

## &lt;研究ノート&gt;

電力消費データ分析の経緯と事例のサーベイ  
—水道料金制度検討を念頭に置く観点から—Survey on “History and Cases of Power Consumption Data Analysis”  
— From the perspective of considering the water rate system —

長野県立大学 穴山 悌三

The University of Nagano

Teizo ANAYAMA

東海大学 森 由美子

Tokai University

Yumiko MORI

## ABSTRACT:

In recent years, there has been increasing interest in utilizing water usage data acquired by smart meters for water supply projects. In this paper, we aim to investigate the history and trends of power consumption data analysis using data obtained from smart meters, and to use it for future research on new tariff systems using water usage data.

キーワード：DSM、DR、スマートメーター、電力消費、水道事業

Keywords: DSM, DR, Smart meter, Power consumption, Water supply

## 1. はじめに

近年、水道事業においてスマートメーターで取得した水使用量データの利活用に関する関心が高まっている。本稿は、スマートメーターによって得られたデータの利活用において先行する電力消費データ分析の経緯と動向とをサーベイし、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いる。

以下、電力消費データ分析の経緯から近年に至る主な研究動向をサーベイし、次に水道料金制度検討を念頭に置く観点からの留意点について若干の考察を行う。最後に本稿のまとめと課題について述べる。

## 2. 電力消費データ分析のサーベイ

## 1) 歴史的経緯と初期の研究成果

電気は歴史的に非弾力的な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、その過程で需要の価格弾力性が推計されてきた。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、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>(1)</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」と呼び、計器や電気機器の直接制御や電力負荷を遮断ないし削減するプログラムなどのように、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」と区別することがある。

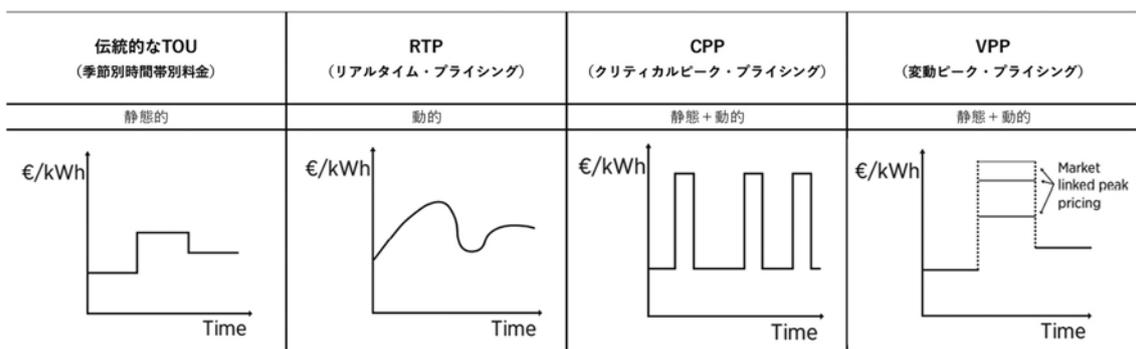
DRの基本的な手法として家庭用需要家向けの情報提供が行われる。わが国ではHEMS (Home Energy Management System) と呼ばれる家庭における機器制御システムが開発され、家庭内の情報端末や表示器を介して使用情報を伝え、電力消費量の変化を促す試みは、NEDOプロジェクトなどでも実施されてきた。また、電力料金を随時変化させて電力消費量の

変化を促す「ダイナミック・プライシング (Dynamic Pricing: DP)」は、計量上の課題などから主に産業用・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。

家庭用需要家が対象のDRの検討が本格的に進んだのは、米国カリフォルニア州での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、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>(2)</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) などの研究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。

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等を背景として、電力システム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、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。

わが国では2009年11月に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、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



(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

の経済効果が測定された。これら4地域実証結果<sup>(3)</sup>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ルギー・新エネルギー部 [2016]）。

