

平成 27 年度商取引適正化・製品安全に係る事業
電力先物の価格形成手法に関する調査

報 告 書

平成 28 年 3 月

株式会社東京商品取引所

目次

第1章	本件調査の概要	4
1.1	背景及び目的	4
1.2	調査内容	4
第2章	海外における電力フォワードカーブモデルの調査・分析	6
2.1	一般的に利用されている電力フォワードカーブモデル	6
2.1.1	ファンダメンタルモデル	7
2.1.2	マーケットアプローチモデル	10
2.1.3	市場環境とフォワードカーブモデル	12
2.2	取引参加者及び取引所における利用事例	13
2.2.1	海外の取引参加者における利用事例	13
2.2.2	取引所におけるセトルメント価格の設定方法	14
2.3	トレーディング、リスクマネジメントに関する組織体制	15
2.3.1	独 E.ON におけるリスクマネジメント体制	15
2.3.2	仏 EDF におけるリスクマネジメント体制	16
2.4	電力フォワードカーブ算定に必要な情報の開示義務	17
第3章	日本における電力フォワードカーブモデルの利用状況	19
3.1	電力フォワードカーブモデルの利用状況	19
3.1.1	現物取引における利用用途の想定	19
3.1.2	現物取引における利用状況	19
3.2	電力フォワードカーブモデルの研究状況	21
3.3	事前インタビューでの意見	21
3.3.1	ファンダメンタルモデルが妥当とする主な意見	22
3.3.2	マーケットアプローチモデルが妥当とする主な意見	23
3.3.3	その他の主な意見	23
第4章	日本市場向け電力フォワードカーブモデル及びその応用の検討	25
4.1	インタビュー結果の総括とモデル検討に当たったの方針	25
4.1.1	市場参加者向けモデル	25
4.1.2	帳入値段算定モデル	25
4.2	日本向けフォワードカーブモデルの算定例	26
4.2.1	ジェネレーションスタックモデルの算定例	26
4.2.2	マーケットアプローチモデルの算定例	34
4.3	日本向けフォワードカーブモデルの留意点	41
4.4	帳入値段算定モデルへの応用	42
付録1	：統計的パターン作成手法	43

付録 2 : 価格過程のモデル化	44
付録 3 : フォワードカーブ作成に当たって必要となるデータの一覧表	46

図表目次

図 2-1 ファンダメンタルモデルによるフォワードカーブの算定イメージ	8
図 2-2 メリットオーダー曲線と需要曲線	8
図 2-3 マーケットアプローチモデルの算定イメージ	10
図 2-4 マーケットアプローチモデルによる電力価格算定の基本的構造	11
図 2-5 燃料価格の変動要素を入れたモデルの算定イメージ	11
図 2-6 一般的なトレーディングデスクの体制	15
図 2-7 E.ON における発電部門とトレーディング部門の役割分担	16
図 2-8 EDF における発電部門とトレーディング部門の役割分担	17
図 3-1 現物取引における電力フォワードカーブモデルの利用の状況	20
図 3-2 電力フォワードカーブモデルの研究等の状況	21
図 3-3 電力フォワードカーブモデル検討の方向性に関する意見	22
図 4-1 簡便なファンダメンタルモデルの作成手順の例	26
図 4-2 需要見通しのイメージ	27
図 4-3 電源スタックのイメージ	27
図 4-4 需要見通しの作成方法の概要	28
図 4-5 全国の電力消費実績の作成方法	28
図 4-6 再生可能エネルギー発電量	29
図 4-7 燃料データ収集・整理のプロセス	31
図 4-8 燃料のデータソースの例	31
図 4-9 燃料の単回帰分析の例	31
図 4-10 月別の電源スタックのイメージ	32
図 4-11 電力価格（限界費用）の算定イメージ	33
図 4-12 月次フォワードカーブの算定イメージ	33
図 4-13 《再掲》マーケットアプローチモデルによる電力価格の基本的構造	34
図 4-14 JEPX スポット価格（季節性除外）とドバイ原油スポット価格の相関関係	35
図 4-15 簡便なマーケットアプローチモデルの作成手順例の概要	35
図 4-16 簡便なマーケットアプローチモデルのデータの整理	36
図 4-17 季節調整係数の算定	37
図 4-18 過去の JEPX スポット価格の季節調整	38
図 4-19 JEPX スポット価格とドバイ原油スポット価格の単回帰分析	39

図 4-20	電力フォワードカーブの算定（季節性なし）	40
図 4-21	季節性を反映させた電力フォワードカーブ	40
表 2-1	代表的なフォワードカーブモデル	7
表 2-2	ファンダメンタルモデルとマーケットアプローチモデルの長所・短所と適用対象	12
表 2-3	取引参加者によるフォワードカーブの利用事例	13
表 2-4	取引参加者によるセトルメント価格の決定方法	14
表 2-5	インサイダー情報の公表内容と公表時期	18
表 4-2	プラントデータのイメージ	29
表 4-3	プラントデータ情報の取得方法	30
表 4-4	回帰分析によるマーケットヒートレート（フォーミュラ）の算定結果	39
表 4-5	提案ジェネレーションスタックモデルの留意点	41
表 4-6	提案マーケットアプローチモデルの留意点	42

第1章 本件調査の概要

1.1 背景及び目的

現在、電力システム改革の様々な取組が進められているところであり、2016年4月に、電力システム改革の第二段階として、電力の小売・発電の全面自由化が行われる予定である。新規の小売電気事業者による卸電力市場からの購入が増加し、また、卸電気事業者等から一般電気事業者への卸供給への規制が撤廃されることに伴い、卸電力市場への売却も増加することが想定され、卸電力市場の取引量が増加していく可能性が高まっている。卸電力市場の価格は需給に応じて変動するため、かかる価格変動をヘッジするための電力先物市場が必要となる。このような状況の下、経済産業省において電力先物市場の創設について検討（電力先物市場協議会）が行われ、2015年7月に報告書が取りまとめられた。

電力先物市場の活性化のためには、電気事業者の他、取引の相手方として金融機関等、多様なプレイヤーの電力市場への参入が必要であるが、市場開設当初は市場の相場観の無さゆえにプレイヤーの参入障壁が極めて高い。この障壁を下げ、市場参加者を拡大させるためには、市場参加者に相場観を示すため電力のフォワードカーブ（相場観）モデルが必要である。

本調査は、日本市場の特性を踏まえた中立的なフォワードカーブの開発、モデルの構造や必要な情報、考え方を整理するとともに、フォワードカーブの普及啓発を行い、もって卸電力市場、電力先物市場の早期の活性化と秩序ある相場形成に貢献することを目的とする。

1.2 調査内容

本調査「電力フォワードカーブモデルの構造形成と課題整理」においては、海外での先行事例の調査・分析や、日本市場の特性を踏まえたモデルにするためのデータ等の収集、市場参加予定者に対するヒアリングを実施する。また、データ収集・ヒアリングを通じて得た情報を基に、日本市場向けの簡易な電力フォワードカーブモデルを作成する。具体的な内容は次のとおりである。

(1) 海外におけるフォワードカーブモデルの調査・分析

既に成熟している海外電力先物市場において用いられているフォワードカーブモデル、取引参加者及び取引所における利用事例を、文献等により調査・分析する。

(2) 日本におけるフォワードカーブモデルの利用状況

電力先物市場へ参加が見込まれる事業者に対して、現物市場において用いているフォワードカーブモデル、利用事例、フォワードカーブ作成にあたっての留意点や方向性等に関するヒアリングを行う。また、フォワードカーブモデルの作成後も同様にヒアリングを行い、モデルの合理性や妥当性を検証する。

(3) 日本向け電力フォワードカーブモデルの作成・応用の検討

上記(1)(2)を踏まえ、日本市場の実情を反映し、多くの取引参加者が簡易に運用可能なフォワードカーブモデルを作成するとともに、モデル作成に当たって必要となる情報を整理する。併せて、当該モデルを用いて帳入値段の算出へ活用するなど、モデルの応用を検討する。

第2章 海外における電力フォワードカーブモデルの調査・分析

2.1 一般的に利用されている電力フォワードカーブモデル

(1) フォワードカーブの定義

フォワードカーブは、将来の電力の受け渡しについて、現時点で約定可能な価格を表すものである。すなわちフォワードカーブは将来のスポット価格の単純な予測ではなく、将来の卸価格に対する市場参加者の「現時点での」平均的な見方を反映したものであることに注意が必要である。

(2) 電力フォワードカーブの特徴と要件

電力のフォワードカーブは他のコモディティのフォワードカーブとは性質を異にする。電力は、①生活必需品ともいえる不可欠なコモディティであること、②リアルタイムでの需給バランスの維持が必要であり、ほとんど所蔵できないこと（水力発電は例外）などの特徴がある。このため電力のフォワードカーブの算定に当たっては、保管コスト等を考慮する必要性がない一方、需要・供給に応じて価格が変動するなどの特徴を反映させたモデル化が行われている。

電力フォワードカーブに関する研究¹では電力フォワードカーブに次の要件を求めている。

- 無裁定（Arbitrage Free）な価格であること
- 価格変動の周期性（季節、月、週、日内）を適切に表現していること
- 特殊日需要（祝休日、正月、盆）を適切に表現していること
- スムーズに変動すること
- 過去の特別なイベントと無関係であること
- 関係する他の市場価格を反映していること

(3) 代表的電力フォワードカーブモデル

電力の卸市場価格をシミュレートするマーケットモデルは、ファンダメンタルモデル、マーケットアプローチモデルの二つに大別される。フォワードカーブモデルは、これらのマーケットモデルを基礎に作成されている。

ファンダメンタルモデルは電源のメリットオーダー²をシミュレートし、需要を満たす最も高い電源の変動費を求めてこれを市場のマージナルコストとし、このマージナルコストをフォワード価格算定のベースとするものである。ファンダメンタルモデルではスポット市場の価格形成機能が不十分な場合でも、理論的なフォワードカーブを算定することが可能である。他方で、マーケットアプローチモデルは、スポット価格の値動きをモデル化することにより、フォワード価格を算定するモデルであり、市場価格のヒストリカルデータが十分に蓄積

¹ 出典：M. Hildmann, et al., “What Makes a Good Hourly Price Forward Curve?”, IEEE 2013

² 発電所を変動費の安い順に起動すること

されている場合には、フォワードカーブの作成に有効である。

両モデルには様々なものがあるが、欧米の電力市場では表 2-1 のようなものが利用されている。以下では、これらのうちから、ファンダメンタルモデル及びマーケットアプローチモデル別に特に一般的なモデルについて記述する。

表 2-1 代表的なフォワードカーブモデル

分類	需給構造	代表的モデル
ファンダメンタルモデル	考慮する	<ul style="list-style-type: none"> ● ジェネレーションスタックモデル（個々の電源の情報を使い、簡易的に現実のメリットオーダーをシミュレートするもの） ● 電源ディスパッチモデル（個々の電源の情報を使い、最適化手法により現実のメリットオーダーをシミュレートするもの） ● SMaPSモデル（Spot Market Price Simulation Model：メリットオーダーを関数として表現） ● 多商品SMaPSモデル（上記で燃料を複数に拡張したもの）
マーケットアプローチモデル	考慮しない	<p>《古典的モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 幾何学的ブラウン運動モデル（GBM） ● 平均回帰モデル（Mean Reverting Model） ● ジャンプ拡散モデル（Jump Diffusion Model） <p>《応用モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Schwartz-Smith Model（長期、短期のショック要因） ● レジームスイッチングモデル（確率過程の変化を導入） ● 2ファクターモデル、マルチファクターモデル（複数の価格変動要因を加味）

出典 アレキサンダー・アイデランド、ウルジストフ・ウォロニーク『電力取引の金融工学』エネルギーフォーラム、2004 / Burger, Markus et al., *Managing Energy Risk: An Integrated View on Power and Other Energy Markets*, John Wiley & Sons, 2007 などをもとに作成

2.1.1 ファンダメンタルモデル

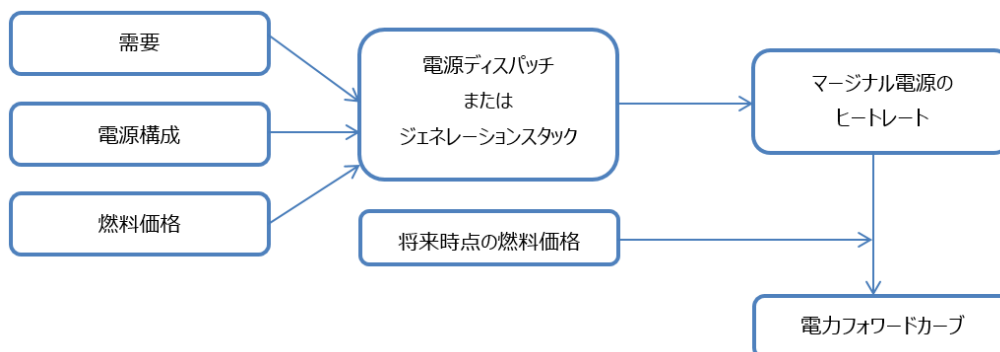
ファンダメンタルモデルには、計算のアプローチ別にいくつかのモデルがあるが、代表的なものとして、メリットオーダーに基づく供給曲線と需要曲線の交点からマージナルコストを算定するジェネレーションスタックモデル³や、総発電コストを最小化する電源運用を求める最適ディスパッチモデルがある。また、そのほかに、SMaPSモデル（Spot Market Price Simulation Model）モデル⁴と呼ばれるものがある。いずれの

³ 出典：土方薫『電力デリバティブ』シグマベイスキャピタル、2004

⁴ Burger, Markus et al., *Managing Energy Risk: An Integrated View on Power and Other Energy Markets*, John Wiley & Sons, 2007

モデルも需要と供給のバランスをシミュレートし、その限界費用（マージナルコスト）をベースとして電力価格を算定する点で共通している。図 2-1 にファンダメンタルモデルのフォワードカーブの算定イメージを示す。

図 2-1 ファンダメンタルモデルによるフォワードカーブの算定イメージ



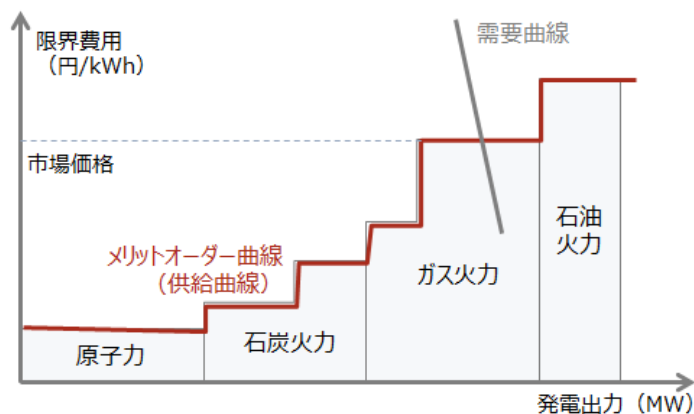
出典 三菱総合研究所

ファンダメンタルモデルによるフォワード価格算定に当たっては、需要の想定、電源構成、発電プラントの容量、発電効率、燃料コスト等、多くの入力情報が必要となる。

(1) ジェネレーションスタックモデル

ジェネレーションスタックモデルは、個々の電源の情報から供給曲線を作成する最も単純なファンダメンタルモデルである。ジェネレーションスタックモデルによる市場価格の算定のイメージは図 2-2 に示すとおりである。メリットオーダーに基づく供給曲線（赤線）を算定し、需要曲線（黒線）の交点から、限界費用（マージナルコスト）として電力価格が決まることになる。なお、電力の場合、需要の価格弾力性が極めて小さいため、需要曲線は垂直と仮定することが多い。

図 2-2 メリットオーダー曲線と需要曲線



出典 三菱総合研究所

ジェネレーションスタックモデルは、計算量が少なく、計算速度が速いという利点がある一方、起動停止コストや、発電機ごとの部分負荷効率が加味されないなど現実の電源運用を十分に模擬していないため、精度が劣るという欠点がある。

