Project Value Assessment of Thermal Power Plant based on RNPV Probit Model Considering Real Option*

Takafumi Hirose,^a Hajime Miyauchi^{a,†} and Tetsuya Misawa^b

^a *Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University*

^b *Graduate School of Economics, Nagoya City University*

Abstract: Deregulation of electric power utilities are processing in the world. As the uncertainties of the business environment are increasing, return for asset investment is also uncertain. Therefore, the electric utilities should evaluate the appropriate value of the capital investment. When only the execution of the project is observed, we have proposed a risk assessment method for generation investment by the probit model (RNPV probit model) which simplifies the evaluation method by the net present value based on utility indifference pricing. In this paper, RNPV probit model is applied to asset evaluation of thermal power plant considering the option to abandon, a kind of real option.

Keywords: NPV; expected utility theory; utility indifference pricing; risk; real option; project value assessment; thermal power plant

*Received: June 23, 2011; Accepted: January 5, 2012.

[†]Corresponding author. Address: 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan; Phone: +81-96-342-3612; E-mail: miyauchi@cs.kumamoto-u.ac.jp

リアルオプションを考慮した RNPV プロビットモデルに基づく 火力発電事業価値評価

廣瀬 高史^a, 宮内 肇^a, 三澤 哲也^b

^a 熊本大学大学院自然科学研究科

^b 名古屋市立大学大学院経済学研究科

1 はじめに

電力自由化に伴い、電気事業には不確実性（＝リスク）が増大している。そのため、適切な事業価値評価法が必要とされている。事業価値の評価法として NPV（純現在価値）法がよく知られているが、リスクへの対応は割引率を定める際の経験則に依存していることが多い。市場で扱われている財ではリスク中立で測ることが適しているが、必ずしも市場と関連しないプロジェクトの価値を測る際には、そこに含まれるリスク（CF: Cash Flow（キャッシュフロー）、割引率）を含めた価値評価法を定式化することが重要である。その 1 つの方法として、効用無差別価格理論に基づく NPV 法（UNPV: Utility indifference Net Present Value 法）による事業価値評価が挙げられる。これは現在、宮原孝夫氏によって提唱されている「リスク鋭感的価値尺度」を効用関数に基づいて作成する際の具体的手法に相当しており [6, 7], UNPV 法は NPV 法の自然な拡張となっていること、またリスク価値尺度による方法と密接に関係していることが検証されている。我々は既に、火力発電事業を対象に、この UNPV 法を用いて事業の実行可否に関する評価を行い、事業者のリスクに対する態度が UNPV 法で正当に評価されることを示している。その際、リアルオプションの一つである事業からの撤退オプションを考慮に入れた場合についても、UNPV 法による事業価値評価の検討を行っている [3]。

UNPV 法では、事業者のリスクに対する考え方が効用関数を通じて表現される。電気事業は莫大な投資を伴うためにリスクを回避する傾向にある。そのためリスク回避型の効用関数を採用すべきであるが、過去の投資家のプロジェクト投資行動データからの効用関数の推定法が確立されておらず、どのような効用関数が適切か、また適切な効用関数を選択できたとしてもそのパラメータをどのようにして推定するか、といった困難な問題が存在する。そこで我々は、効用関数を前面に出さずにリスクを評価する方法として、ランダムな NPV（RNPV: Random Net Present Value）を基に、UNPV 法の簡約化から導かれる「プロビット型 RNPV 中心モーメント回帰モデル」（以下、RNPV プロビットモデルと記す）に基づいて事業決定を行う方法を提案した [2]。この手法は過去のプロジェクトの採否実績に着目し、UNPV 法を簡約化して導かれるプロビット回帰モデルを推定し、それに基づいて新規プロジェクトの採否が決定される方法であり、UNPV 法における効用関数の推定と比較してモデルの推定が容易であるという点で有利であると言える。現在は提案手法の有効性を火力発電事業への投資問題を題材に検討

を進めている [1]。その結果、事業者が UNPV 法に従って事業の実行、非実行を決定していると仮定するとき、RNPV の分布が正規分布に近い場合は 2 次の中心モーメントまでの RNPV プロビットモデルによる事業の採否の判断と UNPV 法による採否の判断はほぼ一致すること、また、RNPV の分布が正規分布から離れるとともに、2 次の中心モーメントまでの RNPV プロビットモデルよりも、3 次、4 次の高次中心モーメントまでも考慮した RNPV プロビットモデルによるプロジェクトの採否の判断の方が、UNPV 法による採否の判断と整合することを示している [5]。しかしながら、UNPV 法の有効性を評価する際に行った撤退オプションなど、事業者のリスクヘッジを考慮した場合に対する本モデルの有効性に関する検証はいまだ行っていない。

そこで、本論文では、事業者のリスクヘッジの手段として撤退オプションを取ることができるとし、そのようなケースにおける RNPV プロビットモデルの妥当性を検証するとともに、我々のモデルのフレームワークではこうしたリスクヘッジの効果が、どのように表現、評価されるかについて論考する。

