

# 電力取引における先物市場の影響予測モデル

## Artificial Electricity Futures Market to Predict an Impact on Power Trading

倉橋節也<sup>1\*</sup> 吉田孝志<sup>2</sup>  
Setsuya KURAHASHI<sup>1</sup> Takashi YOSHIDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学大学院ビジネス科学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Business Sciences, University of Tsukuba  
<sup>2</sup> 日本電気株式会社  
<sup>2</sup> NEC Corporation

**Abstract:** The liberalization of the electricity market has begun since 2016. In the current power market, there are the spot market trading electricity of the next day, the intraday market trading electricity of the next hour, and the forward market for bulletin board products. Under such circumstances, a new electricity futures market is being studied. This is expected to be a means for retailers, power producers, customers, etc. to determine future prices in advance and to avoid cost variation risk. However, only the spot market currently conducts transactions actively. If the role of the electricity futures market remains unknown, we can not take advantage of the benefits. It is also necessary to verify risk factors in the electricity futures market in advance. Therefore, in this research, we aim to model the electricity futures market as an artificial market, analyse its behaviour and influence, and elucidate the prediction and mechanism of price fluctuation including spot market.

## 1 はじめに

2016年に、日本における電力システム改革が、電力小売の全面自由化として開始された。その結果、新電力への契約先スイッチングが約300万件、従来の大手電力内での契約先スイッチングが約260万件となり、合計で8.8%となっている。2000年の部分自由化以降、新電力のシェアは微増のままであったが、全面自由化によってkWhベースでも10%を超えるようになっている [1]。

これらの電力は、電力卸売市場（日本卸電力取引所 JEPX）や市場外の相対取引などによって、発電事業者（大手電力、独立系発電事業者、新電力等）・電力小売事業者による売買が行われている。電力取引が市場で売買されることにより、市場原理によって価格の透明性が促進され、より安い電力供給が可能となることが期待されるが、一方で安定した価格での電力供給を行うためには、長期に渡る売買契約が必要になる。このような中、経済産業省は電力先物市場の望ましい枠組みを検討・協議するため、電力先物市場協議会を設置

し、複数回の協議を重ねてきていたが、取引形態などの制度設計が難航し、2016年度での上場を見送り、現在のところ上場の正式な計画は示されていない。一方、東京商品取引所は2016年に、現物取引と先物を一体運用する模擬取引を実施したものの、既に現物取引を手掛ける卸売市場である日本卸電力取引所との調整は進んでおらず、現状では現物市場の活性化が主な議論となっている。

そこで、本研究では、日本卸電力取引所で取引が行われている現物市場（スポット市場、時間前市場）に対して、今後導入される電力先物市場がどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的に、両者をモデル化した人工電力市場を構築する。このモデルを用いて、電力先物市場の効果を検証し、経済的で安定した電力取引を行うための市場設計を目指す。

## 2 関連研究

スマートグリッドにおいては、ユーザと電力会社両方がデマンドサイドに卸売り価格の変動を反映することができるリアルタイムダイナミックプライシングから利益を得ることができることが期待されている [2]。

\*連絡先：筑波大学大学院ビジネス科学研究科  
〒112-0012 東京都文京区大塚 3-29-1  
E-mail: kurahashi.setsuya.gf @ u.tsukuba.ac.jp

一方では、オークションによる電力価格決定という発想も珍しいものではない。しかし、オークションに参加するデマンドサイドは、太陽光等の再生可能エネルギーをベースとするため、発電量が非常に変動的である [3]。一方最近では、電力市場を両面性市場として捉えて、社会的厚生を最大化する電力プラットフォームデザインの研究や、単一市場ではなく競争的な複数の電力市場を対象とした研究も報告されている [4][5]。また、欧州の電力リスクプレミアムを分析し、電力先物価格が炭酸ガス先物価格に関係していることを実証分析から示した論文 [6] や、確率的プログラミングモデルを用いて電力先物市場を分析したモデル [7]、線形ガウスモデルを用いて電力先物価格を予測する手法 [8] などが提案されている。これに対して、人工市場を構築して電力市場の動的過程を研究した論文はあるが [9]、電力先物市場とスポット市場との関係を人工市場で分析したものは調査した限りではない。そこで、本論文では、エージェントベースモデリング手法を用いて人工的な電力市場を構築し、電力先物市場が、スポット市場や時間前市場にどのような影響を与えるのかを分析する。

