

# 電力中央研究所報告

わが国の電力先物市場における  
リスクプレミアムの実証分析

研究報告：Y20004

2021年3月

 電力中央研究所

**IR**

**CRIEPI**

---

**Central Research Institute of  
Electric Power Industry**

# わが国の電力先物市場における リスクプレミアムの実証分析

松本 拓史\*<sup>1</sup> 遠藤 操\*<sup>1</sup>

キーワード：電力先物市場  
リスクプレミアム  
市場の非効率性  
スポット価格予測  
気温感応度

Key Words : Electricity futures market  
Risk premium  
Market inefficiency  
Spot price forecasting  
Temperature sensitivity

## Empirical analysis of risk premium in the Japanese electricity futures market

Takuji Matsumoto and Misao Endo

### Abstract

As one year has passed since the start of the Japanese electricity futures market, this report analyzes its risk premium. After discussing the logical background of the components of the risk premium based on the survey of previous researches, we analyze the risk premium using the data in the electricity futures market of Tokyo Commodity Exchange (TOCOM) and provide the interpretation from multiple perspectives.

The empirical results demonstrated that TOCOM's electricity futures have a significant positive risk premium overall, similar to the results observed in the electricity markets of many countries, and the risk premium has relatively shrunk since the start of futures market trading as corresponding to the improvement of inefficiencies. The risk premium tends to be higher in the west area than in the east and in spring/fall than in summer/winter, which may suggest the existence of a risk premium that responds to price fluctuations caused by photovoltaic power generation. However, the negative risk premium was observed around summer, which may stem from the fact that the TOCOM's futures market remains inefficient and does not reflect prevailing prices.

For the spot price forecast, which is needed to measure the risk premium, we built a model focused on representing changes in the supply and demand structure in recent years, and the estimation results revealed that the amplitude of temperature sensitivity to spot prices is increasing year by year. Evidently, it is becoming more difficult to predict spot prices as the influence of weather conditions becomes stronger, suggesting that the premium as compensation for bearing the spot price risk may increase in the future.

---

\*<sup>1</sup> 社会経済研究所 事業制度・経済分析領域 主任研究員

## 背 景

電力スポット市場のボラティリティ増加に伴い、リスクヘッジの必要性が高まっており、その一手段として電力先物の活用が期待される。諸外国では、電力先物のリスクプレミアムが正となる傾向が知られているが、その要因については不明な点も多い。市場参加者がリスクプレミアムについての理論的な背景を理解し、さらに実証的な分析を通じた裏付けを得ることで、わが国の電力先物市場の効率的活用が促される期待がある。

## 目 的

先行研究サーベイに基づき、リスクプレミアムの定義と意味を明確化するとともに、諸外国の電力先物市場において、一般的に正のリスクプレミアムの存在が確認されていることの理論的背景を探る。また、TOCOM（東京商品取引所）の電力先物市場におけるリスクプレミアムを実際に測定し、需給構造の経年変化といったファンダメンタルズに基づく解釈を与えるなど、実務での活用に向けた示唆を得る。

## 主な成果

### 1. 先行研究を踏まえた電力先物リスクプレミアムに関する理論的背景の整理

先行研究を踏まえ、「先物価格」と「スポット価格の期待値」の差分で定義されるリスクプレミアムが、①「リスク引受けの対価」と②「先物市場の非効率性」の2つの要素から構成されることを明確に示した上で、先物市場の流動性が高まるにつれて、後者の要素が縮小し、前者の要素に収束していくことの論理的背景を示した。さらに、電力先物市場においては、一般的に、発電設備を持たない買い手（小売電気事業者）の方が市場リスクに対する柔軟性を持たないため、売り手（発電事業者）よりもリスク回避性向が高く、ゆえに正のリスクプレミアムが存在する傾向があることを、具体的な事例を用いて明らかにした。

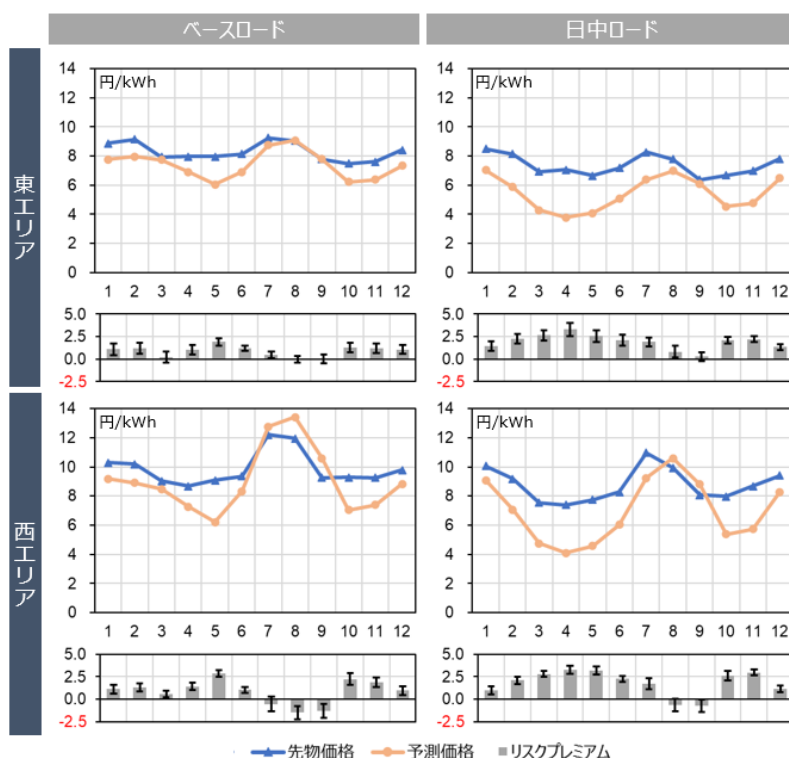
### 2. TOCOMの電力先物市場におけるリスクプレミアムの実証分析

(i) TOCOMの電力先物市場には、総じて有意な正のプレミアムがあることを示し、諸外国市場と同様に買い手のリスク回避性向が高い市場環境となっていることを確認した。(ii) 東エリアよりも西エリアで、需要期よりも中間期の限月で、リスクプレミアムが大きくなっている傾向を捉え（図1）、太陽光発電由来の価格変動に連動したリスクプレミアムが、特に西エリアに存在する可能性を示した。ただし、需要期に観測された負のリスクプレミアムは、諸外国を対象とした先行研究に照らすと一般的ではないことから、TOCOMの電力先物市場が効率的ではなく、それゆえに当該期間を含めて実勢価格を反映していない可能性があることも指摘した。(iii) 各商品ともに、市場開始直後よりもリスクプレミアムの大きさが縮小傾向にあることを明らかにし（図2）、先物市場の非効率性

が上場直後よりは改善されてきている可能性があることなどの示唆を得た。

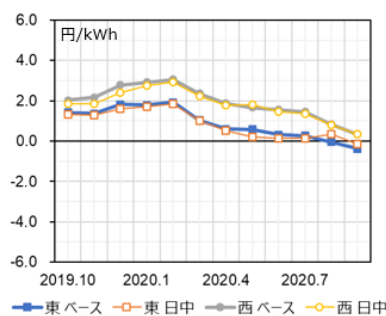
### 3. スポット価格のファンダメンタル分析と先物リスクプレミアムに対する示唆

リスクプレミアムの測定に必要となるスポット価格の予測に際しては、太陽光発電の導入拡大等に伴う需給構造の変化を模擬できるようなモデルを構築した。その推定結果から、スポット価格に対する気温感応度の大きさが経年的に拡大傾向にあること（図3）、予測モデルの当てはまりや燃料価格の感応度が縮小傾向にあることなどを明らかにした。これらの結果からは、長期予測が困難である気象条件との連動性が強まるに従い、スポット価格の予測が難しくなっていることが示唆され、先物を用いたヘッジニーズが高まっていくことが想定される。すなわち、成果1の理論整理で述べた①「リスク引受けの対価」に由来して本来的に存在する正のプレミアムが今後増大していく一方で、②「先物市場の非効率性」に起因するプレミアムについては、成果2-(iii)で述べたように解消していくことが推察できる。



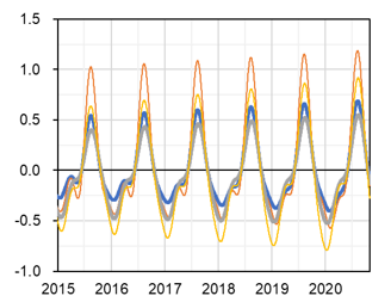
注1 上段の折れ線は、月別の先物価格とスポット価格予測値であり、各限月（横軸）毎に、受渡時点が1から12か月先までの12サンプルを平均したものを示す。  
注2 下段の棒グラフは、リスクプレミアムであり、エラーバーは95%信頼区間を示す。

図1 先物価格、スポット価格予測、リスクプレミアムの月別集計



注 観測時点毎の12限月平均値を示す。

図2 リスクプレミアムの推



注 スポット価格予測モデルから推定された気温の係数を示す。

図3 スポット価格に対する気温感応度

関連報告書：

[1] Y17002 「JEPX スポット市場における価格の長期予測手法の検討」(2018.03)

[2] Y14012 「電力・燃料トレーディングとアセット最適運用による発電事業の収益管理—ドイツ事業者の事例—」(2015.04)

# 目 次

1. はじめに .....	1
2. リスクプレミアムの定義と先行研究.....	2
3. 電力スポット・先物市場の概要.....	4
3.1 JEPX スポット市場の概要 .....	4
3.2 TOCOM 電力先物市場の概要 .....	8
4. スポット価格予測モデル .....	8
4.1 価格予測モデルの構築.....	8
4.2 価格予測モデルの推定結果 .....	10
5. リスクプレミアムの分析 .....	13
5.1 Ex-ante リスクプレミアム.....	13
5.2 Ex-post リスクプレミアム.....	15
6. 先物取引利益 .....	16
7. おわりに .....	18
参考文献 .....	19
付録 A TOCOM 電力先物取組高の推移.....	22
付録 B 燃料先物価格の推移.....	22
付録 C フーリエ級数展開の考え方に基づく周期性トレンドのモデル化 .....	23
付録 D スポット価格の予測精度.....	23
付録 E リスクプレミアム測定結果詳細.....	23
付録 F リスクプレミアムの期待ペイオフとしての解釈 .....	26

## 1. はじめに

わが国では、2019年9月に国内初の電力先物市場が TOCOM（東京商品取引所）に試験上場され、電気事業者等による効果的な活用が期待されている。また、最近の電力スポット市場におけるボラティリティ増加も相まって、先物を活用したヘッジ取引の必要性は日増しに高まってきている。特に、2021年1月のスポット価格の高騰を受け、スポット調達に依存する小売電気事業者のヘッジの必要性が強く認識されたことは特筆すべき事実である。電力・ガス取引監視等委員会においても、ヘッジャー（電気事業者）による先渡・先物市場の活用促進策が検討されており[6]、先物市場を用いた効率的なヘッジ取引の実現は、公的課題としての側面からも急務となっている。しかし、現状の TOCOM 電力先物市場の取引量は、開設以降徐々に増加しつつあるものの、2020年で最も出来高が大きくなった11月の取引実績でも、チャーンレトリに相当する対需要比率は0.15%、JEPX（日本卸電力取引所）スポット市場取引量

との比率で見ても0.42%程度となっており、依然としてシェアは小さい状況である（図1）<sup>2)</sup>。

そこで、本研究では、電気事業者等の市場参加者に対して電力先物市場の活用を促すような示唆を獲得するために、市場の開設からこれまでの動向を概観しつつ、先物市場取引における重要な概念であるリスクプレミアムについての分析を行う。リスクプレミアムとは、「先物価格」と「スポット価格の期待値」の差分として定義され、主として、スポット価格リスクの引受けに係る対価と解釈されている（詳細は2章で述べる）。つまり、リスクプレミアムを評価することは、電気事業者がリスクヘッジの意思決定を行う際に欠かせないものといえる。また、リスクプレミアムは、先物取引における期待利益に相当する概念でもあるため、先物市場の流動化に貢献する金融プレイヤーにとっても、リスクプレミアムの分析は市場取引の基本として位置づけられる。このようなリスクプレミアムに対する理解が深まり、市場参加者の取引の効率化が促されれば、電力市場の価格安定化にも寄与することが期待される。

以上を背景に、本研究は、リスクプレミアムに関する先行研究を概観し、その定義や意味を明確にするとともに、TOCOMの電力先物市場の実証分析から、今後の見通しについて論考することを目的とする。リスクプレミアムを様々な角度から分析するとともに、ファンダメンタルズに基づく考察を行い、市場参加者の先物取引の実務に資するような示唆を得る。

本報告の構成は以下のとおりである。まず、次章にて、電力先物市場のリスクプレミアムに関する先行研究のレビューを行う。次に、3章では、JEPX スポット市場及び TOCOM の電力先物市場のデータを概観する。4章にて、リスクプレミア

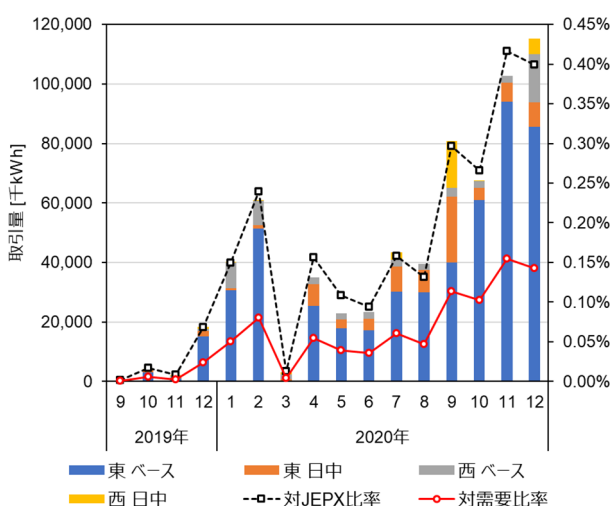


図1 TOCOM 電力先物の受渡限月別の出来高

<sup>1)</sup> 先物等の総取引量の総需要（消費量）に対する倍率を表す指標。

<sup>2)</sup> 図1は、商品（受渡限月）別の取組高を表示している。月末の取組高（ポジション残高）の推移については付録Aを、各商品の概要については3.2節を、先物市場の流動性に関する論点については文献[3]をそれぞれ参照されたい。

ムの測定に必要となるスポット価格の予測モデルを提案した後、5章では、実際に TOCOM の電力先物市場におけるリスクプレミアムを測定し、エリア差、季節変化、推移等の傾向を捉え、日本市場特有の傾向を分析する。また、6章では、リスクプレミアムに対応する概念である先物取引の利益を試算する。最後に、7章にてまとめを述べる。

## 2. リスクプレミアムの定義と先行研究

本章では、リスクプレミアムの定義を明確にした上で、諸外国市場を対象とした先行研究のレビューを行う。まず、前章で言及したとおり、先物市場のリスクプレミアム (Forward Premium; FP<sup>3)</sup>) とは、「先物価格」と「スポット価格の期待値」の差分で定義され、具体的には次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$\overline{FP_{t,T}} = E_t[F_{t,T} - S_T] = F_{t,T} - E_t[S_T] \quad (1)$$

ここで、 $\overline{FP_{t,T}}$  (オーバーラインは期待値を表す) 及び  $F_{t,T}$  は、時点  $t$  における受渡時点  $T$  に係る電力先物のリスクプレミアム及び先物価格、 $S_T$  は受渡時点  $T$  におけるスポット価格、 $E_t[S_T]$  は、時点  $t$  における  $S_T$  の期待値をそれぞれ表す。なお、時点  $t$  では先物価格  $F_{t,T}$  がすでに観測されるため、 $E_t[F_{t,T}] = F_{t,T}$  となる。

このように定義されるリスクプレミアムの構成要素は、先行研究を踏まえると、①「リスク受けの対価」と②「先物市場の非効率性」の2つに分類される (図 2)。このうち、①「リスク受けの対価」が、古典的な文献 (例えば[12][23]を参照) で述べられているところの、リスクプレミアムに対する最も端的な解釈である。すなわち、先物の売り手にとっては、将来の不確実なスポット価格の変動リスクを引き受けることに対する「先物契約の対価ないし報酬 (compensation)」であり、買い手にとっては、「リスクヘッジに要する費用」と言い換えることができる。

次に、②「先物市場の非効率性」もリスクプレミアムの構成要因となり得ることが、いくつかの先行研究で指摘されている[11][14][21]。すなわち、これは市場が非効率である場合に発生し得る「適正価格からの乖離」であり、市場が成熟 (流動化・効率化) するにつれて縮小するものとされる[21][22]。これは、「効率的市場仮説[19]」が示唆する「効率的な市場においては裁定機会が存在しない」<sup>5)</sup> という議論に対応するものである。

