

# 多様な料金制度の検討

## —電力消費データ分析の経緯と事例の検証—

研究分担者 穴山悌三 公立大学法人長野県立大学・教授

森由美子 東海大学・教授

### <本稿の構成>

1. 本稿の位置付け
2. 電力消費データ分析の経緯
3. 近年の主たる電力消費データ分析の動向
4. 近年のわが国における具体的な分析事例
5. 水道料金制度検討を念頭に置く観点からの留意点
6. 本稿の成果と課題
7. 主要文献リスト

### 1. 本稿の位置付け

本稿は、現在に至る電力消費データ分析の動向と研究事例を調査し、検証を加え、ひいては水使用量データを活用した新たな料金制度の検討に役立てることを狙いとした研究成果をディスカッションペーパーとしてとりまとめたものである。

### 2. 電力消費データ分析の経緯

#### (1) 歴史的経緯

経済学における市場分析においては、一般に需要曲線や需要の価格弾力性の推計を行い、当該市場の態様を明らかにすることが試みられる。電気は特殊な財であり<sup>1</sup>、必需的な性格も有することから、非弾力的な財（価格が変化しても需要の変化量が相対的に小さい財）であるということが共通理解となる一方で、その確実な供給には中長期的な観点からの設備投資を必要とすることから、伝統的な料金理論における「ピーク・ロード・プライシング（peak-load pricing）」の研究が多く重ねられ、その過程において需要の価格弾力性が推計されてき

---

<sup>1</sup> 穴山[2005]は、電気という財の特質として、①非貯蔵性、②同質性、③共通必需性、④ネットワークシステム供給、⑤装置型産業、⑥サービス製品を挙げている。

た。たとえば Matsukawa[2001]は、1993年の日本の東北4県の家計の時間帯別需要データから需要関数を推計して、時間帯別電灯料金選択家計の価格弾力性（絶対値表示）を、ピーク時：0.70～0.78、オフピーク時：0.51～0.72と推計している。

また、特に1980年代以降のわが国においては、夏季平日のピーク時間帯の需要の尖鋭化が電力設備投資額の増嵩を招き、電気事業者の財務体質悪化が深刻な経営問題となっていた。当時の円高差益還元を求める社会的要請や、広く規制改革を求める声が高まっていたことなどもあって、電気事業制度改革の検討が進んでいたが、併せて先鋭化するピーク需要をいかに平準化するかが社会的にも重要な問題であった。このための試みの一環として、前述のピークロード料金の在り方が検討され、たとえば1996年から1999年にかけて福岡で実施された夏季平日のピーク時間帯の電力消費量削減に応じて協力金を支払う実験では、電力需要の協力金単価に関する弾力性（絶対値表示）は0.06～0.14（松川[2003]）であった。

このような「需要家側に何らかの働きかけを行い、電力の使い方を社会的に望ましい形に誘導すること」を「デマンドサイド・マネジメント（Demand-Side Management: DSM）」といい、DSMは電力負荷を直接的ないし間接的に制御すること（ロード・マネジメント）を試みた米国における統合資源計画（Integrated Resource Planning）の流れも汲んでいる。DSMのうち特に「時間的に変化する電力価格、もしくは卸電力価格高騰時や需給逼迫時に電力使用を減らすように設計された報酬に反応して、最終需要家自らが通常の電力消費パターンから電力使用を変化させること」（浅野・永田[2015]）は「デマンド・レスポンス（Demand Response: DR）」と呼ばれる<sup>2</sup>。DRの分類として、後述する価格が変化するように設計された料金体系を「価格ベースのプログラム（Price-based Programs）」と呼び、計器や電気機器の直接制御（Direct Load Control: DLC）や電力負荷を遮断ないし削減するプログラム（Interruptible/Curtailable Load Programs）などのように、需要削減に対するインセンティブの支払を行う「誘因ベースのプログラム（Incentive-based Programs）」と区別することができる。

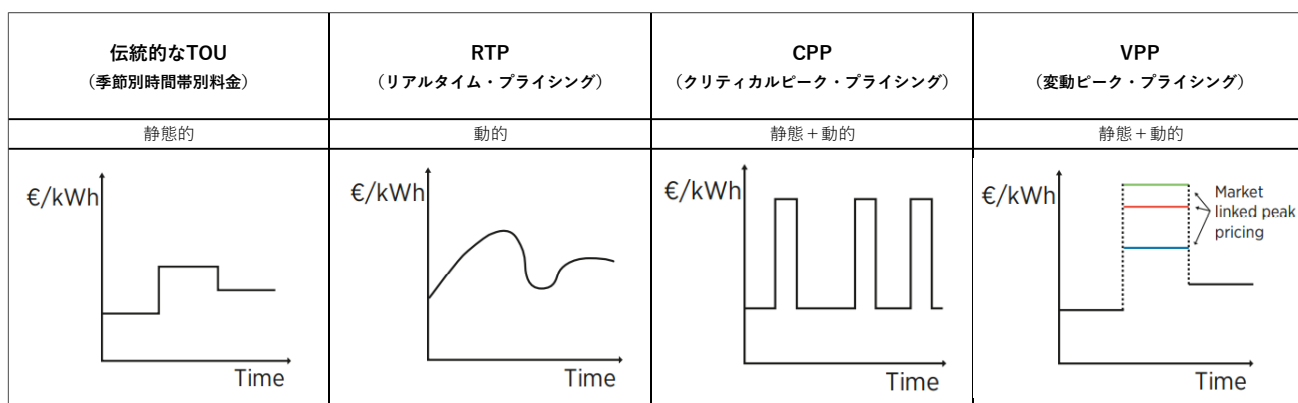
どのタイプのDRであっても基本的な手法として家庭用需要家向けの情報提供が行われ、いわゆる「見える化」などが行われる。わが国ではHEMS（Home Energy Management System）と呼ばれる家庭における機器制御システムが開発されてきたが、需要家に対して家

---

<sup>2</sup> 米国連邦規制当局（Federal Energy Regulatory Commission: FERC）のDRの定義は「時間経過に伴う電力価格の変化、または卸売市場価格が高いときやシステムの信頼性が危険にさらされているときに電力使用量を減らすように設計されたインセンティブ支払いに応じた、最終消費者による通常の消費パターンからの電力使用量の変化」である。他に米国エネルギー省（DOE）や研究論文等にそれぞれ定義がある。

庭内の情報端末や表示器を介して使用情報を伝え、電力消費量の変化を促す試みは、NEDOプロジェクトなどでも実施されてきた。また、電力料金を随時変化させて電力消費量の変化を促す「ダイナミック・プライシング (Dynamic Pricing: DP)」については、主として計量上の課題などから主として産業用・業務用等の大口需要家向けの実験として、1980年代以降に国内外で行われてきた経緯がある。

DRについて、大口需要家のみならず家庭用需要家が対象となる検討が本格的に進んだのは、電気事業制度改革を通じて市場取引の依存度を高めていた米国のカリフォルニア州における2000～2001年の深刻な電力危機や2003年の北米大停電が発生した2000年代以降のことである。電力危機は電力市場の不完全性とピークロード・マネジメントの重要性を改めて明確化し、これを踏まえたDR、たとえば従前からの季節別時間帯別料金制度 (Time-of-Use: TOU) に加え、卸電力市場価格を柔軟に小売価格へ連動させるリアルタイム・プライシング (Real Time Pricing: RTP) や、電力需給のタイト化が予想される緊急ピーク時に特別な価格を提示するクリティカルピーク・プライシング (Critical Peak Pricing: CPP)<sup>3</sup>、市場価格に連動してピーク時の料金を変動させる変動ピーク・プライシング (Variable Peak Pricing: VPP) などに関する研究の蓄積や制度面への応用が従前以上に盛んに行われるようになった。



(出所) IRENA[2019]等を参考に作成。図部分は同Table1から引用。

(図1) DR料金体系の例

また情報通信技術の発展と再生可能エネルギーを含む分散型電源の相対的な効率性向上

<sup>3</sup> DPは課金水準を変化させることによって消費行動変化を促すが、他方で報奨(リベートなど)のようにインセンティブを付与する方式もあり、たとえばCPPに対応する方式はクリティカル・ピーク・リベート(Critical Peak Rebate: CPR)と呼ばれる。これらは理論的には同等の効果を持つことが予想されるが、実証実験においては、後述するように行動経済学的なバイアス等の存在によって実質的な効果が異なることが多い。

等を背景として、電力系統を地域的に最適制御するスマートグリッド（Smart Grid）と呼ばれる概念が普及し<sup>4</sup>、その一つの要素としてスマートメーターを活用した多種多様な DR が検討されるに至った。スマートグリッドのシステムを構成する要素としては、スマートメーターの他に、配電設備網(distribution grids)に接続される分散型電源(distributed generation: DG)、マイクログリッド(microgrids: MGs)、蓄電システム(energy storage systems: ESSs)、電気自動車(electric vehicles: EVs)などがあり、分散型エネルギー資源(distributed energy resources: DERs)と総称される。DRもその一つの資源と見なされる(DR resources)。

スマートメーター<sup>5</sup>については、年間50～100時間程度の夏季ピーク需要の抑制を主に目的としたカリフォルニア州での導入以外に、2000年代初めからイタリア、スウェーデン、オランダ、カナダ、オーストラリアにおいても導入が進みつつあったが、2009年のEU指令で「2020年までに少なくとも80%の需要家にスマートメーターを導入(to be equipped with intelligent metering systems)」とされてから導入が加速し、現在は2020～2025年に殆どの加盟国で目標達成すると見込まれている<sup>6</sup>。スマートメーター導入の費用対効果の分析では、標準的なメーター費用の回避や検針費用の節減以上に電力費用の節減に資することが見込まれている<sup>7</sup>。

他方、わが国でも、電気事業制度改革における小売自由化範囲拡大の検討にあたり、家庭用需要家の供給事業者変更(スイッチング)にはスマートメーターの普及拡大が有効ではないかとの問題意識があり各一般電気事業者は原則全家庭に対する導入計画を立案していた。また変動性電源である再生可能エネルギーを導入するための課題解決を図る必要もあって、次世代型のスマートコミュニティ<sup>8</sup>に対する関心も高まっていたことから、2009年11月に

---

<sup>4</sup> 依田・田中・伊藤[2017]は、その契機を2009年の米国オバマ大統領就任後の景気対策としてグリーン・ニューディール政策が打ち出され、スマートグリッド関連予算が多数の実証事業を可能にしたことを挙げている。

<sup>5</sup> スマートメーターの「スマート」は、“Advanced metering infrastructure (AMI)”とも称される。

<sup>6</sup> smartEn[2020]によれば、欧州10か国(フランス、フィンランド、ドイツ、ギリシャ、アイルランド、イタリア、ルーマニア、スロベニア、スペイン、英国)のうち7か国でスマートメーター導入済みであり、イタリアとスロベニアも2025年までには全戸導入予定で、ドイツのみ今後8年で大口需要家とプロシューマー(太陽光発電設置者等)へのスマートメーター導入と他の消費者へのデジタル・メーター(後日スマートメーターにアップデート可能なもの)を導入するとしている。ただしこれらのスマートメーターがエネルギー・マネジメント・システムやスマートグリッドと相互接続可能なのは、まだフランス、フィンランド、イタリア、英国の4か国にとどまっている。

<sup>7</sup> たとえばTorriti[2020]ではドイツの試算結果としてその効果がメーター1個あたり年間240ユーロに達すると紹介している。

<sup>8</sup> スマートコミュニティという用語は、わが国の2014年4月閣議決定のエネルギー基本計画において

は次世代エネルギー・社会システム実証事業が立ち上がり、この事業の一環として、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市の4地域でDRを含むフィールド実験が設計され、2011～2014年度にDRの経済効果が測定された。なお、このように2011年3月の東日本大震災とこれに伴う原子力発電所事故後の需給逼迫の経験前からDRの活用に関する問題意識と検討は継続して存在していたが、震災後の社会的認知は大きく高まっている(4地域実証結果をまとめた論文・著作として依田・田中・伊藤[2015]やMatsukawa[2016]などがある)。

