【土木計画学研究・講演集　No.23(2)　2000年11月】

社会的最適成長，環境・経済統合勘定，および生態系評価

Social Optimal Growth, Integrated Environmental and Economic Accounting, and Evaluating Ecosystem

宮田　譲**・李　愛軍***
By Yuzuru MIYATA** and Aijin LI***

1．はじめに

国連によってその概念が提示された環境・経済統合勘定[1]は，環境水準を含めた1国の真の経済的豊かさを表す統計概念として，世界中に着実に普及しつつある。現在その推計方法に力点が置かれているようではあるが，環境悪化の推計には概念的にも曖昧な部分が散見される。環境悪化の評価は，その悪化水準を元に戻す費用，もしくは悪化させない回避費用をもって，計測するとされている。しかし人工的にも自然的にも再生不可能な環境財については，これらの2種類による計測結果は異なるのは明らかである。

したがって，理論的側面から環境・経済統合勘定の推計方法や，その経済学的含意を明確にしておく必要がある。この方面の研究としては Maelar[2]による研究が特筆される。彼の研究は経済を動学的に捉え，その社会的最適化問題から整合的に環境経済統合勘定を導き出している。すなわち動学的最適化問題に現れる *Hamiltonian* を国民純福祉指標と見なし，環境経済統合勘定をごく自然に導出するという考え方である。

本研究は Maelar の定式化を踏まえながらも，2種からなる生態系を社会的最適成長モデルに導入し，社会的純福祉指標，環境・経済統合勘定，および生態系評価の新たな方法論を提案するものである。

2．本研究のモデル

本研究では一つの閉じた経済を考え，そこには同質な多数の家計と企業の存在を仮定する。家計数は時間を通じて変化しないものとし，企業は1種類のみの財を生産する。家計と企業のほか，この経済には3種類の環境財が存在する。1つは環境フロー財であり，自然界より毎期一定の質・量が供給される。しかし自然界に蓄積はしないものとする。例えば大気や水が考えられる。さらに2種からなる生態系を考え，それらは捕食関係にあるとする。この生態系は保存系と呼ばれるが，その特性は第5節で詳説する。

家計は集計化された効用関数を共有し，財消費，余暇，環境から効用を得る。ただし環境フローについては家計自ら浄化活動を行い，効用を高めることが可能である。

企業活動は集計化された生産関数によって表現され，労働，資本，生態系資源を投入し，財を生産する。環境フロー財，生態系の水準は企業生産に正の技術的外部効果を与える。生産活動に伴い企業は廃棄物を排出するが，それは環境保全企業によって処理される。処理費用は企業の負担とする。

環境保全企業は労働，資本を投入して産業廃棄物を処理するが，中間処理・最終処分段階で環境フロー水準を低下させる。2種からなる生態系は企業により中間財として消費される一方，生態系保全活動によって管理され，中間財，労働を投入して，自然成長率をコントロールする。

本研究では以上の経済が一元的に管理されるものとして，家計効用現在価値総和を最大化するような経済成長を考察する。

$$max \int_0^\infty u(c,l_F,\psi(n_0,x_n,l_n),\phi_1(n_1,n_2))e^{-\xi t}dt \quad (1)$$

subject to

$$\begin{aligned} x &= f(l_x,k_x,z_1,z_2,n_0,n_1,n_2) \\ &\equiv \phi_2(n_0)\phi_3(n_1,n_2)h(l_x,k_x,z_1,z_2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$s = \alpha x \quad (3)$$

$$z_0 = g(s,l_z,k_z) \quad (4)$$

$$n_0 = \bar{n}_0 - z_0 \quad (5)$$

$$\dot{n}_1 = [\bar{\varepsilon}_1 + \varepsilon_1(x_1,l_1) - \delta_1 n_2]\,n_1 - z_1 \quad (6)$$

