不確実性下における資本予算の評価モデル
—リアル･オプション法の意義と課題—

篠　田　朝　也

1．はじめに

近年まで，管理会計における資本予算の分野においては，NPV法（Net Present Value method）が最も優れた投資意思決定評価のモデルであると考えられてきた。その一方で，同じ資本予算の評価方法として，リアル・オプション（Real Options）が注目されてきている[1)]。リアル・オプションは，金融工学の分野で開発された金融オプション・プライシング・モデルを実物資産の投資意思決定に適用した価値評価モデルであり，経営の柔軟性（flexibility）を考慮に入れることができるという点で，伝統的なNPV法の問題点を克服している。

1）特にファイナンスの分野において，リアル・オプション法への注目は高まってきている。その証左として，2000年前後から，リアル・オプションを主題とした著書が多数出版されている。巻末の参考文献を参照されたい。

しかし，わが国の会計分野の研究において，リアル・オプションに接近した研究成果はさほど多くはない[2)]。とはいえ，資本予算は管理会計における主要なトピックのひとつであり，リアル・オプションは資本予算に関連する価値評価モデルである。また，リアル・オプションは，企業の経営活動の一部の価値を，貨幣額単位で測定するものであり，会計領域とも高い親和性を有する評価手法であると思われる。したがって，リアル・オプション法の特徴を的確に理解して，その有効性や可能性，および，問題点について検討をしておくことは，会計領域の研究においても一定の意義があるものと思われる。

そこで，まず本稿では，伝統的なNPV法との比較を通じて，リアル・オプションの本質的特徴について明らかにしたい。次に，金融オプションのオプション・プライシング・モデルについて概観して，それをリアル・オプションに適用した場合の具体的な価値評価手続きについて考察する。最後に，リアル・オプションの課題と問題点について検討をおこなう。

2．不確実性下における投資プロジェクトの柔軟性の評価

本節では，近年まで，資本予算の投資意思決定評価モデルとして最善のモデルとされてきた伝統的なNPV法とリアル・オプションの基本的な思考方法の相違点について概観していく。

企業は，不確実性下において，さまざまな投資意思決定を行っている。そのため，企業は，投資案件を取り巻く環境の変化に応じてその実行内容を変更することがある。しかし，伝統的なNPV法による現在価値計算は，不確実性下における企業の意思決定の柔軟性を考慮していない。伝統的なNPV法には，将来にわたる不確実な事象への対応策が投資意思決定の評価モデルに組み込まれていないために，投資案件の評価額を過小評価してしまうという虞が生じる。

そこで，投資案件の柔軟性を考慮すると，プロジェクトの価値評価にどのよう

2）わが国の会計領域においてリアル・オプションの検討を試みた研究成果で，代表的なものとしては，小林［2003］，［2004］，上野［2005］などがある。

な変化が生じるのかについて，簡単な設例（〔設例１〕）をもとにして具体的に検討をしたい。

> **設例１**
>
> Ａ社は，初期投資Ｉ（＝8,000）により製品Zを生産する[3]。製品Ｚから得られる初年度（t＝０）の利益は1,000である。しかし，経済の動向次第で翌年における製品単価が変動する可能性があり，製品Zから得られる翌年の利益は，確率q(＝50%）で1,500に上昇し，確率（1-q)(＝50%)で500に下落する。なお，再来年以降の利益はｔ＝１時点の水準で永久に一定であるとする。また，割引率ｒは10%である。ただし，これら以外の要素で，初期投資以後においてキャッシュ・フローに影響を及ぼす収支はないものとする。

【伝統的なNPV法】

この設例において，伝統的なNPV法によれば，この投資のNPVは下記の通り計算される。なお，t=１以降のキャッシュ・イン・フローの期待値は常に1,000である。

表１：キャッシュフローの流列（伝統的なNPV法：〔設例１〕）

期間	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
キャッシュ・フローの流列	1,000	0.5 → 1,500	→ 1,500	→ 1,500	→ 1,500	→ 1,500
		0.5 → 500	→ 500	→ 500	→ 500	→ 500
割引率=0.1	−8,000					

$$NPV=\sum_{t=1}^{\infty}\left(\frac{1,000}{(1+0.1)^{t}}\right)+1,000-8,000=3,000 \qquad (1)$$

この場合，計算式（１）からNPVは3,000となり，正の値を返すので，この投資は実施されるべきであるとの結論を得る。もちろん，この結論は部分的には正しい。とくに，「t=０時点において投資を行うか，さもなければ一切投資を行わない」

3）議論の単純化のために，初期投資が行われたら，即座に製品の生産が可能である（したがって，t=０において，投資と同時に製品Zからの利益を得ることができる）と想定する。

