

オフィスビルを対象にした 自動化デマンドレスポンスの実証試験

Automated Demand Response in Office Buildings: A Field Experiment

アズビル株式会社
技術開発本部

黒崎 淳
Atsushi Kurosaki

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

小柳 隆
Takashi Koyanagi

キーワード

デマンドレスポンス, 実証試験, オフィスビル, 節電, 受容性, クラウド, Web-Inflex

日本のオフィスビルへのデマンドレスポンス (DR) の導入可能性を検討するため、2012年度の夏季と冬季に、東京電力管内にあるオフィスビル2件を対象に実証試験を行い、空調・照明のDR制御の需要削減効果や受容性を評価した。夏季試験の結果から、自動化DR (ADR) は確実な需要削減を期待できるが、執務者の作業効率感を低下させるので、その実用には受容性を高める様々な工夫が必要になる。一方、冬季試験では、ADRの需要削減効果は明確でなく、DR方策に研究余地がある。最後に、DR機能を提供するアズビルのクラウドサービスについて紹介する。

To explore the possibility of implementing a demand response (DR) program for commercial buildings in Japan, we studied the impact on load and the customer acceptance of demand response air-conditioning and lighting load control through a field experiment at two office buildings located in the Tokyo Electric Power Company service area in the summer of 2012 and winter of 2013. The summer experiment results show that automated DR (ADR) control can be expected with some certainty to reduce demand, but it decreases the working efficiency of workers on the controlled floors. This implies that advanced ADR control techniques having little effect on working efficiency are needed to gain customers' acceptance. In the winter experiment, the effectiveness of ADR control in shedding load was unclear, and further research is needed to develop winter DR techniques. We also describe Azbil's cloud-based services, which provide DR functions.

1. はじめに

デマンドレスポンス (DR) とは、需要家側の機器の電力消費パターンを変更することで、需要家を電力系統の需給調整に参加させる電力需要管理システムの1つである。DRは、スマートグリッド上の1つのアプリケーションになると考えられているが、日本におけるDRの研究は始まったばかりであり、DRの有用性を定量的に解析できるデータが不足している。さらに、2011年から始まった東日本大震災に伴う電力需給の逼迫は、運用を見据えた需要抑制型DRの導入可能性の検討の必要性をますます高めている。

そこで著者らは、2012年度の夏季と冬季に、アズビルと電力中央研究所との共同研究(期間:2012年3月~2013年3月)

による実証試験を通じて、BEMSが設置されたオフィスビルにおける自動化デマンドレスポンス (ADR) の効果検証⁽¹⁾・影響評価⁽²⁾を実施した。系統側からの情報に応じて需要家側の機器を自動制御するADRは、人を介さないため、制御実行の確実性が高く有用な手法であると考えられている。本試験では特に、手動デマンドレスポンス (MDR) との比較や、普及を見据えた場合に重要となるビルユーザーの受容性の評価に注目した。なお、本試験では、需要家側に対し経済的なインセンティブを与えていないので、DR料金実験にはなっていない。しかし、元々直接的にインセンティブを受け取ることができない執務者の受容性評価には、この制約は大きく影響しないと考える。

本論文では、アズビルと電力中央研究所が実施したDR

実証試験の内容とその結果について報告する。そして最後に、本試験においても活用した、DR機能を提供するアズビルのクラウドサービスについて紹介する。本研究は、アズビルが注力するエネルギーマネジメントソリューション事業のスマートコミュニティ対応領域において、2011年夏季の緊急節電でみられたような需要家負担が大きい恒常的な節電を避け、業務に支障がないよう必要な時間・量だけ抑制するDRを実現し、需要家にとって価値の高い節電機能を提供することに繋がるものである。

2. 実証試験の概要

2.1 試験対象ビル

本研究では、東京電力管内にあるBEMS導入済みのオフィスビルの代表として、空調方式が異なる2件を試験対象ビルに選定し、実証試験を実施した。対象としたオフィスビルAおよびBの概要を表1にまとめる。建物運用上の制約により全館での試験は実施できず、試験フロアを限定している。