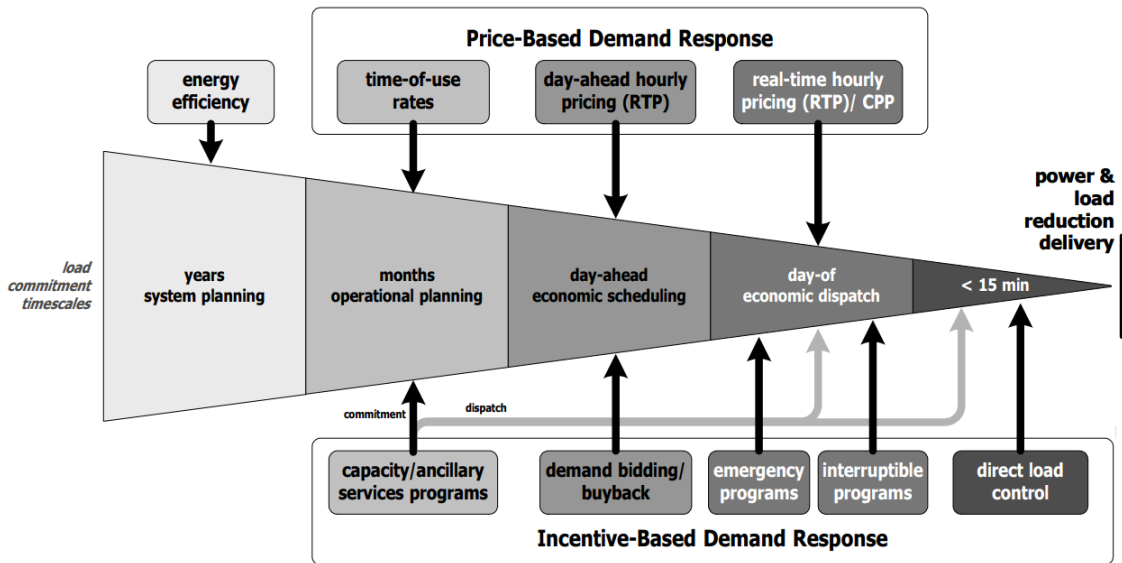
なおDRの効果は、狭義には電力消費量の抑制もしくはシフトを指すが、電気という財の特質に即して時間軸の異なる効果を有する。すなわち、事故発生時の対応のための予備力対応(Contingency)、風力や太陽光等の変動性電源への柔軟な対応(Flexibility)、中長期的な電源代替としての容量面での対応(Capacity)である(Olsen, et al.[2013]、Lee et al. [2016])。品質維持のための系統安定機能はアンシラリー・サービス(Ancillary Service: AS)と呼ばれ、電力市場において重要な役割を果たしているが、電力におけるDR分析を論じる際は、これら容量市場やAS市場との関係についても念頭に置く必要がある(Du, et al.[2019], Ch.1 他を参照)。ただし電力品質の維持を目的とする場合、価格ベースのDRでは応答が遅れるため有効に機能し得ないのではないかと指摘がされており、効率的なエネルギー・マネジメント・システム(EMS)の有無がポイントとなる(Joskow and Wolfram[2012])。

DRは需要家が価格やインセンティブに反応して需要を変動させることから最終小売市場での需要家行動を指す場合が多いが、たとえば米国のPJMやMISO(Midcontinent Independent System Operator)の独立系統運用者(ISO)が管轄する地域の電力市場では、卸市場等でDRが行われている(Dahlke and Prorok[2019]、Hale et al.[2018])。この場合、最適化問題は需要家の費用節減に止まらず、系統全体での環境負荷や経済性を考慮した予備力確保費用の最小化等がターゲットとなり、別途その計算が行われる(Shehata[2019]など)。

以上のDRを、実際に電力が消費される実需要時に至るまでのタイムラインに並べると、次頁図2のようになり、品質維持のための電力系統運用上、実需の直前になるほど迅速で確実なDRコントロールが必要になる。

---

「再生可能エネルギーやコージェネレーション等の分散型エネルギーを用いつつ、ITや蓄電池等の技術を活用したエネルギー・マネジメント・システムを通じて、分散型エネルギーシステムにおけるエネルギー需給を総合的に管理し、エネルギーの利活用を最適化するとともに、高齢者の見守りなど他の生活支援サービスも取り込んだ新たな社会システムを構築したもの」と定義されている。



(出所) U.S. Department of Energy [2006], Fig.2-3, p.15.

(図2) 実需要までの DR 手段

## (2) DR に関する主な実証の成果 (日本の4地域実証)

わが国の代表的な DR 実証である 2010 年代前半の 4 地域実証の成果を確認しておく<sup>9</sup>。4 地域で実証した DR の概要は図3の通りである。

		制御手法		
		電気料金の表示	電気料金の表示 + リコメド (省エネコンサル)	電気料金の表示 + 自動制御
料金メニューによる効果	TOU (※1)	けいはんな	けいはんな <省エネコンサル>	横浜 <エアコン>
	CPP (※2)	北九州 <料金変動> その他3地域 <ポイント与奪>	豊田 <Webポータル、スマートフォン、フォトフレーム で節電行動アドバイス> けいはんな <省エネコンサル>	横浜 <エアコン> 豊田 <エアコン、照明、TV>
	RTP (※3)	豊田 <Webポータル、スマートフォン、 フォトフレームで地域内ランキング、 電気料金等表示>	豊田 <Webポータル、スマートフォン、フォトフレーム で節電行動アドバイス>	豊田 <蓄電池、PHV>

(※1) TOU(Time of Use) : 時間帯別料金 (時間帯に応じて異なる料金を課すもの)

(※2) CPP(Critical Peak Pricing) : ピーク別料金 (需給が逼迫しそうな場合に、事前通知をした上で変動された高い料金を課すもの)

(※3) RTP(Real Time Pricing) : リアルタイム料金 (需給バランスに刻一刻と対応して料金が変動するもの)

(出所) 資源エネルギー庁省エネルギー新エネルギー部[2016]

(図3) 4 地域実証における DR の概要

<sup>9</sup> 実証結果については、地域ごとにいくつか論文が存在する。たとえば Matsukawa[2016]は、けいはんな学研都市の実証結果を詳細に扱っており、依田・田中・伊藤[2017]は、北九州市、けいはんな学研都市、横浜市の3地域を総合的に論じている。

北九州市のマンション住民 180 世帯を対象にした実験では、4 段階の CPP (kWh 単価をランダムに 50 円、75 円、100 円、150 円にする) を発動し、既存の TOU の昼間料金水準の 23.4 円/kWh よりも遥かに高い水準をつける。実験協力世帯は宅内表示 (in-home displays: IHDs) で 30 分ごとの消費量を確認でき、DR 発動時には IHDs での表示と共に前日夕と当日朝に電子メールで通知が行われた。実験は 2012 年夏、同冬、2013 年夏と実施され、2012 年夏には各 CPP でそれぞれ節電率は 9.0%, 9.6%, 12.6%, 13.1%と金額が増すほど節電行動が観察されたが、2012 年冬には各 10.2%, 10.7%, 9.0%, 12.0%と CPP 水準による行動差はあまり認められなくなり、2013 年夏も各 11.1%, 10.1%, 9.7%, 10.1%と特に高金額帯において前年からの効果の低下がみられる結果となった。この結果は、DR における電力消費データ分析を現実の政策適用に応用するに際しては、行動経済学的な要素を加味して考慮する必要があることを示唆している。

けいはんな学研都市では、実験協力世帯 691 に IHDs を貸与し、うち 154 世帯には節電要請 (Conservation Requests: CRs)、384 世帯には CPP の DR を実施した。DR 発動日には、前者には IHDs、パソコン、携帯電話で閲覧可能な道義的勧告 (Moral Suasion) を含むメッセージが送られ、後者には通常 25 円/kWh の料金単価が 3 段階の CPP (kWh 単価をランダムに 65 円、85 円、105 円にする) を発動した。2012 年夏の節電率は、CRs が平均 3.1%であったのに対して、CPP は各 15.1%, 16.7%, 18.2%の効果があった。同冬の節電率は、CRs が 3.2%、CPP は各 16.3%, 16.4%, 18.9%であった。依田・田中・伊藤[2017]の推計モデルによればこれらの価格弾力性は 0.1 から 0.2 に相当する。また同論文は、この実証の節電要請や CPP 発動のサイクルを観察することで、DR 発動が継続する場合の順化 (繰り返しの刺激に対する反応の低下) や、節電行動の定着化 (習慣形成) の効果についても検証しており、人間の内的動機に訴える節電要請の効果には持続性がなく、外的動機に訴える DP の効果は実験期間中持続して有効であり、また後者については省エネ行動の定着もみられたと論じている。他方 Matsukawa[2016]はこの実証結果に対して上記と異なるモデルを適用することで自己価格弾力性 (絶対値表示) が 0.157 から 0.389 の範囲にあることを示した。

横浜市では、IHDs を設置した 2153 の実験協力世帯をランダムに 4 グループに分けた。①CPP への加入を選択 (opt in) できるグループ、②前年度の電力消費量に基づいて CPP に加入していたらいくら電気代が得ないし損になったかという機会費用 (shadow bill) の提示を受けて翌年夏の CPP 加入を選択できるグループ、③機会費用の呈示に加えて翌年夏の CPP 加入に 6000 円のキャッシュ・インセンティブを与える約束で翌年夏の CPP 加入を選択できるグループ、そして④コントロール・グループである。CPP は発動日の 13 時~16 時の料金 kWh 単価を 100 円とし、発動日以外の同時間帯は 45 円、それ以外は 21 円の TOU となる。コントロール・グループと CPP 加入を選択しない場合は一律 26 円の適用となる。

結果としての翌年夏の CPP 加入率は、①単純な選択制 16.0%、②機会費用の呈示 30.8%、③機会費用の呈示+インセンティブ付与 47.5%だった。自らの意思で CPP の選択加入をした世帯の 2014 年夏の節電効果は、CPP と TOU の併用のケースで、①22.0%、②9.0%、③13.2%であり、選択加入しなかつたコントロール・グループの効果は、①3.7%、②2.9%、③6.6%となる。この結果は、仮に加入率を高める目的での施策は最終的な目的の達成に必ずしも有効とは限らないことを示唆している。

豊田市の実証はトヨタが中心となってエネルギー情報マネジメントシステム (EDMS) の開発研究の一環として行われており、純粹な DR 結果は公表ベースでは認められなかった。2011 年度から 5 年間にわたり継続して実施した行動誘発として、DR に伴うポイント・インセンティブの付与、非金銭的インセンティブとして EDMS のポータルサイト、コミュニティ内のランキング、掲示板、地域情報配信等のサービスを提供することで、生活者の意識変革・行動変化を促すこと、そしてリコメンド(行動支援)や機器の間接制御が実施された。実証結果の詳細は確認できないが、2011 年度のポイント・インセンティブによる CO<sub>2</sub>削減効果は 27.5%であったと実証事業成果報告に記されている。

