

## 研究報告

## 日本卸電力取引市場におけるスポット価格の要因分析

中嶋明宏\*\*・佐藤正志\*\*・吉村昇\*\*

Attribution Analysis of Spot Price  
in the Japanese Wholesale Electricity Market

Akihiro Nakajima\*\*, Masashi Sato\*\* and Noboru Yoshimura\*\*

## Abstract

In electric power market, knowledge of risk factors is essential to the risk management on price variations. Thus, we performed attribution analysis on the spot prices in the Japanese wholesale electricity market by a linear multiple regression model with economical and physical parameters in electricity trades as predictor variables. The analysis shows that the standardized partial regression coefficients as the incidence degree to the spot prices are statistically significant. Furthermore, the week variation, the deepest snowfall and the CIF fuel price are determined as the variation factors of the spot prices at the rate of incidence degree of 40%, 30% and 20%, respectively. It is concluded that the analysis using the proposed model provides the major variation factors and their incidence degree to the spot prices.

## 1. はじめに

1990年頃を初めとして、米国、英国及び北欧などの多くの国々や地域で電力の自由化が進展し卸電力取引所の運用が開始されている。わが国においても、2005年4月に日本卸電力取引所（Japan Electric Power Exchange: 以下 JEPX）が開設され市場を介した電力取引が行われている。一般に、電力自由化市場におけるスポット価格は、電力の需要と供給に関連する様々な要因が複雑に関係しながら不確実性を伴って変動することが知られている。とくに電力には、一般財にはない貯蔵の困難性や発電と消費の同時性、さらに、電力系統における送電容量不足に伴う物流制約といった特徴を持っている<sup>(1)</sup>。また、電力は必需品であるために、大きな価格変動は市場参加者にとって深刻に受け止める必要がある。そのため市場参加者には、従来の総括原価主義による電力価格とは異なり、価格変動リスクの定量的な管理が必要不可欠なものとなっている。このリスク定量化の基礎となるのがリスク要因の把握、すなわち、価格変動要因の定量分析である。

これまでの国内外における電力価格分析では、統計

や数学モデルによる確率的性質に着目した研究<sup>(2),(3)</sup>や、戦略的入札行動分析を主眼に置いたマルチエージェントモデルを適用した研究<sup>(4)</sup>、あるいは、需要と供給の関係を定式化して分析する経済学モデルを適用した研究<sup>(5)~(8)</sup>などが報告され数多くの成果が得られている。

しかしながら、これまでの研究では実際の電力需給の物理的かつ経済的な因子を考慮した価格変動要因の検討はなされているものの、価格形成においてどのような因子がどの程度影響しているのかが直感的に分かりやすく説明されている例はほとんどない。また、統計的な説明変数への検定に不足がある場合や、誤差項の系列相関が存在し、見せかけの有意性を含んだ結果となっている例もある。したがって、筆者らもこれまでに、実態に即した線形重回帰モデルから価格決定要因を検証している<sup>(9)</sup>が、市場動向との整合性が得られるまでには至っていない。

そこで本研究では、JEPXにおけるスポット価格の変動要因について、実際の電力需給に関連する因子を用いて、価格形成においてどのような経済的かつ物理的因子が影響しているのかが直感的にわかりやすい説明変数（例えば、気温や発電燃料価格など）を取り入れた線形重回帰モデルを構築し要因分析を行い、統計的な検定を踏まえて、市場動向との整合性について検討を行う。

本論文は、まず第2章ではスポット価格に及ぼす変

2007年7月17日受理

\*\*秋田大学工学資源学部電気電子工学科, Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University.