ここで、オフィスビルAの空調方式は中央熱源方式のため、フロア毎の空調熱源の電力需要量を計測することはできず、フロア毎に空調機が処理した負荷熱量から案分して求めた。一方、オフィスビルBの3Fから6Fまでは氷蓄熱槽を共有しており、その動力を4フロアに等分に振り分けた。

表1 試験対象ビルの概要

	オフィスビルA※	オフィスビルB
所在地	神奈川県藤沢市	神奈川県横須賀市
建物用途	事務所	事務所
階数/構造	地上7F/鉄骨造	地上6F/鉄骨造
延床面積	18,000 m ²	4,900 m ²
空調方式	中央熱源 スクルーチラー+ 氷蓄熱	1-2F: ビルマル 3-6F: 氷蓄熱ビルマル
試験フロア	4-5F (400名)	1F, 3-6F (162名)

※オフィスビルAは、アズビル藤沢テクノセンター内の第100建物である

2.2 DR発動の流れ

本実証試験では、ADRとMDRの2種類の実験を行った。ADRについては、対象ビルに導入済みのBEMSにADR機能を付加し、DR制御実施の有無を判断する試験担当者が遠隔から指令信号を送ることにより、試験フロアの空調設定温度と天井照明照度の遠隔制御を行った。本機能は、5章で後述するアズビルのDRシステムの枠組を活用して実現した。なお、当日のDR制御実施の有無については、対象ビルの総務担当者を通じ、試験フロアの執務者へメールで周知される(図1)。

MDRでは、DR実施要請が対象ビルの総務担当者を通じて試験フロアの執務者へメールで周知され、各執務者による節電行動を促す。

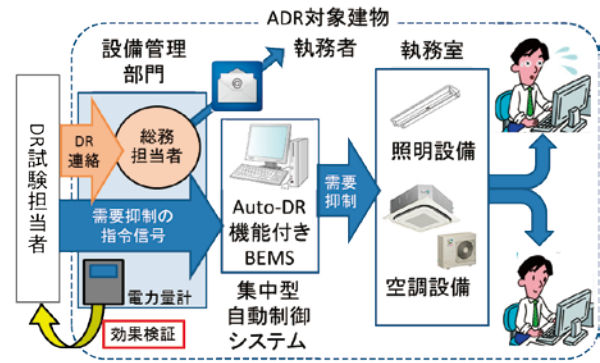


図1 ADRの通知・制御の流れ

2.3 試験条件

試験期間は、夏季が2012年7月2日~9月14日の平日49日間(盆休み除く)、冬季が2013年1月8日~2月28日の平日36日間である。このうち、気象庁が発表する当日9時時点の東京の予想最高気温Tmaxが、それぞれ夏季:Tmax≥32℃ 冬季:Tmax≤8℃ となった日にDR制御イベントを発動した。

夏季、冬季に使用したDR制御イベントの種類をそれぞれ表2、表3にまとめる。Event-Pはリファレンスケースとしての通常運用ケース、ADRの制御目標が厳しいケースをEvent-K、緩いケースをEvent-Uとした。さらに、夏季のオフィスビルAについてのみ、DR方策の単体効果を確認するため、温度緩和についてEvent-T、プレクールについてEvent-Cを用意した。ここで、発動日に実行するDR制御イベントの種類は、各イベント日の最高気温分布が可能な限り均等になるよう選択した。

