

リスク下における長期脱炭素電源オークションを考慮した風力発電の価値評価*

同志社大学・商学研究科 辻村元男[†]

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科 吉岡秀和

概要

本研究は長期脱炭素電源オークションを考慮した風力発電への投資について、リアルオプション・アプローチを用いて考察する。長期脱炭素電源オークションは、脱炭素電源投資を促進させる目的で、容量市場の一部として導入された。この制度が脱炭素電源の一つである風力発電の価値に与える影響を分析する。そのために、発電事業者の風力発電所への投資問題を最適停止問題として定式化する。

キーワード: リアルオプション, 風力発電, 長期脱炭素電源オークション, 最適停止

1 はじめに

電力の安定供給に懸念がもたれており、発電容量を確保するために、2020年に日本でも容量市場が導入された(資源エネルギー庁, 2022.10.17)。さらに、カーボンニュートラルの目標を達成すべく、発電事業者は長期固定収入を確保させ、脱炭素電源への投資を促進させる目的で、容量市場の一部として長期脱炭素電源オークションが2023年に導入され、2024年1月に第1回オークションが実施された。容量市場を含む容量メカニズムの詳細については、服部(2015)を参照されたい。

2021年に策定された第6次エネルギー基本計画(資源エネルギー庁, 2021)によると、2030年度の電源構成に占める再エネ電源の割合は36~38%程度とされた。そのうち、風力発電の目標は5%であるが、2022年度実績は0.9%に過ぎず(資源エネルギー庁, 2024.5.29)、今後も導入が進むと考えられる。

本研究は長期脱炭素電源オークションの対象電源の1つである風力発電の価値評価について考察する。これまでも風力発電の価値評価は、Verdejo et al. (2016), Loukatou et al. (2018), Aquila et al. (2020)などで行われてきた。これらの研究に加え、Wesseh and Lin (2016)は風力発電に固定価格買い取り制度(feed in tariff: FIT)も考慮した価値評価を行い、Loukatou et al. (2021)は風力発電に蓄電池も考慮した価値評価を行った。一方、本研究は日本の長期脱炭素電源オークションを考慮した風力発電所の価値評価について考察する。発電事業者は風力、電力価格の変動リスクに加え、長期脱炭素電源オークションによって決まる容量価格の変動リスクに晒されており、風力発電所への投資について、いつ投資をすべきかという問題に直面している。この問題をリアル

*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

オプションアプローチを用いて考察する。より詳しくは、いつ風力発電所に投資するかという最適停止問題を考察する。

2 発電事業者の問題

発電事業者は、総発電容量 K [MW] の風力発電所への投資を検討している。投資費用は MW (Mega Watt) 単位当たり費用を k [百万円/MW] とする。風力発電機の出力曲線 $Q(W)$ は、Karki et al. (2006), Loukatou et al. (2018, 2021) などと同様に次のように与えられるとする。

$$Q(W_t) = \begin{cases} (A + BW_t + CW_t^2)q_R, & w_{CI} < W_t \leq w_R \\ q_R, & w_R < W_t \leq w_{CO} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.1)$$

ただし、 W_t [m/s] は風速を、 A, B, C は係数を、 w_{CI} はカットイン風速 [m/s] を、 w_R は定格風速 [m/s] を、 w_{CO} はカットアウト風速 [m/s] を、 q_R は定格出力 [kW] をそれぞれ表す。風車を含めた発電機の耐用年数 ξ は 20 年とする。

発電された電力を電力市場で売電することで得られる利益 $\pi(X_t, W_t)$ は次で与えられる。

$$\pi(X_t, W_t) = (1 - a)X_t Q(W_t)K \quad (2.2)$$

ただし、 a は還付率を表す。長期脱炭素電源オークションを利用した場合は、容量市場以外から得られる収入の内、変動費を除いた純利益の 9 割を電力広域的運営推進機関に還付することになっている。変動費は無視できるほどの少額とし、本研究では変動費をゼロとする。制度の詳細については、電力広域的運営推進機関 (2023.12) を参照されたい。

X_t [円/kWh] は電力価格を表し、Lucia and Schwartz (2002), Loukatou et al. (2021) に従い、対数電力価格が次で与えられるとする。

$$\ln X_t = g_t + v_t \quad (2.3)$$

ただし、 g_t は季節性やトレンドを表し、 v_t は次の平均回帰過程で表されるとする。

$$dv_t = -\kappa_X v_t dt + \sigma_X dZ_t^X \quad (2.4)$$

ただし、 $\kappa_X > 0$ は平均回帰速度を、 $\sigma_X > 0$ はボラティリティーを、 Z_t^X は標準ブラウン運動を表す。以上から、電力価格の振る舞いが次式ように得られる。

$$dX_t = \kappa_X (\gamma_t - \ln X_t) X_t dt + \sigma_X X_t dZ_t^X, \quad X_0 = x > 0 \quad (2.5)$$

