

Title	バイオベンチャーの開発意思決定へのタイミングオプションの応用について
Author(s)	藤原, 孝男
Citation	年次学術大会講演要旨集, 23: 999-1004
Issue Date	2008-10-12
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/7732">http://hdl.handle.net/10119/7732</a>
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

## 2 F 2 2

# バイオベンチャーの開発意思決定へのタイミングオプションの応用について

○藤原 孝男（豊橋技術科学大学）

### 序

日米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、他方、製薬大企業は基礎研究から臨床開発に R&D 資源を集中化させている。生命科学の事業化としての医薬開発プロセスのこの空隙を埋める役割が創薬型バイオベンチャーに期待されている。しかし、創薬型バイオベンチャーは限られた資源で長期的開発というディレンマに直面することになる。既に、デスバレー克服にはリアルオプション、戦略的提携にはオプションゲームの有効性を示したが、本研究では、埋没原価としての投資と不確定な将来収益と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とを検討する。すなわち、日米のバイオベンチャー数の格差是正に向けて、R&D プロジェクトへの最適投資タイミングに関する指標の観点から可能性を考察する。

### I. タイミングオプションの基本モデル

#### 1. 問題意識

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、技術の事業化に比較優位を有する。しかし、医薬開発に伴う 10 年以上の開発期間、数百億円以上の開発コスト、そしてコンパウンド水準で 100 万分の 1 の成功率という制約下で、多産多死の傾向を持つベンチャーの存続には大きな課題が存在する。米国では、バイオベンチャー数 1500 社、IPO 成功企業数 300 社、黒字企業数数十社の水準なのに対して、日本では、バイオベンチャー数 350-400 社、IPO 企業数 16 社の水準である。また、日本では米国に比較して創薬系バイオベンチャー数の割合が低い。存続の厳しい創薬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・多額の不可逆的投資としての埋没原価に対して、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？

#### 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うる。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経営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 Model(1986)、Dixit & Pindyck(1994)、及び Mun(2002)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コスト 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。

先ず、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。

## II. 決定論での最適投資基準

### 1. 最適投資基準のモデル

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

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

(1)  $\mu \leq 0$ の場合、 $V(t)$ 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、 $F(V) = \max E[V_0 e^{-(\rho-\mu)T} - Ie^{-\rho T}]$ から、 $F(V)$ を $T$ に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、

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

$\lim_{\mu \rightarrow \rho} T^* = \infty$  および  $\lim_{\mu \rightarrow 0} T^* = 0$  の境界条件から、 $0 < \mu < \rho$ の範囲内で、投資の延期に伴う埋没コスト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コスト $\delta$ とのバランスを見つめる必要がある。延期オプションの行使タイミングに関する事業のトリガー価格 $V^*$ は(3)式で $T^* = 0$ とおくと、

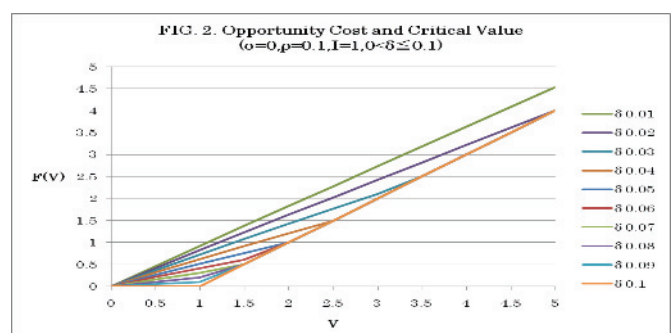
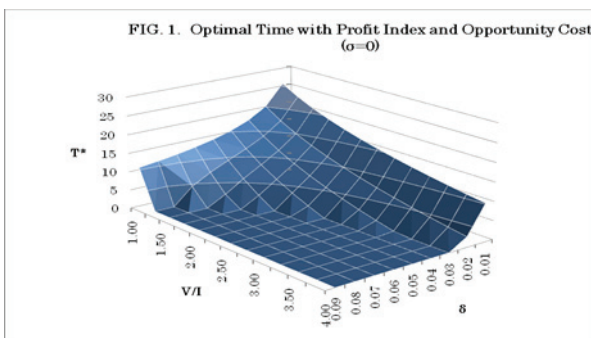
$$V_0^{\mu T^*} = V^* = \left(\frac{\rho}{\rho-\mu}\right)I > I \quad (4)$$

