

進化的枠組みにおける自主的環境取り組みと社会的圧力の効果

Voluntary Approaches and Social Pressure: An Evolutionary Approach

大石 和博

Oishi Kazuhiro

要約

本稿では、社会的圧力に起因する費用と自主的環境取り組みに要する費用を考慮した生物資源の長期的利用問題をevolutionary game theory frameworkで考察する。生物資源の利用者は、単に環境規制を遵守する戦略（非協力戦略）と、単なる規制遵守ではなく、遵守すべき規制基準を超えて環境負荷削減に向け自主的に取り組む戦略（協力戦略）という二つの戦略を持つと仮定する。また、協力戦略が選択される場合には、自主的環境取り組みによって一定の割合で環境負荷が削減されると仮定する。費用の変化により協力戦略が普及し、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, 自主的取り組み, 社会的圧力.

1. はじめに

環境問題が地球規模で深刻化する中、生物資源の長期的利用が企業経営の重要課題のひとつとなっている。企業にとって環境対策は費用の増加要因であるが、軽視すれば長期的に資源の安定確保は困難となり、事業基盤は傷つき、結局自らにはねかえってくることになるからだ。持続可能な社会に向けた自主的環境取り組みが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、重要となっている¹。

企業は環境経営上、supply chainの上流及び下流で起きる問題にも対応する必要がある。たとえば、supply chainの川下にある組織は川上にある組織に対し調達を通じて影響力を有しているため、川下で環境配慮製品しか買わないと声が上がれば、川上ではそれに配慮することになるだろう。このように、企業はsupply chain全体として環境への負荷を低減するよう自主的に取り組む必要がある。

また、企業にとっては資本市場への情報開示がいっそう重要になっている。投資に際し環境（Environment）、社会（Social）、企業統治（Governance）の視点から企業価値を測り、投資先企業を選別するESG投資が活発になっているからだ。資産運用業界では、投資先企業の業績や財務の分析だけでなく、非財務情報である環境問題等への取り組み

を含めた長期的な事業評価の必要性が増している。

本研究の目的は、社会的圧力が存在する状況で、企業の自主的環境取り組みが有効に機能するための条件を理論的に考察することにある。企業の自主的環境取り組みの経済学的な分析は、たとえばBlanco *et al.* (2009), Blanco and Lozano (2015) などで展開され、両研究とも自主的環境取り組みに関するevolutionary frameworkの中で定式化されている。Blanco *et al.* (2009) は、tourism productの差別化による需要増加に焦点を当て、common pool resourceを利用する観光事業者の自主的環境取り組みを考察した。また、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分析した。しかし両研究では、社会的圧力が企業行動にどのような影響を及ぼすかについて分析されていない。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、社会的圧力に起因する費用と自主的環境取り組みに要する費用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、費用の変化が企業の協力行動や生物資源の利用に与える影響を考察する。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、自然環境と社会経済の両面から構築する。まず、bioeconomicsにおいて通常用いられる仮説にしたがって、resource-stock dynamicsを定式化しよう²。時間は連続とし、各時点 t における生物資源の存在量を $N > 0$ で表す³。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、以下のlogistic equationで表される。

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

ここで、定数 $r > 0$ は生物資源のintrinsic growth rate、定数 $k > 0$ はenvironmental carrying capacityである。上記の式は各時点の瞬時的な自然回復力を表している。

しかし、生物資源の存在量は、企業の経済活動が環境へどれだけ悪影響を及ぼしているかということによっても影響を受ける。企業の経済活動に起因する環境悪化の影響を明示的に扱うために、Blanco and Lozano (2015) にしたがって、上記の式を

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

と修正する。ここで、 D はすべての企業の環境負荷を表す。

企業数を定数 $m > 0$ で表す。各企業は生物資源を利用するだけでなく環境負荷削減にも取り組み、環境負荷削減に関してつぎの二つの戦略から一つを選択すると仮定する。一つ目は単に環境規制を遵守する戦略であり、二つ目は単なる規制遵守ではなく、遵守すべき規制基準を超えて環境負荷削減に向け自主的に取り組む戦略である。簡略化のために、前者を非協力戦略（非協力行動）、後者を協力戦略（協力行動）と呼ぶことにしよう。また、後の説明を容易にするために、非協力戦略を選択する企業を非協力企業、協力戦略を選択する企業を協力企業と呼ぶことにしよう。

