影響を与える点である。第2の特徴は、再生可能資源の再生能力がそのストック量のみ依存するだけでなく、目的志向的な労働投入(資源の回復という目的)にも依存するという点である。この点は特に我々の新しい試みである。資源管理に労働力が必要とされることは、現実的な観点から支持され得るものであろう。第3に、Schou (2000) にならって、環境外部性のメカニズムを導入している点である。環境が外部性をもつというのは、環境問題が世界的に極めて重要視される1つの大きな要因となっている。このメカニズムを具体的に述べておくと、枯渇性資源フローの利用が汚染物質フローを排出し、それが財の生産にネガティブな影響を与えることになる。¹⁸ その際重要なのが、枯渇性資源使用(フロー)の成長率が汚染フローの成長率と厳密に比例的な関係にあるという点である。この仮定は、後で示すように、モデルの帰結にとって重要な役割を果たすことになる。以上のような構造

¹⁷ いわゆる温室効果や酸性雨の問題の大部分は、化石燃料の燃焼という形での利用によって引き起こされている。すなわち、大半の鉱物資源は、それを燃焼すれば汚染物質が排出され、また資源の採掘それ自体はしばしば環境汚染問題を伴うことになる。

¹⁸ 再生可能資源からは汚染物質が排出されないものと仮定する。

をもつ内生的成長モデルを基礎として、我々は定常状態 (steady state) でのプロパティに関する分析を中心に、モデルのさまざまな部分に光をあてていく。その際の分析上のキーワードは上に挙げた4点であるが、とりわけ持続的成長という問題を重視する。

以下、本論の残りの構成を記しておこう。第2節の前半では、モデルを提示し本論における「環境のマクロ経済学」のアウトラインを議論する。続いてこのパートでは、モデルの中央計画問題が解かれ、定常状態でのプロパティがかなり詳細に分析される。第2節の後半(2.4節 比較分析)では、モデル内のさまざまなパラメータ(選好・技術パラメータ; 環境パラメータ)の変化、つまり与件が変化した場合に動学経路がどのような影響を受けるのかということが厳密に分析される。この分析から数々の有用と思われるインプリケーションを導き、さらにそれらを基礎に環境政策へのインプリケーションが提示される。第3節では、分権経済モデルが解かれることになる。一般に外部性の存在が分権経済と計画経済の解を乖離させるわけであるが、この点の本論の分析ではどうなるのか、はたまた再生可能資源の存在の影響を受けるのか、といったことが大きな論点になる。第4節では、拡張されたフェイズ・ダイアグラムを利用して、主に枯渇性資源の要素集約度と生産活動に従事する時間シェアの動きに注意しながら、以前までの節とは異なった角度からモデルにアプローチしていく。この分析は、2.4節の結果を補完するものとなるであろう。最後の第5節では、本論の分析結果の大要が持続的成長という観点からまとめられ、今後の研究に対する課題と展望が与えられる。尚、付論Aでは、モデルの詳細な導出過程が与えられ、付論Bでは、モデルの局所的安定性 (local stability) が議論される。

2 モデル

2.1 モデルの環境

本サブセクションでは、2種類の環境資本と成長のモデルを提示する。生産活動は3つのセクターにおいて行われる。1つは最終財生産セクター (final good sector) であり、ここでは消費財もしくは資本財が生産される。2つめは再生可能資源セクター (renewable resource sector) である。ここでは再生可能資源が、それ自身本来持つ自然回復能力だけでなく、資源回復のために費やされる労働にも依存して生成される。最後の3つめは枯渇性資源セクター (non-renewable resource sector) であり、ここでは初期の枯渇性資源の賦存(ストック)量が固定されており、人間がいかなる努力を傾注しても新たに資源を生成することができない。

生産関数

最終財・サービスの生産 Y は、物的資本 K (保有する労働力のうち) 生産活動に費やされる時間シェア u 、再生可能資源 R 、枯渇性資源 E 、枯渇性資源の使用に付随し発生する汚染物 P に依存するものとする。

$$Y_t = AK_t^{\alpha_1} (uL_t)^{\alpha_2} R_t^{\alpha_3} E_t^{\alpha_4} P_t^{-\epsilon}, \quad A, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 > 0, \quad \epsilon \geq 0. \quad (1)$$

ただし，Stiglitz (1974) にならい $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$ とする。¹⁹ また，変数 A は外生的な技術パラメータである。

汚染物の生成プロセス

枯渇性資源を使用することにより，汚染物 (pollutants) P が副産物として一定割合発生するものとする。Schou (2000) 等にならって，我々はこのネガティブなメカニズムを次のような比較的簡単な関数形で表現する。²⁰

$$P = BE^\mu, \quad B, \mu > 0 \quad (2)$$

最終財の分配

生産された最終財は，通常のように消費と資本財への投資に振り分けられるものとする。

$$\dot{K} = Y - cL, \quad K(0) = K_0 > 0 \quad (3)$$

ただし， c は 1 人あたり消費を表す。また，簡単化のために資本減耗は捨象する。

労働市場の均衡条件

総労働力 (L) は最終財セクター (L_Y) と再生可能資源セクター (L_R) に配分されるものとする。ただし，簡単化のため人口成長を捨象する。以上の想定の下では，労働市場の均衡条件は以下の式で表される。

$$L_Y + L_R = L$$

再生可能資源

再生可能資源についての動学方程式 (遷移式) は，以下のように表される。

$$\dot{R} = F(R) - X, \quad R(0) = R_0, \quad X \geq 0$$

ただし， $F(R)$ は再生関数であり，再生可能資源 (R) が本来持つ自己再生能力を表すものである。また， X は再生可能資源の使用による減耗 (フロー) である。ここで各期の再生可能資源の使用による減耗はその期首のストック水準の一定割合である，すなわち $X \equiv \gamma R$ であるとすると，上式は以下のように書き直すことができる。

$$\dot{R} = F(R) - \gamma R, \quad R \geq 0$$

本論では，先述のとおり，再生関数 F がその資源 R の自己再生能力のみならず，資源回復のために費やされる労働 (L_R) にも依存するものとする。これは，再生可能資

¹⁹Hall (1990) や Caballero and Lyons (1992) 等は，アメリカ合衆国やヨーロッパの製造業においては，規模や外部効果に関して収穫逓増であるという実証的証拠を報告している。

²⁰ここから時間についての添字は，必要な場合を除き省略する。

源の回復は人間の環境保全努力によっても達成されることを意味する。²¹ ここで、主体は1単位の労働時間を保有しており、その1単位の保有時間のうち、 u の割合を上述した生産活動に、残りの $1-u$ を資源回復のために費やすものとする、再生可能資源の動学方程式は以下の式のように書き直すことができる。

$$\dot{R} = F(R, (1-u)L) - \gamma R, \quad R \geq 0$$

尚、本論では、再生関数が資源回復のために費やされる労働と再生可能資源の自己再生能力のそれぞれについての線形関数によって表されるものと想定する。したがって、最終的な再生可能資源の動学方程式は、以下の(4)式のように表される。

$$\dot{R} = D(1-u)LR - \gamma R, \quad D > 0, \quad R \geq 0 \quad (4)$$

ただし、 D は外生的に与えられる技術パラメータである。²² この(4)式を構造的に考えると、Lucas (1988)の人的資本生産関数に類似したものとしてみる事ができる。

枯渇性資源

最後に、枯渇性資源についての動学方程式(遷移式)は、Stiglitz (1974)に従い、(5)式で表されるものとする。²³

$$\dot{S} = -E, \quad S(0) = S_0 > 0 \quad (5)$$

ただし、 S 、 E はそれぞれ t 時点における残存枯渇性資源ストック、枯渇性資源の使用量(フロー)である。

選好

代表的個人の効用 U_t は消費にのみ依存するものとする。さらに、この消費選好は以下のような標準的なCRRA型効用関数に従うものとする。

$$\begin{aligned} \max_c \int_0^{\infty} \frac{c^{1-\theta} - 1}{1-\theta} L e^{-\rho t} dt, \quad \rho > 0, \quad 0 < \theta < 1 \\ \max_c \int_0^{\infty} \ln c L e^{-\rho t} dt, \quad \rho > 0, \quad \text{if } \theta = 1, \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 ρ は時間選好率、 θ は現在消費と将来消費間の異時点間の代替弾力性の逆数である。

²¹例えば、河川、海の水質や森林などの環境資本(広義の意味では地球環境)の保全には、人間による保全努力が大きく寄与していることは、周知の事実である。これらに関する事例については、World Bank (2000)で紹介されているので、詳しくはそちらを参照されたい。

²²現実の世界に鑑みると、技術進歩が環境に対して与えてきた影響は大きいことは否めない。したがって、この技術パラメータを内生化して考えることは重要な拡張分析であると思われるが、この点に関しては、次稿以降の分析課題としたい。

²³本論では、枯渇性資源の採掘に伴い発生する不確実性や採掘費用は捨象する。

2.2 中央計画問題

このサブセクションでは、モデルの中央計画問題を議論する。全知全能の社会的計画者 (social planner) は、(1)-(5) 式の制約条件群のもとで、(6) 式によって表現される代表的家計の異時点間にわたる効用の積分和を最大化しようとする。社会的計画者の最適化行動は次のように定義される。

定義 1 社会的計画者は、最終財の生産に負の影響を及ぼす環境外部性 (汚染物 P) を認識した上で、そのインパクトを考慮した中で最適化を行うものとする。すなわち、社会的計画経済では外部効果が内部化されることになる。

このとき、対応する動学的最適化問題を解くために、我々は経常価値ハミルトニアン (current-value Hamiltonian) を以下のようにセットアップし、Pontryagin の最大値原理 (maximum principle) を適用する。

$$\begin{aligned} \mathcal{H} \equiv & \frac{c^{1-\theta} - 1}{1-\theta} L + \lambda_K \{ AK^{\alpha_1} (uL)^{\alpha_2} R^{\alpha_3} E^{\alpha_4} (BE^\mu)^{-\epsilon} - cL \} \\ & + \lambda_R \{ D(1-u)LR - \gamma R \} - \lambda_S E \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 λ_K 、 λ_R 、 λ_S はそれぞれ物的資本、再生可能資源、枯渇性資源に関するシャドープライスを表している。

この標準的な動学的最適化問題における長期均衡経路は、以下の定理 1 によって特徴付けられる。詳しくは、Arrow and Kurz (1970)、Halkin (1974) 等を参照せよ。

定理 1 $[c(t), K(t), u(t), R(t), S(t), E(t)]$ が経済成長の長期均衡経路であるならば、下記の条件を満足するような連続微分可能な連続関数 $\lambda_K(t) : [0, \infty) \rightarrow \mathfrak{R}$ 、 $\lambda_R(t) : [0, \infty) \rightarrow \mathfrak{R}$ 、 $\lambda_S(t) : [0, \infty) \rightarrow \mathfrak{R}$ が存在して、以下に示すような 1 階の条件が成立している。 \square