$$\dot{n}_2 = [-\bar{\varepsilon}_2 + \varepsilon_2(x_2,l_2) + \delta_2 n_1]n_2 - z_2 \quad (7)$$

$$x = x_1 + x_2 + x_n + c + I_x + I_z \quad (8)$$

$$\bar{l} = l_x + l_1 + l_2 + l_z + l_n + l_F \quad (9)$$

---

*キーワード：持続的成長管理論，環境計画，
地球環境問題，システム分析
**正会員，学博，豊橋技術科学大学人文・社会工学系
***学生員，工修，豊橋技術科学大学大学院
環境・生命工学専攻博士後期課程
（〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1, Tel. 0532-44-6955, Fax. 0532-44-6947, e-mail. miyata@hse.tut.ac.jp）

$$\dot{k}_x = I_x - \delta_x k_x \tag{10}$$

$$\dot{k}_z = I_z - \delta_z k_z \tag{11}$$

ここで，u：効用関数，c：家計消費，l_F：家計の余暇需要，ψ：家計環境保全関数，n_0：環境フロー財，x_n：家計の環境保全中間投入，l_n：家計の環境保全労働投入，ϕ_1：生態系による家計への外部性，n_1：種1の個体数，n_2：種2の個体数，ξ：主観的割引率，x：生産物，f：生産関数，ϕ_2：環境フロー財による生産への外部性，ϕ_3：生態系による生産への外部性，h：生産関数，l_x：生産への労働投入，k_x：生産への資本投入，z_1：企業による種1の使用量，z_2：企業による種2の使用量，s：生産に伴う廃棄物，α：廃棄物発生係数，$\overline{n}_0$：自然から供給される毎期の環境フロー財(定数)，z_0：廃棄物処理に伴う環境フロー財$\overline{n}_0$の減少量，g：環境保全企業の生産関数，l_z：環境保全企業の労働投入，k_z：環境保全企業の資本投入，$\overline{\varepsilon}_1$：種1の自然増加率，ε_1：種1の育成関数，x_1：種1を育成するための中間投入，l_1：種1を育成するための労働投入，θ_1：種1の種間競争係数，$\overline{\varepsilon}_2$：種2の自然減少率，ε_2：種2の育成関数，θ_2：種2の種間競争係数，$\overline{l}$：家計の労働時間保有量(定数)，I_x：企業投資，I_z：環境保全企業投資，δ_x：企業資本ストックの減耗率，δ_z：環境保全企業資本ストックの減耗率

3．国民純福祉指標

上記の(1)~(11)を解くために，*current value Hamiltonian* を導入するが，本研究ではそれを経済 *Hamiltonian* と呼ぶ。

$$\begin{aligned}
H_A \equiv\ & u(c,l_F,\psi(n_0,x_n,l_n),\phi_1(n_1,n_2)) \\
& + p(f(l_x,k_x,z_1,z_2,n_0,n_1,n_2) - x_1 - x_2 - x_n - c - I_x - I_z) \\
& + q(s - \alpha x) + v(\overline{n}_0 - z_0 - n_0) + \zeta(g(s,l_z,k_z) - z_0) \\
& + w(\overline{l} - l_x - l_1 - l_2 - l_z - l_n - l_F) \\
& + \mu_x(I_x - \delta_x k_x) + \mu_z(I_z - \delta_z k_z) \\
& + \lambda_1\{[\overline{\varepsilon}_1 + \varepsilon_1(x_1,l_1) - n_2]n_1 - z_1\} \\
& + \lambda_2\{[-\overline{\varepsilon}_2 + \varepsilon_2(x_1,l_1) + n_1]n_2 - z_2\}
\end{aligned} \tag{12}$$

