

課題情報シート

テーマ名：	再生可能エネルギーを利用して持続可能性を高めた「500W 住宅」の開発		
担当指導員名：	石戸谷 裕二	実施年度：	23 年度
施設名：	北海道職業能力開発大学校		
課程名：	応用課程	訓練科名：	建築施工システム技術科
課題の区分：	開発課題	学生数：	7 時間：26 単位 (468h)

課題制作・開発のポイント

【開発（制作）のポイント】

化石燃料の大量消費と自然の再生能力を超えた排気物質の排出が、地球規模での気候変動の原因として取り上げられており、民生エネルギー分野とりわけ家庭でのエネルギー消費量抑制は喫緊の課題として共有されるようになってきました。本課題では、住宅における暖・冷房、給湯エネルギーの消費量抑制を目的とした新規の環境調整システムを適用することにより、一人当たりのエネルギー消費量が 500W 以下になるような住宅を実現することをテーマとして設定しました。

開発するシステムは、エラストマーでゲル化した n-パラフィン、高耐候性不織布などの新規機能材料を使用した、蓄熱窓ガラス、蓄熱型ブラインド、太陽光暖房器、日射遮へい装置、地中採熱管、太陽光集熱器などであり、これらの複数の新規技術を採用し、組み合わせた環境システムを構築することで、目標である 500W 住宅を実現しようとするものです。

課題では、エラストマーでゲル化した n-パラフィンを蓄熱体に利用した日射蓄熱型暖房機を開発して、日射暴露・放熱実験を行ったところ、本装置 6 台を設置して昼間の日射を蓄熱することで、一軒の住宅の夜間暖房需要を十分に賄えることが分かりました。また、同種の潜熱蓄熱材を二重窓ガラスに充填して開口部に設置したところ、日射利用により暖房需要を 80%削減することができました。この蓄熱窓システムで、日射量の多い北関東地域以西では、ほぼ無暖房の住宅が実現できます。さらに、日射および UV の遮蔽率が 90%以上の高効率高耐候性不織布を実験棟に設置して、省エネルギー性能を測定したところ、外気冷房との併用で日最高室内温度を 7℃程度抑制できることが確認されました。さらにデータ解析により、伝統的な住宅が夏期に使用していた日射遮蔽、外気冷房の環境改善・冷房負荷抑制効果を定量化することができました。これらの新規技術を用いれば、住宅における暖冷房エネルギーは大幅に削減でき、一人当たりのエネルギー消費量が 500W 以下の省エネルギー住宅が実用化できる可能性があることを、科学的に証明することができました。

【訓練（指導）のポイント】

新規の環境調整システムの開発を通して、複合した技術・技能の習得とその活用能力（応用力、創造的能力、問題解決能力、管理的能力など）を養成することを目標にしました。具

体的には、物理モデルの解析による環境調整システムの設計技術、木構造工事、内装工事、配管工事などを複合的に活用した製品の製造技術開発、試作品の環境暴露性能試験の情報を活用したドキュメント作成能力、発表能力の習得させることができました。

課 題 に 関 す る 問 い 合 わ せ 先

施設名 : 北海道職業能力開発大学校
住 所 : 〒047-0292 北海道小樽市銭函 3 丁目 190 番地
電話番号 : 0134-62-3553 (代表)
施設 Web アドレス : <http://www3.jeed.or.jp/hokkaido/college/>

課 題 制 作 ・ 開 発 の 「 予 稿 」 お よ び 「 テ ー マ 設 定 シ ー ト 」

次のページ以降に、本課題の「予稿」および「テーマ設定シート」を掲載しています。

再生可能エネルギーを利用して 持続可能性を高めた「500W 住宅」の開発

建築施工システム技術科 室内気候研究室

1 はじめに

近年、地球温暖化や局地的な気候変動が世界的な問題となっているが、これらの背景として建築が有限なエネルギーを大量に消費し、自然の再生能力を超えた量の物質を排出していることがあげられ、結果として建築の持続可能性が憂慮されている。また、エネルギー消費の不均衡は正のための代替エネルギーとして、太陽を源とする日射、風力、波力などの再生可能エネルギー利用があげられるが、その方法は電気エネルギーへの変換が前提となっていることが多く、その変換効率率は依然として低い。

本研究では、日射の直接的な熱利用を目的として n-パラフィンをエラストマーでゲル化することによって得られた、新規のゲル状潜熱蓄熱材(以下ゲル状 PCM; CALGRIP JSR(株製))に着目した。はじめに、建築材料としての基本的な熱性能を検証するため PCM 試験体を作製し、地域特性に適応した新規のゲル状 PCM の用途開発を行った。また、設計への適応性を考慮して、ゲル状 PCM の固液相域における比熱の定量化も併せて行った。さらに、ゲル状 PCM を充填したブラインドやまどガラス、蓄熱型暖房機を開発することによって太陽熱による暖房負荷抑制を確認した。一方、耐候性の高い布を屋外に設置する日射遮蔽装置と夜間外気冷房を併用することで、夏期における冷房負荷の抑制効果を検討した。ここで開発した技術を用いることで一人当たりのエネルギー消費量を 500W 以下に抑制したハイコンタクト・ローインパクト型「500W 住宅」の実現性を、新規の暖冷房負荷計算プログラムで確認して、実用化への可能性を明らかにしていく。

2 開発の方法

2.1 エラストマーでゲル化した n-パラフィンの

熱性能と比熱の定量化に関する研究

既往の研究^{1),2),3),4)}で用いたマイクロカプセルPCMは、建築用途への適用法が内装材に限定されていた。n-パラフィンは、融点を自由に設計できる安定したPCMであるが、ゲル状に加工することによって熱可塑性が得られ、用途に見合った任意の成型加工が可能になる(写真 2.1.1)。

本節では、厚さ 12mm の試験体を用いてゲル状 PCM の加熱・冷却実験(以下熱性能試験)を実施し、試験体への流入・出熱流および表面温度の測定結果から、蓄熱量、固相

域・液相域における比熱、熱伝導率などについて検討を加えた。なお、試験体の下部の表面温度が融点以下の状態を固相域、上部の表面温度が融点以上の状態を液相域、その中間の状態を固液相域と定義して、データを整理した。



写真 2.1.1 ゲル状 PCM

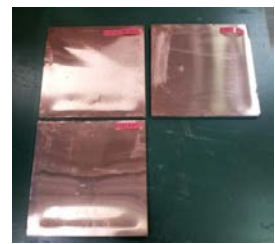


写真 2.1.2 試験体の様子

2.1.1 PCM 試験体の作製方法

前述した熱性能を測定するために銅板(0.5 t(mm))を用いて容器を作り、内部にゲル状PCMを充填した試験体(300×300×12mm)を作製した(写真 2.1.2)。また、熱性能を定量化するため試験体の嵩比重試験および平均厚さ計測試験を既報⁹⁾の各試験方法に則して実施した。嵩比重試験と平均厚さ計測試験の結果を表 2.1.1 に示す。表から、融点が高くなるにつれて比重が大きくなることが確認できる。

表 2.1.1 嵩比重、平均厚さ計測試験の結果

No.	名称	PCMの種類	融点 (℃)	混和率 (%)	PCM比重 (kg/m ³)	厚さ (mm)
1	GNP2510	n-ヘプタデカンC17 n-オクタデカンC18	25	10	848.0	11.95
2	GNP3610	n-イコサンC20	36.8	10	898.7	11.73
3	GNP4410	n-ドコサンC22	44	10	911.5	11.34

2.1.2 基本的熱性能試験とその評価

熱性能試験の実施にあたり、試験体の上下表面に T 型熱電対(シート状)を各 5 点、熱流計を各 1 点取り付け、下部を断熱した電熱式面状ヒータ(シリコンラバー・P&F ヒータ:オーエムヒータ株式会社)の上に配置して恒温室内に設置した。試験中は面状ヒータの電圧を一定に保ちながら試験体への流入・出熱流が定常状態になるまで上下の表面温度と熱流を 1 分間隔で測定し、データロガー(GL800:グラフテック株式会社)に記録した。また、試験は既報と同様にヒータと試験体の間に 36mm の間隔を空けて試験装置を傾けて設置し、周囲の空気が試験体の両表面を停滞なく流れるように配慮した放射加熱法を用いて行った。試験装置の概要を写真 2.1.3 および写真 2.1.4 に示す。

蓄熱量は試験体の上下両表面に貼り付けた熱流計で測定

した流入・出熱流の差から式(2.1.1)により算出した。試験体への流入・出熱流の測定例(PCM 融点:25℃)を図 2.1.1 に示す。

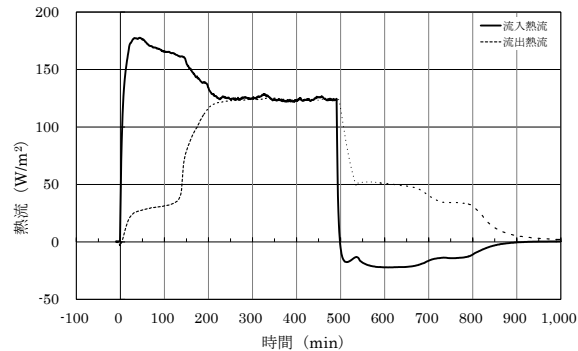
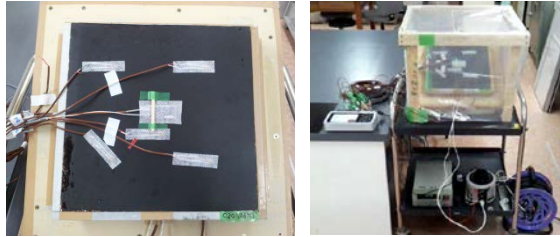


図 2.1.1 流入・出熱流の経時変化 (GNP2510-1)

図から、流入・出熱流は定常状態においても異なる値を示していることが分かる。これは、熱流計と試験体の内部熱抵抗による測定誤差が主因であると考えられるため、定常状態の平均流出熱流が平均流入熱流と同値となるように補正してデータ整理を行った。

図 2.1.2 に PCM の蓄熱量の測定結果を試験体温度が 60℃の時の蓄熱量で無次元化して示す。パラメータは蓄熱材の融解温度である。本報では、加熱開始直後より定常状態に至ったと考えられる時刻から 30 分後までの範囲のデータを用いて整理した。なお、試験体の温度は上下の表面温度の平均値で代表させた。図から、蓄熱量の増加分布は PCM の融解温度によって異なることが分かるが、これは PCM の種類により相変化の開始温度が異なることに起因している。GNP2510(パラフィン番号 C17,C18 を混和したゲル状 PCM)の蓄熱量は融解温度である 25℃を超えてから急激に増加する傾向を示しているが、GNP3610(パラフィン番号 C20)は融点の 36.8℃より約 3℃低い 33℃、GNP4410(パラフィン番号 C22)は融点の 44℃を中心とした領域で蓄熱量が増加していることが確認できる。これは、GNP2510 が 2 種のパラフィンの混合物であるのに対して、GNP3610,4410 は単一パラフィンを使用していることが原因として考えられる。

$$Q_{ST} = \frac{1}{p \cdot l} \cdot \sum (\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out}) \Delta t \quad \dots (2.1.1)$$

$$c_{PCM}(\theta) = \frac{dQ_{ST}}{d\theta} \quad \dots (2.1.2)$$

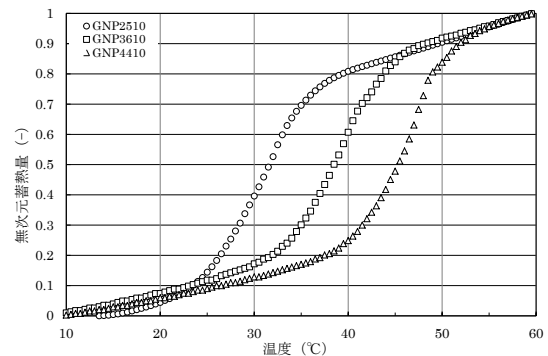


図 2.1.2 試験体の無次元蓄熱量

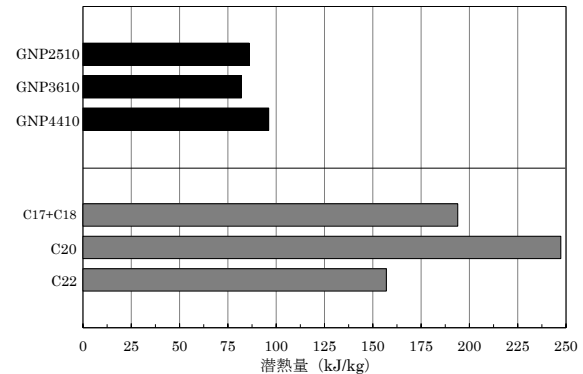


図 2.1.3 潜熱量の比較

図 2.1.3 は n-パラフィン単体とゲル状 PCM の潜熱量を比較して示している。ゲル化した n-パラフィンの潜熱量は n-パラフィン単体に対して、GNP2510 で約 44%、GNP3610 で約 33%、GNP4410 で約 60%であった。また、ゲル状 PCM の融点による差異は見られない。この結果は、試験体や試験方法の誤差に起因している可能性もある。

図 2.1.4 に比熱の測定例を示した。固相域、液相域におけるゲル状 PCM の等価的な比熱は、蓄熱量と温度の関係から式(2.1.2)で定義し、加熱時と冷却時の比熱を比較するために測定データの回帰分析を実施してその傾きを比熱として採用し、その結果を表 2.1.3 に示す。

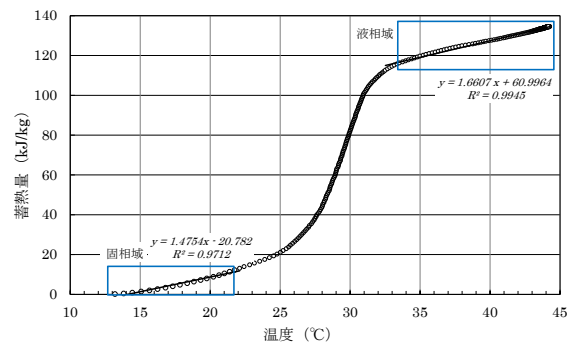


図 2.1.4 比熱の測定例 (GNP2510-1)

表 2.1.2 蓄熱・放熱時の比熱

名称	単位	GNP2510		GNP3610		GNP4410	
		固相域	液相域	固相域	液相域	固相域	液相域
比熱 (蓄熱時)	(kJ/kg・K)	1.41	1.54	1.53	1.98	1.39	1.60
比熱 (放熱時)		1.92	1.42	1.53	1.22	1.45	1.56

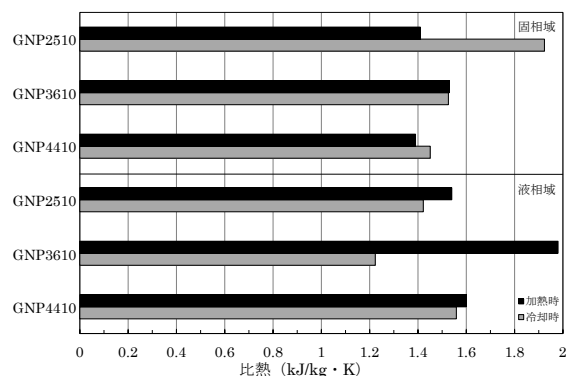


図 2.1.5 比熱(蓄熱・放熱時)

両相における比熱は GNP2510 が固相域のとき、冷却時の方が加熱時よりも大きく、GNP3610 が液相域のとき、加熱時の方が冷却時よりも大きい(図 2.1.5)。GNP4410 では、加熱時と冷却時の差異は少ないが、液相域の方が固相域よりも約 0.2(kJ/kg·K) 大きい値を示しており、系統的な傾向を把握するには至らなかった。

一方、潜熱量は固液相域の蓄熱量から固相域、液相域の比熱と温度差(固液相域の温度巾の 2 分の 1 の値)の積を差し引いて式(2.1.3)により求めた。潜熱量の算出方法の概念図を図 2.1.6 に示す。

$$Q_L = Q_{ST} - (c_s + c_l)\Delta\theta \quad \dots(2.1.3)$$

$$\lambda = \dot{q} \cdot \frac{\ell}{\Delta\theta_s} \quad \dots(2.1.4)$$

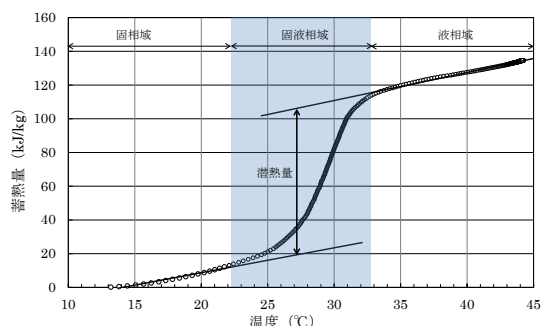


図 2.1.6 潜熱量の算出方法(概念図)

さらに、試験体の熱伝導率は、定常状態における流入・出熱流の実測値と上下の平均表面温度の差から、式(2.1.4)を用いて算出した。

融点 25°C の PCM 試験体の表面温度の実測例を図 2.1.7 に示すが、加熱開始後の下部表面温度は PCM の融解温度を跨ぐ領域で特徴的に変化していることが分かる。これは PCM の相変化による影響を示すものと考えられ、加熱停止後の各温度も同様の傾向を示している。なお、冷却時の方が温度変化の特徴を明瞭に示しているのは、冷却時の熱流束が加熱時よりも大きいことによるものと考えられる。

図 2.1.9 から、加熱時と冷却時の蓄・放熱量において明らかなヒステリシスが認められ、その温度巾は GNP2510 で約 6°C、GNP3610 で約 8°C、GNP4410 で約 6°Cであることを確認した。凝固時の中心核となる物質の添加など、

これを解消するための手法の導入が必要となろう。ゲル状 PCM の基本的熱性能試験の測定結果を表 2.1.3 に示す。

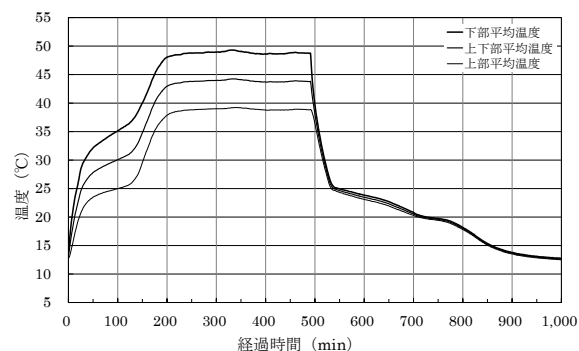


図 2.1.7 試験体の表面温度 (GNP2510-1)

図 2.1.8 にゲル状 PCM の熱伝導率を既往の研究⁹⁾における PCM 内装材の熱伝導率と比較して示す。図から、熱伝導率は融点に依存しておらず RGP(母材を石膏プラスターとした PCM 内装材)と同等であることがわかる。

さらに、GNP2510 試験体の加熱開始から、加熱停止および冷却時の蓄・放熱量の推移を 35°C の時の蓄熱量で無次元化して図 2.1.9 に示す。

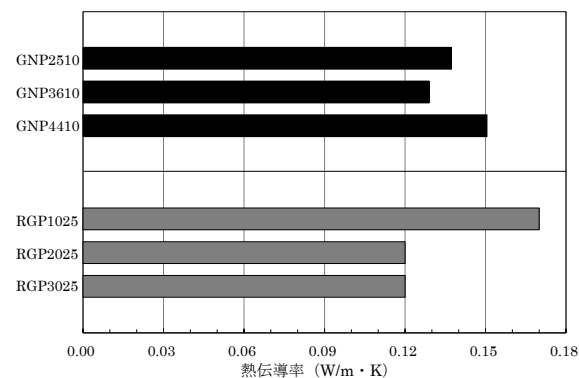


図 2.1.8 熱伝導率の比較

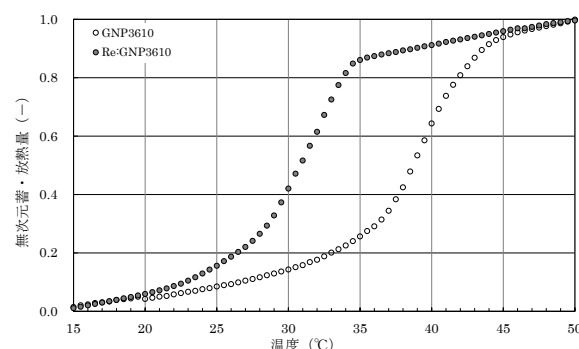


図 2.1.9 無次元蓄・放熱量 (GNP2510)

2.1.3 ゲル状 PCM の固液相域における比熱の定式化

2.1.3.1 比熱の算出方法

前述のように、ゲル状 PCM の比熱は PCM の融解温度近傍で大きく変化するが、既往の研究⁹⁾では便宜的に PCM の潜熱量をある一定の温度域に分散させて顕熱の比熱に加えることで比熱を定式化している。本報では、前節の実験で得られた蓄熱量と温度の測定値を 6 次多項式で近似し、こ

れを微分した関数に温度を変数として与えることでゲル状PCMの比熱と温度の関係性を求めた。蓄熱量と温度の測定例を図 2.1.10 に示す。

この方法で得られた比熱を式(2.1.5)により調和解析することで⁶⁾、ゲル状PCMの比熱を温度の関数として定式化した。本報では、比熱を 24 個のフーリエ級数の和で表したが、y 番目のフーリエ級数の調和解析係数M,N は、実験値からそれぞれ式(2.1.6)で求めた。

$$c_{PCM}(\theta)=M_m+M_1\cdot\cos\frac{2\pi}{\tau}\cdot\theta+M_2\cdot\cos\frac{2\pi}{\left(\frac{\tau}{2}\right)}\cdot\theta+\dots$$
$$+N_1\cdot\sin\frac{2\pi}{\tau}\cdot\theta+N_2\cdot\sin\frac{2\pi}{\left(\frac{\tau}{2}\right)}\cdot\theta+\dots\quad\cdots(2.1.5)$$

$$\left[\begin{array}{l}M_y=-\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{2n-1}x_i\cos y\frac{2\pi}{2n}i\\M_n=\frac{1}{2n}\sum_{i=0}^{2n-1}x_i\cos n\frac{2\pi}{2n}i\\N_y=\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{2n-1}x_i\sin y\frac{2\pi}{2n}i\\N_n=0\end{array}\right]\quad\cdots(2.1.6)$$

