

修士論文

再生可能エネルギーを考慮した  
電力市場の価格決定方式の解析

平成 26 年 2 月 5 日 提出

指導教員 合原一幸 教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

37-126450

高橋 優斗

## 研究概要

本研究では電力市場における価格決定方式を、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を考慮しながら解析することを目的としている。

電力自由化以降、各国で電力市場が誕生し、誰もが電力を自由に取引できるようになった。電力市場においては実験をすることが出来ず、十分にシミュレーションを行わないとカリフォルニア電力危機のような事態が起こる可能性を秘めており、様々な観点から研究が行われている。特に、再生可能エネルギーは天候に左右される不安定性を伴うため、その影響を十分考慮する必要がある。電力市場におけるメカニズムを解析するため、多くの研究対象が存在しているが、その中で本研究では価格決定方式に着目した。これは市場における落札額の決定法の事であり、先行研究では主に統一価格オークション・提示価格オークションの比較が重点的に行われている。これらの価格決定方式にはそれぞれ良し悪しがあり、絶対的に良い方式は決定できないことが示されている。

本研究ではこの統一価格オークション・提示価格オークションに加え、近年注目されている Vickrey オークション、またそれを一般化した一般化 Vickrey オークションを解析対象とした。解析を行う際、評価基準として電力価格や発電事業者の利益などに加え、近年導入量が増加している再生可能エネルギー発電の導入による影響を考え、各価格決定方式の特徴を調査した。再生可能エネルギー発電の導入が進むことによる影響に関しては、価格決定方式によらず、電力価格が低下し、電力価格の標準偏差、つまり価格変動が大きくなることが分かった。価格決定方式毎の結果を比較すると、一般化 Vickrey オークションでは電力価格が非常に高くなるため発電事業者の利益確保は容易だが、再生可能エネルギーの出力の不安定性によって価格変動が他の価格決定方式と比較して大幅に増加してしまうように、不安定な方式であることが示された。また統一価格オークション・Vickrey オークションでは電力需要量によって再生可能エネルギーによる価格変動の大きさが変動し、安定した価格提供を出来る場合もあれば逆の場合もあり、そういった点ではある程度不安定な方式であると言える。これらに対して提示価格オークションでは、再生可能エネルギーの出力の不安定性の影響が限定されている様子が観測された。価格変動の大きさの最大値は 4 つの価格決定方式下で最小であり、電力需要量によって価格変動の大きさが他ほど変わらないといった点では安定した方式であると言える。しかし提示価格オークション下では電力価格も 4 つの価格決定方式下で最小であるため、発電事業者の利益確保が困難となるなど、欠点も存在していることを確認した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>4</b>
1.1	研究の背景 .....	4
1.2	研究の目的と意義.....	5
1.3	本論文の構成.....	7
<b>第 2 章</b>	<b>再生可能エネルギーを考慮した電力市場のエージェントベースモデル</b>	<b>8</b>
2.1	モデルの概要.....	8
2.2	発電事業者、発電所 .....	9
2.2.1	発電事業者の行動 .....	9
2.2.2	機械学習 .....	9
2.3	電力市場.....	11
2.4	消費者 .....	13
2.5	再生可能エネルギー .....	15
2.5.1	風力発電 .....	15
2.5.2	太陽光発電.....	16
2.6	シミュレーションの流れ .....	18
<b>第 3 章</b>	<b>価格決定方式の解析</b>	<b>20</b>
3.1	シミュレーションのための諸パラメータ設定 .....	20
3.2	電力需要量毎の価格決定方式の違い .....	22
3.3	再生可能エネルギーの不安定な出力による価格変動.....	29
3.4	本章のまとめ.....	33
<b>第 4 章</b>	<b>電力市場における取引のシミュレーション</b>	<b>34</b>
4.1	リアルタイム市場.....	35
4.2	一日前市場 .....	39
4.3	本章のまとめ.....	43
<b>第 5 章</b>	<b>結論と今後の課題</b>	<b>44</b>
5.1	本研究の結論.....	44
5.2	今後の課題 .....	45

謝辞	47
発表実績・参考文献	48
付録 異なる環境設定におけるシミュレーション .....	50

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景

電力は国民生活や産業の基盤であり、国民や事業者などに安定して供給を行う必要がある。電力自由化以前の日本においては、電力の供給は民営の電力会社はその地域において独占的に行ってきた。しかし高コスト構造・内外価格差の是正などが問題となり、その供給方式の非効率性がしばしば指摘されてきた。そこで経営を効率化するため、諸外国に倣って1985年に電力自由化が行われ、この流れの中で、誰もが自由に電力を取引できる場として電力市場が誕生した。市場においては発電事業者同士の競争、また消費者同士の競争が起こるため、価格の低下やサービスの向上が達成されることとなった。しかし電力は貯蔵することができないという特徴を持ち、万が一需給バランスが崩れると系統周波数の不安定化、さらには停電を引き起こす可能性があるため、他の市場とは異なり、電力市場においては生産量と消費量を等しくしなくてはならない(同時同量の法則)。このように特殊な性質をもつ電力市場においては独自の研究が多く行われており、そのメカニズムの解明が進められている。

一方、世界各国で再生可能エネルギーの注目が高まっている。現在発電の際の燃料としてよく用いられているものに石油・石炭・天然ガス・ウランなどがあるが、これらは将来的には枯渇してしまうことが問題点として取り上げられている。また温室効果ガスによる地球温暖化問題やそれに付随する海面の上昇、地表面の乾燥などの環境問題に対処するため排出権取引が導入され、温室効果ガスの排出量を低下させるための取り組みが世界各国で行われている。このような背景の中、燃料の枯渇することがなく、運用時に二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量の少ない再生可能エネルギーへの関心が高まっている。しかし再生可能エネルギー発電所(Renewable Power Plants, RPP)は建設コストが高いため発電コストが高く、また、出力が気象条件に左右されることがあるため、風力発電や太陽光発電などでは出力が不安定である点などが問題点として掲げられている。これらの点から再生可能エネルギー発電事業者は利益を確保するのが難しく、新規参入が進まない状況であったため、各国ではこれを促進するために固定価格買取制度を導入した。この制度は再生可能エネルギーによる電力を決まった価格で長期間買い取り、利益の確保が容易にできるようにしようというものである。日本では2012年まではこの制度の対象は太陽光発電のみであったが、それ以後にその他の再生可能エネルギーにも拡大された。これから分かるように、再生可能エネルギーへの注目は高まっており、今後ますますの導入が見込まれている。また日本では2011年の東日本大震災以降、環境に優しく人間への悪影響も小さい風力発電や太陽光発電等に対する国民の関心が高まっており、また同時に枯渇性燃料への依存を抑えるために、クリーンエネルギーの積極的な導入が急務であると言われている[1]。

## 1.2 研究の目的と意義

電力市場を対象とした研究は多く行われており、それらのほとんどが電力市場のメカニズムを解明するものである。研究対象としては「最適入札戦略」[2-4]、「市場支配力」[5-7]、「制度」[5,6,8]、「価格決定方式」[8-16]等が挙げられる。制度を対象とした研究では、新しい制度を提案するものや、市場にて実際に用いられている制度の効率を解析しているものが多い。具体的には、考案した制度が市場支配力の低下に繋がることを示した研究[5]や、現在使われている市場の制度が効率のよいものか否かを示した研究[6]などがある。市場支配力とは市場への影響力のことであり、例えば大口の発電事業者等は大きい市場支配力を持つ。電力市場に限らず全ての市場において、この市場支配力は市場を操作する力となり得るために市場に悪影響を及ぼすものであると考えられており、各国は市場支配力を抑えるような市場の作成に取り組んでいる。この市場支配力に着目した研究も行われており、具体的には市場支配力を観測・解析するための方法を提案したもの[7]などがある。

よく取り扱われている研究テーマとして価格決定方式がある。詳細は第 2 章にて述べるが、電力市場では落札価格を決定する方法として、主に統一価格オークションと提示価格オークションという 2 つの方式が存在している。これらの違いは様々な観点から解析されている。しかし各方式ともに長所、短所を持ち合わせており、いずれかが絶対的に優れているとは言えず、用いられている方式も国によって異なっている。このテーマにおいては、各価格決定方式の違いをエージェントベースモデル、Q 学習を用いて数学的なアプローチによって解析しているもの[8]や、ゲーム理論を応用し経済学的な観点から解析している研究[13]などがある。最後に、電力市場に対する研究テーマとして最適入札戦略がある。ある市場において、1 発電事業者に着目し、どのように入札戦略を立てれば自身の利益を最大化することができるかを解析している。解析方法としてもモンテカルロ法・遺伝的アルゴリズムを用いたもの[2]から Q 学習を用いたもの[4]まで、多岐に渡って最適戦略が提案されている。

以上に挙げたように、電力市場においては様々な研究テーマが存在しているが、本研究ではそれらのうち、価格決定方式に焦点を当てている。電力市場のメカニズムは多くの手法で解析されているが、これらの結果は電力市場をとりまく環境に影響を受けやすいと言われており、解析を行う際には対象とする市場独自の解析を行う必要がある。そこで本研究では日本におけるデータを参考とした発電事業者の集合を考え、代表的な価格決定方式である統一価格オークションと提示価格オークションの違いを数値解析、時系列データを使用して解析する。これらの比較は多くの研究で行われているが、観測される結果はその市場が置かれている環境によって異なるため、その市場が何を重視しているかを考えた上で、その市場にあった価格決定方式を決定する必要がある。統一価格オークション、提示価格オークションは電力市場において落札価格を決定する際に実際に用いられている価格決定方式であるが、これらとは別に、近年オンラインオークション等で用いられていることから注目を集めており、効率のよい取引が可能になると言われている Vickrey オークション、またそれをもとに提案された一般化 Vickrey オークション[17,18]についても考え、これら 4 方式を比較・解析する。

解析を行うにあたっては、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響も考慮する。昨今の電力不足、クリーンエネルギーへの関心の高さ、また政府が掲げている 2020 年における再生可能エネルギー導入量の目標などから、今後再生可能エネルギーの導入はより一層進むと考えられている。そのような背景の中で、再生可能エネルギー発電事業者の導入が進むことによる影響としては、出力の不安定性が電力系統の電圧や周波数に悪影響を及ぼす可能性などがあると言われており、これを解析するため安定性の観点から研究が進められている。また電力市場への参入による影響としては、限界費用の低さ・出力の不安定性が電力価格へ何らかの影響を及ぼすと考えられており、電力価格の観点からも研究が行われている[15,19]。このように、再生可能エネルギー導入に関しても多くの観点から研究

が行われており、この分野における研究の重要性は今後ますます高まると考えられている。

上で述べた背景を総合して、本研究では再生可能エネルギー発電事業者の電力市場への参入による影響を解析することを通し、市場における価格決定方式の比較検討を行うことを目的としている。このような影響を解析した研究としては、事業者の利益確保のための価格決定方式をマクロな視点から解析しているもの[15]などがある。本研究ではよりミクロな視点からの研究として、参加事業者の行動を考慮するエージェントベース解析を利用し、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を、各価格決定方式のもとで解析することを目的としている。また電力需要量を固定した場合のシミュレーションや、実際の一日の電力需要量推移を考慮した上でのシミュレーションを通し、各価格決定方式下での結果を比較・検討することを目的としている。

### 1.3 本論文の構成

本論文では、まず本章において電力市場を取り巻く背景、またその市場を対象とした研究の紹介、それらを基にした本研究の位置付けを行った。次に、第 2 章において電力市場の構成を説明する。具体的には、電力市場を構成しているエージェントについての説明を行い、シミュレーションを行うためにそれらの行動のモデル化し、電力市場を数理モデルとしてどのように解釈するかを示す。第 3 章においては、第 2 章で紹介したモデルを利用し、消費者の行動を考慮しない場合について、各評価基準の下で価格決定方式の差がどのように現れてくるのか、各発電事業者の出力や利益、電力価格などを観測することによって解析する。また再生可能エネルギー発電事業者の市場参入による影響はどのようなものなのか、価格決定方式によって現れてくる差について解析する。さらに第 4 章では消費者の行動を考慮し、リアルタイム市場・一日前市場の 2 つの市場を考え、実際に市場で取引が行われた際の解析結果を示す。以上をもとに第 5 章では本論文のまとめ、今後の課題について言及する。また、付録においては第 3 章で得られた結果の確認のため、本文とは異なる環境設定のもと再生可能エネルギー発電事業者の市場参入による影響について解析した結果を示す。



## 第 2 章 再生可能エネルギーを考慮した電力市場のエージェントベースモデル

### 2.1 モデルの概要

本章ではシミュレーションを行うための電力市場のモデルについて説明する。電力市場においては実験を行うことが難しいため、解析を行う際には電力市場をモデル化し、コンピュータ上でシミュレーションを行うのが一般的である。モデル化には様々な手法が取られているが、本研究ではエージェントベースモデルに着目する。このモデルを使用することで市場に参加するエージェントを個別にモデル化することができるとともに、人間の行動を機械学習によってモデル化することができ、自由度の高いモデルであるため市場における制度やメカニズムの解析によく用いられている。以下では電力市場のエージェントベースモデルの概要を示す。

まず、本研究で用いた電力市場のモデルを図 2.1 に示す。エージェントベースモデルにおいては、市場を構成する各エージェントの行動やエージェント間の相互作用をモデル化して解析することにより、市場全体の解析を行う。本モデルでは、電力市場は発電事業者、発電所、電力市場、消費者というエージェントから成るとする。このモデルにおいては、発電事業者が発電所の作った電力、入札額を電力市場に入札し、電力市場は消費者からの需要量をもとにそれらを落札するというメカニズムになっている。本モデルは電力市場を単純化したものであり、下記に挙げるような簡略化を行っている。

1. 各発電事業者は発電所を 1 つしか持たない
  2. 発電事業者にかかるコストは発電コストのみであり、送電コストや送電線による制約は考えていない
  3. 消費者はある集合体として存在しており、消費者同士の競争は考えられていない
- 本論文では価格決定方式の違いを解析対象としており、モデルを複雑にするとどのパラメータが結果に影響を及ぼしているのかが不透明になる恐れがあるため、このように簡略化された市場モデルにおいて解析を行っている。また、再生可能エネルギーに対しては出力が不安定であるなど他と異なるため、個別にモデル化を行う。

次に、各エージェントの行動、ならびにその行動のモデル化について示す。

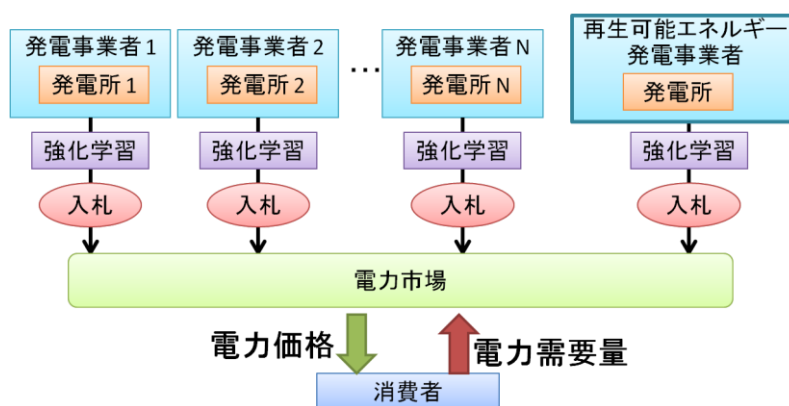


図 2.1. 電力市場のエージェントベースモデル

## 2.2 発電事業者、発電所

本節では電力市場を構成するエージェントのうち、発電事業者・発電所の行動について説明する[16]。発電所による出力を発電事業者が入札するため、ここではまとめて考えている。2.2.1項で発電事業者の行動について、2.2.2項で発電事業者のモデル化に用いた機械学習について説明する。

### 2.2.1 発電事業者の行動

発電事業者は自身の発電コストを考慮することで入札額を決定し、発電所の作り出した発電量、入札額をあわせて電力市場に入札する[16]。入札量に関しては、基本的には発電事業者は発電容量をそのまま入札するが、再生可能エネルギー発電事業者は出力が不安定であるため、その時点における出力を入札量とする。まず、発電事業者が発電を行う際に生じるコストの計算は燃料費、運転維持費から成るものとし、式(2.2.1)のように計算する。

$$c(q) = qc_m + qc_f \quad (2.2.1)$$

$c$ : コスト,  $c_m$ : 運転維持費,  $c_f$ : 燃料費,  $q$ : 発電量

本来、発電コストの計算には設置コストも含めるが、今回は既存の施設を利用し、新規に建設することはないと仮定しているため、考慮していない。このように計算された発電コストを基に発電事業者は入札を行うが、入札を行い、電力市場に落札されたとき、発電事業者は式(2.2.2)で計算される利益を得られるものとしている。

$$R = pq - qc_m - qc_f \quad (2.2.2)$$

$R$ : 利益,  $p$ : 入札額

発電事業者の行動としては、式(2.2.2)で計算される利益が最大となるように入札額を決め市場に入札する、と仮定している。このような発電事業者の行動をモデル化するため、本研究では機械学習を用いる。以下では、発電事業者の行動のモデル化に用いた機械学習について説明する。

### 2.2.2 機械学習

機械学習とは人間の学習能力と同様のものをコンピュータ上で実現しようとする技術の事であり、幅広く研究が進められている。機械学習には様々な種類があり、場面によって用いられるものが異なるが、本研究ではそれらのうち、強化学習を使用して発電事業者の行動をモデル化している。強化学習とは、自分の取り巻く環境によって取るべき最適な行動が変わるケースに有効な学習方法であり、自分がとった行動によって周りの環境から得られる報酬を、学習を行う上での指針とする。本研究では代表的な教師なし学習かつ強化学習であるQ学習を用いており[16]、機械学習におけるQ学習の位置付けを図2.2に示す。

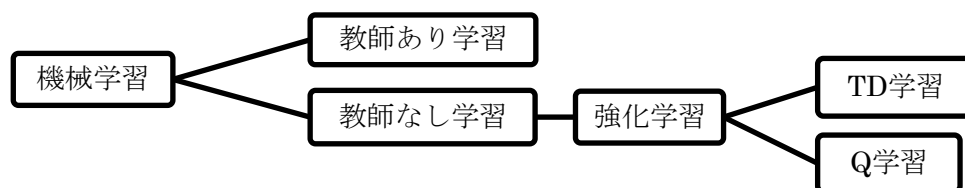


図 2.2. 機械学習

まず、ある状態  $s = \{s_1, s_2, \dots, s_{M_s}\}$  のときに取れる行動の集合が  $a = \{a_1, a_2, \dots, a_{M_a}\}$  のように存在しているとする。後述するが、本研究では発電事業者のモデル化のため、第3章においては状態  $s$  として電力需要量 ( $s = \{55, 60, \dots, 190\}$ ) を、第4章においては時刻 ( $s = \{0, 1, \dots, 23\}$ ) を対応させている。それと同時に行動  $a$  として入札額 ( $a = \{0, 0.2, \dots, 15\}$ ) を対応させていることに注意する。各行動に対して行動価値関数、つまりその行動を選択することにどれほどの価値があるのかを示す関数  $Q(s, a)$  を設定しておく。行動価値関数の大きさに応

じてその行動を選択する確率 $\pi(s, a)$ が変化し、一回の試行において、まずエージェントは各行動の選択確率に基づいて一つの行動を選択する。そしてその行動によって得られた報酬の大きさに応じてその行動の価値関数を更新し、行動の選択確率も同様に更新する。このような試行を複数回重ねることにより、最終的に状態 $s$ において最適な行動を選択することが出来るようになる、というのが Q 学習の概要である。具体的な計算式としては、ある状態 $s_i$ のときに選択可能な行動の集合 $A_s$ の中からある行動 $a_j$ を選択し、それによって利益 $R$ が得られたと仮定すると、行動価値関数を

$$Q(s_i, a_j) = (1 - \alpha)Q(s_i, a_j) + \alpha R \quad (2.2.3)$$

$\alpha$ : 学習率

で更新する。ここで、行動を選択する際にはボルツマン選択を採用している。ボルツマン選択とは、式(2.2.3)で計算された各行動の行動価値関数を基に、状態 $s_i$ における行動 $a_j$ の選択確率を

$$\pi(s_i, a_j) = \frac{\exp(Q(s_i, a_j)/T)}{\sum_{a_k \in A_s} \exp(Q(s_i, a_k)/T)} \quad (2.2.4)$$

