

1G10 プロダクトイノベーションに関する研究開発投資戦略のモデル分析

○勝本雅和（京都工芸繊維大）

1. イントロダクション

現代のイノベーションの最も重要な担い手が企業であることは論をまたない。企業は利益の獲得を目標としてイノベーションレースを戦い、その結果を通じて経済全体の福利の向上に貢献している。

イノベーションレースについては様々な分析が行われており、例えば Christensen[2]は供給者側と需用者側との性能への認識の乖離がイノベーションレースに大きな影響を及ぼしたことを示している。また他にもイノベーションレースの勝者や敗者について様々な観点からの分析が行われてきた。多くの研究がイノベーションレースには様々な要因が影響を及ぼし、興味深い現象であると同時に複雑であることを示している。

図1は典型的なプロダクトサイクルとプロダクトの世代交代の概念図を示したものである。新世代製品の性能が旧世代を大きく凌駕することはまれで、新世代製品の登場時には旧世代の方が技術的性能が高い場合

もししばしばである。このような場合にどの時点で新世代製品にスイッチするかは複雑な要素をはらんでいる。もし企業がこの製品市場全体を独占しているならば、世代交代の必要性は認めないであろう。しかし、競争相手がいる場合や、旧世代製品を独占していても新世代製品に新規参入者が現れる可能性がある場合には、企業の持続的発展のためには、それが短期的には利益を生じないとしても新世代製品の開発に取り組まざるを得ない。

またイノベーションに内在する不確実性の問題はレースの行方を大きく左右する。先の Christensen[2]のケースではイノベーションの価値（市場）の不確実性が重要な要因となったと解釈できる。

イノベーションに関わる現象には、非線形性が重要な役割を果たしていることが多い。図1のような状況では、プロダクトサイクルに伴って各世代の技術的性能の向上が頭打ちになることが世代交代の必要性の源泉となっている。さらにイノベーションは数世代にわたって繰り返されることがほとんどである。その際に、旧世代の製品にどれだけのコミットしたかによって新世代のイノベーションを導入するかどうかの影響を受ける場合が報告されている。このことは一回の世代交代を分析するだけでは不十分であることを示している。

本研究では、以上の①イノベーションにおける不確実性、②競争を通じた企業間の相互作用、③非線形の生産、需要関数、④多段階のイノベーション、を考慮した分析モデルの構築を行い、分析のための専用ソフトウェアを作成した。以下にはその内容を紹介する。

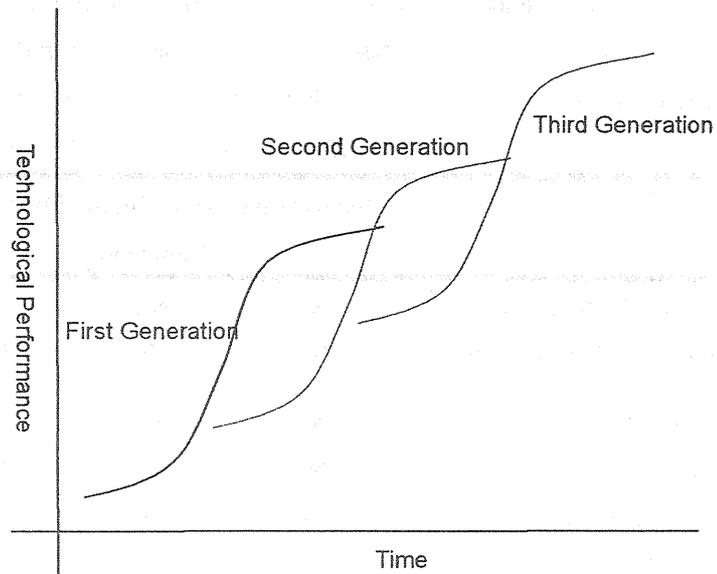


図1 プロダクトサイクルと世代交代

2. 既存のイノベーションレースモデル

前節で述べたようにイノベーションレースは極めて複雑な要因から影響を受けているが、その本質をモデル分析によって明らかにしようという試みが1980年代初頭から続けられてきた。これらの試みは競争を通じた企業間の戦略的相互作用を扱うかどうかで大まかに二つに分類することができる。

