

進化的枠組みにおける持続可能な生物資源管理と経済的手段の有効性

Economic Instruments and Sustainable Management of Biological Resources: An Evolutionary Approach

大石 和博

Oishi Kazuhiro

要約

本稿では、補助金制度を考慮した生物資源の持続的利用問題をevolutionary game theory frameworkで考察する。生物資源の利用者は、利用量を制限する戦略（協力戦略）と、制限しない戦略（非協力戦略）という二つの戦略を持つと仮定する。協力戦略を選択する利用者は政府より補助金を受け取るとする。補助金制度は協力的な環境保全行動を促進し、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: Dulac's criterion, evolutionary framework, globally asymptotically stable.

1. はじめに

生物資源や生態系を持続的に管理する手段には様々なものがあるが、近年、経済的手段が注目されている。たとえば、WBCSD and IUCN (2007) では、市場機構を活用した手段がDirect payments, Tradable permit及びCertificationという三つに分類されている。その例として、Direct paymentsでは税、補助金、PES (Payment for Ecosystem Services), Tradable permitではbiodiversity offsets, Certificationでは漁業や林業での認証制度などが挙げられる。これらの手段に共通するのは、生物資源や生態系機能に依存している経済主体にとって環境保全に取り組むほうが経済的に有利になるという考え方である。経済主体が環境保全に協力的に行動するよういかに促すかが鍵となる。生物資源の持続的な利用について経済的手段の有効性が期待されている。

本研究の目的は、補助金制度の下で、生物資源を長期的に利用するにはどのような制度的諸条件を満たす必要があるのかを理論的に考察することである。自然資源の持続可能な利用に関しては、Sethi and Somanathan (1996), Noailly *et al.* (2003), Osés-Eraso and Viladrich-Grau (2007) などによって分析が展開されてきた。これらの研究は自然資源の動学的分析をevolutionary frameworkのなかで定式化したものである。本稿では、予算制約のある補助金制度を分析枠組みに導入し、補助金制度の効果について考察することにしたい。

予算制約のある補助金制度をevolutionary frameworkのなかに導入した研究として

Estruch-Bosch *et al.* (2018) がある。そこでは、生物多様性保全的な構成員に対し補助金が支払われるが、支払額が固定されている場合と変動する場合が考察されている。後者は、補助金の受給者数が増加すると（つまり、生物多様性保全的な構成員が増加すると）、各受給者の受取額が減少するというものである。本研究では、支払額が変動する場合に焦点をあて定式化を行うが、我々の分析枠組みではglobal stabilityを明示的に扱うという点が特徴的である。このような視点から、本研究は先行研究の補完的な考察となっている。

本論文の構成は以下の通りである。第2節では、補助金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。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補助金の増減や制度の撤廃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構築する。考察の対象とするのは生物資源の動学的利用の問題である。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¹。時間は連続とし、一時点を $t \geq 0$ 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²。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、つぎのlogistic equationで表されるとする。

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

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、生物資源の時間的変化 \dot{N} は減少すると考えられる。この点を考慮し、各時点の生物資源の利用量を H とすると、上記の微分方程式は

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

と修正される。

以下では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 $m > 0$ で表し、一定とする。各利用者は獲得努力量 $E_i \in \{E_1, E_2\}$ 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³。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 を採用する戦略である。以下では表現を単純化するために、戦略 E_1 を選択する構成員を非協力者、戦略 E_2 を選択する構成員を協力者とよぶことがある。戦略 E_i を選択する構成員の資源利用量は、Lamantia and Radi (2015) にしたがって、

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

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。

戦略 E_i を選択する構成員の利得を特定化する。価格を $p > 0$ とし、収入を ph_i とする。獲得努力量 1 単位当たりの費用を $c > 0$ とし、総費用を cE_i とする。 c と p は一定であるとする。資源利用量 h_i を用いて総費用を $\frac{c}{q_i N} h_i^2$ と表すと、利得は

