

進化的枠組みにおける環境ラベルの長期的効果

大石 和博

本稿では、生物資源の長期的利用に焦点を当て、環境ラベル制度が生物資源の利用に与える影響をevolutionary game theory frameworkで考察する。生物資源の利用者は環境ラベルを導入するかどうかという二つの戦略を持つ。環境ラベルを導入しない企業は、標準的な技術を採用し生物資源を利用する。環境ラベルを導入する企業は自発的に経済活動を制限し、経済活動の効率性を意図的に低下させる技術を採用する。環境ラベルの普及によって、生物資源の過剰利用を回避する可能性があることを示す。

Keywords : evolutionary framework, heteroclinic orbit, stable manifold, unstable manifold, 環境ラベル.

1 はじめに

環境問題が多様かつ深刻になる中で、企業や産業界の自主的な環境取り組みが進展している。自主的な環境取り組みはpublic voluntary programs, negotiated agreements, unilateral commitmentsなどからなる¹。これらは直接規制的手段や経済的手段といった政府主導の環境政策を補完あるいは代替する政策手段である²。環境問題に対する社会的な関心の高まりから、自主的な環境取り組みがCSR (corporate social responsibility) として企業に認識され、環境へ配慮した生産活動や商品供給が環境経営上、最も重要な戦略の一つとなっている。

生物資源が保全されつつ有効活用されるための自主的取り組みの一手段として、環境ラベル制度を挙げることができる。環境ラベル制度は、生物資源や生態系などに配慮した商品にラベルを貼付し、環境ラベル付き商品の環境情報を消費者に伝達することにより、環境配慮型商品が普及することを狙いとする。環境ラベル制度により情報の非対称性を解消し、環境意識の高い消費者が環境ラベル付き商品を選択することで、生物資源の過剰利用を回避できる可能性がある。

本研究の目的は、環境ラベル制度の下で、生物資源の過剰利用を回避するためには、どのような制度的前提条件を満たす必要があるのかを理論的に考察することにある。Blanco and Lozano (2015) は、環境ラベル付き商品のprice premiumに焦点を当て、環境ラベル制度の創設が資源利用に与える影響を考察した。本稿でもこのprice premiumを分析枠組みに導入し、生物資源の長期的利用可能性を考察する。しかし、彼らと異なり、

本稿では各時点において自己の現在の利潤を最大化する企業を想定し、分析を試みる。このような意味で、本稿は先行研究を補完するものとなっている。

本稿の構成は以下のとおりである。第2節では、環境ラベル制度を考慮した生物資源利用の基本構造をresource-stock dynamicsとevolutionary dynamicsにより定式化する。第3節ではこれらの2次元力学系の均衡点を求める。第4節では均衡点の安定性を調べ、均衡点の特徴付けを行う。第5節ではsensitivity analysisを試み、環境ラベル制度が機能するための条件を検討する。第6節は簡単なまとめである。

2 分析の枠組み

ここでは、或る経済における生物資源の持続的利用を考えるための数理模型を構築する。生物資源を利用する企業数を $m > 0$ で表し、一定とする。まず、bioeconomicsにおいて通常用いられる仮説にしたがい、resource-stock dynamicsを定式化することから始める³。時間は連続とし、一時点を t と書き、各時点 t における生物資源の存在量を $N \geq 0$ で表す⁴。再生可能資源である生物資源の時間的変化 $\dot{N} = \frac{dN}{dt}$ は、logistic equation

$$\dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{k} \right)$$

で表現される。ここで $r > 0$ は生物資源のintrinsic growth rate、 $k > 0$ はenvironmental carrying capacityであり、共に一定と仮定する。上記の式は各時点の瞬時的な自然回復力を表しており、企業の経済活動に起因する環境悪化の影響を直接含まない。Blanco and Lozano (2015)にしたがい、企業の経済活動が環境へ悪影響を及ぼす状況を想定するとともに、企業は環境負荷を削減するために環境改善努力を行うことができると仮定する。すべての企業の環境負荷を D とし、上記の式を

$$\dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{k} \right) - D$$

と修正する。

以下では、生産活動だけでなく環境負荷削減にも取り組む企業の行動が分析される。各企業は獲得努力量 $E_i \in \{E_1, E_2\}$ と資源獲得能力に関する技術 $q_i \in \{q_1, q_2\}$ を選択することにより、生物資源の利用量を選択する⁵。ここで、 E_1 は標準的な技術 q_1 を採用して生物資源の獲得や利用を選択する戦略である。 E_2 は自発的に経済活動を制限し、経済活動の効率性を意図的に低下させる技術 q_2 を採用するとともに、自主的に環境負荷を削減し環境ラベルを導入する戦略である。戦略 E_i を選択する企業の資源利用量は、Lamantia and Radi (2015)にしたがい、

