

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2008 年度 ～ 2010 年度

課題番号：20560556

研究課題名(和文) 躯体の熱容量を利用した動的室温制御法の確立と検証

研究課題名(英文) Establishment of Dynamic Room Control by use of Building Thermal Storage

研究代表者

長井 達夫 (NAGAI TATSUO)

東京理科大学・工学部第一部建築学科・准教授

研究者番号：00316001

研究成果の概要(和文)：事務室等、間欠使用される室の空調方法について、1日の室温設定値を動的に変化させることによって日中のピーク電力の削減等を図る最適制御システムを構築した。対象とした制御システムでは、Web および無線による気象情報や室内環境データの取得、最適化計算、空調装置の設定温度変更を自動で行い、気象条件等に応じた最適な時々刻々の室温制御を行う。更に、計測ポイントが少なくても済む準最適運転法についても提案を行った。

研究成果の概要(英文)：Through this research, I constructed an optimal control system that may be implemented in HVAC system. The system collects data such as weather forecast or indoor environment through the Web or wireless devices, calculates the optimal room temperature trajectories to achieve, for example, minimum peak electrical demand during the daytime, and sends the optimized temperature set-points to the HVAC system. I also proposed a near-optimal control method that is easy to implement and effectively decrease electricity consumption during daytime.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,426,713	630,000	2,056,713
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,126,713	1,140,000	4,266,713

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：空調システム、躯体、熱容量、制御、エネルギー、平準化、負荷、電力

1. 研究開始当初の背景

電力の夜間移行を目指した蓄熱技術について、従来の蓄熱槽を利用した方式に加えて、近年では建物躯体の熱容量を利用した躯体蓄熱方式が導入されるようになり、蓄熱方式の選択枝も広がりを見せている。

躯体蓄熱方式に関して、わが国における実施例のほとんどは天井懐空間や床下に蓄熱する方式(以下「天井チャンバー方式」)である。この方式では、蓄熱槽との併用により

割安な電力量単価の適用が可能となるが、昼夜の給気・還気経路の切替え装置が必要となり初期設備費の増大につながる。

これに対して、時間外に通常の給還気経路を用いて室内冷暖房を行うことによって、装置容量・ピーク電力の低減、夜間電力移行、コスト低減を図ろうとする方式(以下「室直接方式」)については、特段の設備的改変を必要とせず、海外特に米国において研究が盛んであるが、その効果は、建物特性、空調シス

テムの特性、料金体系、気候特性によって大きく変わるため、それら多様な特性を持った建物・空調システムに適応可能な汎用的制御ロジックは未だに確立されていない状況である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では以下について明らかにする。

(1) 最適制御コントローラ実装のための要素技術の整備

研究代表者による既開発の室温設定値最適化プログラムは、動的熱負荷計算プログラム HASP に準拠した建物熱負荷モデルを用いて、与えられた気象条件、制約条件（許容室温範囲等）のもと、午後のピーク熱負荷といった評価関数を最小化するような時々刻々の室温設定値の軌跡を出力するものである。このプログラムを実システムに実装するために、①室の熱応答や空調機器類のモデル化手法、②気象要素を主とした予測手法の整備について検討する。

(2) 実証試験により最適運転法の効果を検証する

前項で得られた最適運転法を、実建物に設置された空調制御システムに組み込んで、期待された性能が得られるかどうかの検証を行う。

(3) 準最適な室温設定値決定ロジックを構築する

上記(1)、(2)のように、最適化手法を直接、制御系に組み込むには、計測点数の増大や壁体仕様データの入力（同定モデルによらず既存の熱負荷計算プログラムを流用する場合）等を行う必要があり、初期設備費・導入費の増大に繋がる可能性がある。そこで、上記(1)、(2)と並行して、計測項目を抑えつつ、最適運転に近い性能が発揮される準最適運転法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 最適制御コントローラ実装のための要素技術の整備

機器モデルについて、ここではパッケージマルチ方式を対象に、負荷率、室温等による簡易な特性回帰式を考え、実測値からの回帰によりモデル化を行う方法を検討する。併せて、直膨コイルの場合の除湿モデルを構築する。

気象予測については、時系列モデルと気象庁による予報を組み合わせる方法（ベイズ推定法）、あるいは気象情報会社より入手可能な時刻別の気温予測値を用いる方法について検討する。

また最適制御実験のために、Web による気象予測値の入手、室温や外気温等の測定データのオンライン取得、最適化計算、赤外線に

よるリモコン自動操作といった、一連の計測制御システムの構築を行う（図-1）。

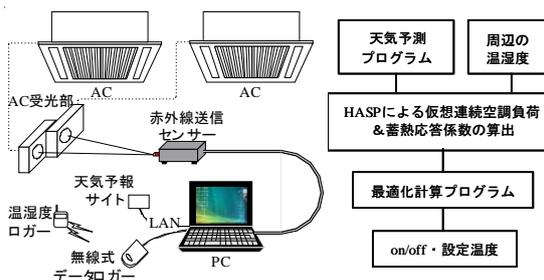


図1 最適制御のための計測制御フロー

(2) 実証試験

上記(1)で構築した計測制御システムを用いて、最適制御による場合、通常の運転の場合、および夜間に極力運転を行った場合等に対して実験を行い、制御方式間のピーク・積算消費電力、PMV 等による温熱環境等について算出・検討する。

