

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：22301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00693

研究課題名(和文) 再生可能エネルギー利用社会を支える経済制度の構築

研究課題名(英文) Development of economic systems for the massive use of renewable energy in society

研究代表者

山本 芳弘 (Yamamoto, Yoshihiro)

高崎経済大学・経済学部・教授

研究者番号：20419435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：第1に、再生可能エネルギー普及策を整理し著書にして出版した。再生可能エネルギーから発電された電気の売電制度を中心に検討した。

第2に、普及後に再生可能エネルギーを社会で効率的、安定的に利用するための新たな経済制度を考案した。それは、再生可能エネルギー発電者と電力消費者からなる家庭の集団を所与として、一定時間(例えば15分間)毎に発電量と消費量を比較して発電または消費に対する報酬を定めるものである。最後に、数値シミュレーションを実施して、この制度がどのように機能するかを具体的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

技術開発とさまざまな普及策の実施によって、再生可能エネルギーの利用は拡大しつつある。本研究は、普及後に再生可能エネルギーを社会で効率的、安定的に利用するための新たな経済制度を考案した。それは、ローカルな電力需給均衡を目指した報酬制度で、再生可能エネルギーの小規模分散型発電という特性を考慮に入れている。制度自体は簡便で、シミュレーションにより実用性も示した。これを従来の大規模集中型電源のための制度と組み合わせることで、再生可能エネルギーを電力システムに組み込みことが可能になる。

研究成果の概要(英文)：We have achieved mainly three results. First, a monograph was published in English, which surveys promotion programs for renewables, particularly focusing on a feed-in tariff system, where a set price is applied to the electricity produced from renewable energy sources (RES-E) during a set period of years.

Second, a new payment system was proposed for the efficient and stable use of RES-E in society after some diffusion of renewables. Given a set of RES-E producers and electricity consumers, it prescribes a payment depending on the comparison between production and consumption during a period of time, say 15 mins. Third, simulation was conducted to illustrate how the payment system proposed will be running.

研究分野：再生可能エネルギーのための制度設計

キーワード：再生可能エネルギー 報酬制度 提携形ゲーム コア 太陽光発電 FIT

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの普及を目的にさまざまな支援策が実施されてきた。例えば、再生可能エネルギーから発電された電気(以下、再生可能エネルギー電気)について、電気事業者に販売義務を課すと同時にその取引を認める RPS (Renewables Portfolio Standard)、一定期間にわたり一定価格で電力会社に売電できる FIT (Feed-in tariff)、再生可能エネルギー設備の設置に対する補助金制度などがある。技術開発の進展とこれらの制度により、再生可能エネルギーは国内外で普及しつつある。

その一方で新たな課題が浮上してきた。少なくとも次の4点を挙げることができる。第1は、電力システムの安定性確保である。自然条件に左右され不安定な再生可能エネルギー電気が送電網に連系されると、電力潮流が攪乱され電圧や周波数などに深刻な影響を及ぼす。また、出力変動に対応するためのバックアップ電源の配備や、季節・時間帯によっては供給過剰になるなどの問題もある。技術的対策として蓄電や水素製造などの研究開発が進められているが、エネルギー効率やコストなど点で未だ課題も多い。適切な経済インセンティブを制度設計することで、これらの負の効果をできるだけ発生させないようにできればよい。

第2は、地域内での再生可能エネルギーの有効活用である。再生可能エネルギー資源を地域内で有効活用できれば、送電ロス回避を回避できるだけでなく雇用や新産業の創出など地域活性化につながる可能性もある。このような取り組みを後押しする経済制度が期待されている。

第3は、需要応答との連携である。再生可能エネルギー発電は自然条件に左右されるため、従来とは逆に消費を発電にマッチさせることができればよい。スマート家電やスマート・メーターなど新技術による対応が進められている一方で、そのような電気の使い方を後押しする新たな電気料金制度は未だ十分な検討がなされていない。

第4は、電力制度改革との融合である。日本では2016年4月から電力小売りが完全自由化された。しかしながら、現在の制度では、再生可能エネルギー電気を電力システムに組み込むことを十分に想定しているわけでは必ずしもない。電力小売り自由化とも整合的な経済制度を構築する必要がある。

このような課題を解決し再生可能エネルギーを社会で利用するためには、従来のものとは異なる新たな経済制度が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、再生可能エネルギーが普及した段階を想定して、再生可能エネルギー電気を社会で効率的、安定的に利用するための経済制度を考案することである。普及を目的とした RPS や FIT などの経験を踏まえた上で、そのような経済インセンティブの制度設計を行い、政策オプションとして提案する。

