

リアルオプション手法を用いた不確実性下における風力発電事業の評価

環境システムコース 環境経済システム分野

26659 吉岡 剛

1. はじめに

近年、風力発電は欧米をはじめ世界的規模で導入が進んでいる。日本においても、2002年度までに約46万kWが導入されているように、急激に導入量が増加している。しかし、風力発電事業も様々なリスクを抱えているため、それらのリスクを考慮して事業投資を行わなければならない。そこで、事業の不確実性を考慮することができるリアルオプション手法を風力発電事業評価へ適用することの有効性について、ケーススタディを通じて検証していく。

2. 風力発電事業が抱えるリスク

風力発電事業は、技術面、経済面で実用化されており、新エネルギーの中でも最も期待されている技術のひとつである。風力発電事業の収益に影響を及ぼす主な要因としては、設備利用率、自家消費率（自家消費用風力発電の場合）、売電価格（電気価値とRPS価値）、保守経費等が挙げられる。これらの要因は、それぞれ様々なリスクを抱えており、大きく二つに分けて自然リスクと制度リスクに整理することができる。

3. リアルオプションによる評価

従来のDCF法で計算したNPVを用いた評価方法では、投資を行うか、行わないかの択一的な判断しかできず、投資の柔軟性を考慮することができない。しかし、リアルオプションでは、投資に対する柔軟なオプションを作り出し、そのオプションを行使または放棄する権利を持っていることを考慮に入れることができる。そこで、本研究では、風力発電事業に関する2つのケーススタディを用意し、リアルオプションを用いた評価を試みる。

4. ケーススタディ

4.1 問題設定

ここでは、ケーススタディとして2ケースを取り上げ、それぞれについて表1のように問題設定を行い、リアルオプションを用いた評価を行う。

表1 問題設定の概要

	ケーススタディ : 競争条件下における風力発電事業の投資タイミング	ケーススタディ : 中山峠風力発電における設備更新検討
検討概要	新規の風力発電事業投資において、不確実性要因の状況に応じて投資を延期し、最適なタイミングを探る。ただし、同様に風力発電事業に参入しようとする事業者も多いことから、それらの競争参入者の影響も考慮して検討を行う。	既設の風力発電事業において、風力発電設備の耐用年数を迎えるにあたり、設備の稼働状況、外部環境等の状況次第で、事業の継続、撤退、更新のいずれかのオプションを行使する最適なタイミングの検討を行う。
対象プロジェクト	新設する事業用風力発電 (出力合計: 20,000kW、建設コスト: 20万円/kW)	中山峠風力発電施設 (出力: 250kW)
不確実性要因	設備利用率: 初期値: 25%、 μ : 40%/月 RPS 価値: 初期値: 4円/kWh、 μ : 10%/年、 μ : 5% (ケースの当初3年間)、 μ : 10% (ケースの3年後以降)	設備利用率: 実績データより、初期値: 各月平均風速、 μ : 各月の平均風速のポテンシャル 電力量料金: 東北電力(株)のデータより、初期値: 10.4円/kWh、 μ : 5.5%/月
オプションの種類	延期オプション (ヨーロピアンオプション)	継続、撤退、拡大オプション (アメリカンオプション)
評価手法	解析型モデル: 競争条件を考慮した拡張ブラック・ショールズモデル	二項モデル
対象期間	1年~9年満期 (満期期間を1年ずつ増やして評価)	5年満期 (風力発電設備の運転開始15年目から20年目まで)
試算ケース	ケース : 電気価値とRPS価値を一括として11.5円/kWhの固定価格で売電 ケース , : 電気価値 (3.5円/kWh)、RPS価値をそれぞれ分離して販売 (RPS価値の成長率別にケース設定)	-

4.2 確率変数の設定

風力発電事業の収益に影響を与える不確実性要因（設備利用率、RPS 価値、電力料金単価）を確率変数の対象とし、各値は次の幾何ブラウン運動に従うものと仮定する。

$$\text{幾何ブラウン運動： } dS(t) / S(t) = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dz(t)$$