という二者択一を迫られている場合においては，上記の結論から得られるように当該企業は投資を行うべきである。しかし，この結論は，t＝0時点で投資を行うか，さもなければ一切投資を行わないかの二者択一を迫られた場合の結論であり，他の選択肢は考慮に入れられていない。例えば，t＝1時点まで投資を行うか否かの結論を待って，獲得できる利益が下落する場合には投資を行わないという柔軟性のある選択肢は考慮に入れられていないのである。ここに，伝統的なNPV法の限界がある。

【t＝1時点まで投資の意思決定を延期するケース】

次に，t＝1時点まで投資を延期して，獲得できる利益が上昇した場合のみに投資を行い，下落した場合には投資しないというケースを考えてみる。

表2：キャッシュフローの流列（延期オプション：〔設例1〕）

期間	t=0		t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
キャッシュ・フローの流列	0	0.5 →	1,500 →	1,500 →	1,500 →	1,500 →	1,500
			−8,000				
		0.5 →	投資しない				
割引率=0.1							

$$\mathrm{NPV}=0.5\times\left[\sum_{t=1}^{\infty}\left(\frac{1{,}500}{(1+0.1)^{t}}\right)-\frac{8{,}000}{(1+0.1)}\right]+0.5\times 0=3{,}863.64 \qquad (2)$$

[4)]

このケースでは，計算式（2）から，期待されるNPVは3,863.64となる。したがって，t＝0時点において投資した場合に得られるNPV（3,000）よりも，t＝1時点まで投資を延期して投資意思決定を行うケースで得られるNPV（3,863.64）のほうが大きくなる。

ここで注目すべき点は，伝統的なNPV法を用いた場合では考慮に入れられていなかった，「t＝1時点まで投資の意思決定を延期する」という選択肢を考慮に入れることによって，この投資プロジェクトの価値をより高く算定できるというこ

4）小数点第3位で四捨五入している。

とである。この〔設例１〕において，投資の意思決定を延期するという柔軟性を考慮に入れることにより得られる増分価値は，863.64（＝3,863.64−3,000）である。この点について換言すれば，投資の意思決定をt＝１まで延期するという柔軟なオプションを考慮に入れることができるのであれば，863.64の追加的な費用を負担しても良いということである。

上述の【t＝１時点まで投資の意思決定を延期するケース】のように，投資プロジェクトの開始時点（t＝０）以降にいくつかの選択権が用意されており，それらを包括的にプロジェクト価値の評価に織り込もうとする評価手法が，プロジェクトの柔軟性を考慮に入れたリアル・オプションの基本的な思考法である[5)]。この思考法が，投資開始時点に全ての投資の意思決定を済ませたものとして価値の評価を行う伝統的なNPV法には見られない大きな特徴である。

3．リアル・オプションと伝統的なNPV法のNPV分布の比較検討

前節の設例の検討を通じて，意思決定の柔軟性を考慮に入れることができるというリアル・オプションの特性について，具体的に確認することができた。引き続き，本節では，この柔軟性を考慮に入れることで，NPVにどの程度の相違が見られるのか，シミュレーションを実施して確認したい。以下では，前節の設例に，モンテカルロ・シミュレーションを適用してNPVの分布を比較する。

モンテカルロ・シミュレーションは，不確実性下の投資プロジェクトの評価をおこなう際に利用できる分析的手法である。モンテカルロ・シミュレーションでは，まず，観察者が，不確実性を伴うインプット変数に対して，特定の確率分布を当てはめたモデルを構築する。そのうえで，コンピュータを使用して，特定された確率分布に従って確率変数の値をランダムに発生させながら，モデルの繰り返し試行を実施することで，アウトプット値の分布を求める[6)]。

ここでは，〔設例１〕のキャッシュ・フローの流列に不確実性が生じているも

5）なお，投資の開始時期を延期するという選択権は，延期オプションと呼ばれている。
6）伝統的なNPV法とそれにモンテカルロ・シミュレーションを適用したケースの比較検討については，篠田［2005］を参照されたい。

のと想定し，伝統的なNPV法とリアル・オプションの双方にモンテカルロ・シミュレーションを適用してNPVの分布の相違を比較・検討する。

設例２

今回の設例では，〔設例１〕の初期設定から一部の設定を変更する。変更点は下記の通り。

・投資の効果の発現期間を無限から有限（t＝５まで）として，また，初期投資Ｉの金額を4,000とする。そのほかの初期数値の設定については，〔設例１〕から変更はない。

・t＝１以降の各期のキャッシュ・イン・フローにのみ不確実性があるとして，その期待値を各期の予測値，ボラティリティを50％と想定する。

・以上の条件で，モンテカルロ・シミュレーションを実施する。7)

【伝統的なNPV法】

表３：キャッシュフローの流列（伝統的なNPV法：〔設例２〕）

期間	t=0		t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
キャッシュ・フローの流列	1,000	0.5 →	1,500 →	1,500 →	1,500 →	1,500 →	1,500
		0.5 →	500 →	500 →	500 →	500 →	500
割引率=0.1	−4,000						

$$\mathrm{NPV}=0.5\times\left[\sum_{t=1}^{5}\left(\frac{1{,}500}{(1+0.1)^t}\right)+\sum_{t=1}^{5}\left(\frac{500}{(1+0.1)^t}\right)\right]+1{,}000-4{,}000=790.79 \quad (3)$$

