

## 再生可能エネルギー政策と均衡容量

申請中 東京理科大学 \*平山晃大 HIRAYAMA Kodai

05000319 東京理科大学 伊藤真理 ITO Mari

02303360 統計数理研究所 田中未来 TANAKA Mirai

01308970 東京理科大学 高嶋隆太 TAKASHIMA Ryuta

### 1 はじめに

近年、地球温暖化防止のために温室効果ガス排出量の削減が重要な政策課題となっている。そこで、温室効果ガス排出量を減らすために、発電時に温室効果ガスの排出のない再生可能エネルギー電源の普及が急がれている。また、電力事業分野においては、再生可能エネルギーの導入を促すために、普及促進政策が講じられている。その代表的な制度として、再生可能エネルギー利用割合基準 (Renewable Portfolio Standard: RPS) 制度があげられる。RPS は、発電事業者が発電量の一定割合

(RPS 要求割合) 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。この義務の履行方法の一つとして、再生可能エネルギーの導入の代わりに、グリーン電力証書 (Renewable Energy Certificates: REC) などの再生可能エネルギー等電気相当量の取引をすることによって補うことが認められている。これまで再生可能エネルギー政策の経済分析に関する研究で扱われているモデルでは、投資の意思決定が考慮されていないものがほとんどである [1]。しかしながら、発電事業者の経済活動としては、短期的視点の生産活動のみならず、長期的視点の投資活動も考慮する必要がある。特に、再生可能エネルギーの普及を考えた場合、投資の意思決定は比較的重要である。すなわち、生産活動と投資活動の両方の経済活動を捉えたモデルで政策評価を行うことが必要である。発電電力量 (生産活動) と発電容量 (投資活動) 決定に関するモデルには、発電電力量と発電容量を同時に決定する開ループモデルと、容量を決定した後で生産量を定める閉ループモデルがある [2]。本研究では、開ループモデルと閉ループモデルの両方により RPS 制度の評価を行う。発電事業者の投資・発電活動の両方を考慮し、利潤最大化問題を定式化し、完全競争からクールノー競争の市場構造で、発電電力量、電力価格や社

会厚生がどのように変化するかについて考察する。

### 2 モデル

本研究では、電力市場に再生可能エネルギー事業者 ( $i = r$ ) と非再生可能エネルギー事業者 ( $i = n$ ) がそれぞれ 1 社 (もしくは 1 群) ずつ存在する 1 期間のモデルを考える。発電事業者の年間の稼働時間を  $t_i$ 、単位容量あたりの投資費用を  $\beta_i$ 、燃料費と運転維持費の変動費を  $\delta_i$  と表す。電力価格を表す逆需要関数は  $p(q_n, q_r) = \frac{1}{\alpha}(D_0 - q_n - q_r)$  とする。RPS の要求割合を  $\eta$  とし、REC 価格は  $P_{REC}$  で表す。各事業者は自社の利潤を最大化する意思決定を行う。本研究では、RPS 制度を適用しない場合 (ベンチマークケース) と RPS 制度を適用する場合 (RPS ケース) の 2 つのケースに分けて、開ループモデルと閉ループモデルを用いて分析を行う。

#### 2.1 推測的変動モデル

推測的変動モデルの価格反応パラメータは、競争の度合いを数値化したもので、生産量の変化に対する価格変化を表す。  $\phi = \frac{\partial q_{-i}}{\partial q_i} \geq 1$  と仮定すると、価格反応パラメータ  $\theta$  は以下のように定義される。

$$\theta = -\frac{\partial p}{\partial q_i} \geq 0$$

ここで、 $\theta = 0$  は完全競争、 $\theta = \frac{1}{2\alpha}$  は先渡契約、 $\theta = \frac{1}{\alpha}$  はクールノー競争を表す。

#### 2.2 ベンチマークケース

##### 2.2.1 開ループモデル

開ループモデルでは、発電容量と発電電力量が同時に決定される。ベンチマークケースにおける各事業者の利潤最大化問題を解くと、以下の均衡容量 (発電量)、市場均衡価格が得られる。

$$x_i = q_i = \frac{D_0\theta + \left(\delta_{-i} + \frac{\beta_{-i}}{t_{-i}}\right) - \left(\delta_i + \frac{\beta_i}{t_i}\right)(\alpha\theta + 1)}{\theta(\alpha\theta + 2)} \quad (i = n, r)$$

$$p = \frac{D_0\theta + \left(\delta_n + \frac{\beta_n}{t_n}\right) + \left(\delta_r + \frac{\beta_r}{t_r}\right)}{(\alpha\theta + 2)}$$

## 2.2.2 閉ループモデル

閉ループモデルでは、各事業者とも発電容量を決定し、その後発電電力量を決定する。発電電力量を求めると  $q_i = x_i$  となり、各事業者の利潤最大化問題を解くことによって、以下の均衡解が得られる。

$$x_i = q_i = \frac{D_0 + \left(\alpha\delta_i + \frac{\alpha\beta_i}{t_i}\right) - 2\left(\alpha\delta_{-i} + \frac{\alpha\beta_{-i}}{t_{-i}}\right)}{3}$$

$$p = \frac{\frac{D_0}{\alpha} + \left(\delta_n + \frac{\beta_n}{t_n}\right) + \left(\delta_r + \frac{\beta_r}{t_r}\right)}{3}$$

## 2.3 RPS ケース

利潤最大化問題において、非再生可能エネルギー事業者は RPS 要求割合  $\eta$  を満たすため、REC を価格  $p_{REC}$  で購入する必要がある。一方、再生可能エネルギー事業者は RPS 要求割合  $\eta$  を超過した分の REC を売却することが可能である。

