潜熱蓄熱内装左官材を適用したハイブリッド壁暖冷房システムに関する研究

ジオサーマルコイルと組み合わせたシステムの基本的熱性能試験及び実験住宅における通年での実測結果

A STUDY ON A RADIANT HEATING-COOLING SYSTEM WITH A PCM PLASTERED WALL

The basic thermal performance examination of a combined radiant heating-cooling system with a geothermal coil and measurement results for the experimental houses throughout the year

草間 友花*, 石戸谷 裕二**

Yuka KUSAMA and Yuji ISHIDOYA

The aim of this study was to elucidate the energy saving effects and indoor environment of a radiant heating-cooling hybrid system, which combines a phase-change material (PCM)-plastered wall with capillary tubing mats.

First, an overview of the new system that combines natural energy was proposed for the effective application of the PCM. A geothermal coil is used in the summer and solar heat obtained through a solar collector is effectively used in the winter. The basic thermal performance of the system was tested on a prototype to measure the heat storage and dissipation capacity. Results indicated that the heat dissipation capacity depended on a steady heat radiation amount. Second, the basic thermal performance was tested using a geothermal coil to measure the heat storage and temperature distribution of the soil. The experimental results were generally in good agreement with the simulation results. Finally, the PCM-plastered wall and hybrid system were assessed using two experimental housing structures. According to resulting indoor environmental data, the room temperature remained within a comfortable range all year. Furthermore, the hybrid system could provide approximately half of the heating load.

Keywords: Phase change material, Renewable energy utilization, Hybrid system, Energy-savings, Experimental housings

潜熱蓄熱材, 自然エネルギー利用, ハイブリッドシステム, 省エネルギー, 実験住宅

1. はじめに

室内環境の快適性と省エネルギー性の観点から、断熱・蓄熱性能や自然エネルギーの活用等の研究がこれまで活発に進められてきた。潜熱蓄熱材(PCM)を適用した空調システムの領域においても、PCMをカプセル化して石膏ボードや内装材として利用し、ダイレクトゲインや内部取得熱を躯体に蓄熱させるパッシブ蓄熱構法があり、これまで数多くの実測や数値計算などにより検討されてきた^{1)~9)}。

一方、冷暖房機器^{10),11)}や換気システム¹²⁾などでPCMをアクティブ利用する方法も提案されている。自然エネルギー利用を考慮したパッシブなPCM建材とアクティブな設備機器を併用した、ハイブリッド型のPCM利用システム(以下、ハイブリッドシステム)もさかんに研究がなされている^{13)~15)}。坂東ら¹⁶⁾は、ハイブリッド床蓄熱システムを開発して、ダイレクトヒートゲインと深夜電力の利用により最大で9.6%の省エネルギー効果を確認した。Y. RABINら¹⁷⁾は、太陽熱集熱器と無機塩系の蓄熱材を組み合わせたシステムを作製し、

温水を循環させたときのシステムの基本的熱性能について検討を加えた。また、高瀬ら¹⁸⁾は、温水ヒートポンプ熱源を利用した潜熱蓄熱式床暖房システムの運転について、実住宅レベルでの計測を行った。太陽熱利用を目的とした設備機器の高効率化に伴い、ハイブリッドシステムにも低廉で高効率な新規システム開発が期待されている。パッシブ蓄熱建材と熱交換器を組み合わせたハイブリッドシステムでは、室内側の蓄熱層の一部が蓄熱と放熱の両機能を担うことになるが、とりわけ熱媒を循環させるパイプと蓄熱材との接触面積が熱交換効率に影響を与えることが予想される。また、ダイレクトヒートゲインの有効利用を考慮した時には蓄熱材は室内側に設置されていることが効果的であることから、ハイブリッドシステムには、単位体積当たりでの蓄熱材とパイプとの接触面積が大きいこと、蓄熱材がより室内側に設置されていること、集熱器部分の効率が高いことが求められる。

本研究では、自然エネルギーを効率良く利用するために、潜熱蓄

本報に示したデータの一部は既発表論文^{19)~21)}で報告されている。

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
日本学術振興会特別研究員 DC・修士(工学)
(当時、北海道職業能力開発大学校)

** 室内気候研究所 主席研究員・博士(工学)
(当時、北海道職業能力開発大学校)

JSPS Research Fellowship for Young Scientists, Dept. of Architecture, School of engineering, The University of Tokyo, M.Eng.

Principal Investigator, Institute of Indoor Climate, Dr.Eng.

熱内装左官材と毛細管マットを組み合わせたハイブリッド壁暖冷房システムを開発し、システムの基本的熱性能試験を行った。また、自然エネルギーの利用方法として太陽熱及び土壌の熱容量の利用方法を提案した。パッシブな地中熱利用システムとしてジオサーマルコイルの基本的熱性能を検証し、シミュレーションと比較検討した。最後に、2棟の実験住宅における実測結果を示し、ハイブリッド壁暖冷房システムの室内環境及びエネルギー消費実態を示した。

