

Title	バイオベンチャーの不確実性下の意思決定と競争構造 ： オプションゲームを基に
Author(s)	藤原, 孝男
Citation	年次学術大会講演要旨集, 27: 275-280
Issue Date	2012-10-27
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/11022
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 B 2 1

バイオベンチャーの不確実性下の意思決定と競争構造： オプションゲームを基に

○藤原孝男（豊橋技術科学大学）

KW：バーチャルバイオベンチャー、オプションゲーム、オープンイノベーション

1. 序

IPO 市場の停滞による VC (Venture Capital) の消極性からバイオベンチャーの資金調達競争の激化、製薬大企業の大型医薬の特許切れ・ジェネリック医薬との競争激化によって、バーチャルバイオベンチャー(Virtual Biotech Start-up)モデルが生じている。例えば、Quanticel Pharmaceuticals は、2011 年 11 月にサンフランシスコとラホヤで、VC の Versant Ventures、バイオ大企業の Celgene、Stanford Univ 研究者との間で創業した、ヒト癌の単一細胞ゲノム分析に特化したベンチャーである。他に、同年末のボストン創業の Warp Drive Bio の例もある。

このような VBS モデルは、POC(Proof-of-Concept)のマイルストーンを達成すれば参加プレイヤーの製薬大企業がプロジェクトを買収可能という投資出口を当初からビルトインしたオプションに基づいているが、Arch2POCM や Sage Bionetworks など競争前の開発コスト重複の防止によるスピード加速を目指す同じオープンソース型イノベーションと同じと見なしてよいのであろうか？

この問題意識に対する主要概念として、まず、POC 特化型バーチャルバイオベンチャーは、大学研究者・製薬大企業・VC からなるネットワーク型プレイヤーによって、POC のマイルストーンを目指し生命科学の基礎研究アイデアを事業化する過程でのリアルオプションのポートフォリオと定義できる。次に、オプションゲーム(Option-Games)はリアルオプションとゲーム理論を統合し、リアルオプションの金融オプションとの相違を排他性の限界にあるとし、市場競争構造の視点から不確実性に対する不可逆的投資の柔軟的意思決定の価値を評価するので、問題意識に適したアプローチといえる。

本稿の目的として、資金調達競争の激化と不確実性下におけるバイオベンチャーの新しい投資パターンを分析する為に、オプションゲームの手法によって、まず、投資タイミングと不確実性・競争とに関する理論モデルを、次に、デスバレー克服に必要な成長オプションの劣化モデルに関する独占・完全競争の両極競争構造での比較を、そして、中間競争構造の寡占にて VBS ビジネスモデルの有効性を各検討する。

2. バイオベンチャーの投資タイミング

2.1 バイオベンチャーの機能

バイオベンチャーは、大学からの画期的な基礎研究アイデアをニッチ市場に向け応用開発する際、大規模市場向けの量産型改良製品を志向する製薬大企業よりも、開発のスピード・コスト・リスクにて優位性を有する。しかし、バイオ医薬品の基礎研究から製造承認を得るまでに 10 年以上の期間、10 億ドル以上のコスト、コンパウンドレベルでの 1/10 万の成功確率とデスバレーが深淵なため、米国での大多数の創薬ベンチャーは赤字で、且つ倒産率も高い。上市医薬を持たない多くのバイオベンチャーが存続できるのは、各マイルストーン達成で証明するポテンシャルを、成長オプションとして投資家の評価に依存しているからである。技術的な成果は、長期的研究によって核酸医薬・再生医療・個別化医療などでコンスタントに出ているが、他方で、資本市場は、金融危機・先進国国債・高齢化などから派生する短期的変動の影響を受けている。基本的に、バイオベンチャーは、マイルストーンタイプの投資や状況に応じた多様な出口戦略（アウトライセンス・提携・M&A・IPO）によって高リスクプロジェクトに対する不可逆的投資に柔軟性を活用している。しかし、停滞する IPO 市場を反映した VC の消極性や、ライセンシー製薬大企業の直面する大型医薬特許切れ、ジェネリック・バイオシミラー医薬との競争激化などによって、特許の排他性に基づくバイオベンチャーの成長オプションが、デスバレーを克服する際に従来ほどには高いペイオフを期待できなくなっている。こうして、特許による成長オプション価値が経済的環境によって脅かされるに従い、従来のバリューチェーンにおける市

