

R & D 投資のリアルオプションモデル

西原 理

R & D のマネジメントにおいて、投資プロジェクトの価値評価や投資戦略の決定は、重要な問題である。近年、価値評価や意思決定を行う新しい手法として、金融オプションの価格付け理論から派生したリアルオプションアプローチが、注目を集めている。そこで、本稿では、リアルオプションアプローチを用いた R & D 投資プロジェクトの評価と意思決定について説明する。特に、R & D 投資の特徴である、「段階的な投資」、「技術的な不確実性」、「ライバル企業との競争」に着目したリアルオプションモデルを紹介する。さらに、リアルオプションアプローチを現実の問題に適用する際の手順や留意点についても述べる。

キーワード：R & D, リアルオプション, 段階的な投資, 技術的な不確実性, 競争

1. はじめに

従来、R & D などの投資プロジェクトは、プロジェクトが将来に生み出す利益から投資費用を差し引いた NPV (Net Present Value) によって、評価されることが多かった。しかし、NPV を用いた評価では、将来の不確実な状況に応じた柔軟な投資戦略（例えば、好況になったら追加投資を行ってプロジェクト規模を拡大する一方で不況になったらプロジェクトから撤退するといった戦略）を評価できないために、初期段階の R & D 投資では NPV が負となる場合も多く、適切な評価が難しかった。

このような問題を解決する新しい手法として注目を集めているのが、リアルオプションアプローチである。リアルオプションアプローチを用いると、投資戦略の柔軟性も考慮に入れたプロジェクト価値の評価が可能となる。さらに、この手法を用いると、価値評価を行うだけでなく、将来の不確実な状況に応じた最適な投資戦略（投資タイミングや投資規模、プロジェクトの種類を選択など）も導出できる。したがって、R & D のように将来の利益に関して不確実性が大きい投資プロジェクトの価値評価や投資戦略の決定に対して、NPV などの従来手法よりもリアルオプションアプローチは有効である。

近年では、リアルオプションに関する理論モデルの構築・分析といった学術的な研究だけでなく、コンサルティング会社などの実務家の間でもリアルオプション

ンアプローチが広まってきている。4 節で述べるように、この手法を現実の問題に応用する際には様々な困難が生じることは事実であるが、今後も一層の発展と活用が期待され、本稿でとりあげる価値も十分にあるのではないかと考えている。

本稿では、2 節で金融オプションとリアルオプションについて紹介した後、3 節で R & D 投資の特徴である「段階的な投資」、「技術的な不確実性」、「ライバル企業との争い」について着目したリアルオプションモデルを紹介する。また、4 節で、リアルオプションアプローチを現実問題に適用する際の手順と留意点についても説明する。

2. オプションとは

2.1 金融オプション

オプションとは、株価や金利、為替レートといった資産価格や指数の変動に基づいて買い手と売り手のペイオフが決定される金融派生商品である。市場で取引されているオプションは、主に、ヨーロッパ型とアメリカ型の 2 種類に分類される。

まず、ヨーロッパ型オプションを紹介しよう。資産 X の上に書かれた満期日 T 、行使価格 K のヨーロッパ型コールオプションとは、満期日 T に資産 X のあらかじめ決められた取引単位を、資産の市場価格に関係なく、価格 K で購入する権利を意味する。ここで、「ヨーロッパ型」は、権利を行使できる日が満期日のみであることを表し、「コールオプション」は、購入する権利であることを表す。

