

潜熱蓄熱材を用いた躯体蓄熱空調システムの蓄熱特性並びにエネルギー評価

中村 卓司 鈴木 道哉 長野 克則
(技術研究所) (技術研究所) (北海道大学)

A Study on the Energy and the Thermal Characteristics Evaluation of the Building Thermal Mass Storage System with the Phase Change Materials

by Takuji Nakamura, Michiya Suzuki and Katsunori Nagano

Abstract

In this paper, energy and thermal characteristics of the building thermal mass storage system based on the floor-supply displacement air-conditioning system with the granulated PCM (Phase Change Material) is evaluated. A typical commercial building model is simulated by a computer and the influence of the quantity of the PCM and the rate of the supply air into the room at the thermal charging period is examined. This simulation consider that the peak-cut is carried out by the PCM quantity smaller than the case of all cooling load supplied by the thermal storage. And the efficiency of the peak-cut, the thermal storage quantity of the each materials and the effect of the thermal environment improvement by the PCM is studied. And the energy evaluation of the air-conditioning system shows that the energy consumption is reduced by optimizing the thermal charging time all over cooling season.

概要

本報では粒状の潜熱蓄熱材(PCM)を利用した全面床吹出し型の躯体蓄熱空調システムに関して蓄熱特性ならびにエネルギー評価を行った。「全蓄」より少ないPCM量でピークカットを考へ代表的なモデルビルを対象にPCM敷設量と蓄熱時の室内への給気を送風割合の影響をシミュレーションにより検討を行った。その結果より、ピークカット性能、部位別の蓄熱量、PCMを設置することによる室内環境の改善などに考察を加えた。さらに空調システムを想定しエネルギー消費特性に関する評価を行い、月別に蓄熱時間を調整することでエネルギー消費特性を改善可能なことを示した。

§ 1. はじめに

電力の負荷平準化のため、建築躯体を蓄熱体を利用する躯体蓄熱空調システムが1990年頃より研究開発され実用化にいたっている。しかしながら躯体蓄熱の特性として、放熱の制御が難しく、電力消費削減が最も望まれる午後のピーク時に効果を発揮できないため、水蓄熱や氷蓄熱など他の蓄熱システムとの併用が行われてきた。これに対し、本システムは潜熱蓄熱材(Phase Change Materials、以下PCMと略)を建物内の二重床内に設置することで、建物側だけで電力のピークカットを達成し、蓄熱システムを成立させることを目的としている。これにより水や氷など外部蓄熱槽が不要となるほか、蓄熱材を細かくし蓄放熱性能を上げることで十分な負荷追従性が得られる、相変化温度が20℃と水蓄熱や氷蓄熱など他の蓄熱システムに比べ高いため熱源の成績係数が向上する等の特長を有する。

これまでに全面床吹出し空調システムをベースとした躯体蓄熱空調システムを対象に基礎的な研究を行い、本システムの基本性能を明らかにしてきた^{1)~3)}。また、経済性を考慮してPCM敷設量を減らしてもピークカットを可能とする空調方法のシミュレーションによる検討^{4)~6)}、PCMを実際の建物に導入した小規模実証試験⁷⁾、全面床吹出し空調システム以外の吹出し口を用いた床吹出し空調システムへの適用の検討⁸⁾などを行ってきた。

本報では既報のPCM敷設量削減に関するシミュレーションによる検討に追加検討を行った。これまでの検討²⁾ではPCMを床下に30mm程度の厚さでPCMを敷設すると、建物側だけの夜間蓄熱で昼間の全空調負荷を賄い、冷凍機の運転を行わないことが可能となる。(以下、本蓄熱方法を「全蓄」と称する。)これにより、躯体蓄熱空調システムの欠点であったピークカットに向かないという点を回避できることが明らかとなっている。しかしながら実用化を考えた場合、より

