蓄熱槽の合理的運転管理のための冷暖房負荷予測

HEATING AND COOLING LOAD PREDICTION FOR THE RATIONAL MANAGEMENT OF THERMAL STORAGE TANK OPERATION

吉田 治典*
Harunori YOSHIDA

Thermal storage tanks are used to store thermal energy that is considered to be used up on the following day. However if heat is stored excessively, some of it will be lost due to heat transfer through walls and slabs surrounding the tank. To avoid the energy loss related to thermal storage tanks, predicted air-conditioning load required for the following day can be one of the indispensable information because rational operation of a heat source system with thermal storage tanks can be achieved utilizing the information.

In this paper the method to predict the air-conditioning load is proposed. The method consists of two stages; weather data prediction and load prediction. The method was applied for the operation of the heat source system of a real building and the measured results are shown here. The error of the prediction was about 12 % for winter and 29 % for summer. The low accuracy for summer should be improved, however, it is also due to the highly unpredictable summer weather when the trial was made.

Keywords : *thermal storage tank, air-conditioning load prediction, weather data prediction*

蓄熱槽, 空調熱負荷予測, 気象データ予測

1. 序

空調用熱源での蓄熱槽の利用は、電力の負荷平準化、発電所の効率運転、空調用熱源の縮小、熱負荷に対する弾力的運用など、その効用は周知のとおりである。しかし、設計方法に比して蓄熱槽の合理的な運用方法については、なお問題が多く残されているようである。

蓄熱運転は次のように行われることが多い。1) 電力会社が決めた深夜電力のタイムフレームに従って毎晩早い時刻から熱源を運転するため、特に中間期に蓄熱は空調運転開始よりかなり前に完了する。2) 蓄熱槽には能力限界までフルに蓄熱されるが、蓄熱された熱が次の日に十分使われず残る。3) 蓄熱の温度レベルは冷房・暖房の全期間を通して一定（設計値）とされる。

こうした運転は、蓄熱槽からの少なからぬ熱損失を招いたり、冷凍機やヒートポンプの効率よい運転がなされないなど、省エネルギーの観点から好ましくない面が多々ある。この欠点を補うため、オペレータは経験と勘で蓄熱運転開始時間や運転時間の長さを決定したり、蓄熱温度レベルを調整したりすることもあるが、実態は必ずしも満足のゆく結果ではないといわれる。

この困難の理由の一つに、蓄熱運転の翌日に生ずる未来の熱負荷予測の技術が未熟で、現実のシステムへの応用も過渡的な段階にあるため、蓄熱槽の合理的な運転が難しいことが上げられる。このよ

うな背景から、本研究では、熱負荷予測手法の一手法として筆者が開発した手法を提案し、実際の建物の負荷予測にその手法を応用した例を報告する。

ところで最近、電力料金は、ピーク時刻の高料金制度の導入など、需要と供給の関係からトータルな最適化を目指す中で自由化の方向にある。今後はわが国でも、欧米に見られるように、時々刻々料金が変動するという究極の自由化も考えられる。こうして、電気だけでなくガス・オイルのエネルギー源、コジェネレーションなど、空調熱源以外のエネルギー供給システムも視点に入れたトータルな最適運転が課題となり得る。この場合、蓄熱槽を持たないシステムであっても、数時間先の短期的な予測の必要性があり、熱負荷予測手法の確立は重要と考えられる。

2. 手法

熱負荷予測の手法は、どのような情報とアルゴリズムを用いるかで様々のバリエーションが生まれる。ここでそれらを概括しながら本手法の特長を示す。

予測に用いることのできる情報には、過去の観測情報と未来の予報情報の2つがある。過去の観測情報は、一般に、熱負荷、室温・湿度などの室内環境データ、空調運転スケジュール、外気温などの外界気象データ、使用エネルギー量などで、これらは中央監視盤やエネ

本稿は文献1)～2)を基に加筆修正したものである。

* 京都大学工学研究科環境地球工学専攻 助教授・工博

Assoc. Prof., Department of Global Environment Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

ギー管理システム（BEMS：Building Energy Management System）で集積されることが多い。未来の予報情報には、気象台やその他の機関から出される天気予報、ならびに将来の内部発熱負荷の基となる使用パターンや付随する空調運転スケジュールなどがある。