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、風力や太陽光等の変動性電源への柔軟な対応、中長期的な電源代替としての容量面での対応である（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）。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]）。

## 2) DRに関する主な実証の成果（国外実証）

依田・田中・伊藤 [2017] は、米国のDRのフィールド実験の殆どが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。同書も紹介するように、Faruqui and Sergici [2010]（米国15実証のピーク需要削減率はTOU：3～6%、CPP：13～20%、削減技術＋CPP：27～44%）、Faruqui et al. [2010]（米国67実証のメタ分析で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、地理的条件の差異や料金制度のタイ

プと支援技術の有無によって削減効果が変わることを示した）、Cappers et al. [2015]（米国10事業者の11実証のサーベイで、CPPのピーク需要削減率が平均21%であるのに対してリバートを用いるCPRは平均11%に留まること、遠隔制御のエアコンを活用する場合に削減効果が大きいことを示した）などがある。

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]）。

プログラムへの参加率については、Parrish et al. [2020] が近年の29プログラム、35のDRメニューの選択加入（opt-in）と選択退出（opt-out）を確認した。参加率は2%～98%と様々で、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）が重要である（Potter et al. [2014], Blumsack and Hines [2013]）。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%以下しか参加せず、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。

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は7～22%程度の効果を有すると期待される（Faruqui and Sergici [2010] など）。リバ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（Wolak [2011] など）。Parrish et al. [2020] は近年の52の研究論文をサーベイし、家電機器の直接制御の効果は平均的に30～40%の大きな削減<sup>(4)</sup>、単なる節電情報の提供や静態的なTOU（わが国の伝統的な季節別時間帯別料金制度など）が主に10%未満の削減であり、殆どのDRメニューが10～30%の期待削減効果となることを示した。機器を直接操作する介入や、柔軟に価格を変動させる動的なスキームは平均的な期待削減効果が高い。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バー

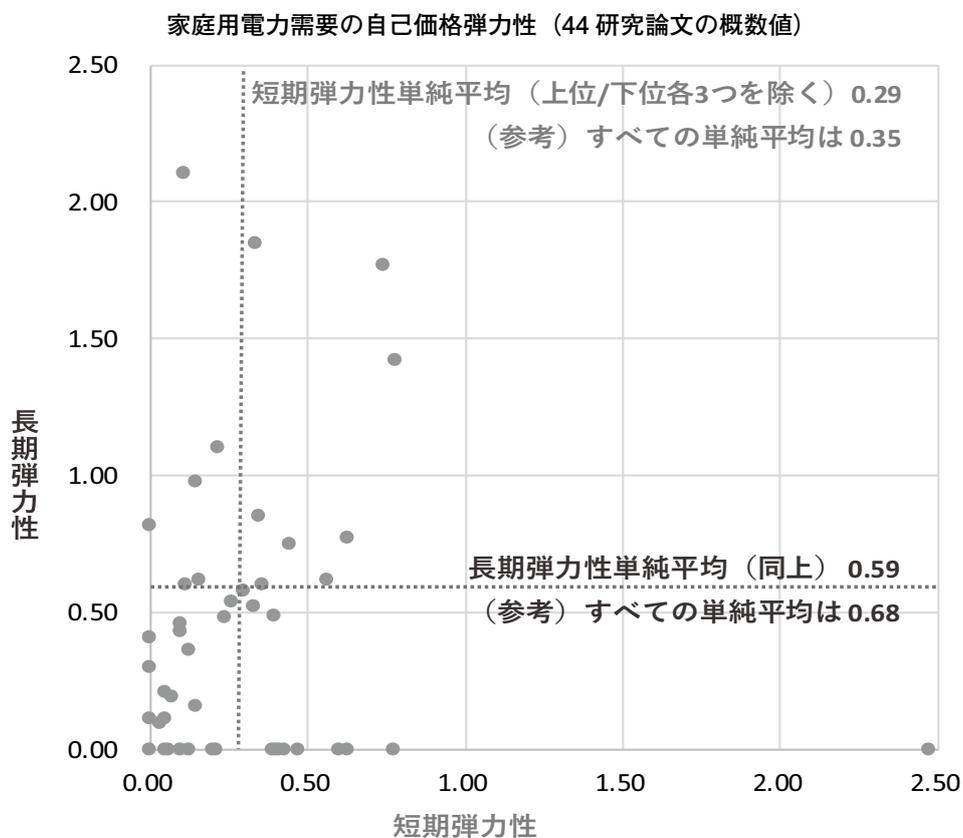
スとなる電力需要水準、ピークとオフピークの価格比や比較可能なインセンティブなどが指摘されるが、これらの要因がすべての期待効果差を説明できるわけではないと結論している。

