

# 電力経済研究

特集 「日本におけるデマンドレスポンス研究の最前線」

No.62 (2015.11)



**IR** 電力中央研究所  
社会経済研究所

## 「電力経済研究」

「電力経済研究」は電気事業、電力産業に関わる社会経済・制度問題を対象分野とし、課題指向型、問題解決型に関連した研究成果等を掲載し、学術の振興に寄与することを目的とした雑誌です。一時休刊ののち、2015年3月にリニューアル復刊し、本号はその第2号になります。当面の間は、広く一般に投稿論文を募ることは致しません。

### 原稿の種類と内容

電力経済研究の原稿には次のようなカテゴリーがあります（下記のカテゴリーは当面のものであり、今後、編集委員会での議論を経て追加・変更になる場合があります）。

#### (1) 総説

特集を全体的に俯瞰して、その目的や意義、内容などについて総合的に展望・解説したものの。

#### (2) 研究論文

主題、内容、手法等の新規性を有し、当該分野の発展に貢献すると思われる研究成果を報告したもの。また、特定の主題に関する一連の事象を、実態調査を通して、あるいは特定の主題に関する一連の研究及びその周辺領域の発展を、著者の見解にしたがって総括的かつ系統的に報告したもの。

#### (3) 研究ノート

総合的な報告までには至らないが、その研究途上で得られた有用な分析手法に関して記録にとどめておく価値があると認められたもの。特に、テクニカルな分析手法を特徴とするもの。また、特集の目的に沿って、他の媒体で報告した内容について、本誌向けに要約したもの。

#### (4) 研究トピックス紹介

経済、経営、エネルギー・電力、環境等に関連する国内外の新たな研究動向を紹介するもの。

一般財団法人 電力中央研究所

社会経済研究所

「電力経済研究」編集委員会

E-mail : src-henshu-ml@criepi.denken.or.jp

## 電力経済研究 No.62 (2015.11) 目次

巻頭言

永田 豊

### 特集「日本におけるデマンドレスポンス研究の最前線」

#### 総説

デマンドレスポンスの国内外の動向と当所の取り組み 浅野 浩志 永田 豊 … 1

#### 研究論文

ピークタイム・リベートによる家庭用需要家のデマンドレスポンスの効果  
ー北陸地域での実証データに基づく分析ー  
服部 徹 高橋 雅仁 坂東 茂 加部 哲史 … 9

テナント事務所ビルにおけるスマート節電実証試験  
高橋 雅仁 上野 剛 岩松 俊哉 坂東 茂 西川 雅弥 岩村 集 …25

#### 研究ノート

家庭部門における行動変容型ピーク抑制策  
ー見える化システムと料金体系を組み合わせた事例ー  
向井 登志広 西尾 健一郎 小松 秀徳 内田 鉄平 石田 恭子 …35

スマートメータデータの活用方法 小松 秀徳 西尾 健一郎 …46

太陽光発電大量導入時の電圧上昇対策に関する考察  
ー無効電力補償とデマンドレスポンスの比較ー 高木 雅昭 田頭 直人 …55

アンシラリーサービス型デマンドレスポンスの日米における取組み状況 坂東 茂 …64

#### 研究トピックス紹介

九州電力におけるデマンドレスポンス実証試験 中野 忠幸 …72

## 巻頭言

2011年3月の東日本大震災以降、我が国では、デマンドレスポンスはもっぱら需給緩和策としての役割が期待されていた。しかし、今後は、需給状況の緩和が予想され、それに連れて、デマンドレスポンスに対して新たな役割が重視されていくと思われる。それらは、FIT（再生可能エネルギーの固定価格買取制度）により急速に増加している余剰電力への対応や、電力システム改革を念頭においた、小売自由化後の新サービスとしてのツール、あるいは欧米諸国並みに瞬動予備力市場や周波数安定化市場など、系統安定化対策に市場を創設した場合の資源の供給元としての役割などである。特に、現在、我が国は電力システム改革の途上にあるため、海外での先進事例を学びつつ、我が国に相応しい形で、デマンドレスポンスを今後の制度改革に取り込んでいくことが求められている。

電力中央研究所では、東日本大震災より前からデマンドレスポンスに関する研究に取り組んできた。本特集は、上に述べた国内外のデマンドレスポンスを巡る動向についての概観と、当所のデマンドレスポンスに関するこれまでの研究の経緯や内容について紹介する記事、および様々な研究成果に関する論文および研究ノートから構成される。本特集が、読者にとってデマンドレスポンスに関する一貫した理解を深めることの参考になれば幸いである。

2015年11月

編集責任者  
社会経済研究所  
永田 豊

# デマンドレスポンスの国内外の動向と当所の取り組み

## A Survey of Demand Response and Research Activities at CRIEPI

キーワード：デマンドレスポンス，需要側資源，アンシラリーサービス，再生可能エネルギー，系統運用

浅野 浩志 永田 豊

需要家と協調して、電力の使い方を社会的に望ましい形に誘導するデマンドサイドマネジメント (Demand-Side Management, DSM) の一形態として、デマンドレスポンス (Demand Response, DR) が、2011年の震災以降の電力供給不足の中で、新しい節電方法として注目されてきた。当所では、1980年代から需要側研究を学術面で先導してきた。本稿では、欧米におけるデマンドレスポンスの導入状況、国内のデマンドレスポンスの位置づけの変化、当所における研究の変遷、今後の展望を概説する。

- |                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| 1. はじめに              | 4.1 初期段階 (1980年代～2000年) |
| 2. 国内外における研究の変遷と導入状況 | 4.2 研究の本格化と着眼点          |
| 3. 最新動向              | 4.3 今後の研究の方向性           |
| 4. 当所の取り組み           |                         |

### 1. はじめに

需要家と協調して、電力の使い方を社会的に望ましい形に誘導するデマンドサイドマネジメント (Demand-Side Management, DSM) の一形態として、デマンドレスポンス (Demand Response, DR) が、2011年の震災以降の電力供給不足の中で、新しい節電方法として注目されてきた。DRとは、「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」である。

電力中央研究所は1980年代の米国におけるロードマネジメントの調査や費用便益分析に始まり、新しい電気料金メニューの効果分析などの実証研究を含む理論、実証の両面で需要側研究をリードしてきた。現在、電力各社は家庭用需要家まで全ての需要家向けにスマートメータ設置を進めている。例えば、スマートメー

タを活用すれば、様々なダイナミックプライシング (緊急ピーク時課金制など) を適用できるようになるが、その費用対効果の分析手法<sup>[1]</sup>は、1980年代に米国カリフォルニア州規制当局が開発した手法<sup>[2]</sup>がベースとなっている。

デマンドレスポンスは本来、電力の供給信頼度を維持し、料金水準を安定化することを主たる目的としてきた。近年、電力供給の低炭素化のため、太陽光発電 (PV) など変動電源が大量に連系してくると、系統安定化、すなわち、各種アンシラリーサービスや系統柔軟性を供給するために高速に応答するDR (Fast DR)<sup>[3]</sup>を導入する必要性が生じる。これは、既存電源などの供給側資源と同じ土俵で、ヒートポンプ給湯機や電気自動車などの可制御負荷、住宅用PV等の分散型電源を含む需要家資源をDRという系統側の信号を通じて統合制御する形態に電力系統の運用が進化していくこと (いわゆるスマートグリッド化) を意味する。

本稿では、これまでのDRの役割の変遷や実

証研究など、関連する研究動向と今後の展望を解説する。

## 2. 国内外における研究の変遷と導入状況

DRがDSMから進化、発展してきた背景は、1990年代からの電力市場設立を含む電力自由化という制度的変化、実時間での電力取引を可能とするICTの進化（技術進歩）、近年のスマートグリッド化であり、これにさらに社会の低炭素化という側面も融合しながら、時代の要請に適合してきたことである。

DSM, DRのもっとも基本的な手法として、家庭用需要家向けの情報提供（電力消費量の需要家へのフィードバック、いわゆる見える化を含む）がある。高度なエネルギーマネジメントシステムで家電機器を自動制御するシステムが広く社会に普及するには時間がかかる一方で、集合住宅などで電力寡消費型世帯の場合、HEMSや高度なDRより、アクセスしやすく、消費者にわかりやすい携帯端末や宅内表示器による電力量・電力支出表示が好まれる場合がある。既に1990年代後半にNEDOプロジェクトとして、九州電力管内で自宅の電力消費量を表示するシステムの効果が検証されている<sup>[4,5]</sup>。現在、この研究は日米で需要家毎にカスタマイズされた省エネルギーレポートを配信する形で実装されつつある<sup>[6]</sup>。

電気料金を動的に時変にするダイナミック料金制も米国では1980年代から大口需要家向けに実験され<sup>[7]</sup>、我が国でも1990年代後半から実験が行われてきた<sup>[4]</sup>。

震災前からスマートメータ導入効果の実証試験の一部として、緊急ピーク時課金（Critical Peak Pricing, CPP）によるピーク電力抑制効果が示された<sup>[8]</sup>。震災以降は政府の意向により、いわゆるスマートコミュニティ4地区実証事業

の中でも社会実験が行われた<sup>[9]</sup>。

しかし、より費用対効果の高い需要分野は産業用・業務用の大規模に電力を消費し、エネルギーマネジメントを行っている需要家層である。DSMをDRに進化させた大きなドライバーは、2000年の加州での電力危機である。これにより、当時は卸市場と小売市場の価格を通したリンクが十分でなく、真に競争的な市場設計になっていなかったこととの教訓を得た。これを踏まえて、リアルタイム料金などで需要反応を系統に直ちにフィードバックし、卸市場の価格高騰を抑え、系統全体の信頼度を確保するためにピークロードマネジメントが導入されるようになった<sup>[10, 11]</sup>。さらに米国では、エネルギー市場（前日市場）での経済プログラム（需要入札）に始まり、容量市場への投入、アンシラリーサービス市場への投入と進んできた。ただし、DRの市場化に積極的なPJMの場合、新設電源と並んでDRを容量市場向けに用いているため、契約容量や収入ベースでは、容量プログラムが9割近くを占めている。

## 3. 最新動向

米国では、アグリゲータ等の新たなプレイヤーや様々なスマートグリッド技術を活用しながら、電力貯蔵やデマンドレスポンスなどの分散型エネルギー資源を電力市場に組み込み、系統運用に役立てる制度が展開されつつある<sup>[12]</sup>。今後、PVによる余剰発電（over-generation）が頻発する事態になると、デマンドレスポンスの役割としては、需要削減より、再生可能エネルギー余剰時の需要創出がより重要になる。

我が国でも米国やフランスより数年遅れで、同様の動きがある。DRの活用領域を従前のピークカットだけでなく、アンシラリーサービスまで拡大することを念頭に、2013年12月～2015

年3月の期間で経済産業省資源エネルギー庁実証事業として、DR事業者（アグリゲータ）と東京電力がインセンティブ型DR実証を実施した（経済産業省インセンティブ型ダイヤモンドリスポンス実証事業）。DR発動から実負荷抑制までの時間や削減量の有効性等を検証し、DRの価値を評価した。当該実証を通じて、今後のDR市場の姿を示すことで、海外事業者も含めたDR事業者の支援、ビジネス環境整備の促進を目的としている。

さらに、2015年度にはネガワット取引を対象とした「エネルギーマネジメントシステム構築に係る実証事業」が行われている。本事業では、需要削減を発電と等価な資源として相対契約や市場を通して取引することを想定して、ネガワット取引と称している。本稿執筆時点でアグリゲータ18社が事業者として採択されており、約2000口の需要家と契約し、一般電気事業者3社（東京、関西、中部）との間で、2015年8月からネガワット取引の実証を行っている。本事業の目的は、資源エネルギー庁が策定した「ネガワット取引に関するガイドライン」に定めた

ネガワット量を確定するためのベースラインの決定と測定方法等の妥当性の評価、国内のネガワットポテンシャルの推計である。

我が国でも系統運用のためのネガワット取引の経済性が検討される段階に進んでいる。デマンドレスポンス効果の測定方法・確実性や報酬額の決め方について検討し、市場化が進むことが期待される。また、FITによる変動電源の大量連系に備えて、系統柔軟性の供給源として需要側資源の活用が期待される。

## 4. 当所の取り組み

### 4.1 初期段階（1980年代～2000年）

電力中央研究所では、古くは1980年代から電力需要のマネジメントに関する研究を行ってきた。需要マネジメントに関する研究は、当時は文字通りデマンドサイドマネジメント（Demand Side Management, DSM）と呼ばれていた。ここでは、発電から小売り販売に至る一貫した垂直統合型の電気事業において、季時別料金（Time-of-Use Rate）による負荷削減・移行

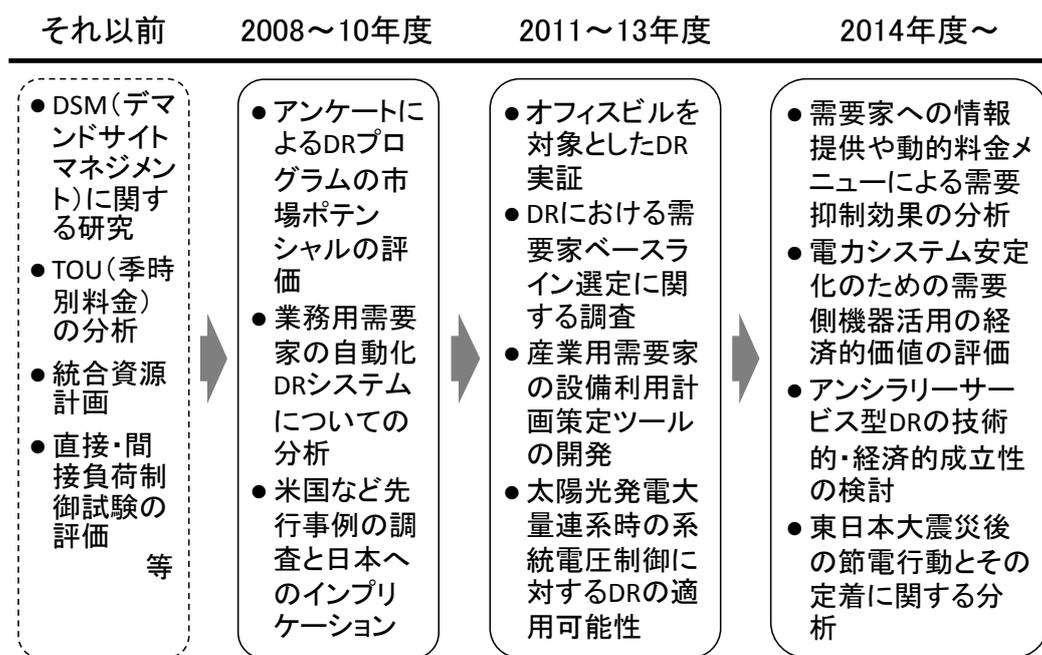


図1 電力中央研究所におけるデマンドレスポンス関連研究の経緯

効果の分析などが主なテーマであった<sup>[13-15]</sup>

(図1)。本分野の研究は、その後、需要サイドのとりわけ最大電力負荷の削減効果を供給サイドと同様に資源 (Resource) として扱い、供給サイドのみならず、需要サイドの資源も含めて経済的に最適な電力供給計画、いわゆる「統合資源計画 (Integrated Resource Planning)」へと発展を遂げた<sup>[16]</sup>。また、90年代の終わりに、国からの委託事業として九州電力㈱が実施した負荷制御試験に協力し、家庭部門における電気料金や情報提供、ピーク抑制協力金等に対する反応度合いについて定量的な分析を行って

いる<sup>[4,17-18]</sup>。

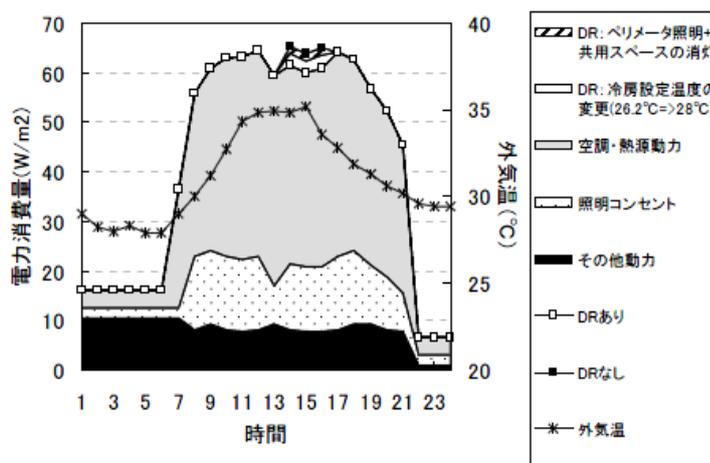
## 4.2 研究の本格化と着眼点

近年では、2008年度に研究課題「デマンドレスポンスの評価」を設定し、米国など先行する国における事例の調査に基づく日本へのインプリケーションの提示<sup>[11]</sup>、アンケートによるDRプログラムの市場ポテンシャルの評価 (表1)<sup>[18]</sup>、業務用需要家の自動化DRシステムについての分析 (図2)<sup>[19]</sup> などを実施した。また、各国で家庭用スマートメータの一斉導入が論じられ、米国がスマートメータ導入に期待する

表1 規模別・用途別のピーク時間帯需要と負荷削減ポテンシャル

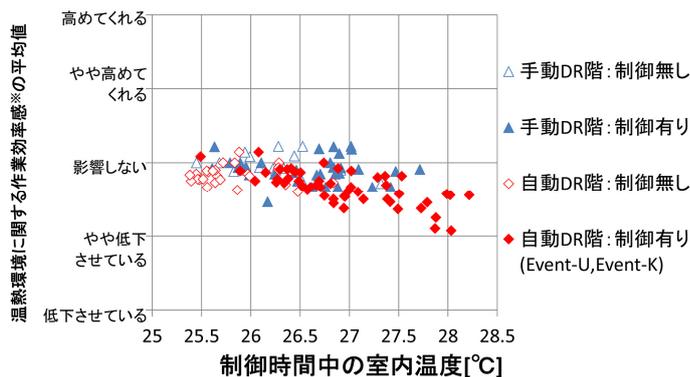
		総計	契約電力規模別			
			2000kW以上	500kW以上 2000kW未満	200kW以上 500kW未満	50kW以上 200kW未満
上段：負荷削減量 (MW)		1.323	708	410	99	104
中段：ピーク需要 (MW)		28.393	12,692	9,507	3,731	2,349
下段：ピーク需要に対する 負荷削減量の割合		4.7%	5.6%	4.3%	2.7%	4.4%
事業所 用途別	オフィス・ 事務所	149 4,694 3.2%	23 1,335 1.7%	36 1,100 3.3%	26 839 3.1%	63 1,323 4.8%
	工場	950 12,422 7.6%	639 7,153 8.9%	279 4,078 6.8%	26 1,031 2.5%	6 154 3.8%

出典：文献<sup>[18]</sup>



出典：文献<sup>[19]</sup>

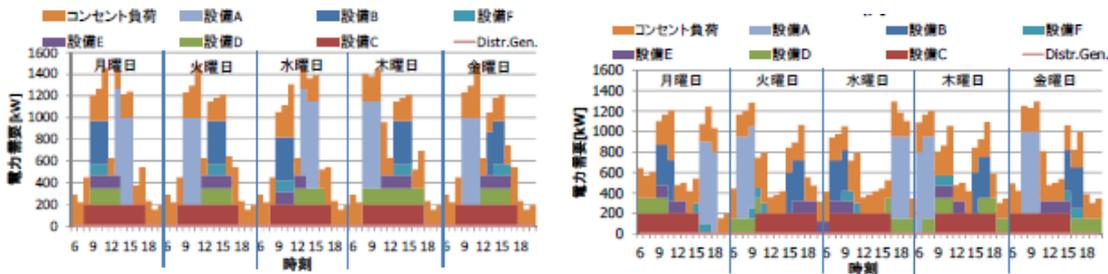
図2 モデル事務所ビルの電力負荷曲線と負荷削減量 (個別電気空調, 床面積5千㎡未満)  
(夏季平日の13~16時の間にデマンドレスポンスプログラムを発動する場合)



出典：文献<sup>[22]</sup>

※温熱環境が自分の作業効率に与える影響に関する主観申告値

図3 DR制御に伴う温熱環境変化に対する作業効率感（自動DR vs 手動DR）



(a)各設備が各自のタイミングで稼働した場合 (b)コスト最適ツールを用いて最大電力を抑制した場合

出典：文献<sup>[24]</sup>

図4 翌週設備利用計画の例

社会的便益を調査し、我が国においてこれらの便益を評価する上での課題を明らかにした<sup>[1]</sup>。これらの研究を通じて、日本でピークカット型のデマンドレスポンスを実施する場合には、どのような需要家や用途で削減ポテンシャルが多そうか、また、どのような課題が予想されるかなどを明らかにしてきた。

その後、後継課題として、2011年度に「日本型デマンドレスポンスの成立性評価」を設定した。本フェーズでは、外部機関との共同研究を通じて、実際のオフィスビルを対象としたDR実証試験を行うことによる、文献調査では得られない実体験に基づく課題の洗い出し（図3）<sup>[20-22]</sup>、DRの効果を測定するために不可欠であるベースライン需要の推定方法などについての研究<sup>[23]</sup>を実施した。また、これまで焦点を当て

ていなかった産業用需要家にも着目し、ピーク需要を削減するような大規模な電力負荷の機器の利用計画を策定するためのツール開発を行った（図4）<sup>[24]</sup>。一方、この頃より、太陽光発電（PV）が大量に系統連系されることによる様々な問題が指摘されるようになり、これらのうち、特にPVからの逆潮流による配電電圧の上昇問題に対し、これをDRメニューとして需要家に協力を仰いだ場合の便益などについて評価した（図5、表2）<sup>[25]</sup>。

そして、2014年度より研究課題「次世代需要マネジメントの価値評価」を開始し、本特集号でこの後に記す研究論文や研究ノートに関する研究を行っている。これらの内容については、本誌の個々の記事を参照されたい。

表2 配電線電圧制御のためにPV逆潮流を抑制するDRのシミュレーション結果

DR発動	パターンi (PVが高圧系統全体にわたって均等に配置される場合)			パターンii (PVが高圧系統の後半部分に配置される場合)		
	30%	40%	50%	30%	40%	50%
DR発動日数[日/年]	23	98	221	50	182	263
1日あたりのDR発動時間[時間/日]	2.4	3.4	4.2	3.0	3.7	4.6
年間必要抑制電力量a [MWh/年]	16	210	771	42	376	1,124
年間全逆潮流量に対するaの割合 ([ ]は年間PV全発電量に対するaの割合)	2% [0.4%]	13% [4%]	30% [12%]	6% [1%]	24% [8%]	44% [18%]

出典：文献<sup>25)</sup>

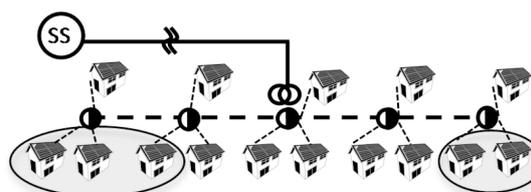
### 4.3 今後の研究の方向性

以上述べてきたように、当所では長年、需要マネジメントの研究に関わってきた歴史と実績がある。それらを踏まえ、本節では、今後の需要マネジメント研究として重要となると思われる分野について述べる。

ピークカット型のDRについては、当所における研究のみならず、国の4地域実証試験（例えば<sup>26)</sup>）、電力各社の実証試験（例えば<sup>27)</sup>）など、様々な成果が蓄積されるに至り、CPP等に対する反応度合いなどが明らかになりつつある。しかしながら、効果の継続性や、価格弾力性等についてはバラツキが大きく、統一的な知見が整理されたとは言えない状況であると思われる。

ピークカット型以外のDRについては、前節でも紹介したように、固定価格買取制度（Feed-in-Tariff, FIT）の影響による、PV等の大量連系もたらす系統不安定化に関する様々な問題のうち、特に配電レベルで、PV逆潮流削減に対する具体的な出力抑制インセンティブを提案するようなDRプログラムの費用便益分析が重要になっている。また、アンシラリーサービス等のFast DRについては、電力システム改革が先行する米国では市場取引も行われ

ている段階にあるが、日本では具体的なサービスとその便益について研究を進めるべき段階にあると考えられる。



SS:配電用変電所  
太点線:低圧線、細点線:引込線、実線:高圧線  
PV連系:丸囲み住宅の5軒のみ

(PV連系率30%における柱上変圧器以下の低圧形態)

出典：文献<sup>25)</sup>

図5 低圧配電システムモデル

電力システム改革との関係で付言すれば、2016年度に開始される小売全面自由化を控え、新たな顧客サービスとしてDRを考え、どのようなインセンティブを提供すれば需要家の満足度を高められるかといった視点の研究も求められよう。そして、このために、今年度より本格的な普及が始まるスマートメータから得られる30分積算・100W単位の時間帯別電力需要データを活用することが重要である。

以上のことから、今後、われわれの研究を強化していきたいと考える分野として、以下の3分野をあげたい。

- ・各地のDRパイロット事業データに基づく評価, 国外事例の調査と教訓の分析
- ・需要側資源を供給力に位置付ける制度の設計
- ・電力システム改革後の需給体制を見据えた新サービスの創出

当所は, 今後も電気事業の中核的研究機関として, 来るべき電力システム改革後を見据えた望ましい需要マネジメント方策に関する研究を進めていく所存である。

## 参考文献

- [1] 高山正俊, 山口順之, 高橋雅仁, 戸田直樹, 浅野浩志 (2010) 「スマートメータ導入に関する米国の動向とわが国における便益評価の課題」, 電力中央研究所報告 Y09028.
- [2] 浅野浩志 (1985) 「ロードマネジメントとその費用便益分析」, 電力経済研究, No.19.
- [3] 浅野浩志 (2012) 「デマンドレスポンスによる需給安定化」, 電気学会誌, Vol.132, No.10, pp.688-691.
- [4] 浅野浩志 (1997) 「ピーク対応料金下における家庭用需要家の負荷調整行動の分析—間接負荷制御実験データを用いた価格効果の測定—」, 電力中央研究所報告 Y97004.
- [5] 浅野浩志 (1999) 「電力使用量情報の省エネルギー効果」, 電力経済研究, No.41.
- [6] 向井登志広, 西尾健一郎, 小松秀徳, 内田鉄平, 石田恭子 (2015) 「スマートメータデータを活用した情報提供と行動変容—集合住宅におけるピーク抑制・省エネ実証事例—」, 電力中央研究所報告 Y15002.
- [7] H. Asano (1989). “Survey of Utility Real-Time Pricing Projects in the U.S.,” Energy Modeling Forum SR 3, Stanford University.
- [8] H. Asano (2012), “Smart Metering and Demand Response Programs in Japan,” Evora 2012 Symposium on Microgrids, September 2012, Evora, Portugal.
- [9] 浅野浩志 (2014) 「これからのデマンドレスポンスの姿は」, 電気新聞ゼミナール, 2014年8月.
- [10] 浅野浩志 (2001) 「競争市場における需要側反応プログラムの役割—米国におけるピークロードマネジメントの現状—」, 電力経済研究, No.46.
- [11] 山口順之, 今中健雄, 浅野浩志 (2006) 「米国における需要反応プログラムの実態と課題」, 電力中央研究所報告 Y05028.
- [12] 浅野浩志 (2015), 「電力システム運用における需要側資源の活用」, 電気学会誌, 135 巻, 11 号.
- [13] H. Asano, S. Sagai and K. Yamaji (1988) “Microscopic Analysis of Industrial Customers Response to Time-of-Use Rates: Case Studies for an Integrated Steel Mill and a Heavy Electrical Apparatus Works,” CRIEPI Report, EY87002
- [14] H. Asano, S. Sagai and E. Imamura (1991) “Commercial Customer Response to Time-of-Use Rates: Case Study of Hotel with Cogeneration Systems,” CRIEPI Report, EY90002
- [15] H. Asano (1992) “Demand-Side Management of Japanese Electric Power Industry,” CRIEPI Report, EY92002
- [16] 高橋雅仁, 浅野浩志, 永田真幸 (1998) 「統合資源計画モデルの開発と蓄熱式空調システム普及方策への適用」, 電力中央研究所報告 Y97021.
- [17] 浅野浩志 (1998) 「家庭用間接負荷制御実験における情報提供とピーク抑制協力金の効果分析」, 電力中央研究所報告 Y97008.
- [18] 山口順之, 高山正俊 (2011) 「業務・産業需要におけるデマンドレスポンスのポテンシャル評価—関東圏の事業所アンケート調査に基づく集計・分析—」, 電力中央研究所報告 Y10020.
- [19] 高橋雅仁, 浅野浩志, 山口順之 (2009) 「業務部門のデマンドレスポンスによる需要調整の技術的ポテンシャルの評価」, 電力中央研究所報告 Y08034.
- [20] 高橋雅仁, 上野剛, 高山正俊, 浅野浩志 (2010) 「オフィスにおけるデマンドレスポンス制御試験: 需要調整効果と居室内快適性の分析」, 電力中央研究所報告 Y09014.
- [21] 高橋雅仁, 上野剛, 高山政俊, 浅野浩志 (2011) 「オフィスにおけるデマンドレスポンス制御試験 II: 居室内快適性とワーカーの制御キャンセル率の分析」, 電力中央研究所報告 Y10040.
- [22] 高橋雅仁, 上野剛, 坂東茂 (2013) 「オフィスビルを対象にしたデマンドレスポンス制御の実証試験—自動 DR と手動 DR の比較—」, 電力中央研究所報告 Y12025.
- [23] 山口順之 (2013) 「デマンドレスポンスにおける需要家ベースライン選定に関する北米評価事例の調査」, 電力中央研究所報告 Y12021.
- [24] 坂東茂, 比護貴之, 浅野浩志, 古川慧 (2013) 「産業用需要家の電力需要マネジメントのための設備利用計画策定ツールの開発」, 電力中央研究所報告 Y12018.
- [25] 河村清紀 (2013) 「太陽光発電大量連系時の系統電圧制御に対するデマンドレスポンスの適用可能性—発動頻度と経済性の評価—」, 電力中央研究所報告 Y12008.
- [26] 資源エネルギー庁 (2014) 「ディマンドリスボ

ンスについて「新たな省エネのかたち」, 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会 (第6回) 配布資料3.

[http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene\\_shinene/sho\\_ene/pdf/006\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/pdf/006_03_00.pdf) (最終アクセス日: 2015年10月1日)

[27] 九州電力 (2013) 「電気料金による電力使用抑制効果に関する実証試験 結果概要」, 2015年1月22日プレスリリース資料.