$$h_i \triangleq \sqrt{q_i E_i N}$$

によって表される。ここで、技術 q_i は外生的に決定され、一定であり

$$0 < q_2 < q_1$$

と仮定する。各企業による環境負荷を生物資源1単位当たり $\beta > 0$ とし、戦略 E_1 を選択する企業による環境負荷を βN とする。戦略 E_2 を選択する企業の場合には、自主的に環境負荷の低減に努めることによって $a \in (0, 1)$ の割合で環境負荷を削減すると仮定し、環境負荷を $\beta N(1 - a)$ とする。任意の時点で、戦略 E_i を選択する企業の割合を $s_i \in [0, 1]$ とすると、 $s_1 + s_2 = 1$ である。したがって、環境負荷の総量は

$$D \triangleq \beta Nm(1 - s_2) + \beta N(1 - a)ms_2$$

と定義され

$$D = \beta mN(1 - as_2)$$

が得られる。企業の割合 s_2 の変遷はreplicator dynamicsとして後に定式化される。

戦略 E_i を選択する企業の費用を特定化する。獲得努力量1単位当たりの一定の費用を $c > 0$ 、獲得努力から独立した一定の費用を $\mu_i > 0$ とすれば、総費用は $\mu_i + cE_i$ となる。Lamantia and Radi (2015)と同様に、技術 q_i を選択する企業の総費用は、資源利用量 h_i を使って、

$$\mu_i + c \frac{h_i^2}{q_i N}$$

と表される。 μ_2 には環境ラベルに関する費用が含まれているため、 $\mu_1 < \mu_2$ と仮定する。

企業の収入を特定化する。技術 q_i を選択する企業の生産物（商品）の価格を $p_i > 0$ とする。消費者の中には環境に配慮した生産物（商品）に高い価値を認め、より多く支払おうとする者もいる。環境ラベル付き商品の価格 p_2 は環境ラベル無し商品の価格 p_1 より高くなり、 $p_1 \leq p_2$ と仮定する。

Blanco and Lozano (2015)は、環境ラベル付き商品のprice premiumを分析枠組みに導入し、環境ラベル制度の創設が資源利用に与える影響を考察した。環境ラベルを導入する企業の割合が増加するほど環境ラベルのprice premiumも増加と仮定されている。本稿では直観的な解釈を促すために、価格を

$$p_1 \triangleq \sqrt{\theta} \quad , \quad p_2 \triangleq \sqrt{\theta(1 + \sigma s_2)}$$

と特定化して分析を行う。ここで $\theta > 0$ および $\sigma \in (0, 1)$ は定数である⁶。 σ は環境配慮型商品や自主的環境取り組みに対する消費者の評価を表す。消費者の環境志向が高まっていく（ σ が増加する）場合や環境ラベルの利用が普及し（ s_2 が増加し）認知度が向上する場合には、 σs_2 も増加し、したがって価格 p_2 も上昇することになる。

収入は $p_i h_i$ であり、利潤は

$$\pi_i \triangleq p_i h_i - \mu_i - c \frac{h_i^2}{q_i N}$$

と定義される。本稿では, Blanco and Lozano (2015) と異なり, 各企業は近視眼的であり, 各時点において自己の現在の利潤を最大化すると仮定する。企業の利潤が最大となるための1階の必要条件より, 内点解は, h_i^* を最適利用量として

$$h_i^* = \frac{p_i q_i N}{2c}$$

となる⁷。これを利潤の式に代入すると最大利潤

$$\pi_i^* \triangleq \frac{p_i^2 q_i N}{4c} - \mu_i$$

を得る。企業全体の平均利潤を

$$\bar{\pi}^* \triangleq (1-s_2)\pi_1^* + s_2\pi_2^*$$

とすると, 環境ラベルを導入する企業の割合 s_2 のevolutionary processはreplicator dynamics

$$\dot{s}_2 = s_2(\pi_2^* - \bar{\pi}^*)$$

によって特徴付けられる⁸。これはimitation-type dynamicsであり, 各企業が戦略を変化させるか否かは模倣学習に基づくと仮定されている。この式から第1に分かることは, 利潤 π_2^* が平均利潤 $\bar{\pi}^*$ より大きいとき s_2 が増加するということである。第2に,

$$\bar{\pi}^* = \begin{cases} \pi_2^* & \text{if } s_2(0) = 1, \\ \pi_1^* & \text{if } s_2(0) = 0, \end{cases}$$

という場合には, s_2 は時間を通じて一定であることも分かる。我々は各企業の模倣学習によって s_2 がどのように進化するかに関心があるので, この場合を除いておく。以下では初期値を $s_2(0) \in (0, 1)$ と仮定して考察を進める。

