

○渡辺千仞 (東工大社会理工学)

1. 序 論

かつてカルドア(1962)は「成長こそ最大の技術進歩要因である」と指摘した。技術進歩が戦後の我が国の成長の原動力となり、競争力の源泉をなしたことは論を待たない。これは 21 世紀においてもしかりである。今日、低成長化に直面し、また、高齢化やエネルギー・環境制約等各種成長制約の強まる中、低成長・技術進歩の停滞の悪循環の輪を断ち切るためには持続的な技術開発努力が必要不可欠である。

政府は過去の 5 年間で 17 兆円を科学技術に投資した。1990 年代のロストデCADEと軌を一にして低迷した産業の研究開発投資も景気の復調と共にようやく回復軌道を示すに至った。研究開発投資規模で見ると我が国は文字通り技術大国である。だが、研究開発投資面の大国はインプット大国に過ぎず、それは必ずしも本来希求すべきそのアウトプットに即した本来的意味での技術大国と同義ではない。その限りにおいて、最近つとに我が国の研究開発投資の生産性の低さが問題視されるに至っている。我が国においてこの問題はあまり直視されずに来た。それは、第 1 にカルドアの法則に従った高成長故の技術進歩により研究開発投資の生産性も高いものとの錯覚が横行したことである。第 2 に、官民を問わず研究開発の収益性概念が極めて希薄であったことによる。そして、第 3 に研究開発の生産性や収益性を計測・評価する技術そのものが欧米に比して著しく立ち後れていたことによる。

実際、研究開発投資の軌道運用はきわめてナイーブなものである。成長成果をリードタイムもリスクや確実性も、またリターン確率程度も全く異なる生産投資とどのようなペースで、どのような割合で配分するかを走りながら瞬時に決定するようなものである。その判断の結果は確実にね返り、軌道運用をゆさぶる。少なからぬハイテク企業が過去に手痛いやけどをした。その経験はいたずらな重武装を促し、株主や消費者も

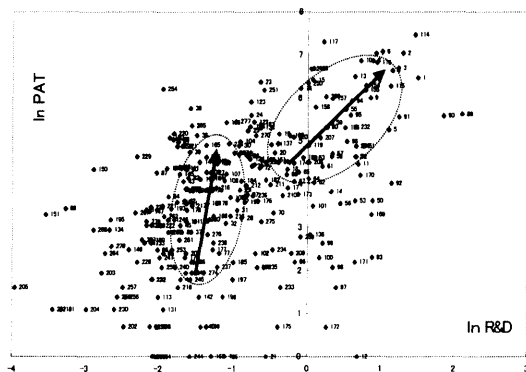


Fig. 1 Relationship between R&D Investment and Patents Granted (300 global firms)

Source: Processed using US Industrial Research Institute Data (1999).

それを無審査で容認してきた。米国が直接資本市場からの収益性に対する圧力を背景に研究開発投資の生産性や収益性の評価を徹底的に行い、それが選択と集中の共存をもとに今日のニューエコノミーの基盤となる創造性と効率性が両立した産業構造を実現した¹⁾の好対照である。

本稿は、以上の問題意識に立脚して、最適化理論をベースとする研究開発投資の最適選択理論について検討する。第 2 章で分析のフレームワークを示し、それを第 3 章で具体的に実践する。その結果に基づき、第 4 章で考察を集約する。

2. 分析フレームワーク

2.1 研究開発投資

生産関数を次のように定める

$$Y = F(t, (X-X_T), T) \tag{1}$$

ただし、 $X: L, K, M, E$ (労働、資本、原材料、エネルギー)、 $X_T: L_T, K_T, M_T, E_T$ (技術ストックの構成要素: 研究者、研究設備、原材料、エネルギー)