ここでは、Smit & Ankum(2000)[10]モデルを参考に、独占と完全競争の両極間での成長オプション価値の劣化傾向の相違に伴う投資延期の影響比較のため、配当の離散時間モデルの要点を検討する。離散時間での時刻 t における投資の見返りとしての期待正味 CF（キャッシュフロー）を、投資家への定期返済の資本コストと優位性に基づく期待超過利益との合計として以下の式で定義する。

$$\overline{CF}_t = I \cdot r + \overline{EP}_t \quad t = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (1)$$

ここで、 $\overline{CF}_t$ = 期待正味 CF、 I = 投資の CF、 r = 資本コスト、 $\overline{EP}_t$ = 期待超過利益、 $I \cdot r$ = 無期限継続事業での投下資本の年間機会コスト、 t = 時刻を各々示す。

独占では、競争による期待超過利益としての新規事業価値の劣化はないと仮定できるので、タイミング（延期）オプションの価値は配当付き株式のコールオプションの価値と等しくなる。その配当率は、時刻 s から t までの期間において、以下のように 2 項モデルの経路とは無関係となる。

$$\delta_{t,s} = \frac{r}{1+r} = \delta_t \quad t = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2)$$

他方、完全競争下では、有望な投資源泉への継続的新規参入が可能なので、期待正味 CF は初期の正の値から時間の経過に伴い低下し、最終的に採算ラインの資本コストに収斂する。故に、完全競争下での配当率は以下のように仮定可能である。

$$\delta_{t,s} = \frac{I \cdot r + \left[1 - \frac{e^{-d}}{(1+r)}\right] [FV_{t,s} - (1+r)I]}{FV_{t,s}} \quad t = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (3)$$

$FV_{t,s}$ は時刻 t から見た将来時刻 s での将来価値を示す。分子の第 1 項は毎年の投資家への資本コストを示し、第 2 項は各状態での超過利益を反映する。バイオ産業が低下率 d の指数関数による e^{-d} 式にて長期的な均衡点に接近すれば超過利益は最終的には消滅することになる。

3.3 数値計算：投資タイミング戦略と超過利益

各競争市場でのオプション評価のための数値計算の仮定として、資本コスト $r = 0.15$ 、2 項過程での原資産の年上昇率 $u = 1.25$ 及び下降率 $d = 0.8$ と仮定する。モデル特性として $u = 1/d = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$ から、 $\Delta t = 1$ 年とすれば、リスク尺度のボラティリティ $\sigma = 22.314\%$ となる。また無リスク金利 $r_f = 0.05$ とする。

他方、革新による初期 1 年末時点での期待超過利益を $\overline{EP}_1 = 30$ とするが、完全競争での参入により指数関数的に年率 0.30 の劣化を想定する。加えて、M&A 後を含む永続稼働で、事業開始の投資金額 $I = 1000$ とそれぞれ仮定する。

3.3.1 独占

ここでは永続事業(Going Concern)における 2 期間内でのオプション行使の合理性を検討する。まず、独占の排他的状態では、(1)式からの資本コスト及び超過利益の期待正味営業 CF を一定金額で安定可能とし、現在の事業価値は以下のように計算できる。

$$V_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\overline{EP}_i + r \cdot I}{(1+r)^i} = \frac{\overline{EP}_1 + r \cdot I}{r} = \frac{30 + 0.15 \times 1000}{0.15} = 1200 \quad (4)$$

