### 第3章 潜熱蓄熱材による対策技術

### 3.1 目的

本研究は、第1章で述べたように、建材等の工夫による対策の一環として、潜熱蓄熱材 の活用について検討を行うことを目的の一つとしている。建物における潜熱の利用に関し ては、様々な検討事例が見られる(散水(布施・高橋ら、2006)<sup>1)</sup>、保水性建材(足永ら、 2014)<sup>2)</sup>、光触媒(武田ら、2006)<sup>3)</sup>、霧噴霧(ファーラムら、2012)<sup>4)</sup>など)。潜熱を利用 する建材の場合、相変化に伴う熱量を使える分、顕熱交換を主とする一般の建材の場合よ り温度変化が緩慢になる。潜熱蓄熱材(PCM: Phase Change Material)は、化学反応(吸 収、混合、水和)時の吸熱・発熱の効果により、任意の温度で相変化が生じる材料であり、 利用時の温度範囲を拡張するものと言える。既往の研究では、潜熱蓄熱材を建物に適用す ることで、室内の熱負荷変動の平準化(近藤ら、2001)<sup>5)</sup>や暖房エネルギーの削減(佐藤・ 尾崎ら、2012)<sup>6)</sup>等の効果が確認されている。

第3章では、潜熱蓄熱材による対策技術を開発することを研究目的とする。本章で実施 した検討内容について以下に概要を示す。

潜熱蓄熱材の熱物性

潜熱蓄熱材は、相変化に伴いみかけの比熱が温度により変化する。そこで、示差走査熱 量測定(DSC: Differential Scanning Calorimetry)による物性値の評価技術を検討すると ともに、いくつかの製品について熱物性値の計測を実施した。また、恒温室において実大 の試料を用いた加熱・冷却実験を行い、DSCの計測結果との比較も行った。

② 潜熱蓄熱材の数値モデル

熱物性に関して非線形性を有する潜熱蓄熱材の特徴を考慮した数値モデルを作成し、潜 熱蓄熱材を含めた多層構造の壁体を対象として任意の気象条件下で非定常計算を行う計算 モジュールを開発した。さらに、開発した計算モジュールを、汎用の空調熱負荷シミュレ ーションシステムに組み込むための理論的検討を行い、年間の空調熱負荷計算において潜 熱蓄熱材の効果を考慮できるように改良を施した。

なお、外壁の断熱等を含めた建材等の工夫による総合的な熱負荷計算の検討は第6章で 実施する。

### 3.2 潜熱蓄熱材の熱物性

### 3.2.1 示差走査熱量測定の概要

### (1) 測定原理

示差走査熱量測定(DSC)とは、試料セルと参照セルの熱流差を求めることにより、融点、 潜熱量などの熱特性を分析するものであり、プラスチック、有機材料などの熱分析に幅広 く活用されている。

温度制御されたヒートシンク内において、試料と標準物質をそれぞれホルダーに設置し、 ヒートシンクとの間には熱抵抗体を設ける。熱抵抗体を通して試料と標準物質に熱の出入 りが生じると、試料に比較してヒートシンクは大きな熱容量を有しているので、ヒートシ ンクー試料間、及びヒートシンクー標準物質間に流れる熱流差は検知している温度差に比 例する。図3-1に示差走査熱量測定の原理を示す。

標準物質、空容器及び試料について同一の条件で示差走査熱量測定を実施し、次式から 試料の比熱を求める。図3-2に測定のイメージを示す。

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \frac{m_0}{m} C_{p0} \tag{3.1}$$

ここで、 $C_p$ : 試料の比熱[J/(kg·K)]、 $C_{p0}$ : 標準物質の比熱[J/(kg·K)]、 $\Delta H$ : 空容器 と試料の DSC 曲線の差[J/(kg·K)]、 $\Delta H_0$ : 空容器と標準物質の DSC 曲線の差[J/(kg·K)]、  $m_0$ : 標準物質重量 [kg]、m: 試料重量[kg]



図3-1 示差走査熱量測定の原理



ΔH:空容器と試料のDSC曲線の差[J/kgK] ΔH<sub>0</sub>:空容器と標準物質のDSC曲線の差[J/kgK]

図3-2 示	差走査熱量測定のイメー	ジ
--------	-------------	---

(2) 測定概要

標準物質はサファイアとする。比熱の温度特性については、JIS K7123(プラスチックの 比熱容量測定方法)において、α-アルミナ(合成サファイア)の数値が-150℃から500℃ の範囲で規定されているので、それを用いた。

試料については、今回は潜熱蓄熱材として、以下の2種類について、示差走査熱量測定 を行った。

◆材料A: 有機系潜熱蓄熱材(パラフィン)

◆材料B:無機系潜熱蓄熱材(硫酸ナトリウム10水和物)

**写真3-1(a)**に有機系潜熱蓄熱材(パラフィン)、**写真3-1(b)**に無機系潜熱蓄 熱材(硫酸ナトリウム 10 水和物)を示す。

固相で保管した試料を80℃で湯煎後、撹拌し液相のものを10mg 採取した。 測定に用いた装置の仕様は以下の通りである。

- ◆熱流計測方式:熱流束型
- ◆温度範囲:-150~725℃
- ◆測定範囲:±350mW

- ◆感度:0.2μW
- ◆昇温速度 0.01~100℃/min
- ◆冷却ユニット:電子冷却
- ◆不活性ガス:N<sub>2</sub>

主な計測条件を以下に示す。

- ◆昇温降温速度:0.1℃/分~10℃/分
- ◆温度パターン: $20^{\circ}$ C→ $50^{\circ}$ C→ $-20^{\circ}$ C→ $50^{\circ}$ C→ $-20^{\circ}$ C
- ◆測定容器:アルミパン(オープン、クローズの2種類)

測定風景を写真3-2に示す。



- (a) 有機系潜熱蓄熱材
- (b)無機系潜熱蓄熱材





(a) 試料充填

(b) ヒートシンクへの設置

写真3-2 測定風景

### 3.2.2 示差走査熱量の測定結果

### (1) 試料間のばらつき

製造業の品質管理においては、設計者が目標として設定した品質が工業製品として担保 されている必要がある。そのような適合品質を高めるためには、ばらつき(標準偏差)を 抑制することが重要となる。そこで、試料を複数用意し、それぞれのDSC曲線を作成する ことにより、試料間のばらつき度合いを調べることにする。試料の抜き取りにおいては、 できるだけ同一の場所からの抽出は避けるように配慮した。

計測の諸条件を以下に示す。

- ◆昇温・降温速度 10℃/min
- ◆昇温および降温1 サイクル
- ◆試料種類と個数:無機系潜熱蓄熱材(硫酸ナトリウム 10 水和物)の相変化温度 18℃、 22℃、28℃製品(B18、B22、B28 と称する。)について、それぞれ 5 個

測定結果を図3-3に示す。昇温時において、B18 は 22℃近辺、B22 は 27℃近辺、B28 は 35℃近辺でピークが見られ、試料間の測定に偏りはあまり見られない。降温時において、B18 は 5℃近辺、B22 は 10℃近辺、B28 は 18℃近辺でピークが見られ、この場合も試料間の 測定に偏りはあまり見られない。したがって、試料間のばらつきという点では、製品の質 に問題はないと言える。



