

先進諸国における電力一日前市場の 価格変動の特徴について

松田 年弘・西藤 真一¹⁾

キーワード：電力価格，一日前市場，価格分布，モデル適合度

Key word：electricity price, day ahead market, price distribution, goodness of model fitting

1. 目 的

電力取引所（Power Exchange）とは組織化された卸電力市場を指し，卸電力市場とは発電事業者および小売供給事業者等が電力の売買を行う場のことである．卸電力市場は，電気の物理的な需給時点からどれだけ遡った時点で取引が行われるかによって細分類され，一日前市場（Day Ahead Market）とは文字通り一日前に電力取引を行う市場を指し，価格は需要曲線と供給曲線の交点で決定されることが多い．電力取引所の一日前市場における取引量は，何らかの規制がない限り，全電力需要量の高々約 20% であるが，価格の水準やその変動の性質が事業者に与える影響は少なくないと考えられる．その第一の理由は，垂直統合型の事業構造を持たない新規参入者にとって，卸電力市場を利用する必要性は一般に高いからである．第二に，他のエネルギー市場と同様に，電力取引所の価格水準は，取引所を通さない卸電力の相対取引においても指標として用いられることがある

1) 鳥根県立大学 総合政策学部

からである。

本論文の目的は、公開された価格データを用い、わが国および先進工業諸国の電力取引所における一日前市場の価格変動の大きさとその性質について、価格分布指標および価格変動モデルへの適合度を用いて分析することである。具体的には、はじめに需給曲線モデルから近似的に既知の4種類の価格変動モデルを導出する。次に、①各電力取引所の価格分布指標（平均、分散、歪度、尖度）、および②各電力取引所の価格データに4種類の価格変動モデルを適合させた結果から、各電力取引所の特徴、なかでもわが国の電力取引所（JEPX）の価格変動にどのような特徴があるのかを調べる。更に、各電力取引所の価格分布指標（歪度と尖度）と4種の価格変動モデルに対する適合度との関係を理論的に考察し、その後に両者の整合性を計算結果から検討する。また、価格データにジャンプ現象付きの平均回帰モデルを適合させる場合に幾つかの難点が見れるが、それらの難点を緩和するための工夫を検討かつ実行する。

2. 価格変動モデルの需給曲線モデルからの導出

本論文で電力価格データに適合させる価格変動モデルは、平均回帰モデル（Mean Reverting Processes：以下「MR」）、ジャンプ付平均回帰モデル（Mean Reverting Processes with Jumps：以下「MRJ」）、幾何平均回帰モデル（Geometric Mean Reverting Processes：以下「GMR」）、ジャンプ付幾何平均回帰モデル（Geometric Mean Reverting Processes with Jumps：以下「GMRJ」）の4種である。これらのモデルは金融工学や既存の電力市場研究でもよく利用されているものであるが（Pilipovic, 1998）（Johnson & Barz, 1999）（Knittel & Robert, 2001）、本稿では、これらの4種モデルを需給曲線の交点により単一価格を決める需給曲線モデル（Supply Demand Model）から導出する。その導出方法は基本的に Barlow（2002）のそれと

同じものである。

Barlow は、価格非弾力的な需要量 $q(t)$ が (1) 式の平均回帰モデル (Vasicek モデルまたは Ornstein-Uhlenbeck 過程) に従い、供給曲線が $S = a_0 - b_0 p^\alpha$ と表現できると仮定した (a_0, b_0 は任意の定数である)。

$$(1) \quad dq(t) = k(\mu - q(t))dt + \sigma dw(t)$$

ここで、 $q(t)$ は t 時点の需要量、 k は回帰速度、 μ は価格の回帰水準、 σ はドリフトの標準偏差、 $w(t)$ は標準ウィーナー過程を示している。

そして、Barlow は $\alpha = 1$ 、すなわち供給曲線が線形関数の時、 $p(t)$ を t 時点の価格とすると、その価格変動は (2) 式の平均回帰モデル (OU 過程) に従うことを指摘している。ただし、(2) 式では供給曲線を $p = a_1 + b_1 S$ と書きなおしている (a_1, b_1 は任意の定数)。

$$(2) \quad dp(t) = k(b_1 \mu + a_1 - p(t))dt + b_1 \sigma dw(t)$$

我々は、逆供給曲線が一般の指数関数、すなわち $p = a_2 e^{b_2 S}$ と表現できる時 (a_2, b_2 は任意の定数)、 $\ln p(t)$ がやはり平均回帰モデル (OU 過程) に従うことを、簡単に導けることを示す。需給均衡条件から $S = q(t)$ 、これから $p(t) = a_2 e^{b_2 q(t)}$ であり、対数をとると $\ln p(t) = b_2 q(t) + \ln a_2$ である。従って、伊藤の公式を用いると (1) 式から $d(\ln p(t)) = b_2 \kappa(\mu - q(t))dt + b_2 \sigma dw(t)$ が得られ²⁾、 $\ln p(t) = b_2 q(t) + \ln a_2$ を代入すると、

2) $p(t) = a_2 e^{b_2 q(t)}$ に伊藤の公式を用いると、

$$\frac{d(p(t))}{p(t)} = [k(b_2 \mu + \ln a_2 - \ln(p(t))) + \frac{1}{2} b_2^2]dt + b_2 \sigma dw(t) \text{ と GMR の別表現となる。}$$

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

$$(3) \quad d(\ln p(t)) = k(b_2\mu + \ln a_2 - \ln p(t))dt + b_2\sigma dw(t)$$

となる。これは $\ln p(t)$ についての OU 過程にほかならない。

更に、突然の需要量増加（需給逼迫）が発生するという現象を組み込むために、 $q(t)$ が (4) 式のジャンプ付平均回帰モデルに従うと仮定しよう。

$$(4) \quad dq(t) = k(\mu - q(t))dt + \sigma dw(t) + z_1dB(t)$$

ここで、 $B(t)$ は需給逼迫が起こる確率を λ とするベルヌーイ過程であり、 z_1 は正規分布 $N(\mu_j, \sigma_j^2)$ に従うジャンプの水準 (size) を示している。供給曲線が $p = a_1 + b_1S$ の時、(4) 式から (5) 式が得られる。ここで、 z_1 は正規分布 $N(b_1\mu_j, b_1^2\sigma_j^2)$ に従うジャンプ水準である。

$$(5) \quad dp(t) = k(b_1\mu + a_1 - p(t))dt + b_1\sigma dw(t) + z_1dB(t)$$

結局、逆供給曲線の形状および突然の需要量増加（需給逼迫）の有無によって、需給曲線モデルから (6)～(9) の 4 種類の価格変動モデルが得られる。ただし、定数パラメーターは整理・統合して表示している。

$$(6) \text{ モデル 1 (MR)} \quad : dp(t) = k(\mu - p(t))dt + \sigma dw(t)$$

$$(7) \text{ モデル 2 (MRJ)} \quad : dp(t) = k(\mu - p(t))dt + \sigma dw(t) + z_1dB(t)$$

$$(8) \text{ モデル 3 (GMR)} \quad : d(\ln p(t)) = k(\mu - \ln p(t))dt + \sigma dw(t)$$

$$(9) \text{ モデル 4 (GMRJ)} \quad : d(\ln p(t)) = k(\mu - \ln p(t))dt + \sigma dw(t) + z_1dB(t)$$

これらのモデルは、需要曲線の価格非弾力性および供給曲線が時間に依存しないこと³⁾など、幾つかの前提に依存した粗い近似的なモデルであ

る。ここで我々が強調したいことは、4種のモデルを需給曲線モデルから導出したことにより、それぞれのモデルがどのような価格変化をジャンプ現象として認識するのかを直感的に解釈できることである。価格変化が線形供給曲線上にあると近似できれば、モデル2 (MRJ) はそれをジャンプと認識しない。一方、価格変化が指数型供給曲線上にあると近似できれば、モデル4 (GMRJ) はそれをジャンプと認識しない。

3. 対象と分析方法

3.1 分析対象とした電力取引所

需要曲線と供給曲線の交点により単一価格を決める入札ルール（シングルプライスオークション）を採用する一日前市場を持つ取引所を分析対象とした。具体的には、JEPX（日本）、BELPX（ベルギー）、EEX（ドイツ）、EXAA（オーストリア）、IPEX（イタリア）、Pownext（フランス）、NSW（オーストラリア）である。なお、Nord Pool（北欧四カ国）もシングルプライスオークションを採用する欧州最大の一日前市場を持つが、水力を主電源とするため、他の電力取引所に比べて、価格の平均回帰傾向が弱いことから分析の対象外とした。第2章で述べたように、本稿で用いる4種の価格変動モデルは価格の平均回帰傾向を前提としているからである。

各電力取引所の取引量、取引量が各国の全需要量に占める比率、取引の開始年度は表1のとおりである。JEPX, BELPX, Pownext, EEX, EXAA

-
- 3) 幾つかの電力市場の実証研究では、供給曲線も時間に応じて移動することが確認されている（松田・吉川, 2001）（山口, 2007）。供給曲線の移動を考慮する場合、同様な価格変動モデルを得るためには、供給曲線が平行移動し、需要曲線との距離が平均回帰過程に従うものと仮定すること等が必要となる。また、供給曲線と需要曲線の双方が線形であれば、MRとMRJにおける需要曲線の価格非弾力性という仮定は緩めることができる。

表 1 各電力取引市場の概要

国名	取引所名	国内総需要量 (TWh)	1 日前市場		取引 開始年
			取引量 (TWh)	総需要比	
ベルギー	BELPX	92	7.6	8.2%	2006
フランス	Powernext ^(注1)	489	44.2	9.0%	2001
オーストリア	EXAA	66	2.3	3.4%	2002
ドイツ	EEX ^(注1)	569	117.9	20.7%	2000
イタリア	IPEX	346	329.9	95.3%	2004
オーストラリア	NSW ^(注2)	79	78.4	99.4%	1996
日本	JEPX	1061	3.8	0.4%	2005