製品需要変動の 2 項モデルでは、事業価値は、資産変化率と配当を控除した比率との積として計算できる。故に、時刻 2 の原資産の中位水準は、式(2)から、 $V_{ud} = V_{du} = 907.3$ と上昇→下降及び下降→上昇の両方の経路とも同じ値になり図 2 のように再結合ノード(node)となる。

永続稼働の仮定のため、通常の後向き帰納法を使用できない場合でも、アメリカンコールを 1 年単位のヨーロッパアンコールから構成される複合オプションとし、配当付き原資産用のブラックショールズ方程式(Black-Scholes formula)[11]によって、延期オプション価値の評価が可能となる。また、ヘ

ッジポートフォリオ法を用いて現時点でのオプション価値は $C_0^* = 200$ となる。

すなわち、 C_0^* での意思決定は、時刻 0 での事業中止 0 や延期オプション価値 166.27 よりも、投資による $NPV=200$ の方が大であり、速やかなオプション行使としての投資決定が合理的となる。図 2 では、オプション選択方針として、原資産変動の 2 項経路において、投資(Invest)のノードは V_0 、 V_u 、 V_{uu} で、残りのノードでは延期(Defer)オプション維持の選択が合理的といえる。

3.3.2 完全競争

ここでの完全競争として縮小傾向の VC 資本市場への過度な自由参入に由来する超過利益の指数関数的劣化の仮定に基づき、2 項モデルでの原資産の時刻 0 での数値計算は以下のようになる。

$$V_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\overline{EP}_{i-1} e^{-d(i-1)t} + r \cdot I}{(1+r)^i} \approx 1073.31 \quad (5)$$

式(3)を用いた期間[0,1]の配当 $\delta_{0,1} = 0.1458$ 及びリスク資産の 2 項変化率によって、1 期後の上昇した原資産は $V_u = 1145.99$ と計算できる。

2 項格子モデルでの時刻 2 の原資産の中位金額水準では、経路の相違によって V_u よりも V_d 経由の配当率の方が小さいため $V_{du} = 872.30 > V_{ud} = 770.89$ と、図 3 のように再結混合型とはならない。さらに、独占モデル同様に、ブラックショールズ式・ヘッジポートフォリオ法によってオプション評価を行うと最終的に、現時点でのオプション価値は $C_0^* = 84.68$ となる。

こうして現時点での C_0^* の意思決定の成果は、時刻 0 での事業中止の 0、投資による $NPV = 73.31$ よりも、延期オプション価値 84.68 が最大であり、延期して当該オプションを維持した方が良い。計算の結果、図 3 では、2 項格子での選択指針は C_0 以外で独占の場合と同じになっている。

配当（延期ペナルティ）を加えた 2 項リスクモデルでの競争の両極である独占・完全競争の比較にて、先ず、独占では、金融オプションと同様に成長オプションとしての超過利益が排他的に守られるので、良好な状態での投資と不利な状態での延期という各選択方針が確認できる。他方、完全競争では、成長オプション価値に由来する超過利益の劣化速度を上回る迅速な投資戦略と、ライバルの参入を阻止できない以上むしろ不確実性としての価値上昇機会が充分に大きくなるまで見極めて決断する投資戦略とに 2 極化する。延期のペナルティとしての配当の減少に合わせ投資の誘因も加速度的に劣化する

ので、革新に伴う開発コストの差を一層明確にする形で、画期的バイオ新薬はバーチャルバイオベンチャー・モデルで投資を促進し、ネグレクティド医薬やバイオシミラー・ジェネリック医薬は後者の主としてオープンソース活用型で需要・技術ソースの状態に合わせて柔軟に投資決定を行うのが合理的といえる。