本論文では火力発電事業を対象とし、簡単のために、コストである燃料価格と売価である電力価格のみが平均回帰モデルで変動するとした単純なモデルを考える。回帰モデルの各パラメータを変動させ、まず、撤退オプションを考慮せずにモンテカルロ・シミュレーションを行い、多数の RNPV を作成し、それを基に RNPV プロビットモデルを作成する。次に、撤退オプションを考慮して RNPV を求め、その値を先に求めた RNPV プロビットモデルに代入することで事業の実行の可否を判断する。撤退オプションを考慮した多数の試行に対し、RNPV プロビットモデルによる実行可否判断と UNPV 法による判断がどの程度整合しているか、また、撤退オプションを考慮する場合には RNPV プロビットモデルで得られる評価値、すなわち、事業の実行確率が高くなり、事業が実行される可能性が高くなることや、事業者がリスク回避的になるほどリアルオプション効果が大きくなることを示す。以上のことから、撤退オプションを考慮した場合も、RNPV プロビットモデルは事業の実行可否を正當に評価することを示す。また、プロジェクトの実行確率より事業者のリスクに対する感度が実行確率の数値を指標として示されるとともに、リアルオプションの意思決定におけるリスクヘッジ効果も数量的に示し得る。

このように、本論文では、既に提案している RNPV プロビットモデルの適用を、リアルオプションを含む事業へと拡張することで、リスクに対する事業者の態度が正しく評価されることを示し、それにより RNPV プロビットモデルの有効性を明らかにすることを目的とする。

2 モデル

2.1 基本モデル

2.1.1 従来の評価手法

NPV (Net Present Value: 純現在価値) 法は事業の価値を評価する最も一般的な手法である。NPV 法は DCF (Discounted Cash Flow: 割引キャッシュフロー) 法とも呼ばれ、将来得られ

るであろう CF (Cash Flow: キャッシュフロー) を現在の価値に換算することで投資の実行可否を判断するものである。

現時点 (第 0 年度末) に投資額 I を一括投資することで、第 1 年度から第 N 年度まで毎年、第 n 年度にはキャッシュフロー CF_n が発生する事業を考える。CF 列 $\{CF_n : n = 1, 2, \dots, N\}$ を用いると、この事業の PV (Present Value: 現在価値) は、

$$PV = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1+r)^n} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 r は割引率である。そして、この事業の純現在価値 NPV は、現在価値 PV から投資額 I を引くことで求められる。すなわち、

$$NPV = PV - I \quad (2)$$

NPV 法における投資の決定判断は、式 (3) で表せる。

$$NPV \begin{cases} > 0 & (\text{投資実行}) \\ = 0 & (\text{任意}) \\ < 0 & (\text{投資不実行}) \end{cases} \quad (3)$$

2.1.2 期待効用理論による評価手法

式 (1), (2) における将来得られる CF 列が確率変数 $\{X_n : n = 1, 2, \dots, N\}$ で与えられた場合、現在価値 PV と純現在価値 NPV は、

$$PV(X) = \sum_{n=1}^N \frac{E[X_n]}{(1+r)^n} = E \left[\sum_{n=1}^N \frac{X_n}{(1+r)^n} \right] \quad (4)$$

$$NPV(X) = PV(X) - I \quad (5)$$

で表現される。CF 列は確率変数であり、ランダムな現在価値 RPV (Random Present Value) は、

$$RPV(X) = \sum_{n=1}^N \frac{X_n}{(1+r)^n} \quad (6)$$

と定義される。ここで、 $E[RPV(X)] = PV$ である。

$RPV(X)$ の効用無差別価格を考え、それを X の効用無差別現在価値 (Utility indifference Present Value) と呼び、 $UPV(X)$ で示す。 $UPV(X)$ は

$$E[u(-v_0 + RPV(X))] = 0 \quad (7)$$

を満たす v_0 の値である [6]。また、一試行毎の純現在価値 RNPV は投資額 I が一定ならば、式 (8) で与えられる。

$$RNPV(X) = RPV(X) - I \quad (8)$$

また、 X の効用無差別純現在価値 (Utility indifference Net Present Value) $UNPV(X)$ は

$$E[u(-v - I + RPV(X))] = 0 \quad (9)$$

を満たす v の値である。式 (7), (8) を比較すると、 $v_0 = v + I$ と導け、

$$UNPV(X) = -I + UPV(X) \quad (10)$$

が成立することがわかる。このとき、

$v > 0$ ならば投資を実行、 $v < 0$ ならば投資非実行

とする。これが UNPV 法である。なおこの場合の割引率 r としては、投資家の効用関数に適合したものをいれればよい [4]。特に効用関数が $u(x) = x$ であれば、

$$UNPV(X) = E[RNPV] = NPV(X) \quad (11)$$

が導かれ、UNPV は従来の NPV に帰着されることに注意する。すなわち UNPV 法は NPV 法の自然な拡張になっている。

2.1.3 UNPV 法を簡約化したプロビットモデル

本節では、提案しているプロビットモデルについて説明する。リスクを考慮する事業価値評価手法である期待効用理論に基づく UNPV 法には、既に説明したように効用関数が使われている。しかし、例えばリスク回避型の事業であるとしても、どのようなリスク回避型の効用関数が適切なのか、また、適切な効用関数が定まったとしても、そのパラメータの同定が困難である。そこで、プロジェクトの採否だけに着目するならば、UNPV 法で得られた結果をプロビットモデルに帰着させることができ、効用関数を前面に出さずに事業価値評価が可能となる。なお、提案手法においては、結果的に事業価値評価の対象は事業そのものの価値の大小や取引価格ではなく、プロジェクトの採否となる。

