

# 環境経済グローバルモデルによる生態系評価を 含むシミュレーション分析\*

鷲 田 豊 明

## 1. はじめに

1980年代以降の地球環境問題への社会的な関心の広まりは、同時に、人々に人間の社会経済システムと地球規模での生態系、あるいはその構成要素としての地域的な生態系に対する関心の高まりでもあった。地上のすべての生物は地球という生態系のなかで関係づけられているという理解の広まりである。それは、人類の自己認識が新たな地平に到達したことを意味している。

このような認識には、確かに一面で、森林、河川、湖沼、海洋などの生態系が人々に直接の利用可能性があることについての認識や評価も含まれている。しかし、もう一つ重要な側面として、たとえ直接利用可能性がない人々の間でも、生態系に対する選好があらわれる可能性も意味している。生態系に対する後者のような評価は、存在価値 (existence value) あるいは受動的利用価値 (passive use value) などと呼ばれることがある。

この生態系の存在価値にあらわれる生態系評価は、直接的な形では社会経済システムの中に取り込まれない。しかし、たとえば人々の存在価値としての評価が高まるにつれて、熱帯林の保全対策に支出の増大などの間接的な形で、社会経済システムの中に関係づけられるようになる。そして、このような人々の生態系に対する評価は、生態系に対する利用と保全のダイナミックな展開に反映するはずである。

本稿では、このような人々の生態系評価と生態系の利用と保全に関する動学的経路との関係を分析する。そのために、生態系の利用と保全に対する経済システムの制約を考慮に入れた、基本的なモデルを提示する。モデルは、ラムゼイ型の最適成長モデルであり、それに生態系の利用と保全を組み入れたモデルとなっている。以下、簡単化のために本稿で用いるモデルを EEI (Economic system Ecosystem Indicator) モデルとよぶことにしよう。

また、シミュレーション分析では、W.D.Nordhaus が地球温暖化の政策評価に用いた DICE モデルから地球温暖化に関わる部分を切り離し、基本的な経済システムだけのモデルを基礎として、それに生態系評価と生態系の運動を定式化した部分を付加したモデルを用いた<sup>1</sup>。これによってモデルの基本的なパフォーマンスに対する理解が容易になることをねらっている

る。

本稿のE E Iモデルにおいては、生態系はさしあたって世界の閉鎖林で代表させている。そして、森林に対する社会の希少性評価を消費とのあいだの代替の弾力性によってとらえる。そして、この弾力性が変化するときの伐採、植林そしてその結果としての森林ストック、さらには消費で測った森林の限界価値のダイナミックな動きに注目する<sup>2</sup>。

シミュレーション分析の主要な結果は次のようにまとめられる。第一に、上記の基本的特徴を体化したモデルにおいて、20世紀後半の森林生態系のグローバルな減少と21世紀以降の回復のダイナミックな最適性が確認できた。これは、最適な環境利用におけるU字性と考えるとよいだろう。第二に、最適経路において、森林の限界価値が21世紀初頭にかけて上昇し、その後低下していく状況をとらえることができた。人々の評価価値における逆U字性とよぶことができるだろう。第三に代替の弾力性であらわした森林の希少性が高まると森林ストックの経路と消費で測った森林の限界価値が高まることを確認できた。

本稿の構成は、次節で、単純化した理論的モデルで、経済と生態系間の関係をとらえておく。第3節で、E E Iモデルを示す。第4節以降で、モデルの動態とその結果を示す。

## 2. 経済—生態系の理論モデル分析

生態系に対する経済評価を含む最も単純な理論モデルを示して、最適経路における全体の変数間の相互関係を認識しておこう。

理論モデルの基本的な構造は、図1に示している。左側の部分が基礎的な経済システムである。右側に生態系をめぐる関係が描かれている。生産要素としては、資本と経済利用された生態系部分の二つになっている。E E Iモデルにおいては、さらに労働が加えられるが、ここでは簡単化のために省略されている。

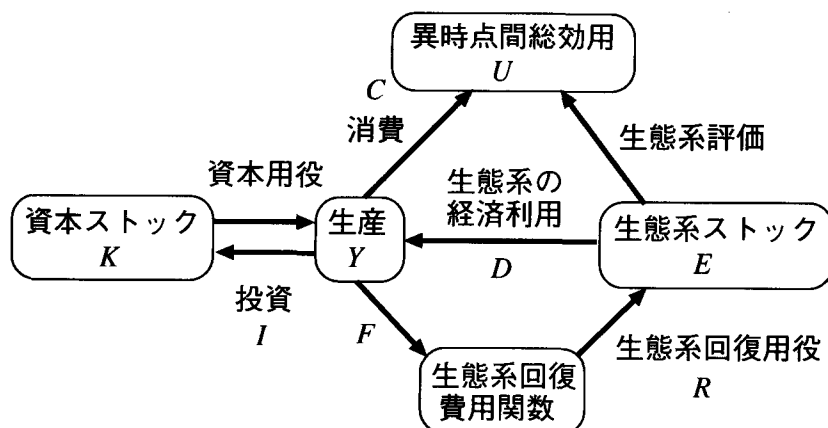


図1：理論モデルの基本構造

モデルは、数学的には次のようにあらわされる。

$$\max. U = \sum_{t=0}^{\infty} u(C_t, E_t) \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \quad (1)$$

s. t.

