

令和元年5月21日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26282086

研究課題名(和文) デマンドレスポンスを導入した電力システムの評価と分析

研究課題名(英文) Evaluation and Analysis of Power Systems with Demand Response

研究代表者

西崎 一郎 (Nishizaki, Ichiro)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：80231504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：単一の電力小売業者と一般家庭、商業、製造業の3種の最終消費者集団の間の電力取引モデルを2レベル確率計画問題として定式化し、定式化した最適化問題をある種の変換手法を用いて厳密解を計算できる問題に変換し、商用ソルバで最適解を求めた。また、市場価格変動リスクを考慮してフラクタルモデルを用いたリスク分析を実施した。経済主体の行動を試行錯誤繰り返しながら学習して適切な行動を選択すると考え、エージェントベース・シミュレーションを実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電力システムの改革に伴う電力市場の導入に対して、2レベル数理計画法および確率計画法に基づいて、日本における電力市場を数理的にモデル化すると同時に、数理モデルの補完として、エージェントベースのシミュレーションを実施することで、より複雑化したモデルにも対応できるだけでなく、適応的行動基準に基づく分析を可能とした。その成果として、電力市場およびデマンドレスポンスの導入による需要のシフトや抑制やシステム運営の効率化などに関する学術的知見を提供できた。

研究成果の概要(英文)：We formulated an electricity market model between a single electricity retailer and three consumer groups of general household, commercial firms, and manufacturers as a two-level stochastic programming problem. Employing some transformation method, we converted the original problem to a problem that can be solved by a commercial solver. In addition, considering market price fluctuation, we performed risk analysis using the fractal model. Furthermore, we carried out agent-based simulations, taking into account situations that learning of economic agents proceeded through trial and error to select appropriate actions.

研究分野：社会システム工学

キーワード：デマンドレスポンス 電力システム 2レベル数理計画問題 確率計画問題 エージェントベース・シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

経済産業省の審議会である電力システム改革専門委員会は平成 24 年 7 月に「電力システム改革の基本方針」をまとめ、電力システムの地域割垂直一貫体制を見直し、「エネルギー安定供給」、「競争力の強化」、「地球環境問題への挑戦」の 3 目標を考慮した電力システムの再構築を目指すことを提言していた。とくに、全ての消費者が電力供給者を自由に選択でき、全ての供給者が安定供給マインドをもった電力市場創設の必要性を論じており、地域独占を撤廃し、電力小売りの全面自由化を実施すべきであると主張していた。電力市場に対する、風力、太陽光、潮力、波力などの再生可能エネルギーによる発電事業者の参入が供給量の確率的事象による変動をもたらす、市場価格に影響を与え、価格変動の増大が懸念されていた。

一方、低需要時の低料金と高（ピーク）需要時の高料金をもつ時間別電力価格を消費者に提示することによって、ピーク需要時の負荷のシフトや抑制が期待できる。このようなデマンドレスポンスの導入による需要のシフトや抑制の結果、発電能力の必要量を減じることができ、再生可能電力の統合を助け、システム運営の効率化を支援し、全体のエネルギーシステムのコストと炭素排出量の削減に導けると考えられていた。

### 2. 研究の目的

このような研究背景のもとで、我々はこれからの日本の電力システムにおけるデマンドレスポンスの導入の必要性に鑑み、「デマンドレスポンスを導入した電力システムの評価と分析」の研究を始めようと考え、次の研究課題を掲げた。

#### (1) デマンドレスポンスを導入した電力市場モデルの分析

安いピークオフ電力価格をもつ固定料金体系のもとで、消費者の行動を最適化問題として定式化し、消費者の最適応答を仮定して、電力小売業者の価格決定および電力購入問題を定式化する。このモデルに対して、実時間での変動料金体系を採用した場合の動的価格決定モデルを定式化する。さらに、消費者が電力市場において複数の電力小売業者の選択を可能にする拡張モデルも考察する。これらのモデルに対して、運用コストや電力使用量の比較、さらに社会的余剰の観点から比較する。

上述のモデルは電力小売業者と最終消費者との 2 レベル数理計画問題として定式化されるが、電力使用時より前に価格が決定されるため、この問題は不確実性下の意思決定問題となる。電力フローなどの制約の違反部分が目的関数でペナルティ項として加えられる形式のリソース問題としての定式化が自然であるが、目的関数の値がある一定値以下になる確率を最大にするという考えに基づく確率モデルや、満たすべき確率レベルを指定したうえで目標値を最大あるいは最小化する満足基準モデルによる定式化も考察する。

仮に目的関数や制約式が線形関数であっても、2 レベル計画問題としての定式化や確率変数が導入されるので、最終的に解くべき問題は非線形性や整数変数をもつ数理計画問題として定式化されることになる。解法としては、分枝限定法に基づく厳密解法の開発を試みるとともに、遺伝的アルゴリズムなどのメタヒューリスティクスを用いた近似的解法も検討する。

