

2024 年度 卒業論文

再生可能エネルギーが与える電力卸売市場への影響

慶應義塾大学 経済学部

石橋孝次研究会 第 25 期生

清水 大輔

はしがき

近年日々の生活の中でもカーボンニュートラル、SDGsといった声がよく聞こえるようになった。そして多くの産業において再生可能エネルギーが注目されてきていると考える。

そんな中、自分は日々の生活で必要不可欠かつ、身近な電力市場というところに関して、再生可能エネルギーがどのような影響を与えているのかということが気になり、今回の研究を行うこととした。

本論文では再生可能エネルギーを用いた発電がどのような市場に与える影響ということを中心に考えた。結果として政策の効果などより産業組織に通ずる内容が書けたか心残りがある結果となってしまった。しかし今後も発展していくである再生可能エネルギー市場に議論のきっかけなどが作れていたら嬉しいと考える。

目次

序章

第1章 電力市場に関する現状分析

- 1.1 電力販売の仕組みや制度について
- 1.2 現在の発電状況や価格設定について
- 1.3 SDGs に向けた今後の電力市場について

第2章 再生可能エネルギーが与える卸売価格への影響の分析

- 2.1 先行研究の紹介 Bushnell and Novan (2018)
 - 2.1.1 先行研究の概説
 - 2.1.2 分析方法および変数
 - 2.1.3 実証結果
- 2.2 日本電力市場(当日市場)においての実証分析
 - 2.2.1 実証方法と使用データについて
 - 2.2.2 実証結果
- 2.3 日本電力市場(前日市場)においての実証分析
 - 2.3.1 実証方法と使用データについて
 - 2.3.2 実証結果

第3章 再生可能エネルギーが与える需要への影響の分析

- 3.1 先行研究の紹介 秋山・細江(2007)
 - 3.1.1 先行研究の概説
 - 3.1.2 分析方法および変数
 - 3.1.3 実証結果

第4章 結論

参考文献

あとがき

序章

本論文の目的は再生可能エネルギーが卸売価格にどのような影響を与えるかを分析することである。現状の日本電力市場では、SDGs の進展を中心に再生可能エネルギーが推進されている点、2011 年に起きた東日本大震災の影響から原子力発電の利用が停止されている点などが問題点として挙げられる。これらが電力卸売価格にどのような影響を与えているか実証分析に基づき、考察していく。また太陽光電源や風力電源など再生可能エネルギー電力が従来の電力制度に対してどの程度代替することが可能なのかという今後の議論にも寄与できればと考える。

各章を概説する。本稿は 3 章で構成されており、第 1 章では、電力市場の現状の説明や SDGs の推進が電力市場に与えている影響などを述べていく。第 2 章で、再生可能エネルギーが卸売価格に与える影響を分析する。第 3 章では、結論を述べていく。

第1章 電力市場に関する現状分析

第1節では、電力市場の近年の変化や現状抱えている問題点について述べていく。第2節では制度の変化などから電力市場がどのように変化したのか、主に今回対象としている卸売市場について述べていく。第3節では現在の電力市場での発電状況を述べるとともに、価格にどのような影響を与えているのかについて言及する。第4節では今後の電力市場ではCO2削減のためにどのように取り組んでいくのか、その結果どのような影響がもたらせる可能性があるのか、現状の再生可能エネルギーが抱える問題点などを説明する。

1.1 電力市場の変化や課題

電力市場では近年多くの変化が起き、問題も抱えていると言えるのではないかと考える。これには電力制度改革や東日本大震災を契機とした従来電力システムの変更、SDGsの進みからカーボンニュートラルを目標とする世界的変化などが挙げられる。ここからはこれらの変化についてや影響について考えていく。

まず東日本大震災を契機とした従来電力システムの変更についてだ。東日本大震災を契機に原子力発電の運用停止、そこから多様な電源の活用が不可避になった。また、原子力発電の停止から電気料金の上昇圧力が高まり、価格抑制の重要性が上昇した。他にも地域ごとの供給力確保ではなく、広域的な系統運用を行いながら発電所を全国レベルで活用していくことなどが必要となった。これらのような従来の電力制度では避けられない課題が明確に浮き彫りとなった。これらの課題の改善を行うためにも電力制度改革は行われた。詳しい内容については以下に述べていく。

ここからは電力制度改革について概要を確認していく。電力制度改革は1995年以降段階的に行われており、現在は2015年に行われた第5回電力制度改革が最後となっている。詳しい内容としては次のとおりである。1995年には発電部門の自由化、2000年、2003年には小売部門の部分的自由化に移行。そして2008年では卸売市場に時間前市場の導入といった制度改革、2015年には小売部門の全面自由化、発電部門と送配電部門の法的分離などが行われた。

これらの制度改革を通して3つの目的があった。1つは需給調整能力を高めるとともに広域的な電力融通の促進し安定供給の確保する点。2つ目は競争の促進から電気料金を最大限抑制する点。3つ目は需要家の選択肢や事業者の事業機会拡大が挙げられる。

これらの制度改革は発送電の分離とともに出来た電力広域的運営推進機関(OCCTO)により電力融通を行っていることや、2022年の燃料価格高騰まで小売価格は低下していたことから成果が出ていたと言えるだろう。また、需要家の選択肢や事業者の事業機会の拡大については、700を超える事業者が新規参入、再エネに特化したメニューなど料金メニューも多様化したと言える。つまり3つの目的についてある程度の成果が確認できたと言える。そ

の一方で再生可能エネルギー導入が進んでいることなどから供給力低下が課題として挙げられる。他にも燃料価格の高騰など外部的な上昇圧力に対しての課題なども残る。

最後にカーボンニュートラルを目標とする世界的変化についてだ。日本では2050年にカーボンニュートラル実現を目指すと言明した。そのため発電割合としても2030年に36~38%を目標とし、再生可能エネルギーの導入拡大を図ろうとしている。課題として地域共生が可能なのか、安定供給することが可能な電源か、などさまざまな問題点が残っていると言える。また現在では、発電コストが低下し、他の電源と比べてコスト競争力のある発電方法となってきた。ここから価格の低下を促せるかといった点も再生可能エネルギー導入拡大において重要だと言える。これらについては詳しく3節で述べていく。

上記のような変化が起きている電力市場において、再生可能エネルギーの拡大から生じる供給面の懸念や価格への影響が考えられるとわかった。また制度改革によって市場構造の変化もあったと述べたが具体的にはどのような市場があるのか。今回議題に挙げる卸売市場を中心に次の節で述べていく。

1.2 現在の電力市場について

現在の電力市場では制度改革などに伴い、いくつかの市場が存在する。1つ目は卸売市場である。そして容量市場、需給調整市場などがある。ここからはこれらの順に述べていく。

卸売市場は今回の論文で分析を行っていく市場である。具体的な内容は節の後半で述べていく。

2つ目は容量市場だ。容量市場とは将来の供給量を取引する市場である。これは将来に必要な発電量に対する容量の確保を目的とする市場だ。小売全面自由化や再生可能エネルギーの導入拡大による卸電力市場の取引拡大、市場価格の低下により、どのくらい発電することが必要なのかという予測が難しくなっている。その後適切な発電ができないことから発電事業者の収益低下や価格の上昇などの問題が懸念される。そのためあらかじめ必要な発電量を確実に確保していくことで発電事業者、小売事業者、消費者へのリスクを軽減することが目的となっている。

次に需給調整市場についてだ。これは卸売市場で取引計画が締め切られた後に生じる需給ギャップを補填するための市場だ。エアコンの使用量増加や再生可能エネルギーの発電量変動などによって直前に予測されていた発電量が直前に変化する場合がある。この問題を最終的な需給調整を行うことで解消する。そしてこの最終調整のために必要な電力量を調整することが需給調整市場の役割と言える。

最後が卸売市場だ。卸売市場は発電した電力を需要家に供給するための電力取引を行う市場である。その中でも1日前市場、先渡し市場、当日市場、ベースロード市場、非化石価値取引市場の5つがある。

まずスポット(1日前)市場は翌日1日を30分毎に分割し48の時間帯での電力量(kWh)

を取引する市場だ。この市場は翌日の電力供給を計画的に確保することで効率的な電力供給を果たそうとしている。またこの市場で国内の需要電力の4割を取引している。

続いて、先渡し市場は将来の特定期間における電力取引を行う市場である。ここから将来の電力売買を確定させることで電気事業者の経営安定や将来の予測を安定させることが出来る。

そして3つ目は当日市場である。これは当日の発電と需要を調整するための市場。予測不可能な需給変化に対応することを目的とした市場だ。

続いてベースロード市場だ。この市場では旧一般電気事業者が保有する安価にいつの時間も発電できる電力の電力量を新電力事業者と取引する市場だ。この市場により新電力事業者も常に電力を販売することができるようになり、小売市場での競争性を活発にさせることを目的としている。しかし、実際に約定されている電力量は低くあまり活用されていないという現状がある。

最後に非化石価値取引市場についてだ。これは非化石価値電源の価値を証明化し、この証明書について取引する市場である。この取引により小売販売において再生可能エネルギー電源を販売していることが証明でき、環境を意識していることなどが証明できる。またこの取引から再生可能エネルギーの促進も普及を進めようとしている。