計算式（３）より，伝統的なNPV法によるNPVの理論的な期待値は790.79となる。

【t＝１時点まで投資の意思決定を延期するケース】

表４：キャッシュフローの流列（延期オプション：〔設例２〕）

期間	t=0		t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
キャッシュ・フローの流列	0	0.5 →	1,500 →	1,500 →	1,500 →	1,500 →	1,500
			−4,000				
割引率=0.1		0.5 →	投資しない				

7）モンテカルロ・シミュレーションは，Crystal Ball 7（日本語版）を用いて実施した。↗

$$NPV=0.5\times\left[\sum_{t=1}^{5}\left(\frac{1{,}500}{(1+0.1)^t}\right)-\frac{4{,}000}{(1+0.1)}\right]+0.5\times0=1{,}024.91 \quad (4)$$

計算式（4）より，t＝1まで投資の意思決定を延期した場合のNPV法の理論的な期待値は1,024.91となる。

ここで，表3および表4の網かけされた箇所のインプット値を，ボラティリティ50％の正規分布として特定した。そのうえで，100,000回試行のモンテカルロ・シミュレーションを実施して得られたNPVの分布を示したものが，図1である。

図1：NPVの分布の比較

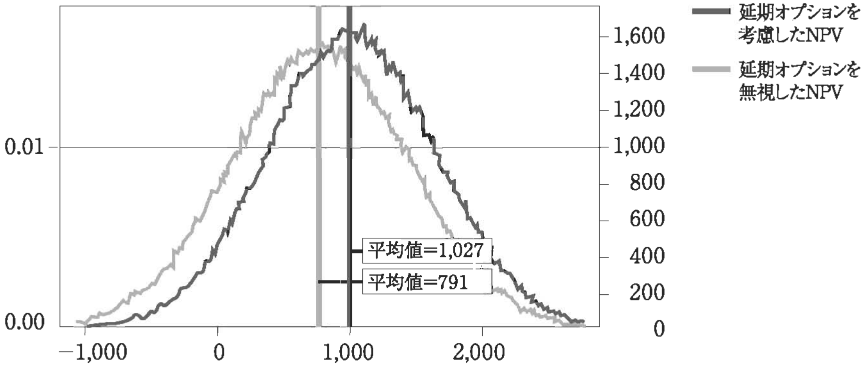


表5：NPV分布の比較：統計量

NPVの分布の比較：統計量		
統計量	延期オプションを考慮したNPV	延期オプションを無視したNPV
試行回数	100,000	100,000
平均値	1,027	791
中央値	1,027	792
標準偏差	640	675
分散	409,196	455,484
下限	-1,812	-2,207
上限	3,858	3,487

図1から明らかな通り，オプションを無視したNPVの分布とオプションを考慮

↘シミュレーション分析ツールとしてのCrystal Ballの使用法については，Evans and Olson［2001］，Mahoney and Kelliher［1999］などを参照されたい。

したNPVの分布を比較すると，オプションを考慮したNPVの分布のほうが正の方向に偏向している。しかも，ただ単に正の方向に偏向しているわけではない。グラフからのみならず，表５の統計量からも分かるとおり，オプションを考慮したケースのほうが，標準偏差（したがって分散も）が小さくなっていることを確認することができる。つまり，リアル・オプションを導入することで，NPVの分布は，標準偏差が小さくなると同時に正の方向に偏向することになる。オプションを考慮することには，NPVを大きく提示するだけなく，NPVの変動性を縮小させるという特徴があることが確認できる。

以上のように，オプションを考慮することによって，プロジェクトから得られるNPVの分布が大きく改善されることが見てとれる。

4．リアル・オプションの定量化：２項モデルとブラックショールズ・モデル

本節では，リアル・オプションの定量化における特徴を理解するために，リアル・オプションの価値を定量化するための数理モデルの概要についてみていくこととする。定量化数理モデルを用いることで，より一般的な投資プロジェクトの価値の評価が可能となる。

4.1　金融オプション・プライシング・モデルとの対比

金融オプションとは，定められた期間のなかで事前に決めた価格（これを一般に権利行使価格という）で，株式などの原資産を買ったり，売ったりすることのできる権利のことをいう。なお，事前に決められた価格で原資産を買うことのできる権利をコールオプションといい，売ることのできる権利をプットオプションという。また，最終的な取引日までのどの時点でもオプション権利を行使できるものはアメリカン・オプションとよばれ，最終的な取引日においてのみ権利を行使できるものはヨーロピアン・オプションとよばれている。

ここで，実物資産への投資プロジェクトの評価は，金融オプションに類似したものとみなすことができるという点に注目したい。つまり，投資プロジェクトは，ある投資費用を投入することで，投資プロジェクトからの利益を得る権利を有し

