

# 電力市場のシミュレーションを用いた 政策シナリオオプションの評価

## The Analysis of Policy Scenarios for Electric Power Market with a Simple Computational Model

黒島 麻衣<sup>1,2)</sup>, 大山 力<sup>3)</sup>, 秋山 太郎<sup>1,4)</sup>

Mai KUROSHIMA, Tsutomu OYAMA and Taro AKIYAMA

- 1) 横浜国立大学成長戦略研究センター (〒 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1, E-mail: mai@ynu.ac.jp)  
 2) 名古屋大学大学院情報科学研究科 (〒 464-8601 名古屋市千種区不老町 )  
 2) 横浜国立大学大学院工学研究院 (〒 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1 )  
 4) 横浜国立大学大学院国際社会科学研究院 (〒 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1 )

This paper aims at clarifying the influences of the use of new institutions on the Japanese-style electric power market. We build an agent-based model to analyse the market. In particular, we evaluate various policy options such as correction of volume discrepancy of suppliers with compulsory company split-up, and the influence caused by revenue-raising customers that have demand response programs.

**Key Words:** Institutional Design, Policy Proposal, Power Market Liberalization, Multi-agent

### 1. はじめに

電気事業は公益事業であるという考えに基づき、様々な規制が行われてきた分野であるが、電気事業の効率化を目指すために規制を緩和しようというのが世界的な動きとなっており、自由化の流れが進んでいる<sup>(1, 2)</sup>。

電力市場自由化の最大の目的は、競争を導入することで電力の供給費用を下げることにある<sup>(3)</sup>。競争によって費用削減のインセンティブが強化される。長期的には、費用削減をもたらすようなイノベーションも促進される。また、多様な供給者が出現するようになるので、分散型電源やコジェネなどの分野でのイノベーションも期待されるといわれている。

一方、そのためには規制、補助金、その他を適切に設計する必要がある。制度によっては、新規参入者への参入阻止行動のような、競争を阻害する事態を招くという分析がなされている<sup>(4)</sup>。また、日本の電力供給の制度設計に不備があるとの指摘もある<sup>(5)</sup>。

さらに東日本大震災と原発事故により、日本の電力網にはシステムとしての脆弱性があるとの認識が広まり、スマートグリッドや分散電源の役割が改めて評価され、従来の電力供給システムの見直しが図られようとしている。

このような情勢を鑑み、適切な制度設計に役立つ政策提言の一手段として、シミュレーションを活用することが本研究での提案である。

社会・経済領域の先行研究としては、マクロ計量モデル<sup>(6)</sup>やシステム・ダイナミクス<sup>(7)</sup>などによる分析が主要な手法であったが、コンピュータ技術の高度化により計算のコストが下がることによって、社会を構成するステークホルダーの相互作用の動的プロセスとして記述しボトムアップに社会現象を捉え、複雑な制度的境界条件をモデル化することも可能なエージェントベースドシミュレーションが現在期待されている<sup>(8, 9)</sup>。

米国では 1990 年代から電力自由化が進められており、これに関する研究も盛んに行われ、卸売電力市場研究のためのエージェントベースの大規模なテストベッドとして、Iowa State University の研究グループによって開発された AMES がすでに存在する<sup>(10, 11)</sup>。しかし、AMES で表現されているのは米国の卸売電力市場であり、日本で 2005 年に開設された卸電力取引市場では米国とは異なる入札方法が採用されたため、日本の市場に対する政策オプションの評価を行うにあたっては、日本の現状方式に即したモデルでのシミュレーションが望ましい。よって、本研究では日本の入札方法を実

装している。

本論文の構成は次のとおりである。第2節では、電力市場のモデルについて述べる。第3節では、政策オプションについてのパラメータ化を行う。第4節では、設計されたモデルとパラメータを用いてシミュレーションを行い、政策シナリオごとの取引価格に対する応答性を比較する。第5節では、本研究で得られた知見について、改めてまとめる。

## 2. 電力市場のモデル

このシミュレーションでは、 $N$  個体の発電エージェント  $G$  と  $M$  個体の需要エージェント  $D$  がいると定める。

- Generator (Supply agent) :  $\{G_i \mid i \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq N\}$
- Demand agent :  $\{D_j \mid j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq M\}$

