

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656346

研究課題名(和文)PCM入り銅フォームを利用した蒸暑地域の住宅におけるパッシブ冷房壁体の提案と評価

研究課題名(英文)Proposal of passive cooling wall using copper foam integrated PCM panel for residences in hot humid region

研究代表者

吉野 博(Yoshino, Hiroshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：30092373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、蒸暑地域における潜熱蓄熱材(PCM)を利用したパッシブ冷房壁体の提案と評価を目的とする。初めに、東南アジアの蒸暑地域住宅を対象としたアンケート調査と実測調査を行い、蒸暑地域における温熱環境やエネルギー消費の実態を明らかにした。次に、蒸暑地域における住宅の採涼手法として、PCMと夜間換気を組み合わせたパッシブ冷房システムを提案し、そのためのPCM入り銅フォームパネルの開発を行うとともに、住宅の縮小模型を使った実験によりその効果を確認した。さらに、PCM入り銅フォームパネルの最適設計やそれを利用した住宅の温熱環境予測のための、三次元伝熱解析プログラムを作成した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to propose and evaluate passive cooling wall using phase change material for residences in hot humid region. First, we conducted a questionnaire survey and field measurements on residences in Southeast Asia, and revealed their indoor thermal conditions and characteristics of energy consumption. Second, we proposed a passive cooling system that combines phase change material (PCM) with night ventilation. For the proposed system, we also developed a new PCM panel which was integrated with copper foam. We measured its thermal performance by testing with a scale model house. Finally, a heat transfer analysis program was developed for optimal design of the PCM panel and evaluation of its effect on indoor thermal environment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築環境・設備

キーワード：熱環境

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化等の地球環境問題の解決のためにはグローバルな環境戦略が必要である。特に東南アジア地域では近年の急速な経済成長に伴って生活水準が飛躍的に向上し、エネルギー消費量も急増している。急激な人口増加と生活水準の向上に伴う室内環境の快適性に対するニーズの高まりや、各種の家電製品の普及率の増加により、住宅用エネルギー消費の増大が地球温暖化に及ぼす影響は極めて大きいと予測される。東南アジアで一般的にみられる蒸暑地域において、室内環境の快適性を実現するためには防暑対策が必要であるが、現在はエアコンや扇風機などのアクティブな手法が主流となりつつあることから、エアコンの普及に伴って増大する冷房用エネルギーを削減し、地球環境への負荷を抑える必要があると考えられる。

一方、パッシブな温熱環境調整手法の1つに、潜熱蓄熱材 (Phase Change Material: PCM) を利用する手法が存在する。PCM については、これまで寒冷地域における省エネルギー建築技術の1つとして研究が実施されてきたが、東南アジアの様な蒸暑地域への利用は今まで検討された例がない。PCM を利用したパッシブクーリング手法としては、日中に高温の空気から吸熱して夜間にその蓄えた熱を放出する手法が考えられる。しかし、PCM には熱伝導率が低いという特徴がある。そのため、PCM 単体の利用では、低い熱伝導性により、相変化が完了しない部位が発生し、本来の性能を十分に発揮できない可能性がある。そこで PCM の熱伝導率の低さを補うために、熱伝導性の高い物質と組み合わせた新しい PCM ユニットの開発が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、これらの地域の冷房エネルギーを削減するために、新たなパッシブクーリング手法として、熱伝導性の高い銅フォームに封入した PCM と夜間換気を組み合わせた壁体システムを考案し、実験と数値解析によって冷房エネルギーの削減効果に関する性能を明らかにする。また、そのために、現地の気候風土、住宅内の温熱環境やエネルギー消費量の現状についてアンケート調査及び実測調査を実施し、性能検証並びに適用範囲検討のためのデータ収集を実施する。以下に主な目的に関して詳述する。

(1) 東南アジアの蒸暑地域の住宅を対象とした気候風土、室内温熱環境、エネルギー消費量の現状調査

アンケート調査と実在住宅を対象とした実測調査の2種類の現地調査を、マレーシアとベトナムの主要都市で実施する。アンケート調査では住宅の様式や構成、世帯構成、ライフスタイル、家電機器や冷暖房の使用状況、エネルギー消費量、居住者の環境意識などについて把握することを目的とする。実測調査