注 1：2009 年から EPEX（EEX と Powernext の共同出資による電力取引所）に統合化されている。

注 2：NEMMCO が運営する NEM（全国電力取引市場）のうち、ニュー・サウス・ウェールズ州の市場。2009 年 7 月から NEMMCO に代わって Australian Energy Market Operator（AEMO）が電力取引を行っている。

（出所）International Energy Agency website “Monthly Electricity Statistics Archives”, Australian Competition and Consumer Commission (2008) *State of the energy market*, ECORYS Nederland BV (2008) *Review and Analysis of EU Wholesale Energy Markets*, 各取引市場ウェブサイトから作成。

は任意参加型市場，NSW（NEM）は強制参加型市場，IPEX は任意参加型市場であるが，シングルバイヤーシステムのもとで取引量の総需要比は高くなっている。

3.2 対象データ（単位と期間）

各電力取引所における 2007 年の公開価格データを対象とした。JEPX と NSW は 30 分単位で価格を決定し，他の電力取引所は 1 時間単位で価格を決定している。本論文においては，①1 時間単位の価格（JEPX と NSW は 1 時間の単純平均価格），および②1 日を 5 つに分割した時間帯単位の平均価格の双方について，各種の計算や分析を実行した。1 日の時間帯への分割は，JEPX のそれに準拠して，daytime として 8 時～12 時・17 時～22 時，peak として 13 時～16 時，night として 23 時～7 時とした。

1 時間単位の価格のみならず時間帯単位の価格について分析を実行した理由は以下のとおりである。Clewlow & Strickland (2000) は、電力価格データにジャンプ付平均回帰モデルを最尤法により適合させた場合、ジャンプに関する母数は最もサイズが小さく頻度の大きいジャンプ要素に収束する傾向があることを指摘している。比較的に大きなサイズのジャンプ要素の抽出を望む場合、一定時間の平均価格に同モデルを適合させることが経験的に有効なためである（松田・手塚・吉川，2002）。

図 1～2 に示すように、2007 年は原油等の発電燃料価格が上昇した 1 年間であった。詳細には、2004 年から強い上昇を示した原油価格は、2006 年第 4 四半期と 2007 年第 1 四半期に若干下落したものの、2007 年第 2 四半期から上昇に転じ、同年 7 月以降は最高値を更新し続けた（エネルギー白書，2008）。従って、発電コストの上昇に伴い、電力価格の回帰水準をはじめとした需給構造の変化が 2007 年の間に生じた可能性が高い。このため、1 年間を 2 カ月×6 期間に分割して、期間ごとに後述する分布指標の計算、および各価格変動モデルをデータに適合させた場合の母数推定等を実施した。

図 1 原油価格の推移
(2007 年 CIF 価格)

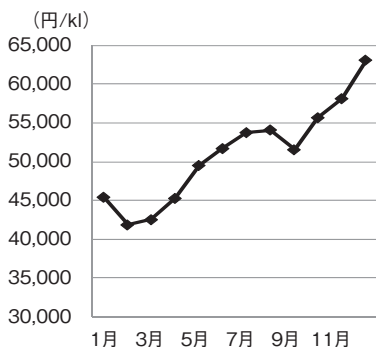
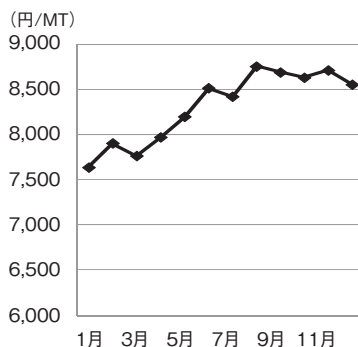


図 2 LNG 価格の推移
(2007 年 CIF 価格)



3.3 基礎的な分布指標の計算

6 期間ごとに、各電力取引所の価格平均値および標準偏差を円換算ベースで求めた。円換算にあたっては、日本銀行の外国為替相場状況のデータを用いた。また、分布の形状の指標となると歪度と尖度をやはり 6 期間ごとに求めた。

3.4 価格変動モデルの電力価格データへの適合（最尤法）

最尤法を用いて、第 2 章で需給曲線モデルから導出したモデル 1（平均回帰モデル：MR）、モデル 2（ジャンプ付平均回帰モデル：MRJ）、モデル 3（幾何平均回帰モデル：GMR）、モデル 4（ジャンプ付幾何平均回帰モデル：GMRJ）の 4 種モデルを電力価格データに適合させた。モデル選択基準の指標としては、BIC（ $= -2 \times \text{最大対数尤度} + \text{母数の数} \times \text{データ数の自然対数}$ ）を用いた。

最尤法の適用にあたっては、モデル 1～モデル 4 を離散化して、尤度関数を導いた。この時、各モデルの BIC を比較可能とするために、 $p(t)$ が従う条件付確率を求めてから尤度関数を導いた。

はじめに (6) 式を離散化する。 $F(t, p(t)) = e^{\mu} p(t)$ と定義する。ここで、 $p(t)$ と定数 k は (6) 式を満たすものとする。 $\frac{\partial F}{\partial t} = k e^{\mu} p(t)$, $\frac{\partial F}{\partial p(t)} = e^{\mu}$, $\frac{\partial^2 F}{\partial p(t)^2} = 0$ なので、伊藤の公式を用いると、

$$\begin{aligned} F(t, p(t)) - F(0, p(0)) &= e^{\mu} p(t) - p(0) \\ &= \int_0^t \left[\frac{\partial F}{\partial t} + k(\mu(s) - p(s)) \frac{\partial F}{\partial p(t)} + \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{\partial^2 F}{\partial p(t)^2} \right] ds \\ &\quad + \int_0^t \sigma \frac{\partial F}{\partial p(t)} dw(s) = \int_0^t k e^{\mu} \mu(s) ds + \int_0^t \sigma e^{\mu} dw(s) \end{aligned}$$

これを $p(t)$ について整理すると、

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

$$p(t) = e^{-kt} p(0) + \int_0^t k e^{-k(s-t)} \mu(s) ds + \int_0^t \sigma e^{-k(s-t)} dw(s)$$

さらに、 $p(t-1)$ と $p(t)$ の漸化式の形にすると、

$$p(t) = e^{-k} p(t-1) + \int_{t-1}^t e^{-k(s-t)} k \mu(s) ds + \int_{t-1}^t e^{-k(s-t)} \sigma dw(s)$$

ここから (10) 式が得られる。

$$(10) \quad p(t) = \alpha_t + \beta p(t-1) + \varepsilon_t$$

$$\text{ただし, } \alpha_t = \int_0^t k e^{-k(s-t)} \mu(s) ds = \mu(t) (1 - e^{-k}), \quad \beta = e^{-k}, \quad \varepsilon_t = \int_{t-1}^t e^{-k(s-t)} \sigma dw(s)$$

である。 ε_t はガウス過程であり、分散 $\sigma_\varepsilon^2 = \frac{\sigma^2(1 - e^{-2k})}{2k}$ の正規分布に従う誤差項とみなせる。(10) 式から、 t 期の価格 $p(t)$ は正規分布 $N(\alpha_t + \beta p(t-1), \sigma_\varepsilon^2)$ に従うことがわかる。 $p(t)$ の条件付き確率を標準正規分布の確率密度関数 $\phi(\cdot)$ で表すと (11) 式となり、尤度関数 L は (12) 式で与えられる。

$$(11) \quad f(p(t)) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \phi \left\{ \frac{p(t) - (\alpha_t + \beta p(t-1))}{\sigma_\varepsilon} \right\}$$

$$(12) \quad L = \prod_{t=1}^T \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \phi \left\{ \frac{p(t) - (\alpha_t + \beta p(t-1))}{\sigma_\varepsilon} \right\}$$

次に、(7) 式の価格過程に対応する尤度関数を求める。ジャンプ発生確率は λ 、その水準は $N(\mu_j, \sigma_j^2)$ に従うことから、ジャンプが発生した時の $p(t)$ は正規分布 $N(\alpha_t + \beta p(t-1) + \mu_j, \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_j^2)$ に従う。よって、 $p(t)$ の条件付確率は (13) 式、尤度関数 L は (14) 式で与えられる⁴⁾。

$$(13) \quad f(p(t)) = (1 - \lambda) \phi \left\{ \frac{p(t) - (\alpha_i + \beta p(t-1))}{\sigma_\varepsilon} \right\} \sigma_\varepsilon^{-1} \\ + \lambda \frac{1}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_j^2}} \phi \left\{ \frac{p(t) - (\alpha_i + \beta p(t-1) + \mu_j)}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_j^2}} \right\}$$

$$(14) \quad L = \prod_{i=1}^T \left[(1 - \lambda) \phi \left\{ \frac{p(t) - (\alpha_i + \beta p(t-1))}{\sigma_\varepsilon} \right\} \sigma_\varepsilon^{-1} \right. \\ \left. + \lambda \phi \left\{ \frac{p(t) - (\alpha_i + \beta p(t-1) + \mu_j)}{(\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_j^2)^{\frac{1}{2}}} \right\} (\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_j^2)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

次に、(8) 式を離散化する。あらためて関数 $F(t, \ln p(t)) = e^{kt} \ln p(t)$ と定義し、 $\ln p(t)$ は (8) 式を満たすものとすれば、(10) 式を導いた時と同様の式変形により、 $\ln p(t-1)$ と $\ln p(t)$ の漸化式は、

$$\ln p(t) = e^{-k} \ln p(t-1) + \int_{t-1}^t e^{-k(s-t)} k \mu(s) ds + \int_{t-1}^t e^{-k(s-t)} \sigma dw(s)$$

で与えられ、ゆえに (15) 式が得られる。

$$(15) \quad \ln p(t) = \alpha_i + \beta \ln p(t-1) + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$$

ここで、 α_i と β と ε_i は (10) 式と同様に定義される。(15) 式から、

$$p(t) = \exp \{ \beta \ln p(t-1) + \alpha_i + \varepsilon_i \} = \exp \{ \beta \ln p(t-1) + \alpha_i \} \cdot \exp \{ \varepsilon_i \}$$

ゆえに $p(t)$ は対数正規分布 $\Lambda(\beta p(t-1) + \alpha_i, \sigma_\varepsilon^2)$ に従い、条件付き確率は (16) 式、尤度関数 L は (17) 式で与えられる⁵⁾。