図3-3 複数サンプルによる示差走査熱量の測定結果の比較 (無機系潜熱蓄熱材 (18℃、22℃、28℃製品、n5)、昇温・降温速度:10℃/min)

### (2) 潜熱量

潜熱量を求めるには潜熱域を設定する必要がある。JIS K7121(プラスチックの転移温度 測定方法)では、DSC 曲線のベースラインからの離反・接近より潜熱域を設定している。 本研究では、JIS K7121 に加えて、DSC 曲線の勾配から 2 つの変曲点を割り出し、それぞれ 相変化の開始・終了と見なすことにより潜熱域を設定した場合も検討した。

変曲点による方法をα法、JIS K7121 による方法をβ法と呼び、パラフィン(15℃製品) について、DSC 曲線から潜熱域を求めた結果を表3-1に一覧する。昇温・降温過程とも にα法の潜熱域の方がβ法のものより広めとなる。ピーク温度及び潜熱量はα法による数 値を記載しており、昇温時、降温時で潜熱量はほぼ一致するが、ピーク温度は異なる。 図3-4は各 DSC 曲線を示したものである。昇温・降温速度が低下するにつれて、昇温・ 降温のヒステリシスが小さくなることが分かる。また、0.1℃/min では過冷却現象が見ら れる。

	昇温降温	昇温過程				降温過程			
材料	速度	潜熱域α	潜熱域β	ピーク温度	潜熱量	潜熱域α	潜熱域β	ピーク温度	潜熱量
	°C/min		°C		J/g		°C		J/g
パラフィン 設定相変化温度15℃ 液状	10	6.1~41.0	14.8~28.9	20.4	199	-10.1~11.7	-0.8~ 9.1	6.4	190
	5	5.0~33.3	14.8~24.3	18.7	201	-5.0~11.8	$2.6\sim 9.9$	8.9	196
	1	7.1~20.7	13.4~18.0	16.0	197	4.7~12.3	8.3~11.1	11.4	191
	0.1	8.6~16.4	13.0~15.3	14.1	193	6.5~12.9	10.6~11.9	12.3	191

表3-1 潜熱量の計測結果(パラフィン、15℃製品)



図3-4 昇温・降温速度が異なる示差走査熱量の計測結果の比較 (有機系潜熱蓄熱材(15℃製品)、昇温・降温速度:0.1、1、5、10℃/min)

### (3)相変化回数によるストレス試験

相変化を繰り返したときの潜熱量の推移を確認するため、昇温・降温速度 10℃/min に て昇温および降温過程を繰り返すことにより、ストレス試験を実施した。今回は 300 サイ クルを設定した。図3-5に試験結果を示す。有機系潜熱蓄熱材は、300 サイクル繰り返 しても潜熱量の低下はみられず、安定した熱量挙動を示していた。一方、無機系潜熱蓄熱 材では、昇温過程において 20 サイクルで1 サイクル目の 55%、300 サイクルで 43%となっ ており、降温過程では 20 サイクルで 70%、300 サイクルで 55%と潜熱量の推移が見られた。 また、昇温過程と降温過程での潜熱量の相違がみられ、蓄熱量が放熱量と比べ少ない現象 が確認された。

図3-6にサイクル数とDSC 曲線の関係を示す。有機系潜熱蓄熱材の場合、1 サイクル と 300 サークルでDSC 曲線にほとんど変化を生じていない。一方、無機系潜熱蓄熱材の場 合、昇温過程でサイクルが進むにつれてピーク部分が潰れてしまい、降温過程ではその影 響を受けて、潜熱量の相違が生じている。既往の研究では、有機系潜熱蓄熱材の潜熱量の 低下に至るまでの相変化回数は3 サイクルから5,000 サイクルとも報告されており<sup>7)</sup>、300 サイクル以降で潜熱量が低下する可能性は十分にある。無機系潜熱蓄熱材の潜熱量は収束 傾向にあり、300 サイクル以降も緩やかに減少しているため、1 サイクル目の 30%以上の 潜熱量は保持できると推定される。



図3-5 繰り返し回数と潜熱量の関係(昇温・降温速度:10℃/min)



図3-6 繰り返し回数とDSC曲線の関係(昇温・降温速度:10℃/min)

# 3.2.3 実大サンプルを用いた計測

### (1) 見かけの比熱計測装置

実大の潜熱蓄熱材を用いて見かけの比熱 計測を行う方法を説明する。図3-7に装 置構成を示す。一定の速度で昇温および降 温できる平板状の2枚の熱板で試験体を 挟み,熱板から試験体に供給(または除去) される熱量を熱流計で測定する。試験体の 液化・変形に配慮し、試験体は水平に設置 した。試験体の中心部には5枚の熱流計 (50mm×50mm)を設置した。

温度制御は恒温室の室温制御とし、15 分 で 1℃の温度変化を設定した。室温の制御 パターン例を図3-8に示す。この場合、 室温を-10℃から 40℃で変化させ、昇温過 程と降温過程の間に 40 分の養生期間を設 けている。

### (2) 見かけの比熱計測結果

実大サンプル(300mm×300mm×10mm)を用 いて、潜熱蓄熱材の見かけの比熱計測装置







による温度及び熱量の時間変化のデータ取得を行い、温度と熱量の関係を図3-9に示す。 潜熱蓄熱材量は無機系潜熱蓄熱材(18℃製品)を用い、昇温・降温速度は 0.0667℃/min とした。温度と積算熱量は概ね比例関係にあるが、傾きが大きく現れている箇所があり、 相変化の影響と考えられる。また、降温過程では 15℃近辺で積算熱量が減少(材料が周囲 に放熱)しているのに、材料の温度が上昇しており、過冷却現象をうかがい知ることがで きる。

図3-10に実大サンプルによる見かけの比熱の計測結果を示す。

DSC との比較を行ったものが表3-2である。DSC では昇温時と降温時の潜熱量はほぼ一 致するのに対して、実大サンプルでは昇温過程の方が大きな値を示した。実大サンプルの 場合、全体の量が多いため、内部に放熱しきれなかった潜熱蓄熱材が存在する可能性が考 えられる。そのため、昇温時の潜熱量は、0.1℃/minのDSC と実大サンプルの結果が近く、 降昇温時の潜熱量は、1℃/minのDSC と実大サンプルの結果が近い。

図3-11にDSCによる見かけの比熱の計測結果を示す。DSCにおいて、1℃/minを選択 した場合、実大サンプルと似た比熱の分布が得られている。



<sup>(</sup>無機系潜熱蓄熱材 (18℃製品、300mm×300mm×10mm)、昇温・降温速度:0.0667℃/min)

	昇温降温	温降温 昇温過程				降温過程			
試験	速度	潜熱域α	潜熱域β	ピーク温度	潜熱量	潜熱域α	潜熱域β	ピーク温度	潜熱量
	°C/min		°C		J/g		°C		J/g
DEC	1	$10.5 \sim 25.2$	16.5~20.5	18.2	104	4.1~14.1	7.7~10.0	9.4 (11.4)*	106
DSC	0.1	12.1~22.4	16.7~20.8	17.1	132	7.8~15.1	10.3~12.6	12.4	131
熱流計	0.0667	8~26	16~25	17	136	5~15	9~15	14	116

表3-2 DSCと実大サンプル試験の比較

\*()内は2つピークが確認された時のもう一方の温度





(無機系潜熱蓄熱材 (18℃製品、300mm×300mm×10mm)、昇温・降温速度:0.0667℃/min)



