電力市場と容量市場における価格のジャンプリスクを考慮した発電容量への投資価値評価について*

同志社大学・商学研究科　辻村元男†

島根大学・生物資源科学部　吉岡秀和

東京理科大学・理工学部　高嶋隆太

東京理科大学・理工学部　後藤允

概 要

本研究は，リアルオプション・アプローチを用いて，電力市場価格と容量価格のジャンプリスクを考慮した発電容量投資の評価モデルを構築する。発電事業者の問題は，発電容量から得られる利益の現在価値を最大とする投資時刻を求める最適停止問題として定式化される。定式化された電事業者の問題に対する変分不等式を，有限差分法を用いて数値的に解くことで，投資の閾値を求める。さらに，価格のボラティリティ，ジャンプ強度やサイズ，容量市場への売却割合などに対して感度分析を行い，投資の意思決定に対する示唆を明らかにする。

キーワード: 電力市場，容量市場，ジャンプ拡散過程，最適停止，有限差分法

1　はじめに

エネルギー政策の基本方針は，安全性（Safty）を大前提として，エネルギーの安定供給（Energy Security），経済効率性（Economic Efficiency），環境への適合（Environment）のいわゆる S+3E を同時に達成することにある (資源エネルギー庁, 2021.10)。しかし，現代社会の基盤となっているエネルギーの安定供給に関して，電力需給の逼迫が問題となっており，電力の安定供給が脅かされている (資源エネルギー庁, 2022)。

電力の小売り自由化以降，発電容量への投資は電力市場で回収することになり，発電容量の投資回収の予見性が低下することや，再生可能エネルギーの導入拡大により，電力市場価格が低下することなどから，発電容量への投資が停滞することが懸念されていた (Henriot, Arthur and Glachant, 2013; 資源エネルギー庁, 2016.10)。資源エネルギー庁 (2022.10) によると，2016 − 2020 年度の実績で，火力発電の設備容量が約 172 万 kW 減少した。また，2021 − 2030 年度は，約 2,902 万 kW 減少する見通しである。このように，電力の安定供給に対する懸念が高まっている。

自然条件に発電量が大きく左右される太陽光などの再生可能エネルギーが導入されるに従い，電力供給に対するリスクが高まる (Finon and Pignon, 2008)。電力需給のバランスを調整するためには，バックアップ電源として，出力変更が容易な火力発電が必要となる (Hach and Spinler, 2016; 資源エネルギー庁, 2021.10)。中長期的に必要な電力の供給力を確保し，気候変動への対策とエネ

*本研究は JSPS 科研費 JP21K01573 の助成に加え，京都大学数理解析研究所「共同利用・共同研究拠点事業」の支援を受けた。

†連絡先：602-8580 京都市上京区今出川通烏丸東入

E-mail address: mtsujimu@mail.doshisha.ac.jp

ルギーの安定供給を両立させるためには，2000 年代からヨーロッパや米国で導入されてきた容量メカニズムが有効な手段とされている (Greenblatt et al., 2007; Batlle and Pérez-Arriaga, 2008; IEA, 2016; 資源エネルギー庁, 2016.10)。

容量メカニズムは，発電容量に対する経済的価値を容量価格（kW 価格）として支払うメカニズムである。容量メカニズムには，戦略的予備力，容量市場， 信頼度オプション，容量支払いなどにいくつかのタイプがある (服部, 2015)。日本でも容量市場が創設され，2020 年に第 1 回オークション，2021 年には第 2 回オークションが実施された。容量市場の制度については，中長期的な電力の安定的な供給を確保するために見直しが進められている[1]。

本研究は，リアルオプション・アプローチを用いて，電力市場と容量市場を考慮した発電容量投資の基本的な評価モデルを構築する。リアルオプション・アプローチを用いて，発電容量への投資を分析した研究として，de Moraes Marreco and Carpio (2006)，Aïd et al. (2017) などがある。容量メカニズムを考慮した分析として次がある。Brøndbo et al. (2020) は，容量支払いを考慮した発電容量への投資問題を分析した。本研究と同様に，電力市場と容量市場を考慮した発電容量への投資問題を考察した研究として，高野・高嶋 (2015) がある。辻村 (2023) は，電力価格と容量価格に対する曖昧性を考慮することで，投資回収の予見性の低下を表現し，高野・高嶋 (2015) を拡張した。一方，本研究は，電力市場価格と容量価格に対してジャンプリスクを考慮することで，高野・高嶋 (2015) を拡張し，発電容量への投資価値評価モデルを構築する。

本稿の構成は以下である。第 2 節では，発電事業者の発電容量への投資問題を最適停止問題として定式化する。次に，第 3 節では，定式化された発電事業者の問題を変分不等式を用いて解く。次いで，第 4 節では，数値例を用いていくつかのパラメータについて感度分析を行い，発電容量投資への示唆を明らかにする。最後に，第 5 節で，本研究の残された課題と拡張の可能性について述べ，本稿をまとめる。

