

## 特集・生命科学の事業化

# 生命科学の事業化への タイミングオプションの応用

藤原 孝男\*

## 序

最近の新薬承認の約25%はバイオ医薬で、今後、生命科学の研究成果の実用化につれて化学合成低分子薬に対するバイオ医薬の割合の増加が期待される。しかし、2006年度の米国政府の基礎研究予算の約60%の高割合をはじめ、日米欧政府の生命科学への基礎研究投資が医学系大学を中心に大きな比重を占める中で、逆に製薬大企業は基礎研究よりも臨床開発にR&D資源を集中させている。創薬型バイオベンチャーは製薬大企業よりも迅速な基礎研究成果の事業化によってこの空隙の充足を期待されるが、資源制約から倒産率が高い。すなわち、当初からバイオ医薬が製薬大企業ではなくバイオベンチャーによって推進されてきたにもかかわらず、米国でのバイオベンチャーの多くは赤字で、倒産率も高く、GenentechやAmgenのようにごく限られた企業のみが製薬大企業と伍して競争できるに過ぎない[1][2]。例えば、米国ではバイオベンチャー数約1500社、株式公開企業約300社に対して黒字企業数十社で、ほとんどが赤字企業である。加えて、日本ではバイオベンチャー数約500社、米国に比較して創薬系バイオベンチャー数の割合が低く、株式公開企業22社であり、黎明期である。日本のバイオベンチャー数は増えてきたが、未だ米国に比較して少なく、バイオベンチャー

と基礎研究機関、製薬企業、ベンチャーキャピタルなどとの間の連携が機能してなくバイオベンチャーの生態系は未熟である。

米国のサンフランシスコ湾エリア、ボストン、及びサンディエゴは世界的なバイオクラスターとして注目されているが、米国では何故、多数の赤字バイオベンチャーが新陳代謝を前提としても存在できるのであろうか。基本的に、長期間遂行しないと成果が実現できなく且つ高リスクの新プロジェクトに、何故、不可逆的で大規模な埋没費用・時間を反復的に投資できるのであろうか。他方、米国では大多数が赤字でもさらに多数の企業が絶えず創業するのに、何故、日本では創業件数が相対的に少ないのであろうか。また、もしも、米国のバイオベンチャーモデルにブレイクスルーの経済的合理性があるのなら、日本に移植可能であろうか。

このような問題意識に対して、本稿では分析枠組みとしてリアルオプション (Real Options) を用いる。リアルオプションとは、ファイナンスデリバティブ (Financial Derivatives) の概念・手法を実物資産に応用するアプローチを指し、画期的で有望ではあるが高リスクのプロジェクト遂行の経済的妥当性の評価機能が期待できる [3]。中でも、不確実な収益のプロジェクトに対する不可逆的な埋没費用の投資には、不確実性が低下するまで開始を待つ延期オプ



\* Takao FUJIWARA  
豊橋技術科学大学工学部人文・社会工学系 教授  
1984年名古屋大学大学院経済学研究科博士課程満期退学, Department of Humanities and Social Engineering,  
1994年博士(経済学)  
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1  
0532-44-6946 (勤務先)  
fujiwara@hse.tut.ac.jp

Professor,  
Division of Planning and Management,  
Department of Humanities and Social Engineering,  
Toyohashi University of Technology  
1-1 Hibirigaoka, Tenpaku  
Toyohashi, Aichi 441-8580 (office)

ションとしてのタイミングオプション (Timing Option) が応用可能であり、特に、タイミングオプションの特徴・機能について検討する。

以上の問題意識及び方法論を基礎に、本稿では、バイオベンチャー生態系のモデル化とリアルオプションの活用可能性に注目し、概念証明過程へのリアルオプションの応用に加えて、主に断続的な新プロジェクトへの投資決定を可能にするタイミングオプションの基本モデルと、原資産の確定論及び確率論の仮定における各モデルの特性・機能を検討する。特に、合理的な意思決定の再現可能性について考察する。

## 1. バイオベンチャーの生態系とタイミングオプション

ここでは、バイオベンチャーの存続にとってリアルオプションの有効性を考察する。そのために、バイオベンチャーの生態系のモデル化や、モデルの各要素とリアルオプションの主要手法との対応関係について検討する。中でも、創業着手の最適タイミングの決定に関して、タイミングオプションの基本モデルに注目する。

### 1.1 バイオベンチャーの生態系

日本政府のベンチャー 1000 社計画によって最近までバイオベンチャー数も増加傾向を示してきた。例えば、1994年の102社の水準から2006年に586社へと順調に増加していたが、2007年には577社へと若干減少している [4]。

日米のバイオベンチャー生態系の比較において、2006年度に米国では生命科学の基礎研究予算288億31百万ドル、バイオベンチャーキャピタル投資金額46億ドル、製薬業界研究開発費434億ドルに対して、日本では生命科学の基礎研究予算3025億円 (2007年度)、バイオベンチャーキャピタル投資金額26億円、製薬業界研究開発費1兆1735億円と日米間に大きな格差が存在する [5][6][7]。特に、米国のベンチャーキャピタルの投資金額が日本の基礎研究予算を上回っている。また、日本のバイオベンチャーキャピタルの投資金額は米国のバイオベンチャーキャピタルの投資金額に比較して約5.6%と、他のセクターに比較しても彼我の大きな

格差が存在する。また、ラウンド当たりの調達資金やIPO (新規株式公開) での調達資金の格差もしばしば議論される。加えて、日本のバイオベンチャーの生態系には、ベンチャーキャピタルやIPO関連の投資金額の問題だけでなく、戦略的提携 (Strategic Alliance) 先の製薬大企業が国内よりも海外の大学・バイオベンチャーを選好し、治験のコスト・時間・患者数の国際比較劣位や、ドラッグラグのような新薬承認の手續き等の制約が多く、必ずしもバイオベンチャーにとって存続が容易な環境ではない。故に、国内での生態系の整備と同時に、米国のサンフランシスコ湾エリアにて創業し、ベンチャーキャピタル・大学・製薬大企業・臨床機関とのネットワークを構築し、FDAの承認取得を習得してから国内に戻り、日本の比較優位性の活用を検討する方法もあり得る。