(2) 最適ディスパッチモデル

最適ディスパッチモデルは、ジェネレーションスタックモデルで加味されない電源の起動・停止費用や部分負荷効率等の影響を織り込み、より現実の電源運用をシミュレートした精緻なモデルである。需給バランスの制約の下、発電費用の総合計が最小となるように発電機の出力を決定するために次の最適計画問題を解く。

$$\text{需給バランスの制約：} \quad \sum_g P_{g,t} \geq L_t \quad \forall t$$

$$\text{発電費用合計の最小化：} \quad C = \sum_{g,t} (CA_{g,t} + cB_g \cdot \bar{B}_{g,t} + cV_g \cdot P_{g,t}) \equiv \min.$$

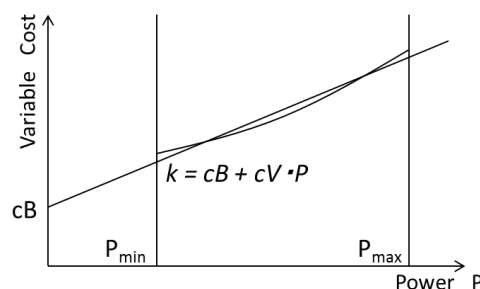
ここで、 L_t 時刻 t における負荷量、 $CA_{g,t}$ は発電機 g の時刻 t における起動コスト、 cB_g は発電機 g の部分負荷費用曲線⁵の切片、 $\bar{B}_{g,t}$ は発電機 g の時刻 t における稼働状態（稼働時は 1、停止時は 0）、 cV_g は発電機 g の部分負荷費用曲線の傾き、 $P_{g,t}$ は発電機 g の時刻 t における出力をそれぞれ表す。

その他の制約条件として、ランプレート（電源の立ち上がり速度）、起動停止時間、連系線制約などを導入することができる。

(3) SMaPS モデル (Spot Market Price Simulation Model)

SMaPS モデルは、電力需要を電力スポット価格のファンダメンタルドライバーとして活用するモデルであるが、メリットオーダー曲線をスポット価格の過去の値動きから経験的に求める点で、ジェネレーションスタックモデルや最適ディスパッチモデルとは異なる。具体的には、経験的なメリットオーダー関数に短期の価格

⁵ ここでの部分負荷費用曲線とは、発電機の出力に対する変動費（燃料費）の曲線のことを指す。なお、上記の式では、簡略化のため、下図のように直線で一次近似したものを利用している。



変動、長期の価格変動を加味することで、電力価格を確率過程で表現するモデルである。これを算定式で表現すると以下ようになる。

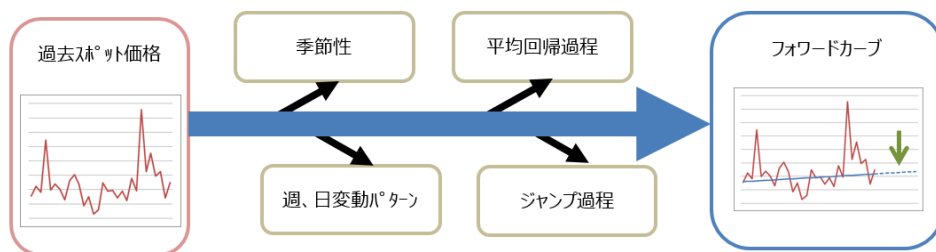
$$S(t) = \exp\left(f(t, L(t)/v(t)) + X(t) + Y(t)\right).$$

ここで、 $S(t)$ は時刻 t における電力スポット価格、 $f(t, L)$ は経験的メリットオーダーカーブ、 v はプラントの平均稼働率、 L 需要、 X は短期の価格変動要因、 Y は長期の価格変動要因を表す⁶。また、 f に電源構成、再生可能エネルギー、燃料価格等の要素を取り入れた「Multi-Commodity SMaPSモデル」も提唱されている⁷。

2.1.2 マーケットアプローチモデル

電力の市場価格の変動には、①季節性、②平均回帰性（価格が高騰しても元の回帰値に戻る）、③週・日変動パターン、④極端な価格変動（ジャンプまたは価格スパイク）、⑤燃料価格との相関などの特性がある。マーケットアプローチモデルでは、これらの要因を統計的に処理して将来の価格変動をモデル化するアプローチをとる⁸。図 2-3 のように、過去の電力スポット価格の値動きから、季節性、平均回帰性、週・日変動パターン、ジャンプ過程等のモデル化が行われている⁹。

図 2-3 マーケットアプローチモデルの算定イメージ



出典 三菱総合研究所

電力価格は燃料価格に強く連動していることから、マーケットアプローチモデルでは、燃料価格の変動要因を織り込むことが一般的である。燃料の価格変動を考慮した電力価格の基本的な構造は図 2-4

⁶ 出典：M.Burger et al., "A spot market model for pricing derivatives in electricity markets, Quantitative Finance 4", 2004, 109-122

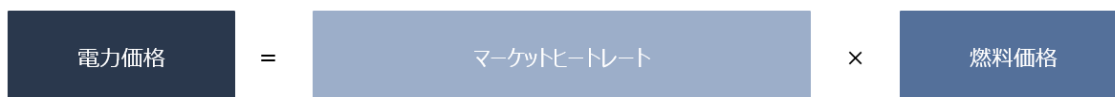
⁷ 出典：Muller, J., "Stochastic modeling of the spot price of electricity incorporating commodities and renewables as exogenous factors. Preprint from University of Siegen", 2013

⁸ 具体的なモデルの種類や算定方法は、Burger, Markus et al., *Managing Energy Risk: An Integrated View on Power and Other Energy Markets*, John Wiley & Sons, 2007 に詳しい。

⁹ 平均回帰性やジャンプ過程等のモデル化の方法については、付録 2 を参照。

ようになる。需給構造から求めたヒートレートをを用いるファンダメンタルモデルとは異なり、マーケットアプローチモデルでは、電力・燃料の市場価格からヒートレートを算定する。

図 2-4 マーケットアプローチモデルによる電力価格算定の基本的構造

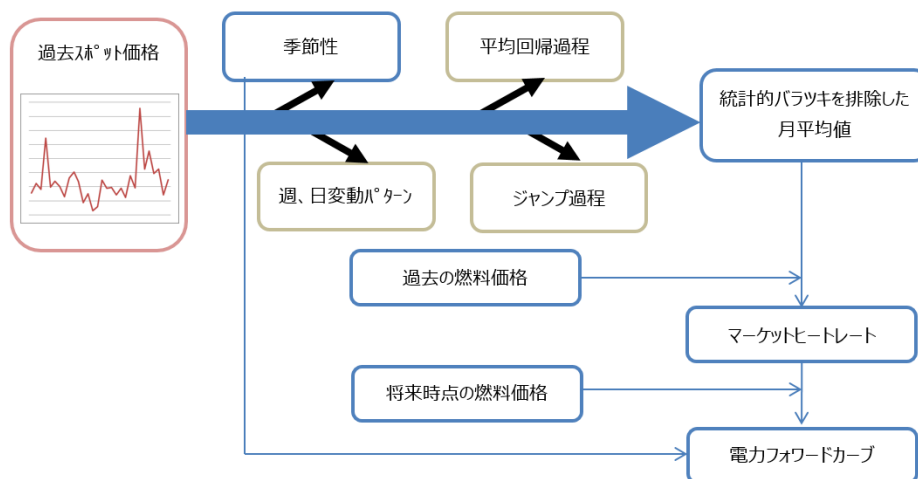


出典 三菱総合研究所

フォワードカーブの算定プロセスを図式化すると図 2-5 ようになる。①まず、過去のスポット価格から、季節性、平均回帰性、曜日・日変動パターン、ジャンプ過程などの統計的ばらつきを排除した月平均値を算定する。②次に、これと過去の燃料価格との相関を求めることにより、マーケットヒートレートを算定し、将来の各時点の燃料価格と掛け合わせることで、季節性のない電力フォワードカーブが算出される¹⁰。③最後に、①で除外した季節性を反映することにより、季節性を加味した電力フォワードカーブが算定できる。

なお、上記で求められた月次粒度の電力フォワードカーブに、週、日変動パターンや各時間帯の変動パターンを掛け合わせることで、日次あるいは時間単位の粒度のフォワードカーブも作成することも可能である（付録 1 を参照）。

図 2-5 燃料価格の変動要素を入れたモデルの算定イメージ



出典 三菱総合研究所

¹⁰ 将来の燃料価格として、燃料市場が十分に流動的な場合は、燃料先物価格を利用するのが一般的である。

2.1.3 市場環境とフォワードカーブモデル

一般的に、市場の流動性が低い場合、需要と供給のバランスから理論値を算定するファンダメンタルモデルが有効である。将来の需給環境の変化を見通すことができれば、これを反映することが可能である。しかし、ファンダメンタルモデルの構築には需要想定や電源構成の想定等、数多くのインプットデータが必要となるため、その扱いは煩雑である。特に重要な電源の情報（効率や起動・停止情報など）は一般的には入手が困難である。

他方で、マーケットアプローチモデルでは、想定データが少なく、作成者の恣意性が入らないなどの長所がある。しかし、市場の流動性が低い場合や十分なヒストリカルデータが得られない場合、データの信頼性の確保が難しいこと、将来の電源構成の大きな変化を反映しにくいことなどの短所もある。

両者の長所・短所及び利用に適した市場・商品をまとめると表 2-2 のようになる。

表 2-2 ファンダメンタルモデルとマーケットアプローチモデルの長所・短所と適用対象

モデル	概要	長所	短所	適用対象
ファンダメンタルモデル	「需要と供給のバランス」をシミュレーションし作成	<ul style="list-style-type: none"> ● 市場の流動性が低い場合でも作成可能 ● 将来の需給環境の変化を反映可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 必要なデータが多い 注：入手が困難な場合あり ● 作成者の恣意性が入りやすい ● データの精度が低い場合、短期的な変動を反映するのが困難 ● 市場価格に関するデータを取り込まないため、モデルで算定した理論値と市場価格が乖離する可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ● 流動性が低い市場・商品
マーケットアプローチモデル	「過去の取引データ」を統計処理し作成	<ul style="list-style-type: none"> ● 必要なデータが少ない ● 作成者の恣意性が入りにくい ● 市場価格から導かれるマーケットヒートレート等に立脚するため、市場価格の水準感を反映できる 	<ul style="list-style-type: none"> ● 流動性の低い市場では信頼性に劣る。 ● 将来の需給環境の変化の反映が困難^注 注：ただし、部分的にファンダメンタルの要素を取り入れて、将来の需給環境の変化を反映する方法もある。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 流動性の高い市場／需給環境の著しい変化のない市場・商品

出典 三菱総合研究所

2.2 取引参加者及び取引所における利用事例

2.2.1 海外の取引参加者における利用事例

欧米諸国では、取引参加者がフォワードカーブモデルを自社で開発したり、情報プロバイダーが提供するフォワードカーブを参考にしたりして日々の取引を行っている。

代表的なフォワードカーブのプロバイダーには Platts 社や Argus 社などがあり、様々な期間や粒度のフォワードカーブが提供されている。情報プロバイダーからの情報はブローカーなどの取引実績情報の収集に基づいて作成されているものである。

- Argus : 50 以上の地域毎に、6～7 年分の月単位、四半期単位等のフォワードカーブを毎日配信。また、主要な一部の特定地域についてはインプライドボラティリティも合わせて提供。
- Platts : 5 地域 66 の主要なトレーディングハブにおける 10 年分のフォワードカーブを毎日配信。また、20 年分のフォワードカーブを毎月提供。

上記の情報以外に、比較的規模の大きいエネルギー企業の場合、自らがフォワードカーブモデルを作成することが多い。これは自らの先物市場の見通しを作成し、情報プロバイダーから得られる情報と比較分析することが主目的である。

他に、フォワードカーブは表 2-3 のように、様々な用途に利用されている¹¹。相対取引におけるプライシングをはじめとして、リスク管理（保有する資産・契約の時価評価を通じたリスク量の把握）、ポートフォリオの最適化、ヘッジ取引の判断などを目的とした利用が一般的である。また、長期のフォワードカーブは、発電所の新設、リプレイスへの投資や売却の判断にあたって活用できるほか、投資や売却の際の当該発電所の価値評価（バリュエーション）にも利用されている。

表 2-3 取引参加者によるフォワードカーブの利用事例

分類	利用事例
プライシング	<ul style="list-style-type: none">● 先渡取引（JEPX）、先物取引（新設予定）、相対取引の値決め● 管理会計における社内仕切値（発電部門／小売部門間）の決定
ポートフォリオマネジメント	<ul style="list-style-type: none">● 発電所の稼働計画／電力の調達計画の策定● 燃料の調達計画の策定
リスクマネジメント	<ul style="list-style-type: none">● 保有ポジションの時価評価（⇒日次 PL の作成など）● リスク量の把握（⇒ヘッジ取引の判断）
バリュエーション	<ul style="list-style-type: none">● 発電所の新設／更新時の投資評価

出典 三菱総合研究所

¹¹ 欧州の電力フォワードカーブ提供事業者、取引参加者等からのヒアリング

2.2.2 取引所におけるセトルメント価格の設定方法

各国の主要な取引所（NASDAQ OMX Commodities、Euroean Energy Exchange AG (EEX)、ICE グループ、CME グループ、オーストラリア証券取引所 (ASX) グループ）におけるセトルメント価格の決定方法を表 2-4 に示す。約定取引がある場合は、一定期間における取引量の加重平均によって算定する方法が一般的（NASDAQ 及び ICE グループ）であるが、約定取引が存在してもブローカーからの情報に基づいて算定する方法（CME グループ）も見られる。

約定取引や注文がない場合のセトルメント価格の算定方法として最もシンプルなもの、前日のセトルメント価格を採用する方法（ASX グループ）である。しかし、この方法は、長期にわたって約定取引や注文が存在しない場合、セトルメント価格に変化がなく、想定される価格から次第に乖離してしまう問題点も残る。

この点、約定取引や注文の有無にかかわらずブローカーの情報を利用する方法（CME グループ）や、両者がいない場合に外部のインデックスプロバイダー等からの価格情報やトレーダー等から収集した情報を用いる方法（EEX のノルウェーの電力先物）のように、できるだけ市場価格の実勢値に近づける工夫を行っている市場も見受けられる。

表 2-4 取引参加者によるセトルメント価格の決定方法

取引所	日々のセトルメント価格の決定方法
NASDAQ OMX Commodities	<ul style="list-style-type: none"> セトルメント価格算定時間の直前 1 分間に実施された取引量の加重平均（Volume Weighted Average Price (VWAP)）により算定。
Euroean Energy Exchange AG (EEX)	<ul style="list-style-type: none"> 算定方法は商品ごとに異なる。 例えば、ノルウェーの電力先物のセトルメント価格の算定方法は次のとおり。 $\text{セトルメント価格} = 0.75 * \text{「平均取引価格」} + 0.25 * \text{「平均中央値」}$ 「平均取引価格 (AverageTradePrice)」= 実取引の算術平均 「平均中央値 (AverageMid)」= もっとも近い bid/ask の平均 ※約定取引、bid/ask とともにない場合、外部の価格情報（インデックスプロバイダー等）が取引参加者の主たるトレーダーの情報が用いられる。
ICE グループ	<ul style="list-style-type: none"> 特定のセトルメント期間における取引価格の加重平均により算出。 ※市場の停止等の緊急時には、前日のセトルメント価格などを採用。
CME グループ	<ul style="list-style-type: none"> ブローカーの情報を利用（理論価格による算定モデルは利用していない）
オーストラリア証券取引所 (ASX) グループ	<ul style="list-style-type: none"> 取引がない、または有効な近い価格の注文がない場合、前日のセトルメント価格を採用

