

# リアル・オプション実用モデル開発に関する研究

AlphaPoint Consulting, LLC. 佐藤成治

## A Study on Developing Real Option Application Models

AlphaPoint Consulting, LLC. Johji Satoh

### (Abstract)

The purpose of this paper is to discuss my study on developing real option application models. In the real world, real options are used as analytical tools for decision-making on investment in huge uncertain projects. Yet in my study, I have been trying to develop real option application models not just as analytical tools but also as strategic products like financial options. Most real option application models that have been developed are based on geometric Brownian motion such as the Black-Scholes model, which cannot be applicable to underlying assets or projects under incomplete situations. Real options, however, can be strategically used in any field with uncertain value changes. So I suggest real option transactions for non-marketable assets and projects under incomplete situations. I also develop a real option evaluation model that is based on the Bayesian estimation in order to realize the transactions. Finally I discuss the effectiveness and applicability of the model and real option transactions.

Keywords: Black-Scholes model, incomplete/imperfect information, incomplete market, Bayesian estimation, Radon-Nikodym theorem, and applicability.

## はじめに

リアル・オプションのマネジメントにおける有用性は、現状では、不確実性が高くかつ市場性のある大規模プロジェクトにおける投資意思決定ツールとしての利用など限定的である。その主な理由は、必ずしも現実的ではない完備情報性と市場性および原資産の幾何ブラウン運動性が仮定されたブラック・ショールズモデル(BSモデル)を用いての原資産価値評価が必要なためと考えられる。本研究は、この現状を打破し、リアル・オプションの戦略性と汎用性を高めるため、より現実的な非完備情報下におけるリアル・オプションの非市場性モデルを提唱し、その有意性と応用可能性を検討するものである。本稿では、まず、一般空間上での情報とリアル・オプションを定義し、それに基づいて、リアル・オプションの商品化を提唱し、次にそれを実現するためのリアル・オプション価値評価モデル式の導出とその有意性および応用可能性を検討する。最後にその一般的普及へ向けての実用性と意義考察および問題提起を試みることとする。

## 問題

### 1.1 情報空間とリアル・オプションの定義

あらゆる情報は、数学的に演算処理可能な一般情報空間上の元として仮定される。本稿では、ある一つの確率事象に対して、一意に情報が定まる状態を情報について完備であると言い、一意に定まらない状態を非完備であると言う。また、すべての参加者が、すべての利用可能情報を知っている状態を情報について完全であると言い、必ずしもすべての情報を知らない状態を不完全であると言うこととする。現実的には、錯綜した複数の情報が存在し、しかもすべての参加者が必ずしもすべての情報を知らない場合が多いから、我々は一般的に非完備情報空間上に不完全な状態で存在していると考えられる。

リアル・オプションについては、Myers(1977)が実物資産を可能な限り有利な条件で購入する機会の意味で最初に用いて以来、拡張的に普及し、現在では一般的に、不確実性の高いプロジェクトなどの意思決定チョイス(選択権)あるいはその思考方法を意味すると考えられている。通常のリアル・オプションは、その意味で用いられ、原資産の幾何ブラウン運動性を仮定したBSモデル(Appendix)がそのまま原資産やプロジェクトの価値評価ツールとして援用されている。しかしながら、私はここで、あるもの(実物資産やプロジェクトなど)を、一定期間内に一定の価格で売買する権利や契約をリアル・オプションと定義することとする。本稿では、主にこの意味でのリアル・オプション・モデル開発とその有意性および応用可能性の検討を行う。そもそもオプションとは、将来ある行動を取るための権利であり、義務ではない(Amram and Kulatilaka, 1999)。一般的な意思決定ツールとしてのリアル・オプションも私の提唱する売買権や契約としてのリアル・オプションも、本質は同じ一つの選択権としてのリアル・オプションであるが、後者は前者のコンセプトを戦略的に商品化することにより、一般社会における資産・プロジェクトや資金の流動化を促進しようと試みたものである。フィナンシャル・オプションを一般財・サービス・プロジェクトなどに拡張したものとイメージするなら、容易に理解されるであろう。

### 1.2 先行研究

先行研究としては、一般的意味でのリアル・オプションの意思決定ツールとしての有意性を、市場性のある資産やプロジェクトに当て嵌めて検証するもの、フィナンシャル・オプション理論を援用した意思決定モデル開発、モンテカルロ・シミュレーションを組み入れたモデルやファジー理論による評価モデル開発などが多数知られている。これらの研究では概ね原資産やプロジェクトの完備性が仮定されている。また、類似研究としてのフィナンシャル・オプション分野では、BSモデルの応用、対数正規分布・t分布・ポアソン分布やGibbs Samplerに基づいたベイズ推定(三井、2003年)などマルコフ過程に依存したモデルやARCH・GARCHモデルを応用したオプションモデル開発とそれらの有効性検証(渡部、2003年)などの実証研究が多数存在する。これらの研究は、オプション戦略開発や原資産の本質価値評価やオプションの理論価格推定などの点で、優れた先駆的、実用的あるいは実証的意義が認められる。Myers(1977)は、企業の成長機会のコール・オプション性に着目し、将来的課題として実物資産にたいするオプションとリアル・オプション市場の創設を示唆しているが、非完備な売買権や契約としてのリアルオ・プション性の探求を試みた先行研究は明示的には知られていない。更に近年、レビュ過程を用いた非完備市場モデル(宮原、2003年)も出現しているが、レビュ過程モデルは、ジャンプ拡散過程を複合ポアソン過程として説明しており、正規分布より裾野が広く適合性はあるが、基本的に拡張ランダム・ウォーク過程であり、非市場性資産やプロジェクトなどの本質価値評価の正確性は限定的である。不完備市場リスクを仮定ししかもウィナー過程とも整合的で線形化されたリアル・オプション評価とアメリカンオプションの最適化をも論考する意欲的な研究(長江・赤松、2003年)とそれを非市場性資産の価格評価枠組みとして拡張した不完備市場リアル・オプションの線形化モデルと最適化を論考した研究(赤松・長江、2004年)やベイズ推定を学習機会として組み入れた一般的リアル・オプション研究(Grenadier and Malenko, 2010)も出現している。非完備情報下(ゲーム論的意味)でのベイズ推定によるゲーム理論については、