図3-11 みかけの比熱 (DSC) (無機系潜熱蓄熱材 (18℃製品)、昇温・降温速度:1℃/min)

# 3.3 潜熱蓄熱材の数値計算手法

# 3.3.1 基礎方程式

• •

# (1) 相変化のモデル化

相変化による潜熱の効果を本来の比熱に加え、「見かけの比熱」として扱う。基礎方程式を以下に示す。

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$
(3.2)

ここで、 $C_p$ :比熱、T:温度、 $\lambda$ :熱伝導率、ho:密度 である。

$$C_p = C_s + (C_l - C_s)\phi + L\frac{d\phi}{dT}$$
(3.3a)

$$\lambda = \lambda_s + (\lambda_l - \lambda_s)\phi \tag{3.3b}$$

ここで、誤差関数を導入し、相変化率  $\phi$  を以下の関数で表す。

$$\frac{d\phi}{dT} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \exp[-\varepsilon^2 (T - T_f)^2]$$
(3.4)

$$\varepsilon = 1/\sqrt{2}\Delta T \tag{3.5}$$

 $\Delta T$ :相変化温度間隔の 1/2

図3-12は物性値の温度依存のイメージを示したものである。相変化により見かけの 比熱は急激な変化を伴うが、相変化率を連続的な関数で定義することで、潜熱を考慮した 比熱の変化および熱伝導率の変化を、円滑に取り扱うことができる。



# (2) 差分計算モジュールの作成

既往の研究では、潜熱蓄熱材の非線形性に対応するため有限差分法、もしくは有限体積 法で離散化されており、本研究においては有限差分法を用いる。式(3.2)を有限差分により 完全陰解法で離散化すると以下のようになる。

$$\rho_{i}C_{pi}^{n+1}\frac{T_{i}^{n+1}-T_{i}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_{i}}\left(-\lambda_{i-1/2}^{n+1}\frac{(-T_{i-1}^{n+1}+T_{i}^{n+1})}{\Delta x_{i-1/2}} + \lambda_{i+1/2}^{n+1}\frac{(-T_{i}^{n+1}+T_{i+1}^{n+1})}{\Delta x_{i+1/2}}\right)$$
(3.6)

計算格子点の変数の配置について図3-13に示す。格子点間における熱伝導率は調和 平均を適用する。



図3-13 格子点の配置

差分計算モジュールの概要を図3-14に示す。(a)は全体の計算の流れを示しており、 ファイル入力および解析条件設定のプリ部分、熱伝導方程式の時間発展ループ部分、ファ イル出力のポスト部分から成る。(b)は熱伝導方程式の時間発展を行うサブルーチンである。 ここでは、物性値の設定、係数行列の計算、右辺ベクトルの計算、境界条件の設定を行い、 マトリックスソルバー(BiCG-Stab 法)で時々刻々の温度を計算する。なお、物性が非線 形となるため式(3.6)を解くには Newton 法等による計算処理が通常必要となるが、ここで はマトリックスソルバーの反復計算の過程で熱物性値を更新し、収束判定を行う。(c)はサ ブルーチン構成である。





# 3.3.2 理論解によるモデル検証

# (1) ノイマン問題

相変化現象のベンチマークテストとして取り上げられるノイマンの凍結問題を用いて、 開発したモデルの検証を行う。図3-15に示すように半無限固体の表面温度を固定する 1次元の相変化問題を考え、時間経過とともに凝固面が伝播する現象を検討対象とする。



ノイマンの凍結問題に関する理論解は、次に示す、半無限固体の非定常熱伝導の理論解 を基本としている。

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0} = erfc\left[\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right]$$
(3.7)

凍結域、非凍結域でそれぞれ式(3.7)を適用し、凍結深さ*xp*においては、固相温度と液相 温度が一致し、相変化熱を含む熱フラックスの収支式が成立すると仮定する。そうすると、 各相の温度分布の理論解が、式(3.8a)、(3.8b)と求まる。このとき、凍結深さ*xp*は式(3.8c) を満足する。

固相の温度 
$$(0 \le x \le x_p)$$
:  

$$T_s = T_1 + \frac{T_p - T_1}{erf\left(\frac{x_p}{2\sqrt{\kappa_s t}}\right)} erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa_s t}}\right)$$
(3.8a)

液相の温度 $(x_p \leq x)$ 

$$T_{\ell} = \frac{T_p - T_0 erf\left(\frac{x_p}{2\sqrt{\kappa_{\ell}t}}\right)}{erfc\left(\frac{x_p}{2\sqrt{\kappa_{\ell}t}}\right)} + \frac{T_0 - T_p}{erfc\left(\frac{x_p}{2\sqrt{\kappa_{\ell}t}}\right)} erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa_{\ell}t}}\right)$$
(3.8b)

界面の熱フラックス $(x = x_p)$ 

$$\frac{\sqrt{\pi}L\rho_{s}x_{p}}{2\sqrt{t}} = \frac{\lambda_{s}}{\sqrt{\kappa_{s}}} \frac{T_{p} - T_{1}}{erf\left(\frac{x_{p}}{2\sqrt{\kappa_{s}t}}\right)} exp\left(-\frac{x_{p}^{2}}{4\kappa_{s}t}\right)$$
$$-\frac{\lambda_{\ell}}{\sqrt{\kappa_{\ell}}} \frac{T_{0} - T_{p}}{erfc\left(\frac{x_{p}}{2\sqrt{\kappa_{\ell}t}}\right)} exp\left(-\frac{x_{p}^{2}}{4\kappa_{\ell}t}\right)$$
(3.8c)

(2) モデル検証

潜熱蓄熱材を想定して、表3-3の物性値を設定し、差分計算と理論解の比較を行った。 差分計算においては、空間分割数 500、時間刻み 12 分とした。

項目	固相	液相
密度 [kg/m³]	1,4	20
熱伝導率 [W/m•K]	0.63	0.57
比熱 [kJ/kg•K]	3.7	3.5
潜熱 [kJ/kg]	106	
融点 [℃]	22	

初期温度 [℃]

表3-3 計算条件

図3-16に凍結深さの計算結果を表す。時間とともに、凍結が進行し、20日目には凍結深さは 30cm 以上に到達する。凍結深さの計算結果は、理論解と良く合致する。

30



図3-17に示す温度分布についても、数値モデルの再現性は十分高いと言える。相変 化温度の22℃を境に、各時間の温度分布が明瞭に異なっており、理論、計算ともに、固体 では直線状、液体側では深部温度30℃に対して漸近する曲線状となる。

このように、計算と理論は良く合致しており、差分計算モジュールは適切にプログラム が組まれていると考えられる。





## 3.3.3 空調熱負荷計算プログラムへの潜熱蓄熱効果の組み込み

### (1) 応答係数法と差分法

空調熱負荷計算では応答係数法により熱伝導方程式を計算している場合が多い。一方、 潜熱蓄熱材は今回差分法で計算しているため、両者の接続にはいくつかの工夫が必要とな る。通常の壁は応答係数法、潜熱蓄熱材を有する壁(PCM壁)は差分法で解き、両者はモ デル上混在することになる。差分法がモデル上混在する状況に関して、壁体内に問題は留 まらず、間欠空調運転や多数室換気の計算による室温変動やふく射の影響にも及ぶ。した がって、空調熱負荷計算で取り扱われる各種熱応答係数とも理論的整合を図る必要がある。