$T$ : ボルツマン温度

で計算し、この確率を基に選択を行う方式の事である。式(2.2.3)、(2.2.4)において用いられている学習率、ボルツマン温度は試行が進むのに従って

$$\alpha = \frac{T_\tau}{T_\tau + 2t} \alpha_0 \quad (2.2.5)$$

$$T = (0.999)^t T_0 \quad (2.2.6)$$

$T_\tau$ : 総試行回数、 $t$ : 試行回数、 $\alpha_0$ : 初期学習率、 $T_0$ : 初期ボルツマン温度

で更新。これにより、試行が進むとともに学習率は $\alpha_0/3$ に収束し、ボルツマン温度は 0 に近づく。これらが小さくなることにより、選択した行動による結果が行動価値関数、確率に与える影響が徐々に小さくなり、最終的に収束する。以上をまとめた、本モデルにおける発電事業者の行動の全体的な流れを以下に示す。

1. ある状態 $s_i$ において取ることのできる各行動 $a_j$ に対して、行動価値関数 $Q(s_i, a_j)$ 、選択確率 $\pi(s_i, a_j)$ の初期化
2. 選択確率 $\pi(s_i, a_j)$ の大きさに応じて、各発電事業者が入札額の決定
3. 2.にて決定された各発電事業者の入札により、電力市場が落札(落札方法などの詳細は後述)、各発電事業者が利益を獲得
4. 利益の大きさに応じて、式(2.2.3)、(2.2.4)にて行動価値関数、選択確率を更新
5. 式(2.2.5)、(2.2.6)にて学習率、ボルツマン温度を更新
6. 指定の学習回数に達するまで 2~4 を繰り返す

## 2.3 電力市場

電力市場は発電事業者からの入札額・発電量を受け取り、消費者からの需要量を基にそれらの落札を行い、落札額に応じた電力価格を消費者に示す。具体的には各発電事業者からの入札を入札額の低い順に並べ、消費者からの需要量に達するまで価格の安いものから落札していくのだが、ここで落札額を決める際には価格決定方式を導入している。この価格決定方式には主に統一価格オークションと提示価格オークションというものが存在しており、いずれも長所・短所があるために今なお比較検討が進められている。本研究ではそれらの方式に加え、近年注目が高まっている Vickrey オークション、またそれを基にして提案されている一般化 Vickrey オークション[17,18]を導入し、比較対象としている。各方式の概要を図 2.3.1、表 2.3.1 を用いて説明する。

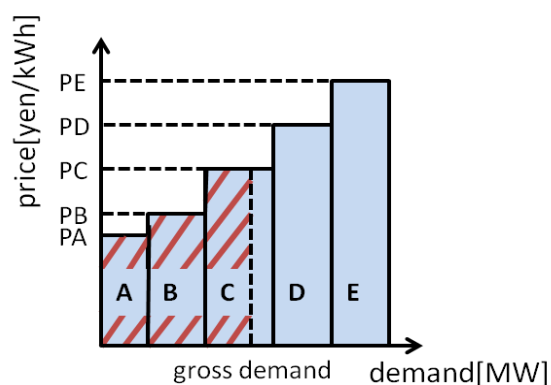


図 2.3.1. 価格決定方式の例

表 2.3.1. 各価格決定方式下での落札額

		Uniform Price Auction	Pay-as-bid Auction	Vickrey Auction	Generalized Vickrey Auction
market value	A	PC	PA	PD	PE
	B	PC	PB	PD	PE
	C	PC	PC	PD	PD
	D	0	0	0	0
	E	0	0	0	0

説明のため、5つの発電事業者が存在し、それぞれ入札額と発電量の関係が図 2.3.1 のようになっていると仮定する。また、この例においては総需要量が発電事業者 A ~ C で賄うことができると仮定している。統一価格オークションにおいては、総需要量に達した時点での入札額、つまりこの図では PC が全ての落札対象の発電事業者の落札額になる、という方式である。それに対し提示価格オークションでは、自身の入札額にて落札されるため、「賭け」に近い性質をもつ方式であると言える。さらに本研究ではこれらに加え、Vickrey オークション、一般化 Vickrey オークションを導入する。Vickrey オークションとは第二価格決定方式とも呼ばれており、落札者に支払われる額は、落札されなかった発電事業者の入札額のうち均衡価格(PC)に最も近いもの、つまり PD に統一される。統一価格オークションと似た方式であるが、統一価格オークション下における落札者同士の駆け引きを無効化できる方式であると言われており、主にインターネットオークションで採用されている方式である。これを一般化したものとして一般化 Vickrey オークション[17,18]が提案されている。この方式においては、各発電事業者の落札額が落札対象外の発電事業者の入札額によって決定される。この例では、発電事業者 C は発電事業者 D の入札額で、発電事業者 B は

その次の落札対象外の発電事業者 E の入札額によって落札される。需要量が一定である場合についての例を図 2.3.2 に示す。この方式においては、供給曲線を描いた時に総需要量に達した点から垂直におろした線に対して対称に折り返すことで落札額を決定する。一般化 Vickrey 方式下では入札額が安いほど高く落札されるため、他の価格決定方式のように市場参加者が利益を得るために入札額をある程度高くする必要がなくなり、各参加者は自分の真の入札値を入札すると言われている。

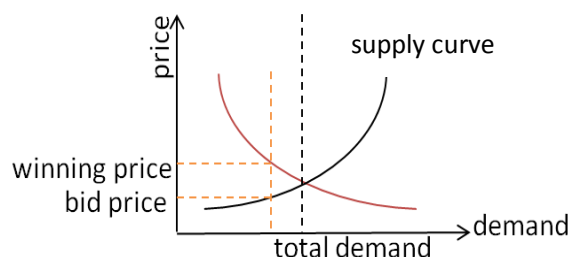


図 2.3.2. 一般化 Vickrey オークションのメカニズム

以上に述べたような価格決定方式の研究は多く行われており、各方式の優劣は評価基準をどのように設定するかによって異なることが示されている。具体的には、統一価格オークションにおいては電力価格が高くなるために発電事業者の利益確保が容易になるため発電事業者の観点からは良いと示されている[14]一方、提示価格オークションでは電力価格が安価になり、需要毎の価格変動も小さくなるために消費者の視点から良いと解析されている[8]。一方で提示価格オークションによって価格が高くなると解析されている研究もあり[11]、これらの良し悪しは評価基準ならびに電力市場を取り巻く環境に大きく左右されることがうかがえる。そのため採用されている方式も国によって異なり、真に効率の良い市場を作成するためには慎重な議論を行い、その市場に合った価格決定方式を選択する必要がある。

## 2.4 消費者

前述の通り、本来の電力市場においては発電事業者と同様に消費者同士も自身の需要量と入札額を入札し、電力市場は双方の入札の均衡点を取ることによって落札額・落札量を決定する。本モデルにおいては簡略化のため、消費者の集合をまとめて一つと捉えており、消費者同士の競争については考慮していない。消費者の集合の行動に対しては基本的なデマンドレスポンスの考えを導入し、モデル化を行っている。

消費者はまず初期需要量を電力市場に提出し、その需要量に応じて発電事業者が入札を行い、電力市場が落札することで電力価格が決定される。消費者はその価格が高かった場合に電力需要量を小さく、安かった場合には電力需要量を大きくする、というように電力需要量を変化させる。このような消費者の行動と発電事業者の行動の均衡点を計算し、最終需要量、最終価格を決定する。この消費者の行動をモデル化する際に、広く用いられている価格弾力性という概念を導入する。これは価格が1%上昇したときに需要量がどれほど変化するかを表す指標であり、電力価格を $p$ 、電力需要量を $q$ としたとき式(2.4.1)で定義される。

$$E(h) = \frac{dq/q}{dp/p} \quad (2.4.1)$$

一般的に電力市場においては、電力需要量に対する電力価格の価格弾力性はおよそ-5%程度であると言われている。消費者は全員同じ行動を取ることにはないために価格弾力性は電力需要量の大きさによって変わるのが現実的であるが、ここでは最も一般的かつ単純な行動パターンとして、電力需要量の大きさに依らず価格弾力性が一定である場合について考える。この場合、式(2.4.1)を変形することにより、電力価格と電力需要量の関係が式(2.4.2)のように表すことが出来る。

$$\begin{aligned} \frac{\frac{dq}{q}}{\frac{dp}{p}} = e_p &\Leftrightarrow \frac{dq}{q} = e_p \frac{dp}{p} \\ &\Leftrightarrow \log(q) = e_p \log(p) \\ &\Leftrightarrow p = Cq^{1/e_p} \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

$e_p$ : 価格弾力性

ここで、 $C$ は初期値( $p_0, q_0$ )によって決定される。本モデルにおいては初期需要量 $q_0$ として取引時刻の需要量を与え、初期価格 $p_0$ は常に5.0[yen/kWh]に設定する。また、価格弾力性は電力需要量によらず-5%であるとしている。このようにパラメータを設定し計算することによって需要曲線を描くことができ、例を図2.4.1に示す。発電事業者の入札を価格の安い順に並べることで供給曲線を描き、需要曲線との交点を計算することで最終需要量、最終価格を決定する。本モデルにおいては基本的な行動を考えたが、デマンドレスポンスとしては研究が幅広く進められており、価格の変化に対して考えられる消費者の行動を数パターンに分類し、各パターンの人数によって重み付けした複合モデル[20]など、応用が進んでいる。

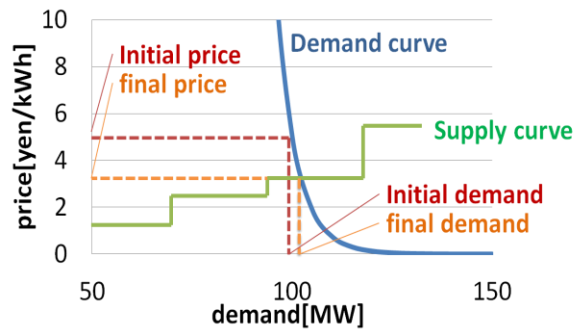


図 2.4.1. 取引額・取引量の決定(消費者行動有)

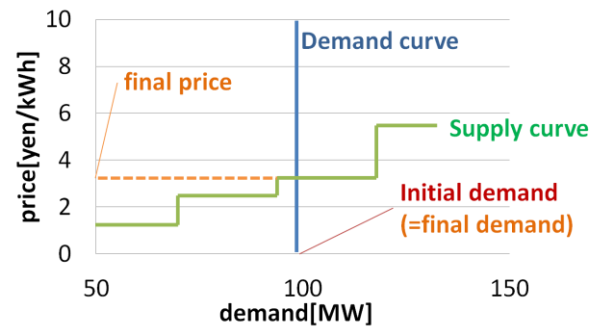


図 2.4.2. 取引額・取引量の決定(消費者行動無)

消費者の行動を考慮しない場合には図 2.4.2 に示すように、消費者の需要量は電力価格に関わらず一定であり、その際は初期需要量・最終需要量、初期価格・最終価格の概念が導入されないことに注意する。3 章ならびに 4 章のリアルタイム市場、付録においては図 2.4.2 のように消費者の行動が考慮されていない場合についての結果を示しており、4 章の一日前市場の結果においてのみ消費者の行動を考慮し、図 2.4.1 のような需要曲線を設定する。

## 2.5 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーは他の発電源と異なり、自然的なものを発電源とするために刻一刻と出力が変化する発電方式であり、個別にモデル化する必要がある。本研究においては再生可能エネルギーとして、日本における導入が進んでいる風力発電、太陽光発電を考えている。現在のこれらの発電容量は他と比べて小さいが、これらの発電所の促進のため、再生可能エネルギーによる電力を高い価格で買い取る固定価格買取制度が日本においても導入されており、2012年にはこの制度の買取対象が拡大されたことから、今後ますます導入が進み、総発電容量も大きくなることが予想されている[1]。

### 2.5.1 風力発電

ここでは本モデルに用いた風力発電についてのモデルを説明する。風力発電をはじめとした再生可能エネルギーは他の発電源とは違い、風や太陽光など自然的なものに大きく左右されるため出力が不安定であるため、個別にモデル化を行う必要がある。

風力発電は、風速が一定風速(カットイン風速)以上で発電を開始し、風速とともに発電量が大きくなる。発電量が定格出力に達する風速(定格風速)以上では出力が一定となるような制御を行う。さらに風速が強くなり、ある一定風速(カットアウト風速)を越えた場合には、発電機をはじめ施設への危険を防ぐために運転を停止する。このように風力発電所は風速に大きく左右されることから出力が不安定であり、電力系統や系統周波数への悪影響が問題視されている。

風力発電の出力には風向なども関係してくるためモデル化することは難しいが、このような出力特性を数学的に近似するため、ここでは最も簡単なケースとして、風速と出力の関係を線形で近似する。つまり、発電容量を $C_w$ 、カットイン風速・定格風速・カットアウト風速をそれぞれ $v_{in}$ 、 $v_r$ 、 $v_{out}$ で表したとき、発電量 $q$ を

$$q(v) = \begin{cases} 0 & (v \leq v_{in}, v_{out} \leq v) \\ C_w \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} & (v_{in} \leq v \leq v_r) \\ C_w & (v_r \leq v \leq v_{out}) \end{cases} \quad (2.5.1)$$

で計算するものとする[16]。これをもとにした出力曲線を図 2.5.1 に示す。

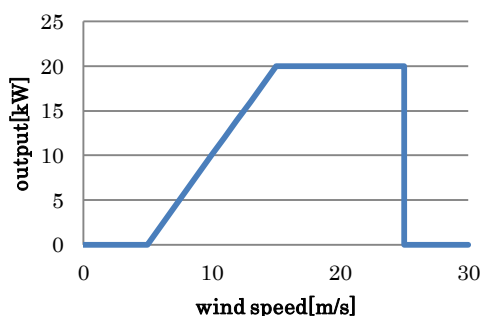


図 2.5.1. 風速と風力発電の出力の関係

式(2.5.1)から分かるように、ある時刻における風力発電の出力を計算するにはその時刻の風速のデータが必要となる。そこで本研究でケーススタディを行う際には、気象庁に提供して頂いた、実際に観測された風速のデータを使用する。図 2.5.2 に、ある数日間における時刻毎の風速の分布を示す。



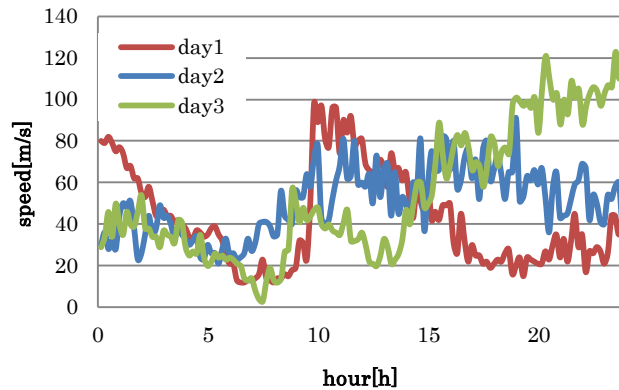


図 2.5.2. ある数日における時刻毎の風速

このように、風速に関しては時刻毎に法則性があるわけではなく、非常に予測が難しいため、何らかのモデル化を行うより時系列データを使用するのが良いと考えられる。この風速のデータを使用し、式(2.5.1)に従って試行毎に風力発電の出力を計算する。

## 2.5.2 太陽光発電

太陽光発電も他の発電と異なり出力が不安定であるため、個別にモデル化を行う[16]。太陽光発電においては太陽の光エネルギーを太陽光電池が受け取り、電力に変換することで発電しているが、風力発電と同様に、日射量という自然的なものが発電源となるため出力が不安定となる。日射量と出力の関係は

$$q(l) = ClI \quad (2.5.3)$$

$l$ :日射量,  $C$ :容量,  $I$ :損失効率

で計算されるとする。ここで、損失効率は使用する太陽電池におけるハードウェア上の特性によって決まっている。また、太陽光発電における発電容量は、ソーラーパネルの温度が 25℃、エアマスが 1.5、放射照度(日射量とほぼ同意)が 1kW/m<sup>2</sup>のときの発電量のことを表すため、日射量によっては実際の発電量が発電容量を越えることがあることに注意する。日射量においては、風力発電のモデル化における風速のデータと同様に、気象庁より提供されたデータを使用する。具体的な時系列データを図 2.5.3 に示す。

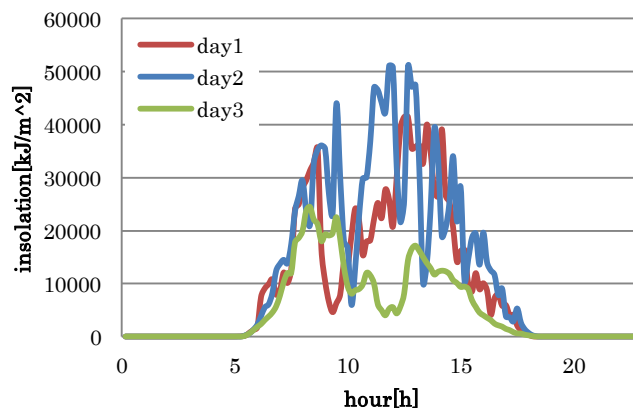


図 2.5.3. ある数日における時刻毎の日射量

風速のデータ、日射量のデータとしては一年のうち需要量が最小である 4 月、日射量・需要量ともに最大である 8 月、日射量が最小である 12 月のデータを使用する。2011 年 4 月、8 月、12 月からあらかじめ対象とする月を決め、試行毎にその月から 1 日をランダム

に選び出し、その日の1時間毎の風速、日射量を使用する。

図 2.5.2, 2.5.3 から分かるように、風速・日射量は時刻ごとに変動し、その出力も不安定であることが予測される。そのため、再生可能エネルギーの出力次第では各発電事業者の選択する行動が変化することが考えられる。そこで本研究では先に示した発電事業者の行動のモデル化において、各発電事業者は再生可能エネルギーの出力の大きさに応じて異なる行動価値関数を設定することで、利潤の最大化を図るものとしている。

## 2.6 シミュレーションの流れ

本項では、以上に述べた各エージェントのモデルをもとに、シミュレーションのフローチャートを示す。図 2.6.1 に 3 章における結果の導出に用いたシミュレーションの流れを、図 2.6.2 に 4 章におけるシミュレーションの流れを示す。3 章においては電力需要量毎の結果を検討するため、消費者の行動は考慮しておらず、常に需要量一定の下で計算している。4 章では実際の市場を参考にしたシミュレーションを行っているが、特にリアルタイム市場と一日前市場について考えている。リアルタイム市場とは、あらかじめ契約と同時に現物が取引される市場であり、取引量が予め決められており入札による変動がない市場のことである。それに対し一日前市場においては、取引の一日前に需要側・消費側双方の入札に基づき取引量・取引額を決定するため、これらの入札によって取引量が変動する。これらをモデル化するため、上記に挙げた各エージェントのうち、消費者の行動を考えないものをリアルタイム市場、考えるものを一日前市場としている。図 2.6.2 に示すものは一日前市場におけるシミュレーションであり、リアルタイム市場では消費者は行動しないため図 2.6.2 のうち需要曲線の計算の部分が省かれたものとなることに注意する。

