電力取引市場における供給力確保とコールオプション

石　井　昌　宏*

概要

電力取引市場において、その供給力確保は重要な諸課題の一つと考えられる。本研究では、電力取引市場における供給力確保を目的とするコールオプション利用の効果をきわめてシンプルなモデルを用いて考察した。具体的には、1期間の複占市場を仮定して、市場で取引されているスポット電力を原資産とするコールオプションの売りポジションを発電企業が保有しない場合と保有する場合を比較した。その結果、発電企業の保有するコールオプションの売りポジションがある値以上であるならば電力取引市場へ最大の供給量が提供されることが示された。一方、これとは異なるある値よりも発電企業が保有するコールオプションの売りポジション量が小さい場合には、その効果は無いことも示された。ただし、コールオプションの売りポジション量がこれら2値に挟まれる場合については議論していない。

キーワード：電力取引市場、コールオプション、非協力ゲーム

I　問題とその背景

本研究の目的は、電力取引市場（電力取引所）における発電企業の戦略的行動に対してコールオプションが与える効果の有無およびその程度を考察することである。そこで、この問題の背景を述べていく。

1990年にイギリスのイングランド・ウェールズで行われた発電と送電の分離から始まる電力産業の制度改革において、電力取引市場が諸外国および日本において開設されてきた。この制度改革を市場を通じた価格評価システムの適用範囲拡大と解釈できる。この制度改革を後押しする諸要因には、標準的な経済学のテキストに述べられている一つの結果「ある諸仮定の下では、完全競争市場において最も効率的な資源配分が達成される」が含まれているであろう。ただし、現実の諸製品や諸サービスに広く共通する性質を抽出したモデルにおいてこの結果が得られている。したがって、現実の市場へこの結果を適用する際にはその産業が有する性質にも注意を払う必要があるように思われる。

実際、電力産業もその注意を要するケースに該当すると考えられている。これを具体的に説明する。電気は貯蔵不可能である。電気という財が持つこの特徴のため、発電と消費は同時に行われかつそれらの量も等しいこと（同時同量の原則）が要求される。もし同時同量の原則が満たされないのであれば、停電へつながることもある。停電の頻発または大規模停電からもたらされる損害は計り知れない。ここで、電力需要者は多人数かつ多種多様であるため、各需要者が他の需

* 上智大学 経済学部 経営学科
連絡先　E-mail：mishii@sophia.ac.jp

要者の消費行動を知ることは不可能に近い。このため、同時同量の原則を考慮した消費行動の要求には限界がある。したがって、同時同量の原則維持は供給サイドに依存していると言っても過言ではない。すなわち、電力産業において供給の信頼度は財の品質を測る主項目の一つである。しかし、Oren [4] や服部 [15] 等でも指摘されるように電力取引市場のみでは供給の信頼度を高く維持することは難しい。実際、2000年夏から2001年冬にかけてカリフォルニア州で発生した電力危機および1999年5月から12月におけるニューイングランド地方における電源の事故停止率増加については、その原因の1つに発電企業が意図的に供給力を抑制した可能性が疑われた。これらの他にも供給力抑制および市場支配力の行使が市場価格高騰の背後要因に含まれることを否定できない事例は少なくない。そのため、完全競争市場への接近と供給力確保の両立を達成するためのシステムが電力産業の制度改革において要求されるようになってきた。

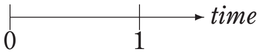
なお、電力産業の特徴については穴山 [9] の第1章を、電力取引市場において競争が機能するための諸条件については南部・西村 [13] の第4章と第5章および矢島 [17] の第3章をそれぞれ参考にされたい。また、西村 [14] から電力産業の制度改革の鳥瞰を得られる。

ここで、電力取引市場における市場支配力の計測に関する既存研究のいくつかを紹介しておく。Borenstein et al [1] ではカリフォルニアの電力取引市場を対象として市場支配力が行使されたか否かについての分析がなされた。その中で、2000年夏から2001年冬にかけて発生した電力危機以前にもこの市場では市場支配力が行使されたことを示す結果が出された。Pennsylvania、New Jersey、and Maryland (PJM) 市場を対象として、Mansur [3] は市場支配力行使の有無を検証した。そして、1998年夏および1999年夏には発電企業により市場支配力が行使しされていたことが示された。これらに関連して、Joskow and Kahn [2] ではカリフォルニアの電力取引市場において、Wolfram [8] および Wolack and Patrick [7] ではイングランド・ウェールズの電力取引市場において、それぞれ、発電企業が戦略的に供給力を過少申告して価格を上昇させたことを示す結果が得られている。これらの研究のいずれについても各市場のデータがその分析の基礎である。これに対して、石井・手塚 [10] では発電企業の容量が電力スポット価格へ与える影響があるモデルを用いて考察されている。なお、熊谷・服部 [11] および竹中 [12] には電力市場における市場支配力を分析対象とする諸研究がまとめられている。