2　発電事業者の問題

発電事業者は，発電容量 Q[kW] への投資を検討している。分析の簡単化のため，投資された発電容量はリードタイム無しで完成する。さらに，完成された発電容量はそれ以降継続して稼働し，計画期間は無限期間とする。投資された容量の一定割合 $\alpha \in (0, 1)$ は容量市場に売却され，残りの容量 $(1-\alpha)Q$ で発電された電力は電力市場で売却されるとする。

発電容量 1 単位当たりの費用を b [円/kW] とすると，発電容量 Q に対する投資費用 I [円] は，

$$I = bQ$$

となる。

[1]詳しくは，経済産業省「総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会」における議論を参照されたい。(`https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/index.html`)

電力価格を P_t [円/kWh]，発電に掛かる操業費用を C [円/kWh]（定数）とする。発電事業者が容量に投資する時刻 τ 以後の時刻 $t \geq \tau$ において，$(1-\alpha)Q$ の容量で発電された電力によって得られる利益は，$[(1-\alpha)P_t - C]Q$ となる。一方，容量 αQ は容量市場に売却される。容量 1 単位当たりの価格を X_t [円/kW] とすると，容量の取引時刻 ξ_i （$i \geq 0$）に $\alpha X_{\xi_i} Q$ の売却益を得る。容量市場の取引間隔を 1 年とする。分析の簡単化のため，投資された時刻と容量市場での最初の取引が同時刻だと仮定する（$\xi_0 = \tau$）。また，固定費用を F[円]（定数）とする。したがって，時刻 $t \geq \tau$ における発電事業者の操業利益 π は次となる。

$$\pi(P_t, X_t) = [(1-\alpha)P_t - C]Q - F + \alpha X_t Q 1_{\{t=\xi_i\}}, \quad t \geq \tau. \tag{2.1}$$

ここで，電力価格 P_t は，通常は幾何ブラウン運動に従っているが，時刻 T_n^P $(n \geq 1)$ にジャンプし，$P_{T_n^P} = P_{T_n^P -}(1 + Z_n^P)$ となる次のジャンプ拡散過程に従っているとする (Runggaldier, 2003)。

$$\mathrm{d}P_t = \mu_P P_{t^-}\mathrm{d}t + \sigma_P P_{t^-}\mathrm{d}W_t^P + P_{t^-}\mathrm{d}J_t^P, \quad P_{0^-} = p > 0. \tag{2.2}$$

ただし，$\mu_P > 0, \sigma_P > 0$ は定数，W_t^P は標準ブラウン運動，$\{J_t^P\}_{t \geq 0}$ は複合 Poisson 過程:

$$J_t^P = \sum_{n=1}^{N_t^P} Z_n^P$$

である。$\{N_t^P\}_{t \geq 0}$ は強度 $\lambda_P > 0$ の Poisson 過程，$\{Z_n^P\}_{n \geq 1}$ はジャンプサイズを表し，互いに独立で同一で $(-1, \infty)$ に値を取る分布 F^P に従う:

$$\mu_{Z^P} = \mathbb{E}\left[\int_{-1}^{\infty} z \mathrm{d}F^P(z)\right] < \infty. \tag{2.3}$$

また，$\{W_t^P\}_{t \geq 0}, \{N_t^P\}_{t \geq 0}, \{Z_n^P\}_{i \geq 0}$ は互いに独立であるとする。

電力価格と同様に，容量 1 単位当たりの価格 X_t [円/kW] もジャンプ拡散過程に従う。

$$\mathrm{d}X_t = \mu_X X_{t^-}\mathrm{d}t + \sigma_X X_{t^-}\mathrm{d}W_t^X + X_{t^-}\mathrm{d}J_t^X, \quad X_{0^-} = x > 0. \tag{2.4}$$

ただし，$\mu_X > 0, \sigma_X > 0$ は定数，W_t^X は標準ブラウン運動。$\{J_t^X\}_{t \geq 0}$ は，複合 Poisson 過程

$$J_t^X = \sum_{n=1}^{N_t^X} Z_n^X$$

である。$\{N_t^X\}_{t \geq 0}$ は強度 $\lambda_X > 0$ の Poisson 過程を表す。容量価格は，時刻 T_n^X $(n \geq 1)$ でジャンプし，$X_{T_n^X} = X_{T_n^X -}(1 + Z_n^X)$ となる。$\{Z_n^X\}_{n \geq 1}$ はジャンプサイズを表し，互いに独立で同一で $(-1, \infty)$ に値を取る分布 F^X に従う:

$$\mu_{Z^X} = \mathbb{E}\left[\int_{-1}^{\infty} z \mathrm{d}F^X(z)\right] < \infty. \tag{2.5}$$

