

技術転換の最適タイミングと技術投資評価

Optimal Timing of Technology Switch and Evaluation of Technology Investment under Uncertainty

東洋大学経営力創成研究センター 研究員 董 晶輝

要旨

この論文では、技術転換および技術投資評価のダイナミック・モデルを提案する。連続時間モデルを用いて、技術転換の最適タイミングの導出について議論し、先に1回のみの技術転換を考える場合について、最適タイミングの決定と技術評価の明示的な解を示す。続いて、将来複数回の技術転換を考える場合に拡張する。このモデルでは、将来技術転換は現在の技術転換の最適タイミングに影響を与えず、将来技術転換の回数が多いほど利潤の現在価値が大きく評価されることが示される。さらに、市場の不確実性を表すパラメータの値および技術条件の変数値の変化が技術転換の最適タイミングに如何に影響を及ぼすのか、将来技術転換の回数が利潤の現在価値に対して如何に影響を及ぼすのかについて数値例で分析する。

キーワード(Keywords) : 技術転換(technology switch)、投資の不可逆性(investment irreversibility)、不確実性(uncertainty)、最適タイミング(optimal timing)、利潤の現在価値(present value of profit)

Abstract

In this paper we develop a dynamic model of technology switch and technology investment valuation under uncertainty. Using continuous time framework, we explain how to derive the optimal timing of technology switch, and we show a closed-form solution for the optimal timing decision and technology investment value in the case of one technology switch, then extends to the case of sequential technology switches. We find that the optimal timing is not influenced by future's technology switches, and the present value of profit rise if technology switch occurs more frequently in the future. Furthermore, use numerical examples, we analyze how the optimal timing is affected by changes in parameter values reflecting market uncertainty and technology conditions, how the present value of profit is affected by times of technology switch in the future.

はじめに

技術改良の積み重ねにより時々技術革新が起こり、企業は生産性の向上と競争力の維持を図るために、新技術への転換をしなければならない。新技術への転換の意思決定問題は時代の移りとともに重要性が増してきている。最近では、特に情報通信分野

での技術の発展が目覚しく、技術革新も頻繁に起こり、数年前技術が過去のものとなるケースも多い。新技術への転換は設備の更新などで投資支出が必要で、殆どの場合、投資は不可逆である。また、市場の不確実性が増してきた現在では、技術転換の意思決定において、どの技術を採用するのか、いつ投資を実行するのか、重要な問題となっている。

技術革新が起きてから、普及するまでにかかなりの時間差があることがしばしば観察される。その原因は主に技術転換の経済性と漸進性の二つと考えられる。経済性問題は、技術転換のための投資支出に見合う収益を得られるか否かで判断されるので、収益が十分でない場合には、技術転換を見送るのが合理的であると認識される⁽¹⁾。漸進性の問題は、技術の吸収能力が段階的に高めていくため、複雑で高度な技術へ一気に転換することができない現実から起きる⁽²⁾。新技術採用の意思決定については、McCardle (1986)は技術革新の発生プロセスとそのタイミングに着目するのではなく、利用可能な技術から得られる収益性が不確実な場合、技術の採用と却下のタイミングについて議論している。Bhattacharya, Chatterjee, and Samuelson (1986)は技術の拡散と企業間の相互影響を考慮して、技術の採用と却下のタイミングを連続的な意思決定モデルで議論している。技術革新のプロセスが不確実的で、さらに技術進歩が速い分野では、ある新技術を採用して投資を行った場合、その後の技術進歩の結果によって採用した技術が採算に合わなくなる場合もある。したがって、企業は早過ぎた新技術の採用による期待損失と、より効率的な新技術を待つことより発生する機会費用を勘案しながら複雑な状況において意思決定しなければならない。この場合、技術採用のタイミングは技術進歩の速さと効率性向上の大きさに対する期待から決まる。Balcer and Lippman (1984)と Farzin, Huisman, and Kort (1998)は、このような技術進歩が不確実な場合、技術転換の最適タイミングについて議論している。Doraszelki (2001)は Farzin et al (1998)の誤りを指摘し、続いて Doraszelski (2004)ではさらに議論を展開している。Huisman (2001)は Farzin et al (1998)をもとに展開した一連の研究をまとめている。これらのモデルでは、技術革新はジャンプ・プロセスに従い、生産関数がこのプロセスと線形関係にあると仮定して、技術のレベルが最適水準に到達した場合に直ちに投資して、新技術へ転換することを考えている。