発電エージェント、需要エージェントそれぞれが、市場での希望取引量  $G_A, D_A$ ・希望取引価格  $G_P, D_P$  を持っている。

- Suggested Amount・Price :  $G_{A_i}, G_{P_i}, D_{A_j}, D_{P_j}$

提示価格は、市場での成功／不成功により随時変化させる。この部分の戦略については後述する。

一方、取引量は固定であり、発電側が毎回必ず決まった量を供出し、需要家側は毎回必ず決まった量を購入するとしている。この部分は高橋による、一般電気事業者に対してその発電量の一定割合を電力取引市場に供出することを義務づけるという提言があることから、取り入れた<sup>(12)</sup>。日本でも自由化の流れはあり、取引所もあるが、現状において取引量は極端に少なく、取引所の活性化が急務であるとの主張がある。

また、卸電力取引市場で取引するかが任意である (= 既存の大規模事業者が新規参入小規模電力事業者 (フリッジプレイヤー) に対して卸供給するかが任意である) 場合、自社のブランド価値が低下したり付帯事業への悪影響といった類のコストがわずかでもある場合には卸し供給を行わないとする分析もなされている<sup>(4)</sup>。

発電エージェント、需要エージェントに対しては共に、取引所での約定不成立を回避するようにさせるためのペナルティ政策が導入されている。これは適正な価格を提示して取引を成立させるための制度として設計したものである。今回のモデルでは、ペナルティの実態は特に議論せず、結果的に価格上げ下げの圧力が生じるとした。

以下では、提示価格に関する戦略を述べる。各時刻  $t+1$  での価格戦略は次式を用いる。

$$G_{P_i(t+1)} = \left( G_{P_i(t)} + W \times (-10) + Z \times (10) \right) \quad (1)$$

$$D_{P_j(t+1)} = \left( D_{P_j(t)} + W \times (10) + Z \times (-10) \right) \quad (2)$$

ただし、価格は 10 ～ 90 の範囲を超えないものとする

$$(10 \leq price \leq 90).$$

まず、係数  $W$  のかかる項について説明する。ここでは、買いそびれたり売りそびれたりした場合には、重いペナルティを課されてしまうため、取引の成功率が高まる方へ価格を変えたとした。

発電エージェントが希望した価格で希望した全量を売却できたときには価格は変更しないが、できなかった場合には値下げをする。

$$W = \begin{cases} 0 & (if \quad s = G_{A_i}) \\ 1 & (otherwise) \end{cases} \quad (3)$$

$s$  は  $G_i$  が希望した価格での取引に成功した量を表す。

需要エージェントが希望した価格で希望した全量を購入できたときには価格は変更しないが、できなかった場合には値上げをする。

$$W = \begin{cases} 0 & (if \quad s = D_{A_j}) \\ 1 & (otherwise) \end{cases} \quad (4)$$

$s$  は  $D_j$  が希望した価格での取引に成功した量を表す。

このアルゴリズムは Nowak らのパブプロフ戦略 (初回は協調、以降は対戦結果が相対的に良ければ次回も同じ手を出し、悪ければ手を変える) を参考に構築した<sup>(13)</sup>。

次に、係数  $Z$  のかかる項について説明する。ここでは、まれに強気に出る (有利な価格で取引できるかもしれないと思いつく) 効果を表現すると共に、行動の失敗などを意味するノイズの効果も兼ねている。

$$Z = \begin{cases} 0 & (if \quad k > p_{mut}) \\ 1 & (otherwise) \end{cases} \quad (5)$$

$k$  はランダムな値 ( $0 \leq k \leq 1$ ).

$p_{mut}$  は閾値。

市場での約定処理は、入札データを積み上げ、「売り」の量-価格線と「買い」の量-価格線を作成し、その交点をもって約定価格、約定量を定める。ただし、交点が複数存在する場合には、最も安価な点を約定価格とした。これは、日本卸電力取引所のスポット市場（1日前市場）および時間前取引（4時間前市場）での処理を参考としたものである<sup>(14)</sup>。

本シミュレーションでは、取引の1単位時間を1ステップとし、ステップを一定値まですすめることでそのダイナミクスを観測する。

### 3. 政策シナリオを表現するパラメータ

政策シナリオは、政策オプションごとのパラメータを変更することで表される。

今回の実験では、発電業者を分社化するというオプションと、交付金などの後押しによるデマンドレスポンス契約をもつ需要家が存在するというオプションを扱う。

#### 3.1. 発電業者の分社化

分社化して（発電業者を分割して）発電業者間の規模の格差を縮小させるとともに、需要家の数と発電側の数の相対的バランスが変わることによる影響を見ることとする。

- 発電企業数： $N = \{10, 20\}$

発電総量は変わらないものとして、基本のモデルとなる発電企業数で取引を行う場合と、発電企業数を倍にした状況で取引を行う場合を考える。

#### 3.2. 需要家がデマンドレスポンス契約に応じる割合

市場価格の高騰時には、需要家側が電力の使用を抑制するようなデマンドレスポンス契約に応じる可能性をもつものとする。

- 需要家がデマンドレスポンス契約に応じる割合： $r_D$   
( $0 \leq r_D \leq 0.156$ )