3. 研究の方法

(1) 再生可能エネルギー普及策の整理と再検討

これまで再生可能エネルギーの普及を目的に、RPS や FIT などの普及策が実施されてきた。新たな経済制度を考案するにあたっては、それらから教訓を学ぶべきである。そこで、FIT を中心に既存制度を整理する。特に、売電価格をどのように設定してきたかという点に焦点を絞って再検討する。

(2) ミクロ経済モデルによる分析

ミクロ経済モデルによる理論分析を行う。エネルギー経済の分野ではしばしばデータを用いた計量経済分析がなされるが新たな経済制度を考案する本研究には適さない。再生可能エネルギー普及策についてこれまで行ってきた研究において、私は独自のミクロ経済モデルを開発した。その基本構造は、発電量と消費量のさまざまな組み合わせをもつ経済主体に適切なインセンティブを与え、ある経済主体は再生可能エネルギー設備を導入する一方、他の経済主体は導入しないというものである。本研究でも、この基本構造をもつモデルをベースに理論分析を行う。そうすることで、発電量と消費量という2つのパラメータを持つ経済主体に対するインセンティブ設計が容易になるからである。

分析ツールとして、提携形ゲームにおけるコア(Core)やシャプレイ値(Shapley value)の応用を考える。これらは、経済主体間の提携がもたらした費用や便益を構成員に配分するルールを提供する。本研究では、発電と消費の結果を経営主体がもたらした成果として定式化し、その成果を経営主体に配分することを考える。

(3) 数値シミュレーションによる分析

数値シミュレーションは、理論分析に基づいて考案した経済制度が実際にどのように機能するかを示す上で重要な役割を果たす。計画しているミクロ経済モデルは経済主体を離散変数で表現するので、数値シミュレーションとは相性がよい。これまでも同様の構造をもつ理論分析に

対して数値シミュレーションを実施してきた。

本研究では、太陽光発電量と電力消費量の現実的な数値を用いて、実際にどのような報酬配分になるのか、コンピューターの計算負荷は過剰にならないかなどの点を検証する。

4. 研究成果

(1) 再生可能エネルギー普及策の整理

FITを中心にこれまでの再生可能エネルギー普及策についての研究を整理し、単著にして出版した。特に、FITとRPSの関係を線形計画法の双対性を用いて明らかにした。両者の関係は、汚染物質の排出抑制策である環境税と排出許可証取引の関係と同様に、本質的には同等である。一方で、再生可能エネルギーの普及では設備投資を要するので、排出抑制策のような短期の分析ではなく、中長期の意思決定を分析する必要があることを指摘した。

次に、FIT以外の再生可能エネルギー普及に関連するトピックを整理した。電力システムの安定性にかかわる経済制度、再生可能エネルギーの海外直接投資、普及理論の応用、官民協働やコミュニティの役割などについての研究をとりあげた。特に、電力システムの安定性を確保するための費用を関係者間でどのように負担し合うかについて、提携形ゲーム理論を応用して分析する可能性を検討した。

(2) 新たな経済制度の提案

普及が進んだ段階で、再生可能エネルギーを社会で効率的、安定的に利用するための経済制度の提案を行った。再生可能エネルギー電気が送電線に連系されると、場合によっては電力システムの安定性や安全性に支障をきたす。そこで、電力供給者と需要者に需給不均衡を生じさせないようにさせる経済制度を検討した。問題を具体的にするために、家庭部門での太陽光発電を分析対象にした。

提携形ゲームのコアを応用した経済制度

提携形ゲームのコアを応用した経済制度を提案した。コアとは、提携が生み出す価値をその構成員に配分する方法のひとつで、構成員が離反して新たな配分を試みてもコアが指定する配分よりも有利なものは得られない。

コアを応用した価格設定方法は次の通りである。送電線上の近隣にある家庭の集団が与えられていると仮定する。この集団には太陽光発電を設置している家庭も設置していない家庭も含まれる。ある期間(例えば1カ月間)で総発電量と総消費量を比較する。もし総発電量の方が総消費量よりも小さければ通常の電力価格を適用する。もし総消費量の方が総発電量よりも小さければ価格ゼロを適用する。

ここでは、集団内で発電し消費する電力量を通常の電力価格で評価した値をこの集団が生み出す価値と定義し、その価値を構成員間に配分する方法としてコアを採用している。この点で、この価格設定方法を報酬制度と言い換えることができる。コアには通常、複数の要素が存在するが、構成員数に無関係に常に存在する要素を選択することで解決した。