事業者の考えている効用関数 $u(x)$ が分からないと仮定する。 $Y = -v - I + RPV(X)$ とおくと、式 (9) は、式 (12) のように書ける。

$$E[u(Y)] = 0 \quad (12)$$

式 (12) の左辺を例えば 2 次までのモーメントで近似展開すると、

$$\begin{aligned} E[u(Y)] &\approx u(E[Y]) - u'(E[Y])E[(Y - E[Y])] + \frac{1}{2}u''(E[Y])E[(Y - E[Y])^2] \\ &= u(E[Y]) + \frac{1}{2}u''(E[Y])E[(Y - E[Y])^2] \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $-I + RPV(X) = RNPV(X) = Z$ とおき、 $E[(Z - E[Z])^2] = V(Z)$ と定義すると、

$$u(E[Y]) + \frac{1}{2}u''(E[Y])E[(Y - E[Y])^2] = u(-v + E[Z]) + \frac{1}{2}u''(-v + E[Z])V(Z) \quad (14)$$

式 (12), (13) より, 式 (14) は,

$$u(-v + E[Z]) + \frac{1}{2}u''(-v + E[Z])V(Z) \approx 0 \quad (15)$$

となる. 式 (15) の左辺が, 適当な点 $(v_0, E[Z]_0, V(Z)_0)$ で, $v, E[Z], V(Z)$ に関して C^1 級関数とすると, 陰関数定理により, その近傍で次の C^1 級関数 g を得る.

$$v = g(E[Z], V(Z)) \quad (16)$$

さらに簡単のために, 関数 g を $E[Z], V(Z)$ の線形関数で近似する. ただし, 式 (12) と $u(0) = 0$ より, $Z = 0$ のとき $v = 0$ であることを考慮すると, 近似式として

$$v \approx \alpha_1 E[Z] + \alpha_2 V(Z) \quad (17)$$

を得るが, 式 (17) を確定するには, 右辺の各説明変数の回帰係数を求めなければならない. それには, 過去のプロジェクト i における UNPV の値 v_i と $RNPV = Z$ の平均, 分散のデータ値 $(v_i, E[Z]_i, V(Z)_i)$ ($i = 1, \dots, n$) から推定する回帰モデル

$$v_i = \beta_1 + \beta_2 E[Z] + \beta_3 V(Z) + \varepsilon_i \quad (18)$$

を考える必要がある. ここで, ε_i は標準正規分布に従う平均 0 の誤差項で, 式 (17) のように近似した際の誤差も含まれている.

ところで, 事業者が UNPV 法にしたがってプロジェクトの採否を決定しているとしても, 実際に我々が入手できる情報は, UNPV の値 v_i そのものではなく, プロジェクトの採否の結果だけである. このことから, ここで二値関数 v^* を設定し, $v > 0$ ならばプロジェクトを採択して $v^* = 1$ とし, 逆にもし $v < 0$ ならば否として $v^* = 0$ とする. 過去のプロジェクトに関して, この二値関数 v^* と $RNPV = Z$ の平均, 分散からなるデータの組合せ $(v_i^*, E[Z]_i, V(Z)_i)$ ($i = 1, \dots, n$) を作成する. このデータから, 式 (19) の尤度関数が得られる.

$$\begin{aligned} L(\beta_1, \beta_2, \beta_3) &= \prod_{v_i^*=1} F(\beta_1 + \beta_2 E[Z]_i + \beta_3 V(Z)_i) \\ &\quad \times \prod_{v_i^*=0} \{1 - F(\beta_1 + \beta_2 E[Z]_i + \beta_3 V(Z)_i)\} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで F は標準正規分布の累積分布関数

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (20)$$

である.

式 (19) より対数尤度関数は式 (21) で表される.

$$\begin{aligned} \log L(\beta_1, \beta_2, \beta_3) &= \sum [v_i^* \log F(\beta_1 + \beta_2 E[Z]_i + \beta_3 V(Z)_i) \\ &\quad + (1 - v_i^*) \log \{1 - F(\beta_1 + \beta_2 E[Z]_i + \beta_3 V(Z)_i)\}] \end{aligned} \quad (21)$$

これを最大化する式 (18) の係数を最尤法で求める。すなわち、式 (18) をプロビットモデルとして推定する。なお、この問題では v の符号（正負）だけを問題としている（プロジェクトの採否）ので、誤差項 ε_i の分散を 1 としても一般性は失わないことに注意する。

以上のデータを元に得られた回帰係数を、 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ とすれば、

$$\hat{v} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 E[Z] + \hat{\beta}_2 V(Z) \quad (22)$$