では、各都市における住戸の1年間の室内温熱環境とエネルギー消費について明らかにすることを目的とする。

(2) PCM 入り銅フォームパネルの開発

蒸暑地域で利用できる熱伝導性の高い PCM パネルの開発を行う。開発パネルは、スポンジ状の銅フォームに PCM を封入したものとし、このような PCM の使い方について既往の研究を整理した上で、材料の構成比の異なるパネルを複数作成し、それぞれのパネルが持つ熱的性能を実験により把握する。

(3) 模型実験によるパッシブ冷房壁体の性能検証

(2)で作成した PCM 入り銅フォームパネルを用いて、夜間換気と組み合わせた提案システムの部分模型を作製して実験を行い、本システムの蒸暑地域における有効性を明らかにする。

(4) 数値解析によるパッシブ冷房壁体の性能検証

実験結果を受けて、アジアの蒸暑地域の様々な地域における本システムの適用可能性について、建物の断熱性能を変更した場合も含めて数値解析により検討する。

3. 研究の方法

(1) 東南アジアの蒸暑地域の住宅を対象とした気候風土、室内温熱環境、エネルギー消費量の現状調査

2011年12月に、東南アジアの蒸暑地域に属するベトナムとマレーシアを訪れ、現地の住宅に関する情報収集や実在住宅の視察を行った。具体的には住宅内の快適性と電化製品の所有数、使用時間についてのアンケート調査を実施した。また、マレーシアの主要な3種類の住宅(伝統的住居・新様式の住宅(テラスハウス)・タウンハウス)6件を対象に、長期的な実測調査を実施し、室内温熱環境に関する分析を行った。さらに、テラスハウスを対象として、居住者へのヒアリングを含めた詳細調査を行った。

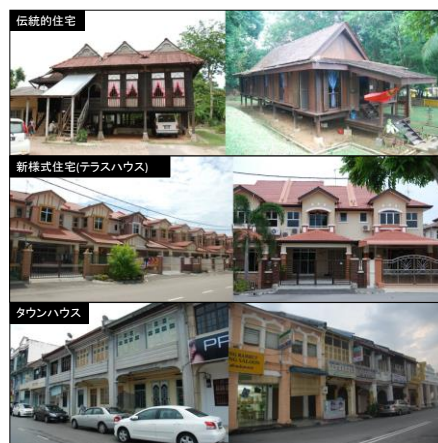


図1 調査対象住宅の外観

(2) PCM 入り銅フォームパネルの開発

化学的に安定、不活性で低コストのパライン系 PCM を、Y.Shiina (Y.Shiina, T.Inagaki (2005) International Journal of Heat and Mass Transfer 48, 373-383) の既往研究を基に、多孔性素材(スポンジ状)である銅フォームの空洞内に充填させ、PCM の欠点である熱伝導率の低さを改善した新素材(PCM 入り銅フォーム)を作成した。室内環境を快適に保つために、PCM は融点 25°C のものを用いた。PCM の充填率、天然ゼオライトの有無などの条件を組み合わせ、数種類の PCM 入り銅フォームパネルを作成し、以下のように熱的性能の把握を行った。

- ① PCM 液相時と固相時それぞれの熱伝導率を測定した。
- ② PCM 入り銅フォームパネルの温度を、擬似定常状態を保ちながら低い温度から高い温度まで変化させることにより、固相時、液相時の比熱と相変化時の融解熱量を測定した。
- ③ 蓄放熱特性把握するため、PCM 入り銅フォームパネルを人工気象室と恒温槽の間に設置し、恒温槽内部の温度を実験開始直後に 20°C から 45°C へ、実験開始から 1,000 分後に再び 45°C から 20°C へステップ変化させ、それに伴って変化する熱流と温度の測定を行った。図 2 に実験に用いた系の概略図を示す。