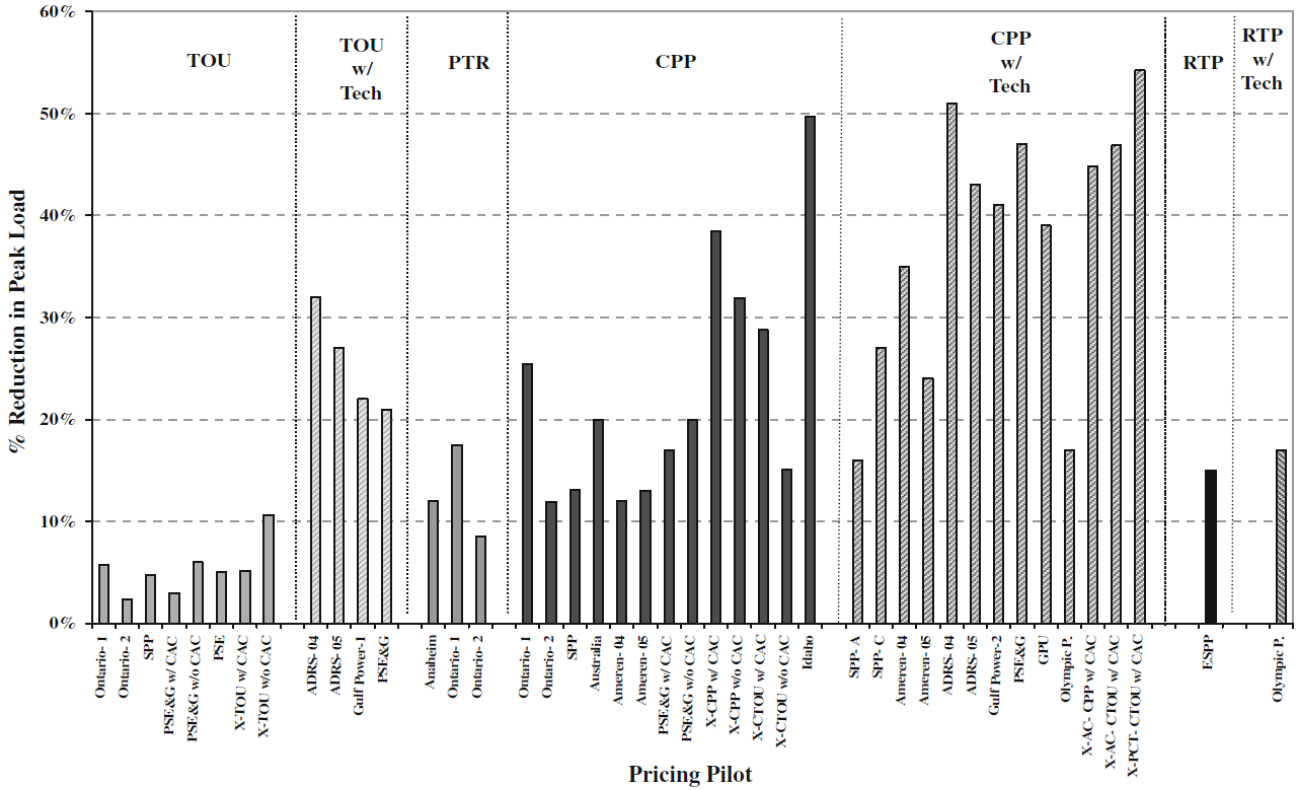
これら 4 地域実証結果は「約 2 割のピークカットが継続的に可能であること、CPP の価格を高くした場合でも、その効果は飛躍的に伸びるわけではないことを確認」と総括され、また併せて「①電気料金負担が増加する可能性、②オフピーク時間帯の安く受ける割引メリットよりもピーク時間帯に電気料金が大幅に割高となるデメリットを重視する、③需要の大きい時間帯に電気料金を引き上げるのはフェアではない等の課題があり、CPP の普及には更なる取組が必要と考えられる」としている(資源エネルギー庁省エネ・新エネ部[2016])。

### (3) DR に関する主な実証の成果 (国外実証)

前述の通り、米国では DR のフィールド実験に対する予算措置が取られたことから多くの実証実験が行われたが、依田・田中・伊藤[2017]はその殆どが RCT (無作為比較対照法)に基づいていないとして結果の信頼性に疑問を呈する。また 2000 年以降に米国で実施された 15 の実証をサーベイした論文(Faruqui and Sergici [2010])と、米国エネルギー省(DOE)の支援を受けて実施された各種の消費者行動研究(Consumer Behavior Study: CBS)の成果報告(Cappers, et al. [2015])を紹介している。

Faruqui and Sergici [2010]は、15 の事例を対象とする研究成果から、DR の反応程度は価格上昇の度合い、集中式空調の有無、遠隔からプログラムで温度調整可能なエアコンや機器管理システムの活用などによること等を明らかにし、ピーク需要の削減率として、TOU は 3~6%、CPP は 13~20%、そして削減に資する技術を伴って CPP を用いれば 27~44%の削減が可能であると整理した(図 4)。

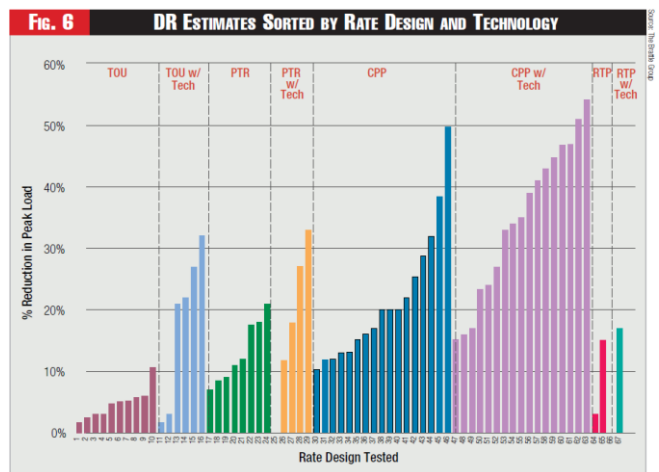
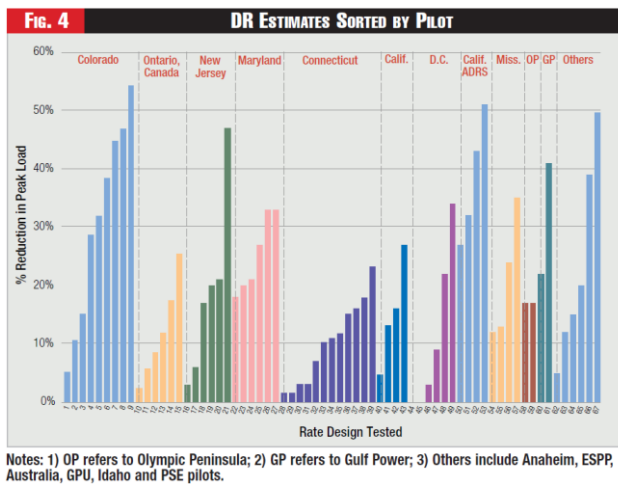




(出所) Faruqui and Sergici [2010], p.215, Fig.1

(図4) 米国等の 15 実証 (1996~2007 年実施) における DR 効果

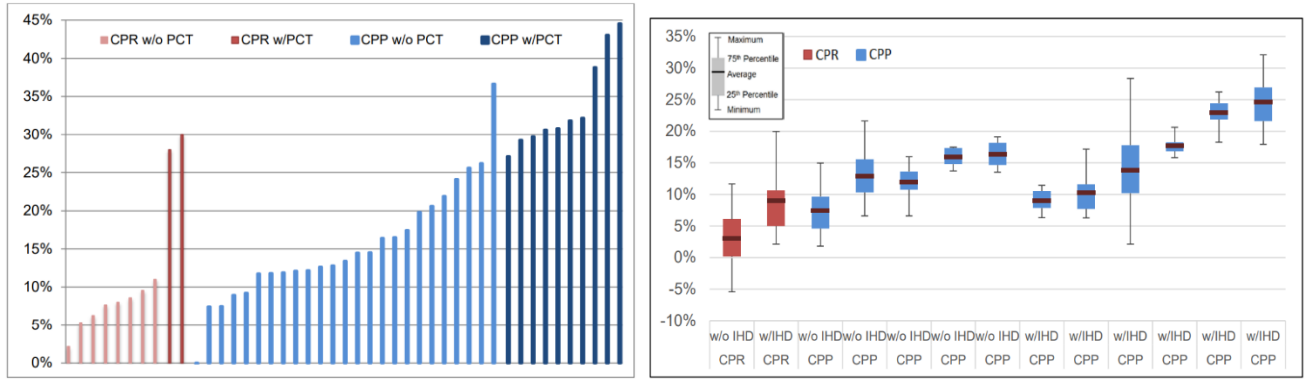
また Faruqui, Hledik, and Sergici [2010]は、米国各地で実施された 67 実証の DR の削減効果が 5%未満から 50%超まで幅広く分布することを踏まえ、実施州による違い (地理的条 件の差異) や (図5左)、料金制度のタイプと支援技術の有無 (図5右) によって、削減効 果が変わることを示している。



(出所) Faruqui, A. et al. [2010], pp.34-35, Fig.4 & 6.

(図5) 米国の 67 実証における DR 効果 (地理的条 件、料金制度のタイプと支援技術の有無)

Cappers, et al. [2015] は、米国の 10 事業者が実施した 11 実証をサーベイし、CPP によるピーク需要の削減率が平均 21%であるのに対してリベートを用いる CPR は平均 11%に留まること、遠隔制御のエアコン (Programmable Communicating Thermostats: PCT) を活用する場合に削減効果が大きく (図 6 左)、宅内表示がない場合でも一定の削減効果があること (図 6 右) を確認した。



(出所) Cappers, et al. [2015], pp.38-39 Fig.10 & 11.

(図 6) 米国の 11 実証における DR 効果 (PCT・IHD の有無と CPP/CPR)

### 3. 近年の主たる電力消費データ分析の動向

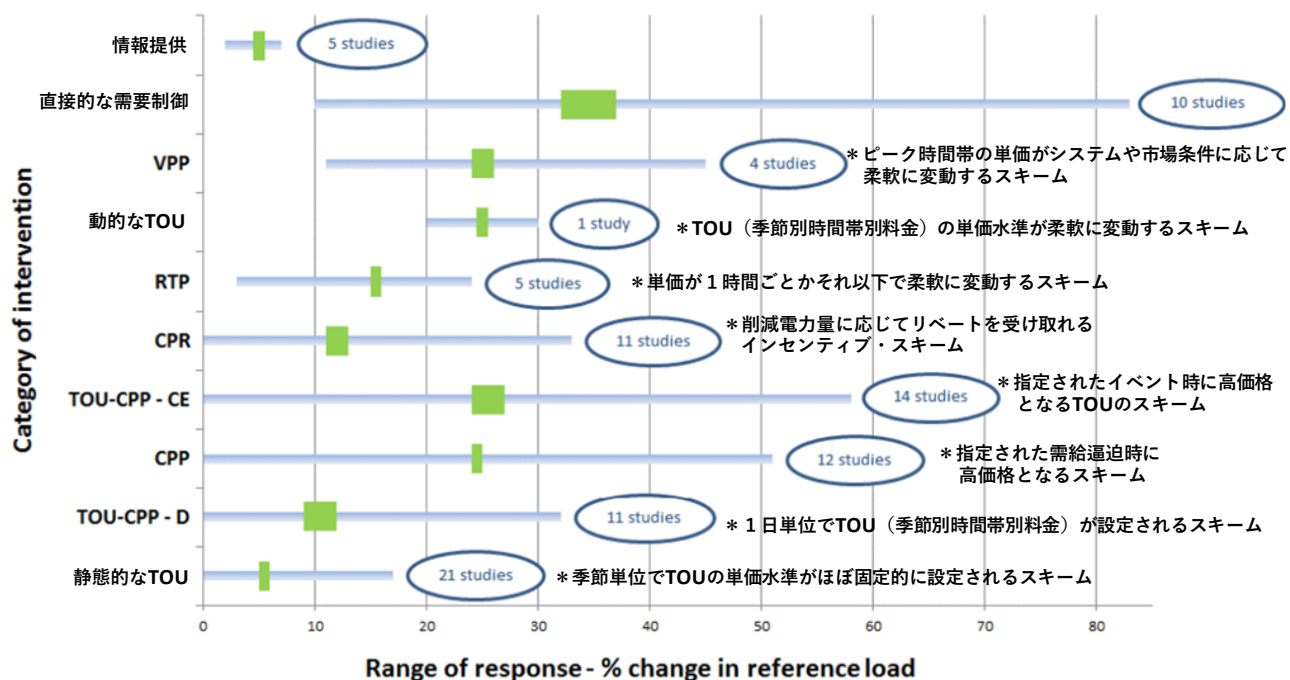
以上、電力消費データ分析の経緯と主な研究成果の蓄積について概観してきたが、近年における分析動向と方向性について整理しておく。DR を政策として実装・展開する場合にその効果を左右するのは、①消費者の DR プログラムへの参加率、②参加者の行動変容 (需要応答)、③その行動変容の持続程度、である (米国 EPRI[2012]にいうところの participation, performance, and persistence)。

