

# ABS とビルシミュレーションを用いたエネルギーシミュレーションによる DR の評価手法

○高橋悟 北島弘伸 園田俊浩 竹林知善 (富士通研究所 ソフトウェアシステム研究所)

太田博士 市川学 出口弘 (東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻)

## Agent Based Simulation and Building Energy Simulation for Analyzing Demand Response

\*S.Takahashi, H.Kitajima, T.Sonoda, and T.Takebayashi (Fujitsu Laboratories), and  
H.Ohta, M.Ichikawa, and H.Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

**Abstract**— Demand Response (DR) is customer side electricity saving program which is requested by the electric company. To analyze the effects of DR, we developed the simulation of human behavior and energy consumption in a building. This simulation is based on Spot Oriented Agent Role Simulator (SOARS) and building energy simulator (EnergyPlus). We describe the evaluation of simulation results for the building model of our company.

**Key Words:** Agent Based Simulation, Energy Simulation, Demand Response

### 1 はじめに

再生可能エネルギーの普及や電力取引市場の拡大に対応するため、エネルギー管理システム (以後、EMS) は、総需要に対して巨大な発電所の供給量を調整する従来の集中型 (Fig.1) から、家庭やビル、地域などのコミュニティ単位でエネルギーを管理しつつ、コミュニティ間で強調して全体の需給バランスを維持する分散型 (Fig.2) へと移行が進むと考えられる。分散型の EMS として、HEMS (Home Energy Management System) や BEMS (Building Energy Management System)、コミュニティ間の電力融通や系統からの電力調達を行う CEMS (Community Energy Management System) の開発が加速している。

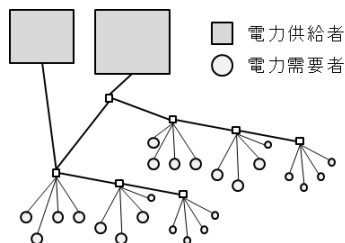


Fig. 1: Center controlled EMS

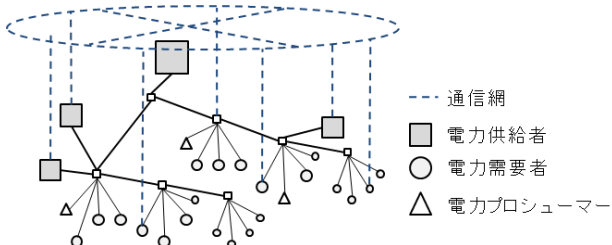


Fig. 2: Distributed EMS

今後、分散型 EMS は他の EMS と情報をやり取りしながら、地域全体のエネルギー需給バランスを維持するように強調して動作するようになる。情報のやり取りとして、例えば、電力需要者が電力の必要に応じて電力供給者に電力を要求するオンデマンド型の情報交換や、電力供給不足の際に、供給者側から需要家に節電要請を行うデマンド・レスポンスにおける情報交換が提案されている。

現状の分散型 EMS の課題は、エネルギー使用状況のリアルタイムな見える化が可能になってきているが、エネルギーの利用コストや居住者の快適性、オフィスや工場であれば生産性など、その居住空間の目的にあった最適な制御方式を実現できていないことである。

今回、分散型 EMS として BEMS に注目し、ビルシミュレーションである EnergyPlus<sup>1)</sup> と社会シミュレーション SOARS<sup>2)</sup> を活用して、BEMS の在り方について検証した結果を報告する。

### 2 従来技術

分散型エネルギー管理が普及すると、EMS は、情報をやり取りしながら地域全体のエネルギー需給バランスを維持するようになる。

オンデマンド型の EMS<sup>3)4)5)</sup> では、需要家が必要に応じて EMS にエネルギー要求を送信する。この EMS は電力要求の優先度や省エネ率を考慮し、供給可能な電力量を決定するようになっており、省エネ率保障を提供しながら、自給バランスを維持する新しい制御方式である。オンデマンド型における方式においても、書エネ率を維持しながら快適性を保持するための最適な制御方式が必要である。