少ない PCM 敷設量での実現が望まれる。そこで「全蓄」から午後の「ピークカット」に視点を移し、より少ない PCM 敷設量でピークカットを可能とする運転方法について検討を行った。具体的には午前中に冷凍機を運転させることで PCM の蓄熱を温存し、ピーク時まで蓄熱状態を保持させる方法について検討した。また、PCM 敷設量と蓄熱する際の室内への送風割合をパラメータに条件を設定し数値シミュレーションによりケーススタディを行った。これより、ピークカット性能、部位別の蓄熱量、PCM を設置することによる室内環境の改善等の点に考察を加えた。さらに空調システムを想定し、エネルギー消費特性に関する評価を行ったので報告する。

§ 2. システムの概要

空調方式は全面床吹出し空調システムをベースとしている。本システムは穴あき OA フロアパネルと通気性タイルカーペットを用いて床全面より毎秒数 mm から十数 mm の微風速で空調を行う空調方式である。

図-1 は PCM を用いた全面床吹出し型の躯体蓄熱空調システム概念図を示す。夜間蓄熱時は冷凍機を運転し、床下空間に冷風を循環させ、コンクリートスラブ、コンクリート製の OA フロアパネル、PCM に冷熱を蓄える。また、PCM への蓄熱を促進するため、蓄熱時にも室内空間へ一定割合で送風を行い PCM 充填層に冷風を通気させる。昼間空調時は、その冷熱を床吹出し空調を行う際に室内へ放熱させる。

本報での PCM はパラフィンワックスを含有したマイクロカプセルを直径約 2mm の粒状に成型されたものを対象とした。これを粒状 PCM と呼ぶ。また、PCM は相変化温度が約 19℃、潜熱量が 120kJ/kg のものを対象とした。粒状 PCM の特長としては PCM 充填層内部にまで空調空気が入り込み、全面床吹出し空調時

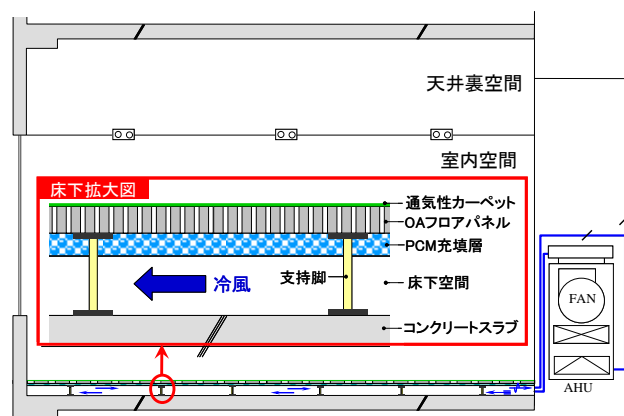


図-1 PCM を用いた全面床吹出し型躯体蓄熱空調システム概念図

は PCM 全面を空気が通過することで熱交換性能の向上が見込めることにある。

§ 3. 検討対象システム

3.1 対象建物概要

検討対象建物は図-2 に示す日本建築学会のオフィス用標準問題⁹⁾にある建物とした。このうち基準階の事務室の一室の二次元空間を計算対象領域とした。外壁など建築躯体の各物性値は文献⁹⁾にある標準値を使用した。外壁の熱貫流率は 1.0W/m²/K と算出される。室寸法は奥行き 12.3m、天井高 2.6m で、計算領域の幅は単位長とした。また、窓高さは 1.8m であるが、単位長での窓面積率は外壁全体での平均の 30% を適用した。床は今回のシステム用にコンクリートスラブ 120mm の上に 150mm の二重床を設けた。二重床は 22mm のコンクリート製の OA フロアパネルと 5mm のタイルカーペットから構成される。また、窓ガラスの仕様は Low-E ペアガラス (熱貫流率 1.7W/m²/K、反射率 34%、吸収率 33%、透過率 33%) に変更して検討した。図-3 に検討対象室の断面を示す。