Harsanyi (1967-1968) が知られているが、あくまで戦略論であり、正確なオプション価値を計算するものではない。完備市場における一般的な条件付請求権については、Arrow (1964) の先駆的研究がある。非完備市場におけるベイズ推定的期待形成による一般均衡実現については、Radner (1972) が知られている。意思決定問題におけるベイズ推定については、Arrow (1949) の研究が知られている。なお非完備情報空間について、Savage (1954) の状態空間アプローチと Harsanyi (1967-1968) のタイプ空間アプローチの同値性を情報構造の点から証明した Ichiishi and Yamazaki (2006) の優れた研究も出現している。最近特に、Akerlof (1970) が明示的に指摘した情報の非対称性(不完全性)と Savage (1954) によって確率における有意性を提示されたベイズ推定を用いた研究が増えている。本研究においては、一般的な状態空間アプローチを用いて、ベイズ推定の測度変換性に着目し、情報の非対称性にも対応している。その他リスク・マネジメントについては、ポートフォリオ理論や先物・オプション・キャップ・スワップ・スワップションなど完備な金融派生商品を応用したモデル開発・実証研究が多数存在する。

### 1.3 リアル・オプションの問題性

多くの確率モデルでは、一般的に情報の完備性および完全性が仮定されている。そうしなければ、確率が定義されないからである。しかしながらそれは、上述した様に必ずしも現実的ではない。我々人間が非完備情報空間上に不完全な状態で存在している以上は、そのような状態下でのより現実に近い形のモデル化が望ましい。従って、非完備情報空間上に確率を定義する必要がある。本稿では、非完備情報を完備化した期待値情報で近似的に考えるものとする。

現在一般的に知られているリアル・オプション理論では、その価値評価において、ファイナンシャル・オプション用のBSモデル (Appendix 参照) が援用されている。それは、原資産やプロジェクトが完備市場下にあり、それらの価値変動の幾何ブラウン運動性やマーチングール性および情報における完備性および完全性が仮定されていることを意味する。しかしながら、現実的には、原資産やプロジェクトの本質価値が、必ずしも幾何ブラウン運動性やマーチングール性および完備情報性を有するとは限らず、価格形成と情報の両面で非完備である場合が多いのである。

例えば、パソコン価格は、部品の積上げによってほぼ決定され、大きく変動する余地は、部品価格次第である。他社製品との競争による価格形成も存在するが、それも使用する部品の組合せ次第である。部品の品質性能と価格は一様ではなく非完備情報性を持つと言えよう。また、業務用ソフトウェア開発プロジェクトでは、開発費 (エンジニア単価・人月数・その他経費)、管理費 (保守・マニュアル・販売費その他) と利益の和を予想販売数で割ったものとして製品価格が決定される場合が多い。更に、新車開発プロジェクトでは、一定のコストパッケージ的価格形成やライバル車との比較による価格形成などのパターンがある。日本の新薬開発プロジェクトでも、原価算定方式や類似薬効既収載品との比較や外国平均価格を参考するなど一定要件によって、価格形成が決まって来る。これらの動きは幾何ブラウン運動ではなく、非完備である。このように、非市場性資産やプロジェクトの価格形成において幾何ブラウン運動性と完備性を仮定することは、実在する一定の規則性や複数情報を無視することとなり、BSモデルによる近似は全く正確性を欠いた価値評価となってしまう可能性が高い。それ故、幾何ブラウン運動性と完備性を仮定しない、より現実的な確率過程を用いたモデル開発が必要であると考えられる。更に、そのモデルを用いて、リアル・オプションの商品化を図る事により、リアル・オプションの戦略性を一層高めることが可能となるのである。

### 1.4 リアル・オプション取引の提唱

リアル・オプションを投資意思決定のための価値評価手段として用いるだけではなく、ファイナンシャル・オプション同様に、原資産やプロジェクトを一定の期間内に一定の価格で売買する権利や契約として商品化し、それを売買する取引を、リアル・オプション取引として、私はここで提唱したい。同様な取引は、天候デリバティブ、CO<sub>2</sub>排出権、農産物・原油等の商品先物・オプション取引などがすでに存在するが、企業の非市場性資産や非市場性プロジェクトなどの実物に対して、オプションを発行して売買する取引は存在しないか、少なくとも一般的には普及していない。このようなリアル・オプション取引を行うことにより、企業は資金調達が容易になり、リスクを投資家など第三者に分散させ、実物資産の流動性やプロジェクトの成功確率を一層高めることができると考えられる。そしてこのリアル・オプション取引が将来的に普及するなら、ファイナンス(資金調達)や投資意思決定やマーケティング戦略など企業の経営行動は、大きく変質することが予想される。

## 方法

### 2.1 方法論

そこで、このような非市場性資産やプロジェクトのリアル・オプション取引を実現するためには、リアル・オプション価値を評価するためのモデル式が必要となる。市場性のある原油探索プロジェクトや農産物などの商品オプション取引では、金融資産同様にBSモデルを援用できるが、非市場性実物資産や非市場性プロジェクト等に関しては、一般的にBSモデルを援用できないと考えられているからである。それ故、私はまず、BSモデルが非市場性資産やプロ

ジェクトに必ずしも援用出来ないことを、背理法を用いて簡単に論証する。次に、無裁定条件および幾何ブラウン運動性に基づかないリアル・オプション価値評価モデル式の導出を試みる。その導出過程においては、非完備情報空間上に確率を定義し、ベイズ推定を用いるなどの統計的方法を援用する。またモデル式有意性の検討には、数学的思考法および定性的・定量的分析法を用いるものとする。最後の結果考察においては、総括的観点からのリアル・オプション取引の有意性・実用性・将来的展望について、定性的分析法を用いて論考する。

