木造住宅における潜熱蓄熱建材の導入効果に関する研究（その2）：冬期実大実験による潜熱蓄熱建材の床と天井への敷設による効果の比較

STUDY ON INTRODUCTION EFFECTS OF PHASE CHANGE BUILDING MATERIALS USED IN WOODEN HOUSES (PART 2): COMPARISON OF EFFECTS OF PHASE CHANGE BUILDING MATERIALS LAID IN FLOOR AND CEILING USING REAL-SCALE EXPERIMENTAL ROOM IN WINTER

季 思雨 — * 1 谷口景一朗 — * 2
岸本尚子 — * 3 芹川真緒 — * 4
佐藤 誠 — * 5 高瀬幸造 — * 6
前 真之 — * 7 井上 隆 — * 8

Siyu JI — * 1 Keiichiro TANIGUCHI — * 2
Naoko KISHIMOTO — * 3 Mao SERIKAWA — * 4
Makoto SATOH — * 5 Kozo TAKASE — * 6
Masayuki MAE — * 7 Takashi INOUE — * 8

キーワード：

潜熱蓄熱材, ダイレクトゲイン, オーバーヒート, 敷設部位, 蓄熱率

Keywords:

Phase change material, Direct gain, Overheat, Laid position, Heat storage ratio

The potential of using Phase Change Material (PCM) in wooden house has been investigated. Since the cost of the PCM is high, searching for a laying position with high heat absorption and dissipation efficiency has been shown as a problem to solve. In this study, we focused on the distribution of the efficiency of heat absorption of PCM laid in the floor or in the ceiling or both in the floor and ceiling of real scale experimental room in winter.

1. はじめに

高断熱高气密化した木造住宅に潜熱蓄熱材 (Phase Change Material) を付加することが、昼間の過剰な室温上昇と夜間の冷え込みを抑制すると期待される。一方、潜熱蓄熱材を含んだ建築材料 (潜熱蓄熱建材, 以下PCM) は一般建材に比べて高価なため、設置効果の高い敷設位置を見極めることが課題である。

既報¹⁾では、PCMを床仕上げ材の下に設置した場合に、PCMの吸熱量、放熱量が最も大きくなるPCM敷設位置を実大実験にて検討した。室奥行方向については、開口部から遠ざかるほど、開口方向については、室中央、東側、西側の順番に日積算PCM吸放熱量が小さくなった。直達日射が直接当たらない部位でPCMに吸熱できた要因は、室温上昇に伴う対流熱や他の部位からの反射日射等と考えられる。一方、床は居住状態において家具がおかれる場合が多く、かつ荷重を考慮して仕上げ材を厚くするため安定した蓄熱が期待できる部位としてはむしろ天井の方がよいと考えられる。

既往研究では、PCMを床、壁、天井に敷設する時、部位の違いによる蓄熱効果の比較が実験とシミュレーションで試みられている。竹内ら²⁾は模型箱に、PCM施工条件を「なし」、「床」、「天井」、「床+天井」とし、実験を行った。Lauren H.Cら³⁾はPCM敷設部位に関す

るシミュレーションケーススタディを行い、住宅への敷設面積と年間熱負荷削減効果を示した。

しかしながら、既往研究では、模型実験やシミュレーションが用いられており、居室スケールでPCM設置部位について検討されたものは見当たらない。本報では、前報の検討手法に基づいて、同量同特性のPCMを床と天井に敷設した時の蓄熱効果を実大実験で検証し、適切なPCMの設置部位について検討したので報告する。

2. PCMの敷設部位と吸放熱効果の関係検証のための実験概要

2.1 実験棟概要と実験概要

本実験は既報¹⁾で用いた実験棟の南面開口部を断熱性能と日射取得性能のバランスを考慮し日射取得型真空トリプルガラスへ改修して使用した。図1に実験棟外観とPCM敷設状況を示す。実験棟概要と使用したPCMの物性値を表1に示す。PCM相変化温度帯は、居住者の快適性を優先して20~24℃近辺の材料を選定した。パラフィン系マイクロカプセル含浸積層板のPCMを均一に床または天井 (床/天井面積15.5 m²中PCM敷設面積10.9 m²) の仕上げ材 (床:合板15mm, 天井:合板6mm) の裏の45mm空気層に敷設した。実験ケースによっては、PCMが仕上げ材に密着しないためPCM裏側に適

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科 大学院生・日本学術振興会特別研究員 DC1 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部1号館223室)

²⁾ 東京大学大学院工学系研究科 特任助教・修士 (工学)