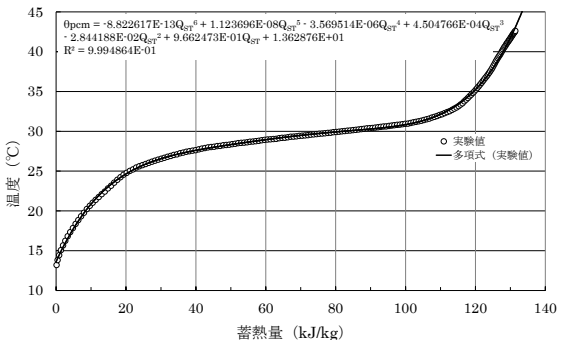


図 2.1.10 蓄熱量の温度依存性 (GNP2510-1)

表 2.1.3 融点の異なるゲル状 PCM の基本的熱性能

名称	GNP2510	GNP3610	GNP4410
PCMの種類	n-ヘプタデカンC17	n-イコサンC20	n-デコサンC22
	n-オクタデカンC18		
PCMの融点 (°C)	25	36.8	44
混和率 (%)	10	10	10
	固相域 液相域	固相域 液相域	固相域 液相域
熱伝導率 (W/m・K)	0.14	0.13	0.15
比熱 (kJ/kg)	1.41 1.54	1.53 1.98	1.39 1.60
潜熱量 (kJ/kg)	86.04	82.01	96.10
蓄熱量 (kJ/kg)	100.78	99.59	111.05
容積比熱 (MJ/m ³ ・K)	1.20 1.30	1.30 1.69	1.27 1.45
容積潜熱量 (MJ/m ³)	72.97	73.51	87.60
容積蓄熱量 (MJ/m ³)	85.46	89.26	101.22
蓄熱量の比率 (-)	1.00	0.99	1.10

2.1.3.2 比熱の定式化

調和解析の計算結果を図 2.1.11 に示す。プロットは実験値、実線は解析結果を示している。

図から、各試験体の比熱は PCM の融解温度近傍で最大となっていることが分かる。また、各融点の範囲で、実験値と解析値はほぼ一致することが確認できた。比熱の定式化によってゲル状 PCM のように比熱が温度によって変化する材料の熱挙動を数値計算により、精度よく再現することが可能となろう。

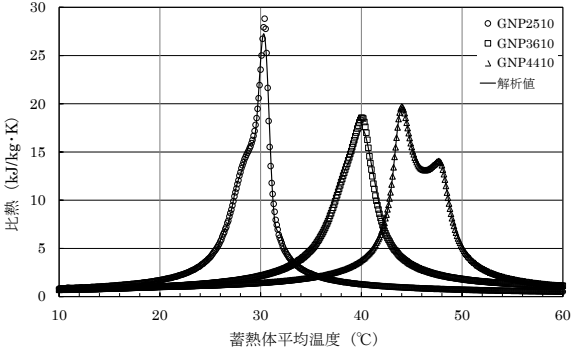


図 2.1.11 比熱の調和解析結果

2.2 ゲル状 PCM を充填した二重ガラスによる日射調整効果に関する研究

ガラス建築の普及をはじめ建築物の開口部面積は拡大を続けているが、開口部に要求される機能は、光、熱、音、空気などの外界の変動要因を透過あるいは遮蔽して室内の環境を調整することにある(図 2.2.1)。ガラスは建築躯体に比べて日射熱取得や熱損失が大きく、空調負荷の増大や室内熱環境の形成に対して配慮が必要になるため、熱的に高性能なガラスの開発が求められるようになってきた。これまで高性能ガラスの研究は複層化、機能性薄膜の貼付けや蒸着、不活性ガスの封入などの分野で進められてきたが^{7),8)}、ガラスに蓄熱性能を付与することで日射のダイレクトゲインを暖冷房に利用する研究は非常に少ない。

本研究では、蓄熱性能を有する窓ガラスに関する一連の研究の端緒として、二重ガラスで構成された容器にエラストマーでゲル化した n-パラフィン(以下ゲル状 PCM)を充填して、その基本的な性能を検討した。蓄熱材には暖冷房の設定温度を参考にしながら融点の異なる 3 種のゲル状 PCM を選択し、これを充填した試験体(以下 PCM ガラス)を作製して、日射透過率の温度依存性や熱貫流性能など基本的性能の定量化を行った。

2.2.1 PCM ガラスの日射透過率の

温度依存性に関する実験

2.2.1.1 実験装置と測定方法

ゲル状PCMの光透過性は液相域では高いものの、固相域ではn-パラフィンが白濁するために低下する。また、固液相域においては日射透過率が温度と相関関係を有することも予測されるため、PCMガラスを透過する日射量を直接測定する装置を作製して温度との関係を観察した。試験装置の概略図と外観写真を図 2.2.2、写真 2.2.1 に示す。測定装置はフォームポリスチレン板(50mm)にアルミ箔を内張りして構成し、点光源を有する光源室A室と受光室B室の間に試験体を配置した。既往の研究⁹⁾を参考に試験体への入射光束と透過光束は各室に設置した照度計で検出する機構となっている。

一方、PCM ガラスの試験体は300mm 角に切り放した3mm フロートガラスとアルミ角柱(12mm)をエポキシ樹脂で接着したガラス容器の間に、ゲル状 PCM を充填し

て作製した。作製方法を写真 2.2.2、図 2.2.3 に示す。ガラス容器は 2 層ガラスと 3 層ガラスの 2 種類であり、3 層ガラスでは一方の間に PCM を充填し他方は中空層とした。また、充填したゲル状 PCM の融点は各々 25℃、36.8℃、44℃ であり、都合 6 種の試験体を作成した。

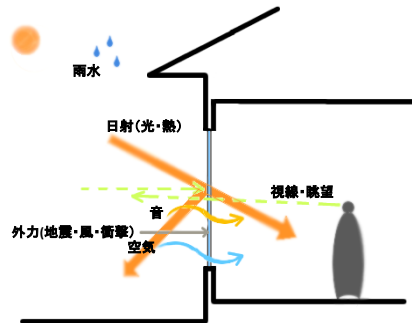


図 2.2.1 まどに要求される性能

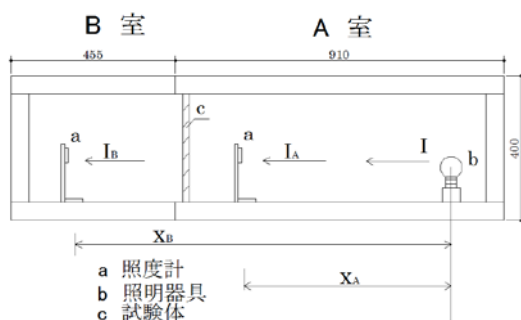


図 2.2.2 実験装置の概略図

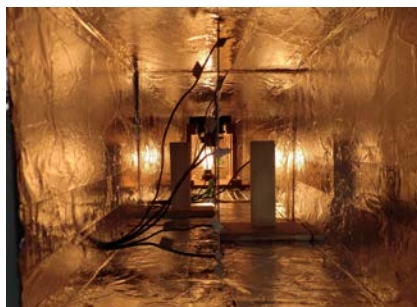


写真 2.2.1 実験装置の内部（A 室）

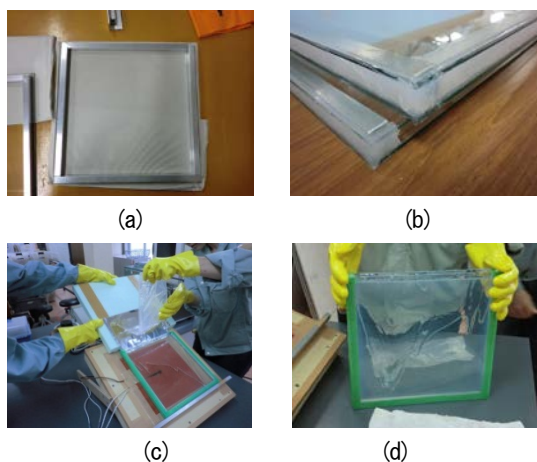


写真 2.2.2 試験体の作製手順

試験体の両表面中心部に T 型熱電対（シート状）を各 1 点取り付け設置し、A 室の白熱電球を点灯して試験体前後の照度、両室の室温及び試験体の両表面温度をデータロガーに 1 分間隔で記録した。また、A 室に上下温度分布が生じないように、A 室内にはファンが設置され実験中は A 室内空気が常時攪拌されている。

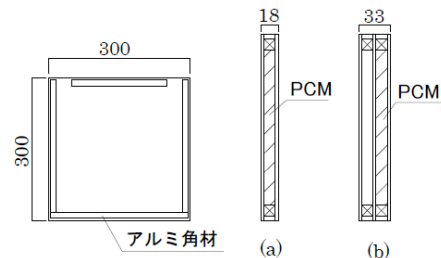


図 2.2.3 試験体の概略図

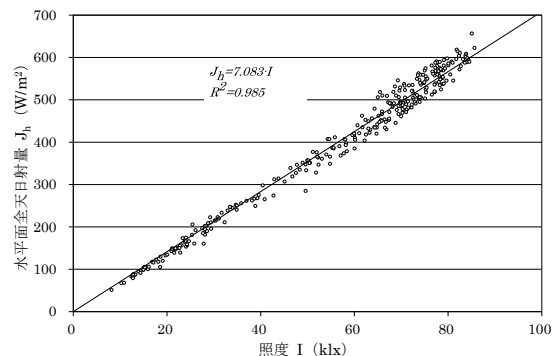


図 2.2.4 南面するガラスの透過日射量と照度

直達日射量が大きく変動する日の南面透過日射量と照度を同時に測定して、その結果を図 2.2.4 に示す。日射量と照度には線形的な相関性がみられることから、本装置の測定機構は日射透過率の傾向を十分把握できるものといえる。

一方、点光源からの照度は光源からの距離の 2 乗に反比例することが知られている。本装置でも、照度計を試験体の前後に設置するため、照度の測定値を光源からの距離で校正する必要がある。図 2.2.5 は A 室の照度計位置を固定し、B 室内の照度計の位置を変えながら照度の測定値を比較した結果を示している。両室の照度の比は、距離の比の 2 乗に反比例していることが確認できた。また、両室の照度の測定結果はこの校正曲線を利用して位置補正を行なった。

2.2.2.2 日射透過率の測定結果

A 室の光源を点灯し、室内温度に伴って試験体のゲル状 PCM が相変化を起こして透明になっていく様子を写真 2.2.3 に示した。ゲル状 PCM は温度上昇に伴って、周囲部から徐々に融解し、透過性が高まっている。

加熱・冷却時の固相および液相の透過率をまとめて表 2.2.1 に示す。さらに、PCM ガラスの日射透過率の測定結果を図 2.2.6、図 2.2.7 に示す。図 2.2.6 から、2 層ガラスの場合には液相域、固相域において融点の違いによる日射

透過量の差異はほぼ無視できる程度であった。また、3 層ガラスでも 2 層ガラスと同様の傾向を確認できるものの、液相域における透過率が 2 層ガラスよりも若干低い結果となった。これは空気層の前面フロートガラスの反射、吸収の影響を示しているものと考えられる。

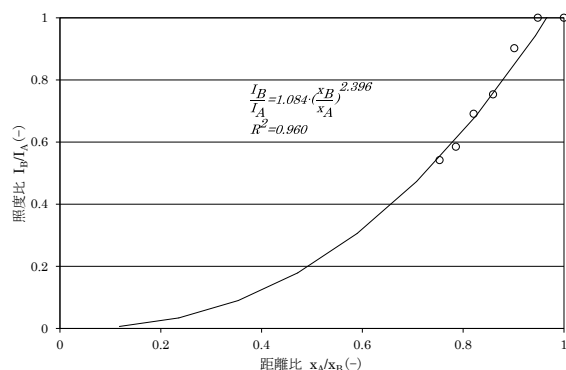


図 2.2.5 透過率のキャリブレーション

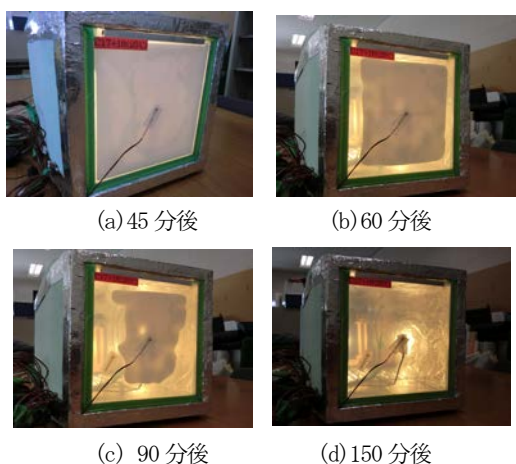


写真 2.2.3 実験の様子

表 2.2.1 固相・液相域における日射透過率

		固相		液相	
		温度 (°C)	透過率 (-)	温度 (°C)	透過率 (-)
加熱時	2-C17+18	26.0	0.122	49.0	0.654
	3-C17+18	33.8	0.217	66.0	0.499
	2-C20	26.9	0.103	47.7	0.655
	3-C20	27.1	0.142	59.6	0.640
	2-C22	39.1	0.141	66.4	0.487
	3-C22	34.9	0.139	63.0	0.737
冷却時	2-C17+18	22.3	0.146	38.8	0.581
	3-C17+18	22.4	0.253	36.5	0.626
	2-C20	17.8	0.094	39.7	0.561
	3-C20	23.0	0.125	44.2	0.539
	2-C22	46.9	0.097	20.4	0.540
	3-C22	36.3	0.361	37.0	0.423

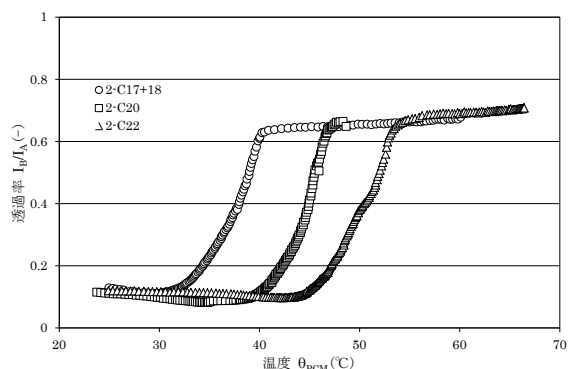


図 2.2.6 日射透過率(2層ガラス)

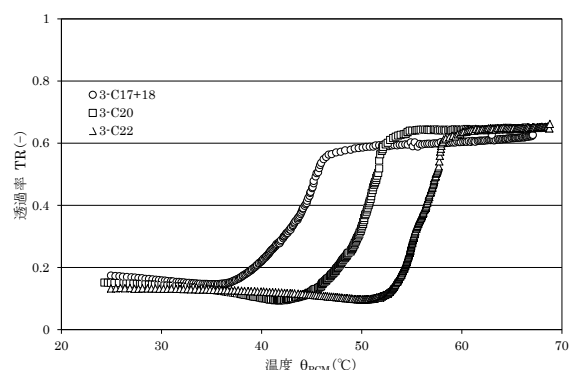


図 2.2.7 日射透過率(3層ガラス)

一方、固液相域における透過率の測定結果を図 2.2.8 及び表 2.2.2 に示すが、各試験体の日射透過率からは明らかに試験体の温度に依存しており、回帰分析の結果両者は指数関数的な関係を有していることが明らかとなった。固液相域における透過率の回帰分析の結果から、式(2.2.1)の各係数と決定係数を表 2.2.2 にまとめて示した。

$$TR = c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot \theta_{PCM}) \quad \dots (2.2.1)$$

前述のように、PCM ガラスの日射透過率と温度の関係を各相ごとに定量化したところ、透過率には温度に対する依存性があることが明らかとなった。また、試験体に設置されたアルミ角柱がガラスに比べて熱伝達率が高いため、試験体はアルミ角材に近接している箇所から溶け始め、加熱が進むにつれ試験体中心部へと液相化が進むため、融点付近で急激に透過率が高くなっている。

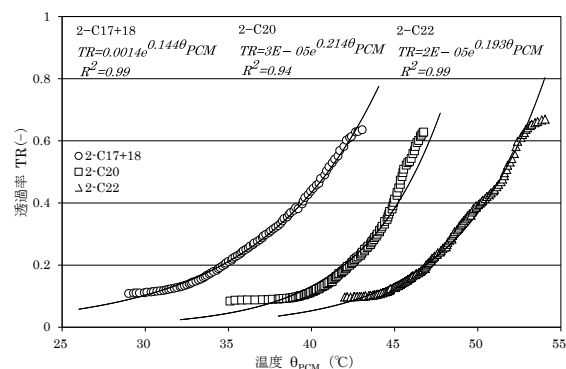


図 2.2.8 固液相域における透過率の測定例

表 2.2.2 固液相域における日射透過率

		c_1	c_2	R^2
加熱時	2-C17+18	1.40E-03	0.144	0.992
	3-C17+18	5.19E-02	0.032	0.939
	2-C20	2.00E-05	0.215	0.947
	3-C20	7.00E-05	0.173	0.971
	2-C22	3.40E-03	0.074	0.979
	3-C22	1.50E-08	0.359	0.887
冷却時	2-C17+18	5.00E-07	0.561	0.965
	3-C17+18	3.00E-04	0.306	0.973
	2-C20	8.00E-06	0.338	0.943
	3-C20	4.00E-04	0.246	0.969
	2-C22	6.00E-07	0.347	0.983
	3-C22	2.75E-04	0.233	0.955

2.2.2 PCM ガラスの熱貫流率に関する実験

2.2.2.1 実験装置と測定方法

日射透過率試験で使用した6体の試験体と照明器具を除いた前述のA室の試験装置を利用して、JIS¹⁰⁾の方法に準拠した熱貫流率実験を恒温高湿室で実施した。恒温高湿室の高温室側の温度は20℃、低温室は-10℃に設定している。実験装置と実験の様子を図2.2.9、写真2.2.3に示す。

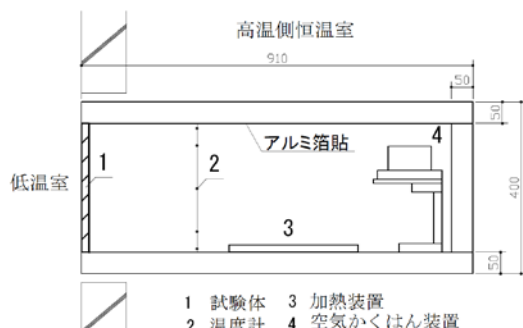


図 2.2.9 実験装置の概要



写真 2.2.4 実験の様子

実験は試験装置（A 室）を恒温高湿室内に置き、低温室と高温室の間に試験体がかかるよう装置を固定して実施した。試験体の両表面には T 型熱電対（シート状）を各 3 点、熱流計を各 1 点取り付け付けた。また、試験中は A 室内に装備した面状ヒータの電圧を一定に保ちながら（30V,50V,60V,70V,80V）A 室温が定常状態になるまで加熱を行い、A 室温度及び低温側室温、試験体の両表面温度と熱流を測定してデータロガーに記録した。なお、A 室内の空気は内蔵するファンで攪拌し、上下温度分布を抑制した。

2.2.1.2 熱貫流率の測定結果

PCM ガラスの熱貫流率実験の結果を図 2.2.10 及び図 2.2.11 に示す。熱貫流率は次式(2.2.2)から求めることができるが、本報では高温室内の加熱量を変化させながら定常状態における加熱量と室温を測定し、その回帰分析の結果から試験体の熱貫流率を予測した。

$$Q_m + Q_{ht} = K \cdot A \cdot (\theta_{in} - \theta_{out}) \quad \cdots (2.2.2)$$

熱貫流率の測定結果を表 2.2.3 に示す。表から、PCM ガラスの熱貫流率は充填した n-パラフィンの種類には依存しておらず、ほぼ同一の値を示している。また、3 層ガラスは 2 層ガラスに比べ断熱性能は高いものの、密閉中空層を有する一般的なペアガラスよりも断熱性能が低い結果となった。これは、実験装置の密閉度が低かったこと、加熱室から恒温室への熱移動量があったこと、PCM ガラスに設置されたアルミ角柱部の熱伝導量が大きかったことなど

の影響が原因として考えられる。

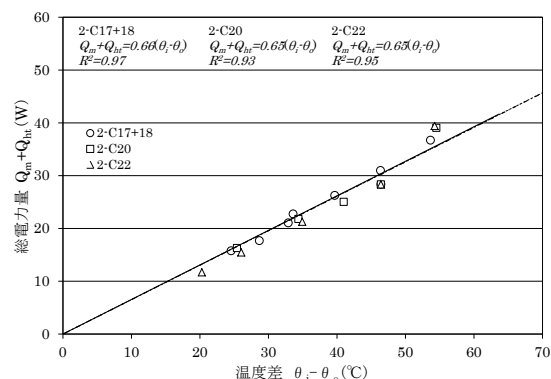


図 2.2.10 熱貫流率(2層ガラス)

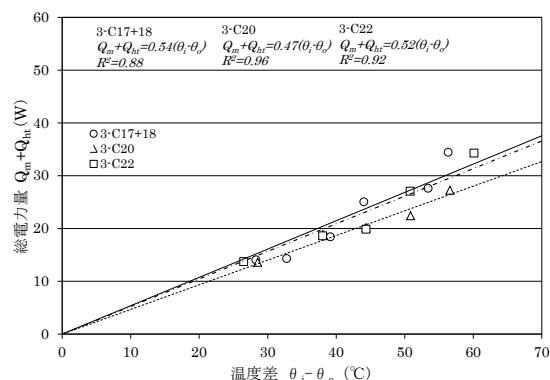


図 2.2.11 熱貫流率(3層ガラス)

表 2.2.3 熱貫流率

	PCMの種類	内容量	K
		(kg/m ²)	(W/m ² ・K)
2-C17+18	n-ヘプタデカンC17	10.2	7.27
	n-オクタデカンC18		
2-C20	n-イコサンC20	10.8	7.25
2-C22	n-デコサンC22	10.9	7.25
3-C17+18	n-ヘプタデカンC17	10.2	6.01
	n-オクタデカンC18		
3-C20	n-イコサンC20	10.8	5.19
3-C22	n-デコサンC22	10.9	5.80