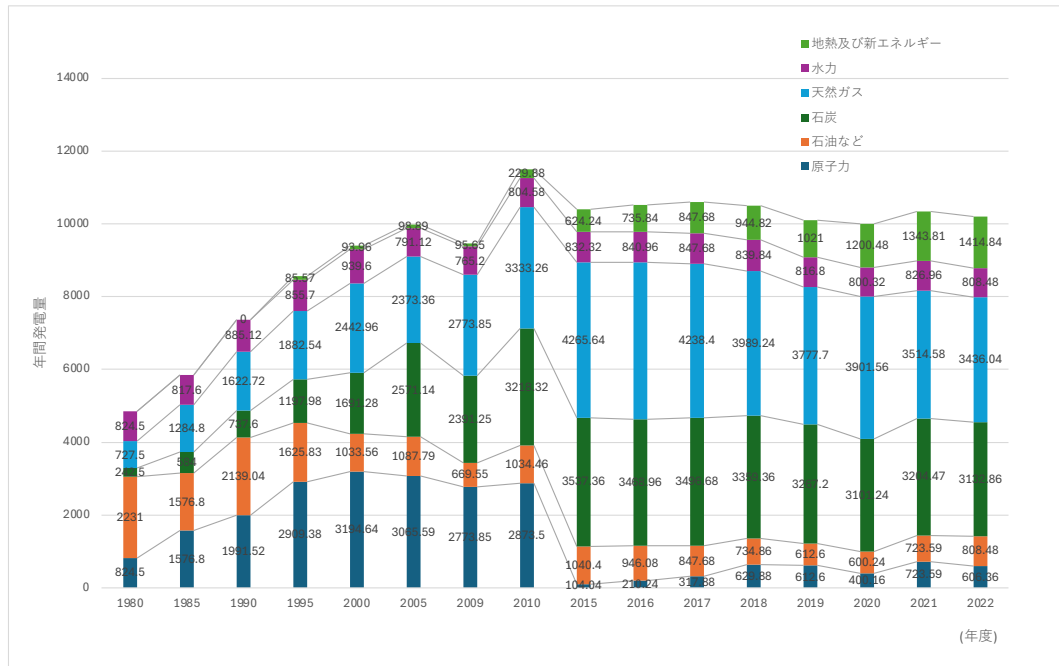
現在の市場ではこれだけではなく他にもあるが受給調整や将来のこと、再生可能エネルギーの導入などさまざまなことを考え、市場が構成されている。続いては、現在主に使われている電源はなんなのか、価格はどのような状況にあるのかということを見ていく。

1.3 現在の発電状況や価格設定について

まず1980年度から2022年度までの電源別発電量の推移を図1-1に記した。図1-1を見ていくと2010年度以降に原子力発電が減ったと言える。これは東日本大震災による福島第一原発事故の影響だろう。また2015年度以降では、2010年度と比較し、全体の発電量が減少した点が特徴と言えるだろう。他にも2010年度頃から再生可能エネルギーの発電量も大きく伸びているということが挙げられる。また、2022年度のところを見るとわかるように徐々にだが原子力発電所の運転再開も進んでいることがわかる。これらの傾向を踏まえると再生可能エネルギーや原子力の発電量は今後も増えていくと考えられる。

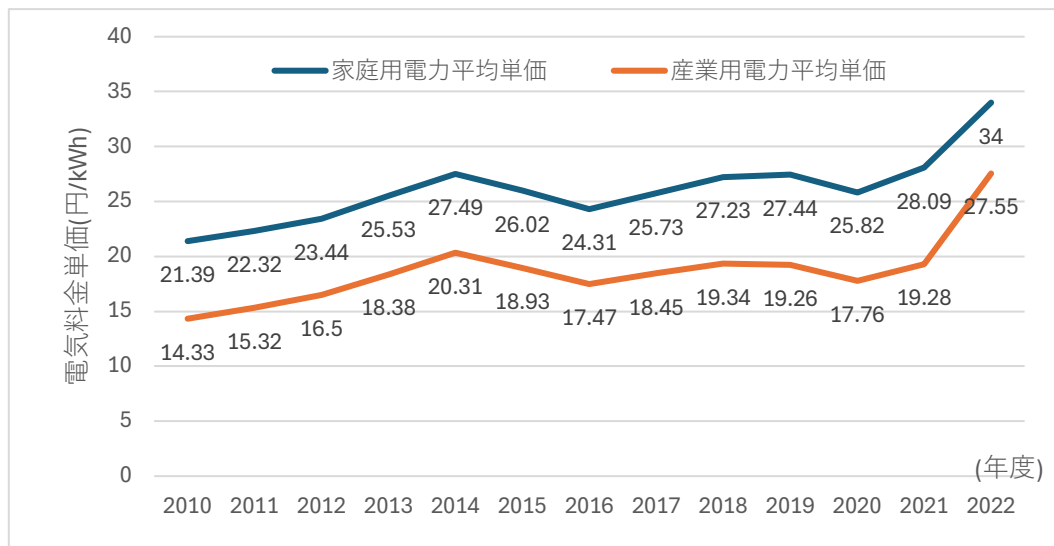
次に電力価格の推移について図1-2を踏まえて考えていく。価格についても同様に東日本大震災の影響からか価格への上昇圧力が起きていることがわかる。また小売電力全面自由化が行われた2015年付近でも価格低下が見られる。ここからも電力制度改革の効果がわかると言える。しかしながら全体として価格は上昇傾向であると言える。これは燃料価格の高騰や再生可能エネルギー導入量増加によるコスト負担増大が背景にあると言える。現在の発電状況や価格についてはこのような変化や課題が挙げられる。

図 1-1 電源別発電量推移



出典:電気事業連合会

図 1-2 電気料金の変化



出典:資源エネルギー庁

1.4 カーボンニュートラルに向けた今後の電力市場について

続いてカーボンニュートラルの実現を目指した電力市場の動きについてだ。まず先述の通り、日本では 2050 年にカーボンニュートラル実現を目指すと言明した。そのため発電割

合としても 2030 年に 36~38%を目標としているというのが現状だ。そしてここからは各電力の近年の動きと課題について述べていく。

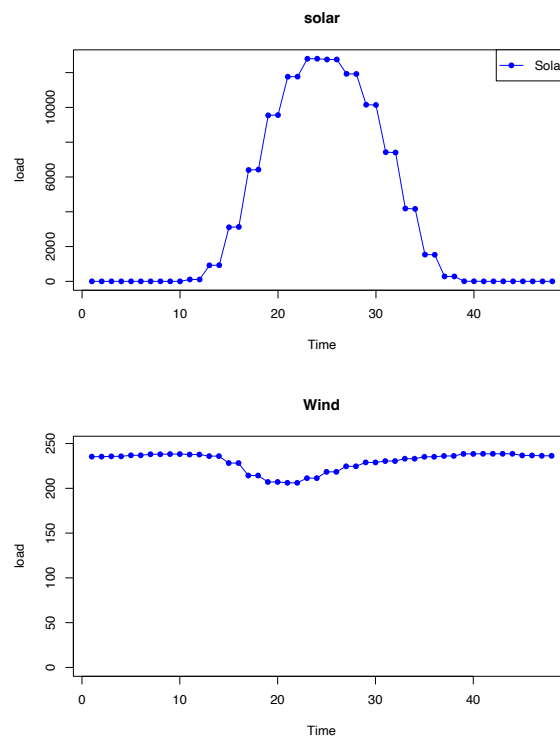
まずは太陽光発電についてだ。2019 年度末から 2022 年度末までに 14.9GW の追加稼働が見られ、導入が進んでいると言えるだろう。しかし適地の確保や地域との共生や長期安定的な事業継続などに懸念が残っている。

続いて陸上風力発電について述べていく。風力発電も同様に 0.9GW の増加が見られた。こちらは太陽光発電と比較し、緩やかな増加傾向と言えるだろう。また課題については太陽光発電と同様に地域共生の課題などを抱える。他にも立地制約などの問題も抱えている。

他にも洋上風力発電や地熱発電、バイオマス発電などが再生可能エネルギーとして注目されている。実際に発電設備なども増加傾向にある。

その一方で、再生可能エネルギー導入による影響から電力コストの上昇や再生可能エネルギーを主電源とした時に安定供給は可能なのかなどといった懸念点は残る。今回はこのような流れを踏まえ、再生可能エネルギーの導入が電力市場にどのような影響を与えるのかということを次の章で考察していこうと考える。

図 1-3 時間ごと平均発電量

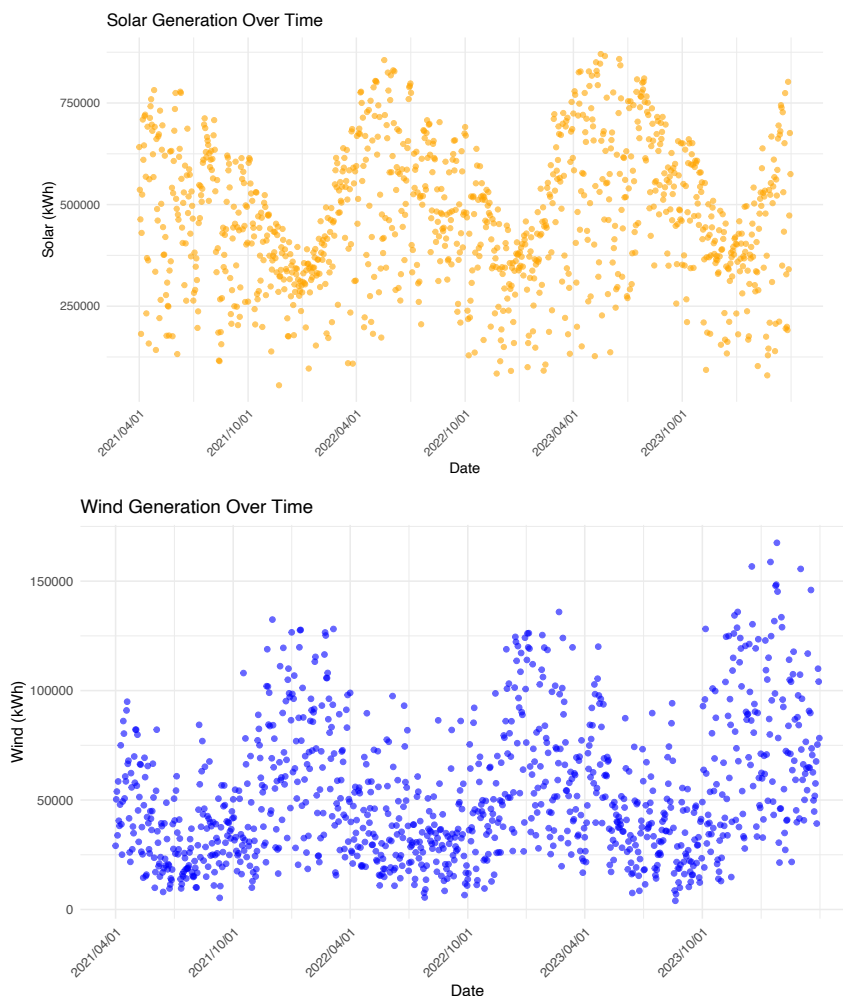


出典:一般電力事業者の受給実績データから作成

図 1-3 は時間ごと発電量の平均を表している。Time は 30 分刻みの時間を数値に置き換えたものとなっている。太陽光発電では昼間が発電のピークとなり、早朝や夜間は発電がないことがわかる。これは太陽の日照時間の影響からだろう。また風力発電では 5 時ごろから 12 時ごろまで発電量が低下することがわかる。しかし発電量として概ね安定しているということがわかる。また 2 つとも GWh あたりで図を表示しているが太陽光の方が多く発電しているということがわかる。これは日本の設備推進としても太陽光を重点的に推進してきたことがわかる。

