

不確実性下における再生可能エネルギー割当基準制度での均衡投資戦略

東京理科大学大学院理工学研究科 鴨林 裕太

Yuta Kamobayashi

Graduate school of Science and Technology, Tokyo University of Science

東京理科大学理工学部 高嶋 隆太

Ryuta Takashima

Department of Science and Technology, Tokyo University of Science

政策研究大学院大学 田中 誠

Makoto Tanaka

National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS)

University of California, Merced

Yihsu Chen

1 序論

近年、二酸化炭素に代表される温室効果ガス排出による地球温暖化問題が世界的に大きな関心を集めている。これに伴い、電気事業において、再生可能エネルギーの重要性が高まっており、世界中で様々な普及促進策が実施されている。その代表的な制度として、固定価格買い取り制度 (FIT) と電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法 (RPS) がある。FIT 制度は、再生可能エネルギー源を用いて発電された電力を、国が定める固定価格で一定の期間、非再生可能エネルギー事業者に調達を義務づけるものである。一方、RPS 制度は、電力会社に発電の一定割合を再生可能エネルギーによって発電することを義務づける制度である。RPS 制度の義務の履行方法は自家発電、双務契約を介して再生可能エネルギーによって発電された電力の購入、流通市場からグリーン電力証書 (REC) を購入の3つが存在する。これらの制度は、再生可能エネルギーの導入を促進し、温室効果ガスの排出を抑えることを目的としており、米国を中心に世界中に行われている。

RPS 制度の普及とそれに伴う REC 市場の拡大とともに、制度設計や市場均衡に関する研究が多く行われてきた。Amundsen and Bergman[1] は、北欧諸国における REC 市場と電力市場を分析し、スウェーデンの発電事業者は REC 市場を利用して、市場支配力を行使することを提言している。Fischer[2] は、完全競争下において、RPS 制度を考慮するとき、市場結果を評価する一般的なフレームワークを構築している。Tanaka and Chen[3] は、電力及び REC 市場において、事業者が市場支配力を行使すると仮定することにより、Fischer[2] を拡張し、電力と REC 市場の競争モデルを構築している。Siddiqui et al.[4] は、事業者の戦略的行動を反映する (寡占) かない (完全競争) かによる社会厚生への RPS の影響を分析している。

これらの先行研究において、RPS 制度による競争の影響について考えてはいるが、現実的な企業数の影響や将来の不確実性は考慮していない。また、企業行動や市場均衡に関する研究では、再

生可能エネルギーへの投資を考えたモデルは、ほとんど見受けられない。以上のことから、本研究は、企業数、将来の電力価格の不確実性、投資を考慮したモデルの構築を行う。これにより、企業数の変化による市場結果への影響や RPS の要求割合による投資の意思決定への影響を分析することを本研究の目的とする。

2 モデル

本章では、構築したモデルを紹介する。本研究では、RPS 制度を考慮した電力市場におけるクールノー競争モデルを構築する。また、将来の投資を考慮し、時点 0 及び時点 1 の 2 期間が存在するとする。REC 市場が存在し、REC 価格は内生的に決定される。将来の電力及び REC の価格は不確実であるとし、時点 1 の電力価格の逆需要関数の切片 $\tilde{a}_1$ は対数正規分布 $\text{LN}(\mu, \sigma^2)$ に従うとする。また、時点 0 の逆需要関数の切片 a_0 と時点 1 の逆需要関数の切片 $\tilde{a}_1$ の期待値は等しい、つまり、 $a_0 = \mathbb{E}[\tilde{a}_1]$ とする。投資は時点 1 にのみ行えらるとし、その意思決定は時点 1 の利潤の期待値が正になるときに行うとする。

2.1 各企業が対称

本節では各企業が対称であると仮定した場合のモデルを示す。ここでは、市場に再生可能エネルギー事業者と非再生可能エネルギー事業者がそれぞれ 1 社ずつ存在する場合と再生可能エネルギー事業者が N 社、非再生可能エネルギー事業者が M 社存在する場合を示す。 p_t , p_t^{REC} をそれぞれ時点 t における電力価格、REC 価格とする。また、 q_t^k , c_t^k をそれぞれ時点 t における発電量、変動費とする。 I^k を投資費用とする。ここで、 k は企業の種類を表しており、 $k = r$ のとき、再生可能エネルギー事業者、 $k = n$ のとき、非再生可能エネルギー事業者を表している。 α , β をそれぞれ RPS 要求割合、割引係数とする。

2.1.1 再生可能エネルギー事業者が 1 社、非再生可能エネルギー事業者が 1 社の場合

逆需要関数を、

$$\begin{aligned} p_0 &= a_0 - b(q_0^r + q_0^n) \\ p_1 &= \tilde{a}_1 - b(q_1^r + q_1^n) \end{aligned} \quad (2.1)$$

