

負荷予測の誤差を考慮した空調システム運用の最適化手法の開発

住吉, 大輔
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻博士後期課程

赤司, 泰義
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

和田, 晃史
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

林, 徹夫
九州大学大学院総合理工学研究院

<https://doi.org/10.15017/19065>

出版情報：都市・建築学研究. 8, pp.101-107, 2005-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

負荷予測の誤差を考慮した空調システム運用の最適化手法の開発

Development of Optimization Methods for Air-Conditioning System Operation Considering Thermal Load Prediction Errors

住吉大輔*¹, 赤司泰義*², 和田晃史*³, 林 徹夫*⁴

Daisuke SUMIYOSHI*¹, Yasunori AKASHI*², Akifumi WADA*³
and Tetsuo HAYASHI*⁴

This study is concerned with development of optimization methods for building air-conditioning system operation considering thermal load prediction errors. A building air-conditioning system is conventionally operated under different set-points which are not almost changed through a year. Further energy savings for air-conditioning, however, can be achieved if these set-points are optimized according to the situations which change hour by hour. In this paper, prediction methods for weather data needed for calculation of building thermal loads and optimization methods for air-conditioning system operation are examined and newly proposed. The numerical simulation results based on the proposed methods show that reduction rate of air-conditioning system energy consumption is improved more than an existing method.

Keywords : Air-conditioning system, Energy conservation, Optimization, Simulation
空調システム, 省エネルギー, 最適化, シミュレーション

1. はじめに

空調システムの省エネルギーを実現するためには、「建物計画による空調負荷の削減」、「適切な空調システムの採用と設計」に加えて、「空調システムの適切な運用」が不可欠である。しかしながら、これまでは「建物計画による空調負荷の削減」、「適切な空調システムの採用と設計」に重点が置かれており、「空調システムの適切な運用」に関しては室温湿度や機器の運転状況の確認といった初歩的な日常業務に留まり、消極的な運用しかなされてこなかったという問題がある。そこで本研究では、通常の空調システムにおいて固定的に扱われている設定値（例えば、予冷・予熱運転の開始時刻、室温設定、熱源機器の出口温度、給気温度など）を日々刻々と変化する状況に応じて最適な設定にすることによって「空調システムの適切な運用」を実現し、その省エネルギー効果を明らかにする。特に、空調システムを長期にわたって使用する場合、設計時には想定していなかった建物用途の変更や機器の増減による内部発熱の大幅な変化、機器の劣化等が発生するが、その際に状況に応じた設定値の変更が

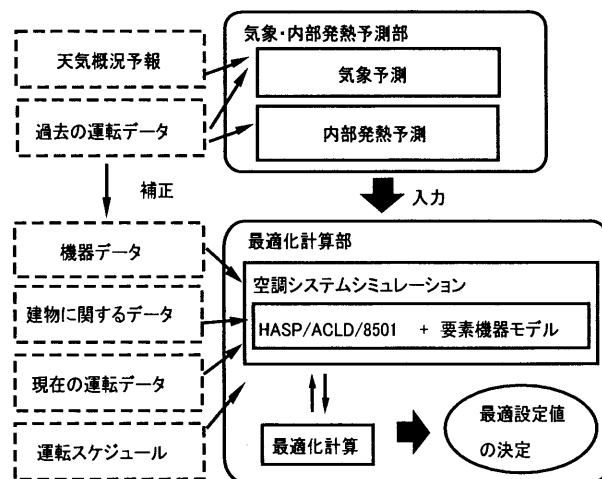


図1 空調システム運用の最適化概念図

実施されることは稀であり、不適切な設定値であるために非省エネルギーな運転となっている可能性がある。こうした状況を改善するためにも、設定値を状況に応じて最適にする必要性があり、その技術として空調システム運用の最適化を位置付ける。

本研究における空調システム運用の最適化は気象・内部発熱予測部と最適化計算部とに分けられる(図1)。気象・内部発熱予測部では、過去の運転データ等から気象・

*1 空間システム専攻博士後期課程
*2 都市・建築学部門
*3 空間システム専攻修士課程
*4 九州大学大学院総合理工学研究院

内部発熱予測を行う。それらを入力として、最適化計算部では建物の熱負荷計算に HASP/ACLD/8501¹⁾ (以下 HASP) を用いた空調システムシミュレーションを行い、最適化手法により給気設定温度や熱源出口設定温度といった各種設定値の最適値を算出し、変更・更新を行うことで1日のエネルギー消費量を最小にすることを考える。