ただし、 $\gamma_t = \frac{1}{\kappa_X} \left(\frac{dg_t}{dt} + \frac{1}{2} \sigma_X^2 \right) + g_t$ である。

風速 W_t の振る舞いも電力と同様の確率微分方程式で与えられるとする (Loukatou et al., 2018, 2021)。対数風速は次で与えられる。

$$\ln W_t = f_t + \ell_t \quad (2.6)$$

ただし、 f_t は季節性やトレンドを表し、 ℓ_t は次の平均回帰過程で表されるとする。

$$d\ell_t = -\kappa_W \ell_t dt + \sigma_W dZ_t^W \quad (2.7)$$

ただし、 $\kappa_W > 0$ は平均回帰速度を、 $\sigma_W > 0$ はボラティリティを、 Z_t^W は標準ブラウン運動を表す。ここで、 Z_t^X と Z_t^W は独立であるとする。以上より、風速の挙動は次の確率微分方程式で表されるとする。

$$dW_t = \kappa_W (\beta_t - \ln W_t) W_t dt + \sigma_W W_t dZ_t^W, \quad W_0 = w \geq 0 \quad (2.8)$$

ただし、 $\beta_t = \frac{1}{\kappa_W} \left(\frac{df_t}{dt} + \frac{1}{2} \sigma_W^2 \right) + f_t$ である。

次に、長期脱炭素電源オークションからの収入について見ていく。FIT, FIP (Feed-in Premium)¹ 電源は対象外で、電力の供給期間は 20 年、参加可能な設備容量は 10 万 kW 以上と定められている。また、オークションでの上限価格が定められており、風力発電は 100,000 円/kW/年となっている。他の制度の詳細については、電力広域的運営推進機関 (2023.12) を参照されたい。

長期脱炭素電源オークションの制度は複雑であるため、本稿では上限価格に着目し、容量価格の挙動に反映させる。本稿では分析の第一歩として、オークションで決まる風力発電の容量価格の挙動は有限状態、連続時間の Markov 連鎖に従うとする。簡単化のため、3 状態 ($Y_t = \{Y_L, Y_M, Y_H\}$) とし、各状態の関係は $0 < Y_L < Y_M < Y_H < \bar{Y}_W$ である。ただし、 $\bar{Y}_W$ は上限価格を表す ($\bar{Y}_W = 100$ [百万円/MW/年] (100,000 [円/kW/年])). さらに、簡単化のため、風力発電所への投資されたと同時に長期脱炭素電源オークションでの価格が決まるとする。

以上より、風力発電事業者の問題は、利益の現在価値を最大とするように風力発電所への投資時刻 τ を決定する問題となる。

$$V(t_0, x, w, y) = \sup_{\tau} \mathbb{E} \left[e^{-r\tau} \left(\int_{\tau}^{\tau+\xi} e^{-r(t-\tau)} \pi(X_t, W_t) dt + \sum_{i=0}^{\xi-1} e^{-(r-\alpha)(i-\tau)} Y_{\tau+i} K - kK \right) \right] \quad (2.9)$$

ただし、 $t_0 = 0$, $Y_0 = y$ であり、 r は割引率を、 α は物価調整係数を表す。また、発電所は風力発電の耐用年数を終えたら価値がゼロ、すなわち、 $V(\tau + \xi, X_{\tau+\xi}, W_{\tau+\xi}, Y_{\tau+\xi}) = 0$ とする。

発電事業者の問題 (2.9) は、風力発電所へ投資した後は確定した期間 ($\xi = 20$ 年) 稼働することになっている。停止時刻 (投資時刻) τ に対する期限はなく、一般的な有限期間の最適停止問題とは異なり、分析上の注意が必要である。また、容量市場から得られる収益 $Y_{\tau} K$ は、投資時点 τ で確定している事にも注意が必要である。

3 風速・電力データ

発電事業者の問題 (2.9) を解くために、風速と電力のデータについて見ていこう。例として、データ期間を 2011 年 1 月 1 日から 2023 年 12 月 31 日までの日次データを用いる。風速データは、気象庁の「過去の気象データ検索」² から、日本海側のある地点 A のデータを用いる。電力価格は日

¹FIP 制度は、売電価格に一定のプレミアムを上乗せすることで再エネ導入を促進する制度である。詳しくは、次の資源エネルギー庁のウェブページを参照されたい。URL) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/fip.html>

²URL) <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>

本卸電力取引所（JEPX）³で取引されているスポット市場のシステムプライスを用いる。電力価格の日次データは、スポット市場の30分間隔のデータを用いて、24時間平均を計算して日次データとしている。図1に電力価格の推移を、図2に電力価格のヒストグラムを示した。また、図3に風速の推移を、図4に風速のヒストグラムを示した。

