事務所建築における空調システムに潜熱蓄熱式床暖房を併用した場合の 床暖房への投入熱量の予測制御に関する研究

その1 空調負荷の時系列変動を考慮したヒーター稼働率の予測制御

A STUDY ON PREDICTION CONTROL OF THE LATENT STORAGE FLOOR-HEATING SYSTEM IN AN OFFICE ROOM UNDER AIR CONDITIONING

Prediction control of required thermal energy using time series analysis

三島 真巳^{*2}, 浅野 良晴^{*1}, 岸本 孝志^{*3}

Mami MISHIMA, Yoshiharu ASANO and Takashi KISHIMOTO

The authors made into a prediction control model of the required thermal energy for an office room in which there was the combination system of the latent storage floor heating and the air conditioning. This model is based on the day series and the time series load prediction. The authors set a condition in constructing the model that the gained heat load should not be over the lost heat load in each hour. The following results were obtained.: 1)The gained heat load didn't come over the lost heat load in each hour. 2)The load was cut about 70% in total and 50% in a peak. 3)SET* had been kept between the comfortable range during the working time.

Keywords: Load prediction, Day series heat load, Time series heat load, Prediction control

Latent storage floor-heating system for office automation, Air handling unit

負荷予測、日系列、時系列、予測制御、OA用潜熱蓄熱式床暖房、空調

1. はじめに

従来、事務所建築では、フリーアクセスフロアと電気床暖房を同時に採用することはできなかった。しかし、フリーアクセスフロアに対応した床暖房パネルユニットが開発され、フリーアクセスフロアの事務所建築でも床暖房を使用できるようになった。この床暖房パネルは、空調と併用することにより、空調のみの運転による電力消費量に対してピークカットの効果をもたらす。また、空調設備容量を小さくし、さらに、日中のランニングコストを軽減し電力の平準化を推進することができる。しかし、これらの効果の前提として、深夜電力を利用して前日の夜間から翌日の朝にかけて蓄熱を行なうにあたり、翌日の負荷変動に対応した適切な投入熱量の予測制御が必要となる。

従来の敷設型床暖房における蓄熱予測制御を扱った既往の論文⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾では、室内の暖房方法として床暖房のみの使用であった。従って、空調との併用運転を前提とした床暖房の蓄熱制御には、既往の論文の方法と同様の予測制御方法をそのまま適用することはできない。そこで、本論文では、空調と併用することを前提とした場合の、床暖房における蓄熱予測制御モデルの構築をすることにした。

既往の論文⁽³⁾では、床暖房の蓄熱量の予測制御において、ファジィ推論の評価項目に、翌日の日積算負荷の可能性範囲と、前日の生活時間帯の平均室温を用いていた。さらに、既往の論文⁽⁶⁾の評価項目には、室温の代わりに、新標準有効温度 SET* (以下 SET*) の平均値を用いていた。これらの前件部の評価項目は日系列的な値を使用しており、時系

列的な変化に対応させていない。そのため、日積算負荷が同じ値となる日や、平均 SET* が同じ値となる日でも、時刻変動のプロファイルによつては全く異なった室内温熱環境が形成される可能性がある。これを防止する方法として、日系列の負荷予測に加えて、時系列の負荷変動傾向を予測し、その結果を潜熱蓄熱材の蓄熱量に反映させることが考えられる。今までに、吉田⁽¹¹⁾が時系列的な負荷変動の予測の必要性を提唱したり、川島⁽¹²⁾が時系列負荷予測方法の提案をしたりしているが、実際に時系列的な負荷変動を予測し、制御に反映させた既往の論文や運転実績は少ない。そこで、本論文では、既往の論文⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾のようにファジィ推論の評価項目に日系列的な負荷の変動値を用いて制御量を決定するだけでなく、一日の時系列的な負荷の変動要素を取り入れてファジィ推論を行ない、制御量を検討することにした。その上で、昼間の空調時間帯において、床暖房を最大限に使いながら、暖房負荷を必要最大限に削減することを目指した。詳細に述べると、ファジィ推論の前件部に、日積算負荷だけでなく、時系列的な負荷の変動を示す値を取入れて推論を行い、床暖房蓄熱量の制御量の予測を行う。さらに、予測された制御量に基づいて暖房運転をした場合の空調負荷と室内温熱環境を明らかにするために、シミュレーションを用いて検証を行っている。その結果、日中に潜熱蓄熱材から放熱されている場合の、一時間当たりの取得熱量は、損失熱量を上回ることではなく、その上で、空調機が分担する時間最大暖房負荷と日積算暖房負荷は大幅に削減されることが明らかとなった。このことから、本論文のファジィ推