[http://www.kyuden.co.jp/press\\_h130122-1.html](http://www.kyuden.co.jp/press_h130122-1.html)  
(最終アクセス日: 2015年10月1日)

浅野 浩志 (あさの ひろし)

電力中央研究所 社会経済研究所

永田 豊 (ながた ゆたか)

電力中央研究所 社会経済研究所

# ピークタイム・リベートによる家庭用需要家の デマンドレスポンスの効果 —北陸地域での実証データに基づく分析—

Residential Demand Response by Peak-Time Rebate  
-Evidence from Pilot Program in Hokuriku Area-

キーワード：家庭用需要家，デマンドレスポンス，ピークタイム・リベート，実証試験

服部 徹 高橋 雅仁 坂東 茂 加部 哲史

2013年度から2カ年にわたって実施された北陸地域での家庭用需要家を対象としたデマンドレスポンス(DR)の実証試験では、これまで我が国で実証が進められてきたクリティカル・ピーク・プライシング(CPP)に加え、需要家の節電量に対して割引(払い戻し)を行うピークタイム・リベート(PTR)による需要抑制効果を国内では初めて検証した。その結果、PTRは、節電による経済的メリットが等しくなるように設計されたCPPと、ほぼ同程度の需要抑制効果を持つことが分かった。また、調査終了後のモニターへの意識調査からは、PTRの方がCPPよりも受容性が高いことも確認した。ただし、割引単価が高くなるほど需要抑制効果が大きくなるといった効果は見られなかった。なお、1年目と2年目の夏季の需要抑制効果を比較すると2年目の需要抑制効果は小さいことが分かった。

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. PTRに関する海外の実証試験のレビュー             <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 PTRの概要</li> <li>2.2 PTRの設計事例</li> <li>2.3 PTRの需要抑制効果</li> </ol> </li> <li>3. 北陸地域の家庭用DR実証試験の概要</li> <li>4. 需要抑制効果の推定手法とデータ</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>5. 分析結果             <ol style="list-style-type: none"> <li>5.1 PTRとCPPの比較</li> <li>5.2 単価の違いによる影響</li> <li>5.3 需要抑制効果に関するその他の結果</li> <li>5.4 モニターごとの需要抑制</li> </ol> </li> <li>6. おわりに</li> </ol> |
|---|---|

## 1. はじめに

我が国では、東日本大震災以降、電力の需給ひっ迫の緩和のため、需要家に経済的インセンティブを与えて、ピーク需要の抑制を促すデマンドレスポンス(DR)に対する注目が高まった。特に、スマートコミュニティの実証事業では、需給ひっ迫の予想される日のピーク時間帯(緊急ピーク時)に電気料金の単価を通常の2倍から5倍の水準に引き上げるという緊急ピーク時課金(Critical Peak Pricing, CPP)と呼ばれる料金メニューによる家庭用需要家のDRの効果の検証も行われ、一定の需要抑制効果が認められたとされている。このようなDRを促す料

金メニューは、2016年度から始まる小売電力市場の全面自由化によって、競争の中で提供されることも期待されている。

しかし、CPPについては、需要抑制効果が認められるとしても、時折極端に高くなる料金に直面するリスクを嫌い、特に小売全面自由化後に、需要家が料金メニューを自由に選ぶ状況においては、選択されない可能性が高い。実際に、小売全面自由化を実施し、スマートメーターを設置している諸外国でも、小売事業者が競争の中でCPPのような料金メニューを提供している事例はほとんどない。

そうした中、DRを促しつつ、需要家にとっても魅力のあるプログラムとして注目されて

いるのが、ピークタイム・リベート (PTR) である<sup>1</sup>。PTRでは、需給ひっ迫が予想される日のピーク時間帯に、節電を行った需要家に対し、節電量に応じた割引 (リベート) を適用することで、節電に対する経済的インセンティブを与えるプログラムである。PTRでは、需要家は高い料金を支払うリスクには直面せずに、節電を行う経済的インセンティブが与えられるので、CPPよりも受容性が高いと思われる<sup>2</sup>。もし、PTRによる需要抑制効果がCPPによるそれとほぼ同じであれば、全体として得られる需要抑制効果は大きくなると考えられる。しかしながら、PTRでは、需要家が料金単価の上昇というリスクに直面しないがゆえに、節電に最大限取り組みず、需要抑制効果も小さくなるのではないかと懸念もある。そこで、これから小売全面自由化を控え、需要家に選択されることを前提に、DRの効果を得るための手段として、PTRが有用かどうかについては、その効果を検証する必要がある。

2013年から2014年の2カ年にわたって北陸地域で実施された家庭用需要家向けのDRの実証試験は、国内では初めてPTRを対象に含めた、本格的な実証試験である。また、これまで国内での実証試験が主に太平洋側で行われてきたのに対し、気候帯の異なる日本海側で行われた実証試験として、DRの需要抑制効果に地域差があるかどうかを見る上でも重要な実証となっている。本稿は、この北陸地域の実証試験で得られたデータを分析し、主にPTRの需要抑制

効果についての分析結果をとりまとめたものである。

以下、2節で、これまでのPTRに関する海外の先行的な実証試験を振り返った後、3節では、北陸地域で実施された家庭用DRの実証試験の概要を述べる。次に、4節で分析手法について述べた後、5節でPTRやCPPの需要抑制効果の分析結果を示す。6節で、分析結果をまとめ、今後のDR実証に関する展望について述べる。

## 2. PTRに関する海外の実証試験のレビュー

### 2.1 PTRの概要

ピークタイム・リベート (PTR) とは、緊急ピーク時に需要を通常の水準よりも節電した場合、その節電量に応じて払戻を行うが、使用した電力量については、通常の料金を支払うというものである。節電量を決める際の参照基準となる通常の消費量を「ベースライン」と呼ぶ。PTRを適用される需要家は、緊急ピーク発動日のピーク需要を抑制すれば、その分、普段支払う電気料金を節約できるだけでなく、払戻を受けることができるので、節電のインセンティブが与えられると考えられる。一方で、仮に需要を抑制できなくても、普段支払う電気料金を払うだけなので、CPPの場合のように、使用電力量に対して非常に高い料金を支払うことになるリスクはない、という意味でリスクフリーである。したがって需要家は、もしPTRが提供されれば、CPPよりも積極的に選択すると考えられる。もっとも、PTRを提供する電力会社の側は、払戻の原資を確保しなければならない他、払戻単価やベースラインの設定など、プログラムの設計が難しい部分もある<sup>3</sup>。また、PTRで

<sup>1</sup> 服部・戸田(2011)および服部(2013)を参照。

<sup>2</sup> DRを促す料金メニューやプログラムの中で、PTRを選ぶ需要家が多いことを示す米国の調査結果として、例えば、Treadway (2013)がある。また、米国メリーランド州ではBaltimore Gas & Electric社などがスマートメーターを設置した需要家にPTRを適用しており、2014年の夏の時点で全需要家の約7割に相当する86万軒の需要家が加入している。Baltimore Gas & Electric (2015)を参照。

<sup>3</sup> Borenstein (2014)は、ベースラインの設定に伴う経済的問題に基づいて、PTRに対する批判的見解を述べている。

表1 PTRを適用している北米の主な家庭用DR実証試験における単価の設定

実証試験 (地域, 実施年, 参加世帯)	単価設定ケース	比較対象 世帯の 料金単価	PTRの 払戻単価	CPPの 料金単価
Anaheim Critical-Peak Pricing Experiment [Anaheim] (米・カリフォルニア, 2005年, 123世帯)	240kW/月まで	6.72	35.00	N/A
	240kW/月を超える分	11.02		
Ontario Smart Price Pilot [Ontario] (カナダ・オンタリオ, 2007年, 498世帯)	600kWh/月まで	5.80	30.00	30.00
	600kWh/月を超える分	6.70		
BGE Smart Energy Pricing Pilot [BGE] (米・メリーランド, 2008年, 1,375世帯)	PTR低単価ケース(L)	15.00	116.00	130.00
	PTR高単価ケース(H)		175.00	
PowerCents DC [PCDC] (米・ワシントンD.C., 2008-09年, 1,245世帯)	夏季	12.30	66.00	77.10
	冬季	11.70	36.00	72.20
CL&P Plan-it Wise [CL&P] (米・コネチカット, 2009年, 1,251世帯)	低単価ケース(L)	12.20	77.70	77.80
	高単価ケース(H)		173.60	173.60

注：単位はセント/kWh (Ontario Smart Price Pilotのみカナダ・セント)

出所：Anaheim Critical Peak Pricing ExperimentについてはWolak (2006), Ontario Smart Price PilotについてはOntario Energy Board (2007), BGE Smart Energy Pricing PilotについてはFaruqui and Sergeci (2009a), PowerCents DCについてはeMeter Strategic Consulting for the Smart Meter Pilot Program (2010), CL&P Plan-it WiseについてはFaruqui and Sergeci (2009b)をそれぞれ参照。

CPPと同様の需要抑制効果が得られるのかについては検証が必要とされ、海外、特に北米では、PTRによるDRの実証試験が行われてきた。

## 2.2 PTRの設計事例

家庭用需要家を対象にPTRを適用した北米の主なDR実証試験において、PTRの払戻単価がどのように設定されたのかを表1にまとめている。緊急ピーク時のPTRの払戻単価は、多くの場合、1 kWhの節電に対して、同じ実証試験で適用されているCPPと少なくとも同程度の経済的インセンティブを与えるように設定されている<sup>4</sup>。例えば、BG&E社のSmart Energy Pricing PilotのPTR低単価ケースでは、払戻単価と通常支払う料金単価の合計がCPPの緊急ピーク時の料金単価とほぼ同じ水準に設定されている。すなわち、以下の式が成り立つように設定されている<sup>5</sup>。

$$\text{CPPの料金単価} \leq \text{PTRの払戻単価} + \text{通常の料金単価} \quad (1)$$

等号が成り立つように設定すれば、消費電力を一単位節電する時の需要家の利得の変化はCPPとPTRで同じとなる。さらに、PTRの払戻単価とCPPの料金単価を同じ（またはほぼ同じ）に設定しているケースもある<sup>6</sup>。

また、PTRのリバートの支払い額を決める節電量の測定に必要なベースラインについては、緊急ピーク時に経済的インセンティブがなければ生じていたであろう需要量を反映するように設定するのが基本となる<sup>7</sup>。ただし、これ

<sup>6</sup> その理由については、各実証試験の報告書等には明記されていないが、緊急ピーク時において、普段であれば使っていた電気を使わない（節電する）ということは、いわば発電をして需給ひっ迫を緩和しているのと同じであり、そうであれば、同じ時に発電した事業者が受け取る対価（価格）を節電した需要家も受け取れるようにすべき、という理由が考えられる。

<sup>7</sup> なお、ベースラインの値については、実証試験に参加するモニターには事前に知らせていないケースが多いが、これは、需要家によって意図的にベースラインを操作されるのを防ぐためである。普段の電力消費量を増やし、ベースラインを高くすることで、リバートの適用を受けられる削減量を大きくすることができてしまうという問題をいかに回避するかは、PTRのベースライン設定に伴う問題の一つである。

<sup>4</sup> 緊急ピーク時以外の単価はPTRの方がCPPよりも少し高めに設定されていることが多い。

<sup>5</sup> 表1の単価では、厳密には(1)式に一致していないが、例えばPowerCents DCの夏季においては、Wolak (2011)が、こうした考え方で設定されたと述べている。

までの北米におけるDR実証の事例を見ると、その設定にはいくつかの方法があり、必ずしも定まった方法があるとはいえない。

例えば、Ontario Energy Board (2007)によれば、San Diego Gas & Electric社のPTRプログラムでは、直前の平日の5日間の平均としていた。また、カナダのオンタリオ州の実証 (Ontario SPP) では、直前の平日の5日間の平均の25%増しとしていた<sup>8</sup>。このように緊急ピーク発動日の直前のデータを用いる方法がある一方で、Anaheim Critical Peak Pricing Experimentでは、夏季の前半の平日における最大3日平均としていた他、PowerCentsDCでは、当月の平日の最大3日平均とするなど、一定期間の最大消費電力をベースラインにする方法もある。

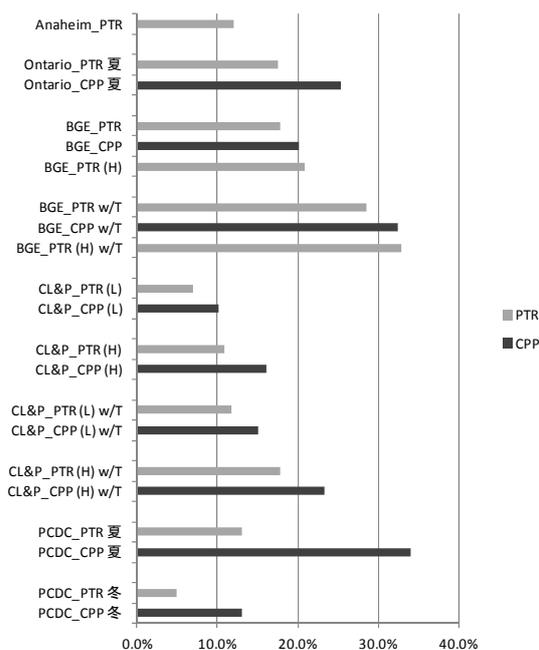
### 2.3 PTRの需要抑制効果

では、PTRによって、CPPと同じような需要抑制効果が見られたのかどうかを北米の実証事例に基づき検証してみよう。図1は、北米の実証でPTRによるピーク需要抑制の効果を同じ実証事業の中ではほぼ同じ条件で適用されたCPPによるピーク需要抑制効果と並べて比較したものである。Anaheim Critical Peak Pricing Experimentのケースのみ、PTR単独の実証のため、CPPとの比較はない。

図1からは、PTRでも一定のピーク需要抑制効果が見込めるといえることがわかる。ただし、図1には示していないが、Ontarioの実証における冬季の結果では、CPPもPTRも統計的に有意な抑制効果は見られなかったとしている。

<sup>8</sup> 25%増しとするのは、計算の簡便性から、基本的には直前の平日の5日間の平均値をベースラインとするアプローチを採用したが、そのままでは、緊急ピーク発動日に予想される需要を過小評価してしまう可能性があったためである。そこで、別の実証でCPPの発動日におけるコントロールグループの需要が23%増加しているというデータに基づき、一律に直前の平日の5日間の平均値を25%大きくしたのである。

PowerCents DC (PCDC) では冬季でもピーク需要抑制効果が認められるが、それは夏季における効果よりもそれぞれ小さくなっている。また、(w/T) と表示したDRの支援技術<sup>9</sup>を利用するケースでは、PTRもCPPも需要抑制効果は大きくなる。



注：w/Tは、DR支援技術を利用したケースを表わす。

図1 北米の家庭用DR実証におけるPTRとCPPの需要抑制効果

PTRの需要抑制効果について、CPPとの比較で図1から読み取れることは、ほぼ同じ条件であれば、CPPよりもその効果は小さいということである。OntarioやCL&Pの実証では、PTRの払戻単価とCPPの料金単価が同じでPTRの方がCPPよりも節電に対する経済的インセンティブは大きいはずだが、ピーク需要の抑制効果はCPPの方が大きい。また、BG&Eのケースで

<sup>9</sup> DRの支援技術とは、スマートサーモスタットなど、空調機器の温度などをCPP発動日に合わせて自動的に変更するよう事前に設定することができる技術である。服部・戸田(2011)を参照。

は、PTRの払戻単価がCPPの料金単価とほぼ同じケースでは、CPPよりも抑制効果は小さく、払戻単価をCPPの料金単価の約1.35倍に設定したPTR (H)のケースで、CPPと同程度の抑制効果が得られている。

このように、少なくとも北米の家庭用DR実証試験では、PTRとCPPが、節電に対して同じような経済的インセンティブを与えるように設計されていても、PTRの需要抑制効果はCPPに比べて弱い傾向がある。ただし、日本国内でも、同じような傾向が認められるのかどうかは、実証試験で確認する必要があるだろう。

### 3. 北陸地域の家庭用DR実証試験の概要

北陸地域における家庭用DR型料金メニューの実証試験は、CPPとPTRおよび消費の「見える化」による需要抑制効果を明らかにするために実施されたものである。調査期間は、2013年の夏季（7月から9月中旬）、2013年の冬季（2013年12月から2014年2月）、2014年の夏季（7月から9月末）である。

北陸の3つの県（富山、石川、福井）で募集したモニターをCPP、PTR、見える化、比較用、の4つのグループにランダムに振り分け<sup>10</sup>、対照実験で料金メニュー等の効果を分析する。それぞれのグループに割り振られた2013年時点でのモニターの数表2に示すとおりである。

表2 グループ別モニター数（2013年夏季）

グループ	従量電灯	季時別電灯	合計
CPP	107	110	217
PTR	109	110	219
見える化	52	51	103
比較用	75	107	182
合計	343	378	721

注：2013年冬季、2014年夏季のモニター数は若干減少している。

<sup>10</sup> ただし、夏季使用電力量が偏らないように振り分けを行った。

なお、CPPが適用されるモニターには、CPPを「仮想の電気料金メニュー」として説明し、PTRが適用されるモニターにはPTRを「仮想の割引型料金メニュー」として説明している。また、モニターへの説明資料には、ピーク時間帯における電力使用量を抑えることで、電気料金が安くなることについての説明がある。以下、各グループに適用される条件について説明する。

#### (1) 緊急ピーク時課金（CPP）

CPPでは、調査期間中に、節電をお願いする日（DR発動日）のピーク時間帯（夏季は13～16時、冬季は17～20時）に、通常の数倍から10倍程度に料金単価を変化させる。「発動日」は土日祝日・お盆・年末年始を除く日に発動され、モニターには前日に電子メールまたはFAXで連絡される。

調査終了後、モニターにはCPPの適用によって生じる差額精算金を加味した協力金が支払われる。差額精算金とは、モニターの電気の使用実績に基づいて、基準とする電気料金メニューを適用した場合の支払額と、CPPを適用した場合の支払額の差額である。ピーク時間帯とその他の時間帯の使用量によって差額精算金はプラスにもマイナスにもなる。モニターには一律に協力金が支払われるが、これに差額精算金を加えた額が最終的にモニターに支払われる。具体的には、2013年夏季に7,000円、2013年冬季と2014年夏季は合わせて7,000円を協力金として支払っている。ただし、差額精算金を加えた後の支払い額は、5,000円が最低保証額となっており、差額精算金が合計でマイナス2,000円以下であっても、5,000円が支払われる。

#### (2) ピークタイム・リベート

PTRは、調査期間中に、節電をお願いする日の節電量に応じて、料金単価を割り引くメニューである。節電量とは、発動日に、通常

であれば使用していたと考えられる使用量を基準（ベースライン）として算定する。今回の調査では、ベースラインを発動日の前日までの平日の3日間の使用量の平均値とし、その中に発動日が含まれる場合には、それを除外した3日間とする。その計算のイメージは図2に示すとおりである。

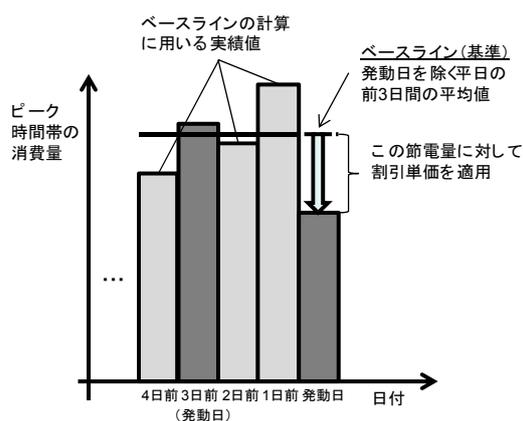


図2 ピークタイム・リベートにおける節電量の算定のイメージ

なお、発動日にベースラインを上回っても、モニターには特段、高い料金単価が適用されるわけではない。PTRのモニターには、基本協力金の7,000円に加え、割引額の合計が加算されて支払われる。したがって、最終的な協力金の支払い額は7,000円を下回ることはない。

### (3) 消費の見える化

消費の「見える化」のモニターには、調査期間中の節電をお願いする日の連絡はするが、料金単価を変えたり、割引を適用したりせず、省エネナビによる消費量の情報のみを提供する。見える化のモニターには協力金として5,000円が支払われる。

### (4) 比較用

比較用のモニターは、通常通り電気を使用してもらい、使用電力量の計測のみ行った。比較用のモニターにも省エネナビが設置さ

れ、使用量を記録するが、モニター自身はそれを見ることができないようにしている。ただし、調査への協力金として5,000円が支払われる。

調査期間中の非発動日に、モニターに適用される電気料金の単価（基準とする電気料金メニューの単価）は表3に示すとおりである。

表3 電気料金単価（円/kWh，税抜き）

(従量電灯契約のモニター)

1ヶ月の使用量	CPP	PTR	見える化・比較用
～120kWh	14.80	17.00	16.96
120～300kWh	18.80	21.00	20.66
300kWh～	20.80	23.00	22.30

(季時別電灯契約のモニター)

時間帯	CPP	PTR	見える化・比較用
10～17時	30.30	33.00	32.30
8～10時, 17～22時	18.30	21.00	20.48
22～8時	8.00	8.00	7.47

注：見える化・比較用の電気料金単価は約款単価。他に、燃料費調整額・再エネサーチャージ・太陽光付加金に加算される。

緊急ピーク時にCPPのモニターに適用される料金単価およびPTRのモニターに適用される割引単価は、発動日によって、表4に示す第1段階から第4段階までのいずれかとなる。

表4 発動日に適用されるCPPの料金単価およびPTRの割引単価（円/kWh，税抜き）

	CPP	PTR	
		従量電灯	季時別電灯
第1段階	50円/kWh	30円/kWh	17円/kWh
第2段階	100円/kWh	80円/kWh	67円/kWh
第3段階	150円/kWh	130円/kWh	117円/kWh
第4段階	200円/kWh	180円/kWh	167円/kWh

各段階におけるCPPの料金単価とPTRの割引単価は、平均的なモニター（従量電灯の場合、月の使用量を300kWhとする）が1kWhの使用量を控えるときに実質的に獲得できる額がCPPとPTRでほぼ同じになるように設定している。すなわち、2節で説明したように、CPPとPTRでは節電を行う経済的インセンティブは同じという前提になっている。例えば、第1段階の場合、CPPのモニターは1kWhの使用を控えれば、50円を支払わずに済むので、50円を獲得することになる。一方、従量電灯のPTRのモニターは1kWhの使用を控えることで、21円を支払わずに済むことになるのに加え、割引額として30円を受け取るので、合計で51円（約50円）を獲得することになる。季時別電灯のPTRのモニターは1kWhの節電で、33円を支払わずに済み、さらに割引額として17円を受け取るので、実質的に50円を獲得する計算になる。

なお、CPPの料金単価は、北陸地域の平均的な需要家の電気の使い方を当てはめた場合に、料金収入（需要家の支払額）が同じになるよう、「収入中立的」に設定されている。

#### 4. 需要抑制効果の推定手法とデータ

需要抑制効果は、パネルデータ重回帰分析という計量経済学的手法を用いて推定する。すなわち、モニターの日々のピーク時間帯の消費量（ $Peak_{it}$ ）をグループ別のダミー変数（比較用を除く）、発動日のダミー変数、およびグループ別のダミー変数と発動日のダミー変数の交差項を説明変数とするモデルで、料金変動による需要抑制効果は、CPPやPTRといったグループを表すダミー変数と発動日のダミー変数の交差項の係数に基づいて推定することができる。他に、気温の変化による需要の変化を考慮するため、日最高気温（冬季は日最低気温）を

説明変数に加えている他、夏季はお盆の日を表すダミー変数を説明変数に加えている。なお、週末や祝日のデータは除いており、平日のデータのみを利用して回帰モデルを推定している<sup>11</sup>。また、従量電灯契約のモニターと季時別電灯契約のモニターのサンプルを分け、別々にモデルを推定する。推定する回帰モデルは、夏季の場合、以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \ln Peak_{it} = & \alpha + \beta_1 \cdot VIS_i + \beta_2 \cdot PTR_t + \beta_3 \cdot CPP_i \\ & + \gamma_0 DR_t + \gamma_1 DR_t \cdot VIS_i \\ & + \gamma_2 DR_t \cdot PTR_t + \gamma_3 DR_t \cdot CPP_i \quad (2) \\ & + \delta_0 Obon_t + \delta_1 Temp_{it} + \delta_2 Temp_{it}^2 \\ & + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

ただし、 $CPP_i$ はモニター*i*がCPPグループである場合に1をとるダミー変数、 $PTR_t$ はモニターがPTRグループである場合に1をとるダミー変数、 $VIS_i$ はモニターが見える化グループである場合に1をとるダミー変数である。また、 $DR_t$ はDR発動日のみ1をとるダミー変数で、 $Obon_t$ はお盆の日に1をとるダミー変数である。 $Temp_{it}$ はモニター*i*の居住する地域の日最高気温で、富山市、金沢市、福井市、高岡市、魚津市、七尾市で記録されたデータを用いる。ただし、小松市は金沢市の気温データ、越前市は福井市のデータを用いる。 $Temp^2$ は $Temp$ の二乗で、日最高気温がピーク需要に与える効果が一定ではなく、徐々に変化する可能性（気温とともに需要が増加するものの、増加率は徐々に小さくなる、あるいは減少に転じる、といった可能性）も考慮するために含める。 $\alpha$ や $\beta$ 、 $\gamma$ および $\delta$ は、推定するパラメータで、 $\varepsilon$ は誤差項である。

<sup>11</sup> なお、2013年夏季の実証試験は7月1日から9月13日まで、2014年夏季は7月1日から9月30日まで実施しているが、2年間の比較を行うため、2014年の夏季については9月13日までのデータを用いている。

表5 基礎統計量

変数	2013年夏季				2014年夏季				2013年度冬季			
	従量電灯		季時別		従量電灯		季時別		従量電灯		季時別電灯	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
ピーク時消費量 (Wh)	1,717	1,285	1,762	1,330	1,478	1,094	1,537	1,124	3,002	1,683	3,679	2,267
オフピーク時消費量 (Wh)	12,075	6,222	13,759	7,282	10,988	5,799	12,773	6,446	15,031	7,983	18,224	10,761
日消費量 (Wh)	13,793	7,255	15,521	8,308	12,466	6,693	14,309	7,320	18,033	9,349	21,903	12,503
ピーク時消費比率	0.1199	0.0461	0.1099	0.0463	0.1152	0.0418	0.1042	0.0404	0.1686	0.0526	0.1731	0.0594
見える化ダミー	0.1435	0.3506	0.1321	0.3387	0.1559	0.3628	0.1334	0.3400	0.1586	0.3653	0.1344	0.3411
PTRダミー	0.3236	0.4679	0.2904	0.4539	0.3070	0.4613	0.2887	0.4532	0.3172	0.4654	0.2912	0.4543
CPPダミー	0.3071	0.4613	0.2966	0.4568	0.2915	0.4545	0.2996	0.4581	0.2973	0.4571	0.2964	0.4567
DR発動日ダミー	0.2958	0.4564	0.2935	0.4554	0.2218	0.4155	0.2216	0.4153	0.2641	0.4409	0.2643	0.4410
お盆休みダミー	0.0732	0.2604	0.0746	0.2628	0.0477	0.2132	0.0477	0.2131				
日最高気温 (°C)	31.3231	2.9116	31.3381	2.9047	29.5325	3.4146	29.5614	3.4067	0.9163	2.9564	0.9511	2.9431
日最低気温 (°C)												
観測数	16,165		17,633		19,816		22,000		17,488		19,623	

DR発動日ダミーと各グループの交差項のパラメータ ( $\gamma_1 \sim \gamma_3$ ) が、DRによる需要抑制効果を表すパラメータで、被説明変数のピーク需要は対数変換しているため、需要の変化率として解釈する。

なお、冬季に行われた実証のデータについては、お盆を表すダミー変数を除き、日最高気温の代わりに日最低気温 ( $LTemp$ ) を用いたモデルで推定する。

また、今回の実証ではPTRの割引単価やCPPの料金単価を変化させており、単価の違いによる需要抑制効果についても確認する。そのため、料金単価や割引単価の段階ごとのダミー変数  $DRQ_k (k=1, \dots, 4)$  を用いて、回帰モデルを以下のように拡張する。

$$\begin{aligned}
 \ln Peak_{it} = & \alpha + \beta_1 \cdot VIS_i + \beta_2 \cdot PTR_i + \beta_3 \cdot CPP_i \\
 & + \delta_0 Obon_t + \delta_1 Temp_{it} + \delta_2 Temp_{it}^2 \\
 & + \sum_{k=1}^4 \gamma_k DRQ_i^k + \sum_{k=1}^4 \gamma_{1k} DRQ_i^k \cdot VIS_i \\
 & + \sum_{k=1}^4 \gamma_{2k} DRQ_i^k \cdot PTR_i \\
 & + \sum_{k=1}^4 \gamma_{3k} DRQ_i^k \cdot CPP_i \\
 & + \varepsilon_{it}
 \end{aligned} \tag{3}$$

データが正しく取得できずに欠損となったサンプルを除いているため、データセットは非

バランスパネルデータとなる。モデルの推定方法としては、個々のモニターに特有の効果を誤差項の分散において考慮する、ランダム効果モデルと呼ばれる推定方法を用いている。標準誤差には、不均一分散調整済みの標準誤差を用いる。

各変数のデータの基礎統計量は表5に示すとおりである。

## 5. 分析結果

以下では、実証試験で得られたモニターの時間帯別の需要データを用いて、PTRやCPPによる需要抑制効果について報告する。また、適宜、モニターに対するアンケート調査の結果による補足も行う。

まず、2013年夏季、2013年冬季、2014年の夏季のそれぞれの調査期間を対象として、(2)の回帰式を推定した結果を表6に示す。自由度調整済み決定係数は小さいが、PTRとCPPの平均的な需要抑制効果を表す交差項はいずれも統計的に有意である。ただし、見える化については、2013年冬季以外は、統計的に有意な需要抑制効果が得られていない。この点については、今回の実証の「見える化」が、省エネナビによるもので、国内外の実証との比較では、「見える化」が実際にどのように行われているのかに留意する必要がある。また、今回の実証では、(PTR

表6 家庭用デマンドレスポンスによる平均的な需要抑制効果の推定結果

説明変数	2013年夏季		2014年夏季		2013年度冬季	
	従量電灯	季時別	従量電灯	季時別	従量電灯	季時別電灯
<i>VIS</i>	0.1718 *	0.0161	0.1554 **	-0.0434	-0.0917	0.0313
	(1.749)	(0.154)	(2.327)	(-0.633)	(-0.963)	(0.326)
<i>PTR</i>	-0.0023	0.0623	0.0148	0.0286	-0.0889	-0.0829
	(-0.029)	(0.753)	(0.269)	(0.527)	(-1.111)	(-1.087)
<i>CPP</i>	-0.0261	-0.0276	-0.0244	-0.0525	-0.0944	-0.0866
	(-0.323)	(-0.333)	(-0.440)	(-0.971)	(-1.173)	(-1.139)
<i>DR</i>	-0.0018	0.0267 *	-0.0307 ***	-0.0050	0.0292 **	0.0380 ***
	(-0.111)	(1.912)	(-2.766)	(-0.520)	(2.191)	(3.380)
<i>DR*VIS</i>	-0.0330	0.0053	-0.0218	-0.0135	-0.0543 ***	-0.0468 **
	(-1.267)	(0.216)	(-1.238)	(-0.805)	(-2.627)	(-2.384)
<i>DR*PTR</i>	-0.1188 ***	-0.1194 ***	-0.0830 ***	-0.0829 ***	-0.0766 ***	-0.0835 ***
	(-5.619)	(-6.142)	(-5.726)	(-6.191)	(-4.404)	(-5.331)
<i>DR*CPP</i>	-0.1118 ***	-0.1283 ***	-0.0741 ***	-0.1026 ***	-0.0692 ***	-0.0901 ***
	(-5.232)	(-6.617)	(-5.053)	(-7.710)	(-3.926)	(-5.767)
<i>Obon</i>	0.1201 ***	0.1123 ***	0.0881 ***	0.0910 ***		
	(8.248)	(8.161)	(8.759)	(9.592)		
<i>Temp</i>	-0.1317 ***	-0.1662 ***	-0.1985 ***	-0.2009 ***		
	(-5.964)	(-7.883)	(-13.493)	(-14.327)		
<i>Temp</i> <sup>2</sup>	0.0030 ***	0.0035 ***	0.0041 ***	0.0041 ***		
	(8.322)	(10.235)	(17.147)	(18.134)		
<i>LTemp</i>					-0.0177 ***	-0.0219 ***
					(-12.535)	(-16.355)
<i>LTemp</i> <sup>2</sup>					-0.0005 *	-0.0003
					(-1.725)	(-1.009)
(定数項)	8.3720 ***	8.9448 ***	9.3477 ***	9.4441 ***	7.9300 ***	8.0902 ***
	(24.353)	(27.271)	(40.847)	(43.342)	(129.556)	(147.887)
自由度調整済み決定係数	0.0669	0.0455	0.0697	0.0574	0.0111	0.0185

カッコ内はt値

\*\*\*, \*\*, \*は、それぞれ有意水準1%, 5%, 10%で有意であることを示す。

やCPPのグループと比べても) サンプル数が少なく、わずかな抑制効果では統計的に有意になりにくいことにも留意する必要がある。

### 5.1 PTRとCPPの比較

パラメータの推定結果から、PTRとCPPの平均的な需要抑制効果を推定し<sup>12</sup>、図示したのが

<sup>12</sup> 例えば、PTRの需要抑制効果は $\exp(\gamma_2) - 1$ として計算する。これは、基準となる需要を $y_0$ とし、例えばDR発動日のPTR適用モニターの需要を $y_1$ とすると、DR発動日のPTR適用モニターにのみ生じる効果は、 $\ln y_1 - \ln y_0 = \ln(y_1/y_0) = \gamma_2$ となる。エクスポネンシャル関数 $\exp$ を用いて、これを整理すると、 $\exp(\ln x) = x$ であるから、 $y_1/y_0 = \exp(\gamma_2)$ である。両辺から1を差

図3である。需要抑制効果の程度は、調査時期や契約種別の他、料金メニューによっても若干の違いがみられるが、まず、国内の本格的なDR実証で初めて適用されたPTRの需要抑制効果について、特にCPPとの比較で見てみよう。図3から、CPPと比べた場合のPTRの需要抑制効果は、一概に大きいとも小さいとも言えず、総じて、ほぼ同じ程度の需要抑制効果が得られて

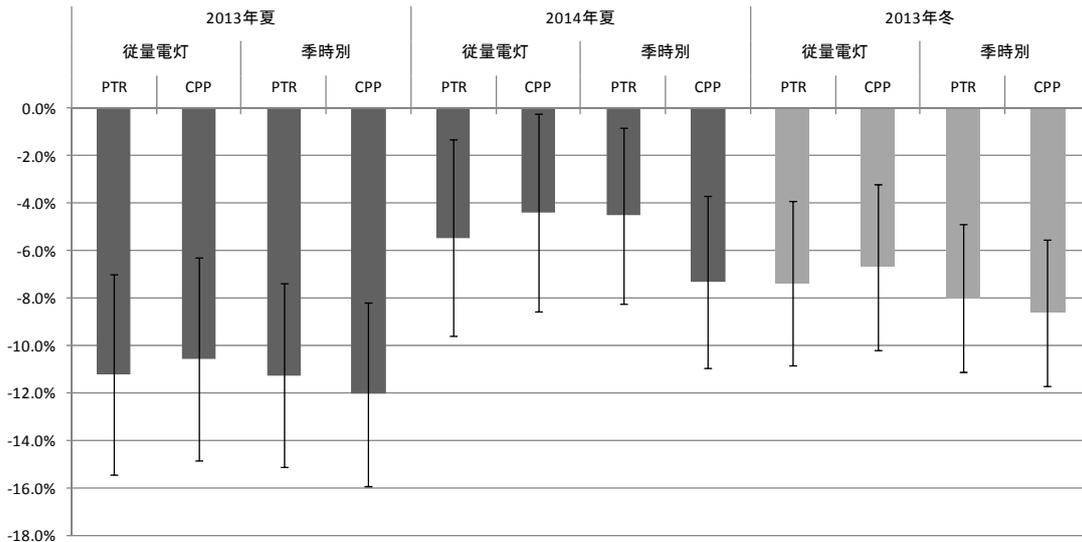
し引くと

$$y_1/y_0 - 1 = \exp(\gamma_2) - 1$$

となり、

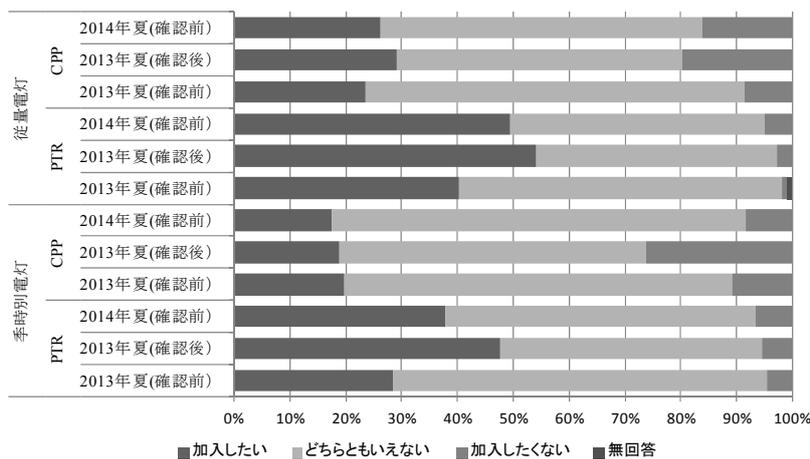
$$(y_1 - y_0)/y_0 = \exp(\gamma_2) - 1$$

となる。すなわち $\exp(\gamma_2) - 1$ が需要の変化率となる。



注：エラーバーは95%信頼度区間を表す。

図3 PTRとCPPによる需要抑制の平均的な効果



注：(確認前)は差額精算金を確認する前の回答、(確認後)は差額精算金を確認した後の回答

図4 実証参加モニターのパTRとCPPへの加入意向

いる。強いて言えば、季別電灯のモニターよりも従量電灯のモニターの方が、PTRの需要抑制効果はやや大きく見える。逆に、季別電灯のモニターの間では、CPPの需要抑制効果の方が比較的大きく、特に2014年の夏にはやや大きな差が見られる。しかし、総じて明確な傾向は見られないと言えよう。今回の実証では、モニターが1kWhを追加的に節電した時に得られる経済的メリットが同じになるように料金を設定しており、図3に示す分析結果は、モニターが節電で得られる経済的メリットに反応した

結果と見ることができる。

今回の平均的な需要抑制効果の結果から、CPPとPTRを比較した場合、それぞれの需要抑制効果については大きな差がないとすれば、本格導入することを考えた場合に、PTRの方がCPPよりも受容性が高く、加入者が多くなると考えられる分、加入者全体で得られる需要抑制効果はPTRの方が大きいことになる。CPPと比べた時の、PTRの受容性の高さについては、今回の調査に参加したモニターに対するアンケート調査でも確認している。具体的には、モニ

ターに、実証で適用された料金メニューが本格導入された場合に加入したいと思うかどうかを尋ねたところ、図4に示すとおり、PTRの方が、CPPよりも実際に加入したいと考えるモニターの割合が多く、CPPは加入したくないと考えるモニターの割合が多いことが分かった。どちらとも言えない、とするモニターも多かったものの、総じてPTRの方が受容性は高いと言える。したがって、上で述べたように、PTRとCPPを比較した場合には、PTRの方が全体として大きな需要抑制効果が見込めることになる。

## 5.2 単価の違いによる影響

CPPの料金単価やPTRの割引単価は発動日によって異なるが、経済理論から、単価が大きくなればなるほど、需要抑制効果も大きくなると考えられる。このことを確認するために、回帰式(3)を推定し、発動パターンと各グループの交差項の推定値から、単価の水準別の需要抑制効果を示したのが図5である（パラメータの推定結果は省略する）。