2. ハイブリッド壁暖冷房システムの概要
2.1 システムの概要

筆者らはこれまで、マイクロカプセル PCM を左官内装材として利用できる潜熱蓄熱左官内装材(Phase Change material (PCM)-plastered wall ; 以下、PCM 内装左官材)のパッシブ蓄熱効果について検討を行ってきた^{19)~21)}。本報では、自然エネルギーをより効果的に利用する手法としてハイブリッド壁暖冷房システムを開発した(Fig.1)。PCM 内装左官材を、毛細管放射暖冷房マット(Capillary tubing mat ; 以下、CTM)と組合せ、湿式工法により施工する(Photo1 and Photo2)。なお、本報で取り扱った PCM 内装左官材の母材は石膏、PCM は融点 25℃ の n-パラフィンであるが、実用化の際には任意の母材(漆喰、珪藻土等)及び任意の融点選択が可能である。潜熱蓄熱内装左官材の各融点・母材ごとの基本的熱物性については、既発表論文で報告している通りである^{22), 23)}。

2.2 自然エネルギー利用方法の提案

蓄熱建材を適用した高断熱・高気密住宅には、ダイレクトゲインや内部取得熱等の有効利用ばかりでなく、建築周囲の自然エネルギーの効率的利用に関する構法の検討が求められる。PCM 内装左官材は蓄熱層を最も室内側に施工でき、太陽熱や内部取得熱を有効利用できる。また CTM は熱交換部の比表面積が大きく、蓄熱層に効率よく蓄熱することが可能である。PCM 内装左官材と CTM を組み合わせたハイブリッド壁暖冷房システムの自然エネルギー利用の概念を夏季、冬季でそれぞれ Fig.2 及び Fig.3 に示す。夏季には、土壌に埋設したジオサーマルコイルと CTM 間に冷媒を循環させることで採涼効果を促進させる。冬季は、屋根または外壁に設置した太陽熱集熱器と CTM を循環させることでダイレクトゲインの有効利用が促進させる仕組みとなっている。

2.3 プロトタイプの概要

既報では、潜熱蓄熱内装左官材の蓄放熱特性を示したが、CTM で熱媒を循環させた時の非定常蓄放熱特性については明らかではないため試験用プロトタイプを作製し実験的に検討した。また、設計時におけるシステムの必要施工面積を把握するために、片側断熱・熱媒温度一定条件下で定常放熱量を定量化した。ラスボード(1000×2000mm)の4周に幅 30mm の石膏ボード(t=12mm)をエアタッカで固定したものを壁下地とし、9カ所の表面温度測定点に T 型熱電対(0.3mmφ)を取付けた。次に、壁下地に CTM(900×1900mm)をステップで固定し、PCM 内装左官材(マイクロカプセル PCM の混和率: 30 wt.%, 母材: β 石膏, 融点: 25℃)を、4 周の石膏ボードを基準として 12mm 打設した。養生後、鏝で表面を平滑にしてシーラーで仕上げ、9カ所の表面温度測定点に T 型熱電対を、表面中央に熱流計(MF-180)を取付けた(Photo3, Fig.4)。なお、下地材の背面には FP 板(100mm)を施工しており、背面への熱流は無視できるものとした。実験装置

Fig.1 Radiant Heating Cooling System with PCM

Photo1 CTM

Photo2 PCM Plastered wall

Fig.2 Summer

Fig.3 Winter

Photo3 Prototype

Fig.4 Measuring points

Fig.5 Experimental device

は、恒温・恒湿室(居住環境シミュレーション室)の居住室側に配置した。実験装置の概念図を Fig.5 に示す。熱媒供給装置とプロトタイプを結ぶ配管には酸素透過防止型架橋ポリエチレン管(10A)を使用し、配管からの熱損失を抑制するために断熱パイプカバーを使用した。

2.4 送水温度一定運転時の表面温度

恒温室に設置した温水発生装置を運転し、温水を CTM に供給して、CTM から PCM 内装左官材への加熱量と室内への放熱量が定常状態になるまで放置した。また、定常状態を確認後、流量計で温水流量を測定し、装置の運転を停止した。実験中、試験体の表面熱流および CTM の表面温度、出入口温水温度、壁下地・室内の表面温度を 1 分間隔で測定し、データロガーに記録した。なお、本実験装置は、ヒーターの電圧を変圧器で変化させることで、供給温水の温度を任意に設定することができる。流量は 5[L]の温水が流量計を通過するのに要する時間を 3 回測定し、その平均値 0.053[L/s]を実験値として採用した。表面温度の測定例を Fig.6 に示す。加熱時・冷却時ともに 25℃付近で温度変化がやや緩やかになっており、壁内部での PCM の相変化の影響がうかがえる。また、加熱時と冷却時を比較すると、冷却時の方が相変化の起きている時間が長く、表面温度は約 3 時間に亘って 25℃付近に保たれている。

2.5 加熱量と放熱量

出入口温水温度と温水流量の測定値より、CTM から PCM 内装左官材への加熱量を式(1)で算出した。また、熱流計の実測値から得られた放熱量の測定結果を加熱量と合わせて Fig.7 に示す。図から、加熱開始後、1 時間を経過するまでの時間帯で加熱量が大きくなっていることがわかる。

2.6 蓄熱量の算出

蓄熱量を式(2)で算出し Fig.8 に示す。温度は PCM 内装材の両表面温度の平均値で代表させた。なお蓄熱量は温度が相変化域を含む 20℃から 30℃間のエンタルピー差と定義した。図から、蓄熱量の増加の割合が 25℃付近で大きくなっており、潜熱による蓄熱効果が見られる。蓄熱量と温度の近似線の傾きから、本システムの見かけの比熱は固相域で 2.67 [kJ/(kg・K)]、液相域で 3.30 [kJ/(kg・K)]である。

$$Q_{in} = c \cdot \rho \cdot V \cdot (\theta_v - \theta_R) \tag{1}$$

$$Q = \frac{1}{l \cdot \rho_p} \cdot \sum (Q_{in} - Q_{out}) \cdot \Delta t \tag{2}$$

