

博士論文

潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した
住宅の環境設計に関する研究

草間 友花

目次

第1章 序論

1.1 研究背景と目的	1
1.2 潜熱蓄熱材(PCM)の概要	5
1.3 既往の研究と本研究の位置づけ	8
1.4 本論文の概要	10
参考文献	

第2章 PCM 内装左官材の基本的物性能試験

2.1 PCM 内装左官材の開発	16
2.1.1 ふるいわけ試験と嵩比重測定試験	
2.1.2 PCM 内装左官材の強度試験	
2.1.3 PCM 内装左官材の施工性	
2.2 PCM 建材の基本的熱性能試験の検討	28
2.2.1 放射加熱による基本的熱性能試験	
2.2.2 対流加熱による基本的熱性能試験	
2.3 PCM 建材の固液相域における比熱の定式化	49
2.3.1 調和解析による比熱の定式化	
2.3.2 PCM 内装左官材を用いた平板試験体の非定常熱伝導計算	
2.4 摘要	57
参考文献	

第3章 PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

3.1 熱容量が室温変動幅と補助暖房量抑制に及ぼす影響	62
3.1.1 有効熱容量の定量化に関する実験	
3.1.2 間欠暖房時における熱容量の影響	
3.2 実証実験棟における PCM 内装左官材の効果	72
3.2.1 実験棟における蓄熱層内の熱挙動	
3.2.2 潜熱蓄熱材の施工位置が省エネルギーと環境改善効果に及ぼす影響	

目次

3.3	PCM 内装左官材を施工した実住宅における実測結果	100
3.4	摘要	108
	参考文献	
第4章 PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果		
4.1	日射遮蔽材の遮蔽性能に関する実験	112
4.1.1	遮蔽性能及び遮蔽材からの輝度の測定	
4.2	室内熱容量が日射遮蔽，外気冷房の冷房負荷抑制効果に与える影響	117
4.2.1	実証実験棟での試験概要	
4.2.2	日射遮蔽と外気冷房による室内環境改善効果の検討	
4.3	日射遮蔽と外気冷房による冷房負荷抑制効果	128
4.3.1	準非定常冷房負荷の計算法	
4.3.2	高断熱・高气密住宅における空調負荷の計算例	
4.4	摘要	135
	参考文献	
第5章 ハイブリッド壁暖冷房システム		
5.1	ハイブリッド壁暖冷房システムの基本的熱性能試験	141
5.1.1	ハイブリッド壁暖冷房システムの概要	
5.1.2	蓄熱量と放熱量試験	
5.1.3	ジオサーマルコイルによる土壌蓄熱	
5.2	太陽熱集熱器を設置した実証実験棟における暖房量抑制効果	157
5.2.1	システムの概要	
5.2.2	実証実験棟における暖房量抑制効果	
5.3	実験住宅における通年での環境測定	165
5.4	摘要	175
	参考文献	
第6章 PCM を適用した開口部システムの性能試験		
6.1	PCM 窓の熱的・光学的挙動に関する研究	181
6.1.1	エラストマーでゲル化した n-パラフィンの熱性能	
6.1.2	ゲル状 PCM を充填した二重ガラスにおける物性試験	
6.1.3	実証実験棟における PCM 窓の冬期性能評価	

6.2 PCM ブラインドによる日射利用空調システム	200
6.2.1 融点及び形態の異なる蓄熱材を充填した蓄熱ブラインドの熱特性	
6.2.2 蓄熱ブラインドの日射遮蔽効果及び夜間換気駆動力	
6.3 摘要	237
参考文献	
第 7 章 PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果	
7.1 非定常熱負荷計算の概要	242
7.1.1 数値計算の概要	
7.1.2 計算値と実測値の比較	
7.2 簡易熱箱モデルによる PCM 内装左官材の空調負荷削減効果	248
7.2.1 簡易熱箱モデルの概要	
7.2.2 連続運転時における融解挙動ごとの各地での顕熱負荷の算出	
7.2.3 寝室スケジュール運転時における融解挙動ごとの各地での 顕熱負荷の算出	
7.2.4 リビングスケジュール運転時における融解挙動ごとの各地での 顕熱負荷の算出	
7.3 断熱性能の違いによる効果	279
7.3 摘要	286
参考文献	
第 8 章 PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果	
8.1 物理モデルの概要	289
8.1.1 PCM 窓	
8.1.2 数値計算の概要	
8.2 PCM 窓の設置方法による検討	292
8.2.1 数値計算の概要	
8.2.2 PCM 窓内付時の顕熱負荷	
8.2.3 PCM 窓外付時の顕熱負荷	
8.3 PCM 窓の地域ごとの検討	304
8.4 摘要	307

目次

第 9 章 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計	
9.1 計算条件	311
9.2 寝室における PCM 建材の効果	313
9.2.1 東京	
9.2.2 札幌	
9.2.3 那覇	
9.3 リビングにおける PCM 建材の効果	317
9.3.1 東京	
9.3.2 札幌	
9.3.3 那覇	
9.4 各地での PCM 建材の負荷削減効果	330
9.5 札幌における連続暖房時の効果	333
9.6 摘要	337
第 10 章 総括	
10.1 本論文の総括	340
10.2 今後の課題	342

1. 序論

1.1 研究の背景と目的	1
1.2 潜熱蓄熱材 (PCM) の概要	5
1.3 既往の研究と本研究の位置づけ	8
1.4 本論文の概要	10

参考文献

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

私たちの暮らしは清らかな水や大気，多様な生態系や安定した気候など，豊かな自然環境という基盤の上に成り立っている^{1.1)}。豊かな地球の恵みは私たちに健康で文化的な生活だけではなく，様々な産業を与えてくれた。

1800年頃，産業革命の幕開けとともに電気やガスなどのエネルギーが普及していき，1900年移行，急激な人口増加，経済成長，科学技術の発達により「暮らし」のあり方に変化が生じはじめた。「暮らし=生存」に，様々な趣味や価値観が加わるとともに，快適な暮らしを追求するヒエラルキー^{1.2)}が形成されることとなった(図 1.1)。

この暮らしの変化は先進国に豊かな生活を与えたが，同時に枯渇性エネルギーの大量消費，貧富の差や環境破壊などの深刻な弊害は多岐に及ぶ。

元ノルウェー首相のブルントラント氏は「もし我々のために人間および自然の一部を救おうとするならばこのシステム全体を救わなければならない。これが持続可能な発展の本質である」と主張した^{1.3)}。

この『持続可能な発展』の4つの柱として「貧困とその原因の排除」「資源の保全と再生」「経済成長から社会発展へ」「全ての意思決定における経済と環境の統合」を提示した。

環境と開発に関する世界委員会(World Commission on Environment and Development)での報告書においては，われら共有の未来(Our Common Future:1987)として『持続可能な発展』は次のように定義されている。

『持続可能な発展とは，将来の世代が自らの欲求を充足する能力を損なうことなく，今日の世代の欲求を満たすような発展をいう。この語句には2つの鍵となる概念を含んでいる。一つは世界の貧困層の不可欠なニーズであり，もう一つは現在及び将来世代のニーズを満たすだけの環境の能力の限界についての概念である。』^{1.4)}

私たちは将来世代の資源を損ねることなく，現在直面している問題に向い発展を続けなければならない。

1. 序論

枯渇性エネルギーの大量消費を前提とした先進国の暮らし及び社会活動を見直す必要があることはいうまでもない。

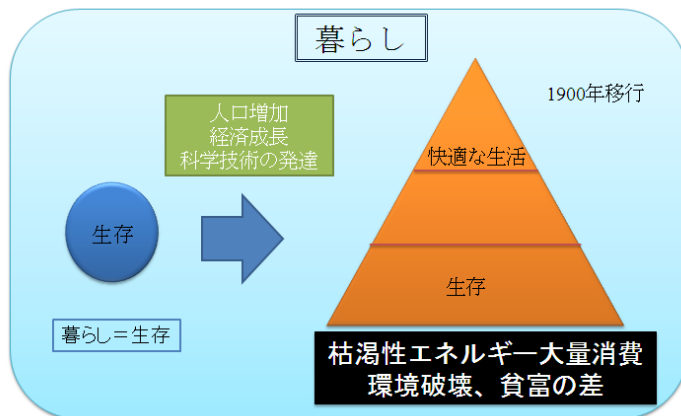
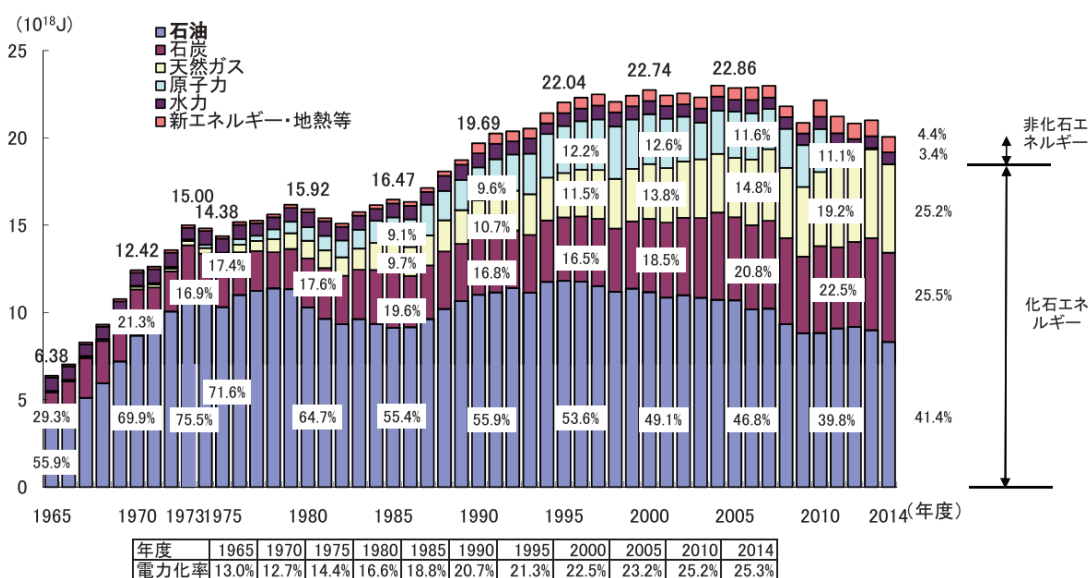


図 1.1 暮らしの変化

我が国の一次エネルギーの国内供給の推移を図 1.2 に示す。これまで、エネルギー消費の多くを石油・石炭をベースとした枯渇性エネルギーに依存してきた。天然ガスも 70 年代から増加傾向にあるが、これらの化石燃料の大量消費は大気汚染, 酸性雨, 地球温暖化という地球規模の環境問題につながっている^{1.5)}。



(注1)「総合エネルギー統計」では、1990年度以降、数値について算出方法が変更されている。

(注2)「新エネルギー・地熱等」とは、太陽光、風力、バイオマス、地熱などのこと(以下同様)。

出典:資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」を基に作成

図 1.2 一次エネルギー国内供給の推移^{文献 1.6 より引用)}

また、原子力は2011年3月の東日本大震災での福島第一原発の事故を契機として、国内の原子力発電が一時的に全停止になるなど、これまで危惧されていた放射性廃棄物や地域住民の反対などの様々な問題が浮き彫りとなった。

一方、期待が高まる太陽光やバイオマスなどを利用した新エネルギーは全体の4%と低く、今後の技術的な成長と普及が課題となっている。同時に、全体の省エネルギー化が求められる。

国内最終エネルギーの構成比を図1.3に示す。2014年度の最終エネルギー消費は13558PJであり、家庭部門は約14.3%を占めている。家庭部門とは、自家用自動車等を除く家庭消費部門でのエネルギー消費を対象とし、「世帯当たり消費量×世帯数」で表している^{1.6)}。

このことから、世帯当たり消費量の増減（原単位要因）や世帯数の増減（世帯数要因）が、家庭部門のエネルギー消費の増減に影響を与えており、世帯当たりの消費量は、エネルギー消費機器の保有状況・効率、所得、エネルギー価格、世帯人員、省エネルギー行動などに左右されることに加えて、短期的には気温変動の影響も大きく受けることが考えられる^{1.6)}。

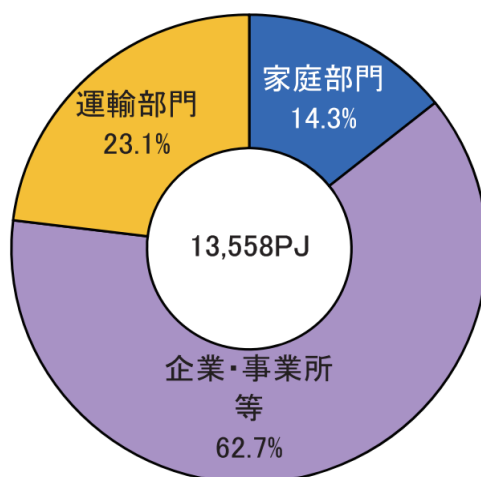


図 1.3 国内最終エネルギーの構成比 文献 1.6 より引用

図 1.4 に世帯あたりのエネルギー消費量原単位を示す。家庭部門では暖房、給湯が負荷の半分以上を占めており、全体の4分の1は空調負荷が占めているといえる。近年、木造住宅においても高断熱、高气密化や設備の高度化により、

1. 序論

冬期でも快適な室内環境が得られるようになってきたが、一般に建物の熱損失に比べて室内の熱容量が小さいため、日射による熱取得などで室温が過度に上昇する過昇温やそれに伴う過乾燥などの現象が指摘されている。

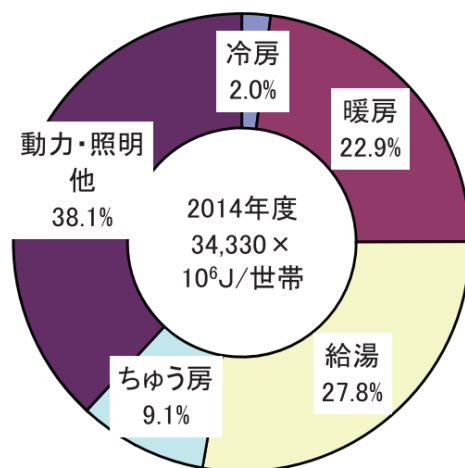


図 1.4 世帯当たりのエネルギー消費原単位と用途別エネルギー消費の推移文献 1.6 より引用

建築と設備の連携的技術によって木造建築物に熱容量を付与し、図 1.5 に示すような緩やかで快適な室内環境を維持しつつ、暖冷房エネルギー消費量の削減を実現することが求められている。

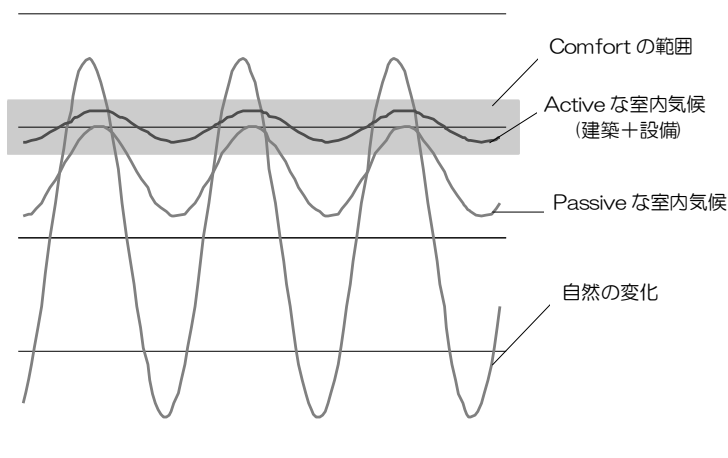


図 1.5 環境の変化文献 1.7 より引用

本研究では、日射のダイレクトヒートゲインや、夏季の冷涼な夜間外気などの自然エネルギーを空調エネルギーとして活用するために、新規の建築的(passive)な手法として潜熱蓄熱材(PCM)を混和した種々の建材を作製した。蓄熱建材は古くから土壁やレンガなどの顕熱蓄熱材が用いられてきたが、近年では状態変化の特性を利用した潜熱蓄熱材の研究が盛んに行われてきており、本研究で扱う建材についても、PCMを用いた建材を潜熱蓄熱建材としPCM建材と定義して呼称することとする。

これまでパッシブな手法を用いて建築物の熱性能を高める方法として、断熱材の厚みを増やすことが試みられてきたが、日中の過昇温や施工性、建築面積が限定されるなどの課題が挙げられる。PCM建材は、生活温度域近傍で状態変化を行うことにより、日中の過昇温を抑制することが可能である。また、日中蓄熱された熱を夜間に放熱することにより、空調負荷削減効果が期待できる機能建材である。

今後のパッシブ住宅の普及に向けて、自然エネルギーの有効利用するため、蓄熱建材が居住空間に与える影響について明らかにすることが求められている。

図 1.6 に示すような、自然と環境を調和させた手法から、設計者や居住者が蓄熱建材を用いてパッシブな環境設計が可能となるよう、本論文では、PCM建材を適用したパッシブな住宅の設計について提案する。

1.2 潜熱蓄熱材(PCM)の概要

潜熱とは、物質の相変化を生じさせる熱エネルギーの総称である。この潜熱を利用した蓄熱技術が潜熱蓄熱であり、蓄熱材の融解と凝固に伴い吸熱と放熱を繰り返す特徴を持つ。これは、一定温度での熱授受が可能であるなどの特徴を有し、組成によって融解温度を任意に設定することもできる(図 1.7)。

もっとも一般的に利用されているPCMは水であるが、無機系塩類やパラフィンも機能建築材料として有望視され、多くの研究が行われているが、それぞれ金属腐食や過冷却による劣化等が指摘されている。

1. 序論

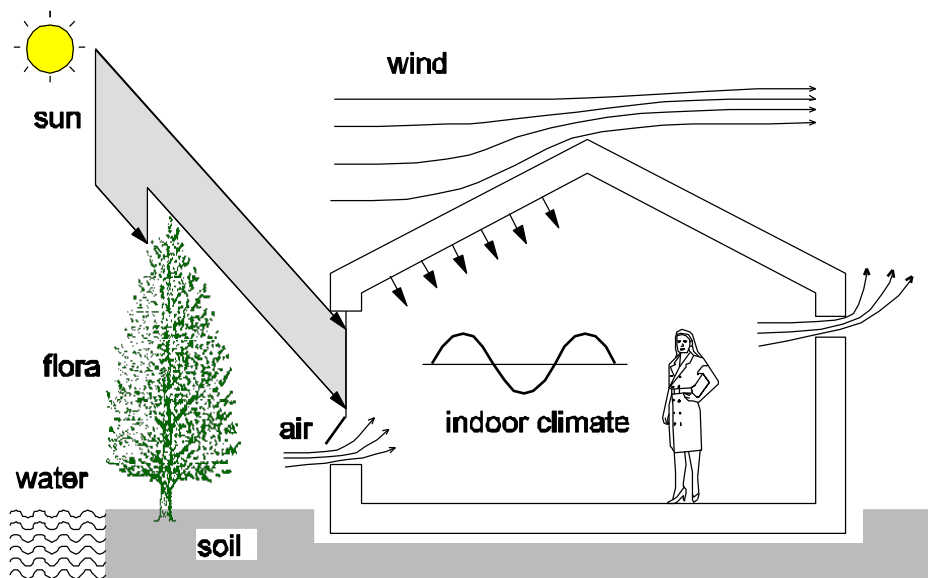


図 1.6 自然環境と室内気候 (文献 1.7 より引用)

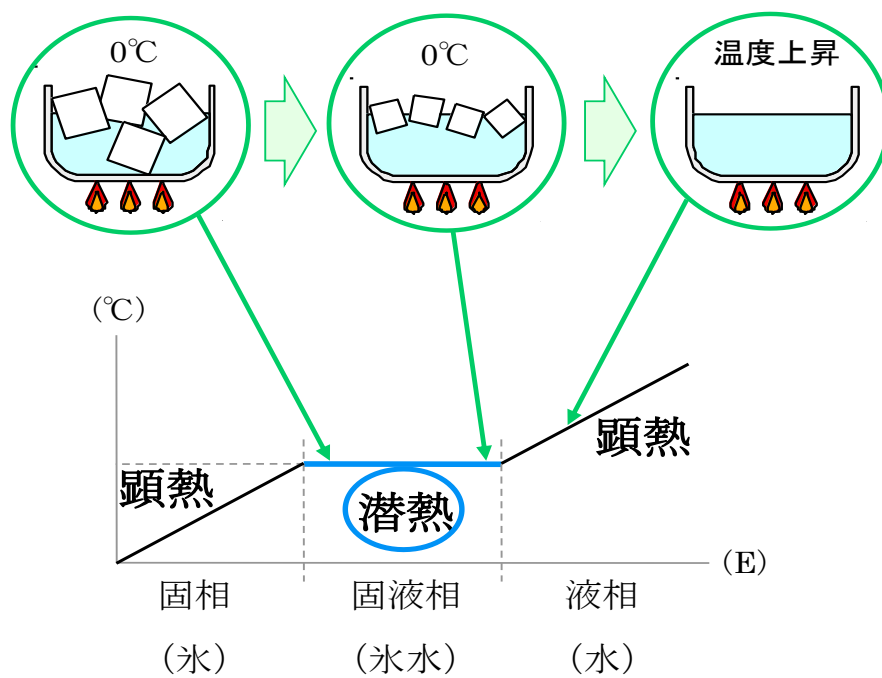


図 1.7 潜熱と顕熱

表 1.1 に主要な PCM を示す。本研究では、融点が生活温度範囲に存在し、パッシブ利用に適しているパラフィン系の PCM に着目して、研究開発を行っている(図 1.8)。パラフィンは、蝋燭の原料として知られており、融点の選択が可能であり、微生物に 100% 分解され、劣化しないという特徴がある。

表 1.1 主要な PCM 文献 1.8 より引用)

潜熱蓄熱材種	潜熱蓄熱材	融点 (°C)	潜熱量 (kJ/kg)
水	水	0	333.9
n-パラフィン	n-テトラデカンC14	5.9	229.8
	n-ペンタデカンC15	9.9	163.8
	n-ヘキサデカンC16	18.2	228.8
	n-ヘプタデカンC17	22	168.4
	n-オクタデカンC18	28.2	243.6
	n-ナノデカンC19	32.1	170.6
	n-イコサンC20	36.8	247.3
	n-デコサンC22	44	157
	n-テトラコサンC24	50.6	162
	n-ヘキサコサンC26	56.3	162
	n-オクタコサンC28	61.4	164
脂肪酸	カプリル酸C8(オクタン酸)	16.5	149
	カプリン酸	31.5	153
	ラウリン酸	44.2	178
	ミリスチン酸	53.9	187
	パルミチン酸	63.1	187
	ステアリン酸C18(オクタデカン酸)	69.6	203
糖アルコール	エリスリトール	119	340
	スレイトール	89	225
	セチルアルコール	51	224
無機水和物	硫酸ナトリウム10水和物	32	254
	塩化カルシウム6水和物	29.7	192
	チオ硫酸ナトリウム5水和物	48	197
	酢酸ナトリウム3水和物	58	264
	硝酸リチウム3水和物	30	255
無機塩水溶液	炭酸ソーダ水溶液	-3	308
	炭酸アンモニウム水溶液	-4	286
	塩化カリウム水溶液	-10	283
	塩化アンモニウム水溶液	-15	293
	塩化ナトリウム水溶液	-21	222
TBAB	テトラn-ブチルアンモニウムブロマイド	0~12	193~206

1. 序論

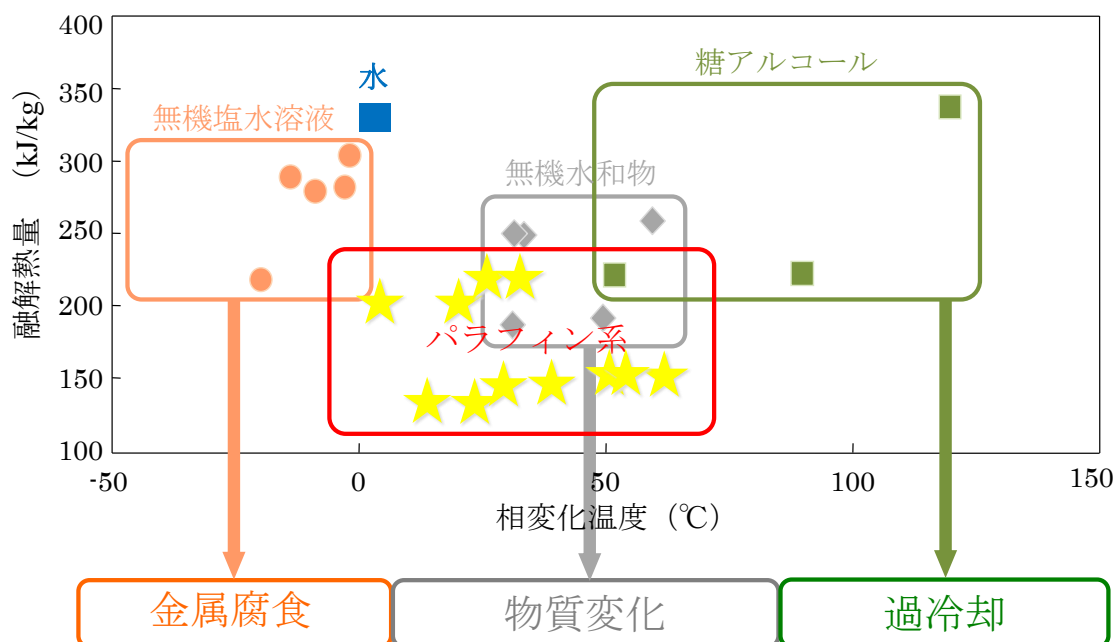


図 1.8 PCM の位置づけ 文献 1.8 より引用

1.3 既往の研究と本研究の位置づけ

居住空間における快適な室内空間の形成と省エネルギーの観点から、断熱性能に加えコンクリート躯体などで室内に熱容量を付与する構法の研究が注目されてきた^{1.9)~1.11)}。

2013年からの省エネ基準改正に伴い、建築物の高断熱・高气密化が全国的に進む一方、過昇温等の諸問題への対策は十分とはいえず、室内熱容量と断熱気密の適正化は今後ますます重要な課題になると考えられる。

これまでPCMを躯体や建材等に適用したPCM建材の研究が国内外で活発に行われており、日射熱や内部取得熱を有効利用するパッシブ蓄熱の分野としてはPCMボード^{1.12)~1.16)}や、PCMパネル¹⁷⁾を壁や天井に適用した実証研究が行われてきた。

近藤ら^{1.18)}はPCMの適用構法と効果の関係について検討を行い、木造建築物へ潜熱蓄熱壁体を適用することでRC造と概ね同等の室温変動抑制効果及び熱負荷平準化効果が得られることを明らかにした。

佐藤ら^{1.19)}は、数値計算により潜熱蓄熱材の適用方法と潜熱蓄熱内装建材の暖房負荷削減効果について検討を行い、PCM建材の施工面積や断熱性の違いに

よる影響について詳細に検討した。

また、武田ら^{1.19)}は潜熱蓄熱材壁で構成された空間における室温変動の解析について詳細な検討を行っている。

PCM 建材は一般に、相変化時に蓄放熱が行われる特性を持つことから、熱伝導性の高い容器が必要となる。潜熱蓄熱材を壁・床等に適用する既往の研究では、樹脂容器の内部に潜熱蓄熱材を含有させたペレット^{1.12), 1.16), 1.17), 1.21)}やマイクロカプセル^{1.22)~1.24)}を、ボード等に混入させることが多いが建材の構造上、潜熱蓄熱材への熱移動量が抑制されてしまうことが課題として挙げられる。

潜熱蓄熱建材を適用する構法には日射熱や内部発熱を効率的に蓄・放熱できることが求められるため、より蓄熱速度の速い方法での利用が不可欠である。

また、n-パラフィン^{1.19)}は炭素の直鎖型である特性を持つことから、炭素数によってその融解挙動が決定されてしまうが、材料開発により融点の設計が可能となるならば、室内環境に与える影響についてもまた更なる省エネルギー効果が期待できる。

一方、蓄熱建材の性能測定法は現在まで確立されておらず、基本的熱性能試験方法も規格化がなされていない。また、建材の基礎試験から室内環境に与えるパッシブ効果についても評価手法は明らかではない。近年では、PCM 単体の評価のみならず、母材も含めた PCM 建材全体の規格化の動きも高まってきている^{1.25)~1.27)}。

本研究では、複数の PCM 建材を開発し、その基本的熱性能を明らかにする。最初に、n-パラフィンをマイクロカプセル化したマイクロカプセル PCM を左官材料に混和させた PCM 内装左官材やハイブリッド壁暖冷房システム、n-パラフィンをエラストマーでゲル化したゲル状 PCM を開口部に適用する PCM 窓、PCM ブラインドを開発し、その基本的熱性能を明らかにした。

次に、PCM 内装左官材と PCM 窓を対象に、融点や融解幅などの融解挙動毎の効果を明らかにし、地域特性によって求められる融解形状について明らかにした。PCM 建材はダイレクトヒートゲインの有効利用を目的としているが、建築躯体で蓄熱されるか、開口部付近で蓄放熱されるかによりその効果は異なり、蓄熱方法の違いによる効果について PCM 内装左官材と PCM 窓に関して、その違いを明らかにする。

1. 序論

最後に、実居室の1室を対象にして、地域毎や方位ごとのPCM建材の効果を明らかにすることで、蓄熱建材を適用した住宅における環境設計に向けた資料を示した。

1.4 本論文の概要

本論文の概要を以下に示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、既往研究と本研究の位置づけを明確にしたのち、本論文の概要について述べた。

第2章では、n-パラフィンをカプセル化したPCM内装左官材を開発し、基本的な物性試験を示した。PCM内装左官材は、我が国の伝統的な内装左官材料に蓄熱性能を付与した内装仕上げ材料である。JISを参考に種々の物性試験を行った後、基本的熱性能の測定方法について提案した。また、融点や混和率ごとの熱性能を明らかにした。

第3章PCM内装左官材の冬季におけるパッシブ効果について明らかにした。室の温度低下率から、有効に機能する熱容量を有効熱容量と定義し、省エネルギー効果と室温変動抑制効果について検討を加えた。また、施工方法の異なる室を比較し、有効熱容量との関係について明らかにした。

第4章では、PCM内装左官材の夏季におけるパッシブ効果について明らかにした。実証実験棟を用いて、PCM内装左官材とパッシブな手法（日射遮蔽と夜間外気冷房）を組み合わせた時の効果について実験的に明らかにした。また、各地での日射遮蔽の効果についても検討を加えた。

第5章では、パッシブなPCM内装左官材とアクティブなシステム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、その基本的熱性能を明らかにした。PCM内装左官材と、夏季には太陽熱集熱器、冬季にはジオサーマルコイルと組み合わせ、自然エネルギー利用を測定したシステムについて、実証実験棟及び実験住宅レベルでの検討を行った。

第6章では、開口部にPCMを適用したシステムである、PCM窓とPCMブラインドを開発し、その基本的な物性を明らかにした。また、実証実験棟に設置した時の表面温度や室温等の挙動を観測し、省エネルギー効果や室内環境改善効果について検証した。

第7章では、非定常熱負荷計算により、PCM内装左官材の融解挙動ごとにおける顕熱負荷を算出して、PCM内装左官材に求められる最適融解挙動について検討した。地域特性を考慮しながら、通年でもっとも効果の高い融解挙動について、夏季・冬季ともに検討を行った。

第8章では、PCM窓の設置方法について検討し、地域特性についても検討を加えた。PCM窓は相変化の状態により、入射日射の特性が異なることから、各地におけるダイレクトゲインの特性について明らかにした。

第9章では、寝室及びリビング等の居室の1室におけるPCM内装左官材及びPCM窓の効果について検討し、地域ごとにPCM建材の効果を明らかにし、実環境における設計指針としての資料を示した。

第10章では、本論文で得られた知見を総括した。

1. 序論

参考文献

- 1.1) 環境省：環境白書，平成 21 年度版，循環型白書/生物多様性白書～地球環境の健全な一部となる経済への転換～，日経印刷株式会社，p. 2, 2009.6
- 1.2) 大野秀夫，堀越哲美，久野覚，土川忠浩，松原斎樹，伊藤尚寛：快適環境の科学，朝倉書店，1993.6
- 1.3) 小宮山宏，武内和彦，住明正，花木啓祐，三村信男：サステイナビリティ学 ①サステイナビリティ学の創生，東京大学出版会，p. 9, 2011.1
- 1.4) 内藤正明，加藤三郎，金子熊夫，加藤久和，竹本和彦，森口祐一，松下和夫：岩波講座 地球環境学 10 持続可能な社会システム，岩波書店，1998.5
- 1.5) 川合真一郎，山本義和：明日の環境と人間 地球をまもる科学の知恵，科学同人，p. 234, 2004.7
- 1.6) 資源エネルギー省ホームページ エネルギー白書 2016
- 1.7) 石戸谷裕二：室内気候設計資料(改定 2 版)，pp. 220 - 232, ピーエス(株)，2006.6
- 1.8) JSR 株式会社：潜熱蓄熱材のご紹介，機能化学品事業部
- 1.9) 伊藤直明，須永修通：ダイレクトゲインシステムにおける補助暖房量と蓄熱部位の熱挙動に関する実験的研究 一室内気候調整における熱容量に関する研究，1—，日本建築学会計画系論文報告集 第 377 号，pp. 1-8, 1987.7
- 1.10) 町田誠，土屋喬雄：木造住宅における潜熱蓄熱材の適用に関する研究，その 3 夏季冷房負荷低減を目的とした潜熱蓄熱材利用の数値解析と基本実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp. 77-78, 1998.9
- 1.11) 斎藤宏昭，土屋喬雄：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
- 1.12) 坪田祐二，射場本忠彦，金岡賢司，多和大介：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
- 1.13) G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella : A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, Building and Environment 59 (2013) , pp. 517-527, 2013.1

- 1.14) E. Rodriguez-Ubinas, B. Arranz Arranz, S. Vega Sánchez, F.J. Neila González : Influence of the use of PCM drywall and the fenestration in building retrofitting, *Energy and Buildings* 65 (2013), pp. 464-476, 2013.10
- 1.15) I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti : Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, *Building and Environment* 61 (2013), pp. 93-103, 2013.3
- 1.16) Maha Ahmad, André Bontemps, Hébert Sallée, Daniel Quenard : Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material, *Energy and Buildings* 38 (2006), pp. 357-366, 2006.4
- 1.17) Cecilia Castellón, Marc Medrano, Joan Roca, Luisa F. Cabeza, Maria E. Navarro, Ana I. Fernández, Ana Lázaro, Belen Zalba : Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, *Renewable Energy* 35 (2010), pp. 2370-2374, 2010.10
- 1.18) 近藤武士, 射場本忠彦, 坪田祐二, 鎌田元康 : 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
- 1.19) 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林禎彦, 石黒成紀 : 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
- 1.20) 武田仁 : 潜熱蓄熱材(PCM)の建物暖房への適用:—潜熱蓄熱材壁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 80(718), pp.1115-1123, 2015
- 1.21) 長野克則, 武田清香, 持田徹, 嶋倉一實, 中村卓司 : 粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究, 第 1 報 小型実験システムの構築およびその蓄放熱特性, 日本建築学会環境系論文集 第 579 号, pp. 21-28, 2004.5
- 1.22) Guobing Zhou, Yinping Zhang, Qunli Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di : Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates, *Applied Energy* 84 (2007), pp. 1068-1077, 2007.10
- 1.23) Shazim AliMemon : Phase change materials integrated in building walls : A state of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (2014), pp. 870-

1. 序論

906, 2014.1

- 1.24) Chi-ming Lai, Shuichi Hokoi : Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, *Energy and Buildings* 73 (2014), pp. 37-47. 2014.1
- 1.25) 芹川真緒, 佐伯智寛, 館林恵介, 崔榮晋, 前真之 : 潜熱蓄熱材の熱特性の測定法および熱的挙動の計算法に関する研究, パラフィンを対象とした見かけの比熱・熱伝導率の測定および非定常熱伝導計算による相変化挙動の再現(その 1), *日本建築学会環境系論文集* 82(740), pp. 853-862, 2017.10
- 1.26) 佐伯智寛, 黒木勝一 : 潜熱蓄熱材の性能評価方法に関する研究, (その 1) 熱物性値(見かけの比熱)の測定法の検討, *日本建築学会学術講演梗概集 2012(環境工学 II)*, pp. 201-202, 2012.9
- 1.27) 馬淵賢作, 黒木勝一, 佐伯智寛 : 潜熱蓄熱材の性能評価方法に関する研究, (その 2) 見かけの比熱及び蓄熱量の測定方法の検討, *日本建築学会学術講演梗概集 2013(環境工学 II)*, pp. 45-46, 2013.8

2. PCM 内装左官材の基本的物性能試験

2.1	PCM 内装左官材の開発	16
2.1.1	ふるいわけ試験と嵩比重測定試験	
2.1.2	PCM 内装左官材の強度試験	
2.1.3	PCM 内装左官材の施工性	
2.2	PCM 内装左官材の基本的熱性能試験の検討	28
2.2.1	放射加熱による基本的熱性能試験	
2.2.2	対流加熱による基本的熱性能試験	
2.3	PCM 建材の固液相域における比熱の定式化	49
2.3.1	調和解析による比熱の定式化	
2.3.2	PCM 内装左官材を用いた平板試験体の非定常熱伝導計算	
2.4	摘要	57

参考文献

2. PCM 内装左官材の基本的物性能試験

居住空間における快適な温熱環境の形成と省エネルギーの観点から、断熱性能に加えコンクリート躯体などで室内に熱容量を付与する構法の研究が注目されてきた^{2.1)~2.3)}。平成 25 年からの省エネ基準改正に伴い、建築物の高断熱・高气密化が全国的に進む一方、過昇温等の諸問題への対策は十分とはいえ、室内熱容量と断熱気密の適正化は今後ますます重要な課題になると考えられる。

これまで PCM を建築躯体や内外装材の一部に適用した PCM 建材の研究が国内外で活発に行われており、日射熱や内部取得熱を有効利用するパッシブ蓄熱の分野としては PCM ボード^{2.4)~2.8)}や、PCM パネル^{2.9)}を壁や天井に適用した実証研究が行われてきた。

佐伯ら^{2.10)}は伝導加熱法により種々の PCM 建材の熱物性を測定し、測定方法の妥当性と精度に関して検討を加えた。佐藤ら^{2.11)}は、数値計算により PCM の建材への適用方法と暖房負荷削減効果について検討を行い、PCM 建材の施工面積や断熱性の違いによる影響について詳細に検討した。また、近藤ら^{2.12)}は PCM の適用構法と効果の関係について検討を行い、木造建築物へ PCM 建材を適用することで RC 造と概ね同等の室温変動抑制効果および負荷削減効果が得られることを明らかにした。

一方、PCM 建材の性能測定法は現在まで確立されておらず、基本的な熱性能試験方法については、再現性が高い測定方法が求められている。また、PCM 建材の室内環境に与えるパッシブ効果についても評価手法は明らかではない。PCM 建材は一般に、相変化時に蓄放熱が行われる特性を持つことから、熱伝導性の高い容器が必要となる。PCM を壁・床等に適用する既往の研究では、樹脂容器の内部に PCM を含有させたペレット^{2.4), 2.8), 2.9), 2.13)}やマイクロカプセル^{2.14)~2.16)}をボード等に混入させることが多いが、建材の構造上、PCM への熱移動量が抑制されてしまうことが課題として挙げられる。また、PCM 建材を適用する構法には日射熱や内部発熱を効率的に蓄・放熱できることが求められるため、施工面積が広く、より室内側に PCM 層を設置できることが求められる。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

本研究では、PCM 層を最も室内側表面に施工でき、施工面積を拡張できる手法として、カプセル状の PCM を湿式左官内装材に混和した PCM 内装左官材の開発を行った。これは窓からのダイレクトゲインを有効に蓄熱できる新規の PCM 内装材であり、本章ではその基本的熱性能の試験方法について検討するとともに、測定結果から得られた PCM 内装材の比熱定式化に関する検証を行った。

2.1 PCM 内装左官材の開発

本研究では、PCM 層を最も室内側表面に施工でき、施工面積を拡張できる手法として、図 2.1 に示すような PCM 内装左官材の開発を行った。PCM 内装左官材は、カプセル状の PCM を湿式左官内装材に混和させた蓄熱性能を付与した内装左官材であり、写真 2.1 及び写真 2.2 に示すように、通常の左官内装材にカプセル状の PCM を加えて湿式内装左官施工を行う。仕上がりは、写真 2.3 に示すように、伝統的な日本の湿式内装左官材と同様である。

本研究で取り上げた PCM は比較的マイクロカプセル化し易いノルマルパラフィンを内包し、構成する炭素数によって生活温度近辺における融点設定が可能という特徴がある。母材は、通常の左官材料と同様に、石膏プラスターや軽量セメント、漆喰など、任意の材料を選定することが可能である。

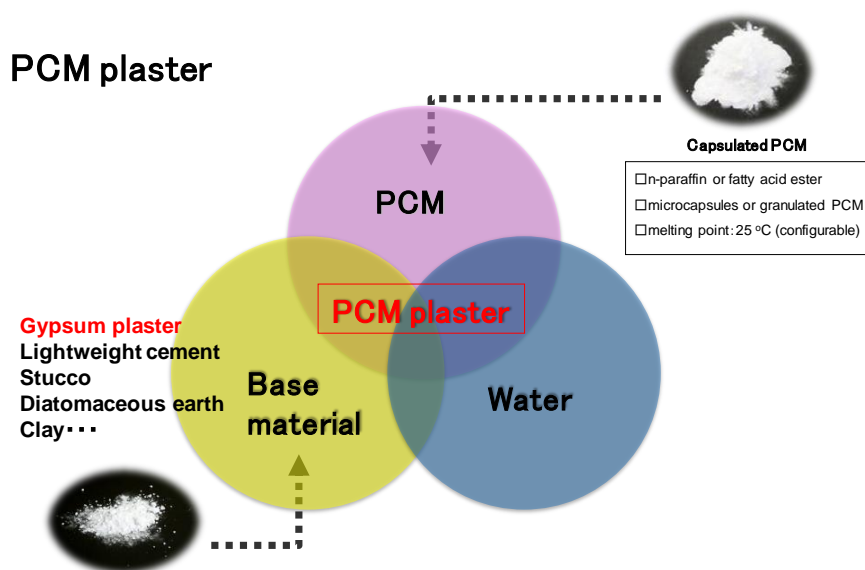


図 2.1 PCM 内装左官材の概念図

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験



写真 2.1 PCM 内装左官材の作製



写真 2.2 PCM 内装左官材の施工



写真 2.3 PCM 内装左官材の施工後

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

本節では、PCM 内装左官材の実用化に向けて、母材と PCM の混和率が材料の圧縮強度、乾燥収縮量やフロー値など施工性に及ぼす影響について明らかにする。

2.1.1 PCM 内装左官材のふるいわけ試験とかさ密度試験

本節で取り上げる PCM(FP-25:M 社製)の組成^{2,17)}は、n-オクタデカン(95wt.%)、n-ヘキサデカン(5wt.%)であり、融解温度は 25°C である。また測定結果より、真密度は 890kg/m³であった。

本実験で採用した PCM は容態がパウダー状、固形成分率は 70%程度でアクリル樹脂によりマイクロカプセル化されている。また、母材には通常の湿式内装左官施工で用いられる β 石膏(Plaster:P)、既調合軽量セメントモルタル(Lightweight Cement Mortar:LCM)、既調合石膏プラスター(Ready-mixed Gypsum Plaster:RGP)をそれぞれ採用した。

これらの内装左官材料にマイクロカプセル PCM を混和させることで蓄熱性能を向上させた種々の PCM 内装左官材を作製して、まずふるいわけ試験及びかさ密度試験により、材料的な性能を明らかにした。

a) PCM 内装左官材の試験体作製

β 石膏を母材とした場合の試験体の基本的な作製方法を以下に示す。NC 値とは、PCM 内装左官材の母材に対する水の質量比であり、PCM 混和率とは、PCM と母材との全重量に対する PCM の質量百分率である。

NC 値が高すぎると乾燥収縮が大きく割れやすいため、NC=1.0~1.3 の範囲で調合設計を行った。

混練容器に β 石膏と水を加え、泡立たせないようにヘラで約 7 分間練り混ぜる。練り混ぜる時間については、経験則から求めた。さらに PCM を加えて約 3 分間^{注 1)}程度、材料がペースト状になるまで練混ぜた。乾式工法への適応性の検討もできるよう、ペースト状にした材料を型枠(内法寸法 300×300×12mm)に流し込んで表面を均して自然乾燥させた(写真 2.4)。この際、乾燥収縮や亀裂等が生じないかを目視で経時観察した。

また、湿式工法に関わる検討では、同様にして作製したペースト状の材料をラズボードにコテで塗り付け、作業のし易さなどを検討するとともに、自然乾燥させて、ひび割れ等の発生がないかを目視で観察した(写真 2.5)。

β 石膏を母材とした湿式工法の検討では、硬化遅延剤としてクエン酸ナトリウムを使用し、0.5g/kg で 40～90 分程度の硬化遅延効果を確認した。 β 石膏を母材とした乾式工法用の PCM 内装左官材は混和率 10～40wt.%の範囲でひび割れなどの障害なく作成することができた。

また、 β 石膏及び下塗用既調合石膏プラスターを同量混ぜたものを母材とすることで、PCM 内装左官材の混和率 30 wt.%以下の範囲で、ひび割れ等の発生がないことを確認した。さらに、湿式工法施工時には混合軽量骨材を混和することで、材料のコテからの離れが良好になり施工性が向上した。ただし、施工時の温湿度環境が実験結果に与える影響については、今後さらなる検証が必要である。



写真 2.4 乾式工法



写真 2.5 湿式工法

b) 粉末材料のふるいわけ試験

図 2.2 に既調合軽量セメントモルタル(LCM)と既調合石膏プラスター(RGP)のふるい分け試験結果の比較を示す。RGP は 0.075mm 以下の微細な粒子が 70%以上を占めた構成となっており、LCM と比べて骨材の粒径が全体として小さいことがわかる。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

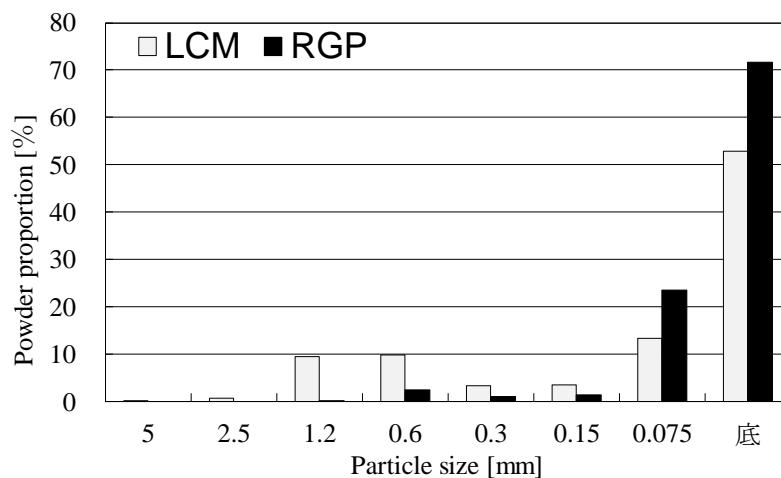


図 2.2 ふるい分け試験の結果

c) PCM 内装左官材のかさ密度試験

PCM 内装左官材の熱性能試験における蓄熱量算出時の基礎資料を得る目的で、成形した PCM 内装左官材のかさ密度を測定した。PCM, 粉末材料及び PCM 内装左官材のかさ密度のそれぞれの測定結果を表 2.1 に示す。表 2.1 中の No.2 は市販の石膏ボードであり、No.6~9 の母材は β 石膏(JIS R 9111), No.4 は下塗用既調合石膏プラスター(JIS A 6904), No.11 は β 石膏と No.4 の下塗り材を同量混ぜたものを母材とし、これに PCM を混和した。水の密度の温度特性^{2,18)}は、式(2.1)で近似して求めた。

$$\rho = -0.0027\theta^2 - 0.1534\theta + 1001.6 \quad (2.1)$$

ρ : 水の密度 [kg/m³]

θ : 水の温度 [°C]

単体の PCM は LCM に比べて比重が小さいので、PCM 混和率を高くするほど PCM 内装左官材の比重は小さくなる傾向があることがわかる。また、RGP に PCM を混和するとひび割れ・そりなどの品質の低下が目視により確認された。

これを解決するために、3 種類の硬化促進剤を採用して各試験体に添加し硬化時間を調整した。下塗りと仕上げの施工では硬化時間の要求が異なるため、遅延剤に関する適合実験及び施工段階ごとの最適な調合設計が必要となる。

表 2.1 嵩比重試験結果

No.	Name	Constitution	Density [kg/m ³]
1	PCM	潜熱型蓄熱材料 (mPCM)	455
2	P	β 石膏 (JIS R 9111)	815
3	LCM	既調合軽量セメントモルタル(LCM)	797
4	B	下塗用既調合石膏プラスター (JIS A 6904)	892
5	RGP	RGP	1377
6	P10	β 石膏 + PCM10 wt.%	732
7	P20	β 石膏 + PCM20 wt.%	686
8	P30	β 石膏 + PCM30 wt.%	642
9	P40	β 石膏 + PCM40 wt.%	591
10	B10	下塗用既調合石膏プラスター + PCM10 wt.%	828
11	BP30	下塗用既調合石膏プラスター + β 石膏 + PCM30 wt.%	680
12	LCM10	LCM + PCM10 wt.%	749
13	LCM20	LCM + PCM20 wt.%	707
14	LCM30	LCM + PCM30 wt.%	662
15	LCM40	LCM + PCM40 wt.%	623
16	RGP10	RGP + PCM10 wt.%	1219
17	RGP20	RGP + PCM20 wt.%	1103
18	RGP30	RGP + PCM30 wt.%	1025
19	RGP40	RGP + PCM40 wt.%	970

2.1.2 PCM 内装左官材の強度試験

a) 曲げ・圧縮試験概要

JIS R 5201^{2.19), 2.20)}に準拠して、 β 石膏(P)、既調合軽量セメントモルタル(LCM)、既調合石膏プラスター(RGP)を母材とした材齢 21 日の PCM 内装左官材の曲げ及び圧縮強度試験を行った(写真 2.6, 写真 2.7)。曲げ強度試験の試験体数は各 3 本、圧縮強度試験は各 6 片の平均値である。P20(β 石膏+PCM20 wt.%)は、断面欠損があったため、圧縮試験の内 1 片を除外した。

曲げ強度及び圧縮強度の試験結果をそれぞれ図 2.3 及び図 2.4 に示す。既調合軽量セメントモルタル(LCM)は β 石膏(P)と比べて硬化後の強度が高いため、曲げ強度が他の母材よりも高いことがわかる。下塗り用既調合プラスターの JASS 規格強度^{2.13)} (2N/mm²)と比較すると、LCM を母材とした PCM 内装左官材の各

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

強度は、混和率 30wt.%以下の範囲で内装材として十分な強度を有すると考えられる。

また、RGP 母材では混和率 10wt.%で JASS 規格強度^{2,21)}を満足する結果となった。 β 石膏は PCM を混和すると急激に強度が低下するのに対して、LCM ではその傾向が抑制されている。RGP は、 β 石膏を母材とした P シリーズと同様に、PCM を混和すると強度が低下する傾向がみられたが、PCM 混和率 10~40 wt.%の範囲でいずれも目視によるひび割れ、そりや剥離などの欠陥は見られなかった。また、RGP を母材とした PCM 混和率 30 wt.%の試験体で、硬化遅延剤添加と強度の関係を比較したところ、遅延剤を入れたものは入れなかったものに比べて強度が約 25%低下した。ここから、硬化遅延剤は内装材の強度を低下させる可能性があることが確認された。



写真 2.6 曲げ強度試験



写真 2.7 圧縮強度試験

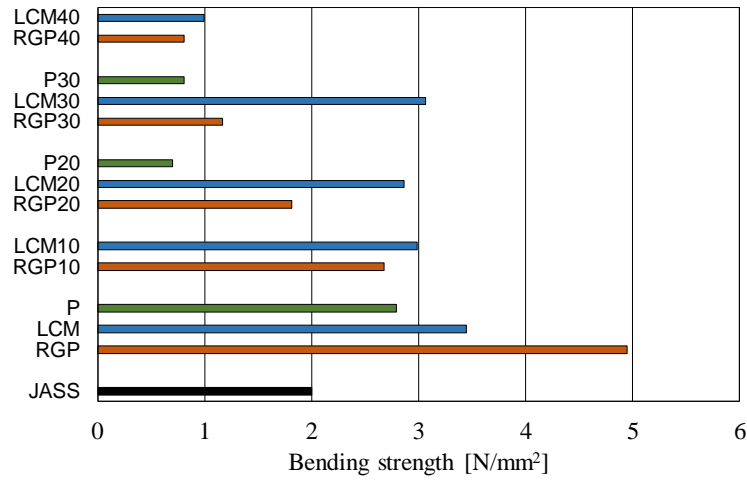


図 2.3 曲げ強度試験結果

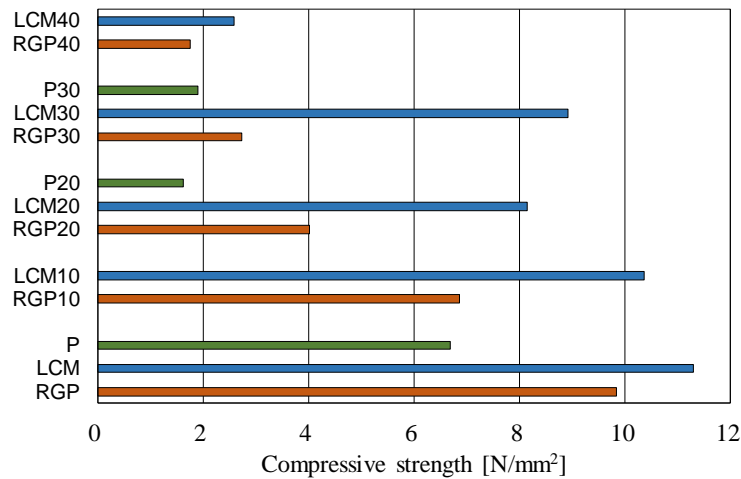


図 2.4 圧縮強度試験結果

b) PCM 内装左官材の乾燥収縮試験

セメントモルタル塗りは、建築物の各種構造と仕上げ材とを一体化し、建築物の寸法精度を向上する役割を果たしているが^{2,22)}、LCM は乾燥収縮によるひび割れや反りが生じやすいことが知られており、本研究で取り扱う PCM 内装左官材も例外ではない。そこで、LCM を母材とした PCM 内装左官材の乾燥収縮に関する性状を知る目的で、JIS^{2,20)}に基づいて乾燥収縮に関する経時変化を測定した。図 2.5 に各混和率における材齢ごとの長さ変化率を示す。図から、PCM 混和率を高くするほど材齢に伴う収縮が大きくなることがわかり、基準値以下に抑制するためには膨張剤の添加等の検討が必要となろう。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

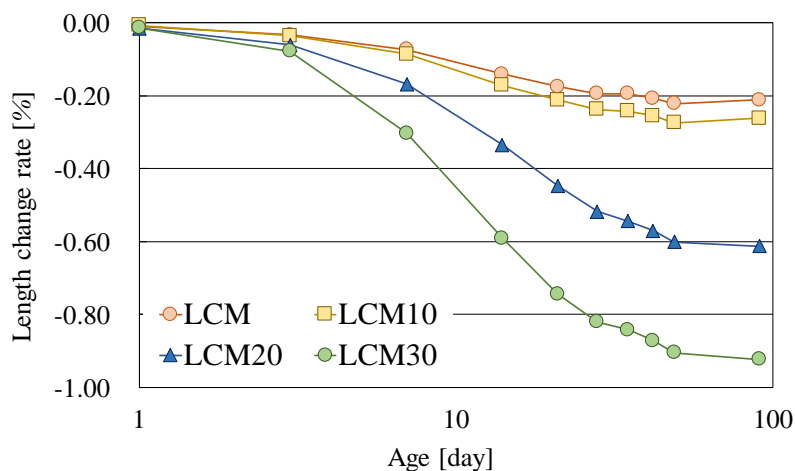


図 2.5 長さ変化(PCM 混和率比較)

2.1.3 PCM 内装左官材の施工性

a) スランプ試験

PCM 内装左官材の施工性を検討するためには、用途に応じた適切な水分量を検討する必要がある。ここでは、PCM 内装左官材に混合する水分量を検討するため、NC 値とフロー値の関係を定量化した。

スランプ試験は JIS A 6904^{2,20)}に基づき、写真 2.8, 写真 2.9 のように実施した。母材を LCM, RGP としたときの、各 NC 値におけるスランプ試験の結果を以下のように整理した。



写真 2.8 スランプ試験の様子①



写真 2.9 スランプ試験の様子②

LCM と RGP を母材としたときの各フロー試験の結果を図 2.6, 図 2.7 に示す。図から、LCM 母材のフロー値は NC 値と線形的な関係を有しており、PCM 混和率を高くするとフロー値は低下する傾向があることがわかった。

一方、RGP 母材では、PCM 混和率が高い程、水分量を多くすることが必要であり、NC 値とフロー値の間に比例的な関係が確認できなかった。これは、RGP の硬化速度が 60 分程度と LCM と比較して高いことが結果に影響を与えた可能性も考えられる。混練温度条件などの影響についても今後検討の予定である。

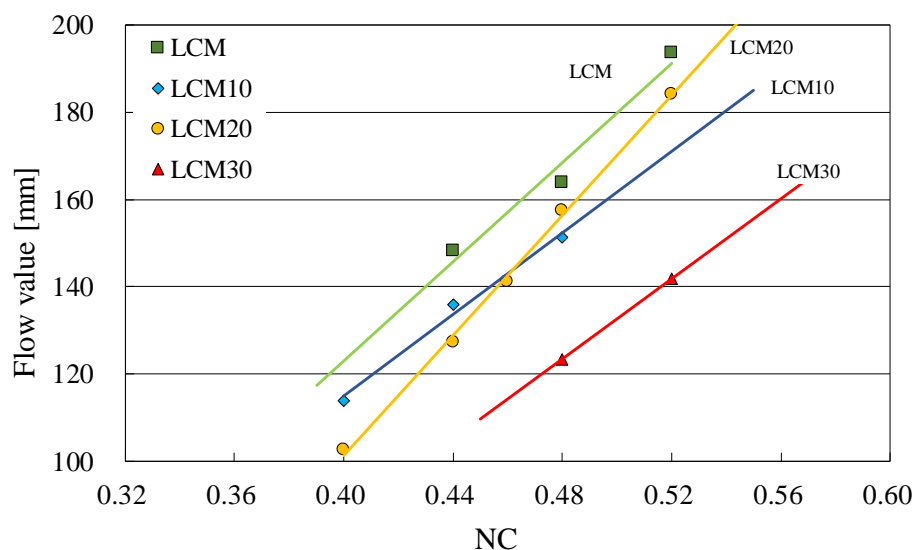


図 2.6 フロー試験結果 (LCM)

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

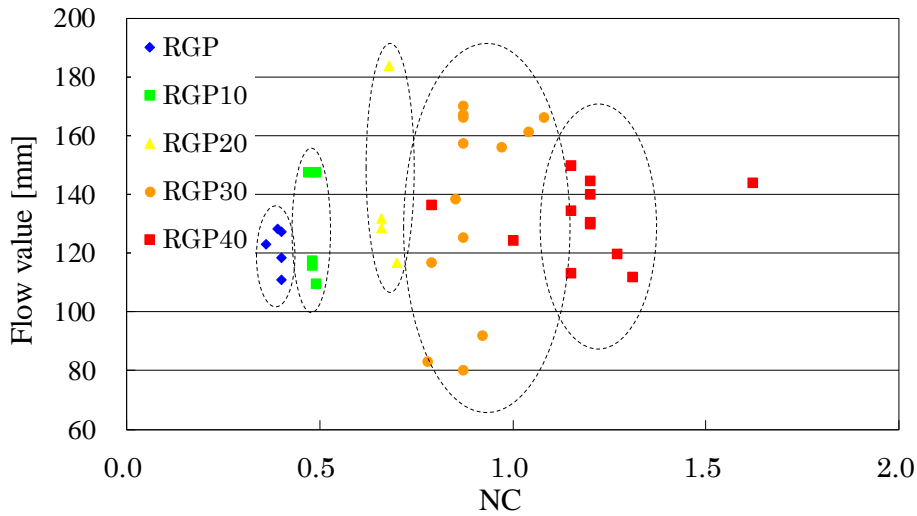


図 2.7 フロー試験結果 (RGP)

b) 左官施工時の施工性に関する主観的評価

PCM 内装左官材の、フロー値を含む施工に関連する要因を総合的に評価するために、主観的評価実験を試みた。なお、母材は図 2.6 で NC 値とフロー値の関係が概ね捉えることができた LCM を採用した。まず、フロー試験を行った直後の試験体の硬性、粘性、施工性について主観的申告による評価を実施した。尺度は、硬性、粘性、施工性とし、硬性及び施工性を 7 段階、粘性を 4 段階として、両極尺度を用いて評価を行った(図 2.8)。

図 2.9 にフロー値と主観的評価の結果を示す。硬性は、フロー値に対して線形的な相関関係を有し、高フロー域に向かうに伴って直線的に減少した。一方、粘性は、低フロー域と高フロー域において評価が低くフロー 140~180 で粘り感が極大となる。

同様に施工性に関する評価においても、フロー値が 160 で施工性が極大化する。図 2.10 は、硬性、粘性と施工性の関係を示しているが、いずれの指標とも施工性と密接な関係を有していることが示され、材の硬さや粘りが施工のしやすさに影響していることがわかる。

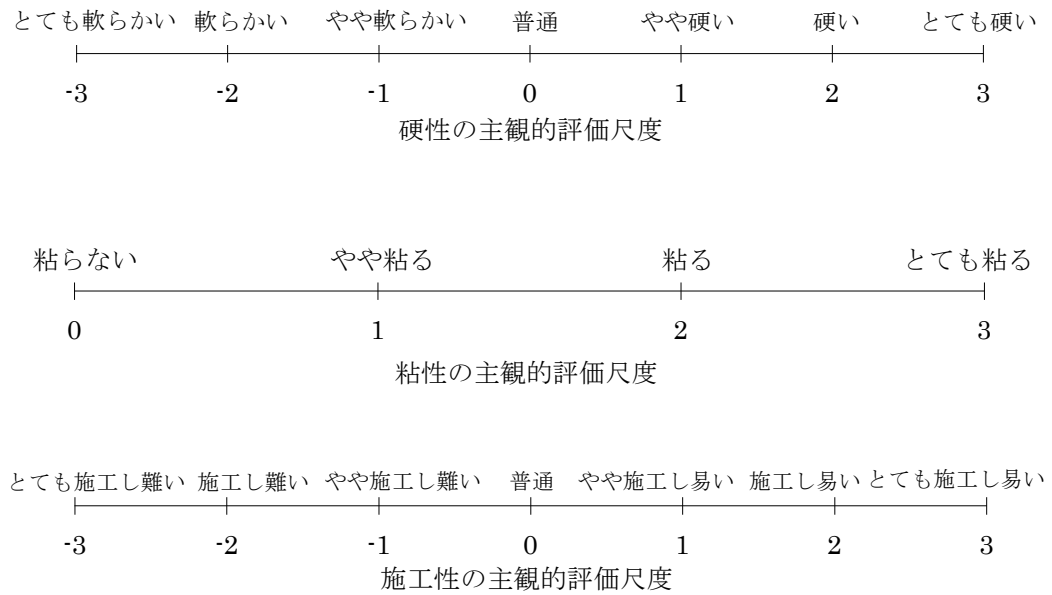


図 2.8 主観的評価の尺度

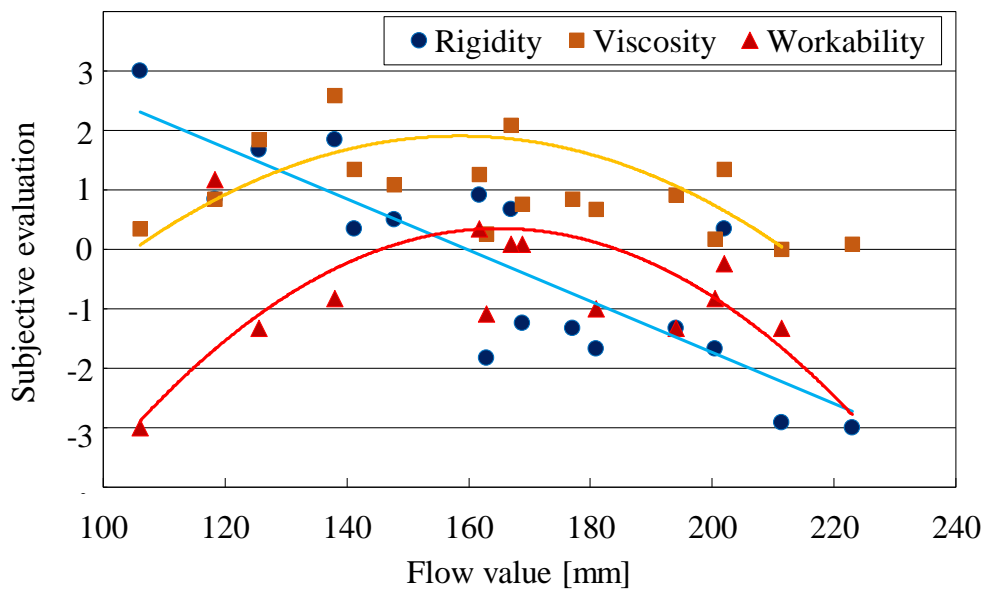


図 2.9 フロー値と主観的評価 (LCM)

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

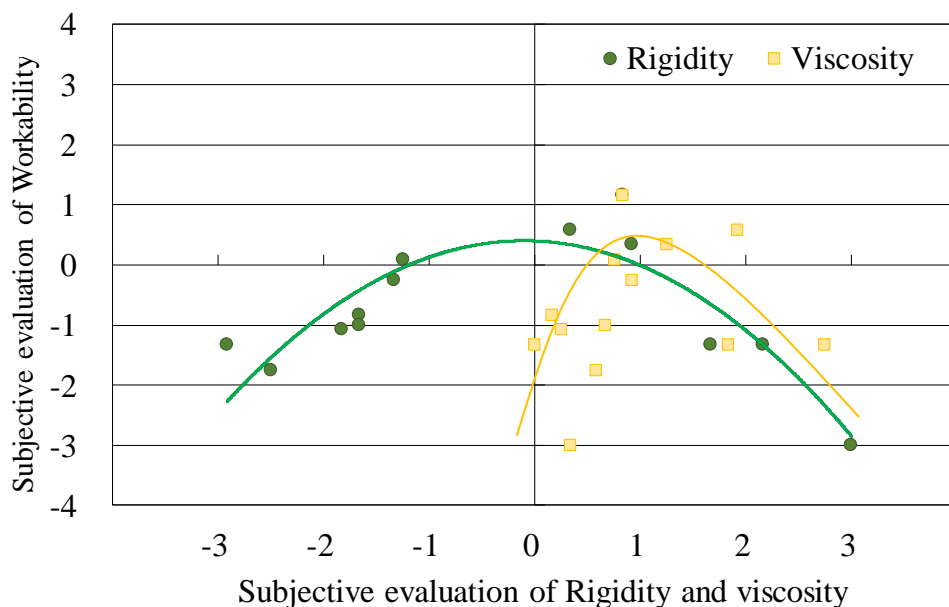


図 2.10 硬性・粘性と施工性の主観的評価 (LCM)

2.2 PCM 内装左官材の基本的熱性能試験の検討

蓄熱建材によるパッシブ効果は PCM の種類や使用方法，融点や蓄熱量，建築の熱性能や日射取得性能，居住者のライフスタイル等の影響を受けるため，総合的な評価指標の構築が必要となる。

一方で，蓄熱建材単体の蓄熱性能に関する評価手法もいまのところ確立されているとは言い難く，今後予測される省エネルギー住宅の普及に備えて，その性能評価手法を構築することが喫緊の課題となっている。

蓄熱建材の性能を評価する際には，使用する PCM の熱的な特性のみならず，これを構成材とする蓄熱建材の総合的な評価法が必要不可欠である。

これまで PCM 単体の熱性能を評価する方法として，示差走査熱量測定(DSC)による評価が広く用いられてきたが，母材の影響が考慮されていないため，PCM 建材全体の評価はできない。また，PCM 建材に関する様々な測定が行われているが，加熱方法や測定方法が異なり相対的に評価することは困難である。加熱方法を含めた測定方法に関して PCM 建材全体を評価する方法が求められている。

また，相変化領域における見かけの比熱の取り扱い，数値計算によって精度よく効果を予測する際に大変重要な要素となる。融点が多峰性状を有するもの

など、様々な形状の PCM 建材を精度よく近似する手法が求められている。

本節では、PCM 内装左官材の試験体サンプルを作成し、蓄熱量算出のための基本的熱性能を測定した。仕上用途での PCM 建材には、非平滑面を含む試験体表面へのセンサ設置が可能であることが不可欠であり、再現性が高く精度の高い測定方法を検討するため、放射加熱及び対流加熱による測定を検討した。

2.2.1 放射加熱による基本的熱性能試験

PCM 内装左官材の放射加熱による加熱・冷却実験を実施し、試験体への流入・流出熱流及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、放熱量など PCM 内装左官材の基本的な熱性能を検討した。

なお、下部から加熱を行うため、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混相域と定義した。

a) 放射加熱による熱性能試験の概要

PCM 内装左官材を型枠に湿式工法で施工し、蓄熱性能を有する平板試験体(300×300×12mm)を作製した。試験体の外観を写真 2.10 に示す。また、試験体の種類、名称、PCM の融点、混和率、嵩比重および平均厚さの測定試験結果を合わせて表 2.2 に示す。

PCM 内装左官材の母材は左官材料として広く利用されている既調合石膏プラスター(Ready mixed Gypsum Plaster : 以下, RGP)であり、これに融点が 20°C, 25°C のマイクロカプセル PCM(以下, mPCM)を 10, 20, 30 wt.%の混和率で調合した。PCM の融点は、年間を通したパッシブ利用ができるよう、暖冷房システムの設定温度を参考にして決定した。

また、融点 20°C と 25°C の mPCM を 1 : 1 の質量比で RGP に調合し、多融点型の PCM 内装左官材を作製した。表中の名称はそれぞれ母材、PCM 混和率、融点を示している。M は 2 種の融点を Mix させた材である。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

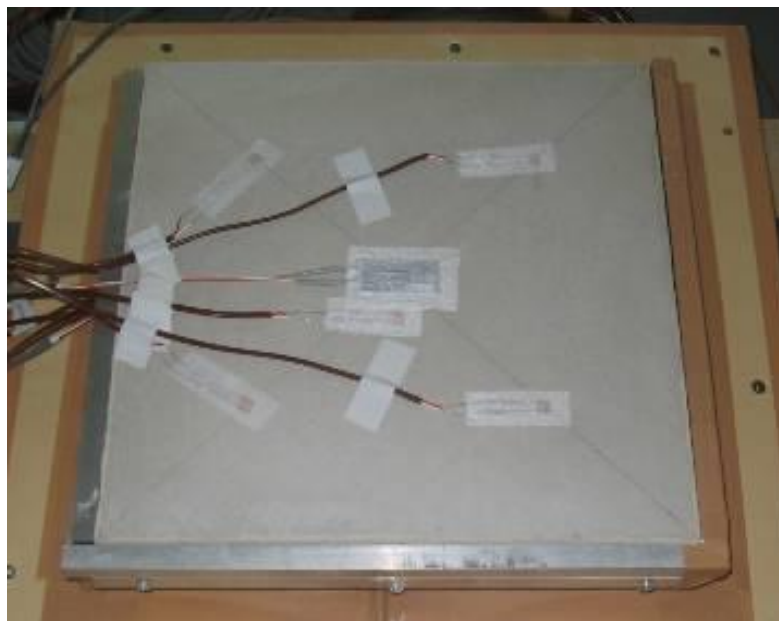


写真 2.10 熱性能試験体サンプル

表 2.2 放射加熱法による基本的熱性能試験体の概要

№	Name	PCM Mixing rate [%]	Melting point	Mass density	Thickness
				[kg/m ³]	[mm]
0	PB (Plaster Board)			710	12
1	RGP (Ready mixed gypsum plaster)			1,494	12.17
2	RGP1020	10	20°C	1,331	12.35
3	RGP2020	20		1,223	12.31
4	RGP3020	30		1,084	11.33
5	RGP1025	10	25°C	1,320	12.51
6	RGP2025	20		1,243	12.09
7	RGP3025	30		967	11.75
8	RGP10M	10	20°C, 25°C (各50%wt)	1,300	12.23
9	RGP20M	20		1,193	13.14
10	RGP30M	30		1,115	12.75

蓄熱建材は融点近傍で比熱が変化するため、加熱面と試験体の温度が乖離する領域における性能を精確に把握するには、加熱面と試験体表面が接触しない放射または対流による加熱が適している。

本節では、表面が非平滑面である試験体においてもセンサ設置が可能な放射加熱による試験法を提案し、これを放射加熱法と呼称する。試験体の上下表面にシート状 T 型熱電対を各 5 点、熱流計(英弘精機：MF-180)を各 1 点取り付け(同系色のテープを表面貼り)、電熱式面状ヒータ (シリコンラバーヒータ：オーエムヒーター) の上部に配置して恒温室(20°C 一定)内に設置した。熱電対の設置位置を図 2.11 に、加熱装置の概要を図 2.12 に、示差走査熱量測定(DSC)による熱分析結果を図 2.13 に示す (※データは JSR(株)から提供いただいた)。

試験体温度が固液相を含む温度帯で推移し、かつ昇温速度が 10min./K 程度となるよう面状ヒータの電圧を一定(38~40V)に保ち、試験体への流入・流出熱流が定常状態になるまで加熱した。上下の表面温度と熱流は 1 分間隔で測定して、データロガー(GL800：グラフテック)に記録した。

また、周囲空気の滞留による熱流測定値の変動を抑制するため、ヒータと試験体の間に 36 mm の間隔を空け水平面から傾けて設置し、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。試験体への流入・流出熱流の測定結果の例を図 2.14 に示す。蓄熱量は、試験体の上下両表面の熱流計で測定した流入・流出熱流の差を用いて、式(2.2)より算出した。

試験体の温度は上下の表面温度(図 2.11)の平均値で代表させた。図 2.14 に示す加熱開始から定常状態(試験体温度変動が 10 分間で 0.1°C 以内)に至るまでの流入・流出熱流の挙動を見ると、PCM の混和率の高い RGP30M は、RGP(ブラック)と比較して、定常状態に至るまでの時間が長いことがわかる。

なお、流入・流出熱流は、試験体の上部及び下部に設置した熱流計より算出した。

図 2.15 に比熱及び潜熱量の評価方法を示す。固相域、液相域における PCM 内装左官材の等価的な比熱は、蓄熱量と温度の関係から式(2.3)で定義し、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た。

一方、固液相域の積算蓄熱量を算出することで試験体の潜熱量を算出した。潜熱量は固液混相域の蓄熱量から固相域、液相域の比熱と温度差 (固液混相域の温度幅の 2 分の 1 の値) の積を差し引いて式(2.4)より求めた。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

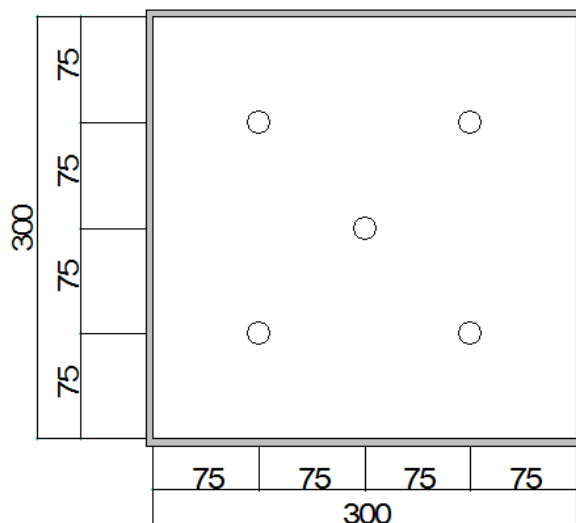


図 2.11 温度測定点

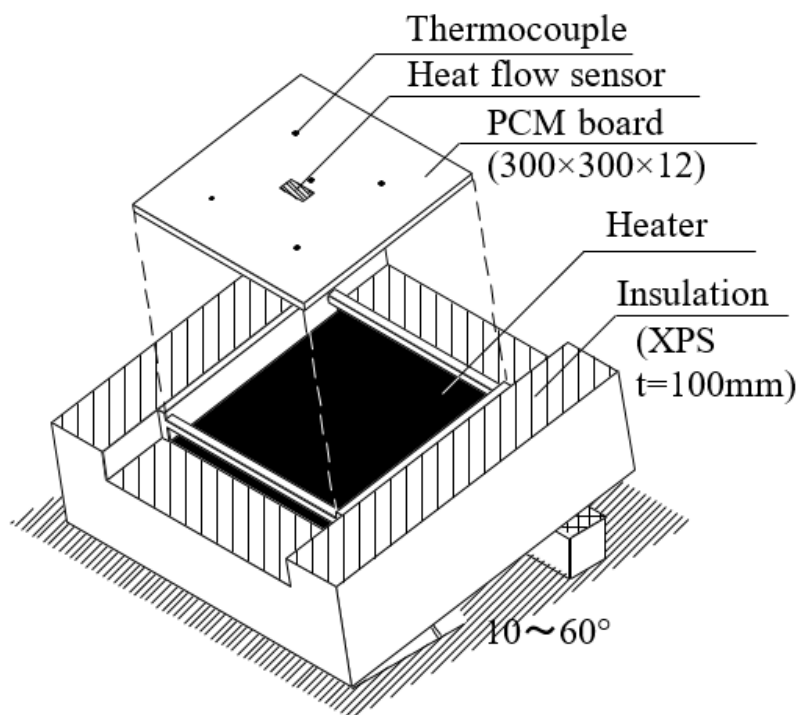


図 2.12 試験装置概要

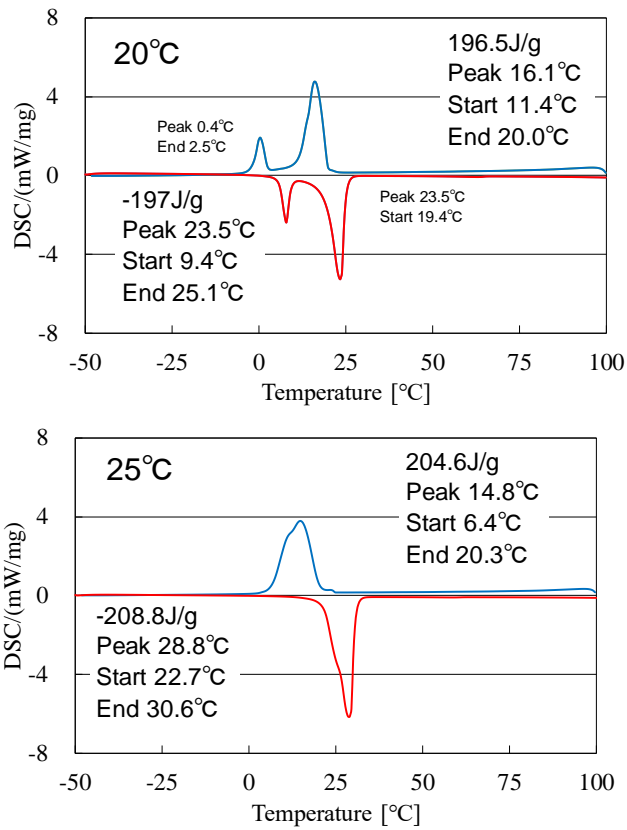


図 2.13 DSC チャート (※JSR(株)提供)

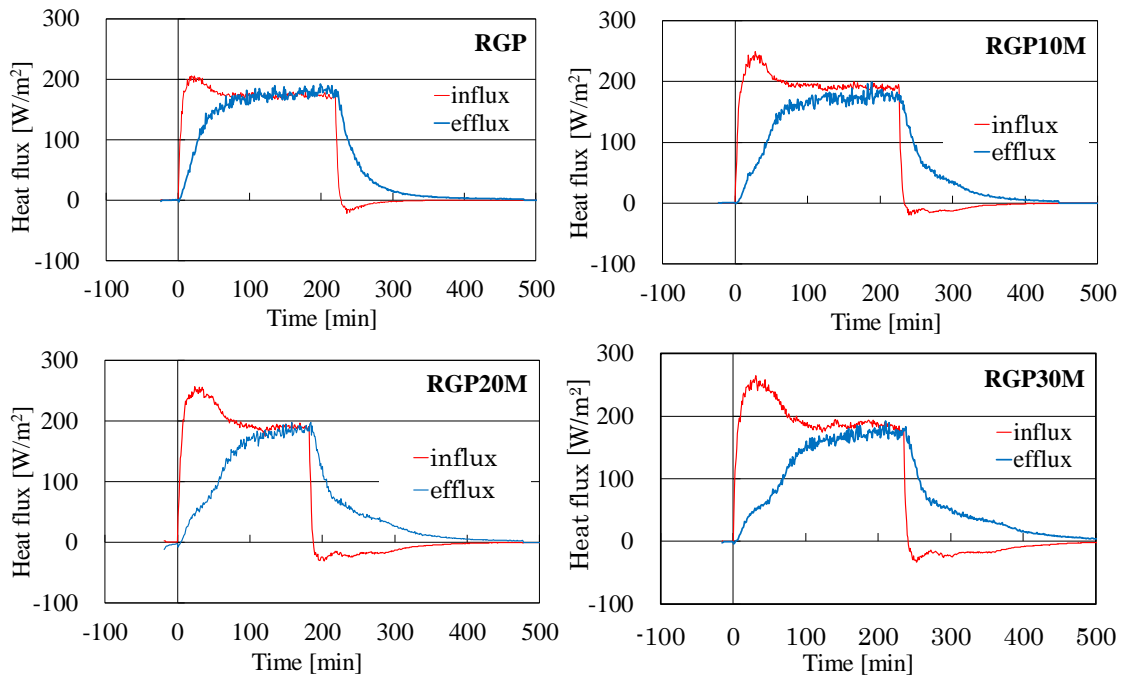


図 2.14 流入熱流と流出熱流

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

$$Q_{ST} = \frac{1}{\rho \cdot l} \cdot \sum (q_{in} - q_{out}) \Delta t \quad (2.2)$$

$$c_{PCM}(\theta) = \frac{dQ_{ST}}{d\theta} \quad (2.3)$$

$$Q_L = Q_{ST} - \frac{\Delta\theta}{2} (c_s + c_l) \quad (2.4)$$

Q_{ST} : 蓄熱量 [J/kg]

Q_L : 潜熱量 [J/kg]

ρ : 比重 [kg/m³]

l : 試験体の厚さ [m],

q_{in}, q_{out} : 流入出熱量 [W/m²]

Δt : 時間間隔 [s]

c_{PCM} : PCM の比熱 [J/(kg · K)]

c_s : 固相域の比熱 [J/(kg · K)]

c_l : 液相域の比熱 [J/(kg · K)]

θ : 温度 [°C]

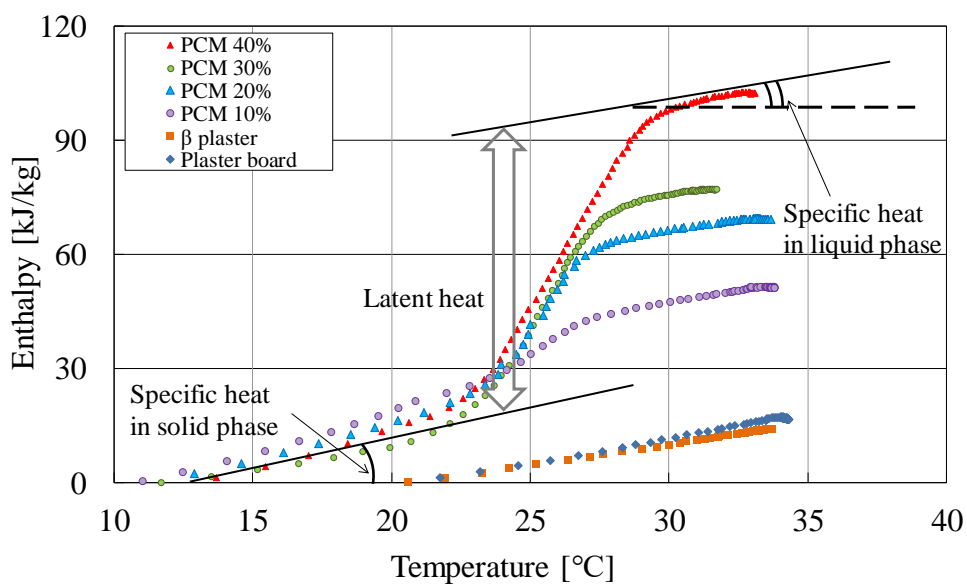


図 2.15 蓄熱量測定結果

b) 放射加熱による熱性能試験結果

図 2.16 は PCM 混和率を 10, 20, 30 wt.%とした時の, PCM 内装左官材の蓄熱量を示している。融点は 20°C, 25°C, 20°C と 25°C を 1 対 1 の比率で調合したものをそれぞれ示している。

一方, PCM を含まない母材(RGP) の蓄熱量を基準とした時の, 各 PCM 内装左官材の蓄熱量の比率を図 2.17 に示す。図 2.16 から, 試験体の蓄熱量は PCM の融点に関らず PCM の混和率に依存しており, 図 2.17 から蓄熱量は PCM 混和率と線形的な関係を有していることが確認できた。

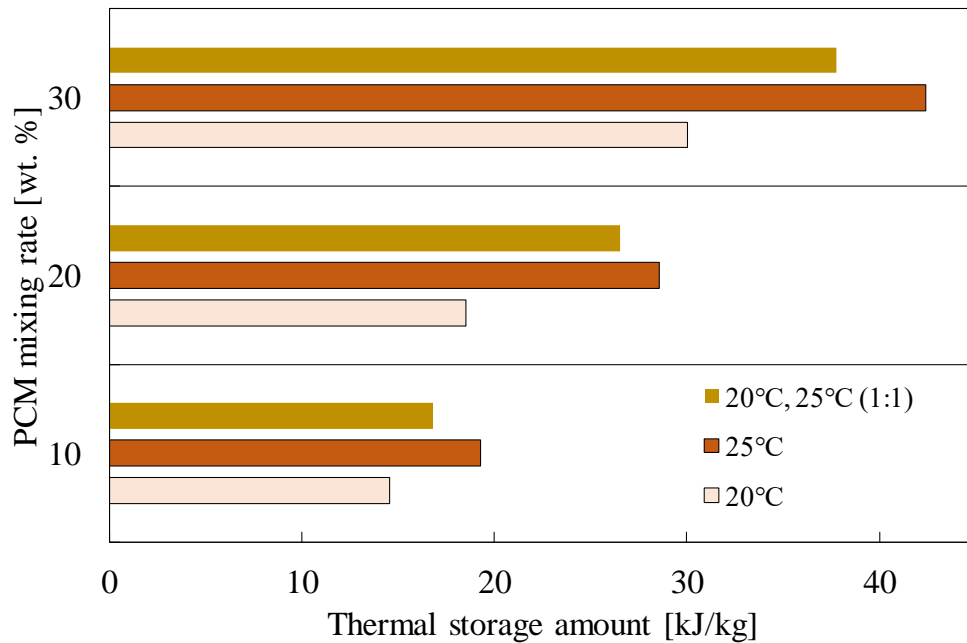


図 2.16 混和率ごとの蓄熱量

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

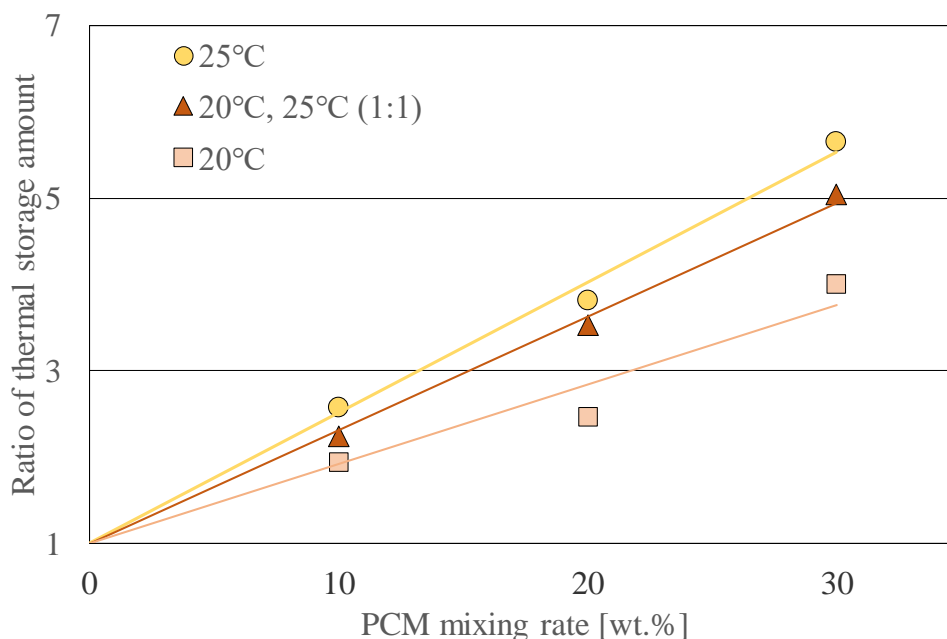


図 2.17 混和率に対する蓄熱量

図 2.18 に PCM 内装左官材の蓄熱量を、試験体温度が 40°C の時の蓄熱量で無次元化して示す。横軸は蓄熱材の融解温度であり、測定を開始した時(試験体温度約 5°C)の無次元蓄熱量はゼロである。

図から、蓄熱量の増加分布は調合した PCM の融解温度によって異なることが分かる。これは mPCM の融点の相違により相変化の開始温度が異なることに起因している。単一の mPCM を混和した PCM 内装左官材(RGP2020, RGP2025)の蓄熱量はそれぞれ融解温度を超えてから急激に増加する傾向を示しているが、二種の mPCM を混合した多融点型 PCM 内装左官材では、それぞれの PCM 内装左官材の中間的な変化の様相を示している。融点の異なる mPCM の調合によってコア部分の n-パラフィンの組成を変えることなく等価的に融点を変化させる手法の可能性が示唆される。

本節では、融点 20°C と 25°C の混合物を作製しその性質を明らかにしたが、試験体の基本的熱性能をマクロ的に捉えた時に、任意の融解温度幅の混合物においても同様に、それぞれの PCM の融解挙動特性が常に中間的な性質を示すかについて本結果のみから言及することはできない。

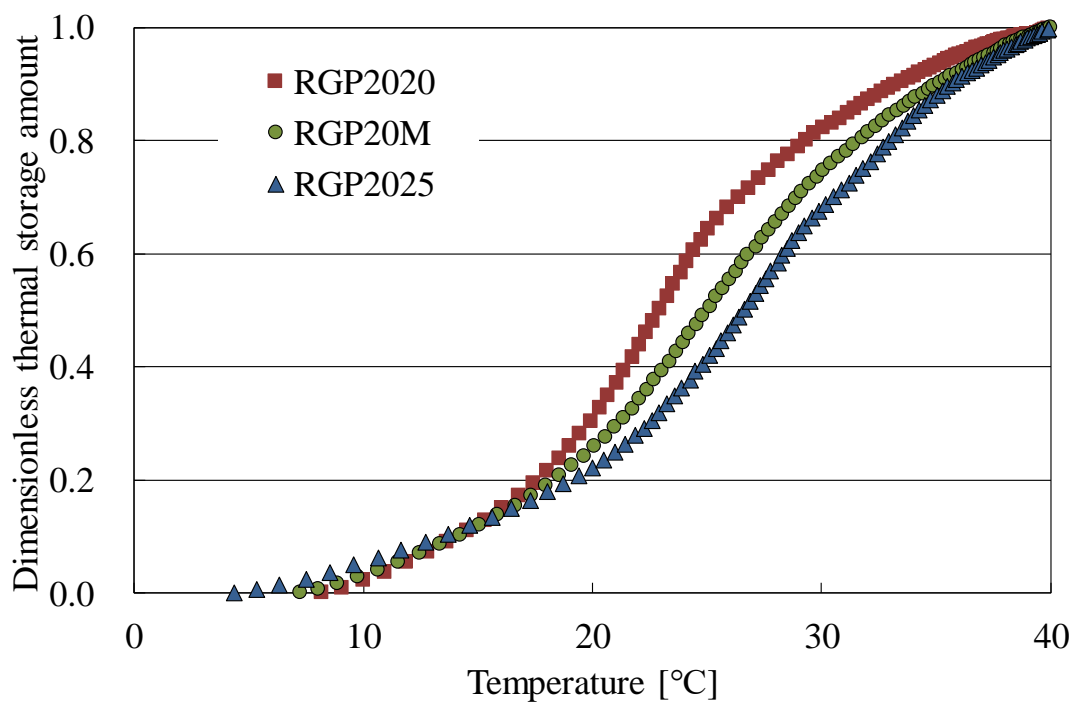


図 2.18 無次元蓄熱量

融点 20°C および 25°C の PCM を等量混合して RGP に 20wt.% 混和した試験体 (RGP20M) の表面温度の実測例を図 2.19 に示す。試験体の表面温度は図 2.11 で示した測定点から得られた上部及び下部での測定結果の平均値である。また、それらの値の平均を試験体の平均値として図に示した。

加熱開始後の上部表面温度は 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る。本実験によって得られた PCM 内装左官材の基本的熱性能を表 2.3 に示す。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

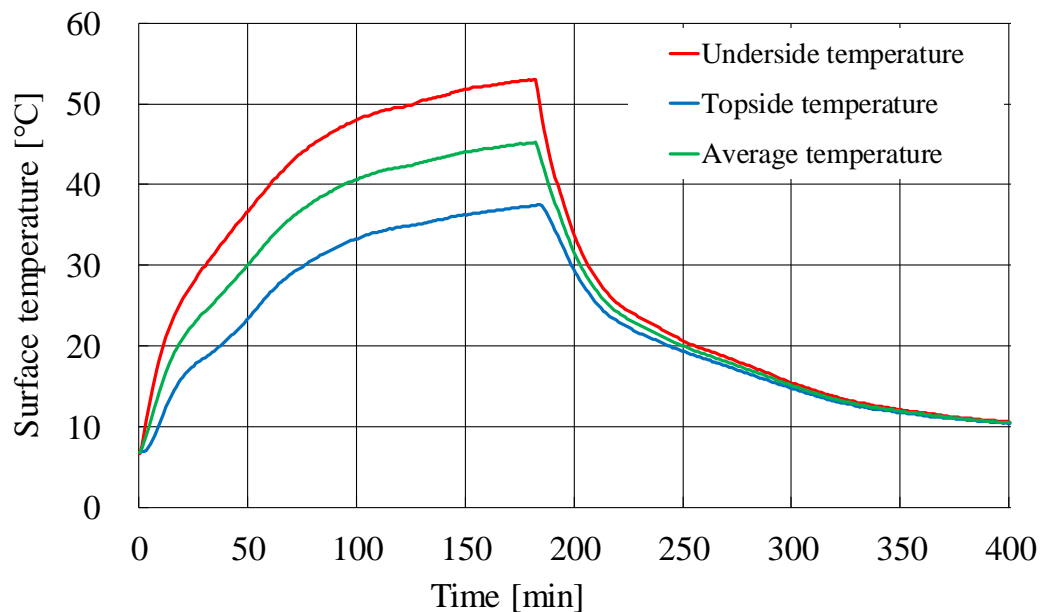


図 2.19 表面温度 (RGP20M)

本節で提案した放射加熱法は、レファレンスとして石膏ボード(PB)の物性値を本測定法で測定し、既知^{2,23)}の値(比熱, 熱容量)と同程度の値を示していることを確認している(Table2 内の PB)。本節で提案した放射加熱法は、加熱時に限定すれば、測定方法・加熱方法による測定誤差は少ないと考える。次節以降では、対流加熱による試験方法を実施する。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

2.2.2 対流加熱による基本的熱性能試験

本節では、再現性及び汎用性が高い PCM 建材の測定方法を見出すために、昇温速度の影響を考慮した対流加熱による熱性能試験法の検討を行った。

既往の研究^{2,24)}では、DSC の昇温速度の違いに着目し、PCM の熱物性を測定したが、PCM 建材全体の性能測定や実際の建築物で生じる昇温速度の影響については検討しておらず、PCM 建材の熱性能試験は現在までのところ確立されているとは言えない。本節では、対流加熱による蓄熱建材の昇温速度や温度幅について検討を行う。

a) 対流加熱による熱性能試験の概要

PCM 建材の熱性能を測定するために PCM の混和率を変えながら、表 2.4 に示す 4 種 8 体の試験体(270×270×12mm)を作製した。なお本節で取り扱う PCM はオクタデカンを内包した構造を持つ粒状 PCM で、母材には石膏を用いた。前述の放射加熱による試験とは粒径が異なるが、一般的な母材とカプセル化した PCM を混和させている構成であり、物性に大きな違いはないものと考えられる。試験体名称の g は粒状 PCM (granulated PCM)を示しており、P は石膏を示している。数字は左から、融点と PCM 混和率を示している。

試験に用いた熱電対と熱流計の設置位置を図 2.20 に示す。青い部分が熱流計を示しており、右図の赤い点は熱流計の設置箇所を示している。また、写真 2.11 に示す。片面にシート型熱電対(VT01-999 ; ナガノ)を 3 点貼り付けた試験体に、熱電対が接合面に当たるように注意しながら混和率が等しい 2 体の試験体を重ねた。

また、接合後の試験体は両表面に熱流計(L33A;江藤電気)を設置し、試験体への熱流束と表面温度を計測した。試験体温度は熱流計 2 点及び熱電対 3 点から得られた 5 点の温度測定値の平均値として与えた。

表 2.4 対流加熱による基本的熱性能試験体概要

No.	Name	PCM mixing rate	Weight	Size			Density
		[%]		Width	Height	Thickness	
			[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]
1	Blank 1	0	1,096	270	267	11.04	1,377
2	Blank 2		1,123	267	267	12.07	1,305
3	g26P10-05	10	1,115	270	266	12.52	1,240
4	g26P10-06		1,093	267	270	12.2	1,243
5	g26P20-05	20	1,065	268	270	12.72	1,157
6	g26P20-06		1,076	267	266	12.84	1,180
7	g26P30-02	30	1,111	270	268	13.11	1,171
8	g26P30-03		1,047	270	267	12.91	1,124

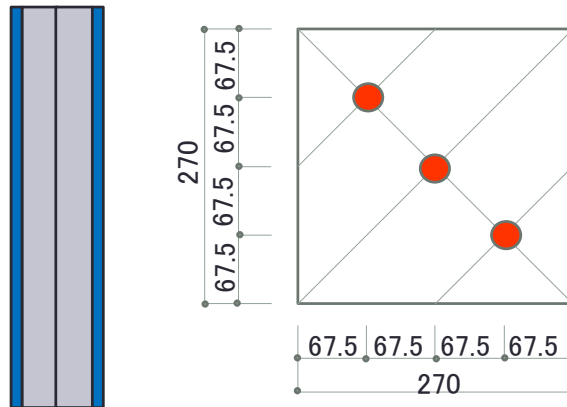


図 2.20 センサ位置

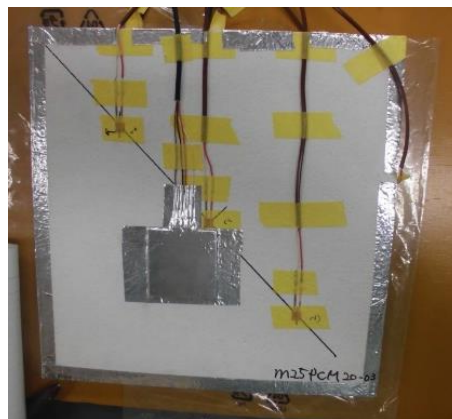


写真 2.11 試験体外観

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

これまで PCM 建材の熱的性能を測定するために、対流^{2.12)}・伝導^{2.11)}・放射による試験体の加熱・冷却法が提案されてきたが、加熱・冷却方法の差異が測定再現性や精度に与える影響は検討されていない。それぞれの加熱方法の概念図を図 2.21 に示す。前節では、放射加熱により PCM 建材の熱性能を測定したが、加熱時と冷却時の比熱の測定値が異なって観測されることや、特に冷却時に表面に温度ムラがみられることが報告された。

伝導加熱は伝熱面と試験体が直接接するため試験体に設置した熱電対等のケーブルにより隙間が生じることから、センサ数を増加させるほど外乱が増大することが懸念される。また、片面加熱をした場合には試験体内部で生じる温度分布を捉えることができず、試験体の代表温度を正確に定めることが困難である。一方、対流加熱法は昇温速度のコントロールが容易であり、試験体の両面から空気加熱することから、センサの試験体への設置が容易になるなどの利点がある。

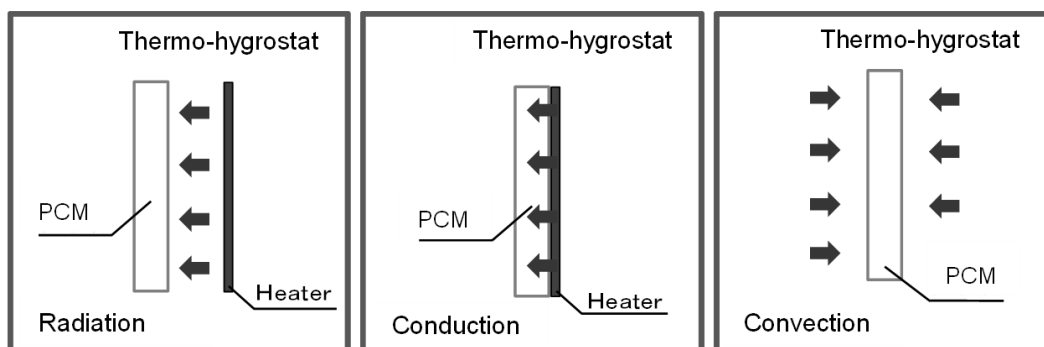


図 2.21 加熱方法

本研究では、対流加熱法を用いて昇温速度を変化させながら PCM 建材の熱性能を測定し、既往の研究結果と比較した。測定に用いた恒温恒湿器を写真 2.12 に、温度制御の概念図を図 2.22 に示す。



写真 2.12 恒温恒湿器

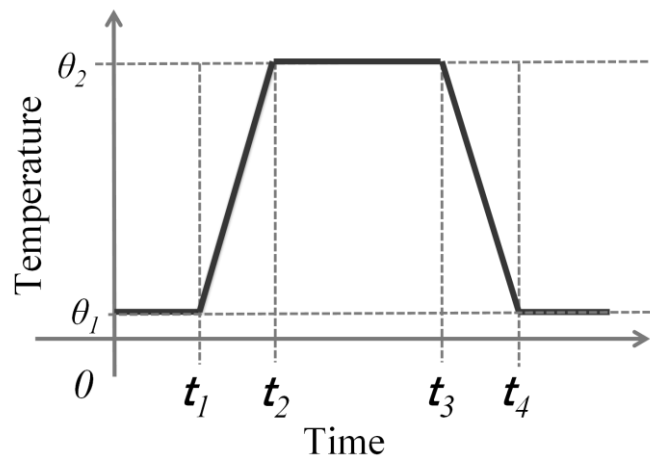


図 2.22 温度制御概念図

また、昇温速度のパターンを表 2.5 に示す。測定結果のバラ付きなどが図 2.23 のような内部温度分布に起因するとすれば、昇温速度が遅い程、精度よく測定できることになるが、本研究では、実際に居室に起こり得る日変動のなかでのパッシブ効果を明らかにしたいため、建築壁体が曝される温度変動よりも極端に長い周期に関しては検討しないこととした。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

表 2.5 温度制御条件

	Preparation	Heating	Thermostatic	Cooling	Heating rate	Total time
	[hour]	[hour]	[hour]	[hour]	[min./K]	[hour]
	t_1-0	t_2-t_1	t_3-t_2	t_4-t_3	$(t_2-t_1)/(\theta_2-\theta_1)$	
CASE 1	3	2	3	2	5	10
CASE 2	3	4	3	4	10	14
CASE 3	3	8	3	8	20	22
CASE 4	3	16	3	16	40	38

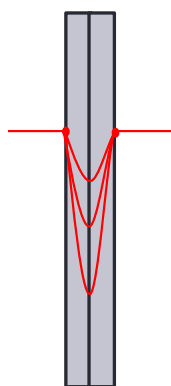


図 2.23 試験体内部の温度分布

b) 対流加熱による熱性能試験結果

蓄熱量、比熱及び潜熱量は前節で用いた式(2.2)～式(2.4)により求めた。表 2.4 の g26P20 試験体において、試験条件を表 2.5 の CASE2 の条件で測定した試験体温度の推移を図 2.24 に示す。加熱・冷却時いずれも融点(26°C)近傍で潜熱蓄熱材特有の温度変化が確認された。試験体内部は 2 体の試験体の間で計測された値を示しており、上部、下部の温度はそれぞれの平均値を示している。

また、相変化が確認できる同領域において表面温度と内部温度の差が増大しているが温度分布は昇温速度に依存すると考えられ、適切な昇温速度及び温度幅について検討する必要がある。

蓄熱量及び比熱の測定例を図 2.25 に示す。試験体の蓄熱量と試験体温度の測定値を回帰分析し、固相域及び液相域の接線の傾きから比熱を定量化した。

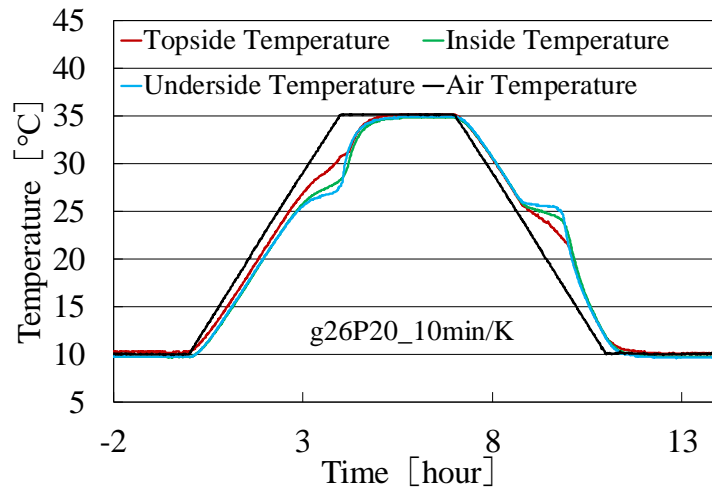


図 2.24 試験体の温度分布 (g26P20_10min/K)