4) ここまでの式変形は (Knittel & Robert, 2001) など多くの文献で説明されている。

5) $\ln p(t)$ の条件付き確率から尤度関数を求めた場合、尤度関数は (16) 式と異なるものとなる。

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

$$(16) \quad f(p(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\varepsilon p(t)} \exp \left\{ \frac{-(\ln p(t) - \beta \ln p(t-1) - \alpha)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right\},$$

$$p(t) > 0$$

$$(17) \quad L = \prod_{t=1}^T \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\varepsilon p(t)} \exp \left\{ \frac{-(\ln p(t) - \beta \ln p(t-1) - \alpha)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right\} \right]$$

続いて、(9) 式の尤度関数を求める。ジャンプ発生確率は λ ，その水準は $N(\mu_\beta, \sigma_\beta^2)$ に従うことから、ジャンプが発生した場合は $p(t) \sim \Lambda(\beta \ln p(t-1) + \alpha + \mu_\beta, \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\beta^2)$ となり、 $p(t)$ の尤度関数は (18) 式で与えられる。

$$(18) \quad L = \prod_{t=1}^T \left[(1-\lambda) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\varepsilon p(t)} \exp \left\{ \frac{-(\ln p(t) - \beta \ln p(t-1) - \alpha)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right\} \right. \\ \left. + \lambda \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\beta^2} p(t)} \exp \left\{ \frac{-(\ln p(t) - \beta \ln p(t-1) - \alpha - \mu_\beta)^2}{2(\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\beta^2)} \right\} \right]$$

なお、価格水準に日内サイクルおよび週末効果があることを考慮して、

$$\mu = \mu(t) = \alpha_1 d_1(t) + \alpha_2 d_2(t) + \alpha_3 d_3(t) + \alpha_4 d_4(t)$$

と設定した。ここで $d_k(t)$ は二値変数であり、 t 時点が「8 時～12 時、17 時～22 時 (daytime)」ならば $d_1(t) = 1$ ，「13 時～16 時 (peak)」ならば $d_2(t) = 1$ ，「23 時～7 時 (night)」ならば $d_3(t) = 1$ ，日曜・祝日ならば $d_4(t) = 1$ の値をとり、それ以外の時点ではゼロの値をとる。各時間帯の類別は JEPX におけるそれを準用した。

3.5 ジャンプ付平均回帰モデル改善の試み

本論文で用いたジャンプ付平均回帰モデル (MRJ) は、ジャンプの発生確率が任意の期間において一様であると仮定している。しかし、ジャンプ

を需給逼迫現象と考えた場合、直近の価格水準 $p(t-1)$ とジャンプ発生確率 λ に正の相関があると仮定してモデル化したほうが自然である。そこで、ロジスティック関数を用いて、

$$(19) \quad \lambda = \frac{1}{1 - \theta \exp(-\tau p(t-1))}, \quad 1 - \lambda = \frac{\theta}{\exp(\tau p(t-1)) - \theta}$$

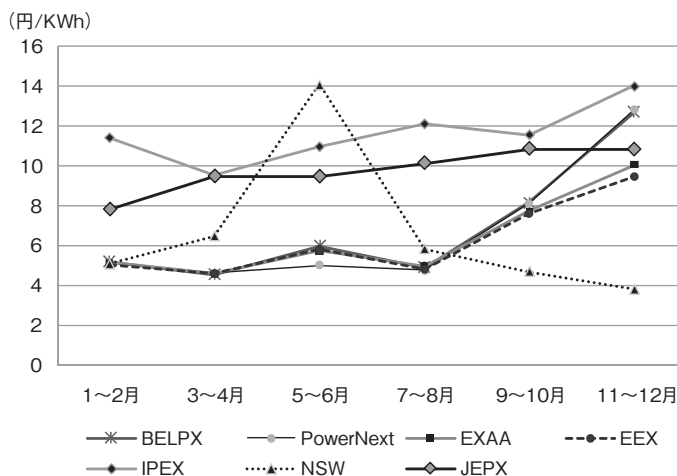
と直近の価格水準 $p(t-1)$ とジャンプ発生確率 λ の正の相関関係を表現してモデルに挿入し、適合度の改善の有無を調べた。ここで θ と τ は正の定数である。

4. 計算結果

4.1 基礎的な分布指標

各電力取引所の価格平均値の推移を図3に示している。石炭を主電源と

図3 各電力取引所における平均価格



する NSW（オーストラリア）を除き、各取引所の電力価格平均値が5～6月頃から上昇しているが、この背景には第3章第2節で述べた2007年の発電燃料（原油・天然ガス・石炭）の価格上昇があると考えられる。オーストラリアの NSW の5～6月の電力価格急騰は、渇水のために発電所の冷却水が不足し、発電停止に至った石炭火力発電所が複数現れるなど、需給逼迫が生じたためと報じられている（Australian Energy Regulator, 2008）。これらの価格変化が回帰水準の変化として現れたのか、それとも価格ジャンプ水準や頻度の変化として現れたのかについては、次章で分析を行うことにする。なお、BELPX（ベルギー）と Powernext（フランス）の平均価格は殆ど同水準であるが、これは両取引所間の連携が密であるためと考えられる。

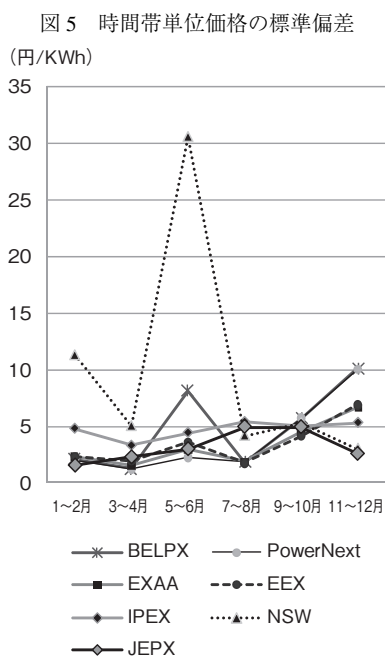
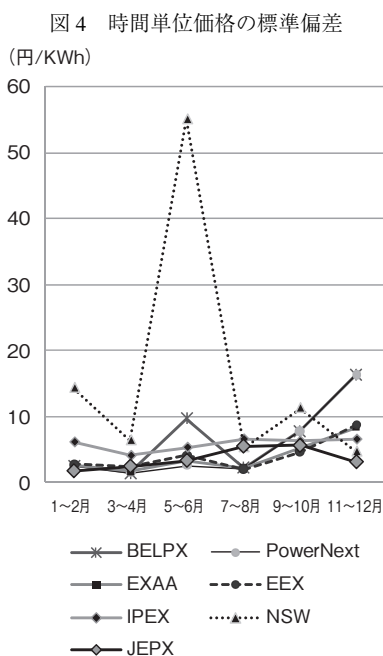


図4と図5は、それぞれ時間単位と時間帯単位の価格の標準偏差を示している。NSWの価格標準偏差は、上述の渇水期間に大きく上昇し、その後は元の水準に戻している。他の電力取引所の価格標準偏差は、平均価格の上昇と期を同じくして5～6月以降は上昇傾向にある。

JEPX（日本）と他の電力取引所を比較すると、2007年各期間のJEPXの平均価格はIPEX（イタリア）について高い水準にある。JEPXの価格の分散は、最も分散が大きかったNSWを除くと、期間によって大小は異なるが、他の電力取引所とほぼ同程度の水準にある⁶⁾。

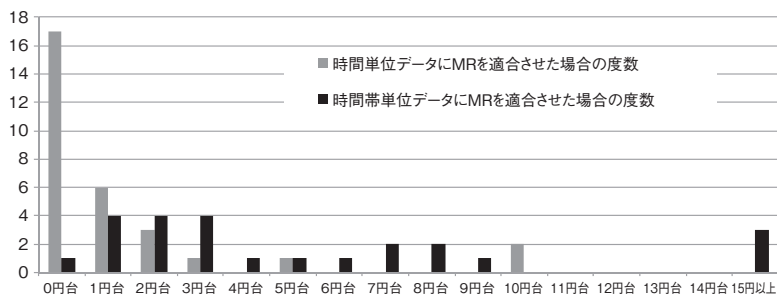
4.2 価格変動モデルの適合結果

各電力取引所の時間単位および時間帯単位の価格データにモデル2（MRJ）とモデル4（GMRJ）を最尤法によって適合させた場合の母数の推定値を付録で示している。母数の推定値で注意すべきことは、Clewlow & Strickland（2000）が指摘した現象の発生である。時間単位の価格データにモデル2（MRJ）を適合させた場合、推定されたジャンプ頻度の平均値は0.25であり、これは1日あたり平均約6回の価格ジャンプが発生することを意味する。また、価格変動が大きかったNSW（オーストラリア）を除くと、ジャンプ水準は平均で1.7円/kWhと小さかった。これは時間単位の価格データにMRJを適合させた場合、日内の価格サイクルを含めた小さな価格変化をジャンプ現象とモデルが認識していることを示唆している。

一方、時間帯単位の価格データにモデル2（MRJ）を適合させた場合、推定されたジャンプ頻度の平均値は0.15、ジャンプ水準はNSW（オーストラリア）を除くと平均で5.5円/kWhであり、Clewlow & Stricklandが指摘した現象が緩和されている（図6参照）。また、ジャンプ現象が生じて

6) ただし、2007年の1年間を通じてのJEPXの価格の分散（または標準偏差）は、7つの取引所の中で最も低い水準にある。

図6 ジャンプ水準の MR による推定値の比較（NSW を除く）



いないとモデルが認識する期間が明確になることも利点であり，具体的にはジャンプ頻度の推定値が下限のゼロとなり，ジャンプに関係しない母数の推定値は MR のそれに一致する。

Clewlow & Strickland が指摘した現象の発生は，時間単位データに GMRJ を適合させた場合でも観察されるが，第2章で説明したように GMRJ は MRJ と比べて小さな価格変化をジャンプ現象と把握する傾向が弱いいため，MRJ のように顕著ではない．時間帯単位データに GMRJ を適合させることにより，やはりこの現象は緩和される。