技術ストックは次のように表される

$$T = T(L_T, K_T, M_T, E_T) \tag{2}$$

t 時点の技術ストックは、

$$T_t = R_{t,m} + (1-\rho)T_{t-1} \tag{3}$$

ただし、 R : 研究開発投資、 m : リードタイム、 ρ : 陳腐化率

$$\Delta T = -\rho T(t) + R'(t) \tag{4}$$

ただし、 γ : リードタイム係数

研究開発着手時を (t_0, R_0) 、商業化開始時を (t_a, R_a) とすると、商業化に至るまでの研究開発投資総額は、

$$J(t_0, R_0, t_a, R_a, \gamma, \eta, \rho) = \int_0^a e^{-\rho s} R_0(s, t_0, R_0, \gamma, \eta, \rho) ds \tag{5}$$

ただし、 η : 現在価値割引率

最適研究開発投資を R_a^0 とすると、最適研究開発投資総額 W は、

$$W(t_0, R_0, t_a, R_a, \gamma, \eta, \rho) = \int_0^a e^{-\rho s} R_a^0(s) ds \tag{6}$$

2.2 新技術商品化の便益

以上の研究開発投資により、 t_a 時点から新技術の商品化が始まり、同商品の市場の評価が行われる。その結果、ヒット商品の例に見られるように、当初の売り上げ想定 S_a をはるかに越えた「成功売り上げ」 S_b が期待される場合もある。「成功売り上げ」終焉時点を t_b とすると、新技術商品化の便益関数 (Benefit function) $B(\cdot)$ は、

$$B(t_a, t_b, S_a, S_b, \eta, \rho) = \int_0^{t_b-t_a} S_a e^{-(\eta-\mu)s} ds + \text{Max}[0, \int_0^{t_b-t_a} S_b e^{-(\eta-\mu)s} ds] \tag{7}$$

ただし、 μ ($0 < \mu < \eta$): イノベーション利益割引率

従って、利益関数 (Profit function) $P(\cdot)$ は、

$$P = B(t_a, t_b, S_a, S_b, \eta, \rho) - W(t, R, t_a, R_a, \gamma, \eta, \rho) \tag{8}$$

¹⁾ 本予稿集2C16(田辺, 渡辺)参照。

(8)式をもとに、研究開発投資の最適選択（最適タイミング、最適投資レベル等）を検討することが出来る。

3. 実践的適用

3.1 最適研究開発タイミング

(7), (8) 式より商業化開始時 T_0 における利益関数 $P(t_0)$ は次のように示される

$$P(t_0) = \text{Max} \left[\frac{S_a}{\eta - \mu} e^{-(\eta - \mu)t_0}, \frac{S_a + S_b}{\eta - \mu} e^{-(\eta - \mu)t_0} - r(t_b) \right] - W(t_0) \quad (9)$$

ただし、 $r(t_b) \equiv \frac{S_b}{\eta - \mu} e^{-(\eta - \mu)t_b}$ (10)

(9), (10) 式より $t_0 \rightarrow T_0$ (初期値) のとき $P(t_0) \rightarrow -\infty$, $\Delta t_0 > 0 \rightarrow \Delta P(t_0) > 0$, $t_0 \rightarrow +\infty$ のとき $P(t_0) \rightarrow 0$ が示されるので、最適商業化時点 $t_m > t$ が存在することが立証される。

成功売上げ持続期間 ($t_b - t$) は、各期の技術水準 $T(t)$ 、その加速係数 v ($v = \Delta(\Delta T/T)$) 及び成功売上げ終焉時期 T_b 時の技術レベル T_b を用いて、次のように表される。

$$t_b - t = \frac{2(\ln T_b - \ln T)}{\frac{\Delta T}{T} + \left[\frac{\Delta T}{T} + 2v(\ln T_b - \ln T) \right]^{1/2}} \quad (11)$$