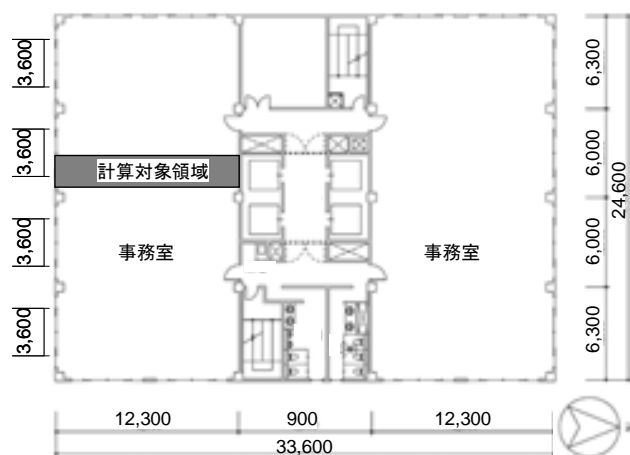


図-2 検討対象事務所ビル平面図

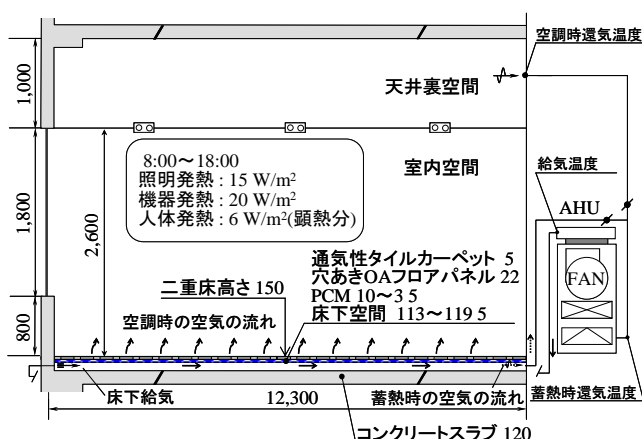


図-3 検討対象室の断面

3.2 シミュレーションプログラムと計算条件

シミュレーションプログラムは既報²⁾で開発されたPCMの相変化を考慮できる数値シミュレーションプログラムを用いた。

空調制御としては22:00からの躯体蓄熱時間(以下、蓄熱時)は13℃給気、一定風量30m³/h/m²で二重床内を循環し蓄熱を行い、蓄熱終了の8:00まで蓄熱運転を行った。また、蓄熱時に蓄熱促進のため一定割合で室内へ送風を行う。昼間の空調時間(以下、空調時)は8:00から18:00とし、空調機の制御は設定室温26℃に対する変風量制御とし、最大風量30m³/h/m²、最小風量5m³/h/m²、最低吹出し温度19℃と設定した。ただし、午前中の8:00から12:00の4時間は蓄熱温存を考え、吹出し温度19℃一定での給気に対する変風量制御とした。

気象データには、日本建築学会拡張アメダス気象データ¹⁰⁾のうち、東京における標準年データの中から、外気温と日射量を使用した。日射熱取得は、ペリメータゾーンに与えた。室内発熱負荷は、在室者数を0.1人/m²として人体6W/m²(顕熱負荷)、機器20W/m²、照明15W/m²の合計41W/m²とし、空調時に与えた。

シミュレーションのパラメータとしてはPCMの敷設密度(2kg/m²、4kg/m²、6kg/m²)、蓄熱時の室内への送風割合(0%、10%、20%、30%、50%、80%)を設定した。

§ 4. 建物側の負荷計算による躯体蓄熱特性の検討

4.1 代表日の設定

躯体蓄熱特性の検討は冷房代表日の周期定常計算で行った。冷房代表日は、5月1日から10月31日までを非蓄熱、休日無しで冷房計算を行い、最大日負荷となった9月1日とした。

4.2 午前中の蓄熱温存の効果

まず、全蓄よりPCM量を減らして午後のピークカットを行うために午前中若干冷凍機を動かさず蓄熱温存の効果の検証を行った。図-4はPCM敷設密度4kg/m²(潜熱量480kJ/m²)で午前中冷凍機を動かさなかったケース、図-5は午前中冷凍機を動かし蓄熱温存を行ったケースである。蓄熱時の室内への送風割合は20%とした。これによると、午前中冷凍機を動かさないケースでは16:56に追掛け運転が発生しているが午前中蓄熱を温存したケースでは午後は追掛けが発生せず午後のピークカットを実現している。