図 1-6 は 1 日ごと発電量を散布図として表したものだ。太陽光発電も風力発電も季節の影響や天候の影響を受けるということがこの図からわかる。また発電量全体が徐々に増えていくことから設備投資の推進などが伺える。今回実証に用いた期間では太陽光発電は大幅な容量増加は行われたなかったのではないかと考えられる。その一方で風力発電では容量増加が認められた。

図 1-4 1 日ごと再生可能エネルギー発電量



出典:一般電力事業者の受給実績データから作成

第2章 再生可能エネルギーが与える卸売価格への影響の分析

本章では、再生可能エネルギーが卸売電力価格に与える影響を推定する。1 節では、カルフォルニア市場を対象に再生可能エネルギーが与える影響を分析した先行研究を紹介する。2 節では、先行研究を参考にしながら 2021 年から 2023 年のデータを用いて日本市場を対象として分析を行う。

2.1. 先行研究の紹介 Bushnell and Novan (2018)

ここでは先行研究の概説及び、実証結果について紹介を行う。

2.1.1 先行研究の概説

Bushnell and Novan(2018)では、2012 年 1 月から 2017 年 3 月までの電力卸売価格、再生可能エネルギー電源の発電量などのデータを用いて再生可能エネルギーが電力市場にどのような影響を与えるのかを測定している。そして以下の点を明らかにするために行われた。1 つ目は再生可能エネルギーの生産能力増加が卸売価格にどのような影響を与えるか。2 つ目は従来型発電事業者の利潤にどのような影響を与えるかについてだ。最後に 3 つ目はある時間の卸売価格が同時期の再生可能エネルギー発電量によってどのような影響を得たかについてだ。先行研究では 3 点を明らかにするために研究が行われた。

2.1.2 分析方法および変数

Bushnell and Novan (2018) では前述の点を明らかにするために以下のことを行なった。まず卸売価格に対する再生可能エネルギーの発電量の影響力を調べるために回帰分析を行った。その式は以下の通りである。また以下の式で使われている変数の説明は表 2-1 に記した。

$$P_{h,d} = \alpha_{h,m} + \beta_h^s \cdot solar_d + \beta_h^w \cdot wind_d + \beta_h^g \cdot spot_d + \theta_h \cdot X_{h,d} + \varepsilon_{h,d} \quad (2.1)$$

表 2-1 回帰分析に用いられた変数

変数	説明
$P_{h,d}$	1 時間ごとの RTM 価格(\$/MWh)
$solar_d$	1 日毎の発電量(GMh)
$wind_d$	1 日毎の発電量(GMh)
$spot_d$	1 日毎天然ガス価格(\$/MMBtu)

$X_{h,d}$	電力需要に影響するその他説明変数
-----------	------------------

電力需要に影響するその他の説明変数 $X_{h,d}$ には、1 時間ごとの電力需要量と降水量データを用いた水力発電の発電能力を表す代替データが入っている。 $spot_d$ と $X_{h,d}$ は太陽光発電や風力発電の生産量による需要や、非再生可能エネルギーによる卸売価格への影響をコントロールするために含めている。

続いて、太陽光発電や風力発電の設備容量が異なる場合、2016 年の卸売価格はどのように異なっているかを予測する。そのために(2.1)の式を再推計する。そして、再推計した値と反実仮想的に設定された発電容量の値を用いて卸売価格を予測する。この時、再生可能エネルギーが与える不均質な影響を除くために季節毎の各時間で再推計する。また、その日の太陽光発電量や風力発電量によって卸売価格が線形に変化するという仮定とともに未観測誤差項が太陽光発電と風力発電の日時レベルに依存しないと仮定をとっている。

$$\tilde{P}_{h,d} = \hat{\alpha}_{h,m} + \hat{\beta}_{h,q}^s \cdot \widehat{Solar}_d + \hat{\beta}_{h,q}^w \cdot \widehat{Wind}_d + \hat{\beta}_{h,q}^g \cdot Spot_d + \hat{\theta}_{h,q} \cdot X_{h,d} + \hat{\varepsilon}_{h,d}$$

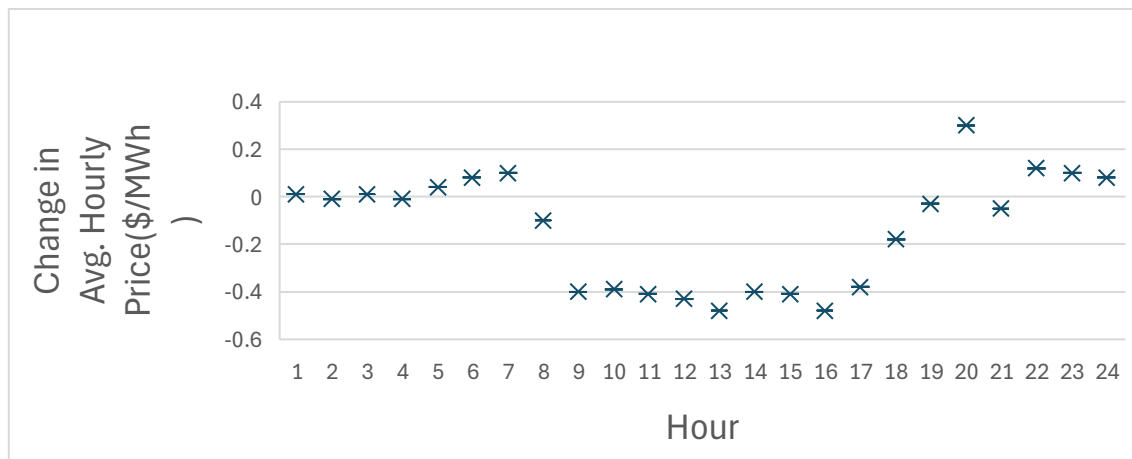
この時再生可能エネルギーの容量増加が与える影響を理解することを目的としているが、この方法では観測された再生可能エネルギーの発電量より大きい値になり、(2.1)の式の推定した値を観測された範囲外で用いられないといけなくなるので適切な予測とは言えない。そのためサンプル期間終了時に観測された水準よりも低かった値で予測を行うことでこの問題を解決する。

2.1.3 実証結果

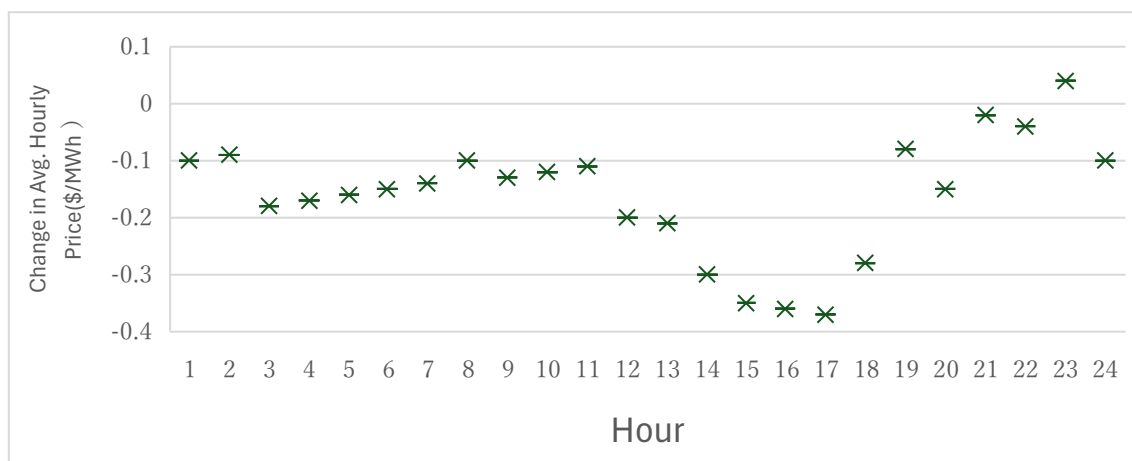
卸売価格に対する再生可能エネルギーの発電量の影響力については、推定結果を図 2-2 にまとめた。上段の図では午前 9 時から午後 4 時までは太陽光発電量が増加すると、RTM 価格も低下することがわかる。また午前 6 時、7 時、午後 7 時と 8 時では RTM 価格が上昇することがわかる。中段の図では風力発電が 1GWh 増加した時の RTM 価格の平均変化の推定結果を表している。風力発電では太陽光発電とは対照的に 1 日通して RTM 価格は低下する。また夕方の時間に発電量が増えることで相殺する従来型発電が限界費用の高いものである傾向から大幅な価格下落が認められる。また下段は天然ガス価格による影響を表している。これは比較として載せている。これは発電ユニットの仕組みから図の形が予想できる。