モデル内の関数に1次同次性を仮定し，最適化1階の条件を用いると，最適軌道に沿って経済 *Hamiltonian* は以下のように表現される。

$$\begin{aligned}
H_A^* =\ & p(x_1 + x_2 + x_n + c + \dot{k}_x + \dot{k}_z) \\
& - p(x_1 + x_2) + w(l_n + l_F) \\
& + \frac{\partial u}{\partial \psi}\frac{\partial \psi}{\partial n_0}n_0 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1}n_1 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_2} + \lambda_1\dot{n}_1 + \lambda_2\dot{n}_2
\end{aligned} \tag{13}$$

式(13)の意味を簡単に考察しよう。まず右辺第1項は通常の国民純生産を表す。第2項は国民純生産のうち，生態系保全に用いられる財が控除されていることを示している。これはこの財の評価が第7，8項に含まれるためである。第3項は家計労働供給のうち，余暇と家計自身の環境保全は評価されるべきことを示している。第4項から第6項は環境フローと生態系が家計効用に与える影響を表す。最後の第7，8項は生態系純成長の価値を表す。以上をまとめて，以下の命題1を得る。

命題1．「最適軌道上の経済 *Hamiltonian* は，環境の影響を考慮した国民純生産(エコ純生産)を定義する。」

さらに最適軌道上の経済 *Hamiltonian* の時間微分を計算すると，

$$\frac{dH_A^*}{dt} = \xi(H_A^* - u^*) \tag{14}$$

この微分方程式を解き，以下の表現を得る。

$$\int_t^\infty H_A^*(t)\, e^{-\xi(\tau - t)}d\tau = \int_t^\infty u^*(\tau)\, e^{-\xi(\tau - t)}d\tau \tag{15}$$

この関係式より命題2が導かれる。

命題2．「経済 *Hamiltonian* は家計の現在価値効用総和に等しい静的等価を与える。」

命題1，2により，動学経済では経済 *Hamiltonian* が厚生水準を表す指標となることが分かる[3]。

4．環境・経済統合勘定

最適解は内点解であると仮定すれば，モデルの制約条件(2)~(11)は全て等号が成立する。これに shadow price を乗じ，各経済主体間の取引を整理すれば，表1の環境・経済統合勘定が得られる。なお表1では以下の記号を用いている。

家計貯蓄

$$\begin{aligned}
S_H \equiv\ & p\dot{k}_x + p\dot{k}_z + \lambda_1\dot{n}_1 + \lambda_1(-\overline{\varepsilon}_1 + \theta_1 n_2)n_1 \\
& + \lambda_2\dot{n}_2 + \lambda_2(\overline{\varepsilon}_2 - \theta_2 n_1)n_2
\end{aligned} \tag{16}$$

環境所得

$$\begin{aligned}
Y_E \equiv\ & \frac{\partial u}{\partial \psi}\frac{\partial \psi}{\partial n_0}n_0 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1}n_1 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_2}n_2 \\
& + \lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + v \cdot z_0 \\
& + p\frac{\partial f}{\partial n_0}n_0 + p\frac{\partial f}{\partial n_1}n_1 + p\frac{\partial f}{\partial n_2}n_2
\end{aligned} \tag{17}$$

企業の環境調整資本収益率

$$\begin{aligned}
r_x \equiv\ & (px - wl_x - q\alpha x - p\delta_x k_x - \lambda_1 z_1 - \lambda_2 z_2 \\
& - p\frac{\partial f}{\partial n_0}n_0 - p\frac{\partial f}{\partial n_1}n_1 - p\frac{\partial f}{\partial n_2}n_2)/k_x
\end{aligned} \tag{18}$$

環境保全企業の環境調整資本収益率

$$r_z \equiv (q \cdot s - wl_z - p\delta_z k_z - \nu \cdot z_0)/k_z \tag{19}$$

この環境･経済統合勘定で家計部門の列和を見ると，エコ純生産に生態系の自然成長価値 $\lambda_1(-\bar{\varepsilon}_1 + \theta_1 n_2)n_1 + \lambda_2(\bar{\varepsilon}_2 - \theta_2 n_1)n_2$ を加えたものであることが分かる。これより命題３を得る。