が簡約化による最終的な結果である [2]。これに評価したい $RNPV = Z$ の期待値と分散を代入し、 $\hat{v} > 0$ ならばプロジェクトを実行と判断すればよい。こうして UNPV の簡約化から得られたプロビットモデルを RNPV プロビットモデルと呼ぶ。なお、ここでは 2 次のモデルについて紹介したが、さらに高次のモデルについても同様に導ける [2]。

2.2 想定モデル

本論文では、LNG を燃料とする新設火力発電施設の事業価値評価を行う。簡単のため、以下の仮定をおく。

- 建設のリードタイムは考慮しない
- 事業年数を 22 年間とする
- 想定する不確実さは電力価格と燃料価格のみとする
- 電力価格と燃料価格は平均回帰モデルで表され、1 日単位で変化する
- 電力取引は前日スポット市場のみで行われる
- 検討している発電機が参入しても電力市場価格は変化しない
- 発電機は 8 時～22 時までの 14 時間定格で出力し、発電した電力はすべて売電される
- 発電機の起動停止コストは考慮しない

2.2.1 年間収益の評価モデル

本論文では電力価格、燃料価格を不確実なものとし、確率変数で表す。そのためキャッシュフロー CF も確率過程である。税なども考慮しないため、以下 CF と収益は等しいものとして取り扱う。電力スポット市場では 30 分もしくは 1 時間といった定められた時間単位で取引が行われる。取引される発電量（エネルギー）の単位は kWh であるため、スポット市場の取引時間単位を 1 時間とすると収益計算が簡単であるので、本論文ではスポット市場での取引時間単位を 1 時間とする。これより、発電事業の年間（ $24 \times 365 = 8760$ 時点）の収益 $profit$ は、

$$(profit) = \sum_{j=1}^{8760} (EP_j \times PO_j) - \sum_{j=1}^{8760} (H' \times CP_j \times PO_j) - OMC \times PO_{\max} \quad (23)$$

j : 時間を表す添え字 [hour]

EP : 電力価格 [yen/kWh]

PO : 発電量 [kWh]

H' : 発電効率費 [(yen·barrel)/(\$·kWh)]

CP : LNG 価格 [\$ /mmBTU]

OMC : 運転維持費 (Operating and Maintenance Cost) [yen/kWh]

$PO_{\max}$: 定格出力 [kWh]

で表される。右辺第二項の $(H' \times CP)$ は燃料価格に相当する。ここで各時点の発電電力を定格出力と仮定しているので、

$$(profit) = \left(\sum_{j=1}^{8760} (EP_j - H' \times CP_j) - OMC \right) \times PO_{\max} \quad (24)$$

と表せ、収益は単純に 1kWh あたり収益に定格出力をかけた式で表すことができる。発電機は 8 時～22 時までの 14 時間運転で、1 日の電力価格、市場価格は変化しないとしているので、年間収益は、式 (25) で表される。

$$(profit) = \sum_{i=1}^{365} (14 \times (EP_i - H' \times CP_i)) - OMC \quad (25)$$

ここで、 i は年間のある日を表す。電力価格 EP や LNG 価格 CP は平均回帰モデルで表現され、式 (25) で得られる $(profit)$ が CF 列 $\{X_n : n = 1, 2, \dots, N\}$ の確率変数 X の値である。

本論文では、式 (24) で示したように、年間の収益は、1kWh あたり収益に定格出力をかけて表すことができ、逆に言えば、事業価値を kWh 当たりで評価することになる。さらに、検討する発電機の参入が電力市場価格に影響しないものとし、特に発電機の設備容量 (kW) を想定していない。しかし、これらの点については、電力市場で取引される電力が検討する発電設備に比べ十分大きいと想定すれば問題ではなく、また、市場取引そのものをモデル化すれば、本手法を用いて発電設備の設備容量も考慮した事業価値評価が可能である。したがって、本論文において、これらの仮定をおき、事業価値を kWh 当たりで評価することは妥当であり、本手法の適用を制限しているものではない。

2.2.2 平均回帰モデル

本論文では簡単のために電力市場価格の週間、季節ごとなどの周期的変動を考慮しないこととし、単純な平均回帰モデルで電力市場価格の大局的変動のみを表現する。平均回帰モデルは、市場価格 S に対して式 (26) で表わされる。

$$dS = \alpha(\mu - \ln S)Sdt + \sigma Sdz \quad (26)$$

ここで、 α は平均回帰率、 μ は長期価格水準 $\bar{S}$ の対数値、 σ はボラティリティである。

式 (26) は、市場価格の自然対数 $x = \ln S$ をとれば、式 (27) のように書き換えることができる。

$$dx = \left[\alpha(\mu - x) - \frac{1}{2}\sigma^2 \right] dt + \sigma dz \quad (27)$$

この式を時間単位 t で離散化すると、

$$\Delta x_t = \left[\alpha(\mu - x_t) - \frac{1}{2}\sigma^2 \right] \Delta t + \sigma\sqrt{\Delta t}\varepsilon_i \quad (28)$$