本報では、気象予測のみを取り上げ、それに伴う負荷予測の誤差を考慮した空調システム運用の最適化手法を提案し、シミュレーションによりその効果を検討した。

2. 空調システム運用における最適化手法の開発

空調システム運用における最適化手法の開発方針を以下に示す。

- 1) 建物の熱負荷を予測する場合にコイル処理熱量といった過去の負荷実測値を用いる方法もあるが、コイル処理熱量は実現された室温に対するものであるため、設定室温の変更や予冷予熱運転を取り入れた最適化は困難となる。そのため、気象・内部発熱をそれぞれ予測し、それらを入力する建物の熱負荷計算を行う。
- 2) 高い精度の気象・内部発熱予測を行うには多くのセンサーを設置することが必要である。しかし、空調

システム運用の最適化手法導入による費用対効果を考慮した場合、新たなセンサーの設置は最小限に抑える必要がある。最適化のためだけに新たにセンサーを設置することは考えず、空調システムの通常の制御等で設置される基本的なセンサーにより得られるデータを利用する。

- 3) 気象・内部発熱予測には必ず誤差が伴う。しかし、これまでに研究されてきた最適化手法のほとんどが負荷予測は正確に行えることを前提に開発されており、誤差を含む予測熱負荷を用いた際の最適化効果については明らかにされていない。本研究では負荷予測の誤差を確率的に考慮した最適化手法の開発を行う。

本報では、九州大学筑紫キャンパスに位置する HVAC&R 実験解析システムを対象とする。写真1に HVAC&R 実験解析システムの外観を示す。HVAC&R 実験解析システムは一般に広く導入されているエアハンドリングユニットを使用した中央供給方式を採用している。熱源機器は ON/OFF 運転を行う。各階の VAV ユニットは室温が設定温度となるようにダンパ開度を制御し、風量を調節する。1階平面図、断面図、空調システム図を

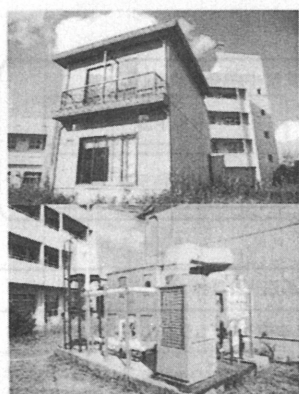


写真1 HVAC&R 実験解析システム外観

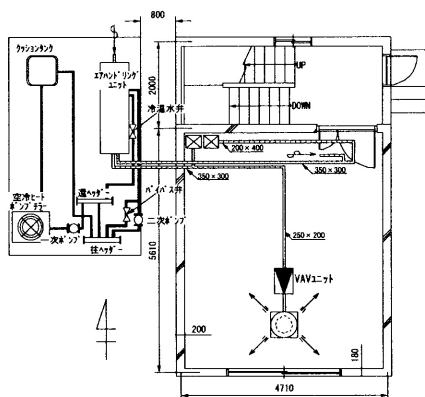


図2 1階平面図 (単位: mm)

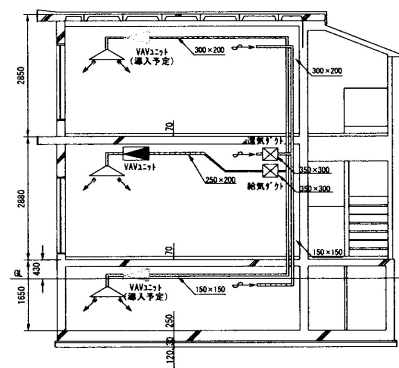


図3 断面図 (単位: mm)