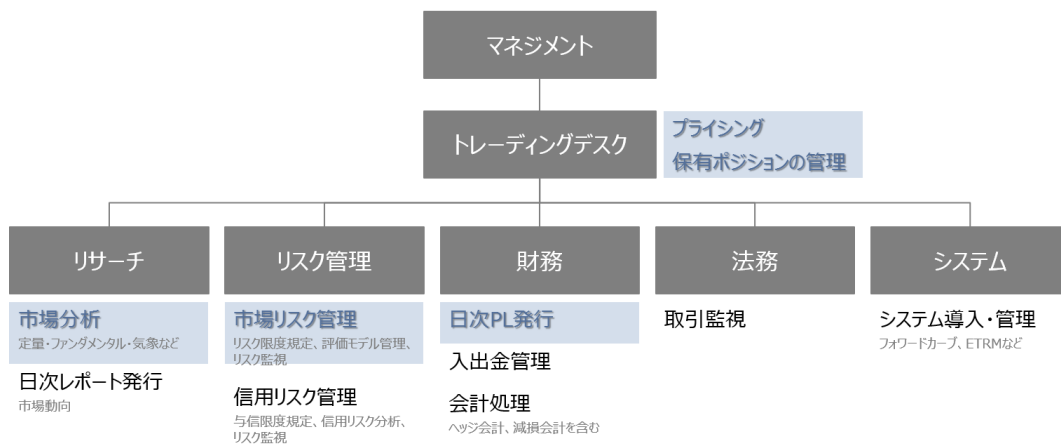
出典 各取引所のウェブサイト公表資料（NASDAQ、EEX、ICE、ASX）または聞き取り調査（CME）を元に三菱総合研究所作成（公表資料：NASDAQ, “NLX Trading Procedures”, 2015 / EEX, “Settlement Pricing Procedure”, 2016 / ICE, “TRADING PROCEDURES”, 2014 / ASX, “Energy Market Policy”, 2015）

2.3 トレーディング、リスクマネジメントに関する組織体制

本節では、海外の市場参加者における電力フォワードカーブの利用事例に関連して、トレーディングやリスクマネジメントの体制についても記述する。

電力トレーディングの先進国である欧州では、図 2-6 に示すとおり、一般に、取引機能をトレーディングデスクに集約し、リサーチ部門、リスク管理部門、財務部門、法務部門、システム部門等のミドル/バックオフィスがサポートする体制がとられている。また、大手電力会社では、複数のクウォンツハウスと契約し、フォワードカーブ、その背景にあるファンダメンタル、分析のためのモデルやツール、リスク管理のためのシステムなどを整備し、電力取引が行われている。

図 2-6 一般的なトレーディングデスクの体制



出典 三菱総合研究所

具体的な組織体制としては、トレーディング及びアセット運用最適化を専門に行う部門（若しくは子会社）が、電力会社のグループ内に新たに設立されることが多い。その組織形態には、事業者のビジネスモデルに依存して、①市場リスクをトレーディング部門が引き受ける組織形態（独 E.ON など）や、②市場リスクを発電部門が引き受ける組織形態（仏 EDF など）がある¹²。

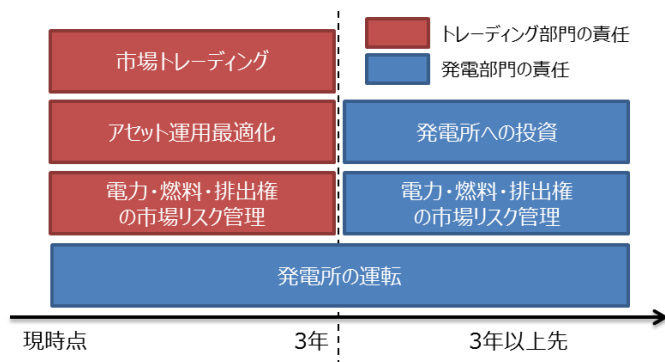
2.3.1 独 E.ON におけるリスクマネジメント体制

ドイツの E.ON においては、トレーディング部門に電源の運用権を移転し、その対価として、発電部門に移転価格を支払う仕組みとなっている。これを図式化すると図 2-7 のようになっている。トレーディング部門では、現時点から向こう3年間について、卸電力や燃料を含めたエネルギー商品の現物取引とヘッ

¹² 欧州事業者のトレーディング部門に関する組織構造は事業者ごとに異なり、各事業者が適切な構造を採用している。

ジ取引、アセット運用最適化、それらの市場管理等を担っている。一方、発電部門は、実際の発電所の運転を担うとともに、長期のエネルギー商品の市場価格リスクを見ながら、発電所の建設投資の意思決定を行っている¹³。

図 2-7 E.ON における発電部門とトレーディング部門の役割分担



出典 電力中央研究所 『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 より作成

2.3.2 仏 EDF におけるリスクマネジメント体制

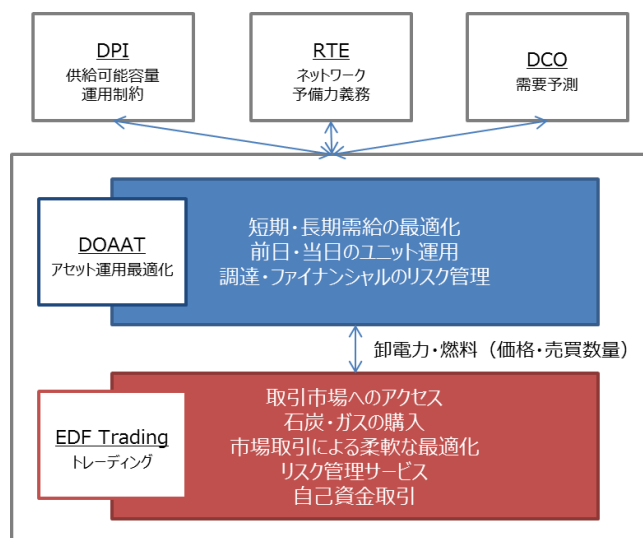
フランスの大手電力会社である EDF では、発電部門が電源の運用権限を持ち、トレーディング部門は市場へのアクセス（ブローカーとしての機能）を担う組織体制をとっている。

具体的には図 2-8 のように、2 つの組織が連携して最適化とトレーディングを行っている。まず、EDF の一部門（DOAAT : Division Optimisation Amont Aval Trading）が、需要想定、運転計画、燃料消費計画、貯炭場容量などに基づき、トレーディング子会社（EDF Trading）に毎月の石炭必要量を指示する。EDF Trading のトレーダーは市場から必要数量を確保し、調達された燃料は DOAAT にスポット価格で受け渡される。このため、EDF Trading は、スポット価格での受渡を前提に、スポット価格より安い燃料の調達を行うなど、市場での取引を通じた利益の追求を行う。このような組織体制により、スポット価格で購入する DOAAT が市場リスクを引き受け、デリバティブ取引によってそれを回避している¹⁴。

¹³出典 電力中央研究所 『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

¹⁴出典 電力中央研究所 『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

図 2-8 EDF における発電部門とトレーディング部門の役割分担



出典 電力中央研究所『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より作成

2.4 電力フォワードカーブ算定に必要な情報の開示義務

経済産業省と公正取引委員会は、電力市場における公正かつ有効な競争の観点から、独占禁止法上又は電気事業法上問題となる行為等を明らかにした「適正な電力取引についての指針」を作成・公表しており、2016年3月に、同年4月に施行予定の電気事業法の一部を改正する法律が施行されること等に伴い、本指針を改定したところである。

改定された「適正な電力取引についての指針」によれば、諸外国の卸電力市場において、インサイダー取引が明示的に禁止されていることなどを踏まえ、日本の卸電力市場の透明性と健全性の確保のために、インサイダー情報を明示した上で、この公表を求める方針を定めている。具体的には、電気の卸取引に関係があり、卸電力市場の価格に重大な影響を及ぼす以下の事実をインサイダー情報としている。

- (A) 認可出力10万kW以上の発電ユニットの計画外停止に係る事実（停止日時、ユニット名、当該発電ユニットが所在するエリア及び発電容量）
- (B) 上記(A)の発電ユニットを保有する発電事業者が合理的に推測する当該ユニットの停止原因及び復旧見通し
- (C) 認可出力10万kW以上の発電ユニットの計画停止を決定した場合における当該決定の事実
- (D) 上記(C)の決定を変更する決定を行った場合における当該変更決定の事実（当該変更決定を更に変更する場合も含む。）

(E) 上記 (A) 又は (C) の発電ユニットの復旧予定日を決定した場合における当該決定の事実

(F) 広域機関の系統情報公開サイト (OASIS) において公表することとされる送電設備の運用容量や使用状況に関する事実等

特に、指針によれば、(A) から (E) は表 2-5 に記載の時期及び方法等に従って、当該情報を公表することが適切であるとしている。

表 2-5 インサイダー情報の公表内容と公表時期

分類	公表内容	公表時期
計画外停止	計画外停止に関する速報 <ul style="list-style-type: none"> ● 発電事業者名 ● 停止した発電ユニットの名称・容量、当該発電ユニットが所在するエリア ● 停止の日時 	計画外停止の発生後 1 時間以内
	計画外停止に関する詳報 <ul style="list-style-type: none"> ● 停止原因 (不明である場合はその旨) ● 復旧見通し (見通しが立たない場合はその旨) 	計画外停止の発生後 4 8 時間以内 (公表した情報に変更・更新がある場合は、変更・更新についての決定後速やかに)
	復旧時期の公表	復旧時期の決定後速やかに
計画停止	計画停止の予定 <ul style="list-style-type: none"> ● 発電事業者名 ● 停止を予定する発電ユニットの名称、容量、当該発電ユニットが所在するエリア ● 停止を予定する期間 	計画停止の決定後速やかに
	計画停止の予定の変更	変更についての決定後速やかに
	復旧時期の公表 (公表済みの計画停止の予定どおりに復旧が行われる場合は不要)	復旧が行われる 4 8 時間前まで

出典 経済産業省、公正取引委員会「適正な電力取引についての指針」2016年3月

電源設備を有する者に対する電源に係る情報開示の義務は、取引の透明性を向上させる市場監視に必要であるとともに、間接的には新規参加者が市場に参加しやすくなるなど、市場活性化の効果も果たすものと考えられる。

第3章 日本における電力フォワードカーブモデルの利用状況

各企業が、現状どの程度電力フォワードカーブモデル及びその実務への応用に習熟しているのか、電力先物取引への参画に向けて、どの程度準備を進めているのかを把握するため、①現物取引における電力フォワードカーブモデルの利用状況、②電力フォワードカーブモデルの研究・検討状況等についてインタビューを行った。

また、第4章で検討する日本市場向けの電力フォワードカーブにおいて、潜在的な市場参加者の意見を取り込むため、当該検討に先立ち、検討の方向性や留意点について、併せてインタビュー（以下「事前インタビュー」）を行った。

なお、当該インタビュー調査は、2015年11月から12月にかけて、一般電気事業者、卸電気事業者、新規参入者（以下、これらを総称して「電気事業者」）、金融機関など計30社に対して実施した。

3.1 電力フォワードカーブモデルの利用状況

3.1.1 現物取引における利用用途の想定

前述の通り、電力フォワードカーブモデルは、将来の卸電力価格に対する市場参加者の平均的な見方を反映したものである。したがって、既に取りが行われている現物取引（先渡市場取引、スポット市場取引、相対取引）においても、以下のような用途で利用されているものと想定される。

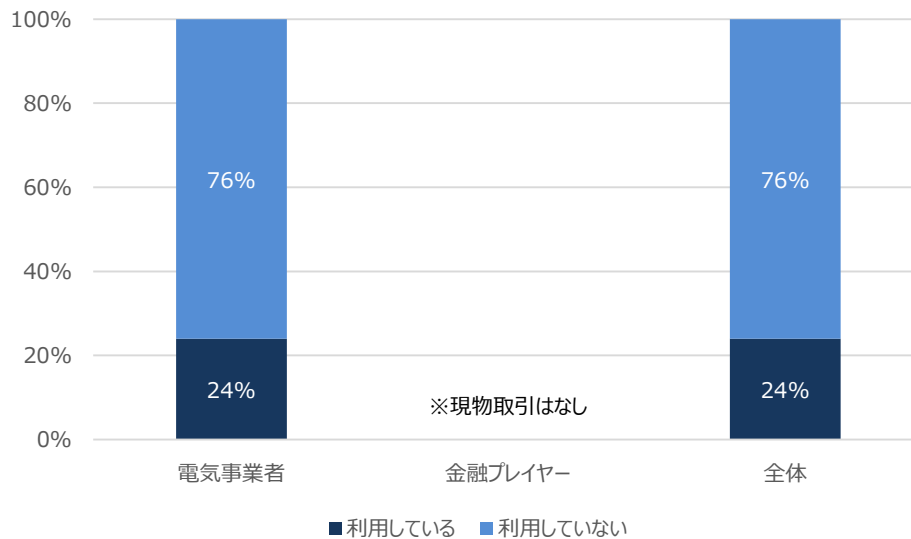
- 先渡市場取引、相対取引におけるプライシング検討
- 電力調達計画（主に常時バックアップ調達量）の検討（スポット市場取引との優劣の比較）
- 発電計画・燃料調達計画の検討（スポット市場取引との優劣の比較）
- 保有ポジションの時価評価
- リスクマネジメント（リスク量の把握）

3.1.2 現物取引における利用状況

(1) 利用状況の概要

既に行われている現物取引において、何らかの電力フォワードカーブモデルを利用している企業は、全体で24%に留まる。更に、電力フォワードカーブモデルを利用している企業も、大半は、プライシングの参考として利用するに留まっている状況であり、電力フォワードカーブモデルを調達計画・発電計画・燃料調達計画の検討、リスクマネジメント（リスク量の把握）などに応用している企業は、一部に留まる。

図 3-1 現物取引における電力フォワードカーブモデルの利用の状況



出典 インタビュー調査をもとに作成

(2) 未利用企業の実態と課題認識

一般電気事業者は、自主的取組みの一環で、自社電源の限界費用をベースに現物取引のプライシングを行っているとの回答であった。また、新規参入者でも、自社電源を保有する企業は、自社電源の限界費用をベースに現物取引のプライシングを行っているとの回答であり、自社電源を保有していない企業では、経験則でプライシングしているとの回答や、小売価格との比較で一定の-marginが確保出来る水準でプライシングしているとの回答が多くあった。特に新規参入者の相対取引に関しては、現状の経験則や感覚に頼ったプライシングではなく、何らかのモデルや価格指標に基づく客観的なプライシングにシフトしなければならないとの問題意識が多く聞かれた。

電源調達や発電の計画にフォワードカーブを活用していない背景として、卸市場の流動性が乏しく、そもそも調達手段が限られることを理由に挙げる企業が多くあった。また、リスクマネジメントを行っていない理由として、卸市場が未成熟であること（市場価格を形成するに至っていないこと）、期先のポジションがほとんどないこと、を挙げる企業が多くあった。

電力先物取引への参画にあたっては、燃料取引と電力取引を包括的にとらえたリスクマネジメント体制の構築が必要と認識しているものの、具体的な議論や準備には至っていないと回答する企業が大半であった。

3.2 電力フォワードカーブモデルの研究状況

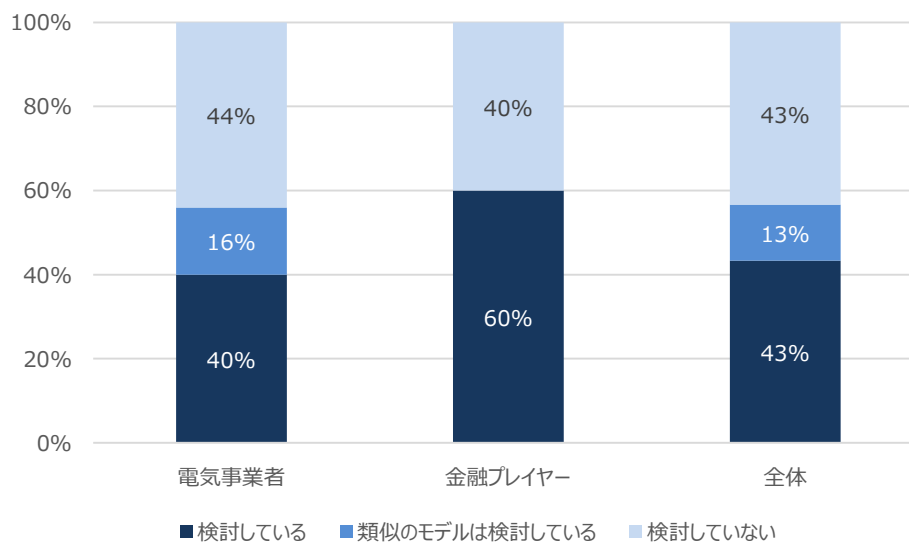
全体では約半数の企業が電力フォワードカーブモデルについて、調査、研究、モデル導入に向けた検討を行っていると回答した。