*1 信州大学工学部社会開発工学科 教授・工博

*2 信州大学工学部社会開発工学科 大学院生

*3 きんでん(株)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Eng., Univ. of Shinshu, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Eng., Univ. of Shinshu
Kinden Corporation

論は有効な制御方法であると考えた。

2. T 事務所と OA 用床暖房システムの概要

本論文では長野県下伊那郡豊丘村に立地している T 事務所ビルの事務スペースを解析対象としている。図 1 に T 事務所全体平面図を示す。また、その中に OA 用床暖房のヒーター系統割付図を示す。表 1 に建物主仕様を示す。ここでは全室ともに、比例制御による空調運転が行なわれている。また、事務スペースと東西の隣室は OA 用床暖房を、待合スペースでは湿式工法の埋設型電気床暖房を敷設している。また、事務スペースと待合スペースの間にはたれ壁がなく、カウンターで仕切られている。事務スペースは、床面積 683.48 m^2 、室容積 2392.18 m^3 、OA 用床暖房敷設面積 522 m^2 、ヒーター容量 104.4kW、在室人員 44 人で、勤務時間帯が 8 時から 18 時までである。また、事務スペースの OA 用床暖房パネルのヒーターは 34 系統に分かれているが、1 系統毎に敷設されているパネルの枚数が異なるため、1 系統におけるヒーター容量は 1.65kW $\sim$ 3.30kW までと異なる。これらのヒーター系統の組み合わせを変えることによって、ヒーター稼働率を調整して、翌日の暖房負荷に対応した熱量を蓄熱することができる。なお、本論文では、事務スペースのヒーター系統全体に対して、実際に電力供給するヒーターの面積割合をヒーター稼働率とする。また、ヒーター 1 系統における、ヒーター系統全体に対する面積率は 2 $\sim$ 3% となる。しかし、系統毎にヒーター容量が異なるため、面積率も異なることから、数系統ずつ組み合わせで制御を行うこととする。また、予測したヒーター稼働率が小さい場合は、開口部近くのヒーター系統を優先的に採用していくこととする。これをまとめて、本論文では、ヒーター系統全体に対する面積率を 10% 刻みで区切り、ヒーター稼働率の予測を行う。

蓄熱材への加熱時間は夜 22 時から翌日の朝 8 時までの夜間電力を使用している。そして蓄熱材上面温度があらかじめ設定した加熱停止温度 32 $^{\circ}\text{C}$ に達した時にヒーターへの通電を停止する。T 事務所では、コントローラーによる内部演算により加熱必要時間を算出し、朝 8 時に蓄熱材上面温度が 32 $^{\circ}\text{C}$ になるように逆算して加熱開始時刻を予測している。図 2 は OA 用床暖房敷設部の断面詳細であり、その各部の仕様を表 2 に示す。さらに、そのうちの潜熱蓄熱材の物性を表 3 に示す。

3. 負荷予測における取得熱量・損失熱量の扱い方

本論文で解析対象としている T 事務所は、図 1 に示すように、東西北に作業室等の隣室を持ち、南には待合スペースがある。本論文では、待合スペースをペリメータゾーンとして、事務スペースをインテリアゾーンとみなすこととした。また、本論文では、両ゾーンの相互の熱干渉は考えていない。すなわち、日射による取得熱量は、ペリメータゾーンである待合スペースに影響し、インテリアゾーンである事務スペースには影響しないものとする。

本論文では、事務スペースの空調設定温度を一定とした場合、損失熱量は、外気温度の変化にのみ影響されるものと扱う。さらに、取得熱量については、時間帯に関わらず変化しない固定取得熱量と、時間毎に変化する取得熱量の 2 種類に分けて扱う。前者は、機器発熱量、照明発熱量、人体発熱量とする。後者は床面からの放熱量とする。

床面からの放熱量の時系列変化の傾向を把握するため、シミュレーションを用いて検証した。なお、このシミュレーションプログラムについては次章で詳細に説明する。計算条件として、空調設定温度を