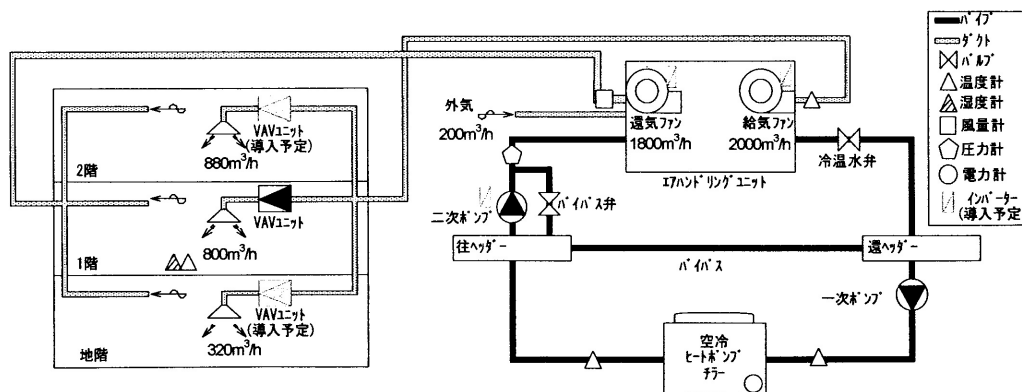


図4 空調システム図

図2, 図3, 図4に示す。建物概要, 空調システム概要を表1, 表2に示す。

3. 気象予測

3.1 気象予測方法

HASP の入力に必要な外界気象は外気温度, 外気絶対湿度, 法線面直達日射量, 水平面天空日射量, 雲量, 風向, 風速の7項目である。外気温度, 外気絶対湿度の予測には ARIMA モデル²⁾を用いる。ARIMA モデルは時系列データを簡潔なモデルで記述するもので, 近未来のデータがこのモデルに従うと考えると予測を行う。過去1週間分のデータを差分操作で近似的に定常なデータに変換し, 式1のモデル誤差が最小となるパラメータを準ニュートン法で同定し, そのモデルを用いて1時間間隔で9時~翌日8時までの1日分を予測する。

$$y_t = \sum_{i=1}^m a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^l b_j v_{t-j} + v_t \quad (式1)$$

ここで, y_t :時刻 t における値, a_i :ARパラメータ[-], b_j :MAパラメータ[-], v_t :時刻 t におけるモデル誤差で平均0, 分散 σ^2 の正規分布に従う白色雑音[-]

水平面全天日射量と雲量は天気と強く相関があると考え, 天気予報を用いて予測を行う。そのため過去の気象データと天気予報の分析を行った。まず, 1991年~1995年の気象データ(福岡)³⁾の雲量・降水量から, 表3の天気概況の用語定義に基づいて実際の天気概況を判別した。次に判別した天気概況を表4に示す天気区分に分け, 天気区分ごとに基準値を作成する。天気区分を5種類としているのは発生頻度の少ない天気概況までも区分として用いることは不適切と考えたからである。水平面全天日射量の予測では, まず, 日積算全天日射量を日積算大気圏外日射量で除した値を基準化日射量(無次元)⁴⁾とし, この基準化日射量の月別平均を月別基準化日射量として算出する(表5)。予測対象日の前日18時に気象庁が発表する天気予報⁵⁾に基づいて天気区分に対応する基準化日射量を選択し, 式2から水平面全天日射量を予測する。式2は終日一定の割合(月別基準化日射量)で大気圏外の日射が減衰し地表に到達することを意味している。予測した水平面全天日射量を直散分離手法³⁾により法線面直達日射量と水平面天空日射量に分離し予測値とする。

$$J_{N,j} = \frac{1}{L^2} \eta_N I_0 \sinh j \quad (式2)$$

ここで, $J_{N,j}$:水平面全天日射量[kW/m²], L :太陽と地球の距離/太陽と地球の平均距離[-], η_N :月別基準

表1 建物概要

所在地	福岡県春日市(九州大学大学筑紫キャンパス)
用途	実験棟
建築面積	35.84m ²
延床面積	107.53m ²
階数	地下1階, 地上2階
高さ	軒高6.15m, 1階階高2.70m
構造	壁式鉄筋コンクリートパネル造(階段室は木造)

表2 空調システム概要

名称	機器仕様	
エアハンドリングユニット	冷却能力	10.5 kW
	加熱能力	10.5 kW
	冷温水流量	1.86 m ³ /h
給気ファン	定格風量	2000 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
還気ファン	定格風量	1800 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
加湿器	気化式	
	有効気化量	2.0 kg/h
空冷ヒートポンプチラー	冷却能力	12.5 kW
	加熱能力	15 kW
	定格消費電力: 加熱時	5.2 kW
	定格消費電力: 冷却時	5 kW
一次ポンプ	ライン型	
	冷温水流量	2.7 m ³ /h
	定格消費電力	0.4 kW
二次ポンプ	ライン型	
	冷温水流量	2.4 m ³ /h
	定格消費電力	0.4 kW
往ヘッダー	寸法	φ65×L800
還ヘッダー	寸法	φ65×L800

表3 天気概況の用語定義

晴れ…雲量が9未満
曇り…雲量が9以上
雨…雨量が観測
晴れ後曇り…予報した期間の前半が晴れで, 後半が曇り
晴れ時々曇り…予報した期間の1/4以上1/2未満が断続的に曇り
晴れ一時曇り…予報した期間の1/4未満が連続的に曇り

表4 天気概況による天気区分

天気区分	天気概況
1	快晴, 晴れ
2	薄曇り, 晴れ(一時, 時々)(曇り, 雨)
3	晴れ後曇り, 曇(後, 一時, 時々)晴れ
4	曇り, 曇り(時々, 一時)晴れ(時々, 一時)雨
5	曇り(後, 一時, 時々)雨, 雨(後, 一時, 時々)曇り, 雨

