

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12444

研究課題名（和文）再エネ大量導入によるプロシューマ行動の創発に関する総合的研究

研究課題名（英文）Comprehensive research on the prosumer behaviour through t renewable energy mass-introduction

研究代表者

尾形 清一（Seiichi, Ogata）

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：60622991

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：欧米、東南アジアの一部の地域では、エネルギープロシューマがエネルギーシステムのイノベーションに大きな影響を与えている。さらにエネルギープロシューマは、エネルギーデジタル化技術を基盤とする社会システム化は、Community Renewable Energy（CRE）のような地域社会のWell-Being達成を目指す活動と融合しつつある。このような「プロシューマ行動の創発」が、エコロジー的近代化や持続可能な社会構築に向けていかなる意味を持つかや、今後のエネルギーモデルの可能性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギープロシューマの台頭により、エネルギーインフラも大きく変貌を遂げようとしている。特にエネルギーデジタル化技術によって電力グリッド（配電網）は、もはや電力を供給するだけのパイプ（血管）ではなく社会の情報シグナルを伝搬する「神経網」としての機能も担うことになる。また、Agrivoltaicsでは、農業用地の上部に太陽光発電パネルを設置し、農業作物と電力の併産を実施している。これもプロシューマといえる。このようなAgrivoltaicsの社会実装の可能性が飛躍的に増大したのは太陽光パネルの低価格化に加えて、スマート農業などの農業部門のDXとの親和性の高さも背景にあるといえる。

研究成果の概要（英文）：In Europe, the USA, and parts of South-East Asia, Energy Prosumers are significantly impacting energy system innovation. Furthermore, social systemization based on energy digitalization technologies is merging energy prosumers with activities such as Community Renewable Energy (CRE) that aim to achieve the Well-Being of local communities. The implications of such 'emergence of prosumer action' for ecological modernization, sustainable society building, and the potential of future energy models were examined.

研究分野：政策学

キーワード：プロシューマ Agrivoltaics ネットワークシステム

## 1. 研究開始当初の背景

パリ協定やSDGs等によって、脱炭素化シナリオとしてRE大量導入やRE100%が世界的に強く認知されるようになってきた。日本では「REの主力電源化」がエネルギー基本計画に盛り込まれ、カリフォルニア州・ハワイ州では2050年を目途に州内電源構成をRE100%に高める政策目標を掲げた。このような背景から学術研究としても、Lund(2016)のRE100・エネルギーシステム分析やRE大量導入シナリオとしての「電気自動車(EV)やエネルギーキャリア(水素等)」に関する研究が増加している。しかし、RE大量導入に伴う人間行動と社会経済システムの変化について省察した研究は少ない。

そこで、研究課題の学術的「問い」は、RE大量導入が人間行動と社会経済システムに対し如何なる変化を生じさせるのか？そして、この変化は「エコロジー的近代化」「持続可能な社会構築」等の社会経済システム再構築にいかなる影響があるのか？である。火力・原子力を中心とする従来のエネルギーシステムは、「供給の安定性」を重視してきた。他方でRE大量導入やRE100%のエネルギーシステムでは、自然気象条件の変動性と不確実性をシステムに内包する。このため、RE比率が増加し、RE100%に近づくに従い、従来システムよりも「供給の変動性」が増大する。Müller(2014)等の研究で、供給の変動性はデマンドレスポンス(DR)やエネルギー貯蔵技術(蓄電池等)の「柔軟性資源」によって適切な対処がなされれば「技術的」には大きな問題ではないことが研究的に示され実証されつつある。