なお，GMRJ をデータに適合させた場合，マイナスのジャンプ水準の推定値が得られる場合がある．これは指数型供給曲線では供給量の減少に応じて価格が減少する率が徐々に小さくなるため，低価格領域を表現するためにマイナスのジャンプ現象をモデルが必要とするためと考えられる。

次に，各電力取引所の時間単位の価格データを対象として，4種類の価格変動モデルを適合させた場合の BIC を表2に示している．斜体太字は各モデルの中で BIC が最も低いモデル（モデル選択指標が相対的に良いモデル）である。

表2から，ジャンプ付きのモデルである MRJ または GMRJ のほばいずれかが最小 BIC となっているが，これは時間単位のデータでは価格変化

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

表2 モデルを時間単位の価格データに適合させた場合の BIC

		1～2 月	3～4 月	5～6 月	7～8 月	9～10 月	11～12 月
JEPX (日本)	MR	2583	3966	4542	6055	6545	4870
	MRJ	1782	(-567)	(112)	(-900)	4897	4557
	GMR	2258	3722	4006	5125	5065	4418
	GMRJ	2280	3744	4028	4793	5001	4440
BELPX (ベルギー)	MR	9606	7996	14225	8594	14235	17231
	MRJ	8950	7748	9590	8320	10510	12769
	GMR	11276	11339	10068	9009	10295	12664
	GMRJ	9109	8243	9320	8644	9808	12264
PowerNext (フランス)	MR	13158	13150	13142	13134	13125	13117
	MRJ	8757	7789	8464	7894	10459	12734
	GMR	10795	11023	9593	8783	10323	12604
	GMRJ	9020	8272	8824	8382	9732	12204
EXAA (オーストラリア)	MR	9304	8094	9911	8588	11951	13800
	MRJ	8833	7707	8807	8102	10078	11911
	GMR	10781	7840	8445	8418	11048	12680
	GMRJ	8977	7663	8305	8139	9754	11429
EEX (ドイツ)	MR	10371	10049	11723	8653	11442	14270
	MRJ	9124	8435	9407	8318	10138	11898
	GMR	10868	9811	9396	8791	9977	12756
	GMRJ	9308	9833	8967	8813	9999	12778
IPEX (イタリア)	MR	12380	11445	11927	12961	12934	12645
	MRJ	12402	11268	11640	12176	12448	12066
	GMR	11448	10981	11285	12024	11907	11701
	GMRJ	11469	10898	11178	11761	11490	11722
NSW (オーストラリア)	MR	17883	15919	22150	14946	17868	14967
	MRJ	10869	12007	14644	11975	10254	9330
	GMR	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	GMRJ	9767	11226	13240	11057	9678	8645

(注1) JEPX の括弧内数字は非定常解である。

(注2) 解が収束しなかった場合は (-) と表記している。

が激しいこと、先述したように日内の価格サイクルをジャンプ現象とモデルが認識している可能性が高いことが原因と考えられる。

最後に、時間帯単位の価格データに4種類の価格変動モデルを適合させ

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

表3 時間帯単位の価格データにモデルを適合させた場合の BIC

		1～2 月	3～4 月	5～6 月	7～8 月	9～10 月	11～12 月
JEPX (日本)	MR	575	1004	975	1459	1545	911
	MRJ	(MR)	(MR)	(MR)	1135	1298	(MR)
	GMR	550	971	871	1190	1183	898
	GMRJ	(GMR)	(GMR)	(GMR)	(GMR)	1141	(GMR)
BELPX (ベルギー)	MR	2033	1936	3107	2175	2902	3296
	MRJ	1991	(MR)	2404	(MR)	2463	2856
	GMR	2040	2057	2384	2217	2436	2745
	GMRJ	2010	1961	2348	(GMR)	2422	2726
PowerNext (フランス)	MR	2003	1940	2207	2134	2903	3287
	MRJ	(MR)	(MR)	(MR)	(MR)	2456	2858
	GMR	2008	2447	2188	2164	2426	2743
	GMRJ	(GMR)	1961	(GMR)	(GMR)	2409	2719
EXAA (オーストラリア)	MR	2054	2013	2422	2165	2659	2842
	MRJ	(MR)	1882	2148	2080	2387	2723
	GMR	2120	1901	2200	2081	2507	2485
	GMRJ	1987	1877	2152	(GMR)	2377	(GMR)
EEX (ドイツ)	MR	2116	2251	2601	2124	2592	2930
	MRJ	2075	1989	2291	2085	2374	2735
	GMR	2068	2059	2285	2078	2318	2566
	GMRJ	2064	(GMR)	(GMR)	(GMR)	(GMR)	(GMR)
IPEX (イタリア)	MR	2383	2387	2591	2802	2596	2607
	MRJ	(MR)	2390	2534	2664	2518	2568
	GMR	2371	2406	2566	2717	2550	2427
	GMRJ	2377	(GMR)	(GMR)	(GMR)	2547	(GMR)
NSW (オーストラリア)	MR	3642	3198	4332	3041	3264	2783
	MRJ	2594	2768	3231	2730	2322	2315
	GMR	2502	2683	3131	2530	2372	2235
	GMRJ	2397	2646	2937	(GMR)	2244	2162

た場合の BIC を表 3 に示している。ジャンプ頻度がゼロと推定された期間については、MRJ の推定結果は MR と一致するので、該当セルに (MR) と表記し、同様に GMRJ の該当セルには (GMR) と表記している。斜体太字は各モデルの中で BIC が最も小さいモデル (モデル選択指

標が相対的に良いモデル)を示している。

時間帯単位の価格データに対して最尤法を用いて4種モデルを適合させた場合、各期間の最小 BIC モデルは特定のモデルに限定されないことが表3からわかる。同一の取引所でも、期間が異なれば MR と GMR (または MRJ と GMRJ) がそれぞれ最小 BIC モデルとなる場合もあることから、第2章の議論に基づけば、その期間で実現する価格領域に応じて供給曲線の形状が線形または指数型曲線で近似されうると考えられる⁷⁾。

後述するが、各期間における分布指標のうち尖度・歪度と最小 BIC モデルとの間には一定の関係が観察される。この関係については第5章第2節で詳しく見ていくものとする。

4.3 ジャンプ発生確率にロジスティック関数を用いた結果

表4は、時間帯単位の価格データに(19)式のロジスティック型ジャンプ付き平均回帰モデル(MRLJ)を適合させた場合の BIC をモデル2(MRJ)のそれと比較したものである。非定常解が得られた3期間(JEPX)は比較対象外として、39期間のうち30期間において BIC の改善が見られた。収束しなかったり、母数の推定下限に達して最尤解が得られなかった6期間も非改善ケースとして数えている。これら6期間も比較対象外とすると、33期間のうち30期間で BIC が改善している。

ただし、時間帯単位の価格データにロジスティック型ジャンプ付き平均回帰モデル(MRLJ)を適合させた場合では、モデル2(MRJ)に比べて BIC の改善は殆ど見られなかった。これは、時間帯単位の価格では、前時間帯の価格水準と現時間帯のジャンプ発生確率の相関が希薄化または消滅

7) 電力取引所の一日前市場の供給曲線は公表されないことが殆どであるので、供給曲線の形状を直接に確認することは一般に困難である。米国の電力取引所である CALPX の供給曲線の形状は知られている(松田・吉川, 2001)。ただし、CALPX は既に廃止されている。

表 4 MRJ モデルと MRLJ モデルを時間単位の価格データに適合させた場合の BIC 比較

		1～2 月	3～4 月	5～6 月	7～8 月	9～10 月	11～12 月
JEPX (日本)	MRJ	1782	(-567)	(112)	(-900)	4897	4557
	MRLJ	1674	(433)	4571	6043	6574	4243
BELPX (ベルギー)	MRJ	8950	7748	9590	8320	10510	12769
	MRLJ	8844	(LBC)	9400	8313	10266	12472
PowerNext (フランス)	MRJ	8757	7789	8464	7894	10459	12734
	MRLJ	8695	(-)	8423	7899	10206	12435
EXAA (オーストリア)	MRJ	8833	7707	8807	8102	10078	11911
	MRLJ	8744	7601	8549	8034	(LBC)	(LBC)
EEX (ドイツ)	MRJ	9124	8435	9407	8318	10138	11898
	MRLJ	9083	(-)	9147	8682	9931	11711
IPEX (イタリア)	MRJ	12402	11268	11640	12176	12448	12066
	MRLJ	11265	10839	11268	11676	11798	11761
NSW (オーストラリア)	MRJ	10869	12007	14644	11975	10254	9330
	MRLJ	10509	11793	(LBC)	11770	10201	9152

(注 1) 括弧内数字は非定常解である。

(注 2) 収束しなかった場合は (-) と表記している。

(注 3) 推定値の下限に達した場合は (LBC) と表記している。

しているためと考えられる。

5. 計算結果の分析

5.1 各取引所における価格ジャンプの水準と頻度

電力価格の特徴の一つである価格ジャンプ現象の実態を前章の計算結果を用いて更に分析する。なお、日内価格サイクルをジャンプ現象として認識することが相対的に少ないと考えられる「時間帯単位のデータにモデルを適合させた計算結果」を本章では用いるものとする。

はじめに、各取引所の価格ジャンプの水準と頻度を比較する。表 5 は、モデル 2 (MRJ) によるジャンプ発生頻度の推定値、およびモデル 4 (GMRJ) によるそれを示している。表中の斜体太字推定値はジャンプ発

表 5 モデル 2 (MRJ) とモデル 4 (GMRJ) を時間帯単位の価格データに適合させた場合のジャンプ頻度推定値 (回/時間帯)