$$Y_t = f(K_t, D_t) \quad (2)$$

$$Y_t = C_t + I_t + F_t \quad (3)$$

$$K_{t+1} = (1-\delta)K_t + I_t \quad (4)$$

$$F_t = h(R_t) \quad (5)$$

$$E_{t+1} = E_t + R_t - D_t \quad (6)$$

$$E_0, K_0 \text{ given}$$

ここで、(1)は、異時点間にまたがる総効用を評価する関数である。各時点の消費と生態系ストックに対する効用関数  $u$  はすべて等しく、それらは、割引率（純粋時間選好率） $\rho$  で割り引かれている。効用関数は連続微分可能な準凹関数であり、代表的個人の効用関数と考えてもよいし、グローバルな社会的厚生関数が与えられていると考えてもよいだろう。 $C_t$  は  $t$  期の貨幣単位で測った消費水準で、 $E_t$  は  $t$  期の生態系ストックである。(2)は、生産関数であり、 $t$  期の資本ストック  $K_t$  と生態系の経済利用部分  $D_t$  が用役ないしは投入として利用され  $Y_t$  の生産が行われている。生産関数は、二回連続微分可能であると通常凹性が満たされているとしよう。(3)は生産と支出の分配をあらわし、 $I_t$  は  $t$  期の期中の投資額、 $F_t$  は同じく生態系回復のために必要となる支出をあらわしている。(4)は蓄積方程式で、 $K_t$  は第  $t$  期期首の資本ストックである。 $\delta$  は資本減耗率である。(5)の関数  $h$  は生態系修復の費用関数であり、 $R_t$  は  $t$  期の生態系の修復水準をあらわす。(6)は、生態系ストックの動態をあらわしている。最後は、初期ストックは与えられていることをあらわしている。

(6)については、追加的な説明が必要である。期間のとり方にもよるが、森林であれその他の生態系であれ、修復の試みが行われた生態系がすぐに経済的に利用可能になるとは限らない。農地などは、一定の修復と破壊を短期間（たとえば1年）を繰り返している生態系ととらえることもできる。しかし、森林などの場合は、修復が行われて実際に利用可能な質と水準を回復するまでには、数十年あるいはそれ以上の年月が必要となる。ここでは、このようなストックに内在化されるべき年齢構成が考慮されていない。これは、(4)の資本ストックと同様の仮定を生態系についても前提にしていることになる。一つの、単純化として理解していただきたい。

この問題の最適解が満たすべき必要条件を調べる。すべて内点解が約束されていると仮定しよう。次のようなラグランジュ方程式を考慮する。

$$\begin{aligned}
L = & \sum_{t=0}^{\infty} u(C_t, E_t) \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \\
& + \sum_{t=0}^{\infty} \theta_t \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \{f(K_t, D_t) - C_t - I_t - F_t\} \\
& + \sum_{t=0}^{\infty} \zeta_t \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \{(1-\delta)K_t + I_t - K_{t+1}\} \\
& + \sum_{t=0}^{\infty} \gamma_t \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \{E_t + R_t - D_t - E_{t+1}\} \quad (7)
\end{aligned}$$

この最大化のための必要条件は次のようになる<sup>3</sup>。

$$u_C = \theta_t \quad (8)$$

$$u_E + \gamma_t = (1+\rho)\gamma_{t-1} \quad (9)$$

$$\zeta_t = \theta_t \quad (10)$$

$$\gamma_t = \theta_t h_R \quad (11)$$

$$\theta_t f_K + (1+\delta)\zeta_t = (1+\rho)\zeta_{t-1} \quad (12)$$

$$\gamma_t = \theta_t f_D \quad (13)$$

ただし、(9)と(12)は $t=1, \dots, \infty$ のすべての $t$ についての条件をあらわし、その他の式は、 $t=0, 1, \dots, \infty$ のすべてに関する条件をあらわしている。また、関数に対応する変数のサフィックスをつけた記号( $u_C, u_E, f_K, f_D, h_R$ )は、関数をその変数で偏微分したものであることをあらわしている。

これらの条件の意味するところを確認しておこう。まず(8)より、 $\theta$ が貨幣1単位の価値を効用水準で測ったものであることがわかる。すなわち、 $\theta$ は貨幣の価値を効用水準による価値に変換する係数である。

(9)における左辺と右辺の $\gamma$ の意味は違ったものと考えた方がわかりやすい。左辺の $\gamma$ は1単位の生態系が生産的に利用されることによって潜在的にどれだけの効用増加に貢献するかをあらわしている。すなわち、これは、(13)式の右辺であらわされる $\gamma$ と解釈できるのである。これに対して、右辺の $\gamma$ は(11)の右辺であらわされるもので、1単位の植林をすることの費用を効用水準であらわしたものである。したがって、この(9)は1単位の限界的な植林費用が次期にもたらされる効用水準の限界的増加に等しいことを表現している。

(10)は左辺の $\zeta$ は、1単位の資本ストックの効用価値であり、これが消費を通しての1単位の効用価値に等しいことを意味している。そして、これより(12)の左辺が限界的な資本増加によってもたらされる限界的な便益の増加をあらわし右辺が投資の限界費用をあらわしている。左辺の第1項は、資本の限界生産力の効用価値であり、第2項は、その限界的な資本ストックが次期以降に働くことに対する潜在的評価をあらわしている。

また、(11)と(13)により、次の式が導出される。

$$f_D = h_R \quad (14)$$

ここで、左辺が生態系利用の限界生産力をあらわし、右辺は生態系修復の限界費用をあらわし、両者が等しいことを示している。これは、先に述べたように、修復生態系の年齢構成が考慮されないモデルであるために同一期間内での限界条件としてあらわされてしまっているのである。

### 3. E E I モデル

#### 3.1 関数の定式化

上記のモデルをシミュレーション可能なモデルに発展させよう。ポイントは、登場する三つの関数、効用関数、生産関数、生態系修復関数の特定化にある。

まず、効用関数から検討する。D I C E モデルでは、次のような効用関数から出発する。

$$u(c_t, L_t) = L_t \frac{c_t^{1-\alpha} - 1}{1-\alpha}$$

ただし、 $c_t$ 、 $L_t$  はそれぞれ、一人当たりの消費と人口（労働投入量）をあらわしている。この効用関数は、1%の消費の増加に対する限界効用の低下の割合が一定になる特徴を持っている。すなわち、

$$\frac{\Delta u_c}{u_c} / \frac{\Delta c}{c} = -\alpha$$

ただし、 $u_c$  は効用関数を一人当たりの消費で微分したものをあらわしている。したがって、この型の効用関数は、効用からくる社会的割引率が一定の $\alpha$ になるという特徴を持っているのである。このような割引きとともに、D I C E モデルは将来効用水準を純粋時間選好率（前節の場合は、 $\rho$ ）でも割引いている。<sup>4</sup>