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、非協力企業による環境負荷を βN とする。協力企業の場合には自主的環境取り組みにより、 $a \in (0,1)$ の割合で環境負荷が削減されると仮定する。協力企業による環境負荷は $\beta N(1-a)$ となる。任意の時点で、非協力企業の割合を $s_1 \in [0,1]$ とし、協力企業の割合を $s_2 \in [0,1]$ とする。ここで、 $s_1 + s_2 = 1$ である。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。協力企業の割合 s_2 の変遷は replicator dynamics として後に定式化される。

我々が注意を集中したいのは自主的環境取り組みと社会的圧力の効果であるので、企業の生産活動をできるだけ単純に仮定する。企業は各時点で homogeneous product を 1 単位生産（販売）する。価格を定数 $p > 0$ で表し、費用を定数 $q > 0$ で表す。費用 q に環境規制の遵守費用も含まれているとする。非協力企業の利潤を π_1 、協力企業の利潤を π_2 で表し、

$$\begin{aligned}\pi_1 &\triangleq p - q - \mu(1 + \lambda s_2) \left(1 + \frac{\delta}{N}\right) \\ \pi_2 &\triangleq p - q - c\end{aligned}$$

と定義する。両式の違いは第 3 項にある。協力企業の利潤 π_2 の第 3 項には定数 $c > 0$ があり、単なる規制遵守ではなく、遵守すべき規制基準を超えて環境負荷削減に向け自主的に取り組む場合にかかる費用を表している。

一方、非協力企業の利潤 π_1 の第 3 項

$$\mu(1 + \lambda s_2) \left(1 + \frac{\delta}{N}\right)$$

では、非協力企業に社会的圧力がかかることが考慮されている⁴。ここで、 $\mu > 0$ 、 $\lambda > 0$ 及び $\delta > 0$ は定数である。 μ は社会的圧力の基本的な強さを示している。 $1 + \lambda s_2$ は協力企業の割合 s_2 が増加すると非協力企業の利潤 π_1 が減少することを表している。また、 $1 + \frac{\delta}{N}$ は生物資源の存在量 N の減少により非協力企業の利潤 π_1 が減少することを表し

ている。環境負荷削減に自主的に取り組まない企業（非協力企業）は、原材料や資金の安定調達ができなくなり、また地域住民との紛争が起こるおそれがあるため、本稿では利潤 π_1 の第3項を、社会的圧力に起因する費用と解釈し考察を進める。

協力企業の割合 s_2 が非常に小さく、生物資源の存在量 N が十分大きい場合には、非協力企業に対する社会的圧力は小さく、社会的圧力に起因する費用は μ に近いであろう。このため、 $c > \mu$ と仮定する。

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。協力企業の割合 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⁵。ここで、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おり、imitation-type dynamicsとなっている。この式から、協力企業の利潤 π_2 が平均利潤 $\bar{\pi}$ より大きいとき協力企業の割合 s_2 が増加することが分かる。さらに、

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

に注意すると、 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協力企業の割合 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 $s_2(0) \in (0,1)$ と仮定する。

上記の replicator dynamics の直感的理解を促すために、

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

と変形してみよう。利潤 π_2 が利潤 π_1 より大きい場合、非協力戦略より協力戦略を選択する方が有利であり、非協力企業は協力行動をとるよう戦略を変更することになるだろう。したがって、協力企業の割合 s_2 は増加することになる。逆に、 $\pi_2 < \pi_1$ の場合には、協力企業の割合 s_2 は減少することになる。

以上から、考えるべき dynamic system は

$$\begin{cases} \dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{k}\right) - \beta m N (1 - a s_2), \\ \dot{s}_2 = s_2 (1 - s_2) \left[\mu (1 + \lambda s_2) \left(1 + \frac{\delta}{N}\right) - c \right], \end{cases} \quad (1)$$

という形をとる。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

ここでの考察の関心事は、2次元力学系 (1) で表現された数理模型において、どのよ

うな費用構造の場合に協力戦略が普及し、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、経済の長期均衡、すなわち定常状態が存在するかどうかを検討しよう。定常状態を探すためには二つの条件式 $\dot{N} = 0$, $\dot{s}_2 = 0$ を連立させて解けばよい。