図 2-2 1 単位あたり RTM 平均変化価格

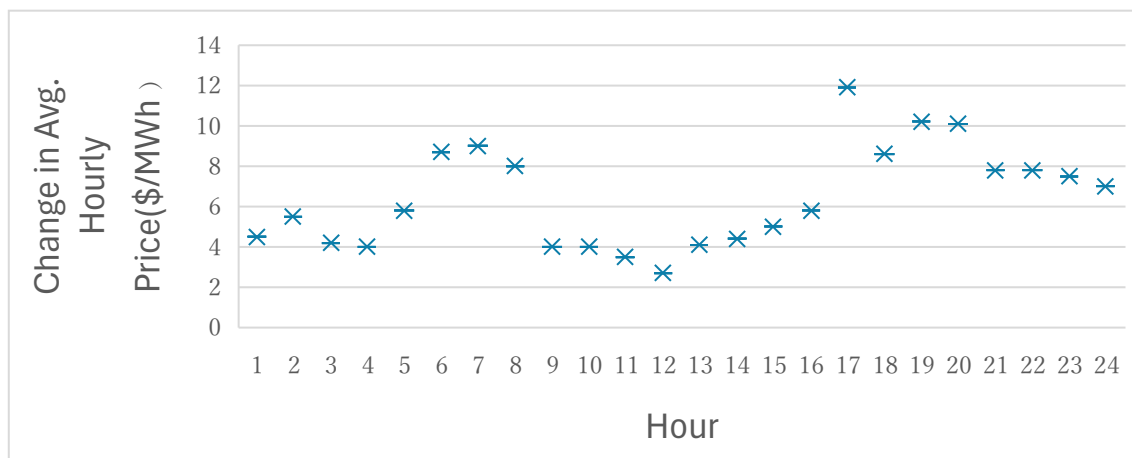
太陽光発電



風力発電



天然ガス価格

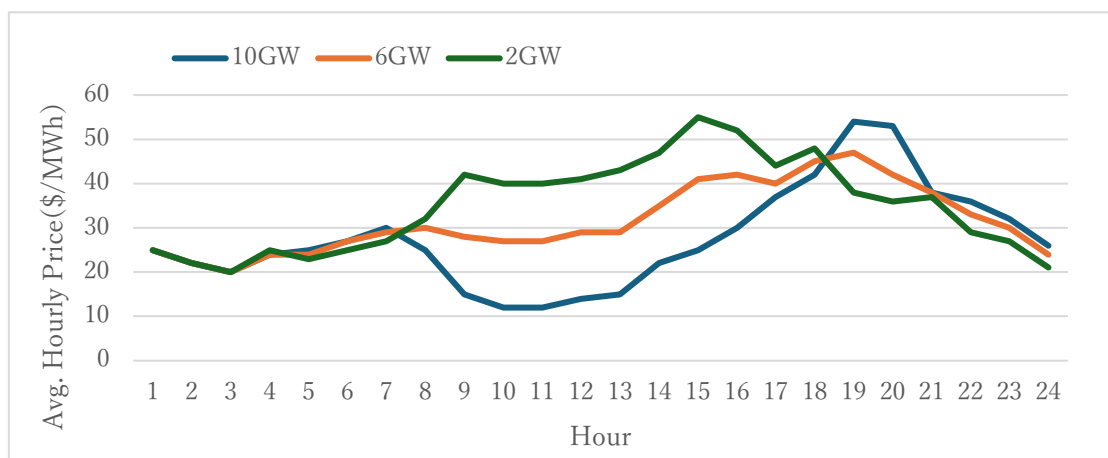


出典: Bushnell and Novan (2018)

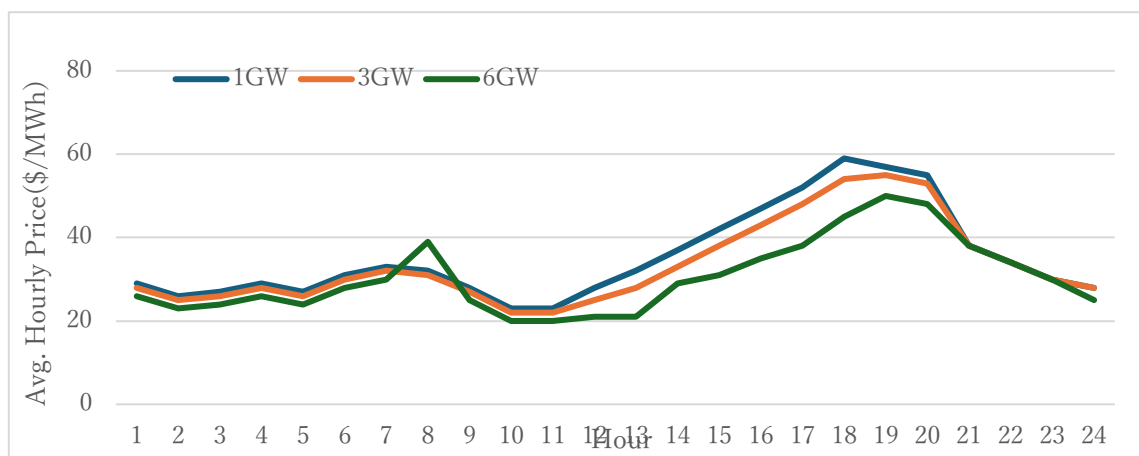
回帰分析の結果から上記のことが言えた。続いて設備容量を変化した時どうなるのかを見ていく。まず太陽光発電容量を 2 GW から 10GW に容量を増加させたときは 2016 年の RTM 価格は日中約 20\$/MWh 低下することがわかる。また太陽光発電が始まろうとする早朝と終わる夕方には容量拡大が卸売価格を上昇させると考えられる。

続いて風力発電の結果を確認する。風力発電の容量を増やすと、下段の図からもわかるように各時間帯の卸売価格の平均が低下する。

図 2-3 反実的 RTM 価格
太陽光発電



風力発電



出典: Bushnell and Novan (2018)

最後に従来型発電機の利潤はいかに変わるのかということを見ていく。これは再生可能エネルギー容量が 2GW、1GW だった場合と比較して求めてある。まず太陽光発電容量が

増加するにつれて利潤は一貫して減少していく。2000MW と 10000MW を比較すると 52%利潤が減少すると言える。また下段の風力発電に関しても 1000MW から 6000MW に容量を増加すると 20%の利潤減少が認められる。つまり太陽光発電と風力発電の投資に関しては、発電容量が増加するほど価値が低下していくと言える。

2.2 日本電力市場(当日市場)においての実証分析

ここからは先行研究の事例を日本市場に当てはめ考えていく。日本でもカルフォルニア同様に卸売市場では前日市場と時間前市場の 2 つが存在する。今回は先行研究と同様に時間前市場が再生可能エネルギーによってどのような影響を受けているのかを考察していこうと思う。また時間前市場では日本全土が 1 つの市場として捉えられているため日本市場として考えていく。データは 2021 年度から 2023 年度までのデータを使用して推定していく。

2.2.1 実証方法と使用データについて

再生可能エネルギーと卸売価格の影響を定量化するために以下の回帰式を推定する。

$$P_{h,d} = \alpha_{h,m} + \beta_h^s \cdot solar_d + \beta_h^w \cdot wind_d + \beta_h^g \cdot spot_d + \theta_h \cdot X_{h,d} + \varepsilon_{h,d} \quad (2.2)$$

変数の出典と説明については表 2-2 と表 2-3 にまとめた。データは 2021 年度から 2023 年度のものである。 $spot_d, X_{h,d}$ では再生可能エネルギー以外の影響を価格に考慮するために降水量データ、電力需要データや天然ガス輸入価格などを含んでいる。また天然ガス輸入価格の日次データは存在しなかったため、月次データで代用した。

表 2-2 変数の出典元

変数	出典
$P_{h,d}$	JPEX 時間前市場データから作成
$solar_d$	各電力事業会社データから作成
$wind_d$	各電力事業会社データから作成
$spot_d$	e-stat から作成
$X_{h,d}$	気象庁、各電力事業会社データから作成

表 2-3 変数の説明

変数	説明
$P_{h,d}$	30 分ごとの時間前市場価格(\$/MWh)
$solar_d$	1 日毎の発電量(GMh)
$wind_d$	1 日毎の発電量(GMh)
$spot_m$	1 ヶ月毎の天然ガス輸入価格
$X_{h,d}$	電力需要に影響するその他説明変数

また設備容量の変化が価格にどのような影響を与えるのか分析するためにも先行研究に基づき反実仮想分析を行っていく。この推計に関しても先行研究と同様の仮定をおき、以下の式で定式化した。これについて季節毎データで変数を再推計し、その値を用いて価格を予測していく。反実仮想を行う年度については 2023 年度で行うこととする。

太陽光や風力発電の反事実的値は 1 日の潜在発電能力から計算する。潜在発電能力とは 1 日の太陽光発電量と抑制量を設備用容量で割ったものである。その結果、反実仮想的値は潜在発電量と設備容量の積と等しくなる。この計算を用いて反事実的値を用いる。

$$\bar{P}_{h,d} = \hat{\alpha}_{h,m} + \hat{\beta}_{h,q}^s \cdot \widehat{Solar}_d + \hat{\beta}_{h,q}^w \cdot \widehat{Wind}_d + \hat{\beta}_{h,q}^g \cdot Spot_d + \hat{\theta}_{h,q} \cdot X_{h,d} + \hat{\varepsilon}_{h,d} \quad (2.3)$$

そして式(2.3)に反事実的な発電量や(2.2)で求めた回帰係数の値を考慮して考えていく。その結果、反実価格の推定が可能となる。次は実証方法を踏まえ、実際の結果に着目していく。