### 3 日本における電力市場の動向

電力事業には、発電と送配電および小売の3事業があり、これらの事業者間の取引は電力取引所で行われる。発電事業者はコストを安く発電し電力を高く売ることが目的であり、小売事業者は顧客の電気を安く購入し顧客に届けることを目指している。その仲介役を、国内で唯一の日本卸電力市場 (JEPX) が担っている。JEPX では、電気の実物を扱い純資産が1000万円以上の事業者だけが会員となることができ、コンピュータシステムによってインターネット経由で電力の売買が可能となっている。売買が成立した電気は、一般送配電事業が管理する送配電網によって受け渡しが行われる。売買には手数料や預託金が必要となる。

取引は、1日前市場 (スポット市場) と当日市場 (時間前市場)、および先渡市場と掲示板市場の4つからなる。スポット市場は翌日の30分毎の電気を入札によって売買する。発電事業者は、自身が保有する発電所および契約する電力をもとに、すでに決まっている売り先を考慮しながらスポット市場に入札を行う。入札では、発電可変費以上の価格がつけば売り、それ以下であれば買うことになる。小売事業者は、顧客の需要を予測しながら発電所の電気を調達し、余りがあれば市場で売却する。これらを1日前に突き合わせて価格と量でバランスさせるのが1日前市場 (スポット市場) となる。スポット市場では、翌日の24時間30分毎の48商品の電気を一括で入札し、市場で個別に価格を決定

し売買する。約定は、ブラインド・シングルプライスオークション方式で、他参加の入札動向は開示されず、入札価格によらず、決定された約定価格で売買することになる。しかし、当日になって天候や発電所の事故などによって計画の見直しが発生することが避けられないため、調整の場として当日市場 (時間前市場) が存在する。時間前市場では、気温の変化によって生じた需要の変動部分を追加調達あるいは余剰売却などを行うことができる。電力の計量単位は同じく30分毎だが、スポット市場と異なり商品毎のザラ場取引となっている。よって、ブラインド・シングルプライスオークションではなく、売買商品の市場動向を参照しながらの入札となる。

これらに加えて、他に先渡市場と掲示板市場が存在する。先渡市場では、将来受け渡しされる電気の価格を固定して価格ヘッジするために利用する。最大3年先までの電気を10日前から入札可能となっている。掲示板市場では、相対取引の仲介業務を卸電力市場が行う。

最近の電気料金は、2014年をピークに下落傾向が続いているが、燃料価格の下落によって大手電力の財務状況は改善しつつある。しかし、燃料価格の動向は不確定であり、小売電気事業者、発電事業者、電力需要家などにとって、将来の電力価格をあらかじめ確定し、電力価格の変動リスクを回避する重要な手段として、電力先物市場の導入は意義があるものとされている [10]。

### 4 人工電力市場モデル

本モデルでは、電力先物市場と既存のスポット市場および時間前市場との関連を調べることを目的とし、これらを包含した人工電力市場モデルを構築する。人工電力市場モデルの概念図を、図1に示す。

スポット市場モデルは、翌日の24時間1時間毎の24商品に一括入札し、個々の商品をブラインド・シングルプライスオークション方式で約定する。市場には、スポット市場における需要家 (ベース需要家) が個々の需要に応じた電気量を指値で入札し、供給者 (ベース供給者) は1日を通して一定量の電気を入札する。時間前市場では、需要家 (ピーク需要家) と供給者 (ピーク供給者) がそれぞれ1時間毎の電気を指値で入札し、ザラ場で随時約定していく。需要家はそれぞれの商品の予想価格を計算し、市場価格がそれを下回っていれば買い注文を出す。供給者も同様に、それぞれの商品の予想価格を計算し、市場価格がそれを上回っていれば売り注文を出す。それぞれの注文を累積し、市場価格と指値に応じて売買数量を決定していく。予想リターンは、式1で定義する。

