

令和元年6月15日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06277

研究課題名（和文）小口分散型再生可能エネルギーの利用を促進する電力取引システムに関する研究

研究課題名（英文）Study on electricity trade system promoting small scale dispersed renewable energy utilization

研究代表者

天野 耕二（Amano, Koji）

立命館大学・食マネジメント学部・教授

研究者番号：80167957

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）：本研究では、家庭等の再生可能エネルギーによる小口発電主体を想定し、他の小口事業者や系統電力事業者との電力取引を行う市場が形成された際の社会への影響や小口発電事業者の行動について、経済実験手法を中心とした検討を行った。数名程度の取引参加の場合、形成される価格は実験施行によって一定のばらつきがみられたが、市場はある程度の気象条件や需要変動に対応し需給バランスを調整できることがわかった。また、排出権取引と再生可能エネルギー取引の組み合わせは需要者の市場参加の促進に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力の小規模なプロシューマー（生産消費者）を中心とする電力市場を想定した市場の成立性の実験的な検討は既存の研究例が少ない。本研究では小規模な再生可能エネルギー市場の挙動について基礎的な検討を行っており、その成果はマイクログリッド等の小規模な電力システムに対して市場取引等の制度設計を行う際に有用な知見となる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated behavior of renewable electricity market participated by small scale electricity producer such as households. Its effect to economy and environment is evaluated mainly by economic experiment method. Results showed that a level of electricity price fluctuated by each run of the experiments of small scale (a few households) market, however, the market was capable to adjust a supply-demand balance against a certain variation of weather and electricity demand. A combination of a renewable electricity market and a cap-and-trade emissions trading of carbon dioxide was effective to promote renewable electricity trading.

研究分野：環境システム分析

キーワード：再生可能エネルギー 電力取引市場 マイクログリッド 経済実験 地理情報システム

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

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの固定価格買取制度は、発電側の売電価格を人為的に引き上げることから、技術の普及促進効果は期待されるものの、導入量の増加に伴い一般消費者の金銭的負担が大きくなる可能性が高い。また、分散型電源の将来的な普及拡大に伴う制度廃止・縮小の際、一時的に増大した発電設備への需要が急減することにより雇用・経済へ悪影響を及ぼすことが懸念される。そのため、太陽光発電など分散型エネルギーの普及施策においても、可能な限り市場原理に立脚した政策をとることが望ましい。

現在の（卸）電力取引市場では、一定規模以上の発電事業者でなければ、制度上あるいは実務上取引を行うことは困難であり、個人や小規模事業者等、小口の分散型電力の供給者（以下、小口事業者）の市場への参入は事実上不可能である。しかし、情報技術を活用した制御技術の発展や発送電分離等の電力制度改革により、市場と供給者の電力需給を考慮した、発電システム自体による自律的な取引の実施が可能になることが予想される。このような小口事業者による電力取引が活発化することにより、電力の効率的な利用や、再生可能エネルギー導入に係る社会負担の軽減が期待される。

近年、家庭等の小口分散型電源と蓄電池を構成要素とする自立的な電力供給システムであるマイクログリッドの研究開発が活発に行われている。マイクログリッドとその系統連系による電力システムは、マイクログリッド単体での運転よりも、リスク分散による安定供給が期待できるとともに、設備投資が軽減され、経済面からもより効率的であると考えられる。また、電力市場を通じた再生可能エネルギーの取引システムは、市場メカニズムを通じて発電設備投資の増加を促すことができ、社会的負担を最小限に抑えながらエネルギーの低炭素化（脱化石燃料依存）に貢献することができる可能性がある。