図 1 T 事務所全体平面図

表 1 建物主仕様

名称		T 事務所
所在地		長野県下伊那郡豊丘村
建物構造		RC・S
断熱仕様	外壁	フォームポリスチレン
	内壁	ロックウール
	壁	グラスウール
	天井	グラスウール
	土間下	フォームポリスチレン
外部仕上	屋根	ステンレス
	外壁	タイル
内部仕上	天井	石膏ボード
	内壁	合板
	床	OA 用フロアパネル
窓仕様	ペアガラス	内側 3mm、空気層 6mm、外側 3mm
建築面積	m^2	2496.6
延べ床面積	m^2	4618.3
暖房方法	空調	氷蓄熱式空調
	床暖房	潜熱蓄熱式電気床暖房

図 2 OA 用床暖房断面図

表 2 OA 用床暖房パネルの仕様

名称	OA フロア用蓄熱床暖房パネル	
パネル面積	m^2	0.25
蓄熱材重量	kg	3
ヒーター容量	kW/枚	0.05
熱伝導率 [10^{-3}kW/mK]	タイルカーペット	0.13
	ケイカル板	0.37
	潜熱蓄熱材	0.66
	断熱材	0.03

21.5 $^{\circ}\text{C}$ にした。この条件では SET*は快適域から外れないことを確かめている。さらに、加熱停止温度 32 $^{\circ}\text{C}$ 、ヒーター稼働率 100%で床暖房を運転した。ヒーター通電停止後の床面からの放熱量と、それに伴う蓄熱材温度の変化の仕方を図 3 に示す。また、1998 年 12 月に T 事務所事務室において、室内温熱環境の実測調査を行った。そこで、事務室の室温、床面温度を把握し、その数値を基に床面からの放熱量を算出

した。算出した数値の平均値を、シミュレーションによって算出された12月平均値と同時に図3に示す。床面からの放熱量について、実測値とシミュレーション値の相関を求めたところ、 $R^2=0.955$ と高い値となった。これを図4に示す。さらに、実測値とシミュレーション値でt検定を行った所、両者の間に差があるという仮説は棄却された。そこで、シミュレーション値を用いて、床面からの放熱量と蓄熱材温度の相関を求め、図5に示す。両者の相関は $R^2=0.974$ と高いことから、ヒーター通電停止後の床面からの放熱量は蓄熱材温度の変動に依存するものといえる。また、ヒーター稼働率を変えた場合においても図5の関係は変わらないことを確かめた。これは、OA用ユニット間の横方向への熱の伝わりはないことによる。従って、ヒーター稼働率を変えることによって、翌日の床面からの放熱量を調整することが可能となる。

4. シミュレーションの概要

本論文における負荷計算、及び制御対象は、T事務所の事務スペースとしている。事務スペースにおける8時から17時までの時間毎の負荷の積算値を、熱性能評価シミュレーションプログラム「ESPAR/M」⁽¹⁰⁾を用いて算出している。シミュレーションにおける空調運転の室内設定温度を決めるにあたり、室温を21.5℃、相対湿度を50%、換気回数を1回/h、着衣量を1clo、作業量を1Met、空調時の風速を0.1m/sとしてシミュレーションを行なった。その結果、この条件ではSET*は快適域から外れないことを確かめている。なお快適域については、既往の研究報告⁽⁷⁾における実測とアンケート調査より、T事務所の事務室のSET*の快適域は、 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ であることが明らかにされている。そこで、この条件で負荷計算を行うこととした。また、その他の条件として、実測値から得られた機器発熱量 $22.4\text{W}/\text{m}^2$ 、人体発熱量 $5.2\text{W}/\text{m}^2$ 、照明発熱量 $8.7\text{W}/\text{m}^2$ の取得熱量があるとした。さらに、外気温度や水平面全天日射量などの外気条件は標準気象データ「松本」を用いた。他の部屋は室温を21.5℃、湿度50%と、換気回数1回/hと固定した。なお、本論文では、熱負荷シミュレーションの第1段階として、床暖房を併用しない状態での空調運転時における負荷を計算している。そして、算出された暖房負荷を基に床暖房の必要投入熱量を予測している。ただし、ヒーター通電時における夜間の躯体への蓄熱効果を考慮している。さらに、第2段階として、床暖房を併用した状態での空調運転時における負荷を計算している。