以上でみたように、既存の研究では、主に技術転換の経済性に着目して技術採用のタイミングについて議論し、技術転換の漸進性については問題にしていない。この論文では、技術転換の経済性ととともに漸進性も考慮するモデルを提案する。ここでは、技術の進歩は確定的で、技術の採用はレベルの低いものからレベルの高いものへと漸進的な場合、将来の技術転換も考慮した各段階での技術転換のタイミングおよび投資価値について議論する。技術投資の意思決定では技術水準のほかに市場の状況にも影響される。新技術が利用可能であっても、企業は直ちにこれを使用するのではなく、製品の需要を考慮して技術転換の投資を行っている。また、技術革新により製品の性能が高くなる一方、価格が下がる現象も観察される。これは技術革新が製品の性能を向上させるだけでなく、生産コストの削減にもつながっていると考えられる。この論文では、技術転換の経済性を製品の需要と生産コストで捉え、企業が現在使用中の

技術から利用可能な新技術へ段階的に転換する場合、各段階での技術転換の意思決定について考える。製品の需要は価格弾力性一定の需要関数に従い確率的にシフトするものとし、生産コストは技術水準の減少関数であるとする。ある技術を使用することにより製品の単位あたり生産コストが決まり、企業は需要関数のもとで利潤が最大になるように生産量を決める。技術転換の意思決定問題は、利潤の現在価値が最大になるように、需要のシフト水準を変数として技術転換の最適タイミングを決めることとなる。

論文は次のように構成される。第1節では、モデルの説明を行い、技術変換を考慮する場合の利潤の現在価値の一般式を導出する。第2節では、技術転換の最適タイミングの導出について議論し、利潤の現在価値の計算式を示す。まず、1回のみ技術転換を考える場合について、最適タイミングを求め、利潤の現在価値の計算式を示す。次に、2回の技術転換を考える場合について議論したうえで、数回の技術転換を考える場合と展開し、一般的な結果を導く。第3節では、数値例を示し、市場の不確実性を表すパラメータの値と技術条件が最適タイミングと利潤の現在価値に与える影響について分析する。第4節では結論と今後の展開について述べる。

1. モデル

ある企業が独自の技術を利用して生産を行い、この製品の需要は

$$Q_t = \theta_t P^{-\varepsilon} \quad (1)$$

であるとする。 $\varepsilon > 1$ は需要の価格弾力性であり、 θ_t は需要のシフトを表す確率変数で、その変動は幾何ブラウン運動

$$d\theta_t = -\mu\theta_t dt + \sigma\theta_t dW \quad (2)$$

に従うとする。 $\mu \geq 0$ は製品の普及による需要の減少率(技術の減耗)を表し、 $\sigma > 0$ は景気の変動や他の競合製品の開発などによる需要の不確実性の大きさを表す。

製品の単位あたり生産コストを $K^{-\gamma}$ で表すこととし、 K を技術レベルと呼ぶ。 $\gamma > 0$ とすると、生産コストは技術レベルの減少関数となる。企業は独自の技術で生産を行っているため、利潤が最大になるように生産量を決め、時刻 t で最大化された利潤率は、

$$\pi_t = \omega K^\lambda \theta_t \quad (3)$$

となる⁽³⁾。ここで、

$$\omega = \frac{1}{\varepsilon} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)^{(\varepsilon-1)}, \quad \lambda = \gamma(\varepsilon-1)$$

である。 $\lambda < 1$ とし、利潤は技術レベルの凹関数となる。 K^λ を技術効率性と呼ぶことにする。ある技術レベルで生産を永久に続けた場合、割引率を r とすると、利潤の現在価値は

$$E_0 \left[\int_0^\infty \omega K^\lambda \theta_t e^{-rt} dt \mid \theta_0 = \theta \right] = \frac{\omega K^\lambda \theta}{r + \mu} \quad (4)$$