(11) 式から、技術水準との関数で戦略目標に応じた最適研究開発タイミングを決定することが出来る²。

3.2 最適研究開発投資軌道

第2章及び3.1節から伺われるように、研究開発投資はそのタイミングと合わせて投資のレベル及びテンポが決定的に重要である。この命題は、端的に言えば、成長の成果をいかなるペースで、いかなる割合で生産投資と研究開発投資に配分するかの問題であるが、前者からは短期間に着実に相応の成果が期待されるのに対して、後者は飛躍的な成果を期待させる反面、懐妊期間（リードタイム）が長く、またリスク・不確実性が高い等の問題をはらんでおり、両者の比較評価は高度な複雑事象である。更に、それぞれの成果が成長に反映し、その結果が更なる投資にフィードバックされるので、その軌道運用如何によっては、投資と成長が悪循環に陥るおそれがある。

本研究では、このような命題に対して、最適化理論を適用し、最適研究開発投資軌道を明らかにする。その分析ステップは、図2に示すとおりであり、

- ① 生産関数における生産と研究開発への投資配分の動態影響を示す「投資配分動態関数」の構築
- ② 研究開発投資への配分に伴う「短期的成長制約、長期的革新効果」条件の設定
- ③ 消費者の消費選好を表す需要関数を核とする「効用関数」の構築
- ④ ②の条件下での③の効用関数を最大化させる「最適軌道関数」の探索
- ⑤ 最適軌道関数支配要因の計測
- ⑥ 最適軌道の計測・評価からなる³。

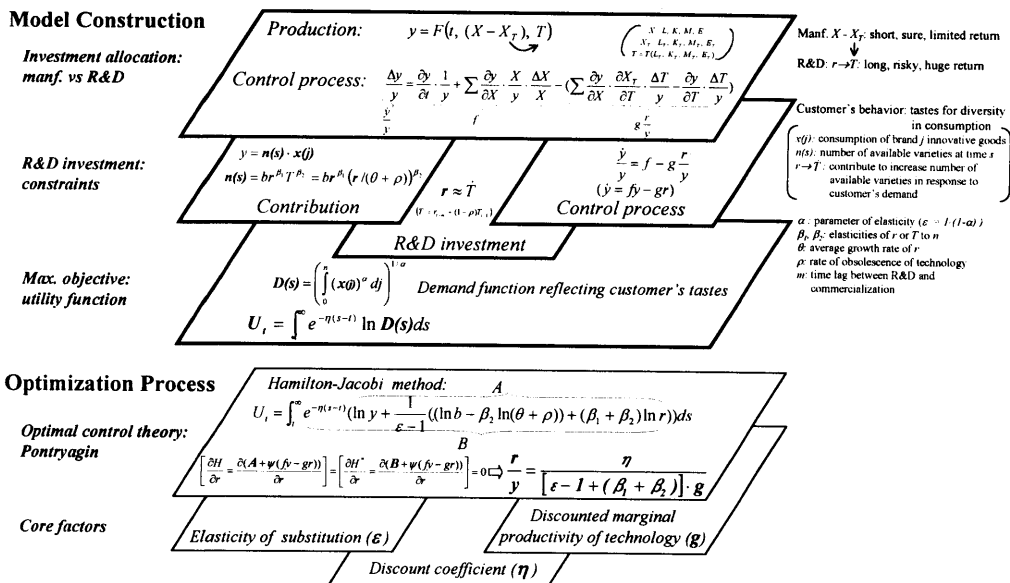


Fig. 2 General Analytical Framework of Optimal R&D Investment Control Model

² 詳細は、A. M. Tarasyev and C. Watanabe, Dynamic Optimality and Sensitivity Analysis in Models of Economic Growth, Proceedings of 7th Viennese Workshop on Optimal Control, Dynamic Games and Nonlinear Dynamics (Vienna, 2000) 参照。

³ 本予稿集2B22(朱, 渡辺)参照。

以上の最適軌道関数を用いて、1975-1996の期間の日本の製造業代表業種の研究開発強度（GDP当たり研究開発費）の最適レベルと実績の推移を比較検証した結果は図3に示す通りである。

図3を見ると、日本の製造業の研究開発強度は、1980年代半までは、最適レベルをはるかに下回っていたことがわかる。このインバランスは、たゆまぬ研究開発強度上昇努力等の結果着実に減少し続け、1980年代半にはほぼ最適レベルに等しいレベルに改善するに至った。しかし、バブル経済の期間に再び逆転し、最適レベルより数%低いレベルに転じた。この傾向はバブル崩壊後も続き、インバランスは更に拡大するに至っている。