化日射量[-], I_0 :太陽定数 (=1367) [kW/m²], h_j :太陽高度[deg]

雲量の予測については、天気区分ごとに月別平均雲量を算出した(表6)。水平面全天日射量予測と同様に天気予報を用いて表6から予測対象日の雲量を選択し、その雲量が1日中続くものとする。

風向・風速に関しては予測を行わず、すきま風の換気回数を0回/hと設定する。こうした設定を行うのは、最適化手法を適用する対象建物として事務所ビルを想定していて、近年の多くの事務所ビルは気密性が高いことから建物熱負荷への風向・風速の寄与は小さいと考えられるためである。

3.2 気象予測結果

1995年の気象データ(福岡)を用いて1年間の気象予測を行った。代表日として10月1日から14日の実測値と予測値の比較を図5に、雲量・降水量の実測値から判別した実際の天気区分と天気予報の天気区分を表7に示す。また、図6に各予測値の月別平均誤差を示す。ARIMAモデルを用いた外気温度予測、外気絶対湿度予測は前日と大きく挙動が変わると誤差が大きくなる傾向が見られた。また、水平面全天日射量予測、雲量予測は天気予報のみを利用しているため、天気予報が大きく外れると誤差が大きくなった。年間平均誤差は外気温度 2.13K, 外気絶対湿度 1.63g/kg (DA), 水平面全天日射量 125.7W/m², 雲量 1.95 となった。

3.3 気象予測値を用いた熱負荷

前節の気象予測値を用いた熱負荷予測誤差を検討するため、気象予測値と1995年気象データ(福岡)を用いてHASPによる熱負荷計算を行った。計算時間間隔は5分、空調時間帯は9時から18時とし、気象予測は空調開始時刻の1時間前である8時から1日分を行う。設定室温は冬季(12月から3月)20℃, 中間季(4,5,10,11月)24℃, 夏季(6月から9月)28℃, 設定湿度は50%である。各部屋の全熱負荷を加算して建物熱負荷とした。図7に10月1日から14日の気象予測値を用いた場合と実測値を用いた場合の熱負荷とその誤差・相対誤差を、図8に日積算負荷の相対誤差出現頻度(年間, 2月, 8月, 10月)を示す。日積算熱負荷は年間で相対誤差±10%が全体の41%, 相対誤差±30%が全体の77%となった。8月では全体が相対誤差-30%から+10%以内となっているのに対し、2月では-30%から+90%にまで広がる。10月においても8月, 2月とは違った分布になっており、季節変動とともに相対誤差出現頻度の様子が大きく変化することが分かる。

表5 月別基準化日射量 [-]

	天気区分				
	1	2	3	4	5
1月	0.557	0.453	0.294	0.184	0.185
2月	0.62	0.513	0.363	0.183	0.164
3月	0.674	0.518	0.287	0.161	0.196
4月	0.641	0.544	0.272	0.181	0.202
5月	0.617	0.492	0.237	0.214	0.219
6月	0.542	0.382	0.299	0.272	0.171
7月	0.542	0.382	0.299	0.272	0.171
8月	0.545	0.376	0.266	0.223	0.174
9月	0.508	0.425	0.269	0.170	0.169
10月	0.493	0.414	0.234	0.194	0.190
11月	0.499	0.386	0.238	0.122	0.177
12月	0.494	0.383	0.275	0.164	0.203

表6 月別平均雲量 [-]

	天気区分				
	1	2	3	4	5
1月	3	5	8	8	9
2月	3	5	7	8	9
3月	2	5	8	8	9
4月	2	5	7	8	9
5月	2	5	7	8	9
6月	2	6	7	8	9
7月	2	6	7	8	9
8月	1	5	7	7	9
9月	1	5	7	8	9
10月	2	5	7	8	9
11月	2	5	7	8	9
12月	3	6	8	8	8