2.2.2 実証結果

図 2-4 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響

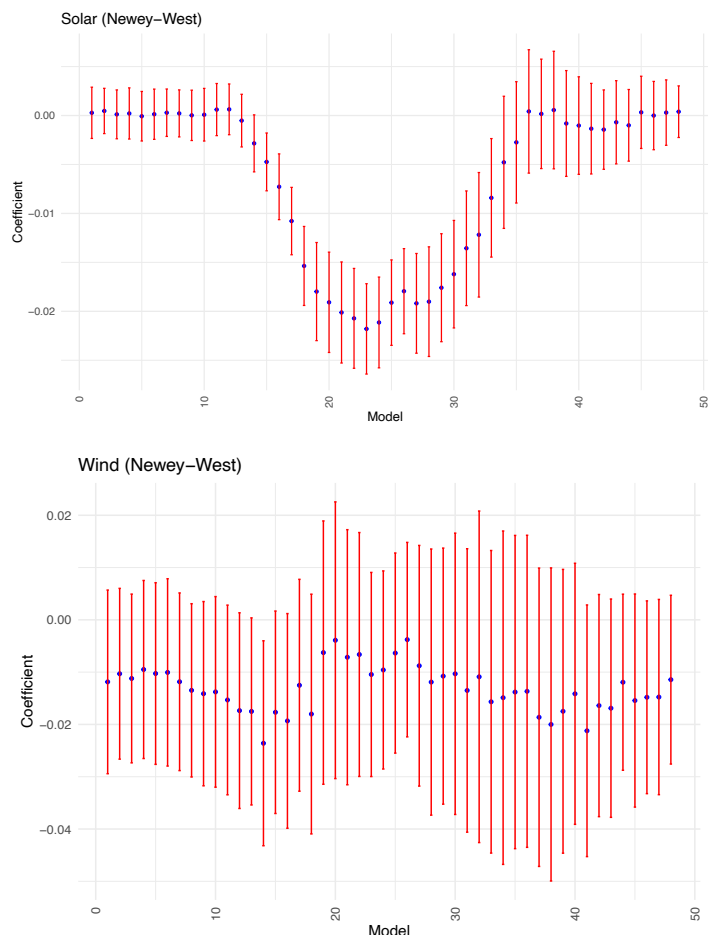


図 2-4 からわかるように太陽光発電は 6 時ごろと 17 時や 22 時ごろは発電が価格への上昇を影響するということがわかった。これは再生可能エネルギーが発電する代わり、発電を止めるユニットなどのランピングコストの影響だと考えられる。また、7 時から 18 時ごろまでは価格を低下させる効果が認められた。この時間によっての変動は日照などの問題が背景にあると考えられる。実際に 1 番大きい値では 1GW 発電すると 0.02 円下がると言える。つまり 100GW を太陽光で代替的に発電した場合 2 円程度の価格低下効果が認められる。

次に風力発電の結果についてだ。風力発電では基本的に価格低下をもたらすことができる。昼頃は価格低下の効果はあまり小さくなく、朝方や夕方大きい影響を持つということがわかる。これらは気温の変動による影響なのではないかと考えられる。また、風力発電でも 1 単位の増加で多い時は 0.0235 円下がると言える。つまり 100GW を風力発電で代替的に発電した場合 2.35 円程度の価格低下効果が認められる。

図 2-5 再生可能エネルギーの設備容量が変化した時の反実価格

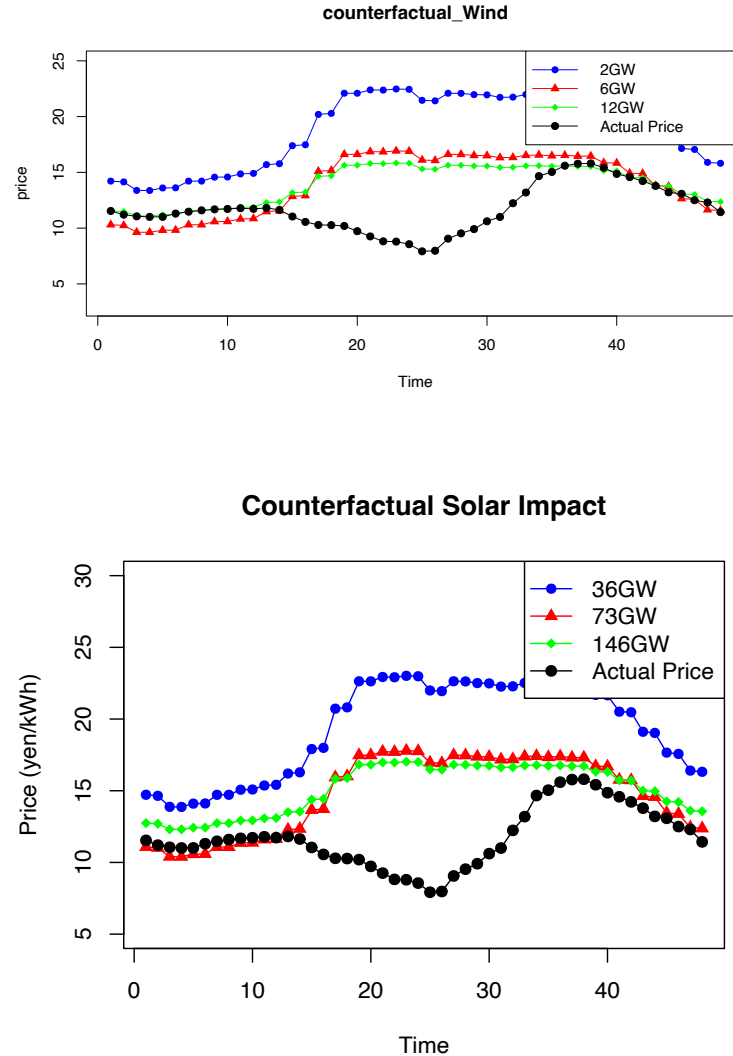


図 2-4 は再生可能エネルギーの設備容量が変わった時を反実仮想的に求めている。先行研究では既存の設備容量以上のものでは今回の回帰モデルではうまく説明できない可能性から行なっていなかったが今回は行った。それぞれ青線が現在の容量よりも少なくした場合、赤線が現在の容量に近い値での推計、緑線が容量を増加した時のものである。また黒線は実際の価格の時間あたり平均値である。この推計の結果容量を増加させると価格の低下が認められるということがわかった。その一方で実際の容量よりも増加させた場合は価格の低下は微かに認められた。しかし一定の時間では価格の上昇も見られる。また実際の価格と比較するとグラフの概形などに違いが見える。これはモデルの設定において考慮されていない点などが影響しているのではないかと考える。

2.3 日本電力市場(前日市場)においての実証分析

ここでは 2.2 で行った分析の回帰分析の部分について前日市場を用いて再度行っていく。

2.3.1 実証方法と使用データについて

実証方法、データ、共に表 2-2 と変わらないと言える。そのため異なるデータを用いた変数について述べる。今回は地域ごとの変数 a として考えられる点と価格が前日市場の価格に変更された。その他は先と一緒である。そのため(2.4)の式を時間ごとの回帰分析を行い、2.2.2 同様に実証結果を述べていく

$$P_{h,d,a} = \alpha_{h,m,a} + \beta_{h,a}^s \cdot solar_{d,a} + \beta_{h,a}^w \cdot wind_{d,a} + \beta_{h,a}^g \cdot spot_{d,a} + \theta_h \cdot X_{h,d,a} + \varepsilon_{h,d} \quad (2.4)$$

2.3.2 実証結果

下の図がスポット市場で回帰を行った結果である。グラフの概形としては当日市場の分析と大きく変わらないと言えるだろう。その一方で東京は風力発電の係数の多くがプラスという結果を得た。中部、中国などでも同様なことが言える。また太陽光発電では比較的に係数が負の時点が多いように感じられる。しかしながら朝方、夜型の上昇は依然として存在すると言える。

図 2-6 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(北海道)

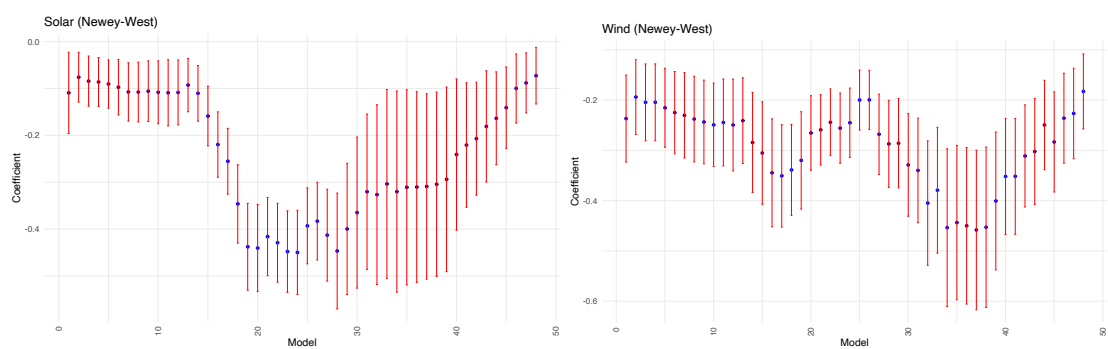


図 2-7 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(東北)

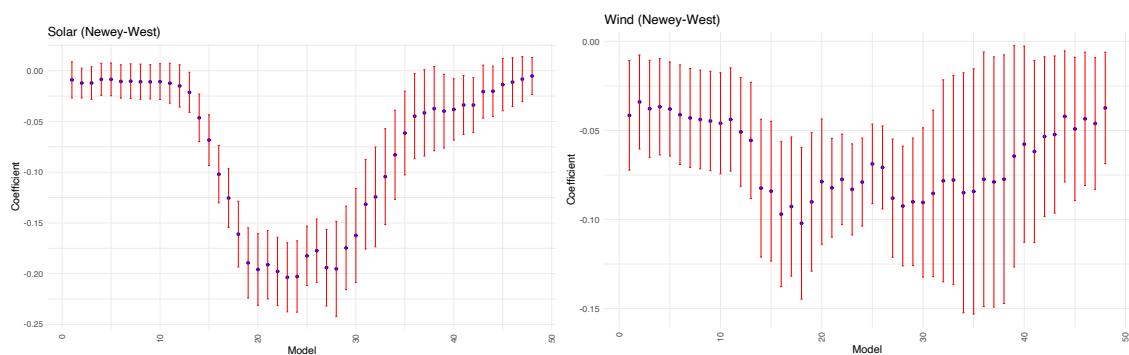


図 2-8 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(東京)