#### (2) エージェントベースのシミュレーションモデルの開発

(1)でのモデル化は電力小売業者や最終消費者などの行動が最適化問題として定式化されているが、現実の経済主体は最適性の基準に基づいて行動しているとは必ずしも言えない。すなわち数理的な分析では、経済主体は収入最大化のように極めて合理的に行動することがモデル化の基礎となっているが、この合理性の仮定が経済主体の行動や社会の振舞いを分析する上では、しばしば過大な要求である場合がある。最適行動の代替案となりうる行動形式は適応的行動である。エージェントベース・シミュレーションでのモデル化はこの適応的行動をエージェントの行動原理とすることが極めて自然であり、電力システムのモデル化としてエージェントベース・シミュレーションシステムを構築する。このようにシミュレーションを用いて電力システムの分析を行うことは、エージェントの適応的行動あるいは学習に焦点を当てる場合極めて有効であり、デマンドレスポンスの導入による電力システムへの影響を説明するうえで有効な手法が新たに開発できると考える。

### 3. 研究の方法

デマンドレスポンスを導入した電力システムにおいて、電力小売業者が先に電力価格を決定し、その価格に対応して最終消費者が電力使用量を調整する数理モデルを 2 レベル数理計画問題として定式化し、その解法を開発する。さらに、経済主体の最適行動ではなく、適応的行動を基礎としたシミュレーションモデルを構築する。

電力小売業者を上位レベルの意思決定者とし、最終消費者を下位レベルの意思決定者としたリーダー・フォロワー型の Stackelberg ゲームモデル、すなわち 2 レベル計画問題として固定料金モデルを定式化する。最終消費者の目的関数は電力を消費することによる便益から使用量に応じた電力料金を差し引くことで定式化する。最終消費者の計画問題の最適性の条件を電力小売業者の最適化問題の制約に入れ、電力小売業者の決定変数を市場での電力購入量と最終消費者に提示する電力価格とし、目的をたとえば収入の最大化とすることによって、電力小売業者の最適化問題を定式化することができる。最終消費者の電力消費による便益や電力小売業者の目的関数など表現には様々な可能性があり、いくつかの定式化を比較検討する。このような 2 レベル計画問題は上位および下位レベルの意思決定者の目的関数や制約式が線形であっ

ても、下位レベルの問題の最適性の条件の中に相補条件などがあり、結局非線形計画問題となる。そのため、分子限定法などを基礎として、問題の性質を利用した効率的な解法を開発する。

変動料金モデルでは、卸売電力価格と電力消費に関する不確実性を考慮して定式化する。事前に決められた電力購入量と需要に見合うように電力を供給するために当日市場で売買される電力量の差分に対して、ペナルティの重みを乗じたペナルティ項を上位レベルの目的関数に付加するリコース問題として定式化する。あるいは、確率変数を含む目的関数に目標値を与え、その目標を達成する確率を最大化する確率モデルや、目標達成の確率を指定した値以上にする制約のもとで、目標値を変数にとらえ、これを最大あるいは最小化する満足基準モデルの適用可能性を検討する。

電力小売業者を上位レベルの意思決定者とし、最終消費者を下位レベルの意思決定者とした、エージェントベースのシミュレーションモデルの開発を行う。

数理モデルにおいて複数の電力小売業者を考慮することは、電力小売業者の数だけ数理計画問題を取扱い、他の電力小売業者の決定変数はパラメータとなるように全体の問題を定式化する。このとき、全体の問題に対する解概念は、互いに他の電力小売業者問題に対する最適解が自己の電力小売業者問題でパラメータとなるような Nash 均衡解である。したがって、Nash 均衡解は各電力小売業者問題の最適性の条件を同時に満足する解である。このような数理モデルを考察する。

上記の問題に対して、太陽光エネルギーが導入された場合の状況を考察する。この場合、配電系統における電圧管理の問題が生じる。したがって、電力会社が需要家にインセンティブを与え、電圧を制御しながら、各需要家の公平性を考慮した配電系統の運用モデルを定式化し、協力ゲームの考えを導入し、消費者間の協力の安定を考慮したモデルを開発する。

#### 4. 研究成果

単一の電力小売業者と一般家庭、商業、製造業の3種の最終消費者集団の間の電力取引モデルを2レベル確率計画問題として定式化し、この問題に対する近似的解法を開発した。数値計算のため IEEE の配電ネットワークなどを取り上げ、電力系統制約なども考慮した問題を用いて、開発したアルゴリズムの利用可能性や有効性を確認した。さらに、この最適化問題のある種の変換手法を用いて厳密解を計算できる問題に変換し、商用ソルバで最適解を求めた。また、市場価格変動リスクを考慮してフラクティルモデルを用いたリスク分析を実施した。このような数理モデルでは、経済主体は合理的な行動をとると仮定しているが、現実の経済主体は必ずしも厳密に最適な行動を選択しているとは限らず、むしろ試行錯誤的に対応し、その過程で学習して適切な行動を選択するとも考えられる。この観点から、エージェントベース・シミュレーションを実施した。

