潜熱蓄熱(PCM)内装左官材のパッシブ蓄熱効果に関する研究

基本的熱性能試験の測定方法及び実験棟における環境改善効果と省エネルギー効果に関する検討

A STUDY ON PASSIVE THERMAL STORAGE EFFECTS OF PCM PLASTERED WALL

An examination of the basic thermal performance test method, indoor environmental improvements,
and energy saving effects of PCM plastered wall in the experimental module

草間友花*, 石戸谷裕二**, 三浦 誠***, 宮崎智仁****

Yuka KUSAMA, Yuji ISHIDOYA, Makoto MIURA
and Tomohito MIYAZAKI

The objective of this study is to report the passive thermal storage effects when applying PCM plastered wall on the surface of a wall. First, the measurement method of the basic thermal performance test of thermal storage building materials was examined. The examination revealed that the material required to be heated at a rate of 20 [min./K], and for more than 10 [K] width except in the phase change region at the thermo-hygrostat. Second, the heat balance of the window was measured in the experimental module. The heat balance of the integrated value during the measurement period was +16.2 [MJ/m²]. By measuring the natural room temperature, it was found that PCM plastered wall demonstrated indoor environmental improvements. Finally, the heat flow of the PCM layer was measured, and the thermal performance of PCM plastered wall was verified. It was revealed that after applying the PCM plastered wall, the energy savings were estimated at 17% for this module in Otaru, Hokkaido, which is a snowy cold region in Japan.

Keywords : Phase change material, Thermal performance test, Indoor environmental improvements, Energy-savings, Natural room temperature

潜熱蓄熱材, 熱性能試験, 室内環境改善, 省エネルギー, 自然室温

1. はじめに

居住空間における快適な室内空間の形成と省エネルギーの観点から、断熱性能に加えコンクリート躯体などで室内に熱容量を付与する構法の研究が注目されてきた^{1)~3)}。平成25年からの省エネ基準改正に伴い、建築物の高断熱・高気密化が全国的に進む一方、過昇温等の諸問題への対策は十分とはいえず、室内熱容量と断熱気密の適正化は今後ますます重要な課題になると考えられる。これまで潜熱蓄熱材(Phase Change Material: PCM)を躯体や建材等に適用した蓄熱建材(以下 PCM 建材)の研究が国内外で活発に行われており、日射熱や内部取得熱を有効利用するパッシブ蓄熱の分野としては PCM ボード^{4)~8)}や、PCM パネル⁹⁾を壁や天井に適用した実証研究が行われてきた。佐伯ら¹⁰⁾は伝導加熱法により種々の PCM 建材の熱物性を測定し、測定方法の妥当性と精度に関して検討を加えた。佐藤ら¹¹⁾は、数値計算により潜熱蓄熱材の適用方法と潜熱蓄熱内装建材の暖房負荷削減効果について検討を行い、PCM 建材の施工面積や断熱性

の違いによる影響について詳細に検討した。また、近藤ら¹²⁾は PCM の適用構法と効果の関係について検討を行い、木造建築物へ潜熱蓄熱壁体を適用することで RC 造と概ね同等の熱処理が可能となることを明らかにした。一方、蓄熱建材の性能測定法は現在まで確立されておらず、基本的熱性能試験方法も規格化が必要である。また、建材の基礎試験から室内環境に与えるパッシブ効果についても評価手法は明らかではない。PCM 建材は一般に、相変化時に蓄放熱が行われる特性を持つことから、熱伝導性の高い容器が必要となる。潜熱蓄熱材を壁・床等に適用する既往の研究では、樹脂容器の内部に潜熱蓄熱材を含有させたペレット^{4), 8), 9), 13)}やマイクロカプセル^{14)~16)}を、ボード等に混入させることが多いが建材の構造上、潜熱蓄熱材への熱移動量が抑制されてしまうことが課題として挙げられる。また、潜熱蓄熱建材を適用する構法には日射熱や内部発熱を効率的に蓄・放熱できることが求められるため、施工面積が広く、蓄熱量が大きく、より室内側に潜熱蓄熱層を設置できることが求められる。

本論文は既発表論文(19), (23), (24)を取りまとめ、加筆・修正を加えたものである。

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
博士課程・修士(工学)

** 室内気候研究所 主席研究員・博士(工学)

*** 北海道職業能力開発大学校 准教授・博士(工学)

**** 北海道職業能力開発大学校 建築施工システム技術科1年

Doctoral course, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, M.Eng.
Principal Investigator, Institute of Indoor Climate, Dr.Eng.
Assoc. Prof., Hokkaido Polytechnic College, Dr.Eng.
Department of Advanced Architectural Technology for Construction System, Hokkaido Polytechnic College, Jun.