Q_{in} : 加熱量 [kW],
 ρ : 冷媒の比重 [kg/m³],
 θ_v : 入口温水温度 [°C],
 Q : 蓄熱量 [kJ/(kg・m³)],
 ρ_p : PCM 内装左官材の比重 [kg/m³],
 Δt : 時間 [s],
 c : 冷媒の比熱 [kJ/(kg・K)],
 V : 流量 [m³/s],
 θ_R : 出口温水温度 [°C],
 l : PCM 内装左官材の厚さ[m],
 Q_{out} : 放熱量 [kW],

2.7 加熱停止後の放熱量

温水供給装置の運転を停止した時間を基点として、プロトタイプ の表面から室内への放熱量を Fig.9 に示す。熱媒循環の停止後、放熱量は時間の経過と共に減少していくが、停止 2 時間後から 5 時間後の間では約 30 [W/m²]でほぼ一定となっており、PCM の潜熱蓄熱の効果が示唆される。

2.8 定常状態における放熱能力

放熱面積設計の基礎資料を得る目的で JIS A 1400 を参考に^{注1}プロトタイプの放熱量を整理した。実験装置のヒーター電圧を 50[V]から

Fig.6 Average Temperature of Experimental device

Fig.7 Amount of Heating and heat discharge

Fig.8 Enthalpy of the Prototype

Fig.9 Heat discharge amount

Fig.10 Heat discharge ability

95[V]まで、5[V]刻みで変化させ定常状態を確認したのち熱媒流量と出入口温度差の測定値から求めた放熱量と、その近似線を Fig.10 に示す。また本節で得られたプロトタイプ熱性能を Table1 に示す。平均温水温度と室温の差が 50[K]のときの標準放熱能力は 385 [W/m²]であり、プロトタイプの放熱量は式(3)で表すことができる。

$$Q_{out} = x \cdot (\theta_w - \theta_{in})^n \quad \cdots(3)$$

θ_w : 平均熱媒温度 [°C],
 x : 定数 (=2.383)[-],

θ_{in} : 室温 [°C],
 n : 定数 (=1.3)[-],

3. ジオサーマルコイルによる土壌蓄熱

地中熱を利用するシステムが国内外で盛んに研究されており、コンクリートなどの躯体蓄熱^{24),25)}の熱源やクールチューブ²⁶⁾として利用されている。また、浅層採熱管に関する詳細な検討²⁷⁾も行われている。本研究では、建築の基礎内部にある浅層土壌の熱容量の簡易な利用方法としてPCM内装左官材による蓄熱層内のCTMと住宅の基礎内部の地中埋設管間に熱媒を循環させることにより採涼効果を得るジオサーマルコイル提案する。はじめに土壌とジオサーマルコイルからなる実験装置を作製して、熱媒による加熱時の地中温度分布の推移を観測して埋設深度の参考値を得た。またジオサーマルコイル設計の最適化には管径、ピッチ、深度と利用可能な残熱量、出入口温度差の予測が必要となる。本章では、室内で回収された熱が土壌へ放熱された時の熱挙動を予測する一方法を提案し、実測値と比較して数値計算法の妥当性に関する検討も行った。

3. 1 土壌蓄熱試験体の概要

合板製の箱体(300×900×1800mm)内部の、深さ 130mm、左右中央の位置に架橋ポリエチレン管(10A)を施工し、内部に砂を充填して試験体を作成した(Photo4)。また、箱体周囲は厚さ 25mm のポリスチレン板で断熱した。試験体の断面図を Fig.11 に示す。同時に、土壌の温度を測定するために、土壌内部に T 型熱電対を 35 箇所設置した。設置位置は温水入口、および出口側の両端面から 225mm の位置と中央部である。

3. 2 実験方法

試験体内部に設置した架橋ポリエチレン管に温水を供給し、土壌を加熱しながら土壌温度および温水出入口温度、温水流量、室温を測定した。測定間隔は 1 分であり、測定値はデータロガーに集録した。また、加熱開始前に砂の含水率を測定した。

3. 3 数値計算法の一提案

ジオサーマルコイルを二次元非定常熱伝導²⁸⁾⁻²⁹⁾でモデル化して数値計算を行った。Table2 に初期条件として与えた物性値、Fig.12 に流体と接している離散点を示す。また、基礎方程式を式(4)に示すが、時間を中心差分、空間を前進差分で離散化して計算を実施した。基礎方程式を差分表示して式(5)に、流体の熱伝達率を式(6)に示す。配管の熱伝導を無視した時、流体と土壌が接する部分の境界面温度は、式(7)により求めた対流熱伝達率と土壌の熱抵抗を考慮した合成熱伝達率である式(8)を用いて式(9)で計算し、土壌温度を式(10)より求めた。空間差分間隔は x, y 軸方向とも 10[mm]、時間差分間隔は 1[s]であり、実測した温水温度の推移を回帰分析して計算の境界条件として与えた(Fig.13)。

