

# ビル群の需要特性に柔軟に対応できるDR最適化技術

DR Optimization Technology with Flexibility to Respond to Demands of Multiple Buildings under Electricity Demand Uncertainty

大槻 知史      愛須 英之      飯野 穰

■ OTSUKI Tomoshi      ■ AISU Hideyuki      ■ IINO Yutaka

東芝は、個々のビルのタイプや特性と地域全体の合理的なエネルギー利用を両立させるスマートコミュニティの実現を目指して技術開発に取り組んでいる。また、その一環として、ビル群のエネルギーを統合して管理する統合BEMS (Building Energy Management System) のための基盤技術開発を進めており、横浜スマートシティプロジェクト (YSCP) において、デマンドレスポンス<sup>(注1)</sup> (DR) の実証実験を行っている。統合BEMSは、各ビルの特性に合った無理のない電力抑制計画 (DR計画) を作成し、この計画に基づく要請を実施することで、ビル群としてのエネルギー削減目標の達成を目指している。

今回、統合BEMSにおけるDR計画機能の基礎技術検討の一環として、ビル群の需要特性と需要予測に柔軟に対応できるDR最適化技術を開発した。計算機シミュレーションにより評価した結果、開発技術は、他の手法を用いた場合に比べて電力削減の平均コストと平均失敗回数がともに最小となることを確認した。

Toshiba has been engaged in the development of technologies for the realization of smart communities to achieve a balance between the electricity demand of individual buildings and optimized energy usage in the community as a whole. As part of this effort, we are developing a clustered building and energy management system (BEMS) technology for comprehensive energy management among multiple buildings, and are now conducting demand response (DR) demonstration experiments in the Yokohama Smart City Project (YSCP), one of the largest smart city demonstration projects in Japan. The clustered BEMS is targeted at reducing the aggregate power consumption of a group of buildings through the development of a power reduction plan (DR plan) consistent with each building and the implementation of that plan.

As one of the basic technologies for the clustered BEMS, we have now developed a DR optimization technology that takes into consideration both the power demand characteristics of individual buildings and electricity demand uncertainty in the region. We have conducted computer simulations and confirmed that the average costs and average number of failures in power reduction at the implementation of DR using this method are lower compared with those using other methods.

## 1 まえがき

東芝は、個々のビルのタイプや特性と地域全体の合理的なエネルギー利用を両立させるスマートコミュニティの実現に向けた技術開発に取り組んでいる<sup>(1)</sup>。また、その一環として、ビル群のデマンドレスポンス (DR) を統合的に管理する統合BEMS (Building Energy Management System) の開発を進めており、横浜スマートシティプロジェクト (YSCP)<sup>(2)</sup> においてDRの実証実験を行っている。統合BEMSは、管理下のビル群を束ね、各ビルの特性に合った無理のない電力抑制計画 (DR計画) を作成し、この計画に基づくDR要請を実施することで、ビル群全体でのエネルギー削減目標の達成を目指している。

YSCPの実証実験において、統合BEMSは、地域の電力を管理するCEMS (Community Energy Management System) に対し、事前に一定の電力削減目標を約束する。統合BEMSは、この削減目標を達成できるように各ビルのDR計画

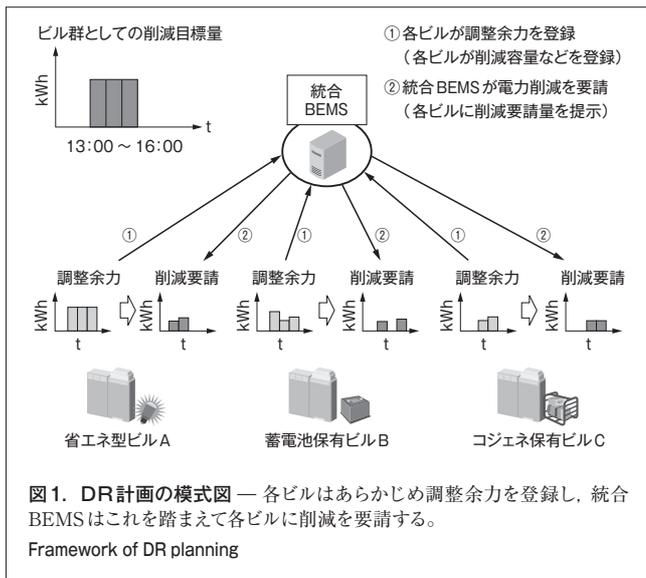
を作成し、ビルごとに電力抑制を要請する。また、各ビルに対しては、予定どおりの電力抑制を実現できた場合にかぎりインセンティブを支払うコミット型のDR方式を採用することで、ビルの電力需要削減を促し、結果としてビル群全体での確実な削減目標の達成を目指している。