## 2.2 研究の限界

本研究の限界は、まず、非市場性資産やプロジェクトのリアル・オプション取引が実在しないか有意なデータが存在しないため、現段階では実務によるモデル有意性の検証が不可能であることである。従って、この論文そのものが、未来へ向けての問題提起性の強いものとなっている。私の研究目的は、単なる数学的論証や理論モデルの提供ではなく、モデルの実用性と汎用性を目指したものである。それ故、モデル式導出とその有意性検討の面では、数学的厳密性を幾分犠牲にしている。また本研究では、非完備情報空間と不完全情報空間の構造的同値性を仮定した一般情報空間上に確率測度を定義し、期待値情報を用いて近似的なモデル化を行なっている。最後に、厳密な意味での先行研究が少ないため、保険なども含めた一般的な条件付請求権、意思決定ツールとしてのリアル・オプションやファイナンシャル・オプションその他のデリバティブ等類似取引や情報の非対称性、ベイズ推定の有意性やその応用等の先行研究を以って、先行研究調査とした。

## 結果

### 3.1 BS モデルの限定性

今、BS モデルが非市場性資産やプロジェクトにも必ず有効であると仮定すると、非市場性資産やプロジェクトは、情報と価格形成の両面で非完備である場合が多く、その価格変動が必ずしも幾何ブラウン運動に従うとは言えないの、BS モデルの前提条件である情報と価格形成の完備性および原資産の幾何ブラウン運動性に反することとなり、矛盾が生じる。従って、BS モデルは非市場性資産やプロジェクトには必ずしも有効ではなく、その限定性が証明される。

### 3.2 非完備情報下の確率

測度空間  $(\Omega, B, F)$  ( $\Omega$  ; 全情報集合、 $B$ ; 利用可能情報集合  $B \subset \Omega$ ,  $F(B)=1$ ) 上で定義された確率測度  $F$  を用いて、ある確率事象集合  $\{X_m\}$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ) に対して、その事象に関連する情報集合を  $\{I_m : i_m \in I_m \subseteq B\}$  とすると、一般的に  $I_m$  は非完備で一意に定まらず、錯綜する複数情報が存在し、その状態を  $j$  ( $j=1, 2, \dots, J$ ) で表現すると、ラプラスの原理から複数情報の期待値  $E[I_{jm}]$  によって判断するのが合理的なので、 $X_m$  が実現する確率は、 $F_I(X_m) = F(X_m | E[I_{jm}])$  によって定義される。

### 3.3 リアル・オプション価値評価モデル式の導出

前節の定義、問題意識や方法論に基づいて、リアル・オプション価値 (ROV) 評価モデル式を導出してみたい。原資産やプロジェクトの本質価値は、一般的にそれらから生み出される将来キャッシュフローの正味現在価値 (NPV) によって表されるので、そのように仮定すると、定義により、リアル・オプション価値は、測度空間  $(\Omega, B, F)$  上で、次のように表現される。

$$ROV := NPV \cdot F_I(P_t) + \sigma \cdot W(w_t) = F V_t \cdot e^{-rt} \cdot F_I(P_t) + \sigma \cdot W(w_t) \quad (t \in [0, n])$$

ここに、 $F V_t$  は  $t$  時点における原資産やプロジェクトのキャッシュフローの将来価値、 $r$  ( $=r_t$ ) は  $t$  時点における資本コストまたは無リスク資産金利、 $t$  は将来価値計測時点 ( $t \in [0, n]$ ,  $n$  は資産の耐用年数やプロジェクトの期日)、 $e$  は自然対数の底、 $F_I(P_t)$  は複数情報集合  $\{I_{jm} : i_{jm} \in I_{jm} \subseteq B\}$  の下で  $t$  時点における  $FV_t$  の実現確率  $P_t$  を変数とする確率関数 ( $F_I(P_t) \geq 0$ )、 $\sigma$  は原資産やプロジェクトの価値変動ボラティリティ (標準偏差)、 $W(w_t)$  は  $t$  時点のノイズ  $w_t$  を変数とする確率密度関数である。なお、原資産やプロジェクトへの投資額、権利行使価格 (所与で  $G$  とする) や取引コスト等は、キャッシュアウトフローとして  $FV_t$  の中に含まれ、原資産やプロジェクトのキャッシュインフローと相殺計算される (プット・オプションの場合は、 $G$  からその他の正味価値を引く)。ここで、 $F_I(P_t)$  に連続性を仮定したベイズ推定を適用すると、測度空間  $(\Omega, B, f)$  ( $B \subset \Omega$ ,  $f(B)=1$ ) 上で定義された確率測度  $f$  を用いて、次のように表現される。

$$F_I(P_t) = f_I(P_t | X_t) = f_I(X_t | P_t) / f_I(P_t) \quad (\text{a.e. } X \in B)$$

ここに、 $f_I(P_t | X_t)$  は、複数情報集合  $\{I_{jm} : i_{jm} \in I_{jm} \subseteq B\}$  の下で  $t$  時点における直前観察事象  $X_t$  が起こった場合の  $P_t$  の条件付確率測度、 $f_I(P_t)$  は  $\{I_{jm}\}$  の下での  $P_t$  の事前推定確率測度、 $f_I(X_t | P_t)$  は  $P_t$  の下での  $X_t$  の条件付確率測度、 $f_I(X_t)$  は  $\{I_{jm}\}$  の下での直前観察事象確率測度である。

ここで、簡単化のため、 $f_I(X_t)$  の期待値  $E[f_I(X_t)]$  をとると、 $F_I(P_t)$  式は次のようになる。

$$F_I(P_t) = f_I(P_t | X_t) \approx f_I(X_t | P_t) / E[f_I(X_t)] \quad (\text{a.e. } X \in B)$$