となる。ただし、この離散化においては、ドリフト項が変数 x に依存するため、極めて 0 に近い時間刻み Δt を選ぶ必要がある。現実的には、平均回帰率に比べて十分短い時間刻み Δt を選定する。よって式 (25) における電力価格 EP_i 、燃料価格 CP_i は、

$$EP_i = EP_{i-1} \times \exp \left\{ \left[\alpha_1 (\mu_1 - x_{1,i-1}) - \sigma_1^2/2 \right] \Delta i + \sigma_1 \sqrt{\Delta i} \varepsilon_{1,i} \right\} \quad (29)$$

$$CP_i = CP_{i-1} \times \exp \left\{ \left[\alpha_2 (\mu_2 - x_{2,i-1}) - \sigma_2^2/2 \right] \Delta i + \sigma_2 \sqrt{\Delta i} \varepsilon_{2,i} \right\} \quad (30)$$

で表現されるものとする。

2.3 シミュレーション方法

2.3.1 パラメータ

表 1 に、数値計算に用いたパラメータを示す。長期価格水準 $\bar{S}$ 、平均回帰率 α 、ボラティリティ σ のパラメータについてはそれぞれ、表 1 に示す範囲で多数変化させ、計 255 ケースのシミュレーションを行った。また、表 1 に示す電力価格の長期価格水準 $\bar{S}_E$ は初期値であり、毎年一定確率で上昇 (up) あるいは下降 (down) するものとした。本論文では、up 確率を p 、down 確率を $q (= 1 - p)$ とし、 p, q ともに 0.5 とした。この p, q に基づいて、電力価格の長期価格水準 $\bar{S}_E$ は、毎年、前年の 0.5% だけ増加または減少するものとする。

各ケースについて 10,000 回試行を行い、10,000 個の RNPV を計算する。

2.3.2 撤退オプション

電力価格の長期価格水準が下降した場合、年間の平均電力価格が下がるため収益が低下する。事業の収益が負となったときに資本回収をあきらめ、事業を中止することでこれ以上の損失を出さないことを目的に、撤退オプションを考慮する。本論文では以下のように撤退オプションを設定した。撤退オプションの導入により、リスク回避的である事業者の投資意欲の変化は実行確率の変化として数量的に示すことができるものと考えられる。そのため、本論文では撤退オプションの有無による差異を比較することを目的としており、下記の意思決定における up 回数と down 回数の差は、例示的に 5 回と設定したものに過ぎない。

表 1: 数値シミュレーションのパラメータ

	電力価格 EP	LNG 価格 CP
$\bar{S}$: 長期価格水準	9.1–9.9 [yen/kWh]	5.7–6.5 [\$/mmBTU]
α : 平均回帰率	70–150	5–30
σ : ボラティリティ	3.0–3.6	0.5–2.0
Δt : 離散時間	1/365 [1/day]	
H : 発電効率	7.9×10^{-3} [\$/mmBTU]	
$rate$: 為替レート	100 [yen/\$]	
H' : 発電効率費	0.79 [yen·mmBTU]	
OMC : 運転維持費	9,636 [yen/(kW·year)]	
I : 建設コスト	2.0×10^5 [yen/kW]	
n : 施設の廃棄年数	22 [year]	
r : 割引率	0.03	

- 事業開始から 5 年毎に事業を撤退するかどうかの意思決定を行う
- 意思決定の年に、電力価格の長期水準が上がった回数よりも下がった回数が 5 回以上多ければ (down 回数 – up 回数 ≥ 5 回であれば), 事業から撤退する

3 結果と考察

本節では、以下の順に計算し、検討を行う。すなわち、撤退オプションを考慮しない新規プロジェクト（火力発電事業）について RNPV を計算し、2 次中心モーメントまでの RNPV プロビットモデルを推定する。そして、その RNPV プロビットモデルを用いて、撤退オプションを考慮しない場合の事業の採否結果を求める。次に、撤退オプションを考慮した場合について RNPV を計算し、そのデータに対して、撤退オプションを考慮しない場合の RNPV から求めた RNPV プロビットモデルに基づいて、事業の採否結果を求める。撤退オプションを考慮しない場合と考慮する場合について事業の採否結果について比較する。次いで、撤退オプションを考慮しない場合と考慮する場合について、実行確率やリスク感度を求め比較する。

3.1 UNPV の比較

本節では 2.3.1 節で述べたように、火力発電事業に関して、市場価格の長期価格水準 $\bar{S}$, 平均回帰率 α , ボラティリティ σ のパラメータを変化させた 255 ケースについて、撤退オプションを考慮した場合と考慮しない場合の双方を、2.1.2 節で述べた UNPV 法により評価し、比較検討

表 2: UNPV の平均値及び UNPV によるプロジェクトを採とした数

撤退オプション	考慮しない場合	考慮する場合
UNPV 平均値	-15,283.62	-8,076.13
プロジェクト採の数	50	92

表 3: プロビットモデルによる $\hat{v}$ の平均値及び $\hat{v}$ 値によるプロジェクトを採とした数

撤退オプション	考慮しない場合	考慮する場合
$\hat{v}$ 値平均	-10.95	-7.35
プロジェクト採の数	49	72

する。なおここでは、事業者は、リスク回避的な指数型効用関数 $u(x) = 1 - \exp(-\beta x)$ ($\beta > 0$) に従うものとして UNPV を求めている。

