

最適成長理論と力学系

京大経済研 西村和雄

(Kazuo Nishimura)

1. はじめに

経済学において、社会的厚生を最大化する動学的経路がどのような性質を持つかを研究する分野は最適成長理論とよばれている。他方、景気循環を実証的に研究することも行なわれてきたが、景気循環が必ずしも経済成長の特殊ケースとして扱われてはいなかった。太陽黒点説などはその例である。最近の最適成長理論のテーマは、景気循環を生む経済の内生的メカニズムを説明することである。その為に、ホップ分岐やカオスの理論が有効な方法として扱われている。以下では最近の結果を議論する為の準備として、最も簡単な経済の最適成長モデルの説明から始める。

2. 経済モデルの説明

生産関数：いま、生産関数が1次同次関数

$$(1) \quad Y = F(K, L)$$

で表わされたとする。Kは資本財、Lは労働量である。生産物Yは消費と投資に費やされる。減価償却率を δ とすると、t期における資本ストックの減耗分は δK_t である。よって、t期における純投資額は、

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

である。 K_{t+1} は $t+1$ 期の初めにおける資本ストックの量である。かくて、生産物の需給均等式は

$$(2) \quad Y_t = C_t + K_{t+1} - (1 - \delta) K_t$$

で表わされる。(1)式と、(2)式から

$$(3) \quad c_t = F(K_t, L_t) + (1 - \delta) K_t - K_{t+1}$$

となる。生産関数の1次同次性から、(3)式を L_t で割って一人当りの変数に直すと、

$$(4) \quad C_t = F(k_t, 1) + (1 - \delta) k_t - n_t k_{t+1}$$

となる。ここで、

$$c_t = \frac{C_t}{L_t}, \quad k_t = \frac{K_t}{L_t}, \quad n_t = \frac{L_{t+1}}{L_t}$$

といている。 $n_t - 1$ は労働者人口の成長率である。さらに

$$f(k_t) = F(k_t, 1) + (1 - \delta) k_t$$

とおくと、(4)式は

$$(5) \quad c_t = f(k_t) - n_t k_{t+1}$$

となる。よって、以下では $f(k_t)$ を生産関数のようにみなして議論を進めてもかまわないであろう。当面の間、 $f(k_t)$ は単調増加な凹関数であると仮定する。しかも $f(\bar{k}) = \bar{k}$ となる $\bar{k} > 0$ が存在し、

$$(6) \quad f(k) > k \text{ for } 0 < k < \bar{k}, \quad f(k) < k \text{ for } k > \bar{k}$$

が成り立つとする。

効用関数：個人は、各期に消費財を消費することから効用 $u(c_t)$ を得る。ここで c_t は 1 人当りの消費量である。全ての個人が同じ効用関数を持つと仮定すると、 t 期における全ての個人の効用の和は $L_t u(c_t)$ である。しかも、人口成長率 n_{t-1} が常に一定値 $n-1$ をとると仮定すると

$$L_t = n L_{t-1} = n^t L_0$$

である。これを用いると、 t 期の効用の総和すなわち社会的効用は

$$n^t L_0 u(c_t)$$

となる。今期を 0 期とよび、無限の将来期間に渡る社会的効用の和を

$$(7) \quad \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t n^t L_0 u(c_t) = L_0 \sum_{t=0}^{\infty} (\rho n)^t u(c_t)$$

と定義する。 ρ^t は将来効用に対するウェイトで、 $0 < \rho < n^{-1}$ である。このウェイト ρ の意味をみるために、 $n=1$ のケースについての 2 期に渡る効用の和

$$(8) \quad V(c_0, c_1) = u(c_0) + \rho u(c_1)$$

を考える。効用の和 V の値を一定とする (c_0, c_1) の組合せは $c_0 - c_1$ 平面上での無差別曲線を描く。この限界代替率をとると

$$(9) \quad - \frac{dc_1}{dc_0} = \frac{u(c_0)}{\rho u(c_1)}$$

である。ここで限界代替率 (9) を $c_0 = c_1$ で評価すると

$$\left. \frac{dc_1}{dc_0} \right|_{c_1=c_0} = \rho^1$$

と一定の値をとる。よって、無差別曲線の傾きは45°線上で一定となる。限界代替率は今期の消費財1単位に対する主観的評価を将来財 c_1 の量で測った値である。その値 ρ^1 は1より大きい。すなわち、将来財は割引されて評価されている。 ρ^1 は割引因子 (discount factor)、 $\rho^1 - 1$ は割引率 (discount rate)あるいは時間選好率 (rate of time preferenceとよばれている。ここで $\beta = \rho^1 - 1$ とおくと、