天気情報には「晴れ」や「曇り後雨」のような予報天気概況の他に、最低湿度、風向・風速などの予測値がある。近年、予報の信頼性がかかなり高くなっているため、多くの熱負荷予測手法で予報を利用している^{1),2),3),7)-11)}。しかし大半の手法では、翌日の最高・最低気温を利用するに止まっている。もし、気温・日射・湿度の生起に高い相関があれば、予測値として気温のみを用いても他の要素の予測は間接的に組み入れられたことになり必要性は低い。しかし、気象データの解析によれば、夏は気温と日射に正の相関があるが冬にはない、湿度と日射は冬に負の相関があるが夏にはない、気温と湿度は一年中正の相関がある、など相互の関係は確定的ではなく¹²⁾、要素ごとの予測を別個に組み入れる方法が精度向上の意味からは好ましい。そこで本手法では「晴れ」などの天気概況予測の利用と、最低相対湿度でなされる湿度の予測値の利用を図った。

熱負荷の予測にはどの手法も何らかのモデルを利用している。手法の差はモデル構成とパラメータを見いだすアルゴリズムにある。大別すれば、熱負荷生成の内部構造を無視して、熱負荷と熱負荷に深い情報とを経験的・恣意的に捉えるモデルと、熱負荷の発生機構をベースにしたモデルがある。前者をブラックボックスモデル、後者をフィジカルモデルとして区別することもできる。ブラックボックスモデルはさらに線形モデルと非線形モデルに分けられ、前者はARMAXやARIMAモデルを利用して^{6),7)}、後者は多次式やニューラルネットワークなどを利用して構成される¹¹⁾。一方、フィジカルモデルは熱負荷計算の体系を基に応答係数を介して線形モデルを構成するもの^{3),9)}、線形な近似モデルを構成する本手法などがある^{1),2)}。

本報を含む少数の手法（文献1,2,3,9）が他の手法と大きく異なるのは建物躯体の蓄熱負荷を陽にモデルに組み入れている点で、特に土・日に運転が停止されたり、極端な場合には不定期な運転スケジュールで空調されても原理的に対応可能である。これに対して他の多くの手法は、蓄熱作用の効果を曜日情報という経験的な因果関係で対処しているため、一般に、残業、特別休日など、典型的なスケジュールから逸脱するに従い対応が難かしくなる傾向にある。

さて、本手法では予測を2段階に分けて行う。第1段階は気象データの予測であり、第2段階はその気象データを基にした熱負荷の予測である。この2段階の予測手法は、いわゆる熱負荷計算のアルゴリズムと同様の流れを持つことを意図して構成した。このモデルの採用により上記した柔軟性が得られると共に、気象予測、熱負荷予測それぞれの精度を分離してモデルを評価・改善できるというメリットがある。

2-1 気象データの予測

まず、第1段階の気象データの予測について述べる。熱負荷に影響する気象データには、気温、日射、湿度、風向・風速、長波長放射などがある。本研究ではこの中から気温、日射、湿度を取り上げた。通常、長波長放射の熱負荷への影響は大きくない。風向・風速の影響は建物によっては大きいこともあるが本研究ではこれを無視

する。なお、気象データの予測では、筆者による気象データのモデル化の研究で得られた知見を用いている^{12),13)}。

予測情報としての気象データは天気予報を基に作成するが、次の問題がある。

1) 一般に、温度、湿度の予報は気象台の存在する地点（以後、参照地という）の予測値であり、また、天気の場合は建物の存在地点（以後、現地という）を含むかなり広い地域（例えば神奈川県西部など）の概況予報である。つまり、「現地」に直結する予報値や概況が直接得られる訳ではないため、参照地の予報と現地の予報の関係づけが必要となる。

2) 予報は、気温に対して最高・最低気温、天気に対して「晴れ」などの概況、湿度に対して翌日の最低相対湿度でなされ、24時間先までの時々刻々の気温、日射、湿度のデータが直接与えられるものではない。つまり、これらも何らかの変換が必要である。

以下では、横浜を「参照地」、横浜の西40kmの山麓にある秦野を「現地」とし、横浜の気象台の予報値から秦野の気象データを予測するという具体例を示しながら、本研究で用いる気象データの予測法を述べる。