本研究では、PCM 層を最も室内側表面に施工でき、施工面積を拡張できる手法として、カプセル状の PCM を湿式左官内装材¹⁷⁾に混和した PCM 内装左官材の開発を行った。これは窓からのダイレクトゲインを有効に蓄熱できる新規の PCM 内装材であり、本報ではその基本的熱性能の試験方法について検討するとともに、実験棟において省エネルギー効果と環境改善効果の検証を行った。

2. PCM 建材の熱性能測定法に関する検討

潜熱蓄熱材(PCM)の潜熱量は一般的に示差走査熱流計法 (DSC 法) によって測定されるものの、PCM を適用した蓄熱建材など混合構成物の性能評価には適さない可能性が指摘されている¹⁰⁾。既往の研究¹⁸⁾では、昇温速度の違いに着目して DSC 法により PCM の熱物性を測定したが、PCM 建材の性能測定や実際の建築物で生じる昇温速度の影響については検討しておらず、PCM 建材の熱性能試験は現在までのところ確立されているとは言えない。本研究では、再現性及び汎用性が高い PCM 建材の測定方法を見出すために、昇温速度の影響を考慮した熱性能試験法の検討を行った。

2.1 試験体の概要

PCM 建材の熱性能を測定するために gPCM の混和率を変えながら、Table1 に示す 4 種 8 体の試験体(270×270×12[mm])を作製した。gPCM はオクタデカンを内包した構造を持ち、母材には石膏を用いた。試験に用いた熱電対と熱流計の設置位置を Fig.1, Photo1 に示す。片面にシート型熱電対(VT01-999; ナガノ)を 3 点貼り付けた試験体に、熱電対が接合面に当たるように注意しながら混和率が等しい他の試験体を重ねた。また、接合後の試験体は周囲を断熱してから両表面に熱流計(L33A;江藤電気)を設置し、試験体への熱流束と表面温度を計測した。試験体温度は熱流計 2 点及び熱電対 3 点から得られた 5 点の温度測定値の平均値として与えた。

2.2 試験体の加熱方法

これまで PCM 建材の熱的性能を測定するために、対流¹¹⁾・伝導¹²⁾・放射¹⁷⁾による試験体の加熱・冷却法が提案されてきたが、加熱方法の差異が測定誤差に及ぼす影響は検討されていない。それぞれの加熱方法の概念図を Fig.2 に示す。既往の研究¹⁹⁾では、放射加熱により PCM 建材の熱性能を測定したが、加熱時と冷却時の比熱の測定値が異なって観測されることや、蓄熱性状にヒステリシスがみられることが報告された。伝導加熱は伝熱面と試験体が直接接するため試験体に設置した熱電対等のケーブルにより隙間が生じることから、センサー数を増加させるほど外乱が増大することが懸念される。また、片面加熱をした場合には試験体内部で生じる温度分布を捉えることができず、試験体の代表温度を正確に定めることが困難である。一方、対流加熱法は昇温速度のコントロールが容易であり、試験体の両面から空気加熱することから、センサーの試験体への設置が容易になるなどの利点がある。本研究では、対流加熱法を用いて昇温速度を変化させながら PCM 建材の熱性能を測定し、既往の研究結果と比較した。測定に用いた恒温恒湿器を Photo2 に、温度制御の概念図を Fig.3 に示す。また、昇温速度のパターンを Table2 に示す。測定誤差が Fig.4 のような内部温度分布に起因するとすれば、昇温速度が遅い程、精度よく測定できることになるが、本研究では実際に建築壁体が曝される温度変動よりも極端に長い周期(CASE4 以上)に関しては検討しないこととした。

Table1 Overview of PCM boards

No.	Name	PCM mixing rate	Weight	Size			Density
				Width	Height	Thickness	
		[%]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]
1	Blank 1	0	1,096	270	267	11.04	1,377
2	Blank 2		1,123	267	267	12.07	1,305
3	g26P10-05	10	1,115	270	266	12.52	1,240
4	g26P10-06		1,093	267	270	12.2	1,243
5	g26P20-05	20	1,065	268	270	12.72	1,157
6	g26P20-06		1,076	267	266	12.84	1,180
7	g26P30-02	30	1,111	270	268	13.11	1,171
8	g26P30-03		1,047	270	267	12.91	1,124