式(3)を式(2)に代入して、オプションの価値は、

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

### 2. 数値計算例

リスク $\sigma = 0$ の場合、(3)式から、特定 $T^*$ の時、利益指標 $V/I$ と機会コスト $\delta$ とは反比例の関係になる(Fig.1)。さらに、 $\rho = 0.1$ の場合、(5)式から、最適投資基準 $V^*$ は、機会コスト $\delta$ が0.1に近づき大となるほど投資額 $I$ に接近し、最適行使タイミングは早まる(Fig.2)。



### III. 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的にすることになる。 $V$  は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(gBm)、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、及びライバルの先行的開発による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。

#### 1. gBm による原資産モデルの場合

##### (1) 理論モデル

原資産  $V$  の不確実性を幾何ブラウン運動と仮定すると、

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

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、本源的価値のカーブ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  $I$  と機会費用  $F(V^*)$  との合計に等しいことが前提となる。故に、 $F(V^*) \geq V^* - I$  では行使には早計で、 $F(V^*) < V^* - I$  は遅すぎることになる。

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できる。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  $\delta V F'(V)$  を要する総収益は、

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

各前提から伊藤の公式を応用した微分方程式は、

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

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、

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

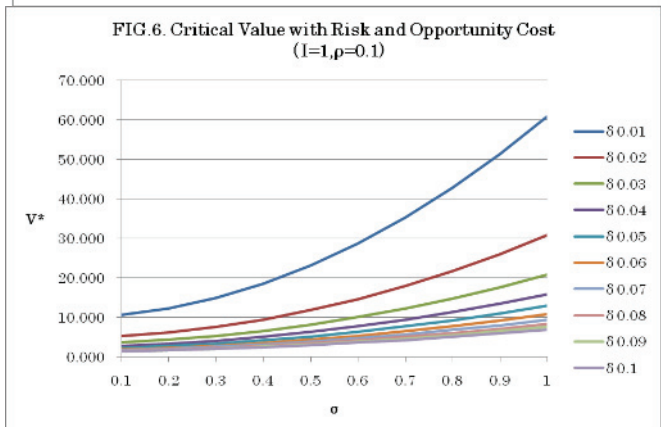
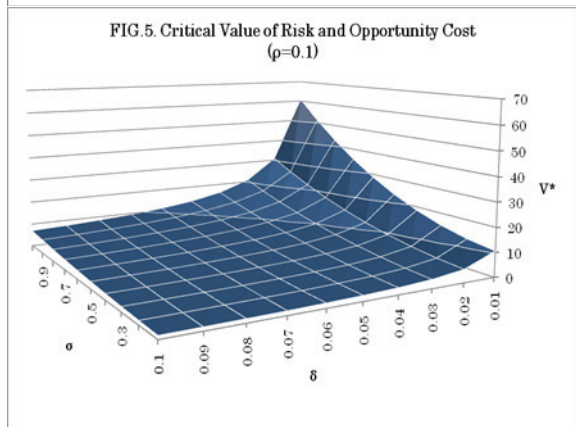
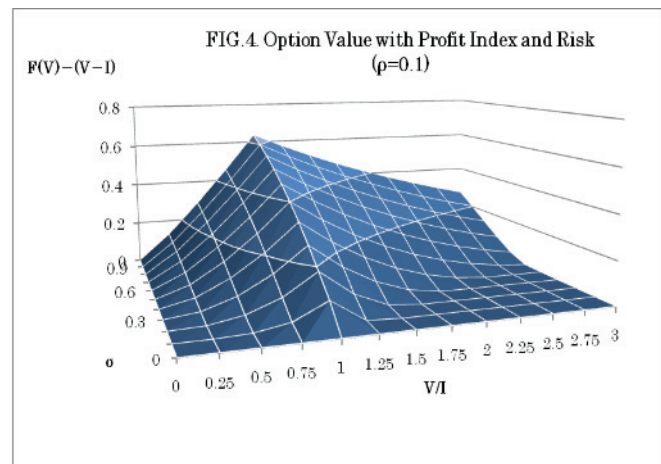
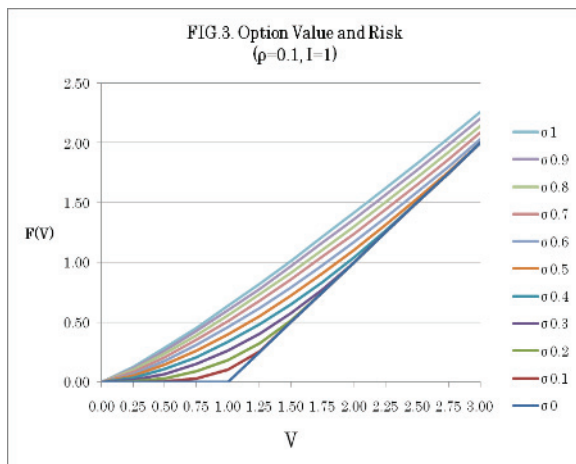
ここで、

