

環境政策における経済的手段と協力行動の進化

Economic Instruments and Cooperative Behavior: An Evolutionary Approach

大石 和博
Kazuhiro OISHI

要約

本稿では、生物資源の利用問題を進化的枠組みで考察する。生物資源の利用者は協力的に振る舞うか、非協力的に振る舞うかを選択する。利用者がどちらの戦略を選択するかは模倣学習に基づく。生物資源の過剰利用を回避するために税と補助金を導入する。税と補助金は協力行動の促進と生物資源の持続可能な利用の双方に有効である可能性があることを示す。

Keywords: Dulac's criterion, evolutionary dynamics, globally asymptotically stable, heterogeneous equilibrium.

1. はじめに

森林、水産資源等の生物資源の管理、保全是現代の環境問題において解決すべき重要課題の一つとされている。こうした生物資源はopen-access resourceの性質を持つため、その管理を困難にしている。ここでopen-access resourceとは、それを利用したいと思う経済主体であれば無制限に開放されている資源のことである¹。資源が誰にも利用可能であり、利用のための費用が低いのであれば社会的に過大に利用されるおそれがあり、自己の短期的利潤追求と集団全体の利益の間に対立が生じる。このような対立が生じるsocial dilemmaを解決する方法については研究の蓄積がなされている²。

生物資源を持続的に利用するために生態系と人間社会との間を総合的に表現できる数理的枠組みが必要とされている。生物資源の過剰利用により生態系が劣化し、それが時間の経過と共に社会全体に悪影響を与え続けてしまうことから、生物資源の長期的利用を考察するには動学的観点から生物資源と経済活動の相互依存関係を表現しなければならない。さらに、集団内部の構成員の相互作用も重要だ。ある構成員は資源利用の抑制に協力し、別の構成員は過剰利用するかもしれない。また、協力的に振る舞っていた者が戦略を変更し非協力的に振る舞うこともある。このような異質な戦略を持つ構成員の直接あるいは間接的な相互作用と、これらの相互作用から現れる集団全体の特徴付けも動学的な観点から捉えなければならない。

ここで述べた数理的枠組みと密接に関連する文献として、進化的枠組みにおいて考察されたSethi and Somanathan (1996), Noailly *et al.* (2003) を挙げることができる。彼らの進化的枠組みの特徴は模倣にある。ある行動（戦略）を選択する構成員の割合は、その行動（戦略）に対する利得が集団の平均利得を上回るときに増加し、逆のときに減少すると仮定されている。したがって、構成員に不利な行動（戦略）は淘汰され、有利な行動（戦略）は模倣される。彼らは特定の行動（戦略）を選択する構成員の割合の時間的変遷をreplicator dynamicsで表現し、これとresource-stock dynamicsを一つの枠組みの中で双方向的に組み合わせている。Sethi and Somanathan (1996) は社会規範とそれに基づく罰の存在が共有資源の持続的な利用に貢献する可能性を示し、Noailly *et al.* (2003) は資源利用に関して異質な戦略を持つ構成員が長期的に共存する可能性を考察した。

またOsés-Eraso and Viladrich-Grau (2007) は、社会の構成員のうち協調行動をとる主体だけがsocial capitalから便益を得るという報酬機構を導入し、再生可能資源の利用が長期的に可能であることを明らかにした。さらに、Chen and Szolnoki (2018)は、罰と監視を導入し、資源枯渇を回避するためには罰の微妙な調整だけでなく再生可能資源の成長率にも配慮するよう指摘した。

これらの業績を踏まえて、本稿ではChen and Szolnoki (2018)の分析枠組みを用いて、生物資源の利用問題を考察する。ただし、罰と監視を導入するのではなく、税と補助金を彼らの分析枠組みに導入し、環境保全のために税と補助金が果たす役割について理論的に考察することにしたい。本論文の構成は以下の通りである。第2節では、税と補助金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。後者は生物資源利用者の模倣学習から導出される。第3節ではこれらの微分方程式体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。均衡点がglobally asymptotically stableであることをDulac's criterionにより証明する。最後に、第5節では数値的な分析から税と補助金の増減が均衡点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察するための数理模型を動学的観点から構築する。まず、bioeconomicsにおいて通常用いられる仮説にしたがい、resource-stock dynamicsを定式化する³。時間は連続とし、一時点を $\tau \geq 0$ と書き、各時点 τ における生物資源の存在量を $Y \geq 0$ で表す⁴。再生可能資源である生物資源の時間的変化 $\dot{Y} = \frac{dY}{d\tau}$ は、つぎのlogistic equationで表されるとする。

