

# 横浜スマートシティプロジェクトにおけるビル群協調型デマンドレスポンス実証実験

—大規模な社会実証実験を通して得られた知見—

愛須 英之<sup>†1</sup> 大槻 知史<sup>†1</sup> 前川 智則<sup>†1</sup> 松澤 茂雄<sup>†1</sup> 飯野 穰<sup>†1</sup>  
萩原 一徳<sup>†1</sup>

<sup>†1</sup> 株式会社東芝

デマンドレスポンスとは、電力の需給バランスの維持のために電力供給者側と需要家側が協力して電力を調整する方式で、日本でも急激に取り組みが進んでいる。筆者らは、経済産業省の横浜スマートシティプロジェクトに参画し、複数のビルを相手にデマンドレスポンスの実証実験を進めている。本論文では、実証実験の概要と結果について紹介するとともに、大規模な社会実証実験を通して得られた知見を述べる。

## 1. はじめに

近年、ガスタービン発電システムや太陽電池、大型蓄電池などの分散型エネルギー技術の進歩が著しい。このような分散型エネルギー技術と情報処理技術に裏打ちされたスマートグリッドの発達により、電力における規模の経済原理が崩れてきており、供給者、需要家の一元的な線引きが困難になり、世界的に電力自由化の流れが加速している。

日本においても、東日本大震災以来、次世代に向けたエネルギーシステムに関する議論が続いており、2014年2月には、家庭向けを含めた電力小売事業への参入を2016年に全面的に自由化する電気事業法の改革案[1]が閣議決定されている。小売全面自由化の後には、需要家側も、災害時の対策のために導入した自家発電設備や蓄電設備などを活用し、自ら電力を販売するプロシューマ化が進むことが予想される。

電気を安定的に供給するためには、需要と供給が各時間帯でバランスしている「同時同量」が大原則で、既存の需要を削減することで発電と同様の価値があり、これらの電力削減量は、ネガワット（負のワット）と言われている。電力供給の逼迫時に、電力会社側で発電量を増やさず、代わりに需要家側に受電電力削減協力を要請してネガワットを創出することで電力需給のバランスを維持する仕組みを、デマンドレスポンス（Demand

Response）と称する。

筆者らは、後述する横浜スマートシティプロジェクトの一環として、デマンドレスポンス（以降DR）の実証実験にかかわっており、複数のビル群をターゲットとした大規模な社会実証実験を進めている。本論文では、多数のステークホルダーが同時参加する大規模な社会システムの機能検証の難しさなど、実証実験を通して得られた知見を中心に紹介する。

## 2. 横浜スマートシティプロジェクト

### 2.1 プロジェクトの全体像

横浜スマートシティプロジェクト（以降YSCP）は、日本型スマートグリッドの開発と実証実験を目的として、経済産業省の「次世代エネルギー・社会システム実証地域」に2010年4月に選定されたプロジェクトである。2014年までの5カ年計画で、横浜市が東芝などの32の民間企業・団体と協働、3エリア（みなとみらい21エリア、港北ニュータウンエリア、横浜グリーンバレーエリア）を中心とした横浜市全域において、多岐に渡る実証実験を展開している[2]。

図1に、YSCP実証実験の全体像と各実証実験の主要な参加企業を示す。図に示すように、電力会社と協力して地域全体の統括的なエネルギー管理を行うCEMS（Community Energy Management System）、横浜の主要

な大型ビルをターゲットとしたBEMS (Building Energy Management System), 公募した1900世帯をターゲットとしたHEMS (Home Energy Management System) などの各種EMSに加え, 充放電対応EVや充電ステーション, 分散した定置蓄電池を統括管理して系統安定化を実現する蓄電池SCADAなど, 各種のシステムが連携しコミュニティ全体でエネルギー管理の最適化を図る。

## 2.2 ビル群管理のための統合 BEMS

DRの実用化は米国で先行しており, たとえば, 米国を代表する地域送電機関 (RTO) の1つであるPJMでは, 各種電力取引市場でのDRによるネガワットの取引が可能となっている[3],[4]。小口の需要家が直に市場取引に参加することは難しいため, 複数の需要家を束ねてネガワットの取引の仲介を行う業者であるアグリゲータの存在が, DRの活性化の鍵となっている。