と設定する。各企業の利潤関数は、

$$\begin{aligned} \pi_0^r &= [p_0 - c_0^r + (1 - \alpha)p_0^{REC}] q_0^r \\ \pi_1^r &= [p_1 - c_1^r + (1 - \alpha)p_1^{REC}] q_1^r - I^r \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \pi_0^n &= (p_0 - c_0^n - \alpha p_0^{REC}) q_0^n \\ \pi_1^n &= (p_1 - c_1^n - \alpha p_1^{REC}) q_1^n - I^n \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表される。各企業の総利潤関数は、

$$\Pi^r = \pi_0^r + \beta \pi_1^r \quad (2.4)$$

$$\Pi^n = \pi_0^n + \beta \pi_1^n \quad (2.5)$$

と表される。各企業の最適応答関数は、

$$q_1^r = \frac{\tilde{a}_1 - c_1^r + (1 - \alpha) p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2} q_1^n \quad (2.6)$$

$$q_1^n = \frac{\tilde{a}_1 - c_1^n - \alpha p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2} q_1^r \quad (2.7)$$

と求められる。REC 市場における均衡条件は、

$$q_1^r - \alpha (q_1^r + q_1^n) = 0 \quad (2.8)$$

のように表せることから、(2.6)、(2.7)、(2.8) 式を解くことによって、

$$q_1^{r*} = \frac{\alpha}{2b(\alpha^2 - \alpha + 1)} [\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)] \quad (2.9)$$

$$q_1^{n*} = \frac{1 - \alpha}{2b(\alpha^2 - \alpha + 1)} [\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)] \quad (2.10)$$

のように、クールノー・ナッシュ均衡が得られる。さらに、REC 及び電力の均衡価格は、

$$p_1^{REC*} = \frac{(\alpha - 2) (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (\alpha + 1) (\tilde{a}_1 - c_1^n)}{2(\alpha^2 - \alpha + 1)} \quad (2.11)$$

$$p_1^* = \tilde{a}_1 - \frac{\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)}{2(\alpha^2 - \alpha + 1)} \quad (2.12)$$

と求められる。これらより、各企業の最適利潤は、

$$\begin{aligned} \Pi^{r*} &= [p_0 - c_0^r + (1 - \alpha) p_0^{REC}] q_0^r \\ &+ \beta \left[\frac{\alpha^2 [\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)]^2}{4b(\alpha^2 - \alpha + 1)^2} - I^r \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \Pi^{n*} &= (p_0 - c_0^n - \alpha p_0^{REC}) q_0^n \\ &+ \beta \left[\frac{(1 - \alpha)^2 [\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)]^2}{4b(\alpha^2 - \alpha + 1)^2} - I^n \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

のように得られる。

次に、投資の閾値を求める。前述したように、時点1の利潤の期待値が正、すなわち、 $\mathbb{E}[\pi^{k*}] > 0$ のとき投資を行う。再生可能エネルギー事業者の投資の閾値は、 $\mathbb{E}[\pi^{r*}] > 0$ より、

$$\sqrt{\frac{4b(\alpha^2 - \alpha + 1)^2 I^r}{\alpha^2}} - V[\tilde{a}_1] - \{b(q_0^r + q_0^n) - [\alpha c_1^r + (1 - \alpha) c_1^n]\} < P_0 \quad (2.15)$$

と求められる。同様に、非再生可能エネルギー事業者の投資の閾値は、 $\mathbb{E}[\pi^{n*}] > 0$ より、

$$\sqrt{\frac{4b(\alpha^2 - \alpha + 1)^2 I^n}{(1 - \alpha)^2}} - V[\tilde{a}_1] - \{b(q_0^r + q_0^n) - [\alpha c_1^r + (1 - \alpha) c_1^n]\} < P_0 \quad (2.16)$$

と求められる。

2.1.2 再生可能エネルギー事業者が N 社, 非再生可能エネルギー事業者が M 社の場合

逆需要関数を,

$$\begin{aligned} p_0 &= a_0 - b(Nq_0^r + Mq_0^n) \\ p_1 &= \tilde{a}_1 - b(Nq_1^r + Mq_1^n) \end{aligned} \quad (2.17)$$

と設定する。各企業の利潤関数は,

$$\begin{aligned} \pi_0^r &= [p_0 - c_0^r + (1 - \alpha)p_0^{REC}] q_0^r \\ \pi_1^r &= [p_1 - c_1^r + (1 - \alpha)p_1^{REC}] q_1^r - I^r \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \pi_0^n &= (p_0 - c_0^n - \alpha p_0^{REC}) q_0^n \\ \pi_1^n &= (p_1 - c_1^n - \alpha p_1^{REC}) q_1^n - I^n \end{aligned} \quad (2.19)$$

