

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25285073

研究課題名(和文) 電力消費デマンド・レスポンスの経済効果の実証研究

研究課題名(英文) Empirical Analysis of Economic Effects of Demand Response of Electric Consumption

研究代表者

依田 高典 (Ida, Takanori)

京都大学・経済学研究科(研究院)・教授

研究者番号：60278794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：企業と政府は様々な経済活動の内的動機と外的動機に影響を与えるために、道義的勧告と経済的インセンティブを使う。これらの政策的介入の持続性を調べるために、我々は参加世帯を道義的勧告グループとダイナミックプライシング・グループに若得て、電力のピーク時に節電行動を促した。家庭単位の30分電力消費量データを用いて、我々は道義的勧告には短期的効果があることを明らかにしたが、その効果は何回か介入を繰り返すうちに逡減することも明らかにした。経済的インセンティブはより大きく持続的な効果を生み出し、習慣形成促進効果も持っていた。

研究成果の概要(英文)：Firms and governments often use moral suasion and economic incentives to influence intrinsic and extrinsic motivations for various economic activities. To investigate the persistence of such interventions, we randomly assigned households to moral suasion and dynamic pricing that stimulate energy conservation during peak demand hours. Using household-level consumption data for 30-minute intervals, we find significant short-run effects of moral suasion, but the effects diminished quickly after repeated interventions. Economic incentives produced larger and persistent effects, which induced habit formation after the final interventions. While each policy produces substantial welfare gains, economic incentives provide particularly large gains when we consider persistence.

研究分野：応用経済学

キーワード：社会実験 フィールド実験 スマートグリッド デマンドレスポンス ダイナミックプライシング

### 1. 研究開始当初の背景

この研究の学術的背景は2つあります。

第一に、研究を取り巻く現実の経済的背景について説明します。太陽光や風力など再生可能エネルギーの導入・普及は日本のエネルギーセキュリティやCO<sub>2</sub>の排出削減を目指す上で重要なエネルギー源です。また、2011年に発生した東日本大震災とその後の電力供給不足から、価格や見える化などを通じて、需要家に負担をかけないデマンドピークのカットやシフトの誘導が必要とされています。

スマートグリッドはセンサー機能を搭載した家電製品などを電力ネットワークに接続して、電力需給を安定的・自動的に調整し、省エネとコスト削減を向上させ、その結果、次のような経済効果の達成が期待されています。

- 住民全体のデマンド・レスポンスと環境意識を高め、再生可能エネルギーの導入を促進し、コミュニティ全体のエネルギー・環境問題の解決に貢献する。
- 需要家の電力消費をリアルタイムに制御し、電気料金を時間帯別に変動させるダイナミック・プライシングを通じて、ピーク時の電力需要をオフピーク時にシフトさせる(ピークシフト効果)。
- 電力消費の見える化やダイナミック・プライシングを通じて、消費者の省エネへの意識を高め、ピーク時の電力需要をカットさせる(ピークカット効果)。

また、スマートグリッドが新興技術のため、実際に経済効果を測定した事例は国内では存在しません。そこで、本研究では社会的応用を見据えて、電力消費のデマンド・レスポンスの経済効果を測定します。こうした経済効果の測定は2014年以降に議論される一般家庭も含めた小売り全面自由化や、発電と送電を行う事業者を分離する発送電分離の可否にとっても、不可欠な基礎資料となります。

第二に、本研究の基礎となるランダムイズド・エクスペリメント(Randomized Experiment, RE)手法の学術的背景について説明します。米国エネルギー省では、連邦予算に基づくスマートグリッド社会実験のガイドラインを策定し、経済効果を正しく測定するために、産官学のテクニカル・アドバイザリー・ボードを立ち上げ、RE社会実験を推奨しています。RE社会実験は既に開発経済学や労働経済学の分野ではセルフセレクトション・バイアスを排除して真のトリートメント効果を得るための必須なツールとして定着していますが、今後、大規模な産業政策へも適用が求められていくと予想されます。

