

潜熱蓄熱材による空間の温度変動緩和効果に関する基礎的研究

竹内仁哉¹, 長谷川兼一¹, 松本真一¹, 篠澤航平²

¹ 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科

² 全国農業協同組合連合会

潜熱蓄熱材 (PCM) は室内の温熱環境の改善や省エネルギー効果が期待されるが、木造住宅のような熱容量が不足する構造体に PCM を付加した場合や、日射熱に期待できない秋田県のような寒冷地に適用した場合の有効性については不明な点が多く、この点を検討した研究例は少ない。本研究では、住宅の環境調整手法の一つとして、PCM を寒冷地の木造住宅へ適用した場合の有効性を評価することを最終目標とし、模型実験や CFD 解析により床や壁、天井等の異なる部位に PCM を貼付した場合や PCM の融点の違いによる温熱環境への影響について明らかにすることを目的とする。本報では模型実験や CFD 解析を用いた温熱環境評価により、PCM を内装材として貼付面積を増大させることや設定室温と同等の融点となる PCM を適用することにより、室温の低温化による省エネルギー効果や良好な暖房環境が形成される可能性がある一端を示した。この知見を実在住宅に適用すれば、寒冷地における住宅の環境調整手法の一つとして期待される。

キーワード: 潜熱蓄熱材, 実験, CFD, 貼付位置, 融点, 室内温熱環境

潜熱蓄熱材 (以降, PCM) は一般的に蓄熱量を十分に確保するため、日射熱と暖房設備を活用することが前提とされ、室内空気の温度変動の緩和および熱負荷変動の平準化が可能となり、室内温熱環境の改善や省エネルギー効果が期待される。しかしながら、木造住宅のような熱容量が不足する構造体に PCM を付加した場合や、日射熱に期待できない秋田県のような寒冷地においてどの程度有効であるかについては不明な点が多く、この点を検討した研究例は少ない。

本研究では、住宅の環境調整手法の一つとして、PCM を寒冷地の木造住宅へ適用した場合の有効性を評価することを最終目標とし、模型実験を用いた基礎的実験や CFD 解析により、床や壁、天井等の異なる部位に PCM を貼付した場合や PCM の融点の違いによる温熱環境への影響について明らかにすることを目的とする。

実験概要

実験概要

表 1 に本実験で用いた PCM の物性値、図 1 に実験模型の概要と熱流センサーの測定ポイントを示す。実験模型は幅 1.82m×奥行 1.82m×高さ 2.02m、換気回数が約 1 回/h に制御された排気ファン設備を有している。本実験で取り扱う PCM は、表 1 に示す融点 19°C に対して ±3°C の相変化域となる 16°C~22°C の温度範囲にて蓄熱効果が期待できる仕様を用いた。実験条件として、昇温開始時は実験模型の周囲温

表 1 PCM の物性値

密度 [g/cm ³]	比熱 (顕熱域) [kJ/(m ² ·K)]	熱伝導率 [W/(m·K)]	熱容量 (15~ 35°C 降温時) [kJ/m ²]	熱容量(潜熱域) (15~25°C 昇温時) [kJ/m ²]
1.0	5.0	0.10~0.13	196	150

度、模型内温度を約 10℃に維持し、実験模型内に設置した 200W (100W×2 箇所) の電球を稼働させ昇温開始させる。各測定ポイントの温度が昇温開始から定常状態に達したことを確認後、電球の電源を停止し、模型内温度が周囲温度と同等となるまで降温させる。

