

# 分散型エネルギーシステムによる多主体発電と電力消費を考慮したエネルギーモデルの構築

川村淳貴 市川学 出口弘 (東京工業大学)

## Construction of Energy Model for Electricity Demand and Multi-Stakeholder Supply including Distributed Energy Systems

\*J. Kawamura, M. Ichikawa and H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

**Abstract**— In Japan, the installation of distributed energy systems is progressing because of Feed-in Tariff for renewable energy and the nuclear accident. Adopter of distributed energy systems is not only utility company but also municipality, enterprise and household. Therefore, it is necessary to consider more detailed power supply. In this study, we propose the energy supply-demand model focused on power generation in household mainly.

**Key Words:** Energy Supply-Demand, Distributed Energy System, Feed-in Tariff

### 1 はじめに

#### 1.1 分散型電源とは

東日本大震災を機に、様々な人がエネルギー問題に関心を持つようになり、国としてもそれまで進めてきた原子力発電拡大から方向転換をせざるを得なくなった。そこで代替電源として注目されているのが、主に太陽光発電を始めとする分散型電源である。

分散型電源とは、需要地に隣接して分散配置される小規模な発電設備全般<sup>1)</sup>を指し、再生可能エネルギー、コージェネレーション、燃料電池に大別される。分散型電源と対照となる集中型電源を含めた発電設備の種類、発電規模、それに伴うステークホルダをまとめるとFig. 1のようになる。

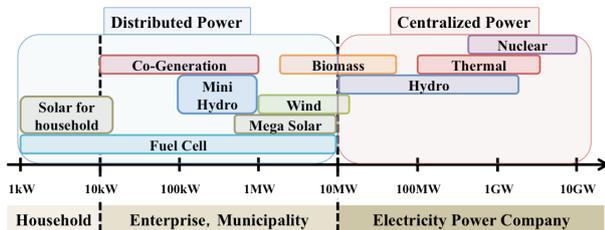


Fig. 1: Types of power plants

分散型電源の大きな特徴として、発電設備の供給者の違いが挙げられる。水力発電、火力発電、原子力発電とする既存の大規模集中型電源による供給者は、主に電気事業者であったが、分散型電源による供給者は、自治体や民間企業、さらには世帯など、今までは需要者であったステークホルダが供給者となることで、導入規模は小さいものの様々なレベルで発電が可能となった。

一方で、導入者が多様になることにより、電力エネルギーの供給は複雑化する。また、自然エネルギーによる発電設備に関しては、日射量や風速によって発電量が変化することから、電力供給そのものが不確実性を伴う。

#### 1.2 電力供給の安定化

分散型電源による供給の複雑化と不確実性に対応する方法として、集中型電源による調節と電力貯蔵装置による調節が挙げられる。

集中型電源による調節は、調節可能な火力発電や揚水式水力発電などを用いて、電気事業者により行われる。このとき、各分散型電源ごとの調節はできないので、需要量と供給量とある程度集約して調節を行う。

電力貯蔵装置による調節は、二次電池や電気自動車などを用いて行われる。このとき、設置者は分散型電源による発電量と電力貯蔵装置の充電量を考慮して、自身の需要量を調節するため、ステークホルダは需要と供給、さらには制御・管理を行うため、さらなる需給構造の複雑化が進む。

ただし、電力貯蔵装置のみで常に需給関係を安定化できるわけではないので、ベース電源の確保や電力融通が必要となる。

### 2 先行研究および関連研究

日本では、国全体におけるエネルギー需給を予測するモデルとして、各エネルギー源がどのように転換され、最終的にどのような形態で、どの部門や目的に消費されたかについて定量的に示すエネルギーバランス表に基づいた、エネルギー需給モデルを採用している<sup>2)</sup>。サブモデルとして、分散型電源導入に関するモデルも導入されているが、エネルギーのやり取りに関する記述はない。

一方で、国全体とするマクロなエネルギー需要から一般的な世帯のエネルギー消費を見積もるのではなく、家族類型別に、各世帯の人間の動向調査からエネルギー消費を推定する、世帯詳細区分型都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発と応用が水野ら<sup>3)</sup>によって行われている。

エネルギーエンドユースモデルは、分散型電源のために作成されたモデルではないが、電力消費の詳細化により、需要者ごとに電力貯蔵装置を導入する際の電力のやり取りや、固定価格買取制度における住宅用太陽光発電の余剰電力の買い取りの仕組みを表現でき、さらには、家族類型別に電力消費を決定することで、電力消費について複数の特定都市を再現する際の汎用性を持たせることができる。