日本のバイオベンチャーの生態系が未熟であるとしても、米国のバイオベンチャーは何故、赤字でもそのように多数存続できるのであろうか。バイオベンチャーは、ブロックバスター志向の製薬大企業よりも、ニッチ市場への画期的技術の応用可能性の点で技術事業化に比較優位を有する。すなわち、FDA承認件数では2003年からベンチャーの方が製薬大企業よりも多くなり、パイプライン医薬候補件数の多さ、研究開発コストの低さの点でも、売上合計金額を除けば、バイオベンチャーの生産性の方が高い [8]。今後、個別化医薬 (Personal Medicine) が定着すればこの傾向は一層促進されると思われる。しかし、医薬開発に伴う10年以上の開発期間、1千億円近くの開発コスト、そしてコンパウンド水準で100万分の1の成功率という条件下で、資源制約の大きなベンチャーの存続には課題が存在する。基本的にバイオベンチャーの存続は、多産多死の戦略に依存し、多数の画期的アイデアの中で卓越した成果と実現可能性のある企業だけが Genentech, Amgen 及び Gilead Sciences のように製薬大企業と伍して存続・成長でき、他方、概念の妥当性を証明できない企業は迅速に消滅するという概念証明型 (Proof of Concept) のいわば「突然変異と淘汰」の実験・

証明型の革新システムによって経済的合理性を維持している。こうして、不確実性の中で、できるだけ多くの企業ポートフォリオから優れた企画だけを継続・進化させ、その他を各マイルストーンにおいて選別・排除することで高付加価値の飛躍的なアイデアのみを適時、抽出すると同時に無駄なコスト・リスクを低下させている。すなわち、一握りの大成功した企業の生み出す価値が、消滅した多数の企業の早期の試行的赤字部分を埋め合わせて余りあれば系として存続・成長可能といえる。

米国での典型的なバイオベンチャー生態系では、政府による莫大な基礎研究予算を背景に大学等からベンチャーキャピタルの支援を受けての創業以降の選別段階として、先ず多くの企業が倒産し、次に製薬大企業との戦略的提携によってライセンスアウトし、M&Aによって企業を製薬企業に売却し、さらに限られた企業のみがIPO後、自律的企業になることができる。順次途中で事業化を断念した関係者は再度、ベンチャーキャピタルの支援や以前の人脈などを通じて創業に挑戦することで資源の循環が維持されている。また、ベンチャーキャピタルは、意図的に初期のデスバレー先行投資を行ない、継続・中止の意思決定を行ない、M&A・IPOを経たポートフォリオ全体の収益によって投資を回収し、再度、次のファンド組成を経て創業支援を繰り返している。

このような創業・淘汰・循環のモデルによるバイオベンチャーの生態系は図1のように概念

化できる。故に、赤字が大多数でも、魅力的なポートフォリオにおける開発段階途中での選別精度と進化促進の水準が高ければ、投資として機能し得る。また、選別が有効に機能するには適切なタイミングで創業し、製品アイデア・廃業・M&A・IPO・上市の選別過程を経た情報・資金・人の再創業に向けた循環の機能も必要となる。

しかし、バイエリアのような選別・循環の生態系を持つとはいえ、存続の厳しい創業系バイオベンチャーの創業に向け、日本に比較し米国で既に多数の投資を可能にした意思決定基準とはどのようなものであろうか。換言すれば、長期・多額の不可逆的投資としての埋没費用に対して、回収すべき収益の不確実性も非常に高い場合の投資の意思決定に関する最適なタイミングを判断する理論モデルと管理手法とは、どのような仕組みを必要としているのであろうか。次にこの課題を検討する。

## 1.2 バイオベンチャー資源循環モデルとリアルオプション

ここではバイオベンチャーの生態系のモデル化と各段階での意思決定へのリアルオプションの応用を検討する。

生態系は価値創造を求めて創業や選別・淘汰を経てアイデア・人・資金などの資源が循環する仕組みであるが、主要機能として、ベンチャーキャピタルによって大学などの基礎研究機関から創業を促す投資、基礎研究からIPOあるいはM&Aに向けて創業・前臨床・臨床第1相

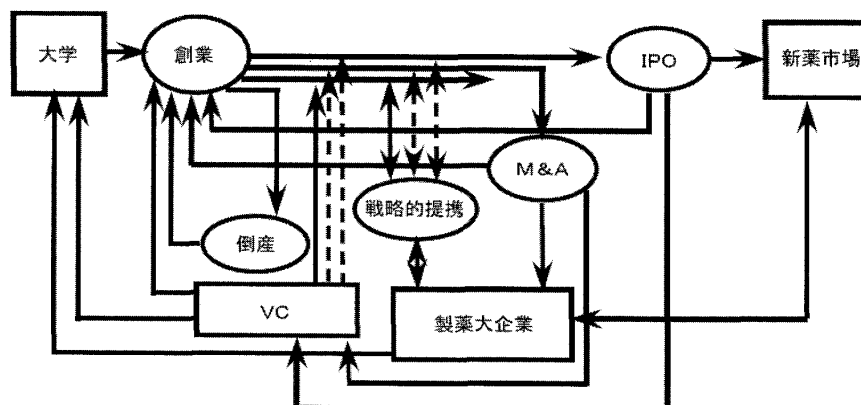


図1. バイオベンチャーの生態系：創業・淘汰・循環モデル

—第3相・FDA承認までの開発・選別，そして開発においてデスバレーを越え上市に向かいどこまで推進するかを判断する基準による投資回収が考えられる。すなわち，バイオベンチャーの資源循環モデルとしては，投資・開発選別・回収の機能から構築できる。