また，$\{W_t^X\}_{t \geq 0}, \{N_t^X\}_{t \geq 0}, \{Z_n^X\}_{i \geq 0}$ は互いに独立であり，$\mathbb{E}[\mathrm{d}W_t^P \mathrm{d}W_t^X] = \rho \mathrm{d}t$ となる。

以上より，発電事業者の問題は，将来に渡る利益の現在価値を最大とするため，発電容量 Q に投資する最適な時刻 τ を求める問題となる。

$$V(p,x)=\sup_{\tau\in\mathcal{T}}\mathbb{E}\left[\mathrm{e}^{-r\tau}\left[\int_{\tau}^{\infty}\mathrm{e}^{-r(t-\tau)}[[(1-\alpha)P_t-C]Q-F]\mathrm{d}t+\sum_{i=0}^{\infty}\mathrm{e}^{-r(\xi_i-\tau)}\alpha X_{\xi_i}Q-I\right]\right]. \tag{2.6}$$

ただし，V は価値関数を，$\mathcal{T}$ はを停止時刻の集合を表す。ここで，意味のある問題を考えるため，利益のフローに対して次を仮定する。

$$\mathbb{E}\left[\int_{0}^{\infty}\mathrm{e}^{-rt}[[(1-\alpha)P_t-C]Q-F]\mathrm{d}t\right]<\infty, \tag{2.7}$$

$$\mathbb{E}\left[\sum_{i=0}^{\infty}\mathrm{e}^{-r\xi_i}\alpha X_{\xi_i}Q\right]<\infty. \tag{2.8}$$

3　発電事業者の問題に対する変分不等式

発電事業者の問題 (2.6) は最適停止問題として定式化されており，変分不等式を用いて解く。

変分不等式を見やすくするために，時刻 $t=\xi_0$ における操業利益を $G(P_t,X_t)$ とすると，次のようになる (Liang et al., 2013)。

$$\begin{aligned}G(P_t,X_t)&=\mathbb{E}_t\left[\int_{t}^{\infty}\mathrm{e}^{-r(s-t)}[[(1-\alpha)P_s-C)Q-F]\mathrm{d}s+\sum_{i=0}^{\infty}\mathrm{e}^{-r(\xi_i-t)}\alpha X_{\xi_i}Q\right]\\&=\frac{(1-\alpha)P_tQ}{r-(\mu_P+\lambda_P\mu_{Z^P})}-\frac{CQ+F}{r}+\frac{\alpha X_tQ}{1-\mathrm{e}^{-[r-(\mu_X+\lambda_X\mu_{Z^X})]}}.\end{aligned} \tag{3.1}$$

発電事業者の問題 (2.6) に対する変分不等式は，次で与えられる。

Definition 3.1 (変分不等式)**.**

$$\mathcal{L}V(p,x)\leq 0, \tag{3.2}$$

$$V(p,x)\geq G(p,x)-I, \tag{3.3}$$

$$\mathcal{L}V(p,x)[(G(p,x)-I)-V(p,x)]=0. \tag{3.4}$$

ただし，$\mathcal{L}$ は次で定義される無限小作用素を表す。

$$\begin{aligned}\mathcal{L}V(p,x):=&(\mu_P+\lambda_P\mu_{Z^P})pV_P+(\mu_X+\lambda_X\mu_{Z^X})xV_X\\&+\frac{1}{2}\sigma_P^2p^2V_{PP}+\frac{1}{2}\sigma_X^2x^2V_{XX}+\rho\sigma_P\sigma_XpxV_{PX}\\&+\lambda_P[\mathbb{E}[V((1+z)p,x)]-V(p,x)]+\lambda_X[\mathbb{E}[V(p,(1+z)x)]-V(p,x)]-rV.\end{aligned} \tag{3.5}$$

ここで，$V_P:=\partial V/\partial P$，$V_X:=\partial V/\partial X$，$V_{PP}:=\partial^2V/\partial P^2$，$V_{XX}:=\partial^2V/\partial X^2$，$V_{XP}:=\partial^2V/\partial P\partial X$ を表す。また，$\mathbb{E}[V((1+z)p,x)]=\int_{-1}^{\infty}V((1+z)p,x)\mathrm{d}F^P(z)$，$\mathbb{E}[V(p,(1+z)x)]=\int_{-1}^{\infty}V(p,(1+z)x)\mathrm{d}F^X(z)$ である。