供給力抑制と市場支配力の関係についての研究が蓄積する一方、供給力確保を目的として複数の制度が電力取引市場へ導入されてきた。スペインやラテンアメリカ諸国では容量料金 (capacity payment) が導入され、PJM では容量市場 (capacity market) が設けられている。ただし、Nordpool や Electric Reliability Council of Texas (ERCOT) ではこれらの政策は実施されていないことも付記しておく。

供給力確保という視点において、コールオプションの利用は容量料金や容量市場とは異なる方法である。本論文では、その効果について論ずる。具体的には、市場で取引されているスポット電力を原資産とするコールオプションの売りポジションを発電企業が保有することがその発電企業の電力取引市場への戦略的行動へもたらす効果を考察する。本論文の構成は次の通りである。第II節では、仮定と記号設定について述べる。第III節では、コールオプションの売りポジションを発電企業が保有しないケースを考察する。このケースを基準としてい用いる。第IV節では、コールオプションの売りポジションを発電企業が保有するケースを対象として、その効果を議論する。第V節にまとめと今後の研究課題を述べる。

II　モデル



ここでは、仮定と記号設定を述べる。議論を簡単にする目的で、同質的発電企業から形成される複占市場を仮定する。すなわち、同一の限界費用関数を持つ発電企業2社のみが電力取引市場の供給者と仮定する。これら2つの発電企業を発電企業1と発電企業2と表すこととする。一方、多数の電力小売事業者の存在を仮定する。これら小売事業者はこの電力取引市場から電力を調達しそれを消費者たちへ販売することとしておく。各小売事業者はそれぞれの消費者たちの電力需要を集計し、その合計額を電力取引市場で調達することとする。

本論文においては、1期間モデルを用いて考える。期間の初めを0時点とよび、期間の終わりを1時点とよぶこととする。ここで､経済主体の行動をその時間の順に概説する。0時点において、各発電企業は自社の戦略を決定し、その戦略に基づいて1時点の電力需要に対する供給関数を電力取引市場へ提示する。電力取引市場は各発電企業から提示された供給関数を合計し、市場全体の供給関数を算出する。1時点において電力需用量が判明し、その値を0時点で得られた市場全体の供給関数へ代入する。これにより、スポット電力価格が定まる。さらに、各社の発電量および利潤も得られる。

$(\Omega, \mathcal{F}, \mathrm{P})$ を確率空間とする。確率変数 $Z \sim \mathrm{N}(0, 1)$ と仮定し、

$$X = e^{\mu + \sigma Z}$$

とする。ただし、$\mu \in \mathbf{R}$、$\sigma > 0$。ここで、X は1時点における総電力需要量を表す。すなわち、電力に対する需要関数は非弾力的であると仮定する。0時点において、各発電企業は X の確率分布のみを知っていることとする。

a と b を正の定数、$q \geq 1$ とし、2変数関数 f を次のように定める。

$$f(x, s_j) = a(s_j x)^q + b \quad \text{for } (x, s_j) \in [0, \infty) \times [1, \infty) \tag{1}$$

このモデルにおける関数 f の意味を説明する。x は各発電企業の発電量を表す変数であり、s_j は戦略を表現する変数である。0時点において発電企業 j が戦略 s_j を選択するならば、1時点の電力供給に関わる限界費用関数は $f(x, s_j)$ である。$s_j = 1$、すなわち、$f(x, 1)$ を発電企業 j が保有する発電設備全てを用いて電力を供給する場合の限界費用関数と解釈する。ここで、$s_j < s'_j$ ならば

$$f(x, s_j) < f(x, s'_j) \quad \text{for } x > 0.$$

すなわち、s_j の増加は限界費用の増加を意味している。そこで、s_j の増加を1時点において使用可能な発電設備の減少および発電容量の減少と解釈する。さらに、発電企業 j が戦略 s_j を選択すれば、$f(x, s_j)$ が1時点の電力取引についての供給関数として電力取引市場へ提示されることとする。すなわち、限界費用に mark up を上乗せした関数を発電企業が取引市場へ提示するという戦略を本モデルは考慮しない。各発電企業の発電容量は現実的には有限であり、各発電設備の限界費用と容量を基にして作成される限界費用関数は非減少の階段関数を用いて表現することがより適切である。しかし、それでは解析的取扱いが困難になるため、本研究ではその特徴をある程度表現できそうな (1) を用いて議論していく。