まず、 $\dot{N} = 0$ となるのは、 $s_2 = \Phi(N)$ 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、

$$\Psi(N) \triangleq \frac{1}{\lambda\mu} \left(\frac{cN}{\delta + N} - \mu \right)$$

である。関数 $\Psi(N)$ は

$$\frac{d\Psi}{dN} = \frac{\delta c}{\lambda\mu(\delta + N)^2} > 0$$

より単調増加であり、かつ

$$\frac{d^2\Psi}{dN^2} = -\frac{2\delta c}{\lambda\mu(\delta + N)^3} < 0$$

となるので strictly concave function である。

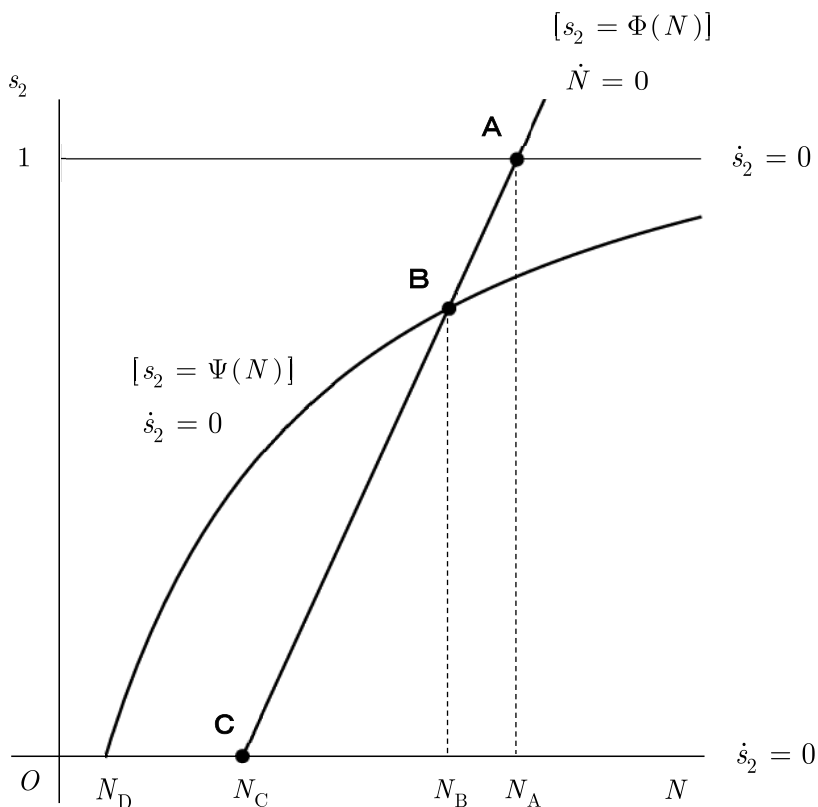
図 1 は 2 次元力学系 (1) の nullcline と均衡点を示したものである。横軸に生物資源の存在量 N , 縦軸に協力企業の割合 s_2 がとられている。三つの均衡点をそれぞれ **A** , **B** , **C** と呼ぶことにする。図 1 は $N > 0$ かつ $0 \leq s_2 \leq 1$ に対して三つの均衡点が存在するという意味で、特殊な場合であることに注意していただきたい。

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

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(N_B, s_{2B}) \quad N_B &\triangleq \frac{\delta\mu(1 + \lambda s_{2B})}{c - \mu(1 + \lambda s_{2B})} \\ s_{2B} &\triangleq \frac{-\Lambda_2 + \sqrt{\Lambda_2^2 - 4\Lambda_1\Lambda_3}}{2\Lambda_1} \end{aligned}$$

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

図1 2次元力学系の nullcline と均衡点



ここで,

$$\Lambda_1 \triangleq \beta\lambda\mu ak m,$$

$$\Lambda_2 \triangleq \lambda\mu[k(r - \beta m) + \delta r] - \beta ak m(c - \mu),$$

$$\Lambda_3 \triangleq \delta\mu r - k(c - \mu)(r - \beta m)$$

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協力戦略を選択する。逆に**C**均衡ではすべての企業が非協力戦略を選択する。これらと違い、**B**均衡では協力企業と非協力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。