図5から、2013年冬季の従量電灯のCPPにおいては、理論通りの関係、すなわち、単価が高くなるほど、需要抑制効果が大きくなる、という傾向が示されているが、その他では、同じような関係は見られない。2014年夏季の季時別電灯のCPPおよび従量電灯のPTRでは、単価の水準を100円以下と150円以上の2つにまとめて考えれば、前者よりも後者の需要抑制率が大きいという意味で理論と整合的と言えるが、その他では、そのような関係すら明確ではない。

この点に関連して、モニターへのアンケートで、CPPの料金単価やPTRの割引単価と節電への取り組みに対する意識との関係を尋ねたところ（2014年の夏季の調査終了後）、図6に示すように、多くのモニターが、単価の水準によって節電への取り組みを変えているわけではな

いことが分かった。

このように消費データの分析結果とアンケートの結果は整合的であり、DRのための料金メニューの設計においても重要な示唆を含むといえる。つまり、理論的には、需給ひっ迫の程度に応じて、料金単価あるいは割引単価を変化させて、単価の高いときにより大きな需要抑制効果を得る、ということが考えられるが、今回の実証の結果からすると、必ずしも狙い通りの効果もたらされるとは限らないと言える<sup>13</sup>。もし、単価を変化させるために追加的費用がかかるのであれば、発動日に適用する単価は常に同じでも、費用対効果の観点からは正当化される。

また、ある特定の発動日に1をとるダミー変数を全ての発動日について用意し、単純に発動日毎の需要抑制効果も推定したが、その結果、需要抑制効果は、発動日に毎回ほぼ同じような効果として現れるのではなく、発動日によって大きく変動し、時には需要を抑制するのではなく、増加させる日もあることが分かった。需要抑制率はその日の気温が影響を及ぼす可能性があるため、発動日毎の需要抑制効果と気温との関係についても、統計的な分析を行っている。その結果、例えば、ある時期のあるグループについては、需要抑制効果と日最高気温（冬季は日最低気温）の間に非線形の関係があり、ある一定の気温までは効果が大きくなるものの、それを超えると効果が小さくなってしまいう関係が見られるケースがあった。しかし、このような関係は全ての時期の全てのグループについて有意な結果として得られたわけでは

<sup>13</sup> なお、モニターに対するアンケート調査では、PTRやCPPのモニターは、節電をお願いした日に節電に取り組んだ理由として、社会貢献を挙げる人が多かった。したがって、発動日に節電に取り組む需要家のすべてが、経済的動機で取り組むわけではなく、全体としては、経済的メリットの大小はあまり関係がない可能性もある。

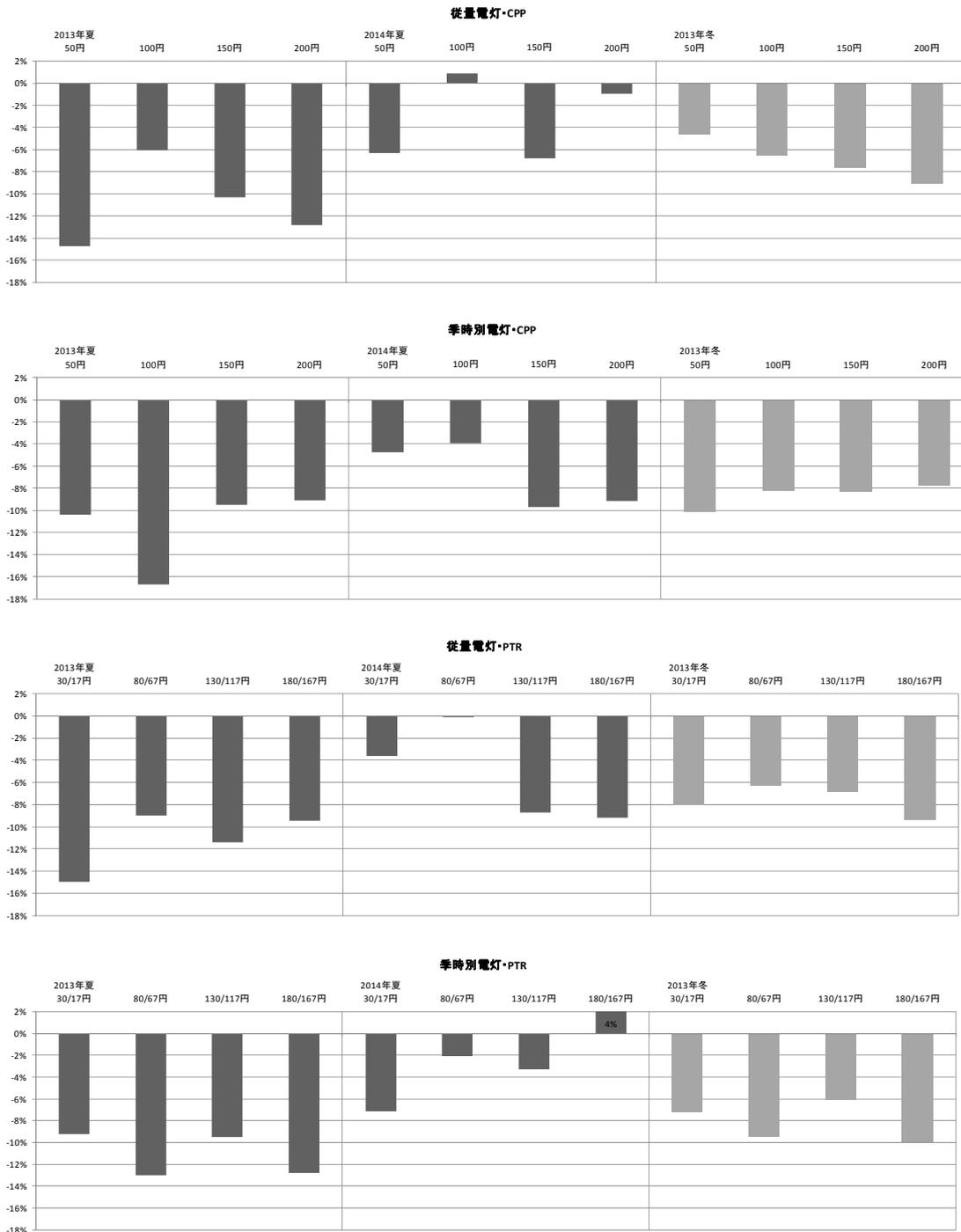


図5 料金単価・割引単価による需要抑制効果

なく、需要抑制効果が気温によって異なる可能性があるという結果については留意が必要である。

### 5.3 需要抑制効果に関するその他の結果

今回の実証では、PTRとCPPによる平均的な需要抑制効果について、他にもいくつか興味深い結果が得られている。

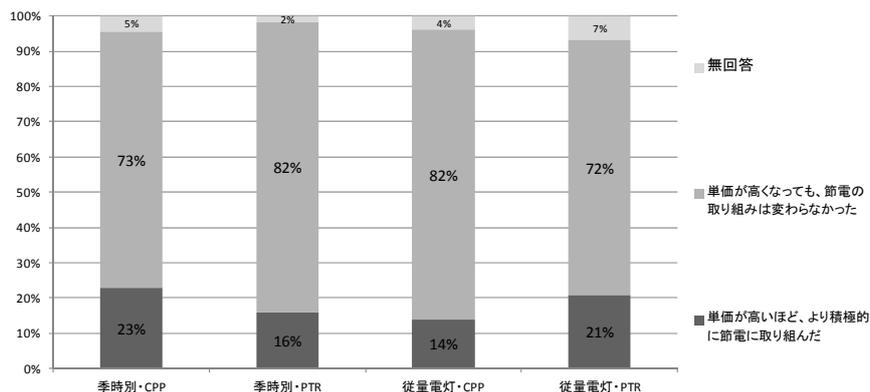


図6 単価の違いが節電の取り組みに与える影響

### 5.3.1 国内外の実証結果との比較

まず、北陸地域の実証における平均的な需要抑制効果は、全体的には4%から最大でも12%程度であり、これまでに国内で先行的に行われてきた実証の結果と比べると、決して大きい方ではないということが指摘できる<sup>14</sup>。特に、これまでの国内での実証で適用されているCPPの需要抑制効果について、同じ2013年の結果同士で比較すると、北陸地域の実証におけるCPPの需要抑制効果は、横浜・豊田での実証の結果（10～15%）とは同程度であるが、けいはんな・北九州における20%前後の抑制率と比較すると小さい。北陸地域の実証試験におけるCPPの料金単価が、他の実証試験よりも安く設定されていたわけではなく、こうした違いが生じる理由としては、節電量などに関する実証試験期間中の情報提供の方法の違いや、地域特性の違いによる影響が考えられる。ただし、例えば、夏季の需要抑制効果を左右すると考えられる冷房需要は、地域や年度によって異なるため、常に北陸地域の需要抑制効果が小さくなる点までは言えない点に留意が必要である。

また、海外（主に北米）で家庭用需要家にCPP

とPTRの両者を適用して行われた実証の結果（図1）と比較しても、北陸地域の実証で得られた需要抑制効果は小さい方に属するといえる。海外の実証試験も、様々な条件が異なるため、一概に比較はできないが、海外の実証でのCPPの料金単価やPTRの割引単価が極端に高く設定されているわけではなく、北陸地域の需要抑制効果が小さかったのは少なくとも単価が安く設定されたからだと言えない。

### 5.3.2 夏季と冬季の違い

今回の調査では2年にわたり夏季の調査を行うとともに、2013年の冬季にも同様の調査を実施している。冬季には、ピーク時間帯を17時～20時に設定して、PTRやCPPによる節電のお願いをしている。先の図3において、夏季と冬季の需要抑制効果を比較すると、2013年の夏季よりは明らかに小さく、2014年の夏季よりはやや大きいという傾向がうかがえる。

しかし、ピーク時間帯の平均的な消費量は、表5の基礎統計量からも分かるように、基本的には夏季よりも冬季の方が大きい。そこで、比較用モニターを基準とした時の需要抑制率だけでなく、その率を表5のピーク需要の平均値に適用して得られる需要抑制量を比較すると、冬季においては従量電灯、季時別電灯ともに、2013年夏季と比べて抑制率は小さいものの、抑

<sup>14</sup> 国内のDR実証試験の結果等については、資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部(2014)を参照。

制量は大きくなっている。2014年夏季と比較すると、抑制率、抑制量ともに大きくなっている。したがって、冬季においては、夏季に比べてモニターの需要抑制量が大きいといえる。他方、少なくとも2013年の夏に比べれば、需要抑制率は小さい。モニターからも、夕方の時間帯は家族の団らんの時間帯と重なり、節電を行うことが難しかったという意見が多く、冬季におけるデマンドレスポンスの活用には一定の配慮が必要かもしれない。

### 5.3.3 実証1年目と2年目の比較

夏季に関しては、2013年と2014年の2年にわたって調査を行っており、2年間で需要抑制効果に変化が生じているかどうかを確認することができる。図3において、同じ調査期間における同じ契約の同じ料金メニューで2013年と2014年の需要抑制効果を単純に比較すると、2年目の2014年の需要抑制効果が、一様に小さくなっていることが分かる。2014年の方が日最高气温の平均は1～2度低くなっているが（表5参照）、図に示した需要抑制効果の推定にあたっては、それぞれ気温の違いを考慮しており、気温の差によって2年目の効果が小さくなったというわけではない。発動日は2年目の方が2日分少ないが、それだけで大きな差を生みだしているとは考えにくい。変動する料金の単価などの条件も同じである。したがって、2年目に需要抑制効果が小さくなったことについては、CPPやPTRを適用されたモニター自身の経済的インセンティブへの反応が弱まったことなどが考えられる。

2014年に入って、節電対策の実施率が低下し、需要抑制効果の低下にもつながったと考えられるが、そもそもなぜ2年目に節電を実施する割合が低下したのかは定かではない。推測できることとしては、1年目の実証を経験して、節

電の費用対効果が小さいと感じられた可能性が考えられる。1年目において、このような実証が初めてで、節電による経済的メリットがどの程度か分からずに過剰に反応していたということも考えられる。

### 5.4 モニターごとの需要抑制

これまでは、平均的な需要抑制効果とその変動要因について分析してきたが、以下では、各グループの平均的な効果ではなく、モニターごとの需要抑制効果について見ておく。これは、PTRのモニターの節電量を計算する際に用いた方法で計算する。すなわち、発動日の前の平日3日間の需要量の平均値をベースライン（基準）とし、発動日の消費量とベースラインとの差をとり、それをベースラインの値で除する。このようにして、全ての発動日における消費量の変化率の平均値をそのモニターの需要抑制効果とする。例えば、2014年の夏季の従量電灯のモニターについて、グループごとにモニターごとの需要抑制効果を大きい順に並べたのが図7である。横軸はモニターの数である。すなわち、発動日に普段よりも多く節電した人ほど左側に位置していることになる。グラフの色の濃い方が需要を抑制した（非発動日より発動日の需要の方が小さい）モニターである。また、図の中の縦線は、比較用グループにおける需要抑制率の中央値に最も近い抑制率のモニターの位置を指している。

図から、PTRやCPPのグループで、発動日に消費量を減らした割合の多いモニターが、比較用のグループと比べて多いことがわかる。しかし、一方で、PTRやCPPのグループでも、全てのモニターが消費量を減らしているわけではなく、かえって増加させているモニターも少なくないことがわかる。このような傾向は、季節別電灯のモニターについても見られるし、2013

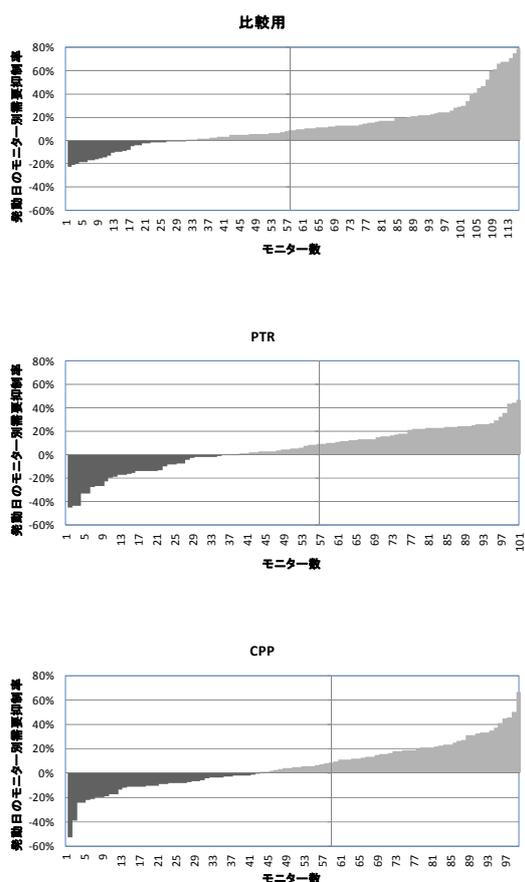


図7 モニターごとの需要抑制率の分布  
(2014年夏季)

年も同様である。また、需要の抑制量で見ても同じような結果となる。このようなモニターによる需要抑制効果の違いがどのような要因によって決まるのかについて、モニターの属性データを用いた分析を試みたが、エアコンの使用台数が多いモニターにおいて、需要抑制量（および抑制率）が大きくなることを除くと、決定要因として影響を与える属性は明確には特定できなかった<sup>15</sup>。こうした需要抑制効果の要因分析、すなわち、どのような需要家でDRの効果が大きくなるのかを明らかにすることは、今後の課題として残されている。

<sup>15</sup> 例えば、世帯人数や、高齢者の割合などを考慮したが、安定した推定結果を得られなかった。

## 6. おわりに

本稿では、北陸地域で実施された家庭用デマンドレスポンスの実証データを用いて、我が国で本格的に検証するのは初めてとなるPTRによる需要抑制効果を分析した。その結果、今回の実証では、PTRは、節電による経済的メリットが等しくなるように設計されたCPPと、ほぼ同程度の需要抑制効果を持つことが分かった。また、調査終了後の参加モニターへの意識調査からは、PTRの方がCPPよりも受容性が高いことが分かった。ただし、参加モニターはPTRの割引単価やCPPの料金単価の違いについてはあまり意識しておらず、単価が高くなるほど、需要抑制効果が大きくなるといった関係は見られなかった。

また、CPPの需要抑制効果は10%前後で、国内の他のDR実証の結果と比較するとやや小さく、1年目と2年目の夏季の需要抑制効果を比較すると2年目の需要抑制効果は小さくなっていることなどが分かった。

今後、PTRはもとより、家庭用需要家のDRを促す様々な料金メニューやサービスについて、実証に基づく知見が蓄積されることが望まれる。我が国で急速に導入が進んでいる再生可能エネルギーの発電電力量に応じたデマンドレスポンス、すなわち、再生可能エネルギーの発電電力量が多い時には、むしろ需要を増加させるようなデマンドレスポンスの可能性などが注目される。

## 謝辞

本稿の作成にあたっては、北陸電力株式会社営業部に多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。なお、本稿に残る誤りについては全て筆者の責任であります。

## 参考文献

- [1] 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部 (2014)「次世代エネルギー・社会システム実証事業～進捗状況と成果等～」.  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/pdf/016\\_01\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/pdf/016_01_00.pdf) (最終アクセス日: 2015年10月7日).
- [2] 服部徹 (2013)「北米の家庭用デマンドレスポンスの実証におけるピークタイム・リバートの評価」, 第32回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, 149-152.
- [3] 服部徹・戸田直樹 (2011)「米国における家庭用デマンドレスポンス・プログラムの現状と展望ーパイロットプログラムの評価と本格導入における課題」, 電力中央研究所報告 Y10005.
- [4] Baltimore Gas & Electric (2015) “BGE Customers Reach Energy-Saving Milestones,” News Release (April 22, 2015).
- [5] Borenstein, S. (2014). “Money for Nothing?” Energy at Haas Blog.  
<https://energyathaas.wordpress.com/2014/05/12/money-for-nothing/> (最終アクセス日: 2015年10月7日).
- [6] eMeter Strategic Consulting for the Smart Meter Pilot Program (2010). “PowerCentsDC Program Final Report.”
- [7] Faruqi, A. and S. Sergici (2009a). “BGE’s Smart Energy Pricing Pilot Summer 2008 Impact Evaluation,” Brattle Group.
- [8] Faruqi, A. and S. Sergici (2009b). “Impact Evaluation of CL&P’s Plan-it Wise Energy Program Final Results, Results of CL&P Plan-it Wise Energy Pilot (Appendix A)”.
- [9] Ontario Energy Board (2007). “Ontario Energy Board Smart Price Pilot Final Report.”
- [10] Treadway, N. (2013). “Consumer Preferences and the Elusive Magic of Dynamic Pricing,” Survey Report, Issue 17, Distributed Energy Financial Group.
- [11] Wolak, F.A.(2006). “Residential Customer Response to Real-Time Pricing: The Anaheim Critical-Peak Pricing Experiment,” Stanford University.
- [12] Wolak, F.A.(2011). “Do Residential Customers Respond to Hourly Prices? Evidence from a Dynamic Pricing Experiment,” *American Economic Review: Papers & Proceedings*, 101:3, 83-87.

服部 徹 (はっとり とおる)  
電力中央研究所 社会経済研究所

高橋 雅仁 (たかはし まさひと)  
電力中央研究所 社会経済研究所

坂東 茂 (ばんどう しげる)  
電力中央研究所 社会経済研究所

加部 哲史 (かべ さとし)  
電力中央研究所 社会経済研究所

社会経済研究所「電力経済研究」No.62

「ピークタイム・リバートによる家庭用需要家のデマンドレスポンスの効果  
—北陸地域での実証データに基づく分析—」の記載内容の訂正について

「電力経済研究」No.62 に収録いたしました上記の論文につきまして、分析に用いたデータの説明を誤っていたことと、本来掲載すべき表とは異なる表を誤って掲載していることが分かりました。既にダウンロードされた皆さまにはご迷惑をおかけしますことを深くお詫びいたします。なお、今回の訂正による論文の分析結果の説明や結論には変更ございません。詳細は下記をご覧ください。

2016年5月12日

正誤表

① p.16 表5 基礎統計量

表5の2014年夏季の基礎統計量は、2014年夏季の調査期間(2014年7月1日～9月30日)に得られたデータに基づくものでした。しかし、2014年夏季を対象に回帰式(1)の推定を行う際に用いたデータは、2013年夏季の結果との比較を念頭に、サンプルを2014年7月1日から9月15日までとしておりましたので(下記②参照)、実際に分析に用いたデータに基づく基礎統計量に訂正(2014年夏季分のみ)、注釈をつけました。また、「2013年度冬季」を「2013年冬季」に修正しました。

(正)

変数	2013年夏季				2014年夏季 <sup>注)</sup>				2013年冬季			
	従量電灯		季時別		従量電灯		季時別		従量電灯		季時別電灯	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
ピーク時消費量 (Wh)	1,717	1,285	1,762	1,330	1,570	1,154	1,602	1,160	3,002	1,683	3,679	2,267
オフピーク時消費量 (Wh)	12,075	6,222	13,759	7,282	11,523	6,016	13,100	6,539	15,031	7,983	18,224	10,761
日消費量 (Wh)	13,793	7,255	15,521	8,308	13,093	6,954	14,702	7,436	18,033	9,349	21,903	12,503
ピーク時消費比率	0.1199	0.0461	0.1099	0.0463	0.1345	0.0585	0.1207	0.0545	0.1686	0.0526	0.1731	0.0594
見える化ダミー	0.1435	0.3506	0.1321	0.3387	0.1583	0.3650	0.1340	0.3407	0.1586	0.3653	0.1344	0.3411
PTRダミー	0.3236	0.4679	0.2904	0.4539	0.3175	0.4655	0.2878	0.4527	0.3172	0.4654	0.2912	0.4543
CPPダミー	0.3071	0.4613	0.2966	0.4568	0.3021	0.4592	0.3008	0.4586	0.2973	0.4571	0.2964	0.4567
DR発動日ダミー	0.2958	0.4564	0.2935	0.4554	0.2638	0.4407	0.2631	0.4403	0.2641	0.4409	0.2643	0.4410
お盆休みダミー	0.0732	0.2604	0.0746	0.2628	0.0569	0.2317	0.0566	0.2311				
日最高気温 (°C)	31.3231	2.9116	31.3381	2.9047	30.2927	3.1612	30.3139	3.1518				
日最低気温 (°C)									0.9163	2.9564	0.9511	2.9431
観測数	16,165		17,633		16,095		18,426		17,488		19,623	

注) 2014年夏季については、2013年夏季との比較を念頭に、7月1日から9月30日までに得られたデータのうち、9月15日までのデータを用いている。

(誤)

変数	2013年夏季				2014年夏季				2013年度冬季			
	従量電灯		季時別		従量電灯		季時別		従量電灯		季時別電灯	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
ピーク時消費量 (Wh)	1,717	1,285	1,762	1,330	1,478	1,094	1,537	1,124	3,002	1,683	3,679	2,267
オフピーク時消費量 (Wh)	12,075	6,222	13,759	7,282	10,988	5,799	12,773	6,446	15,031	7,983	18,224	10,761
日消費量 (Wh)	13,793	7,255	15,521	8,308	12,466	6,693	14,309	7,320	18,033	9,349	21,903	12,503
ピーク時消費比率	0.1199	0.0461	0.1099	0.0463	0.1152	0.0418	0.1042	0.0404	0.1686	0.0526	0.1731	0.0594
見える化ダミー	0.1435	0.3506	0.1321	0.3387	0.1559	0.3628	0.1334	0.3400	0.1586	0.3653	0.1344	0.3411
PTRダミー	0.3236	0.4679	0.2904	0.4539	0.3070	0.4613	0.2887	0.4532	0.3172	0.4654	0.2912	0.4543
CPPダミー	0.3071	0.4613	0.2966	0.4568	0.2915	0.4545	0.2996	0.4581	0.2973	0.4571	0.2964	0.4567
DR発動日ダミー	0.2958	0.4564	0.2935	0.4554	0.2218	0.4155	0.2216	0.4153	0.2641	0.4409	0.2643	0.4410
お盆休みダミー	0.0732	0.2604	0.0746	0.2628	0.0477	0.2132	0.0477	0.2131				
日最高気温 (°C)	31.3231	2.9116	31.3381	2.9047	29.5325	3.4146	29.5614	3.4067				
日最低気温 (°C)									0.9163	2.9564	0.9511	2.9431
観測数	16,165		17,633		19,816		22,000		17,488		19,623	

② p.16 右の段、下から 11 行目

上記①の修正に関連して、本文について下記の修正を行いました（下線部）。

(正) まず、2013 年夏季、2013 年冬季、2014 年夏季 (9 月 15 日まで) のそれぞれの調査時期を対象として、(2)の回帰式を推定した結果を表 6 に示す。

(誤) まず、2013 年夏季、2013 年冬季、2014 年夏季のそれぞれの調査期間を対象として、(2)の回帰式を推定した結果を表 6 に示す。

③ p.17 表 6 家庭用デマンドレスポンスによる平均的な需要抑制効果の推定結果

表 6 の推定結果のうち、2014 年夏季の結果について別のデータ（2013 年夏季と 2014 年夏季の 2 カ年分のデータ）で推定した結果を誤記載していたため、訂正しました（2014 年夏季分のみ）。なお、p.18 図 3 は、もともと 2014 年夏季のデータを用いた推定結果に基づいて作成されたものであり、以後の分析結果の記述や結論には変更ございません。また、「2013 年度冬季」を「2013 年冬季」に修正しました。

(正)

説明変数	2013年夏季		2014年夏季		2013年冬季	
	従量電灯	季時別	従量電灯	季時別	従量電灯	季時別電灯
<i>VIS</i>	0.1718 *	0.0161	0.0961	-0.0919	-0.0917	0.0313
	(1.749)	(0.154)	(1.026)	(-1.041)	(-0.963)	(0.326)
<i>PTR</i>	-0.0023	0.0623	-0.0160	-0.0015	-0.0889	-0.0829
	(-0.029)	(0.753)	(-0.204)	(-0.021)	(-1.111)	(-1.087)
<i>CPP</i>	-0.0261	-0.0276	-0.0709	-0.0663	-0.0944	-0.0866
	(-0.323)	(-0.333)	(-0.896)	(-0.954)	(-1.173)	(-1.139)
<i>DR</i>	-0.0018	0.0267 *	-0.0529 ***	-0.0440 ***	0.0292 **	0.0380 ***
	(-0.111)	(1.912)	(-3.292)	(-3.253)	(2.191)	(3.380)
<i>DR*VIS</i>	-0.0330	0.0053	-0.0112	-0.0338	-0.0543 ***	-0.0468 **
	(-1.267)	(0.216)	(-0.457)	(-1.465)	(-2.627)	(-2.384)
<i>DR*PTR</i>	-0.1188 ***	-0.1194 ***	-0.0560 ***	-0.0463 **	-0.0766 ***	-0.0835 ***
	(-5.619)	(-6.142)	(-2.719)	(-2.500)	(-4.404)	(-5.331)
<i>DR*CPP</i>	-0.1118 ***	-0.1283 ***	-0.0450 **	-0.0760 ***	-0.0692 ***	-0.0901 ***
	(-5.232)	(-6.617)	(-2.164)	(-4.151)	(-3.926)	(-5.767)
<i>Obon</i>	0.1201 ***	0.1123 ***	0.0728 ***	0.0892 ***		
	(8.248)	(8.161)	(4.951)	(6.500)		
<i>Temp</i>	-0.1317 ***	-0.1662 ***	-0.2475 ***	-0.2368 ***		
	(-5.964)	(-7.883)	(-12.057)	(-12.253)		
<i>Temp</i> <sup>2</sup>	0.0030 ***	0.0035 ***	0.0049 ***	0.0048 ***		
	(8.322)	(10.235)	(14.699)	(15.183)		
<i>LTemp</i>					-0.0177 ***	-0.0219 ***
					(-12.535)	(-16.355)
<i>LTemp</i> <sup>2</sup>					-0.0005 *	-0.0003
					(-1.725)	(-1.009)
(定数項)	8.3720 ***	8.9448 ***	10.1083 ***	9.9508 ***	7.9300 ***	8.0902 ***
	(24.353)	(27.271)	(31.712)	(33.301)	(129.556)	(147.887)
自由度調整済み決定係数	0.0669	0.0455	0.0688	0.0710	0.0111	0.0185

カッコ内はt値

\*\*\*,\*\*,\*は、それぞれ有意水準1%, 5%, 10%で有意であることを示す。

(誤)

説明変数	2013年夏季		2014年夏季		2013年度冬季	
	従量電灯	季時別	従量電灯	季時別	従量電灯	季時別電灯
<i>VIS</i>	0.1718 *	0.0161	0.1554 **	-0.0434	-0.0917	0.0313
	(1.749)	(0.154)	(2.327)	(-0.633)	(-0.963)	(0.326)
<i>PTR</i>	-0.0023	0.0623	0.0148	0.0286	-0.0889	-0.0829
	(-0.029)	(0.753)	(0.269)	(0.527)	(-1.111)	(-1.087)
<i>CPP</i>	-0.0261	-0.0276	-0.0244	-0.0525	-0.0944	-0.0866
	(-0.323)	(-0.333)	(-0.440)	(-0.971)	(-1.173)	(-1.139)
<i>DR</i>	-0.0018	0.0267 *	-0.0307 ***	-0.0050	0.0292 **	0.0380 ***
	(-0.111)	(1.912)	(-2.766)	(-0.520)	(2.191)	(3.380)
<i>DR*VIS</i>	-0.0330	0.0053	-0.0218	-0.0135	-0.0543 ***	-0.0468 **
	(-1.267)	(0.216)	(-1.238)	(-0.805)	(-2.627)	(-2.384)
<i>DR*PTR</i>	-0.1188 ***	-0.1194 ***	-0.0830 ***	-0.0829 ***	-0.0766 ***	-0.0835 ***
	(-5.619)	(-6.142)	(-5.726)	(-6.191)	(-4.404)	(-5.331)
<i>DR*CPP</i>	-0.1118 ***	-0.1283 ***	-0.0741 ***	-0.1026 ***	-0.0692 ***	-0.0901 ***
	(-5.232)	(-6.617)	(-5.053)	(-7.710)	(-3.926)	(-5.767)
<i>Obon</i>	0.1201 ***	0.1123 ***	0.0881 ***	0.0910 ***		
	(8.248)	(8.161)	(8.759)	(9.592)		
<i>Temp</i>	-0.1317 ***	-0.1662 ***	-0.1985 ***	-0.2009 ***		
	(-5.964)	(-7.883)	(-13.493)	(-14.327)		
<i>Temp</i> <sup>2</sup>	0.0030 ***	0.0035 ***	0.0041 ***	0.0041 ***		
	(8.322)	(10.235)	(17.147)	(18.134)		
<i>LTemp</i>					-0.0177 ***	-0.0219 ***
					(-12.535)	(-16.355)
<i>LTemp</i> <sup>2</sup>					-0.0005 *	-0.0003
					(-1.725)	(-1.009)
(定数項)	8.3720 ***	8.9448 ***	9.3477 ***	9.4441 ***	7.9300 ***	8.0902 ***
	(24.353)	(27.271)	(40.847)	(43.342)	(129.556)	(147.887)
自由度調整済み決定係数	0.0669	0.0455	0.0697	0.0574	0.0111	0.0185

カッコ内はt値

\*\*\*, \*\*, \*は、それぞれ有意水準1%, 5%, 10%で有意であることを示す。

以上

# テナント事務所ビルにおけるスマート節電実証試験

## Field Test of Smart Load Shedding Strategies for Rental Office Buildings

キーワード：デマンドレスポンス、実証試験、テナントビル、ピーク需要抑制

高橋 雅仁 上野 剛 岩松 俊哉 坂東 茂 西川 雅弥 岩村 集

本研究では、テナント事務所ビルにおけるスマート節電の効果を明らかにするため、テナントビル6棟を対象に実証試験を行った。スマート節電では、就業時間中常時節電するのではなく、経済的インセンティブや空調制御装置を用いて、デマンドレスポンスのようにある特定のピーク時間帯のみ節電を行う。試験結果から、インセンティブを用いた間接制御は、テナント側の手動による節電行動を促し、確実なピーク抑制効果を出すためには、検討の余地が残り、夏・冬共にピーク抑制手法としては直接制御がより適切であった。テナント専有部に自動デマンドレスポンスを導入するため、テナントへのメリット還元や契約など何らかの制度の検討が必要である。

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. 既往の事業所デマンドレスポンス (DR) の実証研究             <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 4地域実証</li> <li>2.2 東京都テナントビルDR実証事業</li> </ol> </li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>3. テナントビルDR実証試験             <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 夏季試験</li> <li>3.2 冬季試験</li> </ol> </li> <li>4. 考察とまとめ—テナントビルにおけるDRの導入可能性</li> </ol> |
|--|---|

## 1. はじめに

原子力発電所の長期停止によって、電気料金が上昇し、需要側での節電・省エネ・省コストの重要性が増している。しかし、本研究で対象にするテナントビルでは、空調設備などのビル所有者（オーナー）と使用者（テナント）が異なること、テナント専有部のサービスレベルが低下する節電をビルオーナー側が実施することが難しいこと等を原因として、ビルオーナーとテナントの協働による節電・省エネの取り組みはこれまで十分に進んでいない。

震災直後は、社会的要請から節電に取り組んだが、従業員の負担が大きい節電方策（例：冷房設定温度28℃）を常時継続することを取りやめる企業が増えている<sup>1)</sup>。このことから、本研究では、就業時間中常時実施する節電ではなく、デマンドレスポンスのようにある特定のピーク時間帯のみ節電を行うこと（スマート節電）

を検討対象とした<sup>1)</sup>。

「次世代エネルギー・社会システム実証事業」の4地域実証では、家庭だけでなく、ビルや工場におけるデマンドレスポンス実証研究も行われた。テナントビルを対象にしたデマンドレスポンス実証試験は実施事例が少なく、その効果や受容性については不明な点が多い。そこで、本研究では、テナントビルのテナント専有部を対象として、空調機の集中制御装置を用いた直接御（デマンド抑制）と、経済的インセンティブを用いてピーク時にテナントの節電行動を促す間接制御によるピーク需要抑制の有効性を明らかにする実証試験を行った。本稿では、東京都23区内にあるテナントビル6棟の参加テ

<sup>1)</sup> デマンドレスポンスでは、電力系統側からの情報（需給逼迫、動的料金）をトリガーとして需要抑制を行うが、スマート節電では、系統の需給逼迫緩和だけでなく、自身のビルの最大デマンド抑制を目的として需要抑制を行う。

ナント24社を対象に、2014年の夏季と冬季に行った実証試験結果を紹介する。なお、本試験は、野村不動産株式会社と日本ファシリティ・ソリューション株式会社が2013-2014年度に実施した共同研究に、共同研究機関として電力中央研究所が参画する形で実施した。

本稿の構成は次の通りである。2章で既往の事業所デマンドレスポンス実証研究をレビューする。3章では本研究で実施した夏季と冬季の実証試験の内容と結果を説明する。4章は考察とまとめであり、試験結果を踏まえて、テナントビルにおけるDRの導入可能性について論ずる。