### 2. 研究の目的

本研究「電力消費デマンド・レスポンスの経済効果の実証研究」では、ランダムイズ

ド・エクスペリメント手法を用いて、電力消費に関する個票データに基づいて、ピークカット・ピークシフトのトリートメント効果評価を行い、それら経済効果の日米国際比較を通じて、日本のスマートグリッドの経済効果の測定を行います。特に、同じような研究課題に取組む米国研究チームとの研究交流を密にし、国際共同研究の推進に注力します。そして、本実証研究の結果をもとに、電力産業の規制改革への含意を議論します。

こうしたREを用いた電力消費デマンド・レスポンスの経済効果の計測論文の嚆矢にはWolak (2011)があります。日本でもRE手法に従った社会実験経済効果を測定しなければ、国際的な信用が獲得できず、ひいては日本産業界の国際競争力にも悪い影響を及ぼすのではないかと懸念されるところです。また、REを活用したバイアスのないトリートメント効果の推定に基づいた経済政策の企画立案は、今後の日本の経済政策の質の向上にとって必須です。

Wolak, Frank A. 2011. "Do Residential Customers Respond to Hourly Prices? Evidence from a Dynamic Pricing Experiment." *American Economic Review*, 101(3): 83-88.

### 3. 研究の方法

本研究では、3ヶ年計画で、所期の研究目標を果たすように研究を進めます。第1年度は、主にRE社会実験のセットアップに注力します。第2年度以降は、RE社会実験に基づいて、得られたデータに基づいて、デマンドレスポンスの経済効果の測定を行い、推定結果の政策論的検討を行います。

第1年度にあたる2013(H25)年度では、RE社会実験のセットアップを行います。

RE社会実験の候補地としては、スマートグリッドの社会実験の対象となっている神奈川県横浜市の新築・既築の2,000世帯となります(データ利用の横浜市との協議済み)。

RE社会実験にあたっては、トリートメントを決定し、サンプルをランダムにコントロール・グループとトリートメント・グループに振り分けます。以下、RE社会実験の概要について説明します。

先ず、REに基づき、次のような2つのトリートメントを考えます。

- 電力使用量の見える化・省エネ情報提供
- 需給ピークを反映したダイナミックプライシング

横浜市 RE	通常料金	変動料金
見える化なし	コントロール・グループ (通常料金)	トリートメント・グループ (ダイナミックプライシング)
見える化あり	トリートメント・グループ (見える化)	トリートメント・グループ (見える化+ダイナミックプライシング)

以上から、コントロール・グループとトリートメント・グループを定義します。

以上のような RE 社会実験設計に基づいて、2013(H25)年度夏以降、データの本格的な収集を行います。収集されるデータは、スマートメーターから得られる 30 分値の電気使用量(kWh)であり、これらを利用して、気温・電気料金データと合わせて、時間帯別デマンド・レスポンス効果の計量分析を行います。

ここでは、デマンド・レスポンスを次のような 2 つのサブ効果に分けて考えます。

- ピークカットによるデマンド・レスポンス
- ピークシフトによるデマンド・レスポンス

ピークカットは 1 日のピーク時電力消費量の削減率から定義できます。また、ピークシフトは 1 日のピーク時電力消費量とオフピーク時電力消費量の比率の平準化として定義できます。

第 2 年度にあたる 2014(H26)年度では、データの計量経済学的分析に当たります。データの収集と整理には膨大な手間暇がかかることから、データ調査機関への一部外注も検討しています。第 3 年度に当たる 2015(H27)年度では、分析結果の評価に基づく政策的議論に当たります。

RE 社会実験に基づくトリートメント効果の推定作業は極めて単純です。ここでは、ダイナミックプライシングを例に取り、RE 実証で得られたデータを用いてどのようにデマンド・レスポンスを推定するのか、その方法について解説します。

価格トリートメント	第 0 期(2013 年)	第 1 期(2014 年)
トリートメント・グループ	通常電気料金	ダイナミックプライシング
コントロール・グループ	通常電気料金	通常電気料金

- RE 社会実験において、価格トリートメントに関して、参加者が上表のように、ランダムに 2 つのグループに分かれています。
- 第 0 期では、両グループとも、電気料金が変動しない通常料金を受けます。
- 第 1 期では、トリートメント・グループだけが、ダイナミックプライシングというトリートメントを受けます。