2.3 ダブルスキン内に設置した蓄熱ブラインド

による日射利用システムに関する研究

現在、ガラス建築のストック数は増加しているが、ダブルスキン(以下DS)などのファサード対策が施されている例は少ない。既往の研究¹¹⁾では高効率の熱源導入とDSなどのファサード対策を行うことで 2050 年時のエネルギー消費量を 25%削減できるという。しかし、DSの採用によって自然換気力が得られると同時に、建築外皮における断熱性能の向上が期待されるものの、DS内に付与されているブラインドが高温になると、二次放射によるペリメータゾーンの室内環境の悪化が夏期の問題点として懸念される。また、DS内部の熱容量は限定的であるため、日没後の内外温度差は保持しにくく重力換気を利用したナイトパージによる冷房負荷削減のためには新たな機構が必要となる。

本研究では、DS 内部に n-パラフィンを変ラストマーでゲル化したゲル状 PCM を充填したブラインド(以下 PCM

ブラインド)を設置して日射利用システムを構築した。PCM ブラインドによって日射を蓄熱することで夜間換気駆動力が得られ、結果としてナイトページが可能となる。以下に、PCM ブラインドの熱容量の大きさを利用した換気駆動力と日射熱調整による環境改善効果を実験的に定量化して示す。

2.3.1 事務所を想定した 1/3 模型試験体詳細

および PCM ブラインド試験体

本研究では日射利用システムの効果を把握するために、図 2.3.1 に示す事務所を想定した 1/3 模型試験装置を作成して実験を行った。試験装置はビルの中間階のペリメータゾーンを想定している。外界暴露時の DS 以外からの熱取得を抑制する目的で、合板(t=12mm)で作製した模型の周囲を断熱材(t=25mm)で覆い、日射を反射させるためにアルミ箔で表面仕上げを施した。また、試験体内部の上下温度差を抑制するため内部にファンを取り付けた。DS を構成するガラスはフロートガラス(t=3mm)を用いた。

実験では、装置内部にピンポン球を用いた自作グローブ温度計を 13 ヶ所、室温測定のために T 型熱電対を 6 ヶ所設置して内部環境を測定するとともに、ガラスの内外表面温度と室内壁表面温度を測定した。また、DS の中央部の同一高さの位置に熱電対を 10 カ所設置して温度分布を測定した。環境暴露試験は屋外に 9 時から 17 時まで模型を置いて一分間隔で各温度を測定しデータロガーに収録した。一方、17 時から翌朝 9 時まで装置を屋内に入れ、装置内部と DS 内の温度分布とブラインドの表面温度を測定した。ベネシャンブラインドは黒く塗装したステンレス板 830×830×0.5 t(mm) (以下 SUS ブラインド) で代用し、PCM ブラインドは 3mm フロートガラスで作成したガラス容器に融点 25℃ のゲル状 PCM を充填して DS 内部に設置した。装置のファサードは、シングルスキン、DS、DS+SUS ブラインド、DS+PCM ブラインドの 4 種類で、DS 側を南面および西面に向けそれぞれ測定した。

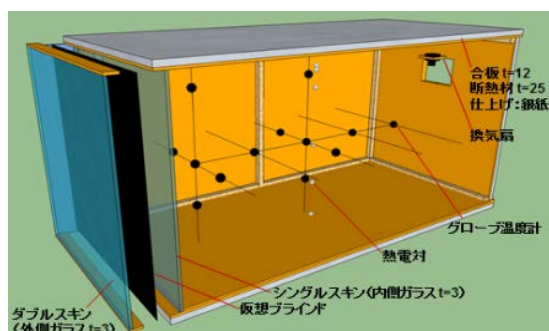


図 2.3.1 事務所を想定した 1/3 模型

2.3.2 ダブルスキン内の温度分布に関する実験

夏期に測定したブラインド表面温度、外気温および鉛直面全天日射量の関係を図 2.3.2 および 2.3.3 に示す。外気温、日射量がほぼ同値の日において、正午の PCM ブラインド

表面温度はその潜熱蓄熱効果によって SUS ブラインドに比べ約 25℃ 低減できていることが確認できる。

また、ブラインド表面温度、外気温および各鉛直面全天日射量の測定結果を図 2.3.4 に示すが、重回帰分析の結果からブラインド表面温度は外気温と日射量から予測することができることを確認した。重回帰式を式(2.3.1)に示す。

$$\theta_s = -38.612 + 2.861\theta_o + 0.375Q_s \quad \cdots(2.3.1)$$

上式に PCM ブラインドの表面温度を測定した日の日射と外気温を用いて SUS ブラインド表面温度を予測したところ最高値は 70.2℃ であり、PCM ブラインドの採用によりその表面温度が 20℃ 低減されることを確認した(図 2.3.5)。一方、17 時から翌朝 9 時までのブラインドの温度降下を図 2.3.6 に示す。図から PCM ブラインド温度降下は SUS ブラインドに比較して緩慢であることから、ナイトページの駆動力を長時間保持する性能を有することが期待できる。

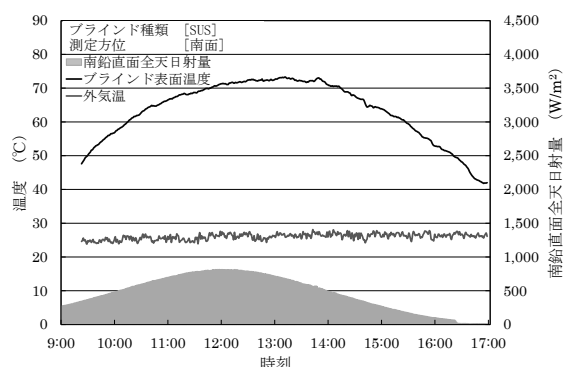


図 2.3.2 DS 内の SUS ブラインド表面温度

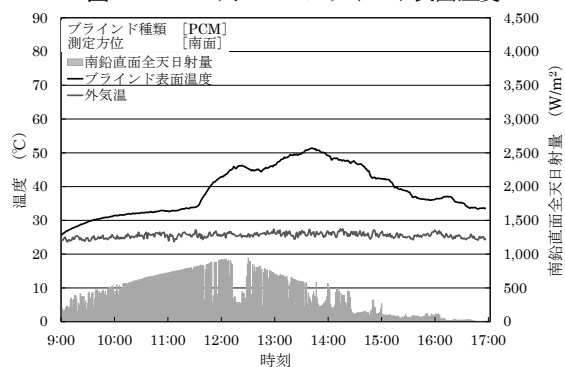


図 2.3.3 DS 内の PCM ブラインドの表面温度

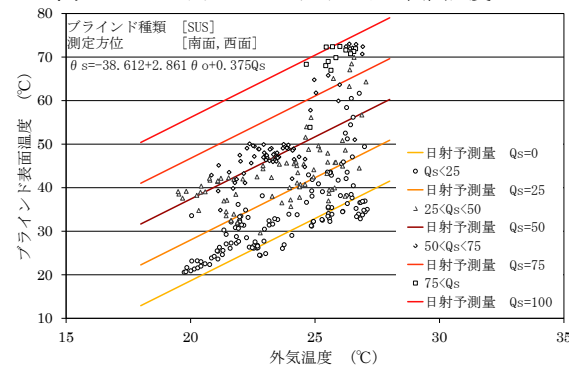


図 2.3.4 SUS ブラインド表面温度の重回帰分析

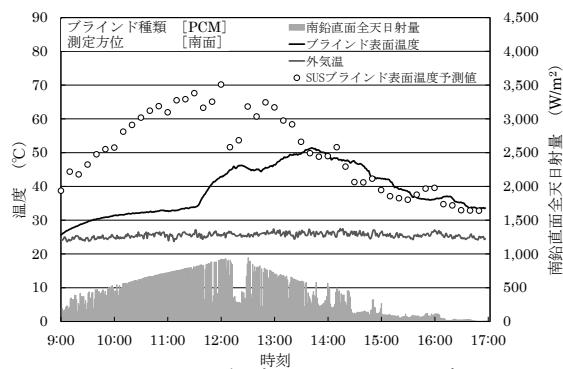


図 2.3.5 各ブラインドの表面温度

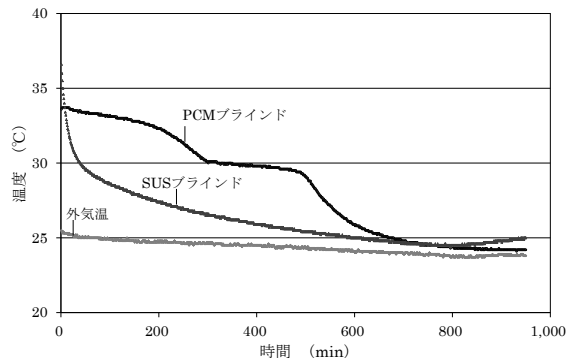


図 2.3.6 夜間ブラインド表面温度降下

2.3.3 ブラインドからの二次放射

ブラインド表面温度及び試験体内部の温度測定結果からブラインドの放射熱流束は式(2.3.2)で表現できる。図 2.3.7 および 2.3.8 に二次放射熱量と日射量の測定値を示す。

$$E_b = \sigma_b \cdot \varepsilon_a \cdot \varepsilon_b \cdot \left\{ \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right\} \quad \dots (2.3.2)$$

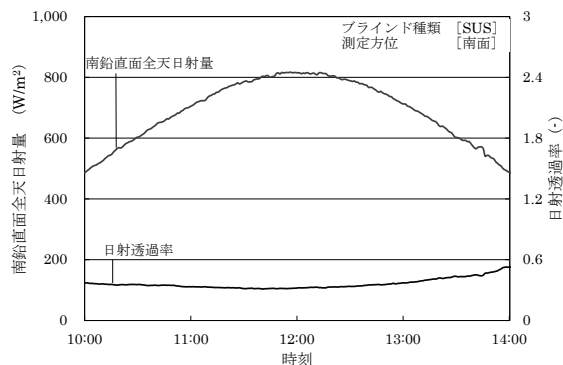


図 2.3.7 SUS ブラインドの日射透過率

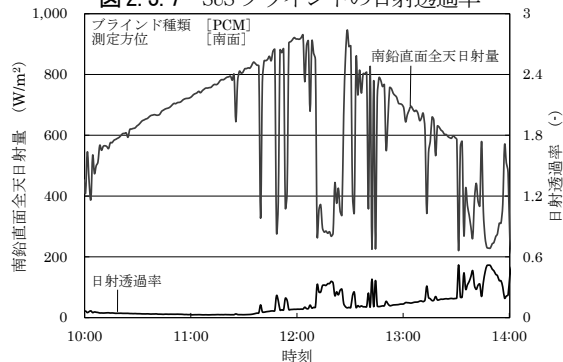


図 2.3.8 PCM ブラインドの日射透過率

二次放射熱流束と鉛直面全日射量の測定結果を用いて PCM ブラインドと SUS ブラインドの相当日射透過率を整理して図 2.3.9 に示す。PCM ブラインドの日射透過率は SUS ブラインドに比較して平均 38% 程度低減されていた。また、外付けブラインドの相当日射遮蔽率は一般的な資料からえられる内付けブラインドの値と同等となった。

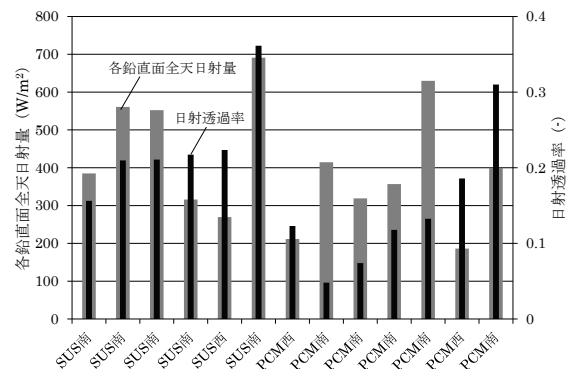


図 2.3.9 日射透過率

2.3.4 蓄熱ブラインドの換気駆動力に関する実験

DS 内部に設置した蓄熱ブラインドは、日射取得による夜間換気駆動力の保持性能が期待される。本研究では重力換気力とブラインドの自然対流による駆動力を分離して把握するため、以下に示す実験を実施した。

日射取得により昇温したブラインドの換気駆動力を予測するため、DS 内に設置したブラインド(ステンレス板 0.5 t(mm))に電気ヒータを取付け、温度を一定に保ちながらスリット上部の噴流速度および温度分布を測定した。検査断面はスリット上部 100mm の位置であり、気流速度および温度はトラバース装置(距離分解能 0.1mm)を用いて測定した。なお速度は無指向型サーミスタ流速計、温度は T 型熱電対(0.1mmφ)を用いて測定した。測定開始位置はスリット端部から 10mm 外側の位置であり、空間測定間隔を 3mm とし検査断面において 40 ヶ所のデータを採取した。各測定位置において 0.2 秒間隔で 3 分間データを収録し、数値群の平均値を実験値として採用した。また、室温は上下スリット高さにおいて T 型熱電対(0.3mmφ)を用いて測定して代表室温とした。

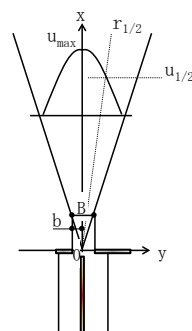


図 2.3.10 解析モデル



写真 2.3.11 トラバース装置

浮力噴流における既往の研究^{12), 13)}から浮力噴流の軸上流速 u_{max} は式(2.3.3)で表現できる。最大流速を垂直平板へ加熱量で整理して図2.3.11に示すが、吹き出し流れの最大流速は加熱垂直平板からの放熱量の3分の1乗に比例していることからDS上部の流れは浮力噴流の特性を有していることが予見される。

$$u_{max}=1.16\{K_p\cdot F_s\}^{\frac{1}{3}}$$

$$u_{max}=0.12\cdot Q_b^{\frac{1}{3}}$$

…(2.3.3)

浮力噴流の速度、温度分布に関する知見をもとに、吹き出し流体の速度と温度分布の測定結果を最大流速と温度の半値幅で無次元化して図2.3.12, 2.3.13に示す。図から、速度および温度分布はブラインド温度に係らず相似形に保たれていることが分かる。また、浮力噴流の速度分布、温度分布は式(2.3.4)および式(2.3.5)で示される。

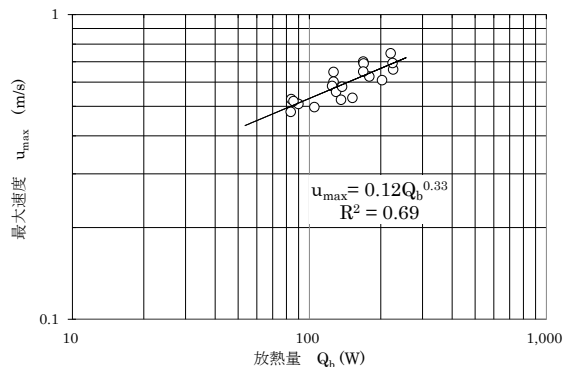


図 2.3.11 対流放熱量

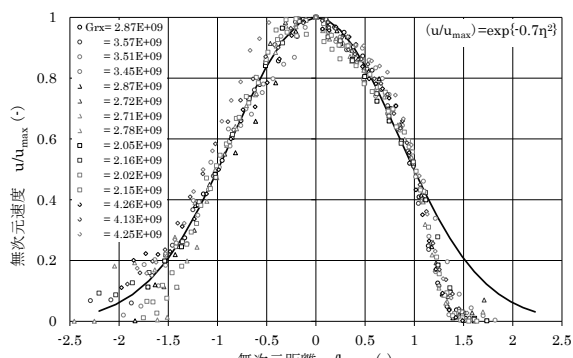


図 2.3.12 速度分布

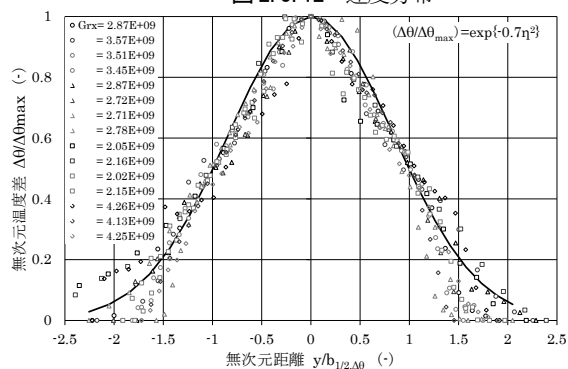


図 2.3.13 温度分布

$$\frac{u}{u_{max}}=\exp\left\{-0.7\cdot\left(\frac{y}{b_{\frac{1}{2}}}\right)^2\right\} \quad \cdots(2.3.4)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{max}}=\exp\left\{-0.7\cdot\left(\frac{y}{b_{\frac{1}{2}}}\right)^2\right\} \quad \cdots(2.3.5)$$

一方、吹き出し流れの速度の最大値はブラインドのグラスホフ数の関数として図 2.3.14 および式(2.3.6)で表現できる。

$$u_{max}=3\cdot 10^5\cdot Gr_x^{0.458} \quad \cdots(2.3.6)$$

$$\Delta\theta_{max}=6\cdot 10^{-7}\cdot Gr_x^{0.787} \quad \cdots(2.3.7)$$

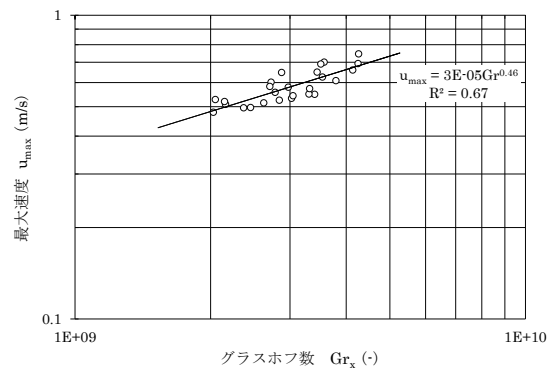


図 2.3.14 最大速度

検査断面における速度、温度差の半値幅を、ブラインドのグラスホフ数で整理して図 2.3.15 に示す。図から速度、温度の半値幅は、ブラインド温度に関わらず定数として扱うことができる(式2.3.8, 2.3.9)。

また、換気駆動力は検査断面を一秒間に通過する流体がもっている運動量と密接な関係があることが予測される。そこで、吹き出し噴流の運動量 M 、対流放熱量 Q および流量 V を、式(2.3.10), (2.3.11), (2.3.12)のように計算した。

$$y/b_{\frac{1}{2}u}=15.29\cdot Gr_x^{0.038} \quad \cdots(2.3.8)$$

$$y/b_{\frac{1}{2}\theta}=8.67\cdot Gr_x^{0.054} \quad \cdots(2.3.9)$$

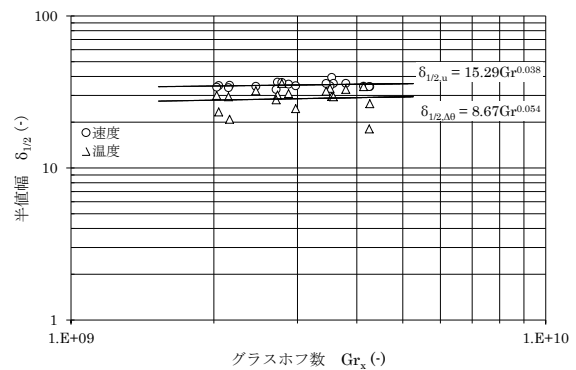


図 2.3.15 半値幅

$$b_{\frac{1}{2}u}=0.035, \quad b_{\frac{1}{2}\theta}=0.028$$

$$\begin{aligned} M &= \int_b^b \rho_a \cdot u^2 dy \\ &= \rho_a \cdot u_{\max}^2 \cdot b_{\frac{1}{2}u} \cdot F_1 \\ &= 5.49 \cdot 10^{-11} Gr_x^{0.916} \\ &= 1.64 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\theta^{0.916} \cdot h^{2.748} \end{aligned} \quad \dots (2.3.10)$$

$$\begin{aligned} Q &= \int_b^b c_a \rho_a \cdot u \Delta\theta dy \\ &= c_a \rho_a \cdot u_{\max} \Delta\theta_{\max} \cdot b_{\frac{1}{2}\theta} \cdot F_2 \\ &= 8.82 \cdot 10^{-13} Gr_x^{1.245} \\ &= 1.3 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta\theta^{1.245} \cdot h^{3.735} \end{aligned} \quad \dots (2.3.11)$$

$$F_1 = F_2 = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \left(\frac{u}{u_{\max}} \right)^2 d \left(\frac{y}{\frac{b}{2}} \right) = 1.49$$

$$\begin{aligned} V &= \int_b^b u dy \\ &= u_{\max} \cdot b_{\frac{1}{2}u} \cdot F_3 \\ &= 2.22 \cdot 10^{-6} Gr_x^{0.458} \\ &= 1.2 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta\theta^{0.458} \cdot h^{1.374} \end{aligned} \quad \dots (2.3.12)$$

$$F_3 = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \left(\frac{u}{u_{\max}} \right) d \left(\frac{y}{\frac{b}{2}} \right) = 2.11$$

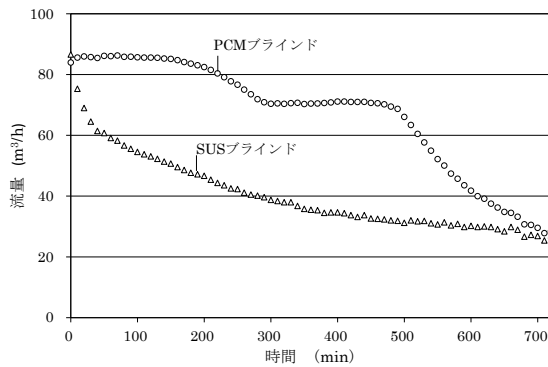


図 2.3.16 夜間換気駆動力

表 2.3.1 スリット上部の浮力噴流の特性

			①PCM	②SUS	①/②
運動量	ΣMt	kN/h	12	3	4.04
流量	ΣVt	m³/h	55	28	1.98
熱量	ΣQt	kJ/h	138	21	6.65