したがって定理 1 をみたく条件として、3 つの操作変数 (c, u, E) と 3 つの状態変数 (K, R, S) に関して、内点解を得るための 1 階の条件は次のように求められる。

$$c^{-\theta} = \lambda_K \quad (8)$$

$$\lambda_K \alpha_2 \frac{Y}{uL} = \lambda_R DR \quad (9)$$

$$\lambda_K (\alpha_4 - \mu\epsilon) \frac{Y}{E} = \lambda_S \quad (10)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_K}{\lambda_K} = \rho - \alpha_1 \frac{Y}{K} \quad (11)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_R}{\lambda_R} = \rho - \alpha_3 \frac{\lambda_K Y}{\lambda_R R} - D(1-u)L + \gamma \quad (12)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_S}{\lambda_S} = \rho \quad (13)$$

さらにこのとき，いわゆる横断性の条件 (transversality condition) は，以下の 3 本の式で表される．

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_K K(t) e^{-\rho t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_R R(t) e^{-\rho t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_S S(t) e^{-\rho t} = 0$$

2.3 定常状態分析

本論では分析を定常状態に限定して行っていく．定常状態では，通常の内生的成長モデルと同様に，以下のような性質がみだされることになる．

定義 2 定常状態では， Y ， K ， c の諸変数は，同率の一定率で成長しなければならない．我々はこれを g と表す．すなわち， $g \equiv \frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{\dot{K}}{K} = \frac{\dot{c}}{c}$ である．また同様にして， R および E も定常状態では一定率で成長するので（必ずしも同率ではない），それらの変数の成長率を g_R ， g_E で表すことにする．

ここで生産関数 (1) 式に (2) 式を代入してそれを時間について微分し，上記の定常状態 (均斉成長経路上) における定義の表記を利用すると，以下のような式が得られる．²⁴

$$g = \frac{\alpha_3}{1 - \alpha_1} g_R + \frac{\alpha_4 - \mu\epsilon}{1 - \alpha_1} g_E \quad (14)$$

この (14) 式より，当該経済の成長率 g は， g_R と g_E の線形結合によって表現されることがわかる．ここで以下の仮定を置く．

仮定 1 最終財生産に占める枯渇性資源の投入シェアは， $\alpha_4 > \mu\epsilon$ という関係をみたすものとする．すなわち，生産活動への枯渇性資源利用のポジティブな効果が実質的なネガティブな効果を上回るものとする．

(14) 式の関係を利用して，具体的に経済成長率を求めると，それは (15) 式で表される．

$$g = \frac{\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)}{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)} \quad (15)$$

²⁴(14) 式をはじめとして，本節で提示される諸式の導出過程については付論 A を参照されたい．

この成長率決定式より，例えば再生可能資源の生産性パラメータ D が上昇すると，経済成長率は高まることなど，さまざまな要素の変化に対するマクロ経済的反応が明らかになる．尚，(15) 式のプロパティについては，節を改めて 2.4 節で詳細に検討する．ところで，我々は本論を通じて，持続的成長の定義を Hartwick(1977) 等に倣い，正の成長率が達成されることであるとし，これが達成される場合に焦点を当てることにする．したがって (15) 式より，内生的成長が保証されるための条件は以下のように求められる．

$$\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon) > 0 \quad (16)$$

ここで，以下のような追加的仮定を置く．

仮定 2 $DL > \gamma$, $\alpha_2 + \alpha_4 > \mu\epsilon$ と仮定する．最初の仮定は，再生可能資源の生産性パラメータが，ある一定の大きさ以上でなければならないということを表している．次の仮定は，最終財生産に占める労働投入シェアと枯渇性資源フローの投入シェアの和が，枯渇性資源の利用によって生じる実質的な負の効果よりも大きくなければならないことを要請している．ただし後者は，上記の仮定 1 によって自動的にみたされることに注意されたい．

(16) 式の不等式条件について，今後，それを便宜上 E.G. 条件 (Endogenous Growth Condition) と呼ぶことにする．

続いて，再生可能資源ストックについての定常状態での成長率は，(17) 式で表される．

$$g_R = \frac{\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)(\mu\epsilon - \alpha_4) + (\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_2\rho\}}{\alpha_3\{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}} \quad (17)$$

経済分析として意味のあるケースを分析対象とするために，我々は内点解のケースについて分析する必要があるだろう．求められる解が内点解であるためには，それが上で求めてきた最適化の条件をみたすとともに，労働力が最終財の生産と再生可能資源の回復の双方に用いられることが必要である (すなわち， $0 < u < 1$ であるということ)．これは以下のパラメータ制約によって保証される．

$$\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma) < \rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) \quad (18)$$

上で述べた E.G. 条件と同様にして，この条件については I.S. 条件 (Inner-Solution Condition) と呼ぶことにしよう．

最後に，枯渇性資源使用についての成長率は，次の (19) 式のように求められる．

$$g_E = \frac{\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)}{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)} \quad (19)$$

この式の最も基本的なプロパティとして，I.S. 条件 (18) 式を考慮すると，次の補題 1 が得られる．

補題 1 枯渇性資源使用（フロー）の成長率 g_E は，定常状態，すなわち *balanced growth path* 上において負である。 □

証明: (19) 式より，その分母は $0 < \theta < 1$ という仮定より明らかに正である．一方，分子については先ほどの I.S. 条件 ((18) 式) より，必ず負となる．このことから，定常状態における枯渇性資源使用（フロー）の成長率は負値をとることがわかる。 ■

これまでの議論では，再生可能資源の成長率 g_R について，明示的にその符号を確定してこなかった．しかしながら，(14)，(16) 式と仮定 1 および補題 1 の結果を利用すると， g_R の符号が自動的に決定される．すなわち

補題 2 定常状態では，再生可能資源の成長率 g_R は必ず正である。 □

証明: まず (16) 式の E.G. 条件は，経済成長率の正值性を保証するから，このことを仮定 1，補題 1 とともに (14) 式の線形結合関係に適用すると， g_R は正でなければならないことが明らかとなる。 ■

以上の分析をベースとして，次節では定常均衡状態でのさまざまなプロパティが詳細に検討される．尚，本節でこれまでに提示してきた中央計画問題の解は，サドル経路安定的なものになる．このことについての厳密な証明は付論 B で与えられる．

2.4 比較分析

本サブセクションでは，各パラメータの変化が定常状態における当該経済の成長率，ならびに再生可能資源ストックと枯渇性資源使用（フロー）の成長率の各変数に及ぼす影響について分析する．対象とするパラメータは $(\theta, \rho, D, \gamma, \epsilon, \mu, \alpha_3, \alpha_4)$ である．本論では，これらのパラメータのうち， (θ, ρ, D) を選好・技術パラメータ， $(\gamma, \epsilon, \mu, \alpha_3, \alpha_4)$ を環境の変化に付随するパラメータ（以下，環境パラメータ）と呼ぶことにする．

2.4.1 選好・技術パラメータ

まず，現在消費と将来消費間の異時点間の代替弾力性の逆数である θ が限界的に 1 単位上昇した場合に，各変数の成長率に及ぼす影響は以下のように求められる．

$$\frac{\partial g}{\partial \theta} = -\frac{\{\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)}{\Delta^2} < 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \theta} = -\frac{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\{\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}}{\Delta^2} < 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \theta} = -\frac{\alpha_2\alpha_3(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\{\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}}{(\alpha_3\Delta)^2} < 0 \quad (22)$$

ただし， $\Delta \equiv (\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon) > 0$ である．また，(20) 式の符号決定には，E.G. 条件 ((16) 式) ，および仮定 2 における $\alpha_2 + \alpha_4 > \mu\epsilon$ を，(21) ，および，(22) 式の符号決定には，E.G. 条件 ((16) 式) を用いた．

(20) ，(21) ，(22) 式は，それぞれ， θ が上昇するならば，当該経済の成長率は減少すること，枯渇性資源の使用量の減少に歯止めがかかること，再生可能資源ストックの成長率は低下することを意味する．

θ が上昇するということは，異時点間の代替の弾力性が低下することと同値であることから，人々が投資リターンを待つことを止め，現在消費を増加させることを意味する．本論においては，このことは，再生可能資源回復のための投資を減らし，枯渇性資源を使うようになることを意味するため，枯渇性資源の使用量が増加し，再生可能資源ストックの成長率は低下することになる．当該経済の成長率は，(14) 式で示したように，枯渇性資源使用 (フロー) の成長率 (g_E) と再生可能資源ストックの成長率 (g_R) の線形結合によって表される．したがって，先の結果を受けて，当該経済の成長率は低下することになる．

次に，時間選好率 ρ が上昇した場合を考えよう．このケースは，主体が現在の消費に比して将来の消費をより軽視するようになることを意味する．各変数の成長率に与える影響を求めると，以下ようになる．

$$\frac{\partial g}{\partial \rho} = -\frac{\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon}{\Delta} < 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \rho} = -\frac{\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{\Delta} < 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \rho} = -\frac{\alpha_2(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)}{\alpha_3\Delta} < 0 \quad (25)$$

ただし，(23) 式における符号を決定する際には，先述の仮定 2 における $\alpha_2 + \alpha_4 > \mu\epsilon$ を用いた．

(23) ，(24) ，(25) 式は，それぞれ，主体が将来の消費をより軽視するようになると，当該経済の成長率は低下すること，枯渇性資源の使用量の減少を阻害する方向に働くこと，再生可能資源ストックの成長率は減少することを意味する．

主体が現在の消費に比して将来の消費を軽んじるようになると，再生可能資源よりもそのままフローとして使用できる枯渇性資源を投入要素として用いることを選好するようになる．このことは，再生可能資源回復のために労働力を投資するよりも生産活動に投資するようになることを意味するため，再生可能資源の再生能力は低下することになる．したがって，枯渇性資源の使用量が増加し，再生可能資源ストックの成長率は低下することになる．その結果，当該経済の成長率も低下してしまうことになるのである．

最後に，再生可能資源の再生関数における生産の効率性を表す技術パラメータ D が上昇するケースを考えよう．これは，再生可能資源の回復がよりスムーズに行われるよ

うになる状況，すなわち，資源回復のために投資される労働時間（ひいては環境保全努力）をより効率的に資源回復のために活用できるようになる状況を表す．このケースでは，各変数の成長率に与える影響は以下のように求められる．

$$\frac{\partial g}{\partial D} = \frac{\alpha_3 L}{\Delta} > 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial D} = \frac{\alpha_3(1-\theta)L}{\Delta} > 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial D} = \frac{\alpha_3 L \{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1-\theta)(\alpha_4 - \mu\epsilon)\}}{\alpha_3 \Delta} > 0 \quad (28)$$

(26)，(27)，(28) 式は，それぞれ環境保全努力がより効率的になると，当該経済の成長率は上昇，枯渇性資源の使用量の減少が促進される（一段と使用量が減少する）こと，再生可能資源ストックの成長率は上昇することを意味する．

環境保全努力がより効率的になるということは，枯渇性資源ではなく再生可能資源を利用する方が効率的になることを意味するため，主体は生産活動から再生可能資源回復のための環境保全努力へ労働をシフトさせるようになる．かくして，汚染物を発生させる枯渇性資源からクリーンな再生可能資源への移行が生じることになる．その結果，当該経済の成長率に対しても正の効果をもたらすことになる．