図 2 に実験模型の壁構成と PCM 蓄熱量を測定するための熱流センサーの設置状況、図 3 に PCM 蓄熱量の概念図を示す。PCM 単体の蓄熱量 $q_{PCM}[W/m^2]$ は図 2 に示すように PCM の表裏面に熱流センサーを設置し、PCM 表裏面における各熱流量 q_{in} , q_{out} の差より測定可能である。したがって、空間における PCM の蓄熱量 $Q[kJ/m^2]$ は、PCM 単体の蓄熱量 q_{PCM} と時間経過 $t[s]$ を考慮すると、図 3 に示す PCM 施工有無の差より求めることが出来る。なお、実験ケースは表 2、写真 1 に示す PCM 貼付の有無による計 4 ケースとした。測定ポイントとして、実験模型内の代表温度を空間中央の FL+1.1m に設置し、各壁面の表面温度の計測以外に、センサーの感度と外径寸法が異なる 2 種類の熱流センサーを用いて熱流量を計測した。

温度推移と熱流量推移

図 4 に各ケースの実験模型内の温度推移、図 5 にリファレンスケースである Case 1 と各ケースにおける模型内の代表温度との差、図 6 に PCM を貼付した部位を対象に単体の蓄熱量 (熱流量) を示す。図 5 に示す空間温度の推移は、昇温・降温過程ともに PCM 貼付面積が増加するにつれ緩やかな温度勾配となるが、床や天井等の異なる部位に同じ貼付面積で貼付した場合、空間に対する温度変動への影響は比較的小さい。図 5 より、PCM の貼付位置によって多少の差異はあるものの、温度変動の緩和効果が比較的大きい天井と床を対象に貼付面積を増大させた Case 4 では昇温過程で約 2.2℃、降温過程で約-1.3℃の緩和効果が期待できる。図 6 より PCM 単体の蓄熱量 q_{PCM} は昇温過程において多少の差異はあるものの、PCM の貼付位置による差異は比較的小さく、概ね同等の蓄熱量となる。したがって、表 1 に示す PCM の昇温過程や降温過程の温度範囲を考慮し時間経過を反映させた PCM 蓄熱量 Q は、センサーの

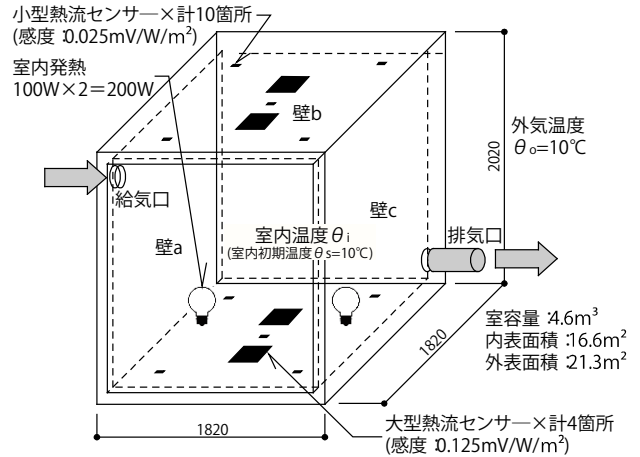
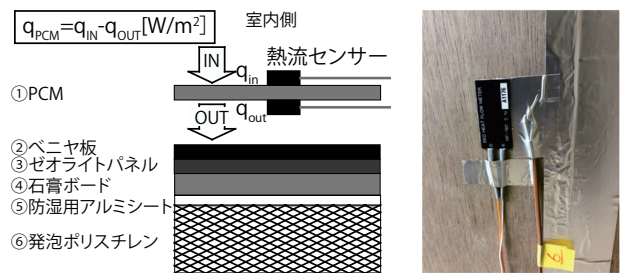


図 1 実験模型概要・測定ポイント



(1) 壁構成とセンサー設置位置 (2) 測定風景

図 2 実験模型の壁構成・測定概要

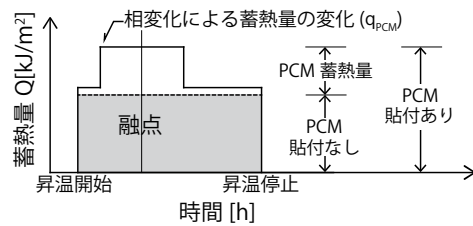
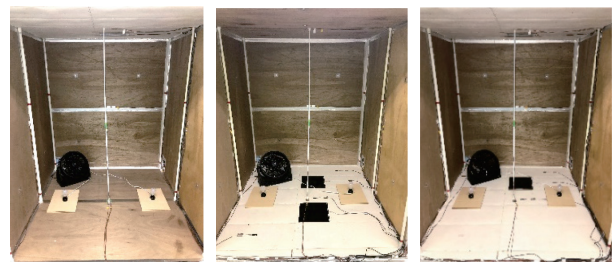