(3) 準最適な室温設定値決定ロジックの構築

既開発の室温設定値最適化プログラムを用いて、各種の建物条件に対して計算を実施し、最適化された室温の軌跡をパターン化・整理し、例えば深夜の室温と最適蓄熱時間、あるいは最適な蓄熱時室温設定について回帰式により算出できるようにする。このようにして得られた準最適制御と最適制御との間の評価値（ピーク電力、積算電力等）の相違についてシミュレーションにより検討する。

4. 研究成果

(1) 最適制御コントローラ実装のための要素技術の整備

室の熱応答モデルについて、同定用モデルを用いて同定を行わなくても、シミュレーションモデル HASP の流用により、実測負荷と概ね対応した室温・負荷が得られることが分かった。また、システムモデルについては、実測データから得られた部分負荷特性を用いたモデル化が可能なことを確認した。

気象予測については、既開発のベイズ推定法によるものと、気象情報機関から発表される時系列予報を利用する2つの方法について検討したが、大きな差異は見られず、また、ベイズ推定法による場合、天気予報の数を増やしすぎると、逆に精度が劣化することが判明し、時系列予報を内挿する方法を採用することとした。

また、図-1に示す計測・制御システムを構築した結果、LAN の通信障害や計測エラー等が生じた場合にシステム全体が動作しなくなるなどの問題は見られたが、基本的に一連の制御が実行可能であることを確認した。

(2) 実証試験

実機による実証試験を実施し、期待されたピーク削減効果および不必要な蓄熱の回避がなされるかどうかの確認を行った。対象室は 54m² の小部屋 (RC 造) で北面に開口部があり、躯体蓄熱には若干不利な条件である。表 1 に実験ケースを示す。

表 1 実測期間と室温制御方法

ケース	実測期間	室温制御方法
W1	8/11-8/16	在室時間帯のみ27℃で手動運転
W2	8/17-8/23	在室時間帯のピーク消費電力を最小化する運転
W3	8/24-8/30	在室時間帯の積算消費電力を最小化する運転
W4	8/31-9/6	(日中許容最大電力25[W/m ²])
W5	9/7-9/13	在室時間帯の積算消費電力を最小化する運転
		(日中許容最大電力17[W/m ²])
W6	9/14-9/20	午後ピーク時間帯(13:00-15:00)の積算消費電力を最小化する運転
		(日中許容最大電力12[W/m ²])

実測結果より外気温等の環境条件の近い日を選び、ピーク消費電力及び積算消費電力の比較を行った。比較対象日の集計結果を表 2 に、また時系列グラフを図 2 に示す。比較 1 において、W2 は 24 時間積算消費電力が 2 倍に増加したものの日中のピーク消費電力をおよそ 26%削減でき、夜間空調が日中のピーク消費電力削減に効果があることがわかった。また、比較 2 において、W5 では在室時間の許容最大電力を設けたことで、W2 と比較して、在室時間の積算消費電力を 78%削減できた (ただし外界条件の若干の不一致が見られる)。W6 では 12:30~15:30 を極力運転しないように設定したことで、午前中の室温を低く、午後になると室温を上昇させる傾向が顕著に見られ、午後ピーク消費電力を 98%削減することができた。W1 と比較して W2、W5、W6 はそれぞれの評価値の削減効果を得られたが、執務開始時間の 8:30 まで低温度運転していたことで、8:30 の室温が 17.5~18.8℃、PMV が -1.57~-1.13 とかなり低い値を示していたが、1 時間後には -0.5 以上を示していた。

また問題点として、最適化計算による夜間蓄熱の効果を大きくしようとして日中許容最大電力を低く設定しすぎると、許容室温範囲に留まるような操作時系列が存在しなくなる (実行可能解が見つからない) 現象が見られた。このことから、適切な許容最大電力の設定が重要であることが明らかとなった。実験では、最適化計算によるものの他、強制的に夜間蓄熱を行う、あるいは午前中のみ許容最低室温に維持する、といった運転パターン間の比較についても実施した。その結果、夜間 19℃ に保つ夜間蓄熱では、通常の間欠運転と比較して 3 割程度の午後ピーク時間帯負荷の削減となり、躯体熱容量のポテンシャルを確認できたが、日積算負荷は倍増した。午前中のみ蓄熱では、実験日数の制約から明確にできなかったが、シミュレーションによる追加検討では、通常の間欠運転と比較して 7%程度のピーク負荷削減に留まった。