動要因の説明を行い、第 3 章では、要因分析に用いる線形重回帰モデルを提案する。さらに第 4 章では、要因分析を行う。第 5 章はまとめである。

## 2. スポット価格に及ぼす変動要因

### 〈2・1〉 JEPX におけるスポット価格

JEPX で開設している市場は、翌日受け渡す電気を取引する「スポット市場」、一定期間後に受け渡す電気を取引する「先渡定型市場」並びに、掲示板への書き込みによる取引の場である「先渡掲示板市場」の合わせて 3 つある。いずれも地域別市場ではなく、全国市場である。この JEPX で取引されている電力は、卸電力全体の 1% 程度と割合が低く、価格変動そのものが直接企業収益に与える影響は今のところ大きくはない。しかしながら、スポット市場における取引量は予想を上回っており、また今後は全面自由化を含めて、市場のさらなる活発化が予想されている。また、先渡市場のような安定的な電源確保を目的とする固定的で標準的な商品設計が可能な取引とは異なり、スポット市場では、需給の最終調整の場として重要な役割を持っており、需給のバランスが崩れるような場合にはとくに価格変動が大きくなり、過度に価格変動リスクが高まることが考えられる。

### 〈2・2〉 スポット価格に及ぼす変動要因

一般に、電力自由化市場のスポット価格に影響を及ぼす要因として、需要と供給に関連する様々な因子が考えられる。例えば、需要の側面から見た因子としては、気温、暦及び GDP が考えられる。気温に関しては、燃料価格や GDP にも影響することがある。暦は平日や土日祝日などの需要変化が起因する。供給の側面から見た因子としては、燃料価格や為替相場が考えられる。また、電力特有な性質として送電容量不足に伴う物流制約などがある。

このように、様々な因子が複雑に関係しながら不確実性を伴ってスポット価格が変動するが、このような因子並びにその影響度合いは、市場取引の形態等により異なるため、明らかにはなっていない。本研究で用いるデータについては、次節で説明する。

## 3. 分析方法

### 〈3・1〉 重回帰分析

様々な因子が複雑に関係しながら変動する変数を定量的に分析する手法の一つに重回帰分析<sup>(10)</sup>がある。本研究では、JEPX におけるスポット価格を目的変数とし、価格に及ぼす様々な変動要因を説明変数とした、線形重回帰モデルにより分析を試みた。重回帰モデル

の関係式を式(1)に、重回帰式を式(2)に示す。

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_iX_i + b + e \quad (e = Y - \hat{Y}) \quad \dots \dots (1)$$

$$\hat{Y} = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_iX_i + b \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 $Y$ : 目的変数、 $X$ : 説明変数( $i \geq 2$ )、 $\hat{Y}$ : 推定値、

$a$ : 偏回帰係数、 $b$ : 回帰定数、 $e$ : 予測誤差(残差)とする。

### 〈3・2〉 検定方法

検定方法は、モデルの当てはまりを表す自由度調整済み決定係数  $R^2$  (以下  $R^2adj$ )<sup>(11)</sup>を用いる。また、各説明変数の寄与の大きさを表す標準偏回帰係数により、スポット価格に及ぼす因子の影響度合いを評価し要因を定量的に明らかにする。さらに、誤差項の系列相関については、ダービン・ワトソン比 (以下  $DW$  比)<sup>(12)</sup>を用いて検定した。

### 〈3・3〉 変動要因と分析データ

本分析に用いたデータを表 1 に示す。

スポット価格<sup>(13)</sup>は、午前 8 時から午後 10 時までを単純平均したシステムプライスである昼間価格を用いた。

気温 (平均気温) と最深積雪は、電力需要の動向を表す指標として、電力需要の多い地点を複数選択後に変数選択法 (総当り法) により選出された 1 地点データを用いた。

週間変動は、平日、土日祝日及び連休による電力需要量の変動を表す指標として連休を 0、日曜日を 1、土曜日を 2、平日を 3 としたダミー変数を用いた。

発電燃料価格は、保険料、運賃や為替を考慮した財務省発表の原油価格である Cost Insurance Freight (以下 CIF) 燃料価格を用いた。また、CIF 燃料価格と市場参加者が燃料を調達した時期にどれだけの時間差があるのかは明らかではない。そこで、スポット価格に対して、1ヶ月前から 2, 3, 4, 5, 6ヶ月前の CIF 価格との相関係数によって時間差を検証した。その結果、5ヶ月前の CIF 燃料価格とスポット価格が強く関係していることがわかった。これは単に、CIF 燃料価格と市場参加者の燃料調達時期による時間差だけではなく、電力会社の収益に影響を与える燃料費調整制度が大きく影響していることが考えられる。本研究では、相関が一番強い 5ヶ月前の CIF 燃料価格 (月次) を用いた。