		1～2 月	3～4 月	5～6 月	7～8 月	9～10 月	11～12 月
JEPX (日本)	MRJ	0	0	0	0.595	0.031	0
	GMRJ	0	0	0	0.007	0	0
BELPX (ベルギー)	MRJ	0.260	0	0.029	0	0.075	0.071
	GMRJ	0.421	(0.032)	0.049	0	0.059	0.602
PowerNext (フランス)	MRJ	0	0	0	0	0.080	0.071
	GMRJ	0	(0.008)	0	0	0.152	0.127
EXAA (オーストリア)	MRJ	0	0.126	0.323	0.215	0.303	0.415
	GMRJ	(0.026)	0.357	0.227	0	0.026	0
EEX (ドイツ)	MRJ	0.227	0.083	0.208	0.357	0.217	0.170
	GMRJ	0.514	0	0	0	0	0
IPEX (イタリア)	MRJ	0	0.574	0.197	0.263	0.169	0.245
	GMRJ	(0.003)	0	0	0	0.142	0
NSW (オーストラリア)	MRJ	0.098	0.072	0.192	0.122	0.012	0.084
	GMRJ	0.098	0.120	0.168	0	0.009	0.274

生頻度がゼロの期間、括弧付きの斜体太字推定値はジャンプ水準がマイナスである期間を示している。

モデル 2 (MRJ) においてジャンプ発生頻度の推定値がゼロの期間については、モデル 4 (GMRJ) でも同推定値がゼロまたはジャンプ水準がマイナスであることがわかる。一方、モデル 2 (MRJ) においてジャンプ発生頻度が正であっても、モデル 4 (GMRJ) では同推定値がゼロとなる期間が EEX (ドイツ) および IPEX (イタリア) 等で多く見られる。これは、第 2 章で説明したように、価格変化が近似的に指数型供給曲線上にあれば、GMRJ モデルはそれをジャンプと認識しないため、MRJ モデルに比べて、価格変化を回帰水準のまわりの価格変動として捉える傾向が強いと考えられる。このように、ある価格変化を回帰水準のまわりの価格変動として捉えるか、それともジャンプ現象として捉えるかについては、適合させるモデルによってやや異なる結果が得られる場合がある。

ジャンプの大きさは、ジャンプの水準 μ_j だけではなく、その分散 σ_j^2

も考慮して把握したほうが価格ジャンプの実態に近い。図7は時間帯単位データにモデル2（MRJ）を適合させた場合の $\mu_j + 0.5 \sigma_j$ の推定値を示している。図8はモデル4（GMRJ）を適合させた場合のそれを価格に換算した数値を示しているが、簡単のために価格の回帰水準でジャンプが発生したと仮定して計算している⁸⁾。なお、区間 $[\mu_j - 0.5 \sigma_j, \mu_j + 0.5 \sigma_j]$ の範囲で価格ジャンプの約40%が実現する。

図7と図8から、最も価格ジャンプが大きいのはNSW（オーストラリア）であり、9～10月を除くとJEPX（日本）は価格ジャンプが発生していないか、または発生しても他の電力取引所に比べてサイズが小さかった

図7 $\mu_j + 0.5 \sigma_j$ の推定値（MRJ）
（円/KWh）

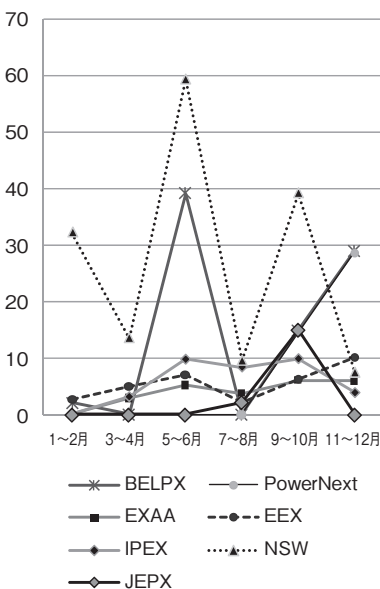
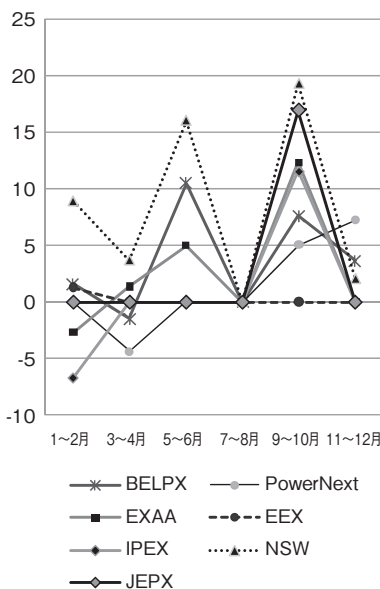
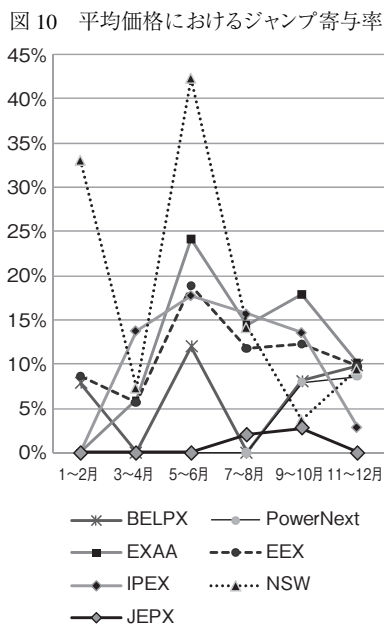
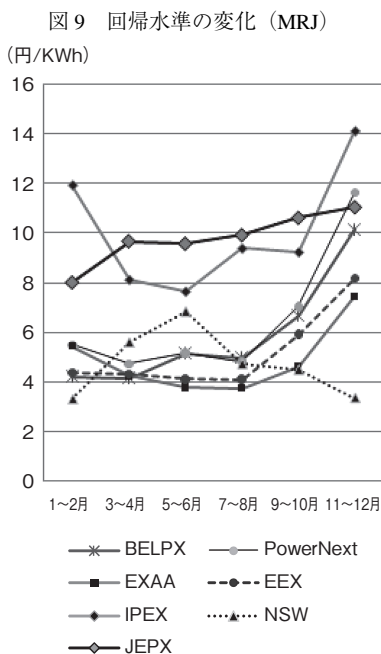


図8 $\mu_j + 0.5 \sigma_j$ の推定値（GMRJ）
（円/KWh）



8) (9) 式の記号を用いると、ジャンプ水準を $\exp \mu \times (\exp(\mu_j + 0.5 \sigma_j) - 1)$ で計算した。



ことがわかる。期間で見ると、NSW と BELPX（ベルギー）では5～6月に、EEX（ドイツ）を除く全取引所では9～10月に比較的に大きな価格ジャンプが発生し、Powernext（フランス）と BELPX では11～12月にも価格ジャンプ現象が続いたことが読み取れる。

次に、期間ごとの平均価格の変化が、回帰水準の変化によるものなのか、あるいは価格ジャンプの水準や頻度の変化によるものなのかという問題について、価格データをモデル2（MRJ）に適合させた結果から検討する。図9はモデル2（MRJ）による回帰水準の期間ごとの変化を示している。図10は、各期間の平均価格を回帰水準 μ とジャンプ寄与分（＝ジャンプ水準 $\mu_j \times$ ジャンプ頻度 λ ）に分解し、そのうちのジャンプ寄与分の比率を示したものである。

図 9 から、IPEX（イタリア）を除き、殆どの電力取引所の回帰水準は、図 3 の平均回帰と同じ増減の方向で推移している。もっとも、NSW（オーストラリア）は 5～6 月に平均価格が急騰したにもかかわらず、5～6 月の回帰水準の上昇幅は小さい。図 10 から、NSW の 5～6 月の平均価格急騰については価格のジャンプ現象の寄与が大きかったとモデル 2（MRJ）が認識していることがわかる。

各電力取引所の平均価格におけるジャンプ現象の寄与率を比較すると、NSW が最も大きく、JEPX（日本）が最も小さいことが図 10 からわかる。2007 年においては、JEPX の平均価格におけるジャンプ現象の寄与率は常に 5% 以下である。注意すべきことは、EEX と IPEX の平均価格におけるジャンプ現象の寄与率は図 10 ではやや高いものの、GMRJ モデルでは表 5 が示すように両取引所ではジャンプ現象が殆ど発生していないと推定されており、第 2 章で論じたように MRJ モデルと GMRJ モデルの差が顕著なことである。JEPX については、GMRJ モデルを用いても平均価格におけるジャンプ現象の寄与率は低い。

5.2 歪度と尖度の間に観察された曲線関係と最小 BIC モデルとの整合性

2007 年における各期間の電力価格分布の歪度と尖度を平面上にプロットしたものが、図 11（時間単位価格）および図 12（時間帯単位価格）である⁹⁾。図 11 と図 12 から、価格分布の歪度（ γ_1 ）と尖度（ γ_2 ）の間に曲線関係（以下、 $\gamma_1 - \gamma_2$ 曲線）が観察される。観察される $\gamma_1 - \gamma_2$ 曲線は、時間単位価格の分布または時間帯単位価格の分布でも殆ど差は見られない。参考として、対数正規分布における歪度（ γ_1 ）と尖度（ γ_2 ）が描く曲線（Log Norm と表示）を図中に表示したが、価格分布の歪度と尖度が大きくなるにつれて、 $\gamma_1 - \gamma_2$ 曲線はそれから乖離していく。

9) 2006 年と 2008 年における JEPX の価格データも含む。

図 11 時間単位の価格分布の歪度・尖度

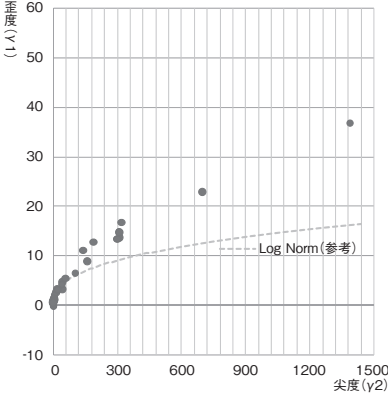
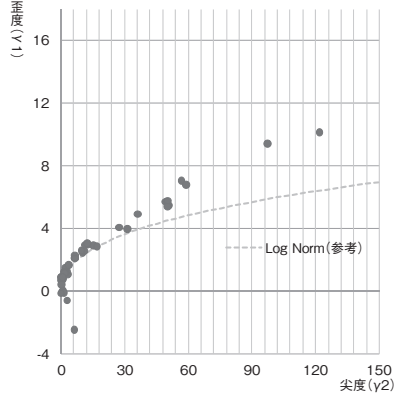