撤退オプションを考慮しない場合と考慮した場合の、UNPV の平均値と UNPV の正負に基づくプロジェクトを採とした数を、表 2 に示す。撤退オプションを考慮した場合、考慮しない場合よりもプロジェクトを採とした数が増え、また、UNPV の平均値も大きい。撤退オプションを考慮した場合、UNPV の値が大きくなったケースは 255 ケース中 245 ケースである。以上のことから、撤退オプションを考慮すると、事業の実行可能性が高く評価されていることがわかる。

3.2 プロビットモデルによる事業採否の比較

次に、2.1.3 節で述べたプロビットモデルによる事業の採否について比較する。撤退オプションを考慮しない場合の RNPV からプロビットモデルを求めると、式 (31) が得られる。各回帰係数の下に括弧書きされた値は t 値を表す。

$$\hat{v} = -8.394 + 6.945 \times 10^{-4} E[Z] - 1.068 \times 10^{-7} V(Z) \quad (31)$$

(-3.143) (3.196) (-2.818)

なお、この回帰式の対数尤度は -7.331 であった。

このプロビットモデルに、撤退オプションを考慮しない場合、考慮した場合の両方について、 $Z = RNPV$ を代入し左辺の値 $\hat{v}$ を求める。付録 A の表 5-13 に、撤退オプションを考慮した場合としない場合の $\hat{v}$ 値の差、すなわち（撤退オプションを考慮した場合の $\hat{v}$ 値）－（撤退オプションを考慮しない場合の $\hat{v}$ 値）を示す。255 ケース中 254 ケースで、 $\hat{v}$ 値が撤退オプションを考慮した場合の方が大きい。また、式 (31) のプロビットモデルを用いて事業の採否を求めた結果を表 3 に示す。

表 4: プロジェクト実行確率

撤退オプション	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
考慮しない場合	198	3	1	0	1	2	0	0	3	0	46
考慮する場合	164	6	2	0	8	3	0	0	7	2	62

撤退オプションを考慮した場合の方が考慮しない場合よりプロビットモデルの $\hat{v}$ 値が大きい。しかし、表 2 に示す UNPV 法による事業採否を求めた結果と比較すると、撤退オプションを考慮した場合に、プロジェクトを採とする数がかなり減っていることに気付く。これは、撤退オプションを考慮した場合でも、式 (31) の撤退オプションを考慮しない結果に基づくプロビットモデル、すなわち、過去のプロジェクトの実行判断において撤退オプションを考慮していないモデルに基づくためと考えられる。

3.3 実行確率

前節のプロビットモデル値 $\hat{v}$ は符号のみにプロジェクトの採否という意味があり、値そのものには特に意味はない。しかし、その $\hat{v}$ の値を用いることでプロジェクトの実行確率を計算することができる。すなわち、あるプロジェクトに関する $RNPV = Z$ の平均 $E[Z]$ 、分散 $V[Z]$ を求め、推定したプロビットモデルにそれらの値を代入して求めた $\hat{v}$ 値を、標準正規分布の累積分布関数に代入すれば、プロジェクトの実行確率を求めることができる。すなわち、

$$\hat{P} = F(\hat{v}) \quad (32)$$

を計算することでプロジェクトの実行確率 $\hat{P}$ が求められる。ここで、 F は標準正規分布の累積分布関数である。プロジェクトが採、すなわち $\hat{v} > 0$ であるとき $\hat{P} > 0.5$ となり、プロジェクトが否、すなわち $\hat{v} < 0$ であるとき $\hat{P} < 0.5$ となる。表 4 に実行確率を計算した結果を示す。これより、撤退オプションを考慮した場合の方が実行確率は全体的に大きいことがわかる。

3.4 リスク感度分析

前節で計算した $\hat{P}$ の値と推定されたプロビットモデルを用いることで、リスク感度分析ができる。推定したプロビットモデル $\hat{v} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 E[Z] + \hat{\beta}_2 V[Z]$ で、平均 $E[Z]$ をある値に固定し、分散 $V[Z]$ の二乗根、すなわち、標準偏差 σ (リスクに相当する) を 0 から少しずつ増やし、その時々 $\hat{v}$ 値の値から、プロジェクトの実行確率 $\hat{P}$ を計算することで、リスクの増加に対する $\hat{P}$ の変化 (プロジェクト実行確率曲線) を見ることができる。

式 (31) において、 $RNPV$ の平均 $E[Z]$ を、平均値 (撤退オプションを考慮しない場合は 17,950.98、撤退オプションを考慮する場合は 19,364.22) で固定し、標準偏差 σ を 0~15,000 と変化させることで、プロジェクト実行確率曲線を求める。結果を図 1 に示す。図中、一点鎖線

図 1: プロジェクト実行確率曲線

が撤退オプションを考慮しない場合，点線が撤退オプションを考慮する場合である．これより，撤退オプションを考慮する場合の方が，リスク（標準偏差）が増えた場合でも実行確率が高く，プロジェクトが採用されやすいことがわかる．

次に，撤退オプションを考慮した場合の RNPV から推定したプロビットモデルを式 (33) に示す．以下，両者を区別するために，式 (31) のモデルを通常モデル，式 (33) のモデルをオプション考慮モデルと呼ぶ．

$$\hat{v} = -1.805 + 8.630 \times 10^{-4} E[Z] - 1.870 \times 10^{-7} V(Z) \quad (33)$$

