

情報セキュリティと研究開発への戦略的投資

河重 隆一郎
首都大学東京

(受理 2013 年 10 月 18 日; 再受理 2014 年 12 月 5 日)

和文概要 この 10 年の間に、企業にとって情報セキュリティ投資の重要性は非常に高くなっている。そこで本論文では、情報セキュリティ投資と研究開発投資とを行なう企業の投資行動を分析する。そのために技術スピルオーバーがあるときに、情報セキュリティ投資と研究開発投資とをクールノー市場競争に先立って同時に行なう 2 つの企業の 2 段階ゲームを定式化する。まず、より一般的な関数によるモデルを用いて、情報セキュリティ投資量の増加が企業の利潤を増加させる仕組みを明らかにする。つぎに、費用関数と逆需要関数とを線形関数にしたモデルを用いて、最適な企業の投資行動とゲームの均衡とを導出する。その結果から情報セキュリティ投資量は、競争相手の情報セキュリティ投資量とは戦略的代替の関係にあり、研究開発投資量とは技術スピルオーバーが十分に小さいときには戦略的代替の関係に、大きいときには戦略的補完の関係になることを示す。そしてゲームの均衡においては、市場が縮小するときには情報セキュリティ投資量を減少が、また情報拡散の可能性が高くなるときには情報セキュリティ投資の費用が十分に高いときに限り、投資量の増加が、最適な投資行動であることを示す。最後に、均衡においては情報セキュリティ投資が企業の研究開発投資を低下させることを示し、企業の情報セキュリティ投資量に対するコミットメントと研究開発水準との関係を明らかにする。

キーワード: ゲーム理論, 経営, 産業組織論, 情報セキュリティ, 研究開発, 投資.

1. 序章

この 10 年の間に、企業にとって情報セキュリティ投資の重要性は非常に高くなっている。実際、2012 年に鋼板製造技術の不正取得に関して、韓国の鉄鋼業者に対する訴訟を日本の鉄鋼業者が起こした。しかも、その製造技術がさらに中国の企業に二次流出し、韓国企業が中国企業に対して起こした訴訟によって事実が明らかになったことが、日本企業による訴訟のきっかけとなった。これは企業の情報拡散 (漏えい) を大きな問題であると経営者が認識するものの、対策が後手にまわっていることを示している。その原因は、多くの企業において情報セキュリティ投資が利益に直結しない費用の位置付けであり、対策を実施することの重要性が十分に理解されていないことにある (経済産業省 [13])。このような企業の認識に対して、市場での競争に先立って行なわれる情報セキュリティ投資が、どのような仕組みで利潤に対して影響を与えるのかを示すならば、利潤の視点からも情報セキュリティ投資の有用性が明らかになる。本論文では、情報セキュリティ投資による戦略的效果 (これに関しては後に詳細を述べる) の仕組みを明らかにすることで、情報セキュリティ投資が企業の利潤を増加させることを示す。しかし、問題はそれだけではない。その効果と仕組みとを理解して、企業が投資行動を選択した場合でも、経済状況や社会状況の変化は投資行動に影響を与えることがある。たとえば、市場規模の縮小によって収入や利潤が減少する状況では、企業にとって全ての投資は費用削減の対象であり、情報セキュリティ投資も例外ではない。また企業情報拡散の危険度が高まる状況では、情報セキュリティ水準を高めるように企業が行動することは一般的である。しかも、経済状況が悪化するとき企業情報拡散の危険度が高まると、多くの IT

専門家は考えている。しかし、これら2つの外的要因の変化が同時に発生する状況において、情報セキュリティ投資を拡大するのか現状維持なのか縮小するのか、IT専門家の提言は一樣ではない*。したがって、社会状況の変化が投資行動に与える効果とそれに対する最適な投資行動とを知ることは企業にとって重要である。そこで本論文は、研究開発競争を行う企業による情報セキュリティ投資の意思決定を、完備情報の2段階ゲームとして定式化し、企業の投資行動を分析してこれらの問題の解を示す。

産業組織論では企業の技術情報が拡散することを技術スピルオーバーと呼ぶ。そして技術スピルオーバーが存在するとき、他者が開発した技術の恩恵を受けようとするために、誰もが社会的に過小にしか投資を行わないとされてきた (Arrow[1])。そのため研究開発への誘因を確保する手段に関する数多くの研究が行われてきた。なかでも、d'Aspremont and Jacquemin[2], Kamien et al.[7], Suzumura[12] を嚆矢とする、企業の研究開発における協力の競争に対する優位性の研究は、その中心である。とくに近年では、技術スピルオーバーを内生化するという視点での研究が行なわれており、De Bondt[3], Gil Moltó et al.[4], Milliou[10] はその代表例である。なかでも Milliou[10] は研究開発投資の保護と研究開発投資との意思決定に関する研究であり、本論文と関連性がある。Milliou[10] では市場での競争に先立って、情報セキュリティ水準 (Milliou[10] では情報の保護水準と呼ぶ) の決定と研究開発水準の決定とを順次行なう3段階モデルを用いているが、本論文はそれとは異なり、市場での競争に先立つ段階で企業は研究開発水準と情報セキュリティ水準とを同時に決定する2段階モデルである。また、Milliou[10] では情報セキュリティ水準が技術スピルオーバー係数に対して作用するが、本論文では情報セキュリティ水準が係数ではなく、研究開発水準が限界生産費用にあたる効果を減算する形で作用する。これは、d'Aspremont and Jacquemin[2] をはじめとする先行研究で、研究開発水準が限界生産費用に対して減算の形で影響を与えるのにならったためである。その結果、本論文では、情報セキュリティ水準を高めることによる戦略的効果が限界投資費用を上まわるとき、技術スピルオーバーが存在するかぎり、情報セキュリティ投資に対する企業の誘因は存在することが明らかになる。これは、Milliou[10] で、技術スピルオーバーが少なすぎず競争が激しい場合に限り、企業は一部分だけイノベーションを保護、すなわち情報セキュリティ投資を行なう誘因があるとした結果とは異なる。さらに本論文では、主に企業の視点で、情報セキュリティ投資と研究開発投資とに対する、最適な投資行動の解を示すことに重点をおいて分析を行なう。

本論文の目的は以下の4点である。第1は情報セキュリティ投資が企業の利潤に与える効果とその仕組みとを明らかにすること。第2は競争相手の投資行動が変化したときの最適な企業の投資行動を示すこと。第3は市場規模の変化と技術スピルオーバーの大きさの変化とに対する最適な投資行動を示すこと。第4は前出の3つとは異なり先行研究にしたがいが、情報セキュリティ投資を行うときと、行なわないことを各企業がコミットしたときとを比較して、情報セキュリティ投資が企業の研究開発投資量に与える影響を明らかにすることである。

本論文が提案する情報セキュリティ投資モデルは、研究開発と情報セキュリティとの2つの投資を同時に、市場での数量競争に先立ってそれぞれの企業が決定する2段階ゲームである。さらに以下の2つの水準でモデルを導入する。第1のタイプは、先行研究の線形関数による市場逆需要関数と限界費用関数の設定を包含する、より一般的な関数を用いたモデルである。情報セキュリティ投資が企業の利潤に与える効果を、この水準のモデルを用いて戦略的効果と直接効果とに分解する事で、それらの仕組みを明らかにする。ここでの戦略的効果と