これらの条件が意味するところはつぎのとおりである。まず**A**均衡の存在条件

$r > \beta m(1-a)$ については、すべての企業が協力行動を取るときに生物資源のintrinsic growth rateが総環境負荷率 $\beta m(1-a)$ 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、すべての企業が非協力行動を取るときに生物資源のintrinsic growth rateが総環境負荷率 βm 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、 $N_C > 0$ 、すなわち

$$r > \beta m$$

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

最後に**B**均衡の存在条件に移ろう。**B**均衡が存在する条件、すなわち協力企業と非協力企業が共存する条件は $0 < s_{2B} < 1$ である。この条件を満たすためには $\Lambda_3 < 0$ となる必要があり、**図1**では $N_D < N_C$ となることを意味する。ここで、

$$N_D \triangleq \frac{\delta\mu}{c-\mu} > 0$$

である。

以上では、定常状態が存在することを確かめ、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、定常状態の安定性を調べ、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

ここからは、経済が**B**均衡から離れているとき、2次元力学系(1)の解軌道が共存均衡**B**へ向かうのかどうか、論点を絞ることにする。

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から始める。**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、

$$\begin{aligned}
j_1 &\triangleq -\frac{rN_B}{k} < 0, \\
j_2 &\triangleq \beta amN_B > 0, \\
j_3 &\triangleq \frac{-s_{2B}(1-s_{2B})(1+\lambda s_{2B})\delta\mu}{N_B^2} < 0, \\
j_4 &\triangleq s_{2B}(1-s_{2B})\left(1+\frac{\delta}{N_B}\right)\lambda\mu > 0
\end{aligned}$$

と定義されている。

数値解析的手法で分析するために、基準となるbase caseとして各parameterを

$$\begin{aligned}
\beta = 0.1, & \quad \delta = 0.4, & \quad \lambda = 3.2, & \quad \mu = 2.7, & \quad a = 0.6, \\
c = 13.5, & \quad k = 1.4, & \quad m = 10, & \quad r = 1.4
\end{aligned}$$

に固定する⁶。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**(0.85,0.75), **C**(0.4,0)である⁷。 J_B の行列式 $|J_B|$ は負(-1.5)であるから、**B**均衡はsaddle pointである⁸。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。

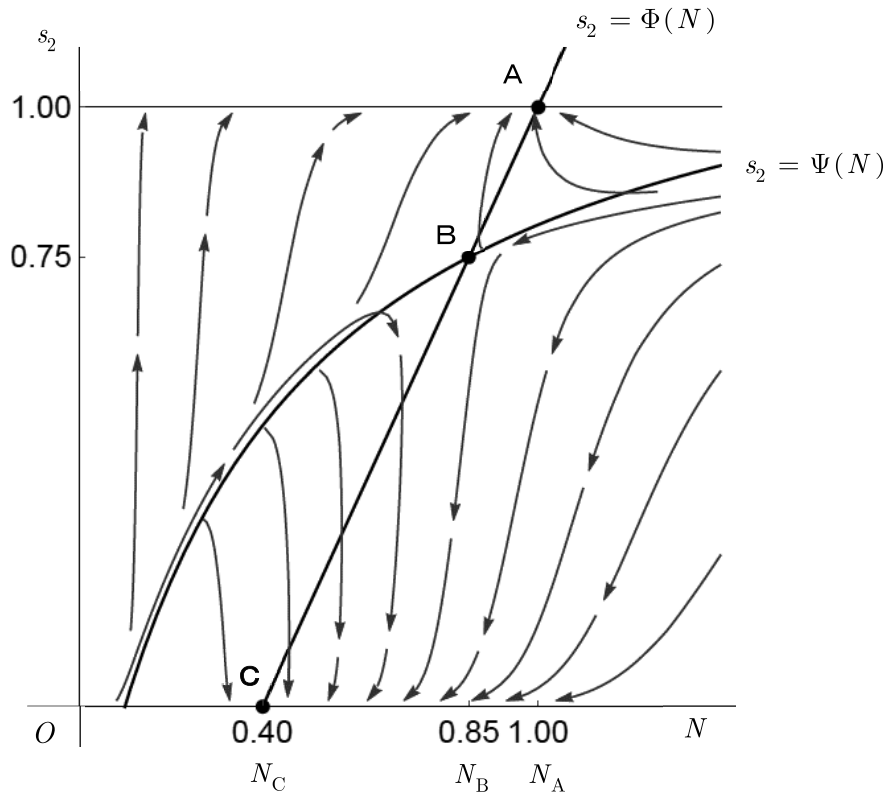
Result 1 **B**均衡のlocal stability

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

なお、**A**点で評価されたJacobian matrixの固有値は二つとも負(-2.4と-1.0)であるので、**A**均衡はstable nodeである。同様に、**C**点で評価されたJacobian matrixの固有値は二つとも負(-8.1と-0.4)であるので、**C**均衡もstable nodeである。