2.4.2 環境パラメータ

まず，再生可能資源の使用による減耗の程度を表す γ の上昇が，各変数の成長率に与える影響について考える．これらは以下のようにまとめられる．

$$\frac{\partial g}{\partial \gamma} = -\frac{\alpha_3}{\Delta} < 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \gamma} = -\frac{\alpha_3(1-\theta)}{\Delta} < 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \gamma} = \frac{\alpha_3 \{(1-\theta)(\alpha_4 - \mu\epsilon) - (\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\}}{\alpha_3 \Delta} < 0 \quad (31)$$

まず，(29)，(30)，(31) 式は，それぞれ，再生可能資源の使用による減耗 (γ) の上昇は，当該経済の成長率を阻害する方向に働くこと，枯渇性資源の使用量の減少に歯止めをかける，すなわち，枯渇性資源の使用量が増加する方向に働くこと，再生可能資源ストックの成長率を低下させることを意味する．

再生可能資源の使用による減耗の程度が上昇するということは，限界効果として，再生可能資源の再生能力よりも使用による減耗の方が相対的に大きくなることを意味するため，再生可能資源ストックの再生を逼迫してしまう状況に陥ることを意味する．そのため，再生可能資源だけでは生産活動が間に合わず，枯渇性資源にも依存せざるを

得なくなるため，枯渇性資源使用（フロー）の成長率も低下することになる．したがって，再生可能資源ストックの成長率の低下と枯渇性資源使用（フロー）の成長率の低下に伴い，当該経済の成長率も低下することになる．²⁵

次に， ϵ が上昇した場合を考えよう．これは，汚染物が生産性に与える負の外部効果のインパクトが上昇する状況を表す．このケースでは，各変数の成長率に及ぼす影響は以下のように求められる．

$$\frac{\partial g}{\partial \epsilon} = \frac{\mu\{\rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - \alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)\}}{\Delta^2} > 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \epsilon} = -\frac{\mu(1 - \theta)\{\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\}}{\Delta^2} > 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \epsilon} = \frac{\alpha_2\alpha_3\mu(1 - \theta)\{\rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - \alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)\}}{(\alpha_3\Delta)^2} > 0 \quad (34)$$

ただし，(32)，(33)，(34) 式の符号を決定する際に，それぞれ，I.S. 条件 (18) 式) を用いた．

(32)，(33)，(34) 式は，それぞれ，汚染物が生産性に与える負の外部効果のインパクトが上昇すればするほど，当該経済の成長率は上昇すること，枯渇性資源の使用量の減少が促進される（一段と使用量が減少すること，再生可能資源ストックの成長率は上昇することを意味する．

非常に直感的であるが，汚染物が生産性に与える負の外部効果のインパクトが上昇すると，当然その発生源である枯渇性資源の使用を控えるようになる．枯渇性資源の使用量が一段とが減少する下で，生産活動を同水準に保ちつづけるためには，再生可能資源に依存せざるを得なくなる．その一方で，当該経済の成長率をプラスに維持するためには，労働時間を生産活動から（再生可能資源回復のための）環境保全努力活動へより一層シフトさせ，再生可能資源ストックの成長率を正に保ちつづければならないことになる．したがって，再生可能資源ストックの成長率は上昇することになる．(32) の帰結は，通常の成長と環境のモデルにおいて得られる汚染パラメータの効果とは，逆であるように思われるかもしれない．しかしながら，理由は以下で述べるように，極めて直感的なものである． ϵ は，資源の生産に対する正の効果を増害する方向に作用する．その一方で，資源の使用量は，(33) 式で示されたとおり，一段と減少するので，資源の使用からもたらされる正の効果のみならず，汚染の負の効果も減少することとなる．²⁶ したがって， ϵ が上昇することにより，成長率に及ぼす有害な負の効果は減少するので，当該経済の成長率は上昇することになる．²⁷

²⁵ 以上の帰結は，先の再生可能資源の生産性パラメータ D が上昇するケースと全く逆の理由によりもたらされる．

²⁶ 定常状態において，負値をとる g_E が ϵ の上昇により，さらに低下することには留意されたい．

²⁷ 生産関数 (1) 式の両辺の成長率をとると， $g = \dots + \alpha_4 g_E - \epsilon g_P$ となる．ただし $g_P = \frac{\dot{P}}{P}$ である． g_P は (2) 式より g_E に依存するが， g_E は先述のとおり，必ず負値をとるため，最終的に g_P が当該経済の成長率 g に及ぼす影響は正となるのがわかる．

次に、 μ が上昇した場合、すなわち、生産性に負の外部効果をもたらす（枯渇性資源の使用により発生する）汚染物の発生率が上昇した場合に、各変数の成長率に及ぼす影響を考えよう。これらは以下のように求められる。

$$\frac{\partial g}{\partial \mu} = \frac{\epsilon\{\rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - \alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)\}}{\Delta^2} > 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \mu} = -\frac{\epsilon(1 - \theta)\{\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\}}{\Delta^2} > 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \mu} = \frac{\alpha_2\alpha_3\epsilon(1 - \theta)\{\rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - \alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)\}}{(\alpha_3\Delta)^2} > 0 \quad (37)$$

となる。ただし、(35)、(36)、(37) 式の符号決定には、I.S. 条件（(18) 式）を用いた。(35)、(36)、(37) 式は、それぞれ、汚染物の発生率が上昇するならば、当該経済の成長率が上昇すること、枯渇性資源の使用量の減少を促進する（枯渇性資源への依存度がより減少する）方向に働くこと、再生可能資源ストックの成長率は上昇することを意味する。これらの帰結がもたらされるのは、先の (32)、(33)、(34) 式と同様の理由によるものである。

次に、 α_3 が上昇するケースについて考えよう。これは、生産に用いる再生可能資源のシェアが上昇する状況を表す。各変数の成長率に与える影響は、

$$\frac{\partial g}{\partial \alpha_3} = \frac{\theta(DL - \gamma)(\alpha_2 + \alpha_4) + (1 - \theta)(DL - \gamma)\mu\epsilon + \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)}{\Delta^2} > 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \alpha_3} = \frac{\{\theta(DL - \gamma)(\alpha_2 + \alpha_4) + \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon) + \mu\epsilon(1 - \theta)(DL - \gamma)\}}{\Delta^2} > 0 \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_R}{\partial \alpha_3} = & \frac{\alpha_3\{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}}{(\alpha_3\Delta)^2} \\ & \times \frac{[(1 - \alpha_3)(DL - \gamma)\{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_4 - \mu\epsilon)\} + \{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_1\alpha_2\rho\}]}{(\alpha_3\Delta)^2} > 0 \end{aligned} \quad (40)$$

と求められる。ただし、(38)、(39) 式の符号決定に際しては、仮定 2 を用いた。また、(40) 式においては、仮定 1 ($\alpha_4 > \mu\epsilon$)、仮定 2 における $DL > \gamma$ 、ならびに E.G. 条件（(16) 式）を用いた。

(38)、(39)、(40) 式は、それぞれ、生産に用いられる再生可能資源のシェアが上昇すると、当該経済の成長率は上昇すること、枯渇性資源の使用量の減少は促進される（一段と使用量が減少する）こと、再生可能資源ストックの成長率は上昇することを意味する。

生産に用いる再生可能資源のシェアが上昇するということは、再生可能資源を用いる方がより効率的に生産活動を行えることを意味するため、枯渇性資源から再生可能

資源への移行が生じることになる。したがって、枯渇性資源の使用量は減少する。その一方で、枯渇性資源の使用量は一段と使用量が減少するので、生産活動を同水準に保ちつづけるためには、さらに再生可能資源に依存せざるを得なくなる。この下で、当該経済の成長率をプラスに維持するためには、労働時間を生産活動から（再生可能資源回復のための）環境保全努力活動へシフトさせ、再生可能資源のストックの成長率を正に保ちつづけないといけないことになる。したがって、再生可能資源ストックの成長率は正となる。これら2つの結果を受けて、当該経済の成長率は上昇することになる。

最後に、 α_4 が上昇した場合を考えよう。これは、生産に用いられる枯渇性資源のシェアが上昇する状況である。この場合に、各変数の成長率に及ぼす影響は以下のようになる。

$$\frac{\partial g}{\partial \alpha_4} = \frac{-\rho(\alpha_3 + \mu\epsilon) - \alpha_3\theta(DL - \gamma)}{\Delta^2} < 0 \quad (41)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \alpha_4} = \frac{-\rho(1 - \theta)(\alpha_3 + \mu\epsilon) - \alpha_3\theta(1 - \theta)(DL - \gamma)}{\Delta^2} < 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial g_R}{\partial \alpha_4} = -\frac{\alpha_2\alpha_3(1 - \theta)\{(DL - \gamma) + \rho(\alpha_3 + \mu\epsilon)\}}{(\alpha_3\Delta)^2} < 0 \quad (43)$$

ただし、(41)、(42)、(43) 式の符号決定には、仮定2における $DL > \gamma$ を用いた。

(41)、(42)、(43) 式は、それぞれ、生産に用いられる枯渇性資源のシェアが上昇すると、当該経済の成長率は低下すること、枯渇性資源の使用量の減少が阻害されること、すなわち、枯渇性資源への依存度が上昇すること、再生可能資源ストックの成長率は低下することを意味する。

生産に用いられる枯渇性資源のシェアが上昇するという事は、枯渇性資源への依存度が上昇するという事なので、当然、枯渇性資源の使用量は増加することになる。また、生産に用いられる枯渇性資源のシェアが上昇するという事は、枯渇性資源に比した再生可能資源の相対的な評価が低下することを意味するものでもあるため、主体にとっては再生可能資源回復のために労働力を投資するよりも生産活動に労働力を投資するほうが好ましいことになる。その結果、再生可能資源の再生関数が使用による減耗分に比して小さくなるため、再生可能資源ストックの成長率は低下することになる。したがって、当該経済の成長率は低下することになる。

2.4.3 モデルからのインプリケーション

表1は、本サブセクションで得られた結論を要約したものである。尚、 g_E は補題1から負であったため、便宜上その実質的な変化はマイナスを乗じたもので示されている。

本論は1節においても言及したように、環境資源の利用をはじめとする様々な要因と持続的成長との関連性について分析することが主目的であるため、ここでは持続的成長の観点から、以上の結果を要約したい。2.3節でふれたように、本論ではポジティブな当該経済の成長率が達成される場合に焦点を当てているため、本サブセクションで

得られた結果は、2つのケースに大別されることになる。1つは、より高い持続的成長が達成されるようなケースであり、いま1つは、持続的成長が達成されるものの、その程度は鈍化してしまうケースである。以上の観点の下では、2つの命題が得られることになる。

Parameter	g	$-g_E$	g_R
θ	-	+	-
ρ	-	+	-
D	+	-	+
γ	-	+	-
ϵ	+	-	+
μ	+	-	+
α_3	+	-	+
α_4	-	+	-

表 1: 各パラメータの成長率に与える影響

命題 1 主体に対し、再生可能資源回復のための環境保全努力に労働力を傾注させるようなショック（再生可能資源の再生関数における生産の効率性を表す技術パラメータの上昇、汚染物が生産性に与える負の外部効果のインパクトの上昇、生産性に負の外部効果をもたらす汚染物の発生率の上昇、ならびに、生産に用いられる再生可能資源のシェアの上昇）は、再生可能資源の更なる蓄積を促進し、経済のより高い持続的成長を可能にする。 □