これを ROV 式に代入すると、

$$ROV \approx FV_t \cdot e^{-rt} \cdot f_I(X_t | P_t) / E[f_I(X_t)] + \sigma \cdot W(w_t) \quad (t \in [0, n], \text{ a.e. } X \in B)$$

また、 $FV_t$  が一意に定まらない場合、その複数状態  $k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ) を考慮して、更に第 1 項の期待値を取る必要があるので、求めるモデル式は以下のようになる。

$$ROV \approx E[FV_{kt} \cdot e^{-rt} f_I(X_{kt} | P_{kt}) / E[f_I(X_{kt})] + \sigma W(w_t)] \quad (t \in [0, n], \text{ a.e. } X \in B)$$

これによる計算可能性は自明で、幾何ブラウン運動性を仮定した場合に比べて、より精度の高い予測が期待される。

## 考察

### 4.1 リアル・オプション価値評価モデル有意性の検討

まず、上記 ROV モデル式右辺第 1 項においては、主観確率測度  $f_I(P_{kt})$  および同値な直前観察事象確率測度  $f_I(X_{kt})$  の絶対連続性を仮定すると、 $f_I(X_{kt} | P_{kt})$  も同値かつ絶対連続なので、ラドン・ニコディム定理による測度変換が成り立つことが理解される。また、リアル・オプション価値が、原資産・プロジェクトの本質価値に基づいている以上、その妥当性は高いと考えられる(Fig. 1 参照)。更に、非完備かつ不完全状態における価値評価は、単純平均によるよりも、各事象の生起確率によりウェイト付けされた期待値を用いることにより、より正確な予測が可能になると考えられる(Fig. 2 参照)。Jaynes(1957)は、予測において、情報エントロピーを最大にする状況下での利用可能情報による統計的推計の正当性を力説している。ノイズ項  $W(w_t)$  については、リアル・オプションの時間価値<sup>1</sup>や需給バイアスなどを含み、一般的にウィナー過程と見なされ、如何なる現実的システムにおいても存在するものであるが、リアル・オプション市場が存在しないので、一般的に小さいと考えられる。上記 ROV モデル式において、趨勢的に右辺第 1 項 > 第 2 項と仮定すると、時間発展に伴い、右辺は第 1 項の変動パターンに収束することが予想され、ROV の幾何ブラウン運動性やマーチングール性は必ずしも言えない。一方、趨勢的に第 1 項 < 第 2 項となるような場合には、時間発展に伴い、右辺は幾何ブラウン運動に収束すると考えられ、第 1 項の有界性は自明なので、ROV はセミマーチングールとなる。この場合は、市場性資産のリアル・オプションと同様な動きをするものと推測される。第 1 項 = 第 2 項となる場合は、物理学的重ね合わせ状態で、どちらとも言い難く、時間発展に伴う各項関数の趨勢的な振る舞いを見て行く必要がある。なお上記いずれの場合も、アウト・オブ・ザ・マネー(OTM: 含み損失発生状態)、アット・ザ・マネー(ATM: 含み利益ゼロ状態)では、オプションの性質上  $ROV = 0$  となるので、イン・ザ・マネー(ITM: 含み利益発生状態)が仮定された議論となっている。

従来の本質価値計算では、NPV を線形的かつ不可逆的に計算し、 $NPV > 0$  (ITM 状態) ならば投資可、 $NPV \leq 0$  (OTM または ATM 状態) ならば投資不可とする意思決定を行う場合が多かった。それでは不確実性の高いダイナミックな原資産や原プロジェクトの本質価値変動に対応できず、間違えた意思決定を導く可能性が高いことが予想される。また、上述した多くの先行モデルでは、基本的に完備性が仮定されたランダムな対数正規分布やその拡張形に依存しており、非完備な非市場性資産やプロジェクトにおける本質価値評価の正確性は限定的であるが、FV の直前状況（情報）を考慮したベイズ推定を用いることにより、より優れた予測が可能になるものと考えられるのである。このような思考方法は、近年の行動経済学によって指摘された人間思考のバイアス性や情報の非対称性が存在しても、直前の観察事象に基づいて予測を隨時訂正（測度変換）していくことになるので、より現実的で合理的な価値評価予測が可能となる。

ここで例えば、初期投資額 1 億円で 3 年の商品開発プロジェクトにリアル・コール・オプションを発行し、買手が 2 年目末に権利行使価格  $G = 1$  億円で権利行使したとする。簡単化のため取引コスト・税金や追加費用等を無視して、上記 ROV モデル式で、 $FV_1 = -1$  億円、 $FV_2 = 2$  億円、 $FV_3 = 3$  億円、 $r_1 = 2\%$ 、 $r_2 = 2.5\%$ 、 $r_3 = 3\%$ 、 $E[f_I(X_{k1})] = 0.5$ 、 $E[f_I(X_{k2})] = 0.6$ 、 $E[f_I(X_{k3})] = 0.4$ 、 $E[f_I(P_{k1})] = 0.8$ 、 $E[f_I(P_{k2})] = 0.7$ 、 $E[f_I(P_{k3})] = 0.6$ 、 $E[f_I(X_{k1} | P_{k1})] = 0.6$ 、 $E[f_I(X_{k2} | P_{k2})] = 0.5$ 、 $E[f_I(X_{k3} | P_{k3})] = 0.5$ 、 $\sigma = 0.25$ 、 $W(w_1) = 0.3$ 、 $W(w_2) = 0.2$ 、 $W(w_3) = 0.3$  が得られたとして計算すると、以下のような展開式で、 $ROV = 0.472$  となり、当該プロジェクトのリアルオプションバリューは 4,720 万円となる。

$$\begin{aligned} ROV = & -1 + (-1/1.02) \cdot 0.6 \times 0.8/0.5 + (2/1.025^2) \cdot 0.5 \times 0.7/0.6 - 1/1.025^2 + (3/1.03^3) \cdot 0.5 \times 0.6/0.4 \\ & + 0.25 (0.3 + 0.2 + 0.3) = 0.472 \end{aligned}$$