Fig.1 Sensor position

Photo1 Test piece

Fig.2 Heating method

Photo2 Thermo-hygrostat

Fig.3 Temperature control

Table2 Temperature control conditions

	Preparation	Heating	Thermostatic	Cooling	Heating rate	Total time
	[hour]	[hour]	[hour]	[hour]	[min./K]	[hour]
	< t ₁	t ₂ -t ₁	t ₃ -t ₂	t ₄ -t ₃	(t ₂ -t ₁)/(θ ₂ -θ ₁)	
CASE 1	3	2	3	2	5	10
CASE 2	3	4	3	4	10	14
CASE 3	3	8	3	8	20	22
CASE 4	3	16	3	16	40	38

Fig.4 Temperature distribution of sample

Fig.5 Temperature of PCM board

Fig.6 Experimental results of enthalpy and specific heat

2.3 熱性能試験の概要

gPCM を適用した PCM 建材の基本的熱性能を前述の方法で測定し、蓄熱量、比熱及び潜熱量を式(1)～式(3)により求めた。Table1 の g26P20 試験体において、試験条件を Table2 の CASE2 の条件で測定した試験体温度の推移を Fig.5 に示す。加熱・冷却時いずれも融点近傍で潜熱蓄熱材特有の温度変化が確認された。また、同領域において表面温度と内部温度の差が増大することが確認できるが温度分布は昇温速度に依存すると考えられ、適切な昇温速度及び温度幅について検討する必要がある。また、蓄熱量及び比熱の測定例を Fig.6 に示す。試験体の蓄熱量と試験体温度の測定値を回帰分析し、固相域及び液相域の接線の傾きから比熱を定量化した。

2.4 PCM 建材の熱性能試験結果に及ぼす昇温速度の影響

Fig.7 に加熱時と冷却時の蓄熱量の推移を示すが、放射加熱を採用した既報¹⁷⁾で観察された固相・液相域における測定法に起因した比熱のヒステリシスは見られない。他方、凝固開始温度が融解温度よりも低下する、いわゆる過冷却現象が生じており、凝固時に核となる物質の添加など材料的な解決策が必要になる。Fig.7 より、固相域・液相域では加熱時と冷却時に測定した比熱はいずれも同等であることから、比熱測定は加熱・冷却の一方で測定しても良い。ただし、固相域と液相域の比熱の測定には、試験体の相変化終了から 10℃以上の温度幅が必要であることがわかった。Fig.8 及び Fig.9 に、固相域と液相域の比熱の測定結果を昇温速度ごとに整理して示す。なお、固相域は昇温過程、液相域は冷却過程の比熱から求めた。図から、固相域と液相域の比熱は昇温速度への依存性が低いことがわ

かる。潜熱量の測定結果を昇温速度ごとに整理して Fig.10 に示すが、測定値は昇温速度に依らずほぼ同一の値を示している。また、既報¹⁷⁾で採用した放射加熱法では潜熱量測定においても再現性が得にくいことが報告されたが、対流加熱法を採用した本実験では、再現性が高く安定した結果が得られた。さらに、固相域・液相域の比熱及び潜熱量の測定には 5[min./K]の昇温速度で十分に正確な値が得られるといえる。熱性能試験結果をまとめて Table3 に示す。また、固液混相域における加熱時と冷却時の蓄放熱量を Fig.11 及び Fig.12 に示す。図より、固液混相域において昇温速度に依る蓄熱挙動の相違がみられ、加熱・冷却時の双方において昇温速度の増大により蓄熱量変化率が低下する傾向が確認できた。

$$Q_{st} = \frac{1}{\rho \cdot l} \sum (q_{in} - q_{out}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$c_{PCM}(\theta) = \frac{dQ_{ST}}{d\theta} \quad (2)$$

$$Q_L \equiv Q_{ST} - \frac{\Delta\theta}{2} (c_s - c_l) \quad (3)$$

Q_{ST} : 蓄熱量 [kJ/kg],

ρ : 比重 [kg/m³],

q : 熱流 [W/m²],

q_{out} : 流出熱量 [W/m²],

c_{PCM} : PCM の比熱 [kJ/kg/K],

c_l : 液相域の比熱 [kJ/kg/K],

Q_L : 潜熱量 [kJ/kg],

l : 試験体の厚さ [m],

q_{in} : 流入熱量 [W/m²],

Δt : 時間間隔 [s],

c_s : 固相域の比熱 [kJ/kg/K],

θ : 温度 [°C]

Table3 Thermal characteristics of the PCM boards

Name	Blank	g26P10	g26P20	g26P30
Base material	gypsum plaster	gypsum plaster	gypsum plaster	gypsum plaster
PCM mixing rate[wt%]	[wt%]	10	20	30
	Solid	Liquid	Solid	Liquid
Specific heat	[MJ/m ³ /K]	[kJ/kg/K]	[kJ/kg/K]	[kJ/kg/K]
Latent heat	[kJ/kg]	[MJ/m ³]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
Thermal storage	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]