ここでは、統合BEMSにおけるDR計画機能の基礎技術検討の一環として開発した、ビル群の需要特性と需要予測に柔軟に対応できるDR最適化技術と、シミュレーションによるその評価事例について述べる。

## 2 ビル群の需要特性を考慮したDR計画

図1のように、統合BEMSの管理下には複数のビルが所属しており、統合BEMSはこれらのビルの合計電力量を統合して管理する。管理下のビルには様々なタイプがあり、例えば、電力と熱を同時に供給するコージェネレーションシステム (以下、コジェネと呼ぶ) や蓄電池などを持つビル、及び省エネ努力で電力を削減できるビルなどがある。したがって、ビル群として無理なく効率的に電力を削減するためには、これらのビル

(注1) 需要家が電力を抑制することで需給バランスを調整する仕組み。



の特性を生かす仕組みが必要である。

統合BEMSは、ビル群の削減目標をこれらの各ビルに割り当てることで、ビル群全体での削減目標達成を目指す。ビル群の削減目標は、図1の左上図のように時間帯（以下、スロットと呼ぶ）ごとに設定され、ここでは、スロットは1時間単位とする。これは、地域の電力の逼迫（ひっばく）状況や電力会社の要請に応じて、削減目標が定まっている状況に相当する。

各ビルは、スロットごとの調整余力<sup>(注2)</sup>に関する情報をあらかじめ登録する（図1の①）。これに対し統合BEMSは、ビル群として削減目標を達成できるように削減量を各ビルに割り当て、各ビルに削減要請量を提示する（図1の②）。ここで、各ビルに対する削減要請量は、各ビルがあらかじめ登録した調整余力の削減容量以下に抑えるものとする。

ここで、ビルの負担を最小化するためには、ビルの規模や種類及び保有する機器に応じて、各ビルのタイプや特性を考慮することが望ましい。例えば、実際の運用では、次に挙げるような各ビルのタイプや特性への配慮が必要であり、それぞれの数値は、シミュレーション用の仮想データである。

- (1) 省エネ型ビルA 省エネ努力で電力の削減が可能であるが、合計2時間以下しか対応できない。ただし、直前（1時間前）の削減要請にも対応可能である。
- (2) 蓄電池保有ビルB 蓄電池による蓄エネルギーで1日合計300 kWh以下の電力削減が可能であるが、事前に運転計画を作成する必要があり、5時間前には要請が必要である。
- (3) コジェネ保有ビルC コジェネによる創エネルギーで電力の削減が可能であるが、10時間前には要請が必要である。

(注2) 削減可能な電力量のこと。

表1. ビルの調整余力特性の例（仮想データ）

Example of reserve power characteristics of buildings (virtual data)

項目	ビルのタイプ		
	省エネ型ビル	蓄電池保有ビル	コジェネ保有ビル
削減容量 (kWh/スロット)	100	300	200
負担コスト (円/kWh)	80	20	30
起動時間 (スロット)	1	5	10
通算対応可能時間 (スロット/日)	2	24	24
通算対応可能電力量 (kWh/日)	200	300	4,800

これらを表現するため、各ビルの調整余力に関して、それぞれの特性を考慮した表1のようなモデル化を行う。

ここで、削減容量は1スロットで削減可能な電力を表す。また、負担コストは1 kWh削減に必要な金額を表す。これは蓄電池やコジェネを保有するビルの場合は機器の運転コストに相当し、省エネ型ビルの場合は省エネ負担コストを金銭で置き換えた場合の金額とする。次に起動時間とは、削減を実現するために必要な準備時間のことである。更に、通算対応可能時間と通算対応可能電力量は、それぞれ、ビルが1日の合計として対応可能な最大スロット数と最大削減電力量を表す。