売手（発行者）は 4,720 万円の利益を先取りし、当該プロジェクトが予定通りの利益を生むなら、買手は 2 年目に権利行使して 2 億円、3 年目に 3 億円を得て、1 年目の -1 億円と権利行使価格 1 億円とオプション料 4,720 万円を相殺してトータル 25,280 万円の利益を得られるが、プロジェクトが予定通り進まなければ、その分利益が減少することになる。最悪の場合、買手は権利放棄して、オプション料 4,720 万円の損失となる。売手は投資額 1 億円も回収できず、先取りしたオプション料のみの利益で、5,280 万円の損失でプロジェクトを終了する。

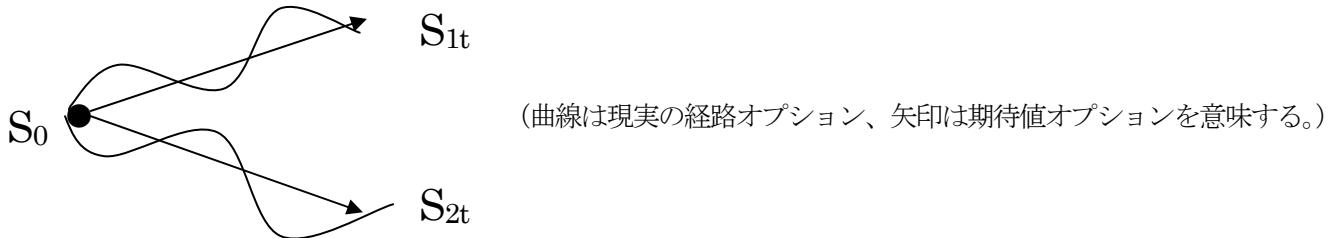
**Fig.1. Images of Pricing Process**

$$\boxed{\text{価 格}} = \boxed{\text{本質価値}} + \boxed{\text{ノイズ}}$$



(注) 価格は一般的に本質価値とその他情報のすべてを反映したノイズからなる。現実価格は本質価値の周りを上下する。このフィードバック過程が価格付け（価値評価）の必要条件となる。十分条件は需給一致である。

**Fig.2. An Image of Real Option**



(注) 原資産・プロジェクトの現状態を  $S_0$ 、未来時間  $t$  のある状態を  $S_{jt}$  ( $j=1, 2 \dots$ ) とすると、リアル・オプションの本質は、 $S_{jt}$  の状態価値の期待値  $E[S_{jt}e^{-rt}]$  を考えることである。

(市場が存在しなければ、状態価値は必ずしも一意に定まらないので、期待値で考える必要がある。)

1. オプションの時間価値の本質は、価格変動期待であり、主に需給関係に反映される。

#### 4.2 リアル・オプション取引の意義と展開例

このROVモデル式を用いることにより、非市場性資産やプロジェクトにリアル・オプションを発行し、原資産の流動性やプロジェクトの成功確率を高めることができるものと期待される。また、企業経営においては、新しいオプション（選択権）が加わることとなり、リスクヘッジあるいは保険機能が強化され、戦略立案・ファイナンス・マーケティングその他経営管理行動が大きく変質することとなる。例えば、商品開発プロジェクトにおいて、リアル・コール・オプション（商品買付権）を発行することは、開発資金を投資家など第三者から募ると同時に、開発に掛かるリスクを第三者とシェアすることになる。発行企業はオプション・プレミアムとしてのキャッシュフローを先取りし、経営基盤が安定する。投資家にとっては、リスク限定の少ない資金でレバレッジを効かせた実物投資が可能となる。当該商品がヒットすれば、莫大な利益が得られることとなる。また、ある食品メーカーがリアル・プット・オプション（商品売付権）付きで新商品を大量に小売店に卸し、プレミアムを先取りすることが出来る。その新商品が売れ残った場合は、小売店側でプット・オプション行使して、売れ残り品をメーカー側に一定の価格で引取らせることが出来る。小売店側では、オプション料および仕入れ値と権利行使価格の差額のみの支払い、機会損失を解消し、商品廃棄損もゼロにできるのである。あるいは企業がリアル・オプションを発行することにより、M&A・MBO・リストラや共同研究プロジェクトなどが容易になり、経営戦略の高度化も期待される。企業経営のみならず、学校・病院・公共事業などあらゆる分野でリアル・オプションを発行して、資金調達・リスク管理や経営の安定化や効率化を図ることが出来るのである。何よりも、リアル・オプション取引が単なるマネーレース性を超えた新たな価値創造に繋がる実物投資へのファイナンスとして機能することの意義は大きいと言えよう。更に、リアル・オプションを用いて、多様な仕組み商品やビジネスモデルを創造することも可能となるのである。

#### 4.3 リアル・オプション取引普及への課題

リアル・オプション取引が一般的に普及するためには、その意義と利便性を企業経営者やマネージャーレベルの人々に認知させる必要がある。そのためには、スペシャリストの養成とリアル・オプション商品開発が不可欠である。リアル・オプション取引は、市場が存在しないため、取引への参加者が少なく、実際の価格形成がフレキシブルではないことも予想され、相対取引やインターネットを利用した価格付け作業などが必要になると考えられる。また、リアル・オプション取引により、企業経営は一層の効率化が期待されるため、経営管理者には一層厳しい責任と対応能力が求められることになる。更に、リアル・オプションの発行により、粉飾取引も容易となり得るし、リアル・オプションが投機性やマネーレース性を帯び、バブルや価格急落などの経済的混乱を招く可能性も否定出来ない。従って、取引や価格形成の適正性を監視する第三者機関の設置や法規制の整備が不可欠である。