エネルギーに関する関連研究としては、アリゾナ州を題材とした固定価格買取制度の評価として、エージェントベースシミュレーションを使った研究<sup>4)</sup>があるが、

エネルギーのやり取りではなく、太陽光発電の普及が主なテーマとなっている。

また、1世帯を対象とした、世帯内のエネルギーを管理する Home Energy Management System(HEMS) や、1つビルを対象とする Build and Energy Management System(BEMS) など、一つの建物に限定したエネルギーの最適化は実用段階にあるものの、地域を対象とした Community Energy Management system(CEMS) として、分散型電源を含めた都市全体を対象としたエネルギー管理に関する研究はまだ少ない。

### 3 本研究の位置づけ

分散型電源の普及により、電力供給者が電気事業者だけでなく、自治体や企業、世帯など多様になり、電力貯蔵装置の普及により、建物内や小さなコミュニティの中でエネルギーを制御・管理できるようになると、電力貯蔵装置による電力融通や電力事業者による供給量の調整など、電力エネルギーの需給構造は複雑になる (Fig. 2)。

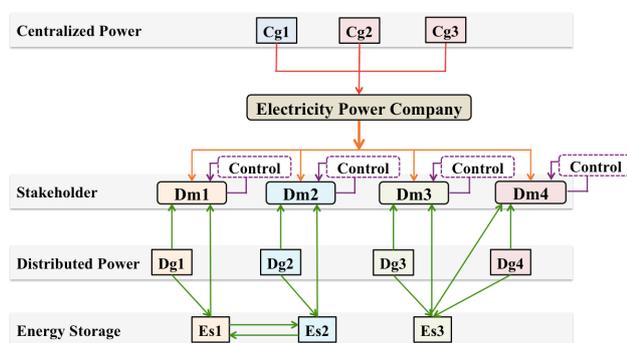


Fig. 2: Energy supply-demand structure including distributed power and energy storage

分散型電源が普及した状況下では、供給者となるステークホルダに焦点を当て、よりミクロな需給関係を表現できる新しいエネルギー需給モデルが必要である。そこで、本研究では、分散型電源による多主体発電と、複雑なエネルギー需給構造を表現するモデルの構築を目的とする。

電力供給安定化の手法から見た分析対象は、集中型電源のみによる調整は固定価格買取制度、電力貯蔵装置のみによる調整はマイクログリッド、集中型電源と電力貯蔵装置による調整はスマートグリッドにあたる (Table 1)。今回は、エネルギー需給構造が比較的複雑ではない固定価格買取制度の中心にモデルの構築を扱う。

Table 1: Targets of Analysis

Target	Centralized Power Plant	Energy Storage System
Feed-in Tariff	○	×
Micro Grid	×	○
Smart Grid	○	○

## 4 モデルの構想

### 4.1 固定価格買取制度と再生可能エネルギー

固定価格買取制度とは、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスとする再生可能エネルギーで発電された電力を、定められた期間および価格によって、その地域の電気事業者が買い取ることを国が義務づける制度である。

この制度は、導入者が、電力を売ることによる金額で、初期投資に係るコストの回収が可能となり、これがインセンティブとなり導入を促す。一方で、電気事業者は、一般の電力料金より高い金額で電力を買い取るため、その買取費用は全利用者から賦課金として、電力価格に上乗せする形で回収を行う。

制度の特徴として、各再生可能エネルギーと発電規模により、買取価格と買取期間が異なることが挙げられる (Table 2)。これらの価格・期間の設定は毎年4月に改定される。特に買取価格については、早急な導入を促す意味で、現在は高めに設定されているが、これからは導入状況によって価格が下がることが予想される。実際に、住宅用太陽光発電については2012年度は42円/kWhであったが、2013年度からは38円/kWhとなった。

Table 2: Buyback prices and terms in 2013<sup>5)</sup>

Energy	Capacity, Types	Buyback price [yen/kWh]	Buyback term [year]
Solar	over 10kW	37.80	20
	below 10kW	38.00	
	below 10kW (linked other facility)	31.00	10
Wind	over 20kW	23.10	20
	below 20kW	57.75	
Geothermal	over 15MW	27.30	15
	below 15MW	42.00	
Water	over 30MW	25.20	20
	200kW - 30MW	30.45	
	below 200kW	35.70	
Biomass	Gasification	40.95	20
	Unused wood	33.60	
	Wood	25.20	
	Waste	17.85	
	Recycle wood	13.65	

