

## 論文の内容の要旨

論文題目 Thermal Performance Analysis of Phase Change Material in Residential Buildings using Direct Solar Gain

(太陽熱利用住宅でのPCM適用手法による蓄熱熱性能効果に関する研究)

氏名 金鉉倍

本論文では、建物の適用可能性を高めるためにシートで製作されたSSPCMサンプルを利用して室内の温度安定化を通じた、冬の暖房負荷削減効果の向上と、日本と北米をはじめとするヨーロッパの地域まで様々な気候でのPCMの適用の可能性を把握目標に研究を進めた。

まず、実験部ではPCM建材の熱性能を把握するために、恒温槽を使用した比熱の測定実験を行った。これを基に、実験棟での室温と各面の熱流を、ヒーターとFCUの電力使用量を監視してPCMの効果を確認した。

シミュレーション部では、比熱の測定実験を通じてPCMモデルを作成し、実験棟の結果と比較してPCMモデルの妥当性を検証した。これを基に、シミュレーションで使用されるPCM適用による年間負荷低減効果を確認し、同じ潜熱量のPCMを敷設したときに効果が大きくなる適用方法を検討し、日本の気候での効果を確認した。そして、北米を中心に様々な気候でのPCMを通じた負荷削減予測式を作るために、PCM適用を通じた加熱負荷に影響を与える建物の形とPCMの敷設条件、気候要素を選定してシミュレーションした。この結果を基に、各要素を回帰分析し相関関係式を作った。他の条件の検討を通じ、住宅でのPCM敷設方法による適用の可能性を確認した。次は各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的、そして潜熱蓄熱材の種類と特徴と必要性について説明した。本論文の目的は、住宅のPCMの適用を通じた室温安定効果による快適性の向上と負荷低減効果の確認と、さまざまな気候でのPCM適用可能性の検討である。そのため論文の構成を示した。

第2章では、潜熱蓄熱材の建築分野での過去の研究を調査し、研究動向を把握した。PCM建材の熱性能に関する研究や、建物の外皮にPCMを適用して室内快適性を高め負荷を減らす研究をまとめた。また、PCMのシミュレーション適用のために、相変化区間の比熱変化を計算する方法も一緒に整理した。

第3章では、温度制御が可能な恒温槽から10種類のSSPCMシートと石膏ボードマイクロカ

プセルPCM建材を利用して、それぞれ時間ごとに温度を上昇（加熱）、下降（冷却）をして比熱測定実験を実施した。本研究でメインサンプルとして使用されるSSPCMの比熱を測定し、恒温槽の設定温度とPCM内部温度の使用方法に応じた特徴と効果的な実験方法を確認した。

第4章では、建物の使用段階で室温安定化を通じた快適性の向上と冬季暖房エネルギー低減のための方法について述べ、潜熱蓄熱を利用したパラフィン系SSPCMシートを床や天井や壁仕上げへ活用する可能性を検討するために実験を行った。三つの実験棟でPCMがないA棟（0MJ）とPCMが敷設されたB棟（床のみ：6.65MJ）、C棟（床、壁、天井：6.74MJ）に分類してSSPCMシートの有無と敷設面積、厚さ、適用例に係る熱環境への影響と、自然室温での快適性、暖房、冷房条件での負荷への影響を検証する。1月15日から19日まで、自然室温条件で室内温熱環境を測定した。SSPCMシートの敷設によってオーバーヒーティングがB棟で最高2.32℃、C棟で最高3.11℃が低くなり、夜間の室内温度の低下はB棟で最高1.86℃、C棟で最高2.53℃が減少した。同量のPCMを敷設しても敷設部位や面積に応じて、PCMの室内温度制御の効果が異なることを確認した。2月3日から9日まで、6：00から24：00まで20℃の設定温度でヒーターを稼働させた。A棟（15.30 MJ）と比較した測定期間中の総電力消費量は、B棟で9.2%（13.89 MJ）、C棟で18.4%（12.48 MJ）減少した。適用された面積が床から全面に拡張されると、加熱電力を減らす効果が二倍になった。同じ量のPCMが敷設されていても敷設面積と場所に応じて、熱保存性能が異なることを示した。直射日光を受ける床にPCMが適用されたとき、高い熱利益が達成された。

