

○鈴木昭彦（中部電力）

### 1. はじめに

研究開発投資は、通常、多段階の研究開発フェーズから構成され、長期間にわたって段階的に投資が実行されていく（投資はあらかじめ全額コミットされておらず、研究開発成果あるいは最終製品の市場規模ないし収益性が予想以上に悪いことが判明した場合にはそれ以降投資を実行する必要はない）という特徴を有している。このような特徴を有する研究開発投資プロジェクトの価値を評価する場合、通常事業プロジェクトの価値評価において用いられるDCF法（割引キャッシュフロー法）では限界があり、プロジェクトに内在するオプションの経済的価値を定量的に評価に組み込むことのできるリアルオプション法が適していると考えられる。

リアルオプションとは、事業価値評価（Valuation）手法の一つであり、事業に内在する不確実性（リスク）と経営の柔軟性（オプション）がもたらす価値を金融のオプション理論を応用して定量的に評価しようとするところにその名を由来する。リアルオプションの解法は、金融のオプションの解法に対応し、①解析解による解法、②バイノミナル・ラティスによる解法、③モンテカルロシミュレーションによる解法、の三手法に大別することができる。

本稿では、上記のリアルオプションの解法のうち、モンテカルロシミュレーション法に着目し、金融のオプションの世界において近年開発された最小二乗モンテカルロ法の研究開発投資のリアルオプションによる価値評価への適用について検討する。

## 2. 最小二乗モンテカルロ法

### (1) 基本コンセプト

「最小二乗モンテカルロ法」は、アメリカン・オプションの価値を一定レベルの正確性を維持しつつ高速かつ簡便に評価するための手法として、1998年に米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校の Longstaff 教授と Schwartz 教授によって開発されたものである。

「最小二乗モンテカルロ法」は、モンテカルロシミュレーションと最小二乗法を組み合わせた手法である。具体的には、アメリカン・オプションの価値をモンテカルロシミュレーションで評価する場合のネックであった「続行価値（権利を行使しないで留保しておいた場合に将来得られるであろうキャッシュフロー（の現在価値）の期待値）」を最小二乗法により推計し、当該推計値に基づいて、オプションの行使、非行使の判定をするものである。「続行価値を最小二乗法により推計する」とは、「いま原資産価格がいくらであれば、将来どれだけのキャッシュフローを期待できるか」を表す関係式を求めることである。

### (2) 最小二乗モンテカルロ法とリアルオプション

「最小二乗モンテカルロ法」が持つ最大の特長は、「高速計算の実現」ならびに「実装の簡便性」にある。かかる「最小二乗モンテカルロ法」が持つ特長は、金融資産との比較において比喩にならないほど複雑なキャッシュフローパターン、リスク特性、オプション構造を有する事業の評価（リアルオプション）において、その威力を一層発揮するものと期待される。また、事業価値評価においては、評価者が設定する前提条件によって計算結果が左右されるところが大きく、日々市場で取引される金融のオプションほどには計算精度を要求されないため、計算精度の問題に過敏になる必要性は低いと思われる。

以上から、最小二乗モンテカルロ法のリアルオプションへの適用は総体的に推奨されると考える。

## 3. 研究開発投資の価値評価への適用

研究開発投資プロジェクトの価値評価は、大きく分けて、次の二部から構成される。

- 前半部 「事業キャッシュフローシミュレーション」
- 後半部 「プロジェクト価値計算」

前半部は、シミュレーション用のスプレッドシートを構築し、モンテカルロシミュレーションを実施するステップである。モンテカルロシミュレーションにより、研究開発終了時点における事業価値  $V(T)$ 、およびリスクファクターのパス  $X(t)$ 、 $Y(t)$ 、 $Z(t)$  ( $t=1, 2, 3, \dots, T$ ) のデータセットを作成する。後半部は、これらのデータセットをもとに、最小二乗モンテカルロ法を用いて、プロジェクト価値計算を実施するステップである。

#### 4. モデル事例による検討

##### (1) 研究開発プロジェクトのモデル事例の概要

研究開発期間は2004年度から2010年度までの7年間を想定する。2011年度以降に、あるシステムを当社がリースし、電力を販売するプロジェクトのために設備・装置の開発をする研究開発プロジェクトを想定する。なお、投資の回収期間は2011年度から2020年度までの10年間とする。