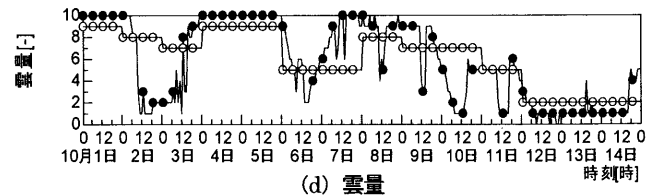
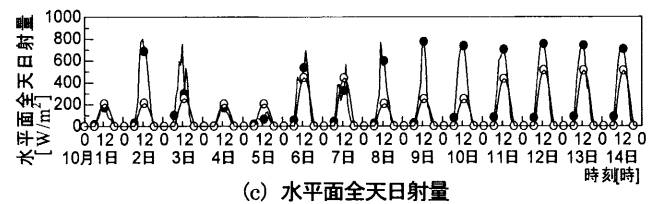
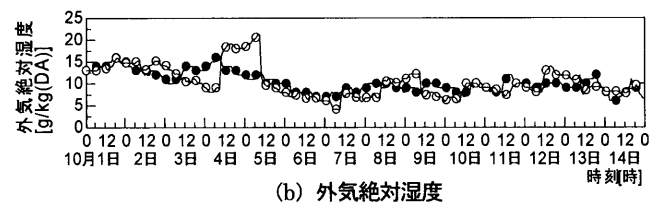
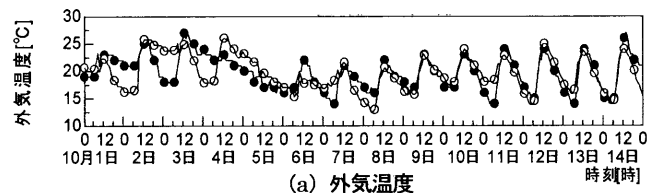


図5 気象予測値と実測値の比較 (●:実測値, ○:予測値)

表7 実際の天気の天気区分と天気予報の天気区分

日付	10月													
	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日
実際の天気	5	2	2	5	5	1	3	3	3	1	1	1	1	1
天気予報	5	4	3	5	5	2	2	4	3	3	2	1	1	1

4. 負荷予測の誤差を考慮した最適化手法

最適化計算において、その入力となる気象・内部発熱予測には必ず誤差が伴う。この誤差を考慮するために以下に示す2種類の手法を考える。

1) 手法1：予測期間を短くする

外気温度・外気絶対湿度予測では、過去の実績値を用いて予測を行っているため、既知のデータが存在する時刻に近い時刻の予測値ほど精度が高くなる。ここで、予測期間を短くした場合の予測値の概念図を図9に示す。前日23時に1日分の外気温度の予測を行った場合に比べ、当日11時に新しく得た既知のデータを利用して予測値を更新した場合の方が予測値の精度が向上する。したがって、空調時間帯中1時間ごとに設定値の変更を行う場合、8時の時点で空調時間帯終了時刻までを予測して各時刻の設定値を決定するよりも1時間ごとに負荷予測値を更新することで負荷予測の精度向上が図れる。

2) 手法2：負荷予測の誤差分布を考慮する

空調システム運用の最適化を実施した際に、負荷予測の誤差が及ぼす影響として危惧される状況を図10に示す。負荷予測の誤差は式3により算出される。

$$m_r = \frac{Q_p - Q_r}{Q_r} \times 100 \quad (\text{式3})$$

ここで、 m_r :負荷予測の誤差[%]、 Q_p :負荷予測値[MJ]、 Q_r :実際の負荷[MJ]

最適化手法の多くは負荷予測の誤差はないものと仮定しているため、誤差0%の負荷予測値に対して最適な設定値を選択している。図10の例では、設定値Bとした場合のエネルギー消費量の方が設定値Aとした場合よりもエネルギー消費量はわずかに小さいため、設定値Bが選択される。しかし負荷予測の誤差が-20%であった場合には、設定値Aとした方が有利であり、設定値Bでは大きくエネルギーを損失する。誤差を考慮すれば設定値Aの方が確実性が高い設定値であると判断できる可能性がある。こうした状況を考慮して設定値を選択する方法として、誤差0%だけでなく、-20%や+20%でも最適化計算を行い、各負荷予測誤差における計算結果をその出現頻度に応じて重み付けして評価することを考える。