発電機停止は、電力供給量不足による取引価格上昇が考えられるため、とくにベース電源としての重要性から、わが国すべての原子力発電所における定期検査

を1, 緊急停止時を3としてすべての累積値をダミー変数として用いた。これにより, 想定外の供給停止の影響を表した。

電力に特有な因子である物流制約の指標として, 送電混雑による市場分断件数を用いた。この市場分断件数のほとんどが東京電力と中部電力間の周波数変換所(以下FC)で起こっていることが報告されており<sup>(14)</sup>, とくにその中でも空容量超過の因子が大きく影響することが考えられるため, 本分析では空容量超過による市場分断件数を用いた。

なお, 分析期間は, 大寒波により予想以上に需給が逼迫し価格変動が顕著に現れた冬季(2005年10月～2006年2月末)とした。分析には, 統計解析パッケージであるR(The R Foundation)を用いた。

表1 分析データ

Table 1. Analysis Data.

スポット価格(目的変数)	昼間価格(午前8時～午後10時)
気温・最深積雪 (説明変数)	変数選択法により統計的優位に選出された1地点(札幌)の平均気温と最深積雪
週間変動(説明変数)	連休0, 日曜日1, 土曜日2, 平日3
発電燃料価格(説明変数)	CIF原油価格(5ヶ月遅れ)
発電機停止(説明変数)	原発(定期1点, 緊急3点)の累積値のダミー変数
市場分断(説明変数)	FCによる空容量超過件数 <sup>*</sup>

※出所: 制度改革評価小委員会報告書  
(公正取引委員会電気事業者アンケート(平成18年3月))

#### 4. 分析結果及び考察

##### 〈4.1〉 予備的データ分析

重回帰分析により要因分析を行う場合には, 誤差項の系列相関や, 扱うデータ変数相互間の相関に注意するとともに, 極力少ない説明変数によって, 最適なモデルを構築する必要がある。

前節でも述べたように, 説明変数として取り上げている気温および最深積雪データには, 暖房用電力や融雪用電力といった気象的事象による共通的な要因が含まれると考えられる。このため, スポット価格に対して相関が高い最深積雪をモデルに取り込み, 気温の説明変数は強制的に取り除いた。以下に, モデルの概略を次式に示す。

モデル = 最深積雪+週間変動+

CIF燃料価格+発電機停止+市場分断・・・(3)

式(3)の線形重回帰モデルを分析した推定結果を表2に示す。また, 実測値と推定結果を図1に示す。

表2 予備的データ分析の推定結果(DW比改善前)

Table 2. Estimated Results of Preliminary Analysis.

$R^2_{adj}$	F値	P値	DW比	
0.86	185	5.3E-61	1.22	
偏回帰係数 ()内はt値を示す				
最深積雪	週間変動	CIF燃料価格	発電機停止	市場分断
0.046 (6.3)	1.38 (11.0)	0.0003 (3.3)	-0.024 (-0.69)	0.0021 (4.3)
標準偏回帰係数				
最深積雪	週間変動	CIF燃料価格	発電機停止	市場分断
0.58	0.55	0.52	0.09	0.0002

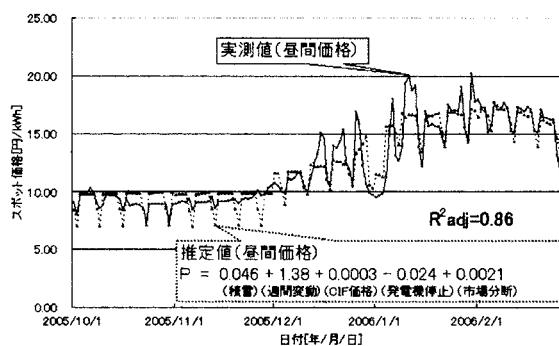


図1 実測値と推定結果(DW比改善前)

Fig.1. Observed Value and Estimated Results.