次に、2 変数関数 C を

$$C(x,\ s_j) = \int_0^x f(u,\ s_j)du = \frac{a(s_j)^q}{q+1}x^{q+1} + bx \quad \text{for } (x,\ s_j) \in [0,\ \infty) \times [1,\ \infty) \tag{2}$$

と定める。0 時点で発電企業 j が戦略 s_j を選択し、かつ、1 時点の発電量が x である場合、1 時点で発電企業 j に生ずる費用を $C(x, s_j)$ が表している。いずれの発電企業においても固定費用を 0 と仮定しておく。しかし、この仮定が以下の議論に影響を与えることは無い。1 時点で生ずる発電費用を $C(x, s_j)$ と仮定することにより、このモデルでは電力の貯蔵不可能性を表現している。

各 $s_j \in [1, \infty)$ について、$f^{-1}(y, s_j)$ を次の通り定める。

$$f^{-1}(y,\ s_j) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \le y < b \\ \dfrac{1}{s_j}\left(\dfrac{y-b}{a}\right)^{\frac{1}{q}} & \text{for } y \ge b \end{cases}$$

さらに、関数 G を次のように定める。

$$G(y,\ s) = f^{-1}(y,\ s_1) + f^{-1}(y,\ s_2) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \le y < b \\ \dfrac{s_1+s_2}{s_1 s_2}\left(\dfrac{y-b}{a}\right)^{\frac{1}{q}} & \text{for } y \ge b \end{cases} \tag{3}$$

ただし、s は発電企業 1 の戦略 s_1 と発電企業 2 の戦略 s_2 からなるベクトルを表す、すなわち、$s = (s_1, s_2)$。

任意の $s \in [1, \infty)^2$、任意の $x > 0$ について未知数 y についての方程式

$$G(y, s) = x \tag{4}$$

を考える。ここで、(3) から明らかに $G(y, s)$ は y についての連続な増加関数である。したがって、この方程式には正の解が唯一つ存在する。そこで、その解を $\varphi(x, s)$ で表せば、

$$\varphi(x,\ s) = a\left(\frac{s_1 s_2}{s_1+s_2}x\right)^q + b. \tag{5}$$

発電企業の戦略ベクトルが s であり、かつ、1 時点における市場全体の電力需要量が x である場合、関数 $\varphi(x, s)$ がスポット電力価格を表す。方程式 (4) の解をスポット電力価格として用いることにより、このモデルでは同時同量の原則を表現している。

$j = 1, 2$ とする。1 時点におけるスポット電力価格が $\varphi(x, s)$ であるとき、発電企業 j の発電量は

$$f^{-1}(\varphi(x,\ s),\ s_j) = \frac{s_k}{s_1+s_2}x \tag{6}$$

となる。ただし、$k \in \{1, 2\} \setminus \{j\}$。そして、1 時点における発電企業 j の利潤は

$$F_j(x, s) := \varphi(x, s) f^{-1}(\varphi(x, s), s_j) - C(f^{-1}(\varphi(x, s), s_j), s_j) \tag{7}$$

と表せる。そこで、(2)、(5)、(6) を (7) へ代入することにより

$$F_1(x,\ s) = \frac{aq(s_1)^q(s_2)^{q+1}}{(q+1)(s_1+s_2)^{q+1}}x^{q+1} \tag{8}$$

$$F_2(x,\ s) = \frac{aq(s_1)^{q+1}(s_2)^q}{(q+1)(s_1+s_2)^{q+1}}x^{q+1} \tag{9}$$