電力供給不足の際には、供給者側から需要家に節電要請を行うデマンド・レスポンスが注目を集めている。デマンド・レスポンスの要請に応じると供給者から報酬が得られるため、需要家に要請削減量を達成するよ

うに電力の利用抑制を促す仕組みとなっている。Asanoらは、デマンド・レスポンスの潜在的な節電量は関東圏のピーク電力比率の約4.7%になると調査報告を行っている<sup>6)</sup>。また、Kiliccoteらはカリフォルニア州においてデマンド・レスポンスにより2005年に平均10%削減した事例などを報告している<sup>7)</sup>。デマンド・レスポンスを活用するには、需要家が普段の需要量や設備の稼働状態などを把握し、有効な制御を行うことが必要である。

ビルの制御についての研究では、JingranらがEnergyPlus<sup>1)</sup>とMATLABを使ったビルシミュレーションを行い、コストモデルを含むMPCモデルによる結果とベースラインの比較を行っている<sup>8)</sup>。EnergyPlusは米国エネルギー省が公開している建物エネルギーシミュレーションソフトウェアである。

また、東京工業大学にて開発されたSOARS<sup>2)</sup>はエージェントベースシミュレーションのソフトウェアであり、シミュレーションに人の動きを取り入れることができる。SOARSを用いると、オブジェクトをエージェントとして階層的にモデル化し<sup>9)</sup>、エージェントの振る舞いを決定するパラメータの組み合わせによって、多様なシナリオを作成することができる<sup>10)</sup>。我々は、SOARSを用いて弊社事業所をモデルとし、節電施策を評価する研究を行った<sup>11)</sup>。本稿のシミュレーションモデルは以前の研究と関連するが、以前の研究では物理シミュレーションは導入していない。

### 3 提案するシミュレーションモデル

SOARSとEnergyPlusを用いて、エージェントベースシミュレーション、エネルギーシミュレーションを連携し、弊社事業所をモデルとしたシミュレーションモデルについて紹介する。本稿におけるシミュレーションの構成は下図のようにになっている。

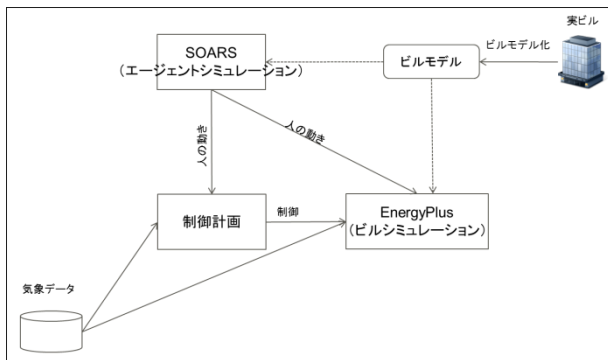


Fig. 3: Structure of simulation

本稿の構成では、人の動きをSOARSにてシミュレーションし、その情報に基づいてビルシミュレーションを行うようになっている。

まず、ビルモデルについては、弊社事業所をモデルとし、建物内の空間を設定温度の対象範囲である空調管理区間（フロアあるいはゾーン）に分割し、それぞれに従業員の数と空調、照明、電気機器の規模を設定した。ゾーンの構成はFig.4のようにになっている。建物は6階建てとなっているが、1階から4階は北西から南東

まで4つのゾーンに分割し、5階から6階は南西、南東の2つのゾーンに分割しており、計20個のゾーンに分かれている。

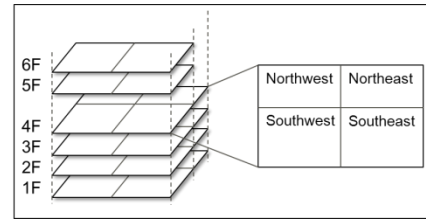


Fig. 4: Zones of the building

ゾーン毎の面積は完全な均等ではなく、実際の建物の構造を基に北側が少し小さいサイズとなっている。EnergyPlusの最小構成は以上のようなゾーンとなっているが、制御計画においては最初はフロア単位での制御を行うこととし、建物全体を同じ設定とする方式と比較するものとする。