しかし、マイクログリッドの構築を含む小口事業者の広域的な電力市場取引に基づく電力供給の安定化・効率化については、その効果について十分な評価がなされていない。より望ましい電力システムの構築のために、効果とリスクを定量的に評価する手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、小口事業者（個人・小規模事業者・マイクログリッド）について、再生可能エネルギーの取引を通じた他の小口事業者や系統電力との連系を想定する。電力取引市場への小口事業者の参入による、事業者自身や社会全体への効果とリスクを包括的に評価することを目的とする。マイクログリッドを構成する小口事業者が、市場の参入障壁のない（あるいはきわめて低い）状況下において、発電した再生可能エネルギーを自由に取引できる状況を仮定する。蓄電池を有する小口事業者は、発電した電力を自ら使用するか、売電するか、蓄電するかを市況に応じて選択することができる（図1）。これら個々の取引主体の行動の結果として、市場の均衡や変動が生じるが、そのときの電力需給の効率性、環境負荷やリスクを評価する。このような小口分散型発電における市場取引の導入について、そのメリットとデメリットを明らかにし、電力システムの低炭素化（脱化石燃料依存）のためのより効率的な取引市場設計のための指針を示すことが本研究の目的である。

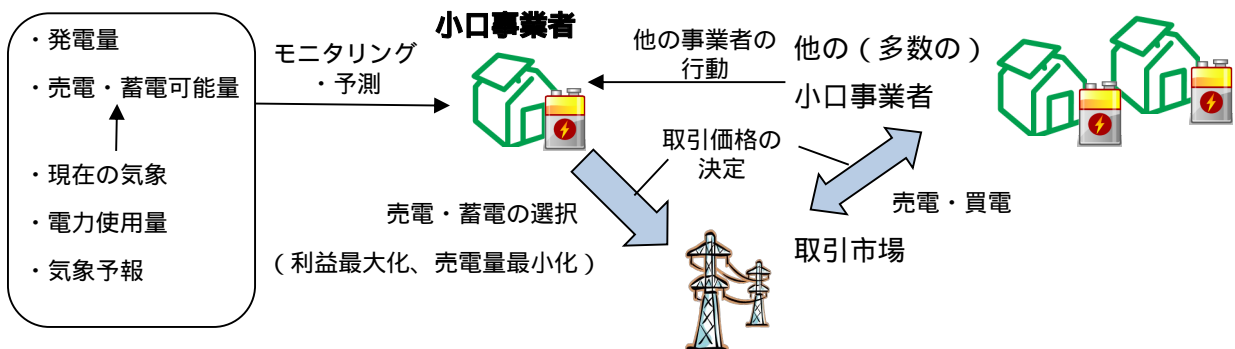


図1：小口電力取引市場における取引主体の行動

3. 研究の方法

(1) 概要

小口電力の多様な供給主体・需要主体を仮定した仮想的な電力取引市場の経済実験手法によるシミュレーションにより、市場設計の効果を定量化する。個人や小規模電力事業者などの主体について、需要・供給パターンと、再生可能エネルギー供給に影響を与える気象情報や価格情報などを受けての各主体の選択行動を分析する。個々の行動の結果である、価格変動・社会負担・環境負荷などの指標を評価する。シミュレーションは気象情報などの不確実性も考慮して行う。

市場取引の導入市場設計の違いによる影響についてシミュレーションを通じて分析する。

また、広域的評価を行うための基盤として、再生可能エネルギー普及による電力需給ポテンシャルの地域メッシュ単位での評価を、地方レベル（旧一般電気事業者レベル）において試みる。

(2) 経済実験手法による小口電力取引市場の挙動分析

経済実験の手法により、小口電力取引市場において、市場の状況が参加者(小口電力事業者)の挙動と価格形成に与える影響を分析する。

経済実験は以下の要領で行った。数名単位の実験参加者と参加者以外の(プログラム上で設定される)需要者を想定する。参加者は日々発電量の変動する太陽光発電設備と蓄電池設備を有する一般家庭とし、晴天時の日中においては自家で消費する以上の発電を行うものとする。参加者は実験内の1日につき2回(日中・夜)電力の取引を行うことができ、取引市場に対し設定された価格(14~24円/kWh)の範囲で電力の売り注文・買い注文を出すことができる。取引市場ではシングルプライス・ブラインドオークションを取引方法とし、参加者および需要者の注文を集計して、需要と供給が一致する価格で取引を約定させるものとする。また、参加者は蓄電池設備を有しているため、電池容量の範囲で自由に充放電を行い、電力を運用することができる。天候(晴天、曇天、雨天の3パターンを設定)は日によって変化し、天候により発電量が異なるが、参加者は常時1~2日先の天候を知ることができる。この条件下で、参加者は10~14日程度の取引を行い、利益の最大化を目指して行動するものとした。