*Goodchild [5], Noda [11] を見よ。

は、第1段階での自社の投資行動の変化によって競争相手の第2段階での行動が変化し、その結果が自社の利得にもたらされる効果を意味する。第2のタイプは、第1のモデルの前提を満たすように先行研究の線形関数に拡張を加えたモデルである。その拡張では、d'Aspremont and Jacquemin[2]のモデルを情報セキュリティ投資を行わない場合の投資行動として位置付け、Kawashige[8]が情報管理区画と情報セキュリティ投資との関連性分析で提案したモデルにしたがい、情報セキュリティの効果を自社技術が競争相手に与える恩恵を軽減する形で追加して、新たな線形の限界生産費用関数を定義する。この第2のモデルを用いて最適な情報セキュリティ水準と均衡とを得る。ここで得られた最適な情報セキュリティ水準からは、競争相手企業の投資行動を所与として最適な投資行動を示し、均衡からは、市場規模の変化と技術情報が拡散する度合いの変化とが両方の投資行動に与える効果を分析する。最後に産業全体での研究開発水準を情報セキュリティ投資を企業が行なう場合と、行なわないと企業がコミットした場合とについて比較して分析する。

以上のモデルを用いて本論文は以下の4点を明らかにする。第1に、情報セキュリティ投資を行なうことで企業は利潤を増加させる事ができること。第2に、情報セキュリティ投資は戦略的代替の関係にあり、その一方で、情報セキュリティ投資と研究開発投資との間には、技術スピルオーバーの大きさに依存して、戦略的補完の関係と戦略的代替の関係とになること。第3に、均衡において、市場が縮小する場合には情報セキュリティ投資の減少が最適な投資行動であり、情報拡散の可能性が高くなる場合には投資の費用係数が十分に高いときに限って増加が最適な投資行動であること。第4に、情報セキュリティ投資が産業全体での研究開発投資を、均衡においては低下させることを示す。

なお、法的な権利保護ではなく企業の情報セキュリティ投資に本論文が注目した理由は、法的な権利保護よりも企業秘密やノウハウとして情報を保有することの方が有効であると、多くの企業が考えていることである。同様に、研究開発協力ではなく研究開発競争に注目した理由は、同一産業内部の競合企業との研究開発協力を重要でない、多くの企業が考えていることである。これらのことはIjichi et al.[6]の実証研究に示されている。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では第1のタイプのモデルを定式化し、それを用いて投資が利潤に与える効果を分析する。第3章では第2のタイプのモデルを導入して、最適な情報セキュリティ水準を求めて企業の投資行動を分析する。第4章では、経済状況の変化と技術スピルオーバーの大きさの変化とが、情報セキュリティ水準に与える影響を均衡において分析する。さらに、情報セキュリティ投資が研究開発水準に与える影響を分析する。第5章では結論と今後の課題を述べる。

2. モデル

本章は2.1節で、先行研究が想定した線形の関数を包含する形で、市場逆需要関数と限界生産費用に、より一般的な関数を与える。2.2節で、情報セキュリティ水準の変化が純利潤に与える効果を戦略的効果と直接効果に分解する。2.3節で、情報セキュリティ投資が企業にとって単なる費用ではなくなるための条件を示す。

2.1. モデルの設定 (一般形式)

同質財を生産する2つの企業が2段階ゲームをプレイする。このとき、各企業は利潤を最大化するように行動するものと仮定する。

第1段階で企業 i ($= 1, 2$)は、研究開発水準 x_i (≥ 0)と情報セキュリティ水準 y_i (≥ 0)をそれぞれ同時に決定して投資を行うものとする。これらの投資は第2段階での生産費用に影響を

与えるものとする。このとき、研究開発投資費用は2階微分が可能な関数 $R(x_i)$ 、情報セキュリティ投資費用は2階微分が可能な関数 $S(y_i)$ で定まるとする。それぞれ、全ての x_i に対して、 $R(x_i) \geq 0$ 、 $R'(x_i) \geq 0$ 、 $R''(x_i) > 0$ 、全ての y_i に対して、 $S(y_i) \geq 0$ 、 $S'(y_i) \geq 0$ 、 $S''(y_i) > 0$ を満たすとする。また、 $R(0) = 0$ 、 $S(0) = 0$ とする。

第2段階で企業 i は数量競争を行い、供給量 $q_i (> 0)$ を決定するものとする。生産費用関数 $C_i : R_+^4 \rightarrow R_+$ を $C_i(q_i, x_i, x_j, y_j)$ で定義する。このとき、供給量 q_i の増加に対して生産費用は増加するとする。そして、研究開発水準 x_i, x_j の増加に対して生産費用は減少すると考える。ここで、 x_j の増加による生産費用の減少が、技術スピルオーバーによってもたらされた恩恵である。一方、競争相手による情報セキュリティ水準 y_j の増加に対して、生産費用は増加すると考える。

第2段階において、市場逆需要関数 $P : R_+^2 \rightarrow R_+$ 、供給量を q_i, q_j とするとき、財の価格は $P(q_i, q_j)$ で定まり、 $\partial P / \partial q_i < 0$ 、 $\partial P / \partial q_j < 0$ であるとする。このとき企業 i の収入は $P(q_i, q_j)q_i$ であるので、限界収入は、

$$\frac{\partial P}{\partial q_i} q_i + P$$

により定まり、

$$\frac{\partial P}{\partial q_i} + \frac{\partial^2 P}{\partial q_i^2} q_i + \frac{\partial P}{\partial q_i} < 0$$

を満たすとする。企業 i の粗利潤 π_i は、

$$\pi_i(q_i, q_j) = P(q_i, q_j)q_i - C_i(q_i, x_i, x_j, y_j) \quad (1)$$

により定まり、

$$\frac{\partial^2 \pi_i}{\partial q_i^2} = \frac{\partial P}{\partial q_i} + \frac{\partial^2 P}{\partial q_i^2} q_i + \frac{\partial P}{\partial q_i} - \frac{\partial^2 C_i}{\partial q_i^2} < 0$$

を満たすとする。以上より純利潤 Π_i は、

$$\Pi_i(q_i, q_j, x_i, y_i) = \pi_i(q_i, q_j) - R(x_i) - S(y_i)$$

で定まる。

2.2. 情報セキュリティによる戦略的效果

本節では y_i の変化が Π_i に与える効果を、戦略的效果と直接効果とに分解する。

第1段階で x_i, x_j, y_i, y_j が決まったもとの、第2段階のクールノー均衡を $q_i^*(x_i, x_j, y_i, y_j)$ 、 $q_j^*(x_i, x_j, y_i, y_j)$ とする。このときクールノー均衡は内点解とする。 y_i の変化が Π_i に与える効果は、

$$\frac{\partial}{\partial y_i} (\Pi_i(q_i^*(x_i, x_j, y_i, y_j), q_j^*(x_i, x_j, y_i, y_j), x_i, y_i)) = \frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} \frac{\partial q_i^*}{\partial y_i} + \frac{\partial \pi_i}{\partial q_j} \frac{\partial q_j^*}{\partial y_i} - S'(y_i)$$

となる。第2段階の q_i による π_i の最適化から $\partial \pi_i / \partial q_i = 0$ である。よって、この式の右辺第1項は0になる。したがって、

$$\frac{\partial}{\partial y_i} (\Pi_i(q_i^*(x_i, x_j, y_i, y_j), q_j^*(x_i, x_j, y_i, y_j), x_i, y_i)) = \frac{\partial \pi_i}{\partial q_j} \frac{\partial q_j^*}{\partial y_i} - S'(y_i)$$

と書ける. さらに式 (1) より $\partial\pi_i/\partial q_j = (\partial P/\partial q_j)q_i$ である. よって, 以下の式

$$\frac{\partial}{\partial y_i}(\Pi_i(q_i^*(x_i, x_j, y_i, y_j), q_j^*(x_i, x_j, y_i, y_j), x_i, y_i)) = \frac{\partial P}{\partial q_j} \frac{\partial q_j^*}{\partial y_i} q_i^* - S'(y_i). \quad (2)$$

を得る.