一般電気事業者・発電事業者及び電源を保有する新規参入者では、中長期の事業計画の作成や発電所への投資判断のため、長年にわたってメリットオーダーシミュレーション（ファンダメンタルモデル）を研究し、実務において活用してきた経緯がある。そのため、総じて、ファンダメンタルモデルを中心に研究しているとの回答が多かった。

一方で、金融プレイヤーでは、マーケットアプローチモデルを中心に研究している企業が多く、電力先物取引への参画を念頭に、特に、ここ 1 年、電力フォワードカーブの研究に取り組んでいると回答する企業が多かった。

少数ではあるが、実際の取引では粒度の細かいフォワードカーブが不可欠との認識のもの、30 分単位のフォワードカーブの開発に取り組んでいるとの回答があった。

図 3-2 電力フォワードカーブモデルの研究等の状況



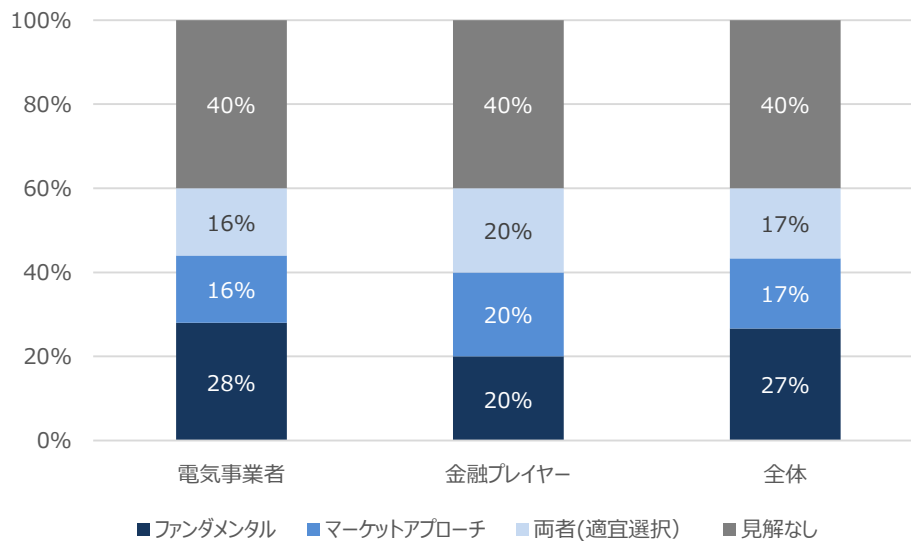
出典 インタビュー調査をもとに作成

3.3 事前インタビューでの意見

日本市場向け電力フォワードカーブモデルを検討するに際し、その方向性や留意点について、潜在的な市場参加者の意見を取り込むため、インタビュー調査を実施した。

一般電気事業者、卸電気事業者については、ファンダメンタルモデルをベースに電力フォワードカーブモデルを検討すべきとの意見が大半を占めたが、全体としては、大きく意見が分かれた。

図 3-3 電力フォワードカーブモデル検討の方向性に関する意見



出典 インタビュー調査をもとに作成

ファンダメンタルモデルの問題点として、①複雑であり且つ十分なデータを得られないこと、②実際の取引価格とかい離しがち（特に短期的にその影響大）であることを指摘する意見が多くあった。

逆に、マーケットアプローチモデルでは、①そのベースとする JEPX スポット価格の指標性が低いこと、②需給環境が大きく変化する局面にもかかわらず、その影響を反映しないことを指摘する意見が多くあった。

いずれのモデルに関しても、電力先物取引における値洗いへの応用、多様な市場参加者による活用を念頭に、シンプルなものにすべきとの意見が大勢を占めた。

3.3.1 ファンダメンタルモデルが妥当とする主な意見

ファンダメンタルモデルが妥当（或いはマーケットアプローチモデルは不適）とする意見として、主に以下のような回答があった。

- JEPX スポット市場は、流動性が低く十分な指標性を有していないこと、市場分断、インバランス回避を意図した応札などによりノイズが多いこと、などから、それに依拠したマーケットアプローチモデルは不適
- 原子力発電の再稼働、相次ぐ火力電源の新設、需要の減少（節電意識の定着化など）、再エネの増加（特に、昼間の太陽光発電の影響）など需給環境が大きく変化する局面にあることから、需給環境の変化を反映出来ないマーケットアプローチモデルは不適。
- 本来、マーケットアプローチモデルはオプション取引におけるボラティリティの算出を目的としたものであり、先物取引（スワップ取引）では、ファンダメンタルモデルが妥当。

3.3.2 マーケットアプローチモデルが妥当とする主な意見

マーケットアプローチモデルが妥当（或いはファンダメンタルモデルは不適）とする意見として、主に以下のような回答があった

- 「スポット価格の季節性」、「供給力の燃料別構成比」、「原油価格」を加味すれば回帰モデルが構築可能であり、複雑なファンダメンタルモデルを使う必要性がない。
- 欧州の例を見ても、流動性が高いのは1年程度先までであるため、マーケットアプローチモデルの課題とされる需給環境の変化の影響は軽微（逆に、ファンダメンタルモデルは、インプットデータが複雑であり、且つ一般の市場参加者にとって取得出来ないデータも多い）。
- JEPX のスポット価格は原油価格と概ね相関している。季節性を、JEPX スポット価格をもとに反映すればフォワードカーブとして機能する。将来的に需給が緩和し、原油価格との相関性が低下する可能性もあるが、当面、その可能性は低いと考えられる。

3.3.3 その他の主な意見

上記の他、フォワードカーブモデルを検討するに際しての方向性や留意点として、市場参加者向けモデル・値洗い向けモデルそれぞれについて、主に、以下のような意見が出された。

(1) 市場参加者向けモデル

- 本件プロジェクトでのフォワードカーブモデルの検討・公表は、取引参加者の底上げのために有意。一方で、当該モデルと実際の取引価格とに乖離が生じた場合、特に、十分な知見を持たない取引参加者をミスリードする結果となり、トラブルの原因になることが懸念される。
- 本件プロジェクトの検討結果として、画一的なフォワードカーブモデルを示すのは不適であり、市場参加者が自らの検討のベースとして活用できるよう、いくつかのオプションを加えつつ検討結果を示すべき。

(2) 値洗い向けモデル

- 原子力の再稼働など不確定な要素は、各々の市場参加者が自社のために作成するフォワードカーブモデルでは考慮すべきものだが、値洗いモデルで考慮するのは妥当ではない。
- 実取引があった場合には当該取引価格を、なかった場合には理論モデルを値洗いに使うと、取引日によって値洗い価格が頻繁に変動し、取引証拠金の預託・引き出しの実務が煩雑になることが課題。
- 前提条件や算定プロセスを開示すべき。特に、モデルを海外ベンダーに依存すると、これらがブラックボックスになってしまいかねない。

(3) 共通

- 需給環境の変化が生じにくい短期（最長でも数か月程度）はマーケットアプローチモデルが、中長期（数か月以上）は需給環境の変化を反映可能なファンダメンタルが妥当。
- ファンダメンタルモデルは、インプットデータを精緻化しても、さほど結果に影響を及ぼさない（燃料価格と発電所のヒートレートが支配的）。使い勝手を考慮し、シンプルなモデルにすべき。

次章では、上記のインタビューでの意見を総括するとともに、当該意見を総合的に加味した上で、日本市場向けのフォワードカーブモデルを提案する。

第4章 日本市場向け電力フォワードカーブモデル及びその応用の検討

本章では、第2章の「海外における電力フォワードカーブモデルの調査・分析」、第3章の「日本におけるフォワードカーブモデルの利用状況」における潜在的な市場参加者のインタビュー結果を踏まえて作成した、日本市場向けの電力フォワードカーブモデルの作成方法と、そのために必要な情報について記述する。

なお、本章で提案する日本市場向けの電力フォワードカーブモデルとは、本調査の目的に照らし、市場参加者の裾野の拡大に資するよう、簡易に作成可能なモデルとする。また、電力先物市場協議会で議論した電力先物取引の商品設計を踏まえ、システムプライスの月平均価格に関するフォワードカーブを算定することを目的としている。

4.1 インタビュー結果の総括とモデル検討に当たっての方針

前章でのインタビュー結果を踏まえ、日本市場向けのフォワードカーブを市場参加者向けモデルと帳入値段算定モデルに分けた上で、それぞれについて提案するモデルを検討した。

4.1.1 市場参加者向けモデル

市場参加者向けモデルとしては、潜在的な市場参加者へのインタビューにおいて、「画一的なモデルとすべきではなく、市場参加者に選択肢を持たせるべき」との意見が寄せられた。本調査が市場参加者の裾野拡大を目的としていることを踏まえると、潜在的な市場参加者各々が自ら持つ知見や情報を活かして、独自にモデルを進化することが出来ることが重要である。このため、本章では、ファンダメンタルモデルとヒストリカルモデルの両方を提案することとする。

4.1.2 帳入値段算定モデル

潜在的な市場参加者へのインタビューでは、帳入値段算定モデルは「シンプル且つ恣意性の入りづらいモデルとすべきこと」、「市場に立脚したモデルにすべき」などの意見が数多く寄せられた。

この点、ファンダメンタルモデルは、前提条件に将来の不確定要素が数多く含まれ、恣意性が入りやすいため、帳入値段算定モデルとしては不向きである。他方で、マーケットアプローチモデルは、恣意性が入りづらく、先物市場価格の決済に利用される JEPX スポット価格と整合性をとることができ、限定された算定期間（15 ヶ月）における需給環境の変化は軽微とみなせることなどから、帳入値段算定モデルに適しているといえる。

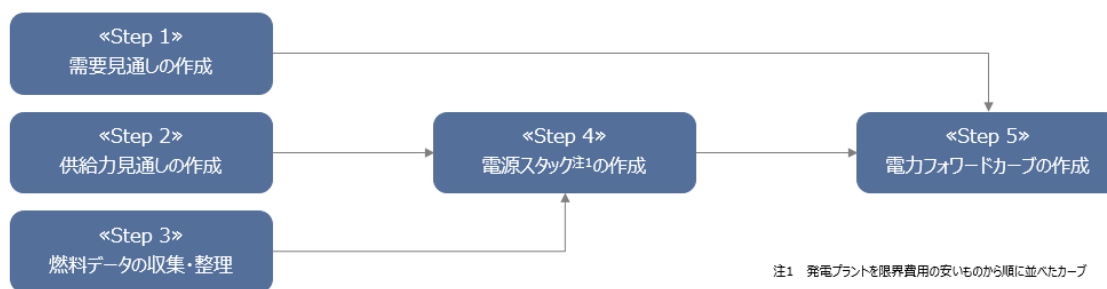
4.2 日本向けフォワードカーブモデルの算定例

以下では、上述のインタビュー結果を踏まえ、分かりやすさと利便性を重視した簡易なジェネレーションスタックモデルとマーケットアプローチモデルを提案し、その具体的な算定例について記述する。（必要な情報は付録3を参照）

4.2.1 ジェネレーションスタックモデルの算定例

本節では、簡易なファンダメンタルモデルとして、ジェネレーションスタックモデルの作成手順を示す（図4-1参照）。まず、①1時間単位の粒度の将来の需要見通しを作成する（図4-2参照）¹⁵。次に、②プラントデータを積み上げた供給力の見通しを作成し、③燃料の想定データと組み合わせることにより、④電源スタックを作成する（図4-3参照）。最後に、⑤需要見通しと電源スタックの交点からマージナルコストを求め、これをベースに電力フォワードカーブを作成する。

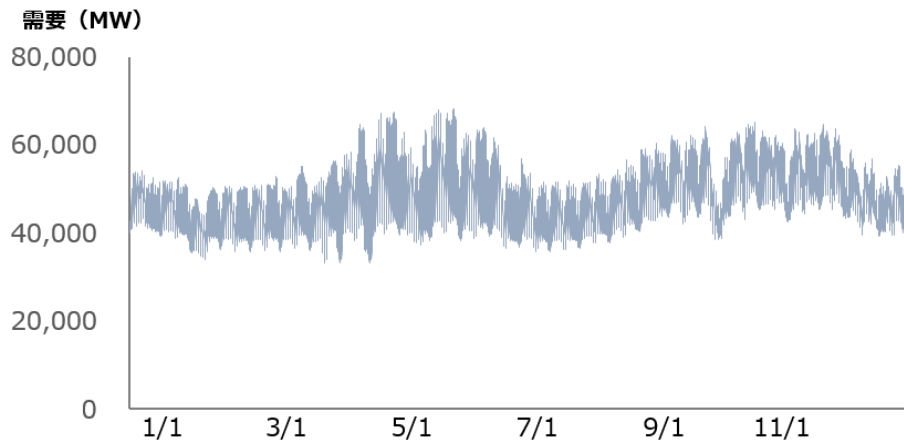
図 4-1 簡便なファンダメンタルモデルの作成手順の例



出典 三菱総合研究所

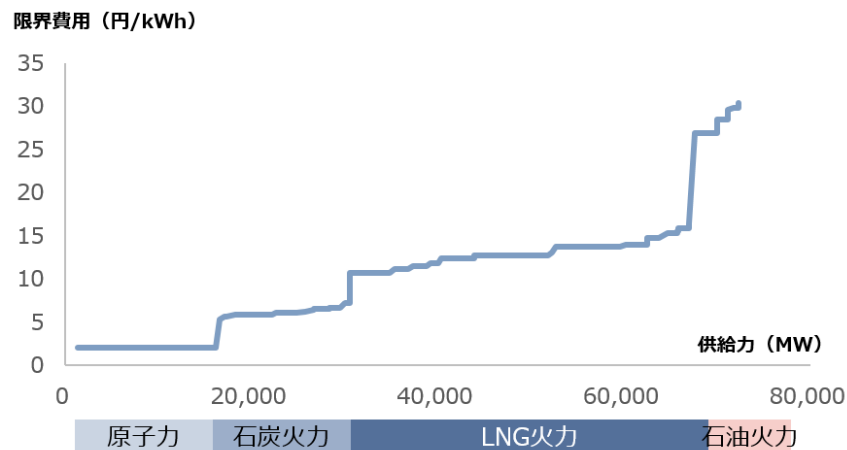
¹⁵ 月平均価格を算出する目的に照らし、簡易な方法として1時間単位の需要見通しを利用する例を記載している。ただし、電力広域的運用推進機関（OCCTO）等の公表データを用いて、より高粒度（30分単位など）の需要見通しを作成することも可能である。

図 4-2 需要見通しのイメージ



出典 三菱総合研究所

図 4-3 電源スタックのイメージ



出典 三菱総合研究所

(1) 残余需要の見通しの作成

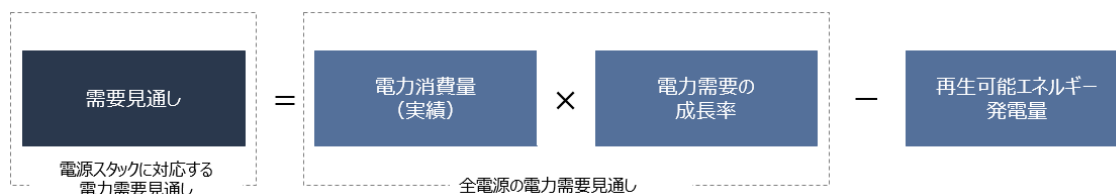
ここで「残余需要」とは、電力の系統需要（自家発自家消費を含まない電力系統に対する需要）から、再生可能エネルギーの発電分（ただし自家消費を含まない系統への流入分）を差し引いた需要のことである。