を得る。

III　コールオプションを利用しないケース

本節において、各発電企業がコールオプションの売りポジションを保有しないケースについて考察する。具体的には、次の非協力ゲームを考える。

$$\begin{cases} \text{発電企業 } j \text{ の戦略集合：} [1, \infty), \\ \text{発電企業 } j \text{ の利得関数：} \mathrm{E}(F_j(X, s)). \end{cases} \tag{10}$$

この非協力ゲームの意味を説明する。0時点において、各発電企業は1時点の電力需要量の確率分布と他の発電企業の戦略を考慮する。そして、自社の期待利潤が最大となる戦略（発電設備または容量）を各発電企業は選択する。

定理 1

$q=1$ ならば、非協力ゲーム（10）の Nash 均衡は $\{(s_1, s_2) \mid s_1, s_2 \geq 1, s_1 = s_2\}$ である。$q>1$ ならば、非協力ゲーム（10）の Nash 均衡は存在しない。

証明　(8) と (9) より、各発電企業の利得関数は

$$\mathrm{E}(F_1(X, s)) = \frac{aq\,\mathrm{E}(X^{q+1})(s_1)^{q}(s_2)^{q+1}}{(q+1)(s_1+s_2)^{q+1}}, \quad \mathrm{E}(F_2(X, s)) = \frac{aq\,\mathrm{E}(X^{q+1})(s_1)^{q+1}(s_2)^{q}}{(q+1)(s_1+s_2)^{q+1}}.$$

各 $j=1, 2$ について、発電企業 j の利得関数を s_j で微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial s_1}\mathrm{E}(F_1(X, s)) = \frac{aq\,\mathrm{E}(X^{q+1})(s_1)^{q-1}(s_2)^{q+1}(qs_2-s_1)}{(q+1)(s_1+s_2)^{q+2}},$$

$$\frac{\partial}{\partial s_2}\mathrm{E}(F_2(X, s)) = \frac{aq\,\mathrm{E}(X^{q+1})(s_1)^{q+1}(s_2)^{q-1}(qs_1-s_2)}{(q+1)(s_1+s_2)^{q+2}}.$$

これより、発電企業 j 最適反応集合 D_j を求めると、

$$D_1 = \{(qs_2, s_2) \mid s_2 \geq 1\}, \quad D_2 = \{(s_1, qs_1) \mid s_1 \geq 1\}.$$

よって、

$$D_1 \cap D_2 = \begin{cases} \{(s_1, s_2) \mid s_1, s_2 \geq 1, s_1 = s_2\} & \text{for } q = 1, \\ \phi & \text{for } q > 1. \end{cases}$$

□

このモデルにおける定理1の意味を説明する。$q>1$ とする。その証明から分かるように、発電企業2の任意の戦略 $s_{2,0} \geq 1$ に対して、$s_{1,0} = qs_{2,0} > s_{2,0}$ という戦略により発電企業1の期待利潤は最大になる。そして、発電企業1の戦略 $s_{1,0}$ に対して、戦略 $s_{2,1} = qs_{1,0} > s_{1,0}$ を選択することにより発電企業2は自社の期待利潤を最大にできる。これがくり返し行われることにより、各発電企業の戦略は限りなく大きくなる。すなわち、1時点の電力供給のための限界費用が増加し、スポット価格も増加する。$q=1$ であっても、Nash 均衡における各発電企業の期待利潤は戦略の増加関数となる。ここから、お互いに限界費用を増加させようとするインセンティブが生ずると解釈できる。このモデルにおいて、限界費用を増加させる戦略は利用可能な発電設備の減少の表現である。現実の取引市場において、各発電企業が容量を限りなく小さくするということは生じない。

しかし、電力産業の制度改革が進展しているアメリカ、イギリス、北欧諸国などにおいて、供給力確保の問題は顕在化してきている。上述したように、Wolfram [8]、Joskow and Kahn [2]、Wolack and Patrick [7] では、供給力の抑制による市場支配力の行使を示す結果が出されている。

ここで、確率変数 X の仮定について付記しておく。ここまでの議論に関しては、確率変数 X の $q+1$ 次のモーメントの存在を仮定するのみで十分である。すなわち、X の確率分布が対数正規分布という仮定を定理1の証明において用いていない。