表2 夏季のDR制御イベントの種類

	制御内容	
	オフィスビルA (4F,5F: ADR)	オフィスビルB (1F,4F,6F: ADR) (3F,5F: MDR)
P	空調: 26℃ 照明: 400lx	空調: 執務者依存 照明: 900lx ・上限調光率 窓側 70%, 中央 100%
U	空調: ・プレクール [12-13時] -1℃ ・温度緩和 [13-16時] +1℃ 照明: 照度緩和 [13-16時] 300lx	A D R 空調: Aと同じ 照明(6Fのみ): ・上限調光率 [13-16時] 55%
		M D R 空調: 執務者依存 照明(5Fのみ): ・照度リモコン
K	空調: ・プレクール [12-13時] -1℃ ・温度緩和 [13-16時] +2℃ 照明: 照度緩和 [13-16時] 300lx	A D R 空調: Aと同じ 照明(6Fのみ): ・上限調光率 [13-16時] 55%
		M D R 空調: 執務者依存 照明(5Fのみ): ・照度リモコン
T	空調: 温度緩和 [13-16時] +1℃	-
C	空調: プレクール [12-13時] -1℃	-

表3 冬季のDR制御イベントの種類

	制御内容	
	オフィスビル A (4F,5F : ADR)	オフィスビル B (1F,4F,6F : ADR) (3F,5F : MDR)
P	空調：22℃	空調：執務者依存
U	空調：温度緩和 [9-12時] -1℃	A D R 空調：温度緩和 [9-12時] -1℃ [16-19時] -1℃
		M D R 空調：執務者依存
K	空調：温度緩和 [9-12時] -2℃	A D R 空調：温度緩和 [9-12時] -2℃ [16-19時] -2℃
		M D R 空調：執務者依存

2.4 試験実施状況

DR制御イベントの実施日数を表4に示す。2012年夏は平年よりもやや暑かったが、東京電力管内の需給逼迫状況は、7月8月は比較的良好な状態であった。しかし、試験期間中の執務者クレームや設備不具合の発生により、オフィスビルA、Bともに、DR発動中止や収集データ異常という事態が発生したため、両ビルのDR実施日数は異なっている。特にオフィスビルAでは、温熱環境を著しく悪化させるEvent-Kを途中でメニューから外したため、Event-Kの実施日数は0日になっている。一方、2013年冬は平年よりもやや寒かったが、東京電力管内の需給逼迫状況が大きく悪化することはなかった。

表4 DR制御イベントの実施日数

	オフィスビル A		オフィスビル B	
	夏季	冬季	夏季	冬季
P	5日	5日	9日	6日
U	5日	5日	9日	6日
K	0日	6日	7日	7日
T	3日	-	-	-
C	3日	-	-	-

3. 夏季試験の結果

3.1 ベースラインモデル

ベースラインモデルは、DRが発動されなかった場合の時刻毎の電力需要量の推定値であり、DR発動日の電力削減量を推定するための基準になる。その計算手法は多数報告されているが⁽³⁾、今回の夏季試験では、対象日付近の複数の通常運用日の時刻毎の電力需要量(元データ)の平均値を、当日午前中の実績値に合わせ込むよう調整する手法を採用した。手法決定にあたっては、元データの選択(対象日の前後

2日間または前5日間)、午前実績補正の有無、外気温補正の有無を組み合わせた6種類のモデルを候補とし、試験フロア毎に、通常運用日のベースライン推定値と実績値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を比較し、最適なベースラインを採用した。図2に代表例として、オフィスビルA-4Fの8/28の電力需要量の実績値とベースラインを示す⁽⁴⁾。

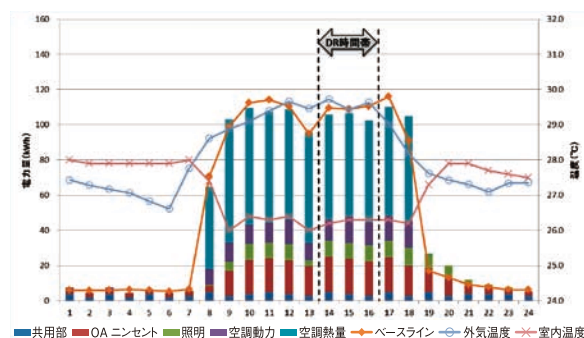


図2 オフィスビル A-4F のEvent-P 代表日 8 / 28

3.2 電力削減量の比較

夏季のイベント種類による電力削減量の違いを比較分析する。最初に、Event-U代表日として、オフィスビルA-4Fの8/27の電力需要量の実績値とベースラインを図3に示す。これはDR実行時の典型的な電力需要量グラフとなっており、12-13時にプレクールで冷房を強めたことによる需要増加、13-16時に温度緩和で冷房を弱めたことによる需要減少、16-17時にDR終了によるリバウンドの需要増加が発生している。温度緩和による電力削減効果は発動直後の13-14時が最も大きく、徐々に効果が小さくなる傾向がある。