前述のゾーン構成はEnergyPlusのものであり、SOARS上では従業員毎に普段勤務する事務室と自席があり、会議用には会議室への移動を行う。SOARSがEnergyPlusと共有する情報はゾーン単位での合計人数となる。EnergyPlusはゾーン内の人や機器の発熱や、日光、気流等の計算により、空調の負荷を計算するが、個々人の位置情報については考慮していない。

また、従業員数については全体で720人となる。SOARSでは従業員がエージェントとなり、出社、昼休み、退社、あるいは会議に際して移動を行う。SOARS上でエージェントは空間として定義されるスポット間を移動することになるが、各スポットはEnergyPlusのいずれかのゾーンに含まれるように対応付けられている。本稿のシミュレーションでは、SOARSから各時間帯において、それぞれのスポットに存在している人数を把握し、ゾーン毎に合計人数を集計して、EnergyPlusと制御計画の機能に情報を渡すようになっている。

次に、本稿の制御計画では、空調設定温度による空調需要の制御を対象とすることにした。設定温度を厳しくして空調需要を削減するとき、ビル内の従業員にとっては快適度が損なわれることになる。このため本稿の制御計画では、要求される節電目標量に対し、ビル内の従業員の快適度をなるべく損なわないように最適化を行うようにした。

空調需要の制御計画と、制御計画に必要な空調設定温度による空調需要の予測については以下に詳細を述べる。

#### 3.1 空調需要の予測（線形回帰）

最適化の前段階の処理として、空調設定温度の変化による空調需要の削減量を予測する必要がある。本稿では、外気温と各空調管理区間の設定温度を説明変数として、空調需要の回帰式を求めることとした。回帰式は以下のようになる。

$$p(t, T) = c^T t + dT + e + err$$

ただし、

$\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n)^T$  : 空調管理区間毎の設定温度[°C]  
 $T$  : 外気温[°C]  
 $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n)^T, d, e$  : 回帰係数

である。

$\mathbf{c}$ は各設定温度に対する回帰係数であり、夏場であれば設定温度が高くなるほど空調需要が減ると考えられるため、負の値となる。空調管理区間については、フロア単位を基準とすれば $n$ は6となるが、ゾーン単位を考えるとときには $n$ はゾーン数の20となる。

この回帰式は時刻毎に別々の式で求めることとしており、本稿では30分間隔でのシミュレーションを行うため、1日の各時刻に対して計48個の式が得られる。空調需要の予測削減量はこれらの式を用いて、設定温度が標準の場合の電力需要と、変化させた場合の電力需要の差を求めることで計算する。

回帰用の学習データについては、本来、予測日より過去のDR実施日のデータを集める必要があるが、本稿ではシステムを単純化するため、学習データ生成用に機械的な空調制御を行うシミュレーションを別途実施するようにした。このシミュレーションでは、日毎に別々に選択した1つの空調管理区間のみ標準温度+0.5~3.0°Cの設定温度とし、他の区間は標準温度に設定するようにした。DRは一般的に平日が対象となるため、学習用のシミュレーションでは全ての日を平日扱いとしている。

### 3.2 空調設定温度の最適化（二次計画法）

本稿のシミュレーションモデルにおける最適化の方式について説明する。ここでは、室温に基づいた集合的な快適度を目標関数とし、快適度をできるだけ悪化させないことを目標とする最適化問題としている。

まず、オフィスの温度環境に対する作業効率に対する関係は、多和田らにより以下のモデル式が推定されている<sup>12)</sup>。

$$\text{eff}(t) = -1.383(t - 25.67)^2 + 85.61$$

上記の式は、標準温度25.67°Cを頂点とした二次関数となっている。本稿のシミュレーションモデルは空調管理区間毎に設定温度を変えられるようになっているため、空調管理区間毎の人数 $\alpha$ で重み付けた値を本稿では集合的な快適度の指標として用いることにする。

$$\text{cfl}(t) = - \sum_i \alpha_i \{1.383(t_i - 25.67)^2 - 85.61\}$$

ここから快適度の目的関数を以下のように定める。

$$\text{cfl}^{(t)} = - \left\{ \sum_i \alpha_i t_i^2 - 2t_{STD} \sum_i \alpha_i t_i \right\}$$