となる。(4)式の右辺からわかるように、利潤の現在価値は需要のシフトを表す確率変数の現在の値と線形関係にあり、この値が大きいほど、利潤の現在価値が高くなる。

技術は常に改良され、その積み重ねにより技術革新が起こり、新技術の利用が可能となる。現在使用中の技術よりレベルの高い新技術を利用することで、利潤を増大させることができるので、企業は新技術への変換を望む。しかし、現在使用中の技術から新技術への転換は投資支出が必要で、投資は不可逆的(投資した技術の使用を途中でやめても、投資資金の回収は不可能)であるため、さらに、将来の需要が不確実であり、企業は新技術への投資を慎重に行わざるを得ない。そこで、企業は需要のシフトを表す確率変数の値を観察して、新技術への転換のタイミングを考える。

確率変数の現在の値が θ で、将来ある値 $\theta^* > \theta$ に達したときに、直ちに新技術への変換する場合の利潤の現在価値を $V(\theta)$ とすると、次の微分方程式

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \theta^2 V'' - \mu \theta V' + \omega K^\lambda \theta - rV = 0 \quad (5)$$

が得られる。この微分方程式の一般解は

$$V(\theta) = A\theta^\alpha + B\theta^\beta + \frac{\omega K^\lambda \theta}{r + \mu}$$

である⁽⁴⁾。AとBは境界条件から決まる係数で、 $\alpha > 1$ と $\beta < 0$ は二次方程式

$$f(x) = \frac{1}{2} \sigma^2 x(x-1) - \mu x - r = 0$$

の正負2根である。確率変数 θ が一旦零になった場合、その後も永久に零にとどまる性質から、境界条件 $V(0) = 0$ を満たす必要がある。 $\beta < 0$ であるから、 θ^β は $\theta = 0$ で無限大となる。境界条件 $V(0) = 0$ を満たすには、係数 $B = 0$ でなければならない。したがって、

$$V(\theta) = A\theta^\alpha + \frac{\omega K^\lambda \theta}{r + \mu} \quad (6)$$

となる。(6)式右辺の第2項はある技術レベルで永久に生産を継続した場合の利潤の現在価値であり、第1項は将来新技術への転換により得られる利潤の現在価値である。

2. 技術転換の最適タイミング

企業は利潤の現在価値が最大になるように、技術転換の最適タイミングを決める。技術転換の最適タイミングは θ_t がある値に最初に到達する時刻であり、この値を最適転換点と呼ぶ。この節では、最適転換点を求める方法について議論し、最適転換点お

よび利潤の現在価値のいくつかの性質を明らかにする。考え方を明瞭にするため、まず、1回だけの技術転換を考える場合について議論し、続いて、2回の技術転換を考える場合に議論を展開し、最後に、議論を一般化する。

2.1 1回の転換のみを考える場合

ここでは、転換が1回だけの場合について、最適転換点 θ^* の値を求める。現在使用中の技術レベルは K_0 であり、新技術レベルは $K_1 (> K_0)$ であるとする。転換前の現在時点で $\theta_0 = \theta$ とし、利潤の現在価値を $V_0(\theta)$ とすると、(6)式により

$$V_0(\theta) = A\theta^\alpha + \frac{\omega K_0^\lambda \theta}{r + \mu}$$

となる。転換後の τ 時点での利潤の現在価値を $V_1(\theta_\tau)$ とすると、次の転換を考えないので、(6)式右辺の第1項は零となり、

$$V_1(\theta_\tau) = \frac{\omega K_1^\lambda \theta_\tau}{r + \mu}$$

となる。

新技術への転換のための投資額を I とする。最適転換点 θ^* では、次の価値対等条件と滑らかな張り合わせ条件

$$V_0(\theta^*) = V_1(\theta^*) - I \quad (7)$$

$$V_0'(\theta^*) = V_1'(\theta^*) \quad (8)$$

をみだす。(7)式と(8)式から θ^* と A を求めると、

$$\theta^* = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{(r + \mu)I}{\omega(K_1^\lambda - K_0^\lambda)} \quad (9)$$

$$A = \frac{I^{1-\alpha}}{\alpha - 1} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{\omega(K_1^\lambda - K_0^\lambda)}{r + \mu} \right)^\alpha \quad (10)$$