5. シミュレーションによる検討

4章で示した手法の効果をシミュレーションにより検討した。以下にその概要を示す。

5.1 計算方法

対象建物において1995年10月8日の気象データ（福岡）を用いてHASPにより算出した熱負荷を実測値と見なし、一方、3.1節で示した気象予測値を用いて同じくH

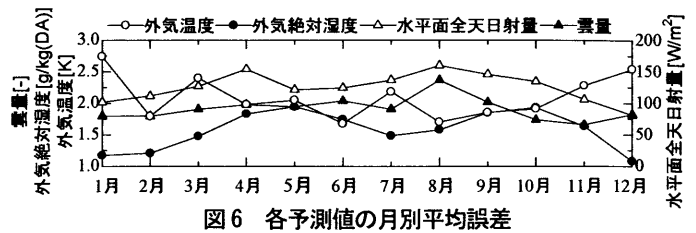


図6 各予測値の月別平均誤差

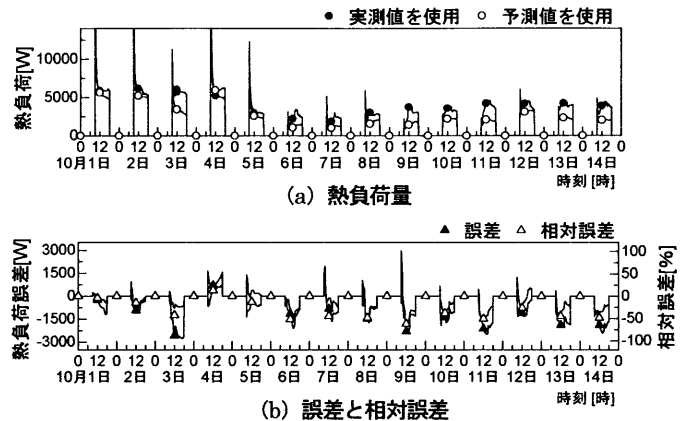


図7 気象予測値、実測値を用いた負荷計算結果の比較

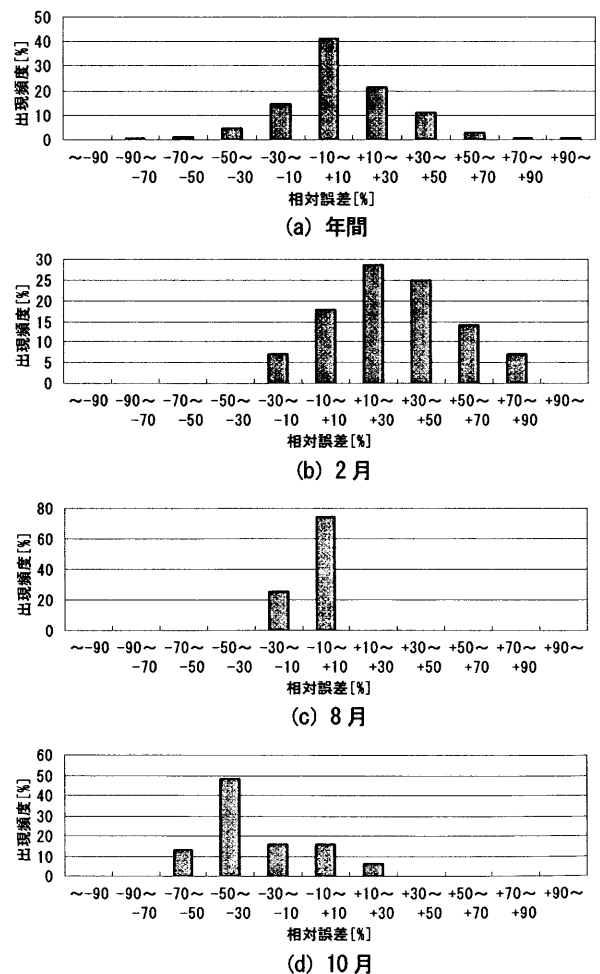


図8 日積算負荷の相対誤差出現頻度

ASPにより算出した熱負荷を予測値とする。空調時間帯は9時～18時、計算時間間隔は5分とした。空調システムの電力消費量の計算は、各要素機器をサブシステムとしてモデル化して、システムの挙動を再現するシミュレーションモデルを構築して行った。最適化計算には遺伝的アルゴリズム⁶⁾を採用し、図11に示すフローで計算を行った。

空調システム運用の最適化は、機器の劣化や建物用途の変更等、設計時とは異なる条件下において最適な運転状態を考えることに意味がある。そこで本報では、室内機器発熱が設計時よりも増加した状況を想定した。室内機器発熱を表8に示す。

最適化計算では、空調時間帯中1時間ごとに、給気設定温度として16/17/18/19/20℃のいずれか、熱源出口設定温度として7/8/9/10/11℃のいずれかを選択し、最も評価値が小さくなる設定値の組み合わせを求める。評価値は式4で算出した。式4は、室温湿度を許容範囲内に納めた上で電力消費量が小さいものほど評価値が小さくなる。したがって、1日の電力消費量を制約条件の中で最小にすることを目的とした計算となっている。

$$V = E + Pt + Ph \quad (式4)$$

ここで、 V :評価値[-]、 E :システムの日積算電力消費量[kWh]、 Pt :室温が設定室温 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内でない場合のペナルティ[-]、 Ph :室相対湿度が40～70%に収まらない場合のペナルティ[-]