ここでは、快適度が最大となる標準温度を25.67°Cから $t_{STD}$ とおき、さらに気温変化に影響する係数のみを残した。上記式の符号を反転し、最小化問題として以下のように定式化する。

$$t^* = \arg \min_t (t^T A t + b^T t)$$

制約条件は次式とする。

$$\begin{aligned} c^T t &\leq c^T t_{STD} - R \\ l_l &\leq t \leq u_l \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= \text{diag}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \\ b &= -2t_{STD} \alpha \\ p(t, T) &= c^T t + dT + e + \text{err} \end{aligned}$$

$\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n)^T$  : 空調管理区間毎の設定温度[°C]  
 $t_{STD} = (t_{STD}, \dots, t_{STD})^T, t_{STD}$  : 空調設定温度の標準値

$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)^T$  : 空調管理区間毎の人数[人]

$R$  : 空調需要の目標削減量[kWh]

$l_l$  : 設定温度の下限[°C]

$u_l$  : 設定温度の上限[°C]

$p(t, T)$  : 空調需要電力

$\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n)^T, d, e$  : 回帰係数

$T$  : 外気温[°C]

$T_{PRD}$  ; 外気温の予報値[°C]

とする。空調管理区間については空調需要の予測と同様にフロア単位が基準である。 $\mathbf{c}$ は空調需要の予測の回帰係数である。 $\mathbf{t}$ は各空調管理区間の設定温度であるが、 $\alpha$ はその空調管理区間に存在する人の人数を表している。空調需要の予測は時刻毎に別々であるが、空調設定温度の最適化についても同様に時刻毎に別々に求めることとする。

制約条件の1つ目の不等式は、

$$\begin{aligned} R &\leq p(t = t_{STD}, T = T_{PRD}) - p(t, T = T_{PRD}) \\ &= c^T (t_{STD} - t) \end{aligned}$$

を変形したものであり、空調需要の回帰式における外気温の項と定数項は相殺されて消えている。ここでは、室温は設定温度と等しくなると仮定する。また、 $t_{STD}$ および $l_l, u_l$ の値については、それぞれ26.0°C、26.0°C、29.0°Cで固定とした。さらに、最適化は実数解を計算するようにしているが、一般的な空調機器は0.5°C刻みの設定値であるため、シミュレーションに与える空調設定温度は0.5°C単位へ四捨五入するようにした。

$R$ はDRにおける電力需要の削減要請量であるが、いくつもの値を与えてそれぞれシミュレーションすることとする。ただし、 $R$ の値はDRを行わなかった場合の電力需要からの相対的な削減量とし、電力需要の絶対的な大きさは考慮しないものとする。

## 4 シミュレーション結果

最適化の効果を検証するため、本稿ではフロア単位の空調管理区間による最適化を行った場合と、建物単位による設定を行った場合のシミュレーション結果を比較した。建物単位は設定温度を組み合わせられないため、最適化しないケースとして考える。それぞれの方式について行ったシミュレーションの共通条件は下記の通りである。

Table 1: Terms of the simulation

DR target date	Hotday between 2012/8/1-8/10 (5 days)
DR target time	from 10:00 to 17:00
Reduction value	5.0, 10.0, 15.0, 20.0 [kwh] (4 values)

これらの条件で実行したシミュレーション結果に対し、快適度および削減量を計算した。ここでは快適度

の計算式における標準温度は、最適化と同様に26.0℃とした。

シミュレーションの結果は以下のようになった。



Fig. 5: Power curves of simulation results

上図はDRを実施した場合と、実施しなかった場合の総電力需要を表したものである。本稿のDRは空調需要の削減によって行っているため、DRの終了時に空調の負荷が大きくなる現象が起きている。