これらの2つの要素の関係性を論じるためには、リスクプレミアムが「先物取引による期待利益そのものである」[37]という別の解釈を考察することが有用である。ここでの「先物取引」とは、先物価格  $F_{t,T}$  と最終的な精算価格 (スポット価格

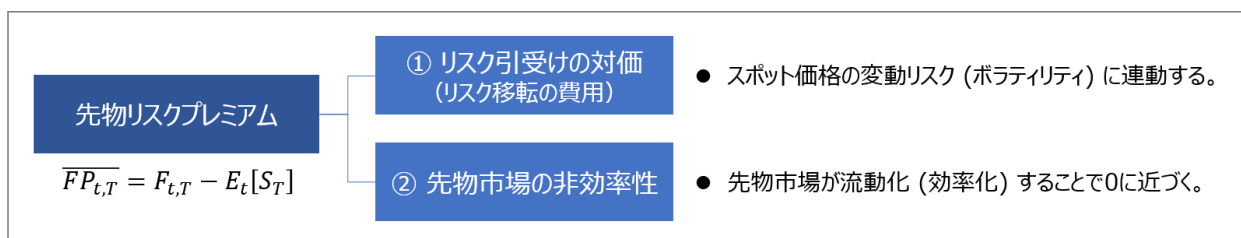


図2 リスクプレミアムの構成要素

<sup>3)</sup> 電力先物のリスクプレミアムは、“futures (risk) premium” と呼ばれる場合もあるが、多くの文献で “forward premium” が用いられている。なお、リスクプレミアムに関しては先物 (futures) と先渡 (forward) に違いはない。

<sup>4)</sup> 例えば[16]や[18]を参照。この他に、同式を対数化したり、スポット価格で除したりしたものをリスクプレミアムと呼ぶケースもある。

<sup>5)</sup> Fama(1970) の効率的市場仮説は「すべての利用可能な情報が完全に市場価格に反映されている」というものであるが、Malkiel (2011) は、効率的市場仮説の「第二の基本的信条」として、ここに記述した側面を論じている[26]。

$S_T$ ) との値差から利益を得ようとする取引のことである。この時の期待利益  $E_t[F_{t,T} - S_T]$  は、(1)式におけるリスクプレミアムの定義と等しくなっていることから、上記の解釈が正しいことは明らかである<sup>6)</sup>。ここで、先の「効率的市場仮説」を踏まえると、この先物取引の利ザヤは、市場が効率化するにつれて縮小すると考えられる。ただし、この取引は、スポット価格の不確実性に起因する損失リスクを引き受ける「投機的取引」である（無リスクの「裁定取引」ではない）ことに留意が必要である。つまり、どんなに市場が効率化しても、①「リスク引受けの対価」としてのリスクプレミアムが存在することには一定の合理性がある。言い換えれば、十分に効率化された市場においては、②「先物市場の非効率性」に由来するリスクプレミアムは限りなく縮小し、①「リスク引受けの対価」に相当するリスクプレミアムが残ることになる。

電力先物市場におけるリスクプレミアムを実際に測定した先行研究には様々なものがあるが、多くの市場において有意なリスクプレミアムの存在が報告されている。特に、北米や欧州等の流動化が進んだ電力先物市場においては、概して正のリスクプレミアムが存在することが明らかになっている[15][20][23][33][38]<sup>7)</sup>。電力市場において正のプレミアムが存在することは、買い手のリスク回避性向が売り手よりも強いことを意味しており、このことは売り手側（発電事業者）が所有している発電機等の「柔軟性」から説明することができる。例えば、水量を調整できる水力発電においては、価格の低い時は貯水し、高い時に発電して売

るというような柔軟な意思決定ができる点で、スポット価格の変動リスクを一定程度回避することが可能である<sup>8)</sup>。他方、買い手側（小売電気事業者）は、元々そのような柔軟性を備えていないために、売り手よりも将来価格を固定化したいニーズが高く、こうしたリスク選好度の違いが、正のリスクプレミアムに反映されると解釈される[15][20]<sup>9)</sup>。言い換えれば、買い手側は、柔軟性のある設備の投資・運転に係る費用を支払う代わりに、先物等の市場取引によって一定のリスク回避ができることから、その価値が正のリスクプレミアムに表れているともいえる。

この点に関しては、発電・小売を含めた電気事業者（ヘッジャー）と金融プレイヤー（リスクテイクヤー及びアービトラージャー）といった対比からも、プレイヤー別の市場行動とリスクプレミアムとの関係性を整理する必要があるだろう。これにはまず、先物市場は電気事業者（ヘッジャー）のヘッジニーズを満たすための市場である、という前提が起点となる。つまり、最初に先物市場の主体であるヘッジャーが取引を行うことによって、上述のように、リスク選好度の違いからプレミアムの符号が決定される。そして、収益機会を求め金融プレイヤーは、リスクプレミアムが正の時は売り手に、負の時は買い手になるように、すなわちリスクプレミアムの符号を所与として、取引行動をとることになる。言い換えれば、先物市場の取引主体であるヘッジャーのニーズが、元々のリスクプレミアムを形成し、それに引き寄せられるように、リスクテイクヤーやアービトラージャーが取引に参加する。そして、取引量が増加するこ

<sup>6)</sup> ただし、本研究で観測するリスクプレミアムは、4章で述べるとおり、燃料先物価格を用いた電力スポット価格予測に基づくため、燃料先物と電力先物のペアトレーディングによる期待ペイオフと解釈できる（付録Fで詳述する）。

<sup>7)</sup> 日本においてもJEPXの先物市場に正のリスクプレミアムがあることが報告されている[9]。

<sup>8)</sup> 火力発電を例にとっても同様のことがいえる。火力発電は、一定の価格リスクを回避できる柔軟性を備えており、金融市場におけるコール・オプションと同様の電源価値を持っている（[2]参照）。

<sup>9)</sup> 一般的に、リスクプレミアムの符号は、「ある程度の効率的な市場」においては、「市場参加者の相対的なリスク選好」によって決まるものであるとされる[18]。なお、リスクプレミアムは期近で負になりやすい傾向があることも指摘されており[24][35]、正のプレミアムの存在については、一般的ではある[20]ものの、必ずしも統一の見解があるわけではない[21]。

とでプレミアムの信頼性が高まり、これにより、さらにヘッジャーの取引を呼び込むことにつながっていく。このように、リスクプレミアムには、市場の流動性を高めるための、取引を媒介するシグナルのような側面もあるといえる。

以上のような議論を別の角度から深めていくと、スポット価格変動リスクと先物リスクプレミアムとの間にはどのような関係性があるかという問いが浮かぶ。この点を実証した先行研究もいくつかあり、多くの文献では、スポット価格の分散（ボラティリティ）が大きくなるほど、または価格スパイクの頻度が高くなるような時期に、リスクプレミアムが大きくなる傾向が明らかになっている[24][32][33]。もしリスクプレミアムが正となるような一般的な市場環境であれば、スポット価格の変動リスクが大きい程、売り手が要求するリスク引受けの対価も大きくなって然るべきであるといえる。

なお、本来のリスクプレミアムは、前述の(1)式で定義されるのだが、これは、特に“ex-ante”（事前の）リスクプレミアムと呼ばれ、次式で定義する“ex-post”（事後的な）リスクプレミアムと区別して用いられることがある。

$$FP_{t,T} = F_{t,T} - S_T \quad (2)$$

このように定義される ex-post リスクプレミアムは、受渡時点  $T$  以降に「事後的に」測定されるものであり、 $F_{t,T}$  及び  $S_T$  はいずれも観測値として得られる。一方で、前述の ex-ante リスクプレミアムを測定する際には、定義式(1)中の観測されない  $E_t[S_T]$  を求めるために、スポット価格を精緻に予測することが前提となっていた。それゆえ、予測モデルを構築する際に恣意性が入る余地がある。他方、ex-post リスクプレミアムは、このような問題を含まないため、客観性が高い指標であるといえる。このため、上述したような、ス

ポット価格の変動リスクとリスクプレミアムの関係性を分析した先行研究に関しては、ex-post リスクプレミアムが用いられることが多い[16][32]。

なお、本研究の分析では、リスクプレミアムの本来の定義に基づく「ex-ante リスクプレミアム」に焦点を当てるが、現時点までに観測された先物価格が十数か月程度とサンプルサイズが非常に小さいことから、ex-post プレミアムも併せて測定することにより、一定の客観性を確保することとする。ただし、本報告で用いる「リスクプレミアム」は、特段の説明がない限り「ex-ante リスクプレミアム」の方を指すものとする。

### 3. 電力スポット・先物市場の概要

前章で述べたように、リスクプレミアムの測定には、スポット価格の合理的な予測が必要となることを踏まえ、本章では、まず JEPX スポット市場の価格特性に関する考察を行う。その後、TOCOM の電力先物市場の商品概要及び試験上場から現時点までの価格推移について概観する。

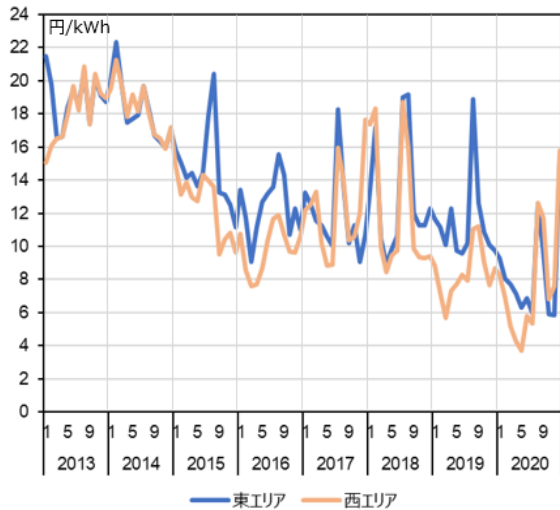
#### 3.1 JEPX スポット市場の概要

JEPX スポット市場は、グロスビディングや間接オークション等の導入以降、取引量を堅調に増加させてきており、2020年6月時点（2020年4～6月）において、わが国の販売電力量（1825億 kWh）に占める卸電力のシェアは、約38%（約定量683億 kWh）に達している[5]。

このように流動性は高まってきている一方、価格については、特徴的な季節変動が年々強まってきている。まず、月平均価格の変動の推移について見ると、図3に示すとおり、2015年頃から、季節別の変動幅が大きくなり、東西価格の市場分断が頻発していることが分かる<sup>10</sup>。特に、春や秋

<sup>10</sup> 本報告では TOCOM 先物市場の商品名に合わせ、JEPX の東京・関西エリアをそれぞれ東・西エリアと表記する。

における西エリアの価格低下が顕著となっている。東西エリアの値差でみると、2018年頃から拡大傾向が続いており、西エリアが月平均で2~4円/kWh程度低い状況が継続している（ただし、2020年9月頃から逆転する現象も生じている）。



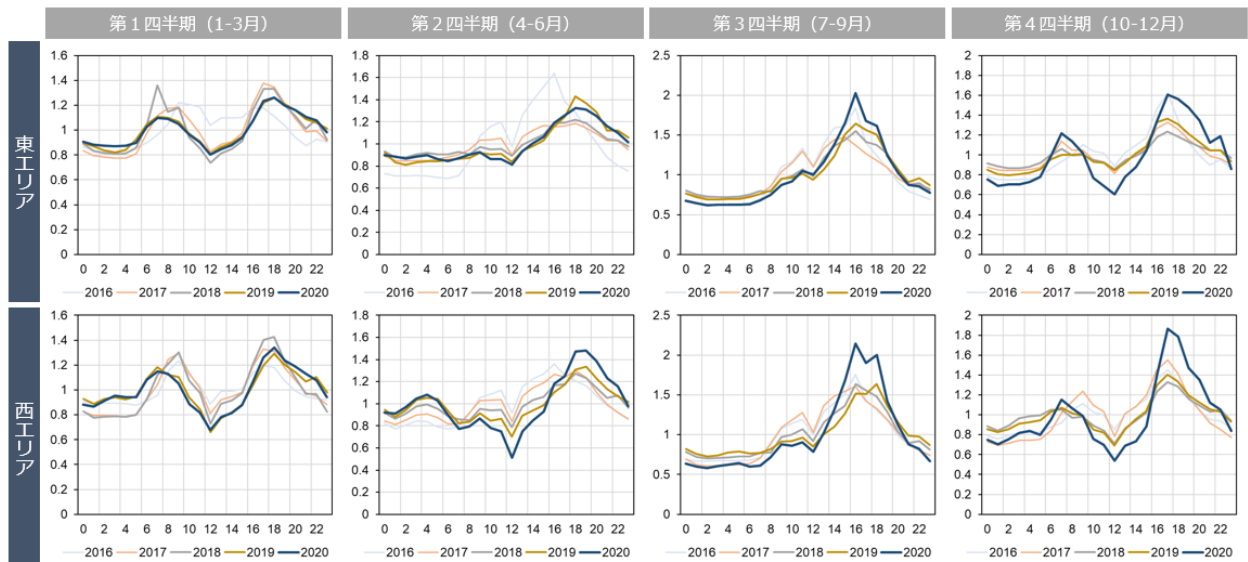
注: TOCOM の日中ロード（平日 8~20 時）に対応する価格を表示している。

図3 JEPX スポット価格（月平均）の推移

次に、JEPX スポット価格の時刻別の変動パターン<sup>1)</sup>の推移を四半期別・エリア別に図4に示す。総じて、昼間の時間帯の価格低下幅が、年々顕著に拡大してきていることが確認される。この特徴的な変化は、太陽光発電電力量が多くなる第2四半期（4~6月）で顕著であり、特に、東エリアよりも、西エリアにおいて、年ごとの低下幅が拡大してきていることが確認される。

続いて、近年の電源別の発電量比率の推移を図5に示す。電源構成は、太陽光発電の導入拡大、原子力発電所の再稼働等により、近年大きく変化してきている<sup>1)</sup>。図3や図4でみたような、春・秋の中間期や昼間の時間帯での価格低下が進行している背景には、このような需給構造の変化が影響していると考えられる。

次に、太陽光発電と原子力発電の供給実績（2020年4~6月の例）の日次推移を図6に示す。太陽光発電電力量は、天気の良し悪しによって、全国で3000万kW程度の変動幅（東エリアで1000万kW、西エリアで2000万kW程度）が生じている。太陽光発電の出力変動と比較すると、1基当

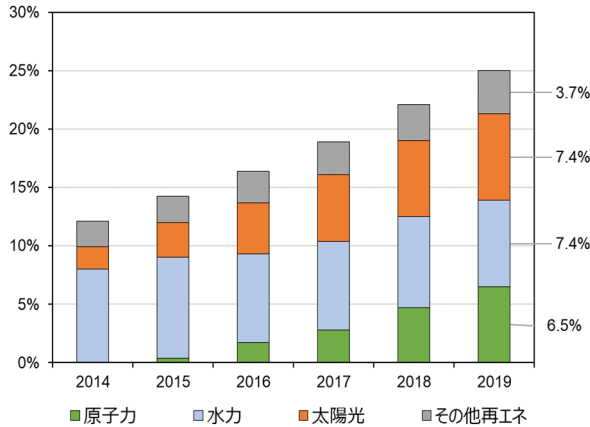


注：日平均値で正規化（日平均価格=1）した時刻別の相対的な価格について、該当期間で平均化した値をプロットしている。

図4 JEPXスポット価格の時刻変動パターンの年次推移

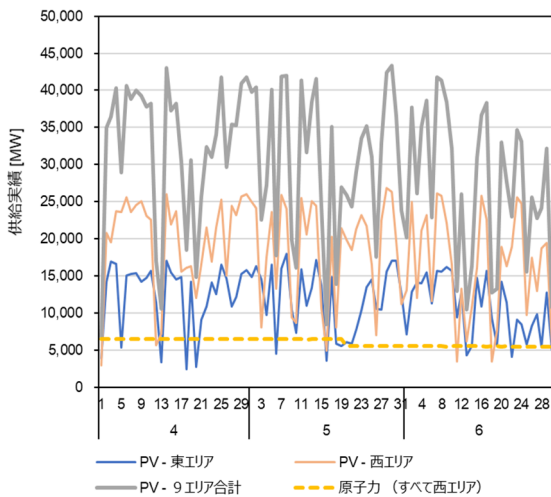
<sup>1)</sup> 太陽光発電に関しては、住宅用太陽光発電設備が増加している点では、需要の低下にも影響を与えている。