売電に関しては、住宅用太陽光発電の場合、太陽光発電による発電から世帯の電力需要を差し引いた余剰電力が発生した時に限り、その余剰電力を売ることができる。それ以外の発電設備に関しては、設置者の電力需要に関係なく、全ての電力を売ることができる全量買取となっている。

現在、再生可能エネルギーの導入状況は、固定価格買取制度が開始される以前の平成24年6月までの導入量を除いても、主に住宅用太陽光発電の導入が進んでいることが分かる (Table 3)。これは建設工事が短く、立地に対して支障となる規制が少ないためである。一方で、認定を受けた設備容量を見ると、今後は住宅用太陽光発電と平行して、規模が大きい非住宅用太陽光発電や風力発電を中心に導入が進むことが予想される。

### 4.2 モデルの概要

本研究のモデルは、固定価格買取制度により、分散型電源による電力が電気事業者に集められ、それらの電力が都市全体の電力需要に対して再分配するために電気事業者が発電量を調整する仕組みを表現する。このとき、分散型電源は固定価格買取制度を想定するため、再生可能エネルギー発電設備のみとし、コージェネレーションや燃料電池は想定していない。

また、再生可能エネルギー発電設備は、太陽光発電と風力発電のみを想定する。これら2種類の発電設備

Table 3: Installed renewable energy systems<sup>6)</sup>

	April, 2012 ~ February, 2013	
	Start-up Capacity	Licensed Capacity
Solar Power (Households)	1,137MW (April - June:300MW)	1,246MW (month-to-month +288MW)
Solar Power (non Households)	422MW (April - June:2MW)	11,012MW (month-to-month +5,263MW)
Wind Power	63MW (April - June:0MW)	622MW (month-to-month +5.2万kW)
Mini Hydro Power (over 1000kW)	1MW (April - June:1MW)	23MW (month-to-month +22MW)
Mini Hydro Power (below 1000kW)	2MW (April - June:1MW)	5MW (month-to-month +1MW)
Biomass Power	36MW (April - June:6MW)	147MW (month-to-month +63MW)
Geothermal Power	1MW (April - June:0MW)	4MW (month-to-month +2MW)
Total	1,662MW	13,059MW

は、前述のように今後多く導入が想定されていて、他の再生可能エネルギー発電設備よりも不安定な電源である。そのため、導入が進んだ時に、電気事業者の調節機能にどの程度影響するかを評価する意味で、本研究では太陽光発電と風力発電を対象とする。このとき、現行制度に従って、太陽光発電は住宅用を余剰買取、非住宅用を全量買取とし、風力発電は全量買取とする。

ステークホルダは主に、余剰買取によりエネルギー需給構造が変化し、時間によって需要者または供給者となる世帯、再生可能エネルギーによる発電の回収により電力供給の調節や電源構成が変化する電気事業者に焦点を当てる。その他に、常に需要者である世帯以外の需要者、供給者となる再生可能エネルギー発電設備で構成される。

また、モデルの汎用化のために、特定都市の特性として世帯構成や外部環境のデータを設定する都市特性モジュールを組み込み、電力に係る費用の計算のために、電力コストモジュールを導入する。

以上のことから、本研究のモデルの全体像は Fig. 3 となる。

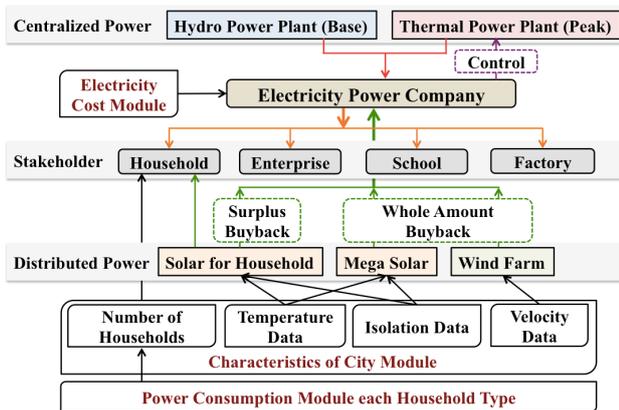


Fig. 3: Overview of model for Feed-in Tariff

本研究では、固定価格買取制度の買取価格および買取期間が1年間で改定されることから、シミュレーション期間は1年間とし、ステップ数は、都市特性モジュールのデータ群が1時間刻みであるため、それに合わせて1時間とする。

ここではインデックス番号  $i, j$  について、世帯や会社などの需要者エージェントのインデックス番号  $i = \{1, \dots, d_{all}\}$  ( $d_{all} \in \mathbb{N}$ )、ステップのインデックス番号  $j = \{1, \dots, 8760\}$  と定義する。