前提条件：

- 1) 予測を行う日の最低1日前から、参照地ならびに現地建物で観測した気象データ（外気温、湿度、水平面全日射量）、および現地を含む地域の天気予報が既知とする。
- 2) 予測は午後9時の天気予報を用い、午後10時から翌日にかけて24時間先までの予測を行う。ただ、天気予報は当日の早朝にも再度出されるので、当日の短期予測には同じ手法を適用し精度を高めることもできる。

A) 気温予測の手順

1) 日周期成分

予報から n 日前の現地観測気温 $\theta_{N-n,j}$ （ N ：予報日、 j ：時刻）を用いて K 日間の期間平均値 $\bar{\theta}$ を算出する。次にこの値を用いて日周期成分 $\tilde{\theta}_j$ を求める（式(1)）。この成分は季節と共に変化するので、平均を取る期間 K が余りに長くなると不適切となる。種々の気象データの解析の経験から最大30日程度でよいと考える^{12),13)}。

$$\bar{\theta}_N = \frac{1}{(K \times 24)} \sum_{n=1}^K \sum_{j=1}^{24} \theta_{N-n,j} \quad \tilde{\theta}_{N,j} = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K \theta_{N-n,j} - \bar{\theta} \quad (1)$$

2) 日最高気温・最低気温

現地と参照地（添字 R で示す）の日最高気温・最低気温の関係を線形関係で表せると仮定し、係数を最小二乗法により見いだす（次式）。

$$\begin{aligned} \theta_{N-n,\max} &\cong a_{\max} \theta_{(R)N-n,\max} + b_{\max} \\ \theta_{N-n,\min} &\cong a_{\min} \theta_{(R)N-n,\min} + b_{\min} \end{aligned} \quad (2)$$

例として、横浜（参照地）と秦野（現地）の観測記録（1985年）から求めた係数を以下に記す。

	$a [-]$		$b [K]$	
	$\max$	$\min$	$\max$	$\min$
夏期	0.960	0.924	0.458	0.637
冬期	0.936	1.089	-0.555	-0.979

表-1 式(2)の係数（秦野）

気候が変化しない限り過去のデータを多量に用いるほど係数の信頼度は高くなるので、データが十分長期（数年間）にわたって蓄積されれば、係数を月ごとに求め、精度を向上させるのが良いであろう。

3) 時刻別予測値

観測値から、1～24時の日平均気温 θ_{ave} を求めた結果、現地と参照地ともに、最高気温と最低気温の平均値で近似できることが判った。つまり

$$\theta_{N,ave} \cong (\theta_{N,max} + \theta_{N,min})/2 \quad (3)$$

この平均値は文献12, 13でいうところの、年周期成分と確率的中周波数成分の和に相当し、サンプリング時刻としては時刻12時で表される値である。さて、気温の時刻変動はこの値に確定的日周期成分 $\tilde{\theta}_j$ と確率の高周波数成分を加えてモデル化できるが¹³⁾、この高周波成分は微細に振動する成分ゆえ無視することにより、将来の気温を近似的に次式で予測する。

$$\hat{\theta}_{N,j} = \theta_{(N-1),ave} + \frac{(j-12)(\hat{\theta}_{N,ave} - \theta_{(N-1),ave})}{24} + \tilde{\theta}_j \frac{\Delta \hat{\theta}_N}{\Delta \tilde{\theta}} \quad (4)$$

ただし、変数の記号 $\wedge$ は予測値を示す。また、

$$\Delta \tilde{\theta}_N = \max(\tilde{\theta}_{N,j}) - \min(\tilde{\theta}_{N,j}), \quad \Delta \hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N,max} - \hat{\theta}_{N,min}$$

ここで、 j は時刻であり、翌日の場合は実際の時刻に24時間を加える。式(4)の右辺第1項は(N-1)日の平均気温、第2項は(N-1)日からN日へ向かう平均気温の線形的変化、第3項は平均的日周期成分を振幅調整して得た日周期成分を意味する。また、予測開始の時間が午後9時ではなく翌日の朝で、既に当日早朝の最低気温が観測されていれば、 $\hat{\theta}_{N,ave}$ 、 $\Delta \hat{\theta}_N$ はその値を基にして求める。