主要業種について見ると、化学及び電気機械のハイテク業種は、1980年代以降一貫して最適レベルを大きく上回る研究開発強度を維持しているが、それと好対照に食料品に見られるローテク業種は、最適レベルをはるかに下回るレベルにとどまっていることが伺われる。両業種の好対照は、ハイテク業種においては、研究開発投資が収益最大化に決定的役割を果たしているのに対し、ローテク業種においては、生産投資の方が重要な役割を果たしていること及びハイテク業種からの技術スピルオーバーへの依存を示唆するものである。

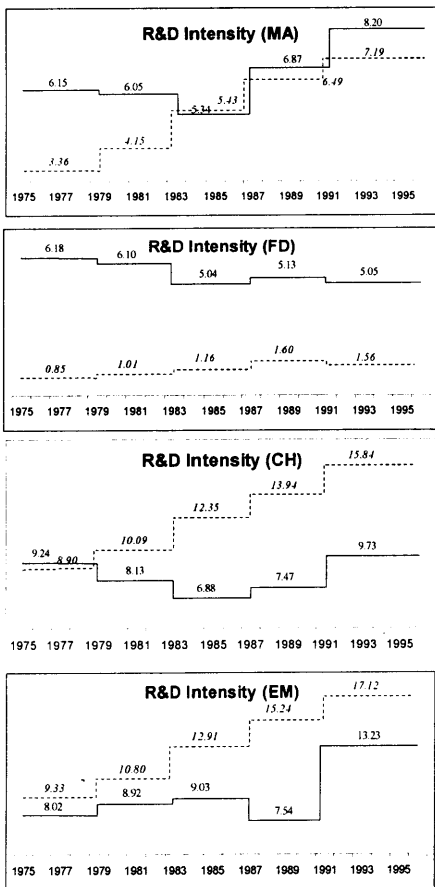


Fig. 3 Comparison of Optimal R&D Intensity and Actual R&D Intensity of Leading Sectors in the Japanese Manufacturing Industry

一方、化学、電気機械の2大ハイテク業種が一貫して最適レベルを上回る研究開発強度を維持している背景には、イノベーション製品を持続的に生み出すために必要不可欠な部分と同時に、厳しい企業間競争の中で競争相手を牽制したり、顧客に対し、ハイテクイメージを植え付けたりする上で必要な、ハイテク業種に固有な「疑似研究開発強度」(Pseudo R&D intensity) 部分も含まれているものと思われる⁴。この割合はバブル崩壊後低下を示しているが、これについては、「投資の合理化」という面と「リスク・不確実性に対するセキュリティ係数の安易な削減」という面の両面についてさらに掘り下げた評価・検証が必要である。

3.3 スピルオーバー技術の最適活用

グローバル経済化や情報化の急速な進展は技術の国境を越えたスピルオーバーを加速的に進める。他方、技術開発のコストやリスクの高まりの中で、自前による開発の限界が現れつつある。このような中で、スピルオーバー技術の効果的活用が競争力の決め手になりつつある。スピルオーバー技術の効果的活用はそれを認識・峻別・吸収・体化する能力すなわち同化能力 (Assimilation capacity) に依存する。同化能力は、同化をねらう技術との接近度 (Proximity) に大きく関係し、それは自らが有する同関連分野の技術ストックに依存し、それは研究開発強度や研究開発の多角化に大きく関係する。自前による開発の限界の脱却を効果的に進めるためには相応の自前の研究開発強度が必要であり、それが実行されれば、同化能力の向上→スピルオーバー技術の効果的活用→成長→研究開発強度の向上の好循環が期待される。この因縁関係も最適化のイシューである。また、同化能力の向上に大きく関係する多角化も過度に過ぎるとコアコンピタンスを喪失し、競争力をそぐことになりかねない。これも同様に最適化のイシューである。