オプションがその上に派生するという意味で、資産 X をオプションの原資産と呼ぶ。 $X(t)$ を原資産の時

にしはら みち

大阪大学 金融・保険教育研究センター

〒560-8531 豊中市待兼山町1-3

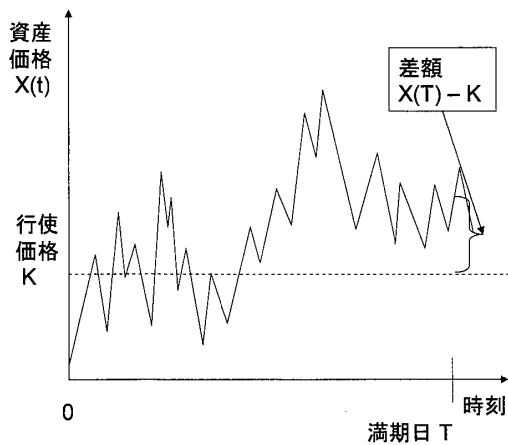


図1 ヨーロッパ型オプション

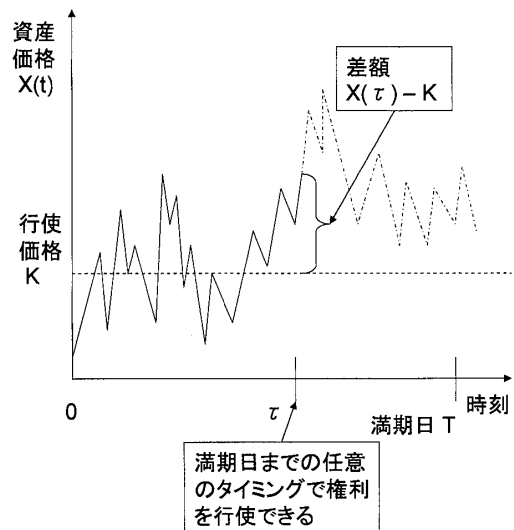


図2 アメリカ型オプション

刻 t における市場価格とする。満期日 T における原資産の市場価格 $X(T)$ が K よりも安ければ、権利を行使するよりも、市場で資産を購入したほうが安いので、オプションの保有者は権利を行使しない。逆に、市場価格が K よりも高ければ、オプションの保有者は権利を行使する。多くの場合、権利行使の際には、原資産の受け渡しの代わりに清算が行われ、オプションの保有者は、市場価格と K との差額 $X(T) - K$ を得ることができる。すなわち、ヨーロッパ型コールオプションの保有者は、満期日 T にペイオフ $\max\{X(T) - K, 0\}$ を得る (図1を参照)。

「ヨーロッパ型」が、権利を行使できる日が満期日のみであるのに対し、満期日までの期間にいつでも権利を行使できるオプションを「アメリカ型」と呼ぶ。つまり、資産 X の上に書かれた満期日 T 、行使価格 K のアメリカ型コールオプションとは、満期日 T までの任意のタイミングで、資産 X のあらかじめ決められた取引単位を、価格 K で購入する権利を意味する。ただし、オプションの保有者は、満期日 T までの資産価格の情報 $\{X(t)\}_{0 \leq t \leq T}$ を知った上で権利行使のタイミング τ を選べるのではなく、 τ 時点までの情報 $\{X(t)\}_{0 \leq t \leq \tau}$ で権利行使するか否かの判断を行わなければならない (図2を参照)。

オプションの適正な価格を求める理論が、70年代の Black-Scholes モデル[1]によって始まったオプション価格付け理論である。原資産価格 $X(t)$ を何らかの確率微分方程式に従うと仮定すると、原資産市場におけるリスク評価に対応する確率測度の変換を行うことによって、オプション価格は、ペイオフの期待割引価値として表される。例えば、上記のコールオプションの初期時点での価格は、ヨーロッパ型では、確率測

度の変換後の期待値

$$E[e^{-rT} \max\{X(T) - K, 0\}] \quad (1)$$

と表され、アメリカ型では、確率測度の変換後の期待値

$$\sup_{\tau \in T_T} E[e^{-r\tau} \max\{X(\tau) - K, 0\}] \quad (2)$$

と表される¹。ただし、 r は無リスク金利の利率²であり、 T_T は時刻 T 以前の停止時刻全体の集合である。停止時刻とは、直観的にいえば、図2のように、停止する (ここでは権利を行使する) か否かの判断が、その時点までの $X(t)$ の情報だけで行われるような時刻である。一般的には、アメリカ型オプションは、権利を行使するタイミングに自由度があるため、ヨーロッパ型オプションの価値に加えて、早期行使プレミアムと呼ばれるプラスアルファの価値が存在する。

現在、企業は、様々なリスクをヘッジするために、上で説明したコールオプション以外にも、様々な種類のオプションを売買しており、オプション価格付け理論は、その取引において重要な役割を果たしている。