式 (2) の右辺第 1 項は y_i の変化による戦略的效果を表す. また第 2 項は限界投資費用で, y_i の変化による直接効果を表す.

2.3. 情報セキュリティ投資を行なう条件

本節では, 情報セキュリティ投資を行なうときに, そうでないときよりも, 情報セキュリティ投資が純利潤を増加させるための条件を示す. ここでの粗利潤 $\pi(q_i^*, q_j^*)$ は y_i に対して凹関数とする. 関数 $S(y_i)$ が凸増加関数なので x_i, x_j, y_j を所与としたとき, $\Pi_i(q_i^*, q_j^*, x_i, y_i)$ は y_i に対して凹関数となる. したがって式 (2) より以下の命題を得る.

命題 1. $y_i = 0$ のとき

$$\frac{\partial P}{\partial q_j} \frac{\partial q_j^*}{\partial y_i} q_i^* - S'(y_i) > 0$$

ならば, この x_i, x_j, y_j に対して, $y_i > 0$ で Π_i は最大値をとる.

つまり $y_i = 0$ において, 情報セキュリティ水準を高めることによる戦略的效果が限界投資費用を上まわるとき, y_i が 0 よりも大きい値で Π_i は最大になる. このとき情報セキュリティに対する投資をすること, つまり y_i を正の値にすることで, 企業は純利潤を高める事ができる. これは情報セキュリティ投資が単なる費用ではないことを意味する.

また仮定より $S'(y_i) \geq 0$ である. よって命題 1 が成立するためには, 少なくとも戦略的效果は正の値でなければならない. さらに仮定より $q_i^* > 0, \partial P/\partial q_j < 0$ である. よって $\partial q_j^*/\partial y_i < 0$ ならば戦略的效果が正の値となる. したがって, 第 1 段階で情報セキュリティ水準を高めることが, 第 2 段階の均衡における競争相手の供給量に対して負の効果を与えることは, 命題 1 の中で示された式 $\frac{\partial P}{\partial q_j}(q_i^*(x_i, x_j, 0, y_j), q_j^*(x_i, x_j, 0, y_j)) \frac{\partial q_j^*}{\partial y_i}(x_i, x_j, 0, y_j) q_i^*(x_i, x_j, 0, y_j) > S'(0)$ が成立するための必要条件であるとわかる.

この利潤を変化させる仕組みのなかで, 情報セキュリティ投資の限界費用が利潤を減少させる負の効果は明らかである. 一方, 投資の増加が利潤を増加させる正の効果は, 上で示した 2 つの条件が成り立つときに限って現れる. つまり, まず情報セキュリティ水準を自社が高めたとき, 競争相手の供給量に負の効果を与えること. もうひとつは, 情報セキュリティ水準が 0 のときに, その水準を高めることによる正の戦略的效果が限界投資費用よりも大きいことである. そしてその場合に限り, 投資の正の効果は現れる. したがって, 少なくとも上記の 2 つの条件が満たされているときに情報セキュリティ投資は利潤を増加させることがわかる.

3. 最適な情報セキュリティ水準

本章では具体的な純利潤関数を定義して最適な情報セキュリティ水準を求め, 他の企業の戦略を所与としたときの各企業の投資行動をより詳細に分析する. 3.1 節では線形の限界生産費用関数と線形の逆需要関数とを導入して, クールノーの複占市場を考える. 限界生産費用関数は各企業の第 1 段階での投資水準を独立変数として持つ関数で, 第 2 段階での生産費用に影響を与える. 以上の条件のもとで具体的な純利潤関数を導出する. 3.2 節では導出した純利潤関数から最適な情報セキュリティ水準を求める.

3.1. 線形の限界生産費用関数と逆需要関数

両企業が研究開発を行わない場合の限界生産費用を $\bar{c}(> 0)$ として、第2段階での限界生産費用関数 c_i は、

$$c_i(x_i, x_j, y_j) = \max\{0, \bar{c} - x_i - \beta(x_j - y_j)\}, i = 1, 2, j \neq i$$

により定まるとする。ここで $\beta \in [0, 1]$, $y_j \in [0, x_j]$ である。技術スピルオーバーの程度を示すスピルオーバー係数 β は外生的に与えられるものとする。d'Aspremont and Jacquemin[2] では、各企業の研究開発水準 x_i と x_j による2変数関数として、限界生産費用関数が定義された。本論文ではこれを拡張して、競争相手の情報セキュリティ水準を第3の独立変数として追加する。このとき、 y_j が限界生産費用に与える効果を x_i, x_j と同程度の投資水準として扱える形にする。導入した限界生産費用関数と供給量を用いて、生産費用は

$$C_i(q_i, x_i, x_j, y_j) = c_i(x_i, x_j, y_j)q_i$$

により定まるとする。財の価格 $P(\geq 0)$ は、逆需要関数

$$P(q_i, q_j) = a - q_i - q_j$$

により定まるとする。ここで $a - \bar{c} > 0$ とする。したがって企業 i の粗利潤 π_i は、

$$\pi_i(q_i, q_j) = [a - (q_i + q_j) - c_i(x_i, x_j, y_j)]q_i$$

により定まる。また研究開発投資費用と情報セキュリティ投資費用は、それぞれ

$$R(x_i) = \frac{\kappa}{2}x_i^2, S(y_i) = \frac{\theta}{2}y_i^2$$

により定まるとする。ここで $\kappa(> 0)$, $\theta(> 0)$ は費用係数である。

先行研究と同様に内点解が存在すると考えると、クールノー均衡における供給量は $q_i = (1/3)(a - 2c_i + c_j)$ となる[†]。さらに、この最適な供給量をそれぞれの全ての投資量の関数として $q_i^*(x_i, x_j, y_i, y_j)$ としたとき、粗利潤は $[q_i^*(x_i, x_j, y_i, y_j)]^2$ となる。よって企業 i の純利潤 Π_i は、

$$\begin{aligned} \Pi_i(x_i, x_j, y_i, y_j) = & \\ & \frac{1}{9} \{a - 2[\bar{c} - x_i - \beta(x_j - y_j)] + [\bar{c} - x_j - \beta(x_i - y_i)]\}^2 - \frac{\kappa}{2}x_i^2 - \frac{\theta}{2}y_i^2 \end{aligned} \quad (3)$$

と書ける。さらに以下の仮定をする。

仮定 1. $\kappa > \frac{2}{9}(2 - \beta)^2$,

仮定 2. $\frac{\theta}{\kappa} > \frac{2\beta^2}{9\kappa - 2(2 - \beta)^2}$.

これは研究開発投資の費用係数 κ がある程度大きいことを分析の範囲とすることを意味する。このとき Π_i は (x_i, y_i) に対して凹関数となる。この証明は付録 A.1 参照の事。純利潤関数に関して以下の命題を得る。

[†]これ以降クールノー均衡の内点解のみを考えるので、 $q_i^*(x_i, y_i, x_j, y_j) > 0$ かつ $q_j^*(x_i, y_i, x_j, y_j) > 0$ を満たす範囲の (x_i, x_j, y_i, y_j) を分析の対象とする。

命題 2. $q_i^*(x_i, x_j, 0, y_j) > 0$ を満たす (x_i, x_j, y_j) に対して, 式 (3) の $\Pi_i(x_i, x_j, y_i, y_j)$ において純利潤を最大化する y_i は $y_i > 0$ である.