以上の経済実験を、複数回実施した。実験参加者の意思決定に関わる条件を変えて行い、それぞれの条件が取引参加者の行動や取引市場全体のパフォーマンス(二酸化炭素削減量や外部電源への依存度等)に与える影響を分析した。

天候の違いによる比較

実験日数内の各天候の日数の違いによる価格形成への影響を比較した。

天気情報提供の度合い

天気情報の提示度合い(1日先までもしくは2日先まで)の違いによる影響を比較した。

(3) 小口電力市場設計の効果の分析

3(2)での市場挙動の基礎的な分析に加え、市場設計の違いによる影響を経済実験手法により以下の通り分析を行った。

先渡取引の導入

3(2)の経済実験と同様の枠組みで実験を行った。実験期間の日中において、通常の電力取引に加え2日先の日中の電力の取引を行い、価格形成や参加者の行動に与える影響を分析した。

排出権取引との組み合わせ

本実験項目のみ、3(2)で述べた実験方式とは異なる設定での経済実験を実施した。

家庭規模においてキャップアンドトレード方式を用いた二酸化炭素排出量取引市場が導入されるとともに、家庭においても入札制度の下で電力取引市場による発電事業者と需要家の取引が行われることを想定した。電力取引市場では系統電力と再生可能エネルギーによる電力供給を行う新電力会社(以下「再エネ」)を仮定した。

実験参加者は、家庭側と再エネ側の二つのプレイヤーに分かれて取引を行った。家庭側は自らは発電を行わず、入札により電力を購入し、購入量に応じた効用を得る(限界効用逓減を仮定)。再エネ側は、天候の不確実性とそれに基づく戦略的な行動を考慮するために、太陽光発電および蓄電池を有するものと想定し、同じく入札により電力を売却する。再エネ電力については、簡単化のため二酸化炭素は排出されないものと仮定した。入札結果により再エネから購入できなかった電力は再生可能電源でない外部電源(価格は一定)から購入するものとした。

毎日1回の電力取引に加えて、家庭間での排出量取引を3日に1回行う。家庭側は使用電力量の選択と、電力購入先を勘案しながら電力購入注文を行う。二酸化炭素排出量を考慮しながら家庭間で排出枠の購入、売却の注文を行う。再エネ側は天候による発電量と、蓄電量を勘案しながら電力販売注文を行う。実験日数は15日間とし、終了時点で排出枠を超える排出がある家庭については、外部電源発電1kWh相当の二酸化炭素排出量について10円のペナルティーを科すものとした。

(4) 再生可能エネルギー普及時における電力需給ポテンシャルの広域的評価

3(1)(2)は一定の狭い地域を想定した小規模な市場取引実験である。これが広域に波及した場合には、地域特性により電力の需給バランスが異なり、取引市場の挙動も大きく異なってくるのが想定される。そこで、広域的な分析の予備的評価のため、近畿地方を対象として、住宅・業務建物において太陽光発電が大量導入され、山間部においても立地可能な風力発電が最大限導入された場合の地域メッシュ(500m)レベルでの家庭・業務部門の電力需給バランスを推計した。

4. 研究成果

(1) 経済実験手法による小口電力取引市場の挙動分析結果

天候の違いによる比較

13日間の設定による3パターンの天候を設定した実験の結果を表1に示す。表の実験A・D

が晴天6日・曇天2日・雨天5日、実験B・Eが晴天8日・曇天4日・雨天1日、実験Cが晴天7日・曇天4日・雨天2日の設定である。晴天時の発電量が参加者1人あたり約20kWh、曇天時は約8kWh、雨天時は約2kWhとしている。発電量の多い実験B、Eにおいて取引量が多く、価格水準が低くなることが確認された。