証明: 上述の議論から明らかである。 ■

命題 2 主体に対し、再生可能資源回復のための環境保全努力ではなく、生産活動に労働力を傾注させるようなショック（異時点間の代替弾力性の低下、時間選好率の上昇、再生可能資源使用による減耗の程度の上昇、ならびに、生産に用いられる枯渇性資源のシェアの上昇）は、再生可能資源の蓄積を阻害し、経済の持続的成長の程度を鈍化させる。 □

証明: 上述の議論から明らかである。 ■

2.4.4 環境政策へのインプリケーション

環境経済学の1つの重要な使命は、他の学問分野同様、精緻な規範的・実証的分析を展開することに加えて現実的・政策的な課題に対しても十分に適用可能な簡明なインプリケーションを導くことにある。ここでは先に得られた命題のうち我々の大きな分析テーマである、より良い持続的成長の達成という課題についてポジティブな意味をもつ命題 1 を基礎に、環境政策へのインプリケーションを議論していく。

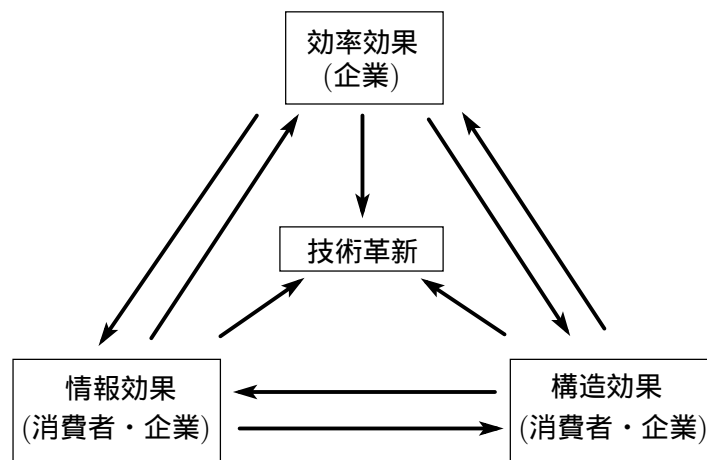


図 1: 技術革新の分類

技術革新と環境政策

まず、再生可能資源の再生関数における生産の効率性を表す技術パラメータ D の観点から考えていこう。このパラメータについて、単に狭義の「技術的」側面のみを捉えるパラメータと考えるのは早計で、以下に述べるようになりに広い概念を包摂するものと考えられる。したがって、このことに付随する環境政策も、環境に関する広い意味での技術革新全般を推進するための政策でなければならないだろう。

一口に技術革新と言っても、単に企業の有する生産技術の向上のみを意味するわけではない。我々はここで環境資源生産についての技術革新というものを、図 1 に示されるように 3 つの効果に分解してみる。まず第 1 は、生産単位あたりの資源利用の効率性向上や汚染物質排出削減を可能とする「効率効果」である。これは企業側の生産技術の向上を意味するわけであるから、一般に言われる技術革新や技術進歩というのは、このことを指している場合が多い。したがってこれは主に企業側からもたらされる効果である。第 2 の効果は、環境に及ぼす複雑な影響に関する情報の流布や環境保全に対する意識の向上といった側面を捉える「情報効果」である。²⁸ 情報の特性ということから考えて、これは企業側、消費者側双方からもたらされる効果であろう。さらには第 3 点目として、経済全体での生産構造の在り方を変化させるような効果をもつ「構造効果」が挙げられる。すなわち、技術革新をリードする企業の技術開発に対する考え方が変化し、従来の利益追求型から環境へのインパクトをも考慮した技術開発が進み、それが企業間での *de facto standard* として定着すればマクロ経済構造全体に影響を与える効果を発揮すると考えられる。この効果は、主に企業側の努力によってもたらされるものと推測されるが、一方で、企業側、消費者側双方における環境情報の流布がこの効果を下支えし後押しすると考えられるため、より広い意味で捉えるべきであろう。

ここでの分類から明らかなのは、それぞれの効果が必ずしも独立のものではないということである。例えば、1 つの考えられる経路として、「情報効果」の高まりによって「構造効果」が一層促され、それがポジティブな意味での環境技術のスピルオーバー

²⁸ 環境意識の向上を促す 1 つの大きな契機となり得るのが、情報を知ることであると考えられる。

を生み出して、具体的に個々の企業にとっての「効率効果」として結実するということが考えられる。また逆に、環境技術についてのリーディング・カンパニーが「効率効果」として新技術を開発したときに、それが「情報効果」によって社会に広く流布し、結果として経済の生産構造をある程度転換させるような「構造効果」をもたらす場合も考えられる。²⁹

上に示したように、環境に関する広い意味での技術革新は、経済の持続的成長にとって好ましいものとなる。しかしながら、技術革新は、時として環境に対しマイナスの影響をもたらす場合もあり、環境面での技術革新を考える際には、短期での影響のみならず中・長期的な時間軸の上に立って、そのネットでの影響について十分な配慮を行うことが必要であると考えられる。³⁰

以上のことに鑑みると、環境に配慮した持続可能な技術革新の道筋を構築するには、企業や地方自治体が環境関連の研究・開発に投資し、且つ、環境にとってプラスに働く技術を製品や製造工程で採用するよう適切なインセンティブを与えることが必要である。そうしたときに、環境に関する情報や知識は社会にとってハブの役割を果たすものとなるのである。上での議論を受けて、広い意味での環境技術革新をリードしていく際に、我々は以下に提示する3点を強調したい。

まず第1点として、生産単位あたりの資源利用効率向上や汚染物質排出削減を可能とする「効率効果」を生み出すような技術開発をスムーズに進められるような施策が挙げられる。「効率効果」による技術革新の達成は、上でも述べたように一般的な技術革新の大部分を占めるものであり、持続的成長という観点から極めて重要である。この点については、内生的技術進歩モデルの分析において広く認識されているように、政府が環境 R&D 活動に対して補助金を拠出することが適切である。通常、市場経済の下では R&D 投資が社会的に最適な水準よりも過少になる傾向があり、その分を補填してやるのが望まれるわけである。ただし、これについては先に述べたように、時として環境にマイナスの影響を与える場合もあるため、この技術創出活動をバックからサポートするためにも、さらに異なった視点からの政策が必要不可欠になってくる。

そこで第2の施策として、政府が企業の技術開発に対する長期的研究をサポートするための仕組みをデザインすることである。これは、既に多くの OECD 諸国で推進されていることであるが、具体的には、政府が技術開発における協働を官民の間だけでなく、民間部門の異なる企業同士の間でも行えるようにバックアップすることを意味している。仮に、政府が企業と大学や公的機関との協力（いわゆる産学協同）や民民連携を奨励し、そのような機会を具体的に与えるならば、単体では十分な投資収益を生み出すのが困難な企業にとっては、研究・開発投資に付随する多額のコストや不確実性から幾分緩和され、コスト面、研究環境面から見ても、より効率的な技術開発が可能となるであろう。先の議論との関連では、この第2の施策は「構造効果」を補完するものと考えられる。

²⁹ 企業は専門的な立場からその新技術に興味を示し、一方で消費者も情報の流布によってその新技術のトータルな優秀性を認知するならば、その社会にとって新技術の模倣・採用は誘因整合的なものとなるだろう。

³⁰ 例えば、OECD (2002) では、近年の OECD 地域全体では、確かに技術革新により、経済活動は資源利用の効率性という点では向上してきた一方で、世界全体の生産量の増加分が資源利用にもたらす数量効果も上昇し、効率向上により達成されたプラスの効果を上回る大きさであることが報告されている。

第3は、環境の質に対する人々の意識の高まりを誘うために、国、地方自治体などが、企業の担当者や一般の消費者への環境教育を充実させることが挙げられる。人的資本と経済成長に関する多くの研究が指摘しているように、教育は労働生産性の向上という間接的なルートで財の生産にも寄与するため、教育投資の増加はロング・ランでの持続的成長にとって必要不可欠なものと考えられる。³¹ 我々のモデルに則して言うならば、こうした通常の教育投資に類似した効果はパラメータ D に含まれていると見るべきであり、環境教育による D の上昇が再生可能資源の資源生産性を向上させ、財の生産にポジティブに影響してくるのである。この施策は以前に指摘した「情報効果」を生み出すものであると考えられよう。

この段階において再度確認しておくべきことは、それぞれの政策は密接に関連し、お互いに高め合う関係にあるということである。とりわけ、企業と消費者の間でのリンケージは極めて重要である。例えば、技術革新が進展しないのは、往々にして研究・開発が足りないためではなく、需要が不足しているためであるとも言われている。すなわち、ある新技術に対して、製品の品質の高さや環境保護の面で市場からの支持を得、その製品の需要が拡大すれば、企業が技術開発にさらなる労力を傾注する強力なインセンティブを付与することになる。一方で、こうしたニーズを高めるには、まさに環境の質（環境問題）に対する人々の理解や意識を向上させるための環境教育の拡充が必要となる。環境教育が充実し、人々の環境保全に対する意識が改善すれば、それは結果として、環境を配慮した新しい技術製品に対する消費者の需要を喚起することにつながると考えられる。こうした市場動向を受けて、企業はさらなる新技術の開発に取り組んでいくだろうし、こうした動きが他の企業にも波及していくであろう。我々のターミノロジーに従うならば、仮に最終的に「効率効果」によって具現化される技術革新であっても、そこへと到る過程では「情報効果」や「構造効果」が複雑に、相互的に、また階層的に影響し合っているのである。すなわち、これらはまさに環境技術革新についてのプロセス・イノベーションを表している。したがって、上で挙げたようなそれぞれの効果を補完するような施策を同時並行的に行っていく必要があると考えられる。翻って言うならば、政府は、産学協同、民民連携、または地方自治体、企業、そして消費者の間の緊密な調整を図りながら、環境に関する技術革新全般をサポートすることが必要である。

資源代替と環境政策

次にもう1つの観点、すなわち生産に用いられる再生可能資源のシェア α_3 の上昇という観点から考えよう。これは、モデルに則して考えるなら、再生可能資源を利用する方がより効率的に生産活動を行えるようになることを意味するため、枯渇性資源から再生可能資源への資源の代替を進めることに他ならない。したがって、このような移行を促進する政策、すなわち、企業や消費者に対して、クリーンな資源を使用することのbenefitを理解させるような政策が必要である。このことを素直に考えるならば、やはり環境教育の拡充という施策が重要視されることになる。もちろん、企業側にある一定量の再生可能資源の使用を義務付けるといった施策もあるが、現実的にこうしたrationingは大きなコンフリクトを伴うものになる。いずれ、環境教育を充実させると