需要家がデマンドレスポンス契約に応じる割合の上限には、計画停電を回避するという目的のために成し遂げられ

た、東京電力管内での2011年7月1日から8月15日までの各日での前年からのピーク需要減少率の平均値である15.6%を用いた\*。3月中には工場が被災して操業ができなかったところも、4月以降はおおむね正常な活動に戻っていると考えられ、この期間の値は需要者の自律的な節電への協力の

結果といえとされているからである<sup>(12)</sup>。よって、この上限までの範囲内でデマンドレスポンス契約に応じる場合を考える。

可能な上限に対し、実際にどれだけの割合のデマンドレスポンス契約に応じるかは、応じた場合に受けられる交付金の後押し（インセンティブ）の強さにより変化するものとして設計する。今回のモデルでは、交付金の実態は特に議論せず、結果的にデマンドレスポンス契約に応じる割合に変化が生じるものとした。

需要家がデマンドレスポンスに応じる場合は、

$$D_{A_j} \leftarrow (D_{A_j} \times (1 - r_{D_j})) \quad (6)$$

であったものとして、(4)式および(2)式を評価し、価格を更新する。

### 4. 政策シナリオのシミュレーションと評価

#### 4.1. 発電業者の分社化の影響

価格形成に対する発電業者の分社化の影響を検討するため、 $N = 10$ の場合と、 $20$ の場合で実験を行い比較を行った。 $N$ が $10$ の場合のそれぞれの $G$ が持つ $G_A$ は $(90 \times j - 30)$ 、 $N$ が $20$ の場合のそれぞれの $G$ が持つ $G_A$ は $(15 \times j + 75)$ とした。発電総量は2つの場合で同一である。

その他のパラメータは、 $M$ は $30$ とし、 $D$ が持つ $D_A$ は $(10 \times j)$ 、 $G_P$ と $D_P$ の初期値は一律で $70$ 、 $p_{mut}$ は $0.05$ とした。

図1は、 $N = 10$ と、 $N = 20$ の場合の取引結果の典型例、

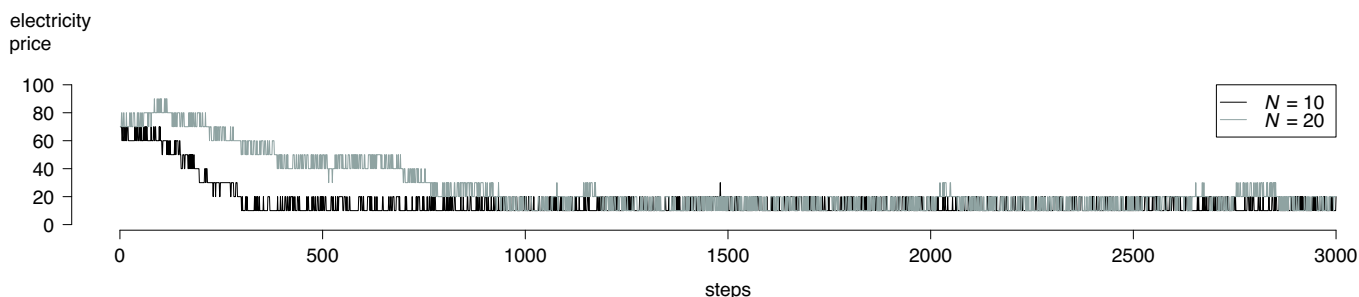


Fig. 1 An example of transaction results through 3000 steps in the case of  $N = 10$  and  $N = 20$ .