B) 湿度予測の手順

湿度の予測は翌日の最低相対湿度 $\hat{\phi}_{N,min}$ でなされる。そこで、最低相対湿度が最高気温時に生ずると仮定し、その時の混合比（絶対湿度）を求める。また、最高気温は午後2時に生ずることも仮定する。混合比の日周期変動は少ないので無視し、各時の混合比を次式で線形的に予測する。つまり、式(4)の第3項を無視することに相当する。

$$\hat{x}_{N,j} = x_{(N-1),ave} + \frac{(j-12)(\hat{x}_{N,ave} - x_{(N-1),ave})}{24} \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \hat{x}_{N,ave} = f_S(\hat{\theta}_{N,max}, \hat{\phi}_{N,min})$$

ここで、 f_S は乾球温度と相対湿度から混合比を求める関数である。

C) 日射予測の手順

天気と日射量は相関が高いので、日射量の予測は天気概況の予測を用いる。天気概況は「晴れ時々曇り」など、天気の組み合わせで予報され、20以上もの種類がある。そこで、天気を表-2のように区分し、実際に生じたある日の天気（予報ではない）で生じた基準化日射量（日積算全日射量を日積算大気圏外日射量で除した値）の日

平均値と標準偏差の関係として整理し図-1.1に示す。ただし参照地（横浜）の日射記録はないので、現地（秦野）の日射量との関係である。

このように天気区分から日射を推定すると相当の偏差を持つことが判る。しかし、偏差を減らすために区分数を増しても各区分内のデータ数が少なくなるため、結果的には必ずしも偏差は減少しないことが確認された。この検討から、区分数6を最適と判断した。

区分	天気
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
6	雨、雨強

表-2 天気の区分

図-1.1 実際に生じた天気区分と基準化日射量
（■：平均、実線：標準偏差）

区分	データ数	η_N	偏差
1	59	0.598	0.059
2	92	0.486	0.092
3	115	0.380	0.115
4	98	0.283	0.098
5	90	0.178	0.090
6	36	0.079	0.036

表-3.1 天気区分と平均基準化日射量 η_N

図-1.2 天気予報による天気区分と基準化日射量

区分	データ数	η_N	偏差
1	36	0.568	0.085
2	57	0.464	0.136
3	44	0.373	0.156
4	45	0.237	0.153
5	27	0.177	0.121
6	11	0.088	0.067

表-3.2 天気予報区分と平均基準化日射量 η_N

偏差の原因には次のようなものが考えられる。

- 1) 言葉によって天気を表すことの限界。
- 2) 参照地と現地で必ずしも天気が一致しない。
- 3) 本予測方法では、終日一定の割合で大気圏外の日射が減衰し地表に到達するとしており、水平面日射の時間変化は正午を中心にプロファイルが対象となる。つまり、「晴れ後曇り」という予報において、午前中の日射を増すという細かな予測操作はしていない。

ただ、上記の結果は横浜の221日間の天気を基に検討したものであるが、データ数が増えれば区分数やプロファイルをより細かくして精度の向上を図れる可能性も残されている。しかし現在、予報値は記録データとして公開されておらず、多量のデータ収集は簡単ではない。従ってある地点で自前でデータを集積し分析を別途行う必要がある。このように、多量のデータが得られた場合の天気区分の最適化は今後の課題である。

ところで、予報はある確率で外れる。図-1.2は、秦野が含まれる地域（神奈川県西部）の天気予報を基に作成した図-1.1と同様の図である。この場合天気予報が外れることに起因する予測の偏差が更に加わる。

以上より、本研究の日射の求め方を整理する。

- 1) 天気予報を基に明日の天気の区分を表2で決め、表3.2から平均基準化日射量 η_N を求める。
- 2) 次式で水平面全天日射量を予測する。

$$J_{N,j} = \frac{1}{L^2} \eta_N I_0 \sin h_j \quad (5)$$

ここで、 I_0 ：太陽定数、 h_j ：太陽高度、 L ：太陽と地球の距離／太陽と地球の平均距離

なお、表3.2は、参照地（横浜）と現地（秦野）という特定の地域のデータから得られた値である。従って、原理的には表3.2は地点が変われば別途作成する必要がある。しかし、1) 基準化した日射量のため太陽位置が変わっても近似的には適応可能なこと、2) 後述するように、日射量による熱負荷への影響を決定するパラメータは予測過程で同定するため、天気区分間の基準化日射量の比が保たれていれば近似的に使用可能であること、の理由により、他の地域にも適用できる可能性は高いと思われる。