Fig.7 Experimental results of enthalpy (Influx and Efflux)

Fig.8 Specific heat (Solid)

Fig.9 Specific heat (Liquid)

Fig.10 Latent heat

Fig.11 Enthalpy (Influx)

Fig.12 Enthalpy (Efflux)

Fig.13 Specific heat

昇温速度が遅い程見かけの比熱を正確に測定できるものと仮定し、40[min./K]の測定結果を参考にすれば、固液混相域の潜熱量測定には、加熱時で10[min./K]以上、冷却時には20[min./K]以上の時間を要するといえよう。ただし、本条件に関する知見は母材が石膏であり、かつ、PCMの混和率が20%以下、厚みが24mm以下の建材に限定される。固液混相域の見かけの比熱をFig.13に示す。図から、昇温速度を緩慢にするとピーク位置が低温域に遷移しているが、ピークの値と昇温速度には相関関係がみられなかった。

3. PCM 建材の効果確認に用いた実証実験棟の特性

3.1 実験棟の概要

実験棟の概要をTable4に示す。実験棟平面図及び測定点をFig.14に示す。実験棟は断熱隔壁で熱的に分離されており、右室はPCM建材を内装左官仕上げとして施工したgPCM室、左室はプラスターボードの表で仕上げたPB室(ブランク)の2室で構成されている。gPCM室には床と間仕切りを除くすべての壁及び天井面にPCM建材を施工し、約4.5[MJ]の潜熱量を付与した。PB室は9.5[mm]の石膏ボードで仕上げたが、両室の仕上材はともに母材が石膏であることから、PCMを含む建材の顕熱容量はほぼ等しい。本報では、PCM建材で熱容量を付与したgPCM室の環境改善効果及び省エネルギー効果を、PB室と比較して評価することとした。暖房の熱源は白熱電球(1P, 100V, 300W)でありサーモスタットでオンオフ制御しながら設定室温20℃で24時間連続暖房した。前節の熱性能試験では対流加熱法を採用したが、実環境における熱伝達は日射や暖房機からの放射熱が影響を与える可能性がある。潜熱蓄熱内装左官材は最も室内側にPCMが施工されることから、窓面からのダイレクトゲインのうち、室温上昇による対流成分だけではなく、放射成分も有効利用が期待されるシステムであり、本章ではまず窓の熱的性能及び蓄熱層の熱的挙動について報告する。

3.2 開口部に適用した高性能トリプル樹脂窓の熱的性能実測

寒冷地の開口部には日射熱取得が大きい複層ガラスが適していると報告されている²⁰⁾ものの、開口部の熱収支を実測により確認した例はみられない。本節では日射取得率の高い高性能トリプル樹脂窓からのダイレクトゲインの実態を観測するために日射計と熱流計による簡易測定を実施した。実験棟南面ガラス部ではFig.15に示すような熱バランスが考えられるが、窓面の熱収支を簡易測定するため、試みに室内側ガラス表面に熱流計を設置した。開口部に設置された熱流計をPhoto3に示す。熱流の日積算値を日積算熱収支と仮定してFig.16に示す。図は日射熱取得量と熱損失量の差を示しており、測定期間での合計は+16.2[MJ/m²]と日射熱取得が大きい結果となった

Fig.17 Surface temperature of glass

Fig.18 Coefficient of solar heat gain

Fig.19 Coefficient of solar heat gain (Time series)

Name	PB room	gPCM room
Size [mm]	W2,080×D2,070×H2,400	
U _A [W/m ² /K]	0.24	
Base material	Gypsum plaster (t=12)	
Finish material	Gypsum plaster (t=9.5)	PCM plastered wall (t=9.5)
PCM shape	Granulated PCM(gPCM)	
Melting point [°C]	-	26
Latent heat [kJ/kg]	-	150
gPCM [kg]	-	30.1
Window specification	Triple glass resin window	
Window size [mm]	W1,400×H1,870	
U _w * [W/m ² /K]	1.17	
η*	0.56	
Location	Otaru, Hokkaido Zenibako	

Note: * catalog value(YKKAP:APW430)

Fig.14 Plan of experimental module

Fig.15 Heat balance model

Photo3 Heat flow sensor

Fig.16 Heat balance of the window

$$\eta = q_{s,t}/q_{s,v} \quad (4)$$

η: 相当日射熱取得率 [-],

q_{s,t}: 透過日射量 [W/m²], q_{s,v}: 南鉛直面日射量 [W/m²]

Fig.20 Natural room temperature (2015.4.1-2015.4.30)