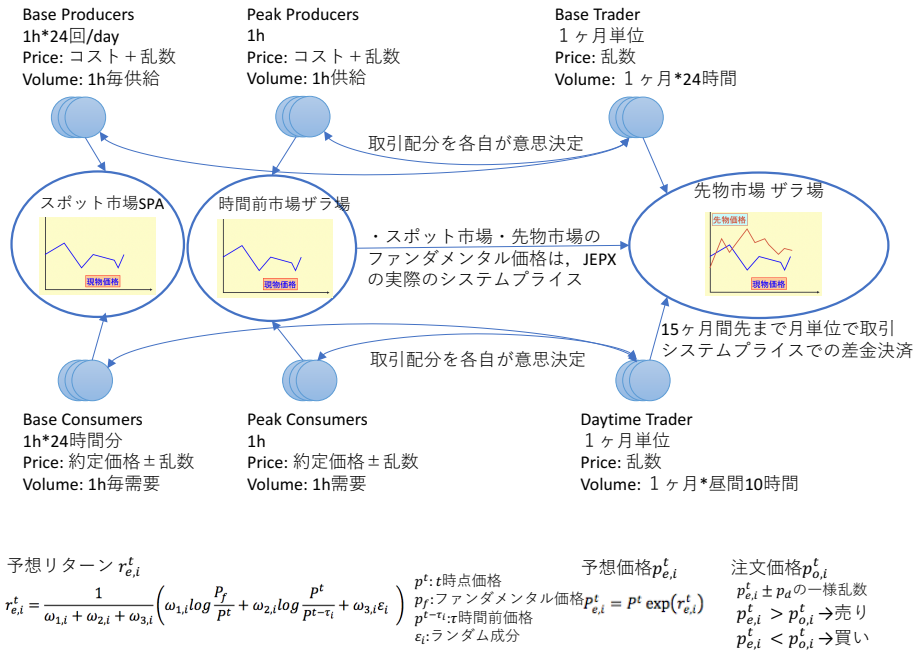


図 1: 人工電力市場モデルの概念図

$$r_{e,i}^t = \frac{1}{\omega_{1,i} + \omega_{2,i} + \omega_{3,i}} \left( \omega_{1,i} \log \frac{P_f}{P^t} + \omega_{2,i} \log \frac{P_f}{P^{t-\tau_i}} + \omega_{3,i} \epsilon_i \right) \quad (1)$$

ここで、 $P^t$  は  $t$  時点価格、 $P_f$  はファンダメンタル価格、 $P^{t-\tau_i}$  は  $\tau$  時間前価格、 $\epsilon_i$  はランダム成分を表す。スポット市場のファンダメンタル価格は、JEPX データからのシステムプライス（前日終値の平均約定価格）を用い、時間前市場では前日のモデル上でのスポット市場価格を用いる。この予想リターンから式 2 で予想価格  $p_{e,i}^t$  を算出する。

$$p_{e,i}^t = P^t \exp(r_{e,i}^t) \quad (2)$$

この予想価格  $p_{e,i}^t$  と、注文価格  $p_{o,i}^t$  を比較することで、需要者は買い注文を、供給者は売り注文を出す。注文価格  $p_{o,i}^t$  は、予想価格  $P^t$  を平均、 $p_d$  を標準偏差とする正規乱数により決定する。

これに加えて、電力先物市場をモデルに追加する。先物市場では、1ヶ月先から 12ヶ月分の月単位のベースロード電力 12 商品を取引する。ファンダメンタル価格は、スポット市場と同じシステムプライスを用いる。受け渡しの 3ヶ月前から 1日前まで取引が可能とし、ザラ場で随時約定していく。市場参加者は、スポット市場の発電事業者と小売事業者に加えて、金融トレーダー

