環境経済学における最適成長論*

OPTIMAL ECONOMIC GROWTH THEORY IN THE ENVIRONMENTAL ECONOMICS : ECONOMICS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT *

林山　泰久**・武藤　慎一***・佐藤　徹治****

By Yasuhisa HAYASHIYAMA** • Shinichi MUTO*** • Tetsuji SATO****

１．はじめに

1984年10月のブルントラント会議以降，化石燃料をはじめとする天然資源の枯渇問題，環境汚染および環境破壊問題の２つの意味において，「持続可能な開発（Sustainable Development）」がキーワードとなっており，これを如何に達成するかが世界的な問題・課題となっている．経済学的には，持続可能な開発は「将来にわたって経済学的社会厚生が持続可能な開発」と解釈され，①望ましい経済成長 (最適経済成長)とは如何なるものか？ ②持続可能な開発を達成するための条件は如何なるものか？の２つが問題となる。

本稿は，上記の２つの経済問題について，環境経済学の既存研究を整理することによって明らかにすることにより，土木計画学における最適投資論等の動学最適化問題への示唆を得ることを目的とするものである．

以下では，枯渇性資源を考える場合と環境汚染を含む再生可能資源を考える場合とに大別し，それぞれ功利主義的社会厚生を仮定したときの最適成長理論について概説した後，持続可能な開発を達成するための割引率および社会厚生関数について提案されているいくつかの考え方を示す．

*キーワーズ：最適成長論，持続可能な開発

**正員，博(工)，東北大学大学院経済学研究科
（〒980-8576　仙台市青葉区川内，
TEL:022-217-6317,
E-mail:yhaya@econ.tohoku.ac.jp）
***正員，博(工)，大阪工業大学工学部
（〒535-8585　大阪市旭区大宮5-16-1,
TEL:06-6954-4203，E-mail:muto@civil.oit.ac.jp）
****正員，修(情報科学)，(財)計量計画研究所
（〒162-0845　東京都新宿区市ヶ谷本村町2-9,
TEL:03-3268-9966，E-mail:tsato@ibs.or.jp）

２．枯渇性資源と最適成長

（1）枯渇性資源に関する既存研究

枯渇性資源と最適経済成長に関しては，Hotelling (1931)の問題提起に始まり Stiglitz (1974)以降，枯渇性資源のフローが財の生産投入要素として定式化され，それ以降，様々な議論が展開されている．その代表的研究として，Dasgupta and Heal (1974)を挙げることができ，この研究は功利主義的社会厚生関数に基づく最適成長経路が世代間の公平性と乖離する可能性を示しその後の研究に大きな影響を与えたことで知られている．また，1980 年代後半以降に急速な発展をみせた内生的成長理論により，環境のマクロ経済分析は多様な方向でより一層の進展を見せている．例えば，Stiglitz モデルに内生的人口成長を組み込んだ Cingo (1981)，この種の問題に関する研究の発展経緯を取りまとめた Krautkraemer (1998), Romer タイプの内生的技術進歩モデルに枯渇性資源を導入した Barbier (1999)，Jones タイプの準内生的成長モデルを用いた Groth and Schou (2002)を挙げることができる．さらに，近年の研究として Schou (2000)では，生産関数に枯渇性資源が投入され，その利用に応じて生じる汚染フローが同時に生産に対して負の影響を及ぼすというメカニズムが表現されている．

（2）功利主義的社会厚生に基づく最適成長論

Dasgupta and Heal (1974)に従って概説する．

$$\max.\int_0^{\infty} e^{-\theta t} U\left(C_t\right) dt \tag{1}$$

$$s.t.\ \dot{K}_t = F\left(K_t, R_t\right) - C_t \tag{2}$$

$$\dot{S}_t = -R_t \tag{3a}$$

$$\int_0^{\infty} R_t dt \le S_0 \tag{3b}$$

$$C_t, K_t, R_t \ge 0\ and\ K_0\left(>0\right)\ is\ given$$

ここで，C_t, K_t, R_t, S_t は，各々 t 期における総消費量，再生可能な人工資本，枯渇性資源投入量，残存枯渇性資源ストックである．また，$F(\bullet)$ は生産関数であり，人工資本と枯渇性資源の投入によって生み出される生産物の総量を与える．なお，生産関数は狭義の凹の一次同次関数であり，かつ $\partial F/\partial K_t = F_K \geq 0$，$\partial F/\partial R_t = F_R \geq 0$ とし，F_K は人工資本の限界生産性，F_R は枯渇性資源の限界生産性を意味する．また，θ は割引率であり，$\theta > 0$ と仮定する．さらに，$\partial U/\partial C_t = U_C > 0$ とする．