Fig.21 Room temperature at heating (2014.12.18-2015.1.6)

(2014/11/20-2015/2/18)。ただし、開口部のガラスと熱流計では反射率や吸収率が異なること等を考慮すると測定方法については改良の余地があり今後も検討を行っていく予定である。室内側及び室外側のガラス表面温度を外気温、ガラス面熱流と合わせて Fig.17 に示す。ガラスの Low-e 膜の影響を受け、室内側ガラス表面温度は晴天日に 60℃ 近くまで上昇していることがわかる。また、室内外に日射計を設置し南鉛直面日射量と透過日射量の測定値から式(4)で定義した相当日射熱取得率を求めた。また、日積算日射熱取得量の実測値を Fig.18 に示す。太陽高度・入射角等の影響により、日射熱取得率(η 値) 実測値は 0.38[-]となった。また、Fig.19 に日射熱取得率の日推移を示す。拡散光が入射するときに透過率はやや高くなるもの、直達光では概ね Fig.18 と同様の傾向がみられた。

4. PCM 建材の室内環境改善効果

4.1 融点と凝固点に関する検討

PCM 建材は室温変動を緩やかにする性質を有し、その施工量や施工方法、融点によっても効果は異なる。既往の研究では蓄熱材厚さや融点に関して議論がなされてきたが^{21),22)}、蓄熱材の種類により加熱・冷却時の熱挙動が異なることや過冷却現象も懸念されることから、融点のみでその最適解について議論することは困難である。PCM 建材が室内環境に及ぼす影響に関わる因子には、蓄熱量や融点の他に凝固点や相変化温度幅があり、これらについても検討する必要がある。実験棟で得られた自然室温の推移を Fig.20 に、連続暖房時における室温の推移を Fig.21 に示す。また、熱性能試験から得られた測定間隔である 30 秒ごとの温度上昇に対する蓄熱量(瞬間蓄熱量)を Fig.22 に示す。融点 26℃ の gPCM を混和させた試験体が、潜熱蓄熱の能力を発現させる温度帯は加熱時で 26~31℃ 程度、冷却時で 20~27℃ 程度となり、加熱時と冷却域では温度帯が異なることがわかる。室内環境を考慮した場合、一般に加熱時は過昇温抑制効果、冷却時は冷込抑制の効果が考えられることから、融点と凝固点の双

Fig.22 Enthalpy of every 30s (instant : g26p20 40min./K)

Fig.23 Maximum temperature Fig.24 Minimum temperature

Fig.25 Comparison of minimum temperature

Fig.27 Temperature and heat flow of PCM

方の議論が必要となろう。Fig.20 より加熱時は融点よりも高い温度で潜熱蓄熱の効果がみられることから、上限とする設計室温が、ピーク融点から相変化終了温度とすることで環境改善効果が期待できる。冷却時の温度帯(20～27℃)において温度降下が緩慢になっていることから(Fig.20), 凝固点は夜間の設計室温付近にあることが望ましいと考えられる。連続暖房時の室温推移をみると日中は融点付近で温度上昇が緩慢になり、日中の過昇温が抑制されていることがわかる(Fig.21)。また、室温が融点以上になる日では暖房需要の生起時刻が遅延しており、パッシブ蓄熱効果の一端を示した。

4.2 最高室温と最低室温

Fig.23 及び Fig.24 に PB 室と gPCM 室の自然室温測定時における日最高室温と日最低室温を示す。Fig.23 では、PB 室の最高室温が 20℃を超える日には gPCM 室の過昇温抑制効果がみられ、それ以下の日には gPCM 室と PB 室はほぼ同等の値を示した。Fig.24 より、gPCM 室の最低室温は PB 室よりも常に高い値を示しており、5～17℃の範囲では約 1～2℃の冷込防止効果が期待できる。ただし、これらの温度域は相変化の温度域ではないため、母材である漆喰の顕熱蓄熱による効果及び前日までの蓄熱量による効果であることが考えられる。日最高気温と翌朝の最低室温を比較して Fig.25 に示すが、PCM により冷え込みが 2～4℃抑制されることが確認できた。

5. 実験棟における蓄熱層内の熱挙動

これまで、熱性能試験で比熱や蓄熱量を含む熱性能を検討してきたが、実験棟レベルの壁体で断熱層も含めた熱挙動は確認されていない。本章では、実験棟に施工した蓄熱層(Fig.26)の両表面に熱流計及びシート型熱電対を設置し、実環境における熱挙動を測定した。