たり 100 万 kW 程の原子力発電が数基、稼働または停止することによる市場価格への影響はそこまで大きくないと推察される（このため、4 章で構築するスポット価格予測には原子力の影響は加味していない）。



注：縦軸は総発電電力量 (kWh) に占める電源別発電量 (kWh) の比率、右側の数値は 2019 年の電源別の比率を表す。  
出所) 経済産業省「電力調査統計」より作成

図 5 電源別発電量比率の推移 (火力以外)



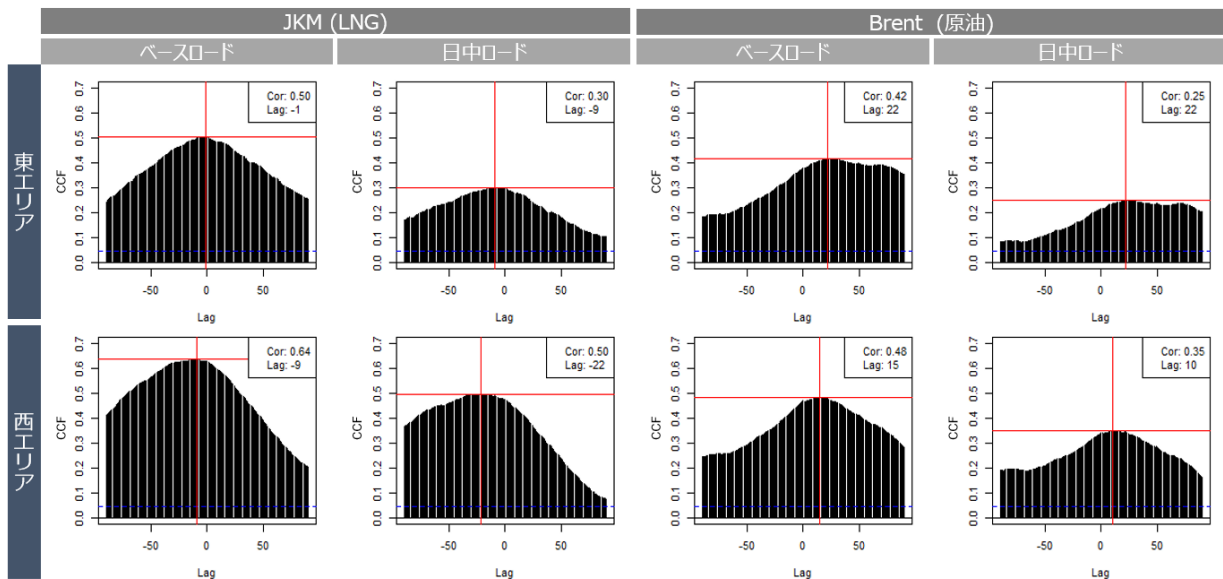
注：12-13 時の供給実績をプロットしている。  
出所) 各一般送配電事業者公表の「需給実績」より作成

図 6 太陽光発電と原子力発電の供給実績

電力・ガス取引監視等委員会[4]では、「太陽光発電など発電量をコントロールできない電気については、最低入札価格（現行の JEPX システム上では 0.01 円/kWh）での入札を求める。」との整理がなされている。従って、太陽光発電電力量は、スポット価格変動に対する主要な影響要因となっていることが想定される。従って、図 5 でみたような近年の太陽光発電の導入拡大トレンドを考慮すると、スポット価格に対する気象条件の感応度が経年的に変化していることを考慮することが、価格のモデル化に際して重要であると考えられる。

また、JEPX スポット価格は、限界費用での入札が基本となっていることを考慮すると、火力発電の限界費用を決定づける燃料価格との間に相関があることも想定される。そこで、図 7 に示すように、JEPX スポット価格に対する LNG スポット価格 (Platts JKM) 及び Brent 原油価格とのタイムラグ相関を測定した。まず、相関に関しては、Brent 原油よりも JKM の方が大きくなっていることが分かる。スポット価格の決定要因となるマージナルプラント（電力市場にて最後の 1 単位の発電量を生産している発電所）は多くの時間帯で LNG 火力となることから、LNG 価格との間に強い相関があることは整合的である。また、電力価格に連動するまでのタイムラグに関しては、Brent 原油は 2~3 週間あるものの、JKM は比較的短くなっている。なお、この点に関しては、JKM 価格及び JEPX 価格が、それぞれ Brent 原油価格を起点として遅れを持って連動し、その結果として両者が遅れを持たずに相関しているという可能性もある<sup>12)</sup>。このため、JKM 価格と JEPX 価格の因果関係を特定することはできないが、本研究 (4 章) で構築する JEPX スポット価格予測には、

<sup>12)</sup>これに関連し、文献[31]は「JKM 価格には原油からの一方向的な因果関係があり、その逆はない」と結論付けている。



注1：2014年8月から2020年3月までのデータより作成。JKM 価格、Brent 価格はリフィニティブ EIKON よりダウンロード。  
 注2：横軸は燃料価格が JEPX スポット価格に反映されるまでのタイムラグの日数、縦軸は相互相関（cross-correlation function; CCF）を示す。右上の数字（Cor と Lag）は、相関の最大値とその時のタイムラグを表し、赤色の横線と縦線にそれぞれ相当する。

図7 JEPX スポット価格と燃料価格とのタイムラグ相関

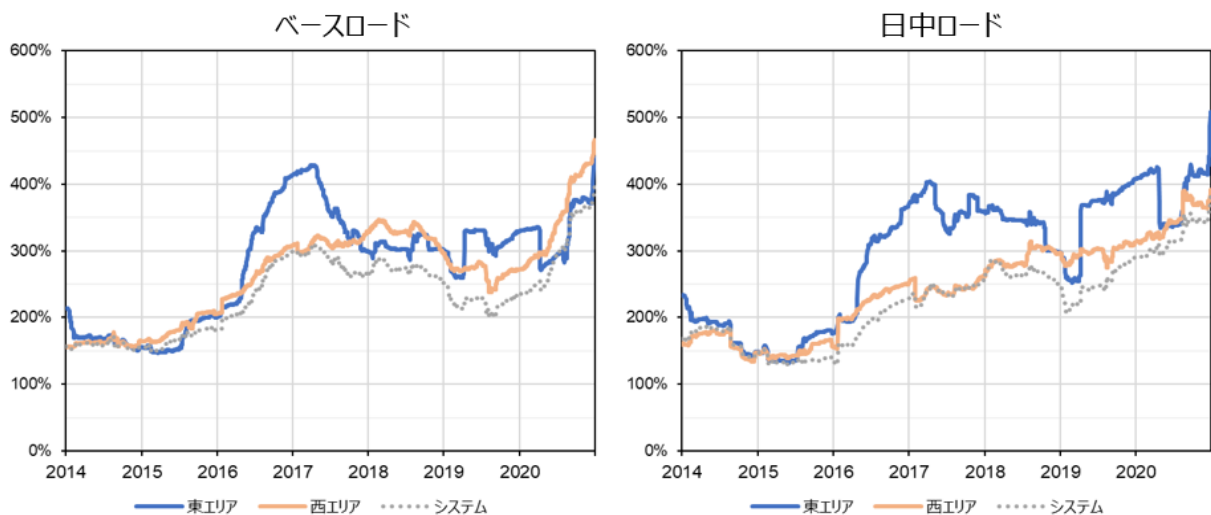


図8 JEPX スポット価格のヒストリカル・ボラティリティ（左：ベースロード／右：日中ロード）

当てはまりを重視して JKM 価格を用いることとする<sup>13)</sup>。

最後に、JEPX スポット価格のボラティリティの推移についても概観する。図8にベースロード、日中ロードそれぞれのヒストリカル・ボラティリ

ティ<sup>14)</sup>の推移を示す。年によって変動はあるものの、大きなトレンドとしては、2016年の小売全面自由化の頃から上昇を続けており、足元では、2015年の2～3倍程度にまで拡大している。

<sup>13)</sup> この理由については、脚注20も併せて参照されたい。

<sup>14)</sup> ベースロードのヒストリカル・ボラティリティは、[当該日から過去365日間についての、「価格の前日対比」の自然対数の標準偏差] ×  $\sqrt{365}$  を計算している。なお、日中ロード（対象時間帯は3.2節記載のTOCOM先物商品に合わせた）は平日のみを対象としており、365の代わりに250を用いている。

## 3.2 TOCOM 電力先物市場の概要

本節では、TOCOM の電力先物市場の概要について述べる<sup>15)</sup>。まず、上場されている商品の概要を表 1 に示す。

2021 年 3 月現在、東西 2 エリアに対して、ベースロード（全日 24 時間）と日中ロード（平日 8～20 時）の計 4 商品があり、それぞれ、月間物で直近 15 限月が上場されている。立会時間は日中立会（8:45～15:15）と夜間立会（16:30～19:00）の 2 回あり、その開始時と終了時の 1 日 4 回、シングルプライスオークション（板寄せ<sup>16)</sup>）が行われ、その間はザラバ取引<sup>17)</sup>が行われている。その他に、一律の値段で複数限月のセット取引を行う商品が立会外取引によって提供されている。

表 1 TOCOM 電力先物の商品概要

ロード	ベースロード		日中ロード	
エリア	東エリア	西エリア	東エリア	西エリア
取引種類	現金決済先物			
取引対象	JEPX スポット （東京/関西） 全日 0-24 時 価格		JEPX スポット （東京/関西） 平日 8-20 時 価格	
取引単位	月物（100kWh×24h× 当該月の暦日数）		月物（100kWh×12h ×当該月の平日日数）	
呼値	0.01 円/kWh			
限月	直近 15 限月			

次に、各商品の限月別の価格推移を図 9 に示す。各商品・各限月ともに、取引開始（受渡の 15 か月前）後は、しばらくの間は緩やかに推移し、満期が近づくとつれて変動が大きくなる傾向が読み取れる<sup>18)</sup>。また、各限月商品ともに、2020 年 2 月頃から緩やかに低下しているのは、燃料価格の低下した時期に一致している（付録 B 参照）。コロナ禍での世界的な景気後退を契機としてエネルギー価格が暴落したことが、電力先物価格に影響したものと考えられる。

なお、図 9 で示した価格は、TOCOM の「帳入値段」<sup>19)</sup>であり、必ずしも約定価格でないことに留意されたい。実際に 2020 年末現在までの TOCOM の先物市場では、各商品ともに押しなべて約定のない日の方が多くなっている。

## 4. スポット価格予測モデル

### 4.1 価格予測モデルの構築

リスクプレミアムの測定には、2 章の(1)式で述べたとおり、スポット価格の期待値（予測値）を求める必要があることから、本節では、まずスポット価格の予測モデルを構築する。電力スポット価格の予測に対しては、これまでに様々な手法が提案されており、諸外国市場を対象としたものについては、文献[36]のサーベイ研究に体系的にまとめられている。また、JEPX を対象としたスポット価格予測についても、いくつかの先行研究が

<sup>15)</sup> 日本向けの電力先物は、2020 年 5 月に EEX（欧州エネルギー取引所）において、2021 年 2 月に CME（シカゴ・マーカントイル取引所）においても、それぞれ上場開始されている。

<sup>16)</sup> 締め切りまでの入札を付け合わせ、売り買いが均衡する量と価格で取引を成立させる方式。

<sup>17)</sup> 価格優先・時刻優先で、個別の入札を付け合わせて随時取引を成立させる方式。

<sup>18)</sup> 満期までの期間が短くなるほど価格変動が大きくなる傾向はサミュエルソン（Samuelson）効果[34]と呼ばれ、電力以外の複数の市場に共通して見られる。特に電力等のエネルギー商品において顕著であることが知られている[18]。

<sup>19)</sup> 損益計算（値洗い）をする際の基準となる値段のことを指す。電力先物取引の当日帳入値段については、現在では、TOCOM の業務規程 36 条により、JSCC（日本証券クリアリング機構）が定めることになっている。JSCC の定めによれば、「当該限月取引の最終約定値段を原則とし、約定値段がない場合は、直近の限月または直前計算区域の帳入値段とするが、それらを帳入値段とすることが適当でないと認める場合には、当日の立会の呼値の状況等を勘案して JSCC が定める値段とする」旨が規定されている[7]。

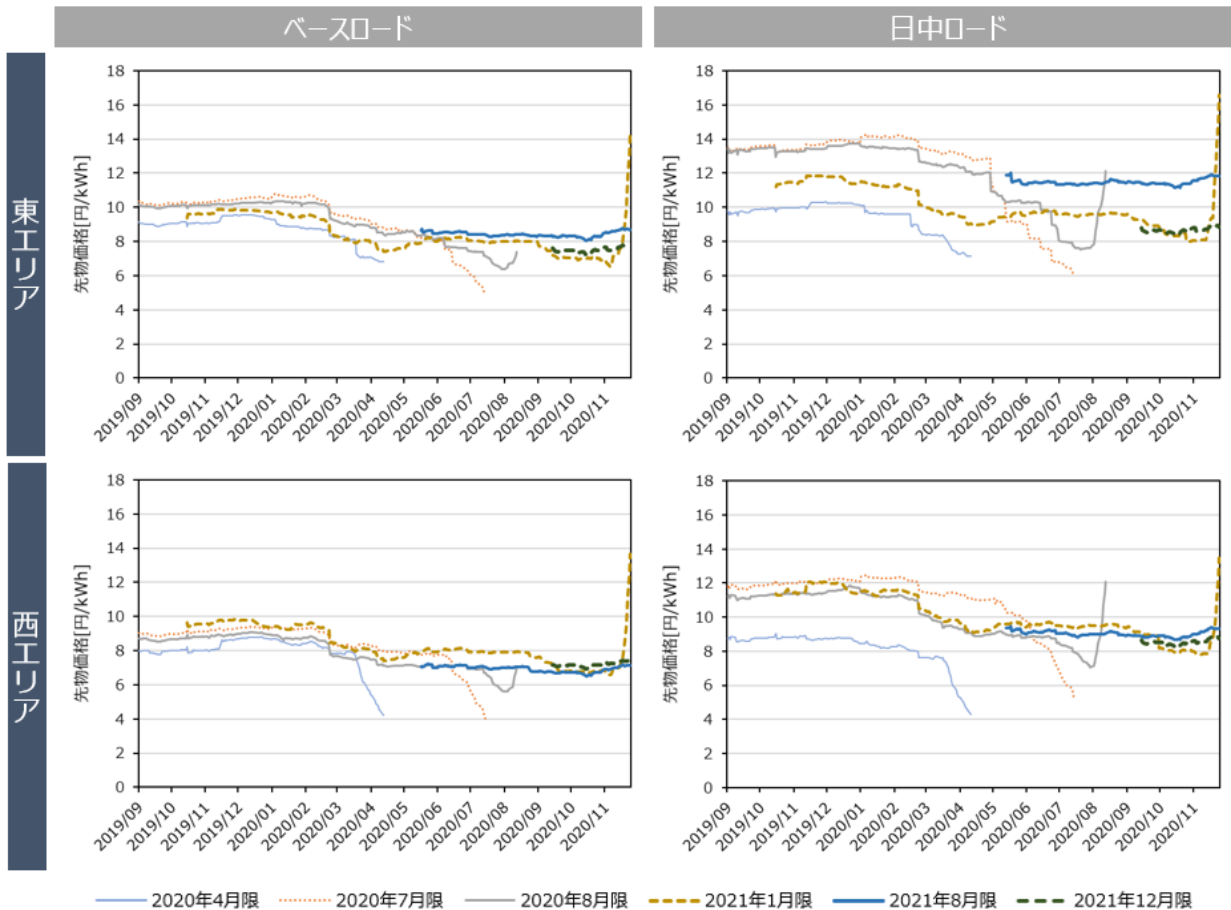


図9 TOCOM 電力先物価格の推移

ある。例えば、文献[1]では、ARIMAX（外生変数付き自己回帰和分移動平均モデル）及びニューラルネットワークを用いて、月平均スポット価格に対する長期の予測モデルの比較・検証を行っている。また、文献[10]では、一般化加法モデルにより季節性トレンドをモデル化するなどし、時間帯別の価格予測手法を提案している。

本研究では、3.1 節で概観したような、年々大きく変化している季節変動を効果的に模擬するようなモデル化手法を提案する。具体的には、気温と JKM 価格<sup>20)</sup>を用いた重回帰モデルをベースと