### (2) 差分壁を考慮した各種熱応答

全ての壁は、応答係数により表現できるとすると、壁 i の内表面における熱収支は式 (3.9)で表される<sup>8)</sup>。

$$\alpha_t \theta_{si} - \alpha_r \sum_j g_{ij} \left( 1 - \frac{\phi_{A_i}}{\alpha_t} \right) \theta_{sj} = \theta_{oi} \phi_{T_i} + \alpha_c \left( 1 - \frac{\phi_{A_i}}{\alpha_t} \right) \theta_r$$
(3.9)

ここで、 $g_{ij}$ :ふく射吸収係数、 $\alpha_c$ :対流熱伝達率、 $\alpha_r$ :放射熱伝達率、 $\alpha_t$ :総合 熱伝達率、 $\theta_s$ :室内壁表面温度、 $\theta_o$ :外気温度、 $\theta_r$ :室温、 $\phi_A$ :吸熱応答、 $\phi_T$ :貫流 熱応答である。ここで、 $g_{ij}$ を以下のように仮定する<sup>8</sup>。

$$g_{ij} = A_j / \overline{A}$$
(3.10a)  
$$\overline{A} = \sum_j A_j$$
(3.10b)

次に、通常壁(応答係数)と PCM 壁(差分)が混在する場を考える。差分壁については、 仮想温度を用いず壁の表面温度が直接算出されるので、まず、通常壁について整理する。 壁の種類を個別に扱うため、通常壁で 0、PCM 壁で 1 となる関数  $\delta_i$  を便宜的に導入する。 式(3.10)を式(3.9)に代入し、両辺に表面積  $A_i$  を掛けて通常壁のみで *i* に関する総和を 取ると以下の式が得られる。

$$\alpha_{t}\sum_{i}(1-\delta_{i})A_{i}\theta_{si}$$

$$-\alpha_{r}\sum_{i}(1-\delta_{i})\frac{A_{i}}{\overline{A}}\left(1-\frac{\phi_{A_{i}}}{\alpha_{t}}\right)\left\{\sum_{j}(1-\delta_{j})A_{j}\theta_{sj}+\sum_{j}\delta_{j}A_{j}\theta_{sj}\right\}$$

$$(3.11)$$

$$=\sum_{i}(1-\delta_{i})A_{i}\theta_{oi}\phi_{T_{i}}+\alpha_{c}\sum_{i}(1-\delta_{i})A_{i}\left(1-\frac{\phi_{A_{i}}}{\alpha_{t}}\right)\theta_{r}$$

総和に関するインデックス *i* と *j*はクロスしないので *i* に統一し、整理すると以下の式 が得られる。

$$\begin{cases} \alpha_{t} - \alpha_{r} \sum_{i} (1 - \delta_{i}) \frac{A_{i}}{\overline{A}} \left( 1 - \frac{\phi_{A_{i}}}{\alpha_{t}} \right) \end{cases} \sum_{i} (1 - \delta_{i}) A_{i} \theta_{si} \\ = \sum_{i} (1 - \delta_{i}) A_{i} \theta_{oi} \phi_{T_{i}} + \alpha_{c} \sum_{i} (1 - \delta_{i}) A_{i} \left( 1 - \frac{\phi_{A_{i}}}{\alpha_{t}} \right) \theta_{r} \\ + \alpha_{r} \sum_{i} (1 - \delta_{i}) \frac{A_{i}}{\overline{A}} \left( 1 - \frac{\phi_{A_{i}}}{\alpha_{t}} \right) \sum_{i} \delta_{i} A_{i} \theta_{si} \end{cases}$$
(3.12)

ここで、右辺第3項は PCM 壁に関する総和であり、PCM 壁からのふく射に起因する項である。さらに整理すると以下の式を得る。

$$=\frac{\sum_{i}(1-\delta_{i})A_{i}\theta_{si}}{\sum_{i}(1-\delta_{i})A_{i}\theta_{oi}\phi_{T_{i}}+\alpha_{c}\left(A^{'}-\frac{\phi_{A}^{'}}{\alpha_{t}}\right)\theta_{r}+\alpha_{r}\left(\frac{A^{'}}{\overline{A}}-\frac{\phi_{A}^{'}}{\overline{A}\alpha_{t}}\right)\sum_{i}\delta_{i}A_{i}\theta_{si}}$$

$$\alpha_{c}+\alpha_{r}\left(1-\frac{A^{'}}{\overline{A}}+\frac{\phi_{A}^{'}}{\overline{A}\alpha_{t}}\right)$$
(3.13)

ここで、

$$A' = \sum_{i} (1 - \delta_i) A_i \tag{3.14a}$$

$$\phi_A' = \sum_i (1 - \delta_i) A_i \phi_i \tag{3.14b}$$

とする。よって、通常壁のみから部屋に流入する熱量 Q' は以式で表される。

$$Q' = \alpha_{c} \sum_{i} (1 - \delta_{i}) A_{i} (\theta_{si} - \theta_{r})$$

$$= \frac{\alpha_{c}}{\alpha_{c} + \alpha_{r} \left(1 - \frac{A'}{\overline{A}} + \frac{\phi_{A}'}{\overline{A}\alpha_{r}}\right)}$$

$$\times \left[ \sum_{i} (1 - \delta_{i}) A_{i} \theta_{oi} \phi_{T_{i}} - \left\{ \frac{1}{\alpha_{t}} \left(\alpha_{c} + \frac{A'}{\overline{A}} \alpha_{r}\right) \phi_{A}' + \alpha_{r} A' \left(1 - \frac{A'}{\overline{A}}\right) \right\} \theta_{r} + \alpha_{r} \left(\frac{A'}{\overline{A}} - \frac{\phi_{A}'}{\overline{A}\alpha_{t}}\right) \sum_{i} \delta_{i} A_{i} \theta_{si} \right]$$

$$(3.15)$$

室の蓄熱応答  $\Psi_A$  は式(3.15)において、 $\theta_r \neq 0$ 、 $\theta_{oi} = \theta_{si} = 0$ の場合であり、

$$\Psi_{A} = \frac{\alpha_{c}}{\alpha_{c} + \frac{\alpha_{r}}{\alpha_{t}} \frac{\phi_{A}^{'}}{\overline{A}} + \alpha_{r} \left(1 - \frac{A^{'}}{\overline{A}}\right)} \times \left\{ \frac{1}{\alpha_{t}} \left(\alpha_{c} + \frac{A^{'}}{\overline{A}} \alpha_{r}\right) \phi_{A}^{'} + \alpha_{r} A^{'} \left(1 - \frac{A^{'}}{\overline{A}}\right) \right\}$$
(3.16a)

となる。また、貫流応答  $\Psi_T$ は式(3.15)において、 $\theta_{oi} \neq 0$ 、 $\theta_r = \theta_{si} = 0$ の場合であり、

$$\Psi_{T} = \frac{\alpha_{c}}{\alpha_{c} + \frac{\alpha_{r}}{\alpha_{t}} \frac{\dot{\phi}_{A}}{\overline{A}} + \alpha_{r} \left(1 - \frac{A}{\overline{A}}\right)} \times \sum_{i} (1 - \delta_{i}) A_{i} \phi_{T_{i}}$$
(3.16b)