図 3 PCM 蓄熱量の概念図

表 2 実験ケース

ケース名	PCM 施工条件	
	貼付位置	貼付面積[m²]
Case 1	なし	0
Case 2	天井 (1 面)	2.6
Case 3	床 (1 面)	2.6
Case 4	天井+床 (2 面)	5.2



(1) Case 2 (2) Case 3 (3) Case 4

写真 1 実験模型を用いた実験風景 (内観)

種類によって異なるが、例えば、A センサーでは昇温過程で平均 511[kJ/m²], 降温過程で平均-195[kJ/m²], 一方、B センサーでは昇温過程で平均 180[kJ/m²], 降温過程で平均-225[kJ/m²]となる。

貼付面積を考慮した容積比と緩和温度の関係

図 7 に実験模型の室容積に対して PCM の貼付面積と厚みを考慮し無次元化した容積比と空間に対する緩和温度との関係、ならびに昇温・降温過程の最小二乗法による回帰直線を示す。なお、本実験結果以外に既報で得られた実験結果（竹内ら, 2018）もあわせて示す。昇温・降温過程ともに PCM の貼付面積の増加に伴い、温度変動の緩和効果が期待できると示唆される。特に、空間内の全壁面を対象に PCM を施工した場合、昇温過程で約 8.0°C, 降温過程で約-5.7°Cの緩和効果が期待できる。しかしながら、実際の居住状態では家具の配置状況や暖房方式、換気方式等により、PCM の施工可能なスペースも異なるため、これら条件を考慮した検討も必要である。

貼付位置や融点の違いによる温熱環境評価

解析概要

居住者が滞在する室内の温熱環境は、異なる暖房方式や換気方式による影響以外に、天井や床等の周囲の各壁面からの放射による影響によって、室内の温熱環境の様相に違いがあると推察される。本研究では、PCM の有無や貼付位置、PCM の融点の違いによる温熱環境への影響を明らかにするために、図 1 に示す模型実験モデルを再現した解析モデルを想定して検討を行う。

表 3 に解析条件、図 8 に PCM の温度・比熱モデル、表 4 に解析ケースを示す。解析モデルは図 1 に示す実験模型と同じ壁構成とし、流入・流出条件として実験時の流入・流出開口面積と同等となる開口面積を設け、流入面から 10°Cの空気を空間内へ吹出す設定とした。PCM の温度と比熱の関係についてはモデルの簡略化を図るために、図 8 に示す PCM の昇温過程ならびに降温過程による温度と比熱の関係を平均化したモデルを採用した。