図 12 時間帯単位の価格分布の歪度・尖度



ここで、モデル 1 (MR) とモデル 3 (GMR) に従う確率過程の定常分布を考えよう。平均回帰過程 (MR) に従う価格の分布は $N\left(\mu + (p(0) - \mu)e^{-kt}, \sigma^2\left(\frac{1-e^{-2kt}}{2k}\right)\right)$ であるため、 $t \rightarrow +\infty$ の時、価格の定常分布は正規分布 $N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{2k}\right)$ であり、幾何平均回帰過程 (GMR) に従う価格の定常分布は $t \rightarrow +\infty$ の時に対数正規分布 $\Lambda\left(\mu, \frac{\sigma^2}{2k}\right)$ であることが知られている。正規分布の歪度は $\gamma_1 = 0$ 、尖度は $\gamma_2 = 0$ なので、歪度-尖度平面において、モデル 1 (MR) に従う価格分布の座標 (γ_1, γ_2) は原点付近に位置する。一方、対数正規分布の歪度 γ_1 と尖度 γ_2 は、 $\omega = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2k}\right)$ とおくと、 ω を媒介変数として、

$$(20) \quad \begin{cases} \gamma_1 = \sqrt{\omega - 1} (\omega + 2) \\ \gamma_2 = \omega^4 + 2\omega^3 + 3\omega^2 - 6 \end{cases}$$

という曲線関係にある ($\omega > 1$)。従って、モデル 3 (GMR) に従う価格分布の座標 (γ_1, γ_2) は、(20) 式で与えられる曲線の近傍に位置する。

図 13 時間帯単位の価格データで最小 BIC モデルが MR・MRJ の場合

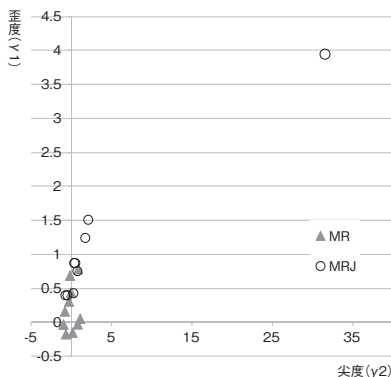
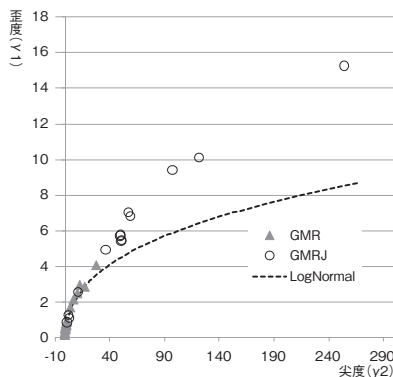


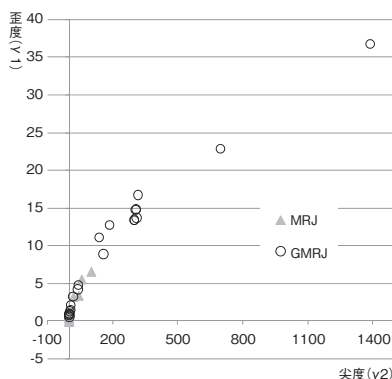
図 14 時間帯単位の価格データで最小 BIC モデルが GMR・GMRJ の場合



以上の理論的な歪度と尖度の関係を考慮しながら，図 11（時間単位）と図 12（時間帯単位）に最小 BIC モデルをそれぞれプロットしたのを見ることにしよう．第一に，図 12（時間帯単位）において，最小 BIC がモデル 1（MR）又はモデル 2（MRJ）である期間データのみをプロットしたものが図 13 である．図 13 を見ると，原点に近い期間データは MR モデルを最小 BIC とするものが多く， $\gamma_1 - \gamma_2$ 曲線が原点から遠ざかるにつれて，MRJ モデルを最小 BIC とするものが多くなっている．これは MR モデルに従う価格分布の座標 (γ_1, γ_2) は原点付近に位置することと整合的である．

第二に，図 12（時間帯単位）において，最小 BIC モデルがモデル 3（GMR）又はモデル 4（GMRJ）である期間データのみをプロットしたものが図 14 である．図 14 を見ると， $\gamma_1 - \gamma_2$ 曲線と (20) 式に従う曲線に近い領域では最小 BIC モデルを GMR モデルとする期間データが多く， $\gamma_1 - \gamma_2$ 曲線が (20) 式の曲線から乖離するにつれて，最小 BIC モデルを GMRJ モデルとする期間データのみとなる．

図 15 時間単位の価格データで最小 BIC モデルが MRJ・GMRJ の場合



第三に、図 11（時間単位）において、最小 BIC モデルがモデル 2（MRJ）又はモデル 4（GMRJ）である期間データのみをプロットしたものが図 15 である。図 15 を見ると、原点に近い期間データは最小 BIC が MRJ モデルであることが多く、 γ_1 - γ_2 曲線が原点から遠ざかるにつれて、最小 BIC モデルが GMRJ モデルとなることが多い。

我々は本論文の分析でモデル選択の指標として BIC を用いてきたが、図 13・図 14・図 15 において、観察された電力価格分布の歪度と尖度の γ_1 - γ_2 曲線と最小 BIC によるモデル選択がおおよそ整合的であることが確認できた。なお、2007 年に観察された価格分布の歪度と尖度の曲線関係が、他の期間や火力を主電源とする他の取引所においても観察されるのかどうかについては、今後の分析を待たなければならない。電力価格の特徴として、平均回帰性向があり、更にジャンプ現象を持つことから、価格ジャンプが多数発生するに伴って、歪度が正の方向に大きくなり、同時に尖度も大きくなることは直感的に予想できるが、両者の増大度に曲線関係が観察されるかどうかに関心の中心となろう。

6. ま と め

本研究で得られた結果をまとめる。第一に、MR・MRJ・GMR・GMRJの4種の価格変動モデルが、前提条件を変えることにより、Barlow流の方法で需給曲線モデルからそれぞれ導出できる。前提条件の差異は、供給曲線の形状と需給逼迫現象の有無である。この導出により、各価格変動モデルを実際の価格データに適合させた結果の直感的な解釈が可能となる。

第二に、時間単位の価格データに最尤法を用いてMRJ・GMRJの価格変動モデルを適合させると、Clewlow & Strickland (2000) が指摘した「ジャンプに関する母数は最もサイズが小さく頻度の大きいジャンプ要素に収束する」という現象が発生する。この現象を緩和するには数時間単位の平均価格データに4種モデルを適合させることが有効である。この方法を用いると、ジャンプ現象が生じていないとモデルが認識する期間が明確になりやすく、具体的にはジャンプ頻度の推定値が下限のゼロとなり、ジャンプに関係しない母数の推定値はMR又はGMRのそれに一致する。第三に、前期価格を変数とするロジスティック関数により、MRJのジャンプ発生確率を表現すると、時間単位の価格データにモデルを適合させた場合のBICが改善されることが多い。

第四に、7つの電力取引所（JEPX, BELPX, EEX, EXAA, IPEX, Powernext, NSW）における2007年の価格分布指標を計算すると、JEPX（日本）の価格平均値はIPEX（イタリア）に次いで高い水準にあり、その分散はNSW（オーストラリア）を除くと他の取引所とあまり変わらない水準である。第五に、2007年ではJEPXの期間ごとの平均価格におけるジャンプ現象の寄与率は5%未満であり、7つの電力取引所の中では相対的に低い。一方、NSWは5～6月に平均価格が急騰したが、その約40%がジャンプ現象によるものであった。また、JEPXのジャンプサイズも他の取引

所に比べて相対的に小さい。

第六に、2007 年 6 期間における各取引所の価格分布の歪度と尖度について、両者の間に曲線関係が観察された。この曲線関係は、歪度と尖度が小さい領域では GMR に従う価格の分布の理論的な歪度・尖度曲線と似ているが、歪度および尖度が大きくなるにつれて両者は乖離していく。第七に、2007 年 6 期間における各取引所の価格データに 4 種の価格変動モデルを適合させた結果から、最小 BIC モデルをデータごとに選択したが、観察された価格分布の歪度と尖度の曲線関係と最小 BIC モデルがおおよそ整合的であることが確認できた。

我々の研究の主な目的は一日前市場の価格変動の特徴を 4 種の価格変動モデルを適合させることによって調べることであったが、分析結果は任意の期間または取引所によく妥当する万能の価格変動モデルがこれらの 4 種類の中には存在しないことも結果として示唆している。もちろん、これら 4 種の価格変動モデルは基礎的なモデルであり、この他にも多くのモデルが現在も検討されており、また果たして、任意の取引所データを常に良く説明する唯一の価格変動モデルが存在するかどうか我々は知らない。しかし、電力価格の定性的な性質に合致するような金融工学の既存モデルの適用を試みるだけではなく、電力価格の分布等に関する定量的な性質を積み上げて、それらとの整合性も考慮してモデルの検討を行うことが今後は更に必要とされると我々は考える。

以上

参考文献

- Australian Competition and Consumer Commission (2008) State of the Energy Market.
- Barlow, M. T. (2002) "A Diffusion Model for Electricity Prices," *Mathematical Finance*, Vol.12, No.4, pp.287–298.
- BELPX website (<http://www.belpex.be/index.php?id=78>).