IV コールオプションを利用するケース

発電企業が電力取引市場へ提示する供給関数に対してコールオプションの売りポジションが与える影響を考察する。通常、オプションの売りポジションを保有する場合にはオプション料を受け取る。したがって、オプション料およびその運用方法が将来の利潤へ影響を与える。さらに、売却するオプションの量（ポジション量）は企業の意思決定に依存する。しかし、本研究においてはコールオプションの売りポジションが発電企業の戦略へ与える影響に焦点を絞ることとする。そこで、オプション料の運用方法を無視し、両発電企業が売却するオプションの量は等しく所与とする。

発電企業が売却するコールオプションを定める。$K>b$ をコールオプションの権利行使価格として用いる。すなわち、1時点を満期とし、満期におけるペイオフを $\max(\varphi(X, s)-K, 0)$ とするコールオプションを考える。次に、正の定数 t を各発電企業が売却するコールオプションの量として用いる。したがって、1時点における各発電企業 j の利潤を

$$H_j(x, s) := F_j(x, s) - t\max(\varphi(x, s) - K, 0) \tag{11}$$

と表せる。そこで、次の非協力ゲームを考える。

$$\begin{cases} \text{発電企業 } j \text{ の戦略集合：} [1, \infty), \\ \text{発電企業 } j \text{ の利得関数：} \mathrm{E}(H_j(X, s)). \end{cases} \tag{12}$$

上記の非協力ゲームおいて、各発電企業の戦略は電力取引市場へ提示する供給関数、すなわち、限界費用関数のみである。コールオプションの売りポジション t を所与とする。次に述べる2点を鑑みると、この仮定がきわめて不自然ということは無い。第一に、現実に発電企業が電力取引市場に対して供給関数を提示するタイミングは取引時点の前日から数時間前である。一方、ほとんどのオプション契約において満期までの期間は1ヶ月以上のようである。すなわち、ある時点の電力取引についての供給関数が提示される段階において、そのスポット電力を原資産とするオプション契約は既に成立している。第二に、電力取引市場の供給力確保という政策目的におけるコールオプションの利用が本研究の出発点にある。このため、各発電企業のコールオプションの売りポジションを政策的に決定することを想定している。したがって、各発電企業がその売りポジション量を決定できるよりも、それを所与とすることが本研究の目的にはより適している。

非協力ゲーム (12) の Nash 均衡を求める準備として、$\mathrm{E}(\max(\varphi(x, s)-K, 0))$ を計算しておく。

$$\mathrm{E}(\max(\varphi(x, s)-K, 0)) = Ae^{q\mu+\frac{1}{2}q^2\sigma^2}\Phi(B) - (K-b)\Phi(B-q\sigma) \tag{13}$$

ただし、

$$A = A(s_1, s_2) = a\left(\frac{s_1 s_2}{s_1+s_2}\right)^q, \; B = B(s_1, s_2) = \frac{\log\dfrac{A(s_1, s_2)}{K-b} + q\mu + q^2\sigma^2}{q\sigma},$$

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^{z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2} du.$$

以下において、$A(s_1, s_2)$ および $B(s_1, s_2)$ が、s_1 と s_2 の関数であることを明記する必要の無い場合には、表記を簡素にすることを目的としてそれぞれを A と B と表記する。

非協力ゲーム (12) の Nash 均衡についての一つの結果を述べる前に、簡単な補題を準備しておく。

補題 1

$s_1=s_2=1$ において $\Phi(B)$ は最小となる。すなわち、

$$\min_{(s_1,s_2)\in[1,\infty)^2}\Phi(B)=\Phi(B_{11}).$$

ただし、$B_{11}=B(1,1)=\dfrac{\log\dfrac{a}{2^q(K-b)}+q\mu+q^2\sigma^2}{q\sigma}.$

証明　A、B、Φ の定義、および、

$$\frac{\partial}{\partial s_1}\left(\frac{s_1 s_2}{s_1+s_2}\right)=\frac{(s_2)^2}{(s_1+s_2)^2}>0,\ \frac{\partial}{\partial s_2}\left(\frac{s_1 s_2}{s_1+s_2}\right)=\frac{(s_1)^2}{(s_1+s_2)^2}>0$$

を用いると、$\Phi(B)$ は s_1 と s_2 のいずれについても増加関数である。よって、$s_1=s_2=1$ において $\Phi(B)$ は最小となる。