し、それにフーリエ展開の考えに基づく1年周期の季節性トレンドと経年変化トレンドの交差項等を加味する。これにより、スポット価格（及びスポット価格に対する気温暖感度）に存在する入り組んだトレンドを推定することに焦点を当てる。したがって、アルゴリズムや手法論の観点からモデルを高度化する点には立ち入らないものとする<sup>21)</sup>。本研究で提案するスポット価格予測のアプローチは、多くの市場参加者が容易に実装できるといった利点にも重きを置いており、市場取引に広く活用されることを期待するものである。

<sup>20)</sup> この点に関しては、JKM 価格と Brent 原油価格の両方を予測モデルに組み込むアプローチも考えられる。しかし、実際に両者を同時に用いた予測モデルを構築したところ、多重共線性（multicollinearity）の問題によりアウトオブサンプルでの予測精度の低下が確認されたことから、本研究においては、JKM 価格のみを用いることとした。このようなスポット価格予測に用いる燃料価格の精緻化については、今後の課題としたい。

<sup>21)</sup> スポット価格の予測は、自己相関やボラティリティの影響を考慮したり、その他、有意な関係性を持つ説明変数を加えたりすることで、より精緻なモデル構築ができる可能性があるが、このような精緻化は今後の課題としたい。

以上を踏まえ、スポット価格の予測モデルを次のように構築する。まず、第  $T$  日のスポット価格  $S_T$  に対し、下記の回帰式を構築する。

$$\begin{aligned}
 S_T = & \beta \cdot JKM_T \\
 & + f_1(T) + f_2(T)I_{H,T} + f_3(T)Period_T \\
 & + f_4(T)\epsilon_T + f_5(T)(\epsilon_T^2 - \overline{\epsilon_T^2}) \\
 & + f_6(T)Period_T\epsilon_T + \eta_T
 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $f(T)$  はフーリエ級数展開の考え方に基づくダミー変数で定義される季節性トレンド関数（付録 C 参照）、 $Period_T$  は第  $T$  日に対するサンプル始点からの経過日数<sup>22)</sup>、 $I_{H,T}$  は土日祝日で 1 となり、それ以外で 0 となるダミー変数、 $\epsilon_T$  は気温の実測値  $Temp_T$  の平年値（気温の季節性トレンド  $f_{temp}(T)$ ）からの乖離（すなわち、 $\epsilon_T := Temp_T - f_{temp}(T)$ ）。以下、これを「気温残差<sup>23)</sup>」という）、 $\overline{\epsilon_T^2}$  は気温残差の 2 乗の標本平均値、 $JKM_T$  は第  $T$  日が属する月が受渡月である JKM（LNG スポット）価格<sup>24)</sup>、 $\eta_T$  は平均 0 の残差項を示す。なお、(3)式は、季節性トレンド  $f(T)$  が係る項を含め、推定すべき各係数がパラメトリック<sup>25)</sup>に与えられており、通常の最小二乗法（Ordinary Least Squares ; OLS）を用いて推定することができる。

ここでのポイントは、経年変化を表す  $Period_T$  と季節性トレンドの交差項（ $f_3(T)Period_T$ ）や、

さらにそれと気温残差との交差項（ $f_6(T)Period_T\epsilon_T$ ）も加味しているところである。つまり、3.1 節でみたように、季節変動が経年的に大きく変化してきていることを考慮し、季節別の構造的変化を表現するように、これらの項を組み入れている<sup>26)</sup>。

また、将来期間におけるスポット価格の予測値（期待値）は、気温の平年値を前提とすることとし<sup>27)</sup>、気温残差  $\epsilon_T$  及びその二乗に関する項  $\epsilon_T^2 - \overline{\epsilon_T^2}$  の期待値が、それぞれ 0 になることに留意すると、次式によって求められる<sup>28)</sup>。

$$\begin{aligned}
 E_t[S_T] = & \beta \cdot JKM_{t,T} + f_1(T) + f_2(T)I_{H,T} \\
 & + f_3(T)Period_T
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $E_t[S_T]$  は第  $t$  日における第  $T$  日受渡のスポット価格の期待値、 $JKM_{t,T}$  は、第  $t$  日時点における、第  $T$  日が属する月を受渡限月とした JKM 先物価格である<sup>29)</sup>。このように将来期間のスポット価格予測に燃料の先物を用いることについては、文献[38]で分析されたリスクプレミアムの測定手法と同様のアプローチをとっている。

## 4.2 価格予測モデルの推定結果

本節では、前節で構築したスポット価格予測モデルを、実データを用いて推定した後、ファン

<sup>22)</sup> 例えば、推定に用いる期間の始点が 2013 年 1 月 1 日、 $T$  が 2014 年 1 月 1 日の場合、 $Period_T$  は 365 となる。

<sup>23)</sup> 気象庁公表の平年値は、統計期間が古く（1981～2010 年）、近年の温暖化に伴う気温上昇の傾向が補正されていないため、直近の実測データから推定される季節性トレンドを、本研究で用いる気温平年値とする。

<sup>24)</sup> JKM スポット価格は、受渡月の前月 15 日に、該当月のセトルメント価格が決定する。

<sup>25)</sup> モデルに用いる関数の形をあらかじめ定め、少数のパラメータを推定するアプローチをこのように呼ぶ。付録 C で説明するとおり、 $f(T)$  の関数はいくつかのパラメータ（ $a_k, S_{k,i}, c_{k,i}$ ）のみから表現されている。

<sup>26)</sup> このような経年変化の季節性については、文献[28]が、季節性と経年変化方向の交互作用トレンドについて、平滑化スプライン関数を用いてモデル化している。本研究はこれをさらに実務者にとって扱いやすくするために、フーリエ展開のダミー変数を用いた重回帰モデルを構築している。

<sup>27)</sup> 気象予報に一定の説明力があるのは高々 1 週間程度先である[27]ことを考慮すると、本研究が関心を持つ翌月以降の価格予測に、気温の予報値でなく平年値を前提とすることには、一定の合理性があるといえる。

<sup>28)</sup> (3)式のモデルを構築する際、説明変数である  $\epsilon_T^2 - \overline{\epsilon_T^2}$  の代わりに、 $\epsilon_T^2$  を用いることも可能であるが、その場合、予測価格を求める際に気温平年値を前提とすることからといって、 $\epsilon_T^2$  に 0 を代入することは下方バイアス（(3)式では  $f_5(T)\overline{\epsilon_T^2}$  に相当するもの）が生じ得ることに留意されたい。

<sup>29)</sup> ただし、 $t$  日が  $T$  日の属する月の前月 16 日以降である場合、脚注 24 で示したとおり、JKM 先物価格  $JKM_{t,T}$  は既にセトルメントされている（スポット価格  $JKM_T$  として観測される）ことから、 $JKM_T$  で置き換えることができる。

ダメンタルズの視点からの考察を加える。予測モデルの推定にあたっては、以下のデータを利用する。

- 電力スポット価格 $S_T$ [円/kWh]：JEPX スポット価格東京・関西エリア（東・西エリア）<sup>30)</sup>
- 気温 $Temp_T$ [°C]：気象庁公表の最高気温（東京・大阪）<sup>31)</sup>
- LNG スポット価格 $JKM_T$  [円/MMBTU]：Platts JKM スポット価格<sup>32)</sup>

上記の各データについては、直近までの過去 6 年間の観測値を用い、2019 年 10 月から 2020 年 9 月までの 12 か月の各月末特定日を予測時点とし、それぞれの時点毎に、エリア・ロード別にモデル推定（12 回）を行う<sup>33)</sup>。

まず、12 回のモデル推定から得られた決定係数の推移を図 10 左側に示す。全体として、日中ロードよりベースロードの方が、東エリアより西エリアの方が、それぞれ高い（すなわち、モデルの当てはまりが良い）傾向が見られる。図 7 で確認した結果とも関連するが、西エリアの価格は JKM 価格との相関が比較的強いいため、このことが JKM 価格の感応度（連動性の強さ）、及び価格予測モデルの説明力（当てはまりの良さ）を高めているものと考えられる。また、経年変化としては、総じて減少傾向にあることが確認される。この原因としては、太陽光発電の導入拡大に起因する極端な価格低下（つまり、LNG 等の火力電源の限界費用では説明できないような水準の価格帯）が頻発してきていることなどにより、燃料価格との連動性が薄れてきていることが想定される。また、JKM 価格の感応度に関しても、図 10 右側に

示すとおり、東エリアよりも西エリアが高いことや減少傾向にあることなど、決定係数と類似の傾向が見られる。この原因も決定係数のそれと同様であると考えられる。

次に、気温感応度の季節性と経年的な変化を確認するため、図 11 に、2015 年から直近までの期間を対象とした推定結果を示す<sup>34)</sup>。気温の感応度は、冬期に負、夏期に正の値をとっている。これは、価格高騰の原因が、冬期においては気温の低下（暖房需要の上昇）であるのに対し、夏期においては気温の上昇（冷房需要の上昇）であることに整合する。感応度の絶対値に関しては、総じて、ベースロードより日中ロードの方が大きくなっているが、夜間よりも日中の価格の方が気温に応じて変化しやすいという直観にも一致する。

興味深いのは、両エリアにおいて振幅が年々拡大傾向にあり、特に、この傾向が西エリアにおいて顕著となっていることである。これは、図 3 や図 4 でみたように、中間期や日中の価格低下が西エリアで特に進行していることなども整合する。また、需要期の気温感応度が拡大しているのは、火力電源の運用について、上げ調整力確保に向けた低出力運転の頻度が増えてきていることなどが原因として挙げられる。これらにより、供給曲線が左側にシフトすることで、需給の交点が価格スパイクの起きやすいところに移ってきていることが考えられる。さらには、小売全面自由化以降、市場環境の競争性が高まってきていることにより、買い側を含めた入札行動が気象に連動した需給の変化を強く織り込むようになってきている可能性もある。

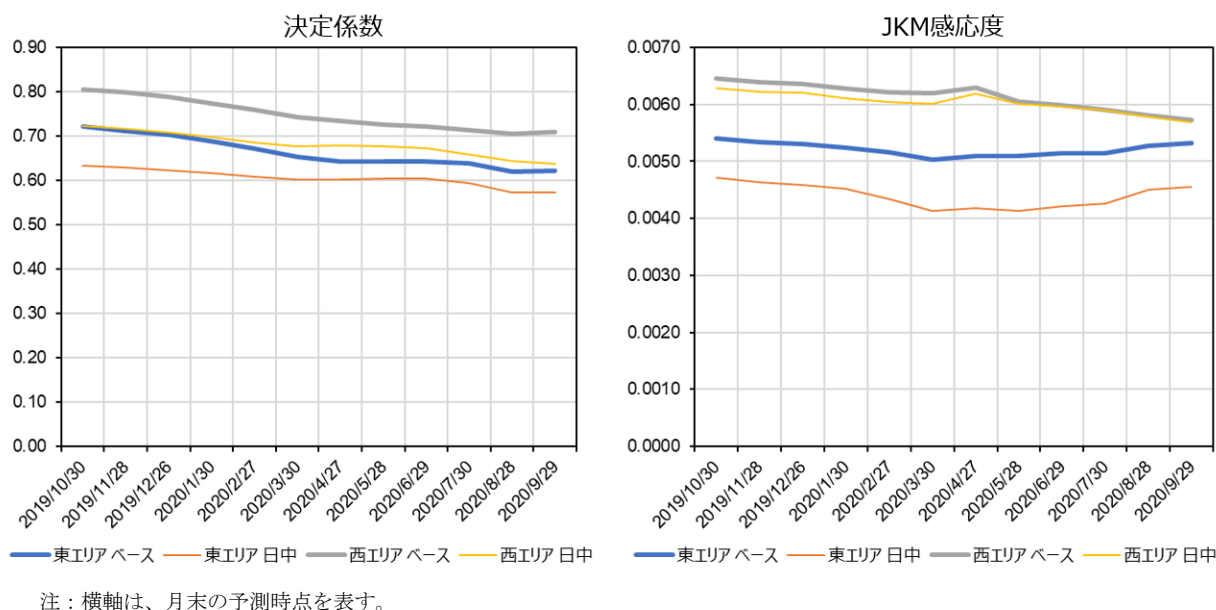
<sup>30)</sup> JEPX ウェブサイト (<http://www.jepx.org/market/index.html>) よりダウンロード。

<sup>31)</sup> 気象庁ウェブサイト (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>) よりダウンロード。

<sup>32)</sup> Refinitiv Eikon よりダウンロード。

<sup>33)</sup> 12 か月分の予測時点のサンプルを用いている理由は、リスクプレミアムの測定に際して季節性を除去するためである（5 章参照）。また、月末特定日は TOCOM 先物市場の各月における最終取引日とする。

<sup>34)</sup> 図 11 は、(3)式で推定された  $f_4(T) + f_6(T)Period_T$  の値をプロットしている。これは、(3)式を  $\epsilon_T$  に関する関数  $S_T(\epsilon_T)$  とみなした時の、 $S_T'(0)$  の値 ( $\epsilon_T = 0$  における 1 階の微分係数) に等しい。すなわち、日付毎の「気温平年値周りで気温感応度」を表している。



注：横軸は、月末の予測時点を表す。

図 10 スポット価格予測モデルの決定係数と JKM 感応度の推移（左：決定係数／右：JKM 感応度）

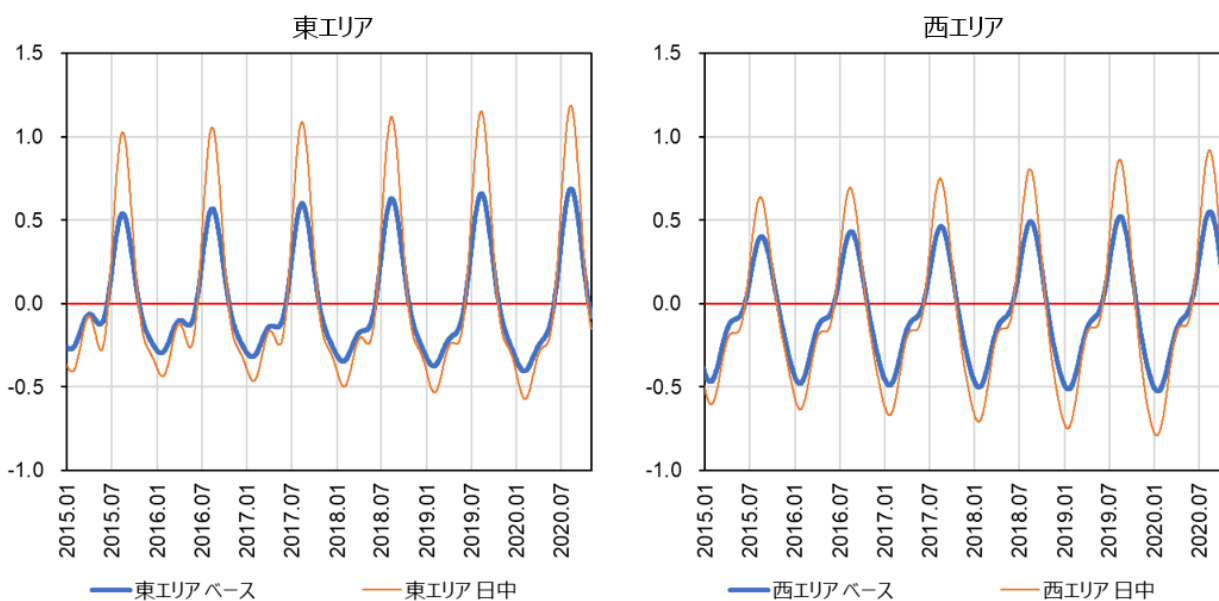


図 11 スポット価格に対する気温感応度の推移（左：東エリア／右：西エリア）

このように、スポット価格に対し、燃料価格との連動が弱まっている一方で、長期的な予測が困難である気象条件<sup>35)</sup>との連動が強まっていることから、スポット価格の予測がますます難しくなっていることが示唆される。3.1 節の図 8 でみたような、スポット価格のボラティリティの

上昇傾向は、こうした気象連動のスポット価格変動リスクの高まりを反映しているものと考えられる。

なお、本節で扱ったスポット価格予測モデルの精度については、付録 D にて概観しているため、併せて参照されたい。

<sup>35)</sup> 気象予測の難しさに関しては、最新の研究でも「実用的な予測可能限界は 10 日先までである」とされている[39]。

## 5. リスクプレミアムの分析

本章では、以上で概観したようなスポット市場の環境変化を踏まえつつ、TOCOM 先物市場のリスクプレミアムについての分析を行う。分析対象とする電力先物価格 $F_{t,T}$  [円/kWh]は、TOCOMの電力先物4商品<sup>36)</sup>すべて（東・西エリア×ベース・日中ロード）とし、必要となるスポット価格予測は4章で利用（4.2節冒頭で記述）したものと同一ものを用いる。また、本来のリスクプレミアムの定義に基づく「ex-ante リスクプレミアム」に加え、「ex-post リスクプレミアム」についても分析を行う。