夜間換気駆動力はブラインドの自然対流によって生じることが予測されるため、ブラインドと PCM ブラインドの表面温度と室温の測定値を式(2.3.12)に適用して、両ブラインドの換気駆動力を図 2.3.16 に示した。また、PCM ブラインドと SUS ブラインドを比較したところ 4.04 倍の換気駆動力、6.65 倍の排出熱量、1.98 倍の流量が得られることが確認できた。

2.4 ゲル状 PCM による日射蓄熱型暖房器の

負荷抑制効果に関する実験的研究

これまでも年間空調負荷の抑制を目的とした日射エネルギー利用システムが開発されてきたが、大規模太陽熱集・蓄熱装置や電気エネルギーへの変換装置など日射のアクティブな利用方法は設置費用が高くなりがちで、積雪などの影響を受ける北海道では普及が遅れている。また、代表的な日射のパッシブな利用方法として、トロンプウォールシステムなどが知られているが、蓄熱体が可動できないなど、設計上の問題が指摘されている。一方、既往の研究¹⁴⁾では潜熱蓄熱材の暖房装置への利用を試みているものの、日射利用は考慮していない。また農業用温室の暖房に関する研究¹⁵⁾では、PCM に硫酸ナトリウム塩を使用しているが、融点が居室の温度よりもかなり低く、住宅の暖房には不適であるなど、日射をパッシブに蓄熱してエネルギー消費量を削減でき、蓄熱型暖房器の開発が期待される。

本研究では、融点 25℃ のゲル状 PCM を利用して日射熱を蓄熱し夜間に利用できる暖房装置を開発するために、その性能評価や設計に関わる基礎的な研究を実施した。はじめに、暖房器に内蔵する蓄熱体の熱的性能を明らかにするために、ゲル状 PCM を充填した円筒型の蓄熱試験装置を作製して加熱実験を実施し、数値計算との比較を行って数値計算の精度を検討した。これにより、任意形状の蓄熱体における蓄・放熱性能を予測することが可能になる。また、安価で可搬型の日射蓄熱型暖房器の開発を目的として、ゲル状 PCM を内蔵した日射蓄熱型暖房器のプロトタイプを作製し、日射蓄熱による暖房負荷の抑制効果を検討した。

2.4.1 円筒型暖房器の蓄熱量に関する実験

蓄熱型暖房器の非接触加熱型エレメントは、ファンなどの強制対流を生じさせる装置を設置しない場合には表面熱伝達率を大きくすることが困難なため、蓄熱速度を増加させるためには表面積を拡張する必要がある。円筒型エレメントは、平板型に比較して単位蓄熱量当たりの表面積が広く蓄・放熱効率が高い形状といえる。本研究では、自然対流による円筒型蓄熱装置のアスペクト比と蓄熱量の関係を明らかにするために、以下の試験装置を作製して、熱性状の測定を行い、数値計算の結果と比較することで計算精度を検討した。ゲル状 PCM の充填した円筒型容器(半径 50×高さ 300mmABS 樹脂製)の形状を図 2.4.1 および 2.4.2 に示す。内部側表面から中央部にかけて、T 型熱電対を 4mm 間隔で 12 ケ所配置し、容器内に加熱して流体にした融点 25℃ のゲル状 PCM を充填した。円筒型容器の外側表面には電熱式アルミ面状ヒータを貼り付け、その周囲を断熱材で覆った。

試験体内部のゲル状 PCM の加熱、冷却時における温度性状を確認するために、以下に示すような実験を行った。試験体を静穏な実験室内に放置して定常状態にあることを確認した後、試験体の表面に貼付けたアルミ面状ヒータの

電圧を一定に保ちながら外縁部から加熱した。試験体内部のゲル状 PCM の温度変化は 1 分間隔で測定し、データロガーに記録した。試験結果を図 2.4.3 に示す。ゲル状 PCM は周囲から加熱されて、中心部に向かって時間遅れを伴いながら徐々に温度が上昇していく様子がわかる。

また、ゲル状 PCM の融点 25℃ 近傍において、温度が急激に上昇しているが、これはゲル状 PCM が相変化により液相へと遷移したことを示しており、潜熱蓄熱の様相が可視化された情報であるということもできる。

図 2.4.4 に試験体内部の温度分布を、半径 R と最大温度差で無次元化して示した。図は、時間の経過とともに試験体の中心から外縁に向かう軸方向温度分布が定常状態に近づいていく様子を示している。

2.4.2 円筒型蓄熱装置の熱伝導に関する数値計算

前節で定式化したゲル状 PCM の物性値と、固液層域における比熱と温度の関係を用いて円筒型容器内の温度変化を計算した。さらに加熱時における円筒型蓄熱装置の温度変化の測定結果と、この実験における加熱面温度を境界条件とした数値計算の結果を比較して計算結果の精度を検討した。数値計算の方法とその結果を以下に示す。

ゲル状 PCM 試験体の非定常熱伝導は簡単のために一次元円筒座系方程式でモデル化して計算を実施した。熱伝導の基礎方程式を式 (2.4.1) に示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_{PCM}(\theta)} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad \dots (2.4.1)$$

計算は基礎方程式 (2.4.1) を差分法で離散化し、市販の表計算ソフトを利用して実施した。時間差分は前進差分、空間差分は中心差分で離散化した。式 (2.4.1) を離散化して式 (2.4.2) に示す。なお、空間離散間隔は 1mm、時間間隔は 1s である。

$$\theta_r^{n+1} = \theta_r^n + \frac{\lambda}{\rho \cdot c_{PCM}(\theta)} \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \left(\theta_{r+dr}^n - \theta_r^n \right) \left(2 + \frac{\Delta r}{r} \right) + \theta_{r-dr}^n \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right) \right) \quad \dots (2.4.2)$$

前述した試験体の加熱実験において計測した加熱前の温度分布を初期条件、試験体の加熱側表面の温度を境界条件として与え計算を行った。なお、試験体の比熱には前述の実験値の調和解析結果を、熱伝導率は表 2.4.1 の物性値を参考にして与えた。計算結果を実験値と比較して図 2.4.5 に示す。実線が実験値、破線が計算値を示している。



写真 2.4.1 試験装置の概要

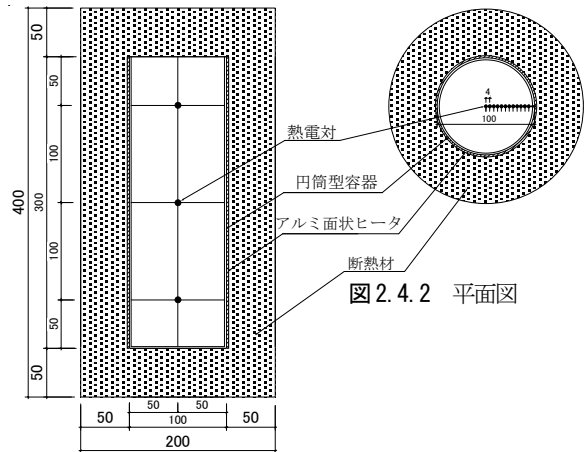


図 2.4.2 平面図

図 2.4.1 試験体断面図

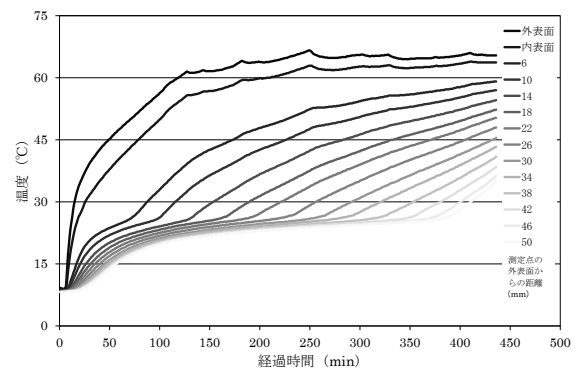


図 2.4.3 試験体内部の温度変化

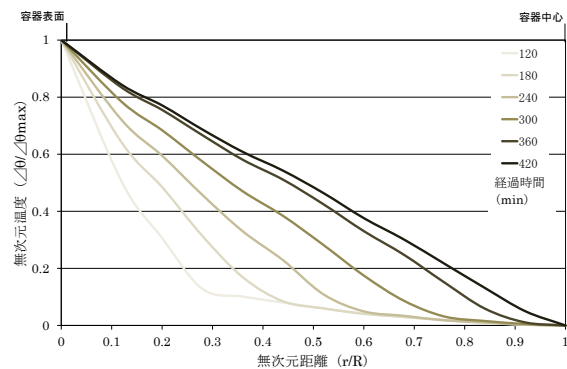


図 2.4.4 試験体内部の温度分布

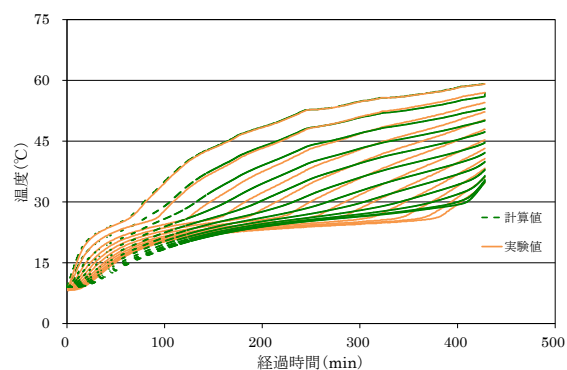


図 2.4.5 数値計算結果

表 2.4.1 ゲル状 PCM の基本的熱性能

名称	C17+C18	
PCMの融点 (°C)	25	
	固相域	液相域
熱伝導率 (W/m・K)	0.19	
比熱 (kJ/kg・K)	1.90	4.96
潜熱量 (kJ/kg)	81.02	
蓄熱量 (kJ/kg)	115.32	

計算結果はゲル状 PCM の相変化に伴う温度変動の挙動の特徴を精度よく捉えているが、固相域では実測値とやや解離する結果となった。また、試験体中心部に近づくにつれてその差は大きくなった。本計算では、液相域において測定したゲル状 PCM の熱伝導率を採用しているが、熱伝導率が相に依存していることも予見されることから、今後固相域における等価熱伝導率の測定も必要と考える。

2.4.3 日射蓄熱型暖房器の

負荷抑制効果に関する実験

日射熱を直接蓄熱して、夜間の暖房エネルギーとして利用する日射蓄熱型暖房器は機構も簡易であり、その省エネルギー効果が期待される。本研究では、日射蓄熱型暖房器のプロトタイプを作製して、その性能を評価した。また日射量が少ない日でも暖房器内の蓄熱体の温度を高められるように、ヒータを蓄熱体の下部に設置して補助熱源とした。

2.4.3.1 プロトタイプの作製方法および性能試験

押出ポリスチレンフォーム板 50 t(mm)で作製した筐体(縦 350×横 600×高さ 700mm)の上部にスライド式温風吹出し口(以下吹出し口)を設け、下部には送風吸気口とファンを取り付けた。また、蓄熱体の下部にはサーモスタットで制御可能なシリコンヒータ(1P100V300V)(以下補助電気ヒータ)を設置した後、平板状アルミパックに封入したゲル状 PCM(縦 550×横 430×厚さ 5.5mm ; 以下パック型 PCM) 15 枚を筐体内 12mm 間隔で受光面に平行に設置し、前面に選択透過膜を貼った塩化ビニール板を施工した。プロトタイプの仕様を表 2.4.2 に示す。日射の有効利用率に関する実験は、受光面パネル表裏に各 1 点、パック PCM 表面に 7 点、吹出し口、サーモスタット付近に各 1 点の合計 11 点に T 型熱電対を設置して 1 分間隔で計測を行い、データロガーに記録した。また、日射計を受光面と同位置に設置して試験装置が受ける日射量を同時に測定している。蓄熱体の蓄熱量および放熱量は表面温度の測定値をもとに、1 分間のエンタルピーの増減を式(2.4.3)により計算した。また、受光面に入射する全天日射量、消費電力量、放熱量の測定結果から、全放熱量に占める日射熱の割合を式(2.4.4)で予測して、暖房器の負荷抑制効果を評価した。

$$Q_{st} = |Q_h| = \sum c_{PCM}(\theta) \cdot \Delta\theta \cdot w \quad \dots(2.4.3)$$

$$\frac{Q_s}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_e}{Q_h} \quad \dots(2.4.4)$$

2.4.3.2 暖房負荷抑制効果に関する実験結果

前述のプロトタイプ試験装置を実験室内の南面窓ガラス近傍に日射が遮断されない様に放置して、受光面を日射に暴露して蓄熱量を測定した。なお、試験体内に取り付けた、補助電気ヒータは、筐体内温度が 30°C 以上になると通電が停止するように設定して実験を行った。

表 2.4.2 プロトタイプの仕様

外形寸法	奥行 350×幅 600×高さ 765 (mm)
受光面積	0.3 (m ²)
質量	約 18 (kg)
消費電力 ヒータ	1P100V300W
ファン	1P100V3.9W
風量	100 (m ³ /h)
筐体 熱容量	300 (J/K)
断熱性能	0.296 (W/K)
蓄熱材	ゲル状 PCM(n-パラフィン)
蓄熱材の融点	25 (°C)
蓄熱材重量	15 (kg)
蓄熱量 (40°C/20°C)	1,800 (kJ)



写真 2.4.2 プロトタイプ

写真 2.4.3 筐体内

表 2.4.3 プロトタイプの実測値

	蓄熱量 Q _{st} (kJ)	放熱量 Q _h (kJ)	日射量 Q _s (kJ)	消費電力量 Q _e (kJ)	日射利用率 Q _h /Q _E
2012/1/31	2,293	2,296	1,688	723	3.18
2012/2/1	1,028	1,063	866	946	1.12
2012/2/2	1,242	1,280	603	1,099	1.16
2012/2/8	3,782	3,901	3,568	390	10.00
2012/2/9	5,960	6,000	2,085	580	10.34
2012/2/10	944	987	554	1,323	0.75
2012/2/13	3,512	3,561	3,698	459	7.76
2012/2/14	4,801	4,815	1,728	598	8.05
2012/2/23	3,541	3,585	1,541	693	5.17
2012/2/24	8,269	9,377	2,123	499	18.80
2012/2/27	2,996	2,676	1,327	1,302	2.06
2012/2/28	7,669	8,141	2,518	359	22.69
2012/2/29	3,936	3,834	1,398	823	4.66
2012/3/1	3,673	3,647	1,290	720	5.06

図 2.4.7、図 2.4.8 に補助電気ヒータの消費電力と PCM の温度、受光面の全天日射量の推移を示す。双方とも補助電気ヒータの稼働可能時間は 6 時間である。また室温はいずれも同等に保たれている。両図から日射を蓄熱して運転した時の消費電力量は日射遮蔽時より 60%抑制されていることが確認できた。また、放熱はいずれも同等であることから、本装置が日射を活用して暖房負荷を抑制できることが示唆された。日射の有効利用率を受光面の全天日射量で整理して図 2.4.9 に示した。有効利用率は全面パネルが受ける日射量と線形的な関係を有しており、全放熱量に占

める日射の割合は最高で85%にも達した。さらに、日射による蓄・放熱量の推移を図2.4.10に蓄熱量、放熱量、日射量、消費電力量、日射利用率を表2.4.3に示すが、日射の増加に伴い蓄・放熱量が増加していることがわかる。両図から、日射蓄熱により暖房負荷が抑制できる可能性が示唆される。

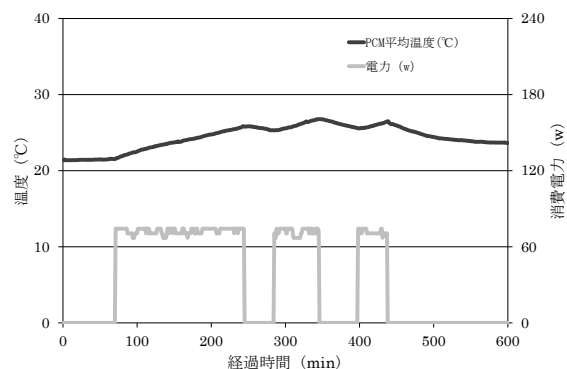


図2.4.7 遮蔽時の消費電力の推移（日射遮蔽）

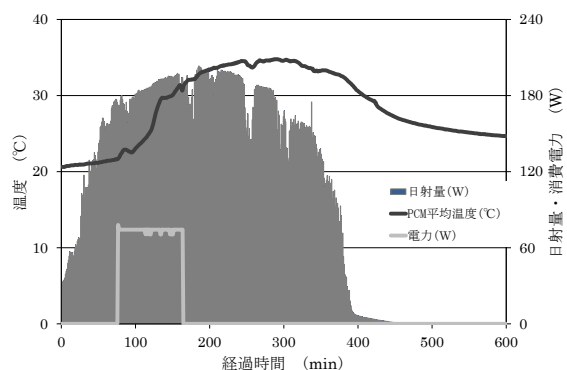


図2.4.8 蓄熱時の消費電力の推移（日射蓄熱）

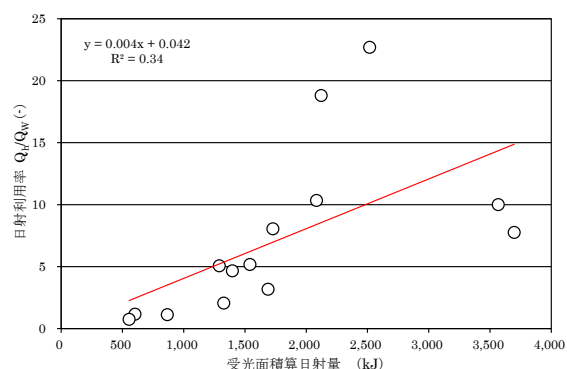


図2.4.9 日射利用率

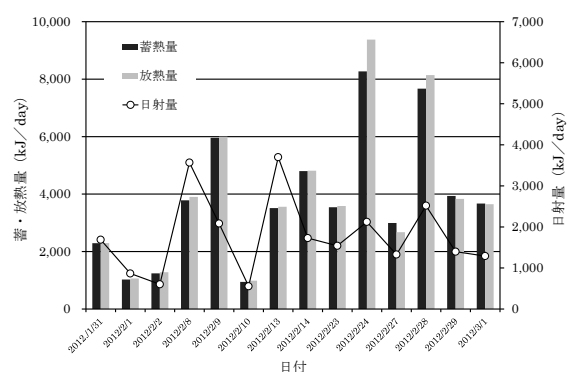


図2.4.10 日射による蓄・放熱量の推移

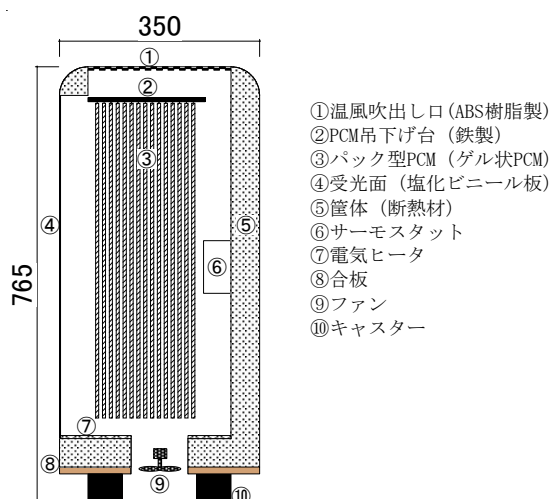


図2.4.6 プロトタイプ断面図

2.5 室内熱容量が日射遮蔽・外気冷房による

冷房負荷抑制に及ぼす影響に関する研究

夏期の日射による過度の室内温度上昇を抑制するために、すだれやよしずなどの日射遮蔽や夜間の冷涼な外気による通風が伝統的に用いられており、その効果を検討した研究も多い^{16),17),18)}。しかし、現在の高断熱・高气密住宅では機械設備と電気エネルギーを用いた冷房装置が夏の環境調整の主流となっている。これらの原因として、ライフスタイルの変化、建築形態や材料、構法の変化があげられる。また、現在の高断熱・高气密住宅では敷地の狭小化により底のない建物も多く、日射遮蔽効果の低いブラインドやカーテンなど内付の装置が使用されているため、日射による過度の室温上昇が問題となっている。一方、室内に熱容量を付加することにより、室内において不要素とされる過度の室温上昇や室温変動の増大を抑制する効果が期待される^{2),3)}、日射遮蔽や外気冷房との併用による効果は今のところ定量化されていない。

本研究では、日射遮蔽効果に優れる新たな材料を使用した日射遮蔽装置を開発し、熱容量が異なる二室を有する実証実験棟の開口外部に設置して、同時に外気冷房を行うことで、室内熱容量が日射遮蔽や外気冷房に与える影響を定量化し、夏期の冷房負荷抑制効果と環境改善効果についても検討を加えた。

2.5.1 実証実験棟の概要

学内に設置した実証実験棟は二室に分かれており、一室には融点において温度を変えずに蓄放熱を繰り返す潜熱蓄熱材(PCM)を用いた潜熱蓄熱内装材(以下PCM内装材)を、他方には石膏ボードを施工した。以下PCM内装材を施工した室をPCM室、石膏ボードを施工した室をPB室と呼ぶ。二室間は断熱界壁によって熱的に区切られており、室間相互の熱の授受は無視することができる。また、断熱・気密性は両室とも同等であることが確認されている^{2),3)}。実証実験棟の仕様を表 2.5.1 に示す。また、実証実験棟の平面詳細と内部に設置した測定器具の位置を図 2.5.1 に示す。

なお、実証実験棟の構造は木造 2×4 工法であり、断熱施工はグラスウール(16K)100mm をスタッド間に充填し、さらに発砲ポリエチレン板 75mm を外張りで付加した、充填+外張断熱の併用法となっている。PB 室と PCM 室の内装仕上げを図 2.5.2 に、二室の熱容量を表 2.5.2 に示す。

表 2.5.1 実証実験棟の仕様

場所	小樽市銭函
構造	木造2×4工法 1階建て
床面積	5.2m ² ×2室
室内法寸法	W2,080×D2,070×H2,400
南面ガラス面積	1.19m ² /室 (W530×H1,125×2枚)
PCM室	PCM内装材 12mm施工
PB室	石膏ボード 12mm施工