Table1 Thermal characteristic of the Prototype

	Specific heat	Thermal storage amount		Latent heat storage amount	
	[kJ/(kg・K)]	[kJ/kg]	[kJ/m ²]	[kJ/kg]	[kJ/m ²]
Solid	2.67	43.1	419.7	10.6	103.2
Liquid	3.3

Photo4 Experimental devise

Fig.11 Section of the experimental devise and measuring points

Table2 Property

Specific heat [J/(kg・K)]	soil	1,100
Density [kg/m ³]	soil	1,510
Thermal conductivity [W/(m・K)]	soil	1.1
	water	0.671
Pipe Diameter [m]		0.01
Kinematic viscosity coefficient [m ² /s]	water	3.378×10 ⁻⁷
Velocity [m/s]	water	0.59
Prandtl number	water	2.064

Fig.12 Discrete point

Fig.13 The hot water temperature

Fig.14 The soil temperature (measurements and analysis)

Fig.15 Dimensionless temperature and distance

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad \dots(4)$$

$$\theta_{i,j}^{n+1} = \theta_{i,j}^n + ar_x(\theta_{i+1,j}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i-1,j}^n) + ar_y(\theta_{i,j+1}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i,j-1}^n) \quad \dots(5)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad \dots(6)$$

$$\alpha_c = 0.023 \lambda_m \left(\frac{u}{v} \right)^{0.8} d^{-0.2} Pr^{0.3} \quad \dots(7)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{l}{\lambda_c} \right)^{-1} \quad \dots(8)$$

$$\theta_x = \frac{\alpha \theta_w + \frac{2\lambda_c}{\Delta x} \theta_{i,j}^n}{\alpha + \frac{2\lambda_c}{\Delta x}} \quad \dots(9)$$

$$\theta_{i,j}^{n+1} = \theta_{i,j}^n + ar_x(2\theta_x - 3\theta_{i,j}^n + \theta_{i+1,j}^n) + ar_y(\theta_{i,j+1}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i,j-1}^n) \quad \dots(10)$$

$$r_x = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad r_y = \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \quad \dots(11)$$

θ : 温度 [°C],
 a : 温度伝播率 [m²/s],
 Re : レイノルズ数 [-],
 α_c : 流体の対流熱伝達 [W/(m²・K)],
 λ : 熱伝導率 [W/(m・K)],
 v : 動粘性係数 [m²/s],
 α : 対流熱伝達率 [W/(m²・K)],
 l : 試験体長さ [m],
 添字 i, j : 空間座標 (x, y 方向),
 m : 冷媒の物性,

Δt : 時間 [s],
 Nu : ヌセルト数 [-],
 Pr : プラントル数 [-],
 u : 水の流速 [m/s],
 d : 代表寸法 [m],
 c : 比熱 [J/(kg・K)],
 ρ : 比重 [kg/m³],
 n : 時間座標
 e : 土壌の物性

3.4 加熱実験と数値計算の結果

Fig.14 は試験体の土壌温度の測定値と解析値の推移を示しており、実線は測定値、プロットは解析値である。50℃の温水で土壌を加熱した時の 670mm 位置の温度は 60[h]経過後ではほぼ一定であり、120[h]経過後も土壌内部に温度成層が形成されていることから、本報ではベース位置 670mm を設計埋設深度の目安とした。

一方パイプからの距離が 30mm の位置での解析値は測定値の変動を精度良く捉えているものの、310mm, 670mm では時間が経過するにつれて解析値と計算値に乖離が生じている。これは数値計算で与えた外周完全断熱という条件と、試験体の外部には断熱材を施工しているものの、土壌から外部へと熱が移動しているという実験条件との差異によるものと考えられる。また、砂の物性値は既往の資料³⁰⁾を参考に与えたが、充填した砂の真の物性値とは異なっていた可能性も誤差の要因として考えられる。

Fig.15 に土壌の上下温度分布を、配管から土壌測定の下下点まで距離(670mm)と最大温度差(熱媒と+670mm 土壌温度の差)で無次元化して示す。ドットが測定値、実線が解析値を示す。図から、加熱開始から 30[h]では土壌温度が定常状態には達していないことがわかる。また加熱開始直後の温度分布には差異が見られるものの、30[h]加熱後では解析値はほぼ実験値を再現していることがわかる。

Table3 Overview of experimental housings

Name	N-project	P-project
Location	Sapporo	Sapporo
Use	Office	Model house
Floor area [m ²]	104.8	102.89
Air conditioning area [m ²]	21.9	28.4
Heat loss coefficient [W/(m ² ·K)]	1.13	1.32
PCM plastered wall [kg]	117	108
Heat souce	Water boiler (heat pump)	
Geothermal coil		
Pipe diameter [mm]	10	10
Pitch [mm]	150	150
Basis area [m ²]	37.8	24.7
Soil volume of basis [m ³]	40.6	26.5

Fig.16 System diagram

Fig.17 Plan of N-project (2F)

Fig.18 Plan of P-Project (1F and 2F)

Table4 Measurement results (Summer)

	N-project	P-project
Measurement period	2010/7/7~8/25	2010/7/7~8/24
Cooling performance [MJ/a]	450	722
Thermal storage amount to the soil [MJ/a]	11,744	5,016
Water temperature rise	4°C	4°C

4. 実験住宅による実測調査

4.1 住宅概要

実住宅規模の建築に、ハイブリッド壁暖冷房システムを施工し、その室内環境とエネルギー消費実態について検証を行った。2 棟の実験住宅の概要及びシステム概要を Table3 及び Fig.16 に示す。