### 5.1 Ex-ante リスクプレミアム

Ex-ante リスクプレミアムの計算には、(1)式に示したようにスポット価格の期待値（予測値）が必要となるため、4章で構築した予測モデルを用いてこれを推定する。なお、同式からは日次の予測価格が得られるが、それを月平均化することによって月次の予測価格を取得するものとする。

Ex-ante リスクプレミアムの測定対象とする期間は、季節性を除去する観点から、先物価格の観測時点（スポット価格の予測時点に等しい）及び限月ともに、それぞれ1年分（12サンプル）を利用することとする。具体的には、リスクプレミアムの測定時点は、先物上場直後の2019年10月から2020年9月までの12か月の各月末時点とし、受渡月は測定時点の翌月から12か月後の各限月を対象とする<sup>37)</sup>。スポット価格の予測値は、各予

測時点（リスクプレミアムの測定時点）までに観測されたスポット価格・気温実測値を用いて、過去6年間（72か月）のデータから(3)式のモデルを推定して得ることとし、将来期間のJKM価格は、各予測時点で観測された先物価格を用いることとする。

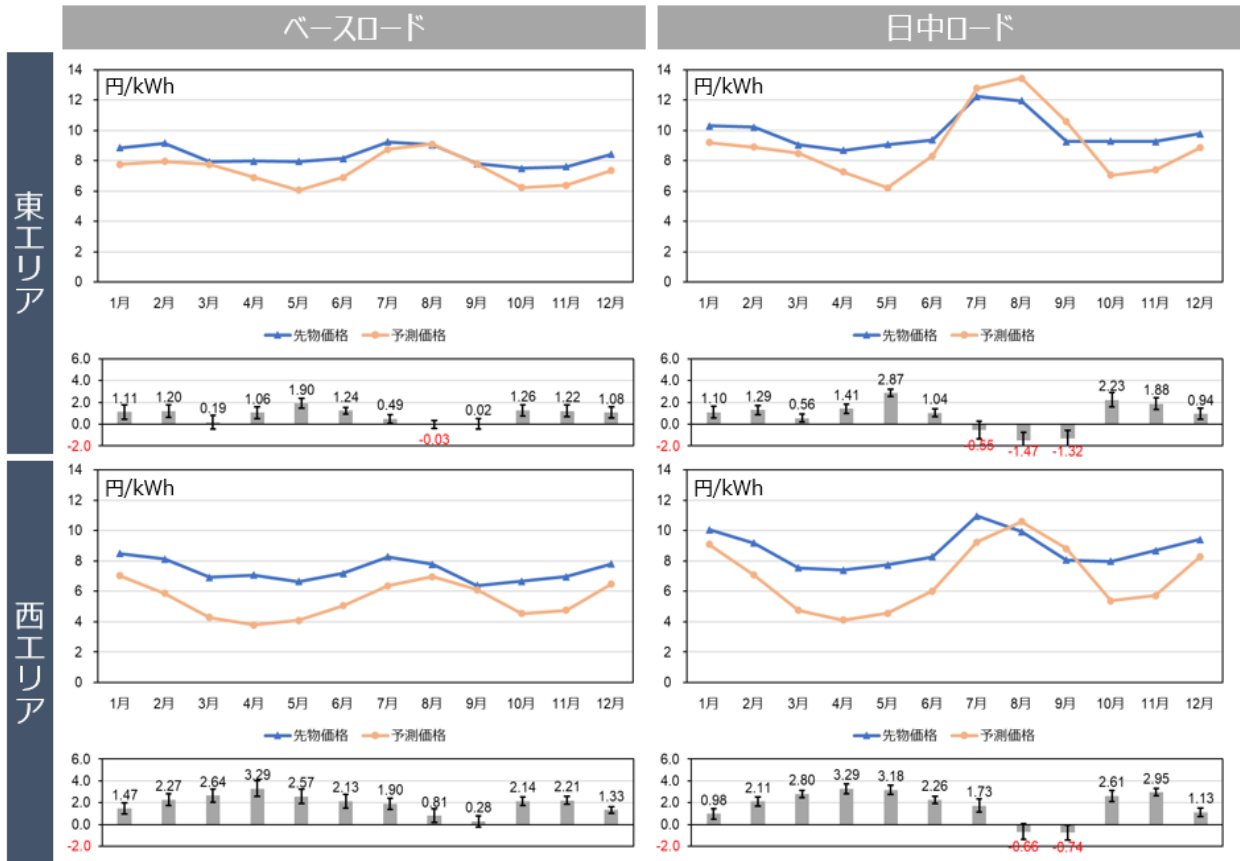
このようにして得られたスポット価格予測値と先物価格について、各限月別に集計したものを図12に示す（なお、付録Eにて、月別集計前の観測時点別のリスクプレミアムの詳細を示す）。上段の折れ線グラフで示される、月別の先物価格とスポット価格の予測値は、各限月ごとに、予測対象時点が1か月先から12か月先までの12サンプルのデータを平均したものである。また、下段の棒グラフは、両者の差分として計算されるリスクプレミアムであり、エラーバーは95%信頼区間を示す。同図が示すように、4商品ともに、概してスポット予測価格よりも先物価格の方が高くなる傾向があり、ほとんどの月で有意な正のリスクプレミアムが観測された<sup>38)</sup>。これは多くの先行研究における実証結果とも整合する結果であり、先物の売り手より買い手の方が、リスク回避的であることが示唆される。

リスクプレミアムのエリア間比較においては、東エリアよりも西エリアの方がやや大きく、月別の比較においては、春期（4,5月頃）や秋期（10,11月頃）の需要・価格が低下する中間期に大きくなっている傾向が見られる。この点に関して、リスクプレミアムの構成要素の①「リスク引受けの対価」（2章参照）に照らし合わせて考察すれば、太陽光発電の導入拡大に起因して、特に価格

<sup>36)</sup> TOCOM ウェブサイト (<https://www.tocom.or.jp/jp/historical/download.html>) よりダウンロード。

<sup>37)</sup> 例えば、2019年10月末時点での測定対象は、2019年11月受渡から2020年10月受渡までの12商品となる。なお、2019年9月末にも先物価格は観測されているが、上場直後のため価格の信頼性が低い（取組高枚数も極端に少ない）ことを考慮して対象から除外した。受渡月は、実際には表1記載のとおり15限月分が取引されている。

<sup>38)</sup> 本研究では、スポット価格予測の説明変数にJKM価格のみを用いたため、長期契約LNG価格（全日本通関LNG価格である「JLC」）に連動する要因は加味されていない。このため、JLCとJKM価格の値差から生じ得るプレミアムの測定誤差が含まれている可能性はある。ただし、当該値差が顕著となった時期（2020年度冬期）は、プレミアムの測定対象とした期間（2019年10月～2020年9月）から外れているため、このような測定誤差はあまり大きくはないと考えられる。



注1 上段の折れ線は、横軸で示す受渡月（ $T$ の属する月）別の先物価格  $F_{t,T}$  とスポット価格予測値  $E_t[S_T]$  であり、受渡月毎に、予測対象時点（つまり、 $T-t$ に対応する受渡までの期間）が、1から12か月先までの異なる12サンプルを平均したものを示す。  
 注2 下段の棒グラフは、 $F_{t,T} - E_t[S_T]$  から求められる ex-ante リスクプレミアムであり、エラーバーは95%信頼区間を示す。

図12 先物価格、スポット価格予測、リスクプレミアムの月別集計

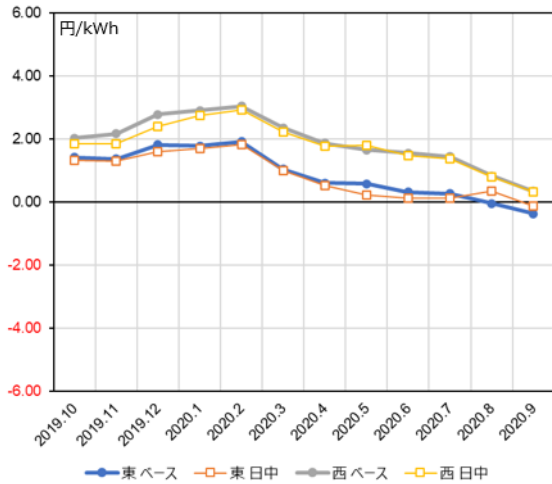
変動の大きくなる西エリアや中間期において、買い手が比較的大きいプレミアムを支払うことに同意しているという一定の解釈ができる。

他方、需要が高く、価格が高騰する夏期や冬期では、リスクプレミアムが小さくなる傾向があり、日中ロードの夏期（東エリアの8,9月、西エリアの9月）に至っては、有意な負の値が測定された。しかし、これは、価格高騰期にリスクプレミアムが大きくなりやすいといった、流動的な諸外国市場で見られる一般的な傾向（2章参照）と逆であることを踏まえると、構成要素の②「先物市場の非効率性」が大きく影響している可能性がある。つまり、取引量が少ないために、先物価格自体が適正価格に収束していないことによる影響である。例えば、東エリアの日中ロードでは、コ

ロナ禍での需要低下を受け、2019年4月末から5月末にかけての1か月間で、2020年7月受渡の先物価格が3.5円/kWhも低下した（図9及び付録Eの図21参照）が、その間の出来高はわずか11枚のみであった。このように、現在の先物市場が、わずかな市場取引によって大幅に価格を変化させ得る環境であることを踏まえると、上述の負のプレミアムは本来の実勢価格を反映していない可能性がある。

次に、リスクプレミアムの時系列的な変化を概観するため、図13に、観測時点別に12限月分の平均値をプロットすると、市場開設以降、4商品ともにリスクプレミアムの縮小傾向が見られる。これは、2章で述べたように、リスクプレミアムは市場の効率性が高まるにつれて縮小する、とい

う傾向と一致する。ただし、上記で述べたコロナ禍の需要低下による一時的な価格低下の影響も受けていると考えられるため、一般的な傾向を論じるためには、より長期的な観測データが必要となることには留意されたい<sup>39)</sup>。



注: 横軸で示される月の月末時点における、翌月から12か月先受渡までのex-anteリスクプレミアムの平均値を示す。

図13 リスクプレミアムの推移

## 5.2 Ex-post リスクプレミアム

次に、ex-postリスクプレミアムについても概観する。2章で述べたように、ex-postリスクプレミアムは観測値のみから測定できる点でex-anteリスクプレミアムよりも客観性が高い指標といえる。まず、ex-postプレミアム $FP_{t,T}$ とex-anteプレミアム $\overline{FP}_{t,T}$ の間には、次式のような関係性があることに注意しておきたい。

$$\begin{aligned}
 FP_{t,T} &= F_{t,T} - S_T \\
 &= F_{t,T} - E_t[S_T] + E_t[S_T] - S_T \\
 &= \overline{FP}_{t,T} - \varepsilon_{t,T}
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 $\varepsilon_{t,T} := S_T - E_t[S_T]$ はスポット価格の予測誤差を表す<sup>40)</sup>。したがって、(5)式は、スポット価格予測にバイアスがなければ、 $\varepsilon_{t,T}$ の期待値は0となり、 $FP_{t,T}$ と $\overline{FP}_{t,T}$ は限りなく等しい値となることを意味する。

以降では、文献[32]と同様に、次式で定義する「相対 ex-post プレミアム」 $\Delta_T$ を用いることにより、季節的な価格水準の変動を調整した ex-post プレミアムを計測する。

$$\Delta_T = \frac{F_{t,T} - S_T}{S_T} \tag{6}$$

つまり、元々の ex-post リスクプレミアムをスポット価格で除することにより、価格高騰月のリスクプレミアムを過剰に加味することを回避する。

この指標を用いて測定された ex-post プレミアムは、表2に示すとおり、前節でみた ex-ante プレミアムと同様、4商品すべてで正の値となっている(ベースロードでは、東西エリアともに5%水準で有意な値)。また、標準偏差はベースロードよりも日中ロード、東エリアよりも西エリアで大きくなっている。ただし、ex-postプレミアムの標準偏差は、(5)式で見たように、本来のリスクプレミアム(ex-anteリスクプレミアム)の変動に加えて、スポット価格の予測誤差の変動も影響することに留意されたい。観測値のみから両者を切り分けることはできないが、西エリアの予測誤差(のばらつき)が比較的大きいことが標準偏差の拡大に影響している可能性がある。

次に、測定対象とした12か月間のex-postプレミアムの推移を図14に示す。先物上場以降、リスクプレミアムは正の値で推移していたが、2020年7,8月末のみ、極端に負の値となっている。これは、コロナ禍による需要低下などにより、7月

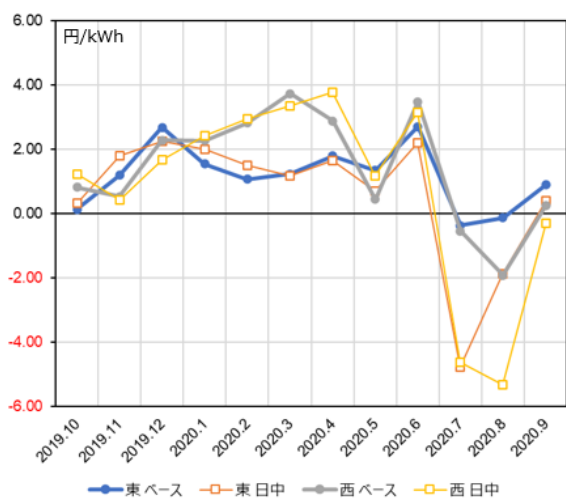
<sup>39)</sup> 図12及び図13に関連し、期近と期先でリスクプレミアムがどのように異なるかという観点からも分析を行ったところ、1か月先から12か月先までほとんど平行線であり、受渡期間による大きな違いは見られなかった。  
<sup>40)</sup> Ex-anteプレミアム $\overline{FP}_{t,T}$ に用いられる $E_t[S_T]$ は、 $t$ 時点における最も「合理的」なスポット価格の期待値であるため、予測誤差 $\varepsilon_{t,T}$ は、時点 $t$ から $T$ までの間に発生する価格関連のショックに起因するものと解釈される[16]。

にスポット価格が低く推移したため、先物市場では夏期の価格低下が見込まれたものの、実際には8月から9月にかけて、猛暑によりスポット価格が高騰したことから、このような結果になったと考えられる。

表2 Ex-post リスクプレミアム

	東エリア		西エリア	
	ベース	日中	ベース	日中
平均	19%	11%	31%	26%
標準偏差	17%	21%	39%	44%
最小	-5%	-38%	-27%	-45%
最大	56%	37%	89%	102%
p 値	2.8E-03**	1.0E-01	1.7E-02**	6.9E-02*

注: 2019年10月から2020年9月までの各月末翌月受渡商品に対する ex-post リスクプレミアム (12 サンプル) を集計。



注: 横軸で示される月の月末時点における翌月受渡の先物に対する ex-post リスクプレミアムを示す。

図14 Ex-post リスクプレミアムの推移

なお、ex-post リスクプレミアムに対しては、スポット価格の変動（ボラティリティ）との関係性を探るために、回帰分析を行う実証アプローチが、複数の既往研究で用いられている。しかし、本研究では、現時点で観測される ex-post リスクプレミアムが、商品ごとに（先物商品が月粒度のため）十数サンプルしかなく、信頼性の確保が困難であることから、今回の研究では分析の対象外とした。ただし、このような分析は、将来のスポット価格の変動リスクとヘッジ対価の関係を見通す上で重要であるため、先物市場のデータが蓄積してからの今後の課題としたい。