命題３．「表１の環境・経済統合勘定の家計所得は，生態系自然成長を考慮したエコ国民総生産を表す。」

5．生態系評価

以上では環境価値を経済的に評価する方法を提示したが，この節では生態系自身が持つ特性に着目し，新たな生態系評価を試みる。

問題を簡単にするため，式(6)，式(7)の生態系ダイナミクスから人為的影響を除き，生態系自身の自然な挙動を考察する。

$$\dot{n}_1 = [\bar{\varepsilon}_1 - \theta_1 n_2]\, n_1 - z_1 \tag{20}$$

$$\dot{n}_2 = [-\bar{\varepsilon}_2 + \theta_2 n_1] n_2 - z_2 \tag{21}$$

このダイナミクスに働く変分原理を調べてみよう。変分問題は以下のように定式化される。

$$\delta \int_0^t F(N_1, n_1, N_2, n_2)\, d\tau = 0 \tag{22}$$

$$N_i(t) \equiv \int_0^t n_i(\tau)\, d\tau \tag{23}$$

これを満たす *Lagrange* 関数 F は以下となる。

$$F = \frac{\omega}{\theta_1} n_1 \ln n_1 + \frac{\omega}{\theta_2} n_2 \ln n_2 + b_{12} n_1 N_2 - b_{21} n_2 N_1 + \frac{\omega \bar{\varepsilon}_1 N_1}{\theta_1} - \frac{\omega \bar{\varepsilon}_2 N_2}{\theta_2} + \frac{\partial X}{\partial N_1} n_1 + \frac{\partial X}{\partial N_2} n_2 \tag{24}$$

ここで，$b_{ij}>0$，$\omega \equiv b_{12}+b_{21}$，$X(N_1, N_2) \in C^2(\boldsymbol{R}_+^2)$

さらに式(22)の第２次変分を計算することにより，生態系ダイナミクス(20)，(21)は式(22)の最小値を与えることが証明される[4]。これより命題４を得る。

命題４．「生態系ダイナミクス(20)，(21)は，２種間の多様性を増加させ，種１は種２との接触を避け，種２は種１を追い，種１の自然増加は抑制され，種２の自然増加は増長される状態を表す。」

さて，*Lagrange* 関数の *Legendre* 変換は *Hamiltonian* となることが知られている。*Hamiltonian* は以下のように計算される。

$$H_B \equiv p_1 n_1 + p_2 n_2 - F = \frac{\omega n_1}{\theta_1} + \frac{\omega n_2}{\theta_2} - \frac{\omega \bar{\varepsilon}_1 N_1}{\theta_1} + \frac{\omega \bar{\varepsilon}_2 N_2}{\theta_2} \tag{25}$$

ここで，$p_i \equiv \partial F / \partial n_i$

H_B を以下では生態系 *Hamiltonian* と呼ぼう。簡単な計算から $\partial H_B / \partial t = 0$ が分かり，生態系 *Hamiltonian* は２種のダイナミクス上で時間不変の定数を取ることが証明される。式 (20)，式(21)の均衡解は以下となり，

$$dn_1/dt = dn_2/dt = 0 \Leftrightarrow n_1^* \equiv \bar{\varepsilon}_2/\theta_2,\ n_2^* \equiv \bar{\varepsilon}_1/\theta_1 \tag{26}$$