シミュレーションの解析期間は12月1日から31日までとし、助走期間は解析開始日の一ヶ月前からとした。

5. ヒーター稼働率の予測制御モデル

本論文における、ヒーター稼働率の予測制御の手順を次に示す。

①日系列の負荷変動を予測し、ヒーター稼働率の初期予測を行う。すなわち、日積算負荷 q_i の可能性範囲 Y_i^* を予測し、空調時間帯における床面からの積算放熱量 q_i が Y_i^* を上回らないようなヒーター稼働率の最大値を算出する。したがって、ここでは以下の大小関係を必要条件としている。

$$Y_i^* \geq \max q_i \quad (1)$$

②負荷の時系列変動を予測し、ヒーター稼働率の最終予測を行なう。すなわち、勤務時間帯のどの時刻においても、時間当たりの床面からの放熱量 $q_{i,t}$ が、時間当たりの空調負荷 $q_{i,t}$ を上回らないようなヒーター

表3 潜熱蓄熱材の性能

物性		NaSO ₄ ・10H ₂ O
融解温度	℃	32.0
凝固温度	℃	30.0
蓄熱量 $\Delta T=10^\circ\text{C}$	kJ/kg	潜熱 129.8
		顕熱 25.1
比重	kg/m ³	1340.0
熱伝導率	10 ⁻³ kW/mK	0.7
比熱	kJ/kgK	15.5
仕様限界温度	℃	50.0

図3 床面からの放熱量と蓄熱材温度の時刻変化

図4 実測値とシミュレーション値の相関図

図5 床面からの放熱量と蓄熱材温度の相関図

稼働率の最大値を算出する。したがって、ここでは以下の大小関係を必要条件としている。

$$\hat{q}_{i,t} \geq \max \hat{q}_{i,t} \quad (2)$$

③ヒーター稼働率の最終予測値を基にシミュレーションを行う。さらに、負荷計算の結果から、式(2)が満たされていることを検証する。

5.1. ヒーター稼働率の初期予測の方法

負荷の日系列変動の予測は、既往の論文⁽³⁾⁻⁽⁵⁾と同様の手法を用いた。すなわち、日積算負荷を予測するにあたり、シミュレーションにより求めた計算値をもとに、前日の日積算負荷から翌日に起る予測範囲を求めている。次にその手順を述べる。

まず、ファジィ数は可能性分布として扱えるが、このファジィ数を係数として扱う線形システムを可能性線形システム⁽⁹⁾とする。基準日(各月の1日)から「i」日目における日積算暖房負荷の可能性範囲を Y_i^* とし、次式で表す。

$$Y_i^* = A_1^* + A_2^* \cdot i \quad (3)$$

ここでの Y_i は可能性分布に基づいている。ただし、 Y_i, A_1^*, A_2^* はそれぞれの区間において三角メンバーシップ関数をあてはめたファジィ集合である。それらの区間を次式に示す。(表記の仕方は文献⁽⁹⁾に従う)

$$Y_i = (y_i, e_i) \quad (4)$$

$$A_1^* = (\alpha_1, c_1) \quad (5)$$

$$A_2^* = (\alpha_2, c_2) \quad (6)$$

ここで、 y_i, α_1, α_2 は Y_i, A_1^*, A_2^* の中心を、 e_i, c_1, c_2 は Y_i, A_1^*, A_2^* の左右の広がりを表す。

したがって、式(3)の Y_i は、式(4)から式(6)までを用いて次式の形に整理することが出来る。

$$Y_i = (\alpha, c_j) \quad (7)$$

区間線形回帰分析⁽⁹⁾により、 Y_i を算出するにあたり、 A_1^*, A_2^* を算出する必要がある。 A_1^*, A_2^* は次の線形計画問題として扱うことで解くことができる。

目的関数:

$$J_{(c)} = \min \sum c \cdot i \quad (8)$$

制約条件:

$$y_i + (1-h)e_i \leq \alpha_j \cdot i + (1-h)c_j \cdot i \quad (9)$$

$$y_i - (1-h)e_i \geq \alpha_j \cdot i - (1-h)c_j \cdot i \quad (10)$$

$$\text{ただし、} h=0 \quad (11)$$

$$c_j \geq 0 \quad (j=1,2) \quad (12)$$

式(8)の $J_{(c)}$ を解くことによって A_1^*, A_2^* の区間が定まり、式(3)の Y_i が求まる。ここにおける詳細な解法は文献⁽³⁾⁻⁽⁵⁾で述べられているので、本論文では概略するにとどめた。