各機能と方法論としてのリアルオプションとの関係では，**図2**のように先ず，開発・選別機能に関しては，デスバレー状態にあるバイオベンチャーの負のNPV（正味現在価値）は，シーケンシャルコンパウンドオプション（Sequential Compound Option）やチューザーオプション（Chooser Option）などを用いることによって，一定の範囲内で，正のENPV（拡張正味現在価値）に変換可能である [9][10]。1点推定法ながらこのようなオプションによって，開発の中断・継続や，拡張・縮小・廃棄の意思決定について各状況に合わせて最適な選択ができる。可能性がなければできるだけ速やかに中止した方が次の創業に早く資源を循環できる。また，モンテカルロシミュレーションによって，複数のシナリオに対応したNPV・ENPVの確率分布によって期待収益率を向上させ且つ標準偏差としてのリスクの低減の同時追求に関するパラメータ探索の可能性が生じる。また，開発の継続性のためにバイオベンチャーが資本市場からの約半額に相当する追加資金源としての製薬大企業との

戦略的提携におけるオープンイノベーションに向けた最適な互恵的協力関係は，リアルオプションによる不確実性に対応する柔軟性の価値と潜在的なライバルに対応するコミットメント価値とのトレードオフの最適化によって，拡大し得ることをオプションゲーム（Option Game）のモデルによって既に検証した [11][12]。

次に，投資回収（Exit）については，製薬大企業へのM&Aとしての売却や，IPOによるキャピタルゲインが主要な方法になるが，リアルオプション使用との関連では，NPVや特にENPVが主な投資の判断基準となる。故に，企画概念の妥当性証明（Proof of Breakthrough Concept）過程としての開発・選別段階へのROA（Real Options Analysis）の応用によって，開発遂行の状況を確認しながら有望なプロジェクトのみに適切に選別できれば，当初の多数の赤字企業によるリスク分散型の研究開発ポートフォリオの管理遂行も妥当性が保証され得る。

バイオベンチャーのように画期的ではあるがリスクなプロジェクトの潜在的価値が適正に評価され事業化が遂行されるには，デスバレーに直面し赤字であっても存続価値が適正に評価されることと同時に，デスバレーに臆することなく最適なタイミングでしかも次々と新たに事業を開始することが重要となる。すなわち，開発・選別や投資回収を含めて生態系の資源循環モデルが機能するには，最適なタイミングでの創業が前提となる。もし，当該プロジェクトが将来的に有望であるのなら，長期・高リスクのプロジェクトに対して不可逆的で高額の埋没費用を投入する最適タイミングを判断する基準・方法論が必要となる。この基準の有無は，バイオベンチャー数による日米間の創業格差に通じる可能性を持つ。故に，日米のバイオベンチャー数の格差は，投資タイミングの認識力の相違を意味し，米国の方が日本よりも早期に創業に着手しているともいえる。また，革新のこの循環型生態系（Symbiotic System of Breakthrough Innovation）を形成すれば，従来の漸進的な改良型システムに加えて，飛躍的革新を目指し赤字に合理的に耐え得る多くのベンチャー

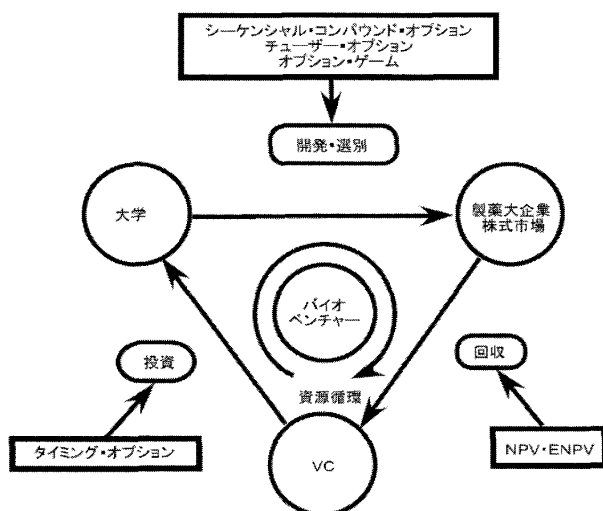


図2. バイオベンチャー資源循環モデルとリアルオプション

数を日本でも増加させ得ることも考えられる。以下では、この最適タイミングについて、不確実な収益のプロジェクトに対する不可逆的埋没費用の投資には、不確実性が低下するまで開始を合理的に待つという延期オプションとしてのタイミングオプション (Timing Option) を基礎に検討する。

### 1.3 タイミングオプションの基本モデル

ここでは、埋没費用としての不可逆的投資と不確定な将来収益との間のトレードオフの中で、タイミング (延期) オプションの概念・手法の開発決定への応用可能性と限界を検討する。すなわち、日米のバイオベンチャー数の格差是正の可能性について、最適投資タイミングに関する指標の観点から考察する。

#### 1) タイミングオプションの問題意識

ベイエリアのような選別・循環の生態系を持つとはいえ、存続の厳しい創業系バイオベンチャーの創業に向け、日本に比較し米国で既に多くの投資を可能にした意思決定基準とはどのようなものであろうか。換言すれば、長期・多額の不可逆的埋没費用としての投資に対して、回収すべき収益の不確実性が非常に高い場合の投資の意思決定に関する最適なタイミングを判断する理論モデルと管理手法とは、どのような仕組みを必要としているのであろうか。

#### 2) 研究の枠組み

主要概念の定義として、タイミングオプションとはリアルオプションの中でコールオプションとしての延期オプションのことである。一般的にアメリカンコールオプションはヨーロッパアンコールオプションと等価で、満期までは行使しない。しかし、原資産に配当があれば、満期前に行使可能になり得る。故に、経営意思決定の速さについて、無期限コールオプションの行使タイミングに関する理論的応用の観点から、日米のバイオベンチャー数の相違の克服可能な意思決定手法について検討する。

#### 3) 基本モデル

ここでの基本モデルは、McDonald & Siegel [13], Dixit & Pindyck [14], 及び Mun [15] の先行研究を基礎にしている。モデルの目的は、 $V$

の価値を有する事業に着手するために埋没費用  $I$  を投資する最適なタイミングを求める解法にある。基本的に企業の全ての投資機会は無期限アメリカンコールオプションとみなすことができる。故に、投資決定は当該オプションの行使タイミングあるいは延期オプションの価値評価の問題と等しい。