³¹ 例えば、Lucas (1988) を見よ。

いう施策は、資源利用の文脈では従来から指摘されてきたことであり、ここではさらに異なった視点から議論を展開していく。

上で述べた環境教育の拡充という施策は、仮にそれが先進工業国においてのみ実施されたのでは、その環境保全に対する実効性は著しく低いものに止まるであろう。すなわち、環境問題の1つの本質である環境外部性を考慮に入れた場合、先進工業国のみならず、開発途上国の生産活動が地球環境に及ぼす負の影響も甚大なものになると予想される。このことから、開発途上国についても先進工業国同様、枯渇性資源から再生可能資源への移行を促進するような政策を実施することが必要である。したがって、世界各国で同時並行的に環境教育のプログラムを推進していくことが重要である。

World Bank (2000)をはじめ、多方面で指摘されているように、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は、悪化する自然資本を物的資本蓄積で代替することによって成長を持続させることはできないため、過去に先進工業諸国のとってきた「今成長して後で浄化する」というアプローチを引き合いに出し、途上国の政策立案者は環境問題を無視して、経済成長の加速化のみに焦点を当てた政策アプローチを取りがちなのだという。しかしながら、彼らは、経済的・社会的・環境的なコストの潜在的影響力の大きさと、しばしばその被害は不可逆的であるというエコロジーの現実を無視している。したがって、このような開発途上国の政策指向を転換させるためには、はたまた開発途上国の公害問題を克服し地球的規模で持続可能な発展を達成するためには、開発途上国の自助努力に対する先進国及び国際機関などの支援が必要不可欠となる。³² その際に重要なことは、これらの資金的・技術的援助をより一層充実するだけでなく、例えば途上国の政策決定者に対するセミナーによる環境教育も推進し、クリーンな資源へ移行できるような土壌を形成することが必要であろう。

以上を要約するならば、先進国の政策決定者は、自国内における環境教育をより充実させるとともに、開発途上国の環境問題に対する自助努力を支援する際には、資金的・技術的援助のみならず、現地での環境教育を推進すべきである。こうした施策が我々のモデルで言うところの α_3 を上昇させ、より良い持続的成長を達成する上での扉を開くことになるのである。

³²現在、OECDの開発援助委員会加盟国においては、ODA（政府開発援助）資金により、開発途上国における様々な環境管理にかかる資金的技術的援助を行っている。また、例えば日本の場合、JICA（国際協力事業団）等が環境ODAを行っている。その他にも、UNEP（国連環境計画）は、GEMS/GRIDによる世界の環境のモニタリング情報提供、環境援助の仲介を行うクリアリングハウスの実施、セミナーによる人材育成、環境教育、広報など多くの分野にわたって途上国の環境問題解決努力を支援している。尚、GEMSとは、地球モニタリングシステム（Global Environmental Monitoring System）のことであり、国際有害化学物質登録制度（IRPTC）、国際環境情報照会制度（INFOTERRA）とともに、UNEP（国連環境計画）の「地球監視」プログラムを構成するものである。GEMSは、主に人の健康を保護し、必要な天然資源を保全するために世界の環境を監視する活動を5つの重要な分野にわたり行っているが、その中の1つとして、再生資源の保全が含まれている。一方、GRIDとは、地球資源情報データベース（Global Resource Information Database）のことであり、GEMSが収集加工したデータや人工衛星によるリモートセンシングデータなど環境に関する多種多様なデータを統合し、世界中の研究者や政策決定者へ提供することと環境データ処理技術が開発途上国へ移転することを目的として設立されたものである。

3 分権経済

環境問題の分析においては，一般に環境外部性 (environmental externality) が存在することから，中央計画経済の解と分権経済の解の間には乖離が生じるであろう．例えば，Bovenberg and Smulders (1995) 等においてもこのことが示されている．したがって，我々のモデルにおいても，分権経済 (市場経済) という側面からモデルを再検討してみる必要があると考えられる．2.3 節の中央計画問題の場合と同様に，分権経済における代表的家計の行動規準は以下のように定義される．

定義 3 代表的家計は，最終財の生産に影響を及ぼす環境外部性 (汚染物 P) を認識できず，したがって，そのインパクトを無視して最適化行動をとるものとする．すなわち，分権経済では外部効果は内部化されない．

このケースも通常の最適化の手続きが利用できるから，経常価値ハミルトニアンをセットアップして，上の定義に基づき 1 階の条件を求めると，

$$c^{-\theta} = \lambda_K \quad (44)$$

$$\lambda_K \alpha_2 \frac{Y}{uL} = \lambda_R DR \quad (45)$$

$$\lambda_K \alpha_4 \frac{Y}{E} = \lambda_S \quad (46)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_K}{\lambda_K} = \rho - \alpha_1 \frac{Y}{K} \quad (47)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_R}{\lambda_R} = \rho - \alpha_3 \frac{\lambda_K Y}{\lambda_R R} - D(1-u)L + \gamma \quad (48)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_S}{\lambda_S} = \rho \quad (49)$$

ただし，この最適化問題に付随する横断性の条件は，中央計画問題の場合と全く同じである．これら 1 階の条件から最終財生産の成長率 (g)，再生可能資源についての成長率 (g_R)，枯渇性資源についての成長率 (g_E) を求めると，中央計画問題におけるそれぞれの成長率 (15)，(17)，(19) 式と一致する．³³ したがって，驚くことに本論のモデルでは，計画解と分権解とが寸分違わず一致することになる．このような帰結の要因は一体どこにあるのだろうか．

いま，(44)-(49) 式をみると，中央計画問題のときと異なるのは (46) 式，すなわち枯渇性資源フローに関する静学的最適条件のみである．ここで，分権経済における均衡条件 $P = BE^\mu$ を代入する前の (46) 式をみてみると

$$\lambda_K \alpha_4 \left(\frac{B}{P} \right)^{-\epsilon} E^{-\mu\epsilon} \frac{Y}{E} = \lambda_S$$

³³Schou(2000) においても同様の結論が導かれている．

この条件式について、両辺の対数をとって時間について微分し、定常状態における表記法を利用すると次のような式が導かれる。

$$g_{\lambda_K} + \epsilon_{gP} - (1 + \mu\epsilon)g_E + g = g_{\lambda_S}$$

一方で、中央計画経済で (46) 式に対応する条件式、すなわち (10) 式に関して上と同様のオペレーションを行うと、次のような式が得られる。³⁴

$$g_{\lambda_K} - g_E + g = g_{\lambda_S}$$

これらの結果より、中央計画経済と分権経済の間の乖離分は $\epsilon_{gP} - \mu\epsilon_{gE}$ ということがわかる。

ところで均衡条件 $P = BE^\mu$ より、定常状態では $g_P = \mu g_E$ という関係が成立するから、これを乖離分に使用すると $\epsilon_{gP} - \mu\epsilon_{gE} = 0$ となる。すなわち、外部性を原因とした両経済間での解の乖離は、本モデルでは完全にオフセットされることになる。こうしたことが生じる理由は、非常に直感的なものである。つまり、我々のモデルでは、汚染物 P から発生する限界的な負の効果 ϵ_{gP} と、枯渇性資源 E の利用から生じる限界的な正の効果 $\mu\epsilon_{gE}$ が、通時的に全く同一の率で成長していくのである。よって、汚染物生成メカニズムの定式化がこのような帰結をもたらしていると言える。以上の中央計画経済と分権経済との比較から、次のような重要なインプリケーションが導かれる。

命題 3 環境資源とそれから生じる環境汚染物の存在を考慮したとき、両者が比例的関係で成長していくという条件下では、環境外部性を内部化する計画経済と、内部化できない分権経済との間の乖離は生じない。したがって、外部性による歪みを是正するための政府の介入も必要ない。 □

証明: 上述の分権経済に関するプロパティの議論から明らかである。 ■

このある意味驚くべき帰結は、モデルについての特定の定式化の下で得られるものであることに注意すべきである。もちろん上記の比例的関係を崩すならば、計画経済と分権経済の乖離という、この問題における conventional な帰結が得られると予想される。さらにこの命題 3 を現実との関係から捉え直した場合、

命題 3 の系 現実の環境評価の際に、汚染排出物質の使用量とそこから排出される実際の汚染物量が単純な比例的関係で表されないにもかかわらず、単純な比例的関係を基に環境悪化のインパクトが計算されているとしたら、それは汚染物質の負の影響を過少評価し、経済が *social optimum* により近い状態にあると判断してしまう恐れがある。 □

証明: 上での議論より明らかである。資源利用と汚染物質の特定の関係が計画解と分権解の一致性を生み出すことが命題 3 で示された。したがって、実際の評価がそうした

³⁴この式は、付論 A における (A3) 式と同一のものである。

特定の関係に近似的な関係を想定して行われているならば，outcomeの乖離分を過少評価することになる。

これらの結果より，汚染物質の生成プロセスの評価が，現実には極めて重要であることが理解されよう。もしこの部分の評価が適切に行われなければ，社会経済的インパクトを正しく推計することが困難になり，環境政策の内容も妥当性をもたないものとなる危険性がある。

4 持続的成長へ向けて

本節では，我々のモデルをこれまでとは異なった観点から分析し，持続的成長ということに対するさらなるインプリケーションを提示する。とりわけ，枯渇性資源と持続的成長の問題に焦点をあて分析がなされる。ここで付論Bに示されている(B12)-(B15)式を利用して位相図を描き，その特性を調べることにする。付論Bでも述べているように，これら4本の動学方程式体系によって，システムの動学が完全に記述される。はじめに， $g_{Z_1} = 0$ 線， $g_{Z_2} = 0$ 線， $g_{Z_3} = 0$ 線を導出しよう。それらは以下のように求められる。

$$\hat{Z}_2 = (1 - \alpha_1) \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon}{\alpha_3 + \mu\epsilon} \right) \hat{Z}_1 - \frac{\alpha_3(DL - \gamma)}{\alpha_3 + \mu\epsilon} \quad (50)$$

$$\hat{Z}_2 = \left(1 - \frac{\alpha_1}{\theta} \right) \hat{Z}_1 + \frac{\rho}{\theta} \quad (51)$$

$$\hat{Z}_2 = \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon}{\alpha_1} \right) \hat{Z}_3 + \frac{\alpha_3(DL - \gamma)}{\alpha_1} \quad (52)$$

ここで， $g_u = \left(\frac{\alpha_3 DL}{\alpha_2} \right) \hat{u} + \frac{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_1 \hat{Z}_2}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon}$ と(52)式を用いると， $g_u = 0$ 線は最終的に以下のように求められる。

$$\hat{u} = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_3 DL} \right) \hat{Z}_3 \quad (53)$$

これら(50)-(53)式を用いることで，第1象限に Z_1 と Z_2 ，第2象限に Z_3 と Z_2 ，そして第3象限に Z_3 と u の関係を統合的に示す位相図を描くことができる。このとき $g_{Z_1} = 0$ 線の傾きは，必ず正値をとる。一方， $g_{Z_2} = 0$ 線については正負が一意に決定されない。事前的に可能と思われるケースとして，第1象限において $g_{Z_2} = 0$ 線の傾きが $g_{Z_1} = 0$ 線のそれより大きいケース，すなわち $1 - \frac{\alpha_1}{\theta} > \frac{(1 - \alpha_1)(\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon)}{\alpha_3 + \mu\epsilon}$ となるケースが考えられるが，このときには均衡は存在せず実行可能でない。したがって，実行可能なケースとして以下の2つのケースについてそれぞれ分析していこう。

