技術開発型企業の投資戦略
- イノベーションに対する技術改良を考慮した投資モデル -

02203650 慶應義塾大学大学院 * 佐藤 豊 SATO Yutaka
01505910 慶應義塾大学 枇々木 規雄 HIBIKI Norio

1 はじめに

本研究では、技術開発型企業がイノベーションを生み出していく状態をモデル化し、開発競争下にある二企業の投資問題に取り入れて、リアルオプション・アプローチにより解析する。

近年、複占市場の技術開発競争下にある二企業の新技術採用問題を取り扱う研究が増えているが、いずれも製品の「需要」や「価格」などに不確実性を仮定しており、「技術効率 (technology-efficiency)」に重点を置いてモデル化しているものは殆どない。

一方、単一企業の技術効率性の先行研究には Farzin et al.[1]、Doraszelski[2] などがあり、「技術革新 (innovation)」およびそこから派生する「技術改良 (improvement)」の到着が技術効率へ離散的なショックを与えると考えて、ジャンプ過程によるモデル化を行っている。

本研究では技術効率の不確実性のモデル化については、Farzin et al.[1] を基礎とし、さらに改良したモデルを用いることにより、複占市場における「リーダー・フォロワーゲーム」の解析を行う。

2 モデル化

2.1 技術効率と採用時刻の仮定

技術開発型企業には数年先までの「ロードマップ」があり、その計画時点に適合した技術レベルの製品をいかにタイミングよくリリースできるかが収益に大きく影響する。

ロードマップはライバル企業の動向を勘案したものであるから、競合関係にある二企業のリリース順序は両者の経営計画完了時点で事前に決定する。そこで、先に新技術効率へ移行する企業 (リーダー) の採用時刻を T_A、後から行う企業 (フォロワー) の採用時刻を T_B とし、以下の不等式を満たすとする[1]。

$$T_A < T_B$$

技術は日々進歩しているので、フォロワー企業がライバル企業より技術効率の低い製品をリリースすることはない。そこで、新技術効率へスイッチするときのリーダーの最適な技術効率を θ_A^*、フォロワーの最適な技術効率を θ_B^* とし、以下の不等式を満たすとする。

$$\theta_A^* < \theta_B^*$$

[1] 以下の変数において、両企業を区別する必要のある場合のみ、A と B の添字を付与する。

企業は技術効率 θ がどのように収益に結びつくのか把握する必要がある。そこで、企業収益の分析の際によく使われる以下の生産関数を定義する。

$$h(x,\theta) = \theta x^a$$

ただし、a は弾力性を表す定数 $(0 < a < 1)$、θ は時刻 t における技術効率である。先行研究 [1, 2] も上記の生産関数を用いている。

2.2 技術効率のモデル化

時刻 t における技術効率 $\theta(t)$ は、技術革新 $\theta^{INV}(t)$ と技術改良 $\theta^{IMP}(t)$ の和からなると仮定する。

$$\theta(t) = \theta_0 + \theta^{INV}(t) + \theta^{IMP}(t)$$

$N(t)$ を期間 $[0,t)$ に到着する技術革新の数とし、技術革新を次式で仮定する。

$$\theta^{INV}(t) = \mathrm{Pr}(0 < N(t) \le \lfloor \lambda t \rfloor) \textstyle\sum_{n=1}^{N(t)} u_n$$

ただし、u_n は各々独立で一様分布 $U(0,\bar{u})$ に従う。λ は技術革新の到着率である。

Doraszelski[2] は技術改良パラメータも同様にジャンプ過程を使いモデル化したが、本研究では「ある漸近線に近づく学習曲線」として次式でモデル化する。

$$v(\tau_n) = k\bar{u}(1 - e^{-\mu\tau_n})$$

ただし、τ_n は前回の技術革新があった時刻からの経過時間とする。$0 \le k < 1$ とし、技術改良は技術革新を超えないものとする。また、μ は「学習スピード」の測度に相当する。よって、技術改良は次式で仮定する。

$$\theta^{IMP}(t) = \textstyle\sum_{n=1}^{N(t)} v(\tau_n)$$

2.3 企業収益のモデル化

企業の瞬間的な収益 $\pi(\theta)$ は生産関数を用いて、

$$\pi(\theta) = \max_x \{p \cdot h(x,\theta) - wx\}$$

とする。ただし、p は 1 単位の価格、w は 1 単位のコストである。これより、$x = \left(\frac{ap\theta}{w}\right)^{\frac{1}{1-a}}$ が求まり、

$$\pi(\theta) = \left\{(1-a)\left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{a}{1-a}} p^{\frac{1}{1-a}}\right\}\theta^{\frac{1}{1-a}} = \phi\theta^b$$

となる。ただし、$\phi = (1-a)\left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{a}{1-a}} p^{\frac{1}{1-a}}, b = \frac{1}{1-a}$ である。

先行研究 [1, 2] は一企業の場合であり、本研究ではこの生産関数をそのまま使うことはできないため、次のように拡張する。$\pi_{10}(\theta)$ を自企業が新技術効率の採用に成功し、ライバル企業はまだ採用していない場合の生産関数とする。この場合、

$$\pi_{10}(\theta) = \pi(\theta)$$

とする。$\pi_{11}(\theta)$ は両企業とも新技術効率の採用に成功している場合の生産関数とし、この場合価格が当初の p から $p(1-d)$ に下落すると仮定する。ただし、d はライバル企業の参入による製品価格の下落率とする。