と表される。各企業の総利潤関数は,

$$\Pi^r = \pi_0^r + \beta \pi_1^r \quad (2.20)$$

$$\Pi^n = \pi_0^n + \beta \pi_1^n \quad (2.21)$$

と表される。各企業の最適応答関数は,

$$q_1^r = \frac{\tilde{a}_1 - c_1^r + (1 - \alpha)p_1^{REC}}{2bN} - \frac{M}{2N}q_1^n \quad (2.22)$$

$$q_1^n = \frac{\tilde{a}_1 - c_1^n - \alpha p_1^{REC}}{2bM} - \frac{N}{2M}q_1^r \quad (2.23)$$

と求められる。REC 市場における均衡条件は,

$$Nq_1^r - \alpha(Nq_1^r + Mq_1^n) = 0 \quad (2.24)$$

のように表せることから, (2.22), (2.23), (2.24) 式を解くことによって,

$$q_1^{r*} = \frac{\alpha}{2bN(\alpha^2 - \alpha + 1)} [\alpha(\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha)(\tilde{a}_1 - c_1^n)] \quad (2.25)$$

$$q_1^{n*} = \frac{1 - \alpha}{2bM(\alpha^2 - \alpha + 1)} [\alpha(\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha)(\tilde{a}_1 - c_1^n)] \quad (2.26)$$

のように, クールノー・ナッシュ均衡が得られる。これは, (2.9), (2.10) 式の結果をそれぞれの企業数で割ったものとなった。そして, REC 及び電力の均衡価格は,

$$p_1^{REC*} = \frac{(\alpha - 2)(\tilde{a}_1 - c_1^r) + (\alpha + 1)(\tilde{a}_1 - c_1^n)}{2(\alpha^2 - \alpha + 1)} \quad (2.27)$$

$$p_1^* = \tilde{a}_1 - \frac{\alpha(\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha)(\tilde{a}_1 - c_1^n)}{2(\alpha^2 - \alpha + 1)} \quad (2.28)$$

と求められる。これは、前節と同様の結果が得られた。これらより、各企業の最適利潤は、

$$\begin{aligned} \Pi^{r*} = & [p_0 - c_0^r + (1 - \alpha) p_0^{REC}] q_0^r \\ & + \beta \left[\frac{\alpha^2 [\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)]^2}{4bN (\alpha^2 - \alpha + 1)^2} - I^r \right] \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \Pi^{n*} = & (p_0 - c_0^n - \alpha p_0^{REC}) q_0^n \\ & + \beta \left[\frac{(1 - \alpha)^2 [\alpha (\tilde{a}_1 - c_1^r) + (1 - \alpha) (\tilde{a}_1 - c_1^n)]^2}{4bM (\alpha^2 - \alpha + 1)^2} - I^n \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

のように得られる。

次に、投資の閾値を求める。前節と同様に、再生可能エネルギー事業者の投資の閾値は、 $\mathbb{E}[\pi^{r*}] > 0$ より、

$$\sqrt{\frac{4bN (\alpha^2 - \alpha + 1)^2 I^r}{\alpha^2}} - V[\tilde{a}_1] - \{b(q_0^r + q_0^n) - [\alpha c_1^r + (1 - \alpha) c_1^n]\} < P_0 \quad (2.31)$$

と求められる。同様に、非再生可能エネルギー事業者の投資の閾値は、 $\mathbb{E}[\pi^{n*}] > 0$ より、

$$\sqrt{\frac{4bM (\alpha^2 - \alpha + 1)^2 I^n}{(1 - \alpha)^2}} - V[\tilde{a}_1] - \{b(q_0^r + q_0^n) - [\alpha c_1^r + (1 - \alpha) c_1^n]\} < P_0 \quad (2.32)$$

と求められる。

2.2 各企業が非対称

本節では各企業が非対称であると仮定した場合のモデルを示す。ここでは、市場に再生可能エネルギー事業者が2社、非再生可能エネルギー事業者が1社存在する場合と再生可能エネルギー事業者が1社、非再生可能エネルギー事業者が2社存在する場合を示す。 p_t , p_t^{REC} を前節と同様に、それぞれ時点 t における電力価格、REC価格とする。 $q_{i,t}^r$, $c_{i,t}^r$ をそれぞれ再生可能エネルギー事業者 i の時点 t における発電量、変動費とする。 $q_{j,t}^n$, $c_{j,t}^n$ をそれぞれ非再生可能エネルギー事業者 j の時点 t における発電量、変動費とする。 I_i^r を再生可能エネルギー事業者 i の投資費用、 I_j^n を非再生可能エネルギー事業者 j の投資費用とする。 α , β を前節と同様に、それぞれRPS要求割合、割引係数とする。

2.2.1 再生可能エネルギー事業者が2社、非再生可能エネルギー事業者が1社の場合

逆需要関数を、

$$\begin{aligned} p_0 &= a_0 - b(q_{1,0}^r + q_{2,0}^r + q_{1,0}^n) \\ p_1 &= \tilde{a}_1 - b(q_{1,1}^r + q_{2,1}^r + q_{1,1}^n) \end{aligned} \quad (2.33)$$