$$\dot{Y} = rY \left(1 - \frac{Y}{K} \right)$$

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。上記の微分方程式は各時点の瞬時的な自然回復力を表している。生物資源の利用という経済活動によって、生物資源の時間的变化 \dot{Y} は減少すると考えられる。各時点の生物資源の利用量を G とすると、上記の微分方程式は

$$\dot{Y} = rY \left(1 - \frac{Y}{K}\right) - G$$

と修正される。

以下では、税と補助金制度の下で生物資源を利用する構成員の行動が定式化される。生物資源を利用する構成員の数を定数 $m > 0$ で表す。各構成員は生物資源の利用量 H_i ($i = 1, 2$) を選択する。 H_1 は生物資源の利用を制限することに協力的に振る舞う戦略であり、 H_2 は非協力的に振る舞う戦略である。構成員が協力行動を選択することは自発的に経済活動を制限することを意味する。表現を単純化するために、戦略 H_1 を選択する構成員を協力者、戦略 H_2 を選択する構成員を非協力者とよぶことがある。構成員の利用量は各時点の生物資源の存在量 Y に依存すると仮定する。Chen and Szolnoki (2018) にしたがって、協力者の利用量は

$$H_1 = \frac{hY}{K}$$

によって表される。生物資源の存在量 Y が上限 K に到達すると $H_1 = h$ となる。この意味で、定数 $h > 0$ は各構成員が利用できる生物資源の最大量であり、

$$h \leq \frac{K}{m}$$

を満たすものとする。非協力者の利用量は

$$H_2 = H_1(1 + \alpha)$$

とする。ここで、 $\alpha > 0$ は非協力の度合いに関する定数である。

任意の時点で、戦略 H_1 を選択する構成員の割合を $s \in [0, 1]$ とすると、戦略 H_2 を選択する構成員の割合は $1 - s$ である。生物資源の総利用量 G は

$$G = msH_1 + m(1 - s)H_2$$

と定義される。 $s = 1$ のとき、すなわち構成員全員が協力者であるときの総利用量は $G = \frac{hmY}{K}$ である。 $s = 0$ のとき、すなわち構成員全員が非協力者であるときの総利用量は $G = \frac{hmY(1 + \alpha)}{K}$ である。協力者が集団内に占める割合 s の変化はreplicator dynamicsとして後に定式化される。

構成員の利得を特定化する。単純化のため戦略 H_i を選択する構成員の利潤を H_i とする。税と補助金については次のように仮定する。構成員は資源を限定的に利用する場合に限り、つまり協力する場合に限り補助金を ws だけ受取る。ここで、定数 $w > 0$ は基準となる補助金であり、協力者の割合 s に応じて受取額が変化する。協力者の利得 u_1 は利潤と補助金の和であり、

$$u_1 = H_1 + ws$$

となる。一方、非協力者は税を $t(1 + \alpha)(1 - s)$ だけ支払う。ここで、定数 $t > 0$ は基準となる税であり、非協力の度合い α と非協力者の割合 $1 - s$ に応じて税支払いが変化する。非協力者の利得 u_2 は利潤から税支払いを引いた残りであり、

$$u_2 = H_2 - t(1 + \alpha)(1 - s)$$

となる。

構成員全体の平均利得 \bar{u} を

$$\bar{u} = su_1 + (1 - s)u_2$$

と定義すると、協力者の割合 s の evolutionary process は replicator dynamics

$$\dot{s} = s(u_1 - \bar{u})$$

によって与えられる⁵。これは imitation-type dynamics であり、各構成員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。平均以上の利得をもたらす戦略は、集団における構成員の割合を増加させるという概念を捉えたものである。すなわち、協力者の利得 u_1 が平均利得 \bar{u} より大きいとき協力者の割合 s は増加し、 $u_1 < \bar{u}$ であれば s は減少することが分かる。上記の replicator dynamics に関して

$$\bar{u} = \begin{cases} u_1 & \text{if } s(0) = 1 \\ u_2 & \text{if } s(0) = 0 \end{cases}$$