表 2 実測における消費電力の比較

比較対象日	平均外気温 [°C]	ピーク消費電力 [kW]	積算消費電力 [kWh]	
			在室	24h
比較1				
W1	8/12	29.1	1.67	15.4
W2	8/20	27.9	1.23	30.6
比較2				
W2	8/21	26.2	0.86	6.7
			0.65	28.0
W5	9/12	25.4	0.47※1	14.7
W6	9/17	24.6	1.05	3.5
			0.01	20.7

※1:ピーク消費電力の下段の値は午後ピーク消費電力(13:00-15:00)を示す。

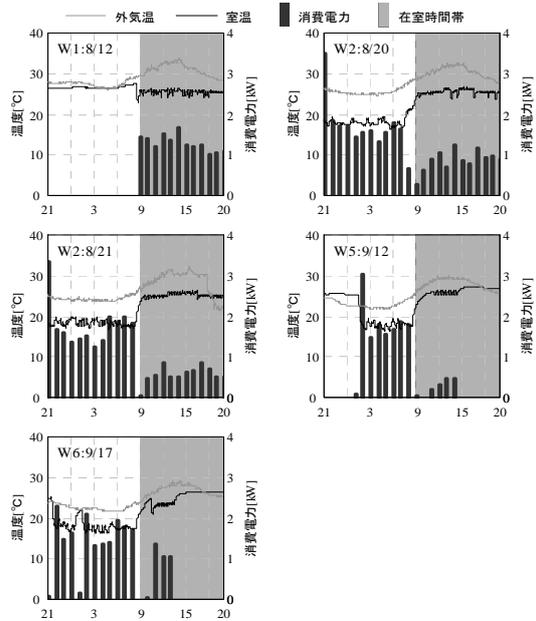


図 2 比較対象日の室温・外気温・消費電力

(3) 準最適な室温設定値決定ロジックの構築

準最適化運転の検討として、まず種々のモデル建物を想定した最適化計算によって、在室時間帯の積算消費電力を最小にする運転がどのような室温軌跡になるか、その傾向を検討した (図 3)。夜間蓄熱が無い時には、執務開始時から終業時まで上限の 27℃付近を辿っているのに対して、夜間蓄熱がある時には、夜間に 20℃前後、執務開始時には下限の 24℃付近から徐々に上昇していくような軌跡を辿っていることがわかる (図 3 左)。また、蓄熱時間の長さによる違いでは、蓄熱時間が短いほど、執務開始前の設定温度が高くなる傾向となっている (図 3 右)。

簡易ロジックでは最適化運転のように毎時計算させるのではなく、ある時刻のある要素によって夜間蓄熱時間を決める必要がある。前日が平日の場合、夜間蓄熱時間数判定は、毎日 0 時に行うことにした。また、前日が休日や祝日の日の場合 (月曜日など) は、最大の蓄熱時間数から検討して、前日の 19 時に判定を行うことにした。今回、検討要素として、室内表面温度、外壁表面温度を算出したが、それぞれ室内温度、外気温度とほぼ

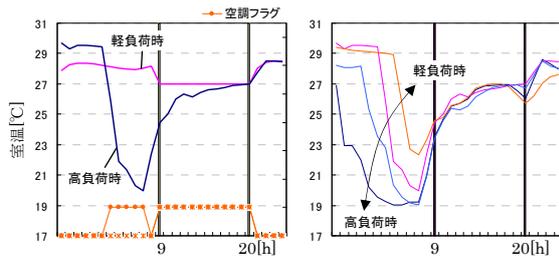


図3 在室時積算消費電力最小化運転の傾向

同じ傾向を示していたため、より簡易的にするために室温と外気温度を対象に夜間蓄熱時間との関係性を確認した。その結果、外気温度に比べて、室温の方では蓄熱時間の長さとの関係性が見られなかったが、基準的な蓄熱応答係数を用いて導き出した蓄熱負荷の積算値と夜間蓄熱時間との関係性を確認したところ、室温よりも関係性を確認することが出来た。これらより、判断要素を外気温度と積算蓄熱負荷に決定し、重回帰分析を行って夜間蓄熱時間を算出する計算式を導出した。

これらの解析で得られた回帰式を用いて空調制御プログラムを構築し、シミュレーションによる効果検証を行った。その結果、簡易ロジックは各建物モデルにおいて、基準運転よりもピーク顕熱負荷に関しては削減できたが、積算顕熱負荷は増大してしまった。しかしながら、最適化運転との比較では最適手法の値に近づけることが出来ていることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

井上由之助, 長井達夫: 躯体の熱容量を利用したピーク電力削減効果に関する実測的研究, 日本建築学会学術講演梗概集D-2, pp. 145-146 (2008, 広島)

[その他]

井上由之助: 室直接型躯体蓄熱方式における空調制御の最適化手法に関する研究, 東京理科大学修士論文, 2010.3

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長井 達夫 (NAGAI TATSUO)

東京理科大学・工学部第一部建築学科・准教授

研究者番号: 00316001

(2) 研究分担者

なし

(3) 研究協力者

井上 由之助 (INOUE YUNOSUKE)

東京理科大学・工学研究科建築専攻・修士課程 (当時)