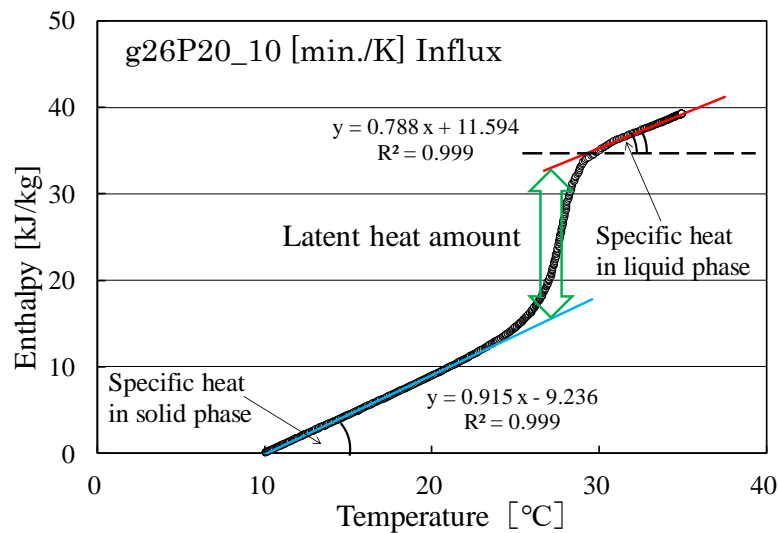


図 2.25 蓄熱量と比熱の測定例

図 2.26 に加熱時と冷却時の蓄熱量の推移を示すが、放射加熱を採用した前節で観察された固相・液相域における測定法に起因した比熱のヒステリシスは見られない。他方、凝固開始温度が融解温度よりも低下する、いわゆる過冷却現象が生じており、凝固時に核となる物質の添加など材料的な解決策が必要になる。図 2.26 より、固相域・液相域では加熱時と冷却時に測定した比熱はいずれも同等であることから、比熱測定は加熱・冷却の一方で測定しても良い。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

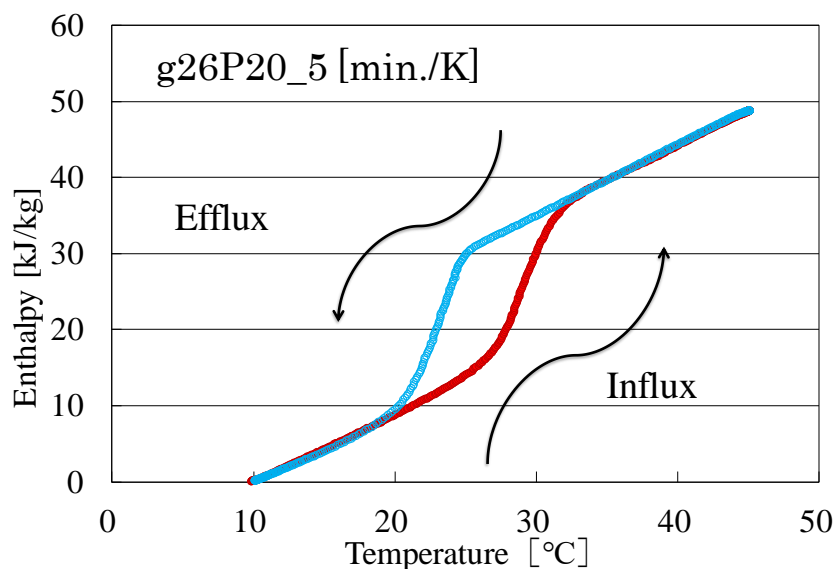


図 2.26 加熱時と冷却時の蓄熱量測定結果

ただし、固相域と液相域の比熱の測定(図中の直線部分の傾き)には、試験体の相変化終了から 10°C 以上の温度幅が必要であることがわかった。図 2.27 及び図 2.28 に、固相域と液相域の比熱の測定結果を昇温速度ごとに整理して示す。なお、それぞれの計測範囲が長くみられる程精度が高いため、固相域は昇温過程、液相域は冷却過程の比熱から求めた。

図から、固相域と液相域の比熱は昇温速度への依存性が低いことがわかる。潜熱量の測定結果を昇温速度ごとに整理して図 2.29 に示すが、測定値は昇温速度に依らずほぼ同一の値を示している。

また、前節で採用した放射加熱法では潜熱量測定においても再現性が得にくいことが報告されたが、対流加熱法を採用した本実験では、再現性が高く安定した結果が得られた。

さらに、固相域・液相域の比熱及び潜熱量の測定には 5 min./K の昇温速度で十分に正確な値が得られるといえる。熱性能試験結果をまとめて表 2.6 に示す。また、固液混相域における加熱時と冷却時の蓄放熱量を図 2.30 及び図 2.31 に示す。図より、固液混相域において昇温速度に依る蓄熱挙動の相違がみられ、加熱・冷却時の双方において昇温速度の増大により蓄熱量が変化する割合が低下する傾向が確認できた。

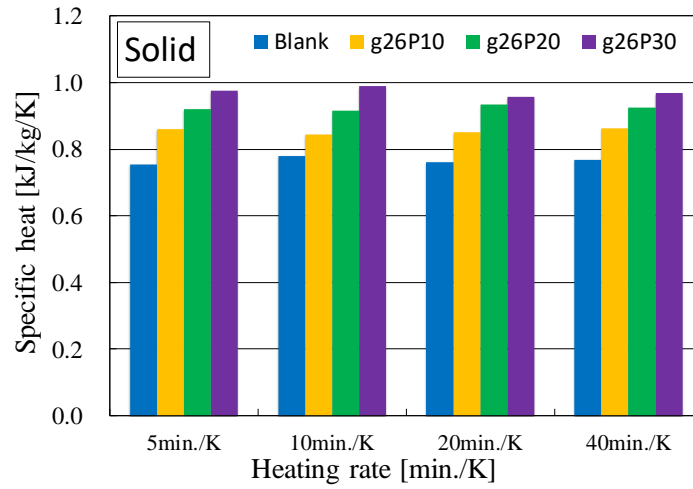


図 2.27 固相域の比熱

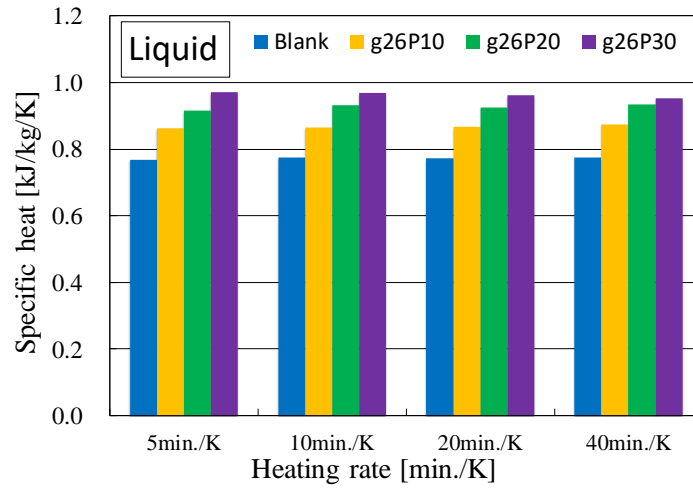


図 2.28 液相域の比熱

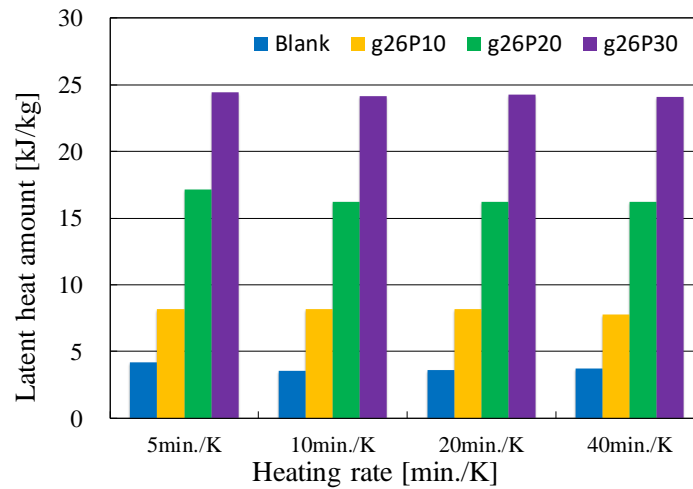


図 2.29 潜熱量

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

表 2.6 対流加熱による基本的熱性能試験結果

Name		Blank		g26P10		g26P20		g26P30	
Base material		gypsum plaster		gypsum plaster		gypsum plaster		gypsum plaster	
PCM mixing rate[wt%]	[wt.%]	0		10		20		30	
		Solid	Liquid	Solid	Liquid	Solid	Liquid	Solid	Liquid
Specific heat	[MJ/m ³ /K]	1.06	-	1.07	1.07	1.09	1.07	1.13	1.05
	[kJ/kg/K]	0.77	-	0.86	0.86	0.92	0.91	0.97	0.90
Latent heat	[kJ/kg]	-		7.85		16.31		24.69	
	[MJ/m ³]	-		9.76		19.24		28.91	
Thermal storage	[kJ/kg]	7.55		16.48		25.48		34.01	
	[MJ/m ³]	10.39		20.49		30.06		39.82	

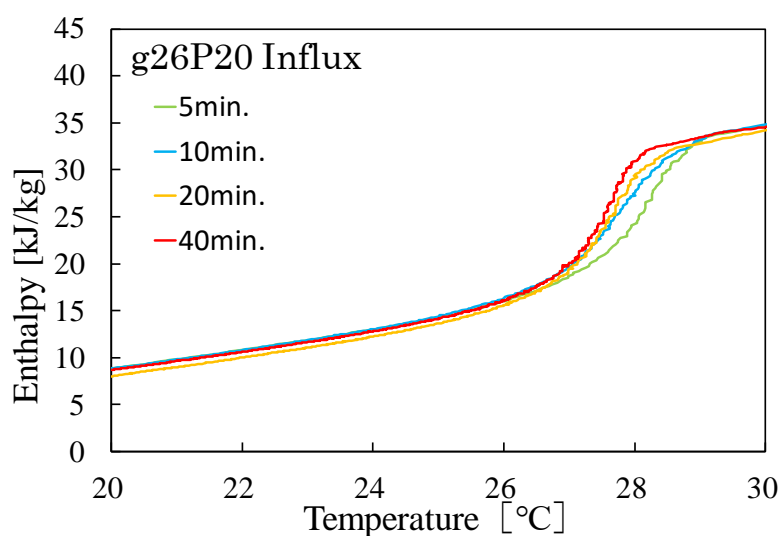


図 2.30 昇温速度ごとの蓄熱量 (加熱時)

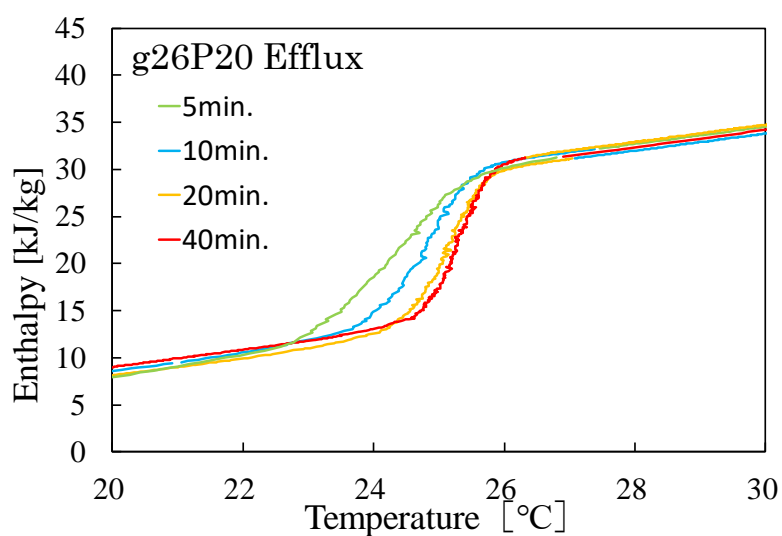


図 2.31 昇温速度ごとの蓄熱量 (冷却時)

昇温速度が遅い程見かけの比熱を正確に測定できるものと仮定し、40 min./K の測定結果を参考にすれば、固液混相域の潜熱量測定には、加熱時で 10 min./K 以上、冷却時には 20 min./K 以上の時間をかけることにより、より精度の高い測定ができると考えられる。

ただし、本条件に関する知見は母材が石膏であり、かつ、PCM の混和率が 20%以下、厚みが 24mm 以下の建材に限定される。固液混相域の見かけの比熱を図 2.32 に示す。図から、昇温速度を緩慢にするとピーク位置が低温域に遷移しているが、ピークの値と昇温速度には相関関係がみられなかった。

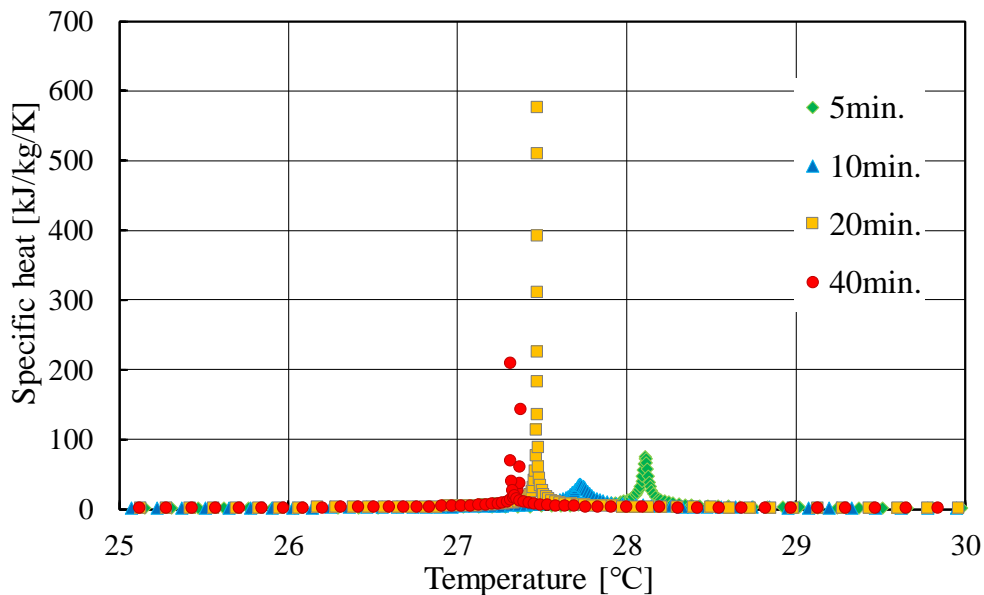


図 2.32 固液混相域の比熱

2.3 PCM 建材の固液相域における比熱の定式化

PCM 内装左官材の見かけの比熱は PCM の融解温度近傍で大きく変化するが、潜熱蓄熱材の見かけの比熱を定式化する研究は 1970 年代から盛んに行われてきた。前述のように既往の研究では、便宜的に PCM の比熱、潜熱量、相変化温度域の測定結果から見かけの比熱の温度依存性を各々仮定して非定常計算を実施し、その精度を検討している。例えば近藤ら^{2.12)}、André Bontemps ら^{2.25)} は潜熱がある一定の温度域に分布しているとの仮定を採用しており、町田ら^{2.26)}は潜熱量に対する流入熱流の比を乗じることで見かけの比熱を予測している。佐藤ら

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

2.11)のように見かけの比熱を三角波で模して扱う手法も検討されている^{2.27)~2.29)}。本研究ではPCM内装左官材の比熱を調和解析で定式化し、多峰性能を有する潜熱蓄熱建材の定式化が可能となるよう検討を進めた。

2.3.1 調和解析による比熱の定式化

2.2.1節の実験で得られた加熱時における蓄熱量と温度との関係を6次多項式で近似し、図2.33に例示した(R^2 :決定係数)。

これを式(2.5)のように調和解析することで、PCM内装左官材の加熱時の比熱を温度の関数として定式化した。ただし、PCM建材の種類によってはヒステリシスを考慮して冷却時の見かけの比熱も同様に定式化し数値計算に用いる必要があるが、本研究では加熱時の試験から得られた値を採用してヒステリシスは考慮をしないものとした。

PCM建材の比熱は多峰を示すPCMへの適用性、汎用性と精度を考慮して、本研究では24個のフーリエ級数の和とした。y番目の調和解析係数M,Nは、実験値からそれぞれ式(2.6)で求めた。

調和解析係数の計算例を表2.7に示す。前述の方法で得られた比熱の実測値及び調和解析の結果を合わせて図2.34に示す。プロットは実測値、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り、PCM混和率が高くなるにつれてこの値が大きくなることが分かる。

また、試験体温度が $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 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。室内環境に関わる非定常数値計算に本法を用いる場合、空調設定温度を参考にしながら採用する定義域(温度幅)を設定し、近接する温度帯では固相・液相域の比熱を採用する方法も考慮すべきであろう。

特に、PCM内装左官材のように比熱が温度によって変化する材料の熱性能を把握することにより、PCM内装左官材を室内に施工した場合の室内環境の熱挙動を、数値計算により精度よく再現することが可能となろう。

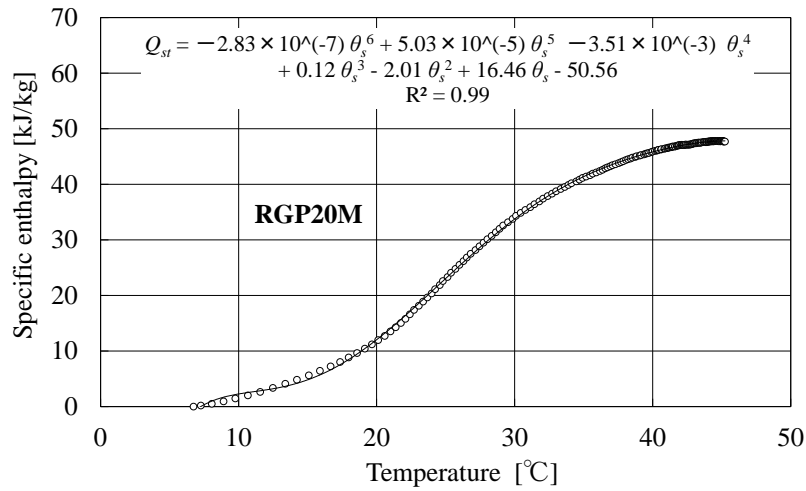


図 2.33 蓄熱量の 6 次多項近似

$$c_{PCM}(\theta) = M_m + M_1 \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} \cdot \theta + M_2 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot \theta + \dots \right) + N_1 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \cdot \theta + N_2 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot \theta + \dots \right) \quad (2.5)$$

$$M_y = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{2n-1} x_i \cos y \frac{2\pi}{2n} i$$

$$M_n = \frac{1}{2n} \sum_{i=0}^{2n-1} x_i \cos n \frac{2\pi}{2n} i$$

$$N_y = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{2n-1} x_i \sin y \frac{2\pi}{2n} i$$

(2.6)

$$N_n = 0$$

M_m : 比熱の算術平均値 [-]

M, N : 調和解析係数 [-]

n, y : フーリエ級数の数 (24 個)

x_i : 実測値

τ : 対象となる温度域(=30 (10~40°C)) [K]

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

表 2.7 調和解析係数(RGP20M)

Mm : 1.4741000	M7 : -0.0051915	M14 : -0.0010010	M21 : -0.0023087	N4 : -0.0269754	N11 : -0.0042123	N18 : -0.0023639
M1 : -0.8303458	M8 : -0.0031315	M15 : -0.0024892	M22 : -0.0016332	N5 : -0.0061100	N12 : -0.0040038	N19 : -0.0036328
M2 : 0.1530739	M9 : -0.0038698	M16 : -0.0045287	M23 : -0.0010138	N6 : -0.0140084	N13 : -0.0061203	N20 : -0.0028426
M3 : -0.0640955	M10 : -0.0048833	M17 : -0.0024289	M24 : -0.0010368	N7 : -0.0085902	N14 : -0.0023435	N21 : -0.0029989
M4 : 0.0011131	M11 : -0.0016777	M18 : -0.0031069	N1 : -0.0897635	N8 : -0.0075762	N15 : -0.0032140	N22 : -0.0026526
M5 : -0.0088812	M12 : -0.0032312	M19 : -0.0015527	N2 : -0.0539041	N9 : -0.0053038	N16 : -0.0057228	N23 : -0.0024762
M6 : -0.0065509	M13 : -0.0033225	M20 : -0.0019708	N3 : 0.0027870	N10 : -0.0063007	N17 : -0.0032785	N24 : 0.0000000

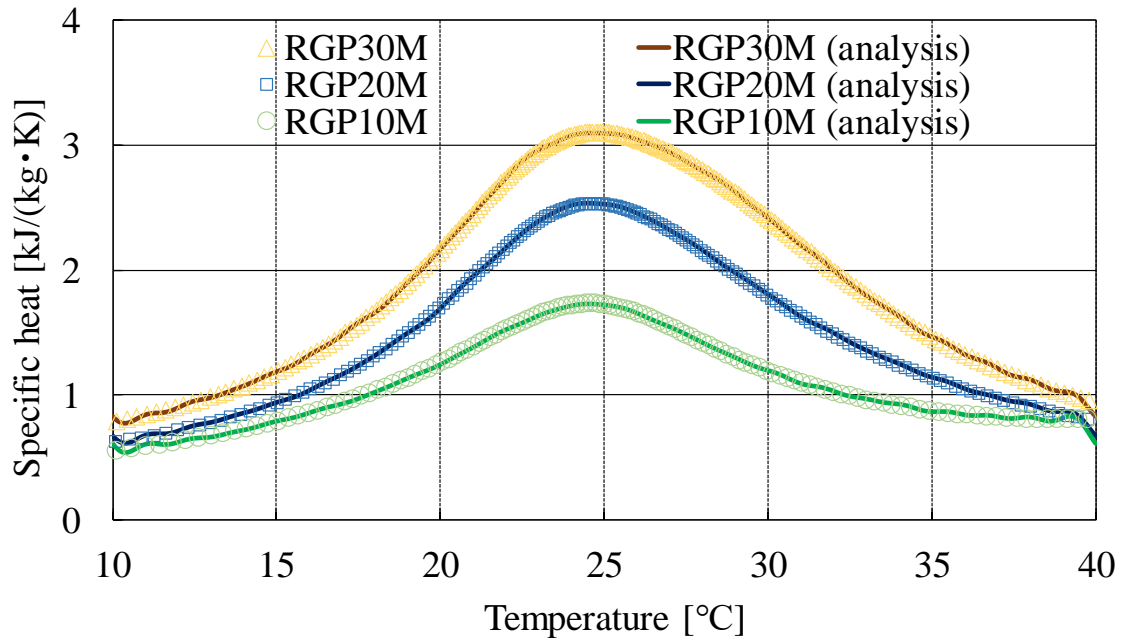


図 2.34 調和解析結果と実測値の比較

2.3.2 PCM 内装左官材を用いた平板試験体の非定常熱伝導計算

前節では、平板試験体の比熱を熱性能試験の結果から予測し、これを調和解析によって定式化することで温度の関数として与えた。本節では、これを適用して非定常熱計算を実施し、熱挙動の計算結果と測定結果を比較することで計算モデルの妥当性を検討する。

PCM 内装左官材を用いて作製した平板試験体の非定常熱伝導は、一次元熱流でモデル化した。基礎方程式を式(2.7)に示す。また計算の実行にあたり時間微分を前進差分、空間微分を中心差分とする離散化を行なった。

また、固体内部から固体外部への熱流はニュートンの冷却法則を用いて計算した。固体内部と外部との境界面における温度の離散式を式(2.8)に示す。なお、総合表面熱伝達率は式(2.9)で定義した^{2,30)}。試験体の加熱実験で計測した試験体のヒータ側表面温度を境界条件として与えて流入熱流と流出熱流を計算した。また、流入・流出熱流の差から試験体の蓄熱量を計算した。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

周囲室温は一定で、平均放射温度は室温に等しく、初期状態では全ての離散点の温度が室温と同値、との仮定を初期条件として与えた。なお、試験体は垂直に設置された垂直平板でモデル化し、比熱として図 2.24 に示す実験値の調和解析結果を与えた。

また、時間差分間隔は 1s、空間差分間隔は 1mm とした。試験体の加熱実験の測定値とシミュレーションの結果を図 2.35 及び図 2.36 に示す。図中のプロットは実験値、実線は計算値を表している。赤が流入熱流、青が流出熱流を示している。

図 2.35 から、流入熱流及び流出熱流の計算値は実験値との間に若干の相違があるものの、概ね精度良く熱挙動を再現している。また、図 2.36 に示す蓄熱量の計算結果は実験値をほぼ精確に再現しており、試験体を加熱したときの相変化現象を再現することに成功している。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\lambda}{c_{PCM}(\theta)} \right) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2.7)$$

$$\theta_s^{n+1} = \theta_s^n + 2 \cdot \frac{\lambda}{\rho \cdot c_{PCM}(\theta)} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\theta_{s-1}^n - \theta_s^n - \frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda} (\theta_s^n - \theta_a) \right) \quad (2.8)$$

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \quad (2.9)$$

$$\alpha_r = \frac{\sigma_b \cdot \varepsilon \cdot (T_s^4 - T_w^4)}{\theta_s - \theta_w}$$

$$\alpha_c = 0.56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{\lambda}{h}$$

ε :放射率 (=0.9) [-]

h :代表寸法(サンプル長さ=0.3) [m]

σ_b :ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸) [W/(m²・K⁴)]

Gr :グラスホフ数 [-]

Pr プラントル数[-]

T :絶対温度 [K]

Δx :離散点の分割間隔(=0.001) [m]

α :総合表面熱伝達率 [W/(m²・K)]

α_r :放射熱伝達率 [W/(m²・K)]

α_c :対流熱伝達率 [W/(m²・K)]

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$:温度勾配 [K/m]

添字

i : 空間座標(表面を除く)

n : 時間座標

s : 着目する表面を表す

w : 他の表面を表す

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

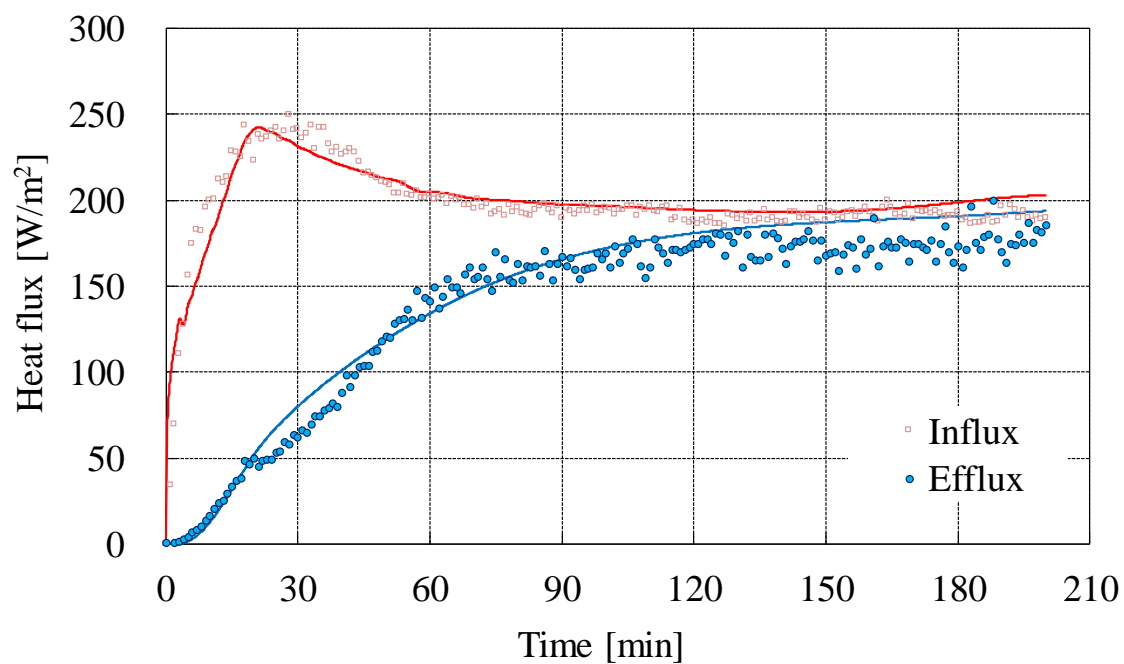


図 2.35 熱流の実測値と計算値

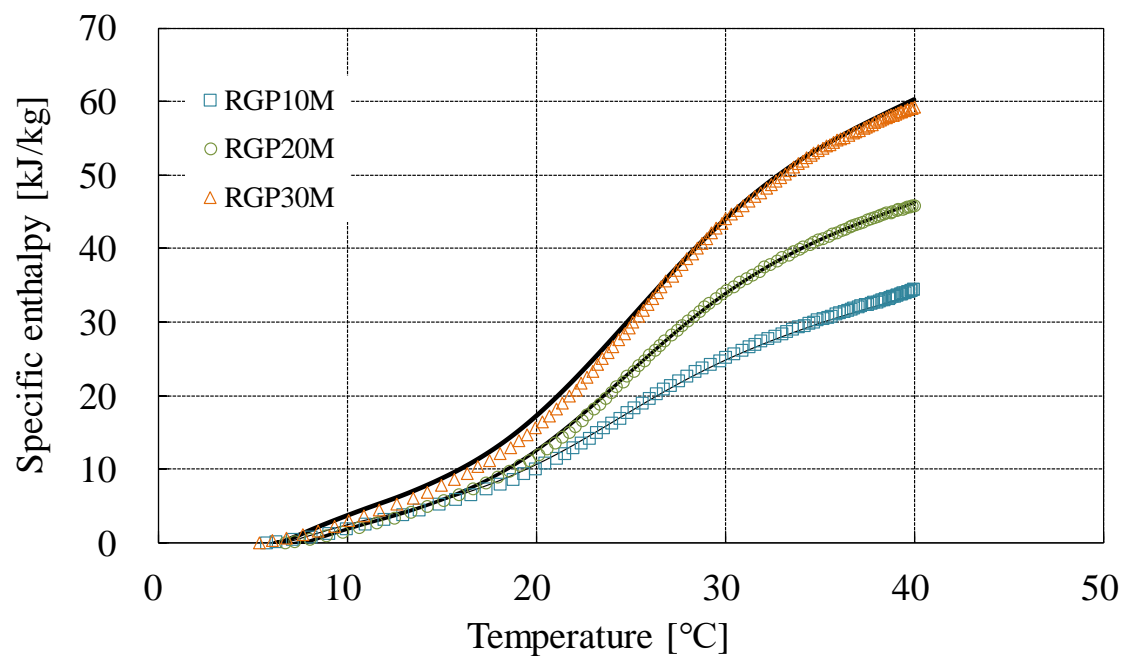


図 2.36 蓄熱量の実測値と計算値

2.4 摘要

本章では、PCM 内装左官材の物性及び熱的諸性能を求めるために種々の基本的物性試験を行った。まず、JIS 規格に基づいてふるいわけ試験、嵩密度試験、強度試験を行い、施工性左官施工時における施工性を主観的評価により検討して、本材の実用化に向けた技術的な検討を行った。

硬性、粘性、施工性に関する主観的申告評価を提案し、PCM 内装左官材の施工性を主観的に評価したところ、フロー値 160mm 近傍で施工性が極大化することを確認した。

次に、PCM 内装左官材の基本的熱性能試験の測定にあたり、試験方法から検討を行った。放射加熱による測定方法では、冷却時には温度分布が大きく、正確なデータを得ることは難しいが、加熱時では精度よく測定することが可能である。

対流加熱による測定方法では、母材が石膏で、カプセル状の PCM 混和率が 20%以下、厚みが 24mm 以下の PCM 建材の熱性能測定方法について、加熱方法・昇速度・昇温幅について検討を行った。加熱方法に対流加熱法を採用したところ、高い再現性が得られた。昇温速度は加熱時で 10min./K、冷却時で 20min./K を要する。固相域・液相域の比熱及び潜熱量の測定には 5min./K でも十分な測定結果を得ることができるといえる。また、温度制御の昇温高さは相変化域を含まない 10°C 以上の温度幅を要する。

最後に、PCM 内装左官材の比熱を調和解析法によって定式化したところ、10°C ~40°C の範囲で測定値を精度よく再現できた。一般的には周期関数的な近似に用いられる調和解析を用いることにより、多峰性状を有する PCM の固液混相域における等価的な比熱の精度の高い定式化を可能にした。

任意の温度帯での融点設計や比熱の定式化法の最適化についても今後詳細な検討を進める予定である。

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

参考文献

- 2.1) 伊藤直明, 須永修通 : ダイレクトゲインシステムにおける補助暖房量と蓄熱部位の熱挙動に関する実験的研究 ―室内気候調整における熱容量に関する研究, 1―, 日本建築学会計画系論文報告集 第 377 号, pp1-8, 1987.7
- 2.2) 町田誠, 土屋喬雄 : 木造住宅における潜熱蓄熱材の適用に関する研究, その 3 夏季冷房負荷低減を目的とした潜熱蓄熱材利用の数値解析と基本実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp77-78, 1998.9
- 2.3) 斎藤宏昭, 土屋喬雄 : 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, pp669-670, 1994.9
- 2.4) 坪田祐二, 射場本忠彦, 金岡賢司, 多和大介 : 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, pp1169-1170, 1991.9
- 2.5) G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella : A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, *Building and Environment* 59 (2013), pp517-527, 2012.9
- 2.6) E. Rodriguez-Ubinas, B. Arranz Arranz, S. Vega Sánchez, F.J. Neila González : Influence of the use of PCM drywall and the fenestration in building retrofitting, *Energy and Buildings* 65 (2013), pp464-476, 2013.6
- 2.7) I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti : Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, *Building and Environment* 61 (2013), pp93-103, 2012.12
- 2.8) Maha Ahmad, André Bontemps, Hébert Sallée, Daniel Quenard : Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material, *Energy and Buildings* 38 (2006), pp357-366, 2005.7
- 2.9) Cecilia Castellón, Marc Medrano, Joan Roca, Luisa F. Cabeza, Maria E. Navarro, Ana I. Fernández, Ana Lázaro, Belen Zalba : Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, *Renewable Energy* 35 (2010), pp2370-2374, 2010.4
- 2.10) 佐伯智寛, 黒木勝一 : 潜熱蓄熱材の性能評価方法に関する研究, その 1 熱物性値(見かけの比熱)の

- 測定方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012(環境工学II), pp201-202, 2012.9
- 2.11) 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林禎彦, 石黒成紀: 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, pp651-659, 2012.8
- 2.12) 近藤武士, 射場本忠彦, 坪田祐二, 鎌田元康: 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, pp23-29, 2001.2
- 2.13) 長野克則, 武田清香, 持田徹, 嶋倉一實, 中村卓司: 粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究 第 1 報 小型実験システムの構築およびその蓄放熱特性, 日本建築学会環境系論文集 第 579 号, pp21-28, 2004.5
- 2.14) Guobing Zhou, Yiping Zhang, Qunli Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di : Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates, Applied Energy 84 (2007) pp1068-1077, 2007.11
- 2.15) Shazim AliMemon : Phase change materials integrated in building walls : A state of the art review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 31 (2014), pp870-906, 2014.1
- 2.16) Chi-ming Lai, Shuichi Hokoi : Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, Energy and Buildings 73 (2014), pp37-47, 2014.1
- 2.17) 石黒守: 蓄熱カプセルの用途紹介, 三菱製紙株総合研究所 R&D センター, 2007
- 2.18) 西川兼康, 藤田恭伸: 伝熱学, 理工学社, pp.457, 1981.12
- 2.19) JIS ハンドブック 2005 建築II 試験・設備, 日本規格協会, 2005.1
- 2.20) JIS ハンドブック 2005 建築II 材料編, 日本規格協会, 2005.1
- 2.21) JASS 15 左官工事, 日本建築学会, 2007.6
- 2.22) 中野剛夫, 守明子, 馬場明生: セメントモルタル塗り仕上げ材の乾燥収縮に及ぼす塗り構成の影響, 日本建築仕上学会論文報告集, 第 10 巻, 第 3 号, 2003.5
- 2.23) 田中俊六, 岩田利枝, 土屋喬雄, 秋元孝之, 寺尾道仁, 武田仁: 最新建築環境工学, 改訂 3 版, 井上書院, 2009.8
- 2.24) 添田晴生, 大西潤治, 中田亮生, 杉本俊哉, 鄭用賢, 木本日出夫: PCM を利用した室内熱環境調整に関する研究, 第 2 報-パラフィンの融解を伴う熱伝導実験による PCM 数値モデルの検証, 空気調和・衛生工学会論文集 (94), pp1-9, 2004.7

2. PCM 内装左官材の基本的熱性能試験

- 2.25) André Bontemps et al. : Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls, *Energy and Buildings* 43, pp.2456-2461, 2004
- 2.26) 松岡大介, 土屋喬雄, 斎藤宏昭 : 木造住宅における潜熱蓄熱材の適応に関する研究, その2 実大4室モデルによるシミュレーション, *日本建築学会大会学術講演梗概集, D*, pp.671-672, 1994.7
- 2.27) Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Rasmus Lund Jensen, Rui Cheng, Yiping Zhang : A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated PCM, *Cement and Concrete Research* 55, pp.22-34, 2014
- 2.28) Javier Mazo, Monica Delgado, Jose Maria Marin, Belen Zalba : Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump, *Energy and Buildings* 47, pp.458-466, 2012
- 2.29) Shuli Liu, Yongcai Li, Yaqin Zhang : Mathematical solutions and numerical models employed for the investigations of PCMs' phase transformations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33, pp.659-674, 2014
- 2.30) 日本機械学会 : 伝熱工学資料 改訂第4版, 1986.10
- 2.31) 草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宮崎智仁 : 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*, 81(722), pp 367-374, 2016.4
- 2.32) 草間友花, 石戸谷裕二 : 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*, 81(729), pp 931-938, 2016.11
- 2.33) 草間友花, 石戸谷裕二 : 潜熱蓄熱内装左官材の圧縮強度と施工性に関する研究, *日本建築学会技術報告集*, 23(54), pp 535-538, 2017.6

本章で得られた知見は,既発表論文^{2.31), 2.32), 2.33)}で報告されている。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

3.1 熱容量が室温変動幅と補助暖房量抑制に及ぼす影響	62
3.1.1 有効熱容量の定量化に関する実験	
3.1.2 間欠暖房時における熱容量の影響	
3.2 実験棟における PCM 内装左官材の効果	72
3.2.1 実験棟における蓄熱層内の熱挙動	
3.2.2 PCM の施工位置が省エネルギーと環境改善効果に及ぼす影響	
3.3 PCM 内装左官材を施工した実住宅における実測結果	100
3.4 摘要	108

参考文献

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

住宅の暖房負荷削減や室内気候改善に有効な手法として、高断熱・高气密住宅に蓄熱性能を組み合わせて日射熱取得を効果的に利用する「パッシブソーラー住宅」が注目されている。

伊藤ら^{3.1)}や小玉ら^{3.2)}はコンクリートの熱容量が補助暖房量や室内気候に及ぼす影響について詳細に検討した。また、室内環境温度域に融点を持つ PCM 利用に関する研究も国内外で盛んに行われており、佐藤ら^{3.3)}や Lai ら^{3.4)}は、小規模実験と数値計算によって PCM の使用量とその効果の関係について検討を行った。

しかし、実際に PCM を設置した時の熱挙動は明確に予測することは難しく、PCM 層の施工方法や空調運転時間の違いによる蓄熱効果の差異を実験的に比較して示した研究は見られない。今後期待されるパッシブソーラー住宅の普及に備え、PCM の熱容量を有効に利用できる施工方法の開発と評価が喫緊の課題となっている。

本章では、室に設置された PCM が室内環境に対し、有効利用できるかどうかを示す指標として、有効熱容量を提案し、実験装置規模での検討を行った。

また、実験棟において、PCM が施工された PCM 層の熱挙動を観測し、室内環境改善効果と省エネルギー効果について明らかにした。

次に、PCM の施工方法(仕上材と下地材)の違いによる効果を明らかにするために、室内環境改善効果を比較検討し、冬季の過昇温に着目した室温測定を行い、各室の過昇温抑制効果について重回帰分析を用いて評価した。

最後に、24 時間連続暖房を行った時の暖房負荷に関する実測を行い、PCM を適用した各室の暖房負荷から等価的な断熱性能を定量化して評価した。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

3.1 PCM 内装左官材が室温変動幅と補助暖房量抑制に及ぼす影響

3.1.1 有効熱容量の定量化に関する実験

PCM 建材は単位壁面積あたりに含まれる PCM の潜熱量が大きいほど、蓄熱できる量は大きくなるものの、日変動の中で有効に蓄放熱される割合は、材の厚みや熱伝達率などの様々な条件により異なる。潜熱量の評価のみにとどまらず、ダイレクトヒートゲインをいかに有効活用できるかを評価できるかを検討することが求められている。本節では、PCM 建材が室温変動抑制効果や省エネルギー効果に有効に寄与する分の熱容量を有効熱容量と定義した。

有効熱容量を測定するために、図 3.1 のような室容積(700×700×700mm)の試験体を作成した。2 種類の厚さの異なる断熱材 (FP 板 (発泡ポリエチレンボード) : 40mm,100mm)と 4 種類の内装材との組み合わせを変えながら、8 種の実験を実施した。表 3.1 に実験結果を示す。

試験体を-10°C に保たれた恒温室に設置し、ヒータ(1P,100V,300W)で装置内部を加熱しながら 30 秒間隔で試験体内中央部にて試験体室内空気温度、試験体内側表面にて壁体温度を測定してデータロガーに記録した。

本実験の試験体室内温度 $R(t)$ には、次式のように室内空気温度 θ_i と壁体温度 θ_w をそれぞれの熱容量 c_i, c_w で加重平均した値を採用した。

$$R(t) \equiv \frac{c_i \theta_i + c_w \theta_w}{c_i + c_w} \quad (3.1)$$

$R(t)$: 試験体室内温度 [°C]

θ_i : 試験体内空気温度 [°C]

θ_w : 試験体内壁体温度 [°C]

c_i : 空気の熱容量 [J/K]

c_w : 壁体の熱容量 [J/K]

本報では既往の研究^{3,5)}を参考に、試験体を用いた加熱実験を行い、室温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物理モデルを適用して、

暖房停止後の室温降下から内装材料の有効熱容量を求めた。

室温変動のしやすさを決定付ける要素として、式(3.2)に示す総熱損失係数 q と熱容量 C の比があり、この2つの割合からなる定数を建築物の時定数 τ と定義する。一方、室温変化率は時定数を用いて式(3.3)で表現することができる。

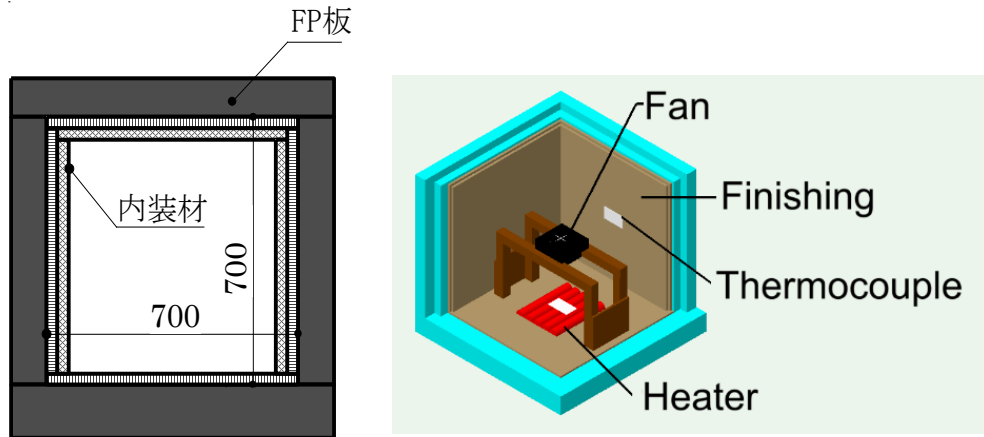


図 3.1 試験体の断面図，内部模式図

$$\tau = \frac{C}{qA_f} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon \equiv \frac{\theta_i(t) - \theta_{os}}{\theta_{is} - \theta_{os}} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.3)$$

τ : 時定数 [s]

ε : 室温変動率 [-]

C : 熱容量 [J/K]

q^* : 熱損失係数 [$W/(m^2 \cdot K)$]

A_f : 床面積 [m^2]

θ_{is} : 試験体内初期温度 [$^{\circ}C$]

θ_{os} : 試験体周囲初期温度 [$^{\circ}C$]

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

t : 時間 [s]

*単位床面積あたりの熱損失量

図 3.2, 図 3.3 に, PCM 内装材の試験体内の室温変動の様子を示した。また, 内装材の種類と室温変動率の関係を断熱材の厚さごとに整理して図 3.4, 図 3.5 に示した。

両図から内装材料を施工しない場合と比較すると, プラスターボードを貼付けて室内に熱容量を付加することで室温変化率の降下が抑制されている様子が見て取れる。さらに, プラスターボードを 2 枚張りにすると, その効果はより大きくなる。

また, PCM 内装材を施工した場合には, 潜熱蓄熱の効果で変動量がより抑制できる。一方, 断熱性能を強化すると同程度の潜熱量でも室温変動の抑制効果が顕著になることから, 室温変動には断熱性能と蓄熱性能の双方が影響を与えていることがわかる。

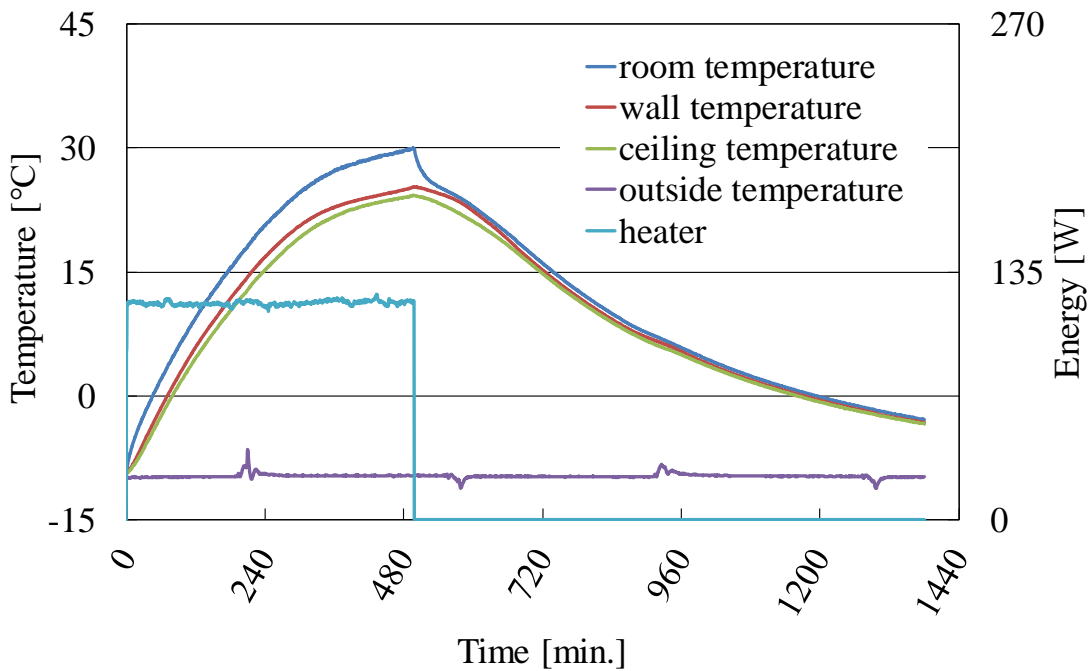


図 3.2 PCM 内装材の室温変動の様子 (FP40mm)

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

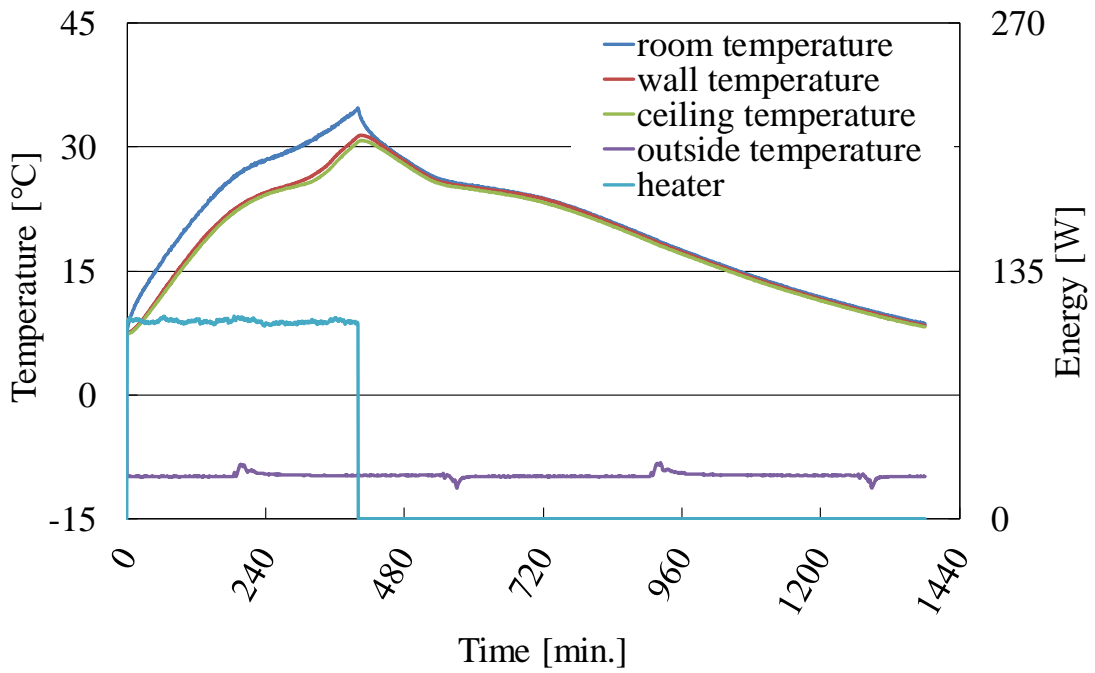


図 3.3 PCM 内装材の室温変動の様子 (FP100mm)

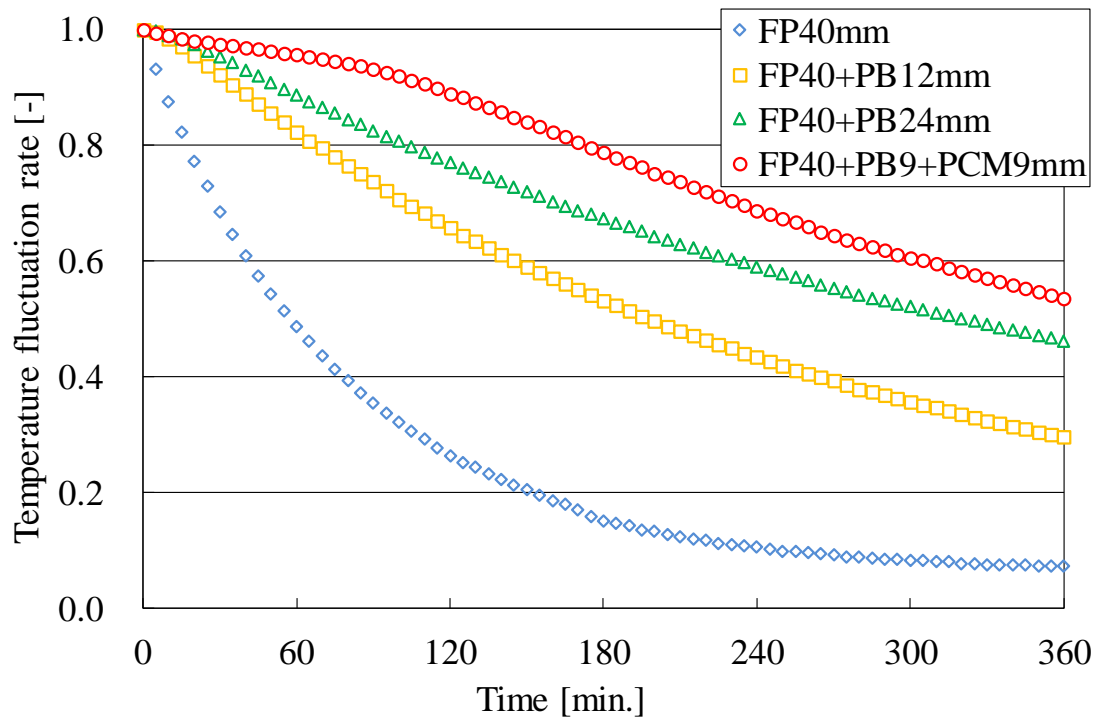


図 3.4 内装材の違いによる温度変化率の比較 (FP40mm)

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

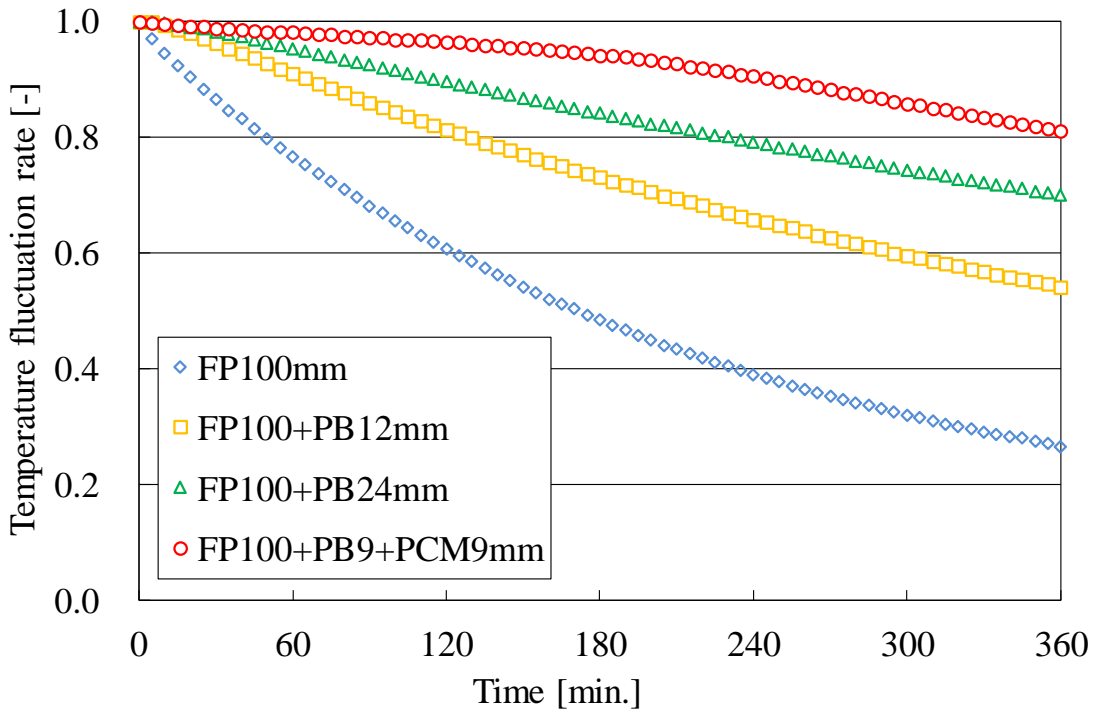


図 3.5 内装材の違いによる温度変化率の比較 (FP100mm)

PCM 内装材の固相、液相、固液相域での温度変化率の変動の様子を図 3.6, 図 3.7 に示す。本節で用いたマイクロカプセル PCM の融点は 25°C であることから、PCM 内装材の表裏の平均温度が $24\sim 26^{\circ}\text{C}$ の範囲にあるときを固液相域、 26°C 以上を液相域、 24°C 以下を固相域と定義してデータを整理した。

図 3.6 及び図 3.7 から、断熱性能に係らず潜熱変化の影響を受けて固液相域の温度変化率の低下が抑制できた。他方、固相域は液相域よりも変化が小さく、有効熱容量が相対的に大きくなることが予見される。

PCM 内装材の有効熱容量は以下に述べる方法で固相域、固液相域、液相域に分けて求めた (表 3.1)。まず、温度変化率(式(3.3))の測定値を指数関数で回帰分析し、材料の温度降下に関する時定数(式(3.2))を求めた。この値に装置の総熱損失係数を乗じた値を各内装材の有効熱容量とした。なお、データ整理の時間は FP40mm で 60 分間、FP100mm では 120 分間とした。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

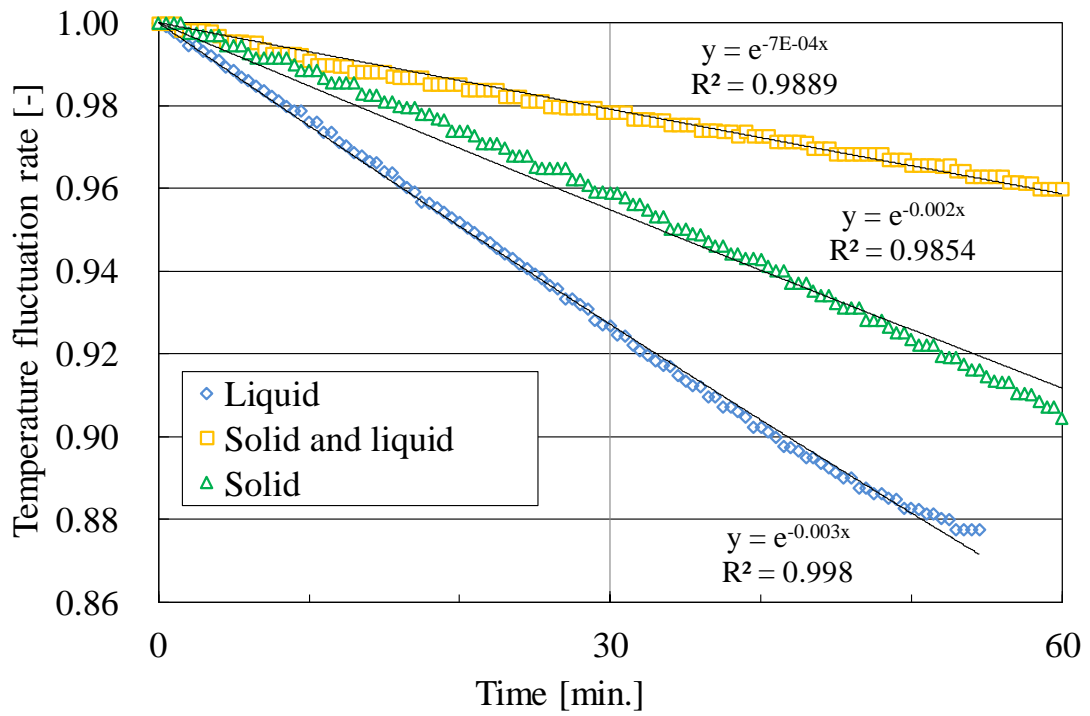


図 3.6 PCM 内装材の温度変化率 (FP40mm)

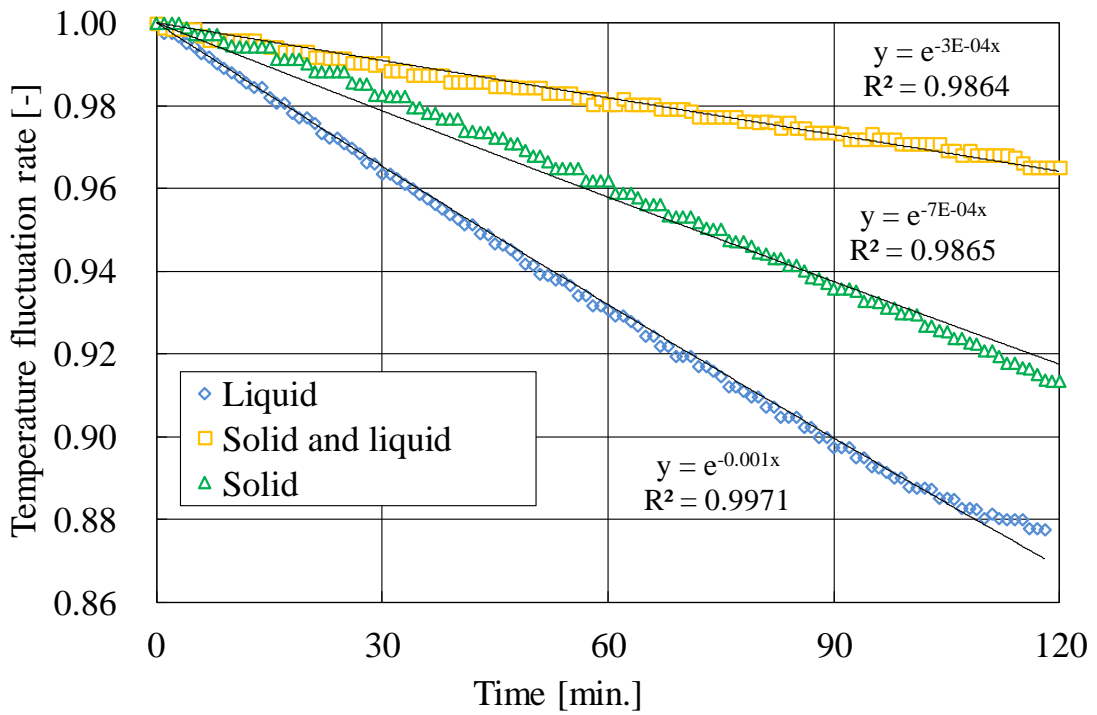


図 3.7 PCM 内装材の温度変化率 (FP100mm)

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

図 3.8 に時定数と総熱損失係数の関係を示すが、内装材料に関係なく時定数は総熱損失係数に逆比例して増加する傾向が見て取れる。また、総熱損失係数と有効熱容量の関係を図 3.9 に示すが、有効熱容量は断熱性能によらずほぼ一定であり、内装材の熱容量にほぼ比例して増大することが見て取れる。

表 3.1 実験結果

Insulation	Finishing	Effective heat capacity [kJ/K]			Time constant [min.]		
		liquid	solid and liquid	solid	liquid	solid and liquid	solid
40mm	FP40mm	3.87			115		
	FP + PB12mm	8.61			289		
	FP + PB24mm	12.56			458		
	FP + PB9mm + PCM9mm	10.52	37.86	17.21	397	1429	649
100mm	FP40mm	4.07			263		
	FP + PB12mm	8.19			578		
	FP + PB24mm	13.33			1026		
	FP + PB9mm + PCM9mm	11.96	40.60	19.89	908	3083	1511

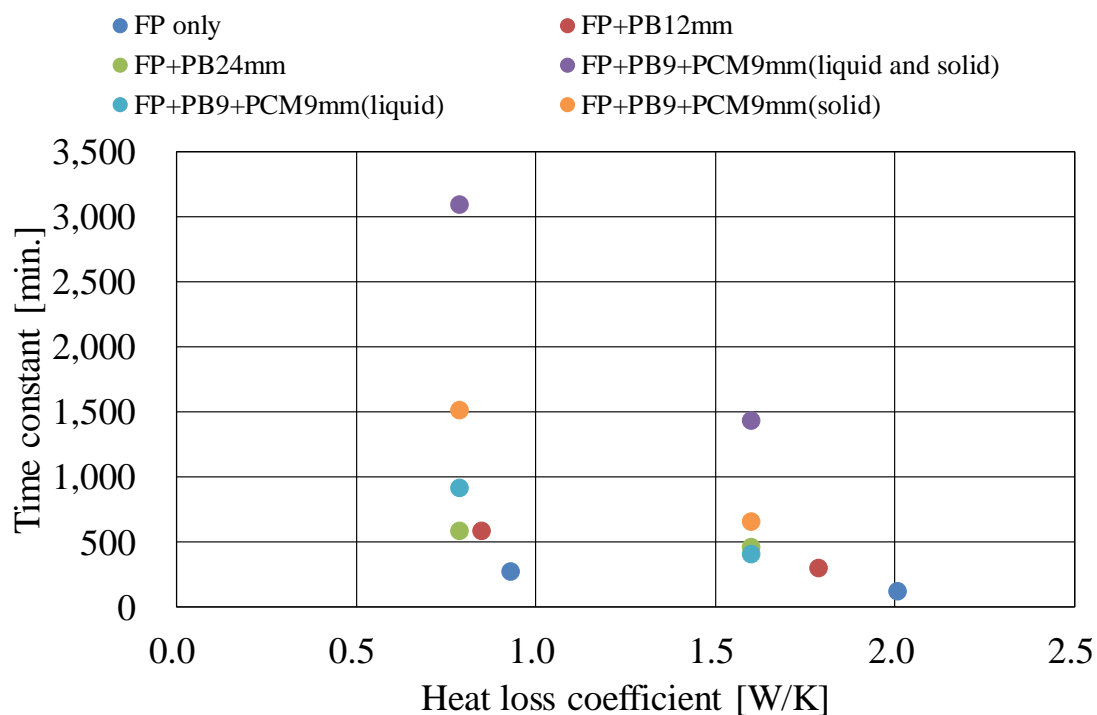


図 3.8 時定数と総熱損失係数の関係

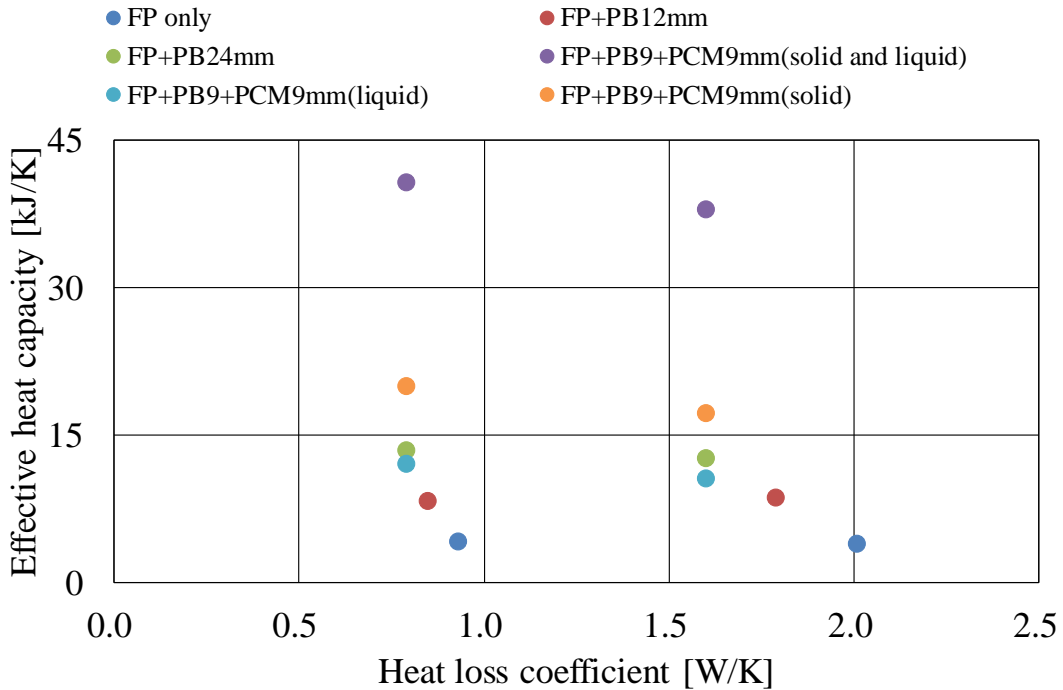


図 3.9 有効熱容量と総熱損失係数の関係

3.1.2 間欠暖房時における熱容量の影響

図 3.1 と同じ試験体を用いて、室温が 30°C になるまで電気ヒータで加熱を行ない、以降 30 分間隔で電源を ON,OFF して間欠暖房を想定した運転を行った。

測定結果を図 3.10, 図 3.11 に示す。また、それを測定期間中の最大室温で無次元化したものを図 3.12, 図 3.13 に示す。

図 3.10 及び図 3.11 の青線から、30 分間隔の間欠暖房時における PCM 内装材の室温変動幅は断熱性能によらず 1°C 前後に抑えられ、他の内装材よりも変動巾が小さかった。また、図 3.12 では間欠暖房開始直後から室温が徐々に低下しているものの、有効熱容量が大きくなるにつれて、その低下量は小さくなっていることが分かる。断熱性能の高い図 3.13 は内装材なしを除いて、間欠暖房停止時の室温は有効熱容量が大きくなるにつれ、温度降下の様相が緩慢になることが見て取れる。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

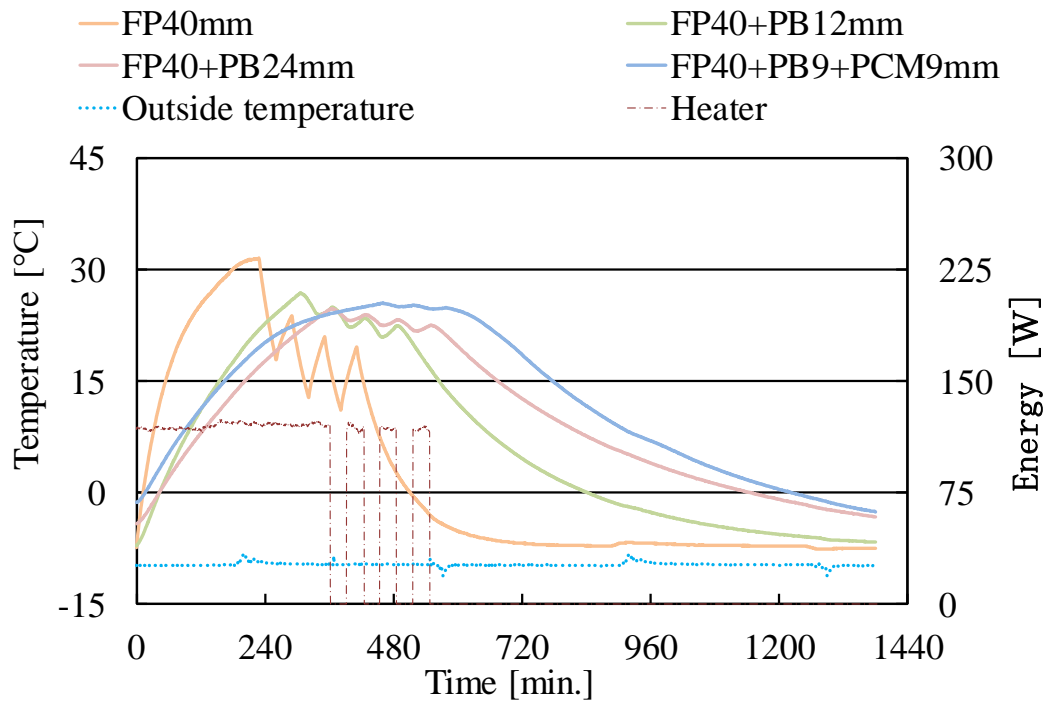


図 3.10 間欠暖房時の室温変動 (FP40mm)

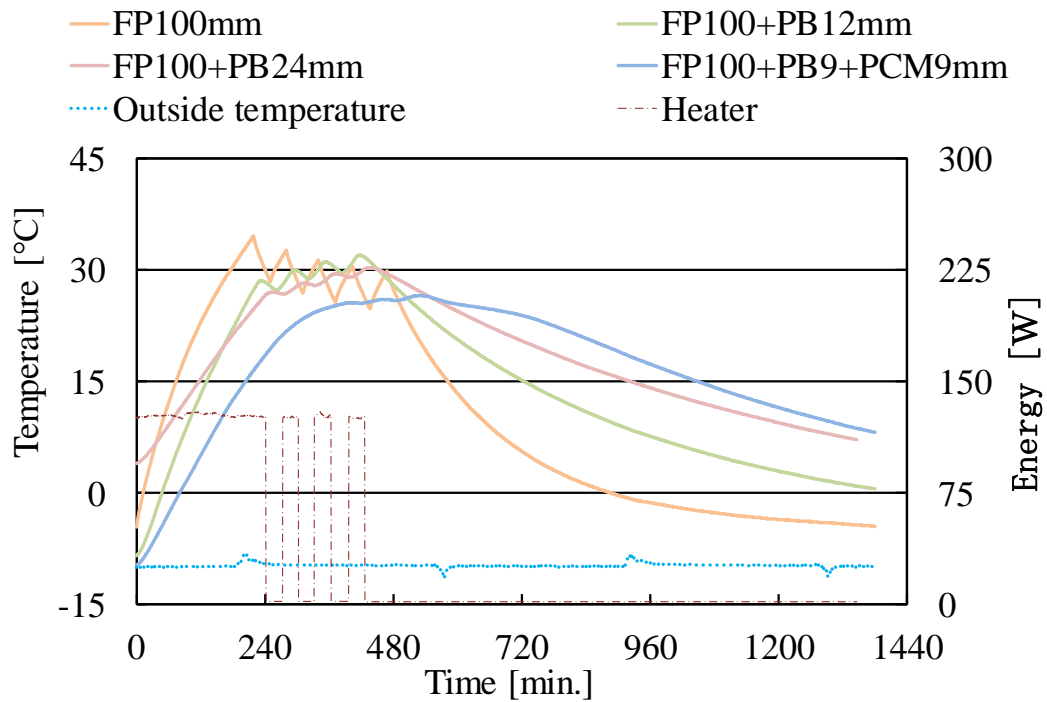


図 3.11 間欠暖房時の室温変動 (FP100mm)

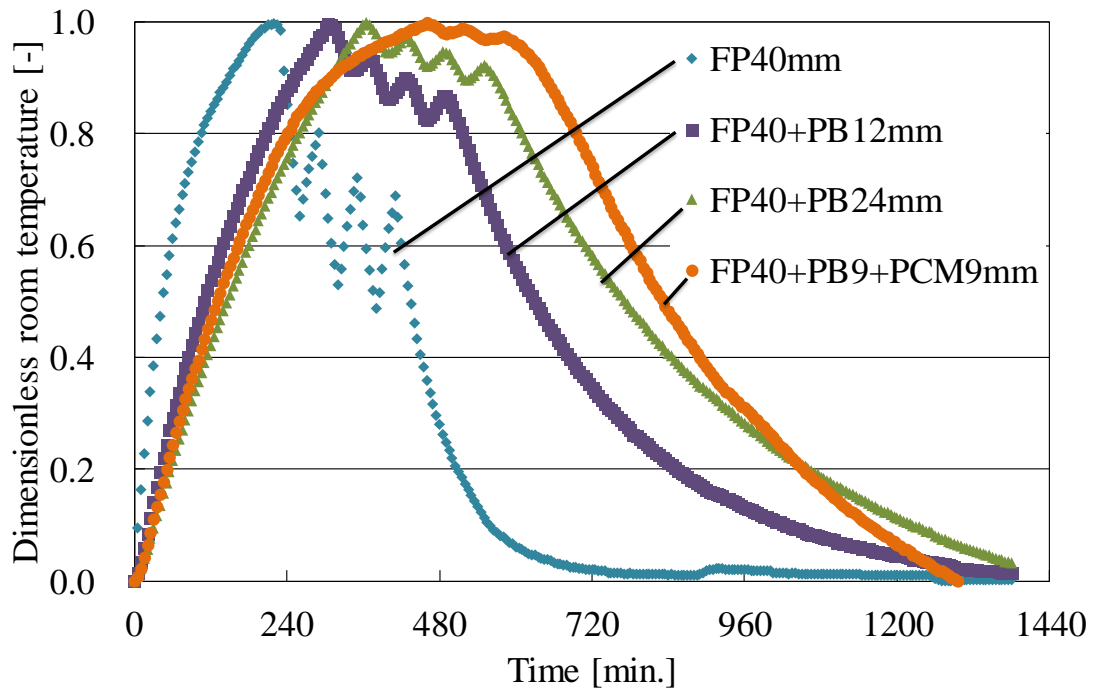


図 3.12 間欠暖房時の無次元室温 (FP40mm)

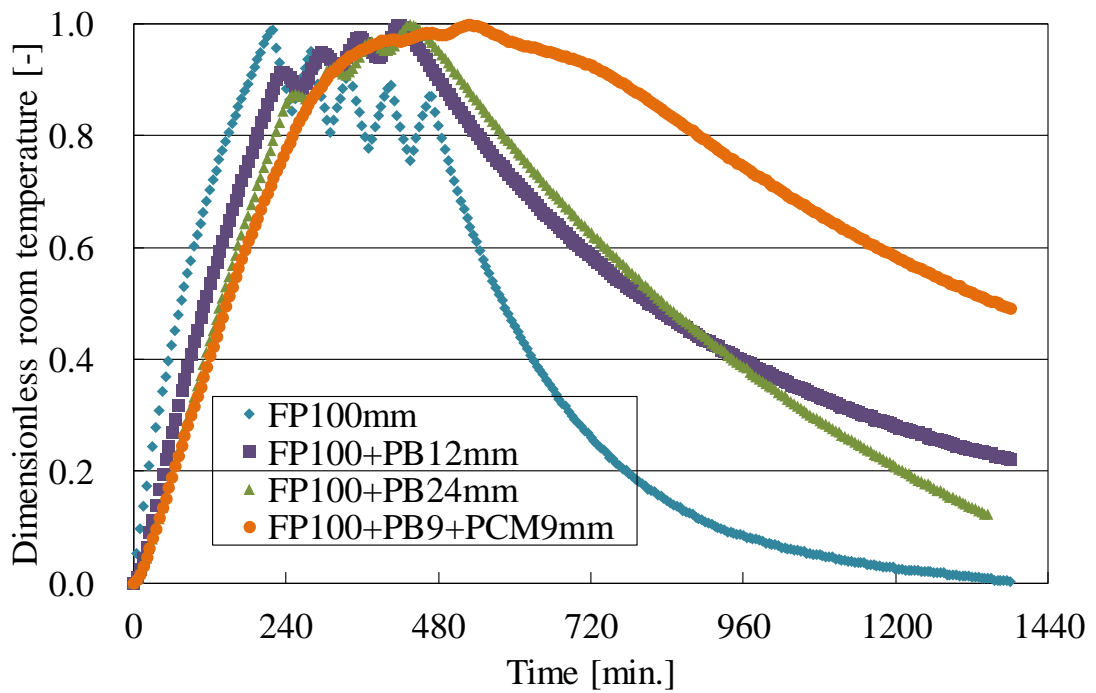


図 3.13 間欠暖房時の無次元室温 (FP100mm)

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

3.2 実験棟における PCM 内装左官材の効果

3.2.1 実験棟における蓄熱層内の熱挙動

本節では、実験棟内での PCM 内装左官材の熱挙動、室温変動に与える影響及び省エネルギー効果について明らかにする。

実験棟の概要を表 3.2 に示す。実験棟平面図及び測定点を図 3.14 に示す。第 3 章でも述べたが、本実験棟は断熱隔壁で熱的に分離されている。

右室は PCM 建材を内装左官仕上げとして施工した gPCM 室、左室はプラスターボード現し仕上げの PB 室の 2 室で構成されている。gPCM 室には床と間仕切りを除くすべての壁及び天井面に PCM 建材を施工し、約 4.5MJ の潜熱量を付与した。PB 室は 9.5mm のプラスターボードで仕上げたが、両室の仕上材はともに母材が石膏であることから、PCM を含む建材の顕熱容量はほぼ等しい。本節では、PCM 建材で熱容量を付与した室の環境改善効果及び省エネルギー効果を、PB 室と比較して評価することとした。

なお本節から次節にかけて、複数の形状の PCM を扱うことから、粒状 PCM を gPCM、マイクロカプセル PCM を mPCM、ゲル状 PCM を gelPCM として呼称することとする。

暖房の熱源は白熱電球(1P, 100V, 300W)でありサーモスタットでオンオフ制御しながら設定室温 20°C で 24 時間連続暖房した。前節の熱性能試験では対流加熱法を採用したが、実環境における熱伝達は日射や白熱電球からの放射熱が影響を与える可能性がある。

PCM 内装左官材は最も室内側に PCM が施工されることから、窓面からのダイレクトゲインのうち、室温上昇による対流成分だけではなく、放射成分も有効利用が期待されるシステムであり、本節ではまず窓の熱的性能及び蓄熱層(実験棟内 PCM 室に施工された PCM 内装左官材の層)の熱的挙動について報告する。

表 3.2 実証実験棟概要

Name	PB room	gPCM room
Size [mm]	W2,080×D2,070×H2,400	
U_A [W/m ² /K]	0.24	
Base material	Gypsum plaster (t=12)	
Finish material	Gypsum plaster (t=9.5)	PCM plastered wall (t=9.5)
PCM shape	-	Granulated PCM(gPCM)
Melting point [°C]	-	26
Latent heat [kJ/kg]	-	150
gPCM [kg]	-	30.1
Window specification	Triple glass resin window	
Window size [mm]	W1,400×H1,870	
U_w^* [W/m ² /K]	1.17	
η^*	0.56	
Location	Otaru, Hokkaido Zenibako	

Note: * catalog value(YKKAP:APW430)

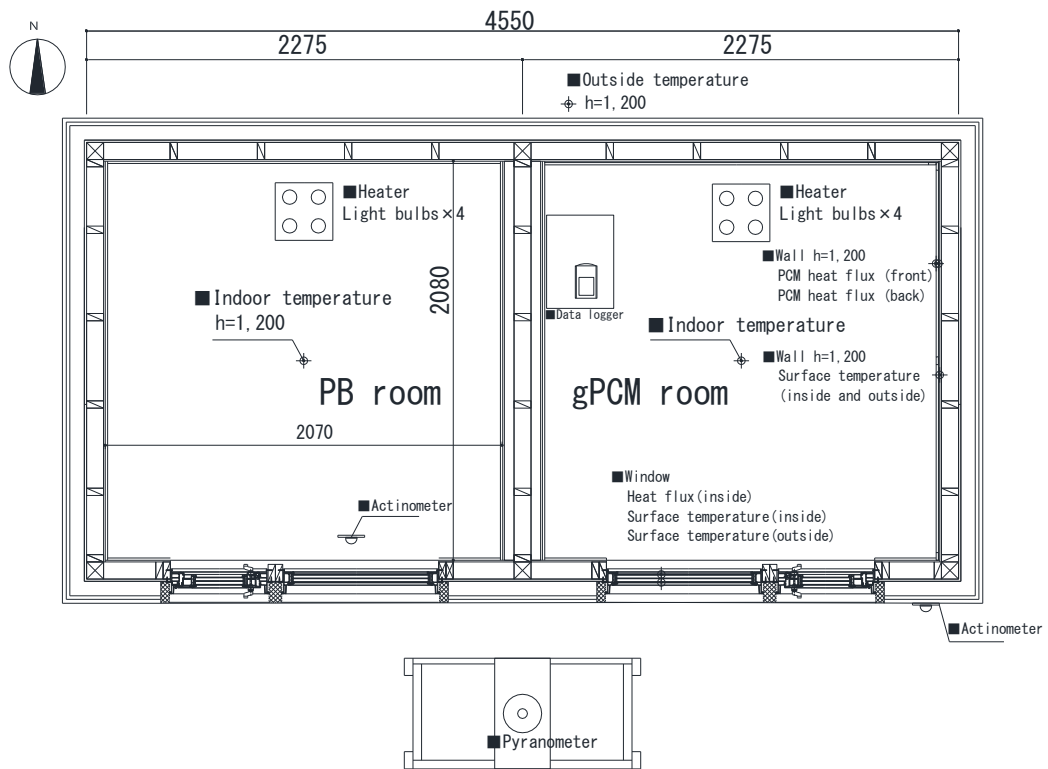


図 3.14 実験棟平面図

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

a) 開口部に適用した高性能トリプル樹脂窓の熱的性能実測

寒冷地の開口部には日射熱取得が大きい複層ガラスが適していると報告されているものの、開口部の熱収支を実測により確認した例はみられない。本節では日射取得率の高い高性能トリプル樹脂窓からのダイレクトゲインの実態を観測するために、日射計と熱流計による簡易測定を実施した。

実験棟南面ガラス部では図 3.15 に示すような熱バランスが考えられるが、窓面の熱収支を簡易測定するため、試みに室内側ガラス表面に熱流計を設置した。

開口部に設置された熱流計を写真 3.1 に示す。熱流の日積算値を日積算熱収支と仮定して図 3.16 に示す。図は日射熱取得量と熱損失量の差を示しており、測定期間での合計は $+16.2\text{MJ/m}^2$ と日射熱取得が大きい結果となった(2014/11/20-2015/2/18)。ただし、開口部のガラスと熱流計では反射率や吸収率が異なること等を考慮すると測定方法については改良の余地があり今後も検討を行っていく予定である。室内側及び室外側のガラス表面温度を、外気温、ガラス面熱流と合わせて図 3.17 に示す。ガラスの Low-e 膜の影響を受け、室内側ガラス表面温度は晴天日に 60°C 近くまで上昇していることがわかる。

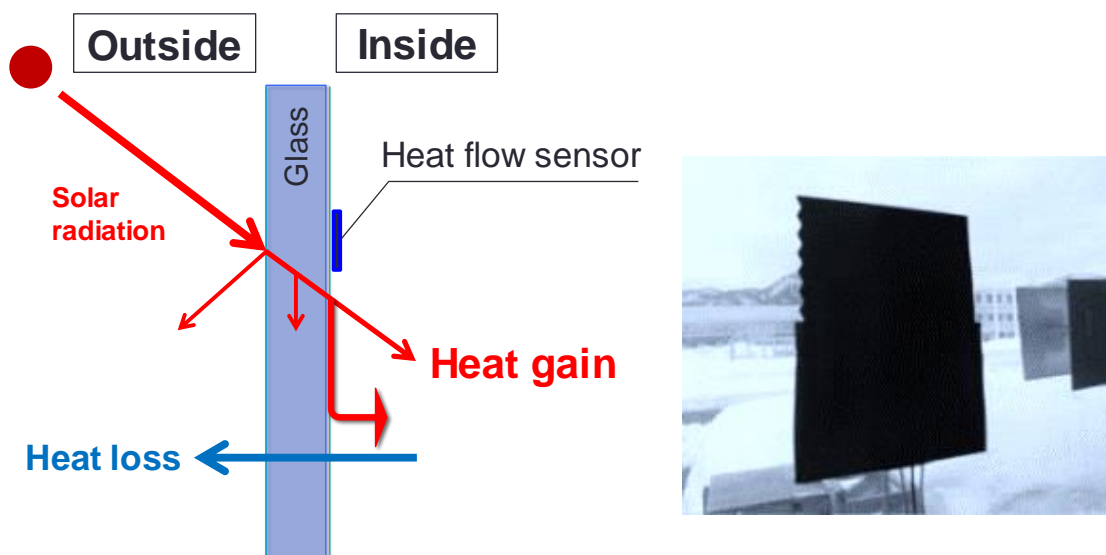


写真 3.1 熱流計

図 3.15 窓の熱収支

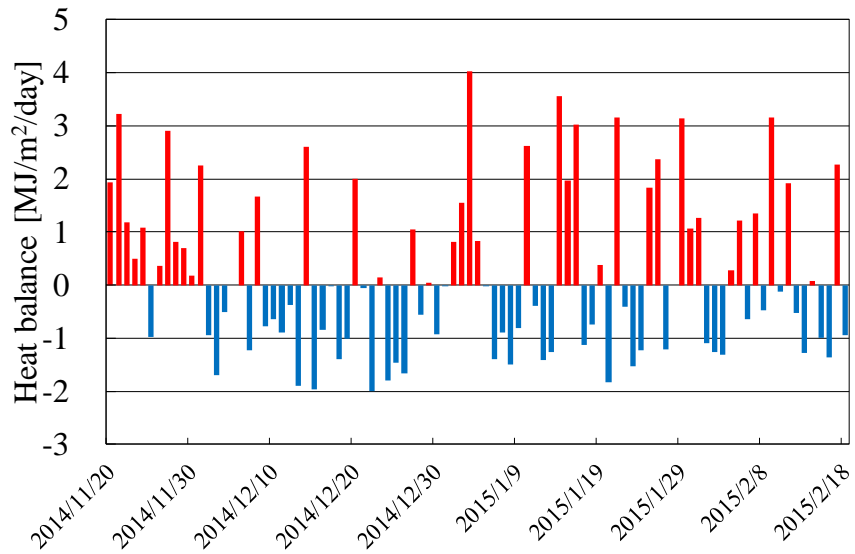


図 3.16 窓の熱収支測定結果

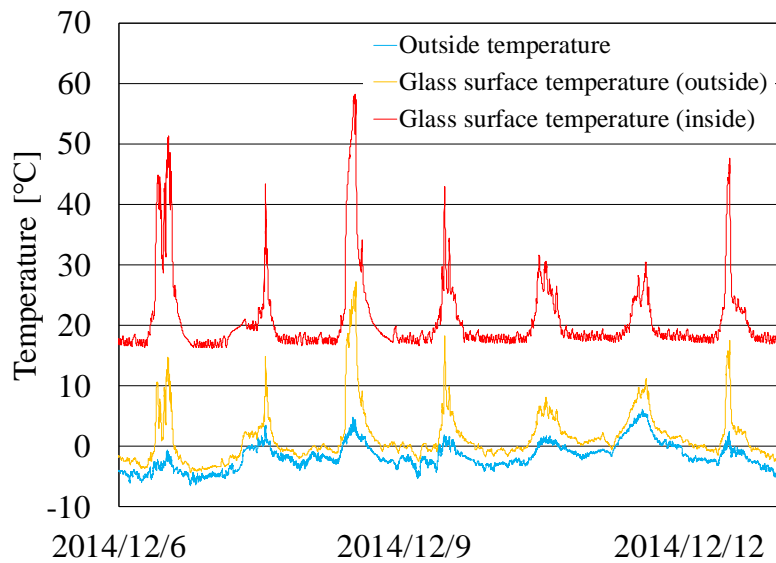


図 3.17 窓の表面温度の推移

室内外に日射計を鉛直に設置し、南鉛直面日射量と南鉛直面透過日射量の測定値から式(3.4)で定義した相当日射熱取得率を求めた。また、日積算日射熱取得量の実測値を図 3.18 に示す。太陽高度・入射角等の影響により、日射熱取得率(η 値) 実測値は 0.38[-]となった。また、図 3.19 に日射熱取得率の日推移を示す。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

$$\eta = q_{s,t} / q_{s,v} \quad (3.4)$$

η : 相当日射熱取得率 [-]

$q_{s,t}$: 透過日射量 [W/m^2]

$q_{s,v}$: 南鉛直面日射量 [W/m^2]

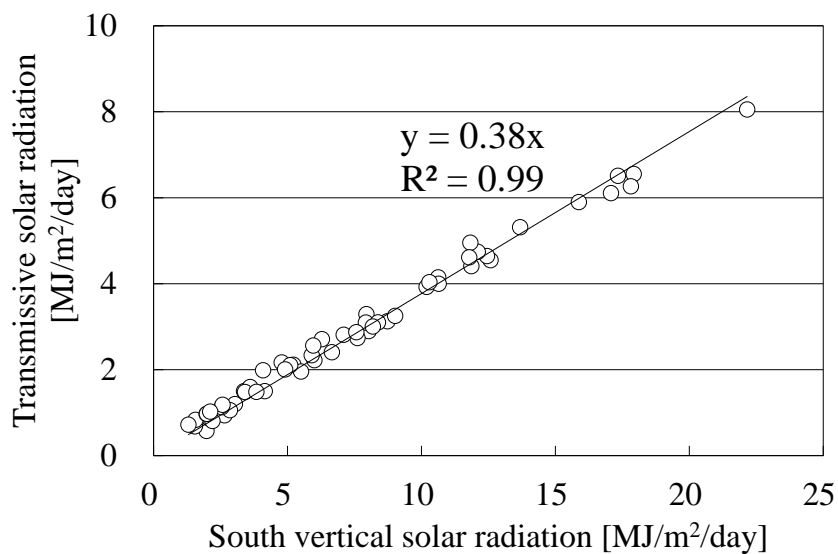


図 3.18 相当日射熱取得率の実測値

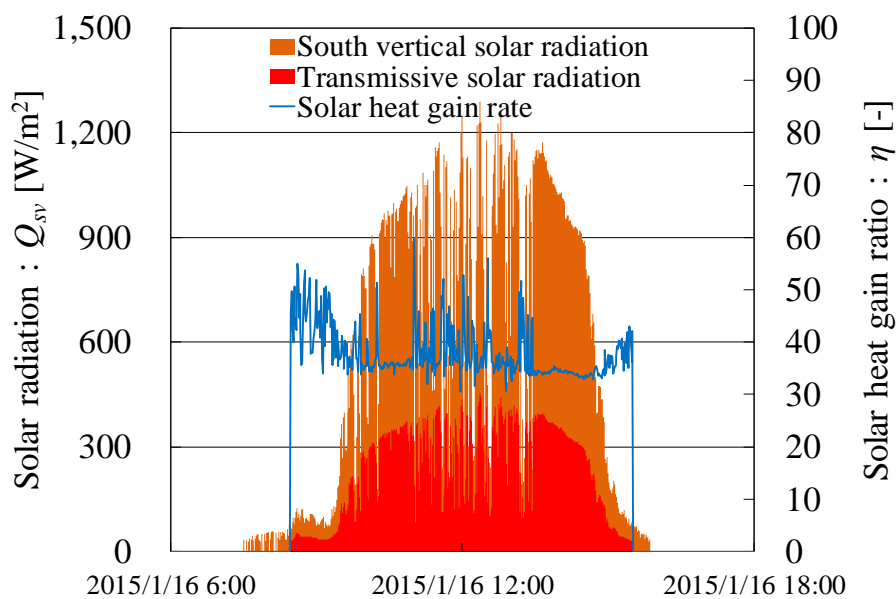


図 3.19 相当日射熱取得率の実測値 (時刻毎)

b) PCM 建材の室内環境改善効果

PCM 建材は室温変動を緩やかにする性質を有し、その施工量や施工方法、融点によっても効果は異なる。既往の研究では PCM 厚さや融点に関して議論がなされてきたが^{3.6),3.7)}、蓄熱材の種類により加熱・冷却時の熱挙動が異なることや、冷却時に凝固点以下の温度域においても固体化されないといった過冷却現象も懸念されることから、融点(融解開始温度)のみでその最適解について議論することは困難である。PCM 建材が室内環境に及ぼす影響に関わる因子には、蓄熱量や融点の他に凝固点や相変化温度幅があり、これらについても検討する必要がある。

実験棟で得られた自然室温の推移を図 3.20 に、連続暖房時における室温の推移を図 3.21 に示す。また、熱性能試験から得られた測定間隔である 30 秒ごとの温度上昇に対する蓄熱量(瞬間蓄熱量)を図 3.22 に示す。

融点 26°C の gPCM を混和させた試験体が、潜熱蓄熱の能力を発現させる温度帯は加熱時で 26~31°C 程度、冷却時で 20~27°C 程度となり、加熱時と冷却域では温度帯が異なることがわかる。

室内環境を考慮した場合、一般に加熱時は過昇温抑制効果、冷却時は冷込抑制の効果が考えられることから、融点と凝固点の双方の議論が必要となろう。図 3.20 より加熱時は融点よりも高い温度で潜熱蓄熱の効果が見られることから、上限とする設計室温をピーク融点から相変化終了温度とすることで環境改善効果が期待できる。

冷却時の温度帯(20~27°C)において温度降下が緩慢になっていることから(図 3.20)、凝固点は夜間の設計室温付近にあることが望ましいと考えられる。連続暖房時の室温推移をみると日中は融点付近で温度上昇が緩慢になり、日中の過昇温が抑制されていることがわかる(図 3.21)。

また、室温が融点以上になる日では暖房需要の生起時刻が遅延しており、パッシブ蓄熱効果の一端を示した。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

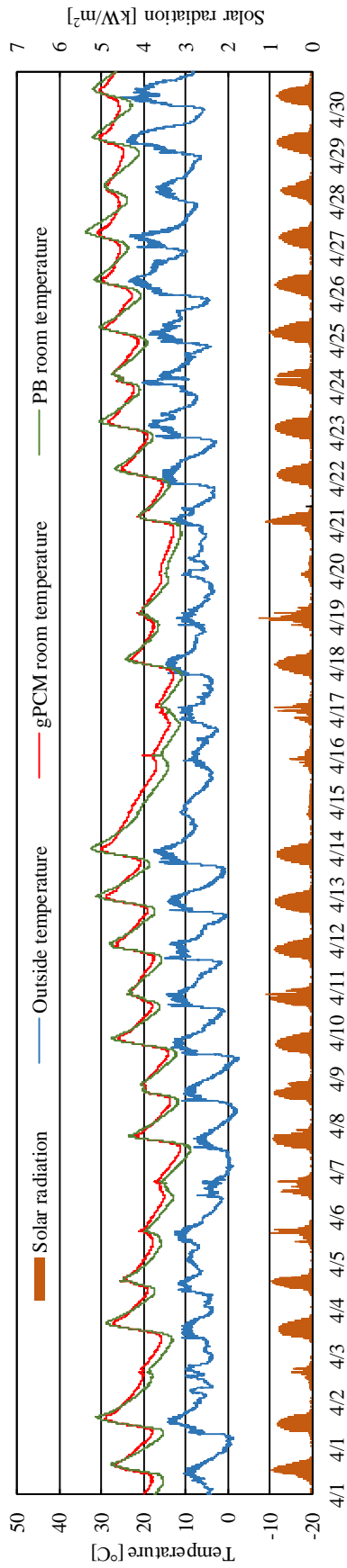


図 3.20 自然室温 (2015.4.1-2015.4.30)

78

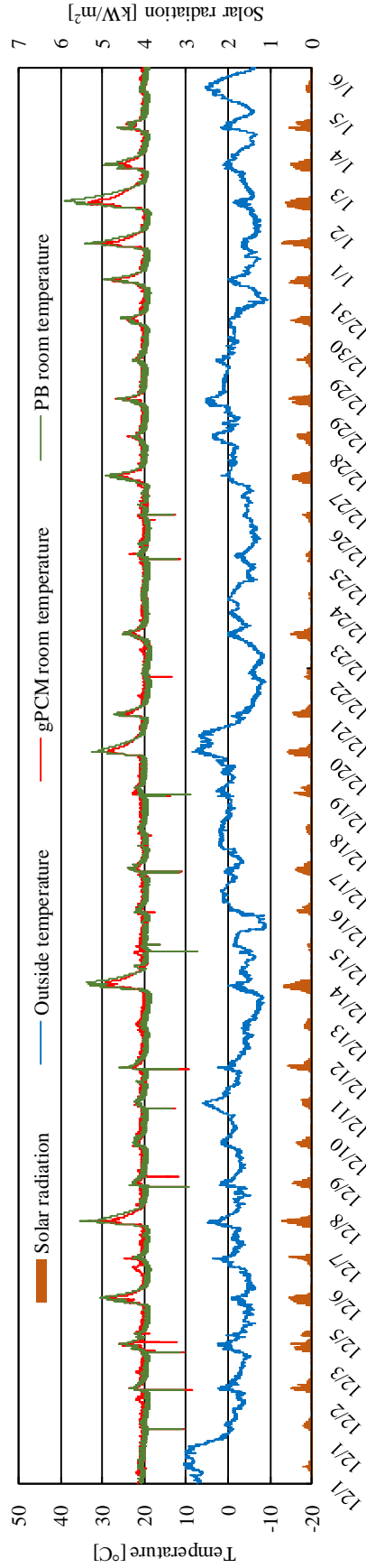


図 3.21 連続暖房時 (2014.12.18-2015.1.6)

図 3.23 及び図 3.24 に PB 室と gPCM 室の自然室温測定時における日最高室温と日最低室温を示す。図 3.23 では、PB 室の最高室温が 20°C を超える日では gPCM 室の過昇温抑制効果が見られた。

図 3.24 より、gPCM 室の最低室温は PB 室よりも常に高い値を示しており、5～17°C の範囲では約 1～2°C の冷込防止効果が期待できる。ただし、これらの温度域は相変化の温度域ではないため、母材である漆喰の顕熱蓄熱による効果及び前日までの蓄熱量による効果であることが考えられる。

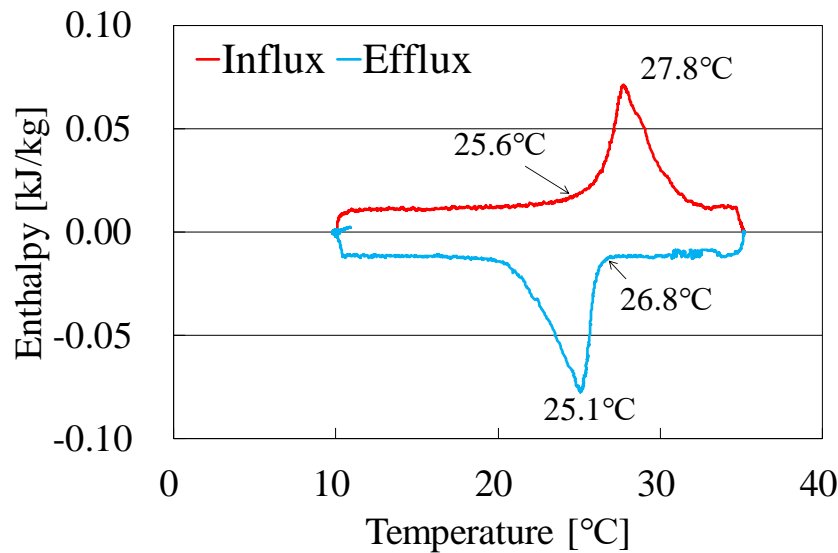


図 3.22 瞬間蓄熱量 (30 秒ごと : g26p20 40min./K)

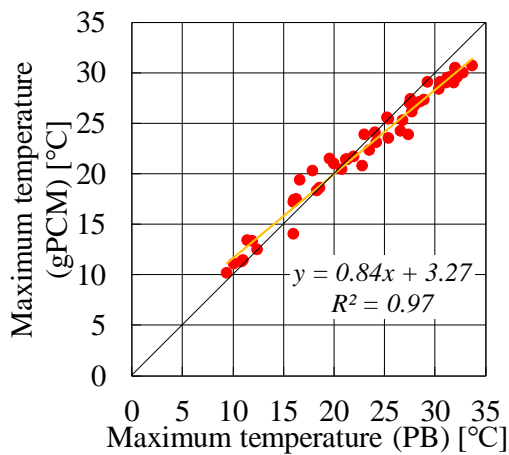


図 3.23 最高室温の比較

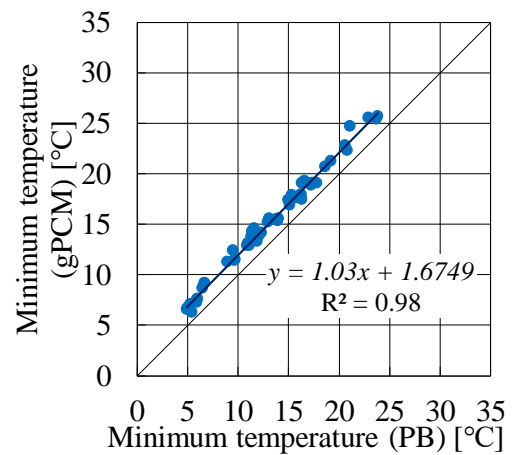


図 3.24 最低室温の比較

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

日最高気温と翌朝の最低室温を比較して図 3.25 に示すが,PCM により冷え込みが 2~4°C 抑制されることが確認できた。

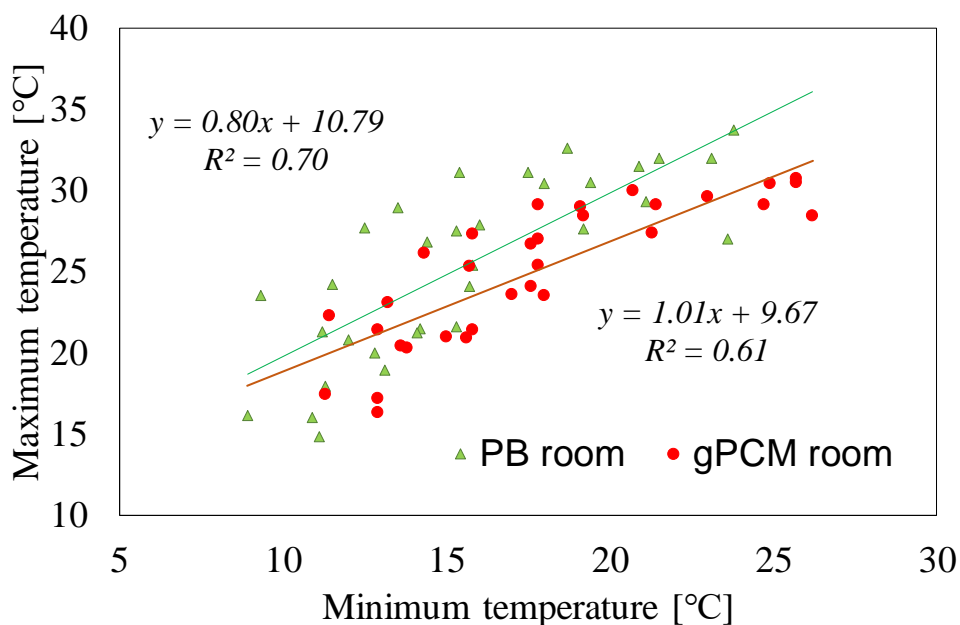


図 3.25 最高室温と最低室温の比較

c) 実験棟における蓄熱層内の熱挙動

これまで、熱性能試験で比熱や蓄熱量を含む熱性能を検討してきたが、実験棟レベルの壁体で断熱層も含めた熱挙動は確認されていない。本節では、実験棟に施工した蓄熱層(図 3.26)の両表面に熱流計及びシート型熱電対を設置し、実環境における熱挙動を測定した。

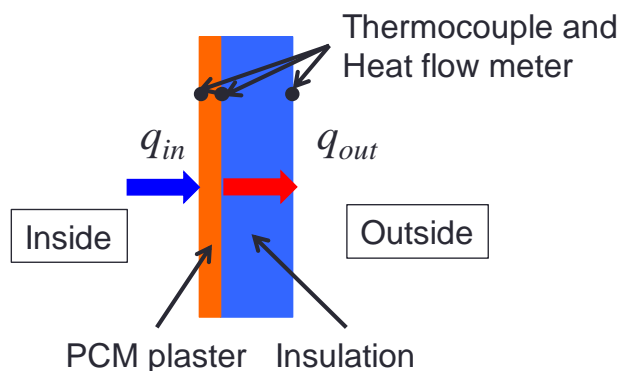


図 3.26 断面図

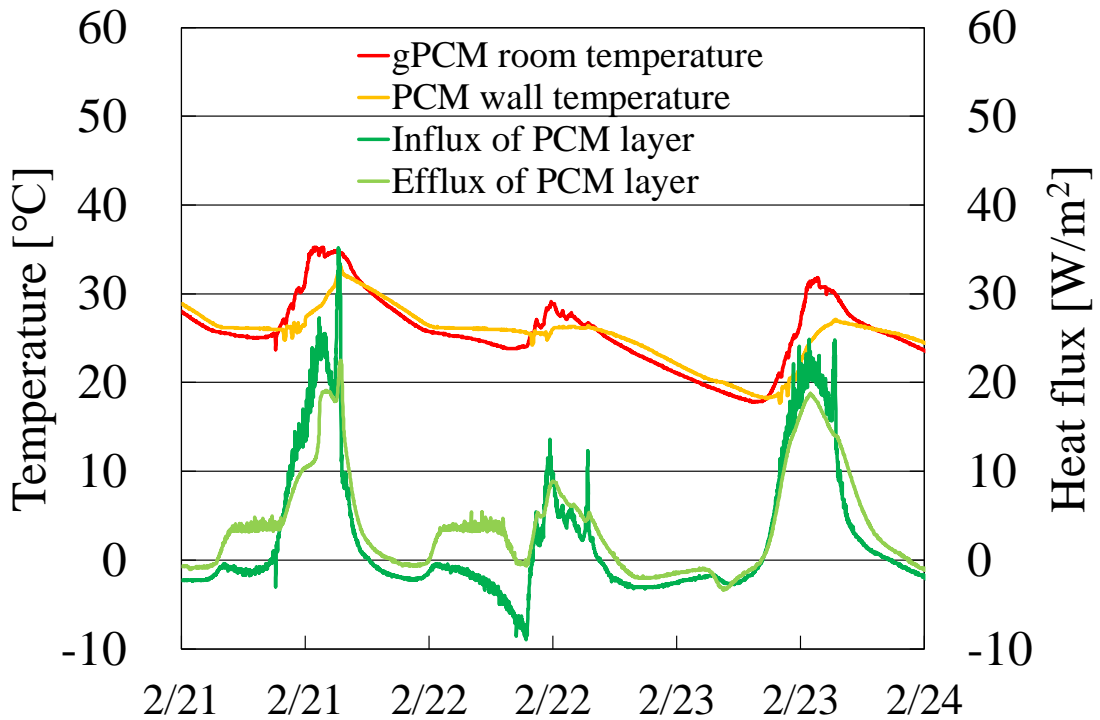


図 3.27 PCM 層の温度と熱流の推移

蓄熱層の両表面温度の経時変化を図 3.27 に示す。壁体表面温度の推移から、2 月 21 日は固液混相域から液相域まで相変化していると考えられ、周囲温度(室温)が 35°C 程度の時、蓄熱層の温度は約 27°C となった。これは第 2 章で示した熱性能試験結果と同様の傾向を示している。蓄熱層の表面温度の経時変化を熱流とともに図 3.28 に示すが、日中の蓄熱過程において表面温度差が大きくなり、蓄熱量が増大していることがわかる。また、夜間には室内側 q_{in} の値が負の値を取り、蓄熱層から室内へと熱が流入している。