という場合には、協力者の割合 s は時間を通じて一定である。我々は各構成員の模倣学習によって協力者の割合 s がどのように進化するかに関心があるので、この場合を除くことにする。以下では初期時点において協力者と非協力者が存在すると仮定する（初期値を $0 < s(0) < 1$ と仮定する）。

上記の replicator dynamics を変形すると

$$\dot{s} = s(1 - s)(u_1 - u_2)$$

を得る。この式の直感的意味を考えてみよう。構成員間の利得差は集団の構成に圧力をかける。利得差が大きいほど、構成員はそれを感知し、戦略を変更する可能性が高くなるだろう。すなわち、協力者の利得 u_1 が非協力者の利得 u_2 より大きいとき、協力的行動（戦略 H_1 ）は非協力的行動（戦略 H_2 ）より有利であるため、戦略 H_2 から戦略 H_1 への変更が生じるであろう。このとき協力者の割合 s は増加する。逆に、 $u_1 < u_2$ の場合には協力的行動（戦略 H_1 ）は非協力的行動（戦略 H_2 ）より不利であるため、戦略 H_1 から戦略 H_2 への変更が生じ、協力者の割合 s は減少する。税と補助金が $w = t(1 + \alpha)$ に設定されていると仮定すれば、利得の差は

$$u_1 - u_2 = t(1 + \alpha) - \frac{ahY}{K}$$

となる。

以上から得られた基本動学方程式

$$\begin{cases} \dot{Y} = rY \left(1 - \frac{Y}{K}\right) - \frac{hmY}{K}(1 + \alpha - \alpha s) \\ \dot{s} = s(1 - s) \left(t(1 + \alpha) - \frac{\alpha h Y}{K}\right) \end{cases}$$

によって必要な分析がすべて可能になる。これはresource-stock dynamicsとevolutionary dynamicsを一つの枠組みに統合したもので、動学的観点から生物資源と経済活動の相互依存関係を表現したものである。すなわち、戦略の進化は生物資源の存在量を変化させる。逆に、生物資源の存在量の変化は利得に影響を与え、戦略の進化に影響を与えるのである。後の説明を容易にするため、 $y = \frac{Y}{K}$ と変数変換すれば、上記の基本動学方程式は

$$\begin{cases} \dot{y} = ry(1 - y) - \frac{hmy}{K}(1 + \alpha - \alpha s) \\ \dot{s} = s(1 - s)(t(1 + \alpha) - \alpha hy) \end{cases} \quad (1)$$

と修正される。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 y と s 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) で表された数理模型において、生物資源の過剰利用を回避するにはどのような前提条件を満たさなければならないか、そして協力者と非協力者が共存状態になる安定均衡は存在するのかという問題である。生物資源の利用問題を動学的な観点から考察するためにphase plane analysisを行い、2次元力学系 (1) の解の挙動を調べよう。まず、定常状態が存在するかどうかを検討する。定常状態は二つの条件式 $\dot{y} = 0$, $\dot{s} = 0$ の解として得られる。 $\dot{y} = 0$ となるのは

$$y = 0, \quad s = \Phi(y)$$

の場合である。ここで

$$\Phi(y) = \frac{rK}{\alpha hm} y + \frac{hm(1 + \alpha) - rK}{\alpha hm}$$

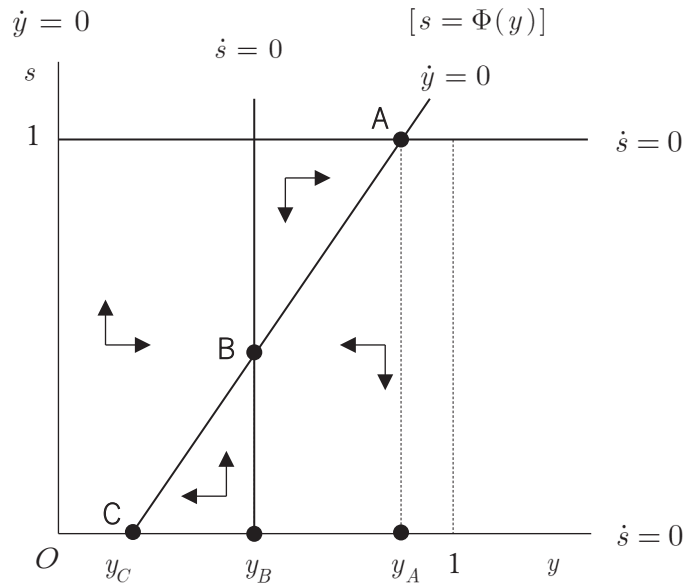
である。 $\dot{s} = 0$ となるのは、

$$s = 0, \quad s = 1, \quad y = \frac{t(1 + \alpha)}{\alpha h}$$

の場合である。

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。横軸には y 、縦軸には s 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 $y > 0$ 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⁶。