まずプログラムへの参加率については、Parrish, et al. [2020]のサーベイによって近年の 29 プログラム、35 の DR メニューについての選択加入 (opt-in) と選択退出 (opt-out) の参加率が確認できる。プログラムへの参加率自体は 2%~98%と様々であり、複数の DR メニューオプションを提示したプログラムの実例 (Potter, et al. [2014], Blumsack and Hines[2013]) からは、DR メニューの種類による参加率の差は認められず、むしろ参加を促すための方策 (個別説明、信頼できる機関の活用、ローカル・ミーティングや地域コミュニティの取組みなど) の重要性が示唆されている。Parrish, et al. [2020] は選択加入方式を採用した約半数の事例でターゲットとする人口の 10%以下しか参加しなかったことと共に、参加率が相対的に高い選択退出方式の場合は後述する需要応答が相対的に小さくなることを指摘している。

次にプログラム参加者の行動変容の程度については、CPP 等の金銭的インセンティブを

用いてピーク時における電力消費量の変化を促す方法については、これまでに確認した通り一定の効果を持ち、制度の設計にもよるが、およそ7~22%程度の効果を有すると期待されている (Faruqui, and Sergici [2010]など)。他方、同じ金銭的インセンティブではあるが、リベートの形で提供されると (CPR)、その効果は CPP の半分程度であることも示されている (Wolak[2011]など)。

また Parrish, et al. [2020]は近年の 52 の研究論文 (うち 40 は実証プログラム) をサーベイ<sup>10</sup>し、参照需要からの削減率を図7のようにまとめた。



(出所) Parrish, et al. [2020], Fig.4, p.9 に加筆

(図7) 52論文で報告された海外 DR プログラムでの需要応答：参照需要からの削減率

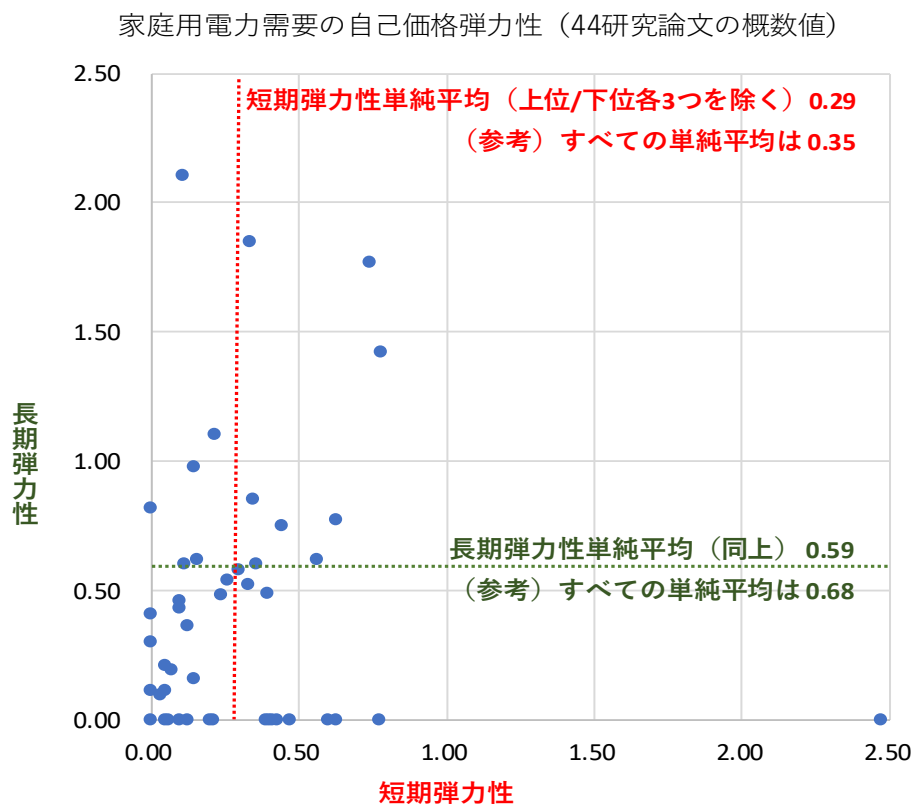
これによれば、家電機器の直接制御による場合の効果は平均的に 30~40%を大きな削減を期待でき<sup>11</sup>、他方で、単なる節電情報の提供や静態的な TOU (わが国でも伝統的に採用され

<sup>10</sup> このサーベイがカバーする DR 事例は、全体で 83 (うち 64 が試行的実証) であり、11 のインタビュー調査を含む。対象は米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、UAE、UK、その他欧州国の 18 か国で、63%が米国、30%が欧州で実施された事例である。日本を対象とする調査は含まれていない。なお、図7はこのうち需要応答の情報が得られた 52 論文を扱っており、また図中の研究論文数は複数メニューを対象を含む研究を各メニューでカウントしているため合計数は 52 にならない。

<sup>11</sup> DR はその殆どが節電行動を促す方向で設計されてきたが、近年の太陽光発電や風力発電のような変動制電源が系統内で一定以上に増大すると、供給力過大時にこれに見合う需要増が必要になる場合がある。このため、こうした状況下では DR は需要削減ではなく需要増加の効果が期待される。

てきた季節別時間帯別料金制度など) が主に 10%未満の削減効果しか期待できないのに対して、殆どの DR メニューが 10~30%の削減期待効果を示していることは、上述の既往研究の成果と概ね整合的である。機器を直接操作するような介入や、ピーク時間、需給逼迫の市場価格高騰時などに応じて柔軟に価格を変動させるダイナミックなスキームは、平均的な期待削減効果が高い。こうしたスキームの実効性を高めるポイントとして、自動化技術の水準とリアルタイムの情報、情報家電の保有等とベースとなる電力需要水準、ピークとオフピークの価格比や比較可能なインセンティブなどが指摘されるが、これらの要因がすべての期待効果差を説明できるわけではないと結論している。

家庭用電力需要の弾力性の推計は、前提となる需要関数をいかに導出するかなど、研究によって多様であるために一括して論じることは困難な面があるが、研究動向を概観する目的で敢えて個々のアプローチの違い等を捨象して、近年に至る 44 の各研究が推計した短期および長期の自己価格弾力性を図 8 にプロットした。値が上位および下位の各 3 つを除いた単純平均は、短期 0.29、長期 0.59 となり、先述の諸研究とも概ね整合的である。



\* 最大/最小値を導出する研究はその中間値をプロットし、単純平均算出にも用いている。  
短期/長期の片方のみ導出の研究は、便宜的に導出がない方の値を 0 として軸上にプロットした。

(出所) 表 1 を元に作成

(図 8) 近年に至る 44 研究論文が導出した家庭用電力需要の自己価格弾力性

表1：家庭用電力需要の自己価格弾力性（少数第2位以下四捨五入、絶対値表示）

研究論文	国	短期	長期
Aalami et al. [2010]	イラン	0.10	—
Alberini et al. [2011]	米国	0.08-0.15	0.45-0.75
AL-Faris [2002]	GCC諸国	0.04-0.18	0.82-3.39
Arthur et al. [2012]	モザンビーク	0.60	—
Atakhanova et al. [2007]	カザフスタン	0.22	1.10
Athukorala et al. [2010]	スリランカ	0.16	0.62
Blazquez et al. [2013]	スペイン	0.07	0.19
Boogen et al. [2014]	スイス	0.54-0.59	0.56-0.68
Boogen et al. [2017]	スイス	0.30	0.58
Boonekamp [2007]	オランダ	—	0.11
Boonekamp [2017]	オランダ	0.12	—
Burke et al. [2018]	米国	0.06-0.24	0.95-1.01
Burns et al. [2020]	オーストラリア	0.20	—
Cambell [2018]	ジャマイカ	—	0.82
Chindakar et al. [2019]	インド	0.39	—
Espey et al. [2014]	米国	0.35	0.85
Filippini et al. [2004]	インド	0.29-0.51	—
Filippini [2011]	スイス	0.65-0.84	1.27-2.27
Gautam et al. [2018]	米国	0.05	0.11
Halicioglu [2007]	トルコ	0.33	0.52
Holtedahl et al. [2004]	台湾	0.15	0.16
Hondroyannis [2004]	ギリシャ	—	0.41
Ishaque [2018]	パキスタン	0.10	0.46
Kwon et al. [2016]	韓国	0.05	0.21
Labandera et al. [2017]	諸国	0.13	0.37
Lijesen [2007]	オランダ	0.00	—
Loi et al. [2018]	シンガポール	0.05-0.37	—
Matar [2018]	サウジアラビア	0.05	—
Narayan et al. [2005]	オーストラリア	0.26	0.54
Nasir et al. [2008]	パキスタン	0.63	0.77
Okajima et al. [2013]	日本	0.40	0.49
Rai et al. [2014]	オーストラリア	0.45	0.75
Schulte [2017]	ドイツ	0.43	—
Shaik et al. [2018]	米国	0.41	—
Shi et al. [2012]	中国	2.48	—
Silk et al. [1997]	米国	0.24	0.48
Silva et al. [2012]	ポルトガル都市部	0.59-0.67	—
Silva et al. [2012]	ポルトガル地方部	0.65-0.90	—
Tambe et al. [2014]	インド	0.47	—
Vita et al. [2006]	ナンビア	—	0.30
Volland et al. [2019]	スイス	0.34	1.85
Wolak [2011]	英国	RTP:0.03, CPP:0.09	—
Woo et al. [2018]	米国	0.04	0.10
Yin et al. [2016]	中国都市部	0.36	0.60
Yin et al. [2016]	中国地方部	0.78	1.42
Zachariadis et al. [2007]	キプロス	0.10	0.43

（出所）Andruszkiewicz et al. [2019], Yin et al. [2016] を参考に作成した。

これまでに実施された実証においては、こうした金銭的インセンティブの付与のみならず、非金銭的なインセンティブ付与についても検証されてきた。その一つが宅内表示 (IHDs) による情報提供であり、市場の失敗の要素である情報の非対称性を緩和する機能が基本的に与えられる。たとえば、現在の価格表示機能、過去の自身の使用量との比較データ等は、本来情報が完全に流通・蓄積されていれば知ることができる情報へのアクセスを容易にするという意味において、経済的な分析において仮定される「合理的な個人」に近付くための方法である。

ただし、この IHDs への表示や、あるいはスマートフォンや PC に表示されるメールや SNS のメッセージなどを介して、単なる情報の非対称性の解消以上の情報が積極的に提供される場合は、最終消費者に対するより意図的・積極的な介入が行われたと解することができる。これには、既に述べたような説得的な節電要請 (Conservation Requests: CRs) ないし道義的勧告 (Moral Suasion) や、社会比較 (Social Comparison) などが含まれて、主たるアプローチとしては行動経済学でいう「ナッジ (Nudge)」の検証になる。近年はこうしたリサーチ・クエスチョンに係る研究が増えており、その成果が蓄積されている (たとえば Jessoe and Rapson [2014], Ito, Ida, and Tanaka [2018], Gillan [2017], Allcott and Kessler [2019], Knittel and Stolper [2019] など)。一例として、メッセージのフレーミング効果についての研究があり (Nab, Jansma, and Gosselt [2020] など)、温暖化対策等の社会的意義やアウトカム、参照点 (point of reference) などの設計によってその介入効果は変化し得ることから、制度面での実装に当たってはこれらの知見も活用されることになる。

また、こうした行動の限定合理性や迅速な反応の難しさを前提に、データを用いたクラスタリングを実施してより効果的なプログラムとするための参加者のターゲティングや、参加者がプログラム等を活用して自動的に電力消費量を変化させる具体的な方法の在り方に関する研究なども進んでいる (Todd-Blick, et al. [2020], Patel, et al. [2016] など)。家庭の最適行動のアルゴリズムとしてエネルギー費用最小化を目指す様々なモデルが採用されるが、スマートメーターの設置に加えていわゆるスマート家電や蓄電池システム、電力取引などが可能なスマートグリッドの実装をふまえた各種予測や最適化のための研究も進んでいる (モデル計算に関する研究蓄積のサーベイとして、Alam, et al. [2016] や Jordehi [2019] がある)。