日中の表面熱流(図中の緑ライン)は、蓄熱層に接する断熱層の表面温度と外気温の差及び熱抵抗(壁面熱貫流率 $0.18\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ 、外気側表面熱伝達抵抗 $0.04\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)から予測した熱貫流量(図中の青ライン)を上回るものの夜間の熱流量は貫流量よりも小さく、PCM の蓄・放熱現象が示唆される(図 3.29)。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

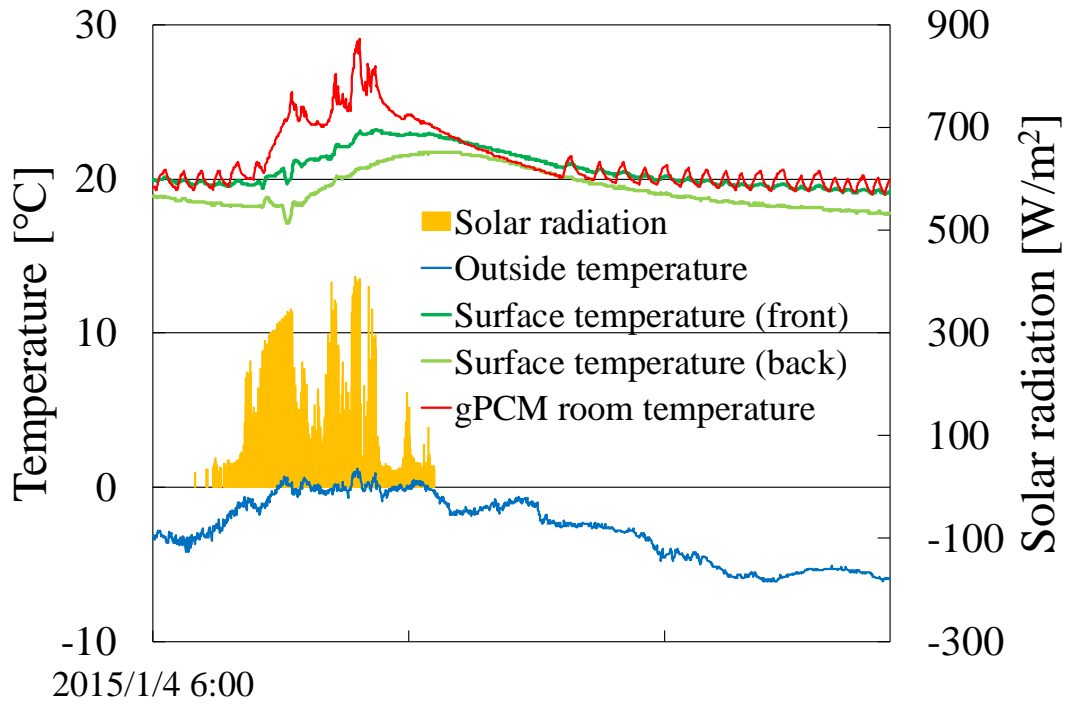


図 3.28 PCM 層の表面温度

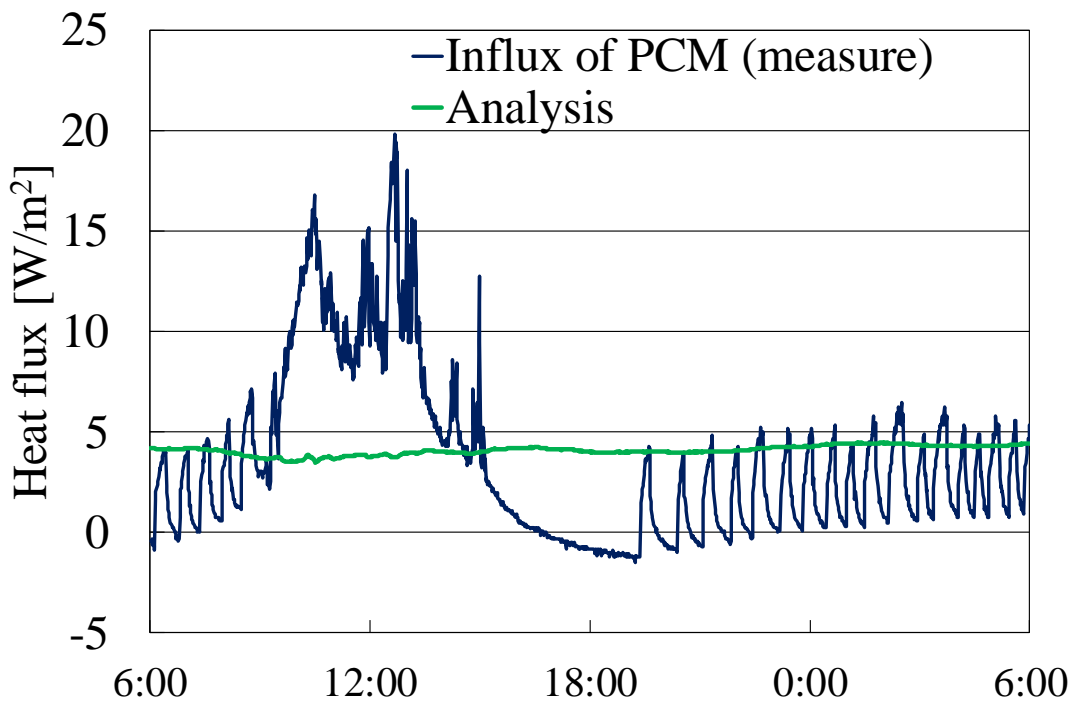


図 3.29 PCM 層の熱流 (2015/1/4)

また、式(3.5)に示すように表面熱流に蓄熱層厚さを乗じて室温と蓄熱層表面温度との差で除し、蓄熱層の熱移動率を定義して図 3.30 に示す。

母材である石膏の熱伝導率は約 0.18 W/m/K であるのに対し、放熱時には熱移動率が小さくなっている。また、夜間には暖房のオンオフの繰り返しの伴い測定値が変動しているものの、潜熱蓄熱材の影響によりみかけの断熱性能が高くなっていることが実験的に観測できた。

特に蓄放熱量の多い代表日における蓄熱層の蓄熱量を図 3.31 に示す。なお、蓄熱量は第 2 章の式(2.2)で定義した蓄熱量の式を参考に算出した。蓄熱層の温度は、室内側と室外側で計測された温度の平均値とした。蓄熱層の蓄熱量は 27°C 付近で急激に上昇していることから、第 2 章で与えた昇温速度 20 min./K や 40 min./K の条件での結果とほぼ一致した。

ただし、冷却過程においては今後も検討が必要である。蓄熱層の室内側熱流を室内温度と蓄熱層表面温度の差で除して等価的な表面熱伝達率を定義し(式(3.6))、図 3.32 に示す。表面熱伝達率は 3.7 W/m²/K 程度となった。センサの表面をアルミテープで固定しているため、放射成分は小さく、この数字は主に対流成分を表していると考えられる。

$$\lambda' = q_{in} l / \Delta\theta_t \quad (3.5)$$

λ' : 熱移動率 [W/m/K]

q_{in} : 蓄熱層表面熱流 [W/m²]

l : 蓄熱層厚さ[m]

$\Delta\theta_t$: 蓄熱層表面温度差 [K]

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

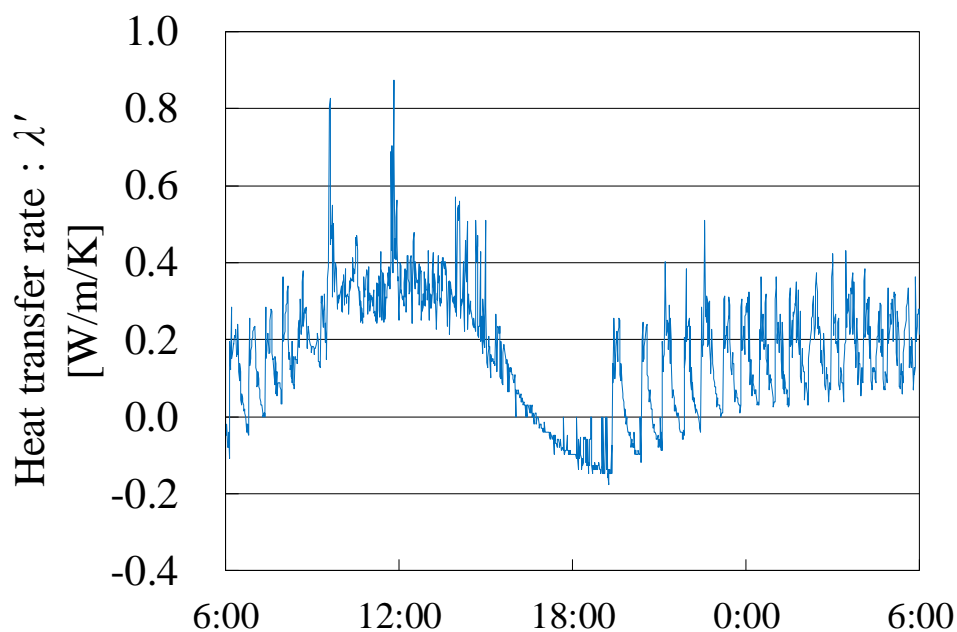


図 3.30 熱移動率 (2015/1/4)

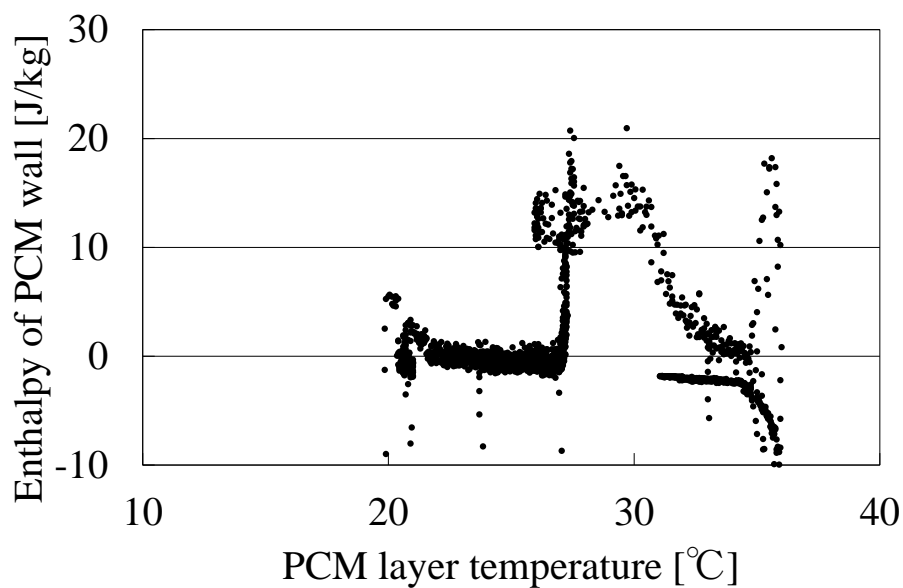


図 3.31 PCM 層の瞬間蓄熱量

$$\alpha = q_{in} / (\theta_{in} - \theta_{wall}) \quad (3.6)$$

α : 表面熱伝達率 [W/m²/K]

θ_{in} : 室温 [°C]

θ_{wall} : 壁温 [°C]

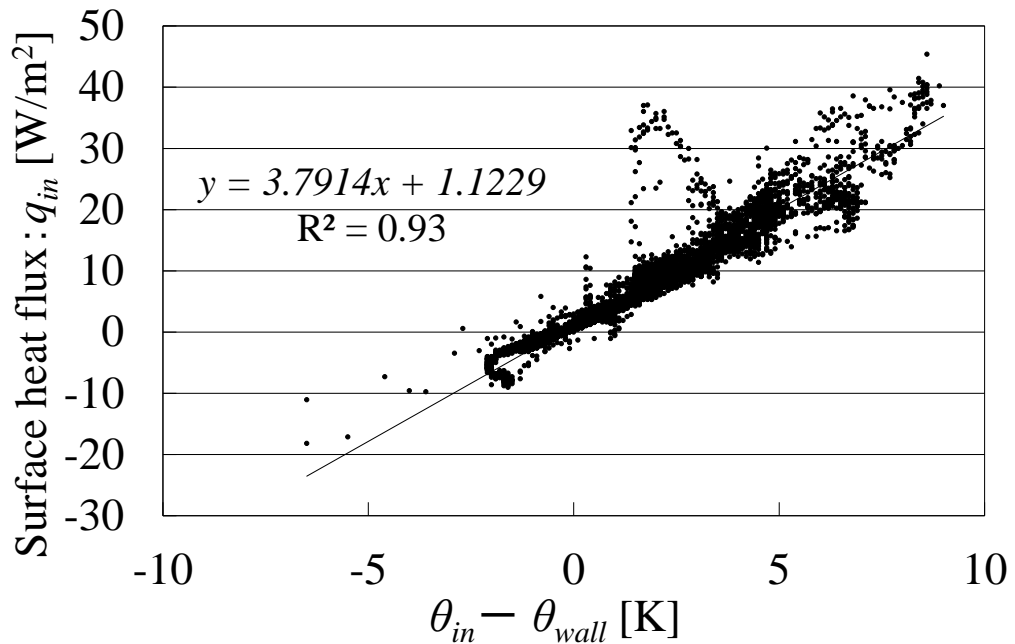


図 3.32 PCM 層の見かけの熱伝達率

gPCM 室と PB 室の日積算暖房量から式(3.7)により定義した暖房削減量及び式(3.8)により定義した削減率の推移を図 3.33 に示す。実測期間中、gPCM 室の暖房量は PB 室と比較すると常に低く、暖房削減率は測定期間積算値で 16.9% であることから、PCM 建材の暖房量削減効果が確認できた。

$$\Delta Q = Q_{h,PB} - Q_{h,PCM} \quad (3.7)$$

$$\varphi = 1 - Q_{h,PCM} / Q_{h,PB} \quad (3.8)$$

ΔQ : 暖房削減量 [W/m²/day]

$\Delta Q_{h,PB}$: PB 室の暖房量[W/m²/day]

$\Delta Q_{h,PCM}$: gPCM 室の暖房量 [W/m²/day]

φ : 削減率 [%]

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

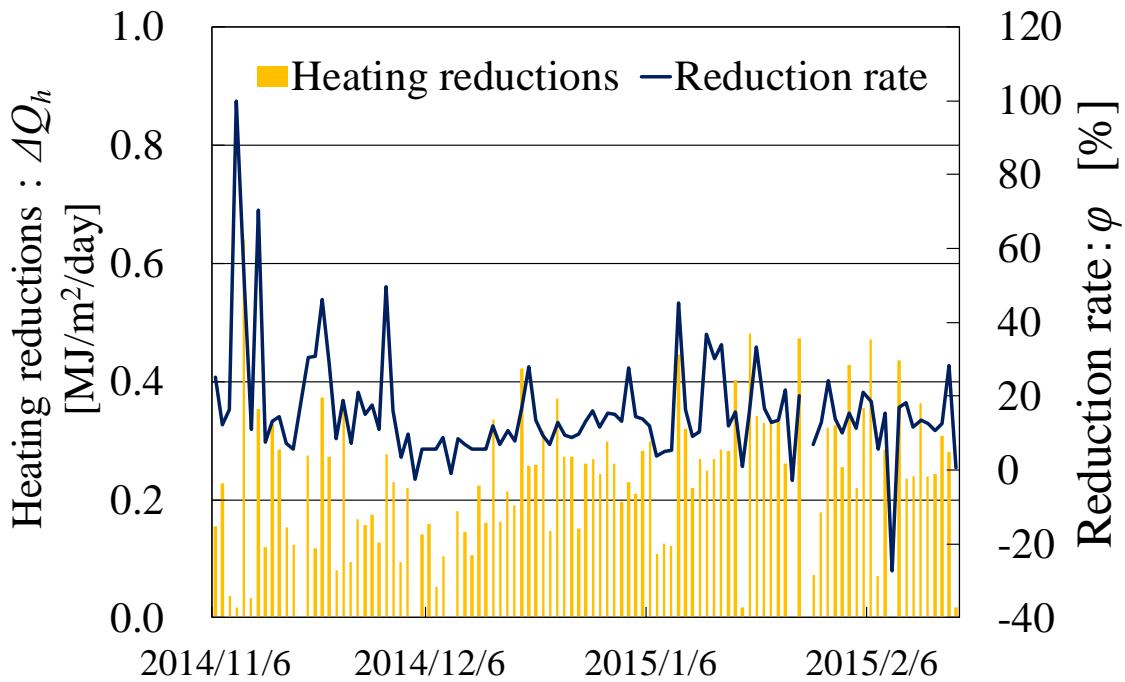


図 3.33 PCM 内装左官材の省エネルギー効果

3.2.2 PCM の施工位置が省エネルギーと環境改善効果に及ぼす影響

a) マイクロカプセル PCM とゲル状 PCM の比較

本節では、マイクロカプセル化した n-パラフィン(三木理研工業製; PMCD-25SP) を配合した潜熱蓄熱内装左官材を室内側表面に左官施工した mPCM 室と、複層アルミパックにゲル状 PCM(JSR(株)製 ; CALGRIP)を封入し内装下地の後背部に施工した gelPCM 室の 2 室で比較検討を行い、施工方法の違いによる蓄熱建材の効果の違いを考察する。

各室の平面図を図 3.34 に、外壁断面図を図 3.35 に示す。それぞれの室の断面は、仕上げ部分の構造のみ異なる。なお、PB 室は 2011 年に gelPCM 室へと改修工事が行われた。各室の概要を表 3.3 に示す。暖房は前節と同様に、白熱電球を用い、サーモスタットで設定室温(20°C)を下回らないようにオンオフ制御しながら 24 時間連続運転した。なお、装置の電流をクランプメーターで測定し、暖房負荷を計算した。

3. PCM内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

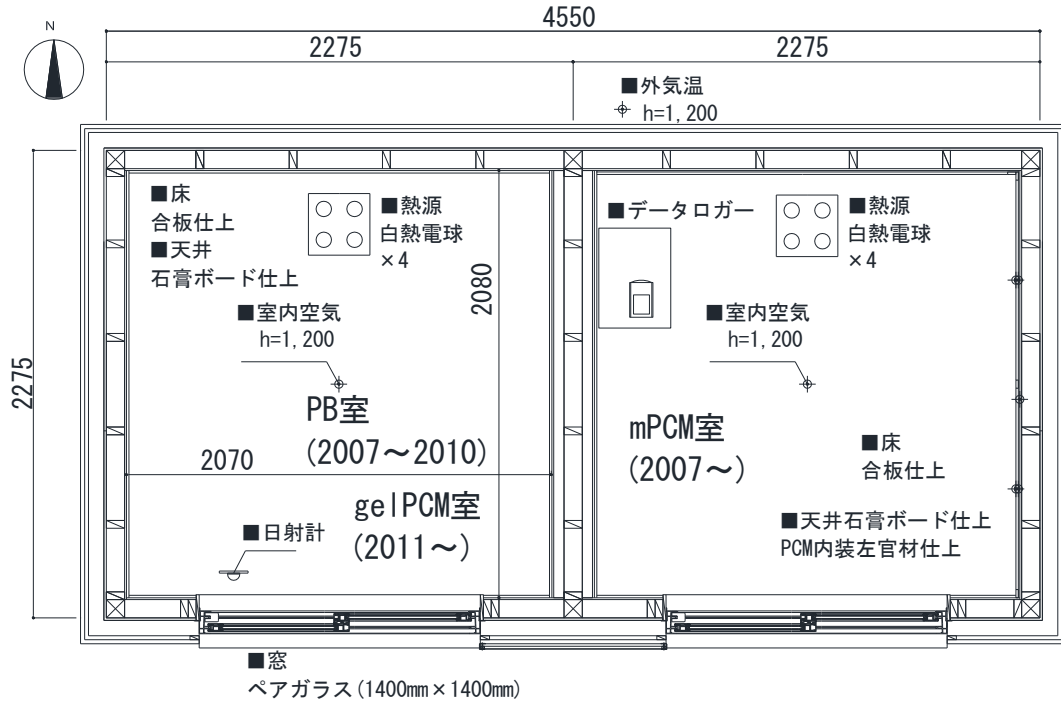


図 3.34 測定点と実験器具の配置

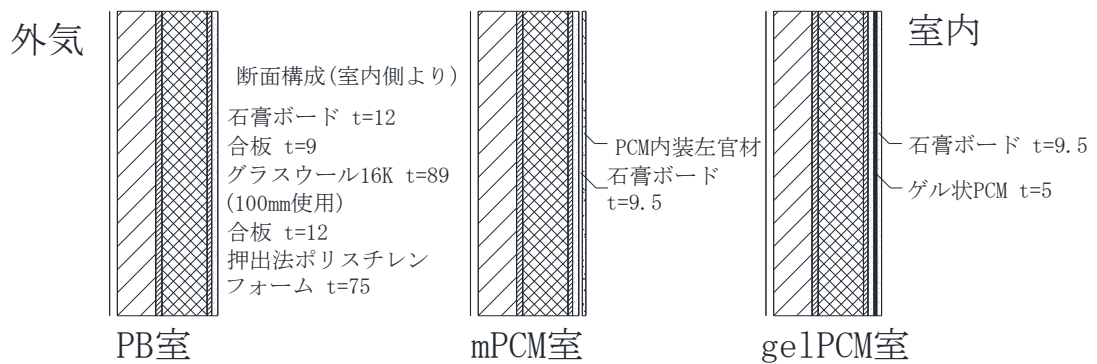


図 3.35 実験棟の各室外壁断面図

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

表 3.3 実験棟の各室概要

Name	PB room	mPCM room	gelPCM room
Size	W2,080×D2,070×H2,400 mm		
q value	1.1 W/(m ² ·K)		
PCM shape	—	mPCM	gelPCM
Melting point	—	25 °C	25 °C
Latent heat amount	—	170 kJ/kg	180 kJ/kg
PCM quantity	—	28 kg	30 kg

窪田ら^{3.5)}は、集中定数系仮定を RC 建築物に適用し、室温変動を時定数で評価した。近藤ら^{3.8)}は、潜熱蓄熱材を適用した室において、潜熱蓄熱の効果を検討したが、潜熱蓄熱材の施工方法の違いによる効果比較についての知見は少なく、日射熱取得の有効利用率に関する指標や熱容量の評価方法は定められていない。

本節では異なる施工方法によって同量程度の潜熱蓄熱層を付与した 2 室の熱容量と省エネルギー効果の関係を明らかにするために、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を採用し、各室の熱容量を室温変動率から予測した。

一般的に集中定数系は、熱容量の大きい建築物には適さないことが指摘されているが、暖房時間が一定以上長く壁温と空気温がほぼ等しいとされる時間においては十分な精度で評価できることが知られている。

また、PCM の相変化領域における室温変動は、指数関数的な挙動を示さないことが予見されるが、PCM 建材の潜熱量を加味した見かけの熱容量を有効熱容量と定義し、集中定数系仮定による有効熱容量の定量化と比較を試みた。

また、本節では朝方の冷え込み防止効果など、比較的長時間経過後の室温挙動の差異に着目した。図 3.27 及び図 3.28 に示したように^{3.9)}、潜熱蓄熱材を内装材として適用した室において、日没後に室温が下降していく過程では壁温(室内側表面温度)と室の中心における空気温は、概ね等しいことが実験的に確認されている。

そこで、日射の影響を受けず外気温の変動が比較的少ない日没後の時間帯において、暖房機器停止時から4時間後までの各室の室温降下率 $\varepsilon[-]$ から有効熱容量を式(3.2)、式(3.3)で求め、室温変動率を図 3.36 に示す。凡例内の括弧書きに初期の室温を示した。また、各室の有効熱容量を表 3.4 に示す。

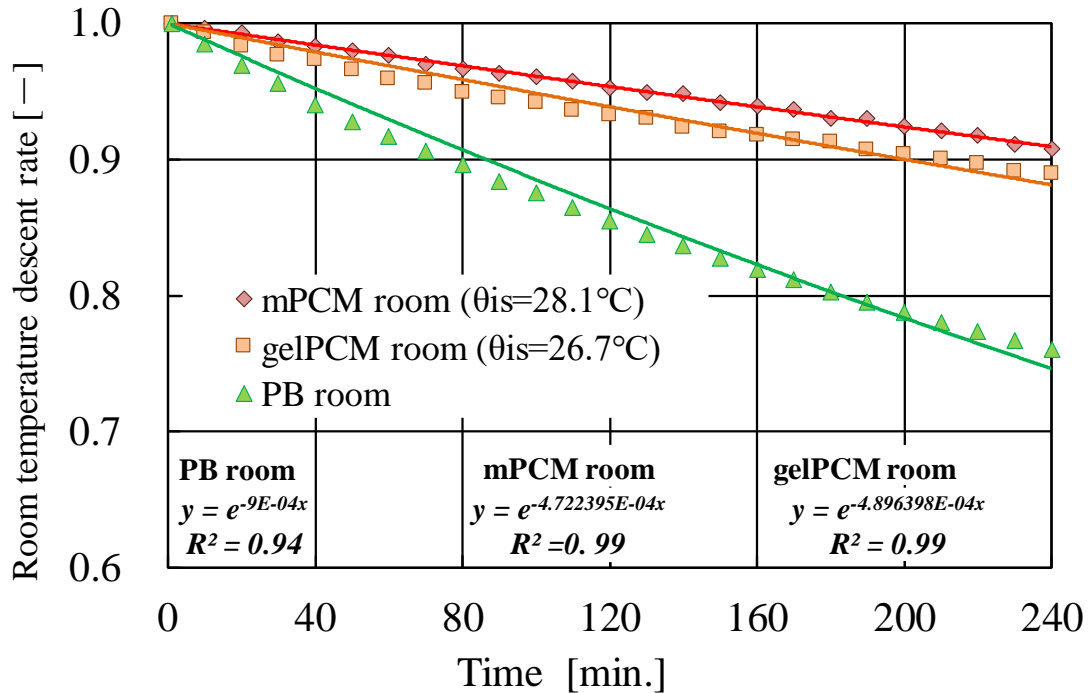


図 3.36 室温降下率

表 3.4 有効熱容量

	PB room	mPCM room	gelPCM room
Latent heat amount [kJ/m ²]	—	811	1042
Effective heat capacity [kJ/(m ² · K)]	73	140	134

図より、蓄熱性能を付与した mPCM 室と gelPCM 室の室温降下は PB 室に比較すると緩慢であり、潜熱蓄熱材を適用することによる暖房停止後の室温降下の抑制が確認できる。

一方、mPCM 室と gelPCM 室を比較すると、mPCM 室の室温降下が僅かではあるが緩慢になっている。これは、mPCM 室では仕上げ表面に潜熱蓄熱層を

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

施工しているのに対し、gelPCM 室では仕上げ層よりも断熱層側に施工されていることから、gelPCM 室の蓄熱層の温度変化が室温変化よりも遅延することに起因するものと考えられる。

表 3.4 より、PCM を施工した室の有効熱容量を PB 室と比較してみると、おのおの有効熱容量が 2 倍程度に増大していることがわかる。また、gelPCM 室は mPCM 室よりも多くの潜熱量を有するものの gelPCM 室の有効熱容量は mPCM 室よりも小さく、蓄熱層を室内に露出して施工する工法の有効性を示唆している。

b) 冬季の過昇温抑制効果

近年、住宅の断熱性能向上にともない日射熱取得による過昇温（オーバーヒート）の発現が懸念されている。室に熱容量を付与することで室温変動が緩和されることは公知であるが、PCM 建材でも同様の効果が得られるかに着目して実験的な検討を行い、前章で示した各室の過昇温抑制効果を評価した。

冬季における過昇温の抑制効果を定量的に明らかにするために室内の熱取得と熱損失は等しくなるとの仮定のもと、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。なお、室温と外気温は日平均値、透過日射量は日積算値を用いた。

暖房期の PB 室、mPCM 室の日平均室温と、日積算透過日射量 Q_s の重回帰式から予測した室温の計算結果（外挿線）を図 3.37 及び図 3.38 に併せて示す。説明変数は日平均室温および日積算透過日射量である。回帰式の決定係数はそれぞれ、0.86、0.79 であり、日平均室温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。

同様の方法で gelPCM 室の室温についても重回帰分析を行い、それぞれの説明変数に対する回帰係数及び決定係数を表 3.5 にまとめて示す。表から、各室の室温は本報で示す重回帰分析により概ね予測することが可能ではあるものの、mPCM 室の決定係数がやや低い。これは前日の日射量が多い日で、前日の蓄熱量が翌日に影響していることも考えられる。

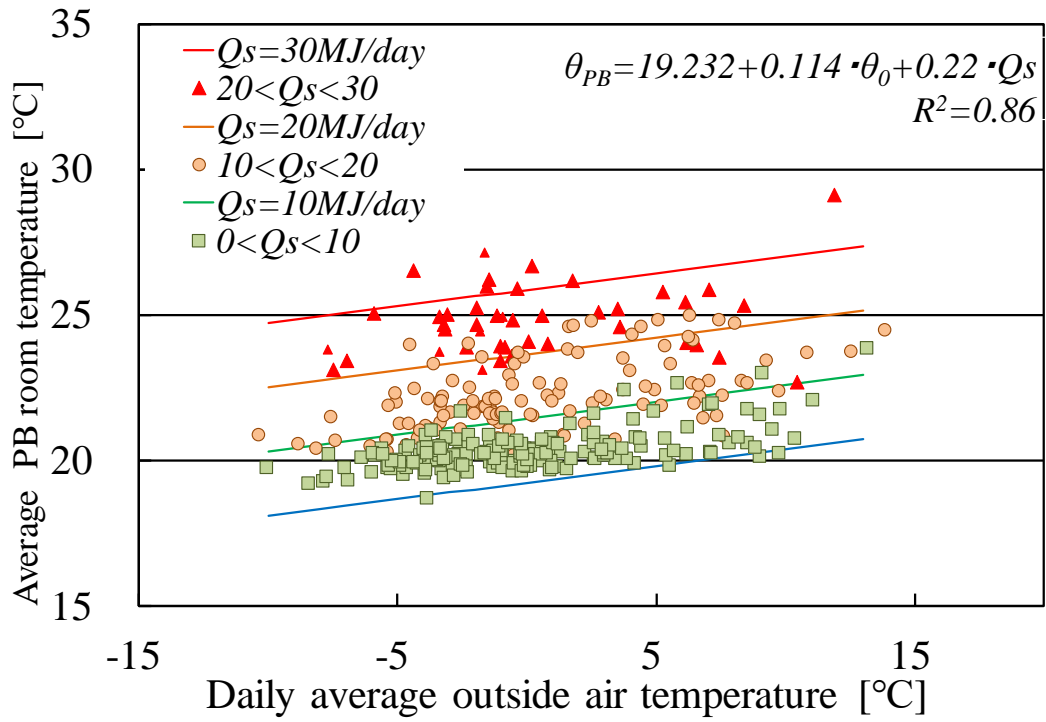


図 3.37 PB 室日平均室温

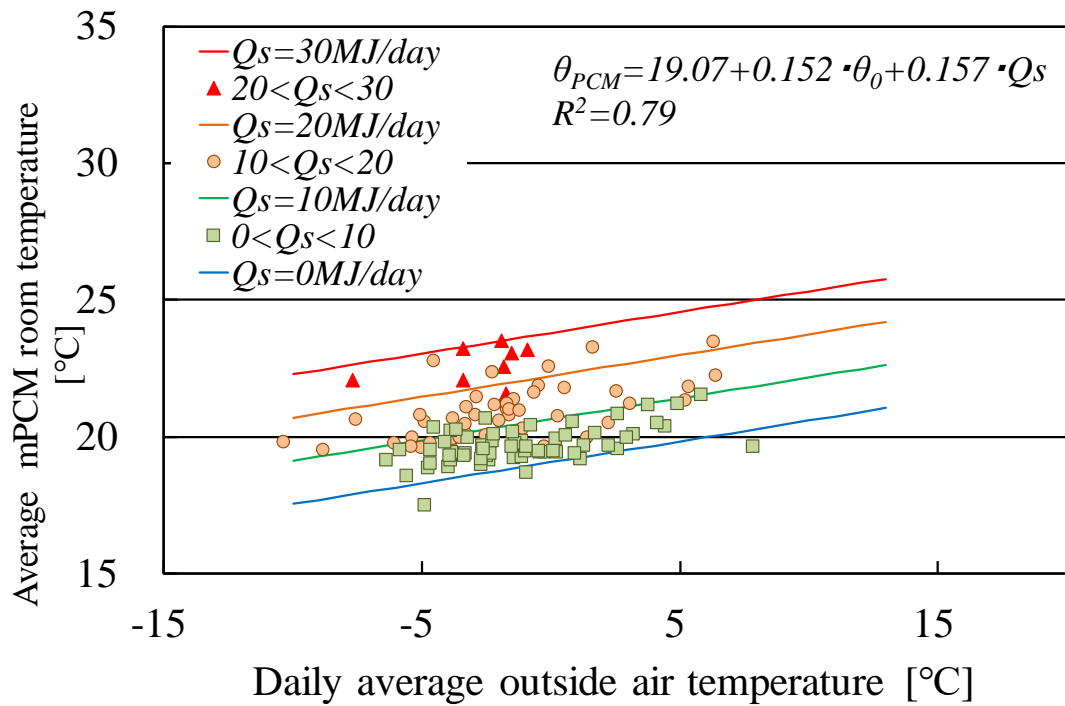


図 3.38 mPCM 室日平均室温

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

表 3.5 各室の日平均室温の回帰係数と決定係数

		PB room	mPCM room	gelPCM room
Regression coefficient	C_1	19.232	19.069	19.732
	C_2	0.114	0.152	0.090
	C_3	0.220	0.157	0.102
Determination coefficient	R^2	0.86	0.79	0.88

表 3.5 に示した回帰式より求めた gelPCM 室の室温と PB 室温との差分から、gelPCM 室の過昇温抑制量を求め図 3.39 に示す。また、mPCM 室と gelPCM 室の過昇温抑制量を式(3.9)、式(3.10)で定義して併せて示す。図より、gelPCM 室の過昇温抑制効果は、外気温及び日積算日射量に比例的して増大することがわかる。また日射量が多い日には約 3°C 程度の過昇温抑制効果がみられ、さらに外気温が高い程その効果が高いことがわかる。本章では当日の日射熱取得由来の蓄熱量を翌日までに放熱しきるという仮定のもと、日平均値及び日積算値の値を用いて重回帰分析により評価したところ、概ね日射量が多く、

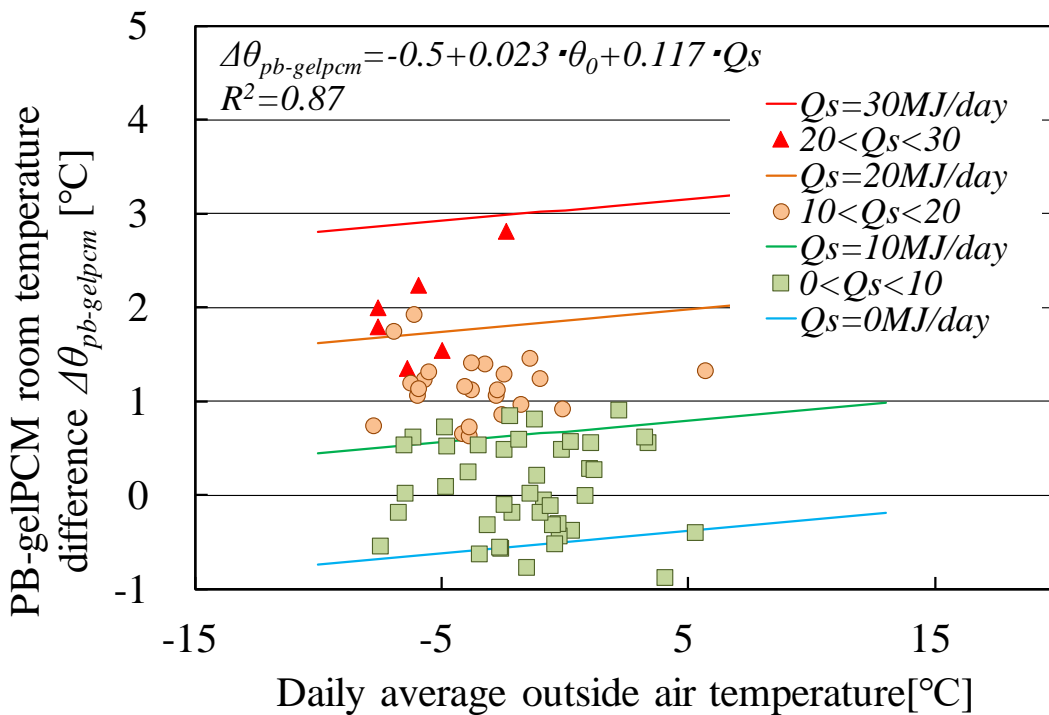


図 3.39 gelPCM 室の過昇温抑制効果

外気温が高い日にその効果が顕著にみられることがわかった。

$$\Delta\theta_{PB-mPCM}=0.163-0.037\theta_o+0.063Q_s \quad (3.9)$$

$$\Delta\theta_{PB-gelPCM}=-0.5+0.023\theta_o+0.117Q_s \quad (3.10)$$

$\Delta\theta_{PB-PCM}$: PCM による過昇温抑制量 [K]

θ_o : 日平均外気温 [°C]

Q_s : 南鉛直面日積算透過日射量 [MJ/day]

c) 暖房負荷抑制効果に関する検討

藤原ら^{3.10)}は、高断熱・高气密住宅の実態調査を行い、日平均内外温度差と暖房負荷に高い相関関係が見られることを示し、回帰直線から実測による熱損失係数(傾き)と自然温度差(x 切片)を算出した。

本章では各室の蓄熱建材の省エネルギー性能を把握するために、同様の手法を用いて等価的な断熱性能を実測により定量化した。2013年10月に実施された省エネルギー基準改定を参考に、外皮平均熱貫流率とともに整理した。各室の週平均の暖房負荷を外皮表面積で原単位化して整理し、週平均の内外温度差との関係を図3.40に示す。

図中の回帰式の傾きから実測外皮平均熱貫流率を求めたところ、PB室では0.4049[W/(m²・K)]となり、PB室の外皮平均熱貫流率の実測値は、計算値である0.40[W/(m²・K)]とほぼ同値を示した。

同様に mPCM 室、gelPCM 室の実測外皮平均熱貫流率を算出し、結果を図3.41にまとめた。PB室と比較した実測の外皮平均熱貫流率は、mPCM、gelPCM室でそれぞれ約10%、5%低い値を示した。

また、前述の回帰式の x 切片から実測の自然温度差を求め、各室の外皮平均熱貫流率の計算値と実測値と合わせて表3.6に示す。各室の自然温度差を比較すると、mPCM室が最も高い値を示した。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

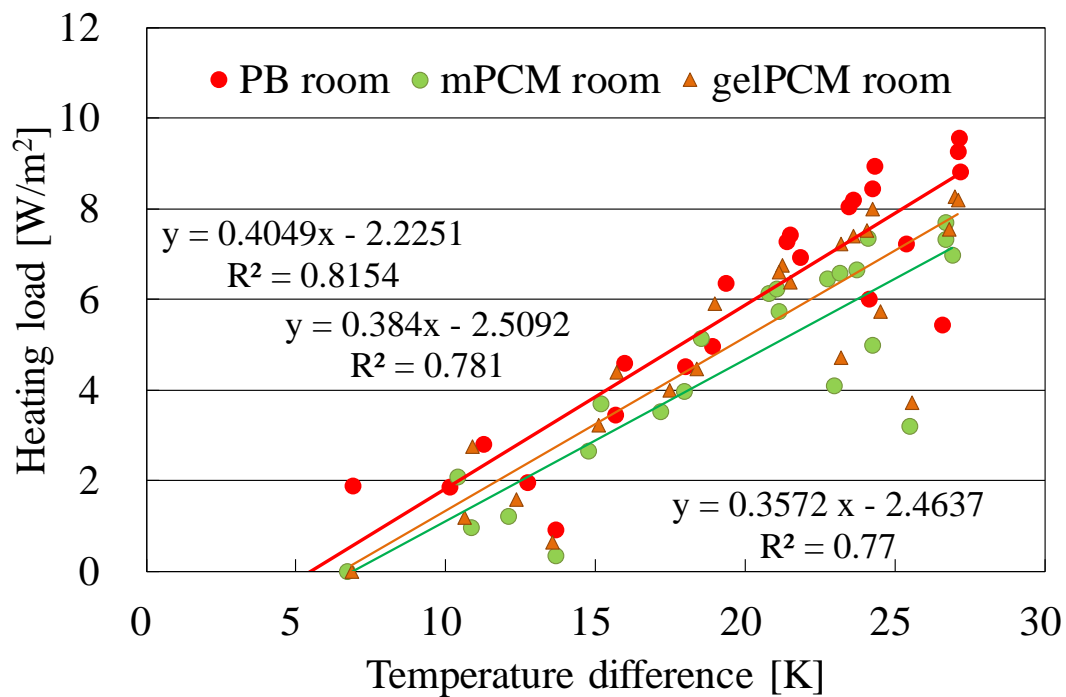


図 3.40 実測による外皮熱貫流率

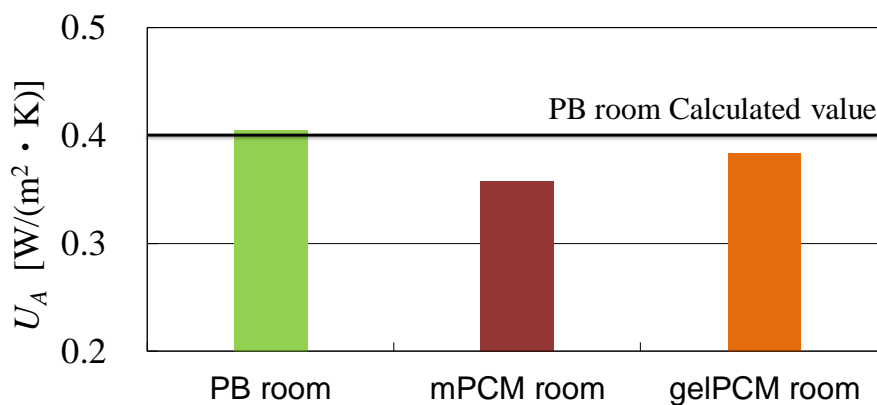


図 3.41 各室の実測外皮平均熱貫流率

表 3.6 外皮平均熱貫流率と自然温度差

	PB room	mPCM room	gelPCM room
Calculated U_A value [$W/(m^2 \cdot K)$]	0.40		
Measured U_A value [$W/(m^2 \cdot K)$]	0.40	0.36	0.38
Natural temperature difference [$^{\circ}C$]	5.5	6.9	6.5

実験棟において mPCM 室と gelPCM 室の 2 室で比較する検討を行ったが、PCM の入っていない PB 室のデータが不可欠である。PB 室は 2011 年に gelPCM 室へと改修工事を実施したため、PB 室の暖房負荷は 2007 年から 2010 年までの測定データを用いて重回帰分析により予測した(図 3.42)。前章と同様に説明変数は日平均外気温、日積算透過日射量とした。図中の線は、それぞれの日積算透過日射量を固定値で入れたときの目安である。

決定係数は 0.91 であり、PB 室の暖房負荷は図 3.42 の重回帰分析式から精度よく予測できる。また mPCM 室における重回帰分析の結果を図 3.43 に示す。mPCM 室と gelPCM 室の暖房負荷の測定値を、PB 室の予測値(2013 年の気象データ測定値を用いて予測した値)とともに図 3.44(重ね合わせグラフ)に示す。

また、PB 室と mPCM 室の暖房負荷の差を PB 室の暖房負荷で除して暖房削減率と定義し図中に示した。暖房負荷及び削減率の算出方法を式(3.11)、及び式(3.12)に示す。

なお図 3.44 における各室の暖房負荷は 1 週間ごとの積算値で整理している。実測期間中、mPCM 室の暖房負荷は他の 2 室に比較して常に低い値を示した。また、削減率は、特に暖房開始・終了時期において高い値を示していることがわかる。

さらに、PB 室の暖房負荷の予測値と実測値を比較して図 3.45 に示すが、予測値は実測値を精度よく再現している。表 3.7 に各室の暖房負荷の回帰係数を示すが、各室の暖房負荷とも概ね精度よく予測できた。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

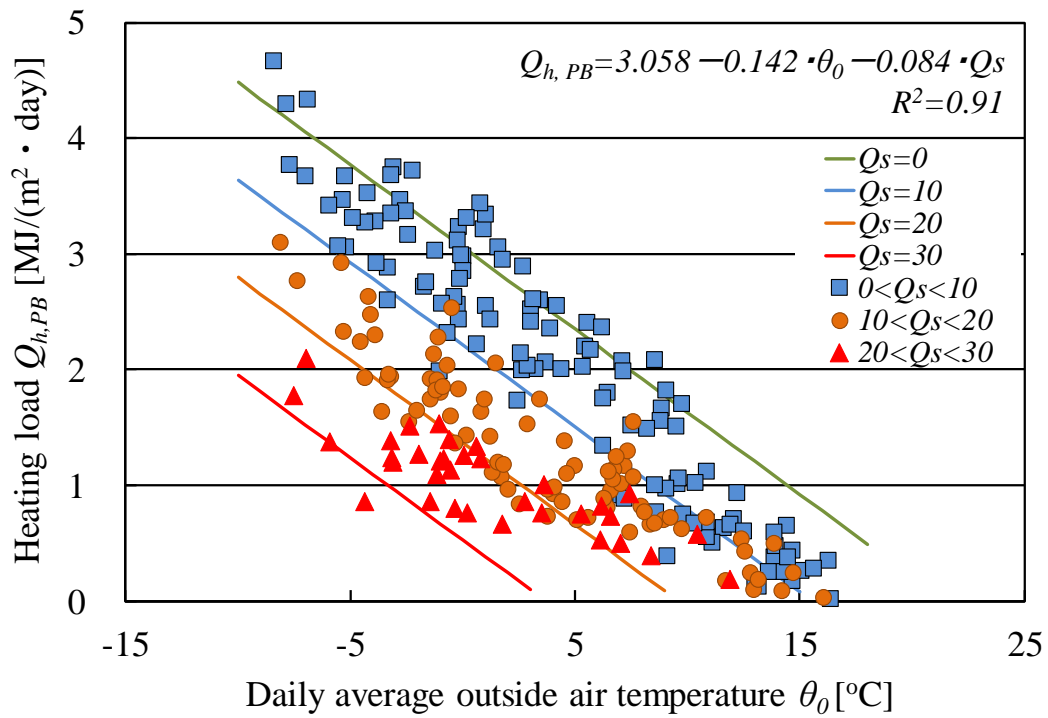


図 3.42 PB 室の暖房負荷 (原単位)

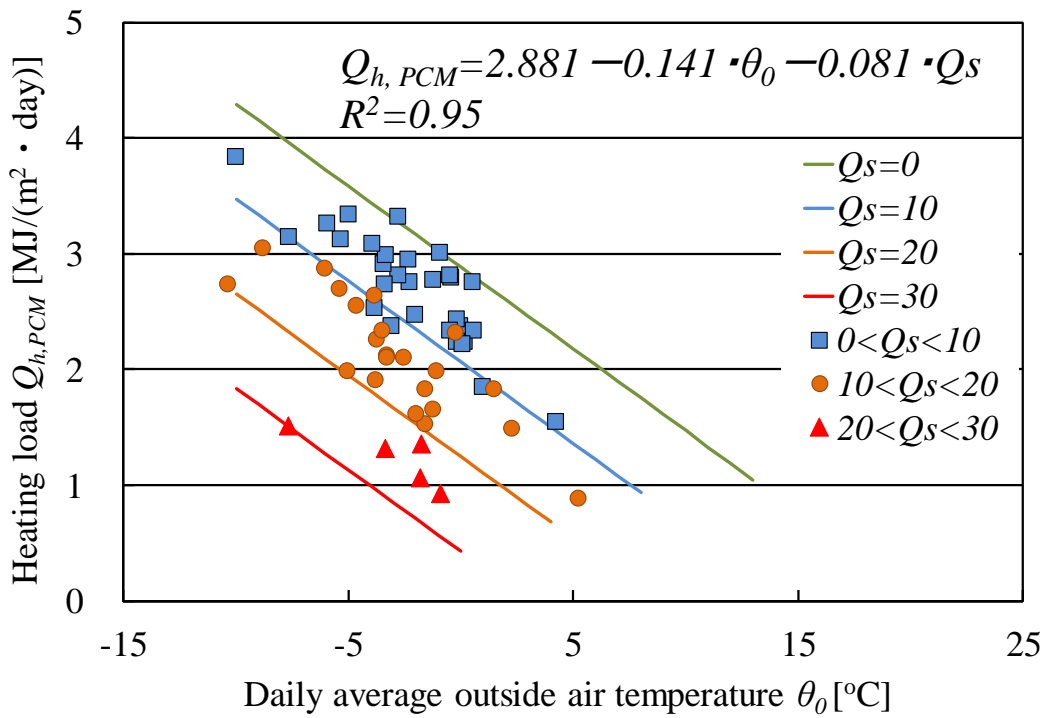


図 3.43 mPCM 室の暖房負荷 (原単位)

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

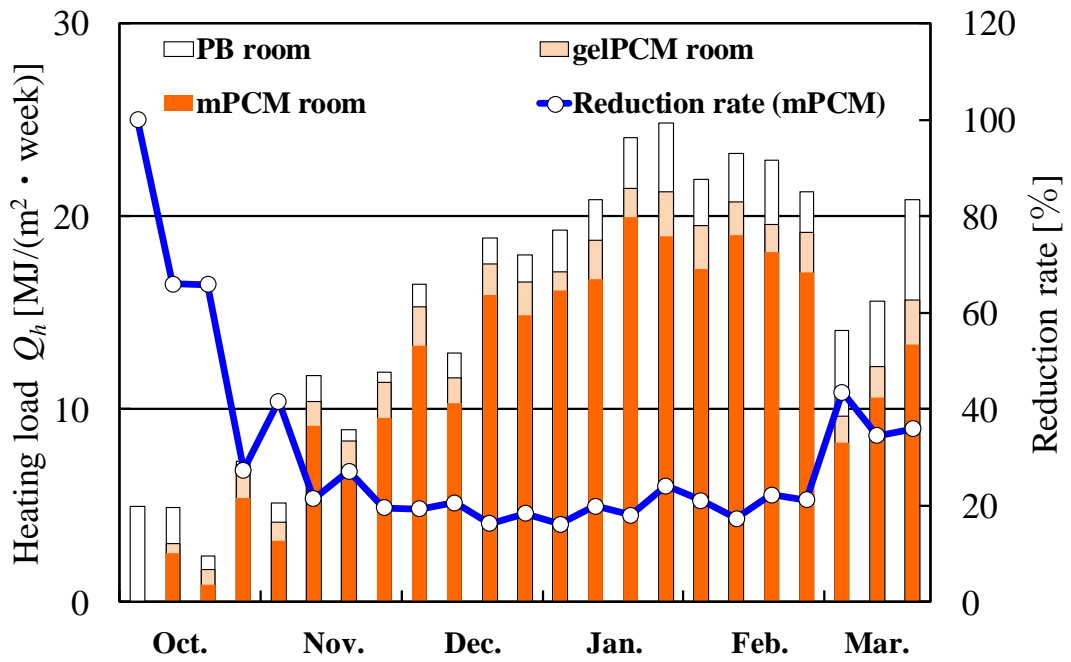


図 3.44 各室の省エネルギー効果

$$Q_h = \sum_j e_j \cdot \Delta t \quad (3.11)$$

$$\varphi = \frac{Q_{h,PB} - Q_{h,PCM}}{Q_{h,PB}} \quad (3.12)$$

Q_h : 暖房量 [MJ/day]

e_j : 消費電力 [W]

t : 時間 [s]

φ : 削減率 [%]

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

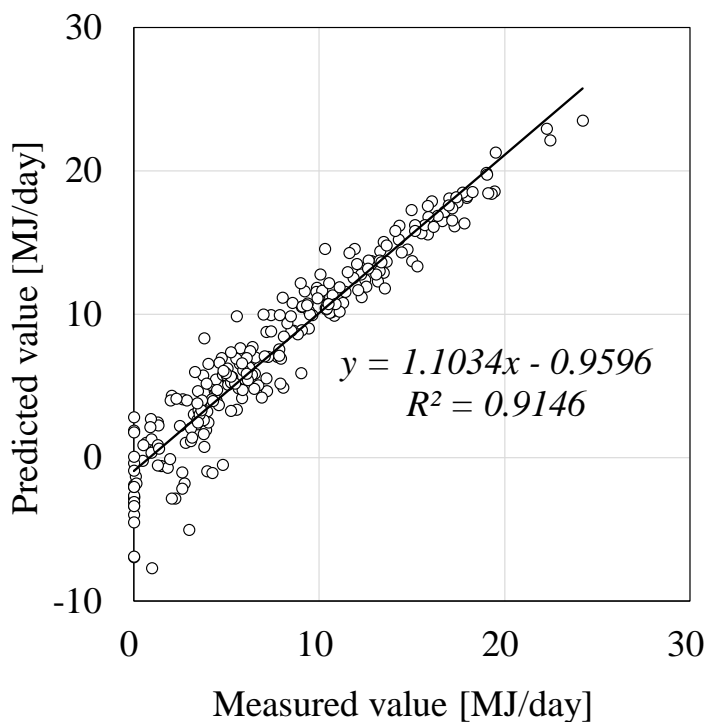


図 3.45 PB 室暖房負荷の実測値と予測値の比較

表 3.7 各室の暖房量の回帰係数と決定係数

		PB room	mPCM room	gelPCM room
Regression coefficient	C_1	17.322	14.942	16.762
	C_2	-0.851	-0.959	-0.627
	C_3	-0.536	-0.478	-0.593
Determination coefficient	R^2	0.91	0.95	0.92

$$Q_h = C_1 + C_2 \cdot \theta_o + C_3 \cdot Q_s$$

各室の期間暖房負荷を表 3.8 に示す。表 3.4 にも示したように、PCM の質量と潜熱量の積から求めた室の潜熱量は mPCM 室の方が小さいにもかかわらず、mPCM 室の期間積算削減率は 37.3% であり、gelPCM 室よりも 10% 程度高い値を示している。

本章で提案した有効熱容量は、暖房停止時の室温降下から室の見かけの熱容

量を定量化するものであり、最も室内側に PCM 層が施工されている mPCM 室が最も大きい値を示すことが、削減率に影響している可能性が強く示唆される。図 3.46 に有効熱容量と年間暖房負荷、自然温度差の関係を示す。図より、有効熱容量が高い程、年間暖房負荷が減少し、自然室温が高くなっている傾向が見てとれる。これは、有効熱容量が室の快適性と省エネルギー効果に影響を及ぼすことを示している。

また、同程度の潜熱量を有する室でも、その施工位置の差異が効果に影響を及ぼすことが明らかとなった。潜熱蓄熱材の見かけの熱容量が及ぼす影響を評価する一手法として、有効熱容量が有用であることも確認できた。

表 3.8 各室の暖房量削減効果

	PB room	mPCM room	gePCM room
Cumulative reduction rate [%]	—	37.3	27.5
Heating load [MJ/(m ² ・a)]	483	303	350

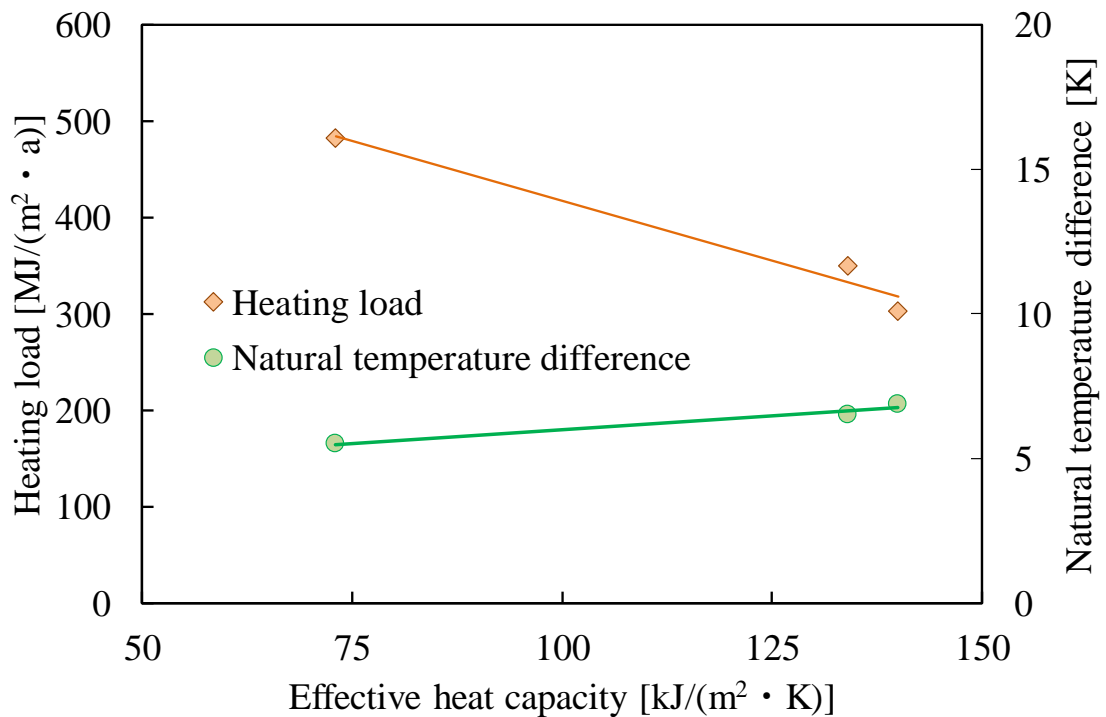


図 3.46 有効熱容量の省エネルギーと快適性

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

3.3 PCM 内装左官材を施工した実住宅における実測結果

住宅規模の建築に PCM 内装左官材を施工しすることで、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。

本節では室内環境及び暖房エネルギー消費量を 2 棟の実験住宅を対象に測定した。これらの住宅は、北方型住宅レベルの高い断熱性能を有しており、1 棟当たり、約 20MJ の熱容量を有している。実験住宅の概要を表 3.9 に示す。

表 3.9 実験住宅の概要

Name	H-project	I-project
Location (Hokkaido, Japan)	Sapporo	Muroran
Use	Residence	Residence
Floor area [m ²]	124.97	99.37
Measurement period	2013/9/1~2014/4/22	2012/12/5~2013/1/23
Heat loss coefficient [W/(m ² ·K)]	1.24	1.47
PCM [kg]	99	100
Heat source	Gas boiler	Wood-burning stove + panel heater
Heater	Hot water panel heater	(Hot water panel heater)

実験住宅の外気温、室温、温水の流入・流出熱量を測定し、暖房量を式 (3.13)、熱損失量を式 (3.14)、有効熱利用率を式 (3.15) で定義した。なお、有効熱利用率は、既往研究を参考に^{3.10)}ダイレクトヒートゲインや内部発熱の有効利用により、総熱損失量に比べて暖房量の割合が小さくなっている量を示している。

$$Q_h = c\rho m(\theta_V - \theta_R)\Delta t \quad (3.13)$$

$$Q_{loss} = qA_f(\theta_{in} - \theta_{out})\Delta t \quad (3.14)$$

$$PHR = \frac{Q_{loss} - Q_h}{Q_{loss}} \quad (3.15)$$

Q_h : 暖房量 [J]

Q_{loss} : 熱損失量 [J]

PHR : 有効熱利用率 [-]

c : 比熱 [J/(kg · K)]

θ : 温度 [°C]

t : 時間 [s]

ρ : 密度[kg/m³]

m : 流量 [m³/s]

q : 熱損失係数[W/(m² · K)]

A_f : 床面積 [m²]

添字

V : 流入

R : 流出

in : 室内

out : 室外

a) H-project の実測調査

H-project は北海道札幌市に建設された住宅であり，図 3.47 及び図 3.48 に H-project の平面図を各階ごとに示す。写真 3.2 及び写真 3.3 は建物の外観および内観を示している。

熱源はガスボイラー，暖房機は温水パネルヒーターである。また，温水の経路が高温と低温のカスケード利用であり，高温は住宅内のパネルヒーターを流れ，

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

その還りが低温の行きとして玄関土間内部の床暖房を流れる仕組みになっている。

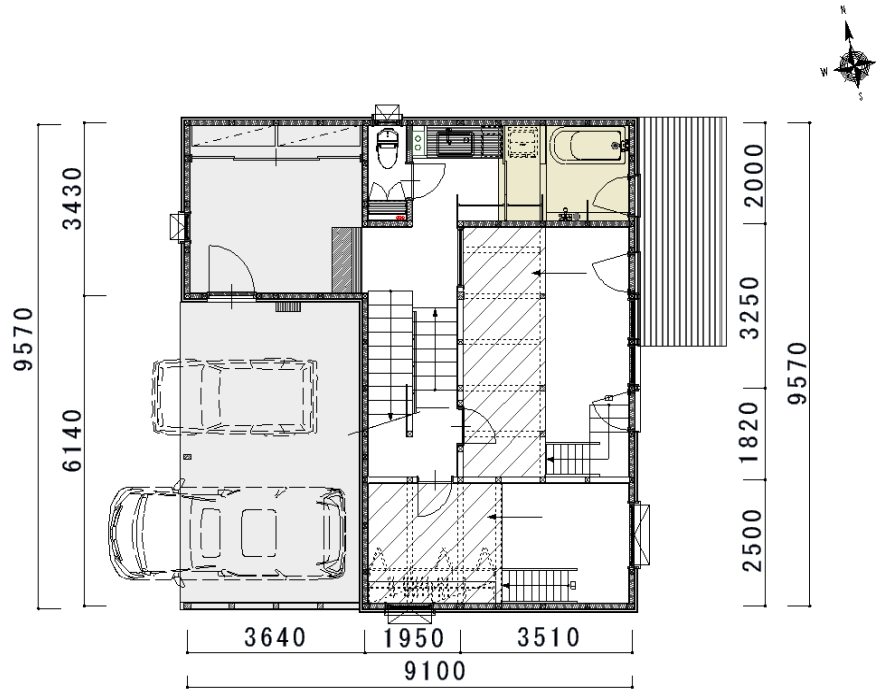


図 3.47 H-project 一階平面図

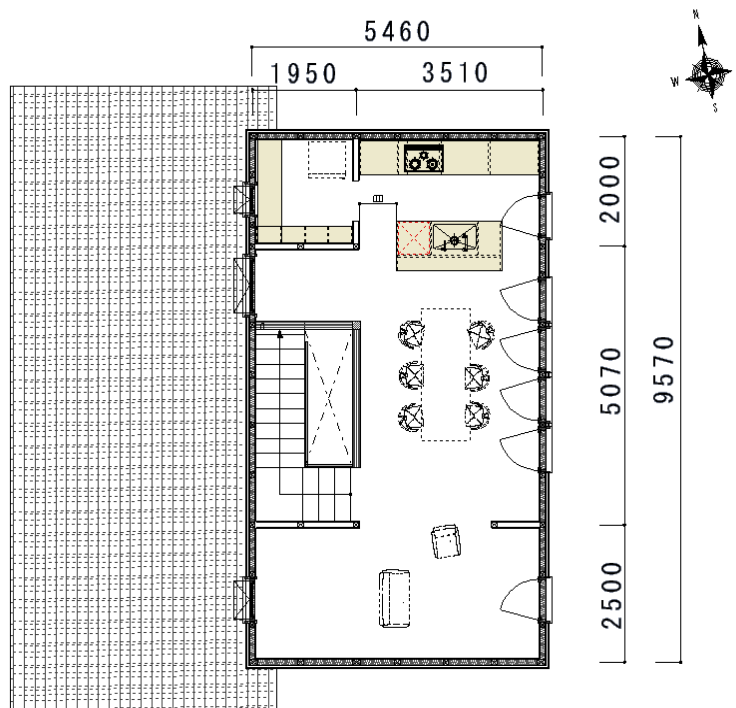


図 3.48 H-project 二階平面図

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果



写真 3.2 H-project の外観



写真 3.3 H-project の内観

図 3.49 に H-project の通年での外気温，室温，暖房量及び熱損失量の測定結果を示す（2013/1/9-2014/4/22）。図からもわかるように，室温は外気温を追従するように変動しているが，全期間中室温は設定室温である 20°C 前後を維持しており，安定した室内環境が得られていることがわかる。また，日射熱や内部取得熱を有効に利用している様子が伺え，期間中の有効熱利用率は約 0.82 となった。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

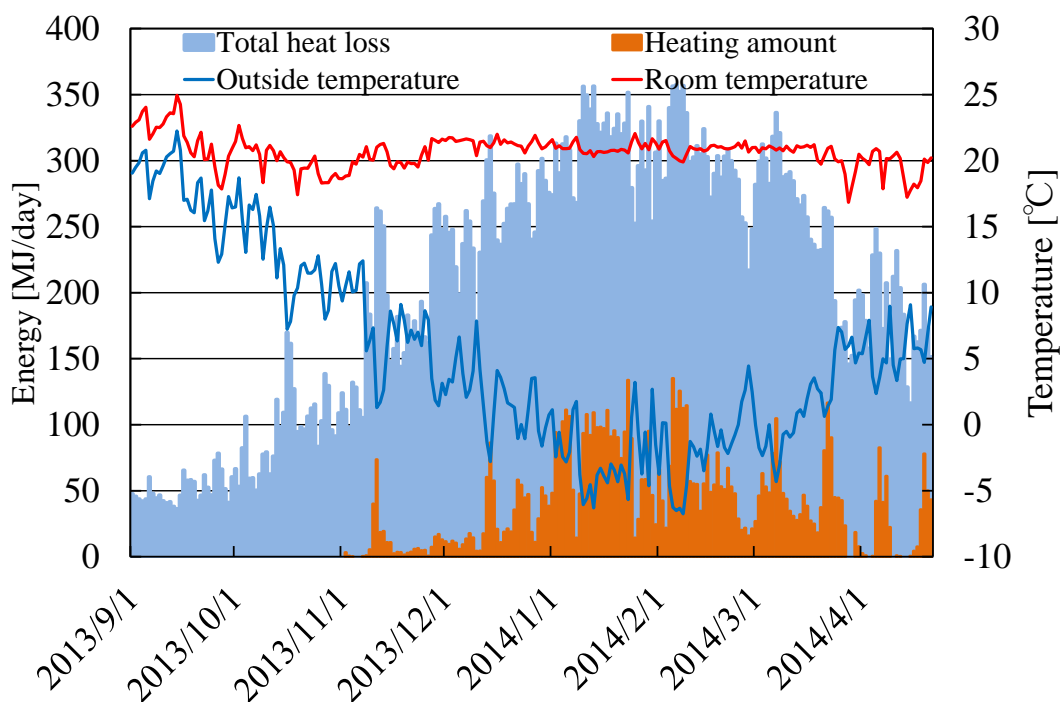


図 3.49 H-project の通年での計測結果

b) I-project の実測調査

図 3.50 及び図 3.51 に I-project の平面図を各階ごとにそれぞれ示す。I-project は北海道室蘭市に建設された住宅である。写真 3.4 及び写真 3.5 に I-project の外観と内観をそれぞれ示す。本住宅は、写真 3.6 に示すような薪ストーブを主たる暖房装置として採用しているが、室温が 17°C を下回ったときには温水パネル暖房システムが自動的に運転されるように制御している。

燃料の薪は針葉樹と広葉樹をほぼ半量ずつとし、1.0～1.5kg/回程度の量をストーブに投入した。12月 は 3～4 回/日程度、1月 は 8～9 回/日程度、不定期に薪を燃焼させたが、夜間には薪を追加していない。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

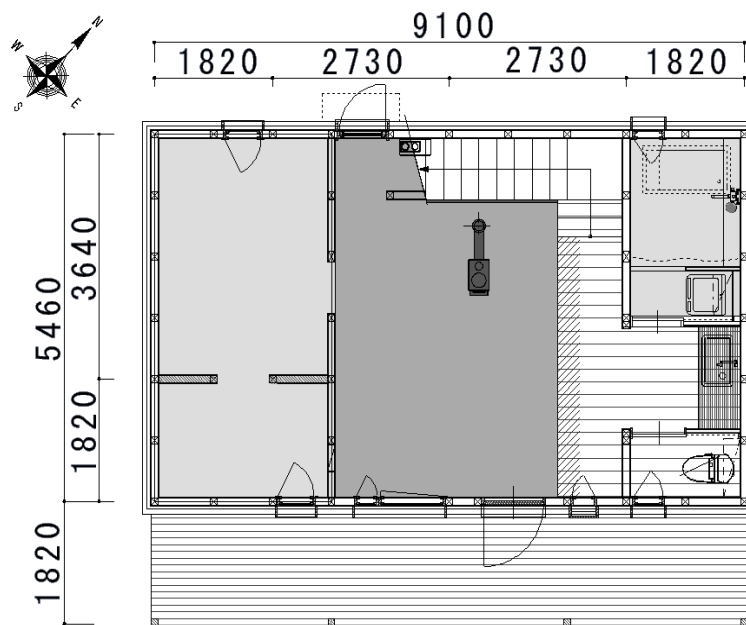


図 3.50 I-project 一階平面図

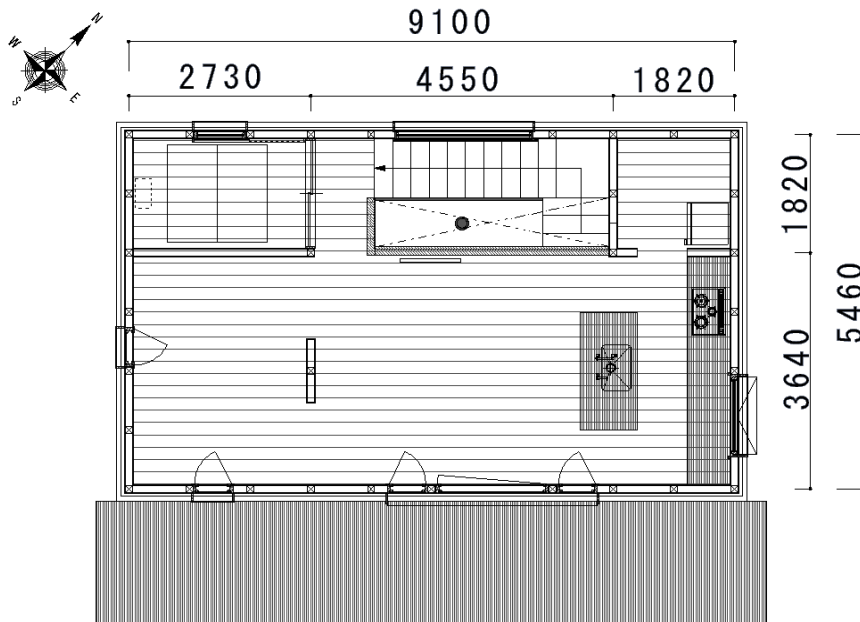


図 3.51 I-project 二階平面図

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果



写真 3.4 I-project の外観



写真 3.5 I-project の内観

期間中の室内温・湿度の変動のグラフを図 3.52 に示すが、薪ストーブという比較的放熱量が不安定な装置を用いた住宅規模の建物でも、PCM 内装材を用いて有効熱容量を増すことで室温を 20°C 程度に維持することが可能であることが分かった。また、1,2F の居住空間は吹き抜け空間によって連続しているものの、空間全体の上下温度分布はほとんど存在しない。

さらに、本住宅では加湿装置を設置していないにもかかわらず、期間中の室内相対湿度をおおむね 40% 以上に維持できた。PCM 内装左官材の母材である左官材料は、古くからが生活による水分放散を吸収・排出して調湿効果を発揮していることが言われており、実測の結果からのその効果がみられることがわかる。

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果



写真 3.6 薪ストーブ

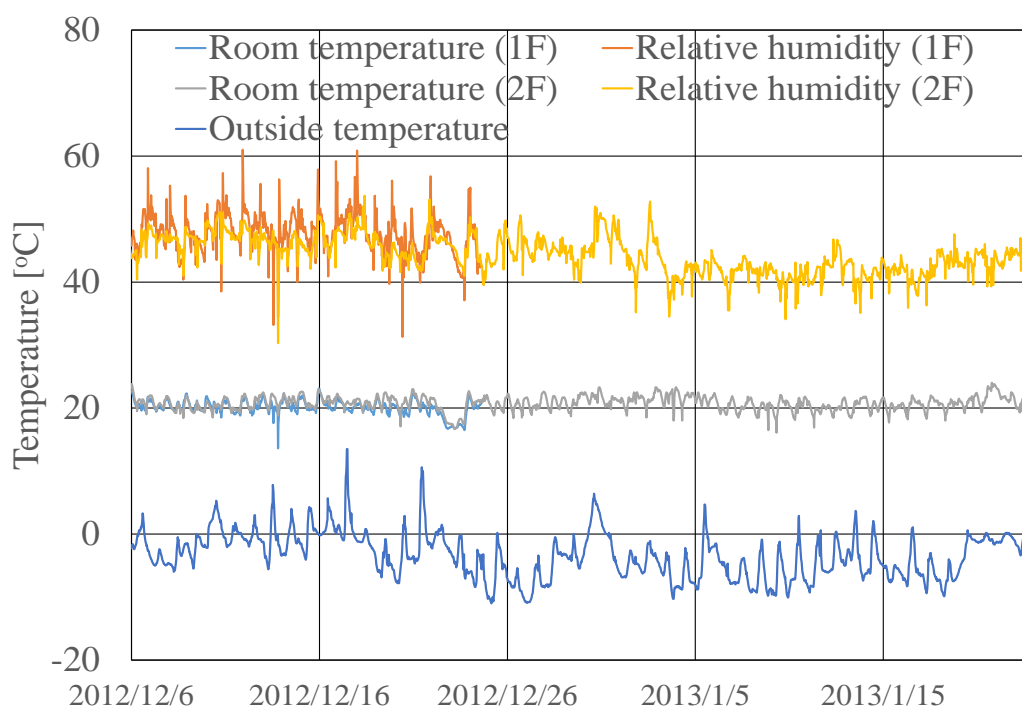


図 3.51 H-project の通年での室内環境計測結果

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

3.4 摘要

本章では、潜熱蓄熱(PCM)内装左官材の冬季のパッシブ蓄熱効果について、箱型の小型サイズから実験住宅規模までそれぞれ測定を行った。

PCM 内装左官材を施工することで、有効熱容量は増加するが、断熱性能を強化すると時定数はより大きくなる。同じ暖房量で間欠暖房の実験を行ったところ、有効熱容量が大きくなると室温の変動幅は小さくなることがわかった。

集中定数系仮定を適用し、室温降下の実測値から室の有効熱容量を求めたところ、室内側表面に潜熱蓄熱層が設置されている mPCM 室が最も高い値を示した。エネルギー量の実測値から等価的な外皮平均熱貫流率を求めたところ、PB 室と比較して、mPCM 室、gelPCM 室でそれぞれ約 10%、5%程度の等価的な断熱性能改善効果が確認できた。

また、自然温度差は mPCM 室が最も高い値を示した。mPCM 室、gelPCM 室の期間積算暖房負荷削減率はそれぞれ 37.3%、27.5%であり、断熱・蓄熱性能が同等でも蓄熱部位や施工方法の差異が暖房負荷削減率に影響を及ぼすことを確認した。今回検討対象とした 3 室において、有効熱容量が高い程年間積算暖房負荷は低い値を示し、自然温度差は高い値を示した。有効熱容量が省エネルギー効果及び環境改善効果に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

2 棟の実験住宅に PCM 内装左官材を住宅に適用してダイレクトゲインシステムを構築することにより、室内環境の実測調査を行ったところ、薪ストーブを熱源とした場合でも室温 20°C 程度の上下温度分布のない、快適で安定した環境が得られた。また、冬期でも相対湿度を 40%以上に維持することができたことから、PCM 内装材の調湿効果も期待できる。

今後、断熱種類を追加して実験を行い、高断熱住宅における有効熱容量の最適化に関する検討を実施する予定である。また、PCM 内装材の調湿効果についても定量化を行うことで、快適で経済的な冬のライフスタイルを提案して行く。

参考文献

- 3.1) 伊藤直明, 須永修通: ダイレクトゲインシステムにおける熱容量と期間補助暖房量に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集 第 397 号, pp38-47, 1989.3
- 3.2) 小玉祐一郎, 武政孝治: 室内の熱容量による省エネルギー効果と快適性, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp573-576, 2001.9
- 3.3) 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林禎彦, 石黒成紀: 潜熱蓄熱内装建材による暖房負荷削減効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻 678 号, pp651-659, 2012.8
- 3.4) Chi-ming Lai, Shuichi Hokoi: Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, Energy and Buildings 73 (2014), pp37-47, 2014.8
- 3.5) 窪田英樹, 鎌田紀彦, 鈴木大隆: 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
- 3.6) 黒木友裕, 銚井修一, 松本衛: 室内温熱環境制御への潜熱蓄熱材の利用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp407-408, 1996.7
- 3.7) Lv Shilei, Zhu Neng, Feng Guohui: Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings 38 (2006), pp18-24, 2005.2
- 3.8) 近藤武士, 射場本忠彦, 坪田祐二, 鎌田元康: 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, pp23-29, 2001.2
- 3.9) 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
- 3.10) 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 73(628), pp767-774, 2008.6.30
- 3.11) 草間友花, 石戸谷裕二: 潜熱蓄熱材の施工位置が省エネルギーと環境改善効果に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 22(52), pp 1027-1030, 2016.10
- 3.12) Yuka Kusama, Yuji Ishidoya: Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster under different insulation and heating scenarios, Energy and Buildings, Volume 141, pp 226-237, 2017.4

3. PCM 内装左官材の冬季におけるパッシブ効果

本章は既発表論文^{3.9), 3.11), 3.12)}を取りまとめ、加筆修正を加えたものである。

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

4.1	日射遮蔽材の遮蔽性能に関する実験	112
4.1.1	遮蔽性能及び遮蔽材からの輝度の測定	
4.2	室内熱容量が日射遮蔽，外気冷房の冷房負荷抑制効果に与える影響	117
4.2.1	実験棟での試験概要	
4.2.2	日射遮蔽と外気冷房による室内環境改善効果の検討	
4.3	高耐候性不織布の冷房負荷抑制効果	128
4.3.1	冷房負荷の計算法	
4.3.2	高断熱・高气密住宅における空調負荷の計算例	
4.4	摘要	135

参考文献

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

夏期の日射による過度の室内温度上昇を抑制するパッシブな手法として、すだれやよしずなどを用いた日射遮蔽や、夜間の冷涼な外気を利用した通風冷却が伝統的に用いられており、その効果を検討した研究がこれまで行われてきた^{4.1)~4.5)}。しかし、よしずや、すだれによる日射遮蔽は開閉や設置に手間を要することや、室内の照度低下等が懸念される。近年建築されている高断熱・高气密住宅では、エアコンなどの機械設備と電気エネルギーを用いたアクティブ手法が夏の環境調整の主流となっている。この原因として、居住者のライフスタイル、建築形態や材料、構法などの変化などがあげられる。また、都市部では敷地の狭小化等の社会的背景に伴い、庇のない住宅も多くみられ、日射遮蔽性能が比較的低いブラインドやカーテンなど内付の装置が使用されることが多い。こういった背景により、冷房用電力消費量やピーク電力も増大の傾向があり、これらに起因するヒートアイランド現象などの環境問題が課題となっている。既往の研究では^{4.6)~4.9)}、日射遮蔽物の熱的、光学的な詳細検討が行われており、高い日射遮蔽性能を得るためには、遮熱性能と光透過性に優れた日射遮蔽物を外付けすることが有効であることが知られている。

一方、PCM を冷房用途に適用したシステムは国内外で研究がなされてきた^{4.10)}ものの、自然エネルギーを利用する際に太陽熱集熱器などを組み合わせ、ファンやポンプなどの搬送動力を前提とする例が多く^{4.11)~4.14)}、蓄熱・蓄冷したエネルギーを利用するために大がかりな設備を要する^{4.15),4.16)}。また、PCM 建材をパッシブな手法で用いる研究も散見されるが^{4.17)~4.20)}、夏期の冷房負荷の多くを占める日射熱の遮蔽対策及び夜間通風の効果が高熱容量住宅に与える影響に関して詳細な検討を加えた研究は少ない。

以上から、室内に PCM を適用する構法には不快要素とされる過度の室温上昇やピーク負荷の増大を抑制する効果が期待されるものの^{4.21),4.22)}、PCM 建材が室内環境に与える影響について、日射遮蔽と外気冷房との併用によるパッシブな環境調整法が高熱容量住宅に与える影響は明らかではない。

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

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できる設計手法が確立されているとは言い難い^{4.23), 4.24)}。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確立されているとは言えず、PCM を適用した高熱容量住宅で日除けや換気の調整・利用をするパッシブ蓄熱・蓄冷などを考慮した空調負荷計算プログラムも開発途上のものである。

本章では、PCM 建材を適用した高熱容量住宅における日射遮蔽および外気冷房の効果について明らかにする。まず、耐候性および日射遮蔽効果に優れた新規の材料を用いた日射遮蔽装置を用い、日射遮蔽装置を設置した時の自然採光の状況を把握するため、遮蔽材から室内に発散する光束に関する測定と日射遮蔽性能の測定を合わせて行った。日射遮蔽装置は、建築外壁の内部に透湿防水シートとして用いられる高耐候性不織布である。また、熱容量が異なる二室を有する実証実験棟の開口外部に日射遮蔽装置を外付けで設置するとともに、夜間には外気冷房を行うことで、PCM 内装左官材が日射遮蔽や外気冷房のピークカット効果および最高室温抑制効果に及ぼす影響を明らかにした。最後に、全国 17 地域のアメダス気象データと直散分離法を用いて、冷房期における日射遮蔽装置の効果を検討しうる簡易冷房負荷計算法を提案し、夏季環境調整法としての日射遮蔽の効果を比較検討した。

4.1 日射遮蔽材の遮蔽性能に関する実験

外部設置を前提とした日射遮蔽装置に用いる素材の日射遮蔽性能を比較するために、W300×D300×H200 mm の木製箱を 2 台作製し、天空に露わにされた箱 A と、上部に日射遮蔽材を設けた箱 B を日射に暴露して、遮蔽材の性能を検討した。検討対象は高遮熱・高透光性を有する不織布(以下、高耐候性不織布(Non-Woven Fabric; (NWF))であり、比較材料は寒冷紗、すだれ、よしず、半紙とした。日射計(MS-402F(箱 A : ISO ファーストクラス), MS-42(箱 B))と照度計(UV・照度レコーダー : TR-74Ui)を両箱内部に設置し、各々の日射量と紫外線量を測定した。なお、設置位置と高さが両箱で同一となるように注意しながら、日射計と照度計を配置した。遮蔽物を設置しない天空暴露試験で、両測定装置の測定値に有

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

為な差がないことを確認している。測定風景を写真 4.1 に示す。また、遮蔽材料からの輝度を検討するため、写真 4.2 に示すような 600×600mm のダンボール板の中央に 300×300mm の開口をあけた比較検討用装置を 2 台作製した。装置の詳細を図 4.1 に示す。一方の開口部には前述の遮蔽材料を貼付け、他方は遮蔽材料が設置されていないブランクの状態を南向鉛直ガラス面に室内側から設置して、室内側から開口中心部の輝度を輝度計(CS-100A)によって測定した。



写真 4.1 日射遮蔽試験装置



写真 4.2 輝度試験装置

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

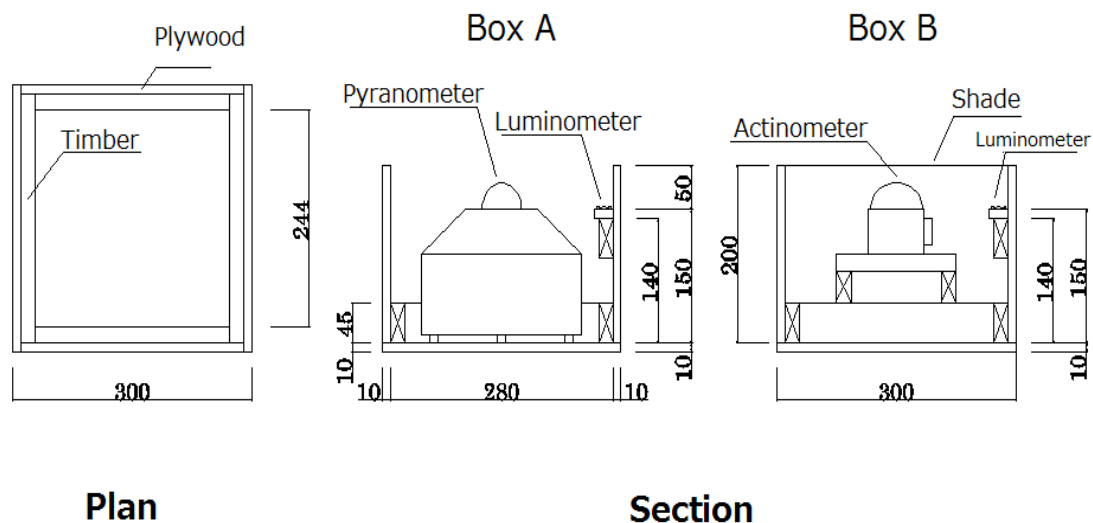


図 4.1 日射遮蔽試験装置概念図

箱 A と箱 B (反射率：約 30 %) で測定した水平面日射量から日射と UV の遮蔽率を式(4.1)で定義して各遮蔽材の日射遮蔽性能を比較した。日射遮蔽材料は、明るさ感を損ねることなく、かつ、日射および紫外線を透過させない材料であることが望ましいことから、日射量、紫外線量、照度について計測を行った。照度についても同様に、箱 A および箱 B で測定された値を用いて遮蔽率を定義した。日射遮蔽率を太陽高度で整理して図 4.2 に示す。また、各材料の日射量 (SR)、UV (SR_{uv})、照度 (SR_L) の平均遮蔽率を表 4.1 に示した。なお、日射量の遮蔽率は、箱の側壁により直達日射が遮られた時間帯における測定値を除いて求めた。

$$SR = 1 - J_{hin} / J_h \quad (4.1)$$

SR：遮蔽率 [-]

J_{hin} ：水平面透過日射量 [W/m²]

J_h ：水平面全天日射量 [W/m²]

図 4.2 から、各材料の遮蔽率は太陽高度が 20～40 度の範囲において一定値として扱えることが見て取れる。また、高耐候性不織布は他の材料と比較し

て、日射、UV ともに遮蔽率が 0.9 以上と高く、日射遮蔽装置の材料として好適であることが期待される。また、伝統的な住宅が夏季に遮蔽装置として使用していたよしずや、すだれなどの装置も寒冷紗(荒く平織に織り込んだ布)に比較して日射遮蔽性能が高いことがわかる。

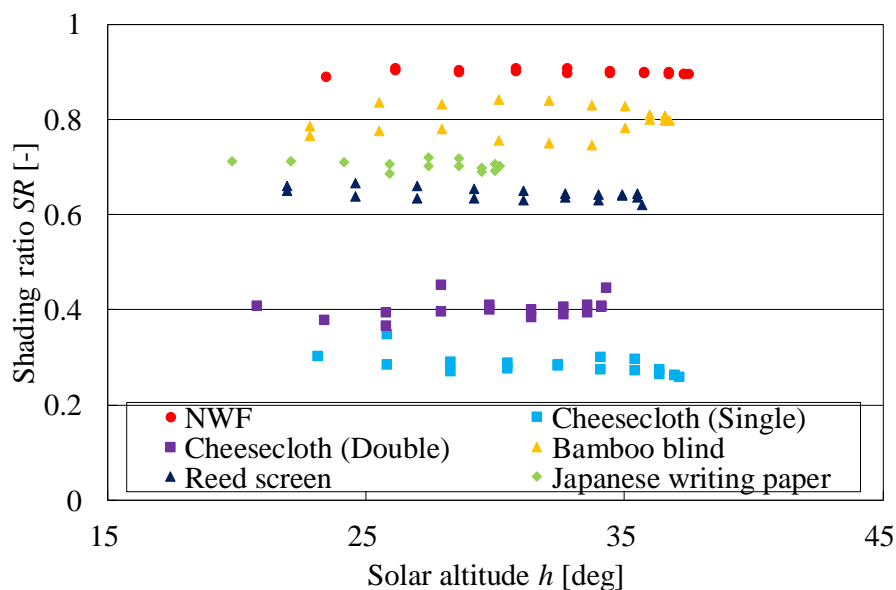


図 4.2 太陽高度と日射遮蔽率

表 4.1 日射遮蔽性能

Name	SR	SR_{UV}	SR_L
	[-]	[-]	[-]
NWF (non-woven fabric): 高耐候性不織布	0.90	0.95	0.94
Cheesecloth (Single): 寒冷紗(1枚)	0.23	0.36	0.31
Cheesecloth (Double): 寒冷紗(2枚)	0.35	0.55	0.41
Bamboo blind: すだれ	0.80	0.84	0.86
Reed screen: よしず	0.65	0.76	0.71
Japanese writing paper: 半紙	0.67	0.91	0.75

晴天時(雲量が 2 以上 8 以下)の直達光が遮蔽膜に入射したときの輝度(時刻瞬時値)を図 4.3 に示すが、寒冷紗や半紙からの発散量は遮蔽物のないブランクの状態よりも大きな値を示した。一方、図 4.4 に示すように曇天時(雲量が 9 以上)

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

の天空放射光では、全ての遮蔽材においてblankよりも輝度が低下することを確認した。

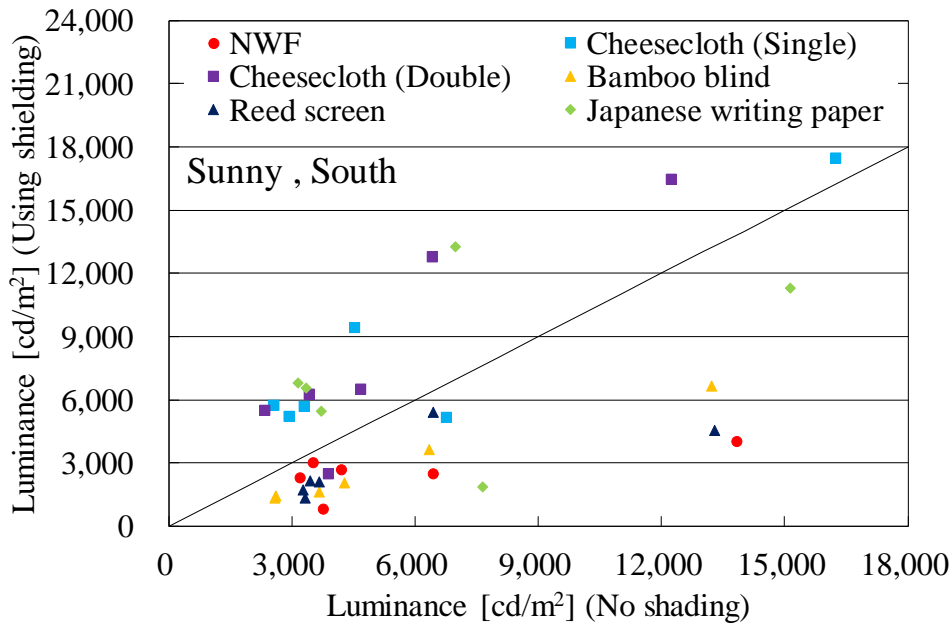


図 4.3 晴天時の輝度

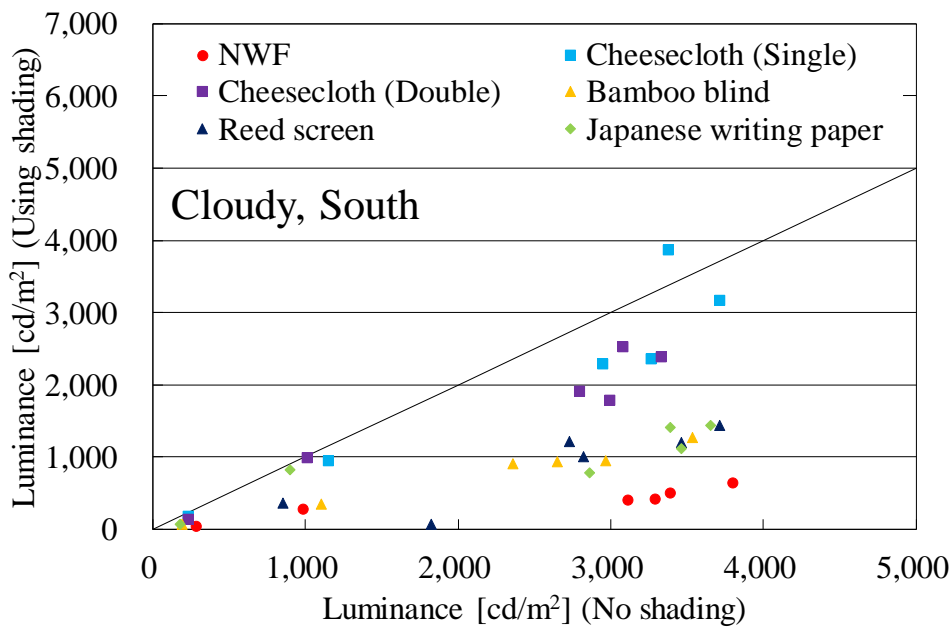


図 4.4 曇天時の輝度

4.2 PCM 内装左官材が日射遮蔽, 外気冷房の冷房負荷抑制効果に与える影響

4.2.1 実験棟と日射遮蔽装置の概要

実験棟は断熱界壁（グラスウール 90mm）によって熱的に区切られた 2 室を有し、室間相互の熱の授受は無視できるものとした。このうちの 1 室に、融点近傍において温度を変えずに蓄放熱を繰り返す PCM(n-パラフィン：融点 25°C) を混合した PCM 内装左官材を壁(界壁面を除く)及び天井に施工した。

一方、他の 1 室には一般的な内装下地材として使用されている石膏ボードを施工した。壁、床、天井と開口部の U 値はそれぞれ $0.18\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $0.15\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $0.16\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $2.88\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ である。以下 PCM 内装左官材を施工した室を PCM 室、石膏ボードを施工した室を PB 室と呼ぶ。

PCM 室の熱容量は $141\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, PB 室は $48\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ である。両室の断熱・気密性は同等であることが確認されている。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、さらに発泡ポリエチレン板 75mm を外張りで付加した、充填+外張断熱の併用工法となっている。実験棟の概要、平面図及び立面図を表 4.2, 図 4.5, 図 4.6 に示す。

表 4.2 実験棟概要

Location	Zenibako, Otarushi, HOKKAIDO
Construction	Wooden 2 × 4 construction method one-story
Floor space	5.2m ² ×2 rooms
Size	W2,080×D2,070×H2,400
South glass area	1.96 m ² /room (W1,400×H1,400)
PCM ROOM	PCM Board 12mm
PB ROOM	Gypsum board 12mm
Heat transfer coefficient (U _A)	0.4 [W/(m ² · K)]

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

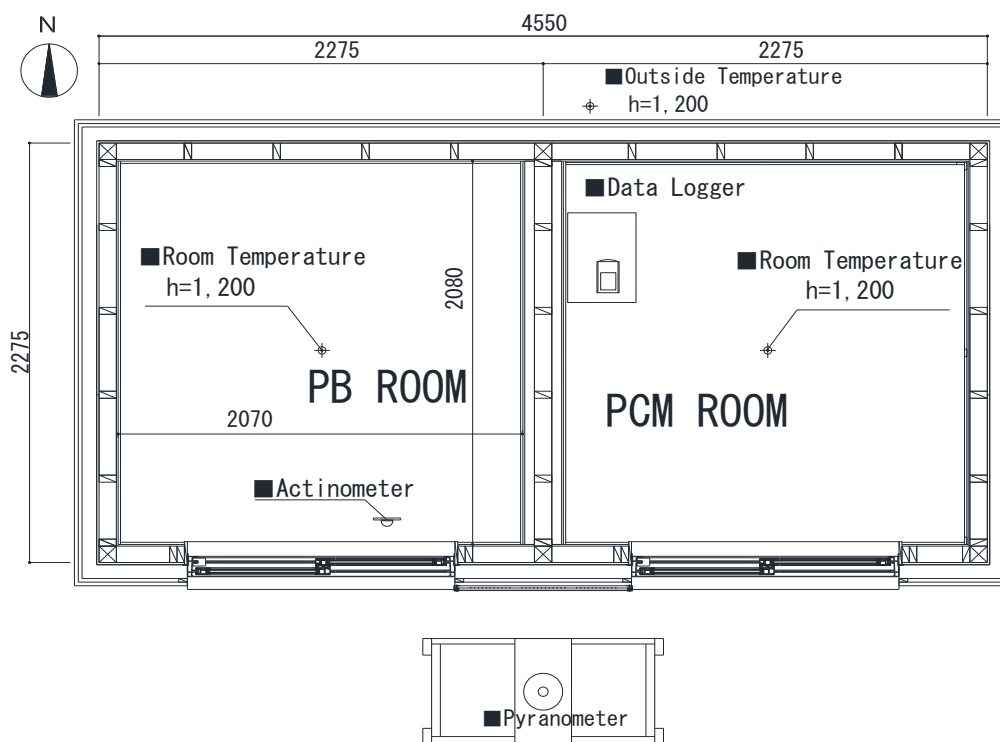


図 4.5 実験棟平面図 (単位 : mm)

前述の日射遮蔽材の性能実験結果を参考に、最も遮蔽率の高い高耐候性不織布 NWF を使用して、簡易に可動する日射遮蔽装置(900×3,200mm)を作製し、夏至の南中時直達日射が法線方向となるよう実験棟の開口外部に設置した。

写真 4.3 に日射遮蔽装置の設置外観を示す。本装置の室内環境改善効果を定量化するために、両室内に T 型熱電対(0.3 φ)と日射計(垂直)を設置して、室温、グローブ温度(室内中央)、外気温、透過日射量を測定した。

各温度と日射量は 1 分間隔で測定し、結果をデータロガーに記録した。一方、実環境下での日射遮蔽効果を検討するため、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日射遮蔽率を式(4.2)で算出した。遮蔽装置への直達日射入射角は式(4.3)を用いて計算し、遮蔽率と入射角の関係を外挿線とともに図 4.7 に示す。

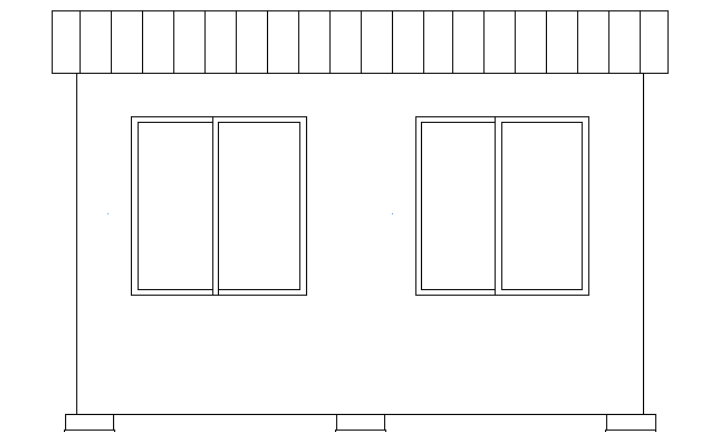


図 4.6 実験棟南面立面図



写真 4.3 実験棟外観

$$SR' = 1 - J_{hsin} / J_{hs} \quad (4.2)$$

$$\cos i = \cos \beta \cdot \sin h + \sin \beta \cdot \cosh \cdot \cos (a - a_0) \quad (4.3)$$

SR' : 遮蔽率 [-]

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]

i : 入射角 [deg]

β : 日射遮蔽装置の傾斜角 [deg]

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

h : 太陽高度 [deg]

a : 太陽方位角 [deg]

a_0 : 日射遮蔽装置の方位角 [deg]

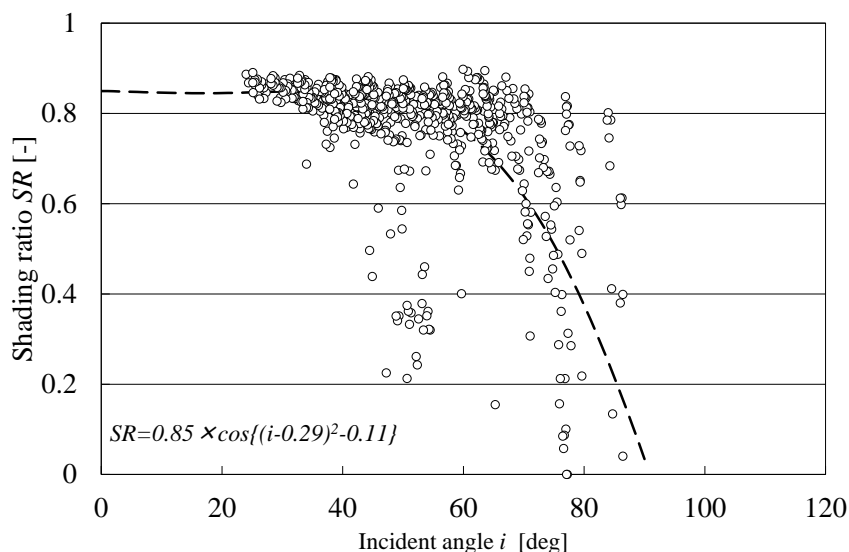


図 4.7 入射角ごとの透過率

図から、実験棟に設置した装置の日射遮蔽率は、入射角が 70 度未満の範囲において 0.85[-]近域に分布しているが、入射角が 70 度を超過する範囲では入射角に依存して日射遮蔽率が急激に減少することが分かった。今回定義した日射遮蔽率は、窓と遮蔽材料の双方の遮蔽効果を組み合わせたものであり、また遮蔽材料の傾斜角度は固定されているため、本条件における限定的な範囲内の結果である。

また、装置を設置した 2 ヶ月間において、台風などの風雨や日中の温度上昇に曝されたが、本体に目立った劣化や破れ等も見られなかった。このことから、本装置は日よけに要求される耐候性を有しているものと考えられる。

2011 年 7 月 4 日から 10 月 4 日まで、実験棟において日射遮蔽装置の有無、換気量の大小をパラメータとする 1 週間連続測定を行って室内環境改善効果を比較検討した。なお、窓開けや換気扇などを想定した第三種換気装置による強制換

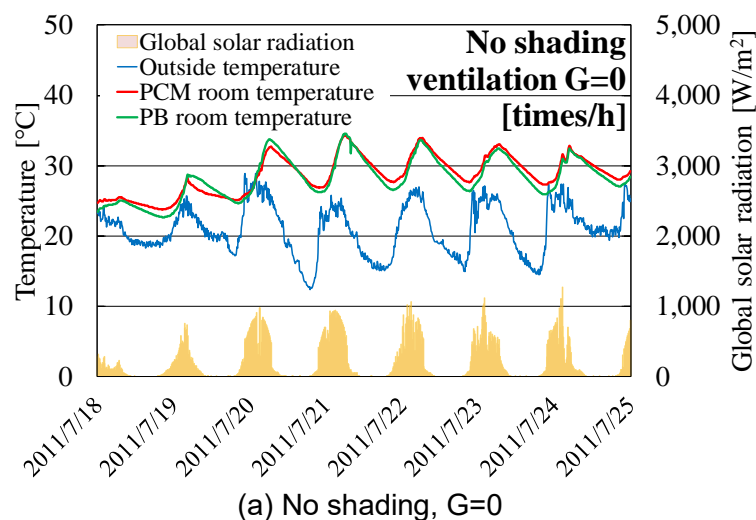
気を行ったが、外気条件に依らず 18 時から翌 6 時まで換気扇を連続運転して通風を確保した。

各条件下における室内環境の日変動の様子を図 4.8((a)~(d))に示す。図より、日射遮蔽と外気冷房を双方とも行わない(a)の場合、PB 室・PCM 室の日最高室温は最高外気温度よりも最大で 10K 高い値を示した。PCM 室の融点は日射熱を多く吸収してしまうため、PB 室よりも高い温度を推移している。

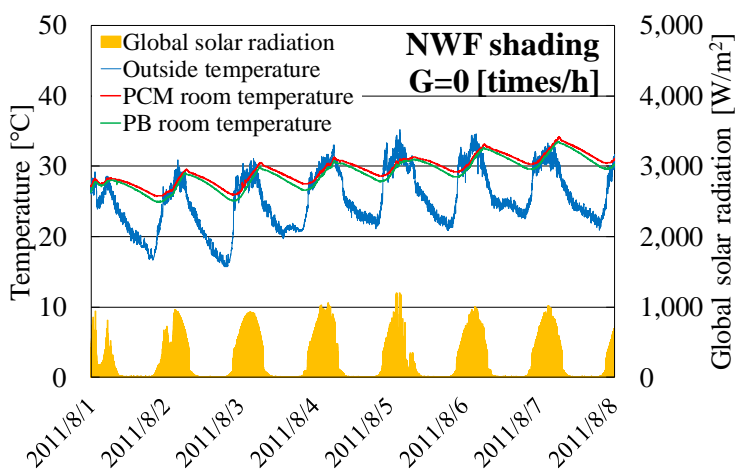
一方、日射遮蔽のみを単独で行う(b)の場合では、日最高室温が最高外気温度以下に抑制されていることが分かる。ただしこの場合も、PCM の融点よりも高い範囲で室温が推移しており、日射熱の影響で PCM 室の融点は PB 室よりも高い温度を推移している。また、日射遮蔽を行わずに外気冷房を単独で行う(c)の場合では、日最高室温は最高外気温度に比較して最大で 5K の上昇にとどまるものの、熱容量が大きい PCM 室の室温は終日 PB 室と同等となり、夜間の躯体蓄冷の効果は確認できなかった。

さらに、日射遮蔽と外気冷房を併用する(d)の場合、日最高室温が最高外気温度より 5K 程度低く保たれていることが確認できた。また、融点以下の範囲まで室温変動を抑制できると、PCM の過昇温抑制効果がみられることがわかる。