図1 微分方程式体系のnullclineと均衡点



$$\mathbf{A}(y_A, s_A) \quad \begin{aligned} y_A &= 1 - \frac{hm}{rK} \\ s_A &= 1 \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}(y_B, s_B) \quad \begin{aligned} y_B &= \frac{t(1+\alpha)}{\alpha h} \\ s_B &= \frac{rKy_B + hm(1+\alpha) - rK}{\alpha hm} \end{aligned}$$

$$\mathbf{C}(y_C, s_C) \quad \begin{aligned} y_C &= 1 - \frac{hm(1+\alpha)}{rK} \\ s_C &= 0 \end{aligned}$$

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**均衡ではすべての構成員が戦略 H_1 を選択し、集団は協力者だけになっていく。逆に**C**均衡ではすべての構成員が戦略 H_2 を選択し、集団は非協力者だけになっていく。これらと違い、**B**均衡では協力者と非協力者が共存状態になる。このように協力者と非協力者が共存するという意味で**B**均衡はheterogeneous equilibriumである。なお、生物資源の存在量は**C**均衡、**B**均衡、**A**均衡の順に大きくなる。

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、 $y_A > 0$ 、すなわち、 $r > \frac{hm}{K}$ である。

C均衡が存在するための必要条件は、 $y_C > 0$ 、すなわち、 $r > \frac{hm(1+\alpha)}{K}$ である。

まず**A**均衡の存在条件 $r > \frac{hm}{K}$ については、構成員全員が協力行動を選択するときに生物資源のintrinsic growth rateが総利用率を上回っていなければならない、と解釈できる。もし $r \leq \frac{hm}{K}$ 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 $r > \frac{hm(1+\alpha)}{K}$ については、構成員全員が非協力行動を選択するときに生物資源のintrinsic growth rateが総利用率を上回っていなければならない、と解釈できる。もし $r \leq \frac{hm(1+\alpha)}{K}$ 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、

$$r > \frac{hm(1+\alpha)}{K}$$

と仮定する。したがって、 $r > \frac{hm}{K}$ である。

最後に**B**均衡の存在条件を明らかにしよう。まず、 $y_B > 0$ は常に成り立つ。したがって、協力者と非協力者が共存するための必要十分条件は、 $0 < s_B < 1$ が成り立つことである。これは

$$y_C < y_B < y_A$$

と同値であり、 y_B は y_C と y_A の間に位置しなければならないということである。これより、協力者と非協力者が共存するための必要条件 $y_B < 1$ を得る。

協力者と非協力者が共存するための必要十分条件は

$$t^* < t < t^{**}$$

のように書き直せる。ここで

$$t^* = \frac{\alpha h y_C}{1 + \alpha}, \quad t^{**} = \frac{\alpha h y_A}{1 + \alpha}$$

である。

以上の考察では、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ことを確認した。我々が注意を集中したいのは**B**均衡である。**B**均衡の場合だけ協力者と非協力者が長期的に共存し、**A**均衡と**C**均衡よりも興味深い結果が得られるからである。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

図1のphase diagramでは2次元力学系 (1) の定性的な問題、すなわちglobal stabilityの性質が示されている。まず、nullcline $\dot{y} = 0$ から得た直線 $s = \Phi(y)$ の性質を見てみよう。この直線はphase planeを二つの領域に分ける。直線 $s = \Phi(y)$ より上の領域では $s > \Phi(y)$ が成り立つ。すなわち、この領域では $\dot{y} > 0$ であり、 y は増加する傾向を持つ。逆に、直線 $s = \Phi(y)$ より下の領域では $\dot{y} < 0$ となるので、この領域で y は減少す