このような特性を考慮することで、ビルのタイプや特性に合わせた削減要請を実施でき、全てのビルが一律で長時間の電力削減を実施する場合に比べて、ビルの負担が軽減されることが考えられる。

これに対し、表1の特性を満たすDR計画としては、例えば図2の例が挙げられる。この例では13:00～16:00の3スロットにおいて、それぞれ削減目標300 kWhが設定されたものとする。

このDR計画では、12:00及び13:00の時点で、省エネ型ビルに13:00～14:00及び14:00～15:00に実行する100 kWhの削減要請、10:00の時点で、蓄電池保有ビルに15:00～

スロット	ビルのタイプ			合計
	省エネ型ビル	蓄電池保有ビル	コジェネ保有ビル	
3:00～4:00			削減要請	削減目標がない時間帯 (準備時間)
4:00～5:00			削減要請	
...	...	...	...	
10:00～11:00		削減要請		削減目標がある時間帯
11:00～12:00				
12:00～13:00	削減要請			
13:00～14:00	100 削減要請		200	
14:00～15:00	100		200	
15:00～16:00		300		

図2. 表1の調整余力特性を満たすDR計画の例 — DR計画は、各ビルの調整余力特性を満たす必要がある。

Example of DR planning satisfying reserve power characteristics in case of Table 1

16:00に実行する300 kWhの放電要請、また3:00及び4:00の時点で、コジェネ保有ビルに13:00～14:00及び14:00～15:00に実行する200 kWhの起動要請を出している。以上の要請は、各ビルの特性要件を満たし、ビル群としての削減目標300 kWhを達成するDR計画となっている。

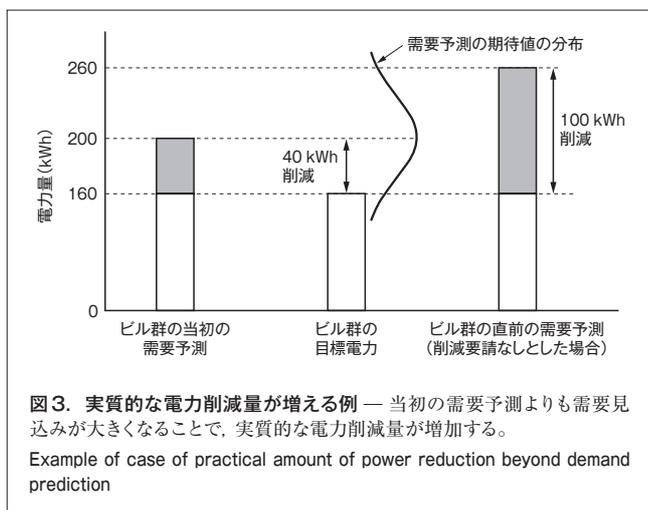
なお、この場合、例えば10:00に予定の蓄電池保有ビルに対する削減要請は、10:00より前にはビルには通知しないものと仮定する。したがって、10:00より前に不要と判断できた場合には、まだ実際に削減要請していないため、取り消すことができる。

### 3 需要予測の変動を考慮したDR計画

電力需要は気象や突発的な要因に左右されやすく、正確に予測することが難しい性質を持つ。したがって、統合BEMSには削減目標未達成となるリスクがある。例えば、図2に示したDR計画の例では、電力需要予測の不確実性を考慮していないため、削減目標を達成できないリスクがある。

ここで、翌日のあるスロット、例えば13:00～14:00のビル群としての削減目標を約束する例を考える。まず、図3のように、削減目標を約束する時点の需要予測値を200 kWhとし、統合BEMSが160 kWh以下に電力の削減が可能と判断し、40 kWhの削減目標を約束したものとする。その後、翌日の気温が予想よりも高くなったなどの要因により、削減を要請したビル以外の電力需要予測が想定よりも60 kWh増加してしまったとする。この場合、削減目標を達成する、すなわち電力需要を160 kWhまで減らすための実質的な電力削減量は、もともと予定した40 kWhに予想外に増加した60 kWhを加えて、合計100 kWhとなる。したがって、このような状況をあらかじめ想定しておかないと、ビル群の目標達成が困難となる可能性がある。

