

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06684

研究課題名(和文)再生可能エネルギー大量導入のための自律分散型電力需給システムの研究

研究課題名(英文)A Study on Autonomous Decentralized Electric Power System with large-scaled Renewable Energy Introduction

研究代表者

手塚 哲央 (Tezuka, Tetsuo)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：60163896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：出力の制御が基本的に困難な太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギー電源から成る電力需給システムにおいては、需給バランスに関する特別な配慮が必要となる。

そこで本研究では、電力需給に関わる利害関係者(ステークホルダー)が多数存在する自律分散型の意思決定システムとして特徴づけられる多様なステークホルダーの意思決定過程のシミュレーションモデルをベースとしたシステム計画手法を提案し、限界費用ゼロという特徴を持つ再生可能分散型電源から成る電力市場の運用方法を検討するための枠組提案を行った。

研究成果の概要(英文)：Electric power system with large-scaled renewable energy requires the investigation especially for balancing electricity supply and demand. It is because the fossil fuel is a energy storage with high performance and renewable energy is flow-type energy supplied from the sun.

In this study the electric power system with a variety of stakeholders is investigated as an autonomous decision-making system. And it is concluded that the new system-design framework for managing the system is required. Some detailed simulation analysis showed them quantitatively.

研究分野：エネルギーシステム学

キーワード：再生可能エネルギー電源 需給バランス 電力市場 Simulation-based design

### 1. 研究開始当初の背景

化石エネルギー資源が乏しく海に囲まれた工業化国である日本では、化石燃料などの枯渇性エネルギー資源に依存した社会から、再生可能エネルギーへの依存度を高めた社会への移行が求められている(2014年エネルギー基本計画)。さらには再生可能エネルギーを主エネルギー源とする社会の構築を必要とする考え方もある(2014年自然エネルギー白書)。しかし、日本において再生可能エネルギーを大量に導入するためには、経済性や土地利用制約の問題に加えて、天候などの状況によって生じる発電電力(kW)及び電力量(kWh)の変動に対処できる電力需給システムを構築する必要がある。

この発電出力変動の問題に対しては、かねてより電力貯蔵装置の運用や需要側からの対応であるデマンドレスポンスなどを考慮した電力システム運用に関わる研究が行われてきた(杉本、手塚、2011)。しかし、電気エネルギーの貯蔵(電力貯蔵)のみを取り上げた研究が多く、熱エネルギー、化学エネルギー、機械エネルギーの多様な貯蔵技術を考慮した電力システム計画についての研究成果は十分とは言えない。エネルギー貯蔵技術については、時間単位の短期的エネルギー貯蔵から季節間にわたる長期的エネルギー貯蔵まで多様な方式が検討の対象となる。断熱材の利用も熱貯蔵の一つと考えられる。また、大きな潜在的需給ギャップに起因する電力価格の高騰を防ぐためには、デマンドレスポンスの考え方にとどまらず需要特性の大幅な変更の可能性についても考慮する必要がある。

一方、日本の電力市場では既に発電部門を中心に自由化が進みつつあるが、2016年以降には小売市場の自由化及び送配電部門の発電部門からの法的分離が予定されている(「電力システムに関する改革方針」(平成25年4月閣議決定))。そのような自由化された電力需給システムでは、今までのトップダウン型の意思決定とは異なり、電力市場における各種ステークホルダー(発電事業者、系統管理者、小売事業者、需要家などの、電力市場における利害関係者)の多様な自律的意思決定が電力需給システムの挙動を決定することとなる。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、再生可能エネルギー導入の割合を大幅に増加させた自由化電力市場における需給バランスの実現方法として、発電設備、多様なエネルギー貯蔵技術、及びデマンドレスポンスなどの機能が、各種ステークホルダーの自律的意思決定を介して適切に導入されるための電力市場の条件を探るとともに、その結果に基づいて民生部門電力需要家、特に家庭部門需要家の自律的な需要特性の変化のシナリオの有効性評価を行う。そして最終的には、再生可能エネルギーが大量に導入された状況下