$S(t)$ ：各種リスクの値、 $dz(t)$ ：標準ブラウン運動
 μ ：期待成長率、 σ ：ボラティリティ

4.3 モンテカルロ DCF

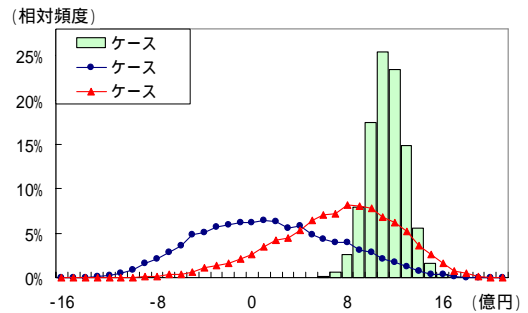
これまでの設定条件をもとに、オプション価値の算出に必要な事業の現在価値（ケーススタディ）もしくは年間収益（ケーススタディ）の期待値と収益率のボラティリティ（標準偏差）をモンテカルロシミュレーションにより統計的に推定する。

5. 競争条件下における風力発電事業の投資タイミング - ケーススタディ -

5.1 リアルオプション評価

モンテカルロDCFの結果（図1）から、RPS制度施行後の風力発電事業は大きな下方リスクを持つことが示された。そこで、事業の下方リスクを回避するために投資をしばらく延期し、RPS価値の市場動向をみながら投資のタイミングを窺うことが妥当だと考えられる。しかし、競合他社にその市場の需要を奪われてしまう可能性も考慮し、本研究では、競争参入に対応できるリアルオプションモデルとしてトゥリジオリス²⁾による評価式(式1,2)を利用する。

オプション評価のためのブラック=ショールズ方程式において、参入確率()、市場構造(k)という2つのパラメータを追加することによって導かれた解が(式3)となる。競争相手のランダムな出現は、連続的な配当支払い(式8)を生じさせると考えることができる。よって、ランダムな競争の出現のある延期可能な共有的リアル・オプション価値(拡張NPV)は、によって調整された専有的リアル・オプション価値 $C(V, t)$ (式4)をポアソン分布にしたがって加重合計した値となる。



$$\frac{dV}{V} = \mu dt + \sigma dz - (1-k)dN \quad \dots (1)$$

$$dN = \begin{cases} 1 & \dots & \lambda dt \\ 0 & \dots & 1 - \lambda dt \end{cases} \quad \dots (2)$$

$$R(V, t) = \sum_{N=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda \tau} (\lambda \tau)^N}{N!} C(V, t) \quad \dots (3)$$

$$C(V, t) = Ve^{-\delta \tau} N(d_1') - I^{-r \tau} N(d_2') \quad \dots (4)$$

$$d_1' = \frac{\ln(V/I) + [(r - \delta) + 0.5\sigma^2]\tau}{\sigma\sqrt{\tau}} \quad \dots (5)$$

$$d_2' = d_1' - \sigma\sqrt{\tau} \quad \dots (6) \quad \tau = T - t \quad \dots (7)$$

$$\delta = \lambda(1-k) - (N/\tau) \ln k \quad \dots (8)$$

- I：初期投資額、T：延期可能期間、 τ ：残り期間
- R：無リスク金利（最近の日本の10年物国債の利回りを参考に1.5%とした）
- λ ：競争の配当支払い、N(d)：累積標準正規分布関数
- V：事業の現在価値
- μ ：ドリフト率(Vの期待成長率)
- σ ：ボラティリティ(収益率の標準偏差)
- t：現在時点
- dz：ウィーナー過程(標準ブラウン運動)
- k：市場構造パラメータ(競争者出現後におけるVの割合)、(需要侵食率：1-k=0.5%とした)
- τ ：瞬間的参入($\tau=5$ とした)
- N：競争相手の出現数

5.2 結果 - 拡張 NPV

各ケースに対して、モンテカルロ DCF で得られた事業価値(V)と収益率のボラティリティおよび各設定条件を先のオプション評価式に代入し、事業投資の延期期間を1年ずつ延長した場合の拡張 NPV を算出した。結果よりケース 1 では、拡大 NPV が受動的 NPV を常に下

回るため、即座に事業投資した方が有利といえる。逆にケース では、拡大 NPV が受動的 NPV を常に上回るため、すぐに投資する価値はないが、これをオプションとして保持する価値はある。一方、ケース では、当初は拡大 NPV が受動的 NPV を上回るが、4年後以降から競争による損失が大きくなり延期する価値が減少していくのがわかる。そのため、3年程度事業投資を延期するのが最適となる。