$$(10) \quad V(c_0, c_1) = u(c_0) + \frac{1}{1+\beta} u(c_1)$$

の関係がある。従って、(8)は消費 c_0, c_1 からの効用の割引現在価値 (present discounted value)であるといえる。また(8)式を

$$V(c_0, c_1) = u(c_0) + \rho n u(c_1)$$

と修正するなら、 $u(c_0)$ は今期の消費 c_0 がもたらす一人当りの効用 $u(c_1)$ は、来期の消費 c_1 がもたらす1人当りの効用である。来期には人口が n 倍されるので、 $u(c_1)$ を n 倍している以上の準備の下で(7)式に戻ると、(7)式は、人口が毎期々に n 倍に増加してゆくときの、無限の将来に渡る効用の割引現在価値を表わすことがわかるであろう。

最適成長問題：経済計画当局が無限期間に渡る社会的効用の経済価値を最大化する問題を考えてみる。目的関数は(7)式

で、生産側の制約条件は (5) 式で与えられる。人口成長率 n_t は本質的でないので、 $n=1$ とここで仮定する。すると、

$$(I) \quad \max \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t u(c_t) \quad \text{s.t.} \quad c_t = f(k_t) - k_{t+1}, \quad \text{for } t \geq 0,$$

$$k_0 > 0 \quad \text{所与}$$

という問題を解くことになる。

我々は (I) の解 (これを 最適解 とよぶ) としての $\{k_t\}_{t=1}^{\infty}$ がどのような数列であるかに関心がある。下で述べるように最も単純なケース (I) の解は、時間 t と共に単調な数列となる。この結果は、解が存在する限りは、効用関数や生産関数の形状から独立に得られるものである。

我々の目的は、振動解、周期解あるいはカオスが生ずる可能性をできるだけ簡単なしかも経済的に意味のあるモデルで議論することにある。(I) の最適解は常に単調な数列となる。そこで次の可能性として、生産関数が

$$(11) \quad c_t = T(k_{t+1}, k_t)$$

となるケースを考える。このような生産関数は経済が少なくとも2つの産業からなるときに、それらを集計して得られるものである。例えば、第1産業で消費財を第2産業で資本財を生産し、その生産過程が

$$(12) \quad C_t = f^1(K_1, L_1)$$

$$K_{t+1} = f^2(K_2, L_2)$$

であらわされるとする。現在の資本ストック量を K_t 、総労働量を L_t として、

$$(II) \quad \max f^1(K_1, L_1)$$

$$s.t. \quad f^2(K_2, L_2) = K_{t+1}$$

$$K_1 + K_2 = K_t$$

$$L_1 + L_2 = L_t$$

を解く。この問題の最大値 C_t は K_{t+1}, K_t, L_t の関数

$$(13) \quad C_t = G(K_t, K_{t+1}, L_t)$$

として表わされる。 L_t は常に一定値 L であり、生産関数 f^1, f^2 が 1 次同次性であると仮定する。このとき (13) の両辺を L で割って (11) が得られる。(11) を効用関数に代入すると、

$$v(T(k_{t+1}, k_t))$$

となる。この関数を改めて $v(k_t, k_{t+1})$ とおく。結局、我々はより一般的には

$$(III) \quad \max \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t v(k_t, k_{t+1})$$

$$(k_t, k_{t+1}) \in D$$

$$k_0 > 0 \quad \text{所与}$$

という問題を解くことになる。ここで D は $R_+^2 = \{x \in R^2 \mid x_1 \geq 0, x_2 > 0\}$ のコンパクトかつ凸な部分集合である。(III) の最適解の性質を調べるが、その際に用いられる条件は、 T と u 、あるいは、 f^1, f^2 と u に関する条件に還元することができる。

3、最適解の性質

単調解と振動解 : v に関しては以下の仮定をする。ただし、 u_i, u_{ij} は偏微分、交差偏微分を表わす。

(A1) v は凹関数であり、 D において連続、 D の内部において C^2 であり、 $v_1 > 0, v_2 < 0, v_{11} > 0, v_{22} < 0$ が成り立つ。