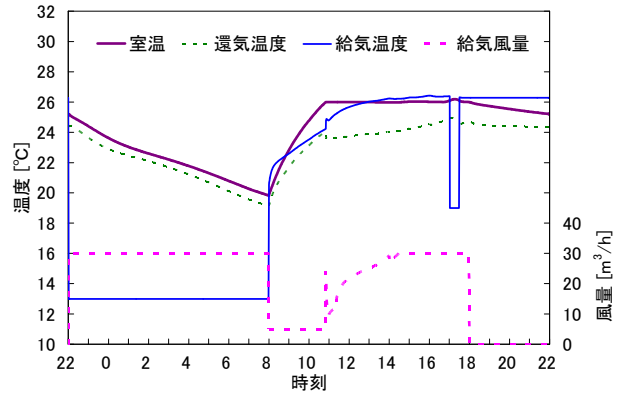


図-4 午前中冷凍機を動かさないケース

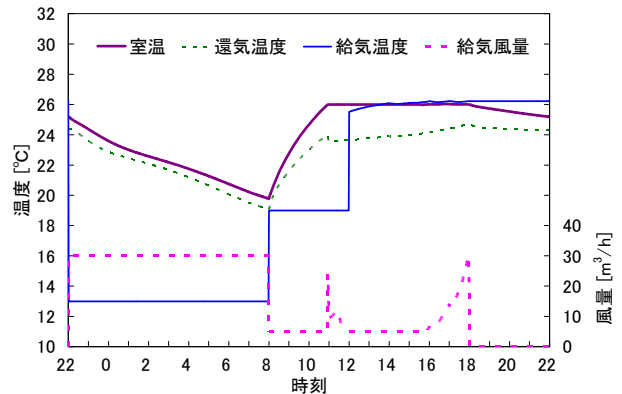


図-5 午前中冷凍機を動かす蓄熱温存ケース

表-1 PCM敷設密度による追掛け運転の有無

PCM敷設密度	追掛け開始時間	夜間移行率
2kg/m ² (240kJ/m ²)	16:08	86.2 %
4kg/m ² (480kJ/m ²)	無し	93.4 %
6kg/m ² (720kJ/m ²)	無し	92.0 %

4.3 PCM敷設密度の比較

次にPCM敷設密度の検討を行った。PCM敷設密度を2kg/m²、4kg/m²、6kg/m²と変化させた場合の午後の追掛け運転の有無、発生時刻および夜間移行率^{注1)}を表-1に示す。

PCM敷設密度6kg/m²、4kg/m²では午後の追掛け運転は発生していない。また、午前中蓄熱温存運転を行っているが、その負荷はわずかでありPCM敷設密度4kg/m²の場合で夜間移行率は93.4%となっている。これに対し、PCM敷設密度を減らしていくとPCM敷設密度2kg/m²で16:08に追掛け運転が発生した。ただし、いわゆるピーク時間帯(13時から16時)には追掛け運転は発生しなかった。

4.4 蓄熱時の室内への送風割合の影響の検討

PCMへの効率的な蓄熱には、給気の一部を室内に循環させることで強制的にPCM充填層内部を通風し蓄熱することが有効であるが、室温低下やコンクリート

スラブへの蓄熱低下をまねく。そこで、蓄熱時に室内へ送風する割合と床下を循環し還気する割合には最適値があると思われるため、その割合を変数とした。PCM 設置密度は前節の検討で追掛け運転の発生しない $4\text{kg}/\text{m}^2$ とした。

まず、図-6 に日最低室温を示す。いずれの条件においても、日最低室温は蓄熱終了直後の 8:00 頃に現れた。室内への送風割合が増えると、蓄熱時の室内への熱供給が増加するため、日最低室温が低下する。蓄熱時の室内への送風割合が 20% のときに室温は 20°C 程度となった。