での大きな潜在的需給ギャップ解消に効果的な、各種ステークホルダーの自律分散的行動の創成に必要なエネルギー政策の要件について検討する。

### 3. 研究の方法

研究の方法は以下のようにまとめられる。

- (1) エネルギー貯蔵装置のベストミックスと各ステークホルダーの意思決定行動との関係分析
- (2) 発電事業者の投資行動分析
- (3) 電力小売事業者のサービスの電力需給システムに及ぼす効果分析
- (4) 電力市場のステークホルダーの自律的意思決定の可能性評価と制度評価

以下に、各項目について説明する。この記載も研究計画提出時のものである。

- (1) エネルギー貯蔵装置のベストミックスと各ステークホルダーの意思決定行動との関係分析

本研究では、需要家として民生部門を対象として考える。一般に、民生部門における需要家でのエネルギー利用は電気エネルギー、機械エネルギー、そして熱エネルギーの利用が目的である。それらは、設備や変換口は伴うものの、他のエネルギーの形に変換することができる。利用される最終エネルギーの形態は利用する機器に依存し、冷蔵庫のように、電気エネルギーを消費するものの最終的に必要なものは熱エネルギーであるという場合もある。その場合には、最終目的である熱さえ保持できれば電気エネルギー消費量を削減することができる。断熱材の利用はその好例である。すなわち、民生部門における電力、熱、機械エネルギーの需給の関係を、必要となる設備や技術特性の情報と共に詳細に調べることが、潜在的需給ギャップ解消に向けて民生部門需要家が自律的になすべきことの理解に不可欠となる。

そこで、民生部門におけるエネルギー利用形態を詳細に調べモデル化することにより、各種エネルギー貯蔵装置導入と電力負荷特性との関係を検討する。具体的には、まず、典型的な民生部門でのエネルギー利用形態の内の複数典型的な形態を取り上げ、その数理モデルを構築する。そして、再生可能エネルギーの大量導入により大きく供給量変動する電力供給システムにおける、電力供給側と需要側の双方におけるエネルギー貯蔵技術を含む電力需給数理モデルを構築し、そのベストミックスについて検討する。この課題の特徴は、電力、熱、機械エネルギーという多様なエネルギー形態の貯蔵技術を考慮することであり、必要となる再生可能エネルギーの出力変動などの供給特性は定量的にモデルに反映される。この結果を応用することにより、後述する各ステークホルダーの自律的行動や民生部門における需要特性の変化が電力需給システムに及ぼす影響を定量

的に評価することが可能となる。

#### (2) 発電事業者の投資行動分析

電力市場における電力買い取り価格が発電事業者の投資行動に及ぼす影響について、最適化型数理モデルを用いて分析し、安定な投資が再生可能エネルギーに対して継続的に行われる条件を探る。この分析目的のために、現在急速に増えつつある各種新電力に対してインタビュー調査をシンクタンクなどと共に実施し、投資の障害となる状況を調査、データベース化し、モデルシミュレーション分析に反映する。

#### (3) 電力小売事業者のサービスの電力需給システムに及ぼす効果分析

電力小売事業者のサービスと電力市場価格が需要家及び発電事業者の自律的な意思決定行動に及ぼす影響について明らかにする。具体的には、電力小売事業者の事業内容を分析・モデル化し、電力小売事業者が電力需給ギャップ解消に向けて実施できるサービスのリストを作成する。そして、その内容を前述のエネルギー需給最適化モデルに含めることにより、電力小売事業者の電力需給バランスへの貢献度を評価する。また、電力小売事業者の存在が、電力需要家の行動特性に影響を及ぼすことにより、ステークホルダー間の公平性の視点を含めて電力市場制度について検討を行う。