### 4.3 分散型発電設備の定義

本節では、分散型電源として太陽光発電および風力発電の発電量に関する算出式を定義する。

#### 4.3.1 太陽光発電の推定発電量の定義

太陽光発電の推定発電量  $Ep_{pv}(i, j)$  [kWh] は、JIS C 8907 : 2005 『太陽光発電システムの発電電力量推定方法』により、世帯  $i$  における太陽光発電の発電容量  $P_{AS}(i)$  [kW]、ステップ  $j$  時の日射量  $H_{AH}(j)$  [kWh/m<sup>2</sup>・時]、ステップ  $j$  時の総合設計係数  $K(j)$ 、標準試験条件時の日射強度  $G_s (=1$  [kW/m<sup>2</sup>]) として、以下のように定義する。

$$Ep_{pv}(i, j) = P_{AS}(i) \times H_{AH}(j) \times K(j) \div G_s \quad (1)$$

総合設計係数  $K(j)$  は、温度上昇により発電効率が低下するという太陽電池の特性と、その他補正係数を含め、外気温  $T(j)$  の関数として以下のように定義される。

$$K(j) = 0.756 \times \{1 + \alpha_{Pmax} \times (T(j) + 21.5 - 25)/100\} \quad (2)$$

$\alpha_{Pmax}$  は最大出力温度係数といい、太陽電池のメーカーにより異なるが、-0.3%から-0.5%の間の値をとる。ここでは、一世帯あたりの発電容量は一律 4kW とし、日射量については最も発電効率が高くなる方位角 0° (真南)、傾斜角 30° と想定する。

#### 4.3.2 風力発電の推定発電量の定義

風力発電の発電量は、風車の性能 (パワーカーブ) と、設置場所の風速によって決まる。風車メーカーは、設計データや実記の性能計測データをもとにパワーカーブを決定する。

発電量の計算には、「ビン法」が用いられる。これは連続的に変化する風速を一定の幅を持った風速息ごとにまとめて計算を行うもので、その風速域の範囲をビン幅と呼ぶ。メーカー提示のパワーカーブが 1.0m/s ごとのデータとして与えられていることが多いため、発電量計算のためのビン幅もそれに合わせて 1.0m/s とすることが多い<sup>7)</sup>。

本研究では、1時間ごとの発電量が必要であり、そのためのステップ  $j$  時の風速  $v(j)$  は1時間ごとに都市特性モジュールのデータセットにより与えられる。設置する風車  $h$  の風速  $v$  のときのパワーカーブ  $P_h(v)$  が与えられているとき、推定発電量  $Ep_{wind}(j)$  を以下のように定義する。

$$Ep_{wind}(j) = P_h(v(j)) \times v(j) \quad (3)$$

### 4.4 固定価格買取制度に係るステークホルダ

本節では、余剰買取によりエネルギー需給構造が変化する世帯と、再生可能エネルギーによる発電の回収により電力供給の調節や電源構成が変化する電気事業者を定式化する。

#### 4.4.1 世帯

世帯の電力消費は家族類型によって異なることが想定されるため、類型によって余剰電力が生じる時間帯や供給量が異なる。本研究では、世帯の家族類型に従って、複数の自律的に行動する人間を組み合わせ、世帯として構成する。

人間の行動は、後述する家族類型別電力消費モジュール内の生活行動パターン作成モデルによって決定し、各行動によるエネルギー消費も同モジュール内のモデルで決定する。

各世帯に所属する各人間のエネルギー消費をアグリゲートすることで、世帯  $i$  のステップ  $j$  時の電力消費量  $E_c(i, j)$  が決定する。これにより、各世帯におけるステップ  $j$  時の売電量  $E_s(i, j)$  および電力需要量  $E_d(i, j)$  は次のように定義できる。

$$E_s(i, j) = \begin{cases} Ep_{pv}(i, j) - E_c(i, j) & (Ep_{pv}(i, j) - E_c(i, j) > 0) \\ 0 & (Ep_{pv}(i, j) - E_c(i, j) \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$E_d(i, j) = \begin{cases} 0 & (Ep_{pv}(i, j) - E_c(i, j) > 0) \\ E_c(i, j) - Ep_{pv}(i, j) & (Ep_{pv}(i, j) - E_c(i, j) \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

#### 4.4.2 電気事業者

電気事業者は、都市全体としての電力需要量と回収した再生可能エネルギー発電量から、電気事業者が持つ発電設備による発電量を電力需要を満たすよう決定し、電力を供給する役割を持つ。