表 2.5.2 二室の熱容量と熱損失係数

	単位	PB室	PCM室
熱損失係数	(W/m ² ・K)	1.1	
熱容量	(kJ/K)	527	610

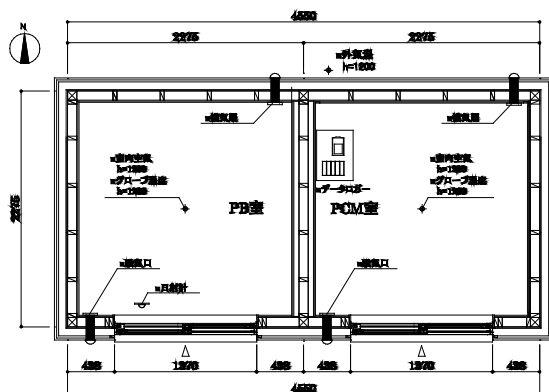


図 2.5.1 測定点と実験器具の配置

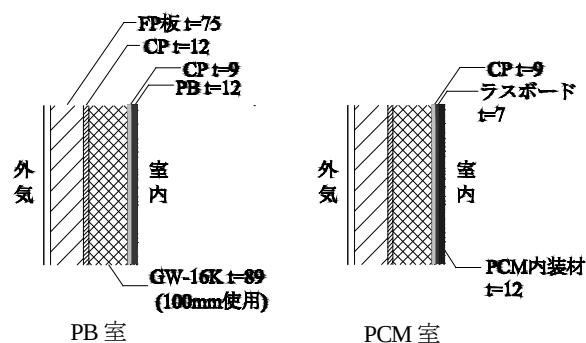


図 2.5.2 壁仕様と内装仕上げ

2.5.2 日射遮蔽装置の性能に関する実験

2.5.2.1 日射遮蔽効果に関する実験

今回新たに開発する日射遮蔽装置の材料の選定・検討を行うため、比較検討用に 300×300×200 h (mm) の 2 つの箱を作製した。また、装置内部に配置された水平面全天日射計と照度計により日射量、照度、紫外線を各々測定し、天空に露わにされた箱 A と、上部に日射遮蔽材料を設けた箱 B による日射遮蔽効果の比較検討を行った。なお、水平面全天日射計と照度の設置高さは揃えて測定した。装置詳細を図 2.5.3 に、測定風景を写真 2.5.1 に示す。

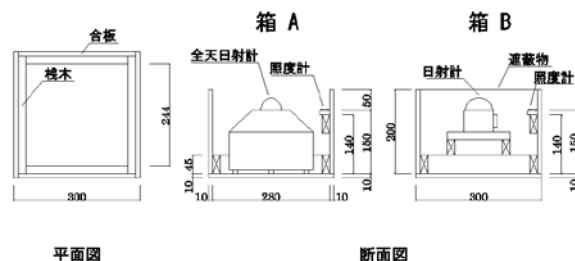


図 2.5.3 装置内部の測定器具配置



写真 2.5.1 日射遮蔽効果の比較検討用装置

2.5.2.2 日射遮蔽効果の測定結果

各材料の日射遮蔽効果を比較するため、箱 A と箱 B で各々測定した水平面透過日射量から遮蔽率を式(2.5.1)で算出し、太陽高度との関係を図 2.5.4 に、各材料の日射量、UV の平均遮蔽率を表 2.5.3 に示す。

$$SR = \left(1 - \frac{J_{hin}}{J_h} \right) \quad \dots (2.5.1)$$

なお、15 時以降は側壁により直達日射が遮蔽されたこと

から、この時間帯の測定値を除いて全天日射量の遮蔽率を算出し比較を行った。高耐候性不織布は日射、UVともに遮蔽率が0.9以上と他の材料と比較して高く、日射遮蔽材としての効果が高いことが期待される。また、伝統的な住宅が夏期に遮蔽装置として使用していたよしずやすだれなどの日射遮蔽装置も高い性能を確認できた。一方、太陽高度が20～40度の範囲では太陽高度と遮蔽率間には相関が見られないことから、遮蔽率は一定値として扱い得る。

2.5.2.3 遮蔽膜からの発散輝度に関する実験

日射遮蔽装置は開口外部に設置するため、室内の照度が低下する可能性があり、よしずやすだれの使用が見られなくなった原因も室内の暗さに依ることが予想される。そこで、装置を設置した時の自然採光の状況を把握するため遮蔽物から室内に透過する光束に関する検討を以下の方法で行った。まず、遮蔽材料の発散輝度を検討するため、600×600(mm)のダンボール中央に300×300(mm)の開口をあけた比較検討用装置を作製した。2台の開口部のうち一方には各遮蔽材料を設置し、他方はブランクの状態です室内側から開口中心部の輝度を測定してその結果を比較した。輝度性能の比較検討用装置を写真2.5.2に示す。

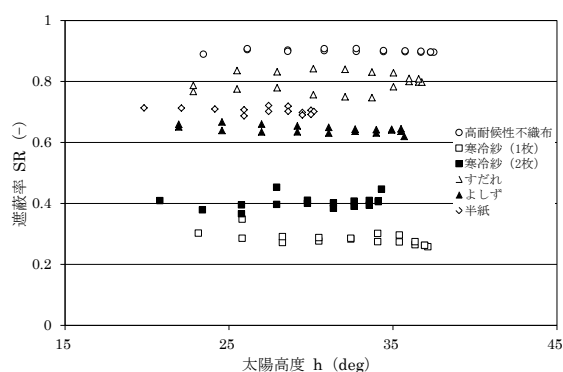


図 2.5.4 太陽高度による各材料の遮蔽率

表 2.5.3 各材料の遮蔽性能

日射遮蔽材料	SR (-)	S _{UV} (-)
高耐候性不織布	0.90	0.95
寒冷紗 (1枚)	0.23	0.36
寒冷紗 (2枚)	0.35	0.55
すだれ	0.80	0.84
よしず	0.65	0.76
半紙	0.67	0.91



写真 2.5.2 発散輝度の測定装置

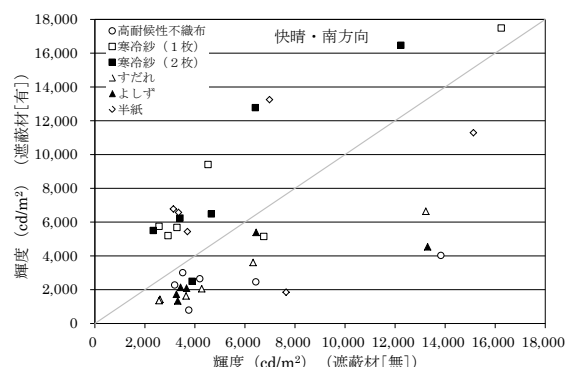


図 2.5.5 直達光入射時の各材料の輝度

図 2.5.5 には直達光が遮蔽膜に入射したときの輝度を、図 2.5.6 には天空放射光が入射したときの輝度を示す。実験結果から直達光が入射した時には、寒冷紗や半紙は発散量が大きく遮蔽物なしよりも大きな値を示した。一方、天空放射光の場合は、全ての遮蔽材においてブランクの状態よりも輝度が小さくなることが確認された。

2.5.3 室内熱容量が日射遮蔽や外気冷房の

冷房負荷抑制効果に与える影響に関する実験

2.5.3.1 日射遮蔽装置の概要

前述の日射遮蔽装置の性能に関する実験結果を参考に、最も効果が期待される高耐候性不織布を材料に使用して簡易に可動できる遮蔽装置 900×3,200(mm)を作製し、実証実験棟の開口外部に設置してその効果を検討した。写真 2.5.3 に日射遮蔽装置の設置外観、図 2.5.7 に遮蔽装置のサーモグラフ画像を示す。図から遮蔽装置の表面温度は周囲の表面温度より 10℃以上も低く、遮蔽装置を設置した南面窓周囲の環境が大きく改善されている。また、設置した 2 ヶ月間に台風などの風雨や過度の温度上昇による破れ等も見られないことから、日よけに要求される強度を十分に有している。

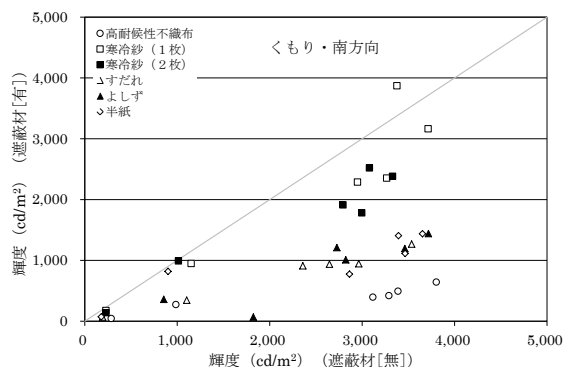


図 2.5.6 天空放射光入射時の各材料の輝度

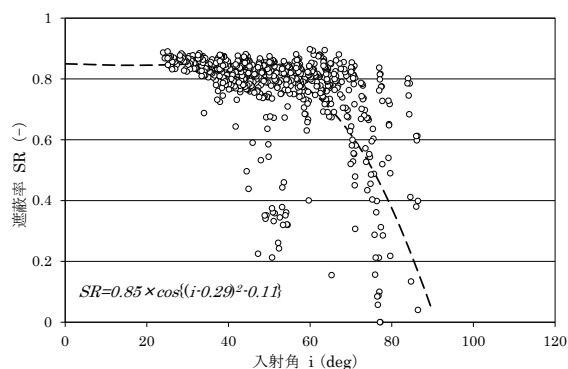


図 2.5.8 遮蔽率と入射角



写真 2.5.3 日射遮蔽装置を設置した実験棟

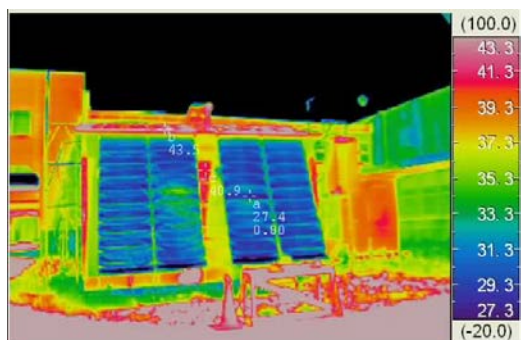


図 2.5.7 日射遮蔽装置のサーモグラフ画像

環境改善効果を定量化するため、図 2.5.1 に示した測定位置に熱電対、日射計を設置し、室温、グローブ温度、外気温、透過日射量を測定した。各温度は T 型熱電対 0.3 φ (mm) を用いて 1 分間隔で測定し、データロガーに記録した。

日射遮蔽装置の効果検討するため、水平面全天日射量の測定値から予測した南鉛直面日射量と南鉛直面透過日射量の測定値から遮蔽率を式 (2.5.2) で算出した。また、入射角は式 (2.5.3) を用いて計算し、その結果を図 2.5.8 に示す。

$$SR = (1 - \frac{J_{hsin}}{J_{hs}}) \quad \dots (2.5.2)$$

$$\cos i = \cos \beta \cdot \sinh + \sin \beta \cdot \cosh \cdot \cos(A - A_0) \quad \dots (2.5.3)$$

図から、実証実験棟に設置された日射遮蔽装置の遮蔽率は日射の入射角が 70 度未満範囲では遮蔽率が 0.85 に分布しているが、入射角が 70 度を超えると遮蔽率は入射角に依存して急激に減少していることを確認した。

2.5.3.2 夏期における日射遮蔽と外気冷房による室内環境改善効果の検証

2011 年 7 月 4 日から 10 月 4 日まで、実証実験棟を用いて夏期の室内環境の測定を行った。実験は、日射遮蔽の有無、換気量の大小をパラメータとして 6 種の条件を設定した。外気冷房は第三種換気装置を 18 時から翌 6 時まで定常運転して行い、条件ごとに 1 週間の連続測定を行って室内環境改善効果を検討した。測定の条件を表 2.5.4 に、室内環境の日変化を条件ごとに図 2.5.9、2.5.10、2.5.11、2.5.12 に示す。

表 2.5.4 室内環境測定の条件

測定条件	日射遮蔽	(○: 有 ×: 無)	
		外気冷房	
		換気回数 (回/h)	
		3.98	5.38
①	×	×	×
②	○	×	×
③	×	○	×
④	○	○	×
⑤	×	×	○
⑥	○	×	○

表 2.5.5 重回帰分析式の係数

	PB室				PCM室			
	c ₁	c ₂	c ₃	R ²	c ₄	c ₅	c ₆	R ²
①	8.916	0.595	0.798	0.797	11.962	0.530	0.669	0.726
②	10.638	0.524	0.641	0.830	8.864	0.609	0.429	0.764
③	8.916	0.595	0.798	0.797	11.962	0.530	0.669	0.726
④	16.719	0.225	0.812	0.942	13.711	0.366	0.569	0.903
⑤	8.916	0.595	0.798	0.797	11.962	0.530	0.669	0.726
⑥	7.727	0.536	0.939	0.784	12.413	0.410	0.558	0.616

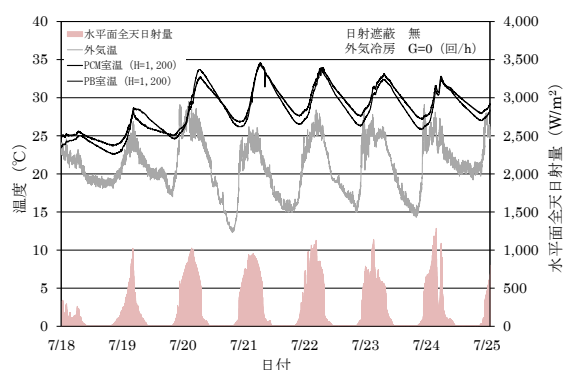


図 2.5.9 夏期の室内環境の日変化(条件①)

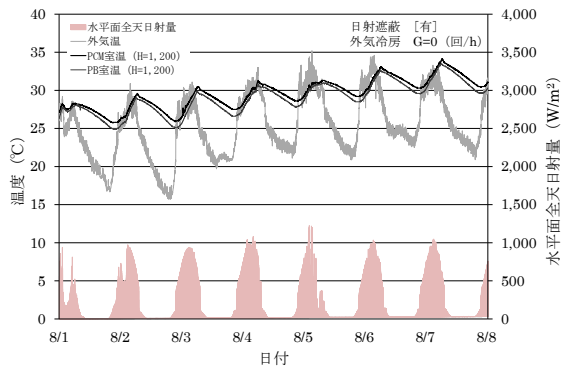


図 2.5.10 日射遮蔽時の室内環境の日変化(条件②)

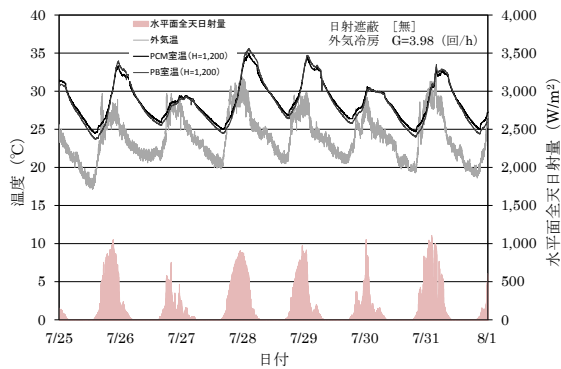


図 2.5.11 外気冷房時の室内環境の日変化(条件③)

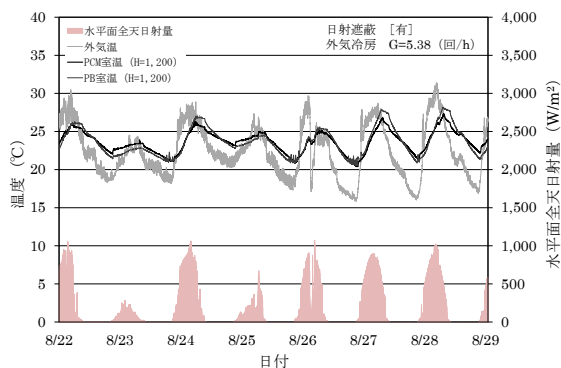


図 2.5.12 日射遮蔽と外気冷房時の室内環境の日変化(条件⑥)

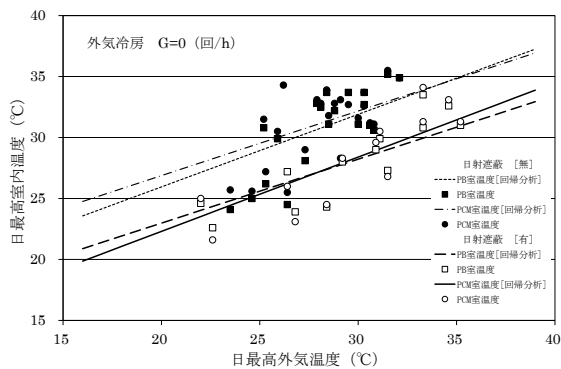


図 2.5.13 日射遮蔽時の日最高室内温度

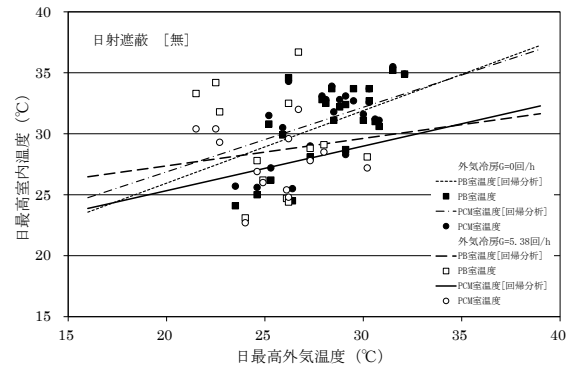


図 2.5.14 外気冷房時の日最高室内温度

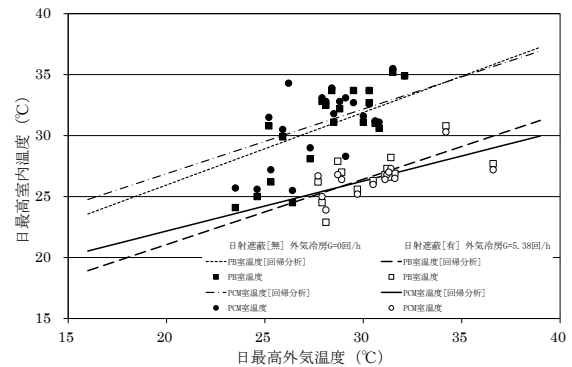


図 2.5.15 日射遮蔽と外気冷房時の日最高室内温度

ただし、
$$\theta_{PB}=c_1+c_2\cdot\theta_0+c_3\cdot Q_S$$
$$\theta_{PCM}=c_4+c_5\cdot\theta_0+c_6\cdot Q_S$$

図 2.5.9 より、日射遮蔽と外気冷房を行わない場合、日最高室温は外気温度に比較して最大で 10℃高い値となった。一方、日射遮蔽を行った場合には(図 2.5.10)、日最高室温を外気温度以下に抑制することができた。しかし、外気冷房のみを行った場合には(図 2.5.11)、最高室温は外気温度に比較して最大で 5℃高い値となったものの、PCM 室の室温は、PB 室と同等となった。また、日射遮蔽と外気冷房を併用すると日最高室温は外気温度より 5℃前後抑制されており、伝統的な採涼法の室内環境改善効果が追認できた(図 2.5.12)。

さらに、室内環境改善効果の比較を行うため、PCM 室と PB 室の室内温度の外気温度と南面透過日射量を説明変数と

する重回帰分析を実施し、結果を図 2.5.13,2.5.14,2.5.15 に、回帰式の各係数を表 2.5.5 に示す。

図 2.5.13 は、日射遮蔽を行うことで日最高室内温度が 4℃程度抑制されることを示しているが、熱容量は日射遮蔽の効果に寄与していないといえる。さらに、外気冷房時の室温を図 2.5.14 に示すが、最高外気温度が 25℃以上の範囲では日最高室内温度が大幅に抑制されており、高熱容量の室ではさらに効果が高くなることが分かる。また、図 2.5.15 からは、日射遮蔽と外気冷房を併用することで日最高室内温度が 7℃程度抑制されることがわかり、単独でこれらを実施した場合に比較してその効果は高い。

以上から、日射遮蔽によって取得熱量を大幅に削減すると、夏期の過昇温による躯体への蓄熱量は抑制され、結果として最高室温は熱容量に依存しなくなると考えることもできる。

2.5.4 夏期における日射遮蔽と外気冷房による冷房負荷抑制効果の予測

夏期の日射遮蔽や外気冷房による冷房負荷抑制効果を検証するため、前述の夏期における日射遮蔽と外気冷房による室内環境改善効果の検証実験で測定した各室の室内温度、外気温度、南面透過日射量、相対湿度から熱取得量と熱損失量を算出し冷房負荷を予測した。日ごとの熱取得量と熱損失量を図 2.5.16,2.5.17,2.5.18,2.5.19 に、各条件の冷房負荷を表 2.5.6 に示す。なお、冷房負荷は取得量と損失量の差と定義した。

図 2.5.16 より、日射遮蔽と外気冷房を行わない場合、日中の熱取得量に比較して夜間に放出する熱量が小さく、日冷房負荷 Q_c は $1.88(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day})$ となった。一方、外気冷房を行った場合には(図 2.5.17)、日中の熱取得量に変化はあまり見られないものの夜間に放出する熱量が大きく、日冷房負荷 Q_c は $1.68(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day})$ となることから、冷房負荷抑制効果が見てとれる。また、日射遮蔽を行った場合では(図 2.5.18)、日中の熱取得量が大幅に減少しており、日冷房負荷 Q_c は $0.21(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day})$ となったことから、日射遮蔽による冷房負荷抑制効果が非常に高いことが確認できた。さらに、日射遮蔽と外気冷房を併用すると日中の熱取得量に比較して夜間の熱損失量の方が大きい。日射遮蔽と外気冷房を併用した場合の日冷房負荷 Q_c は $-0.06(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day})$ となり北海道では冷房が不要になる可能性があることを確認した(図 2.5.19)。