#### 4.4 結論

リアル・オプション取引のコンセプトは、必ずしも新しいものとは言えない。紀元前18世紀古バビロニア時代のハンムラビ法典には、リアル・オプション取引の萌芽を思わせる取引規定が多数見られる。ハンムラビ法典は当時の社会生活や商取引のガイドライン的性格を持っていたとされている（中田訳、1999年）、オプション類似（条件付請求権）取引が当時行われていたものと思われる。人類は長年に亘って、様々なオプション取引を行って来たことは間違いないのである（Ingersoll, 1989）。しかしながら、これらのオプション類似取引では、原資産の本質価値に基づいた正確な価格付けが行われていたとは推測され難い。現代にも類似のデリバティブ取引がすでに多数存在し、充分社会的に機能している。最も分かり易い例は、フィナンシャル・オプションである。これは、株式・指数・債券・為替・金利・商品などの市場性のある資産に対するものであるが、オプションを発行する対象を非市場性資産やプロジェクトなどに拡大する意義は非常に大きいと言えよう。オプションは戦略性が高く、実物投資へのファイナンスや保険機能、更には多様な仕組み商品を作ることも出来るからである。また、私の提唱するROVモデル式によるリアル・オプション評価手法を用いることによって、非市場性資産やプロジェクトの本質価値をより正確に評価出来るようになることは、取りも直さず、従来の一般的リアル・オプション思考に比べて、資産取引やプロジェクト投資の意思決定における成功確率が一層高まることを意味するのである。その意味でも、リアル・オプション取引や評価手法を、企業経営以外のあらゆる分野に拡大して行くことが期待されるのである。それは、Shiller (2003)の主張する社会全体をリスクヘッジする新しい金融システムを作ることに繋がると同時にアロー・ドブリュー一般均衡体系実現にも寄与するものと考えられる。加えて、リアル・オプションは、必ずしもBSモデルに依存すべきではなく、対象となる原資産やプロジェクトなどの価値変動パターンに相応しい最適なモデル開発が隨時行われるべきものと思われる。そして将来的には、社会全体の効率的な発展に資する多様なリアル・オプション市場を創設整備して行くことが期待されるのである。その場合には、完備性を仮定したBSモデルなどの対数正規分布やその拡張形に依存した諸モデルの有意性が再認識されることも予想されるが、完備・非完備両用のROVモデルの優位性が、将来的に検証されることを期待したい。フィナンシャル・オプションの拡張解釈から派生した経営の柔軟性を考えるリアル・オプションは、未だ完成した理論体系とは言えず、経営や社会の様々な課題解決に貢献する戦略商品やビジネスモデルとしてのリアル・オプション体系へと更なる進化が求められるのである。

<本研究論文は、大学院博士課程における拙英語研究論文“*A REAL OPTION FRAMEWORK FOR BUSINESS APPLICATIONS*”(2004)を下に、最近の研究成果を加えて、発展させたものである。>

#### 参考文献

- Aguerrevere, Felipe L. 2009. Real Options, Product Market Competition, and Asset Returns. *The Journal of Finance*, Volume 64: Issue 2: 957 - 983. The American Finance Association.
- 赤松隆・長江剛志 2004 年 経済リスクを考慮した社会基盤投資プロジェクトの動学的財務評価 土木学会論文集, No.751/IV-62: 39-54.
- Akerlof George A. 1970. The Market for “Lemons”: Quality Uncertainty and the Market Mechanism. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 84, No. 3: 488-500.
- Akerlof George A. 1984. *An Economic Theorist's Book of Tales*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Amram, Martha, and Nalin Kulatilaka. 1999. *Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World*. Boston: Harvard Business School Press.
- Arrow, K. J., D. Blackwell, and M. A. Girshick. 1949. Bayes and Minimax Solutions of Sequential Decision Problems. *Econometrica*. Journal of Econometric Society, Vol.17 No 3 and 4.
- Arrow, K. J. 1963. Uncertainty and The Welfare Economics of Medical Care. *The American Economic Review*, 58: 941-973.
- Arrow, K. J. 1964. The Role of Securities in The Optimal Allocation of Risk-Bearing. *Review of Economic Studies*, 31(2) 91-96.
- Balmann, Aflons, and Oliver Musshoff. 2001. Studying Real Options With Genetic Algorithms. *Computing in Economics and Finance*. Society for Computational Economics.
- Bernstein, Peter L. 1992. *Capital Ideas: The Improbable Origins of Modern Wall Street*. N. Y.: The Free Press.
- Bollerslev, T. 1986. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, Vol.31, No.3: 307-327.
- Buraschi, Andrea and Alexei Jiltsov. 2006. Model Uncertainty and Option Markets with Heterogeneous Beliefs.