では、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、最初に生物資源が過剰利用されている状態で協力行動をとる企業の割合が小さいと、すべての企業が協力行動をとるようになる可能性がある。逆に、最初に生物資源が豊富である状態で協力行動をとる企業の割合が小さいと、すべての企業が非協力行動をとる可能性がある。

図2 定常状態と解軌道



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**均衡と原点 O を結ぶseparatrix Γ_0 、右上から**B**均衡へ向かうseparatrix Γ_1 、**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_1 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_1 は特別な解軌道である。

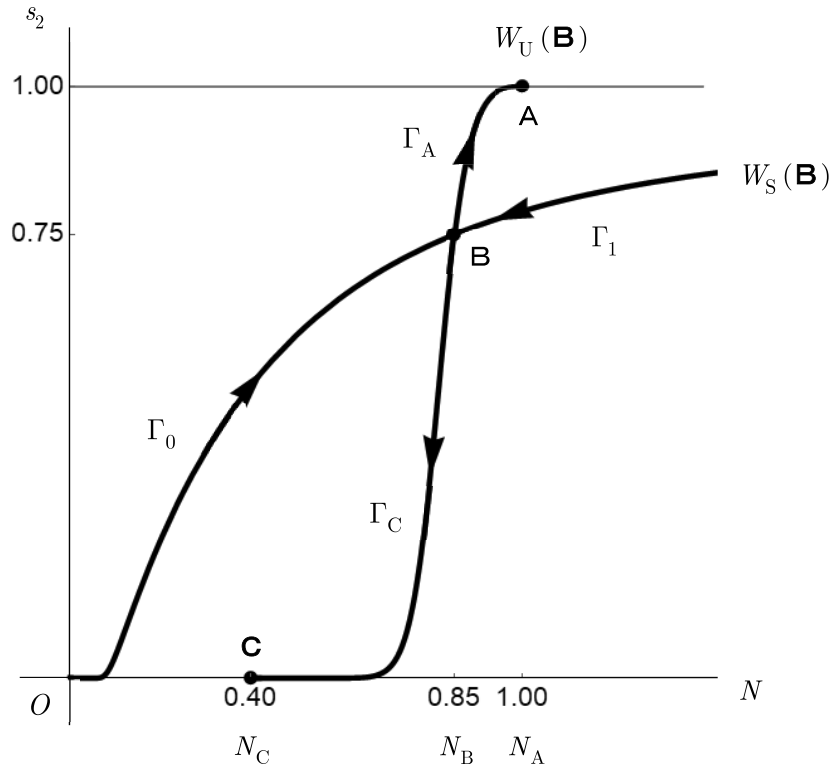
B均衡のstable manifoldとunstable manifoldをそれぞれ $W_S(\mathbf{B})$ 、 $W_U(\mathbf{B})$ と書くと、

$$W_S(\mathbf{B}) = \Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \{\mathbf{B}\},$$

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

が成り立つ。図2と図3から明らかなように、stable manifold $W_S(\mathbf{B})$ より上側、すなわち**A**均衡のbasin of attraction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。また、stable manifold $W_S(\mathbf{B})$ より下側、すなわち**C**均衡のbasin of attractionの点を初期値に持つ解は**C**均衡に収束する。このように、stable manifold $W_S(\mathbf{B})$ は二つの均衡点（**A**均衡と**C**均衡）のbasin of attractionを分割しており、basin boundaryとなっている。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、各均衡点をつぎのように特徴付けることができる。

図3 B均衡のstable manifold と unstable manifold



Result 2 協力戦略の普及の初期値依存性

生物資源の初期存在量と協力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、協力企業と非協力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2次元力学系 (1) の解軌道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、協力戦略が普及する（つまり 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、sensitivity analysisを行い、費用の変化が協力戦略の普及に与える影響を検討する。