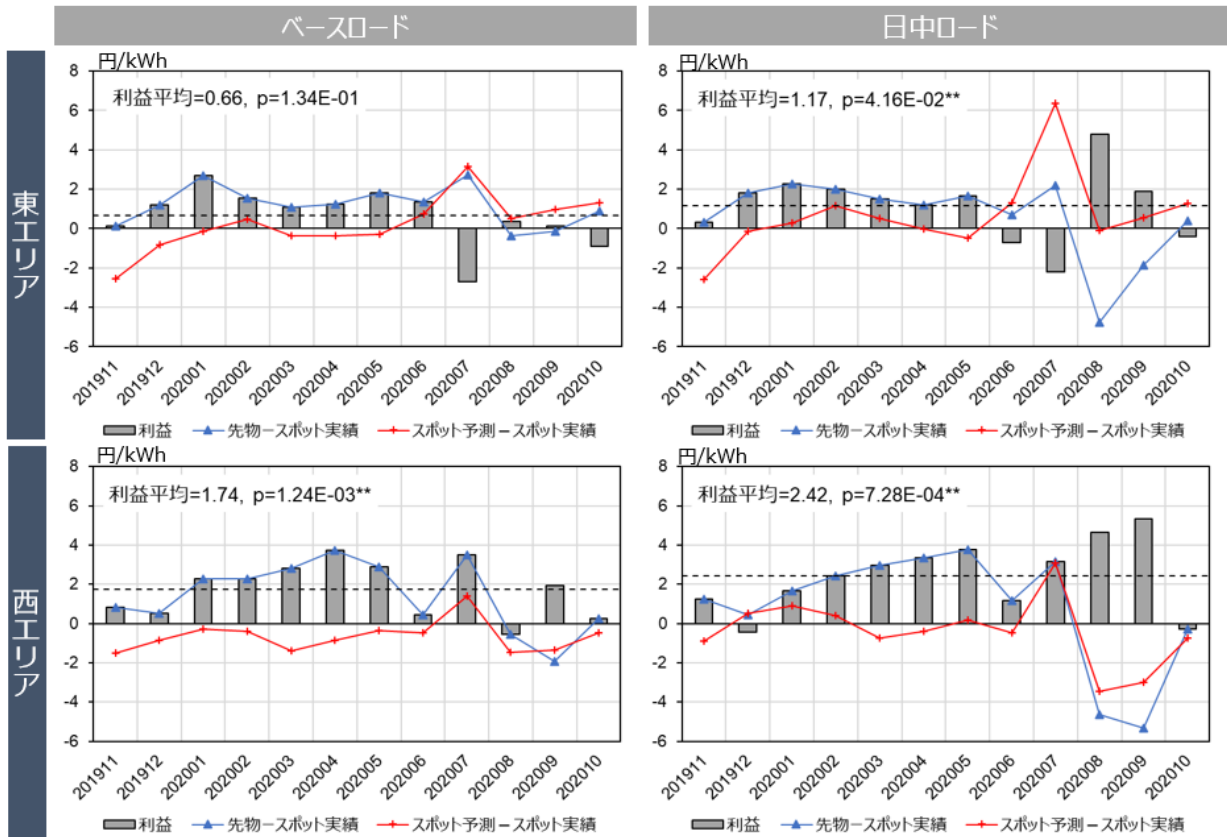
## 6. 先物取引利益

リスクプレミアムは「先物取引における期待利益そのものである」という解釈（2章参照）を考慮すると、実際に投機的な先物取引を行った場合、得られる利益がどの程度になるのかは興味深い問いである<sup>41)</sup>。そこで、本章では、各月末に翌月のスポット価格を予測（期待値  $E_t[S_T]$  を計算<sup>42)</sup>し、同時点での翌月受渡の先物価格  $F_{t,T}$  と比較して、取引の意思決定を行うような戦略を考える<sup>43)</sup>。具体的には、先物価格の方が安ければ ( $F_{t,T} < E_t[S_T]$  の場合) 先物をロング（買いポジションを取得）し、高ければ ( $F_{t,T} > E_t[S_T]$  の場合) 先物をショート（売りポジションを取得）する。こうして取得した先物ポジションを満期まで保有することにより、いずれの場合も最終的にはセトルメント価格（スポット価格  $S_T$ ）で精算される。すなわち、この取引は先物のみを利用し

<sup>41)</sup> 電力市場における裁定取引や投機的取引に関しても複数の先行研究があり、例えば、PJM 電力先物と天然ガス（ヘンリーハブ）先物を用いたもの[30]、前日市場と時間前市場の値差に関するもの[25]、リアルタイム市場と時間前市場に関するもの[17]、JEPX 先渡市場における取引手法に関するもの[27]などがある。

<sup>42)</sup> (4)式及び脚注 29 より、月末時点における翌月スポット価格の期待値は、すでに観測されている JKM スポット価格  $JKM_T$  を用いて、次式で計算できる。 $E_t[S_T] = \beta \cdot JKM_T + f_1(T) + f_2(T)I_{HT} + f_3(T)Period_T$

<sup>43)</sup> 本章では翌月受渡の電力先物を対象とした投機的取引を扱ったが、翌々月以降受渡の電力先物についても、燃料（LNG）先物と同時に取引（ペアトレーディング）することで、同様の投機的取引が可能となる（付録 F 参照）。



注：青線が赤線よりも上にある場合（観測された先物価格がスポット価格の期待値よりも高い場合）は、棒グラフで示される取引利益（先物のショートポジションから得られた利益） $F_{t,T} - S_T$ が青線と一致し、逆の場合は、棒グラフの取引利益（先物のロングポジションから得られた利益） $S_T - F_{t,T}$ は、青線と符号が逆転する。

図 15 1 か月先の先物取引利益

た純粋な金融取引であり、正味の取引利益（負の場合は損失）は、先物をロングした場合は  $S_T - F_{t,T}$ 、先物をショートした場合は  $F_{t,T} - S_T$  となる<sup>44)</sup>。

このような取引から得られる収益の結果を受渡限月別にプロットしたものを図 15 に示す。青色（及び赤色）の折れ線グラフは、先物価格（及び期待スポット価格）の実績スポット価格からの乖離を表しており、灰色の棒グラフが、取引収益（負の場合は損失）である。当然に損失が発生した月も存在しているが、通年の平均利益を計算す

ると（各グラフの左上に記載）、東エリアで 0.7-1.2 円/kWh、西エリアで 1.7-2.4 円/kWh 程度となっており、5 章で測定したリスクプレミアムに近い水準となっていることが分かる。なお、4 商品のうち、東エリアのベースロード以外の先物取引利益は 5%水準で有意となっており、すなわち、これは先物取引には偶然とはいえないほどの収益機会が存在していることを意味する。

このような先物取引における収益機会の存在は、積極的にリスクを引き受けて収益を獲得しようとする金融プレイヤー等に、先物市場への参入

<sup>44)</sup> 本報告で用いる先物価格は、公表されている帳入値段であり実取引価格ではないため、必ずしも実際にこのような取引が実現できるわけではない。ただし、TOCOM では、2020 年 10 月 1 日より東日本のベースロードと日中ロードの 2 商品を対象に、買値と売値を継続的に提示させる「マーケットメイカー制度」の運用が開始されており（<https://www.tocom.or.jp/news/2020/20200904.html>）、このような取引が効率的に実施できるような市場環境が整いつつある。

を促し得る要因といえる。なお、これらのプレイヤーが収益機会を求めて投機的な先物取引を行うことは、2章で述べたように、リスクプレミアム及びそれを含んだ先物価格の信頼性を高めるとともに、先物取引量の増加に貢献し、電気事業者が行うヘッジ取引の効率化にもつながり得る、一定の意義ある市場行動であるといえる<sup>45)</sup>。

## 7. おわりに

本研究では、TOCOM 電力先物が市場開設以降1年経過したことに加え、スポット市場のボラティリティ増加に伴い電気事業者のヘッジニーズが高まっていることを契機として、先物取引を行う上での重要な概念であるリスクプレミアムについての論考を行った。まず、先行研究を踏まえ、リスクプレミアムが、主に①「リスク引受けの対価」と②「先物市場の非効率性」の2つの要素から構成されることについて言及し、市場の流動性が高まるにつれて、後者の要素が縮小し、前者の要素に収束していくことについて論述した。このような背景を踏まえた上で、TOCOM 電力先物市場のデータを用いた実証分析を行い、次のような結果を得た。

### (i) TOCOM の電力先物には、総じて有意な正のプレミアムがあること

この結果は、諸外国の先物市場を対象とした先行研究と同様であり、先物の売り手より買い手の方が、リスク回避性向が強いことを意味している。つまり、柔軟な電源設備を保有しない買い手が、その投資・運用コストを支払う代わりに、市場取引を活用してリスク移転をしたいという（売り手側よりも比較的

強い）ヘッジニーズを持ち、このことが正のプレミアムとなって表れているものと解釈することができる。

### (ii) 東よりも西エリアで、需要期よりも中間期で、それぞれリスクプレミアムが大きくなる傾向があること

これに関しては、リスクプレミアムの①の構成要素から説明すれば、太陽光発電による極端な価格低下が発生しやすいエリア・時期の価格変動に対して、買い手が比較的大きいプレミアムを支払うことに同意している、という一定の解釈ができる。しかし、需要期にリスクプレミアムが縮小する（負になる）という結果は、多くの諸外国市場を対象とした実証結果に照らすと一般的ではなく、②の構成要素が少なからず影響しているとも考えられる。つまり、先物市場が十分に効率化されていないが故に、先物価格が多数の市場参加者が合意するような実勢価格となっておらず、いわゆる「ミスプライシング」が発生している可能性が示唆される。

### (iii) 各商品ともに、市場開始直後よりもリスクプレミアムが縮小傾向にあること

これについては、上場直後と比較して、非効率性が一定程度改善してきていることを反映している可能性がある。ただし、コロナ禍での需要低下等により、将来価格に対する市場参加者の見方が短期的に大きく変化したことなど、特殊な市場環境変化の影響も受けていると考えられる。このため、上述の結果を一般的な傾向として議論するためには、より長期的なデータに基づく分析が必要である。

また、リスクプレミアムの測定に必要となる

<sup>45)</sup> ただし、実際にこのような取引が行われるためには一定の取引量が必要となるため、2章でも述べたとおり、まずは取引主体であるヘッジャー（電気事業者）自らが取引を行う（先物ポジションを保有する）ことが前提となる。また、市場の効率性維持の点からは、本節で述べたようなリスクテイカーの他に、裁定取引者（アービトラージャー）の存在も欠かせない[13][29]。例えば、TOCOM と EEX 間における電力先物の値差から収益を得る裁定取引なども想定されるように、多様な方法による市場の活用が期待される。

スポット価格の予測に際しては、太陽光発電の導入拡大等に伴う需給構造の変化に焦点を当てたモデルを構築し、次のような示唆を得た。

**(iv) スポット価格に対する気温感応度の大きさが、経年的に拡大傾向にあること**

この分析結果については、中間期では近年の太陽光発電の導入拡大が、需要期では石炭火力の低出力運転頻度や市場環境における競争性の高まりなどがそれぞれ影響しているものと考えられる。特に、需要期における気温感応度の拡大傾向は、（前日時点の予測気温に応じて変動する）スポット価格の高騰のしやすさにも直結するものであり、実際に、最近の価格スパイクの発生頻度やスパイク時の価格水準の上昇傾向にも表れているといえる。

なお、予測モデルの構築に際し、本研究では、気温、季節性トレンド及び経年変化トレンドの3変数の交差項を加味することなどによって、気温感応度の季節変動の経年的な拡大傾向を捉えることができた。他方、過去複数年の観測データから年内の季節性のみを模擬しようとするモデル化のアプローチでは、中間期の価格低下トレンドや需要期の価格上昇トレンドを捉えることは難しい。上述の(ii)の説明で述べたような、需要期に低くなるようなリスクプレミアムの季節傾向は、現状の比較的少数の先物市場参加者が、このような季節変動の構造的な経年変化を十分に織り込めていないことが原因となっている可能性も指摘できる。

**(v) 価格予測モデルの当てはまりや、燃料価格の感応度が、経年的に縮小傾向にあること**

この結果も上述の需給環境変化、すなわち気象連動の拡大傾向に由来しているものと考えられる。これにより、燃料価格との連動も薄れつつあり、結果としてモデルの当てはまりが悪くなっていると推察される。本来的に長期的な予測が困難である気象条件との連動

性が年々強まってきていることを踏まえると、スポット価格の予測は今後も一層難しくなっていくことが想定される。3.1節でみたような、スポット価格のボラティリティが上昇している傾向も、こうした構造的な変化を反映しているものと考えられる。

このように、スポット価格の変動リスクが高まることで、先物を用いたヘッジニーズは拡大していくものと考えられる。すなわち、「先物市場の非効率性」に相当するプレミアムは縮小傾向にある一方で、「リスク引受けの対価」に由来して本来的に存在する正のプレミアムは、今後、ますます増大していく可能性が指摘できる。

本研究で示したようなリスクプレミアムの存在とそれに基づく収益機会は、ヘッジ取引の意思決定に考慮されるだけでなく、より多くのリスクテイクを呼び込む可能性をも示唆するものである。その結果として、取引量が増加して十分に市場が効率化すれば、発電事業者や小売電気事業者によるヘッジ取引が、より効果的かつ戦略的に行えるようになることも期待される。

2021年1月のスポット市場価格の高騰を受けて、このような電気事業者のヘッジ取引の必要性が急速に顕在化したことは、本報告書の冒頭でも述べたとおりである。先物市場を活用した戦略的なリスク管理の実現に向けて、ヘッジ取引手法の開発や市場流動化に資する分析等をさらに進めていくことが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 井上智弘, 田中拓郎 (2018). JEPX スポット市場における価格の長期予測手法の検討. 電力中央研究所研究報告. Y17002.
- [2] 遠藤操, 服部徹 (2015). 電力・燃料トレーディングとアセット最適運用による発電事業の収益管理—ドイツ事業者の事例—. 電力中央

研究所研究報告 Y14012.

- [3] 遠藤操, 松本拓史 (2020). 電力先物市場の流動化に向けた考察—戦略的リスクヘッジ取引の実現に向けて—. 電力経済研究, 67, 51–63.
- [4] 電力・ガス取引監視等委員会 (2018). 今秋の再生可能エネルギー出力制御時の卸電力市場の状況及び今後の対応について. 第35回制度設計専門会合 事務局提出資料. 2018年12月17日.
- [5] 電力・ガス取引監視等委員会 (2020). 自主的取組・競争状態のモニタリング報告 (令和2年4月～令和2年6月期). 第50回制度設計専門会合 事務局提出資料. 2020年9月8日.
- [6] 電力・ガス取引監視等委員会 (2021). スポット市場価格の動向等について. 第55回制度設計専門会合資料. 2021年2月5日.
- [7] 日本証券クリアリング機構 (2020). 先物・オプション取引に係る清算値段等の決定方法等. [[https://www.jpx.co.jp/jscc/seisan/sakimono/acceptance\\_debt/cimh1l0000000g4r-att/cimh1l00000017g7.pdf](https://www.jpx.co.jp/jscc/seisan/sakimono/acceptance_debt/cimh1l0000000g4r-att/cimh1l00000017g7.pdf)]
- [8] 松本拓史, 山田雄二 (2019). 天気概況予報と天気別周期性トレンドに基づく太陽光発電事業者のための予測手法. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 62, 1–22.
- [9] 山田雄二 (2017). スポット価格予測に基づくJEPX先渡価格付けモデルの構築. RIETI ディスカッション・ペーパー・シリーズ 17-J-072, 1–21.
- [10] 山田雄二, 牧本直樹, 高嶋隆太 (2015). 一般化加法モデルを用いたJEPX時間帯価格予測と入札量-価格関数の推定. JAFEE ジャーナル, 14, 8–39.
- [11] Asan, G., Tasaltin, K. (2017). Market efficiency assessment under dual pricing rule for the Turkish wholesale electricity market. Energy Policy, 107, 109–118.
- [12] Bessembinder, H., Lemmon, M. L. (2002). Equilibrium pricing and optimal hedging in electricity forward markets. the Journal of Finance, 57(3), 1347–1382.
- [13] Birge, J. R., Hortaçsu, A., Mercadal, I., Pavlin, J. M. (2018). Limits to Arbitrage in Electricity Markets: A case study of MISO. Energy Economics, 75, 518–533.
- [14] Borenstein, S., Bushnell, J., Knittel, C. R., Wolfram, C. (2008). Inefficiencies and market power in financial arbitrage: a study of California's electricity markets. The Journal of Industrial Economics, 56(2), 347–378.
- [15] Botterud, A., Kristiansen, T., Ilic, M. (2010). The Relationship Between Spot And Futures Prices In The Nord Pool Electricity Market, Energy Economics, 32, 967–978.
- [16] Bunn, D. W., Chen, D. (2013). The forward premium in electricity futures. Journal of Empirical Finance, 23, 173–186.
- [17] Bunn, D. W., Gianfreda, A., Kermer, S. (2018). A trading-based evaluation of density forecasts in a real-time electricity market. Energies, 11(10), 2658, 1–13.
- [18] Eydeland, A., Wolyniec, K. (2003). Energy and power risk management: New developments in modeling, pricing, and hedging (Vol. 206). John Wiley & Sons.
- [19] Fama, E. F. (1970). Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. The journal of Finance, 25(2), 383–417.
- [20] Handika, R., Trück, S. (2012). The relationship between spot and futures prices: An empirical analysis of Australian electricity markets. In 3rd IAEE Asian Conference. [[https://eneken.ieej.or.jp/3rd\\_IAEE\\_Asia/pdf/paper/097p.pdf](https://eneken.ieej.or.jp/3rd_IAEE_Asia/pdf/paper/097p.pdf)]
- [21] Haugom, E., Molnár, P., Tysdahl, M. (2020). Determinants of the Forward Premium in the Nord Pool Electricity Market. Energies, 13(5), 1111, 1–