解析ケースは実験条件と同じ融点 19°Cの条件下

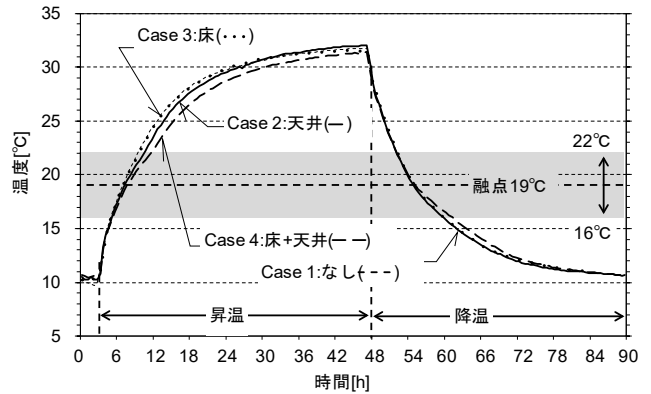


図 4 実験模型内の温度推移（代表温度）

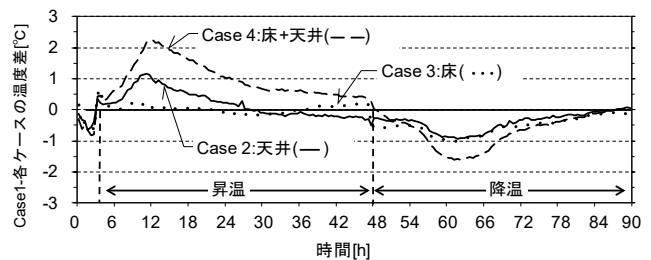


図 5 リファレンスケースと各ケースとの空間代表温度差

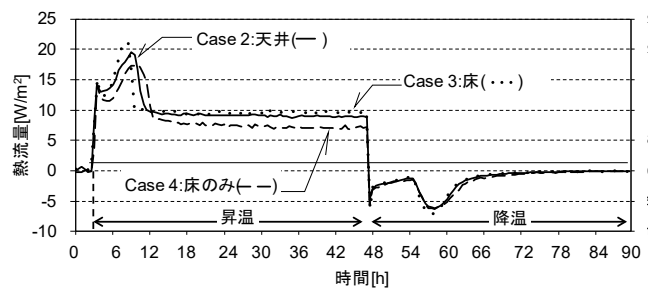


図 6 PCM 単体の蓄熱量（熱流量）推移

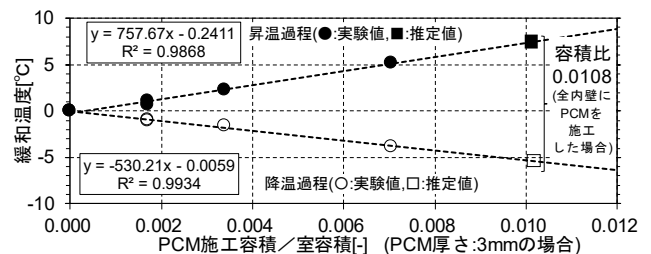


図 7 PCM 貼付面積を考慮した容積比と緩和温度の関係

で PCM を貼付しないリファレンスケース以外に、床や天井、全壁面に PCM を貼付した場合の 5 パターンを想定し、PCM を全壁面に貼付した場合におい

では実験時と異なる融点 17℃, 21℃, 23℃の 3 パターンを追加した計 8 ケースとした。

実験結果と解析結果の比較

図 9 に各ケースの空間代表温度や各壁面の表面温度を対象とした実験値と解析値との関係を示す。なお、実験値と解析値との誤差を把握するために、実験値、解析値の各定常状態のデータを対象に、RMSE（二乗平均平方根誤差）を用いて評価する。解析条件として、図 4 に示す各ケースにおける温度推移の定常状態は相変化域ではないため、図 8 に示す PCM の温度・比熱モデルを用いず、温度と比熱の関係において一定値を用いて解析した。

PCM を貼付しない Case 1, 天井に PCM を貼付した Case 2 の RMSE は 0.17, 1.35 と小さく、実験値と解析値が精度よく対応している。一方、床のみや、天井と床に PCM を施工した Case 3, Case 4 の RMSE は 2.87, 2.89 となる。この理由として、熱源モデルの仕様が実験モデルと解析モデルで多少異なることから、Case 1, Case 2 に比べ熱源に近い床面温度での差異が大きくなり誤差が多少生じたと考えられる。以上より、各ケースとも実験値と解析値は全体的に概ね良好な対応関係を示していることを確認した。

貼付位置・融点の違いによる温熱環境への影響

冬季の暖房時において窓面からのコールドドラフトや隙間風等の周囲の環境条件により不均一な環境が形成されやすい傾向にある。特に、PCM の融点異なる場合、PCM を貼付した各壁面の表面温度の様相に違いが見られ、各壁面からの放射による室内の温熱環境への影響も異なると推察される。そこで、本研究では表 4 に示す計 8 ケースを対象に、暖房時における PCM の融点の違いによる温熱環境への影響を明らかにするために、実験模型を再現した解析モデルを用いて CFD 解析により検討を行った。