となる。

さらに、PCM 壁の室内表面温度に対する熱応答  $\Psi_S$  は式(3.15)において $\theta_{si} \neq 0$ 、  $\theta_r = \theta_{oi} = 0$ の場合であり、

$$\Psi_{S} = \frac{\alpha_{c}}{\alpha_{c} + \alpha_{r} \left(1 - \frac{A'}{\overline{A}} + \frac{\phi'_{A}}{\overline{A}\alpha_{t}}\right)} \times \alpha_{r} \left(\frac{A'}{\overline{A}} - \frac{\phi'_{A}}{\overline{A}\alpha_{t}}\right) \sum_{i} \delta_{i} A_{i} \theta_{si}$$
(3.16c)

となる。

## (3) 差分壁を考慮した室の熱収支

差分壁を考慮した、ある時刻における、室iの熱平衡式は以下で表される。

$$E_{i} = L_{c,i} + L_{s,i} - P_{VO,i}\theta_{r,i} + P_{SO,i}\sum_{l}\delta_{l}A_{l}\theta_{s,l,i} + C_{p}V_{OA,i}(\theta_{o,i} - \theta_{r,i}) + C_{p}\sum_{j}V_{j\to i}(\theta_{r,j} - \theta_{r,i}) + \sum_{k}P_{TV0,k}\theta_{r,j(k)} + Q_{i,pcm}$$
(3.17a)

$$Q_{pcm,i} = \alpha_c \sum_{l} \delta_l A_l (\theta_{s,l,i} - \theta_{r,i})$$
(3.17b)

 $E_i$ :室*i*における除去熱量

 $L_{c,i}$ :室iにおける PCM 壁体を除く壁および隣室からの冷房負荷  $L_{s,i}$ :室iにおける PCM 壁体を除く壁および隣室からの蓄熱負荷  $P_{Vo,i}$ :室iにおける瞬時蓄熱応答係数  $P_{so,i}$ :室iにおける瞬時表面温度応答係数  $V_{oA,i}$ :室iにおける流入外気量  $V_{j \rightarrow i}$ :室jから室iへの移動風量  $P_{TVO,k}$ :内壁kにおける隣室からの瞬時蓄熱応答係数  $C_{p}$ :空気の容積比熱  $\theta_{r,i}$ :室温度  $\theta_{o,i}$ :外気温度  $\theta_{s,l,i}$ :壁lにおける内壁表面温度  $A_{l}$ :壁lの面積  $Q_{ncmi}$ :PCM 壁体からの対流熱伝達

PCM 壁は差分法によって解かれ、この時の室内側境界条件は以下の室内ふく射気温が温 度境界条件 $\theta_{bc}$ として与えられる。

$$\theta_{bc} = \left(\alpha_c \theta_r + \alpha_r \sum_j g_{ij} \theta_{sj}\right) / \alpha_t$$

$$= \left(\alpha_c \theta_r + \overline{\theta_s}\right) / \alpha_t$$
(3.18)

ここで、 $\overline{\theta_s}$ は平均内表面温度であり、以下のように仮定される。

$$\overline{\theta_s} = \sum_j g_{ij} \theta_j = \frac{1}{\overline{A}} \sum_j A_j \theta_j$$
(3.19)

A:表面積を有する部位の面積の総和

PCM 壁の差分計算における境界条件 $\theta_{bc}$ を知るには、平均室内表面温度 $\overline{\theta_s}$ が必要となる。 応答係数法では室内表面温度は直接求められていないので、平均室内表面温度 $\overline{\theta_s}$ を仮定し、 まず次式から室の除去熱量 $E_i$ をいったん計算する。

$$E_{i} = \alpha_{c} \overline{A} (\overline{\theta_{s}} - \theta_{r,i}) + Q_{c}$$
(3. 20)

 $Q_c$ :表面積を持たない部位からの熱量

PCM 壁からの対流熱伝達 $Q_{pcm,i}$ の計算においても平均室内表面温度 $\overline{\theta_s}$ が必要であるので、式(3-17)~(3.20)を通して収束計算を行う必要がある。解の収束には Newton 法により行い、 収束しない場合には Steffensen 法に切り替えた。

# (4) 熱負荷計算プログラムへの PCM モデルの組み込み

差分壁との共存に当たっての、基本となる熱負荷計算プログラムは NewHASP/ACLD(一般 社団法人建築設備技術者協会)<sup>9)</sup>を想定する。同熱負荷計算プログラムへの PCM モデルの 組み込みにおける各種条件を以下に示す。

▶ PCM モデルの適応範囲

- 予熱計算を必要とするピーク計算モードでは使用不可とし、シミュレーションモー ドでのみ使用できるものとする。
- ・ 差分法により取り扱える室要素は外壁および内壁とする。これらは NewHASP で OWAL (外壁)、IWAL(内壁)として指定することができる。
- 室の冷房負荷重み係数および蓄熱応答係数は差分法により取り扱われる壁を除い
   た応答係数により求められる。但し、壁面積の合計には差分法による壁も含める。
- ・ 年間空調スケジュール運転、間欠空調運転、多数室換気の計算を可能とする。
- ・ 多数室換気についてはユーザーが部屋間の移動空気量を指定するものとする。

- ・ 差分法の壁が含まれる時は、冷房負荷単独を計算することはできない。冷房負荷を 求める場合は、基準室温を維持する空調容量として無限大を指定し得られる除去熱 量を冷房負荷とする。
- ・ 潜熱蓄熱材を含む壁材が設定されていないときは、通常の NewHASP と同様の計算が 行えることとする。
- ▶ 入力データ
  - ・ 必要な入力データは NewHASP と同じとする
  - ・ 差分法の壁を含む壁材を作成するには、壁材(WCON)の材番に 100 番を指定する。
  - ・ 潜熱蓄熱材の物性値は別途入力ファイル"pcm.dat"を用意する。
- ▶ 出力データ
  - ・ NewHASP と同様に各室の顕熱および潜熱の室温、冷房負荷、除去熱量、装置除去熱量などが時系列で出力される。
  - ・ 差分法により取り扱う壁の各計算格子における温度の時系列データを出力する。
- ▶ 処理フロー
  - メインルーチン NewHASP-ACLD. f (図3-18)
  - ・ 室の熱平衡式の収束計算(図3-19)



図 3-18 メインルーチン NewHASP-ACLD.fの処理フロー



図 3-19 熱平衡式の収束計算処理 (SLVSM.f)

# (5) 検証計算

(1)から(4)の検証により開発した潜熱蓄熱効果を組み込んだ空調熱負荷計算プログラム (以降、開発プログラムと称する。)について、4枚の壁を有する簡易建物を対象とした検 証を行う。表3-4に建物の概要を示す。外壁に用いるコンクリートおよび潜熱蓄熱材の 物性値は、それぞれ表3-5、表3-6とする。気象データは標準年気象データ(東京) を用いる。

項目	値			
建物緯度経度〔゜〕	35.683、139.77			
軒高 [m]	1.0			
地上高 [m]	0.0			
階高 [m]	2.6			
天井高 [m]	2.6			
床面積 [m <sup>2</sup> ]	29.16			
壁厚さ [m]	0.3			
壁面積 [m²/枚]	14.04			
壁枚数 [枚]	4			
基準温度 [°]	20			