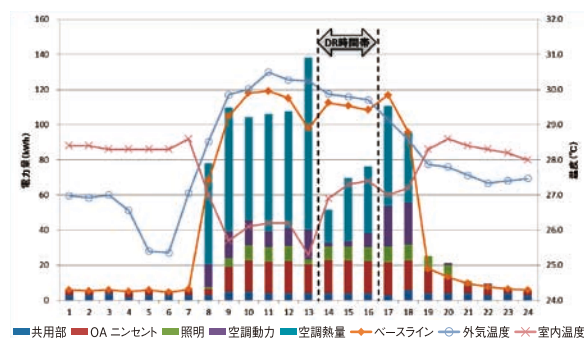


図3 オフィスビル A-4F のEvent-U 代表日 8 / 27

図4にオフィスビルA、Bのイベント種類毎の平均需要削減率とその標準偏差を示す。平均需要削減率は、DR時間帯13-16時の積算削減量の平均値を積算ベースライン需要量の平均値で割って求めている。

オフィスビルAのEvent-U、Tは、平均需要削減率の値に対し、需要削減率の標準偏差であり日毎の削減量の変動度合いを示すエラーバーは十分小さく、確実な需要削減を期待できる。ただし、Event-Cの効果は4F、5Fで明らかに異なり、これは断熱等の特性の違いによりプレクール効果の持続時間に差が出ることに起因している。

オフィスビルBのADR対象フロア1F, 4F, 6Fについては、Event-U, Kの平均需要削減率を比較すると、温度緩和幅の増加に従い削減量も確実に増加している。MDR対象フロア3F, 5Fについては、3Fと比べて5Fは比較的大きく需要削減できている。試験後の聞き取り調査では、3FはDR通知に対する節電体制が確立していなかったが、5Fは担当スタッフを決め節電行動を実行していたことが分かった。

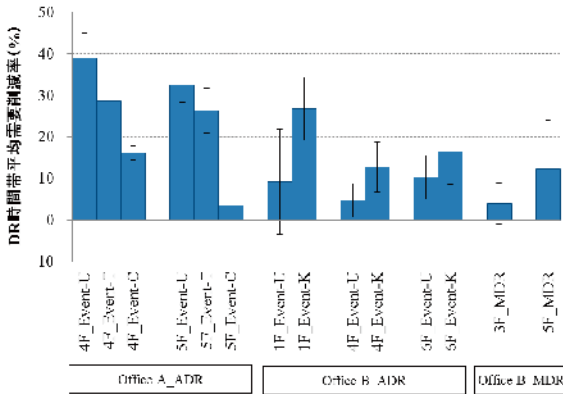


図4 夏季：DR時間帯の平均需要削減率と標準偏差

3.3 作業効率感の変化

試験期間中は執務者へSAP⁽⁵⁾に準拠したアンケートを実施し、温熱環境や光環境による作業効率感の変化を調査した。作業効率感とは、実際の作業効率を客観的に計測するものではなく、執務者の主観的な評価として作業効率を【低下させている、やや低下させている、影響しない、やや高めてくれる、高めてくれる】の5段階で申告するものに過ぎないが、需要家側の意思決定主体がDR制御の受け入れ可否を判断するための材料となる。ここでは紙面の都合上、温熱環境の調査結果のみを説明する。図5はオフィスビルA, BのADR対象フロアとMDR対象フロアの、室内温度と作業効率感の関係を示す。