上記の方法によって算出した事務スペースの Y_i について、12月の結果を図6に示す。図中の『◆-◆』の部分に Y_i がある。次に、式(1)を満たすような q_i を与えるヒーター稼働率を求める。すなわち、図3のシミュレーション値に基づき、先に予測された日積算負荷の可能性範囲の最小値に見合った積算放熱量を与えるヒーター稼働面積を求め、その割合を算出する。そして12月の1ヶ月間のヒーター稼働率の初期予測結果を図7に示す。

5.2. ヒーター稼働率の最終予測

5.1 による方法で日積算負荷を予測した場合、時間帯によっては取得熱量が損失熱量より多くなる可能性がありうる。本節では、そのようなことがないように、制御量の補正方法を示す。すなわち、日中の負荷の時系列変動の状況を W_i という数値で表す。そして、 W_i を前件部に含むファジィ推論を実施し、日積算負荷から求めたヒーター稼働率の初期予測を補正し、最終予測値を求める。

ファジィ推論の前件部及び後件部の各評価項目を示す。

- 前件部…①負荷の時系列変動の状況 : W_i
 ②前日における時間当たりの空調負荷の最小値 : $\min \{\hat{q}_{i-1,t}\}$
 ③蓄熱開始時の蓄熱材温度 : θ_i

後件部…ヒーター稼働率の補正量 : μ

前件部①の負荷の時系列変動の状況 W_i の算出手順を次に示す。

「 i 」日目における、空調運転開始してから「 t 」時間後の時間当たり

図6 日積算負荷の可能性範囲 Y_i

図7 ヒーター稼働率の初期予測値

図8 曲線 L_{it} と平均線 $\bar{L}$ と接線 $\bar{L}'_{i,t}$

の空調負荷を $\hat{q}_{i,t}$ とする。ここで、「 i 」日目の日積算負荷を次のように定義する。

$$\sum_{i=0}^n \hat{q}_{i,t} = q_i \quad \text{ただし}(t=0,1,\dots,n), (i=1,2,\dots,m) \quad (13)$$

次に、時刻毎の積算負荷の基準化を行い、これを L_{it} として式(14)に示す。なお、 L_{it} は基準化された積算負荷の時系列変動プロフィールを表している。

$$L_{it} = \frac{\sum \hat{q}_{i,t}}{q_i} \quad \text{ただし初期値として } L_{i0}=0 \quad (14)$$

12月1日の L_{it} を図8に示す。さらに、勤務時間帯における負荷の平均値を基準化したものを平均線 $\bar{L}$ とし次式に示すとともに、図8を表す。ここで、 t は空調運転開始してから経過した時間、 t' は空調運転時間とする。

$$\bar{L} = \frac{t}{t'} \quad (15)$$

さらに、観測及びシミュレーションの結果から、 $\bar{L}$ と L_{it} の間には次の大小関係が出現していた。

$$\bar{L} \leq L_{it} \quad (16)$$

ここで、 L_{it} に対し、 $\bar{L}$ と同じ傾きの直線を上方から近づけた場合に L_{it} に接する線を $\bar{L}'_{i,t}$ として図8に示す。点 $P(p, L_{i,p})$ で L_{it} と $\bar{L}'_{i,t}$ が接している場合、 $\bar{L}'_{i,t}$ は次式で表される。

$$\bar{L}'_{i,t} = \frac{(t-p)}{t'} + L_{i,p} \quad (17)$$

ここで、 p は自然数であり、式(17)は常に次の条件を満足していな

なければならない。

$$\bar{L} \leq L_{i,t} \leq \bar{L}'_{i,t} \quad (18)$$

したがって、次式に変形できる。

$$\frac{t}{t'} \leq L_{i,t} \leq \frac{(t-p)}{t'} + L_{i,p} \quad (19)$$

接点 P の時間座標 p は $\bar{L}'_{i,t}$ が $\bar{L}$ に対して最も大きく膨らむ時刻を示している。この時の p における $L_{i,p}$ と $\bar{L}$ の差を W_i としたとき、 W_i は $L_{i,t}$ の変動幅であり、次式で表すことができる。