5.1 蓄熱層の熱的挙動

蓄熱層の表面温度の経時変化を熱流とともに Fig.27 に示すが、蓄熱過程において表面温度差が大きくなることがわかる。また、蓄熱層の両表面温度の経時変化を Fig.28 に示す。壁体表面温度の推移から、2/21 は固液混相域から液相域まで相変化していると考えられ、

$$\lambda' = q_{in} \cdot l / \Delta\theta_t \quad (5)$$

λ' : 熱移動率 [W/m/K],

q_{in} : 蓄熱層表面熱流 [W/m²],

l : 蓄熱層厚さ[m],

$\Delta\theta_t$: 蓄熱層表面温度差 [K]

$$\alpha = q_{in} / (\theta_{in} - \theta_{wall}) \quad (6)$$

α : 表面熱伝達率 [W/m²/K],

θ_{in} : 室温 [℃],

θ_{wall} : 壁温 [℃]

$$\Delta Q = Q_{h,PB} - Q_{h,PCM} \quad (7)$$

$$\varphi = 1 - Q_{h,PCM} / Q_{h,PB} \quad (8)$$

ΔQ : 暖房削減量 [W/m²/day],

$Q_{h,PB}$: PB 室の暖房量[W/m²/day],

$Q_{h,PCM}$: gPCM 室の暖房量 [W/m²/day],

φ : 削減率 [%]

周囲温度(室温)が 35℃程度の時、蓄熱層の温度は約 27℃となった。これは前述の熱性能試験と同様の傾向を示している(Fig.5)。また、夜間には室内側 q_{in} の値が負の値を取り、蓄熱層から室内へと熱が流入している。日中の表面熱流は、蓄熱層に接する断熱層の表面温度と外気温の差及び熱抵抗(壁面熱貫流率 0.18[W/m²/K], 外気側表面熱伝達抵抗 0.04[m²K/W])から予測した熱貫流量を上回るものの夜間の熱流量は貫流量よりも小さく、PCM の蓄・放熱現象が示唆される(Fig.29)。また、式(5)に示すように表面熱流に蓄熱層厚さを乗じて室温と蓄熱層表面温度との差で除し、蓄熱層の熱移動率を定義して Fig.30 に示した。母材である石膏の熱伝導率は約 1.8 [W/m/K] であるのに対し、放熱時には熱移動率が小さくなっている。また、夜間には暖房のオンオフの繰り返しに伴い測定値が変動しているものの、潜熱蓄熱材の影響によりみかけの断熱性能が高くなっていることが実験的に観測できた。特に蓄放熱量の多い代表日における蓄熱層の蓄熱量を Fig.31 に示す。蓄熱層の温度は、室内側と室外側で計測された温度の平均値とした。蓄熱層の蓄熱量は 27℃付近で急激に上昇していることから、前節で与えた昇温速度 20[min./K]や 40[min./K]の条件での結果とほぼ一致した。ただし、冷却過程においては今後とも検討が必要である。蓄熱層の室内側熱流を室内温度と蓄熱層表面温度の差で除して等価的な表面熱伝達率を定義し(式(6)), Fig.32 に

Fig.28 Surface temperature of PCM layer

Fig.29 Influx of PCM layer (2015/1/4)

Fig.30 Heat transfer rate (2015/1/4)

Fig.31 Enthalpy of PCM layer

Fig.32 Surface heat transfer of PCM layer

Fig.33 Energy saving effects

示す。表面熱伝達率は $3.7[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$ 程度となった。

5.2 PCM 建材の省エネルギー効果

gPCM 室と PB 室の日積算暖房量から式(7)により定義した暖房削減量及び式(8)により定義した削減率の推移を Fig.33 に示す。実測期間中、gPCM 室の暖房量は PB 室と比較すると常に低く、暖房削減率は測定期間積算値で 16.9%であることから、PCM 建材の暖房量削減効果が確認できた。

6. まとめ

本研究では、新規の潜熱蓄熱(PCM)内装左官材を開発し、その基本的熱性能試験の測定にあたり、試験方法から検討を行った。また、実験棟における PCM 内装左官材の環境改善効果及び省エネルギー効果について検証を行った。本報で得られた知見を以下に示す。

1)母材が石膏で、カプセル状の PCM 混和率が 20%以下、厚みが 24mm 以下の PCM 建材の熱性能測定方法について、加熱方法・昇速度・昇温幅について検討を行った。加熱方法に対流加熱法を採用したところ、高い再現性が得られた。昇温速度は加熱時で $10[\text{min}/\text{K}]$ 、冷却時で $20[\text{min}/\text{K}]$ を要する。固相域・液相域の比熱及び潜熱量の測定には $5[\text{min}/\text{K}]$ でも十分な測定結果を得ることができる。また、温度制御の昇温高さは相変化域を含まない 10°C 以上の温度幅を要する。