次に図-7 に空調機負荷を示す。室内への送風割合が 30% を超えると空調機負荷が増加する傾向がある。これは、室内が冷えることで熱損失が大きくなるためと考えられる。また、送風割合が 0% では空調時の負荷が大きい。これは蓄熱時にある程度室内へ送風しないと PCM 充填層で十分に蓄熱が進行しないためと考えられる。

最後に図-8 に蓄熱時の部位別蓄熱量を示す。PCM への蓄熱量は、室内への送風割合が 10% より大きい範囲ではほとんど増加していない。また、PCM、コンクリートスラブ、OA フロアパネルの合計では送風割合が 20% で頭打ちとなっている。

以上を総合的に考えると今回の条件では蓄熱時の送風割合は 20% 程度が有利であると考えられる。

4.5 室内温熱環境

躯体蓄熱の懸念事項の一つに蓄熱時の室温低下がある。しかしながら PCM 躯体蓄熱では蓄熱時に送風の一部を室内に循環させるもの PCM が相変化状態にある場合は室内へ給気される温度は相変化温度付近に保たれ、逆に室温低下が小さくなる。図-9 はそれを比較した図であるが、最低室温は PCM 無しに比べて $\text{PCM}6\text{kg}/\text{m}^2$ 設置で 1.7°C 改善されている。

§ 5. 空調システムを考慮したエネルギー評価

5.1 検討システム

次に、熱源から搬送ポンプ、二次側空調機までを想定して空調システム全体でのエネルギー評価を実施した。図-10 に空調システムの概略図を示す。ただし、空調機に関しては個別に計算を行わず、前章の負荷計算にある南事務室の単位面積当たりの計算結果を全空調機に適用した。また、PCM 敷設量は $4\text{kg}/\text{m}^2$ 、蓄熱時の室内への送風割合 20% とし、5 月 1 日から 10 月 31 日までを土日を除くとして冷房計算を行った。