³⁾ YKK AP (株) / 東京大学大学院工学系研究科 大学院生

⁴⁾ 東京大学大学院工学系研究科 特任研究員・博士 (工学)

⁵⁾ 佐藤エネルギーリサーチ 博士 (工学)

⁶⁾ 東京理科大学理工学部 講師・博士 (工学)

⁷⁾ 東京大学大学院工学系研究科 准教授・博士 (工学)

⁸⁾ 東京電機大学 客員教授 / 東京理科大学 名誉教授・工博

¹⁾ Grad. Student, Grad. Faculty of Eng., The Univ. of Tokyo, JSPS Research Fellow DC1

²⁾ Project Assist. Prof., Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, M.Eng.

³⁾ YKK AP Inc. / Grad. Student, Grad. Faculty of Eng., The Univ. of Tokyo

⁴⁾ Project Researcher, Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

⁵⁾ Satoh Energy Research, Co., Ltd., Dr.Eng.

⁶⁾ Junior Assoc. Prof., Fac. of Sci. and Tech., Tokyo Univ. of Sci., Dr.Eng.

⁷⁾ Assoc. Prof., Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

⁸⁾ Visiting Prof., Tokyo Denki Univ., Dr.Eng.

宜ウレタンスポンジ（PCM の屋外側に密度 17.8kg/m³，熱伝導率 0.043W/(m・K)）を充填した。在室者や照明・コンセントの内部発熱をヒーター^{注1)}で模擬した。オーバーヒート状態となったときは、居住者による窓開け等の排熱処理を想定しファンコイルユニット（以下,FCU）により 26℃設定で冷房運転し、室温低下時はヒーターにより 18℃設定で暖房した。暖冷房制御用センサーとして、K 型熱電対を室中央に設置した。同一 PCM 敷設量を敷設する部位による蓄熱効果を検討するため、「a.床蓄熱」「b.天井蓄熱」「c.床天井蓄熱」の 3 ケース（図 2）を計測した。c.床天井蓄熱のケースは敷設面積が他のケースの 2 倍になっている。

2.2 計測点

図 3 に計測点位置を示す。計測はすべて 10 秒間隔で行った。気象条件は、外気温湿度に加え、南鉛直面と水平面の全天日射量を計測した。外壁の一般部及び熱橋部の室内側表面にそれぞれ 310 mm 角と 50 mm 角熱流計を取り付けた。空気温度は垂直 5 点(床から高さ 100mm,600mm,1100mm,1700mm,2200mm)を室奥行方向に 4 点,間口方向 5 点で合計 100 点を T 型熱電対で計測した。PCM の設置断面については、時々刻々の吸放熱挙動の計測のため、床と天井にそれぞれ、室窓側から A,B,C,D の 4 列、西から東まで①,③,⑤の 3 列の 12 点ずつで図 4 に示すような PCM の室内側と屋外側に 50mm 角熱流計^{注3)}と T 型熱電対を設置し、熱流及び表面温度を計測した（図 3 中 ■印箇所）。なお、熱流計は PCM が熱取得する場合を正とした。室中央③列の熱流計測点近辺には、床と天井表面に日射計を設置した。床と天井の表面温度分布を把握するため、熱電対 30 点（奥行方向 6 列、間口方向 5 列）ずつ計測した。

2.3 PCM 吸放熱量の定義

計測で得られた熱流、日射量の測定値と PCM 吸熱効果を評価するための日蓄熱率をここでは(1)～(3)式のように定義した。1 日の起点は PCM の放熱が概ね完了する朝 6 時とした。

$$Q_{absorp} = \Delta t \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{t=6:00}^{30:00} \max(q_{pcm,out,t} + q_{pcm,in,t} \quad 0) \quad (1)$$

$$Q_{solar} = \Delta t \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{t=6:00}^{30:00} q_{solar,t} \quad (2)$$

$$r_{store} = \frac{Q_{absorp}}{Q_{storage}} \quad (3)$$

ただし、

Q_{absorp} : 日積算 PCM 吸熱量[MJ/(m²・日)]

Q_{solar} :日積算日射量[MJ/(m²・日)](PCM 熱流計測点近辺日射計によるもの)

$Q_{storage}$:PCM 蓄熱容量[MJ/m²]（表 1 に示した PCM 蓄熱容量 18.0MJ を敷設面積で除したもの）

r_{store} :日蓄熱率[-]