筆者らは, YSCPにおいて, アグリゲータのプラットフォームとしての役割を担う統合BEMSの技術開発と検

証を進めている。統合BEMSは, ビル群とCEMSの間に設置し, 大口需要家であるビルを特定の地域でビル群として集約し, 巨大な需要家と見なすことにより, 個別のビルが独自に対応するより大きな調整余力を確保する。図2に統合BEMSのシステム構成の概略図を示す。図2に示すように, 統合BEMSはCEMSと個別ビルの中に位置し, 各ビルの電力削減能力である調整余力の推定や各ビルへのDR量の再配分量の決定などの機能を担っている。また, 一部のビルに関しては, DR要請に対して, 統合BEMSが代行して負荷設備の電力抑制の設定値レベルの制御を行う。

なお, 統合BEMSは, DRだけではなく, BEMS機能の一部をクラウドサービスとして提供することにより中小ビルのスマート化を図ったり, さらに, 各種エネルギー情報の把握や自動制御のためビル内に設置されるセンサの動作の異常の有無を遠隔から自動的に診断する遠隔監視機能など, ささまざまな機能の実証実験を並行して進めている。

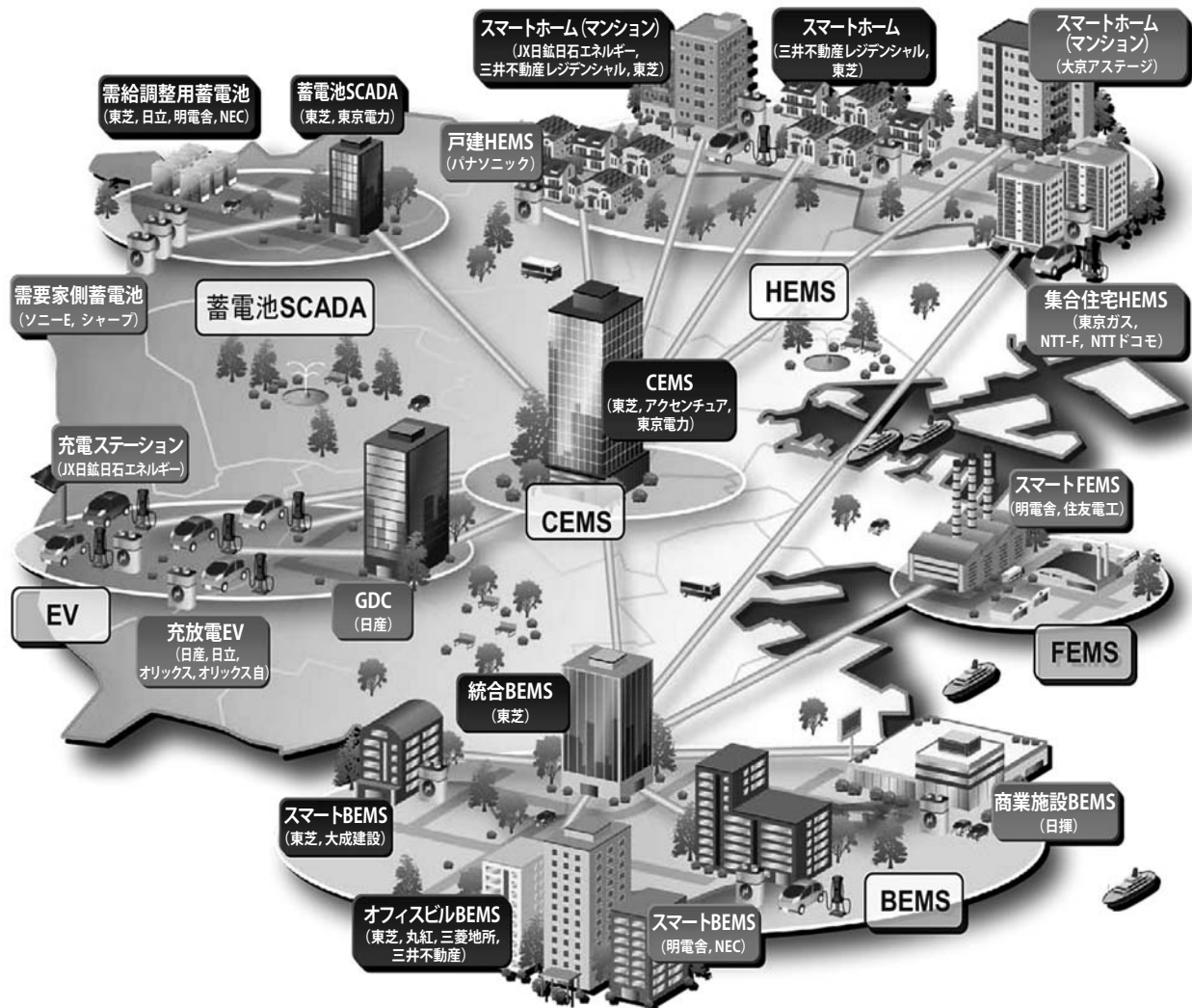


図1 YSCP概要

### 3. アグリゲーションを支える技術

#### 3.1 効果的な DR を支援する計画技術

YSCPにおける需要家アグリゲーションに関する実験では、3種類の異なるDR方式について実証実験を進めている。一般家庭向けのDR方式の実証実験としては、電力需要のピーク時間帯における料金をそれ以外の時間帯に比べて高くすることで電力需要の抑制を促す料金制度であるCPP (Critical Peak Pricing) について実証実験した。また、統合BEMSを経由したビルなどの大口需要家向けのDR実証実験では、従来型のDR方式としてPTR (Peak Time Rebate) 方式を、新しいDR方式として、CCP (Capacity Commitment Program) 方式を実証実験している。

PTR方式では、各ビル一律に電力削減量に応じてインセンティブを支払い、ビルの削減目標値は決めない。一方、CCP方式では、電力需要の削減量が各ビルの約束した削減目標値以下になった場合は削減量に応じてインセンティブをもらえるが、目標値に達しない場合はインセンティブは与えられない (図3)。