も参加ができるため、商品決済以外に差金決済も可能となる。

価格への影響は、ファンダメンタル価格が先物市場とスポット市場に影響を与えると同時に、先物市場の価格と契約量がスポット市場に影響を与える。またスポット市場の約定が時間前市場に影響を与える。実需の変化、気温の変化、燃料コストの変化などが、先物市場を持つ電力市場価格にどのような影響を与えるかを分析する。例えば、1時間毎の実需要データに対し適当な正規乱数ノイズを加えることで、各市場で契約された電気に対して、実需との差分が計算できる。この差分は、実時間の需要変動として、火力や水力などの発電施設を持つ発電事業者がリアルタイムに需給調整発電を行い、送配電会社によって需要家へ送電される。この発電量の決済は、インバランス精算によってシステムプライスに準拠した計算方法で精算されることになるが、大幅な需給のインバランスは、リアルタイムな発電が可能な施設維持コストを増加させる要因ともなり、また契約外の大きな需要変動に対処できず停電のリスクが高くなる要因ともなる。このような需給インバランスをできるだけ縮小するような、効率的な電力市場の設計を行うためのモデル構築と分析が、本研究の目的となる。

## 5 ベースモデル

人工電力市場モデルを適用したシミュレーションの実行環境としては NetLogo[11] を使用する。NetLogo はオープンソースで開発が進められている汎用エージェントベースシミュレーターである。NetLogo はモデル設計の自由度が高いこと、シミュレーション結果のグラフ表示等の機能が充実していること等の特徴を有しており、本研究に適している。

NetLogo 上での人工電力市場モデルの設計内容を、エージェントベースモデルの標準的な記述方法である ODD プロトコル [12] に準拠して以下に記述する。

### 目的

本モデルは、電力の現物市場（スポット市場、時間前市場）に対して、今後導入される先物市場がどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とする。

### エンティティ・状態変数・スケール

本モデルでは trader, facility, order の 3 種類のエージェントを定義する。

trader は電力の供給者と需要家とを包含するエージェントである。trader はまたスポット市場で入札を行うベース trader と時間前市場で入札を行うピーク trader とに分けられる。したがって trader にはベース供給者、ベース需要家、ピーク供給者、ピーク需要家の 4 種類が存在する。trader は後述する facility を保有する。また式 1 に含まれるパラメータを持つ。

facility は供給者が保有する発電設備や需要家が保有する需要設備を表すエージェントである。facility はパラメータとして提示価格と数量を持つ。提示価格は、供給者の場合、電力の市場価格がこれを上回れば発電設備を稼働させて電力を供給するという判断の基準となる価格（操業停止点）である。需要家の場合は、電力の市場価格が提示価格を下回れば電力の供給を受けるという判断となる。数量は、当該設備の電力供給量もしくは需要量を表す。各 trader は提示価格および数量としてそれぞれの値を持つ facility を通常は複数個保有する。

order は trader から出される売り注文もしくは買い注文を表すエージェントである。order はパラメータとして指定時間帯、提示価格、数量を持つ。

本モデルの 1 ティック（NetLogo における離散的な時間ステップ）は 1 日に相当する。各ティックは 24 サブステップを含み、1 サブステップは 1 時間に相当する。

### 処理の全体とスケジューリング

本モデルにおける処理は 1 か月（28～31 ティック）の最初に実行される先物市場、各ティックの最初に実行されるスポット市場、サブステップごとに実行される時間前市場からなる。

先物市場ではその月の先物契約の取引が行われる。供給者と需要家の双方がその月の需要量の予測値に基づいて order を入札し、order 間でのマッチングが行われる。各 trader が先物市場で約定した分の供給量および需要量は、当該 trader のその月の供給量および需要量から差し引かれる。すなわち、供給者の場合は提示価格の低い facility の分から、需要家の場合は提示価格の高い facility の分から順に、供給量および需要量が先物市場で約定済となったとして扱われ、その月のスポット市場および時間前市場ではその分の order は入札されなくなる。

スポット市場では、ベース供給者とベース需要家との間でその日の 24 時間分の各時間帯についての電力供給の取引が行われる。ベース供給者は 1 日を通して同じ量の売り order を入札し、ベース需要家は各時間帯における需要量に応じた買い order を入札する。そして 24 時間分の時間帯ごとに order 間でのマッチングが行われる。マッチングに至らなかった order は時間前市場へと持ち越しとなる。