$(-1.786) \quad (3.642) \quad (-3.516)$

なお，各回帰係数の下の括弧書きの数値は t 値であり，対数尤度は -14.08 である．オプションを考慮したデータに基づく推計モデルを用いることで，事業者にとってのオプションの価値評価がより精密になるものと考えられる．そこで，式 (33) を用いて撤退オプションを考慮した場合の実行確率曲線を求めた結果が，図 1 の実線である．図 1 の実線は，他の 2 つの場合と比較して，リスクに対して一番高い実行確率を示していることから，実行確率の観点からもオプションのリスクヘッジ効果が顕著に現れていると言える．

4 まとめ

本論文では，すでに提案している RNPV プロビットモデルを，リアルオプションである撤退オプションを含む事業に拡張して適用し，比較検討を行った．その結果，プロビットモデルで

評価した場合でも、リアルオプションを考慮すると、考慮しない場合に比べ、UNPV 法による事業評価と同様に事業を採とする数が多く、本論文で用いた RNPV プロビットモデルは撤退オプションを考慮した場合にも適切な評価を行っていることを示した。しかし、UNPV 法による結果と比較した場合、事業を採とする数が減るが、これは、撤退オプションを考慮しない場合のデータを基に作成した RNPV プロビットモデルを用いて評価しているためと考えられる。また、プロビットモデルにより実行確率やリスク感度分析も行った。撤退オプションを考慮した場合の方が、プロジェクトの実行確率が高くなり、また、リスクが増えてもそのプロジェクトが実行される可能性が高くなることが示され、プロビットモデルは撤退オプションの効能を正しく表している。さらに、プロジェクトの実行確率はオプション導入による投資家の投資意欲の変化を明示的・数量的に表していると言える。

なお本論文はまだ基礎的な検討に過ぎず、本方法に関しては以下の課題が残されている：

- 過去にリアルオプションでの実行判断の実績があるプロビットモデルを用いた RNPV プロビットモデルの検証
- さまざまなリスク（例えば市場リスク等）ごとの UNPV および RNPV 法への影響の検証
- RNPV の高次モーメント項を考慮した場合のリアルオプション効果の検証
- 式 (17) の近似を行う際の非線形項の考慮と式 (18) における非線形回帰推定の検討
- プロジェクト採否そのものをオプションとみなしての事業価値評価の検証

これらの課題については今後順次検討を進めていく予定である。

A 付録

3.2 節の式 (31) を用いて、(撤退オプションを考慮した場合の $\hat{v}$ 値) - (撤退オプションを考慮しない場合の $\hat{v}$ 値) を計算した結果を、表 5-13 に示す。

謝辞

本研究の遂行に当たり、名古屋市立大学宮原孝夫名誉教授には有益なご助言を多数頂き、深く感謝致します。本論文に対し査読者の方々から様々な有益なコメントを頂戴したことを心より感謝致します。なお本論文は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 (C) 20560273, ならびに基盤研究 (C) 21540140）の助成を受けて行った研究成果の一部をまとめたものである。

表 5: $\bar{S}_E$ と $\bar{S}_F$ を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\alpha_E = 110, \alpha_F = 20, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

$\bar{S}_F$	$\bar{S}_E = 9.1$	$\bar{S}_E = 9.2$	$\bar{S}_E = 9.3$	$\bar{S}_E = 9.4$	$\bar{S}_E = 9.5$
5.7	3.09	3.10	3.21	3.51	3.33
5.8	3.25	3.27	3.30	3.46	3.51
5.9	3.71	3.63	3.68	3.47	3.99
6.0	3.32	3.46	3.70	3.51	3.58
6.1	3.43	3.58	3.54	3.48	3.68
6.2	3.44	3.51	3.77	3.55	3.70
6.3	3.57	3.78	3.94	4.32	3.84
6.4	3.59	3.40	3.31	3.34	3.73
6.5	-5.12	3.39	3.77	3.73	16.35

表 6: $\bar{S}_E$ と $\bar{S}_F$ を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\alpha_E = 110, \alpha_F = 20, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

$\bar{S}_F$	$\bar{S}_E = 9.6$	$\bar{S}_E = 9.7$	$\bar{S}_E = 9.8$	$\bar{S}_E = 9.9$
5.7	3.35	3.46	3.78	3.73
5.8	3.52	3.56	3.72	3.64
5.9	3.90	3.94	3.73	4.05
6.0	3.73	3.98	3.77	4.28
6.1	3.85	3.80	3.74	3.54
6.2	3.78	4.06	3.84	4.04
6.3	4.08	4.24	4.63	4.41
6.4	3.53	3.44	3.46	4.03
6.5	3.47	3.86	3.83	3.87

表 7: α_E と $\bar{S}_F$ を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\bar{S}_E = 9.5, \alpha_F = 20, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