(3.2) は，発電容量への投資を微少時間遅らせたときに，価値関数 V の変化を表している。初期時点で投資をしないことが最適な場合は，等号で成り立つ。(3.3) の右辺は初期時点で発電容量へ投資した場合の正味現在価値をを表してる。必ずしも初期時点で投資をすることは最適ではないので，不等号で成り立つ。(3.4) は相補性条件であり，(3.2) か (3.3) のいずれかが等号で成り立つことをを表す。すなわち，初期時点で投資をすること，あるいは，投資をせずに待つことのいずれかが最適であることを表す。変分不等式の導出については，辻村 (2022) を参照されたい。

変分不等式 (3.2)–(3.4) から，発電容量へ投資しない領域（続行領域）$\mathcal{C}$ は，

$$\mathcal{C} := \{(p,x); V(p,x) > G(p,x) - I\} \tag{3.6}$$

と与えられる。したがって，発電容量に投資する時刻 τ は，

$$\tau = \inf\{t > 0; (p,x) \notin \mathcal{C}\} \tag{3.7}$$

となる。

$(p,x) \in \mathcal{C}$ では，変分不等式から，次が成り立つ。

$$\mathcal{L}V(p,x) = 0 \tag{3.8}$$

発電容量に投資する閾値を $(\bar{p},\, \bar{x})$ とすると，$(\bar{p},\, \bar{x})$ は，value-matching 条件:

$$V(\bar{p},\bar{x}) = G(\bar{p},\bar{x}) - I \tag{3.9}$$

と smooth-pasting 条件:

$$V_P(\bar{p},\bar{x}) = G_P(\bar{p},\bar{x}) \tag{3.10}$$

$$V_X(\bar{p},\bar{x}) = G_X(\bar{p},\bar{x}) \tag{3.11}$$

によって求めることができる。ジャンプ拡散過程に対する smooth-pasting 条件については，Liang et al. (2013)，Ferrari and Salminen (2016)，Huang et al. (2021)，Wu and Hu (2022) などを参照されたい。

4　数値例を用いた感度分析

本節では，変分不等式を数値的に解き投資に対する閾値 $(\bar{p},\bar{x})$ を求め，さらにいくつかのパラメータについて感度分析をすることで，発電容量投資への意思決定に対する示唆を与える。

本研究では，Gauss-seidel 法による内部反復にもとづく policy iteration を用いて変分不等式を数値的に解く[2]。変分不等式の各項については，2 階微分項を 2 次精度の中心差分，1 階微分項を 1 次精度の風上差分，ジャンプ項を線型補間により離散化する。2 階微分項については，相関係数 ρ が 0 でない場合は中心差分ではなくワイドステンシル等，離散的な退化楕円性を満足する離散化

[2]数値計算については，電力市場のみ，あるいは容量市場のみを考えたモデルで，解析解と数値解の一致を確認済みである。

を用いることが粘性解理論の見地からは望ましい (Feng and Lewis, 2021)。他方，その実装は複雑であり数値計算精度も低いという課題がある。本研究で対象とする変分不等式の解の形状は比較的滑らかであることが事前に示唆されたため，2 階微分項を中心差分で離散化することとした。なお，変分不等式の定義域は非有界であるが，差分法を適用するにあたり十分に大きい有限領域に切除している。この近似手法による数値計算誤差は，遠方では即時停止することが最適であることが予想されるとともに実際にそのような数値解が得られていることから，十分に小さいと考えられる。ただし，これは理論保証ではなく実験的な洞察に依拠する。

計算には，表 1 のパラメータ値を基準値として用いた[3]。これらの数値を用いて得られた価値関数 V は図 1 のようになる。利益関数 (2.1) の関数型から，価値関数も電力価格 P，容量価格 X に関して線形となる。また，価格のボラティリティσ_j $(j = \{P, X\})$，ジャンプ強度 λ_j $(j = \{P, X\})$，ジャンプサイズの期待値 μ_{Z^j} $(j = \{P, X\})$， 容量市場への売却割合 α，価格の相関係数 ρ に関する感度分析の結果を，図 2–6 で表す。

表 1: 基準ケースのパラメータ値

	表記	値
発電容量	Q	10
容量市場への売却割合	α	0.5
割引率	r	0.06
電力価格の期待変化率	μ_P	0.01
電力価格のボラティリティー	σ_P	0.5
電力価格のジャンプ強度	λ_P	0.1
電力価格のジャンプサイズの期待値	μ_{Z^P}	0.2
容量価格の期待変化率	μ_X	0.01
容量価格のボラティリティー	σ_X	0.5
容量価格のジャンプ強度	λ_X	0.1
容量価格のジャンプサイズの期待値	μ_{Z^X}	0.2
電力価格と容量価格の相関係数	ρ	0.6
操業費用	C	1
固定費用	F	10
発電容量 1 単位当たりの価格	b	10