\*東京電力、「過去の電力使用実績データのダウンロード」<sup>(15)</sup>からダウンロードしたデータを素に著者作成。

図2は、1000試行での平均約定価格の推移を示したものである。

価格はいずれの場合でも下落傾向となったが、 $N = 10$ の場合には400ステップくらいで最低価格にまで落ちるのに対し、発電エージェントの数を2倍にした $N = 20$ の場合には1500ステップくらいまでかかって最低価格に落ちており、発電エージェントを分社化した方が、それだけ発電エージェントに有利な方向へ価格を左右しやすいということがいえる。

これは、供給側の個々のエージェントが価格を引き上げる行動に出る確率が同じでも、供給業者の数が増えたため、価格が引き上げられる確率が全体として上がりこのことによって、競争価格（この場合には最低価格と同一視できる）への取束が遅くなるということであると考えられる。

#### 4.2. デマンドレスポンス契約をもつ需要家の影響

価格形成に対するデマンドレスポンス契約をもつ需要家の影響を検討する。

まず、すべての需要家エージェントがデマンドレスポンスに応じるものとして、デマンドレスポンス可能な上限に対して実際に応じる量の比率を変えて実験を行った。

図3に、応じる量の比率が0（全くデマンドレスポンスに応じない）と1/1（可能な最大量までデマンドレスポンスに

応じる）の場合の1000試行平均約定価格の推移を示す。

図から、市場価格の高騰時に需要家側が電力の使用を抑制し買い控えるデマンドレスポンスを行った方が、取引価格は低下すると分かる。これは需要家側によって価格が引き上げられる確率が全体として減少し、供給業者は電力を市場で売却するためには価格を下げざるをえず、競争価格（最低価格）への取束が早くなるということであると考えられる。

表1に、応じる量の比率が0, 1/9, 1/6, 1/3, 1/1の場合の250ステップ時点での1000試行平均約定価格を示す。

表から、需要家側がデマンドレスポンスにより多く応じるほど、取引価格の低下は促進されることが分かる。

次に、需要家エージェントのうち、デマンドレスポンスに応じるエージェントの比率を変えて実験を行った。ここで応じる量は上限の値（最大限）とした。デマンドレスポンスに応じるエージェントの比率が0（全くデマンドレスポンスに応じない）と1/1（全需要家エージェントがデマンドレスポンスに応じる）の場合の1000試行平均約定価格の推移は、前の実験と同じく図3となる。

表2には、デマンドレスポンスに応じるエージェントの比率が0, 1/6, 1/3, 1/1の場合の250ステップ時点での1000試行平均約定価格を示す。

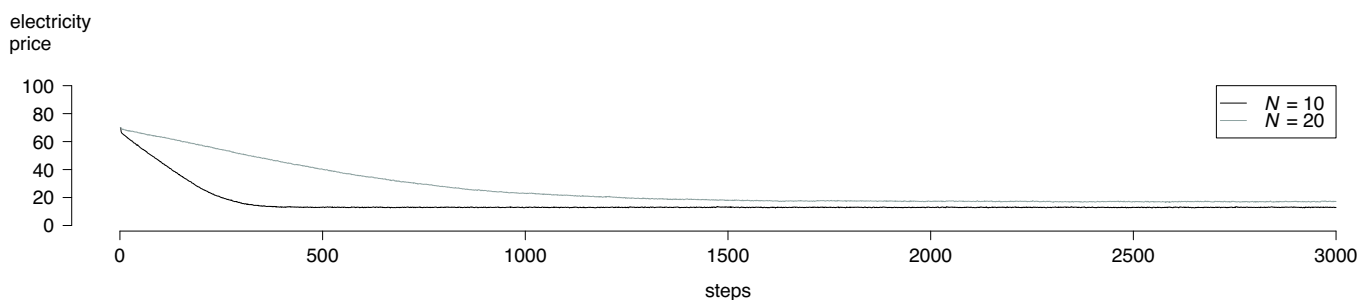


Fig. 2 The average of transaction results through 3000 steps in the case of  $N = 10$  and  $N = 20$ .

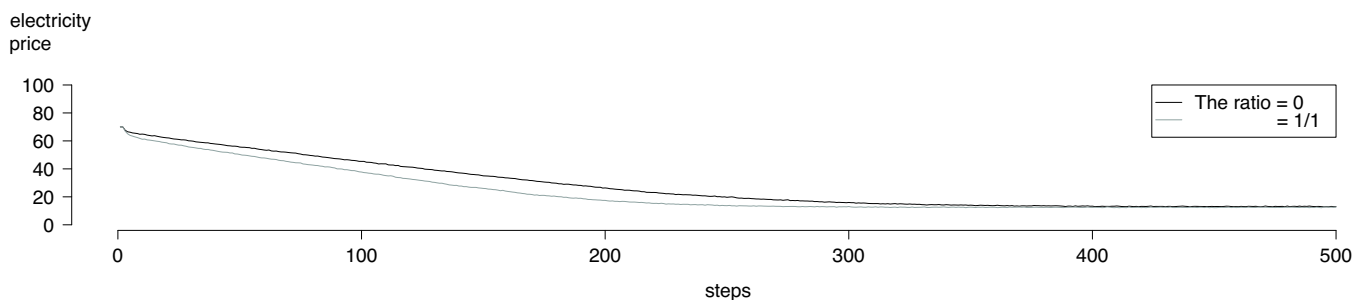


Fig. 3 The average of transaction results through 500 steps in the case of the ratio for maximum possible amount of the demand response = 0 and 1/1.