なお、設備システムについて、市場規模および収支を予測し、研究開発完了時点（2010年度末時点）における事業価値を予測する。

なお、研究開発プロジェクトは表1の3フェーズから構成されると想定する。

表1 研究開発スケジュール

	第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ
研究期間	2004～07年度	2006～09年度	2010年度
研究課題	設備価格 コスト&効率	装置コスト コスト&効率	その他 安全基準等

・研究開発期間中（2004年度末から2009年度末まで）のリスクファクターは、以下の3つとし、ボラティリティの期間構造の設定も考える。

- ①設備価格  $X$ （正規分布）
- ②装置コスト  $Y$ （正規分布）
- ③電力価格  $Z$ （対数正規過程）

##### (2) 最小二乗モンテカルロアルゴリズム

###### （各時点における行使戦略の確定）

##### 7. 研究開発終了時点におけるプロジェクト価値の計算

研究開発終了時点におけるプロジェクト価値  $W(T)$  は、 $W(T) = V(T)$  によって表される。 $V(T)$ ：事業価値  
まず、上記式によって、研究開発終了時点（時点7）におけるプロジェクト価値  $W(7) (= V(7))$  を求める。

##### 1. 各時点における行使戦略の確定

次に、時点6における行使戦略を決定するために、時点6における続行価値を推計する。ここで、続行価値とは、翌年におけるプロジェクト価値に係る現時点における期待値を1年分割り戻した値であるから、翌年（時点7）におけるプロジェクト価値  $W(7)$  に係る時点6における期待値  $E[W(7) | F_6]$  を推計する。

すなわち、実現値  $W(7)$  を被説明変数、時点6における各リスクファクター  $X(6)$ 、 $Y(6)$ 、 $Z(6)$  の値を説明変数として、重回帰分析を行うことにより、次の推計式が得られる。

$$E[W(7) | F_6] = -0.048 \times X(6) - 0.029 \times Y(6) + 1374 \times Z(6) + 23007$$

ここで、(a)「時点6における期待値  $E[W(7) | F_6]$  の推計値を1年分割り戻した値（時点6における続行価値  $e^{-r} \times E[W(7) | F_6]$ ）」と (b)「追加投資額  $I(7)$ 」を比較する。(a)が(b)を上回る場合は、行使戦略は「継続」となり、両者の差額が時点6におけるプロジェクト価値  $W(6)$  となる。

一方、(b)が(a)を上回る場合は、行使戦略は「中止」となり、プロジェクト価値  $W(6)$  は0となる。

次に、時点5における行使戦略を決定するために、時点5における続行価値を推計する。先と同様、翌

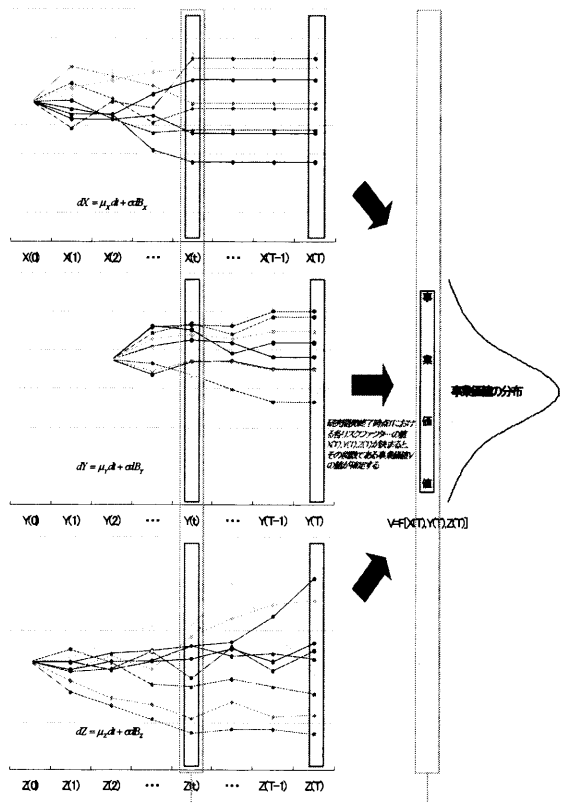


図1 最小二乗モンテカルロ法のコンセプト

年（時点6）におけるプロジェクト価値W(6)に係る時点5における期待値 $E[W(6) | F_5]$ を推計する。  
 $E[W(6) | F_5] = -0.037 \times X(5) - 0.017 \times Y(5) + 1096 \times Z(5) + 15934$