さらに、こうした自動応答等の進化と普及が進めば、DR は電力の実需給市場のみならず、アンシラリー・サービス市場での活用等も進むことが期待されるため、再生可能エネルギーを大量導入するための柔軟性 (flexibility) の研究の文脈でも成果が蓄積されている。

ただし、これらの DR が実装に至れば、各家計における影響が生じることになる。これまでの実証実験レベルでは仮に CPP を採用する場合も原則的に収支の中立性を前提とした設計が行われるのが一般的であるが、各家計の所得やタイプによって異なる影響が予想される

ため、こうした公正上の問題を扱う研究も行われている（Torriti and Yunusov [2020], Cappers, et al. [2018]など）。

最後に、行動変容の持続の観点からは、わが国の北九州市の実証結果でも述べた通り、プログラムを継続した場合の効果の低下が観察されており、グローバルな実証結果においても反応疲れ（response fatigue）の問題として認識されている。たとえば、Allcott [2011]は、Opower 社が用いた社会的比較のナッジ効果が短期的に 11～20%の料金上昇に匹敵することを明らかにしたが、Allcott and Roger [2014] はそのプログラムの効果の持続性を分析し、限界効果が習慣化によって低下することを示した。しかし他方で、長期的には習慣や技術がある種の資本として蓄積されることで長期的効果を過小評価すべきではないとの見方もある。行動変容の持続に関する実態はまだ解明途上であるが、このほか特に近年では SDGs などの社会的問題意識の高まりが行動変容の常態化を促す可能性もあり、また上記の行動経済学的な成果の活用も期待されるところである。

#### 4. 近年のわが国における具体的な分析事例

ここでは近年のわが国の電力産業についての実証を扱った分析事例を紹介する。以下、Kim, Shimada, Ochi, et al.[2016]、小松、向井、西尾他 [2017]、Li, Gao, Ruan, and Ushifusa[2018]、Ida, Murakami, and Tanaka[2020]、Ida, Ushifusa, Tanaka, et al. [2020] の概要を順に述べる。

Kim, Shimada, Ochi, et al. [2016] は、2012 年以降 3 年間の沼島に居住する 50 世帯を対象に、パネルデータによる変量効果モデルで、ライフスタイル要因、ウェブサイト閲覧頻度、気象要因のコントロールが、1 時間当たりのエネルギー消費量にどのくらい影響を与えるかを検証した。結果は、実験前よりダイナミック・プライシングを導入した方が、13.8%のエネルギー消費の削減が見られることが明らかにされている。

小松、向井、西尾他[2017]は、2017 年度冬期にスマートフォンアプリを用いた家庭省エネサービスの実証研究を行い、その結果を報告している。介入効果の検証は、総合効果に関するマッチング法による検証と、レポート・アラートなどの個別効果に関する RCT による検証を行い、パネルデータ回帰分析を行っている。その結果、平均的な省エネ効果は 2.5%で、アプリ利用頻度の高いモニターは、利用頻度の少ないモニターに比べて省エネ効果が 1.6%高いこと、個別効果については、統計的に有意な結果は得られていないが、いずれの通知を行った場合も、使用料が低下することを確認している。通知によるアプリ閲覧の促進効果についても、簡便な回帰分析を実施している。レポートのみ、アラートのみ、レポートとアラートの併用の場合で、いずれも、平均閲覧率は増加傾向を示し、レポートとアラート



併用の場合において日中平均閲覧率が 3.05 向上し、統計的に有意な結果となっている。

Li, Gao, Ruan, and Ushifusa[2018]は、2017年の九州電力のウェブサイトから 500,000 のデータを収集し、とくに電気使用量の変動の大きい真夏の 8 月と真冬の 1 月について、1 日の電気量の変動を電気自動車とヒートポンプを導入することで、深夜と早朝の谷をアップさせることを試みた。電気効率を 39%、燃料電池の熱効率を 46%、慣例的な給湯器の熱効率を 85%、天然ガスとガソリンの CO<sub>2</sub> 排出要因をそれぞれ 2.29 kg/Nm<sup>3</sup>、2.32 kg/L と仮定すると、0.483 kg/kWh となった。CO<sub>2</sub> 排出要因は、九州電力から取り入れた電力として計算された。高効率の技術の容量に対しての年間の平均 CO<sub>2</sub> 排出削減は、ヒートポンプで 0.3 kg/kWh、電気自動車で 1.8 kg/kWh、燃料電池で 1.75 kg/kWh、太陽光発電 1.45 kg/kWh となった。

Ida, Murakami, and Tanaka[2020]は、2013年の夏、横浜市における太陽光発電のスマートメーター実証実験において、CPP の効果を RCT アプローチを使って、スマートメーターと HEMS を装備した 1,202 戸の家庭を対象に、選択バイアスを避けるために無作為にトリートメントとコントロール・グループを決めて、3つのグループに分けて分析を行った。コントロール・グループは、合計 353 世帯からなり、164 世帯は横浜市と定額の契約を行い、157 世帯は時間帯別料金(TOU 料金)の契約を行っている。トリートメント・グループの T1 は、合計 427 世帯であり、211 世帯は定額契約、190 世帯は TOU 料金契約を行っており、加えて、CPP0.6 ドルを受け取っている。トリートメント・グループ 2 は、422 世帯で、210 世帯は定額契約、181 世帯は TOU 料金契約を行っている。その上、CPP1 ドルを受け取っている。30 分間隔のデータで、ピークカット効果をパネルデータによる固定効果モデルで推定した。結果、CPP 料金は太陽光発電の生産消費者の 3~4%の利用削減を促し、ソーラーパネルなしの利用者はその 4 分の 1 だった。太陽光発電を利用すればするほど、ピークカットが小さくなることを導きだした。90%以上の回答者で、エアコンの利用の制限により、ピーク時間の需要を削減し、10%以下の回答者で新しいエネルギー装置を購入したことが判明した。

Ida, Ushifusa, Tanaka et al. [2020] は、4つの分析を行っているが、そのうち3つの分析について述べる。

1 つめは、2016年4月の電力市場が完全な規制緩和に入る以前の 2016年1月からの 3ヶ月の期間で、My Voice Communications Inc.という日本のリサーチ企業により地理的、性別、年齢において日本の平均的な人口を代表する 11,000 世帯として抽出された回答者を対象に、WEB ベースでの調査を実施している。このデータをもとに、ランダムロジットモデル(Random parameter logit:以下、RPL)を使い、効用関数を推計している。電力会社の選択を新規参入会社、既存の会社、料金プランを一律料金、時間帯別料金、再生可能エネルギー



導入率、原子力導入率により、月額料金が、異なるプランを1~3(1.新規事業者による定額料金で再生可能エネルギー40%、原子力エネルギー20%、2.既存の事業者による時間帯別料金、再生可能エネルギー20%、原子力エネルギー40%、3.既存の事業者による定額プランで、再生可能エネルギー10%、原子力エネルギー10%)まで提示し、それによって、効用がどの程度変化するのか、さらに、支払い意思額(Willingness to Pay: WTP)を計測した。

2つめは、2015年1月から9月に横浜市青葉区のHEMSを設置した1063世帯を対象に、30分値での電力消費データを計測した。1063世帯を介入しない531とトリートメントを施す532世帯の2つのグループに分けて実施した。結果として983世帯が参加した。プランの種類、月額電気料金を説明変数とするランダム効用モデルを最尤法により推計し、限界支払意思額を計測した。コントロール・グループの電気料金の支払い率に関する係数は、-23.91で、トリートメント・グループの係数は、-23.15となった。新規参入企業のパラメータは、コントロール・グループで-0.60で、トリートメント・グループで-0.58であった。時間帯別料金の係数は、コントロール・グループで0.25、トリートメント・グループで-0.14であった。再生可能エネルギーの係数は、コントロール・グループで0.053、トリートメント・グループで0.051、原子力発電比率は、-0.12、-0.13であった。貨幣の限界効用は、-0.0034で、トリートメント・グループで-0.0032で、限界的支払意思額は、新規参入企業については-238.04円、トリートメント・グループについては-252.98円、時間帯別料金については125.93円、トリートメント・グループでは-9.04円、再生可能エネルギー率については22.4円、23.72円、原子力エネルギー率については、-49.0696円、-56.4047円となった。

4つめは、竹中工務店と京都大学により、2014年の7月14日から8月1日までの土日祝日を除く2週間について竹中工務店の東京本店の5階と6階で、13時30分から15時30分の高い需要が見込まれる時間帯に、電力貯蓄の要求を提案する実験である。自動デマンド・レスポンスを前提に固定効果モデルで分析している。211の従業員の中で、48人はopt-inパフォーマンスインセンティブグループ(T1)、51人はopt-in固定インセンティブグループ(T2)、58人はopt-outパフォーマンスインセンティブグループ(T3)、54人はopt-out固定インセンティブグループ(T4)に割り当てられた。パフォーマンスインセンティブは、DRに参加するそれぞれの時間につき500円のコーヒークーポンで、6日間で3000円のクーポンを受け取るもので、固定インセンティブは、6日間を通してコーヒー2杯分のクーポン1000円を受け取る。結果は、ITTについて、T3が、最も削減効果が大きく、T1、T4、T2と続き、パフォーマンスインセンティブグループが固定インセンティブグループより、削減効果が高いことが導きだされている。

Gamil, Sugimura, Nakadomari, Senjyu, et al. [2020]は、沖縄において、デマンド・レスポ

ンスと海水電力システムを導入した再生可能なマイクログリッドの最適なサイズについて、混合線形プログラミング技術を利用し、4つのシナリオ（①太陽光電池 PV、水力発電、蓄電池システムの改良、②RTP、③海水発電システム、④デマンド・レスポンスなしの RTP）で、検証した。シナリオ①は、13,944 百万円の総費用と等しい需要を示した。シナリオ②は、蓄電池システムの削減がシナリオ①に比べて RTP を採用することにより -20%削減できた。シナリオ①と比べて、総費用について 130 万円の削減が出来た。シナリオ③は、蓄電池システムの数に 0 に減少させ、発生単位の数は有意に増加した。その数は、シナリオ①の 1.5 倍、化学生産物からの収入は 1 億 7805 万 4000 円に達した。

取り上げた 8 つの分析は、前節の 2016 年以前の研究の特徴でも述べられているように、①消費者の DR プログラムへの参加率、②参加者の行動変容に主眼をおいたものであると言える。また、金銭的、非金銭的インセンティブの付与による効果についての分析も見られ、再生可能エネルギーの導入に関する効果の分析が増えているという点が、特徴であると言える。さらに、スマートフォンなどのアプリを取り入れることによる行動変容の変化に関する分析が行われている点は、新しい側面である。いずれの分析も分析手法は異なり、対象地域についても都市から離島まで異なるものの、ピーク・ロード・プライシングの導入により、省エネ効果が見込まれることが確認されている。

表 2. 2016 年以降の日本の実証実験のサーベイ

	Kim, Shimada, Ochi, et al. [2016]	小松、向井、西尾他 [2017]	Li, Gao, Ruan, and Ushifusa [2018]	Ida, Murakami, and Tanaka [2020]	Ida, Ushifusa, Tanaka et al. [2020] (1)	Ida, Ushifusa, Tanaka et al. [2020] (2)	Ida, Ushifusa, Tanaka et al. [2020] (4)	Gamil, Sugimura, Nakadomari, Senjyu, et al. [2020]
対象地域	沼島に居住する 50 世帯	スマートフォンアプリ	九州電力のウェブサイトの 500,000 のデータ	横浜市スマートメーターと HEMS を装備した 1,202 戸の家庭を対象	日本の平均的な人口を代表する 11,000 世帯	横浜市青葉区の HEMS を設置した 1063 世帯	竹中工務店の東京本店の 5 階と 6 階	沖縄
分析期間	2012 年以降 3 年間	2017 年度冬期	2017 年度の 8 月、1 月	2013 年夏	2016 年 1 月からの 3 ヶ月	2015 年 1 月から 9 月	2014 年の 7 月 14 日から 8 月 1 日までの土日祝日を除く 2 週間	