価格のボラティリティー

価格のボラティリティーσ_j $(j = \{P, K\})$ に関する感度分析の結果（図 2）から，次のことが示される。電力価格と容量価格の初期値の組み合わせとして，$(p, x) = (7, 10)$ を用いて考察する。電力価格のボラティリティσ_P が上昇するにつれて，電力価格の閾値 $\bar{p}$ と容量価格の閾値 $\bar{x}$ は共に大

[3]第 2 節では，各変数やパラメータの単位が示されているが，本計算では主に感度分析が目的であるため，各パラメータの単位については留意せず，無次元量として計算している。実際の単位，数値を用いた分析は今後の課題とする。

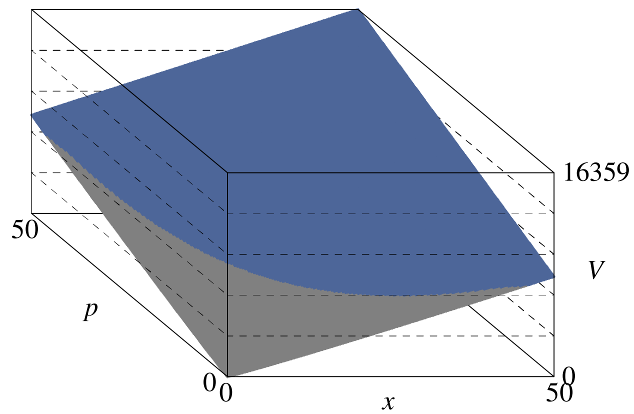
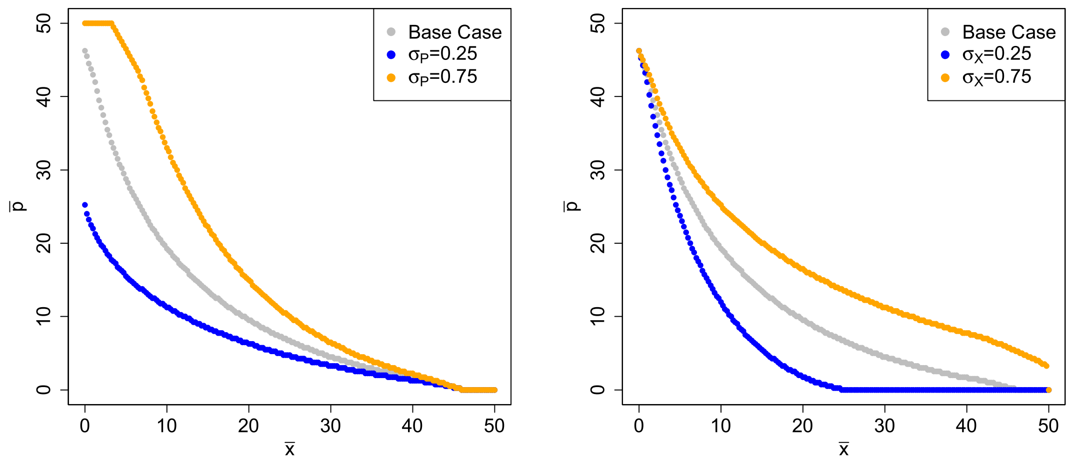


図 1: 価値関数 $V(p,x)$

灰色の部分が続行領域の価値関数の値を，青色の部分が停止領域の価値関数の値を表す。

きくなり，発電容量への投資が抑制される。また，変化の程度は，電力価格のボラティリティが直接影響する電力価格の閾値の方が大きい。容量価格のボラティリティについても，ボラティリティーが大きくなるにつれて両閾値は大きくなり，発電容量への投資が抑制される。変化の程度についても，容量価格のボラティリティが直接影響する容量価格の閾値の方が大きくなり，電力価格のボラティリティに対する感度分析と同様の結果が得られた。



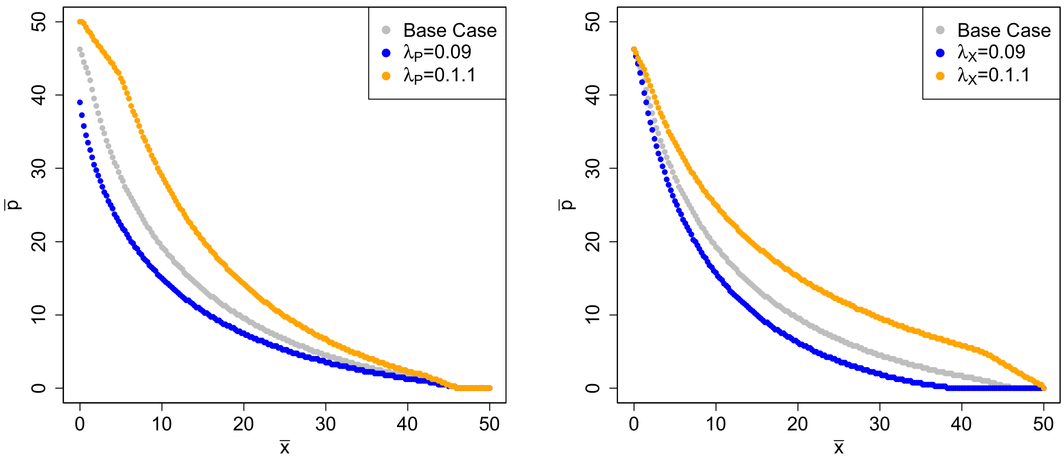
(a) 電力価格のボラティリティσ_P　　(b) 容量価格のボラティリティσ_X