$$ph_i - \frac{c}{q_i N} h_i^2$$

となる。

補助金についてはつぎのように仮定する。生物資源を限定的に利用する場合に限り、つまり、環境保全的に行動する場合に限り構成員は政府から補助金を受け取ることができる。また、補助金総額を一定とし、協力者の人数に応じて均等に支払われると仮定する。補助金総額を決める上で一人当たりの補助金を定数 $w > 0$ とし、総額を wm とする。任意の時点で、戦略 E_i を選択する構成員の割合を $s_i \in [0,1]$ とすると、 $s_1 + s_2 = 1$ であり、協力者の数は ms_2 である。仮定により、補助金は協力者の人数に応じて均等に支払われるから、協力者が受け取る補助金は、

$$\frac{wm}{ms_2} = \frac{w}{s_2}$$

となる。以下では $0 < s_2 \leq 1$ と仮定する。補助金が加味された協力者の利得を π_2 と書き、

$$\pi_2 \triangleq ph_2 - \frac{c}{q_2 N} h_2^2 + \frac{w}{s_2}$$

と定義する。

各構成員は近視眼的であり、各時点において自己の現在の利得を最大化すると仮定する。利得が最大となるための 1 階の条件より、内点解は、 h_2^* を最適利用量として

$$h_2^* = \frac{pq_2 N}{2c}$$

となる。これを利得の式に代入すると最大利得

$$\pi_2^* = \frac{p^2 q_2 N}{4c} + \frac{w}{s_2}$$

を得る。上と同様の手順で、非協力者の最大利得がもとめられる。非協力者に対し補助

金は支払われないので、利得 π_1 を

$$\pi_1 \triangleq ph_1 - \frac{c}{q_1 N} h_1^2$$

と定義すると、最適利用量 h_1^* と最大利得 π_1^* はそれぞれ

$$h_1^* = \frac{pq_1 N}{2c}, \quad \pi_1^* = \frac{p^2 q_1 N}{4c}$$

となる⁴。

構成員の平均利得を

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

と定義する。協力者の割合 s_2 のevolutionary processはreplicator dynamics

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

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。この式から第1に分かることは、利得 π_2^* が平均利得 $\bar{\pi}^*$ 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、 $s_2(0) = 1$ であれば $\bar{\pi}^* = \pi_2^*$ となり、 s_2 は時間を通じて一定であることも分かる。我々は各構成員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 $0 < s_2(0) < 1$ と仮定する。

上記のreplicator dynamicsの直観的理解を促すために、

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

と表してみよう。利得 π_2^* が利得 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、協力者の割合 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、非協力者の割合 s_1 が増加することになる。補助金制度が存在しない場合、常に $\pi_2^* < \pi_1^*$ となることに注意していただきたい。

最後に、最適利用量を用いて、生物資源の総利用量は

$$H = m(1 - s_2)h_1^* + ms_2h_2^*$$

によって特徴付けられる。以上から、考察すべきdynamic systemは

$$\begin{cases} \dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{k}\right) - \frac{mpN}{2c} (q_1 - (q_1 - q_2)s_2), \\ \dot{s}_2 = s_2 (1 - s_2) \left(\frac{w}{s_2} - \frac{p^2 N}{4c} (q_1 - q_2)\right), \end{cases} \quad (1)$$

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

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、生物資源の過剰利用を回避するためにはどのような前提条件を満たさなければならないかという問題である。特に、補助金の増減や撤廃によって協力者の割合がどのように変化するか、また、補助金制度の下で協力者と非協力者は共存できるのかについて考えたい。このために 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、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する。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。 $\dot{N} = 0$ となるのは、

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

の場合である。ここで、

$$\Phi(N) \triangleq \frac{1}{mp(q_1 - q_2)} \left(\frac{2cr}{k} N + mpq_1 - 2cr \right)$$

である。 $\dot{s}_2 = 0$ となるのは、

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

の場合である。ここで、

$$\Psi(N) \triangleq \frac{4cw}{p^2(q_1 - q_2)N}$$

である。以下では $N > 0$ と仮定する。

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 、縦軸に協力者の割合 s_2 がとられている。二つの均衡点をそれぞれ **A**、**B** と呼ぶことにする。図 1 は $N > 0$ かつ $0 < s_2 \leq 1$ に対して二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。