ここで式(3a)は，各期の枯渇性資源投入量と枯渇性資源ストック量の変化分とが一致するという条件，また，式(3b)は，枯渇性資源の総投入量が，初期枯渇制資源ストック量を超えないという条件である．

以上の最適化問題に対するハミルトニアンHは，消費のスポット価格を p_t として，以下となる．

$$\begin{aligned} \mathrm{H} = & e^{-\theta t} U(C_t) \\ & + e^{-\theta t} p_t \left(F(K_t, R_t) - C_t \right) \\ & + e^{-\theta t} \mu_t R_t \quad \to \max \end{aligned} \tag{4}$$

$$s.t. \int_0^\infty R_t dt \leq S_0 \tag{5}$$

$$where \;\; \mu_t \geq 0 \; and \; \mu_t R_t = 0 \tag{6}$$

よって，ラグラジアンLは以下のようになる．

$$\mathrm{L} = \mathrm{H} - \lambda R_t \tag{7}$$

$$where \;\; \mu_t \geq 0 \; and \; \mu_t R_t = 0 \tag{8}$$

$$\lambda \geq 0 \; and \; \lambda \left(S_0 - \int_0^\infty R_t dt \right) = 0 \tag{9}$$

この結果，最適成長経路が満たすべき必要条件として，式(10)および式(11)が導かれる．

$$\frac{\dot{C}_t}{C_t} = \frac{F_K - \theta}{\eta(C_t)} \tag{10}$$

$$\frac{\dot{F}_R}{F_R} = F_K \tag{11}$$

ここで，$\eta(C_t) \equiv C_t \dot{U}_t / U_t$ は，消費に対する限界効用の弾力性を意味する．

式(10)は，最適成長論におけるラムゼイ・ルール（Keynes-Ramsey Rule）と呼ばれるもので，消費時点を先延ばしすることによるメリット F_K がデメリット θ を上回るときには，最適成長経路上で将来時点の消費を増加させ，逆に下回る場合には将来の消費を減少させるべきであることを表している．

一方，式(11)はホテリング・ルール（Hotelling Rule）と呼ばれる枯渇性資源の場合固有の条件式であり，枯渇性資源の限界生産性の成長率が再生産可能な資本の限界生産性に等しいことを意味している．

３．再生可能資源と最適成長

（１）再生可能資源に関する既存研究

環境の自浄能力は，何よりも環境資本が再生可能であり，枯渇性を持たないことを意味している．したがって本稿では，環境汚染や環境破壊と言われている環境汚染問題を再生可能資源と表現する．

この分野の先駆的な研究であるKeeler, Spence and Zeckhauser (1972)では，日常的に排出されている汚染物質の管理問題を最適成長のフレームを用いて分析しており，代表的家計の効用関数は消費と環境汚染ストックから構成されている．

また，汚染ストックと汚染フローの双方を考慮した研究も多い．汚染ストックについては，汚染ストック水準が上昇すると効用水準に負の影響を与え，一方汚染フローは，最終財の生産には正の影響を与え，汚染ストックの遷移にはマイナスの影響を与えると考えられている．例えば，Tahvonen and Kuuluvainen (1991)，Bovenberg and Smulders (1995, 1996)では，効用関数には消費に加えて再生可能資源が考慮され，生産関数には物的な資本の他に汚染物質が投入されるというモデル構造になっている．

その後，枯渇性資源に関する研究と同様に内生的成長理論による環境のマクロ経済分析は，多様な方向でより一層の進展を見せている．例えばBretschger (1998)は，研究開発による内生的技術進歩と再生可能資源の問題を分析している．再生可能資源および枯渇性資源の双方を含んだ分析としては，Tahvonen and Salo (2001)を挙げることができる．

（２）功利主義的社会厚生に基づく最適成長論

Tahvonen and Kuuluvainen (1991)の研究を発展させたMichel and Rotillon (1995)を用いて説明する．

$$\max.\int_0^{\infty} e^{-\theta t} U(C_t, P_t)\, dt \tag{12}$$

$$s.t.\ \dot{K}_t = F(K_t, X_t L) - C_t \tag{13}$$

$$\dot{P}_t = \beta K_t - \mu P_t \tag{14}$$

$$C_t, K_t, P_t \ and\ P_0(>0), K_0(>0)\ is\ given$$

ここで，P_tは環境汚染ストックの水準である．また，Lは労働（=const）であり，X_tは知識ストックの蓄積による正の外部性を表している．$X_t = aK_t$と仮定し，資本減耗率をδ，$A = F(1, aL) - \delta$とすると，式(13)は式(13)'のように書き換えられる．

$$\dot{K}_t = AK_t - C_t \tag{13'}$$

式(9)で$\partial U / \partial P_t = U_P < 0$，$\partial^2 U / \partial P^2 = U_{PP} \leq 0$であり，これは環境汚染が社会厚生水準を逓増的に低下させることを意味している．