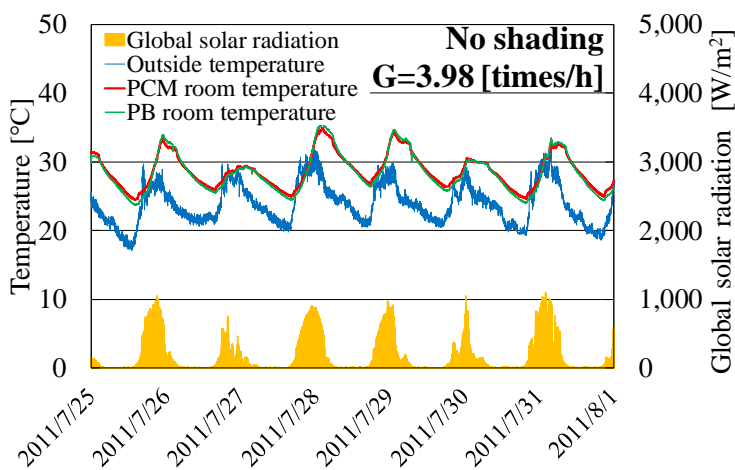
測定期間中のこれらの結果から、外付け日射遮蔽は外気冷房よりも最高室温抑制効果が高く、外気冷房時に熱容量の効果を活かすためには日射遮蔽が前提条件となることが明らかになった。



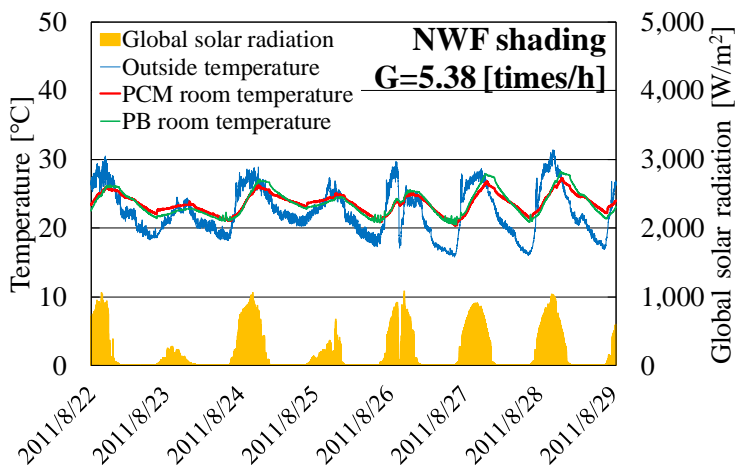
4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果



(b) NWF shading, G=0



(c) No shading, G=3.98



(d) NWF shading, G=5.38

図 4.8 室内環境改善効果

さらに、各条件下における室内環境改善効果を定量的に比較検討するために、熱容量の異なる PCM 室と PB 室の室温を従属変数、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実施した。

結果を図 4.9, 図 4.10, 図 4.11 に、それぞれの回帰式の係数を表 4.3 に示す。図 4.9 から、日射遮蔽を行うことで両室の日最高室内温度が 4K 程度抑制されることが分かるが、室内の熱容量を増加させても日射遮蔽の効果を補強できるとはいえない。さらに、外気冷房単独利用時の解析結果を図 4.10 に示すが、最高外気温度が 25°C 以上の範囲では日最高室内温度が大幅に抑制されていることが分かる。また、融点よりも低い領域で PCM による最高室温抑制効果が確認できる。また、図 4.11 から、日射遮蔽と外気冷房を併用すると日最高室内温度が外気よりも 7K 程度低くなり、単独使用の場合に比較して最高室温抑制効果が大きくなることが分かる。日最高外気温度が 30°C 以上の真夏日では PCM 室の日最高室温は PB 室よりも低く、暑熱時期の外気冷房による躯体蓄冷の効果が確認できた。

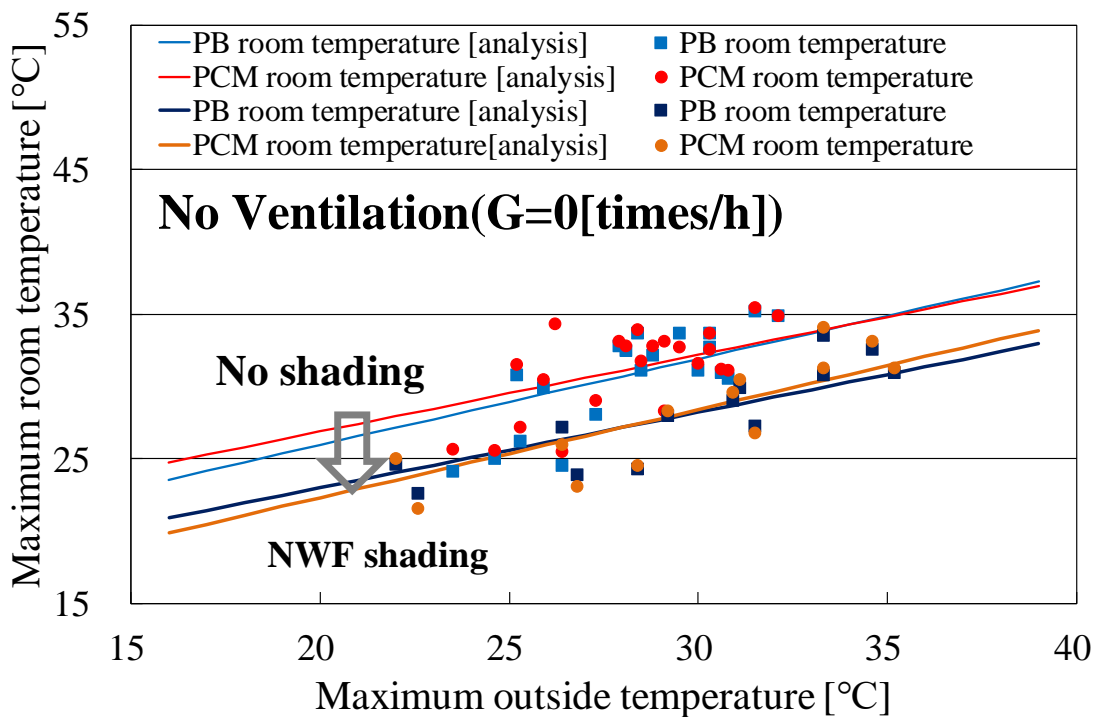


図 4.9 日射遮蔽の効果

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

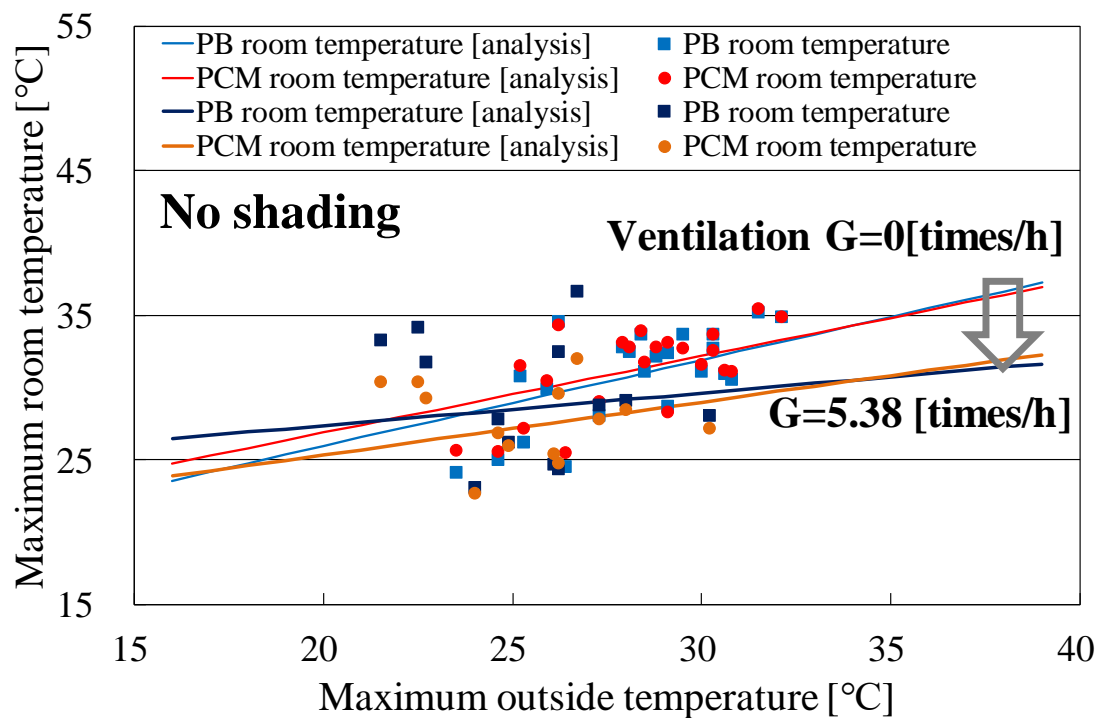


図 4.10 夜間外気冷房の効

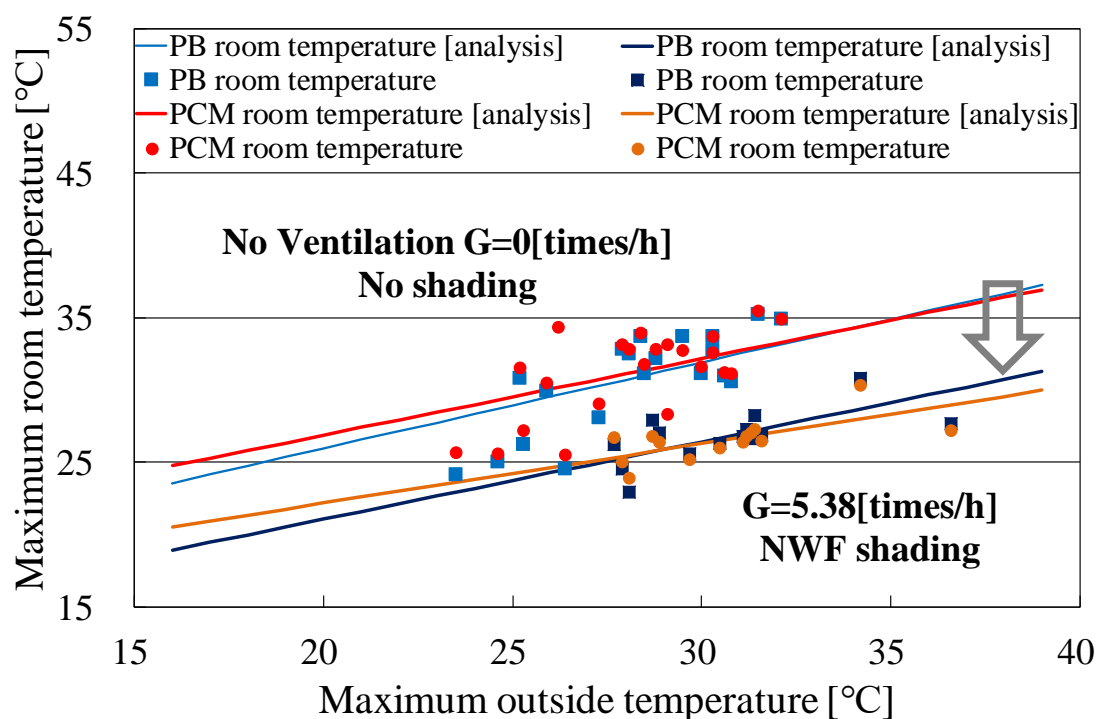


図 4.11 日射遮蔽と外気冷房の効果

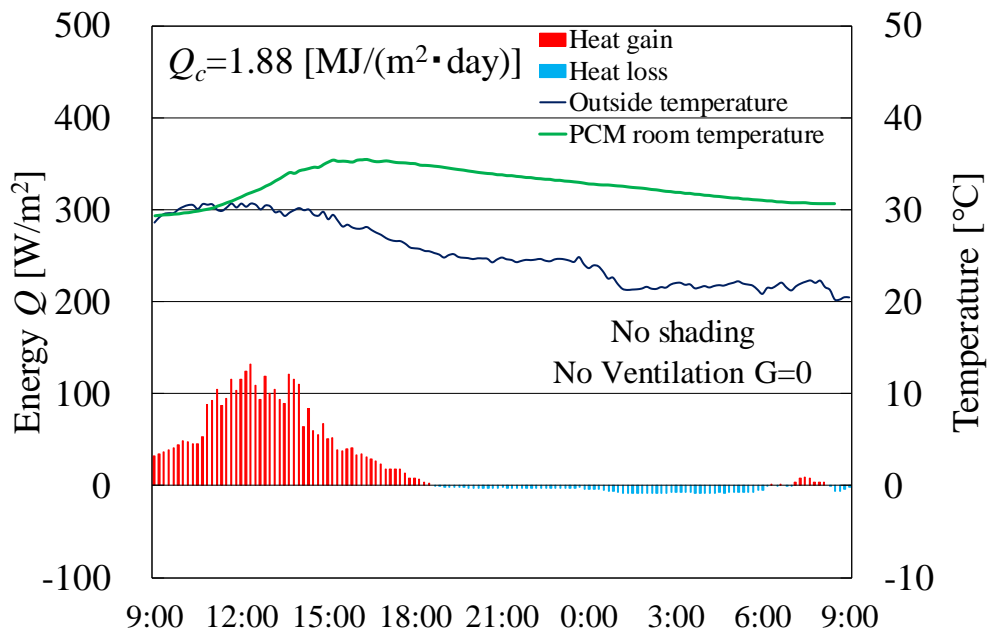
表 4.3 回帰係数

		PB room				PCM room			
		c ₁	c ₂	c ₃	R ²	c ₄	c ₅	c ₆	R ²
Fig.3.9	No shading, G=0	8.92	0.59	0.80	0.80	11.96	0.53	0.67	0.73
	NWF shading, G=0	10.64	0.52	0.64	0.83	8.86	0.61	0.43	0.76
Fig.3.10	No shading, G=0	8.92	0.59	0.80	0.80	11.96	0.53	0.67	0.73
	No shading, G=5.38	16.72	0.23	0.81	0.94	13.71	0.37	0.57	0.90
Fig.3.11	No shading, G=0	8.92	0.59	0.80	0.80	11.96	0.53	0.67	0.73
	NWF shading, G=5.38	7.73	0.54	0.94	0.78	12.41	0.41	0.56	0.62

$$\theta_{PB}=c_1+c_2 \cdot \theta_o+c_3 \cdot Q_s, \theta_{PCM}=c_4+c_5 \cdot \theta_o+ c_6 \cdot Q_s$$

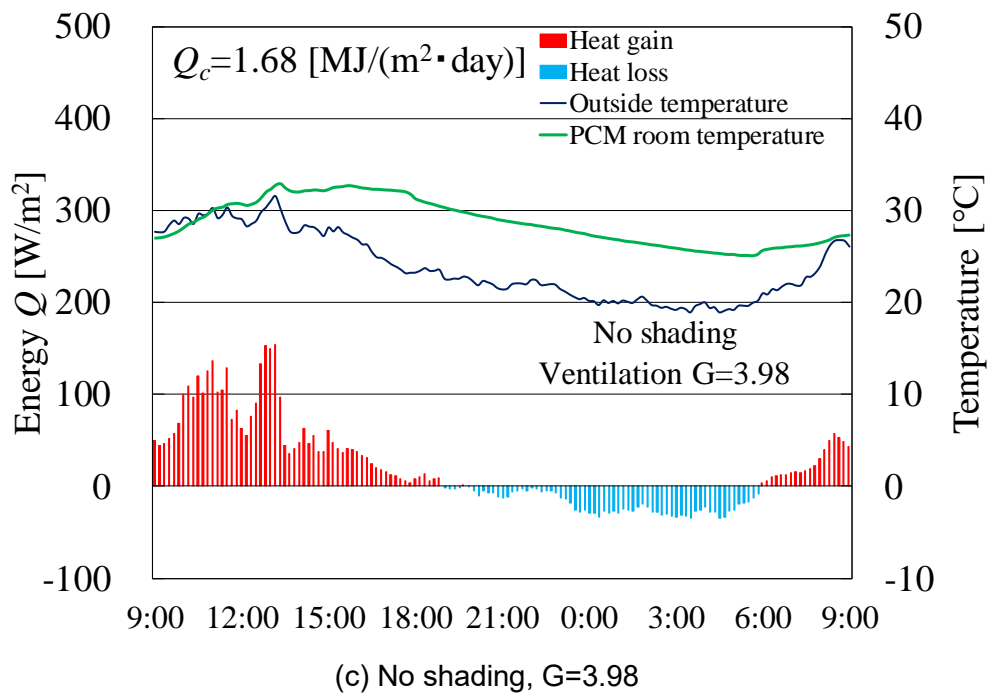
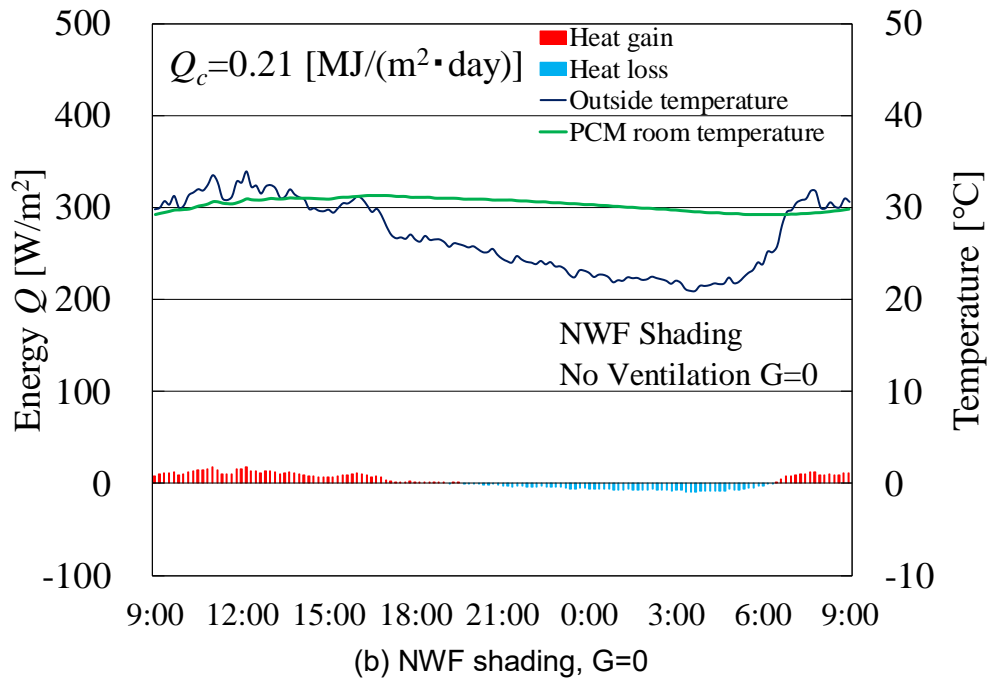
4.2.2 日射遮蔽と外気冷房による室内環境改善効果の検討

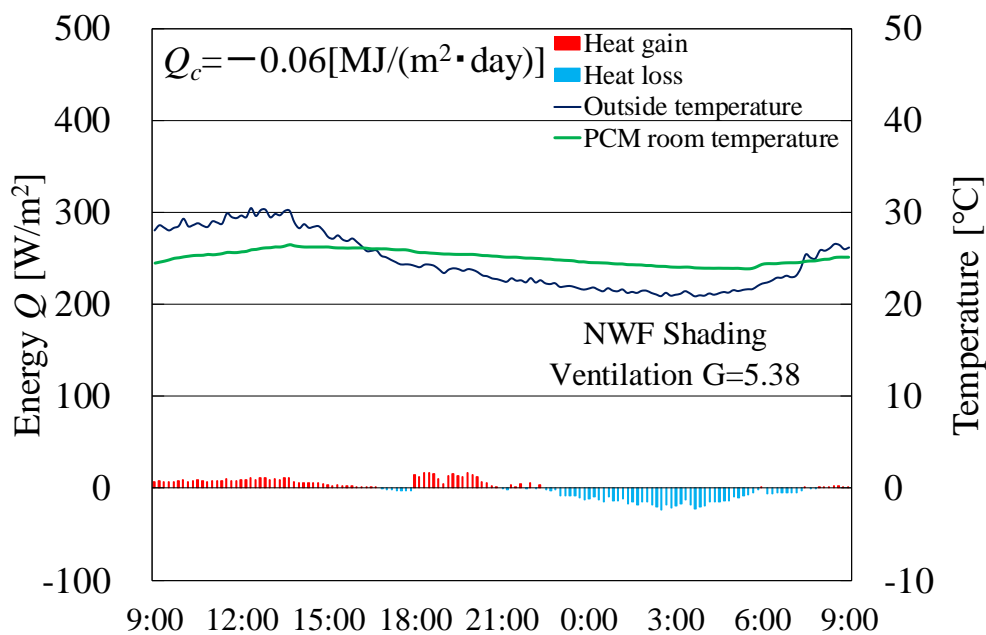
日射遮蔽および外気冷房による冷房負荷抑制効果を検討するため、前述の室内環境測定で得られた各室の室内温度、外気温度、南面透過日射量、相対湿度から、既往の方法^{4,25)}などを用いて定常計算により、日積算熱取得量と日積算熱損失量を算出し、実験棟における冷房負荷の日積算量を予測した。日射遮蔽装置の有無や各換気条件において測定し、日ごとの熱取得量と熱損失量を図4.12((a)~(d))に示す。なお、日積算冷房負荷は日熱取得量と日熱損失量の差と定義した。



(a) No shading, G=0

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果





(d) NWF shading, G=5.38

図 4.12 PCM 室の冷房負荷

図より、日射遮蔽、外気冷房をともに行わない(a)の場合、日中の熱取得量に比較して夜間に外部へ放散する熱量は小さく、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(c)には、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散する熱量は大きく、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、外気冷房による 10%程度の冷房負荷抑制効果が見てとれる。

また、日射遮蔽を行った(b)の場合では、日中の熱取得量が大幅に減少することで日冷房負荷 Q_c は $0.21 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ となり、88%の負荷削減効果が確認できた。

さらに、日射遮蔽と外気冷房を併用した(d)では、日冷房負荷 Q_c は $-0.06 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ となり、比較的冷涼な北海道においては両法の併用によってアクティブな冷房が不要となる可能性があることを確認できた。

つまり、高耐候性不織布による日射遮蔽は日積算冷房負荷、ピーク負荷の双方に対してその削減効果が非常に高く、日射遮蔽と外気冷房を併用する場合に

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

は、熱取得量よりも熱損失量の方が大きくなった。

4.3 高耐候性不織布の冷房負荷抑制効果

本章では、前述のパッシブな採冷手法として提案した高耐候性不織布 NWF を外付けに設置した時の冷房エネルギー削減効果について、実験を実施した北海道以外の地域に適用した時の評価をするために、定常冷房負荷計算プログラムを作成し、全国 17 地域のアメダス気象データを用いた数値計算を実施してその結果を比較した。

4.3.1 冷房負荷の計算法

冷房負荷は顕熱負荷と潜熱負荷に分けて計算し、その合計値を冷房負荷とした。冷房負荷の構成要素と概念図を図 4.13 に示す。

貫流熱取得および換気熱取得は定常（室温一定，外気温変動）を仮定しており，アメダスデータの日最高外気温，日最低外気温，日平均値外気温の 3 値から算出した日冷房デGREEデーを用いて計算した。

また，前述の高耐候性不織布 NWF による日射遮蔽装置を用いた場合の日射熱取得は，直散分離法により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。

各遮蔽物の日射遮蔽係数は表 4.1 の結果を参考に，式(4.4)で求めた。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/m² とした。貫流負荷 Q_{ST} を式(4.5)より，換気による負荷 Q_V の顕熱・潜熱をそれぞれ式(4.6)，式(4.7)より求めた。冷房負荷は各構成要素の積算値とした(式(4.8))。

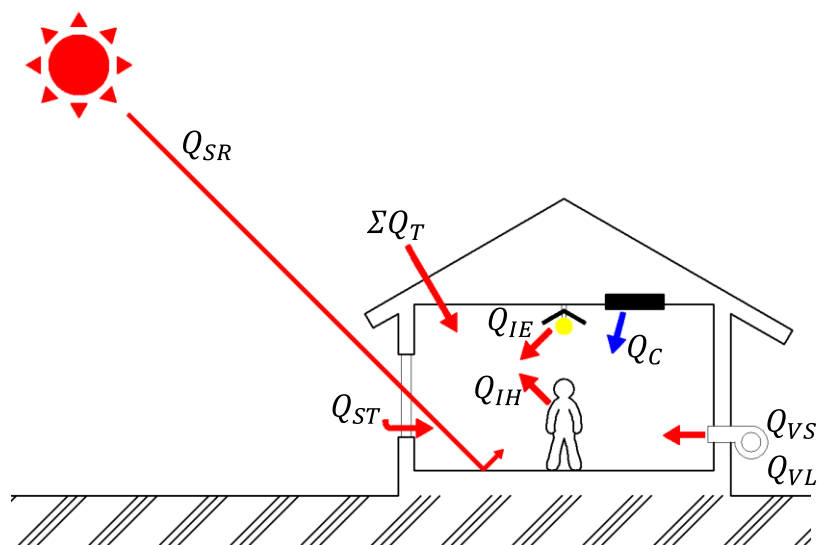


図 4.13 冷房負荷概念図

$$S = 1 - SR \quad (4.4)$$

$$Q_{ST} = I_v \cdot A \cdot \eta \quad (4.5)$$

$$Q_{VS} = 0.34 \cdot D \cdot n \cdot V \quad (4.6)$$

$$Q_{VL} = 834 \cdot n \cdot V \cdot (X_{out} - X_{in}) \cdot 24 \cdot 3600 \quad (4.7)$$

$$Q_C = \Sigma Q_S + \Sigma Q_T + \Sigma Q_{IH} + Q_{IE} + \Sigma Q_V \quad (4.8)$$

S : 遮蔽係数 [-]

I_v : 鉛直面全天日射量(予測値) [W/(m² · day)]

A : 面積[m²]

η : 窓の日射透過率 [-]

Q_{VS} : 換気(顕熱)による熱損失 [W]

Q_{VL} : 換気(潜熱)による熱損失 [W]

D : 日冷房デグリーデー [K · s]

n : 換気回数 [回/h]

V : 室容積 [m³]

X_{in} : 室内の絶対湿度 [kg/kg¹]

X_{out} : 外気の絶対湿度[kg/kg¹]

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

直散分離により計算した日射量を用いて各鉛直面に直達日射量が当たり得る時間を日ごとに算出し、各方位における鉛直面全天日射量を考慮した相当外気温度 SAT (Sol Air Temperature) を式(4.9)より求めた。なお、夜間放射の影響は無視することとした。

SAT 計算法の概念図を図 4.14 に示す。ただし、総合熱伝達率 α_o は $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、鉛直面の日射吸収率 α_s は 0.7 として計算した。

$$SAT = \theta_{out} + \alpha_s / \alpha_o \cdot J \quad (4.9)$$

SAT : 相当外気温度 [$^{\circ}\text{C}$]

θ_{out} : 外気温度 [$^{\circ}\text{C}$]

α_o : 総合熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

α_s : 鉛直面の日射吸収率 [-]

貫流および換気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。一方、アメダスデータでは外気温の日最高、日最低、日平均の3値しか提供されていないため、各日におけるアメダスデータ(2001~2010年)の10年平均値から室内外温度差の日積算値を下記のように求め、これを日冷房デグリーデーと定義した。

各条件の冷房負荷を表 4.4 に示す。冷房期間中、設定室温が終日一定であるとするれば、冷房負荷は概ね外気温と日射量の影響が大きい。そこで日最高相当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する三角形の面積を求め、日冷房デグリーデーとして採用した。

また、設計室温が平均値と最高値の中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換気負荷、壁・屋根・天井からの貫流負荷を計算した。また、日最高外気温が設定温度を上回った日を冷房期間と定義した。日冷房デグリーデーの概念図を図 4.15 に示す。

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

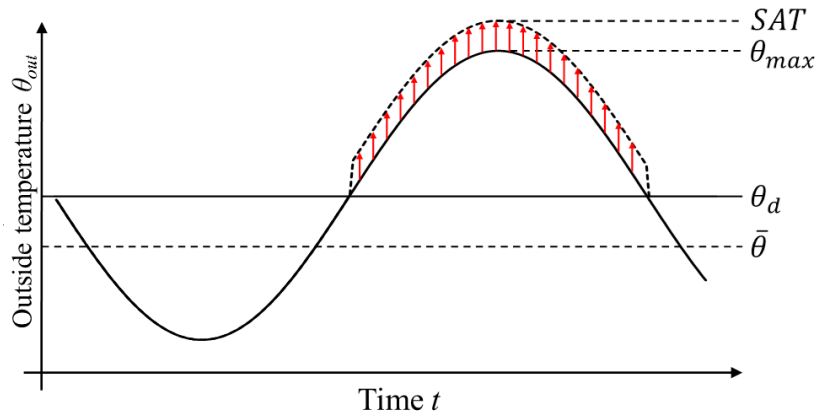


図 4.14 相当外気温度の概念図

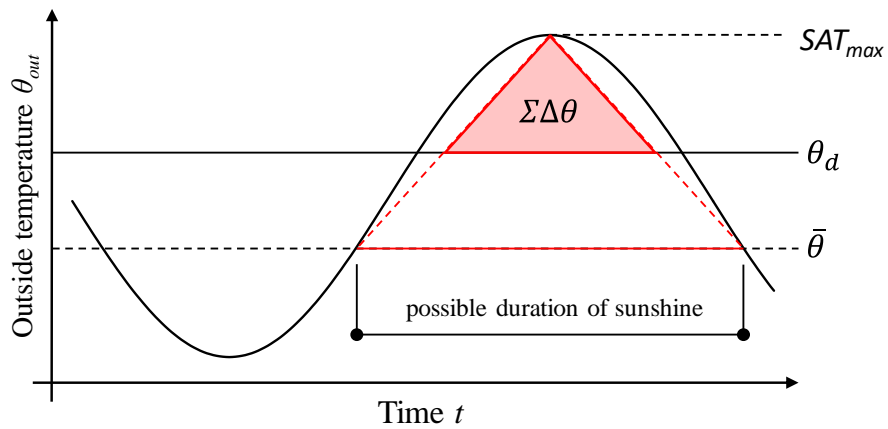


図 4.15 冷房デグリーデーの概念図

ただし, SAT : 相当外気温度 [$^{\circ}\text{C}$], θ_{max} : 日最高外気温度 [$^{\circ}\text{C}$], θ_d : 設定室温 [$^{\circ}\text{C}$], $\bar{\theta}$: 平均外気温 [$^{\circ}\text{C}$]

表 4.4 冷房負荷

Type	Content	Sensible heat	Latent heat	
Heat gain load	wall	Q_T	—	
	window	conduction	Q_{SC}	—
		solar gain	Q_{SR}	—
	Indoor occurrence heat	human	50W/human	50W/human
devices		100W	—	
Outdoor air load	ventilation	Q_{VS}	Q_{VL}	

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

4.3.2 高断熱・高気密住宅における空調負荷の計算例

高断熱・高気密住宅に日射遮蔽をした時の冷房負荷削減効果を予測するために、前述の計算プログラムを用いて数値計算を実施した。本計算に用いた住宅は、2010年1月に札幌市に竣工した実験住宅であり、内装にはPCM内装左官材が使用されている。1階と2階の平面図を図4.16、図4.17に示す。また、実験住宅の仕様を表4.5に示す。

札幌と東京の気象データを用いて前述の空調負荷計算プログラムによって算出した冷房負荷とその削減率の計算結果を表4.6に示す。また、東京における日冷房負荷の推移を表4.18に示した。

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から、効果的な日射遮蔽装置の使用によって夏期の冷房需要を大幅に削減できると考えられる。壁・床・天井等の断熱性能が向上しても、開口部の断熱性・遮熱性を高めない限り、日射による負荷と内部発生熱は一定の値となり、高断熱・高気密住宅では日射による負荷の割合が相対的に大きくなる。

このため、開口部からの日射熱を効果的に遮蔽することは冷房負荷削減に有効である。また、各地域の冷房負荷の結果を表4.19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と組み合わせることで、負荷抑制と住環境改善効果が期待できる。

本節では、簡易冷房負荷計算プログラムによって17地域における高耐候性不織布の冷房負荷削減効果を予測して示した。

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

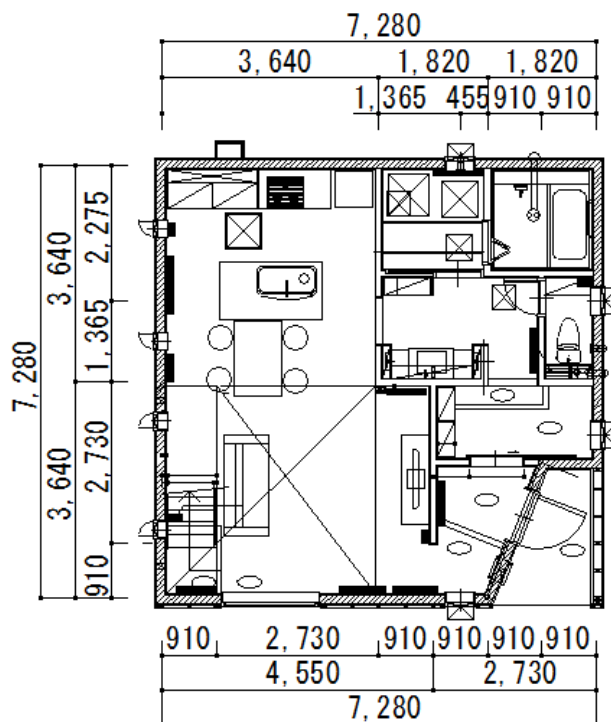


図 4.16 1F 平面図

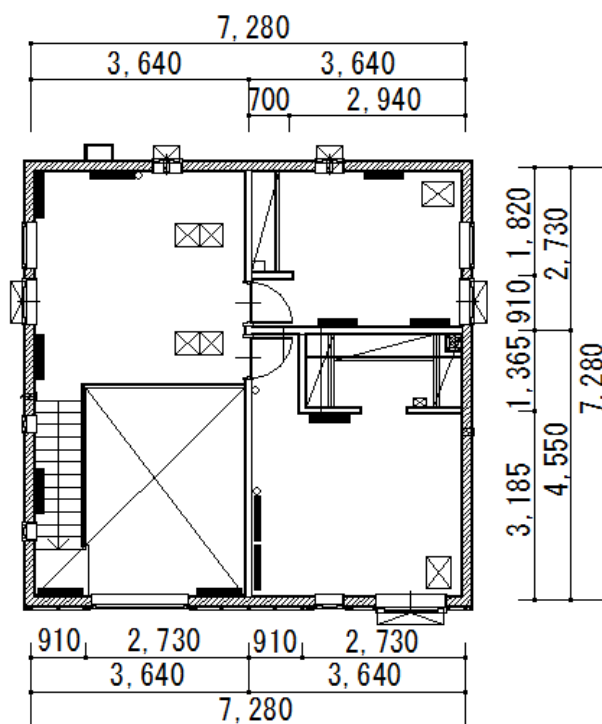


図 4.17 2F 平面図

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

表 4.5 建物概要

Location		Nishiku, sapporo
Type		Model house
Floor space		102.89 [m ²]
Heat loss coefficient		1.32 [W/(m ² ·K)]
window	Heat transmission coefficient	1.5 [W/(m ² ·K)]
	solar shading coefficient	0.1
Quantity of PCM		108 [kg]
Heat source		Heat pump water heater

表 4.6 札幌と東京の冷房負荷

	Cooling load [MJ/(m ² · a)]		Reduction rate [%]	
	Sapporo	Tokyo	Sapporo	Tokyo
No shielding	27	110	—	—
NWF shielding	10	64	64.1	42.2

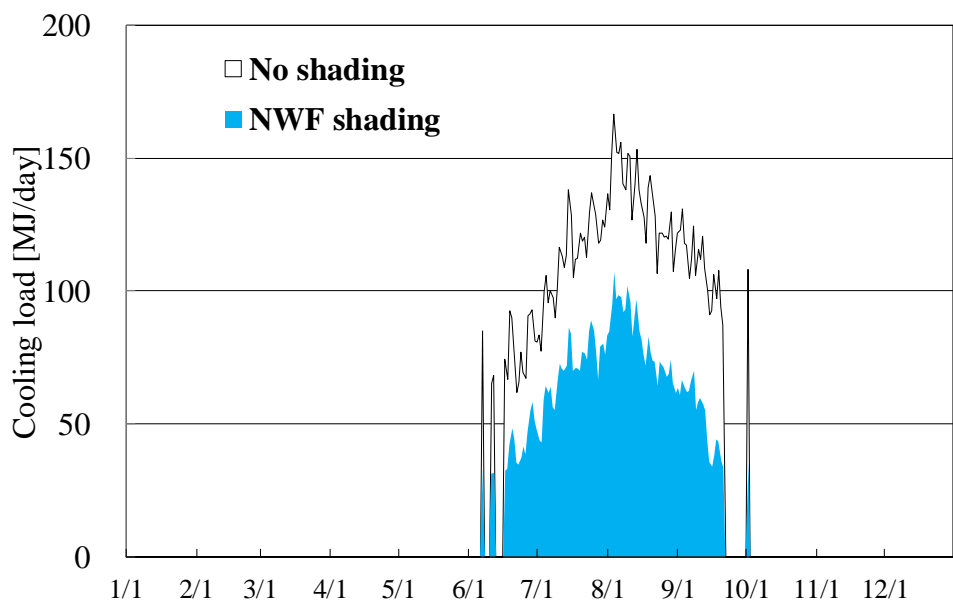


図 4.18 東京の冷房負荷

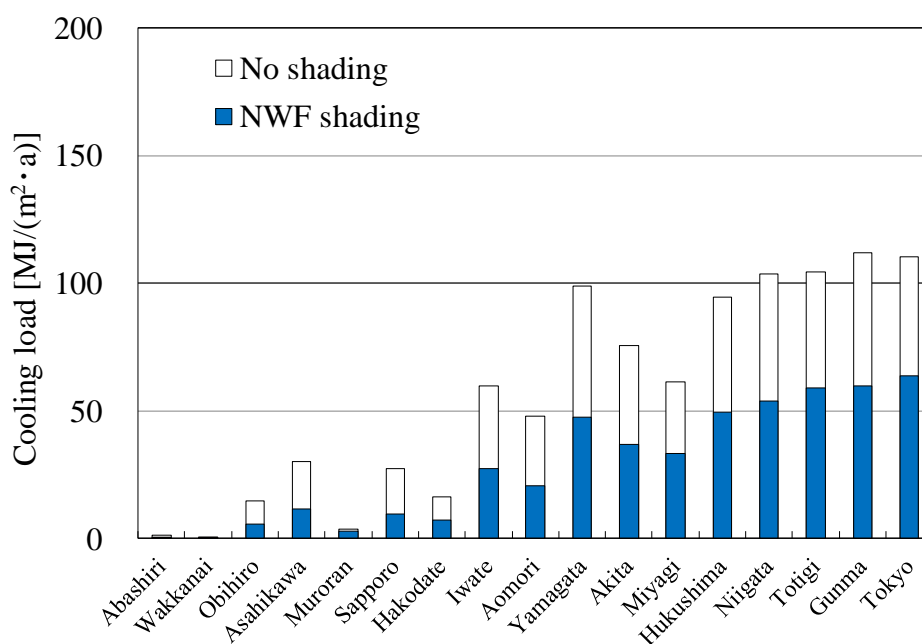


図 4.19 各地での計算結果

4.4 摘要

本章で提案した新規の日射遮蔽材料である高耐候性不織布 NWF の遮蔽率は、日射量、UV 量、照度ともに 0.9 以上であった。また、白色系の日射遮蔽材に直達光が入射すると、透過光束によって遮蔽材からの輝度が増加するが、天空光では遮蔽材からの輝度が減少することが確認された。

日射遮蔽を行うと日最高室内温度は 4K 程度抑制され、さらに外気冷房を併用することで日最高室内温度を 7K 程度まで抑制できることを実験棟において確認した。

日射遮蔽・外気冷房併用時、日最高外気温度が 30°C 以上の真夏日では PCM 室の日最高室温は PB 室よりも低く、暑熱時期の外気冷房による躯体蓄冷の効果が確認できた。PCM 建材は、日中の日射熱を蓄熱する性質を持つことから、夏季に逆効果になることが知られているが、日射遮蔽等を採用することで室の室温上昇を抑制することができれば、日最高室温を抑制できるなど、PCM の効果がみられるといえる。

夏季の冷房負荷は日射遮蔽と外気冷房を行わない時に比べ、外気冷房単独で 10%、日射遮蔽単独で 88%削減できることを確認した。さらに、日射遮蔽と外気

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

冷房を併用することで寒冷地の北海道では冷房負荷が実質ゼロになることを確認した。

高断熱・高気密住宅は、冷房負荷の大部分が日射取得熱であり、計算した 17 地域全てで高耐候性不織布 NWF の設置による冷房負荷の削減効果が高いことを確認した。

本章では、伝統的な夏の採涼手法である日射遮蔽と夜間外気冷房を取り上げ、双方の冷房負荷削減効果に及ぼす室内熱容量の影響を実験棟で計測し、その効果について検討を加えた。庇の深い伝統的な民家では土間床や厚い茅葺き屋根の熱容量を利用しながら夏の環境調整が行われてきたが、日射遮蔽が十分に行われない場合には夜間外気によるパッシブ蓄冷の効果は限定的であることから、その合理性が示唆される結果となった。

また、冷房負荷の削減には日射遮蔽装置 NWF の利用が有効であるが、直達日射がある場合には室内の明るさを犠牲にすることなく負荷削減が可能となる。曇天日には遮蔽膜で室内採光は減少するものの、終日曇天日においては遮蔽膜を上げていても、直達日射による室温の上昇は少ないため、採光を優先させる方法も取りうる。一方、高耐候性不織布を高断熱・高気密住宅において積極的に併用することで、東日本各地において夏季の冷房負荷を大幅に抑制できることも確認できた。

今後は、住宅における高耐候性不織布の日射遮蔽効果と通風効果を示し、非定常熱負荷計算によって蓄熱性能との組み合わせによる効果を明らかにする。また、地域特性を考慮した設計手法について報告する予定である。

参考文献

- 4.1) 根本恭子, 吉野博, 小林仁: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.181-182, 1995.7
- 4.2) 斉藤雅也: 札幌における夏季の夜間換気・日射遮へい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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.599-600, 2006.7
- 4.3) 牧野李会, 斉藤雅也: 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
- 4.4) 小林美和, 澤地孝男, 倉山千春, 西澤繁毅, 瀬戸裕直, 井上隆, 成田健一: 通風と日射遮蔽の両面からみた日射遮蔽部材の評価, 日本建築学会環境系論文集, 613, pp. 57-64, 2007.3
- 4.5) Jittawikul Athasit, 斎藤郁雄, 石原修: 実測及びシミュレーションによるタイ住居におけるパッシブクーリング効果の検討, 日本建築学会環境系論文集, 585, pp. 13-18, 2004.11
- 4.6) 郡公子, 石野久彌: 一般窓の日射遮蔽性能変動の実用的推定法, 熱負荷計算のための窓性能値に関する研究 第2報, 日本建築学会環境系論文集 77, 672, pp. 89-93, 2012.2
- 4.7) 武田仁, 鈴木宏和, 早川眞: 開口部の日射遮蔽物による熱特性: ベネシアンブラインドの光学特性および中空層の熱特性の検証, 日本建築学会環境系論文集 79, 706, pp. 1037-1047, 2014.12
- 4.8) 吉澤望, 武田仁, 近藤純一: 日射遮蔽物の入射角特性を考慮した熱負荷計算, 内付けブラインドの光学特性計算への Radiance の適用, 日本建築学会環境系論文集 74, 640, pp. 675-683, 2009.6
- 4.9) 森太郎, 酒井義幸, 菅原正則, 繪内正道, 羽山広文: 遮光布によるアトリウム空間の光・熱環境調整法に関する研究, その1 遮光布を設置したアトリウムの室内環境実測調査, 日本建築学会環境系論文集, 568, pp. 119-125, 2003.6
- 4.10) 長野克則, 武田清香, 持田徹, 嶋倉一實, 中村卓司: 粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究, 第1報 小型実験システムの構築およびその蓄放熱特性, 日本建築学会環境系論文集, 579, pp. 21-28, 2004.5
- 4.11) A. Shanmuga Sundarama, R.V. Seeniraj, R. Velraj : An experimental investigation on passive cooling system comprising phase change material and two-phase closed thermosyphon for telecom shelters in tropical and desert regions, Energy and Buildings 42 (2010), pp. 1726-1735, 2010.3
- 4.12) Servando Álvarez, Luisa F. Cabeza, Alvaro Ruiz-Pardo, Albert Castell, José Antonio Tenorio :

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

- Building integration of PCM for natural cooling of building, *Applied Energy* 109 (2013), pp. 514-522, 2013.2
- 4.13) Luisa F. Cabeza, Manuel Ibañeta, Cristian Sole, Joan Roca, Miquel Nogues : Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, pp. 1273-1282, 2006
- 4.14) V.V. Tyagi, D. Buddhi, Richa Kothari, S.K. Tyagi : Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study, *Energy and Buildings* 51 (2012), pp. 248-254, 2012.3
- 4.15) M. Noro R.M. Lazzarin, F. Busato : Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage, *international journal of refrigeration*, pp. 1-13, 2013.1
- 4.16) Ming Liu, Wasim Saman, Frank Bruno : Validation of a mathematical model for encapsulated phase change material flat slabs for cooling applications, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011), pp. 2340-2347, 2011.4
- 4.17) Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Rosa Francesca De Masi, Filippo de' Rossi, Giuseppe Peter Vanoli : Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials : Energy savings and indoor comfort in the cooling season, *Applied Energy* 113 (2014), pp. 990-1007, 2013.11
- 4.18) Johannes Persson, Mats Westermark : Phase change material cool storage for a Swedish Passive House, *Energy and Buildings* 54(2012), pp. 490-495, 2012
- 4.19) 添田晴生, 中田亮生, 高岡大造 : 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・衛生工学会論文集 (203)*, pp. 1-11, 2014.2
- 4.20) 添田晴生, 大西潤治, 木本日出夫 : 躯体蓄熱をベース空調とした省エネルギー住宅に関する研究 : その3.夏期における PCM ボード壁の室温上昇抑制効果に関する数値解析的研究, *環境工学総合シンポジウム講演論文集 2001(11)*, pp. 437-440, 2001.7
- 4.21) 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2報 潜熱蓄熱内装材を施工した木造住宅の熱容量と室温抑制効果), *北海道職業能力開発大学校紀要第26号*, pp.45-55, 2009.12
- 4.22) 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

4. PCM 内装左官材の夏季におけるパッシブ効果

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. 24-37,2012.2

- 4.23) 開口部の日射熱取得性能および断熱性能の評価方法に関する調査,平成 24 年度建築基準整備促進事業,34. 開口部材の日射侵入率等熱性能に関する調査
- 4.24) 一般社団法人 日本建材・住宅設備産業協会:窓の遮熱性能計算・試験方法の JIS・ISO 化 成果報告書,2013.3
- 4.25) 井上宇一:建築設備ポケットブック(改訂第 3 版),相模書房,1983.6
- 4.26) 草間友花,石戸谷裕二: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 81(720),pp. 173-180,2016.2

本章は、既発表論文^{4.26)}を取りまとめ、加筆修正を加えたものである。

5. ハイブリッド壁暖冷房システム

5.1	ハイブリッド壁暖冷房システムの基本的熱性能試験	141
5.1.1	ハイブリッド壁暖冷房システムの概要	
5.1.2	蓄熱量と放熱量試験	
5.1.3	ジオサーマルコイルによる土壌蓄熱	
5.2	太陽熱集熱器を設置した実証実験棟における暖房量抑制効果	157
5.2.1	システムの概要	
5.2.2	実証実験棟における暖房量抑制効果	
5.3	実験住宅における通年での環境測定	165
5.4	摘要	175

参考文献

5. ハイブリッド壁暖冷房システム

これまで PCM をパッシブに利用したシステムの領域において、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^{5.1)~5.9)}。

一方、冷暖房機器^{5.10),5.11)}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^{5.13)~5.21)}。

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、PCM 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。

第2章では、PCM 内装左官材の基本的性能を確認し、第3章及び第4章では、PCM 内装左官材が室内環境に与えるパッシブ効果について明らかにした。本章では、自然エネルギーをより効率良く利用できるよう、PCM 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、太陽熱集熱器を設置した実証実験棟および、ジオサーマルコイルを設置した実験住宅における実測調査を行い、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。

5. ハイブリッド壁暖冷房システム

5.1 ハイブリッド壁暖冷房システムの基本的熱性能試験

5.1.1 ハイブリッド壁暖冷房システムの概要

本章では、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、そのシステムの基本的熱性能を明らかにする。

ハイブリッド壁暖冷房システムは、図 5.1 に示すように、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(写真 5.1 及び写真 5.2)。

なお、本章で取り扱った PCM 内装左官材の母材は石膏、PCM は融点 25°C 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。PCM 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、第 2 章でも報告している通りである^{5.22), 5.23)}。

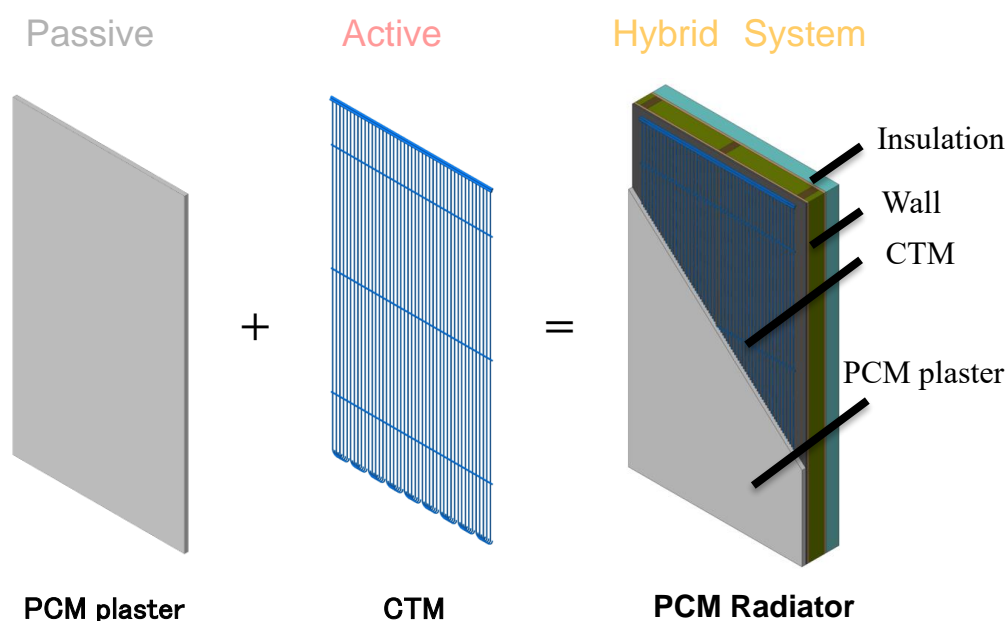


図 5.1 ハイブリッド壁暖冷房システムの概要



写真 5.1 CTM



写真 5.2 PCM 内装材の施工

PCM 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、冬季でそれぞれ図 5.2 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。

5. ハイブリッド壁暖冷房システム

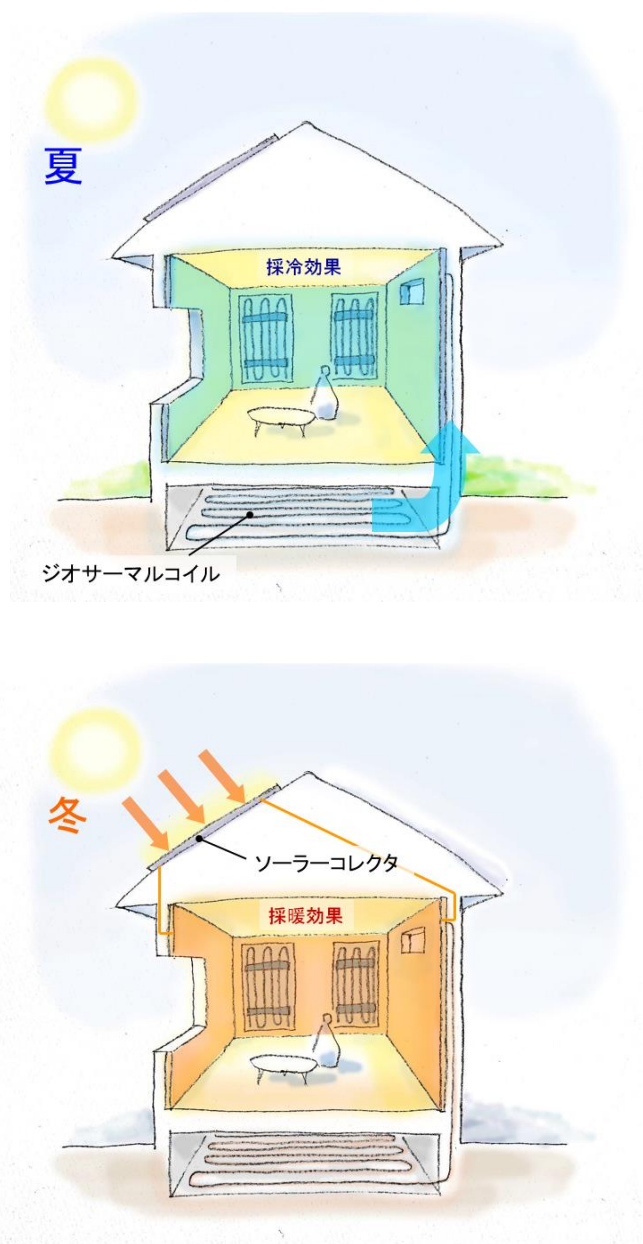


図 5.2 自然エネルギー利用の概念図

5.1.2 蓄熱量と放熱量試験

a) 試験概要

石膏プラスター(RGP)と軽量セメントモルタル(LCM)を母材とした厚さ 12mm の PCM 内装材を毛細管マット(CTM)と組み合わせてハイブリッド壁暖冷房システムの検証試作品(プロトタイプ)を製作した。仕様した母材の物性を表 5.1 に示

す。熱性能は RGP と LCM でほぼ同等の性能を有するが、強度は RGP よりも LCM の方が高いことが一般に知られている。

プロトタイプ(Type A～Type C)は、メタルラスをスポット溶接した 1,000×2,000×0.8(mm)の鋼板の周囲 45(mm)を取り付け用スペースとして残し、CTM をラスに番線でくくりつけ施工して、その上に 910×1,910×12mm の PCM 内装左官材を施工し(写真 5.3), さらに仕上げ材を表面に施工した(写真 5.4)。使用した CTM のチューブ外径、チューブの間隔及び PCM 内装左官材の混和率を表 5.2 に示す。



写真 5.3 PCM 内装左官材施工後



写真 5.4 仕上げ材設置後

表 5.1 母材の物性

	Density	Specific heat	Thermal conductivity	Thermal diffusivity
	kg/m ³	kJ/(kg・K)	W/(m・K)	m ² /s ×10 ⁻⁶
RGP	1,500	0.75	0.60	0.53
LCM	800	0.88	0.32	0.45

表 5.2 試験体概要

	Base material	CTM (mm)		PCM mixing ratio (%)
		Pitch	Diameter	
Type A	RGP	5.0	10	30
Type B	LCM	3.4	15	25
Type C	RGP	3.4	15	30

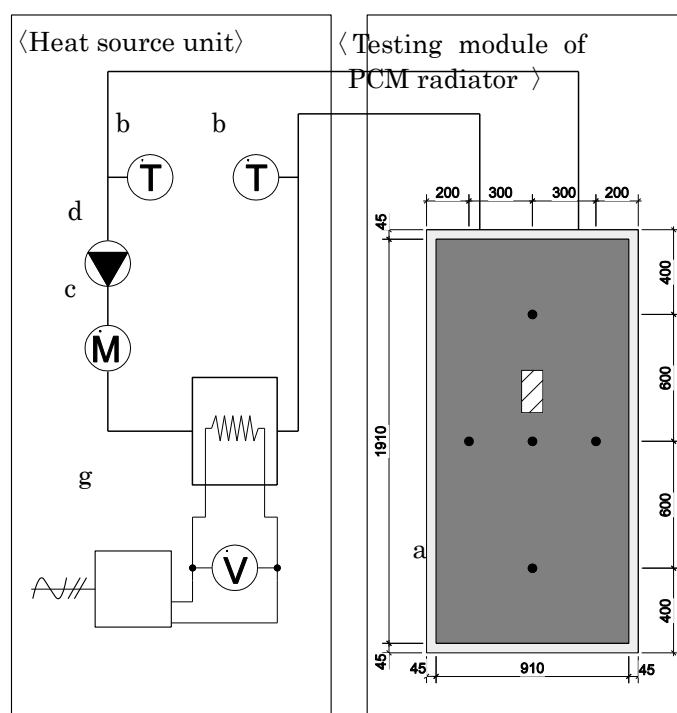
5. ハイブリッド壁暖冷房システム

屋内に開放型環境試験室(以下環境試験室)を建設し、試験室内にプロトタイプ試験体を3体設置して、放熱量、蓄熱量及び比熱などの熱性能を測定した。

本章で用いた実験装置の概念図を図 5.3 に示す。

熱供給装置は写真 5.5、表 5.3 に示すような、電気ヒーターによって加熱した熱媒をキャンド型循環ポンプにより搬送する装置で、温水流量、温水温度を測定することができる装置である。

また、試験体には PCM 内装左官材の内部と表面には図に示す位置に T 型熱電対が取り付けられている。熱供給装置と試験体を結ぶ配管には酸素透過防止架橋ポリエチレン管 (10A) を使用し、配管からの熱損失を少なくするため外部に断熱用のパイプカバーを施工した。



- a: Testing module b: Thermometer c: Flowmeter
d: Pump e: Electric heater f: Voltmeter g: Transformer

図 5.3 試験装置概要と測定点



表 5.3 熱源装置の構成

	Device	Capability
b	Hot water thermo couple (QAE2110.010: SIEMENS)	-30 ~ +130 °C 1 MPa 100 mm (inundation length)
c	Flow meter (FLM21-10: OVAL)	-10 ~ +80 °C 0.98 Mpa (±2%RS±0.05L/min)
d	Pump (StarR S25/4: WILO)	-10 ~ +110 °C 100 V 0.73 A
e	Heater (PHM2: ECOTEC)	1 MPa 2.3 kW 200 V 50 Hz/60 Hz

写真 5.5 熱源装置

屋内にプロトタイプの実験を実施するため環境試験室(写真 5.6, 図 5.4)を建設した。施工にはパネル工法を用いており、各パネルにグラスウール(24K)を 100(mm)充填した(図 5.5)。入り口正面には上記のプロトタイプ 2 が 3 体設置できる。



写真 5.6 環境試験室外観

5. ハイブリッド壁暖冷房システム

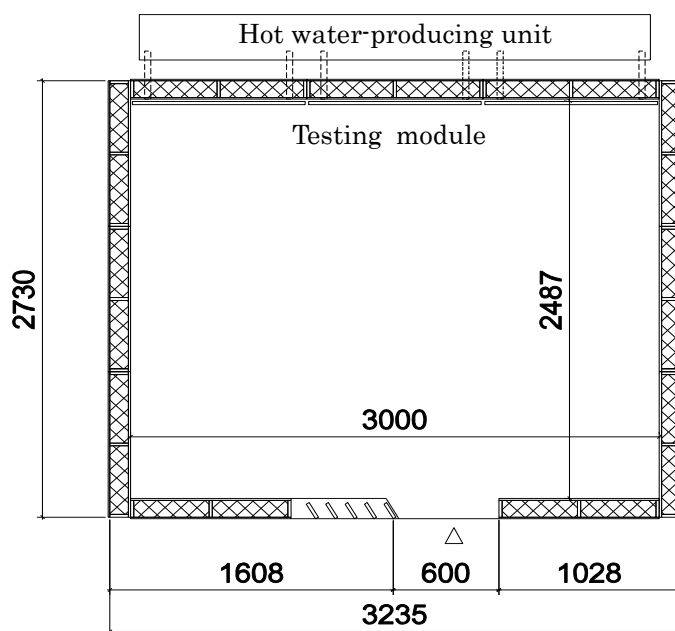


図 5.4 環境試験室平面図

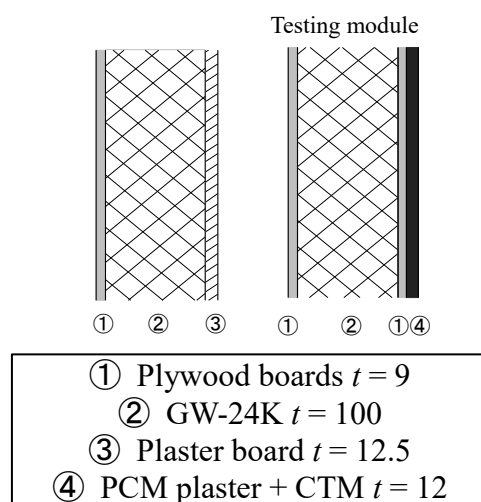


図 5.5 環境試験室断面図

試験室内において試験体に温水発生器で加熱した熱媒を供給し、温水温度及び壁体温度を定常状態に保ちながら放熱量を測定した。また、過渡状態の測定データから等価的な蓄熱量及び比熱を予測して検討を加えた。

測定項目は PCM 内装材の内部温度及び表面温度(図 5.3)、壁体表面熱流、室

温，温水の出入り口温度，温水流量である。測定は1分間隔で行いデータロガーにより記録した。

b) 試験結果

図 5.6 及び図 5.7 に環境試験室内での Type B 試験体の加熱時から冷却開始 1 時間後のサーモカメラの画像を示す。PCM の混和率は左から 10 wt.%，25 wt.% 及び 20 wt.% であり，母材は LCM である。図から，混和率が高い程，加熱終了後の表面温度が高く維持されていることがわかる。

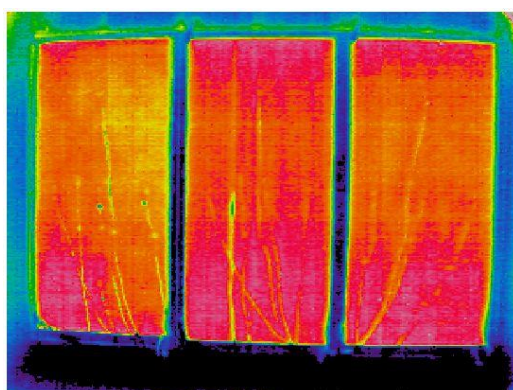


図 5.6 加熱時

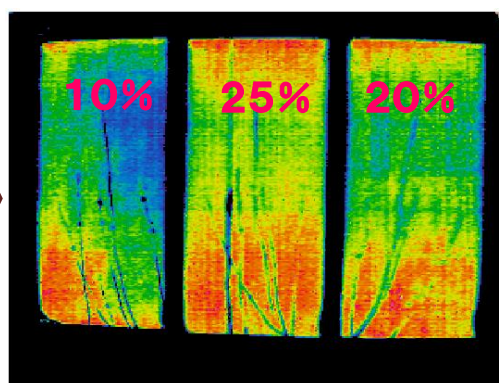


図 5.7 加熱停止から 1 時間後

図 5.8 に壁温の推移を示すが，融点近傍で状態変化の特徴を捉えていることがわかる。また，JIS A 1400^{注)}に準拠して式の放熱量を以下のように測定した。

測定項目は温水出入口温度，室温，温水流量であり，式(5.1)により放熱量を算出した。加熱量と放熱量の瞬時値を図 5.9 に，各試験体の放熱量を図 5.10 に示す。

また，温水と室温の差が $30\text{K}(55^\circ\text{C}(\text{往温度})/45^\circ\text{C}(\text{還温度})-20^\circ\text{C}(\text{室温}))$: $\Delta t = 30$ の時の能力を放熱量と定義すると，Type A は約 198.33 W/m^2 ，Type B は約 133.05 W/m^2 ，Type C は約 117.95 W/m^2 となった。これらの結果から，大きな外径で小さいピッチ間隔を有する方が高い放熱能力を有することがわかる。

5. ハイブリッド壁暖冷房システム

Type B の母材や PCM の混和率は他の 2 種とは異なるため、一概に比較することはできないものの、母材の強度や混和率等、用途や目的に合わせて母材や CTM を選定する必要があるだろう。

$$Q_d = \frac{c_r \cdot \rho_r \cdot V_r (\theta_i - \theta_o)}{A_t} \quad (5.1)$$

Q_d : 放熱量 [W/m²]

c : 比熱 [J/(kg · K)]

ρ : 密度 [kg/m³]

V : 流量 [m³/s]

θ : 温度 [°C]

A : 面積 [m²]

添字

i : 行き

o : 還り

t : 試験体

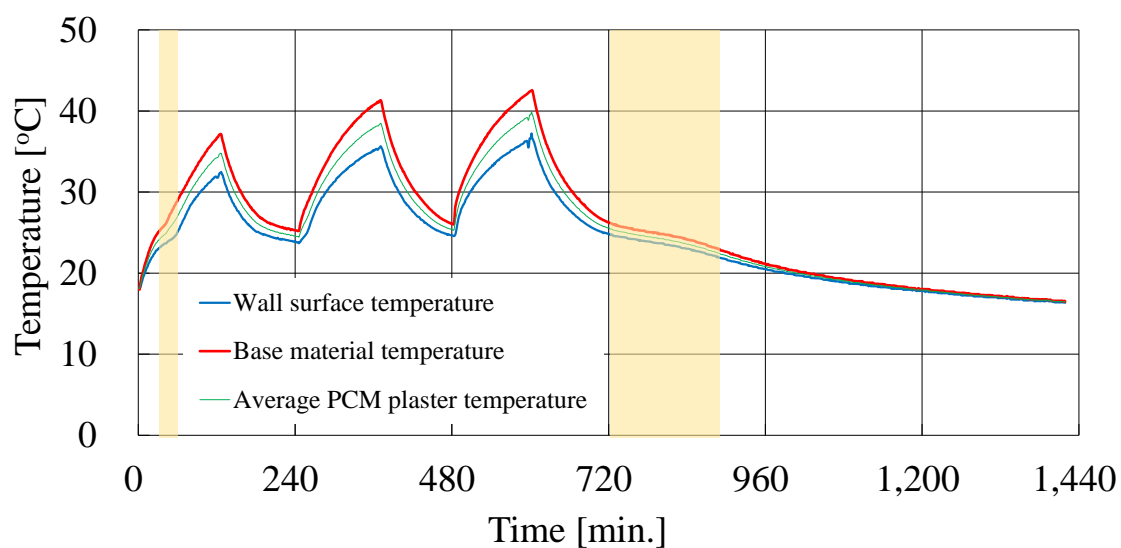


図 5.8 試験体温度の推移

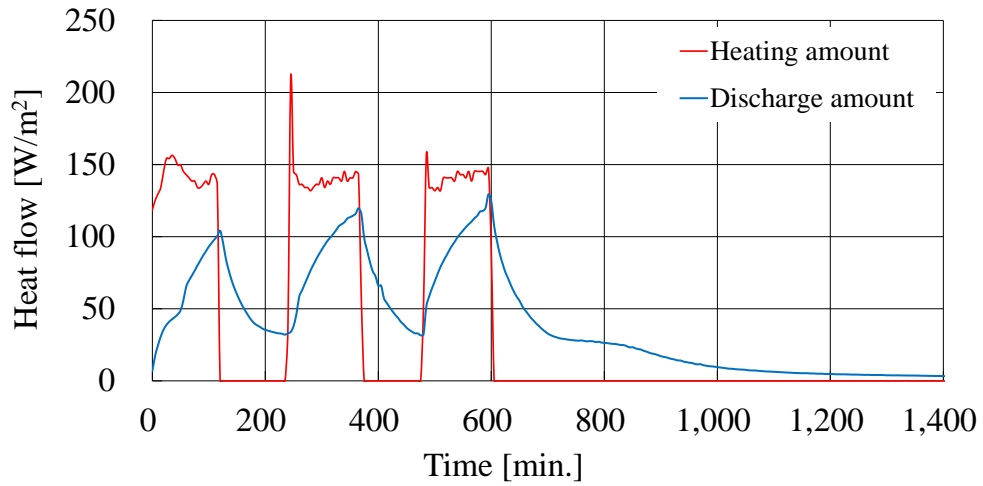


図 5.9 加熱時と放熱時の熱流

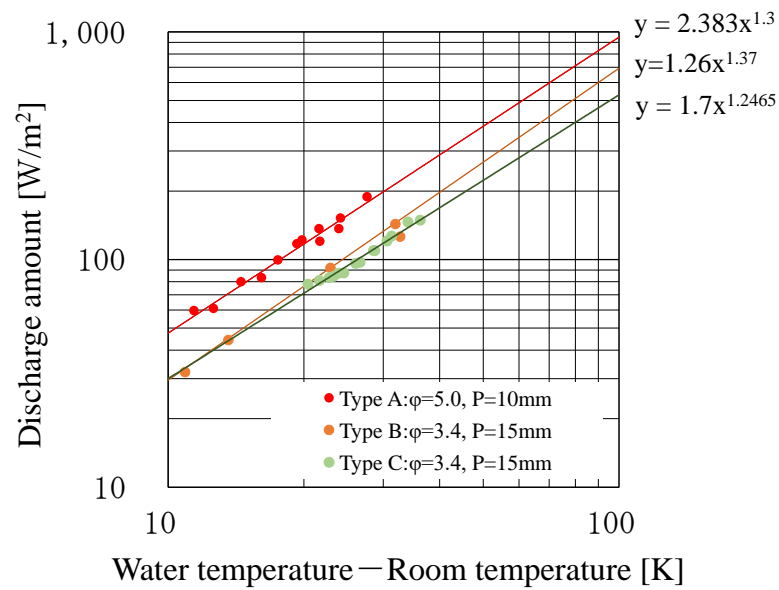


図 5.10 放熱量

5.1.3 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^{5.24),5.25)}の熱源やクールチューブ^{5.26)}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^{5.27)}も行われている。

本章では、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。

本節では、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。

a) 試験概要

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(写真 5.7)。また、箱体周囲は厚さ 25mm のポリスチレン板で断熱した。

試験体の断面図を図 5.11 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 箇所を設置した。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。

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。



写真 5.7 試験装置外観

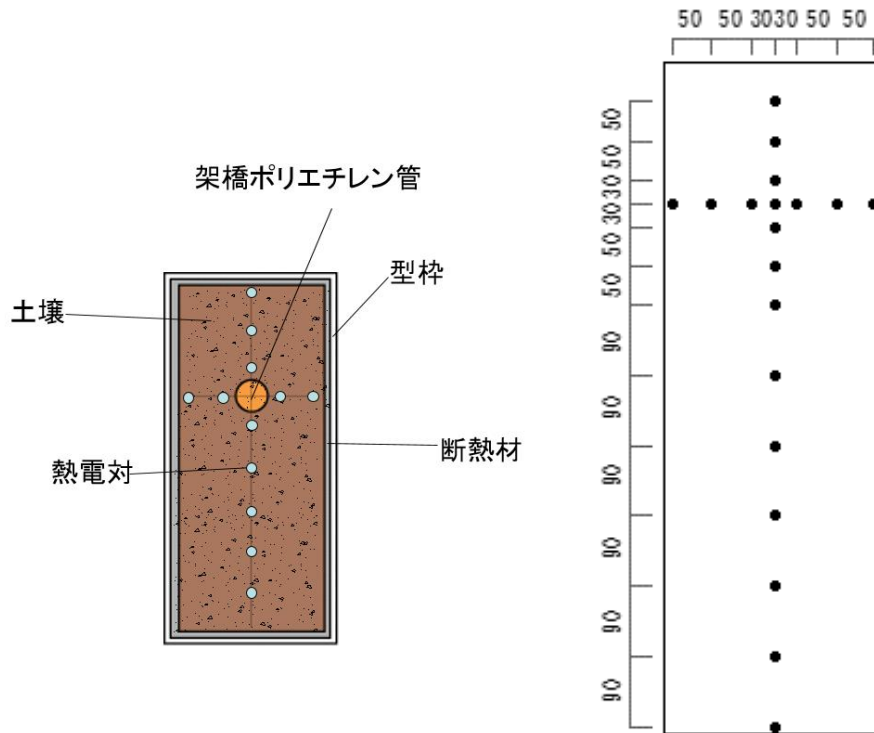


図 5.11 試験装置断面概要及び測定点

ジオサーマルコイルを二次元非定常熱伝導^{5.28)-5.29)}でモデル化して数値計算を行った。表 5.4 に初期条件として与えた物性値，図 5.12 に流体と接している離散点を示す。

基礎方程式を式(5.2)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(5.3)に，流体の熱伝達率を式(5.4)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(5.5)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(5.6)を用いて式(5.7)で計算し，土壌温度を式(5.8)より求めた。

空間差分間隔は x, y 軸方向とも 10mm，時間差分間隔は 1s 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(図 5.13)。

表 5.4 物性値

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

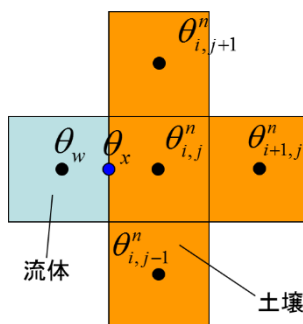


図 5.12 離散点

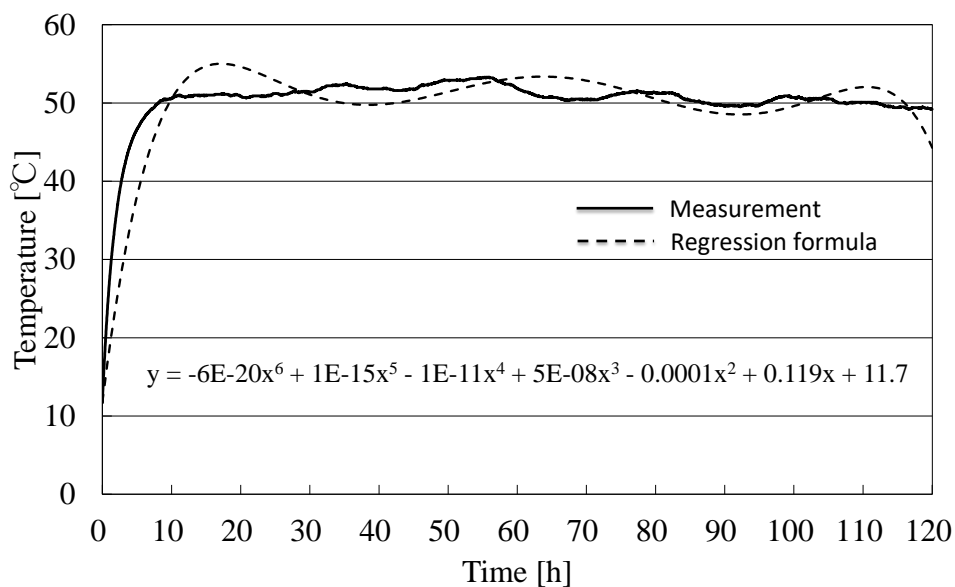


図 5.13 温水温度の推移

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (5.2)$$

$$\theta_{i,j}^{n+1} = \theta_{i,j}^n + ar_x (\theta_{i+1,j}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i-1,j}^n) + ar_y (\theta_{i,j+1}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i,j-1}^n) \quad (5.3)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (5.4)$$

$$\alpha_c = 0.023 \lambda_m \left(\frac{u}{\nu} \right)^{0.8} d^{-0.2} Pr^{0.3} \quad (5.5)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{l}{\lambda_e} \right)^{-1} \quad (5.6)$$

$$\theta_x = \frac{\alpha \theta_w + \frac{2\lambda_e}{\Delta x} \theta_{i,j}^n}{\alpha + \frac{2\lambda_e}{\Delta x}} \quad (5.7)$$

$$\theta_{i,j}^{n+1} = \theta_{i,j}^n + ar_x (2\theta_x - 3\theta_{i,j}^n + \theta_{i+1,j}^n) + ar_y (\theta_{i,j-1}^n - 2\theta_{i,j}^n + \theta_{i,j+1}^n) \quad (5.8)$$

$$r_x = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad r_y = \frac{\Delta t}{\Delta y^2}$$

θ : 温度 [°C]

Δt : 時間 [s]

a : 温度伝播率 [m^2/s]

Nu : ヌセルト数 [-]

Re : レイノルズ数 [-]

Pr : プラントル数 [-]

α_c : 流体の対流熱伝達 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

λ : 熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

u : 水の流速 [m/s]

ν : 動粘性係数 [m^2/s]

d : 代表寸法 [m]

α : 対流熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

c : 比熱 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

l : 試験体長さ [m]

ρ : 比重 [kg/m^3]

添字

i, j : 空間座標 (x, y 方向)

n : 時間座標

m : 冷媒の物性

e : 土壌の物性

図 5.14 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°C の温水で土壌を加熱した時の 670mm 位置の温度は 60h 経過後ではほぼ一定であり、120h 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、本研究ではベース位置 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^{5.30)}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。

図 5.15 に土壌の上下温度分布を、配管から土壌測定之最下点まで距離(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 30h 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、30h 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。

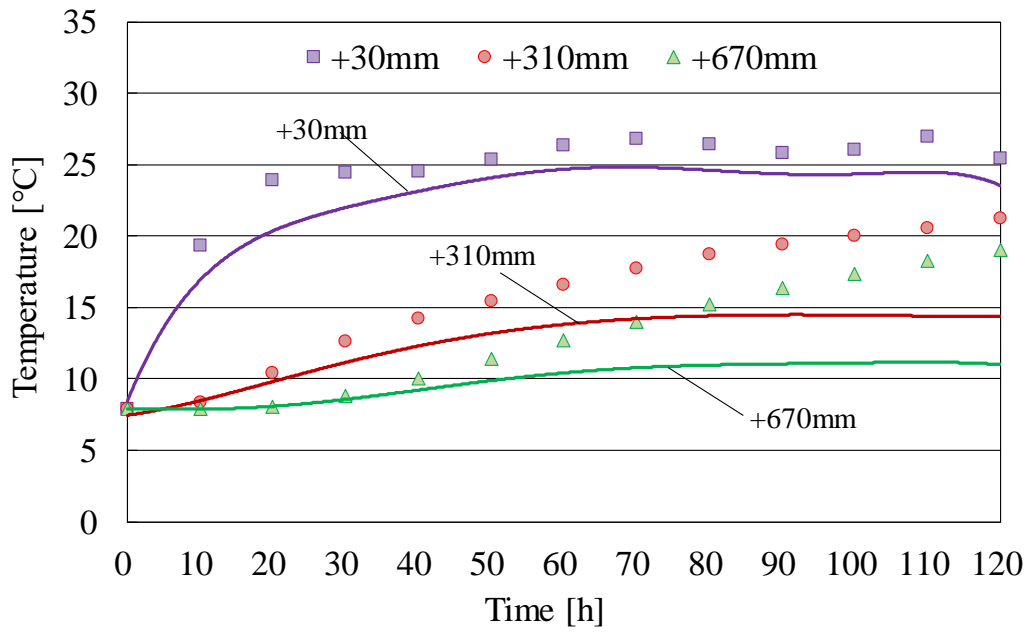


図 5.14 土壌温度の実測値と解析値

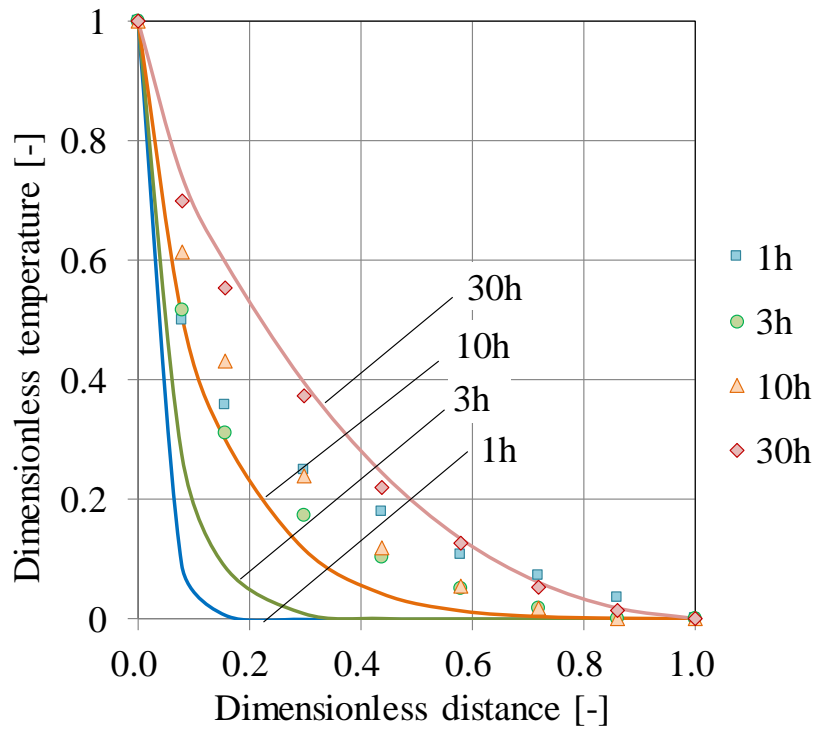


図 5.15 無次元温度と無次元距離

5.2 太陽熱集熱器を設置した実証実験棟における省エネルギー効果

5.2.1 システムの概要

本節では、太陽熱を暖房用エネルギーとして効率良く利用するために太陽熱集熱器を製作し、これにハイブリッド壁暖冷房システムを組み合わせることで、太陽熱利用暖房システムを構築した。

一方、現在実用化されている太陽熱集熱器は主に給湯用途に適用することを目的として開発されているため、器内の保有水量が数十リットル程度と比較的多く、また製品重量も重いことが多い。

従ってこれらの太陽熱集熱器では熱的な過渡応答時間も長く、潜熱蓄熱内装材の性能を十分に発揮し得ない可能性がある。さらに、陸屋根の採用が多い北海道の都市部では、重量構造物を屋上に施工することに起因する漏水や積雪の危険性からその普及が遅れている。

本研究では、軽量・薄型で壁面にも設置可能な太陽熱集熱器のプロトタイプを作製し、太陽熱集熱器の集熱効率の測定と太陽熱利用暖房システムによる補助暖房量抑制効果について検討を行った。

太陽熱集熱器が設置された実証実験棟の外観および詳細表を写真 5.8 及び表 5.5 に示すが、実証実験棟の詳細は第 3 章及び第 4 章で述べた通りである。

図 5.16 に実証実験棟の平面図を示すが、太陽熱集熱器と連携されたハイブリッド壁暖冷房システムが設置された室を scPCM 室と呼称することとする。

図に示した測定位置に熱電対、日射計を設置し、太陽熱集熱器表面温度、室温、グローブ温度、外気温、構造体内外表面温度、構造体内部温度、透過日射量、全天日射量、補助暖房量、ポンプ消費電力を測定した。

各温度は T 型熱電対 (0.3mm φ) を用いて 1 分間隔で測定し、データロガーに記録した。また、各室の断面図を図 5.17 に示す。



写真 5.8 太陽熱集熱器が設置された実証実験棟の外観

表5.5 PB室とscPCM室の詳細

Name	PB room	scPCM room
Finish material	Gypsum plaster (t=9.5)	Radiant heating cooling system
PCM shape	-	Microcapsule PCM
Melting point [°C]	-	26
Latent heat [kJ/kg]	-	170
PCM [kg]	-	28
Location	Otaru, Hokkaido, Japan	
Size [mm]	W2,080×D2,070×H2,400 (pair glass)	
Floor area [m ²]	5.2 each rooms	
U _A [W/m ² /K]	0.4	
Window size [mm]	W1,400×H1,400	

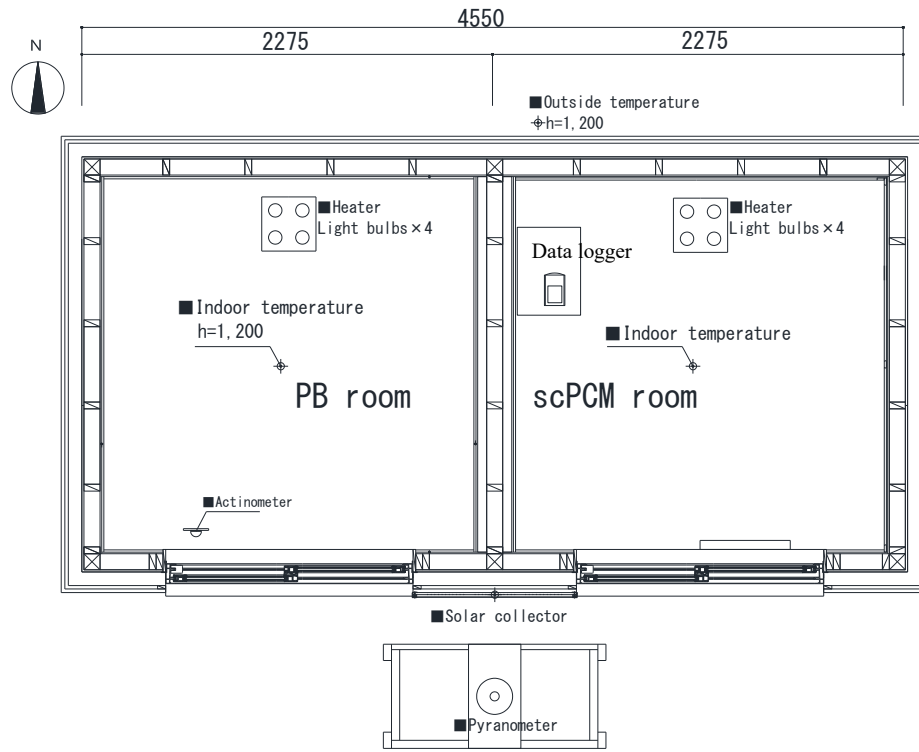


図 5.16 実証実験棟平面図及び測定点

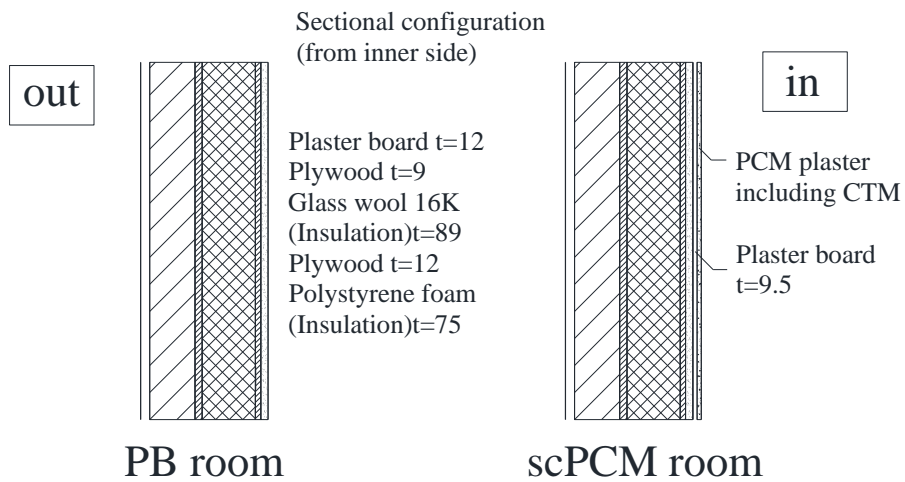


図 5.17 各室の断面図

実証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と架橋ポリエチレン管で接続して太陽熱集熱器の集熱効率と補助暖房量の抑制効果を検討した^{5.31)}。

システムダイヤグラムを図 5.18 に示す。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，循環ポンプを起動して温水温度差と流量の測定値から集熱量を予測した。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°C を超えると運転が開始し，その差が 2°C 以下になると停止するように制御した。

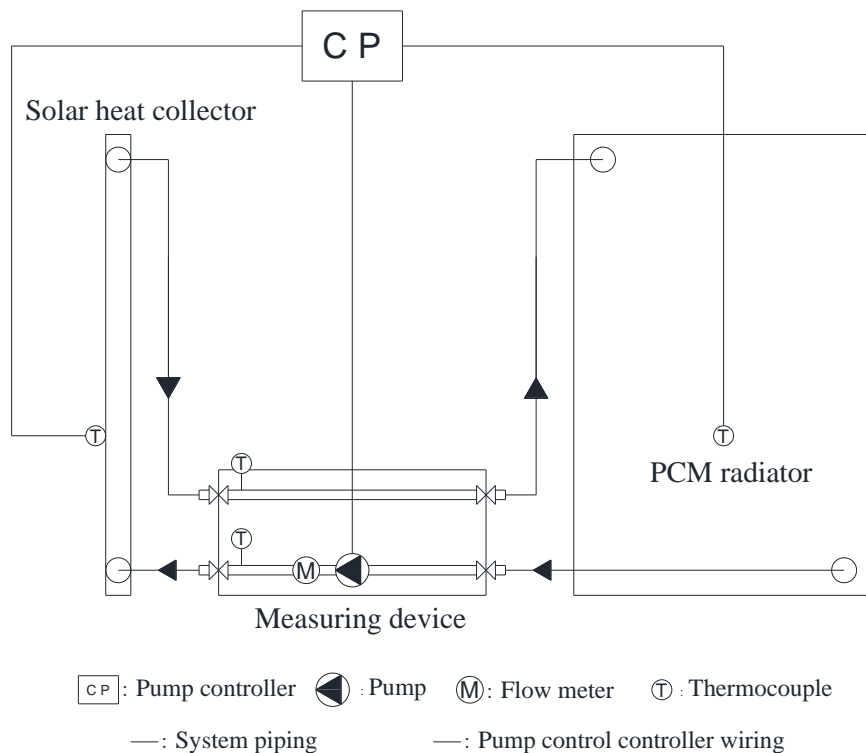


図5.18 システムダイヤグラム

太陽熱集熱器(写真5.9)は，インシュレーションボードにCTMが埋設されたマット(906×1,815×12mm)に選択透過膜を貼り，周囲に木材(21×12mm)，中央部に口型アルミ材(12×12×2mm)を取り付け製作した。また，その上にポリカーボネート板(906×1,815×2mm)を取り付け，外周部をL型アルミ材(25×25×2mm)で覆って防水加工を施した。

なお，製作した太陽熱集熱器の外形寸法は，914×1,823×30mm(設置構台を含む場合の最大外形寸法は，964×1,873×30mm)重さは約17kgである。図5.19～図5.22に，施工手順を写真5.10に示す。

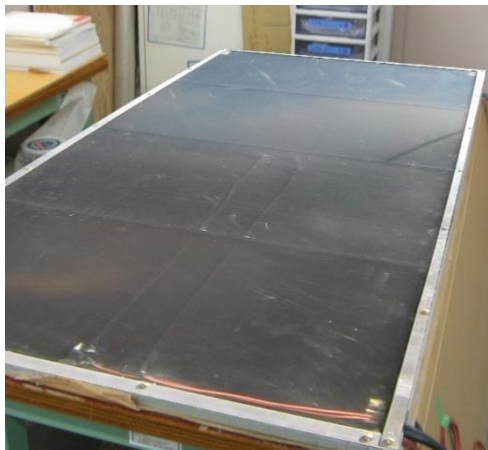


写真5.9 太陽熱集熱器外観

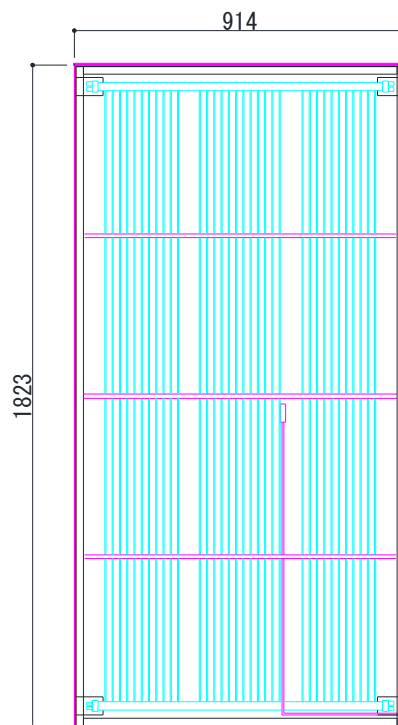


図5.19 太陽熱集熱器外径



図5.20 太陽熱集熱器断面図

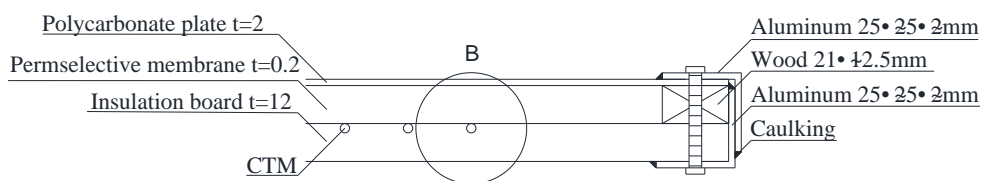


図5.21 断面詳細A

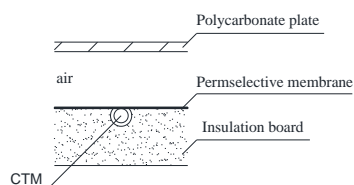


図5.22 断面詳細B

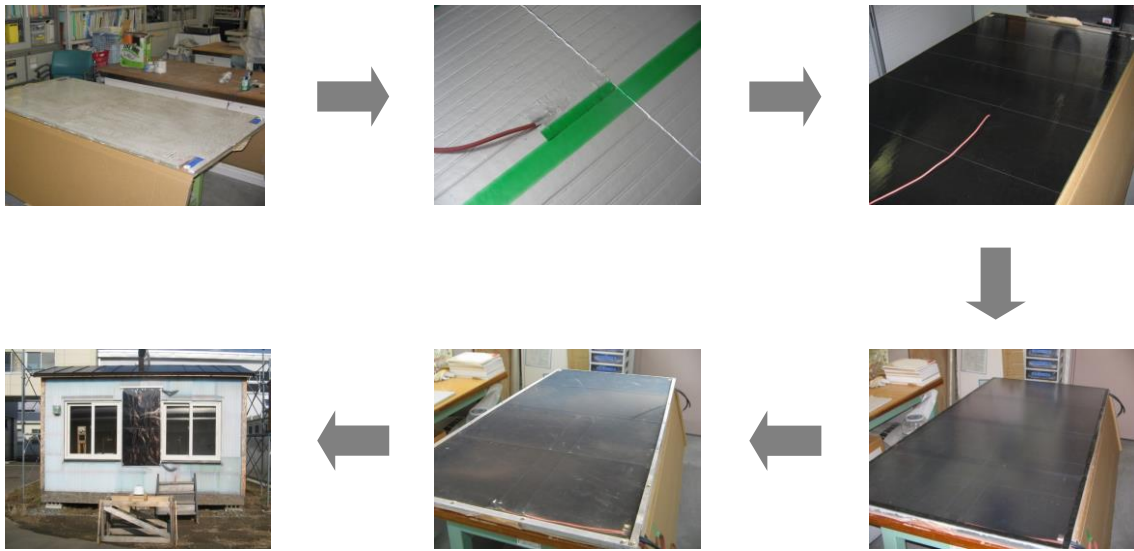


写真5.10 太陽熱集熱器施工手順

本実験では、太陽熱集熱器の集熱量をコレクターの出入口温度差と熱媒の流量から式(5.9)により求め、日積算集熱量とPB室で測定した日積算南面透過日射量の実測値を変換した値を用いて集熱効率を(式(5.10))求めた^{5.32),5.33)}。

$$Q_c = c_r \cdot \rho_r \cdot V_r \cdot (\theta_o - \theta_i) \quad (5.9)$$

$$\eta = \frac{\sum Q_c}{\sum I \cdot A_c} \quad (5.10)$$

Q_c : 集熱量 [W]

η : 集熱効率 [-]

I : 法線面全天日射量 [W/m^2]

添字

r : 冷媒

c : 太陽熱集熱器

太陽熱集熱器の集熱効率を図 5.23 に示す。図はプロトタイプの平均的集熱効率が約 29%であることを示している。既製の太陽熱集熱器と比較すると、やや集熱効率が低いことが予想されるが、本プロトタイプの重量は約 17kg、厚さ 30mm と軽量で薄型であることから、壁面に設置する太陽熱集熱器のプロトタイプとしては十分検討に値するものと考えられる。

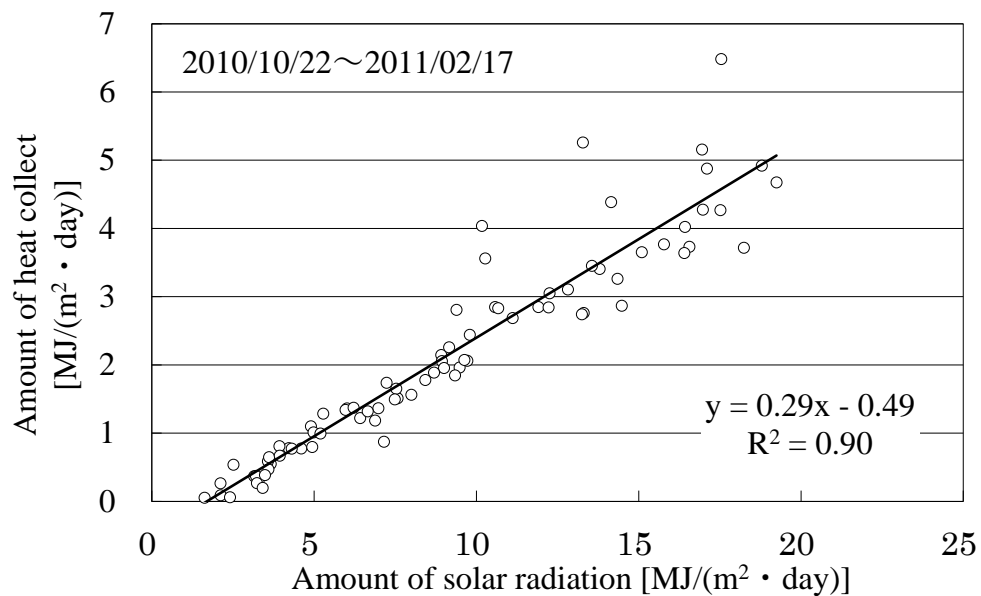


図 5.23 太陽熱集熱器の集熱効率

5.2.2 実証実験棟における暖房量抑制効果

実証実験棟の scPCM 室と PB 室に設置した放熱器により補助暖房を行い、両室の補助暖房量を計測した。scPCM 室には太陽熱利用暖房システムが施工されており、一般的な住宅を模した PB 室と scPCM 室の補助暖房量を比較することで本システムの助暖房量抑制効果を検討した^{5.34),5.35)}。

また、実験で用いた放熱器は白熱球と室温感知型サーモスタットを組み合わせたもので、設定温度(20°C)以下になると白熱球が点灯し放熱を開始するように制御した。詳細は第 3 章に述べた通りである。

各室の暖房量及び削減率を図 5.24 に示す。scPCM 室は PB 室と比較して、暖房開始時期が遅く、また常に低い暖房量を示し期間積算値で 52%の削減効果が

得られた。

また有効取得熱量を式(5.11)で整理して、各室ごとの有効取得熱量を、透過日射量ごとに整理して図 5.25 に示す。

PB 室と比較して PCM 室や scPCM 室は透過日射量が少ない時でも有効取得熱量は高い値を示してしている日が多く、これは、室に PCM を適用すると熱容量が増大することで補助暖房量を抑制できることを示している。横軸は日積算透過日射量、縦軸は日積算値の有効取得熱量である(式(5.11))。

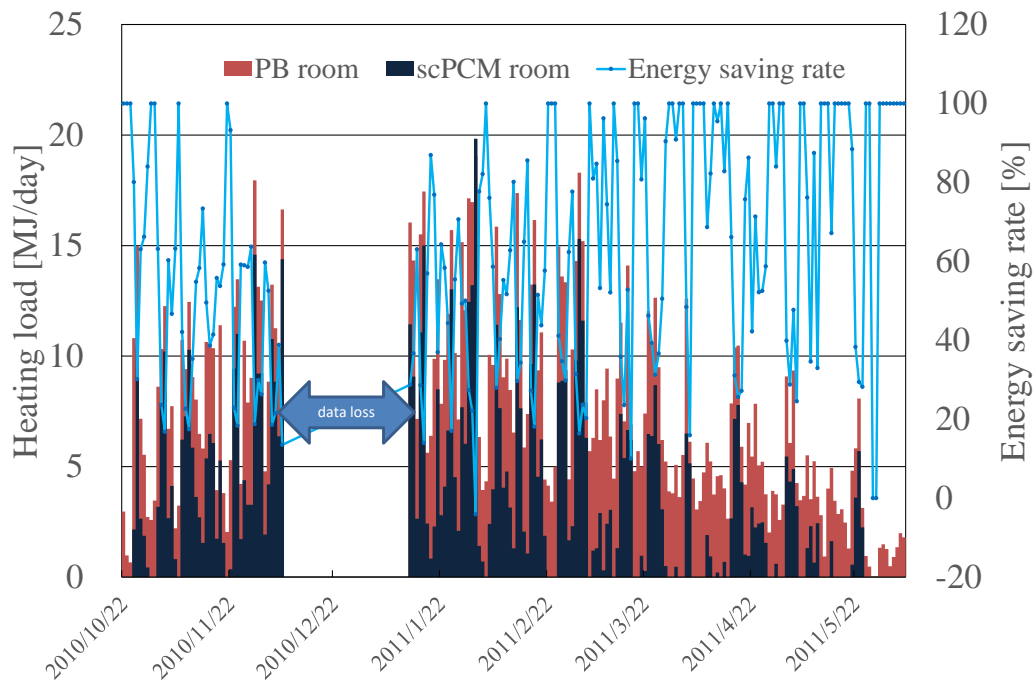


図 5.24 scPCM 室の暖房量抑制効果

$$Q' = \frac{A_w(Q_{loss} - Q_h)}{A_f} \quad (5.11)$$

Q' : 有効取得熱量[MJ]

A_f : 床面積[m²]

A_w : 窓面積[m²]

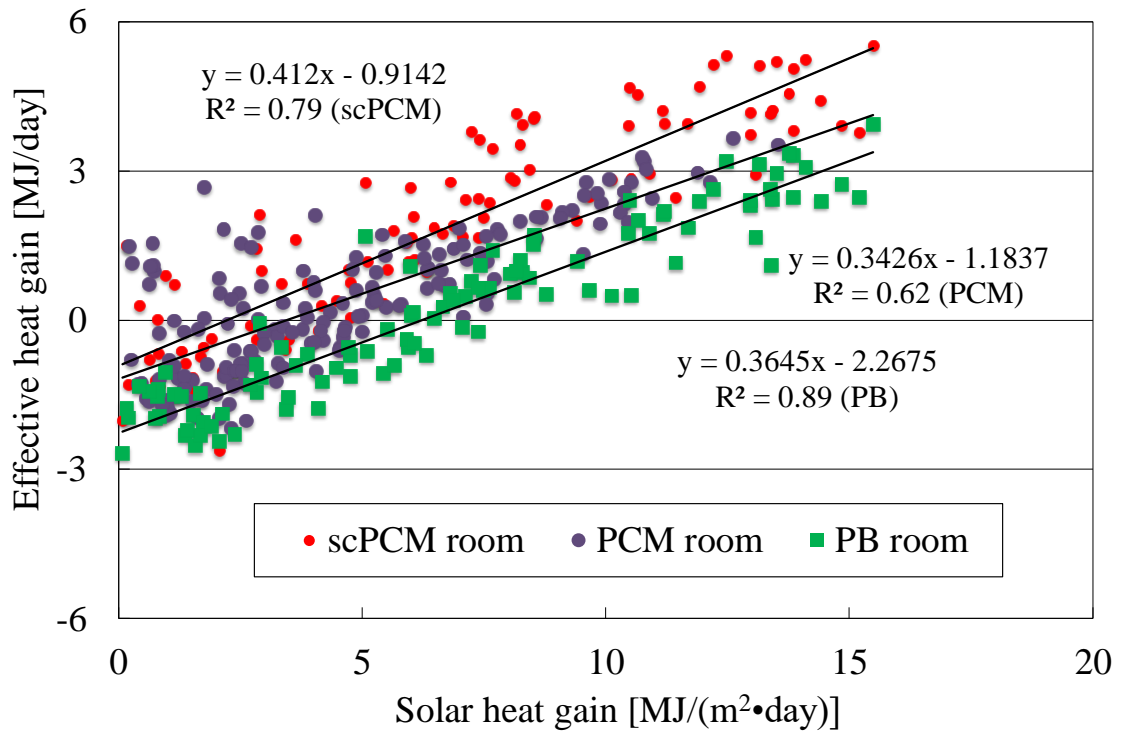


図 5.25 有効取得熱量

太陽熱集熱器の有無で比較を行うと、日射量が多い程その効果は顕著に見られることがわかる。本節では、実験値から得られた有効取得熱量による評価を試みたが、詳細な評価方法については今後も検討を進めたい。

5.3 実験住宅における通年での環境測定

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表 5.6 及び図 5.26 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。

表 5.6 実験住宅の概要

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 source	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

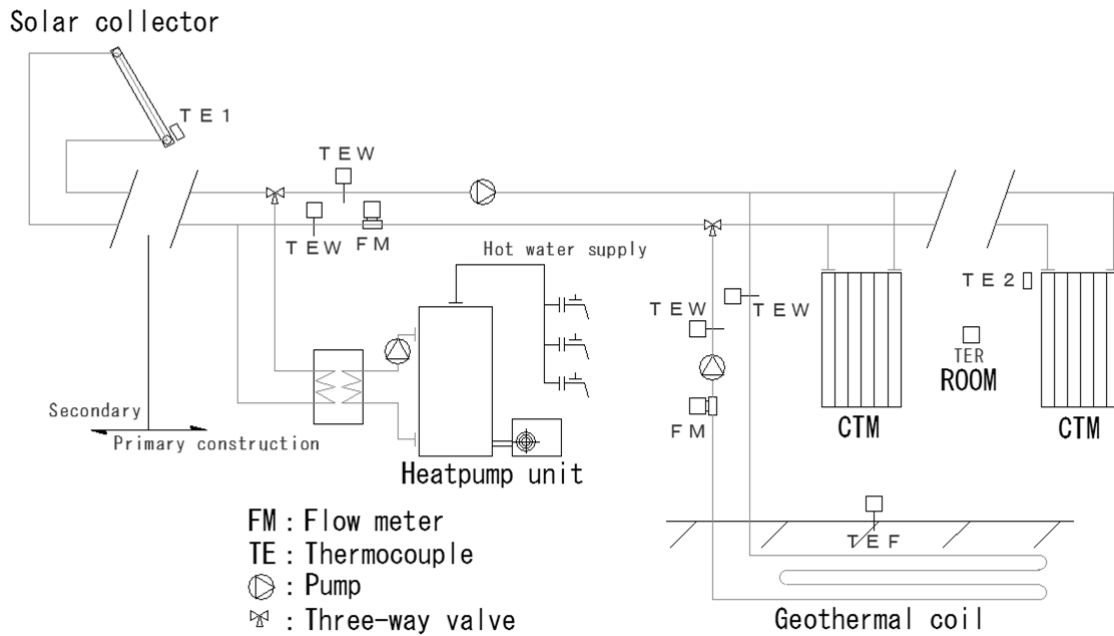


図 5.26 システムの概要

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図 5.27 及び図 5.28 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、土壌と 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。