表1 天候の設定を変えた場合の経済実験結果

	実験A	実験B	実験C	実験D	実験E
取引量(kWh)	294.6	462.1	458.5	237	448.2
曇天・雨天時取引量(kWh)	62.6	169.5	113	71	165.8
買電量(kWh)(太陽光保有者)	91.8	90.4	169.7	21.2	58.2
公共電力購入量(kWh)	396.9	77.4	170.2	296.5	5.6
平均電力取引価格(円/kWh)	21.1	16.3	19.6	21.7	14.8
電力超過量(kWh)	63.7	76.5	37	5.2	23.4

天気情報提供の度合い

実験時の天気表示日数を2通り設定し、天候や家庭の蓄電池容量など他の実験条件を揃えた場合の実験結果を表2に示した。実験条件を統一しても取引量の水準や価格水準には一定のばらつきがみられた。同一実験内での取引量や価格の変動は、天気の表示日数が少ない時に大きいことが示唆された。将来の情報不確実な場合に、より市場の変動性が大きくなることが示唆された。

表2 入手できる天候情報量を変えた場合の経済実験結果

条件	一人1日あたり取引量(kWh/人/日)	取引量(変動係数)	電力の外部電源からの購入割合	価格平均	価格標準偏差
実験F 天気1日	4.25	0.35	3.2%	18.1	4.38
実験G 天気2日	3.72	0.27	2.4%	18.7	3.36
実験H 天気2日	4.82	0.15	0.7%	17.4	3.04

(2) 小口電力市場設計の効果の分析

先渡取引の導入

先渡市場を加えたケースとそれ以外の条件を揃えたケースの比較を表3に示す。(ただしと異なり天候についてはばらつきを含む。)取引量については大きな乖離は見られないが、取引量や価格のばらつきが小さいことが見て取れる。価格水準も1度の実験のため有意かどうかは判定できないものの他の実験よりも高い傾向が見られた。このことより、先渡し取引の設定は、数名程度の取引市場においても、一般の先物市場と同様市場の安定化に寄与する可能性が示唆された。また、外部電源からの購入割合も低く、電力の蓄電・取引が効率的に行われ、二酸化炭素排出量のさらなる削減に寄与する可能性があることがわかった。

表3 先渡取引を考慮した場合の経済実験結果

	先渡取引	一人1日あたり取引量(kWh/人/日)	取引量(変動係数)	電力の外部電源からの購入割合	価格平均	価格標準偏差
実験G	無	4.19	0.36	3.1%	17.6	3.26
実験H	無	3.72	0.19	2.2%	17.8	4.09
実験I	無	4.25	0.35	3.2%	18.1	4.38
実験J	無	4.18	0.31	2.2%	16.4	3.50
実験K	有	4.08	0.21	1.5%	20.1	2.05

排出権取引との組み合わせ

排出権取引との組み合わせによる実験結果を表4に示す。再エネ購入および排出権取引を行わずに効用最大化を図るケース(参考ケース)と比べて、両取引を行った場合は効用値が向上するとともに、平均使用電力が抑えられており、取引の導入により省エネへのインセンティブにつながる事がわかった。

表4 排出権取引との組み合わせによる経済実験の結果

	実験L	実験M	実験N	実験O	参考ケース
平均効用(円)	7306	7382	7365	7357	7010
平均残排出枠(kWh相当-CO ₂)	11.5	7.9	26.8	29.1	-45
平均使用電力量(kWh/日)	11.7	11.6	11.9	11.9	14