この価格設定方法は、再生可能エネルギー普及策のひとつであるネット・メーターリング(Net metering)を拡張した形になっている。ネット・メーターリングの典型例では、1家庭を対象に期間中に生み出された総発電量と総消費量の差を計算して、もし総発電量が大きければ差を電力価格で売電可能にする、もし総消費量が大きければ差を電力価格で購入しなければならない。ネット・メーターリングが1家庭を対象にした制度であるのに対して、本研究での価格設定方法は家庭の集団を対象にしている。ただし、ネット・メーターリングは再生可能エネルギー普及策であるから差に対して常に電力価格を適用している。

計量期間の細分化

上記のコアを応用した価格設定方法では、対象期間において発電か消費の一方のみを有利に評価するので報酬が一方の側に偏ってしまう。この点を改善するため、シャプレイ値による価格設定方法も検討した。この方法は各家庭が集団にもたらす限界的な貢献度(供給に需要が対応する、または需要に供給が対応する程度)に基づくものであるから、より偏りの少ない報酬制度になる可能性がある。一方で、計算負荷が大きくなり実用的でないという欠点がある。

偏りを緩和する別の方法として、対象期間を細分化することを提案した。期間全体(例えば、1カ月間)で総発電量と総消費量を比較するのではなく、それを細分した期間(例えば1日)毎に比較して報酬を算出し、最後にその合計を与えるという方法である。これは、その時々需給状況を詳細に反映させることができる点でも優れていると考えられる。

(3) 数値シミュレーション

理論分析から得られた価格設定方法(報酬制度)がどのように機能するかを具体的に示すために、数値シミュレーションを実施した。25の家庭における15分毎の電力消費データと、日照時間等から推計した15分毎の発電データを1カ月分用意した。そして、計量期間を1カ月全体、1日毎、15分毎のそれぞれとして、コアを応用した価格設定方法を適用した。また、比較のために1カ月全体を対象にシャプレイ値を応用した価格設定方法も適用した。シミュレーションの結果、コアとシャプレイ値ではほとんど違いが見られないこと、計量期間を細分化することで報酬の偏りを小さくできることを具体的に示した。

本研究で提案した再生可能エネルギー利用のための経済制度は、ローカルな電力需給不均衡を緩和することを目的にしている。この方法は、計量期間で総発電量と総消費量を比較するだけのシンプルな制度であるから実用的である。この価格設定方法は、需給不均衡を生じさせないインセンティブとしても機能すると予想される。なぜならば、対象期間における報酬計算が繰り返されるので、各家庭は学習効果によりできるだけ多くの報酬が得られるように再生可能エネルギー電気を送電線に連系したり電力消費のタイミングを調整したりするからである。AI を用いて最適な電力需給計画を立てるなどの方法も考えらえる。

この制度の重要な特徴は、複数の家庭という小規模な集団単位で報酬を決定している点で、再生可能エネルギーの小規模分散型という特性を反映した制度になっている点である。その意義は、従来型の大規模集中型電源のための経済制度と本研究による小規模分散型電源のための経済制度を組み合わせることで、再生可能エネルギーを電力システムの中に適切に組み込むことが可能になると期待される点である。

本研究課題では家庭の集団を与えられたものと仮定していた。今後の研究では、そのような集団をどのような基準で形成するかを検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshihiro Yamamoto	4. 巻 96
2. 論文標題 A bidirectional payment system for mitigating the supply-demand imbalance among prosumers based on the core of coalitional game theory under the enhanced use of renewable energy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy Economics	6. 最初と最後の頁 105156 ~ 105156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.eneco.2021.105156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Yamamoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Rewarding a group of customers for mitigating the imbalance of electricity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IAEE Energy Forum	6. 最初と最後の頁 29 ~ 30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yoshihiro Yamamoto
2. 発表標題 Rewarding a group of customers for energy production and consumption after feed-in programs
3. 学会等名 IAEE Podcast Series（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本芳弘
2. 発表標題 住宅用太陽光発電からの余剰電力に対する新たな価格設定方法
3. 学会等名 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、1月28-29日、東京
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshihiro Yamamoto
2. 発表標題 A support mechanism through the Shapley value for household photovoltaic generation after feed-in tariffs.
3. 学会等名 37th USAEE/IAEE North American Conference, November 3-6, Denver, USA. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Yamamoto
2. 発表標題 A version of net metering for a set of households after the feed-in tariff regime.
3. 学会等名 16th IAEE European Conference, August 25-28, Ljubljana, Slovenia. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Yamamoto
2. 発表標題 A pricing method for the electricity from renewables to be used after feed-in tariffs
3. 学会等名 World Renewable Energy Congress 18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yoshihiro Yamamoto	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer International Publishing	5. 総ページ数 159ページ
3. 書名 Feed-in Tariffs and the Economics of Renewable Energy	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------