- $$\left\{ \begin{array}{l} \text{(i)} \quad g_{Z_2} = 0 \text{ 線の傾きが正の時，すなわち } \frac{(1 - \alpha_1)(\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon)}{\alpha_3 + \mu\epsilon} > 1 - \frac{\alpha_1}{\theta} > 0 \text{ のケース} \\ \text{(ii)} \quad g_{Z_2} = 0 \text{ 線の傾きが負の時，すなわち } \theta < \alpha_1 \text{ のケース} \end{array} \right.$$

ただし，ここで(i)のケースにおいては， $g_{Z_2} = 0$ 線の傾きは正で， $g_{Z_1} = 0$ 線のそれよりも小さくなることには留意されたい。³⁵

³⁵(ii)のケースとの対応で言うならば，先に述べた実行可能でないケースおよび(i)のケースは， $\theta > \alpha_1$ となるケースである。これに $g_{Z_1} = 0$ 線の傾きとの関係で追加的な制約が付加されている。

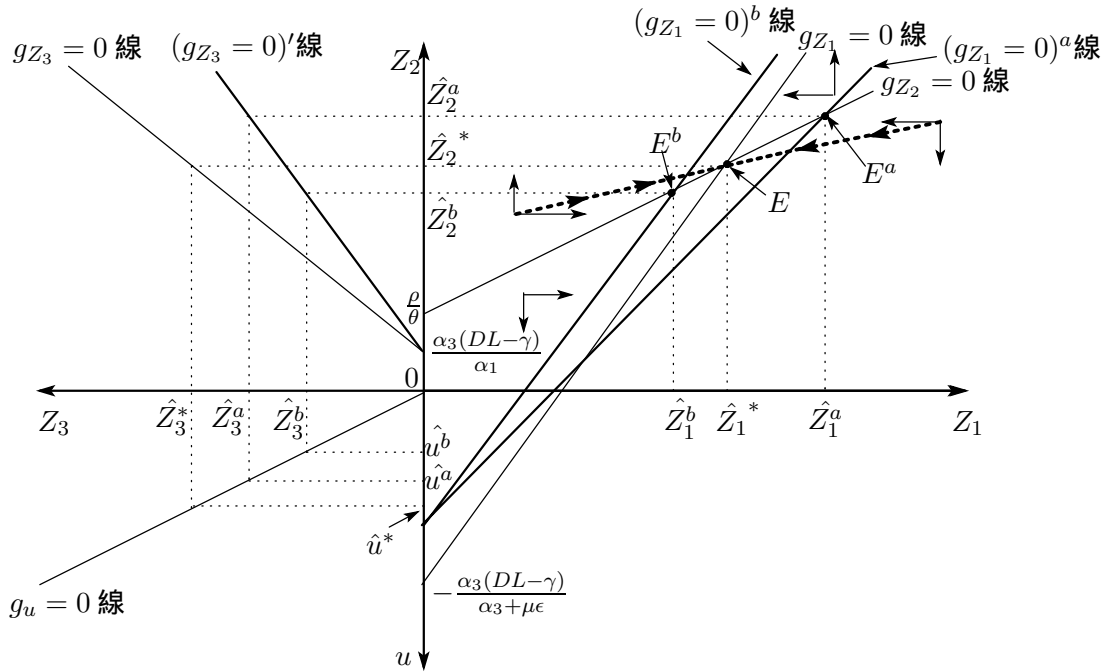


図 2: (i) のケース

いま 1 つの例として，汚染物が生産性に与える負の外部効果のインパクトを表すパラメータである ϵ が変化した場合を考えよう．図 2 は，ケース (i) の場合を表している．このとき， $g_{Z_2} = 0$ 線と $g_u = 0$ 線に変化はなく，変化するのは $g_{Z_1} = 0$ 線と $g_{Z_3} = 0$ 線の 2 本である．順にそれぞれの線が受ける影響について見ていこう．

まず， $g_{Z_1} = 0$ 線については，切片は上方にシフトする．また，傾きについては切片 $-\frac{\alpha_3(DL-\gamma)}{\alpha_3+\mu\epsilon} = 0$ として

$$\left. \frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial \epsilon} \right|_{-\frac{\alpha_3(DL-\gamma)}{\alpha_3+\mu\epsilon}=0} = -\frac{\mu(1-\alpha_1)\alpha_1\hat{Z}_1}{(\alpha_3+\mu\epsilon)^2} < 0$$

となるので，必ず下方にシフトする．ただし，ここで留意しなければならないことは， $\frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial \epsilon} < 0$ の度合い（絶対値）によって，図示されているように $(g_{Z_1} = 0)^a$ （ケース ）と $(g_{Z_1} = 0)^b$ （ケース ）の 2 通りの変化が考えられることである．

まず， $g_{Z_1} = 0$ 線が $(g_{Z_1} = 0)^a$ 線にシフトするケース を見てみよう．このとき，均衡点は E から E^a へと移る．³⁶ それに伴い，産出・物的資本比率 Z_1 は \hat{Z}_1^* から \hat{Z}_1^a へと上昇し，消費・物的資本比率 Z_2 も \hat{Z}_2^* から \hat{Z}_2^a へと上昇する．一方で，枯渇性資源のフロー・ストック比率 Z_3 は，当初の \hat{Z}_3^* から \hat{Z}_3^a へと低下する．最後に，財生産に割く労働時間シェア u は， \hat{u}^* から \hat{u}^a へと減少する．すなわち，再生可能資源の蓄積に割く均衡労働時間シェア $1 - \hat{u}$ は増加する．このことから， ϵ の上昇は，枯渇性資源の利用を抑制し，再生可能資源の生産を活発化させることがわかる．

³⁶ 均衡点 E は，サドル経路安定的な均衡である．均衡へと収束するパスは点線の矢印で示されている．

次に、 $g_{Z_1} = 0$ 線が $(g_{Z_1} = 0)^b$ 線にシフトするケースを見てみよう。このとき、均衡点は E から E^b へ移動する。 Z_1 は、 \hat{Z}_1^* から \hat{Z}_1^b へと低下し、 Z_2 も \hat{Z}_2^* から \hat{Z}_2^b へと低下する。その一方で、 Z_3 も \hat{Z}_3^* から \hat{Z}_3^b へと低下する。このとき、 $\hat{Z}_3^a > \hat{Z}_3^b$ なる関係になるから、枯渇性資源のフロー・ストック比率は、ケース に比してさらに大きく低下することになる。 u についても、 \hat{u}^* から \hat{u}^b へと減少するが、 $\hat{u}^a > \hat{u}^b$ であるので、 \hat{u} はケース よりも、さらに大きく減少し、逆に再生可能資源の蓄積活動はより一層活発化することになる。

このケース を解釈すると、 ϵ の限界的な変化による \hat{Z}_2 の変化が $\frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial \epsilon} = -\frac{\mu(1-\alpha_1)\alpha_1 \hat{Z}_1}{(\alpha_3 + \mu\epsilon)^2}$ であったから、1つの例として、相対的に再生可能資源の投入シェア α_3 が事前的に大きいケースで $(g_{Z_1} = 0)^b$ 線へのシフト現象が起こる。よって、 ϵ が上昇したとき、 α_3 が相対的に大きい経済では、今までに比してより一層、再生可能資源の蓄積が促進されることになり (\hat{u} の減少より)、枯渇性資源を相対的に節約できるようになる (\hat{Z}_3 のより一層の低下より)。ここまでの議論の結果を次の命題に集約する。

命題 4 負の環境外部性が高まったとき、枯渇性資源の利用が節約され、再生可能資源の生産が活発化する。そのとき財生産に占める再生可能資源の投入シェアが相対的に大きい経済では、枯渇性資源残存量に対する每期毎期の使用量（フロー）が一層節約されることになる。すなわち、正の経済成長を維持しながら、枯渇性資源のエンド・ポイントを延伸できることになり、資源利用の観点からより良い持続的成長経路の達成が可能になる。 □

証明: 上述の議論より明らかである。 ■

この結果は、2.4 節での比較分析を、要素集約度と時間シェアの変化を明示的に示すことによって異なった観点から捉えるものと考えられる。したがって、 $\theta > \alpha_1$ 且つこれに付随する条件が成立するとき、政策的に再生可能資源のシェアを高めてやることは、資源利用を考慮した持続的成長という課題をクリアする上で1つの方途となり得る。ただし、特にケース の分析結果から明らかになったこととして、ここでの限定的な意味における「持続的成長」を達成するには、経済活動の水準を幾分かは低下させなければならない。³⁷ この含意は、ケース で想定され得る社会経済システムが、再生可能資源の利用を相対的に重要視することから端的に表されるように、「環境にやさしい」経済システムであり、そのことは収穫一定の生産関数の下では他のマクロ変数の犠牲を不可避的に伴うのである。

次に (ii) のケース、すなわち $\theta < \alpha_1$ である場合について考えていこう。このケースについては図 3 に示されている。³⁸ (i) のケースと同様に ϵ が変化する場合の状況がこの図によって明らかになる。 $g_{Z_2} = 0$ 線がマイナスのスロープをもつ点以外は、基本的に (i) のケースと同じである。以前に示したように、 $g_{Z_1} = 0$ 線の傾きの減少は2通りのパターンをとりうる。これらをやはりケース とケース に分けて考えることにする。

³⁷ 正の成長は維持される一方で、産出・物的資本比率および消費・物的資本比率は、 ϵ の上昇というマクロ・ショックが起こる前に比して低下するという意味である。

³⁸ (i) のケースと同様に、定常均衡 E はやはりサドル経路安定的である。

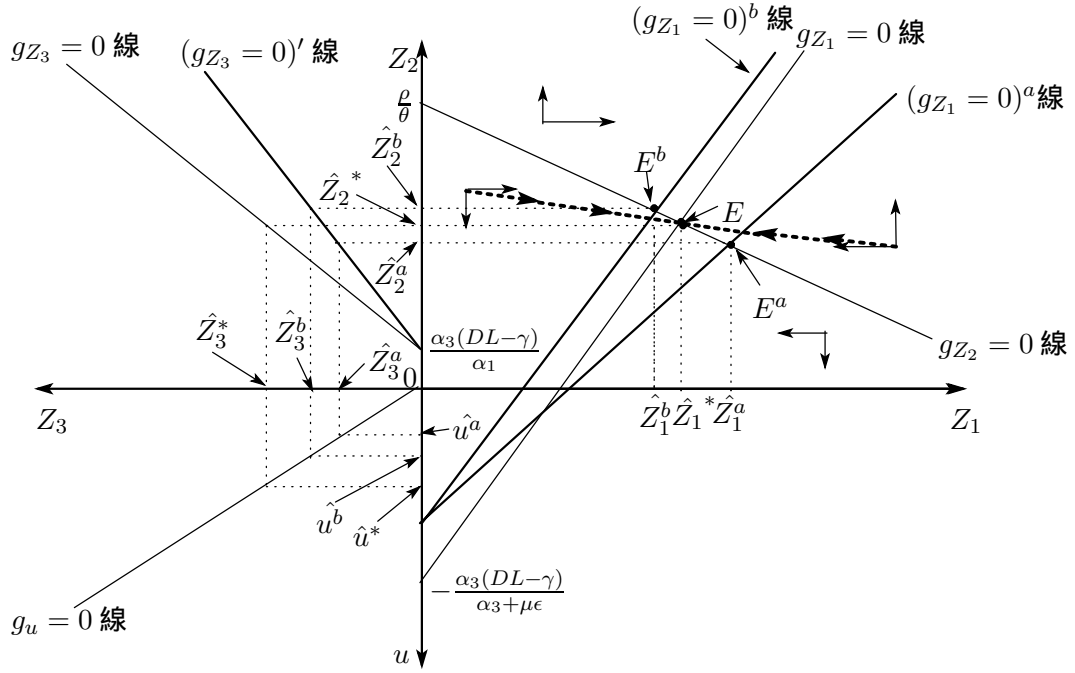


図 3: (ii) のケース

はじめにケース (i) のときには、 $g_{Z_1} = 0$ 線が $(g_{Z_1} = 0)^a$ へとシフトし、新たな均衡は E^a へと移動する。これにより、 Z_1 は \hat{Z}_1^* から \hat{Z}_1^a へと上昇し、逆に Z_2 は \hat{Z}_2^* から \hat{Z}_2^a へと低下する。また、 Z_3 は、当初の \hat{Z}_3^* から \hat{Z}_3^a へと低下する。最後に、 u は、 \hat{u}^* から \hat{u}^a へと減少する。