図 2: 価格のボラティリティーに関する感度分析

価格のジャンプ強度

ジャンプ強度 λ_j $(j = \{P, X\})$ についても，電力価格と容量価格の初期値の組み合わせとして，$(p,x) = (7,10)$ を用いて考察しよう。図 3 によると，電力価格のジャンプ強度 λ_P が大きくなると，電力価格の閾値と容量価格の閾値は共に大きくなり，発電容量への投資が抑制される。変化の程

度は，電力価格のジャンプ強度が直接影響する電力価格の閾値の方が大きい。容量価格のジャンプ強度 λX についても，強度が大きくなるにつれて両閾値は大きくなり，発電容量への投資が抑制される。また，変化の程度についても，容量価格がジャンプ強度が直接影響する容量価格の閾値の方が大きくなり，電力価格のジャンプ強度の感度分析と同様の結果が得られた。



(a) 電力価格のジャンプ強度 λ_P　　(b) 容量価格のジャンプ強度 λ_X

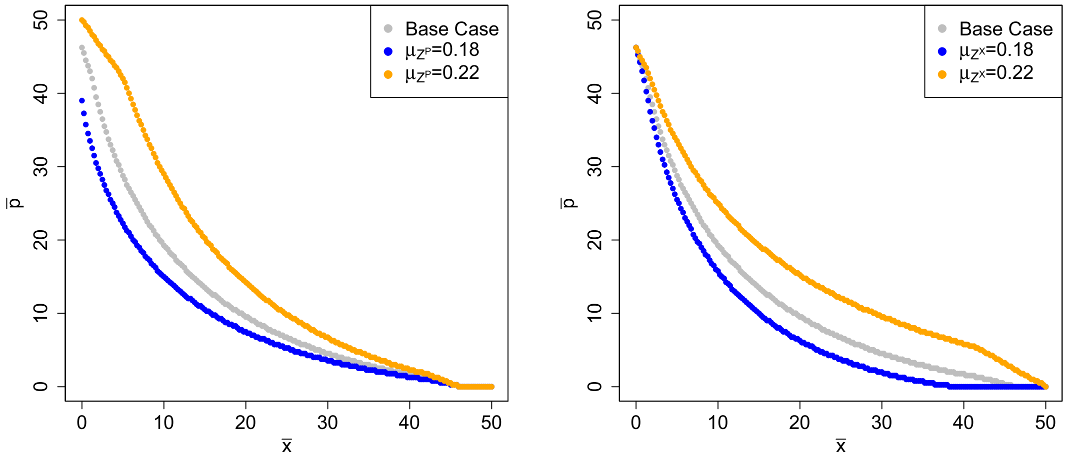
図 3: ジャンプ強度に関する感度分析

価格のジャンプサイズの期待値

価格のジャンプサイズの期待値 μ_{Zj} $(j = \{P, X\})$ についても，電力価格と容量価格の初期値の組み合わせとして，$(p, x) = (7, 10)$ を用いて考察する。図 3 で示されるように，価格のボラティリティとジャンプ強度と同様の結果が得られた。すなわち，ジャンプサイズの期待値が大きくなるに従い，両閾値も大きくなり，発電容量への投資が抑制される。また，図 3 と図 4 を見比べると分かるように，同じ結果が得られている。このことは，価値関数 V が電力価格 P と容量価格 X に関して線形となるためである。例えば，ジャンプサイズの期待値が大きくなる場合は，ジャンプ強度とジャンプサイズの期待値の積は，$0.022(= 0.1 \times 0.22)$ となる。一方，ジャンプ強度が大きくなる場合は，ジャンプ強度とジャンプサイズの期待値の積は，$0.022(= 0.11 \times 0.2)$ となる。したがって，ジャンプサイズの期待値の変化率とジャンプ強度の変化率が同じ場合は，同じ感度分析の結果が得られる。