上記のreplicator dynamicsを変形し,

$$\dot{s}_2 = s_2(1-s_2)(\pi_2^* - \pi_1^*)$$

と表してみよう。利潤 π_2^* が利潤 π_1^* より大きい場合, 技術 q_1 から技術 q_2 への変更が生じ, 環境ラベルを導入する企業の割合 s_2 が増加する。逆に, $\pi_2^* < \pi_1^*$ の場合には q_2 から q_1 への変更が生じ, 環境ラベルを導入しない企業の割合 s_1 が増加することになる。

以上から, 基本的なdynamic systemは

$$\begin{cases} \dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{k}\right) - \beta mN(1-as_2), \\ \dot{s}_2 = s_2(1-s_2)(\pi_2^* - \pi_1^*), \end{cases} \quad (1)$$

によって表される。この微分方程式体系の構造から分かるように, resource-stock dynamicsとevolutionary dynamicsが N と s_2 の時間を通じた動きを決定する。以下では, Noailly *et al.* (2003) による解法を用い, 上記の2次元力学系 (1) の解について考察する。

3 長期均衡点の存在

以下の考察の関心事は、2次元力学系 (1) で表現された数理模型において、どのような制度的前提条件の場合に環境ラベルが普及し、生物資源の過剰利用を回避することができるのかという問題である。この問題を考えるために、phase plane analysisを行う。2次元力学系 (1) の解の挙動を考察する前に、 N, s_2 のそれぞれについて、変数が一定の率で成長するような定常状態が存在するかどうかを検討しよう。定常状態は二つの条件式、 $\dot{N} = 0, \dot{s}_2 = 0$ の解として得られる。まず、 $\dot{N} = 0$ となるのは、

$$N = 0, \quad s_2 = \Phi(N)$$

の場合である。ここで、

$$\Phi(N) \triangleq \frac{1}{\beta am} \left[\frac{r}{k} N - (r - \beta m) \right]$$

である。 $\dot{s}_2 = 0$ となるのは、

$$s_2 = 0, \quad s_2 = 1, \quad s_2 = \Psi(N)$$

の場合である。ここで、

$$\Psi(N) \triangleq \frac{1}{\sigma q_2} \left[\frac{4c(\mu_2 - \mu_1)}{\theta N} + q_1 - q_2 \right]$$

である。

図 1 は2次元力学系 (1) のnullclineと均衡点を示したものである。横軸に生物資源の存在量 N 、縦軸に環境ラベルを導入する企業の割合 s_2 がとられている。 $N > 0$ に対する三つの均衡点をそれぞれ **A**、**B**、**C** と呼ぶことにする⁹。

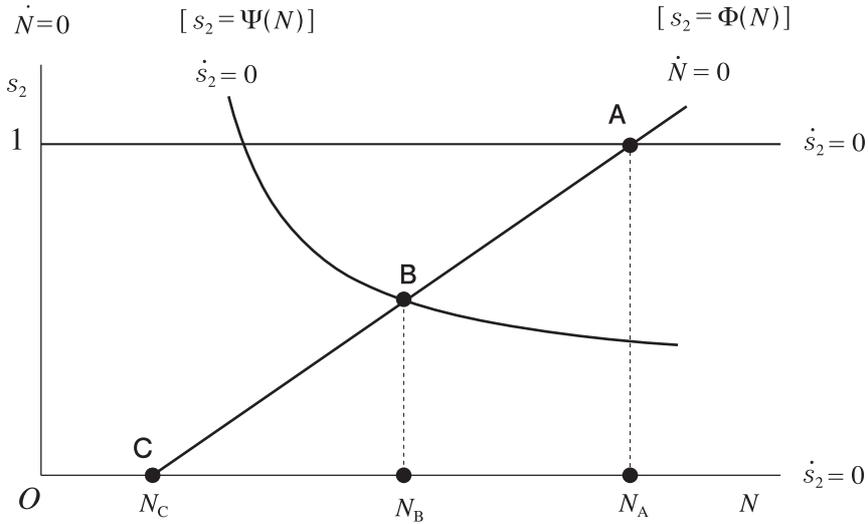
$$\begin{aligned} \mathbf{A}(N_A, s_{2A}) \quad N_A &\triangleq \frac{k[r - \beta m(1 - a)]}{r} \\ s_{2A} &\triangleq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(N_B, s_{2B}) \quad N_B &\triangleq \frac{\Lambda_2 + \sqrt{\Lambda_2^2 + 4\Lambda_1\Lambda_3}}{2\Lambda_1} \\ s_{2B} &\triangleq \frac{1}{\sigma q_2} \left[\frac{4c(\mu_2 - \mu_1)}{\theta N_B} + q_1 - q_2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(N_C, s_{2C}) \quad N_C &\triangleq \frac{k(r - \beta m)}{r} \\ s_{2C} &\triangleq 0 \end{aligned}$$