両実験住宅は、北海道札幌市に建設され、ハイブリッド壁暖冷房システムとジオサーマルコイルが設置されている。夏季は基礎内の土壤に埋設したジオサーマルコイルにより地熱を利用して採涼する。冬季は多機能型ヒートポンプ給湯器に付設した熱交換器に接続するが、二次施工で太陽熱集熱器を設置することが可能である。2 棟の実験住宅 N-project 及び P-project の平面図を CTM 設置位置と合わせて Fig.17 及び Fig.18 に示す。なお、N-project は木造で事務所の用途として使用され、人体・機器からの内部発熱がある。また、P-project は木造 2 階建てのモデルルームとして使用されており内部発熱は含まれていない。両実験住宅ともに第 3 種換気システムを採用しエアコンの設置はなく、窓の開閉も行われていない。また、N-project と P-project における PCM による蓄熱可能量は、それぞれ 17.55MJ、16.2MJ である。本節で取り扱う実験住宅は、土壤と PCM の熱容量を利用したパッシブな手法により、室温変動を緩やかにし、快適性と省エネルギー性を高めることを目的としている。

4.2 測定概要

実測調査の測定項目は外気温、室温、温水出入口温度、冷水出入口温度、温水・冷水流量、CTM マット表面温度および消費電力である。測定間隔はそれぞれ 10 分であり、通年での測定を行った。

夏季における、ジオサーマルコイルから土壤への熱移動量、冷房能力、冷房室の環境の測定を実施し効果の検討するために、土壤温度、冷房室の温度、架橋ポリエチレン管内の冷水の出入口温度、流量を合わせて測定した。土壤温度の測定方法は、ジオサーマルコイルを施工した基礎内の中央部に熱電対を埋設し、土壤の温度を 2 分間隔で測定しデータロガーに集録した。熱電対の設置位置は、GL から深さ 50mm、250mm、430mm、700mm、950mm の 5 箇所であり、測定した土壤の温度の変化量から式(12)より土壤への蓄熱量を求めた。式(13)は、冷媒の出入口温度と流量から求めた室内処理熱量であり、夏季には冷房能力、冬季には暖房能力となる。また、住宅全体からの総熱損失量を式(14)により算出した。

$$Q_{ST}=\Sigma c_e \cdot \rho_e \cdot V_e \cdot (\theta^n-\theta^{n-1}) \cdot \Delta t$$
$$Q_r=c_r \cdot \rho_r \cdot m \cdot (\theta_v-\theta_R) \cdot \Delta t$$
$$Q_{loss}=q \cdot A_f \cdot (\theta_{in}-\theta_{out}) \cdot \Delta t$$

…(12)

…(13)

…(14)

Q_{ST} : 土壤への蓄熱量 [J],
 Q_r : 処理熱量 [J],
 θ_v : 冷媒出口温度 [°C],
 Q_{loss} : 総熱損失量 [J],
 A_f : 床面積 [m²],
 θ_{out} : 外気温 [°C],

V : 体積 [m³],
 m : 流量 [m³/s],
 θ_R : 冷媒入口温度 [°C],
 q : 熱損失係数 [W/(m²・K)],
 θ_{in} : 室温 [°C],

4.3 測定結果(夏季)

N-project における室温の推移を、外気温・冷房能力と合わせて Fig.19 に示す。図は全冷房期間のうち真夏日が続く一週間における、

	N-project	P-project
Calculated q value [W/(m²・K)]	1.13	1.32
Measured q value [W/(m²・K)]	0.69	0.63
Natural temperature difference	10.9 °C	1.2 °C
Total heat loss [GJ/a]	41.6	49.8
Total heating [GJ/a]	8.13	20.1

Fig.23 Relationship between temperature difference and heat loss amount

Fig.24 Comparison of the q-value

1 時間平均の室温・外気温及び積算冷房能力を示しているが、外気温が 35℃に達するような暑い日でも室温は 23℃付近で推移しており、本システムは夏季に必要な冷房能力を有していたことが確認できる。

Fig.20 に P-project の測定期間中の日積算冷房能力と土壌温度、室温、外気温、水温の変化の様子を示す。全冷房期間中で水温は約 4℃上昇したが、土壌と水温は一定の温度差を維持していることから、本システムでの土壌の熱容量が、シーズン後も余剰な蓄熱能力を有していることが示唆される。浅層土壌の温度は外気温変動の影響を多く受けていることが予測されるため、土壌の熱容量を有効に利用するためには、地盤表面や基礎周囲の断熱施工を入念に行う必要があるといえよう。また、外気温が 25℃以上となるとは、PCM の熱容量により、融点より高い範囲で特に室温上昇が抑制されていることがわかる。PCM 建材は冷房負荷を増大させることが指摘されている³¹⁾が、換気などの空調が行われている室においては、過昇温抑制³²⁾に効果があるという既往研究が実験住宅レベルでも示された。なお、Fig.20 では融点以下の範囲において、室温は外気温を追従している形となっていることがわかる。Table4 に夏季の測定結果を示すが、P-project の冷房期間中(2010 年 7 月 7 日から 8 月 24 日)の冷房能力の積算値は 722MJ であり、土壌への蓄熱量は 5,016MJ であった。つまり土壌への蓄熱量のうち約 14%が壁冷房によるもので、残りの約 86%は、基礎周り、床下からの熱侵入の影響であると考えられる。