Δt : 計測時間間隔[s]（ここでは 10 秒）

$q_{pcm,out,t}$: 時刻 t における PCM 屋外側熱流[W/m²]

$q_{pcm,in,t}$: 時刻 t における PCM 室内側熱流[W/m²]

q_{solar} :時刻 t における室内日射量[W/m²]

図 1 実験棟外観と PCM 敷設状況写真(左下：床 右下：天井)

表 1 実験棟概要

測定対象室寸法	W3.97m*L3.97m*H2.40m	
相当隙間面積	1.8 cm ² /m ²	
換気回数	第三種機械換気0.2回/h (第一種機械換気0.5回/hの熱交換効率60%相当を想定)	
外皮平均熱貫流率Ua値	0.30 W/(m ² ・K) (PCM下付加断熱材λ=0.043W/(m・K))	
外皮 熱貫流率	床	0.24 W/(m ² ・K)
	天井	0.17 W/(m ² ・K)
	南北壁	0.29 W/(m ² ・K)
	東西壁	0.29 W/(m ² ・K)
開口部	窓面方位	南
	寸法	W1.87m*H2.23m
	窓面積	Aw=4.17m ² Ag=3.22m ² Af=0.95m ²
	窓仕様・性能	樹脂フレーム(ホワイト) Uw=1.32W/(m ² ・K) ηw=0.45
	ガラス仕様・性能	Low-E 真空トリプルガラス(日射取得型) Low-E3+Ar13+FL3+V0.2+Low-E3 Ug=0.83W/(m ² ・K) ηg=0.58 τg=0.47
PCM	試験体	パラフィン系マイクロカプセル含浸積層板 蓄熱容量 125.4J/g(15~35℃)
	寸法と質量・枚数	300mm*300mm*3mm(=228g/枚) *792枚
	仕様	比熱ピーク温度 24℃(融解過程) 20℃(凝固過程)
	蓄熱容量	18.0MJ(潜熱のみ)

注: Aw: 窓面積 Ag: 窓ガラス面積 Af: 窓フレーム面積

Uw: 窓全体熱貫流率 Ug: ガラス熱貫流率

ηg: 窓ガラス日射取得率 ηw: 窓全体日射取得率 τg: ガラス日射透過率

図 2 計測ケースごとの PCM 敷設イメージ

図 3 計測点位置(PCM 敷設位置は「c. 床天井蓄熱」を例とした)

3. 各ケース測定期間中の気象条件と代表日・代表期間の選出

各ケース実測期間の南鉛直面全天日射量, 外気温, 室温(室内空気温度全計測点の平均値とする)を図5に示す。同図には, 暖房発熱, 冷房除去熱, 内部発熱, 全 PCM の室内側・屋外側平均表面温度も示した。計測期間中, 各ケースにおける前日蓄熱分が夜間に徐々に放熱し, 暖房なしでも室温を約18℃に維持できた。それに対し, 12時頃からは過熱状態になり, 除去熱量が約1000Wにも達した。日射が多い時間帯にPCMの吸熱効果向上が特に重要である。ケースごと起点室温とPCM温度に近い, かつダイレクトゲイン手法の評価に影響する気象要因として, 気温と開口部を有する南鉛直面日積算全天日射量に着目し, 代表日を選定した^{注2)}。また, 期間を通して吸熱効果の傾向を掴むため, 各ケースに連続3日の晴天日を選定し, 代表期間とした。代表期間での検討は3日間の平均値を用いた。

図5 ケースごと計測期間中気象条件と温熱状況

図4 PCM敷設位置断面の計測点

表2 各ケースの計測期間中代表日気象条件

ケース名	代表日	外気温[℃] (最低-平均-最高)	起点 室温[℃]	起点 PCM温度[℃]	南鉛直面 全天日射量[MJ/(㎡・日)]	南中時 太陽高度[°]
a.床蓄熱	2020/1/21	3.5-7.3-11.6	19.1	20.5	21.36	34.6
b.天井蓄熱	2021/3/3	3.8-7.6-13.2	19.1	20.9	19.68	47.6
c.床天井蓄熱	2020/12/26	3.0-7.5-12.0	20.0	21.4	19.70	31.2

図6 床・天井の室内表面温度とPCM平均温度

4. 代表日PCM敷設部位表面温度とPCM温度に関する検証

4.1 敷設部位による室内表面温度とPCMの温度差について

図6に敷設部位である床/天井の表面温度とその部位(床/天井)に敷設した全PCMの平均温度を示した。本実験では, PCMを床・天井の仕上げ材の裏に敷設したため, PCMの温度は仕上げ材の室内側表面温度に伴って変化する。どのケースでも, 床の日射熱取得が多いため, 床室内表面温度が天井より高い。また, すべてのケースにおいて敷設したPCMの平均温度は網掛けした相変化温度域内に収まっており, PCMを有効に活用できていることが伺える。