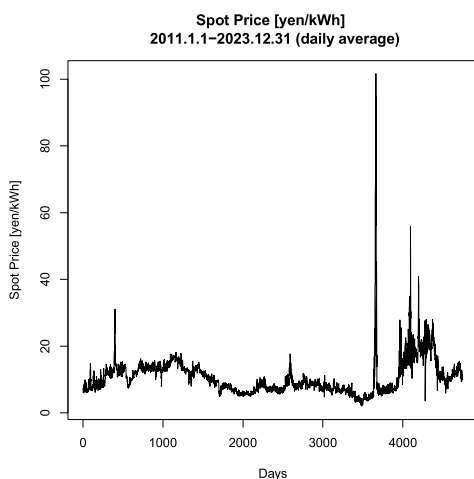


図 1: 電力価格の推移

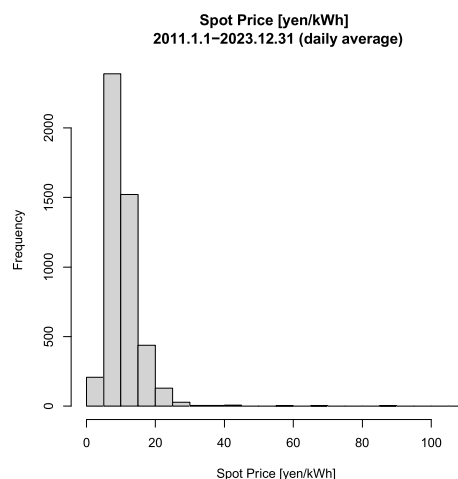


図 2: 電力価格のヒストグラム

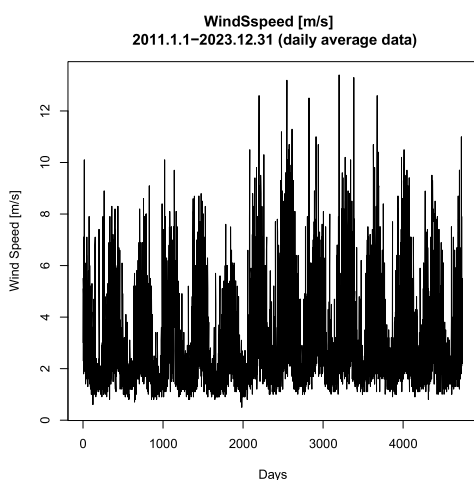


図 3: 風速の推移

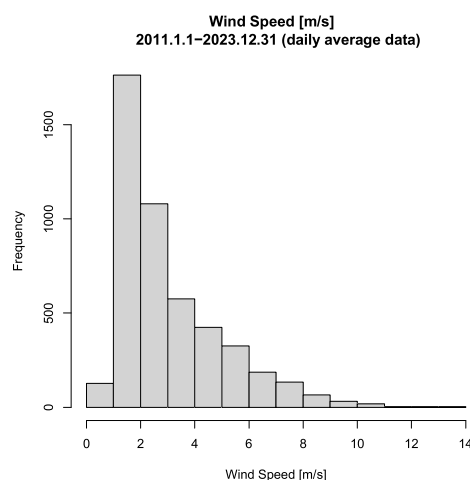


図 4: 風速のヒストグラム

ヒストグラムを見ると電力価格・風速共に正規分布に従っていないことが分かる。そこで、(2.3), (2.6) 式にあるように対数変換を行う。季節性を排除した電力価格と風速のヒストグラムは図 5, 6 のようになる。