ここでは、2 つのグループをランダムに分けているため、原理的に 2 つのグループ間での統計的違いはトリートメント効果以外にないという点が RE の最大の強みです。誤差項や推定にモデルに強い仮定を置かなくても、単純な差の差(Difference in Difference)回帰式で不偏推定量が得られます。

例えば、ダイナミックプライシングに興味のある人をトリートメント・グループとする従来型のセルフセレクション型社会実験を考えます。興味のある人と興味のない人はそもそも全く異なる選好を持っていることに注意しなければなりません。その結果、2 つのグループの間に統計的に有意な電力消費量の差が得られても、それがダイナミックプ

ライシングの効果なのか、そもそも全く異なる選好の結果なのか識別できません。

このようなセルフセレクションを内包したトリートメント効果を社会実験の効果として報告することは、学問的に誤りであるばかりか、政策的に利用された場合、多くの公共資金を本来ならば投入すべきでない政策に対して投入する危険性を持ちます。従って、現在は、開発経済学・労働経済学をはじめとした多くの経済学分野で RE 社会実験に基づかない研究結果の利用について慎重な意見が投げられるようになってきました。本研究はそうした問題に対処しています。

ダイナミックプライシングの効果については、どの程度のピーク価格に対して消費者がどの程度反応するのか、というピーク価格に対する価格弾力性が米国でも日本でもまだ明らかになっていません。横浜市 RE 社会実験はこの点について明確な答えを出すことができます。また、電力消費に関しては、節電による消費量の削減という点が注目されがちですが、情報提供による消費者の行動変容はより継続的なエネルギー消費変化をもたらす可能性があります。本研究はこの点についても明確な答えを出すことで、節電促進政策による消費量の削減、情報提供による行動変容を通じた消費量の削減の比較検討を行い、政策的にどのようなベストミックスが考えられるかについて重要な参考材料を提供できます。

重要な経済効果で統計的に有意な推定結果が得られれば、個人属性・住宅要因・環境要因を内挿して、政策効果を柔軟にシミュレーションできます。家族構成が単身と 5 人家族の場合の比較・夏の最高気温が 30 度と 35 度の場合の比較などを織り込んで、シミュレーション結果がどう変わるかを見れば分かります。当然、経済効果はシナリオによって異なってきます。

さらに、社会全体で達成したい数値目標が別途存在する場合には、多様なシナリオ別に、誰がどれだけ削減すれば、社会的目標を達成できるのかを割り当て、目標達成のためのインセンティブ・メカニズムを考えます。家庭のデマンド・レスポンス・データを地域の電力需給データとも連結させて、社会的な費用便益分析を行うことも可能です。

日本で現在展開中のスマートグリッド社会実験の推進を考える上で、再生エネルギー(バイオマス・太陽熱利用・雪氷熱利用・地熱発電・風力発電・太陽光発電など)・次世代自動車は必須のコンポーネントです。そこで、消費者アンケート調査も行い、世帯の家族構成、生活スタイルの差異に注目しながら、新エネルギーの受容度・支払意思額、EV/PHV への消費者選好を定量的に把握することも重要です。

#### 4. 研究成果

本研究「電力消費デマンド・レスポンスの経済効果の実証研究」の主要な研究成果は、以下のようにまとめられます。[1]はフィールド実験に基づく顕示選好分析であり、[2]はそれを補完するものとしての表明選好分析です。ここでは、それらの研究成果を紹介します。

- [1] Ida, T., K. Murakami, and M. Tanaka (2016) “Electricity Demand Response in Japan: Experimental Evidence from a Residential Photovoltaic Generation System,” *Economics of Energy & Environmental Policy* vol. 5.1: 73-88.