$$W_i = L_{i,t} - \frac{t}{t'} \quad (20)$$

ここで式(17)より、 p を、シミュレーション結果を用いて算出したところ、12月のほとんどの日において $p=4$ となった。12月における p の値を図9に示す。ここで、実値から求めた W_i と、常に $p=4$ と仮定した場合の W_i をそれぞれ算出した。2つの W_i の相関図を図10に示す。さらに双方のデータ間で、有意水準95%で t 検定を行った。その結果、2つのデータ間に差があるという仮説は棄却され、2つのデータの間に差があると言えないことが明らかになった。従って、本論文では $p=4$ として W_i を解析していく。

次に、 W_i は q_i を基準化して算出した値なので、 W_i のみに従って制御量を予測すると、実際の負荷に対応できないことがある。そこで、 W_i に対して q_i の重みをつけて W_i^* とし、次式(21)で表す。これをファジィ推論の前件部①とする。

$$W_i^* = q_i \cdot (L_{i,t} - \frac{t}{t'}) \quad (21)$$

次に、ファジィ推論の三角メンバシップ関数を定めるために、 W_i^* の可能性範囲を予測する。可能性推定モデルの作成手順は5.1.と同様である。12月の W_i^* の可能性範囲を図12に示す。図中の『◆-◆』の部分 W_i^* の可能性範囲となる。ここで、三角メンバシップ関数の中央値は、 W_i^* の可能性範囲の中央値の平均値 $\bar{a}$ とした。中央値からの幅は、 W_i^* の可能性範囲幅の平均値 $\bar{c}$ とした。つまり、左端は $\bar{a}-\bar{c}$ 、右端は $\bar{a}+\bar{c}$ とした。 $\bar{a}+\bar{c}$ よりも W_i^* が大きければヒーター稼働率を上げ、 $\bar{a}-\bar{c}$ よりも W_i^* が小さければ下げることとした。

式(2)を満たすにあたり、三角メンバシップ関数の左端を0、右端を $\min \hat{q}_{i,t}$ とする。また、前件部③の θ_i は、既往の論文⁽³⁾と同様に扱う。本論文では、T事務所の実測データより、ヒーターへの通電必要時間を求める重回帰式を作成し、蓄熱材上面温度が設定温度に達するまでに要する必要時間を算出した。さらに、朝8時から蓄熱時間を逆算して通電開始時刻を決定した。

以上の手順をもとに、ファジィ推論によるヒーター稼働率の最終予測を行なう。図13にファジィ推論の各評価項目の三角メンバシップ関数を示す。また、表4に制御規則表を示す。推論方法としては、Mamdaniの推論方法⁽⁹⁾を使用し、推論結果の非ファジィ化には重心法⁽⁹⁾を用いている。

6. シミュレーションによる検証

ヒーター稼働率の初期予測値と最終予測値を図13に示す。これより、補正されている日は18日あった。次に12月15日から21日までの勤務時間帯における結果を図14に示す。ここでは、SET*、室温、外気温度、空調機が分担する暖房負荷のうち床暖房を併用した場合の暖房負

図9 接点 P の p の値

図10 実測値から求められる W_i と本論文で作成した W_i

— W_i のトレンド

— シミュレーション結果に W_i

○ ○ 前日差から予測される翌日の W_i の可能性範囲

◆ ◆ 最終的な W_i の可能性範囲

図11 W_i^* の可能性範囲

図12 ファジィ推論の三角メンバシップ関数

表4 ファジィ推論の制御規則表

	W_i^*	$\min\{q_{i-1}, t\}$	μ
1	NB	NB	NB
2	NB	ZO	NB
3	NB	PB	ZO
4	ZO	NB	NB
5	ZO	ZO	ZO
6	ZO	PB	PB
7	PB	NB	ZO
8	PB	ZO	PB
9	PB	PB	PB
	θ_i		μ
10	PB		NB

荷、床暖房を併用しなかった場合の暖房負荷、暖房を併用したことによる暖房負荷の削減率を時間毎に示す。下の棒グラフより、0A用床暖房を併用した場合の負荷は、常に0 kw/m²以上であることがわかる。0 kw/m²以下になると空調吹出し温度が室温よりも低くなり、室内を冷やすことになることを考えると、室内の取得熱量が損失熱量を上回る