時間前市場では、その時点以降の各時間帯についての電力供給の取引が行われる。ピーク供給者はそれぞれの商品の予想価格を計算し、市場価格がそれを上回っていれば売り order を出す。ピーク需要家も同様に、それぞれの商品の予想価格を計算し、市場価格がそれを下回っていれば買い order を出す。これらの order にスポット市場から持ち越しとなっている order を加えて order 間でのマッチングが行われる。指定時間帯までにマッチングに至らなかった order はキャンセルされる。

order のマッチングは次の手順で行われる。まず提示価格が最安値の売り order と提示価格が最高値の買い order とを選択する。当該売り order の提示価格が当該買い order の提示価格以下である場合はマッチング成立としてマッチングされた数量を両者から差し引く。数量が 0 となった order は削除する。以上をマッチングできる order がなくなるまで繰り返す。

### 入力データ

入力データとしては、シミュレーション対象期間における 1 時間単位の需要量の予測値を外部から与える。単純化のために、1 日単位の需要量の予測値と、1 日の中の時間帯別の需要量の予測値とを与え、1 時間単位の需要量の予測値はそれらの積としても良い。また時間帯単位の需要量の予測値は当該時間帯に至るまでの

間にランダムに変動する。変動幅の大きさはパラメータとして指定する。

#### エージェントによる予測

ピーク需要家とピーク供給者は、時間前市場への入札に際して、それぞれの商品の価格を予測し、売り order または買い order を入札するか否かを予測値に基づいて決定する。入札価格の予測は式 1 により行う。

## 6 今後の予定

ここまで記述して来たようなモデルを構築し、次のような実験を行う予定である。

- 実際の電力年間需要量を用いた、先物価格やスポット価格の変動
- 電力の供給可能量の変化が、市場価格に与える影響
- 原油価格の変化が、市場価格に与える影響
- 再生可能エネルギーの増加に伴う供給量変動と先物市場導入との関係
- 発電事業者の最低価格保証制度の効果

これらの実験をとおして、電力先物市場が現物市場であるスポット市場と時間前市場に与える影響を分析する。

## 参考文献

- [1] 電力小売り全面自由化の進捗状況, 資源エネルギー庁 (2017)
- [2] Samadi, P., Schober, R., Wong, V.: Optimal energy consumption scheduling using mechanism design for the future smart grid, pp. 369 – 374 (2011)
- [3] 高橋: 北欧から考えるスマートグリッド～再生可能エネルギーと電力市場自由化～, 富士通総研 (FRI) 経済研究所: 研究レポート, No. 366 (2011)
- [4] Kurahashi, S., Jager, W.: Agent-based Gaming for Understanding Two-sided Electricity Markets, Proc. of Social Simulation (2016)
- [5] Kurahashi, S., Jager, W.: An Electricity Market Game using Agent-based Gaming Technique for Understanding Energy Transition, Proc. of 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (2017)
- [6] Daskalakis, G., Symeonidis, L., Markellos, R.: Electricity Futures Prices in an Emissions Constrained Economy: Evidence from European Power Markets, The Energy Journal, Vol. 36, No. 3 (2015)
- [7] Morales, J. M., Pineda, S., Conejo, A. J.: Scenario Reduction for Futures Market Trading in Electricity Markets, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, Issue: 2, (2009)
- [8] Islyayev, S., Date, OP.: Electricity futures price models: Calibration and forecasting, European Journal of Operational Research, Vol. 247, Issue 1 (2015)
- [9] Dehghanpour, K., Nehrir, M. H., Sheppard, J. W.: Agent-Based Modeling in Electrical Energy Markets Using Dynamic Bayesian Networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, Issue 6 (2016)
- [10] 電力先物市場協議会-報告書, 経済産業省 (2015)
- [11] 倉橋節也, 田中雅樹, 小林元, 社会科学におけるエージェントモデリング環境—NetLogo, Repast Symphony, Repast for High Performance Computing—, 人工知能, 30-4, pp. 460 – 467 (2015)
- [12] Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., and Railsback, S. F., The ODD protocol: A review and first update, Ecological Modelling, 221-23, pp. 2760 – 2768 (2010)