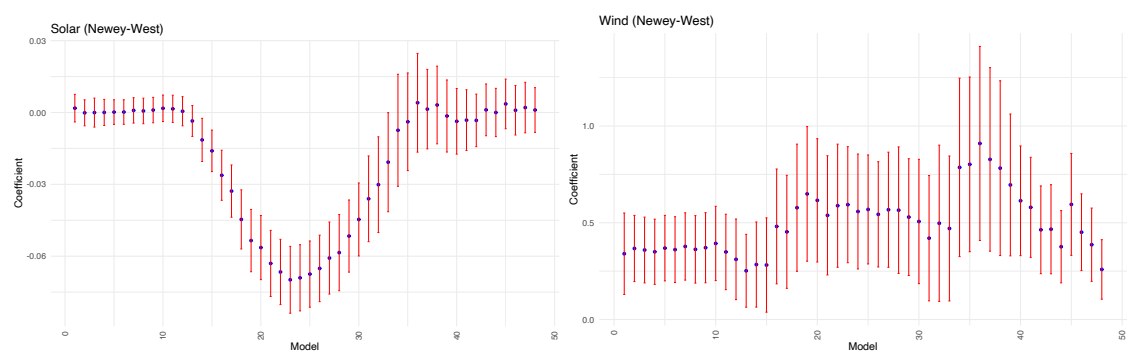


図 2-9 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(中部)

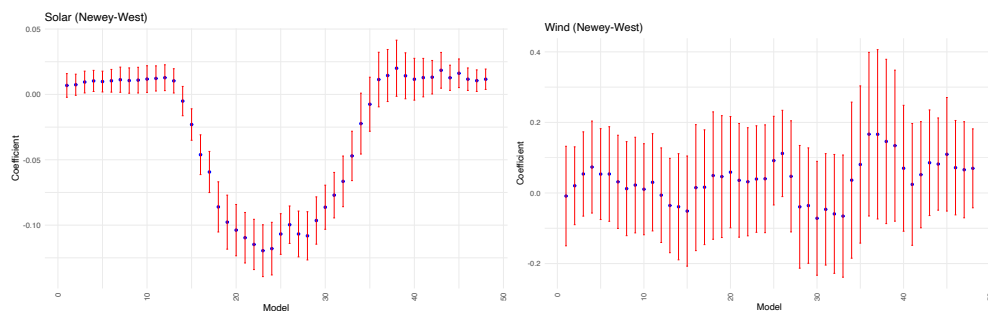


図 2-10 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(北陸)

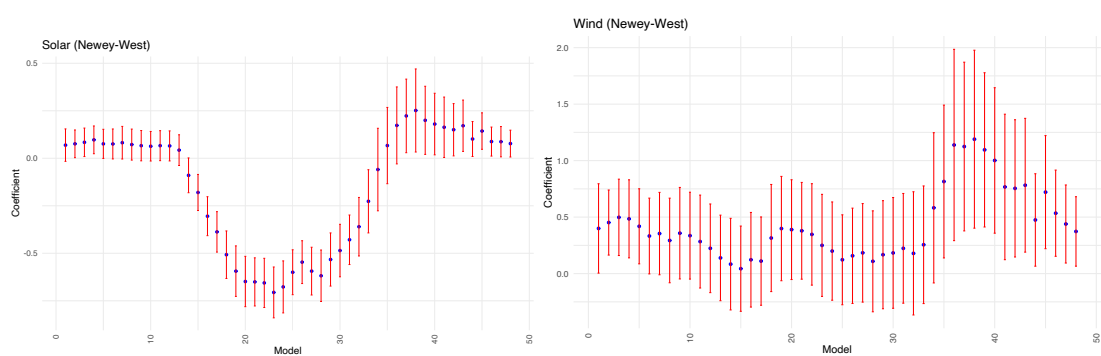


図 2-11 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(関西)

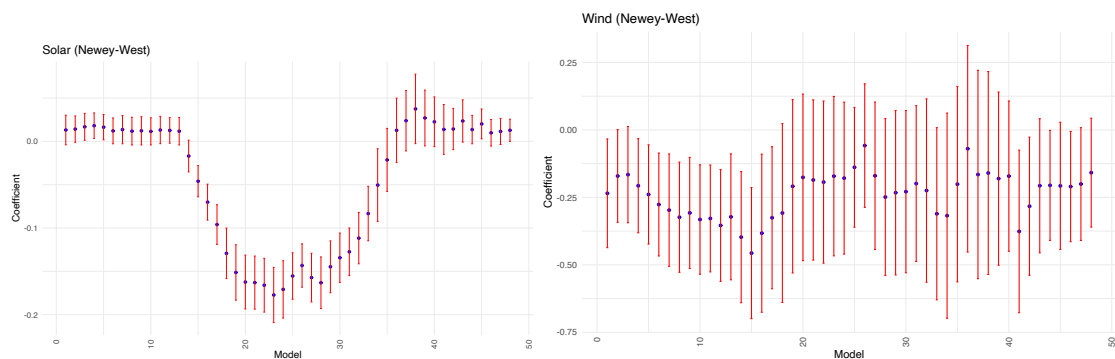


図 2-12 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(中国)

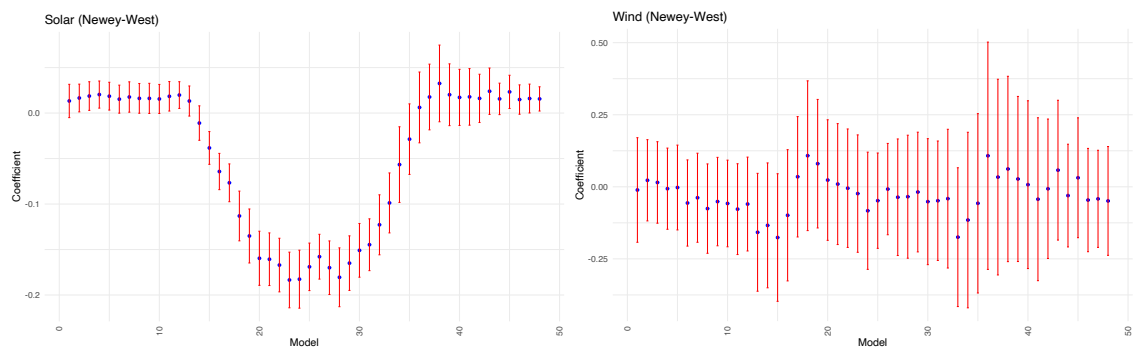


図 2-13 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(四国)

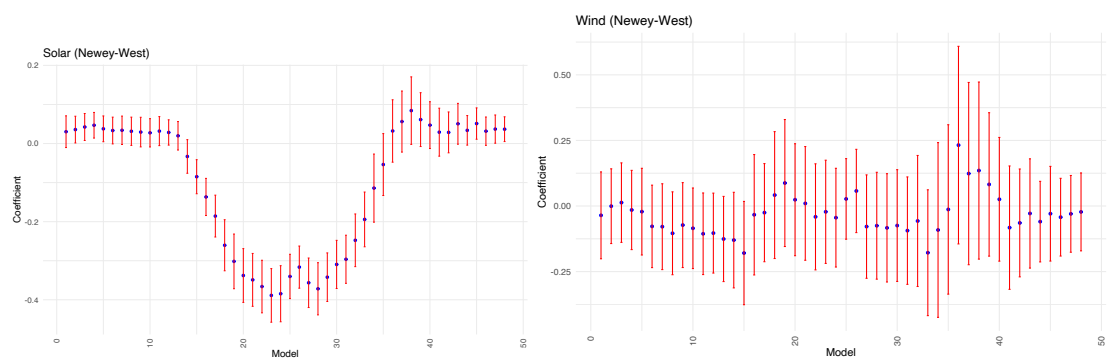


図 2-14 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(九州)