最終的にD I C E モデルでは、 $\alpha=1$  という極限をとって、

$$u(c_t, L_t) = L_t \log(c_t)$$

という形の効用関数を採用している。この場合、上記の議論からも明らかなように1%の効用の上昇は限界効用の1%の低下をもたらす効用関数となっている。

ここでの議論の目的にそってこの効用関数を拡張しなければならない。まず、森林ストックで代表させた生態系ストックの量 $E_t$ を導入する。ここでは、消費と生態系の抽象的な複合商品 $Z_t$ を考えて、上記の $c_t = C_t/L_t$ の $C_t$ を $Z_t$ で置き換えよう。そして、 $Z_t$ を代替の弾力性が一定（CES型）の次のように特定化する。

$$Z_t = \{(1-\beta)C_t^{-\nu} + \beta E_t^{-\nu}\}^{-\frac{1}{\nu}}$$

ここで、 $\beta$ は消費と生態系の間のウェイト（ $0 < \beta < 1$ ）で実質的には、双方の単位を調整する機能を持っている。 $\nu$ は消費と生態系の間の代替の弾力性を規定する係数で、これを使って代

替の弾力性は、

$$\sigma = \frac{1}{1+\nu}$$

によって決定される。この代替の弾力性をここでは生態系の希少性を反映するパラメータとして用いる。この $\sigma(>0)$ が1よりも小さければ小さいほど、生態系の減少を消費の増加によって代替することが困難であることを意味する。

効用関数は完全には、次のように与えられることになる。

$$u(C_t, E_t, L_t) = L_t \log \left\{ (1-\beta) \left( \frac{C_t}{L_t} \right)^{-\nu} + \beta \left( \frac{E_t}{L_t} \right)^{-\nu} \right\}^{-\frac{1}{\nu}} \quad (15)$$

また、ここでは生態系の限界価値を消費で測ったものとしてとらえる。すなわち、(15)から、次のような限界代替率を求める。

$$-\frac{\partial C_t}{\partial E_t} = \frac{\beta}{1-\beta} \left( \frac{C_t}{E_t} \right)^{\nu+1} \quad (16)$$

この右辺が正の値をとるので、これを限界的な生態系価値として、最適経路上でのこの右辺の値の動きに注目している。

生産関数は、次のように定式化する。

$$Y_t = A_t G_t L_t^{1-\mu} K_t^\mu \quad (17)$$

$$G_t = \left( \frac{D_t}{D_0} \right)^\phi \quad (18)$$

ここで、 $A_t$ は全要素生産性と技術進歩をとらえる係数である。 $G_t$ は初期の生態系利用に対する $t$ 時点での利用水準の比を $\phi$ で割り引いたものが生産力効果として反映することをあらわしている。そして、労働と資本について通常のコブ・ダグラス型の関数を想定する。生態系利用も、要素投入として労働、資本と同じ形で入れることも考えられるが、第一にDICEモデルとの整合性を考慮した。DICEモデルの場合は、ここでの生態系利用のかわりに温暖化による負の影響と対策費が、ここでの生態系利用と同じく資本・労働とは違った扱いがされている。

生態系修復費用関数、具体的には植林費用関数は次のように定式化した。

$$F_t = \varepsilon + \pi R_t \quad (19)$$

この $\varepsilon$ は、正の値を取れば一種の固定費用がかかると考えることもできる。しかし、後にみるようにシミュレーションではこの値をある負の値として設定している。それは、生態系の自力の修復作用や再生産力を考慮しているからである。森林の場合は、自然の拡大再生産力を想定することは必要である。

また、人口（労働力）の成長率、あるいは技術進歩率の想定はすべてDICEモデルのそ

のままにしている。DICEモデルのそれは、妥当な率を出すための工夫と考えればよい。EEIモデルにおける人口成長率 $gl_t$ と人口 $L_t$ は次のように定式化されている。

$$gl_t = \frac{gl_0}{\lambda} (1 - \lambda^{-t}) \quad (20)$$

$$L_t = L_0 e^{gl_t} \quad (21)$$

ここで、 $gl_0$ は基準的な人口成長率であり、 $\lambda$ は人口成長率の減少率となっている。(20)は次のように解釈すれば、わかりやすいかもしれない。

$$gl_t = \frac{gl_0}{\lambda} (1 - (1 - \lambda)) \quad t = 1, 2, \dots$$

同じように、全要素生産性の上昇率 $ga_t$ も $\psi$ の率で低下する設定となっている。

$$ga_t = \frac{ga_0}{\psi} (1 - e^{-\psi t}) \quad (22)$$

$$A_t = A_0 e^{ga_t} \quad (23)$$

基本的構造は人口の場合と同じである。

### 3.2 生態系（森林関係）の設定

シミュレーションのために必要な生態系に関する設定は以下のようにおこなう。シミュレーションにおける1期間は10年と設定している。

まず、1965年の森林ストックの設定である。森林は閉鎖林を対象とする。1980年の森林ストックは、 $2822.6 \times 10^6$ ヘクタールである<sup>5</sup>。森林の1965年からの平均減少率を1980年当時(0.3%)より少し高め0.4%と設定して、1965年の森林ストックを $2995.1 \times 10^6$ ヘクタールと想定した。また、10年単位の森林利用量を1965年からの10年間で、 $115 \times 10^6$ ヘクタールと想定した。これは、ちなみに、1980年の熱帯林は、 $1910.4 \times 10^6$ ヘクタールで閉鎖林の67.7%を占めていたが、1990年には $1756.3 \times 10^6$ ヘクタールで、この間の減少率は0.8%である。

次に植林費用関数に関するパラメータの設定である。まず、限界費用を設定する。島本美保子氏の論文により1ヘクタールあたりの平均的な植林費用を1247.4US\$と設定した<sup>6</sup>。また、1980～1985年の年間平均植林実績は $10.5 \times 10^6$ ヘクタールで、ここでのモデルにおける期間は10年単位であるから、1期間当たりの植林実績を $105 \times 10^6$ ヘクタールとする。

植林の費用弾力性を $2(\eta=2)$ とすると、(19)より、

$$\frac{dF_t}{dR_t} = 2\pi R_t$$

この値を先の植林費用とし、 $R_t = 105 \times 10^6$ ヘクタールとすると、 $\pi = 5.94 \times 10^{-6}$ となる。この値をシミュレーションで用いることにする。また、(19)における $\varepsilon$ は、ここでは、 $100 \times 10^6$ ヘ