5. 費用の変化と協力の進化

ここでは、費用の変化が協力戦略の普及に与える影響をsensitivity analysisによって検討する。前で述べたように、費用には二つあった。一つ目は、単なる規制遵守ではなく、遵守すべき規制基準を超えて環境負荷削減に向け自主的に取り組む場合にかかる費用である。もう一つは、社会的圧力に起因する費用

$$\mu(1 + \lambda s_2) \left(1 + \frac{\delta}{N} \right)$$

である。

まず、社会的圧力に起因する費用が変化する状況から見ていく。環境保全に対する構成員の関心の強さを表す δ に注目しよう。環境教育や自主的環境取り組みの公開などにより、環境保全に対する関心が高まり（ δ の増加）、非協力企業の費用が増加し、非協力企業の利潤が減少する。これにより、協力企業が増加し、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、環境保全の意欲の増進（ δ の増加）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、 δ を0.4から0.5へ増加させる。図4は δ の増加が共存均衡の位置に与える影響を示したものである。 δ の増加により、stable manifold は下へ移動し、 $W_S(\mathbf{B}')$ に位置することになり、共存均衡は $\mathbf{B}(0.85, 0.75)$ から $\mathbf{B}'(0.79, 0.64)$ へ移動する。このように、環境保全の意欲の増進（ δ の増加）は \mathbf{A} 均衡の basin of attraction を拡大させるという意味で協力戦略の普及を促す効果がある。

つぎに、協力戦略に同調するよう社会的圧力がかかる状況を考える。このために、同調性の強さを表す λ に注目する。協力戦略への同調性が高まること（ λ の増加）により、非協力企業の費用が増加し、非協力企業の利潤が減少する。これにより、協力戦略の普及と過剰利用の回避の可能性がある。そこで、 λ の増加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、 λ を3.2から3.7へ増加させる。図5は同調性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。同調性の高まりにより、stable manifold が下へ移動し、共存均衡は $\mathbf{B}(0.85, 0.75)$ から $\mathbf{B}''(0.77, 0.62)$ へ移動することがわかる。

最後に、自主的環境取り組みに要する費用 c が低下する状況を考える。技術進歩や環境政策手段（補助金など）によって費用 c が低下すると、協力企業の利潤が増加し、協力行動を選択する企業が増加する可能性がある。図6は、各parameterの値をbase caseに設定し、自主的環境取り組みに要する費用 c を13.5から12.5へ低下させた状況を示したものである。費用 c の低下により、stable manifold が下へ移動し、共存均衡は $\mathbf{B}(0.85, 0.75)$ から $\mathbf{B}'''(0.79, 0.65)$ 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 費用の変化が協力行動の選択へ及ぼす効果