かくのごとくスピルオーバー技術の最適活用は図4に示すように、3.2 で見た研究開発投資軌道の上昇と失速の岐路を擁する研究開発投資の最適選択の重要な課題である⁵。

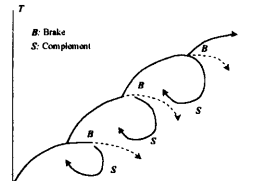


Fig. 4 Slow Itself Down Mechanism of Technology Stock

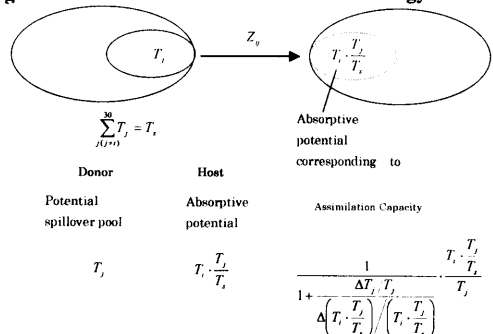


Fig. 5 Configuration of Spillover and Assimilation Dynamics

⁴ 本予稿集2B23(朱, 渡辺)参照。

⁵ 本予稿集2B25(許, 渡辺)参照。

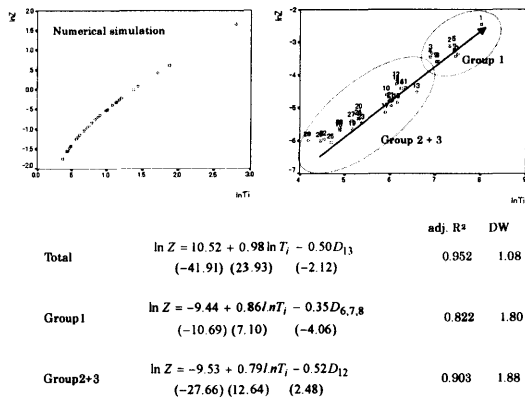


Fig. 6 Correlation between Assimilation Capacity and Sales in 30 R&D Intensive Japanese Pharmaceutical Firms (1991-1994)

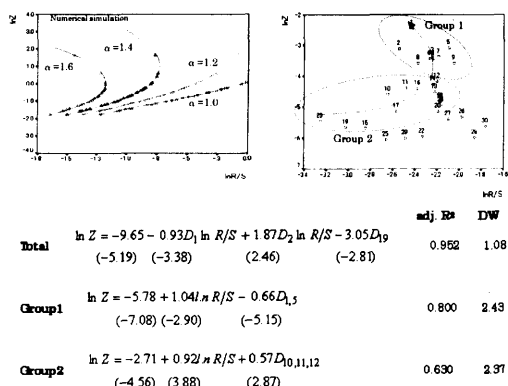


Fig. 7 Correlation between R&D Intensity and Assimilation Capacity in 30 R&D Intensive Japanese Pharmaceutical Firms (1991-1994)

T_i の技術ストックを有する企業が、 $\sum T_j = T_i$ からなる同種技術ストックのスピルオーバープールから T_i 技術を同化する能力は、図5のように示される⁶。

この関係に立脚して、際だってハイテク性の高い医薬品製造業について、先に見た研究開発強度、同化能力、生産（売上）の「因縁関係」について理論・実証両面から検証した結果は図6、7に示すとおりである。図6から伺われるように、同化能力の向上は売り上げの増大に繋がる。従って、製薬各社は同化能力の向上を目指して自前の研究開発強度の向上に勤しむこととなり、これが同業種の研究開発強度を際だって高いものとする要因ともなっている。しかし、図7は、製薬大手と称されるトップ9社はその規模に応じて高い同化能力を有しているがそれは必ずしもそれ以下の規模の各社のように自前の研究開発強度には依存していないことを示している。これは一定の研究開発強度・生産規模に至ると、最適投資軌道に乗り、自ずから同化能力がスパイラルに高まる好循環のメカニズムが働くことを示している。