実証実験棟における夏期の冷房負荷の予測結果から、日射遮蔽や外気冷房を全く行わない場合に比較し、外気冷房を行うことで 10%冷房負荷が抑制された。一方、日射遮蔽を行うと 88%の大幅な負荷抑制が確認された。さらに日射遮蔽と外気冷房を併用することで冷房負荷は考慮する必要がなくなり、室温も快適な範囲に保持され、伝統的な住宅が使用していた手法が大変効果的であることを確認した。

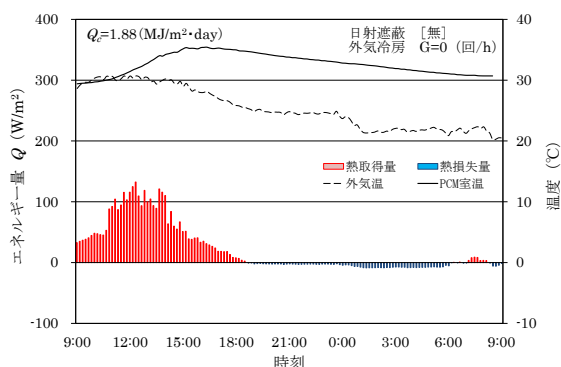


図 2.5.16 日射遮蔽なし時のエネルギー量の推移

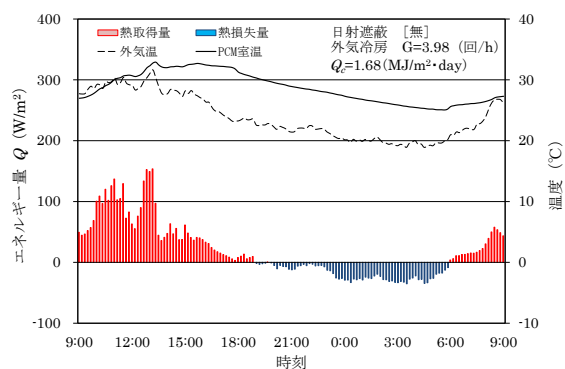


図 2.5.17 外気冷房時のエネルギー量の推移

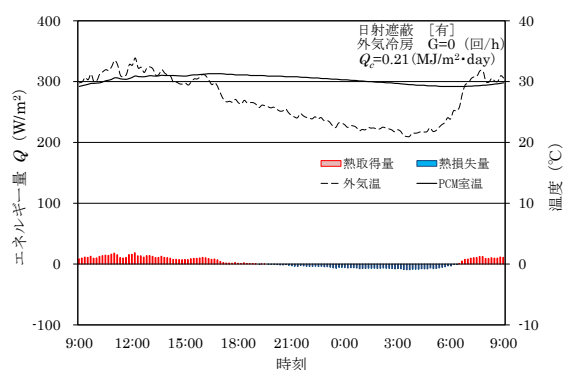


図 2.5.18 日射遮蔽時のエネルギー量の推移

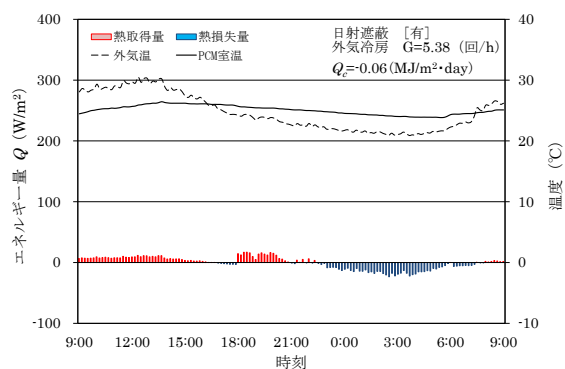


図 2.5.19 日射遮蔽と外気冷房時のエネルギー量の推移

表 2.5.6 各条件の冷房負荷抑制効果

各条件	熱取得量 (W/m^2)	熱損失量 (W/m^2)	冷房負荷 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	冷房負荷抑制効果 (%)
日射遮蔽 [無] 外気冷房 G=0回/h	3,508	-367	1.88	
日射遮蔽 [無] 外気冷房 G=3.98回/h	4,016	-1,211	1.69	0.101
日射遮蔽 [有] 外気冷房 G=0回/h	705	-343	0.21	0.888
日射遮蔽 [有] 外気冷房 G=5.38回/h	557	-649	-0.06	1.032

2.6 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

寒冷地において、高断熱・高気密住宅は快適な室内空間の形成や暖房の負荷抑制に効果があるが、無暖房住宅など

にみられる過昇温や、断熱材の厚さが大きいために生じる施工性が課題となっている。既往の研究^{1), 2), 3), 4)}では、PCM内装材を仕上げ面に施工した室における、室温変動抑制効果と補助暖房量抑制効果が検証された。

本研究では高断熱・高气密住宅の内装仕上げ下部にパック型PCMを乾式工法により施工した室(以下ゲルPCM室)と、PCM室の開口部にゲル状PCMを充填したまどガラスを設置した室(以下PCMまど室)において、躯体蓄熱量と施工法の差異による室温変動抑制量と補助暖房量抑制量の相対的比較を行った。

2.6.1 実験棟の概要

学内に設置した実証実験棟のうち、仕上げに石膏ボードを施工したPB室を基準として、蓄熱内装材を施工した室をPCM室、乾式工法により仕上げ下部にパック型PCMを施工したゲルPCM室の性能比較を実施した。各室の外壁断面図を図2.6.1に示す。実験棟は断熱隔壁で仕切られており、断熱・気密性能は両室とも同等であることを確認している。

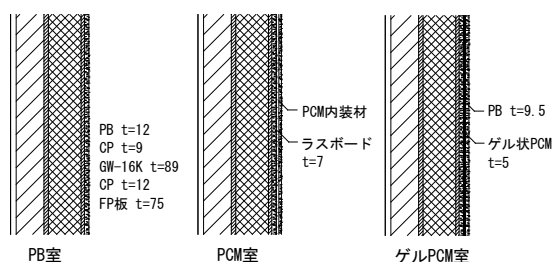


図 2.6.1 各室における外壁断面図



写真 2.6.1 実験棟外観

2.6.2 実験棟に設置した太陽熱集熱器の概要

実験棟の南側垂直壁面に太陽熱集熱器を設置し、PCM室内の集熱量測定装置を経由して、PCM内装材内に設置した毛細管放熱器(Capillary Tubing Mat:CTM)と架橋ポリエチレン管で接続した。システム内にはエチレングリコール水溶液が充填されており、循環ポンプは差温式自動運転制御装置を用いて、太陽熱集熱器の受熱面の表面温度と室内壁表面温度の差が10℃を超えると運転が開始し、その差が2℃以下になると停止するように制御した。

2.6.3 自然温度差と熱損失係数

実験棟で計測された暖房量と室の内外温度差から、熱損

失係数を実測した(以下実測 q 値)。既往の研究¹⁹⁾を参考に日暖房量と日平均内外温度差の週平均値との関係を図2に示す。定常計算によって求めた熱損失係数(以下計算 q 値)は1.1(W/m²・K)であり、実測 q 値の1.18(W/m²・K)とほぼ一致しており、既往の知見¹⁹⁾を確認できた。また、回帰式の x 切片から得られた自然温度差は5.4℃となった。

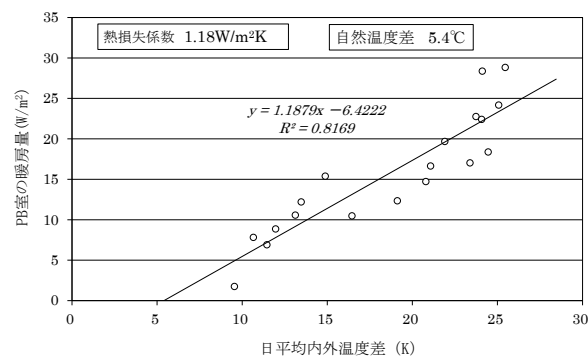


図 2.6.2 PB 室における熱損失係数の実測結果

2.6.4 集中定数系仮定を適用した熱容量の測定

本節では室内の温度分布を無視して熱容量だけを集中系として取り扱う集中定数系モデル²⁰⁾を採用し、PB室、PCM室、ゲルPCM室、PCMまど室の熱容量を温度変動率から予測した。暖房機器停止時から12時間後までの各室の室温降下率 ε を図2.6.3に示す。なお、室温降下率は式(2.6.1)より算出した。また、各室の熱容量と熱損失係数を表2.6.1に示す。図3より、PB室に比較すると蓄熱性能を付与したPCM室とゲルPCM室の室温降下は抑制されている。一方、PCM室とゲルPCM室を比較すると、暖房停止時から4時間後まではPCM室の室温降下は緩やかになっているものの、12時間後には、ほぼ同じ値となった。これは、PCM室では仕上げ表面に潜熱蓄熱材を施工しているのに対し、ゲルPCM室ではこれが仕上げ材の下部に施工されていることから、ゲルPCM室の蓄熱層の温度変化が室温変化より遅延することに起因するものと考えられる。また、PCM+SC室にPCMまどを設置して、蓄熱量をさらに増加させることで、室温変動率が相対的に約10%減少していることがわかる。PCM室の実測 q 値は、PB室よりも約20%低く躯体蓄熱による暖房負荷抑制が期待される。

$$\varepsilon = \frac{\theta_i(t) - \theta_o}{\theta_{is} - \theta_o} = \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad T = \frac{C}{q} \quad \dots(2.6.1)$$

表 2.6.1 各室における熱容量と熱損失係数の測定値

種類	単位	PB室	PCM室	ゲルPCM室	PCMまど室
計算 q 値	(W/m ² ・K)		1.1		-
実測 q 値	(W/m ² ・K)	1.18	0.99	-	-
熱容量	(kJ/K)	527	610	694	815

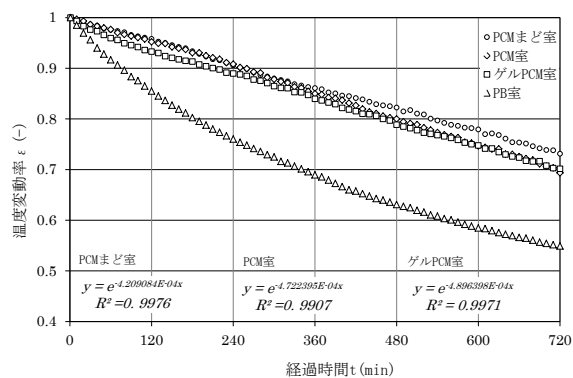


図 2.6.3 室温降下率

2.6.5 室温と暖房量の予測

実験棟で計測された暖房期のデータをもとに、PB 室と PCM 室の室温と暖房量を予測するために、準定常状態において室内の熱取得と熱損失は等しくなると仮定して、外気温と南面透過日射量を説明変数とする重回帰分析を行った。PCM 室の室温、暖房量の重回帰分析結果を図 2.6.4、図 2.6.5 に示す。回帰分析の決定係数はそれぞれ 0.79、0.95 であり、PCM 室の室温と暖房量を予測するには、十分な精度を有しているものと考えられる。

同様に、PB 室、PCM 室、ゲル PCM 室、PCM+SC 室における室温と暖房量を、外気温と透過日射量で重回帰分析を行った。各室における回帰係数を表 2.6.2 に示す。

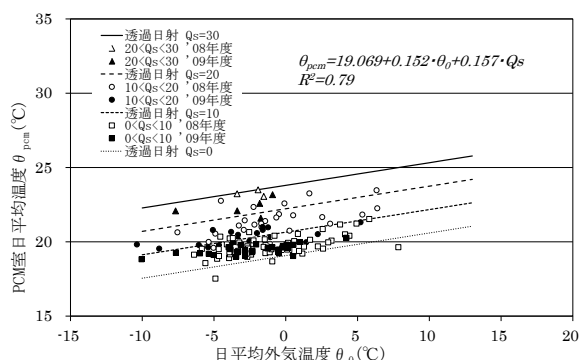


図 2.6.4 暖房期 PCM 室日平均温度(2008. 12. 2-2010. 3. 14)

表 2.6.2 各室の回帰結果

記号	室名	C ₁	C ₂	C ₃	R ²
θ_i	PB室	19.301	0.143	0.272	0.86
	PCM室	18.927	0.147	0.207	0.79
	PCM+SC室	17.792	0.281	0.387	0.80
	ゲルPCM室	19.849	0.13	0.147	0.88
Q_h	PB室	17.322	-0.851	-0.536	0.91
	PCM室	14.942	-0.959	-0.478	0.95
	PCM+SC室	9.932	-0.52	-0.344	0.67
	ゲルPCM室	16.762	-0.627	-0.593	0.92

ただし、 $\theta_i, Q_h = C_1 + C_2 \cdot \theta_o + C_3 \cdot Q_s$

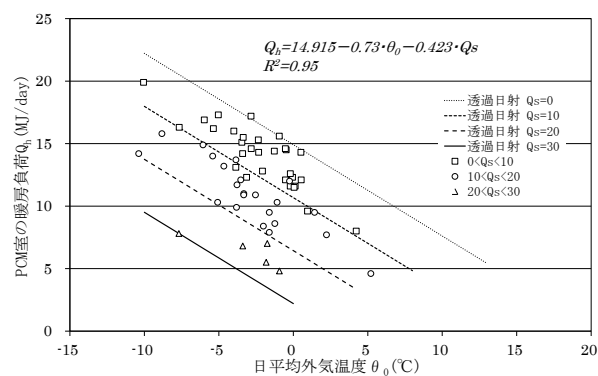


図 2.6.5 PCM 室の暖房負荷(2009. 12. 24-2010. 3. 14)

2.6.6 室温変動抑制効果

前述の重回帰分析の結果から、PB 室と PCM 室の日平均温度差を予測して図 2.6.6 に示す。図より、PB 室と PCM 室との室内温度差は外気温と日射量の関数で表現でき、透過日射量が 30 (MJ/day) 程度の日では室の熱容量によって室最高温度が 3 (K) 抑制される。これは、PCM 室の壁体に日射が蓄熱されていることを示しており、躯体蓄熱による暖房負荷削減効果の可能性を示唆している。

2.6.7 開口部に蓄熱性能を付与した

PCM まどの補助暖房量抑制効果

これまで開口部の熱性能を改善する手法として、空気層の付加や不活性ガスの充填によりガラスの熱損失量を抑制する研究が行われてきたが、n-パラフィンを用いて開口部に蓄熱性能を与えた事例は見られないようである。

本研究では、二重ガラスにゲル状 PCM を充填したまど(以下 PCM まど)を開発し、その省エネルギー性能および環境改善効果について検討を行った。PCM まどの設置例を写真 2.6.2 に示す。なお、ゲル状 PCM の融点は 36.8℃、44℃とした。

ゲル PCM 室と PCM まど室の補助暖房量、PCM まどによるエネルギー削減率、総熱損失量、PCM 室とゲル PCM 室の有効取得熱量は式(2.6.2)～式(2.6.5)により求めた。

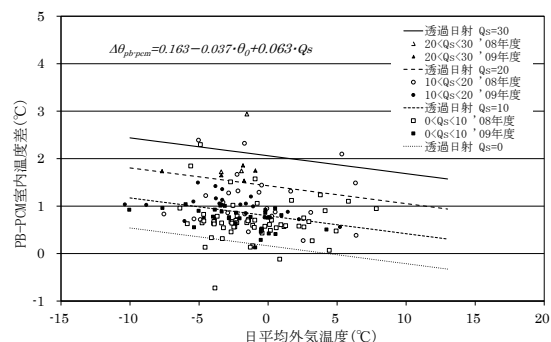


図 2.6.6 PB-PCM 室の日平均温度差(2008. 12. 2-2010. 3. 14)



写真 2.6.2 PCM まど(インプラスタイプ)

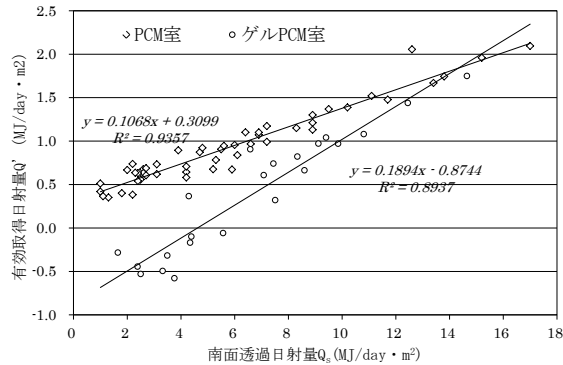


図 2.6.7 有効取得熱量

$$Q_h = \sum_j e_j \cdot \Delta t \quad \dots (2.6.2)$$

$$\phi = \frac{Q_{h,PCM+SC} - Q_{h,PCM+SC+W}}{Q_{h,PCM+SC}} \quad \dots (2.6.3)$$

$$Q_{loss} = \sum_j q \cdot \Delta \theta_j \cdot A_f \cdot \Delta t \quad \dots (2.6.4)$$

$$Q' = \frac{(Q_{loss} - Q_h)}{A_f} \quad \dots (2.6.5)$$

PCM 室とゲル PCM 室の有効取得日射量を図 2.6.7 に示した。図より、PCM 室、ゲル PCM 室ともに日射取得熱量が多いほど、暖房量抑制効果が高くなるものの、PCM 室はゲル PCM 室と比べて有効取得熱量が高かった。これは、PCM 室の仕上げ面に潜熱蓄熱材を施工したため、日射取得熱を有効に利用しやすいことを示唆している。

一方、PCM まど室の補助暖房量を図 2.6.8 に示した。PCM まどの補助暖房量抑制効果は、前述の重回帰分析の結果から PCM+SC 室の暖房量を予測し、これを PCM まど室のエネルギー消費量と比較して検討した(式 2.6.3)。PCM まどによる削減率の期間平均値は 20%、最大値は 68.6%であった。PCM まどの蓄熱量は日射量によって決定されるため、削減率は天候に大きく影響されるものの、その効果は小さくない。

2.6.8 PCM まどの室温変動抑制効果

住宅をはじめとする建築では、躯体に比較して開口部の熱損失が大きいが、これに蓄熱性能を付与することで日射による室内温度の過昇温と夜間の温度低下が抑制でき、室温の日変動の抑制効果が期待される。

住宅をはじめとする建築では、躯体に比較して開口部の熱損失が大きいが、これに蓄熱性能を付与することで日射

による室内温度の過昇温と夜間の温度低下が抑制でき、室温の日変動の抑制効果が期待される。PCM まどの表面温度、ゲル PCM 室と PCM まど室の室温の推移を日射量と比較して図 2.6.9 に示す。PCM まどの表面温度と室温は、日射量と密接な相関を有することがわかる。また、ゲル状 PCM の融点である 36.8℃付近で表面温度が急激に上昇していることが見てとれる。これは、ゲル状 PCM が融解し、液相へと遷移したためと考えられる。日中に日射熱によって蓄熱された熱が放熱された後の日没時において外気温が -5℃でも、PCM まどの最低表面温度は 14℃付近で推移していることがわかる。これは、ペアガラスと PCM まどの間にある空気層によって断熱性能が向上し、窓からの熱損失が抑制されるとともに、コールドドラフトの最大流速が 30%抑制されるなど環境改善の効果も高いことを示している。また、透過日射量が 25 (MJ/day) を超える日では暖房器からの放熱はなく、日射量の多い日には最寒期でも無暖房で 20℃の室温を維持できることが確認された。

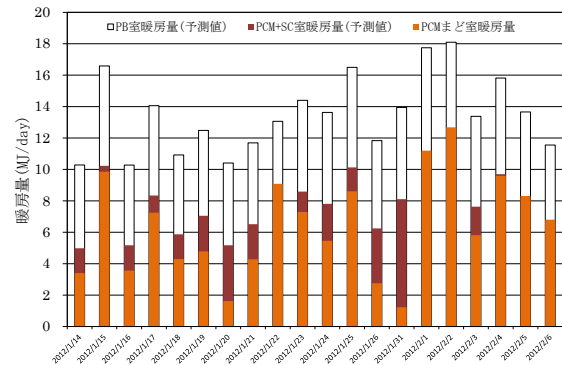


図 2.6.8 PCM まどの補助暖房量抑制効果

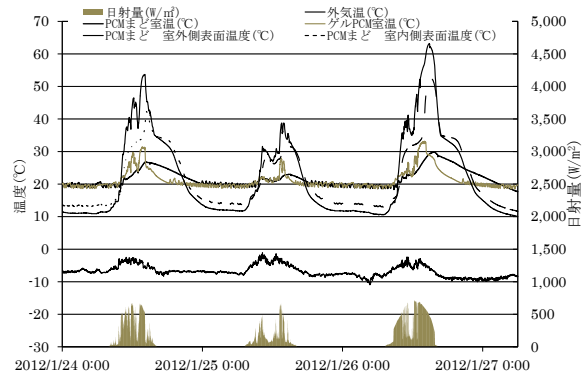


図 2.6.9 PCM まどの表面温度と室温の推移

2.7 日射熱取得を考慮した簡易年間空調負荷

計算法に関する研究

現在までのところ、企画構想の段階から日射熱取得を考慮した空調負荷計算の結果を参考に開口部の設計がなされている建築は限定的な範囲にとどまっている。とりわけ住宅建築の開口部設計は、法的な規制を満足することを前提としていることが多く、建設地の気候や風土などの要素が十分に反映されているとは言い難い。すなわち開口部に限定すれば地域の気候に適合した様式が未だに存在していな

いとも言うこともできる。また日除けやパッシブ蓄熱など、日射の調整方法を考慮した空調負荷計算プログラムも未開発のようである。

既往の研究^{1),2),3),4)}では日射取得熱に着目し、PCM内装材を利用したハイブリッド壁暖冷房システムによる暖房負荷抑制効果を定量化できる簡易年間空調プログラムが開発された。本年度は新たに躯体の熱損失係数と冷房負荷を計算するプログラムを追加するとともに、ゲル状PCMを乾式工法によって施工した室(以下ゲルPCM室)での暖房負荷を簡易的に算出できるようにプログラムを改良した。また、冷房期において日射遮蔽装置の効果を定量化するため、気象データを用いて室に入射する日射取得熱を予測し、その効果を定量化した。このプログラムにより、全国17地域の気候・風土を考慮した開口部の設計と通年における日射調整法の効果を簡易的に算出できるようにした。