まず、投資機会・延期オプションの価値を  $F(V)$  とする。その場合、投資の期待現在価値最大化の基準は、

$$F(V) = \max E [(V_T - I) e^{-\rho T}] \quad (1)$$

ここで、 $T$  は投資の時期、 $\rho$  は割引率を表す。基本的前提として、無期限アメリカンコールでの行使を可能にするために、原資産の成長率 (キャピタルゲイン率) を  $\mu$  とする時に、配当率  $\delta = \rho - \mu > 0$  と仮定する。割引率は配当率とキャピタルゲイン率との和からなる CAPM (Capital Asset Pricing Model) である。配当率は、オプション理論では原資産を当初から持たないことに由来する機会費用を意味する。

以下では、原資産の変動を確定論と確率論とで把握できる場合に分け、この基本モデルの拡張を行なう。

## 2. 決定論での最適投資基準

### 2.1 最適投資基準のモデル

現在価値  $V_0$ 、成長率  $\mu$  で時刻  $t$  の事業価値は、 $V_0 e^{\mu t}$  である。故に、 $T$  時点での投資機会の価値は、

$$F(V) = \max E [(V_0 e^{\mu T} - I) e^{-\rho T}] \quad (2)$$

$\mu \leq 0$  の場合、 $F(V)$  は時間と共に劣化するので待つことの意味はなく、 $F(V) = \max [V_0 - I, 0]$  となる。 $0 < \mu < \rho$  の場合には、 $F(V) = \max E [V_0 e^{-(\rho-\mu)T} - I e^{-\rho T}]$  から、 $F(V)$  を  $T$  に関して微分し最適化の条件から、

$$\frac{dF(V)}{dT} = -(\rho - \mu) V_0 e^{-(\rho-\mu)T} + \rho I e^{-\rho T} = 0$$

最適な投資タイミングは、

$$T^* = \max \left\{ \frac{1}{\mu} \ln \left[ \left( \frac{\rho}{\rho - \mu} \right) \frac{I}{V_0} \right], 0 \right\} \quad (3)$$

$\lim_{\mu \rightarrow \rho} T^* = \infty$  および  $\lim_{\mu \rightarrow 0} T^* = 0$  の境界条件から、 $0 < \mu < \rho$  の範囲内で、投資の延期に伴って、埋没費用の削減効果と原資産としての事業価値の成長を活用できない機会費用  $\delta$  との間のバランスを見つける必要がある。延期オプションの行使タイミングを決める事業のトリガー価格  $V^*$  は (3) 式で  $T^* = 0$  とおくと、

$$V_0^{\mu T^*} = V^* = \left( \frac{\rho}{\rho - \mu} \right) I > I \quad (4)$$

式 (3) を式 (2) に代入して、オプションの価値は、

$$F(V) = \begin{cases} \left[ \left( \frac{\rho - \mu}{\rho} \right) \frac{V}{I} \right]^{\rho/\mu} \left( \frac{\mu}{\rho - \mu} \right) I & \text{for } V \leq V^* \\ V - I & \text{for } V > V^* \end{cases} \quad (5)$$

これによって、オプション価値は、事業価値が最適タイミングを決めるトリガー価格（臨界値）以下の場合には本源的価値プラス時間的価値の曲線で、また、事業価値がトリガー価格よりも大の場合には本源的価値のみの曲線で各々表せることになる。

### 2.2 数値計算例

決定論としてリスク  $\sigma = 0$  の場合、(3) 式から、特定  $T^*$  の時、利益指標  $V/I$  と機会費用  $\delta$  とは反比例の関係になる (図3)。さらに、 $\rho = 0.1$  の場合、(5) 式から、機会費用  $\delta$  が  $\rho = 0.1$  に近づき大になるにつれて、最適投資基準  $V^*$  は投資額  $I$  に接近し、最適行使タイミングは早まる (図4)。

こうして、まず、原資産の変化が決定論で説

明できる場合には、特定の最適投資タイミングの水準では、投資金額に対する事業価値の比としての利益指標 ( $V/I$ ) と機会費用とはトレードオフ関係になる。次に、コールオプションのペイオフ曲線にて、本源的価値と時間的価値の両曲線の交点での事業価値水準である最適投資基準は、待つことに伴う機会費用が大きいほど投資額の水準に接近し、投資の閾値が低下する。故に、原資産の変化が決定論として予測可能な場合には、機会費用と利益指標によって最適な投資タイミングとしての時刻を計算できることになる。また、最適投資基準としての臨界値は、主に機会費用に依存する。

### 3. 確率論での最適投資基準

事業価値リスク  $\sigma > 0$  の場合、投資タイミングとは、 $V$  の価値を有する資産を獲得するために  $I$  の投資をする最適投資時点を決定すること

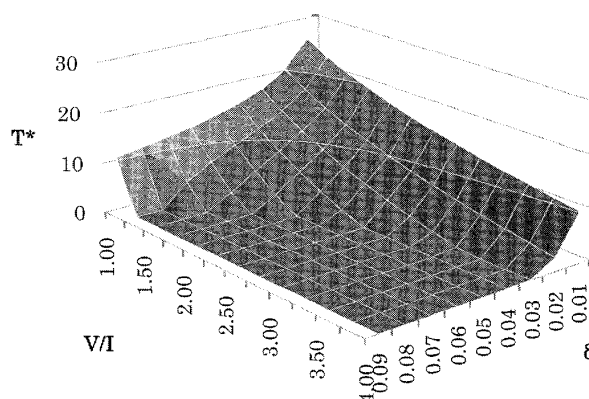


図3. 利益指標と機会コストによる最適時間 ( $\sigma = 0$ )