家庭用電力需要の弾力性の推計は、前提となる需要関数の導出などが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だが、敢えて個々のアプローチの違い等を捨象して、短期および長期の自己価格弾力性の推計値を図2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、旧来の諸研究と概ね整合的である。

これまでの実証では、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、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が与えられる。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。これには説得的な節電要請ないし道義的勧告や、社会比較などが含まれて、行動経済学という「ナッジ (Nudge)」の領域になる。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<sup>(5)</sup>。

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<sup>(6)</sup>。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



※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) Andruszkiewicz et al. [2019], Yin et al. [2016] を参考に作成

(図2) 近年の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

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<sup>(7)</sup>。

行動変容の持続の観点からは、プログラムを継続した場合の効果の低下が観察され、「反応疲れ」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。

### 3) DR に関する主な実証の成果 (国内実証)

次に近年の国内実証を対象とする分析事例を紹介する。

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数効果モデルで、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。DP の導入により 13.8% のエネルギー消費が削減された。

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向け省エネサービスの実証を行い、平均的な省エネ効果は 2.5% で、アプリ高利用頻度モニターの省エネ効果が 1.6% 高いこと、レポート・アラート併用の通知によって日中平均閲覧率が 3.05 向上したことを示した。

Ida, Murakami, and Tanaka [2020] は、横浜市でスマートメーターと HEMS を装備した 1,202 戸の家庭を対象とする 2013 年夏の実証実験で、CPP の効果を RCT アプローチによって測定した。コントロール・グループは、定額契約、TOU 料金契約 + CPP0.6 ドルと、定額契約、TOU 料金契約 + CPP1 ドルに分けられた。30 分間隔のデータを用いて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、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、太陽光発電を利用するほどピークカットが小さくなることを明らかにした。

このほか、Ida et al. [2020] による実証分析（横浜市青葉区の HEMS 設置世帯を対象とする 2015 年 1 月～9 月の限界支払意思額の計測）、Gamil et al. [2020] によるマイクログリッドの経済性評価（沖縄において DR を海水活用型の再生可能エネルギーと組み合わせてマイクログリッドの最適経済性を探る）などの研究がある。

このように、近年はわが国においても消費者の DR プログラムへの参加率、参加者の行動変容に着目した研究が蓄積されている。再生可能エネルギーの導入を念頭に置いた分析が増えているのは海外と同様の傾向であり、さらにデジタル化の浸透を前提としたスマートフォンのアプリ利用を介した行動変容の分析などは、今後の実践的手法のあり方を探る試みである。

### 3. 水道料金制度検討を念頭に置く観点からの留意点

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。以下、水道事業での適用を検討する上で重要な期待効果の捉え方等に関していくつか留意点を指摘する。

#### 1) 期待効果測定における時間軸の設定

電力の DR は歴史的経緯にその源泉があり、中長期的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、フレキシビリティを高めることが 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、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。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。

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では）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。このため、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>(8)</sup>を期待便益として織り込むことも妥当と評価し得る。

他方、水道事業への適用においては、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、電力のアンシラリー・サービスのよ様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。