上記のPTR方式やCPP方式は、直に電力価格やインセンティブ額に関する情報をビルや家庭などの需要家側にブロードキャストする方式であり、多数の需要家を相手に大規模なDRが実現しやすいため、従来からよく利用される方式である。一方、新方式のCCP方式では、各需要家に個別に異なる要請を実施するため、事前に各大口需要家のDR削減量が予測しやすく、電力会社の電力供給計画に確実に反映しやすくなる効果や、個別の需要家の都合を考慮したDR指示により、DRの負担を最小化する効果が期待できる。

各ビルからは、統合BEMSに対し、あらかじめ削減可能な電力量に相当するネガワット情報を登録する。具体的には、各需要家は、30分帯ごとにベースラインからの削減可能量を登録し、かつ、単価による価格付けを行う。

統合BEMSは、各BEMSがあらかじめ登録した入札単価以上での買い取りを保証する必要がある。ここでは、このネガワットを売入札と見なし、一方CEMSの電力削減要求を買入札と見なし、ネガワットを小規模な市場取引により売買するモデルを採用した。取引の方式としては、日本卸電力取引所 (JEPX) [8]で行われているシングルプライスオークション方式ベースの手法を採用した。シングルプライスオークション方式とは、統合BEMSが、30分帯ごとに、各BEMSのネガワットのうち必要な量を、

共通の約定単価で買い取るような方式であり、公平性の高い方式である。

CCP方式では、各需要家ごとの都合を考慮して個別に異なるDR要請を実施することが可能であるため、電力会社と需要家の双方にメリットが期待される。一方で、個別の需要家毎の入札情報や制約条件をすべて考慮して計画を立てるため、すべてを人手で運用する場合は運用コストの増大が予想される。CCP方式の大規模な展開のためには、運用の自動化を目的として、各需要家へ依頼するDR量の配分と依頼するタイミングをそれぞれ最適化することを支援するための計画技術が必要となる。図4に統合BEMSの目指すシステムのイメージを示す。

今回の実証実験の範囲においては、DRを要請する時間帯が分断されないように調整したり、ビルごとに応札する削減量の最低量を制限したりなど、時間帯や削減量に関する需要家側の希望する制約を順守するため、公平性を崩さない範囲で計画的にネガワットの買取量を調整