クータルにおける植林費用がちょうどゼロになるように、すなわち森林生態系についてその程度の自然成長能力を考慮した。この  $\pi$  は、たとえば1990年の国際的な林業協力費の実績から計算することも可能だが、自然成長能力を考慮したために、この方法は採用しなかつた。<sup>7</sup>

### 3.3 フル・モデルの提示

これまでのモデルの特定化とパラメータの他に、DICEモデルにおいて与えられている数値も入れた完全なモデルを示すと次のようになる。単位は、貨幣単位が  $10^{12}$  US\$ であり森林面積がすべて  $10^6$  ヘクタールである。

$$\max. U = \sum_{t=0}^{24} L_t \log \left\{ 0.935 \left( \frac{C_t}{L_t} \right)^{-0.333} + 0.065 \left( \frac{E_t/1000}{L_t} \right)^{-0.333} \right\}^{-\frac{1}{0.333}} \left( \frac{1}{1+0.344} \right)^t + V(K_{24}, E_{24})$$

s. t.

$$Y_t = A_t G_t L_t^{0.75} K_t^{0.25}$$

$$G_t = \left( \frac{D_t}{115} \right)^{0.04}$$

$$Y_t = C_t + I_t + F_t$$

$$K_{t+1} = (1 - 0.651)K_t + I_t$$

$$F_t = -0.059 + 5.95 \times 10^{-6} R_t^2$$

$$E_{t+1} = E_t + R_t - D_t$$

$$gl_t = \frac{0.223}{0.159} (1 - e^{-0.159t})$$

$$L_t = 3369e^{gl_t}$$

$$ga_t = \frac{0.15}{0.11} (1 - e^{-0.11t})$$

$$A_t = 0.00963e^{ga_t}$$

$$K_0 = 16.03$$

$$E_0 = 2995.1$$

目的関数の  $E_t$  は単位の差を  $\beta$  だけで調整するのでは、パラメータの大きさのバランスが悪くなるので、1000で割ることによってモデル全体の動態を適合的なものになるように調整している。 $v$  については、代替の弾力性が0.75になるような値に設定している。<sup>8</sup>

また、EEIモデルは、1965年からの240年間のシミュレーションを実行するように設定している。実際、ここで注目するのはそのうちの2100年ころまでの結果だけである。 $V(K_{24}, E_{24})$  最終期の資本ストックと森林ストックに対して一定のウェイトづけされた評価が与えられることを示している。これがないと、最終期に向けて全ての資本ストックと森林ストック



クをフローに変えることが最適経路になってしまう。この意味では、最終期をどう設定するかが重要に見えるが、実際は多少の最終期ストック評価ウェイトが変わっても2100年までの最適経路には大きな影響を与えない。

#### 4. シミュレーション結果

##### 4.1 D I C Eモデルとの比較

ここでのシミュレーションモデルがD I C Eモデルの経済部分を基幹として保持していることはすでに指摘した。経済部分の動態を簡単に比較しておこう。

最適経路における産出  $Y_t$  の動態を比較したものが図2である。E E Iモデルのグローバル経済部分のD I C Eモデルとの差異は、生産における地球温暖化対策費用支出と温暖化からくる被害の影響を取り除き、代わりに生態系利用による生産性増加がはめ込まれていることである。図からみると明らかなように、E E IモデルはD I C Eモデルの産出動態とほぼ同じ上昇をみせているが、前者がわずかに高くなっている。これは、今述べたように前者の場合は、生産増効果をみているのに対して、D I C Eモデルはコストや被害分を生産関数にかけている側面と、E E Iモデルの場合は、植林費用を生産関数への負荷として組み込んでいるのではなく、支出項目としてとらえているためにその分の追加的な生産が必要になって