表１　環境・経済統合勘定

	H	*L*	*K*	*Pr.*	*E.P.*	*S/I*	*Env.*	*Total*
H		$w\bar{l}$	$r_x k_x + r_z k_z$				Y_E	$w\bar{l} + r_x k_x + r_z k_z + Y_E$
L	$w(l_F + l_n)$			wl_x	wl_z		$w(l_1 + l_2)$	$w(l_1 + l_2 + l_x + l_z + l_n + l_F$
K				$r_x k_x$	$r_z k_z$			$r_x k_x + r_z k_z$
Pr.	$p(c + x_n)$					$p(I_x + I_z)$	$p(x_1 + x_2)$	$p(x_1 + x_2 + c + x_n + I_x + I_z$
E.P.				$q \cdot s$				$q \cdot s$
S/I	S_H			$p\delta_x k_x$	$p\delta_z k_z$			$S_H + p\delta_x k_x + p\delta_z k_z$
Env.	$\frac{\partial u}{\partial \psi}\frac{\partial \psi}{\partial n_0} n_0 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1} n_1 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_2} n_2$			$p\frac{\partial f}{\partial z_1} z_1 + p\frac{\partial f}{\partial z_2} z_2 + p\frac{\partial f}{\partial n_0} n_0 + p\frac{\partial f}{\partial n_1} n_1 + p\frac{\partial f}{\partial n_2} n_2$	$\nu \cdot z_0$	$\lambda_1 \dot{n}_1 + \lambda_1(-\bar{\varepsilon}_1 + \theta_1 n_2) n_1 + \lambda_2 \dot{n}_2 + \lambda_2(\bar{\varepsilon}_2 - \theta_2 n_1) n_2$		$Y_E + \lambda_1 \dot{n}_1 + \lambda_1(-\bar{\varepsilon}_1 + \theta_1 n_2) n_1 + \lambda_2 \dot{n}_2 + \lambda_2(\bar{\varepsilon}_2 - \theta_2 n_1) n_2$
Total	$w(l_F + l_n) + p(c + x_n) + S_H + \frac{\partial u}{\partial \psi}\frac{\partial \psi}{\partial n_0} n_0 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1} n_1 + \frac{\partial u}{\partial \phi_1}\frac{\partial \phi_1}{\partial n_2} n_2$	$w\bar{l}$	$r_x k_x + r_z k_z$	$wl_x + r_x k_x + q \cdot s + p\delta_x k_x + p\frac{\partial f}{\partial z_1} z_1 + p\frac{\partial f}{\partial z_2} z_2 + p\frac{\partial f}{\partial n_0} n_0 + p\frac{\partial f}{\partial n_1} n_1 + p\frac{\partial f}{\partial n_2} n_2$	$wl_z + r_z k_z + p\delta_z k_z + \nu \cdot z_0$	$p(I_x + I_z) + \lambda_1 \dot{n}_1 + \lambda_1(-\bar{\varepsilon}_1 + \theta_1 n_2) n_1 + \lambda_2 \dot{n}_2 + \lambda_2(\bar{\varepsilon}_2 - \theta_2 n_1) n_2$	$Y_E + w(l_1 + l_2) + p(x_1 + x_2)$	

注：*H*：家計部門，*L*：労働，*K*：資本，*Pr.*：生産部門，*E.P.*：環境保全活動，*S/I*：資本勘定，*Env.*：環境部門

若干の計算を行うと，生態系 *Hamiltonian* は最終的に式(27)の形式となる。これより命題5を得る。

$$H_B = \frac{\omega n_1^*}{\theta_1}[\frac{n_1}{n_1^*} - 1 - ln\frac{n_1}{n_1^*}] + \frac{\omega n_2^*}{\theta_2}[\frac{n_2}{n_2^*} - 1 - ln\frac{n_2}{n_2^*}] \equiv C \text{ (constant)} \quad (27)$$

命題5.「生態系 *Hamiltonian* H_B は生態系ダイナミクス(20), (21)の積分曲線と等価であり，均衡解で0を取り，ダイナミクス軌道が均衡解から離れるほど大きな値を取る。」

さらに $p \equiv ln\, n_1$，$q \equiv ln\, n_2$ と置くことにより，式(28)の正準方程式が得られ，生態系 *Hamiltonian* は生態系の運動エネルギー的なものを表すと解釈される。

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H_B}{\partial q}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H_B}{\partial p} \quad (28)$$