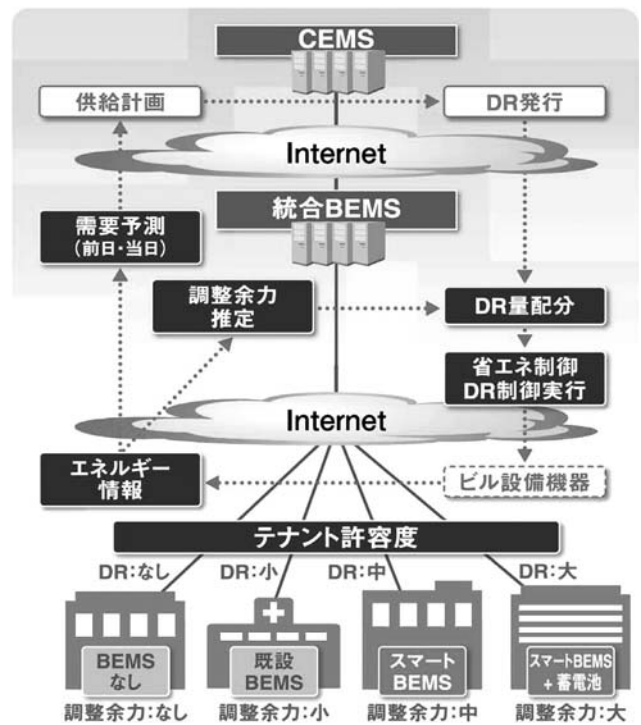


図2 統合BEMSのシステム概要

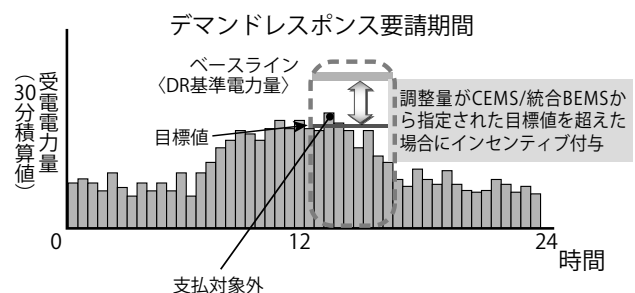


図3 CCP型のインセンティブ計算方法

している。

なお、筆者らは、将来に向け、電力削減リソースの起動時間や特性の違いに着目し、天候や各需要家の入札が不確実性を持つ状況下において、多段階で意思決定を行うことを前提としたDR計画方法についても検討を始めている。複数のサンプルバスを用いた解法を提案し、シミュレーション実験ではあるが、負担コ

ストを削減できる効果を確認している[5]。図5は、天候に応じた2種類のシナリオを想定し、 $T_1$ と $T_2$ の2段階でDR計画（ネガワット買取量の計画）を立案する場合の例である。

### 3.2 大規模なDR実現のための通信技術

YSCPにおける需要家アグリゲーションの実験では、CEMSと統合BEMSを合わせて大量かつさまざまな種類の需要家が遠隔からネットワークを経由して実験に参加し、かつ、さまざまなベンダの提供するシステムが混在する。これらをリアルタイムに接続するため、汎用的でスケーラビリティの高い通信プラットフォームを構築した。

システム内APIは、Webサービスをベースとした抽象化されたAPIを提供しており、さまざまな標準APIへの対応を行うとともに、スケーラビリティを実現し、ビル群の規模拡大に伴う性能劣化の検出や処置が容易となっている。さらに、需要家の数が増大しても通信のリアルタイム性をなるべく崩さないように、センサ情報などの設備情報をインターネットを通じて収集する際の通信負荷ピークを低減する設備情報クローラ機能も開発した[6]。

DRを支援する機能としては、創蓄エネ型ビル向けに、ネガワット取引を実現する機能として、入札要請情報、入札情報、約定情報等の情報を扱うための機能を開発した。ネガワット取引の業務フローに従って、統合BEMSからの入札要請、ビルからの入札、統合BEMSからの約定通知の3フローについて、通信仕様を策定した。ネガワット取引の概念はまだ新しく、通信仕様化の知見も少ないことを考慮し、標準仕様に基づく共通のインタフェ