床蓄熱と天井蓄熱についてみると, 日射量が多い10-16時の時間帯に, 床蓄熱の室内表面とPCMの温度差の平均値は2.2℃になるのに対し, 天井蓄熱では1.7℃であり, 床蓄熱より0.5℃小さかった。床天井蓄熱でも, 床の同時時間帯温度差平均が2.3℃であったのに対し, 天井の温度差平均では床より0.8℃小さく, 1.5℃となった。床

蓄熱, 天井蓄熱と同じ傾向が確認できた。また, 床天井蓄熱の条件について, 床表面温度が天井表面温度より高いのに対し, PCMの温度は逆の傾向にあるのは, 天井と床の仕上げ材の熱抵抗が異なるためであると推察される。

4.2 敷設位置によるPCMの室内・屋外側表面温度について

既報¹⁾にて, 間口方向のPCM吸熱効果の違いが奥行方向より小さいことが分かったため, 本報では, 室奥行方向に着目し, 室中央一列の床と天井のPCMを検討対象とした。図7に各ケース代表日のPCM室内・屋外側表面温度を窓際から室奥方向の順に示した。(1)と(2)より, 室内側表面温度では, 日射が多い時間帯に, 床蓄熱のPCM温度が急激に上昇するのに対し, 天井蓄熱では徐々に上昇している。日射による影響が最も大きいA③に着目すると, PCMの室内側表面温度が最高温度となる時刻は, 床蓄熱が14時頃, 天井蓄熱は室温が下がり始める前の15時頃と1時間程度遅くなる。なお, 両日の南中

時刻はほぼ一致(12:11)している。一方、屋外側表面温度が最高温度となる時刻は、床蓄熱が18時頃で、天井蓄熱は20時頃となった。敷設位置別に見ると、どちらも開口部に近いほど、はやくPCMの温度が上昇しはじめ、最高温度も高い。床天井蓄熱についてみると、敷設面積は他の条件の2倍で、厚さは半分となっていることから、床と天井の両方の温度上昇は床蓄熱、天井蓄熱に比べて早く、特に

屋外側表面温度の上昇速度の差異が大きい。床のPCM屋外側表面温度を見るとA③は相変化温度を超え完全に融解している様子が確認できる。床天井蓄熱は床蓄熱、天井蓄熱に比べて敷設したPCMに有効に蓄熱できており、また夜間の温度低下も遅いことが確認できることから室への放熱も長時間行えている。

図7 代表日室温とPCM室内側・屋外側表面温度

図8 代表日代表点PCM吸放熱量[W/m²]と日射量[W/m²]

4.3 日射量とPCM吸放熱熱流の日変動に関する検討

図8に各ケースの代表日、代表点のPCM吸放熱量及び日射量日推移を示した。(1)と(2)の床蓄熱と天井蓄熱について考察する。床蓄熱は既報と同じく、開口部に近いほど透過日射が当たる時間帯が長く、日積算吸熱量が大きくなった。天井蓄熱では、入射日射が小さいため、吸熱量が緩やかに増え、吸熱量の最大値は床蓄熱と同じく開口部に近いほど大きい傾向にあるが、分布は明らかに小さい。(3)と(4)の床天井蓄熱では、前述した床蓄熱と天井蓄熱の傾向と同様だった。床天井蓄熱の床のPCMは、入射日射があるにも関わらず14時ごろには吸熱が小さくなり完全に融解している様子が確認できた。

図9 代表期間敷設部位ごとの日射量・PCM吸熱量の日積算平均値と日蓄熱率平均値

6. まとめ

東京の実大実験棟に対し、同量同特性のPCMを床、天井、床と天井分散敷設した場合の冬期の実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 床天井蓄熱時、床PCM吸熱量が天井より大きい。床PCMと天井PCMとも、開口部に近いほど、最高温度が高く、吸熱量が大きい。
- ② 床蓄熱と天井蓄熱の日蓄熱率（PCM敷設量に対する吸熱量の比）を比較すると、床蓄熱は室奥行方向の分布が大きいのにに対し、天井蓄熱では均一となっているが天井蓄熱の日蓄熱率が小さい傾向にある。室奥では床蓄熱と天井蓄熱の日蓄熱率の差は僅かであった。床天井蓄熱では前述の条件に比べて改善し、同量のPCMを敷設する場合は床や天井に集中して敷設するよりは、床と天井に分散して敷設する方が良い結果となった。