## 2. 既往の事業所デマンドレスポンス (DR) の実証研究

### 2.1 4地域実証

「次世代エネルギー・社会システム実証事業」の4地域実証のうち、北九州と横浜、けいはんなの3地域において、BEMSやFEMS、蓄電池、蓄熱、コージェネ、見える化表示などを用いたビル・工場のデマンドレスポンス実証試験が行われた。表1は実証結果をまとめたものである<sup>[5,6,7,8]</sup>。北九州は50事業所、横浜は29事業所(2014年度)、けいはんなは1棟を対象とした。様々な業種の事業所を対象に、①制御手法(自動/手動、蓄電池、コージェネ、見える化表示など)、②DR料金インセンティブの種類(CPP, CBP, PTR, CPP入札など)<sup>2</sup>、③抑制時間帯(夏季/冬季、時間帯、持続時間)など条件が異なる実証試験が行われている。表中のピーク削減率の値は、対象需要家の平均値である(削減率の最大値ではない)。業種別や制御手法別の詳

細なピーク削減効果は明らかにされていない。各実証の結果報告を横断的に見ると、以下のことが分かる。:

- ◇ 自動と手動の比較—北九州実証では、CPP料金(15-16時のピーク料金単価=各事業所の電気料金単価×ピーク料金倍率)に対する制御手法別の削減効果を比較しており、夏・冬ともに、自動(機器制御、蓄電池・熱利用など)の方が、手動(見える化と料金インセンティブに基づく節電行動)よりもピーク削減率が大きい結果となった。
- ◇ 地域間の比較—北九州・横浜・けいはんなの自動制御結果を横並び比較すると、それぞれ対象需要家の業種や制御手法(蓄電池やコージェネの有無など)が異なるが、夏は10%程度のピークカット効果がある。一方、冬は2.8%~17%とピーク削減率に幅がある。抑制時間帯のDR可能量(例えばコージェネの余剰発電能力)が削減率に影響している可能性がある。
- ◇ DR料金効果—横浜では、削減量1kWhあたりインセンティブ単価が、PTRでは15円/kWh以上<sup>3</sup>、CPP入札では21.99円/kWhの場合に、削減効果が見られた。一方、北九州では、仮に基準料金単価を20円/kWhとすると、PTR換算したインセンティブ単価は20円/kWh-80円/kWhである。つまり、この2地域の実証では、削減量1kWhあたり20円/kWh程度のインセンティブで削減効果が見られたことになる。ただし、採用される制御手法(コージェネ、蓄電池など)によって、経済的

<sup>2</sup> CPP: Critical Peak Pricing, CBP: Critical Bottom Pricing, PTR: Peak Time Rebate, CCP: Capacity Commitment Program

<sup>3</sup> 横浜実証では、5円/kWhから15円/kWhにPTR価格を上げると需要反応が急増したが、15円/kWhと50円/kWhでは反応は変わらなかったとしている。

表1 既往の事業所DR実証試験

	4地域実証				東京都テナントビルDR実証		
	北九州(2012-2014年度)		横浜(2013-2014年度)		けいはんな(2012-2013年度)	三菱地所(2013年度)	森ビル(2013年度)
平均ピーク削減率(結果)	8.8%(2012年夏) 6.2%(2012年冬)	0.6%(2012年夏) 0.6%(2013年冬)	12.5%(2013年夏) 17%(2013年冬)	削減目標に対して9割超達成(2014年夏)	10%(夏) 2.8%(冬)	[照明コンセント分のみ]※ 6%,10%(夏) 10%,14%(冬)	[空調動力分のみ] 10%(夏・冬)
制御手法	自動(BEMS・FEMSによる機器制御、蓄電池・熱利用によるピークカット)	手動(見える化表示)	自動(BEMSによる機器制御、蓄電池・コージェネ・蓄熱を用いたピークカット)	自動(一部手動)(BEMSによる機器制御、蓄電池・コージェネ・蓄熱によるピークカット、見える化表示)	自動(一部手動)(BEMSによる熱源・共用部制御、蓄電池によるピークカット、テナント・客室の見える化)	自動+手動(直接制御による照度抑制、手動によるOAコンセント節電)	自動+手動(サーモOFF(送風)など空調制御によるデマンド抑制、手動による消灯・換気風量低減)
試験対象需要家	9事業所(オフィス、病院、店舗、公共施設、工場など)	41事業所(オフィス、クリニックなど)	6-14事業所(オフィス、商業施設、工場、集合住宅など)	29事業所(オフィス、商業施設、工場、集合住宅、浄水場、水再生センター、中小ビルなど)	1事業所(ホテル)	1棟・参加テナント2社(オフィス)	2棟・参加テナント4社(オフィス)
DRタイプ	・前日予告DR ・インセンティブ: CPP(ピーク料金倍率=2~5倍)	・前日予告DR ・インセンティブ: CPP(ピーク料金倍率=2~5倍)	・前日/当日予告DR ・インセンティブ: PTR(夏は15円/kWh以上で効果あり)	・前日/当日予告DR ・インセンティブ: CCP入札方式(削減1kWhあたり21.99円(実績))	・前日予告DR(CEMS連携) ・インセンティブ: CEMS配分ポイント、プリペイドカード(客室)	・試験日程に従い実施 ・インセンティブ:あり(テナントのゾーン単位や個人単位へ金銭インセンティブ)	・試験日程に従い実施 ・インセンティブ:なし
抑制時間帯	夏: 最高気温30℃以上の平日の15-16時(1時間) 冬: 最低気温-1~9℃の平日の15-16時(1時間)	夏: 最高気温30-31℃以上の平日の13-16時(3時間) 冬: 2013年1月の7日間の17-20時(3時間)	夏: 需給逼迫が予想される平日の13-16時(3時間)	夏・冬: CEMSと連携したDR発動日13-16時(3時間)	夏・冬: CEMSと連携したDR発動日13-16時(3時間)	夏: 13-15時(2時間)※ 冬: 15-17時(2時間)※	夏・冬: 各テナントのデマンド発生時間帯(例:夏8-21時、冬7-15時)

※実証結果に基づき、抑制時間帯のピーク削減率の見込み値を計算。

に成立するインセンティブ単価が異なることに注意する必要がある。

東京都環境局では、2013年度に、スマートエネルギー都市推進事業の「テナントビルにおけるデマンドレスポンス実証事業」を実施した。

## 2.2 東京都テナントビルDR実証事業

前述したように、自社ビルとテナントビルは、空調などビル設備の所有者と電力使用者の関係が異なる(表2を参照)。また、テナントビルでは、1種類の従量料金(円/kWh)だけでテナントに課金される場合が多く、設備運用はテナント自身が決めているため、デマンドレスポンスのような日・時間帯によって料金単価が変わる電気料金メニューに合わせてビル全体の設備運用を行うことは現状では難しい。

古い資料であるが文献<sup>[10]</sup>によると、首都圏のビルストック量のうち、テナントビルは60%、自社ビルは40%を占めており、DRポテンシャル量を見積もるにあたり、テナントビルにおけるDRの導入可能性は重要なテーマである。

表2 自社ビルとテナントビルの比較

	自社ビル	テナントビル
ビルストック割合	40%	60%
空調システム	建物用途・規模に依存。中央式や個別式など様々	個別空調が多い
電力契約者と電力使用者の関係	電力契約者と電力使用者が同じ	電力契約者(ビル所有者)と電力使用者(テナント)が異なる。テナント向け電気料金は従量料金制が一般的
省エネ・節電の実施のしやすさ	実施しやすい(強制的な節電も可能)	テナントサービス水準が下がる場合は、実施は難しい

この事業は、「都内の電気使用量の抑制及び電力システムに対する負荷の平準化を図る」ことを目的としており、「テナントビルオーナーとテナント等事業者との協働により、建物の共用部だけでなく、テナント等事業者が使用する部分も対象としたデマンドレスポンスの手法開発並びに効果の測定及び検証を実施するもの」である。公募採用された三菱地所と森ビルの2社がこの事業を行った<sup>[3,4]</sup>。三菱地所はビル1棟の参加テナント2社を、森ビルはビル2棟の参加テナント4社を対象とした。両者の試験結果から、

- (1) 自動制御を行ったゾーン単位の照明照度抑制（三菱地所）と共用部・専有部空調のサーモOFF制御（森ビル）は、ピークカット効果があり、室内環境の悪化は受容可能であったこと、
- (2) OAコンセントの手動節電は効果が小さいことが明らかにされた。また、文献<sup>[3]</sup>は、DR実施メリットのテナント還元方法として、二部料金、電気料金割引、テナント側への各種優待サービス付与の3種類をとりあげ、各々の利点・課題を比較している。

### 3. テナントビルDR実証試験

本章では、著者らが、2014年度に実施したテナントビルDR実証試験について述べる。

#### 3.1 夏季試験

##### (1) 試験内容

##### 試験対象ビル

夏季実証試験では、東京都23区内にあるテナントビル6棟（各々延床面積4千-1万㎡程度）、参加テナント24社を対象に実証試験を行った。全てのテナントが事務所用途である。なお、対象テナントのうち、対象としたビルの諸元及び試験内容を表3に示す。以下では、各ビルをビルA～Fの記号で表し、また各ビル

表3 試験対象ビルの諸元と試験内容

ビルID	試験参加テナント数	夏季試験方式	冬季試験方式
A	1(1棟借)	テナント*	7°レヒト+テナント*制御
B	5	スケジュール+間接	7°レヒト+テナント*監視
C	9	間接	
D	3	間接	
E	1	間接	
F	5	間接	

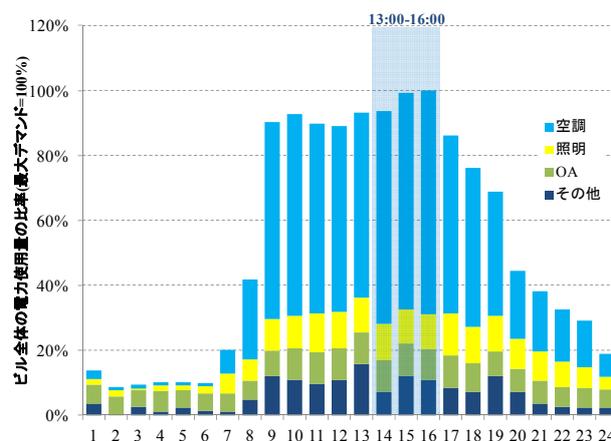


図1 ビルCの夏季電力負荷パターン (2013/7/8)

内のテナントにはテナントB1, B2のようにそれぞれ連番を振る。

ビルAは、テナント1社だけが入居するオフィスビルであり、ビルAだけが直接制御対象である（後述する）。ビルB-Fの5棟の中のテナント23社が間接制御対象である（後述する）。対象ビルの空調システムはビルマルチエアコンである。参考として、図1に、ビルCの2013年7月8日（日最高気温35℃）の電力需要パターンを示す（同日の最大デマンドを100%として規格化した）。空調用途が昼間電力需要の大半を占める。始業時間の8時-9時に需要が急増し、9時-17時は高需要時間帯で、17時以降は終業と共に需要が減少する。なお、2014年度夏季試験で抑制対象にした時間帯は11時-16時である。

## 直接制御と間接制御

夏季のDR実証試験期間は2014/8/18-9/12の平日20日間であった。図2に夏季試験のイメージを示す。制御方式は、直接制御(デマンド制御)、間接制御(インセンティブに基づく手動節電)の2種類である(表3)。

直接制御では、エアコン集中制御装置を用いて、テナント専有部の個別空調を対象にしたデマンド抑制を行った。ビル全体のデマンドの前年比10%削減を目標値とし、①個別空調の設定温度変更と②調湿機の稼働停止を組み合わせた次の3段階の制御レベルを設定し、制御を行った(制御レベル1=1°C上昇&ロッカー室調湿機停止, 同レベル2=2°C上昇, 同レベル3=3°C上昇&大部屋調湿機停止)。30分デマンド予測値に応じて、制御レベルが自動的に決定・実行される。テナント側には制御の事前通知はない。結果として、デマンド制御が実行されたのは8/18-22の5日間のみであった。

次に、間接制御では、抑制日前日の夕方に試験担当者から参加テナントの総務担当者(連絡窓口)に節電依頼メールを送信し、抑制日当日の抑制時間帯(11-16時)に、テナント専有部における手動節電をお願いした。テナント側が、抑制時間帯にどのような節電方策をどの節電レベルで実行するかを自ら決定して、手動実行する。エアコンや照明の自動制御は行わない。本実証では、間接制御は、金銭的インセンティブ(定額)をテナント側に試験後支払うことを前提として試験を行った。間接制御の抑制依頼を行った日は8/20-21, 9/5の3日間のみであった。このうち、東京の予想最高気温が34°C以上だったのは8/20-21の2日間だけである。

間接制御対象のビルBのテナントで、テナントの節電行動を支援するために、テナント総務担当者が許容した場合のみ、空調制御装置を用いたテナント専有部空調のスケジュール運転を実施した。スケジュール運転では、30分毎(一

部テナントは60分毎)に27°C,あるいは28°Cに強制的に変更する。仮に従業員が設定温度を25°Cに下げても、30分(60分)毎に、空調コントローラーによって設定温度27°C(28°C)に戻ることになり、空調需要の削減が期待できる。ただし、この制御は抑制時間帯のみでなく常時稼働し、また試験期間全てに渡って空調機は常時スケジュール運転することに留意が必要である。

## テナント調査：温熱快適性、節電行動

節電に伴う室内環境の変化や執務者の快適感・作業効率感の変化、テナントの節電行動を把握するため、試験期間中に、①各テナント内の室温計測、②温熱快適性に関するwebアンケート

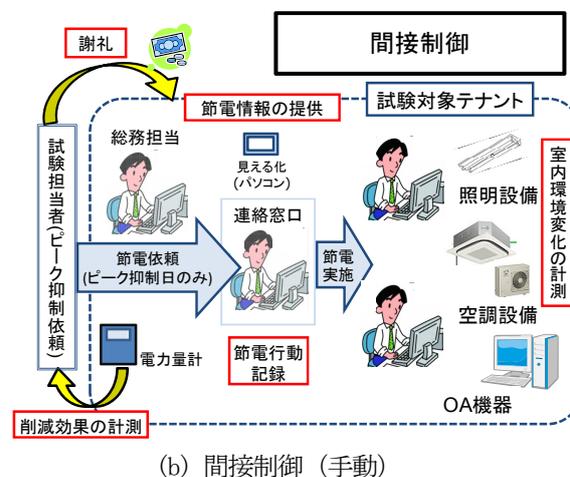
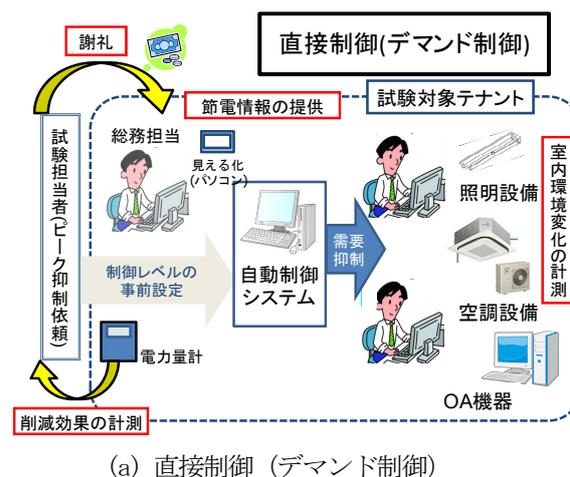


図2 夏季実証試験のイメージ図

ート調査（対象はテナント従業員）、③節電行動記録調査（対象はテナント総務担当）を行った。温熱快適性アンケート調査は、試験期間中、抑制日（2日）、抑制比較日（3日）の計5回行った。調査方法としては、参加テナントの従業員に、アンケート調査webサイトにアクセスしてもらい、対象日の回答時点での温冷感、満足感、作業効率感について回答してもらう形式である。調査項目は文献<sup>19)</sup>を参考に作成した。回答者の属性は、性別、窓近傍か否かを調査した。また、テナント総務担当には、抑制日は毎回、テナント内で実施した節電対策を自由回答形式で記録してもらった。

## (2) 試験結果

### 直接制御

図3に、ビルAについて、試験期間中の電力デマンドと外気温度の推移を示す。外気温が高い8/18-22の5日間のみ、デマンド制御が行われた。試験期間中におけるビルAの最大デマンドは368kW（8/20）であり、目標デマンド370kWを達成できた。前年度最大デマンド400kWと比べて8%削減であり、制御未実施の予測デマンド420kW（中央監視システムの演算による当該日のデマンド予測最大値）と比べて12%の削減となった。図4に時刻別の外気温度と30分デマンド値の関係を示す。四角マーカ（緑色）が2014年夏の試験期間中のデータ、丸マーカ（赤色）が2013年夏の同時期のデータである。

外気温度と30分デマンド値に正相関があることは共通であるが、2014年夏の試験期間中（2014/8/18～2014/9/12）の期間では外気温度に関らず、目標設定値370kW以内で推移していることが分かる。最大デマンド発生日（8/20）の13-17時に、デマンド制御の抑制レベルが3まで到達し、その結果、室温は25～28℃、適正な環境が維持された（図5）。

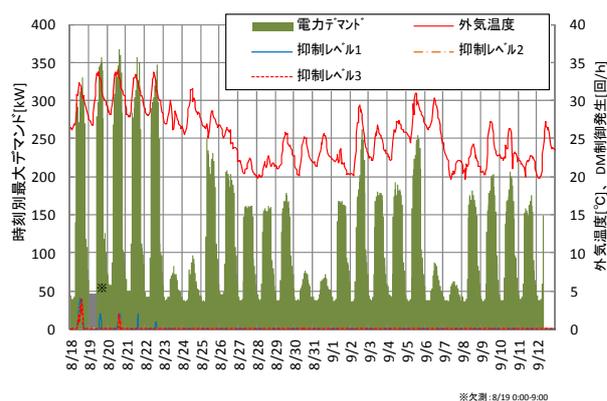


図3 夏季試験期間中の電力デマンドと外気温度の推移（ビルA）

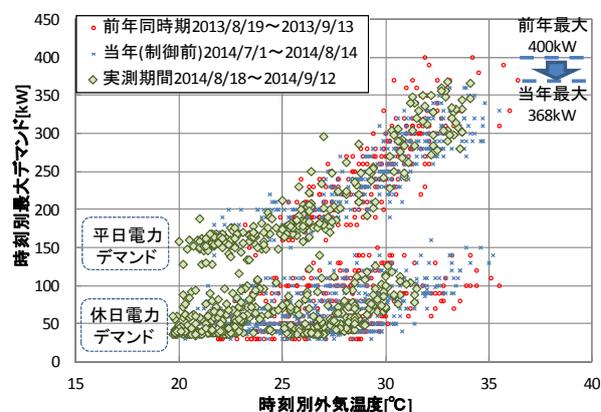


図4 外気温と30分電力デマンドの関係（ビルA）

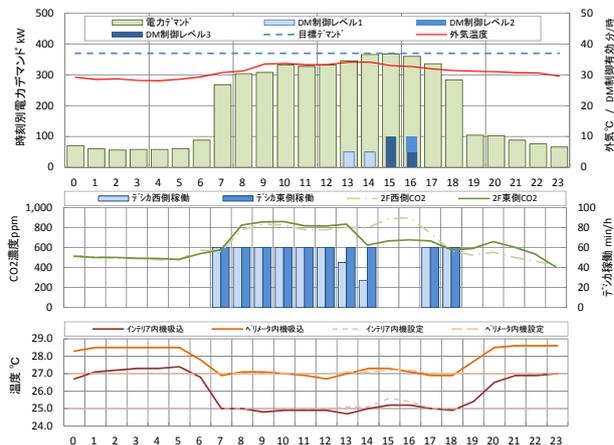


図5 最大デマンド発生日（8/20）の電力デマンド等（ビルA）

### 間接制御

ビルB～Fの計5ビル、23テナントにて夏季の間接制御試験を、抑制日8/20-21、9/5の3日間のみ行った。本試験では、米国のデマンドレスポンス実証試験で用いられた手法に準拠して<sup>[11]</sup>,

ベースライン (BL) 需要を推定し、参加テナント毎の需要削減量 (=BL需要-実需要) を計算した。具体的には、過去の実証研究<sup>[1]</sup>からBL需要の推定精度が高かった「前5日平均+午前補正」を採用して(式1-式3)、間接制御対象の参加テナントのBL需要を推定した。ただし、空調スケジュール運転を行ったビルBの参加テナントに対しては、前5日平均モデルがスケジュール運転効果を評価するモデルとして適切ではないため、「試験前の7月の5日間平均+気温補正」のBL需要モデルを適用した。

<BLモデル(前5日平均+午前補正)>

BL負荷は1時間毎データとして、設定する。発動日前の、非DR発動日5日分(休日を除く)の負荷の平均値として、調整前ベースライン負荷を計算する。調整前のBL負荷カーブに、DR発動日当日の制御時間前(午前9~11時)の実負荷データを用いて調整(底上げ)を行い、調整後のBL負荷とする。

$$E_{BL0}(t, D_0) = \frac{1}{5} \times \sum_{d=D_0-4}^{D_0} E(t, d) \quad (式1)$$

$$E_{BL}(t, D_0) = E_{BL0}(t, D_0) * \alpha \quad (式2)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{t=9}^{11} E(t, D_0)}{\sum_{t=9}^{11} E_{BL0}(t, D_0)} \quad (式3)$$

$E_{BL0}$  [kW]: 調整前のBL電力需要,  $E$  [kW]: 実電力需要,  $t$  [h]: 時刻,  $d$  [日]: 日付,  $D_0$  [日]: イベント発動日当日,  $D_N$  [日]: イベント発動日後の非イベント発動日(N日目)(Nが負の場合はイベント発動日前を意味する)

$E_{BL}$  [kW]: 調整後のBL電力需要,  $\alpha$  [-]: 午前調整比

試験結果の例として、ビルCのテナント2社(テナントC2, C8)の抑制日(8/20)の電力需要カーブを示す(図6, 図7)。テナントC2では、予冷や温度設定緩和が行われており、抑制時間

前に需要増になっているが、抑制時間帯には需要削減できていることが分かる。一方テナントC8では、総務担当による節電行動記録調査によると、設定温度変更(27℃)や不要な窓際の消灯、ブラインドを下ろすなどが実施されたが、結果として抑制時間帯に需要削減はできていなかった。後者は電気の使い方の日変動が大きく、仮に節電行動をしたとしても、抑制日昼間の電気使用量が多かったため節電効果が埋没したと解釈できる。そこで、発動日数が少ないが、削減量の有意性を検証した(図8)。図8に、抑制時間帯11-16時の需要削減率(棒グラフ)を、テナントおよび抑制日横並びで比較した結果を示す。横軸がテナントと抑制日、縦軸が11-16時(5時間合計)の電力需要の削減率(用途別)である。

エラーバーはBL需要の推定誤差であり、エラーバーが大きいテナントほど、日々の電気の使い方の変動が大きいことを表す。削減率が正の値で、かつエラーバーの下限が正の領域にあるテナントは、統計的に見て確かに需要削減ができていたことを意味する。

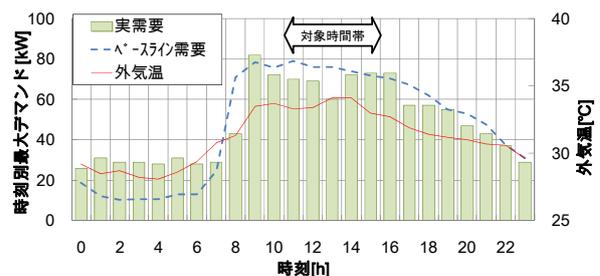


図6 抑制日のBL需要と実需要(8/20, テナントC2)

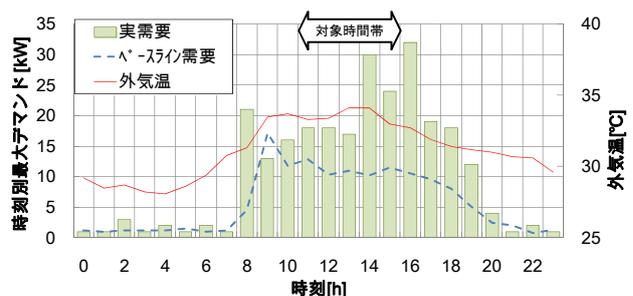


図7 抑制日のBL需要と実需要(8/20, テナントC8)



するピーク削減率が高い場合、夏季昼間だけでなく、冬季早朝のデマンド抑制が必要になる。

### 直接制御（プレヒーティング）

冬季の試験期間は2015年1月-2月の月曜日または休日明けの平日9日間とした。抑制日を4日、デマンド抑制を行わない休日明け平日の比較日を5日設けた。制御方式は、直接制御（プレヒーティング）である（表3）。抑制日の朝に、各テナント空調の空調開始時間を1時間半程度自動制御で前倒しする。始業前であるため手動対応できない。テナント空調系統を3グループに分けてエアコン暖房起動時間をグループ毎にずらすことで、冬季デマンドkWを抑制しつつ、電力消費量増加kWhの抑制も図った。プレヒーティング以外にも、換気停止等の方策と併せてデマンド制御を実施する。室内環境の変化を把握するため、各テナント内の室温計測を行った。執務者アンケート調査は行っていない。

### (2) 試験結果

前述した通り、年末年始明けの仕事初めの日に冬季最大デマンドが発生するため、ビルAの抑制日（1/5）と前年の1/6（非抑制日）の30分デマンドデータを比較する（図11）。冬季最大デマンド384kWは、前年と比べて約10%の削減となった。計測値からは、デマンド制御によって約5%、プレヒーティングによって約5%の削減が達成された。ビルCの抑制日（1/5）と前年の1/6（非抑制日）の30分デマンドデータ（空室テナント補正前）を示す（図12）。冬季最大デマンド920kWは、前年1/6のデマンド976kW（空室テナント補正後）と比べると、プレヒーティングにより約5%の冬季デマンドが削減されたと解釈できる。一方、今冬1/5のプレヒーティングによるkWh増加量（6-8時）は、前冬1/6よりもビルAで40kWh、ビルCで436kWh増加しており、デマンド抑制メリットと消費量増加の見合いでプ

レヒーティングの採否を判断する必要がある。またプレヒーティングは、始業前に室が予熱されるため、抑制日の勤務時間中の室温は比較日よりも悪化していないことを確認した（図13）。

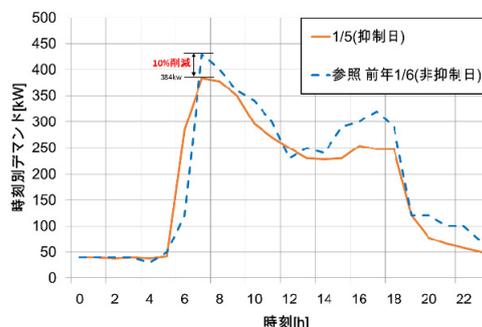


図11 抑制日と比較日の電力需要カーブ（ビルA）

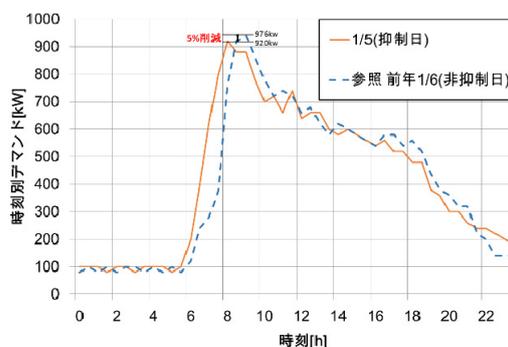


図12 抑制日と比較日の電力需要カーブ（ビルC）

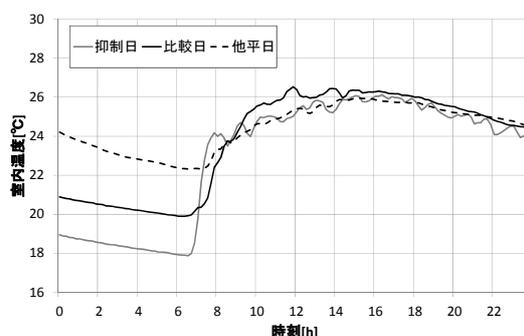


図13 抑制日と比較日の室温の経時変化（テナントC5）

## 4. 考察とまとめ—テナントビルにおけるDRの導入可能性

本稿では、都内のテナントビル（6棟、24テナント）を対象に実施した直接/間接制御によるスマート節電実証試験の結果を紹介した。直接制御対象は事務所ビルのピーク電力需要に占める割合が大きい空調用途である。夏季試験

では、空調機器の直接制御により夏季昼間デマンドを確実に抑制できること（ピーク削減率は10%程度）、間接制御だけでピーク抑制効果を出すためには検討の余地が残ることが分かった。冬季試験では、朝の始業開始時に最大デマンドが発生する建物では、プレヒーティングによるデマンド抑制は有効であった（冬ピーク削減率は5%程度）。また、直接制御によるスマート節電は、制御時間の長さが短く、夏・冬共にテナント執務環境への影響は小さかった。

2章でまとめた既往の事業所DR実証と3章の本スマート節電試験結果を受けて、テナントビルDRの導入可能性について考察する。

- ◇ テナント側の手間の削減、需要制御の確実性、人がいない時間帯の制御可能性（例：プレヒーティング）を考えると、テナントビル専有部のDRは、BEMSや空調制御装置など用いた直接制御（自動）が適切である。ただ、制御装置の導入費用の回収や受容性の高い制御手法という課題が残る。
- ◇ 直接制御によりテナント専有部のサービスレベルが低下する可能性があること、一時的にテナント側の環境選択権を制限することから、テナント専有部に自動DRを導入するためには、テナント側へのメリット還元や契約（どのレベルの節電を行うか）など何らかの制度が必要と思われる。

## 謝辞

本実証試験を実施するにあたりご協力いただいた試験対象ビルのテナントの総務担当と従業員の関係各位にここに記して感謝する。

## 参考文献

- [1] 高橋,上野,坂東,黒崎,小柳,野間:オフィスビルを対象にした夏季および冬季のデマンドレスポンス制御の実証試験—需要削減効果と執務者の受容性の分析—,電気学会電力・エネルギー部門誌 Vol.134 No.8, (2014)

- [2] 木村:事業所における2011~14年夏の節電の実態—東日本大震災以降の定点調査—,電力中央研究所報告 Y14013, (2015)
- [3] 東京都環境局・森ビル株式会社,平成25年度テナントビルにおけるデマンドレスポンス実証事業報告書, (2014)
- [4] 三菱地所,新丸の内ビルディングにおけるビルオーナーとテナント協働によるスマートな電力使用に関する実証事業報告書, (2014)
- [5] 北九州スマートコミュニティ創造協議会 最終報告資料, (2015), <http://www.kscop.jp/download/pre-final.pdf> (アクセス日:2015/9/4)
- [6] 横浜市温暖化対策統括本部,横浜スマートシティプロジェクト(YSCP)の取り組みと今後の展開について,スマートコミュニティサミット2015, (2015), [http://www.nedo.go.jp/events/report/sc\\_summit2015.html](http://www.nedo.go.jp/events/report/sc_summit2015.html) (アクセス日:2015/9/4)
- [7] 実証最終成果まとめ(概要編),横浜スマートシティプロジェクト(YSCP)全体会議, (2015), <http://www.city.yokohama.lg.jp/ondan/yscp/zentai.html> (アクセス日:2015/9/4)
- [8] 資料4 けいはんな学研都市資料,次世代エネルギー・社会システム協議会(第17回), (2014)
- [9] 一般社団法人日本サステナブル建築協会:“知的生産性測定システム(Subjective Assessment of workplace Productivity, SAP)”, <http://www.jsbc.or.jp/sap/notes.html>
- [10] ニューオフィス推進協会,オフィスの省エネが進まない要因はこれだ!~新しい切り口の省エネ手法の提案~, (2014)
- [11] K.Coughlin et al.:“Estimating Demand Response Load Impacts: Evaluation of Baseline Load Models for Non-Residential Buildings in California”, LBNL63728 (2008)

高橋 雅仁 (たかはし まさひと)

電力中央研究所 社会経済研究所

上野 剛 (うえの つよし)

電力中央研究所 システム技術研究所

岩松 俊哉 (いわまつ としや)

電力中央研究所 システム技術研究所

坂東 茂 (ばんどう しげる)

電力中央研究所 社会経済研究所

西川 雅弥 (にしかわ まさや)

日本ファシリティ・ソリューション株式会社

岩村 集 (いわむら あつむ)

野村不動産株式会社

# 家庭部門における行動変容型ピーク抑制策 —見える化システムと料金体系を組み合わせた事例—

Behavioral Interventions for Peak Saving in Residential Energy Use  
-A Case Study of an In-Home Display and a Rate Structure-

キーワード：節電，宅内モニタ，料金インセンティブ，ランダム化比較対照試験

向井 登志広 西尾 健一郎 小松 秀徳 内田 鉄平 石田 恭子

家庭部門のピーク抑制策として、緊急ピーク時料金やピークタイム・リベート等、価格インセンティブを極端に変化させて電気利用を抑制するような料金型アプローチへの認知度が高い。他方で、系統全体で節電効果を得るためには相応の適用世帯数を確保しなければならず、多くの需要家が受け入れやすい料金型アプローチ以外の仕掛けも選択肢となる。筆者らは、需要家の心理的負担が少なく、気軽かつ自然な節電行動を促す「行動変容型」のピーク抑制策について研究を進めてきた。本稿では、これら行動変容型アプローチについて関連研究を紹介する。特に、筆者らが実施した集合住宅での実証研究について、インタビューなどの新たな分析を交えながら、行動変容型ピーク抑制策への需要家の反応や留意すべき点について考察する。

1. はじめに
2. 震災後の節電行動の貢献
3. “ナッジ”
4. 集合住宅における実証
  - 4.1 実施概要と主要成果
  - 4.2 見える化システムと料金体系への反応
5. おわりに

## 1. はじめに

デマンドレスポンスと聞いて、料金型アプローチを思い浮かべる方は多いだろう。通常の数倍といったように電気料金単価に比較的強いコントラストをつける緊急ピーク時課金（Critical Peak Pricing, CPP）や、節電の対価として報酬を受け取るピークタイム・リベート（PTR, Peak Time Rebate）の検討が進められてきたとおりである。国の実証試験においても、適用世帯において20%程度の効果があると報告<sup>1)</sup>されている。

他方で、料金型アプローチが唯一の解というわけでもない。適用世帯では効果の深掘りができたとしても、系統全体で効果を得るためには、相応の適用世帯数を確保しなければならない。小売自由化時代における電気料金

やサービスとしての訴求力を考えると、需要家の心理的負担を軽減し、楽しさや気軽さといった肯定的評価を獲得できるような仕掛けも、登場が待たれるところである。

このような問題意識のもと、より穏やかで、需要家に優しいアプローチを指向して、筆者らはピーク抑制策の検討を進めてきた。抽象的に要約すれば「行動変容型」アプローチであり、あるいは、後述（3章）の表現を借りれば「ナッジ型」と呼ぶこともでき、料金だけでなく情報提供にも関心を向けている。本稿では、関連研究を紹介しつつ、需要家インタビューなどの新たな分析も交えながら、行動変容型ピーク抑制策への反応や課題について考察する。

## 2. 震災後の節電行動の貢献

2011年の東日本大震災以降、大幅な需要抑制が、電力需給状況の緩和に貢献してきた。当所では、同一需要家の毎夏の使用量・節電意識・行動を定点観測してきた<sup>[2]</sup>。