再生可能エネルギーの発電量を差し引くのは、再生可能エネルギーによる発電はディスパッチ不能（給電指令による発電量のコントロールが不能）であること、固定価格買取制度の対象であるためにメリットオーダーに基づく電源運用を行わないことなどから、需要とバランスさせる供給力に含まれないためである¹⁶。

¹⁶ 再生可能エネルギーによる余剰電力の影響をジェネレーションスタックモデルに反映させる方法は、①需要から再生可

電力需要の成長率の想定は、過去のトレンドから推定する方法や、GDP 成長率との相関から求める方法などがある。

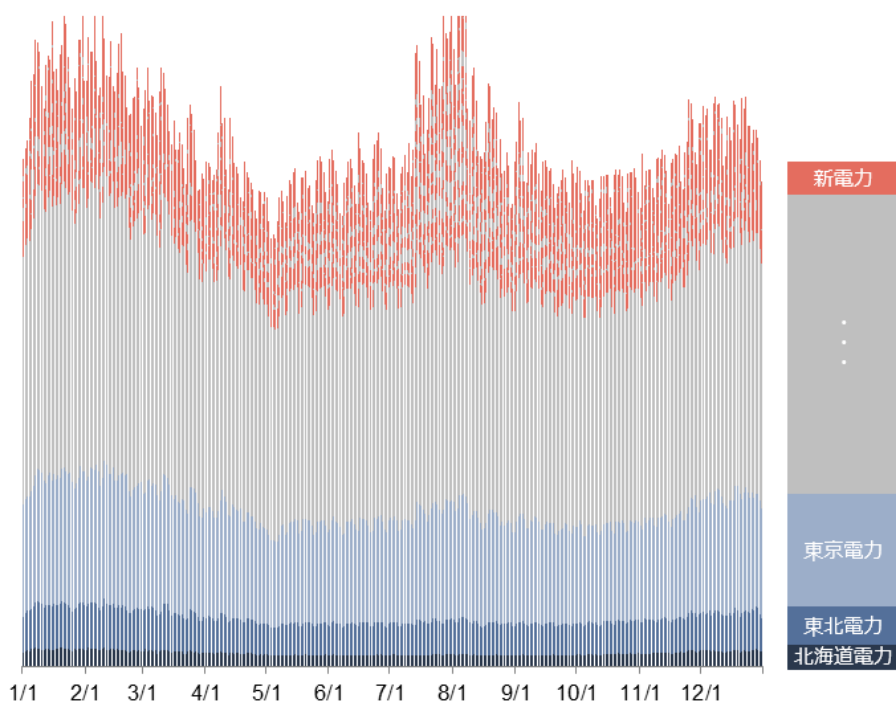
図 4-4 需要見通しの作成方法の概要



出典 三菱総合研究所

過去の電力消費量実績は、一般電気事業者が Web 上で掲載している 1 時間単位の需要実績が利用できる。これを図 4-5 のように、時間帯ごとに 9 電力会社¹⁷と新電力の需要を足し合わせることで、全国の需要が算定できる。なお、新電力の需要の時間帯変動のデータは一般的に公表されていないため想定を行う必要がある。

図 4-5 全国の電力消費実績の作成方法



出典 三菱総合研究所

能エネルギーの発電量を差し引く方法と、②電源スタックの中に再生可能エネルギーをマストラン電源として入れる方法の 2 点があるが、ここで提案するモデルは前者の方法を採用している。

¹⁷ 北海道電力、東北電力、東京電力、北陸電力、中部電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力

再生可能エネルギーの発電量の想定については、図 4-6 のように、設備導入量と発電パターンを想定し、これらを掛け合わせることで、各時間における発電量を求める方法が考えられる。それぞれのデータソースの例は図中に示すとおりである。

図 4-6 再生可能エネルギー発電量

		設備導入量	発電パターン	時間帯別発電量
概要		15ヶ月先までの設備導入量を想定	月別/時間帯別の発電パターンを想定	両者を組み合わせ、15ヶ月間の各時間における発電量を想定
データソース	水力	資源エネルギー庁「電力調査統計」	資源エネルギー庁「電力調査統計」	
	太陽光	«現状» 固定価格買取制度 「情報公開用ウェブサイト」	NEDO「日射量データベース」	
	風力	«将来» 経済産業省 「長期エネルギー需給見通し」 など	NEDO「風況マップ」	
	地熱・バイオマス		月・時間帯に依らず一定と想定	

出典 三菱総合研究所

(2) 供給力見通しの作成

供給力見通しについては、将来の時間別（例えば月別）の電源スタックのベースとなるものであるが、表 4-1 のように、発電所名、定格出力、燃料種別、熱効率、運転状況等の情報を持ったプラントデータリストから作成する方法が考えられる。なお、各プラントデータの情報の取得方法を表 4-2 に示す。

表 4-1 プラントデータのイメージ

NO.	発電所名	出力	燃料	熱効率	運転状況	
					運転開始	廃止
1	XX発電所 XX号機	XX MW	石炭	XX %	XX年XX月	XX年XX月
2	XX発電所 XX号機	XX MW	石炭	XX %	XX年XX月	XX年XX月
3	XX発電所 XX号機	XX MW	LNG	XX %	XX年XX月	XX年XX月
4	XX発電所 XX号機	XX MW	LNG	XX %	XX年XX月	XX年XX月
5	XX発電所 XX号機	XX MW	LNG	XX %	XX年XX月	XX年XX月

出典 三菱総合研究所

表 4-2 プラントデータ情報の取得方法

区分	情報の取得方法
発電所名/ 出力/燃料	<ul style="list-style-type: none"> 火力原子力発電所設備要覧（一般社団法人 火力原子力発電技術協会） ※ 直近の新設/廃止/リプレースの情報を、各社公表情報から加味
熱効率	<ul style="list-style-type: none"> 一部プラントについては、各社公表情報から入手可能 その他のプラントは、同種（形式・規模・運手開始時期・蒸気条件等）のプラントから推定
運転状況	<ul style="list-style-type: none"> 一般電気事業者分については、各社公表情報から、事故停止、長期計画停止の情報を反映（その他事業者分は入手困難） 定期点検については、供給力に想定の係数を掛けて反映

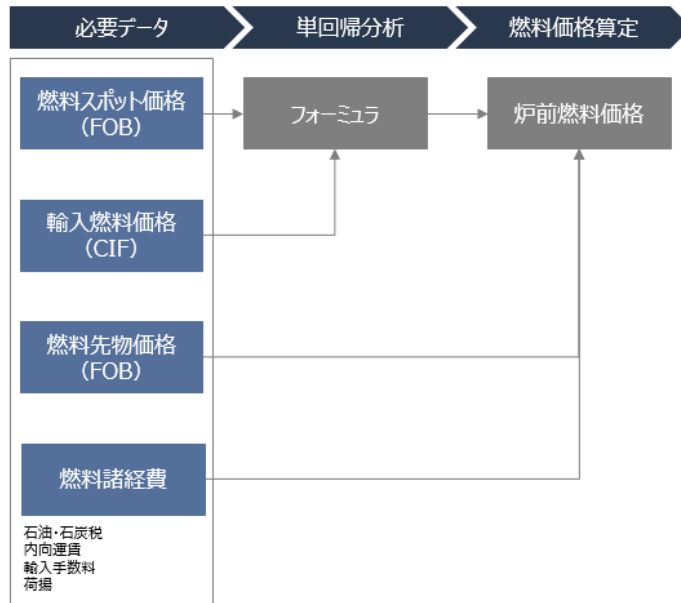
出典 三菱総合研究所

(3) 燃料価格の想定

燃料価格の算定方法の一例として、図 4-7 の手順を示した。ファンダメンタルモデルに限らず、マーケットアプローチでも燃料価格の想定が必要だが、ここでは電力先物価格の算定方法における燃料価格（発電所炉前価格）として、燃料先物価格を利用することを提案している。燃料の先物価格は FOB であるため、これを CIF を経て炉前に換算する必要がある。

手法の一例としては、まず、各燃料の FOB スポット価格と CIF 価格の相関から求めた回帰式（図 4-9 参照）と FOB フォワード価格により、仮想的に CIF ベースのフォワード価格を求める。これに燃料諸経費（石油石炭税、内航運賃、輸入手数料、荷揚料）を足し合わせることで、炉前の燃料先物価格を求める方法が考えられる。なお、燃料に関するデータソースの例としては、図 4-8 のようなものがある。

図 4-7 燃料データ収集・整理のプロセス



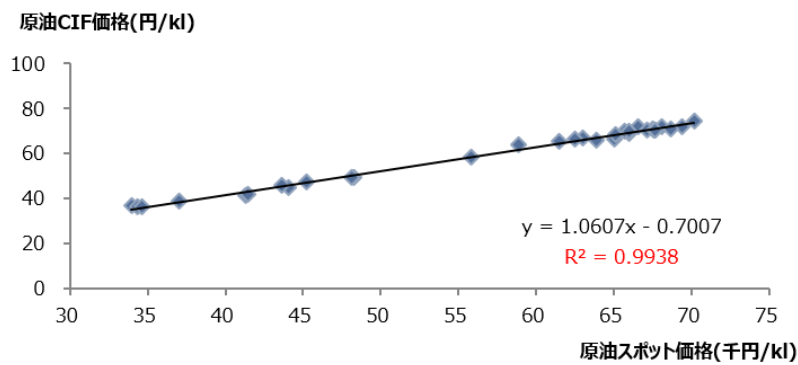
出典 三菱総合研究所

図 4-8 燃料のデータソースの例

	石炭	LNG	石油
燃料スポット価格 (FOB価格)	シカゴマーカンタイル取引所 (ニューカッスル炭)	TOCOM (ドバイ原油)	TOCOM (ドバイ原油)
輸入燃料価格 (CIF価格)	貿易統計 (石炭)	貿易統計 (液化天然ガス)	貿易統計 (原油及び粗油)
燃料先物価格 (FOB価格)	シカゴマーカンタイル取引所 (ニューカッスル炭)	TOCOM (ドバイ原油)	TOCOM (ドバイ原油)
燃料諸経費	長期エネルギー需給見通し小委員会資料 (経済産業省)		

出典 三菱総合研究所

図 4-9 燃料の単回帰分析の例

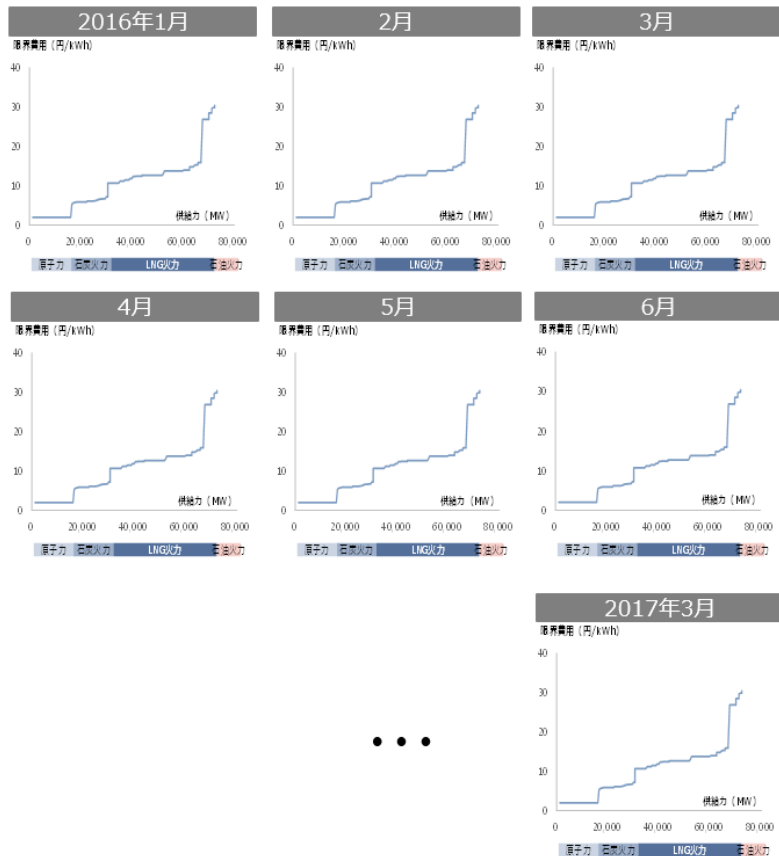


出典 JEPX 公表データをもとに作成

(4) 電源スタックの作成

電源スタックは、(3)で求めた各月の燃料価格を(2)のリストに定義したプラントの熱効率を除することによって、各プラントの発電費用を求め、これをメリットオーダー順に並べ替えることによって、月別に作成する方法がある(図 4-10 参照)。

図 4-10 月別の電源スタックのイメージ



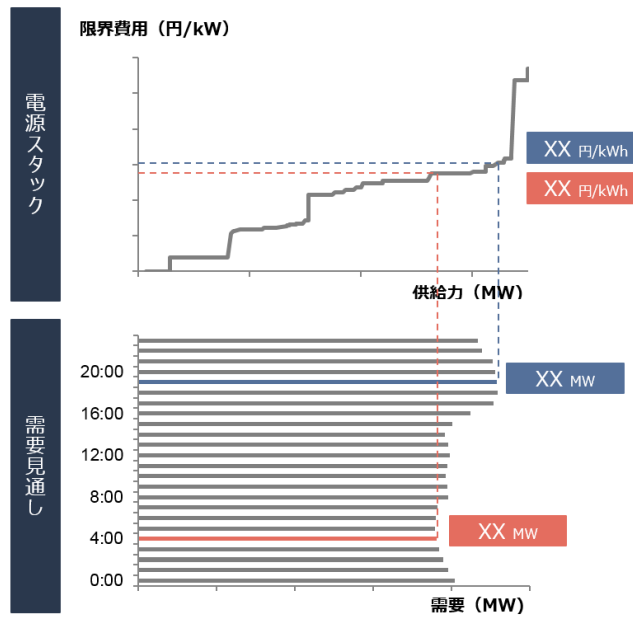
出典 三菱総合研究所

(5) 電力フォワードカーブの作成

最後に、(1)で作成した1時間単位の電力需要の見通しと、(4)で作成した月別の電源スタックから、1時間単位の電力価格の見通しを算出する。電力の需要曲線は、前述のとおり、価格の弾力性が極めて小さいため、垂直とみなすことができる。したがって、図 4-11 のように、電源スタックのグラフから、供給力と需要見通しが一致するときの限界費用として、各時点の電力価格を求めることができる。

以上により、1時間単位の粒度の電力フォワードカーブが算定されるが、これを月毎に平均することにより、月次単位のフォワードカーブが求められる(図 4-12 参照)。

図 4-11 電力価格（限界費用）の算定イメージ



出典 三菱総合研究所

図 4-12 月次フォワードカーブの算定イメージ

月日	デタイプ	時刻	価格 (円/kWh)	集計区分	
				ベース	日中
1/1	祝日	0:00	7.89	○	
1/1	祝日	1:00	XX	○	
1/1	祝日	2:00	XX	○	
...		...			
1/5	平日	0:00	XX	○	
1/5	平日	1:00	XX	○	
1/5	平日	...	XX	○	
1/5	平日	8:00	XX	○	○
1/5	平日	9:00	XX	○	○
...					