2.4 最適な技術効率の導出

初期時点において企業は技術効率 θ_0 を用いて瞬間的な利益フロー $\pi(\theta_0)$ を得ている。時間を経るごとに技術効率は増加していくが、企業が新しい技術効率にスイッチして、その恩恵を受けるのは一度だけとする。

Farzin et al.[1] の θ^* の導出方法について、以下に述べる。本研究における技術改良がない場合に相当する。

技術効率は以下のジャンプ過程に従う。

$$d\theta = \begin{cases} u & \text{確率 } \lambda dt \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

よって、$V(\theta)$ を企業の期待収益の現在価値とすると、$\theta = \theta^*$ のときベルマン方程式は以下のようになる。

$$F(\theta^*) = \frac{\pi(\theta_0)}{r+\lambda} + \frac{\lambda}{r+\lambda}\int_0^{\bar{u}} \{V(\theta^*+u) - I\}\frac{1}{\bar{u}}du$$

ただし、r は割引率、I は埋没コストである。$\theta = \theta^*$ のとき、バリューマッチング条件より、以下の式を得る。

$$F(\theta^*) = V(\theta^*) - I = \frac{\phi(\theta^*)^b}{r} - I$$

以上より、θ^* と他のパラメータの関係式を得る。

$$\frac{\lambda\phi}{\bar{u}r(b+1)}((\theta^*+\bar{u})^{b+1} - (\theta^*)^{b+1}) - \frac{(r+\lambda)\phi}{r}(\theta^*)^b + \phi\theta_0^b + rI = 0 \quad (1)$$

2.5 最適技術効率の採用時刻と成功確率

最適な技術効率 θ_A^* を用いて、採用時刻 T_A^* を次式で定義する[2]。

$$T_A^* = 2(\theta_A^* - \theta_0)/(\lambda_A \bar{u}) \quad (2)$$

ただし、λ_A はリーダー企業の技術効率の到着率である。つまり、採用時刻は「最適技術効率と初期時点の技術効率の差」を「到着率とジャンプ過程の平均の積」で割った値である。

採用時刻を求めたが、当該時刻において技術効率が最適値より低い場合は採用できない。そこで、最適な技術効率 θ^* が与えられた場合の時刻 t での採用成功確率を次の式で定義する。

$$G_A(t) = \sum_{n=1}^{\lfloor \lambda_A t \rfloor}\left(\Pr(N(t)=n)\Pr\left(\sum_{i=1}^{n} U_i \geq \theta_A^*\right)\right)$$

[2] 技術改良がない場合の定義式である。

2.6 企業の期待収益

企業 A の期待収益は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
&V_A(T_A, T_B) \\
&= \int_0^{T_A} \pi_{00}(\theta)e^{-rt}dt \\
&+ \int_{T_A}^{T_B} \{G_A(t)\pi_{10}(\theta) + (1-G_A(t))\pi_{00}(\theta)\}e^{-rt}dt \\
&+ \int_{T_B}^{\infty} \Big\{G_A(t)G_B(t)\pi_{11}(\theta) + (1-G_A(t))G_B(t)\pi_{01}(\theta) \\
&\qquad + G_A(t)(1-G_B(t))\pi_{10}(\theta) \\
&\qquad + (1-G_A(t))(1-G_B(t))\pi_{00}(\theta)\Big\}e^{-rt}dt \\
&- I_A e^{-rT_A}
\end{aligned}$$

企業 B の期待収益についても同様である。

3 技術効率と期待収益の分析

二企業間で技術革新の到着率 λ とジャンプ幅 $\bar{u}$ を変えることにより、各企業の技術開発能力の特徴付けをすることができる。

以下の実験結果の表は生産関数 $h(x,\theta) = \theta x^{\frac{1}{2}}$、技術改良の効果 $k=0$ とし、価格 p から $\bar{u}$ までのパラメータを与えることにより、(1) 式から最適技術効率 θ^*、(2) 式から採用時刻 T^* を得ることを示している。

表 1 のケースは、到着率 λ だけを変えたものである。到着率の小さい企業 A が企業 B より低い技術効率で早く投資することが最適であるケースを示している。

表 2 のケースは、企業 A が企業 B より高い価格かつ安いコストで投資を行う例である。企業 A は先手であるから、企業 B より高い価格であり低い技術効率でも独占状態の間は市場から受け入れられる。

なお、さらに詳しい考察と企業の期待収益の分析については当日会場にて報告する。

表 1：ケース 1

	企業 A	企業 B
p	100	100
w	10	10
r	0.1	0.1
I	350	350
θ_0	1	1
λ	0.95	1.00
$\bar{u}$	0.15	0.15
θ^*	2.024	2.083
T^*	14.37	14.44

表 2：ケース 2

	企業 A	企業 B
p	95	80
w	10	15
r	0.1	0.1
I	350	400
θ_0	1	1
λ	1.00	0.95
$\bar{u}$	0.15	0.15
θ^*	2.089	2.110
T^*	14.52	15.58

参考文献

[1] Farzin, Y., Huisman, K., Kort, P.: Optimal timing of technology adoption., *Journal of Economic Dynamics and Control*, **22** (1998), 779-799.

[2] Doraszelski, U.: Innovations, improvements, and the optimal adoption of new technologies., *Journal of Economic Dynamics and Control*, **28** (2004), 1461-1480.