

空調用熱源システムの最適運転支援システムに関する研究
(第1報) 熱負荷予測手法の概要

正会員 ○田中 翔大*1 同 村上 公哉*2
非会員 小川 彰彦*3 同

熱負荷予測
空調用熱源システム

負荷変化量予測手法
最適運転支援

EFP(誤差率)
最適運転支援

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現に向けて建物だけでなく地区レベルのエネルギーの面的利用が期待されている。エネルギーの面的利用の代表システムの1つが地域熱供給システムであり、近年ではコージェネレーションシステム(以下、CGS)等の自立分散型電源を用いて需要家建物に対して平常時に熱のみならず電気も供給する熱電一体供給が増えつつある。

この際、発電時に発生する排熱を熱供給設備で活用し高効率な熱供給を行うため、複雑な運転計画が求められ、需要家建物の電気と熱の需要予測に基づくCGS・熱源システムの運転計画の最適化が必要不可欠となる。

そこで本研究では、空調用熱源システムの最適運転により省エネルギー化に寄与する運転支援システムの開発を目的とする。本報では、提案する運転支援システムの概要と、熱負荷予測手法の概要及び予測結果を報告する。

2. 最適運転支援システムの概要

図1に本研究で提案する最適運転支援システムのイメージを示す。本システムは、大きく2つの要素から成り立つ。

(1) 負荷予測手法

過去の運転実績データベースとリアルタイムデータを用いて当日(あるいは翌日)の1日単位の時刻別熱負荷を予測する。また、負荷予測は予測日の前日夜間に翌日の負荷を予測する翌日負荷予測と、予測日の始業時間前頃に当日の負荷を予測する当日負荷予測がある。後述する負荷予測手法では当日負荷予測について説明する。

(2) 予測負荷に対する最適運転パターンの提示

予測負荷を基に最適運転パターンデータベースから予測負荷に対する最適運転パターンを提示する。データベースは、建物の負荷パターンと負荷パターン毎に紐づけされた最適運転パターンで構成されている。そして、予測負荷に類似する負荷パターンをデータベースから抽出し、その負荷に紐づけられた熱源システムの最適運転パターンを運転計画として運転制御に用いる。熱源システムの運転制御では、オペレーターによる手動での運転制御とRPA(Robotic Process Automation)等を用いた自動運転によるエネルギーマネジメントでの活用を想定している。

3. 負荷変化量予測手法の概要

本負荷予測手法には、E.I.E(株式会社E.I.エンジニアリングソリューション)が開発した特許6118975号¹⁾による予測手法を用いている。既往研究で発表されているほとんどの負荷予測手法では、過去の実績データや気象データ等