↓
 8,760時間/年
 ×
 1.25年
 (15か月)
 ↓

出典 三菱総合研究所

4.2.2 マーケットアプローチモデルの算定例

多くの市場参加者が利用可能なマーケットアプローチモデルとして、計算の簡便性、分かりやすさに焦点を当てたマーケットアプローチモデルの算定例を記述する。このモデルによる電力先物価格の算定に当たっては、図 4-13 のように、市場価格から計算されるヒートレート（マーケットヒートレート）を求めることになる。

図 4-13 《再掲》マーケットアプローチモデルによる電力価格の基本的構造

$$\text{電力価格} = \text{マーケットヒートレート} \times \text{燃料価格}$$

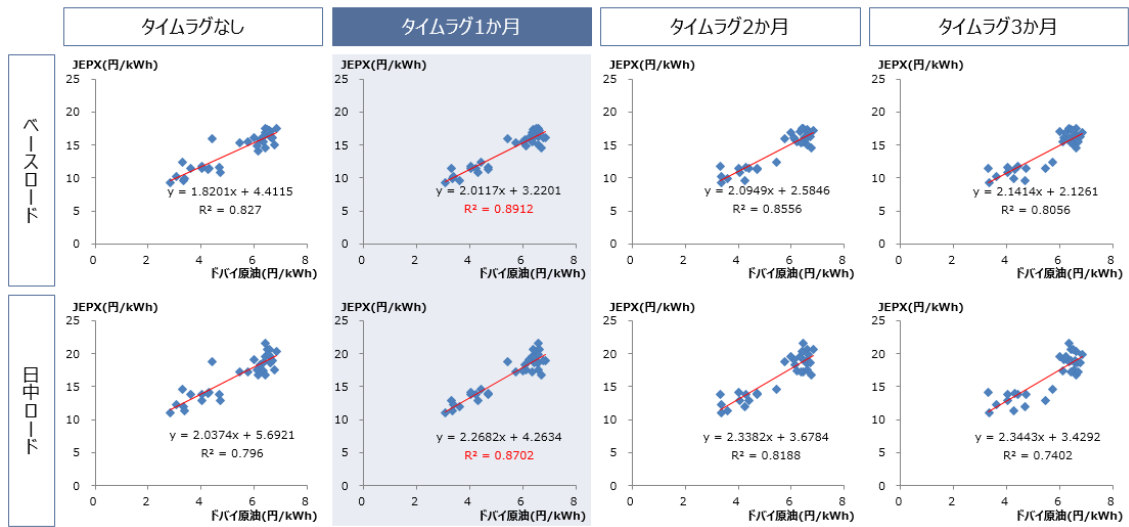
出典 三菱総合研究所

本来、マーケットヒートレートを求めるに当たっては、マージナルプラント¹⁸の燃料種や、各燃料と電力スポット価格の間のタイムラグなどを検討する必要があるが、LNG 等の燃料先物指標が得られにくい現状を踏まえ、十分な流動性のある原油スポット価格と JEPX スポット価格の回帰分析から算定する例を紹介する。

分析の結果、図 4-14 のとおり、季節性を除外（後述）した JEPX スポット価格（ベースロード・日中ロード）と原油スポット価格の間には強い相関が確認される。特に、分析時点では、1ヶ月のタイムラグを設けたときにもっとも相関が強くなっている。決定係数は、ベースロードで 0.89、日中ロードで 0.87 と比較的高い数値を示している。これはすなわち、電力スポット価格は、1ヶ月前のドバイ原油のスポット価格から 9 割程度説明できるということを意味している。したがって、以下では、マーケットヒートレート（電力と原油との相関式）を用いた、電力フォワードカーブの作成方法の例を説明する。

¹⁸ 電源スタックのうち、マージナルコストを決定するプラントのことであり、メリットオーダー曲線（供給曲線）と需要曲線との交点に位置するプラントのこと。

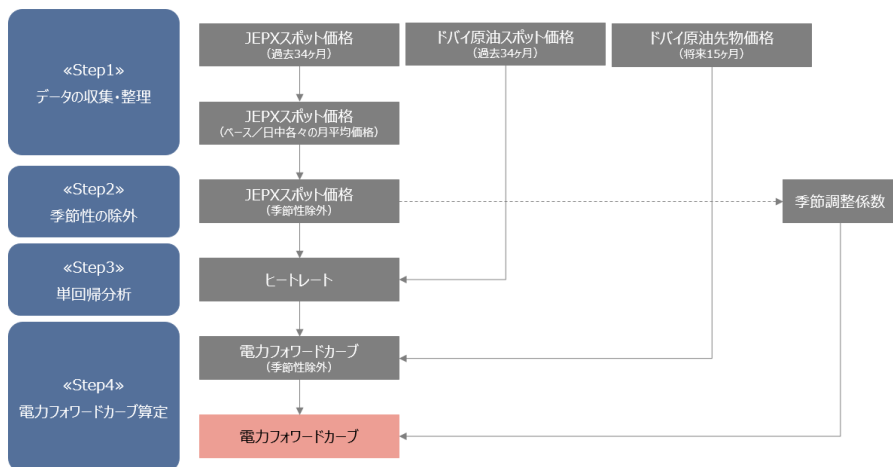
図 4-14 JEPX スポット価格（季節性除外）とドバイ原油スポット価格の相関関係



出典 三菱総合研究所

このモデルの作成手順例の概要を図 4-15 に示す。まず、①JEPX スポット価格、ドバイ原油スポット価格、ドバイ原油先物価格のデータを取得し、JEPX スポット価格については、ベース/日中各々の月平均価格に変換する。次に、両者のトレンドの相関を取るために、電力価格には季節性がある一方で原油価格には季節性がないと仮定して、②JEPX 価格から季節性を除外する。続いて、③季節性を除外した JEPX スポット価格とドバイ原油スポット価格について相関をとり、単回帰式（ヒートレート）を算定する。最後に、④ドバイ原油の先物価格をこの単回帰式で変換することにより、季節性を含まない電力フォワードカーブを作成し、これに②で除外した季節性を掛け合わせることにより、季節性を反映させた電力フォワードカーブを算定する。

図 4-15 簡便なマーケットアプローチモデルの作成手順例の概要



出典 三菱総合研究所

(1) データの収集・整理

必要なデータとして、図 4-16 に示すものが挙げられる。過去の電力スポット価格は JEPX のウェブページからダウンロードできる。また、ドバイ原油価格についても、TOCOM や ICE 等の商品取引所の取引実績を利用することができ、各取引所のウェブページから取得可能である。ドルで取引される原油を円に変換する際には為替先物レートを乗じる必要があるが、これも各種の情報サイトから取得することができる。

図 4-16 簡便なマーケットアプローチモデルのデータの整理

	必要データ	データソース	整理
JEPX スポット価格	<ul style="list-style-type: none"> ● 30分単位のシステムプライス (2013年3月～2015年12月) 	<ul style="list-style-type: none"> ● JEPX 	<ul style="list-style-type: none"> ● ベースロード、日中ロード各々の月別平均価格を算定
ドバイ原油 スポット価格	<ul style="list-style-type: none"> ● 月平均価格 (2013年3月～2015年12月) 	<ul style="list-style-type: none"> ● TOCOM ● ICE ● CME ● NASDAQ など 	
ドバイ原油 先物価格	<ul style="list-style-type: none"> ● 各限月の先物価格 (2016年1月～15ヶ月間) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 同上 ※ 但し、TOCOMは6か月先まで 	<ul style="list-style-type: none"> ● ドバイ原油先物価格を円貨ベースに換算 ※ 但し、データソースがTOCOMの場合は、円貨ベースのため換算は不要
為替先物 レート	<ul style="list-style-type: none"> ● 各限月の為替先物レート 	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種情報サイト 	

出典 三菱総合研究所

(2) 季節性の除外

季節性の除外（季節調整）方法については、月別平均法、センサス局法¹⁹、EPA 法²⁰、局所多項式回帰²¹などさまざまなものがあるが、ここでは最も簡便な月別平均法について解説する。

まず、以下の手順により、過去の JEPX スポット価格（ベースロード・日中ロード）から、月平均価格（月別の季節調整係数）を算定する（図 4-17 参照）。

- 対象期間における各月の「月平均価格」を算定
- 対象期間における「年間平均価格」を算定
- 各月の「月平均価格」を「年間平均価格」で除算
- 「年平均価格」を 1 とした場合の各月の「月平均価格を算定」⇒【季節調整係数】

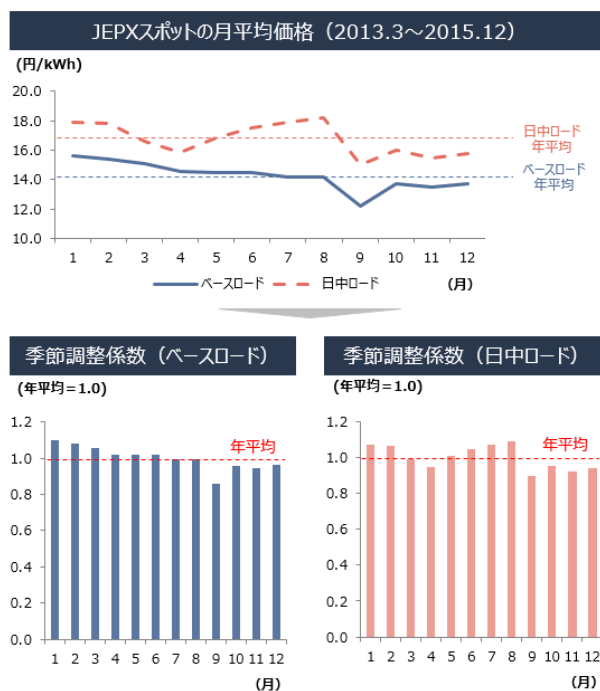
¹⁹ Census Bureau Method。米国のセンサス局が開発した月次または四半期データの季節変動調整法。

²⁰ Economic Planning Agency 法。センサス局法を我が国の旧経済企画庁が日本向けに改善、開発した方法。

²¹ トレンド成分を局所的に多項式で回帰し、「季節性成分（周期成分）」、「トレンド成分」、「残差」に分解する手法

なお、過去の JEPX スポット価格の対象期間は、統計的な信頼性を確保するために十分なデータ量が必要である一方、過去に遡りすぎると市場構造・環境の違いから、データそのものの信頼性が確保できない。このため、以下では、震災後の市場構造の変化から一定期間経過し、自主的取組²²が開始して市場の指標性が向上した 2013 年 3 月以降のデータを用いて計算を行った。

図 4-17 季節調整係数の算定

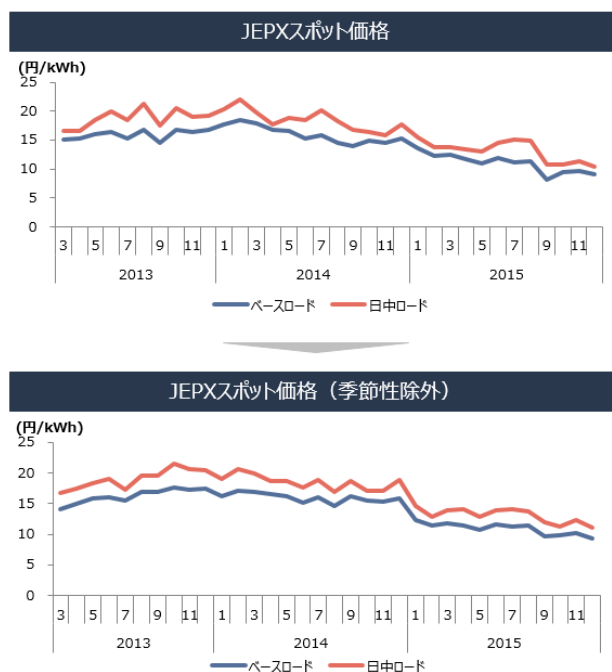


出典 JEPX 公表データをもとに作成

次に、各月の「月平均価格」を、上記で算定した各月の「季節調整係数」で除算し、季節調整後の JEPX スポット価格を算定する（図 4-18 参照）。

²² 2013 年 3 月から、電力会社は、①卸電力取引所のスポット市場において、余剰の電力全量を限界費用に基づき入札を行うこと、②卸電気事業者の電源の売電契約の一部解除を検討することなどを自主的に行っている。

図 4-18 過去の JEPX スポット価格の季節調整

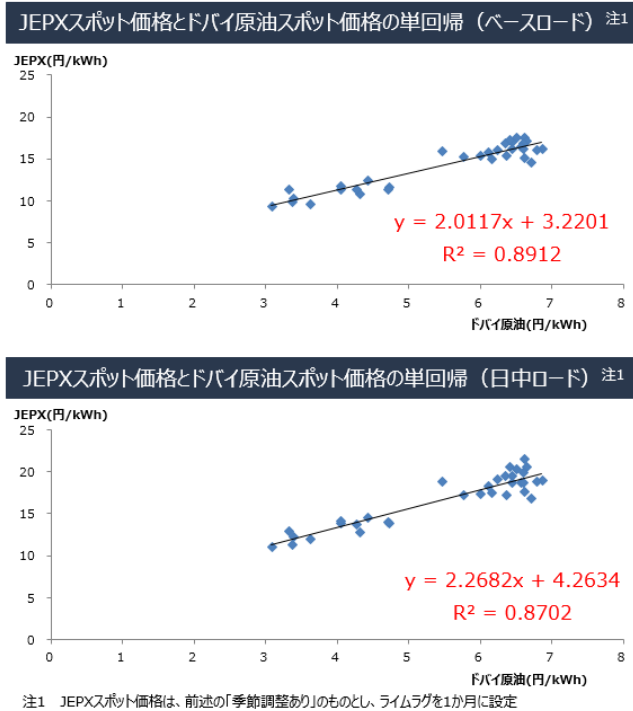


出典 JEPX 公表データをもとに作成

(3) 単回帰分析

続いて、JEPX スポット価格とドバイ原油スポット価格の単回帰分析を行うことにより、両者の関係性（マーケットヒートレート）を求める。JEPX スポット価格（季節調整あり）とドバイ原油スポット価格について、1 か月のタイムラグを設けた上で、単回帰分析を行った結果が図 4-19 である。これにより、ドバイ原油を JEPX スポット価格に変換するフォーミュラが算定される（表 4-3 参照）。

図 4-19 JEPX スポット価格とドバイ原油スポット価格の単回帰分析



出典 JEPX、TOCOM 公表データをもとに作成

表 4-3 回帰分析によるマーケットヒートレート（フォーミュラ）の算定結果

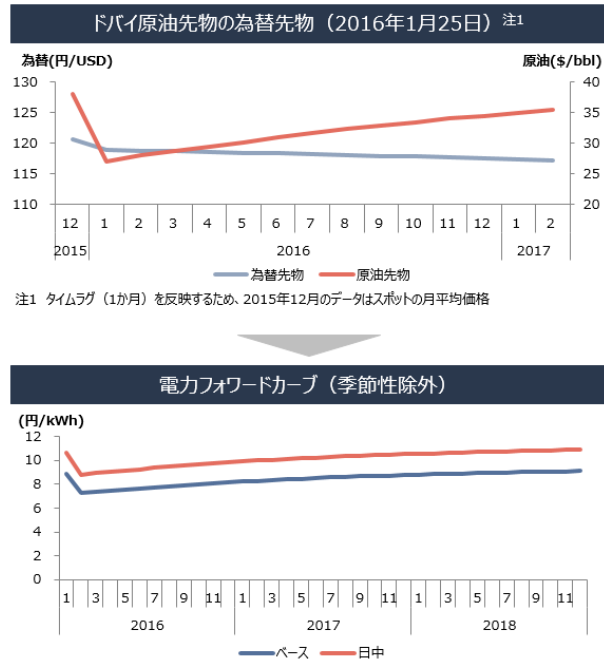
区分	回帰係数	定数項
ベースロード	2.0177	3.2201
日中ロード	2.2682	4.2634

出典 JEPX、TOCOM 公表データをもとに作成

(4) 電力フォワードカーブ算定

最後に電力フォワードカーブを求めるに当たり、まずは季節性のない電力フォワードカーブを作成する。図 4-20 のように、原油先物価格と為替先物レートを掛け合わせ、円貨ベースの原油先物価格を算定した上で、これに(3)で算定したマーケットヒートレートを乗じる（フォーミュラに入力）ことにより、季節性のない電力フォワードカーブを算定する。