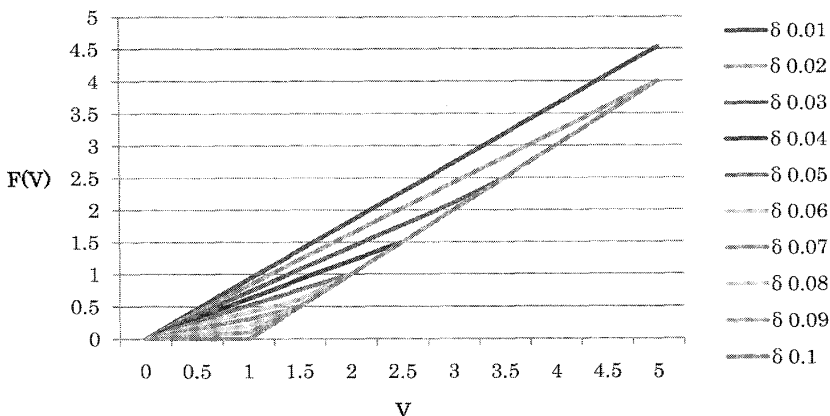


図4. 機会コストと臨界値 ( $\sigma = 0, \rho = 0.1, I = 1, 0 < \delta \leq 0.1$ )

になる。しかし、 $V$ が確率にしたがって変化する場合、決定論のように最適投資時点  $T^*$  を計算できない。故に、 $V \geq V^*$  によってトリガー価格としての臨界値  $V^*$  を設定し、状態変数  $V$  の観察によってタイミングを決定することになる。原資産価値  $V$  の不確実性をモデル化する場合、基本モデルの幾何ブラウン運動 (Geometric Brownian Motion)、長期的な産業全体の平均的事業価値に対応する平均回帰過程、及び潜在的なライバルの先行的開発完了による当該事業価値の突然の喪失に対応するジャンプ過程などがある。

### 3.1 GBMによる原資産モデルの場合

#### 1) 理論モデル

原資産  $V$  の不確実性をドリフトパラメータ  $\mu$ 、ボラティリティ  $\sigma$ 、ウイナー過程  $dz$  の幾何ブラウン運動と仮定すると、ランダムウォークは、

$$dV = \mu V dt + \sigma V dz \quad (6)$$

投資機会としての延期オプション価値  $F(V)$  は、時間的価値を反映して、本源的価値の曲線との間に次のような境界条件を有する。

$$F(0) = 0 \quad (7)$$

$$F(V^*) = V^* - I \quad (8)$$

$$F'(V^*) = 1 \quad (9)$$

延期オプション行使を決めるタイミングでの事業価値の臨界値  $V^*$  は、行使費用  $I$  と待たないで投資することの機会費用としてのオプション価値  $F(V^*)$  との合計に等しいことが前提となる。故に、 $F(V) > V^* - I$  の  $V$  では行使には早計で、 $F(V) = V^* - I$  の  $V$  の状態では最適タイミングになる。

DP (動的計画法) 及び条件付請求権分析法の両手法とも同じ解に到ることが証明されている。DPの場合、金利  $\rho$  及び期間  $dt$  における投資機会  $F$  の収益率と投資機会の期待資産価値変動量とが等しいという前提から、

$$\rho F dt = E[dF] \quad (10)$$

他方、条件付請求権分析では、 $F'(V)$  単位のショートポジションを含む  $F(V)$  の投資オプションの無リスク動的ポートフォリオの時間当たり維持費用  $\delta VF'(V)$  を要する総収益は、

$$dF - F'(V) dV - \delta VF'(V) dt \quad (11)$$

各前提から伊藤の命題を応用した微分方程式は、

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V^2 F''(V) + (\rho - \delta) VF'(V) - \rho F = 0 \quad (12)$$

この方程式を先の3つの境界条件の下で解くと、延期オプション価値は、

$$F(V) = AV^{\beta_1} \quad (13)$$

臨界値は、

$$V^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \quad (14)$$

ここで、

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\rho - \delta}{\sigma^2} + \sqrt{\left[ \frac{\rho - \delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} \quad (15)$$

$$A = \frac{V^* - I}{(V^*)^{\beta_1}} = \frac{(\beta_1 - 1)^{\beta_1 - 1}}{\beta_1^{\beta_1} I^{\beta_1 - 1}} \quad (16)$$

#### 2) 最適投資基準の特徴

コールオプションの本源的価値と時間的価値との両曲線の交点での事業価値である投資決定の臨界値  $V^*$  は、リスク  $\sigma$  の増加に伴い大きくなる (図5)。オプション価値と本源的価値との差である時間的価値  $[F(V) - (V - I) \geq 0]$  の分布は、利益指標  $V/I = 1$  を峰として、リスク  $\sigma$  の増加に伴い拡大する (図6)。一定の  $V^*$  に対してリスク  $\sigma$  の大きさと機会費用  $\delta$  の小ささととはトレードオフ関係にある (図7)。また、所与のリスク  $\sigma$  に対して、機会費用  $\delta$  の増加に伴い臨界値 (Critical Value)  $V^*$  は低下し行使タイミングが早まる (図8)。

こうして、まず、リスクが小さいとオプション価値の内の時間的価値が低下し、本源的価値に追加する時間的価値がゼロでNPV (正味現在価値) とオプション価値とが等しくなる点での事業価値としての臨界値が、行使価格としての

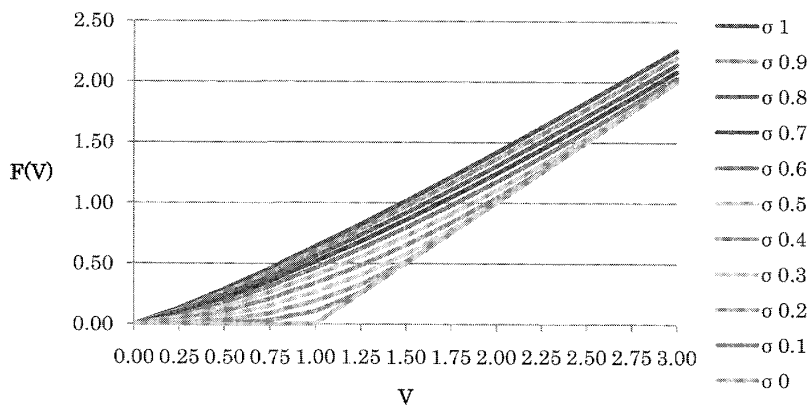


図5. オプション価値とリスク ( $\rho = 0.1, I = 1$ )