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

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

### (2) 最適投資基準の特徴

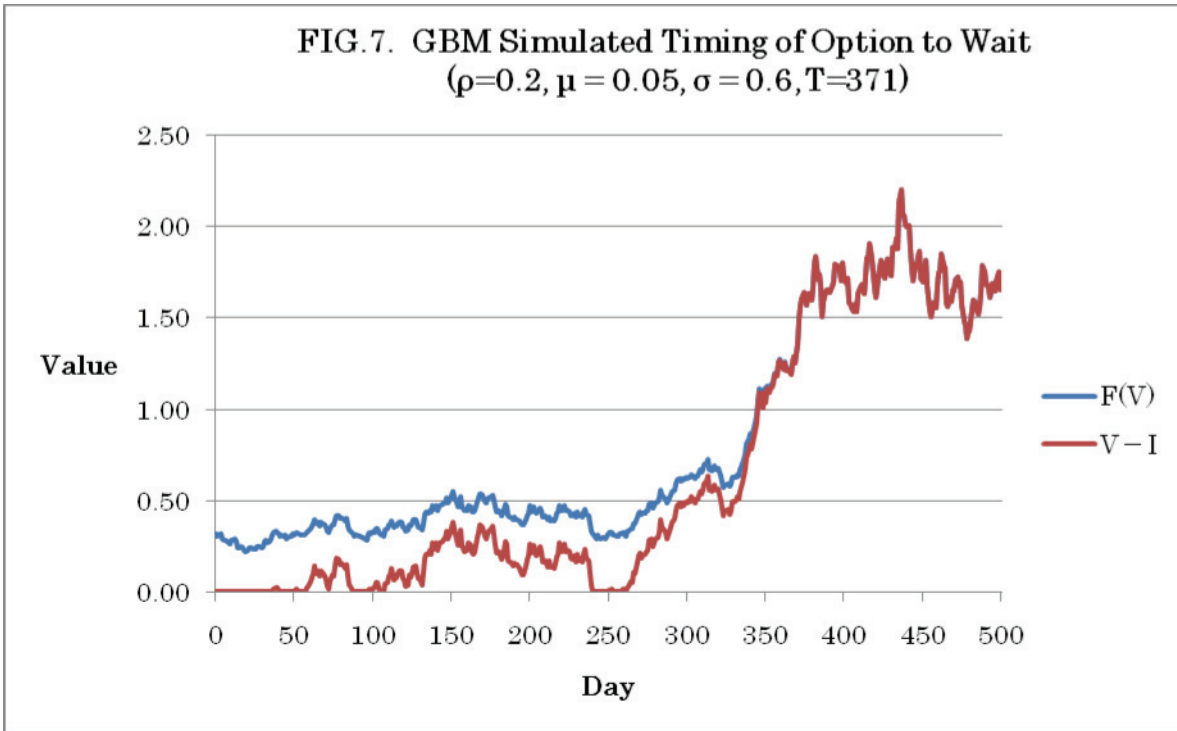
投資決定の臨界値  $V^*$  は、リスク  $\sigma$  の増加に伴い大きくなる (Fig.3)。オプション価値と本源的価値との差である時間的価値は、利益指標  $V/I=1$  を峰として、リスク  $\sigma$  の増加に伴い拡大する (Fig.4)。一定の  $V^*$  に対してリスク  $\sigma$  と機会費用  $\delta$  とはトレードオフ関係にある (Fig.5)。また、所与のリスク  $\sigma$  に対して、機会費用  $\delta$  の増加に伴い  $V^*$  は低下しタイミングが早まる (Fig.6)。



### (3) シミュレーション

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 (Fig.7)。

FIG. 7. GBM Simulated Timing of Option to Wait  
 ( $\rho=0.2, \mu = 0.05, \sigma = 0.6, T=371$ )



## 2. gBm とジャンプ拡散との結合過程による原資産モデル

### (1) 理論モデル

gBm モデルをジャンプ拡散過程の追加によって拡張する。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や、一層有望な代替的プロジェクトの社内提案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。こうして、