電力のデマンドレスポンスに関するフィールド実験の研究が近年盛んに行われている。Faruqui and Sergici (2010)によれば、過去のダイナミックプライシングプログラムに関する15の実証実験研究の多くが2000年以降に米国で実施されたものである。それらすべてが十分に設計された無作為比較対象法(Randomized Controlled Trial, 以下RCT)に基づくフィールド実験というわけではないが、過去の知見からはダイナミックプライシングの導入によってピーク時間帯に削減できる消費電力量の割合は、時間帯別(Time-of-use, 以下TOU)料金の場合には3~6%、クリティカルピークプライシング(Critical Peak Pricing, 以下CPP)料金の場合には13~20%であることが報告されている。また、より近年のRCTフィールド実験のひとつであるWolak(2010, 2011)では、CPP料金のピークカット効果が13%であったのに対して、クリティカルピークリベート(Critical Peak Rebate, 以下CPR)料金では半分以下の5.3%の効果にとどまることも明らかになった。

2010年以降は、ダイナミックプライシング以外にも情報提供や規範的アプローチなどの非金銭的な政策に関する経済効果も検証されるようになった。例えば、Allcott(2011a)やJessoe and Rapson(2014)は、電力価格や使用状況に関する追加的な情報を付加することによって消費者がより敏感に価格変化に反応することを明らかにしている。Allcott(2011b)では、各家庭の月額電力消費量について近隣住民と比較した情報を消費者に提供することで、金銭的なインセンティブがない場合にも1.4~3.3%の節電効果が観察された。他方、Allcott and Rogers(2014)によれば、このような非金銭的な働きかけには、その効果の継続性や習慣形成の面でダイナミックプライシングのような価格シグナルほどの効果がないことも観察されている。

日本においても、電力のデマンドレスポンスに関するフィールド実験は行われている。

例えば、Ito et al. (2015)は、2012年にけいはんな地域(京都府)の約700世帯を対象にRCTフィールド実験を実施し、ダイナミックプライシングと非金銭的な働きかけが節電行動に与える影響をひとつのフィールド実験の枠組みの中で同時に検証している。彼らによると、CPP料金のトリートメント効果は約16%、金銭的インセンティブを伴わない道徳的な働きかけによる効果は約3%であった。これらの数値は国外における過去の研究結果とも整合的である。

本研究でも、ダイナミックプライシングのうちCPP料金プログラムについて、横浜市民を対象に大規模なRCTフィールド実験を行った。実験の対象は、神奈川県横浜市在住の太陽光発電システムを所有する家庭(以下、PVプロシューマー)約1200世帯である。PVプロシューマーは、自宅で電力を消費する一方で、ソーラーパネルで発電した電力を電力会社に売ることができる。このような家庭は、ソーラーパネルの規模やその日の日照量などによって電力の買い手にも売り手にもなり得るため、今後の日本の電力市場において需要サイドのリソースとしても期待できる。しかしながら、PVプロシューマーを対象にしたデマンドレスポンスの大規模なフィールド実験はこれまでに行われていない。

我々は実験からいくつかの興味深い結果を得た。まず、PVプロシューマーを対象にする場合、CPP料金に期待できるピークカット効果は、一般世帯を対象にした場合に観察されたピークカット効果の4分の1程度にとどまることがわかった。さらに、平常時に加入している料金プランによってもCPP料金のインセンティブが異なるために、そのピークカット効果には違いが見られた。

- [2] Murakami, K., T. Ida, M. Tanaka, and L. Friedman (2015) “Consumers’ Willingness to Pay for Renewable and Nuclear Energy: A Comparative Analysis between the US and Japan,” *Energy Economics* vol. 50: 178-189.

昨今、2030年時点の望ましい電源構成「ベストミックス」について、政府内で検討が進んでいる。経産省は「総合資源エネルギー調査会」において、原発比率を20~22%として、震災前の約30%から引き下げる一方で、太陽光や風力など、再生可能エネルギーを現状の10%から2倍となる22~24%とする方向で調整を行い、国民からの意見公募などを経て、6月までに最終案を固める予定である。

この大きな政策的議論の中で、日本の消費者の受容度に関する精緻な定量的分析を行った研究はほとんどなかった。我々はコンジョイント分析と呼ばれる仮想的な消費者選択を通じて、消費者の原発比率や再エネ比率に対する金銭的な支払意思額を計測すると

共に、米国消費者の支払意思額との比較分析も行った。

対象は、東日本大震災後の2013年2月、ネット調査会社に登録しているモニター日米それぞれ4,000名である。日本の消費者は年齢・性別が偏らないようにモニターの中から無作為に抽出した。米国の消費者はニューヨーク・ミシガン・テキサス・カリフォルニアという代表的4州からそれぞれ1,000名を無作為に抽出した。