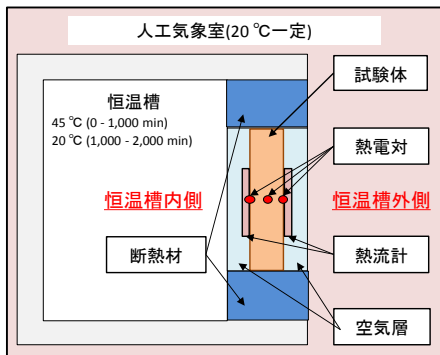


図 2 蓄放熱特性把握実験の概略図

(3) 住宅模型実験によるパッシブ冷房システムの性能把握

PCM 入り銅フォームパネルの有効性と夜間換気の有無による効果の違いを把握するため、人工気象室内に住宅の縮小模型を設置し、実験を行った。図 3 に本実験に用いた模型の概略図を示す。蒸暑地域の外気温度の日変動を想定して人工気象室の温度を変動させ、模型の天井部分に PCM 入り銅フォームパネルを組み込んだ場合と組み込まない場合の実験を行い、模型内部の温度測定を行った。また、PCM パネルを組み込んだ上で、夜間換気を行った場合と行わなかった場合の実験を行い、同様に模型内部の温度測定を行った。なお、夜間換気については、天井裏の強制換気により行う方法とした。

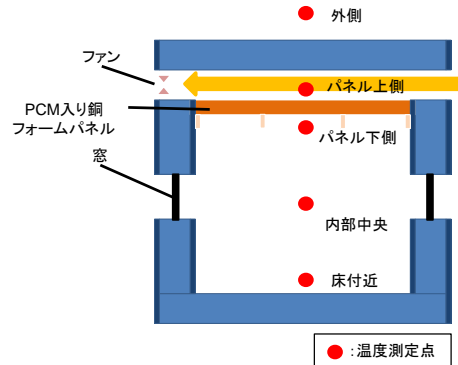


図 3 縮小住宅模型の概略図

(4) 三次元伝熱解析プログラムの作成および解析による PCM 入り銅フォームパネルの性能検討

PCM 入り銅フォームパネルの最適設計や、開発システムを導入した場合の温熱環境予測に利用するため、三次元伝熱解析プログラムを作成し、以下の検討を行った。

- ① 作成したプログラムに、開発パネルの各材料の構成比率・熱伝導率・容積比熱・融解熱量を文献や(2)の①の実験測定値等から与え、(2)の②の実験を再現し、予測値と実験値の比較を行った。
- ② 解析によるパラメトリックスタディーを行い、PCM だけのパネルとの違いや、厚さを変更した場合のパネルの性能の変化について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 東南アジアの蒸暑地域の住宅を対象とした気候風土、室内温熱環境、エネルギー消費量の現状調査

① 東南アジアの蒸暑地域の室内環境とエネルギー消費に関する実態を定量的に明らかにすることを目的として、ベトナムとマレーシアにおいて住宅内の快適性とエネルギー消費に関するアンケート調査を実施した結果、温熱感については、日中に約 4 割の居住者が暑さを感じていること、夜間は約 2 割の居住者が暑さを感じているにも関わらず、セキュリティの問題から約 75% の居住者が窓開け換気を行っていないことなどが明らかになった。エネルギー消費量については、電化製品の所有数と使用時間が増加していることを明らかにするとともに、エアコンと冷蔵庫の消費エネルギーが特に大きく、それぞれ住戸全体の約 25% を占めることを、アンケート結果に基づく消費エネルギー推定により明らかにした。図 4 にエネルギー消費量の内訳と既往文献との比較を示す。

② 室内温熱環境に関する比較分析を目的に実施した、マレーシアの主要な 3 種類の住宅(伝統的住宅・新様式の住宅(テラスハウス)・タウンハウス) 6 件を対象とした長期実測調査の結果を図 5 に示す。伝統的住居では日中の室温が外気温より高くなり 35°C 以上