図8は同じ製薬業について、多角化と同化能力との関係を見たものであるが、一定の「適正多角化領域」においては、多角化に応じ同化能力はS字カーブに従って増大しているが、それ

を越えると逆に減少することを示している。これは過度の多角化によるコアコンピタンスの喪失によるものである。また、適正領域より下の領域においては、逆にニッチを追求した特化が同化能力を高めることになることを示している⁷。

以上はいずれも、研究開発投資の最適選択を検討する上で、スピルオーバー技術活用の最適化軌道を追求することが決定的に重要であることを示すものである。

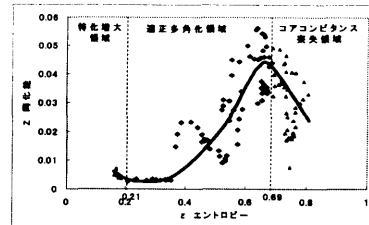


Fig. 8 Optimal Diversity Level for Increasing Assimilation Capacity in Japan's Leading Pharmaceutical Firms

4. 考察

低成長・技術進歩の停滞の悪循環の輪を断ち切るためには持続的な技術開発努力が必要不可欠である。これは研究開発投資の増大もさることながらその生産性の向上を前提に行う必要がある。しかし、我が国においては官民ともにこのような問題に対するアカウンタビリティが極めて希薄である。これと好対照に米国では直接資本市場からの収益性に対する圧力を背景に研究開発投資の生産性や収益性の評価が徹底的に行われ、それが創造性と効率性が両立した産業構造を実現し、それは更なる高生産性・収益性の研究開発投資を促す好循環を形成している。技術立国が我が国の必然的選択であることを考えれば、我が国にこのような面の好循環構造を構築することはいわば歴史の必然である。本稿はこのような問題意識に基づき、最適化理論をベースとする研究開発投資の最適選択理論の検討を行い、日本の製造業代表業種を対象に、最適研究開発投資軌道及びスピルオーバー技術の最適活用について、実践的な適用を試みた。その結果、研究開発投資選択において従来看過されていたいくつかの重要な視点を浮き彫りにすることが出来た。

今後、引き続き、更なる広範かつ実践的な適用を視座に据えた分析手法の発展、その実際の適用の拡大と適用結果のフィードバック等が課題となる。

参考文献

- [1] A. M. Tarasyev and C. Watanabe, "Optimal Control of R&D Investment in a Techno-Metabolic System," IIASA Interim Report, IR-99-01 (1999).
- [2] A. M. Tarasyev and C. Watanabe, "Dynamic Model of Innovation: Optimal Investment, Optimal Timing, Market Competition," IIASA Interim Report, IR-00-003 (2000).
- [3] A. M. Tarasyev and C. Watanabe, "Optimal Dynamics of Innovation in Models of Economic Growth," Journal of Optimization Theory and Applications 108, No. 1 (2000) in print.
- [4] A. M. Tarasyev and C. Watanabe, "Dynamical Optimality Principles in Investment Problem," Optimal Control Applications and Methods (2000) in print.
- [5] Watanabe, "Systems Option for Sustainable Development," Research Policy 28, No. 7 (1999) 719-749.
- [6] Watanabe, C., Wakabayashi, K. and Miyazawa, T., "Industrial Dynamism and the Creation of a 'Virtuous Cycle' between R&D, Market Growth and Price Reduction: The Case of PV Development in Japan," Technovation 20 (2000) in print.
- [7] Watanabe, B. Zhu, C. Griffy-Brown and B. Asgari, "Global Technology Spillover and Its Impact on Industry's R&D Strategies," Technovation (2000) in print.
- [8] Watanabe, B. Zhu and T. Miyazawa, "Hierarchical Impacts of the Length of Technology Wave - An Analysis of Techno-Labor Homeostasis," Technological Forecasting and Social Change 67, No. 3 (2001) in print.

⁶本予稿集2B19(永松, 渡辺)参照。

⁷本予稿集2B20(田上, 渡辺)参照。