ここで、(a)「時点5における続行価値 $e^{-r} \times E[W(6) | F_5]$ 」と(b)「追加投資額 $I(6)$ 」を比較する。(a)が(b)を上回る場合は、行使戦略は「継続」となり、両者の差額がプロジェクト価値W(5)となる。一方、(b)が(a)を上回る場合は、行使戦略は「中止」となり、W(5)は0となる。以降、同様に、時点4、3、2、1における回帰式、行使戦略、プロジェクト価値を求めることができる。

各パスから生じるキャッシュフロー流れを求めるにあたっては、これらを基礎情報として各時点におけるプロジェクトの現実の状況（継続中か、それとも中止決定済みか）を判定する必要がある。

### (3) 期待キャッシュフロー計算

#### 7. キャッシュフロー流れの作成

行使戦略に基づいてそれぞれのパスから生じるキャッシュフロー流れを求め、それぞれを現在価値に割り引き、その総和を求める。時点0ないし時点6については、その時点においてプロジェクトが「継続中」の状態にある場合に限って、1年目ないし7年目の研究開発投資コスト $I(1)$ ないし $I(7)$ が、また、時点7（研究開発終了時点）については、時点6においてプロジェクトが「継続中」の状態にある場合に限って、研究開発終了時点におけるプロジェクト価値 $W(7)$ （＝事業価値 $V(7)$ ）が発生する。一方、プロジェクトが「中止決定済み」の状態にある場合は発生しない。

#### イ. 期待キャッシュフローの計算

最後に、それぞれのパスについて求めたキャッシュフロー流れの現在価値の総和の平均をとることにより、プロジェクト価値193を求める。なお、DCF法による正味現在価値は▲1,898であり、差額の2,091がオプション価値に相当する。

DCF法を想定した場合のネット・キャッシュフローの分布は、マイナスの大きな値からプラスの大きな値まで、広い範囲に分布している。これに対し、リアルオプション法を想定した場合の分布は、事業価値の見通しが明るくない状況では、プロジェクトを中止し、無駄な研究費の支出を食い止めることができることを想定しているため、マイナスの大きな値の領域には分布していない。

これが、まさしくオプション価値の正体にほかならない。

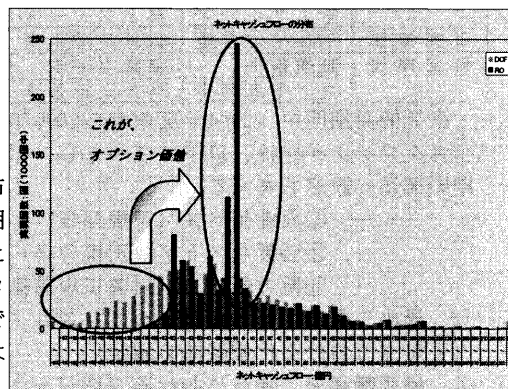


図2 プロジェクトから生じるネット・キャッシュフローの度数分布

### 5. 最小二乗モンテカルロ法とバイノミナル・ラティス法との乖離について

リアルオプション法によるプロジェクト価値は、DCF法による正味現在価値とオプション価値相当額（研究開発投資を途中で打ち切ることができる権利の経済的価値）から構成される。結果の比較にあたっては、リアルオプション法によるプロジェクト価値からDCF法による正味現在価値を引くことによって求められる“オプション価値相当額”に着目する。

最小二乗モンテカルロ法で続行価値の推計式に一次関数を用いた場合のオプション価値相当額は、2,091であったのに対し、事業価値ボラティリティの期間構造を考慮したバイノミナル・ラティス法を用いた場合の計算結果は、2,433となり、342（比率14%程度）の開きがみられた。

一方、最小二乗モンテカルロ法で続行価値の推計式に高次関数を用いた場合の計算結果は、2,267となり、バイノミナル・ラティス法を用いた場合の結果2,433との乖離は166（比率7%程度）に縮まった。

表2 結果の比較

	最小二乗モンテカルロ法		バイノミナル・ラティス法	
	一次関数	高次関数	期間構造考慮	期間構造考慮せず
リアルオプション法によるプロジェクト価値①	193	369	535	621
DCF法による正味現在価値②	-1,898	-1,898	-1,898	-1,898
オプション価値相当額①－②	2,091	2,267	2,433	2,519