ているものとみなすことができる。

したがって，リアル・オプションの定量化も，金融オプションのプライシング・モデルを援用して行うことが可能となる。数理ファイナンスの分野では，オプション・プライシング・モデルは基礎的な概念として既に広く知られている。しかし，その計算理論は，われわれ会計の領域では必ずしも馴染みの深いものとはいえないので，オプション・プライシング・モデルの概略について，ここでごく簡単に整理するとともに，その特徴について理解を深めたい。以下では，代表的なオプション・プライシング・モデルとして，ブラック＝ショールズ・モデルと，２項モデルをとりあげる。

4.2　ブラック＝ショールズ・モデルを用いたリアル・オプションの定量化

ブラック＝ショールズ・モデルでは，オプションの原資産価格が幾何ブラウン運動に従うという仮定に従い，オプション価値の算定が行われる[8]。いま，満期期間（T）の原資産（S_0）を行使価格（K）で購入するヨーロピアン・コール・オプションの価値（c_0）[9]を評価するブラック＝ショールズの公式を示すと下記の通りとなる[10]。

$$c_0 = S_0 N(d) - Ke^{-rT} N(d - \sigma\sqrt{T})$$

$$d = \frac{\ln(S_0/K) + (r + \frac{1}{2}\sigma^2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

σ：ボラティリティ（収益率の標準偏差）
r：リスク・フリーレート（国債などの安全資産から推定）
$N(\cdot)$：標準正規分布の累積密度関数

8）幾何ブラウン運動に従う株価変動については，Hull［2005］ch.10, Luenberger［1998］ch.11などを参照されたい。

9）ブラック＝ショールズ・モデルでは，オプションの行使が満期時点に限られるため，ヨーロピアン・オプションの価値が求められることとなる。

10）なお，原資産価格に対して，配当（δ）がある場合，ブラック＝ショールズ・モデルは次のように修正される。

$$c_0 = S_0 e^{-\delta T} N(d) - Ke^{-rT} N(d - \sigma\sqrt{T})$$

$$d = \frac{\ln(S_0/K) + (r - \delta + \frac{1}{2}\sigma^2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

本稿では，上記のブラック＝ショールズの公式の詳細について解説することは省略するが[11]，リアル・オプション価値の評価において重要な点は，上記の各パラメータの値を得ることができれば，オプション価値を解析的に求めることができるということである。もちろん，$N(\cdot)$を直接計算して求めることは難しいが，関数電卓やExcelに代表される近年の表計算ソフトウェアには，標準正規分布の累積密度関数を求めるための関数がアドインされているので，これらを利用することで，オプション価値を容易に計算することができる。

4.3　ブラック＝ショールズ・モデルの利点と限界

ブラック＝ショールズ・モデルの最大の利点は，入力すべきインプット値さえ入手できれば，オプションの理論的価値を正確かつ容易に計算できるという点にある。したがって，リアル・オプションをある種のヨーロピアン・オプションとみなすことができる場合は，各パラメータを入力して簡単にオプション価値を得ることができる。

しかし，現実の投資プロジェクトを，ブラック＝ショールズ・モデルが想定するようなヨーロピアン・オプションとみなすことは容易ではない。というのも，現実の投資プロジェクトの柔軟性は，ある一定期間においていつでも行使できるようなアメリカンタイプのオプションであることがほとんどだからである。したがって，現実の投資プロジェクトのリアル・オプション価値を計算するために，そのままブラック＝ショールズ・モデルを当てはめることは誤った価値を導くことになりかねない。

4.4　２項モデル

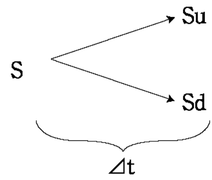
２項モデルとは，原資産の価格がたどる２項格子の経路を明らかにすることを通じて，オプション価値を導出する離散型のオプション価値算定モデルである。紙幅の都合もあるので，２項モデルによる価値計算導出過程の詳細について解説

11）ブラック＝ショールズ・モデルの詳しい導出過程はHull［2005］ch.11, Luenberger［1998］ch.13などを参照されたい。

することはしないが[12]，ここでは，リアル・オプションの評価に用いられる２項モデルの基本的な考え方と，最終的な評価式を示すこととする。

２項モデルでは，原資産の価格（金融オプションなら初期株価等，リアル・オプションなら初期時点に得られると期待される投資案件の現在価値）が，上昇する場合と下落する場合の２つのシナリオを想定して，このシナリオからオプション価値を推定する[13]。

図２：期間⊿tの２項格子



２項モデルには，原資産価格の変動について，加法的なモデルと乗法的なモデルがあるが，以下の議論では，金融オプション理論でより一般的な乗法モデルに従うものとする[14]。また，２項モデルにおけるオプション価値導出手続きとしては，リスク中立確率にもとづく導出法と，原資産と無リスク資産の複製ポートフォリオから導出する方法があるが，ここではリスク中立確率にもとづく導出法を紹介する。