証明. クールノー均衡において, $q_j^* = 1/3 \{a - 2[\bar{c} - x_j - \beta(x_i - y_i)] + [\bar{c} - x_i - \beta(x_j - y_j)]\}$ である. よって, $\partial q_j^*/\partial y_i = -2/3\beta$, $\partial P/\partial q_j = -1$ である. また, 仮定より $q_i^* > 0$. したがって, 戦略的効果は正の値をとる. $S'(y_i) = \theta y_i$ なので $S'(0) = 0$ である. したがって, $y_i = 0$ のとき, $(\partial P/\partial q_j)(\partial q_j^*/\partial y_i)q_i^* - S'(y_i) > 0$ が成立する. よって命題 1 より $y_i > 0$ で Π_i は最大値をとる. \square

3.2. 最適な情報セキュリティ水準

本節では x_i, x_j, y_j を所与としたときの企業 i の最適な情報セキュリティ水準 $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ について考察する. $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ は最大化問題

$$\max_{y_i \geq 0} \Pi_i(x_i, x_j, y_i, y_j) \geq 0$$

の解である. したがって, 式 (3) の y_i による一階の条件 $\partial \Pi_i/\partial y_i = 0$ を求め, それを y_i について解き,

$$\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j) = \frac{2\beta}{9\theta - 2\beta^2} [(a - \bar{c}) - 2\beta y_j + (2 - \beta)x_i - (1 - 2\beta)x_j] \quad (4)$$

を得る. $9\theta - 2\beta^2 > 0$ なので (証明は付録参照のこと) 式 (4) より \hat{y}_i は x_i に対して増加関数とわかる. つまり研究開発水準が増加するときには, 最適な情報セキュリティ水準は増加する. これは情報セキュリティに対する企業の一般的な感覚と整合的である.

情報セキュリティ水準と同様に, 最適な研究開発水準 $\hat{x}_i(y_i, x_j, y_j)$ は最大化問題

$$\max_{x_i \geq 0} \Pi_i(x_i, x_j, y_i, y_j) \geq 0$$

の解である. よって x_i による一階の条件 $\partial \Pi_i/\partial x_i = 0$ を求め, それを x_i について解き

$$\hat{x}_i(y_i, x_j, y_j) = \frac{2(2 - \beta)}{9\kappa - 2(2 - \beta)^2} [(a - \bar{c}) + \beta y_i - 2\beta y_j - (1 - 2\beta)x_j] \quad (5)$$

を得る. ここで $u := 9\kappa - 2(2 - \beta)^2$ とおき, 式 (4) の x_i に \hat{x}_i を代入して, 競争相手の投資行動のみを独立変数とした最適な情報セキュリティ水準

$$y_i^{OPT}(x_j, y_j) = \frac{2\kappa\beta}{\theta u - 2\beta^2\kappa} [a - \bar{c} - (1 - 2\beta)x_j - 2\beta y_j] \quad (6)$$

を得る. 仮定 2 により $\theta u - 2\beta^2\kappa > 0$ なので, $\beta = 0$ のとき $y_i^{OPT}(x_j, y_j) = 0$ となり, $\beta \in (0, 1]$ のとき以下の命題を得る.

命題 3. 1. $y_i^{OPT}(x_j, y_j)$ は y_j に対して減少関数である.

2. $y_i^{OPT}(x_j, y_j)$ は x_j に対して, $\beta < 1/2$ のとき減少関数であり, $\beta > 1/2$ のとき増加関数であり, $\beta = 1/2$ のとき一定である.

証明は付録 A.3 参照の事.

情報セキュリティ投資が戦略的代替の関係にあることを命題3の1は示す。つまり競争相手が情報セキュリティ投資を増加させた場合、自社の限界生産費用が増加するため、粗利潤が減少する。しかし、この減少を補うために、自社の情報セキュリティ投資を増やして粗利潤を増やすことは行わない。なぜなら、 $9\theta - 2\beta^2 > 0$ より、投資費用の係数が高いため、自社の情報セキュリティ投資を増やした時、粗利潤よりも投資費用のほうが大きく増加するためである。

一方、命題3の2が示す自社の情報セキュリティ水準 y_i^{OPT} と競争相手の研究開発水準 x_j との戦略的關係は、技術スピルオーバー β の大きさに依存して変化する。 y_i^{OPT} は式(5)を式(4)の x_i に代入して得られる。よって、 x_j の変化が y_i^{OPT} に及ぼす効果は、 x_j の変化が直接的に $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ に及ぼす効果と、 x_j の変化が自社の研究開発水準 x_i に及ぼす効果を介して間接的に $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ に及ぼす効果との2つの効果の和からなる。まず、 x_j の変化が直接的に $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ に及ぼす効果は、式(4)より $\beta < 1/2$ のときには負の値をとり、反対に $\beta > 1/2$ のときには正の値をとる。一方、 x_j の変化が $\hat{x}_i(y_i, x_j, y_j)$ を介して間接的に $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ に及ぼす効果は、式(5)より x_j の変化が $\hat{x}_i(y_i, x_j, y_j)$ に及ぼす効果が、 $\beta < 1/2$ のときには負の値をとり、反対に $\beta > 1/2$ のときには正の値をとる。このとき式(4)より $2 - \beta > 0$ なので、 x_j の変化が $\hat{x}_i(y_i, x_j, y_j)$ を介して間接的に $\hat{y}_i(x_i, x_j, y_j)$ に及ぼす効果もまた、 $\beta < 1/2$ のときには負の値をとり、反対に $\beta > 1/2$ のときには正の値をとる。よって直接的効果と間接的効果とが同符号になるので、これら2つの効果の和である x_j の変化が y_i^{OPT} に及ぼす効果は、 $\beta < 1/2$ のときには負の値をとり、反対に $\beta > 1/2$ のときには正の値をとる。したがって、 x_j の増加は、 $\beta < 1/2$ のときには自社の y_i^{OPT} を減少させ、反対に $\beta > 1/2$ のときには増加させる。つまり、 $\beta < 1/2$ ならば競争相手の研究開発水準 x_j に対して自社の情報セキュリティ水準 y_i^{OPT} は戦略的代替の関係になり、一方 $\beta > 1/2$ ならば反対に戦略的補完の関係になる。

4. ゲームの均衡

本章では均衡を求めて比較静学分析をする。4.1節でゲームの均衡を導出する。4.2節では市場規模の変化と技術スピルオーバーの変化とが、均衡における企業の最適な情報セキュリティ水準に対して与える効果を分析して、市場規模の縮小と技術スピルオーバーの増加とが発生したときの最適な企業の投資行動について考察する。4.3節では企業の情報セキュリティ投資による産業全体での研究開発水準の変化を分析する。

4.1. 均衡の導出

本節ではゲームの均衡を求める。以下を仮定する。

仮定 3. $\kappa > \frac{2}{9}(2 - \beta)(1 + \beta)$

仮定 4. $\frac{\theta}{\kappa} \geq \frac{\beta}{2 - \beta}$

仮定 5. $\frac{\theta}{\kappa} < \frac{2\beta^2 a}{2(2 - \beta)(1 + \beta)a - 9\kappa\bar{c}}$

以上の条件のもとで、均衡における投資水準 (x_1^*, y_1^*) と (x_2^*, y_2^*) とを求める。なお、 $\beta = 0$ において上記の条件を満たす均衡が存在しないため、これ以降は $\beta \in (0, 1]$ とする。実際には $\beta = 0$ のとき $y_i = 0$ であるため、これが分析に与える影響は少ない。4つの一階の条件 $\partial\Pi_1/\partial x_1 = 0$ および $\partial\Pi_1/\partial y_1 = 0$, $\partial\Pi_2/\partial x_2 = 0$, $\partial\Pi_2/\partial y_2 = 0$ から得られる連立方程式を

x_1 および y_1, x_2, y_2 について解き,

$$x_1^* = x_2^* = \frac{2(2-\beta)\theta(a-\bar{c})}{(2\beta^2+9\theta)\kappa-2(2-\beta)(1+\beta)\theta}, \quad (7)$$

$$y_1^* = y_2^* = \frac{2\beta\kappa(a-\bar{c})}{(2\beta^2+9\theta)\kappa-2(2-\beta)(1+\beta)\theta} \quad (8)$$