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

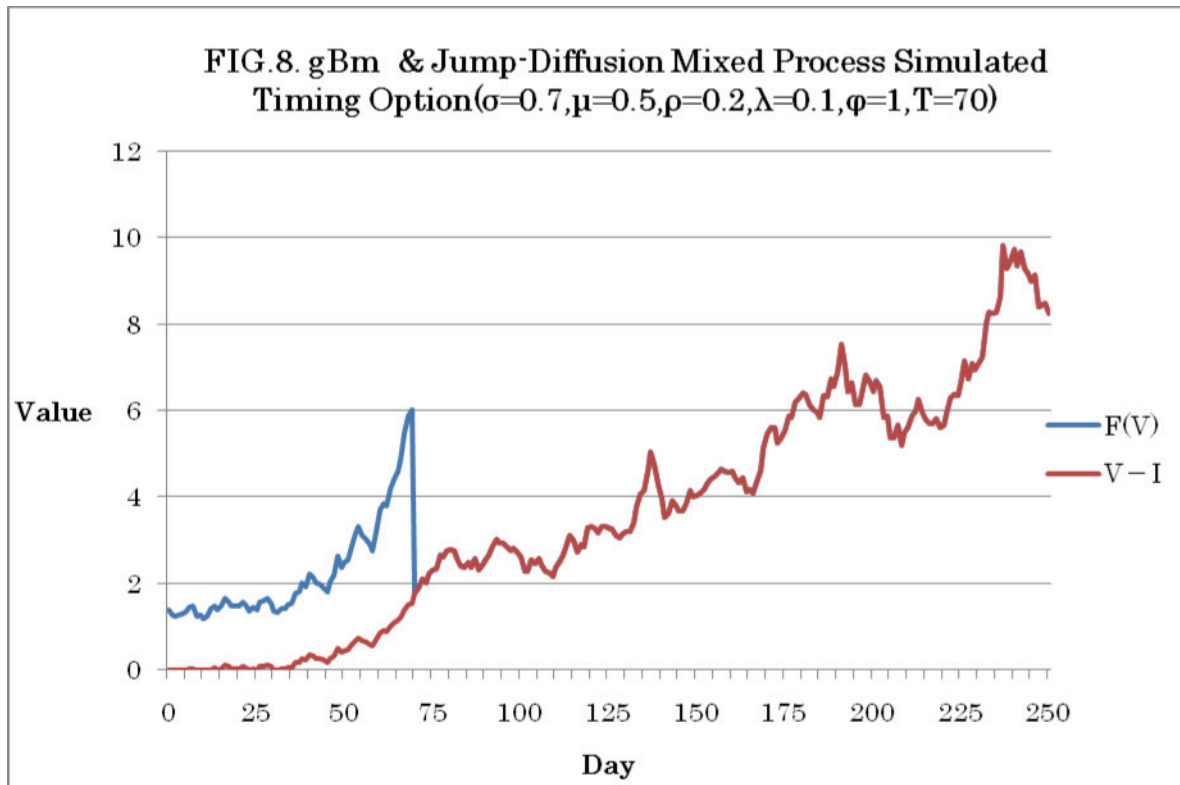
$F(V)$ 、 $A$ 、 $V^*$ は gBm と同じ式が用いられ、 $\phi=1$  の場合、 $\beta_1$ の式は、

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

$-\phi$ は、 $\theta=1$ の場合、 $V-V$ で事業価値を無に帰するので、投資の延期に伴う機会費用を減少させ、トリガー価格としての臨界値を低下させ、投資を早める機能を有する。

### (2) シミュレーション

当該モデルによるシミュレーション結果として、 $\sigma=0.7$ 、 $\mu=0.5$ 、 $\rho=0.2$  及び平均到着率 $\lambda=0.1$ 、 $\phi=1$  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(Fig.8)。



#### 結び

将来収益が不確定な状況下で、不可逆的な埋没コストとしての投資をする指針には、NPVではなく、投資の機会コストとしての延期オプションの価値と投資金額との合計をプロジェクトの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が採用されるのが望ましい。事業価値の変化が決定論的な場合には、臨界値は利益指標  $V/I$  の大きさと機会コスト  $\delta$  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  $V/I$  と  $\delta$  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 gBm にて仮定した場合、リスク  $\sigma$  の小ささと機会コスト  $\delta$  の大きさに伴い臨界値  $V^*$  は早まる。所与の  $V^*$  に対して  $\sigma$  の小ささと  $\delta$  の大き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って延期オプション価値  $F(V^*)$  と  $V^*-I$  とが等しくなる可能性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の経営に対して、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、複数回のトライ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。

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の影響を分析してみたい。

#### 参考文献

- McDonald, Robert and Daniel Siegel. 1986. "The Value of Waiting to Invest." *Quarterly Journal of Economics and Management Science* 4, Spring, 141-183.
- Dixit, Avinash K. and Robert S Pindyck. 1994. *Investment Under Uncertainty*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Mun, Jonathan. 2002. *Real Options Analysis*. Wiley, Hoboken, NJ.