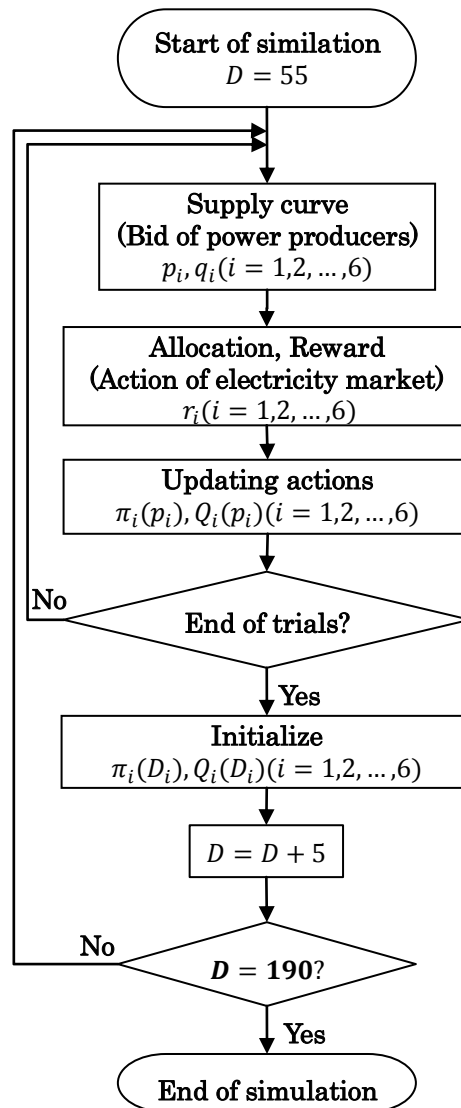


図 2.6.1. 第 3 章におけるシミュレーションのフローチャート

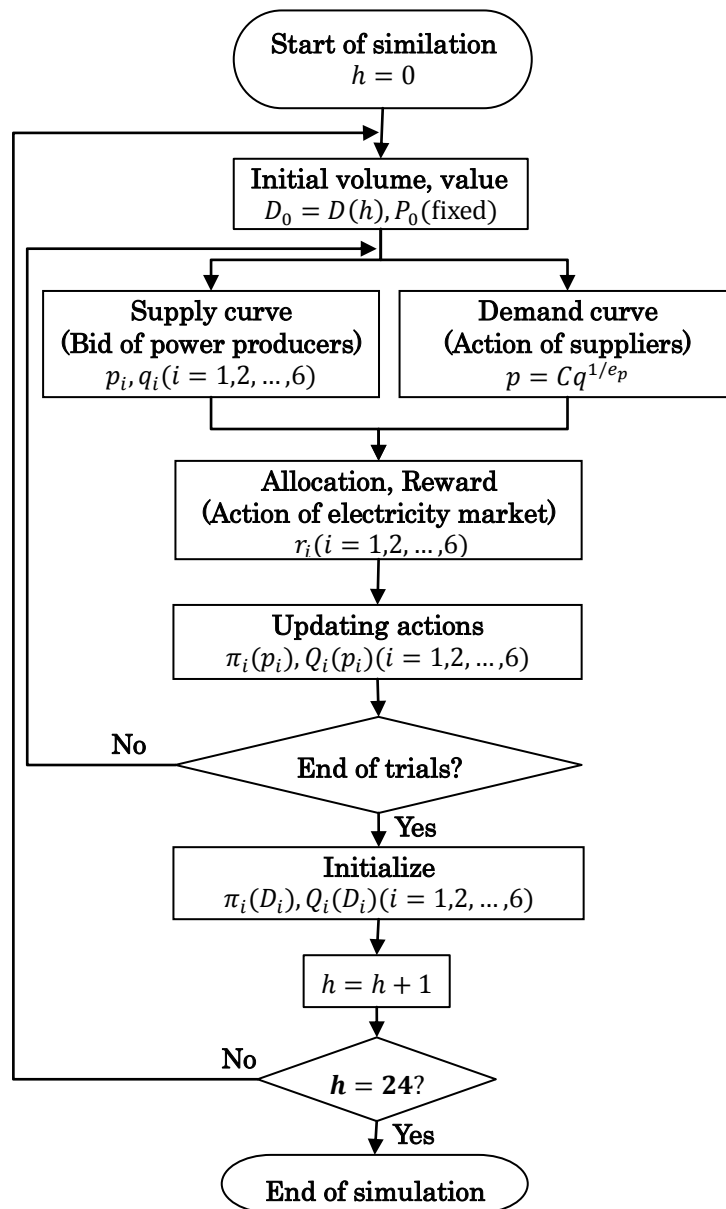


Fig.2.6.2. 第4章における一日前市場でのシミュレーションのフローチャート

## 第3章 価格決定方式の解析

### 3.1 シミュレーションのための諸パラメータ設定

本章では第2章にて紹介したモデルを使用し、各価格決定方式下における電力価格、利益などの違いの解析を行うとともに、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を解析した結果を示す。まずはシミュレーションに用いた各発電事業者の発電容量や運転維持費・燃料費などの諸パラメータを示す。ケーススタディのため、先行研究[16]を参考にして日本における各発電所の発電容量比をもとにした5つの発電事業者を考え、各発電所の発電源は石炭、石油、天然ガス、水力、原子力であるとする。再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響をみるため、風力発電事業者、太陽光発電事業者も考えるが、現在の日本の再生可能エネルギー発電事業者の発電容量は他に比べ極端に小さく、この場合には参入による目立った影響が観測されない。そのため本研究においては参入による影響を分かりやすくするために、導入が進んだケースについて考える。具体的には、本研究では3つのケースに対してシミュレーションを行っており、ケース0として再生可能エネルギー発電事業者がないケース、ケース1として導入がある程度進んだケース(発電容量がそれぞれ20[MW])、ケース2として導入がさらに進んだケース(発電容量がそれぞれ50[MW])を考えている。また、原子力発電に関しては出力を調整することは技術面、コスト面から困難であるとされているため、オークションには参加せず、常に一定量(容量: 50[MW])を出力するものと仮定している。表3.1.1に、原子力発電事業者を除いた6つの発電事業者の発電容量、運転維持費、燃料費を示す。特に水力発電、風力発電、太陽光発電は自然エネルギーであるため燃料費は0[yen/kWh]であるとしている。

表 3.1.1. 発電所のデータ[16]

	resource	capacity[MW]			maintenance cost [yen/kWh]	fuel cost [yen/kWh]
		case0	case1	case2		
#1	coal	50			1.5	2.6
#2	oil	30			1.5	6.5
#3	natural gas(NG)	50			1.1	3.8
#4	hydro	50			2.0	0
#5	wind	0	20	50	1.0	0
#6	photovoltaic	0	20	50	1.0	0

2章において、発電事業者は各状態 $s_i$ において最適な行動 $a_j$ を選ぶようにモデル化することを説明したが、各行動 $a_j$ に対応する入札額 $p(a_j)$ は、

$$p(a_j) = 0.2a_j (a_j \in A = \{1, 2, \dots, 75\}) \quad (3.1.1)$$

で計算されるとする。風力発電事業者・太陽光発電事業者は各ケースでの発電容量をもとに、その時点での風速や日射量を考慮した上で2.2節にて紹介したように計算される発電量を、その他の発電事業者は表3.1.1に示されている発電容量を電力市場への入札量としている。次に、2.1.1項において説明した発電事業者の学習行動に用いたパラメータについて表3.1.2に示す。このパラメータ設定においては、

- ・十分な学習回数設定により、多くのケースにおける学習を行うことでより精密な学習を目指す
- ・学習に用いるボルツマン温度が小さくなりすぎると、式(2.2.4)において分母が発散してしまい正しい学習の妨げになる恐れがあるため、分母の発散を抑える程度のパラメータの設定を行う

以上の項目を考慮した上で決定している。

表 3.1.2. 数値計算におけるパラメータ設定

time steps for learning ( $N_l$ )	9000
time steps for observations ( $N_o$ )	100
number of trials ( $N_t$ )	20
initial learning rate ( $\alpha_0$ )	0.25
initial Boltzmann temperature( $T_0$ )	500

最後に風力発電、太陽光発電のモデル化に用いた諸パラメータを表に示す。

表 3.1.3. 再生可能エネルギーのモデル化に用いたパラメータ設定[16]

cut-in wind speed[m/s] ( $v_{cutin}$ )	5
rating wind speed[m/s] ( $v_r$ )	15
cut-out wind speed[m/s] ( $v_{cutout}$ )	25
loss rate of photovoltaic ( $l$ )	0.77

以上に挙げたような環境設定のもとでシミュレーションを行い、各価格決定方式による違いを解析する。以下では、複数の観点から価格決定方式の違い、また再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を解析した結果を示す。

### 3.2 電力需要量毎の価格決定方式の違い

本項では、電力需要量が一定である場合の結果を示す。つまり、消費者の行動が考えられておらず、初期需要量と最終需要量が一定であり、ある決まった電力量をやり取りするとした場合において、前述の3ケースに対してシミュレーションを行う。ここでは、ある一時間での取引を行った結果を示す。つまり、ここで考えている風力発電事業者・太陽光発電事業者の出力は、対象とする月のうち一日を選び、その中からある一時間を選択し、そこでの風速・日射量を考慮した上で計算する。

まず、需要量を55[MW], 60[MW], ...と変化させた場合の電力需要量と各発電事業者の入札額の関係を示す。ここでは、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を分かりやすくするため、ケース0・ケース2について考えており、統一価格オークション下での結果を図3.2.1, 3.2.2に、提示価格オークション下での結果を図3.2.3, 3.2.4に、Vickreyオークション下での結果を図3.2.5, 3.2.6に、一般化Vickreyオークション下での結果を図3.2.7, 3.2.8に示す。

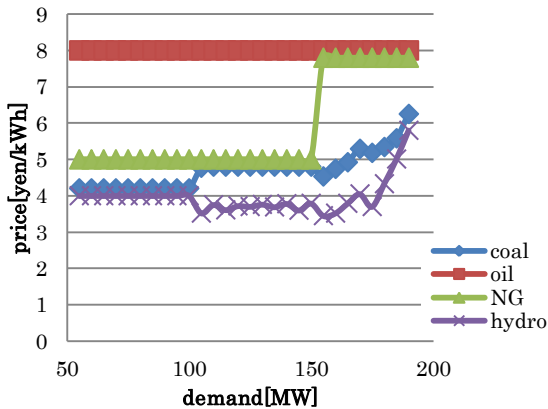


図 3.2.1. 統一価格オークション下でのケース 0 における電力需要量と入札額の関係

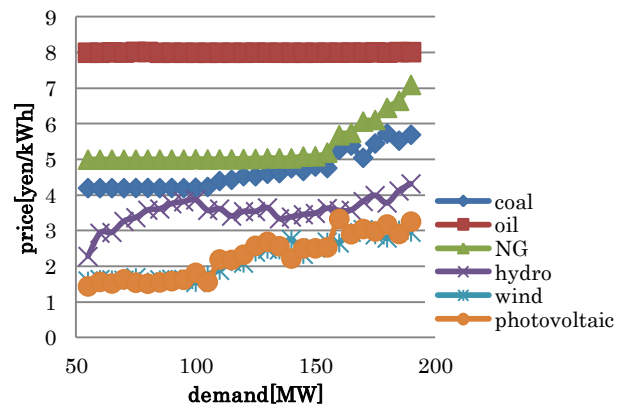


図 3.2.2. 統一価格オークション下でのケース 2 における電力需要量と入札額の関係

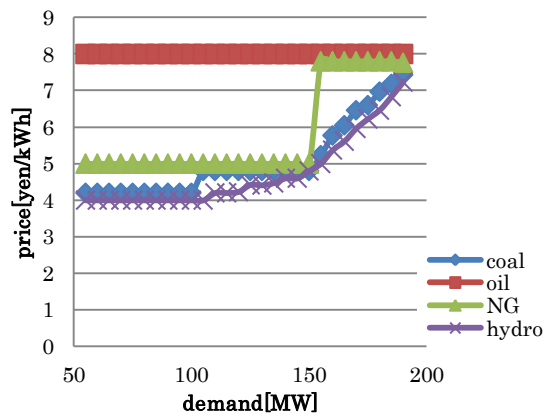


図 3.2.3. 提示価格オークション下でのケース 0 における電力需要量と入札額の関係

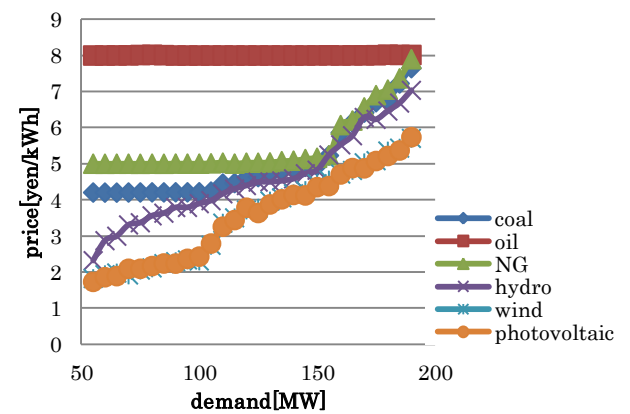


図 3.2.4. 提示価格オークション下でのケース 2 における電力需要量と入札額の関係

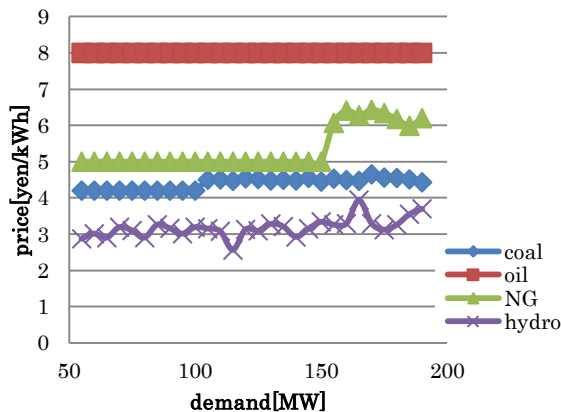


図 3.2.5. Vickrey オークション下でのケース 0 における電力需要量と入札額の関係

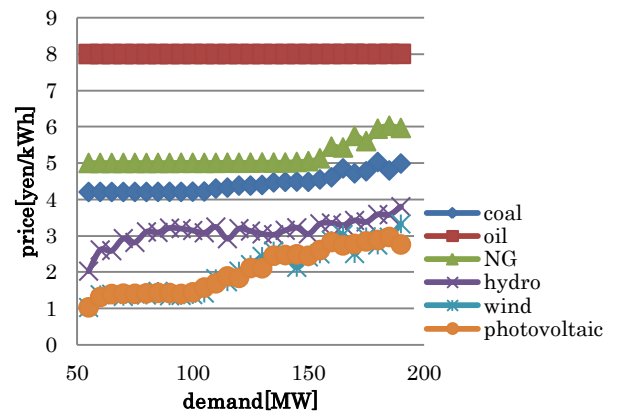


図 3.2.6. Vickrey 価格オークション下でのケース 2 における電力需要量と入札額の関係

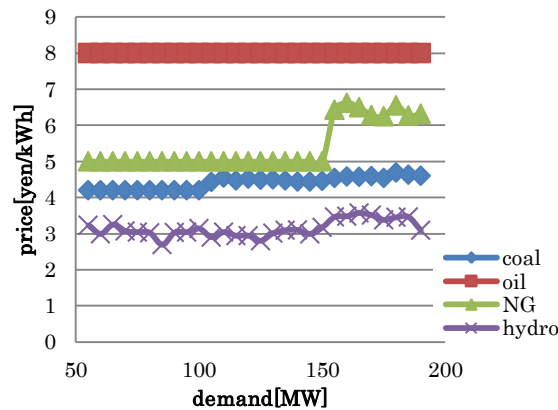


図 3.2.7. 一般化 Vickrey オークション下でのケース 0 における電力需要量と入札額の関係

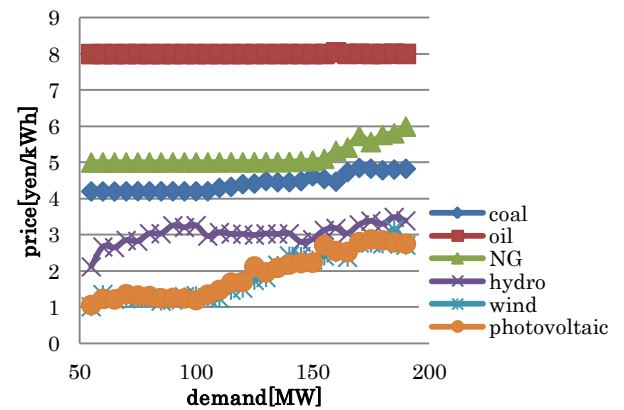


図 3.2.8. 一般化 Vickrey オークション下でのケース 2 における電力需要量と入札額の関係

各ケースにおいて価格決定方式による違いを見てみると、提示価格オークション下では他の価格決定方式より比較的高い入札額を各発電事業者が選択していることがわかる。これは、提示価格オークションでは他の価格決定方式とは異なり、自分の入札額がそのまま落札額に反映されるために、少しでも高く入札して利益を増やそうとする発電事業者の行動から来るものである。各時点での最高入札者は、統一価格オークションと提示価格オークション下においては、自分の入札額がそのまま落札額になるため、同様の入札戦略をとっていることが確認できる。具体的には、図 3.2.1、3.2.3 において電力需要量が 50 ~ 100[MW] 辺りであるとき、価格決定方式に関わらず最高入札額を入札するのは水力発電事業者であり、水力発電事業者の入札額が両価格決定方式でほぼ同じである様子が確認できる。同様に電力需要量が 100 ~ 150[MW] のときには火力発電事業者(石炭)が最高入札者になるため、両価格決定方式下で同じ行動を取っている。これらに対し、Vickrey オークション・一般化 Vickrey オークションの下では入札者は自身の入札額以上の落札額にて落札され、入札額が低くても利益を容易に確保することができるため、統一価格オークション・提示価格オークションにおける入札額よりも低めの入札額を取ることによって確実に落札されようとする戦略を取っていることが図 3.2.5、3.2.7 から確認できる。

また再生可能エネルギー発電事業者の参入により、各発電事業者の入札額が全体的に低下している様子が各価格決定方式下で確認できる。再生可能エネルギーは限界費用が低く、参入によって落札対象になる可能性が高いため、参入前は落札対象であった発電事業者が参入後には再生可能エネルギー発電事業者に押し出される形となる。そのため各発電事業



者は入札額を低くして落札率を上げようとすることから、入札額の低下が観測されたと考えられる。再生可能エネルギー発電事業者の入札額について、風力発電事業者、太陽光発電事業者ともに入札額の変動が大きいように見える。これは、ケース 2 では両者ともに発電容量は同じ 50[MW]であるが、太陽光発電では 0~30[MW]の出力を取り、出力の標準偏差が 9.34[MW]であり、風力発電では 0~50[MW]の出力を取り、出力の標準偏差が 11.65[MW]であるように(詳細は 3.3 節を参照)、出力変動が非常に大きい発電方式であるために学習が難しいことからくるものと考えられる。このように出力変動が大きいため、入札額にばらつきが生まれ、それによって他の発電事業者の入札額にもばらつきが生じていることが確認できる。また風力発電事業者、太陽光発電事業者は限界費用が等しいため、各ケースにおいて同程度の入札額を選択していることが確認できる。

以上の入札によって各発電事業者の発電量が決定するが、ここで、3 ケースにおける電力需要量毎の各発電事業者の発電量を図 3.2.9~3.2.11 に示す。各発電事業者の発電量に関しては価格決定方式毎の違いが小さいため、統一価格オークション下での結果のみを示す。

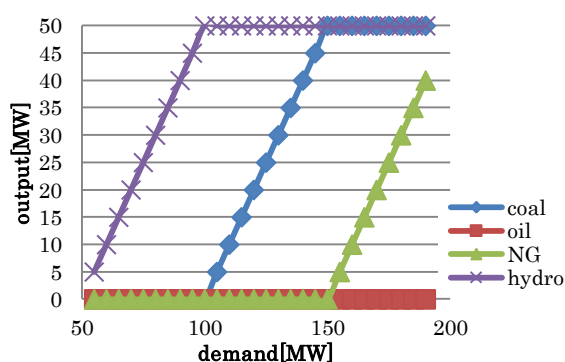


図 3.2.9. 統一価格オークション下でのケース 0 における電力需要量と出力の関係

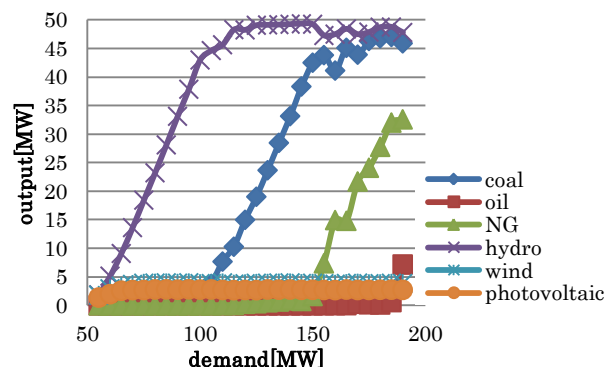


図 3.2.10. 統一価格オークション下でのケース 1 における電力需要量と出力の関係

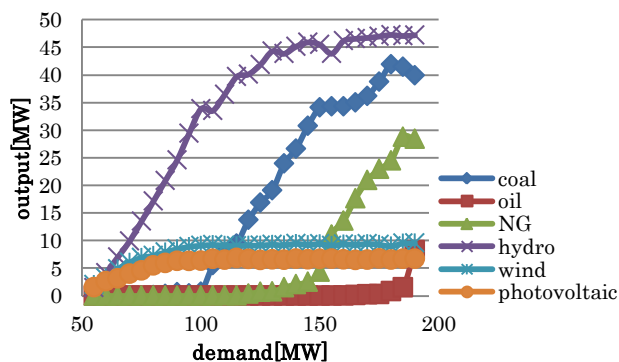


図 3.2.11. 統一価格オークション下でのケース 2 における電力需要量と出力の関係

限界費用の低いものから順に出力を上げていく様子が観察できるが、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって他の発電事業者の出力が小さくなっていることが分かる。その再生可能エネルギー発電事業者に関しては、風力発電事業者に関しては一定以上の風速がないと最大出力を出すことが出来ず、また太陽光発電事業者に関しては日中しか発電できない上に晴れ・曇りなどの天候に大きく左右されてしまうため常に最大出力を出すことは出来ず、他の発電事業者に比べて非常に出力が小さい。これらは限界費用が低いために落札されやすいが、平均出力は容量の 10~20%ほどしか出せていないことが分かる。