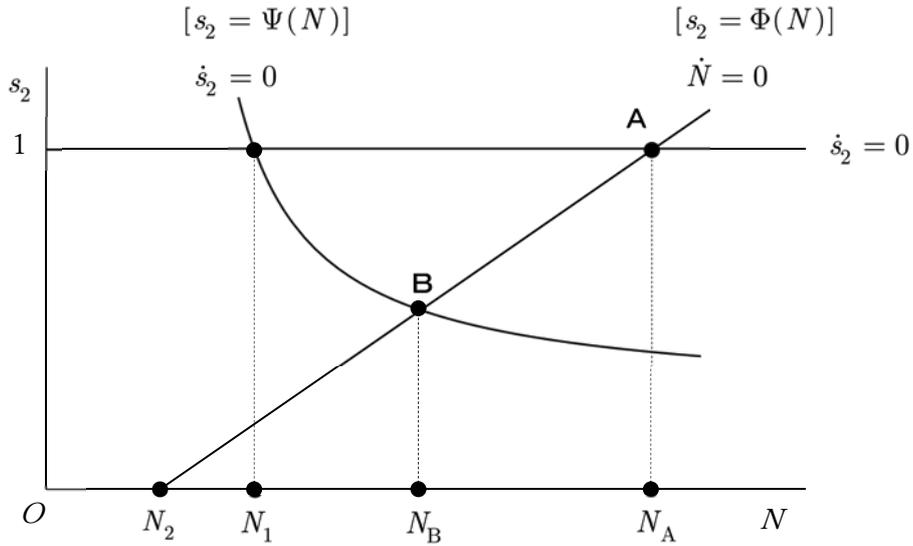
$$\begin{aligned} \mathbf{A}(N_A, s_{2A}) \quad N_A &\triangleq \frac{k(2cr - mpq_2)}{2cr} \\ s_{2A} &\triangleq 1 \\ \mathbf{B}(N_B, s_{2B}) \quad N_B &\triangleq \frac{-\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 32c^2 kmprw}}{4cpr} \\ s_{2B} &\triangleq \frac{4cw}{p^2(q_1 - q_2)N_B} \end{aligned}$$

ここで、

$$\lambda \triangleq kp(mpq_1 - 2cr)$$

と定義されている。これらの均衡点から長期的に二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協力者となり、**B** 均衡では協力者と非協力者が共存状態になる可能性がある。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。

図1 2次元力学系のnullcline と均衡点



A 均衡が存在するための必要条件は、 $N_A > 0$ ，すなわち、 $r > \frac{mpq_2}{2c}$ によって与えられる。これは、すべての構成員が協力者となるときに生物資源のintrinsic growth rateが総利用率を上回っていないなければならない、と解釈できる。もし $r \leq \frac{mpq_2}{2c}$ であれば、**A** 均衡で生物資源は完全に枯渇する。生物資源の枯渇という状況を排除するために、以下では追加的な仮定 $N_A > 0$ ，すなわち、

$$r > \frac{mpq_2}{2c}$$

をおいて考察を進める。

つぎに **B** 均衡の存在条件に移ろう。**B** 均衡が存在する条件、すなわち協力者と非協力者が共存する条件は $0 < s_{2B} < 1$ である。直観的理解を促すためにこの条件式を書き換えると

$$N_1 < N_B < N_A$$

となる。ここで、

$$N_1 \triangleq \frac{4cw}{p^2(q_1 - q_2)} > 0$$

である。したがって **B** 均衡の存在条件は、 N_B が N_1 と N_A の間に位置しなければならないということである（図1を参照）。

以上では定常状態が存在することを確認した。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。以下では定常状態の安定性を調べ、経済が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。**A** 均衡については次節で考察する。

B 均衡の周りの解軌道の性質を調べるにあたり、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、

$$\begin{aligned} j_1 &\triangleq -\frac{rN_B}{k} < 0, \\ j_2 &\triangleq \frac{mp(q_1 - q_2)N_B}{2c} > 0, \\ j_3 &\triangleq -\frac{s_{2B}(1 - s_{2B})p^2(q_1 - q_2)}{4c} < 0, \\ j_4 &\triangleq -\frac{(1 - s_{2B})w}{s_{2B}} < 0 \end{aligned}$$

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、

$$\begin{aligned} \text{tr}J_B &= j_1 + j_4 < 0 \\ |J_B| &= j_1j_4 - j_2j_3 > 0 \end{aligned}$$