定理 2

非協力ゲーム (12) の Nash 均衡に関して次が成り立つ。

(a) $q=1$ とする。$s_1=s_2=1$ のみが非協力ゲーム (12) の Nash 均衡である。

(b) $q>1$ とする。コールオプションの売却量 t が

$$t\geq\frac{aqe^{\mu+(q+\frac{1}{2})\sigma^2}}{(q+1)\Phi(B_{11})}\tag{14}$$

をみたすならば、非協力ゲーム (12) の Nash 均衡は $s_1=s_2=1$ のみである。一方、コールオプションの売却量 t が

$$t\leq\frac{a(q-1)e^{\mu+(q+\frac{1}{2})\sigma^2}}{2(q+1)}\tag{15}$$

をみたすならば、非協力ゲーム (12) の Nash 均衡は存在しない。

証明　各 $j=1, 2$ について、発電企業 j の利得関数 $\mathrm{E}(H_j(X,s))$ を s_j で微分することにより、

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial s_1}\mathrm{E}(H_1(X,\ s))\\&=\frac{q(s_1)^{q-1}(s_2)^{q+1}e^{q\mu+q^2\sigma^2}}{(s_1+s_2)^{q+2}}\left[\left\{\frac{aqe^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}-t\Phi(B)\right\}s_2-\left\{\frac{ae^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}+t\Phi(B)\right\}s_1\right],\\&\frac{\partial}{\partial s_2}\mathrm{E}(H_2(X,\ s))\\&=\frac{q(s_1)^{q+1}(s_2)^{q-1}e^{q\mu+q^2\sigma^2}}{(s_1+s_2)^{q+2}}\left[\left\{\frac{aqe^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}+t\Phi(B)\right\}s_1-\left\{\frac{ae^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}-t\Phi(B)\right\}s_2\right].\end{aligned}$$

ここで、明らかに

$$\frac{ae^{\mu+(q+\frac{1}{2})\sigma^2}}{q+1}+t\Phi(B)>0.$$

(a) を示す。まず、$t\leq\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2\Phi(B_{11})}$の場合を考える。$s_2$が

$$\left\{\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2}-t\Phi(B(1,\ s_2))\right\}s_2-\left\{\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2}+t\Phi(B(1,\ s_2))\right\}\leq 0$$

をみたすならば、$\mathrm{E}(H_1(X,s))$ は s_1 の減少関数である。したがって、$s_1=1$ で $\mathrm{E}(H_1(X,s))$ は最大となる。一方、s_2が

$$\left\{\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2}-t\Phi(B(1,\ s_2))\right\}s_2-\left\{\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2}+t\Phi(B(1,\ s_2))\right\}>0$$

をみたすならば、ある $\xi(s_2)>1$ が唯一存在して、$\mathrm{E}(H_1(X,s))$ を最大にする。ただし、明らかに $\xi(s_2)<s_2$。$\mathrm{E}(H_2(X,s))$ についても同様のことが成り立つ。したがって、Nash 均衡は $s_1=s_2=1$ のみである。

$t>\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2\Phi(B_{11})}$であれば、

$$\frac{ae^{\mu+\frac{3}{2}\sigma^2}}{2}-t\Phi(B)<0\quad \text{for } (s_1,\ s_2)\in[1,\ \infty)^2.$$

したがって、各 $s_2\in[1,\infty)$ について $\mathrm{E}(H_1(X,s))$ は s_1 の減少関数である。明らかに、$\mathrm{E}(H_2(X,s))$ についても同様である。よって、Nash 均衡は $s_1=s_2=1$ のみである。
(b) の前半を示す。不等式 (14) が成り立つならば、補題1により、任意の $(s_1,s_2)\in[1,\infty)^2$ について、

$$\frac{aqe^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}-t\Phi(B)\leq\frac{aqe^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}-t\Phi(B_{11})\leq 0.$$

これより、

$$\frac{\partial}{\partial s_j}\mathrm{E}(H_j(X,\ s))\leq 0\quad \text{for } (s_1,\ s_2)\in[1,\ \infty)^2.$$

すなわち、$\mathrm{E}(H_j(X,s))$ は s_j の減少関数である。よって、$(s_1,s_2)=(1,1)$ が唯一の Nash 均衡である。
(b) の後半を示す。不等式 (15) が成り立つならば、任意の $(s_1,s_2)\in[1,\infty)^2$ について、

$$\frac{aqe^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}-t\Phi(B)>\frac{ae^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{q+1}+t\Phi(B).$$