る傾向を持つ。また、直線 $s = \Phi(y)$ 上では $\dot{y} = 0$ となるので y は変化しない。次に、nullcline $\dot{s} = 0$ から得た直線 $y = y_B$ の性質を見てみよう。この直線も phase plane を二つの領域に分ける。直線 $y = y_B$ より左の領域では $y < y_B$ が成り立つ。すなわち、 $\dot{s} > 0$ となるので、 s は増加する傾向を持つ。逆に、直線 $y = y_B$ より右の領域では $\dot{s} < 0$ となるので、この領域で s は減少する傾向を持つ。また、直線 $y = y_B$ 上では $\dot{s} = 0$ となるので s は変化しない。以上の結果を phase plane 上に矢印を用いて記入したものが図1である。二つの直線によって phase plane は四つの領域に区分され、各領域において2次元力学系(1)の解軌道の動きはその領域内に記入された矢印の方向によって示されている。

以下では **B** 均衡に焦点をあて、**B** 均衡の周りの解軌道の性質について考察する。まず、local stability analysis から始める。**B** 均衡の local stability は Jacobian matrix

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial s} \\ \frac{\partial \dot{s}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{s}}{\partial s} \end{pmatrix}$$

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

$$J_B = \begin{pmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & 0 \end{pmatrix}$$

となる。ここで、

$$j_1 = -ry_B < 0,$$

$$j_2 = \frac{\alpha h m y_B}{K} > 0,$$

$$j_3 = -s_B(1 - s_B)\alpha h < 0,$$

と定義されている。 J_B の trace と行列式をそれぞれ $\text{tr} J_B$, $|J_B|$ と表すと、

$$\text{tr} J_B = j_1 < 0$$

$$|J_B| = -j_2 j_3 > 0$$

となる。したがって、**B** 均衡は locally asymptotically stable である⁷。**B** 均衡が stable focus になるか stable node になるかは、判別式

$$\Delta = (\text{tr} J_B)^2 - 4|J_B| = j_1^2 + 4j_2 j_3 = (ry_B)^2 - \frac{4(\alpha h)^2 m y_B}{K} s_B(1 - s_B)$$

の符号によって決まる。直感的な理解を促すため、 y_A , y_B , y_C を用いて判別式 Δ を書きかえてみよう。

$$s_B = \frac{rK}{\alpha h m} (y_B - y_C),$$

$$1 - s_B = \frac{rK}{\alpha h m} (y_A - y_B),$$

であることに注意して、

$$\Delta = (ry_B)^2 - \frac{4r^2Ky_B}{m}(y_A - y_B)(y_B - y_C)$$

となる。

ここで、図1における y_A, y_B, y_C の位置関係にも注目しよう。協力者の割合 s が0または1に十分近ければ、すなわち y_B が y_A または y_C の十分近くにあれば、判別式 Δ は正になる可能性がある。また、 s が0と1の両方から十分離れていれば、すなわち y_B が y_A と y_C の両方から十分離れていれば、判別式 Δ は負になる可能性がある。このように、判別式 Δ は正にも負にもなり得る。したがって

- $\Delta > 0$ であれば、**B** 均衡はstable nodeである。
- $\Delta < 0$ であれば、**B** 均衡はstable focusである。

以上の考察をまとめよう。

Result 1 **B** 均衡のlocal stability

B 均衡が存在すれば、**B** 均衡はlocally asymptotically stableである。 y_B が y_A または y_C の十分近くにある場合には、**B** 均衡はasymptotically stable nodeであり、 y_B が y_A と y_C から十分離れたところにある場合には、**B** 均衡はasymptotically stable focusである可能性がある。

以上で、**B** 均衡がlocally asymptotically stableであることが示された。つぎにglobally asymptotically stableであることを示そう。このためにはlimit cycleが存在するか否かを調べなければならない。結果から見ていく。

Result 2 limit cycleの可能性の排除

B 均衡が存在すれば、領域 $\Omega = \{(y, s); y_C < y < y_A, 0 < s < 1\}$ 内にlimit cycleは存在しない。

Proof: 2-dimensional Euclidean space \mathbb{R}^2 におけるsimply connected open subset Ω 上で定義された2次元力学系 (1) にDulac's criterionを適用する⁸。 Ω 上で定義された連続微分可能な実数値関数を F とする。 Ω 内で

$$\nabla \cdot (F\dot{y}, F\dot{s}) = \frac{\partial F\dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial F\dot{s}}{\partial s}$$