2-2 熱負荷の予測

熱負荷予測のモデルを単純化するため、次の仮定をおく。1) 対象となる空調ゾーンは等温な一室とみなす、2) 窓を通過する日射は瞬時に熱負荷になる、3) 壁体伝熱には熱水分のインターラクションがない。これから次式の熱バランス式を立てる。

$$\begin{aligned} c_{pa} G_R \frac{d\theta_R}{dt} = & \sum_L \int_0^{\infty} \varphi_{I,L}(\tau) \theta_{0,L}(t-\tau) d\tau + \int_0^{\infty} \varphi_A(\tau) \theta_R(t-\tau) d\tau \\ & + \sum_L \int_0^{\infty} \varphi_{S,L}(\tau) J_L(t-\tau) d\tau + c_{pa} G_o(t) \{ \theta_0(t) - \theta_R(t) \} \\ & + q_{SR}(t) + q_{SA}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 c_{pa} ：空気の比熱、 $c_{pa} G_R$ ：室（建物）の熱容量、 G_o ：

隙間風量（質量）、 J_L ：方位 L の日射量、 q_{SR} ：内部発熱、 q_{SA} ：空調で与えられる顕熱、 φ_I ：外気温に対する外壁の貫流熱のインパルス応答、 φ_A ：室温に対する吸熱のインパルス応答、 $\varphi_{S,L}$ ：方位 L への窓の日射が熱負荷となる係数、 θ_R ：室温、 θ_0 ：外気温、 $\theta_{0,L}$ ：方位 L の等価外気温、 t ：時間

また、水分負荷 x による潜熱負荷は $x(i_o + c_{pv}\theta)$ である（ここで、 c_{pv} 、 θ はそれぞれ、水蒸気の定積比熱と温度）。この潜熱負荷を $(x i_o)$ で近似することにすれば、次式の水分バランス式を得る。

$$i_o G_R \frac{dx_R}{dt} = i_o G_o(t) \{ x_0(t) - x_R(t) \} + q_{LR}(t) + q_{LA}(t) \quad (7)$$

ここで、 i_o ：0℃の水の蒸発潜熱、 q_{LR} ：潜熱発生、 q_{LA} ：空調で与えられる潜熱、 x_R 、 x_0 ：室内、室外空気の混合比

式(6)と(7)を加え、空気の比エンタルピーを $h \equiv c_{pa}\theta + i_o x$ で近似すれば、

$$\begin{aligned} G_R \frac{dh_R}{dt} = & \sum_L \int_0^{\infty} \varphi_{I,L}(\tau) \theta_{0,L}(t-\tau) d\tau + \int_0^{\infty} \varphi_A(\tau) \theta_R(t-\tau) d\tau \\ & + \sum_L \int_0^{\infty} \varphi_{S,L}(\tau) J_L(t-\tau) d\tau + G_o(t) \{ h_0(t) - h_R(t) \} + q_R(t) + q_A(t) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 q_R ：室内の全熱発生、 q_A ：空調が与える全熱式(8)を離散化して、

$$\begin{aligned} G_R(h_{R,j} - h_{R,j-1}) = & \left\{ \sum_L \sum_{p=0}^{\infty} \Phi_{I,L,p} \theta_{0,L,j-p} + \sum_{q=0}^{\infty} \Phi_{A,q} \theta_{R,j-q} \right. \\ & \left. + \sum_L \sum_{r=0}^{\infty} \Phi_{S,L,r} J_{L,j-r} + G_{o,j}(h_{0,j} - h_{R,j}) + q_{R,j} + q_{A,j} \right\} \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