解析方法として、第一に各ケースの流れ場、温度場、放射を考慮した対流・放射連成解析により形態係数と定常解を求めた。第二に、実験条件の降温過程と同様に、室内負荷である電球の発熱条件を OFF にした状態で、流れ場を固定した温度場のみを解いた非定常解析により求めた。解析条件として、暖房

表 3 解析条件

解析領域	1.74[m](x) × 1.74[m](y) × 1.9[m](z)
メッシュ	77(x) × 85(y) × 69(z)=451,605
乱流モデル	標準 k-εモデル
差分スキーム	QUICK
壁面条件	速度 一般化対数則
	温度 全壁面で 4.5[W/m ² ·K], 放射率 0.9 ※PCM: 温度-比熱モデルを適用(図 8 参照)
流入・流出条件	U _{in} =0.147[m/s], U _{out} =0.147[m/s], T _{in} =10[°C]
発熱条件	給排気面: 0.093[m] × 0.093[m] 電球発熱量: 100[W/個] × 2 個

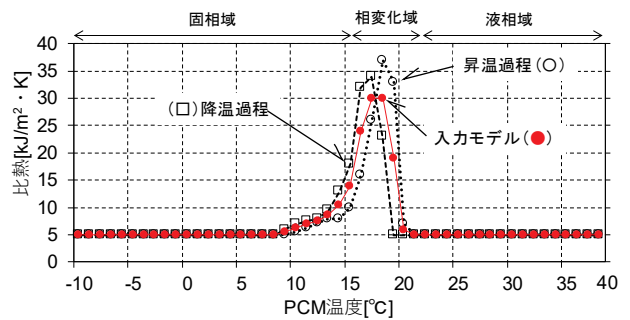


図 8 PCM の温度・比熱モデル (融点 19℃)

表 4 解析ケース

ケース名	PCM 施工条件		
	貼付位置	貼付面積[m ²]	融点[°C]
Case 1	なし	0	—
Case 2-a	天井 (1 面)	2.6	19
Case 3-a	床		
Case 4-a	天井+床 (2 面)	5.2	
Case 5-a	天井+床+壁 (6 面)	16.6	
Case 5-b			21
Case 5-c			23
Case 5-d			23

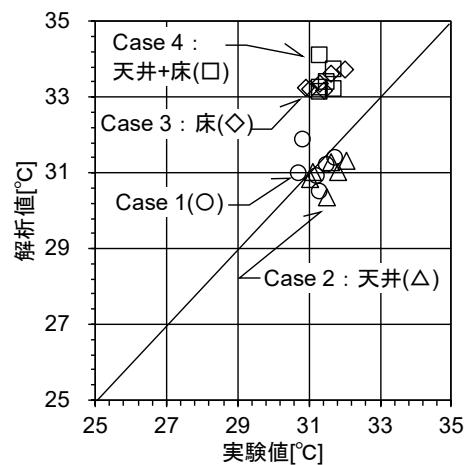


図 9 実験値と解析値の関係

時の空間温度設定を便宜上 22℃と仮定し、各ケースの空間代表温度が 22℃となる条件を求めた。なお、融点が異なる解析ケースを対象とする場合、図 8 に示す PCM の温度・比熱モデル（融点 19℃）を基準に、設定する融点と基準となる融点 19℃との温度差 $\Delta \theta$ だけずらして調整した温度・比熱モデルを用いた。温熱環境の評価指標として、空間内の代表空気温度以外に、平均放射温度 (MRT) と作用温度 (OT) を用いた。ただし、作用温度 (OT) は空間内が静穏な環境とみなし、空間内の平均空気温度と MRT の算術平均値として求めた。