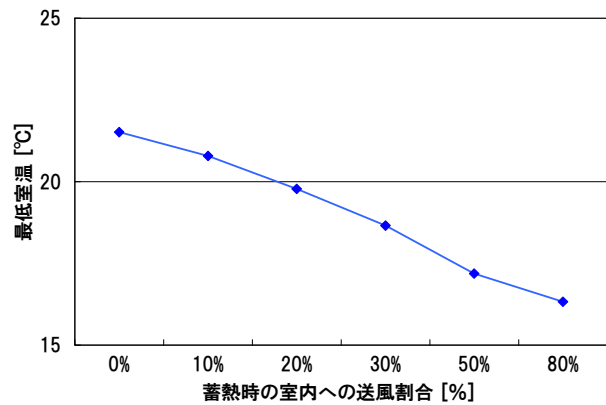


図-6 蓄熱時室内送付割合の違いによる日最低室温

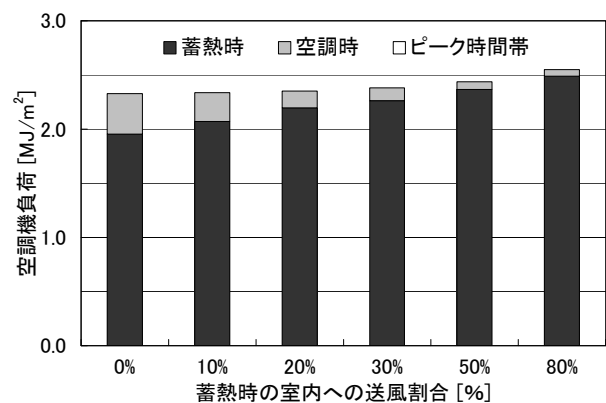


図-7 蓄熱時室内送付割合の違いによる空調機負荷

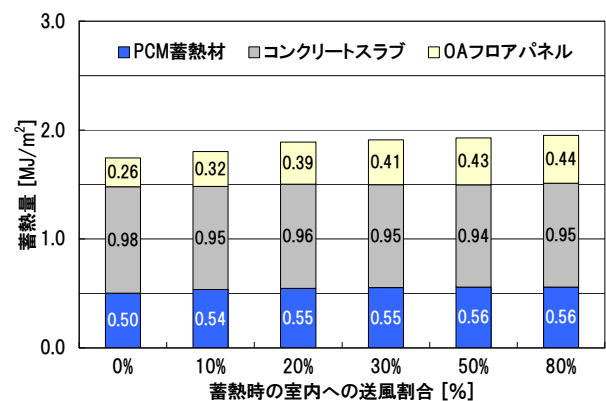


図-8 蓄熱時室内送付割合の違いによる部位別蓄熱量

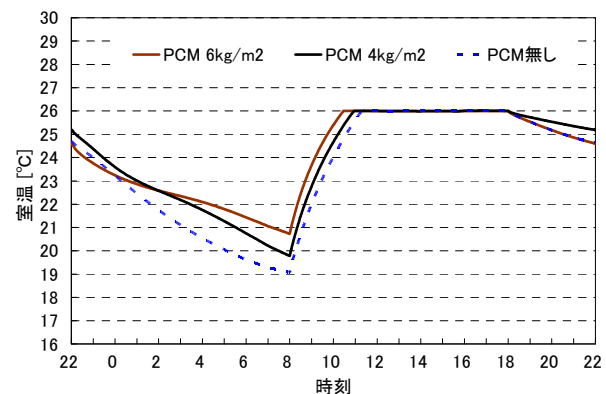


図-9 PCM 敷設量による室温の経時変化の比較

5.2 建物負荷の算出方法

建物負荷は室負荷と外気導入負荷を以下の様に分けて算出した。室負荷は前述の南事務室の単位面積当たりの値に建物全体の空調面積 4,880m² を乗じて建物全体の室負荷とした。外気導入は建物全体でまとめて 1 台の外調機を設け、外気負荷と在室者の潜熱負荷分をあらかじめ処理した後、ダクトで各空調機へ送るものとした。外気導入負荷は 9:00 から 18:00 まで 5m³/h/m² 与えるものとし、室負荷計算とは別に冷房期間分算出した。

5.3 空調システムの設定条件と計算条件

熱源の空冷ヒートポンプチラーは建物負荷を参考に定格冷却能力 265kW の機種を選び、必要台数分を与えた。また、台数制御と部分負荷の容量制御を行うものとし、文献¹¹⁾にある部分負荷特性と外気温度補正を与えた。空調ゾーンは各階 2 つの事務室を各々 1 ゾーンと考えた。ただし、風量は室負荷計算より求めた南事務室の単位面積当たりの風量を全 16 ゾーンに適用した。1 ゾーンの空調面積は 305m² であるので各空調機に最大風量 30m³/h/m² の能力を持ったファン動力を与え、回転数制御による変風量を考慮して動力を算出した。ファン動力は定格値を理論式より求め、部分負荷時の動力はファンの回転数制御特性¹¹⁾を与えて算出した。外調機は外気導入量 24,400m³/h 分のファン動力を理論式より求め、定風量で動力を算出した。搬送ポンプは非蓄熱ケースの建物負荷の最大負荷を用いて理論式より定格値を与え、部分負荷時はポンプの回転数制御特性¹¹⁾を与えて動力を算出した。

5.4 結果と考察

表 2 に月別、機器別の電力量を昼夜に分けて集計した結果を示す。表の最後の列は非蓄熱ケースに比べた合計の増加率である。まず昼夜別の比較では、熱源である空冷ヒートポンプチラーの夜間移行率は高く、冷房期間平均では 79.6% であるが、空調機などを含めたシステム全体では 75.1% となり、熱源以外の機器の運転も比重が大きい。