となる。(9)式右辺の $(r + \mu)I / (\omega(K_1^\lambda - K_0^\lambda))$ は正味現在価値法での投資の現在価値が零のときの転換点であり、投資コストの増加関数で、技術効率性の格差の減少関数である。すなわち、投資コストが低いほど、技術効率性の格差が多きいほど、新技術への転換がしやすくなる。 $\alpha / (\alpha - 1)$ は1より大であり、製品市場の不確実性のパラメータの値の関数である。したがって、最適転換点は投資の現在価値が零以上になるように決められる。(10)式の右辺は正であるから、最適転換点 θ^* に達したとき技術転換を行うことが正の価値を持つことがわかる。

2.2 2回の転換まで考える場合

この節では、次回の技術転換も考慮に入れて、最適転換点について考える。技術は日々進歩しているが、1回の技術革新から次回の技術革新まで、一般に長い時間を要する。今回の技術転換から次回の技術転換できるまでにはかなりの時間を要する場合もあるが、議論を簡単にするため、次回の最適転換点に達したときに、すでに技術革新が可能であると仮定する。ここで、次回の技術革新後の技術レベルを K_2 とし、転換するための投資コストを I_2 とする。1回目と2回目転換後の利潤の現在価値をそれぞれ $V_1(\theta)$ と $V_2(\theta)$ とすると、

$$V_1(\theta) = A_1\theta^\alpha + \frac{\omega K_1^\lambda \theta}{r + \mu}, \quad V_2(\theta) = \frac{\omega K_2^\lambda \theta}{r + \mu}$$

となる。2回目の最適転換点 θ_2^* では、次の境界条件

$$V_1(\theta_2^*) = V_2(\theta_2^*) - I_2$$

$$V_1'(\theta_2^*) = V_2'(\theta_2^*)$$

を満たすことから、

$$\theta_2^* = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{(r + \mu)I_2}{\omega(K_2^\lambda - K_1^\lambda)} \quad (11)$$

$$A_1 = \frac{I_2^{1-\alpha}}{\alpha - 1} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{\omega(K_2^\lambda - K_1^\lambda)}{r + \mu} \right)^\alpha \quad (12)$$

となる。次に1回目の最適転換点を求める。転換前の利潤の現在価値は

$$V_0(\theta) = A_0\theta^\alpha + \frac{\omega K_0^\lambda \theta}{r + \mu}$$

であり、1回目の最適転換点 θ_1^* では、次の境界条件

$$V_0(\theta_1^*) = V_1(\theta_1^*) - I_1$$

$$V_0'(\theta_1^*) = V_1'(\theta_1^*)$$

を満たすので、 θ_1^* と A_0 は

$$\theta_1^* = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{(r + \mu)I_1}{\omega(K_1^\lambda - K_0^\lambda)} \quad (13)$$

$$A_0 = A_1 + \frac{I_1^{1-\alpha}}{\alpha - 1} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{\omega(K_1^\lambda - K_0^\lambda)}{r + \mu} \right)^\alpha \quad (14)$$

となる。

(11)式と(13)式から、各回の最適転換点は将来の技術転換の有無に関係なく、現在使用中の技術と転換可能な技術のレベルおよび転換するための投資コストによって決まることがわかる。 $K_1^\lambda - K_0^\lambda > K_2^\lambda - K_1^\lambda$ であれば、より高いレベルの技術への転換がより多くの投資が必要と考えて、すなわち、 $I_2 \geq I_1$ であれば、 $\theta_2^* > \theta_1^*$ となり、1回目と2回目の技術転換の間には時間が必要となる。(12)式の右辺は正であり、(14)式右辺の第2項も正であり、これは1回の転換しか考慮しない場合の(10)式の右辺に相当するもので、したがって、(14)式右辺は(10)式右辺より大である。したがって、将来の技術転換も考慮すると利潤の現在価値がより高く評価されることになる。

