

論文の内容の要旨

論文題目 潜熱蓄熱建材の熱的挙動の測定および計算の方法ならびに
計算による住宅の温熱環境およびエネルギー性能の評価方法の提案

氏名 芹川 真緒

潜熱蓄熱材(以下、PCM)は、相変化温度域で大きな潜熱容量を有する。そのため、空調温度付近で相変化する PCM を熱容量の小さい木造住宅等に導入することにより、室温の安定効果が期待される。また、建物の性能や PCM の相変化温度、潜熱量、設置位置等の組合せが適切な住宅においては、自然エネルギーを PCM に蓄熱させることによる空調エネルギー削減効果が期待される。特に、近年、住宅の高気密・高断熱化に伴い、冬期の日中の日射熱取得を PCM に蓄熱してオーバーヒートを抑制するとともに、夜間の室温安定や暖房負荷軽減に活用することが期待されている。

PCM を住宅に導入するにあたっては、検討対象の PCM を導入した条件下で、自然室温計算や暖冷房熱負荷計算を行い、導入効果の把握を行うとともに、適切な導入量、設置位置、相変化温度等を決定することが望ましい。

一方で、既往研究の中で PCM の見かけの比熱の測定方法はさまざまに提案されているものの、住宅に導入される PCM のスケールや温度変化速度での測定方法は確立されていない。また、測定結果を PCM の熱的挙動の計算へ反映させる方法について、融解と凝固の見かけの比熱曲線が一致しない PCM の計算を扱う既往研究はあるものの、その扱いについて十分な検討がなされていないといった課題が見られる。

本研究では、PCM 導入の効果を算出するための非定常熱伝導計算に入力する PCM 物性値の測定方法の提案、および、標準的な住戸への PCM 導入を想定した熱負荷計算を実施することを、第一の目的とする。

また、居住者への訴求性を鑑み、PCM が住宅内の温熱環境や熱負荷に与える影響を、快適性・健

健康、エネルギー使用やその経済性の面から評価する方法の提案を行うことを、第二の目的とする。

本論文は9章で構成し、第1章では、上述の研究の背景と目的を取り纏め、本論文の構成を示した。

第2章では、PCM の熱的特性に関する測定法や計算法、室内温熱環境の評価、温熱環境と健康性の関連、住宅での電力使用やそのコスト等に関する既往研究の整理を行った。

PCM 測定法については、既往研究における PCM 熱物性の測定方法と、それらの課題の抽出を行った。PCM の代表的な物性値である見かけの比熱を把握するための既往研究における測定法としては、数 mg 程度の少量の試験体を用いる DSC、PCM を試験管に入れて測定を行う T-history 試験、建物導入時のサンプルサイズに比較的近い状態で測定を行う Panel test experimental set-up を用いる測定など、様々なサイズの試験体を用いた測定方法が提案されている。また、温度変化速度や試験体の代表温度の取り方も、測定方法により様々である。

PCM の蓄放熱挙動は、その大きさや温度変化速度の影響を受ける可能性があるため、実際の建材スケールや温度変化速度で蓄放熱挙動を把握することが望ましい。

温度測定位置について、潜熱変化を伴う場合には一般に試験体内部の温度勾配が一定とはならないため、試験体の代表温度として試験体表層温度を使用することが適切か、中心部の温度を加味すべきか等を考慮すべきと考えられる。

また、PCM の見かけの比熱の測定結果は一般に融解過程と凝固過程で異なるものの、測定は融解過程、凝固過程の単調な温度変化条件で行うものが多く、融解途中で凝固過程に移行する条件や、その逆の温度変化条件での測定を行った例は少ない。しかしながら、融解過程と凝固過程で異なる相変化温度を有する PCM を導入した建物での年間熱負荷計算には、融解過程から凝固過程へ、また、凝固過程から融解過程へ移行する条件での測定を行い、移行過程に関する情報を蓄積して計算に反映すべきである。

3章では、ペルティエ装置を用いて、建物への導入時の形態に比較的近い、200～300mm 角、厚 1～2cm 程度の試験体の測定を行った。ペルティエ装置は、300mm 角の 2 枚の加熱冷却板(熱板)で試験体を挟む構造となっており、熱板はペルティエ素子により加熱・冷却される。

測定より、PCM の固相時と液相時の熱伝導率に差があること、ゲル化されていない PCM では液相時の熱流向きにより熱伝導率に差が生じることが確認された。

見かけの比熱測定では、2 枚重ねて測定した試験体の、熱板に近い表面の温度(外側表面温度)と、2 枚の試験体の中の温度(中心温度)を測定した。温度と熱流の測定結果より見かけの比熱を算出する際、試験体の代表温度としては、外側表面温度よりも中心温度の方が好ましいこと、試験体にもよるが、中心温度割合 0.8 程度として外側表面温度と中心温度の重み付け平均を取った温度がより好ましい場合があることが確認された。

また、昇温/降温や、降温/昇温を繰り返す温度条件を与えて測定を行い、計算における融解時と凝固時の見かけの比熱曲線の切り替えの検討に使用するためのデータを取得した。