と設定する。各企業の利潤関数は、

$$\begin{aligned}\pi_{i,0}^r &= [p_0 - c_{i,0}^r + (1 - \alpha) p_0^{REC}] q_{i,0}^r \\ \pi_{i,1}^r &= [p_1 - c_{i,1}^r + (1 - \alpha) p_1^{REC}] q_{i,1}^r - I_i^r\end{aligned}\quad (2.34)$$

$$\begin{aligned}\pi_{j,0}^n &= (p_0 - c_{j,0}^n - \alpha p_0^{REC}) q_{j,0}^n \\ \pi_{j,1}^n &= (p_1 - c_{j,1}^n - \alpha p_1^{REC}) q_{j,1}^n - I_j^n\end{aligned}\quad (2.35)$$

と表される。各企業の総利潤関数は、

$$\Pi_i^r = \pi_{i,0}^r + \beta \pi_{i,1}^r \quad (2.36)$$

$$\Pi_j^n = \pi_{j,0}^n + \beta \pi_{j,1}^n \quad (2.37)$$

と表される。各企業の最適応答関数は、

$$q_{1,1}^r = \frac{\tilde{a}_1 - c_{1,1}^r + (1 - \alpha) p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2} (q_{2,1}^r + q_{1,1}^n) \quad (2.38)$$

$$q_{2,1}^r = \frac{\tilde{a}_1 - c_{2,1}^r + (1 - \alpha) p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2} (q_{1,1}^r + q_{1,1}^n) \quad (2.39)$$

$$q_{1,1}^n = \frac{\tilde{a}_1 - c_{1,1}^n - \alpha p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2} (q_{1,1}^r + q_{2,1}^r) \quad (2.40)$$

と求められる。REC 市場における均衡条件は、

$$q_{1,1}^r + q_{2,1}^r - \alpha (q_{1,1}^r + q_{2,1}^r + q_{1,1}^n) = 0 \quad (2.41)$$

のように表せることから、(2.38)–(2.41) 式を解くことによって、

$$q_{1,1}^{r*} = \frac{2(\alpha^2 - \alpha + 1)A - (\alpha^2 - 2\alpha + 2)B + \alpha(1 - \alpha)C}{(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)b} \quad (2.42)$$

$$q_{2,1}^{r*} = \frac{-(\alpha^2 - 2\alpha + 2)A + 2(\alpha^2 - \alpha + 1)B + \alpha(1 - \alpha)C}{(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)b} \quad (2.43)$$

$$q_{1,1}^{n*} = \frac{(1 - \alpha)[\alpha(A + B) + 2(1 - \alpha)C]}{(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)b} \quad (2.44)$$

のように、クールノー・ナッシュ均衡が得られる。但し、

$$A = \tilde{a}_1 - c_{1,1}^r$$

$$B = \tilde{a}_1 - c_{2,1}^r$$

$$C = \tilde{a}_1 - c_{1,1}^n$$

である。さらに、REC 及び電力の均衡価格は、

$$p_1^{REC*} = \frac{(\alpha - 2)(A + B) + (\alpha + 2)C}{3\alpha^2 - 4\alpha + 4} \quad (2.45)$$

$$p_1^* = \tilde{a}_1 - \frac{\alpha(A + B) + 2(1 - \alpha)C}{3\alpha^2 - 4\alpha + 4} \quad (2.46)$$

と求められる。

2.2.2 再生可能エネルギー事業者が1社、非再生可能エネルギー事業者が2社の場合

逆需要関数を,

$$\begin{aligned} p_0 &= a_0 - b(q_{1,0}^r + q_{1,0}^n + q_{2,0}^n) \\ p_1 &= \tilde{a}_1 - b(q_{1,1}^r + q_{1,1}^n + q_{2,1}^n) \end{aligned} \quad (2.47)$$

と設定する。各企業の利潤関数は,

$$\begin{aligned} \pi_{i,0}^r &= [p_0 - c_{i,0}^r + (1 - \alpha)p_0^{REC}] q_{i,0}^r \\ \pi_{i,1}^r &= [p_1 - c_{i,1}^r + (1 - \alpha)p_1^{REC}] q_{i,1}^r - I_i^r \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \pi_{j,0}^n &= (p_0 - c_{j,0}^n - \alpha p_0^{REC}) q_{j,0}^n \\ \pi_{j,1}^n &= (p_1 - c_{j,1}^n - \alpha p_1^{REC}) q_{j,1}^n - I_j^n \end{aligned} \quad (2.49)$$