ことはなかったと言える。また、空調機が分担する暖房負荷は時間当たり最大 92%まで削減されていた。さらに、SET*は 23℃から 24.0℃の間にあった。午後に快適域の上限値を若干上回っているが、概ね快適域に収まっていた。次に、12月の日積算負荷に関して、床暖房を併用した場合と床暖房を併用しなかった場合とを合わせて図 15 に示す。床暖房を併用したことにより、日積算負荷は大幅に削減されたことが分かる。削減された日積算負荷と、深夜電力により蓄熱材へ投入された熱量とを比較してみると、後者の方が若干多くなる場合はあるものの、昼間の電力消費量の多くの割合が夜間へ移行され、電力の平準化につながるものといえる。また、負荷の削減量については、まとめて表 5 に表す。ピーク負荷は平均 49%、日積算負荷は平均 71%削減されていた。

7. まとめ

本論文では、空調システムと OA 用床暖房とを併用運転する事務所において、事務スペースを対象に、可能性線形システムとファジィ推論を用いて床暖房蓄熱量の予測制御方法の構築を行なった。また、従来の日系列的な負荷予測に加え、時系列的な負荷変動の予測を行なうことによって、取得熱が損失熱量を上回らないような予測制御方法を提案した。さらに、12月において、シミュレーションを用いて検証を行なった。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 負荷の時系列変動を考慮したヒーター稼働率の最終予測に基づいて、熱負荷シミュレーションを実施した結果、全ての日に於いて、取得熱量は損失熱量を上回ることにはなかった。このことは、本論文の制御方法が有効であることを示していると考えられる。

(2) OA 用床暖房を併用させて空調運転をすることによって空調機が分担する暖房負荷の日積算値は最大 100%、平均で 71%削減できた。ピークシフト率は最大 64%、平均で 49%削減できることがわかった。このことから、空調の間欠運転でも、床暖房を併用することにより、ピークシフトが行われ、一日を通しての電力の平準化が期待できることがわかった。

(3) さらに、解析期間中の勤務時間帯の平均 SET*は概ね快適域の中におさまった。このことから、OA 用床暖房を併用した空調システムにより快適な室内温熱環境を形成することができたと考える。

本論文の今後の課題を述べる。今回は 12 月の結果を示しているが、今後は他の期間へ拡張して適用したい。また本論文では、インテリアゾーンとベリメータゾーンとの間に熱干渉がないものとして検討を進めたが、熱干渉を無視できない場合についてのモデルの構築を行っていくことも必要であると考えられる。

記号

- Y_i : 日積算負荷の可能性範囲[kWh/m²]
- A_1^* : Y_i の区間係数[-]
- A_2^* : Y_i の区間係数[-]
- i : 日数を示すパラメータ[-]
- y_i : Y_i の中心[-]
- α_1 : A_1^* の中心[-]
- α_2 : A_2^* の中心[-]
- e_i : Y_i の左右の広がり[-]
- c_1 : A_1^* の左右の広がり[-]
- c_2 : A_2^* の左右の広がり[-]
- h : 適合度を計るパラメータ[-]

図 14 シミュレーション結果(12月15日～12月21日)

図 15 シミュレーション結果(12月)

表 5 床暖房を併用した事による空調負荷の削減値と削減率

項目	負荷の削減値		負荷の削減率	
	ピーク負荷 kW/m ²	日積算負荷 kWh/m ²	ピーク負荷 %	日積算負荷 %
最大	0.69	0.43	63.6	100.0
最小	0.23	0.17	37.2	54.7
平均	0.49	0.31	49.0	70.7

$J_{(c)}$: 可能性範囲の条件[-]

$\min \sum c \cdot i$: 可能性範囲の和の最小値[-]

q_f : 勤務時間帯における床面からの放熱量の積算値[kWh/m²]

$q_{t,i}$: 空調運転開始時から「 t 」時間後の床面からの放熱量の積算値[kWh/m²]

W_i : 負荷の時系列変動の状況[-]

$\min\{\hat{q}_{i-1,t}\}$: 暖房対象日の前日における時間当たりの空調負荷の最小値[kW/m²]

θ_i : 蓄熱開始時の蓄熱材温度[°C]