Table 2: Simulation results (comfort)

	Number of Set-Point	Reduction value [kwh]			
		5.0	10.0	15.0	20.0
Building-based	1	55661	53538	50298	46579
Floor-based	6	56088	54729	52102	47738
Improved rate [%]	-	0.77	2.22	3.59	2.49

上表より、同じ目標削減量を与えられたとき、フロア単位で最適化する方式の方が、建物単位で設定する方式より高い快適度を維持できていることを確認できる。本稿の最適化方式は人数の多い空調管理区間を優遇して全体の快適度を維持するものになっており、上表の結果はその効果を示している。空調管理区間をより細分化した最適化を行えば、より多くの人に対して快適度を改善できるものと考えられる。

一方で、最適化で得た設定温度に基づいて実際のシミュレーション結果を行ったとき、削減量は予測値に対して30%を超える誤差が生じた。本稿では、空調需要の予測に単純な線形回帰を用いたが、最適化の効果は予測精度に影響されるため、より精度の高い予測方式を検討することが望ましい。

## 5 おわりに

本稿では、BEMSに合った制御方式を検討するため、弊社事業所のビルをモデルとして、社会シミュレーションSOARSとビルシミュレーションEnergyPlusを組み合わせたエネルギーシミュレーションを構築した。このシミュレーションでは、SOARSによる人の動きとビ

ルシミュレーションを連携することで多様なシナリオを実施することが可能である。

本稿では、構築したシミュレーションを使って、従業員の快適度を考慮した空調設定温度の最適化を行った。空調管理区間毎の空調設定温度の最適化を行うことで、より快適度を抑えられることを確認した。しかし、削減量においては予測削減量と実際の削減量が合っていないケースがあり、空調需要の同定については改善を図りたい。

今後は、節電施策として輪番休日やタイムシフトを実施した場合の検証を行いたいと考えている。

## 参考文献

- 1) <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- 2) <http://www.soars.jp/>
- 3) 湯浅健史, 加藤丈和, 松山隆司: “スマートタップネットワークを用いたオンデマンド型電力制御システム”, 信学技報, USN2011-10, pp.25-30, July 2011.
- 4) 田村健人, 加藤丈和, 松山隆司: “オンデマンド型電力制御システムのための蓄電池設計と充放電管理”, 信学技報, 112(133), pp.37-42, 2012-07-19.
- 5) T. Kato, K. Yuasa, T. Matsuyama: “Energy on demand: Efficient and versatile energy control system for home energy management”, Second IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGrid-Comm2011), Brussels Belgium, pp.410-415, 2011.
- 6) H.Asano, M.Takahashi, N.Ymaguchi: “Market Potential and Development of Automated Demand Response System”, Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE.
- 7) S. Kiliccote, M. A. Piette, D. Hansen: “Advanced controls and communications for demand response and energy efficiency in commercial buildings”, presented at 2nd Carnegie Mellon Conference in Electric Power Systems: Monitoring, Sensing, Software and Its Valuation for the Changing Electric Power Industry, Pittsburgh, PA, 2006.
- 8) Jingran Ma, S.Joe Qin, Bo Li, Tim Salsbury: “Economic Model Predictive Control for Building Energy Systems”, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES.
- 9) 市川学, 小山友介, 出口弘: “階層構造を利用したシミュレーション環境の理論と構築”, JAWS2008, 2008.
- 10) 藤川琢哉, 小山友介, 出口弘: “エージェントベースモデリングを用いた携帯電話事業者のプラットフォーム戦略分析”, JAWS2008, 2008.
- 11) 高橋悟, 園田俊浩, 竹林知善, 太田博士, 市川学, 出口弘: “ABMを用いた節電施策の評価手法”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 SSI2011, 1C1-4, pp.64-66, 2011.
- 12) 多和田友美, 伊香賀俊治, 村上周三, 内田匠子, 上田悠: “オフィスの温熱環境が作業効率及び電力消費量に与える総合的な影響”, 日本建築学会環境系論文集, v.648, pp.213-219, 2010.