2.3 一般化

この節では、数回の転換を考慮して最適転換点を求める問題に一般化する。 N 回の技術転換を考え、現在使用中の技術から将来にわたって N 回技術革新後の技術レベルを K_n ($n=0,1,\dots,N-1,N$)とすると、現在から将来各回の技術転換後の利潤の現在価値は

$$V_n(\theta) = A_n \theta^\alpha + \frac{\omega K_n^\lambda}{r + \mu}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, N$$

となる。各回の技術転換するための投資コストを I_n ($n=1,2,\dots,N-1,N$)とし、2.2節と同様な方法を用いて、 N 回目の技術転換から $N-1,\dots,2,1$ に逆順に求めていくと、 $A_N = 0$ であるから、

$$\theta_n^* = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{(r + \mu) I_n}{\omega (K_n^\lambda - K_{n-1}^\lambda)}, \quad n = N, N-1, \dots, 2, 1 \quad (15)$$

$$A_n = \sum_{i=N}^{n+1} \frac{I_i^{1-\alpha}}{\alpha - 1} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{\omega (K_i^\lambda - K_{i-1}^\lambda)}{(r + \mu)} \right)^\alpha, \quad n = N-1, N-2, \dots, 1, 0 \quad (16)$$

となる。

3. 数値例による分析

この節では、数値例を用いて市場の不確実性を表すパラメータの値と技術条件が最適転換点に及ぼす影響について分析し、さらに技術転換の回数と利潤の現在価値の関連について分析する。数値例で用いるパラメータの基準値は表1の通りである。技術転換のための投資コスト I_n を一定とし、技術革新による技術レベルの上昇を一定とした。表2は技術転換回数10回までの各回の最適転換点をまとめたものである。技術レベルの上昇が等間隔で、技術転換のための投資コストが一定の場合でも、技術転換の回数を重ねるにつれ最適技術転換点は高くなっていく。これは、歴史の浅い技術においては比較的頻りに技術革新が起り、新技術へ転換しやすく、新技術への転換を繰り返す

返してきた成熟した技術についてはかなり需要が拡大しているときにしか新技術への転換をしないことを示している。

表1 パラメータの基準値

パラメータ	値	パラメータ	値
r	0.05	γ	1.2
μ	0.05	K_0	1
σ	0.5	I_n	50
ε	1.5	$K_{n+1}-K_n$	0.5

表2 各回の最適技術転換点

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_n	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
θ_n^*	120.47	138.08	152.80	165.64	177.12	187.58	197.23	206.22	214.65	222.61

各回の最適転換点とその後の技術転換に影響されないことから、1回目の技術転換の最適転換点 θ_1^* のみについて分析する。図1では、横軸に需要の不確実性の大きさ σ 、縦軸に最適転換点 θ_1^* をとり、 $\mu = 0, 0.05, 0.1$ の場合の3つ曲線を示した。 μ および σ の増大は両方とも θ_1^* を上昇させることが示されている。製品の需要の減少率 μ が大きい場合、あるいは市場の不確実性 σ が大きい場合に、企業はより需要水準が高いときに技術転換の投資を行うのが最適であることを示している。図2では、横軸に1回目の技術転換後の技術レベル K_1 、縦軸に最適転換点 θ_1^* をとり、技術転換するための投資コスト $I = 40, 50, 60$ の場合の3つ曲線を示した。 K_1 の増大および I の減少は θ_1^* を下げる効果があるが、 K_1 が比較的に小さい範囲では、 K_1 の増大が θ_1^* を大きく下げるが、 K_1 がある程度大きくなると、 K_1 は増大しても θ_1^* はほとんど変わらない。これは、技術の進歩による生産コスト削減は限度があることを示している。