2) 蓄熱建材における相変化温度の最適解を融点のみで議論することは困難であり、融点・凝固点・相変化温度幅に関する議論が必要となる。室内環境改善を考慮した時、前述した試験条件において、加熱時は上限とする設計室内温度が PCM 建材のピーク融点から相変化終了時の温度近辺であること、冷却時は凝固点が夜間の設計室温付近にあることが望ましい。

3) 実験棟に施工した蓄熱層の熱流から熱移動率として定義して求めた所、夜間に等価的な断熱性能が高くなることを確認した。また暖房負荷削減率は、測定期間積算値で 16.9%となった。

今後は、潜熱蓄熱内装左官材と太陽熱利用を組み合わせたシステムの提案を行い、蓄熱建材を採用した各地域における省エネルギー効果を明らかにする。また、実住宅の実測データについても明らかにする予定である。

謝辞

本研究は、北海道職業能力開発大学校専門課程における平成 26 年度卒業研究の一環として行われたものです。本研究を行うにあたり、北海道職業能力開発大学校の前田直樹氏、(有)村井左官工業の村井来宏氏、YKKAP ㈱の皆様、試料をご提供いただいた JSR ㈱、富士川建材工業 ㈱の皆様にご協力をいただきました。ここに記して心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤直明 他:ダイレクトゲインシステムにおける補助暖房量と蓄熱部位の熱挙動に関する実験的研究 ―室内気候調整における熱容量に関する研究、1―、日本建築学会計画系論文報告集 第 377 号, pp1-8, 1987.7
- 2) 町田誠 他:木造住宅における潜熱蓄熱材の適用に関する研究、その 3 夏季冷房負荷低減を目的とした潜熱蓄熱材利用の数値解析と基本実験、日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp77-78, 1998.9
- 3) 斎藤宏昭 他:木造住宅における潜熱蓄熱材の適応に関する研究、その 1

潜熱蓄熱材の数値解析と比較実験、日本建築学会大会学術講演梗概集,D, pp669-670, 1994.9

- 4) 坪田祐二 他:潜熱蓄熱ボードを用いた躯体蓄熱システムに関する研究、その 1 潜熱材の選定と住宅モデルによる数値解析、日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp1169-1170, 1991.9
- 5) G. Evola et al. : A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, Building and Environment 59 (2013), pp517-527, 2012.9
- 6) E. Rodriguez-Ubinas et al. : Influence of the use of PCM drywall and the fenestration in building retrofitting, Energy and Buildings 65 (2013), pp464-476, 2013.6
- 7) I. Mandilaras et al. : Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, Building and Environment 61 (2013), pp93-103, 2012.12
- 8) Maha Ahmad et al. : Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material, Energy and Buildings 38 (2006), pp357-366, 2005.7
- 9) Cecilia Castellón et al. : Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, Renewable Energy 35 (2010), pp2370-2374, 2010.4
- 10) 佐伯智寛 他:潜熱蓄熱材の性能評価方法に関する研究、その 1 熱物性値(見かけの比熱)の測定方法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012(環境工学Ⅱ), pp201-202, 2012.9
- 11) 佐藤友紀 他: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 第 77 巻 第 678 号, pp651-659, 2012.8
- 12) 近藤武士 他: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、日本建築学会計画系論文集 第 540 号, pp23-29, 2001.2
- 13) 長野克則 他: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 第 579 号, pp21-28, 2004.5
- 14) Guobing Zhou et al. : Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates, Applied Energy 84 (2007) pp1068-1077, 2007.11
- 15) Shazim AliMemon : Phase change materials integrated in building walls : A state of the art review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 31 (2014), pp870-906, 2014.1
- 16) Chi-ming Lai et al. : Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, Energy and Buildings 73 (2014), pp37-47, 2014.1
- 17) 石戸谷裕二:潜熱蓄熱材 (PCM) を適用した放射暖冷房システムに関する研究 (第 2 報 潜熱蓄熱内装材を施工した木造住宅の熱容量と室温抑制効果),北海道職業能力開発大学校紀要第 26 号,pp45-55,2009.12
- 18) 添田晴生 他:PCM を利用した室内熱環境調整に関する研究 : 第 2 報・パラフィンの融解を伴う熱伝導実験による PCM 数値モデルの検証, 空気調和・衛生工学会論文集 (94), pp1-9, 2004.7
- 19) 宮崎智仁 他:粒状潜熱蓄熱材 (gPCM) を適用した蓄熱建材に関する研究、その 1 蓄熱建材の基本的熱性能の評価法に関する検討、日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), pp149-152, 2015.6.27
- 20) 鈴木憲三:熱収支の面から見た寒冷地の窓における望ましい性能, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2012.9
- 21) 黒木友裕 他:室内温熱環境制御への潜熱蓄熱材の利用、日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp407-408, 1996.7
- 22) Lv Shilei et al. : Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings 38 (2006), pp18-24, 2005.2
- 23) 前田直樹 他:粒状潜熱蓄熱材 (gPCM) を適用した蓄熱建材に関する研究、その 2 蓄熱建材の環境改善および省エネルギー効果に関する検討、日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), pp153-156, 2015.6.27
- 24) 草間友花 他:粒状潜熱蓄熱材 (gPCM) を適用した蓄熱建材に関する研究、その 3 自然室温による室内環境評価及び省エネルギー効果の算出、日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), pp157-160, 2015.6.27