- Clewlöw, L. and C. Strickland (2000) *Energy Derivatives : Pricing and Risk Management*, Lacima Publications. (山本要一訳『エネルギーデリバティブ』シグマベイスキャピタル, 2004 年)
- ECORYS Nederland BV (2008) Review and Analysis of EU Wholesale Energy Markets : Historical and Current Data Analysis of EU Wholesale Electricity, Gas and CO 2 Markets.
- EEX website (<http://www.eex.com/en/Download/Market%20Data>).
- EXAA website (<http://en.exaa.at/market/historical/austriagermany/index.html>)
- GME website (<http://www.mercatoelettrico.org/En/Statistiche/ME/DatiStorici.aspx>).
- International Energy Agency “Monthly Electricity Statistics”, (<http://www.iea.org/stats/surveys/elecarchives.asp>).
- JEPX website (<http://www.jepx.org>)
- Johnson, B. and B. Graydon (1999) Selecting Stochastic Processes for Modelling Electricity Prices, in Jameson, R. et al. eds., *Energy Modelling and the Management of Uncertainty*, London : Risk Book.
- Knittel, C. R. and M. R. Robert (2001) “An Empirical Examination of Deregulated Electricity Prices,” *POWER*, PWP-087.
- NEMCO website (<http://www.nemmco.com.au/data/aggPD1998to1999.htm#aggprice1998link>).
- Powernext website (<http://www.powernext.fr/modules.php?op=modload&name=PwnStat&file=index&req=stat>).
- 経済産業省 (2008)『エネルギー白書 2008 年版』.
- 松田年弘・吉川榮和 (2001)「電力スポット市場における価格変動分析」『公益事業研究』 Vol.53, No.2.
- 松田年弘・手塚哲央・吉川榮和 (2002)「電力市場における価格リスクの分析－需給構造の変化が与える影響－」『公益事業研究』 Vol.54, No.2.
- 山口順之 (2007)「同時方程式モデルを用いた JEPX の電力取引動向の実証研究」『電力中央研究所研究報告 Y 06006』.

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

付録

(1) 時間単位の価格データに MRJ を適合させた場合の推定値

		α_1	α_2	α_3	α_4	k	σ	λ	μ_j	σ_j
JEPX	1～2 月	8.3	8.7	5.5	-0.5	0.045	0.12	0.416	0.08	1.06
	3～4 月	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.
	5～6 月	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.
	7～8 月	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.	u.s.
	9～10 月	16.7	28.8	3.6	-4.3	0.001	0.11	0.566	0.00	3.17
	11～12 月	12.7	13.6	7.9	-1.9	0.198	0.56	0.425	0.16	1.80
BELPX	1～2 月	44.8	25.9	18.3	-6.5	0.158	4.32	0.122	3.62	16.75
	3～4 月	40.3	14.8	9.3	-3.6	0.099	1.82	0.395	1.37	5.14
	5～6 月	46.1	30.2	14.7	-11.8	0.152	4.81	0.051	19.05	133.43
	7～8 月	29.2	21.8	2.2	-2.4	0.166	1.81	0.483	3.81	5.23
	9～10 月	68.1	37.4	18.6	-10.5	0.149	6.17	0.070	15.87	117.55
	11～12 月	92.2	69.2	42.3	-18.2	0.342	14.44	0.065	63.78	347.10
PowerNext	1～2 月	50.2	21.0	12.1	-8.9	0.105	2.56	0.391	1.00	8.95
	3～4 月	38.5	14.7	10.7	-2.9	0.098	1.75	0.404	1.17	5.36
	5～6 月	30.3	18.9	0.8	-2.2	0.129	2.13	0.421	3.65	6.37
	7～8 月	29.5	23.3	0.3	-3.1	0.150	1.78	0.468	3.52	4.15
	9～10 月	68.6	35.4	17.6	-10.9	0.126	5.89	0.073	13.05	116.06
	11～12 月	91.5	68.1	42.2	-16.7	0.338	14.09	0.067	61.48	342.40
EXAA	1～2 月	52.0	24.4	15.2	-14.1	0.133	2.72	0.356	1.07	9.89
	3～4 月	36.7	22.5	19.4	-6.7	0.220	2.83	0.116	4.31	7.49
	5～6 月	32.6	21.6	16.6	-3.1	0.196	2.89	0.194	9.35	13.81
	7～8 月	29.3	20.4	7.8	-0.2	0.193	1.86	0.364	5.02	5.70
	9～10 月	69.7	22.2	8.6	-9.8	0.094	4.01	0.175	5.61	32.59
	11～12 月	97.2	41.7	27.9	-27.7	0.115	7.39	0.177	5.83	62.73
EEX	1～2 月	43.9	29.7	20.6	-11.8	0.204	5.51	0.038	11.65	39.60
	3～4 月	38.9	21.4	20.8	-7.4	0.221	3.93	0.036	9.51	33.35
	5～6 月	40.6	22.5	18.3	-6.9	0.182	4.15	0.097	12.74	39.19
	7～8 月	39.4	22.4	15.2	-6.5	0.192	3.29	0.125	5.18	7.86
	9～10 月	57.8	35.1	19.8	-10.9	0.182	4.97	0.155	10.48	26.37
	11～12 月	79.8	49.4	30.5	-21.8	0.164	11.08	0.059	25.17	122.67
IPEX	1～2 月	113.4	67.6	40.5	-18.1	0.544	24.24	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	74.9	62.3	27.9	-10.6	0.328	5.10	0.556	3.42	15.12
	5～6 月	76.7	67.2	26.3	-7.3	0.346	7.63	0.392	8.19	19.39
	7～8 月	80.0	64.2	27.4	-1.9	0.326	7.65	0.315	14.36	29.42
	9～10 月	110.4	73.6	24.2	-14.1	0.198	7.14	0.407	0.93	30.92
	11～12 月	107.3	77.0	43.9	-8.5	0.299	7.77	0.349	7.55	27.97
NSW	1～2 月	38.3	122.7	37.1	-21.7	0.056	7.46	0.052	0.68	679.08
	3～4 月	63.5	72.8	50.3	-17.6	0.109	10.80	0.053	20.99	262.43
	5～6 月	76.3	75.4	58.3	-17.0	0.422	20.31	0.102	275.37	1451.95
	7～8 月	51.8	43.3	30.5	-7.4	0.320	7.89	0.146	35.29	88.42
	9～10 月	48.4	46.8	34.5	-12.1	0.290	7.69	0.017	76.62	1006.47
	11～12 月	37.4	48.8	27.7	-9.7	0.115	4.51	0.039	15.49	221.22

注 1：価格データは BELPX・Powernext・EXAA・EEX・IPEX はユーロ/MW, NSW はオーストラリアドル/MW, JEPX は円/kWh である。

注 2：u.s. は非定常解が得られた場合を示している。

注 3：(-) はジャンプ頻度の推定値が下限のゼロである場合を示している。

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

(2) 時間単位の価格データに GMRJ を適合させた場合の推定値

		α_1	α_2	α_3	α_4	k	σ	λ	μ_1	σ_1
JEPX	1～2 月	2.25	2.24	1.82	-0.14	0.414	0.084	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	2.46	2.44	1.99	-0.18	0.275	0.105	0.000	(-)	(-)
	5～6 月	2.47	2.61	1.86	-0.24	0.374	0.125	0.000	(-)	(-)
	7～8 月	2.01	2.72	1.61	-0.07	0.197	0.105	0.107	0.395	0.061
	9～10 月	2.56	2.79	1.84	-0.15	0.280	0.151	0.001	1.028	0.000
	11～12 月	2.58	2.62	2.09	-0.18	0.339	0.122	0.000	(-)	(-)
BELPX	1～2 月	3.95	3.33	2.93	-0.27	0.178	0.188	0.034	-0.184	2.335
	3～4 月	3.75	3.23	3.03	-0.18	0.194	0.116	0.079	-0.233	1.610
	5～6 月	3.84	3.19	2.14	-0.29	0.115	0.124	0.235	0.130	0.532
	7～8 月	3.89	3.21	2.17	-0.29	0.132	0.112	0.238	0.112	0.320
	9～10 月	4.37	3.17	1.85	-0.07	0.074	0.067	0.421	0.088	0.286
	11～12 月	4.65	4.02	3.32	-0.21	0.173	0.119	0.426	0.053	0.428
PowerNext	1～2 月	3.91	3.37	2.97	-0.31	0.200	0.191	0.024	-0.152	2.279
	3～4 月	3.70	3.20	3.02	-0.18	0.168	0.115	0.071	-0.106	1.466
	5～6 月	3.85	3.27	2.23	-0.27	0.118	0.129	0.155	0.129	0.572
	7～8 月	3.72	3.25	1.96	-0.22	0.113	0.088	0.316	0.109	0.283
	9～10 月	4.43	2.90	0.95	0.02	0.050	0.063	0.402	0.101	0.303
	11～12 月	4.63	4.00	3.31	-0.23	0.163	0.116	0.409	0.065	0.416
EXAA	1～2 月	4.01	3.39	2.91	-0.44	0.213	0.193	0.033	-0.405	1.926
	3～4 月	3.80	3.12	2.96	-0.34	0.180	0.119	0.050	0.041	0.328
	5～6 月	3.54	2.87	2.33	-0.18	0.134	0.091	0.366	0.164	0.147
	7～8 月	3.48	2.85	1.89	-0.02	0.113	0.073	0.397	0.144	0.185
	9～10 月	4.38	3.32	2.48	-0.15	0.099	0.111	0.132	0.175	0.668
	11～12 月	4.72	4.04	3.37	-0.65	0.217	0.252	0.012	-0.176	2.782
EEX	1～2 月	3.84	3.45	3.10	-0.36	0.289	0.198	0.086	-0.389	1.314
	3～4 月	3.93	3.06	2.88	-0.47	0.180	0.292	0.000	(-)	(-)
	5～6 月	3.80	3.02	2.63	-0.22	0.139	0.126	0.187	0.152	0.362
	7～8 月	3.84	3.37	2.85	-0.36	0.248	0.193	0.000	(-)	(-)
	9～10 月	4.36	3.62	3.23	-0.41	0.165	0.197	0.000	(-)	(-)
	11～12 月	4.79	4.08	3.03	-0.75	0.254	0.499	0.000	(-)	(-)
IPEX	1～2 月	4.71	4.19	3.59	-0.17	0.471	0.265	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	4.38	4.13	3.31	-0.19	0.278	0.090	0.597	0.037	0.232
	5～6 月	4.46	4.23	3.25	-0.14	0.246	0.080	0.618	0.043	0.237
	7～8 月	4.57	4.20	3.30	-0.08	0.192	0.091	0.475	0.053	0.290
	9～10 月	5.40	4.13	3.16	-0.55	0.002	0.004	0.801	0.000	0.307
	11～12 月	4.84	4.37	3.93	-0.20	0.357	0.197	0.000	(-)	(-)
NSW	1～2 月	3.57	4.56	3.23	-0.36	0.145	0.200	0.043	0.134	0.891
	3～4 月	4.05	4.29	3.65	-0.26	0.090	0.172	0.110	0.107	0.441
	5～6 月	4.40	4.23	3.98	-0.39	0.187	0.227	0.084	0.551	1.068
	7～8 月	3.79	3.61	3.14	-0.19	0.192	0.117	0.344	0.221	0.302
	9～10 月	3.87	3.78	3.44	-0.31	0.214	0.161	0.036	0.314	0.773
	11～12 月	3.48	3.82	2.95	-0.19	0.096	0.099	0.190	0.106	0.277