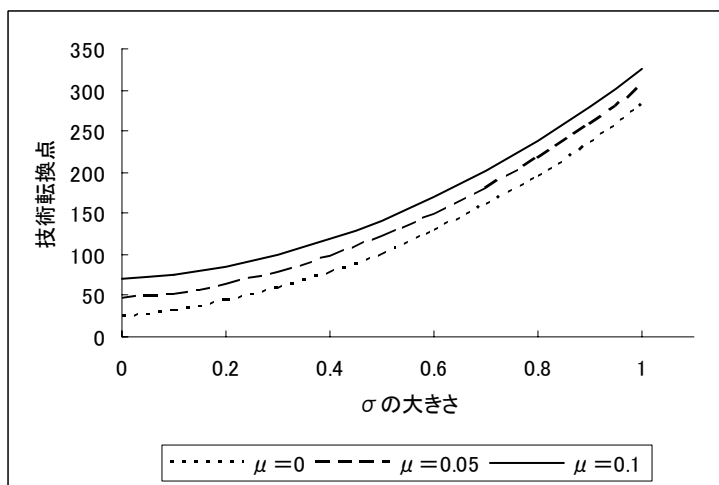


図1 μ および σ と最適転換点の関係

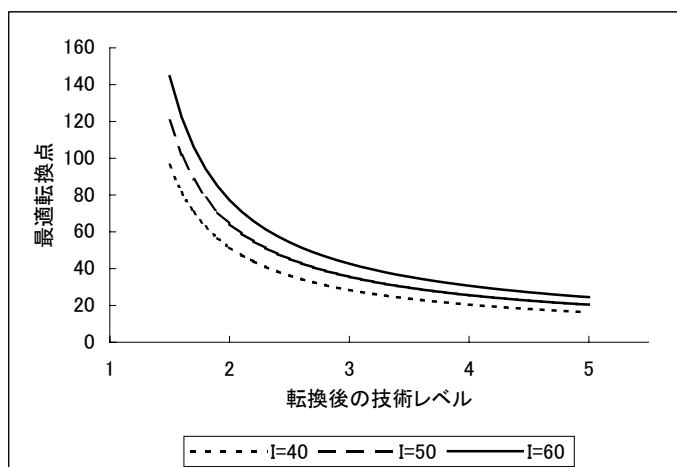


図2 I および K_1 と最適転換点の関係

次に、将来技術転換の回数 N および確率変数の現在の値 θ と利潤の現在価値との関係を分析してみる。図3では、横軸に確率変数の現在の値 $\theta (\leq \theta_1^*)$ 、縦軸に利潤の現在価値 $V_0(\theta)$ をとり、将来技術転換の回数 $N=1$ から $N=10$ の場合の曲線を示した。確率変数の現在の値 θ が大きくなるにつれ利潤の現在価値 $V_0(\theta)$ も大きくなり、また、将来技術転換の回数 N が大きいほど利潤の現在価値が大きくなる。ただし、将来技術転換の回数 N が大きくなるにつれ利潤の現在価値 $V_0(\theta)$ の増分が小さくなる。 θ の値が小さい場合、すなわち、需要の水準がかなり低い場合には、遠い将来の技術転換による利潤の現在価値が小さくなる。