ADRの場合、オフィスビルA, Bともに、室温が上昇すると執務者の作業効率感が低下する。ADRでは確実に需要削減できるが、制御に伴って執務者の作業効率感が低下しないように、制御対象や室温設定値を適切に選択する必要があることがわかる。

オフィスビルBでは、MDRの方がADRよりも作業効率感の低下の度合いが小さい。これは、MDRの場合、環境選択権を執務者が保有しており、許容できる室温設定値を自身が決められるからと解釈できる。なお、MDR対象フロアの制御時間内の最高室温は27.8℃であった(参考:ADR対象フロアは28℃超)。

4. 冬季試験の結果

4.1 ベースラインモデル

ベースラインモデルの計算手法は、夏季試験と同様な手順により決めた。手法決定にあたっては、元データの選択(対象日の前後2日間または前5日間)外気温補正の有無、

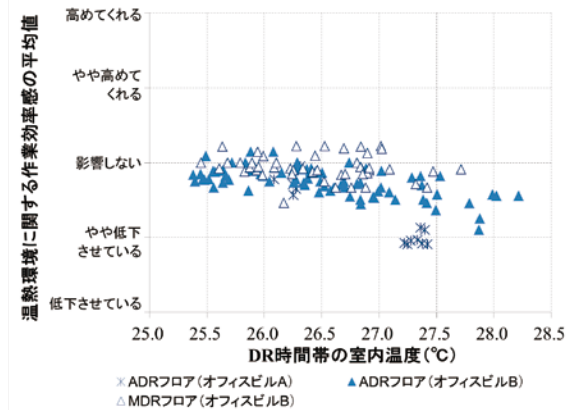


図5 夏季：室内温度と作業効率感の関係

休日明け補正の有無を組み合わせた6種類のモデルを候補とした。なお、冬季のオフィスビルAでは、吹き抜けを通り4Fから5Fへ熱移動が発生する影響が大きいいため、4Fと5Fの合計電力需要量に対して評価している。図6に代表例として、オフィスビルA-4,5Fの1/21の電力需要量の実績値とベースラインを示す。始業時間前後の暖房を開始した8-9時に最も高い需要が発生し、午前の需要が午後よりも比較的高いという傾向は見られるが、ここから通常運用日の典型的な需要パターンを精度高く推定することは難しい。これは、冬季は構造体への蓄熱負荷および起動時の熱負荷が夏季よりも大きいためと考えられる。特に蓄熱負荷は、外壁の断熱性能、前回空調停止からの経過時間、その間の外気温、室内発熱負荷などの複雑な要因で決まるため、推定は難しくなる。

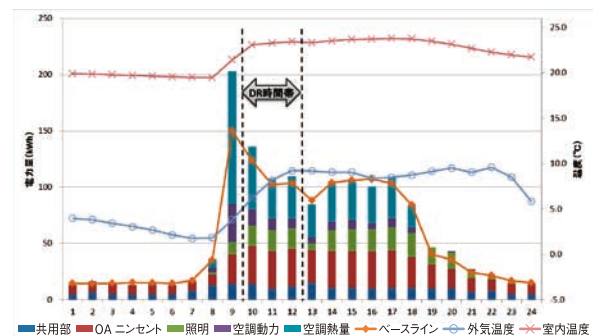


図6 オフィスビルA-4,5FのEvent-P代表日1/21

4.2 電力削減量の比較

冬季のイベント種類による電力削減量の違いを比較分析する。最初に、Event-U代表日として、オフィスビルA-4,5Fの1/22の電力需要量の実績値とベースラインを図7に示す。9-12時に温度緩和で暖房を弱めたことによる需要減少が発生しているはずであるが、ベースラインとの差異としてその電力削減効果を明確に見出すことは難しい。

図8にオフィスビルA, Bのイベント種類毎の平均需要削減率とその標準偏差を示す。平均需要削減率の定義は夏季試験と同様だが、試験条件に合わせてDR時間帯を変更して求めている。