次に、落札率について図 3.2.12~3.2.14 に示す。ここでも、価格決定方式による違いが小さいため統一価格オークションのみの結果を示す。

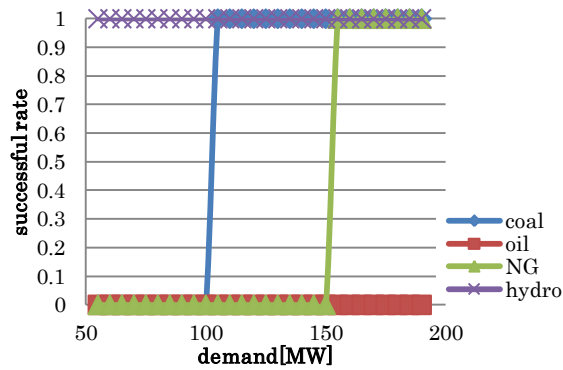


図 3.2.12. 統一価格オークション下でのケース 0 における電力需要量と落札率の関係

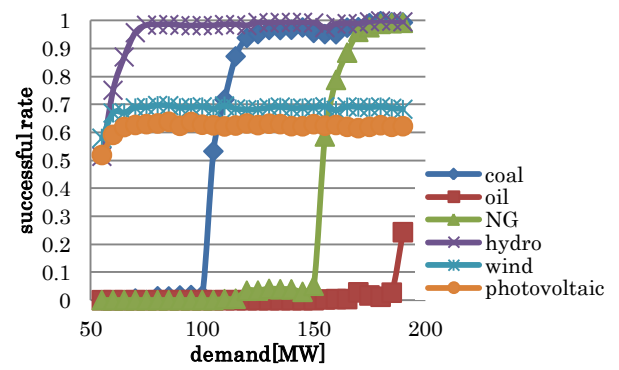


図 3.2.13. 統一価格オークション下でのケース 1 における電力需要量と落札率の関係

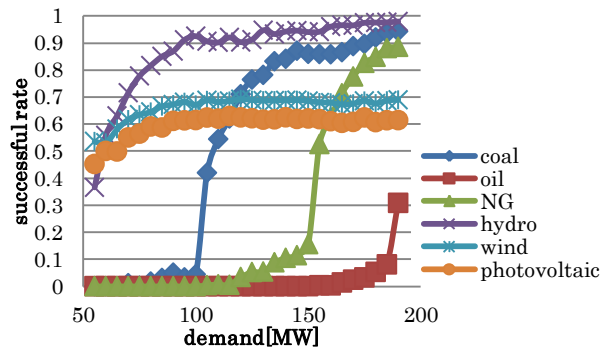


図 3.2.14. 統一価格オークション下でのケース 2 における電力需要量と落札率の関係

限界費用の低いものほど全体的に落札率は高くなり、(風力発電・太陽光発電)、水力発電、火力発電(石炭)、火力発電(天然ガス)、火力発電(石油)の順に落札されていくように、最高入札者の移り変わりが確認できる。再生可能エネルギーについては、風速・日射量次第では出力が 0 となる場合があり、そのときには落札されないものとしてカウントされるため、これらは限界費用が低く落札されやすいにも関わらず落札率が 6 割程度の水準となっている。またこれらを比較すると、太陽光発電事業者よりも風力発電事業者の方が高い落札率を保っている。これは前述の通り、出力の標準偏差が風力発電事業者において高く、出力が 0 になる確率が低い(太陽光発電:0.47, 風力発電:0.38)ことに起因すると考えられる。

次に、以上を踏まえた上で電力需要量毎に計算された電力価格を図 3.2.15～3.2.17 に示す。ここで電力価格は、落札対象である各発電事業者の落札額の平均をとったものである。

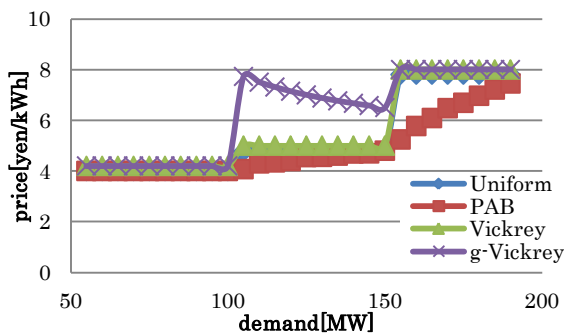


図 3.2.15. 各価格決定方式下におけるケース 0 での電力価格

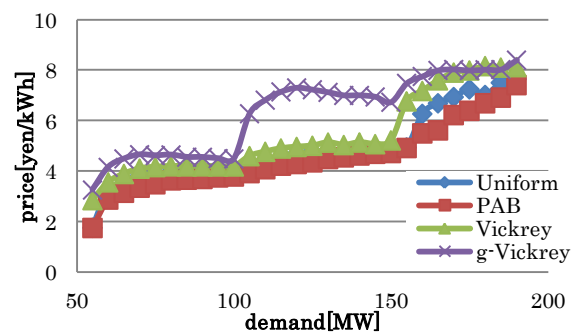


図 3.2.16. 各価格決定方式下におけるケース 1 での電力価格

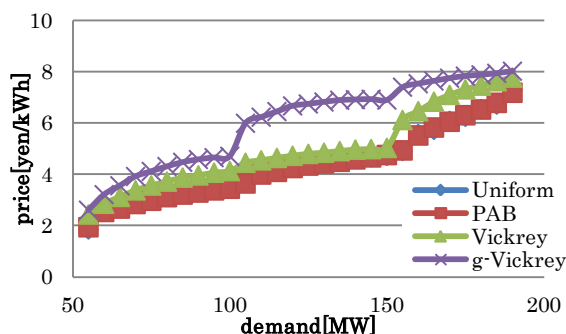


図 3.2.17. 各価格決定方式下におけるケース 2 での電力価格

これらの図から分かるように、再生可能エネルギー発電事業者の有無に関わらず、電力価格は一般化 Vickrey>Vickrey>統一価格>提示価格となっていることが分かる。特に一般化 Vickrey オークションでは他の価格決定方式よりも高い電力価格となっていることが確認できるが、これは価格決定方式のルールを考えても妥当の結果であると言える。

また、図 3.2.15 から分かるように統一価格オークション・Vickrey オークション・一般化 Vickrey オークションにおいては電力需要量に対する電力価格の変動が大きい箇所が出てくることが確認できる。これらの価格決定方式下では、例えば電力需要量が 100[MW]から 105[MW]に変化したとき、150[MW]から 155[MW]に変化したときなどに価格が急に変化している。これは、電力需要量が 100[MW]のときには原子力発電事業者が 50[MW]、水力発電事業者が 50[MW]を担うため水力発電事業者の入札額がそのまま電力価格になるが、電力需要量が 105[MW]のときには原子力発電事業者・水力発電事業者がともに 50[MW]、火力発電事業者(天然ガス)が 5[MW]を担うため、電力価格は火力発電事業者(天然ガス)の入札額になる。このように、落札者数の増加がこの価格変動を引き起こす要因となっていると考えられ、特に一般化 Vickrey オークションにおける具体的な値の変遷を表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1. 電力需要量が 100~110[MW]の時の一般化 Vickrey オークション下での入札額と電力価格

	demand = 100[MW]			demand = 105[MW]			demand = 110[MW]		
	bid [yen/kWh]	output [MW]	winning [yen/kWh]	bid	output	winning	bid	output	winning
hydro	4.0	50	4.2	4.0	50	8.0	4.0	50	8.0
coal	4.2	0		4.8	5.0	5.0	4.8	10	5.0
NG	5.0	0		5.0	0		5.0	0	
oil	8.0	0		8.0	0		8.0	0	
electricity price [yen/kWh]	4.2			7.73			7.5		

需要量が 100[MW]のときと 105[MW]のときを比較すると、表 3.2.1 のように落札者数が増加することが価格変動に繋がると言える。また 105[MW]のときと 110[MW]のときを比較すると、図 3.2.15 から分かるように、一般化 Vickrey オークションでのみ価格の低下が見られる。電力需要量の増加に応じて最高入札者の担う発電量が増加するため、統一価格オークション・提示価格オークション・Vickrey オークションにおいては価格が上昇する、もしくは変化しない。しかし一般化 Vickrey オークションにおいては最高入札者の落札額が落札者のうち最も低い方式であるため、最高入札者の担う発電量の増加は落札額の平均を低下させる要因となることが観測された。また表 3.2.1 でも示したような価格変動の大きさについて、最高入札者の影響が大きい統一価格オークション、Vickrey オークション、一般

化 Vickrey オークションでは大きく、他の発電事業者の入札額との平均で電力価格が決定される提示価格オークションにおいては比較的小さくなることが確認できる。今回は参加事業者の少なから大きい価格変動が観測されたが、参加事業者数が増え、競争が激しくなると価格変動も小さくなることが予想される。

図 3.2.15 ~ 3.2.17 を比較すると、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって電力価格がどの価格決定方式下においても低下することが確認できた。これは、表 3.1.1 から分かるように、再生可能エネルギー発電事業者は限界費用が小さく低い入札額にて利益を得ることができ、参入によって限界費用の高い発電事業者が押し出されるためにこのような結果が得られたと考えられる。ケース 0 においては 100[MW], 150[MW] を超えた場合に必ず最高入札者の切り替わりが発生し、価格決定方式によっては電力価格が急激な変化を見せていたが、再生可能エネルギー発電事業者が参入することにより、出力の大きさによってはこの切り替わりが起きない場合も考えられる。そのためケース 1、ケース 2 では電力需要量ごとの電力価格が急激に変化することが無くなり、参入によって電力需要量ごとの価格変動がなだらかになったと言える。

このようにして決定された落札額に応じ、各発電事業者の得ることのできる利益を以下に示す。統一価格オークション下における各発電事業者の利益について、ケース 0 の結果を図 3.2.18 に、ケース 1 の結果を図 3.2.19 に、ケース 3 の結果を図 3.2.20 に示す。

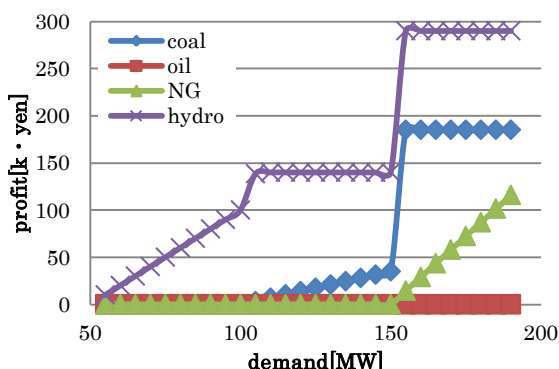


図 3.2.18. 統一価格オークション下でのケース 0 における各発電事業者の利益

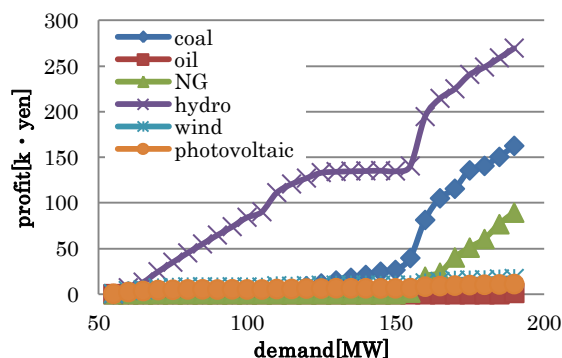


図 3.2.19. 統一価格オークション下でのケース 1 における各発電事業者の利益

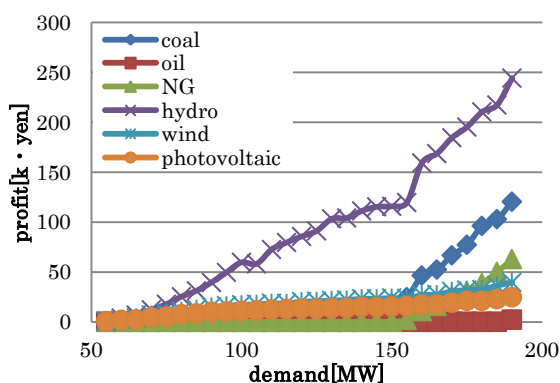


図 3.2.20. 統一価格オークション下でのケース 2 における各発電事業者の利益

ここにおいては、電力価格が高いほど各発電事業者の利益が大きくなるという妥当な結果が得られた。再生可能エネルギー発電事業者の参入が進むことにより電力価格が低下することが確認されたため、再生可能エネルギー発電事業者以外の各発電事業者の利益も低下する。一方で再生可能エネルギー発電事業者に関しては導入が進むにつれて発電量が

きくなるために価格低下の影響が打ち消され、利益が大きくなる様子が確認できる。しかし再生可能エネルギーは気象条件に左右されるために最大出力を常に出すことができず、平均出力が最大出力の 20%程度と小さいため、ケース 2 のように参入が進んだ場合においても得られる利益が他の事業者に比べて非常に小さいことが分かる。しかしこの点においては今回の結果からも分かるように、技術の進歩によって出力効率が向上し、同様の気象条件下でも多くの出力を出すことが可能になれば再生可能エネルギー発電事業者の利益確保も容易になると言える。再生可能エネルギー発電事業者の参入による発電事業者の利益への影響については、提示価格オークション、Vickrey オークション、一般化 Vickrey オークションのもとでも同様の結果が得られたため、ここでは割愛する。

次に、価格決定方式毎の違いを観測するため、水力発電事業者の得る利益を比較したもののについて、ケース 0 の結果を図 3.2.21 に、ケース 2 の結果を図 3.2.22 に示す。

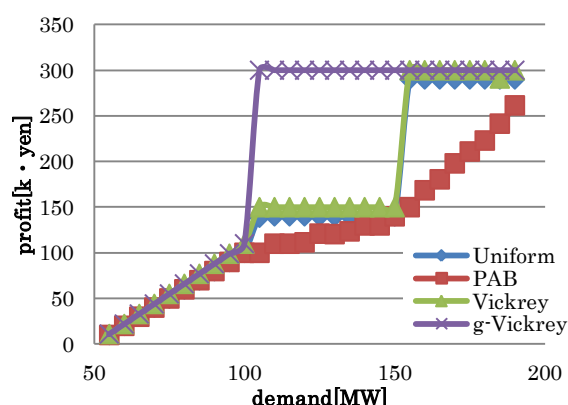


図 3.2.21. 各価格決定方式下でのケース 0 における水力発電事業者の利益

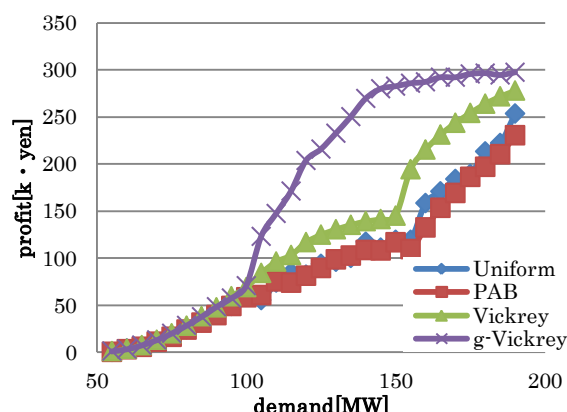


図 3.2.22. 各価格決定方式下でのケース 2 における水力発電事業者の利益

図 3.2.21, 3.2.22 から分かるように、各価格決定方式における電力価格の大小関係がそのまま発電事業者の利益の大小関係と一致している。これらの中でも、一般化 Vickrey オークションにおいては利益の確保が容易であり、電力価格の低くなる提示価格オークションでは利益が最小となっていることが分かる。

### 3.3 再生可能エネルギーの不安定な出力による価格変動

ここまで、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響として、平均電力価格の低下、他の発電事業者の出力や落札率、利益の減少を確認した。これらは再生可能エネルギーの限界費用の低さに起因するものであり、それとは別に、出力の不安定性が電力価格に何らかの影響を与える可能性があると考えられる。こちらに関しては、試行毎に得られる電力価格の変動を計算することで、何らかの影響を観測できると期待される。電力需要量と、試行毎に得られた電力価格の標準偏差の関係を図 3.3.1 ~ 3.3.3 に示す。

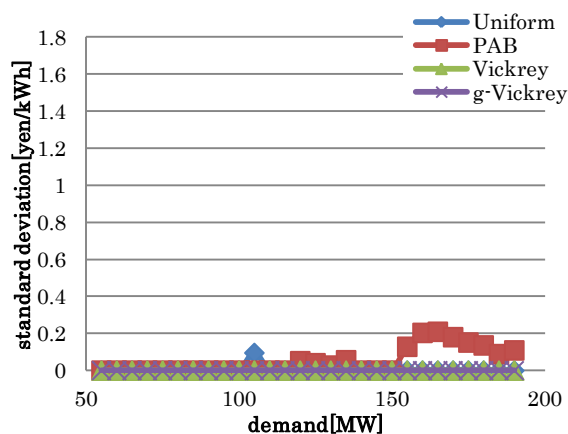


図 3.3.1. 各価格決定方式下でのケース 0 における電力価格の標準偏差

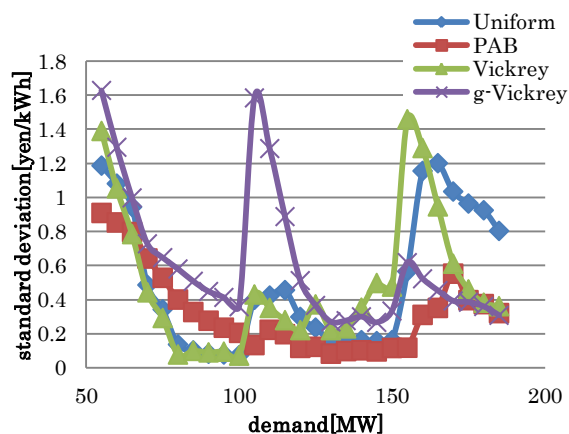


図 3.3.2. 各価格決定方式下でのケース 1 における電力価格の標準偏差

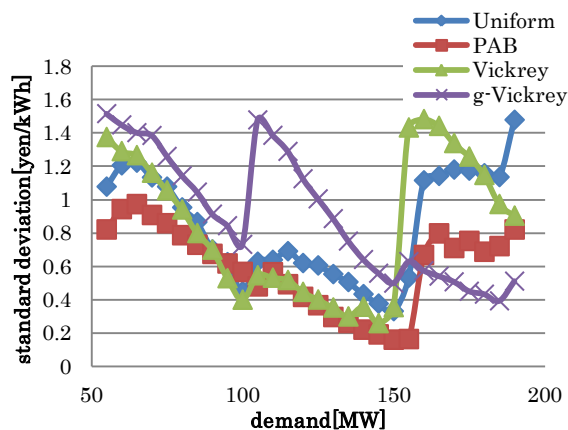


図 3.3.3. 各価格決定方式下でのケース 2 における電力価格の標準偏差

再生可能エネルギー発電事業者の参入がない図 3.3.1 においては、各価格決定方式下で標準偏差が小さくなっているが、これは価格の決定権をもつ発電事業者がうまく学習していることによるものである。その中でも提示価格オークションにおいては少し価格の標準偏差が高い箇所を確認できるが、これは前述の通り、提示価格オークションでは各発電事業者が少しでも高く入札することで利益をあげようとするため、他の価格決定方式に比べて「賭け」の要素が強い方式であり、最適な入札額の決定が多少難しいことから得られた結果であると考えられる。