#### (4) 電力市場のステークホルダーの自律的な意思決定の可能性評価と制度評価

上記の各項目で分析結果として得られた各種ステークホルダーの行動モデルから、自律的な電力需要家の行動の影響を評価することができる。また、建築会社での実験ルームを借りて、エネルギー消費行動変化と実際のエネルギー消費量の変化に関わる実験を行う。この結果より、望ましい需要家の行動モデルとその結果として生じるエネルギー消費特性の変化量との基礎的関係を抽出することにより、再生可能エネルギーを大量に導入した電力需給システムにおける需給バランス維持のために促進すべき各種ステークホルダーの自律的な生活行動変化を、電力システムの総費用との関係により定量的に明らかにすることが可能となる。そして最終的には、その分析結果に基づいて、再生可能エネルギーが大量に導入された電力需給システムにおいて電力需給バランスを維持するために必要となる、発電事業者の投資行動、電力貯蔵などの技術的な対応、電力価格や小売事業者のサービスを介した社会経済的な対応、そして、電力需要家の生活様式変更行動の各種自律分散的行動の望ましい組合、基づいて絞り込まれた電力需給バランス維持のために導入すべき制度を、開発した電力需給モデルのシミュレーション結果に基づき評価・提案する。

## 4. 研究成果

研究目的に記載の各項目に対して、主要な

成果の概要を上記の項目ごとに、以下に整理して述べる。

#### (1) エネルギー貯蔵装置のベストミックスと各ステークホルダーの意思決定行動との関係分析

電力需給を対象とする場合でも、電力需要が派生需要であることを考慮すると、その貯蔵の形態は多岐にわたる。エネルギー消費の目的は主として電力（動力、照明）利用と熱の2通りの目的に分けられることから、その目的に応じたエネルギー貯蔵の方法について検討する必要がある。特に、熱貯蔵については、冷蔵庫や建物（躯体）での熱貯蔵が重要な役割を果たすと考えられる。

そこで、本課題では、電力、熱利用の目的を考慮した多様なエネルギー需給の形態について、特に時間帯間、週間、月間、季節間の変動特性を表現できるように電力需給モデル化し、費用最小化のモデルを構築した。

特に焦点をあてた検討課題は、(ア)熱、電力貯蔵の最適化、(イ)短期エネルギー貯蔵と長期エネルギー貯蔵の選択される技術特性の分析、(ウ)費用最小化の最適解における水素貯蔵装置の導入条件、(エ)デマンドレスポンスの経済価値、(オ)化石燃料のエネルギー貯蔵装置としての経済価値評価、であり、多様な条件設定の下で、各評価目的のためのモデル分析手法の有効性を、モデルシミュレーションを通して示した（発表文献[4]）。

なお、ここでの最も重要な成果は上記の（ア）から（オ）の評価問題を提示したことにより、今後、これらの課題に向けた様々なモデル分析に発展することが期待される。また発表文献[4]では、評価結果の簡易推定方法についても言及している。

#### (2) 発電事業者の投資行動分析

再生可能エネルギーからなる電力市場では、だれでもが発電事業者になれる点が従来の電力システムと大きく異なる点であり、発電能力を持った消費者、すなわちプロシューマの存在を、分析において意識する必要がある。

さて、貯蔵装置はエネルギー利用の時間を変えることはできるが発電総量を増やすことはできない。すなわち、短期ではなく長期の電力需給バランスを考慮しようとする、プロシューマを含む発電事業者の投資行動と電力需要量との関係を分析する必要がある。

本研究では、その基本的な需給バランスのための条件を数理モデルを用いて考察し、技術的対応、経済的インセンティブなどの方策では需給バランスの実現が困難であることをシミュレーションで示した（発表論文[2]、[3]）。この成果で重要なことは、化石燃料に依存した電力需給では、化石燃料という非

常に優れたエネルギー貯蔵装置を利用することにより、エネルギー貯蔵の費用をほとんど考慮する必要がなかったのに対し、エネルギーが太陽からのフローエネルギーとして供給される再生可能エネルギー社会では、エネルギー貯蔵に本来必要であった費用を負担する必要が生じるということである。この点は、従来のエネルギーシステム分析では見逃されてきた。その検討の重要性を指摘したところに本研究の意義がある。

### (3) 電力小売事業者のサービスの電力需給システムに及ぼす効果分析

電力需要が派生需要であることを考えると、その目的は電力を使ったサービスにあり、電力供給そのものは電力供給の目的とはならない。その点を考慮して、そのサービス提供を電力市場の目的とした場合の、電力市場の形態、望ましい制度設計の在り方について基礎的な検討を行った。このようなビジネスの形態はPSS(Product Service System)と呼ばれており、すでにいくつかの例は実際に存在するが、エネルギー需給において正面から取り組んだ例はない。現在、シミュレーションモデルを用いてエネルギーPSSの効果を分析した結果については現在、海外論文誌に投稿中であるため、本報告では電気機器のリサイクルや省エネルギーに効果のあることのみを示すに留める(一部の結果については発表論文[5]参照)。