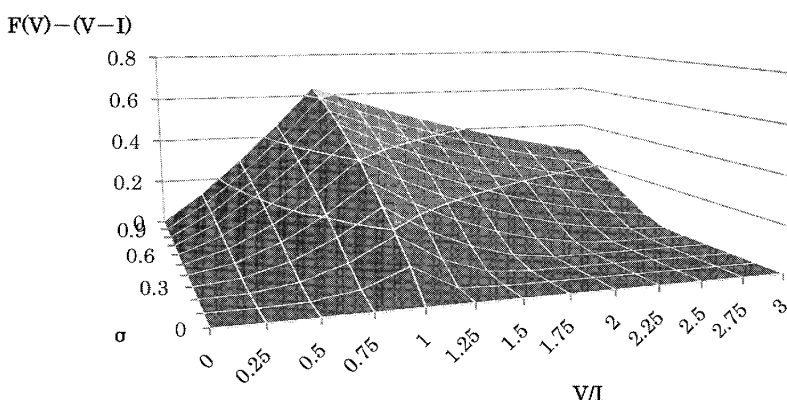


図6. 利益指標及びリスクによる時間的価値 ( $\rho = 0.1, I = 1$ )

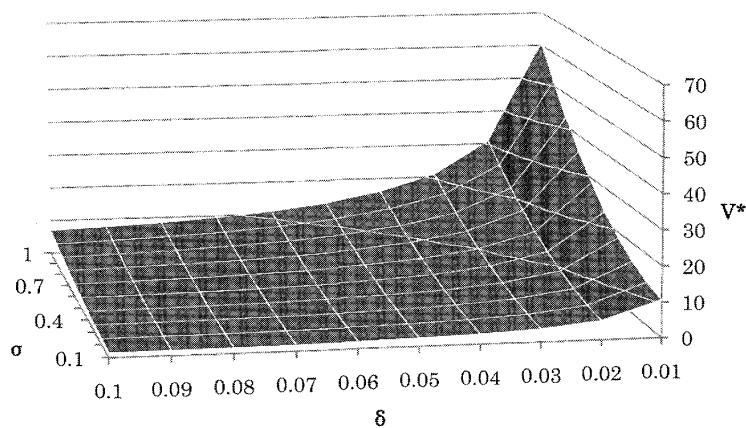


図7. リスクと機会コストによる臨界値 ( $\rho = 0.1$ )

投資金額に接近する。次に、リアルオプションの設計・行使に伴う時間的価値の大きさは、事業価値が投資金額と同じになる利益指標が1の水準としての、NPVがゼロに近いグレイゾーンを中心にして、リスクの増大に伴い拡大する。すなわち、リアルオプションが最も機能を発揮し、NPVをENPVに変える際に効果の大となるパラメータとの関係を示している。第3に、投

資タイミングの基準としての臨界値は、リスクの大きさと機会費用の小ささとの両パラメータのトレードオフ関係によって決定できる。第4に、関連事項として、リスクが一定の場合、機会費用が大きくなるにつれて、臨界値は低下し、タイミングは早まる可能性が生じる。また、当該曲線から両パラメータによって臨界値を特定できる。



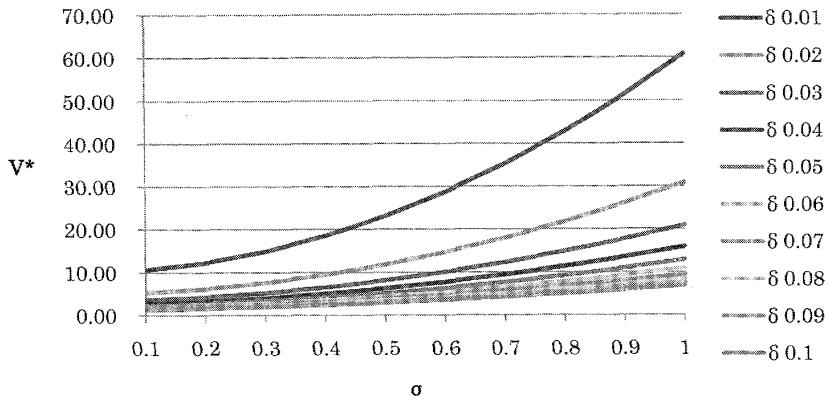


図8. リスク及び機会コストによる臨界値 (2) ( $I = 1, \rho = 0.1$ )

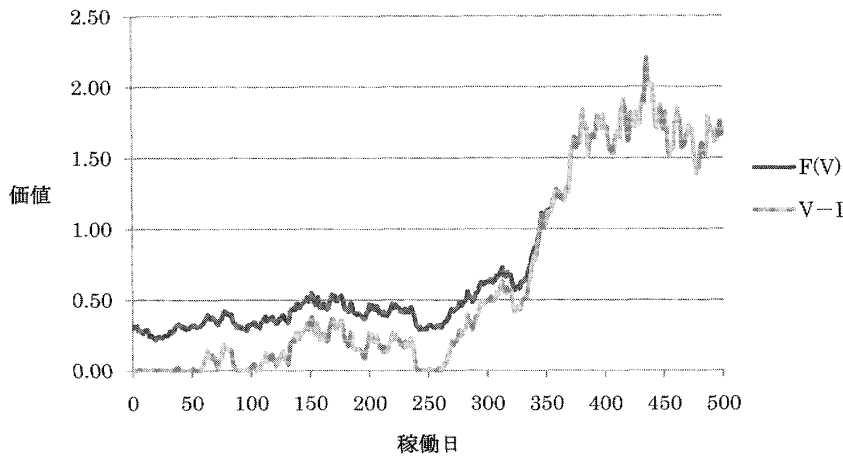


図9. 延期オプションのタイミングのGBMによるシミュレーション  
( $\rho = 0.2, \mu = 0.05, \sigma = 0.6, I = 1, T = 371$ )