に達すること、テラスハウスとタウンハウスでは、壁体の熱容量により日中のリビングの室温は32℃程度に抑えられるものの、夜間の室温が低下せずに30℃程度となることを明らかにした。また、住宅全体の約40%を占めるテラスハウスでは、前述の室内の高温状態を解消するためにエアコンの設定温度が低く設定されており、エネルギー消費量が大きくなっているという実態が明らかとなった。そこで、テラスハウスを対象として、居住者へのヒアリングを含めた詳細調査を行い、気流を加えることにより居住者の温熱快適感が向上することが確認された。

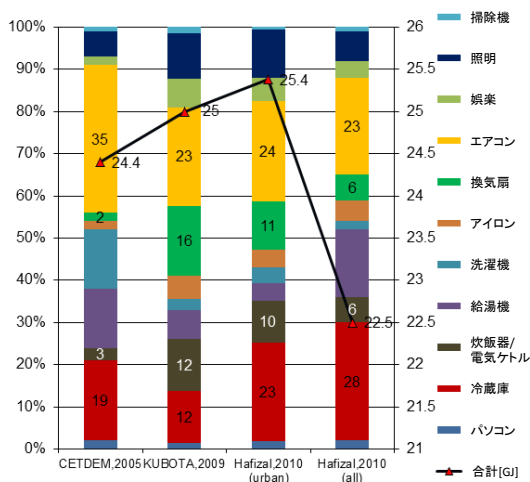


図4 エネルギー消費量の内訳と既往文献との比較

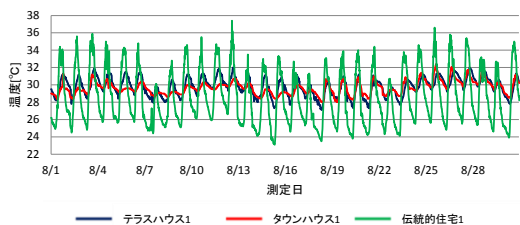


図5 居間温度の連続測定結果 (3タイプの住宅)

(2) PCM 入り銅フォームパネルの開発

① 作成した5種類のPCM入り銅フォームパネルの構成比とPCM充填率、ゼオライトの有無と熱コンダクタンスの測定結果を表1に示す。ヨーロッパで広く市場に出回っているPCMだけの従来パネルの熱コンダクタンスが0.18 W/(m・K) (液相・固相時)であるのに比べ、銅フォームを用いた開発パネルの熱コンダクタンスが約5倍になっていることが分かる。この結果と多湿な環境下で使用されることを考慮し、湿気による銅の腐食を防ぐゼオライトが配合され、PCM含有量と熱コンダクタンスのバランスがとれているCase Cのパネルを暫定的に選択し、以降の検討に用いた。

② Case CのPCM入り銅フォームパネルの比熱の測定結果を図6に示す。PCM入り銅フォ

ームパネルの固相時、液相時の平均比熱は、それぞれ1.87 J/(g・K)、1.63 J/(g・K)であった。また、融点の25℃付近で発生する融解熱量を求めると36.7 J/gであることが確認された。

③ 図2の実験装置を用いて、Case Cのパネルの蓄放熱特性を把握する実験を行い、パネルの内側(恒温槽側)と外側(人工気候室側)の熱流について、図7のような結果が得られた。

表1 開発パネルの材料構成比と熱コンダクタンス測定結果

Case	乾燥前配合比(重量比)			乾燥後重量[g]				熱コンダクタンス[W/m・K]		
	リキッドPCM	パウダーPCM	ゼオライト	総重量	銅	PCM(推定値)	ゼオライトその他(推定値)	液相	固相	
A	3	1	-	165.91	82.24	66.94	16.73	1.03	0.99	
B	4	1	-	174.00	99.35	61.75	12.9	0.98	0.94	
C	4	1	2.5	236.60	102.4	57.84	76.36	1.20	1.13	
D	4	-	-	163.52	97.01	54.14	12.37	1.05	1.01	
E	4	-	1	181.78	95.13	44.60	42.05	1.07	1.00	