現在のところ生態系 *Hamiltonian* の大小が，生態系の望ましさにどのように関係するのかは不明ではあるが，本研究では生態系 *Hamiltonian* を生態系の評価指標と見なす。

6．生態系保全

前節では企業による生態系採取および生態系保全の影響を捨象したが，ここではその影響を考察しよう。すなわち式(6), (7)のダイナミクスを対象とする。ε_i および z_i を外生的な変数とすれば，式(6), (7)を生み出す変分方程式，すなわち *Euler* 方程式は以下となる。

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial F}{\partial n_i} - \frac{\partial F}{\partial N_i} = \varepsilon_i - \frac{z_i}{n_i} \quad (i = 1,2) \quad (29)$$

ここで，F は式(24)と同じ関数である。式(29)の右辺は生態系保全活動による生態系の成長促進，および企業による生態系採取の影響を表している。また右辺がゼロではないため，式(6), (7)はもはや式(22)の積分汎関数を最小化していないことを注意しておこう。

さて *Lagrange* 関数 F は第5節のものと同一であるため，その *Legendre* 変換より得られる *Hamiltonian* も式(25)と同一となる。そこで生態系 *Hamiltonian* (25)の時間微分を計算してみよう。

$$\frac{dH_B}{dt} = \frac{\omega}{\theta_1\theta_2}(\theta_2\varepsilon_1 n_1 - \theta_2 z_1 + \theta_1\varepsilon_2 n_2 - \theta_1 z_2) \quad (30)$$

一般に式(30)はゼロとはならず，H_B は生態系ダイナミクス上で定数とはならない。このため H_B を *Hamiltonian* とは呼べないため，ここでは特性関数と呼ぼう。式(30)より直ちに以下の命題を得る。

命題6.（*M*-rule）「企業による生態系採取および生態系保全活動が以下の条件を満たすとき，特性関数 H_B は保存される。」

$$\theta_2\varepsilon_1 n_1 - \theta_2 z_1 + \theta_1\varepsilon_2 n_2 - \theta_1 z_2 = 0 \quad (31)$$

命題7.「生態系採取量と同量を補う生態系保全活動は命題5の十分条件である。」

命題7は全くの自明であるが，命題6は極めて深い含意を持つ。すなわち，2種のうち1種の採取量が多い場合でも，他の1種を育成することにより，生態系保全が可能となることを示しており，本研究の方法により初めて見い出された命題である。また命題6は生態系における Hartwick rule[5]とも言える。

7．おわりに

本研究は環境を考慮した社会的最適化問題から，環境・経済統合勘定を導き，その厚生的含意を述べるとともに，生態系の新たな評価方法，保全戦略を理論的に考察したものである。

本研究の方法は社会的最適化問題に基づくために，shadow price は市場価格とは一致しない。したがって，分権的なモデルを考察することにより，現実に観測される経済データに基づく考察が可能となるが，これを今後の課題としたい。

なお本研究の一部は特定領域研究(A)(1)(課題番号09247104)の補助を受けている。

参考文献

1)United Nations : *Integrated Environmental and Economic Accounting*, United Nations, New York, U.S.A., 1993

2)Maeler, K.G: National Accounts and Environmental Resources, *Environmental and Resource Economics* 1., pp.1-15, 1991

3)Weitzman, M.L.: On the Welfare Significance of National Product in a Dynamic Economy, *Quarterly Journal of Economics* 22, 5, pp.156-162, 1974

4)Gelfand, I.M. and Formin, S.V. : "*The Problems*" *in* "*Calculus of Variations*", Prentic-Hall, Inc. New Jersey, U.S.A., translated and edited by Silverman, R.A., 1968

5)Hartwick, J.M. : Intergenerational Equity and Investing of Rents from Exhaustible Resources, *American Economic Review* 67, 5, pp.972-974, 1977

6)Miyata, Y.: A Dynamic Population Model Incorporating a Variety of Urban Functions, *Papers in Regional Science* 76, 2. pp.229-256, 1997