まず戦略的相互作用を考慮しないモデルは、相手方の行動を完全に固定あるいは確率過程で表現するもので、最近ではリアルオプションを用いた分析が多くみられる。これらの分析はイノベーションレースの環境がある程度明らかな場合にどのタイミングで参入/投資を行うべきかを分析したもので、必ずしもイノベーションレースのダイナミズムを分析することを目的とはしていない。

戦略的相互作用を考慮したモデルについては、主として先手を取った側（リーダー）と後発者（フォロワー）との間でどちらに有利不利があるかを分析することが大きな関心事となっている。リーダーに与える保護をどの程度にするべきかといった知的財産権制度の整備の問題をダイナミックな観点で考察するにあたって有用なためである。

この領域における個別のモデルについて比較したものが表1である。イノベーションの不確実性を考慮しないモデルでは、概ねリーダーが勝利¹を得るという結果を示している²。これは現実には多くのフォロワーが勝利を得ているという事実と反するものであり、不確実性を考慮しない場合の大きな欠点である。また前節で示した①イノベーションにおける不確実性、②競争を通じた企業間の相互作用、③非線形の生産、需要関数、④多段階のイノベーション、のすべてを考慮したモデルは今のところ存在していない。

表1. 既存のイノベーションレースモデルの比較

	Uncertainty	Non-Linear	Multi-Stage	The Winner
	Function			
Reinganum (1981a, 1981b)	No	No	No	First-mover
Fundberg and Tirole (1985)	No	No	No	First-mover
Hendricks (1992)	No	No	No	First-mover
Riordan (1992)	No	No	No	First-mover
Riordan and Salant (1994)	No	Yes	Yes	First-mover
Dutta et al. (1995)	No	No	No	First-mover
Hoppe and Lehmann-Grube (2001a, 2001b, 2005)	No	No	No	Depend on R&D cost
Stenbacka and Tombak (1994)	Yes	No	No	Simultaneous adoption
Goetz (2000)	Yes	No	No	Depend on Player's R&D efficiency
Hoppe (2000a, 2000b)	Yes	No	No	Depend on R&D success rate

¹ 多くのモデルで利益をより大きく得る方を勝者としている。

² Hoppe and Lehmann-Grubeは不確実性を考慮しなくても極端に研究開発コストが高い場合等についてはフォロワーが有利であることを示している。

3. 分析モデル

本分析モデルの概念的フレームワークは図2に示す通りである。

二人のプレーヤーが存在し、それぞれがリーダー戦略をとるか、フォロワー戦略をとるかを決定する。リーダー戦略を採った場合には、既存世代の製品を生産しつつ新世代の製品を開発する。フォロワー戦略を採った場合には、既存世代の製品を生産しつつ、リーダーが新世代の製品を開発した後、新世代製品のイミテーションを開始する。

先に挙げた4つのポイントについて言えば、①イノベーションにおける不確実性を表すために製品の開発は確率過程とする。②プレーヤー間の相互作用を表すため、それぞれのプレーヤーは相手が取る戦略を考慮しつつ自らの戦略を決定する。③イノベーションの持つ非線形性を表すために、それぞれのプレーヤーは非線形の生産関数、研究開発関数を有する。また製品の需要についても非線形の需要関数を仮定する。④このフレームワークでは触れていないが、多段階のイノベーションを表すため、プレーヤーは無限に新製品の開発を繰り返す。