<p>分析方法</p>	<p>パネルデータによる変量効果モデル</p>	<p>パネルデータ回帰分析</p>		<p>CPP の効果を RCT アプローチ 固定効果モデル</p>	<p>ランダムロジックモデル</p>	<p>プランの種類、月額電気料金を説明変数とするランダム効用モデルを最尤法により推計</p>	<p>固定効果モデル 211 の従業員の中で、48 人は opt-in パフォーマンスインセンティブグループ (T1)、51 人は opt-in 固定インセンティブグループ (T2)、58 人は opt-out パフォーマンスインセンティブグループ (T3)、54 人は opt-out 固定インセンティブグループ (T4) に割り当てられた。</p>	<p>混合線形プログラミング技術</p>
<p>分析内容</p>	<p>ライフスタイル要因、ウェブサイト閲覧頻度、気象要因のコントロールが、1 時間当たりのエネルギー消費量に与える影響</p>	<p>家庭省エネルギーサービスの実証研究 総合効果に関するマッチング法による検証と、レポート・アラートなどの個別効果に関する RCT による検証</p>	<p>電気量の変動を電気自動車とヒートポンプの導入による深夜と早朝の谷をアッブさせること。</p>	<p>トリートメントとコントロール・グループを、3 つのグループに分けて分析</p>	<p>1.新規事業者による定額料金で再生可能エネルギー40%、原子力エネルギー20%、2.既存の事業者による時間帯別料金、再生可能エネルギー20%、原子力エネルギー40%、3.既存の事業者による定額プランで、再生可能エネルギー10%、原子力エネルギー10%）まで提示</p>	<p>介入しない 531 とトリートメントを施す 532 世帯の 2 つのグループに分けて実施</p>	<p>13 時 30 分から 15 時 30 分の高い需要が見込まれる時間帯に、電力貯蓄の要求を提案する実験。</p>	<p>デマンド・レスポンスと海水電力システムを導入した再生可能なマイクログリッドの最適なサイズ ①太陽光電池 PV、水力発電、蓄電池システムの改良、②RTP、③海水発電システム、④デマンド・レスポンスなしの RTP</p>
<p>分析結果</p>	<p>ダイナミック・プライシングを導入した方が、13.8%のエネルギー消費の削減が見られた。</p>	<p>平均的な省エネ効果は 2.5% アブリ利用頻度の高いモニターは、利用頻度の少ないモニターに比べて省エネ効果が 1.6% 高い。</p>	<p>CO2 排出削減は、ヒートポンプで 0.3 kg/kWh、電気自動車で 1.8 kg/kWh、燃料電池で 1.75 kg/kWh、太陽光発電 1.45 kg/kWh</p>	<p>CPP 料金は太陽光発電の生産消費者の 3~4% の利用削減を促し、ソーラーパネルなしの利用者はその 4 分の 1</p>		<p>時間帯別料金の係数は、コントロール・グループで 0.25、トリートメント・グループで -0.14 再生可能エネルギーの係数は、コントロール・グループで 0.053、トリートメント・グループで 0.051、原子力発電比率</p>	<p>T3 が、最も削減効果が大きく、T1、T4、T2 と続き、パフォーマンスインセンティブグループが固定インセンティブグループより、削減効果が高いことが導きだされている。</p>	<p>シナリオ①は、13,944 百万円の総費用と等しい需要を示した。シナリオ②は、蓄電池システムの削減がシナリオ③に比べて RTP を採用することにより -20% 削減できた。シナリオ①と比べて、総費用について 130 百万円の削減が出来た。シナリオ③は、</p>

						は、-0.12、-0.13 貨幣の限界効用は、-0.0034で、トリートメント・グループで-0.0032 で、限界的支払意思額は、新規参入企業については-238.04円、トリートメント・グループについては-252.98円、時間帯別料金については125.93円、トリートメント・グループでは-9.04円、再生可能エネルギー率については22.4円、23.72円、原子力エネルギー率については、-49.0696円、-56.4047円	蓄電池システムの数に0に減少させ、発生単位の数は有意に増加した。その数は、シナリオ①の1.5倍、化学生産物からの収入は1億7805万4000円に達した。
--	--	--	--	--	--	---	--

出所：各論文についての要点をまとめて筆者作成。

## 5. 水道料金制度検討を念頭に置く観点からの留意点

電力分野でのスマートメーター導入とこれを活用してきたDRとその知見について整理してきたが、特に今後の水道料金制度検討を念頭に置く観点からは、電気と水という財の性質の違いや、各事業の特質などを考慮する必要がある。本稿では、特にプログラム導入を検討する上で重要な期待効果の捉え方等に関して、これまでのレビューをふまえていくつか留意点を指摘したい。

### (1) 期待効果測定における時間軸の設定

電力のDRは、石油危機後の省エネルギー意識の高まりや、ピーク時間帯の需要の尖鋭化が電力設備投資額の増嵩を招いて経営問題となった歴史的経緯にその源泉があることについては既述の通りであり、この場合は中長期にわたる省エネルギー・高効率機器の導入促進および既に保有している低効率機器の代替などへの期待も高い。すなわち、DRによる短期的な（1日単位・週間単位・季節単位での）需要シフトのみならず、中長期的な（数年以上の単位での）需要抑制や負荷パターンの変化も併せ

て期待されている。加えて近年では、太陽光発電や風力発電のような変動性電源の大量導入と共にアンシラリー・サービスと呼ばれる系統安定機能のための活用が DR にも期待されるようになってきており、この場合は逆に、分単位・秒単位での即応性や需要応答の確実性が求められ、これらフレキシビリティ (flexibility) を高めることが DR のプログラム実装とその普及拡大を推進する大きな動機となっている。

水道事業への DR 適用を検討するにあたっては、こうした電力の DR の知見が大いに参考になることは無論であるが、ただしそのまま直接的に参照されて制度設計が進むわけではなく、電気と水の財の性質やその使われ方の違い (たとえば、貯蔵性、品質の考え方、その財が投入されて価値を生む機器・サービスなどの違い、他の産業・サービスなどとの関連など)、それを扱う産業組織の違いなどをふまえる必要がある。その際、これらの相違が DR プログラムの期待効果に与える影響は、今後スマートメーターを実装し、プログラム導入実施を検討するにあたって特に重要な論点の一つになるだろう。

電力の場合、省エネルギーに関する問題意識は、消費者の短期的・直接的な利益向上 (費用節減) ばかりではなく、中長期的な高効率機器の導入普及による産業政策的経済波及効果や、(特にわが国のようなエネルギー資源に乏しい国にとっては) エネルギー安全保障の向上にも繋がるといった、幅広い時間スパンでの効果が期待できる。従って、既述のように仮に短期 0.3 程度、長期 0.6 程度の価格弾力性であるとして、これらを通じて短期から長期にわたる多面的な効果<sup>12</sup>を期待便益として織り込むことも妥当と考えられる。

他方、水道事業への適用を考える場合、その貯蔵性や品質維持のためのネットワーク・サービスの性質の違いをふまえると、電力におけるアンシラリー・サービスのよような瞬時の運用は事業者に求められず、DR に対する技術的要請も相対的に小さい可能性がある。また、これを日単位での負荷シフトでみた場合、負荷平準化による設備投資等の回避・節減効果がどの程度かが問われるが、詳細は今後の検討に委ねる必要があるものの、直感的には、電力設備と水道設備のピーク需要回避に係る期待効果の

---

<sup>12</sup> ただし様々な期待効果が語られる電力分野においても、期待効果の測定は慎重に行うべきとの見方もある。たとえば、Blasch, et al. [2020] は家庭が現状の生活を維持しようとするバイアスが働くために古い家電機器をそのまま使うなどの行動を調べ、David, et al. [2021] はランダムに選択した家庭の 1 か月間の電気料金を大幅に変動させるフィールド実験をしても需要は硬直的だったことを述べている。記述の通り他に多くの研究成果が蓄積されていることから、これらの研究成果が直ちに DR 効果がないことを意味するものではないが、実際のプログラム設計にあたっては様々な要素を考慮すべきだということを示唆していよう。

違いは存在しているようにも思われる。従って、水道事業の場合は、とりわけ中長期的な期待効果をどう見込むかが重要視されるべき可能性があり、期待効果測定にあたっては、単に短期的視野にとどまれば、こうした本来見込むべき効果を軽視するおそれがあることに留意しなくてはならない。

## (2) 都市部と地方部との対比

電力分野における研究成果の蓄積は、どのような社会的経済的状況や、あるいはプログラム参加家計がどのような性質を持っている時に効果が認められるかという領域にも及んでいる。たとえば、Srivastava, et al. [2018] は 2006 年から 2017 年にかけて公表された 32 本の研究論文のメタ分析によって、DR プログラムが成功する地域の条件として、より高度に都市化が進んでいること、経済成長が高いこと、再生可能エネルギー政策がより支持されていることを示した。他方、表 1 に含む研究には国内の都市部と地方部との対比を行った研究があり（ポルトガルが対象の Silva, et al. [2012]、中国が対象の Yin et al. [2016]）、それぞれ都市部よりも地方部の方が弾力的である（ポルトガルは都市部 0.63 に対して地方部 0.78、中国は短期弾力性が都市部 0.36 に対して地方部 0.78、長期弾力性が都市部 0.60 に対して地方部 1.42）。

ここで DR 効果の大きさを論じるにあたって、上記の「より高度に都市化が進んだ地域の方が成功する」との結果と、「都市部よりも地方部の方が弾力的である」との結果とは一見相矛盾するようだが、必ずしもそうとは限らない。たとえば、同じ中国を対象とした Li, et. Al. [2011] では都市部 0.36 に対して地方部 0.06 となっており、地方部においては電気使用が必需的なものの割合が多いためこのような結果になると理解されている。こうしたことを考慮すれば、「地方部」と一括りにして解されるものではなく、その地域の経済的な発展段階や成熟度、家計の所得水準やライフスタイルなどによって、当該地域の価格弾力性や DR 効果の程度が変わり得るものだと考えることが妥当であろう。実際に、所得水準が高いほど DR プログラムへの参加意思が低下するとの研究結果もある（Wang, et al. [2020]）。これらをふまえた仮定として、必需財的使用が中核を占める発展途上状況から経済発展段階に至るにつれて地方部の都市化が進み、電力の価格弾力性も大きくなるが、ある段階で（おそらくは高効率の家電製品等がある程度普及してライフスタイルが定着するなどした段階で）また価格に対して非弾力的となり、必需財的な使われ方をする。また高所得になるほど金銭的なインセンティブに対する反応が薄れると考えられることもこの一つの要因となり得る。しかしこれがさらに進んで「未来型都市」のような資本装備、たとえばスマートグリッドのような最先端の各種技術や関連設備が備わって機能する状況に至

れば、ハード面およびソフト面でのサポートが有効に機能する場合に DR はまた有効性を高めよう。

水道事業への適用を考える上では、その地域性が事業展開に密接に関わることから、上記の点にはとりわけ留意が必要であろう。都市部か地方部かという単純な二分法ではなく、先述の時間軸の検討と併せて、どのような地域・コミュニティへと展開していくのか、その以降の工程表と各段階で予想される成熟・発展状況等との関連も含めて、総合的に検討していくことが重要であろう。その際、電力の場合は周辺機器・システムなども含めた総合的な効果（たとえば、電気自動車などを含む蓄電システム、ヒートポンプや地域熱供給などの面的供給が可能なエネルギーシステムの活用など）も考慮したビジョンが相対的に描きやすいのに対して、水道事業の場合はどこでどのように包括的に便益を見出していけるかについて、前向きな検討が期待されるところである。