The average of transaction results through 500 steps in the case of the ratio for all of the demand response = 0 and 1/1.

Table 1 The average of transaction results at 250 steps in the case of each ratio for maximum possible amount of the demand response.

	The ratio for maximum possible amount of the demand response				
	0	1/9	1/6	1/3	1/1
Price	19.66	16.37	16.18	15.61	13.68

Table 2 The average of transaction results at 250 steps in the case of the ratio for all of the demand response.

	The ratio for all of demand agent			
	0	1/6	1/3	1/1
Price	19.66	17.69	16.33	13.68

この場合にも、需要家側がデマンドレスポンスにより多く応じるほど、取引価格の低下は促進されることが分かる。

## 5. 結言

本研究では、政策シナリオの評価手法として、マルチエージェントモデルを用いた電力市場のシミュレーションを提案した。分社化して発電業者間の規模の格差を縮小させる政策をとった場合や、交付金などで後押しされたデマンドレスポンス契約をもつ需要家の影響についての検討を行い、本手法の有効性を確認した。今後は、蓄電池の導入による電力の貯蔵や燃料電池・エネルギー効率化投資など、さらに政策オプションを増やした上での複合的な評価や、市場への提示価格の更新について取引の可能性だけではなく利潤を元にしたラーニング戦略に改めるなどのより現実的な設計を行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業（社会技術研究開発）「科学技術イノベーション政策のための科学」の成果によるものである。

また、本論文の匿名査読者より有益なコメントを多数いただいた。ここに記して感謝を申し上げる。

## 参考文献

- (1) 大山力：規制緩和下の電力供給システムにおける価格戦略に関する考察. 電気学会論文誌 B, **117(1)**, pp. 54–60 (1997)
- (2) 新道徹, 大山力：需要変動・電力取引形態を考慮した電力市場シミュレーション. 電気学会論文誌 B, **124(5)**, pp. 683–689 (2004)
- (3) 金本良嗣: 総論：電力自由化の現状と課題. 電気評論, **94(6)**, pp. 7–12 (2009)
- (4) 金本良嗣: 託送方式の電力市場におけるキャパシティー選択と卸取引. RIETI Discussion Paper Series, **07-J-027** (2007)
- (5) 西村陽：わが国電力小売市場の競争構造と既存電力会社の対応戦略. 学習院大学 経済論集, **37(3/4)**, pp. 215–226 (2001)
- (6) Klein, L. R. and Goldberger, A. S.: An Econometric Model of the United States, 1929-1952. (1955)
- (7) Forrester J.W.: Industrial Dynamics. MIT Press (1961)
- (8) 出口弘：社会シミュレーション & サービスシステムが目指す世界. 計測と制御, **52(7)**, pp. 563–567 (2013)
- (9) 出口弘：社会システムの研究動向 2—研究のための方法論—社会システムの制度デザインの方法論：政策科学の方法としてのエージェントベースモデリング & シミュレーション計測と制御, **52(7)**, pp. 574–581 (2013)
- (10) The AMES Wholesale Power Market Test Bed, <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/amesmarkethome.htm>
- (11) Sun, J., Tesfatsion, L.: Dynamic testing of wholesale power market designs: An open-source agent-based framework. Computational Economics. **30(3)**, pp. 291–327 (2007)
- (12) 高橋洋：電力自由化 発送電分離から始まる日本の再生. 日本経済新聞出版社 (2011)
- (13) Nowak, M., Sigmund, K.: A Strategy of Win-Stay, Lose-Shift that Outperforms Tit-for-Tat in the Prisoner's Dilemma Game. Nature, **364**, pp. 56–58 (1993)

(14) 日本卸電力取引所, 取引概要,  
<http://www.jepx.org/business.html>

(15) 東京電力, 過去の電力使用実績データのダウンロード,  
[http://www.tepco.co.jp/forecast/html/  
download-j.html](http://www.tepco.co.jp/forecast/html/download-j.html)