再生可能エネルギー発電事業者が参入した図 3.3.2, 3.3.3 においては、図 3.3.1 と比較し、どの価格決定方式のもとでも標準偏差が増加していることが観測できる。統一価格オークション、Vickrey オークション、一般化 Vickrey オークションにおいては、電力需要量の大きさによっては標準偏差が非常に大きくなる箇所があるのが分かる。例えば統一価格オー

クシオン下において、局所的に高くなっている箇所について、表 3.3.1 に発電事業者ごとの入札額、それによる電力価格を示す。

表 3.3.1. 電力需要量が 105[MW]の時の統一価格オークシオン下での入札額と電力価格

	demand = 105[MW]					
	output of RPP = 0[MW]			output of RPP = 5[MW]		
	bid [yen/kWh]	output [MW]	winning [yen/kWh]	bid	output	winning
RPP(wind + photovoltaic)	1.8	0		1.8	5.0	4.0
hydro	4.0	50	4.8	4.0	50	4.0
coal	4.8	5.0	4.8	4.2	0	
NG	5.0	0		5.0	0	
oil	8.0	0		8.0	0	
electricity price[yen/kWh]			4.8			4.0

このように電力需要量が 105[MW]の場合、再生可能エネルギー発電事業者の出力の大きさによって最高入札者が変わり、電力価格が 4.0～4.8[yen/kWh]の値を取り得る。同様の計算をすれば、提示価格オークシオンの下では 4.0～4.07[yen/kWh]の値を、Vickrey オークシオンにおいては 4.2～5.0[yen/kWh]の値を、一般化 Vickrey オークシオンでは 4.27～7.73[yen/kWh]の値を取り得ることがあるため、再生可能エネルギー発電事業者の出力の大きさによって、電力価格への影響が大きくなる箇所が存在する。このような価格の標準偏差における極大値について、例えば統一価格オークシオンにおいて電力需要量が 100[MW]付近のときと 150[MW]付近のときを比較すると標準偏差の極大値が異なるが、100[MW]付近の場合は水力発電事業者と火力発電事業者(石炭)、150[MW]付近の場合は火力発電事業者(石炭)と火力発電事業者(天然ガス)の入札額が価格決定に影響を及ぼしているように、標準偏差における極大値の大きさはその時点において価格決定に影響を及ぼす発電事業者によって異なると考えられる。

提示価格オークシオンにおいても上記の通り、他の価格決定方式と同様に最高入札者が変わることによって電力価格が変化するが、最高入札者以外の落札者の入札額との平均をとることによって電力価格を計算しているため、この価格決定方式下では価格の標準偏差の極大値を最小化することができ、また 4 つの価格決定方式の中で最も価格の変動幅が小さいことが確認できる。しかし提示価格オークシオンでは価格決定の際に、再生可能エネルギー発電事業者の入札も他と同様に考慮する必要があるため、再生可能エネルギーの出力の不安定性の影響を受けやすく、電力需要量の大きさに関わらず常にある程度の価格変動が観測される。その様子を表 3.3.2 に示しているが、この表が示すように、電力需要量の大きさによっては、統一価格オークシオンにおいては再生可能エネルギーの出力の不安定性が電力価格に影響を及ぼさないにも関わらず、提示価格オークシオンでは価格変動を引き起こしてしまうことがある。そのため図 3.3.2 から分かるように、再生可能エネルギー発電事業者の発電容量が小さい場合には価格の標準偏差が統一価格<提示価格となる範囲が大きいことが確認できる。このように、提示価格オークシオンは再生可能エネルギーの不安定な出力の影響を常に受けてしまう一方、局所的な価格変動の増大を抑えることができる方式であると言えることができる。

表 3.3.2. 電力需要量が 100[MW]の時の統一価格・提示価格オークション下での入札額と電力価格

	demand = 100[MW]							
	output of RPP = 5[MW]				output of RPP = 10[MW]			
	bid [yen/kWh]	output [MW]	winning [yen/kWh]		bid	output	winning	
			Uniform	PAB			Uniform	PAB
RPP	4.0	5	4.8	4.0	4.0	10	4.8	4.0
hydro	4.8	45	4.8	4.8	4.8	40	4.8	4.8
electricity price [yen/kWh]			4.8	4.72			4.8	4.64

図 3.3.3 はケース 2 における結果であるが、図 3.3.1, 3.3.2 と比較すると、再生可能エネルギー発電事業者の出力が大きくなると標準偏差も全体的に大きくなることが確認できる。図 3.3.2 においては再生可能エネルギー発電事業者の出力が比較的小さく、標準偏差も局所的に大きくなる範囲を除いては小さく抑えられていることが分かる。しかしケース 2 のように発電容量が増大し出力が大きくなると、標準偏差が大きくなる範囲が拡大するためにどの価格決定方式下においても平均的な標準偏差が増加していることが確認できる。前述の通り提示価格オークションにおいては発電事業者の落札額の平均をとるために局所的に標準偏差が増大することはなく、4 つの価格決定方式のうち価格変動の幅が最小であるという結果が得られたが、同様の結果がケース 2 においても得られた。また電力需要量が 150[MW] より大きい時に対しては、提示価格オークションよりも一般化 Vickrey オークションにて価格の標準偏差を抑えることができていることが分かる。これは、例えば再生可能エネルギー発電事業者が参入している場合、電力需要量が 150[MW] より大きいと提示価格オークションでは 3～5 発電事業者(風力、太陽光、水力、火力(石炭)、火力(天然ガス))の入札額で電力価格が決まるが、一般化 Vickrey オークションでは 1～3 発電事業者(火力(石油)、火力(天然ガス)、火力(石炭))と少ない発電事業者の入札額で電力価格が決まるため、価格の変動が提示価格オークションよりも小さくなったと考えられる。

統一価格オークションと提示価格オークションに焦点を当てると、基本的には提示価格オークションにて価格の標準偏差を抑えることが出来ていることが確認できるが、ケース 1 では電力需要量の大きさによってはこの関係性が逆転しているところも見受けられた。しかしケース 2 では再生可能エネルギーの出力が上がったために価格の標準偏差が全体的に大きくなり、この場合には統一価格オークション下での価格の標準偏差が提示価格オークション下での値より小さくなる範囲が縮小され、全体を通して価格の標準偏差は統一価格オークション > 提示価格オークションとなっている。そのため再生可能エネルギーの導入が進んだ場合には、出力の不安定性が影響を及ぼす範囲が拡大することから、提示価格オークションにて変動を最小限に抑えることができると言える。ケース 1、ケース 2 においてこの関係性が逆転する箇所について説明するために、統一価格オークション下でのケース 0 における最高入札者の出力とケース 1、ケース 2 における価格の標準偏差をまとめたものを図 3.3.4 に示す。また、図 3.3.5 に各ケースにおける再生可能エネルギーの出力分布を、図 3.3.6 にケース 2 における風力発電事業者・太陽光発電事業者の出力分布をまとめたものを示す。



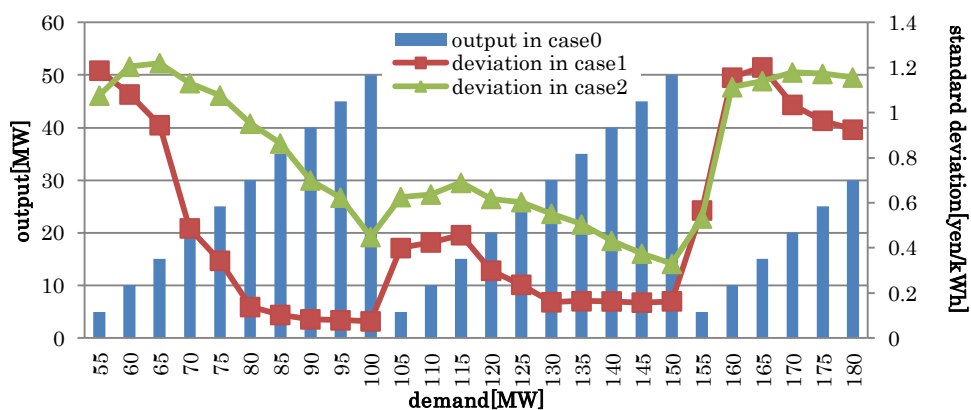


図 3.3.4. 統一価格オークション下での電力価格の標準偏差と最高入札者の出力の関係

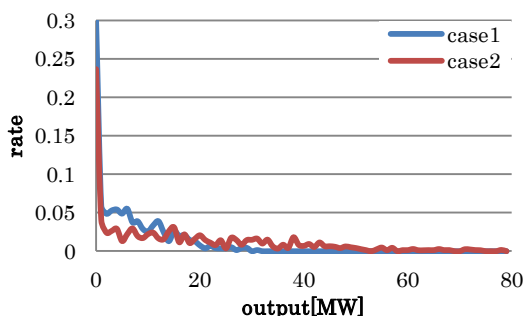


図 3.3.5. ケース 1, 2 における再生可能エネルギーの出力分布

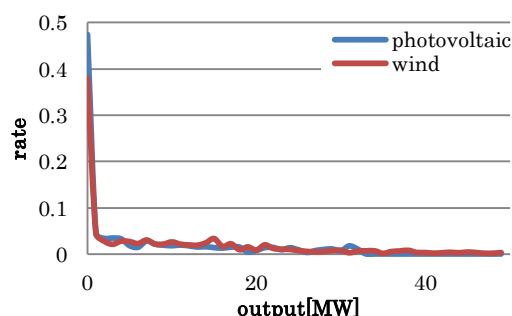


図 3.3.6. ケース 2 における太陽光発電・風力発電の出力分布

図 3.3.4 から分かるように、前述の通り最高入札者の切り替わりで標準偏差の水準が高くなっているように見える。そのタイミングに関しては、ケース 1 がケース 2 よりもはっきりとしていることが分かるが、これは再生可能エネルギーの出力分布によるものと考えられる。最高入札者の切り替わりのタイミングと価格の標準偏差の関係について、例えば電力需要量が 100[MW]の場合と 105[MW]の場合を考える。100[MW]の場合、ケース 0 での最高入札者の担う電力量は 50[MW]であるため、再生可能エネルギーの出力が 50[MW]を超えるか否かで最高入札者の切り替わりが起こる。図 3.3.5 から分かるように、ケース 1 においては再生可能エネルギーの出力が 0~30[MW]程度であるため、この切り替わりが発生せず価格の標準偏差が小さい。しかし電力需要量が 105[MW]になると最高入札者の出力は 5[MW]となるため、5[MW]を超えるか否かで最高入札者が切り替わり、この場合にはケース 1 でも切り替わりが発生するため価格の標準偏差が大きくなっている。それに対しケース 2 において再生可能エネルギーは 0~70[MW]程度と、他の発電事業者と比較しても大きい出力をまんべんなく出すため、電力需要量が 105[MW]の場合だけでなく、100[MW]の場合でも最高入札者の切り替わりが起こる可能性を秘めている。このように常にケース 2 では電力需要量に関わらず再生可能エネルギーの出力の不安定性に価格が影響され、標準偏差がある程度大きくなるため、ケース 1 ほど極値が際立たないことが分かる。

再生可能エネルギー発電事業者の参入によって最高入札者の切り替わりが起こらない場合、表 3.3.2 から分かるように、統一価格オークションでは再生可能エネルギー発電事業者の出力による影響を受けないために価格の標準偏差が小さくなるが、提示価格オークションにおいては各発電事業者の平均をとるために電力需要量に関わらず不安定な出力の影響を受けるためにある程度の価格の標準偏差が観測されるため、図 3.3.2 のように価格決定方式毎の標準偏差の大小関係が逆転する所があると考えられる。

### 3.4 本章のまとめ

本章では電力需要量毎の電力価格や発電事業者の出力・利益、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を考えることで価格決定方式の解析を行った。再生可能エネルギー発電事業者の参入により、限界費用の低さから電力価格の低下が、出力の不安定性から電力価格の標準偏差の増大が観測された。電力価格の低下については価格決定方式毎に目立った差が見られなかったが、価格の標準偏差の増大については、提示価格オークション下で最大値を最小とすることができ、標準偏差の変動幅も最小となることが分かった。これは再生可能エネルギー発電事業者の参入が進むほど顕著であり、今後技術が発展し再生可能エネルギーの発電容量がますます増加すると予想される中で、提示価格オークションが他の方式よりも出力の不安定性の影響を比較的抑えることが出来る価格決定方式であると言えるのではないかと考えられる。ここで得られた結果は環境依存であることが考えられ、対象とする発電事業者のデータによっては異なる結果が得られる可能性があると予想される。そこで、別の環境設定のもと同様の解析を行った結果を付録にて示す。次章では、本章にて使用した発電事業者のデータをもとに、ある1日を対象として市場において取引を行った結果を示す。

## 第4章 電力市場における取引のシミュレーション

本章では、実際に1日の取引を通して価格決定方式の比較、再生可能エネルギー発電事業者参入による影響を解析する。具体的には、2章にて説明したように、消費者の行動が考慮されておらず常に取引量が一定であるリアルタイム市場、消費者が行動し価格に応じて取引量に変化する一日前市場において解析を行う。解析対象としては、2章において風力発電・太陽光発電の導入の際に説明したように、2011年の4月、8月、12月の中のある1日を考えている。入力データとして使用した1日の時間毎の電力需要量を図4.1に示す。

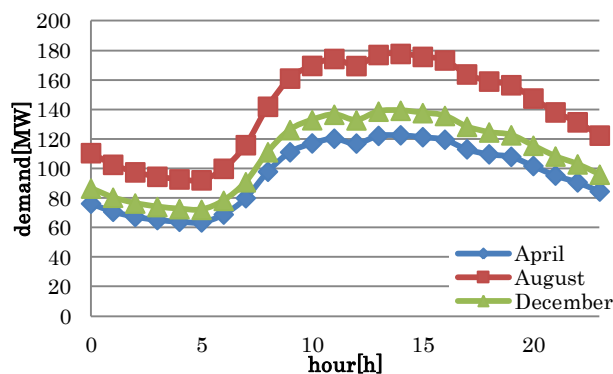


図 4.1. 4月、8月、12月における時刻毎の電力需要量

各月に対してこの電力需要量を使用し、その月における風速・日射量等のデータをもとに再生可能エネルギー発電事業者の出力を計算した上で1時間毎にシミュレーションを行う。リアルタイム市場ではここで示した時間毎の電力需要量がそのまま取引量となるため、その需要量が満たされるよう3章と同様のシミュレーションを行うことで価格を決定する。一方で一日前市場ではこの電力需要量を初期需要量として与え、初期価格を5.0[yen/kWh]に設定し、発電事業者の入札とのバランスを取ることによって取引量、価格を決定する。

## 4.1 リアルタイム市場

ここでは、リアルタイム市場における結果について述べる。前述の通り、リアルタイム市場においては消費者が価格に対する行動を起こさないため、初期需要量として与えられた電力需要量そのまま取引量となる。そのため、価格決定方式によって取引量に差は生じない。図 4.1 に示す電力需要量を使用し、各価格決定方式のもとでケース 0、ケース 1、ケース 2 に対して一時間毎の電力価格を計算し、それらを足し合わせたものを表 4.1.1 に示す。ここではそれらとともに、再生可能エネルギー発電事業者の導入による影響を効率として、ケース 0 での結果に対する比率も示している。また、取引の概要として、ケース 2 における時間毎の電力価格の様子を図 4.1.1 に示す。これらは 8 月のデータを基にした結果であり、4 月・12 月の結果については後述する。

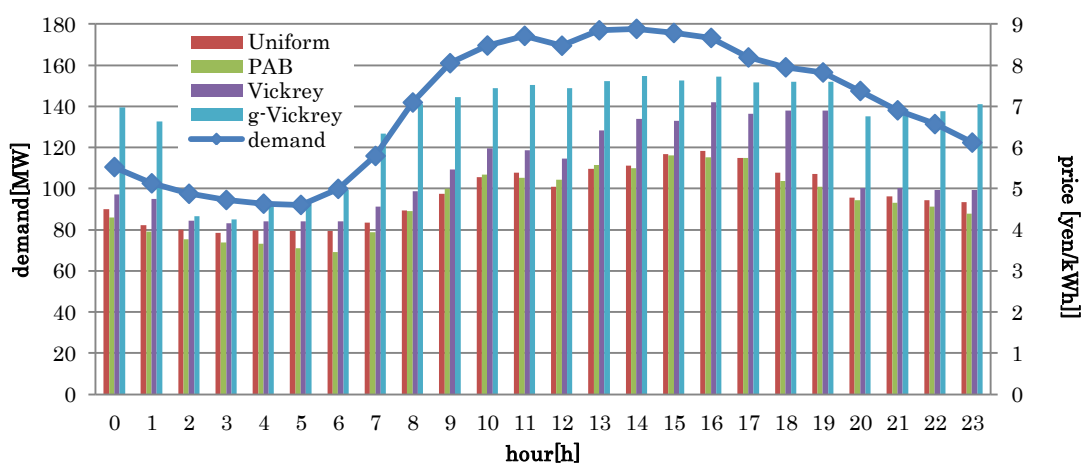


図 4.1.1. 8 月の各価格決定方式下でのケース 0 における電力価格と電力需要量

表 4.1.1. 8 月のリアルタイム市場での総需要量と電力価格の総和

		demand[MW]	price[k・yen]	efficiency
<b>Uniform</b>	case0	3344.4	21240.65	
	case1	3344.4	19068.84	89.78%
	case2	3344.4	16601.01	78.16%
<b>PAB</b>	case0	3344.4	18349.55	
	case1	3344.4	16975.73	92.51%
	case2	3344.4	16208.00	88.33%
<b>Vickrey</b>	case0	3344.4	21912.84	
	case1	3344.4	21240.45	96.93%
	case2	3344.4	18859.53	86.07%
<b>g-Vickrey</b>	case0	3344.4	23932.59	
	case1	3344.4	23796.24	99.43%
	case2	3344.4	23127.29	96.64%

図 4.1.1 において、ここでは基本的には 3 章でのシミュレーションと同様のシミュレーションを行っているため、3 章にて得られた価格決定方式による電力価格の大小関係と同様の関係が時間ごとに得られた。また表 4.1.1 において、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって電力価格が低下していく様子がケース 0～2 から観測でき、価格低下は再生可能エネルギー発電事業者の発電容量が大きくなるほど進むことも確認できる。価格決定方式の性

質上、一般化 Vickrey オークションにおいては電力価格が高くなるが、価格低下の影響を 4 つの価格決定方式の中で最小にすることができていることが分かる。その他の価格決定方式下では価格低下の大きさは同程度であるために優劣はつけられず、特に一般化 Vickrey オークションは再生可能エネルギーの限界費用の低さによる影響を受けにくい方式であると言える。