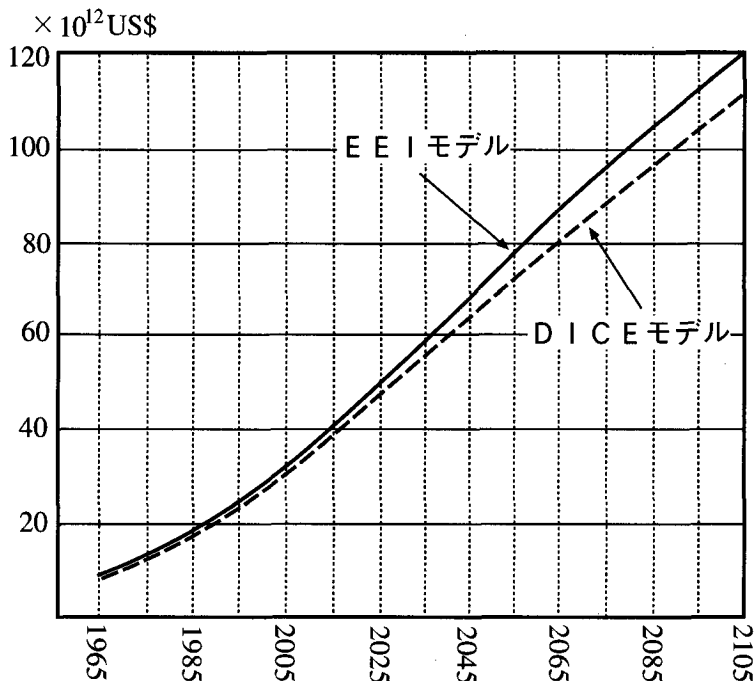


図2：産出動態のD I C Eモデルとの比較

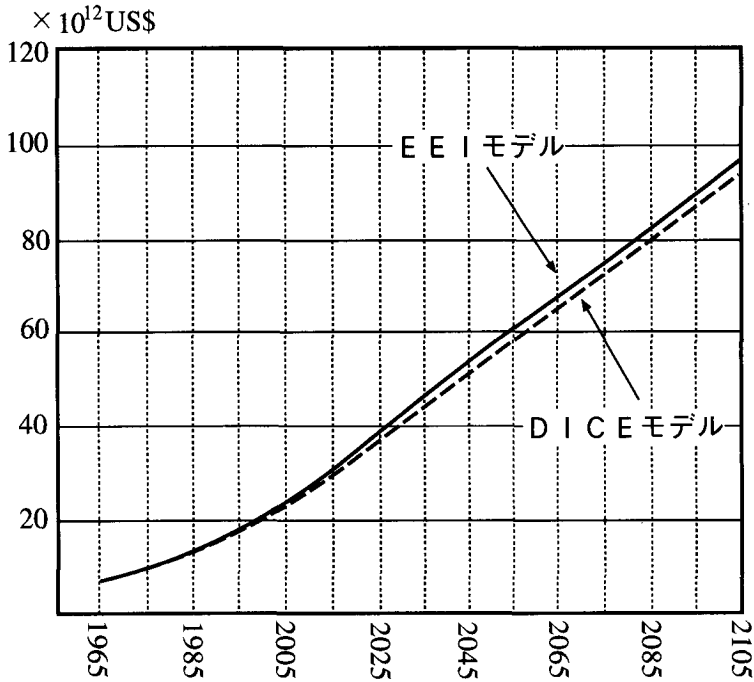


図3：消費動態のD I C Eモデルとの比較

いるためであると考えられる。

また、消費  $C_t$  を比較は図3である。基本的に同じ増加傾向を示しているが、生産に比べるとD I C EモデルとE E Iモデルの差が小さい。これは生産の差が消費に影響を与えるのではなく、投資やE E Iモデルの場合の植林費用にかけられているためである。

このように若干の差はあるが、E E IモデルとD I C Eモデルのグローバル経済に関わる基幹部分の振舞は大きく違っていないことを確認できた。

#### 4.2 生態系ストックの最適経路

これまで示して来たのは、すべて特定化の中で述べて来たモデルでこれを以後、基本モデルとよぶことにしよう。これに対して、消費と生態系間の代替の弾力性の違う二つのモデルを比較する。すでに述べたように基本モデルの場合、代替の弾力性は0.75に設定している。そこで、生態系の高希少モデルと低希少モデルの二つを追加しよう。高希少モデルは弾力性を0.70までわずかに低下させる。そして、低希少モデルは弾力性を0.80まで高めて、消費と生態系間の代替可能性を高めている。すなわち、代替の弾力性を7%上下に変動させていることを意味している。

まず、このように代替の弾力性を変化させることが生態系の最適ストックにどのように影

モデルタイプ	代替弾力性
基本モデル	0.75
高希少モデル	0.70
低希少モデル	0.80

響を与えるかをみておこう。図4は三つのモデルの最適資本ストックのダイナミックな変化をあらわしている。

それぞれのモデルの間の差異の検討の前に、まず、基本モデルも含めいずれのモデルでもあらわれている、90年代末から2000年前半にかけての森林ストックの減少に注目しておこう。基本モデルの動態は今日までの現実の森林ストックの減少を表現している。基本モデルの1985年のストック水準は $2823 \times 10^6$ ヘクタールで、すでに述べた1980年の実績水準をわずかに上回っている。現実にはこの間も低下していると考えべきであり、その点では、基本モデルは現実の森林ストックの動きよりも高めの森林水準をフォローしている

これは、現実が最適ではないと解釈してしまうことも可能である。経済と生態系のバランスを最適にコントロールしているような世界的な主体は存在していないのであるから。しかし、シミュレーション分析としては、それでは不満が残る。現代に至る経路は、現実をトレースしながら、その後の動きは、認識や政策評価の基準として最適経路をとらえるというの

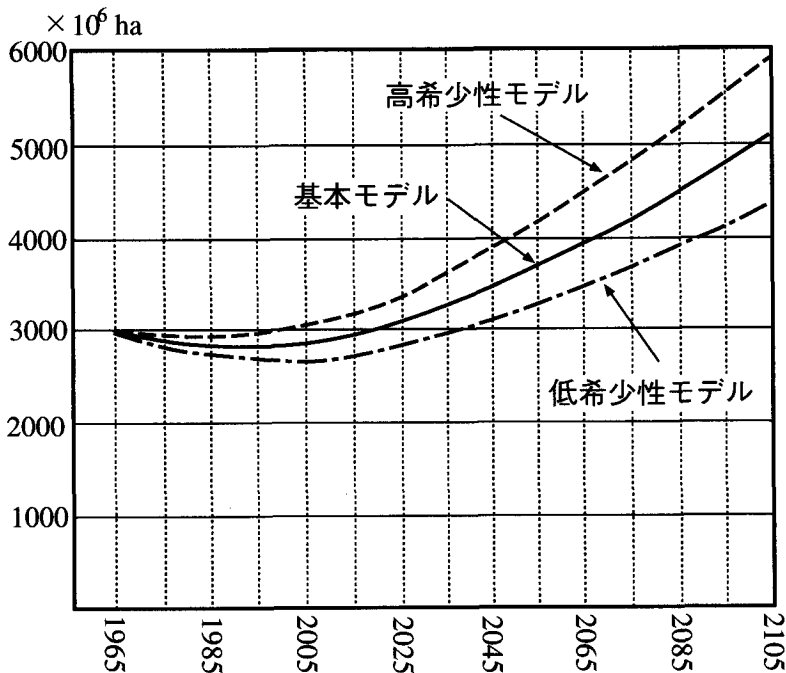


図4：最適森林ストックの変化

が望ましい。

この初期の森林ストックの低下とその後の回復という動きは、今日までの現実とレベルにおいて若干の差がある可能性はあるが、全体としてみれば最適経路として現実性をもっていると考えられる。当然、人々が森林生態系に何らの評価も与えなければ、それは利用・伐採だけが進行し一方的に減少していくはずである。しかし、人々の森林生態系に対する評価は、そのような状況を許すことはできないだろう。地球環境問題への関心が、地球規模の生態系に対する人々の関心を高めている現状がある。1992年のUNCED（環境と開発に関する国連会議）における「森林原則声明」も次のように述べている。