結果によれば、調査最終年である2014年の節電効果の中には家電や照明の更新効果もそれなりに混在してくるが、特に震災直後の2011年夏は、エアコンの利用控えや温度設定変更で代表されるちょっとした行動が節電効果の大半をもたらしていた。行動変容の果たした役割は大きく、その原動力は、電力不足の貢献に解消したい・社会のために何かしたいといった規範的動機や、メディアなどを通じてコツやノウハウを見聞きしたという情動的動機だった。電気代節約が日常的な節電動機の一つであることは疑いないが、震災直後に料金型アプローチがとられたわけでもない。

しかしそうはいつでも、震災後にとられた国民運動的アプローチは特異な例であり、恒常的な取り組みとして一般化できるようなものでもない。節電意識や各種行動の実施率も後退傾向にある。今後の省エネ・節電を考える上では、規範や情報といったキーワードを意識しつつ、より能動的で予見性のある行動変容策を模索していくべきである。

## 3. “ナッジ”

行動変容型ピーク抑制策を考える上で、ナッジ（nudge）という概念は有用である。ナッジとは「直観的な情報提供等の働きかけにより、人々の行動を社会的に望ましい形に変える」ことを意味する用語であり、米国の行動経済学者セイラー氏とサンステーション氏が、著書『実践行動経済学』において提案したものである<sup>[3]</sup>。ナッジ型アプローチの特徴

として、閲覧者が自然と行動を変えるような直観的な情報提供を行うという点があり、従来の見える化等で見られるような、消費者の集中と熟考を暗黙の前提とした、複雑な情報提供とは対極的な手法である。

加えて、ナッジ型アプローチはあくまで人々の行動を「緩やかに」変えることを狙った方法であり、大幅な単価差をつけることも、人々の自由な行動を制約したりすることもしない。これは裏を返せば、ナッジ型アプローチが付加サービスのであることを意味しており、消費者から好意的に受け入れられることが期待される。

## 4. 集合住宅における実証

### 4.1 実施概要と主要成果

ピーク抑制手法について、冒頭にあげた料金型手法の検討は先行しているが、情報提供による行動変容にも重点をおいた手法については、その効果を検証した事例は少ない。スマートメータ（次世代電力量計）の本格導入により、消費量30分値データの有効活用法に対する、政府や電力業界の関心も高まっている。

そこで筆者らは、集合住宅で実証研究を実施し、行動変容型手法による節電・省エネ効果や、意識・行動の変化の様子を検証してきた。詳細は当所報告書<sup>[4]</sup>にゆずるが、主要成果は以下のとおりである。

まず、スマートメータデータを用いた節電手法として、省エネアドバイスレポート自動生成システムを提案・開発した。これは、30分消費量データを読み込み、行動変容を促す複数レポートから各世帯に最適な1つのレポートを自動選択するシステムである。レポートには、行動科学的な情報デザイン（図1左側から3枚目の周囲比較情報のほか、顕著性の高い表現や、探索コスト低減のための工

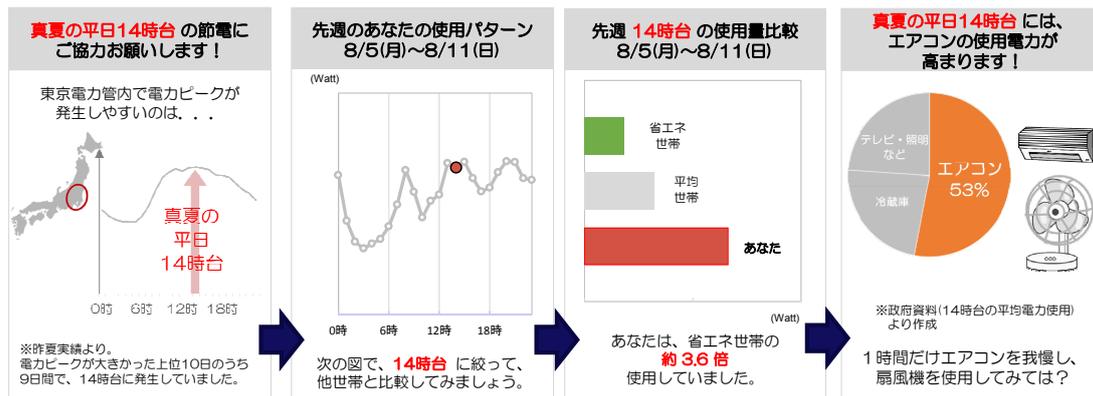


図1 ストーリーの一例

夫)を取り入れた。

次に、システム運用時の効果も見極めるため、千葉県船橋市の高圧一括受電マンション居住者(約500世帯)を対象に、2013年夏から14年秋にかけて、ランダム化比較対照実験(RCT)を行った。RCTとは、協力世帯をランダムに複数の群に分け、ある群にのみ節電手法を提供して、参照群と消費量等を比較する検証方法であり、バイアス(世帯属性や気象等の外的要因)のない検証を行える。当実証では、従来型の条件を適用した世帯(情報提供なし・従量電灯)を参照群とした(図2)。



図2 グルーピング

検証結果によれば、レポート、および、後述の見える化システム・30分逓増型料金のすべてを提供した世帯群での節電効果は、最大1割程度であった。これは、系統ピーク時間帯(夏季;図3)と建物ピーク時間帯(冬季)の両方で確認された。また、当実証の節電手法

に対する受容性や満足度の高さも確認されており、料金型の節電手法と比べた際の強みであるといえる。さらには、夏冬ピーク時ほどではないものの、通年での省エネ効果も確認した。

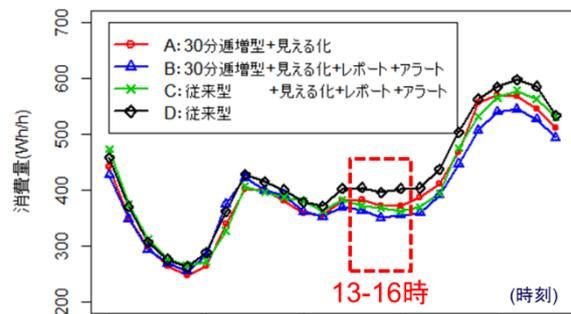


図3 2013年度夏の時間帯別消費量

#### 4.2 見える化システムと料金体系への反応

消費量データ分析を含む主要成果は前節のとおりだが、実際にどのような行動変容が起きていたかを理解することも重要である。そこで本稿では、レポートは提供しなかったが、見える化システムと料金体系(30分逓増型料金)を組み合わせ適用した世帯(A群)に焦点をあて、インタビュー結果などを新たに紹介した上で、それらへの反応や課題について考察を加える。なお、レポートに対する反応については、既報<sup>[4,5]</sup>を参照されたい。

#### 4.2.1 適用した項目

第1に、当該物件の見える化システムを象徴するのは、台所近くの壁面に埋め込まれた宅内モニタである。通常時は暗転状態にあるが、モニタ画面に触れることで即座に表示され、図4のような3種の画面を順に閲覧できる。第1画面の「ただ今の電気使用状況」は、主幹（住宅全体）電力使用瞬時値を表す帯状インジケータがリアルタイムに更新されるもので、0.4kW以下は緑、0.4kW超1.5kW以下は黄、1.5kW超は赤で表示される。

宅内モニタの主要要素の1つは、外縁部に埋め込まれた赤いLEDランプである（図5）。この赤いランプは、瞬時値が1.5kWを超えると自動点灯して単価が高いことを警告（アラート）する仕組みになっている。



図4 宅内モニタの画面構成

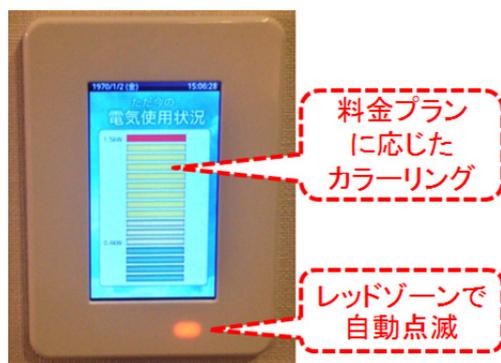


図5 宅内モニタの画面とLEDランプ

第2に、高圧一括受電のもとでの独自料金体系として、「30分逓増型料金」が提供されている。30分使用量別に3段階の料金単価を設

定しており、0.4kWh/h以下の使用量は約22円/kWh（税抜；以下同様）、0.4～1.5kWh/hは約28円/kWh、1.5kWh/h以上は約38円/kWhとして課金する仕組みとなっている。各料金ゾーンには「グリーンゾーン」「イエローゾーン」「レッドゾーン」という名称が付けられている。例えば、19時半から20時までの30分使用量が合計0.3kWhであった場合、0.2kWh（0.4kWh/h×0.5h=0.2kWh）まではグリーンゾーン、残りの0.1kWhはイエローゾーンとみなされ、料金は約7.2円（=0.2kWh×約22円/kWh+0.1kWh×約28円/kWh）となる。

30分逓増型料金は、0.4kWや1.5kWという目安を意識してもらうことで、家電同時利用を避け、オフピーク時間帯へ需要をシフトすることを狙っている。緑黄赤で統一されたデザインに投影されているように、宅内モニタは、30分逓増型料金の支援技術的側面が強い。

#### 4.2.2 インタビュー調査

実証研究全体では、2013年9月（各1時間）、2014年3月（各1時間）、同年9月（各45分）の3回にわたって、計22件の個別対面式インタビューを実施している。このうち本稿では、見える化システムと30分逓増型料金が適用されているA群6件のインタビューデータを扱う。表1および表2はインタビュー内容をまとめたもので、ID1・2は入居後約半年、ID3・4は約1年、ID5・6は約1年半が経過した時点の聞き取り内容である。各対象者の特徴を要約すると、次のとおりである。

ID1は、電気料金への意識は高くないものの、宅内モニタの存在をきっかけとして、食洗機や掃除機の時間をずらす工夫をしている。モニタ表示内容を能動的に閲覧する習慣もあり、電気使用やCO<sub>2</sub>排出量をどの程度に抑えるかという点について、自分なりの目安を設けている。

表1 インタビュー調査結果 (ID1-3)

ID	対象者	見える化システムの受け止め方	料金体系の受け止め方	節電意識・行動への影響
1	40代 女性 A群 実施 2013/9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電気使用状況と CO<sub>2</sub> 排出の画面は日常的に見る癖がついている。キッチンの横にあるので、通るたびに何となく見ている。</li> <li>● 電気使用は黄色の真ん中くらいをキープしようと思っている。</li> <li>● CO<sub>2</sub> 排出が今何%という日々のグラフを意識はしている。そこが下がれば自然と料金も下がっているのではないかと考えている。エアコンなど付けていると 90% になるので「ああ駄目だな」と思う。</li> <li>● ランプは本当に目に入る位置にある。電子レンジを使っている時に、エアコンや他のものを使うとついていたりする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電気料金は全く意識していない。多分、インターネットで見られるとは思いますが、こちらに来てから金額では見えていない。主人は見ていると思う。</li> <li>● 従来型の料金ではないというのはわかるが、料金の計算方法は全然わからない。色によって単価が多分違うだろうなと思ひ、止めてはいるのだが、幾らぐらいというのには頭に入っていない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● なるべく重複しないようにしている。洗濯が終わってから掃除機をかけるとか、食洗機も寝る前にスイッチを入れる。入居前は洗濯しながら掃除機という感じで、朝にまとめていっぺんにやっていたが、ほんのちよっとだけ変わった。</li> <li>● もともと節電の意識はあったが、見えることによって更にピンポイントでやっていたりける意味では、意識は高まっていると思う。</li> </ul>
2	30代 女性 A群 実施 2013/9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● できるだけランプはつけないようにと思って、節約している。</li> <li>● 最初はモニタを頻繁に見ていた。「この電気はどれくらい」というのを知りたくて、つけたり消したりとか結構した。大体わかるようになったので、見る頻度は減っていくと思う。</li> <li>● 画面はそんなに変えず、電気使用状況だけ見て終わりの時も。でんき予報はよくわからないのであまり見ない。</li> <li>● パソコンで見るのは月 1 回とかで、ほとんど見ない。電気代を管理しているのが主人だし、パソコンを開くのが面倒。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 料金プランは大体把握している。料金体系が緑・黄・赤みたいに分かれているのを説明会で聞いて、赤になるとすごく高いというイメージを持っていた。何色ならいくらみたいなことまではわからないが、段階的に単価が上がることはわかっている。</li> <li>● 見える化もあるが、主に料金プランによって、節電意識は変わった。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● エアコンをつけながら炊飯器を使うと絶対に赤くなるので、炊飯器を使う時はエアコンを切ったりとか、ご飯を朝炊いてしまっただけで冷凍しておくとかいうことはしている。入居前はオープントースターを使いながら電子レンジや炊飯器も使ってという感じだった。</li> <li>● 入居前にスマートプランの話を開いた時に、「食洗機を使う時間をずらしてレッドゾーンにならないようにしましょう」というのを教えてもらっていて、食洗機は夜寝る前に使うようになった。</li> </ul>
3	50代 女性 A群 実施 2014/3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● モニタはコンスタントにずっと見ている。電気製品を使う時や何も使っていない時に「今どのくらい」と。洗濯機の洗濯や排水の時に「なるほどね、そういう風になっているんだ」とちらっと見たり。主人は見ないが、自分には楽しくて、飽きない。</li> <li>● モニタが赤にならないようにする。5 分間くらいだったら平気というのが分かっているのだから「それはいいや」ということになるが。</li> <li>● パソコンで毎月のランキングを見ている。主人はノータッチで興味がないが。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 基本料金がなくことや、モニタが赤になると電気代が高くなることはわかっている。</li> <li>● マンションを買う時に、食洗機も時間をずらして使うと電気料金が安くなるという話があった。もちろん実践しようと思った。電気代を高くしたくない。</li> <li>● 入居後しばらくは、ランプがついた段階で、レッドゾーンの料金になると思っていて、30 分間トータルで下回ればレッドゾーンにならないことを、秋頃に教えてもらい、赤になっても長時間にならないければ心配ないことがわかった。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 洗濯機が古いので、掃除機や何か使おうとすぐ赤になる。掃除ロボットもあるので、電気を使っていない時に充電しておいて、洗濯機をかけている間にロボットをピッと。アイロン掛けも、洗濯機をつけている時にはやらないとか。</li> <li>● 炊飯器と一緒に使うと赤になることは自分で勉強したので、時間をずらしてご飯を炊くようにした。主人が帰ってくるまで全部つけるから、なるべく帰る前に。</li> <li>● 入居したての頃は、電気ポットも使っていた。それが、使用量が上がることがわかったから、使わなくなった。</li> </ul>

ID2は、電気代節約のために、炊飯器とエアコンの重複を避ける、食洗機利用を就寝時にずらすといった行動を心がけている。入居当初は、モニタ画面で家電利用時の電気使用量を確認することをしてきたが、見当がつくようになったことで、閲覧頻度は減少するものと予想している。

ID3も、家電稼働状況と電気使用量の関係を、モニタ画面から学び取ろうとしている。洗濯機・掃除機・炊飯器・電気ポットなどの傾向を把握することで、利用時間を工夫している。そうした学習プロセスを楽しみ続けている点も

特徴的である。当初は瞬時値が料金に反映されるものと誤解していたが、入居から約半年が経ち、料金は30分合計値で決まることを理解するに至った。

ID4は、宅内モニタ外縁部のLEDランプ点灯をきっかけに、消せるものがないかを考えることがある。その際には、利便性や快適性とのバランスを重視する様子がかがしい知れ、習慣として利用時間シフトする特定の家電があるわけではない。料金単価や料金算出方法に関する理解は、やや曖昧である。

ID5は、当初は宅内モニタやパソコンを通じ

表2 インタビュー調査結果 (ID4-6)

ID	対象者	見える化システムの受け止め方	料金体系の受け止め方	節電意識・行動への影響
4	40代女性 A群 実施 2014/3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 節電意識を刺激するのはランプ。点灯していると「今ほどの程度使っているのかな」と思って画面をタッチする。「これとこれを一緒に使うと赤くなる」というのが段々把握できている。</li> <li>● モニタは通り道にあるので、気が向けばタッチする。1日に何回も。見るのは電気使用状況がメイン。CO<sub>2</sub>排出量は寝る前に確認するようにはして、今日は収まった、オーバーしたとか見ている。</li> <li>● パソコンでは見ていない。自分は普段あまりパソコンを使わない。主人もあまり興味無いかと思う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 3段階にわかれていて、30分なり10分なりの使用量の平均がどのゾーンに入るかで、単価が高くなってしまふ。とにかくモニターで赤に入らないように気をつけている。料金の名称や単価は把握していない。説明パンフレットのなものは頂いた気はするが、あまり深く読んでいない。</li> <li>● 赤くなってしまう時に分からない時がある。赤くなってしまうたら、まとめて使って時間を短くするほうがいいのか、ずらすほうがいいのか。</li> <li>● 節約するようにはしているが、利用する時にはやむを得ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 入居前はあまり行動まではしなかったが、今はランプがどうしても気になってしまふ。点灯すると、子供に声をかけたり自分も見回したり。消せるものがある時は消すが、朝はやむを得ないのでしようがない。</li> <li>● 食洗機はあまり気にせず、片付けた時にスイッチを入れることが多い。後回しにすると忘れてしまうので。</li> <li>● 加湿器付きのストーブも結構食うみたいで、それと合わせると必ずランプがついてしまふが、それはやむを得ない。</li> </ul>
5	60代女性 A群 実施 2014/9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ランプがつくと、やはり「あれ？」と思う。「何をやるとランプがつくか」というのが慣れて分かってきた。ランプは常にあるので、意識しなくなることはない。</li> <li>● モニタは普段は触らない。入居したての頃は「今どれくらいかな」と結構見ていたが、半年くらいで大体つかめた。</li> <li>● CO<sub>2</sub>排出量は自分だけではどうしようもない、でんき予報も今は落ち着いてきているので、画面はあまり必要ない。</li> <li>● パソコンでは、最初1年くらいは月1回くらいアクセスしていたが、最近3ヶ月くらいは見えていないかも。面倒なのと予想がついてきたから。主人は見えていない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 料金プランの名称はわからないが、グリーン・イエロー・レッドゾーンがあって、単価が上がっていくことは知っている。単価までは意識していないが「緑なら安い料金帯だな」というのはわかる。</li> <li>● ランプが点灯しても、30分以下だと料金に影響しないと聞いていた。だから、ドライヤーも30分からはならないので大丈夫。</li> <li>● 今月の電気料金の確定のお知らせというのがメールで来るので、その時にパソコンを見るのが結構あるかも。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 若干早く使い終えるようにしている。ドライヤーが一番変わった。毎日のことなので、できるだけ早く髪を乾かすようにしている。</li> <li>● 入居前は、節電意識があまりなかった。だから、使用量が見えているというのは、やはり大きい。</li> <li>● 実際にタイマーを使ったり、使う時間をずらすかということ、そこまではやっていない。何とか少しは意識しているかもしれないが、食洗機はずらしている。</li> </ul>
6	30代男性 A群 実施 2014/9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ランプが赤くなった時は、切れるものは切ったりずらしたりという意識はする。</li> <li>● ランプが赤くなった時には、モニターをタッチして「消したらここぐらいまで下がったな」みたいな形で見ていた。正直なところランプが赤くなる時しか見えていない。わざわざタッチしては見なくなった。</li> <li>● CO<sub>2</sub>排出量やでんき予報は、去年の夏などは初めの面白さなどもあって見ていたが、今年はそんなに見ていなかった。単純に飽きっぽいから。</li> <li>● パソコンは始めのうちに見ただけで、その後定期的に見たりはしていない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 料金名称や何ワット以上までかはわからないが、緑・黄・赤でどんどん単価が上がっていく仕組みだと理解している。基本料金はすごく低いか無いかどちらか。</li> <li>● 一瞬ランプがついても、30分間継続でそのレベルでなければ料金的にはレッドゾーンにならない。始めは、30分単位というところまでは分かっていたなかった。請求が何回か来て、明細にレッドゾーンが0円と書いてあって「たまにランプが赤くなるのに何でだろう」とよくよく見て気付いた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 特に夕方など、レンジを使ったり、エアコンもかけて食洗機も使ったりすると赤になる。レンジや食洗機を使っているので一瞬ドライヤーはやめようかなとか、組み合わせせだったり遅らせたり、そこら辺では気をつけるようになった。</li> <li>● 初めの1ヶ月に何をを使うと使用量が跳ね上がるかというのを見たりして、コーヒーメーカーを保温で長くつけておくのはやめようと思った。</li> <li>● もしモニターがついていなかったら、気にせず同時進行で使っているだろう。</li> </ul>

て閲覧していたが、傾向が把握できたことなどを理由に、入居から約1年半経過した段階では、LEDランプ点灯に気付くことが主なきっかけになっている。主な行動はドライヤーの利用時間減で、利用時間シフトを強く意識する例は特にない。

ID6も同様に、宅内モニターやパソコンを通じた閲覧は減少し、意識するとすればLEDランプの点灯である。入居後1ヶ月程度で、コーヒー

メーカーの保温をやめるに至った。決まった習慣があるわけではないが、LEDランプが点灯しやすい夕方などに、家電の組み合わせについて緩やかな意識がある。入居当初は、料金計算に関する理解が不正確だったが、請求明細を確認することで自ら理解するに至った。

次に、6件を横断的に分析することで、全体の傾向を抽出する。

### (1) 見える化システムの受け止め方

最も身近な存在といえるのはLEDランプで、すべての対象者が点灯を意識している (ID1-6)。瞬時値が1.5kWを超えると自動点灯する仕組みのため、入居からの経過月数によらず注意喚起につながっている。

宅内モニタの3画面は、電気使用状況、CO<sub>2</sub>排出量、でんき予報の順に関心が低下する。モニタ表示内容を閲覧するためには自ら画面に触れる必要があるが、LEDランプ点灯時にもそれほど頻繁には触れない (ID2,5,6)、点灯時に限らず家電稼働状況と使用量変化の関係を把握しようとする (ID1,3,4)、1日の使い方を振り返るためにCO<sub>2</sub>排出量を確認する (ID1,4)、といった様々なタイプの行動が観察される。宅内モニタを継続的に閲覧している対象者もいる (ID1,3,4)。一方で、閲覧頻度が低下傾向にある対象者も存在し、その理由として、しばらく使い続けることで、使用量傾向が把握できたとする声が多い (ID2,5,6)。

Web上の見える化システムの閲覧頻度は低く、月1回程度 (ID2,3) かほとんど閲覧していない (ID4,5,6) という例が多い。入居当初は閲覧していたものの、面倒であるといった理由により、アクセスしなくなった対象者もいる (ID5,6)。アクセス手段としては、スマートフォンや携帯電話ではなく、パソコンが主に用いられている (ID2,3,5,6)。宅内モニタとは異なり、Web上の見える化システムの閲覧者は夫婦のいずれかに限定されることがある (ID2,3,5)。

### (2) 料金体系の受け止め方

使用量に応じて決まる緑黄赤3ゾーンの使用量や、レッドゾーンの料金が最も高いことについての認知度は高い (ID2-6)。各ゾーンの閾値 (kW) や単価 (円/kWh) を正確に把握している対象者はいないものの、家電利用をずらすほうが安くなるという特徴は、対象者全てに浸透している (ID1-6)。

30分合計値 (kWh) にもとづいて適用される単価が決まる点については、正確に理解している対象者もいる (ID3,5,6)。一方で、調査時点ないし入居当初においては、リアルタイムに情報更新されるLEDランプと宅内モニタと直結させて、瞬時値 (kW) で適用される単価が決まるという理解でいた例も存在する (ID3,6)。もっとも、料金体系の理解が正確だったとしても、現実問題として30分合計値を随時把握・予測することは容易でないので、使用量の多い状況が続くのは数分間だから大丈夫のはず、といった感覚的な判断が加わるか否かの違いに過ぎない。すなわち、LEDランプや宅内モニタの瞬時値情報が、わかりやすい目安として用いられることには変わらない。

### (3) 節電意識・行動への影響

高い料金ゾーンの課金を避けるために、家電の同時利用を避ける工夫がなされている。具体的に言及された家電は、掃除機 (ID1,3)、洗濯機 (ID3)、炊飯器 (ID2,3)、食洗機 (ID1,2,5,6)、エアコン (ID2,6)、電気ケトル・ポット (ID3)、電子レンジ・オーブン・トースター (ID2,6)、ドライヤー (ID5)、アイロン (ID3) などで、反応が多様であることは特徴的である。使用時間を減らす例としては、ドライヤー (ID5)、コーヒーポットの保温 (ID6) などがあげられた。必ずしも明確に区別できるものではないが、LEDランプ点灯に対処的に行動するタイプ (ID4,5,6) と、予防的に行動するタイプ (ID1,2,3) がある。前者の場合は、例えば快適性や利便性とのバランスを重視することもあるので (ID4)、行動変容効果としては控えめであると予想される。後者は、具体的に習慣として実施されているものも多い。例えば、食洗機を就寝中に使う (ID1,2)、炊飯器を家族の帰宅前に使う (ID3)、掃除機と洗濯機の同時利用を避ける (ID3)、といったものである。

### 4.2.3 アンケート調査

次に、アンケート調査結果について述べる。

アンケート調査は、実証参加申し込み時、および、毎夏冬後にその季節の実態を振り返る位置づけで実施したもので、高い回収率（延べ数ベースの回収率は99%）により協力世帯の全容が把握可能となっている。調査は郵送式で実施し、2013年度夏前に入居した協力世帯は2013年6月（本稿では実証前と表記；以下同様）・9月（13夏）、2014年3月（13冬）・9月（14夏）の4回、2013年度冬前に入居した協力世帯は2013年10月（実証前）、2014年3月（13冬）・9月（14夏）の3回にわけて行った。入居時期によって、実証前調査の実施時期が異なるが、いずれも群をランダム割付する前に実施した点は共通である。本稿の分析では、対象とするA群について、各設問の有効データを用いる。

#### (1) 見える化システムの受け止め方

図6は、見える化システムの各種媒体の閲覧頻度、および、それらの推移を表す。最も頻繁に閲覧されている媒体は宅内モニタで、「ほぼ毎日」の世帯がおよそ半数を占め、回答結果から推定すると平均して週4～5日程度利用されている。「ほぼ毎日」の比率は低下傾向にあるが、14夏調査でも4割以上を占めている。対照的に、パソコン・スマートフォン・携帯電話を閲覧する世帯は少数派で、14夏においては「ほぼ毎日」利用する世帯は数%にとどまる。経時変化については、いずれの媒体についても、14夏の閲覧頻度は実証前（入居当初）の水準を下回る傾向にある。

見える化システムにより電力使用を確認していた家電を、図7に示す。最も多いのは、電子レンジ・オープン・トースターである。これら家電は、数分間程度の利用であれば使用電力量（kWh）はそれほどではないものの、使用電力（kW）が大きいことから、瞬時値の見える化

がされる宅内モニタにおいて、関心を集めやすかったものと考えられる。2番目はエアコンで、使用電力量が大きく、使用電力も条件やタイミングによって様々であることから、確認対象になりやすかったものと考えられる。3番目のヘアドライヤーや、4番目に含まれる電気ケトルの使用電力の特徴は、1番目の電子レンジ等のそれに類似する。

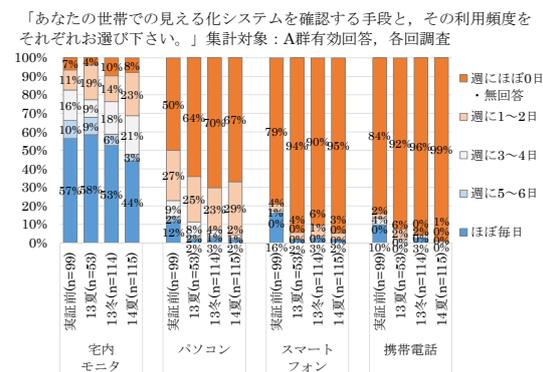


図6 IHD等見える化システムの閲覧頻度

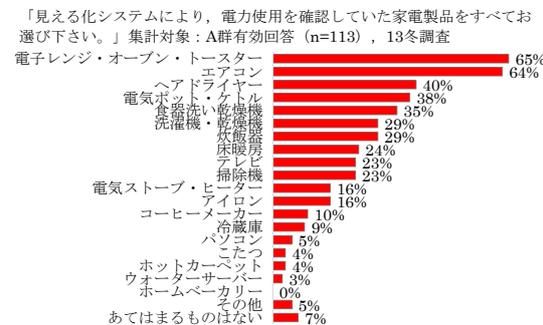


図7 IHDにより確認していた家電

#### (2) 料金体系の受け止め方

図8では、料金体系の認知度を比較する。単価や閾値といった具体的な数値を覚えている回答者は多くないものの、同時使用量に応じた3段階の単価の存在や呼称のように、仕組みに関する認知度は高かった。

そこで、料金ゾーンの捉え方を詳しく見るため、レッドおよびイエローゾーンに対する意識を図9で比較する。レッドゾーンにならないよ

う意識する世帯は、「そう思う」「まあそう思う」の合計で約9割を占める。これは、イエローゾーンの約4～5割を大きく上回る。レッドゾーンは、料金単価が最も高く、連動して宅内モニタ外縁部のアラート用LEDランプが点灯することもあり、電気利用の工夫を意識づけする目安として機能している様子が見えてくる。

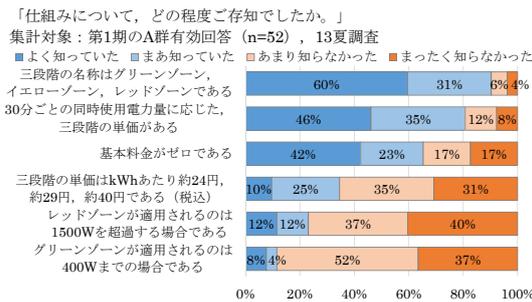


図8 料金体系の認識

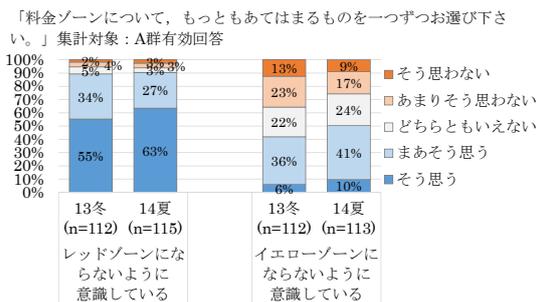


図9 料金体系への意識

#### 4.2.4 考察

本節では、集合住宅に導入された見える化システムや料金体系への反応を分析した。アンケートデータからは、これらの導入世帯において、節電意識が高められるとともに、家電の使用時間をずらすといった行動が促されていることが明らかとなった。特に意識されていたのは、家全体の瞬時使用電力が1.5kWを超えると点灯するアラート用LEDランプや、瞬時値をカラー表示するモニタ画面、30分使用量が多い場合に適用される「レッドゾーン」と呼ばれる高めの単価帯である。インタビューデータからは、各々の世帯において、家電利用状態と使用電力

の対応関係が徐々に把握された上で、ライフスタイルに適合した節電行動が選択されている様子が観察された。このように、エネルギー利用の多様性にあわせて、折にふれて注意喚起し、能動的な学習と判断を徐々に促すアプローチは、一般的なアドバイスを提供する方法と比べて、行動変容につながりやすいものと期待される。

また、受容性の観点からは、それぞれ次の評価ができる。従来の見える化システムでは、閲覧者がもともと関心の高い層に偏る傾向があるのに対して、LEDランプや瞬時値表示画面は、多くの需要家に身近なものとして受け入れられていた。特に、LEDランプについては宅内モニタ以外でも類似機能を持たせることが可能であり、例えばスマートフォンへのプッシュ配信機能も該当しうる。緊急時ピーク課金のような料金体系では、単価変動幅が大きいことに対して抵抗感が指摘されることもあるのに対して、本実証の単価変動を抑えた料金体系に対する否定的な反応は観察されなかった。

他方で、次のような課題もあげられる。

第1に、見える化システムの閲覧頻度の低下である。パソコンやスマートフォンからアクセスできるWebポータルについては、当初から一部の世帯でしか閲覧されていない。それと比べて、宅内モニタの閲覧頻度は高いが、それでも徐々に関心を失う傾向がある。学習したから見なくても済むようになるという状況は評価できるものの、住宅設備としてとらえるときに、利用率が低下していく傾向は望ましいことではない。その解決策の1つは、本システムのLEDランプが「目に入る」「通り道にある」ものであったように、生活シーンの中心に溶け込ませ、刺激を与え続ける機能を備えておくことかもしれない。

第2に、わかりやすさと正確さのトレードオフである。瞬時値を伝えるわかりやすさや電気

料金を色で視覚化したデザインは、好意的に受け止められ、行動変容の主要なドライバーとなっていた。一方で、本来であれば、料金体系に直結する30分値を正確に伝達するのが好ましい。このどちらを優先するかは、使用経験に依存する可能性がある。例えば、モニタの表示内容については、時の経過とともに学習が一定程度進むことで飽きが観察されるようになり、料金体系の仕組みについては、ふとしたきっかけから正しい理解が進むことがあった。すなわち、初期段階ではわかりやすさが優先されるべきだが、時間が経つと正確・詳細な情報を理解する素地が形成され、電気利用に対する理解や効率性がさらに促されるものと期待される。見える化システムを長期間活用されるべき住宅設備ととらえると、このようなフェーズにあわせて、表示内容をアップデートしていくことも考えられるだろう。

第3には、見える化システムの費用対効果である。本実証の見える化システムは備え付けのものだが、実際には導入コストがかかる。第1の課題で指摘したような機能も、安価に提供できることが望ましい。今日の住宅内には、スマートフォン端末、タブレットPCやスマートフォン、小型ガジェットなどが増加しており、それらデバイスを活用することができるか否か、あるいは、筆者らが別途検討を進めてきた省エネアドバイスレポートのように、見える化端末を必ずしも必要としない情報提供手法の活用もあわせて、省エネ・節電支援手段としての費用対効果を検討していく必要があるだろう。

## 5. おわりに

本稿では、家庭部門におけるピーク抑制策のうち行動変容型のものについて、需要家の反応や課題について考察してきた。インタビューなどの新たな分析から、「レッドゾーン」のような料金体系との連動表示やアラート用LEDラ

ンプ点灯といったわかりやすい表示が、閲覧者の行動をナッジし、能動的な学習や節電行動を促している様子が観察された。

見える化システムや料金体系による行動変容策には様々な工夫の余地がある。特に、現在導入が進んでいるスマートメータから得られる消費量30分値データの活用可能性は高く、データ分析技術<sup>[6]</sup>を駆使することで多様なサービス提供につながることを期待される。一方で、すべての行動変容策が効果的なわけではない。効果と課題を正確に把握するために、適切な実験計画にもとづく効果検証が重要であることも認識しておく必要がある。

## 謝辞

4章で紹介した研究は、野村不動産、ファミリーネット・ジャパンが実施した「スマートマンション・エネルギーシステムに関する省エネ調査」の一環で、共同研究機関として電力中央研究所が参画する形で実施しました。協力世帯の皆様にはインタビュー・アンケート調査等にご協力頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 省エネルギー小委員会 (2014) 「省エネルギーに関する情勢及び取組の状況について」、省エネルギー小委員会配布資料、経済産業省。
- [2] 西尾健一郎 (2015) 「家庭における 2011～14 年夏の節電の実態—東日本大震災以降の定点調査—」、電力中央研究所報告 Y14014。
- [3] リチャード・セイラー、キャス・サンスティーン (2009) 「実践行動経済学」、日経 BP 社。
- [4] 向井登志広、西尾健一郎、小松秀徳、内田鉄平、石田恭子 (2015) 「スマートメータデータを活用した情報提供と行動変容—集合住宅におけるピーク抑制・省エネ実証事例—」、電力中央研究所報告 Y15002。

- [5] 小松秀徳, 西尾健一郎, 向井登志広, 篠原靖志  
(2014)「電力消費量データを活用した省エネルギー  
アドバイザーレポートの自動生成システム」, 電  
気学会論文誌 C, 第 134 巻 9 号, 1394-1405.
- [6] 小松秀徳, 西尾健一郎 (2014)「スマートメータデ  
ータ分析情報の活用—分析技術の動向調査と需  
要分析の予備的検証—」, 電力中央研究所報告  
Y14003.