- 18.
- [22] Haugom, E., Ullrich, C. J. (2012). Market efficiency and risk premia in short-term forward prices. *Energy Economics*, 34(6), 1931–1941.
- [23] Longstaff, F. A., Wang, A. W. (2004). Electricity forward prices: a high-frequency empirical analysis. *The journal of finance*, 59(4), 1877–1900.
- [24] Lucia, J. J., Torró, H. (2011). On the risk premium in Nordic electricity futures prices. *International Review of Economics & Finance*, 20(4), 750–763.
- [25] Maciejowska, K., Nitka, W., Weron, T. (2019). Day-ahead vs. Intraday-Forecasting the price spread to maximize economic benefits. *Energies*, 12(4), 631, 1–15.
- [26] Malkiel, B. G. (2011). The efficient-market hypothesis and the financial crisis. In *Rethinking finance: perspectives on the crisis*, Proceedings of a conference, Russel Sage Foundation. [<https://www.russellsage.org/sites/all/files/Rethinking-Finance/Malkiel.The.Efficient-Market.Hypothesis.and.the.Financial.Crisis.102611.pdf>]
- [27] Matsumoto, T., Endo, M. (2020). Electricity price forecast based on weekly weather forecast and its application to arbitrage in the forward market, Proceedings of 2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE 2021) [in press].
- [28] Matsumoto, T., Yamada, Y. (2021). Simultaneous hedging strategy for price and volume risks in electricity businesses using energy and weather derivatives. *Energy Economics*, 95, 105101.
- [29] Mercadal, I. (2018). Dynamic competition and arbitrage in electricity markets: The role of financial players. Mimeo.
- [30] Nakajima, T. (2019). Expectations for statistical arbitrage in energy futures markets. *Journal of Risk and Financial Management*, 12(1), 14, 1–12.
- [31] Perifanis, T., Dagoumas, A. (2020). Price and Volatility Spillovers between Crude Oil and Natural Gas markets in Europe and Japan-Korea. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(5), 432–446.
- [32] Redl, C., Bunn, D. W. (2013). Determinants of the premium in forward contracts. *Journal of Regulatory Economics*, 43(1), 90–111.
- [33] Redl, C., Haas, R., Huber, C., Böhm, B. (2009). ‘Price Formation In Electricity Forward Markets And The Relevance Of Systematic Forecast Errors’, *Energy Economics*, 31, 356–364.
- [34] Samuelson, P. A. (2016). Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. In *The world scientific handbook of futures markets*, 25–38.
- [35] Veraart, A. E., Veraart, L. A. (2013). Risk premia in energy markets. *Journal of Energy Markets*, 6(4), 91–132.
- [36] Weron, R. (2014). Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. *International journal of forecasting*, 30(4), 1030–1081.
- [37] Woo, C. K., Horowitz, I., Hoang, K. (2001). Cross hedging and forward-contract pricing of electricity. *Energy Economics*, 23(1), 1–15.
- [38] Woo, C. K., Horowitz, I., Olson, A., DeBenedictis, A., Miller, D., Moore, J. (2011). Cross-hedging and forward-contract pricing of electricity in the Pacific Northwest. *Managerial and Decision Economics*, 32(4), 265–279.
- [39] Zhang, F., Sun, Y. Q., Magnusson, L., Buizza, R., Lin, S. J., Chen, J. H., and Emanuel, K. (2019). What is the predictability limit of midlatitude weather?. *Journal of the Atmospheric Sciences* 76(4), 1077–1091.

## 付録A TOCOM 電力先物取組高の推移

図16に、TOCOM 電力先物の月末取組高（ポジション残高）の推移を示す。取組高は、上場開始後、2020年1, 6, 10, 12月に出来高が増えている（左図）。また、右図のとおり、2020年1月には同月・翌月と2020年度の1年間の各限月、2020年6月には2020年度下半期の限月、2020年10月には2020年度下半期と2021年度上半期の限月、2020年12月には、2021年1, 2月の限月における商品の取組高が、それぞれ増加している。流動性が乏しく約定実績が少ないために、取組高の増加が不連続となっている状況が読み取れる。

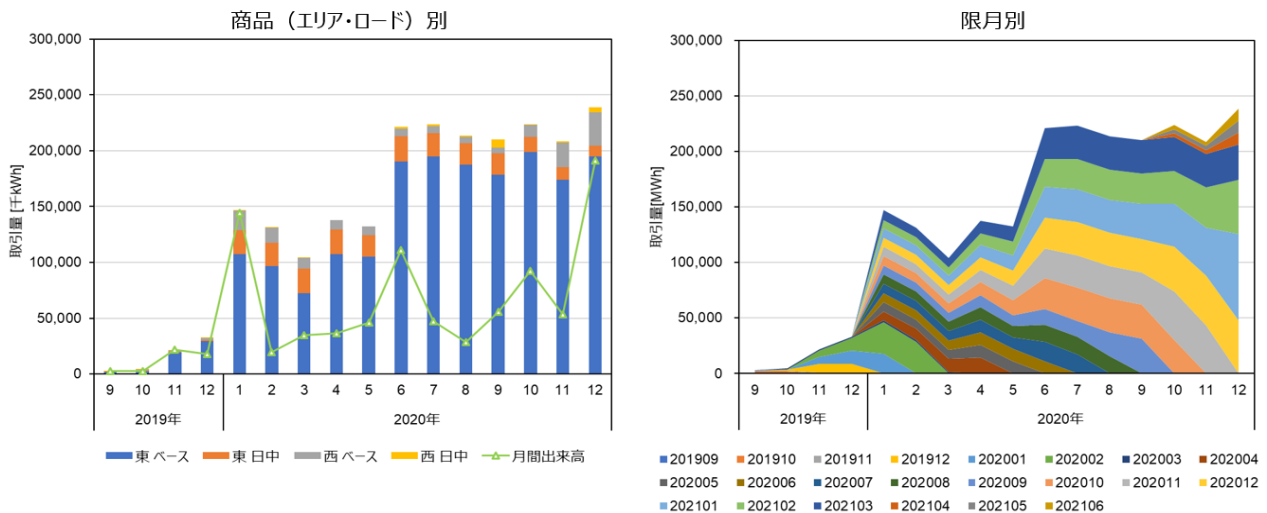


図16 TOCOM 電力先物の月末取組高の推移（左：商品別／右：限月別）

## 付録B 燃料先物価格の推移

図17に、LNG（Platts JKM）と Brent 原油の先物価格推移を示す。両商品ともに、コロナ禍による世界的な景気後退を契機として、2020年2月頃から、価格が急落している。Brent 原油は、2020年5月を境に、負の傾き（バックワーデーション）から、正の傾き（コンタンゴ）に変化している。なお、JKM 価格には、冬期に高くなる季節性が顕著に存在している。これは、LNG は保管コストが高いため、季節別の需給構造を強く反映する（つまり、需要が高くなる冬期に価格が高くなる）ことに由来している[18]。

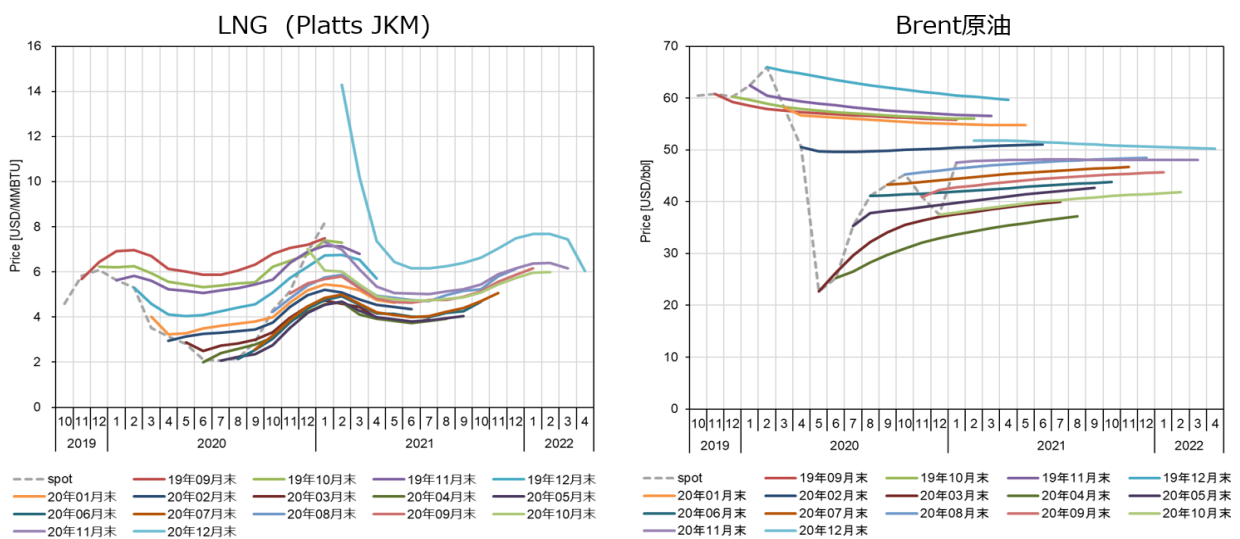


図17 燃料先物価格の推移（左：LNG スポット (Platts JKM) / 右：Brent 原油）

## 付録C フーリエ級数展開の考え方に基づく周期性トレンドのモデル化

本研究では、次のようなフーリエ級数展開の考え方に基づく周期性関数を定義する。

$$f_k(T) = \sum_{i=1}^{n_k} (s_{k,i} \sin \theta_{i,T} + c_{k,i} \cos \theta_{i,T}) + a_k \quad (7)$$

ここで、 $\theta_{i,T} = 2\pi i \times \text{Seasonal}_T / 365.25$ 、 $\text{Seasonal}_T (= 1, \dots, 365(\text{or } 366))$ は1月1日から12月31日までを順番に割り当てるダミー変数、 $a_k, s_{k,i}, c_{k,i}$ は(3)式のOLSから推定される係数であり、 $n_k$ はフーリエ級数展開の次数 ( $n_k \geq 1$ ) を意味する。本研究では、頑健性を確保するため、交差変数の多い項は、当該次数を下げることを考慮し、(3)式中の  $f_k(T)$  のうち、 $k = 1, 2, 3, 4$  の時は  $n_k = 3$ 、 $k = 5, 6$  の時は  $n_k = 2$  と設定した。

なお、季節性トレンドのモデル化には、この他にも平滑化スプライン回帰を用いる手法がある<sup>46)</sup>[8][10]が、フーリエ級数展開のダミー変数を用いることで単純な重回帰モデルとして扱える。これにより、Microsoft® Excel® 等の一般的なビジネス向けソフトのみを用いて、多くの実務者が共用しやすい汎用ツールの実装が可能となる。

## 付録D スポット価格の予測精度

提案する予測モデルのアウトオブサンプルでの当てはまりを確認するため、図 18 に各月末における、翌月のスポット価格予測  $E_t[S_T]$  と先物価格  $F_{t,T}$ 、及び実績スポット価格  $S_T$  の比較を示す。総じて先物価格は、スポット価格よりも高くなっており、提案モデルの予測値は、スポット価格の大まかなトレンドを比較的よく捉えている。

逆に、スポット価格の実績値が先物価格よりも高くなった月（2020年8-9月）では、スポット価格の予測は先物価格より高めの価格を出している。全体的に、提案モデルの予測値と比較してみると、先物価格はスポット価格の構造的な季節変動にあまり追従できていないことが読み取れる<sup>47)</sup>。

なお、参考までに、将来期間において、気温及びJKM価格が予め観測されていると仮定して、2019年10月末時点の日次スポット価格の予測値を求め、これと実績を比較したものを図 19 に示す<sup>48)</sup>。予測価格は、日々の変動を概ね追従できていることが分かる。2020年4月頃から、実績が予測を下回っているのは、コロナ禍での緊急事態宣言の発令等により、需要が過去のトレンドよりも下方シフトしたことが影響していると考えられる。

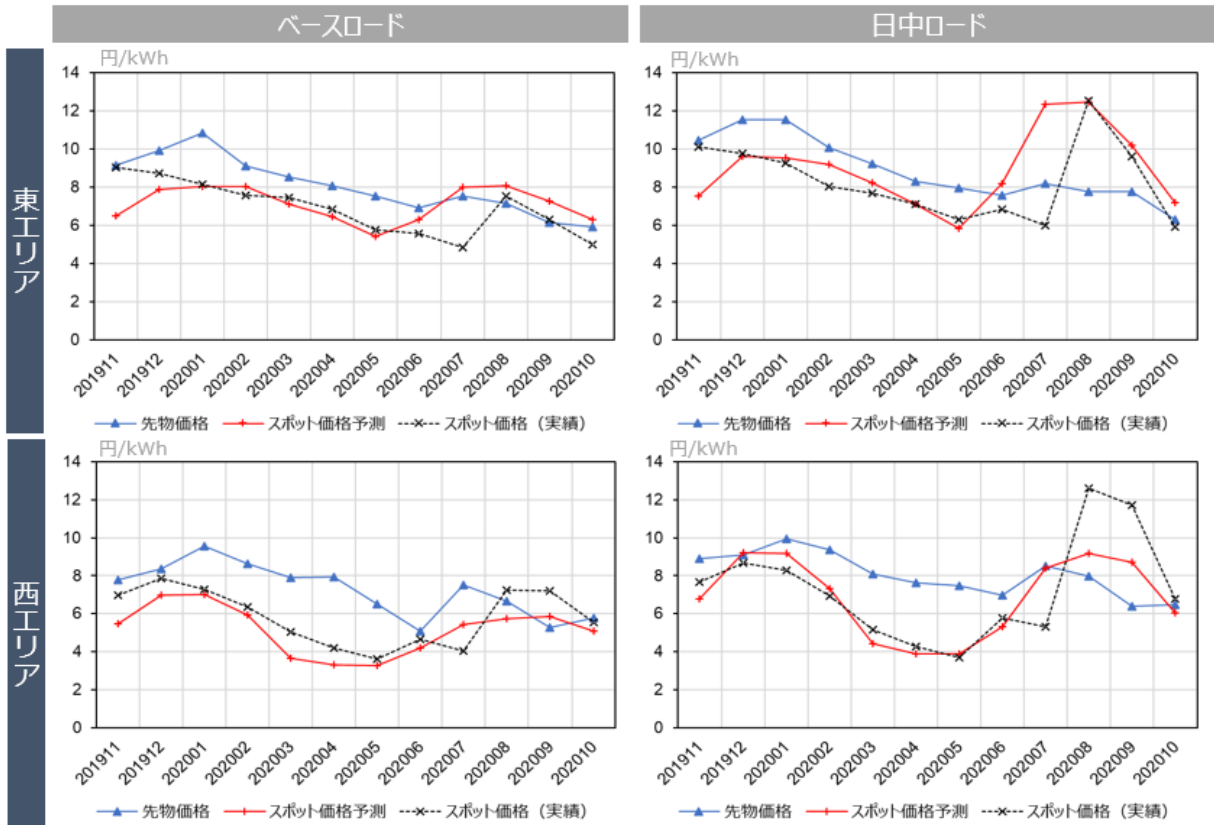
## 付録E リスクプレミアム測定結果詳細

図 20 及び図 21 に、2019年10月から2020年9月までの各月末  $t$  時点における先物価格  $F_{t,T}$ 、スポット価格予測値  $E_t[S_T]$ 、及びリスクプレミアム  $F_{t,T} - E_t[S_T]$  を示す。なお、これを受渡月  $T$  別に集計したものが図 12 である。まず、先物上場開始から半年の期間（図 20）についてみると、全商品とも比較的大きなリスクプレミアムがあったことが分かる（東エリアで1-3円/kWh、西エリアで2-4円/kWh程度）。次に、上場開始半年経過後以降（図 21）については、全体として徐々にリスクプレミアムが縮小してきている傾向が見られる。特に、東エリアの2020年7-8月受渡の先物は、4-5月の足元のスポット価格低下を反映し、5月末（時点  $t$ ）に大きく低下するなど、先物市場は（構造的な季節変動に追従していない一方で）足元の価格に比較的早く反応する傾向が見られる。