表 5 に各ケースにおける空間の代表空気温度が 22℃の場合における MRT と OT を示す。融点が 19℃の場合、PCM の貼付面積が増大するにつれて MRT, OT とともに緩やかに高くなる傾向がある。異なる融点の MRT, OT を比較すると、各ケース間において顕著な差異は見られないが、空間の設定温度付近となる融点 21℃, 23℃の場合、他の融点に比べ高くなる傾向がある。以上より、各ケースにおけるグローブ温度を等価と仮定した場合、PCM の貼付面積を増大させる程、室温を低く設定することが可能である。また、実際の居住状態においては、暖房方式や換気方式以外に家具の配置等の影響を受けるが、空間の設定温度と同等の融点を適用することにより、良好な暖房環境が形成される可能性があるとして示唆される。

表 4 空気温度と MRT・OT の関係

ケース名	貼付位置	融点 [°C]	MRT [°C]	OT [°C]	空間代表温度 [°C]
Case 1	なし	—	23.4	22.7	22
Case 2-a	天井	19	23.4	22.7	
Case 3-a	床		23.6	22.8	
Case 4-a	天井+床		23.7	22.8	
Case 5-a	天井+床+壁(6面)		24.4	23.3	
Case 5-b			17	24.3	
Case 5-c		21	24.8	23.5	
Case 5-d		23	24.9	23.6	

まとめ

実験模型内に PCM を付加した基礎的実験により、貼付面積が等しく貼付位置が異なる場合、空間の温度変動の差異は小さく蓄熱量も概ね等しいことを確

認した。また、貼付面積を考慮した容積比と緩和温度の関係より、貼付面積の増大に伴い温度変動の緩和効果が期待されるが、実際に PCM の貼付可能なスペースの可否について検討が必要である。

CFD 解析を用いた温熱環境評価により、PCM を内装材として適用する場合、グローブ温度を等価と仮定すると、貼付面積を増大させるほど室温を低く設定することが可能である点、また空間の代表温度と同等の融点となる PCM を適用することにより、良好な暖房環境が形成される可能性がある点が示唆された。

今後は、実際の居住状態では暖房方式や換気方式以外に、家具の配置等の影響も受けると推察されるため、住宅に PCM を付加するために必要な設計・施工法に資する知見を蓄積する。

謝辞

本研究は平成 30 年度 秋田県立大学・創造的研究の一環として研究補助を受けて実施している。実験を実施するにあたり、DIC 株式会社の藤崎氏、静谷氏には多くの貴重なご助言をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

文献

竹内仁哉, 長谷川兼一, 松本真一 (2018) 「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 3 模型実験による PCM 導入効果・PCM 蓄熱量の推定」『日本建築学会東北支部研究報告集』(81), 37-38

〔 令和 3 年 7 月 30 日受付
令和 3 年 9 月 1 日受理 〕

The Effect of Introducing Phase Change Materials in Test Chamber Assuming Houses

Jinya Takeuchi¹, Kenichi Hasegawa¹, Shin-ichi Matsumoto¹, Shinozawa Kouhei²

¹ *Department of Architecture and Environment System, Faculty of Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *National Federation of Agricultural Cooperative Associations*

Phase change materials (PCM) could be an indoor thermal environmental control method for residential housing. The effect of introducing PCM is uncertain for residential houses of insufficient heat capacity, such as timbered houses or houses using insufficient solar radiation heat in cold regions such as Akita. In this study, an experiment was conducted using test chamber assumed houses to investigate the effect of installing PCM. Furthermore, a computational fluid dynamics (CFD) model was assumed based on a test chamber model to evaluate the effect of indoor thermal environment positioning by introducing PCM. The relationship between the melting point of PCM and indoor thermal environment was analyzed using CFD. Consequently, the difference in indoor temperature fluctuations owing to different positionally installed PCM was small in the experiment. An energy-saving effect and a good indoor thermal environment could be formed by expanding the PCM area and applying the PCM of the melting point equivalent to the air-conditioning temperature.

Keywords: Phase change materials, Computational fluid dynamics, Pasting position, Melting point, Indoor thermal environment