### (4) 電力市場のステークホルダーの自律的意思決定の可能性評価と制度評価

現状の電力システムでは一般に、電力需給の制御を考える際には、中央から発電所(火力、原子力、水力などの従来型発電所)に向けて発せられる給電指令によるものとされている。この考え方は電力の供給責務と火力や水力発電の出力調整能力によるものである。しかし、出力調整が基本的にできない風力や太陽光などの再生可能エネルギー電源では、供給責務を維持すべきかどうかという点で疑問が生じる。

本課題では、その第一歩として、現状と同様の供給責務を条件として課した場合の、電力市場の在り方について、モデル分析を通して検討した。

まず、多様な規模の消費者の自律行動の特徴について検討し、その意思決定プロセスをペトリネットを用いて表現する手法を考案した(発表文献[1])。そこでは、グループ組織の自律的意思決定行動において、リーダーと称される人の役割が重要であることが客観的に示されている。いうまでもなく、リーダーを取り巻くフォロワーの重要性は周知のことであるが、リーダーが存在することがいわゆる望ましい自律行動にとって重要であることが示されたことは興味深い。

次に、電力システムとして需給バランスをとるために必要なことは、電力システムの状態に関する情報を共有することであり、そのためには何らかのシグナルをすべてのステークホルダーに送信する必要がある。従来のシステムでは、価格シグナルがその効果的なシグナルとして認識されてきたが、需給バランスという物理的に厳密に評価される条件を価格シグナルで実現しようとする、非常な価格高騰を招くことがシミュレーションで示される。この価格高騰を避けるために必要なことは価格シグナルに依存しない需給調整方法であり、消費者の利他的な行動がその解決策の一つとして挙げられる。その重要性はシミュレーションモデルを用いて示すことができる(発表文献[2],[3])。

このように、自由化された電力市場における再生可能エネルギー大量導入に伴う大きな潜在的需給ギャップが存在する状況下での、各種ステークホルダーの自律分散的意思決定行動の有効性検討とその実現のために必要となる政策の評価を目的とした研究は過去には例を見ない。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

- [1] Prilandita Niken, McLellan Benjamin, Tezuka Tetsuo, Evaluation Method for Autonomous Decision-Making Performance in Energy and Environmental Innovations: A Case Study of an Indonesian Community, Sustainability, 10.3390/su9010080, 2017

[学会発表](計4件)

- [2] 坂上瑛亮, Benjamin C. McLellan, 手塚哲央, 再生可能エネルギー電源のみで構成された日本の電力市場の制度設計, 平成29年電気学会全国大会, 2017, 京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻2016年度修士論文, 著者: 坂上瑛亮, 題目「再生可能エネルギー電源のみで構成された電力市場の制度設計」
- [3] 手塚哲央, 坂上瑛亮, Benjamin C. McLellan, Widha Kusumaningdyah, 再生可能エネルギー100%電力市場の制度に関する一考察, 第36回エネルギー・資源学会研究発表会, 2017
- [4] 小林伸寛, 手塚哲央, Benjamin C. McLellan, 民生用熱電需要の変動を考慮した再生可能エネルギーのためのエネルギーキャリアベストミックス, 第

34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018,  
京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻 2017 年  
度修士論文, 著者: 小林伸寛, 題目: 「再生可能エネルギー利用社会におけるエネルギー貯蔵のベストミックス」

- [5] Widha Kusumaningdyah, Benjamin C. McLellan, 手塚 哲央, Modeling Customers' Switching Behavior from Product-Oriented to Product-Service Systems in a Liberalized Energy Market, 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

手塚 哲央 (TEZUKA, Tetsuo)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号 : 6 0 1 6 3 8 9

### (2) 研究分担者

Benjamin C. McLellan  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号 : 1 0 7 2 3 4 5 5