4.4 測定結果(冬季)

2 棟の実験住宅の通年での外気温、室温、暖房熱量、熱損失量の推移を Fig.21 及び Fig.22 に示す。定常状態では熱損失量が暖房熱量と内部取得熱量の和に一致するが、定常状態を想定した貫流熱損失量の(14)式では瞬時処理熱量(13)式と差異が生じている。暖房の期間積算量は、総熱損失量に比較して大幅に低い値を推移しているのは、PCM 内装左官材の蓄熱性能により、日射熱と内部取得熱が有効利用

できていることを示唆している。特に、事務室として利用されている N-project は、住宅と比較して単位床面積当たりの人数が多く、OA 機器類の内部取得熱が大きいと、その効果が顕著に表れているものと考えられ、PCM 内装左官材の蓄熱性能は日射取得熱のみではなく、内部発生熱利用にも有効であることを示している。

藤原らの既往研究³³⁾を参考に、一般的な断熱指標である定常状態を仮定した計算 q 値と、実非常環境下における暖房熱量と室内外温度差の実測値から予測した実測 q 値を比較して評価した。N-project の 1 週間平均の室内外温度差と暖房熱量との関係を回帰式とともに Fig.23 に示し、回帰式の傾きと x 切片から実測 q 値と等価的な自然温度差を求めた。N-project の実測 q 値は $0.69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であり、潜熱蓄熱内装材を含む熱容量を有効利用することにより得られる当該システムの熱損失低減効果は、熱抵抗のみで定義される計算 q 値で表現すると 40%低下したことに相当する。Fig.24 に q 値の計算値と実測値の関係を示す。藤原ら³³⁾、筆者ら²¹⁾の既往研究で計測された高断熱・高気密住宅は、実測 q 値と計算 q 値がほぼ一致するのに対し、PCM 内装左官材を施工した場合、実測値が計算値を大幅に下回る結果となった。また、各実験住宅における熱損失係数、自然温度差、総熱損失係数、暖房熱量を Table5 に示す。躯体蓄熱による日射エネルギー利用率を高めると暖房熱量抑制に効果があり、日射などの取得熱の有効利用により、春先や秋口の暖房の使用が抑制され、暖房期間そのものの短縮も期待される。実験住宅は同 q 値の高断熱・高気密住宅と比較して大幅に暖房熱量が抑制されることから、潜熱蓄熱内装左官材の負荷抑制効果が確認できた。

5. まとめ

潜熱蓄熱内装左官材と毛細管暖冷房マットを組み合わせた潜熱型壁暖冷房システム(ハイブリッド壁暖冷房システム)を開発し、その基本的熱性能試験を行った。また、ジオサーマルコイルによる自然エネルギーの新たな利用方法を提案し、その基本的な熱特性について検証した。最後に、2 棟の実験住宅における通年での実測結果を示した。本報で得られた知見を以下に示す。

- 1) システムの基本的熱性能を把握するために、プロトタイプの蓄放熱特性を定量化した。また、JIS の方法を参考にした測定により定常状態における放熱能力を定式化した。
- 2) パッシブな地中熱利用としてジオサーマルコイルを提案し、基本的熱性能試験を行った。二次元非定常熱伝導計算により、土壌温度を計算したところ、加熱後 30[h]以降の範囲では、解析値が試験体の測定値をほぼ再現できることが示された。
- 3) 実験住宅で、真夏日が続く一週間の室内環境を実測したところ、外気温が 35℃に達するような日でも室温は 26℃付近で推移したことから、本システムは北海道など涼しい地域の夏季に必要な冷房能力を有していることを確認した。
- 4) 実験住宅の暖房熱量は、一般的な高断熱・高気密住宅の約 4 割～6 割に削減され、暖房期間の短縮も確認できた。また、実測した実験住宅の等価的な熱損失係数は N-project で $[0.69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、P-project では $0.63 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ に相当し、提案したシステムには断熱強化と等価な省エネルギー工法としての効果を有することが確認できた。

本報では、未知であるハイブリッド暖冷房システムの非定常蓄放

熱特性をプロトタイプの加熱実験より検討した。また設計施工面積に関する基礎資料を得る目的で、熱媒温度一定の条件下における放熱特性に関する実験を行い、定常状態における冷暖房能力を定量化した。一方、建築基礎内部にある浅層土壌の熱容量を利用する方法としてジオサーマルコイルを提案し、土壌モデルの加熱実験から実験住宅における埋設深度の目安として布基礎ベース深さ 600[mm]レベルの温度変動を観察して参考とした。同時に実験装置をモデル化して数値計算を行い、実測値と比較することで計算方法の妥当性を検討した。今後ジオサーマルコイルの管径、ピッチ、深度と利用可能な残熱量、出入口温度差の予測法に関する検討を継続していく予定である。また、実証住宅の設備設計にあたりハイブリッド壁暖房システムの放熱面積は最大暖房負荷と同等となるよう設計したが、熱源容量は最大暖房負荷の 50%以下（最大出力 2[kWh]）であり、蓄熱によるピークカット効果の一端が観測された。今後熱源容量の最適化にあたり、蓄熱効果の定量化と設計手法の開発を継続的に実施していく。