再生可能エネルギーの出力の不安定性の影響として、3 章で取り扱ったように時間毎の電力価格の標準偏差をとったものを図 4.1.2 ~ 4.1.4 に示す。

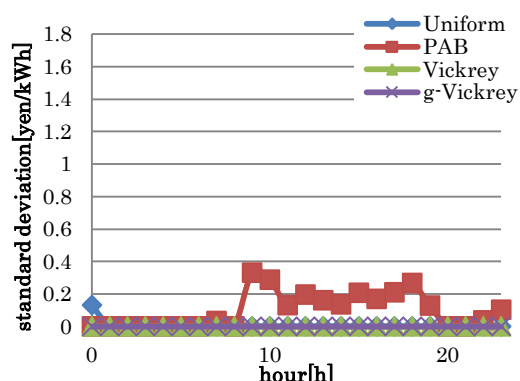


図 4.1.2. 8月のケース 0 における電力価格の標準偏差

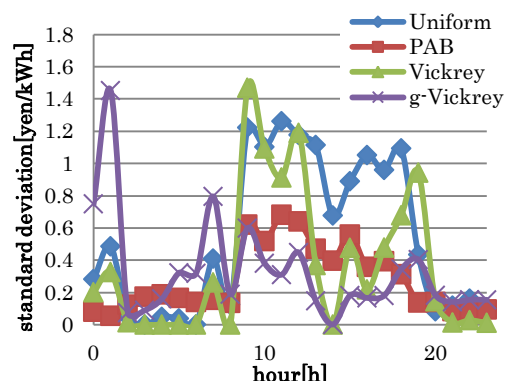


図 4.1.3. 8月のケース 1 における電力価格の標準偏差

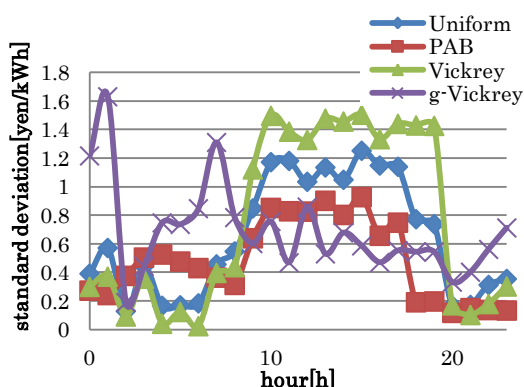


図 4.1.4. 8月のケース 2 における電力価格の標準偏差

図 3.2.23 ~ 3.2.25 で得られた標準偏差の大小関係と同様の関係性が得られる。図 4.1.2 から分かるように、ケース 0 のように再生可能エネルギー発電事業者が参加していない場合、各発電事業者は学習が容易であるために統一価格オークション・Vickrey オークション・一般化 Vickrey オークションでは価格の標準偏差が抑えられていることが分かる。これらに対し、提示価格オークションでは賭けのように発電事業者が入札するため、価格の標準偏差がある程度観測された。再生可能エネルギー発電事業者の導入が進む図 4.1.3, 4.1.4 においては、図 3.2.24, 3.2.25 から得られるように時刻によって不規則な変化をしていることが確認できる。時刻によって価格の標準偏差が大きく変化しているが、標準偏差の変動幅はどのケースにおいても提示価格オークションにおいて比較的小さい。3 章でも示したように、提示価格オークションにおいては再生可能エネルギーの出力の不安定性の影響を受けやすいため、常にある程度の価格変動が起きてしまい、電力需要量によっては価格の標準偏差は統一価格オークションや Vickrey オークション下での値の方が小さくなることもあり、ここでも時間帯によってはそのような結果が得られる。しかし一般化 Vickrey オークションを除いた価格決定方式下では電力需要量がピークとなる時間帯ほど電力価格の標準

偏差が大きく、価格変動が大きくなることが分かるが、ここにおいて提示価格オークションでは図 3.2.25 からも予想できるように、他の価格決定方式と比較して価格の標準偏差を抑えることができ、全体を通しては安定した方式であると言える。またピーク時間帯において、一般化 Vickrey オークションではこの時間帯の価格の標準偏差を提示価格オークションよりも小さくすることが出来るが、これは 3 章にて述べたように、電力需要量が多い場合には落札額を決定する発電事業者の数が提示価格オークションより一般化 Vickrey オークションの方が少ないことから来るものであるため、発電事業者が増えた際にはこの結果にはならないと考えられる。また、その他の時間帯では他の価格決定方式よりも複雑な挙動を示し、その値も大きいため、安定した方式とは言えない。再生可能エネルギー発電事業者の参入の影響としては、図 4.1.3, 4.1.4 を比べて分かるように、再生可能エネルギーの発電容量が大きくなると各時刻において電力価格の標準偏差が大きくなることも観測できる。

次に、4月・12月の結果について、上記と同様のシミュレーションを行った結果を表 4.1.2, 4.1.3, 図 4.1.5, 4.1.6 に示す。ここで示す結果は、再生可能エネルギー発電事業者の影響を中心に観測するため、ケース 0 とケース 2 のみとしている。標準偏差はケース 0 においては提示価格オークション下でのみ多少大きくなり、それ以外の価格決定方式下ではほぼ 0 であるという、対象月に関わらずほとんど同様の結果が得られており目立った違いが観測されないため、ここではケース 2 の結果のみ示す。

表 4.1.2. 4月のリアルタイム市場での総需要量と電力価格の総和

		demand[MW]	price[k・yen]	efficiency
<b>Uniform</b>	case0	2308.3	10340.24	
	case2	2308.3	7820.54	75.63%
<b>PAB</b>	case0	2308.3	9695.96	
	case2	2308.3	6966.30	71.85%
<b>Vickrey</b>	case0	2308.3	10801.90	
	case2	2308.3	8761.54	81.11%
<b>g-Vickrey</b>	case0	2308.3	13993.77	
	case2	2308.3	11303.52	80.78%

表 4.1.3. 12月のリアルタイム市場での総需要量と電力価格の総和

		demand[MW]	price[k・yen]	efficiency
<b>Uniform</b>	case0	2619.1	11986.21	
	case2	2619.1	10608.03	88.50%
<b>PAB</b>	case0	2619.1	11466.45	
	case2	2619.1	10055.64	87.70%
<b>Vickrey</b>	case0	2619.1	12514.06	
	case2	2619.1	11637.94	93.00%
<b>g-Vickrey</b>	case0	2619.1	16280.11	
	case2	2619.1	15199.88	93.36%

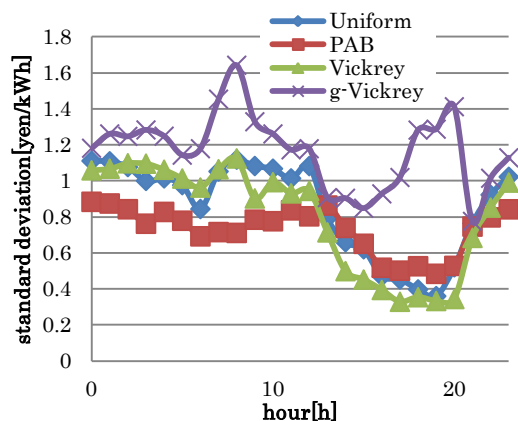


図 4.1.5. 4 月のケース 2 における電力価格の標準偏差

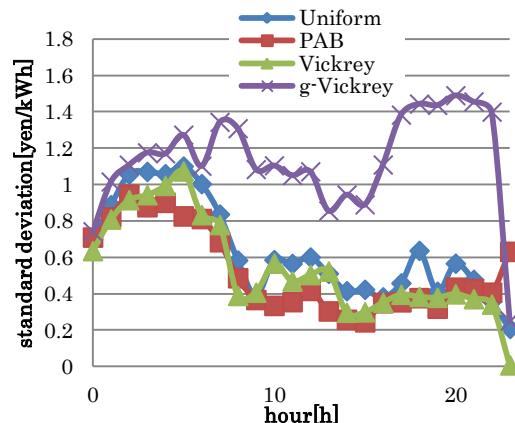


図 4.1.6. 12 月のケース 2 における電力価格の標準偏差

表 4.1.2, 4.1.3 から分かるように、4 月、12 月に関しても 8 月と同じように再生可能エネルギー発電事業者の参入によって電力価格の低下が確認できたが、特に Vickrey オークション、一般化 Vickrey オークションにおいては電力価格の価格低下が他の価格決定方式より多少小さいことが確認できる。本モデルにおいては電力需要量に応じて電力価格が変動することが 3 章にて示されているため、各対象月における電力価格、ならびに再生可能エネルギー発電事業者の参入による電力価格低下の度合いも変化することが表 4.1.1 ~ 4.1.3 から分かる。

電力価格の標準偏差について、4 月、12 月に関しては電力需要量が 8 月ほど大きくないために競争も抑制され、8 月に得られた電力価格の標準偏差の推移とは異なる形となっていることが分かる。これは図 3.2.25 のように、電力需要量毎に価格の標準偏差が不規則に変化することからくるものであると考えられる。各価格決定方式を比較すると、一般化 Vickrey オークションではどちらの月においても大きい値を示していることが分かる。その他の 3 つの価格決定方式は大小関係が時刻によって変化しているため、どれが絶対的に優れているとは言えないが、全体を通して価格の標準偏差の最大値は各月で提示価格オークションにて最小に出来ており、標準偏差の変動幅も最小となっていることが確認できる。

表 4.1.1 ~ 4.1.3 から分かるように、リアルタイム市場においては再生可能エネルギー発電事業者の参入によって電力価格が低下することが確認できる。一般化 Vickrey オークションではその低下を小さくすることが出来るが、取引額そのものが他に比べて非常に大きくなるという難点も持つ。また再生可能エネルギー発電事業者の参入によって各時刻で観測される電力価格の標準偏差が大きくなることが観測されたが、図 4.1.4 ~ 4.1.6 から分かるように、一般化 Vickrey オークションでは特に大きい値が観測されたため、再生可能エネルギーの出力の不安定性による影響を受けやすく、不安定な方式であると言える。またここにおいて、各月で観測される価格の標準偏差の最大値ならびに変動幅は提示価格オークションにて最も小さいため、突発的に価格変動が大きくなることなく、常に同程度の価格変動が観測されると言う点では 4 つの方式の中で安定した方式であると言える。

## 4.2 一日前市場

本項では電力価格に応じて消費者が需要量を変動させる場合について考える。本章において与えた時間毎の電力需要量を初期需要量とし、初期価格を考慮した上で図 2.3.2 のような行程を経て最終的な需要量・電力価格を計算する。一日前市場における取引の様子として、統一価格オークションのもとで各ケースに対して時間毎に取引量と取引価格を表したものを図 4.2.1 に、また各ケースにおいて電力需要量の総和、電力価格の総和を計算したものを表 4.2.1 に示す。

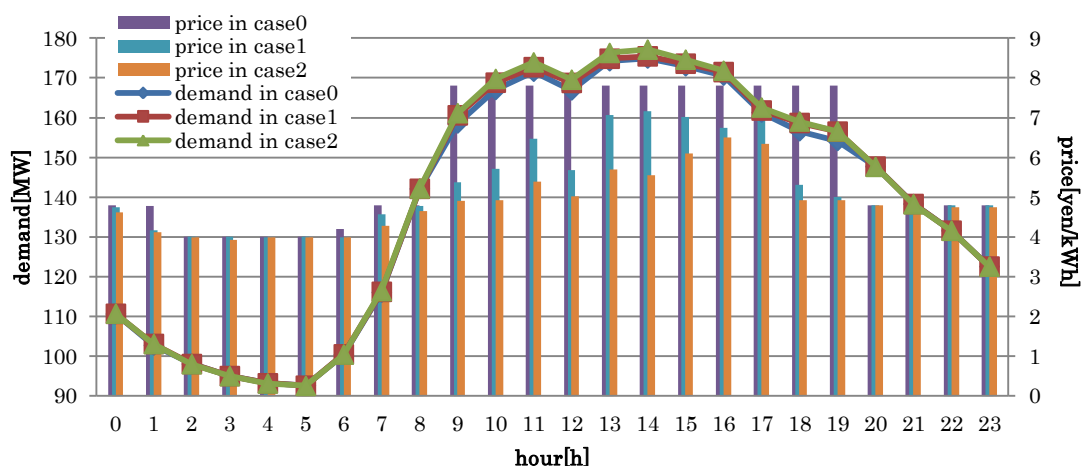


図 4.2.1. 8月の各ケースにおける統一価格オークションでの各時刻の電力価格と電力需要量

表 4.2.1. 8月の一日前市場での総需要量と電力価格の総和

		demand[MW]	efficiency	price[k・yen]	efficiency
<b>Uniform</b>	case0	3319.33		21053.46	
	case1	3334.52	100.46%	18220.12	86.54%
	case2	3345.63	100.79%	16411.08	77.95%
<b>PAB</b>	case0	3319.32		17776.72	
	case1	3332.09	100.38%	16426.77	92.41%
	case2	3340.25	100.63%	15892.79	89.40%
<b>Vickrey</b>	case0	3348.83		21996.52	
	case1	3349.03	100.01%	21229.92	96.51%
	case2	3356.55	100.23%	18849.33	85.69%
<b>g-Vickrey</b>	case0	3348.91		24312.73	
	case1	3349.14	100.01%	23700.56	97.48%
	case2	3357.12	100.25%	23056.29	94.83%

図 4.2.1 から分かるように、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって時間毎の電力需要量が僅かに増加し、同時に電力価格が低下している。この価格低下に関しては、電力需要量の大きさに比例しているように見受けられ、需要量のピーク時間帯には価格低下が大きくなっている様子が確認できる。これは統一価格オークションにおける結果であるが、他の価格決定方式下でも同様の傾向が確認できたためここでは割愛する。

表 4.2.1 から分かるように、再生可能エネルギー発電事業者が参入すると電力価格の総和が低下する一方、電力需要量の総和が増加する。これは、再生可能エネルギー発電事業者が参入するとその限界費用の低さから電力価格が低下するが、それによって図 4.2.2 のよ



うに供給曲線の位置がずれることから電力需要量の増加に繋がるものと考えられる。また case0 に関して、Vickrey オークション・一般化 Vickrey オークションにおいては統一価格オークション・提示価格オークションよりも電力需要量が大きいように見える。これらの方式においては最高入札者の入札額は電力価格に直接的に結びつかず、最高入札者が低めに入札しても落札額が変わることがない。そのためこれらの価格決定方式下では図 4.2.3 のように、最高入札者はあえて低く入札することで落札量を増やし、利益を確保する行動を取る。そのためこれらの価格決定方式下では統一価格オークション・提示価格オークション下と比べて電力需要量が大きくなっている。

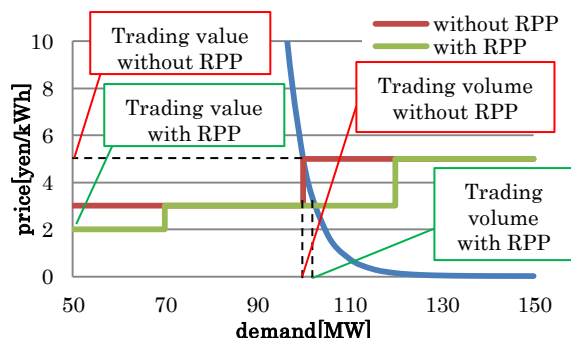


図 4.2.2. 一日前市場における再生可能エネルギー発電事業者の導入による影響

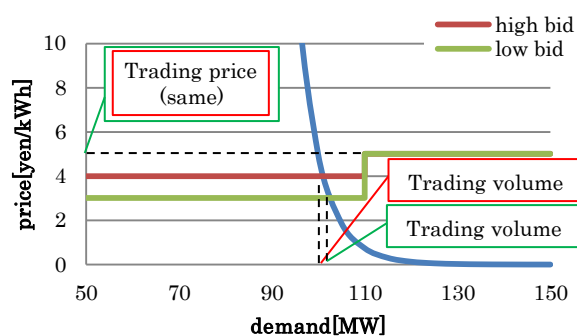


図 4.2.3. 一日前市場における Vickrey オークション下での入札による取引量の決定

この価格低下・需要増加の影響はどの価格決定方式下でも確認できるが、特に一般化 Vickrey オークションでは両者が抑えられており、消費エネルギーの増加の抑制に繋がる点、価格変動による混乱を生まない点からは安定した方式であると言えることができるが、その反面、実際に取引される電力量・電力価格ともに他の価格決定方式と比較して高くなっており、絶対的に良い方式であるとは言えない。

このように、一日前市場における再生可能エネルギー発電事業者の参入は電力価格の低下に繋がる反面、電力需要量の増加に繋がる恐れがあるため、省エネルギーの観点からは好ましくないと言えることができる。次に、各時刻における電力価格の標準偏差について、各ケースに対する結果を図 4.2.4 ~ 4.2.6 に示す。

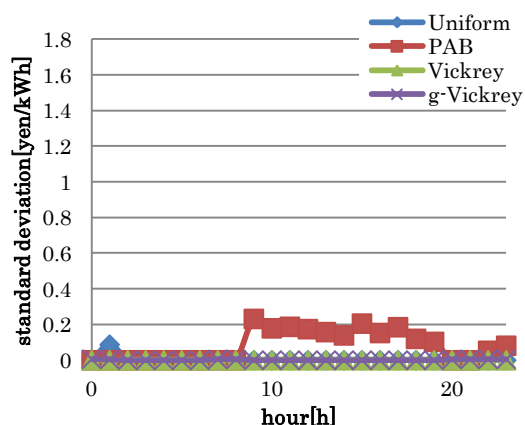


図 4.2.4. 8月のケース 0 における電力価格の標準偏差

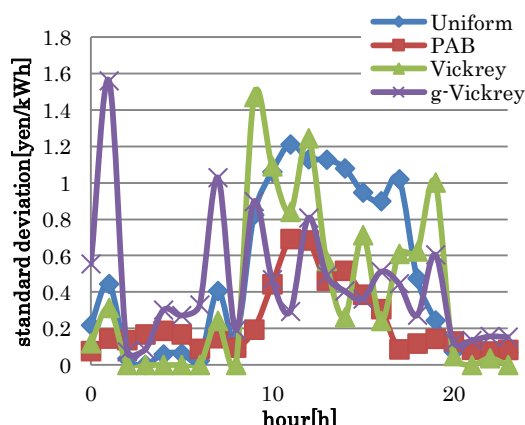


図 4.2.5. 8月のケース 1 における電力価格の標準偏差

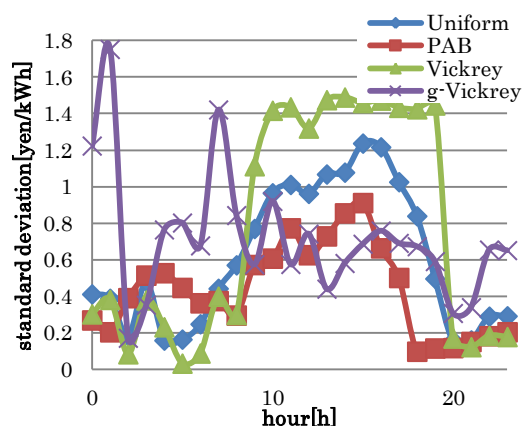


図 4.2.6. 8月のケース 2 における電力価格の標準偏差

図 4.1.2 ~ 4.1.4 と同様に、一般化 Vickrey オークションでは電力需要量のピーク時間帯こそ価格の標準偏差を抑えることができているものの、それ以外の時間帯において他の方式よりも価格の標準偏差が高く、また不規則な挙動を示しているために不安定な方式であると言える。統一価格オークション・Vickrey オークションでは電力需要量の小さい時間帯の価格変動を抑えられているものの、電力需要量のピーク時間帯に価格変動が急激に大きくなっている。これらと比較すると、価格の標準偏差の変動幅が小さく、時間帯によらず価格変動がある程度抑えられている提示価格オークションは再生可能エネルギーの出力の不安定性による影響を受けにくい方式であると言える。

次に、4月、12月の結果について上記と同様のシミュレーションを行った結果を表 4.2.2, 4.2.3、図 4.2.7, 4.2.8 に示す。4.1 と同様に、再生可能エネルギー発電事業者の参入の影響を分かりやすくするため、ここでもケース 0、ケース 2 における結果を示す。

表 4.2.2. 4月の一日前市場での総需要量と電力価格の総和

		demand[MW]	efficiency	price[k・yen]	efficiency
Uniform	case0	2313.56		10359.40	
	case2	2328.33	100.64%	7963.91	76.88%
PAB	case0	2313.54		9731.30	
	case2	2327.31	100.60%	7021.20	72.15%
Vickrey	case0	2322.70		10866.31	
	case2	2342.42	100.85%	9032.52	83.12%
g-Vickrey	case0	2322.50		14051.12	
	case2	2342.31	100.85%	11618.43	82.69%

表 4.2.3. 12 月の一日前市場での総需要量と電力価格の総和

		demand[MW]	efficiency	price[k・yen]	efficiency
<b>Uniform</b>	case0	2624.55		12011.76	
	case2	2632.55	100.30%	10712.62	89.18%
<b>PAB</b>	case0	2624.54		11480.03	
	case2	2630.83	100.24%	10036.51	87.43%
<b>Vickrey</b>	case0	2633.98		12581.85	
	case2	2642.17	100.31%	11786.67	93.68%
<b>g-Vickrey</b>	case0	2633.89		16341.04	
	case2	2643.03	100.35%	15342.38	93.89%