続いてケース (ii) では、 $g_{Z_1} = 0$ 線が $(g_{Z_1} = 0)^b$ へとシフトするから、新しい均衡点は E^b である。この変化によって、 Z_1 は \hat{Z}_1^* から \hat{Z}_1^b へと低下し、逆に Z_2 は \hat{Z}_2^* から \hat{Z}_2^b へと上昇する。また、 Z_3 についても、初期の \hat{Z}_3^* から \hat{Z}_3^b へと低下する。最後に、 u も \hat{u}^* から \hat{u}^b へと減少する。

ここで分析結果を議論する前に、1つ確認しておかなければならないことがある。それは、この (ii) の場合におけるケース (ii) の実行可能性についてである。上の分析よりケース (i) では、 ϵ の上昇によって、 Z_1 が低下し Z_2 が上昇するという結果を得た。一方、付論 B の (B4) 式より、均斉成長経路上では $g = g_K = Z_1 - Z_2$ という関係が成立することがわかる。この結果を総合すると、このケース (ii) では、 ϵ の変化によって定常状態での成長率 g が減少するということになる。³⁹ しかしながら、2.4.2 節の (32) 式から明らかのように、 $\frac{\partial g}{\partial \epsilon} > 0$ であることが要請される。よってこのケース (ii) は、我々のモデルでは実行可能でないということになる。このことから、(ii) の分析に際しては、以後ケース (ii) に限定して議論を進めることとする。

さて、ケース (ii) では、枯渇性資源についてのフロー・ストック比率 Z_3 の低下、財生産に割く労働時間シェア u の減少が確認された。したがって、(i) と同様にこの (ii) でも、負の環境外部効果の上昇は枯渇性資源の使用を節約し、再生可能資源の蓄積をよ

³⁹ Z_1 が低下し Z_2 が上昇するので、 $\frac{\partial g}{\partial \epsilon} < 0$ の成立が予想される。

り一層進める方向に作用する。ただし、異時点間の代替の弾力性が相対的に大きいので (θ が相対的に小さいので)、投資量を増やして消費水準を抑えるような均衡に向かうことになる ($Z_1 = \frac{Y}{K}$, $Z_2 = \frac{C}{K}$ の変化より)。以上を総括して、次の命題にまとめる。

命題 5 $\theta < \alpha_1$ の場合でも、負の環境外部性が高まったとき、枯渇性資源の利用が節約され、再生可能資源の生産が活発化する。やはりこのときにも、正の経済成長を維持しながら、枯渇性資源のエンド・ポイントを延伸できることになり、資源利用の観点からより良い持続的成長経路の達成が可能になる。 □

証明: 上述の議論より明らかである。 ■

本節の分析では、要素集約度と時間シェアという観点から、持続的成長経路のプロパティについて詳細に議論を行ってきた。これら 2 つの観点からモデルを再考することによって、より明示的に 2.4 節の議論をサポートする結果が得られた。しかしながら、ここでの分析は負の環境外部性の上昇という 1 つの限定的な視点からのみ展開されている。よって他のパラメータの変化による影響も考える必要があるが、それについては上での分析からも明らかなように 2.4 節での議論の延長上にあるため、ここでは分析を省略する。もちろん、個々のパラメータの変化に対して、本節と同様の分析を行えば、以前の議論をより一層豊かなものにすることが期待できるだろう。

5 おわりに

本論では、再生可能資源および枯渇性資源の双方の動学プロセス組み込んだ 3 部門内生的成長モデルを提示し、環境資源利用に関連するさまざまな問題について、持続的成長とのリンケージから詳細な分析を展開した。本論を閉じるにあたり、分析結果の概要を持続的成長という観点に集中してまとめたい。

本論の一連の分析では、Hartwick (1977) 流の持続的成長の概念を踏襲し、(i) 正の成長の達成、が持続的成長とイコールであると定義し議論を進めてきた。しかしながら、本論における分析目的から強調されるべき環境資源利用の観点から考えた場合、持続的成長の概念について、追加的に次の 2 つの定義付けが可能となろう。それは、(ii) 正の成長の達成と枯渇性資源使用の節約、という (i) より強い定義。さらには、(iii) 正の成長の達成と枯渇性資源使用のより一層の節約、という (ii) をさらに強化した定義である。(i)、(ii) については、仮定として本論の全ての分析において満たされている。

(iii) については、資源利用と経済成長の複眼的視点からみてより望ましい、すなわち「より」環境にとってやさしい成長プロセスとして捉えることができ、それを我々はより高位の持続的成長概念として位置付けるのである。この定義に照らして分析結果を振り返ると、(iii) の持続的成長は、再生可能資源回復のための環境保全努力にさらなる労働力を再配分させるようなショックがある場合に達成されることが明らかとなった。⁴⁰

⁴⁰ 例えば、生産に用いる再生可能資源のシェア α_3 が上昇した場合には、(iii) の定義下での持続的成長は達成可能だが、生産に用いられる枯渇性資源のシェア α_4 が上昇した場合には、それは達成不可能となる。

環境に配慮した経済政策を考える場合には，正の経済成長の達成に加えて，環境資源を量的側面および質的側面の双方から考えることも必要不可欠である．したがって，とりわけ (iii) の持続的成長概念との関係に鑑みた場合，本論で得られた「厳しい」ながらも「明るい」結論は，地球環境に育まれて生きる術しかもたない我々が，今後進むべき方向性を示唆するものである．

最後に，今後本論に課せられるべき課題について簡単に記しておこう．本論では，再生可能資源の動学に関して，その再生関数が，資源回復のために費やされる労働と再生可能資源の自然再生能力のそれぞれについて線形であるという仮定の下で分析を進めてきたが，収穫逓減の可能性を含んだより現実的と思われる仮定の下で再度分析する必要性があろう．また，枯渇性資源使用とそれに付随して発生する汚染物との関係を，単純な比例的関係で表現し分析してきたが，より一般性を有する関数形の下で再考する必要もあろう．これらの点に関しては，本論の次なるステップとして早急に取り組むこととしたい．

付論

A. 均斉成長率の導出

均斉成長経路上では、 Y, K, c は同じ成長率（この成長率を g で表す）でなければならない。また、 R が一定率で成長するならば（(4) 式より） u は一定でなければならない。この結果を用いて、定常状態において (8)-(10) 式の両辺の対数を取り、時間について微分すると以下の式が得られる。

$$-\theta g = g_{\lambda_K} \quad (A1)$$

$$g_{\lambda_K} + g = g_{\lambda_R} + g_R \quad (A2)$$

$$g_{\lambda_K} + g - g_E = g_{\lambda_S} \quad (A3)$$

定常状態において生産関数 (1) 式の対数を取り、時間について微分し、(2) 式を考慮すると以下の式が得られる。

$$g = \frac{\alpha_3}{1 - \alpha_1} g_R + \frac{\alpha_4 - \mu\epsilon}{1 - \alpha_1} g_E \quad (A4)$$

ここで (A3) 式における共役変数の成長率を除去するために、(A1) 式と (13) 式を (A3) 式に代入すると、次の (A5) 式が得られる。

$$(1 - \theta)g = g_E + \rho \quad (A5)$$

次に (9) 式と (12) 式より、

$$g_{\lambda_R} = \rho - \frac{\alpha_3 DL}{\alpha_2} u - D(1 - u)L + \gamma$$

が成立する。これに再生可能資源の遷移式 (4) 式より得られる $u = 1 - \frac{\gamma}{DL} - \frac{g_R}{DL}$ を代入すると、以下の式が得られる。

$$g_{\lambda_R} = \rho - \frac{\alpha_3 DL}{\alpha_2} + \frac{\alpha_3 \gamma}{\alpha_2} + \frac{\alpha_3 g_R}{\alpha_2} - g_R \quad (A6)$$

ここで (A1) 式と (A2) 式より得られる $g_{\lambda_R} = (1 - \theta)g - g_R$ を (A6) 式に代入すると、以下の (A7) 式が得られる。

$$(1 - \theta)g = \rho - \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (DL - \gamma - g_R) \quad (A7)$$

(A4), (A5), (A7) 式は未知の 3 変数（消費、資源搾取、再生可能資源の水準の成長率）に関する 3 本の方程式である。このシステムを解き、整理すると (15), (17), (19) 式により表される成長率が導出される。

内生的成長が達成されるためには、(15) 式より

$$\frac{\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)}{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)} > 0 \quad (A8)$$

が成立しなければならない．分母については必ず正值をとることが即座に導かれるので，内生的成長が保証されるための条件は，以下の式が成立することである．

$$\alpha_3(DL - \gamma) - \rho(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon) > 0 \quad (A9)$$

内点解であるためには，労働力が最終財の生産と再生可能資源の回復の双方に用いられることが必要である．これは，再生可能資源の成長率が $-\gamma$ 以上であり ($u = 1$ のケース)，且つ最大成長率 $DL - \gamma$ ($u = 0$ のケース) 以下でなければならないことを意味する．この条件は，(17) 式を用いると以下のように表される．

$$-\gamma < \frac{\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)(\mu\epsilon - \alpha_4) + (\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_2\rho\}}{\alpha_3\{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}} < DL - \gamma \quad (A10)$$

ところで，補題 2 に依れば，定常状態における再生可能資源の成長率 g_R の正值性は確保されているから，上の不等式条件の左側の関係は以下のように修正されるべきであろう．

$$0 < \frac{\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)(\mu\epsilon - \alpha_4) + (\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)\{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_2\rho\}}{\alpha_3\{(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - (1 - \theta)(\alpha_2 + \alpha_4 - \mu\epsilon)\}} < DL - \gamma \quad (A11)$$

よって (A11) の条件の右側の関係より， $\alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma) < \rho(\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)$ という条件式が導かれる．これは本文中の (18) 式と同値である．