原資産の変動が確率論の世界では、最適タイミングを計算できないので、状態変数としての現在の事業価値がシミュレーションによって臨界値を超える時点を再現することで確率的に可能なタイミングを予測することになる。

### 3) シミュレーション

原資産の変動リスクを幾何ブラウン運動によってモデル化する場合の状態変数としての事業価値が臨界値を超える点での投資の最適タイミングの測定を、ここでは数値計算によるシミュレーションによって検討する。

例えば、年利  $\rho = 0.2$ 、成長率  $\mu = 0.05$ 、リスク  $\sigma = 0.6$ 、投資  $I = 1$  の場合、 $V^* = 2.425$  の計算でのシミュレーション結果では、371日目（年250稼働日）に最適投資タイミングが訪れている（図9）。グラフでは、 $NPV = V - I$  がオプション価値  $F(V)$  に等しくなる時点で、オプション

価値の中の時間的価値としての投資行動の機会費用がゼロになったと判断できる。すなわち、投資を延期する価値はゼロになった時点で投資をするのが最適タイミングと判断できる。

## 3.2 ジャンプ拡散過程による原資産モデル

### 1) 理論モデル

原資産変動の基本モデルとしてのGBMモデルをポワソン過程の追加によってジャンプ拡散過程 (Jump Diffusion Model) に拡張する。例としては、潜在的なライバルベンチャーによる開発の先行的な成功及び市場独占のリスクに直面している現在延期中のプロジェクトの価値の変化を、

$$dV = \alpha V dt + \sigma V dz - V dq \quad (17)$$

$dq$  は平均到着率を  $\lambda$  とするポワソン過程の増分で、確率  $\lambda dt$  にて  $dV$  を  $-\phi V$  だけ変化させ

る ( $0 \leq \phi \leq 1$ )。Merton [16] の証明によって  $dq$  をランダムウォーク (6) 式に加えて (17) 式に変換することができるようになった。こうして、

$$dq = \begin{cases} -\phi & \text{with probability } \lambda dt \\ 0 & \text{with probability } 1 - \lambda dt \end{cases} \quad (18)$$

$F(V)$ ,  $A$ ,  $V^*$  は GBM の場合と同じ式が用いられ、 $\phi = 1$  の場合、 $\beta_1$  の式は、

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\rho - \delta}{\sigma^2} + \sqrt{\left[ \frac{\rho - \delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{2(\rho + \lambda)}{\sigma^2}} \quad (19)$$

(18) 式の事業価値低下率  $-\phi$  は、 $\phi = 1$  の場合、(17) 式から  $V - V$  で事業価値を無に帰するので、延期なしで直ぐ投資することに伴う機会費用を減少させて、トリガー価格としての臨界値を低下させ、投資を早める効果を有する。

こうして、不確実性の減少を期待して延期するオプションにおいて、原資産の変動に対するリスクモデルとしての基本的な幾何ブラウン運動に加え、潜在的なライバルに突然先を越され、当該プロジェクトの価値がゼロになるというジャンプ拡散過程によるリスクを盛り込んだトレードオフを想定している。故に、着手を待つことによる、不確実性低下の効果と突然プロジェクトの価値を全く喪失するリスクとのバランスを確率的に考慮したシミュレーションによって、最適タイミングを再現する必要がある。

## 2) シミュレーション

数値計算に基づくシミュレーションによって、最適な投資タイミングの決定の妥当性を事業価値の状態変数と臨界値との比較によって検証することができる。例えば、当該モデルによるシミュレーション結果として、ボラティリティ  $\sigma = 0.7$ 、ドリフト  $\mu = 0.5$ 、割引率  $\rho = 0.2$ 、投資  $I = 1$ 、平均到着率  $\lambda = 0.1$ 、及びポワソン過程の変化率  $\phi = 1$  の場合、70日目（年間250稼働日）に最適投資のタイミングが生じている（図10）。

原資産の確率論的な変動を幾何ブラウン運動 (GBM) にてモデル化できる場合には、最適投資基準としての臨界値は、リスクと機会費用によって決まる。また、原資産の変動を対数正規分布に基づく幾何ブラウン運動だけでなく、事業価値の突発的変動の発生を示すポワソン分布を加えたジャンプ拡散過程によってモデル化した場合にも、類似の最適投資基準を計算できる。確率論に基づく事業価値がシミュレーションによって最適投資基準を超える場合を最適タイミングの再現として予測に使える。

タイミングオプションによる着手の確率的なモデルも含めシミュレーションによって最適なタイミングの予測が可能となっても、スポットのタイミングではなく、着手以降のプロセスとの適合性の予測も含み、同時に最も有利な機会のみを絞り込む機能が、今後、必要となるように思われる。

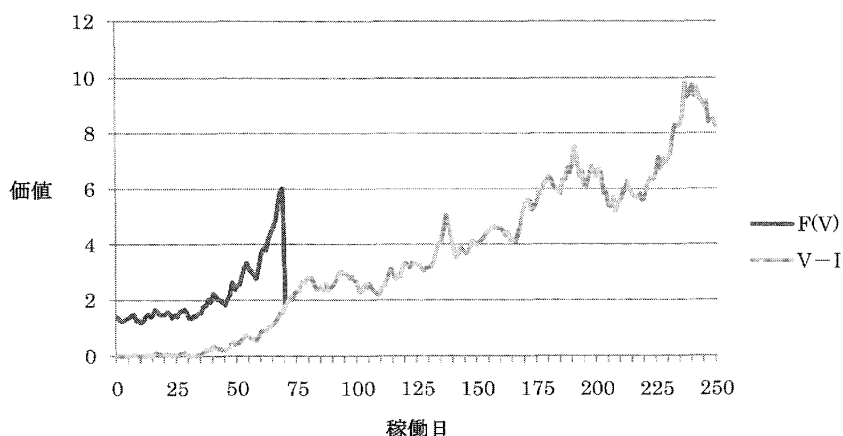


図10. タイミングオプションのジャンプ拡散過程によるシミュレーション ( $\sigma = 0.7$ ,  $\mu = 0.5$ ,  $\rho = 0.2$ ,  $\lambda = 0.1$ ,  $\phi = 0.1$ ,  $I = 1$ ,  $T = 70$ )