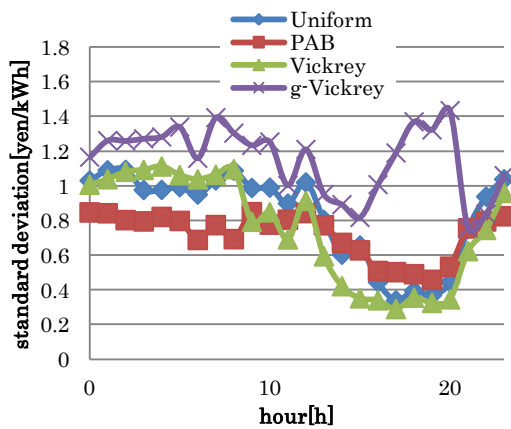


図 4.2.7. 4 月のケース 2 における電力価格の標準偏差

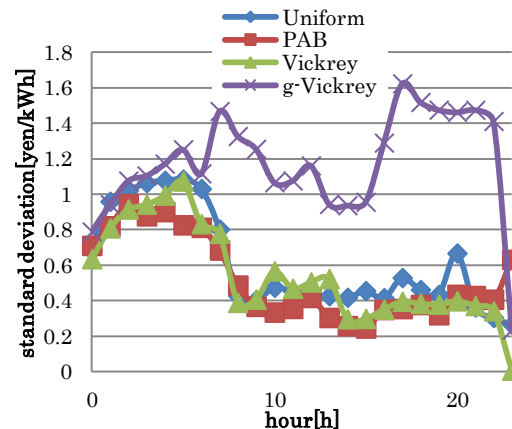


図 4.2.8. 12 月のケース 2 における電力価格の標準偏差

これらにおいても 8 月の結果と同じように、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって電力価格が低下する反面、電力需要量が増加することが確認できた。表 4.2.1 ~ 4.2.3 から分かるように、取引量増加の程度はどの価格決定方式でも同程度であるが、価格低下の大きさに関しては、リアルタイム市場と同様に一般化 Vickrey オークションにおいて比較的小さくすることができていると確認された。取引量の増加についても各価格決定方式下で観測されたが、ここでは価格決定方式による差がさほど見受けられなかった。

時刻毎の価格の標準偏差に関しては図 4.2.4 ~ 4.2.8 から、ここでもリアルタイム市場と同様に、8 月ほど電力需要量が大きくなるために図 4.2.6 とは異なる推移となっている。ここでも一般化 Vickrey オークションでは価格の標準偏差が非常に高い水準を保っているために不安定な方式と言える。その他の方式では全体を通して同程度の値が観測できるが、提示価格オークションにて標準偏差の最大値を最小と出来ており、時刻毎の標準偏差の値の変動も小さく、再生可能エネルギーの不安定な出力の影響を受けにくい方式であると言える。しかし一般化 Vickrey オークションを除いた価格決定方式下での結果は 8 月における結果ほどはっきりとした差は見受けられず、このような電力需要量推移の場合には優劣をつけることが困難である。

### 4.3 本章のまとめ

本章では、リアルタイム市場・一日前市場において4月、8月、12月に対してシミュレーションを行い、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を解析した。リアルタイム市場においては参入により電力価格の低下が、一日前市場においては電力価格の低下ならびに取引量の増加が観測された。これらの大きさを4つの価格決定方式のもとで解析したところ、一般化 Vickrey オークションにてこれらの影響がある程度抑えられることがわかったが、取引量・電力価格そのものが増加してしまうという結果が得られた。その他の価格決定方式では電力価格の低下・取引量の増加は同程度観測されたため、優劣をつけることは出来なかった。

これらと同時に、試行毎の電力価格を記録し標準偏差を計算することにより、再生可能エネルギー発電事業者の出力の不安定性が及ぼす影響を時刻毎に解析したが、再生可能エネルギーの導入が進むにつれて価格の標準偏差が大きくなり、価格変動が大きくなる様子が観測された。この価格変動に関しても価格決定方式ごとに良し悪しがあるが、一般化 Vickrey オークションでは特に大きい値が観測され、出力の不安定性の影響を強く受ける不安定な方式であることが分かった。その他の価格決定方式に関して、4月、12月のような電力需要量の推移を見せる月に関しては、価格の標準偏差にさほど差が生まれず、どの価格決定方式でも同程度の価格変動が観測された。8月のように電力需要量が大きい月に関しては競争も激しくなり、電力需要量がピークを迎える時間帯に価格変動が大きく立ちあがる様子が観測できた。ここにおいて、提示価格オークションではこの立ち上がりを最小とすることができ、時刻毎の価格の標準偏差の変動幅が他の価格決定方式よりも小さい結果となった。他の価格決定方式では電力需要量毎に価格変動の大きさが大きく増減するが、提示価格オークションでは常に同程度の影響を受けるためにこのような結果が得られたと考えられる。そのため、提示価格オークションにおいて電力価格は他と比べて安くなるものの、価格の標準偏差を時間帯によらずほぼ同程度に抑えることができている、この観点からは4つの価格決定方式の中で安定した方式であると言える。この観点からは4つの価格決定方式の中で安定した方式であると言える。

## 第5章 結論と今後の課題

### 5.1 本研究の結論

本研究では電力市場における落札額の価格決定方式として、実際に市場で用いられている統一価格オークション・提示価格オークションと、近年注目が高まっている Vickrey オークション・一般化 Vickrey オークションを加えた四種類の価格決定方式を考え、電力価格や各発電事業者の利益、再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響などを比較することを通し、各価格決定方式の解析を行った。3章においては日本の発電所の発電容量等に基づいた発電事業者のデータをもとに電力需要量の大きさ毎の比較を行ったが、得られた結果を表 5.1 に示す。ここでは、価格決定方式毎の各項目について大きい順に並べた結果を示している。

表 5.1. 価格決定方式の比較

	price	profit	price range caused by introducing renewable power plants
1	g-Vickrey	g-Vickrey	g-Vickrey
2	Vickrey	Vickrey	Vickrey
3	Uniform	Uniform	Uniform
4	Pay-as-bid	Pay-as-bid	Pay-as-bid

電力価格は一般化 Vickrey>Vickrey>統一価格>提示価格という大小関係が常に成立しており、各発電事業者の得る利益もそれに等しい関係となることが分かった。再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響に関しては、限界費用の低さから電力価格の低下が、出力の不安定性から試行毎の価格変動の増加が見受けられた。価格決定方式の性質上、一般化 Vickrey オークションでは発電事業者の利益の確保が容易であることが確認できたが、再生可能エネルギーの出力の不安定性の影響を受けやすく、価格変動の大きい不安定な価格決定方式であると考えられる。

試行毎の電力価格の標準偏差を計算することにより、再生可能エネルギーの導入量が増えるに従って価格変動が大きくなることが確認できた。その中で、各価格決定方式下において、再生可能エネルギーの出力が最高入札者の切り替わりを左右するような場合に価格変動が特に大きくなる様子が確認された。提示価格オークションでは、電力価格が安くなり発電事業者の利益確保は難しい反面、この価格変動の立ち上がりを抑えることができることが分かった。再生可能エネルギーの導入量が少ない場合には、電力需要量の大きさによっては出力の不安定性が最高入札者の切り替わりを左右しないことがケース 1 の結果から分かるが、提示価格オークションではケース 0・ケース 1 における結果からも分かるように、その場合にもある程度の価格変動が観測された。一方でそのような場合には統一価格オークション・Vickrey オークションにて価格変動を抑えることができ、ケース 0・ケース 1 においては、これらの価格決定方式下での価格変動の大きさが提示価格オークション下での価格変動より広範囲に渡って小さい値となることが確認できた。しかしケース 2 のように導入量が増加し、再生可能エネルギーの出力変動が大きくなったために常に最高入札者の切り替わりの可能性を秘めている場合には、これらの価格決定方式下でも常に大きな価格変動が常に確認され、提示価格オークションにおける価格変動を下回る範囲が縮小されることが分かった。

4章においては3章で扱った発電事業者のデータを使用し、4月・8月・12月を対象としてある一日の電力需要量の推移を与え、リアルタイム市場・一日前市場においてその日の取引を考えることで、各価格決定方式の比較を行った。再生可能エネルギー発電事業者の参入によってリアルタイム市場では価格の低下が、一日前市場では価格の低下と取引量の増大が観測されたが、価格決定方式毎のこれらの影響についての結果は表 5.2 に示す。こ

らも、各評価基準に関して得られた値の大きい順に価格決定方式を示している。

表 5.2. リアルタイム市場・一日前市場における価格決定方式の解析

	real time market		day-ahead market		
	price decline	price range	price decline	price range	demand increase
1	Uniform Pay-as-bid Vickrey	g-Vickrey	Uniform Pay-as-bid Vickrey	g-Vickrey	Uniform Pay-as-bid Vickrey
2		Vickrey		Vickrey	
3		Uniform		Uniform	
4	g-Vickrey	Pay-as-bid	g-Vickrey	Pay-as-bid	g-Vickrey

価格低下、取引量の増加の影響について、一般化 Vickrey オークションではこれらを抑えることが出来ることが確認できたが、その他の方式に関してはすべて同程度であるため、ここで優劣を決めることは出来なかった。一般化 Vickrey オークションにおいては取引量そのものが他に比べて大きくなってしまい、また価格変動増加を考えると、この価格決定方式下では対象月によらず最大となったため、これらの市場においても再生可能エネルギーの出力の不安定性の影響を受けやすく、安定した方式とは言えないと考えられる。その他の価格決定方式下では価格変動の大小関係が時刻によって異なる結果となったが、特に8月のように電力需要量が多い場合、提示価格オークションにて広範囲に渡って価格変動を抑えられている様子が確認でき、またその他の対象月においても価格の標準偏差の最大値が最小となることが分かった。

以上のように、各価格決定方式はそれぞれに優劣があり、どれが絶対的に優れているとは言えないことが分かる。例えば、電力価格に関して発電事業者は自身の利益の確保のため電力価格が高い方を好むが、消費者は逆に安い方を好む。また再生可能エネルギー発電事業者の参入の進行による価格低下について、他の発電事業者は利益が減少するため好ましく思わないが、再生可能エネルギー発電事業者自身は利益を増やすことが出来るため、そうは考えない。このように、評価基準一つ取ってもどの立場に立つかによって価格決定方式の良し悪しが変わる。しかし評価基準が数多くある中で再生可能エネルギー発電事業者の参入による価格変動に関しては、どの立場からしても小さい方が混乱を招かず、安定して取引が出来るため好まれると考えられる。本研究では、この価格変動の大きさは提示価格オークションにて影響がある程度抑えられることを数パターンにおいて示した。しかし再生可能エネルギーの導入量が少ない場合など、変動する出力の影響力が小さい、比較的安定した取引を行うことが可能となる場合には、その他の価格決定方式下において価格変動が抑えられるように、提示価格オークションが絶対的に優れた価格決定方式とは言えないことに注意する。

## 5.2 今後の課題

本研究では再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を分かりやすくするため、電力市場のモデルとして、様々な制約を簡略化したモデルを使用した。より正確なシミュレーションを行う際には送電線の制約、設営コストを考慮した発電コストの計算などを組み込む必要があると考えられる。また発電事業者の学習・行動については全ての事業者が同様の思考のもと学習し、行動を選択するモデルにしていたが、事業者毎にこれらを変更し、様々な種類の発電事業者が存在しているモデルのもと解析を行うと異なる結果が得られるのではないかと考えられる。

また技術的な面として、蓄電池の導入やスマートグリッドなどにより、再生可能エネルギーの出力の不安定性も解決されると期待されている。このような背景の中、今後は出力の不安定性が解決された場合に対して価格決定方式の比較を行う必要があると考えられる。同様に、技術発展により風力発電・太陽光発電の出力効率が向上すれば、現在ほど出力の不安定性に悩まされることがなくなることも考えられるなど、多くの可能性を考慮した上で解析を行うことが必要であると言える。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にお世話になりました。指導教員である合原一幸教授には、セミナーや輪講を通して研究の取り組み方から研究内容に至るまで、数多くの点で助言を頂き、心より御礼申し上げます。また鈴木秀幸准教授には研究を進めるにあたって熱心に御指導頂き、御陰様で学会発表にてポスター賞を頂けるなど研究を充実させることができ、深く感謝致します。また本研究で用いた風速や日射量などのデータは気象庁にて観測されたものを使用させていただきました。データを提供して下さった気象庁ならびに仲介して下さった平田祥人特任准教授に誠に感謝致します。研究室の諸先輩方、同期には研究についての話から日常会話まで、よくコミュニケーションをとって頂き、研究生活を支えて下さったことに感謝申し上げます。最後に、様々な形で支えてくれた家族に心より感謝致します。



## 発表実績

Y. Takahashi, H. Suzuki, K. Aihara, “Analysis of Electricity Market Auctions with Introduction of Renewable Power Plants”, The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling, 2013(Best Poster Award Silver Prize 受賞).

## 参考文献

- [1] 資源エネルギー庁: 平成 22 年度エネルギーに関する年次報告書(エネルギー白書 2011)
- [2] F.Wen, A.K.David, “A genetic algorithm based method for bidding strategy coordination in energy and spinning reserve markets”, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.15, No.1, pp.71-79, 2001.
- [3] V.P.Gountis, A.G.Bakirtzis, “Bidding Strategies for Electricity Producers in a Competitive Electricity Marketplace”, *IEEE Trans. On Power Syst.*, Vol.19, No.1, pp.356-365, 2004.
- [4] M.Rahimiyan, H.R.Mashhadi, “Supplier’s optimal bidding strategy in electricity pay-as-bid auction: Comparison of the Q-learning and a model-based approach”, *Electric Power Systems Research*, Vol.78, No.1, pp.165-175, 2008.
- [5] N.P.Yu, C.C.Liu, J.Price, “Evaluation of Market Rules Using a Multi-Agent System Method”, *IEEE Trans. On Power Syst.*, Vol.25, No.1, pp.470-479, 2010.
- [6] M.Rahimiyan, H.R.Mashhadi, “Evaluating the efficiency of divestiture policy in promoting competitiveness using an analytical method and agent-based computational economics”, *Energy Policy*, Vol.38, No.3, pp.1588-1595, 2010.
- [7] H.R.Mashhadi, M.Rahimiyan, “Measurement of Power Supplier’s Market Power Using a Proposed Fuzzy Estimator”, *IEEE Trans. On Power Syst.*, Vol.26, No.4, pp.1836-1844, 2011.
- [8] G. Xiong, S. Okuma, and H. Fujita, “Multi-agent based experiments on Uniform price and Pay-as-bid electricity auction markets”, in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, pp.72-76, 2004.
- [9] G. Federico and D. Rahman, “Bidding in an Electricity Pay-as-bid Auction”, *Journal of Regulatory Economics*, Vol. 24, No.2, pp. 175-211, 2004.
- [10] N. Fabra, N. H. v. d. Fehr, and D. Harbord, “Designing Electricity Auctions”, *Rand Journal of Economics*, Vol. 37, No.1, pp. 23-46, 2006.
- [11] S. Rassenti, V. Smith, and B. Wilson, “Discriminatory Price Auctions in Electricity Markets: Low Volatility at the Expense of High Price Levels”, *Journal of Regulatory Economics*, Vol. 23, No.2, pp.109-123, 2003.
- [12] E.Maskin and J. Riley, “Asymmetric Auctions”, *Review of Economic Studies*, Vol. 67, No.3, pp.413-438, 2000.
- [13] Y. S. Son, R. Baldick, and K. H. Lee, “Short-term electricity market auction game analysis: Uniform and Pay-as-bid pricing”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No.4, pp. 1990-1998, 2004.
- [14] D. W. Bunn and F. S. Oliveira, “Agent-Based Simulation—An Application to the New Electricity Trading Arrangements of England and Wales”, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol. 5, No.5, pp. 493-503, 2001.
- [15] S.Nielsen, P.Soaknaes, P.A.Ostergaard, “Electricity Market Auction Setting in a Future Danish Electricity System with a High Penetration of Renewable Energy Sources – A Comparison of Marginal Pricing and Pay-as-bid”, *Energy*, Vol.36, No.7, pp.4434-4444, 2011.
- [16] 岩上顕夫, 鈴木秀幸, 合原一幸, “風力・太陽光による再生可能エネルギー電源導入時の電力市場に関するエージェントベースモデル解析”, *IEEJ Trans. Power, Energy*, Vol.132, No.5, pp.468-477, 2012.
- [17] A. Hailu, S. Thoyer, “Designing Multi-unit Multiple Bid Auctions: An Agent-based Computational Model of Uniform, Discriminatory and Generalised Vickrey Auctions”, *The Economic Record*, Vol.83, Special Issue, pp.57-72, 2007.
- [18] 諸富徹, “排出量取引制度におけるオークション方式の検討”, 会計検査研究第 41 号, pp.81-95, 2010.
- [19] C. Obersteiner and M. Saguan, “Parameters influencing the market value of wind power – a model-based analysis of the Central European power market”, *Euro. Trans. Electr. Power*, Vol.21, No.6, pp.1856-1868, 2011.
- [20] S.Yousefi, M. P. Moghaddam, V. J. Majd, “Optimal real time pricing in an agent-based retail market using a comprehensive demand response model”, *Energy*, Vol.36, No.9, pp.5716-5727, 2011
- [21] A. G. Bakirtzis, A. C. Tellidou, “Agent-Based Simulation of Power Markets under Uniform and Pay-as-Bid Pricing Rules using Reinforcement Learning”, in *Proceedings of the IEEE Power*

- Systems Conference and Exposition PSCE '06*, pp.1168–1173, 2006.
- [22] A. Azadeh, M.R. Skandari, B. Maleki-Shoja, “An integrated ant colony optimization approach to compare strategies of clearing market in electricity markets: Agent-based simulation”, *Energy Policy*, Vol.38, No.10, pp.6307-6319, 2010.
  - [23] C.J.C.H. Watkins, P. Dayan, “Technical Note: Q-Learning”, *Machine Learning*, Vol.8, No.3-4, pp.279-292, 1992.
  - [24] D. J. Veit, A. Weidlich, J. A. Kraft, “An agent-based analysis of the German electricity market with transmission capacity constraints”, *Energy Policy*, Vol.37, No.10, pp.4132-4144, 2009.
  - [25] H. A. Gil, C. G. Quiles, J. Riquelme, “Large-scale wind power integration and wholesale electricity trading benefits: Estimation via an ex post approach”, *Energy Policy*, Vol.41, pp.849-859, 2012.
  - [26] E. Alishahi, M. P. Moghaddam, M. K. Sheikh-El-Eslami, “A system dynamics approach for investigating impacts of incentive mechanisms on wind power investment”, *Renewable Energy*, Vol.37, No.1, pp.310-317, 2012.
  - [27] A. Banal-Estanol, A. R. Micola, “Behavioural simulations in spot electricity markets”, *European Journal of Operational Research*, Vol.214, No.1, pp.147-159, 2011.
  - [28] D. S. Kirschen, “Demand-Side View of Electricity Markets”, *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol.18, No.2, pp.520-527, 2003.
  - [29] C. L. Su, “Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets”, *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol.24, No.3, pp.1199-1207, 2009.
  - [30] J. M. Morales, A. J. Conejo, J. Perez-Ruiz, “Simulating the Impact of Wind Production on Locational Marginal Prices”, *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol.26, No.2, pp.820-828, 2011.
  - [31] European Wind Energy Association, “Powering Europe: wind energy and the electricity grid”, 2010.
  - [32] A.C.Tellidou, A.G.Bakirtzis, “Agent-Based Analysis of Capacity withholding and Tacit Collusion in Electricity Markets”, *IEEE Trans. On Power Syst.*, Vol.22, No.4, pp.1735-1742, 2007.
  - [33] M.Rahimiyan, H.R.Mashhadi, “An Adaptive Q-Learning Algorithm Developed for Agent-Based Computational Modeling of Electricity Market”, *IEEE Trans. On Syst., Man, and Cybernetics-Part C*, Vol.40, No.5, pp.547-556, 2010.
  - [34] A. Weidlich, D. Veit, “A critical survey of agent-based wholesale electricity market models”, *Energy Economics*, Vol.30, No.4, pp.1728-1759, 2008.
  - [35] G. Li, J. Shi, X. Qu, “Modeling methods for GenCo bidding strategy optimization in the liberalized electricity spot market – A state-of-the-art review”, *Energy*, Vol.36, No.8, 4686-4700, 2011.