いま１年間を⊿tの微小期間に分割して，各期間（⊿t）が経過するごとに原資産の初期価格Sが，Sのu倍上昇するか，Sのd倍下落すると仮定する（図２参照）。また，リスクフリーレートはｒとする。

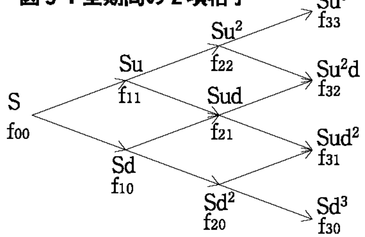
このとき，ある期の資産価格を次期の価格の割引期待値と一致させるようなリスク中立確率pを導入すると，p, d, u, の値は，以下の通りに与えられる[15]。

$$p=\frac{e^{r\Delta t}-d}{u-d}$$

$$u=e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$$

$$d=e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$$

図３：全期間の２項格子



12）２項モデルの詳細については，Hull［2005］ch. 9， Luenberger［1998］ch.12, Mun［2002］ch. 6 などを参照されたい。

13）各格子点上において，３つのシナリオを想定してオプション価値を推定する３項モデルもある。３項モデルをはじめとする，発展的なオプション価値評価モデルの詳 ↗

つづいて，図３のように２項格子を延長していくことで，２期間以上の原資産の価格変動を表現できる。この格子構造にしたがって，原資産の初期価格Sから順に各期の資産価格を計算していけば，期末時点の資産価格を得ることができる。

ここで，アメリカン・プット・オプションの場合を考えてみる。行使価格をK，図３の最後の格子点の資産価格をS_Tとすると，オプション価値はmax［$K-S_T$, 0］と計算される。この要領で，全ての末端の格子点のオプション価格が判明する。ここで，図３の最終期のSu^3のときのオプション価値をf_{33}，Su^2dのときのオプション価値をf_{32}としたとき，１ステップ前の格子点（Su^2）でのオプション価値f_{22}は，オプションを行使しなかったときの価値である$e^{r\Delta t}$［$pf_{33}+(1-p)f_{32}$］と，この時点でオプションの行使をしたときに得られる収益（$K-Su^2$）を比較して大きいほうの値となる[16)]。このように１ステップずつ逆算して，始点のオプション価格を求めていくのが，２項モデルによるオプションの評価方法である。

4.5　２項モデルの利点と限界

２項モデルは，比較的構造が簡単であるために，あらゆるタイプのオプションを想定した分析に適用できるという利点がある。したがって，かなり複雑なオプションが想定されるような投資プロジェクトのオプション価値の評価にも適用できるという利点がある。

↘細はHull［2005］ch.16, Luenberger［1998］ch.13を参照されたい。

14）リアル・オプションにおいては，下落時に価値が負の値となりうる加法的な２項モデルも重要であるが，紙幅の都合もあり，ここでは省略した。詳細は，Luenberger［1998］ch.11などを参照されたい。

15）ただし，$u=\frac{1}{d}$が条件として満たされていなければならない。また，裁定機会を避けるために，$u>1+r>d$でなければならない。

16）オプション期間が，長さΔtのN個の期間に分割されているとき，$0\leqq i\leqq N$，$0\leqq j\leqq i$において，資産価格は$Su^j d^{i-j}$と表現できる。このとき，アメリカン・プット・オプションの満期時点のオプション価値は，max［$K-Su^j d^{i-j}$, 0］となる。

格子点（i , j）から，１ステップ後の時点において格子点（i+１ , j+１）に移るときのリスク中立確率をp，格子点（i+1 , j）に移るときのリスク中立確率を（１－p）とすると，アメリカン・プット・オプションの価値は，$f_{ij}=\max\{K-Su^jd^{i-j}, e^{-r\Delta t}[pf_{i+1,j+1}+(1-p)f_{i+1,j}]\}$となる。（ただし，$0\leqq i\leqq N-1$，$0\leqq j\leqq i$）

また，満期前の各格子点上で，オプションを行使したときのオプション価値を求めることができるために，アメリカンタイプのオプション価値を求めることができるということも大きな利点である。

さらに，２項モデルは，アメリカンタイプのオプションを行使した結果などが，ツリーの展開図のなかで明示されるために，投資意思決定の結果として導き出される結果について，図式的に理解できる。

しかし，２項モデルは，離散型の数理モデルであるために，オプションの理論値を正確に求めることはできない。もちろん，ステップ数を増加させることで，理論値の近似値を得ることは可能であるが，そうすると多くのステップの計算が必要となってしまうという問題点が生じる。したがって，表計算ソフトウェアとそれらにアドインされている関数を活用して，２項モデルの解析を可能とするスプレッドシートを作成しておくなど計算上の工夫が必要となる。