これより、各 $s_2 \in [1, \infty)$ について、$\mathrm{E}(H_j(X, s))$ を最大にする $s_1 \in [1, \infty)$ が唯一存在する。その値を $\zeta_1(s_2)$ で表せば、発電企業１の最適反応集合 D_1 は

$$D_1 = \{(\zeta_1(s_2), s_2) \mid s_2 \geq 1\}.$$

同様に、各 $s_1 \in [1, \infty)$ について、$\mathrm{E}(H_2(X, s))$ を最大にする唯一の値を $\zeta_2(s_1)$ で表せば、発電企業２の最適反応集合 D_2 は

$$D_2 = \{(s_1, \zeta_2(s_1)) \mid s_1 \geq 1\}.$$

ここで、

$$s_2 < \zeta_1(s_2) \quad \text{for } s_2 \in [1, \infty) \text{ かつ } \quad s_1 < \zeta_2(s_1) \quad \text{for } s_1 \in [1, \infty)$$

に注意すると、$D_1 \cap D_2 = \phi$。したがって、Nash 均衡は存在しない。

□

電力取引市場において供給力を確保する、すなわち、設備容量を維持するという観点から、この定理は有用である。

まず、$q=1$ すなわち１次関数により発電設備の限界費用を近似できるような場合について定理２の含意を述べる。コールオプションの売りポジションが１単位であっても、発電企業はその持てる供給能力を最大限に活用しようとする。すなわち、定理１が示すような「意図的に供給力を小さくするという戦略」を選択するインセンティブが失われる。

次に $q>1$ の場合について述べる。定理２(b) を基にすると、電力取引市場における供給力確保においてコールオプションが機能することが示された。発電企業がある量以上のコールオプションを売却することにより、発電企業にはその持てる供給能力を最大限に活用しようとするインセンティブが生ずる。反対に、発電企業が売却するコールオプションの量が小さすぎるならば、お互いに設備容量を小さくしスポット価格を上昇させ利潤の期待値を増加させるというインセンティブが生ずる。この状況は定理１と同様である。すなわち、電力取引市場における発電企業の戦略的行動に対してコールオプションの売りポジションは効果を持たない。

V　まとめと今後の研究課題

本研究では、電力取引市場における供給力確保を目的とするコールオプション利用の効果をきわめてシンプルなモデルを用いて考察した。その結果、発電企業がコールオプションの売りポジションをある量以上保有しているならば電力取引市場へ最大の供給力が提供されることが確認された。一方、発電企業が保有するコールオプションの売りポジション量がある値を下回る場合には、その効果は無いことも確認された。

以下に述べる諸点は今後の研究課題として残されている。第一に、本研究で用いたモデルにおいても、$q>1$ の場合には議論は尽くされていない。具体的には、発電企業のコールオプションの売りポジション量 t が $\dfrac{a(q-1)e^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{2(q+1)} < t < \dfrac{aqe^{\mu+\left(q+\frac{1}{2}\right)\sigma^2}}{(q+1)\Phi(B_{11})}$ については、非協力ゲーム（12）の Nash 均衡を求めていない。第二に、同質的な企業から構成される複占市場モデルを同質的な n 社から構成される寡占市場モデル、さらに、同質的ではない n 社から構成される寡占市場モデルへの拡張も今後の課題である。第三に、発電企業のコールオプションの売りポジション量を決定する問題が挙げられる。この問題に対する一つのアプローチをここに記しておく。電力取引市場における供給力確保を目的とする規制手段としてコールオプションを用いるならば、その