ここで、

図1 2次元力学系の nullcline と均衡点



$$\Lambda_1 \triangleq \theta \sigma q_2 r > 0,$$

$$\Lambda_2 \triangleq \theta k [\sigma q_2 (r - \beta m) + \beta a m (q_1 - q_2)],$$

$$\Lambda_3 \triangleq 4 \beta a c k m (\mu_2 - \mu_1) > 0$$

と定義されている。これらの均衡点から長期的に三つの戦略の分布が考えられる。**A** 均衡ではすべての企業が環境ラベルを導入している。逆に**C** 均衡ではすべての企業が環境ラベルを導入しない。これらと違い、**B** 均衡では環境ラベルを導入する企業と導入しない企業が共存状態になる可能性がある。

さて、**A** 均衡と**C** 均衡が存在するための条件から見てみよう。

A 均衡と C 均衡の存在

A 均衡が存在するための必要条件は、 $N_A > 0$ ，すなわち、 $r > \beta m (1 - a)$ である。

C 均衡が存在するための必要条件は、 $N_C > 0$ ，すなわち、 $r > \beta m$ である。

まず**A** 均衡の存在条件 $r > \beta m (1 - a)$ については、すべての企業が環境ラベルを導入するときに生物資源のintrinsic growth rateが総環境負荷率を上回っていなければならない、と解釈できる。もし $r \leq \beta m (1 - a)$ であれば、すべての均衡点で資源は完全に枯渇する。つぎに**C** 均衡の存在条件 $r > \beta m$ については、すべての企業が環境ラベルを導入しないときに生物資源のintrinsic growth rateが総環境負荷率を上回っていなければならない、と解釈できる。もし $r \leq \beta m$ であれば**C** 均衡では資源が枯渇する。以下では、すべての均衡での資源枯渇の可能性を排除するために、

$$r > \beta m$$

と仮定する。したがって、 $r > \beta m (1 - a)$ かつ $\Lambda_2 > 0$ である。

最後に **B** 均衡の存在条件に移ろう。

B 均衡の存在

B 均衡が存在するための必要十分条件は、 $s_{2B} \in \left(\frac{q_1 - q_2}{\sigma q_2}, 1 \right)$ である。

各 parameter に関する条件より、

$$0 < N_B \text{ かつ } 0 < \frac{q_1 - q_2}{\sigma q_2} < s_{2B}$$

は常に成り立つ。条件 $s_{2B} < 1$ より、環境ラベルを導入する企業と導入しない企業が共存するための必要条件

$$0 < (1 + \sigma) q_2 - q_1$$

を得る。また、条件 $s_{2B} < 1$ は、 $N_B < N_A$ と同値であることを考慮すると、

$$\underline{\theta} < \theta \tag{2}$$

と表現することができる¹⁰。ここで、

$$\underline{\theta} \triangleq \frac{4c(\mu_2 - \mu_1)}{N_A[(1 + \sigma)q_2 - q_1]} > 0$$

と定義される。

以上では、各parameterに関する条件次第で一意的な均衡点か複数の均衡点が現れる可能性があることを示した。つぎの節では、経済が **B** 均衡から離れているとき、2次元力学系 (1) の解軌道がどのように表現されるのかを見てみよう。

4 長期均衡点の安定性

B 均衡の周りの解軌道の性質を調べるにあたり、まず local stability analysis から始めよう。**B** 均衡の local stability は Jacobian matrix

$$J \triangleq \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{N}}{\partial N} & \frac{\partial \dot{N}}{\partial s_2} \\ \frac{\partial \dot{s}_2}{\partial N} & \frac{\partial \dot{s}_2}{\partial s_2} \end{pmatrix}$$

の固有値や行列式によって特徴付けられる。**B** 点で評価された Jacobian matrix J_B は

$$J_B = \begin{pmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & j_4 \end{pmatrix}$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned}
j_1 &\triangleq -\frac{rN_B}{k} < 0, \\
j_2 &\triangleq \beta amN_B > 0, \\
j_3 &\triangleq \frac{\theta s_{2B}(1-s_{2B})[(1+\sigma s_{2B})q_2 - q_1]}{4c} > 0, \\
j_4 &\triangleq \frac{\theta \sigma q_2 N_B s_{2B}(1-s_{2B})}{4c} > 0,
\end{aligned}$$