- The Journal of Finance*, Volume 61: Issue 6: 2841 - 2897. The American Finance Association.
- Busse, Jeffrey A. and Paul J. Irvine. 2006. Bayesian Alphas and Mutual Fund Persistence. *The Journal of Finance*, Volume 61: Issue 5: 2251 - 2288. The American Finance Association.
- Carlsson, Christer and Robert Fuller. 2003. A Fuzzy Approach to Real Option Valuation. *Fuzzy Sets and Systems*, 139. 297–312.
- Chew, Donald H., ed. 1993. *The New Corporate Finance: Where Theory Meets Practice*. N. Y.: McGraw-Hill, Inc.
- Copeland, Tom and Vladimir Antikarov. 2001. *Real Options: A Practitioner's Guide*. (柄本克之監訳 2002 年 決定版リアル・オプション：戦略フレキシビリティーと経営意思決定 東洋経済新報社).
- Duffie, Darrell 1996. *Dynamic Asset Pricing Theory 2nd Edition*. (山崎昭・桑名陽一・大橋和彦・本多俊毅訳 1998 年 資産価格の理論：株式・債券・デリバティブのプライシング 創文社).
- Dixit, A., and R. Pindyck. 1994. *Investment Under Uncertainty*. Princeton: Princeton University press.
- Dixit, A., and R. Pindyck. 1995. The Options Approach to Capital Investment. *Harvard Business Review*, May-June. (鈴木一功訳 オプション理論が高める経営の柔軟性 ダイヤモンドハーバードビジネス 2000 年 9 月号 68–85).
- Engle, R.F. 1982. Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variances of United Kingdom Inflation. *Econometrica*, Vol.50, No.4 : 987-1007.
- Figlewski, Stephen, William L. Silber, and Marti G. Subrahmanyam. 1990. *Financial Options: From Theory to Practice*. Homewood: Business One Irwin.
- Giacotto, Carmelo, Gerson M. Goldberg, and Shantaram P. Hegde. 2007. The Value of Embedded Real Options: Evidence from Consumer Automobile Lease Contracts. *The Journal of Finance*, Volume 62: Issue 1: 411 - 445. The American Finance Association.
- Gilboa, Itzhak, Andrew W. Postlewaite, and David Schmeidler. 2008. Probability and Uncertainty in Economic Modeling. *Journal of Economic Perspectives*, 22(3): 173–188.
- Grenadier, Steven R. and Andrey Malenko. 2010. A Bayesian Approach to Real Options: The Case of Distinguishing between Temporary and Permanent Shocks. *The Journal of Finance*, Volume 65: Issue 5: 1949 – 1986. The American Finance Association.
- 平賀暁・佐藤徳之・前田祐治 2000 年 統合リスク・マネジメントによる分散効果と財務効果 ダイヤモンドハーバードビジネス 9 月号 112–121.
- Harsanyi, J. C. 1967-1968. Games with incomplete information played by "Bayesian" players, I-III. *Management Science*.
- Howell, Sydney, Andrew Stark, David Newton, Dean Paxson, Mustafa Cavus, Jose Pereira, and Kanak Patel. 2001. *Real Options: Evaluating Corporate Investment Opportunities in a Dynamic World*. Great Britain: Pearson Education Ltd.
- Huang, Chi-Fu. 1989. Continuous-time Stochastic Processes. In John Eatwell, Murry Milgate, and Peter Newman (Eds.) *The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Finance* 110-118. New York: W. W. Norton & Co., Inc.
- 本田俊毅 2005 年 企業価値評価と意思決定：バリュエーションからリアルオプションまで 東洋経済新報社
- 伊庭幸人 2005 年 ベイズ統計と統計物理 岩波書店.
- Ichiishi, Tatsuro and Akira Yamazaki. 2006. *Cooperative Extensions of the Bayesian Game*. Singapore: World Scientific Pub Co Pte. Ltd.
- 市石達郎・山崎昭 2008年 経済における不完備情報のベイジアン表現について：状態空間アプローチとタイプ空間アプローチ 明星大学経済学研究紀要 Vol. 39 No. 2.
- 今井潤一 2004 年 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.
- Ingersoll, Jonathan E., Jr. 1989. Option Pricing Theory. In John Eatwell, Murry Milgate, and Peter Newman (Eds.) *The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Finance* 199-212. N. Y.: W. W. Norton & Co., Inc.
- Jaynes, E. T. 1957. Information Theory and Statistical Mechanics. *The Physical Review*, Vol. 106, No. 4: 620-630.
- Jing-zhi Huang and Liuren Wu. 2004. Specification Analysis of Option Pricing Models Based on Time-Changed Levy Processes. *The Journal of Finance*, Volume 59: Issue 3: 1405 - 1440. The American Finance Association.
- Johannes, Michael. 2004. Statistical and Economic Role of Jumps in Continuous-Time Interest Rate Models. *The Journal of Finance*, Volume 59: Issue 1: 227 - 260. The American Finance Association.