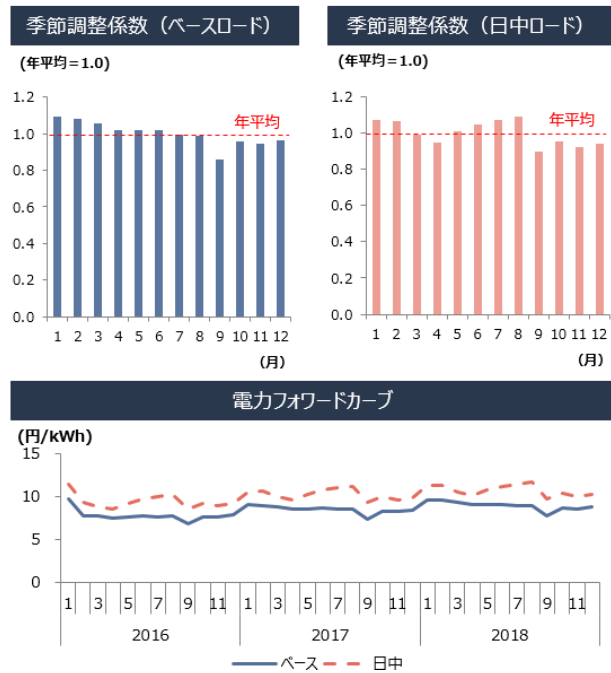
図 4-20 電力フォワードカーブの算定（季節性なし）



出典 JEPX、TOCOM 公表データをもとに作成

次に、上記の電力フォワードカーブに、(2)で除外した季節性を再度加味（季節調整係数を乗算）することにより、季節性を反映させた求めるべき電力フォワードカーブが完成する（図 4-21）。

図 4-21 季節性を反映させた電力フォワードカーブ



出典 JEPX 公表データをもとに作成

4.3 日本向けフォワードカーブモデルの留意点

前節で提案した日本向けフォワードカーブには、モデルに考慮されていない事項があるため、以下では、モデル作成者が運用上更に検討するべきいくつかの留意点について記述する。

ジェネレーションスタックモデルでは、表 4-4 に挙げるような、電源の起動・停止コストの影響、部分負荷効率、ランプレート等の影響が加味されないため、実際の電源運用パターンを正確にシミュレートしていない。例えば、日中の短期的な需要の落ち込みの際、実際には、一旦停止すると数時間後に相当の起動コストが発生することを見込んで、最低出力で運転し続ける電源が存在するが、ジェネレーションスタックモデルではこのような現象は加味されない。改善方法としては、最適ディスパッチモデルを利用することにより、これらの電源運用の特徴をシミュレートした限界費用の算定が可能となる。

表 4-4 提案ジェネレーションスタックモデルの留意点

考慮されていない事項	改善方法の例
<ul style="list-style-type: none"> ● 電源ディスパッチへの起動／停止コストの影響 ● プラントの部分負荷効率 ● プラントの設計上の制約（DSS、WSS） ● 瞬動予備力・ランプレート（上げ調整力・下げ調整力） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 最適ディスパッチモデルを利用（詳細は 2.1.1 を参照）

出典 三菱総合研究所

前節で提案したマーケットアプローチモデルには、表 4-5 のような留意事項がある。すなわち、提案手法では、JEPX の月平均価格を利用していることから、曜日数等のカレンダー補正を行っていないこと、気温の影響を考慮していないこと、季節性の除外に簡便な方法（月別平均法）を用いていること、過去の特殊な事情による影響の補正を行っていないことなどが、留意点として挙げられる。これらについては、別途詳細に加味することで、より精緻なフォワードカーブを算定することができる。また、採用データの期間については、提案モデルでは直近の特定期間を用いることとしているが、異常値がある場合は除外したり、直近の期間のウェイトを重くしたりするなど、信頼性を向上するための様々な方法がある。

なお、前節のマーケットアプローチモデルはエリアプライスの算定を対象とはしていない。これは、市場分断の発生頻度が急速に高まってきている現在の市場環境や、ファンダメンタルの情報無しに将来の市場分断の発生確率を見込むことが困難であることを考慮すると、提案モデルではエリアプライスの特性を十分に反映しきれていないためである。

表 4-5 提案マーケットアプローチモデルの留意点

分類	留意事項	改善方法の例
カレンダー補正	<ul style="list-style-type: none"> 過去の JEPX スポットの月平均価格を算定する際、年によるカレンダーの相違は未考慮 ※ 例えば、ある月の休日の日数は、年によって違う 	<ul style="list-style-type: none"> デイトタイプ（曜日・盆・正月など）別に月平均価格を算定 将来のカレンダーに合わせてデイトタイプを組み合わせた上で全体の月平均価格を算定
気温補正	<ul style="list-style-type: none"> 過去の JEPX スポットの月平均価格を算定する際、気温の影響（平年値比の上昇／低下の影響など）は未考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 気温と JEPX スポット価格の相関を分析 気温が平年値だった場合の JEPX スポット価格に補正した上で月平均価格を算定
季節性除外の手法	<ul style="list-style-type: none"> 「年平均価格と月平均価格の比」を使った簡易的な季節性除外手法を採用 ※ 月別の平均価格の差異は全て「季節性」として除外 	<ul style="list-style-type: none"> 季節性に起因する変動成分と、他のトレンドに起因する変動成分を区分した上で、季節性に起因する変動成分のみを除去
採用データの期間	<ul style="list-style-type: none"> マーケットヒートレートの算定の際、採用データの期間（2013年3月以降の34ヶ月）において需給環境の大きな変化はなく、且つ今後も同様の需給環境が継続するものと仮定 	<ul style="list-style-type: none"> 期間を分けてマーケットヒートレートを算定 今後の需給環境を強く表すと想定される期間のマーケットヒートレートの加重を重くする
その他	<ul style="list-style-type: none"> 過去の特異事情（災害、イベントなどによる電力消費量の増減など）を考慮せずに（除外せずに）、単純平均で月平均価格を算定 	<ul style="list-style-type: none"> 特異事情がある場合には、その影響を補正した上で月平均価格を算定

出典 三菱総合研究所

4.4 帳入値段算定モデルへの応用

前述のとおり、先物市場開設当初は、取引量が少ないことから約定が成立しないことが想定される。注文（bid/ask）がある場合は、それらを用いる方法が考えられるが、注文もない場合には、何らかの方法に基づいて、取引所は帳入値段（セトルメント価格）を算定する必要があり、その方法の一つとして電力フォワードカーブモデルの活用が考えられる。

4.1.1 で述べたとおり、帳入値段を算定するに当たっては、恣意性を排除する必要があることなどから、マーケットアプローチモデルが適している。ただし、4.2.2 で提案したマーケットアプローチモデルを帳入値段算定モデルへ応用するに当たっては、以下のような運用上の留意点があり、更なる検討の必要があるといえる。

- 透明性を確保するための、前提条件や算定プロセスの開示
- マーケットヒートレート等の設定について、定期的な見直しの実施とその方法の開示
- 帳入値段として、実取引があったときには当該取引価格を、なかったときには理論モデルを使った場合に想定される、帳入値段の頻繁な変動に対する対策

付録 1 : 統計的パターン作成手法²³

欧州では、電力スポット市場の 24 時間価格パターンが比較的安定的であるため、月物の電力先物取引の決済価格を 24 時間の価格パターンに展開する方法が用いられている。

電力価格は季節や曜日等に特有の変動パターンが見られる。この変動パターンを反映したフォワードカーブについて、時間単位の粒度で作成する方法を紹介する。時間単位のフォワードカーブは、スタンダードでないフォワード取引のプライシングに用いることができる。以下に、簡単な作成手順を示す。

- ①過去の電力スポット価格から、週次（曜日別）・年次の日平均価格を算定する。
- ②月別・曜日別の日中変動パターン（時間帯変動パターン）を算定する。
- ③上記①②を組み合わせ、アワリーフォワードカーブを作成する。

これを具体的な数式で表すと次のようになる。まず、①の算定方法について説明する。 $y(t)$ を正規化した日付 t における日平均スポット価格²⁴として定義する。また、月別・曜日別のクラスタを $\{1, 2, 3, \dots, N\} = \{1 \text{ 月(月)}, 1 \text{ 月(火～水)}, 1 \text{ 月(金)}, 1 \text{ 月(土)}, 1 \text{ 月(日)}, \dots, 12 \text{ 月(日)}\}$ のように定義する。この時、クラスタ j に属する日付の集合を D_j と置くと、スポット価格の日平均変動パターン $y(t)$ は、次のような回帰式モデルから算定することができる。ここで、 β_j はクラスタ j における回帰係数、 $\mathbf{1}_A(t)$ は、 t が集合 A に属するかを表す指示関数で、次で定義されるものである。

$$y(t) = \sum_{j=1}^N \beta_j \mathbf{1}_{D_j}(t) + \epsilon(t); \quad \mathbf{1}_A(t) = \begin{cases} 1 & t \in A, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

次に②の算定を行うに当たり、 $y_k(t)$ を日付 t の時刻 k ($k = 1, \dots, 24$)における正規化された時刻平均スポット価格²⁵として定義すると、正規化した時間帯変動パターン $h_k(t)$ は、次のように算定される。

$$h_k(t) = \frac{y_k(t)}{y(t)}$$

これを用いて①と同様の計算を行うことにより、 $h_k(t)$ をクラスタ別に平均した時間帯変動パターン $\hat{h}_k(t)$ を求めることができる。この場合も、①と同様に異常値を適切に除外する必要がある。

最後の③の手順では、単純に①と②を掛け合わせることで、フォワード価格を算定することができる。つまり、年平均フォワード価格 F が与えられたとき、時刻 t_0 における受渡日時 t_k (t 日の時刻 k) のフォワード価格（フォワードカーブ）は次のようになる。

$$F(t_0, t_k) = \hat{y}(t) \hat{h}_k(t) F$$

²³ 本付録は、2.1.2 節で言及した、日次粒度・時間単位粒度のフォワードカーブの作成方法について記述している。

²⁴ ここでの正規化とは、平均を 1 とした時の指数として定義する。 $y(t)$ は日平均変動パターンと言い換えることができる。

²⁵ 日本の電力卸売スポット価格は 30 分単位で取引されるため、 k は k ($k = 1, \dots, 48$)として定義できる。 $y_k(t)$ は時間帯変動パターンと言い換えることができる。

付録 2 : 価格過程のモデル化

マーケットアプローチによる価格過程のモデル化に当たっては、過去の電力価格の変動から、価格の変化を表す確率過程について、パラメータで表現されるいくつかの過程（幾何ブラウン運動、ジャンプ拡散過程等）の中から最適なものを選択することになる。確率過程のモデル化は、特に、短期的な価格変動が影響を及ぼす短期かつ高粒度のフォワードカーブをモデル化するときに有効なアプローチである。ここでは、2.1.2 節で言及した価格過程のモデルのうち、代表的なものについて記述する。

(1) 古典的モデル

電力価格の平均回帰性やジャンプ過程等の特徴を記述するため金融工学の分野で確立されてきた古典的モデルを電力価格に当てはめようとするアプローチである。電カスポット価格の変動を確率過程でモデル化し、平均価格のトレンド変化と変動（ボラティリティ）を推定することを目的としている。フォワード価格はスポット価格の将来期待値として算定される。以下に代表的なモデルを示す。

GBM (Geometric Brownian Motion)

GBM はスポット価格がランダムウォーク（ブラウン運動）に従うとしてモデル化したものであり、下記のように表される。

$$\frac{dS(t)}{S(t)} = \mu dt + \sigma dW(t).$$

ここで、 $S(t)$ はスポット価格（ $dS(t)$ はスポット価格の変動分）、 μ はトレンド的な変化率、 σ はボラティリティ、 $W(t)$ は正規分布に従う変動を表す。

平均回帰モデル

平均回帰モデルは GBM に平均値への回帰過程を導入するものであり、下記のように表される。

$$\frac{dS(t)}{S(t)} = x(\ln S(\infty) - \ln S(t))dt + \sigma dW(t).$$

ここで、 x は回帰速度、 $S(\infty)$ は長期間のスポット価格の均衡値を表し、第 1 項目が平均回帰を記述している。

ジャンプ過程モデル

ジャンプ過程モデルは、ジャンプ発生確率を導入することにより、価格のジャンプ（スパイク）を加味するものである。例えば、平均回帰モデルと組み合わせたジャンプ過程モデルは、具体的には下記のように表される。

$$dS(t) = d\mu(t) + x(\mu(t) - S(t))dt + \sigma dW(t) + Jd\theta(\lambda).$$

ここで、 $\mu(t)$ は時刻 t における均衡値であり、第2項が平均回帰を記述している。また、第4項がジャンプ過程を記述しており、 J は平均 μ_J 標準偏差 σ_J の正規乱数、 $d\theta(\lambda)$ はジャンプ発生確率 λ のポワソン過程を表している。

以上の古典的モデルは、短期的な均衡価格（あるいはトレンド）に対する価格変動のモデル化を行うものである。他方で電力価格の中長期変動は燃料価格の影響と需給のバランスが大きく影響を及ぼすため、これらの要素を別途取り入れる必要がある。たとえば、複数の外的要因を加味した応用モデルが作成されている。

(2) 応用モデル

電力フォワードカーブのマーケットアプローチモデルには、電力の価格変動の特徴をより精緻に反映させるため、古典的モデルをベースに様々な応用モデルが生まれている。代表的なものとしては、長期及び短期のショック要因を加味した Schwartz-Smith Model、確率過程の変化を導入したレジーム・スイッチングモデルのほか、燃料等の外的要因変数を別途組み込む2ファクター（マルチファクター）モデルなどがある²⁶。

²⁶ 具体的なモデルの算定方法は、Burger, Markus et al., *Managing Energy Risk: An Integrated View on Power and Other Energy Markets*, John Wiley & Sons, 2007 に詳しい。

付録 3 : フォワードカーブ作成に当たって必要となるデータの一覧表

第 4 章に提案したフォワードカーブの作成に当たって必要となるデータを以下に示す。

表 付録 3-1 フォワードカーブ作成に当たって必要となるデータの一覧

分類	影響要因	小分類	データ元	モデル ^注		
				F	M	
需要	標準時間別	一般電気事業者の需要	各社の「電力使用実績」	○		
	変動パターン	PPS の需要	資源エネルギー庁「電力調査統計」	○		
	再エネ	導入量		固定価格買取制度情報公開ウェブサイト	○	
		太陽光の発電量 変動パターン		国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） 「日射量データベース」	○	
		風力、水力、地熱等の 発電量変動パターン		資源エネルギー庁「電力調査統計」	○	
供給	プラント仕様	対象プラント	火力原子力発電技術協会「火力原子力発電所設備要覧」	○		
		発電効率	電気事業者ウェブサイト	○		
	起動/停止等	起動・停止情報	電気事業者のプレスリリース等	○		
	燃料	燃料先物価格	インターコンチネンタル取引所（ICE）、シカゴ・マーカントイル取引所（CME）等	○	○	
		為替	取引所（ICE、CME 等）または情報ベンダー	○	○	
電力 価格	変動パターン	—	日本卸電力取引所(JEPX)	○	○	

注：「F」はファンダメンタルモデル（ジェネレーションスタックモデル）、「M」はマーケットアプローチモデルを表す

出典 三菱総合研究所

平成27年度商取引適正化・製品安全に係る事業
電力先物の価格形成手法に関する調査

報告書サマリ

2016年3月

1. 本件調査の概要

背景と目的

現在、創設が検討されている電力先物市場の活性化のためには、電気事業者のほか、取引の相手方としての金融機関など、多様なプレイヤーの市場参加が必要であり、その参画の障壁を下げるためには、相場観としての電力フォワードカーブを示すことが有効である。

かかる認識のもと、本件調査では、日本市場の特性を踏まえた中立的なフォワードカーブモデルを検討するとともに、その普及啓発を行い、もって卸電力市場の早期の活性化と秩序ある市場形成に貢献することを目的とする。