### （3）期待効果における社会的意義の観点

最近の電力の DR においては、その実施理由として社会的意義が重視されている。たとえば、「電力等のエネルギー需要削減が CO2 排出量の削減を通じて地球温暖化問題に対処するための脱炭素社会の実現に資する」という社会的意義は、電力の DR プログラムの導入・普及を図る上で、近年ますます強調される傾向にある。特に環境意識が高い欧州では、電力市場改革もかつてのような効率性向上よりもむしろ再生可能エネルギーの導入拡大やこれを可能にするための各種の施策が注目され、DR によって需要側のフレキシビリティを高めること（demand side flexibility）が進むことへの期待も高い（こうした観点から DR の潜在的役割を述べたものとして Hale, et al. [2018]、欧州の市場モニタリングとして Delta Energy & Environment Ltd. and smartEn [2019]、ドイツ・スウェーデン・フランス・英国の 4 か国の家庭用電力需要が持つフレキシビリティの大きさに関する研究をレビューした Mata, et al. [2020] などがある）。

先述の通り Wang, et al. [2020] では高所得層ほど DR プログラムへの参加意思が低下することを指摘したが、Ito [2015]、Matsukawa [2016]、Royal and Rustamov [2018] などが指摘するように、非金銭的インセンティブも DR の実効性を有する。DR の導入や有効性の阻害要因についての検討は様々存在するが（たとえば Nolan and O'Malley [2015]、Haeri, et al. [2018] など）、それらの殆どが金銭的インセンティブと非金銭的インセンティブを併用してプログラムを設計することによって DR の実効性を高め得ると指摘している。また、DR の阻害要因として、プログラム参加者

が被る負の効用があげられる（たとえば生活上の不便や不快感を強いられるなど）。これらは時に先入観によって形成されている場合があるため、信頼できる主体による丁寧なコミュニケーションが重要であると言われている。

水道事業は、DRに関わる機器やその使われ方の特質を電力のそれと比較した場合、相対的に手段が少ない可能性があり、また仮に相対的により必需財的な使われ方をする場合は金銭的インセンティブを用いたDRの効果が電力以上に小さくなる可能性もある。もしも今後の研究成果の蓄積等によってかかる状況が観察されるような場合には、電力において環境面での社会的意義が強調されている状況に鑑みて、水道におけるDRの社会的意義についても説得的な材料の蓄積やその効果的な普及啓発などについても検討が必要になるだろう。電力分野の研究では、高所得層等で金銭的インセンティブが低下した場合には精神面でのモチベーションを高めることでDR効果が期待できることが確認されている。これは水道事業へのDRプログラムの適用を検討する際にも留意すべき点である。

## 6. 本稿の成果と課題

本稿は、現在に至る電力消費データ分析の動向と研究事例を調査し、検証を加え、ひいては水使用量データを活用した新たな料金制度の検討に役立てることを狙いとして、特に電力分野のDRに関する分析の経緯と最近に至る動向を文献レビューによって明らかにし、ディスカッションとして、DRの期待効果の測定には時間軸を考慮する必要があること、単純な都市部と地方部との二分法ではなくその地域の実態に応じた検討が必要であること、そして水道事業の場合も精神面のモチベーションとなるような非金銭的インセンティブについて考える必要があることなどを述べてきた。

近年の電力消費データ分析はDRプログラム実証等の検証やモデル解析について行われるのが一般的であり、その研究論文数は膨大な数に及ぶが、本稿はある程度包括的に全体像を示すことができたのではないかと考える。他方、個々の論文紹介や論文名の例示についてややアドホックになった点が反省としてあり、いかに網羅的かつ重要な諸点の内容について具体的に充実させていくべきかについては、引き続き今後の課題としたい。

また「水使用量データを活用した新たな料金制度の検討に役立てる」という狙いに対して、電力分野の研究成果で得た知見を活かすという意味で若干のディスカッションを含めたほうが、より具体的で実践的な教訓が得られたのではないかとの反省もある。この点については、次のステージでの研究において改めて取組む所存である。

謝辞) 本稿は、厚生労働省科学研究費助成「水道スマートメーター導入に向けた



データ利活用の検討(20LA1006)」における「多様な料金制度の検討」の一環として作成した。ここに改めて感謝を述べる。

## 7. 主要文献リスト

- 浅野浩志・永田豊[2015], 「デマンド・レスポンスの国内外の動向と当所の取り組み」, 『電力経済研究』, No.62, pp.1-8.
- 穴山悌三[2005], 『電力産業の経済学』, NTT 出版.
- 依田高典・田中誠・伊藤公一朗[2017], 『スマートグリッド・エコノミクスーフィールド実験・行動経済学・ビッグデータが拓くエビデンス政策ー』, 有斐閣.
- 小松秀樹、向井登志広、西尾健一郎、伊原克将、佐々木正信、小川崇、大谷智子、伊藤千加、大館陽子[2017] 「スマートフォンを活用した家庭向け省エネサービスの実証研究：2017年度冬期の省エネ効果」 *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, Vol.40, No.3, pp39-48.
- 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部[2016], 「次世代エネルギー・社会システム実証事業～総括と今後について～」, [https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/pdf/018\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/pdf/018_04_00.pdf).
- 松川勇[2003], 『ピークロード料金の経済分析ー理論・実証・政策ー』, 日本評論社.
- Alam, M.R., M. St-Hilaire, and T. Kunz [2016], “Computational Methods for Residential Energy Cost Optimization in Smart Grids: A Survey,” *ACM Computing Surveys*, 49(1), Article 2:1-34.
- Aalami, H.A., P. Moghaddam, G.R. Yousefi [2010], “Demand Response Modeling Considering Interruptible/Curtailable Loads and Capacity Market Programs,” *Applied Energy*, 87(1), pp.243–250.
- Alberini, A., and M. Filippini [2011], “Response of Residential Electricity Demand to Price: The Effect of Measurement Error,” *Energy Economics*, 33(5), pp.889-895.
- Al-Faris, A. R. F. [2002], “The Demand for Electricity in the GCC Countries,” *Energy Policy*, 30(2), pp.117–124.
- Allcott, H. [2011], “Social norms and energy conservation.” *Journal of Public Economics* 95(9–10), pp.1082–1095.
- Allcott, H. and T. Roger [2014], “The Short-Run and Long-Run Effects of Behavioral Interventions: Experimental Evidence from Energy Conservation,” *American Economic Review* 104(10), pp.3003–3037.
- Allcott, H., and J. B. Kessler [2019], “The Welfare Effects of Nudges: A Case Study of Energy Use Social Comparisons,” *American Economic Journal: Applied Economics*, 11(1), pp.

236-76.

- Andruszkiewicz, J., J. Lorenc, and A. Weychan [2019], "Demand Price Elasticity of Residential Electricity Consumers with Zonal Tariff Settlement Based on Their Load Profiles," *Energies*, 12, 4317; doi:10.3390/en12224317, 1-22.
- Arthur M. de F.S.R., C. A. Bond, B. Willson [2012], "Estimation of elasticities for domestic energy demand in Mozambique," *Energy Economics*, 34(2), pp.398-409.
- Atakhanova, Z., and P. Howie [2007], "Electricity Demand in Kazakhstan," *Energy Policy*, 35, pp.3729–3743.
- Athukorala, P. P. A., and C. Wilson [2010], "Estimating Short and Long-Term Residential Demand for Electricity: New Evidence from Sri Lanka," *Energy Economics*, 32 (Suppl. 1), S34–S40.
- Blasch, J., and C. Damiano [2020], "Behavioral Anomalies and Energy-related Individual Choices: The Role of Status-quo Bias," *The Energy Journal*, 41(6), pp.181-214.
- Blazquez, L., N. Boogen, and M. Filippini [2013], "Residential Electricity Demand in Spain: New Empirical Evidence Using Aggregate Data," *Energy Economics*, 36, pp.648–657.
- Blumsack, S. and P. Hines [2013], *Analysis of Green Mountain Power Critical Peak Events During the Summer/Fall of 2012*, VT: Green Mountain Power.
- Boogen, N., S. Datta, M. Filippini [2014], *Going Beyond Tradition: Estimating Residential Electricity Demand Using an Appliance Index and Energy Services*, Working Paper 14/200; CER-ETH: Zurich, Switzerland.
- Boogen, N., S. Datta, M. Filippini [2017], "Dynamic Models of Residential Electricity Demand: Evidence from Switzerland," *Energy Strategy Reviews*, 18, pp.85–92.
- Boonekamp, P.G.M. [2007], "Price Elasticities, Policy Measures and Actual Developments in Household Energy Consumption - A Bottom-up Analysis for the Netherlands," *Energy Economics*, 29(2), pp.133–157.
- Burke, P.J., and A. Abayasekara [2018], "The Price Elasticity of Electricity Demand in the United States: A Three-Dimensional Analysis," *Energy Journal*, 39, pp.123–146.
- Burns, K., and B. Mountain [2020], "Do Households Respond to Time-Of-Use Tariffs? Evidence from Australia," VEPC Working Paper WP2007, Victoria Energy Policy Centre, Victoria University.
- Byrne, D. P., A. L. Nauze, and L. A. Martin [2021], "An Experimental Study of Monthly Electricity Demand (In)elasticity," *The Energy Journal*, 42(2), pp.205-222.
- Campbell, A. [2018], "Price and Income Elasticities of Electricity Demand: Evidence from

- Jamaica,” *Energy Economics*, 69, pp.19–32.
- Cappers, P., Hans, L., and Scheer, R. [2015], *American Recovery and Reinvestment Act of 2009. Interim Report on Customer Acceptance, Retention, and Response to Time-Based Rates from the Consumer Behavior Studies*, LBNL-183029, U. S. Department of Energy.
- Cappers, P., C. A. Spurlock, A. Todd, and L. Jin [2018], “Are vulnerable customers any different than their peers when exposed to critical peak pricing: Evidence from the U.S.,” *Energy Policy*, 123, pp.421-432.
- Chindakar, N., and N. Goyal [2019], “One Price doesn’t Fit all: An Examination of Heterogeneity in Price Elasticity of Residential Electricity in India,” *Energy Economics*, 81, pp.765–778.
- Dahlke, S., and M. Prorok [2019], “Consumer Savings, Price, and Emissions Impacts of Increasing Demand Response in the Midcontinent Electricity Market,” *The Energy Journal*, 40(3), pp.243-262.
- David P., B. Andrea, L. Nauze, and L. A. Martin, [2021], “An Experimental Study of Monthly Electricity Demand (In)elasticity,” *The Energy Journal*, 42(2), pp.205-222.
- Delta Energy & Environment Ltd. (Delta-EE), and smartEn (Smart Energy Europe) [2019], *EU Market Monitor for Demand Side Flexibility 2019*.
- De Vita, G., K. Endresen, and L. C. Hunt [2006], “An Empirical Analysis of Energy Demand in Namibia,” *Energy Policy*, 34, pp.3447–3463.
- Du, P., Lu, N., and Zhong, H. [2019], *Demand Response in Smart Grids*, Springer.
- Espey, J.A., and M. Espey [2004], “Turning on the Lights: A Meta-analysis of Residential Electricity Demand Elasticities,” *Journal of Agricultural Economics*, 36, pp.65–81.
- Faruqui, A., Hledik, R., and Sergici, S. [2010], “Rethinking Prices -The changing architecture of demand response in America-,” *Public Utilities Fortnightly*, January 2010, pp.30-39.
- Faruqui, A. and Sergici, S. [2010], “Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments,” *Journal of Regulatory Economics*, 38(2), pp.193-225.
- Filippini, M. [2011], “Short- and Long-run Time-of-Use Price Elasticities in Swiss Residential Electricity Demand,” *Energy Policy*, 39, pp.5811–5817.
- Filippini, M., and S. Pachuari [2004], “Elasticities of Electricity Demand in Urban Indian Households,” *Energy Policy*, 32(3), pp.429–436.
- Gamil, M.M., Sugimura, M., Nakadomari, A., Senjyu, T., Howlder, H.O.R., Takahashi, H., and Hemeida, A. M. [2020], “Optimal Sizing of a Real Remote Japanese Microgrid with Sea Water Electrolysis Plant Under Time-Based Demand Response Programs,” *Energies*, 13,

3666.