2.7.1 標準気象データの整理と

鉛直面日射量の予測

建物を設計する際に行う暖冷房負荷計算には標準気象データが不可欠であり、とりわけ外気温と各方位の鉛直面全天日射量が重要になる。しかし、気象庁が発表している日射量の測定値は水平面全天日射量であり、空調負荷計算の際には時別の鉛直面全天日射量への変換が必要になることから、その予測法について検討を行った。

本研究では、Bouguerの式(式(2.7.1))とBerlageの式(式(2.7.2))から求めた水平面全天日射量の予測値(式(2.7.3))と、気象庁の観測データ(2000年~2010年の平均値)の比を天候補正係数と定義し(式(2.7.4))、計算値に天候補正係数を乗じることで鉛直面日射量を予測した(式(2.7.5))。

$$J_{dn} = J_o \cdot P^{\cos \theta} \cdot \sin h \quad \dots(2.7.1)$$

$$J_{sh} = J_o \cdot \frac{\sin h}{2} \cdot \frac{1 - P^{\cos \theta}}{1 - 1.4 \ln P} \quad \dots(2.7.2)$$

$$I_h = \sum(J_{dh} + J_{sh}) \cdot \Delta t \quad \dots(2.7.3)$$

$$\mu = I'_h / I_h \quad \dots(2.7.4)$$

$$I_v = \mu \cdot J_v \quad \dots(2.7.5)$$

南鉛直面全天日射量と水平面全天日射量との比と水平面全天日射量の関係を図2.7.1に、南鉛直面全天日射量と水平面全天日射量の実測値を図2.7.2に示す。

図2.7.1から、南面と水平面の全天日射量比は水平面全天日射量に対して線形的な関係を有していることが見て取れ、既往の研究²¹⁾とも精度良く一致していることから、水平面全天日射量の測定値から直接的に鉛直面日射量が予測できることを示唆している。一方、図2.7.2の予測値と測定値には大きな差異は存在していないことから、本法は鉛直面日射量の予測法として十分な精度を有しているものと考えることができる。

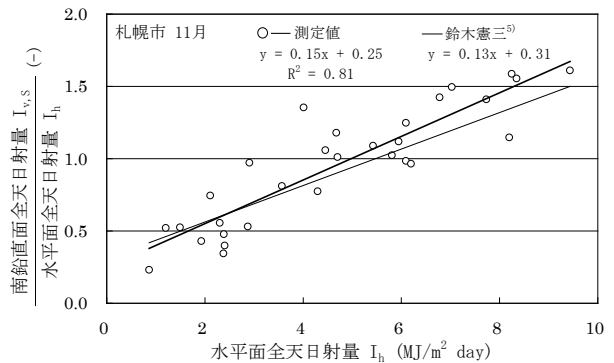


図 2.7.1 南面/水平面日射量の比と水平面日射量

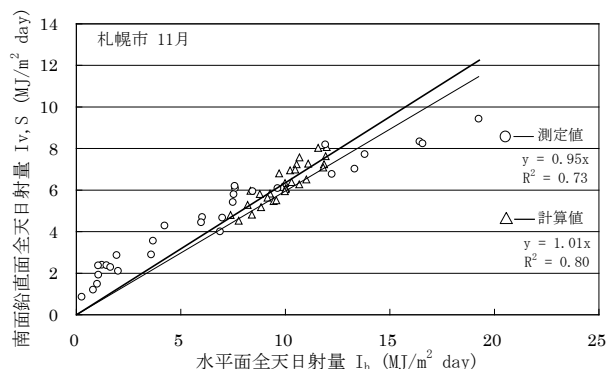


図 2.7.2 鉛直面日射量と水平面日射量

図2.7.3、図2.7.4に札幌と東京における天候補正係数 μ の日変動を示す。また、各地域における天候補正係数の回帰式の係数を表2.7.1に示す。図より、各地における日照時間、大気透過率の季節変動など気候の特色を示しているが、冬季に比べ夏季は天候補正係数 μ が減少する傾向を示している。これは夏季において大気透過率が低下すること起因した傾向であるといえよう。

一方、日最高、日最低、日平均、外気温は各地のアメダスデータ(2001~2010年)の10年平均値を求めて、日毎のデータとした。尚、暖房計算には日平均値を、冷房計算には日最高、日最低、日平均値の3値を用いて、後述する方法により貫流と顕熱換気負荷を求めた。

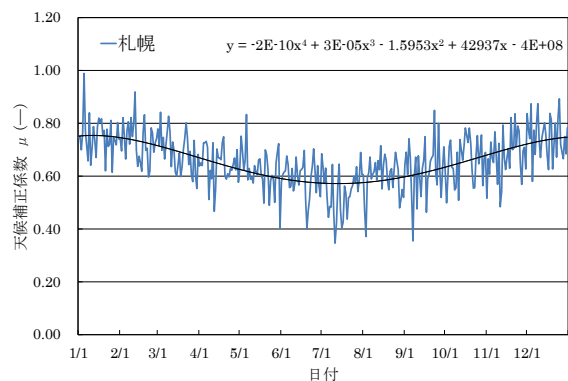


図 2.7.3 天候補正係数(札幌)

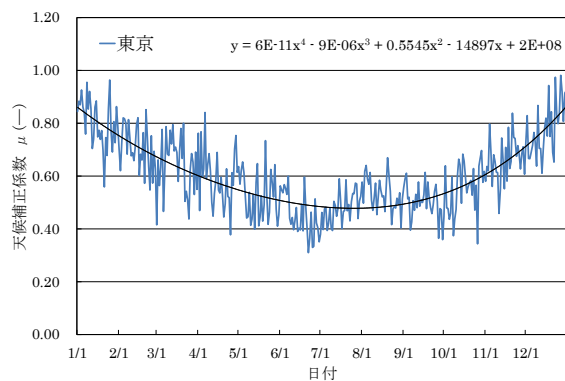


図 2.7.4 天候補正係数(東京)

表 2.7.1 各地の天候補正係数 μ

地域	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
青森	-3×10^{-10}	5×10^{-5}	-2.9	7×10^4	-8×10^8
秋田	-4×10^{-10}	7×10^{-5}	-4.1	1×10^5	-1×10^9
岩手	-2×10^{-10}	4×10^{-5}	-2.3	6×10^4	-6×10^8
山形	-2×10^{-10}	3×10^{-5}	-2.0	5×10^4	-6×10^8
宮城	-3×10^{-10}	5×10^{-5}	-3.1	8×10^4	-9×10^8
新潟	-2×10^{-10}	3×10^{-5}	-1.5	4×10^4	-4×10^8
福島	-2×10^{-10}	3×10^{-5}	-1.9	5×10^4	-5×10^8
群馬	-1×10^{-10}	2×10^{-5}	-1.4	3×10^4	-4×10^8
栃木	-1×10^{-10}	2×10^{-5}	-1.3	3×10^4	-4×10^8
東京	6×10^{-11}	-9×10^{-6}	0.5	-1×10^4	2×10^8
札幌	-2×10^{-10}	3×10^{-5}	-1.5	4×10^4	-4×10^8
旭川	-9×10^{-11}	1×10^{-5}	-0.8	2×10^4	-2×10^8
帯広	-4×10^{-10}	7×10^{-5}	-4.1	1×10^5	-1×10^9
函館	-3×10^{-10}	5×10^{-5}	-3.0	8×10^4	-8×10^8
網走	-3×10^{-10}	5×10^{-5}	-2.9	7×10^4	-8×10^8
室蘭	-6×10^{-10}	1×10^{-4}	-5.8	1×10^5	-2×10^9
稚内	-4×10^{-10}	6×10^{-5}	-3.8	1×10^5	-1×10^9

※ ただし、 $\mu = C_1 x^4 + C_2 x^3 + C_3 x^2 + C_4 x + C_5$

2.7.2 簡易年間空調負荷計算プログラム

既往の年間空調計算プログラムは建築の仕様を詳細に入力する必要があるため複雑で難しく、計算後の修正や変更に手間が掛かる。また開口部における庇・日除けなど日射を調整する手法が考慮されていないことも多い。本研究では、既往の暖房負荷計算プログラム⁴⁾に住宅の熱損失係数計算および日射遮蔽や外気冷房を用いた時の冷房負荷計算を組み合わせるとともに、当研究室で開発してきたPCM内装材を仕上げ面に施工した工法や太陽熱集熱器を導入した時の年間空調負荷を実施できるプログラムの開発を行った。本計算プログラムは、設計者が簡易に窓の断熱性能、形状、面積や方位、日射調整の有無といったパラメータを変えながら応答型で開口部をデザインする手法を見出すことを目的としている。

2.7.2.1 暖房負荷の計算法

これまで、簡易的な負荷計算では各地域での寒冷の度合いを表した暖房デグリーデーを用いて年間の暖房量を求める手法が採用されてきた。本節では、室に蓄熱性能を付与した場合の暖房量の予測を行うために、日ごとの日射取得熱に着目して PCM 内装材を仕上げ面に施工した PCM 室、ゲル PCM 室の暖房量を算出可能とした計算法について述

べる。各室において日射熱が暖房量削減のために有効に利用される割合を求めるために、有効取得熱量 Q' を前述の式(2.6.5)により求めた。実験棟における有効取得熱量は、窓からの日射受熱量のうち暖房量抑制に寄与している割合を前述の方法から求め、蓄熱性能を付与した各室における有効日射受熱量とした。また、暖房負荷の概念図を図 2.7.5 に示す。熱取得は日射熱 Q_{SR} と太陽集熱器からの集熱量であり、熱損失は換気 ΣQ_V と貫流 ΣQ_T によって生じるものとした。暖房量は、取得熱量と損失量の差として計算したが、換気による熱損失、貫流による熱損失、暖房量をそれぞれ式(2.7.6)、式(2.7.7)、式(2.7.8)によって算出した。

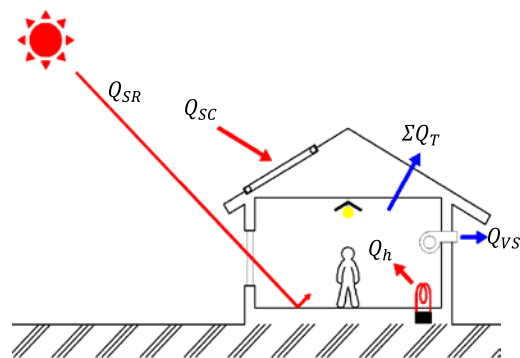


図 2.7.5 暖房負荷の概念図

$$Q_{VS} = 0.34 \cdot \Delta\theta \cdot n_V \cdot V \quad \dots(2.7.6)$$

$$Q_T = A_T \cdot K \cdot \Delta\theta \quad \dots(2.7.7)$$

$$Q_h = (Q_{VS} + \Sigma Q_T) - (Q_{SR} + Q_{SC}) \quad \dots(2.7.8)$$

なお、有効取得熱量が熱損失量を下回った場合を暖房期間とし、日暖房量を年積算することで年間暖房負荷を求めた。また、北方型住宅の予測値と比較することで各システムの暖房削減効果の検証を行った。

2.7.2.2 冷房負荷の計算法

冷房負荷計算は、熱取得の各因子を顕熱負荷と潜熱負荷に分けて計算、その合計値を冷房負荷とした。冷房負荷の構成要素を表 2.7.2、概念図を図 2.7.6 に示す。また、当研究室で開発された高耐候性不織布による日射遮蔽装置を用いた場合の冷房負荷の削減率も算出できるようにした。室温は一日中設定温度で固定されているものと仮定し、外気温は、日最高、日最低、日平均値の3値から算出した日冷房デグリーデーを用いて計算した。

表 2.7.2 冷房負荷の構成要素

種類	内容	顕熱	潜熱
室内取得負荷	壁体	Q_T	—
	開口部	伝導	Q_{SC}
		日射	Q_{SR}
	室内発生熱	人体	50W/人
		機器	100W
外気負荷	換気	Q_{VS}	Q_{VL}

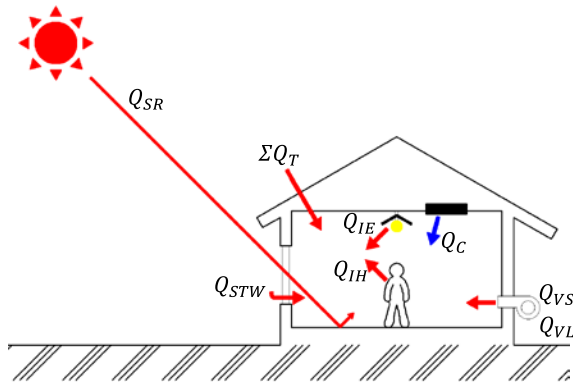


図 2.7.6 冷房負荷の概念図

なお、人体からの発熱 Q_{IH} は顕熱と潜熱それぞれ 50W/人とし、動力機器等による発熱 Q_{IE} は 100W とした。貫流負荷 Q_{ST} を式(2.7.9)より、換気による負荷 Q_V の顕熱・潜熱をそれぞれ式(2.7.10)、式(2.7.11)より求めた。冷房負荷は各構成要素の積算値とした(式(2.7.12))。

$$Q_{STW} = I_V \cdot A_T \cdot \eta \quad \dots(2.7.9)$$

$$\Sigma Q_V = Q_{VS} + Q_{VL} \quad \dots(2.7.10)$$

$$Q_{VS} = 0.34 \cdot D \cdot n_V \cdot V \quad \dots(2.7.10)$$

$$Q_{VL} = 834 \cdot n_V \cdot V \cdot (X_{out} - X_{in}) \cdot 24 \cdot 3600 \quad \dots(2.7.11)$$

$$Q_C = \Sigma Q_S + \Sigma Q_T + \Sigma Q_{IH} + Q_{IE} + \Sigma Q_V \quad \dots(2.7.12)$$

(a) 日射遮蔽物の効果を考慮した

日射による負荷の計算法

前節で求めた各方位の鉛直面全天日射量に、遮蔽係数を乗じた値を日射取得熱として計算した。各日射遮蔽物を遮蔽係数の一覧にして表 2.7.3 に示す。

表 2.7.3 日射遮蔽物の遮蔽係数

種別	種類	遮蔽係数
遮蔽装置	高耐候性不織布	0.10
	寒冷紗 (1枚)	0.73
	すだれ	0.20
	よしず	0.36
	寒冷紗 (2枚)	0.69
ブラインド	ベネシアブラインド	0.25

(b) 日冷房デグリーデー

貫流熱負荷を計算するためには、時毎の室内外温度差を与える必要があるが、本標準気象データは日最高、日最低、日平均値の 3 値しか有していない。そこで室の内外温度差の日積算値(以下日冷房デグリーデー)を求めるために、各地域における気象庁の観測データ(2000 年~2010 年の平均値)の日最高外気温、日最低外気温、日平均外気温の 3 値から、以下に示す方法で日冷房デグリーデーを求めた。設定室温は終日固定されていると仮定し、日最高外気温と日平均外気温を高さ、直達日射の可照時間を底辺とした三角形の面積を求めた。また、設計室温が平均値と最高値の間に位置する場合には、その差異を用いて日冷房デグリーデーを比例的に内分して、日冷房デグリーデーとした。日冷房デグリーデーの概念図を図 2.7.7 に示す。

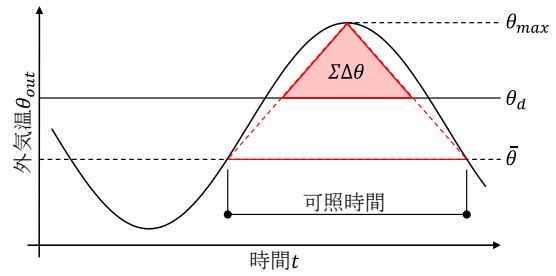


図 2.7.7 日冷房デグリーデー

換気負荷、壁・屋根・天井からの貫流負荷はこの日冷房デグリーデーを用いて求めた。また、設定温度が日最高外気温を上回った時を冷房期と定義した。

(c) 各方位における SAT の検討

前節の方法で計算した日射予測値を用いて直達日射量が当たりえる時間を日ごとに算出し、鉛直面全天日射量の積算値と各方位における SAT を求めた(式(2.7.13))。SAT の概念図を図 2.7.8 に示す。

$$SAT = \theta_0 + \frac{\alpha_s}{\alpha_0} J \quad \dots(2.7.13)$$

ただし、総合熱伝達率 α_0 を 23(W/m²・K)、面の日射吸収率 α_s を 0.7 とした。

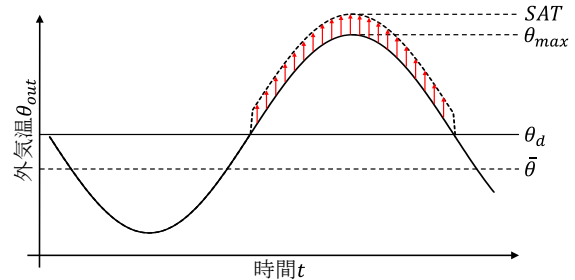


図 2.7.8 SAT の概念図

2.7.3 高断熱・高気密住宅における計算例

高断熱・高気密住宅の年間空調負荷を計算し、実測値との比較を行って、その精度を検討した。また、同住宅を東京に建設した時の年間空調負荷についても計算を実施して高断熱・高気密住宅における日射調整効果の検討を行った。

2.7.3.1 住宅の概要

本計算に用いた住宅は、2010 年 1 月に竣工した実験住宅であり、内装には潜熱蓄熱材が使用されている。1 階平面図と 2 階平面図を図 2.7.9、図 2.7.10 に示す。また、実験住宅の仕様を表 2.7.4 に示す。

表 2.7.4 実験住宅の仕様

所在地	札幌市西区
用途	モデルハウス
床面積(m ²)	102.89
q 値(W/m ² K)	1.32
PCM施工量(kg)	108
放熱機	CTM
熱源	ヒートポンプ

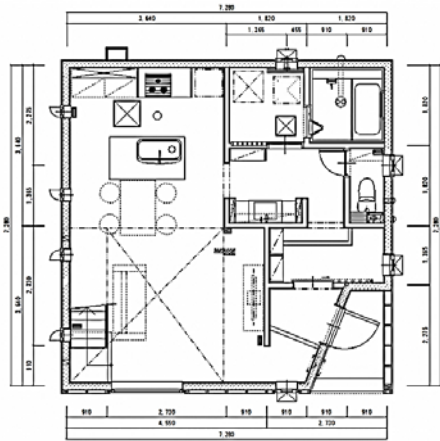


図 2.7.9 P-Project 1 階平面図

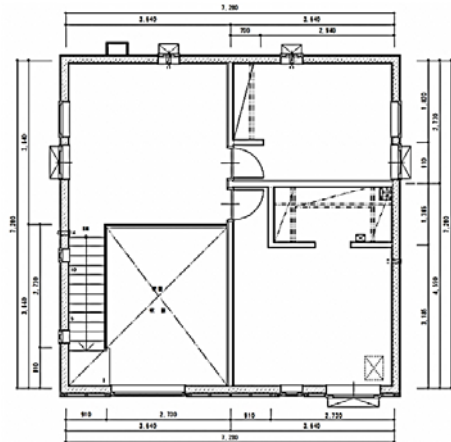


図 2.7.10 P-Project 2 階平面図

2.7.3.2 日射調整システムの年間空調負荷計算結果

本研究で開発した年間空調負荷計算プログラムから算出した暖冷房負荷と削減率の結果を表 2.7.5、表 2.7.6 に示す。

表 2.7.5 暖房負荷計算結果の比較

住宅仕様	補助暖房量		削減率	
	[MJ/(a・m ²)]		[%]	
	札幌	東京	札幌	東京
高断熱・高気密住宅(日射を考慮)	360	151	—	—
PCM内装材を施工した場合	277	91	23.1	39.9
PCM内装材+太陽熱集熱器27%	162	13	54.9	91.6
PCM内装材+太陽熱集熱器50%	85	1	76.3	99.7

表 2.7.6 冷房負荷計算結果の比較

遮蔽装置の有無	冷房負荷		削減率	
	[MJ/(a・m ²)]		[%]	
	札幌	東京	札幌	東京
日射遮蔽装置を用いない場合	27	110	—	—
日射遮蔽装置を用いる場合	10	64	64.1	42.2

また、札幌と東京における日暖房負荷の推移を図 2.7.11、図 2.7.12 に示す。図より、暖房負荷は外気温に強く依存していることがわかる。札幌では PCM 内装材を施工し、太陽熱集熱器を設置した場合暖房負荷は半減しているが、東京ではその削減率が 99% となり、IV 地域では PCM 内装材と太陽熱集熱器の設置により無暖房を実現可能となることが示唆される。

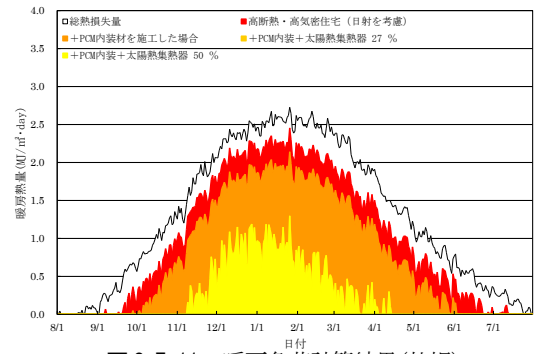


図 2.7.11 暖房負荷計算結果(札幌)

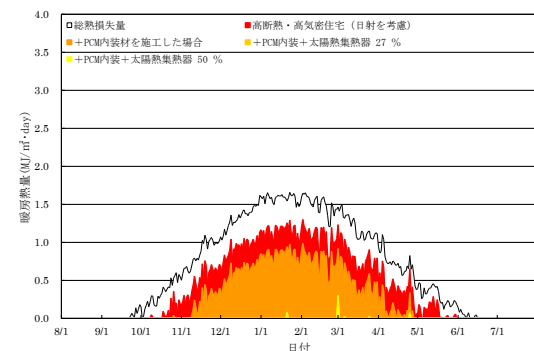


図 2.7.12 暖房負荷計算結果(東京)