本式に次の近似を導入し式(10)を得る。

- 1) 比エンタルピーは温度と混合比の関数であるが、室内湿度の場合は変動が小さいことから温度のみの関数として近似する。つまり、 $G_R(h_{R,j} - h_{R,j-1}) \equiv a(\theta_{R,j} - \theta_{R,j-1})$
 - 2) 漏入外気の比エンタルピーも温度のみの関数とする。また漏入空気量は一定と仮定する。この仮定による誤差は漏入風量が少なければ無視できる。つまり、 $G_{o,j}(h_{0,j} - h_{R,j}) \equiv a_j(\theta_{0,j} - \theta_{R,j})$
 - 3) 室内発生熱 q_R は通常観測していないので時刻変化のプロファイル ζ_R を既知とし、その大きさ（レベル） a_R を未知係数とし表す。つまり、 $q_{R,j} = a_R \zeta_{R,j}$
 - 4) 予測したい熱負荷は熱源で要求されるシステム全体の熱負荷 q_{AC} であり、これは室の熱負荷 q_A と、外気導入負荷、ダクトやパイプからの損失などの熱負荷 q_o の和である。ここで q_o は外気と室内のエンタルピー差 Δh で表せる外気導入負荷に比例するものと仮定し、外気導入のスケジュール $\zeta_{o,j}$ は既知として、3)と同様にレベル a_o を未知とする式で表す。 $q_o \equiv a_o \zeta_{o,j}(h_{0,j} - h_{R,j}) = a_o \zeta_{o,j} \Delta h_j$
 - 5) 式(9)のコンボリューション項は有限項で打ち切る。
- 以上の係数 a を部分的に再定義することにより次式を得る。

$$q_{AC,j} = \sum_L \sum_{p=0}^p a_{T,L,p} \theta_{0,L,j-p} + \sum_{q=0}^q a_{A,q} \theta_{R,j-q} + \sum_L \sum_{r=0}^r a_{S,L,r} J_{L,j-r} + a_R \zeta_{R,j} + a_o \zeta_{o,j} \Delta h_j + \varepsilon_j \quad (10)$$

本式は空調負荷 q_{AC} が誤差 ε_n と既知変数の積の線形和で表されることを示す。ここで、各項に含まれる係数 a と積和の次数 p, q は未知である。

さて、係数 a は誤差を白色雑音と見なし、以下の最小2乗法により逐次推定する。

まず次のようにベクトルを定義する。

$$a = (a_{T,1,1}, \dots, a_{T,L,p}, a_{A,0}, \dots, a_{A,q}, a_{S,1,0}, \dots, a_{S,L,r}, a_R, a_o) \\ \varphi_j = (\theta_{0,1,j}, \dots, \theta_{0,L,j-p}, \theta_{R,j}, \dots, \theta_{R,j-q}, J_{1,j}, \dots, J_{L,j-q}, \zeta_{R,j}, \zeta_{o,j}, \Delta h_j) \quad (11)$$

次式を逐次適用し、係数ベクトル a を推定する。

$$\begin{cases} \hat{a}_j = \hat{a}_{j-1} + K_j (q_{AC,j} - \varphi_j \hat{a}_{j-1}) \\ K_j = \frac{P_{j-1} \varphi_j^T}{1 + \varphi_j P_{j-1} \varphi_j^T} \\ P_j = P_{j-1} - \frac{P_{j-1} \varphi_j^T \varphi_j P_{j-1}}{1 + \varphi_j P_{j-1} \varphi_j^T} \end{cases} \quad (12)$$

ここで、次数 p, q は不明である。この最適次数は次式で定義されるAICを最小化し推定する^{16), 17)}。

$$AIC = N \log \sigma_e^2 + 2(p+q) \quad (13)$$

次数推定のプロセスは逐次ではなく適当な期間ごとにバッチ的に行わねばならない。モデルが定常であれば最適な次数は年間一定となるが、実際には内部発熱の変動や風速変動による熱負荷への影響を無視したモデルのため、経年的・季節的にモデルの次数が変化する可能性がある。従って、次数が安定するまでは初動期間に次数の見直しを行い、モデル次数の検討を行いながらモデルを構築してゆく必要がある。

将来の熱負荷は式(10)を用い、雑音を零 ($\varepsilon_j = 0$) として予測する。ここで、外気温、日射量、外気のエンタルピーなどは気象データの予測により既知である。しかし、第2項に関係する室温は非空調時間帯に未知となる。非空調時は熱負荷は零で、外気取り入れもないため、式(10)の左辺と右辺第5項は零である。これから非空調時の室温を求める次式が得られる。

$$\theta_{R,j} = \frac{1}{a_{A,0}} \left(\sum_L \sum_{p=0}^p a_{T,L,p} \theta_{0,L,j-p} + \sum_{q=1}^q a_{A,q} \theta_{R,j-q} + \sum_L \sum_{r=0}^r a_{S,L,r} J_{L,j-r} + a_R \zeta_{R,j} \right) \quad (14)$$