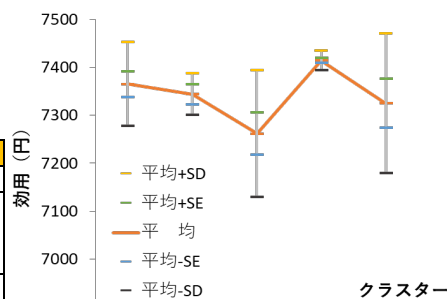


図2 クラスター別効用値の比較

また、表4の実験参加者の行動（電力使用、再エネ購入、排出権取引）についてクラスター分析を試みた。その結果、省エネ・排出枠売却型（クラスター1）、排出枠購入型（クラスター2）、再エネ購入型（クラスター3）、再エネ購入、排出枠売却型（クラスター4）、排出枠販売型（クラスター5）の5つに分類された。この5つのクラスターごとに効用値の分布を比較した結果を図2に示した。その結果、再エネ購入と排出権取引の両方を活用するクラスターにおいて効用値が高く、再エネ取引のみを活用するクラスターにおいて効用値が相対的に低い傾向がみられた。このことから、電力取引市場と排出権取引市場を組み合わせという制度設計は、効用最大化を目指す個々の家庭に取引への積極的な参加を促進する仕組みとなりうると考えられた。

（3）再生可能エネルギー普及時における電力需給ポテンシャルの広域的評価結果

業務用建物・住宅において太陽光発電がポテンシャルの50%導入されたケースを想定し、近畿地方における時間帯別電力需給バランスを推計した結果を図3に示す。対象地域全体での家庭部門の需要電力量と太陽光発電による発電電力量の月別電力需給バランスは1時～6時は月による差が少ないが、太陽光発電が発電を始める6時以降からは5月と8月は正の値へと転じるのに対して、1月は1日を通して負の値が

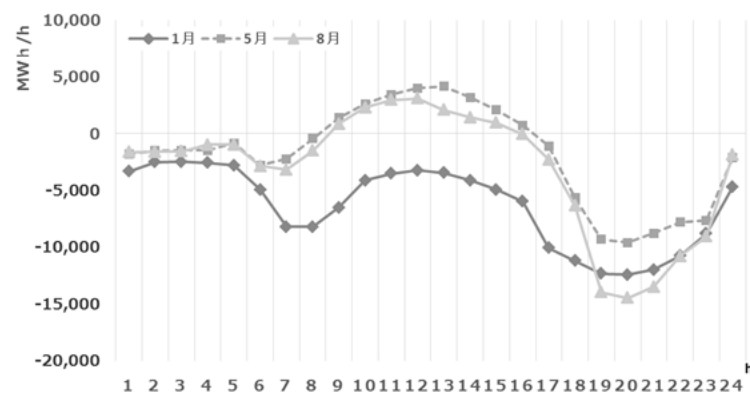


図3 近畿地方における電力需給バランスの推計結果

継続する。太陽光発電が発電を終える日没以降では、20時頃の需給バランスは8月の-14.5GWh、1月の-12.4GWhに対して、5月は-9.6GWhという差となった。これらは、冷暖房による電力需要量が1月、8月は大きく、太陽光発電の発電量は5月、8月が大きくなるためである。

図4に各メッシュにおける民生部門全体の5月における日電力需給バランスを示す。北部と南部の山間部は、人口密度が低く風力発電を多く設置できることから、日電力需給バランスの値が正になっている。これに対して、大阪市・京都市の中心都市部は山間部と比較して、人口密度が高いため需要電力量が多く、風力発電はほとんど設置されないため、日電力需給バランスの値は大きな負値をとる。したがって、太陽光発電と風力発電による供給電力量だけでは、中心市街への電力供給が難しく周辺部から電力融通する必要があるといえる。

このように、広域的な観点では再生可能エネルギー電力の需給バランスが地域により大きく異なる。小口事業者による再生可能エネルギーの導入・流通を最大化しつつ広域レベルの需給を安定化させるためには、地域レベルの電力取引と広域的な電力融通の両方を考慮した市場設計が必要であると考えられる。