<sup>46)</sup> 平滑化スプライン回帰の推定は、統計ソフト R の“mgcv”パッケージを用いて比較的容易に実装できる。本研究は、多くの実務者に活用されることを念頭に、可能な限り、用いるアルゴリズムを簡易にすることに重点を置いている。

<sup>47)</sup> 予測は気温平年値を前提としているため、実際の気温の変動（平年値からのずれ）によっても予測誤差は生じる。

<sup>48)</sup> 予測モデルは、2019年10月末までのデータから構築しているため、アウトオブサンプル期間の検証結果である。



注：各月末時点での JEPX スポット価格予測値・TOCOM 先物価格、JEPX スポット価格実績を比較している。

図 18 1 か月先の月平均スポット価格の予測（アウトオブサンプル）と実績の比較

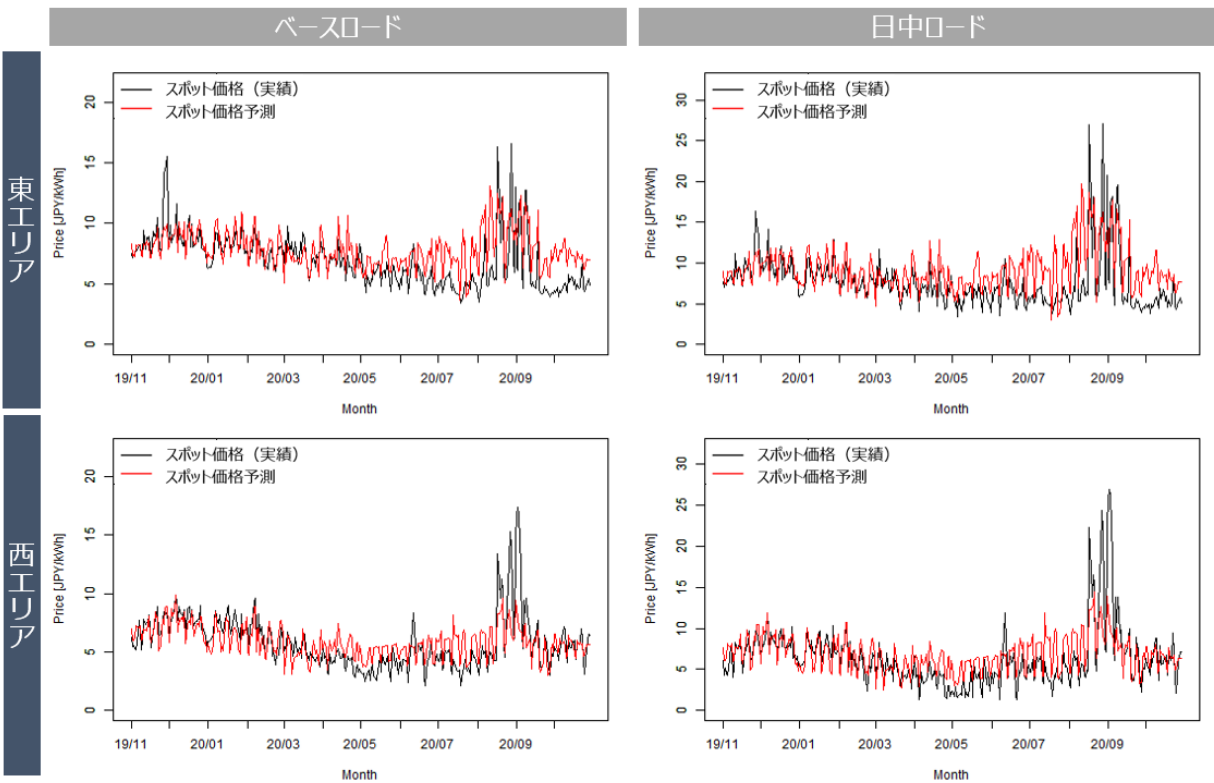
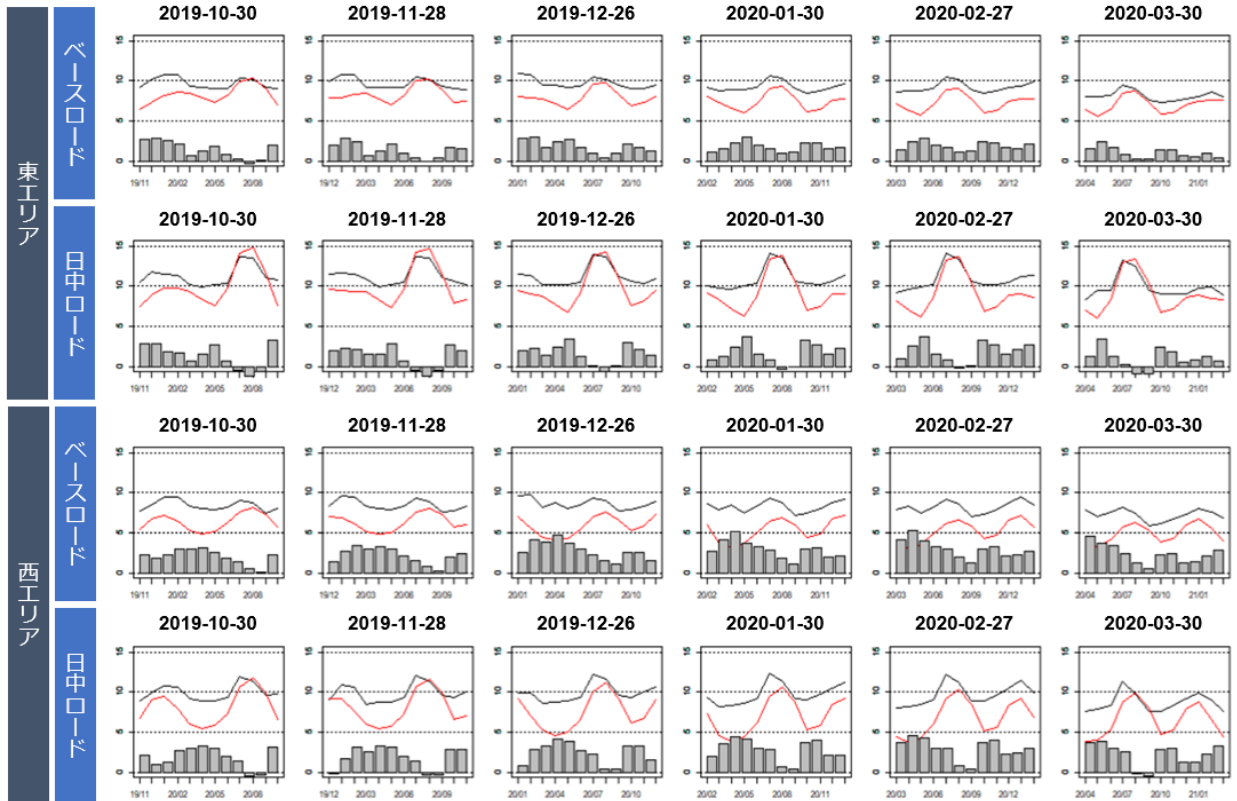
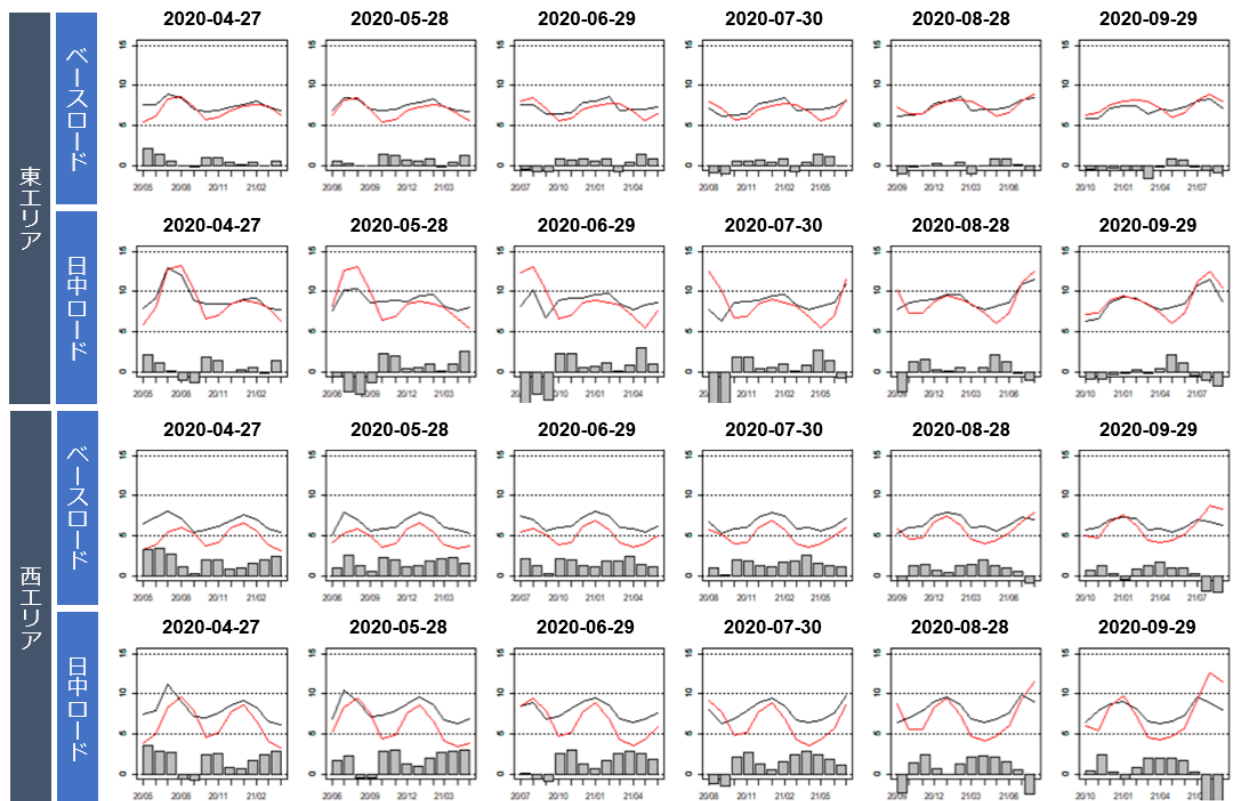


図 19 実績気温等に基づくスポット価格予測（アウトオブサンプル）と実績の比較



注：黒線は先物価格 $F_{t,T}$ 、赤線はスポット価格予測値 $E_t[S_T]$ 、棒グラフはリスクプレミアム（ $t$ 別のグラフで、横軸は $T$ ）を表す。

図 20 リスクプレミアムの推移（各月末：2019.10末-2020.3末）



注：黒線は先物価格 $F_{t,T}$ 、赤線はスポット価格予測値 $E_t[S_T]$ 、棒グラフはリスクプレミアム（ $t$ 別のグラフで、横軸は $T$ ）を表す。

図 21 リスクプレミアムの推移（各月末：2020.4末-2020.9末）

## 付録F リスクプレミアムの期待ペイオフとしての解釈

本研究でのリスクプレミアムは、燃料（JKM）先物と電力先物をペアトレーディング<sup>49)</sup>した場合における期待ペイオフに対応する<sup>50)</sup>。以下、このことについて、簡単な式展開を用いて説明する。

まず、(3)式に対応するスポット価格予測モデルを便宜的に簡略化し、次式のように記述する。

$$S_T = \beta E_t + f(T) + \mathbf{g}(T)^\top \boldsymbol{\epsilon}_T + \eta_T \quad (8)$$

ただし、 $S_T$  は電力スポット価格、 $E_T$  は燃料価格（(3)式の  $JKM_T$  に対応）、 $f(T)$  は気温や燃料に依存しない季節性トレンド、 $\boldsymbol{\epsilon}_T$  は気温残差ベクトル、 $\mathbf{g}(T)^\top$  は気温残差の感応度ベクトルを示す。

ここで、将来期間のスポット価格の期待値は、(8)式の燃料価格に燃料先物価格を、 $\boldsymbol{\epsilon}_t$  および  $\eta_t$  に 0 を代入することにより、次式で得られる。

$$E_t[S_T] = \beta F_{T,t}^{(E)} + f(T) \quad (9)$$

ただし  $F_{T,t}^{(E)}$  は、取引時点  $t$  における受渡時点  $T$  を対象とした燃料先物価格である。

この時、もし、時点  $t$  で電力先物価格  $F_{T,t}^{(P)}$  がスポット価格の期待値  $E_t[S_T]$  より大きく、 $F_{T,t}^{(P)} > E_t[S_T]$  の関係（つまりリスクプレミアムが正）があれば、電力先物  $F_{T,t}^{(P)}$  をショートし、満期まで保有する（スポット価格  $S_T$  で精算される）。この場合の利益（負の場合は損失）は次式となる。

$$\begin{aligned} \pi_{T,t}^{(P)} &= F_{T,t}^{(P)} - S_T \\ &= F_{T,t}^{(P)} - \{\beta E_t + f(T) + \mathbf{g}(T)^\top \boldsymbol{\epsilon}_T\} + \eta_T \end{aligned} \quad (10)$$

同時に、時点  $t$  で燃料先物  $F_{T,t}^{(E)}$  をロングし、満期まで保有（スポット価格  $S_T$  で精算）した場合のペイオフは、次式で表される。

$$\pi_{T,t}^{(E)} = E_T - F_{T,t}^{(E)} \quad (11)$$

以上の電力取引と燃料取引を同時に実施（ペアトレーディング）した場合の最終的なペイオフは、（電力取引 1 単位に対して  $\beta$  単位の燃料取引を行う<sup>51)</sup>ものとして）次式で計算される。

$$\begin{aligned} \pi_{T,t} &= \pi_{T,t}^{(P)} + \beta \pi_{T,t}^{(E)} \\ &= F_{T,t}^{(P)} - \{\beta F_{T,t}^{(E)} + f(T) + \mathbf{g}(T)^\top \boldsymbol{\epsilon}_T + \eta_T\} \end{aligned} \quad (12)$$

このペイオフの期待値は  $\boldsymbol{\epsilon}_T$  及び  $\eta_T$  が 0 となることに留意して、次のように算定される。

$$\begin{aligned} E_t[\pi_{T,t}] &= F_{T,t}^{(P)} - \{\beta F_{T,t}^{(E)} + f(T)\} \\ &= F_{T,t}^{(P)} - E_t[S_T] \end{aligned} \quad (13)$$

これはすなわち、電力先物価格  $F_{T,t}^{(P)}$  の、スポット価格の期待値  $E_t[S_T]$  からの乖離であり、リスクプレミアムの定義そのものである。以上により、リスクプレミアムと電力・燃料先物のペアトレーディングの期待利益が等しいことが示された。

なお、もし  $F_{T,t}^{(P)} < E_t[S_T]$ （つまり、リスクプレミアムが負、もしくは(13)式においては  $E_t[\pi_{T,t}] < 0$ ）であれば、(10)(11)式それぞれで反対ポジションをとることにすれば、 $E_t[\pi_{T,t}]$  の符号は逆転する。つまり、リスクプレミアムの符号によらず、先物取引の収益機会が存在し、その期待収益は、 $|E_t[\pi_{T,t}]| = |F_{T,t}^{(P)} - \{\beta F_{T,t}^{(E)} + f(T)\}|$  と書くことができる。このような投機的な取引戦略の利益は、(8)式の  $\mathbf{g}(t)^\top \boldsymbol{\epsilon}_T + \eta_T$  に相当するリスク（気象変動等、燃料以外の電力価格変動リスク）を引き受けることに対する報酬と解釈することができる。

<sup>49)</sup> 既に、EEX 及び CME において、日本の電力先物と JKM 先物の両方が上場されており、流動性の問題はあるもののペアトレーディングを行える環境自体は整っている。

<sup>50)</sup> 各月末にて翌月受渡の先物取引をする場合には、LNG スポット価格は確定しているため、燃料先物を用いない（ペアトレーディングでなく、電力先物単独の）取引が有効である（6章で実証した取引がこれに該当する）。

<sup>51)</sup>  $\beta$  は電力価格に対する燃料価格の感応度であり、いわゆるデルタヘッジにおける調達単位  $\Delta$  に相当するものである。

電力中央研究所報告

---

[不許複製]

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所  
社会経済研究所長  
東京都千代田区大手町1-6-1  
e-mail [src-rr-ml@criepi.denken.or.jp](mailto:src-rr-ml@criepi.denken.or.jp)

---

発行・著作・公開 一般財団法人 電力中央研究所  
東京都千代田区大手町1-6-1

---

ISBN978-4-7983-1900-1