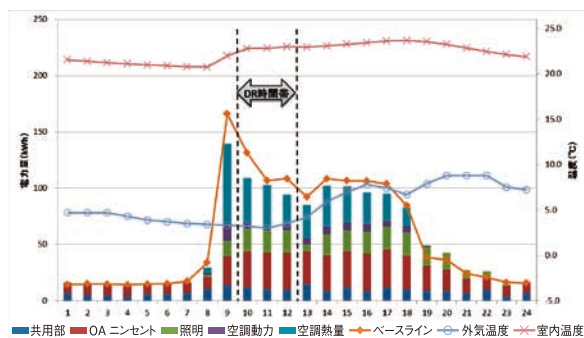


図7 オフィスビルA-4,5FのEvent-U代表日1/22

オフィスビルAのEvent-Uの平均需要削減率は負の値、すなわち、平均すると需要増加に転じている。また、フロア/イベント種類によらず、全ての標準偏差を示すエラーバーは大きく、かつ、下限が負の領域に入っており、需要削減ができていないとは言えない。前節で示した冬季ベースラインの推定誤差は、最も精度が高いオフィスビルA-4,5Fの場合でも10.3%であり、平均需要削減率の値とはほぼ同程度となるため、ここに有意差を見出すことはできない。これらの結果は、冬季の需要削減量について議論するには、現状のベースラインの推定精度に問題があることを示唆している。なお、オフィスビルBのMDR対象フロア3F, 5Fは、どちらも平均すると需要増加に転じているが、試験後の聞き取り調査で組織的な節電行動を実施しなかったことが分かっている。

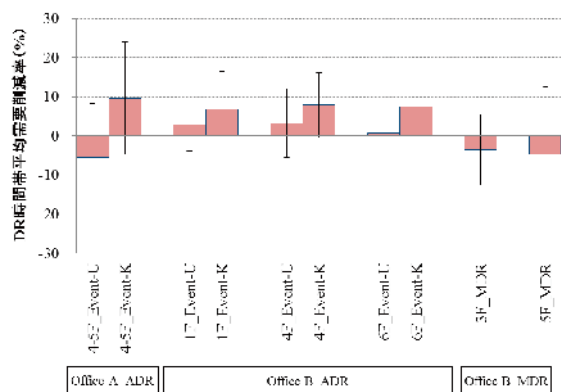


図8 冬季：DR時間帯の平均需要削減率と標準偏差

4.3 作業効率感の変化

夏季試験と同様にアンケートを実施し(実施方法は夏季・冬季で若干異なる)、温熱環境による作業効率感の変化を調査した。図9はオフィスビルA, BのADR対象フロアとMDR対象フロアの、室内温度と作業効率感の関係を示す。そもそも冬季の午前中の室温は、暖房以外にも内部負荷により上昇する過程にあるため、温度緩和による室温変化より例えば早朝室温の影響の方が大きい場合がある。Event-U, Kの実施日には、DR開始と同時に室温上昇の速度が鈍る挙動が観察され、節電運転が実行されて

いることは確認できるが、室温を精密に制御できてはいない。本アンケートでは、オフィスビルA, Bともに、冬季に室温が低下すると執務者の作業効率感が低下することを確認できた。

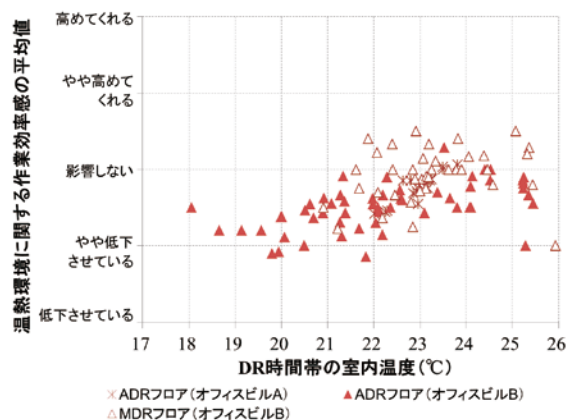


図9 冬季：室内温度と作業効率感の関係

5. クラウドサービスを活用したDRの紹介

5.1 クラウドサービスの構成と特長

アズビルのクラウドサービスは、Web-Infilex™と称している。遠隔サーバと建物のビルディングオートメーションシステムを専用回線で結び、遠隔から設備機器の制御(各種設定値変更、起動/停止など)を可能にすることで、様々なアプリケーションを提供している(図10)。