調査内容

(1) 海外におけるフォワードカーブモデルの調査・分析

- 既に成熟している海外電力先物市場で用いられているフォワードカーブモデル、取引参加者及び取引所における利用事例等を調査

(2) 日本におけるフォワードカーブモデルの利用状況

- 日本の現物市場において用いられているフォワードカーブモデル、利用事例を調査

(3) モデル作成にあたって必要となる情報の整理

- モデル作成にあたって、一般的な電力フォワードカーブモデル、日本市場特有の事項、需給状況、課題などの情報を整理

(4) 電力フォワードカーブモデル及びその応用の検討

- 潜在的な市場参加者へのインタビューを行いつつ、日本市場の実情を反映し、多くの取引参加者が簡易に運用可能なフォワードカーブモデルを検討
- 併せて、当該モデルを用いて帳入値段の算出へ活用するなど、モデルの応用を検討

2. 海外における電力フォワードカーブモデルの調査・分析

- 諸外国で利用されている電力フォワードカーブモデルを調査し、その定義、求められる要件、モデルの概要を整理

電力フォワードカーブの定義と要件

- 将来の電力の受け渡しについて、現時点で約定可能な価格
- 電力フォワードカーブに求める要件として、以下の点が挙げられる
 «要件注1»
 - 無裁定 (Arbitrage Free) な価格であること
 - 周期性 (季節、月、週、日内) を適切に表現していること
 - 特殊日需要 (祝休日、正月、盆) を適切に表現していること
 - スムーズに変動すること
 - 過去の特別なイベントと無関係であること
 - 関係する他の市場価格を反映していること

注1 M. Hildmann, et al., "What Makes a Good Hourly Price Forward Curve?", IEEE 2013より

一般的な電力フォワードカーブモデル

	ファンダメンタルモデル	マーケットアプローチモデル
概要	「需給バランス」をシミュレーションし作成	「過去の市場価格」を統計処理し作成
長所	<ul style="list-style-type: none"> ● 流動性が低い場合でも作成可能 ● 需給環境の変化を反映可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 必要データが少ない ● 市場価格の水準感を反映できる
短所	<ul style="list-style-type: none"> ● 必要データが多く、一部入手困難 ● 短期の変動を反映するのが困難 ● 恣意性が入りやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ● 流動性が低い場合には作成困難 ● 需給環境の変化の反映が困難 (市場環境変化が激しい場合は不適)
利用	● 未成熟の市場や長期取引など流動性が低い場合に適	● 成熟し、流動性の高い市場に適

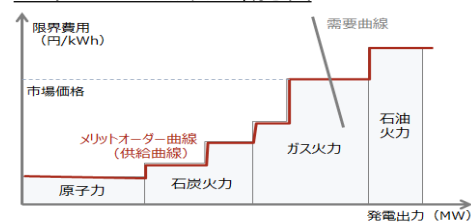
フォワードカーブモデルの概要

ファンダメンタルモデル

- 電源のメリットオーダー注2をシミュレートし、ある時間帯に稼動している電源のうち、最も高い電源の限界費用をその時間帯の市場価格とするモデル
- 限界費用の安い電源を単純に積み上げた供給力を想定する「ジェネレーションスタックモデル」、現実存在する制約条件注3を加味し、最適化された供給力を想定する「最適ディスパッチモデル」などあり

注2 電源を限界費用の安い順に起動すること 注3 起動・停止費用、部分付加効率など

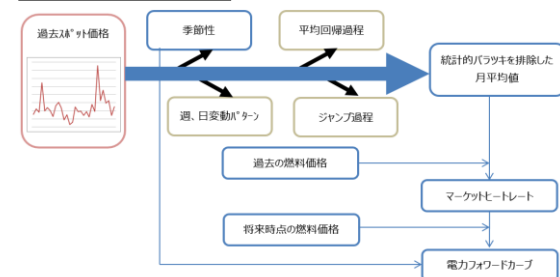
ジェネレーションスタックの概念図



マーケットアプローチモデル

過去のスポット価格の値動きにおける季節性、週・日変動パターン、燃料価格との相関などを統計処理し、将来な価格変動をモデル化するモデル

算定プロセスの概念図



3. 日本における電力フォワードカーブモデルの利用状況

- 現物取引におけるフォワードカーブの利用状況、先物取引に向けた同検討状況、これらに関連する課題認識、本件調査で検討する電力フォワードカーブモデルに対する意見等をインタビューを通じて把握

現物取引における利用状況

想定される利用用途

- 先渡市場取引でのプライシング
- 相対取引でのプライシング
- 電力調達計画の立案

※ 相対取引や常時バックアップと、スポット市場調達との比較など

- 発電計画の立案

※ スポット市場調達との比較

- 保有ポジションの時価評価
- リスクマネジメント（日々のリスク量の把握）

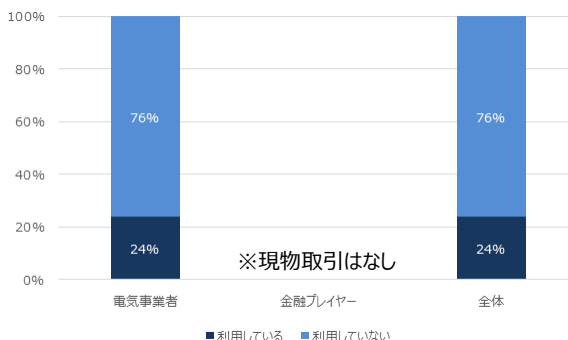
現状

- 現物取引において、何らかの電力フォワードカーブモデルを利用している企業は、全体の24%
- 電力フォワードカーブモデルを利用している企業も、大半は、プライシングの参考として利用するに留まっている状況

課題認識

- フォワードカーブモデルによる客観的なプライシング
- （先物取引に向けた）フォワードカーブを利用したリスクマネジメント体系の構築

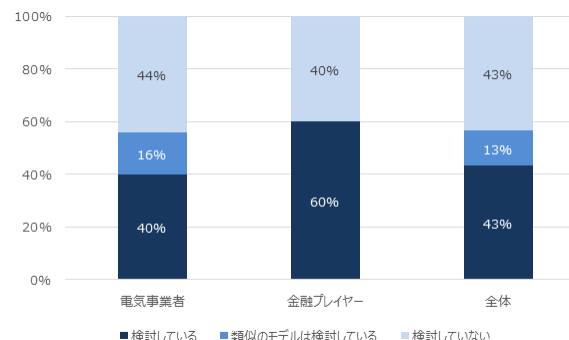
現物取引におけるフォワードカーブ利用の有無



先物取引に向けた検討状況

- 約半数の企業は、先物取引を見据え、何らかの電力フォワードカーブモデルを検討
- 本件調査で検討するモデルに対しては、多様な市場参加者による活用を念頭に、シンプルなモデルとすべき、との意見が大勢
- また、値洗いへの応用の際には、恣意性の入らないモデルとするとともに、算定方法を明示すべきとの意見が大勢

先物取引に向けたフォワードカーブモデルの検討の有無



4. 日本市場向け電力フォワードカーブモデルとその応用

- 幅広い事業者が作成・利用可能な簡便な電力フォワードカーブモデル注として、以下の2つのモデルを提案

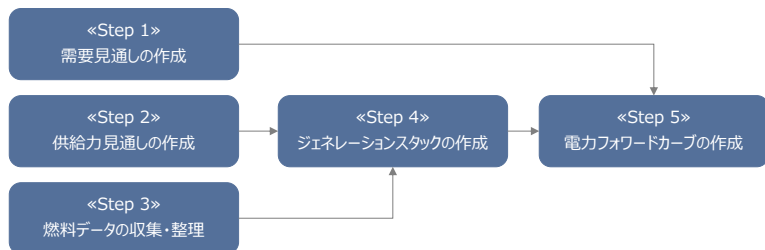
注：電力先物市場協議会での議論を踏まえたシステムプライスの月平均価格に関するフォワードカーブ

ファンダメンタルモデル注1の作成手順

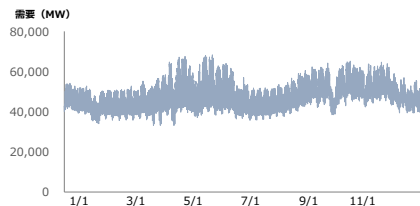
注1 簡便なモデルとして「ジェネレーションスタックモデル」を提案

- Step 1**
 - 過去の需要にGDP成長率等を加味し、1時間毎の需要見通しを作成
 - ディスパッチの対象外である再エネは、上記需要から控除
- Step 2**
 - 国内の発電所をリストアップし、出力、燃料種、熱効率の情報を整理
- Step 3**
 - 燃料（石油、石炭、LNG）の先物価格のデータを収集
- Step 4**
 - 燃料価格を熱効率で割り、各発電所の限界費用を算定
 - 限界費用の安い順に出力を積み上げ、ジェネレーションスタックを作成
- Step 5**
 - 需要見通しとジェネレーションスタックの交点から、各時間帯の価格を算定

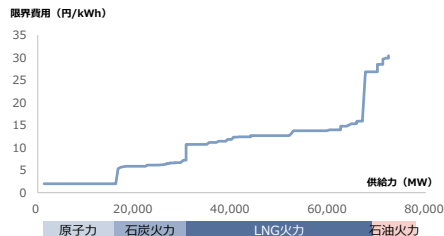
作成プロセス



需要見通し



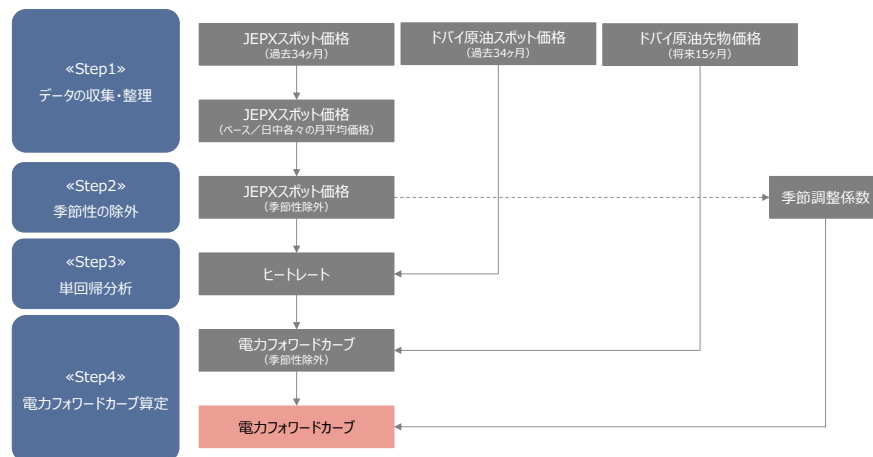
ジェネレーションスタック



マーケットアプローチモデルの作成手順

- Step 1**
 - 過去の「JEPXスポット価格」及び「原油スポット価格」、直近の「原油先物価格」のデータを収集・整理
- Step 2**
 - 過去の「JEPXスポット価格」から、季節性を除外（例：各月の月平均価格を、年平均価格で除算）
- Step 3**
 - JEPXスポット価格（季節性除外）と原油スポット価格の単回帰分析を行い、ヒートレートを算定
- Step 4**
 - ヒートレートと燃料先物価格を乗じたものに、除外した季節性を加え、電力フォワードカーブを作成

作成プロセス



電力フォワードカーブセミナー実施概要

1. 開催：3回開催（東京2回、大阪1回）

- ①東京 2016年2月16日（火）13：30～16：15
- ②大阪 2016年2月19日（金）13：30～16：15
- ③東京 2016年2月23日（火）13：30～16：15

※開催場所

東京：東京商品取引所 B1 セミナールーム、
大阪：大阪堂島商品取引所 6階大会議室

2. セミナー参加者：79社149名

内訳 当業者（電力、ガス、PPS、商社等）：38社76名
ブローカー、金融機関等：15社32名
その他（システムベンダー、記者等）：26社41名

3. 実施内容（プログラム）

第1部 電力先物市場について（東京商品取引所より）

13：30～14：15 電力先物市場の開設に向けて
14：15～14：30 質疑応答

第2部 電力フォワードカーブモデルについて（三菱総合研究所より）

14：45～15：45 電力フォワードカーブモデルとその応用
15：45～16：15 質疑応答

4. 配付資料

- ・本日のプログラム
- ・アンケート
- ・TOCOM グループのご案内
- ・電力フォワードカーブモデルについて

5. アンケート結果

問1. 電力小売事業への参入自由化後、貴社の事業活動において電力先物を活用したヘッジニーズは発生すると思われますか。

有効回答数 93

①発生する	⇒問2へ	57 (61%)
②発生しない	⇒問3へ	14 (15%)
③不明	⇒問4へ	22 (24%)

問2. 今後、先物取引を活用するために必要となる情報は何とお考えでしょうか。(複数回答可)

全回答数 102

①先物取引の仕組み	28
②先物取引の具体的な利用事例	26
③先物取引を利用する社におけるリスク管理の手法	40
④その他	8

(主なコメント)

- ・電力先物市場における商品設計
- ・システムプライスだけでなく、エリアプライスでの商品
- ・市場の流動性に関する情報

問3. どのような理由からヘッジニーズが発生しないとお考えでしょうか。(複数回答可)

全回答数 12

①燃料費調整制度があるため	2
②顧客と一定価格で販売する契約を締結しているため	0
③先物で利益が上がる時はよいが、逆に損することもあるため	0
④日本卸電力取引所の先渡取引で対応するため	0
⑤その他	10

(主なコメント)

- ・受託取引以外に自己販売の機会が将来発生するか現時点で判断できないため
- ・非当業者（金融機関・仲介業者・情報ベンダー）であるため

問4. どのような理由からヘッジニーズが不明なのでしょうか。(複数回答可)

全回答数 28

①実際に自由化が始まってみないと分からないと考えているため	11
②事業モデルが確立していないため	8
③その他	9

(主なコメント)

- ・今後のビジネスモデル次第であるため
- ・電源の最適バランスが確立しておらず、市場調達で運用できるか不明のため

- ・今後、卸市場がどの程度活発になるか不明のため
- ・電力先物取引の活用方法について社内検討中のため

問5. 電力先物市場への参加について、現時点での貴社内の検討状況はいかがでしょうか。

全回答数 68

①開設当初から参加する予定	16
②時機を見て参加する予定	41
③参加しない	11

(②に関する主なコメント)

- ・上場のタイミングや卸取引市場の流動性を見て判断したい
- ・自社の需要獲得状況を踏まえて判断したい
- ・企業のヘッジニーズの普及状況及び個人投資家の参入状況を見て判断したい

(③に関する主なコメント)

- ・先物市場の設計、電力自由化後の動向を注視した上で検討したい。
- ・事業モデルを検討中であるため、参加の可否は未決定。
- ・電力自由化後のスポット市場・時間前市場の価格が不明であるため。

問6. 本日のセミナーを受けて、電力フォワードカーブに対する理解は深まりましたか。

有効回答数 83

①深まった	74 (89%)
②よく分からなかった	4 (5%)
③その他	5 (6%)

問7. 本日提示した電力フォワードカーブモデルを活用し、取引を行おうとお考えでしょうか。

有効回答数 73

①提示されたモデルを利用予定	9 (12%)
②今後、自社内で独自にモデルを開発予定	18 (25%)
③その他	46 (63%)

(主なコメント)

- ・もう少し分析が必要でよく検証したい。
- ・現在の自社モデルの改良について参考にしたい。
- ・試行錯誤を重ねて、提示されたモデルを吟味して活用する予定。

問8. 本日提示した電力フォワードカーブモデルについて、よく分からなかった点、もっと説明して欲しかった点などありましたら、御自由に御記入下さい。

(主なコメント)

- JEPX スポット価格との相関関係を詳細に説明して欲しかった。
- エリアプライスのフォワードカーブモデルの作成が可能か説明して欲しかった。
- 電力会社の自主的取組みが終わったときの想定がどうなるのかよく分からなかった。
- 再生可能エネルギーのモデルへの折り込み方がよく分からなかった。

以 上