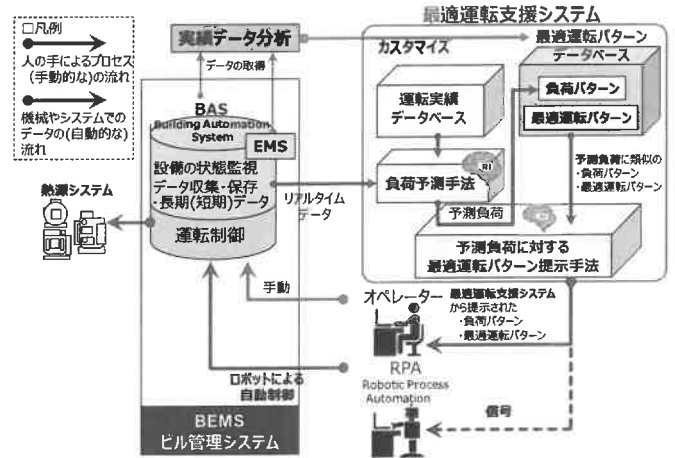


図1 最適運転支援システムの概要

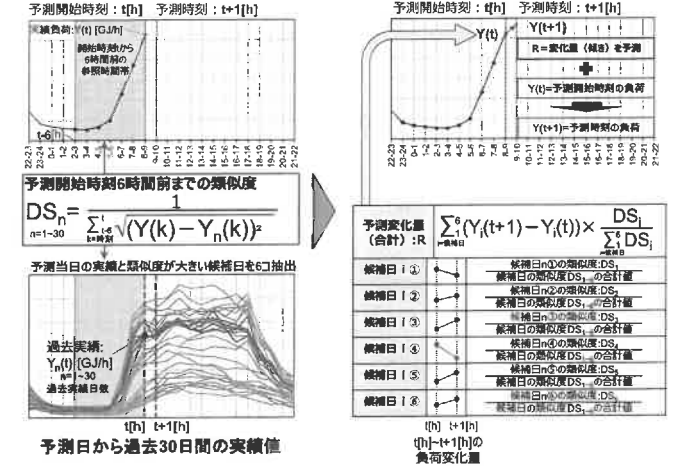


図2 負荷変化量予測手法の概要

の複数の予測因子を用いて予測時刻の負荷絶対量を予測している。一方で本手法は、過去の実績データのみを用いて任意のデータ間隔で予測開始時刻の実績値から予測時刻までの負荷変化量を予測するのが特徴である。

なお、この手法では電力負荷予測は実施されてきたが、熱負荷予測は建物の時刻別レベルの詳細な熱負荷データが必要であり、ま調査・収集が困難である等の理由から、予測精度結果は報告されていない。以下に本負荷予測手法の概要を記す。

(1) 予測当日の実績値と類似度が高い候補日の選出

図2に負荷変化量予測手法の概要を示す。本報では図2左上のグラフに示すように、予測開始時刻(t)を9時(8-9)として、1時間後の予測時刻(t+1):10時(9-10)に記録される9時台の負荷を予測する場合を説明する。

グラフの青色で塗られた予測開始時刻(t):9時(8-9)から

6 時間前(t-6) : 3 時(2-3)までを参照時間帯とし、プロットで示された当日実績値と図 2 左下のグラフに示す予測日から過去 30 日間同時刻の実績値を用いて、予測日の実績値に対する過去 30 日分の実績値の類似度(DS)を図 2 左側中央の赤枠の式で求める。式 1 にその詳細を記す。

$$DS_n = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \sqrt{(Y(k) - Y_n(k))^2}} \dots\dots\dots(1)$$

DS : 類似度
 Y(k) : 参照時間帯(予測開始時刻-6 時間前)の当日実績値
 Y_n(k) : 参照時間帯(予測開始時刻-6 時間前)の過去実績値
 n=データ数

類似度は参照時間帯における同時刻の当日実績値と過去実績の二乗誤差平方根の合計値 (6 時間分) の逆数である。そして、この値が大きい候補日(i)を図 2 左下のグラフの赤線の時刻別負荷推移に示すように過去 30 日間の中から 6 個抽出する。

(2) 変化量の予測

次に図 2 右下の表の上部の式に示すように、各候補日(i)の予測時刻の負荷(Y_{i(t+1)})と予測開始時刻の負荷(Y_{i(t)})の差に類似度から算出される重み係数を乗じ、候補日 6 個の合計値を予測変化量(R)とする。式 2 にその詳細を記す。

重み係数は図 2 右下の表の下部に示すように、各候補日の類似度を全候補日の類似度の合計値で除した値である。

$$R = \sum_{i=1}^6 (Y_i(t+1) - Y_i(t)) \times \frac{DS_i}{\sum_{i=1}^6 DS_i} \dots\dots\dots(2)$$

R : 予測変化量
 Y_{i(t+1)} : 候補日の予測時刻の過去実績値
 Y_{i(t)} : 候補日の予測開始時刻の過去実績値
 DS_i : 候補日の類似度
 i=抽出した候補日

そして図 2 右上のグラフに示すように、予測時刻 : 10 時(9-10) に記録される 9 時台の負荷(Y_(t+1))は、予測開始時刻 : 9 時 (8-9) の負荷(Y_(t))に予測変化量(R)を加算し算出する。なお、上記の予測開始時刻(t)や類似度算出時の参照範囲等は建物個々に空調システムの使用状況や負荷予測結果などを考慮してチューニングすることが可能である。

(3) 24 時までの毎時負荷変化量の予測

次の予測時刻(t+2) : 11 時 (10-11) に記録される 10 時台の負荷を予測する場合、予測開始時刻が 10 時(t+1)となる。そのため、算出した 9 時台の予測負荷(Y_(t+1))を実績値として扱い、類似度の算出に用いる参照時間帯も予測開始時刻(t+1) : 10 時から 6 時間前(t-5) : 4 時までとする。