原資産変動		Vuu= 1417.769	原資産変動	1204.516
	Vu= 1304.348	Vud= 907.3724		1145.994 770.8905
	Vo= 1200.00			1073.317
	Vd= 834.7826	Vdu= 907.3724		733.4362 872.3095
		Vdd= 580.7183		558.2781
オプション価値		Cuu= 417.7694	オプション価値	
	Cu= 304.3478	Cud= 23.42305		204.5164
	Co= 200			145.9941 3.579656
	Cd= 12.39315	Cdu= 23.42305		84.68782
		Cdd= 0		17.5823 33.04891
選択方針		Invest	選択方針	
	Invest	Defer		Invest
				Defer
	Defer	Defer		Invest
		Defer		Defer
				Defer

図 2 2 項格子モデル：独占

図 3 2 項格子モデル：完全競争

4. 提携型仮想バイオベンチャー：寡占市場

4.1 寡占市場のオプションゲーム分析

VC 資本市場の厳しさによる成長オプションの劣化スピードを上回る早期投資戦略では、オープンよりはクローズドな関連プレイヤーからなる提携が不可欠で、独占と完全競争との中間に位置する寡

占市場の競争構造に相当する。単純化のために複占に焦点を当てると、2社の投資タイミングは互いの戦略の組み合わせに依存する。

特に、新事業着手競争の場合、対不確実性に加え、早期の市場占有による事業価値の防御が可能となる。

4.2 展開型ゲーム分析

I(Invest)が投資、D(Defer)が延期を指す場合、投資はペイオフが $V_{t,s} - I$ となるオプション行使、投資延期は価値 $C_{t,s}$ のオプション保持となる。不確実性も考慮した対等な競争力の企業間展開型ゲームツリーでは、無限回反復ゲームのように満期のゲーム状態の情報が得られなくとも、部分ゲーム完全均衡によって解が得られる。

こうして競争力対称型のオプションゲームでは、両社が同時に投資をする場合は、過当・補完競争を考慮したクールノーナッシュ(Cournot Nash)均衡解を、リーダー・フォロワーの相互進行ゲームでは、シュタッケルベルク(Stackelberg)均衡を、延期した場合は自然(N;Nature)選択、配当 δ の機会損失、配当付きブラックショール方程式で評価後のヘッジポートフォリオ法による割引期待値などを考慮する。

当該のゲームツリーは、直面する不確実性への延期による柔軟的対処とライバルによる先攻的リスクとのトレードオフの最適化を図ることが可能となる。

4.3 数値計算

数値計算による複占・競争力対称型プレイヤーの2期間展開型ゲームの評価のために、0時刻での原資産 $V_0 = 100$ 、投資金額 $I = 50$ 、リスク調整型金利 $k = 0.15$ 、無リスク金利 $r_f = 0.05$ 、2項過程・原資産上昇率 $u = 1.25$ 、同下降率 $d = 0.8$ 、投資クールノーゲームにおける競合係数 $v = 0.5$ 、シュタッケルベルク均衡でのリーダーによる市場占有率 $\theta = 0.525$ 、及び単位期間 $\Delta t = 1$ 年と仮定する場合には、計算式からボラティリティ $\sigma = 0.2231$ 、リスク中立確率 $p = 0.5555$ 、配当 $\delta = 0.1304$ /年となる。

これらのパラメータを用いてゲームツリーを完成させると図4のような結果となる。すなわち、部分ゲーム完全均衡としての「ナッシュ均衡」は、時刻0で、先ずA・B両社とも延期{D,D}する。不確実生としての自然N1が良好(u)ならば、両社とも投資{I,I}し時刻1のペイオフは(4.34,4.34)となる。他方、不利(d)ならば、両社とも延期{D,D}し、次の自然N2が良好(u)ならば、両社とも再度延期{D,D}し時刻2のペイオフはオプション維持により(5.24,5.24)となる。他方、自然N2が不利(d)ならば、両社とも同様に