と定義されている。 J_B の行列式 $|J_B|$ は

$$|J_B| = j_1 j_4 - j_2 j_3 < 0$$

であるから、**B** 均衡はsaddle pointである¹¹。以上から長期均衡点のlocal stabilityをつぎのように特徴付けることができる。

Result 1 **B** 均衡のlocal stability

B 均衡が存在すれば、**B** 均衡はsaddle pointであり、不安定である。

これまでは解析的な手法により均衡点の特徴付けを行った。以下では数値解析的手法でphase plane analysisを行う。基準となるbase caseとして各parameterを

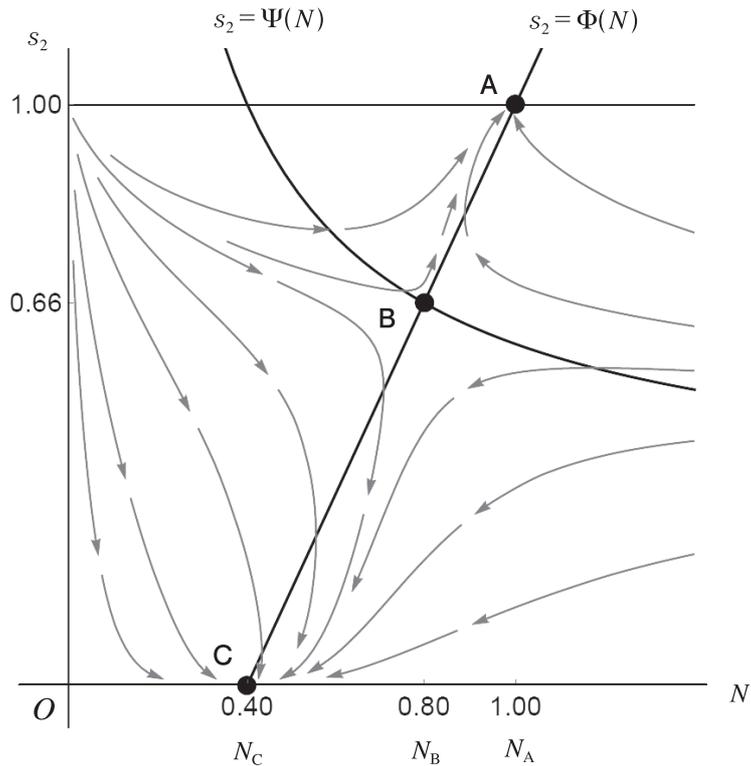
$$\begin{aligned}
\beta = 0.1, & \quad \theta = 2, & \quad \sigma = 0.2, & \quad \mu_1 = 0.8, & \quad \mu_2 = 1.6, & \quad a = 0.6, \\
c = 0.11, & \quad k = 1.4, & \quad m = 10, & \quad q_1 = 3.4, & \quad q_2 = 3.2, & \quad r = 1.4,
\end{aligned}$$

に固定する¹²。 $\theta = 0.8$ であるから、共存均衡の存在条件(2)が成り立ち、**B** 均衡が存在する¹³。**図2**は2次元力学系(1)の定常状態と解軌道を示したものである。定常状態の座標は**A**(1,1), **B**(0.80,0.66), **C**(0.4,0)である。

図2の直観的意味を考えてみよう。まず、**B** 均衡に近づく方向と離れる方向があるということがわかる。初期値の位置によって、**A** 均衡に落ち着く場合もあれば**C** 均衡に落ち着く場合もある。たとえば、最初に生物資源が豊富である状態で環境ラベルを導入する企業の割合が大きいと、すべての企業が環境ラベルを導入するようになる可能性がある。逆に、最初に生物資源が過剰利用されている状態で環境ラベルを導入する企業の割合が小さいと、すべての企業が環境ラベルを導入しないようになる可能性がある。

つぎに、**B** 均衡のstable manifoldとunstable manifoldによって、**B** 均衡のまわりの解の振る舞いを調べてみよう。**図3**は、**B** 均衡と点(0,1)を結ぶseparatrix Γ_0 , **B** 均衡と無限遠点を結ぶseparatrix Γ_∞ , **B** 均衡と**A** 均衡を結ぶheteroclinic orbit Γ_A , **B** 均衡と**C** 均衡を結ぶheteroclinic orbit Γ_C を示したものである。 (N, s_2) の初期値が Γ_0 か Γ_∞ の経路上にあれば、解軌道は**B** 均衡に向かう。この意味で Γ_0 と Γ_∞ は特別な解軌道である。**B** 均衡のstable manifoldとunstable manifoldをそれぞれ $W_S(\mathbf{B})$, $W_U(\mathbf{B})$ と書くと、