「全てのタイプの森林は、人類の必要を充足させる資源および環境的価値を供給する現在及び将来の潜在的能力の基礎となる複雑で固有の生態学的プロセスを持っており、したがって、その健全な管理と保全は森林の存する国の政府にとって関心事であり、また地域社会と環境全体にとって価値のあることである」

したがって、森林生態系ストックの最適経路が一方的な減少ではないことは、確実である。モデルの特性も、この事実を踏まえたものになっていなければならない。そして、EEIモデルの場合、この経路が初期の低下とその後の持続的回復および増大という特性を持っているのである。

しかし、この最適経路の特性がモデルのどのような特徴から派生しているのかを確実にとらえることは、容易ではない。(6)式から明らかのように、森林ストックの水準を規定しているのは伐採と植林のバランスである。森林ストックの減少は伐採水準が植林水準を上回っ

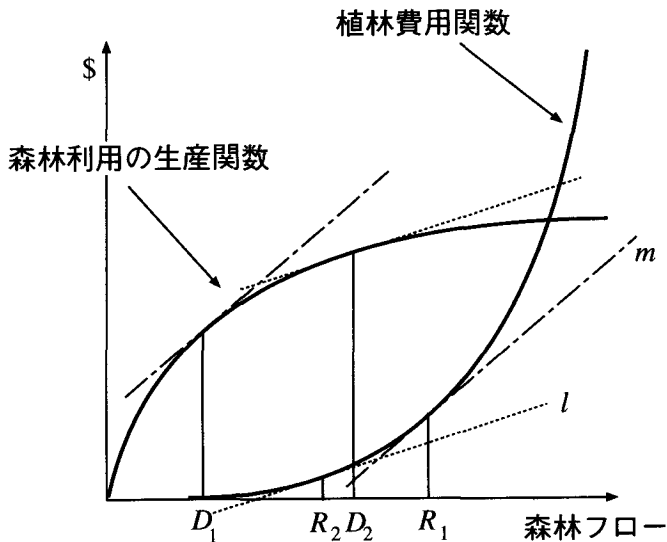


図 5：最適植林—伐採バランス

ていることを意味する。そして、伐採と植林の水準を規定しているのは、(9)と(14)である。まず、後者に注目しよう。この式は、植林の限界費用と森林の生産的利用に関わる限界生産力が等しいことを意味している。これを単純化すれば、図5のようにあらわすことができる。

いま、(14)の両辺のある値が与えられたとする。するとそれぞれ左辺と右辺から最適な植林と伐採の水準が決まる。たとえば、いまそれが直線  $l$  の傾きとしてあらわされる値であったとしよう。このとき、最適な植林水準は  $R_2$  となり、最適な伐採水準は  $D_2$  となる。このような状況のもとでは、純伐採が正となり森林ストックのレベルは低下する。しかし、(14)の両辺の値が図の直線  $m$  の傾きであらわされるように上昇したとしよう。このとき最適な植林水準と伐採水準は  $R_1$  と  $D_1$  のようになり、純伐採水準が負となり最適森林ストックのレベルは上昇する。

したがって、森林ストックの変化は(14)の両辺の値を規定するものにある程度、依存していることがわかる。そして、この値と密接な関係を持っているのが(9)なのである。すでに述べたように、この式の右辺は、今期の植林の限界費用を効用水準で測ったものである。(8)式を使えば、これを貨幣単位に変換できる。この貨幣単位に換算した(9)の左辺、植林の時期における限界的な効用水準の増加量と(9)の右辺、今期の植林の限界費用とが等しくなるところで、傾きが決まってくるのである。

このように、純伐採の最適水準は常に、先の効果と今期の費用とのバランスであたえられ

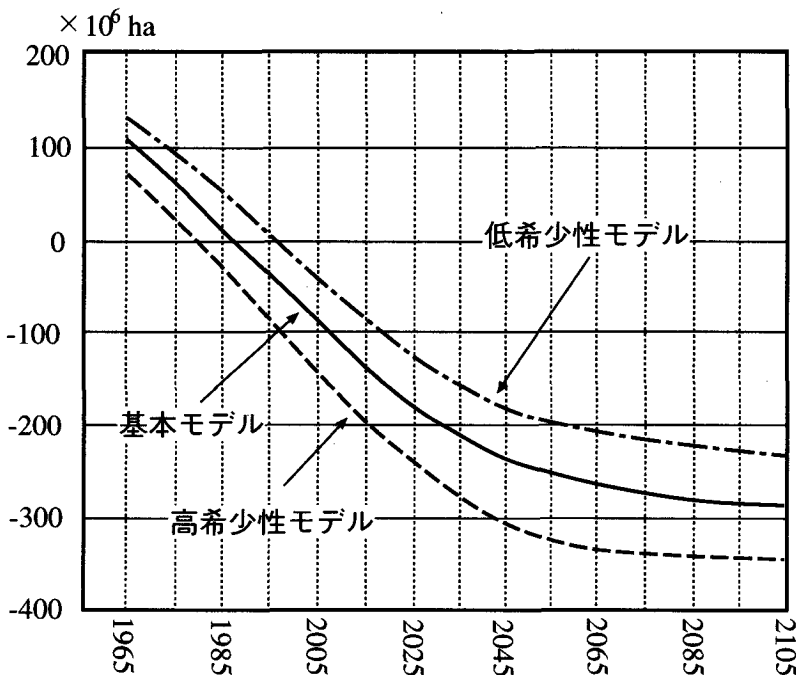


図6：純森林伐採水準の最適経路

る。このことは、最適水準が将来のさまざまな要因に規定されることを意味しているが、いずれにしても究極的には将来の森林生態系に対する評価に強く依存していることは明らかである。

図4にもどると、そこには、人々の生態系の希少性に対する認識の変化が最適ストックのレベルに重要な影響を与えることが示されている。すなわち、森林の希少性の認識が高まるとその経路は上方にシフトし、逆に、希少性の認識が低いと下にシフトする。この変化を純伐採水準の変化としてみると図6のようになる。