2.2 リアルオプション

80年代に入り、金融オプションの価格付け理論は、天然資源の開発権といった金融オプションと同様な性

¹ 観測確率 P の下で期待値 $E^P[\cdot]$ をとると、通常、 $E^P[e^{-rT} X(T)] > X(0)$ となる。これは、原資産価格 $X(0)$ は将来にリスクがある分だけ市場で低く評価されているからである。このリスク評価を考慮して、変換後の期待値が $E[e^{-rT} X(T)] = X(0)$ となるように確率測度の変換を行った上で、期待割引価値 $E[\cdot]$ としてオプション価格は計算される。

² 本稿では、簡略化のため、無リスク利率は定数と仮定する。

質をもつ権利（リアルオプションと呼ばれる）の評価に用いられるようになっていった。特に、McDonald, Siegel[8]は、アメリカ型コールオプションの価格付け理論を用いて、企業が市場の状況を観察しながら最適なタイミングで投資プロジェクトを実行する問題を分析した。実際、図2や価格式(2)で、 $X(t)$ を投資プロジェクトの利益とし K を投資費用と読み替えると、企業がタイミングを選んで投資を行う問題とみなすことができる。

現時点ではNPVが負になるような（つまり $X(0)$ が K よりも小さい）投資プロジェクトであっても、このように将来的に投資を行うというオプション価値を考慮に入れると、正の価値として評価できるようになる。将来の状況に応じて投資タイミングや投資の拡大・縮小・撤退などを調節するという柔軟性を考慮した投資プロジェクトの評価や最適な投資戦略の導出は、従来のNPVなどの評価手法ではできなかったことである。

さらに、投資プロジェクトの利益に関するリスクが市場で評価されている場合³には、市場のリスク評価を用いた価値評価が可能となる。すなわち、将来の利益を現在価値に評価する際に用いる割引率をどのように決めればよいのかという従来手法の問題点が解消される。ただし、市場でリスクが評価されていないプロジェクトでは、従来手法と同様に、割引率の設定という問題が生じる。例えば、企業が投資タイミングを選べる問題(2)では、リスクが評価されているプロジェクトなら、リスク評価に対応する確率測度の変換（注1を参照）を行って r を無リスク利率とすればよいが、リスクが評価されていないプロジェクトでは、確率測度の変換はできず r を無リスク利率ではなく割引率として新たに設定する必要がある。

リアルオプションでは、オプションの構造や、保有者や利害関係者が複雑なので、金融オプションの価格付け理論をそのまま応用できる場合は少なく、問題に応じたモデルの構築が必要となる⁴。次節では、R&Dの特性を考慮したリアルオプションモデルを紹介する。

³ 例えば、原油の採掘プロジェクトでは、プロジェクトの価値は、市場で取引されている原油価格に大きく依存する。したがって、この場合、原油の取引を通じて、プロジェクトのリスクが市場で評価されているとみなすことができる。

⁴ リアルオプションの代表的な教科書であるDixit, Pindyck[2]で基本的なモデルが紹介されている。最近では、今井[12]などの日本語の教科書も出版されている。

3. R & D 投資に関するリアルオプション

R & D 投資の重要な特性として、「段階的な投資」、「技術的な不確実性」、「ライバル企業との競争」が挙げられる。本節では、この3つの特性に着目したリアルオプションモデルを紹介する。

3.1 段階的な投資

R & D では、一括して投資が行われるのではなく、段階的に投資が行われることが多い。段階的な投資プロジェクトでは、各ステップの終了時点で、次のステップにR & Dを進めるために必要な追加的な投資費用と、完成した製品から得られる予想利益などを比較しながら、次のステップにR & Dを進めるか否かの判断を行う（図3を参照）。