図2 定常状態と解軌道



$$W_S(\mathbf{B}) = \Gamma_0 \cup \Gamma_\infty \cup \{\mathbf{B}\},$$

$$W_U(\mathbf{B}) = \Gamma_A \cup \Gamma_C \cup \{\mathbf{B}\}$$

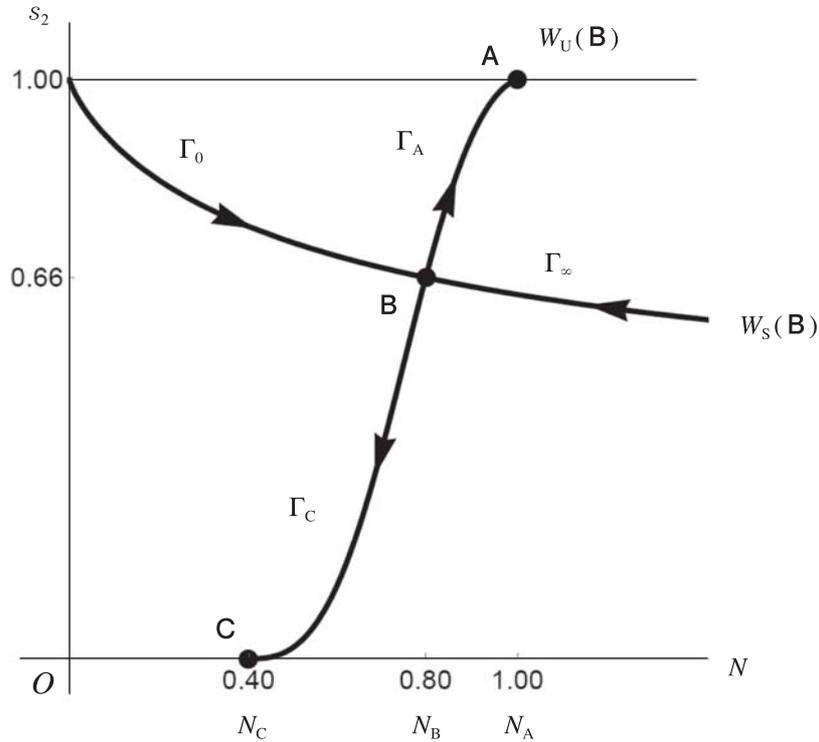
が成り立つ。図2と図3から明らかなように、stable manifold $W_S(\mathbf{B})$ より下側の点を初期値に持つ解はC均衡に収束し、上側の点を初期値に持つ解はA均衡に収束することがわかる。要するに、偶然、初期値がstable manifold $W_S(\mathbf{B})$ 上にある場合を除いて、2次元力学系(1)の解軌道がB均衡に収束するということはないということである。以上から、環境ラベル制度の効果をつぎのように特徴付けることができる。

Result 2 環境ラベル制度の効果の初期値依存性

生物資源の初期存在量と環境ラベルの導入企業の初期割合により、A均衡かC均衡に落ち着く可能性があり、B均衡は非常に成り立ちにくい。すなわち、環境ラベルを導入する企業と導入しない企業は大抵の場合は共存できない可能性がある。

以上の分析では、B均衡が存在するならば、stable manifold $W_S(\mathbf{B})$ を境にして解の振る舞いが大きく異なることを示した。ここで得られた結果から、長期的に資源の過剰利用を防ぐためには、環境ラベルの利用が普及する(s_2 が増加する)ように、stable manifold $W_S(\mathbf{B})$ を下方に移動させる必要があると考えられる。つぎの節では、

図3 B 均衡の stable manifold と unstable manifold



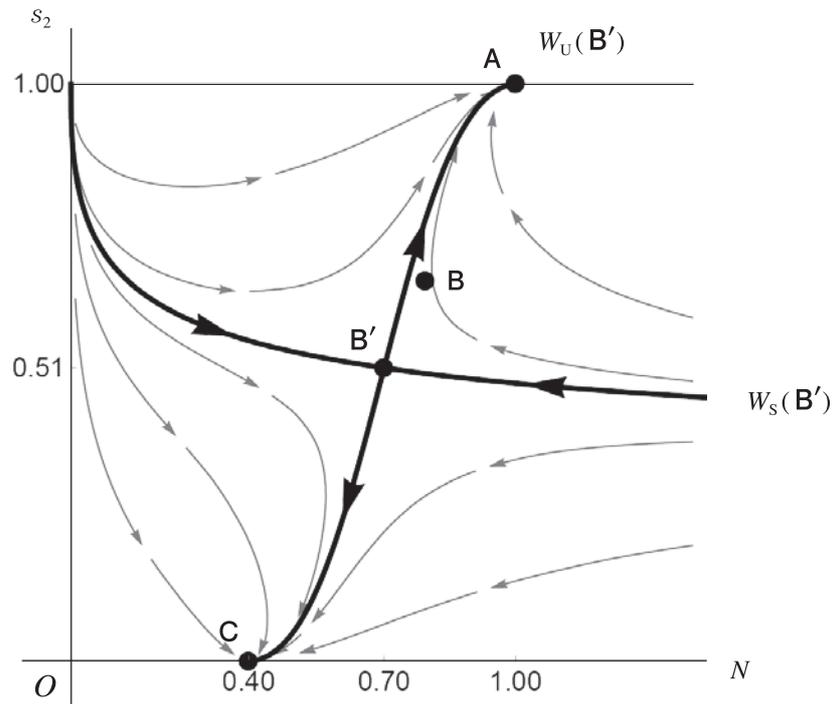
sensitivity analysisを行い，環境ラベルの利用が普及する制度的条件を検討する。