我々のコンジョイント分析では、説明変数として、月間電気料金、温室効果ガス排出削減量、電源構成における化石燃料比率、原発比率、再エネ比率、水力比率を用いた。数値設定が異なる二者択一の中から、回答者は望ましい選択を選び、我々は得られた選択データに計量経済学的手法を用いて分析した。

定量的な分析に先だって、日米消費者に対して、環境やエネルギーに関する定性的な意識調査を行った。

- 温室効果ガス排出量削減に対して、日米の6割以上が肯定的に評価した。
- 福島事故以降、日本の6割以上が、原発に対する認識が変わったと回答し、国内の原発を将来的には廃止すべきと考えている。他方で、米国では半数の回答者が、原発は慎重に増設すべきと考えている。
- 再エネに対しては、日米とも、7割以上が今後もっと普及するべきだと考え、日米とも太陽光に対する評価が大きい。日本では地熱、米国では風力に対する期待が大きいなど若干の差もあった。

計量経済学的な定量的分析の結果、ベストミックスに関する消費者の受容度について、以下のような結果が得られた。

- 再エネ比率を10%上昇(火力電源を代替)するプランに対して、日本の消費者は月間電気代が310円上昇することが妥当と考える。他方で、米国の消費者は、720円上昇してもよいと考えている。
- 原発比率を10%上昇(火力電源を代替)するプランに対して、日本の消費者は月間電気代が720円下落しないと釣り合いがとれないと考える。他方で、米国の消費者は、100~200円の下落で十分と考えている。
- 温室効果ガス排出量を10%削減するプランに対して、日本の消費者は月間電気代が260円上昇することが妥当と考える。米国の消費者も、おおよそ300円上昇してもよいと考えている。

消費者は、ベストミックスと電気料金に関するトレードオフに直面しており、一方で原発嫌い(再エネ好き)他方で値上がり嫌いと思っている。このような時に、消費者は「認知的不協和」を引き起こしやすい。具体的には、原発容認・値上がり反対あるいは原発反対・値上がり容認の選択肢を無理やり選ばせ

てしまうと、たまたまってしまった自分の態度に固執してしまう。そのような場合は、今は無理をして選ばないという第三の選択肢があると、消費者厚生は約10%上昇することも知られている

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 6件)

- [3] Tanaka, M. and T. Ida (2013) "Voluntary Electricity Conservation of Households after the Great East Japan Earthquake: A Stated Preference Analysis," *Energy Economics* vol. 39: 296-304.
- [4] Ida, T., K. Murakami, and M. Tanaka (2014) "A Stated Preference Analysis of Smart Meters, Photovoltaic Generation, and Electric Vehicles in Japan: Implications for Penetration and GHG Reduction," *Energy Research & Social Science* vol.2: 75-89.
- [5] Tanaka, T., T. Ida, K. Murakami, and L. Friedman (2014) "Consumers' Willingness To Pay for Alternative Fuel Vehicles: A Comparative Analysis between US and Japan," *Transportation Research A* vol.70: 194-209 .
- [6] Ida, T., K. Takemura, and M. Sato (2014) "Inner Conflict between Nuclear Power Generation and Electricity Rates: A Japanese Case Study," *Energy Economics* vol.48: 61-69.
- [7] Murakami, K., T. Ida, M. Tanaka, and L. Friedman (2015) "Consumers' Willingness to Pay for Renewable and Nuclear Energy: A Comparative Analysis between the US and Japan," *Energy Economics* vol. 50: 178-189.
- [8] Ida, T., K. Murakami, and M. Tanaka (2016) "Electricity Demand Response in Japan: Experimental Evidence from a Residential Photovoltaic Generation System," *Economics of Energy & Environmental Policy* vol. 5.1: 73-88.

[学会発表](計 0件)

[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

<http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/smartgrid/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

依田高典 (TAKANORI IDA)

京都大学・経済学研究科・教授

研究者番号：60278794

##### (2) 研究分担者

該当者なし

##### (3) 連携研究者

田中誠 (TANAKA MAKOTO)

政策研究大学院大学・政策研究科・教授

研究者番号：10377137

村上佳世 (MURAKAMI KAYO)

東京都市大学・総合研究所・研究員

研究者番号：40572269