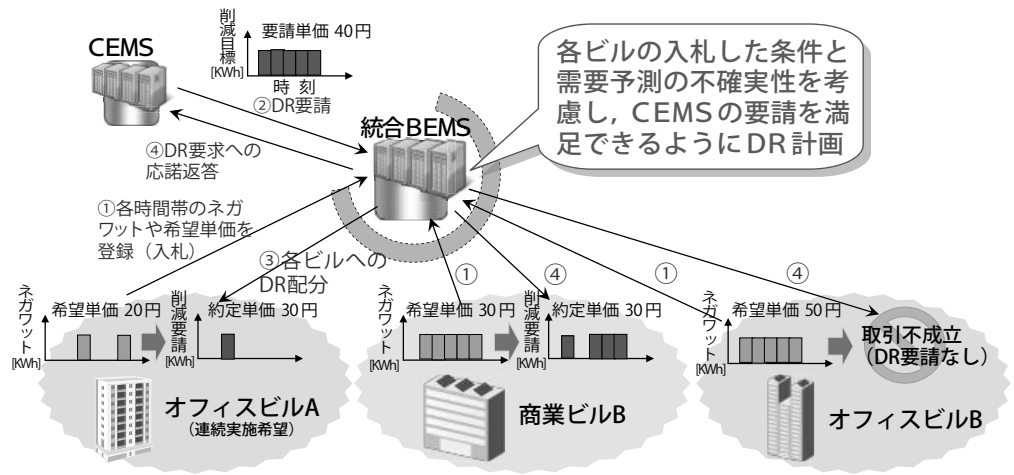


図4 ネガワット取引とDR計画

ース仕様書を整備し、YSCP 参画企業が理解しやすい通信仕様とした。

また、DR時に制御の対象となるビルとはBACnet/WSゲートウェイ装置を介して接続した。BACnet/WSゲートウェイは、国際的な標準であるBACnet/WS (ANSI/ASHRAE Standard 135 BACnet 2008 ANNEX.N) に準拠した通信インタフェースを備えており、統合BEMSとデータ授受を行う。

将来に向けては、DRを発行するCEMSや統合BEMSと、ローカルな制御を行うBEMSやHEMSが運用者を介さずに直接連携するADR (Automated Demand Response)が重要となる。各システムが異なるベンダの機器で構成されることが予想されるため、普及のためにはDRインタフェース方式の標準化が重要となる。有力な標準仕様とし

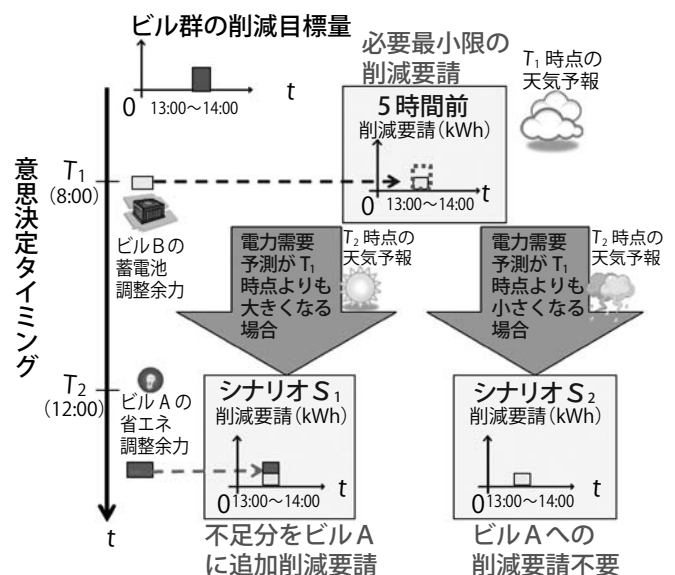


図5 シナリオベースのDR計画

て、米国ローレンスパークレイ国立研究所で提案された OpenADR がある。

YSCP では、将来のインターオペラビリティ向上を睨み、OpenADR 1.0 仕様を参考にして DR インタフェースを設計した [7]。さらに、OpenADR アライアンスから OpenADR 2.0b 仕様 [9] が 2013 年 7 月に公開されており、YSCP への適用準備を進めている段階である。

## 4. DR 実証実験を通じて得られたプラクティス

### 4.1 DR 実証実験の概要

DR 実証実験は、図 6 に示すように、フェーズ 1 実証実験と、フェーズ 2 実証実験の 2 つの段階に分けて進めている。以下、各フェーズの実証実験の結果に関し簡単に報告する。

#### (1) フェーズ 1 実証実験

フェーズ 1 実証実験では、基本的なデータを収集し、ビルの価格反応性などを評価／実証するために、従来型の PTR 方式による実験を実施した。

まず、2012 年度の冬季実証実験では、計 6 需要家が参加し、1/9 ~ 1/29 の間に計 7 回の DR 実証実験を実施した。冬の電力需要のピーク時間帯（17:00 ~ 20:00）に DR 要請を出し、ベースラインから平均で 17%、最大で 22% のピーク抑制効果を確認した [10]。