電気事業者が持つ発電設備は、毎時一律に発電するベース電源と需要の大きい時のみ発電するピーク電源、そしてその中間を担うミドル電源がある。実際の電源との対応は、ベース電源は一般水力発電と原子力発電、ミドル電源は大規模火力発電、ピーク電源は揚水式水力発電と小規模火力発電となる。

本研究では、電気事業者は、ベース電源（制御不可能、毎時一律に発電）として一般水力発電と、ミドル・ピーク電源（制御可能、売電量に合わせて発電）として火力発電を持つものとする。従って、再生可能エネルギーの不安定な電力供給の調整は火力発電が行う。このとき、火力発電量  $TPG(j)$  は、水力発電量  $HPG(j)$  ( $= const.$ ) と以下の式で定義できる。

$$TPG(j) = \sum_i E_d(i, j) - \sum_i E_s(i, j) - HPG(j) \quad (6)$$

### 4.5 モジュールの定義

本節では、モデルに必要な機能やモデルの汎用化のため、家族類型別電力消費モジュール、都市特性モジュール、電力コストモジュールを定義する。

#### 4.5.1 家族類型別電力消費モジュール

世帯の電力消費は、世帯に所属する人間の数やライフスタイル、ライフステージによって異なるため、世帯を家族類型化し、電力消費の違いを再現する。

家族類型別のエネルギー消費を再現するモデルとして、エネルギーエンドユースモデル<sup>3)</sup>を参考にする。エネルギーエンドユースモデルは、生活行動パターン作成モデル、エネルギー消費行動モデル、給湯エネルギー消費モデル、冷暖房エネルギー消費モデルとする4つのサブモデルによって構成されている。

現段階では、モデルが複雑であるため再現に至っていないが、行動パターンに関しては社会生活基本調査をベースにし、暖冷房エネルギー消費モデルの簡略化を行うことで、本研究のモデルに沿うような形で改善を加えたい。

#### 4.5.2 都市特性モジュール

本研究では、特定都市を特徴付けるデータセットとして、都市特性モジュールを定義する。

具体的には、家族類型別世帯数、平均気温、日射量、風速の4つのデータである。家族類型別世帯数は国の統計や地方自治体が公表しているデータを元に設定する。平均気温、日射量、風速に関するデータは、NEDOが公表しているアプリケーション「標準気象・日射データ (METPV-11)」を用いる。METPV-11とは、国内837地点・20年間(1990~2009年)に関する1時間あたりの平均気温、日射量、風速等のデータベースである。

都市特性をモジュール化することで、別の都市特性モジュールを組み込み、別の都市を表現することが可能となり、モデルの汎用性が高まる。

#### 4.5.3 電力コストモジュール

電力コストモジュールでは、電気事業者の発電に係るコストや買取価格を設定する。

電力コストをモジュール化することで、燃料費の変動による価格の変更や、固定価格買取制度の買取価格の変更などのシナリオ分析が可能となる。

### 5 おわりに

ここまでは、分散型電源の導入者となるステークホルダに焦点をあてたモデルの必要性と、その一例として固定価格買取制度の需給構造を述べた。今後の展開としては、まず、家族類型別のエネルギー消費を再現し、発電設備のみでエネルギーの売買の仕組みをモデル上で構築する。その上で、簡略化した仮想都市を設定しシミュレーションを行い、モデルの妥当性の検証したのち、現実都市に応用しモデルの有用性を検討する。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本電気工業会 『分散型電源システム』  
[http://www.cite\\_1-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/](http://www.cite_1-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/) (2013年8月30日最終閲覧)
- 2) 経済産業省 『平成24年度 エネルギー環境総合戦略調査 (将来のエネルギー需給構造に関する研究調査)』
- 3) 藤井 拓郎, 下田 吉之, 森川 貴夫, 水野 稔 "熱負荷計算を組み込んだ都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発", 日本建築学会環境系論文集 第589号, 51-58(2005).
- 4) Jiayun Zhao, Esfandyar Mazhari, Nurcin Celik and Young-Jun Son, "Hybrid agent-based simulation of policy evaluation of solar power generation systems", *Simulation Modelling Practice and Theory* 19, 2189-2205(2011).
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁 『再生可能エネルギー 固定価格買取制度ガイドブック』
- 6) 経済産業省 資源エネルギー庁 『再生可能エネルギー発電設備の導入状況を公表します (平成25年2月末時点)』
- 7) 牛山 泉 (2005) 『風力エネルギー読本』 オーム社 pp.239-244