と表される。各企業の総利潤関数は,

$$\Pi_i^r = \pi_{i,0}^r + \beta \pi_{i,1}^r \quad (2.50)$$

$$\Pi_j^n = \pi_{j,0}^n + \beta \pi_{j,1}^n \quad (2.51)$$

と表される。各企業の最適応答関数は,

$$q_{1,1}^r = \frac{\tilde{a}_1 - c_{1,1}^r + (1 - \alpha)p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2}(q_{1,1}^n + q_{2,1}^n) \quad (2.52)$$

$$q_{1,1}^n = \frac{\tilde{a}_1 - c_{1,1}^n - \alpha p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2}(q_{1,1}^r + q_{2,1}^n) \quad (2.53)$$

$$q_{2,1}^n = \frac{\tilde{a}_1 - c_{2,1}^n - \alpha p_1^{REC}}{2b} - \frac{1}{2}(q_{1,1}^r + q_{1,1}^n) \quad (2.54)$$

と求められる。REC 市場における均衡条件は,

$$q_{1,1}^r - \alpha(q_{1,1}^r + q_{1,1}^n + q_{2,1}^n) = 0 \quad (2.55)$$

のように表せることから, (2.52)–(2.55) 式を解くことによって,

$$q_{1,1}^{r*} = \frac{(1 - \alpha)[2\alpha A + (1 - \alpha)(B + C)]}{(3\alpha^2 - 2\alpha + 3)b} \quad (2.56)$$

$$q_{1,1}^{n*} = \frac{\alpha(1 - \alpha)A + 2(\alpha^2 - \alpha + 1)B - (\alpha^2 + 1)C}{(3\alpha^2 - 2\alpha + 3)b} \quad (2.57)$$

$$q_{2,1}^{n*} = \frac{\alpha(1 - \alpha)A - (\alpha^2 + 1)B + 2(\alpha^2 - \alpha + 1)C}{(3\alpha^2 - 2\alpha + 3)b} \quad (2.58)$$

のように, クールノー・ナッシュ均衡が得られる。但し,

$$A = \tilde{a}_1 - c_{1,1}^r$$

$$B = \tilde{a}_1 - c_{1,1}^n$$

$$C = \tilde{a}_1 - c_{2,1}^n$$

である。さらに、REC 及び電力の均衡価格は、

$$p_1^{REC*} = \frac{(\alpha - 3)A + (\alpha + 1)(B + C)}{3\alpha^2 - 2\alpha + 3} \quad (2.59)$$

$$p_1^* = \tilde{a}_1 - \frac{2\alpha A + (1 - \alpha)(B + C)}{3\alpha^2 - 2\alpha + 3} \quad (2.60)$$

と求められる。

3 数値分析

本節では、2.1 節のモデル、つまり、各企業が対称の場合のモデルを用いて数値分析を行った結果を示す。用いるパラメータは、表 1 に示す。

表 1: 分析に用いるパラメータ

c_t^r [\$/MWh]	30	P_0^{REC} [\$/MWh]	30
c_t^n [\$/MWh]	10	β	$\frac{1}{1.02}$
I^r [\$/MWh]	5000	a_0	100
I^n [\$/MWh]	2000	b	0.01
q_0^r [MW]	1000	μ	4.6
q_0^n [MW]	1500	σ	0.05

3.1 RPS 要求割合の影響

本節では、RPS 要求割合の影響を考察する。

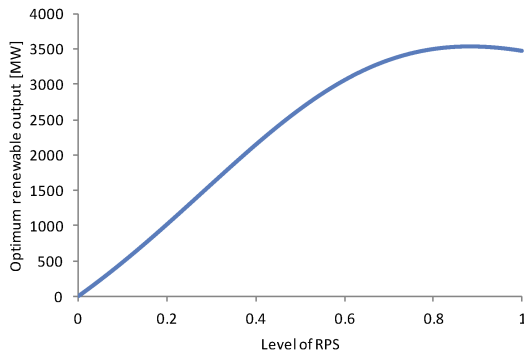


図 1: RPS 要求割合の q_1^{r*} への影響

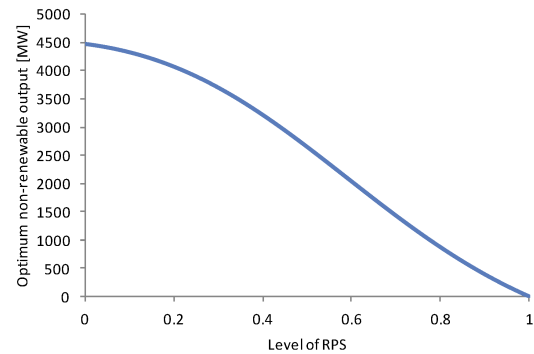


図 2: RPS 要求割合の q_1^{n*} への影響

図 1, 2 より、再生可能エネルギー事業者の発電量は凹曲面を描き、非再生可能エネルギー事業者の発電量は規制が厳しくなるにしたがい単調減少となる。これは、先行研究である Tanaka and Chen[3] と同様の結果を示している。