因みに、本式は時系列解析の分野でARXモデルと呼ばれる。

通常、午後9時に明日の天気予報の情報を得て次の日の気象データを予測し、それを用いて、まず式(14)により非空調時の室温を逐次求め、午前8時頃に空調が開始されると式(10)を用いて熱負荷を予測する。これが一般的な予測のプロセスである。

図-2.1 1985年2月1日～3月2日の気象データ予測結果

上から、気温、湿度（混合比）、水平面全天日射

実線：計測結果、点線：予測値

図-2.2 1994年2月15日～24日の気象と熱負荷予測結果

上から、気温、湿度（混合比）、水平面全天日射、熱負荷

実線：計測結果、点線：予測値

3. 応用例

秦野に建つTビルで観測された値を利用して本手法の性能を検討した¹⁴⁾。本建物では予測をリアルタイムに行い、その結果が実際に最適な運転への情報として用いられている。

まず、気象データの予測の例を示す。図-2.1には1985年の冬期（2月1日～3月2日）の例を、また図-2.2では、より詳細に日プロファイルを見るため、1994年の冬期（2月15日～24日）の例を示す。

表-4には上記期間の他に、1984年と1993年の夏期の予測を加えて計4シーズンの予測の精度を誤差の標準偏差として示す。1984,5年と1993,4年では10年の時間差があり予報の確度が向上していることが期待できるが、結果からは日射において若干良くなっている程度で差がないことが判る。なお、参照地と現地の気象を関係づける係数は表-1を用い、更新は行っていない。

図-3には、前日午後9時の天気予報を用いて24時間先までの時刻別熱負荷を予測した結果から日積算熱負荷を算出した値を示す。図-3.1は1994年の冬期（1月3日～2月27日）、図-3.2は1993年の夏期（7月20日～9月10日）の結果である。冬期は熱負荷の平均が2992 J に対し誤差の標準偏差は328 J で、相対誤差は12.2%である。夏期は平均 3719 J に対して偏差が 1067 J で相対誤差29%である。モデルの最適次数は式(10)の右辺第一項から順に冬期が (2,2,2,1,1)、夏期が (4,4,4,1,1) であった。

予測誤差は気象データの予測誤差によるものと、式(10)による熱負荷の予測誤差によるものに分解できる。そこで気象が完全に予測できたとして熱負荷を予測する

ことで両者の寄与を分離してみた。その結果、夏期・冬期とも、気象予測による誤差が1/3程度、熱負荷モデルによる予測誤差が2/3程度となった。

図-2.2の最下段には1994年冬期10日間の予測値の時刻プロファイルを示す。実測値と合致しないものもあるが、大きな推定誤差は見られない。実測値に突発的な変化が見られる日があるが、この原因は定かではなく、推定の立場からは雑音と呼ぶべき性質のものとしてしか扱えないようである。

4. 結論

蓄熱槽を合理的に運転するために不可欠な情報である翌日の熱負荷を予測する手法を提案し、実際の建物の観測値に適用してその性能を調べた。以下に本研究の結論と成果を列記する。

- 1) 熱負荷の予測を行うのに、天気予報による気象データ予測とそれを用いた熱負荷予測という2段階の方法を提案した。本モデルは時系列分野でARXモデルと呼ばれる形のモデルの一部を用いているが、熱負荷計算の手順に比較的近い構造を意図しており、その意味ではブラックボックスモデルではなくフィジカルモデルと言うことができる。
- 2) 熱負荷予測の安定度、精度の確認を実際の熱負荷データを用いて行った。本例で示した結果によれば、冬期の予測熱負荷誤差は約12%、夏期は29%で夏期に問題がある。内部発熱が熱負荷

期間	気温	湿度（混合比）	日射
1985.2.1～3.2	2.29	0.90	79.60
1994.1.26～2.24	2.29	1.36	64.40
1984.6.26～7.27	2.27	2.71	110.70
1993.8.1～8.28	2.49	2.77	99.20

表-4 気象データ予測の誤差（誤差の標準偏差）

図-3.1 熱負荷予測の日積算値（1994年1月3日～2月27日）

図-3.2 熱負荷予測の日積算値（1993年7月20日～9月10日）

図-3 熱負荷予測の日積算値 実線：計測結果、点線：予測値
（予測は前日の午後9時に行い予測の日積算値を熱負荷として示す。）

に大きく寄与することが大きな誤差の原因でもあろう。しかし、本例で用いた期間は夏としては気象の変動が激しい冷夏の気象であり、ある意味ではさほど精度は低くないとも言える。今後、他の手法との比較・検討が必要と考える。