第5章では、温度に応じて比熱が変化するPCMの特性をシミュレーションに適用するために、第3章で恒温槽実験を通じて求められたシートPCMの比熱を介してEnergyPlusに利用するPCMモデルを作成し、2月3日から14日までの実験結果とEnergy Plusの結果を比較した。測定期間全体で平均温度が同様の傾向を示し、シミュレーションの結果を信頼することができた。このPCMモデルを利用してSSPCMシートの日本の様々な気候への適用可能性を検討した。シミュレーションは、日本の気候区分（地域1-7）でそれぞれ標準的な住宅をType A（PCMなし）、同じ量のPCMが別々の面積で設置されているType B（床、6.65 MJ）とType C（全面、6.74 MJ）に分類して、21個のケースで進行した。各地域でSSPCMシートの設置効果と設置面積に応じた性能の違いを検討した結果、全地域の平均年間暖房負荷削減はType Aに比べてType Bで19%、Type Cで30%の低減が示された。外部エネルギーを相変化に使用する潜熱蓄熱材であるSSPCMシートを室内の仕上げに活用すれば、室温の安定化と冬季の暖房消費電力の削減が可能になることが実験とシミュレーションにより、日本の様々な気候において確認された。建物に同じ潜熱量のPCMが設置されていても、設置面積と場所に応じて蓄熱性能が変わる。したがって、建物のPCMを施工

時に性能を最大化するためには、PCMの潜熱量と設置面積、位置を考慮する必要がある。

第6章では、本研究に使用したSSPCMシートサンプルは、加熱と冷却時でピーク値と潜熱区間が違う。しかし、EnergyPlusのPCMモデリング方法は、16個の温度点にそれぞれ1つのエンタルピー値だけしか入力できないので、加熱と冷却時の平均値を用いたが、これにより誤差が発生した。この部分の改善のために計算の変化が可能なExTLA (ExTLA、Excel based Thermal Load Analysis) を介してFeustelの近似式を用いて、加熱と冷却時それぞれの比熱の計算が可能なPCMモデルを作成し、シミュレーションしてEnergyPlusと実験結果と比較した。温度では大きな差が現れなかったが、熱流では吸熱と放熱が実験結果と比較した場合ExTLAの結果はEnergyPlusより、はるかに近いが分かった。ExTLAのPCMモデルを利用して、年間の負荷をシミュレートし、容量と室内の適用方法（設置面と位置）に応じたPCMの性能を向上させることができる方法を検討した。本研究で使用されたSSPCMシートは、相変化温度19°C-25°Cの暖房用に製作された。PCMを床（12.32m<sup>2</sup>）と全面（49.95m<sup>2</sup>）に設置したとき、遮蔽を追加してもPCMの容量が増加するにつれて暖房負荷は削減されたが、冷房負荷はほとんど変化がなかった。暖房負荷削減の場合、PCMの効果を最大化することができる設置容量があることと、PCMの室内適用方法に応じて効果が変わるポイントがあることを確認した。

暖房負荷削減を通じてPCMの性能を最大限にするためには、PCM容量に応じて最も効果的な室内の適用方法を見つけることが重要である。PCM設置容量と室内の適用方法に依存する負荷削減量を予測することができる場合、室内条件と気候が変わっても、最も効果的なPCMの設置方法を見つけることができる。様々な室内条件と気候でPCMの暖房負荷に影響を与える要因を探して、負荷削減量を予測することができる計算方法の検討が必要であると考えている。

第7章では、PCMの性能に最も大きな影響を与える気候条件とPCMの適用方法による住宅での効果を検討した。これにより、各地域でのPCM使用の相対的な有効性を判断することができると考えられる。暖房負荷削減を通じてPCMの性能を最大限にするためには、PCM容量に応じて最も効果的な室内の適用方法を見つけることが重要である。そのためにASHRAE気候区分の各地域の代表都市を様々なPCM容量、建物形状、敷設条件で総429ケースの年間負荷シミュレーションを計算し、暖房負荷削減量を確認した。PCMの敷設方法（面積と位置）と、建物の形態と各地域の代表都市の外気温、日射量に求めた様々な気候要素との相関関係の分析を通じたPCM適用による暖房負荷低減効果に最も影響を与える要素を選定した。これらを利用して回帰分析によって関係式を作った。建物の外観とPCMの容量を変えて負荷削減量を計算し、シミュレーションと比較して、アジア、ヨーロッパの気候でも適用可能であることを確認した。シミュレーションの暖房負荷削減量と負荷削減予測式の相関性は重決定R<sup>2</sup>約0.79以上に高かった。PCMを住宅に適用す

る方法には数多くの変数があるが、断熱条件と体積による窓の面積を固定したときに、対象地域（都市）が変わってPCM敷設方法が異なっても、複雑なシミュレーションをすることなくPCMの施工前や住宅の設計時、地域別のおおよそのPCM適用可能性と効果を確認する指標として使用することができると考えられる。

以上により、PCM適用による建物の室内温度の安定化効果と年間負荷削減効果を介してPCM適用効果を向上できる方法について検討した。そしてPCMの負荷削減量を予測する式により、対象地域やPCM敷設方法が変わってもPCM施工前におよそのPCM適用効果を判断することが可能である。