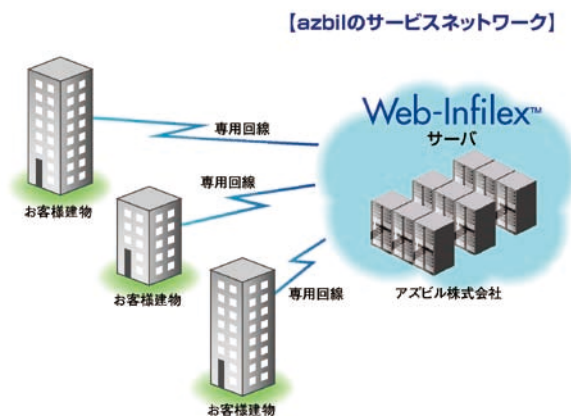


図10 Web-Infilexの構成

Web-Infilexの特長としては、「機能の高度化」「大規模投資不要」「短工期」「常に最新のアプリケーション提供」が挙げられる。中でも「機能の高度化」は自動制御技術を従来から大きく進歩させており特筆すべき点である。この機能の高度化に関して、クラウドが果たした役割を以下に述べる。

1) 高度計算処理

高度なアルゴリズムを搭載する場合、現地システムよりもクラウド上に実装する方が、システム制約が少なく経済性が高い。

2) 外部リソースの活用

クラウド上のシステムに、最新の外部情報(気象予報, 電力需給逼迫状況など)を取り入れることで、外部環境に合わせた柔軟な制御が可能となる。

3) 遠隔監視/管理

通常、自動制御に関する情報は、建物/敷地単位で閉じられていたが、クラウドを活用した場合は、遠隔からでも現地状況の確認および設備制御に関連する設定が可能となる。

5.2 Web-Infilexを活用したDRシステム

電力会社の需給逼迫状況あるいは外部からのトリガー(緊急逼迫警報など)を遠隔センターにて収集し、Web-Infilexを介して、遠隔から建物の消費電力を抑制する「節電制御」を実施する。

Web-Infilexを活用した「デマンドレスポンスシステム」の特長は下記である。

1) 需要抑制量の分配が可能

各需要家建物に対する需要抑制量を調整し、計画的にデマンドレスポンス指令を送出することができる。

2) 既存監視盤の改造が最小限

大規模建物から中小規模建物まで、ビルディングオートメーションの形態に合わせて提供している。現地の監視盤のソフトウェアとWeb-Infilexとを連携する方法や、監視盤改造なしでWeb-Infilexからの制御信号のみで実現するなど、最小限の改造(低コスト)での導入が可能である。

3) 多種多様な空調節電制御を提供

需要家建物の設備条件や運用条件に合わせて、需要抑制型(設定値の緩和、ゆらぎ運転制御、間欠運転、サイクリック運転など)や、ピークシフト型(熱源蓄熱槽制御、空調機起動スケジュール変更など)の節電制御を提供可能である。

5.3 デマンドレスポンスシステムの構成例

監視盤ソフトウェアとWeb-Infilexを連携させて実現する方法を紹介する。

建物が契約する電力会社の需給逼迫状況に応じて30分毎の目標電力を決定し、建物の監視盤の電力デマンド制御ソフトウェアの目標値を変更する。電力デマンド制御は、目標値に対しインターバル(30分)内の使用電力量を予測し、インターバル終了時に目標電力量を超えないように空調節電制御を稼働させる(図11)。