環境保全の意欲の増進、同調性の高まり、技術の進歩、補助金制度の創設により協力戦略が普及し、生物資源の過剰利用を回避できる可能性がある。

図4 環境保全に対する関心が高まった場合

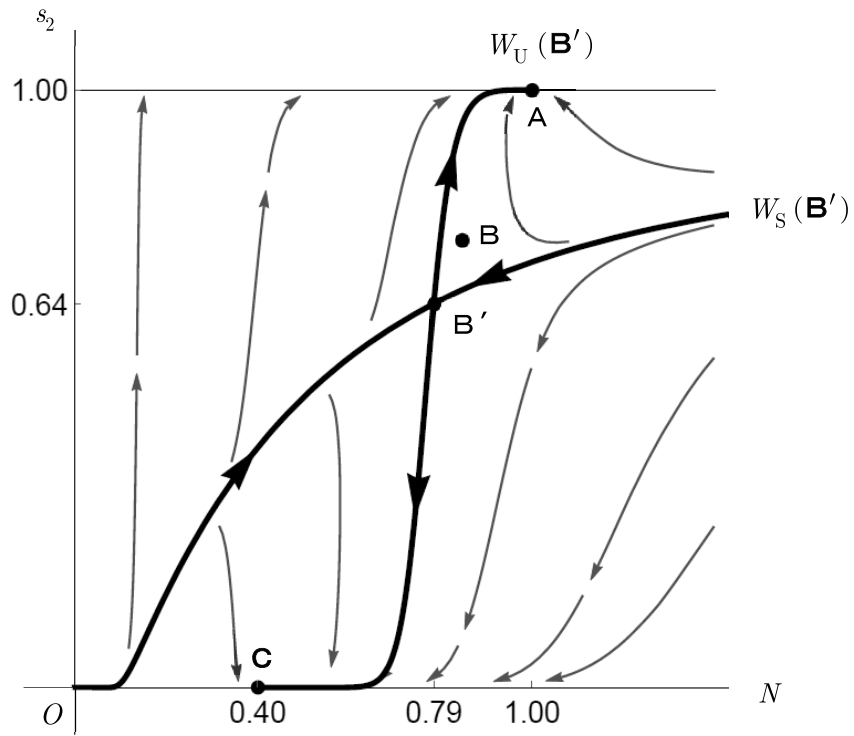


図5 同調性が高まった場合

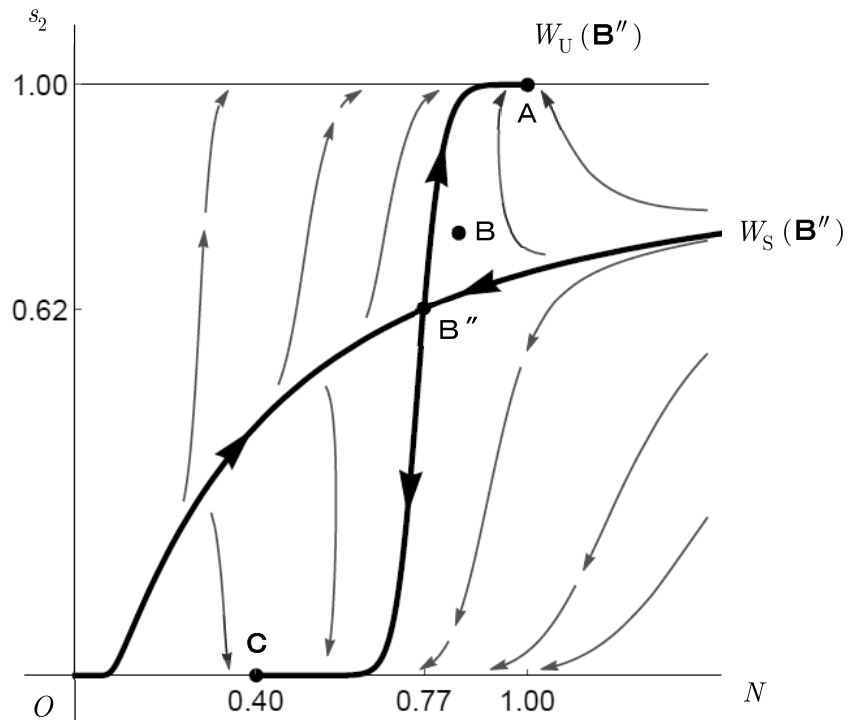
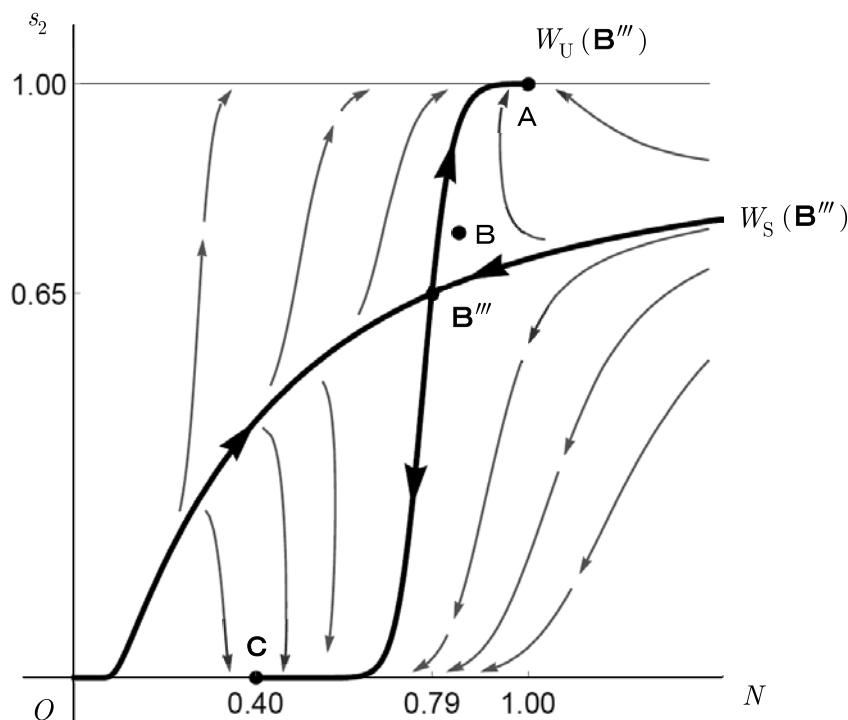