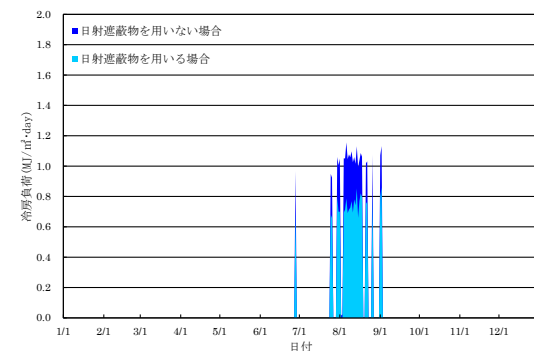


図 2.7.13 冷房負荷計算結果(札幌)

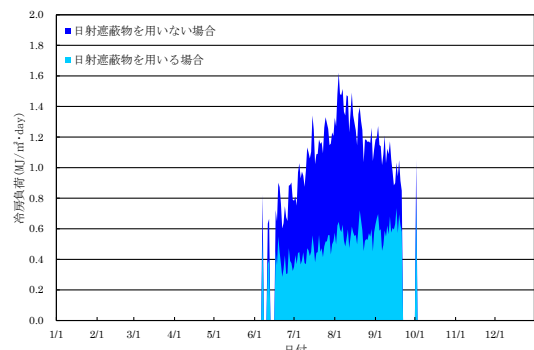


図 2.7.14 冷房負荷計算結果(東京)

札幌と東京における日冷房負荷の推移を図 2.7.13、図 2.7.14 に示した。また、札幌における冷房負荷の割合を図 2.7.15 に示す。図より、冷房負荷の約 70% は日射受熱によ

って生じていることがわかる。つまり、効果的な日射遮蔽装置の使用によって夏の冷房需要を大幅に削減できると考えられる。また、高断熱・高気密住宅は q 値の高い住宅と比較して貫流負荷を抑制する効果が確認でき、IV地域においても通年での空調負荷抑制効果が期待できる。

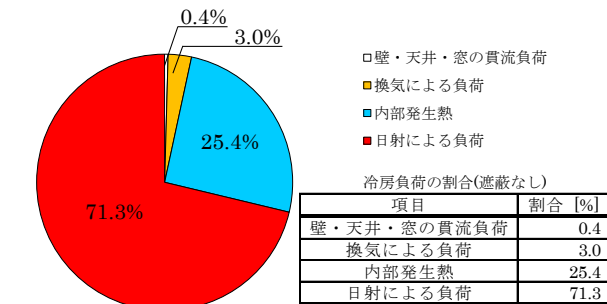


図 2.7.15 冷房負荷の割合(札幌)

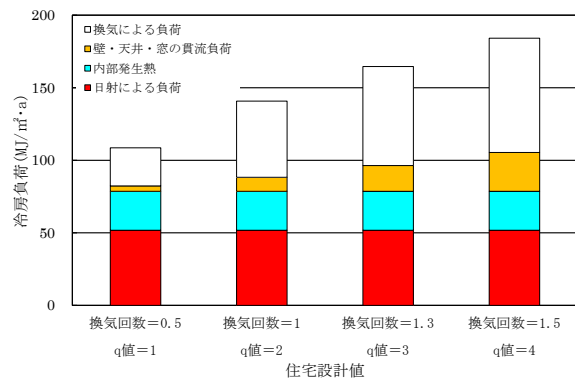


図 2.7.16 q 値の違いによる冷房負荷の割合(東京)

q 値の違いによる冷房負荷の割合の変化を、建設地を東京とした場合を例にして図 2.7.16 に示す。

図より、 q 値が小さいほど冷房負荷は小さくなるが、 q 値に関わらず日射による負荷と内部発生熱は一定の値となる。このことから、高断熱・高気密住宅では日射による負荷の割合が大きいため、開口部からの日射熱を効果的に遮蔽することが有効であるといえる。また、各地域における暖冷房負荷の結果を図 2.7.17、表 2.7.7 に示す。高断熱・高気密住宅は、寒冷地の風土を考慮した工法として発展してきたが、温暖地においても日射調整や蓄熱技術を併用すると、負荷抑制と住環境改善効果が期待できる。札幌における実験住宅の暖房量を本プログラムで算出したところ、その結果は $277 \text{ (MJ/m}^2 \cdot \text{a)}$ となった。一方、実際に実験住宅で 2011 年に測定した暖房量は $195 \text{ (MJ/m}^2 \cdot \text{a)}$ となり、42% 小さい値となった。これは既往の知見³⁾より、日照条件に恵まれない小樽で計測された有効取得日射量を使用しているためと考えられ、各地域においても安全側の数値が算出されることが予測される。

本プログラムを利用することによって、日射を考慮しながら応答型の開口部設計を行い、各地の気候・風土に合った新たな建築形態が見出されることが期待される。

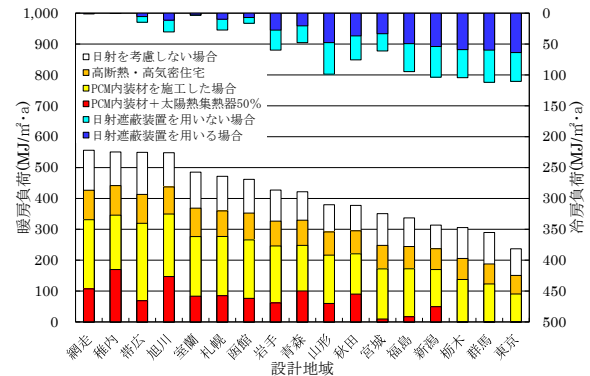


図 2.7.17 各地域における暖冷房負荷の結果

表 2.7.7 各地域における暖冷房負荷の結果

	暖房 [MJ/(m ² ・a)]				冷房 [MJ/(m ² ・a)]	
	A	B	C	D	E	F
札幌	472	360	277	85	27	10
旭川	548	437	350	147	30	11
帯広	549	413	319	69	15	5.5
函館	462	353	266	76	16	7.1
網走	556	427	331	107	1.1	0.4
室蘭	485	369	277	84	3.5	2.8
稚内	550	442	346	170	0.1	0.1
青森	421	330	248	100	48	21
秋田	377	295	221	90	76	37
岩手	427	327	246	62	60	27
山形	380	291	216	60	99	48
宮城	351	248	172	9.4	61	33
新潟	314	237	170	50	104	54
福島	337	244	172	17	95	49
群馬	290	188	123	0.2	112	60
栃木	306	205	137	1.0	104	59
東京	237	151	91	0.5	110	64

※ A: 日射を考慮しない場合、B: 高断熱・高気密住宅
C: PCM内装材を用いた場合、D: PCM内装材+太陽熱集熱器50%
E: 日射遮蔽装置を用いない場合、F: 日射遮蔽装置を用いた場合

3 おわりに

本研究では、建築の持続可能性を「私たちの子孫が私たちと同じような選択ができる余地を残しておくこと」であると定義した。再生可能エネルギーは、絶え間なく太陽から地球に到達する莫大な量の放射エネルギーを源としているが、建築の持続可能性を維持するためには、これを有効に活用することが不可欠であるといえる。私たちはゲル状 PCM を用いたまどやブラインドによる蓄熱、高耐候性不織布による日射の遮蔽を試みて、その効果を定量化してきた。本報は、エネルギー利用の不均衡を正すを目標に「500W 住宅」の可能性を議論したが、ほぼ目標を達成できるとの知見を得た。一方で、社会全体の持続可能性を高めるためには全体的な合意が必要であるとともに、長大な時間を要することはいうまでもない。本研究を端緒とした太陽熱利用の新たな取り組みが進展するとともに、エネルギー需要のあり方そのものを議論する雰囲気醸成されることを期待したい。本報で得られた知見を以下に要約する。

1. ゲル状 PCM 試験体を作製して、その熱性能を定量化し表 2.1.3 に示した。
2. GNP2510,3610 の固相域および液相域における等価

- 的な比熱は、蓄熱時と放熱時に異なる傾向を示した。
3. ゲル状 PCM の固液相域における比熱を定量化した。
 4. PCM ガラスの日射透過率を定量化するとともに、固液相域における温度依存性を定式化した。
 5. 固相域・液相域における日射透過率は、n-パラフィンの種類に関わらず定数として扱うことができる。
 6. PCM まどガラスの熱貫流率を定量化した。
 7. SUS ブラインドの表面温度は外気温および鉛直面全天日射量から予測できる。また、PCM ブラインドの表面温度は最高で 20℃低減できる。
 8. PCM ブラインドの日射透過率は SUS ブラインドと比較して平均 38%程度低減される。
 9. 夜間換気駆動力はガラスホフ数の関数で表すことが確認できる。また、PCM ブラインドは SUS ブラインドと比較して検査断面における運動量は 4.04 倍、排出熱量 6.65 倍、流量 1.98 倍得られた。
 10. 円筒型蓄熱装置を作成して加熱実験を行い、非定常時の温度変動を観察した。
 11. ゲル状 PCM の円筒試験体における熱挙動を差分法で離散化して数値計算を実施し、潜熱蓄熱の挙動をとらえることができた。
 12. 蓄熱用消費電力量の測定結果から、日射受熱が暖房エネルギー消費量の削減に効果的であることを確認し、放熱量に占める消費電力量の割合を定量化した。
 13. 高耐候性不織布の遮蔽効果は 90%以上であった。
 14. 白色系の日射透過材に直達光が入射すると透過光束によって発散輝度が増加する傾向が確認された。
 15. 日射遮蔽を行うと日最高室内温度は 4℃程度抑制されるが、さらに外気冷房を併用することで日最高室内温度を 7℃程度まで抑制できることを確認した。
 16. 日射遮蔽をしない時、熱容量を付与することで外気冷房の効果を促進できる。
 17. 夏期の冷房負荷抑制効果は、外気冷房で 10%、日射遮蔽で 88%であることを確認した。また、日射遮蔽と外気冷房を併用すると無冷房となった。
 18. 伝統的な住宅が夏期に使用していた日射遮蔽、外気冷房の環境改善・冷房負荷抑制効果を定量化した。
 19. 室に蓄熱性能を付与することにより、室温降下率は抑制されるが、仕上げ表層に蓄熱層を施工する方が下部に設置するよりも効果的であることがわかった。
 20. 躯体蓄熱をした室の日平均室温、暖房量は日平均外気温と日積算透過日射量により説明できる。
 21. PCM まどを設置した場合、昼間の過昇温は抑制され最高温度のピークシフトができることがわかった。
 22. PCM まどによる負荷削減効果と暖房時間の短縮が確認された。
 23. 各方位における鉛直面全天日射量の新たな予測法は、十分な精度を有していることがわかった。

24. 高断熱・高気密住宅は、暖冷房の抑制に効果があることが確認され、年間空調負荷の削減が期待される。
25. 高断熱・高気密住宅では、冷房負荷の約 70%が日射による取得熱であり、効果的な日射遮蔽を行うことで冷房負荷が大幅に削減できると考えられる。

<謝辞>

本研究を行うにあたり、JSR(株)様、(株)フォーム空間計画工房様、(株)ピタレスク様、(株)クワザワ工業様、(株)山田硝子店様、札幌市立大学 山田良講師にご協力頂きました。また、北海道職業能力開発大学の田畑雅幸先生に貴重なご助言とご協力を頂きました。ここに記して心より感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 大坪未生他：潜熱蓄熱内装材を用いたハイブリッド壁暖冷房システムに関する研究、北海道職業能力開発大学校、2008.3
- 2) 尾関公敏他：潜熱蓄熱内装材を用いたハイブリッド壁暖冷房システムに関する研究（その2）、北海道職業能力開発大学校、2009.3
- 3) 黒田真彦他：潜熱蓄熱による再生可能エネルギー利用システムに関する研究、北海道職業能力開発大学校、2010.3
- 4) 葛西仁他：潜熱蓄熱材(PCM)を適用したロー・エミッション住宅の開発、北海道職業能力開発大学校、2011.3
- 5) 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 第 558 号、pp.43-48、2002.8
- 6) 斉藤平蔵：建築気候、井立出版株式会社、2000.10
- 7) 菊地弘明他：寒地省エネルギー住宅における熱特性―寒地省エネルギー住宅の窓の断熱性能に関する実験(その 1)―、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.527-528、1979.9
- 8) 砂川雅彦他：快適窓学窓の高性能化による省エネ性・快適性向上効果、Heat&Environment, vol.05、2006
- 9) 一ノ瀬雅之他：高性能窓システムの熱・光性能の現場測定法、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻 No.614、845-851、2009.7
- 10) JIS A 4710 建具の断熱性試験方法：pp.467-471、1996
- 11) 金政秀他：ガラス建築群の将来予測モデルによるファサード熱性能に関する研究、日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 No.646、1283-1289、2009.12
- 12) 石戸裕二：室内設計資料(改定2版)、pp.106-132、ピーエス(株)、2006.6
- 13) 窪田英樹：大空間へ垂直に吹き出す非等温噴流の解析、空気調和・衛生工学、vol.47-9、p.35-41
- 14) 堀田郁夫：潜熱蓄熱材による温室暖房のための基礎試験、北海道大学、1984.8
- 15) 武田仁他：潜熱蓄熱材(PCM)の住宅暖房への適用 ナイロンポリ充填型PCM暖房装置の開発とその利用方法の検討、日本建築学会計画系論文集 第 551 号、pp.53-59、2002.1
- 16) 吉野博他：断熱・気密化住宅における日射遮蔽と夜間換気の効果に関する実測、日本建築学会学術講演梗概集、pp.181-182、1995.7
- 17) 斉藤雅也：札幌における夏季の夜間換気・日射遮蔽の効果に関する研究(その 1. 夜間換気効果の実測とエクセルギー解析)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.599-600、2006.7

- 18) 斉藤雅也他：札幌市立大学図書館の壁面緑化・日射遮蔽のデザインと性能検証, 空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演会論文集, 2011.3
- 19) 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状態に関する調査, 日本建築学会環境系論文集, 第73巻第628号, 767-774
- 20) 窪田英樹他：RC造建物における間欠暖房時の室温と最大暖房負荷の集中定数系適用による把握, 日本建築学会計画系論文集, 第530号 pp12-24, 2000.4
- 21) 鈴木憲三：北海道並びに東北地方における窓面日射取得熱量, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.64, 1991.3

(記号)

A : 太陽方位角(deg), A_f : 床面積(m^2), A_s : 試験体面積(m^2), $\Sigma\Delta\theta$: 冷房負荷範囲(deg・day), A_0 : 日射遮蔽装置の方位角(deg), A_T : 面積(壁, 床, 天井, 屋根)(m^2), α_o : 外気側熱伝達率($W/m^2 \cdot K$), α_s : 面の日射(短波)吸収率(-), C : 室の熱容量(J/K), $c_{PCM}(\theta)$: PCMの比熱($kJ/kg \cdot K$), c_s : 液相域の比熱($kJ/kg \cdot K$), c_l : 固相域の比熱($kJ/kg \cdot K$), $c_{1,2,3,4,5,6}$: 定数(-), D : 日冷房デグリーデー($K \cdot s$), e_f : 放熱量(W), h : 太陽高度(deg), i : 入射角(deg), I_h : 水平面全天日射量(計算値)($W/m^2 \cdot h$), I'_h : 水平面全天日射量(気象庁2001~2010年の平均値)($MJ/m^2 \cdot day$), I : 照度(lx), I_v : 鉛直面全天日射量(予測値)($W/m^2 \cdot day$), J : 各面の全天日射量(W/m^2), J_{dn} : 水平面直達日射量(W/m^2), J_h : 水平面全天日射量(W/m^2), J_{hin} : 水平面透過日射量(W/m^2), J_{hsin} : 南鉛直面透過日射量(W/m^2), J_{hs} : 南鉛直面日射量(W/m^2), J_{sh} : 水平面天空日射量(W/m^2), J_o : 太陽定数(=1,353)(W/m^2), J_v : 鉛直面全天日射量(計算値)($W/m^2 \cdot day$), Kp : 吹き出し定数(-), K : 熱貫流率($W/m^2 \cdot K$), ℓ : 試験体の厚さ(m), $\mathcal{M}$: 運動量(N), $\mathcal{M}, \mathcal{N}$: 調和解析係数(-), $\mathcal{M}_m$: 比熱の算術平均値(-), n : フーリエ級数の数(24個), n_v : 換気回数(回/h), $\mathcal{P}$: 大気透過率(=0.75)(-), Q_g : 総熱取得(W), Q_h : 暖房熱量(J), Q_{TE} : 機器発生熱(W/m^2), Q_{δ} : 加熱垂直平板からの対流放熱量(W), Q_E : 消費電力量(J), Q_{hw} : 補助暖房量(開口部のみ)(MJ/day), Q_{ℓ} : 総熱損失(W), Q_{ht} : ヒータからの熱量(W), Q_L : 潜熱量(kJ/kg), Q_{loss} : 熱損失量(J), Q_j : 室内発生熱による熱取得(W), Q_{ℓ} : 熱伝達(壁, 床など)(W), Q_m : 空気攪拌装置の電力量(W), Q_{STW} : 開口部の貫流負荷(W/m^2), Q_{vs} : 換気(顕熱)による熱損失(W), Q_{TH} : 人体発生熱(W/m^2), Q_{vL} : 換気(潜熱)による熱損失(W), Q_{ST} : 蓄熱量(J), Q_{sc} : 日射量(熱伝達率)(W/m^2), Q_{SR} : 日射量(透過)(W/m^2), Q' : 有効取得熱量(W/m^2), q : 熱損失係数(W/K), $\dot{q}$: 熱流(W/m^2), $\dot{q}_{in}$: 流入熱量(W/m^2), $\dot{q}_{out}$: 流出熱量(W/m^2), r : 試験体幅(m), SR : 遮蔽率(-), ST : 日照時間(s), T : 時定数(s), TR : 日射透過率(-), t : 経過時間(s), Δt : 測定間隔(s), u_{max} : 最高速度(m/s), V : 容積(m^3), V_A : 流量(m^3), w : PCM重量(kg), W : 日射熱有効取得量(開口部のみ)(MJ/day), xi : 実測値(-), W_p : 日射熱有効取得量(PCMあり)(MJ/day), X_{in} : 室内の重量絶対湿度(kg/kg), X_{out} : 外気の重量絶対湿度(kg/kg), x : 照度計までの距離(mm), η : 窓の日射透過率(-), β : 日射遮蔽装置の傾斜角(deg), τ : 対象となる温度域(=30)(K), ρ : 比重(kg/m^3), μ : 天候補正係数(-), λ : 熱伝導率($W/m \cdot K$), φ : 削減率(%), $\partial\theta/\partial t$: 温度勾配(K/m), θ_d : 設定室温($^{\circ}C$), θ_{gelpcm} : ゲルPCM室温度($^{\circ}C$), $\theta_i(t)$: 室温($^{\circ}C$), θ_o : 外気温($^{\circ}C$), θ_{in} : 加熱室内温度($^{\circ}C$), θ_{is} : 初期の室温($^{\circ}C$), θ_{max} : 最高外気温($^{\circ}C$), $\bar{\theta}$: 平均外気温($^{\circ}C$), θ_{out} : 低温室温度($^{\circ}C$), θ_{PCM} : PCM室温度($^{\circ}C$), $\Delta\theta$: 室内外温度差(K), θ_{PB} : PB室温度($^{\circ}C$), θ_s : 試験体の表面温度差(K)

課題実習「テーマ設定シート」

作成日： 6 月 20 日

科名：建築施工システム技術科

教科の科目		実習テーマ名	
開発課題実習		再生可能エネルギーを利用して持続可能性を高めた 「500W 住宅」の開発	
担当教員		担当学生	
○建築施工システム技術科 石戸谷 裕二			
建築施工システム技術科 中渡 憲彦			
課題実習の技能・技術習得目標			
新規の環境調整システムの開発を通して、複合した技術・技能の習得とその活用能力（応用力、創造的能力、問題解決能力、管理的能力など）を養成します。具体的には、物理モデルの解析による環境調整システムの設計技術、木構造工事、内装工事、配管工事などを複合的に活用した製品の製造技術開発、試作品の環境暴露性能試験の情報を活用したドキュメント作成能力、発表能力の習得を目標にします。			
実習テーマの設定背景・取組目標			
実習テーマの設定背景			
化石燃料の大量消費と自然の再生能力を超えた排気物質の排出が、地球規模での気候変動の原因として取り上げられており、民生エネルギー分野とりわけ家庭でのエネルギー消費量抑制は喫緊の課題として共有されるようになってきました。本実習では、住宅における暖・冷房、給湯エネルギーの消費量抑制を目的とした新規の環境調整システムを適用することにより、一人当たりのエネルギー消費量が500W以下になるような住宅を実現することをテーマとして設定しました。開発をとおして、工学的な研究開発の実施法、および開発プロセスの管理能力を習得していきます。			
実習テーマの特徴・概要			
開発するシステムは、エラストマーでゲル化したn-パラフィン、高耐候性不織布などの新規機能材料を使用した、蓄熱窓ガラス、蓄熱型ブラインド、太陽光暖房器、日射遮へい装置、地中採熱管、太陽光集熱器など複数の新規技術を採用し、これらを組み合わせた環境システムを構築することで、目標である500W住宅を実現しようとするものです。個々の構成要素の制作および性能確認、システムの設計・制御技術の確立などを工学的な根拠に基づいて評価していきます。開発されたシステムは、ポリテクビジョンで発表し実際の住宅に適用して効果の確認も行なっていきます。			
No	取組目標		
①	建築を取り巻く諸問題を整理し、解決されるべき課題を明確にします。		
②	文献検索によって既往の研究業績を整理し、テーマの新規性を確認します。		
③	課題を解決するために必要な情報を収集し、分析・評価して合理的な手順や方法を提案します。		
④	装置を設計・制作する際、理論と技術を複合して取り組み、独自性のあるシステムを開発します。		
⑤	装置の性能評価を実験計画法に基づいて検討、実施します。		
⑥	日程、工程、予算、リスクを総合的に評価・判断して、進捗を調整します。		
⑦	各自が与えられた役割を果たし、グループのメンバーをフォローし合って作業します。		
⑧	図表を効率的に利用した分かりやすい報告書を作成し、発表会では時間内に伝えたい内容を説明します。		
⑨	専門家の意見も拝聴して、開発システムの逐次改善を図ります。		
⑩	5S（整理、整頓、清掃、清潔、しつけ）の実現に務め、安全衛生活動を行います。		