また、非蓄熱ケースに対する電力消費量の増加率では期間の合計で 11.5% となり、特に負荷の小くなる月で増加率が大きくなっている。これは中間期などの低負荷日に 10 時間蓄熱を行うことは、過大な蓄熱となるためと考えられる。そこで以下の方法で蓄熱時間の改善を行った。まず非蓄熱ケースの日空調機負荷の月平均値に最も近い日を月代表日とし、次に月代表日で蓄熱時間を変えて周期定常計算を行い夜間移行率が 100% となる蓄熱時間をその月の蓄熱時間として設定した。表 3 に月別に蓄熱時間を検討した結果を示す。



図-10 空調システム概略図

表 2 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	1,453	9,377	817	5,341	1,630	273	411	19,301	18.9
6月	2,414	11,011	849	5,390	1,630	273	462	22,029	19.3
7月	4,090	13,241	903	5,145	1,556	261	514	25,710	6.6
8月	5,653	16,480	1,324	5,635	1,704	286	654	31,737	2.6
9月	3,712	13,324	1,134	5,390	1,630	274	546	26,009	13.2
10月	1,514	10,253	875	5,390	1,630	273	455	20,389	16.9
期間計	18,836	73,686	5,901	32,291	9,777	1,641	3,042	145,175	11.5

表 3 各月代表日における蓄熱時間と夜間移行率

	蓄熱時間							合計	増加率 [%]
	4時間	5時間	6時間	7時間	8時間	9時間	10時間		
5月	80	94	100	100	100	100	100	100	
6月	69	83	97	100	100	100	100	100	
7月		73	85	95	100	100	100	100	
8月				85	94	100	100	100	
9月		81	92	100	100	100	100	100	
10月		75	88	100	100	100	100	100	

■:全蓄熱× ■:全蓄熱×、ピークカット○ ■:全蓄熱○、ピークカット○

表 4 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率 (蓄熱時間の改善後)

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	645	8,340	1,748	3,234	1,630	274	415	16,286	0.3
6月	1,912	10,044	1,346	3,749	1,630	274	475	19,429	5.2
7月	3,750	13,969	1,809	4,092	1,556	269	545	25,988	7.8
8月	4,848	19,341	1,901	5,047	1,704	304	705	33,850	9.4
9月	4,367	11,426	1,888	3,822	1,630	299	514	23,945	4.2
10月	2,729	7,306	2,434	2,744	1,630	304	384	17,530	0.5
期間計	18,252	70,427	11,126	22,687	9,777	1,723	3,036	137,029	5.3

次に表-3に示す月別の蓄熱時間で冷房期間のシミュレーションを再度行った結果が表-4である。電力消費量の増加率は期間の合計で5.3%に低減しており、低負荷月の増加率も大きく改善している。そのため蓄熱運転における蓄熱時間のチューニングは非常に重要であると言える。

最後に省エネ性の検討を行うため、一次エネルギー消費量での比較を行った。蓄熱を行うことによるメリットの一つに夜間電力のもつ低環境負荷特性がある。電力の一次エネルギー原単位としては省エネ法^{注2)}に昼夜別の値が定められているので、昼間9,970kJ/kWh、夜間9,280kJ/kWhを用いた。図-11は非蓄熱ケースと比較した月別の一次エネルギー消費量の削減率を示している。削減率は式(1)により定義した。

$$G = \frac{E_0 - E}{E_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、

- G : 非蓄熱ケースに比した一次エネルギー削減率 [%]
- E_0 : 非蓄熱ケースの一次エネルギー消費量 [kJ]
- E : 蓄熱ケースの一次エネルギー消費量 [kJ]

7月、8月で削減率がプラス、期間の合計でわずかにプラスとなるが負荷の低い月では一次エネルギー削減率はマイナスとなった。よって、一次エネルギーの点からは蓄熱運転を行う月の選択が必要である。また、比較のため蓄熱時間改善前の10時間蓄熱を行った場合も示したが、一次エネルギー削減効果は低く、負荷に合わせた蓄熱時間の設定が重要であるといえる。