表2の予備的データ分析の推定結果より, 重回帰モデルの当てはまりを示す $R^2_{adj}$ は, 0.86であり非常によい当てはまりを示している。図1の実測値に対して推定値の値動きがよく連動していることがわかる。

説明変数の有意性について検定(t検定)すると, 最深積雪, 週間変動及びCIF燃料価格のt値は, 2以上と有意であることが確認できたが, 発電機停止並びに市場分断のt値が2よりも小さく, 統計的に有意でないことがわかる。F値は185であり, F分布の1%点よりも高くF検定による「説明変数全てが目的変数を説明しない」とする帰無仮説が棄却される。

誤差項の系列相関に関して, DW比を用いた検定を行った。このDW検定では, DW比が0以上4以下の値をとり, 検定不能領域を含む臨界値(上限 $du$ , 下限 $dl$ )を境に判断する。DW比が任意の有意水準において $du \leq DW \leq 4-du$ の範囲内であれば推定の妥当性が保証されるが,  $du$ ,  $4-du$ の臨界値から外れた場合には, 誤差項に正または負の自己相関があると判断される。分析の結果, 有意水準5%の上限臨界値(データ数 $n=151$ , 説明変数 $k=5$ ) $du=1.802$ となり, DW比1.22

$\leq du$  の関係になり、正の自己相関があると判断される。

これによって、 $t$  値や  $F$  値に基づく説明変数の統計的有意性については、本来有意でない推定結果を有意であると見なす「見せかけの有意性」である可能性が高い。そこで本研究では、次節において、コ克蘭・オーカット法<sup>(15)</sup>を用いて  $DW$  比の改善を行った推定結果について示す。

#### 〈4・2〉本分析結果

誤差項が、一階の正規マルコフ過程に従っているときにこれを修正して有効な推定量を得る方法としては、コ克蘭・オーカット法がよく用いられる。このコ克蘭・オーカット法によって  $DW$  比を改善した推定結果を表3に示す。同表より  $DW$  比は、改善前の1.22から1.817と改善され、 $du(1.802) < DW$  比(1.817)の関係から、「誤差項間に系列相関がある」とする帰無仮説が棄却され、 $t$  値や  $F$  値に基づく説明変数の統計的有意性を示すことができる。

同表より、 $R^2_{adj}$  が0.78 ( $DW$  比改善前0.86)と高い当てはまりを示した。このように極力少ない説明変数によって、最適なモデルを構築した線形重回帰モデル式による本分析においても、高い精度で推定できることがわかった。

次に、スポット価格に対する各説明変数の影響度合いを図2に示す。同図の標準偏回帰係数から、最深積雪が0.52と高く、全体の32%を示していることがわかる。また、週間変動が0.64と最も高く、全体の40%程度を占めており、強く影響していることがわかる。CIF燃料価格は0.3と高く、全体の20%程度を占めていることがわかる。

また、統計的な有意性を  $t$  値により検証した結果、上述した要因全てにおいて、2(絶対値)以上であり、モデル式における説明変数の妥当性を示すことができた。

一方、発電機停止(原子力)の標準偏回帰係数は-0.04と非常に小さく、全体の3%であることがわかる。この発電機停止に関しては、緊急停止により、供給量の低下に伴うスポット価格の高騰を仮定してモデルに取り込んだものの、本分析結果からは、標準偏回帰係数の値が小さいことに加えて、負の値を示すことから、定性的に考えられる発電機停止による価格高騰への影響は見られなかった。また、 $t$  値においても、2(絶対値)以下となり、統計的な有意性を示さなかった。送電混雑による市場分断を表すFCにおける空容量超過は0.11と影響度合いが小さく、全体の7%と小さいことがわかる。ただし、統計的な有意性に関しては、 $t$  値が3.05と

表3 DW比改善後の本分析推定結果

Table 3. Estimated Results.

$R^2_{adj}$	F 値	P 値	DW 比	
0.78	106	2.2E-46	1.817	
偏回帰係数 ( )内は $t$ 値を示す				
最深積雪	週間変動	CIF 燃料価格	発電機停止	市場分断
0.049 (7.14)	1.18 (9.47)	0.0002 (5.07)	-0.06 (-1.50)	0.002 (3.05)
標準偏回帰係数				
最深積雪	週間変動	CIF 燃料価格	発電機停止	市場分断
0.52	0.64	0.30	-0.04	0.11