が恒等的にzeroでなく、その符号も変わらないことを示せばよい。そこで、

$$F(y, s) = \frac{1}{s(1-s)y}$$

とおくと、

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (Fy, F\dot{s}) &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{r(1-y) - \frac{hm}{K}(1+\alpha-\alpha s)}{s(1-s)} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{t(1+\alpha) - \alpha hy}{y} \right) \\ &= -\frac{r}{s(1-s)} < 0\end{aligned}$$

となる。よって、 Ω 内にlimit cycleは存在しない。■

以上のglobal stability analysisから、**B** 均衡を以下のように特徴付けることができる。

Result 3 **B** 均衡のglobal stability

B 均衡が存在すれば、**B** 均衡はglobally asymptotically stableであり、すべての解軌道は**B** 均衡に収束する。

5. 数値解析

これまでは解析的手法で**B** 均衡の特徴付けを行った。ここでは数値解析的手法により、解軌道を描いてみよう。基準となるbase caseとして各parameterを

$$h = 0.6, \quad K = 1000, \quad m = 1000, \quad r = 4, \quad t = 0.25, \quad \alpha = 5$$

に固定する⁹。 $t^* = 0.05$, $t^{**} = 0.425$ であるから、 $t^* < t < t^{**}$ が成り立ち、**B** 点が存在する¹⁰。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**(0.85, 1), **B**(0.5, 0.53), **C**(0.1, 0) である。**B** 点で評価された判別式は $\Delta = -0.48 < 0$ となる。2次元力学系(1)の解軌道は、矢印を付けた曲線群で表されるような構造を持つ。 y_B が y_A と y_C から十分離れたところにある場合には、すべての解軌道は**B** 均衡の周りを時計回りに回転しながら**B** 均衡に収束していく。このように、**B** 均衡はstable focusである。

つぎに、 y_B が y_A の近くにある場合を考える。ここで税 $t > 0$ に注目する。各parameterをbase caseに設定し、 $t^* < t < t^{**}$ を満たす範囲で税 t を増加させてみよう(したがって補助金 w も増加する)。図3に示されているように、税 t を0.25から0.35に増加させると、共存均衡は**B**(0.5, 0.53) から**B'**(0.7, 0.8)へ移動することがわかる。**B'** 点で評価された判別式は $\Delta = 3.808 > 0$ となるので、**B'** 均衡はstable nodeである。図3では、税と補助金の増加により、協力的に振る舞う構成員が増大し、生物資源を持続的に利用できる可能性を示している。

逆に、 y_B が y_C の近くにある場合を見てみよう。各parameterをbase caseに設定し、 $t^* < t < t^{**}$ を満たす範囲で税 t を減少させる(したがって補助金も減少する)。図4に示されているように、税 t を0.25から0.07に減少させると、共存均衡は**B**(0.5, 0.53) から**B''**(0.14, 0.05)へ移動することがわかる。**B''** 点で評価された判別式は $\Delta = 0.059 > 0$