- 3) 予測が気象予測と熱負荷予測と分離されているため、モデルの誤差がどちらに起因するかが調べ易い。本報で示した例では全誤差に対する前者の寄与が約1/3、後者が約2/3であった。つまり、天気予報の精度が100%になれば予測誤差は1/3程度減ずる言える。
- 4) 2手法で述べたように、本方法は他の多くの方法と異なり空調の運転時間が不定期であっても原理的には対応可能である。ただし、本報で具体的な検討はしていないので今後検討を行いたい。
- 5) 本手法は計測データから予測を行うだけではなく、本予測アルゴリズムを実際の建物に導入し、その予測の基に蓄熱システムが運転されたという実績がある。このことは本手法が十分実用的に応用できることを示している¹⁴⁾。

本研究で報告した熱負荷の予測は蓄熱槽の合理的運転管理に不可欠の条件ではあるが十分条件ではない。つまり、熱負荷の予測に基づいていかに運転するかは、蓄熱槽からの熱損失、電気料金の体系、取り出し水温の決定など冷凍機やヒートポンプの運転方法、等々多くの問題が残されていると考える。

謝辞：本研究に用いた観測データは東京電力の営業所で実測されたものである。快くデータの提供許可を頂いた（株）東京電力と、本手法を実際の建物に適用するに当たり本手法に関して多くの指摘を頂いた日建設計・猪岡達夫氏には記して感謝の意を表します。また、天気区分と日射量の関係は片岡卓氏（元京都大学建築学科学生・現、間組）の協力を得て作成したものであることを付記する。

参考文献

- 1) 吉田他、「蓄熱槽の合理的運転のための熱負荷予測」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1617～1618、1992
- 2) 吉田、「蓄熱槽運転のための熱負荷予測」、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 69～72、1992
- 3) 木村、「空調のコンピュータ制御のための負荷予測の一方」、日本建築学会大会学術講演梗概集・計画系、pp. 247～248、1972
- 4) 中原他、「空気調和設備の最適化制御について・その7」、日本建築学会大会学術講演梗概集・計画系、pp. 287～288、1976
- 5) 相楽、「蓄熱空調システムの熱負荷予測に関する研究」、日本建築学会計画系論文報告集、No. 440、pp. 11～20、1992
- 6) 金原他、「[ARIMAモデルによる空調熱負荷予測]」、計測自動制御学会論文集、Vol. 26、No. 6、pp. 721～728、1990
- 7) J.W.MacArthur、「On-Line Recursive Estimation for Load Profile Prediction」、ASHRAE Transactions Vol. 95、pp. 621～628、1989
- 8) 神村他、「空調熱負荷の実用化」、計測自動制御学会論文集、Vol. 27、No. 7、pp. 827～833、1991
- 9) 長井他、「熱負荷の短期的予測手法に関する研究」、大会学術講演梗概集、pp. 997～998、1991
- 10) 塩谷他、「（その1）夜間蓄熱運転のための日積算熱負荷予測への適用性の検討」、大会学術講演梗概集、pp. 131～132、1995
- 11) 川島他、「Hourly Thermal Load Prediction for the Next 24 Hours by ARIMA, EWMA, RLR and Artificial Network」、ASHRAE Transactions Vol. 101(1)、pp. 186～200、1995
- 12) 吉田他、「熱負荷計算用気象データのモデル化 - 気温の日周期成分についての検討」、日本建築学会論文報告集、No. 391、pp. 39～49、1988
- 13) 吉田他、「気象データの時系列モデルと確率的熱負荷に関する研究」、日本建築学会計画系論文集、463号、pp. 11～19、1994
- 14) 猪岡他、「蓄熱式空調システムの制御方式に関する研究（第3報）」、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 1577～80、1994
- 15) 「デジタル信号処理ハンドブック（システム推定）」、電子情報通信学会、オーム社、1994
- 16) 「計数・測定」、得丸他、培風館、1982
- 17) 「空気調和・衛生工学便覧第12版、1.基礎編、2.11 時系列モデル」、吉田（分担執筆）、空気調和・衛生工学会、1995

(1996年9月9日原稿受理、1997年1月21日採用決定)