謝辞

本報は北海道職業能力開発大学校における卒業研究の一環として実施されたものです。本研究を行うにあたり、当時北海道職業能力開発大学校の西垣祐輔氏、木村雄一郎氏、村上雄軌氏、笠島陽子氏、山崎泰貴氏、㈱日和住設の皆様、ミサワホーム北海道㈱、ピーエス工業㈱、吉野石膏㈱の皆様にご協力をいただきました。ここに記して心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤宏昭 他：木造住宅における潜熱蓄熱材の適応に関する研究、その 1 潜熱蓄熱材の数値解析と比較実験、日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.669-670, 1994.9
- 2) 坪田祐二 他：潜熱蓄熱ボードを用いた躯体蓄熱システムに関する研究、その 1 潜熱材の選定と住宅モデルによる数値解析、日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1169-1170, 1991.9
- 3) 佐藤友紀 他：潜熱蓄熱内装建材による暖房負荷の削減効果に関する研究 模型箱実験・試験家屋実験および数値シミュレーションによる検討、日本建築学会環境系論文集 第 77 巻 第 678 号, pp.651-659, 2012.8
- 4) 近藤武士 他：潜熱蓄熱壁体による躯体蓄熱システムに関する研究 潜熱蓄熱ボードの性能把握および適用効果の検討、日本建築学会計画系論文集 第 540 号, pp.23-29, 2001.2
- 5) 黒木友裕 他：室内温熱環境制御への潜熱蓄熱材の利用、その 4 冬期利用の場合の検討、日本建築学会大会学術講演論文集, D-2, pp.79-80, 1998.7
- 6) 添田晴生 他：PCM を利用した室内熱環境調整に関する研究(第 3 報)夏期及び冬期における PCM 壁ボードの熱的性能評価、空気調和・衛生学会論文集(203), pp1-11, 2014.2
- 7) V.V.Tyagi et al. : Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) , pp1373-1391, 2011
- 8) Erlin Meng et al. : Experimental and numerical study of the thermal performance of a new type of phase change material room, Energy Conversion and Management 74 (2013) pp386-394, 2013
- 9) Yusuf Ali Kara et al. : Performance of coupled novel triple glass unit and pcm wall, Applied Thermal Engineering 35 (2012) 243-246, 2012
- 10) 長野克則 他：マイクロカプセルスラリーPCM の温熱蓄熱システムへの応用に関する研究、第 4 報 太陽熱利用時のシステムシミュレーション、空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演集, pp.241-244, 2005.7
- 11) 武田仁 他：潜熱蓄熱材(PCM)の住宅暖房への適用：潜熱蓄熱材利用壁式暖房装置の製作と有効性、日本建築学会計画系論文集, 558, pp.43-48, 2002.8
- 12) 高山裕香子 他：寒冷地における太陽熱空気集熱器と潜熱蓄熱材を組み合わせた外気負荷削減装置の開発:個別要素の特性によるシステム効果の数値解析、日本建築学会環境系論文集 80, 708, pp.117-126, 2015.2
- 13) 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究、第 3 報 PCM を適用した放射暖冷房システムの省エネルギー性能に関する検討、北海道職業能力開発大学校紀要第 27 号, pp.21-37, 2012.2
- 14) Guobing Zhou et al. : Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates, Applied Energy 84 (2007) pp.1068-1077, 2007.11
- 15) A. Hasan et al. : Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics, Solar Energy 84 (2010), pp.1601-1612, 2010
- 16) 坂東薫 他：PCM を使用したハイブリッド床蓄熱暖房システムに関する研究、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.279-282, 2012.3
- 17) Y. RABIN et al. : INTEGRATED SOLAR COLLECTOR STORAGE SYSTEM BASED ON A SALT-HYDRATE PHASE-CHANGE MATERIAL, Solar Energy Vol. 55, No. 6, pp.435-444, 1995
- 18) 高瀬幸造 他：実在住宅における温水ヒートポンプ熱源を利用した潜熱蓄熱式床暖房システムの効果的な運転に関する研究、その 1 システムの概要と実測による評価、日本建築学会環境系論文集 77, 673, pp.175-184, 2012.3
- 19) 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究、第 1 報 β 石膏に PCM を混和した潜熱蓄熱内装材と毛細管マット(CTM)を組み合わせた放射暖冷房システムの基本的性能、北海道職業能力開発大学校紀要(26), pp33-43, 2009.12
- 20) 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究、第 5 報 潜熱蓄熱材を利用した躯体蓄熱空調の暖房負荷削減効果、北海道職業能力開発大学校紀要(28), pp.27-39, 2013.3
- 21) 草間友花 他：潜熱蓄熱材を利用した躯体蓄熱空調の負荷削減効果に関する研究、その 1 n-パラフィンを壁と窓に施工した住宅の暖房負荷削減効果に関する実測調査、日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II , pp.145-146, 2012.9
- 22) 草間友花 他：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した内装左官材の基本的熱性能及び比熱の定式化、日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 729 号, pp.931-938, 2016.11
- 23) 草間友花 他：潜熱蓄熱(PCM)内装左官材のパッシブ蓄熱効果に関する研究、基本的熱性能試験の測定方法及び実験棟における環境改善効果と省エネルギー効果に関する検討、日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 722 号, pp.367-374, 2016.4
- 24) 森山実記 他：太陽熱利用住宅におけるベタ基礎を利用した蓄熱コンクリートの蓄放熱特性、空気調和・衛生工学会論文集 (167), pp.1-10, 2011.2
- 25) 鳥羽大樹 他：地中熱、太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する研究、その 9 夏期実測における夏期冷房性能検証、日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.575-576, 2015.9
- 26) 垂水弘夫 他：ヒート&クールチューブ住宅の地中熱利用効果に関する調査研究:北陸に立地する戸建モデル住宅を対象として、日本建築学会環境系論文集 75, 651, pp.423-429, 2010.5
- 27) 若山尚之 他：現場打ち基礎杭を利用した地中熱ヒートポンプシステムに関する研究、浅層探熱管の導入可能性について、空気調和・衛生工学会論文集 (189), pp.21-28, 2012.12
- 28) 日本機械学会, 丸善, 伝熱工学, 2005.3
- 29) 関信弘, 森北出版株式会社, 伝熱工学, 1988.11
- 30) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第 4 版, 1986.10.20
- 31) 武田仁：潜熱蓄熱材(PCM)の建物暖房への適用、潜熱蓄熱材で構成されたスペースの室温変動解析、日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.718, pp.1115-1123, 2015.12
- 32) 草間友花 他：高遮熱・高耐候性不織布(NWF)を適用した日射遮蔽と外気冷房が高熱容量住宅の冷房負荷削減に及ぼす効果に関する研究、潜熱蓄熱(PCM)内装仕上材で室内熱容量を付与した実験棟における NWF の基本的熱性能、その 1、日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 720 号, pp.173-180, 2016.2
- 33) 藤原陽三 他：北海道の高断熱・高気密住宅におけるセントラル暖房システムの運転実態に関する調査、日本建築学会環境系論文集, 73, 628, pp.767-774, 2008.6