また、2013 年度の夏季実証実験は、計 14 需要家が参加し、7/18 ~ 9/20 の間に計 22 回の DR 実証実験を実施した。夏の電力需要のピーク時間帯（13:00 ~ 16:00）に DR を要請、ベースラインから最大で 22.8% のピーク抑制効果を確認した [11]。また、インセンティブ価格を 3 段階（5 円 / kWh, 15 円 / kWh, 50 円 / kWh）に変えることによる効果も検証し、15 円 / kWh 以上で大きな DR の削減効果が見られることを確認した。これは、創蓄エネ型ビルの損益分岐点に近い価格と推測される。

#### (2) フェーズ 2 実証実験

フェーズ 2 実証実験では、アグリゲーション事業の経済性を評価／実証するために、削減目標の達成可否に応じてインセンティブを支払う CCP 方式による実験を実施している。

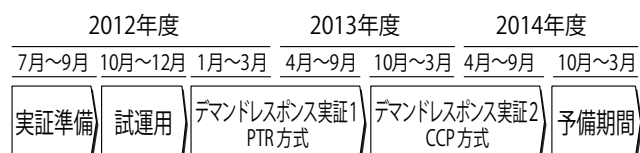


図 6 DR 実証実験計画

2013 年度の冬季実証実験では、計 16 需要家が参加し、1/7 ~ 1/29 の期間内に、冬の電力需要のピーク時間帯（17:00 ~ 20:00）に DR を要請する計 3 回の DR 実証実験を実施した。ただし、マンションや寮はシステムが CCP 方式に対応できないため、引き続き PTR 方式で参加し、CCP 方式に対応したのは 9 拠点である。

結果として、各回のビル群全体の目標を大きく超過する削減結果が得られた。また、同規模の需要家が参加した同年の PTR 夏季実験におけるインセンティブと削減量の平均値と比較すると、ビル全体として 3 割強少ないインセンティブで、同程度の削減を達成できた。時期が異なるため単純比較はできないが、PTR 方式を採用することによる、アグリゲーション事業への経済的な効果が期待される結果となっている。

また、1 月のビルの入札量と目標達成率の推移を図 7 に示す。入札量、目標達成率共に、後半になるほど増加する傾向が見られ、回数を重ねることで、各ビルが制度に慣れ、実行可能な削減量を適切に入札できるようになっている傾向が読み取れる。

### 4.2 実証実験で得られた知見

前節で紹介した実証実験の概要からも分かるように、YSCP における実証実験は、各種システムと運用管理者、需要家等が連携し、コミュニティ全体でエネルギー管理の最適化を図ることが可能かどうかを検証することが目的である。システムとしての工学的な有効性の検証以外に、参加者等のインセンティブ価格への反応や適正な制度の検証、経済的なインパクトの見積もりなど、社会実証実験としての意味合いが大きい。ここでは、本実証実験を通して得られた、大規模な社会実証実験ならではの難しさを示すプラクティスの一例を紹介する。

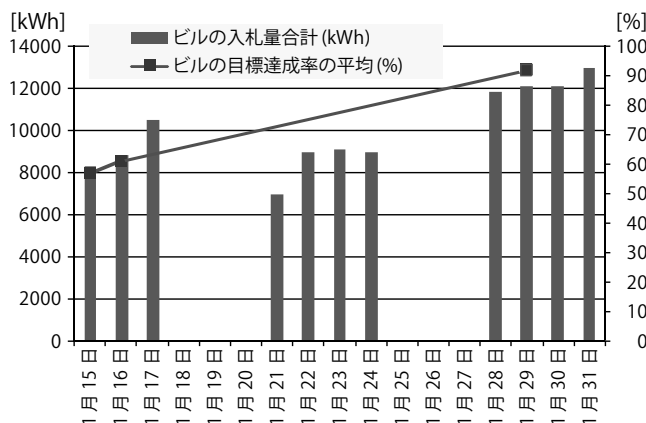


図 7 ビルの入札量と目標達成率の推移

### 実際的な利用状況を考慮した実験条件設定

実証実験の実験条件設定の難しさは、本実験を通して再確認した課題の1つである。過去3回の実証実験では、実際にDRが必要となる電力逼迫状況を模擬するため、気温の電力消費量に及ぼす影響を重視した。前日13時(2012年度実験では17時)発表の天気予報の情報を元に、実験期間の中で冬季は翌日の最高気温の予想値が規定値以下になる場合、夏季は規定値以上になる場合に、DRを要請し実験を行う設定とした。しかし、2013年度の夏季実証実験では冷夏の影響で1回、冬季実証実験では期間中の暖冬の影響で2回の設定温度の条件変更が必要となった。