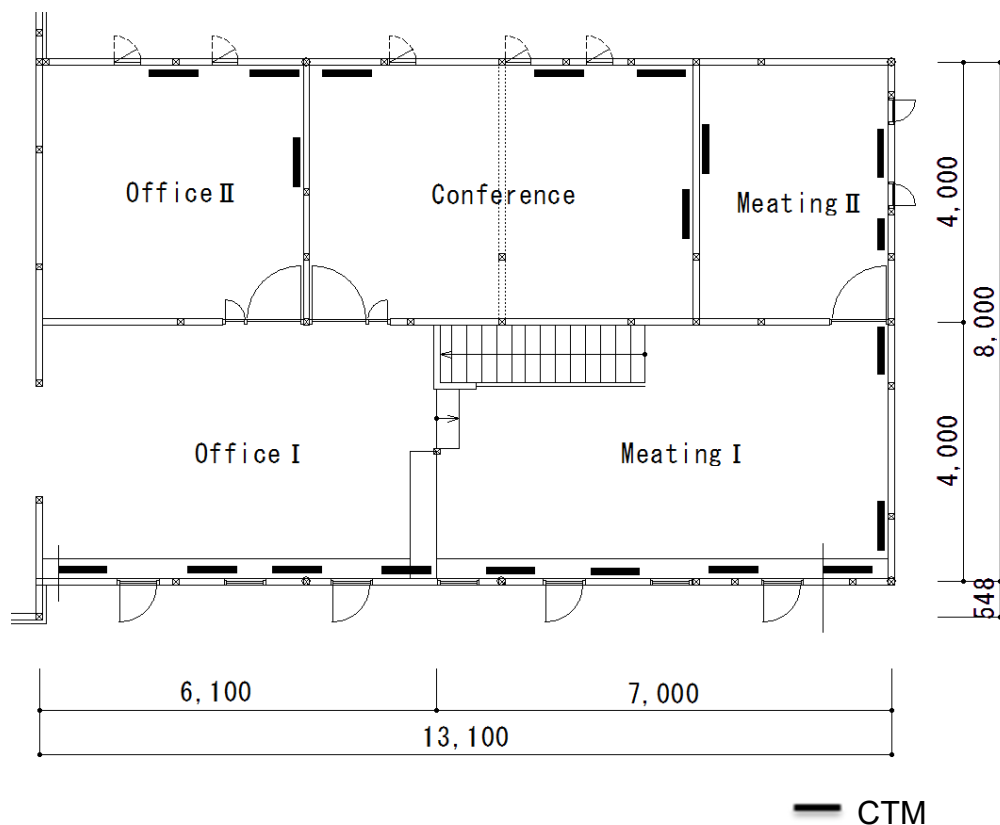


図 5.27 N-project 平面図 (2F)

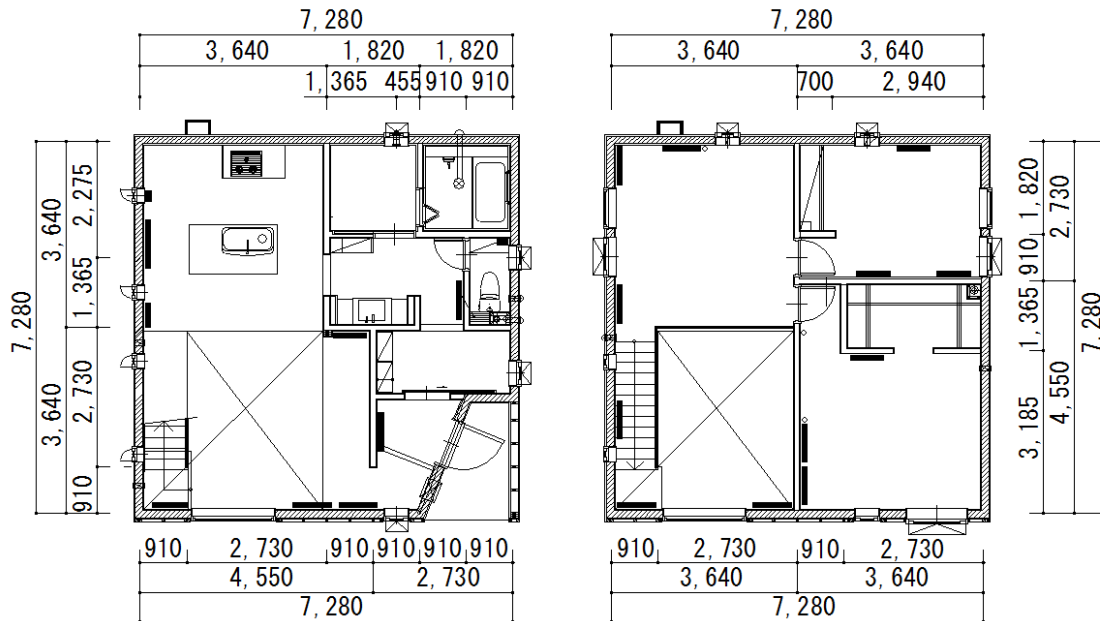


図 5.28 P-Project 平面図 (1F と 2F)

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壌への熱移動量、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、土壌温度、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。なお、冬季はジオサーマルコイルに循環は行われない。

土壌温度の測定方法は、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、土壌の温度を 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、測定した土壌の温度の変化量から式(5.12)より土壌への蓄熱量を求めた。

式(5.13)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(5.14)により算出した。

$$Q_{ST} = \Sigma c_e \cdot \rho_e \cdot V_e \cdot (\theta^n - \theta^{n-1}) \cdot \Delta t \quad (5.12)$$

$$Q_r = c_r \cdot \rho_r \cdot m \cdot (\theta_V - \theta_R) \cdot \Delta t \quad (5.13)$$

$$Q_{loss} = q \cdot A_f \cdot (\theta_{in} - \theta_{out}) \cdot \Delta t \quad (5.14)$$

Q_{ST} : 土壌への蓄熱量 [J]

V : 体積 [m³]

Q_r : 処理熱量 [J]

m : 流量 [m³/s]

θ_V : 冷媒出口温度 [°C]

θ_R : 冷媒入口温度 [°C]

Q_{loss} : 総熱損失量 [J]

q : 熱損失係数 [W/(m² · K)]

A_f : 床面積 [m²]

θ_{in} : 室温 [°C]

θ_{out} : 外気温 [°C]

N-project における室温の推移を、外気温・冷房能力と合わせて図 5.29 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、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°C に達するような暑い日でも室温は 23°C 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。

図 5.30 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°C 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°C 以上となるときは、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^{5.36)}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^{5.37)}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。

表 5.7 夏季の測定結果

	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

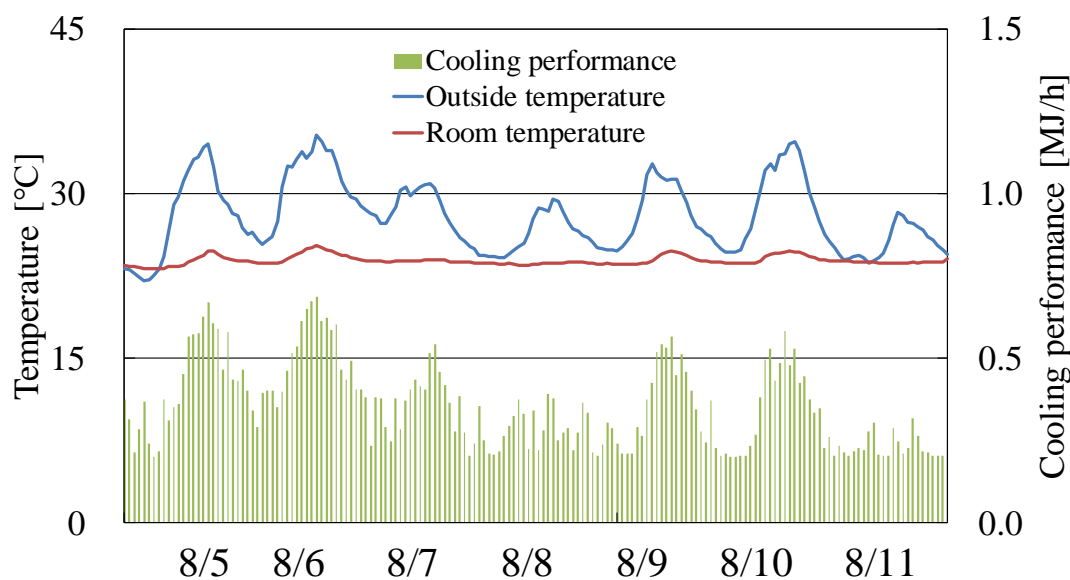


図 5.29 環境測定結果 (N-project)

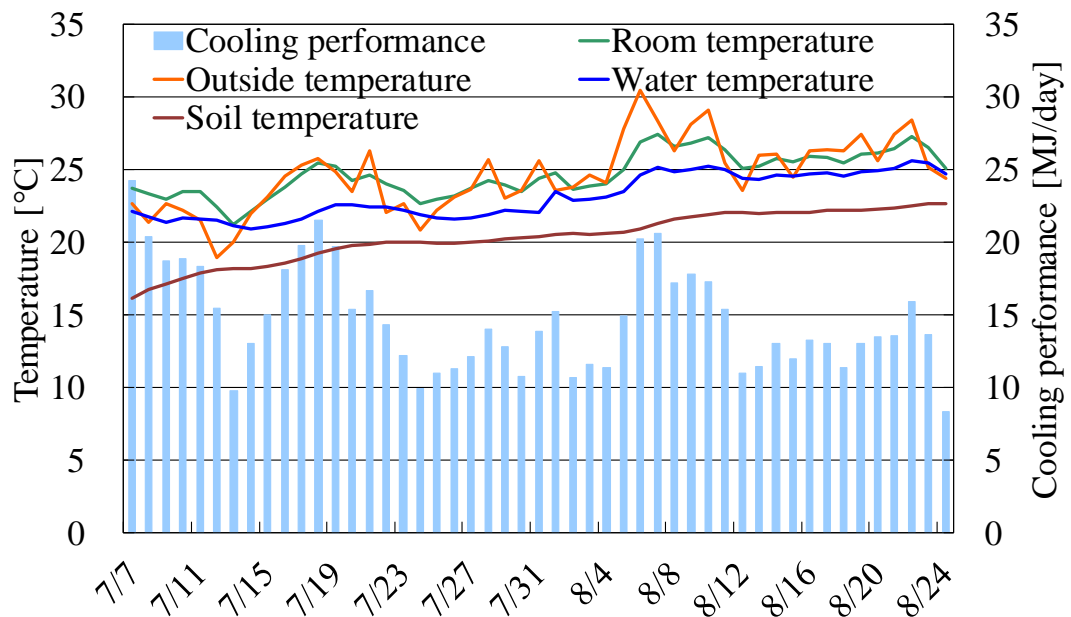


図 5.30 環境測定結果 (P-project)

なお、図 5.30 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。表 5.7 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。

2 棟の実験住宅の通年での外気温、室温、暖房熱量、熱損失量の推移を図 5.31 及び図 5.32 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(5.14)式では瞬時処理熱量(5.13)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。

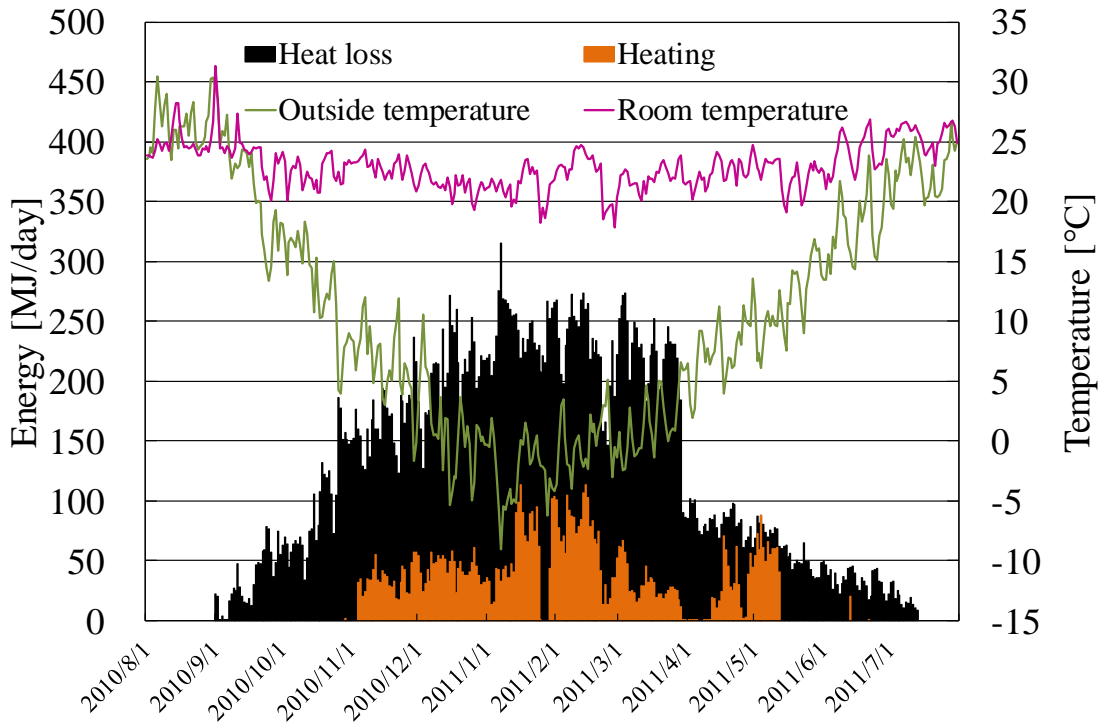


図 5.31 N-project

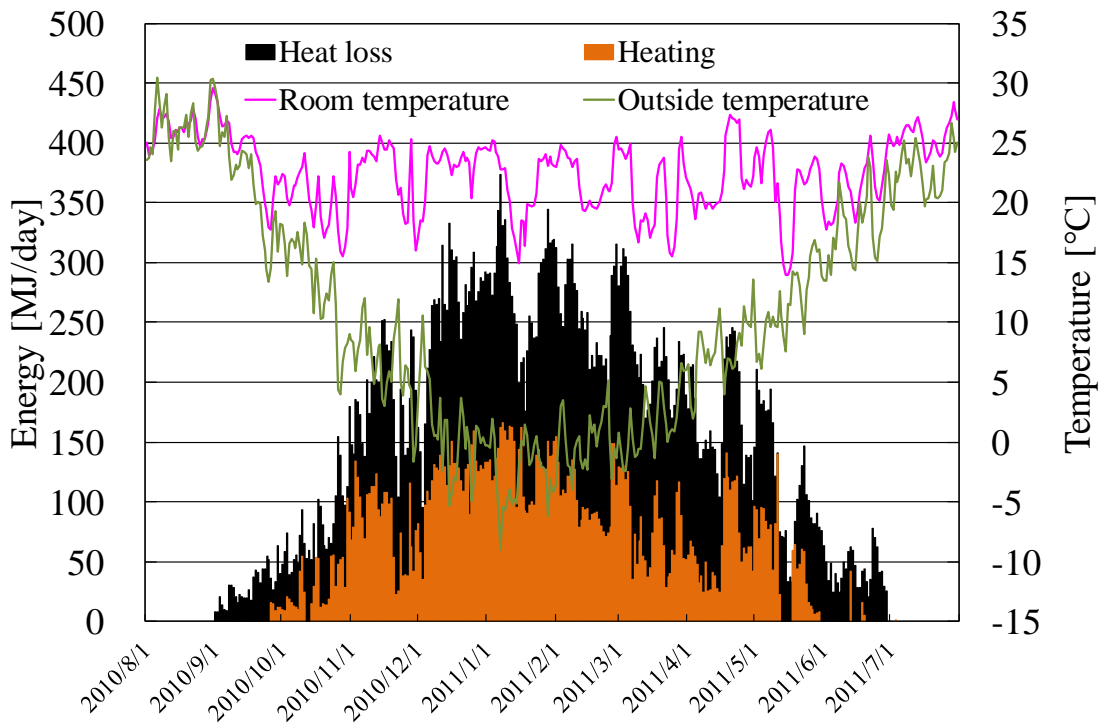


図 5.32 P-project

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ため、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^{5.38)}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、実非定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図 5.33 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、PCM 内装左官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。

表 5.8 測定結果まとめ

	N-project	P-project
Calculated q value [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	1.13	1.32
Measured q value [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	0.69	0.63
Natural temperature difference	$10.9 \text{ }^\circ\text{C}$	$1.2 \text{ }^\circ\text{C}$
Total heat loss [GJ/a]	41.6	49.8
Total heating [GJ/a]	8.13	20.1

図 5.34 に q 値の計算値と実測値の関係を示す。藤原ら^{5.38)}、第 4 章の既往研究^{5.21)}で計測された高断熱・高气密住宅は、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、暖房熱量を表 5.8 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。

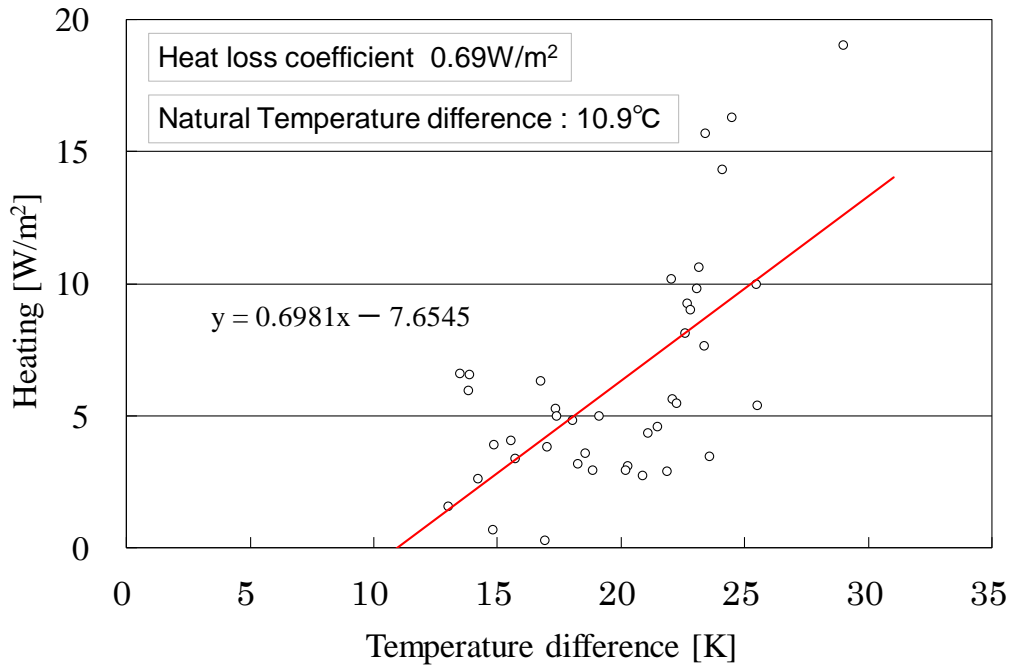


図 5.33 内外温度差と暖房量

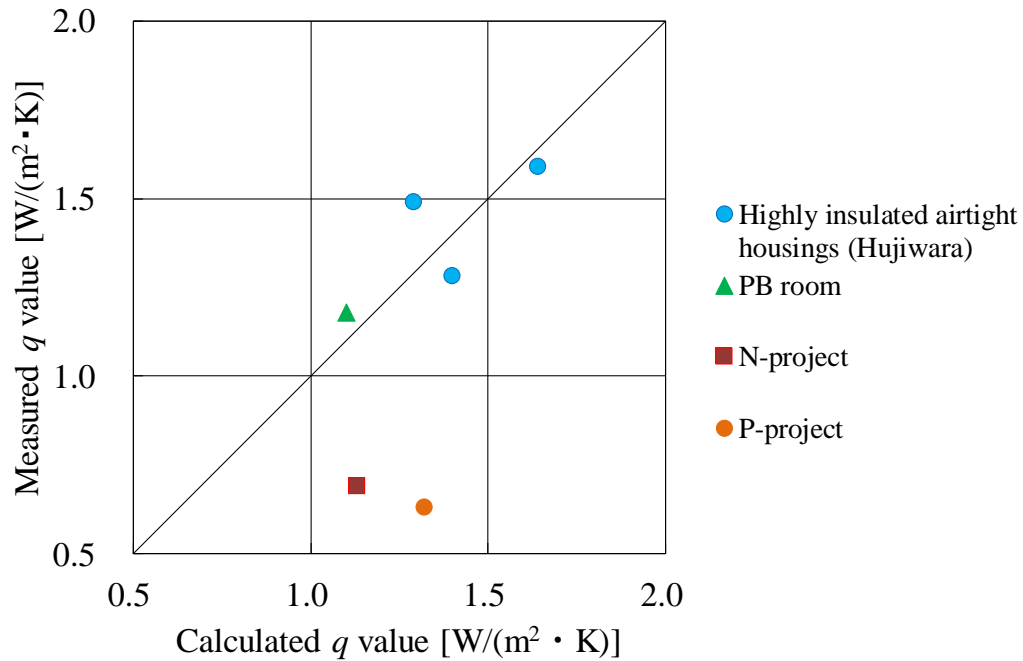


図 5.34 q 値比較

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、PCM 内装左官材の負荷抑制効果が確認できた。ただし、本節で

示した実験住宅の実測結果は、ブランクの状態と条件を一致させて評価したのではなく、内部発熱、ダイレクトヒートゲイン、暖房方式やPCM以外の熱容量も影響していると考えられる。今後はPCM単体での効果についても検討を進めたい。

5.4 摘要

PCM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。

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。

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30h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。

太陽熱集熱器と組み合わせたハイブリッド壁暖冷房システムはPB室と比較して期間積算値で52%の暖房量抑制効果が確認できた。

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°Cに達するような日でも室温は26°C付近で推移したことから、本システムは北海道など冷涼な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。

実験住宅の暖房熱量は、一般的な高断熱・高气密住宅の約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。

参考文献

- 5.1) 斎藤宏昭, 土屋喬雄: 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
- 5.2) 坪田祐二, 射場本忠彦, 金岡賢司, 多和 大介: 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
- 5.3) 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林禎彦, 石黒成紀: 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
- 5.4) 近藤武士, 射場本忠彦, 坪田祐二, 鎌田元康: 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
- 5.5) 黒木友裕, 銚井修一, 松本衛: 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
- 5.6) 添田晴生, 中田亮生, 高岡大造: 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・衛生工学会論文集(203), pp. 1-11, 2014.2
- 5.7) V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama : Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) , pp. 1373–1391, 2011
- 5.8) Erlin Meng, Hang Yu, Guangyi Zhan, Yang He : Experimental and numerical study of the thermal performance of a new type of phase change material room, Energy Conversion and Management 74 (2013) pp. 386–394, 2013
- 5.9) Yusuf Ali Kara, Aslihan Kurnuç : Performance of coupled novel triple glass unit and pcm wall, Applied Thermal Engineering 35 (2012) , pp. 243-246, 2012
- 5.10) 長野克則, 福村文, 橋本崇史, 嶋倉一實: 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

- 5.11) 武田仁, 山本未生: 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
- 5.12) 高山裕香子, 森太郎, 石戸谷裕二, 松永潤一郎, 羽山広文, 菊田弘輝: 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
- 5.13) 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
- 5.14) Guobing Zhou, Yinping Zhang, Qunli Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di: 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
- 5.15) A. Hasan, S.J. McCormack, M.J. Huang, B. Norton: Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics, Solar Energy 84 (2010), pp.1601–1612, 2010
- 5.16) 坂東薫, 尾崎明仁, 佐藤友紀, 李明香: 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
- 5.17) Y. Rabin, I. Bar-Niv, E. Korin, B. Mikic: INTEGRATED SOLAR COLLECTOR STORAGE SYSTEM BASED ON A SALT-HYDRATE PHASE-CHANGE MATERIAL, Solar Energy Vol. 55, No. 6, pp.435-444, 1995
- 5.18) 高瀬幸造, 前真之, 赤嶺嘉彦, 河野良坪, 佐藤誠, 坂本雄三: 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
- 5.19) 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), pp.33-43, 2009.12
- 5.20) 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
- 5.21) 草間友花, 石戸谷裕二: 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
- 5.22) 草間友花, 石戸谷裕二: 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
- 5.23) 草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宮崎智仁: 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
- 5.24) 森山実記, 中村安弘, 小金井真, 後藤伴延: 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
- 5.25) 鳥羽大樹, 近本智行, 李明香, 関根賢太郎, 小林陽一, 金子幸樹: 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
- 5.26) 垂水弘夫, 蓑原由紀: 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
- 5.27) 若山尚之, 葛隆生, 長野克則, 佐藤信孝: 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, 浅層採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
- 5.28) 日本機械学会, 丸善, 伝熱工学, 2005.3
- 5.29) 関信弘, 森北出版株式会社, 伝熱工学, 1988.11
- 5.30) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第 4 版, 1986.10.20
- 5.31) 佐々木正忠他: 寒冷地における太陽光/熱ハイブリッドパネルの集熱性能の向上に関する研究, 北見工業大学地域共同研究センター年報 2002
- 5.32) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第 4 版, 1986.10
- 5.33) JIS A 1425-1985 太陽熱集熱器の集熱性能試験方法
- 5.34) 岡建雄: 太陽熱のパッシブ利用に関する研究 第 1 報—小実験室に取り付けられたパッシブシステム, 空気調和・衛生工学会論文集 No.21 1983.2
- 5.35) 長谷川房雄, 木村建一, 吉野博, 石川善美, 松本博: パッシブソーラーシステム試験家屋を

用いた蓄熱床方式に関する実験的研究,日本建築学会計系論文報告集 第 366 号 1986.8

- 5.36) 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
- 5.37) 草間友花，石戸谷裕二：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
- 5.38) 藤原陽三，絵内正道，鈴木憲三，羽山広文：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
- 5.39) 草間友花，石戸谷裕二：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，日本建築学会環境系論文集，81(730), pp.1085-1093, 2016.12
- 5.40) Yuka Kusama, Yuji Ishidoya : Study on a tankless solar heating system using phase-change material plaster, Building and Environment, Volume 127, pp. 256-267, 2018.1

注

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。

本章は，既発表論文^{5.39), 5.40)}を取りまとめ，加筆修正を加えたものである。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

6.1	PCM 窓の熱的・光学的挙動に関する研究	181
6.1.1	エラストマーでゲル化した n-パラフィンの熱性能	
6.1.2	ゲル状 PCM を充填した二重ガラスにおける物性試験	
6.1.3	実証実験棟における PCM 窓の冬期性能評価	
6.2	PCM ブラインドによる日射利用空調システム	200
6.2.1	融点及び形態の異なる蓄熱材を充填した蓄熱ブラインドの熱特性	
6.2.2	蓄熱ブラインドの日射遮蔽効果及び夜間換気駆動力	
6.3	摘要	237

参考文献

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

建築における快適な室内環境生成や空調負荷削減には、外皮の断熱性能の向上と日射熱の制御が有効である。また、日射熱取得が行われる開口部には、熱、光、音、空気などの外界の変動要因を透過あるいは遮蔽してこれらを調整する機能が要求される。とりわけ、開口部は建築躯体に比べて断熱性能が劣るため、熱収支に対する配慮が不可欠であり、ガラスの複層化や中空層への不活性ガスの封入、機能性薄膜の付加による日射透過率の制御などの分野で高性能化に関する研究が進められてきた。一方、開口部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調節する手法も提案されている^{6.1),6.2)}。しかし、現在までのところ蓄熱性能を有する窓の普及には至っていない。その背景として蓄熱材の経年変化や、相変化に伴う形状維持が困難である等の技術的な課題が残されていることが考えられる。今後予測される省エネルギー住宅の普及に備え、蓄熱性能を有する開口部の開発における技術的な課題の解決が求められているが、相変化に伴う熱的、光学的挙動について数値シミュレーションによる検討が行われている^{6.3),6.4),6.5)}ものの、実験的な検討は行われていない。

第2章から第5章では、PCM内装左官材を対象に、壁や天井などの建築躯体への蓄熱に関する検討を行ってきた。本章ではさらに、開口部に潜熱蓄熱性能を付与したシステムを提案し、検討を行う。本研究では二重ガラスの内部に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)を充填した窓ガラス(以下、PCM窓)と、内部が中空である既存のブラインドの内部にPCMを充填したもの(以下、PCMブラインド)を提案する。2つのシステムは開口部における日射の直接的な熱利用に供することを目的としている。

本章では、ゲル状PCMの基本的熱物性を明らかにし、それぞれの開口部システムにおける熱性能と、建築物に適用した際に期待される効果について実測を元に検討を行った。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

6.1 PCM 窓の熱的・光学的挙動に関する検討

開口部に要求される性能として、雨水や風などの外力を遮ること、眺望を得ること、日射光や日射熱を必要に応じて取り込むことなどが挙げられる(図 6.1)。開口部の断熱性能を高める研究開発は古くから国内外で進められ、不活性ガスを用いた複層ガラスや樹脂サッシは、寒冷地を中心に広く普及されている。

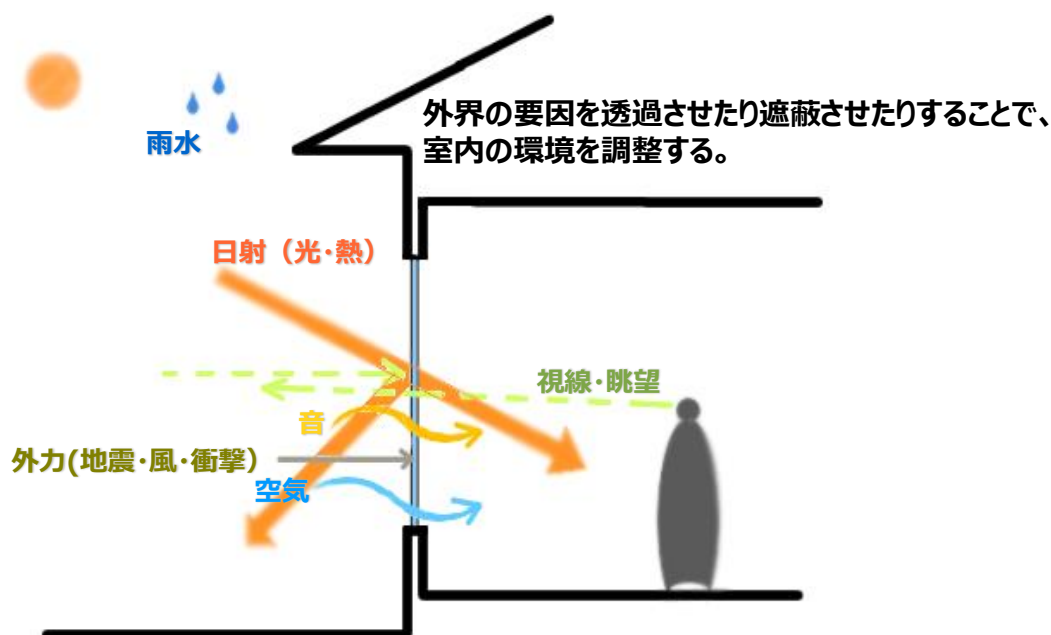


図 6.1 窓に要求される性能

一方、開口部に潜熱蓄熱性能を付与した研究は、発展途上段階であり、研究論文が散見される^{6.3), 6.4), 6.5)}ものの現在のところ普及に至っておらず、建築物への省エネルギー効果についての詳細は明らかではない。

本研究で取り扱ってきた n-パラフィン^{6.3)}は、固相時には白色であるが、液相時には透明となる性質を有している。図 6.2 に示すように、n-パラフィンを開口部に適用したとき、日中の太陽熱の影響を受けて融解と凝固と繰り返すことにより、日変動の中で眺望を得たり、遮ったりすることが可能である。

また、日中に開口部に蓄熱された熱が、日没後に室内に放熱されることが期待できる。一般に、熱損失の大きい開口部から熱が放熱されることで、コールドドラフトの抑制や省エネルギー効果が期待できる。

本章では、開発した PCM 窓（エラストマーでゲル化したゲル状 PCM を 2 重ガラスの内部に充填させたもの）の熱的・光学的な挙動について述べる。

また、実験棟に PCM 窓を設置することによって形成される室内環境を分析し、その省エネルギー効果を実験的に示す。

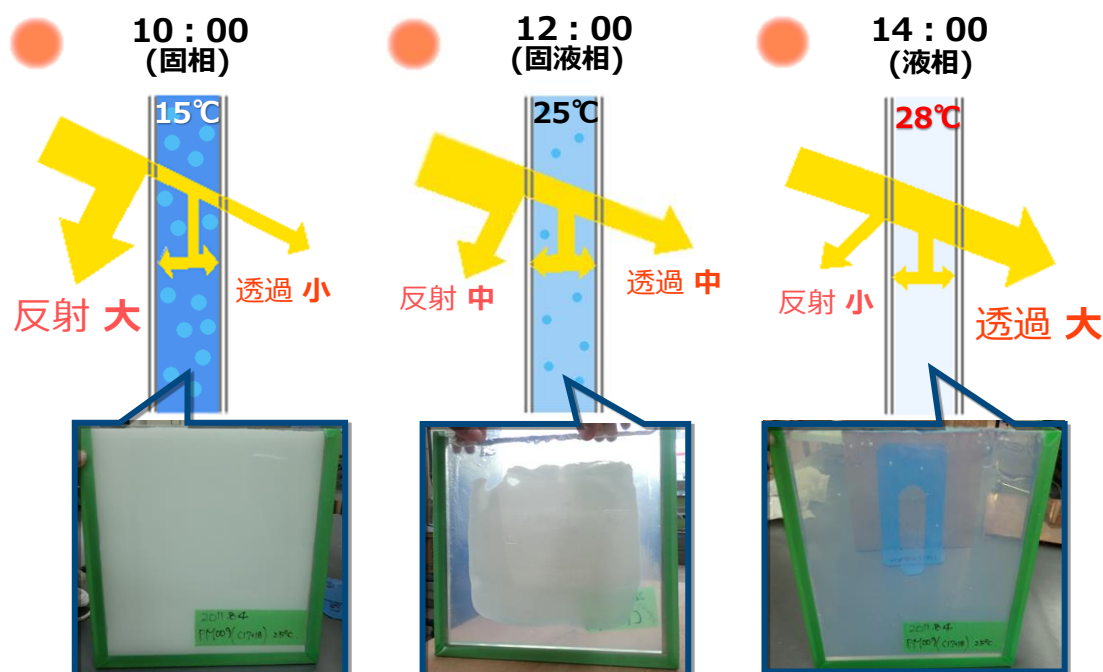


図 6.2 PCM 窓の性質

6.1.1 エラストマーでゲル化した n-パラフィンの熱性能

n-パラフィンには、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 6.1)。

本節では、写真 6.2 に示すような厚さ 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、第 2 章で述べた放射加熱の方法にて、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、放熱量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。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験



写真 6.1 ゲル状 PCM

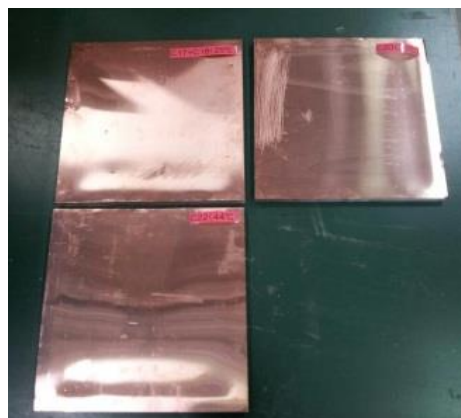


写真 6.2 試験体

ゲル化した n-パラフィンの熱性能を測定するために、銅板(0.5 t(mm))を用いて容器をつくり、内部にゲル状 PCM を充填して試験体(300×300×12mm)を作製した(写真 6.2)。また、試験体の嵩比重試験および平均厚さを計測し(写真 6.3)、それぞれの試験結果を表 6.1 に示す。

なお、PCM をゲル化させるために用いたエラストマーの混和率はそれぞれ 10%である。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。

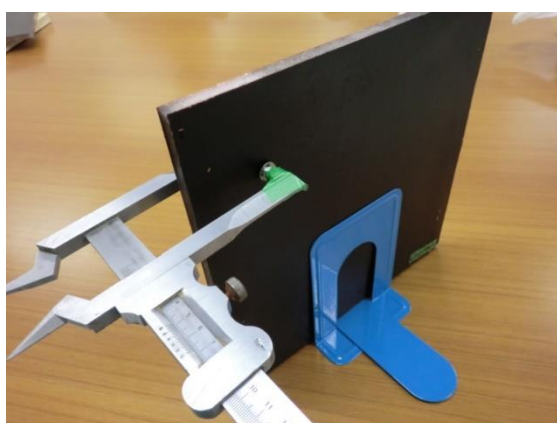


写真 6.3 平均厚さ計測試験



写真 6.4 熱性能試験

表 6.1 嵩比重・平均厚さ計測試験結果

No.	Name	PCM	Melting point	Mixing rate	PCM density	thickness
			[°C]	[%]	[kg/m ³]	[mm]
1	GNP2510	n-Heptadecane C17	25	10	848.0	11.95
		n-Octadecane C18				
2	GNP3610	n-Icosan C20	36.8	10	898.7	11.73
3	GNP4410	n-Decosan C22	44	10	911.5	11.34

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(写真 6.4)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、試験は第 2 章で示した放射加熱による熱性能試験と同様に、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。試験体への熱伝達方法は放射加熱によるものであり、試験方法の詳細は、既往研究^{6.6),6.7)}および本論文第 2 章に示した通りである。

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(6.1)により算出した。GNP2510-1 の試験体への流入・出熱流の測定例(PCM 融点:25°C)を図 6.3 に示す。

流入・出熱流は定常状態においても異なる値を示していたが、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 6.4 に PCM の蓄熱量の測定結果を試験体温度が 60°C 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。

本章では、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。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

$$Q_{st} = \frac{1}{\rho l} \sum (\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out}) \Delta t \quad (6.1)$$

Q_{st} : 蓄熱量 [J/kg]

ρ : 比重 [kg/m³]

t : 時間 [s]

l : 試験体厚さ [m]

\dot{q}_{in} : 流入熱流 [W/m²]

\dot{q}_{out} : 流出熱流 [W/m²]

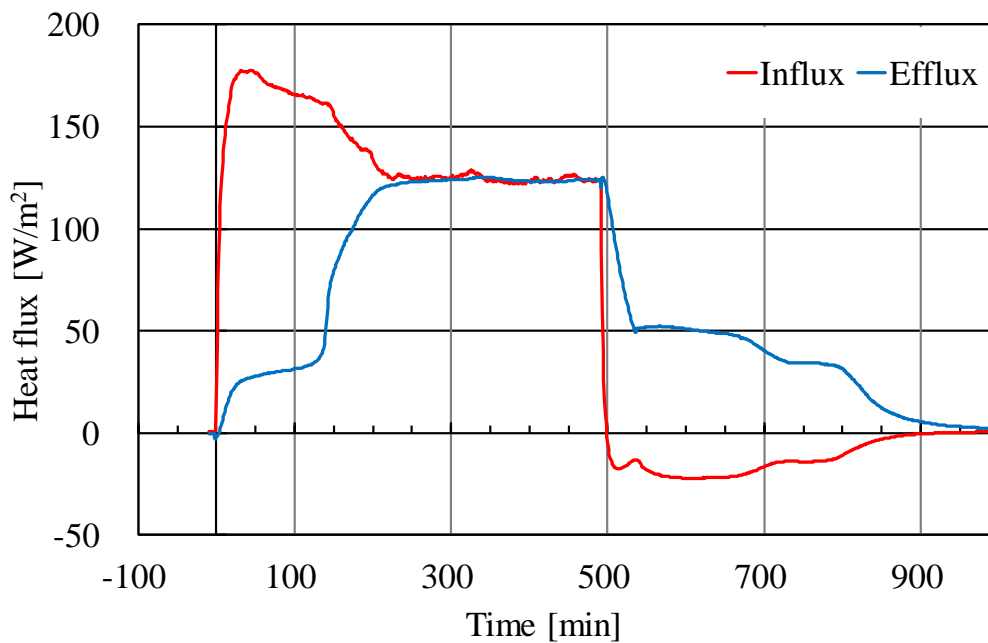


図 6.3 流入・出熱流の径時変化 (GNP2510-1)

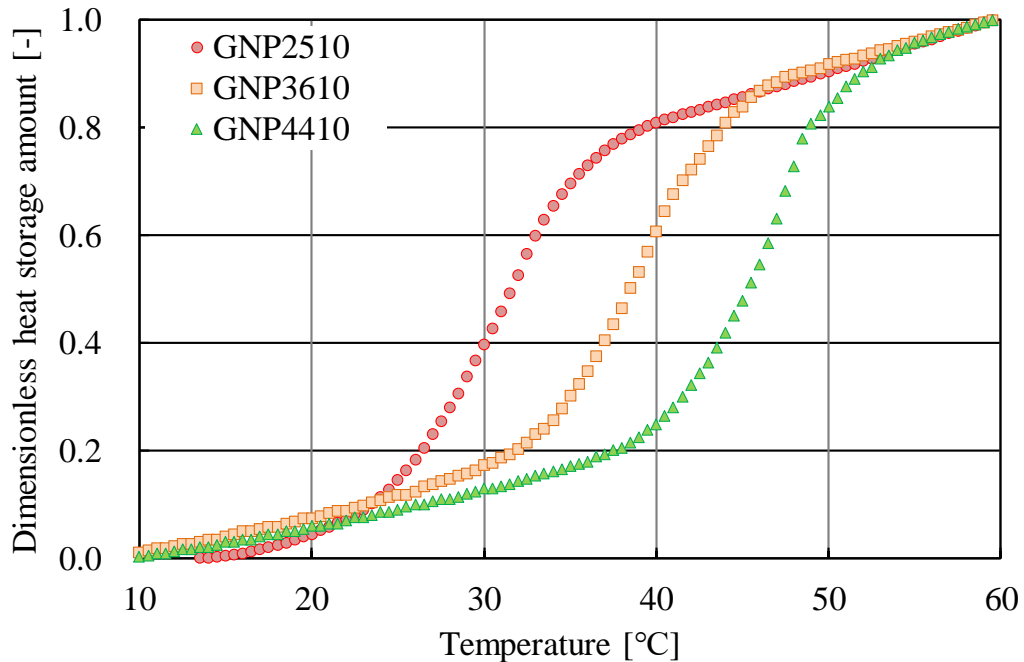


図 6.4 試験体の無次元蓄熱量

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°C 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°C より約 3°C 低い 33°C、GNP4410(パラフィン番号 C22)は融点の 44°C 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。

固相域、液相域におけるゲル状 PCM の等価的な比熱及び潜熱量は、蓄熱量と温度の関係から第 2 章と同様に定義し、固相域・液相域の測定データの回帰分析を実施してその傾きを比熱と定義した^{6.6),6.7)}。

融点 25°C の PCM 試験体の表面温度の実測例を図 6.5 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

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

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。また、ゲル状 PCM の基本的熱性能試験の測定結果を表 6.2 に示す。

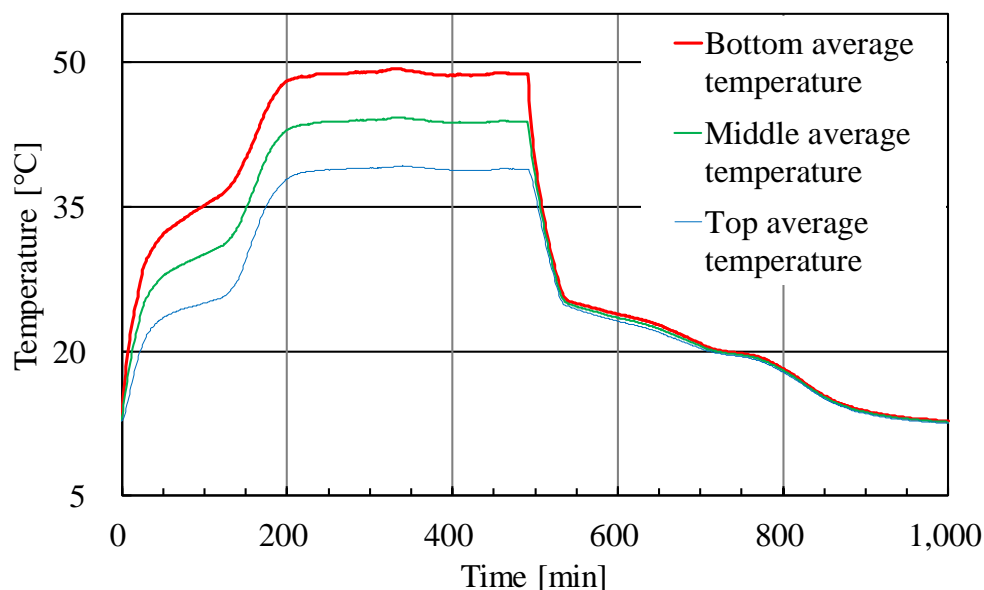


図 6.5 試験体の表面温度 (GNP2510-1)

表 6.2 ゲル状 PCM の基本的熱性能

	GNP2510		GNP3610		GNP4410	
PCM	n-Heptadecane C17		n-Icosan C20		n-Decosan C22	
	n-Octadecane C18					
Melting point [°C]	25		36.8		44	
Mixing rate [%]	10		10		10	
	Solid	Liquid	Solid	Liquid	Solid	Liquid
Thermal conductivity [W/(m · K)]	0.14		0.13		0.15	
Specific heat [kJ/(kg · K)]	1.41	1.54	1.53	1.98	1.39	1.60
Latent heat amount [kJ/kg]	86.04		82.01		96.10	
Latent heat amount [kJ/kg]	72.97		73.51		87.60	
Thermal storage amount [kJ/kg]	100.78		99.59		111.05	
Thermal storage amount [MJ/m ³]	85.46		89.26		101.22	

第 2 章で示した方法と同様に、調和解析の計算結果を図 6.6 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。一般に周期的な関数などに用いられる調和解析で定式化することにより、図のように、多峰性状を持つ PCM 建材においても、定式化することが可能となる。

また、比熱の定式化により、種々の PCM 建材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。

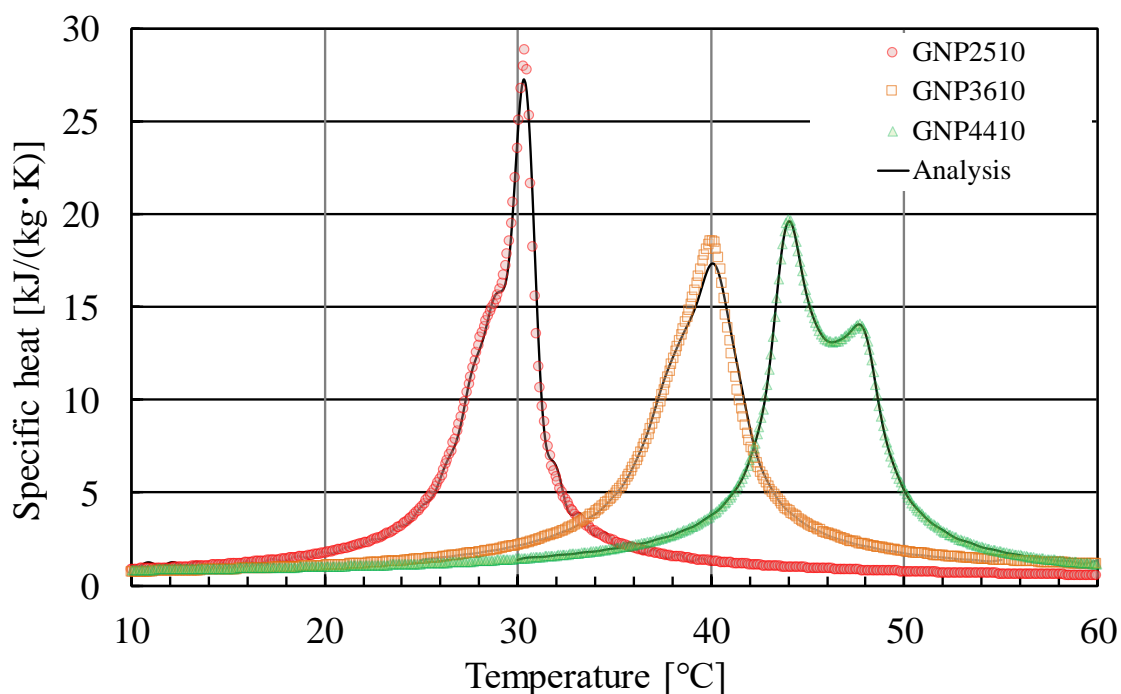


図 6.6 比熱の調和解析結果

6.1.2 ゲル状 PCM を充填した二重ガラスにおける物性試験

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透過率が温度と相関関係を有することも予測される。相変化時の熱貫流率についても明らかではない。

本節では PCM 窓を透過する光量を直接測定する装置を作製し、ゲル状 PCM

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

を充填した二重ガラス日射透過率の温度依存性を予測した。また、2室の恒温恒湿器を用いて熱貫流率を測定する装置を作製し、状態変化ごとの熱貫流率を予測した。

a) 日射透過率の温度依存性に関する検討

試験装置の概略図を図 6.5 に示す。試験装置はフォームポリスチレン板 (50[mm]) にアルミ箔を内張りして構成し、白熱灯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^{6,8)}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 (JIS 一般型 A 級) で測定した。

一方、PCM 窓の試験体は 300mm 角に切り放した 3mm フロートガラスとアルミ角材(12mm)をエポキシ樹脂で接着してガラス容器を作製し、その間隙にゲル状 PCM を充填しながら作製した。試験体の詳細を図 6.6 に、A 室の光源を点灯し、室内温度上昇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過程を写真 6.5 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隙に 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 25°C, 36.8°C, 44°C の 3 種類であり合計 6 種の試験体を作製した。試験体の両表面中心部に T 型熱電対(シート状)を各 1 点取り付けて設置し、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。試験体の温度には両表面温度の平均値を採用した。

また、A 室に上下温度分布が生じないよう A 室内にはファンが設置されており、実験中は A 室内空気が常時攪拌されている。本装置は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。

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から距離比及び照度比におけるキャリブレーションを行った。試験体を設置した時の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った。

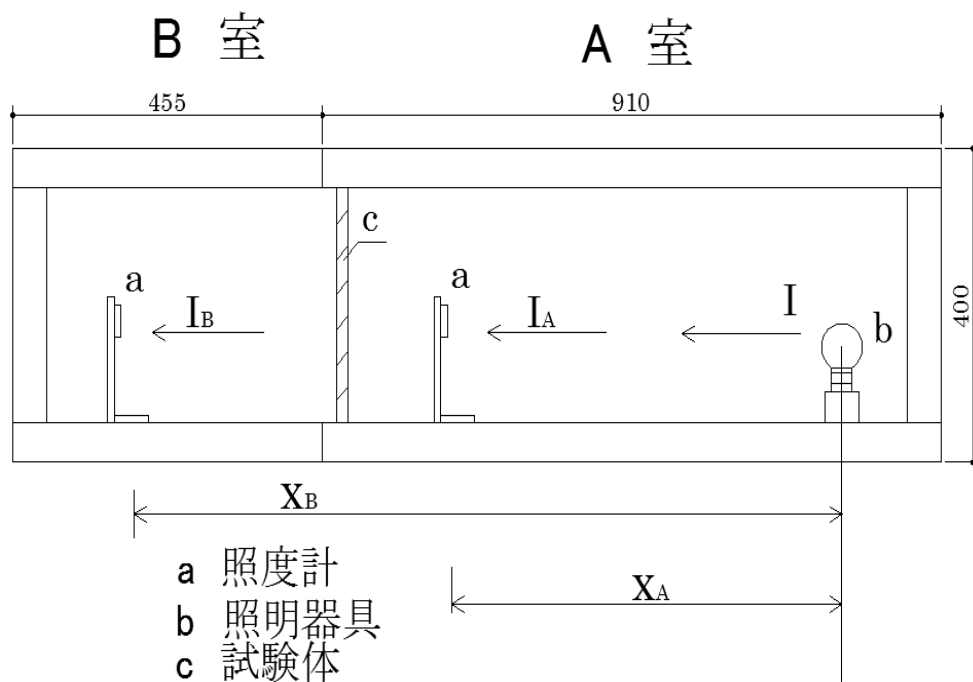


図 6.5 日射透過率試験概略図

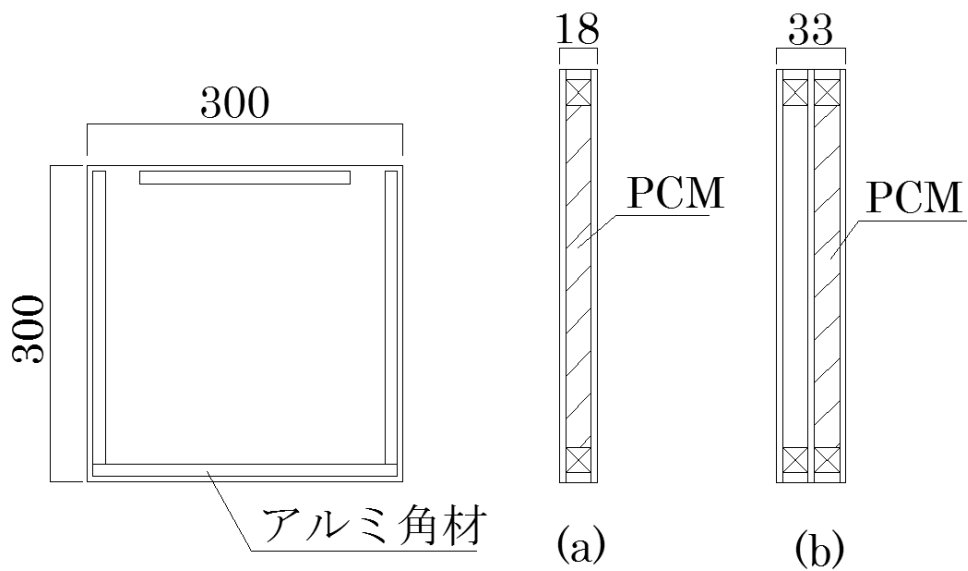


図 6.6 日射透過率試験体

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験



写真 6.5 日射透過率試験装置 (A 室昇温時)

写真 6.5 から分かるように、ゲル状 PCM は A 室の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。

2 層ガラスの試験体における試験体温度と透過率の関係を図 6.7 に示す。また図 6.8 に 3 層ガラスにおける試験結果を示す。

図より、2 層ガラスでは液相域、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 層ガラスにおいても 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。

加熱・冷却時の固相および液相の透過率の平均値をまとめて表 6.3 に示す。固液相域における透過率は、各試験体の日射透過率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 TR の回帰分析の結果から、式(6.2)の各係数と決定係数を表 6.4 にまとめて示した。

前述のように、PCM 窓試験体の透過率 TR と試験体温度 θ_{PCM} の関係を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、試験体作成に用いたアルミ角材はガラスに比べて熱伝達率が高いため、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。

$$TR=c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot \theta_{PCM}) \quad (6.2)$$

TR : 透過率

θ_{PCM} : 試験体温度 [$^{\circ}\text{C}$]

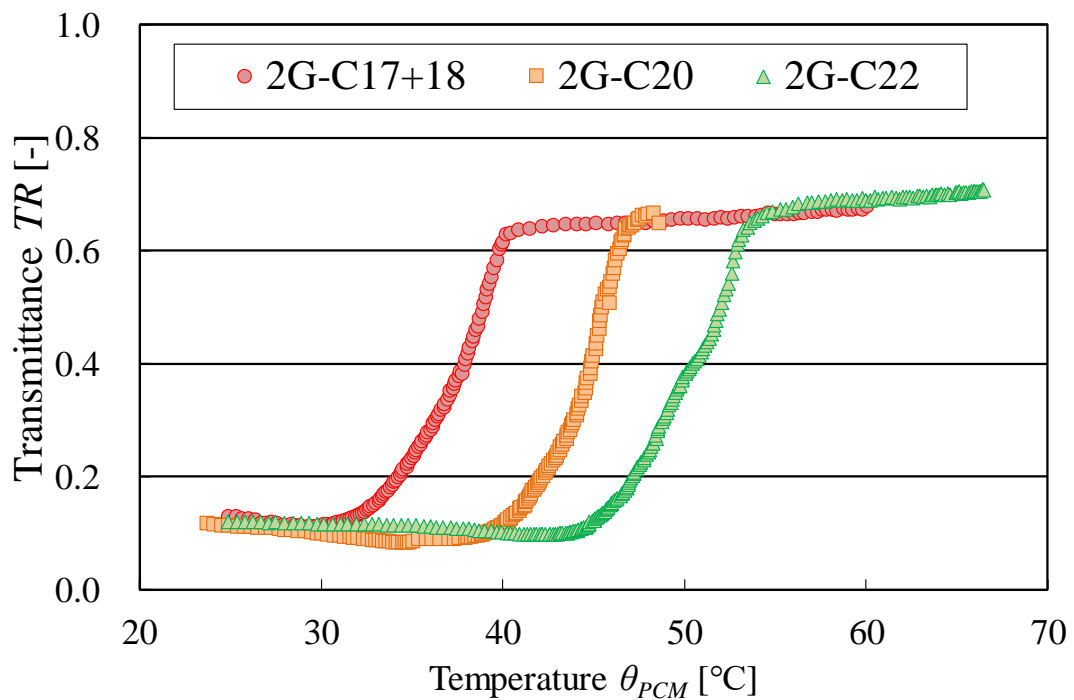


図 6.7 透過率 (2 層ガラス)

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

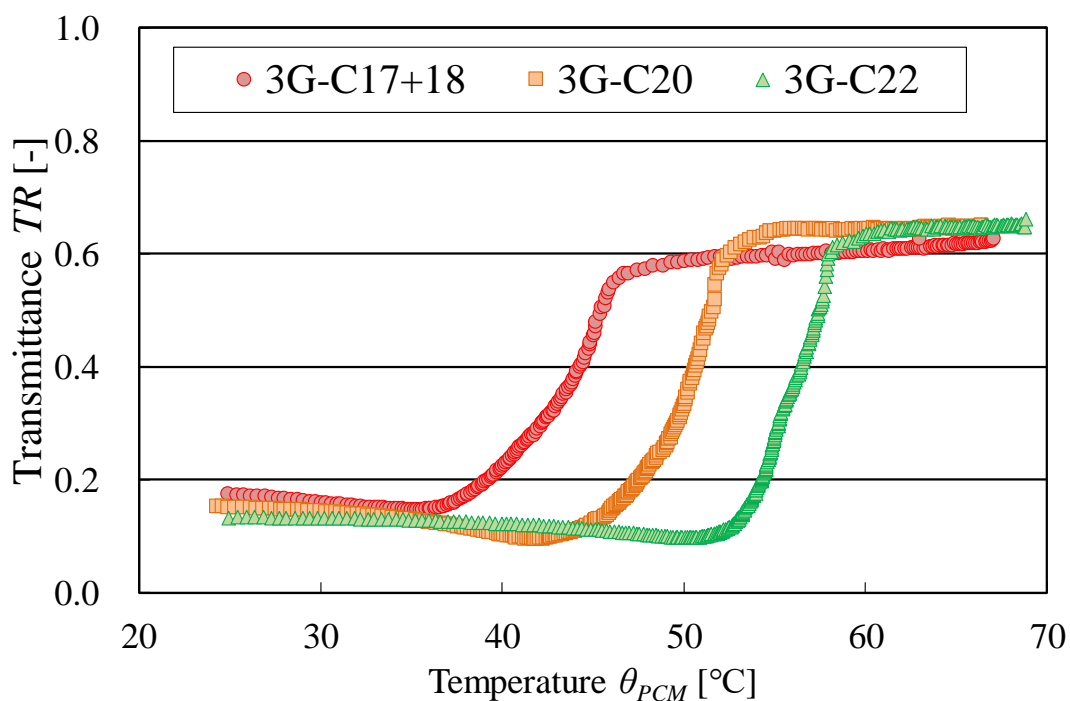


図 6.8 透過率 (3層ガラス)

表 6.3 固相・液相域における透過率

		Solid		Liquid	
		$\theta_{PCM}[^{\circ}C]$	TR	$\theta_{PCM}[^{\circ}C]$	TR
Heating	2G-C17+18	26.0	0.122	49.0	0.654
	3G-C17+18	33.8	0.217	66.0	0.499
	2G-C20	26.9	0.103	47.7	0.655
	3G-C20	27.1	0.142	59.6	0.640
	2G-C22	39.1	0.141	66.4	0.487
	3G-C22	34.9	0.139	63.0	0.737
Cooling	2G-C17+18	22.3	0.146	38.8	0.581
	3G-C17+18	22.4	0.253	36.5	0.626
	2G-C20	17.8	0.094	39.7	0.561
	3G-C20	23.0	0.125	44.2	0.539
	2G-C22	46.9	0.097	20.4	0.540
	3G-C22	36.3	0.361	37.0	0.423

表 6.4 固液相域における透過率

		C_1	C_2	R^2
Heating	2G-C17+18	1.40E-03	0.144	0.99
	3G-C17+18	5.19E-02	0.032	0.94
	2G-C20	2.00E-05	0.215	0.95
	3G-C20	7.00E-05	0.173	0.97
	2G-C22	3.40E-03	0.074	0.98
	3G-C22	1.50E-08	0.359	0.89
Cooling	2G-C17+18	5.00E-07	0.561	0.96
	3G-C17+18	3.00E-04	0.306	0.97
	2G-C20	8.00E-06	0.338	0.94
	3G-C20	4.00E-04	0.246	0.97
	2G-C22	6.00E-07	0.347	0.98
	3G-C22	2.75E-04	0.233	0.95

b) 熱貫流率に関する検討

前述の試験体と白熱灯を除いた A 室の試験装置を利用し、JIS の方法^{6,9)}に準拠した熱貫流率実験を恒温恒湿室で実施した。

恒温恒湿室の高温室側の温度は 20°C、低温室は-10°C に設定している。実験装置を図 6.9 に示す。実験は試験装置(A 室)を恒温恒湿室内に置き、低温室と高温室の間に試験体がく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 点取り付けた。

また、試験中は A 室内に装備した面状電気ヒータの電圧を一定に保ちながら (30, 50, 60, 70, 80 V) 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、上下に温度分布が生じるのを抑制した。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

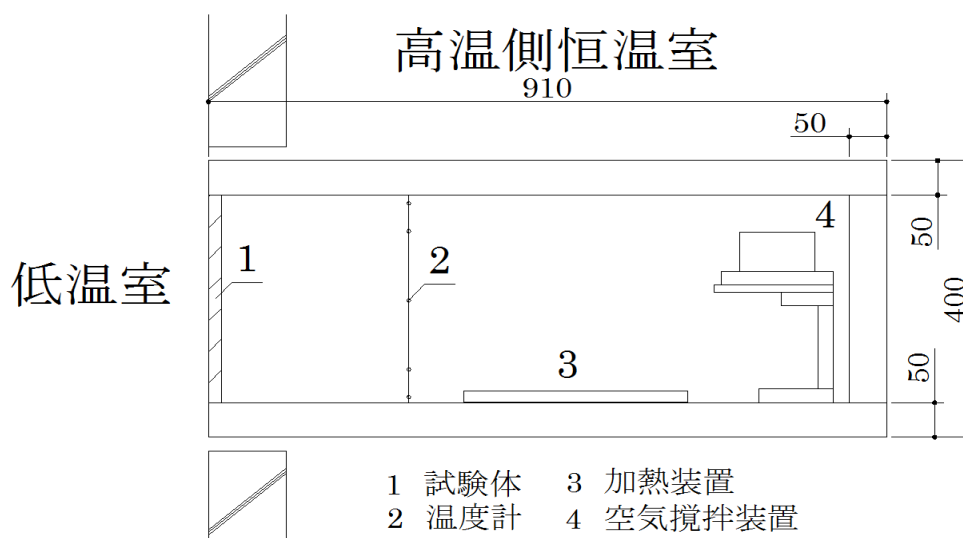


図 6.9 熱貫流率試験装置の概要

PCM 窓の熱貫流率実験の結果を図 6.10 及び図 6.11 に示す。本報では高温側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。PCM 窓の熱貫流率の測定結果を表 6.5 に示す。

表から、PCM 窓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 窓に設置されたアルミ角材(図 6.6)の熱伝導量が大きかったことなどが原因として考えられる。

アルミ角材は熱伝導率が高く、日射量が多い時間帯には内部のパラフィンを融解させるために大きく寄与するが、日没後の熱損失が大きくなるため、総合的な断熱性能を高めるためには窓枠部分に断熱材や空気層等の断熱機構を付与する必要がある。

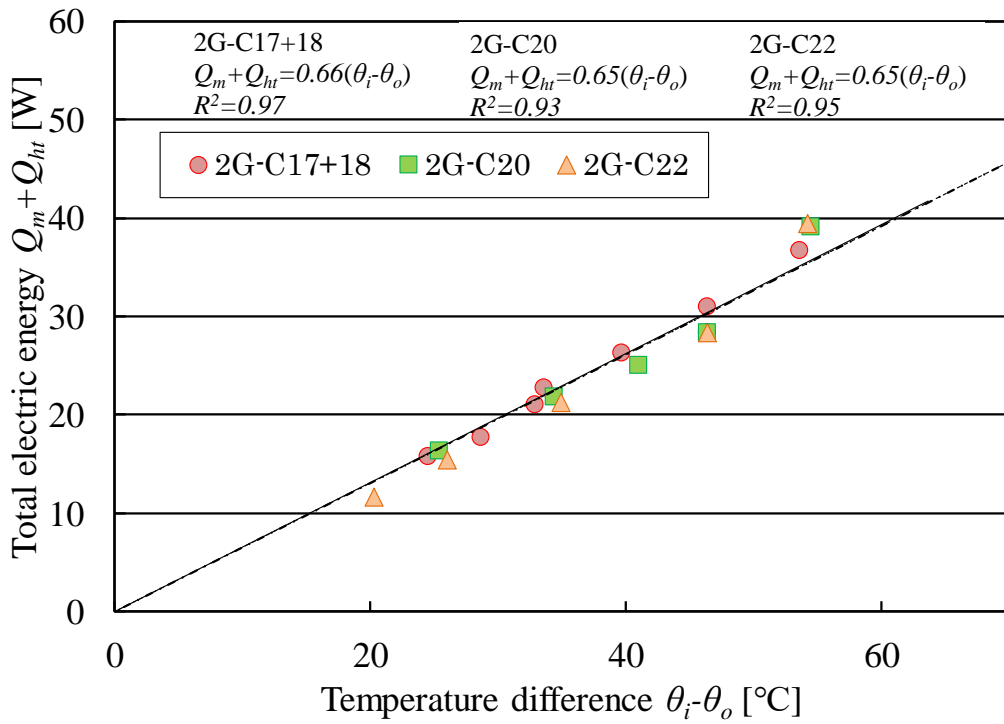


図 6.10 熱貫流率(2層ガラス)

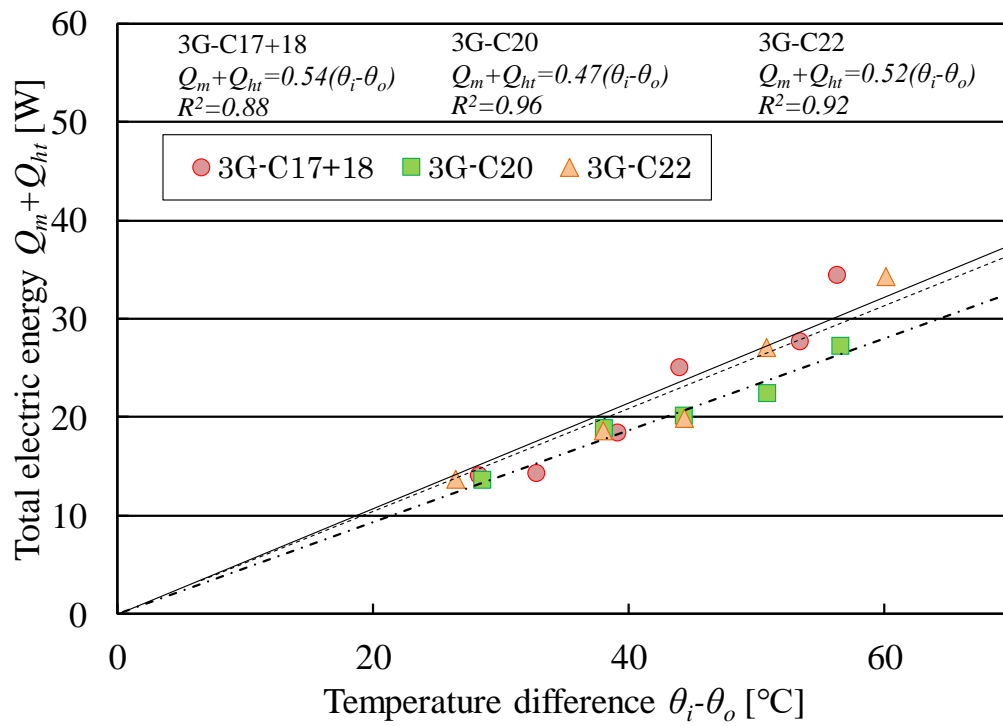


図 6.11 熱貫流率(3層ガラス)

表 6.5 PCM 窓の熱貫流率

	PCM	Volume	Heat transmission coefficient U
		(kg/m^2)	[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
2G-C17+18	GNP2510	10.2	7.3
2G-C20	GNP3610	10.8	7.2
2G-C22	GNP4410	10.9	7.3
3G-C17+18	GNP2510	10.2	6.0
3G-C20	GNP3610	10.8	6.0
3G-C22	GNP4410	10.9	5.8

c) 実験棟における PCM 窓の冬期性能評価

開口部は他の建築躯体に比較して熱損失が大きく、室内側表面温度も低い。PCM の充填により窓に蓄熱性能を付与することで、日射のダイレクトゲインによる夜間の窓表面温度低下の抑制や熱損失量の削減等の効果が期待される。

開口部に PCM を適用するとき、液相域での漏れや凝固・融解に伴う形状の変化等、充填する蓄熱材の取り扱いが課題としてあげられる。複数の円形アクリル容器をガラス内部に導入する例もあるが^{6.10)}、容器間の空隙による熱抵抗の増大などで、蓄熱性能は限定的となる。

本研究では PCM をゲル化することにより、蓄熱層とガラス層と密着させつつ、蓄熱層の形状変化や漏出を抑制する機構とした。窓面積全体に蓄熱性能を付与できる PCM 窓を実験棟に設置して、暖房量抑制効果及び環境改善効果を実測した。

第3章及び第4章で用いた実験棟 (q 値: $1.1[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$) に PCM 窓を設置した PCM 窓室と、PCM 窓を設置していない対象室における暖房量と比較することで、PCM 窓の暖房量抑制効果を検討した。

実験棟の外観を写真 6.6 に、PCM 融解時の PCM 窓の様子を写真 6.7 に示す。なお暖房方法は前章と同様に、放熱器は白熱球と室温感知型サーモスタットを組み合わせたもので、設定温度(20°C)以下になると白熱球が点灯し放熱を開始するよう制御した。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

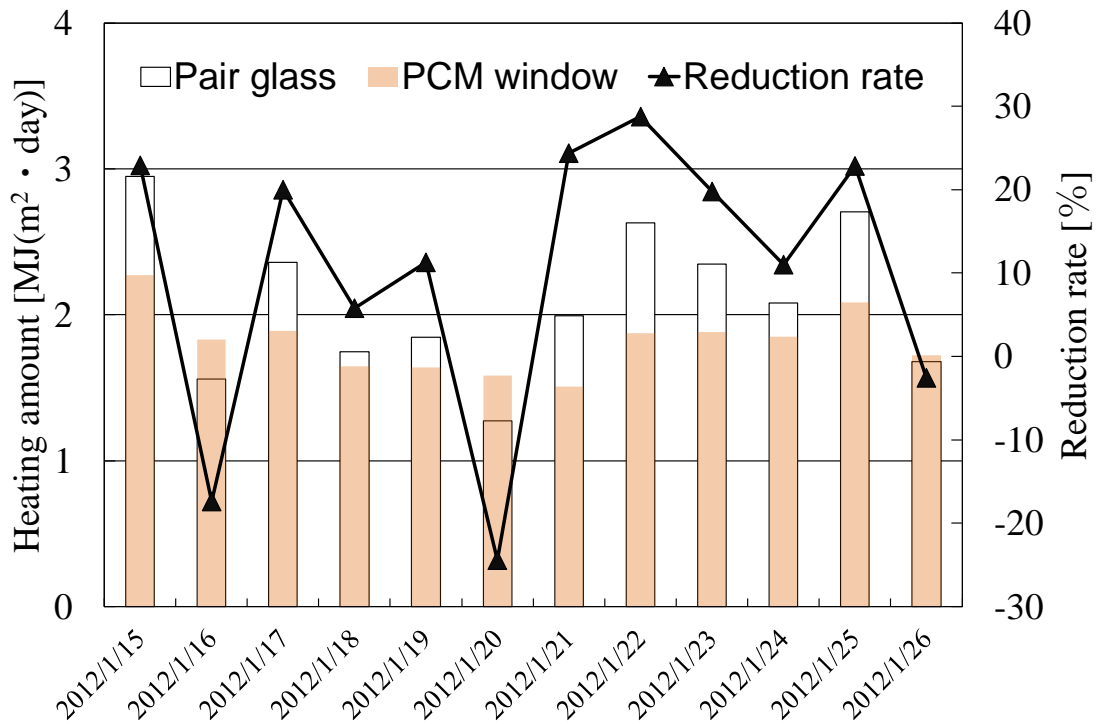


写真 6.6 実証実験棟の外観



写真 6.7 PCM 窓 (内付付加式)

両室の暖房量と、PCM 窓の設置によるエネルギー削減率を図 6.12 に示す。PCM 窓による削減率は曇天日には低く期間中の 4 日間は効果が確認できなかったが、期間平均値は 13.4%，最大値は 28.7%であった。



6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

次に、室温推移の実測データを用いて PCM 窓の効果について述べる。図 6.13 に、冬期実測期間中の室温の推移を示すが、PCM 窓を設置していない対象室の最高室温が 30°C を超える日でも、PCM 窓室の室温は 3~5°C 程度過昇温が抑制されている。

これは、窓にゲル状 PCM を充填することによりダイレクトゲインが開口部に蓄積され、相対的に室への透過日射量が減少することによる。また、PCM 窓室の最高室温の出現時間帯は PCM 窓を設置していない対象室よりも遅く、室温のピークがシフトしていることがわかる。

さらに、1月26日では、PCM 窓室の暖房開始時刻は対象室よりも6時間程度遅く、昼間の日射量が多い日には無暖房になるなど、PCM 窓による暖房量削減の可能性を強く示唆している。

PCM 窓の効果はシミュレーションにより、第8章で詳細に検討を加える予定である。

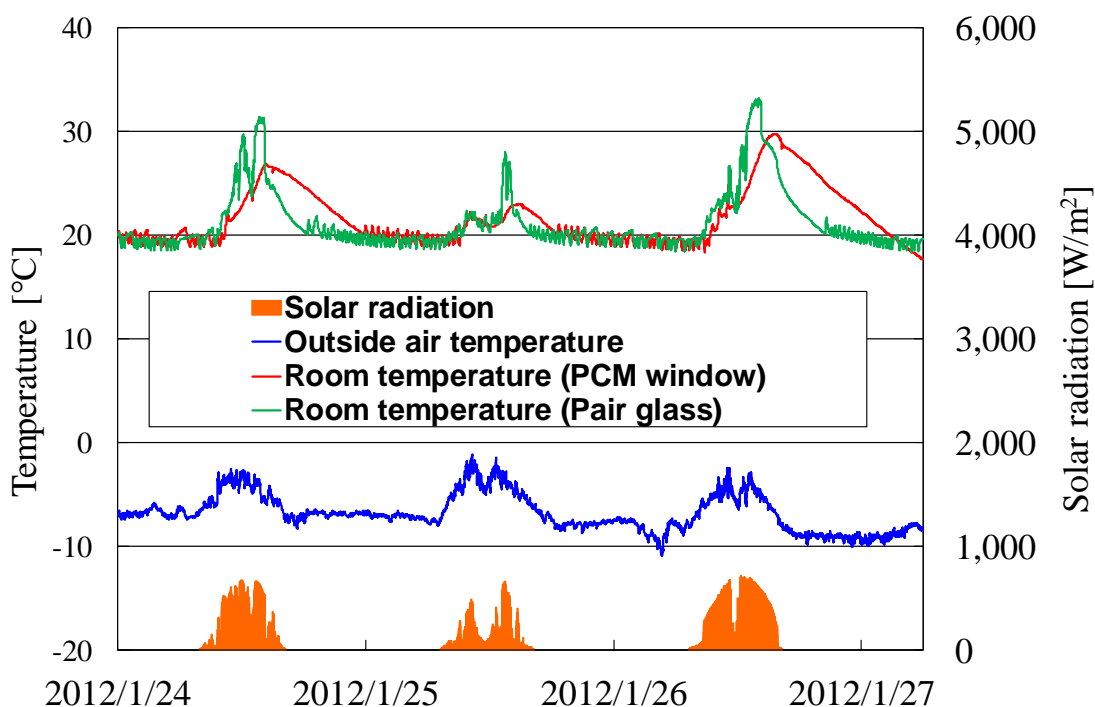


図 6.13 実測期間中の室温の推移

6.2 PCM ブラインドによる日射利用空調システム

PCM ブラインドは、扁平なアルミ製管状容器内に日射を潜熱蓄熱することができ、ベネシャンブラインドなどに比べて昼間の表面温度上昇が抑制できることから、外付けや、ダブルスキン内部に設置した場合、二次放射とインナーガラスの温度上昇を抑制して夏期の室内環境を改善することが期待できる。

同時に、蓄積した日射エネルギーを利用して夜間外気冷房用途のパッシブ換気駆動力が促進されるとともに冬期には蓄熱した日射エネルギーを暖房に利用できるなど、通年での大きな省エネルギー効果も予見できる。

実用的な用途を考えた時の PCM ブラインドの概要を図 6.14 に示すが、表面は日射熱利用を目的とした蓄熱面(表面に熱線吸収フィルム)と日射遮蔽を目的とした反射面(表面に熱線反射フィルム)とで構成されておりブラインドの回転により蓄熱モード、反射モード、透過モードを任意に選択できる。

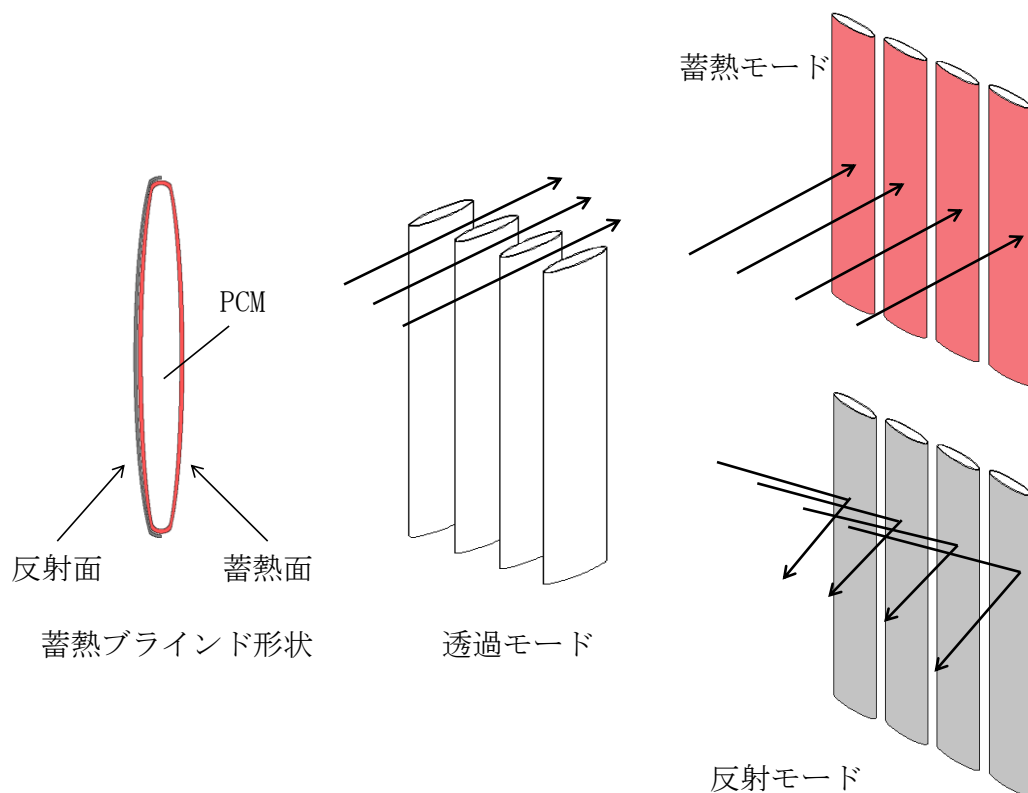


図 6.14 PCM ブラインドの概要

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

本節では、まず、PCM を扁平管ブレードに充填した蓄熱ブラインド(以下 PCM ブラインド) を開口部に外付けに設置して日射利用システムを構築した場合の、省エネルギー効果と室内環境改善効果を定量化する。各 PCM の形状、融点ごとの基本的熱性能を明らかにし、PCM ブラインドが二次放射により室内に与える熱的影響と相当日射透過率について報告する。

また、ダブルスキン内に PCM ブラインドを設置した時の二次放射の抑制効果や夜間換気駆動力について、事務所を模擬した 1/3 模型を用いて実験的に検討を行う。

6.2.1 融点及び形態の異なる蓄熱材を充填した蓄熱ブラインドの熱特性

押し出し成形された中空アルミ製ブラインドに、ゲル状 PCM と粒状 PCM を充填して PCM ブラインドを作製した。PCM ブラインドに充填する蓄熱材の融点の熱的影響を検討するために、融点の異なる PCM を充填したブラインドを加熱して表面温度と蓄熱量を測定した。実験で使用した PCM 充填後のブラインド断面を写真 6.8, 写真 6.9 に、ブラインドに適用した PCM の一覧を表 6.6, 表 6.7 に示した。

ゲル状 PCM の充填作業は、エラストマーの流動性が発現する 90℃ まで湯煎により加熱し真空引きをしながら行ったが、温度が低下するとブラインド内部で凝固が始まり充填ムラが生じるため、ブラインドを周囲から加温しつづける必要がある。一方、粒状 PCM は簡単な治具での充填が可能で、引火などの危険性も低く作業時間も短縮されるなど、製造工程における生産効率を上げられる。PCM ブラインドの一覧を表 6.8, 表 6.9 に示すが、長さ当り充填量を比較するとゲル状 PCM が平均 650 g/m であるのに対し、粒状 PCM では平均 343 g/m と充填量は約 53%にとどまった。

一方、PCM の重量と n-パラフィンの熱物性を示す DSC(示差走査熱量計)での測定結果から予測した潜熱量と、後述する方法で測定した顕熱を含む蓄熱量を比較すると、ゲル状 PCM を充填したブラインドの蓄熱量に顕著な低下が見られた。これは、PCM 充填時にブラインド内部にできた空隙による熱抵抗の増加が影響しているものと考えられる。

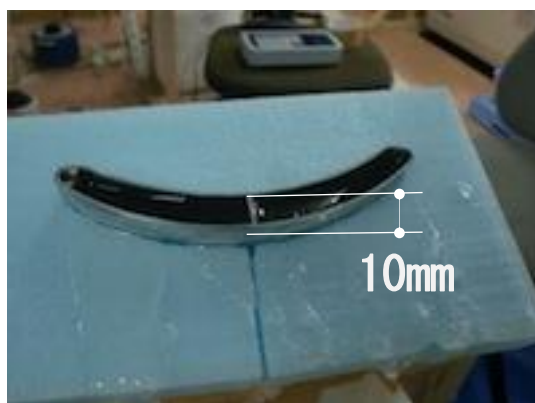


写真 6.8 ゲル状 PCM の充填



写真 6.9 粒状 PCM の充填

表 6.6 ゲル状 PCM の概要一覧

		Gelled PCM		
		PM506G	PM507G	PM508G
Melting point	°C	26	32	40
Freezing point	°C	24	33	38
Melting calorie	kJ/kg	203	200	221
Bulk density (solid phase)	kg/m ³	848	899	912

表 6.7 粒状 PCM の概要一覧*

		Gelled PCM		
		PM506	PM507	PM078
Melting point	°C	26	32	54
Freezing point	°C	24	33	56
Melting calorie	kJ/kg	200	199	134
density (liquid)	kg/m ³	790	780	n.d.
density (solid)	kg/m ³	980	910	890
Bulk density (sold)	kg/m ³	558	530	567
Equivalent diameter	mm	3.85	3.80	3.97

*資料提供： 等価粒径以外のデータはJSR(株)より提供いただいた。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

表 6.8 ゲル状 PCM を充填したブラインドの一覧

		Blank	PCM Shading		
		BL-B	BL-25G	BL-32G	BL-40G
Surface area	m ² /m	0.213			
Empty weight	kg/m	0.721			
PCM	—	—	PM506	PM507	PM508
Total weight	kg/m	—	0.653	0.645	0.651
Latent heat amount (DSC)	kJ/m	—	130.6	128.4	130.2
Thermal storage amount (Measured value)	kJ/m	8.0	68.8	82.4	58.0
(20°C~50°C)					

表 6.9 粒状 PCM を充填したブラインドの一覧

		Blank	PCM Shading		
		BL-B	BL-32	BL-3250	BL-50
Surface area	m ² /m	0.213			
Empty weight	kg/m	0.721			
PCM	—	—	PM507	PM507	PM078
				PM078	
				(each 50wt.%)	
Total weight	kg/m	—	0.328	0.345	0.356
Latent heat amount (DSC)	kJ/m	—	65.3	57.5	47.7
Thermal storage amount (Measured value)	kJ/m	8.0	53.4	50.2	36.0
(25°C~55°C)					

a) PCM ブラインドの蓄熱性能

断熱材(FP板 40mm)で作製した加熱チャンバの中央部に PCM ブラインドをつり下げ、内部に設置した面状ヒータ(1P-100V, 450W)の電圧を一定に保ちながら加熱して蓄熱量を測定した。表面熱流と表面温度は蓄熱ブラインドに貼付けた熱流計を用いて1分間隔で測定した。蓄熱量測定実験の様子を写真 6.10, 写真 6.11 に示す。

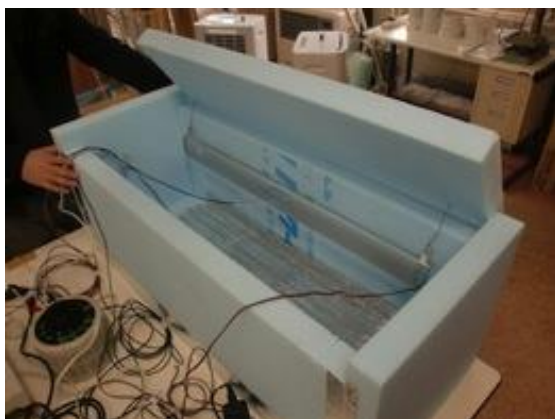


写真 6.10 加熱チャンバの概要



写真 6.11 熱流計の添付状況

PCM ブラインドの加熱時における表面熱流と、表面温度と空気温度の温度差の関係を図 6.15 に示した。また、チャンバ内の空気温度とブラインドの表面温度の差も合わせて示す。

図中の表面熱流と温度差は、ほぼ同様の挙動を示していることから、簡易的に表面熱流を測定する方法としては妥当と考えられる。なお、ブラインドの蓄熱量は、式(6.3)で定義した。

$$Q_{st} = \sum \dot{q} \cdot A \cdot \Delta t / L \quad (6.3)$$

A : 表面積[m²]

L : 長さ[m]

\dot{q} : 熱流[W/m²]

Δt : 時間間隔[s]

Q_{st} : 蓄熱量[kJ/m]

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

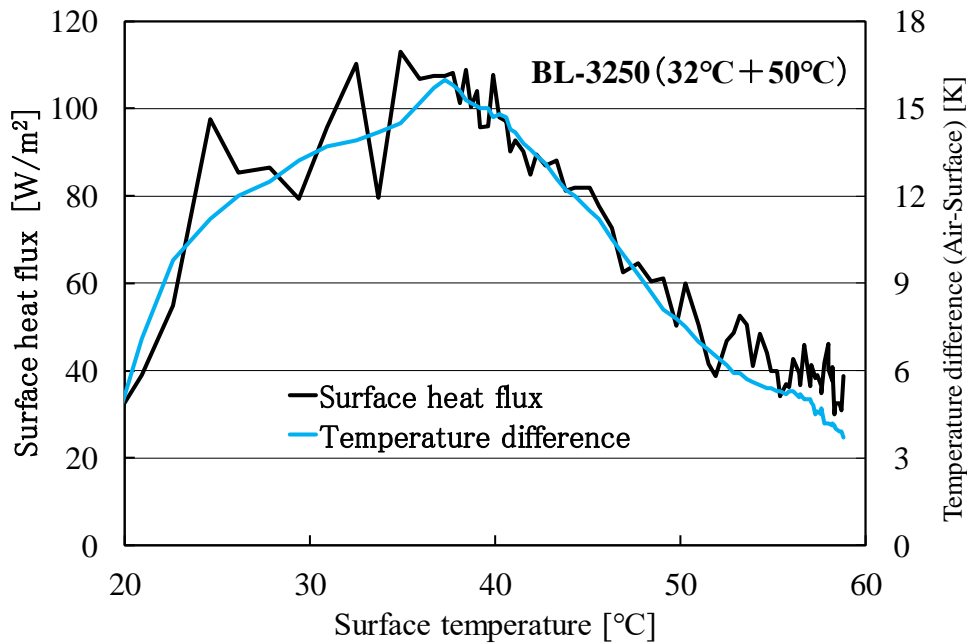


図 6.15 ブラインドの表面熱流と温度差

ブラインドの加熱実験の結果を図 6.16, 図 6.17 に示す。また, PCM を充填したブラインドの蓄熱量をそれぞれ 50°C, 59°C の蓄熱量で無次元化して図 6.18, 図 6.19 に示す。図 6.16, 図 6.17 をみると, ブランクの蓄熱量は表面温度に対して線形的な変化を示すものの, ゲル状 PCM および粒状 PCM を充填したブラインドの蓄熱量は融点付近で急激に増加しており, 潜熱蓄熱の特長を反映した性状を示している。

一方, 図 6.18 のゲル状 PCM の無次元蓄熱量は融点近傍における増加率が非常に大きい, 図 6.19 の粒状 PCM では増加率がやや緩慢となった。これは, PCM を粒状にすることでブラインド内に空隙が生じ, PCM の熱伝導性が相対的に低下したことに起因するものと考えられる。融点の異なる 2 種類の粒状 PCM を混合して充填した BL-3250 の蓄熱量は BL-32 及び BL-50 の中間的な性能を示した。

また, 粒状 PCM を充填した融点 25°C のブラインドを 25 から 55°C まで昇温した時の蓄熱量はブランクに対して 5~7 倍程度であるもののゲル状 PCM を充填した PCM ブラインドと比較すると PCM のかさ比重の減少により単位長さ

当たり蓄熱量が平均で 65%にとどまった(表 6.7, 表 6.8)。

夜間換気駆動力の保持など、ブラインドの蓄熱量確保を優先する場合には、ゲル状 PCM の採用が好適となろう。

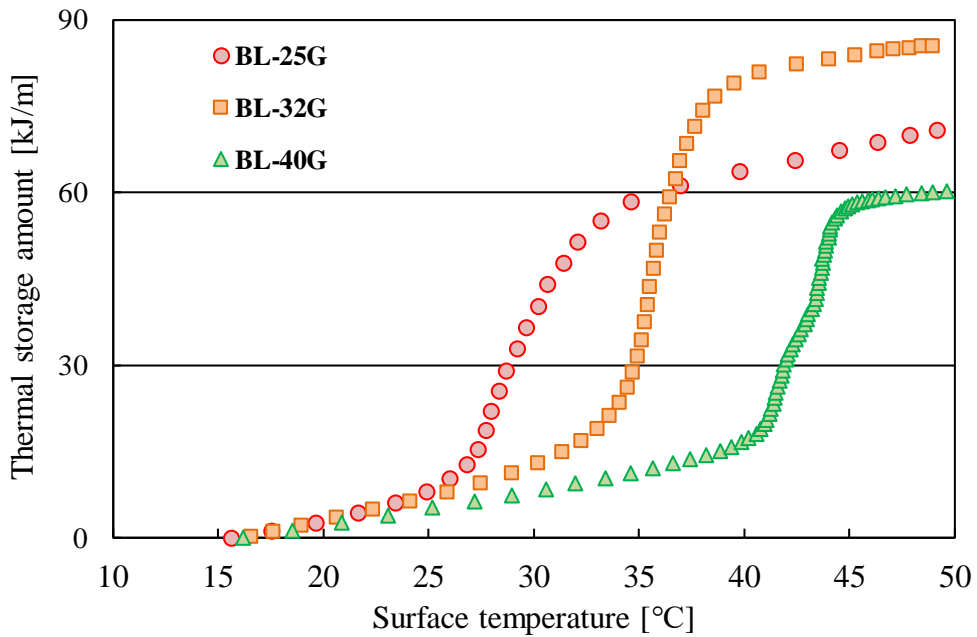


図 6.16 ゲル状 PCM を充填したブラインドの蓄熱量

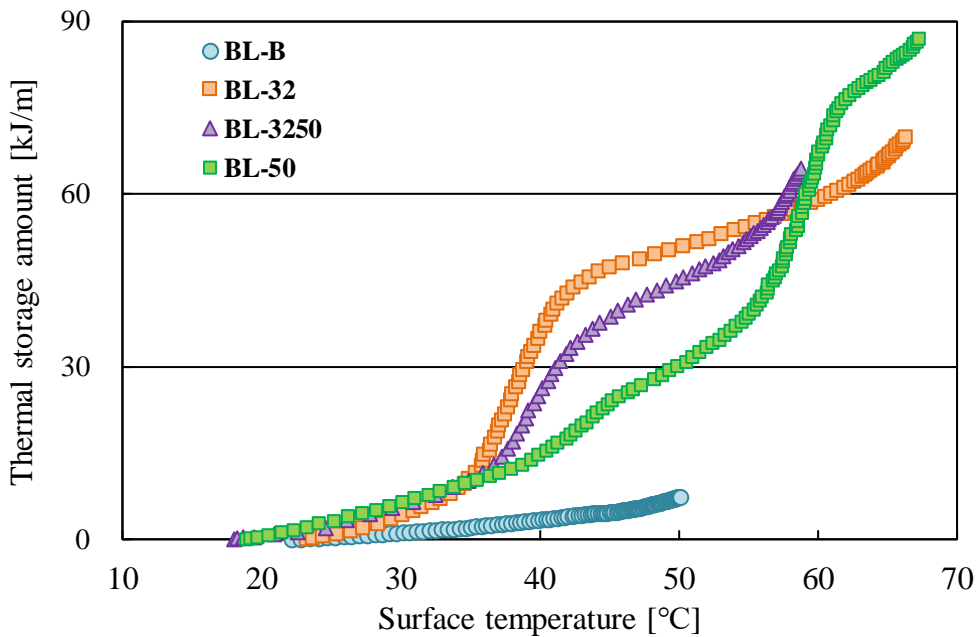


図 6.17 粒状 PCM を充填したブラインドの蓄熱量

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

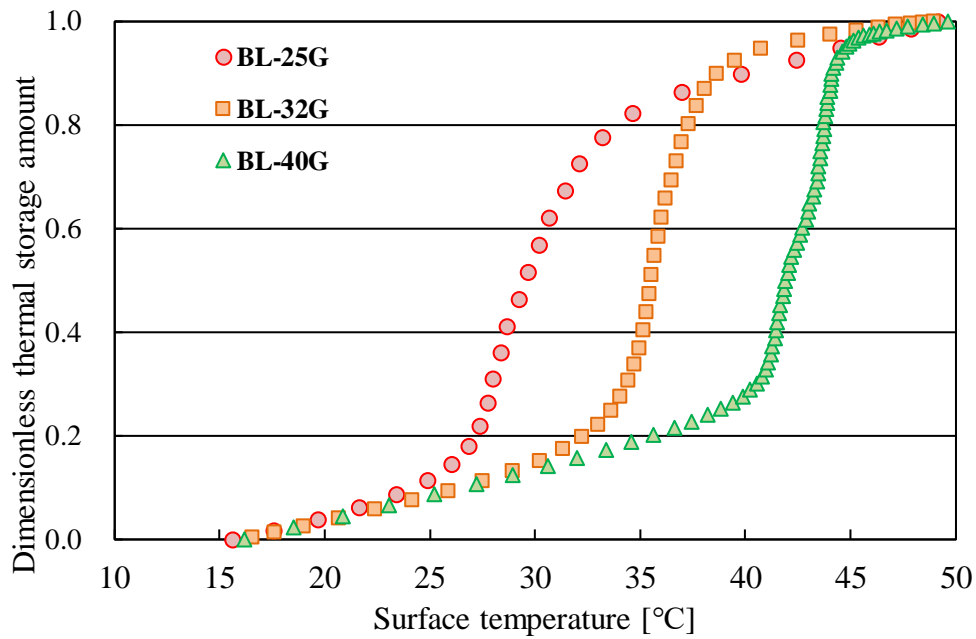


図 6.18 ゲル状 PCM を充填したブラインドの無次元蓄熱量

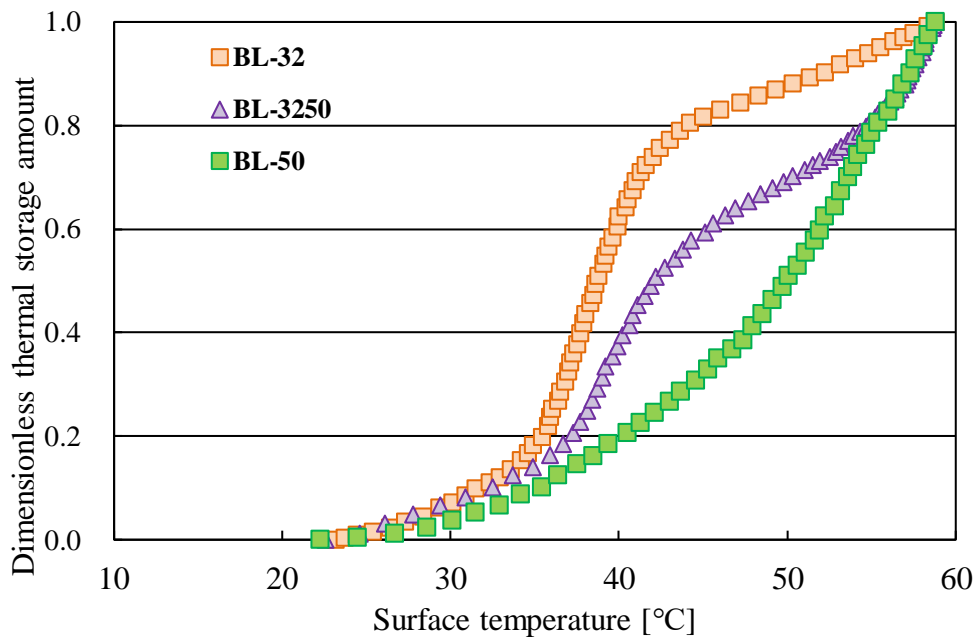


図 6.19 粒状 PCM を充填したブラインドの無次元蓄熱量

b) ゲル状 PCM を充填した蓄熱ブラインドの透過日射量削減効果

前述した融点 26°C のゲル状を充填した PCM ブラインド (BL-25G) を作製して、夏期における蓄熱ブラインドの透過日射量削減効果について検討した(表 6.10)。比較対象は PCM 非充填のブラインド(以下ブランク : BL-B)である。図 6.20 に示すように北海道小樽市にある実験棟の南面ガラス窓に PCM ブラインド(右側)とブランクブラインド(左側)を設置した。

本研究の目的は PCM ブラインドを設置し日射利用空調システムを構築することにあるが、本節ではまず、蓄熱ブラインドの日射遮蔽性能を分離して把握するため、窓面に外付け設置することとした。室内への透過日射量は実験棟内部で南鉛直面方向に設置した全天日射計を用いて測定し、ブラインドの表面温度とともに 1 分間隔で記録した。ダブルスキンやブラインドを含めた窓システムにおける日射遮蔽性能は、日射の波長域における透過日射分、室内側窓表面及びブラインド表面の温度上昇に伴う放射成分、室内側窓表面の温度上昇に伴う対流成分に分けられる。

本実験で用いた全天日射計で測定した透過熱量とは、そのうち拡散入射した日射の波長域における透過成分及びブラインドや窓表面の温度上昇に起因する放射のうち、近赤外域 (780~2800nm) の成分である。

表 6.10 ゲル状 PCM を充填した外付けブラインド概要

Name of PCM shading		BL-25G
Dimensions	mm	2000(H)×1700(L)×214(D)
Number of blade	Sheet / unit	20
Blade length	mm	1650
Blade elevation angle		55°from the horizontal plane
Name of filled PCM		PM506G
Quantity of PCM	kg / unit	22.2
Thermal storage amount (25~55°C)	kJ / unit	23387

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

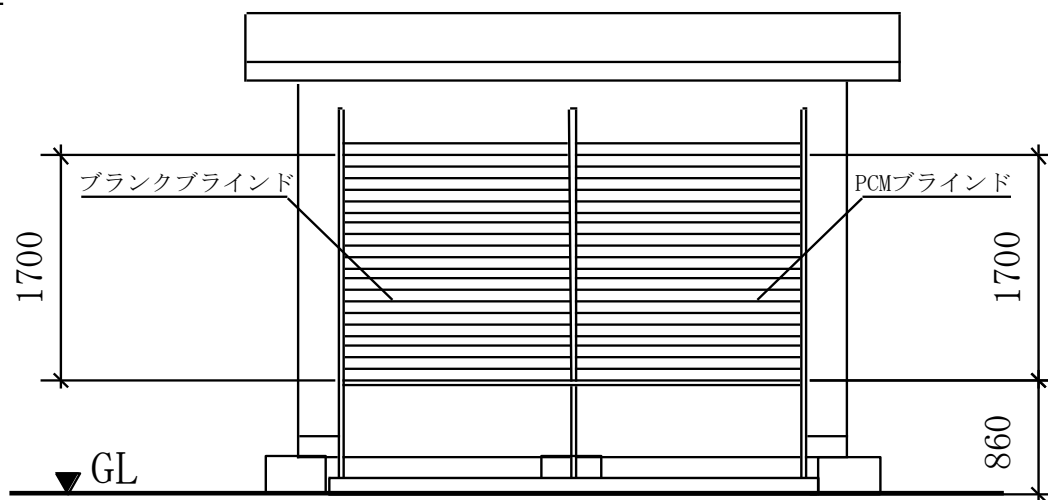


図 6.20 外付けブラインド 南立面図

測定期間中の夏季代表日における透過日射量の測定例を図 6.21 に示すが、日中における PCM ブラインドの透過熱量はblank よりも低い。また、ブラインド表面温度の測定例を図 6.22 に示す。PCM ブラインドは融点近傍で表面温度がblank よりも低く、二次放射により室内へ透過する熱量が抑制されていると考えられる。一方、12 時以降の表面温度抑制効果はわずかに見られるもののゲル状 PCM 充填量が少なかったため、表面温度の日最高値の抑制量は不十分な結果となった。図 6.23 にゲル状ブラインドの透過熱量の日積算値と、次式で定義した透過熱量の削減率を示す。

$$\varphi = (Q_b - Q_{pcm}) / Q_b \quad (6.4)$$

φ : 透過熱量削減率 [-]

Q_b : blank ブラインドの透過熱量 [kJ/(m² · d)]

Q_{pcm} : PCM ブラインドの透過熱量 [kJ/(m² · d)]

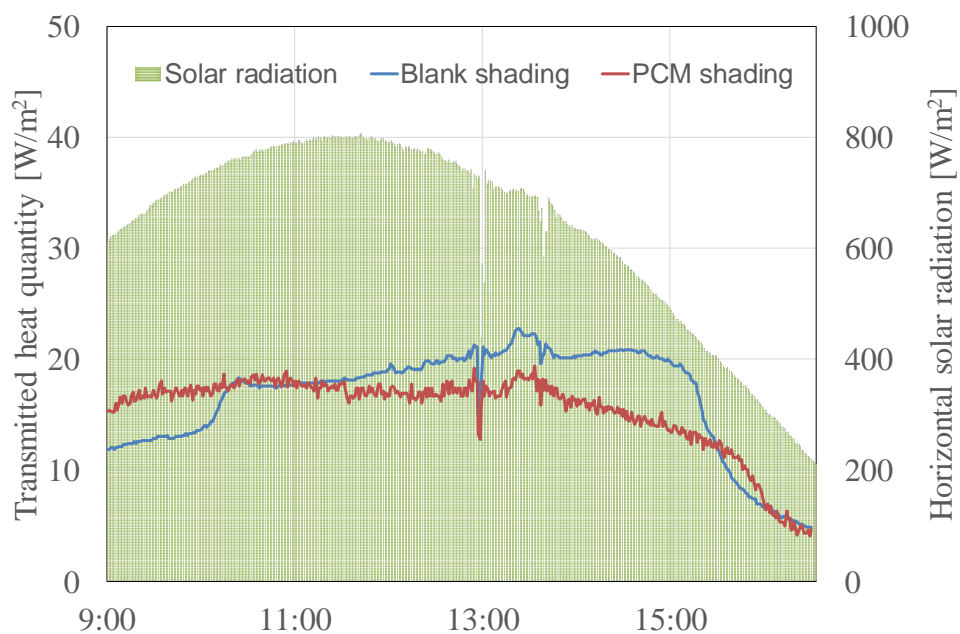


図 6.21 透過日射量 (ゲル状 PCM)

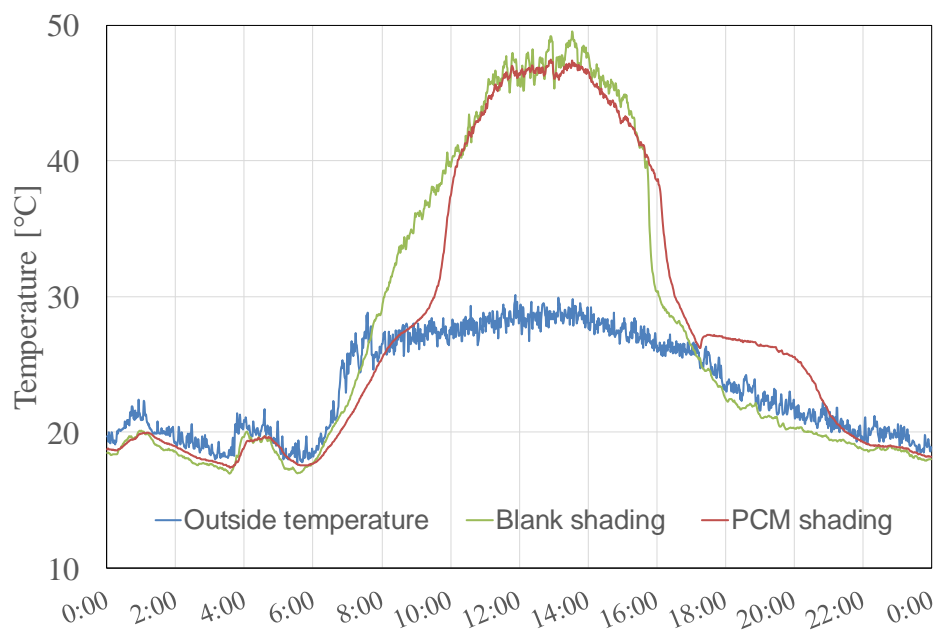


図 6.22 ブラインドの表面温度 (ゲル状 PCM)