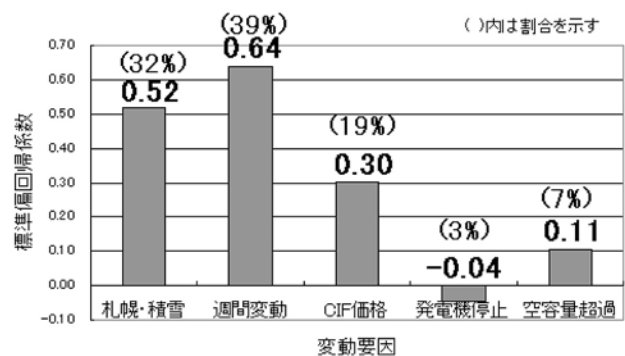


図2 変動要因の影響度合い

Fig. 2. Incidence Degree of Variation Factors.

高く、説明変数として妥当であることがわかる。

#### 〈4・3〉考察

以上の分析結果より、線形重回帰モデルに取り込んだ因子から、曜日依存による週間変動がスポット価格に対してより強く影響を及ぼしていることがわかる。すなわち、電力需要の側面から見た産業活動や家庭生活習慣等による曜日の周期的な事象がスポット価格の要因として強く依存することを示している。また、最深積雪の影響が強く、とくに大寒波による融雪用電力や暖房用電力の需要増加が起因しているものと考えられる。この最深積雪には、気温の影響も含まれていることは〈4・1〉で既に述べている。したがって本結果は、降雪や予想を上回る気温低下による電力需要の増加がスポット価格変動の要因として強く依存していると考えられる。一方、電力供給の側面から見た因子の一つであるCIF燃料価格は、スポット価格に対して20%程度の影響があるとともに、とくに市場参加者の燃料調達時期と実際の発電使用時期による時間差、並びに、電力会社の収益に影響を与える燃料費調整制度によつ

て5ヶ月の遅れがあることが考えられた。

これらは、冬季シーズン前の暖冬予想から、例年がない想定外の大寒波（主に日本や韓国）となったために、極東市場での原油とLNG（液化天然ガス）の需給が相当逼迫した<sup>(16)</sup>ことによる原油高が主な背景にあると考えられる。これによって、一般電気事業者やPPS（特定規模電気事業者）が燃料不足に伴う供給力不足懸念<sup>(17)</sup>を踏まえて買い札を増やし、スポット調達により電力をまかなうようになったことが考えられる。また同時に、一般電気事業者の売り札が大きく減少したために、これまでの買い手市場から売り手市場に大きく変化し、価格が高くて量を買わざるを得ない状況になり、スポット価格が高騰したと考えられる。参考までに、JEPXにおける売り札量並びに買い札量の推移を図3に示す。同図より、12月中旬を境に、市場の売り札と買い札量が大きく変化したことが分かる。

一方、発電機停止については、統計学的に説明することができなかった。これは、突発的な事象に対して戦略的な入札行動のために、緊急等の計画外停止の影響が日次単位ではなく、より短時間（例えば1商品毎）に影響を及ぼしていることが原因として考えられる。そのため、スポット価格や発電機停止のダミー変数に日次データを用いている本分析では、影響度を明らかにすることができなかったと考えられる。また、送電混雑による市場分断を表すFCの空容量超過は、統計的な有意性はあるものの、例えば電気新聞<sup>(18)</sup>で指摘されている内容とは異なり、その影響度は著しく小さい。これは、主に月次データを用いていることによるデータ制約が考えられる。また、空容量超過に加えて、最低潮流制約、ステップ制約などがあるため、的確なデータを用いた分析には至らなかったことが考えられる。

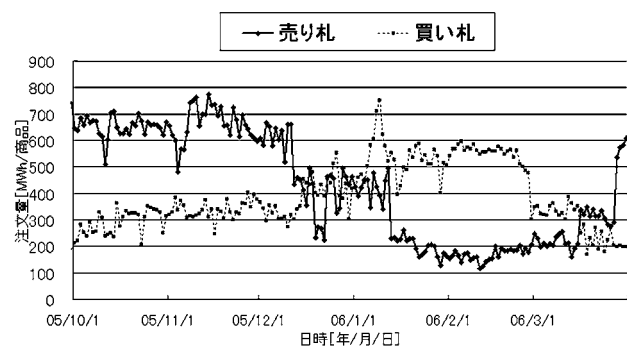


図3 売り札量と買い札量の推移

Fig. 3. Changes in Selling bill and Buying bill.