以上の前提に基づき、各プレーヤーの最適戦略を求める手順は以下の通りになる。

A) 各プレーヤーの相手プレーヤーに対する最適反応戦略を最適化理論に基づき解析的に求める。

B) A)の結果に基づいて各戦略対

(リーダー=リーダー、リーダー=フォロワー、フォロワー=フォロワー)について均衡解³を求める。

C) B)の結果に基づいて全体としてのペイオフマトリクスを構築し、均衡解⁴を求める。

ここでは紙幅の関係で全体的な数学モデルの展開を紹介することはできない。例としてリーダー=リーダー・ケースにおける最適反応戦略を図3に示すが非常に複雑

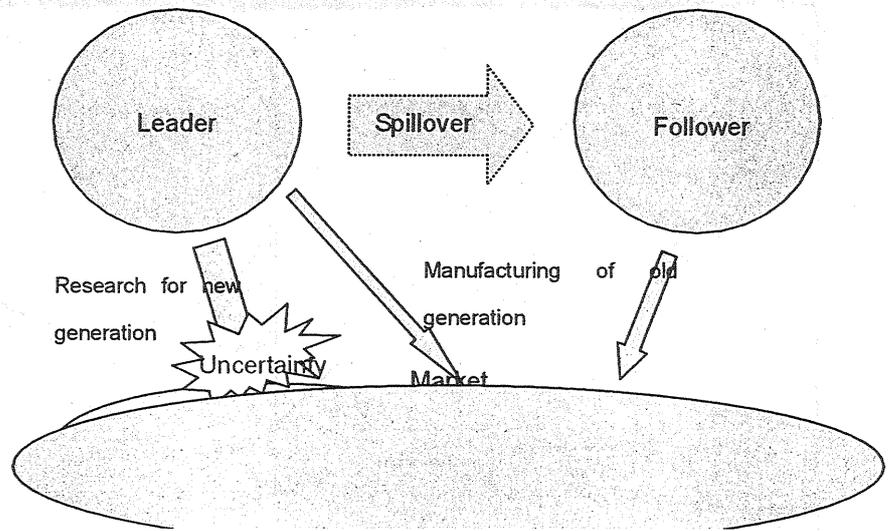


図2 モデルの概念的フレームワーク

Solution of Problem (P) (Leader - Leader Case):

Proposition. Optimal value J_* of the functional in problem (P) is represented by the following formula:

$$J_* = \frac{1}{\alpha} \max_{u \geq 0, v > 0} \frac{\eta(u, v, \bar{u}_2, \bar{v}_2)}{1 - \mu(u, \bar{u}_2, \bar{v}_2)}$$

$$\xi(u, v, \bar{u}_2, \bar{v}_2, t_1^1, t_2^1) = \left(\frac{d_0 \sigma_1 v_1^1}{\sigma_1 v_1^1 + \sigma_2 \bar{v}_2^1} - p_1 u_{1,n} - p_2 v_{1,n} \right) + \left(\frac{d_0 \sigma_2 \bar{v}_2^1}{\sigma_1 v_1^1 + \sigma_2 \bar{v}_2^1} + p_1 u_{1,n} \right) e^{-\alpha t_1^1} - (d_0 - p_2 v_{1,n}) e^{-\alpha t_2^1}$$

$$\eta(u, v, \bar{u}_2, \bar{v}_2) = \int_0^\infty \int_0^\infty \xi(u, v, \bar{u}_2, \bar{v}_2, t_1, t_2) \times p_1 u_1 e^{-\rho_1 t_1^{\frac{1}{2}}} p_2 \bar{u}_2 e^{-\rho_2 t_2^{\frac{1}{2}}} dt_1 dt_2$$

$$\mu(u, \bar{u}_2, \bar{v}_2) = 1 - \alpha \left(\int_0^\infty e^{-\alpha \tau - \rho_1 u \tau^{\frac{1}{2}}} d\tau + \int_0^\infty e^{-\alpha \tau - \rho_2 \bar{u}_2 \tau^{\frac{1}{2}}} d\tau - \int_0^\infty e^{-\alpha \tau - (\rho_1 u + \rho_2 \bar{u}_2) \tau^{\frac{1}{2}}} d\tau \right)$$

Notation of Parameters

α : Discount rate (0.1)

J : Profit of Each Leader

d_0 : Market size (1000)

p_1 : Price of R&D investment (25)

σ : Production level of both Leader (10)

ρ : R&D efficiency of Both Leader (0.1)

u : R&D investment of Leaders

()内は参照ケースにおける数値

p_2 : Price of production investment (25)

γ : Production elasticity of Both Leader (1)

v : Production investment of Leaders

³ 現時点ではナッシュ均衡を前提。

⁴ 脚注2と同様。

図3 リーダー=リーダー・ケースの最適反応戦略

なものとなっている。

4. 数値解析用ソフトウェア

3節で示したように本モデルの解析には複雑な計算が必要であり、長い計算時間を要する。このため専用のソフトウェアを開発した(図4)。このプログラムによって前期三段階のうちA)B)の二段階の解析を実施することが可能であるこの結果、MAPLE等の汎用ソフトウェアの使用に比べ、概ね10~50倍程度のスピードで数値解析を行うことが可能となった。特にB)の各戦略対毎の均衡解の算出の計算量は大きい、この段階の高速化が図られた点が全体のスピードアップに貢献している。