を得る. ここで仮定1から仮定5までの5つの仮定を満たすならば, 得られた投資水準の組 $((x_1^*, y_1^*), (x_2^*, y_2^*))$ はゲームの均衡である. 証明は付録A.4参照の事. 5つの仮定のうちで, 外生的に与えられたパラメータ β あるいは κ の値に依存して, 他の仮定を包含するものがある. つまり, 5つの仮定のうちで3つの仮定が満たされることによってゲームの均衡は成立する. まず, 仮定1と仮定3とは $\beta = 1/2$ のときを除いてそれぞれの右辺は異なる値をとり, $\beta < 1/2$ では仮定1が仮定3を包含して κ の制約として有効となり, 一方 $\beta > 1/2$ では仮定3が仮定1を包含して κ の制約として有効となる. また仮定2と仮定4とは κ の大きさによってどちらか一方の条件が有効になる. 具体的には $\kappa > 4(2-\beta)/9$ の場合には仮定4が θ/κ の制約として有効となり, $\kappa < 4(2-\beta)/9$ の場合には仮定2が θ/κ の制約として有効となり, $\kappa = 4(2-\beta)/9$ の場合にはどちらの仮定も同値となる. この β と κ との条件によって有効となる仮定の組み合わせを表1にまとめる.

表1: β と κ との条件によって有効となる仮定の組み合わせ.

条件	$\beta < 1/2$	$\beta > 1/2$
$\kappa > 4(2-\beta)/9$	仮定1かつ仮定4かつ仮定5	仮定3かつ仮定4かつ仮定5
$\kappa < 4(2-\beta)/9$	仮定1かつ仮定2かつ仮定5	仮定2かつ仮定3かつ仮定5

得られた (x_i^*, y_i^*) から以下の命題を得る.

命題 4. ゲームの均衡における最適な投資水準 (x_i^*, y_i^*) には以下の関係がある.

$$y_i^* = \frac{\beta\kappa}{(2-\beta)\theta} x_i^*. \quad (9)$$

情報セキュリティ水準と研究開発水準との間には, 均衡において式(9)が成り立つ. したがって, 技術スピルオーバー β がより大きくなるほど, そして投資費用係数の比 θ/κ が小さくなるほど, 所与の x_i^* に対する y_i^* は大きくなる. この研究開発水準と情報セキュリティ水準との関係は, 一般的な企業が持つ認識と整合的である.

4.2. 市場規模と技術スピルオーバーの変化が戦略に与える効果

本節では市場の規模や技術スピルオーバーの度合いに変化が生じた場合に, 企業の投資行動が均衡においてどう変化するかを考察する.

最初に, 市場規模の変化に対する y_i^* の変化を分析する. いま逆需要関数の切片 a の変化で市場規模の変化が表されるとして, y_i^* の a による比較静学分析を行なう. y_i^* を a で偏微分して

$$\frac{\partial y_i^*}{\partial a} = \frac{2\beta\kappa}{(2\beta^2+9\theta)\kappa-2(2-\beta)(1+\beta)\theta} \quad (10)$$

を得る. 式(10)右辺の分母は, 仮定3により正なので $\partial y_i^*/\partial a > 0$ である. よって, 以下の命題を得る.

命題 5. ゲームの均衡において y_i^* は a の増加関数となる。

つまり、市場規模の縮小によって収入や利潤が減少したとき、情報セキュリティ投資も費用削減の対象であるという、序章で述べた一般的な企業の投資行動と命題5とは整合的である。

続いて、技術スピルオーバーの変化に対する y_i^* の変化を分析するために、 y_i^* の β による比較静学分析を行なう。 y_i^* を β で偏微分して

$$\frac{\partial y_i^*}{\partial \beta} = \frac{2\kappa(a - \bar{c})[(9\theta - 2\beta^2)\kappa - 2(2 + \beta^2)\theta]}{[(2\beta^2 + 9\theta)\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta]^2} \quad (11)$$

を得る。式(11)の分母は正の値をとるので、分子の符号に依存して $\partial y_i^*/\partial \beta$ の符号は定まる。ここで以下を仮定する。

仮定 6. $\kappa > \frac{2}{9}(2 + \beta^2)$

この仮定は、 $\beta < 1/2$ のときに仮定3に包含され、 $\beta > 1/2$ のときに仮定3を包含する関係にある。なお、 $\beta = 1/2$ のときにこの仮定と仮定1と仮定3との右辺はいずれも $1/2$ で同じ値になる。いま

$$\hat{\theta} = \frac{2\beta^2\kappa}{9\kappa - 2(2 + \beta^2)}$$

とおくと、 $\theta > \hat{\theta}$ のときには $\partial y_i^*/\partial \beta > 0$ となり、 $\theta = \hat{\theta}$ のときには $\partial y_i^*/\partial \beta = 0$ となり、 $\theta < \hat{\theta}$ のときには $\partial y_i^*/\partial \beta < 0$ となる。よって以下の命題を得る。

命題 6. ゲームの均衡において $\theta > \hat{\theta}$ のときには y_i^* は β の増加関数であり、 $\theta < \hat{\theta}$ のときには y_i^* は β の減少関数であり、 $\theta = \hat{\theta}$ のときには y_i^* は β に対して一定である。

式(9)より

$$\frac{\partial y_i^*}{\partial \beta} = \frac{k}{(2 - \beta)\theta} \left[\frac{2}{2 - \beta} x_i^* + \beta \frac{\partial x_i^*}{\partial \beta} \right]$$

を得る。つまり、技術スピルオーバー β の変化が自社の情報セキュリティ水準 y_i^* に及ぼす効果は、その時の自社の研究開発水準 x_i^* による効果と技術スピルオーバー β の変化が自社の研究開発水準 x_i^* に及ぼす効果との和である。自社の研究開発水準 x_i^* による効果は正の値をとる一方、技術スピルオーバー β の変化が自社の研究開発水準 x_i^* に及ぼす効果は、

$$\frac{\partial x_i^*}{\partial \beta} = -\frac{2\theta(a - \bar{c})\{[9\kappa - 2(2 - \beta)^2]\theta + 2\beta\kappa(4 - \beta)\}}{\{[9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)]\theta + 2\beta^2\kappa\}^2} < 0,$$

となり負の値をとる。よって、これら正負2つの効果の和が正ならば技術スピルオーバー β の増加は自社の情報セキュリティ水準 y_i^* を増加させ、反対に負ならば自社の情報セキュリティ水準 y_i^* を減少させる。このように技術スピルオーバー β の変化に対して自社の情報セキュリティ投資の増減を一様には決定できない。この閾値となるのが費用係数の臨界値 $\hat{\theta}$ である。

つまり、情報セキュリティ投資の費用係数 θ が十分に大きくかつ技術スピルオーバー β が増加するようなときに、企業は情報セキュリティ水準を高める誘因がある。したがって、情報拡散の危険度が高くなる時、それに備えて情報セキュリティ投資を増やすべきであるという序章で述べた直感は、情報セキュリティ投資の費用係数が十分に大きい場合に限り正しいことがわかる。また、企業の行動を変化させる費用係数の臨界値 $\hat{\theta}$ は、研究開発投資の費用係数 κ を所与としたときに、技術スピルオーバーが最大となる時 ($\beta = 1$) に最大の値をとり、一方技術スピルオーバー β を所与としたときに κ が大きくなるにつれて臨界値は小さく