このような段階的な投資プロジェクトは、コンパウンドオプション（権利を行使するとオプションが得られるようなオプション）の評価手法を用いて評価することができる。例えば、図3では、企業は時刻 T_1 で投資を行うと、時刻 T_2 で投資を行うオプションを得ることができる。各ステップの研究開発期間と投資費用があらかじめ分かっている（つまり T_1, T_2 と K_1, K_2 が定数である）場合、投資プロジェクトの利益の初期時点での価値は(1)でペイオフをオプションの形に変形した式になる：

$$E[e^{-rT_1} \max\{E[e^{-r(T_2-T_1)} \max\{X(T_2) - K_2, 0\} | X(T_1)] - K_1, 0\}] \quad (3)$$

ただし、(3)で $E[\cdot | X(T_1)]$ は、時刻 T_1 で状態 $X(T_1)$ という条件の下での確率変数 $X(T_2)$ に関する条件付期待値であり、外側の期待値は、初期時点での確率変数 $E[\cdot | X(T_1)]$ に関する期待値である。

例えば、(3)で $X(t)$ がBlack-Scholesモデルと同様に幾何ブラウン運動に従う場合には、Geske[4]によ

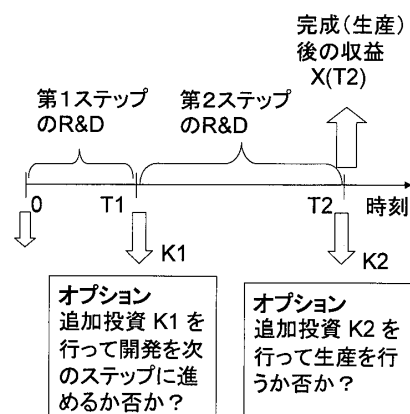


図3 段階的な投資

る解析解をそのまま用いることができる。コンパウンドオプションの評価手法を用いた R & D プロジェクトの評価については、Perlitz, Peske, Schrank[10]に詳しく述べられている。また、Lee, Paxson[7]は、投資費用も不確実であり 2 段階目の投資時刻 τ を満期日 T_2 までの任意の時点から選べる（つまり 2 段階目のオプションがアメリカ型である）モデルで R & D プロジェクトの評価を行っている。

3.2 技術的な不確実性

R & D 投資においては、開発した製品などの利益に関する市場の不確実性に加えて、技術的にも不確実な要素が含まれることが多い。技術的な不確実性の一例として、R & D 期間の不確実性が考えられる。R & D プロジェクトでは、新製品や新技術の開発に成功するまでの R & D 期間は、必ずしも前もって予測できるとは限らない。

R & D 期間の不確実性を捉えるには、市場の不確実性 $X(t)$ とは別に、R & D 期間を表す新たな確率変数 s を加えてモデル化を行えばよい。

例えば、企業が最適な投資タイミングを選べる問題(2)で、R & D 期間 s を考慮すると、(図 4 を参照) 以下の問題となる：

$$\sup_{\tau \in T_\tau} E[e^{-r\tau} \max\{E[e^{-rs}X(\tau+s)|X(\tau)] - K, 0\}] \quad (4)$$

ただし、(4)で $E[\cdot|X(\tau)]$ は、時刻 τ で状態 $X(\tau)$ という条件の下での条件付期待値であり、外側の期待値は、初期時点での確率変数 $E[\cdot|X(\tau)]$ と $e^{-r\tau}$ に関する期待値である。

例えば、(4)で $X(t)$ を Black-Scholes モデルと同様に幾何ブラウン運動に従うと仮定し、 $T = \infty$ ⁵ として s を指数分布とすると、Weeds[11]で分析されている

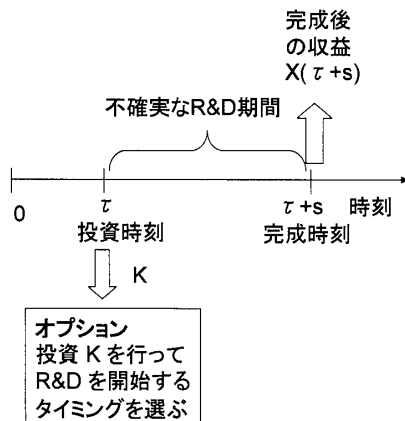


図 4 R & D 期間の不確実性

モデルとなる。

また、技術的な不確実性として、技術革新の不確実性を考慮した研究も行われている（例えば Huisman, Kort[6]）。技術革新の不確実性とは、当該プロジェクトに関連する分野で技術革新が起こることによって、研究開発が成功する可能性が上昇したり研究開発にかかる費用が安くなったりする可能性のことである。