となる。したがって、**B** 均衡はlocally asymptotically stable である⁶。**B** 均衡がstable focusになるかstable node になるかは、判別式

$$\Delta \triangleq (\text{tr}J_B)^2 - 4|J_B| = (j_1 - j_4)^2 + 4j_2j_3$$

の符号によって決まる。直観的な理解を促すため、 N_A と N_B を用いて書き直すと、

$$\Delta = \left(\frac{rN_B}{k}\right)^2 \left(\frac{p(N_A - N_B)}{2m} - 1\right)^2 - \frac{4rw(N_A - N_B)}{k}$$

となる。ただし、 $N_B < N_A$ である。

ここで、**図 1** における $N_2 \triangleq \frac{k(2cr - mpq_1)}{2cr}$, N_B , N_A の位置関係にも注目しよう。協力者の割合 s_{2B} が0または1に十分近ければ、すなわち N_B が N_2 または N_A 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_{2B} が0と1の両方から十分離れて

いれば、すなわち N_B が N_2 と N_A 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。 N_B が N_2 または N_A の十分近くにある場合には、**B** 均衡は asymptotically stable node であり、 N_B が N_2 と N_A 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 $\Omega \triangleq \{(N, s_2); 0 < N < N_A, 0 < s_2 < 1\}$ 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⁷⁾。 Ω 上で定義された連続微分可能な実数値関数を G とする。 Ω 内で

$$\nabla \cdot (G\dot{N}, G\dot{s}_2) \triangleq \frac{\partial G\dot{N}}{\partial N} + \frac{\partial G\dot{s}_2}{\partial s_2}$$

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、

$$G(N, s_2) \triangleq \frac{1}{s_2(1-s_2)N}$$

とおくと、

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (G\dot{N}, G\dot{s}_2) &= \frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{r \left(1 - \frac{N}{k}\right) - \frac{mp}{2c}(q_1 - (q_1 - q_2)s_2)}{s_2(1-s_2)} \right) + \frac{\partial}{\partial s_2} \left(\frac{\frac{w}{s_2} - \frac{p^2 N}{4c}(q_1 - q_2)}{N} \right) \\ &= -\frac{r}{s_2(1-s_2)k} - \frac{w}{Ns_2^2} < 0 \end{aligned}$$

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

$$\begin{array}{llll} p = 8, & q_1 = 0.4, & q_2 = 0.2, & c = 6, \\ r = 3, & k = 18, & m = 10, & w = 1.6 \end{array}$$

に固定する⁸。各fixed pointの座標は **A** (10, 1) , **B** (6, 0.5) である。**B** 点で評価されたJacobian matrix J_B の二つの固有値は複素数 ($-1.3 \pm 0.988264i$) となる。図2に示されているように、 N_B が N_2 と N_A 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logarithmic spiralを形成し、**B** 均衡に収束する。このように、**B** 均衡はstable focusである。

つぎに、 N_B が N_A の十分近くにある場合を見てみよう。ここで一人当たりの補助金 w に注目する。各parameterの値をbase caseに設定し、 w を1.6から4.8に増加させる（したがって補助金総額 wm も増加する）。図3は w の増加（したがって補助金総額の増加）が共存均衡の位置に与える影響を示したものである。補助金総額の増加により、共存均衡は **B** (6, 0.5) から **B'** (9.54, 0.94) へ移動することがわかる。**B'** で評価されたJacobian matrixの二つの固有値は互いに異なる負の実数 ($-1.18133, -0.699468$) となるので、**B'** 均衡はstable nodeである。

さらに、 N_B が N_1 の十分近くにある場合も見てみよう。図4は w を1.6から0.1に減少させる（したがって補助金総額 wm も減少する）場合を示したものである。共存均衡は **B** (6, 0.5) から **B''** (2.58, 0.07) へ移動することがわかる。**B''** で評価されたJacobian matrixの二つの固有値は互いに異なる負の実数 ($-1.08889, -0.617903$) となるので、**B''** 均衡はstable nodeである。図4では、補助金総額の大幅削減または制度の撤廃により、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。