注

注1) JIS A 1400 の対象試験範囲は、放熱能力 700W であるが、測定方法及び放熱量の算出方法として参考にして求めた。

A STUDY ON A RADIANT HEATING-COOLING SYSTEM WITH A PCM PLASTERED WALL

The basic thermal performance examination of a combined radiant heating-cooling system with a geothermal coil and measurement results for the experimental houses throughout the year

Yuka KUSAMA * and *Yuji ISHIDOYA* **

* JSPS Research Fellowship for Young Scientists, Dept. of Architecture, School of engineering, The University of Tokyo, M.Eng.

** Principal Investigator, Institute of Indoor Climate, Dr.Eng.

In earlier studies, we developed a PCM-plastered wall, which is a novel finishing material with a high thermal storage capacity. In addition, previous experiments by our research group have shown that the PCM-plastered wall significantly improves indoor environments and saves energy when an experimental module is used. In the present study, we developed a radiant heating-cooling hybrid system shown in Fig.1 and measured its thermal performance. The indoor environment and the amount of energy saved from two experimental housings were also measured.

First, as shown in Photo1 and Fig.2, we constructed the hybrid system by combining a PCM-plastered wall and capillary tubing mats. We proposed a method for using the new system that combines natural energy for the effective use of the PCM through the application of a thin tube, which increases the contact area. In the summer, the system is used with a geothermal coil, whereas in the winter, solar heat obtained via a solar collector is effectively used. Fig.3 depicts the renewable energy utilization.

In the basic thermal performance test, the experimental device was installed in a room thermostat, and hot water from the refrigerant was circulated using a pump (Photo 3, Fig.4 and Fig.5). The temperature of the water, the surface temperature of the front and back of the PCM, and the surface heat flow on the PCM layer were measured in one-minute intervals (Fig.6 and Fig.7). The heat dissipation ability of the prototype was calculated from the difference between hot water and room temperatures, as shown in Fig.8 to Fig.10 and in Table1.

Next, the basic thermal performance was tested using a geothermal coil to measure the heat storage and the temperature distribution of the soil. Photo 4 and Fig. 11 show the test device, which is a polyethylene pipe and a sensor installed inside the soil and covered with a heat insulating material. As shown in Table 2 and Fig. 12, the temperature was measured by a thermocouple, and an analysis was conducted by calculating two-dimensional non-steady heat conduction. Fig.13 shows the temperature of the water, which was approximated by a sixth-order polynomial. Measurements results and analysis data were indicated that a position close to the pipe (30mm) was approximately the same (Fig.14). All of the values approximately match after 30 hours.

Finally, the energy savings and indoor environments were measured on the two experimental housings. The two buildings installed the hybrid system and geothermal coil. Table3 gives an overview of the experimental housing. The system diagram is shown in Fig.16. Water is used as the refrigerant, and the heat source is a heat pump unit. The solar collector would be a secondary construction. One building is used by the office, and the other is a model house. Both buildings are in Sapporo, Hokkaido and plans for these buildings are shown in Fig. 17 and Fig. 18.

In the summer, the room temperature of the N-project was stable and near the PCM melting point (Fig.19). Even when the outside temperature reached 35 °C, P-project's room temperature remained approximately 26 °C. Therefore, it was confirmed that it had the cooling capacity required during the summer in Hokkaido (Fig.20 and Table4). In the winter, the heating required for the experimental house is generally reduced to between 4% and 6% of the high thermal insulation and the significantly airtight house. It also demonstrated the reduction of the heating period. Furthermore, as shown in Fig.21, Fig.22, and Table5, there was a demonstrated decrease in heating. We confirmed, as shown by the graphs in Fig.23 and Fig.24, that the equivalent heat loss coefficient decreases owing to the PCM-plastered wall.

(2016年5月10日原稿受理, 2016年9月12日採用決定)