3.3 ライバル企業との競争

ライバル企業が同様の製品を研究開発している場合、R & D プロジェクトの利益は、ライバル企業よりも先に開発に成功するか否かに大きく影響を受けることが多い。特に、特許争いや技術の規格争いでは、先に開発に成功した企業のほうが圧倒的に有利になる。ライバル企業に先を越される可能性を考慮して、投資プロジェクトの競争的な側面を捉えるために、タイミングゲームと呼ばれるゲーム理論の概念⁶が用いられることが多い。

ここでは、簡単のために、完全情報下の対称な 2 企業の争いを考えることにする。状態が $X(t)$ であるときに、相手より先にリーダーとして投資を行うときの期待利益と、逆に相手に先を越されてフォロアーとして投資を行うときの期待利益を比較する。もし、リーダーとして投資を行うときの期待利益がフォロアーとして投資を行うときの期待利益よりも大きければ、相手より先回りして投資を行うインセンティブが生じることになる。リーダーのインセンティブが生じるような $X(t)$ では、互いに相手より先回りしようと投資を早めようとするので均衡とはならない。結果として、均衡では、リーダーとフォロアーの期待利益が一致する時点まで投資タイミングが早まる（図 5 を参照）。競争がない場合に比べて投資タイミングが早まることにより、プロジェクトの価値は減少する。

例えば、Weeds[11]では、(4)を対称な 2 企業の競争モデルにした分析が行われており、Nishihara, Ohyama[9]では、開発する製品の水準についても同

⁵ リアルオプションの理論モデルの研究では、解析解を導出するために、原資産が幾何ブラウン運動に従うとし、満期を無限大と仮定することが多い。これは、実際のデータを入れた数値的な検証が難しいために、解析解を用いて定性的な性質を示そうとするためである。しかし、4 節で述べるように、現実問題に適用する際には、満期を有限とし確率過程を離散時間のモデルに設定するほうが適切な場合が多いであろう。

⁶ 詳細については、教科書 Fudenberg, Tirole[3]を参照。リアルオプションモデルにタイミングゲームを組み込んだ代表的な論文としては、Grenadier[5]が挙げられる。

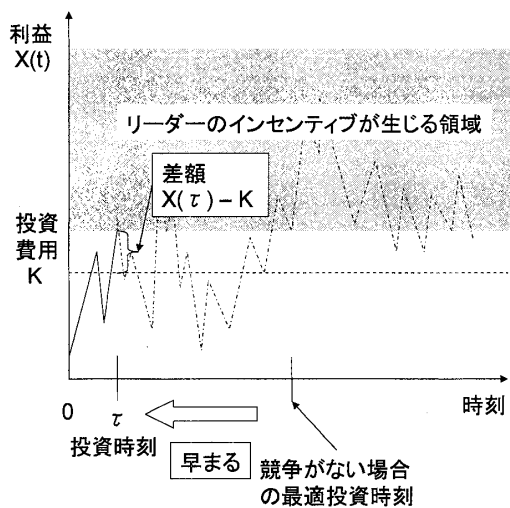


図5 ライバル企業との競争の影響

時に考慮した分析が行われている。

また、ゲーム理論を用いる方法とは別に、ライバル企業の動向に関する不確実性を外生的な確率過程で表現する方法もある。プロジェクトから得られる利益 $X(t)$ を下向きにジャンプするような確率過程でモデル化して、ジャンプの発生とライバル企業の開発の成功とを対応させるといった方法などである。

4. 現実問題への適用

本節では、リアルオプションアプローチを現実問題に適用する際の手順と留意点を説明する。以下に述べるものは一般的な手順であり、問題によっては、必ずしもこの手順通りに行うことができるとは限らないことに注意する。また、現実問題への適用方法については、Perlitz, Peske, Schrank[10]でも詳しく述べられているので参考にするとよい。