A	B	ペイオフA	ペイオフB	N1	A	B	ペイオフA	ペイオフB	N2	A	B	ペイオフA	ペイオフB
I	I	0	0		I	I	3.59375	1.630435		I	I	5.166016	6.120038
I	D	2.5	1.713288	u	D	I	3.59375	3.238115		D	I	5.166016	3.993923
									u			3.30625	-14.0832
									d			3.30625	0
				d	I	I	2.3	-16.9565					
					D	I	2.3	0					
									u	I	I	3.30625	-14.0832
										D	I	3.30625	0
									d	I	I	2.116	-27.0132
										D	I	2.116	0
D	I	1.713288	2.5	u	I	I	1.630435	3.59375				6.120038	5.166016
					D	I	3.238115	3.59375				3.993923	5.166016
									u	I	I	6.120038	5.166016
										D	I	3.993923	5.166016
									d	I	I	-14.0832	3.30625
										D	I	0	3.30625
				d	I	I	-16.9565	2.3					
					D	I	0	2.3					
									u	I	I	-14.0832	3.30625
										D	I	0	3.30625
									d	I	I	-27.0132	2.116
										D	I	0	2.116
D	D	3.474378	3.474378	u	I	I	4.347826	4.347826					
					I	D	7.065217	3.238115					
									u	I	I	41.01563	6.120038
										D	I	41.01563	3.993923
									d	I	I	6.5	-14.0832
										D	I	6.5	0
					D	I	3.238115	7.065217					
									u	I	I	6.120038	41.01563
										D	I	3.993923	41.01563
									d	I	I	-14.0832	6.5
										D	I	0	6.5
					D	D	4.808526	4.808526	u	I	I	9.073724	9.073724
										D	I	12.02741	3.993923
										D	I	3.993923	12.02741
										D	I	5.241793	5.241793
									d	I	I	-12.1928	-12.1928
										D	I	-10.3025	0
										D	I	0	-10.3025
										D	I	0.017989	0.017989
				d	I	I	-15.2174	-15.2174					
					I	D	-13.4783	0					
									u	I	I	26.25	-14.0832
										D	I	26.25	0
									d	I	I	16.8	-27.0132
										D	I	16.8	0
				D	I	0	-13.4783						
									u	I	I	-14.0832	26.25
										D	I	0	26.25
									d	I	I	-27.0132	16.8
										D	I	0	16.8
					D	D	2.773435	2.773435	u	I	I	-12.1928	-12.1928
										I	D	-10.3025	0
										D	I	0	-10.3025
										D	I	5.241793	5.241793
									d	I	I	-25.8034	-25.8034
										I	D	-24.5936	0
										D	I	0	-24.5936
										D	D	0	0

図4 対等複占におけるナッシュ均衡とパレート最適

延期し時刻 2 のペイオフは (0,0)となる。時刻 2 の両ペイオフからの割引期待値として時刻 1 のペイオフは(2.77,2.77)となる。さらに、時刻 1 の両ペイオフから遡る割引期待値、また、当該の部分ゲーム完全均衡戦略採用による時刻 0 での総括的ペイオフは(3.47,3.47)となる。

しかし、このナッシュ均衡解は囚人のジレンマ（互いの不信感から両社にとって最適ではない不幸な）状態にある。むしろパレート最適（両社にとって最適）な戦略は、時刻 0 での両社とも延期{D,D}の後、自然(N1)が不利(d)ならば両社とも延期{D,D}の戦略は変わらないが、良好(u)ならば片方が投資し残りが延期後{I,D}に、自然(N2)が良好(u)ならば投資{I}し不利(d)ならば再延期{D}すれば、時刻 1 のペイオフは(7.05,3.23)に改善する。この場合、改善後の収益の再配分を目的に、単に公平な競合よりも、先導・追随の役割をスマートに調整する社会的機能があれば、両社合計（社会全体）の収益は改善する可能性がある。

故に、バーチャルバイオベンチャー・モデルでは社会的革新としての一層洗練された調整機能が全体最適化に向け求められる。

5. 結び

投資基準としての NPV（正味現在価値）は、不確実な状況下での迅速な意思決定というトレードオフに直面する場合、事業価値の評価において弱点を持つ。オプション理論が当該状況に有効であるが、リアルオプションは金融オプションとは排他性の限界において相違点を持つ。