※その他…PCM中に含まれる接着剤やアクリル樹脂など

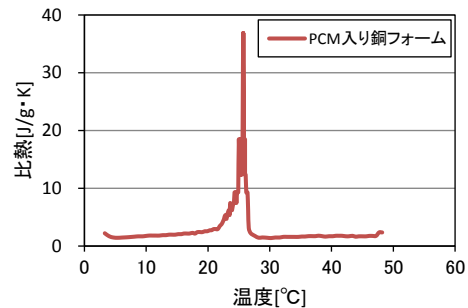


図6 温度と比熱の関係

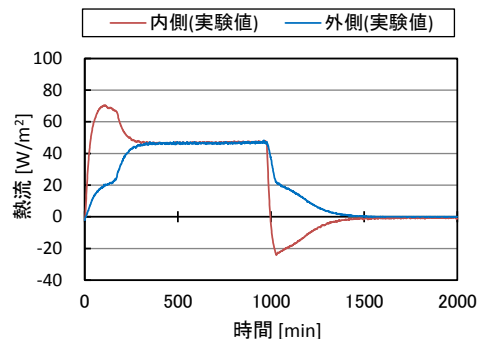


図7 開発パネルの熱流測定結果

(3) 住宅模型実験によるパッシブ冷房システムの性能把握

実験結果の一部を図8に示す。PCM入り銅フォームパネルを組み込み、天井裏換気を行った場合では、日中の室温上昇に時間遅れが生じ、パネルも天井裏換気も無い場合よりも模型内部の温度が低く保たれる様子が観察された。また、夜間においては模型内部の温度が早く下降する様子がみられた。これらのことは、PCM入り銅フォームパネルと夜間換気を組み合わせた本システムにより、日中の蓄熱と夜間の放熱の効果が得られたことを示している。以上より、PCM入り銅フォームと夜間換気を組み合わせたパッシブ冷房システムの有効性を確認した。

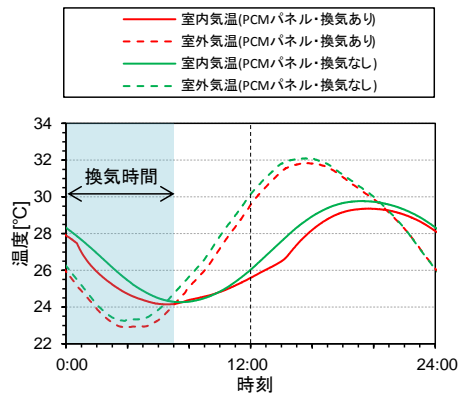


図8 パッシブ冷房システムの有無と温度の関係

(4) 三次元伝熱解析プログラムの作成および解析による PCM 入り銅フォームパネルの性能検討

① 実験の方法(2)の③の実験におけるパネル表面の熱流量と、プログラムによる計算結果の比較を図9に示す。定常状態における熱流量の実験値と計算値が良く一致していることから、パネルの熱コンダクタンスについては、計算によって十分な精度で再現できたとと言える。本パネルにおいては、それを構成する各材料が三次元的かつ複雑に分布しており、熱コンダクタンスの再現は必ずしも容易ではないが、そのような複雑な分布性状が適切にモデル化されたことで、熱コンダクタンスについて十分な精度が得られたものと考えられる。一方で、蓄熱量（両側の熱流量の差）については、実験値と計算値で大きく異なった。ただし、本計算では、PCM融解熱量の入力値として図6の実験から得られた値を用いているが、その値が図7の熱流量から推定されるPCM融解熱量と大きく異なっていることから、どちらかの実験値に問題の原因がある可能性が高い。なお、図9の計算値から導かれる融解熱量と図6で得られた融解熱量は一致している。