検討ケースを以下に示す caseA から caseF とした。

caseA: 設計時の設定値である給気設定温度18℃、熱源出口設定温度7℃で一定としたケース。

caseB: 実測値(1995年10月8日の気象データ(福岡))を用いて算出した熱負荷により最適化計算を実施したケース。

caseC: 8時の時点での負荷予測値を用いて1日分の設定値を決定したケース。

caseD: 8時から16時までの毎正時での負荷予測値を用いて各時刻の設定値を決定したケース(手法1)。

caseE: 計算対象日の前日までの2週間の誤差分布を時刻ごとに算出する。図12に10月8日の8時の時点での計算に使用した予測負荷の誤差分布を示す。出現した誤差を含むと考え補正した数点の負荷(図12の例では-60/-40/-20/0/+20の5点の負荷)に対して、それぞれ最適化計算を実施し評価値を出現頻度で加重平均して設定値を決定したケース(手法2)。

caseF: 8時から16時までの毎正時の負荷予測値を用いて各時刻の設定値をcaseEの計算方法で決定したケース(手法1+手法2)。

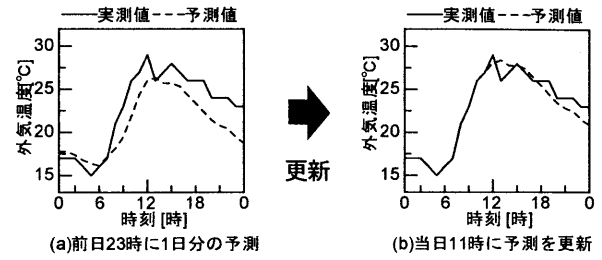


図9 予測期間を短くした場合の予測値(概念図)

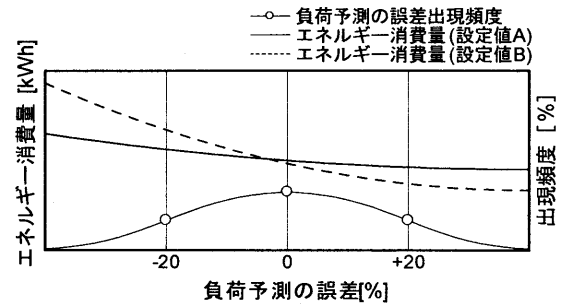


図10 負荷予測の誤差とエネルギー消費量の関係(概念図)

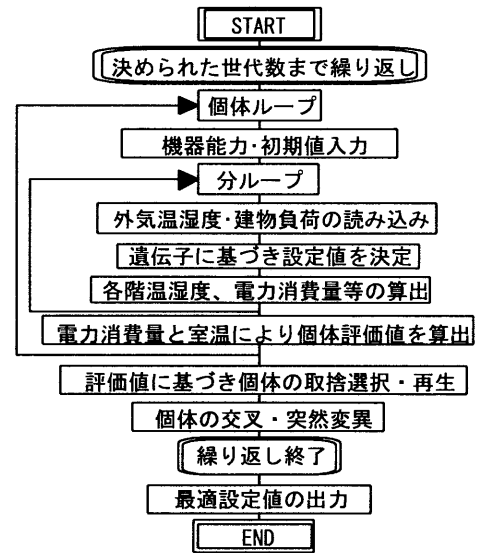


図11 最適化計算フロー

表8 室内機器発熱

	設計時	最適化計算時
	顕熱	顕熱
地階	0W	120W
1階	120W	240W
2階	120W	240W

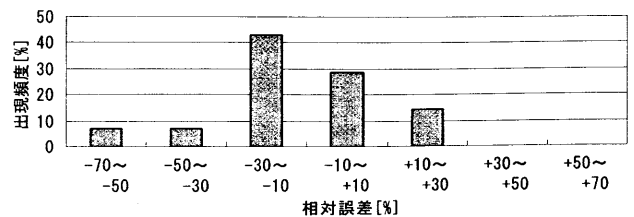


図12 負荷予測の誤差分布

5.2 計算結果

図13に各ケースの熱源出口設定温度の推移を示す。給気設定温度は全ケースともほぼ全ての時間帯で16°Cが選択された。その要因として、ファンのインバータ制御を行っているためにファン風量を絞ることによる電力消費量削減効果が非常に大きいことが挙げられる。各ケースの電力消費量を図14に示す。図14にはcaseAに対する各ケースの電力消費量削減率を併せて示している。caseBの結果より負荷予測が完全に行えたならば電力消費量を19%削減できることが分かる。それに対して8時の時点での負荷予測値を使用して最適化計算により設定値を決定したcaseCでは電力消費量削減率に6%の開きがある。しかし手法1を採用したcaseDでは、電力消費量削減率17%でありその開きは2%に抑えられた。各時刻における負荷予測値を図15に、各時刻における1日の空調時間帯の積算負荷相対誤差を図16に示す。予測期間を短くすることで予測精度が向上しているのが分かる。その結果としてcaseDでは電力消費量削減率の向上に繋がったと考えられる。caseEでは電力消費量削減率は15%となり、8時の時点での負荷予測値を使用して最適化計算により設定値を決定したcaseCよりも電力消費量削減率は2%上がった。手法1と手法2を組み合わせたcaseFでは電力消費量削減率は19%であり、負荷予測が完全に行えると仮定して計算を行ったcaseBとほぼ変わらなかった。今回の検討では計算期間が1日であり、手法による最適化効果を十分に把握したとは言い難いため、長期にわたりシミュレーションを行って検討する必要がある。