季節性を表す g_t , f_t はフーリエ級数で近似する (Verdejo et al., 2016; Loukatou et al., 2018)。

³URL) <https://www.jepx.jp/>

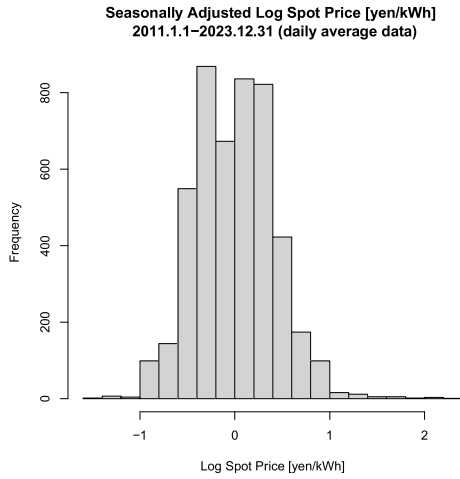


図 5: 調整後電力価格ヒストグラム

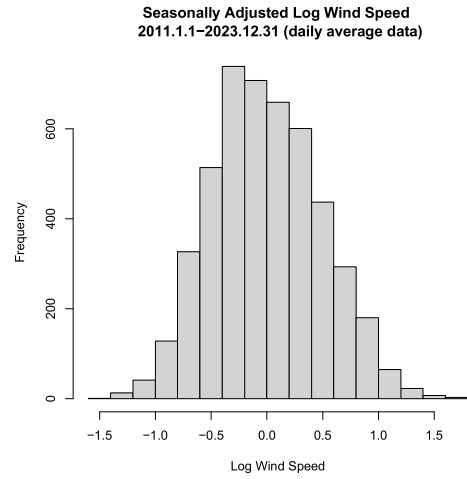


図 6: 調整後風速ヒストグラム

電力価格の季節性を表す g_t は 1 次のフーリエ級数で近似した結果が, (3.1) 式と表 1 である。

$$g_t = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + b_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \quad (3.1)$$

表 1: g_t

Coefficient	Value	p value
a_0	2.265985	0.00000
a_1	0.031634	0.00002
b_1	0.129252	0.00000

2 次以上の係数は有意ではなかった。

風速の季節性を表す f_t も 1 次のフーリエ級数で近似した結果が, (3.2) 式と表 2 である。

$$f_t = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + b_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \quad (3.2)$$

表 2: f_t

Coefficient	Value	p value
a_0	0.961199	0.00000
a_1	0.043297	0.00001
b_1	0.420109	0.00000

2 次以上の係数は有意ではなかった。

(2.4), (2.7) 式に対して, パラメータ κ_X , κ_W , σ_X , σ_W を最尤法を用いて推定すると, $\kappa_X = 0.0394$, $\sigma_X = 0.1146$, $\kappa_W = 0.7051$, $\sigma_W = 0.4666$ と得られた。これまでに, 長期脱炭素電源オークションは1回しか実施されておらず, Y_L , Y_M , Y_H の値や推移確率は仮想的な値を用いる。こうした数値を用いて, 発電事業者の問題 (2.9) を解いて風力発電所の価値を求めることができると考えられる。

4 まとめ

本稿では, 容量市場の一部として導入された長期脱炭素電源オークションを考慮した風力発電所への投資問題を考察した。発電事業者の風力発電所への投資問題を最適停止問題として定式化し, その問題を解くことで風力発電所の価値が求まる。発電事業者の問題は数値的に解かざるを得ず, そのために必要となる電力価格と風速の数値例について紹介した。今後は, これらの数値を用いて発電事業者の問題を解くことが残されている。

参考文献

- Aquila, G., de Queiroz, A.R., Balestrassi, P.P., Junior, P. R., Rocha, L.C.S., Pamplona, E.O., and Nakamura, W.T., 2020. Wind energy investments facing uncertainties in the Brazilian electricity spot market: A real options approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **42**, 100876.
- 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.
- Karki, R., Hu, P., and Billinton, R., 2006. A simplified wind power generation model for reliability evaluation, *IEEE transactions on Energy conversion*, **21**(2), 533–540.
- Loukatou, A., Howell, S., Johnson, P., and Duck, P., 2018. Stochastic wind speed modelling for estimation of expected wind power output, *Applied energy*, **228**, 1328–1340.
- Loukatou, A., Johnson, P., Howell, S., and Duck, P., 2021. Optimal valuation of wind energy projects co-located with battery storage, *Applied Energy*, **283**, 11624.
- Lucia, J. J. and Schwartz, E. S., 2002. Electricity Prices and Power Derivatives: Evidence from the Nordic Power Exchange, *Review of Derivatives Research*, **1**(5), 5–50.
- Verdejo, H., Awerkin, A., Saavedra, E., Kliemann, W., and Vargas, L., 2016. Stochastic modeling to represent wind power generation and demand in electric power system based on real data, *Applied Energy*, **173**, 283–295.

Wesseh Jr, P. K. and Lin, B., 2016. A real options valuation of Chinese wind energy technologies for power generation: do benefits from the feed-in tariffs outweigh costs?, *Journal of Cleaner Production*, **112**, 1591–1599.

電力広域的運営推進機関, 2023.12. 長期脱炭素オークションの制度詳細について（応札年度：2023年度）, URL) https://www.occto.or.jp/market-board/market/files/202309_youryou_syousaisetsumei_long.pdf (閲覧日：2024年9月17日)

資源エネルギー庁, 2021. エネルギー基本計画 URL) https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/ (閲覧日：2024年9月3日)

資源エネルギー庁, 2022. 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：2024年9月3日).

資源エネルギー庁, 2024.5.29. 今後の再生可能エネルギー政策について URL) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/062_01_00.pdf (閲覧日：2024年12月5日).