そこで、需要予測が変動し、結果として実質的な電力削減



量が変動する場合の、リスクを低減するDR計画を考える。

需要予測の変動をモデル化するために、単純には、需要予測の期待値を利用することが考えられる。しかし、期待値を利用するだけでは、予測が外れるケースの考慮が不十分のため、極端に予測が外れた場合に、削減目標の達成に失敗する可能性がある。ここでは、需要予測の変動を複数のシナリオ（需要のバリエーション）を用いてモデル化し、ありうる様々な状況を考慮しながら負担コストを最小化する方針を採用する。

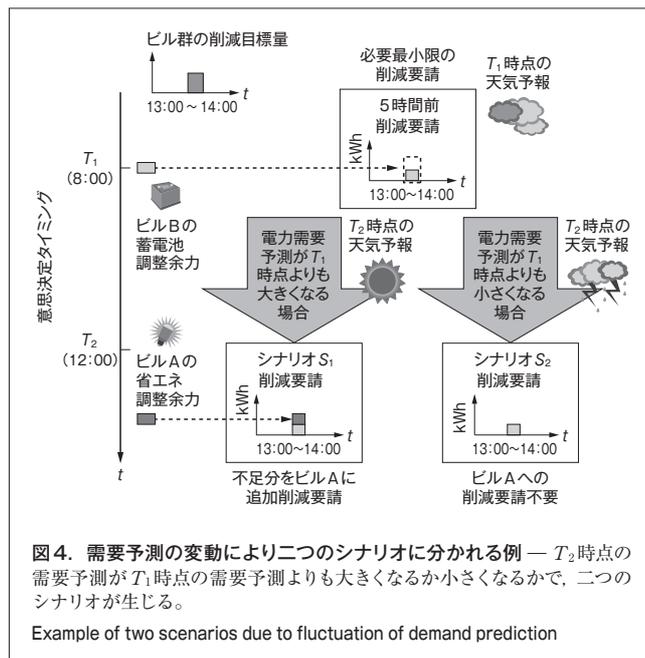
図4は、需要予測の変動を二つのシナリオ ( $S_1$ ,  $S_2$ ) で捉える例を表している。ここでは  $T_1$  (5時間前の8:00) 及び  $T_2$  (1時間前の12:00) の2段階の意思決定に基づき、13:00～14:00のDR計画を作ることを想定する。なお、起動時間が5時間の調整余力を持つビルBに対しては  $T_1$  には削減を要請する必要があるが、起動時間が1時間の調整余力を持つビルAに対しては、1時間前の  $T_2$  での要請でもよい。

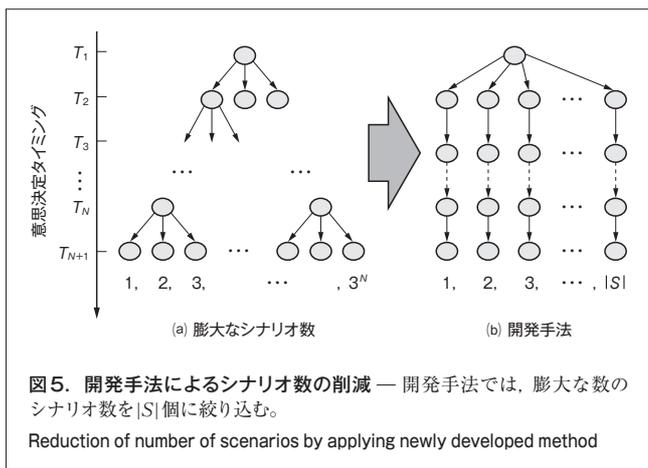
最初に、 $T_1$  では、その時点での天気予報に基づく13:00～14:00の電力需要予測を基に、ビルBに必要な最小限の電力削減要請を行うDR計画を作成する。

次に  $T_2$  では、その時点での天気予報に基づく13:00～14:00の電力需要予測を基にDR計画を更新するが、ここでは電力需要予測が  $T_1$  時点よりも大きくなるシナリオ  $S_1$  と、 $T_1$  時点よりも小さくなるシナリオ  $S_2$  の、二つのシナリオに分けて考える。