図6 自主的環境取り組みの費用が低下した場合



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、社会的圧力に起因する費用と自主的環境取り組みに要する費用を考慮した生物資源の利用問題をevolutionary frameworkの中で考察した。各企業は、非協力戦略（単に環境規制を遵守する戦略）と協力戦略（単なる規制遵守ではなく、遵守すべき規制基準を超えて環境負荷削減に向け自主的に取り組む戦略）という二つの戦略を持つと仮定した。

第3節では長期均衡点が存在する条件を導出した。非協力戦略を選択する企業と協力戦略を選択する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協力戦略の普及が経済の初期状態に強く依存することを示した。

第5節では協力戦略が普及するための条件をsensitivity analysisによって検討し、環境保全の意欲の増進、同調性の高まり、技術の進歩、補助金制度の創設により、**A**均衡のbasin of attractionを拡大させるという意味で協力戦略の普及が促され、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。

参考文献

- [1] 巖佐庸・大野ゆかり (2009) 「第6章 生態系ダイナミクスと人の選択ダイナミクスのカップリング」高村典子編著『生態系再生の新しい視点 —湖沼からの提案』pp.179-218, 共立出版。
- [2] Blanco, Ester, Javier Lozano, Javier Rey-Maqueira (2009) “A Dynamic Approach to Voluntary Environmental Contributions in Tourism,” *Ecological Economics*, Vol.69, No.1, pp.104-114.
- [3] Blanco, Esther and Javier Lozano (2015), “Ecolabels, Uncertified Abatement, and the Sustainability of Natural Resources: An Evolutionary Approach,” *Journal of Evolutionary Economics*, Vol.25, No.3, pp.623-647.
- [4] Clark, Colin W. (2010), *Mathematical Bioeconomics: The Mathematics of Conservation*, Third Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [5] Conrad, Jon M. (2010), *Resource Economics*, Second Edition, Cambridge University Press, New York, NY.
- [6] Gintis, Herbert (2009), *Game Theory Evolving*, Second Edition, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [7] Hanley, Nick, Jason F. Shogren, and Ben White (2007), *Environmental Economics: In Theory and Practice*, Second Edition, Palgrave Macmillan, New York, NY.
- [8] 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.
- [9] Iwasa, Yoh, Yukari Suzuki-Ohno and Hiroyuki Yokomizo (2010), “Paradox of nutrient removal in coupled socioeconomic and ecological dynamics for lake water pollution,” *Theoretical Ecology*, Vol.3, No.2, pp.113-122.
- [10] Khanna, Madhu (2001), “Non-Mandatory Approaches to Environmental Protection,” *Journal of Economic Surveys*, Vol.15, No.3, pp.291-324.
- [11] 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*, Vol.13, No.2, pp. 183-200.
- [12] Perman, Roger, Yue Ma, Michael Common, David Maddison and James McGilvray (2011), *Natural Resource and Environmental Economics*, Fourth Edition, Pearson Education Limited, Harlow, Essex.
- [13] Strogatz, Steven H. (1994), *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, Westview Press, Cambridge, MA.

- 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 詳しくは、Clark(2010), Conrad(2010), Hanley *et al.*(2007), Perman *et al.*(2011)を参照。
- 3 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の簡略化ために時点 t を省略し、 N と表す。他の変数も同様である。
- 4 社会的圧力については、Iwasa *et al.* (2010) 及び巖佐・大野 (2009) を参考にした。
- 5 導出についてはGintis (2009) を参照。
- 6 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。
- 7 計算及び作図についてはMathematica (Version Number: 11) を用いた。また、計算結果は近似値である。
- 8 均衡点の特徴付けについては、Hirsh *et al.* (2004), Strogatz (1994)を参照。