図2 定常状態と解軌道

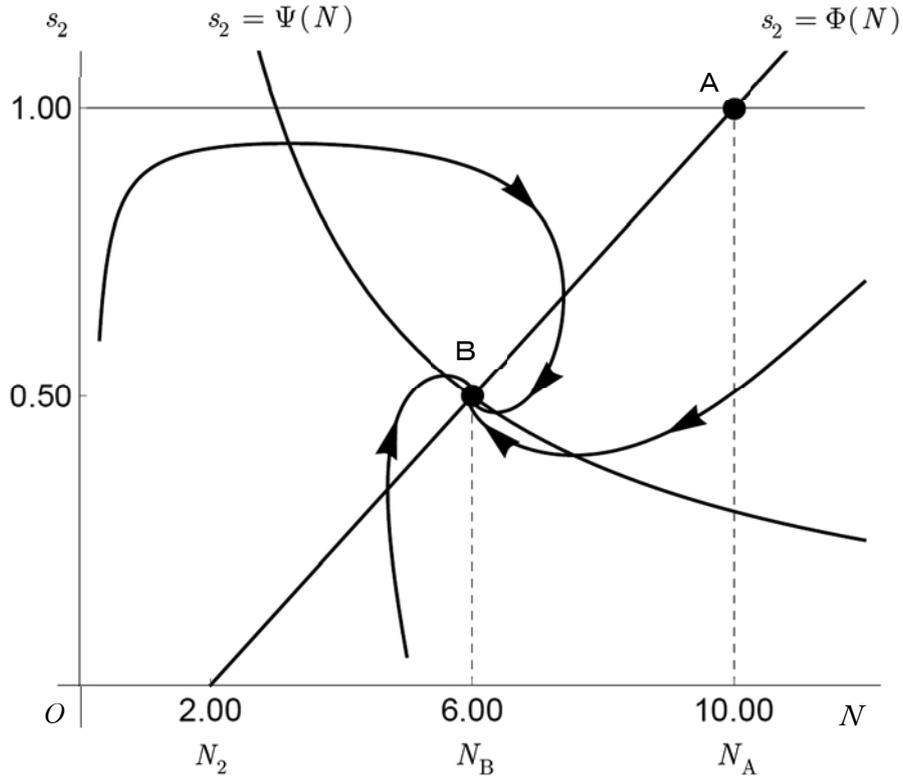


図3 補助金総額を増やす場合

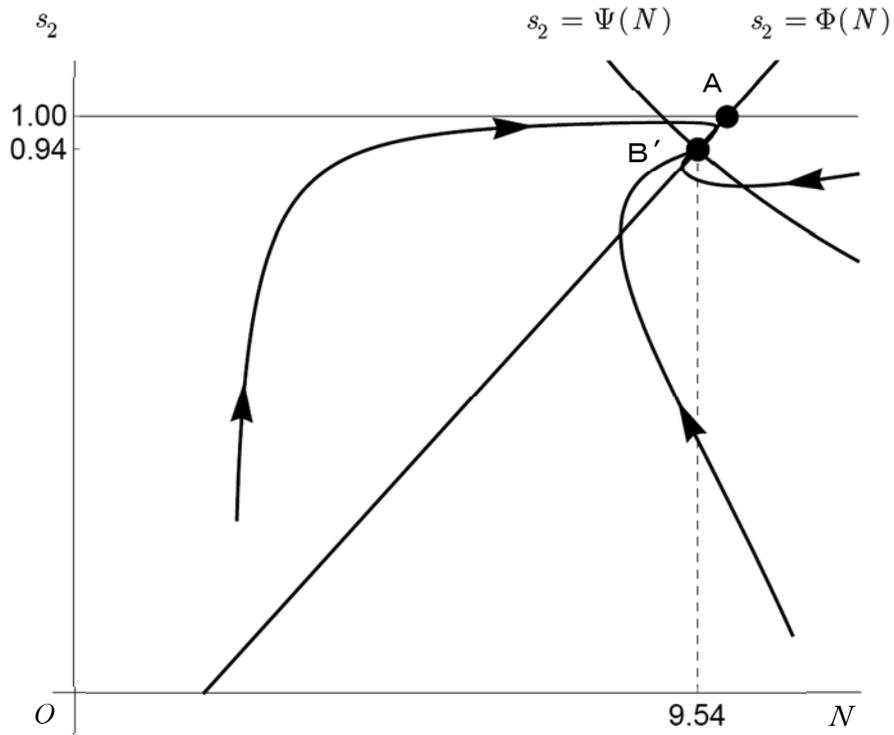
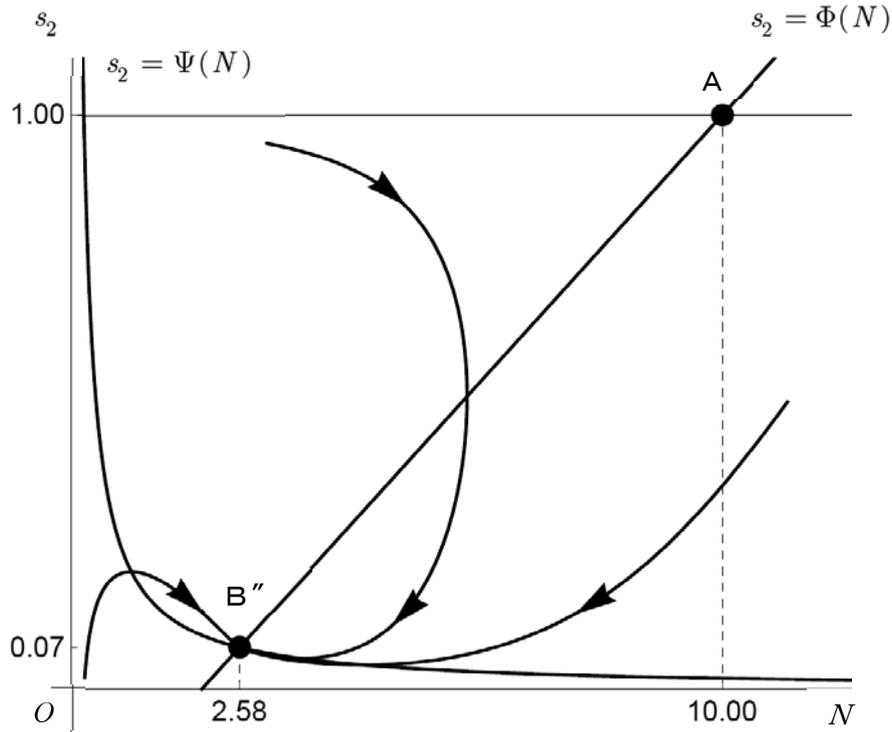