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

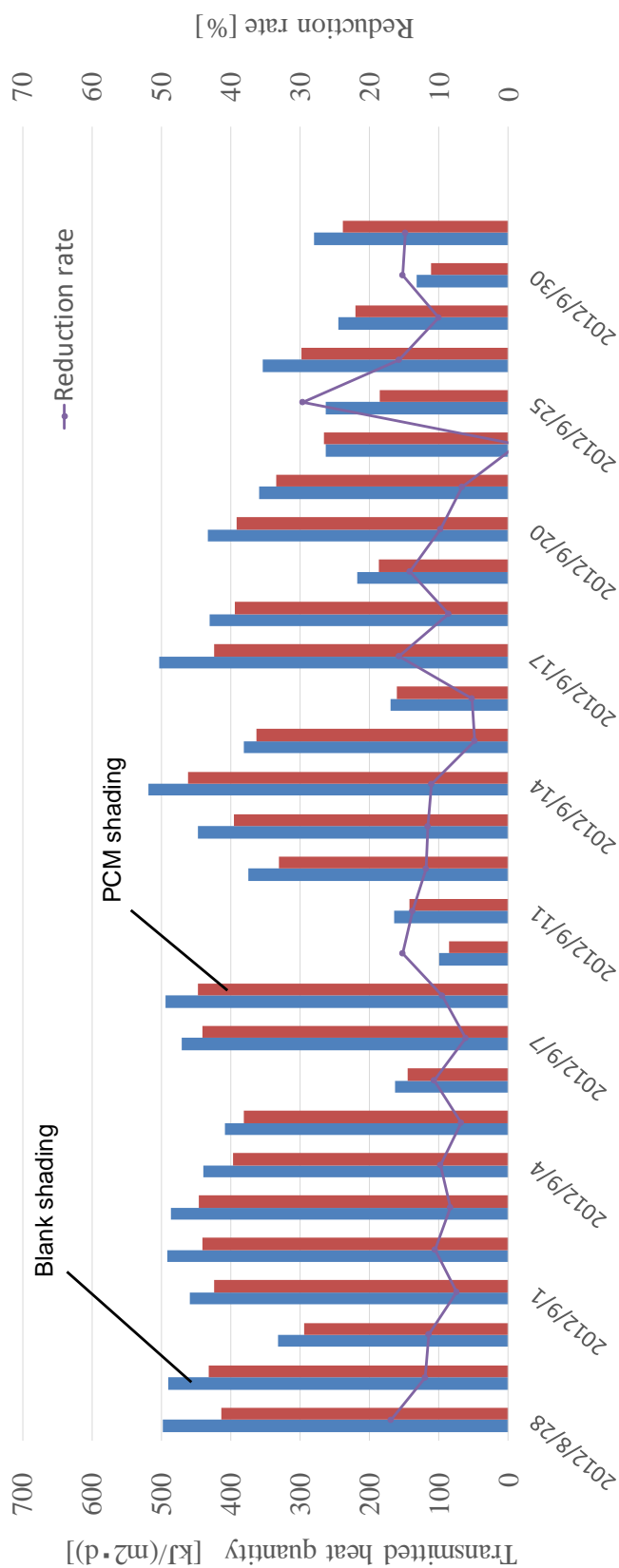


図 6.23 ゲル状 PCM を充填した PCM ブラインドの透過熱量及び削減率 (2012/8/28-9/30)

c) 蓄熱ブラインドの透過熱量削減効果

粒状 PCM を充填した蓄熱ブラインドの冷房負荷削減効果を比較検討するために、前述の実験棟南面ガラス窓外部に粒状 PCM を充填したブラインド(写真 6.12 内(a))とblankブラインド(写真 6.12 内(b))を外付け設置して、室内への透過熱量、ブラインドの表面温度、室内環境を1分間隔で測定した。ブラインドの概要を表 6.11 に示す。また、充填する PCM をゲル状から粒状に変更する事で、製造上の課題であったブラインドへの充填作業の簡素化が可能となる。



写真 6.12 PCM ブラインド設置状況 写真 6.13 ブラインド背面の状況

表 6.11 粒状 PCM を充填した外付けブラインドの概要

Name of PCM shading		BL-3250
Dimensions	mm	2000(H)×1700(L)×214(D)
Number of blade	Sheet / unit	20
Blade length	mm	1,650
Blade elevation angle		55°from the horizontal plane
Name of filled PCM		PM507+PM078 (each 50wt.%)
Quantity of PCM	kg / unit	11.8
Thermal storage amount (25~55°C)	kJ / unit	18156

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

図 6.24 に測定期間中におけるブラインド表面温度の推移の一例を示した。日射受熱時のblankブラインドの表面温度は、外気温よりも 15~20°C 高く、夜間のブラインド表面温度はほぼ外気温と同様に推移した。図 6.25 は PCM ブラインドとblankの表面温度差の推移を示している。

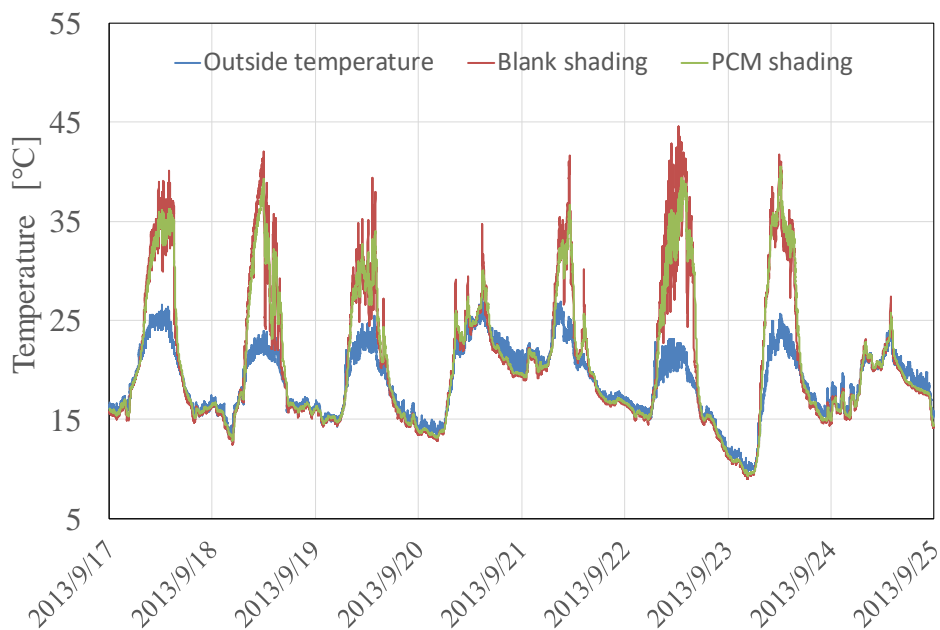


図 6.24 ブラインド表面温度と外気温の推移(2013/9/17-9/24)

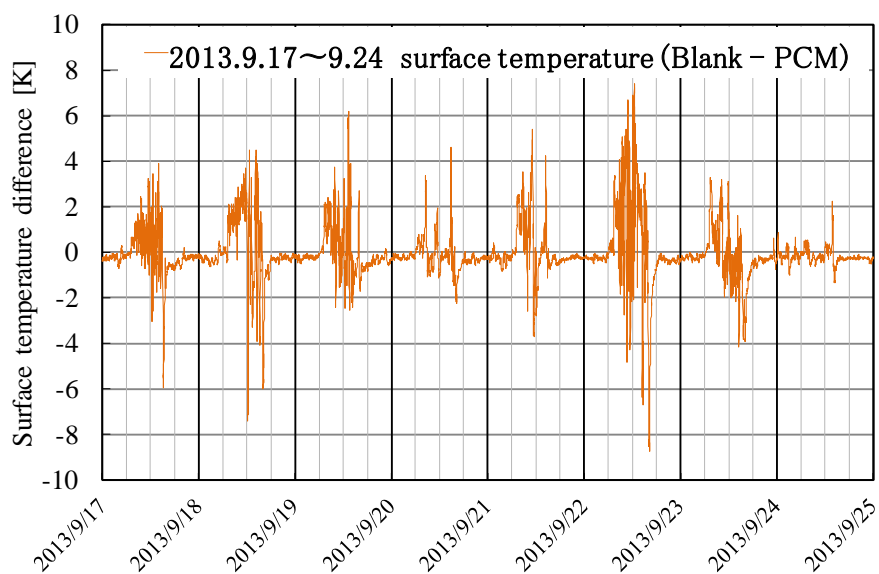


図 6.25 ブラインド表面温度差の推移 (2013/9/17-9/24)

また、図 6.26 にブラインドの熱画像を示す。昼間 PCM ブラインドの表面温度はブラंकより 4~7°C 程度低いが生後には蓄熱の影響によりこの傾向が逆転しており、潜熱分の放熱が収束すると表面温度の差異は無視できる程度となる。図 6.27 に室内で測定した透過熱量の推移を示す。晴天日の PCM ブラインドの透過熱量をブラंकと比較すると、15~20 W/m² 程度抑制されていることが確認できる。

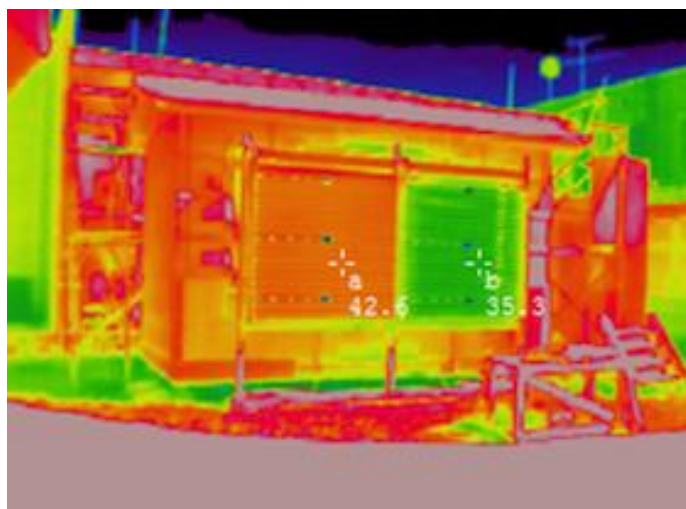


図 6.26 ブラインドの熱画像

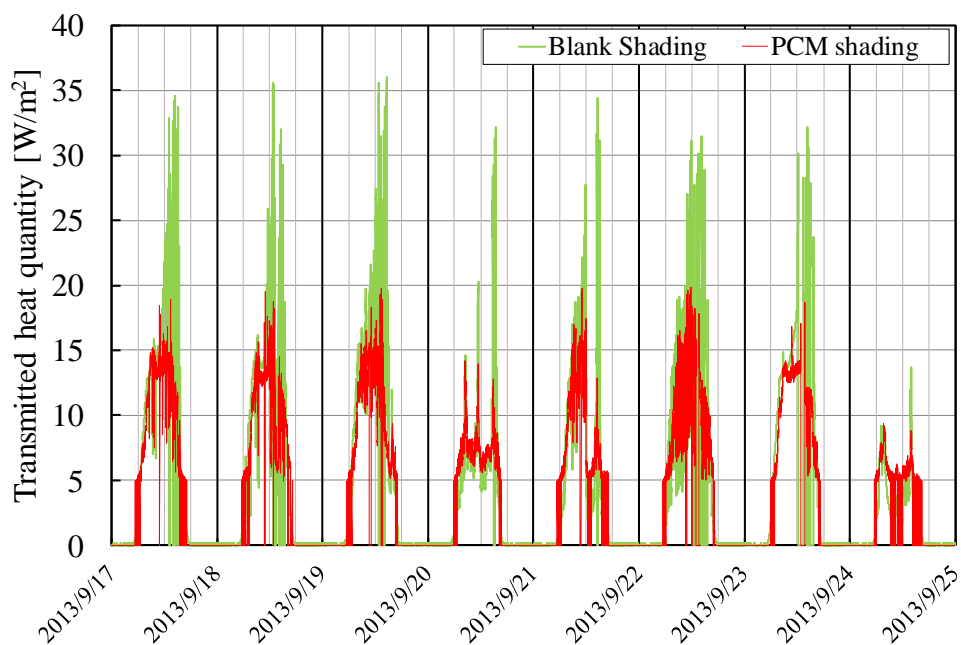


図 6.27 室内への透過熱量の推移 (2013/9/17-9/24)

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

図 6.28 に透過熱量の日積算値及び削減率を示す。図から、透過熱量が多い日では PCM の充填により透過熱量削減率の向上が見られるものの、曇天日には透過熱量がブランクよりも大きくなる結果となった。

図 6.23 と比較すると、曇天日の傾向がやや異なることから、外気温や前日の日射量なども影響を与えていることが考えられる。ブラインド表面や室内側窓表面の熱放射成分は主として中赤外線から遠赤外線領域に位置するが、全天日射計による測定では近赤外線領域での放射成分の差異しか議論することはできない。

しかし、ブラインドの形状、角度や材質などが透過日射に与える影響は少ないと考えられることから、図 6.28 で得られた差異は近赤外線領域での放射成分の違いによるものと考えられる。

また、近赤外線領域における本試験結果は中赤外線域から遠赤外線域においても同様の傾向となることが推察されることから、遠赤外線領域の日射遮蔽性能が測定可能なシステムを参考に^{6.11)}、今後も測定方法についての検討を加える予定である。

また、透過熱量の削減率を日ごとの日照時間で整理して図 6.29 に示した。図から、削減率が逆転する日の日照時間はおおむね 1 時間以下であることが明らかとなった。これらの日にはブラインドの使用そのものが不要であることが予測されるため、日照時間が 1 時間以上の日の透過熱量を集計して、削減率を議論することとした。

透過熱量の削減量を表 6.12 に示すが、粒状 PCM を充填したブラインドの日透過熱量は最大で 30%、期間平均で 13%削減された。

また、期間中の透過熱量の削減量は $1,412 \text{ kJ/m}^2$ であり、PCM ブラインドの蓄熱よる冷房負荷削減効果が確認できた。また、粒状 PCM 充填による削減率はゲル状 PCM の測定結果とほぼ一致している。

なお、ブラインドの日射透過率を、期間積算値での鉛直面日射量に対する透過日射量の割合で定義して評価したところ、ブランクブラインドの日射透過率は 0.12、PCM ブラインドの日射透過率は 0.1 であった。

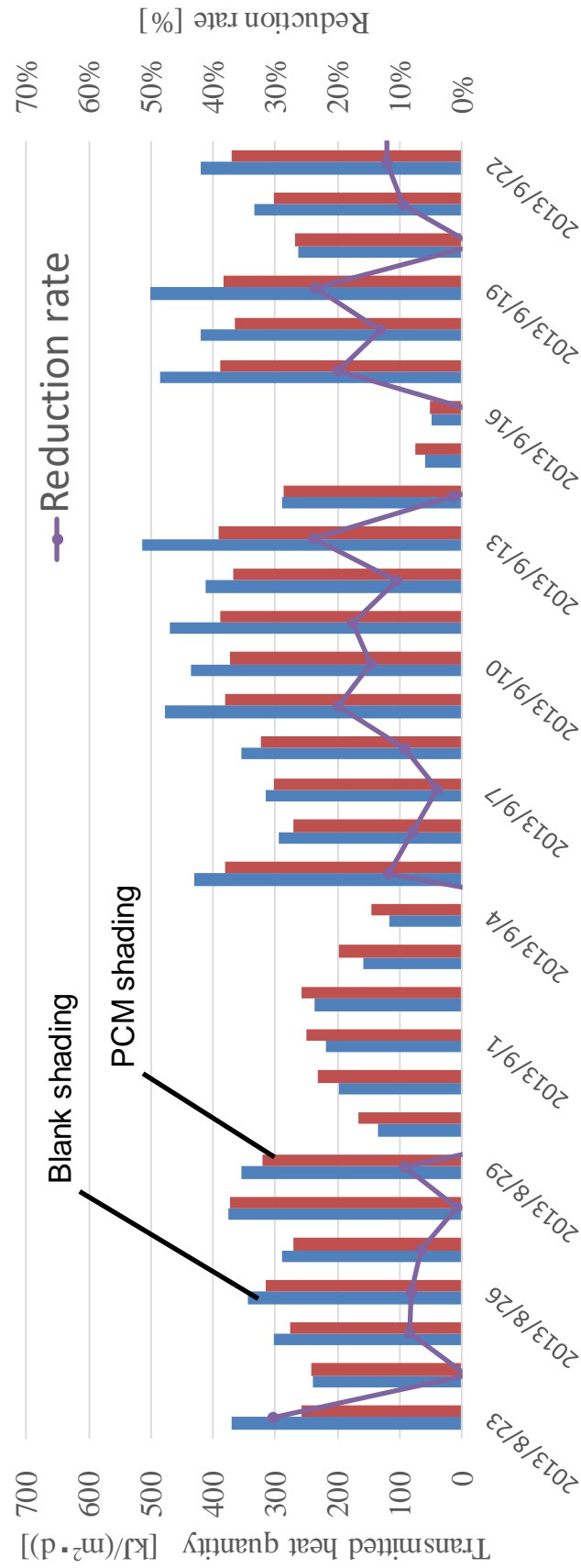


図 6.28 粒状 PCM を充填した PCM ブラインドの透過熱量及び削減率
(2013/8/23-9/28)

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

外付中空アルミブラインドは元来より高い日射遮蔽性能を有しているが、中空層に PCM を充填することにより、さらにその性能を高めることができる可能性が示された。

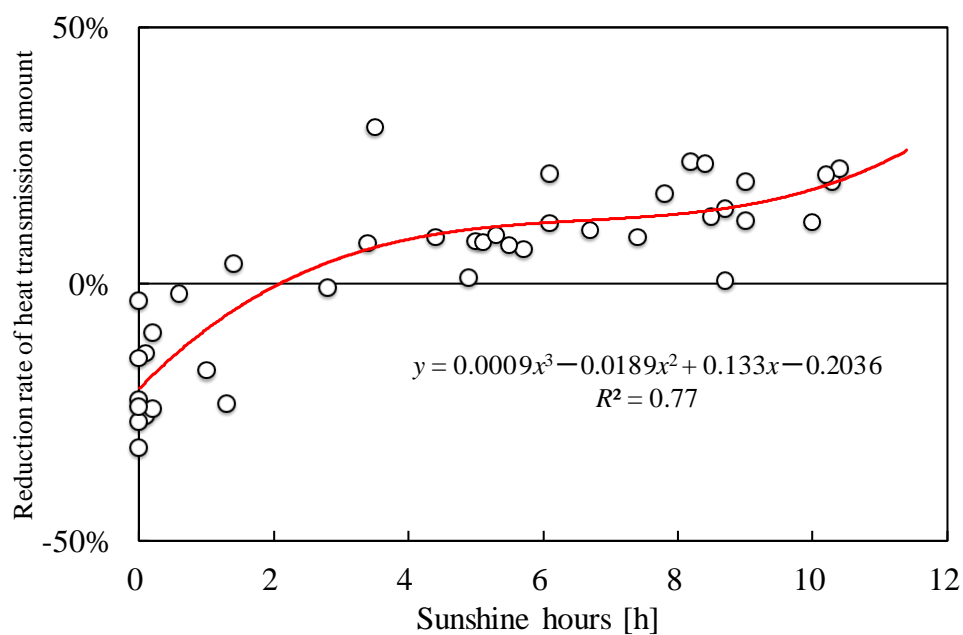


図 6.29 透過熱量削減率と日照時間(2013/8/23-10/1)

表 6.12 外付けブラインドの日射遮蔽性能

Measuring period		2013/8/23~10/1
Vertical plane solar radiation	kJ/m^2	91,017
Blank shading transmission heat	kJ/m^2	10,853
PCM shading transmission heat	kJ/m^2	9,441
Reduction amount	kJ/m^2	1,412
Reduction rate	%	13.0 (30.0: Max)

*測定期間中、日照時間が1時間未満の日の測定値を除外した。

6.2.2 PCM ブラインドの日射遮蔽効果及び夜間換気駆動力

本節では、ダブルスキンを有する事務所を想定した 1/3 模型を夏期の屋外環境に暴露して、エラストマーでゲル化した n-パラフィンを充填した PCM ブラインドの表面温度及びダブルスキンの内部温度分布の実測結果から、PCM ブラインドが二次放射により室内に与える熱的影響と相当日射透過率を報告する。また、ダブルスキン上部開口における噴流の測定から、日没後に生じる PCM ブラインドの換気駆動力の性状を明らかにする。

a) ダブルスキン内に設置した PCM ブラインドの日射利用システム

ダブルスキン内に設置した PCM ブラインドの特性を利用した日射利用空調システムの概念図を図 6.30 に示す。夏期には外気温とダブルスキン内部の温度差を用いた自然排熱およびナイトパーズモード、中間期は室内空気を誘引排出する自然換気モード、冬期は日中 PCM ブラインドに蓄熱した日射熱を夜間に室内へと導入する熱回収モードに変更し、夏期・冬期のいずれも日没後も含めて終日運転が可能となる。

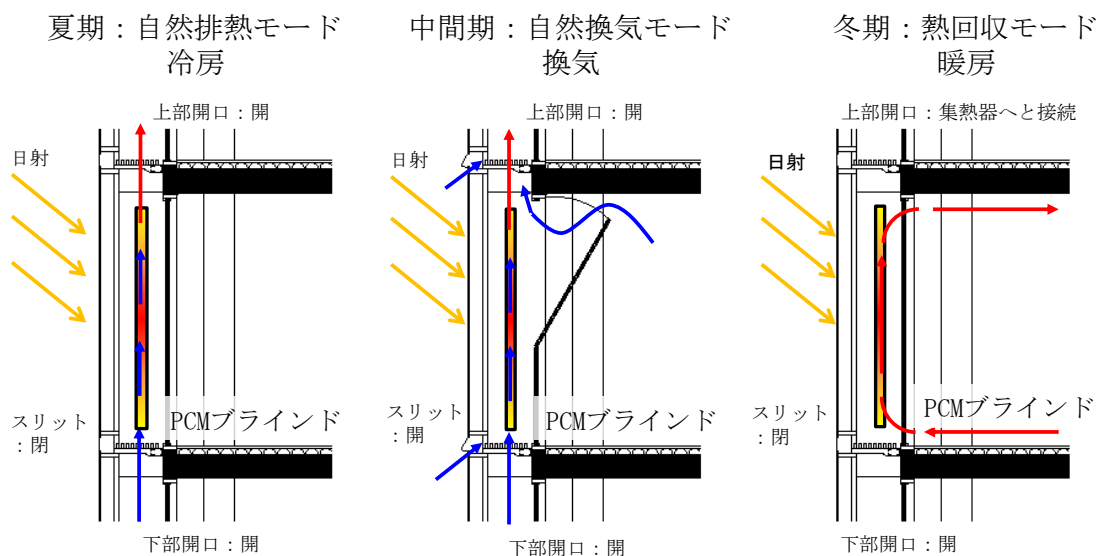


図 6.30 日射利用空調システムの概要

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

本節では、夏期における PCM ブラインドの効果を把握するために、図 6.31、図 6.32 に示すような事務所を想定した 1/3 模型試験装置を作製し、屋外暴露時の試験装置内部の環境測定と、夜間換気駆動力に関する実験を行った。

試験装置(高さ 900×幅 900×奥行き 1,800mm)は、事務所ビルの間階中間部のペリメータゾーンを想定している。屋外暴露時におけるダブルスキン以外からの熱取得を抑制するために、合板($t=12\text{mm}$)で作製した模型の周囲を断熱材($t=25\text{mm}$)で覆い、アルミ箔を表面に施した。

また、試験装置内部(室内部分に相当)の上下温度差を抑制するため、内部にファン(消費電力 3.9W, 風量 100CMH)を取り付けた。

ダブルスキンを構成するインナーとアウターガラスにはフロートガラス($t=3\text{mm}$)を用いた。屋外環境暴露実験では、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、上下室温分布測定のために 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、ガラスの表面温度と室内壁表面温度を測定した。

また、ダブルスキン中央部の同一高さの位置に熱電対を 10 カ所設置しての水平温度分布を測定した。試験装置を 9 時から 17 時まで屋外に放置して各部の温度を 1 分間隔で記録した。

風雨が装置に及ぼす影響を避けるため、17 時から翌朝 9 時まで装置を屋内実験室に移動して、装置内部とダブルスキン内の温度分布およびブラインドの表面温度の挙動を測定した。

PCM ブラインドは $830 \times 830 \times 3\text{mm}$ のフロートガラスで作製した内法幅 12mm のガラス容器に、n-イコサン(C20: 融点 36.8°C , 融解熱量 1.53 kJ/kg/K , 容積比熱 $1.3 \text{ MJ/m}^3\text{K}$)のゲル状 PCM を充填して代用した。

一般的なブラインドは熱負荷抑制のために明色塗装が施される場合が多いが、PCM ブラインドの蓄熱性能の評価を行うためblankブラインドは黒色塗装を施したステンレス板 $830 \times 830 \times 0.5\text{mm}$ (以下 SUS ブラインド)で模して比較した。

なお、PCM ブラインドの受光面には全反射率が 5%以下の熱線吸収フィルム(可視光線透過 0%)を貼付けた。試験装置の開口部仕様は、ブラインド非設置の

1. シングルスキン, 2. ダブルスキン, およびダブルスキン内部にブラインドを設置した 3. ダブルスキン+SUS ブラインド, 4. ダブルスキン+PCM ブラインドの4種類とし, 各々の開口部を南方向または西方向に向けて測定した。

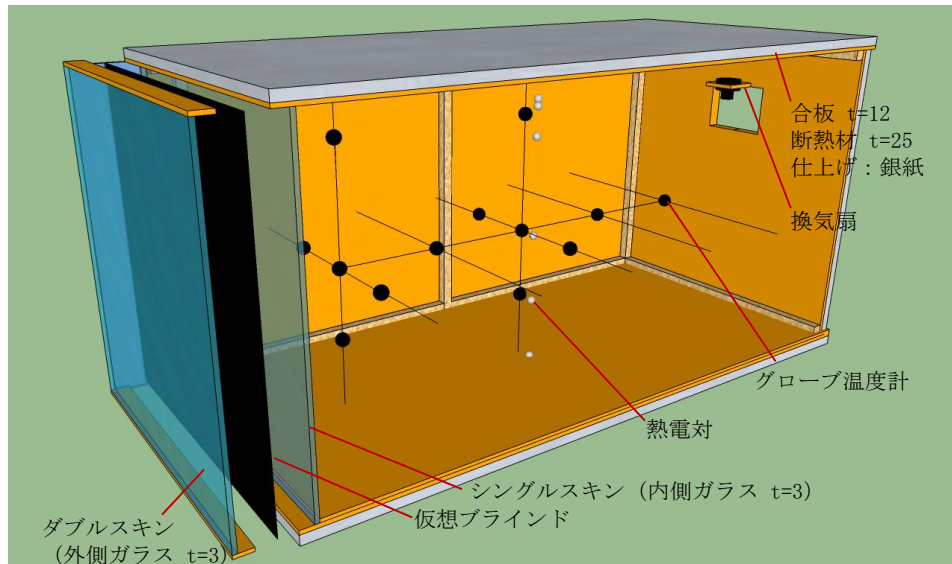


図 6.31 事務所を想定した 1/3 模型

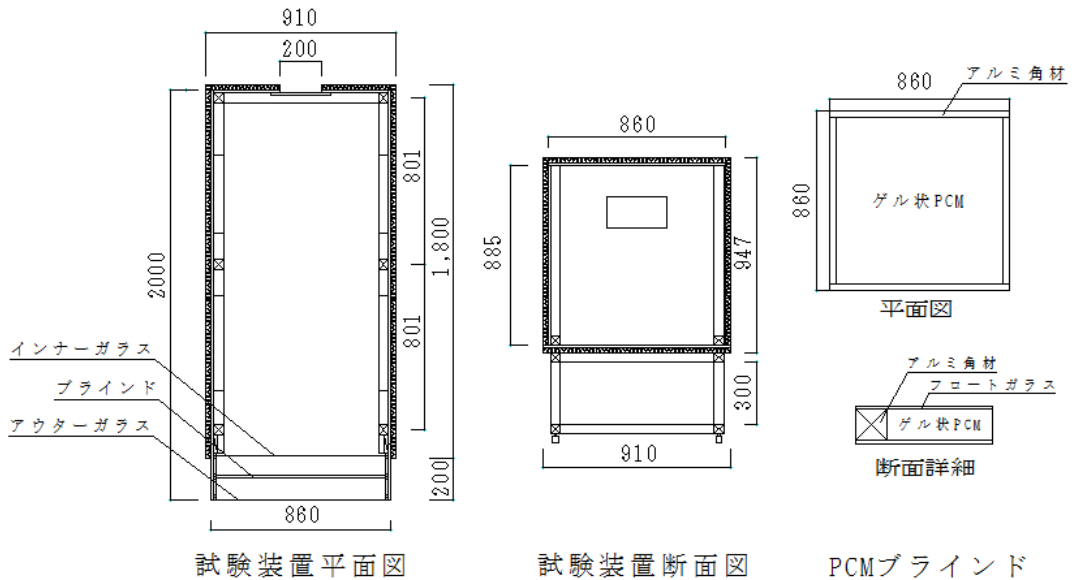


図 6.32 試験装置及びブラインド詳細図

b) 夏期の PCM ブラインド表面温度に関する屋外暴露実験

前述のように、夏期におけるダブルスキン内のブラインド表面温度の上昇に起因したペリメータゾーンの環境悪化が懸念されるため、これを検討する目的で夏期屋外暴露時のブラインド表面温度とダブルスキン内部の温度分布に関する測定を実施した。また、外気温度と全天日射量を説明変数とするブラインド表面温度の重回帰分析を行い、その精度を検討した。

実験地である北海道小樽市の夏期の代表日として最も気温の高い8月の快晴日における PCM および SUS ブラインド設置時のダブルスキン内の温度分布の測定例を図 6.33、図 6.34 に示す。

また、表 6.13 に測定期間中のブラインド表面の最高温度を、外気温および鉛直面全天日射量の日最高値とともに測定日ごとに示す。

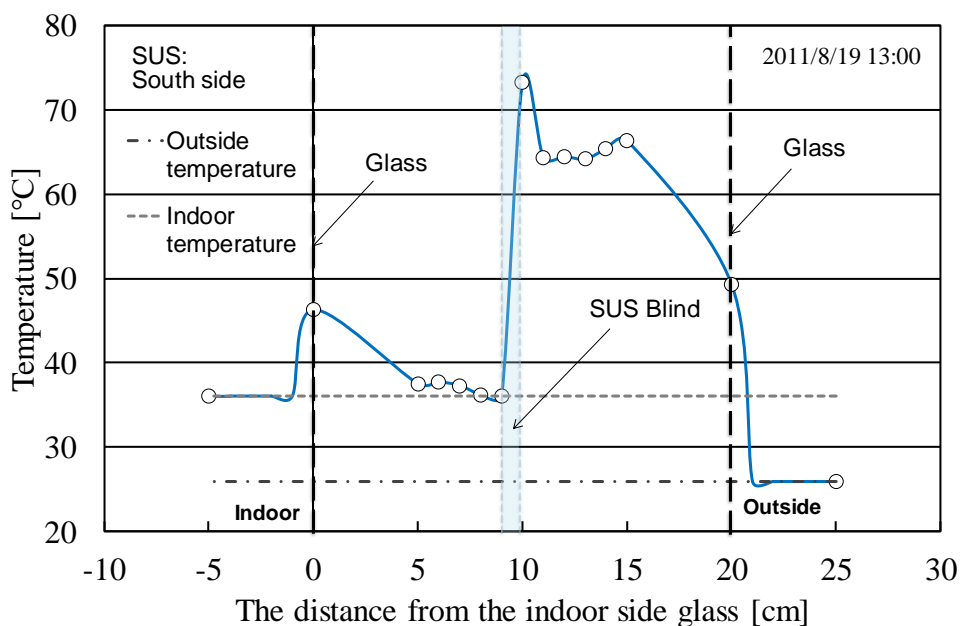


図 6.33 ダブルスキン内温度分布 (SUS ブラインド)

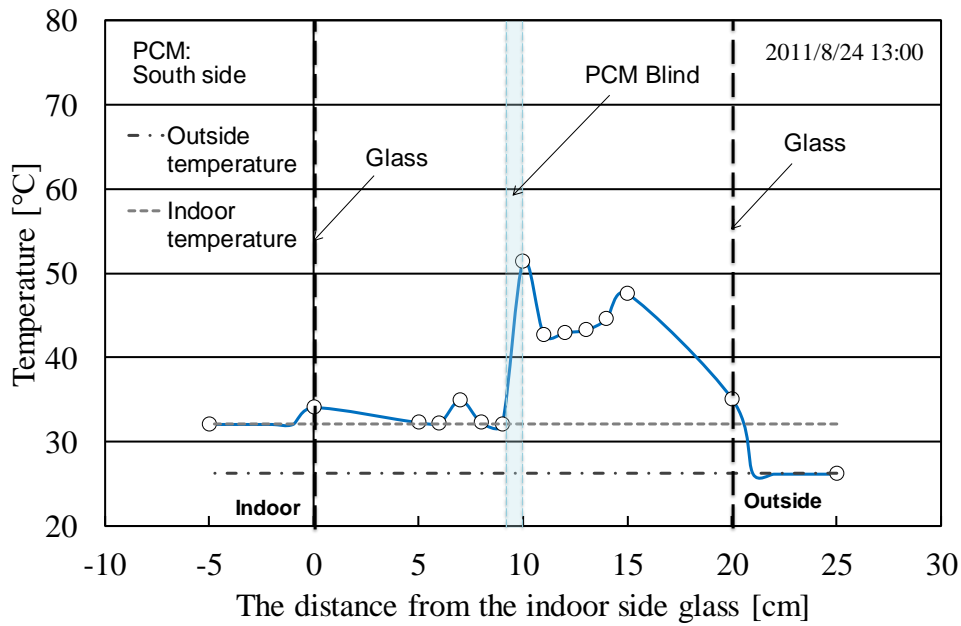


図 6.34 ダブルスキン内温度分布 (PCM ブラインド)

PCM ブラインドを設置したときのインナーガラスの表面温度は、外気温、日射量がほぼ等しい日に SUS ブラインド設置した場合と比較して 10K 以上低減されており、夏期におけるペリメータゾーンの放射環境を改善するという PCM ブラインドの環境調整効果が確認できた。

また、最高室温は PCM ブラインド設置時のほうが 5K 低く、空調負荷のピークカット効果が予見できる結果となった。

表 6.13 ブラインド表面最高温度

	θ_{max}	$\theta_{o,max}$	$Q_{s,max}$		θ_{max}	$\theta_{o,max}$	$Q_{s,max}$
	[°C]	[°C]	[W/m ²]		[°C]	[°C]	[W/m ²]
SUS	56.7	27.1	987.1	PCM	33.0	28.3	632.6
	60.3	28.3	661.5		51.4	27.5	945.9
	73.3	28.1	817.0		41.0	29.2	503.2
	52.0	25.0	646.7		33.6	29.3	810.4
	51.0	25.7	639.1		53.1	33.3	553.1
	46.6	23.0	698.6		44.2	23.7	769.3
	-	-	-		34.1	28.7	761.7

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

表 6.13 より，SUS ブラインドの表面温度は日射量が 987.1W/m^2 の時よりも 817.0W/m^2 のとき方が 16.6°C 高い値を示した。一方で外気温は後者の方が高く，ブラインドの表面温度は日射量だけではなく，外気温にも依存することが示唆される。

ブラインドの表面温度，外気温および鉛直面全天日射量の推移を図 6.35，図 6.36 に例示した。外部環境への暴露開始直後の PCM ブラインドの表面温度は，潜熱蓄熱の効果によって PCM の融解温度である 36.8°C 以下に抑制され，相変化が完了して液相になると再び上昇を始めている。

また，図 6.35，図 6.36 に示す日の午前中の外気温，日射量はほぼ等しいにも係わらず，正午頃の PCM ブラインド最高表面温度は SUS ブラインドに比べて大幅に低く，潜熱蓄熱による表面温度上昇の抑制効果が示唆される。

一方，SUS ブラインドの表面温度を従属変数，外気温および鉛直面全天日射量を説明変数とする重回帰分析を行い，SUS ブラインドの表面温度は，外気温と南面日射量によって精度よく予測できることを確認した。

回帰式を式(6.5)に，ブラインド表面温度の重回帰分析の結果を図 6.37 に示す。また，式(6.5)に外気温と日射量(25W/m^2 間隔, $0\sim 100\text{W/m}^2$)を与えて表面温度を予測値し，図中に外挿線として示した。

$$\theta_s = -38.612 + 2.861\theta_o + 0.375Q_s \quad (6.5)$$

θ_s : ブラインド表面温度 [$^\circ\text{C}$]

θ_o : 外気温 [$^\circ\text{C}$]

Q_s : 日射量 [W/m^2]

PCM ブラインドの表面温度を測定した図 6.36 に示す日の日射量と外気温を用いて SUS ブラインド表面温度の変動を式(6.5)から予測して，PCM ブラインドの表面温度の実測値と併せて図 6.38 に示す。

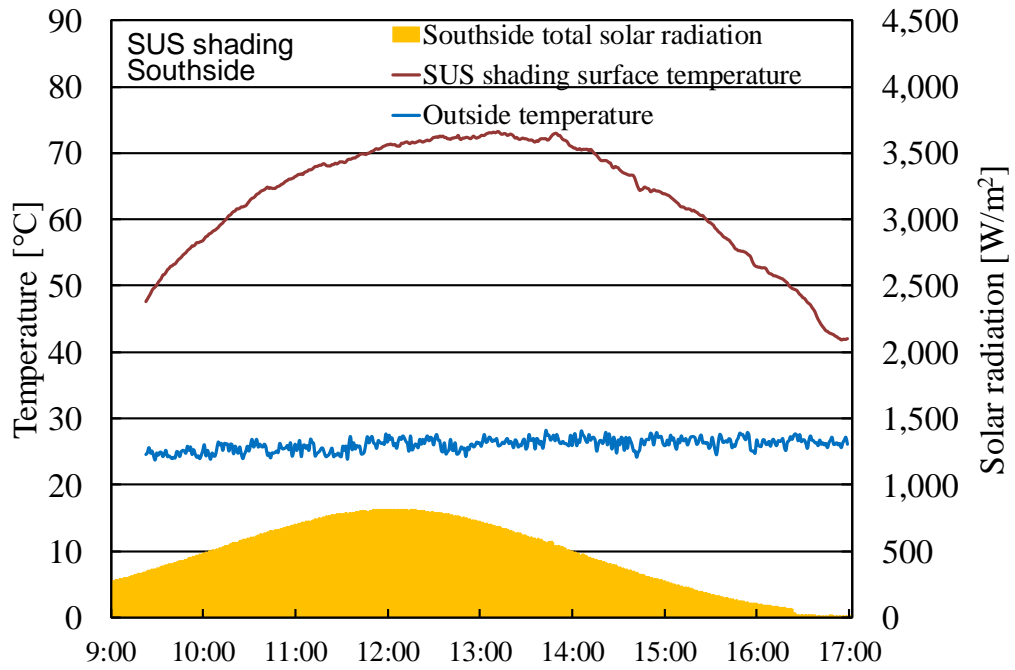


図 6.35 SUS ブラインドの表面温度

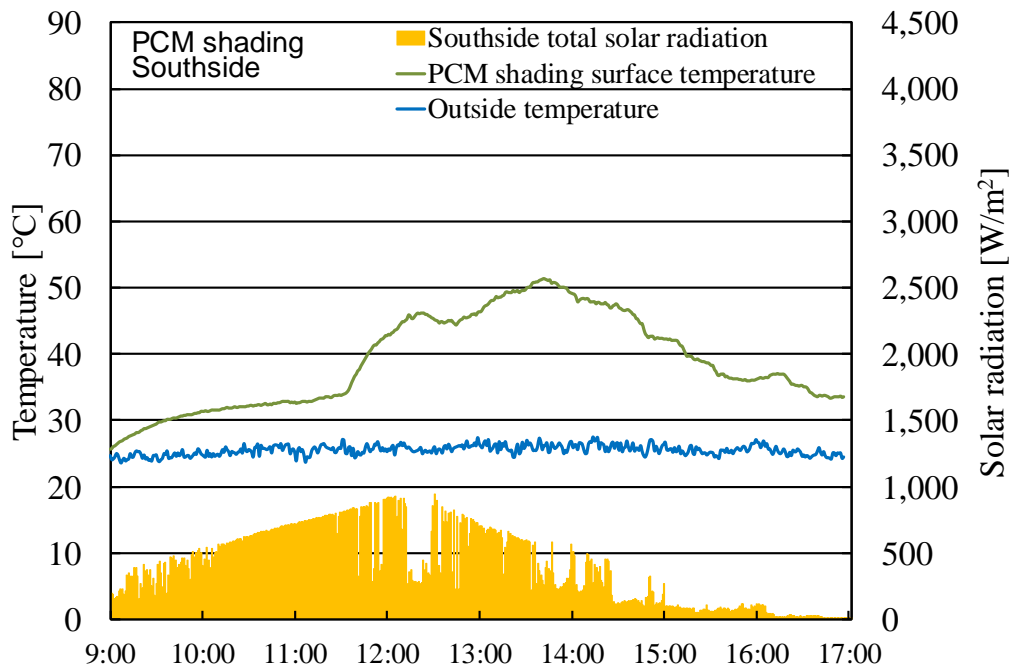


図 6.36 PCM ブラインドの表面温度

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

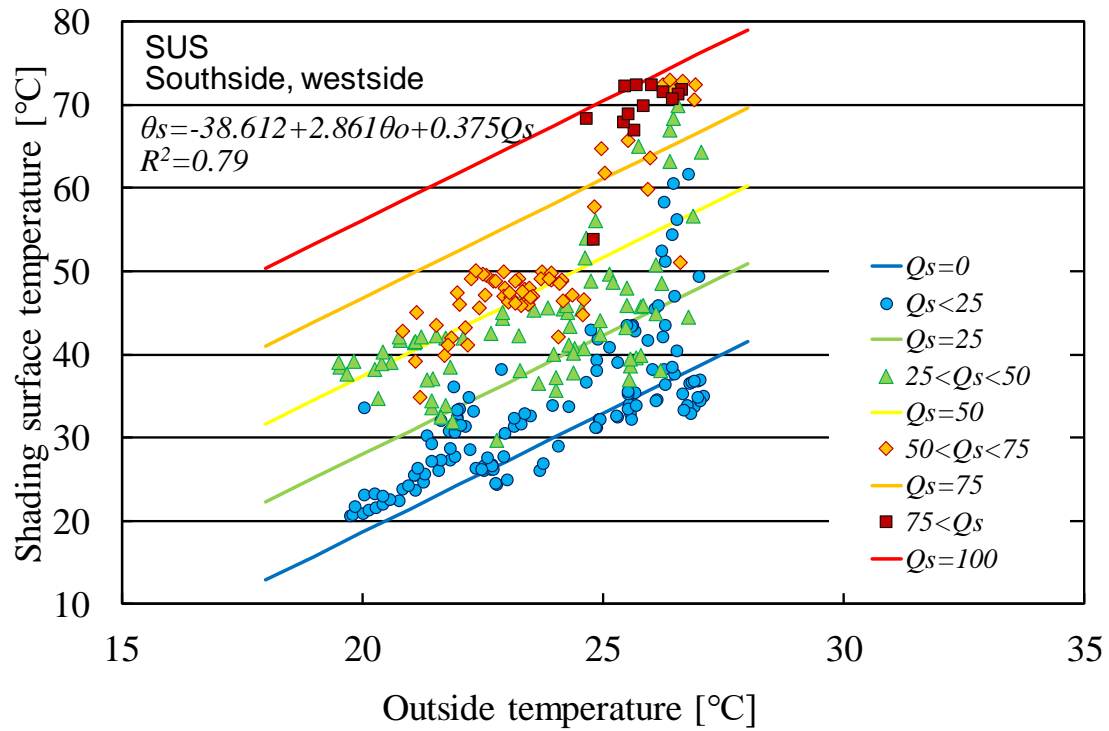


図 6.37 SUS ブラインド表面温度の重回帰分析

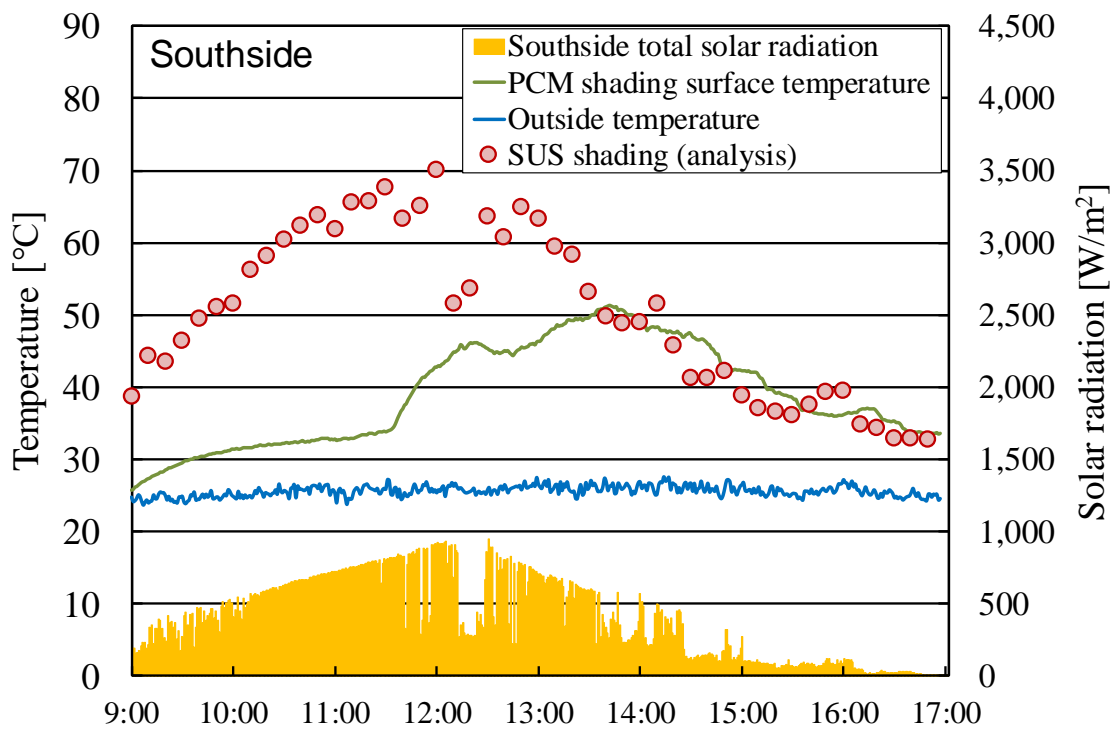


図 6.38 SUS ブラインドの表面温度予測

図中、午前中の SUS ブラインドの表面温度の推移は、午前中の日射量と外気温度がほぼ等しい図 6.35 で観測された測定結果と高い類似性を示している。

SUS ブラインドの相変化が終了する時刻における両表面温度の差は 35K 程度であった。また、17時から翌朝9時まで試験装置を屋内に移動してブラインドの温度変動を観測して、図 6.39 に示す。

図から PCM ブラインドの温度降下は PCM の相変化の様相を明示しており、同時に SUS ブラインドに比較してその降下が緩慢であることから、PCM ブラインドは夜間の換気駆動力を長時間保持する性能を有することが見て取れる。

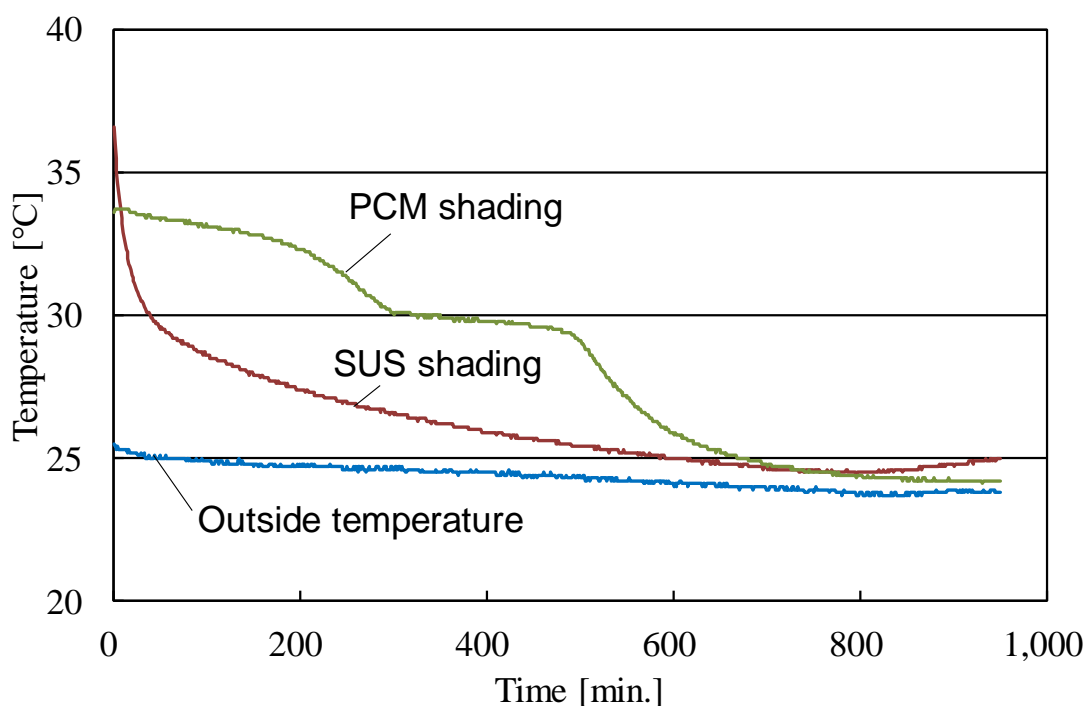


図 6.39 夜間ブラインド表面温度降下

c) PCM ブラインドの二次放射と相当日射熱取得率

ブラインドからの二次放射の影響を検討するため、ブラインド表面温度と試験装置内部(室内)の温度を測定し、鉛直面全天日射量との関係を整理することで相当日射熱取得率を求めた。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

ステファンボルツマンの法則によれば、すべての物体は絶対温度の 4 乗に比例する放射エネルギーを放射する。

簡単のため、ブラインドと室内表面との間にある空気のガス放射とガラスの反射、吸収を無視してブラインドと室内表面の放射エネルギーの差引量が室内への二次放射量を予測した。

ブラインド表面温度及び試験装置内部の壁面温度の測定結果にこの関係を導入すれば、ブラインドからの放射熱流束を予測することができる。相当日射熱取得率は、日射熱侵入量の鉛直面全天日射量に対する割合と定義して整理した式(6.6)。

$$\eta = Q_{st} / Q_{sv} \quad (6.6)$$

η : 相当日射熱取得率 [-]

Q_{sv} : 鉛直面全天日射量 [W/m²]

Q_{st} : 日射熱侵入量[W/m²]

図 6.40, 図 6.41 に相当日射熱取得率の予測値と鉛直面日射量の測定値を示す。図から PCM ブラインドの透過日射量は固液相領域において 0.1 以下と非常に低い値を示し、液相領域において徐々に上昇する傾向を示していることから、PCM の融点および充填量の設計が遮熱性能に大きな影響を与えることが予見できる。

一方、SUS ブラインドの相当日射熱取得率は 0.4 程度と一般的な資料³⁾にある内付ブラインドの値と同等であり、PCM ブラインドの環境調整効果の高さが示された。

図 6.42 に PCM ブラインドと SUS ブラインドの相当日射熱取得率を示す。なお、横軸はブラインドの種類及び装置の開口部設置方向を示している。

縦軸は、各測定日に観測された最大瞬時値である。PCM ブラインドの期間平均日射熱取得率は SUS ブラインドよりも平均 38%程度低減されている。

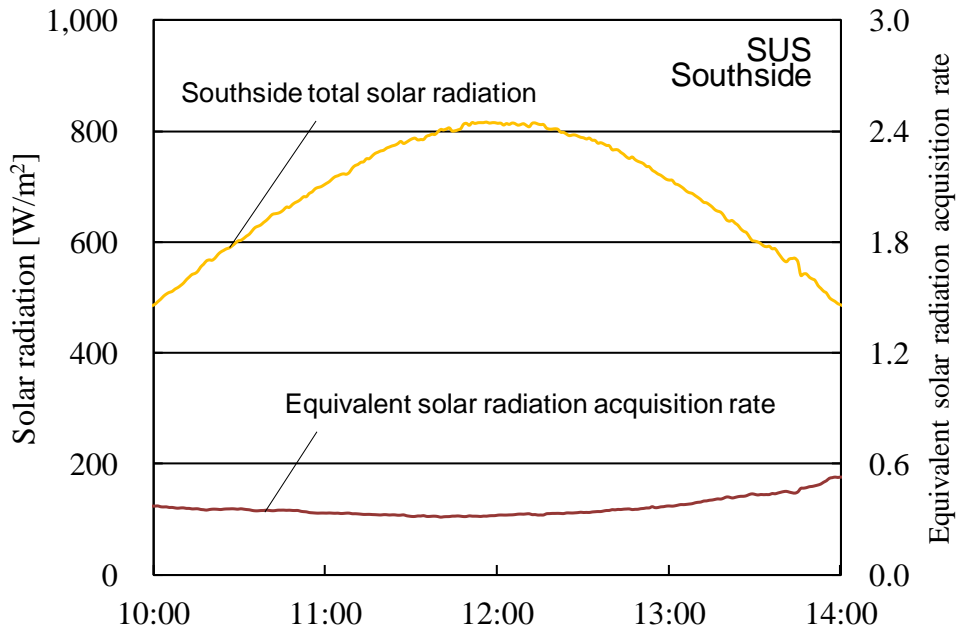


図 6.40 SUS ブラインドの相当日射熱取得率

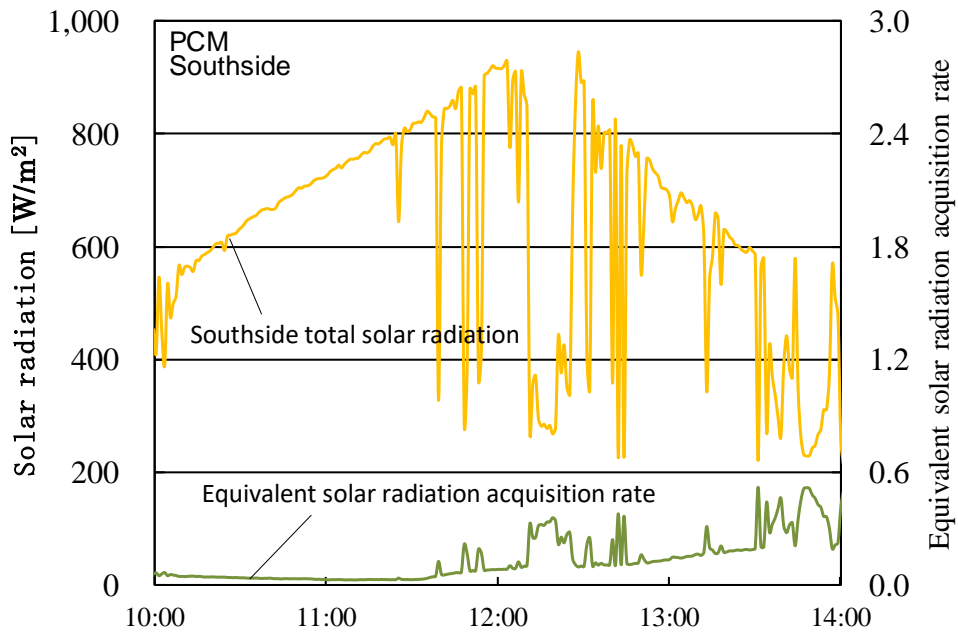


図 6.41 PCM ブラインドの相当日射熱取得率

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

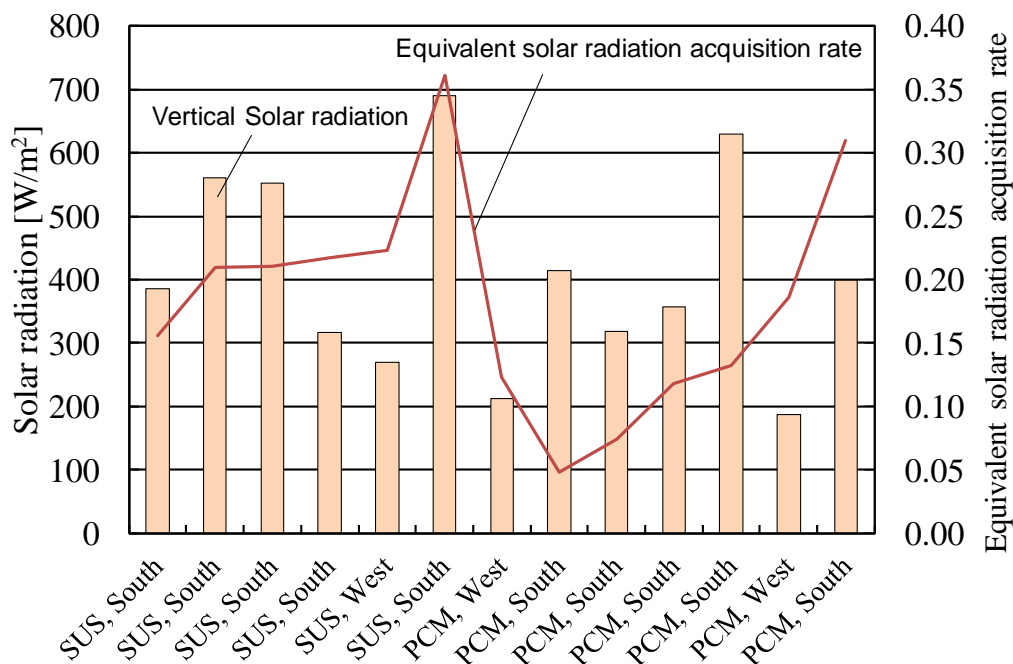


図 6.42 ブラインドの相当日射熱取得率

d) PCM ブラインドの夜間換気駆動力

前述のように、ダブルスキン内部に設置した PCM ブラインドには、昼間の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。

既往の研究^{6.12)}などでは、ダブルスキン内温度と外気温の差を用いた重力換気による換気駆動力の予測が行われているが、ブラインドの熱授受の影響を考慮した換気駆動力評価に関する研究は、これまで見られないようである。

ダブルスキン内部に PCM ブラインドを設置する場合、内外空気温度差による重力換気に加えて、ブラインドの自然対流の影響を考慮する必要がある。

本節では、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に図 6.43 に示す解析モデルを用いて以下の実験を実施した。

ブラインドの換気駆動力を予測するために、ダブルスキン内に設置した SUS ブラインドに面状電気ヒータ(830×830mm, 1P 100V 430W)を取付け、温度を一定に保ちながらダブルスキン上部に設けたスリット(w=100mm)の上部におい

て、噴流の速度分布および温度分布を測定した(写真 6.14)。

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($\phi=0.1\text{mm}$)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 として検査断面で各 40 点のデータを取得した。

噴流の流速と温度は 0.2 秒間隔で 3 分間記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($\phi=0.3\text{mm}$)を用いて測定し、測定時間中の平均値を代表室温として採用した。

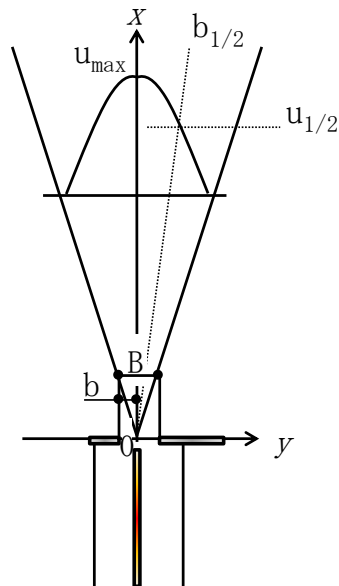


図 6.43 解析モデル



写真 6.14 トラバース装置とセンサ

既往の研究^{6.13), 6.14)}から、浮力噴流の軸上流速 u_{max} は式(6.7) で表現できる。最大流速を垂直平板の放熱量 Q_b で整理して図 6.44 に示すが、スリット上部の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 乗にほぼ比例している(式(6.8))ことから、ダブルスキン上部の流れは浮力噴流の特性を有しているといえよう。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

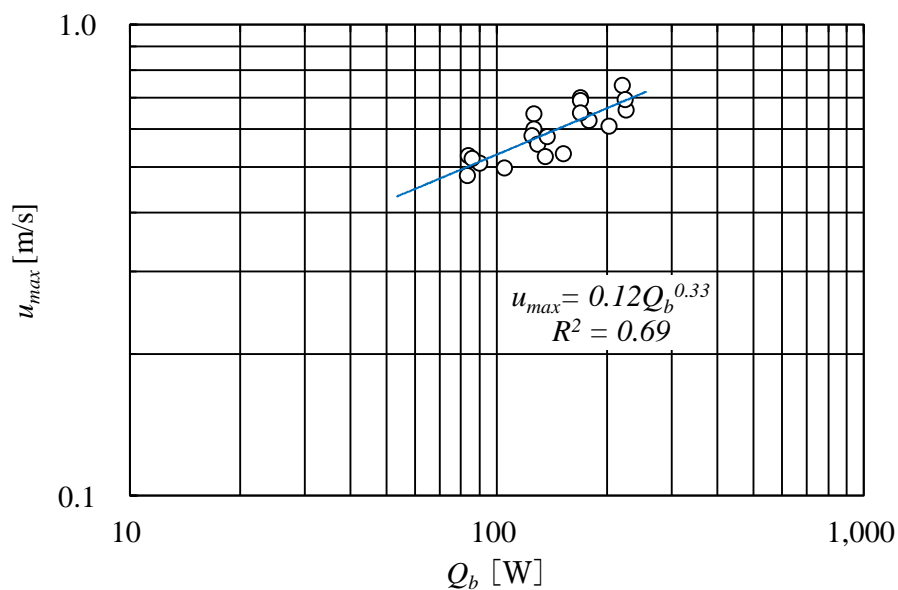


図 6.44 吹き出し噴流の軸上流速

$$u_{max} = 1.16 \cdot (K_p \cdot F_s)^{\frac{1}{3}} \quad (6.7)$$

$$u_{max} = 0.12 \cdot Q_b^{\frac{1}{3}} \quad (6.8)$$

u_{max} : 最大速度 [m/s]

K_p : 吹き出し定数 [-]

$$F_s = \frac{g \cdot \beta \cdot Q_0}{(c_a \cdot \rho)} \quad [(\text{m/s})^3]$$

Q_b : 加熱垂直平板からの対流放熱量 [W]

一方、浮力噴流の速度、温度分布に関する知見をもとに、吹き出し噴流の速度分布と温度分布の測定結果を最大流速、最大温度差、および各々の半値幅 ($b_{1/2,u}$, $b_{1/2,\Delta\theta}$) で無次元化して図 6.45, 図 6.46 に示す。

図から、速度および温度分布はブラインドの表面温度に係わらず相似形に保たれていることが分かる。また、検査断面がスリットの直上であることから、噴流の拡散係数は 1 となった。本実験で観測した噴流の速度分布、温度分布は式(6.9)および式(6.10)で示される。

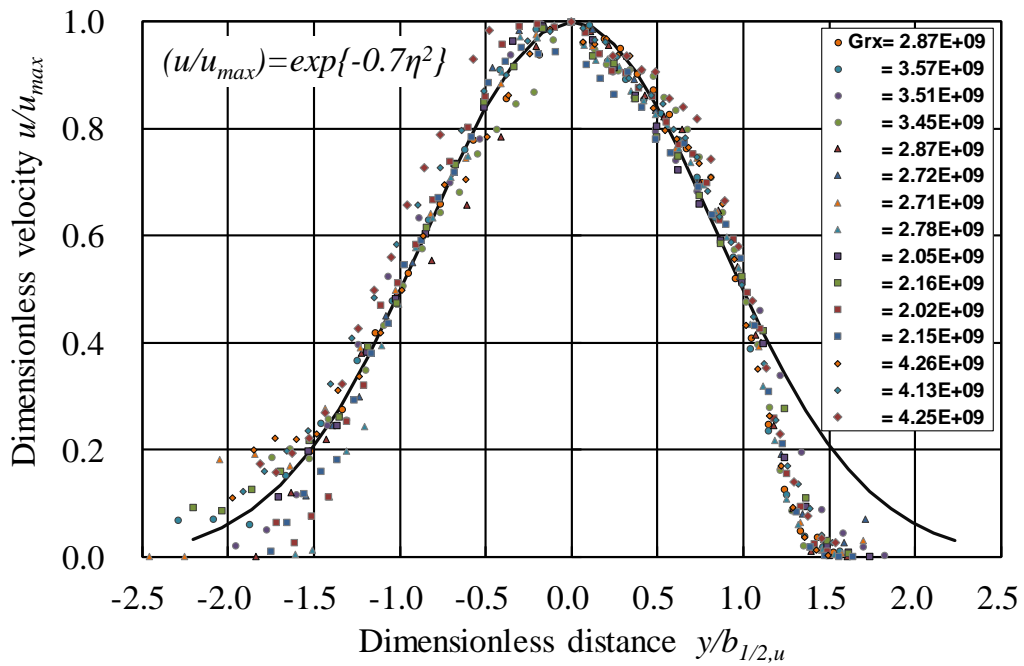


図 6.45 吹き出し噴流の速度分布

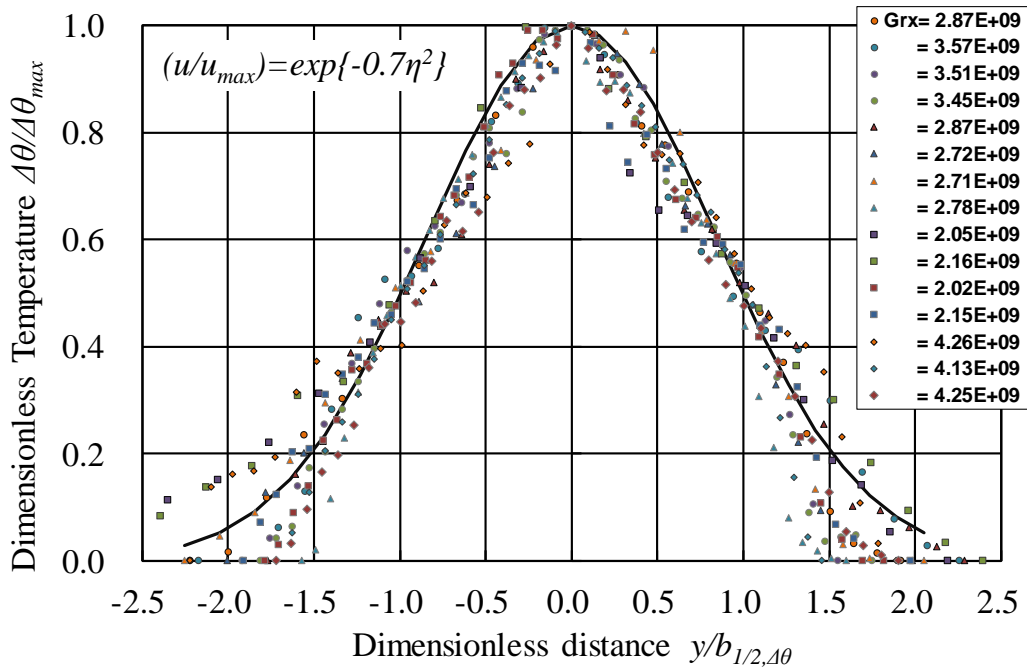


図 6.46 吹き出し噴流の温度分布

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

$$\frac{u}{u_{max}} = \exp \left\{ -0.7 \cdot \left(\frac{y}{b_{1/2}} \right)^2 \right\} \quad (6.9)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{max}} = \exp \left\{ -0.7 \cdot \left(\frac{y}{b_{1/2}} \right)^2 \right\} \quad (6.10)$$

$b_{1/2}$: 噴流の半値幅 [m]

θ_{max} : ブラインド表面最高温度 [°C]

吹き出し噴流の最大速度をグラスホフ数で整理して図 6.47 に示した。代表寸法にはブラインドの高さを採用している。回帰分析の結果から吹き出し流れの最大速度は式(6.11)で、最大温度差は式(6.12)で表現できる。また、検査断面における速度、温度差の半値幅をグラスホフ数で整理して図 6.48 に示すが、速度、温度の半値幅(式(6.13), (6.14))は、通常のブラインド使用温度の範囲においては、その温度に係わらず定数として扱うこともできよう(式(6.15))。

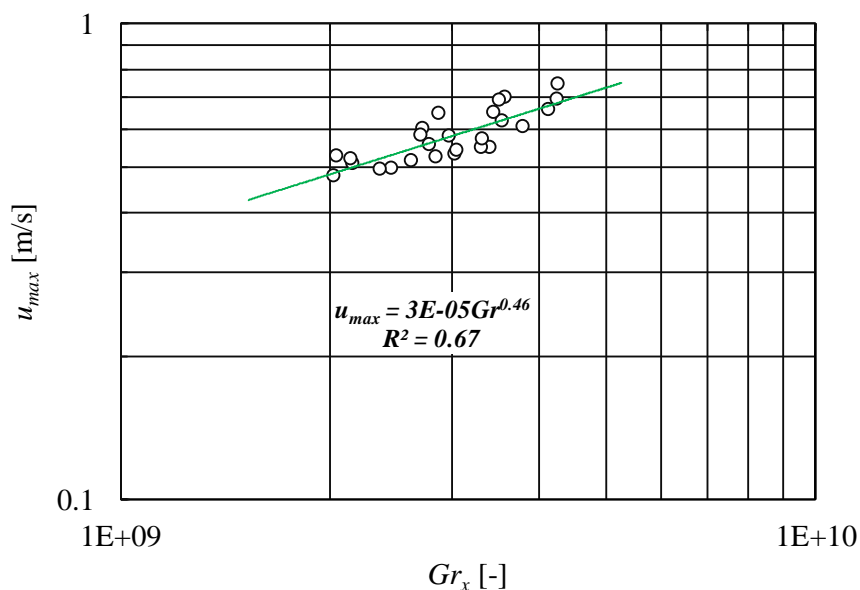


図 6.47 吹き出し噴流の最大速度

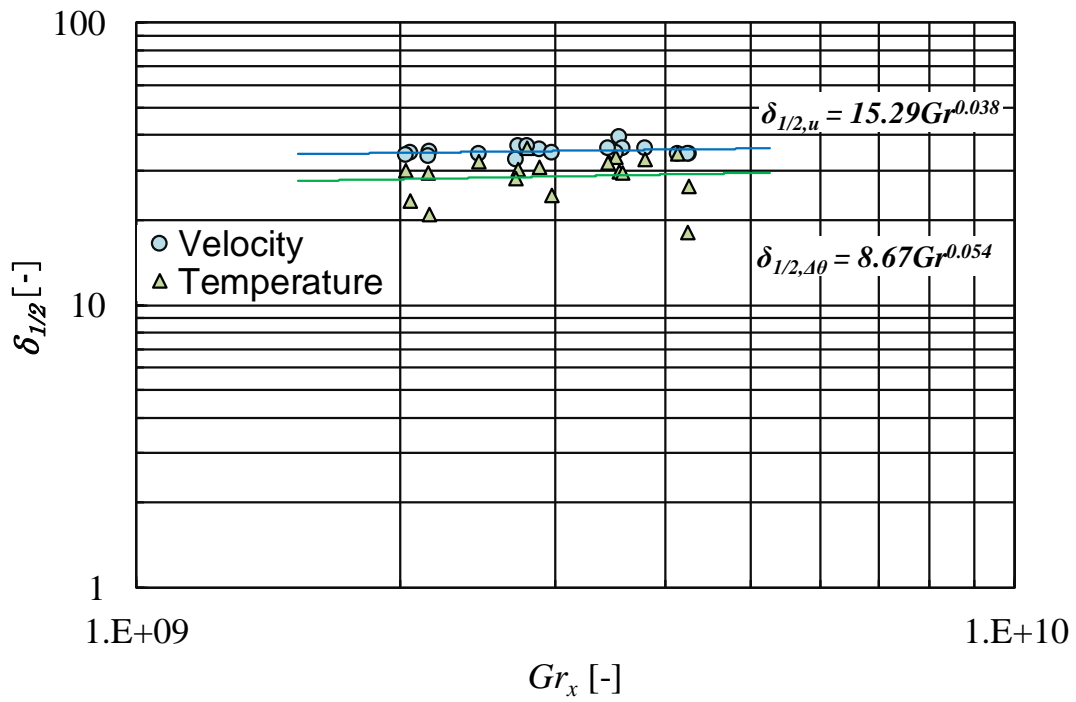


図 6.48 吹き出し噴流の半値幅

$$u_{max} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot Gr_x^{0.458} \quad (6.11)$$

$$\Delta\theta_{max} = 6 \cdot 10^{-7} \cdot Gr_x^{0.787} \quad (6.12)$$

$$y/b_{\frac{1}{2}u} = 15.29 \cdot Gr_x^{0.038} \quad (6.13)$$

$$y/b_{\frac{1}{2}\theta} = 8.67 \cdot Gr_x^{0.054} \quad (6.14)$$

$$b_{\frac{1}{2}u} = 0.035, b_{\frac{1}{2}\theta} = 0.028 \quad (\text{at } 40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}) \quad (6.15)$$

$$Gr : \text{グラスホフ数} = \frac{g \cdot \beta \cdot (\theta_s - \theta_a) \cdot h^3}{\nu^2}$$

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

PCM ブラインドが保有する換気駆動力は、検査断面を一秒間に通過する流体がもつ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 、熱量 Q および流量 V を、式(6.16), (6.17), (6.18)のように予測した。なお、いずれの計算も速度の半値幅を採用した。

$$\begin{aligned}
 M &= \int_{-b}^{+b} \rho_a \cdot u^2 dy \\
 &= \rho_a \cdot u_{max}^2 \cdot b_{\frac{1}{2}u} \cdot F_1 \\
 &= 5.49 \cdot 10^{-11} Gr_x^{0.916} \\
 &= 1.64 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\theta^{0.916} \cdot h^{2.748}
 \end{aligned} \tag{6.16}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_{-b}^{+b} c_a \cdot \rho_a \cdot u \cdot \Delta\theta dy \\
 &= c_a \cdot \rho_a \cdot u_{max} \cdot \Delta\theta_{max} \cdot b_{\frac{1}{2}\Delta\theta} \cdot F_2 \\
 &= 8.82 \cdot 10^{-13} Gr_x^{1.245} \\
 &= 1.3 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta\theta^{1.245} \cdot h^{3.735}
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

ただし、 $F_1 = F_2 = \int_{-\frac{b}{b_{\frac{1}{2}}}}^{+\frac{b}{b_{\frac{1}{2}}}} \left(\frac{u}{u_{max}}\right)^2 d\left(\frac{y}{\frac{b}{2}}\right) = 1.49$

$$\begin{aligned}
 V &= \int_{-b}^{+b} u dy \\
 &= u_{max} \cdot b_{\frac{1}{2}u} \cdot F_3 \\
 &= 2.22 \cdot 10^{-6} Gr_x^{0.458} \\
 &= 1.2 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta\theta^{0.458} \cdot h^{1.374}
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

ただし、 $F_3 = \int_{-\frac{b}{b_{\frac{1}{2}}}}^{+\frac{b}{b_{\frac{1}{2}}}} \left(\frac{u}{u_{max}}\right) d\left(\frac{y}{\frac{b}{2}}\right) = 2.11$

図 6.39 に示したブラインドの表面温度と外気温(設置場所の室温)との差(測定値)を式(6.17)に適用して、両ブラインドの排出熱量を予測して図 6.49 に示した。

また、室内に設置後 720 分間の測定結果の平均から、PCM ブラインドの換気力保持効果を予測して SUS ブラインドと比較したところ、4.0 倍の換気駆動力、6.7 倍の排出熱量、2.0 倍の流量が得られることが確認できた(表 6.14)。

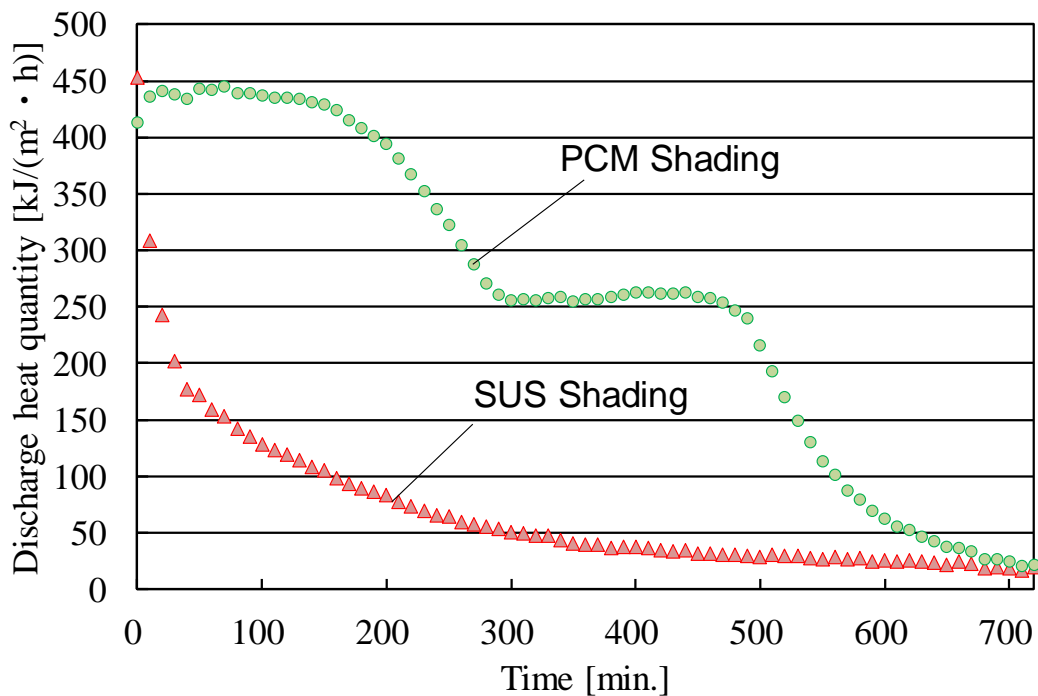


図 6.49 夜間換気駆動力

表 6.14 スリット上部の浮力噴流の特性

		PCM	SUS	PCM/SUS
ΣMt	kN/h	12	3	4.04
ΣVt	m ³ /h	55	28	1.98
ΣQt	kJ/h	138	21	6.65

6.3 摘要

開口部に蓄熱性能を付与するために新規の PCM 建材を提案し、熱的・光学的な性能評価試験を行った。

ゲル状 PCM は融解すると透明度が高くなり、固相域で約 0.1[-]程度であった透過率が、液相域では約 0.6[-]となった。また、固液相域における透過率は温度に依存しており、その関係は指数関数的であることを確認した。

蓄熱層形成に使用したアルミ角材はパラフィン融解を促進させるが熱損失も大きく、窓枠の断熱性を高める必要がある。PCM 窓を設置した室の暖房開始時刻はblankよりも 6 時間程度遅く、暖房時間を短縮できることを確認した。

PCM 窓による暖房量削減率は、期間平均値で 13.4%、最大値は 28.7%であった。また、室内環境改善効果として 3~5°C 程度過昇温の抑制が確認できた。PCM 窓の適用には固相時の光透過性の低下が課題となるが、引き違い窓とすることにより必要に応じて眺望も確保できる。また、透過光は拡散光となるためグレアの予防も期待できる。暑熱時のピークカット、シフト効果についても、今後報告する予定である。

また、融点の異なるゲル状 PCM および粒状 PCM を中空アルミブラインドに充填した試験体を周囲から加熱して、PCM ブラインドの蓄熱性能を定量化した。

粒状 PCM を充填したブラインドを実験棟の南面窓に外付けして受照時間帯の表面温度をblankと比較したところ、4~7°C の表面温度抑制効果が確認できた。また、透過日射量は 15~20 W/m² 程度抑制された。

粒状 PCM の充填により透過熱量が最大で 30%、期間平均で 13%減少し、期間透過熱量を 1,412 kJ/m² 削減できた。また、日照時間が 1 時間以上の日では、PCM ブラインドの透過熱量はblankよりも少なかった。アルミ製中空外付けブラインドの日射透過率は 0.12、PCM ブラインドの日射透過率は 0.1 程度であることを実験的に明らかにした。

事務所を想定した 3 分の 1 模型を屋外環境に暴露したところ、PCM ブラインドの表面温度は SUS ブラインドに比較して相変化終了時の瞬時値で 35K 程、インナーガラスの表面温度も 10K 程低くなることも観察されたことなどから、ダ

ブルスキン内部に設置した PCM ブラインドが夏期のペリメータゾーンの環境改善に有効であることが確認できた。夜間換気駆動力はブラインドのグラスホフ数の関数で表すことができることを示した。

夜間の温度降下が緩やかである PCM ブラインドの夜間換気駆動力をスリット上部の噴流の運動量で評価すると SUS ブラインドと比較して 4.0 倍となった。また、夜間排出熱量は 6.7 倍、流量は 2.0 倍得られることがわかった。

ただし、本実験で測定した透過熱量は可視光域から近赤外線領域の放射強度に限定されており、窓ガラスの放射・対流成分を含めた日射遮蔽性能の測定方法については今後も検討が必要である。

社会の持続可能性を高め、快適で健康的な都市環境を創造するためにはこれらガラス建築の外皮を高性能化する技術の開発と普及が急務であるといえ、ダブルスキンやエアフローウィンドウ、PCM 窓や蓄熱ブラインド等を利用したパッシブ年間空調システムに係る研究が促進されていくことが望まれる。

6. PCM を適用した開口部システムの性能試験

参考文献

- 6.1) Steinar Grynning, Francesco Goia, Egil Rognvik, Berit Time : Possibilities for characterization of a PCM window system using large scale measurements, International Journal of Sustainable Built Environment (2013) 2, pp.56–64, 2013
- 6.2) Esam M. Alawadhi : Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain, Energy and Buildings 47 (2012), pp.421–429, 2012
- 6.3) Francesco Goia, Marco Perino, Valentina Serra : Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems, Energy and Buildings 60 (2013) , pp.442–452, 2013
- 6.4) B.L. Gowreesunker, S.B. Stankovic, S.A. Tassou, P.A. Kyriacou : Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit , Energy and Buildings 61 (2013) , pp,239–249, 2013
- 6.5) Kamal A.R. Ismail, Carlos T. Salinas, Jorge R. Henriquez : Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows, Energy and Buildings 40 (2008), pp.710–719, 2008
- 6.6) 草間友花, 石戸谷裕二 : 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 81, 729, pp.932-938, 2016.11
- 6.7) 草間友花, 石戸谷裕二 : ゲル状潜熱蓄熱材を適用した開口部の熱的・光学的挙動に関する研究, 日本建築学会技術報告集 21(48), pp.715-718, 2015.6
- 6.8) 一ノ瀬雅之, 井上隆, 齊藤寛 : 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, pp.845-851. 2009.7
- 6.9) JIS A 4710 : 建具の断熱性試験方法, pp.467-471, 1996
- 6.10) 田中陽, 小林光 : PCM を用いた開口部におけるパッシブな温熱負荷抑制手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会 東北支部 第3回 学術・技術報告会論文集, pp.95-98, 2014.3
- 6.11) 好井宏介, 井上隆, 一ノ瀬雅之, 齊藤寛 : ブラインドを有する高性能窓システムの熱・光性能の計測手法に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1321-1322, 2007.7
- 6.12) 張本和芳, 田中拓也, 武田仁 : ダブルスキンシステムの構成部材の組み合わせによる熱的性能について : 実建物における比較実測, 空気調和・衛生工学会論文集, No.182, pp.37-42, 2012.5

- 6.13) 石戸谷裕二：室内気計資料(改定 2 版), ピーエス(株), 2006.6
- 6.14) 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, pp.35-41, 1979.9
- 6.15) 草間友花, 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材を適用した蓄熱ブラインドによる日射利用空調システムに関する研究(第 1 報)ダブルスキン内に設置した蓄熱ブラインドの日射遮蔽効果及び夜間換気駆動力, 空気調和・衛生工学会論文集 (218), pp.11-18, 2015.5
- 6.16) 草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宇佐美大将：潜熱蓄熱材を適用した蓄熱ブラインドによる日射利用空調システムに関する研究(第 2 報)融点及び形態の異なる蓄熱材を充填した蓄熱ブラインドの熱特性, 空気調和・衛生工学会論文集 (224), pp.1-8, 2015.11
- 6.17) 草間友花, 石戸谷裕二：可搬型日射蓄熱暖房器の負荷抑制効果に関する研究, 第 1 報—基本的熱性能試験及びプロトタイプの日射利用特性, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 241, pp.29-36, 2017.4

本章は, 既発表論文^{6.7), 6.15), 6.16), 6.17)}を取りまとめ, 加筆修正を加えたものである。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

7.1	非定常熱負荷計算の概要	242
7.1.1	数値計算の概要	
7.1.2	計算値と実測値の比較	
7.2	簡易熱箱モデルによる PCM 内装左官材の空調負荷削減効果	248
7.2.1	簡易熱箱モデルの概要	
7.2.2	連続運転時における融解挙動ごとの各地での顕熱負荷の算出	
7.2.3	寝室スケジュール運転時における融解挙動ごとの各地での 顕熱負荷の算出	
7.2.4	リビングスケジュール運転時における融解挙動ごとの各地での 顕熱負荷の算出	
7.3	断熱性能の違いによる効果	279
7.4	摘要	286

参考文献

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

近年、住宅の高断熱・高気密化に伴い、室の快適性・省エネルギー性の観点から、建築物の熱的性能が向上しつつあるものの、過昇温や過乾燥への対策は十分とは言い難く、前章でも述べたように、日中の日射受熱に伴う過度な温度上昇を抑制する手法として、PCM を適用した蓄熱建材に関する研究が国内外で盛んに行われている。

特に、PCM が室内に与える影響については、佐藤ら^{7.1)}が冬季の暖房負荷抑制効果について詳細に明らかにしており、PCM のピーク融点が設定室温に近い程、蓄熱量が多いほど、施工面積が大きい程、省エネルギー効果が高いことを明らかにした。

また、添田ら^{7.2~7.4)}の研究では、PCM 壁ボードの室内環境調整効果について過冷却現象も含めた数値計算を行い、各地における標準住宅モデルの省エネルギーと快適性について詳細な検討を行った。

ただし、断熱性能が北方型住宅レベルでの、各地における PCM 建材の効果に関して検討された例は少なく、比熱の取り扱いや融点・設計室温をパラメータとした PCM 建材の評価・設計方法は現在までのところ確立されていない。

また、沖縄などの温暖地に求められる理想的な融解挙動については明らかではない。

本論文における第2章から第5章では、PCM 内装左官材の基本的な性能試験及び室内環境に与える影響について検討を行った。第2章から第5章では現存の PCM を用いた実験的な検討を行ってきたが、融点や融解幅を含めた理想的な融解挙動に関して、地域特性を考慮した通年での効果については明らかではない。

本章では、簡易熱箱モデルを用いて、断熱性能・融解挙動をパラメータとした数値計算により、年間顕熱負荷を算出することで、地域ごとの最適な融解挙動について検討を加える。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

7.1 非定常熱負荷計算の概要

7.1.1 数値計算の概要

既往文献^{7.5)}を参考に、一次元非定常熱伝導方程式を差分化し、陽解法により自然室温及び暖房負荷を算出した。壁体の空間座標に関する概念図を図 7.1 に示す。また、壁体の微分方程式を式(7.1)に、空間の微分方程式を式(7.2)に示す。室外側の境界条件を式(7.3)に示す。室内側の境界条件を式(7.4)に示す。平均放射温度は、各面の面積加重平均温度から算出した。また、躯体と空間の差分方程式を式(7.5)及び(7.6)に示した。設定室温を維持するための顕熱負荷を式(7.7)に示す。

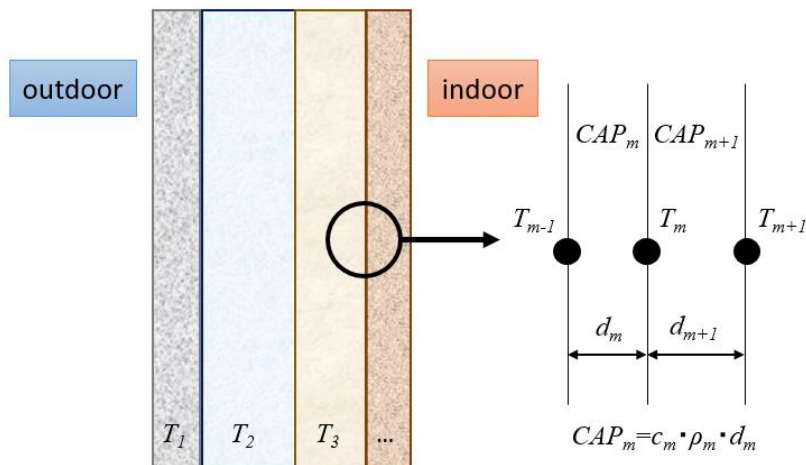


図 7.1 壁体空間座標概念図

$$\frac{\partial(CAP \cdot T)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7.1)$$

$$CAP_{in} \cdot \frac{dT_{in}}{dt} = \sum A \cdot \alpha_c \cdot (T_{MRT} - T_{in}) + c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot n \cdot V_{in} \cdot (T_{out} - T_{in}) + HG_c - HS^* \quad (7.2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_i (T_{S1} - T_{MRT}) \quad (7.3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_c (T_{in} - T_{S2}) + \alpha_r (T_{MRT} - T_{S2}) + s_x \cdot \frac{Q_{gain}}{A_{gain}} + s_y \cdot \frac{HG_r}{A_{HG}} \quad (7.4)$$

$$\frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{R_{m+1}} (T_{m+1}^n - T_m^n) - \frac{1}{R_m} (T_m^n - T_{m-1}^n)}{0.5 (CAP_m^{**} + CAP_{m+1}^{**})} \quad (7.5)$$

$$CAP_{in} \cdot \frac{T_{in}^{n+1} - T_{in}^n}{\Delta t} = \sum A \cdot \alpha_c (T_{MRT}^n - T_{in}^n) + c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot n \cdot V_{in} \cdot (T_{out}^n - T_{in}^n) + HG_c^n - HS^{*} \quad (7.6)$$

$$HS^{*} = (T_{in,set} - T_{in}^{n+1}) \cdot CAP_{in} / dt \quad (7.7)$$

CAP : 熱容量 [J/K]

T : 温度 [°C]

λ : 熱伝導率 [W/(m · K)]

t : 時間 [s]

x : 空間間隔 [m]

A : 各面積 (壁, 床, 天井, 窓) [m²]

α : 熱伝達率 [W/(m² · K)]

T_{MRT} : 平均放射温度 [°C]

c : 比熱 [J/(kg · K)]

ρ : 密度 [kg/m³]

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

n : 換気回数 [ACS (air changes per seconds)]

HG : 内部発熱 [W/m^2]

V : 室容積 [m^3]

HS : 顕熱負荷 [W/m^2]

T_{in} :

T_{S1} : 室外側表面温度 [$^{\circ}C$]

T_{S2} : 室内側表面温度 [$^{\circ}C$]

R : 熱抵抗 [$^{\circ}C/W$]

T_{SAT} : 相当外気温度 [$^{\circ}C$]

s_x : 透過日射の吸収率 [-]

s_y : 内部発熱の吸収率 [-]

($s_x = s_y = 0.7A / \Sigma A$)

Q_{gain} : 透過日射量 [W/m^2]

添字

n : 時間座標

m : 空間座標

in : 室内

out : 室外

c : 対流成分

r : 放射成分

air : 空気

in,set : 設定室温

注

* 暖房負荷は符号が負となる。

** PCM 層の熱容量は温度によって変動する。

7.1.2 計算値と実測値の比較

数値計算の精度を確認するために第3章～第6章で用いた実験棟と同条件で、数値計算を行い、精度の検証を行った。

本章の精度検証に採用した実験棟とPCM内装左官材の概要は表7.1に示すとおりであり、実験棟の概要は前章で述べた通りであるが、PB室は一般的な高断熱・高気密住宅を模擬したPCMの入っていない室であり、PCM室はPB室にPCM内装左官材が施工された室の名称である。

PCMの比熱は、図7.2に示す蓄熱量を固相、液相、固液相ごとに多項近似したものを微分することで与えた。測定方法は第2章で提案した対流加熱法を採用した。

本章で取り扱うPCMは脂肪酸エステル系潜熱蓄熱材 (JSR(株)製 CALGRIP) であり、融点 23°C、潜熱量は 140kJ/kg である。

図7.2の温度毎の傾きから、潜熱蓄熱材を一部に含む建材の見かけの比熱を求めた結果を図7.3に示す。ピーク融点は28°C程度で、10°C～28°Cの間で相変化される材料であることが分かる。

なお、本章ではヒステリシスについては考慮しないこととし、加熱時のみの値を数値計算に与えることとした。計算に用いた条件を表7.2に示す。

表 7.1 実験棟の概要

名称	PB室	PCM室
寸法 [mm]	W2,080×D2,070×H2,400	
潜熱蓄熱材	-	脂肪酸エステル
融点 / 凝固点 [°C]	-	23/22
潜熱量 [kJ/kg]	-	140
PCM施工量 [kg]	-	30
窓仕様	高性能トリプルガラス樹脂窓	
窓寸法 [mm]	W1,400×H1,870	
U_A/U_w 値 [W/(m ² ・K)]	0.24 / 1.17	

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

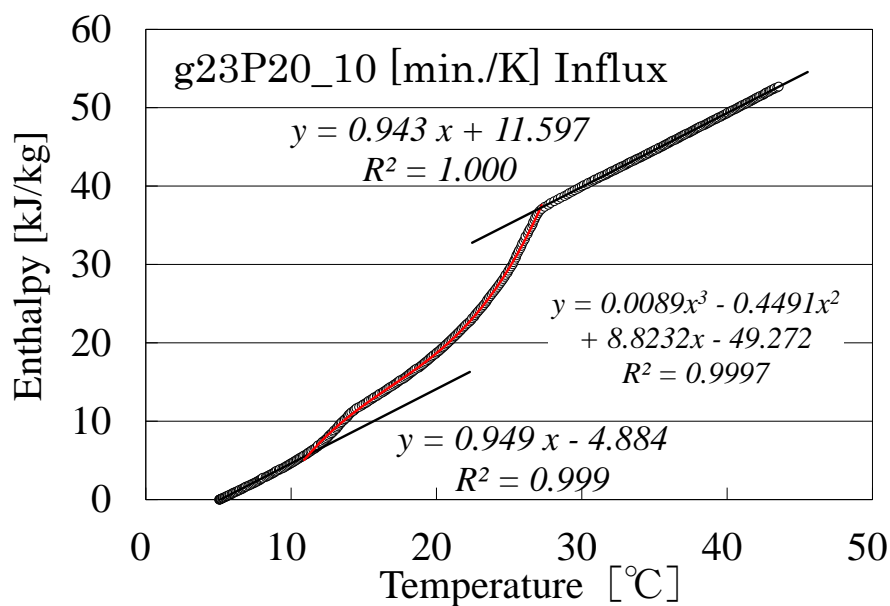


図 7.2 蓄熱量測定結果

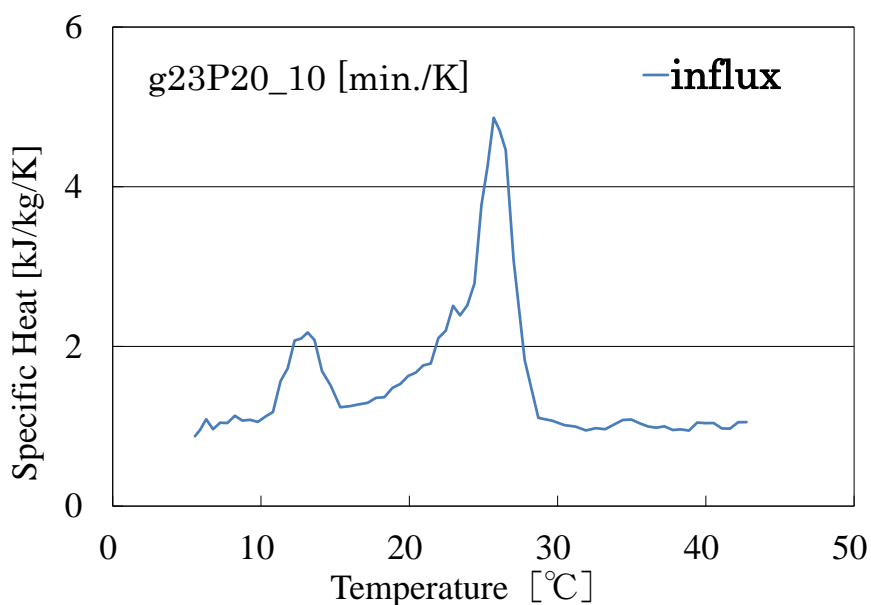


図 7.3 見かけの比熱

PB 室と PCM 室の自然室温の計算結果を、外気温、透過日射量及び室温の実測値と合わせて図 7.4 に示す。PCM 内装左官材の温度は両表面温度を平均して与えた。図より、PB 室、PCM 室の室温は、どちらも概ね精度よく予測できたといえる。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

表 7.2 物性値

時間間隔	30s	物性	比熱 [kJ/(kg・K)]	密度 [kg/m ³]
総合熱伝達率	8.6 [W/(m ² ・K)]	石膏ボード	750	1.2
放射熱伝達率	5 [W/(m ² ・K)]	グラスウール16K	16	1.03
対流熱伝達率	3.6 [W/(m ² ・K)]	グラスウール24K	24	1.03
換気回数	0 [回/h]	押出法ポリスチレン フォーム	25	1.45
内部発熱	0 [W]	合板	551	2.1
壁の日射吸収率	0.7 [W/(m ² ・K)]	空気	1.176	1.006
ふく射率	0.9	窓の日射吸収率	0.3 [W/(m ² ・K)]	
屋外側熱伝達率	23 [W/(m ² ・K)]	照明による発熱	0 [W]	
曇量	10	ステファンボルツマン定数	5.67×10E-8 [W/(m ² ・K ⁴)]	

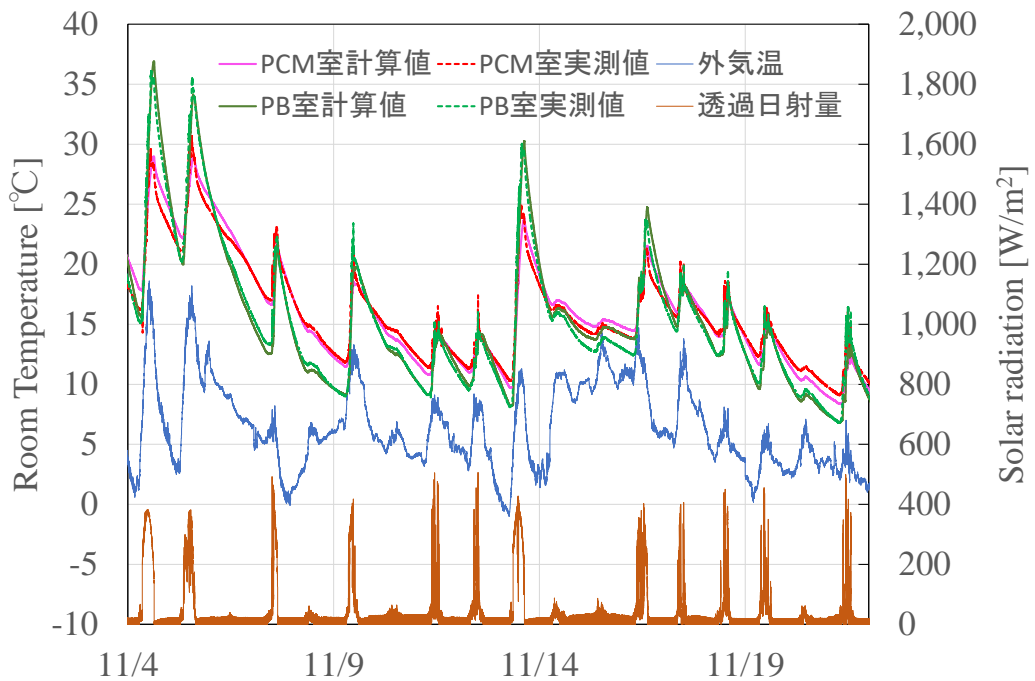


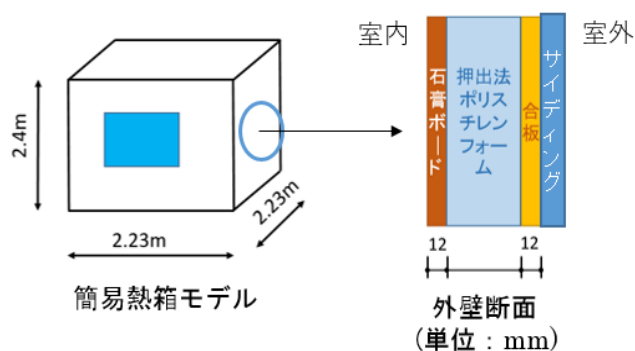
図 7.4 実測値と解析値(室温)

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

7.2 簡易熱箱モデルによる PCM 内装左官材の空調負荷削減効果

7.2.1 簡易熱箱モデルの概要

本節では、図 7.5 に示す簡易熱箱モデルを想定し、融解挙動ごとの特性について明らかにする。



< 断面構成 >

石膏ボード (内装下地材) : PB

断熱材 : 押出法ポリスチレンフォーム : FP

合板 (外装下地材) : CP

外装材→サイディング15mm (天井: ガルバリウム鋼板)

図 7.5 簡易熱箱モデルの概要

本章で取り扱う簡易熱箱モデルは、断面構成が石膏ボード、断熱材(押出法ポリスチレンフォーム)、合板、外装材からなる実証実験棟と同規模のモデルである。壁、床、天井はすべて外気に接していると仮定し、断熱性能、PCM の融解挙動ごとの効果を明らかにする。換気回数は 0 とした。また、南面に設置した窓面積は 1.96m^2 とした。

簡易熱箱モデルの熱回路網を図 7.6 に示す。また、図中の節点番号ごとの熱平衡式と節点温度算出式を式(7.8)～式(7.16)に示す。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

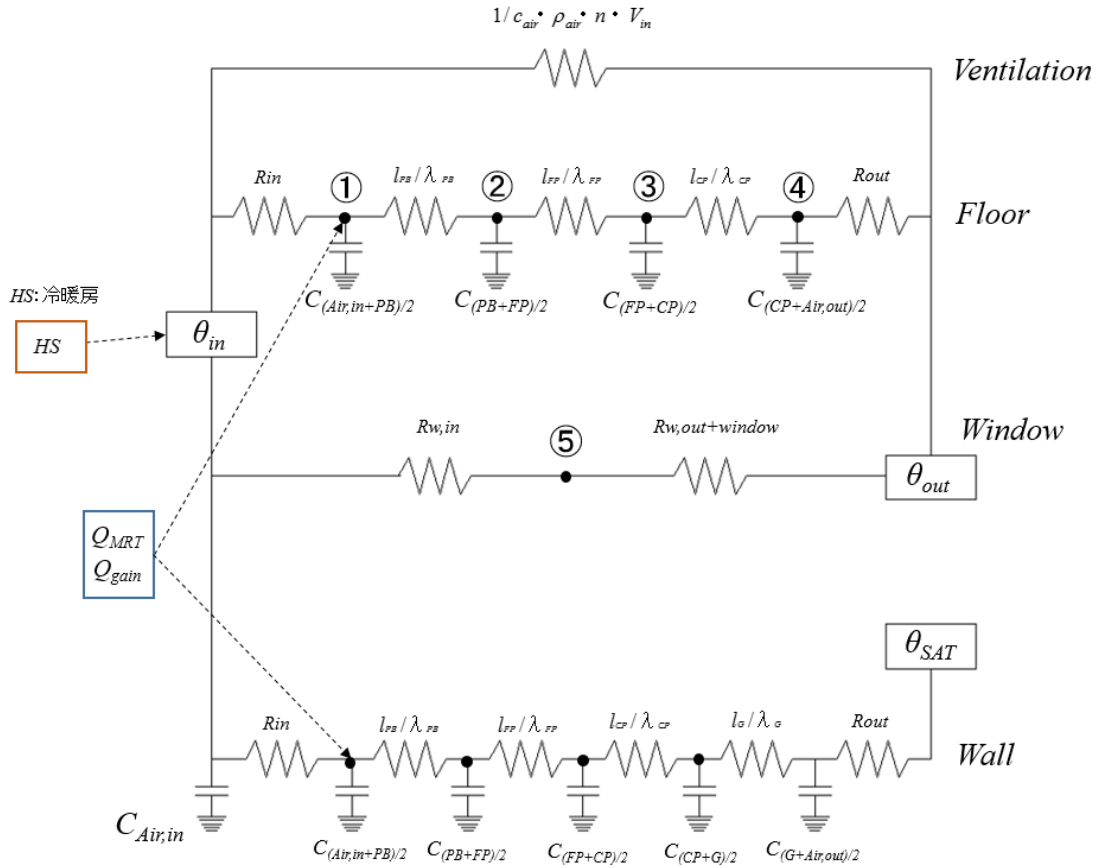


図 7.6 簡易熱箱モデルの熱回路網

① : 熱平衡式

$$CAP_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = Q_{PB} - Q_{in} - Q_{rad, in} \quad (7.8)$$

① : 節点温度算出式

$$T_1^n = \frac{\Delta t}{C_{(Air, in+PB)/2} R_{PB}} \left(T_{in}^{n-1} \frac{\alpha_r}{\alpha_i} + T_{MRT}^{n-1} \frac{\alpha_c}{\alpha_i} + \frac{RS^{n-1}}{\alpha_i} \right) + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{(Air, in+PB)/2} R_{PB}} - \frac{\Delta t}{C_{(PB+FP)/2} R_{Air, in}} \right) T_1^{n-1} + \frac{\Delta t}{C_{(Air, in+PB)/2} R_{Air, in}} T_2^{n-1} \quad (7.9)$$

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

②：熱平衡式

$$CAP_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = Q_{FP} - Q_{PB} \quad (7.10)$$

②：節点温度算出式

$$T_2^n = \frac{\Delta t}{C_{(PB+FP)/2} R_{FP}} T_1^{n-1} + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{(PB+FP)/2} R_{FP}} - \frac{\Delta t}{C_{(PB+FP)/2} R_{PB}} \right) T_2^{n-1} + \frac{\Delta t}{C_{(PB+FP)/2} R_{PB}} T_3^{n-1} \quad (7.11)$$

③：熱平衡式

$$CAP_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = Q_{CP} - Q_{FP} \quad (7.12)$$