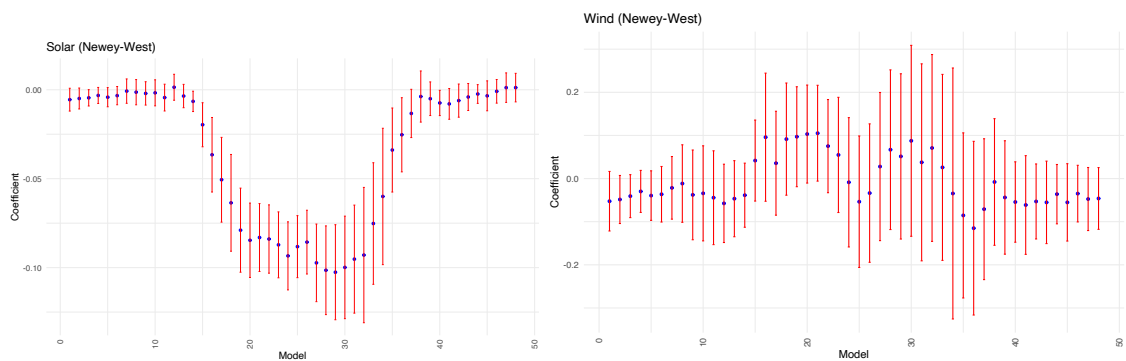
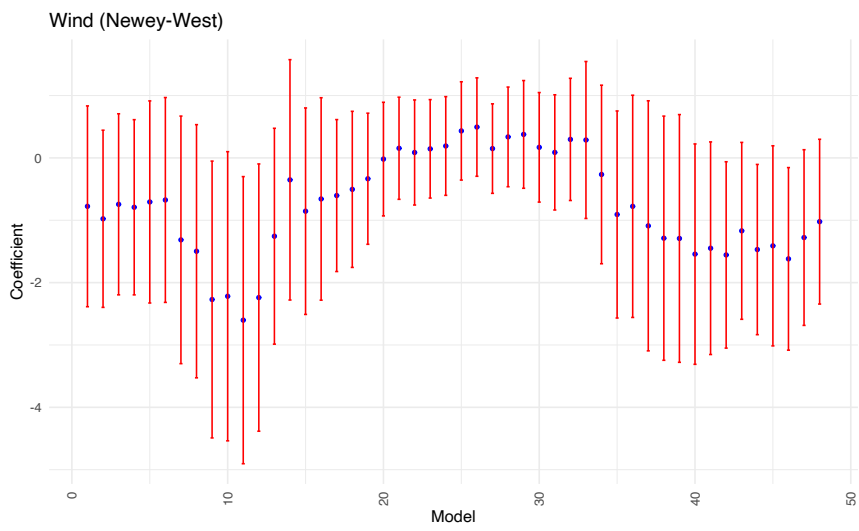
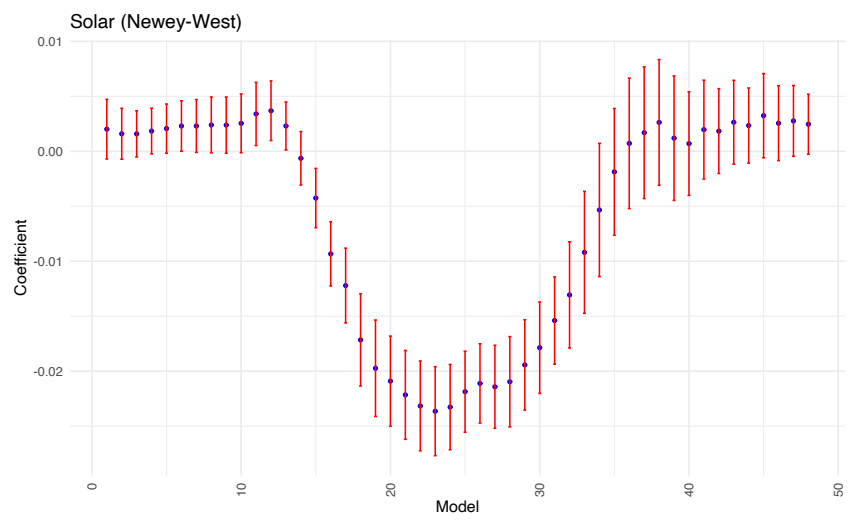


図 2-15 再生可能エネルギーが 1 単位(GWh)変化した時の価格への影響(全国)



第3章 再生可能エネルギーが与える需要への影響の分析

3章では、電力卸売市場の当日市場について需要関数を推計していく。1節では、日本市場で地域別に需要関数を求めている先行研究の紹介を行う。2節では、先行研究をもとに再生可能エネルギーの影響を考慮する形で分析を行っていく。

3.1 先行研究の紹介 秋山・細江(2007)

ここでは先行研究の分析手法や目的、実証結果を述べていく。

3.1.1 先行研究の概説

秋山・細江(2007)では1976年度から2003年度までの年次データを用いて推定を行った。この論文では気候条件により冷暖房機器の利用度合いが変化した時の影響を表す冷房度日と暖房度日などのデータを用いて影響を測定している。そしてこの研究各地域の需要関数を推定することにより、各地域電力市場の需要構造を明らかにしている。

3.1.2 分析方法および変数

秋山・細江(2007)では以下の研究が行われた。まずは地域別の需要構造を求めるために需要関数の推計を行った。ここでは最小二乗法、操作変数法、Newey-Westの修正分散共分散行列、Newey-Westの修正分散共分散行列において有意ではない変数を外した状態での推計という4つの手法が取られた。そしてこの時に分析したものは以下にある(3.1)の式である。また(3.1)で用いられた式については以下の表において変数の説明を記した。

$$\log(Q_{i,t}) = \alpha_i + \beta_i \cdot \log(p_{it}) + \lambda_i \cdot \log(X_{it}) + \delta_i \cdot \log(Q_{i,t-1})$$

表3-1 需要分析に用いられた変数

変数	説明
$Q_{i,t}$	各社の電力需要量
p_{it}	電力の平均価格指数
$Q_{i,t-1}$	1期ラグつき電力需要量
GRP_{it}	地域内総生産
$cool_{it}$	冷暖房日
$heat_{it}$	暖房日
N_{it}	電力契約口数
$Ppet_t$	石油製品平均の卸売物価指数
T_t	タイムトレンド

出典: 秋山・細江(2007)

また今回のモデルにおいて短期の価格弾力性は β_i であり、ラグ付き需要量の変数により過去の変化の影響を判断することができる。そのため $\beta_i/Q_{i,t-1}$ が長期の価格弾力性と言える。

3.1.3 実証結果

地域ごとの需要関数の推計結果を表 3-2 から 3-10 にまとめた。電力価格の係数はすべての地域において一貫して有意に負の値を取った点から理論的整合性を満たしていた。また表 3-11 にまとめた弾力性の結果から以下のことが言える。短期の価格弾力性は 0.06627(東京)～0.32551(東北)の範囲であり、長期の価格弾力性は 0.11326(東京)～0.69075(北海道)の範囲の結果が記された。またこれらの結果から都市部よりも地方部のほうが高い価格弾力性の値を取る傾向が確認された。これは自家発電が行える環境かなどという点が重要だと述べられていた。

表 3-2 北海道需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	-0.86878[.792]	0.82822 [.986]	-0.64875[.816]	0.13700 [.735]
電力価格	-0.30236[.000]	-0.25751 [.890]	-0.29751[.000]	-0.29584 [.000]
地域内総生産	0.58833[.000]	0.46457 [.941]	0.55337[.000]	0.53892 [.000]
石油製品価格	0.21218[.000]	0.12528 [.964]	0.20038[.001]	0.19707 [.000]
冷房度日	0.00990[.001]	0.02173 [.364]	0.01147[.000]	0.01166 [.000]
暖房度日	0.03860[.604]	0.15286 [.928]	0.02273[.734]	-
電力契約口数	0.05542[.843]	-0.18975 [.931]	0.05250[.825]	-
タイム・トレンド	-0.01133[.017]	-0.01049 [.934]	-0.01062[.024]	-0.01058 [.008]
電力需要量(-1)	0.51834[.000]	0.78827 [.870]	0.54336[.000]	0.57171 [.000]

表 3-3 東北需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	0.05471 [.984]	-2.17319 [.602]	0.97294 [.687]	-0.69261 [.384]
電力価格	-0.24545 [.000]	-0.29239 [.296]	-0.28412 [.000]	-0.32551 [.000]
地域内総生産	0.52056[.000]	0.54183 [.283]	0.69600 [.000]	0.72040 [.000]
石油製品価格	0.15295 [.008]	0.15462 [.381]	0.21900 [.001]	0.22104 [.000]
冷房度日	0.00817 [.187]	0.01781 [.433]	0.00955 [.118]	-

暖房度日	0.13603 [.020]	0.10023 [.645]	0.16427 [.002]	0.19243 [.000]
電力契約口数	-0.00205 [.993]	0.21054 [.555]	-0.14390 [.512]	-
タイム・トレンド	-0.00673 [.337]	-0.00577 [.610]	-0.01448 [.056]	-0.01278 [.016]
電力需要量(-1)	0.48636 [.000]	0.41003 [.428]	0.49878 [.000]	0.41473 [.000]
自由度修正済み決定係数	0.99449	0.99220	0.99391	0.99424

表 3-4 東京需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	-0.01377 [.991]	-1.87823 [.794]	1.30137 [.283]	1.50975 [.000]
電力価格	-0.11319 [.028]	-0.05544 [.865]	-0.09847 [.034]	-0.06627 [.011]
地域内総生産	0.32329 [.000]	0.00257 [.995]	0.45858 [.000]	0.41433 [.000]
石油製品価格	0.02959 [.282]	-0.06341 [.594]	0.06502 [.026]	0.04029 [.032]
冷房度日	0.04516 [.000]	0.04065 [.344]	0.04896 [.000]	0.04938 [.000]
暖房度日	0.07574 [.003]	-0.04905 [.637]	0.08498 [.000]	0.07874 [.000]
電力契約口数	0.13375 [.317]	0.33850 [.667]	0.00275 [.983]	-
タイム・トレンド	0.00063 [.835]	0.00470 [.673]	-0.00221 [.474]	-
電力需要量(-1)	0.45031 [.000]	0.62940 [.038]	0.41476 [.000]	0.41483 [.000]
自由度修正済み決定係数	0.99841	0.99515	0.99816	0.99839

表 3-5 中部需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	1.17238	2.02674	0.89745	1.40175

	[.524]	[.516]	[.563]	[.002]
電力価格	-0.14477 [.006]	-0.03409 [.745]	-0.14632[.003]	-0.11018 [.006]
地域内総生産	0.39651 [.000]	0.24169 [.180]	0.42239 [.000]	0.32639 [.000]
石油製品価格	0.07053 [.036]	0.00132 [.986]	0.07002 [.035]	0.03957 [.094]
冷房度日	0.04614 [.001]	0.08147 [.024]	0.04658 [.000]	0.04966 [.000]
暖房度日	0.06124 [.023]	0.02009 [.760]	0.05995 [.009]	0.06519 [.003]
電力契約口数	0.01568 [.927]	-0.11052 [.759]	0.05063 [.734]	-
タイム・トレンド	-0.00237 [.426]	-0.00366 [.530]	-0.00209 [.417]	-

表 3-6 北陸需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	-1.85768 [.472]	-1.98777 [.840]	-1.58644 [.407]	0.19018 [.749]
電力価格	-0.28644 [.000]	-0.30288 [.551]	-0.30393 [.000]	-0.29428 [.000]
地域内総生産	0.44710 [.000]	0.56016 [.279]	0.49896 [.000]	0.53938 [.000]
石油製品価格	0.09086 [.016]	0.08405 [.651]	0.10651 [.002]	0.11669 [.001]
冷房度日	0.02526 [.006]	0.08464 [.285]	0.02811 [.000]	0.02999 [.000]
暖房度日	0.12371 [.006]	0.30128 [.114]	0.14091 [.000]	0.14746 [.000]
電力契約口数	0.23875 [.341]	0.02764 [.983]	0.18531 [.338]	-
タイム・トレンド	- 0.00554[.232]	-0.01326 [.340]	-0.00784 [.065]	-0.01051 [.002]
電力需要量(-1)	0.30184	0.50701	0.31987	0.38518