本稿では、数値計算にて、投資タイミングへの不確実性と競争の影響を検討した。先ず、独占市場での投資機会は金融オプション同様に排他的である。故に、不利な状況では延期を、有利な状況では直ぐに投資をすべきである。他方、完全競争での延期は、ライバルの参入から期待収益の劣化を意味する。排他性の欠如は確かに劣化スピードに優る迅速な行動への誘因を否定できない。しかし、延期の機会コストである配当が加速度的に劣化する中で、参入を阻止できないとすれば、不確実性下での良好な状態を一層慎重に見極めてから投資する誘因も高まる。結果として、初期の新規性に伴う短期的な機会の活用か、逆に状態が確実に良好になるまで慎重な投資延期かという両極化する可能性がある。

寡占は独占と完全競争の中間に位置する。不確実性下での対等な複占では、状態を見極め事業価値が十分に高い場合には両社投資をし、価値が低い場合には、両社とも投資の延期をした方が合理的となり得る。しかし、過剰な競争誘因を抑止し、コンソーシアム等の社会的システムの工夫によってシナジー効果の再配分を事前に決めて先導・追随の役割分担による投資をした方が、両社の得られる成果も改善できる可能性がある。

こうして、社会的革新として画期的バイオ新薬はバーチャルバイオベンチャー・モデルで、ネグレクティブ薬はオープンネットワーク・モデルで各々開発される可能性が高いと思われる。すなわち、バーチャルバイオベンチャー・モデルでは、成長オプションの劣化を防ぐために完全なるオープンソースよりも相対的に閉鎖的なプレイヤー間での寡占的な市場構造で不確実性に対する投資のリスクヘッジを行ない、過剰な競争意識からの囚人のジレンマから脱去してパレート最適を目指す戦略的提携が必要となる。

但し、オープンソースによる PPP での Virtual Network による Non-Profit な研究開発投資の誘因を分析する必要が依然残っている。

参考文献：

- [1] Myers, S.C. (1984): Finance Theory and Financial Strategy. Interfaces 14, 1 (January-February): 126-137.
- [2] 川口有一郎他訳(2001)：投資決定理論とリアルオプション、エコノミスト[Dixit, A.K. & S.P. Robert (1994): Investment under Uncertainty, Princeton University Press].
- [3] 梶本克之他訳(2002)：リアルオプション、東洋経済新聞社[Copeland, T.E. & Antikarov, V. (2001): Real Options, Texere].
- [4] Smit, H.T.J. & L. Trigeorgis, (2004): Strategic Investment, Princeton University Press.
- [5] Kester, W.C. (1984): Today's Options for Tomorrow's Growth, Harvard Business Review, March-April: 153-60.
- [6] Titman, S. (1985): Urban Land Prices under Uncertainty, The American Economic Review 75, 3 (Jun): 505-514.
- [7] Grenadier, S. R. (2000): Option Exercise Game: The Intersection of Real Options and Game Theory, *Journal of Applied Corporate Finance* 13, 2: 99-107.
- [8] Paddock, J.L., D.R. Siegel & J.L. Smith (1988): Option Valuation of Claims on Real Assets: The Case of Offshore Petroleum Leases, *Quarterly Journal of Economics* 103: 479-508
- [9] Hendricks, K. & D. Kovenock (1989): Asymmetric Information, Information. Externalities and Efficiency: The Case of Oil Exploration, *Rand Journal of Economics* 20: 164-182.
- [10] Smit, H.T.J. & L.A. Ankum, (2000): A Real Options and Game-Theoretic Approach to Corporate Investment Strategy under Competition. In S. Grenadier, ed., *Game Choices, Risk Books*: 21-37.
- [11] Black, F. & M. Scholes (1973): The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*, 81: 637-59.