容量市場への売却割合

容量市場への売却割合 α については，閾値の変化の見やすさの観点から，電力価格と容量価格の初期値の組み合わせとして，$(p, x) = (7, 7)$ を用いて考察する。図 5 に示されているように，容量市場への売却割合が高い場合（$\alpha = 0.7$）と基準値の場合（$\alpha = 0.5$）に，閾値を組み合わせた軌跡は $(\bar{p}, \bar{x}) = (11.75, 17)$ で交差している。一方，容量市場への売却割合が低い場合（$\alpha = 0.3$）と基準値の場合に，閾値を組み合わせた軌跡は $(\bar{p}, \bar{x}) = (17.25, 11.5)$ で交差している。この時，容量市場への売却割合が高まると，容量価格の閾値 $\bar{x}$ は基準ケースより低下し，容量への投資を促す影



(a) μ_{Z^P}　　(b) μ_{Z^X}

図 4: ジャンプサイズの期待値に関する感度分析

響を受ける。一方，電力価格の閾値 $\bar{p}$ は基準ケースより高まり，容量への投資を抑制する影響を受ける。この結果は，容量市場への売却割合が高まると，容量市場から得られる利益の割合が高まることから，容量価格が相対的に低くても総額としての利益を得られるためと考えられる。電力価格については，電力市場への売却割合が低下することから，利益を得るためには相対的に高い電力価格が必要とされるため，電力価格の閾値が高まると考えられる。容量市場への売却割合が低下する場合は，逆の効果がそれぞれ得られる。

価格の相関係数

価格の相関係数 ρ については，価格のボラティリティなどど同様に，電力価格と容量価格の初期値の組み合わせとして，$(p, x) = (7, 10)$ を用いて考察する。図 6 によると，相関係数が高くなるに従い，電力価格の閾値 $\bar{p}$ と容量価格の閾値 $\bar{x}$ の双方ともに低下し，発電容量への投資を促すことが示された。

5　まとめ

本研究は，リアルオプション・アプローチを用いて，電力市場価格と容量価格のジャンプリスクを考慮し，発電容量投資に対する評価モデルを構築した。発電事業者の問題は，発電容量へ投資する最適な時刻を求める問題として発定式化され，変分不等式を数値的に解くことで，投資の閾値を求めた。さらに，いくつかのパラメータについて感度分析を行い，投資の意思決定に対する示唆を明らかにした。主な結果として，価格のボラティリティ，ジャンプ強度やサイズが大きくなるにつれて，投資の閾値も大きくなり，投資を抑制する事が示された。また，容量市場への売却割合が大きくなるにつれて，容量価格の閾値は小さくなるが，電力価格の閾値は大きくなることが示され，両価格の組み合わせによって，投資が促される場合と抑制される場合があることが

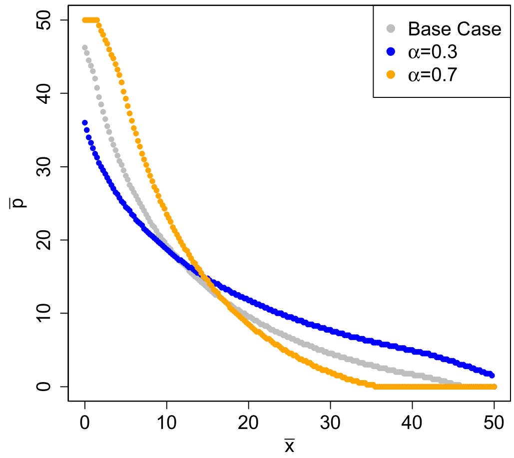


図 5: 容量市場への売却割合に関する感度分析

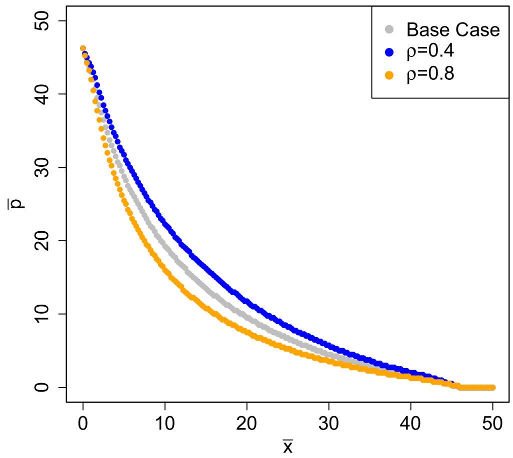


図 6: 価格の相関係数に関する感度分析

示された。

本稿で残された課題として，解の最適性についての議論がある (Øksendal and Sulem, 2019)。また，本稿で用いたパラメータ値は全て仮想的な値であるが，プロジェクトを特定化することで，より現実的な値を用いた分析が可能である。本研究の拡張としては，価格の上限など実際の容量市場の制度を反映させたモデル構築が挙げられる。

参考文献

Aïd, R., L. Li, and M. Ludkovski(2017): Capacity expansion games with application to competition in power generation investments, *Journal of Economic Dynamics and Control*, **84**, 1–31.