さらに、電力会社が需要家にインセンティブを与え、電圧を制御しながら、各需要家の公平性を考慮した配電系統の運用モデルを定式化し、協力ゲームの考えを導入し、消費者間の協力の安定を考慮したモデルを開発した。また、配電系統の管理に関して、複数の目的を考慮した研究も実施した。これらの研究成果は「5. 主な発表論文等」に示すように、13編の学術論文として成果を発表した。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 電力小売自由化における小売業者と需要家が配電系統電圧に及ぼす影響, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 134, No. 11, pp. 917-929, (2014). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 配電ネットワークにおけるデマンドレスポンスを導入した電力市場モデルの分析, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 135, No. 3, pp. 292-303, (2015). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 機会制約付き最適化問題における Fractile model を用いた市場価格変動リスクを考慮した小売業者の電力調達問題, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 136, No. 5, pp. 732-745 (2016). 査読有

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, Electricity retail market model with flexible price settings and elastic price-based demand responses by consumers in distribution network, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 81, pp. 371-386, (2016). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 太陽光発電システムが導入された配電系統における需要家の公平性を考慮した電圧管理手法に関する検討, システム制御情報学会誌, Vol. 30, No. 4, pp. 105-114 (2017). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, クラシファイアシステムを用いた競争環境下における電力小売事業者群のエージェントベース・シミュレーション, システム制御情報学会誌, Vol. 30, No. 12, pp. 467-479 (2017). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 太陽光発電システム導入時における配電系統電圧管理を目的とした需要家リソースに対するプライシングに関する意思決定手法, システム制御情報学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 137-149 (2018). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 競争環境下における電力小売事業者間の均衡分析モデ

ル構築,電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 138, No. 11, pp. 902-913, (2018). 査読有

関崎 真也, 山崎 拓哉, 西崎 一郎, 林田智弘, 石川 博之, 上西 宏和, 配電系統切替実施時における意思決定支援を目的とした進化型多数目的最適化手法の開発, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 138, No. 12, pp. 925-938, (2018). 査読有

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, Distribution network management under electricity deregulation using evolutionary many-objective optimization, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 25, No. 1/2, pp. 17-30 (2018). 査読有

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki and Tomohiro Hayashida, Decision making of electricity retailer with multiple channels of purchase based on fractile criterion with rational responses of consumers, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 105, pp. 877-893, (2019). 査読有

関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, 灘吉 拓哉, 枅見 慎也, 需要家リソース活用型配電系統電圧管理システムに対する利得配分, システム制御情報学会論文誌 (採録決定). 査読有

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, Decision making for electricity retailers in fractile model from multiple markets with rational responses of consumers, International Journal of Energy Technology and Policy, (Accepted). 査読有

〔学会発表〕(計 8 件)

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “Evaluation of demand response in liberalized electricity market at distribution network level for power system management”, Energy Systems Conference, London, UK, (2014).

Shinya Sekizaki, and Ichiro Nishizaki, “Impact of demand response on voltage in distribution network with photovoltaic generations,” Grand Renewable Energy 2014 Proceedings, Tokyo, Japan, CD-ROM, (2014).

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “Multiobjective Optimization of Distribution Network Management in Deregulated Electricity Market,” 23rd International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM2015), Hamburg, Germany (2015).

Kentaro Uehara, Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “A study for retailer’s risk hedge considering responses of consumers in electricity deregulation,” 2015 IEEE 8th International Workshop on Computational Intelligence & Applications Proceedings (IWCIA 2015), Hiroshima, Japan, pp. 167–172 (2015).

Ryo Tanaka, Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “The multiobjective optimization of distribution system management in deregulated electricity market,” 2015 IEEE 8th International Workshop on Computational Intelligence & Applications Proceedings (IWCIA 2015), Hiroshima, Japan, pp. 155–160 (2015).

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “An intelligent home energy management system with classifier system,” 2015 IEEE 8th International Workshop on Computational Intelligence & Applications Proceedings (IWCIA 2015), Hiroshima, Japan, pp. 9–14 (2015).

Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “Practical Decision Making for Distribution Network Management based on Evolutionary Algorithms and Preference of the Network Operator,” 24th International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM2017), July 10 - 14, 2017, Ottawa, Canada (2017).

Shinya Sekizaki, Nadayoshi Takuya, Shinya Masumi, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida, “Payoff Allocation to Controllable Demand Resources in Distribution Network with Photovoltaic Generations,” Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition (GRE2018), O-En-4-1, June 17-22, 2018, Yokohama, Japan (2018).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ : <http://www.hil.hiroshima-u.ac.jp/index.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名 : 林田 智弘

ローマ字氏名 : Tomohiro Hayashida

所属研究機関名：広島大学  
部局名：工学研究科  
職名：准教授  
研究者番号（8桁）：20432685

研究分担者氏名：関崎 真也  
ローマ字氏名：Shinya Sekizaki  
所属研究機関名：広島大学  
部局名：工学研究科  
職名：助教  
研究者番号（8桁）：70724897

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。