なっていく。その値は κ がある程度大きな値 (たとえば > 1) であるような場合に、 $\hat{\theta}$ は κ よりも小さな値となる。したがって、研究開発投資の費用係数が大きくなるほど、情報拡散の危険度が高くなる時に情報セキュリティ投資を増やすように企業は行動する。これは、研究開発への投資額が大きいほど、その成果の拡散を防ごうとする一般的な考え方に整合的である。

命題5および命題6から、市場規模の縮小と技術スピルオーバーの増加とが同時に発生する場合の、 y_i^* の変化について以下の系を得る。

系 1. a が減少し β が増加するとき、もし $\theta \leq \hat{\theta}$ ならば y_i^* は減少する。もし $\theta > \hat{\theta}$ ならば、 a の減少による y_i^* の減少分と β の増加による y_i^* の増加分との合計の符号に y_i^* の増減はしたがう。

まず情報セキュリティ投資の費用係数 θ が十分に低い場合には、市場規模の縮小に対して y_i^* は減少し、技術スピルオーバー β の増加に対しては y_i^* は減少または一定である。つまり、情報セキュリティ投資を減少させる事が最適な投資行動である。一方、その投資の費用係数が十分に高い場合には、市場規模の縮小に対応した最適な情報セキュリティ水準の減少分と、技術スピルオーバーの増加に対応した最適な情報セキュリティ水準の増加分との合計が正か負かによって、最適な投資行動としての情報セキュリティ投資の増減は決まる。このように、市場規模の縮小と技術スピルオーバーの増加とが同時に発生するとき、情報セキュリティ投資の費用係数が十分に高い場合と低い場合とで最適な投資行動は異なる。よって、こういった状況に対する IT 専門家の提言が序章で述べたように一様ではないのは、情報セキュリティ投資の費用に対する異なった前提に基づいて、それらの提言が行なわれたからと考える事ができるのである。

4.3. 情報セキュリティを行なわないときの研究開発投資

本節では前節までとは異なり、情報セキュリティ投資を企業が行なう場合と、情報セキュリティ投資をしないと各企業がコミットする場合とで、研究開発水準を比較して産業全体での研究開発水準の増減という観点から情報セキュリティ投資を分析する。

自社からの技術スピルオーバーによって競争相手が受ける恩恵を軽減することが、研究開発投資に対する企業の誘因を高めるとするならば、情報セキュリティ水準を高めることで、各企業の研究開発水準は増加すると予測できる。そこで情報セキュリティ水準が0のときの研究開発水準 x_i^N と x_i^* とを比較する。式(3)において $y_1 = y_2 = 0$ として $\partial \Pi_1 / \partial x_1 = 0$ と $\partial \Pi_2 / \partial x_2 = 0$ とを連立方程式とみて、 x_i について解き得られた企業の研究開発水準 x_i^N は

$$x_i^N = \frac{2(2 - \beta)(a - \bar{c})}{9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)}$$

となる[‡]。これより以下の命題を得る。

命題 7. ゲームの均衡において $x_i^* < x_i^N$ である。

証明は付録 A.5 参照のこと。

情報セキュリティ投資を行なわないと各企業がコミットした場合と比べて、情報セキュリティ投資を行なう場合の方が低い研究開発水準になることを命題7は示す。式(5)をみると、競争相手企業の戦略 (x_j, y_j) を所与とした場合には、最適な研究開発水準 $\hat{x}_i(y_i, x_j, y_j)$ は自社の情報セキュリティ水準 y_i とともに増加する。これは、情報セキュリティ投資が増加すると、

[‡]これは、d'Aspremont and Jacquemin[2] による研究開発競争の場合の最適な研究開発水準と同等である。肩付き文字の N は、no-investment in information security を意味する。

研究開発投資への誘因も高まることを意味する。実際、自社の情報セキュリティ水準が高まり、情報が競争相手に流出する水準が低くなると、自社の研究開発水準が上昇することへの違和感はない。しかし、対称なゲームの均衡においては、自社の情報セキュリティ水準 y_i と競争相手の情報セキュリティ水準 y_j との両方の変化を考えなければならないので、それが成り立たない。これは式 (5) より、 \hat{x}_i が、自社の情報セキュリティ投資から βy_i の効果を受け、競争相手の情報セキュリティ投資から $-2\beta y_j$ の効果を受けることからわかる。したがって、対称なゲームの均衡においては両社の情報セキュリティ水準が等しく $y_i^* = y_j^*$ となるので、両社の情報セキュリティ水準が自社の研究開発水準 x_i^* に及ぼす効果の和は $-\beta y_j^* (= -\beta y_i^*)$ となる。その結果 $x_i^* < x_i^N$ となる。これは、対称なゲームの均衡での研究開発水準は

$$x_i^* = \frac{2(2 - \beta)}{9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)} [(a - \bar{c}) - \beta y_j^*]$$

と書けることから確認することができる。したがって研究開発水準を高めるという観点においては、両企業ともに情報セキュリティ投資を行なわないというコミットメントを得られることが望ましい。

また費用係数 κ と θ とを所与とすると、技術スピルオーバーが多くなるにしたがって、情報セキュリティ投資を行なう場合と行なわない場合とで、それぞれのゲームの均衡での研究開発水準の差は大きくなる。図 1 は、 $a = 100$, $\bar{c} = 50$, $\kappa = 3$, $\theta = 3$ のとき、 x_i^* と x_i^N をグラフで表したものである。

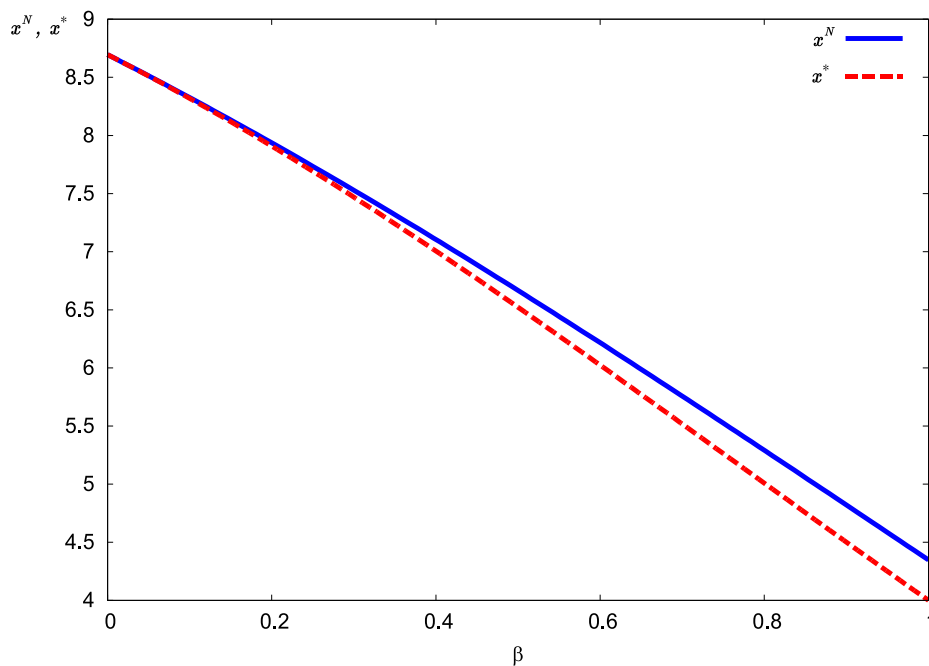


図 1: β に対する x_i^* と x_i^N . $a = 100$, $\bar{c} = 50$, $\kappa = 3$, $\theta = 3$.