買い手は政府と考えられる。そして、そのオプション料総額を消費者が支払う電力価格上昇の要因として扱う。そこで、オプション料総額は総電力需用量の確率分布の期待値を小さくすると仮定する。一方、1時点における発電企業のペイオフには「オプション価格とポジション量の積に時間を考慮した項」を加える。この設定において、限界費用関数を選択する非協力ゲームを解く。さらに、その結果を基にして各オプション価格毎に期待利潤を最大にするポジション量の選択を考える。ここから、コールオプションの供給関数が導出される。一方、コールオプションの需要関数については、「オプション価格とポジション量の積を一定とする関数」を用いる。すなわち、総電力需用量の確率分布の期待値の減少を一定とするようなオプション価格とポジション量の関係を需要関数として用いる。この設定の下で、コールオプションの供給関数と需要関数の交点を求める。ただし、このアプローチにおいても、総電力需用量の確率分布の期待値の減少幅を決定する問題は残る。第四に、発電企業間でコールオプションの売りポジション量が異なる場合の効果についても考察されていない。例えば、同質的複占モデルにおいても一方の発電企業のみにコールオプションの売りポジションを保有させる場合の効果、非同質的な企業から構成される寡占モデルにおいて最も限界費用が大きい発電企業のみにコールオプションの売りポジションを保有させる場合の効果なども興味深く有用な問題である。第五に、容量料金や容量市場とコールオプションの売りポジションとの比較も残されている。この比較には、Stoft [6] で用いられている議論の枠組みが参考になろう。また、この問題には権利行使価格の政策的決定も関連する。第六に、本研究が対象とするコールオプションが市場で取引されている場合の価格評価も残されている。この問題では、小売事業者の行動をモデルで表現することが必要となる。それにはOum and Oren [5] が参考となろう。なお、ファイナンスの視点においては、ここで議論の対象となるコールオプションの価格評価は非完備市場（incomplete market）における価格評価の一問題に位置づけられることも述べておく。

謝 辞

本研究の着想を得る過程において、政策研究会における服部徹先生（電力中央研究所）のご報告（服部[16]）から多くを賜った。服部徹先生および政策研究会の皆様へ感謝の意を表したい。また、本研究は科学研究費補助金基盤研究（C）20530214の助成を受けている。

参考文献

［1］ Borenstein, S., Bushnell, J. B., and Wolak, F. A., “Measuring Market Inefficiencies in California’s Restructured Wholesale Electricity Market,” *American Economic Review,* Vol. 92, pp. 1376-1405, 2002.

［2］ Joskow, P. L. and Kahn, E., “A Quantitative Analysis of Pricing Behavior in Califronia’s Whole Sale Electricity Market during Summer 2000,” *NBER Working Paper,* 8157, 2001.

［3］ Mansur, E. T., “Measuring Welfare in Restructured Electricity Markets,” *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 90, pp. 369-386, 2008.

［4］ Oren, S. S., “Ensuring Generation Adequacy in Competitive Electricity Markets,” in Griffin, J. M. and Puller, S. L. (eds) *Electricity Deregulation : Choices and Challenges*, University of Chicago Press, pp. 388-414, 2005.

［5］ Oum, Y. and Oren, S. S., “Optimal Static hedging of Volumetric Risk in a Competitive Wholesale Electricity Market,” *Decision Analysis*, Vol. 7, pp, 107-122, 2010.

［6］ Stoft, S., *Power System Economics*, Wiley Inter-Science, 2002.

［7］ Wolak, F. A. and Patrick, R. H., “The Impact of Market Rules and Market Structure on the Price Determination process in the England Wales Electricity Market,” *NBER Working Paper,* 8248, 2001,

［8］ Wolfram, C. D., “Strategic Bidding in a Multiunit Auction: An Empirical Analysis of Bids to Supply Electricity in England and Wales,” *RAND Journal of Economics*, Vol. 29, pp. 703-725, 1998.

［9］ 穴山梯三『電力産業の経済学』、NTT 出版、2005。

［10］ 石井昌宏・手塚広一郎「非協力ゲームの枠組みを用いた電力取引市場における市場支配力の分析」、『公益事業研究』、Vol. 59（3）、pp. 33-41、2007。

［11］ 熊谷礼子・服部徹「電力市場における市場支配力の理論と実際」、八田達夫・田中誠（編）『電力自由化の経済学』、東洋経済新報社、pp. 41-62、2004。

［12］ 竹中康治「電力市場における市場支配力」、岸井大太郎・鳥居昭夫（編）『公益事業の規制改革と競争政策』、法政大学出版局、pp. 245-274、2005。

［13］ 南部鶴彦・西村陽『エナジー・エコノミクス』、日本評論社、2002。

［14］ 西村陽・エネルギー政策研究会（監修）『電力自由化完全ガイド』、エネルギーフォーラム、2004。

［15］ 服部徹「電力取引と供給力の確保―米国北東部における容量市場導入の経緯と最新動向―」、『オペレーションズリサーチ：経営の科学』、Vol. 53、7 月号、pp. 397-402、2008。

［16］ 服部徹「供給力確保に関する基礎的サーベイ」、第 7 回政策研究会報告資料、2012。

［17］ 矢島正之『電力改革再考』、東洋経済新報社、2004。