- Gautam, T.K., and K.P. Paudel [2018], “Estimating Sectoral Demands for Electricity Using the Pooled Mean Group Method,” *Applied Energy*, 231, pp.54–67.
- Gillan, J. M. [2017], *Dynamic Pricing, Attention, and Automation: Evidence from a Field Experiment in Electricity Consumption*, JOB MARKET PAPER.
- Haeri, H., K. Horkitz, H. Lee, J. Wang, T. Hardman, H. Ratcliffe, M. Izawa, J. Brant, J. Eckstein, N. Preston, and L. Garth [2018], *Assessment of Barriers to Demand Response in the Northwest’s Public Power Sector*, For Bonneville Power Administration, The Cadmus Group LLC.
- Hale, E., L. Bird, R. Padmanabhan, and C. Volpi [2018], *Potential Roles for Demand Response in High-Growth Electric Systems with Increasing Shares of Renewable Generation*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy.
- Halicioglu, F. [2007], “Residential Electricity Demand Dynamics in Turkey,” *Energy Economics*, 29(2), pp.199–210.
- Holtedahl, P., and F. Joutz [2004], “Residential Electricity Demand in Taiwan,” *Energy Economics*, 26(2), pp.201–224.
- Hondroyannis, G. [2004], “Estimating Residential Demand for Electricity in Greece,” *Energy Economics*, 26(3), pp.319–334.
- Honjo, Shiraki, and Ashina [2018], “Dynamic linear modeling of monthly electricity demand in Japan: Time variation of electricity conservation effect,”
- Ida, T., Murakami, K., and Tanaka, M. [2020], “Electricity demand response in Japan: Experimental evidence from a residential photovoltaic power-generation system,” *Economics of Energy and Environmental Policy*, 5(1), pp73-88.
- Ida, T., Ushifusa, Y., Tanaka, K., Murakami, K., and Ishihara, T. [2020], “Behavioral Study of Demand Response: Web-Based Survey, Field Experiment, and Laboratory Experiment,” in T. Hatanaka, Y. Wasa, and K. Uchida (eds.), *Economically Enabled Energy Management - Interplay Between Control Engineering and Economics-*, pp117–151, Springer.
- Ishaque, H. [2018], “Revisiting Income and Price Elasticities of Electricity Demand in Pakistan,” *Economic Research*, 31, pp.1137–1151.
- Ito, K. [2015], “Asymmetric Incentives in Subsidies: Evidence from a Large-Scale Electricity Rebate Program,” *American Economic Journal: Economic Policy*, 7(3), pp.209–237.
- Ito, K., Ida, T., and Tanaka, M. [2018], “Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand,” *American Economic Journal: Economic*

*Policy*, 10(1), pp.240–267.

International Renewable Energy Agency (IRENA) [2019], *Innovation Landscape Brief: Time-of-Use Tariffs*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Jessoe, K. and D. Rapson [2014], “Knowledge Is (Less) Power: Experimental Evidence from Residential Energy Use,” *American Economic Review*, 104(4), pp. 1417-38.

Jordehi, A. R. [2019], “Optimisation of Demand Response in Electric Power Systems, A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, pp.308-319.

Joskow, P.L. and C. Wolfram [2012], “Dynamic pricing of electricity,” *American Economic Review*, 102(3), pp.381–385.

Kim, Thoa Shimada, K., Ochi, Y., Matsumoto, T., Matsugi, H., and Awata, T.[2016], “An Experimental Study of the Impact of Dynamic Electricity Pricing on Consumer Behavior: An Analysis for a Remote Island in Japan,” *Energies*, 9. 1093.

Knittel, C. R., and S. Stolper [2019], *Using Machine Learning to Target Treatment: The Case of Household Energy Use*, NBER Working Paper Series, 26531.

Kwon, S., S.H. Cho, R.K. Roberts, H.J. Kim, K.H. Park, and T.H.E. Yu [2016], “Short-run and the Long-run Effects of Electricity Price on Electricity Intensity across Regions,” *Applied Energy*, 172, pp.372–382.

Labandeira, X., J.M. Labeaga, X. López-Otero [2017], “A Meta-analysis on the Price Elasticity of Energy Demand,” *Energy Policy*, 102, pp.549–568.

Lee, M.P., B. Foster, D. Kathan, M. O’Brien, A. Park, and S. Peirovi [2016], “Assessment of Demand Response and Advanced Metering,” Staff Report, Federal Energy Regulatory Commission (FERC).

Li, H., L. Dong, and M. Xie [2011], “A Study on the Comprehensive Evaluation and Optimization of How Removing Gas and Electricity Subsidies Would Affect Households’ Living,” *Economic Research Journal*, 2, pp.100–112.

Li, Y., Gao, W., Ruan, Y., and Ushifusa, Y. [2018], “Grid Load Shifting and Performance Assessments of Residential Efficient Energy Technologies, a Case Study in Japan,” *Sustainability*, 10.

Lijesen, M.G. [2007], “The Real-time Price Elasticity of Electricity,” *Energy Economics*, 29, pp.249–258.

Loi, T.S.A., and J. Le Ng [2018], “Analysing Households’ Responsiveness towards Socio-economic Determinants of Residential Electricity Consumption in Singapore,” *Energy Policy*, 112, pp.415–426.

- Mata É., J. Ottosson, and J. Nilsson [2019], “A review of flexibility of residential electricity demand as climate solution in four EU countries,” *Environmental Research Letters*, 15(7), 073001.
- Matar, W. [2018], “Households’ Response to Changes in Electricity Pricing Schemes: Bridging Microeconomic and Engineering Principles,” *Energy Economics*, 75, pp.300–308.
- Matsukawa, I. [2016], *Consumer Energy Conservation Behavior After Fukushima -Evidence from Field Experiments*, Springer.
- Matsukawa, I. [2001], “Household Response to Optimal Peak-Load Pricing of Electricity,” *Journal of Regulatory Economics*, 20, pp.249-267.
- Nab, M., S. Jansma, and J. Gosselt [2020], “Tell me what is on the line and make it personal: Energizing Dutch homeowners through message framing,” *Energy Research & Social Science*, 70, 101760.
- Narayan, P. K., and R. Smyth [2005], “The Residential Demand for Electricity in Australia: An Application of the Bounds Testing Approach to Cointegration,” *Energy Policy*, 33(4), pp.467–474.
- Nasir, M., M. S. Tariq, and A. Arif [2008], “Residential Demand for Electricity in Pakistan,” *The Pakistan Development Review*, 47(4), pp.457–467.
- Nolan, S., and M. O’Malley [2015], “Challenges and Barriers to Demand Response Deployment and Evaluation,” *Applied Energy*, 152, pp.1-10.
- Okajima, S., and H. Okajima [2013], “Estimation of Japanese Price Elasticities of Residential Electricity Demand, 1990–2007,” *Energy Economics*, 40, pp.433–440.
- Olsen, D. J. et al. [2013], “Grid Integration of Aggregated Demand Response, Part 1: Load Availability Profiles and Constraints for the Western Interconnection,” LBNL-6417E.
- Parrish, B., P. Heptonstall, R. Gross, and B. K. Sovacool [2020], “A systematic review of motivations, enablers and barriers for consumer engagement with residential demand response,” *Energy Policy*, 138, pp.1-11.
- Patel, S., S. Borgeson, R. Rajagopal, C. A. Spurlock, L. Jin, and A. Todd [2016], *Time Will Tell: Using Smart Meter Time Series Data to Derive Household Features and Explain Heterogeneity in Pricing Programs*, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
- Potter, J. M., S. S. George, L. R. Jiminez [2014], *Smart Pricing Options Final Evaluation*, CA: Sacramento Municipal Utility District (SMUD).
- Ponocko, J. [2019], *Data Analytics-Based Demand Profiling and Advanced Demand Side*

*Management for Flexible Operation of Sustainable Power Networks*, Doctoral Thesis, Springer.

- Rai, A.M., L. Reedman, and P.W. Graham [2014], "Price and Income Elasticities of Residential Electricity Demand: The Australian Evidence," In Proceedings of the 2014 Australian Conference of Economists ESAMACE 2104, Australia, 1–4 July 2014.
- Royal, A., and G. Rustamov [2018], "Do Small Pecuniary Incentives Motivate Residential Peak Energy Reductions? Experimental Evidence," *Applied Economics*, 50(57), pp.6193–6202.
- Schulte, I., and P. Heindl [2017], "Price and Income Elasticities of Residential Energy Demand in Germany," *Energy Policy*, 102, pp.512–528.
- Shaik, S., and O.A. Yeboah [2018], "Does Climate Influence Energy Demand? A Regional Analysis," *Applied Energy*, 212, pp.691–703.
- Shehata, A. M. [2019], "Model predictive control of electric power and reserve dynamic dispatch including demand response," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37, pp.159–170.
- Shi, G., X. Zheng, and F. Song [2012], "Estimating Elasticity for Residential Electricity Demand in China," *The Scientific World Journal*, Volume 2012, Article ID 395629.
- Silk, J. I., and F. L. Joutz [1997], "Short and Long-Run Elasticities in US Residential Electricity Demand: A Co-Integration Approach," *Energy Economics*, 19(4), pp.493–513.
- Silva, S., I. Soares, C. Pinho [2018], "Electricity Residential Demand Elasticities: Urban versus Rural Areas in Portugal," *Energy*, 144, pp.627–632.
- Smart Energy Europe (smartEn) [2020], *The Implementation of the Electricity Market Design to Drive Demand-side Flexibility – smartEn Monitoring Report*, November 2020.
- Srivastava, A., S. V. Passel, and E. Laes [2018], "Assessing the success of electricity demand response programs: A meta-analysis," *Energy Research & Social Science*, 40, pp.110–117.
- Susowake, Y., Masrur, H., Yabiku, T., Senjyu, T., Howlader, A.M., Abdel-Akher, M., and Hemeida, A. M. [2020], "A Multi-Objective Optimization Approach towards a Proposed Smart Apartment with Demand-Response in Japan," *Energies*, 13, 127.
- Tambe, V.J., and S.K. Joshi [2014], "Estimating Price Elasticity of Electricity for the Major Consumer Categories of Gujarat State," In Proceedings of the 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Australia, 28 September–1 October 2014.
- Todd-Blick, A., C. A. Spurlock, L. Jin, P. Cappers, S. Borgeson, D. Fredman, J. Zuboy [2020],

- “Winners are not keepers: Characterizing household engagement, gains, and energy patterns in demand response using machine learning in the United States,” *Energy Research & Social Science*, 70.
- Torriti, J. [2020], *Appraising the Economics of Smart Meters -Costs and Benefits-*, Routledge Studies in Energy Policy, Routledge.
- Torriti, J., and T. Yunusov [2020], “It’s only a matter of time: Flexibility, activities and time of use tariffs in the United Kingdom,” *Energy Research & Social Science*, 69.
- U.S. Department of Energy [2006], *Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them*.
- U.S. Electric Power Research Institute (EPRI) [2012], *Understanding Electric Utility Customers – Summary Report: What We Know and What We Need to Know*, CA.
- U.S. Federal Energy Regulatory Commission [2009], *A National Assessment of Demand Response Potential*.
- Volland, B., and I. Tilov [2019], “Price Elasticities of Electricity Demand in Switzerland: Results from a Household Panel,” IRENE Working Paper.
- Wang, B., Q. Cai, and Z. Sun [2020], “Determinants of Willingness to Participate in Urban Incentive-Based Energy Demand-Side Response: An Empirical Micro-Data Analysis,” *Sustainability* 2020, 12(19), 8052, pp.1-18.
- Wolak, F. A. [2011], “Do Residential Customers Respond to Hourly Prices? Evidence from a Dynamic Pricing Experiment,” *American Economic Review*, 101(3), pp.83–87.
- Woo, C.K., Y. Liu, J. Zarnikau, A. Shiu, X. Luo, and F. Kahrl [2018], “Price Elasticities of Retail Energy Demands in the United States: New Evidence from a Panel of Monthly Data for 2001–2016,” *Applied Energy*, 222, pp.460–474.
- Yin, H., H. Zhou, and K. Zhu [2016], “Long- and Short-run Elasticities of Residential Electricity Consumption in China: A Partial Adjustment Model with Panel Data,” *Applied Economics*, 48(28), pp.2587–2599.
- Zachariadis, T., and N. Pashourtidou [2007], “An Empirical Analysis of Electricity Consumption in Cyprus,” *Energy Economics*, 29(2), pp.183–198.