そして、類似度が高い候補日の選出プロセスから繰り返すことで 1 時間ごとの予測負荷を算出し、これを 24 時まで続け 1 日の時刻別予測負荷推移を算出する。

4. 負荷変化量予測手法の予測結果

東京都中央区に立地する実建物の 2018 年度・2019 年度の BEMS データを用いて平日冷房負荷の熱負荷予測を行った。予測精度は EEP を採用する。式(3)に算出式を示す。

$$\text{日別 EEP} [\%] = \frac{RMSE}{t_{max}} \times 100 \dots\dots(3)$$

$t_{max} = 1 \text{ 日の実績負荷の最大値} [GJ/h]$

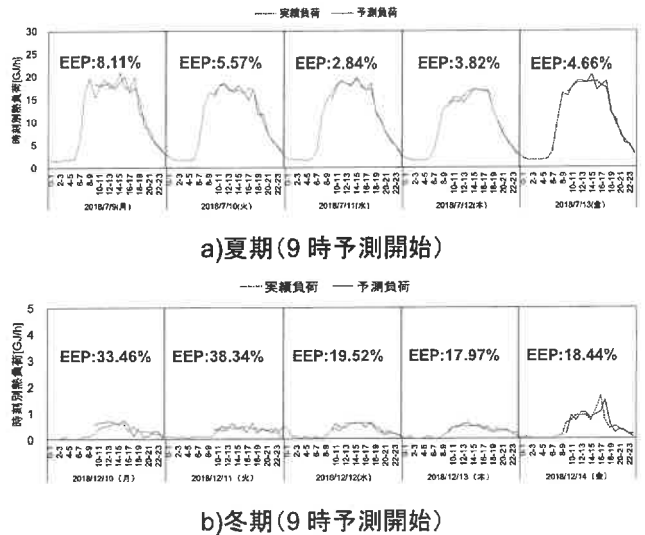


図 3 冷房負荷の実績値と予測値の時刻別推移の比較結果

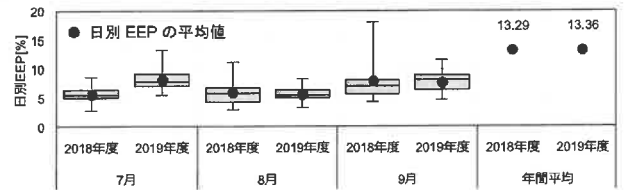


図 4 日別 EEP の各月の分布と月平均・年間平均 (冷房負荷)

図 3 に実績負荷と予測負荷の時刻別推移の比較結果を示す。夏期では予測推移は実績値と同程度であり、EEP も 10% 以下の値を示した。冬期では予測推移は実績値と同程度であったが EEP が大きい値を示した。これは EEP を一日のピーク負荷で除して算出するため負荷の小さい日では EEP が大きくなる傾向にあるためだと考えらえる。

図 4 に 2018 年度・2019 年度平日冷房負荷における日別 EEP の月平均と年間平均を示す。月毎のグラフでは箱ひげ図で日別 EEP の分布も示す。年間の日別 EEP 平均値は 2018 年度では 13.29[%]、2019 年度では 13.36[%]と同程度の予測精度であった。また、7 月～9 月の日別 EEP 平均値は 2018 年度・2019 年度ともに 10[%]以下であった。

5. まとめ

空調用熱源システムの最適運転支援システムに用いる熱負荷予測手法の概要を説明し、実建物の BEMS データを用いて予測精度の確認を行った結果以下の知見を得た。

- 1) 負荷変化量予測手法は過去の実績データのみを用いて予測時刻の絶対値ではなく、予測開始時刻から予測時刻までの負荷変化量を予測するのが特徴である。
- 2) 2018 年度・2019 年度の日別 EEP の年間平均値は約 13[%]であり 7 月～9 月平均値では 10[%]以下であった。

謝辞

本研究のために貴重なデータをご提供いただきました建物関係者の皆様、そして共同研究者の野泰彦氏 (当時、芝浦工業大学卒研)、松田薫乃氏 (当時、芝浦工業大学大学院修士課程) に厚くお礼申し上げます。

参考文献

1) 株式会社 E.I.エンジニアリング : 特許 6118975 号, エネルギー予測システム、エネルギー予測システムの動作方法、これを実行させるためのコンピュータプログラム及びこのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体並びに運転支援システム

*1 長崎総合科学大学工学部工学科建築学コース・助教・博士 (工学)
 *2 芝浦工業大学建築学部建築学科・教授・工学博士
 *3 株式会社 E.I.エンジニアリング

*1 Assist. Prof., Nagasaki Institute of Applied Science, Dr.Eng
 *2 Prof., School of Arch., Shibaura Institute of Technology, Dr.Eng
 *3 E.I.Engineering Company