μ : ヒーター稼働率の補正量[-]

t : 時間を示すパラメータ、空調開始してから経過した時間[h]

q_i : 「 i 」日目の日積算負荷[kWh/m²]

$\sum_{i=0}^n \hat{q}_{i,t}$: 「 i 」日目の日積算負荷[kWh/m²]

$\hat{q}_{i,t}$: 「 i 」日目空調運転開始してから「 t 」時間後の空調負荷[kW/m²]

$L_{i,t}$: 基準化した負荷[-]

$L_{i,0}$: 基準化した負荷の初期値[-]

$\bar{L}$: 基準化した負荷の平均値を表す直線[-]

t' : 1日の全空調時間[時間]

$\bar{L}'_{i,t}$: $\bar{L}$ と同じ傾きで $L_{i,t}$ に接する直線[—]

p : 接点Pの t 座標[—]

$L_{i,p}$: 接点Pの $L_{i,t}$ 座標[—]

W_i : $L_{i,t}$ の変動幅[—]

$\bar{a}$: W_i^* の可能性範囲の中央の平均値[—]

$\bar{c}$: W_i^* の可能性範囲の幅の平均値[—]

$\min\{q_{\theta}\}$: 勤務時間帯における床面からの放熱量の最小値[kW/m²]

θ : 蓄熱材の融解温度[℃]

b : ファジィ推論後件部のパラメータ[—]

参考文献

- (1) 水野、浅野：老人ホームにおける深夜電力を利用した潜熱・顕熱蓄熱材併用型電気床暖房の予測制御に関する論文 その1 厳寒期における投入熱量のファジィ予測制御、日本建築学会計画系論文報告集、第494号、pp. 45～52、1997. 4
- (2) 水野、浅野：老人ホームにおける深夜電力を利用した潜熱・顕熱蓄熱材併用型電気床暖房の予測制御に関する論文 その2 ファジィ・ニューラルネットワーク融合モデルによる投入熱量の予測、日本建築学会計画系論文報告集、第501号、pp. 53～60、1997. 11
- (3) 高村、浅野：老人ホームにおける深夜電力を利用した潜熱・顕熱蓄熱材併用型電気床暖房の予測制御に関する論文 その3 可能性推定モデルを用いた負荷予

測とファジィ推論による予測制御、日本建築学会計画系論文報告集、第517号、pp. 59～64、1999. 3

(4) 鳩野、浅野：学校建築における深夜電力を利用した潜熱蓄熱式床暖房の予測制御法に関する論文 日本建築学会計画系論文報告集、第469号、pp. 25～33、1995. 3

(5) 高村、浅野：学校建築における深夜電力を利用した潜熱蓄熱式床暖房の予測制御法に関する論文 その2 ファジィ・ニューラルネットワーク融合モデルを用いた投入熱量の予測制御 日本建築学会計画系論文報告集、第504号、pp. 71～77、1998. 2

(6) 浅野、三垣：SET*の時系列変化を考慮した潜熱・顕熱蓄熱材併用型電気床暖房の予測制御に関する論文 その1 ファジィ・ニューラルネットワーク融合モデルを用いた投入熱量の予測制御、日本建築学会計画系論文報告集、第528号、pp. 43～50、2000. 2

(7) 浜口、浅野、他：T事務所における床暖房と空調の併用運転の性能評価に関する論文 その1 床暖房運転時の実態調査、日本建築学会学術講演会1999年度大会梗概集、1025～1026

(8) 三島、浅野、他：T事務所における床暖房と空調の併用運転の性能評価に関する論文 その2 シミュレーションによる検証と実測結果からの評価、日本建築学会学術講演会1999年度大会 梗概集、1027～1028

(9) 田中英夫：「ファジィモデリングとその応用」、pp. 134～158、朝倉書店、1990

(10) 熱性能評価シミュレーションプログラム「ESPAR/M」：住宅産業情報サービス、1979

(11) 吉田治典：蓄熱における熱負荷予測の役割と背景 空気調和衛生工学、第73巻、第9号、pp. 7～10、1999. 09

(12) 川島実：負荷予測ベンチマークテストの概要報告 空気調和衛生工学、第73巻、第9号、pp. 37～42、1999. 09

(2001年3月2日原稿受理、2001年8月3日採用決定)