特に、純伐採水準が正から負に変わる時期に注目しよう。高希少性モデルでは、90年代末に転換点があられるのに対して、低希少性モデルでは2020年頃になっている。基本モデルは21世紀に入ってから数年の後に転換するようになっている。解釈としては、すでに生態系に対する世界の人々の認識がこのモデルの高希少性ほどにありながらも実際の森林利用が最適状態からはずれる形で進んでいるか、最適状態で進んでいるが人々の森林生態系に対する評価が高希少性モデルにはめ込まれているほどに高くないのかも知れない。あるいは、その中間かも知れない。

### 5. 生態系の経済価値評価のダイナミクス

次に、(16)にあらわされる生態系価値の動きに注目しよう。この式から明らかのように森林生態系の価値は、ストックとしての森林生態系と消費フローの水準の比に一意に依存している。最適解において消費は、持続的に成長し続ける一方、森林ストックは初期に低下があることが分かっている。したがって、両者の比の変化としては、最初は消費の比重が大きく後に、後に小さくなる傾向と考えられる。したがって、初期には森林の価値の増大が著しく後に緩やかになる傾向が予想されるのである。E E I モデルによって得られた森林生態系の価値の動態は、図7にあらわされている。

この価値の単位は、モデルにおける単位のとり方から、 $10^{12}/10^6$ ヘクタールであるから、 $10^6$ US\$/ヘクタールとなる。すなわち、1ヘクタールが何百万(U S)ドルであることを示しているのである。図の基本モデルにおける1995年の森林生態系の価値は93.6万(U S)ドルである。日本円にすると1ヘクタールが約1億円となる。さらに、2015年における各モデルにおける森林生態系の評価価値は、

モデルタイプ	2015年森林価値 $10^6$ US \$
基本モデル	1.69
高希少モデル	1.88
低希少モデル	1.53

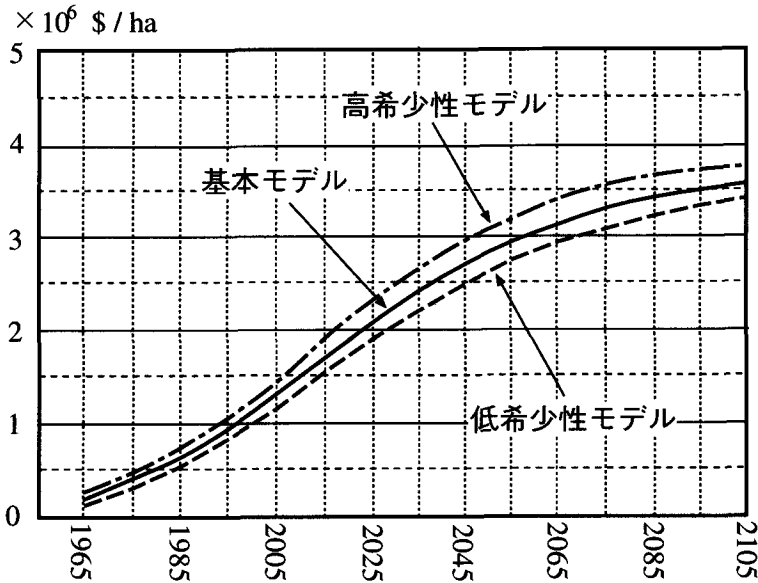


図7：割引前の森林生態系価値の動態

となり、高いモデルと低いモデルの差が35万ドルに広がる。

これらの値の評価のために、仮想評価法によって得られている森林価値と比較してみよう。<sup>9</sup>日本で行われているものとしては、吉田謙太郎氏らによる横浜と東京の水源涵養林の評価がある。<sup>10</sup>横浜市の場合、2868ヘクタールの森林価値が45.45億円と推計されている。1ヘクタールあたり158万円である。この値は、水源涵養林としての利用価値に限定されている。存在価値も含めて推計したものとしては、栗山浩一氏らによる屋久島の仮想評価法による価値評価がある。<sup>11</sup>そこでは、屋久島の15,185ヘクタールの価値が、平均値ベースで最大2483億円となっている。1ヘクタールあたりになおすと1635万円となる。これらに比べて、上記のE E Iモデルにおける評価価値はやや高いものであることがわかる。

また、この森林価値の場合、最終の2105年には基本モデルでも1ヘクタールが354万ドルにまで上昇することになるが、これは将来の貨幣価値がまったく割引かれていないことによる。モデルにはめ込まれている純粋時間選好率で将来の森林生態系価値を割引くと、図8のようになる。

この図によれば、現在価値で測った希少性をもっとも高まる時期は2005年付近で、そのときの価値は次のようになる。

これに関して、一つ言及すべき事実は、森林限界価値がピークに達する時期がほぼ同じになっていることである。これはまず、純粋時間選好率による割引引きが強力であることの結果であると指摘することができる。割引引き前の森林価値のダイナミックな経路が初期において大きく違わずに推移している一方、その後の差異が強力に割引かれるために転換点に

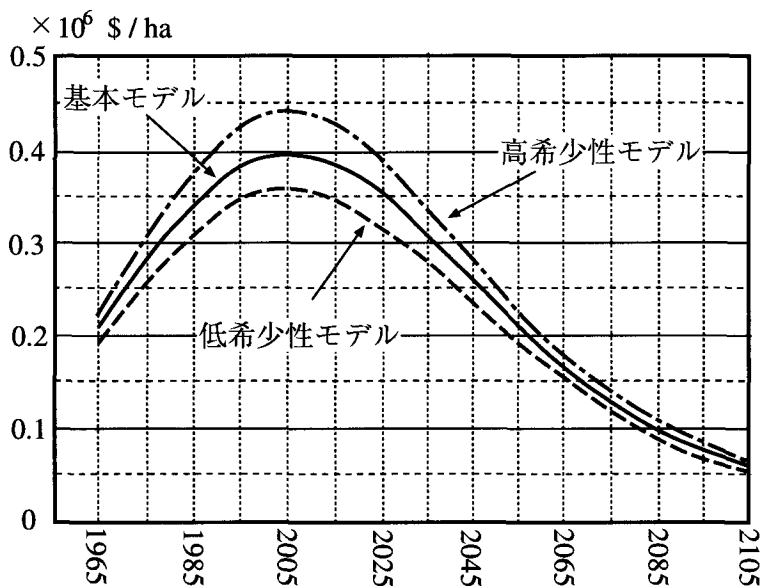


図8：割引森林生態系価値の動態

モデルタイプ	2005年森林の現在価値 1965年価値 $10^6$ US \$
基本モデル	0.399
高希少モデル	0.446
低希少モデル	0.360

違いがあらわれない可能性はある。しかし、純伐採が正から負に代わる時期に20年程の違いがあらわれることに比べて、森林の割り引き価値が同一時点でピークに達するのは、やや違和感があり、さらに分析する必要がある。