しかし、これら研究でも、RE大量導入に伴う人間行動の変化や社会経済システムへの影響について省察されていない。例えばEUやアメリカ等のRE大量導入事例では供給の変動性に伴う柔軟性資源の普及と相乗して「消費者の行動変容」が観察されている。特に電力消費者は系統電源から電力購入を減少させている。そして、太陽光(PV)パネルと「蓄電池・EV」を自己所有し、「RE発電と消費」が一体化するREプロシューマ化が促進されている。そして、このREプロシューマは、REの変動性に対処するため自律的にDRを調整する。具体的には、RE電力の供給超過時には蓄電池やEVに電力を貯蔵し、RE電力の不足時にはREプロシューマ間で協調し電力取引を行う。さらに近年の機械学習やブロックチェーン等のIoT技術を基盤にした「エネルギー情報化技術」は、REプロシューマ間の協調と電力取引をバーチャルパワープラント(VPP)等として社会システム化している。さらにこの社会システム化は、Community Renewable Energy(CRE)のような地域社会のWell-Being達成をめざす活動と融合しつつある。このような「プロシューマ行動の創発」が、エコロジカル近代化や持続可能な社会構築に向けていかなる意味と意義を持ちえるのかという点を意識して研究をする

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、REプロシューマの行動特性を明らかにし、このREプロシューマが人間行動と社会経済システムに与える影響を研究する。この研究の波及効果は、REプロシューマに着眼することで、ポストFIT政策を射程に入れた「新しいRE大量導入シナリオ」を提示できる点にある。現在、最も有力なRE大量導入シナリオは「柔軟性資源への投資シナリオ」であるが、本研究ではREプロシューマに注目し、このシナリオを刷新する。さらにREプロシューマが、エコロジカル近代化や持続可能な社会構築に果たす役割や可能性についても考察

し、環境学の発展に貢献したい。

### 3．研究の方法

脱炭素化や持続可能な社会構築に向けて再生可能エネルギー（RE）大量導入や RE100%に注目が集まっている。学術研究としても RE 大量導入が、人間行動や社会経済システムに与える影響を研究する必要がある。EU やアメリカ等における RE 大量導入事例では、「RE 発電と消費」が一体化する RE プロシューマが社会的に顕著になりつつある。

研究方法としては RE プロシューマの行動分析を行うためクラウド型エネルギーマネジメントシステム等を使い研究し、電力ルーターを約 50 世帯に設置し、RE プロシューマの行動特性を定量的に研究することを想定した。しかしながら、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19)対策のため、この研究方法での実施が不可能であった。このため、波及効果としての、RE プロシューマに注目することで、RE 大量導入による脱炭素化シナリオを大きく進展させるような事例研究を実施した。

### 4．研究成果

エネルギープロシューマの台頭により、実はエネルギーインフラも大きく変貌を遂げようとしている。DX やエネルギーデジタル化技術によって電力グリッド（配電網）は、もはや電力を供給するだけのパイプ（血管）ではなく社会の情報シグナルを伝搬する「神経網」としての機能も担うことになる。

太陽光・EV・蓄電池や、エネルギーマネジメントシステム（EMS）が搭載されたエネルギープロシューマの建物では、IoT プラットフォームと生活空間等との接続が進む。そして、これらの建物自身が、さまざまなデータや情報をやり取りするネットワークのノードやハブとしても機能する。特にエネルギープロシューマの生活空間では、人工知能やセンサーデバイスが搭載された家電や事務機器等からもたらされるセンサー情報等が、ネットワーク内にもたらされる。そして、これらの情報群（ビッグデータ）は、多様な社会ニーズを的確に捉え、最適化された多様なサービスを生み出す源泉となる。

例えば、スマート電力メーターから抽出された、家庭の電力波形や周波数等データについて、機械学習等を用いて解析すれば、その家庭の内部でどのような電力機器が使用されているのかをつぶさに確認することができる。さらに今後は、AI を搭載した家電機器や「ウェアラブルデバイスからもたらされる生体情報」などの「シグナル」も「神経化したエネルギーインフラ」を通じて、ビッグデータとして社会的に共有化されることになる。また、そのような情報（ビッグデータ）は、医療・福祉支援や環境配慮行動の創出、避難行動等の公共政策や新しいエネルギーサービスの高度化につながる。