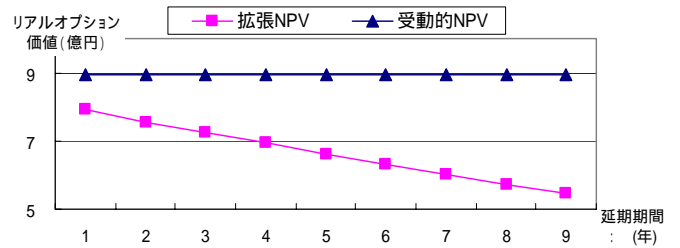


図2 事業用風力風力発電（ケース 1）の NPV 比較

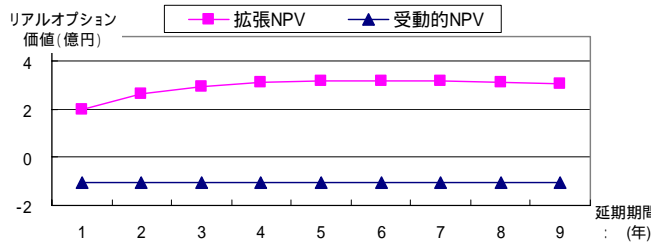


図2 事業用風力風力発電（ケース 2）の NPV 比較

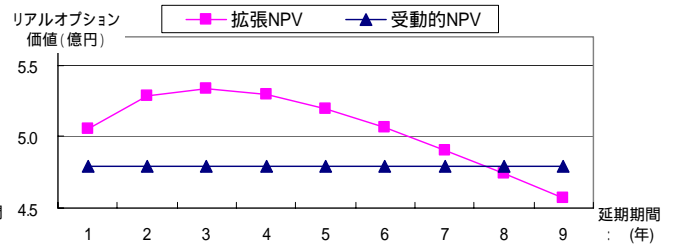


図3 事業用風力風力発電（ケース 3）の NPV 比較

6. 中山峠風力発電における設備更新検討 - ケーススタディ -

6.1 風速と発電出力の関係

2001、2002年度の過去2年間の風速と発電出力の関係を図4に示す。図から分かるように、本発電設備はメーカー保証性能曲線（パワーカーブ）を大きく上回る出力が得られている。また、実測値から得られる出力の近似曲線の式も示す。

近似曲線式： $W = 1.14 \cdot X + 4.77$, ($R^2 = 0.94$) ... (9)

W：実発電出力（kW）

X：メーカー保証性能曲線が示す出力（kW）

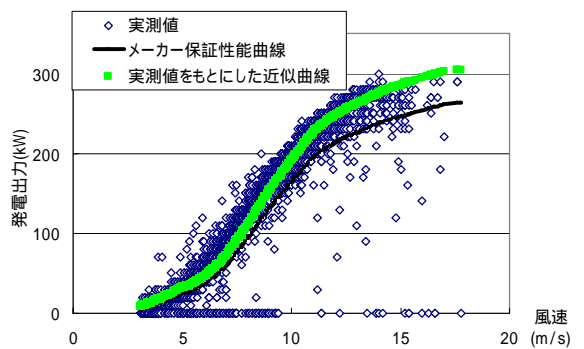


図 4 風速と発電出力の関係

6.2 リアルオプション評価

6.2.1 プロジェクトのキャッシュフロー分析

(1) 250 kW 風車の収益予測

モンテカルロ DCF より、次の結果が得られた。

キャッシュフロー期待値：379万円/年

キャッシュフローの自然対数収益率のボラティリティ：13.7%

(2) 事業撤退にかかる費用

実際には、設備の残存価値はほとんどなく、撤去費用がかかることになるが、本試算における事業撤退時のキャッシュフローは0とする。

(3) 600kW 風車への更新による収益予測

600 kW 風車による発電電力量を図4から得られた式(9)と600kW 風車の出力性能曲線をもとに算出すると、250kW 風車の2.46倍の発電が得られることがわかった。そこで、600kW 風車へ更新した場合の収益は、発電電力量に比例するとして250kW 風車の収益の2.46倍とする。また、更新にかかる新規投資分（1.2億円：20万円/kW）は、設備の事業