向井 登志広 (むかい としひろ)

電力中央研究所 社会経済研究所

西尾 健一郎 (にしお けんいちろう)

電力中央研究所 社会経済研究所

小松 秀徳 (こまつ ひでのり)

電力中央研究所 システム技術研究所

内田 鉄平 (うちだ てっぺい)

ファミリーネット・ジャパン

石田 恭子 (いしだ きょうこ)

野村不動産

# スマートメータデータの活用方法

## The Present and Future of Smart Meter Data Utilization

キーワード：電力需要， スマートメータ， 家庭部門， 省エネルギー， 節電

小松 秀徳 西尾 健一郎

電力各社によるスマートメータ(次世代電力量計)の本格導入に向けた動きが加速している。メータから得られる時刻別データの有効利用が期待されているものの、活用目的およびその基盤となる分析技術について、知見の蓄積や体系化は十分になされてこなかった。そこで、スマートメータデータ活用に資する分析技術について、文献調査により動向や課題を整理する。さらに、家庭用需要家のエネルギー効率利用支援を進める上で重要となる、冷暖房使用傾向の推定等に着目して、需要分析技術の検証を行う。推定精度に改良余地はあるが、平日午後在宅・エアコン多消費傾向にある世帯への選択的な節電アドバイス提示、デマンドレスポンス提案や、暮らしに役立つ新サービス提案等への活用も考えられる。これらの調査・分析を踏まえた上で、今後のスマートメータデータ活用における課題や、現在もなお広がりを見せるデータ利用価値の拡大の状況についても議論する。

- |                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| 1. はじめに            | 4.1 増加傾向にあるスマートメータデータの<br>研究事例 |
| 2. データ活用の動向        | 4.2 スマートメータデータを用いた情報提供         |
| 2.1 活用目的           | 4.3 各種方策のスマートメータデータによる<br>効果検証 |
| 2.2 分析技術           | 4.4 電力消費量以外のデータとの関連性           |
| 3. データ分析の検討        | 5. おわりに                        |
| 3.1 分析手法           |                                |
| 3.2 推定によって得られる情報の例 |                                |
| 4. 考察              |                                |

### 1. はじめに

ピーク時間帯に料金単価を上げるなどして電力需要を抑制するデマンドレスポンス(Demand Response, DR)の検討が進められてきた。DR支援技術としての位置付けから、時刻別使用量を計測できるスマートメータ(次世代電力量計)への期待が語られることも多いが、毎30分値の豊富なデータが得られることから、電力使用量の見える化のあり様も変わっていき、新サービスへの活用可能性も検討されている。

データ分析技術は、スマートメータデータの利用価値を向上させる可能性を秘める。特に近年では先行して導入に踏み切った米国や欧州

各国を中心として、我が国の仕様に近いデータを用いた分析事例も増加しており、中には特定の分析技術に焦点をあてたレビュー文献も存在する。しかし、それらの検討状況は、英語の論文や資料においてそれぞれ個別に文書化されているものが多く、現時点でこういった知見の体系化が十分になされてはおらず、我が国では把握が進んでいないのも実情である。いわゆるビッグデータ分析が新たな道を切り拓くという文脈からも、スマートメータデータへの期待は高まっているが、実態が見えないと感じている読者も多いだろう。

このような背景を踏まえ、当所は電気事業共同の研究機関として、スマートメータデータ活用の全体像を捉えるための調査分析を実施

し、報告書にまとめた<sup>[1]</sup>。その概要紹介として本稿では、2章でスマートメータデータ活用に資する分析技術の動向や課題を、3章で実データを用いた分析検討結果について述べる。

さらに4章では、今後のスマートメータデータ活用における課題、および近年広がりを見せる多様な利用方法の動向についての考察を加え、5章は本稿のまとめを行う。

## 2. データ活用の動向

### 2.1 活用目的

本節ではデータの活用目的を整理する。具体的には、表1の7点について順に述べる。

表1 スマートメータデータの活用目的

活用目的	例
エネルギー効率利用の支援	省エネ・節電・デマンドレスポンスのための見える化・アドバイスなど
料金選択の支援	電気料金の予想額による比較提案など
需要端機器運用の効率化	HEMS等との連携による家電制御など
新サービスの提供	高齢者見守り、防犯、健康管理、製品やサービスのマーケティングなど
ターゲット戦略の高度化	需要家のセグメンテーション、提案内容のカスタマイズなど
配電設備形成・運用の効率化	変圧器などの容量最適化、配電系統の電圧監視、停電監視など
需給計画の高度化	電源計画・運用、電力調達の最適化など

#### 2.1.1 エネルギー効率利用の支援

スマートメータの毎30分値を用いて見える化やアドバイスの質を向上させることで、省エネ・節電行動の促進や、省エネ製品への更新を提案する。

まず考えられるのは、見える化機能の提供である。スマートメータデータをWebや専用端末等で閲覧可能とするもので、自ら情報探索をする能動的な需要家に対して特に有効である。しかし多くの場合、日々の生活においてエネルギーは主たる関心事ではなく、受動的な需要家には訴求力に欠けるため、閲覧頻度の低下や、ほとんど閲覧しないといった状況も生じうる<sup>[2]</sup>。

そこで、見える化の工夫や、エネルギー消費

傾向などに応じた使い方・買い替えアドバイスの付与が求められる。例えば、行動科学の知見<sup>1</sup>を踏まえてグラフや文章表現を最適化する、冬季の消費量が多い世帯には暖房機器や断熱のアドバイスを選択提示する、等である<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.2 料金選択の支援

昼夜や平休日の消費量の多寡によって、需要家にとって望ましい料金メニューは異なる。スマートメータデータにもとづきライフスタイルに合ったメニューを提案することは、顧客満足度の向上にも寄与しうる。2016年度に予定されている小売全面自由化の後には、顧客の獲得や離脱防止のためにも、こうした取り組みの重要性は増すと考えられる。DR料金によるピーク時間帯の負荷抑制も検討されている。

#### 2.1.3 需要端機器運用の効率化

スマートメータのデータをHEMS等の制御機能と連携させることで、使用量や太陽光発電量に応じて、家電などの需要端機器を効率的に運用できる可能性がある<sup>[4]</sup>。制御の例として、需給逼迫時にエアコンの温度設定を変更する、蓄電池の充放電や電気自動車の充電等を最適制御するといったものが考えられる。

#### 2.1.4 新サービスの提供

スマートメータデータを、省エネや省コストのためだけでなく、暮らしに役立つサービスに活用しようという動きもある。例えば、高齢者見守り、防犯、健康管理、製品やサービスのマーケティングへの応用が期待される<sup>[5]</sup>。

<sup>1</sup> 他人の行動に影響されやすい傾向や、利得よりも損失を大きく感じる傾向等が知られている。

### 2.1.5 ターゲット戦略の高度化

これまで紹介したサービスへの反応率や、反応したときの効果量は、需要家によって様々であろう。事業者が講じる方策を費用効果的なものにするためには、全ての需要家に同じサービスを提供するのではなく、提供対象を特定の需要家に絞ったり、需要家に応じて提案内容をカスタマイズしたりすることも検討する必要がある。例えば、DRプログラムでは、ピーク時間帯に在宅傾向にありエアコンを多用する世帯をターゲットに訴求していくことで、プログラム効率を向上できる可能性がある<sup>[6]</sup>。料金メニュー設計や提案に活用するものもある<sup>[7]</sup>。

### 2.1.6 配電設備形成・運用の効率化

配電設備容量に影響を与える要因として、各需要家の電気使用傾向はもちろんのこと、太陽光発電の有無や、将来的には電気自動車の動向も関係しうる。スマートメータデータが蓄積され、負荷実態の把握が進むことにより、変圧器、引き込み線や計器といった配電設備形成の合理化を図ることができる<sup>[8]</sup>。

配電設備の運用面では、別途管理する地理情報システム上の配電設備情報（電圧・負荷電流状況）に、スマートメータデータを重ね合わせることで、配電系統の電圧監視や、故障設備判定を行う停電監視等が可能となる<sup>[9]</sup>。

### 2.1.7 需給計画の高度化

小売電気事業者には、30分単位で需給をバランスさせる「同時同量」が求められ、生じた差（インバランス）についてペナルティを払わねばならない。発電設備の計画・運用を最適化する上でも、需要構造への理解が欠かせない。スマートメータデータにより、電気使用量や太陽光発電量などの予測精度の向上が期待される<sup>[10]</sup>。

## 2.2 分析技術

### 2.2.1 簡易用途分解

主幹消費量データからどのような電気機器が使用されているかを分解して推定する手法は、一般にディスアグリゲーション（または用途分解）と呼ばれている。この呼称が用いられる場合、HEMS等で計測される、秒単位などの詳細な消費量データを前提とすることが多い<sup>[11]</sup>。

それらと比べると、スマートメータのような30分単位の粗いデータを用いた研究は、それほど盛んには行われてこなかった。時間解像度が粗いため、抽出できる情報の質や量は必然的に低下する。実際、15分や30分単位のデータでは機器ごとに電力消費量を把握することの難しさも指摘されている<sup>[12]</sup>。とはいえ、冷暖房需要の分解といった大まかなレベルではあるが、一段深い情報に加工できるため、検討が増えてきている。

こうした違いも踏まえ、以降では詳細な消費量データを用いた「ディスアグリゲーション（用途分解）」との混同を避けるため、スマートメータデータを用いた分解のことを「簡易用途分解」と呼ぶ。簡易用途分解に適用される分析技術には、回帰分析、ニューラルネットワーク、差分法（需要が小さい中間期の需要をベース需要として定義し、上回る量を冷暖房需要と見なす方法<sup>[13]</sup>）等が提案されている。

### 2.2.2 負荷パターン分類

電力消費データを特徴が似通ったクラスター（群）に分類することを負荷パターン分類と呼ぶこととする。負荷パターン分類は、多数の世帯をいくつかのセグメントに分けるために用いられる他、単一世帯の日々の需要パターンを選別し、それらをグループ化するために用いることもでき、クラスタリングと呼ばれる分析技

術が用いられる。

クラスタリングの手法は多数存在する<sup>[14]</sup>。これらを分類した試みとして、ニューラルネットワークを用いたもの、ファジー理論を用いたもの、統計的手法を用いたものの3種類に大別してレビューした例がある<sup>[15]</sup>。

中でもニューラルネットワークの一種である自己組織化マップは比較的よく用いられており、学習誤差が小さいことを指摘した例もある<sup>[15]</sup>。自己組織化マップは、多種類の情報を持つデータを、各情報の大小関係やデータ同士の類似度を極力維持したまま2次元マップ上にプロットし直す場合などに有効な手法である。

### 2.2.3 生活パターン推定

日常的な生活パターン推定の代表例に在不在判定があり、その主な手法として、需要量・変動量の分布から推定するもの、隠れマルコフモデルを用いたものの2種類がある。

需要の分布から推定するものには、需要を大きさ順にソートして、特定のパーセンタイル点を下回る状態を不在とみなし、逆に上回る状態を活動的とみなすものがある<sup>[16]</sup>。

隠れマルコフモデルの適用例としては、電力消費が一定である時間がどれだけ継続しているかという観点から、電力消費傾向の状態遷移を検出して在宅状態推定を行うものがある<sup>[17]</sup>。

### 2.2.4 属性推定

電力データから、世帯や住宅の各種属性を推定する手法がある。例えば、30分値の電力需要データ3,488世帯分に対して、複数の手法を適用し、単身世帯か否か（2区分）、築年数が30年以上か否か（2区分）、のべ床面積（3区分）等について属性推定が行ったものがある。その結果、単身世帯や築年数など2区分の判定において、最もパフォーマンスが良かった手法では

8割を超える正答率であったことが報告されている<sup>[18]</sup>。一方、30分値の電力需要データから、世帯内の子供の人数などの属性推定を試みたものの、精度的には課題があることを指摘するものもある<sup>[19]</sup>。

### 2.2.5 需要予測

電力需要予測には、系統・地域・需要家群レベルでの合計需要を予測するものから、個別の需要家の需要を予測するものまである。予測手法は、数分先等の短期予測から数年先等の長期予測まで含めると多岐に渡る。例えば、時系列モデル、回帰モデル、経済モデル、ファジー／遺伝的アルゴリズム等、12種類のアプローチに大別して整理してレビューしている例がある<sup>[20]</sup>。翌日や当日の需要予測に絞ると、簡易用途分解と同様、回帰分析やニューラルネットワークを用いるのが一般的と考えられる。

ここまで、スマートメータデータに基づく各種分析技術の動向について示した。これら手法に期待されること、および、課題や留意点についてまとめると、表2のようになる。

表2 スマートメータデータ分析技術

分析技術	主な使途・期待	課題・留意点
簡易※用途分解	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各月時刻別の冷暖房使用傾向の推定</li> <li>● 気温応度の推定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 個別家電の使用量・動作状態推定(詳細※用途分解等)には不適</li> </ul>
負荷/パターン分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 時刻別使用傾向などにもとづく需要家の類型化</li> <li>● 特異な負荷/パターンの検知</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 分類は無数あるので、活用目的に適った分析計画が必要</li> </ul>
生活/パターン推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在宅状態や活動傾向の把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在宅・電気非利用時と不在時の判別が困難</li> </ul>
属性推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 需要と相関の強い属性(人数・面積等)については、推定精度がある程度向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 推定モデル構築のために、事前に属性を与えられたデータが一定数必要</li> </ul>
需要予測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 系統・群の需要予測</li> <li>● 各需要家の需要予測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 小規模・長期になるほど、精度は低下</li> </ul>

※使用するデータの時間解像度などが異なる(簡易:30分単位, 詳細:Hz単位など)

## 3. データ分析の検討

本章では、前章で言及した「エネルギー効率利用の支援」を進める上で重要な、簡易用途分

解と生活パターン推定に注目し、データ分析の検討結果を紹介する。

表3 世帯属性

世帯	所在地	家族人数	建て方	延べ床面積	アメダス地点	DB上のID
1	京都府相楽郡	4人	戸建	70m <sup>2</sup>	三重県上野	WEB02
2	奈良県生駒市	4人	戸建	110m <sup>2</sup>	奈良県奈良	WEB04
3	奈良県奈良市	4人	戸建	125m <sup>2</sup>	奈良県奈良	WEA04
4	大阪府吹田市	2人	戸建	139m <sup>2</sup>	大阪府大阪	WEA09

本分析では、電力需要データとして、日本建築学会が公開している「住宅におけるエネルギー消費量データベース」<sup>[21]</sup>の中から、関西地域4世帯の1年分のデータを、1時間値100Wh単位に変換して用いた(表3)。気温データは、近辺のアメダスデータ1時間値を割り当てた。

### 3.1 分析手法

本節では、主幹電力消費量とアメダスデータから、気温感応需要(冷暖房などの気温変化に連動する需要)を推定する手法を紹介する。

回帰分析のモデル候補として、気温感応需要について3種類の式を用意し、時刻別にモデル推定した。

*model 1*は、CDH(Cooling Degree Hours; 冷房度時)とHDH(Heating Degree Hours; 暖房度時)を用いて、気温上昇と冷房需要増、あるいは気温低下と暖房需要増が線形の関係にあることを表現した式である。*model 2*では需要変化を気温の2次関数で近似し、*model 3*は、気温感応的な需要は存在しないと仮定した。ここでは紙面制約上、*model 1*の式のみを示す。

$$\begin{aligned}
 & model\ 1: \\
 & FDem_{1,d,t} = \\
 & ACT_{d,t} \cdot (a_{1t} \cdot CDH_{d,t} + a_{2t} \cdot HDH_{d,t} \\
 & + a_{3t} + a_{4t} \cdot IN_{d,t}) + a_{5t} \cdot HL_d + a_{6t}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{cases}
 CDH_{d,t} = \begin{cases} T_{d,t} - 22 & (T_{d,t} > 24) \\ 0 & (14 < T_{d,t} \leq 24) \end{cases} \\
 HDH_{d,t} = \begin{cases} 14 - T_{d,t} & (T_{d,t} < 14) \end{cases}
 \end{cases}$$

$t$ : 時刻,  $d$ : 日付,  $FDem_{model, d, t}$ : 総需要の推定値(Wh),  $T_{d, t}$ : 気温(°C),  $CDH_{d, t}$ : 冷房度時(°C),  $HDH_{d, t}$ : 暖房度時(°C),  $HL_d$ : 祝休日ダミー,  $IN_{d, t}$ : 日照時間比率(%),  $ACT_{d, t}$ : 需要活動フラグダミー

$CDH_{d,t}$ ,  $HDH_{d,t}$  はある日付 $d$ , ある時刻 $t$ における観測温度の基準温度からの差分である。

各日・時間帯で需要活動的な状態にあるかどうかを表わすダミー変数  $ACT_{d,t}$  については、以下の式で決定した。このダミー変数は、不在時、もしくは、就寝などによる宅内での電力消費の低下を考慮するための変数である。

$$ACT_{d,t} = \begin{cases} 1 & (RDem_{d,t} > Thr) \\ 0 & (RDem_{d,t} \leq Thr) \end{cases} \tag{2}$$

$$Thr = \frac{\sum_{d \in D} \min_t (RDem_{d,t} + 100)}{366} \tag{3}$$

$RDem_{d, t}$ : 総需要の実測値(Wh)

$Thr$ : 需要活動フラグの判定閾値(Wh)

$a_{1t} \cdots a_{6t}$ 等の係数は、0時から23時までの各時刻について、1年分のデータを用いて、推定需要の最小二乗誤差が最小となるように決定した。その上で、各時刻について、全モデルから最も説明力の高いものを採用した。

各時刻での気温感応需要は、以下の式で推定した。なお、*model 2*では2次関数の変曲点からの増分を、*model 3*では0を、それぞれ気温感応需要とした。

$$HCDem_{m_t^*,t,d} = ACT_{t,d}(a_{1t}^* \cdot CD_{t,d} + a_{2t}^* \cdot HD_{t,d}) \quad (4)$$

$$(m_t^* = 1)$$

### 3.2 推定によって得られる情報の例

#### 3.2.1 気温感応需要

図1は、世帯2における気温感応需要（推定値）の年間平均を、冷暖房需要（参照値）と比較したものである。本分析で用いた電力需要データはあらかじめ8用途に分解されて公開されているため、これを参照値として比較した。

深夜から早朝にかけては冷暖房をほとんど利用せず、7時頃から利用し始めて一度需要ピークを迎え、昼間時間帯に利用が一旦低下し、夕方以降再度需要ピークを迎える傾向を再現できた。

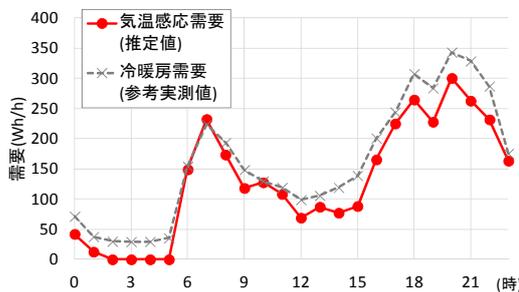


図1 世帯2の気温感応需要および冷暖房需要の年間平均

#### 3.2.2 需要活動レベル

図2は、各世帯の時間帯別需要活動レベル（各世帯の説明変数ACTを年平均したもの）のグラフである。いずれも9時頃から昼頃までにレベルが低下し、夕方に向けて上昇する傾向が見て取れる。昼間時間帯は出勤や買い物などで不在がちになることから、一時的な需要活動レベルの低下が観察されると考えられる。

しかし、各世帯で需要活動レベルの変動パターンは大きく異なる。例えば、世帯3では平日

日中の需要活動レベルが低めである。また、世帯2では18時頃に需要活動レベルがほぼ最大となっていることから、この時間には帰宅していることが多いこと、これに対して世帯4では20時を過ぎた頃から需要活動レベルが大きく上昇していることから、帰宅時間が世帯2よりも遅めであること、等も予想される。

深夜から早朝では、世帯2・3のように需要活動レベルが低下している世帯で、就寝中に冷暖房等の電気機器を使用していない可能性が示唆される。これに対して、世帯1・4では需要活動レベルの低下は見られず、就寝中に冷暖房等を使用していることが予想される。

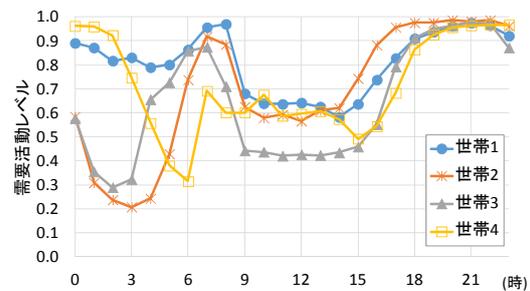


図2 時間帯別の需要活動レベル

## 4. 考察

本章では、スマートメータデータの研究事例が増加傾向にあることを踏まえ(4.1節)、今後のスマートメータデータ利用において留意すべき点として、情報デザインの重要性(4.2節)、介入方策の効果検証の重要性(4.3節)、電力需要以外のデータとの関わりの将来的な可能性(4.4節)について考察する。

### 4.1 増加傾向にあるスマートメータデータの研究事例

スマートメータデータ研究は発展段階にある。近年、当該分野の研究がこのように加速されてきた要因の一つとして、実証によって得ら

れたデータセットの存在が指摘できよう。例えば、アイルランドのエネルギー規制委員会 (CER; Commission Energy Regulation) は約4000世帯分のデータを公開している。件数が多く誰もが利用できるため、同データを基にした分析研究が他の研究機関によって数多くなされてきた。今後、こういった利用可能なデータが増えていくことで、データ分析研究は一層促進されるものと期待される。例えば、ヨーロッパの学術会議 ECEEE (European Council for an Energy Efficient Economy) が主催した2015年夏の会議では、スマートメータに関連する発表が12件あった。この中には、ドイツの研究機関が CER のデータを用いて、アンケートデータとの組み合わせから主要家電のロードカーブを推定した事例なども含まれる [22]。

#### 4.2 スマートメータデータを用いた情報提供

今後、スマートメータの本格導入により、需要家の電気利用・行動に関するデータは増加する。しかし、省エネ・節電等の行動を促す際、やみくもにデータを提示してはむしろ逆効果になる場合もある。適切な効果をもたらす情報提供を行うには、人間の現実的な振る舞いを考慮した情報デザインが一つの重要な検討要素となる。

大量の選択肢による意欲減少を避けるため選択肢を絞り込む、身近な人々の行動への同調傾向を考慮して平均的な行動を伝える、等の情報デザインの重要性は、「ナッジ」として提唱されてきた [23]。電力中央研究所でも、この考え方に基づく情報を、スマートメータデータから自動生成する手法を開発し、需要ピーク時の節電効果を検証する実証試験を行ってきた。

#### 4.3 各種方策のスマートメータデータによる効果検証

情報提供をはじめとする介入は、その効果を定量的に把握することも重要である。スマートメータデータには、これら各種方策の効果を詳細に把握可能となる利点がある。例えば、エネルギーレポートなどにより、どの時間帯でどの程度の需要抑制効果がもたらされるかを正確に把握しようとする動きがある [10]。こういった取り組みの結果、DR や省エネプログラム等の検討の精度が向上する点も期待される。また、断熱改修の効果を評価するためにスマートメータデータを活用したもの [24] もある。

#### 4.4 電力消費量以外のデータとの関連性

前節まで、主幹電力量データの活用に特化した研究について、動向の紹介と考察を行ってきた。しかし、例えばガスや水道の消費量や、クレジットカード等の購買履歴に関するデータ等、既存のデータにも様々なものがある。これに加えて近年では、携帯電話やウェアラブル端末等、インターネット接続されたデバイスの普及に伴い、行動データの種類や量も急激に増加している。こういったいわゆるビッグデータの台頭という、より広い観点から考えると、電力消費量のデータは多様な人間行動データのごく一部であると考えられる。

ビッグデータの利点の一つは、多面的なデータをソフトウェアによって処理することで、多くの場合センサー等の特別なハードウェアを追加的に設置せずとも、従来よりも詳細に行動を把握できる点にあると考えられる。将来の姿としては、こういったデータの利点を活かし、多種多様なデータの相互利用を考えることも有用だろう。

例えば、仮にスマートフォン等で家全体の機器を操作できるようになったとすれば、その枠

組みを利用して、機器単位での利用履歴がより詳細に把握できるようにもなるだろう。このような情報を活用すれば、どの機器に電力を多く消費しているかを専用の装置なしに特定し、選択的な省エネルギー・節電アドバイスを行うことができる可能性がある。または、長期間使用した家電のメンテナンスのお知らせ等にも活用できる可能性も考えられる。このような場合、ECサイトあるいはクレジットカード等、別の購買履歴データと組み合わせることで、家電の使用年数などに関するデータをより正確に推定できる可能性もある。

このように、今後さらに増加する多様かつ大量の行動データにおける電力のスマートメータデータの位置付けを見据えながら、単体利用のみに限定することなく、活用方法を検討することが重要だと考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、スマートメータデータの多様な活用目的・利用価値について、現時点での整理を紹介した。近年見られる、ビッグデータまでを含めたデータ分析技術の急速な発展を踏まえると、将来的なスマートメータデータの利用形態は、本稿における整理のみには止まらない可能性がある。

電気事業としては、サービスに投入できる人的・資金的資源の上限、省エネ・節電促進策の位置づけ、自由化後の市場における需要家からのサービスへの期待等、多様な要件を考慮しながら検討を進めていく必要がある。スマートメータデータの活用が有用な要素となり得るかどうかを見極める際、本稿が検討材料として一助となれば幸いである。

## 参考文献

- [1] 小松秀徳, 西尾健一郎. スマートメータデータ分析情報の活用 —分析技術の動向調査と需要分析の予備的検証—. 電力中央研究所報告 Y14003, (2014).
- [2] 八木田克英; 消費者心理からみた見える化の可能性: パーソナルインタビューからの示唆. 日本エネルギー学会誌, 89(7), (2010), 639–648.
- [3] 小松秀徳, 西尾健一郎. 省エネルギー・節電促進策のための情報提供における「ナッジ」の活用 —米国における家庭向けエネルギーレポートの事例—. 電力中央研究所報告 Y12035, (2013).
- [4] 林康弘; スマートメーターとデマンドレスポンスの連携. OHM, 101(10), (2014), 12–16.
- [5] 寺邊正大; 第 8 回 ビッグデータ活用で業務を効率化・最適化する! — 電力使用量データを活用した新サービスの創造. 三菱総研 未来情報解析センター ビッグデータがビジネスを変える, (2013).
- [6] J. Kwac and R. Rajagopal; Demand response targeting using big data analytics. 2013 IEEE International Conference on Big Data, (2013), 683–690.
- [7] C. Flath, et al.; Cluster Analysis of Smart Metering Data. Business & Information Systems Engineering, 4(1), (2012), 31–39.
- [8] 関西電力; スマートメーターに関する取組み. スマートメーター制度検討会 (第 14 回) 配布資料. 2014.3.17., (2014).
- [9] 野村浩司 他; スマートメーター活用のためのソリューション (特集スマートシティ・エネルギー). Fujitsu, 64(6), (2013), 661–669.
- [10] State and Local Energy Efficiency Action Network; Insights from Smart Meters: The Potential for Peak-Hour Savings from Behavior-Based Programs, (2014).
- [11] C. Armel et al.; Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity. Energy Policy, 52, (2013), 213–234.
- [12] 岩船由美子 他; 分電盤計測に基づく住宅用電力消費パターン分析手法. 電気学会論文誌 C, 133(5), (2013), 1086–1093.
- [13] 奥野宏将 他; 集合住宅のエネルギー消費実態の詳細把握: その 2 電力消費量の用途分解と東日本大震災による影響の把握. 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2012), 1337–1338.
- [14] I. Prahastono et al.; A review of Electricity Load Profile Classification methods. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, (2007), 1187–1191.
- [15] S. V. Verdu et al.; Classification, Filtering, and Identification of Electrical Customer Load Patterns Through the Use of Self-Organizing Maps. IEEE Transactions on Power Systems, 21(4), (2006), 1672–1682.
- [16] O. Ardakanian et al.; Computing Electricity Consumption Profiles from Household Smart Meter Data. the Workshop Proceedings of the

- EDBT/ICDT 2014 Joint Conference, (2014).
- [17] A. Albert and R. Rajagopal; Thermal profiling of residential energy consumption. *IEEE Transactions on Power Systems*, (99), (2014), 1–10.
- [18] C. Beckel et al.; Automatic Socio-Economic Classification of Households Using Electricity Consumption Data. *e-Energy'13 Proceedings of the fourth international conference on Future energy systems*, (2013), 75-86.
- [19] F. Fusco et al.; Mining residential household information from low-resolution smart meter data. *21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)*, (2012), 3545–3548.
- [20] L. Suganthi and A. A. Samuel; Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(2), (2012), 1223–1240.
- [21] 日本建築学会. 住宅におけるエネルギー消費量データベース.  
[http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/databas\\_e/index.htm](http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/databas_e/index.htm) (最終アクセス日:2015年8月17日)
- [22] T. Boßmann, J. Schleich, and R. Schurk; Unravelling load patterns of residential end-uses from smart meter data. *Proceedings from ECEEE (European Council for an Energy Efficient Economy) 2015 Summer Studies*, (2014).
- [23] リチャード・セイラー, キャス・サンスティーン. 実践 行動経済学: 健康, 富, 幸福への聡明な選択. 日経 BP 社, (2009).
- [24] J. Metoyer, P. Ham-Su, A. Stryker, C. Best, and M. Dzvova; Expanding the value of smart meter data for energy efficiency savings estimation. *Proceedings from ECEEE (European Council for an Energy Efficient Economy) 2015 Summer Studies*, (2014).