A STUDY ON PASSIVE THERMAL STORAGE EFFECTS OF PCM PLASTERED WALL

An examination of the basic thermal performance test method, indoor environmental improvements,
and energy saving effects of PCM plastered wall in the experimental module

Yuka KUSAMA^{}, Yuji ISHIDOYA^{**}, Makoto MIURA^{***}
and Tomohito MIYAZAKI^{****}*

^{*} Doctoral course, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, M.Eng.

^{**} Principal Investigator, Institute of Indoor Climate, Dr.Eng.

^{***} Assoc. Prof., Hokkaido Polytechnic College, Dr.Eng.

^{****} Department of Advanced Architectural Technology for Construction System, Hokkaido Polytechnic College, Jun.

The objective of this study is to report the passive thermal storage effects achieved by applying PCM (Phase Change Material) plastered wall. The PCM plastered wall is a novel finish material where PCM in the form of n-paraffin capsules are mixed with wall finishing materials, such as plaster. When applied on the wall, the PCM plastered wall can deliver excellent indoor environmental improvements and energy savings, because of thermal storage of solar heat gain on the wall. In this study, the effects of the PCM plastered wall are elucidated using an experimental module with triple glass window at Otaru, Hokkaido.

First, the measuring method of the basic thermal performance test of thermal storage building materials was examined. The analysis of basic thermal performance using radiant heating, convection heating, and conduction heating, showed that convection heating had the highest reproducibility. In addition, when measuring the specific heat and latent heat of solid and liquid phases, it was found that the heating rate of ambient air had a minor effect on the measurement results (Fig.8, Fig.9, and Fig.10). In contrast, the measurement results of specific heat in the solid liquid mixed phase region tended to depend on the heating rate. To measure the basic thermal performance of the PCM plastered wall, we had to examine the heating rate and the temperature rising width. It was found that a heating rate of 20[min. /K] was required and for more than 10 °C width, except for the phase change region at the thermo-hygrostat.

Second, the effects of the PCM plastered wall on indoor environmental improvement and energy savings were elucidated using the experimental module. The glass surface temperature of the indoor side was approximately 60 °C during the day in winter (Fig.17). The heat balance between direct gain and heat loss from the window was measured by installing a heat flow meter on the indoor side glass surface (Fig.15, Photo3). According to the integrated measured value on the heat flow meter, the heat balance of the window glass during the measurement period was +16.2 [MJ/ m²], where the heat gain was more than the heat loss. The experimental module consist of two rooms: the gPCM room (coated with granulated PCM plastered wall) and the PB room (plain). The room temperatures at both rooms were evaluated and compared. It was found that the gPCM room had a higher minimum ambient temperature than the PB room. (Fig.20 and Fig.24). When the maximum room temperature became higher than the melting point, the minimum room temperature at the gPCM room the next morning was observed to be 3 [K] higher than that at the PB room. Moreover, excess over heat due to direct gain from heating for 24h was suppressed and energy savings were achieved because of the delay in the heating start time (Fig.21).

Finally, the energy-saving effects of PCM plastered wall were established. The influx and efflux of the material measured using the heat flow sensor revealed the thermal behavior of the PCM layer. By observing the heat flow fluctuation in the PCM layer, we found that equivalent thermal conductivity showed a large amount of heat storage, and a small amount of heat loss (Fig.29 and Fig.30). In addition, the equivalent surface heat transfer was about the same as that of the gypsum board (Fig.32). Energy saving effects of the PCM plastered wall was 17% (average of the measurement period) in the experimental module installed at Otaru, Hokkaido (Fig.33). The use of PCM plastered wall is a novel passive thermal storage method that can be located closest to the interior of the heat storage material.

(2015年6月9日原稿受理, 2016年1月13日採用決定)