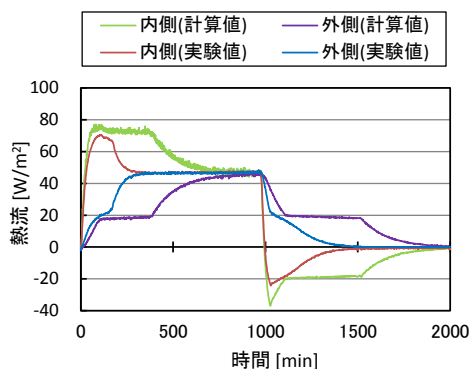


図9 開発パネルの表面の熱流の実験値と計算結果

② パラメトリックスタディーで検討した各ケースにおける単位時間当たり蓄熱量の計算結果を図10に示す。銅フォームの無いPCMだけのパネルでは、温度のステップ変化

直後から、単位時間当たりの蓄熱量が大きく減少していくのに対して、開発パネルでは、単位時間当たりの蓄熱量がPCMの融解終了までほぼ一定に維持されるという結果が得られた。また、パネル厚を2倍にして計算したところ、この場合においても単位時間当たりの蓄熱量が融解終了までほぼ一定に維持されるという結果が得られた。

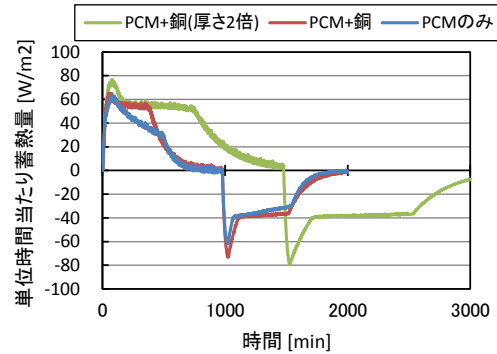


図10 開発パネルと従来型PCMパネルの単位時間当たり蓄熱量の計算結果

表面温度の計算結果について、開発パネルとPCMだけの場合との比較を図11に示す。PCMだけの場合では、PCM融解中であっても表面温度が変動するのに対し、開発パネルでは表面温度が一定に維持される様子が見られる。これは、銅フォームによって熱がパネル内部まで十分に伝わり、パネル全体にPCMの相変化が起きるためである。

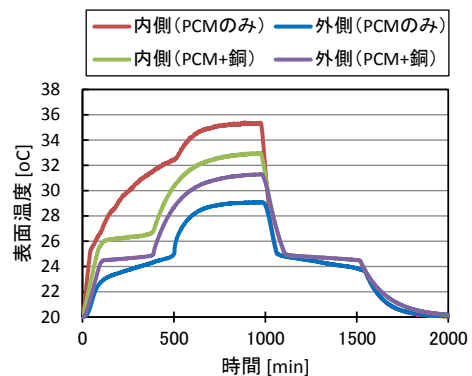


図11 開発パネルと従来型PCMパネルの表面温度計算値の結果

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

① Mohd Hafizal Bin Mohd Isa, The New Development of PCM Panel for Building Finishes in Hot, Humid Climate Regions, 13th Science Council of Asia Conference and International Symposium, 2013年5月7日, タイ・バンコク

② M.I.M. Hafizal, H. Yoshino, T. Goto, Comparative study of indoor environment in residential buildings in hot humid climate of Malaysia, World Academy of Science, Engineering and Technology Conference, 2012

年 11 月 28 日, フランス・パリ

③ M.I.M. Hafizal, H. Yoshino, and T.V. Le Phan,
The comparison of energy consumption and
indoor environment of residential building in hot
humid climate cities in the case of Penang,
Malaysia, and Ho Chi Minh, Vietnam, The 12th
Science Council of Asia Conference-Mobilizing
Science Toward Green Economy, 2012 年 7 月 10
日, インドネシア・ボゴール

④ Mohd Hafizal Bin Mohd Isa, Measurement of
Thermal Comfort based on Four Types of
Ventilation Strategies in Terrace House in Hot
Humid Climate of Malaysia, ISHVAC 2011,
2011 年 11 月 6 日, 中国・上海

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉野 博 (YOSHINO, HIROSHI)
東北大学・大学院工学研究科・名誉教授
研究者番号 : 30092373

(2) 研究分担者

高木 理恵 (TAKAKI, RIE)
秋田県立大学・システム科学技術学部・助
教
研究者番号 : 30466536