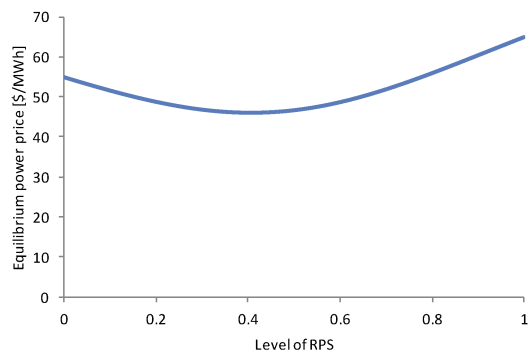
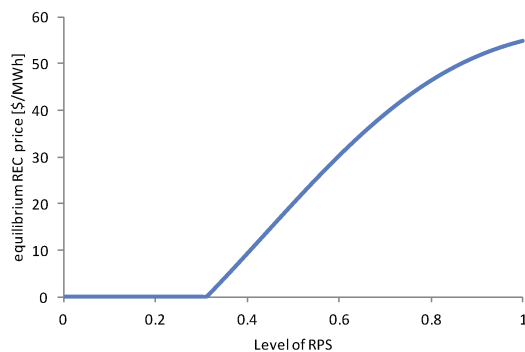
図 3: RPS 要求割合の P_1^* への影響図 4: RPS 要求割合の P_1^{REC*} への影響

図 3, 4 より, 電力価格は凸曲面を描き, REC 価格は規制が厳しくなるにしたがい, ある点を境に上昇していることがわかる.

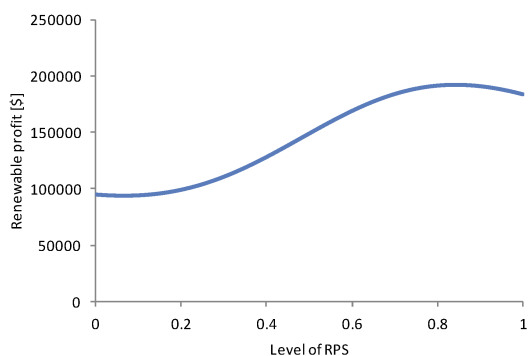
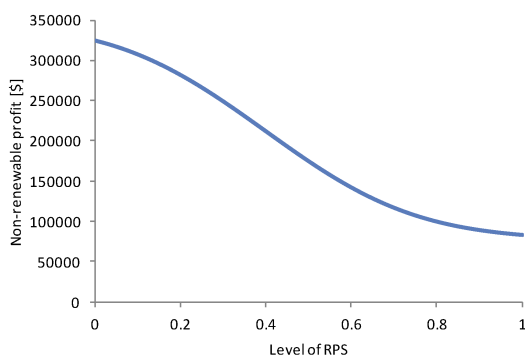
図 5: RPS 要求割合の Π^r への影響図 6: RPS 要求割合の Π^{n*} への影響

図 5 においては, 再生可能エネルギー事業者の利潤は, 規制が極端に緩い場合と厳しい場合を除いて, 上昇していることがわかる. 一方, 図 6 では, 非再生可能エネルギー事業者の利潤は, 規制が厳しくなるにしたがい, 単調減少となる.

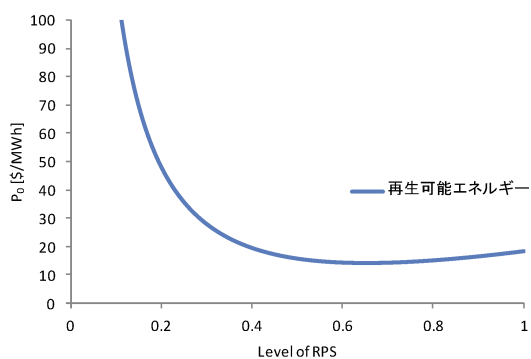


図 7: RPS 要求割合の投資の閾値への影響 (再生可能エネルギー事業者の場合)

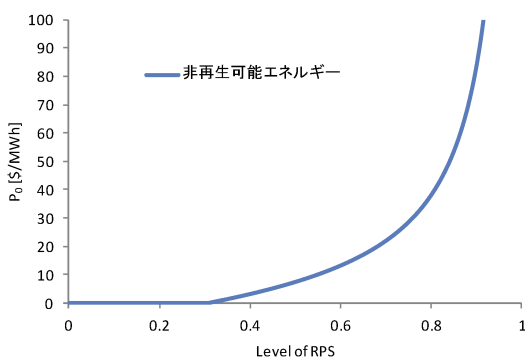


図 8: RPS 要求割合の投資の閾値への影響 (非再生可能エネルギー事業者の場合)