- Karlan, Dean. S. 2005. Using Experimental Economics to Measure Social Capital and Predict Financial Decisions. *American Economic Review*, 95(5): 1688–1699.
- 刈屋武昭 2000年 金融工学とは何か：「リスクから考える」 岩波新書.
- 加藤俊春 2000年 リアル・オプション・アプローチの実態と効果 ダイヤモンドハーバードビジネス9月号 98–110.
- 今野浩 2000年 金融工学の世界 ダイヤモンドハーバードビジネス9月号 44–55.
- Kulatilaka, Nalin and Martha Amram. 1999. Disciplined Decision: Aligning Strategy with the Financial Markets. *Harvard Business Review*, January-February. (小林創訳 リアル・オプションが経営戦略を変える ダイヤモンドハーバードビジネス2000年9月号 98–110).
- Maheu, John M. and Thomas H. McCurdy. 2004. News Arrival, Jump Dynamics, and Volatility Components for Individual Stock Returns. *The Journal of Finance*, Volume 59: Issue 2: 755 - 793. The American Finance Association.
- Malliaris, A. G. 1989. *Stochastic Optimal Control*. In John Eatwell, Murry Milgate, and Peter Newman (Eds.) *The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Finance* 246-251. New York: W. W. Norton & Co., Inc.
- McMillan, Lawrence G. 1993. *Options As A Strategic Investment. 3rd Edition*. NY: New York Institute of Finance.
- Merton, Robert C. 1989. Continuous-time Stochastic Models. In John Eatwell, Murry Milgate, and Peter Newman (Eds.) *The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Finance* 103-109. New York: W.W. Norton & Co.,Inc.
- Merton, Robert C. 1989. Options. In John Eatwell, Murry Milgate, and Peter Newman (Eds.) *The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Finance* 213-218. New York: W. W. Norton & Co., Inc.
- 三井秀俊 2003年 Gibbs Sampler を用いたベイズ推定によるオプション評価の方法 日本大学産業経営研究 第25号 69–88.
- 宮原孝夫 2003年 株価モデルとレビュ過程 朝倉書店.
- Moore, Lyndon and Steve Juh. 2006. Derivative Pricing 60 Years before Black-Scholes: Evidence from the Johannesburg Stock Exchange. *The Journal of Finance*, Volume 61: Issue 6: 3069 - 3098. The American Finance Association.
- Mun, Johnathan. 2003. *Real Option Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Myers, S. 1977. Determinants of Corporate Borrowing. *Journal of Financial Economics*, 5: 147–175.
- 長江剛志・赤松隆 2003年 不完備市場リスク要因を考慮したリアル・オプション評価 応用地域学研究論文集8(2) 81–93.
- 中田一郎訳 1999年 ハンムラビ「法典」 リトン.
- 津田博史・中妻照雄・山田雄二編 2008年 非流動性資産の価格付けとリアルオプション 朝倉書店
- 野口悠紀雄・藤井眞理子 2000年 マーチングールと資産価格理論 ダイヤモンドハーバードビジネス9月号 58–67.
- 大野克人・高橋敦 2000年 リスクの最適化がもたらす収益の安定化 ダイヤモンドハーバードビジネス9月号 32–41.
- Radner, Roy. 1972. Existence of Equilibrium in Plans, Prices, and Price Expectations in a Sequence of Markets. *Econometrica*, Vol. 40:2 289-303.
- Ritchken, Peter. 1987. *Options: Theory, Strategy, and Applications*. Glenview: Scott, Foresman and Company.
- Ross, Stephen A. 1989. Finance. In John Eatwell, Murry Milgate, and Peter Newman (Eds.) *The New Palgrave: A Dictionary of Economics, Finance* 1-34. New York: W.W. Norton & Co.,Inc.
- 里吉清隆・三井秀俊 2006年 マルコフ・スイッチング・モデルによるオプション評価の実証研究 日本大学産業経営研究 第28号 51–71.
- Sala-I-Martin, Xavier, Gernot Doppelhofer, and Ronald I. Miller 2004. Determinants of Long-Term Growth: A Bayesian Averaging of Classical Estimates (BACE) Approach. *American Economic Review*, 94(4): 813–835.
- Savage, L.J. 1954. *The Foundations of Statistics*. New York: Wiley.
- Shiller, Robert. 2003. *The New Financial Order: Risk in the 21st Century*. (田村勝省訳 2004年 新しい金融秩序：来るべき巨大リスクに備える 日本経済新聞社).
- Shreve, Steven E. 2004. *Stochastic Calculus for Finance I: The Binomial Asset Pricing Model*. (長山いづみ他訳 2006年 ファイナンスのための確率解析 I : 二項モデルによる資産価格評価 シュプリンガー).
- Shreve, Steven E. 2004. *Stochastic Calculus for Finance II: Continuous-Time Models*. New York: Springer.
- Sornette, Didier. 2003. *Why Stock Markets Crash*. (森谷博之監訳 2004年 入門経済物理学：暴落はなぜ起こるの

か？ PHP 研究所).

Stroock, Daniel W. 2003. *Markov Processes From K. Ito's Perspective*. Princeton: Princeton University Press.

Sufi, Amir. 2007. Information Asymmetry and Financing Arrangements: Evidence from Syndicated Loans.

*The Journal of Finance*, Volume 62: Issue 2: 629 - 668. The American Finance Association.

Trigeorgis, Lenos. 2002. Real Options and Investment Under Uncertainty: Why Do We Know? *National Bank of Belgium Working Paper*, No. 22. Brussels: National Bank of Belgium.

森村英典・木島正明 1995 年 ファイナンスのための確率過程 日科技連出版社

渡部敏明 2003 年 日経 225 オプションデータを使った GARCH オプション価格付けモデルの検証 日本銀行金融研究所金融研究第 22 卷別冊第 2 号。

渡部敏明・佐々木浩二 2006 年 ARCH 型モデルと” Realized Volatility ”によるボラティリティ予測とバリュー・アット・リスク 日本銀行金融研究所金融研究第 25 卷別冊第 2 号。

Weili, C. and Hui Xue. 2009. A Bayesian's Bubble. *The Journal of Finance*, Volume 64: Issue 6: 2665 - 2701. The American Finance Association.

Yuan, Kathy. 2005. Asymmetric Price Movements and Borrowing Constraints: A Rational Expectations Equilibrium Model of Crises, Contagion, and Confusion. *The Journal of Finance*, Volume 60: Issue 1: 379 - 411. The American Finance Association.

## Appendix :

### 1. ブラック・ショールズ・モデル

配当など支払いがない場合

$$C = S \cdot N(d_1) - e^{-rt} \cdot E \cdot N(d_2) \quad P = -S \cdot N(-d_1) + e^{-rt} \cdot E \cdot N(-d_2)$$

配当など支払いがある場合

$$C = e^{-qt} \cdot S \cdot N(d_1) - e^{-rt} \cdot E \cdot N(d_2) \quad P = -e^{-qt} \cdot S \cdot N(-d_1) + e^{-rt} \cdot E \cdot N(-d_2)$$

$$\ln(S/E) + (r - q + \sigma^2/2)t$$

$$d_1 = \frac{\ln(S/E) + (r - q + \sigma^2/2)t}{\sigma \sqrt{t}}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{t}$$

ここに、C はコールオプション(買付権)価格、P はプットオプション(売付権)価格、S は原資産の市場価格、

$N(d)$  は累積正規分布関数、e は自然対数の底、q は配当性向など支払い金利、r は無リスク金利、

t は満期までの日数、E は権利行使価格、 $\sigma$  は原資産価格のボラティリティを表す。

## 著者紹介

佐藤成治：ラシュモア大学大学院博士課程修了 (Ph.D. 先端経営管理科学専攻)。AlphaPoint Consulting, LLC.

代表コンサルタント。ファイナンス・リアルオプション・経済学・一般科学の経営管理学への応用、ビジネスモデル開発等を中心とした研究活動を展開している。