図4 補助金総額を削減した場合



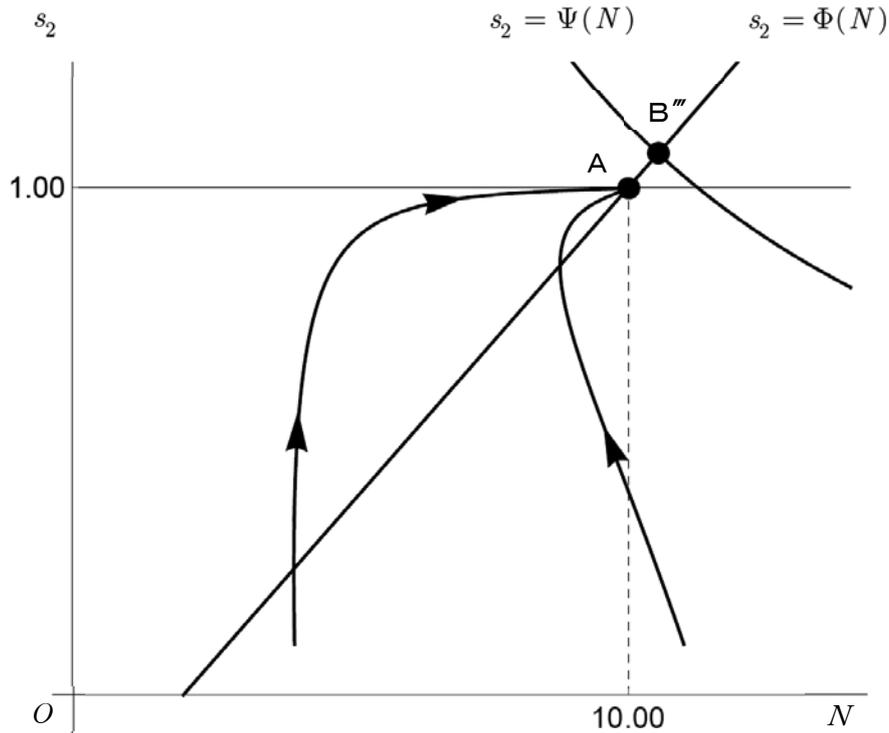
最後に **A** 均衡の特徴を簡単に考察しよう。手順は前に述べたのと同様であるため、あまり形式張らない形で見えていくことにする。図5は、 w を1.6から6.0に増加させる（したがって補助金総額 w_m も増加する）場合を示したものである。各fixed pointの座標は **A**(10, 1), **B'''**(10.54, 1.07) である。**A** で評価されたJacobian matrixの二つの固有値は互いに異なる負の実数（ $-1.66667, -0.66667$ ）となるので、**A** 均衡はstable nodeである。補助金総額が十分大きい場合や予算制約がない場合、全ての構成員が協力者となり、生物資源を持続的に利用できる可能性がある。