B. 局所的安定性の証明

均斉成長経路上で一定となる変数を以下のように定義する．

$$Z_1 \equiv \frac{Y}{K} \quad (B1)$$

$$Z_2 \equiv \frac{C}{K} \quad (B2)$$

$$Z_3 \equiv \frac{E}{S} \quad (B3)$$

したがって

$$g_K = Z_1 - Z_2 \quad (B4)$$

$$g_{Z_1} = g_Y - Z_1 + Z_2 \quad (B5)$$

$$g_{Z_2} = g_C - Z_1 + Z_2 \quad (B6)$$

$$g_{Z_3} = g_E + Z_3 \quad (B7)$$

生産関数 (1) 式より，次の (B8) 式が得られる．

$$g_Y = \alpha_1 g_K + \alpha_2 g_u + \alpha_3 g_R + (\alpha_4 - \mu\epsilon) g_E \quad (B8)$$

ここで , (10) , (11) , (13) 式より

$$g_E = g_Y - \alpha_1 Z_1 \quad (B9)$$

が得られる . また (9) , (11) , (12) 式より

$$g_u = g_Y - \alpha_1 Z_1 + \frac{\alpha_3 DL}{\alpha_2} u \quad (B10)$$

が成立する . 続いて , (4) , (B4) , (B9) , (B10) 式を (B8) 式に代入し , 整理すると (B11) 式が導出される .

$$g_Y = \alpha_1 Z_1 + \frac{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_1 Z_2}{1 - \alpha_2 - \alpha_4 + \mu\epsilon} \quad (B11)$$

この (B11) 式を (B5) 式と (B10) 式に代入すると , 以下の (B12) , (B13) 式が得られる .

$$g_{Z_1} = (\alpha_1 - 1)Z_1 + \frac{\alpha_3(DL - \gamma) + (\alpha_3 + \mu\epsilon)Z_2}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon} \quad (B12)$$

$$g_u = \frac{\alpha_3 DL}{\alpha_2} u + \frac{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_1 Z_2}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon} \quad (B13)$$

次に , (8) 式と (11) 式 , ならびに (B6) 式を考慮すると , (B14) 式が得られる .

$$g_{Z_2} = \left(\frac{\alpha_1}{\theta} - 1 \right) Z_1 - \frac{\rho}{\theta} + Z_2 \quad (B14)$$

最後に , (B9) 式と (B7) 式より , 以下の (B15) 式が得られる .

$$g_{Z_3} = \frac{\alpha_3(DL - \gamma) - \alpha_1 Z_2}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon} + Z_3 \quad (B15)$$

以上より , ダイナミカル・システム (Z_1, Z_2, Z_3, u) は , (B12) , (B14) , (B15) , (B13) によって完全に描写される . 均斉経路上では , $g_{Z_1} = g_{Z_2} = g_{Z_3} = g_u = 0$ であり , このときの定常状態における変数の値をハットで表すこととすると , 定常状態で評価したヤコビアンは以下のように求められる .

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{Z}_1}{\partial Z_1} & \frac{\partial \hat{Z}_1}{\partial Z_2} & \frac{\partial \hat{Z}_1}{\partial Z_3} & \frac{\partial \hat{Z}_1}{\partial u} \\ \frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial Z_1} & \frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial Z_2} & \frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial Z_3} & \frac{\partial \hat{Z}_2}{\partial u} \\ \frac{\partial \hat{Z}_3}{\partial Z_1} & \frac{\partial \hat{Z}_3}{\partial Z_2} & \frac{\partial \hat{Z}_3}{\partial Z_3} & \frac{\partial \hat{Z}_3}{\partial u} \\ \frac{\partial \hat{u}}{\partial Z_1} & \frac{\partial \hat{u}}{\partial Z_2} & \frac{\partial \hat{u}}{\partial Z_3} & \frac{\partial \hat{u}}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha_1 - 1)\hat{Z}_1 & \frac{(\alpha_3 + \mu\epsilon)\hat{Z}_1}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon} & 0 & 0 \\ \left(\frac{\alpha_1}{\theta} - 1\right)\hat{Z}_2 & \hat{Z}_2 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\alpha_1 \hat{Z}_3}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon} & \hat{Z}_3 & 0 \\ 0 & -\frac{\alpha_1 \hat{u}}{\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon} & 0 & \frac{\alpha_3 DL \hat{u}}{\alpha_2} \end{bmatrix}$$

やや複雑な計算を要するが , trace と determinant はそれぞれ以下のように求められる .

$$Trace [J] = \frac{3\alpha_1(\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon)\{\rho(1 - \alpha_1) - \alpha_3(1 - \theta)(DL - \gamma)\}}{(\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon)\{\theta(1 - \alpha_1)(\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon) - (\alpha_3 + \mu\epsilon)(\theta - \alpha_1)\}} > 0 \quad (B16)$$

$$Det [J] = \frac{\alpha_3 DL \hat{Z}_1 \hat{Z}_2 \hat{Z}_3 \hat{u} \{\theta\alpha_1(\alpha_1 - 1) + \alpha_1\alpha_3(\theta - 1) + \alpha_1\epsilon\mu(\theta - 1)\}}{\theta\alpha_2(\alpha_1 + \alpha_3 + \mu\epsilon)} < 0 \quad (B17)$$

この結果に対して次の定理を適用する。⁴¹

定理 B1 拡張された *Routh-Hurwitz* 条件より, *trace* が正で且つ *determinant* が負であるならば, *determinant* は均衡点へと向かう安定的アームを形成するから, このとき均衡はサドル経路安定的である。□

この定理 B1 が述べる状況は, 目下の固有多項式 (characteristic polynomial) が, その解として負の固有値を 1 つと正の固有値を 3 つ有するという状況を指している。したがって, 我々のモデルは定常均衡の近傍において, 均衡はサドル経路安定的である。尚, このプロパティは分権経済のケースでも当然みたまされる。

参考文献

- [1] Aghion, P. and Howitt, P. 1998, *Endogenous Growth Theory*, MIT Press.
- [2] Arrow, K. J. and Kurz, M. 1970, *Public Investment, the Rate of Return, and Optimal Fiscal Policy*, Johns Hopkins University Press.
- [3] Barbier, E. B. 1999, "Endogenous Growth and Natural Resource Scarcity", *Environmental and Resource Economics*, 14(1), 51-74.
- [4] Bovenberg, A. L. and Smulders, S. 1995, "Environmental Quality and Pollution-Augmenting Technological Change in a Two-Sector Endogenous Growth Model", *Journal of Public Economics*, 57(3), 369-391.
- [5] Bovenberg, A. L. and Smulders, S. 1996, "Transitional Impacts of Environmental Policy in an Endogenous Growth Model", *International Economic Review*, 37(4), 861-893.
- [6] Bretschger, L. 1998, "How to Substitute in order to Sustain: Knowledge Driven Growth under Environmental Restrictions", *Environment and Development Economics*, 3(4), 425-442.
- [7] Brock, W. A. and Malliaris, A. G. 1989, *Differential Equations, Stability and Chaos in Dynamic Economics*, C. J. Bliss and M. D. Intriligator (eds.) Advanced Textbooks in Economics Vol.27, North-Holland.

⁴¹Routh-Hurwitz 条件の詳細については, 例えば Brock and Malliaris (1989, pp.75-77) や Gandolfo (1980, pp.248-250, pp.273-274) 等を参照せよ。

- [8] Caballero, R. J. and Lyons, R. K. 1992, " The Case of External Economies ", in A. Cukierman, Z. Hercowitz, and L. Liederman (eds.), *Political Economy, Growth, and Business Cycles*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [9] Cigno, A. 1981, " Growth with Exhaustible Resources and Endogenous Population ", *Review of Economic Studies*, 48(2), 281-287.
- [10] Di Vita, G. 2002, " Renewable Resources and Waste Recycling ", Fondazione Eni Enrico Mattei Working Paper Series No.9. 2002.
- [11] Eicher, T. S. and Turnovsky, S. J. 1999, " Non-Scale Models of Economic Growth ", *Economic Journal*, 109(457), 394-415.
- [12] Foley, D. K. and Michl, T. R. 1999, *Growth and Distribution*, Harvard University Press.
- [13] Gandolfo, G. 1980, *Economic Dynamics: Methods and Models*, 2nd revised ed., C. J. Bliss and M. D. Intriligator (eds.) Advanced Textbooks in Economics Vol.16, North-Holland.
- [14] Groth, C. and Schou, P. 2002, " Can Non-Renewable Resources Alleviate the Knife-Edge Character of Endogenous Growth? ", *Oxford Economic Papers*, 54(3), 386-411.
- [15] Halkin, H. 1974, " Necessary Conditions for Optimal Control Problems with Infinite Horizons ", *Econometrica*, 42(2), 267-272.
- [16] Hall, R. E. 1990, " Invariance Properties of Solow's Residual ", in P. Diamond (ed.), *Growth/Productivity/Unemployment. Essays to Celebrate Bob Solow's Birthday*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [17] Hartwick, J. M. 1977, " Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources ", *American Economic Review*, 67(5), 972-974.
- [18] Jones, C. I. 1995, " R&D-Based Models of Economic Growth ", *Journal of Political Economy*, 103(4), 759-784.
- [19] Keeler, E., Spence, M. and Zeckhauser, R. 1971, " The Optimal Control of Pollution ", *Journal of Economic Theory*, 4(1), 19-34.
- [20] Krautkraemer, J. A. 1998, " Nonrenewable Resource Scarcity ", *Journal of Economic Literature*, 36(4), 2065-2107.

- [21] Lucas, R. E. 1988, “ On the Mechanics of Economic Development ”, *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42.
- [22] Romer, D. 2001, *Advanced Macroeconomics*, 2nd ed., McGraw-Hill.
- [23] Romer, P. 1990, “ Endogenous Technological Change ”, *Journal of Political Economy*, 98(5), S71-S102.
- [24] Schou, P. 2000, “ Polluting Non-Renewable Resources and Growth ”, *Environmental and Resource Economics*, 16(2), 211-227.
- [25] Solow, R. M. 2000, *Growth Theory: An Exposition*, 2nd ed., Oxford University Press. [福岡正夫訳 『成長理論』第2版, 岩波書店, 2000年]
- [26] Stiglitz, J. 1974, “ Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths ”, *Review of Economic Studies*, Symposium Issue, 123-137.
- [27] Tahvonen, O. and Kuuluvainen, J. 1991, “ Optimal Growth with Renewable Resources and Pollution ”, *European Economic Review*, 35(2-3), 650-661.
- [28] Tahvonen, O. and Salo, S. 2001, “ Economic Growth and Transitions between Renewable and Nonrenewable Energy Resources ”, *European Economic Review*, 45(8), 1379-1398.
- [29] World Bank. 2000, *The Quality of Growth*, Oxford University Press.
- [30] 浅子和美・川西 諭・小野哲生. 2002, 「枯渇性資源・環境と持続的成長」『経済研究』, 53, 236-246.
- [31] OECD 環境局 [著], 環境省地球環境局 [監訳]. 2002, 『OECD 世界環境白書 - 2020年の展望 - 』, 中央経済社.
- [32] 柴田弘文. 2002, 『環境経済学』, 東洋経済新報社.