Batlle, C. and I. J. Pérez-Arriaga (2008): Design criteria for implementing a capacity mechanism in deregulated electricity markets, *Utilities Policy*, **16**(3), 184–193.

Brøndbo, H. K., A. Storebø, T. K. Boomsma, C. Skar, S.-E. Fleten (2020): A real options approach to generation capacity expansion in imperfectly competitive power markets, *Energy Systems*, **11**(3), 515–550.

Chassagneux, J.-F., H. Chotai, and D. Crisan (2022): Modelling Multiperiod Carbon Markets Using Singular Forward-Backward SDEs, *Mathematics of Operations Research*, forthcoming.

de Moraes Marreco, J. and L. G. T. Carpio (2006): Flexibility valuation in the Brazilian power system: A real options approach, *Energy Policy*, **34**(18), 3749–3756.

Feng, X. and Lewis, T. (2021): A Narrow-stencil Finite Difference Method for Approximating Viscosity Solutions of Hamilton–Jacobi–Bellman Equations, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **59**(2), 886–924.

Ferrari, G. and P. Salminen (2016): Irreversible investment under Lévy uncertainty: An equation for the optimal boundary, *Advances in Applied Probability*, **48**(1), 298–314.

Finon, D. and V. Pignon (2008): Electricity and long-term capacity adequacy: The quest for regulatory mechanism compatible with electricity market, *Utilities policy*, **16**(3), 143–158.

Greenblatt, J. B., S. Succar, D. C. Denkenberger, R. H. Williams, and R. H Socolow (2007): Baseload wind energy: modeling the competition between gas turbines and compressed air energy storage for supplemental generation, *Energy policy*, **35**(3), 1474–1492.

Hach, D. and S. Spinler (2016): Capacity payment impact on gas-fired generation investments under rising renewable feed-in—A real options analysis, *Energy Economics*, **53**, 270–280.

Henriot, A. and J.-M. Glachant (2013): Melting-pots and salad bowls: The current debate on electricity market design for integration of intermittent RES, *Utilities Policy*, **27**, 57–64.

Huang, W., J. Liang, and H. Guo (2021): Optimal Investment Timing for Carbon Emission Reduction Technology with a Jump-Diffusion Process, *SIAM Journal on Control and Optimization*, **59**(5), 4024–4050.

IEA (2016): *Re-Powering Markets: Market Design and Regulation During the Transition to Low-Carbon Power Systems.*

Liang, J., M. Yang, and L. Jiang (2013):, A closed-form solution for the exercise strategy in a real options model with a jump-diffusion process, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, **73**(1), 549–571.

Nunes, C. and R. Pimentel (2017): Analytical solution for an investment problem under uncertainties with shocks, *European Journal of Operational Research*, **259**(3) 1054–1063.

Øksendal, B. and A. Sulem (2019): *Applied Stochastic Control of Jump Diffusions*, 3rd, Springer.

Runggaldier, W. J. (2003): Jump-Diffusion Models, In: Rachev, S. T. (ed), *Handbook of Heavy Tailed Distributions in Finance*, 169-209, North-Holland, Amsterdam.

Wu, X. and Z. Hu (2022): Investment timing and capacity choice in duopolistic competition under a jump-diffusion model, *Mathematics and Financial Economics*, **16**(1) 125–152.

服部徹 (2015): 容量メカニズムの選択と導入に関する考察:不確実性を伴う制度設計への対応策,『電力経済研究』, **61**, 1–16.

資源エネルギー庁 (2016.10): 容量メカニズムについて（2016 年 10 月 31 日）, url) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/kihon_seisaku/denryoku_kaikaku/shijo_seibi/pdf/02_03_00.pdf (閲覧日：2022 年 8 月 10 日).

資源エネルギー庁 (2021): エネルギー基本計画（2021 年 10 月）, url) https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf (閲覧日：2022 年 8 月 10 日).

資源エネルギー庁 (2022): 『令和 3 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2022)』.

資源エネルギー庁 (2022.10): 安定供給に必要な供給力の確保について（2022 年 10 月 17 日）, url) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/054_04_01.pdf (閲覧日：2022 年 11 月 15 日).

高野祐人・高嶋隆太 (2015): 電力市場における容量メカニズムと電源投資, 『数理解析研究所講究録』**1933**, 184–192.

辻村元男 (2022): 不確実性下における経済主体の問題を解く確率制御の概観, 『同志社商学』**74**(2), 189–217.

辻村元男 (2023): 電力市場と容量市場における価格の曖昧性を考慮した火力発電容量への投資価値評価, 『社会科学』**52**(4), 近刊.