5. 結論

本論文では、研究開発投資と情報セキュリティ投資とを同時に行うときの企業の最適な投資行動を考察した。得られた結果は以下のとおりである。まず、情報セキュリティ投資を利潤に直結しない費用に位置づけるといふ、多くの企業による考え方は必ずしも正しいとはいえない

い。それは、自社の情報セキュリティ水準の上昇が競争相手の供給量に負の効果を与え、情報セキュリティ水準が0のときにその上昇による正の戦略的效果が限界投資費用よりも大きいならば、情報セキュリティ投資が利潤を増加させるためである。つぎに、情報セキュリティ投資は戦略的代替の関係にあるため、競争相手が情報セキュリティ水準を引き上げたとき、自社の情報セキュリティ水準を引き下げることが最適な投資行動である。さらに企業の業績悪化にともなって情報拡散の脅威が増加する場合、情報セキュリティ投資の拡大・現状維持・縮小のうちでどれが企業の最適な投資行動であるのかという問いに対する答えは、そのいずれかに一元的に定まるものではなく、情報セキュリティ投資の費用係数の大きさに依存してそれは決定される。しかも、その投資の費用係数が十分に低いときは最適な情報セキュリティ水準は減少し、十分に高いときは最適な情報セキュリティ水準は増加するので、それにしたがって最適な情報セキュリティ投資は増減する。一方、産業全体での研究開発水準を高めるという観点では、均衡において企業の研究開発投資の水準は情報セキュリティ投資によって低下する。したがってこの点においては、企業の技術が拡散する事は望ましい。しかし実際には、各企業による情報セキュリティ水準に対するコミットメントが得られないかぎり企業が情報セキュリティ水準を0にする行動は選択しない。したがって序章で示した鉄鋼業の事例においても、外国企業に働きかけて情報セキュリティ投資を実施しないことを外国企業も自国企業とともにコミットするようなメカニズムを作り出すことが可能であるならば、そのときには両社が情報セキュリティ投資を実施したときよりも研究開発水準は高くなる。しかし、このようなメカニズムが存在しないときには、両国の企業が情報セキュリティ投資を行なうことで得られる均衡を選択することが、必ずしも悪いとはいえない。

最後に今後の展開を述べる。本論文では複占の競争モデルをあつかった。これを拡張して企業数が3以上の寡占をあつかうときには複数の定式化が可能である。たとえば同質な企業による寡占は最も単純な発想でモデルの拡張は容易である。その他には1つのリーダー企業とその他の企業の組み合わせ、同質な2つのリーダーと複数のフォロワーなどさまざまな状況を想定できる。現状では、同一産業内の研究開発協力に対して企業は重要性を感じていない。しかし、研究開発協力は実施するものの重要情報に限っては隠蔽するという意思決定は存在する。この状況を寡占市場に拡張して、協力企業の間では情報交換を阻害せずに研究開発水準を高める一方で、それ以外に対しては情報管理を行い技術スピルオーバーを低減するようなモデルの定式化も可能である。また、実際の企業が研究開発協力を行うパートナーは、サプライヤーや顧客などの垂直方向やグループ内が主であることを考えると、垂直方向の協力と情報セキュリティに関する研究の重要性は高い。今後、経営学の知見なども取り入れながら、モデルの定式化の可能性を考えたい。

謝辞

渡辺隆裕氏(首都大学東京)から、本稿に対して有益な助言を頂いたことに感謝の意を表します。また、詳細な助言を頂いた匿名の査読者の皆様に対して感謝の意を表します。

付録

A.1. 純利潤関数が凹関数となることの証明

証明. まず, 純利潤関数 $\Pi_i(x_i, y_i, x_j, y_j)$ の x_j, y_j をパラメータと考えて, x_i, y_i の関数と見て, このヘッセ行列を

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial x_i^2} & \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial y_i \partial x_i} \\ \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial x_i \partial y_i} & \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial y_i^2} \end{bmatrix}$$

とする. このとき Π_i が (x_i, y_i) に対して凹関数であるためには,

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial y_i^2} < 0, |\mathbf{H}| > 0,$$

となることを示せば良い. $\partial^2 \Pi_i / \partial y_i^2$ を求めると

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial y_i^2} = \frac{2}{9} \beta^2 - \theta.$$

仮定2より $\theta > 2\beta^2 \kappa / u$ なので

$$\begin{aligned} \frac{2}{9} \beta^2 - \theta &< \frac{2}{9} \beta^2 - \frac{2\beta^2 \kappa}{u} \\ &< \frac{2}{9} \beta^2 - \frac{2\beta^2 \kappa}{9\kappa} = 0 \end{aligned}$$

となり, $\partial^2 \Pi_i / \partial y_i^2 < 0$ は成立する.

つぎに,

$$|\mathbf{H}| = \frac{u\theta - 2\beta^2 \kappa}{9},$$

となる. 仮定2より $u\theta > 2\beta^2 \kappa$ なので, $|\mathbf{H}| > 0$ が成立する. 以上より, Π_i は (x_i, y_i) に対して凹関数である. \square

A.2. $9\theta - 2\beta^2 > 0$ の証明

証明. $9\theta - 2\beta^2 > 0$ を証明する.

仮定1より

$$\begin{aligned} 9\kappa &> 2(2 - \beta)^2 \\ 9\kappa - 2(2 - \beta)^2 &> 0 \end{aligned}$$

仮定2より

$$\theta[9\kappa - 2(2 - \beta)^2] > 2\beta^2 \kappa$$

仮定より $\kappa > 0$ なので上の式の両辺を κ で割り

$$\begin{aligned} 9\theta - 2(2 - \beta)^2 \frac{\theta}{\kappa} &> 2\beta^2 \\ 9\theta - 2\beta^2 &> 2(2 - \beta)^2 \frac{\theta}{\kappa} > 0 \end{aligned}$$

となる. よって $9\theta - 2\beta^2 > 0$ は成り立つ. \square

A.3. 命題3の証明

証明. まず, 命題3の1を証明する. $y_i^{OPT}(x_j, y_j)$ を y_j で偏微分して,

$$\frac{\partial y_i^{OPT}}{\partial y_j}(x_j, y_j) = -\frac{4\beta^2\kappa}{\theta u - 2\beta^2\kappa} = -\frac{4\beta^2\kappa}{(9\theta - 2\beta^2)\kappa - 2(2 - \beta)^2}$$

を得る. 仮定2を再整理すると $(9\theta - 2\beta^2)\kappa - 2(2 - \beta)^2 > 0$ となる. よって, この式は $\beta \in (0, 1]$ で負の値をとる. したがって命題3の1は成り立つ.

つぎに命題3の2を証明する. $y_i^{OPT}(x_j, y_j)$ を x_j で偏微分して,

$$\frac{\partial y_i^{OPT}}{\partial x_j}(x_j, y_j) = -\frac{2\beta\kappa}{\theta u - 2\beta^2\kappa}(1 - 2\beta) = -\frac{2\beta\kappa}{(9\theta - 2\beta^2)\kappa - 2(2 - \beta)^2}(1 - 2\beta)$$

を得る. $2\beta\kappa/(\theta u - 2\beta^2\kappa) > 0$ なので, この式の符号は $1 - 2\beta$ に依存する. したがって $\beta \in (0, 1]$ でこの式の値は, $\beta < 1/2$ のとき負となり, $\beta > 1/2$ のとき正となり, $\beta = 1/2$ のとき0となる. したがって命題3の2は成り立つ. \square

A.4. $((x_1^*, y_1^*), (x_2^*, y_2^*))$ が均衡であることの証明

証明. Π_i が x_i, y_i に対して凹関数であることにより (x_1^*, y_1^*) と (x_2^*, y_2^*) とは最適反応である. よって $((x_1^*, y_1^*), (x_2^*, y_2^*))$ がゲームの均衡であるためには, $\beta \in (0, 1]$ において $0 < y_i^* < x_i^*$ と $\bar{c} - x_i^* - \beta(x_j^* - y_j^*) > 0$ とが成り立つことを示せば良い.