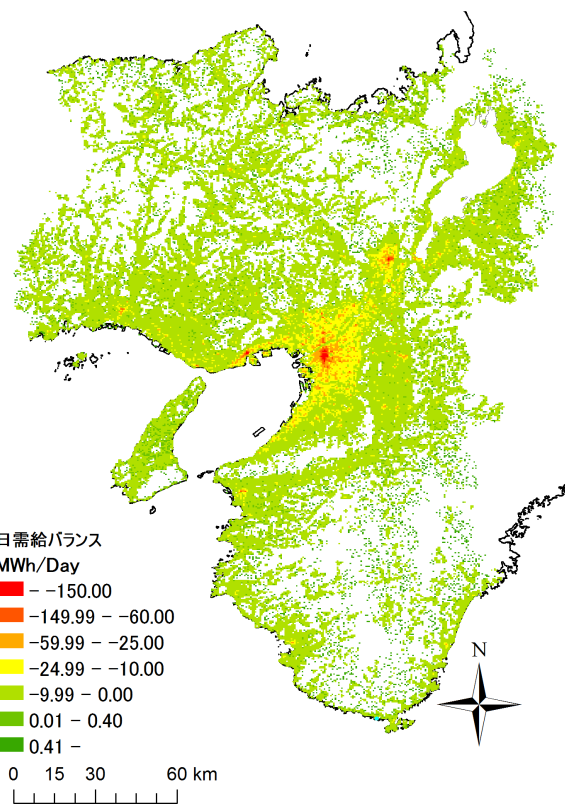


図4 近畿地方民生部門の日電力需給バランス（5月）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

福原大祐・吉川直樹・天野耕二、地域別クラスター分析による再生可能エネルギーの電力融通ポテンシャルの評価, 学会誌E I C A (環境システム計測制御学会誌), Vol. 23/ 2-3, pp.177-186, 査読有, 2018

天野耕二・土居義浩・福原大祐・吉川直樹・島田幸司、太陽光発電と蓄電池を活用した独立系直流LED照明システムの導入に伴う戸建て住宅の電力消費由来CO₂排出削減効果とCO₂ペイバックタイムの推計, 日本LCA学会誌, Vol. 13, No. 4, pp.360-369, 査読有, 2017, <https://doi.org/10.3370/lca.13.360>

福原大祐・吉川直樹・天野耕二・島田幸司, 近畿地方民生部門を対象とした再生可能エネルギーの電力融通ポテンシャルの評価, 日本LCA学会誌, Vol. 12, No. 2, pp.86-96, 査読有, 2016, <https://doi.org/10.3370/lca.12.86>

[学会発表](計6件)

岩崎堅太・吉川直樹・天野耕二, 経済実験による家庭部門の電力・CO₂排出量取引市場に関する基礎的検討, 第13回日本LCA学会研究発表会, 2018

関谷知治・吉川直樹・天野耕二, 集合住宅の壁面における各種太陽光パネルの導入ポテンシャルおよび環境・経済性評価, 第13回日本LCA学会研究発表会, 2018

Jun Maekawa and K. Shimada, Market Design for Renewable Energy Dissemination, 7th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, 2018

Jun Maekawa and Koji Shimada, Market Design for Renewable Energy Dissemination, the 12th International Conference on the Regional Innovation and Cooperation in Asia, 2017

岩崎堅太・天野耕二・吉川直樹, 経済実験による家庭部門の電力・CO₂排出量取引市場に関する基礎的検討, 環境情報科学ポスターセッション, 2017

岩崎堅太・天野耕二・吉川直樹, 都道府県単位の電力自給を想定した最適電源構成のシナリオ分析, 第44回環境システム研究論文発表会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 吉川 直樹

ローマ字氏名: (YOSHIKAWA, Naoki)

所属研究機関名: 立命館大学

部局名: 理工学部

職名: 講師

研究者番号(8桁): 10583271

研究分担者氏名: 島田 幸司

ローマ字氏名: (SHIMADA, Koji)

所属研究機関名: 立命館大学

部局名: 経済学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70367986

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。