小松 秀徳 (こまつ ひでのり)

電力中央研究所 システム技術研究所

西尾 健一郎 (にしお けんいちろう)

電力中央研究所 社会経済研究所

# 太陽光発電大量導入時の電圧上昇対策に関する考察 —無効電力補償とデマンドレスポンスの比較—

Measures for Voltage Stabilization in Distribution Network with Large-scale PV Systems  
- Comparative Analysis of Reactive Power Compensation and Demand Response -

キーワード：太陽光発電，配電系統，電圧安定化，無効電力補償，デマンドレスポンス

高木 雅昭 田頭 直人

太陽光発電(PV)からの逆潮流によって配電系統の電圧が上昇する問題に対しては、配電系統側における対策の他、需要側における対策も検討されている。需要側における対策は、制御対象や運用方法により効果が大きく異なるため、その経済性を評価することが非常に難しい。需要家端で実施可能な対策は、制御対象によって、大きく二つに分けられる。一つは、有効電力を制御するデマンドレスポンス(DR)、もう一つは、無効電力補償である。本稿では、それぞれの対策の経済性を評価した当所の既刊報告書を参照しつつ、両対策の結果を比較する。更に、DRによる対策と無効電力補償による対策の特徴を明らかにすることで、両対策の協調の可能性を検証する。最後に、両対策を組み合わせた場合、設備の稼働率に基づいて、それぞれの対策が経済的に棲み分けることが重要である点について言及する。

1. はじめに
2. 電圧上昇抑制メカニズムの概要
3. 無効電力補償による対策の概要とその特徴
  - 3.1 配電系統モデルの概要
  - 3.2 無効電力補償装置の設置方策
  - 3.3 無効電力補償装置の必要容量
4. DRによる対策の概要とその特徴
  - 4.1 配電系統モデルの概要
  - 4.2 DRによる対策の評価結果
5. 評価結果の分析と考察
  - 5.1 無効電力補償装置の設備容量は何によって決まるか
  - 5.2 DRの必要抑制電力量は何によって決まるか
  - 5.3 無効電力補償による対策とDRによる対策の比較
  - 5.4 協調の可能性
6. まとめ

## 1. はじめに

近年、我が国においても「再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT: Feed-in Tariff)」等の導入により、太陽光発電(PV: Photovoltaic)の普及が加速している。しかしながら、住宅用PVが配電系統に大量に連系された場合、PVからの逆潮流により需要家端の電圧が上昇し、電気事業法で定められた規定値(107V)を逸脱する可能性がある。

電圧上昇を抑える手段としては、柱上変圧器のタップ変更や線路用電圧調整器(SVR: Step

Voltage Regulator)の設置、PVの出力抑制の他、無効電力を補償することも効果的である。これまで、無効電力を補償することで電圧上昇を抑制する場合、静止型無効電力補償装置(SVC: Static Var Compensator)を配電系統の高圧側に設置することが検討されてきた。一方、福島(2012)、樺澤(2012)、飯岡(2006)は、低圧設置の無効電力補償装置を提案し、その有効性を確認している。これら需要サイドにおける無効電力補償に用いる機器(以降、需要側機器と呼ぶ)の一例として、インバータを含む機器や $\mu$ STATCOM(福島2012、樺澤2012)等が挙げられる。その

他の関連研究としては、野田(2011)、三栗(2013)がEVの無効電力制御による電圧低下補償、田中(2009)、八太(2013)が分散型電源の無効電力補償による電圧上昇抑制対策を提案している。

著者らはこれまで、需要側機器による無効電力補償の経済価値を定量的に示す手法(高木2014, 高木2015a)や、低圧系統に設置する無効電力補償装置に関して、複数の設置方を想定し、その費用対効果を比較できる分析手法(高木2015b)を提案してきた。

一方、東日本大震災以降、需給逼迫対策としてピーク電力をカットするデマンドレスポンス(DR: Demand Response)に注目が集まっている。加えて、最近ではピークカット以外に、再生可能エネルギー大量導入時の系統安定化対策としてDRを活用することも検討されている。河村(2013)は、PV逆潮流による電圧上昇問題に対するDRの適用可能性を検討するため、DRの発動日数や発動時間、必要抑制電力量を定量的に把握し、その経済性を評価している。

無効電力は、その特性上、装置容量(kVA)を超えなければ、エネルギーを消費することなく、自由に供給することが可能である。つまり、無効電力の供給に伴って発生する費用は存在しない<sup>1</sup>。従って、配電系統側での電圧対策の経済性評価は、基本的に無効電力補償装置の容量をベースに行う。対して、DRによる対策は、装置を新規に設置する必要性は無いが<sup>2</sup>、抑制した有効電力量(kWh)に対してコストが発生する<sup>3</sup>。このように、電圧対策の経済性を評価す

る上で、有効電力と無効電力とでは性質が大きく異なる。本稿の目的は、需要家端での無効電力補償による対策(高木2015b)と需要家の協力に基づくDRによる対策(河村2013)を比較し、その関係性を明らかにした上で、両対策の協調の可能性を検証することにある。

## 2. 電圧上昇抑制メカニズムの概要

図1に示す2ノードモデルを用いて、PV逆潮流による電圧上昇と有効電力・無効電力を用いた電圧上昇抑制の関係について説明する。

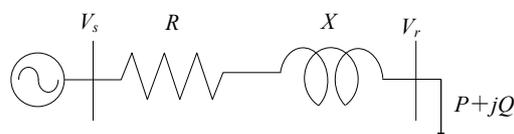


図1 2ノードモデル

送電端と受電端の電圧差である電圧降下 $V_s - V_r$ は(1)式によって近似される。

$$V_s - V_r \cong \frac{PR + QX}{V_r} \quad (1)$$

$$P = P_L - P_{PV} \quad (2)$$

$V_s, V_r$ : 送電端電圧と受電端電圧

$P, Q$ : 受電端の有効電力と無効電力

$R, X$ : 送電線の抵抗分とリアクタンス分

$P_L, P_{PV}$ : 負荷電力とPV出力

ここで、(2)式において、負荷電力 $P_L$ よりもPV出力 $P_{PV}$ の方が大きい場合、受電端の有効電力 $P$ はマイナス(PV逆潮流が発生している状態)となる。この時、(1)式においては、これに抵抗を乗じた値がマイナスの電圧降下、すなわち電圧上昇を引き起こしていることが分かる。DRによる対策の場合、負荷電力 $P_L$ を増加、またはPV出力 $P_{PV}$ を減少させることで、PVによる逆潮流を緩和し、受電端の電圧を適正範囲に維持する。一方、無効電力補償による対策の場合、受電端の無効電力 $Q$ がプラスの値となるよう

<sup>1</sup> 配電損失の増加等はあるが、本稿で検討する程度の無効電力補償量であれば、経済性評価に与える影響は小さい。

<sup>2</sup> ただし、制御指令やその応答を伝達するための通信インフラの構築およびその費用は必要。

<sup>3</sup> 需要家と電気事業者が事前に契約を締結し、系統に問題が生じた際に需要家の有効電力を制御し、その制御量に応じた報奨金を需要家に対して支払うインセンティブベースのDRを想定。

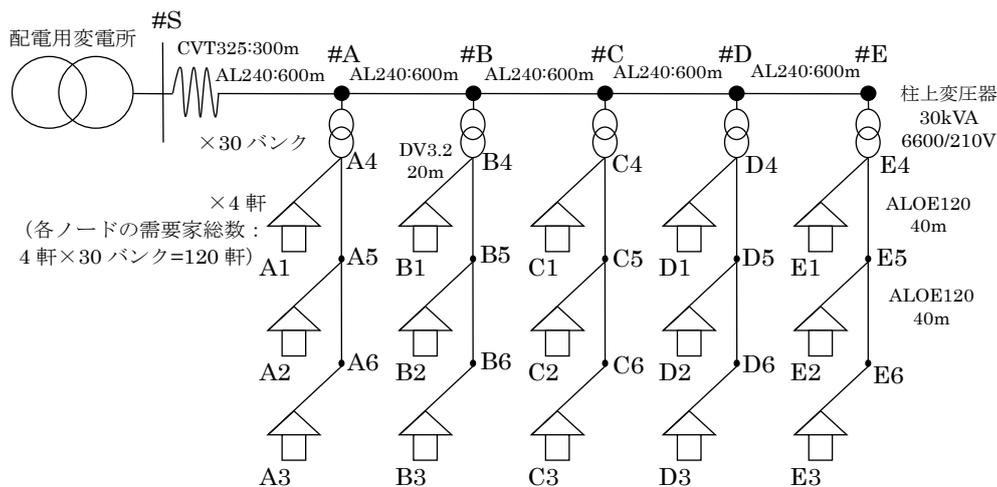


図2 配電システムモデルの概要

に補償することで、(1)式においては、これにリアクタンスを乗じた値が電圧降下となる。従って、PV逆潮流による電圧上昇分をキャンセルするように、無効電力を補償することで、受電端の電圧を適正範囲に維持することができる。

### 3. 無効電力補償による対策の概要とその特徴

本章では、無効電力補償による対策（高木2015b）について概説する。

#### 3.1 配電システムモデルの概要

高木(2015b)が用いた配電システムモデルを図2に示す。各需要家には、高圧配電線と接続する30kVAの柱上変圧器の2次側より低圧線と引込線を介して、電力が供給される。高圧配電線のノード#A~#Eでは、1ノード当たり30フィーダー分の低圧配電線を縮約するものとし、各需要家ノード（#A-1~#E-3）の縮約需要家数は120軒となる。なお、本配電システムモデルにおける電気的特性は文献（田中2009，三栗2013，電気協同研究会2005）を参考に表1のように設定している。

表1 配電システムの電気的特性

	抵抗 ( $\Omega$ /km)	リアクタンス ( $\Omega$ /km)	線種
変電所送り出し用 地中ケーブル	0.076	0.095	CVT325
高圧架空線	0.126	0.309	AL240
低圧線	0.252	0.268	ALOE120
低圧引込線	2.3	0.094	DV3.2
柱上変圧器	0.0186 ( $\Omega$ )	0.0328 ( $\Omega$ )	-

#### 3.2 無効電力補償装置の設置方策

図2に示す配電システムモデル内の各需要家ノード（#A-1~#E-3）にPVが順次設置されるものとした。PVの導入パターンとして、乱数を使って作成したランダムな順列1,000シナリオを想定した。本研究では、電圧逸脱を解消するために必要な容量の無効電力補償装置を、以下に示す4種類の設置ケースを想定して算出する。

- (1) SVCケース：高圧配電線の末端ノード（#E）にSVCを設置。装置容量は、これまでの導入実績より300kVAごとの離散値とする。
- (2) PVノード設置ケース：PVの設置により電圧逸脱が発生した場合、当該PV設置ノードに無効電力補償装置を設置する。

- (3) 需要家設置ケース：全需要家ノード(A1, A2, A3, B1, B2, B3, … E1, E2, E3)が無効電力補償装置の設置可能ノードであり，総容量が最小となるように各ノードの機器容量を決定する。
- (4) 柱上設置ケース：全柱上ノード(A4, A5, A6, B4, B5, B6, … E4, E5, E6)が無効電力補償装置の設置可能ノードであり，総容量が最小となるように各ノードの機器容量を決定する。

### 3.3 無効電力補償装置の必要容量

無効電力補償装置の総容量の1,000シナリオ平均値<sup>4</sup>を図3に示す。無効電力補償装置の総容量が最も大きいのはSVCケースで，次いでPVノード設置ケース，柱上設置ケースと需要家設置ケースはほぼ同容量となった。無効電力補償による電圧上昇抑制効果はリアクタンス分に左右されるため，リアクタンス分の小さい低压引込線の手前に設置する柱上設置ケースと後方に設置する需要家設置ケースは，ほぼ同容量となっている。

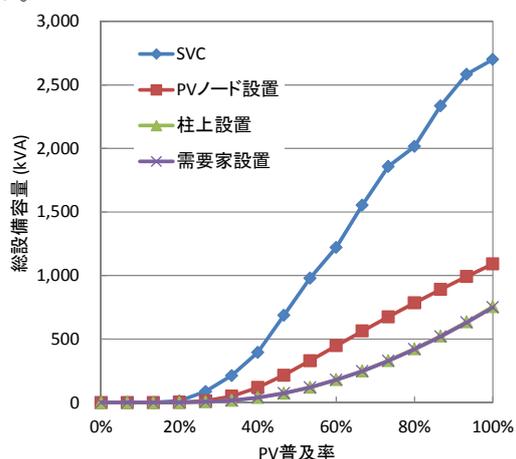


図3 無効電力補償装置の総容量（1,000シナリオの平均値）

<sup>4</sup> 膨大な数の配電線それぞれに対して，PVの導入パターンは異なるので，多数ある配電線の期待値として平均容量を用いる。

SVCケースの容量を100%とした時の各ケースの割合を示すと，PV普及率40%においては，PVノード設置ケースで30%，柱上設置ケースと需要家設置ケースで10%となっている。同様に，PV普及率100%においては，PVノード設置ケースで40%，柱上設置ケースと需要家設置ケースで28%となっており，PV普及率が低い時程，低压に設置する3ケースの総容量の割合が小さくなっている。第3.2節で述べたように，本研究ではPVを縮約した需要家ノード単位で順次設置するため，PV普及率が低いほど，PVが偏在する。また，SVCは需要家端の電圧を高压線から一括して補償するのに対して，低压用無効電力補償装置<sup>5</sup>は需要家近辺に設置することで，局所的に作用するといった特徴がある。つまり，PV普及率が低い程，電圧逸脱が局所的に発生するため，低压に設置する3ケースの効果が大きくなったと解釈できる。

柱上設置ケースと需要家設置ケースの総容量がPVノード設置ケースより小さい理由は，設置候補となるノード数が多いためであり，これは最適配置による効果と解釈できる。

## 4. DRによる対策の概要とその特徴

本章では，DRによる対策の評価手法（河村2013）について概説する。

### 4.1 配電システムモデルの概要

河村(2013)が用いた高压配電システムモデルを図4に，低压配電システムモデルを図5に示す。低压配電線は，柱上変圧器を中心にして，2方向に2径間ずつ延びている。ここで，図4

<sup>5</sup> PVノード設置ケース，柱上設置ケース，需要家設置ケースでは低压側に無効電力補償装置を設置するので，本3ケースにおける装置を総称して，低压用無効電力補償装置と呼ぶ。

に示すパターンiは、高圧系統全体にわたって負荷およびPVが均等分散しているケース、パターンiiは高圧系統の後半部分のみにおいて負荷およびPVが均等分散しているケースを表す。ただし、本稿の目的は、負荷およびPVの分布パターンの違いによる影響を詳細に分析することではなく、DRによる対策の傾向を把握することにある。これに加え、パターンiとiiのいずれにおいても同様の傾向を示していることから、以降はパターンiの結果のみを紹介する。なお、DRによる必要抑制電力量は、全て理想的に実施されるものとする。

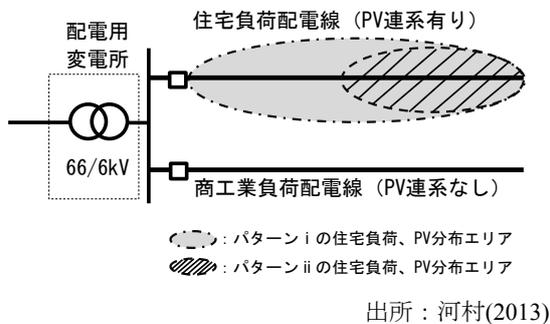


図4 高圧配電システムモデル

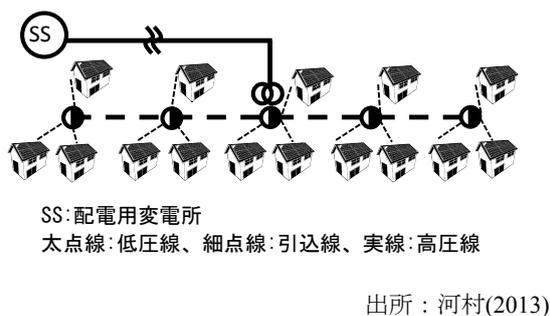


図5 低圧配電システムモデル

#### 4.2 DRによる対策の評価結果

DRによって対策を行った場合の必要抑制電力量を図6に示す（図中、●付実線）。

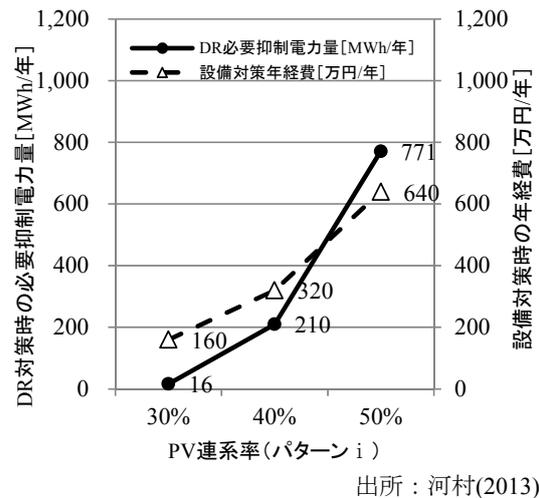


図6 DR対策時の必要抑制電力量と設備対策時の年経費率の変化（パターンi）

図6より、PV連系率の増加とともに、必要抑制電力量が逡増的に増加していることが分かる。一方、図3に示すように、無効電力補償による対策の場合、装置容量はほぼ線形に増加する。なお、河村(2013)も、PV連系率ごとに必要な無効電力量を試算しており（表2）、本容量にSVCの年経費を乗じたものが、図6における設備対策年経費（△付破線）である。併せて、PV連系率が増加すると、必要抑制電力量（DRによる対策）は急激に増加するのに対し、設備年経費（無効電力補償による対策）は概ね直線的に増えている点を指摘している。

表2 電圧適正化対策に必要な無効電力量の試算結果

PV連系率	必要な最大無効電力量[kvar]	
	パターンi	パターンii
30%	300	400
40%	600	800
50%	1000	1300

出所：河村(2013)

## 5. 評価結果の分析と考察

### 5.1 無効電力補償装置の設備容量は何によって決まるか

無効電力補償による対策の場合、PV逆潮流による電圧上昇分をキャンセルするように、無効電力を補償する。本原則を(1)式に適用すると、分子第1項の電圧上昇分と分子第2項の電圧下降分の和がゼロとなるに無効電力を補償することになる。本条件より、PV連系率に比例して増加した逆潮流分に対し、抵抗とリアクタンスの比(R/X)を乗じた値が、電圧を適正範囲に維持するのに必要な無効電力量となることが分かる。ただし、これは電圧が上限値に達した後に成立する条件であり、規定範囲内である間は、必要な無効電力補償量はゼロとなる。以上の理由により、図3に示す無効電力補償装置の容量は、PV普及率に対して、電圧逸脱発生後、ほぼ線形に増加しているものと推測される。

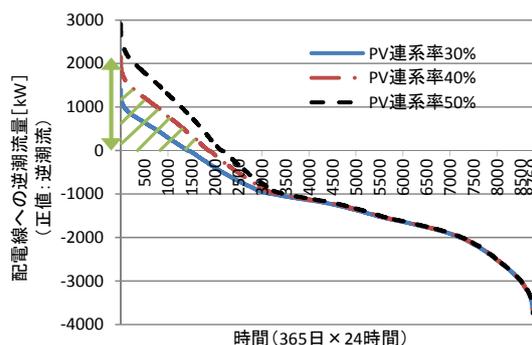
### 5.2 DRの必要抑制電力量は何によって決まるか

図7に、年間の逆潮流を大きい順に並べ替えた潮流持続曲線<sup>6</sup>を示す。無効電力補償による対策の場合、電圧面で最も厳しい1断面(図7において矢印で示した高さ)から必要な装置容量を算出する。これに対し、DRによる対策の場合、年間の逆潮流状態に基づいたシミュレーション(図7において斜線の面積)から必要な抑制電力量を算出する<sup>7</sup>。

<sup>6</sup> 配電線の送り出し電力について、逆潮流を正として大きい順に並び替えたもの

<sup>7</sup> 厳密には、配電用変圧器の送り出し電圧や配電性のインピーダンスによって、電圧逸脱が発生する逆潮流量の値も異なり、逆潮流量の全てを対象とする必要はない。ここでは、無効電力補償による対策が潮流持続曲

図7を見ると、PV連系率に対して、デュレーションカーブの高さはほぼ比例的に増加しているのに対して、面積は急激に増加している様子が見てとれる。その結果、無効電力補償装置の容量は線形に増加し、DRによる必要抑制電力量は通増的に増加したと解釈できる。

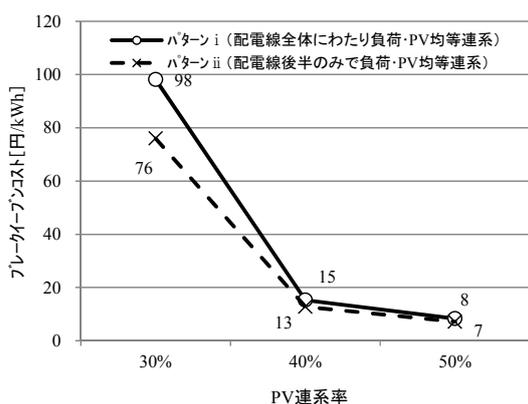


\*矢印と斜線は著者が追記 出所：河村(2013)

図7 潮流持続曲線(PV連系率30%~50%住宅負荷配電線の例)

図8にDR対策時におけるブレークイーブンコストを示す。本ブレークイーブンコストはDR導入に伴い回避できる設備対策費(SVCの設置費用)を逆潮流の抑制電力量で除することで算出されており、PV連系率が低い時に比較的大きなブレークイーブンコストとなっている。また、表3に示すように、PV連系率が低い時程、DRの発動時間が短くなっている。PV連系率が低い時は、年間の逸脱時間が短いので、この時に無効電力補償装置を設置すると設備の稼働率が低くなる。つまり、無効電力補償装置の稼働率が低くなる場合には、DRで対応した方が経済的といえる。

線の「高さ」を問題とするのに対し、DRによる対策が「面積」を問題とする点に焦点を当て、厳密性よりも簡便性を重視し、このような条件の下、以降の説明を行う。



出所：河村(2013)

図8 DR対策時におけるブレークイーブンコストの試算結果

表3 DR発動が必要な時間数

PV連系率	30%	40%	50%
DR発動			
発動が必要な年間延べ時間数	55	331	918

出所：河村(2013)

### 5.3 無効電力補償による対策とDRによる対策の比較

本節では、第3.3節で得られた結果を参照しつつ、低圧用無効電力補償装置をDRに置き換えても、同様の結果が得られるのか考察してみる。

まず、「SVCは需要家端の電圧を高圧線から一括して補償するのに対して、低圧用無効電力補償装置は需要家近辺に設置することで、局所的に作用するといった特徴がある。」点であるが、DRも需要家端で実施されるため、DRに置き換えても同様のことが言える。従って、低圧用無効電力補償装置による対策とDRによる対策は、PV普及率が低い時に効果的な、局所的な電圧上昇抑制

効果を、ともに備えているといえる。

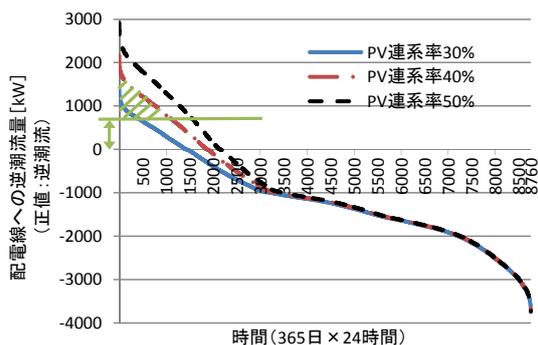
次に、最適配置による効果であるが、これはDRにも当てはまる。DRも需要家端で実施されるので、設置候補となるノードは多数存在する。従って、電圧上昇抑制効果の高い需要家を選択して、契約することができれば、最適化の効果を得られる。ただし、DRを実施する上でこのような選択的な契約が実現可能かに関しては、別途、検討が必要である。

### 5.4 協調の可能性

これまでの議論を踏まえ、無効電力補償による対策とDRによる対策の協調を検証する。本可能性は、河村(2013)も指摘しており、両対策を組み合わせた場合のシミュレーションによる最適な経済性の評価、分析（オプションとしてのDR適用に関する評価、分析）を今後の課題として挙げている。

具体的には、無効電力補償装置の稼働率が高くなるよう<sup>8</sup>、潮流持続曲線のボトム部分（図9において矢印の部分）を無効電力補償による対策が分担する。また、無効電力補償装置を設置すると稼働率が低くなるピーク部分（図9において斜線の部分）はDRによる対策が分担する。本棲み分けは、無効電力補償装置のコストとDRプログラムの実施コストにより決定される。実際の運用方法としては、電圧逸脱が発生した際、無効電力補償装置が優先的に稼働し、それでも逸脱が解消されない場合、DRが発動されることで両対策が棲み分けることになる。

<sup>8</sup> 第1章で述べた様に、無効電力補償装置の場合、装置の設置費用は発生するが、無効電力の供給に伴う費用は発生しない。従って、装置の設置費用を無効電力の供給量で除した単位無効電力量当たりの費用は設備の稼働率が高い（無効電力の供給量が多い）程、低くなる。



\*矢印と斜線は著者が追記 出所：河村(2013)

図9 潮流持続曲線に基づいた無効電力補償対策とDR対策の棲み分け

## 6. まとめ

本稿では、PV逆潮流による電圧上昇問題に関し、無効電力補償による対策とDRによる対策の結果を比較することで、両対策の特性を明らかにした。

無効電力補償による対策の場合、潮流持続曲線の高さから必要な装置容量を決定するのに対し、DRによる対策の場合、潮流持続曲線の面積に基づいて必要な抑制電力量を算出する。また、装置の稼働率が高くなる場合には、無効電力補償装置の設置、装置の稼働率が低くなる場合には、DRの方が経済性の高い対策となる。すなわち、潮流持続曲線において、ベース部分を無効電力補償による対策が分担し、ピーク部分をDRによる対策が分担することで両対策が経済的に棲み分けることになる。

本稿では、需要側における対策に注目して、需要家近辺で対策を行うことで局所的に作用できる点や、最適配置による効果の可能性を整理した。これらは、対策実施箇所の自由度の高さに起因するものであるが、このような前提とするためには、今後、解決すべき課題があることにも留意しなければならない。例えば、需要側における対策

では、制御対象が膨大となるので、通信インフラの構築や、制御協調の問題がある。加えて、多数の需要家の関与を必要とすることから、簡便で透明性の高い制度を構築する必要がある。また、DRに関しては、河村(2013)が指摘しているように、DR参加需要家をPV設置需要家に限るか、負荷のみの需要家も含める必要があるかといった参加対象範囲の議論も重要となってくる。従って、需要側における対策のメリットとデメリットを天秤にかけた上で、その実現性を見極める必要性が有る。本稿で示した考え方は、需要側における対策の経済性を向上させるもので、その実現の一助になるものとする。

## 参考文献

- [1] 飯岡大輔, 榊原邦晃, 横水康伸, 松村年郎, 出原範久 (2006)「太陽光発電装置が集中導入された配電システムの電圧上昇と SVC による抑制」, 電学論 B, Vol.126, No.2.
- [2] 樺澤祐一郎, 野田琢, 福島健太郎, 根本孝七 (2012)「需要家端に分散配置する無効電力補償装置  $\mu$  STATCOM の開発 (その 2) - 太陽光発電および電気自動車普及時の需要家電圧調整の検討 -」, 電力中央研究所報告 H11030.
- [3] 河村清紀 (2013)「太陽光発電大量連系時の系統電圧制御に対するデマンドレスポンスの適用可能性 - 発動頻度と経済性の評価 -」, 電力中央研究所報告 Y12008.
- [4] 高木雅昭, 田頭直人, 岡田健司, 浅野浩志 (2014)「需要側機器による無効電力補償の経済価値分析 - 太陽光発電大量導入時の電圧上昇抑制対策 -」, 電力中央研究所報告 Y13007.
- [5] 高木雅昭, 田頭直人, 岡田健司, 浅野浩志 (2015a)「需要側機器の無効電力補償による電圧上昇対策の経済価値分析」, 電学論 B, Vol.135, No.1.
- [6] 高木雅昭, 田頭直人, 岡田健司, 浅野浩志 (2015b)「低圧用無効電力補償装置の設置方策の検討 - PV 導入時における電圧上昇対策の費用対効果分析手法の提案 -」, 電力中央研究所報告 Y14010.
- [7] 田中俊輔, 鈴木宏和 (2009)「分散形電源の自律分散制御による電圧補償制御方式の検討」, 電学論 B, Vol.129, No.7.
- [8] 電気協同研究会 (2005)「配電系統における電力

品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, Vol.60, No.2.

- [9] 野田琢, 樺澤祐一郎, 福島健太郎, 根本孝七, 上村敏 (2011)「充電器からの無効電力注入による電気自動車夜間一斉充電時の配電線電圧低下補償手法」, 電力中央研究所報告 H10006.
- [10] 八太啓行 (2013)「SVC 容量を低減する分散形電源無効電力制御—PV 出力に応じた無効電力制御のシミュレーション評価—」, 電力中央研究所報告 R12012.
- [11] 福島健太郎, 野田琢, 樺澤祐一郎, 根本孝七 (2012)「需要家端に分散配置する無効電力補償装置  $\mu$  STATCOM の開発 (その 1) —概念と試作機による基本性能の検証—」, 電力中央研究所報告 H11029.
- [12] 三栗祐己, 原亮一, 北裕幸, 神谷英志, 滝照祥治, 平岩直哉, 小暮英二 (2013)「電気自動車の充電調整と無効電力注入による夜間一斉充電時の配電系統電圧低下補償に関する研究」, 電学論 B, Vol.133, No.2.

高木 雅昭 (たかぎ まさあき)

電力中央研究所 社会経済研究所

田頭 直人 (たがしら なおと)

電力中央研究所 社会経済研究所

# アンシラリーサービス型デマンドレスポンスの日米における取組み状況

Current status of utilization of demand resources for ancillary service in Japan and the U.S.

キーワード：デマンドレスポンス，アンシラリーサービス供給，空調負荷

坂東 茂

周波数調整や瞬動予備力といったシステムを安定に運用するためのアンシラリーサービスは、現在主に火力発電や水力発電によって供給されている。将来、不確実な出力特性を持つ再生可能エネルギーが電力システムに大量連系されると、アンシラリーサービスの必要量が增大する可能性がある一方で、火力発電の発電比率の減少により供給量が減少してしまうことが懸念される。これらの問題を解決するために蓄電池や再生可能エネルギーからのアンシラリーサービス供給が検討されているが、システム安定化コストは従来以上になると予想され、社会コストを最小化するためには電力消費機器等の需要側資源を活用する等、供給資源の選択肢を増やすことも重要である。本稿では、米国で先行する需要側資源を用いたアンシラリーサービス供給(ASDR)の現状や、日本におけるASDRの現状の取組みについても紹介し、今後ASDRを展開する上での課題について述べる。

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. 需要側資源を用いたアンシラリーサービス             <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 対象とするアンシラリーサービス</li> <li>2.2 活用が検討されている需要側資源</li> <li>2.3 需要側資源を用いたアンシラリーサービス供給による蓄電池容量代替効果の試算方法</li> </ol> </li> <li>3. 米国の市場における需要側資源のアンシラリー</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>サービス供給の導入状況             <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 需要側資源の周波数調整への活用状況</li> <li>3.2 需要側資源の予備力供給への活用状況</li> <li>3.3 需要側資源をアンシラリーサービス供給源として日本に適用する際の留意点</li> </ol> </li> <li>4. 日本における ASDR の状況</li> <li>5. おわりに</li> </ol> |
|---|--|

## 1. はじめに

再生可能エネルギー電力の固定価格買取制度 (FIT) の導入により太陽光発電 (PV) の大量連系が進む中、予測困難な変動出力に対してシステム運用上の対応が迫られている。平常時の周波数調整・瞬動予備力等のアンシラリーサービス供給は、現在、火力発電・水力発電等が中心的に担っているが、日本の電力供給システムをめぐる環境としては、

- ・人口の減少及び省エネの推進等により電力需要の伸びが鈍化、あるいは減少する可能性がある
- ・再生可能エネルギーの出力変動によって、平常時のアンシラリーサービスの所要量が増

大する可能性がある

- ・従来アンシラリーサービスの供給を中心的に担ってきた火力発電・水力発電の発電比率が減少する可能性がある

以上のようなことが想定される中で、高信頼度かつ経済的な電力供給を維持していくために、新たなアンシラリーサービス供給源として、デマンドレスポンス (DR) 活用の可能性が国内外で注目されている<sup>[1][2]</sup>。

本稿では、アンシラリーサービス型DR (以降、ASDR) について、アンシラリーサービスの種類と特徴、ならびに対象となる負荷の種類について述べ、米国の状況をインタビューと文献<sup>[3]</sup>に基づいて紹介し、国内における取組みにも触れながら解説する。

## 2. 需要側資源を用いたアンシラリーサービス

### 2.1 対象とするアンシラリーサービス

アンシラリーサービスとは、本来電力系統において電力供給を安定的に継続するため、系統の規模・運用形態に因らず、平常時の運用上必要なサービスである。その対象となるサービスは、系統の運用形態や系統信頼度に対する考え方により異なるが、大まかに分けると周波数調整、予備力の確保、無効電力供給および電圧調整、ブラックスタートが挙げられる。

#### ・周波数調整<sup>4)</sup>

周波数は電力の需要と供給のバランスが崩れることにより変動するが、周波数調整は電力需給バランスを調整して周波数を一定の範囲に保つ。需要が持つ変動成分は短周期から長周期まで多岐にわたるが、その周期帯により3つの領域に分けられ、それぞれに対応する周波数制御が施される。すなわち短い周期から順にガバナフリー制御（数秒周期以下の需要に対応）、負荷周波数制御（LFC）（数秒～十数分）、経済負荷配分制御である<sup>1)</sup>。

#### ・予備力の確保<sup>5)</sup>

電力供給側設備は、電力需要を想定して運用されるが、気象条件などにより需要予測が外れてしまうことや、供給側の事故などにより、予定した運用計画に狂いが生じることがある。安定供給のためには、それらの予測できなかった事態に備えて予備の供給力を準備しておくことが必要である。この供給力を予備力と呼ぶ。予備力には供給に至る時間の長さにより、3種類に分けられ、早い順に瞬動予備力（10秒程度で出力）、運転予備力（同10分～30分程度）、待

機予備力（同数時間）と呼ぶ。

瞬動予備力は日本においては系統容量の3%程度を確保することが目標となっており、並列火力発電・水力発電のガバナフリー運転の余力分があてがわれている。

運転予備力は日本では系統容量の3～5%程度が目標とされており、並列水力・火力発電所の出力余力分と停止水力発電機の可能出力、停止待機中のガスタービン発電機が対象となる。

待機予備力は運転予備力との合計値として8～10%が目標値とされ、停止待機中の火力発電がそれに当たる。

文献<sup>3)</sup>で調査した米国の予備力型DRでは、秒単位での反応が必要な瞬動予備力と、分単位での反応が必要な運転予備力が制度化されていることを確認した。

アンシラリーサービス供給源としてDRを活用する制度としては、周波数調整と予備力の確保に現状限られている。

今後、火力発電など従来アンシラリーサービスを主に担ってきた電源による発電量が減ることが予想される上に、そもそものアンシラリーサービスの必要量が増える可能性もあり、動向の見極めが重要である。

### 2.2 活用が検討されている需要側資源

火力発電・水力発電の他にアンシラリーサービスを補える資源としては、応答が速いリチウムイオン蓄電池等のエネルギー貯蔵装置が有効である。一方で、再生可能エネルギーの導入に伴った社会コストを最小化するためには、蓄電池以外の選択肢を用意することも必要であり、筆者らは負荷等の既存資源を用いてアンシラリーサービスを供給することの技術ポテンシャルを検討し、その分蓄電池の容量を最小化することを検討している<sup>6)</sup>。

<sup>1)</sup> 文献<sup>3)</sup>で調査した周波数調整型DRは、自動発電機制御（AGC）を対象としている。AGCとは、日本で言われる発電機の経済負荷配分と負荷周波数制御の総称である。

表1 日米におけるアンシラリーサービス型DR資源として検討されている負荷

アンシラリーサービスのタイプ	物理的要件 <sup>[2]</sup>		検討されている対象負荷	
	反応時間	反応長さ	日本	米国
周波数調整	30秒	15分	蓄電池 <sup>[11][12]</sup>	可変速ポンプ, 給湯機, 蓄電池, PHEV, セラミック蓄熱 <sup>[10]</sup>
瞬動・運転予備力	1分	30分以下	上記の他, 照明・空調, 生産ラインの消費抑制, 自家発電等 <sup>[13]</sup>	上記の他, 空調, 換気, 照明, 冷凍冷蔵倉庫, データセンター, 汚水処理, ポンプ, 製造プロセス等 <sup>[2][14]</sup>

アンシラリーサービス型DR用の需要側資源としては、指令頻度が高くても対応が可能であり、需要規模が大きく、通信・自動制御・計測のためのシステムが既に装備されている、もしくは簡単に設置可能な可制御負荷が望ましい。例えば、連続で同じ作業を繰り返す大規模工業プロセスは、運用計画を再調整することにより負荷を調整することが可能であり、それを可能にする自動制御システムや遠隔計測システムも既に実装されている。文献<sup>[7]</sup>では製錬所が挙げられており、電炉を対象とした予備力供給が行われている。

また、熱容量を多く持つ建物、機器についても対象となり得る。EnorNOCでは冷凍倉庫、Hawaiian Electricでは電気給湯器<sup>[8]</sup>などが予備力供給源として利用されている。また、上・下水道のポンプについても水の位置エネルギーを利用したエネルギー貯蔵を利用しながら素早く応答ができるものとして期待されている<sup>[9]</sup>。

加えて、PJMでは、アンシラリーサービスの中でも、迅速な応答性と、継続的な反応が必要とされる周波数調整用の需要側資源として、温水器、蓄電池、プラグインハイブリッド自動車、可変速ポンプが検討されている<sup>[10]</sup>。

日本においては、経済産業省の補助事業として展開されているインセンティブ型DR事業で、需要側資源から予備力を供給することを想定

し、自家用発電機、照明空調、生産ライン、蓄電池を対象とした制御が行われ、有効性を検証している（表1）。

### 2.3 需要側資源を用いたアンシラリーサービス供給による蓄電池容量代替効果の試算方法

ここでは、文献<sup>[6]</sup>の内容を引用しながら、業務用空調機を対象とした周波数調整DRについて検討し、蓄電池の代替効果の試算方法について示す。

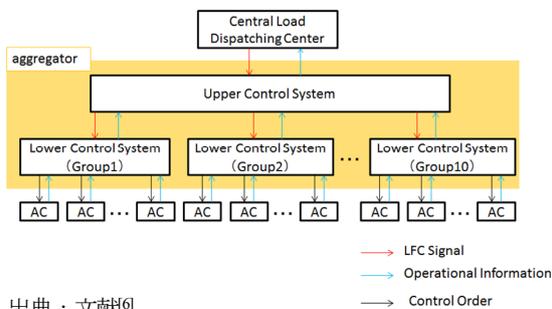
業務用空調機器を対象機器とした理由としては、室内空間そのものが蓄熱装置と同等の役割を担うため、短周期の消費電力制御であれば室温変化を顕在化させることなく需給調整に用いることができると考えられるためである。また、業務用空調機は既に広く普及しており、業務部門の全消費電力量に占める割合が大きく<sup>[15]</sup>、制御効果が得やすいため、大きなポテンシャルを有する。特に業務用空調機は家庭用空調機に比べて年間の稼働時間が長いため、需給調整能力を長期間供給することが期待される。

現在販売されている空調機の中には節電機能がっているものも多くあるが、主に電力ピークカットを目的としており、消費電力の上限値をいくつか設定することができるものもある<sup>[16]</sup>。

文献<sup>[6]</sup>における研究では、ピークカット対応の運転仕様を持つ業務用空調機がアグリゲータによる群制御下にあることを想定し、単独系

統に再生可能エネルギー電源が大量連系された状況において、対象とする空調機と火力発電機で負荷周波数制御を分担させた場合の周波数変動抑制効果の分析を行った。その際、空調機を可制御負荷として用いることにより、自然変動電源対策用蓄電池導入容量の削減が可能であることを示した。今回のシミュレーションにおける空調機群の制御方法としては、消費電力の上限値を何パターンか設定しておき、外部からの要請に応じたパターンの上限值に消費電力を制限することにより、系統からの要請に応じた消費電力を削減することが可能な機種が広まっていることを想定した。