このとき、次の定理が成り立つ。ただし D の内部を $\bar{D}$ と表わす。

定理 1 : (A1) が成り立つとして、 $\{K_t\}$ を (III) の最適解とする。もし、 $(k_t, k_{t+1}) \in \bar{D}$ ならば、次の結果が成り立つ。

(i) $\bar{D}$ 上のすべての点 (x, y) において、 $v_{12}(x, y) > 0$ であれば、 $k_t < k_{t+1}$ のときは必ず $k_{t+1} \leq k_{t+2}$ となる。さらに $(k_{t+1}, k_{t+2}) \in \bar{D}$ であれば、 $k_{t+1} < k_{t+2}$ が保証される。

(ii) $\bar{D}$ 上のすべての点 (x, y) において、 $v_{12}(x, y) < 0$ であれば、 $k_t < k_{t+1}$ のときは必ず $k_{t+1} \geq k_{t+2}$ となる。さらに $(k_{t+1}, k_{t+2}) \in \bar{D}$ であれば $k_{t+1} > k_{t+2}$ が保証される。

証明 Benhabib and Nishimura [1985] をみよ。

定理 1 の (i) は $\{K_t\}$ が単調な数列となることを、(ii) は $\{K_t\}$ が振動する数列となることを意味する。この結果から周期解が存在するとすれば、 $v_{12} < 0$ のケースである。また、カオスが生ずるとしてもやはりこのケースである。

周期解の存在 次に、周期解の存在を議論する。 D の内部上の解について、オイラー V 方程式

$$(14) \quad v_2(k_{t-1}, k_t) + \rho v_1(k_t, k_{t+1}) = 0$$

が成り立つ。(14)の解として、

$$(15) \quad v_2(k(\rho), k(\rho)) + \rho v_1(k(\rho), k(\rho)) = 0$$

をみたす $k(\rho)$ を 定常解 とよぶ。

(A2) 任意の $\rho \in [\delta, 1]$ に対して、定常解 $k(\rho)$ が存在し $(k(\rho), k(\rho)) \in D$ である (但し、 $\delta < 1$)。

(A3) 任意の $(x, y) \in D$ に対して、 $u_{12}(x, y) < 0$ である。

(A4) 適当な値 $\underline{\rho}$ 、 $\bar{\rho}$ が存在し、 $[\underline{\rho}, \bar{\rho}] \subset [\delta, 1]$ でありかつ、次の (i) (ii) が成り立つ。

$$(i) \quad v_{22}(k(\bar{\rho}), k(\bar{\rho})) + \bar{\rho} v_{11}(k(\bar{\rho}), k(\bar{\rho}))$$

$$< (1 + \bar{\rho}) v_{12}(k(\bar{\rho}), k(\bar{\rho}))$$

$$(ii) \quad v_{22}(k(\underline{\rho}), k(\underline{\rho})) + \underline{\rho} v_{11}(k(\underline{\rho}), k(\underline{\rho}))$$

$$> (1 + \underline{\rho}) v_{12}(k(\underline{\rho}), k(\underline{\rho}))$$

以上の仮定のもとにある $\rho^* \in [\underline{\rho}, \bar{\rho}]$ に対して (III) の最適解が周期性を持つことがいえる。

定理 2 : (A1) - (A4) が成り立つとする。このとき、ある $\rho^* \in [\underline{\rho}, \bar{\rho}]$ が存在して、(III) は周期 2 の解を持つ。

証明 Benhabib and Nishimura [1985]

これまでの仮定のうち説明を要するのは (A4) であろう。(A4) (i) は u が凹関数でかつ $v_{11} \neq v_{22}$ であれば十分 1 に近い ρ に対してみたされる。また v が狭義の凹関数であれば、やはり、十分 1 に近い ρ に対してみたされる。またそのとき、定常解は鞍点なる。すなわち、初期値 k_0 が定常解に十分近いとき、最適解は定常解に収束する。これを定常解の局所安定性とよぶ。(A4) (ii) は ρ を $\underline{\rho}$ まで減少させると定常解が局所不安定となることを保証する。