5 環境ラベル制度の機能

ここでは，環境ラベル制度が機能するための条件をsensitivity analysisによって検討する。まず，環境ラベルに関する費用が低下する状況から始める。ここで思い出していたきたいのは費用 μ_1 と μ_2 の関係である。費用 μ_2 には環境ラベルに関する費用が含まれているため， $\mu_1 < \mu_2$ と仮定されていた。この費用が低下すれば，企業は環境ラベルを利用しやすくなり，長期的に生物資源の過剰利用を回避できる可能性がある。そこで，環境ラベルに関する費用の低下が共存均衡にもたらす影響を見てみよう。各parameterの値をbase caseに設定し，費用 μ_2 を1.6から1.2へ低下させる。図4は費用 μ_2 の低下が共存均衡の位置に与える影響を示したものである。費用 μ_2 の低下により，stable manifoldが下へ移動し，共存均衡は $B(0.80, 0.66)$ から $B'(0.70, 0.51)$ へ移動することがわかる。

つぎに，環境配慮型商品や自主的環境取り組みに対する消費者の評価を表す σ に注目する。消費者が生物資源問題の現状と課題について認識を深め，環境ラベルの効果を数字で把握できるようになれば，環境意識が啓発され， σ が増加する可能性がある。そこで， σ の増加が共存均衡に及ぼす影響を見てみよう。各parameterの値をbase case

図4 環境ラベルに関する費用が低下した場合

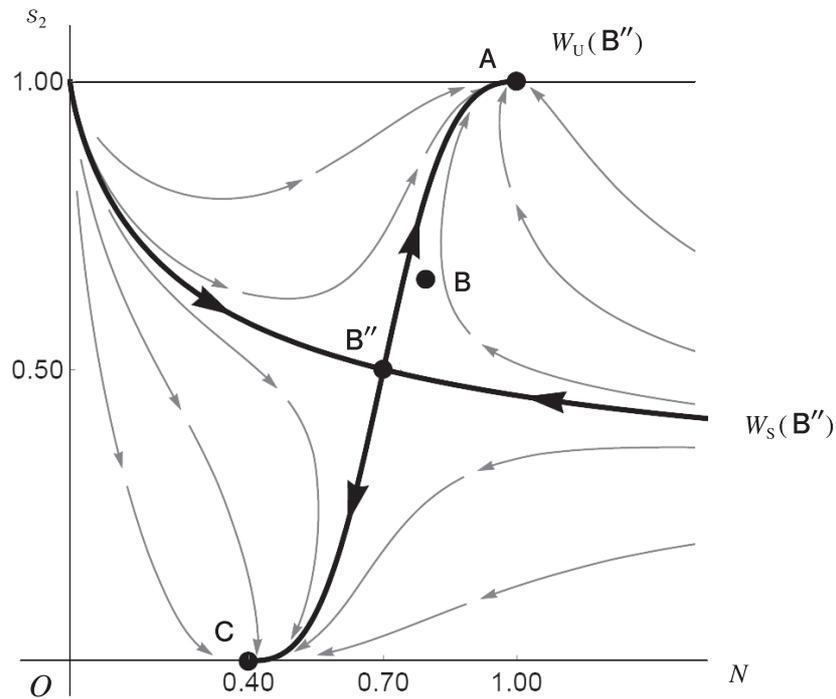


に設定し、 σ を0.2から0.28へ増加させる。図5は消費者の環境志向の高まりが共存均衡の位置に与える影響を示したものである。消費者の環境志向の高まりにより、stable manifold が下へ移動し、共存均衡は $B(0.80, 0.66)$ から $B''(0.70, 0.50)$ へ移動することがわかる。以上をまとめれば、つぎのような結論が得られる。