図1は中央給電指令所、アグリゲータ、空調機の関係を表したものである。今回想定した対象エリア内の空調機はアグリゲータによってその運用情報が一元管理されているものとし、中央給電指令所は空調機と直接情報のやり取りを行わず、空調機の運用情報を集約するアグリゲータとLFC信号、運用情報のやり取りを双方向的に行うものとする。



出典：文献<sup>6)</sup>

図1 空調機によるアンシラリーサービス供給型DR (ASDR) の階層制御

文献<sup>6)</sup>では、空調機の動特性試験を行い、出力上限を指令値とした場合の空調機の応答モデルを構築した。再生可能エネルギーが大量に導入された場合の出力変動パターンの設定、需要変動から計算されるLFC信号の設定を経て、周波数変動をシミュレーションした。表2に、蓄電池を考慮せずに、与えられた短周期の需要変動に、ASDRを用いずに周波数を制御した

場合と、ASDRを用いて周波数を制御した場合の周波数変動の結果を示す。対象日は、火力発電の発電量が非常に少なく、LFC容量を確保するのが難しいと考えられる中間期としたため、非常に大きな周波数偏差となっているが、ASDRの利用により、最大偏差が1.0Hzから0.8Hzまで小さくなった。

表2 空調機によるASDR、蓄電池を考慮しない場合の周波数変動

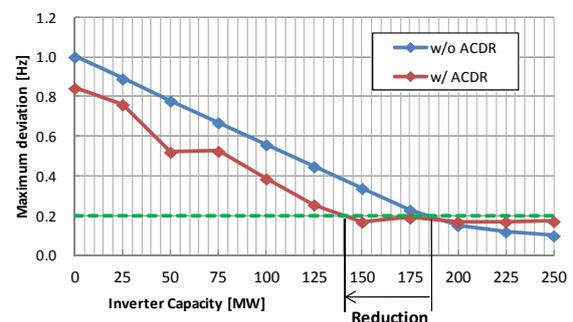
	周波数変動の 最大値[Hz]	RMS 値[Hz]
ACDR無し	1.001	0.140
ACDRあり	0.844	0.130

出典：文献<sup>6)</sup>

注：表中、ACDRは空調機を用いたDRを表している

周波数偏差の最大値が系統運用の目安である0.2Hzになるまで、蓄電池容量を増やして評価すると、ASDRの利用により、蓄電池のインバータ容量を45MW削減できるという結果を得た (図2)。

本分析ではASDRの有効性を、最もLFC供給の逼迫した中間期における技術的ポテンシャルという観点で評価したが、これに加えて、長期の蓄電池削減の経済的ポテンシャルを評価する必要がある。



出典：文献<sup>6)</sup>

注：図中、ACDRは空調機を用いたDRを表している

図2 蓄電池の削減量の評価

### 3. 米国の市場における需要側資源のアンシラリーサービス供給の導入状況<sup>[3]</sup>

米国では、電気自動車や冷凍倉庫などの可制御負荷を、給電指令可能な需要側資源として、エネルギー市場、アンシラリーサービス市場に統合していく動きが見られる。本検討では、需要側資源をアンシラリーサービス供給で先行する米国の現状から、需要側資源の活用事例を調査し、日本に適用する際の課題を抽出する。

米国の主要な6つのISO/RTOにおける、アンシラリーサービス供給源としての需要側資源の活用動向（表3）について、主に文献による調査を行った。

このうち、日本が注目すべきISO/RTOとしては、周波数制御の観点では、系統規模や再生可能エネルギーの導入度合を考慮するとElectric Reliability Council Of Texas (ERCOT)が参考になるが、太陽光発電が大量導入の影響という観点では、同じく太陽光発電の導入が進むCalifornia ISO (CAISO)の今後の動向も参考とすべきである。

需要側資源の活用が顕著であるISO/RTOとしては、主に風力発電の導入量が大きく、他系統

との交流連系のないERCOTが挙げられる。CAISOに関しては、太陽光発電への対応として柔軟性のある予備力の活用<sup>[17] [18]</sup>など、対策が取られつつあるが、まだ需要側資源活用の目立った事例はない。

#### 3.1 需要側資源の周波数調整への活用状況

周波数調整用DRについては、ERCOTにおける需要側資源が37MWあるのが注目される。周波数調整の必要容量は系統規模の1～5%程度であるため、ERCOTにおける周波数調整用DRが占める割合は必要調整容量の1～2%程度であると予想され、周波数調整用DRについてはそれほど大きな需要側資源の活用はなく、まだ試験段階であると言える。

PJMの周波数調整の需要側資源の活用状況は、下記に示すような制度緩和とアンシラリーサービス価格に密接な関係があることが分かった。需要側資源の活用は2006年から認められていたものの、実際に活用が始まったのは2011年であった。これは、2011年に市場参加の最小容量が緩和（1MW →0.1MW）されたことが寄与していると考えられる。また、図3では、2012

表3 各ISO/RTOにおけるアンシラリーサービス供給型DR（ASDR）導入状況<sup>[3]</sup>

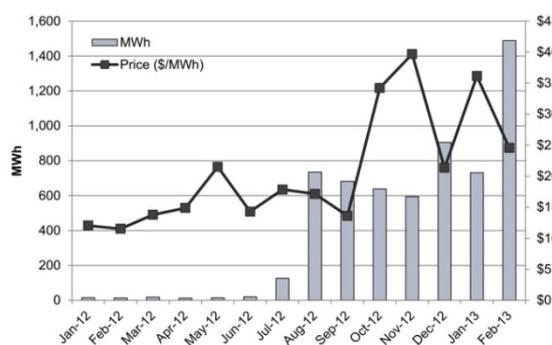
ISO/RTO	ERCOT	PJM	NYISO	ISO-NE	MISO	CAISO
最大需要	68,305MW (2013年)	163,848MW (2011年)	33,956MW (2013年)	27,379MW (2013年)	130,000MW (2011年)	46,847MW (2013年)
風力・太陽光発電 (PV)導入量 <上記最大需要に対 する割合>	風力11,000MW (2013年) <16.1%>	風力8,610MW PV 2,143MW (2012年, 2013年 <sup>※1</sup> ) <6.5%>	風力1,463MW (2013年) <4.3%>	風力800MW PV 500MW (2013年) <4.7%>	風力 12,000MW (2013年) <9.2%>	風力5,749MW PV 4,691MW (2013年) <22.3%>
ASDR制度の有無	○	○	○	○	○	×
周波数調整型 DR活用状況	35 MW / 37 MW (2011年/2014年)	2.46 MW (2013年)	100MW (2012年)	0MW	0MW	0MW
瞬動予備力型DR 活用状況	2,383 MW / 3,300 MW (2011年/2014年)	605,521MWh (2013年) ※3	※2	0MW	0MW	0MW

NYISO: ニューヨーク ISO, ISO-NE: ISO ニューイングランド, MISO: ミッドコンティネント ISO,

※1 州により集計時期が2012年, 2013年と異なる ※2 周波数調整と予備力の合計

※3 契約規模[MW]×契約時間[h]で表されている

年8月から参加資源が増え、10月からは単価も上がり、2013年2月に需要側資源がさらに増加した傾向が見て取れるが、PJMの周波数調整では2012年10月からDRを含む応答の早い資源にインセンティブを与え、市場参加を促していた結果であると考えられる。応答の早い資源は従来型の資源と比較して、容量あたりの応答性能は実績で3倍以上あるため、優先的に用いることによる効果は大きい。



出典：文献<sup>[19]</sup>

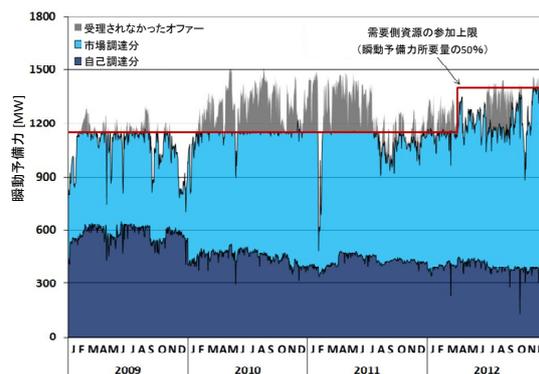
図3 周波数調整用DRの活用状況 (PJM)

ERCOTの周波数調整用DRプログラムは、周波数を上げる方向のサービスと下げる方向のサービスに分けられているが、実際の需要側資源の活用状況は、周波数を上げる方向のサービスのみであることが明らかになった。これは、上げ方向の方が価格が高いということが直接的な原因ではあるが、ASDRは需要造成ではなく、需要抑制が主流であるということも示している。

### 3.2 需要側資源の予備力供給への活用状況

予備力については、ERCOTの瞬動予備力における需要側資源からの供給量が、定められた上限に張り付いた運用がされており (図4)、大き

な役割を担っていると言える<sup>2</sup>。他の市場においては、需要側資源がまだ大きな役割を担っているとは言えないが、短い応答を必要とする予備力においては、PJMでも徐々に活用実績を積んでおり (表3)、貢献度は大きくなりつつあると言える。



出典：文献<sup>[20]</sup>

図4 瞬動予備力型DRの活用状況 (ERCOT)<sup>3</sup>

### 3.3 需要側資源をアンシラリーサービス供給源として日本に適用する際の留意点

米国では需要側資源の導入量の上限を定め、適宜見直しを行っている。これにより、需要側資源の信頼度を確認しながら徐々に導入量を増やす手順を踏んでいる。日本の制度導入時にもASDRの信頼度の確認は必須であると考えられ、米国の事例が留意点となると考えられる。

## 4. 日本におけるASDRの状況

日本におけるASDRは実際のビジネスの段階にはないものの、経済産業省の補助事業による実証試験が行われている。

<sup>2</sup> 表3の数値と図4の数値にずれがあるのは、表3は登録可能な需要の規模であり、図4は実際に入札して落札された需要の規模を示しているためである。

<sup>3</sup> 図中の「自己調達分」とは登録小売会社が相対契約で調達した予備力供給用需要側資源であり、「市場調達分」とは市場で調達した需要側資源である。

予備力供給型DRの実証としては、平成25年11月から次世代エネルギー・社会システム実証事業の中で、複数の実証<sup>4</sup>が展開され、経済性を含めた調査・評価が行われている。2014年時点における調整容量は、東京電力管内において11万kW、需要家件数500件以上となった<sup>[13]</sup>。

これらの試験では、DR発動信号の受信から短時間（5分～60分）で需要削減ができるシステムの構築や、試験が実施されている。「高速DR実証事業（主実施者：丸紅（株）」<sup>[21]</sup>では、ネガワットの登録量を試験毎に設定しており、2014年度は13回の試験が実施された。15分反応プログラムは、発動信号の受信から15分以内に負荷を削減するプログラムであるが、いずれのイベントでも登録以上の削減量を得られた。

これらのインセンティブ型DRでは、予備力供給時の需要削減量に応じたインセンティブが支払われる。仮にDRを発動しなかった場合の想定需要（ベースライン）と、実際の電力消費量との差が評価に直結するため、「正確性」、「簡便性」、「公平性」の三要素を満たしたベースライン算出が非常に重要である。資源エネルギー庁では、ベースライン算出方法のガイドラインを定め、系統運用者とアグリゲータ間の基準とした<sup>[24]</sup>。このように、日本のアンシラリーサービス型DRは、事業展開のための環境整備が行われつつある。

周波数調整型DRとしては、横浜スマートコミュニティ実証事業の中で実施された蓄電池SCADA（主実施者：東芝）<sup>[11]</sup>と、大型蓄電池システム緊急実証事業の中で平成27年から運転を開始した西仙台変電所周波数変動対策蓄

電池システム実証事業（主実施者：東北電力）<sup>[12]</sup>が該当する。どちらも1か所に大容量の蓄電池を配置し、周波数調整の制御に反応するプロジェクトであるが、前者は仮想的に蓄電池を一般需要家に分散設置した場合を想定し、データの集配信・管理運用を試みているのに対し、後者は系統運用者が管理運用する大規模蓄電池の位置づけである。

## 5. おわりに

以上に日米のアンシラリーサービス型DRの現状について述べてきた。米国では多くの市場においてASDRの制度が整えられ、系統の需給の状態が厳しいテキサス州では、瞬動予備力として大きく貢献している。ただし、他の地域では実事業として導入されているところもあるものの、まだ容量は小さく、試験段階であると言える。日本においては実証試験を通して、信頼性を試している段階であり、実事業の展開に向けて環境整備が進められている。

今後の課題としては、信頼性の向上、需要側資源の登録件数の増加などが挙げられるが、通信の確実性の確保も重要な課題である。欧米におけるスマートグリッド実証試験では、通信を第1の課題に挙げているもの<sup>[25][26]</sup>も多く、アンシラリーサービス型DRでは通信手段の常時確保は必須である。今後、通信の100%の成功率を目指してシステム構築を進めるのか、それともある程度の通信の欠損を前提としたシステム構築とするのか、ASDRの通信面の動向を見極める必要がある。

## 参考文献

- [1] 浅野浩志 (2012) “デマンドレスポンスによる需給安定化”，電気学会誌, 132 (10), pp.688-691.
- [2] Ookie Ma et al. (2013) “Demand Response for Ancillary Services”, IEEE Trans. Smart Grid, 4 (4), 1988-1995.
- [3] 坂東茂, 浅野浩志, 金田章宏, 中野忠幸 (2015)

<sup>4</sup> 平成25・26年度の次世代エネルギー・社会システム実証事業「インセンティブ型DR」中、6つのプロジェクトで予備力DRが実施されている。主実施者はそれぞれエナリス、グローバルエンジニアリング、丸紅<sup>[21]</sup>、日立製作所、東芝、双日である。詳細はそれぞれの報告書<sup>[22][23]</sup>を参照されたい。

- “米国におけるアンシラリーサービス供給のための需要側資源の活用動向”, 電力中央研究所報告 Y14011.
- [4] 電気学会 (2007) “電力系統の利用を支える解析・運用手法”, 電気学会技術報告第 1100 号.
- [5] 電気学会 (2002) “電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御”, 電気学会技術報告第 869 号.
- [6] 菊池広典, 浅野浩志, 坂東茂 (2015), “再生可能エネルギー電源大量連系時の業務用空調機電力制御による負荷周波数制御”, 電学論 B, 135(4) 233-240.
- [7] EnerNOC (2006) “Enernoc is First Participation in PJM’s Synchronized Reserve Market”, Enernoc HP. <http://www.enernoc.com/press/press-releases/2006/enernoc-is-first-participant-in-pjms-synchronized-reserves-market> (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [8] E. Ifuku, Yoh Kawanami, H. Upadhye (2015) “Hawaiian Electric Grid Interactive Water Heater Demonstration Status”. <http://c.y.mcdn.com/sites/www.peakload.org/resource/resmgr/2014FallArchive/Harshal.pdf> (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [9] G. Heffner, C. Goldman, B. Kirby, M. K. Meyer (2007) “Loads providing ancillary services: Review of international experience”, LBNL62701.
- [10] PJM (2013) “Ancillary Service”, <http://www.pjm.com/~media/training/core-curriculum/ip-gen-301/gen-301-ancillary-services.ashx> (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [11] 東芝 (2015) “次世代エネルギー・社会システム実証事業成果報告 (蓄電池 SCADA)”, NEPC HP. [http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330\\_6.pdf](http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330_6.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [12] 東北電力 (2015) “西仙台変電所周波数変動対策蓄電池システム実証事業”, NEPC HP. [http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150513/150513\\_1\\_1.pdf](http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150513/150513_1_1.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [13] 資源エネルギー庁 (2014) 「ダイヤモンドリソースについて～新しい省エネのかたち～」, 総合資源エネルギー調査会 (第 6 回), 資料 3. [http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene\\_shinene/sho\\_ene/pdf/006\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/pdf/006_03_00.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [14] 高橋雅仁 (2014) “再生可能エネルギー電源大量連系に対応するアンシラリーサービス型デマンドレスポンスの導入可能性の検討”, 電力中央研究所報告 Y13030.
- [15] 省エネルギーセンター (2009) “オフィスビルの省エネルギー”, ECCJ HP. [https://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/img/office2.pdf](https://www.eccj.or.jp/office_bldg/img/office2.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [16] ダイキン工業株式会社, “節電 [デマンド制御] 機能”, ダイキン HP. [http://www.daikinaircon.com/catalog/i-touchmanager/](http://www.daikinaircon.com/catalog/i-touchmanager/demand/index.html) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [17] CAISO (2012) “Flexible Ramping Products 2nd Revised Draft Final Proposal”, CAISO HP. <http://www.caiso.com/Documents/SecondRevisedDraftFinalProposal-FlexibleRampingProduct.pdf> (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [18] CAISO (2014) “Operation Procedure 2250-Flexible Ramping Constraint”, CAISO HP. <http://www.caiso.com/Documents/2250.pdf> (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [19] Doug Hurley, Paul Peterson, Melissa Whited (2013) “Demand Response as a Power System Resource”, Synapse Energy Economics Inc. HP. [http://www.synapse-energy.com/sites/default/files/SynapseReport.2013-03.RAP\\_US-Demand-Response.12-080.pdf](http://www.synapse-energy.com/sites/default/files/SynapseReport.2013-03.RAP_US-Demand-Response.12-080.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 2 月 1 日).
- [20] Potomac Economists (2012) “2012 State of the market report for the ERCOT wholesale electricity markets”, Potomac Economics HP. [http://www.potomaceconomics.com/uploads/ercot\\_reports/2012\\_ERCOT\\_SOM\\_REPORT.pdf](http://www.potomaceconomics.com/uploads/ercot_reports/2012_ERCOT_SOM_REPORT.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [21] 丸紅 (2015) “東京電力 高速 DR 実証事業”, NEPC HP. [http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330\\_102.pdf](http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330_102.pdf) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [22] 新エネルギー導入促進協議会 (NEPC) (2015), “平成 26 年度次世代エネルギー・社会システム実証事業費補助金の成果報告書について”, NEPC HP. [http://www.nepc.or.jp/topics/2015/0330\\_1.html](http://www.nepc.or.jp/topics/2015/0330_1.html) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [23] NEPC (2014) “平成 25 年度次世代エネルギー・社会システム実証事業費補助金の成果報告書について”, NEPC HP. [http://www.nepc.or.jp/topics/2014/0610\\_1.html](http://www.nepc.or.jp/topics/2014/0610_1.html) (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [24] 資源エネルギー庁 (2015) “ネガワット取引に関するガイドライン”, エネ庁 HP. <http://www.meti.go.jp/press/2014/03/20150330001/20150330001-2.pdf> (最終アクセス日: 2015 年 8 月 1 日).
- [25] R. Yinger (2015) “Communications and Cyber Security: Foundations of the Modern Grid at SCE”, IEEE PES General Meeting 2015, 15PESGM0842.
- [26] M. Vallo (2015) “FirstEnergy Smart Grid Modernization Initiative Distribution Automation”, EPRI Smart Distribution and Power Quality Conference & Exhibition.

坂東 茂 (ばんどう しげる)

電力中央研究所 社会経済研究所

# 九州電力におけるデマンドレスポンス実証試験

中野 忠幸

## 1. はじめに

東日本大震災以降、エネルギーの供給状況に応じて、消費パターンを変化させることの重要性が再認識されている。これを受けて平成 26 年に公表された「エネルギー基本計画」では、デマンドレスポンス（以下 DR）が効率的なエネルギー需給のための有効な手段として位置付けられている。また、DR の普及が先行する欧米で実績のある、EnerNOC（米）や Schneider Electric（仏）などのアグリゲータが国内に進出するなど、DR を取り巻く環境が徐々に整備されつつある。

近年、国内では、経済産業省が進める 4 地域実証に代表されるように、DR 実証事業が盛んに行われている。中でも、一般家庭を対象とした DR 実証においては、大半が、ピーク時の料金価格を変える緊急ピーク時課金（Critical Peak Pricing, CPP）を適用したものである。一方、九州電力では、平成 24 年の夏に CPP を適用した DR 実証試験を行うとともに<sup>1)</sup>、平成 26 年 7 月から、ピークタイム・リベート（Peak Time Rebate, PTR）<sup>2)</sup>によるインセンティブ型 DR 実証も実施している<sup>2)</sup>。

国内では、一般家庭を対象とした PTR 実証の報告事例が限られているため、本稿において紹介する事例は、PTR の有効性を判断するうえ

<sup>1)</sup> 集合住宅の需要家を対象にした実証試験である。電力使用量の「見える化」は行わず、緊急ピークの「お知らせメッセージ」は、メールにて前日に通知している。

<sup>2)</sup> PTR は、緊急ピーク時の電力使用量の削減要請に応じた需要家に対して、その「削減量」に見合った節電協力金（インセンティブ）を、対価として払い戻す仕組みである。CPP と比較して、ピーク時に過度の料金設定とならないため、将来的に DR を導入する際に、需要家が受け入れやすい、現実的な料金メニューとして期待される。

で貴重な知見として期待される。

## 2. PTR による DR 実証の概要

九州電力では、多様化する電源の最適運用が行えるスマートグリッドの構築を目指し、佐賀県玄海町、鹿児島県薩摩川内市において、太陽光発電設備や蓄電池などの試験用設備を設置し、スマートグリッドの実証試験を実施している。DR 実証は本実証試験における一つの検証項目であり、「見える化」による需要家の行動変化（省エネ効果）や仮想料金メニューとインセンティブ付与による需要家の行動変化について、検証を行っている。

本実証試験に参加した協力世帯（モニター）は、玄海、川内の両地区において公募を行い選出（平成 26 年 7 月時点は計 332 件）しており、比較検証のため表 1 に示すとおりグループ分けを行っている<sup>3)</sup>。

グループ A は、電力使用量の計測のみを実施している、比較対象のベースとなるコントロールグループである。これに対してグループ B は、見える化端末（図 1）を配備して、当該モニターが自身の家庭の 30 分毎の電力使用量を

表 1 グループ区分と検証内容

	電力使用量の計測	見える化効果	ピーク時間帯の電力使用抑制効果
グループ A : 122 件	○	—	—
グループ B : 89 件	○	○	—
グループ C : 121 件	○	○	○

出所) 文献<sup>2)</sup>

<sup>3)</sup> グループ分けは、各グループ間の過去の電力使用量の平均が、概ね同程度となるよう考慮している。



出所) 文献<sup>[3]</sup>

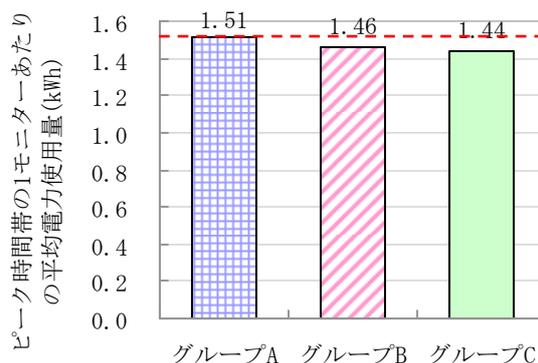
図1 見える化端末

確認可能にしている。見える化端末では、電力使用量の推移や、同様な電力契約形態の他世帯モニターとの比較データなどが提供可能であり、自主的な節電行動の変化が期待される。

グループCは、グループBと同様の「見える化」に加え、仮想の料金メニューを設定して、PTRによる電力使用量の削減効果を確認するグループである。PTR発動予定の前日に、見える化端末に「お知らせメッセージ」を配信している。検証期間は、夏季(7~9月)、冬季(12~2月)別にそれぞれ3か月間に限定しており、PTRについては、電力需給が厳しくなると予想される日のピーク時間帯(夏季:13時~16時、冬季:17時~20時)を対象日時として、5回/月を目安に発動している。

### 3. DR実証における電力使用量削減効果の評価

平成26年の夏季における実証試験では、電力予想使用率が概ね90%程度を上回る日を目安に、計15回のPTRが発動され、その効果について検証が行われた。成果の一例として、従量電灯B契約のモニターに見られた電力使用量削減の効果を図2に示す。グループAよりも「見える化」対象のグループB、更にPTR



出所) 文献<sup>[2]</sup>

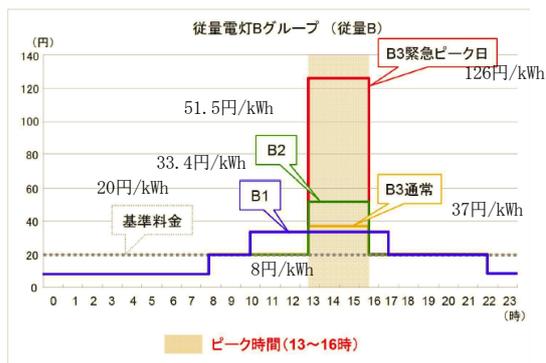
図2 DR発動日におけるピーク時間帯電力量のグループ間比較(平成26年夏季)

発動したグループCの方が、電力使用量が小さい傾向にあり、「見える化+PTR」により4.6%の削減効果を得ている<sup>[2]</sup>。一方、前述した、九州電力のCPPを適用したDR実証では、基準料金に対して6倍もの仮想料金価格を適用した際に、13.1%の削減効果であった<sup>4</sup>(図3)<sup>[1]</sup>。

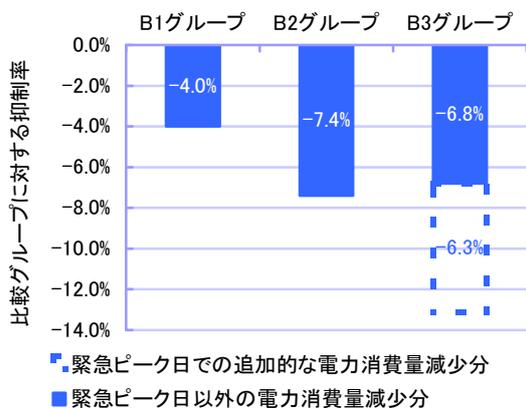
それぞれの実証試験では、参加世帯数の規模や「見える化」の有無などの違いの他、世帯構成や在宅率なども異なっている可能性があるため、単純比較するには無理があるものの、現時点で公表されている結果を見る限りでは、CPPに比べPTRの削減効果が小さく現れている。同様の結果は、米国で実施されたパイロットプログラムでも確認されている<sup>[4]</sup>。

PTRとCPPの効果の差異には、それぞれの仮想料金メニューが有する特性の違いが影響したものと考えられる。CPPはピーク時に高い料金設定となり、心理的に節電行動を取りやすくなると期待されるが、PTRは、節電行動を行わなくとも、リベートをもらえないだけであり、何らの悪影響も受けずに済む(ペナルティなし)ため、期待通りの削減効果が得られない可能性がある。

<sup>4</sup> PTRとの比較検証のため、従量電灯B契約グループ(B3グループ:250世帯)の結果について引用している。



(a) 料金プログラム



(b) ピーク時間の電力消費量削減効果

出所) 文献<sup>[4]</sup>

図3 CPPによるDR実証試験結果  
(平成24年夏季)

また、PTR発動の事前通知を把握していたグループCのモニターには、PTRに伴い電力使用量を削減する傾向が顕著に見られる。しかしながら、事前通知を把握していたモニターは、グループC全体の1/3程度しかなかった。一方、平成24年の夏に行ったCPP実証試験後のアンケート結果によると、約7割の参加者が緊急ピークの通知を「ほぼ毎回把握していた」、「どちらかと言えば把握していることの方が多かった」と回答しており、PTRのケースに比べ事前通知の把握率が高い。これもPTRとCPPとで異なる結果となった要因の一つと考えられる。

## 4. おわりに

DRが電力使用量を削減する効果的な手段と成り得るか否か、その決め手となるのは、需要家による確実な反応(削減行動)である。そのためには、PTRの発動を如何にして需要家へ気付かせるかが肝要であることは、前述の検証結果からも明らかである。このことは、PTRだけでなく、DR実証の全てのプログラムに共通している。また同時に、需要家のモチベーションを向上させる仕組みも必要であり、提供する情報の内容や提供方法、インセンティブ額等、手段として何がどれほど有効であるのかを見極めなくてはならない。

本稿では、PTR実証の成果の一部のみを取り上げて論証したものであり、その俯瞰的な評価は今後の課題である。

今後は、現在継続実施中のDR実証<sup>[5]</sup>を通じて、PTRによるDR実証の最終的な評価が、九州電力によって行われると共に、PTRによる電力使用量削減効果の継続性や価格弾力性等の有益な知見が得られるものと期待される。

## 参考文献

- [1] 九州電力(2013)「電気料金による電力使用抑制効果に関する実証試験(結果)について」  
[http://www.kyuden.co.jp/press\\_h130122-1.html](http://www.kyuden.co.jp/press_h130122-1.html)
- [2] 河村清紀, 土器勉, 大野祐司, 山田淳(2015)「九州電力におけるスマートグリッドへの取り組みについて」, 平成27年電気学会全国大会シンポジウム資料
- [3] 九州電力「スマートグリッドへの取組」  
[http://www.kyuden.co.jp/effort\\_renewable-energy\\_torikumi\\_smartgrid.html](http://www.kyuden.co.jp/effort_renewable-energy_torikumi_smartgrid.html)
- [4] 服部徹, 戸田直樹(2011)「米国における家庭用デマンドレスポンス・プログラムの現状と展望」, 電力中央研究所報告 Y10005
- [5] 九州電力(2015)「スマートグリッド実証試験の延長について」  
[http://www.kyuden.co.jp/press\\_h150501b-1.html](http://www.kyuden.co.jp/press_h150501b-1.html)

中野 忠幸 (なかの ただゆき)

電力中央研究所 社会経済研究所

本号の特集「日本におけるデマンドレスポンス研究の最前線」  
に関連する研究報告書などをご紹介します。弊所 Web サイト  
から PDF 版をご利用ください（無料）。

電力中央研究所 社会経済研究所

<http://criepi.denken.or.jp/serc/index.html>

#### ■電力中央研究所 研究報告書（報告書番号：発行年月）

スマートメータデータを活用した情報提供と行動変容—集合住宅におけるピーク抑制・省エネ実証事例—(Y15002：2015.09)  
スマートメータデータ分析情報の活用—分析技術の動向調査と需要分析の予備的検証—(Y14003：2014.11)  
低圧用無効電力補償装置の設置方策の検討—PV 導入時における電圧上昇対策の費用対効果分析手法の提案—(Y14010：2015.04)  
米国におけるアンシラリーサービス供給のための需要側資源の活用動向 (Y14011：2015.04)  
事業所における2011～14年夏の節電の実態—東日本大震災以降の定点調査—(Y14013：2015.04)  
家庭における2011～14年夏の節電の実態—東日本大震災以降の定点調査—(Y14014：2015.04)  
需要側機器による無効電力補償の経済価値分析—太陽光発電大量導入時の電圧上昇抑制対策—(Y13007：2014.04)  
デマンドレスポンス通知に対する受信者の確認時間計測ツール (Y13016：2014.04)  
欧米のスマートグリッドの費用便益分析手法とわが国への適用に向けた課題 (Y13019：2014.04)  
欧州におけるスマートメータの費用便益分析—分析上の課題を踏まえた結果の評価—(Y13022：2014.05)  
再生可能エネルギー電源大量連系に対応するアンシラリーサービス型デマンドレスポンスの導入可能性の検討 (Y13030：2014.05)  
太陽光発電大量連系時の系統電圧制御に対するデマンドレスポンスの適用可能性—発動頻度と経済性の評価—(Y12008：2013.04)  
家庭用エネルギー管理システム(HEMS)の普及に関する課題とその動向—過去の実証の分析による課題整理—(Y12011：2013.04)  
産業用需要家の電力需要マネジメントのための設備利用計画策定ツールの開発 (Y12018：2013.09)  
デマンドレスポンスにおける需要家ベースライン選定に関する北米評価事例の調査 (Y12021：2013.04)  
業務・産業需要における BEMS/デマンド監視・制御装置のデマンドレスポンスへの活用の可能性 (Y12022：2013.04)  
オフィスビルを対象にしたデマンドレスポンス制御の実証試験—自動 DR と手動 DR の比較—(Y12025：2013.05)  
省エネルギー・節電促進策のための情報提供における「ナッジ」の活用—米国における家庭向けエネルギーレポートの事例—(Y12035：2013.04)

#### ■社会経済研究所ディスカッションペーパー

SERC Discussion Paper 14008 ネガワットの費用便益評価に関する一試算—自律的節電スキームによるピーク火力代替の可能性—(2015.01.22)

#### ■電気新聞「ゼミナール」

東日本大震災以降の定点調査（下）：事業所の節電は継続しているのか？ (2015.05.25)  
東日本大震災以降の定点調査（上）：家庭の節電は継続しているのか？ (2015.05.11)  
自由化時代において、需要家に選ばれるデマンドレスポンスサービスとは？ (2014.08.18)  
これからのデマンドレスポンスの姿は？ (2014.08.04)  
事業所の節電は継続するか？ (2014.04.28)  
家庭用デマンドレスポンスの技術開発の現状と課題は何か？ (2014.02.03)  
家庭の節電は継続するか？ (2013.06.03)  
ビル・エネルギー・マネジメント・システム (BEMS) 普及に向けた今後の課題は何か？ (2013.03.11)  
家庭用ダイナミック料金のピークカット効果と導入の課題は？ (2013.02.25)

\* 原稿の採用、雑誌の編集等については、「電力経済研究」編集委員会がその責任を負います。本誌に掲載されたすべての論文を含む本誌の著作権は、電力中央研究所に帰属します。複製や他の出版物等に転載を希望する場合は、「電力経済研究」編集委員会を通じて電力中央研究所の承諾を得てください。

電力経済研究 No.62 2015年11月

発行：一般財団法人 電力中央研究所 社会経済研究所  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1  
電話：03 (3201) 6601(代)

巻頭言 ..... 永田 豊

**特集「日本におけるデマンドレスポンス研究の最前線」**

総説

デマンドレスポンスの国内外の動向と当所の取り組み  
..... 浅野 浩志 永田 豊 ... 1

研究論文

ピークタイム・リバートによる家庭用需要家のデマンドレスポンスの効果  
ー北陸地域での実証データに基づく分析ー  
..... 服部 徹 高橋 雅仁 坂東 茂 加部 哲史 ... 9

テナント事務所ビルにおけるスマート節電実証試験  
..... 高橋 雅仁 上野 剛 岩松 俊哉 坂東 茂  
西川 雅弥 岩村 集 ...25

研究ノート

家庭部門における行動変容型ピーク抑制策  
ー見える化システムと料金体系を組み合わせた事例ー  
..... 向井 登志広 西尾 健一郎 小松 秀徳  
内田 鉄平 石田 恭子 ...35

スマートメータデータの活用方法  
..... 小松 秀徳 西尾 健一郎 ...46

太陽光発電大量導入時の電圧上昇対策に関する考察  
ー無効電力補償とデマンドレスポンスの比較ー  
..... 高木 雅昭 田頭 直人 ...55

アンシラリーサービス型デマンドレスポンスの日米における取組み状況  
..... 坂東 茂 ...64

研究トピックス紹介

九州電力におけるデマンドレスポンス実証試験  
..... 中野 忠幸 ...72