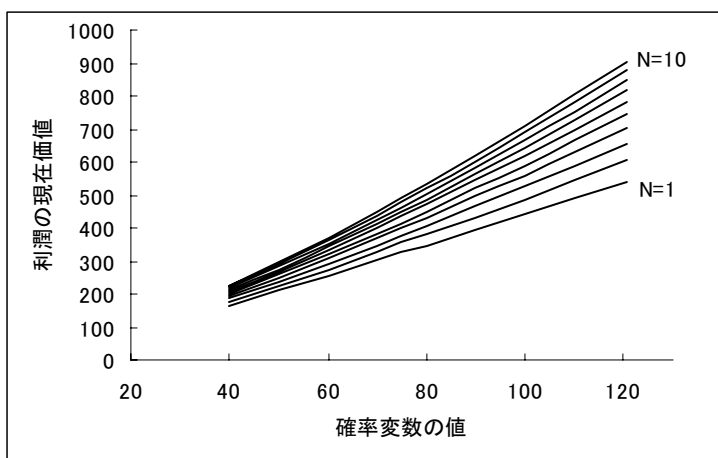


図3 θ および N と利潤の現在価値との関係

4. 結論

この論文では、製品の需要が不確実な場合、企業が現在使用中の技術から漸進的に使用可能な新技術への転換の意思決定について、技術転換のタイミングおよび技術投資評価のダイナミック・モデルを提案した。連続時間モデルを用いて、技術転換の最適タイミングの導出について議論し、先に1回だけの技術転換を考える場合について、最適タイミングの決定と技術投資評価の明示的な解を示し、さらに、将来複数回の技術転換を考える場合に拡張した。将来の技術転換は目前の技術転換の最適タイミングに影響を与えず、将来技術転換の回数が多いほど利潤の現在価値が大きく評価されることは代数解より示された。数値例の分析では、技術の減耗率および需要の不確実性の増加は両方とも技術転換点の水準を上昇させることが明らかにされた。また、新技術のレベルが高いほど、技術転換するための投資コストが低いほど技術転換点が下がるが、技術転換後の技術レベルの高さによって効果が異なる。確率変数の現在の値が大きいほど、将来技術転換の回数が多いほど利潤の現在価値が大きくなる。ただし、将来技術転換の回数が大きくなるにつれ利潤の現在価値の増分が小さくなる。需要の水準がかなり低い場合には、遠い将来の技術転換による利潤の現在価値が小さくなる。

このモデルは技術投資の経済性とともな漸進性も考慮することで、技術採用の意思決定モデルとして実践的な意味を持っている。例えば途上国が技術を導入する際、あるいは先進国企業が途上国で生産を行う際、技術の吸収能力を考えて段階的に高いレベルの技術へと転換していくとともに、十分な投資収益を得られるように最適タイミングを考えなければならない。このモデルはこのような場合の基本的な意思決定の枠組みを提示している。ただし、それぞれ国や地域の発達の状況や時代の変化により、技術を取り巻く状況が変化してきているので、技術転換は必ずしも今までの技術進歩のすべての段階を踏む必要はないと考えられる。今後の研究としては、技術進歩のある段階を飛び越して技術を採用する場合のモデルを考えている。

【注】

- (1) 例えば、鉄道輸送技術は20世紀の初頭ではすでにディーゼル動力を使用する技術が確立され、その後、電氣化が進み、高速輸送技術も発達した。しかし、ディーゼル動力はいまだに広く利用されている。
- (2) 例えば、途上国が半導体の製造技術を導入する際には、最初から集積度の高いものを製造することは大変困難で、まず集積度の低い技術を導入し、技術者の能力向上につれ徐々に集積度の高い技術へ転換していく。
- (3) 生産量が q のときに、価格は $P = (q/\theta)^{-1/\varepsilon}$ となる。このときに利潤は $\pi = Pq - K^{-\gamma} q$ であり、 π を最大にする q を求め、代入すると(3)式を得る。
- (4) 詳細は Dixit and Pindyck (1994) を参照。

【参考文献】

- Balcer, Y., and S. Lippman, 1984, "Technological Expectations and Adoption of Improved Technology", *Journal of Economic Theory*, Vol. 34, pp292-318.
- Bhattacharya, S., K. Chatterjee, and L. Samuelson, 1986, "Sequential Research and the

- Adoption of Innovations”, *Oxford Economics Papers*, Vol. 38, pp219–243.
- Dixit, A. K., and R. S. Pindyck, 1994, *Investment Under Uncertainty*, Princeton.
- Doraszelski, U., 2001, “The Net Present Value Method Versus the Option Value of Waiting: A Note on Farzin, Huisman and Kort (1998)”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 25, pp1109–1115.
- Doraszelski, U., 2004, “Innovations, Improvements, and the Optimal Adoption of New Technologies”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 28, pp1461–1480.
- Farzin, Y. H., K. J. M. Huisman, and P. M. Kort, 1998, “Optimal Timing of Technology Adoption”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 22, pp779–799.
- Huisman, K. J. M., 2001, *Technology Investment: A Game Theoretic Real Options Approach*, Kluwer Academic Publishers.
- McCardle, K. F., 1985, “Information Acquisition and the Adoption of New Technology”, *Management Science*, Vol. 31, pp1372–1389.