### 2.3.1 開ループモデル

各事業者の利潤最大化問題と REC 市場に関する市場清算条件を用いて解くことで、以下のような開ループモデルの均衡解が得られる。

$$x_n = q_n = \frac{D_0 - \alpha\delta_n - \frac{\alpha\beta_n}{t_n} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(D_0 - \alpha\delta_r - \frac{\alpha\beta_r}{t_r}\right)}{(1+\alpha\theta)\left\{1 + \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)^2 \frac{t_n}{t_r}\right\} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(1 + \frac{t_n}{t_r}\right)}$$

$$x_r = q_r = \frac{\eta}{1-\eta} \frac{t_n}{t_r} \frac{D_0 - \alpha\delta_n - \frac{\alpha\beta_n}{t_n} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(D_0 - \alpha\delta_r - \frac{\alpha\beta_r}{t_r}\right)}{(1+\alpha\theta)\left\{1 + \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)^2 \frac{t_n}{t_r}\right\} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(1 + \frac{t_n}{t_r}\right)}$$

$$p = \frac{1}{\alpha}\left\{D_0 - \left(1 + \frac{\eta t_n}{(1-\eta)t_r}\right)q_n\right\}$$

$$p_{REC} = \frac{1}{\alpha(1-\eta)}\left\{\left(1 + \frac{\eta t_n}{(1-\eta)t_r}\right)q_n + \alpha\delta_r + \frac{\alpha\beta_r}{t_r} - D_0\right\}$$

### 2.3.2 閉ループモデル

閉ループモデルの均衡解は、以下のように求まる。

$$x_n = q_n = \frac{D_0 - \alpha\delta_n - \frac{\alpha\beta_n}{t_n} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(D_0 - \alpha\delta_r - \frac{\alpha\beta_r}{t_r}\right)}{2\left\{1 + \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)^2 \frac{t_n}{t_r}\right\} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(1 + \frac{t_n}{t_r}\right)}$$

$$x_r = q_r = \frac{\eta}{1-\eta} \frac{t_n}{t_r} \frac{D_0 - \alpha\delta_n - \frac{\alpha\beta_n}{t_n} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(D_0 - \alpha\delta_r - \frac{\alpha\beta_r}{t_r}\right)}{2\left\{1 + \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)^2 \frac{t_n}{t_r}\right\} + \frac{\eta}{1-\eta}\left(1 + \frac{t_n}{t_r}\right)}$$

$$p = \frac{1}{\alpha}\left\{D_0 - \left(1 + \frac{\eta t_n}{(1-\eta)t_r}\right)x_n\right\}$$

$$p_{REC} = \frac{1}{\alpha(1-\eta)}\left\{\left(1 + \frac{2\eta t_n}{(1-\eta)t_r}\right)x_n + \alpha\delta_r + \frac{\alpha\beta_r}{t_r} - D_0\right\}$$

## 3 分析結果

数値分析の結果、 $\theta = \frac{1}{\alpha}$  のときのクールノー競争のときの閉ループモデルの結果は開ループモデルのものと一致した。これは先行研究 [2] と同様の結果である。RPS 要求割合が 50% のときに  $\theta$  の値に依存せず、REC 価格は等

しいため、RPS 要求割合を 50% に固定させ、 $\theta$  に関して完全競争、先渡契約、クールノー競争の 3 つのケースの影響を比較した。図 1 には、開ループモデルにおける再生可能エネルギー事業者の発電電力量が示されている。RPS ケースではいずれの場合もベンチマークケースと比べて発電電力量が大きくなった。これは RPS 制度の影響により再生可能エネルギーの導入が促進されていることを意味する。また、ベンチマークケースの場合、 $\theta$  の増加に伴って発電電力量は増加した一方、RPS ケースでは減少した。これは、RPS ケースでは、限界発電量に対する価格の変化が大きいくほど（すなわち、より競争的な市場ほど）再生可能エネルギーの発電電力量が減少することを意味する。

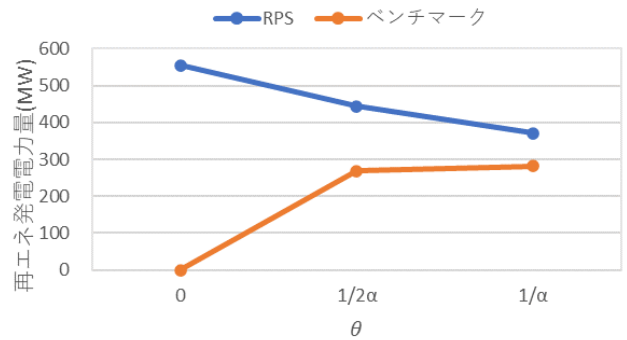


図 1  $\theta$  に対する再生可能エネルギー事業者の発電電力量 (開ループモデル)

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究 (B) (課題番号: JP19H02380) を受けて実施したものである。

## 参考文献

- [1] Siddiqui, A.S., Tanaka, M., and Chen, Y.: Are targets for renewable portfolio standards too low? The impact of market structure on energy policy, *European Journal of Operational Research*, Vol. 250 (2016), 328-341.
- [2] Wogrin, S., Hobbs, B.F., Ralph, D., Centeno, E., and Barquín, J.: Open versus closed loop capacity equilibria in electricity markets under perfect and oligopolistic competition, *Mathematical Programming*, Vol. 140 (2013), 295-322.