③：節点温度算出式

$$T_3^n = \frac{\Delta t}{C_{(FP+CP)/2} R_{CP}} T_2^{n-1} + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{(FP+CP)/2} R_{CP}} - \frac{\Delta t}{C_{(FP+CP)/2} R_{FP}} \right) T_3^{n-1} + \frac{\Delta t}{C_{(FP+CP)/2} R_{FP}} T_4^{n-1} \quad (7.13)$$

④：熱平衡式

$$CAP_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = Q_{out} - Q_{CP} + Q_{SAT} \quad (7.14)$$

④：節点温度算出式

$$T_4^n = \frac{\Delta t}{C_{(CP+Air,out)/2} R_{Air,out}} T_3^{n-1} + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{(CP+Air,out)/2} R_{Air,out}} - \frac{\Delta t}{C_{(CP+Air,out)/2} R_{CP}} \right) T_4^{n-1} + \frac{\Delta t}{C_{(CP+Air,out)/2} R_{CP}} T_{SAT}^{n-1} \quad (7.15)$$

⑤：窓の節点温度算出式

$$T_5^n = \left(1 - \frac{U_w}{\alpha_i} \right) \left(T_{in}^{n-1} \frac{\alpha_r}{\alpha_i} + T_{MRT}^{n-1} \frac{\alpha_c}{\alpha_i} \right) + \frac{U_w}{\alpha_i} \left(\frac{Q_{GA}}{U_w} - \frac{\varepsilon F_s R N}{\alpha_o} + T_{out}^{n-1} \right) \quad (7.16)$$

CAP : 材の熱容量 [J/K]

R : 抵抗 [$m^2 \cdot K / W$]

α_i : 総合熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$]

α_o : 屋外側熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$]

U_w : 窓の熱貫流率 [$W/(m^2 \cdot K)$]

Q_{GA} : 吸収日射による熱取得 [W/m^2]

ε : ふく射率 [-]

F_s : 形態係数 [-]

RN : 夜間ふく射量 [W/m^2]

7.2.2 連続運転時における融解挙動ごとの各地での顕熱負荷の算出

本節では、各地での融解挙動ごとの効果を確認し、最適融点について検討を加える。冬季の最適融点については、佐藤ら^{7.1)}が設定室温とピーク融点が近い程省エネルギーであることを明らかにしているが、夏季の最適融点や温暖地に求められる融解形状などについては明らかではない。

地域の代表値として日本の都市の中心部である東京(東京都)、寒冷地の札幌市(北海道)、温暖地の那覇市(沖縄県)における融解挙動ごとの年間顕熱負荷を算出することで、各地での最適融点について検討を加える。

空調負荷には、顕熱負荷と潜熱負荷があるが、本章ではPCM建材の比熱の特性による違いに着目するため、顕熱負荷のみを取り扱うこととしている。

本来の現象としては、PCM建材の母材となる物質の吸放湿の影響を受け、室内環境に影響を与えることが考えられ、例えばPCM内装左官材であれば、母材の石膏や漆喰の吸湿性能などの影響が室内相対湿度に影響を与えることが考えられる。顕熱負荷のみを扱うことで、加湿や除湿にかかる負荷への検討が制限されるが、建材からの水分移動は考慮せず、室内の相対湿度は成行として取り扱うこととした。

なお、冷房期間は拡張アメダス気象データの冷房デグリーデーD24-24の期間と、暖房期間は暖房デグリーデーD18-18の期間とした。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

設定室温は、「住宅事業主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説」を参考に、夏季 27°C、冬季 20°C とした。自然室温が設定室温を超えた時に負荷が生じるものとし、冷房負荷及び暖房負荷は式(7.7)から算出した。

PCM に与えた比熱は、図 7.7 に示すような矩形の融解融解挙動を持つもので、融解幅 1~7°C、融点 16.5°C から 28.75°C までを検討する。蓄熱量は n-paraffin の物性値を参考に、170kJ/kg とした。

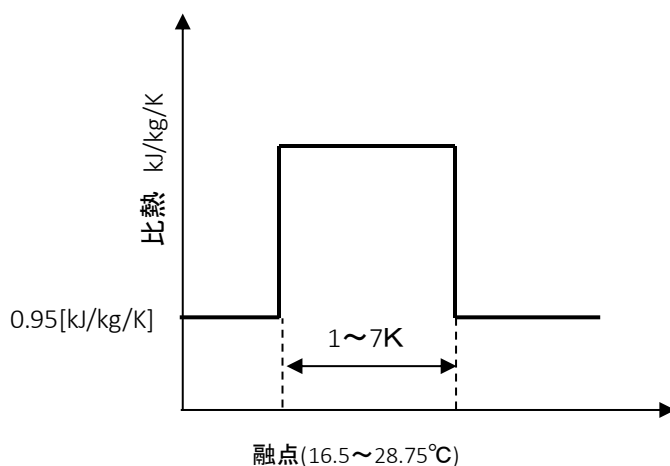


図 7.7 矩形の融解挙動

a) 東京

東京の夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.8 及び図 7.9 に示す。図中の凡例は、融解幅を示している。図より、夏季、冬季ともに PCM 内装左官材の負荷削減効果が確認でき、融解幅が大きいほど低い融点である方が省エネルギー効果が高いことがわかる。冬季はまた、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.10 に示す。各図中の黒線は PCM が入っていないときの顕熱負荷を示している。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.11 に示す。

東京は、暖房負荷が支配的であることを考えると、冬季の設定室温と融点が近いほど、年間での省エネルギー効果が高くなることがわかる。PCM の融解幅は材料物性により決定されるため、融点のみならず、融解幅も合わせた上で PCM の選定を行うことが求められている。

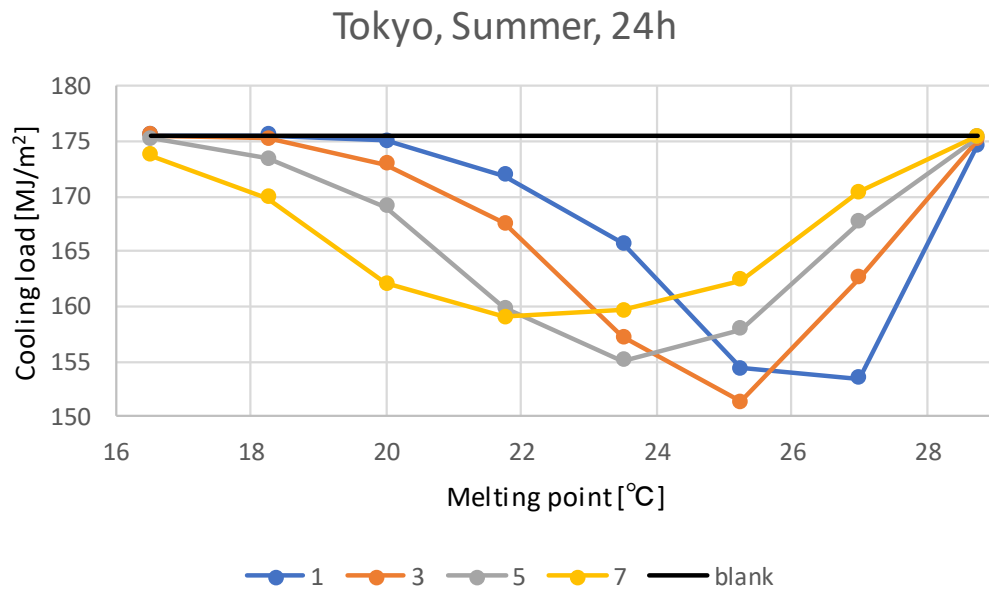


図 7.8 連続運転時の東京の冷房負荷

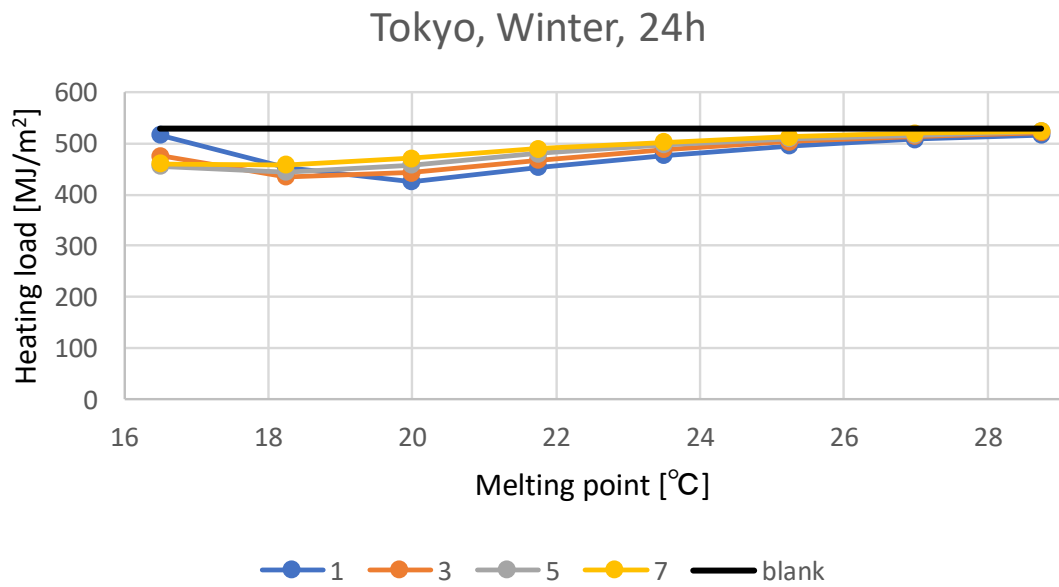


図 7.9 連続運転時の東京の暖房負荷

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

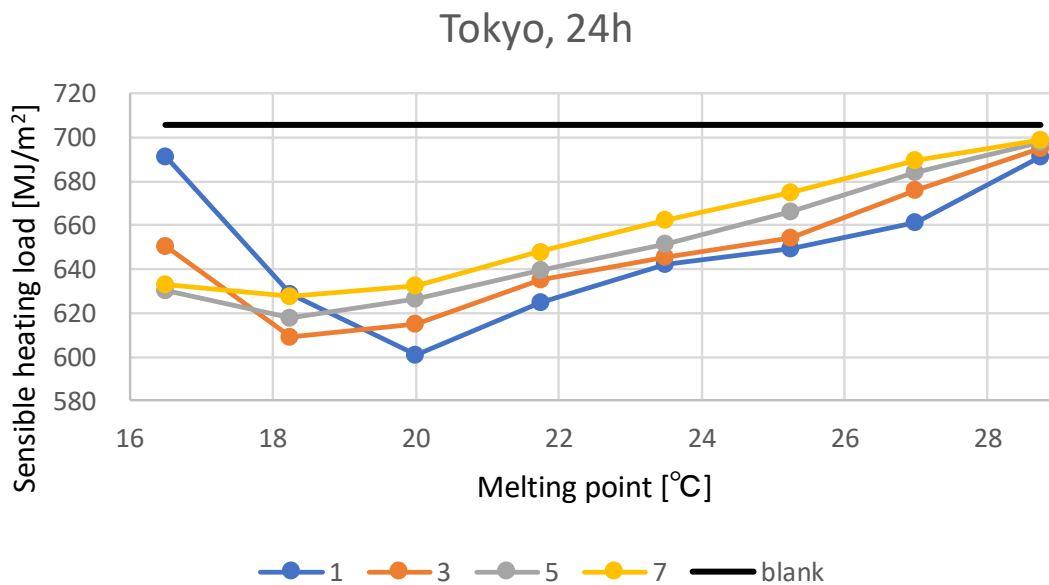


図 7.10 連続運転時の東京の通年での顕熱負荷

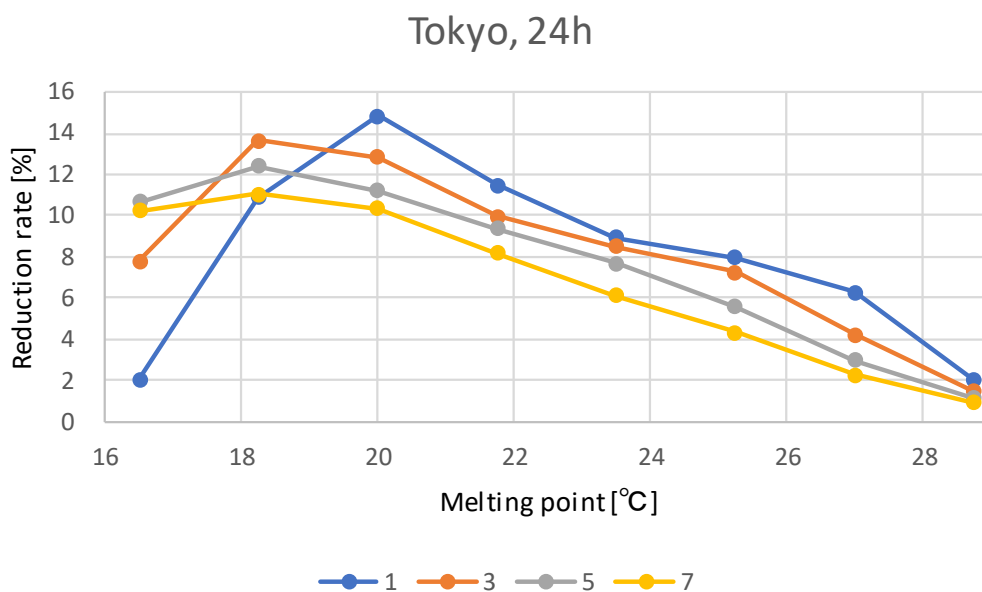


図 7.11 連続運転時の東京の削減率

また、融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.12 に示す。

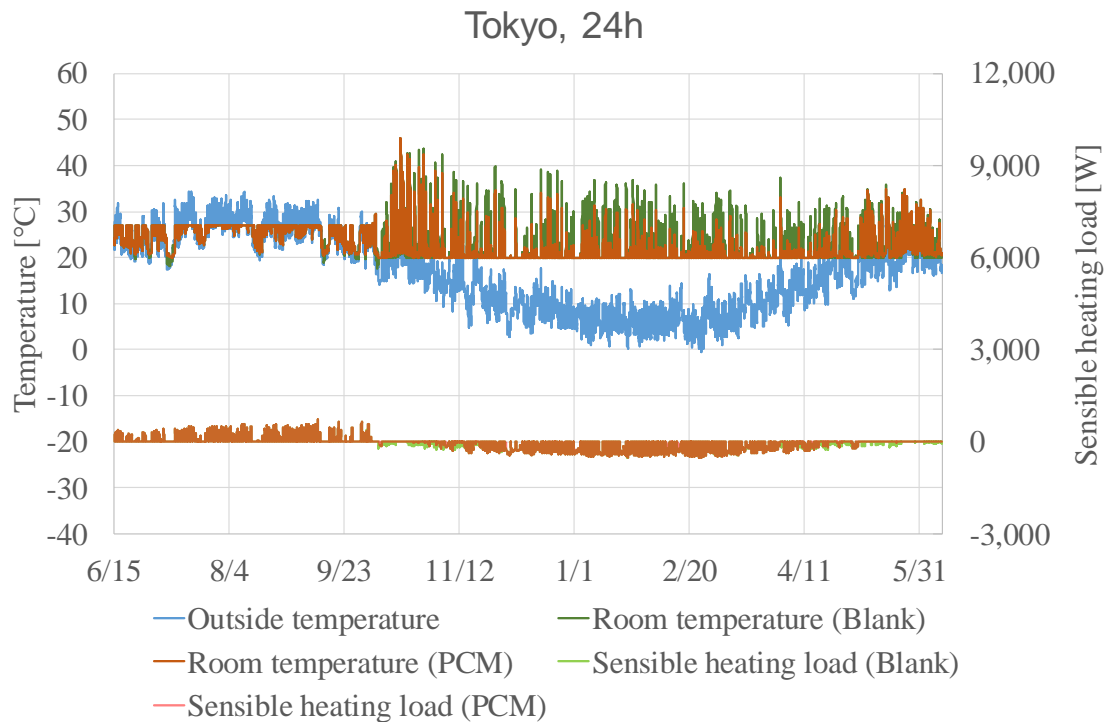


図 7.12 連続運転時の東京の室温と顕熱負荷

図 7.12 より、PCM 内装左官材の過昇温抑制効果が確認できる。また、中間期に特に暖房負荷が抑制できていることがわかる。

b) 札幌

札幌の連続運転時における夏季及び冬季の融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.13 及び図 7.14 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.15 に示す。各図中の黒線は PCM が入っていないときの顕熱負荷を示している。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.16 に示す。

札幌は寒冷地であるため、暖房負荷が支配的であることから、概ね東京と同じ傾向を示している。最適融点は融解幅ごとに異なるものの、最も負荷削減効果が高いのは、融点が冬季の設定室温(20°C)に近く、融解幅が小さいものとなった。ただし、融解幅が小さいときには、PCM が融解する温度領域も小さくなることから、設定室温と融点が離れるほど、急激にその効果は低下することがわかる。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

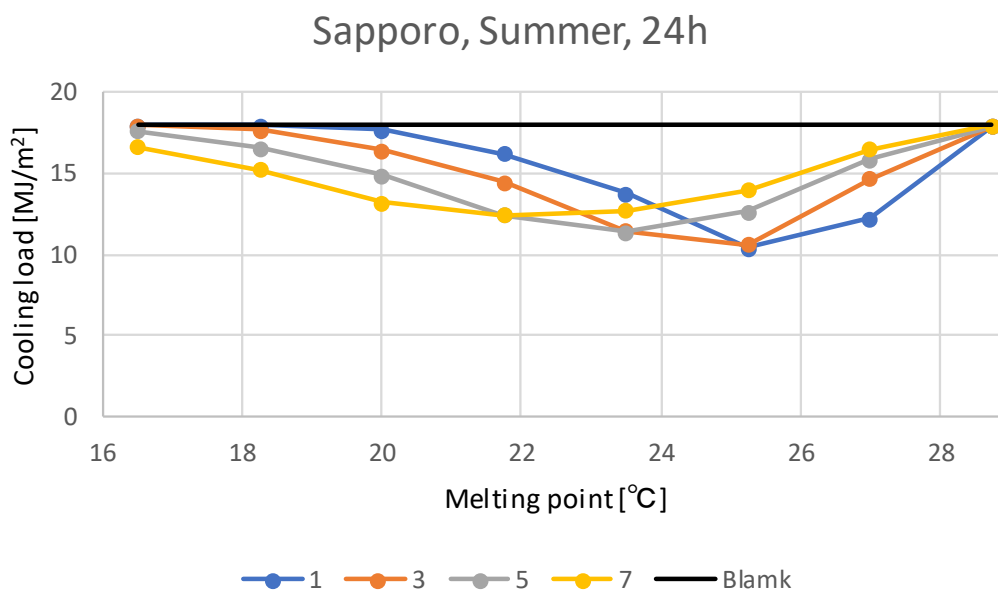


図 7.13 連続運転時の札幌の冷房負荷

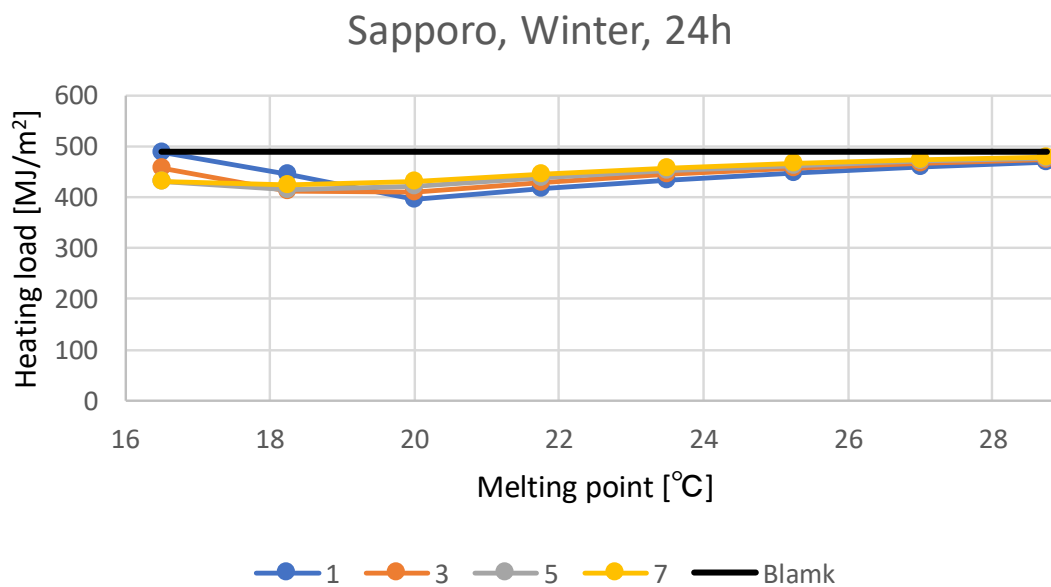


図 7.14 連続運転時の札幌の暖房負荷

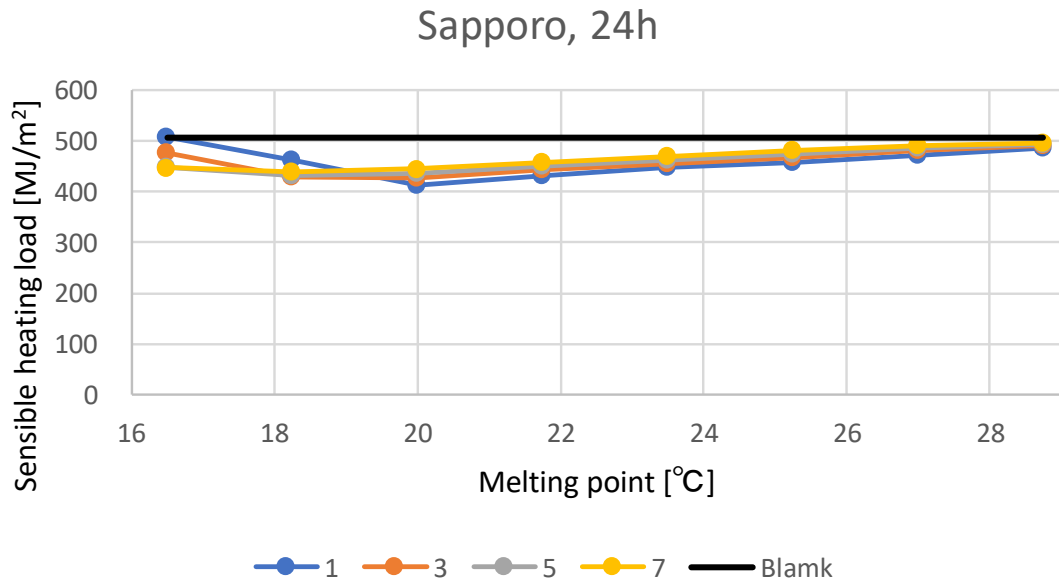


図 7.15 連続運転時の札幌の通年での顕熱負荷

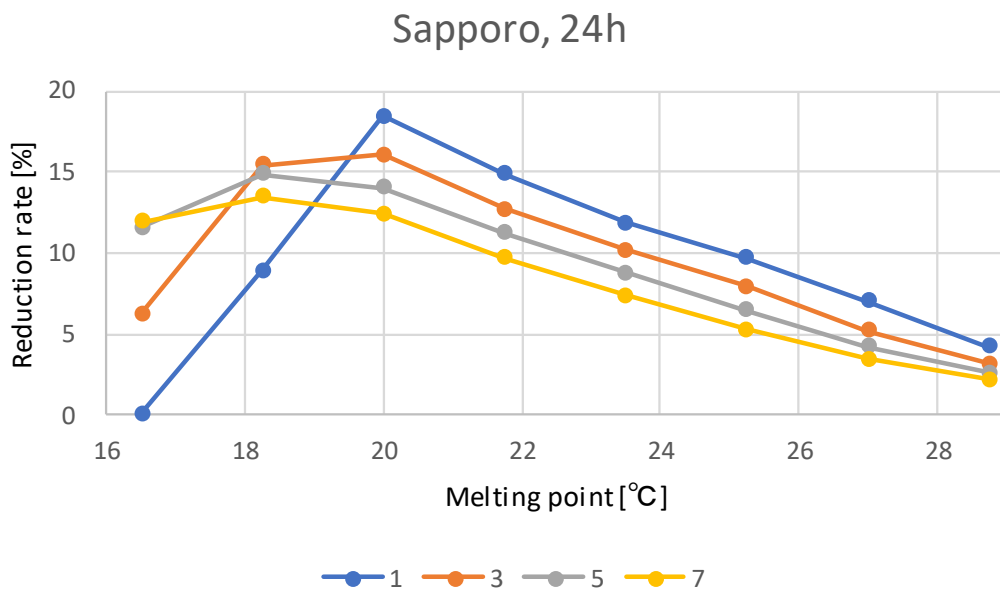


図 7.16 連続運転時の札幌の削減率

また、融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.17 に示す。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

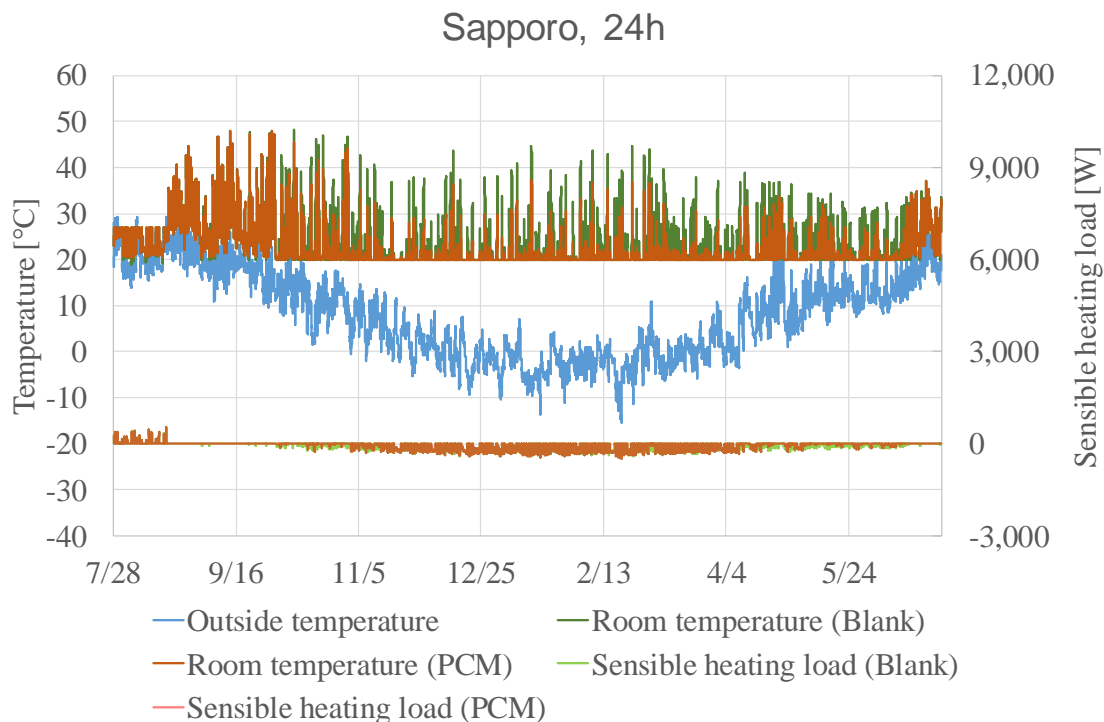


図 7.17 連続運転時の札幌の室温と顕熱負荷

東京と同様に、連続暖房時における日中の過昇温抑制効果が確認でき、また、中間期での顕熱負荷削減効果が大きいことがわかる。

c) 那覇

那覇の夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.18 及び図 7.19 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.20 に示す。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.21 に示す。

那覇は温暖地であるため、暖房負荷と比べて冷房負荷が支配的に高く、東京・札幌とは異なる傾向が見られ、那覇では夏季の設定室温(27°C)よりもやや低い融点のときに最も負荷削減効果が高い値となった。

また、融点 25.25°C、幅 3°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.22 に示す。熱箱モデルを用いていることから、頻繁に過昇温が見られるが、実環境に近い効果については 9 章で詳細に検討を行う予定である。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

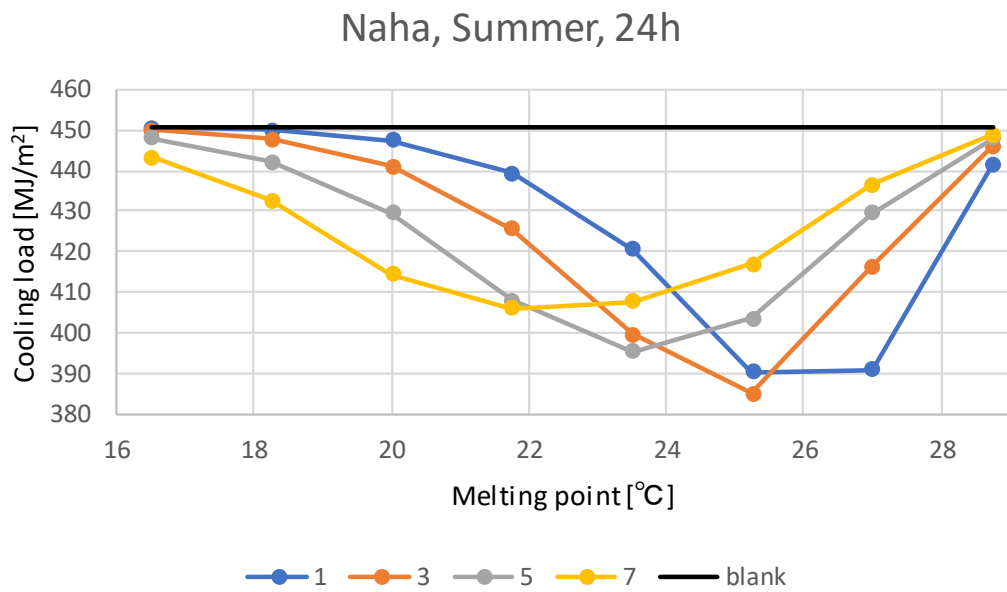


図 7.18 連続運転時の那覇の冷房負荷

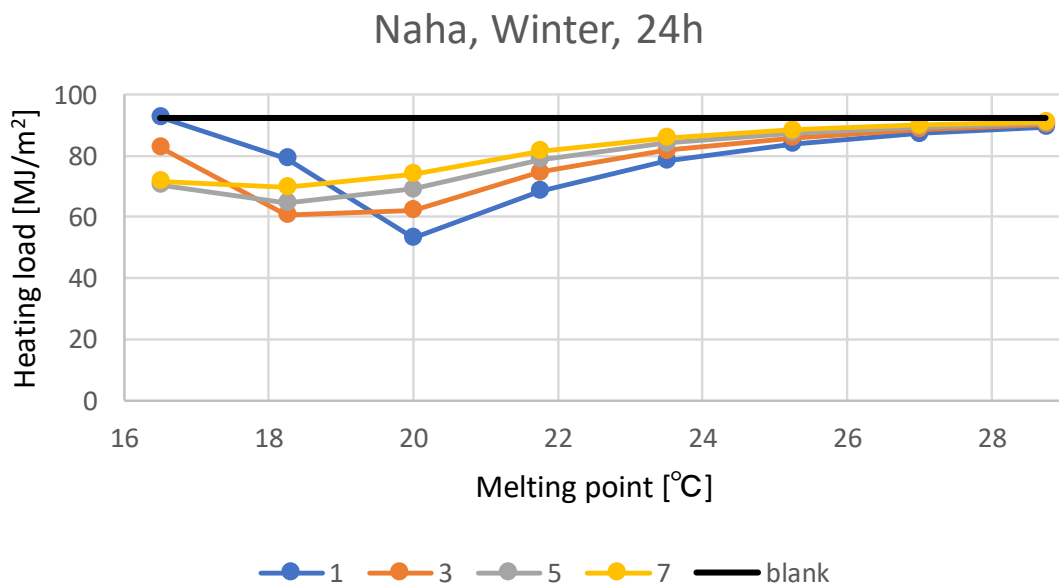


図 7.19 連続運転時の那覇の暖房負荷

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

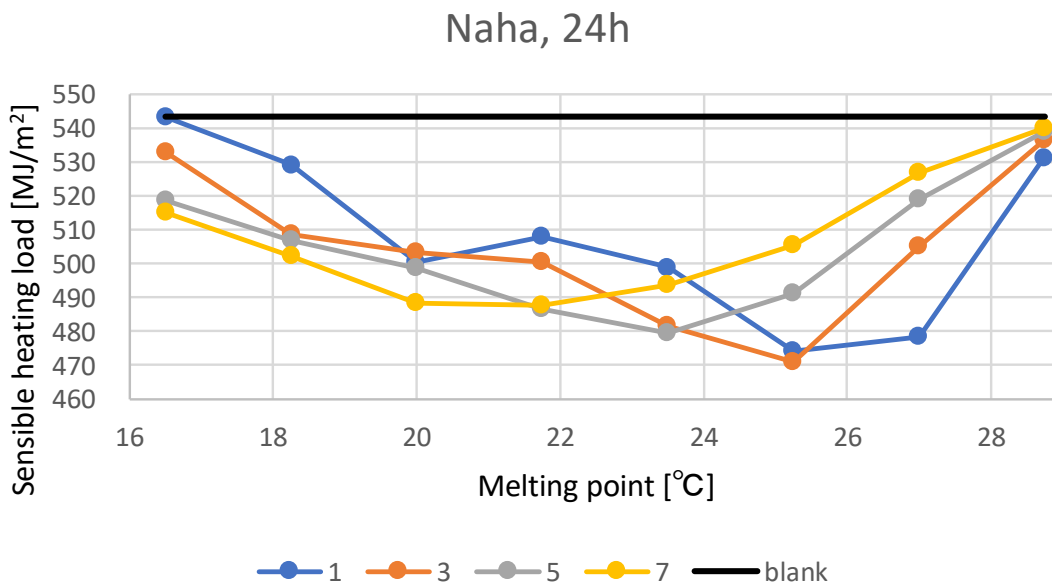


図 7.20 連続運転時の那覇の通年での顕熱負荷

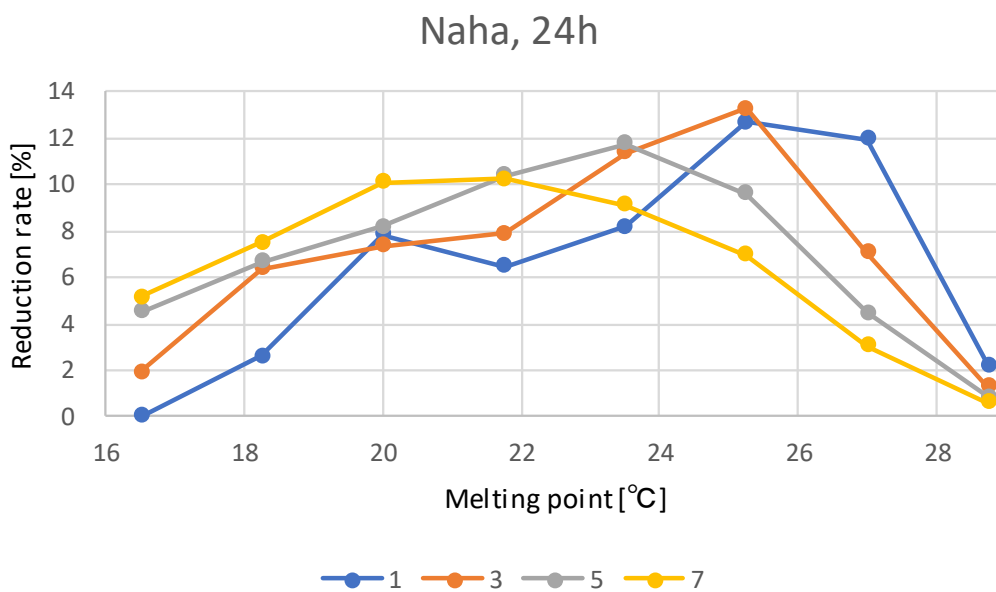


図 7.21 連続運転時の那覇の削減率

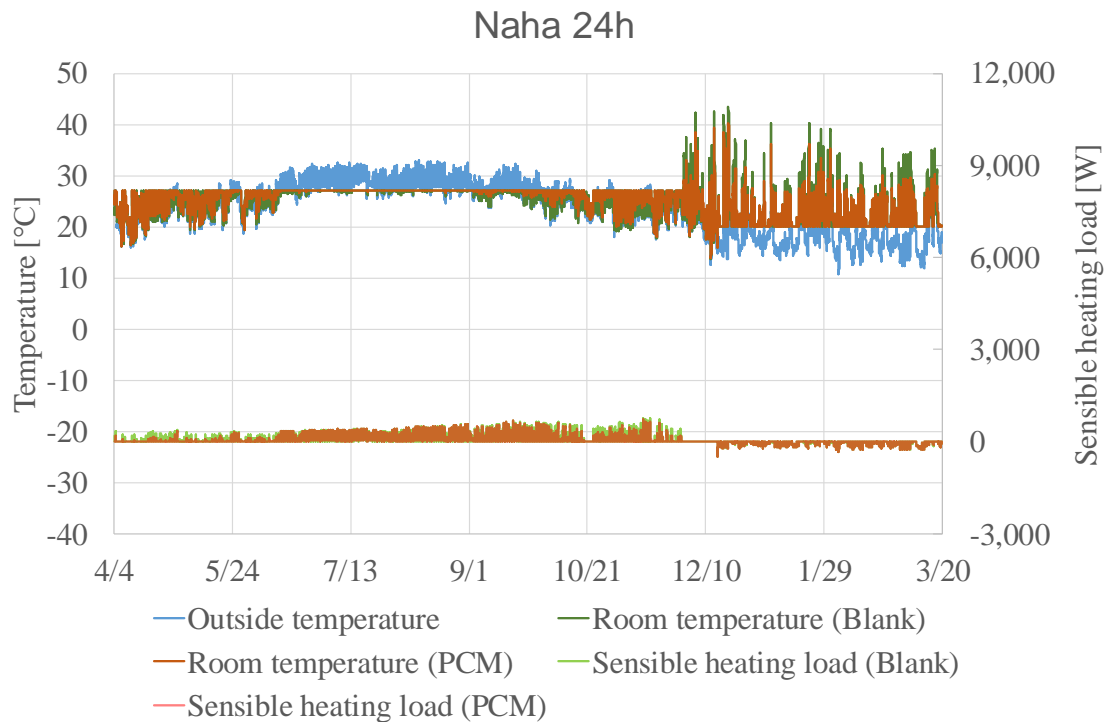


図 7.22 連続運転時の那覇の室温と顕熱負荷

7.2.3 寝室スケジュール運転時における融解挙動ごとの各地での顕熱負荷の算出

前節では、連続運転時には PCM の効果が通年で確認できたが、熱容量の大きい PCM が間欠運転時にどのような効果を示すのか確認するために、夜間スケジュール運転時において同様の検証を行った。運転スケジュールは「住宅事業主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説」の夏季の寝室の運転スケジュールを参考にした。

a) 東京

東京で寝室スケジュール運転としたときの夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.23 及び図 7.24 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.25 に示す。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.26 に示す。冬季には常に暖房負荷削減効果が確認できるが、夏季には融点が高く

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

なるほど冷房負荷が増大することがわかる。寝室スケジュール運転は日中に空調されないため、壁体に熱が蓄えられ、夜間スケジュール運転時に負荷が増大すると考えられる。

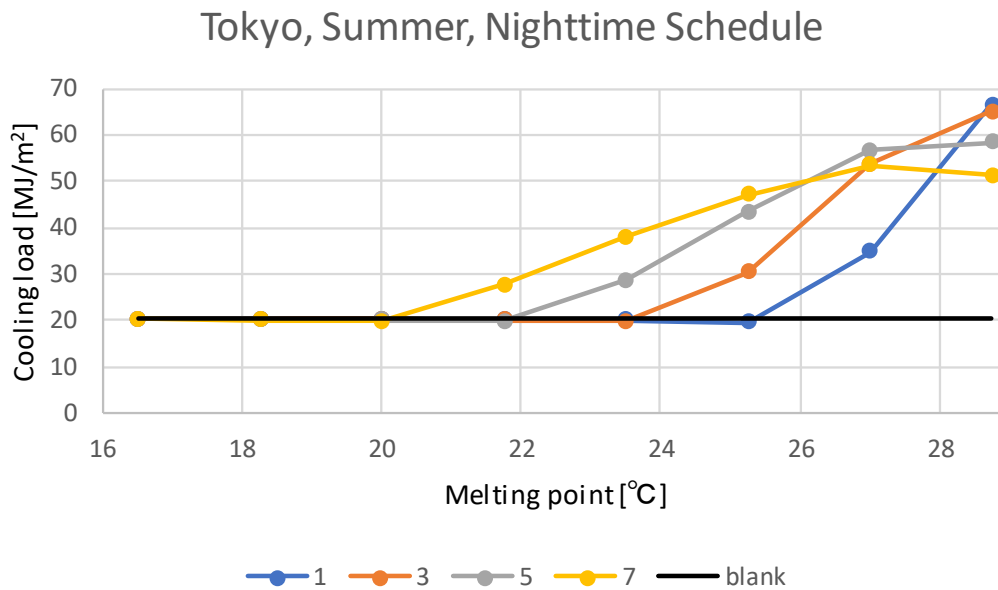


図 7.23 寝室スケジュール運転時の東京の冷房負荷

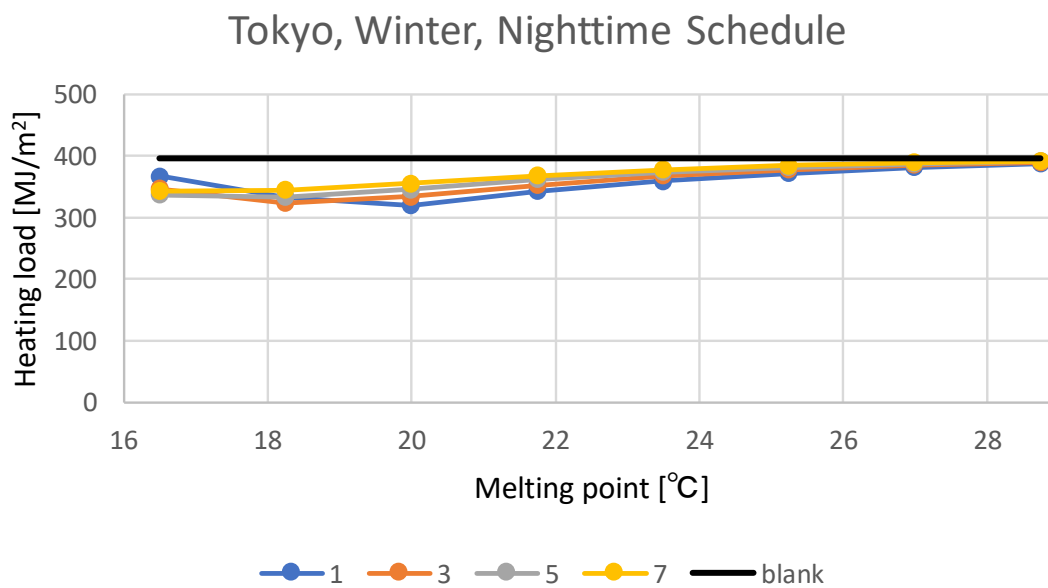


図 7.24 寝室スケジュール運転時の東京の暖房負荷

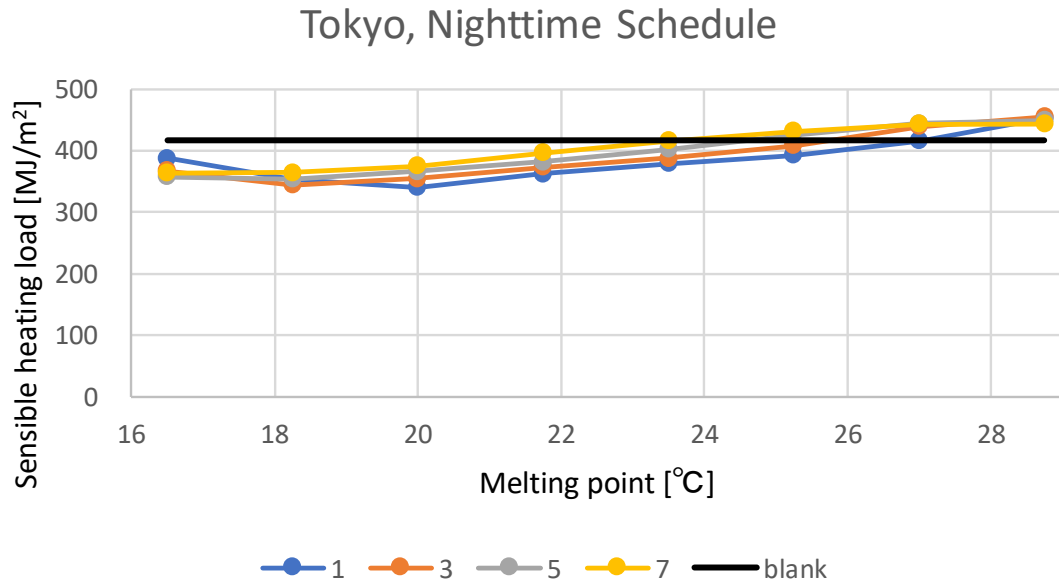


図 7.25 寝室スケジュール運転時の東京の通年での顕熱負荷

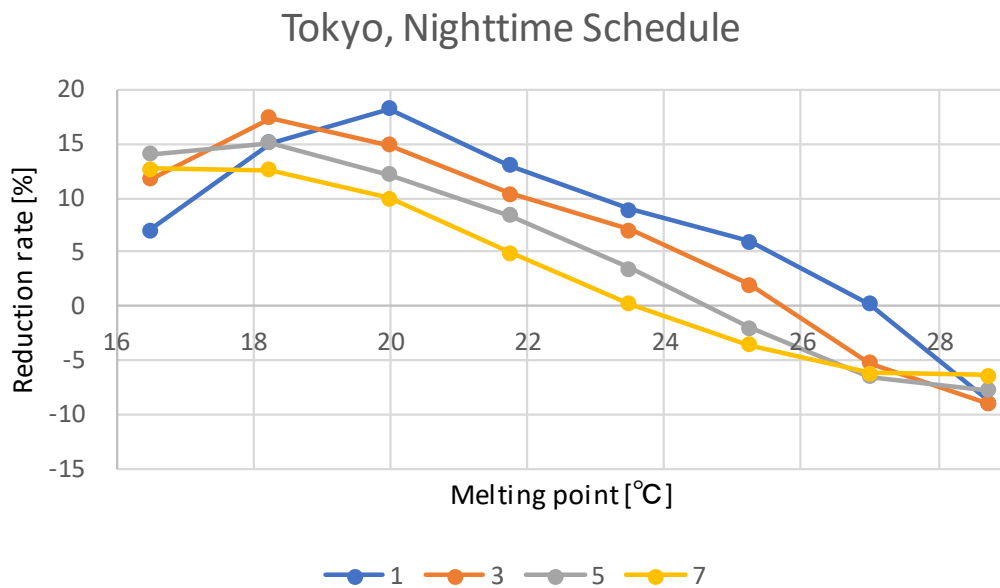


図 7.26 寝室スケジュール運転時の東京の削減率

また、融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.27 に示す。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

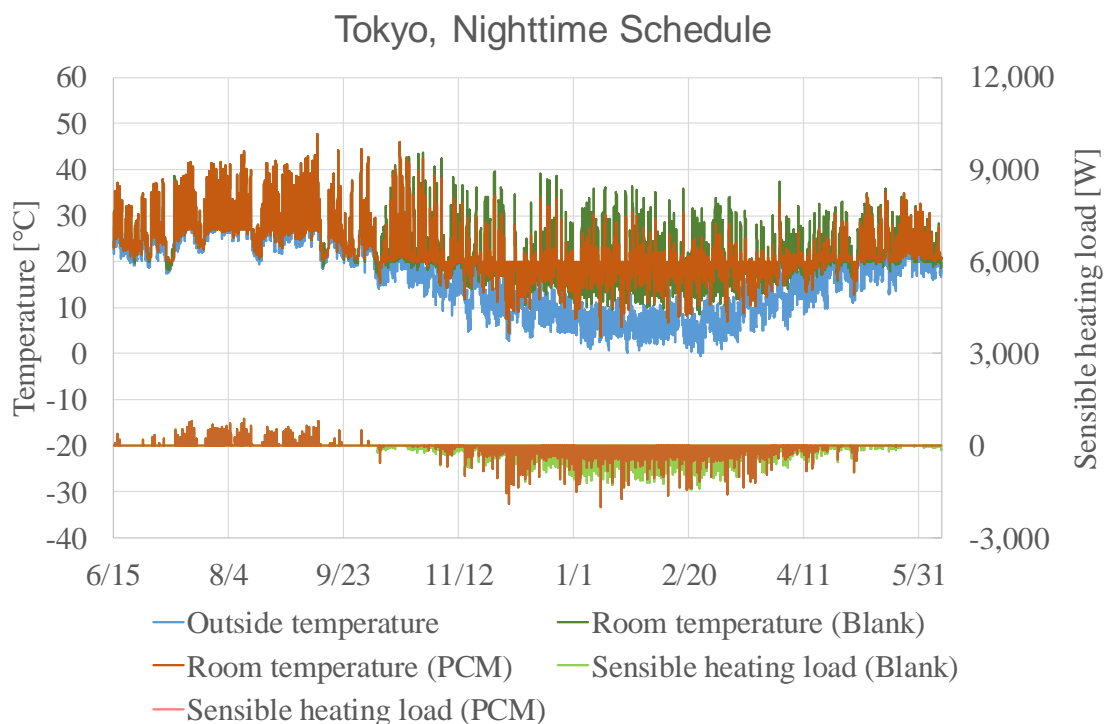


図 7.27 寝室スケジュール運転時の東京の室温と顕熱負荷

寝室の室温は日中には成り行きとなるため、夏季には日中に過昇温がみられる。このため PCM に熱が蓄えられ、夜間の負荷が増大する。冬季は日中のダイレクトゲインを有効利用することにより負荷削減効果が期待できる。

b) 札幌

札幌で寝室スケジュール運転としたときの夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.28 及び図 7.29 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.30 に示す。

夏季にはblankと比較して負荷削減効果が見られる範囲もあるが、傾向としては概ね、東京と同様に、融点が高い程負荷が増大することがわかる。暖房負荷についても概ね東京と同様の傾向が見られた。Blankと比較した時の負荷削減率を図 7.31 に示す。最も負荷削減効果が高いのは、連続運転時と同様に、融点 20°C、幅 1°Cのときとなった。

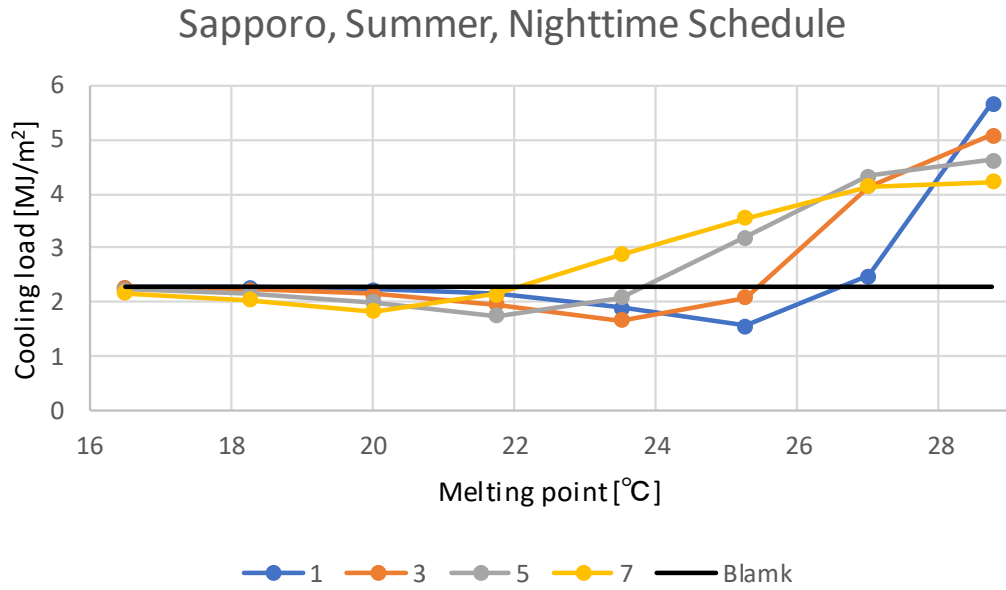


図 7.28 寝室スケジュール運転時の札幌の冷房負荷

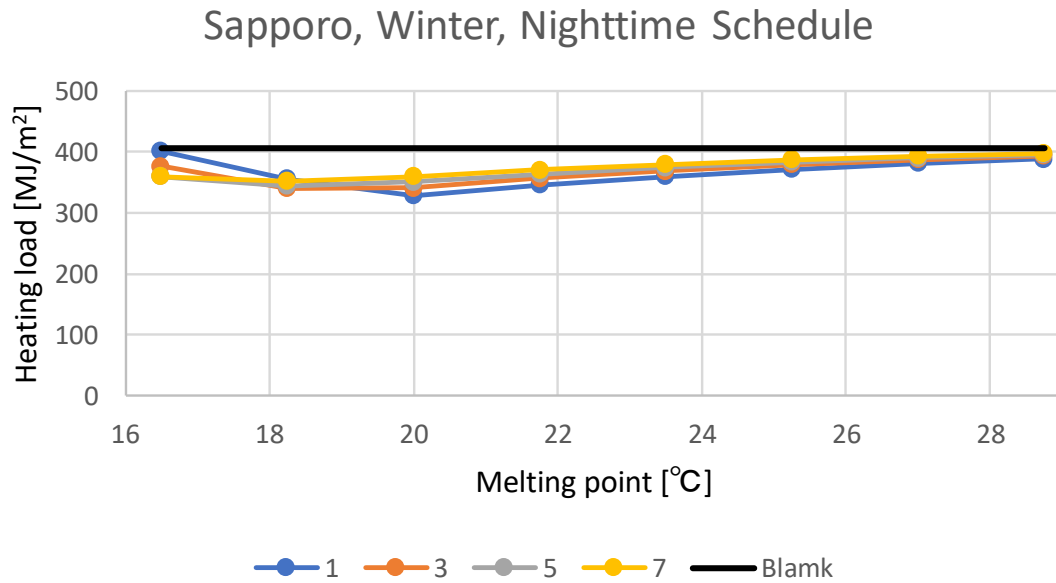


図 7.29 寝室スケジュール運転時の札幌の暖房負荷

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

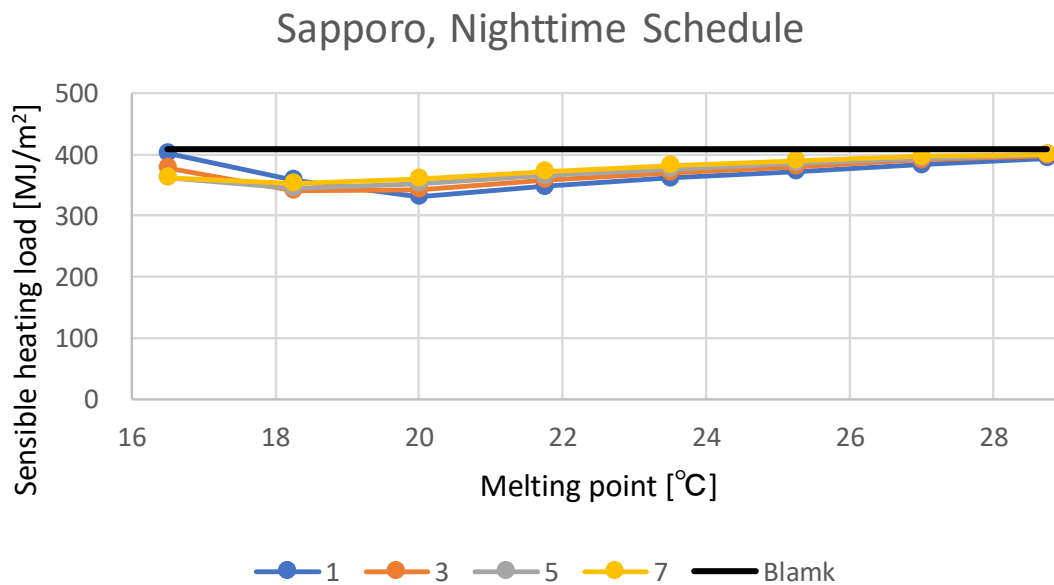


図 7.30 寝室スケジュール運転時の札幌の通年での顕熱負荷

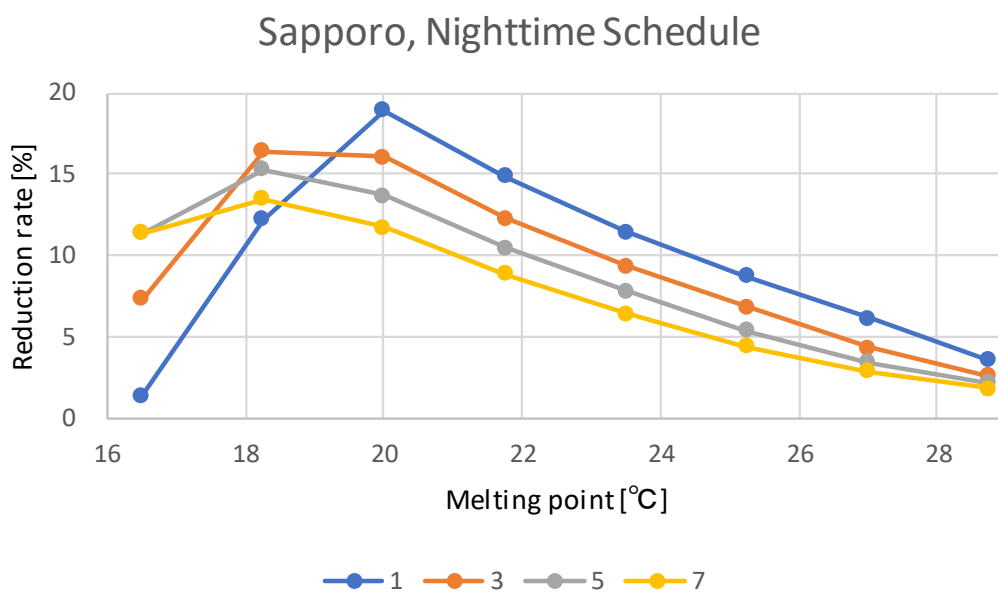


図 7.31 寝室スケジュール運転時の札幌の削減率

融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.32 に示す。

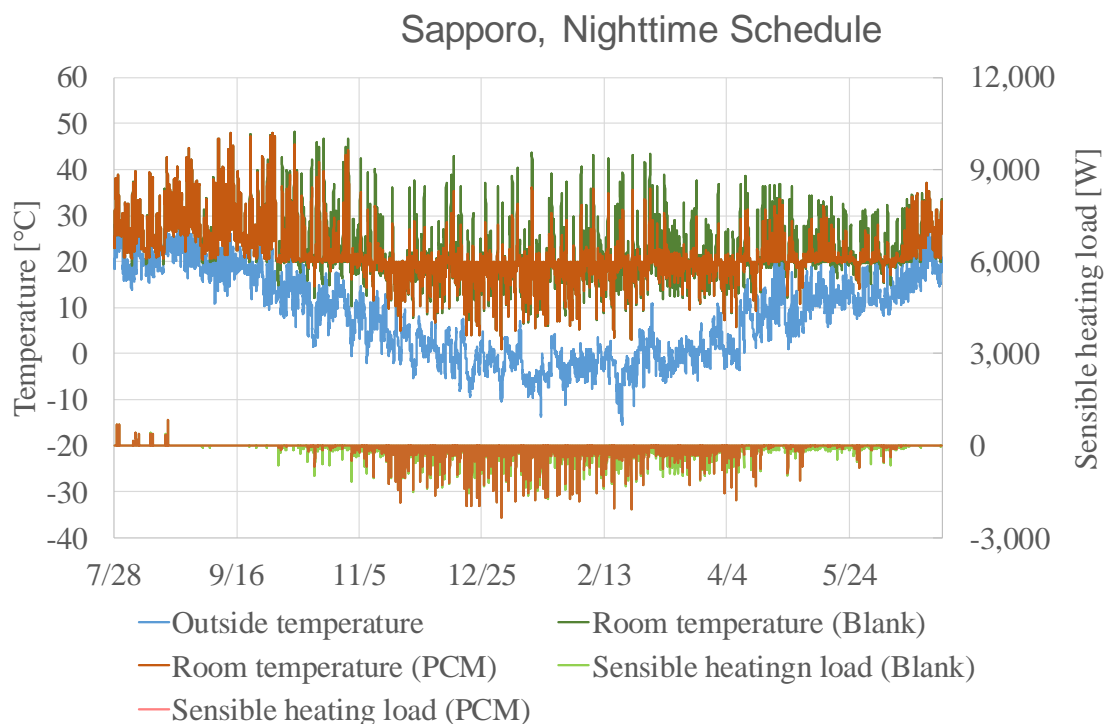


図 7.32 寝室スケジュール運転時の札幌の室温と顕熱負荷

連続暖房時のときと同様に、PCM 内装左官材による過昇温抑制効果と負荷削減効果が確認できる。

c) 那覇

那覇で寝室スケジュール運転としたときの夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.33 及び図 7.34 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.35 に示す。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.36 に示す。

夏季と冬季それぞれの傾向は概ね東京、札幌と同様である。ただし、那覇は冷房負荷が支配的であるため、融点によっては PCM が逆効果となるため融点の選定には注意が必要であり、運転スケジュールや室の用途によっても PCM に求められる性質は異なることがわかる。

また、融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.37 に示す。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

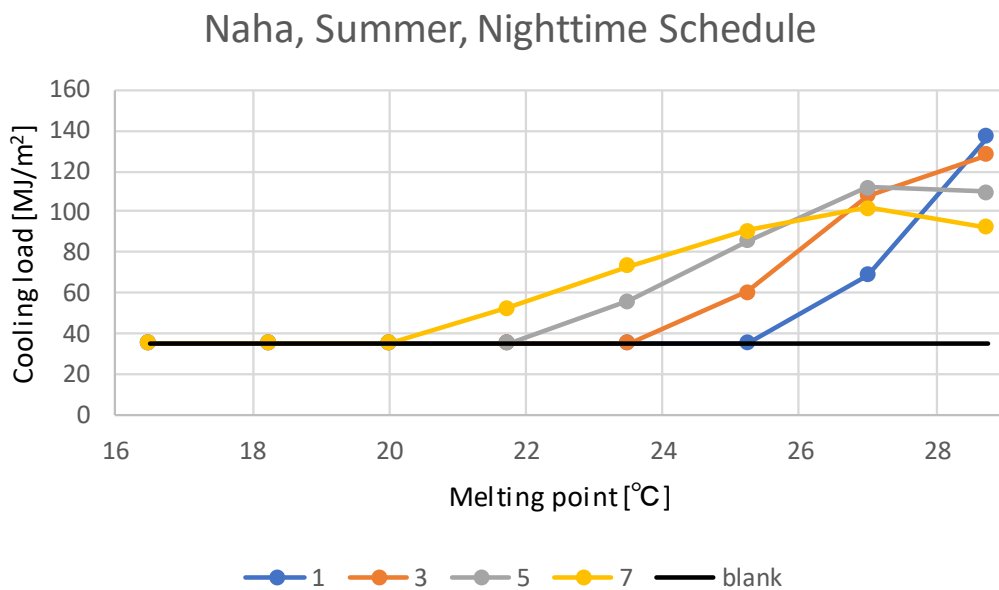


図 7.33 寝室スケジュール運転時の那覇の冷房負荷

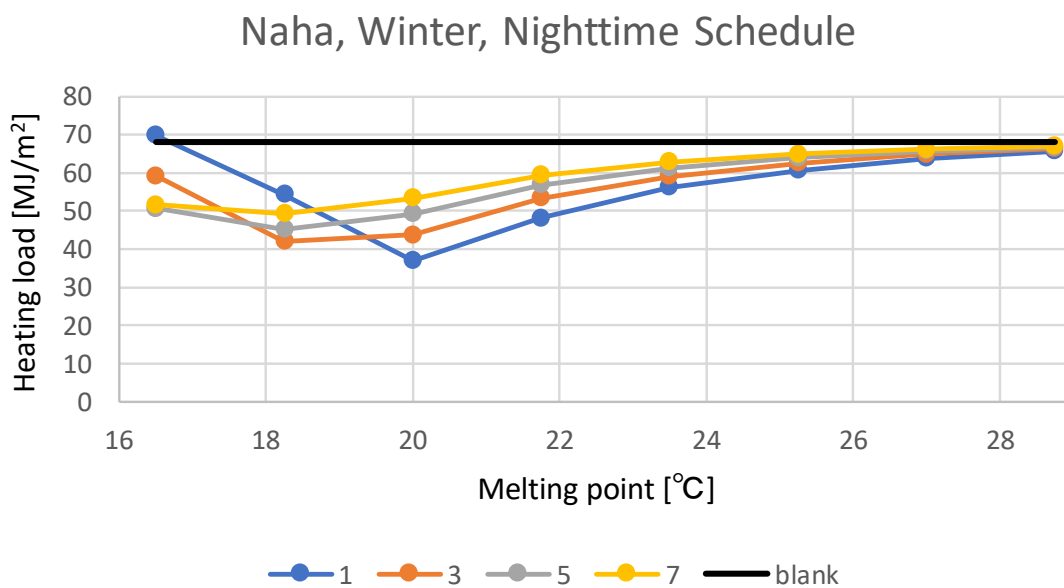


図 7.34 寝室スケジュール運転時の那覇の暖房負荷

寝室スケジュール運転においても連続運転時と同様に、冬季のダイレクトゲインの有効利用により、通年での効果が得られることがわかる。

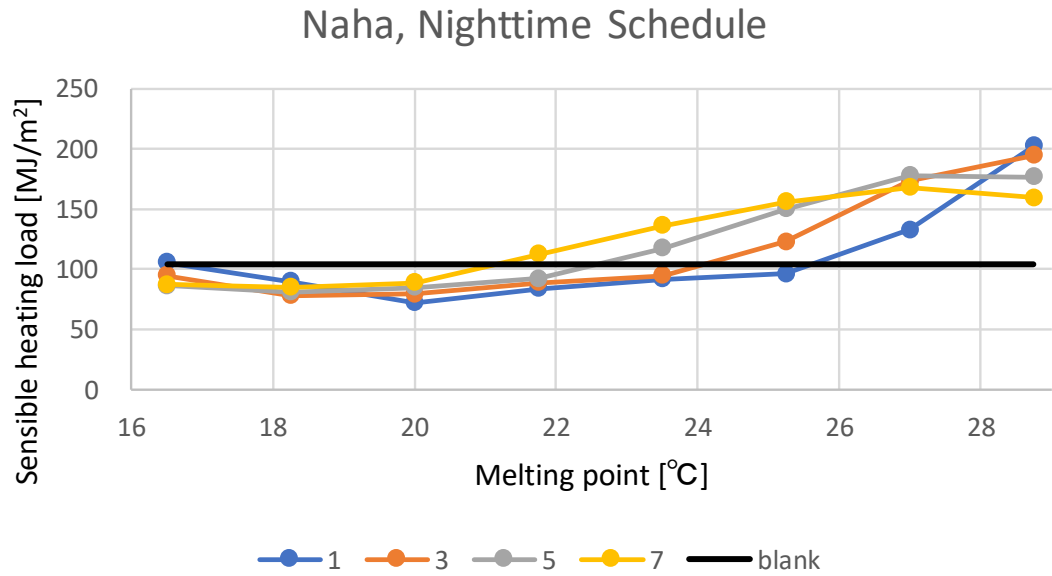


図 7.35 寝室スケジュール運転時の那覇の通年での顕熱負荷

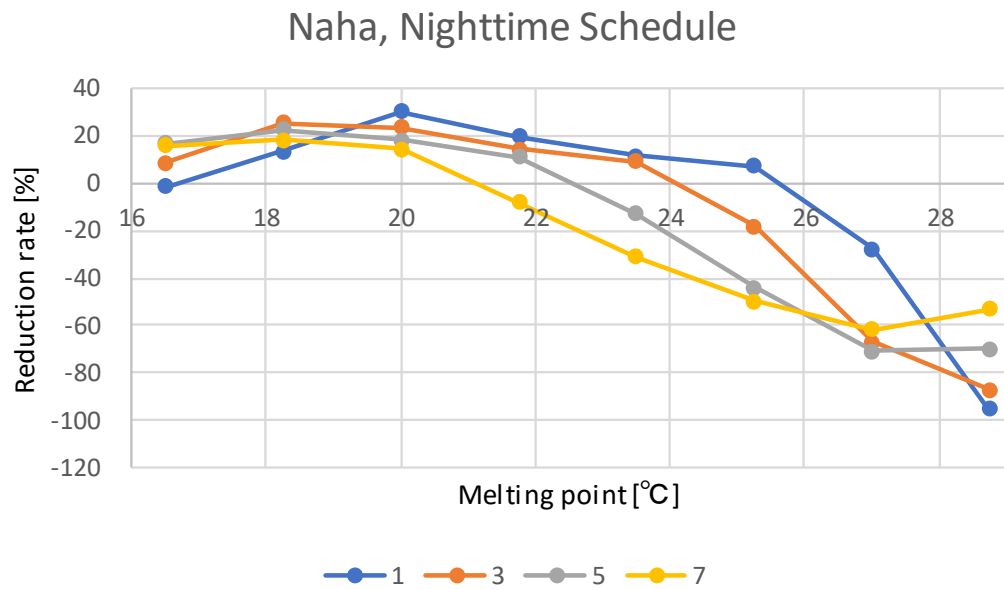


図 7.36 寝室スケジュール運転時の那覇の削減率

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

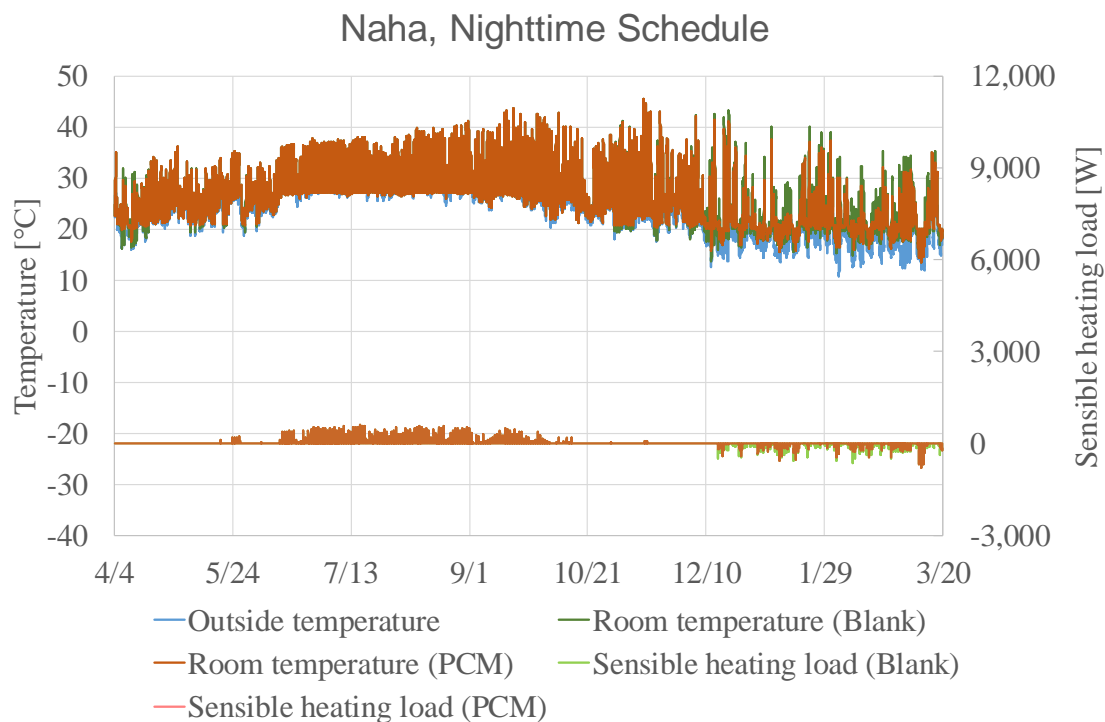


図 7.37 寝室スケジュール運転時の那覇の室温と顕熱負荷

7.2.4 リビングスケジュール運転時における融解挙動ごとの各地での顕熱負荷の算出

寝室スケジュール運転では、PCM 内装左官材を適用した際に夏季の冷房負荷が増大し、融点によっては、冬季にも負荷が増大する傾向がみられた。

日中に空調運転が行われたときの違いを明らかにするために、リビングスケジュール運転時において同様の検証を行った。運転スケジュールは「住宅事業主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説」のリビングの運転スケジュールを参考にした。

a) 東京

東京で寝室スケジュール運転としたときの夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.38 及び図 7.39 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.40 に示す。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.41 に示す。また、融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用

したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.42 に示す。

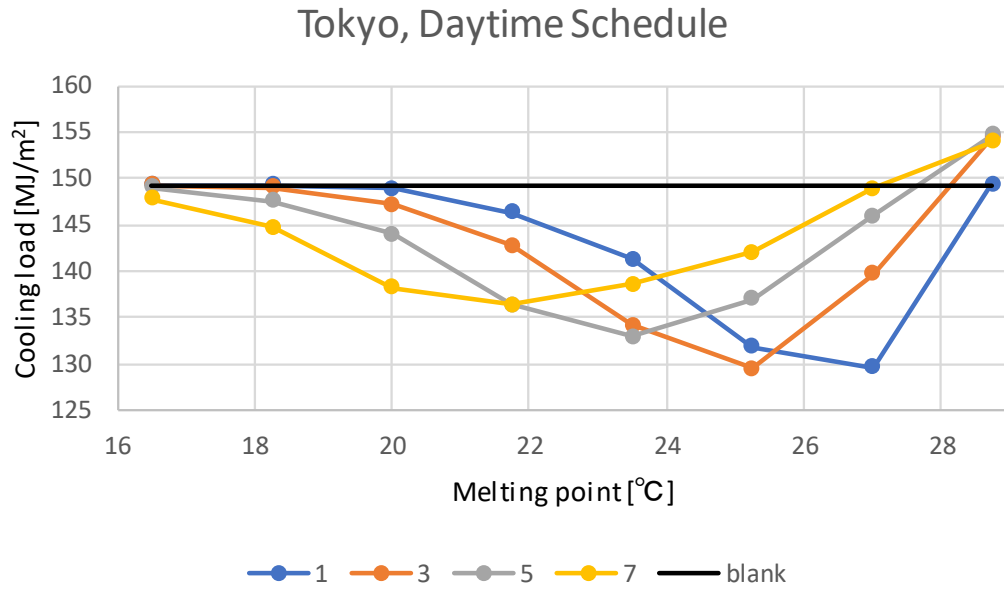


図 7.38 リビングスケジュール運転時の東京の冷房負荷

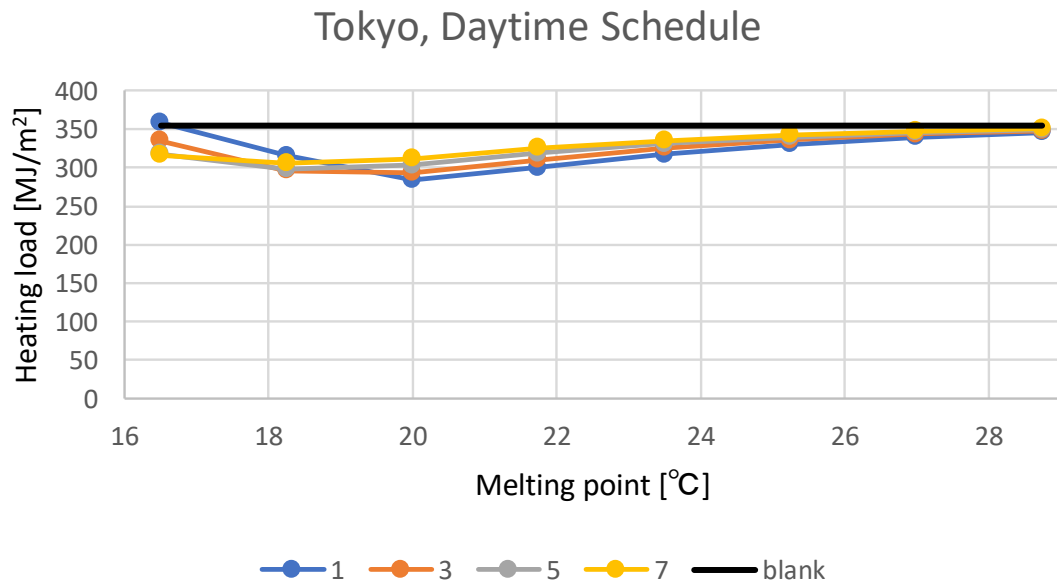


図 7.39 リビングスケジュール運転時の東京の暖房負荷

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

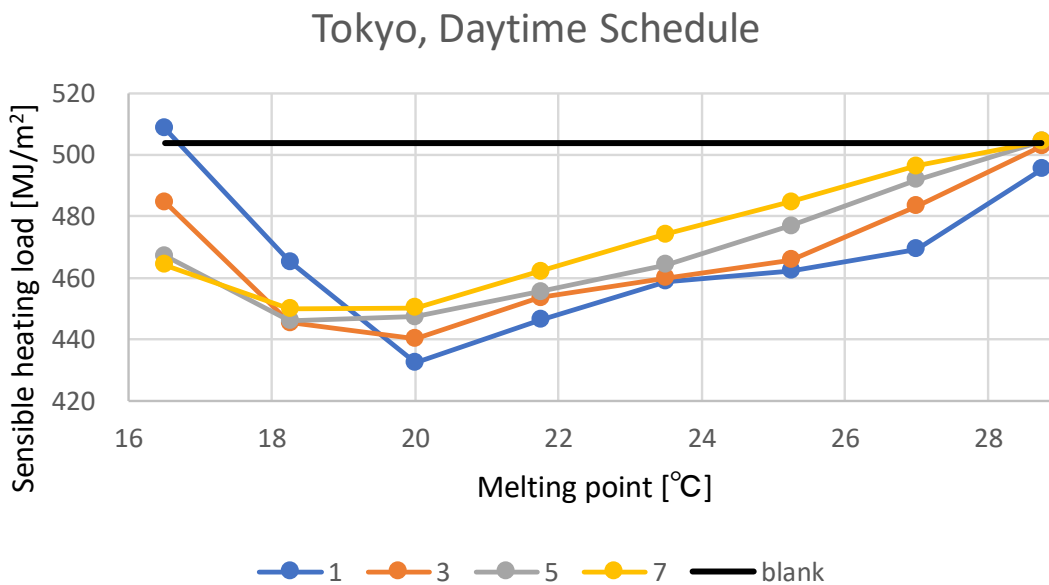


図 7.40 リビングスケジュール運転時の東京の通年での顕熱負荷

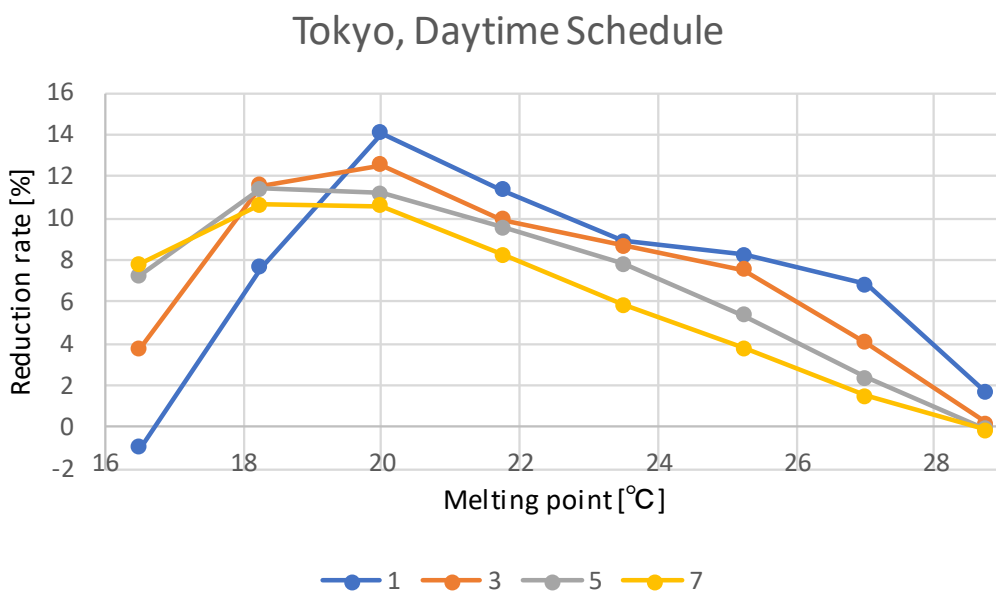


図 7.41 リビングスケジュール運転時の東京の削減率

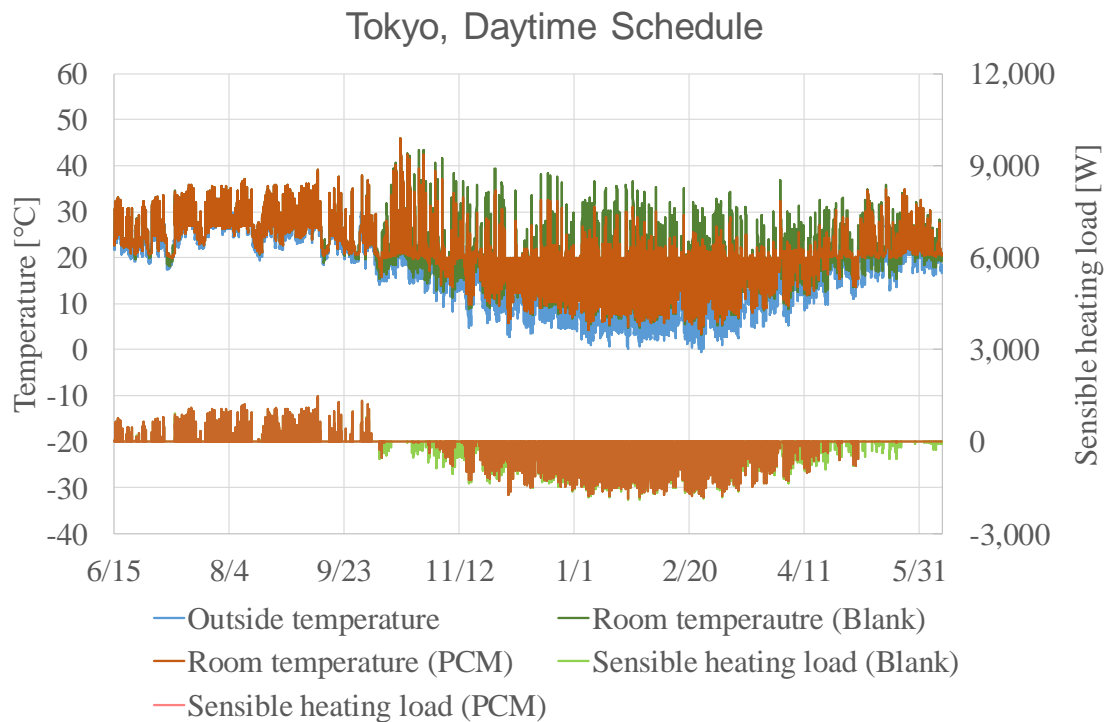


図 7.42 リビングスケジュール運転時の東京の室温と顕熱負荷

東京でリビングスケジュール運転をした時の効果は、概ね連続暖房のときと同様の傾向を示した。寝室スケジュール運転では、特に夏季に連続暖房とは異なる結果が見られたが、リビングスケジュール運転時には、連続暖房時と同じ効果を示す傾向が見られる。これは、日中にオーバーヒートする熱を処理しているかどうかで PCM に蓄えられる熱量が異なるためであると考えられる。

b) 札幌

札幌でリビングスケジュール運転としたときの夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.43 及び図 7.44 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.45 に示す。Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.46 に示す。最も削減効果が高かったのは、東京と同じく融点 20°C、幅 1°C のときである。

また、融点 20°C、幅 1°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.47 に示す。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

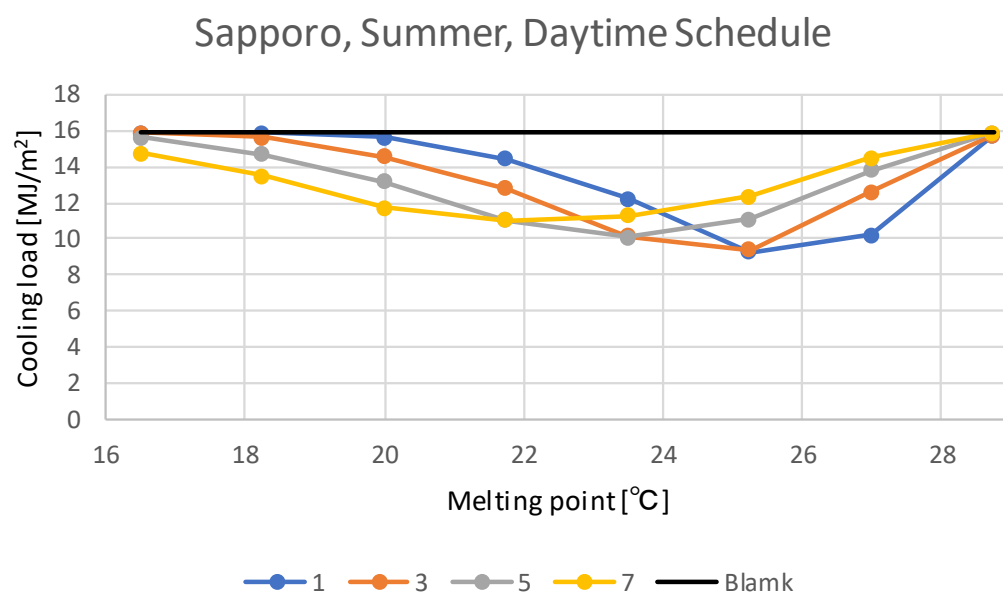


図 7.43 リビングスケジュール運転時の札幌の冷房負荷

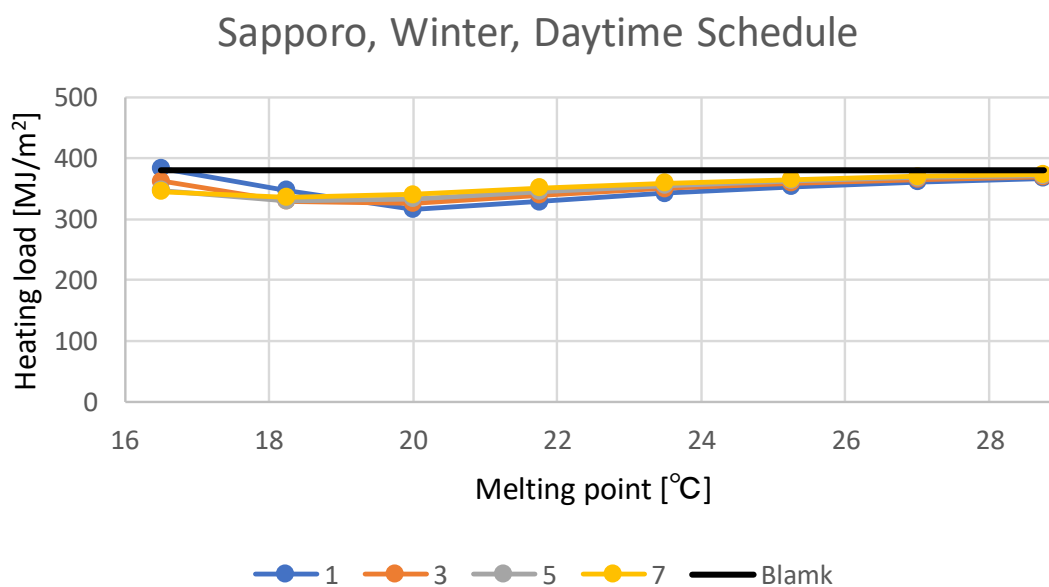


図 7.44 リビングスケジュール運転時の札幌の暖房負荷

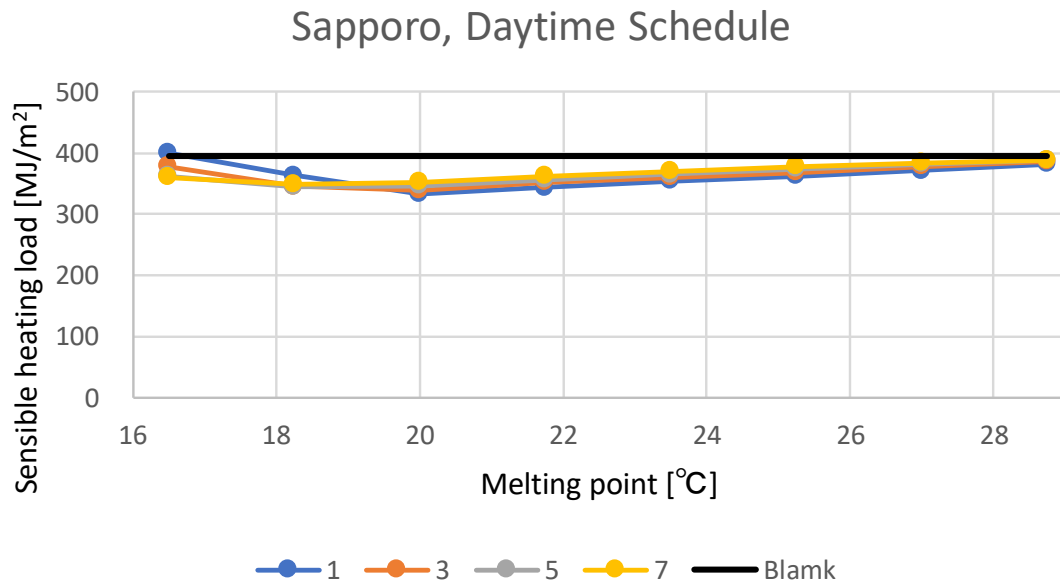


図 7.45 リビングスケジュール運転時の札幌の通年での顕熱負荷

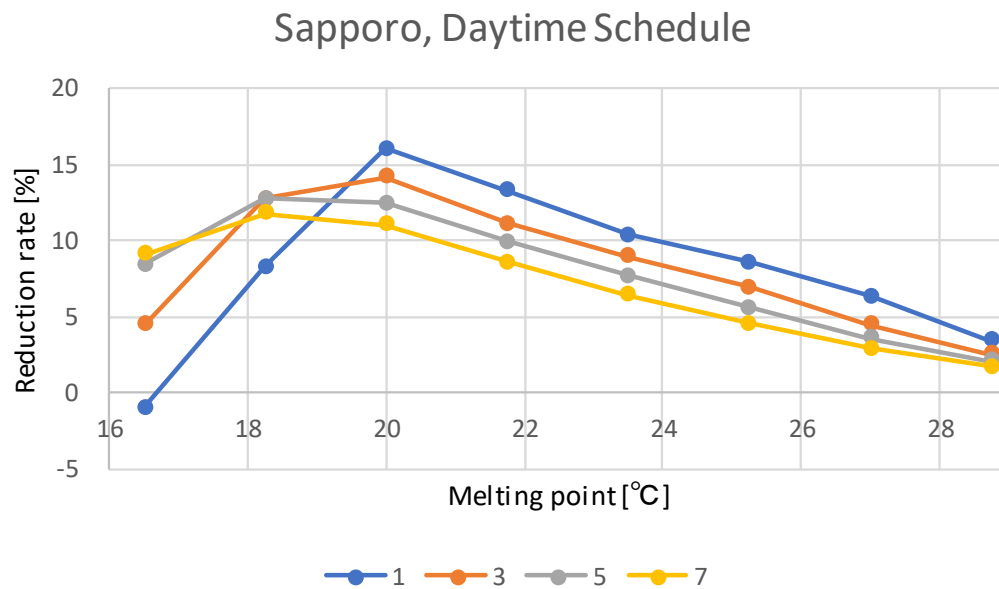


図 7.46 リビングスケジュール運転時の札幌の削減率

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

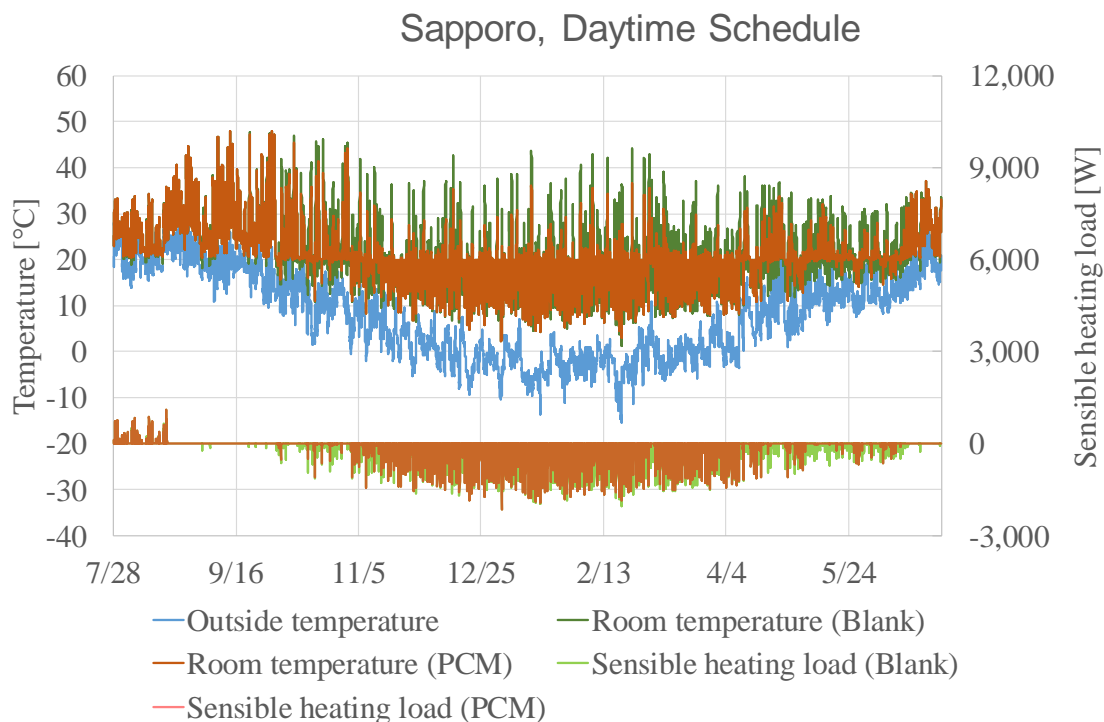


図 7.47 リビングスケジュール運転時の札幌の室温と顕熱負荷

札幌においても東京と同様に、連続運転時と概ね同じ傾向が見られた。図から、連続暖房時よりも立ち上がり負荷が大きいことがわかるが、スケジュール運転であることから顕熱負荷の総量はリビングスケジュール運転のほうが少ない。

c) 那覇

那覇でリビングスケジュール運転としたときの夏季及び冬季における融解幅と融点ごとの顕熱負荷を図 7.48 及び図 7.49 に示す。また、夏季の冷房負荷と冬季の暖房負荷を積算して図 7.50 に示す。

Blank と比較した時の負荷削減率を図 7.51 に示す。連続暖房時と同様に、最も効果が高いのは融点 25.25°C、幅 3°C の時である。寝室スケジュール運転時とは異なり、運転方法により求められる PCM が異なることが考えられる。

また、融点 25.25°C、幅 3°C の PCM を PCM 内装左官材として壁体に適用したときの室温変動抑制効果と顕熱負荷を図 7.52 に示す。連続暖房時と同様に過昇

温抑制効果と負荷削減効果が確認できた。

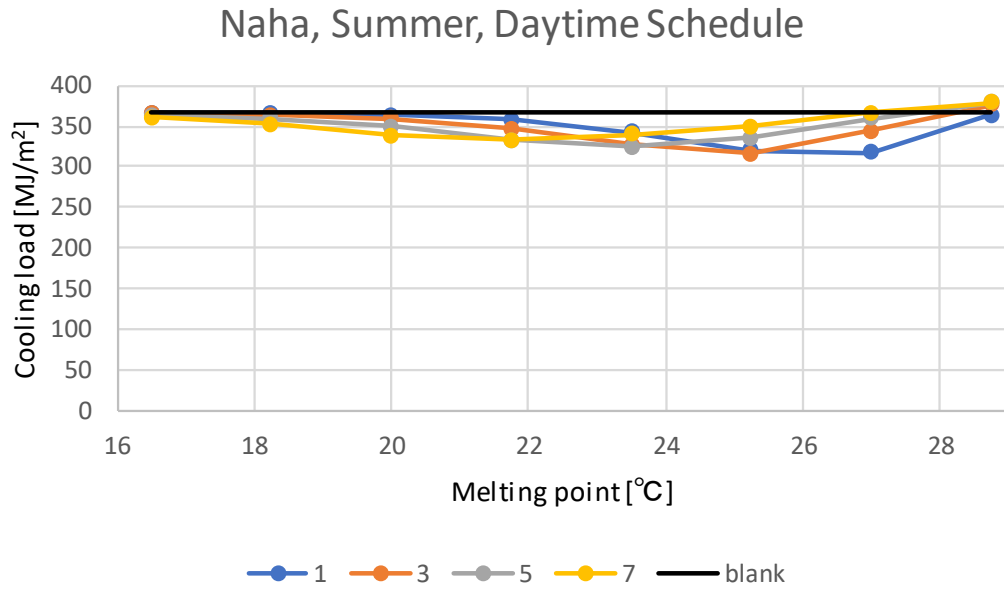


図 7.48 リビングスケジュール運転時の那覇の冷房負荷

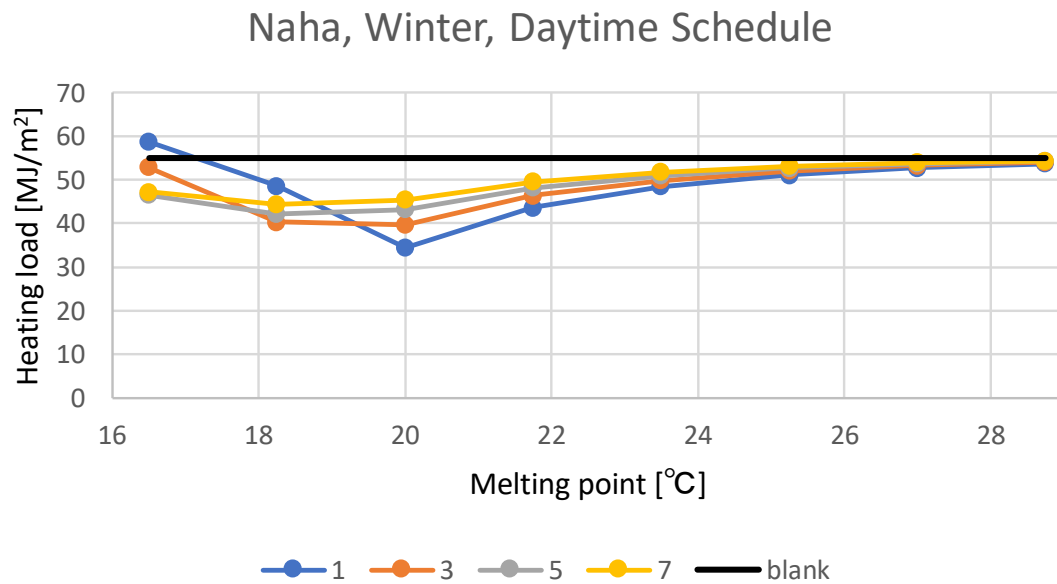


図 7.49 リビングスケジュール運転時の那覇の暖房負荷

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

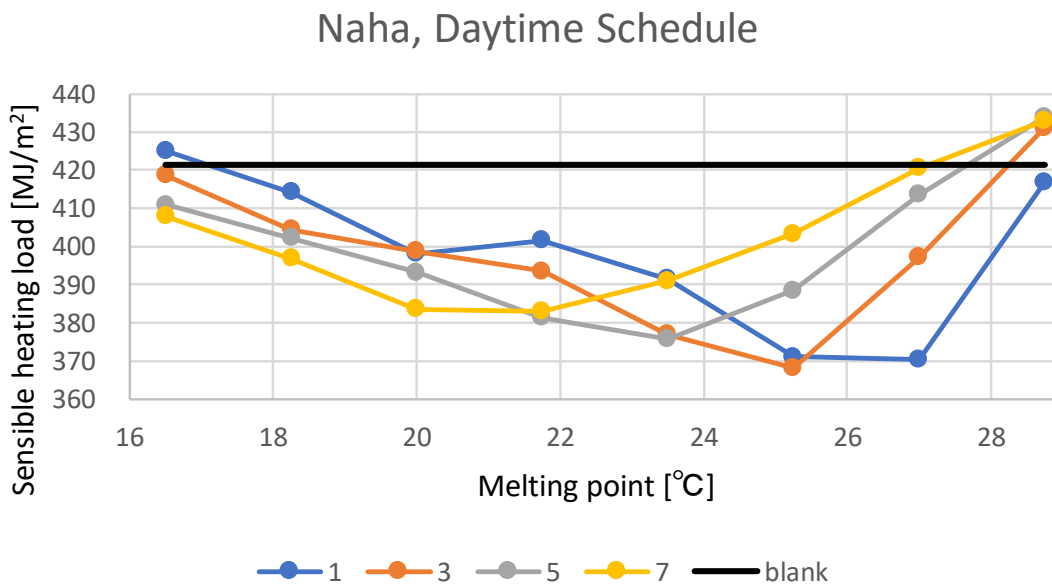


図 7.50 リビングスケジュール運転時の那覇の通年での顕熱負荷

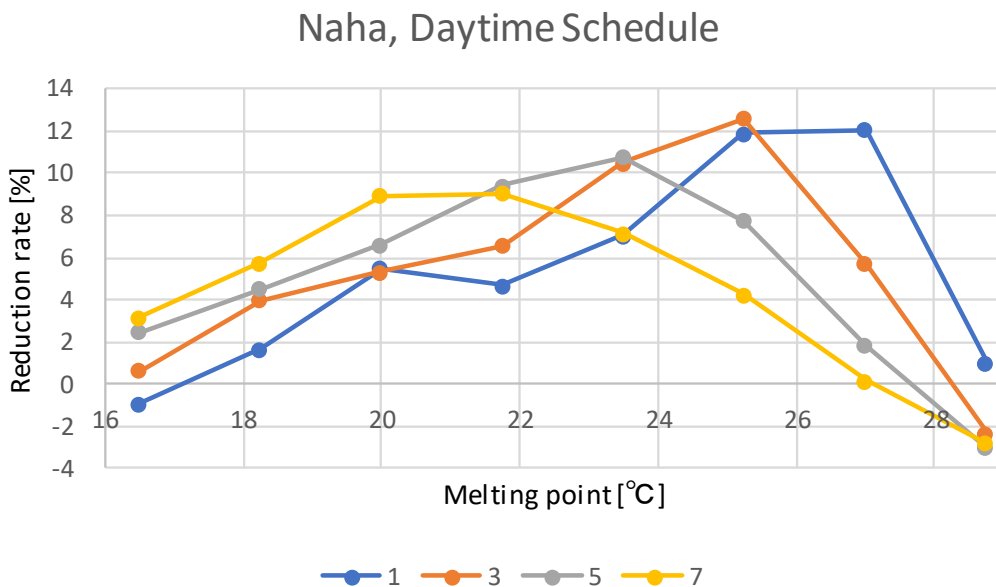


図 7.51 リビングスケジュール運転時の那覇の削減率

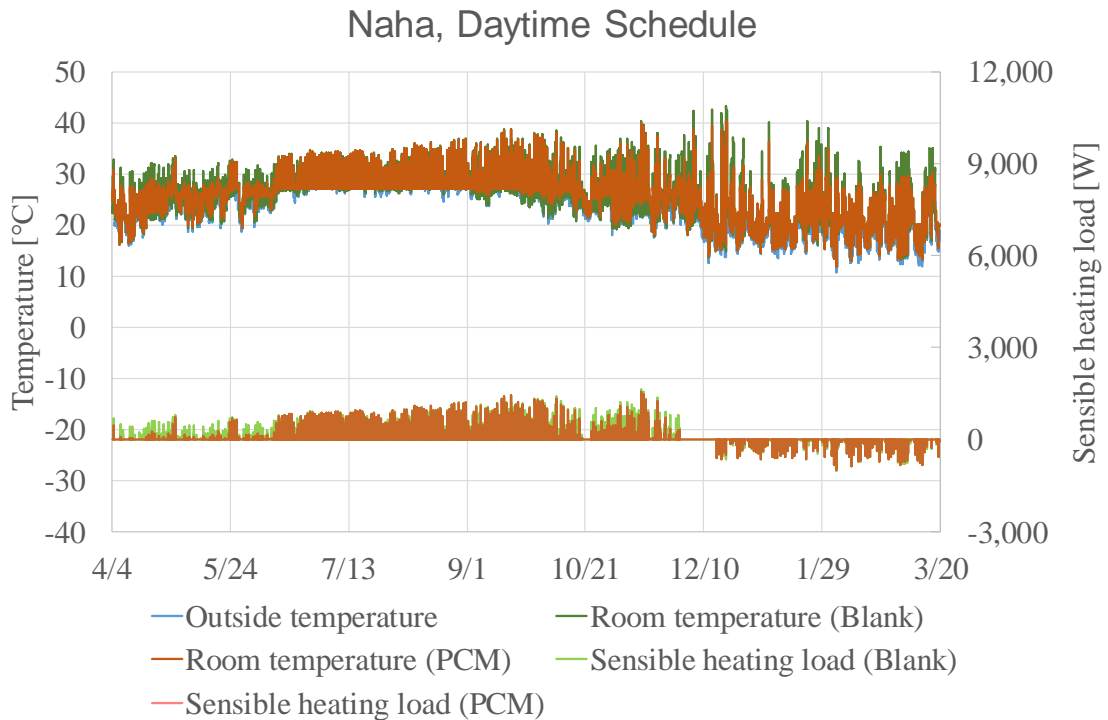


図 7.52 リビングスケジュール運転時の那覇の室温と顕熱負荷

7.3 断熱性能の違いによる効果

空調負荷を低減する手法として、断熱性能を高めることが一般に知られている。我が国では沖縄県を除くすべての地域で省エネルギー基準が設けられており、断熱性能を高めるための政策が進められている。PCM 内装左官材は主として壁や天井等、断熱材と同時に用いられていることから、本節では断熱材の厚みごとにそれぞれの地域及び運転スケジュールごとに検討を加えた。

a) 東京

東京でそれぞれのスケジュール運転としたときの断熱材の厚さごとの効果を算出した。24 時間連続運転、寝室スケジュール運転、リビングスケジュール運転とした時の顕熱負荷及び削減率を図 7.53～図 7.55 に示す。断熱性能が高い程暖房負荷の絶対量が減少することから、PCM による相対的な削減効果は高くなる傾向が見られる。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