適用の手順

1. 原資産（投資判断を行う際に観察する対象）を決める。
2. オプションの種類（満期、ヨーロッパ型かアメリカ型か、など）を判断する。
3. 原資産が従う確率モデルとモデルに含まれるパラメータの予測・推定を行う。
4. 割引率を決める。
5. 競争的な状況のモデル化を行う。

手順1に関しては、（原資産が複数あっても構わないが）取捨選択を行うことにより、原資産として重要な要素を抜き出すことがポイントとなる。単純なモデルの場合、手順3で、連続時間のモデルを用いるほうが計算しやすくなることもある。しかし、R&Dに

関するリアルオプションでは、原資産価格を毎日のように観測できるものは少なく、離散モデルを用いるほうが現実にフィットしやすいであろう。金融データと比べてデータが少ないために、パラメータの予測・推定の作業は難しくなる。これはリアルオプションモデルの大きな欠点であるが、関連する企業の株価などの金融データを用いてうまく推定できる場合もある。

手順4の割引率の設定については、2節で述べたように、プロジェクトに関する不確実性が市場で取引されている場合には問題ない。しかし、R&Dプロジェクトで、将来のリスクが十分に市場で評価されているようなものは少ないであろう。また、手順5では、ライバル企業の技術力やR&D戦略に関して予想した上で競争モデルを構築する必要がある。

以上をまとめると、現実問題にリアルオプションアプローチを適用する際には、場合によっては、パラメータの設定や競争モデルの構築などに関して、主観的にならざるを得ない部分が生じる。このような状況では、絶対的・客観的な価値評価や最適な投資戦略の導出を行うことができないので、リアルオプションモデルは有用でないという意見もあるかもしれない。しかし、パラメータや競争の状況をいろいろと変化させてアウトプットである評価や戦略がどう変わるかを調べることも、投資プロジェクトの評価や意思決定における有用な判断材料となるであろう。主観的な部分で考えの異なる者同士が議論を行うベースとして利用するというのも、リアルオプションモデルの一つの活用方法なのかもしれない。

5. おわりに

本稿では、単一のR&Dプロジェクトの価値評価や投資戦略の決定をどのように行うべきかという問題を、リアルオプションアプローチという視点から概観してきた。しかし、R&Dのマネジメントには、複数のR&Dプロジェクトをポートフォリオとして捉えて評価や意思決定を行う大局的な視点も重要である。したがって、リアルオプションアプローチによる個々のプロジェクトについての局所的な視点と、複数のプロジェクトを管理・統括する大局的な視点をうまく組み合わせていく必要も生じるだろう。

参考文献

- [1] F. Black and M. Scholes, The pricing options and corporate liabilities, *Journal of Political Economy*, 81:

- 637-654, 1973.
- [2] A. Dixit and R. Pindyck, *Investment Under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton, 1994.
- [3] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, MIT Press, Cambridge, 1991.
- [4] R. Geske, The valuation of compound options, *Journal of Financial Economics*, 7 : 63-81, 1979.
- [5] S. Grenadier, The strategic exercise of options: development cascades and overbuilding in real estate markets, *Journal of Finance*, 51 : 1653-1679, 1996.
- [6] K. Huisman and P. Kort, Strategic technology adoption taking into account future technological improvements: a real options approach, *European Journal of Operational Research*, 159 : 705-728, 2004.
- [7] J. Lee and A. Paxson, Valuation of R & D real American sequential exchange options, *R & D Management*, 31 : 191-201, 2001.
- [8] R. McDonald and D. Siegel, The value of waiting to invest, *Quarterly Journal of Economics*, 101 : 707-727, 1986.
- [9] M. Nishihara and A. Ohyama, R & D competition in alternative technologies: A real options approach, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 51 : 55-80.
- [10] M. Perlitz, T. Peske and R. Schrank, Real options valuation: the new frontier in R & D project evaluation? *R & D Management*, 29 : 255-269, 1999.
- [11] H. Weeds, Strategic delay in a real options model of R & D competition, *Review of Economic Studies*, 69 : 729-747, 2002.
- [12] 今井潤一, リアルオプション投資プロジェクト評価の工学的アプローチ, 中央経済社, 東京, 2004.