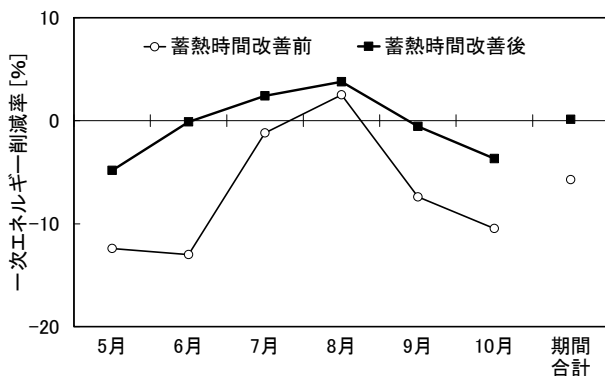


図-11 月別の一次エネルギー削減率

§ 6. おわりに

本報では PCM を利用した全面床吹出し型の躯体蓄熱空調システムに関し、建物側の PCM の相変化を考慮した負荷計算に加えて空調設備を対象としたエネルギーシミュレーションによる検討を行った。その結果、PCM を用いて建物側だけでピークカットを行えることを示した。また、PCM 敷設密度、蓄熱時の室内への送風割合、蓄熱時間など運用面での知見を得ることができ、システムの実用化に向けた基礎資料となると考える。

謝辞

シミュレーションプログラムの使用に当たっては東京大学 金田一清香助教に多大なるご助力をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

注)

注1) 夜間移行率[%] = 蓄熱時の空調機負荷 / (蓄熱時の空調機負荷 + 空調時の空調機負荷) × 100

注2) エネルギーの使用の合理化に関する法律

<参考文献>

- 1)長野克則, 武田清香, 持田徹, 嶋倉一實, 中村卓司:“粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究 第1報 小型実験システムの構築およびその蓄放熱特性”, 日本建築学会環境系論文集, No.579, pp.21-27, 2004
- 2)武田清香, 長野克則, 持田徹, 中村卓司:“粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究 その2 システムのモデル化と空調機負荷の夜間移行効果”, 日本建築学会環境系論文集, No.584, pp.47-52, 2004
- 3)武田清香, 長野克則, 持田徹, 中村卓司:“粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究 その3 マイクロカプセルベレットPCMの適用と室内温熱環境の評価”, 日本建築学会環境系論文集, No.587, pp.29-35, 2005
- 4)中村卓司, 長野克則, 武田清香, 岡部聡太, 山際将司, 角谷悟, 鈴木道哉:“粒状潜熱蓄熱材を用いた躯体蓄熱空調システムに関する研究 (その1) PCMの適正使用量とピークカット特性に関する検討”, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1817-1820, 2007
- 5)中村卓司, 鈴木道哉, 長野克則, 金田一清香, 木虎久隆, 中澤和弘, 寺島崇史:“粒状潜熱蓄熱材を用いた躯体蓄熱空調システムに関する研究 (その2) PCM敷設量の違いによる性能評価に関する検討”, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1631-1634, 2008
- 6)中村卓司, 長野克則, 武田清香:“潜熱蓄熱と躯体蓄熱を併用した床吹き出し空調システムのエネルギー・室内温熱環境シミュレーション”, 第39回熱シンポジウムテキスト, 日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会, pp.115-118, 2009
- 7)中村卓司, 鈴木道哉, 松下景太, 松岡敏昭, 長野克則:“一体成形潜熱蓄熱材を用いた全面床吹出し型躯体蓄熱空調システムに関する研究”, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.903-906, 2009
- 8)木虎久隆, 長野克則, 金田一清香, 中村卓司, 鈴木道哉:“粒状潜熱蓄熱材を用いた躯体蓄熱空調システムに関する研究 (その3) 吹き出し口を用いた床吹き出し空調システムへの適用に関する検討”, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.911-914, 2009
- 9)滝沢博:“標準問題の提案 (オフィス用標準問題)”, 第15回熱シンポジウムテキスト, 日本建築学会環境工学委員会熱分科会, pp.35-42, 1985
- 10)日本建築学会: 拡張アメダス気象データ(2000)
- 11)(財)環境建築・省エネルギー機構:“建築物の省エネルギー基準と計算の手引き (平成15年度版)”, 改定10版, 2003