図2 定常状態と解軌道

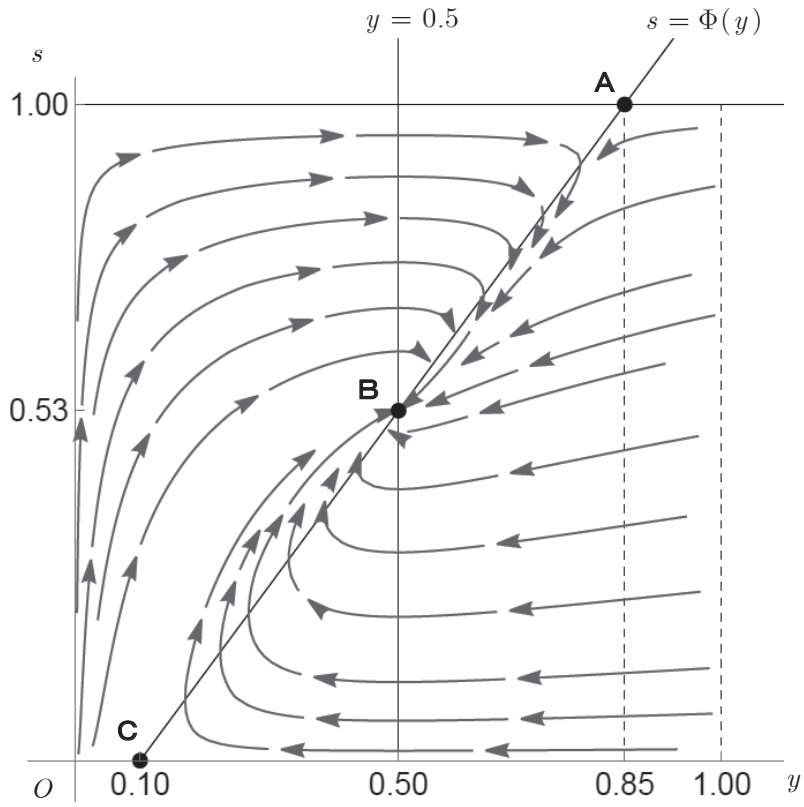


図3 税と補助金を増やす場合

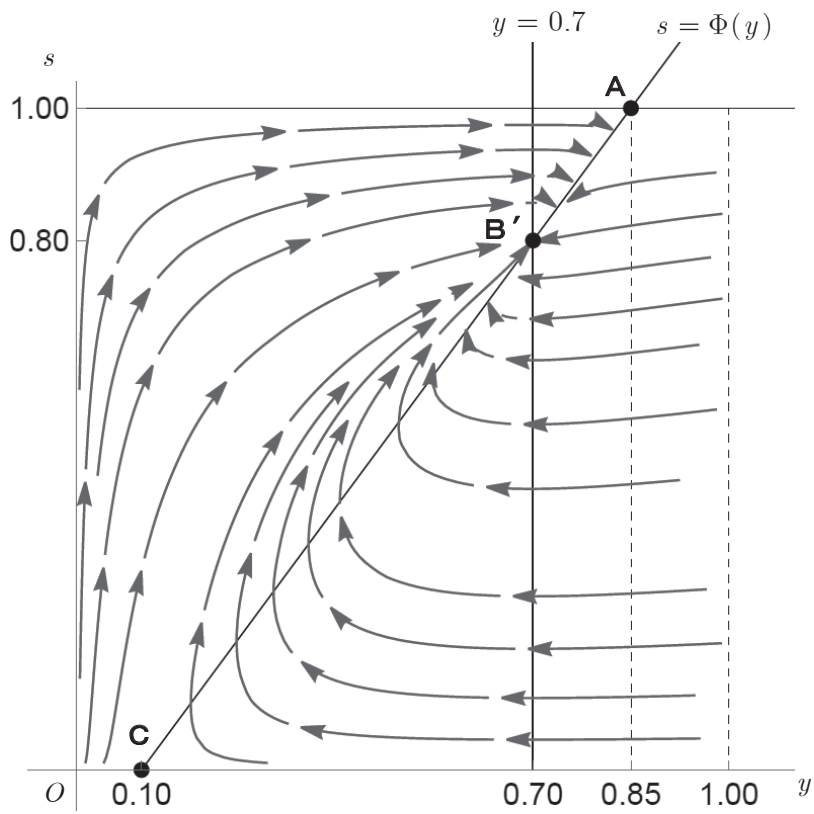
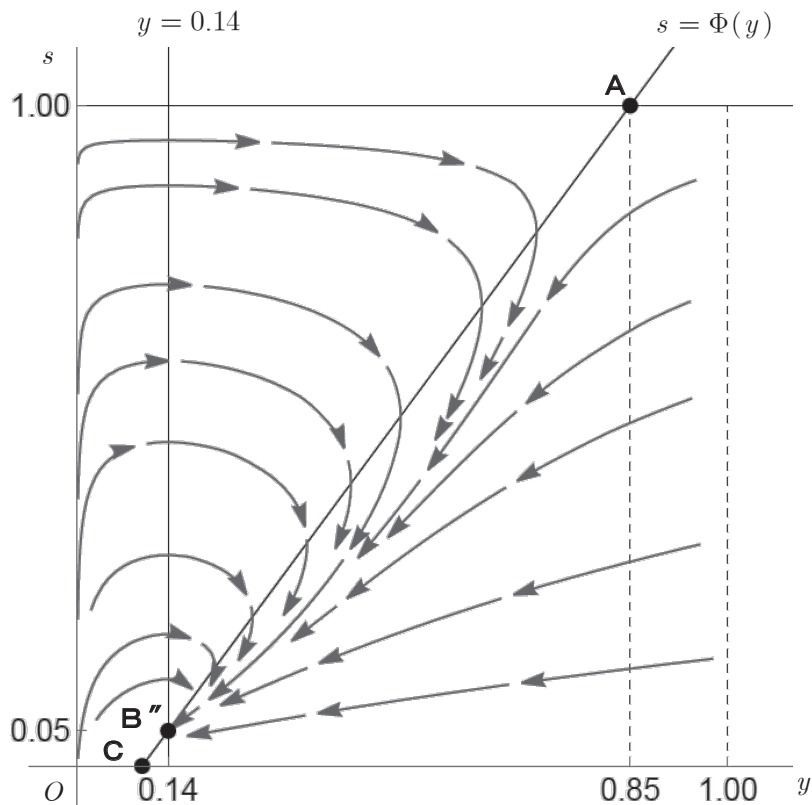