## 結び

米国で多数のデスバレーに直面する赤字企業が存続できるのは、バイオベンチャー生態系としての創業・淘汰・循環モデルにおいて、画期的なアイデアを求める企業ポートフォリオで概念の証明 (Proof of Concept) による選別と迅速な資源循環が機能し、全体として投資よりも収益が越えれば可との判断に依存する。また、バイオベンチャー資源循環モデルと方法論としてのリアルオプションとの関係において、投資回収の基準として NPV・ENPV を基礎に、開発・選別段階ではシークエンシャルコンパウンドオプション、チューザーオプション、加えて戦略的提携ではオプションゲームをそれぞれ応用できる。さらに、長期・高リスクのプロジェクトに対する潜在的に高額な埋没費用の不可逆的投資としての創業決定や、日米間でのバイオベンチャー数格差の解消には、タイミングオプションが活用できる。

タイミングオプションに関して、将来収益が不確定な状況下で、不可逆的な埋没費用としての投資の指針には、NPVではなく、待たないで投資する機会費用としての延期オプション価値と投資金額との合計をプロジェクト価値が越えるべきトリガー価格 (臨界値)  $V^*$  とする最適投資基準の採用が相応しい。事業価値の変化が決定論的な場合には、臨界値  $V^*$  はオプション保持の機会費用  $\delta$  の大きさに伴い小さくなり、最適タイミング  $T^*$  は早まる。また、所与の  $T^*$  では利益指標  $V/I$  と機会費用  $\delta$  との間にトレードオフ関係がある。原資産の変動の不確実性を幾何ブラウン運動 (GBM) にてモデル化できる場合、リスク  $\sigma$  の小ささと機会費用  $\delta$  の大きさに伴い臨界値  $V^*$  のタイミングは早まる。さらに、所与の  $V^*$  では、リスク  $\sigma$  の大きさと機会費用  $\delta$  の小ささはトレードオフ関係にある。基本的に、最適タイミングの予測は、シミュレーションによる延期オプション価値  $F(V^*)$  とオプション行使による正のペイオフ ( $V^* - I \geq 0$ ) とが等しくなる可能性の再現によって行なうことになる。

ここで検討したモデルやそれに基づくシミュ

レーション手法は、事業開始の最適タイミングの予測に貢献し、一般的に意思決定が遅い日本的経営に対して、バイオベンチャー事業における延期オプション価値に加えて、機会損失の重要性を喚起するのに貢献する可能性がある。但し、シミュレーションによるタイミング予測の実際では、1シナリオではなく、複数回の試行による確率分布に基づく推定が必要となるように思われる。

米国のバイオベンチャー生態系は現実にも有効であり、日本への移植には、現地でのノウハウの習得、人的ネットワークの構築に加えて、循環モデルの各機能に対応したリアルオプションの応用が理論的手法的に重要になると思われる。

また、今後、事業参入に加えて撤退のオプション、事業参入・継続による学習効果、アイデアの陳腐化による競争力源泉の減耗など主に知財に依存するベンチャーの現実的状况に対して、モデルの拡張を含めてバイオベンチャーを分析してみたい。

## 参考文献

- [1] M. Kenney, **Biotechnology: The University-Industrial Complex**, Yale University Press (1986)
- [2] G.P. Pisano, **Science Business: The Promise, the Reality, and the Future of Biotech**, Harvard Business School Press (2006) (池村千秋訳, サイエンス・ビジネスの挑戦: バイオ産業の失敗の本質を検証する, 日経BP社 (2008))
- [3] L. Trigeorgis, **Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation**, MIT Press (1996) (川口有一郎他訳, リアルオプション, エコノミスト社 (2001))
- [4] 財団法人バイオインダストリー協会, **2007年バイオベンチャー統計調査報告書**, 財団法人バイオインダストリー協会 (2008)
- [5] National Science Board, **Science and Engineering Indicators 2008**, National Science Foundation (2008)
- [6] 日経バイオテク, **日経2008バイオ年鑑**, 日経BP社 (2008)
- [7] VEC, **平成19年度ベンチャーキャピタル等投資動向**

- 調査/ベンチャーキャピタル・ファンド等ベンチマーク調査, VEC (2008)
- [8] Burrill & Company, **Biotech2007**, Burrill & Company (2007)
- [9] T. Copeland, V. Antikarov, **Real Options: A Practitioner's Guide**, Texere (2001) (栃本克之監訳, 決定版リアル・オプション: 戦略フレキシビリティと経営意思決定, 東洋経済新報社 (2002))
- [10] T. Fujiwara, Japan's Health-care Service and the Death-valley Strategy of Biotech Start-ups, **Global Journal of Flexible Systems Management**, 9(1), 1-10 (2008)
- [11] H. T. J. Smit, L. Trigeorgis, **Strategic Investment: Real Options and Games**, Princeton University Press (2004)
- [12] T. Fujiwara, Modeling of Strategic Partnership of Biotechnological Start-up by Option-Game: Aiming at Optimization between Flexibility and Commitment, **Journal of Advances in Management Research**, 5 (1), 28-45 (2008)
- [13] R. McDonald, D. Siegel, The Value of Waiting to Invest, **Quarterly Journal of Economics and Management Science**, 4, Spring, 141-183 (1986)
- [14] A. K. Dixit, R. S. Pindyck, **Investment under Uncertainty**, Princeton University Press (1994) (川口有一郎他訳, 投資決定理論とリアルオプション: 不確実性のもとでの投資, エコノミスト社 (2002))
- [15] J. Mun, **Real Options Analysis**, Wiley (2002) (川口有一郎訳, 実践リアルオプションのすべて—戦略的投資価値を分析する技術とツール, ダイヤモンド社 (2003))
- [16] R.C. Merton, **Continuous-Time Finance**, Blackwell (1990)