以上をまとめれば、つぎのような結論が得られる。

Result 4 補助金制度の効果

補助金総額の増加により、協力的に振る舞う構成員が増加し、生物資源の過剰利用を回避できる可能性がある。また、補助金総額の大幅削減や制度の撤廃により、非協力的に振る舞う構成員が増加し、生物資源の過剰利用を抑制できない可能性がある。

図5 A均衡と解軌道



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節では予算制約のある補助金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。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、補助金制度の効果を分析した。補助金総額の増加により、環境保全的に振る舞う構成員が増加し、生物資源を持続的に管理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] Clark, Colin W. (2010), *Mathematical Bioeconomics: The Mathematics of Conservation*, Third Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [3] Conrad, Jon M. (2010), *Resource Economics*, Second Edition, Cambridge University Press, New York, NY.
- [4] Estruch-Bosch, Esther, Nuria Osés-Eraso, and Montserrat Viladrich-Grau (2018), "Protecting Biodiversity on Farm Land: Which Type of Agri-Environmental Measure Does It Better?" 20th ANNUAL BIOECON CONFERENCE: Land-use, Agriculture and Biodiversity: Spatial and Temporal Issues, Cambridge, United Kingdom, 2018. (<http://www.bioecon-network.org/pages/20th%202018/Estruch-Bosch.pdf> 閲覧最終日 2019年3月9日)
- [5] Gintis, Herbert (2009), *Game Theory Evolving*, Second Edition, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [6] Hanley, Nick, Jason F. Shogren, and Ben White (2007), *Environmental Economics: In Theory and Practice*, Second Edition, Palgrave Macmillan, New York, NY.
- [7] 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.
- [8] Lamantia, Fabio and Davide Radi (2015), "Exploitation of Renewable Resources with Differentiated Technologies: An Evolutionary Analysis," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 108, pp. 155-174.
- [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] Perman, Roger, Yue Ma, Michael Common, David Maddison, and James McGilvray (2011), *Natural Resource and Environmental Economics*, Fourth Edition, Pearson Education Limited, Harlow, Essex.
- [12] Sethi, Rajiv and E. Somanathan (1996), "The Evolution of Social Norms in Common Property Resource Use," *American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, 766-788.
- [13] Strogatz, Steven H. (1994), *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to*

Physics, Biology, Chemistry, and Engineering, Westview Press, Cambridge, MA.

- [14] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and The World Conservation Union (IUCN) (2007), *Business and Ecosystems: Markets for Ecosystem Services, New Challenges and Opportunities for Business and the Environment - A Perspective*, IUCN, Gland.

-
- 1 詳しくは, Clark (2010), Conrad (2010), Hanley *et al.* (2007), Perman *et al.* (2011) を参照。
 - 2 各時点 t における存在量を $N(t)$ と表すべきだが, notation の簡略化のために時点 t を省略し, N と表す。他の変数も同様である。
 - 3 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。
 - 4 利得が最大となるための2階の十分条件 $\frac{d^2\pi_i}{dh_i^2} = -\frac{2c}{q_i N} < 0$ ($i = 1, 2$) は常に満たされる。
 - 5 導出については Gintis (2009) を参照。
 - 6 均衡点の特徴付けについては, Allen (2007), Hirsh *et al.* (2004), Strogatz (1994) を参照。
 - 7 Dulac's criterion については Allen (2007), Strogatz (1994) を参照。
 - 8 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。計算および作図については Mathematica (Version Number: 11.0.1.0) を用いた。また, 計算結果は近似値である。