以上の最適化問題は，ハミルトニアンHを用いて表現すると式(15)となり，最適化条件は式(16)～(19)となる．

$$\begin{aligned}\mathrm{H} = & U(C_t, P_t) + \phi_t(AK_t - C_t) \\ & + (-\varphi_t)(\beta K_t - \mu P_t)\end{aligned} \tag{15}$$

$$U_C(C_t, P_t) = \phi_t \tag{16}$$

$$\dot{\phi}_t = (\theta - A)\phi_t + \beta\varphi_t \tag{17}$$

$$\dot{\varphi}_t = (\theta + \mu)\varphi_t + U_P(C_t, P_t) \tag{18}$$

$$\lim_{t \to \infty} e^{-\theta t}(\phi_t K_t + \varphi_t P_t) = 0 \tag{19}$$

汚染の増加が限界効用を減少させるケースでは，必要条件から定常状態は式(17)～(20)を満たす．さらに，社会厚生を最大にする解は，式(20)～(21)を制約条件とした$\max_{C_t^*, P_t^*}.U(C_t^*, P_t^*)$の解となることから，式(24)を得ることができる．なお，Chichilnisky, Heal and Beltratti(1995)によれば，式(21)は，グリーン黄金律(Green Golden Rule)と定義されている．

$$C_t^* = AK^* \tag{20}$$

$$P_t^* = \beta K_t^* / \mu \tag{21}$$

$$\phi_t^* = U_C(C_t^*, P_t^*) \tag{22}$$

$$\begin{aligned}(A - \theta)U_C(C_t^*, P_t^*) &= \beta\varphi_t^* \\ &= \beta(-U_P)(C_t^*, P_t^*)/(\theta + \mu)\end{aligned} \tag{23}$$

$$\frac{U_P}{U_C} = -\frac{A\mu}{\beta} : Social\ Optimum \tag{24}$$

一方，モデルの定常状態における解は，式(25)となり，割引率がゼロ($\theta = 0$)の場合にのみ社会的最適解に一致する．すなわち，一般的には，定常状態は社会的最適解に一致しないと言える．

$$\frac{U_P}{U_C} = -\frac{(A - \theta)(\theta + \mu)}{\beta} : Steady\ State \tag{25}$$

４．持続可能な開発

（１）持続可能な開発の定義

「持続可能な開発」の定義については，Tietenberg (1980)，Mäler (1991)，Solow (1992)をはじめとして多くの議論がなされているが，本質的には，「時間が経つにつれて社会厚生が低下しない経路」と解釈できる．

この定義に従えば，持続可能な開発が達成されるかどうかは，割引率と社会的厚生関数の設定に依存することは明らかである．よってここでは，功利主義的社会厚生関数の下で持続可能な開発を行うための条件としてハートウィック・ルールについて概説した後，持続可能な開発を達成するための割引率および社会的厚生関数の考え方を示す．

（２）ハートウィック・ルール

Hartwick (1977)は，枯渇性資源の利用の下に持続可能な開発を行うための必要最小限の条件について，「枯渇性資源所有者の利潤をすべて資本投資に向け，人工資本を蓄積し，生産能力を補わなければならないこと」と主張した．これは，ハートウィック・ルール（Hartwick Rule）と呼ばれ，式(26)で表される．このとき，式(27)が成立し，各世代の消費が同一であるというシンプルな世代間公平性が実現される．

$$\dot{K}_t = F_R R_t\, (\forall t \geq 0) \tag{26}$$

$$\dot{C}_t = 0 (\forall t \geq 0) \tag{27}$$

（３）割引率

Ramsey(1928)，Harrod(1948)，Broome(1992)およびCline(1992)は，環境資本を考慮していないもの

の，割引率をゼロとした問題を考えている．この場合の社会厚生関数は式(28)で表現することができる．ここで，B は至福点（Bliss Point）である．

$$\int_0^{\infty}\left[B-U\left(C_t^*,S_t^*\right)\right]dt<\infty \tag{28}$$

この社会厚生関数は，全ての世代を同等に取り扱うという意味で世代間の公平性を反映している．しかし，Ramsey (1928)の分析では，結果的に高い貯蓄率が要求され，現世代に過大な負担を強いる可能性が指摘されている．