6. おわりに

本報では、空調システムシミュレーションの入力として用いる気象データの予測について検討を行い、負荷予測に誤差が含まれることを考慮した最適化計算手法を提案した。その最適化効果をシミュレーションにより検討した結果、負荷予測の誤差を考慮することによってエネルギー消費量削減率の向上が見られた。

今後は、既知として扱っていた内部発熱についても予測手法を提案し、シミュレーションの対象期間を年間へと拡張するとともに、実測調査を実施して、提案した手法の効果をより詳細に検証する。

謝辞

本研究は21世紀COEプログラム「循環型住空間システムの構築」(拠点リーダー:川瀬博九州大学大学院教授)から多大なご協力を頂きました。ここに記して、深く感謝申し上げます。

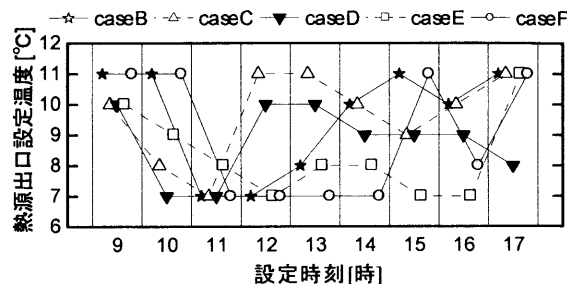


図13 熱源出口設定温度の推移

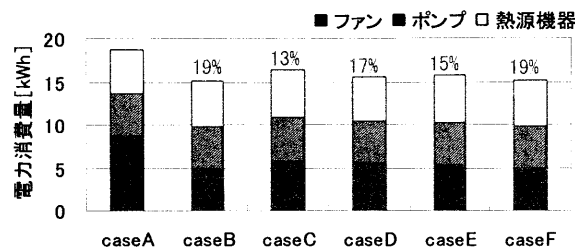


図14 各ケースの電力消費量

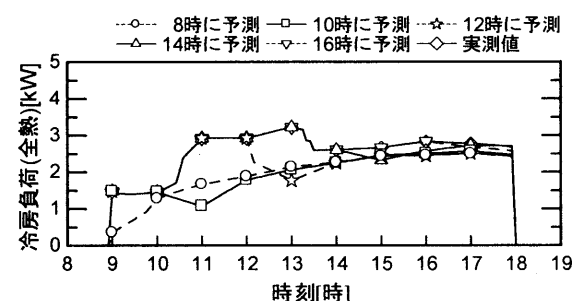


図15 各時刻における負荷予測値

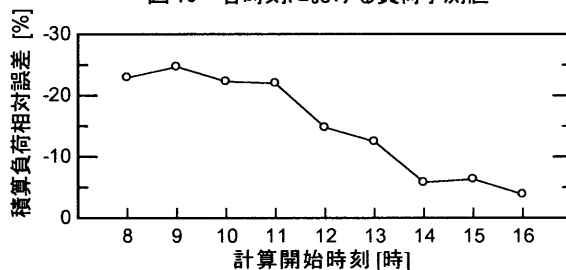


図16 各時刻における積算負荷相対誤差

参考文献

- 1) 松尾陽: HASP/ACLD/8501 解説, (社) 建築設備技術者協会, 1986.2.
- 2) 北川源四郎: FORTRAN77 時系列解析プログラミング, 1993.3.
- 3) 赤坂裕, 他: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000.1.
- 4) 吉田治典: 蓄熱槽の合理的運転管理のための冷暖房負荷予測, 日本建築学会論文集, 第495号, pp77-83, 1997.5.
- 5) 気象庁(予報部予報課予報係): 平成7年府県天気予報, 1995.3.
- 6) (社)電気学会 GA 等組合せ最適化手法応用調査専門委員会(C部門): 遺伝アルゴリズムとニューラルネット, コロナ社, 1998.2.

(受理:平成17年6月9日)