5．具体的なリアル・オプション価値の評価

本節では，前節で概観した金融オプション・プライシング・モデルを利用して，リアル・オプション価値の評価を行う場合の概要を見ていくこととする。

なお，本節では，撤退オプションと拡大オプションが混在している複合オプションのケースを検討していくこととする[17]。

17）リアル・オプションのオプションの形態にはさまざまなものがある。延期オプション，撤退オプション，拡大オプション，縮小オプションなどの基本的なオプションに加えて，これらが混在したオプションや，スイッチング・オプションなど，さまざまなケースが考えられる。リアル・オプションの分類の詳細についてはリアル・オプションを主題とした著書を参考にされたい。特に，Trigeorgis［1996］pp. 2-3 Table 1，および，Mun［2002］ch. 7-8 を参照されたい。

設例３

次のような条件のプロジェクトの，撤退と拡張に関するオプション価値を評価する。

①このプロジェクトから得られるキャッシュ・フローのNPVは，500（億円）である。

②このプロジェクトの満期は５年である。

③このプロジェクトのボラティリティは30％であると推定される。

④リスク・フリーレートは５％である。

⑤このプロジェクトに対して，当該企業は以下の２つのオプションを有している。

[撤退オプション] このプロジェクトに投資された原資産は，250（億円）の価値で満期までの間，いつでも売却できるものとする。

[拡張オプション] このプロジェクトでは，満期までのどのタイミングにおいても，200（億円）の追加投資を行うと，通常と比べて1.5倍のキャッシュ・イン・フローが得られるような生産拡大が可能となると見積もられている。

【オプション価値の評価】

この設例では，満期までのどのタイミングでも撤退するか，拡張するかといった権利を行使できるので，オプションのタイプとしては，アメリカン・オプションとなる。したがって，２項モデルでオプション価値を評価することとなる。

前提条件から，u，d，pの各パラメータを算出すると下記の通りとなる。[18]

$$u=e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}=e^{0.3*\sqrt{1}}=1.349859$$

$$d=e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}=e^{-0.3*\sqrt{1}}=0.740818$$

$$p=\frac{e^{r\Delta t}-d}{u-d}=\frac{e^{0.05*1}-0.740818}{1.349859-0.740818}=0.509741$$

uおよびdが求められたので，原資産から順に２項格子を描く（図３を参照され

18）ここでは，１年を１ステップ（⊿t＝１）として計算している。

たい）と，表6のようになる。

表6：2項格子（原資産の価格）

T=0	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5
500.00	674.93	911.06	1,229.80	1,660.06	(A)2,240.84
	370.41	500.00	674.93	911.06	1,229.80
		274.41	370.41	500.00	674.93
			203.28	274.41	370.41
				150.60	203.28
					111.57

表6は，2項格子を表形式に縮約したものである。表計算ソフトなどで数式を定義しておくとこれらの値は簡単に出力できる。

さらに，表6の末端から，オプション価値を逆算していくこととなる。末端の格子点で，各オプションを行使したときの価値と，行使せずに継続した場合の価値との比較を行い，最も大きな価値を選択する。

具体的には，表6の格子点（A）では，

max［2,240.84（継続：行使なし),1.5×2,240.84－200（拡張）,250（撤退)］

＝1.5×2,240.84－200

＝3,161.26（拡張）[19]

が最も高い価値となる。同様の方法でT＝5列の価値は全て求められる[20]。

T＝5の列の格子点の価値が導出できたら，あとは1ステップずつ逆算して求められた各格子点上における，オプションの行使がない場合の価値（$e^{-r\Delta t}[pf_{i+1,\ j+1}+(1-p)f_{i+1,\ j}]$）と，各オプションを行使したときの価値とを比較すればよい。例えば，表7の格子点（B）は，次のように算定される。

max［$e^{-0.05}[0.509741\times250+(1-0.509741)\times250]$（継続），1.5×150.6－200（拡張）,250（撤退）］

＝250（撤退）

19）ここでの計算結果（3,161.26）と，表7上で該当する数値（3,126.27）が異なっているのは，ここでの計算では，計算過程で出てくる数値（2,240.84）に小数点第3位で四捨五入した数値を用いて計算しているのに対して，表7上では，計算過程で出てくる数値に小数点第3位以下を省略していない数値を用いて計算しているためである。

20）表7のT＝5の列に求められた価値が提示されている。

したがって，この〔設例３〕のプロジェクトにおけるオプション価値の評価は，表７のようにまとめられる。

表７：２項格子（オプション価値）

T=0	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5
621.21 [継続]	858.42 [継続]	1,195.95 [継続]	1,663.73 [継続]	2,299.84 [継続]	(A)3,161.27 [拡張]
	439.55 [継続]	597.25 [継続]	834.64 [継続]	1,176.34 [継続]	1,644.70 [拡張]
		321.55 [継続]	412.89 [継続]	566.65 [継続]	812.39 [拡張]
			260.20 [継続]	296.19 [継続]	370.41 [満期]
				(B)250.00 [撤退]	250.00 [撤退]
					250.00 [撤退]