表3-4 4枚壁を有する建物の概要

表3-5 コンクリートの物性値

項目	値
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	2, 347
熱伝導率 [W/m・K]	2.6
比熱 [J/kg・K]	1,050
厚さ [m]	0.3

# 表3-6 潜熱蓄熱材の物性値

項目	固相 液相			
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1,500	1,500		
熱伝導率 [W/m・K]	1.01	0.7		
比熱 [J/kg・K]	3,832	3,405		
潜熱 [J/kg]	141,000			
融点 [K]	294 (283~298)			
厚さ [m]	0.3			
比熱テーブル	モデル値を使用			

まず、8/1~8/7の夏期1週間において、空調が稼働しない自然室温を考え、以下の2つのケースを設定する。

・ケース1:壁4枚とも応答係数法で解く場合

・ケース2:壁1枚を差分、残りの3枚を応答係数法とする場合

ケース1、ケース2の計算結果を図3-20に示す。応答係数法だけの結果と差分法が 共存する場合で計算結果は合致している。



図3-20 応答係数法と差分法の結果比較(自然室温状態、潜熱蓄熱材潜熱なし)

次に、同時期において空調スケジュール(9~17時、20℃)を設定し、以下の4つのケ ースを設定する。

- ・ケース1:外壁4枚の全てがコンクリート壁で応答係数法を適用する場合
- ・ケース2:外壁4枚の3枚がコンクリート壁で応答係数法、残る1枚はコンクリート 壁で差分法を適用する場合
- ケース3:外壁4枚の3枚がコンクリート壁で応答係数法、残る1枚はPCM壁で差分 法を適用する場合

・ケース4:外壁4枚が全てPCM壁で差分法を適用する場合

室温の結果を図3-21に示す。非空調時において、ケース1、ケース2の結果はほぼ 合致しており、これよりケース3、ケース4では2~5℃程度低い。これは潜熱蓄熱材の蓄 熱効果が非空調時間帯において室温に現れている。

室除去熱量の結果を図3-22に示す。空調時において、ケース1、ケース2の結果は ほぼ合致しており、これよりケース3、ケース4では負荷が小さくなり、20~80%程度で推 移する。潜熱蓄熱材の蓄熱効果が空調負荷に現れている。

以上の結果は、開発プログラムにおいて潜熱蓄熱の効果が適切に反映されていることを 示している。







図3-22 室除去熱量の計算結果比較(空調スケジュールあり)

### 3.4 潜熱蓄熱材の実証実験

## 3.4.1 屋外試験体

### (1) 試験体概要

屋外の環境下における潜熱蓄熱材の効果を把握するため、屋外試験体を設置して、壁体 の温度計測を実施した。

屋外試験体は2つ作成し、南側にコンクリート製の壁を向けて、約2mの間隔で配置されている。**写真3-3**の左側、すなわち西側の屋外試験体をA棟と称し、右側(東側)をB 棟と称する。

屋外試験体は、鉄筋コンクリート製の壁面(高さ1800mm×幅1800mm)を南側に有し、東 西及び北面、屋根・床は鉄骨構造で建築されており、各屋外試験体は内部に室空間を有す る構造となっている。東西及び北面の壁には発泡ウレタン断熱材を充填し、約180mmの断 熱を施している。両者の違いは、南向きの壁構成にあり、A棟には潜熱蓄熱材を設置し、 B棟には潜熱蓄熱材を設置しない。



写真3-3 二つの屋外試験体の外観 (左:A棟(潜熱蓄熱材有)、右:B棟(潜熱蓄熱材無))

### (2) 壁構成

南向きの壁構成について、A棟、B棟をそれぞれ示したのが、図3-23である。A棟 の場合、コンクリート壁 270mm に断熱 30mm を1面に設置し、その中に潜熱蓄熱材設置エリ ア(825×883)を設け、合板 6mm、潜熱蓄熱材 20mm、石膏ボード 9mm を設置した。B棟の 場合、コンクリート壁 300mm に断熱 30mm を1面に設置し、その中にA棟と同様の設置エリ ア(825×883)を設け、合板 12mm を2枚、石膏ボード 9mm を設置した。熱抵抗は同一にな るよう配慮した。



図3-23 壁構成(左:A棟潜熱蓄熱材あり、右:B棟潜熱蓄熱材なし)

### (3) 潜熱蓄熱材の設置

実験に用いた潜熱蓄熱材はパラフィンを原料とする有機系潜熱蓄熱材であり、表3-7 に示す仕様で製造されている。写真3-4に各製品を示す。潜熱蓄熱材は透明ビニールの 包装材で密閉されている。

今回の実験では鉛直の壁に潜熱蓄熱材を設置することになる。今回使用する潜熱蓄熱材 にゲル化剤は含まれていないので、液状になると水のように包装材の下部にたまる(写真 3-5)。潜熱蓄熱材の設置に当たっては以下の工夫を施した。幅300mm×高さ150mmの潜 熱蓄熱材パッケージを縦方向に二つ折にし(300mm×75mm)、ビニールの溶着しろをステー プルで合板(6mm 厚)にステープルで留め付けた。留め付け作業は写真3-6に示すよう に液化した状態で行い、33~36個の潜熱蓄熱材を試験壁内に設置した。二つ折にした潜熱 蓄熱材は、液化状態で下部に溜まって膨らむ。この膨らみは石膏ボードを取り付ける際に 圧縮され、試験壁内部ではほぼ空間を埋め尽くして充填された状態になる。潜熱蓄熱材を 設置後、凍結した際の状況を写真3-7に示す。

品種	ゲル化	寸法	潜熱蓄	融点	凝固点	融解熱量	密度	熱伝導率
	剤の有	(mm)	熱材	(°C)	(°C)	(kJ/kg)	(kg∕m³)	(W/m∙K)
	無		充填量					
			(g)					
15℃	無し	300 × 150 × 10	300	15	10	200	820	未測定
製品								
25°C	無し	300 × 150 × 10	300	26	21	200	820	0.17
製品								
35°C	無し	300 × 150 × 10	300	35	30	200	820	未測定
製品								

表3-7 潜熱蓄熱材の仕様(メーカー提供による)



写真3-4 実験に用いた潜熱蓄熱材(左から15℃製品、25℃製品、35℃製品)



※右側、左側共に液化しているが、右側はゲル化剤が含まれた製品。 実験に使用したのは左側のゲル化剤が含まれていない製品

写真3-5 液化した時の潜熱蓄熱材とパッケージの状態



写真3-6 液化した時の潜熱蓄熱材とパッケージの状態



写真3-7 潜熱蓄熱材の設置状態



写真3-8 潜熱蓄熱材観察窓と撮影用のスポット光照射状況

### (4) 観測窓の設置

潜熱蓄熱材の凍結、融解状態を観察するために、試験壁の左上部に観察窓(200mm×150mm) を設けた。0.8WのLED電球のスポットライトを設置して光源を確保し、タイムラプスカメ ラで状態変化を1分間隔で記録した。写真3-8に観測窓及びスポット光源の設置状況を 示す。

# (5) 放射式暖房機による加熱制御

室の加熱制御には、放射式暖房機を用いた。試験室の気積は3.3m<sup>3</sup>(幅1778mm×奥行920mm ×高さ2000mm)と小さいので、対流式だと発停が頻繁に行われて安定性に欠けるからであ る。放射暖房機(オイルヒーター)を用いれば低温での放射暖房が可能であり、空気温度 の変化は少なく、低出力で安定した暖房が期待できる。