6. おわりに

本論文では、著者らが2012年度の夏季・冬季にアズビルと電力中央研究所との共同研究として実施したDR実証試験の内容とその結果について報告し、本試験でも活用したDR機能を提供するクラウドサービスについて紹介した。ADRは確実な需要削減を期待できるが、執務者の作業効率感を低下させるので、その実用には執務者の受容性を高める様々な工夫が必要になる。一

方、冬季試験では、ADRの需要削減効果は明確でなく、DR方策に研究余地がある。アズビルでは、ビル制御に関しても豊富な知見やノウハウを活かし、実用的なサービスの拡充に今後も取り組んでいく所存である。

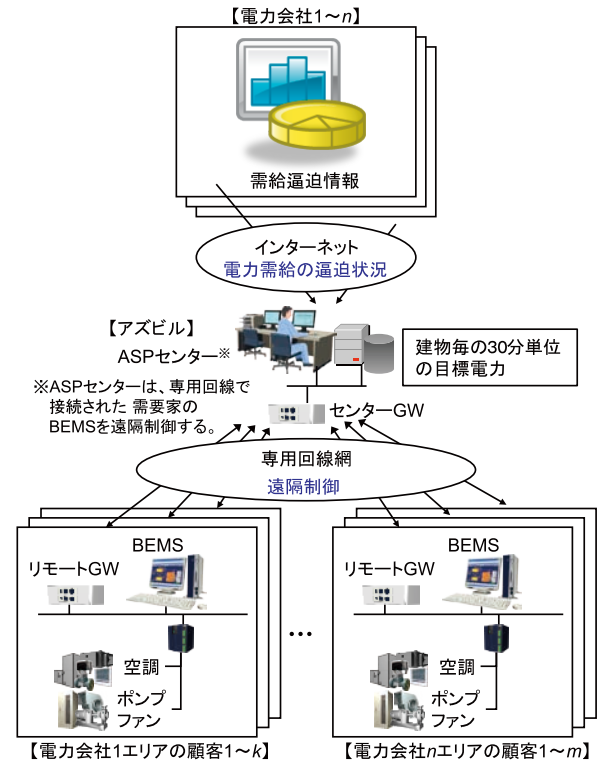


図11 デマンドレスポンス制御の構成例

7. 謝辞

本論文のDR実証試験は、一般財団法人電力中央研究所との共同研究により実施したものである。また、試験対象としたオフィスビルAおよびBの執務者ほかには、試験実施にあたり多大な協力をいただいた。ここに記して関係各位に感謝する。

<参考文献>

(1) 小柳隆, 黒崎淳, 松浦友朋, 潮田尚史, 高橋雅仁, 上野剛, 坂東茂: オフィスビルを対象にした自動化デマンドレスポンス(ADR)の実証試験(第1報) 試験内容, 負荷抑制量の推定, 平成25年度空気調和・衛生工学会大会(長野), pp.149-152, (2013)

(2) 上野剛, 高橋雅仁, 坂東茂, 小柳隆, 黒崎淳, 松浦友朋, 潮田尚史: オフィスビルを対象にした自動化デマンドレスポンス(ADR)の実証試験(第2報) 室内環境とユーザーの受容性, 平成25年度空気調和・衛生工学会大会(長野), pp.153-156, (2013)

(3) K. Coughlin, M. A. Piette, C. Goldman, S. Kiliccote: Estimating Demand Response Load Impacts: Evaluation of Baseline Load Models for Non-Residential Buildings in California, LBNL-63728, (2008)

- (4)坂東茂，黒崎淳，宇野侑希，高橋雅仁，上野剛，小柳隆，野間節：オフィスビルを対象にした夏季・冬季の負荷制御試験におけるベースライン策定方法の一考察，平成 25 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会講演論文集 PE-13-161, (2013)
- (5)財団法人建築環境・省エネルギー機構編著：誰でもできるオフィスの知的生産性測定 SAP 入門，テツアドー出版，(2010)

<商標>

Web-Inflexは，アズビル株式会社の登録商標です。

<著者所属>

黒崎 淳	技術開発本部基幹技術開発部
小柳 隆	ビルシステムカンパニー 開発本部開発3部