ここから，〔設例３〕の条件で，オプションを有している場合，T＝３時点までは，オプションを行使せずに様子を見ることとなる。また，T＝４時点においては，状況次第で撤退オプションを行使することになる。さらに，T＝５時点では，状況次第で拡張オプションを行使する場合と，撤退オプションを行使する場合と，いずれのオプションも行使せずに満期を迎える場合のいずれもが起こりうるということが分かる。このようなオプション行使を前提にこのプロジェクトの価値を求めると，その現在価値は621.21となり，伝統的なNPV法で求められた500よりも価値が大きくなっている。この価値の差が，プロジェクトの柔軟性を評価に組み込んだことによって生じる差である。伝統的なNPV法では，オプションが無視されているという硬直性があるために，121.21（＝621.21−500）だけプロジェクトの価値が過小評価されているのである。

6．リアル・オプションの課題と問題点

ここまでの検討によって，リアル・オプションの基本的かつ本質的な特徴については確認することができた。特に，リアル・オプションは，伝統的なNPV法では把握できない柔軟な投資意思決定を織り込んだ価値の評価を行えるという点において，理論的に優れたモデルであるということを，具体的に明らかにすることができたと思われる。本節では，それを踏まえたうえで，リアル・オプションの問題点と課題について論じることとしたい。

①将来のシナリオ・プランニングの困難さ

投資案件にかかわる不確実な状況に対応しようとする企業の選択権を，投資価値の評価に取り入れているという点において，リアル・オプションは伝統的なNPV法よりも優れている。しかしながら，リアル・オプションにも，NPV法と同様の問題点が残されている。それは，将来のシナリオを予測しなければならないという点である。NPV法と同様に，リアル・オプションにおいても，将来のキャッシュ・フローの流列を予測しなければならない。さらに，リアル・オプションにおいては，分析対象となる投資案件を取り巻く不確実な状況を予測し，将来の状況ごとの対処法（オプション）についてまで予測を行う必要がある。したがって，NPV法よりも将来の予測すべき事象は多くなり，予測の困難さは増大する。予測していたオプションそのものに誤りがあったり，あるいは，本来は考慮すべきであった柔軟性を見落としていたりした場合には，リアル・オプションを用いたとしても適切な価値が得られるわけではない。

②過大な価値が提示される可能性

リアル・オプションでは，伝統的なNPV法によって得られるNPVに，オプション価値の分だけ上乗せされた価値が提示される。つまり，将来の不確実性とそれに対応するオプションの分だけ，投資の価値を大きく見せてくれるのである。もちろん，将来のシナリオとそれに対応するオプションを正しく予測している場合は，リアル・オプションを採用することで投資価値の適切な評価額を得ることができる。しかし，将来のシナリオとオプションに誤りがあった場合は，投資価値が過大に提示されるということもありうる。特に，通常のNPV法において負の価値が提示されているにもかかわらず，リアル・オプションでは正の価値が提示されるような場合においては，注意が必要である。これが適切な価値を提示してくれている場合は，投資の機会を見逃さずに済むという大きなメリットを生み出すことになるが，誤って過大に価値を提示している場合には，投資の失敗につながりかねない。また少々悲観的過ぎる見方をすれば，プロジェク

ト担当者や経営陣が，どうしても投資したい案件を正当化するために，リアル・オプションを悪用する可能性もある。

③競合他社の意思決定の影響を特定する困難性

現実の企業の競争市場を見れば明らかなとおり，ある企業の置かれた不確実な状況には，競合他社の動向などが影響を及ぼしてくる場合がある。例えば，延期オプションを実施するとき，こちらが資本の投資を延期している間に，当該プロジェクトに競合他社が参入してきてしまったら，想定外の不利益が生じることになる。したがって，将来のシナリオについて想定する場合は，競合他社の出方まで考慮に入れる必要がある。競合他社が複数ある場合，問題は複雑化し，将来のシナリオを想定することがより困難になるかもしれない。このような問題に対して理論的な分析を行うために，自社の動向と競合他社の動向についてゲーム理論を援用したリアル・オプションの研究も行われている[21)]。とはいえ，実務上，それらのモデルを適用することは，競合他社の想定しているシナリオ（戦略）とその影響に至るまで的確に予測しておく必要があるために，限りなく困難であるといわざるを得ない。

④モデルに内在されたパラメータの特定困難性：ボラティリティの測定

リアル・オプションの価値評価算定モデルに内在する最も大きな問題点は，ボラティリティの測定である。ボラティリティは，伝統的なNPV法では必要とされないパラメータであるが，リアル・オプションでは不確実性をモデルに織り込んでいるために，どうしても必要となる。しかし，このボラティリティの算定は非常に困難である。本稿で検討した設例では，ボラティリティを所与のものとしたが，本来は，可能な限り信頼性の高いボラティリティをなんらかの方法で入手しなければならない。もちろん，金融工学の数理理論においては，