一方，Ainslie and Haslam(1992)は，非線形な割引率として Hyperbolic な割引を提案している．また，将来世代に低い割引率を適用することを主張した Weitzman(2001)はガンマ分布を仮定した式(29)を提案し，表－１のような結果を示している．

$$\Delta(t)=\frac{1}{1+t\sigma^2/\mu},\quad \theta(t)=-\frac{\dot{\Delta}(t)}{\Delta(t)} \tag{29}$$

表－１　Weitzman(2001)による割引率の試算

期間	名称	割引率(%)
1～5 年	Immediate Future	4.0
6～25 年	Near Future	3.0
26～75 年	Medium Future	2.0
76～300 年	Distant Future	1.0
300 年以上	Far-Distant Future	0.0

（４）社会的厚生関数

Chichilnisky (1996)は，功利主義的な項と遠い将来の効用に基づく項との凸結合した式(30)を提案している．

$$\max.\left[\begin{array}{l}\alpha\int_0^{\infty}e^{-\theta t}U(C_t,S_t)dt\\+(1-\alpha)\lim_{t\to\infty}U(C_t,S_t)\end{array}\right],\alpha\in(0,1) \tag{30}$$

これは Chichilnisky 基準と呼ばれる．この基準における最適経路が $\lim_{C_t\to\infty}U_C=\infty$ の場合には，無限大先の消費がゼロであるとは限らないため，功利主義的基準よりも将来世代に重きを置く動学経路が選択される．

ここで，(31)～(34)の４通りの社会厚生関数を考える．

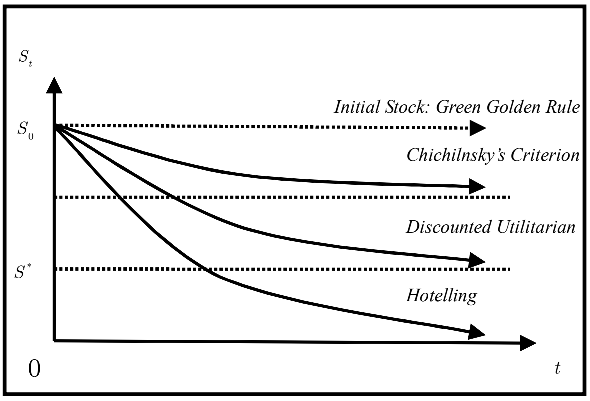
$$\lim_{t\to\infty}U(C_t,S_t):Green\,Golden\,Rule(GGR) \tag{31}$$

$$\int_0^{\infty}e^{-\theta t}U(C_t,S_t)dt+\lim_{t\to\infty}U(C_t,S_t)\quad :Chichilinisky(CH) \tag{32}$$

$$\int_0^{\infty}e^{-\theta t}U(C_t,S_t)dt\quad :Discounted\ Utilitarian(DU) \tag{33}$$

$$\int_0^{\infty}e^{-\theta t}U(C_t)dt:Hotelling(H) \tag{34}$$

いま，再生可能資源を考え，再生可能資源ストック S_t が $\dot{S}_t=R(S_t)-C_t$ なる動学方程式の制約条件の下で，式(31)～(34)の社会厚生関数を最大にした場合，環境資本ストックの時間経路を概念的に図示すると図－１のようになる．これをみると，グリーン黄金律は初期の資本ストックを維持し，功利主義的社会厚生は定常状態に収束し，ホテリング的社会厚生はゼロに収束することが分かる．



図－１　環境資本ストックの時間経路

参考文献

紙面制約のため，一部のみ挙げる．その他は当日配布する論文を参照されたい．

Dasgupta,P. and G.M.Heal: The Optimal Depletion of Exhaustible Resources, Review of Economic Studies, pp.3-28, 1974.

Michel,P. and G.Rotillon: Disutility of Pollution and Endogenous Growth, Environmental and Resource Economics, Vol.6, pp.279-300, 1995.

Hartwick,J.M.: Intergenerational Equity and Investing of Rents from Exhaustible Resources, American Economic Review, Vol.66, pp.972-974, 1977a.

Ramsey,F.: A Mathematical Theory of Saving, Economic Journal, Vol.38, pp.543-559, 1928.

Chichilnisky,G.: An Axiomatic Approach to Sustainable Development, Social Choice and Welfare, Vol.13, No.2, pp.231-257, 1996.