### 公平な比較を実現するための被験者グルーピング

社会実証実験は、同じ実験条件でも得られる結果にばらつきが発生することが避けられないため、実験参加者を2つのグループに分け比較することが望ましい。フェーズ1の夏季実証実験では、DRの効果測定の確度向上のため、参加する需要家を、DR非発行グループ(コントロールグループ)とDR発行グループ(トリートメントグループ)の2つに分け、DRを実施するグループとDRを実施しないグループを2回ごとに交換しながら比較することで、削減効果量を導出する実験を行った。DR発行グループ受電量とDR非発行グループ受電量の差分によるDR効果を試算した結果、需要家全体の合計電力としては、5円と15円の間価格反応閾値がありそのようなことが分かった。

ビルなどの大口需要家を対象とした実験の場合、HEMSの実験のような個人モニタを対象とした場合に比べて、統計的に十分な数の参加者数を確保するのが難しいという課題がある。夏季の実験では、グループの分け方を各実験でランダムに変更しながら多数の実験を行うことで比較実験を行ったが、実際は需要家による総需要量の違いが大きく、2つのグループに分離しても、必ずしも質的に均等なグループ構成にはならない。また、冬季実証実験では、十分な数の実験回数を期間中に確保できないため、このような比較実験は実施していない。

このように、YSCPのような大規模な社会実証実験では、適正な結果の得られる実験条件を保ちつつ、限られた機会を活かして実験を円滑に実施する必要がある。過去3回の実証実験から得られた知見を今後の実証実験計画にも活かし、さらに精度の高い社会実証実験を進める予定である。

### DRによる削減効果の適切な見積もり

実証実験の効果の見積もり方法も、いくつか解決すべ

き課題を含んでいる。例えば、冬季実証実験では、電力需要のピーク時間帯(17:00～20:00)をDR発行時間帯としたが、一方で、オフィスビルでは、従業員の帰宅時にかかることや入居事業者(テナント)の突発的な使用状況の変化も含まれてしまうため、必ずしもピーク時間帯にならない。このように、本来はビルの種別に応じて実験する時間帯を変えることが望ましい可能性もある。

また、DRにおける削減量および削減率はベースラインからの差分であり、ベースラインの計算式に依存するところが大きい。ベースラインとは、電力削減量を計算するための各時間帯の基準となる電力消費量のことであり、たとえば、2013年度の冬季実証実験では、過去5日間の中で平均電力量の上位3日間を選択し、各時間帯ごとに平均値をベースラインとした。

DRの制度としては、ベースラインを基準にインセンティブの付与を行うため、参加者のモチベーション向上のためには、誰でも納得できる単純明快なルールに基づき決定されることが望ましい。しかし、一方で、単純なルールによるベースラインでは、実際の電力需要に即していない場合も発生し得る。

たとえば、2012年度の冬季実証実験では、過去の需要ピーク値を強く反映させるため、DR実施時間帯の最大需要となる30分間の電力量の平日のDR実施日を除いた過去30日間の平均値をベースラインと設定した。しかし、算定基準日として年末年始の一部が含まれたため、ベースラインが実際の需要より大幅に低く設定される期間が発生した。また、DR実施日がベースライン計算から除外されるため、実験期間中はベースラインが長期間更新されず、実需との剥離が大きい状態が続いた。

この結果を踏まえ、2013年度の実証実験では、ベースラインの算定基準とする期間を過去5日と短く設定し、また、需要変化が実験期間中に素早く反映されるように、算定基準日にDR実施日を含めるように変更した。しかし、DR実施日には本来より需要が低い可能性が高いため、実験期間中にDR実施日が連続するとベースラインが本来より低くなる可能性も残る。実証実験で得られた知見を活かし、納得性が高く、かつ、推定精度の高いベースラインの算定方法を今後も検討する予定である。