期間（20年間）で元利均等返済（783万円/年、割引率:3%）するとし、600kW 風車へ更新する場合は、経費[新規投資に係る元利均等返済分（783万円）+ 維持管理費（100万円）]を投入することで、収益（250kW 風車の収益の2.46倍）が得られるものとする。

5.4 プロジェクトのイベントツリーの作成

まずは先のシミュレーション結果をもとに、以下の式から期待収益の増加率(u)、減少率(d)およびリスク中立確率(p)を求めておく。各値はそれぞれ、 $u = 1.15$ 、 $d = 0.87$ 、 $p = 0.52$ となった。次に250kW 風車の期待収益の経時的な確率が二項分布に従うとして、1年後にとる値をそれぞれの増加率、減少率との積で求め、そのイベントツリーを図5に示す。

$$u = \exp(\sigma\sqrt{\delta T}), \quad d = 1/u, \quad p = \frac{(1+rf) - d}{u - d}$$

$\sigma = 13.7\%$ (キャッシュフローのボラティリティ)
 $\delta T = 1$ (1ステップの期間)
 $rf = 1.5\%$ (リスクフリーレート)

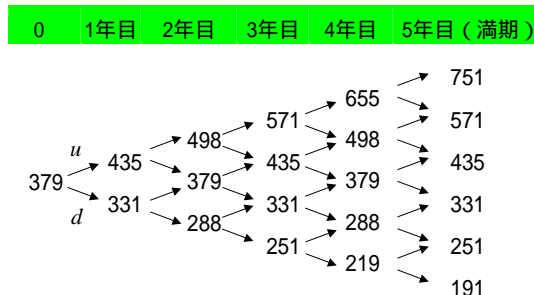


図 5 250kW 風車のイベントツリー（万円）

5.5 選択オプション価値の算出

オプション価値の算出のために、図5のイベントツリーに対応させて、選択オプション価値のツリー図6を作成した。オプション価値の算出は、まず最終時点の価値が最大化になるオプションを行使した時の値を求め、そこからリスク中立確率アプローチにより、前の時点に遡って、その期に事業を継続もしくは拡大した場合の収益にその後得られるリアルオプション価値を加えたそれぞれの値と撤退した場合の収益との価値最大化を図る。このようにして0期の時点にまで遡っていくと、リアルオプション価値1,727万円が得られる。また各時点における最適意思決定を図6に併記する。図6から、状況が好転し続けた場合は、4年目にも拡大オプションを行使するのが最適となるのがわかる。また、本評価では撤退オプションは行使されなかった。しかし、実際には満期間近に故障等で長期間運転が停止する時には、収益の改善が見込めず、撤退した方が望ましい場合もあるだろう。

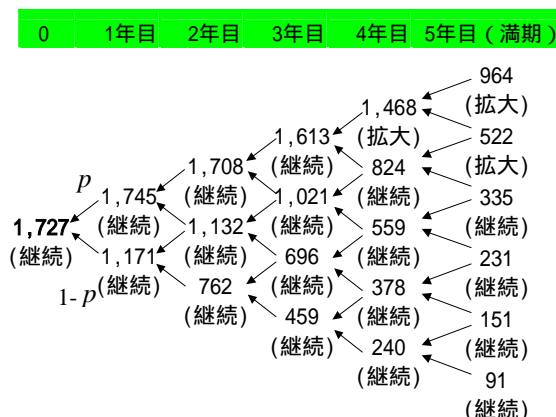


図 6 選択オプションの価値ツリー（万円）

7. おわりに

本研究では、風力発電事業投資への意思決定にリアルオプション手法を用いることの有効性を示すことができた。また、事業の形態に合わせて、どこに投資の柔軟性があるのかを見出し、適切な評価手法を用いることは重要である。今後は今回用いた評価手法をさらに拡張し、実際の事業投資への活用効果を高めることが必要である。

参考文献

- 1) 高橋和広：CO₂排出権取引制度と競争参入を考慮した発電設備投資の意思決定に関する研究、平成13年度東京大学大学院工学研究科修士論文、2001
- 2) トゥリジオリス：リアルオプション、エコノミスト社、2001
- 3) 服部徹、他4名：電力経営におけるリアルオプションの価値評価手法と適用事例、電力中央研究所報告 Y02013、2003