図4 税と補助金を減らす場合



となるので**B''**均衡はstable nodeである。図4では、税と補助金の減少により、大部分の構成員が非協力的に行動し、生物資源が枯渇する可能性を示している。以上から、税と補助金制度の効果を次のように特徴付けることができる。

Result 4 税と補助金の効果

税と補助金の増加により、協力者が増加し生物資源の過剰利用を回避できる可能性がある。また、税と補助金の減少により、非協力者が増加し過剰利用を抑制できない可能性がある。

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節では税と補助金制度を考慮した生物資源の利用問題を進化的枠組みの中で説明した。2本の基本動学方程式、すなわち resource-stock dynamicsとevolutionary dynamicsを一つの枠組みに統合し、動学的観点から生物資源と経済活動の相互依存関係を表現した。第3節では長期均衡点が存在する条件を導出し、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

れることを確認した。協力者と非協力者が共存状態になるという意味でheterogeneous equilibriumが存在する可能性があることを指摘した。第4節では長期均衡点の安定性を分析した。長期均衡点がglobally asymptotically stableであることがDulac's criterionを適用することによって証明された。第5節では数値解析的手法により、税と補助金の変化が協力行動と生物資源の存在量に与える影響を分析した。税と補助金の増加により、環境保全的に振る舞う構成員が増加し、生物資源が持続的に利用できる可能性が示された。

参考文献

- [1] Allen, Linda J. S. (2007), *An Introduction to Mathematical Biology*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [2] Chen, Xiaojie and Attila Szolnoki (2018), "Punishment and inspection for governing the commons in a feedback-evolving game," *PLoS Computational Biology*, Vol. 14(7), pp.1-15.
- [3] Clark, Colin W. (2010), *Mathematical Bioeconomics: The Mathematics of Conservation*, Third Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [4] Conrad, Jon M. (2010), *Resource Economics*, Second Edition, Cambridge University Press, New York, NY.
- [5] Field, Barry C. and Martha K. Field (2009), *Environmental Economics: An Introduction*, Fifth Edition, McGraw Hill, 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 (2013), *Differential Equations, Dynamical Systems, and an Introduction to Chaos*, Third Edition, Academic Press, Waltham, MA.
- [9] 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.
- [10] Osés-Eraso, Nuria and Montserrat Viladrich-Grau (2007), "On the Sustainability of Common Property Resources," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 53, No. 3, pp. 393-410.
- [11] Ostrom, Elinor (1990), *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press, New York, NY.
- [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] Sethi, Rajiv and E. Somanathan (1996), "The Evolution of Social Norms in Common Property Resource Use," *American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, pp. 766-788.

[14] Strogatz, Steven H. (1994), *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, Westview Press, Cambridge, MA.

-
- 1 詳しくは, Field and Field (2009) を参照。
 - 2 代表的な論考としてOstrom (1990)がある。
 - 3 詳しくは, Clark (2010), Conrad (2010), Hanley *et al.* (2007), Perman *et al.* (2011) を参照。
 - 4 各時点 τ における存在量を $Y(\tau)$ と表すべきだが, notationの簡略化のために時点 τ を省略し, Y と表す。他の変数も同様である。
 - 5 導出についてはGintis (2009) を参照。
 - 6 $y = 0$ (つまり $Y = 0$) の場合には構成員による生物資源の利用はないので, 以下の分析では $y = 0$ の場合を無視する。
 - 7 均衡点の特徴付けについては, Allen (2007), Hirsh *et al.* (2013), Strogatz (1994)を参照。
 - 8 Dulac's criterionについてはAllen (2007), Strogatz (1994)を参照。
 - 9 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。
 - 10 計算および作図についてはMathematica (Version Number: 13.1) を用いた。また, 計算結果は近似値である。