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

(3) 時間帯単位の価格データに MRJ を適合させた場合の推定値

		α_1	α_2	α_3	α_4	k	σ	λ	μ_1	σ_1
JEPX	1～2 月	9.35	9.69	6.43	-1.14	1.751	0.36	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	11.71	12.28	7.44	-1.90	1.025	1.08	0.000	(-)	(-)
	5～6 月	11.56	14.11	7.01	-2.48	1.862	0.64	0.000	(-)	(-)
	7～8 月	11.14	16.07	5.71	-0.05	3.799	0.02	0.595	0.34	3.69
	9～10 月	12.53	16.54	7.05	-1.84	1.918	0.89	0.031	9.71	10.38
	11～12 月	13.34	14.51	8.42	-2.24	1.356	0.76	0.000	(-)	(-)
BELPX	1～2 月	43.20	29.61	1.92	4.37	0.465	5.94	0.260	8.78	9.86
	3～4 月	28.93	25.53	16.71	7.47	1.006	5.08	0.000	(-)	(-)
	5～6 月	39.83	48.66	22.32	-12.39	1.286	7.41	0.029	146.69	180.81
	7～8 月	38.25	43.56	23.61	-9.38	1.763	4.60	0.000	(-)	(-)
	9～10 月	60.16	43.80	8.99	7.70	0.583	11.44	0.075	47.73	85.80
	11～12 月	90.93	54.82	12.75	21.59	0.896	17.27	0.071	95.25	163.54
PowerNext	1～2 月	60.08	36.23	10.81	-9.75	0.473	9.84	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	35.57	33.81	24.78	-6.26	1.264	4.36	0.000	(-)	(-)
	5～6 月	39.82	46.70	23.98	-13.40	1.888	4.81	0.000	(-)	(-)
	7～8 月	37.85	42.93	22.57	-10.45	1.462	5.07	0.000	(-)	(-)
	9～10 月	67.03	50.82	15.75	-8.45	0.556	11.35	0.080	45.80	83.79
	11～12 月	111.41	74.90	34.94	-20.34	0.907	17.16	0.071	93.48	161.41
EXAA	1～2 月	58.56	39.13	13.57	-13.57	0.648	9.03	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	32.63	32.06	21.37	-6.29	1.002	3.19	0.126	13.23	9.72
	5～6 月	24.77	28.46	19.17	-1.44	0.932	2.43	0.323	22.49	18.02
	7～8 月	25.36	36.63	15.65	-1.41	0.714	3.97	0.215	18.24	10.13
	9～10 月	42.30	40.52	3.88	1.16	0.360	6.43	0.303	20.12	33.49
	11～12 月	88.33	55.02	-2.30	-11.83	0.299	9.03	0.415	12.39	47.80
EEX	1～2 月	42.01	35.18	14.45	-9.69	0.716	5.83	0.227	11.66	10.18
	3～4 月	32.76	32.25	22.20	-6.47	0.943	4.09	0.083	19.38	22.91
	5～6 月	26.93	38.83	19.04	-3.80	0.825	4.87	0.208	27.82	29.06
	7～8 月	31.35	35.16	19.59	-7.25	1.216	2.90	0.357	9.52	7.87
	9～10 月	52.49	44.99	15.91	-5.75	0.558	7.38	0.217	23.06	29.62
	11～12 月	84.97	67.46	14.88	-20.72	0.611	14.69	0.170	31.67	60.05
IPEX	1～2 月	116.11	73.16	40.84	-16.86	1.725	7.98	0.000	(-)	(-)
	3～4 月	74.08	60.96	28.12	-13.92	1.329	4.23	0.574	14.11	10.61
	5～6 月	65.31	59.32	16.82	0.70	0.618	9.51	0.197	50.86	16.77
	7～8 月	80.20	76.47	26.98	-4.38	0.879	8.60	0.263	41.35	21.81
	9～10 月	83.60	62.25	16.36	4.32	0.754	8.90	0.169	52.08	15.74
	11～12 月	131.92	79.09	42.54	-12.44	1.042	8.93	0.245	10.21	26.46
NSW	1～2 月	41.31	48.18	26.95	-7.25	2.177	4.68	0.098	176.00	335.95
	3～4 月	75.83	83.26	33.33	-12.99	0.537	19.90	0.072	63.65	151.29
	5～6 月	90.81	63.38	49.08	-13.23	1.117	12.07	0.192	255.51	645.66
	7～8 月	73.47	36.61	28.28	-8.16	0.859	12.05	0.122	64.88	64.52
	9～10 月	61.41	48.09	27.97	-12.19	0.628	11.17	0.012	140.96	471.50
	11～12 月	41.58	46.55	25.80	-9.54	1.062	6.01	0.084	42.42	66.27

先進諸国における電力一日前市場の価格変動の特徴について

(4) 時間帯単位の価格データに GMRJ を適合させた場合の推定値

		α_1	α_2	α_3	α_4	k	σ	λ	μ_1	σ_1
JEPX	1～2月	2.24	2.27	1.85	-0.14	1.665	0.140	0.000	(-)	(-)
	3～4月	2.47	2.51	2.00	-0.19	1.081	0.191	0.000	(-)	(-)
	5～6月	2.46	2.65	1.92	-0.25	1.823	0.205	0.000	(-)	(-)
	7～8月	2.51	2.85	1.80	-0.26	2.281	0.368	0.000	(-)	(-)
	9～10月	2.55	2.84	1.93	-0.17	1.833	0.269	0.007	0.983	0.000
	11～12月	2.61	2.69	2.11	-0.21	1.309	0.160	0.000	(-)	(-)
BELPX	1～2月	4.12	3.55	2.33	-0.12	0.298	0.107	0.421	0.127	0.370
	3～4月	3.37	3.25	2.97	0.22	1.104	0.286	0.032	-0.764	0.645
	5～6月	3.70	3.88	3.03	-0.45	1.522	0.569	0.049	0.815	0.710
	7～8月	3.64	3.76	3.07	-0.31	1.804	0.563	0.000	(-)	(-)
	9～10月	4.14	3.72	2.77	0.26	0.601	0.312	0.059	0.639	0.316
	11～12月	4.74	3.92	2.22	0.31	0.400	0.126	0.602	0.231	0.378
PowerNext	1～2月	4.25	3.61	2.71	-0.32	0.497	0.287	0.000	(-)	(-)
	3～4月	3.51	3.51	3.24	-0.19	2.293	0.415	0.008	-4.257	2.468
	5～6月	3.68	3.82	3.05	-0.43	1.717	0.571	0.000	(-)	(-)
	7～8月	3.64	3.74	3.03	-0.36	1.517	0.492	0.000	(-)	(-)
	9～10月	4.35	3.96	2.92	-0.30	0.537	0.275	0.152	0.413	0.339
	11～12月	5.16	4.30	3.35	-0.40	0.601	0.310	0.127	0.230	0.535
EXAA	1～2月	4.11	3.64	2.91	-0.33	0.800	0.277	0.026	-1.117	0.731
	3～4月	3.44	3.43	3.03	-0.18	0.805	0.125	0.357	0.141	0.303
	5～6月	3.16	3.71	2.77	-0.10	0.508	0.162	0.227	0.631	0.487
	7～8月	3.66	3.74	3.12	-0.34	2.032	0.467	0.000	(-)	(-)
	9～10月	4.50	3.95	3.07	-0.37	0.588	0.314	0.026	0.228	1.556
	11～12月	5.24	4.33	2.97	-0.66	0.545	0.343	0.000	(-)	(-)
EEX	1～2月	3.91	3.58	2.70	-0.38	0.577	0.174	0.514	0.101	0.325
	3～4月	3.72	3.51	3.07	-0.37	0.849	0.361	0.000	(-)	(-)
	5～6月	3.84	3.89	3.20	-0.47	1.609	0.581	0.000	(-)	(-)
	7～8月	3.64	3.69	3.10	-0.33	1.680	0.436	0.000	(-)	(-)
	9～10月	4.53	3.96	3.10	-0.40	0.605	0.332	0.000	(-)	(-)
	11～12月	5.19	4.32	2.81	-0.62	0.499	0.419	0.000	(-)	(-)
IPEX	1～2月	4.88	4.24	3.60	-0.16	1.349	0.318	0.003	-0.938	0.000
	3～4月	4.47	4.19	3.65	-0.19	1.636	0.395	0.000	(-)	(-)
	5～6月	4.48	4.41	3.74	-0.20	2.894	0.614	0.000	(-)	(-)
	7～8月	4.66	4.61	3.74	-0.19	1.316	0.456	0.000	(-)	(-)
	9～10月	4.49	4.03	2.83	0.29	0.484	0.192	0.142	0.901	0.000
	11～12月	5.29	4.32	3.66	-0.19	0.671	0.209	0.000	(-)	(-)
NSW	1～2月	3.72	4.03	3.20	-0.27	1.321	0.446	0.098	0.955	0.798
	3～4月	4.56	4.51	3.38	-0.29	0.400	0.288	0.120	0.187	0.651
	5～6月	4.95	4.07	3.60	-0.30	0.567	0.255	0.168	0.778	0.842
	7～8月	6.16	2.96	2.42	-0.29	0.240	0.300	0.000	(-)	(-)
	9～10月	4.30	3.83	3.24	-0.33	0.499	0.261	0.009	0.749	1.885
	11～12月	3.57	3.76	3.12	-0.23	0.785	0.187	0.274	0.354	0.354

(終わり)

(2010年11月24日受理)