モデルは抽象化により本質に接近することを目標とするが、過度の抽象化はかえってその接近を妨げる。本モデルはイノベーションレースの4特性を含む形で抽象化を行った。今後はこのソフトウェアの利用により、現実のイノベーションレースのダイナミズムの解明につながることを期待する。

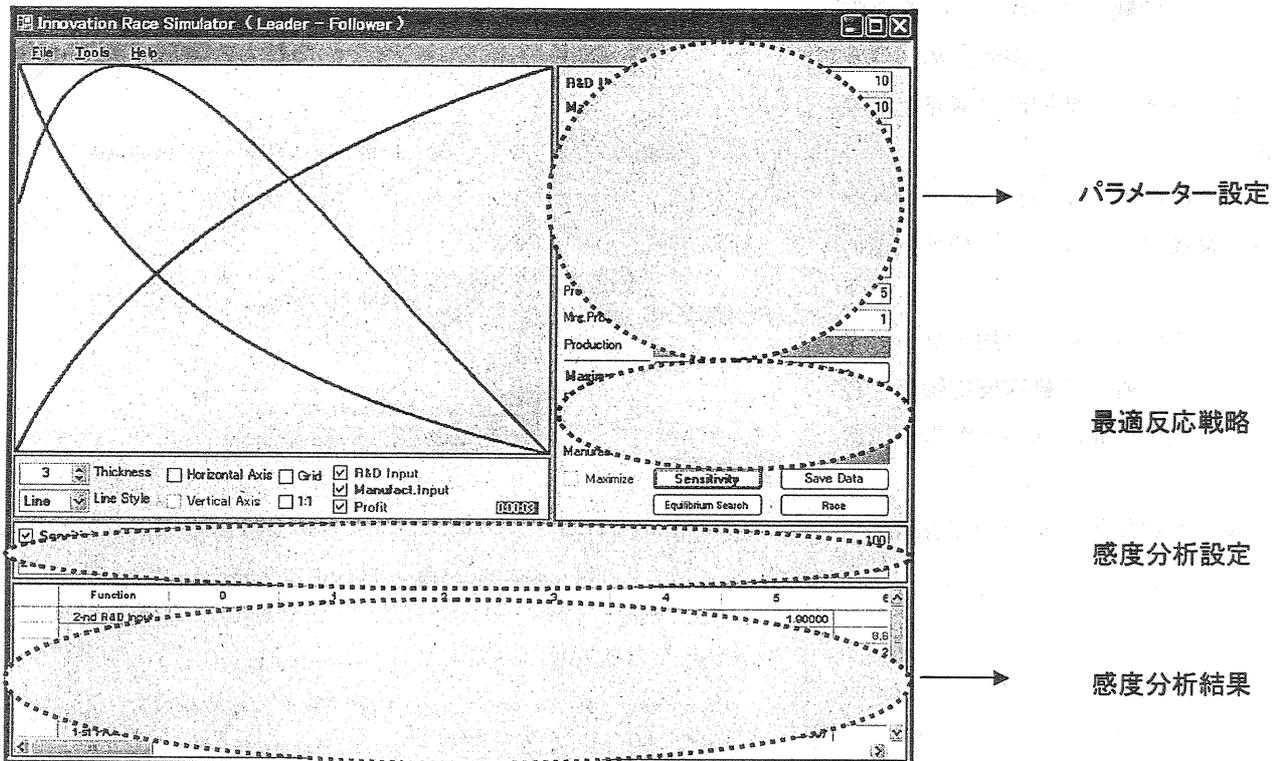


図4. 数値解析用ソフトウェアのインターフェース

Reference

- [1] Aseev, S. and Katsumoto M., A dynamic model of innovation race: Leader-Follower case, IIASA Interim Report, IR-04-035, 2004.
- [2] Christensen, C. M., The innovators dilemma: when new technologies cause great firms to fail, Harvard Business School Press: Boston, 1997.
- [3] Gottinger, H.W., Modeling stochastic innovation races, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 69, pp. 607-624, 2002.
- [4] Schilling, M., Strategic Management of Technological Innovation, McGraw-Hill, Irwin, 2004.
- [5] Hoppe, H. C., The timing of new technology adoption: Theoretical models and empirical evidence, The Manchester School, Vol. 70, pp. 56-76, 2002.