具体例 : 以下の例は Sutherland [1979] によるものである。

$$(16) \quad u = 9k_t^2 - 11k_{t+1}k_t - 4k_{t+1}^2 + 43k_{t+1}$$

この例に対しては (A1) - (A4) がみたされ、 $\rho^* = \frac{1}{3}$ のとき周期解となる。Samuelson [1973] による例を若干修正した

$$(17) \quad u = k_t^\alpha (1 - k_{t+1})^\beta$$

も $\alpha + \beta < 1, \frac{1}{2} < \alpha < k, \alpha < \beta < \frac{1}{2}$ に対して同様の性質を持

つ。

4. カオス : 問題 III の最適解が周期性を持つケースについては十分条件がえられた。次にカオスとなるケースであるが、最適成長問題についてカオスが生じる十分条件を v に関する条件として表現することは容易ではない。Deneckere and Pelikan [1986] は Li and Yorke [1975] の意味で最適解がカオスを成す例をあげている。すなわち $D = [0, 1.7] \times [0, 1.7]$ の上で定義された関数

$$(18) \quad u = xy - x^2y - \frac{1}{2}y + 0.075y^2 + 100/3 \quad x - 7x^2 + 4x^3 - 2x^2$$

に対しては、 $\beta = 0.01$ のときに周期 3 の周期解が存在することを証明した。特定の解が周期 3 の周期となることは、オイラー方程式を用いて簡単に確かめることができる。

また、Boldrin and Montrucchio [1986] は R_+ のコンパクトで凸な部分集合 K に対して、 $D = K \times K$ とし、任意の C^2 関数 $\theta : K \rightarrow K$ に対し、

$$v(k, \theta(k)) = \max \{v(k, k^1) \mid k^1 \in K\}$$

をみたす凹関数 v が存在するという定理を用いて、 ρ が十分小さいときに問題 (III) の最適解がカオスとなすケースがあることを証明した。

連続時間モデル : 以上は離散時間形の最適経済成長モデルであった。連続時間形のモデルでは、一般には、 $\rho > 0$ に対して

$$(IV) \max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} u(\dot{k}(t), k(t)) dt,$$

s. t. $k(0) = k_0$ 所与

$$(\dot{k}(t), k(t)) \in D$$

と問題を定式化できる。ただし、 D は $R_+^1 \times R^n$ のコンパクトで凸な部分集合、 u は D 上で定義された関数である。 $n=1$ のケースには (IV) の最適解は単調な変動しかしないので、周期性を持つためには $n \geq 2$ とする必要がある。Benhabib and Nishimura [1981] は $n=2$ のケースについて、このモデルの背後にある生産関数と効用関数を明示して、定常解が一意的なモデルにおいて、リミットサイクルの存在を証明した。その方法は、一意的な定常解が安定から不安定に変わり、そのヤコビアンが常に複素根を持つことから、ホップの分岐定理を用いて証明するというものである。

参考文献

- J. Benhabib and K. Nishimura, "Competitive Equilibrium Cycles", Journal of Economic Theory 35 (1985), p. 284-306
- J. Benhabib and K. Nishimura, "On the Uniqueness of Steady State in an Economy with Heterogeneous Capital Goods", International Economic Review, 20 (1979), p. 59-82
- J. Benhabib and K. Nishimura, "The Hopf Bifurcation and Stability of Closed Orbits in Multisector Models of Optimal Economic Growth", Journal of Economic Theory 21, (1979), p. 421-p. 444
- M. Boldrin and L. Montrucchio, "On the Indeterminacy of Capital accumulation Paths", Journal of Economic Theory 40, (1986), p. 26-39
- W. D. Dechert and K. Nishimura, "A complete Characterization and Optimal Growth Paths in an aggregate model with a non-concave Production Function", Journal of Economic Theory 31, (1983), p. 332-354.
- R. Deneckre and S. Pelikan, "Competitive Chaos", Journal of Economic Theory 40, (1986), 13-25
- T. Li and J. Yorke, "Period Three Implies Chaos", American Mathematical Monthly 82, (1975), p. 985-992
- P. A. Samuelson, "Optimality of Profit, Including Prices under Ideal Planning", Proceedings National Academy of Science 70 (1973), p. 585-589
- W. A. Sutherland, "On Optimal Development in Multi-sectoral Economy: The Discounted Case", Review of Economic Studies 46, (1979), p. 585-589