今後の課題を以下に示す。

実気象下での実験では条件を揃えるのが困難であり、実験ケースの拡充には限界がある。実験データで検証されたシミュレーション方法を構築し、有効なPCMの敷設方法について設計法を検討する予定である。

5. 代表期間の日蓄熱率に関する考察

図9に3章で選定した各ケース代表期間の3日間における日射量・PCM吸熱量の日積算平均値と日蓄熱率平均値を示す。

敷設したPCMの量のうち、どの程度有効に吸放熱に利用されたのかを確認するために日蓄熱率で評価した。図7と同様に、床蓄熱の日蓄熱率は、室奥行方向の分布が大きく、窓側は奥側の3倍程度に達する。天井蓄熱については、奥行方向の分布が小さいが全体的に敷設したPCMの15~20%程度しか活用できていない。床天井蓄熱では、床PCMの奥行方向の分布も緩和され、天井PCMの値自体も大きくなり、敷設したPCMを有効活用できていることが確認できる。以上より、同量のPCMを薄く広く敷設するのはより良い効果が期待できる。

謝辞

本研究はJSPS科研費19H02295(研究代表者：前真之)と特別研究員奨励費JP21J21376による成果の一部である。潜熱蓄熱材の提供にあたって三木理研工業㈱と一般社団法人日本潜熱蓄熱建材協会にご協力いただきました。関係者の皆様に深く謝意を表します。

注

- 注1) 内部発熱設定では自立循環型住宅設計ガイドライン設定モデル住宅（一般モデル）「住宅事業主の判断基準」に基づいて、LD室に室者がいる状態の日積算内部発熱量を単位面積あたりが同じになるように計算し、24時間平均化し、137.5W(一定値)とした。
- 注2) 全ケース代表日における平均外気温の平均値が7.5℃になり、南鉛直面全天日射量日積算の平均値では20.2MJ/(m²・日)であった。各ケース代表日は以上の平均値に対して、外気温は±0.3℃、日射量は5%以内に収まった。
- 注3) 本実験のPCMの熱流測定で使われた熱流計はすべて江藤電気株式会社製のM55Aであり、仕様を以下に示す。また、熱流計とデータロガー間の接続はシールド線で結線したためノイズはほぼ見られなかった。稀に確認された瞬時のノイズは、前時刻(10s前)の計測値で代用した。

注表 熱流センサーの定格仕様

型式	外形寸法L・W・T(mm)	感度定数(mV/W・m²)	熱抵抗率(°C/W・m²)	熱伝導率(W/m・K)
M55A	50*50*0.7	0.01	2.5*10 ⁻³	0.4

参考文献

- 1) Ji S., et al: Study on Introduction Effects of Phase Change Building Materials Used in Wooden Houses (Part 1): Verification on Heat Storage

Effect of Phase Change Building Materials by Laid Position Using Real-Scale Experimental Room in Winter, AIJ J. Technol. Des. Vol. 26, No.64, 1025-1030, 2020.10(in Japanese)

季思雨, 藤原亮, 谷口景一郎, 芹川真緒, 佐藤誠, 高瀬幸造, 前真之, 井上隆: 木造住宅における潜熱蓄熱建材の導入効果に関する研究 (その1): 冬期実大実験による潜熱蓄熱建材の敷設位置と蓄熱効果に関する検証, 日本建築学会技術報告集, 第26巻, 第64号, pp.1025-1030, 2020.10

- 2) TAKEUCHI J., et al: Study for Effect of Introducing PCM in Test Chamber Assuming Houses Part 5 Evaluation for the Indoor Thermal Environment by the Different of Interior Wall Position installing PCM and Melting Point of PCM, Technical papers of annual meeting, the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (Sapporo), Vol.2, pp.25-28, 2019.9(in Japanese)

竹内仁哉, 長谷川兼一, 松本真一: 潜熱蓄熱材による空間の温度変動緩和効果に関する検討 その5 施工位置や融点の違いによる温熱環境への影響評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2019.9.18~20(札幌)), 第2巻, pp.25-28, 2019.9

- 3) L. Christie, Henry Skates, Comparative Study of Potential PCM Applications in light-weight construction to increase thermal performance: The Architectural Science Association, 2015

[2021年6月2日原稿受理 2021年7月28日採用決定]