なお、放射暖房機は機械式のスイッチを有する製品を採用した。これは、A棟とB棟の 2 台の暖房機をコンセントタイマーで 0N/0FF するためである。電子制御式は暖房機本体の スイッチでしか 0N 出来ない。コンセントタイマーにはデジタル式を採用した。

# 3.4.2 屋外実証実験

#### (1) 実験概要

**表3-8**に示すスケジュールで実験を行った。1日中暖房し、数日の自然冷却を1セットとして、5ケース程度、3週間の計測を実施した。

茨城県つくば市(館野)の平年の気温では、2月に入ると気温が上昇し始め、潜熱蓄熱 材が固まりきらない状況が懸念された。そこで、低温域での潜熱蓄熱材である15℃製品を 使った屋外実験を先行・実施し、次に25℃製品の屋外実験を行うことにした。

(2) 壁面温度の比較

A棟とB棟の壁面温度の挙動を比較したのが、図3-24、図3-25である。

図3-24は、15℃製品を使用した場合の結果である。2016年2月10日0時の暖房中 には、B棟の壁面温度がA棟より高い。暖房停止後はA棟、B棟ともに温度が低下する中 で、A棟の方がB棟より保温効果が見られる。A棟の壁面温度の保温効果は15℃以下で顕 著に表れている。

図3-25は、25℃製品を使用した場合の結果である。2016年2月20日0時の暖房中 には、B棟の壁面温度がA棟より高く、温度差は5℃以上に開く。暖房停止後はA棟、B 棟ともに温度が低下する中で、A棟の方がB棟より保温効果が見られる。A棟の壁面温度 の保温効果は25℃以下で顕著に表れており、温度差は最大8℃程度である。以上から、潜 熱蓄熱材の相変化温度による室の保温効果の寄与が示唆される。

作業日		作業	実験ケース	暖房開始	暖房終了	状態
2016 年	火	実験機材設置	Case1	16 時頃		
2月2日		700W、最大能力で加熱	(FK15)			暖房
2月3日	水	冷却開始			10:10	
2月4日	木					自然冷却
2月5日	金					
2月6日	土	冷却延長、データ回収				
2月7日	日					
2月8日	月	確認				
2月9日	火	7時にヒーター加熱		7:00		
		(中温、500W)				暖房
2月10日	水	7時に冷却開始			7:00	
		現地確認、一部データ回収				自然冷却
2月11日	木					
2月12日	金	現地確認、一部データ回収				
2月13日	±:					
2月14日	日					
2月15日	月	FK25 に換装、データ回収	Case2			
2月16日	火		(FK25)	18:00		暖房
2月17日	水				18:00	
2月18日	木	現地確認、一部データ回収				自然冷却
2月19日	金			12:00		
2月20日	±.				12:00	暖豆
2月21日	日					
2月22日	月	現地確認、一部データ回収				自然冷却
		タイマー設定変更				
2月23日	火			6:00		
2月24日	水				6:00	暖房
2月25日	木					自然冷却
2月26日	金					
2月27日	土	データ回収、実験終了				

# 表3-8 屋外実証実験のスケジュール



### (3) 室温の比較

A棟とB棟の室温等の挙動を比較したのが、図3-26、図3-27である。

図3-26は、潜熱蓄熱剤(15℃製品)を使用した場合の結果である。暖房中には放射 暖房機が設置されているので評価は困難である。暖房停止後はA棟、B棟ともに温度が低 下する中で、A棟の方がB棟より保温効果が見られる。A棟の室温の保温効果は20℃以下 で顕著に表れており、温度差は2℃程度である。なお、2016年2月14日、15日は温暖な 気候であったが、室温の差はあまり生じていない。このとき、潜熱蓄熱材の温度は15℃程 度であったので、室温影響はほとんどないと考えられる。



図3-25 壁面温度の挙動(潜熱蓄熱材(25℃製品))

図3-27は、潜熱蓄熱材(25℃製品)を使用した場合の結果である。この場合も、暖 房停止後はA棟、B棟ともに温度が低下する中で、A棟の方がB棟より保温効果が見られ る。しかし、潜熱蓄熱材温度の挙動より2016年2月21日の夕方には相変化が終了してい ると考えられ、2016年2月21日の夜間以降の室温差は顕熱の熱容量の相違によるものと 推察される。

## (4) 潜熱蓄熱材温度

A棟の潜熱蓄熱材温度の挙動を比較したのが、図3−28~図3−29である。ここで、 潜熱蓄熱材の表面とは室内側、裏面とは断熱材側を示す。



図3-26 室温等の挙動(潜熱蓄熱材(15℃製品))

図3-28は潜熱蓄熱材(15℃製品)の潜熱蓄熱材の温度の挙動を表したものである。 図中に点線で囲った2月5日、2月11日において、潜熱蓄熱材の表面温度、裏面温度がと もにいったん下降し、2℃程度上昇後、15℃近辺で温度を保持する現象が見られる。これは 過冷却現象と考えられる。また、暖房中の2月10日0時において潜熱蓄熱材の裏面温度が 15℃を境に急激に上昇する様子が現れている。このとき、室内表面の石膏ボードの温度は 20℃を超えているが、潜熱蓄熱の影響を受けて温度上昇が抑制されていると解釈される。

図3-29は潜熱蓄熱材(25℃製品)の潜熱蓄熱材の温度の挙動を表したものである。 図中に点線で囲った2月20日において、潜熱蓄熱材の表面温度、裏面温度がともにいった ん下降し、1℃程度上昇後、25℃近辺で温度を保持する現象が見られる。潜熱蓄熱材(15℃ 製品)と同様の、潜熱蓄熱材(25℃製品)の過冷却現象と考えられる。また、暖房中の2 月20日において潜熱蓄熱材の表面温度が上昇する中で、裏面温度が25℃を保持している 様子が現れている。暖房終了間際で潜熱蓄熱材の裏面温度が上昇し始めており、融解終了 を示している。



潜熱蓄熱材が固まる際の静止画像の事例を**写真3-9**に示す。30分程度の時間で潜熱蓄 熱材が白濁している様子が分かる。白濁は左から右に水平方向で生じている。観測窓から 見えている3つの潜熱蓄熱材は2時間以内に全て白濁する。これらの画像が記録されたの は、過冷却後に潜熱蓄熱材が凝固する時間帯に相当する。



図3-28 潜熱蓄熱材の温度の挙動(潜熱蓄熱材(15℃製品))



図3-29 潜熱蓄熱材の温度の挙動(潜熱蓄熱材(25℃製品))







**写真3-9 過冷却後の凝固(潜熱蓄熱材(15℃製品))** (上から2016年2月10日19:03、19:18、19:33のカメラ撮影画像) 3.5 潜熱蓄熱材のケーススタディ

# 3.5.1 事務所最上階の計算モデル

開発プログラムを用いて、潜熱蓄熱材の導入効果を検討する。計算対象は、図3-30 に示す事務所(最上階)である。図3-31は壁等構成、表3-9に潜熱蓄熱材の物性値 (融点 28℃の場合)、表3-10に空調設定を表す。



図3-30 計算モデル(事務所最上階)