## 付録. 異なる環境設定におけるシミュレーション

ここまでは日本の発電所の発電容量をもとにした発電事業者を対象としていたが、本章では、先行研究[18,19]にて取り扱われていた仮想の発電事業者のデータをもとに同様のシミュレーションをし、3章にて取り扱っていた再生可能エネルギー発電事業者の導入による影響を解析する。この解析を通し、価格決定方式の違いによる価格の大小関係など、3章にて得られた結果が環境依存のものであるか否かを確認する。3章において価格の標準偏差を観測したが、最高入札者の切り替わるタイミングで価格変動が大きくなることを確認した。本章ではそれらが本当に同期しているのか、また価格決定方式ごとの結果の違いが環境依存であるのかを確かめるため、仮想の発電事業者の集合を3パターン考え、シミュレーションを行った結果を示す。発電事業者の発電容量、限界費用については表1に示す。

表 1. 各パターンにおける発電所のデータ[18,19]

	Pattern1		Pattern2		Pattern3	
	capacity [MW]	marginal cost [yen/kWh]	capacity [MW]	marginal cost [yen/kWh]	capacity [MW]	marginal cost [yen/kWh]
#1	150	2.5	75	2.5	50	2.5
#2	30	3.5	75	2.5	50	2.5
#3	30	4.0	30	3.5	50	2.5
#4	40	6.0	30	4.0	30	3.5
#5	50	7.5	40	6.0	30	4.0
#6			50	7.5	40	6.0
#7					50	7.5

このように、一つの大口需要者が存在するパターン、それを2つに分割したパターン、3つに分割したパターンについて電力価格、電力価格の標準偏差を計算する。ここでは、再生可能エネルギー発電事業者の影響の解析のため、前章において取り扱った3ケースのうち、ケース0とケース2について考える。

以上の3パターンについて4つの価格決定方式における電力価格、価格の標準偏差を解析する。

## ・パターン 1

大口の発電事業者が存在するパターンに関して、ケース 0 における電力価格・電力価格の標準偏差を図 1, 2 に、ケース 2 における電力価格・電力価格の標準偏差を図 3, 4 に示す。また最高入札者の切り替わりを示すため、ケース 0 において、統一価格オークション下における最高入札者の担う発電量を図 5 に示す。

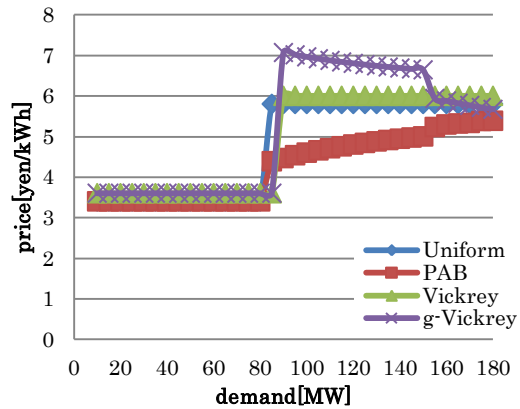


図 1. パターン 1 のケース 0 における電力価格

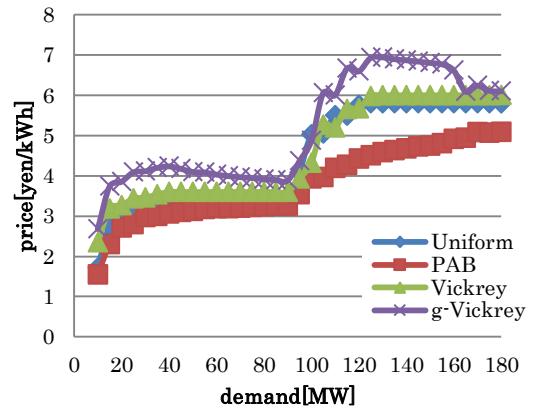


図 2. パターン 1 のケース 2 における電力価格

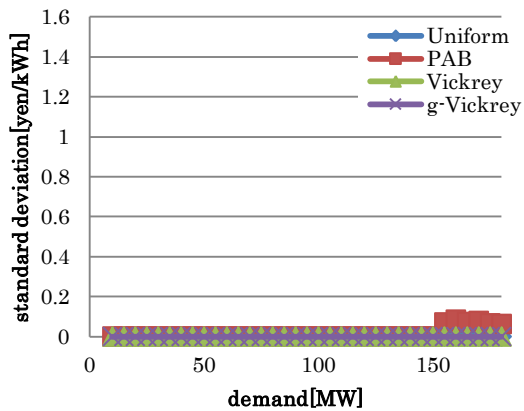


図 3. パターン 1 のケース 0 における電力価格の標準偏差

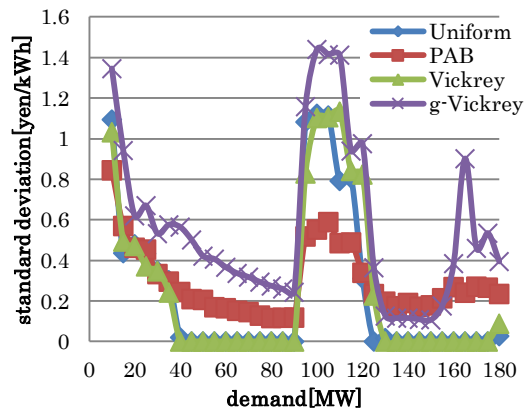


図 4. パターン 1 のケース 2 における電力価格の標準偏差

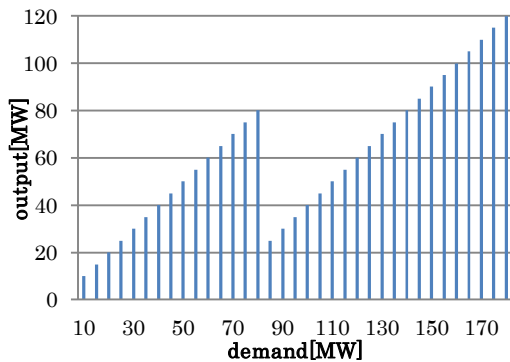


図 5. 統一価格オークション下でのパターン 1 のケース 0 における最高入札者の出力

図 1 において、電力需要量が 90[MW]程度のときに電力価格が大きな変化を見せている。これは、例えば統一価格オークションにおいては、電力需要量が 80[MW]の場合には発電事業者 1 が 3.4[yen/kWh]で入札し、 $72[\text{k} \cdot \text{yen}] (=80[\text{MW}] \times (3.4 - 2.5)[\text{yen/kWh}])$ の利益を得ていたのに対し、電力需要量が 85[MW]になると、同様の入札で  $76.5[\text{k} \cdot \text{yen}] (=85[\text{MW}] \times (3.4 - 2.5)[\text{yen/kWh}])$ の利益を得るよりも、意図的に 5.8[yen/kWh]で入札して自身の発電量を減らす代わりに価格を上げることで、 $82.5[\text{k} \cdot \text{yen}] (=25[\text{MW}] \times (5.8 - 2.5)[\text{yen/kWh}])$ と利益を増やすことができるため、この行動を選択したことが原因であると考えられる。また 3 章において観測されたように、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって電力価格が低下することが図 2 との比較で分かる。

価格の標準偏差について、ケース 0 においては図 3 からわかるように、出力が不安定な発電事業者がいないために各発電事業者の学習が容易となり、非常に小さい水準を各価格決定方式下で保っている。しかし再生可能エネルギー発電事業者の参入が進むケース 2 においては図 4 からわかるように、各価格決定方式下において電力価格の標準偏差が局所的に大きくなる箇所が存在する。これは前述した発電事業者 1 の行動から来るものであると考えられるが、その極値の大きさについては一般化 Vickrey>統一価格≒Vickrey>提示価格となっており、局所的な価格変動を提示価格オークションにて最小に出来ている。しかしそれ以外の電力需要量の場合には統一価格オークション・Vickrey オークションにて変動はほとんど 0 になっている。これは、最高入札者である発電事業者 1 の容量が他と比べて極端に大きく、担う発電量が大きいために再生可能エネルギーの不安定な出力によらず最高入札者でいることができ、価格が最高入札者の入札額となるこれらのオークション下では再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を受けにくいためであると考えられる。一方で、提示価格オークション・一般化 Vickrey オークションにおいてはそれぞれの入札の平均をとるために再生可能エネルギーの出力の大きさに価格が左右され、常にある程度の価格変動が観測されているものと考えられる。

また価格の標準偏差が大きくなるタイミングについては、図 4 と図 5 を比較すると、確かに最高入札者の切り替わるタイミングで価格の標準偏差が大きく立ちあがっている様子が確認できる。ここで、3 章においては実際に最高入札者そのものが変わっていたが、本パターンにおいて最高入札者自体は変わっておらず、最高入札者のとる戦略が変わったために図 5 のような切り替わりが現れていることに注意する。

・パターン 2

次に、パターン 1 における大口の発電需要者が 2 つに分割されたパターン 2 について同様のシミュレーションを行った結果を図 5 ~ 8 に示す。パターン 2, 3 において、ケース 0 での価格の標準偏差はここまでで示されてきたように、各価格決定方式下でほとんど 0 に近い値のため、その結果については割愛する。

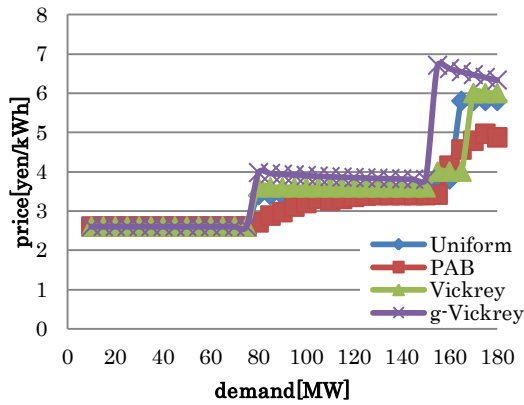


図 6. パターン 2 のケース 0 における電力価格

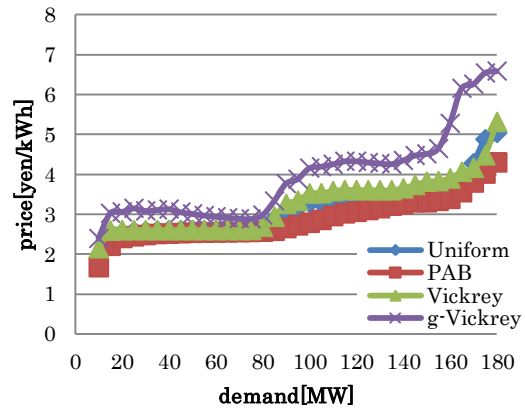


図 7. パターン 2 のケース 2 における電力価格

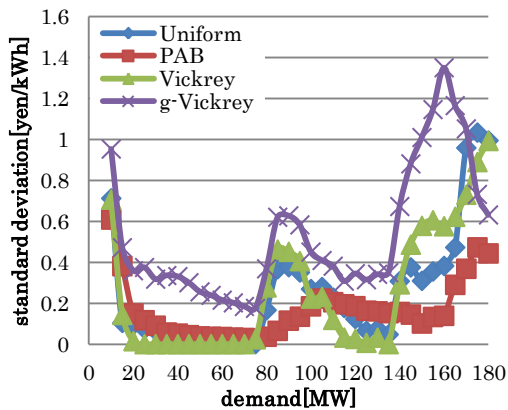


図 8. パターン 2 のケース 2 における電力価格の標準偏差

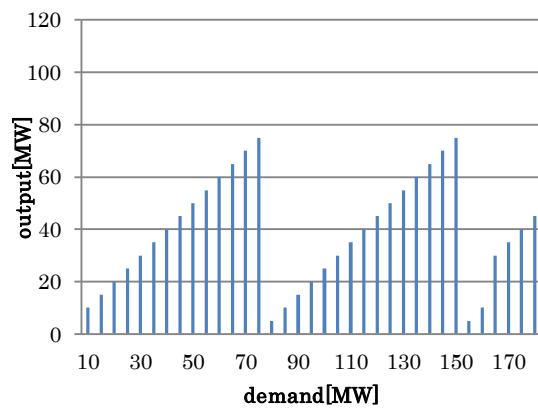


図 9. 統一価格オークション下でのパターン 2 のケース 0 における最高入札者の出力

図 1, 2, 6, 7 から分かるように、発電事業者の数が増えたことによって電力需要量毎の価格変動の大きさが小さくなり、またパターン 2 においてはパターン 1 における電力価格よりも低い価格となることが分かる。これは、発電事業者 1 の分割によって競争が激しくなったために得られた結果であると考えられる。また図 8, 9 をみると、最高入札者の切り替わりのタイミングで電力価格の変動も大きくなっていることが確認できる。パターン 1 のように膨大な発電容量を持った発電事業者がいないために再生可能エネルギー発電事業者の参入による影響を受けやすく、図 3 と図 8 を比較すると、全体的に価格の標準偏差が大きくなっていることが分かる。統一価格オークション・Vickrey オークションにおいて、パターン 1 では再生可能エネルギーの出力の不安定性が影響しないほど大きな発電容量を持つ発電事業者がいたため、広範囲に渡って価格の標準偏差が 0 に近い値となっていたが、そのように小さくなる範囲がパターン 2 では狭められていることも確認できる。また一方で、切り替わりによって生じる価格の標準偏差の極大値がパターン 1 と比較してある程度抑えられており、ここでも極大値の大きさが提示価格オークションにおいて最小と出来ていることも確認できる。

・パターン 3

次に、パターン 1 における発電事業者 1 を 3 つに分割したパターンについてのシミュレーション結果を図 10～13 に示す。

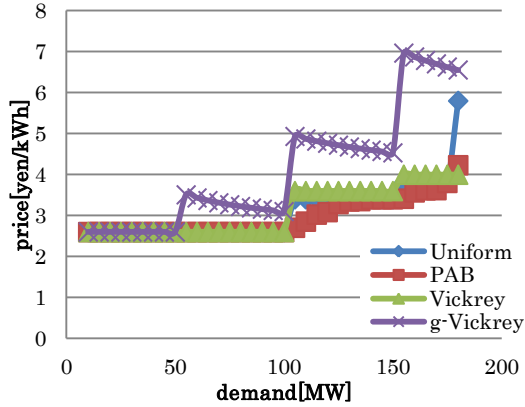


図 10. パターン 3 のケース 0 における電力価格

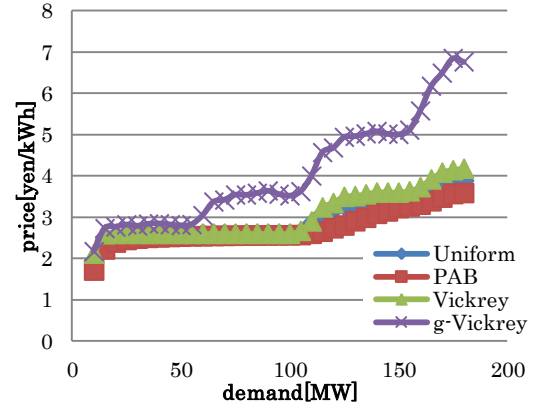


図 11. パターン 3 のケース 2 における電力価格

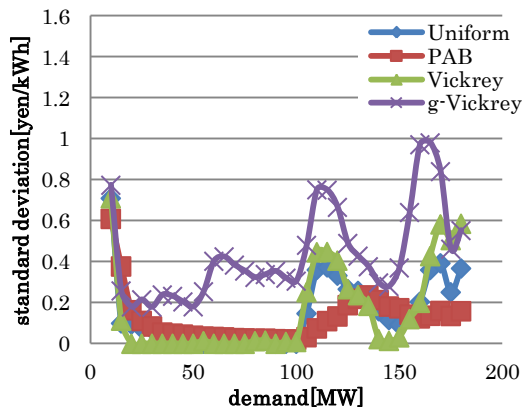


図 12. パターン 3 のケース 2 における電力価格の標準偏差

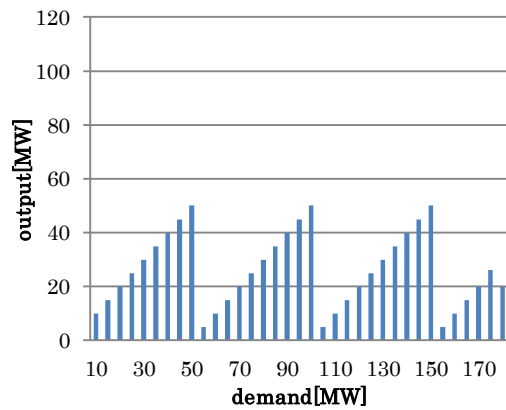


図 13. 統一価格オークション下でのパターン 3 のケース 0 における最高入札者の出力

図 10, 11 より、ここにおいてもケース 2 にて観測されたものと同様に、発電事業者の分割によって電力需要量毎の価格変動が小さくなり、なだらかな変化を示すとともに電力価格も低下することが確認された。また図 12, 13 から分かるように最高入札者の切り替わりのタイミングと価格の標準偏差が増加するタイミングも一致している。このパターンでは各発電事業者の発電容量がどれも同程度であるために再生可能エネルギーの出力の不安定性による最高入札者の切り替わりが起りやすく、再生可能エネルギー発電事業者の参入によって価格の標準偏差が全体的に大きくなることを確認できる。一方で、パターン 1, 2 のように局所的に価格の標準偏差が大きくなる箇所が見受けられるが、その極値はパターン 1、パターン 2 よりも小さくなっていることが確認された。局所的な値をとる範囲を除いては、一般化 Vickrey>提示価格>統一価格=Vickrey であることがパターン 1 にて確認されたが、パターン 2, 3 の結果のように、発電事業者が分割され競争が激しくなるにつれてこの範囲が狭められてきており、常に正しい関係性とは言えないことが確認できる。

以上の3つのパターンから分かるように、大口の発電需要者を分割することで電力価格の標準偏差が高くなる一方、電力価格は低下する。前述の通り、大口の発電事業者は、自身の入札額を意図的に調節することで自身の利益を最大化しようとするように、ある程度市場の価格を操作する力(市場支配力)を持っていると考えられており、電力価格が作為的に引き上げられる可能性があるため市場にとっては好ましい存在とは言えない。この市場支配力は、市場の競争状態を表すハーフィンダール・ハーシュマン指数(HHI)という指標を用いて数値化することができ、具体的には、各市場参加者の市場占有率を $a_1, a_2, \dots, a_n$ としたときに、

$$HHI = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (5.1)$$

で計算される。HHIは0~10000の値をとり、大きいほど市場は独占状態に近く、小さいほど競争状態に近いと言える。各パターンに対してHHIを計算したものを表2に示す。

表 2.3 パターンの電力市場における HHI

	pattern1		pattern2		pattern3	
	capacity[MW]	share[%]	capacity[MW]	share[%]	capacity[MW]	share[%]
#1	150	50.0	75	25.0	50	16.7
#2	30	10.0	75	25.0	50	16.7
#3	30	10.0	30	10.0	50	16.7
#4	40	13.3	30	10.0	30	10.0
#5	50	16.7	40	13.3	30	10.0
#6			50	16.7	40	13.3
#7					50	16.7
HHI	3155.556		1280.556		933.3333	

HHIの値はパターン1>2>3であり、大口の発電需要者が存在することでHHIの値が大きくなり、独占状態に近付いていることが分かる。またそれらが分割され、どの発電事業者も同様の発電容量を持つにつれて競争が激しくなっている。一般的に独占的な市場はその不平等さや効率の悪さから好ましくないとされ、各国は競争の激しい電力市場を作成することを目的としている。そのため今後はパターン1のように大きな市場支配力を持つ事業者が存在する市場は減少し、パターン2、3のような競争の激しい市場に近付くと予想される。

ここでは本文と異なる環境設定として、独占状態に近い市場と競争の激しい市場についてシミュレーションを行った結果を示した。独占状態に近い市場では意図的な価格のつり上げが起こる可能性を秘めており、競争が激しくなるにつれて電力価格が安くなる様子が確認できた。また再生可能エネルギー発電事業者の参入による価格変動に対しては、どの環境設定でも再生可能エネルギーの出力の不安定性が最高入札者の切り替わりを左右する場合に価格変動が大きくなることが確認でき、その大きさを提示価格オークション下で最小とすることができることが分かった。また、この値は競争が激しくなるほど小さくすることができるが、その範囲を除いては、出力の不安定性の影響を受けやすいために全体的に価格変動が大きくなる様子が観測された。不安定な出力が最高入札者の切り替わりを左右しないような範囲では統一価格オークション・Vickreyオークション下で価格変動を抑えることができ、その範囲は競争が激しくなるにつれて縮小された。これらは3章で得られた結果と同様であり、価格決定方式にはそれぞれ良し悪しがあるということが出来る。