## 5. おわりに

本論文では、アグリゲータが多数のビル群を束ねてDRを実現するためのプラットフォームとなる統合BEMSの概要と、YSCPにおける過去3回に渡るDR実証

実験の概要と結果について紹介するとともに、大規模な社会実証実験を通して得られた知見を述べた。

なお本研究開発の一部および実証実験は、経済産業省の次世代エネルギー・社会システム実証事業費補助金の支援によるものであり、ここに感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会総合部会：電力システム改革専門委員会報告書(2014)。
- 2) Japan Smart City Portal: 横浜スマートシティプロジェクト, <http://jscp.nepc.or.jp/yokohama/index.shtml> (2014年3月7日)。
- 3) 小笠原潤一：需要反応(デマンドレスポンス)とは何か②電力取引とデマンドレスポンス, (財)日本エネルギー経済研究所報告レポート(2013)。
- 4) 小笠原潤一：PJMにおける需要反応プログラムの実績, (財)日本エネルギー経済研究所レポート(2012)。
- 5) 大槻知史：需要家の特性を考慮した不確実性下のネガワット計画, 情報処理学会論文誌, 数理モデル化と応用(TOM), Vol.7, No.1, pp.44-52(2014)。
- 6) 伊藤俊夫, 米良恵介, 金子 雄, 松澤茂雄:通信エンドの負荷ピークを低減するためのビル設備情報収集スケジュール作成手法, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク, 111(197), pp.77-82(2011)。
- 7) JIPDEC: エネルギーマネジメントシステムに関する標準化等調査事業, <http://www.jipdec.or.jp/dupc/project/cems/> (2014年3月7日)。
- 8) (社)日本卸電力取引所, <http://www.jepx.org/>
- 9) OpenADR Alliance: OpenADR 2.0b Profile Specification, <http://www.openadr.org/specification> (2014年3月7日)。
- 10) 横浜市: 2013年3月22日横浜市記者発表資料, <http://www.city.yokohama.lg.jp/ondan/press/h24/130322/130322.pdf>
- 11) 横浜市: 2013年10月24日横浜市記者発表資料, <http://www.city.yokohama.lg.jp/ondan/press/h25/131024press.pdf>

愛須 英之 (非会員) [hideyuki.aisu@toshiba.co.jp](mailto:hideyuki.aisu@toshiba.co.jp)  
 (株)東芝, 研究開発センターシステム技術ラボラトリー主任研究員。最適化や人工知能応用システムの研究開発に従事。電気学会, 計測自動制御学会, 日本知能情報ファジィ学会各会員。

大槻 知史 (非会員) [tomoshi1.otsuki@toshiba.co.jp](mailto:tomoshi1.otsuki@toshiba.co.jp)  
 (株)東芝, 研究開発センターシステム技術ラボラトリー主務, 博士(情報理工学)。最適化, スケジューリングなどの研究開発に従事。電気学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会各会員。

前川 智則 (非会員) [tomonori.maegawa@toshiba.co.jp](mailto:tomonori.maegawa@toshiba.co.jp)  
 (株)東芝, 研究開発センターネットワークシステムラボラトリー研究主務, ファシリティネットワークの研究・開発に従事。

松澤 茂雄 (非会員) [shigeo.matsuzawa@toshiba.co.jp](mailto:shigeo.matsuzawa@toshiba.co.jp)  
 (株)東芝, コミュニティ・ソリューション社主幹。スマートコミュニティにおけるシステムの開発に従事。電子情報通信学会会員。

飯野 穰 (非会員) [yutaka.iino@toshiba.co.jp](mailto:yutaka.iino@toshiba.co.jp)  
 (株)東芝, コミュニティ・ソリューション社主幹。スマートコミュニティ向けエネルギー管理システムの企画, 仕様設計, 評価, エンジニアリングに従事。IEEE, 電気学会, 計測自動制御学会各会員。

萩原 一徳 (非会員) [kazunori.hagiwara@toshiba.co.jp](mailto:kazunori.hagiwara@toshiba.co.jp)  
 (株)東芝, コミュニティ・ソリューション社主幹。スマートコミュニティにおけるシステム開発に従事。

採録決定: 2014年5月20日

編集担当: 峯松信明 (東京大学)