図7において、再生可能エネルギー事業者の閾値は凹曲面を描いている。このことから、ある点までは規制が厳しくなるにしたがい投資が促進されることを示している。一方、図8においては、非再生可能エネルギー事業者の閾値は、ある点を境に、単調増加となる。すなわち、比較的規制が厳しい状況では、再生可能エネルギーから発電量を調達する必要があるため、容量投資へのインセンティブが失われることを示している。

3.2 ボラティリティの影響

本節では、ボラティリティの影響を考察する。ここでは、 $\alpha = 0.45$ として、分析を行った。

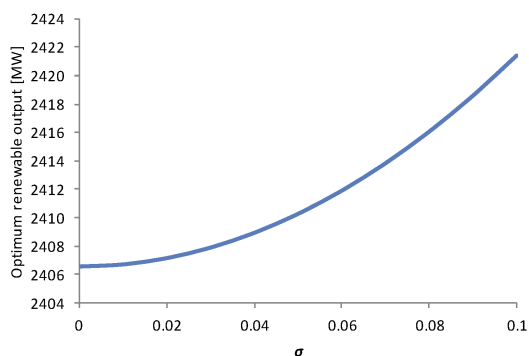


図 9: ボラティリティの q_1^* への影響

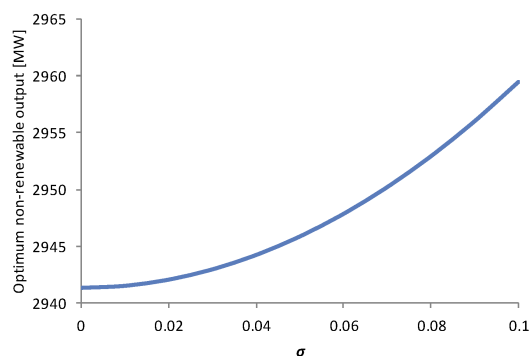


図 10: ボラティリティの q_1^{n*} への影響

図 9, 10 において、再生可能エネルギー事業者・非再生可能エネルギー事業者共に不確実性が大きくなると、発電量は単調増加となることが示されている。

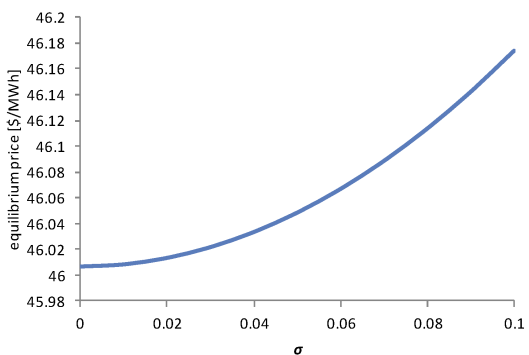


図 11: ボラティリティの P_1^* への影響

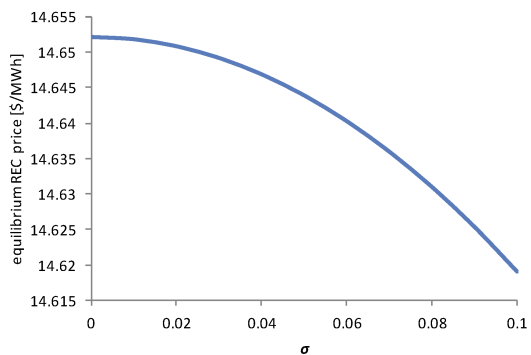


図 12: ボラティリティの P_1^{REC*} への影響

また、図 11, 12 では、不確実性が大きくなるにしたがい、電力価格は単調増加し、REC 価格は単調減少する。これは、上の発電量の影響によるものだと考えられる。

図 13, 14 において、再生可能エネルギー事業者・非再生可能エネルギー事業者共に不確実性が大きくなると、利潤は単調増加することが示されている。

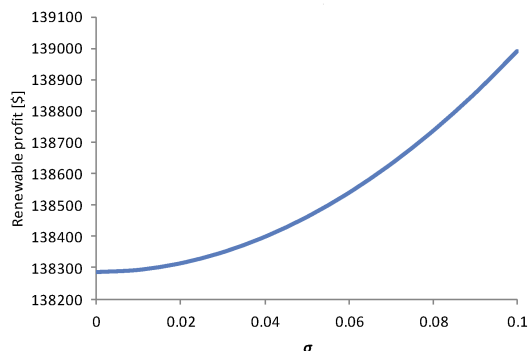
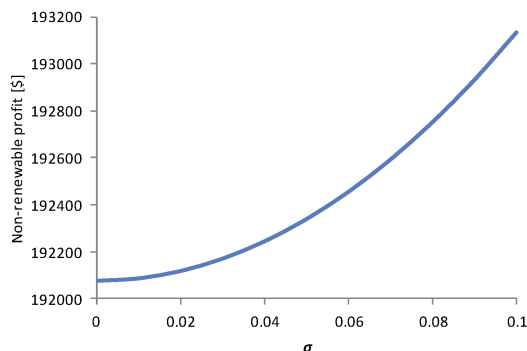
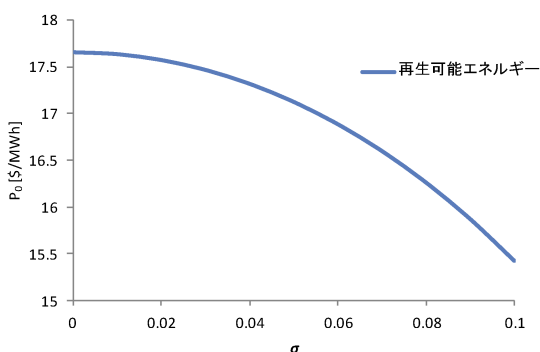
図 13: ボラティリティの Π^{r*} への影響図 14: ボラティリティの Π^{n*} への影響