Result 3 環境ラベルに関する費用と消費者の環境意識が及ぼす効果

環境ラベルに関する費用の低下や消費者の環境志向の高まりにより、環境ラベルの導入が促され、生物資源の過剰利用を回避できる可能性がある。

図5 消費者の環境志向が高まった場合



6 おわりに

我々が行ったことを簡単にまとめておく。

第2節では、環境ラベル制度を考慮した生物資源の利用問題を evolutionary framework の中で説明した。第3節では長期均衡点が存在する条件を導出した。環境ラベルを導入する企業と導入しない企業が共存する可能性があることを示した。第4節では長期均衡点の安定性を分析した。生物資源の過剰利用の回避と環境ラベルの普及は経済の初期状態に強く依存することを示した。第5節では環境ラベル制度が機能するための条件を sensitivity analysis によって検討し、環境ラベルに関する費用の低下や消費者の環境志向の高まりにより、環境ラベルの導入が促され、生物資源の過剰利用を回避できる可能性があることを指摘した。

注

- 1 自主的な環境取り組みの概要については、たとえば Khanna (2001) を参照。
- 2 政府主導の環境政策については、たとえば Kolstad (2010) に概要がまとめられている。
- 3 詳しくは、Clark (2010), Conrad (2010), Hanley *et al.* (2007), Perman *et al.* (2011) を参照。
- 4 厳密には、各時点 t における存在量を $N(t)$ と表すべきだが、notation を簡潔にするた

- めに時点 t を省略し、 N と表す。他の変数も同様である。
- 5 獲得努力量は各時点で生物資源の獲得のために投入される労働と資本の総称である。
 - 6 環境ラベルの price premium については Sedjo and Swallow (2002) を参照。
 - 7 利潤が最大となるための2階の十分条件 $\frac{d^2 \pi_i}{dh_i^2} = -\frac{2c}{q_i N} < 0$ は常に満たされる。
 - 8 導出については Gintis (2009) を参照。
 - 9 $N = 0$ の場合には企業による生物資源の利用はないので、以下の分析では特に断らない限り、 $N = 0$ の場合を無視する。
 - 10 **B** 均衡は $\theta = \underline{\theta}$ のとき **A** 均衡に一致する。つまり、等号で成り立つ場合には環境ラベルを導入する企業だけが長期的に残るということである。
 - 11 均衡点の特徴付けについては、Hirsh *et al.* (2004), Strogatz (1994) を参照。
 - 12 各 parameter の水準は特定の地域を想定して設定されたものではない。
 - 13 計算および作図については Mathematica (Version Number: 10.4.0.0) を用いた。また、計算結果は近似値である。

参考文献

- Blanco, Esther and Javier Lozano (2015), "Ecolabels, Uncertified Abatement, and the Sustainability of Natural Resources: An Evolutionary Approach," *Journal of Evolutionary Economics*, 25(3), pp. 623–647.
- Clark, Colin W. (2010), *Mathematical Bioeconomics: The Mathematics of Conservation*, Third Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Conrad, Jon M. (2010), *Resource Economics*, Second Edition, Cambridge University Press, New York, NY.
- Gintis, Herbert (2009), *Game Theory Evolving*, Second Edition, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Hanley, Nick, Jason F. Shogren, and Ben White (2007), *Environmental Economics: In Theory and Practice*, Second Edition, Palgrave Macmillan, New York, NY.
- Hirsch, Morris W., Stephen Smale, and Robert L. Devaney (2004), *Differential Equations, Dynamical Systems, and an Introduction to Chaos*, Second Edition, Elsevier Academic Press, San Diego, CA.
- Khanna, Madhu (2001), "Non-Mandatory Approaches to Environmental Protection," *Journal of Economic Surveys*, 15(3), pp. 291–324.
- Kolstad, Charles D. (2010), *Environmental Economics*, Second Edition, Oxford University Press, New York, NY.
- Lamantia, Fabio and Davide Radi (2015), "Exploitation of Renewable Resources

- with Differentiated Technologies: An Evolutionary Analysis," *Mathematics and Computers in Simulation*, 108, pp. 155–174.
- Noailly, Joëlle, Jeroen C. J. M. van den Bergh, and Cees A. Withagen (2003), "Evolution of Harvesting Strategies: Replicator and Resource Dynamics," *Journal of Evolutionary Economics*, 13(2), pp. 183–200.
- Perman, Roger, Yue Ma, Michael Common, David Maddison, and James McGilvray (2011), *Natural Resource and Environmental Economics*, Fourth Edition, Pearson Education Limited, Harlow, Essex.
- Sedjo, Roger A. and Stephen K. Swallow (2002), "Voluntary Eco-Labeling and the Price Premium," *Land Economics*, 78(2), pp. 272–284.
- Strogatz, Steven H. (1994), *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, Westview Press, Cambridge, MA.