$\bar{S}_F$	$\alpha_E = 70$	$\alpha_E = 80$	$\alpha_E = 90$	$\alpha_E = 100$
5.7	3.22	3.06	3.51	3.53
5.8	3.39	3.10	3.49	3.08
5.9	3.95	3.51	3.15	3.60
6.0	3.49	3.52	3.30	3.54
6.1	3.52	3.56	3.47	3.71
6.2	3.71	3.92	3.65	2.88
6.3	3.71	3.62	3.53	3.48
6.4	3.78	3.06	3.52	3.95

表 8: α_E と $\bar{S}_F$ を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\bar{S}_E = 9.5, \alpha_F = 20, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

$\bar{S}_F$	$\alpha_E = 120$	$\alpha_E = 130$	$\alpha_E = 140$	$\alpha_E = 150$
5.7	3.35	3.36	3.51	3.61
5.8	3.53	3.15	3.55	3.22
5.9	3.99	3.69	3.43	3.58
6.0	3.59	3.58	3.44	3.62
6.1	3.71	3.75	3.61	3.77
6.2	3.70	3.92	3.68	3.08
6.3	3.86	3.77	3.55	3.57
6.4	3.86	3.24	3.51	3.92

表 9: $\bar{S}_E$ と α_F を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\alpha_E = 110, \bar{S}_F = 6.0, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

α_F	$\bar{S}_E = 9.0$	$\bar{S}_E = 9.1$	$\bar{S}_E = 9.2$	$\bar{S}_E = 9.3$	$\bar{S}_E = 9.4$
5	2.52	3.72	3.66	2.64	2.78
10	3.00	3.25	4.22	3.30	3.32
15	3.74	3.49	3.46	3.62	4.14
20	3.26	—	—	—	—
25	3.29	3.42	3.36	3.58	3.45
30	3.34	3.28	3.03	3.66	3.40

—: Not calculated

表 10: $\bar{S}_E$ と α_F を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\alpha_E = 110, \bar{S}_F = 6.0, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

α_F	$\bar{S}_E = 9.5$	$\bar{S}_E = 9.6$	$\bar{S}_E = 9.7$	$\bar{S}_E = 9.8$	$\bar{S}_E = 9.9$
5	2.80	4.02	4.17	3.37	4.29
10	3.32	3.93	3.62	3.74	3.97
15	4.09	4.01	3.89	3.73	3.79
25	3.56	3.33	4.05	3.48	3.75
30	3.56	3.29	3.83	3.62	3.81

表 11: α_E と α_F を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\bar{S}_E = 9.5, \bar{S}_F = 6.0, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

α_F	$\alpha_E = 70$	$\alpha_E = 80$	$\alpha_E = 90$	$\alpha_E = 100$
5	4.11	3.90	2.71	2.81
10	3.21	4.52	3.41	3.36
15	3.70	3.61	3.67	4.24
25	3.62	3.35	3.68	3.48
30	3.31	3.14	3.81	3.44

表 12: α_E と α_F を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\bar{S}_E = 9.5, \bar{S}_F = 6.0, \sigma_E = 3.3, \sigma_F = 1.0$)

α_F	$\alpha_E = 120$	$\alpha_E = 130$	$\alpha_E = 140$	$\alpha_E = 150$
5	3.99	3.87	2.84	2.91
10	3.53	4.44	3.44	3.46
15	3.77	3.68	3.83	4.15
25	3.69	3.63	3.75	3.59
30	3.55	3.25	3.78	3.54

表 13: σ_E と σ_F を変えた場合の $\hat{v}$ 値の差 ($\bar{S}_E = 9.5, \bar{S}_F = 6.0, \alpha_E = 100, \alpha_F = 20$)

σ_F	$\sigma_E = 3.0$	$\sigma_E = 3.2$	$\sigma_E = 3.3$	$\sigma_E = 3.4$	$\sigma_E = 3.6$
0.5	3.59	3.36	3.59	3.72	3.69
1.0	3.36	3.90	—	3.49	3.54
1.5	3.86	4.46	3.18	3.64	3.83
2.0	4.16	3.58	3.91	3.36	3.28

—: Not calculated

参考文献

- [1] Hirata, N., Miyauchi, H. and Misawa, T. (2010). Composition of probit model of simplified UNPV method. *Proceedings of 16th ICEE*, PM-01.
- [2] Misawa, T. (2010). Simplification of utility indifference net present value method. *Oikonomika*, **46**, 123–135.
- [3] Miyauchi, H., Miyahara K., Misawa T. and Okada, K. (2007). Risk assessment for generation investment based on utility indifference pricing, *Proceedings of CIGRE Osaka Symposium*, 405.
- [4] 木島正明, 中岡英隆, 芝田隆志 (2008). 「リアルオプションと投資戦略」. 朝倉書店.
- [5] 平田直樹, 宮内肇, 三澤哲也 (2010). “UNPV 法の簡約化によるプロビットモデルの構成と検証”. 「電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料」, PE-10-071/PSE-10-070.
- [6] 宮原孝夫 (2006). “期待効用理論に基づくプロジェクトの価値評価法”. Discussion Papers in Economics, Nagoya City University, 466.
- [7] 三輪昌隆, 宮原孝夫 (2010). “設備維持管理計画の価値評価に対する制御マルコフ過程によるリアルオプションアプローチ”. 「リアルオプション研究」, **3**, 185–204.