図 15: ボラティリティの投資の閾値への影響

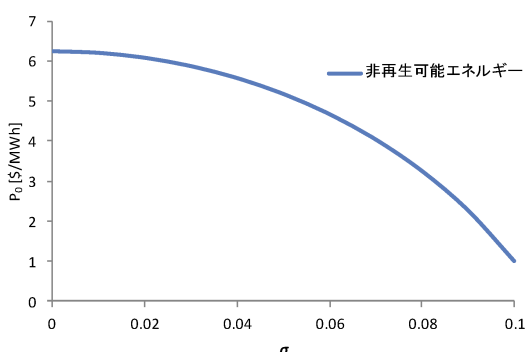


図 16: ボラティリティの投資の閾値への影響

さらに、図 15、16 では、再生可能エネルギー事業者・非再生可能エネルギー事業者共に不確実性が大きくなると、閾値は単調減少している。これは、不確実性が大きいと利潤の期待値が増えるため、投資が促進されることを意味している。

4 結論

本研究は、企業数及び将来の投資を考慮した、RPS 制度下での 2 期間クールノー競争モデルを構築し、RPS 要求割合及び電力価格の不確実性の影響を分析した。再生可能エネルギー事業者が N 社、非再生可能エネルギー事業者が M 社存在する場合、1 社ずつ存在する場合と比較して、各社の発電量はそれぞれの企業数で割っただけとなり、電力価格及び REC 価格は同様の結果となった。これは、各企業が対称であると仮定しているためと考えられる。RPS 要求割合の影響に関しては、実際に想定されるような現実的な結果が得られた。一方、不確実性の影響に関しては、投資の閾値を除いて、現実的な結果が得られた。投資の閾値に関しては、先行研究における、不確実性が大きくなると投資の閾値が大きくなるという結果に対して、本研究では、小さくなるという結果となった。これは、本研究では時点 1 に必ず投資するという設定のためであるからである。

今後の展望としては、各企業が非対称であるモデルの構築を考えている。本稿では、各事業者がそれぞれ 1 社、2 社のみ存在する場合のモデルを示したが、今後は N 社、 M 社のモデルを構築

する。さらに、投資の意思決定にリアルオプション理論を用いることで、より現実的なモデルを構築することを考えている。また、先行研究において、FIT や社会厚生を考慮したモデルは存在するが、本研究の設定のように、企業数を考慮したモデルは存在しないため、そのような分析も将来研究に残したい。

参考文献

- [1] Amundsen, E.S., Bergmen, L., “Green certificates and market power on the Nordic power market,” *Energy Journal* 33 (2), 101–117, (2012).
- [2] Fischer, C., “Renewable portfolio standards: when do they lower energy prices?,” *Energy Journal* 31 (1), 101–120, (2010).
- [3] Tanaka, M and Chen, Y., “Market Power in Renewable Portfolio Standards,” *Energy Economics* 391, 87–196, (2013).
- [4] Siddiqui, A., Tanaka, M, and Chen, Y., “Policy Analysis of Renewable Energy: RPS and Mathematical Program with Equilibrium Constraints,” 第26回 RAMP シンポジウム論文集, 69–83, (2014).

Graduate school of Science and Technology
Tokyo University of Science
Noda-shi 278-8510, Chiba, Japan
E-mail address: 7414609@ed.tus.ac.jp

東京理科大学大学院理工学研究科 鴨林 裕太

Department of Science and Technology
Tokyo University of Science
Noda-shi 278-8510, Chiba, Japan
E-mail address: takashima@rs.tus.ac.jp

東京理科大学理工学部 高嶋 隆太

National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS)
Minato-ku 106-8677, Tokyo, Japan
E-mail address: mtanaka@grips.ac.jp

政策研究大学院大学 田中 誠

School of Social Sciences, Humanities and Arts, School of Engineering
University of California-Merced
5200 N. Lake Rd., Merced, CA, USA
E-mail address: ychen26@ucmerced.edu

University of California-Merced Yihsu Chen