## 2) 都市部と地方部との対比

電力における研究成果の蓄積は、社会的経済的状況やプログラム参加家計の性質と効果との関連にも及んでいる。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、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. [2018]、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）。

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、必需財の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、実装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場所である。

### 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CO<sub>2</sub>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. [2019]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に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。

### 4. 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経緯と動向を文献レビューによって明らかにし、水道事業への適用を念頭に置く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、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

ていくべき点については今後の課題としたい。

**謝辞** 本研究は、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」の一環である。ここに改めて感謝を述べる。

#### 〈注〉

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 4 地域実証結果の論文・著作として Matsukawa [2016]、依田・田中・伊藤 [2017] などがある。
- (4) 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性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。
- (5) たとえば Jessoe and Rapson [2014] , Ito, Ida, and Tanaka [2018] , Gillan [2017] , Allcott and Kessler [2019], Knittel and Stolper [2019],

Nab, Jansma, and Gosselt [2020] など。

- (6) たとえば Todd-Blick et al. [2020] , Patel et al. [2016] など。
- (7) 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。
- (8) 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。既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。

#### 〈主要文献〉

- 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.
- 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—』, 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, pp.39-48.
- 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～」, 経済産業省審議会資料.
- [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—理論・実証・政策—』, 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.
- 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.
- Blasch, J., and C. Daminato [2020], “Behavioral Anomalies and Energy-related Individual Choices: The Role of Status-quo Bias,” *The Energy Journal*, 41 (6), pp.181-214.
- Blumsack, S., and P. Hines [2013], *Analysis of Green Mountain Power Critical Peak Events During the Summer/Fall of 2012*, VT: Green Mountain Power.
- Cappers, P., L. Hans, and R. Scheer [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.
- 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*.
- Du, P., N. Lu, and H. Zhong [2019], *Demand Response in Smart Grids*, Springer.
- Faruqui, A., and S. Sergici [2010], “Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments,” *Journal of Regulatory Economics*, 38 (2), pp.193-225.
- Gamil, M. M., M. Sugimura, A. Nakadomari, T. Senjyu, H. O. R. Howlder, H. Takahashi, and A. M. Hemeida, [2020], “Optimal Sizing of a Real Remote Japanese Microgrid with Sea Water Electrolysis Plant Under Time-Based Demand Response Programs,” *Energies*, 13, 3666.
- 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.
- Ida, T., K. Murakami, and M. Tanaka [2020], “Electricity demand response in Japan: Experimental evidence from a residential photovoltaic power-generation system,” *Economics of Energy and Environmental Policy*, 5 (1), pp.73-88.
- Ida, T., Y. Ushifusa, K. Tanaka, K. Murakami, and T. Ishihara [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-*, pp.117-151, Springer.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) [2019], *Time-of-Use Tariffs: Innovation Landscape Brief*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- 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., T. Ida, and M. Tanaka [2018], “Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand,” *American Economic Journal: Economic Policy*, 10 (1), pp.240-267.
- Jessoe, K., and D. Rapson [2014], “Knowledge Is (Less) Power: Experimental Evidence from Residential Energy Use,” *American Economic Review*, 104 (4), pp. 1417-1438.
- 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, T., K. Shimada, Y. Ochi, T. Matsumoto, H. Matsugi, and T. Awata [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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Nolan, S., and M. O'Malley [2015], “Challenges and Barriers to Demand Response Deployment and Evaluation,” *Applied Energy*, 152, pp.1-10.
- 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).

- Royal, A., and G. Rustamov [2018], “Do Small Pecuniary Incentives Motivate Residential Peak Energy Reductions? Experimental Evidence,” *Applied Economics*, 50 (57), pp.6193-6202.
- Silva, S., I. Soares, C. Pinho [2018], “Electricity Residential Demand Elasticities: Urban versus Rural Areas in Portugal,” *Energy*, 144, pp.627-632.
- 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.
- 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.
- 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*.
- 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*, 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.
- 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.