4章では、PCM の一次元非定常熱伝導計算への組み込みを行った。

計算において、PCM の温度と見かけの比熱を連成して解く際、通常の顕熱のみを考慮した壁体計算のように分割された層単位で比熱を与えるのではなく、節点単位で見かけの比熱を温度の関数として算出することとした。

3章の昇温／降温や、降温／昇温を繰り返す測定結果より、融解時と凝固時の見かけの比熱曲線の切り替えの方法の提案を行った。ピークが単数のパラフィンでは、融解時と凝固時の見かけの比熱のピークがほぼ一致するため、曲線の切り替えを行わないこととした。ピークが複数のパラフィンと無機系のPCM では、複数の見かけの比熱曲線を、PCM 温度をもとに切り替える方法を提案した。

計算により、3章の測定結果の温度変動の傾向を、概ね再現できることが確認された。

5章では、PCM を含む熱伝導計算の妥当性の確認のため、熱箱を用いた測定や、実験棟実測とシミュレーションの比較を行った。計算により、大よその温度変動を再現できることが確認された。

6章では、住宅の温熱環境が健康性・快適性に与える影響の評価方法について考察を行った。また、住宅の熱負荷が電力使用や電力コストに与える影響の評価方法について考察を行った。

健康性に関する住宅温熱環境の評価に関しては、既発表論文をもとに、集計対象の室・期間・時刻／時間帯の実現作用温度が目標作用温度を下回る時刻／時間帯について、実現作用温度の目標作用温度の差を積算した値を、健康リスク要因の評価指標として用いることとした。

快適性に関しては、集計対象の室・期間・時間帯の PPD の平均値を、指標として用いることとした。

熱負荷計算結果を消費エネルギーへ換算する際には、既往研究のエアコン消費エネルギー計算モデルを使用することとした。

暖冷房を含めた電力使用をコスト換算するにあたり、現在の日本の電力料金の体系の調査を行った。7章のケーススタディでは、実際の電力料金プランをもとに、電力コストを算出することとした。

7章では、PCM の計算が可能な熱負荷計算プログラムを用いたケーススタディを行い、室温や住宅全体の空調エネルギーの把握を行った。その結果を、健康性・快適性・経済性の観点から評価した。

計算条件は、基本的に、住宅事業主建築主の判断基準の住宅プランやスケジュールに則った。ケース設定は、断熱性能(平成 28 年基準相当／高断熱)、開口部(日射取得型／日射遮蔽型)、蓄熱(なし／顕熱(水)／PCM)、PCM 相変化温度域(15～20℃／17.5～22.5℃／20～25℃／25～30℃)、個室暖房方式(エアコン／ヒーター)、暖冷房運転スケジュール(間歇運転／連続運転)、暖房設定温度(20℃／25℃)の組合せとした。

PCM 導入による暖房処理熱量の削減効果は、平成 28 年基準相当の間歇運転の暖房スケジュールで 1GJ/年程度、連続運転で 2GJ/年程度であった。削減率は、それぞれ、7.5%と 11.0%である。冷房処理熱量は、冷房運転時間の長い連続運転のケースを除いては、ケース間の冷房処理熱量の差は小さく、ケーススタディの条件設定の範囲においては、PCM の導入により、冷房負荷が増大するという懸念はな

いことが確認された。

PCM 導入が年間の電力料金に与える影響について、その影響は小さいことが確認された。

健康リスク要因の評価指標や暖かさの得点は、PCM 導入が与える影響は小さかった。

快適性を表す指標のひとつのリビングの暖房期在室時の平均 PPD は、断熱性能が高いケースや 25℃設定のケースで概ね小さい値を示した。また、適切な相変化温度の PCM 導入による、PPD の低減効果が確認された。特に、設定温度 25℃のケースで PCM 導入による PPD の低減効果が大きい、PCM が日中のオーバーヒートの防止に効果を発揮しているものと推察される。

リビングの暖房期在室時の平均 PPD とエネルギー消費量の関係について、平成 28 年基準相当／蓄熱なし／間歇運転／暖房設定温度 20℃のケースでは PPD は 28%程度で暖房用一次エネルギー消費量は 7GJ/年程度である。高断熱／PCM(相変化温度域 25～30℃)／間歇運転／暖房設定温度 25℃とすることで、暖房用一次エネルギー消費量は微増するが、平均 PPD は 10%程度に抑えられる。高断熱化と暖房設定温度を高め設定することだけでは日中にオーバーヒートが生じるが、PCM 導入により、オーバーヒートが抑制され、快適性が向上することが確認された。

8章では、住宅性能の評価を、健康性・快適性・経済性を集約したひとつの指標で行う方法の提案を試行的に行った。

まず、エネルギー性能に関する2項目、温熱快適性に関する3項目、健康性に関する3項目の合計8項目を評価項目として抽出した。更に、8項目の重み付けを行う方法を検討し、ひとつの指標として集約する方法を提案した。本章における提案内容は、ひとつの指標に集約する基本的な手法であり、集約の際に使用する項目や重み付けの詳細な検討は今後の課題である。

9章では、論文全体のまとめを示した。