まず、シナリオ  $S_1$  では、より大きな電力削減が必要となり、新たにビルAに削減を要請する。一方、シナリオ  $S_2$  では、新たな削減要請が不要なため、ビルAへの要請は不要である。

このように、各意思決定のタイミングでは、各時点における需要予測に基づき、必要な需要家に対するDR計画を作成し





更新する。また同時に、各ビルの調整余力の負担コストと削減容量、及び起動時間などの制約条件を考慮しながら、負担コストが最小となるDR計画を求める。

ここでは、段階数とシナリオ数がともに2である単純な例を示したが、実際には、より複雑な想定が必要である。例えば、図5(a)のように、意思決定のタイミング数がN段階あり、各段階で3個のシナリオに分岐する例を考えると、シナリオの総数が $3^N$ 個となる。この場合、問題規模が膨大となり、最適な計画を得ることが困難な問題となる。

これに対し、開発手法では図5(b)のように、あらかじめ需要予測の変動に相当する|S|個の代表シナリオを作成し、これらのシナリオにより近似する方針を採る<sup>(3)</sup>。結果として、大規模な問題であっても、実用的な時間で各ビルの負担コストの総和を最小化するDR計画が得られる。

また、各ビルの制約条件は、数理最適化の手段の一つである混合整数計画モデルで表現しており、電力削減実施時間の合計や削減電力量の合計など、複数のスロットにまたがるような複雑な制約条件も容易に表現することが可能である。

#### 4 計算機シミュレーションによる評価結果

次に、統合BEMSが蓄電池やコジェネを備えたビルなど8棟を管理する設定で実施したシミュレーション実験について述べる。

実験では、13:00～16:00の合計3スロットに対し、ビル群としてピーク値から15%の電力削減目標を統合BEMSがあらかじめ約束した状況を想定した。また、本来はビル群として確実に削減目標を達成すべきであるが、需要予測の変動が大きい場合、やむをえず失敗する事例も考えられるため、便宜上、失敗時はスロット当たり20,000円の罰金が生じるとした。

これに対し、10個の需要シナリオを考慮する開発手法と、需要予測の変動を変動幅だけで近似する2手法、すなわち変動幅として $\sigma$  (需要予測分布の標準偏差) 及び $2\sigma$ の2通りを

表2. シミュレーションによる評価結果

Results of simulation evaluation

項目	手法		
	開発手法	変動幅 $\sigma$	変動幅 $2\sigma$
平均コスト (円)	28,827	35,892	33,415
平均失敗回数 (回)	0.01	0.17	0.10

加えた計3通りの手法を比較した。

ビルの調整余力特性をランダムに生成した59ケースに対して、各手法の平均コスト (各ビルの負担コストと罰金の合計の平均値) と、平均失敗回数 (3スロットのうち平均何スロットで削減目標達成に失敗したか) を表2に示す。この結果、これらの3手法の中では、開発手法が平均コストと平均失敗回数ともに最小となることを確認できた。また、内訳では、全59ケース中、コストでは52ケース、失敗回数では全59ケースで、開発手法が最小となることを確認した。

#### 5 あとがき

電力の削減目標を確実に達成するDR最適化の基礎技術として、複数シナリオを考慮する最適化手法と、そのシミュレーションによる検証結果について述べた。

今後は、YSCPの実証実験においてDR計画技術を検証し、地域全体での効率的なエネルギー利用技術の確立を目指す。

#### 文献

- 野田 肇 他. ビル群のエネルギー管理を実現する次世代のBEMS技術. 東芝レビュー. 67, 9, 2012, p.7-10.
- 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). <<http://www.city.yokohama.lg.jp/ondan/yscp/>>. (参照2013-05-21).
- 大槻知史. 需要家不満度を考慮した不確実性下のネガワット戦略. 情報処理学会研究報告. 数理モデル化と問題解決. 2012-MPS-90, 20, 2012, p.1-6.



大槻 知史 OTSUKI Tomoshi, Ph.D.

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務, 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・リサーチ学会会員。System Engineering Lab.



愛須 英之 AISU Hideyuki

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会員。System Engineering Lab.



飯野 穰 IINO Yutaka

スマートコミュニティ事業統括部 スマートコミュニティプロジェクト第四部主幹。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, 計測自動制御学会会員。Smart Community Project Dept. 4