## 5. おわりに

電力需給に関連する因子を考慮した上で、経済的・物理的な説明変数を取り入れた線形重回帰モデルを構築し、2005年冬季におけるスポット価格の要因分析を行った。以下に結果を示す。

- (1)直感的にわかりやすい経済的かつ物理的な説明変数を取り入れた線形重回帰モデルにより推定した結果、 $R^2_{adj}$ は、0.86 ( $DW$ 改善前)と非常によい当てはまりを示し、モデルの妥当性を確認できた。
- (2)誤差項に正の自己相関があったため、 $t$ 値や $F$ 値に基づく説明変数の「見せかけの有意性」を改善し、的確な統計的検定を行った。
- (3)スポット価格に及ぼす要因として、週間変動、最深積雪、CIF燃料価格であることがわかった。また、その影響度合いの割合は、順に40%、30%、20%であることがわかった。

今後は、更なるモデルの高精度化を行う予定である。また、原子力発電機停止に関しては統計的に有意ではなく、また、その影響度合いは負となり定性的に考えられる影響とは整合がとれなかったため、説明変数としての妥当性について再検討する必要がある。さらに、市場分断の影響に関しては、統計的には有意と判断されたが、市場動向との整合性を得ることが出来なかったため、説明変数としての妥当性ととも、数量化の問題も含めて再検討する予定である。

## 参考文献

- (1) 土方薫 (2004) : 「電力デリバティブ」, シグマベイスキャピタル, pp23-25.
- (2) 後藤 (2004) : 「電力価格ボラティリティの分析-米国, 北欧および豪州市場の計測と比較-」, 電力中央研究所報告, Y03006.
- (3) 熊谷, 佐藤, 吉村 (2006) : 「自由化市場における電力価格への一因子平均回帰式の適用性」, 電学論 B, 126, 10, pp.1058-1064.
- (4) 下村, 最所, 藤井, 山地 (2004) : 「マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析」, 電学論 B, 124, 2, pp.281-290.
- (5) S. Vucetic, K. Tomsovic, and Z. Obradovic (2001) : “Discovering Price-Load Relationships in California’s Electric Market”, *IEEE Trans. Power System.*, Vol.12, No.2, pp.280-286.
- (6) 宮内, 竜口, 三澤 (2004) : 「カリフォルニア電力市場価格の回帰分析」, 電学論 B, 124, 2,

pp.199-206.

(7) 山口 (2006) : 「電力需給の状況を考慮した卸電力価格変動の基礎検討」, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PE-06-125/PSE-06-125.

(8) 和地, 福留, 陳, 牧野 (2006) : 「電力市場における約定価格の要因分析法」, 電学論 B, 122, 11, pp.1058-1064.

(9) 中嶋, 佐藤, 吉村 (2006) : 「日本卸電力取引市場におけるスポット価格の重回帰分析」, 平成 18 年度電気関係学会東北支部連合大会, 1H1, p279.

(10) 菅民郎 (2001) : 「Excel で学ぶ多変量解析入門」, オーム社,p110.

(11) 蓑谷千鳳彦(1997):「計量経済学」,多賀出版,p98.

(12) 蓑谷千鳳彦(1997):「計量経済学」,多賀出版,p169.

(13) 日本卸電力取引所 HP : <http://www.jepx.org/>.

(14) 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会 制度改革評価小委員会(第9回)「制度改革評価小委員会報告 参考資料集」, (H18/5/22).

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g60530dj.html>.

(15) 廣松, 池田, 藤原, 若林 (1988) : 「計量経済分析再考 -より信頼性の高いモデル作りのための推定手続き-」, 内閣府経済社会研究所, 経済分析第 112 号, p97.

(16) 電気新聞 (2006) : 2006 年 1 月 16 日発行, 3 面 「電力市場ウィークリー」.

(17) 電気新聞 (2006) : 2006 年 1 月 30 日発行, 3 面 「電力市場ウィークリー」.

(18) 電気新聞 (2005) : 2005 年 12 月 19 日発行, 3 面 「電力市場ウィークリー」.