	[.043]	[.718]	[.008]	[.000]
自由度修正済み決定係数	0.98613	0.94786	0.98583	0.98578

表 3-7 関西需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	-1.08512 [.386]	-1.68863 [.819]	-1.07368 [.332]	-1.48310 [.145]
電力価格	-0.18528 [.008]	-0.14730 [.606]	-0.18577 [.002]	-0.19193 [.001]
地域内総生産	0.41723 [.000]	0.44502 [.620]	0.44754 [.000]	0.39625 [.000]
石油製品価格	0.07688 [.020]	0.06064 [.825]	0.08146 [.007]	0.06121 [.003]
冷房度日	0.05229 [.000]	0.06990 [.470]	0.05367 [.000]	0.05219 [.000]
暖房度日	0.05834 [.019]	0.18208 [.067]	0.06238 [.003]	0.05249 [.004]
電力契約口数	0.24551 [.065]	0.07621 [.931]	0.24826 [.034]	0.32371 [.000]
タイム・トレンド	-0.00225 [.444]	-0.00955 [.603]	-0.00250 [.335]	-
電力需要量(-1)	0.29500 [.019]	0.60780 [.529]	0.25759[.017]	0.21373 [.051]
自由度修正済み決定係数	0.99535	0.98770	0.99531	0.99540

表 3-8 中国需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	0.48186 [.746]	-3.26955 [.575]	0.54955 [.655]	-0.54218 [.448]
電力価格	-0.22111 [.002]	-0.15055 [.608]	-0.21222 [.000]	-0.25888 [.000]
地域内総生産	0.44463 [.001]	0.23231 [.752]	0.51693 [.000]	0.49336 [.000]

石油製品価格	0.16368 [.007]	0.00381 [.990]	0.19601 [.000]	0.18332 [.000]
冷房度日	0.02798 [.127]	0.06766 [.674]	0.04142 [.013]	0.03801 [.019]
暖房度日	0.08484 [.039]	0.28225 [.574]	0.09750 [.006]	0.10192 [.005]
電力契約口数	-0.05031 [.726]	0.06974 [.891]	-0.11081 [.362]	-
タイム・トレンド	-0.00976 [.120]	-0.00551 [.851]	-0.01374 [.010]	-0.01167 [.006]
電力需要量(-1)	0.60181 [.000]	0.94947 [.009]	0.62856 [.000]	0.61273 [.000]
自由度修正済み決定係数	0.98206	0.94383	0.98125	0.98194

表 3-9 四国需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	-0.89026 [.694]	-2.40512 [.889]	-1.26704 [.509]	0.25822 [.762]
電力価格	-0.30909 [.000]	-0.31473 [.670]	-0.33679 [.000]	-0.29992 [.000]
地域内総生産	0.44264 [.003]	0.58101 [.734]	0.54896 [.000]	0.54139 [.000]
石油製品価格	0.19769 [.002]	0.16779 [.903]	0.22638 [.000]	0.23490 [.000]
冷房度日	0.02569 [.217]	0.08951 [.822]	0.03159 [.075]	0.03498 [.043]
暖房度日	0.06548 [.178]	0.21656 [.755]	0.08251 [.045]	0.07476 [.069]
電力契約口数	0.15727 [.447]	0.07093 [.936]	0.13834 [.436]	-
タイム・トレンド	-0.00682 [.248]	-0.01443 [.512]	-0.01098 [.046]	-0.01027 [.082]
電力需要量(-1)	0.31023 [.052]	0.51260 [.881]	0.32454 [.016]	0.35116 [.009]

自由度修正済み決定係数	0.97617	0.95040	0.97530	0.97621
-------------	---------	---------	---------	---------

表 3-10 九州需要関数

説明変数	OLS	IV	NW1	NW2
定数項	-1.17638 [.479]	-1.27903 [.640]	-1.99526 [.226]	-0.07427 [.919]
電力価格	-0.22237 [.000]	-0.26798 [.004]	-0.31085 [.000]	-0.28307 [.000]
地域内総生産	0.48529 [.001]	0.36817 [.290]	0.83442 [.000]	0.90168 [.000]
石油製品価格	0.09207 [.049]	0.08771 [.389]	0.18874 [.004]	0.20724 [.003]
冷房度日	0.02182 [.109]	-0.00669 [.819]	0.01718 [.198]	-
暖房度日	0.05404 [.076]	-0.02865 [.754]	0.08731 [.006]	0.09180 [.006]
電力契約口数	0.21824 [.267]	0.32511 [.424]	0.22658 [.245]	-
タイム・トレンド	-0.00166 [.785]	0.00145 [.925]	-0.01045 [.158]	-0.01517 [.023]
電力需要量(-1)	0.29912 [.089]	0.30551 [.401]	0.12889 [.475]	0.28614 [.044]
自由度修正済み決定係数	0.99514	0.99182	0.99346	0.99328

注: 括弧内は p 値を表す

出典: 秋山・細江(2007)

第3章 結論

現在の日本の電力市場では再生可能エネルギーの推進が進んでいる。そこで本稿で行った再生可能エネルギーと電力市場の影響について検討することが今後重要になると考える。今回は再生可能エネルギーが価格へ与える影響と再生可能エネルギーの影響を踏まえた需要を分析を行った。

1つ目の分析では時間ごとに再生可能エネルギーが与える影響は変化が大きいということがわかった。これは気候変動の影響から発生する電力だからだろう。また容量拡大についての反実仮想分析では容量増加により価格の低下が認められた。しかし実際の容量を超えてからの価格変動では大幅な低下は見られなかったので需給バランスなどの動向を確認することが重要だろう。

日本ではまだできていないが排ガス市場など環境面から産業組織論は活躍することが可能だと考える。そのため今後もより研究を進めることが重要だろう。

参考文献

- 資源エネルギー庁 (2024), 「日本のエネルギー エネルギーの今を知る 10 の質問」
- 資源エネルギー庁 (2023), 「エネルギーに関する年次報告書」
- 資源エネルギー庁 (2024), 「電力システムを取り巻く現状」
- 資源エネルギー庁 (2024), 「電力システムが目指すべき方向性について～電力システム改革の検証～」
- 資源エネルギー庁 (2023), 「今後の再生可能エネルギー政策について」
- 次世代エネルギー研究科, 「電力のCO₂削減に向けた電力市場の状況整理」
- 秋山修一・細江宣裕 (2008), 「電力需要関数の地域別推定」『社会経済研究』 56, pp.49-58.
- Bushnell J and Novan (2018), “Setting With The Sun: The Impacts of Renewable Energy On Wholesale Power Market”, NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH 1050 Massachusetts Avenue Cambridge, MA 02138.
- Makishi Sakaguchi and Hidemichi Fujii (2021), “The Impact of Variable Renewable Energy Penetration on Wholesale Electricity Prices in Japan Between FY 2016 and 2019”, *frontiers in Sustainability*,
- 気象庁ホームページ
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 資源エネルギー庁ホームページ
http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/
- 新電力ネットホームページ
<https://pps-net.org/member>
- JPEX ネットホームページ
<https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/>
- 電気事業連合会ホームページ(『電力統計情報』)
<http://www.fepc.or.jp/library/data/tokei/index.html>
- 電気事業連合会ホームページ(『電気事業 60 年の統計』)
<http://www.fepc.or.jp/library/data/60tokei/index.html>
- 自然エネルギー財団ホームページ
<tps://www.renewable-ei.org/statistics/re/?cat=wind>
- 東京電力ホームページ
https://www.tepco.co.jp/forecast/html/area_data-j.html
- 北海道電力ホームページ
https://www.hepco.co.jp/network/con_service/public_document/supply_demand_results/index.html

東北電力ホームページ

<https://www.tohoku-epco.co.jp/>

北陸電力ホームページ

<https://www.rikuden.co.jp/>

中部電力ホームページ

<https://www.chuden.co.jp/>

関西電力ホームページ

<https://www.kepco.co.jp/>

四国電力ホームページ

<https://www.yonden.co.jp/>

九州電力ホームページ

<https://www.kyuden.co.jp/>

あとがき

まずは、2年間にわたりご指導していただき、また卒業論文の執筆に関しても多くの助言をいただいた石橋教授に深く感謝申し上げます。また、自分が卒業論文を書くに至るまで育ててくれた両親にも謝意を示したい。

今回の卒業論文では現在注目度が高いであろうと考えた電力市場と再生可能エネルギーの関係について述べた。今回電力市場を調べていく中で、さまざまなアプローチのものから成り立っている市場だということがわかった。工学的な側面も持ち、環境問題としての側面も持っていた。そのためなかなか理解が難しかったと感じる。

また中々題材を決めることもできず投げ出そうと悩んだこともあった。結果としてこの論文を書き切ったという経験は自分にとって大きな糧になる確信している。

改めてではあるが最後は感謝の言葉で終わりたいと思う。まずは石橋教授。発表の出来も悪い、授業の成績も悪いなど散々な出来を残していた自分でしたが、丁寧に、時は厳しく指導の言葉をかけていただき誠にありがとうございました。同期へ。自分にとってはこのゼミが大学生として初めての集団に属しました。その時間をみなさんと過ごせたのはとても幸せだったなと思います。みなさんと卒行論文という大きな壁を乗り越えられとても嬉しく思います。最後に後輩へ。みなさんの姿勢ややる気というものには驚かされ、自分も頑張ろうと思えるきっかけでもありました。本当にありがとうございます。OB会などでみなさんと会えることを楽しみにしています。