まず $y_i^* \geq 0$ を示す. ここで $m := (2\beta^2 + 9\theta)\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta$ とおくと, 式(8)より

$$y_i^* = \frac{2\beta\kappa(a - \bar{c})}{m}$$

である. m は $m = 2\beta^2\kappa + [9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)]\theta$ と書ける. 仮定3より $9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta) > 0$ なので $m > 0$ である. よって $\beta \in (0, 1]$ で $y_i^* > 0$ となる. したがって $\beta \in (0, 1]$ において $y_i^* > 0$ が成り立つ.

つぎに $y_i^* \leq x_i^*$ となることを示す. これは $x_i^* - y_i^* \geq 0$ と等価なので

$$\begin{aligned} x_i^* - y_i^* &= \frac{2(2 - \beta)\theta(a - \bar{c}) - 2\beta\kappa(a - \bar{c})}{m} \\ &= \frac{2(a - \bar{c})[(2 - \beta)\theta - \beta\kappa]}{m} \end{aligned}$$

となり, 仮定4より $(2 - \beta)\theta \geq \beta\kappa$ なので $x_i^* - y_i^* \geq 0$ となる, よって $y_i^* \leq x_i^*$ が成り立つ. 以上より $0 < y_i^* \leq x_i^*$ が成り立つ.

つぎに, $\bar{c} - x_i^* - \beta(x_j^* - y_j^*) > 0$ を示す. いま $x_i^* = x_j^*$ なので, この不等式は $\bar{c} - (1 + \beta)x_i^* + \beta y_j^* > 0$ と書ける. この式の左辺の x_i^* と y_j^* とに式(7)と式(8)とを代入すると,

$$\begin{aligned} &\bar{c} - (1 + \beta)x_i^* + \beta y_j^* \\ &= \bar{c} - \frac{1}{m}2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta(a - \bar{c}) + \frac{1}{m}2\beta^2\kappa(a - \bar{c}) \\ &= \frac{1}{m} [m\bar{c} - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta(a - \bar{c}) + 2\beta^2\kappa(a - \bar{c})] \\ &= \frac{1}{m} \{ [m + 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta - 2\beta^2\kappa] \bar{c} + [2\beta^2\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta] a \} \\ &= \frac{1}{m} \{ 9\theta\kappa\bar{c} + [2\beta^2\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta] a \} \end{aligned}$$

と書ける。仮定5は $9\theta\kappa\bar{c} + [2\beta^2\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta]a > 0$ と書けるので、

$$\frac{1}{m} \{9\theta\kappa\bar{c} + [2\beta^2\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)\theta] a\} > 0$$

となり $\bar{c} - x_i^* - \beta(x_j^* - y_j^*) > 0$ が成り立つ。よって、 $((x_1^*, y_1^*), (x_2^*, y_2^*))$ はゲームの均衡であるといえる。□

なお、d'Aspremont and Jacquemin[2] の解が均衡であるための十分条件は Kawashige[9] を参照のこと。

A.5. 命題7の証明

証明. $x_i^N > x_i^*$ を示す. x_i^* は

$$x_i^* = \frac{2(2 - \beta)(a - \bar{c})\theta}{2\beta^2\kappa + [9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)]\theta}$$

と書ける。右辺の分子と分母とをそれぞれ θ で割り

$$x_i^* = \frac{2(2 - \beta)(a - \bar{c})}{2\beta^2\kappa/\theta + [9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)]}$$

を得る. x_i^N は

$$x_i^N = \frac{2(2 - \beta)(a - \bar{c})}{9\kappa - 2(2 - \beta)(1 + \beta)}$$

であり $2\beta^2\kappa/\theta > 0$ である。よって、 x_i^N の分母は x_i^* の分母よりも小さな値となる。したがって、 $x_i^N > x_i^*$ となり命題7は成立する。□

参考文献

- [1] K. Arrow: Economic welfare and the allocation of resources for invention. *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, (NEBR, Cambridge, 1962), 609–626
- [2] C. d'Aspremont and A. Jacquemin: Cooperative and noncooperative R & D in duopoly with spillovers. *The American Economic Review*, **40** (1988), 1133–1137.
- [3] Raymond De Bondt: Spillovers and innovative activities. *International Journal of Industrial Organization*, **15–1** (1997), 1–28.
- [4] María José Gil Moltó, Nikolaos Georgantzis, and Vicente Orts: Cooperative r&d with endogenous technology differentiation. *Journal of Economics & Management Strategy*, **14–2** (2005), 461–476.
- [5] J. Goodchild: 5 tips for managing security in a recession (*CSOonline.com*, 2009), "<http://www.csoonline.com/article/480175/5-tips-for-managing-security-in-a-recession>".
- [6] T. Ijichi, T. Iwasa, H. Odagiri, H. Keira, T. Koga, A. Goto, Y. Tawara, A. Nagata, and Y. Hirano: *Statistics on innovation in japan report on the japanese national innovation survey 2003 (j-nis 2003)* (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, National Institute of Science and Technology Policy, Tokyo, 2004).
- [7] M.I. Kamien, E. Muller, and I. Zang: Research joint ventures and R&D cartels. *The American Economic Review*, **82** (1992), 1293–1306.
- [8] R. Kawashige: Strategic investment in information security of firms: R&D spillovers and information management. *Tokyo Metropolitan University, Graduate School of Social Sciences, Research Paper Series*, **92** (2011).
- [9] R. Kawashige: R&D competition and cooperation with binding non-negativity constraints on production cost. *Journal of Business and Institutions*, **11** (2013), 19–34 (in Japanese).
- [10] Chrysovalantou Milliou: Endogenous protection of r&d investments. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, **42–1** (2009), 184–205.

- [11] T. Noda: Ibm exec warns against budget cuts on IT security (*NETWORKWORLD*, 2009), "<http://www.networkworld.com/news/2009/020309-ibm-exec-security.html>".
- [12] K. Suzumura: Cooperative and Noncooperative R&D in an Oligopoly with Spillovers. *The American Economic Review*, **82** (1992), 1307–1320.
- [13] 経済産業省: 情報セキュリティガバナンス導入ガイダンス (*Technical report*, 2009), "http://www.meti.go.jp/policy/netsecurity/docs/secgov/2009_JohoSecurityGovernanceDonyuGuidance.pdf".

河重隆一郎
首都大学東京
社会科学部研究科経営学専攻
〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1
E-mail: hclylang@gmail.com

ABSTRACT

THE FIRMS' STRATEGIC INVESTMENT IN INFORMATION SECURITY
AND R&D WITH SPILLOVERS

Ryuichiro Kawashige
Tokyo Metropolitan University

We investigate strategic investments of firms in information security and in R&D (research and development) by a Cournot model with R&D spillovers. We consider a two-stage duopoly game in which firms invest in information security and in R&D simultaneously before the firms compete in the Cournot market. We obtain the optimum level of the investments and an equilibrium of the game. In addition, this paper shows a sufficient condition that the information security investment of each firm increases the firm's net-profit. Moreover, we show that the information security levels of firms are strategic substitutes. On the other hand, the information security and the R&D of the rival firm are strategic complements for a small spillover and strategic substitutes for a large one. In the equilibrium, the information security level increases with a decrease in the market size and with an increase in the spillover-rate at low investment cost of the information security. We also show that the information security investment decreases the R&D level of the own firm.