## 6. ま と め

本稿では、経済と生態系をリンクさせたグローバルモデルによって、生態系利用の最適経路と人々の生態系評価価値との関係をとらえた。地球環境問題の対象となる地球規模の生態系に関する問題も、経済システムに内部化することによって効率性に対する犠牲をより少なくする形で、適切な利用の可能性がでてくる。この内部化にとって決定的に重要な要素は、生態系が社会によって評価されていることである。すなわち、社会が生態系の大切さを適切に表現していることである。

社会のグローバルな生態系に対する評価によってその利用の仕方が変わらざるをえない。環境の社会経済評価の分野で、生態系評価の重要性が高まれば高まるほど、社会評価と生態



系利用の動態との関係に対する分析はますます重要になっていくだろう。この、生態系に対する評価は、同時に生態系に対する環境指標 (Environmental Indicator) として機能すべきものである。グローバルな生態系のさまざまな要素に対する環境指標を内部化するシミュレーションモデルの開発により力が注がれるべきだろう。

本稿で示した、E E I モデルは、いまだパイロットモデルである。いくつかの拡張は切実に求められている。その第一は、今回は地球規模の生態系の森林生態系に限定したが、大気や水域のさまざまな生態系が存在している。これらグローバルな生態系の多様な要素を福見込むような拡張が必要である。第二に、生態系に対する評価関数としてのグローバルな効用関数に対する実証的な分析、それによるパラメータや特定化の根拠づけが必要である。森林生態系に限定しても、たとえば、熱帯林に対する仮想評価法による評価などの結果をモデルに内部化する努力が必要である。第三に、生態系の中の相互依存関係の内部かが必要である。これらの方向での拡張を試みたい。

#### 注

\* 本稿作成に当たり、島本美保子氏 (法政大学) からは、世界の森林育成費のデータなどに関する資料の提供や重要な示唆をいただいた。森俊介氏 (東京理科大学) からは、森林問題の取り入れたグローバルモデルの状況に関する資料の提供を受けた。これらの方々に感謝申し上げます。また、本稿の英文化されたものは、オーストラリア国立大学の資源環境研究センター (CRES) のセミナーで報告された。お世話いただいた Dr.D.stern 氏に感謝申し上げます。なお、本研究は科学研究費補助金 (課題番号084581162) を受けておこなわれた。

- 1 Norhaus [5]
- 2 造林費をいれた世界貿易による林産物価格決定のシミュレーションモデル分析は、島本美保子氏が行っている。島本 [8] 参照。自然環境、エネルギー、経済などを含む統合モデルの中で、森林の可能性を取り入れたものとして、森俊介氏の MARIA モデルによるシミュレーション分析がある。森 [4] および山本・山地 [9] 参照。
- 3 ただし、これらは完全な解を得ることができるような必要条件にはなっていない。 $E_t$ ,  $F_t$ ,  $\gamma_t$ ,  $\zeta_t$  の値に関する終端条件が必要である。
- 4 時間選好率については Cline [1], pp.247-256 参照。
- 5 WRI [11]
- 6 島本 [7]。植林費に関する世界的な研究のサーベイを含む論文として、Hourcade [3] がある。他に杉山他 [13] も参照。
- 7 不破 [2], p.362 参照。
- 8 代替の弾力性と希少性の関係については鷺田 [9], 第4章参照。
- 9 仮想評価法については、鷺田・栗山・竹内編 [10] 参照。
- 10 吉田 [12,13]。
- 11 林野庁 [6]。

## 参考文献

- [1] Cline W.R., 1992, *Economics of Global Warming*, Institute for International Economics.
- [2] 不破敬一郎編, 1994, 『地球環境ハンドブック』, 朝倉書店.
- [3] Hourcade, J.C., et al., 1996, "A Review of Mitigation Cost Studies," In *Climate Change 1995: Economic Social Dimensions of Climate Change*, By IPCC, Cambridge University Press.
- [4] 森俊介, 1998, 「統合モデル MARIA による持続可能性の評価」, 『サステイナビリティの長期定量的評価』, 地球産業文化研究所.
- [5] Nordhaus, W.D., 1994, *Managing the Global Commons*, The MIT Press: London.
- [6] 林野庁, 1997, 「平成9年度 森林評価手法に関する調査報告書」.
- [7] 島本美保子, 1998, 「世界の造林・育林費」, 『林業経済』, 594: 1-10.
- [8] 島本美保子, 1998, 「林産物世界貿易モデルによる「環境価格」政策の影響分析」, 『林業経済研究』, 44(1): 75-80.
- [9] 山本博巳・山地憲治, 1994, 「世界エネルギー・土地利用モデルによるバイオマス利用可能量の分析」, 社会経済研究所報告, No.Y94004.
- [10] 鷲田豊明, 1992, 『環境とエネルギーの経済分析』, 白桃書房.
- [11] 鷲田豊明・栗山浩一・竹内憲司編, 1999, 『環境評価ワークショップ』, 築地書館.
- [12] WRI, 1992, *World Resources 1992-1993*, The World Resources Institute, Oxford University Press.
- [13] 杉山大志・齋木博・渡部良朋・中園聰・藤野純一, 1995, 「プランテーションによるバイオマスエネルギーの生産に関する調査」, 社会経済研究所報告, No.Y944005.
- [14] 吉田謙太郎・武田祐介・合田素行, 1996, 「水源林の便益評価における情報効果の分析」, 『農業総合研究』, 50(3): 1-36.
- [15] 吉田謙太郎, 1997, 「CVMによる水道水源林の経済的評価: 横浜市と東京都の事例分析」, 『水利科学』, 41(4): 23-54.