究極的には、エネルギープロシューマは、神経化するエネルギーインフラを拡充する結節点（ノード）としての機能も担うことになる。エネルギープロシューマ間の電力取引やサービス構築、協調行動の社会システム化によって、これらネットワーク網は、あたかも末梢神経が自律的神経網を拡張する様相に類似の傾向を持つと考えることも可能だ。

これは、従来のように公共部門が中央指令型トップダウン計画でインフラ網を拡充するのではなく、自律的で分散的かつ自己増殖的にインフラが拡張される可能性を意味する。この

ような「創発性」やダイナミックスが、社会システムの変化に大きな影響を与えるだろう。

また、近年注目されるスマートシティとは、元々はスマートグリッドと呼ばれた都市における電力需給調整やデマンドレスポンス利用技術を基礎にして発展してきた。このスマートグリッドに DX のような情報技術を活用した新しい都市サービスが付加され、拡大してきたものがスマートシティといえる。

上記で指摘したエネルギープロシューマが、IoT プラットフォームに支えられた「神経化した社会インフラ」に接続され、そして、ここからもたらされる情報がデータプラットフォームで適切に利用され共有されれば、仮想空間と都市空間が融合し、再編成されたスマートな都市やスマートな農山漁村化が今後、加速するだろう。この変化は、経済社会システムやビジネスモデルの変容を考える際の手掛かりになるはずである。

再エネには、地域社会との合意形成という意味での Co-delivery 化に至る能動的コミュニケーションが必要である。これに加えて、自然環境や地域環境情報を観察し活用するための知恵ともいうべき、自然との高度なコミュニケーションが不可欠である。

既にスマート農業では、気温・湿度・日射・土壌中のリンの変化など、各種の農業用センサーデバイスが多く活用されている。これらによって得られた情報は、人工知能などを媒介し、農作物の遠隔による品質管理、無線電力伝送なども活用した農業器具の自動化による農業生産の省力化、Agrivoltaics（営農型太陽光発電）などへの応用など、最先端テクノロジーを活用した新しい農業形態が試みられている。

Agrivoltaics では、農業用地の上部に太陽光発電パネルを設置し、農業作物と電力の併産を実施している。Agrivoltaics の鍵は、太陽光や農業作物で使用する日射調整を通じて、農業作物と電力の併産を最適化することにある。これらの行為は天候などの自然情報や環境情報を的確に知ること、太陽光の農作物と発電の利活用という高度化が可能となる。再エネ大量導入が意識される以前から、この Agrivoltaics のアイデアは存在していたのだが、社会実装の可能性が飛躍的に増大したのは、太陽光パネルの低価格化に加えて、スマート農業などの農業部門の DX との親和性の高さも背景にあるといえる。

これら RE プロシューマと Agrivoltaics との関係などを考察できたことが研究成果として大きい。

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 2件）

1. 著者名 尾形清一	4. 巻 75
2. 論文標題 IoTプラットフォームが築く持続可能な未来社会	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 アド・スタディーズ	6. 最初と最後の頁 22-29
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hideaki Nakata, Seiichi Ogata	4. 巻 13(2)
2. 論文標題 Integrating Agrivoltaic Systems into Local Industries: A Case Study and Economic Analysis of Rural Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 513-533
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/agronomy13020513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 端誠一・尾形清一
2. 発表標題 「デジタル化の受容性と社会関係資本の関係 京都府与謝郡伊根野町における事例研究」
3. 学会等名 政治社会学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideki Nakata Seiichi Ogata
2. 発表標題 Regional Economic Cycle Through the Use of AgriVoltaics on Abandoned Lands-Case of Kyoto Prefecture
3. 学会等名 AgriVoltaics2022 conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiichi Ogata
2. 発表標題 Community acceptance of wind turbine noise
3. 学会等名 2nd International Conference on Energy Research and Social Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	手塚 哲央  (Teduka Tetsuo)  (60163896)	京都大学・エネルギー科学研究科・名誉教授    (14301)	

	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
研究協力者	中田 秀樹  (Hideaki Nakata)	京都大学・エネルギー科学研究科・博士後期課程	

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
---------	---------