21）Smit and Ankum［1993］は，リアル・オプションとゲーム理論を融合した萌芽的な研究成果として参考になる。寡占産業における延期オプションと参入のタイミングなどについて検討されている。また，ゲーム理論とリアル・オプションを結び付けた近年の研究成果については，Smit and Trigeorgis［2004］を参照されたい。

多種多様なボラティリティの測定方法が開発されている[22)]。しかし，これらの手法は，長期にわたり過去データが入手可能な金融資産の予測のために開発されてきた手法であり，リアル・オプションが対象とする実物資産投資にはほとんど活用できない。というのも，リアル・オプションでは，過去の情報に情報価値がない場合が多く，将来の予測にもとづいてボラティリティを算定するしかないからである。ここにボラティリティ測定の困難さの原因がある[23)]。

7．おわりに

ここまでの検討を通じて，リアル・オプションの基本的な特性から生じる有用性と問題点について総括することができた。リアル・オプションには，前節で検討したような問題点があるものの，だからといってその有用性や意義が過小評価されるべきものではない。資本予算の価値評価モデルとして，リアル・オプションは伝統的なNPV法よりも理論的に優れたモデルであるということは，第２節から第５節までの検討で明らかである。問題点の多くは，パラメータの推定の困難さや，将来予測の困難さ，あるいは，柔軟性を考慮したことにより生じる増分価値の解釈など，モデルの運用面での問題がほとんどである。リアル・オプションは優れた評価モデルではあるが，その運用においては，リアル・オプションが有する特性や問題点について，十分に留意しておく必要があるだろう。優れた評価ツールであっても，その潜在能力を十分に発揮させるためには，その特性を理解することが肝要である。

22）ボラティリティを測定する方法としては，過去の株価の対数収益率から求める方法が一般的であるが，より洗練された測定モデルとしては，GARCHモデルなどがある。これについては，Hull［2005］,ch.15などを参照されたい。

23）なお，Copeland and Antikarov［2001］では，実物資産のボラティリティの推定方法として，MAD（Market Asset Disclaimer）やモンテカルロ・シミュレーションを用いた統合的な推計方法などを提唱している（Copeland and Antikarov［2001］,pp.94-95., ch.９）。特に，モンテカルロ・シミュレーションを用いる方法は，過去のデータを必要としない方法として注目されているが，その一方で，プロジェクトの利益に影響を及ぼす別の要素の確率分布を入手する必要があり，問題は必ずしも解決できていない。

［付記：本稿は，文部科学省の科学研究費補助金（若手研究（B）　：課題番号：17730274）の助成を得て行われた研究成果の一部である。］

＜主要参考文献＞

Amram, M. and N. Kulatilaka.［1999］*Real Options*, Harvard Business School Press. 石原雅行，中村康治，吉田二郎，脇保修司訳［2001］『リアル・オプション』東洋経済新報社。

Coreland, T. and V. Atikarov.［2001］*Real Options*, TEXERE. 栃本克之監訳［2002］『リアル・オプション』東洋経済新報社。

Dixit, A. K. and R. S. Pindyck.［1994］*Investment under Uncertainty*, Princeton University Press. 川口有一郎監訳［2002］『投資決定理論とリアルオプション』エコノミスト社。

Evans, J. R. and D. L. Olson.［2001］*Introduction to Simulation and Risk Analysis*, Prentice Hall.

Hull, J. C.［2005］*Options,Futures, and Other Drivatives*, Prentice Hall.

Luenberger, D. G.［1998］*Investment Science*, Oxford University Press. 今野浩，鈴木賢一，枇々木規雄訳［2002］『金融工学入門』日本経済新聞社。

Mahonvey, L. S. and Kelliher, C. F［1999］"Teaching Tools to Deal with the Uncertainty Inherent in Capital Budgeting Models," *Journal of Financial Education*, spring, pp.64-74.

Mun, J.［2002］*Real Options Analysis,* John Wiley & Sons. 川口有一郎監修，構造計画研究所訳［2003］『リアルオプションのすべて』ダイヤモンド社。

Smit, H. T. J. and L. A. Ankum［1993］"A Real Options and Game-Theoretic Approach to Corporate Investment Strategy under Competition." *Financial Management*, autumn, pp.241-250.

Smit, H. T. J. and L. Trigeorgis［2004］*Strategic Investment : Real Options and Games*, Princeton University Press.

Trigeorgis, L.［1996］*Real Options : Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation,* The MIT Press. 川口有一郎監訳［2001］『リアルオプション』エコノミスト社。

上野清貴［2005］『公正価値会計と評価・測定』中央経済社。

小林啓孝［2003］『デリバティブとリアル・オプション』中央経済社。

小林啓孝［2004］「リアル・オプションの有用性と活用範囲」『企業会計』第56巻第６号，18-25頁。

篠田朝也［2005］「投資意思決定会計へのシミュレーション分析の適用における意義と問題点」『滋賀大学経済学部研究年報』第12巻，73-92頁。