バイノミナル・ラティス法を用いた場合の結果が高くなっている原因は、同法が、事業価値の分布（変

動プロセス)として、純粋な正規分布(変動プロセスとしては、ボラティリティの期間構造はあるにせよ、純粋な正規過程)を想定したことによる可能性が高い。本モデル事例の場合、事業価値に影響を与えるリスクファクターは3種類としたが、このうち、2種類は正規分布(正規過程)を想定したのに対し、1種類は対数正規分布(対数正規過程)を想定した。その帰結として、事業価値の実際の分布は、正規分布よりも、右側に歪んだ分布となり、この“右側に歪んだ分布”を純粋な正規分布とみなしたことによる影響として、高めの計算結果になったのではないかと推察される。

正規分布に比べ、事業価値シミュレーションによる分布は、若干ではあるが、右側に歪んだ分布になっている。なお、正規分布と比較した歪みの度合いを表す指標である歪度は、1.18である。ところで、中止オプションが行使されるのは、事業価値の見通しが明るくないケースであるから、一般的傾向として、グラフの左側の領域ほど中止オプションが行使される傾向が強いと考えられる。そして、事業価値の分布を純粋な正規分布とみなした場合は、実際の分布に比べて、グラフの左側の領域における度数が多く、それゆえ、前者の場合は、後者の場合に比べて、中止オプションが行使される頻度(中止オプションの持つ価値が具体的に実現する確率)が大きいと考えられる。このことは即ち、オプション価値が高くなることを意味する。

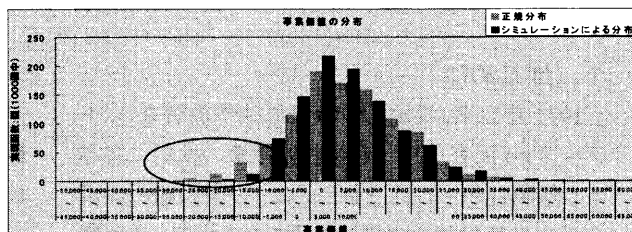


図3 事業価値の分布

## 6. 総括

本モデル事例分析は、事業価値に影響を与えるリスクファクターとして3種類のリスクファクターを想定するとともに、それぞれのリスクファクターの変動過程につき、ボラティリティの期間構造を想定するものであり、最小二乗モンテカルロ法の適用により、事業価値分布の歪み等の特性やリスクファクターの変動特性(ボラティリティの期間構造)を捨象することなく、かつ、実用的なスピードで価値評価を行えることが確認できた。究開発投資のリアルオプションによる価値評価への最小二乗モンテカルロ法の適用について、バイノミナル・ラティス法と比較した利点を表3に整理する。

表3 最小二乗モンテカルロ法の利点

	各観点からの利点	特に、最小二乗モンテカルロ法適用の必要性が高くなるケース
① 計算精度の観点	事業価値分布の歪みやリスクファクターの変動特性(ボラティリティの期間構造)を捨象することなく価値評価に反映しようとするものである点	ボラティリティの期間構造が顕著な場合、事業価値分布の歪みの度合いが顕著な場合
② 作業手間の観点	バイノミナル・ラティス法への翻訳作業が不要となる点	研究開発期間中に収入が発生する場合、事業立ち上げ後に改良研究を継続する場合、事業立ち上げ後の撤退・拡張オプション等を想定する場合等
③ 適用範囲の観点	研究開発計画(コスト、スケジュール)がぶれるリスクを価値評価に反映できる点	研究開発の進捗状況(事業化の時期)がプロジェクトの生涯キャッシュフローに重大な影響をもたらすと考えられる場合

<参考文献>

- 1) Tom Copeland, Vladimir Antikarov, 2001, "Real Options" TEXERE LLC.
- 2) Francis A. Longstaff and Eduardo S. Schwartz, 2001, "Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach," The Review of Financial Studies Spring 2001 Vol.14, No.1, pp.113-147.
- 3) 「ヘッジファンド・テクノロジー 金融技術と投資戦略のフロンティア」三上芳宏、四塚利樹(著)
- 4) Eduardo S. Schwartz, 2001, "Patents and R&D as Real Options," (2001 UCLA Working Paper)
- 5) Andrea Gamba, 2002, "Real Options Valuation: a Monte Carlo Simulation Approach," (2002 University of Verona Working Paper)
- 6) R. Jarrow and A. Rudd, "Approximate option valuation for arbitrary stochastic process," Journal of Financial Economics, Vol. 10, 1982, pp.347-369.