図3-31 屋根、外壁、内壁の構成

表3-9 潜熱蓄熱材の物性値(融点28℃の場合)

	密度	比熱[J/kgK]		熱伝導率λ [W/mK]		融点	相変化温度幅	潜熱
PCM物性值	[kg/m3]	固体	液体	固体	液体	[°C]	[°C]	[J/kg]
	1.53E+03	3.86E+03	3.86E+03	1.01	0.7	28	2	1.50E+05

表3-10 空調設定

対象期間	設定温湿度	備	考
夏期	26°C, 50%	6~9月	冷房モード
冬期	22°C, 50%	12~3 月	暖房モード
中間期	24°C, 50%	4, 5, 10, 11 月	冷房モード

### 3.5.2 事務所最上階のケーススタディ

開発モデルを用いて事務所最上階の年間の空調熱負荷計算を実施した。気象データは岡山を用い、潜熱蓄熱材の融点は18、20、22、24、26、28、30℃の7段階に、潜熱なしの標準ケースを加えた。また、潜熱蓄熱材の厚さは10、50、100mmの3段階を設定した。なお、間仕切りに潜熱蓄熱材は導入しない。

図3-32に計算結果を示す。概ね初夏に省エネ、秋口に非省エネの傾向が現れており、 融点の設定により効果が異なることが分かる。また、その傾向は潜熱蓄熱材厚さが増すに つれて大きくなる。 外壁の潜熱蓄熱材の温度の挙動を図3-33に、融解度を図3-34に示す。潜熱蓄熱 材の温度の挙動が緩慢になる時期は初夏と秋口であり、その際に凍結融解が生じている。

屋根の場合についても同様に潜熱蓄熱材の温度の挙動を図3-35に、融解度を図3-36に示す。傾向は外壁と同様である。

各季節における室温及び室除去熱量の挙動を図3-37~図3-40に示す。この場合、 26℃の融点を想定しており、冬期には固相、夏期には液相となって潜熱蓄熱材の有無によ る相違は見られない。一方、初夏、秋口においては、潜熱蓄熱の効果が明瞭に現れており、 上に述べた傾向を裏付けるものである。

間仕切りの効果を検討するため、開発モデルを用いて事務所最上階の年間の空調熱負荷 計算を実施した。廊下、EVホールを非空調エリアとして、事務室2との内壁に潜熱蓄熱材 を設置した。気象データは岡山を用い、潜熱蓄熱材の融点は18、20、22、24、26、28、30℃ の7段階に、潜熱なしの標準ケースを加えた。また、潜熱蓄熱材の厚さは50mmを設定した。 計算結果を図3-41~図3-43に示す。内壁に潜熱蓄熱材を適用した場合も、外壁、 屋根と類似の傾向が得られている。

### 3.5.3 地区・用途別ケーススタディ

地区として、准寒冷地(盛岡)、温暖地(岡山)、温暖地(那覇)の3種類、用途として、 事務所、商業、住宅(共用部)の3種類を考え、開発プログラムを用いて年間熱負荷計算 を行い、潜熱蓄熱材の導入効果を定量化した。潜熱蓄熱材の厚みは20mm、融点は18℃、28℃、 潜熱なしの3段階とした。

建物モデルを図3-44に、屋根・外壁の構成を図3-45に示す。装置除去全熱負荷 (年間値)を図3-46に示す。潜熱蓄熱材の導入効果は年間で見ると相殺されるため、 さほど大きくないことが分かる。







(潜熱蓄熱材厚さ:50mm、潜熱蓄熱材融点:26℃、場所:事務所最上階事務室1、気象:岡山)











(a) 室温



(b) 室除去熱量

図3-37 冬期における室温、室除去熱量の挙動

(潜熱蓄熱材厚さ:50mm、潜熱蓄熱材融点:26℃、

場所:事務所最上階事務室1、気象:岡山)



(a) 室温





図3-38 初夏における室温、室除去熱量の挙動

(潜熱蓄熱材厚さ:50mm、潜熱蓄熱材融点:26℃、

場所:事務所最上階事務室1、気象:岡山)



(a) 室温



(b) 室除去熱量

図3-39 盛夏における室温、室除去熱量の挙動

(潜熱蓄熱材厚さ:50mm、潜熱蓄熱材融点:26℃、

場所:事務所最上階事務室1、気象:岡山)









3-49





図3-42 内壁の潜熱蓄熱材の温度挙動
 (潜熱蓄熱材厚さ:50mm、潜熱蓄熱材融点:26℃、
 場所:事務所最上階、気象:岡山)



















(c)住宅(共用部)

図3-46 潜熱蓄熱材導入による省エネ効果

### 3.6 まとめ

本章で得られた研究成果を以下に述べる。

### 物性値の試験・整備

潜熱量及び相変化温度に関す DSC 試験では、加熱・冷却速度 0.1~1℃/min とすると、実 大サンプル計測と整合する結果が得られることを明らかにした。

### ②評価技術の開発

非住宅省エネ基準の空調熱負荷計算に使用されている HASP に潜熱蓄熱材の物理的効果 を組み込み、年間の空調熱負荷計算を実施できるようにした。

③系統的シミュレーションの実施

地域、用途、設置場所(壁、床等)、厚みに関する系統的な数値シミュレーションを実施 し、特定の季節に対する電力ピーク対策が可能であることを示した。

### 参考文献

- 1) 布施安隆・高橋達・黒岩哲彦:調湿・躯体蓄冷と複合した二重屋根採冷システムによる室内熱環境調整の実験:その1 実験概要と室内熱環境、日本建築学会大会学術講 演梗概集、pp. 639-640、2006.7
- 2) 足永靖信・武田仁:保水性建材を設置した建物の表面温度及び熱負荷に関する検討、
   日本建築学会環境系論文集、Vol. 79、No. 701、pp. 615-621、2014.7
- 3) 武田仁・安藤邦明:光触媒外装材を用いた実証実験棟の温熱環境実測、日本建築学会 環境系論文集、No. 606、pp. 31-36、2006.8
- 4) Craig Farnam, A. Takakura, M. Nakao, M. Nishioka, M. Nabeshima: Evaporative mist cooling of an urban waste-to-energy plant, Journal of Heat Island Institute International Vol.7, pp. 27-38, 2012
- 5)近藤武士・射場本忠彦・坪田祐二・鎌田元康:潜熱蓄熱壁体による躯体蓄熱システム に関する研究: 潜熱蓄熱ボードの性能把握および適用効果の検討、日本建築学会環境 系論文集、No. 540、pp. 23-29、2001.2
- 6)佐藤友紀・尾崎明仁・中村哲己・林禎彦・石黒成紀:潜熱蓄熱内装建材による暖房負荷の削減効果に関する研究 模型箱実験・試験家屋実験および数値シミュレーションによる検討、日本建築学会環境系論文集、Vol. 77、No. 678、pp. 651-659、2012.8

- 7) Murat M. Kenisarin: Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review, Solar Energy, Vol. 107, pp. 553-575, 2014
- 8) 松尾陽:空調負荷計算におけるふく射熱の取扱い、空気調和・衛生工学、pp. 5-11、Vol. 59、 No. 4、1985.4
- 9)松尾陽、横山浩一、石野久彌、川元昭吾:空調設備の動的熱負荷計算入門、建築設備 技術者協会、1980.2