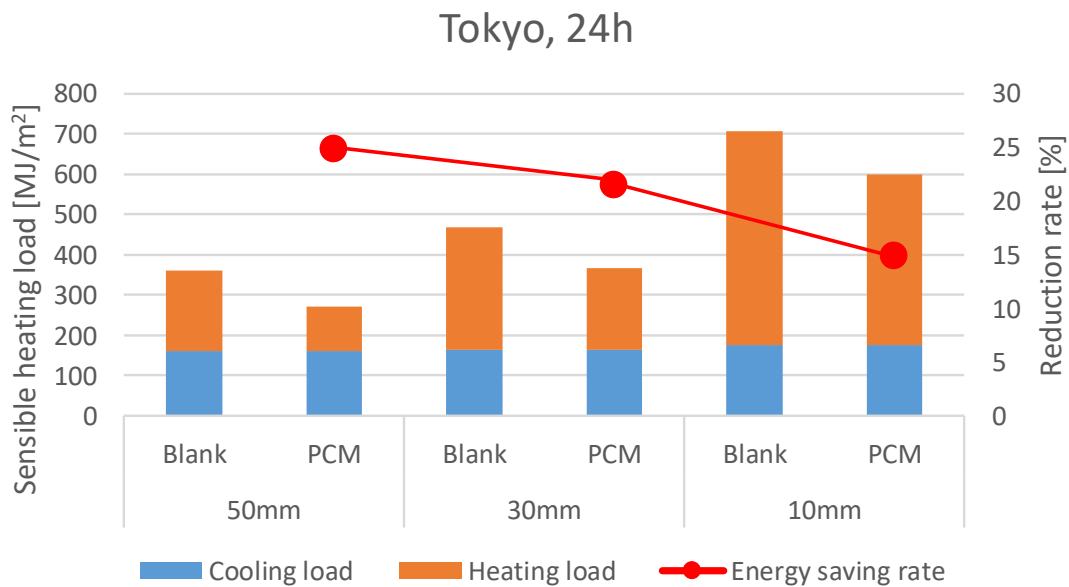


図 7.53 連続運転時の東京の断熱性能ごとの削減効果

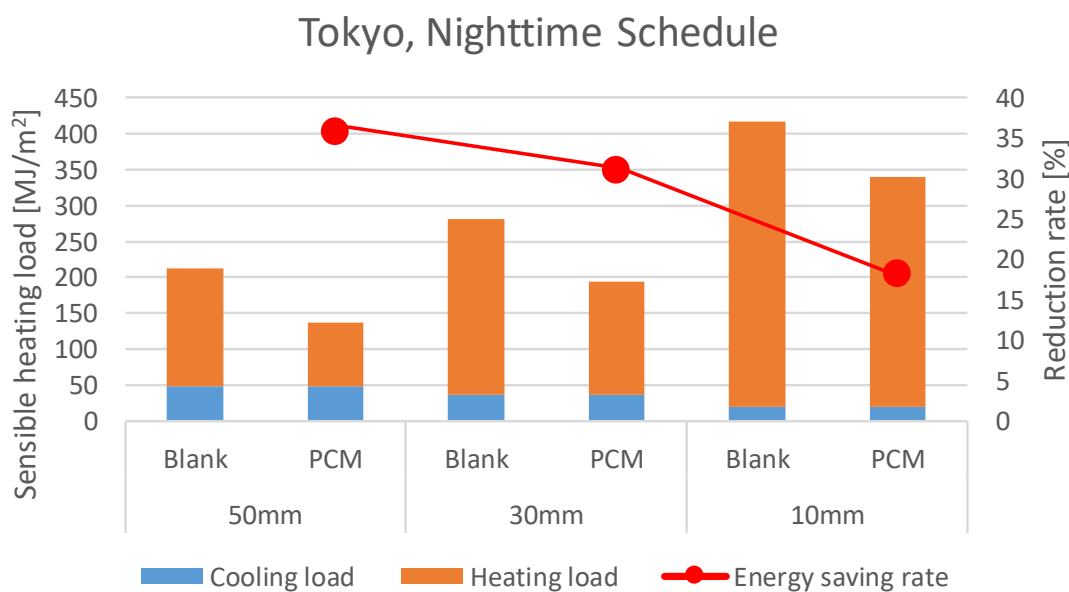


図 7.54 寝室スケジュール運転時の東京の断熱性能ごとの削減効果

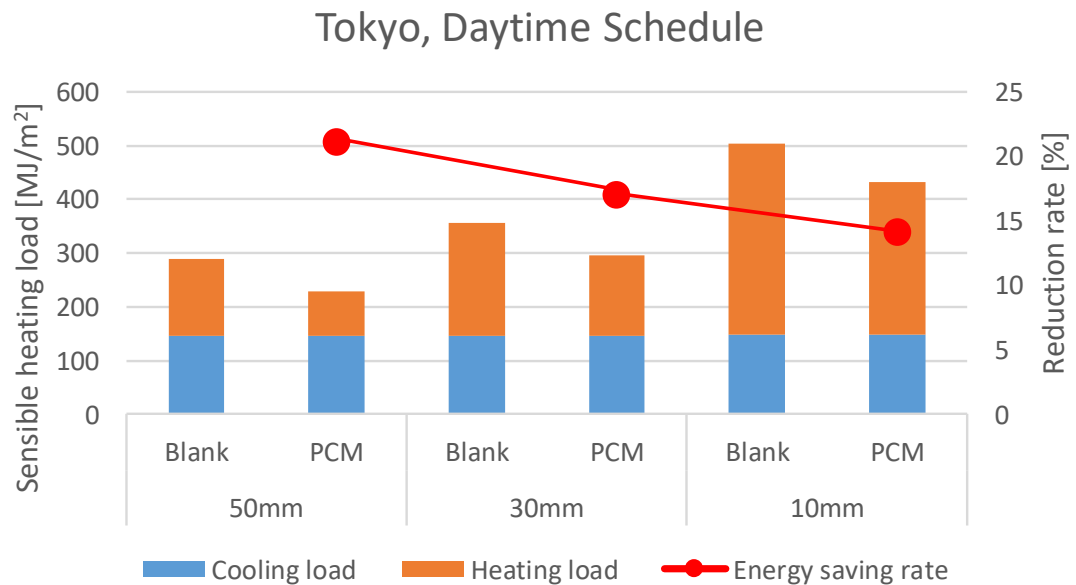


図 7.55 リビングスケジュール運転時の東京の断熱性能ごとの削減効果

ただし、PCM の削減量は断熱材の厚みによらず概ね一定の値を示した。断熱性能を高めることにより、冷房負荷には影響はほぼ見られないものの、暖房負荷が全体的に削減できることがわかる。

b) 札幌

札幌でそれぞれのスケジュール運転としたときの断熱材の厚さごとの効果を算出した。24 時間連続運転、寝室スケジュール運転、リビングスケジュール運転とした時の顕熱負荷及び削減率を図 7.56～図 7.58 に示す。

札幌は東京と同様に、暖房負荷が支配的であるため、断熱性能が高いほど年間での空調負荷が小さくなり、PCM の相対的な削減効果は高くなる。東京と比較して札幌の方が暖房負荷は高く、PCM による削減率もやや高いが、概ね運転スケジュールに依らず、東京と同様の傾向を示した。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

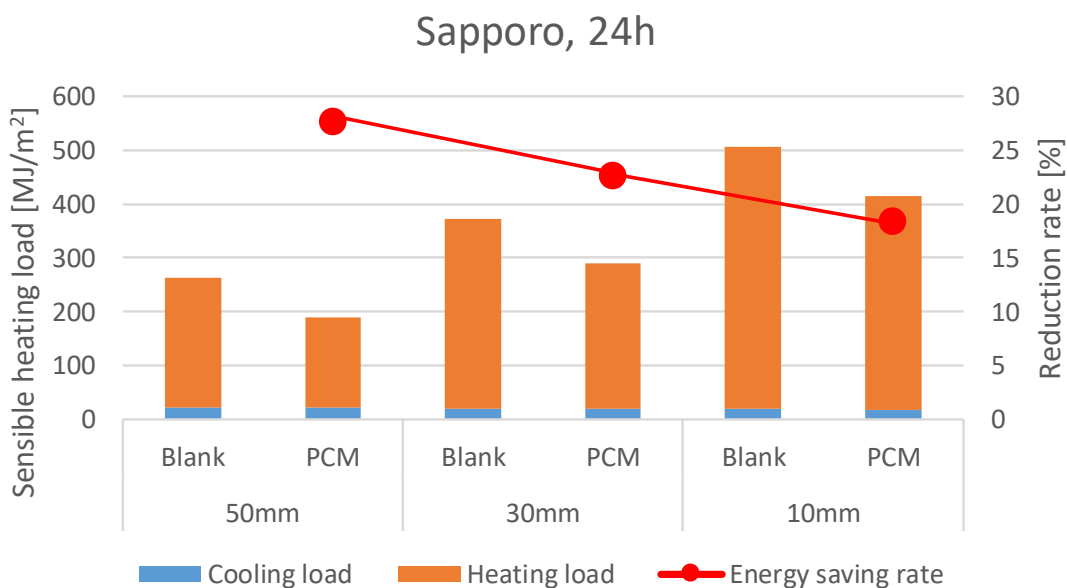


図 7.56 連続運転時の札幌の断熱性能ごとの削減効果

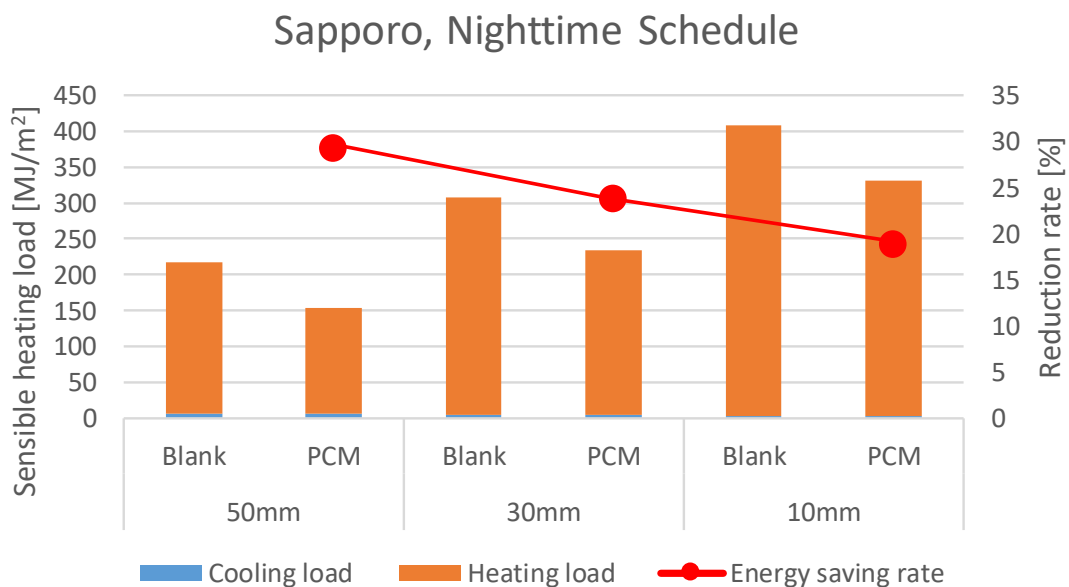


図 7.57 寝室スケジュール運転時の札幌の断熱性能ごとの削減効果

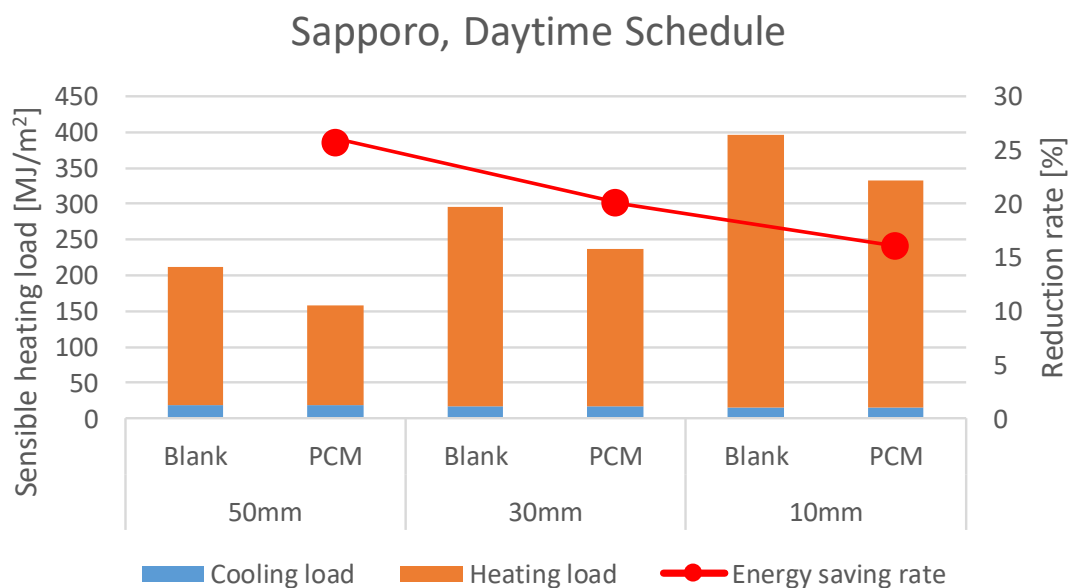


図 7.58 リビングスケジュール運転時の札幌の断熱性能ごとの削減効果

c) 那覇

那覇でそれぞれのスケジュール運転としたときの断熱材の厚さごとの効果を算出した。24 時間連続運転，寝室スケジュール運転，リビングスケジュール運転とした時の顕熱負荷及び削減率を図 7.59～図 7.61 に示す。

那覇は冷房負荷が支配的であるため，断熱材の厚みを高くすると，暖房負荷は削減されるものの，通年での PCM の効果は減少する傾向が見られた。

特に，寝室では冷房負荷が増大しており，連続運転とリビングスケジュール運転のように日中の熱を処理できることが，求められているといえる。

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

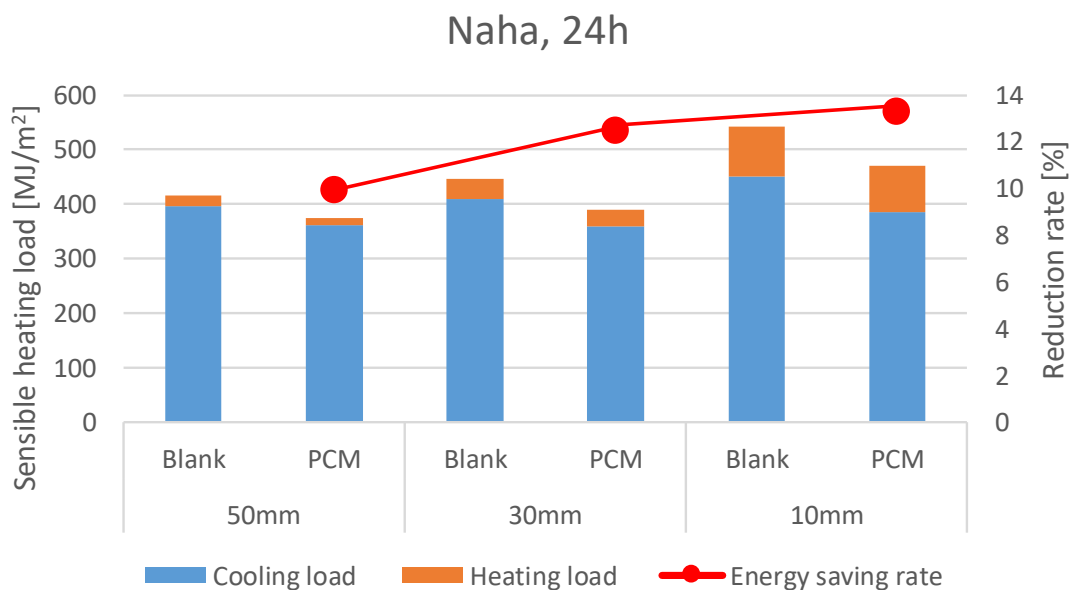


図 7.56 連続運転時の那覇の断熱性能ごとの削減効果

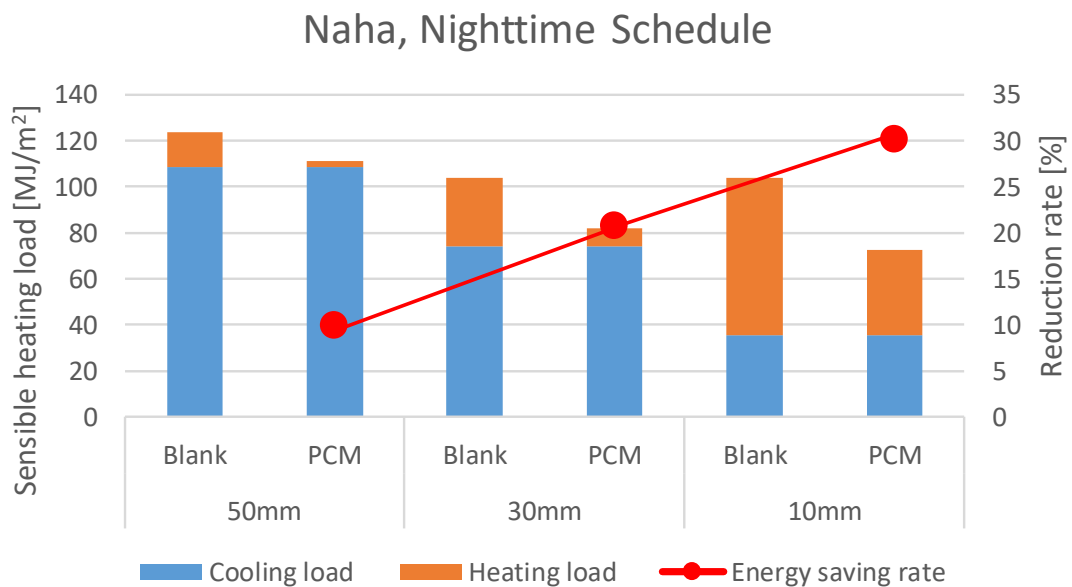


図 7.57 寝室スケジュール運転時の那覇の断熱性能ごとの削減効果

7. PCM 内装左官材の融解挙動による空調負荷削減効果

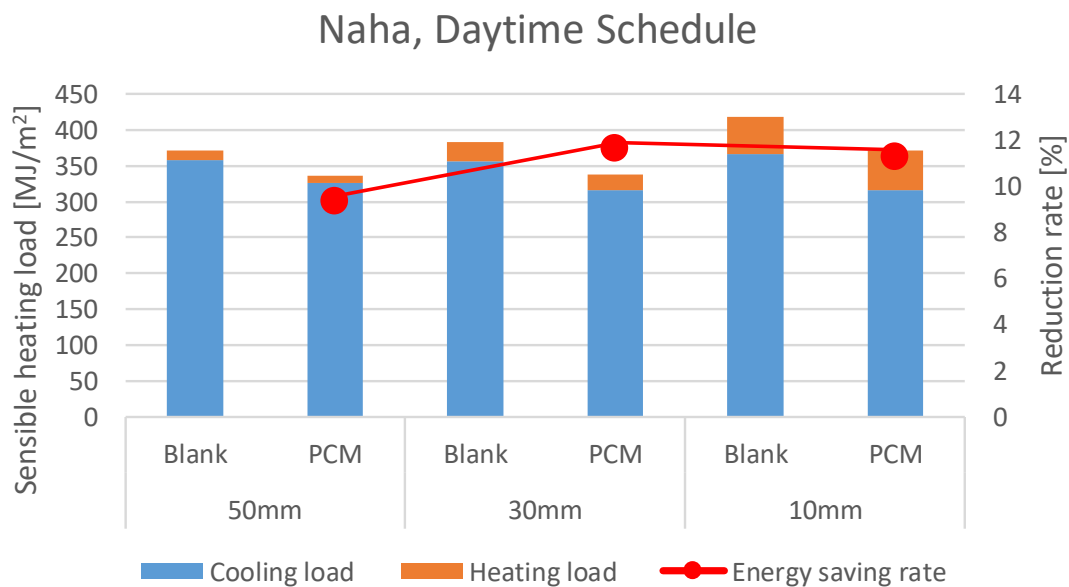


図 7.58 リビングスケジュール運転時の那覇の断熱性能ごとの削減効果

7.4 摘要

本章では、非定常熱負荷計算により、PCM 内装左官材の融解挙動による顕熱負荷抑制効果を東京・札幌・那覇の3地域において検討した。

どの地域も、連続暖房時には常に省エネルギー効果が見られた。冬季はどの地域も設定室温と融点が近いほど暖房負荷は小さい値を示した。暖房負荷が支配的である東京と札幌では冬季の設定室温と融点をあわせる程負荷削減効果が高い。ただし、融解幅が大きいほど融解開始温度は低いほうが効果的であることがわかる。那覇では冷房負荷が支配的であるため、東京、札幌に比べて高い融点が適していることが考えられる。

また、地域ごとに年間負荷削減量に違いはみられたが、札幌、東京での年間負荷削減量は、断熱性能によらず、概ね一定となった。室の余剰な熱量、つまり、過昇温が生じるかどうかは、地域や方位、窓面積の違いによっても異なることが考えられ、これらの違いによる PCM 内装左官材の効果については第9章で詳細に検討することとする。本章では、理想的な融解挙動を把握するために、シンプルな矩形波を用いて検討を行ったが、実際の融解挙動とは異なる場合も多くみられることから、実在する PCM の融解挙動を精密に近似できているとはいえない。ただし、本章で得られた知見は、今後の材料開発の目指すべき視点、性能の大きく異なる複数の PCM の融解挙動特性を比較するときなどに、貢献できるものである。

参考文献

- 7.1) 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林禎彦, 石黒成紀: 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
- 7.2) 添田晴生, 大西潤治, 木本日出夫: PCM を利用した室内熱環境調整に関する研究: 第 1 報-PCM 数値モデルの検証と熱気流環境解析コードへの導入, 空気調和・衛生工学会論文集 (86), pp.11-19, 2002.7
- 7.3) 添田晴生, 大西潤治, 中田亮生, 杉本俊哉, 鄭用賢, 木本日出夫: PCM を利用した室内熱環境調整に関する研究: 第 2 報-パラフィンの融解を伴う熱伝導実験による PCM 数値モデルの検証, 空気調和・衛生工学会論文集 (94), pp.1-9, 2004.7
- 7.4) 添田晴生, 中田亮生, 高岡大造: 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・衛生工学会論文集 (203), pp.1-11, 2014.2
- 7.5) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, pp.26-189
- 7.6) 坊垣和明, 澤地孝男, 吉野博, 鈴木憲三, 赤林伸一, 井上隆, 大野秀夫, 松原斎樹, 林徹夫, 森田大: 全国的調査に基づく住宅の暖冷房時間および暖冷房期間に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 63(509), pp.41-47, 1998

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

8.1	物理モデルの概要	289
8.1.1	PCM 窓	
8.1.2	数値計算の概要	
8.2	PCM 窓の設置方法による検討	292
8.2.1	数値計算の概要	
8.2.2	PCM 窓内付時の顕熱負荷	
8.2.3	PCM 窓外付時の顕熱負荷	
8.3	PCM 窓の地域ごとの検討	304
8.4	摘要	307

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

第5章では、PCM を開口部に適用した時の、光学的・熱的な物性について検討した。開口部に PCM を適用したシステムとして2重ガラス内部に PCM を充填し、インプラスの内付け窓として利用できる PCM 及び、中扁平管ブラインド内部に PCM を充填し、外付けブラインドとして利用できる PCM ブラインドを提案した。

PCM 窓は、固相・液相などの状態変化時に日射の透過率が変化するために、時刻毎にそのダイレクトゲイン特性が異なり、夏季には日射遮蔽効果、冬季には夜間の窓面から熱損失損失を防止するだけではなく、コールドドラフト抑制効果なども期待できる。固相時には、視覚・眺望を得るための機能は持たないものの、伝統的にすりガラスやガラスブロックが建築に多用されてきたことを考慮すれば、デザイン的な選択肢として捉えることもでき、カーテンや障子の用途として捉えることも可能である。

これまで、PCM を開口部に利用して研究された例は、近年、PCM を開口部に適用したときの温度挙動や光学的特性に関する数値計算による検討が見られるが^{8.1)~8.9)}、室内温熱環境に与える影響について検討し、地域ごとの最適融点に関して検討された研究は少ないようである。

PCM 窓はその融解挙動によって効果に違いが出ることが予想されるため、最適融点に関する検討が求められている。本章では、PCM 窓の融解挙動ごとの顕熱負荷を算出し、窓に PCM を設置した時に求められる最適な融解挙動について、地域ごとに検討を加える。

なお、PCM ブラインドは、ダブルスキン等に設置した際に、ナイトパーズや夜間換気駆動力などが得られることが確認されたが、外付けブラインドとして設置した時、室内への入射熱量をやや低減できる効果は確認されたものの、その効果は全体の入射日射量の2%程度と小さいことから、本章では PCM 窓の顕熱負荷抑制効果の検討のみにとどめた。

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

8.1 物理モデルの概要

8.1.1 PCM 窓

PCM 窓は、既存の窓の内側に 2 重窓として設置し、日中に得られる日射熱を効率よく蓄熱し、夜間に開口部から室内に熱が放熱されるシステムである。写真 8.1 に実験棟に設置した PCM 窓が固相から液相に変わる様子を示す。固相時と液相時では透過特性が異なることがわかる。住宅における窓の利用を考えると、日中は眺望を得るため、夜間は視界を遮るためにカーテン等で調整することが多く、窓に求められる性能として、透過性が高いことは必ずしも絶対条件とは限らない。開口部はダイレクトゲインを得ることができる一方で、建築全体の熱損失のうち半分程度を占める等、熱授受の大きい部位であるため、眺望やデザイン、熱的な観点から適切設計が求められている。

本章では、PCM 窓の物理モデルを考案し、融解挙動ごとの効果を算出することにより、地域ごとに求められる PCM の融解挙動特性について検討を加える。

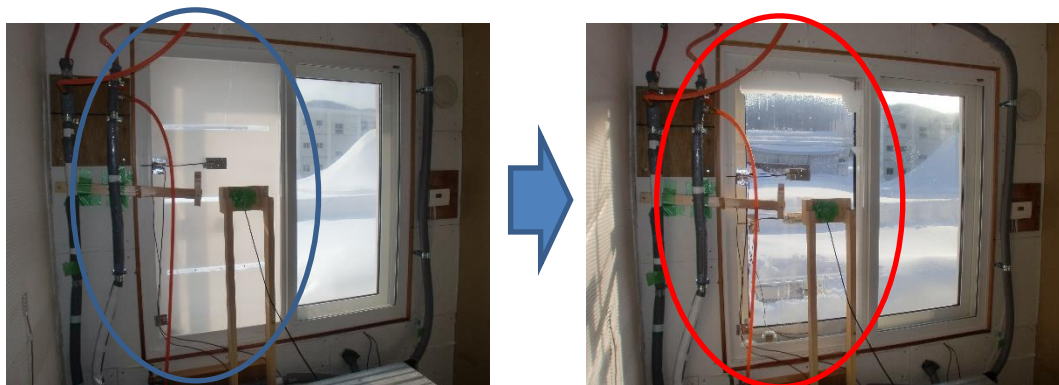


写真 8.1 PCM 窓が固相から液相に変わる様子

8.1.2 数値計算の概要

PCM 窓の物理モデルの概念図を図 8.1 に示す。開口部の構成は、既存のペアガラスのような一般的な透過・反射特性を持つ窓、空気層及び PCM 窓から成っている。既存の窓は単板ガラスやペアガラス、トリプルガラス等があり、そ

れらを総称して窓と表記した。

また、PCM 窓は図 5.6 に示したようなガラスやアクリル等の透明な容器に PCM が重点された物体の総称を PCM 窓と表記した。

窓の表面温度の算出式を式(8.1)、空気層の熱収支式を式(8.2)、PCM 窓の室外側の熱収支式を式(8.3)、PCM 窓の室内側の熱収支式を式(8.4)に示す。

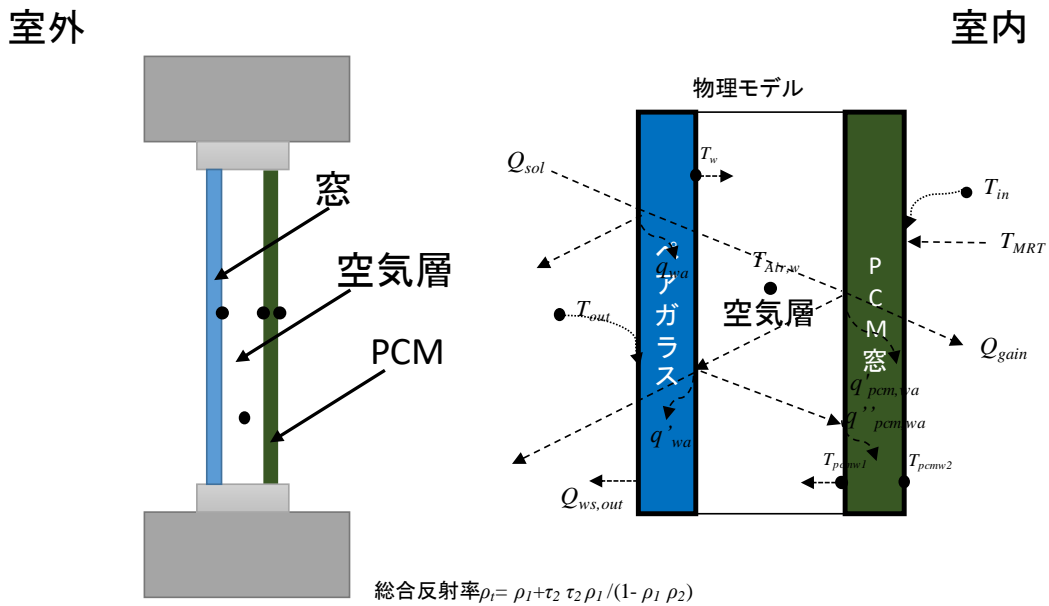


図 8.1 PCM 窓の物理モデル

① 窓の表面温度 : w

$$T_w^n = (1 - U_w / \alpha_i) (\alpha_c / \alpha_i * T_{Air,w}^{n-1} - \alpha_r / \alpha_i * T_{pcmw1}^{n-1} + q_{wa}^{n-1} / \alpha_i) + U_w / \alpha_i (q_{wa}^{n-1} / U_w - \varepsilon F_s R N^{n-1} / \alpha_o + T_{out}^{n-1}) \quad (8.1)$$

② 空気層の熱収支式 : Air,in

$$CAP_{Air} \frac{\partial T_{Air,w}}{\partial t} = Q_w - Q_{pcmw1} \quad (8.2)$$

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

③ PCM 窓(室外側)の熱収支式： pcm,w_1

$$CAP_{(pcm+in)/2} \frac{\partial T_{pcm,w_1}}{\partial t} = Q_{Air,w} + Q_w + q'_{pcmwa} + q''_{pcmwa} - Q_{pcm,w_1} \quad (8.3)$$

③ PCM 窓(室内側)の熱収支式： pcm,w_2

$$CAP_{(Air+pcm)/2} \frac{\partial T_{pcm,w_2}}{\partial t} = q_{pcm,w_2} - Q_{in} - Q_{MRT} \quad (8.4)$$

$T_{Air,w}$: 空気層の空気温度,

Q_{sol} : 窓面日射量,

Q_{gain} : 透過日射量,

q', q'' : 吸収熱量

既存の窓と PCM 窓に入射する入射角及び反射角は等しいと仮定した。また、窓の室外側と室内側の透過・吸収・反射特性は等しいと仮定し、総合的な反射率は式(8.5)から求めた。また、ガラス内部で反射を繰り返し、吸収される量を式(8.6)として求めた。

$$\rho_t = \rho_l + \tau_l \tau_l \rho_l / (1 - \rho_l \rho_l) \quad (8.5)$$

ρ_t : 総合反射率

ρ_l : 窓の反射率

τ_l : 窓の透過率

$$q'_{wa} = q''_{pcm,wa} = (Q_{sol} - \rho_t Q_{sol} - Q_{gain} - q_{wa} - q'_{pcm,wa})/2 \quad (8.6)$$

8.2 PCM 窓の設置方法による検討

8.2.1 数値計算の概要

PCM 窓の融解挙動ごとの効果を検討するにあたり、前7章で述べた簡易熱箱モデルを用いて検討する。PCM の比熱も図 7.7 に示したような矩形による融解挙動を用いて検討し、各地における最適な融解挙動について検討を加える。

図 8.2 に PCM 窓を設置した時の熱回路網を示す。開口部分以外については、前7章で述べた通りであるため、本節では、開口の部分のみ(図 8.2 中、赤枠⑥~⑧)説明を加えるものとする。⑧の窓の表面温度は式(8.1)に示した。PCM 窓の両表面温度の算出式を式(8.7)及び式(8.8)に示す。

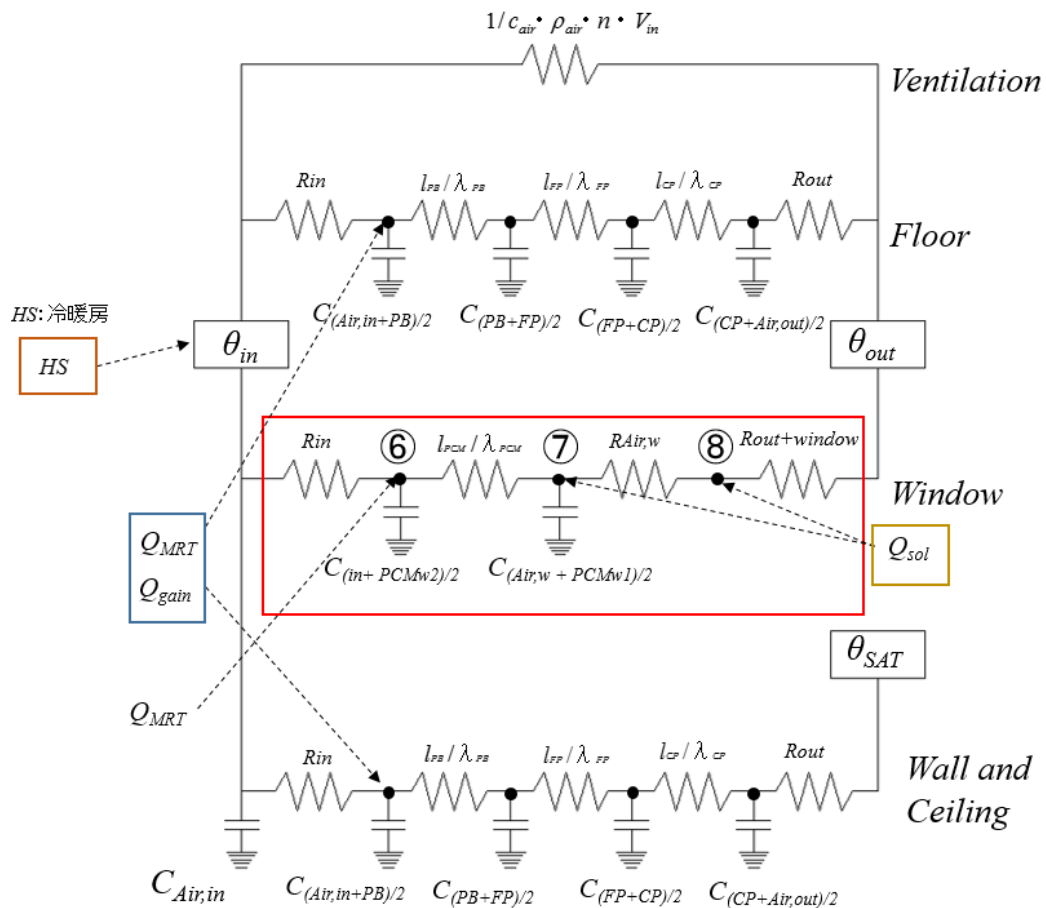


図 8.2 PCM 窓の熱回路網

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

⑥ PCM 窓表面室内側

$$T_6^n = \frac{\Delta t}{C_{(Air,in+PCM,w)/2} R_{PCM,w}} \left(T_{in}^{n-1} \frac{\alpha_r}{\alpha_i} + T_{MRT}^{n-1} \frac{\alpha_c}{\alpha_i} \right) + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{(Air,in+PCM,w)/2} R_{PCM,w}} - \frac{\Delta t}{C_{(Air,in+PCM,w)/2} R_{Air,in}} \right) T_6^{n-1} + \frac{\Delta t}{C_{(Air,in+PCM,w)/2} R_{Air,in}} T_7^{n-1} \quad (8.7)$$

⑦ PCM 窓表面室外側

$$T_7^n = \frac{\Delta t}{C_{(PCM,w+Air,w)/2} R_{PCM,w}} \left(T_{Air,w}^{n-1} \frac{\alpha_r}{\alpha_i} + T_{ws}^{n-1} \frac{\alpha_c}{\alpha_i} + \frac{q'_{pcm,wa}{}^{n-1} + q''_{pcm,wa}{}^{n-1}}{\alpha_i} \right) + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{(PCM,w+Air,w)/2} R_{Air,w}} - \frac{\Delta t}{C_{(PCM,w+Air,w)/2} R_{PCM,w}} \right) T_7^{n-1} + \frac{\Delta t}{C_{(PCM,w+Air,w)/2} R_{Air,w}} T_{pcm,w}^{n-1} \quad (8.8)$$

また、第5章の試験結果を参考に、PCMの日射透過率は、図8.3に示すように、固相域と液相域で一定値を示し、固液相域で直線的に透過率が変化するものと仮定した。第5章での実験結果は可視光領域の範囲において両表面の平均温度から概ね透過率が予測できることを示した。

PCM窓の日射透過率及び反射率を正確に予測するためには今後も更なる検討が必要であるが、本節では、日射透過率を図8.3のようにPCM窓両表面の平均温度から透過率を予測した。

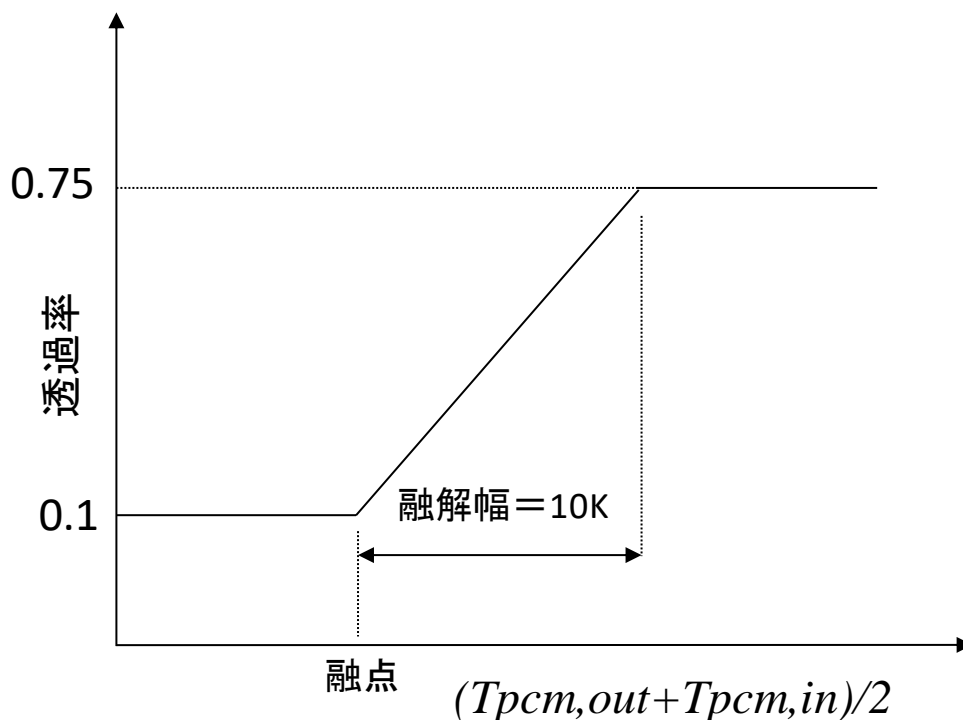


図 8.3 日射透過率の予測

8.2.2 PCM 窓内付時の顕熱負荷

第5章でも述べたように、PCM 窓単体の断熱性能は低く、既存の窓に内付または外付けで設置することが必要である。本節では、既存のペアガラスの内側に PCM 窓を設置したときの融解挙動ごとの顕熱負荷を算出して、最適融点について検討した。また、厚みによる違いについても検討を加えた。

PCM 窓の融解幅は第5章の図 5.7 や図 5.8 からわかるように、融解開始から終了までの融解幅は 10°C 程度と広く、実現象を考慮したときには細かい融解幅に設計することは困難であると考えたため、本章で検討する PCM 窓の融解幅は図 8.3 に示すように 10K で固定した。

図 8.4 に、東京における連続運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷を示す。暖房負荷、冷房負荷ともに PCM 窓による顕熱負荷削減効果が確認でき、融点 15°C のときに最も顕熱負荷は小さくなった。融解幅は 10K であるため、ピーク融点は概ね暖房時の設定室温に近いことから、第7章で求めた PCM

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

内装左官材の最適融点と概ね同様の傾向が見られる。図 8.5 に東京における連続運転時の PCM 窓（内付）の厚みごとの顕熱負荷を示すが、厚みが大きい方が蓄熱量が高く、顕熱負荷を抑制できることが確認できた。

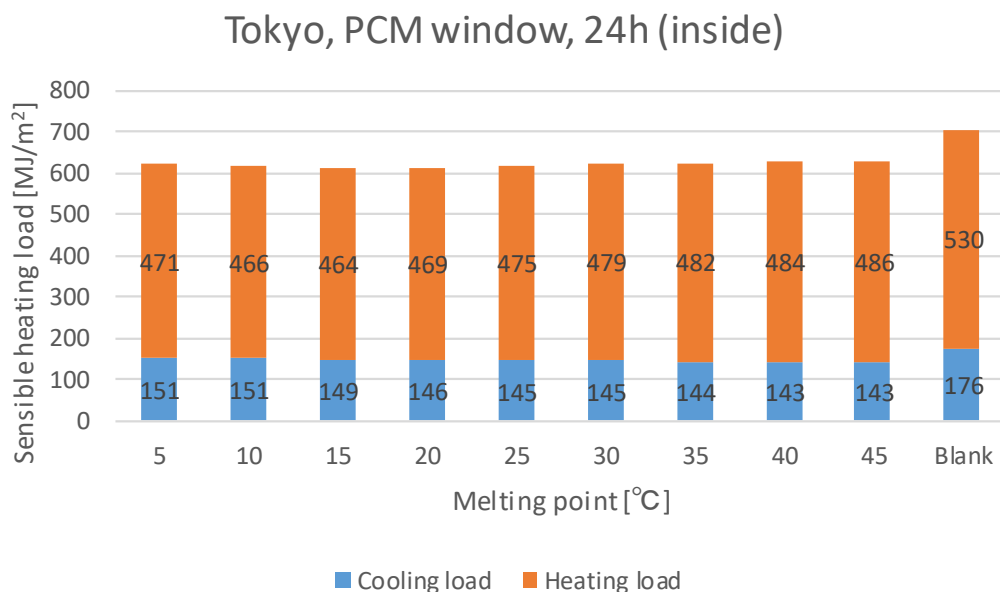


図 8.4 東京における連続運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷

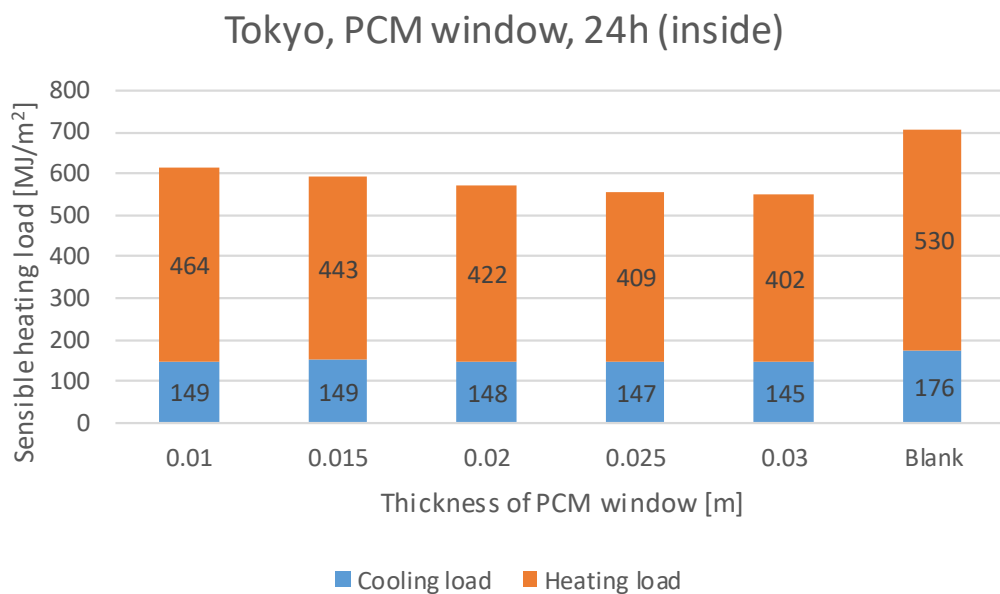


図 8.5 東京における連続運転時の PCM 窓（内付）の厚みごとの顕熱負荷

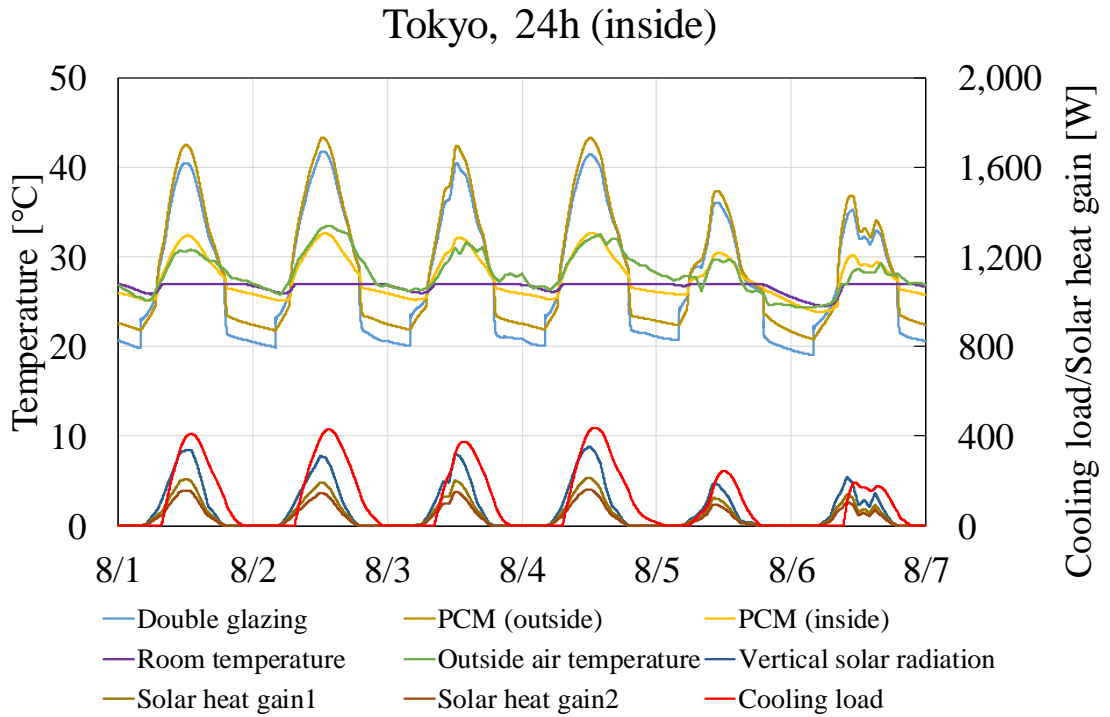


図 8.6 東京における連続運転時の PCM 窓（内付）設置時の夏季の室内環境

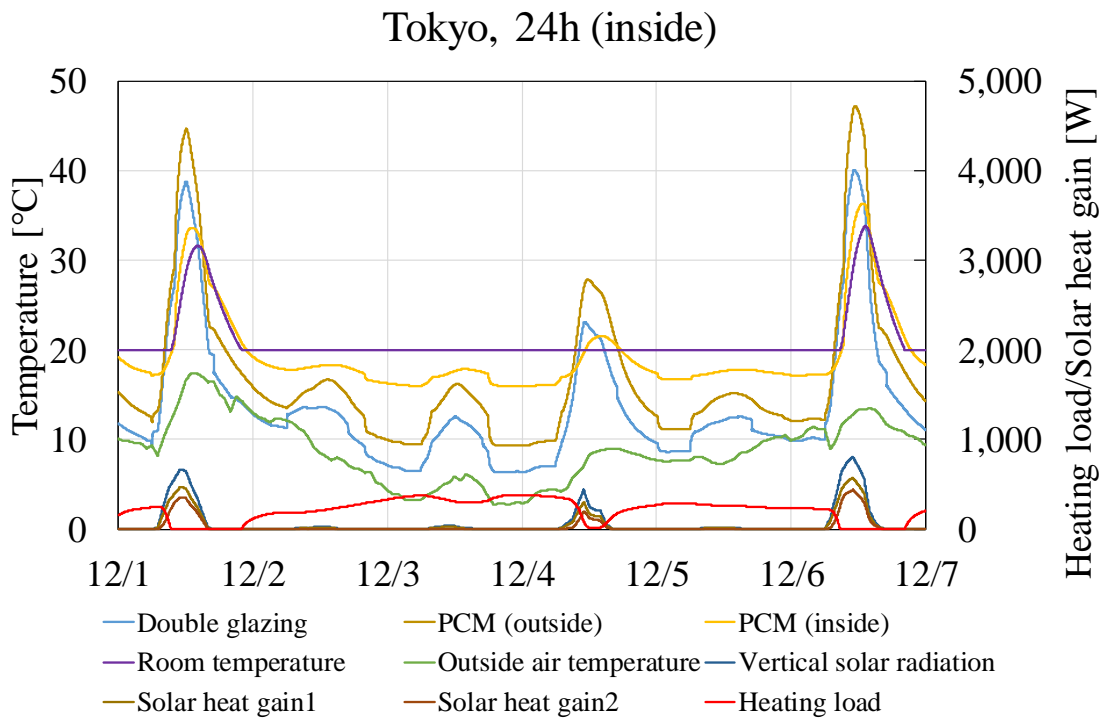


図 8.7 東京における連続運転時の PCM 窓（内付）設置時の冬季の室内環境

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

東京における連続暖房時の PCM 窓（内付）設置時の夏季の室内環境を図 8.6 に示した。融点は 15°C，融解幅は 10K であるため 20°C から 25 の間で相変化の様子が見て取れる。また，図中の凡例の Solar heat gain1 と Solar heat gain2 は，それぞれペアガラスを通過した日射量と，最終的に室に入射した日射量を示している。

図 8.7 に，東京における連続暖房時の PCM 窓（内付）設置時の冬季の室内環境を示す。冬季の南面の日射量が大きいことから，冬季でもガラス表面温度が 40°C を超える日も見られ，有効に蓄熱することで夜間へのピークシフトが期待できる。ただし曇天日にはダイレクトゲインが小さくなることが考えられ，詳細は第 9 章で検討をすすめる。

第 7 章では，寝室スケジュール運転時に，PCM の効果が負の値になることが確認されたため，PCM 窓についても同様にスケジュール運転の違いによる効果を検討した。図 8.8 に東京における寝室スケジュール運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷を示す。連続暖房時と同様に，最も顕熱負荷削減効果が大きいのは融点 15°C のときとなった。寝室スケジュール運転時でも常に負荷削減効果は確認できる。

また，図 8.9 に東京における寝室スケジュール運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷を示すが，連続暖房時と同様に，厚みが大きい程，負荷削減効果が高いことがわかる。

図 8.10 に東京における寝室運転時の PCM 窓（内付）設置時の夏季の室内環境を示す。連続運転時に比較して，立ち上がり負荷が大きいですが，固相時に日中の日射熱を遮蔽することによる効果が期待できる。図 8.11 に東京における寝室運転時の PCM 窓（内付）設置時の夏季の室内環境を示すが，晴天日には日中の日射熱を蓄熱し，夜間の暖房負荷を抑制できることが期待できる。

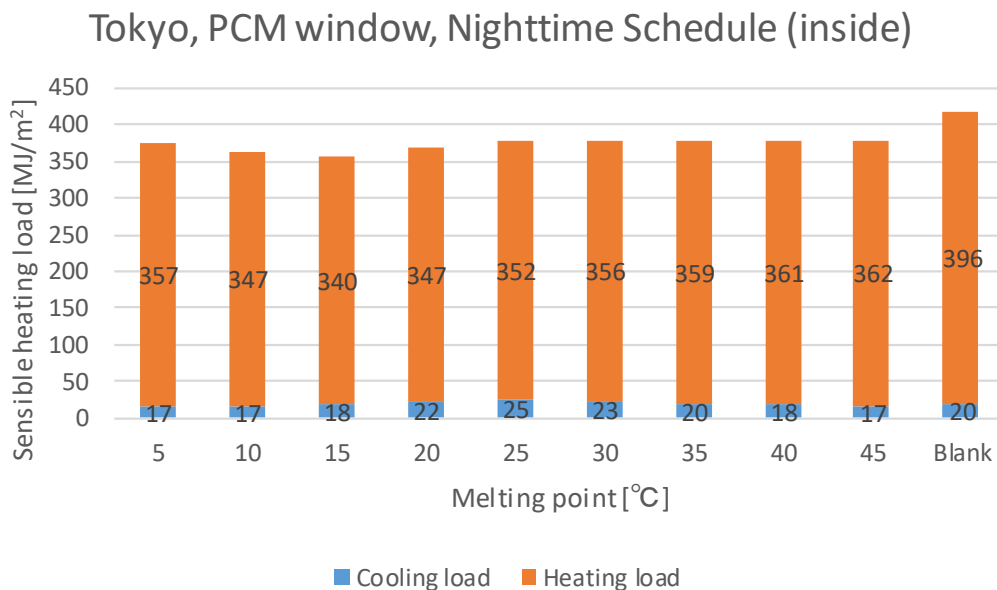


図 8.8 東京における寝室スケジュール運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷

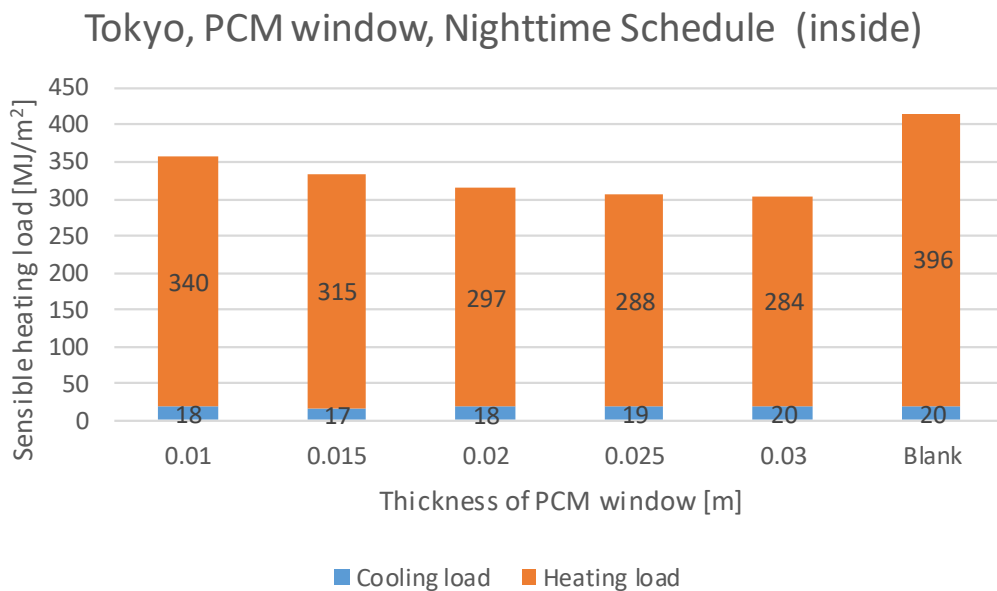


図 8.9 東京における寝室スケジュール運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

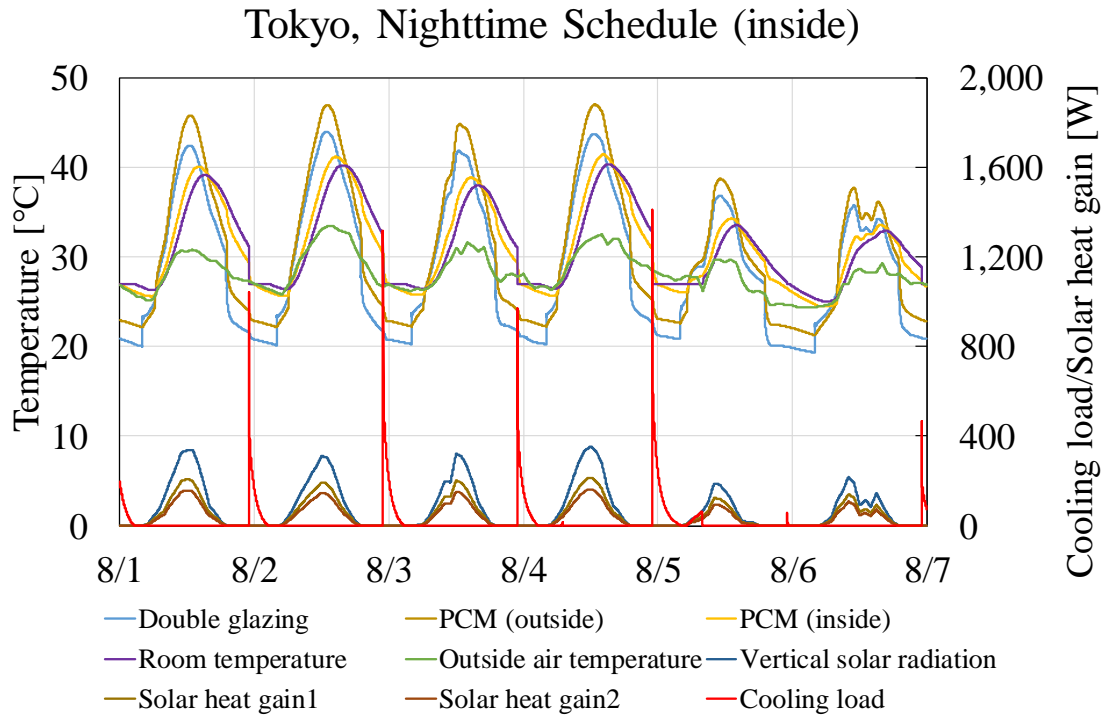


図 8.10 東京における寝室運転時の PCM 窓（内付）設置時の夏季の室内環境

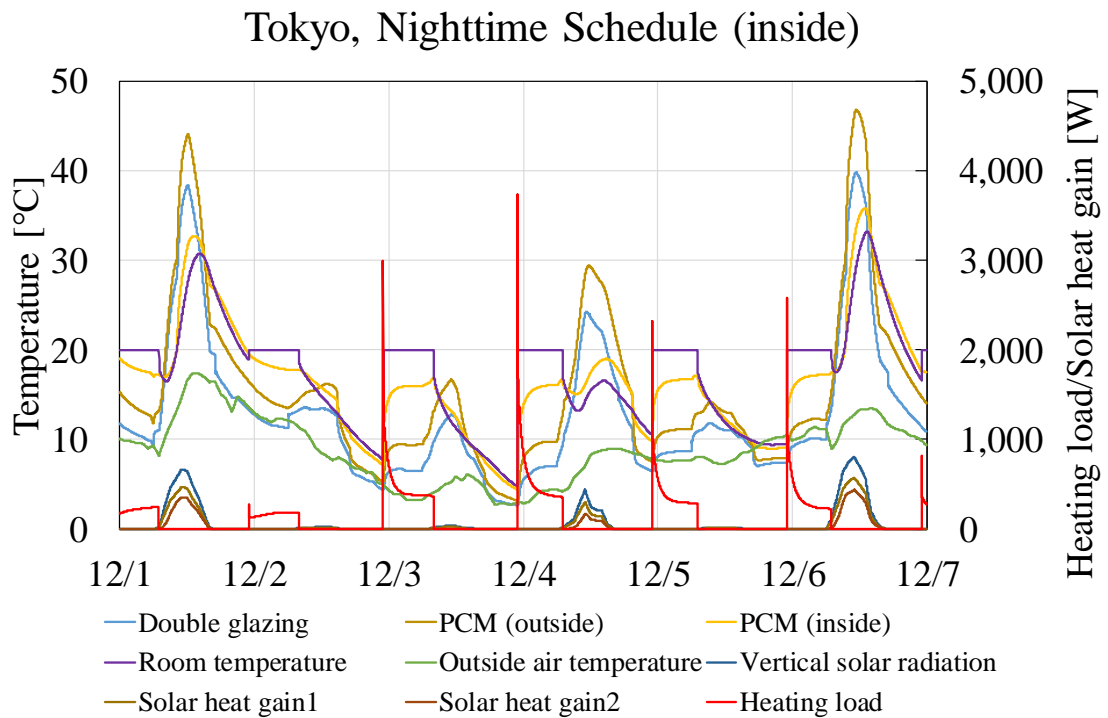


図 8.11 東京における寝室運転時の PCM 窓（内付）設置時の冬季の室内環境

8.2.3 PCM 窓外付時の顕熱負荷

図 8.12 に示すように、既存のペアガラスに PCM 窓を設置した時、日中の日射熱は、冬季は室内側、夏季には室外側に放熱されることが望ましく、設置位置によってその効果に違いが見られることが考えられる。

本節では PCM 窓を室外側に設置したときの効果を融点ごと、厚みごとに同様に検討を行った。

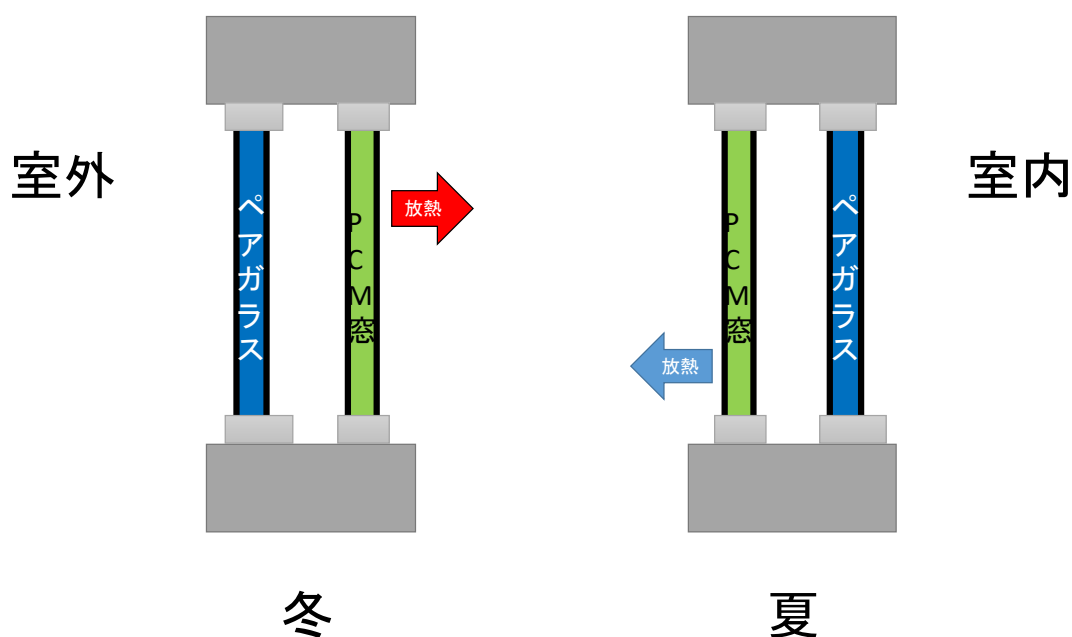


図 8.12 PCM 窓の外付けと内付の違い

図 8.13 に東京における連続運転時の PCM 窓（外付）の融点ごとの顕熱負荷を示す。暖房負荷は融点が低いほど小さい値を示している。これは、融解している時間が長いほどダイレクトゲインを取り入れることができるということを示しているが、蓄放熱挙動によるものではない。冷房負荷が融点が高い程小さくなるのも、融解している時間を短くすることによる日射遮蔽効果であると考えられる。

図 8.14 に東京における連続運転時の PCM 窓（外付）の厚みごとの顕熱負荷を示すが、厚みが薄いほど顕熱負荷が小さくなっているのは、上述のとおり、

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

ダイレクトヒートゲインが大きくなっているためであり、PCM の蓄放熱挙動の影響ではないと考えられる。よって PCM の蓄放熱挙動を活かすには内付での検討が妥当であるといえる。

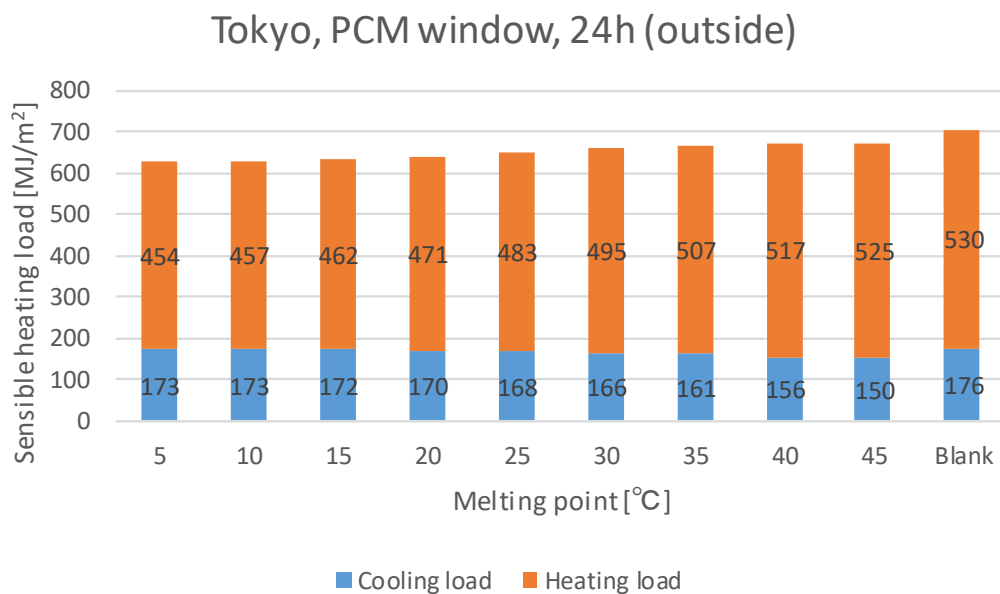


図 8.13 東京における連続運転時の PCM 窓（外付）の融点ごとの顕熱負荷

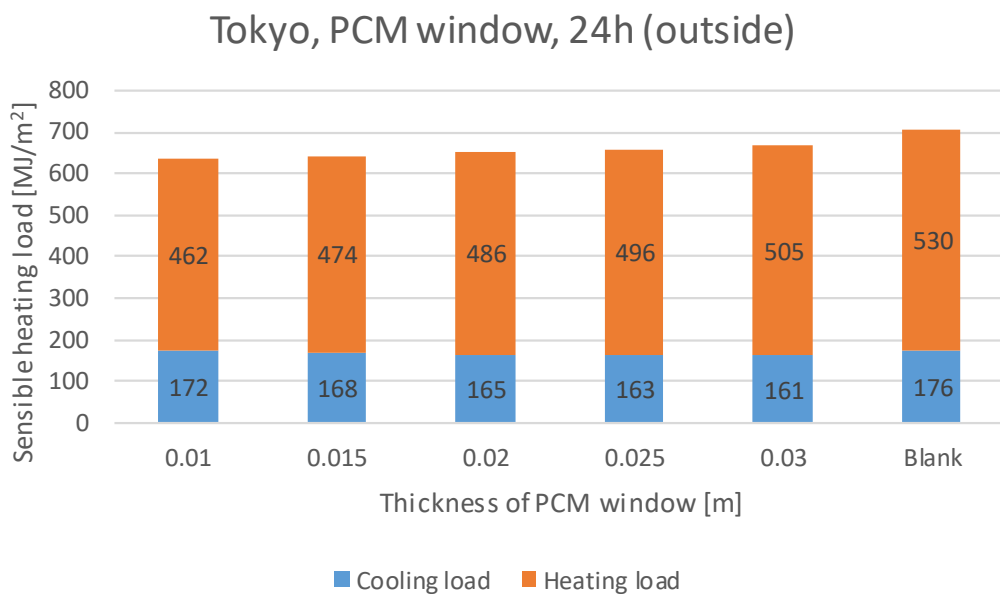


図 8.14 東京における連続運転時の PCM 窓（外付）の厚みごとの顕熱負荷

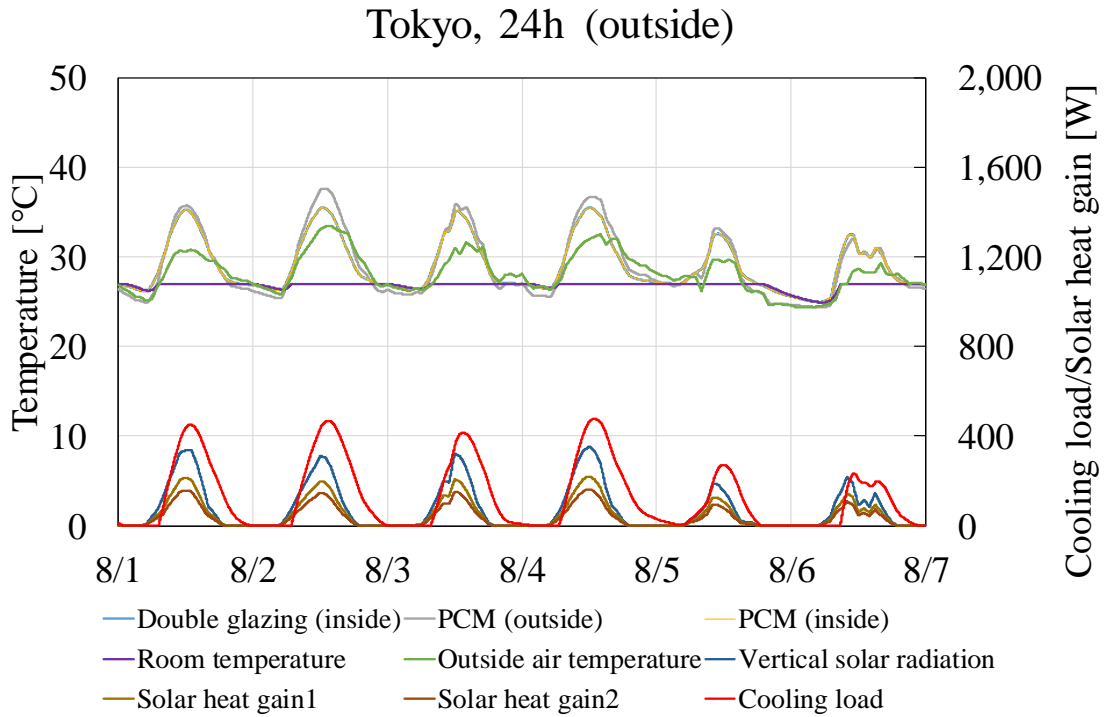


図 8.15 東京における連続運転時の PCM 窓（外付）設置時の夏季の室内環境

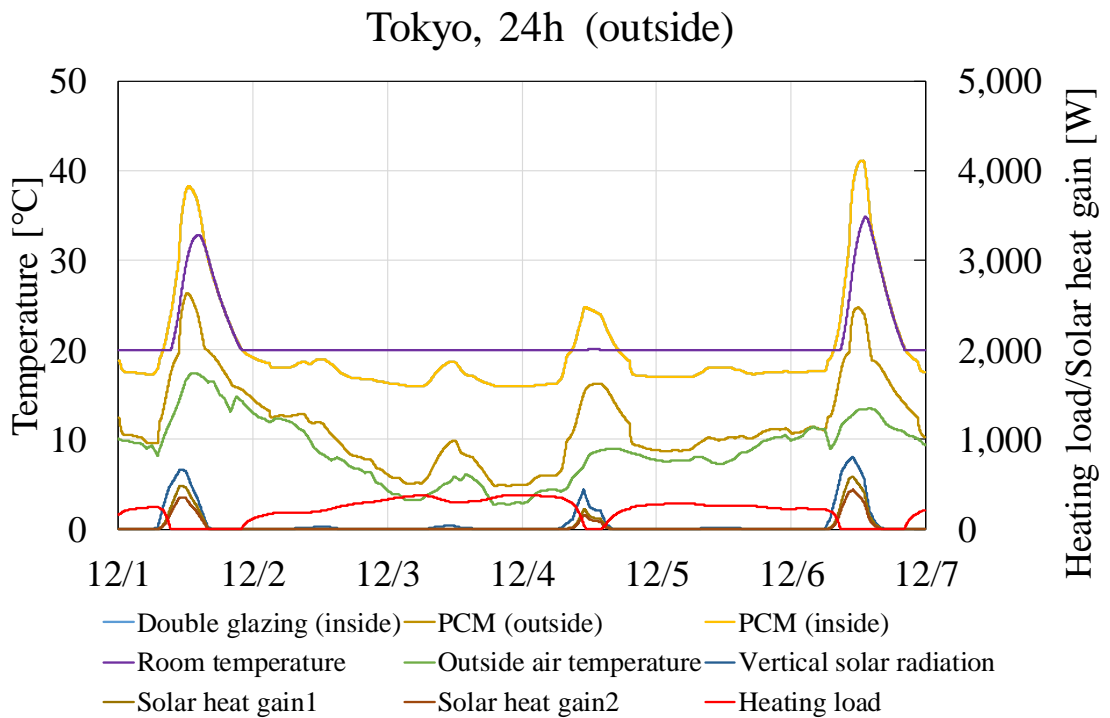


図 8.16 東京における連続運転時の PCM 窓（外付）設置時の冬季の室内環境

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

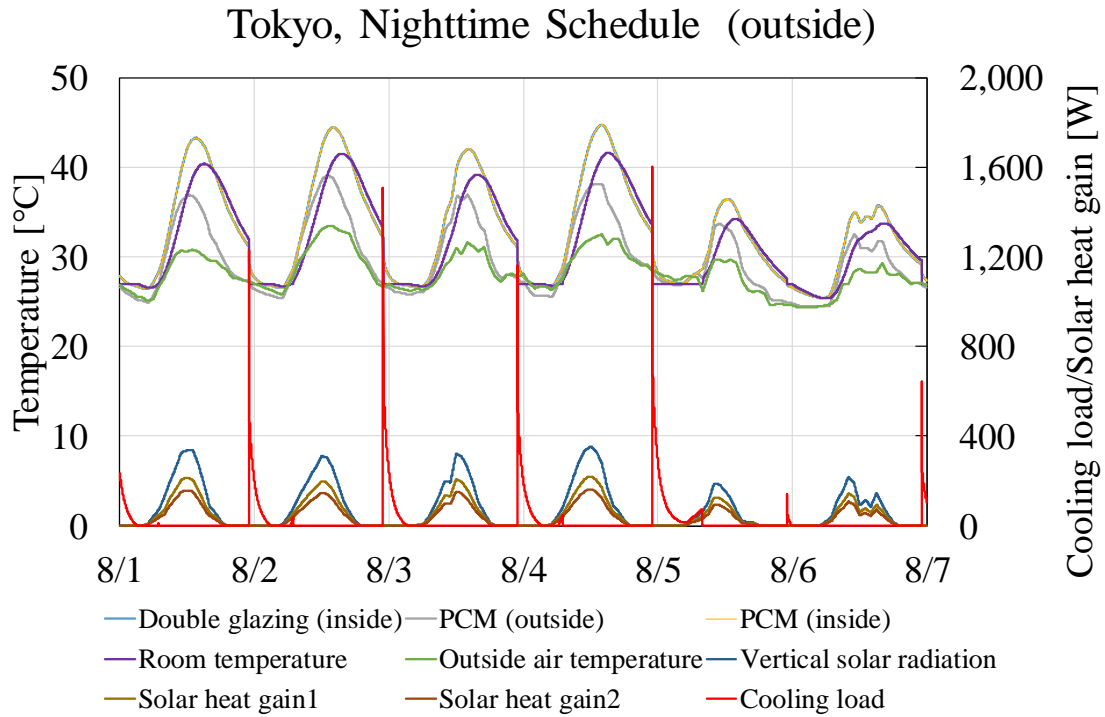


図 8.17 東京における寝室運転時の PCM 窓（外付）設置時の夏季の室内環境

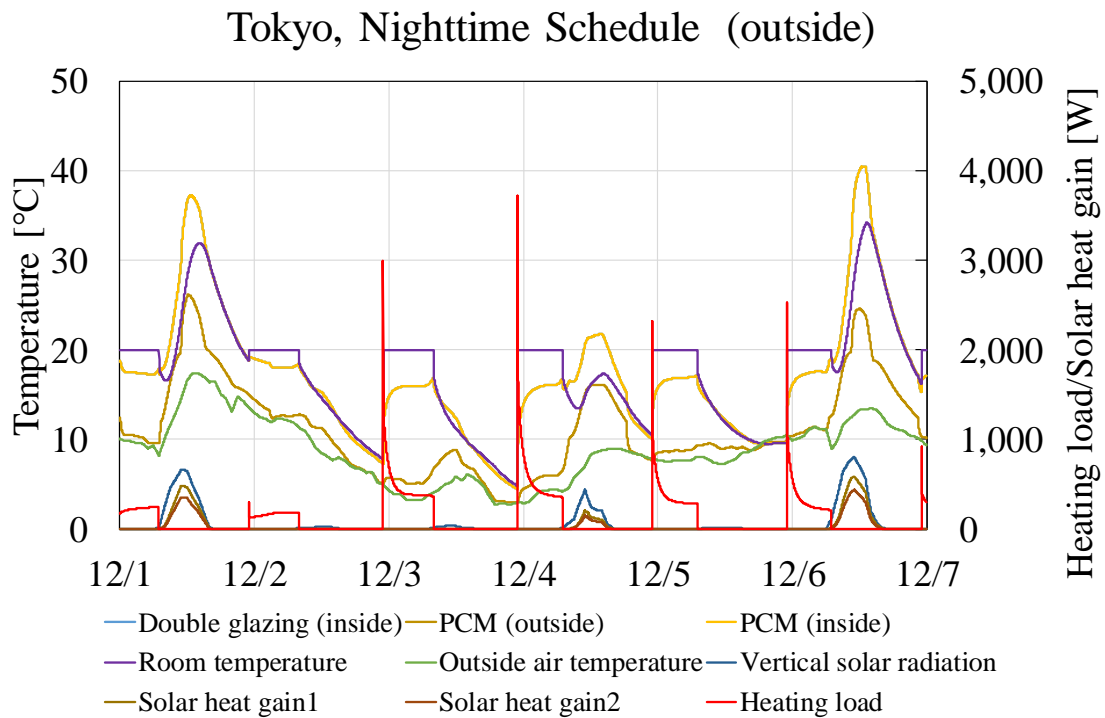


図 8.18 東京における寝室運転時の PCM 窓（外付）設置時の夏季の室内環境

図 8.15 に東京における連続運転時の PCM 窓（外付）設置時の夏季の室内環境を示し、図 8.16 に東京における連続運転時の PCM 窓（外付）設置時の冬季の室内環境を示す。

PCM 窓を内付に設置したときに比べて、外付けで設置した場合では、窓表面温度がほぼ変わらないことがわかる。PCM 窓は熱貫流率が $7.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と大きく、断熱性能が低いことから、外気側に PCM 窓を設置した時には両表面温度に温度差が見られないことなどが考えられる。夏季における省エネルギー効果が内付と比較して小さいのは、外付けに設置したことで吸収される熱量が増えていることにも起因すると考えられる。

図 8.17 に東京における寝室スケジュール運転時の PCM 窓（外付）設置時の夏季の室内環境を示し、図 8.18 に東京における寝室スケジュール運転時の PCM 窓（外付）設置時の夏季の室内環境を示す。

夏季・冬季においても同様に、PCM 両表面温度差は小さく、蓄熱挙動は顕著にみられない。

ただし、今後、夏季に日中内付で設置した後、夜間には外付けで設置するなど工夫をすることでさらなる効果が期待できる可能性もあることから、PCM 窓システムの開発及び検討は今後も詳細に行いたい。

8.3 PCM 窓の地域ごとの検討

前節では、東京での PCM 窓の設置方法の違いについて検討し、PCM の蓄放熱性能を有効に活用するためには、PCM 窓を内付に設置することが望ましいと考えられる。ただし、地域特性については明らかではないため、本節では、札幌、那覇において同様に検討を加えた。

図 8.19 に札幌における連続運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷を示し、図 8.20 に札幌における連続運転時の PCM 窓（内付）の厚みごとの顕熱負荷を示す。また、図 8.21 に那覇における連続運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷を示し、図 8.22 に那覇における連続運転時の PCM 窓（内付）の厚みごとの顕熱負荷を示す。

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

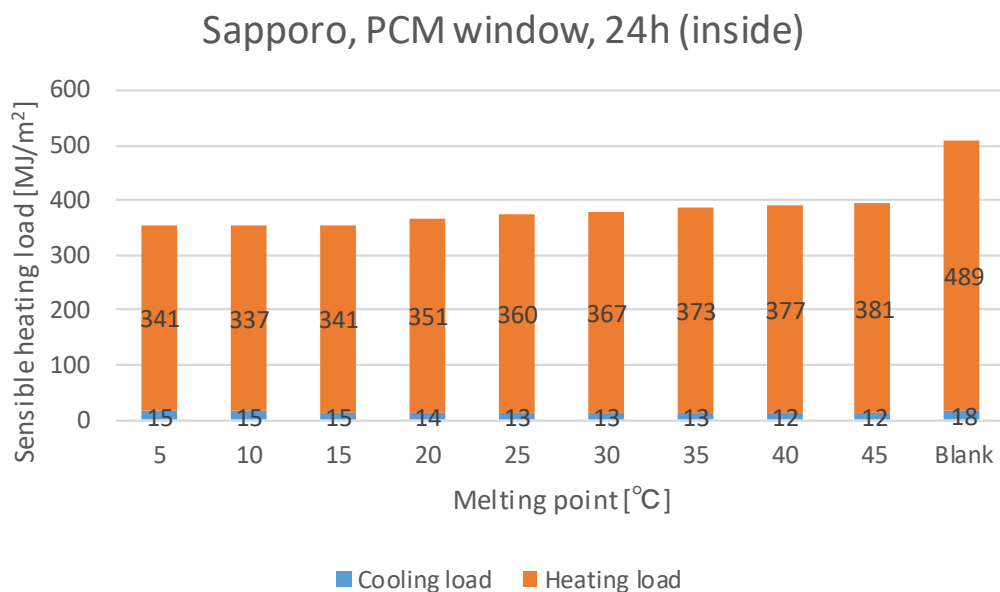


図 8.19 札幌における連続運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷

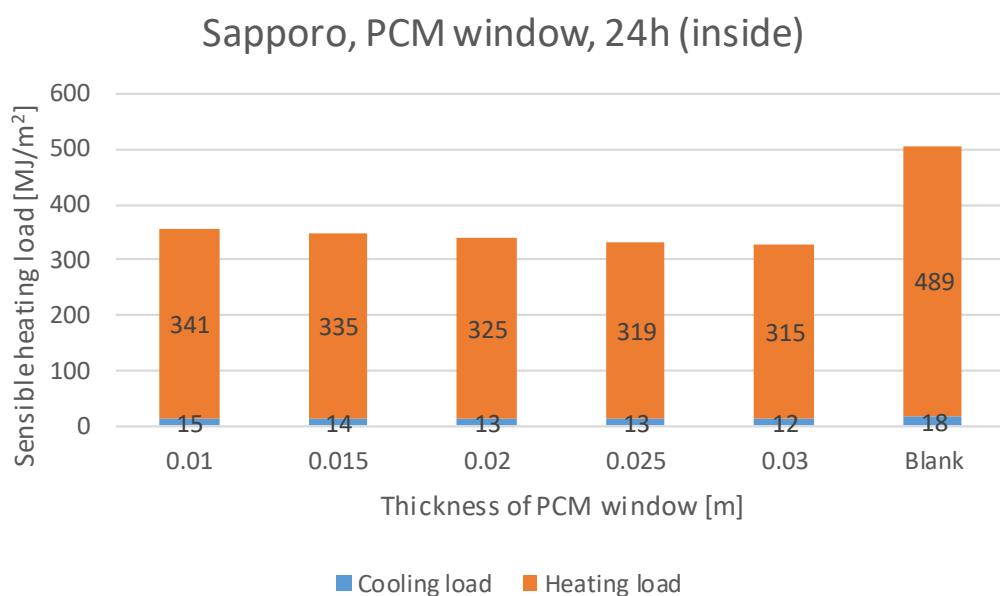


図 8.20 札幌における連続運転時の PCM 窓（内付）の厚みごとの顕熱負荷

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

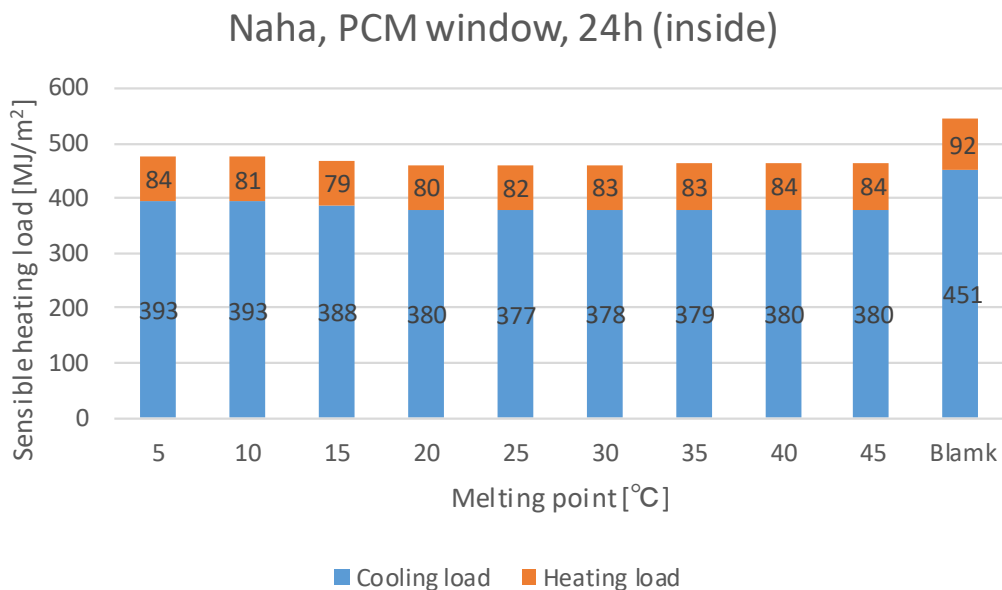


図 8.21 那覇における連続運転時の PCM 窓（内付）の融点ごとの顕熱負荷

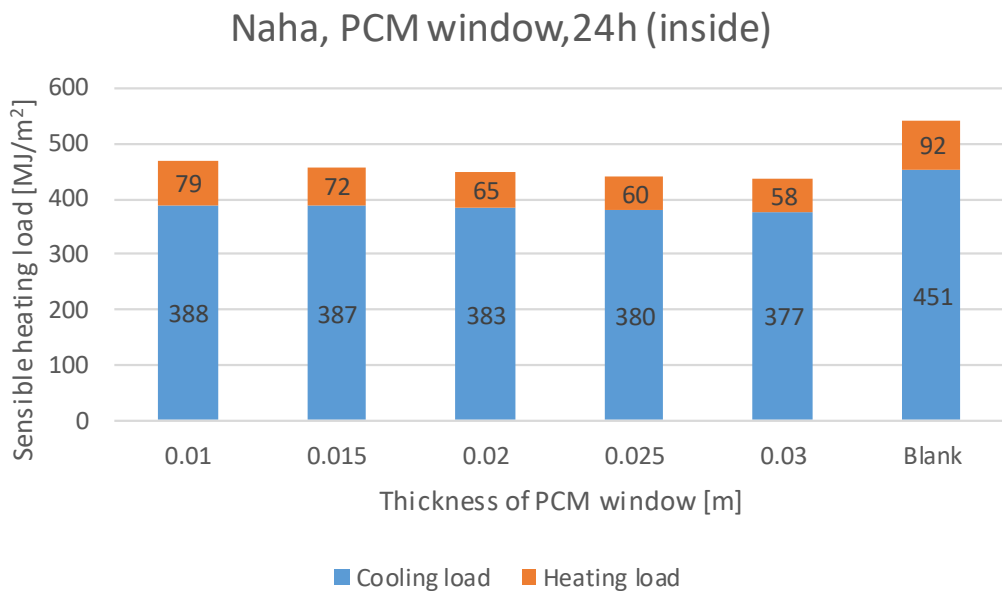


図 8.22 那覇における連続運転時の PCM 窓（内付）の厚みごとの顕熱負荷

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

札幌、那覇ともに、冬季には東京と同様にピーク融点が暖房設定室温に近いほど暖房負荷が小さい傾向がみられ、削減率についても概ね同程度である。夏季には融点が高いほど顕熱負荷削減効果が高い傾向が見られるものの、那覇ではピーク融点が冷房設定室温近辺で、冷房負荷は最も低い値となった。

厚みについては、札幌、那覇ともに厚みが大きい程、すなわち蓄熱量が大きいほど顕熱負荷削減効果が高く、蓄放熱の効果が見られた。

今後は、PCM 窓のさらなる技術開発に向けて、システムの提案や、それに伴う数値計算等、詳細に検討を進める予定である。

8.4 摘要

本章では、非定常熱負荷計算により、PCM 窓の設置方法や融解挙動による顕熱負荷抑制効果を検討した。

PCM 窓の内付と外付けの場合を検討したところ、内付の場合は PCM 両窓表面に温度差が見られ、蓄放熱と負荷削減効果が確認できたが、外付けの場合では、その傾向が顕著に確認できないことから、PCM 窓は内付に設置することが妥当であると考えられる。また、内付に設置した場合は厚みが大きいほど冷房負荷、暖房負荷ともに小さくなる傾向が見られた。

札幌、那覇でも同様の検討を行い、暖房負荷削減率、冷房負荷削減率は概ね同等程度であった。

第 7 章でも述べた通り、那覇の場合は冷房負荷が支配的な地域であることから、那覇では、東京、札幌と比較してやや融点が高いほど年間での顕熱負荷が小さいことがわかった。

今後は、PCM 窓の普及の可能性を探るため、数値計算や技術的な課題を上げるとともに検討を進めていきたい。

参考文献

- 8.1) Tin-Tai Chow, Yuanli Lyu : Numerical analysis on the advantage of using PCM heat exchanger in liquid-flow window *Applied Thermal Engineering*, Volume 125, October 2017, Pages 1218-1227
- 8.2) Shuhong Li, Gaofeng Sun, Kaikai Zou, Xiaosong Zhang : Experimental research on the dynamic thermal performance of a novel triple-pane building window filled with PCM, *Sustainable Cities and Society*, Volume 27, November 2016, Pages 15-22
- 8.3) Kecheng Zhong, Shuhong Li, Gaofeng Sun, Shanshan Li, Xiaosong Zhang : Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material, *Energy and Buildings*, Volume 106, 1 November 2015, Pages 87-95
- 8.4) Alibakhsh Kasaeian, Leyli bahrami, Fathollah Pourfayaz, Erfan Khodabandeh, Wei-Mon Yan : Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review, *Energy and Buildings*, Volume 154, 1 November 2017, Pages 96-112
- 8.5) Steinar Grynning, Francesco Goia, Egil Rognvik, Berit Time : Possibilities for characterization of a PCM window system using large scale measurements, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Volume 2, Issue 1, June 2013, Pages 56-64
- 8.6) Steinar Grynning, Francesco Goia, Berit Time : Dynamic Thermal Performance of a PCM Window System: Characterization Using Large Scale Measurements, *Energy Procedia*, Volume 78, November 2015, Pages 85-90
- 8.7) Shuhong Li, Kecheng Zhong, Yingying Zhou, Xiaosong Zhang : Comparative study on the dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window, *Energy and Buildings*, Volume 85, December 2014, Pages 483-492
- 8.8) Kamal A.R. Ismail, Carlos T. Salinas, Jorge R. Henriquez : Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 5, 2008, Pages 710-719
- 8.9) Francesco Goia, Enico Boccaleri : Physical–chemical properties evolution and thermal

8. PCM 窓の設置方法と融点の違いによる空調負荷削減効果

properties reliability of a paraffin wax under solar radiation exposure in a real-scale PCM window system, *Energy and Buildings*, Volume 119, 1 May 2016, Pages 41-50

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における 室内環境設計	
9.1 計算概要	311
9.2 寝室における PCM 建材の効果	313
9.2.1 東京	
9.2.2 札幌	
9.2.3 那覇	
9.3 リビングにおける PCM 建材の効果	317
9.3.1 東京	
9.3.2 札幌	
9.3.3 那覇	
9.4 各地での PCM 建材の負荷削減効果	330
9.5 札幌における連続運転時の効果	333
9.6 摘要	337

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における室内環境設計

第5章では、PCM建材を適用した実住宅及び事務所の実測結果を示し、PCM内装左官材を適用した実際の室内環境について示した。寒冷地における南面に大開口を有する高断熱・高气密住宅において全館空調をした時の省エネルギー効果や快適性について確認した。

第7章及び第8章では、PCM内装左官材とPCM窓の効果に求められる最適融解挙動について地域特性ごとに明らかにした。ただし、前章で提案した簡易熱箱モデルは、内部発熱や換気の影響等を考慮しておらず、実際の居住環境に近い条件での負荷抑制効果については明らかではない。

また、PCMの融解挙動を矩形で与えているため、PCMの比熱特性についても実物の性能に近いものについて検討を加える必要がある。第7章及び第8章では、南面開口を有する場合のみを検討したが、実際の居室の設計においては東西南北に開口部が設置されるため、各方位に開口部が設置されたときの効果についても明らかにすることが、室内環境設計の観点から求められている。PCM建材は、日中の過昇温を抑制する機能建材としての役割をもつ一方で、省エネルギー建材という役割をもつ。実環境に近い条件下の中で、どのようにPCM建材が負荷削減効果に寄与するのか明らかにすることが必要である。

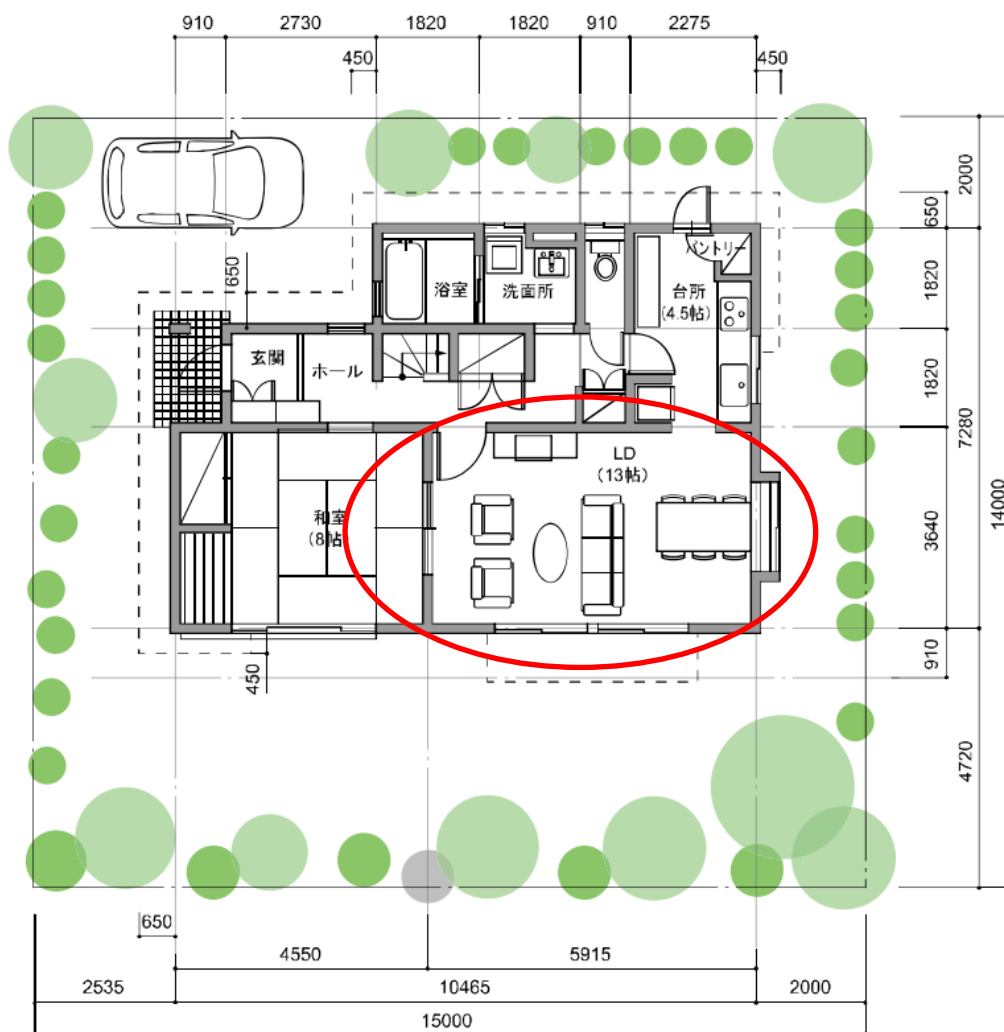
本章では、寝室とリビングの1居室を対象に、PCM内装左官材とPCM窓を設置した時の効果を明らかにすることで、実際に蓄熱建材を住宅居室に採用する際に求められる環境設計指針について示す。

対象地域は第7章及び第8章と同様に、札幌、東京、那覇であり、各地域のそれぞれのスケジュール運転ごとの顕熱負荷を求め、実環境に近い場合でのPCMの効果について検討した。

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

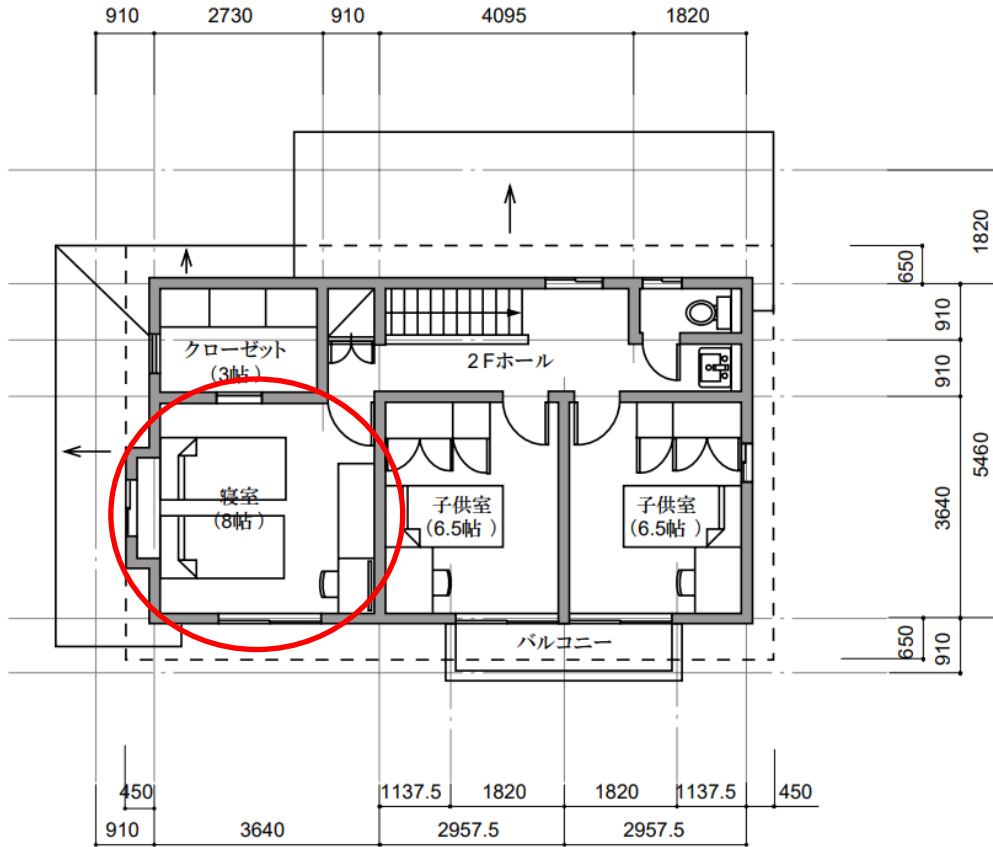
9.1 計算概要

数値計算の方法は、第7章及び第8章で示した通りである。ただし、実際の住宅の居室を模擬することから、図9.1及び図9.2に示すような標準住宅の1室を想定し、外壁が2面、内壁が2面となるようなリビング、寝室を対象とする。



■1階平面図

図9.1 1階平面図(文献9.1から引用)



■2階平面図

図 9.2 2階平面図(文献9.1から引用)

財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説^{9.1)}を参考に、リビングの床面積 21.5m^2 とし、寝室の床面積は 13.24m^2 とした。

なお、PCM 内装左官材の比熱は第7章で参照した脂肪酸エステル系潜熱蓄熱材を多項近似して微分したものを与えた。PCM 窓の比熱は第6章で得られたゲル状 PCM の基本的物性能試験から得られた値を直線的に近似して(図7.7)用いることとした。

内部発熱、在室スケジュール、間欠空調時のスケジュールについても財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断の基準におけるエネ

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における室内環境設計

ルギー消費量計算方法の解説を参考に定めた。

断熱性能は各地の断熱性能等級 4 を満たす値としたが、沖縄は規定がないため、東京と同等とした。

また、換気回数は在室人数に応じて $30\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ とし、在室者がゼロの時は 0.5 回/h とした。また冬季の連続暖房時に、過昇温が生じた場合、窓開けにより外気導入が行われることを想定して、室温が 30°C を超えた場合、換気回数を 10 回/h とした。

隣室の室温は、外気温と対象室温の平均値とした。子供室の場合は、空調時間帯は設定室温に保たれていると仮定し、その他の時間においては、外気温と対象室温の平均値とした。

方位特性を検討するために、図 9.1 および図 9.2 を回転させたときの検討を行った。住宅全体の中でリビングが北面に設置される可能性は低いですが、今回は 1 室モデルを対象にしていることから、寝室やリビングが東、西、北面に開口部を有する場合についても検討を行うことで方位ごとの検討を行うこととした。

9.2 寝室における PCM 建材の効果

9.2.1 東京

図 9.3 に東京の寝室における PCM 建材の効果を示し、図 9.4 に東京の寝室における空調時間を示す。図より、暖房負荷、冷房負荷ともに PCM を適用することで負荷が増大しており、冷房負荷においてはそれが顕著であることがわかる。これは、日中の日射熱が PCM に蓄熱され、夜間に処理する熱量が増大しているものと思われる。

第 7 章でも PCM 内装左官材は寝室スケジュール運転のときに PCM の熱容量が大きいことにより、効果が見られなかったが、実際の居住環境で換気や内部発熱を考慮した上で検討した時、PCM 窓も負荷を増大させる要因となりうる。

PCM 窓は固相の時に日射透過率が低いことから、オーバーヒートしていない通常的环境下で適用すると負荷及び空調時間を増大させる要因となる。

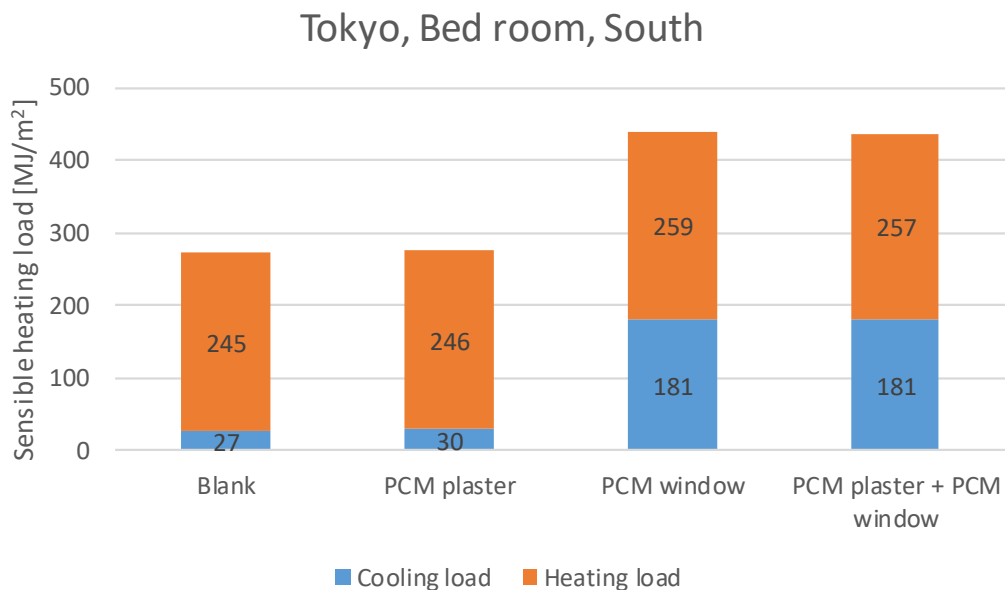


図 9.3 東京の寝室における PCM 建材の効果

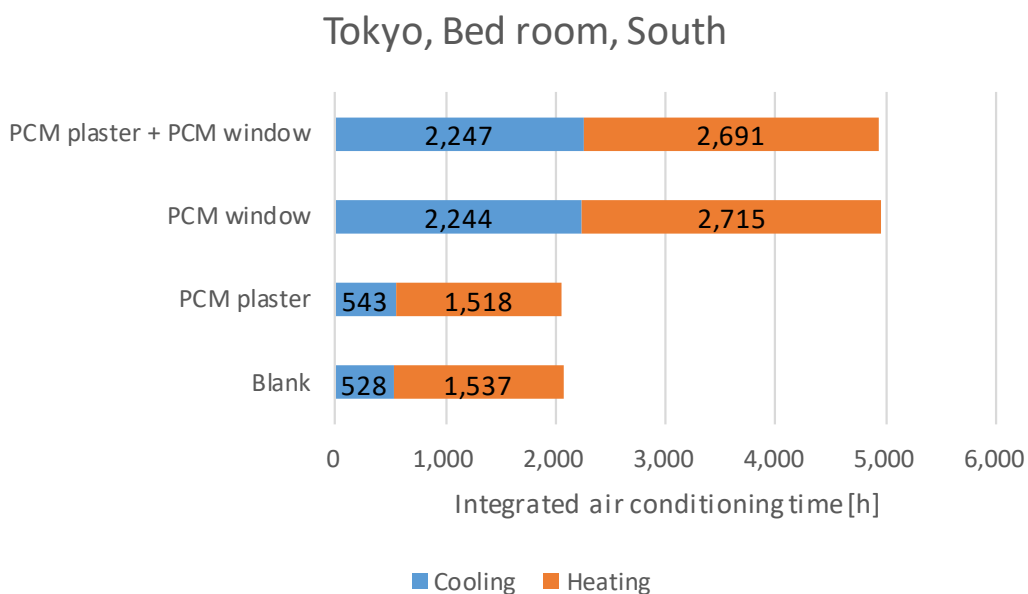


図 9.4 東京の寝室における空調時間

9.2.2 札幌

図 9.5 に札幌の寝室における空調時間を示し、図 9.6 に札幌の寝室における空調時間を示す。札幌においても東京と同様に、寝室スケジュール運転時に

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における室内環境設計

は、夏季、冬季ともに負荷を増大させることがわかる。札幌は寒冷地であるため、南面に大開口を有する高断熱・高气密住宅では、PCM の効果が高いことが知られているが、夜間間欠運転の際には PCM が空調負荷と空調時間を増大させることが考えられる。

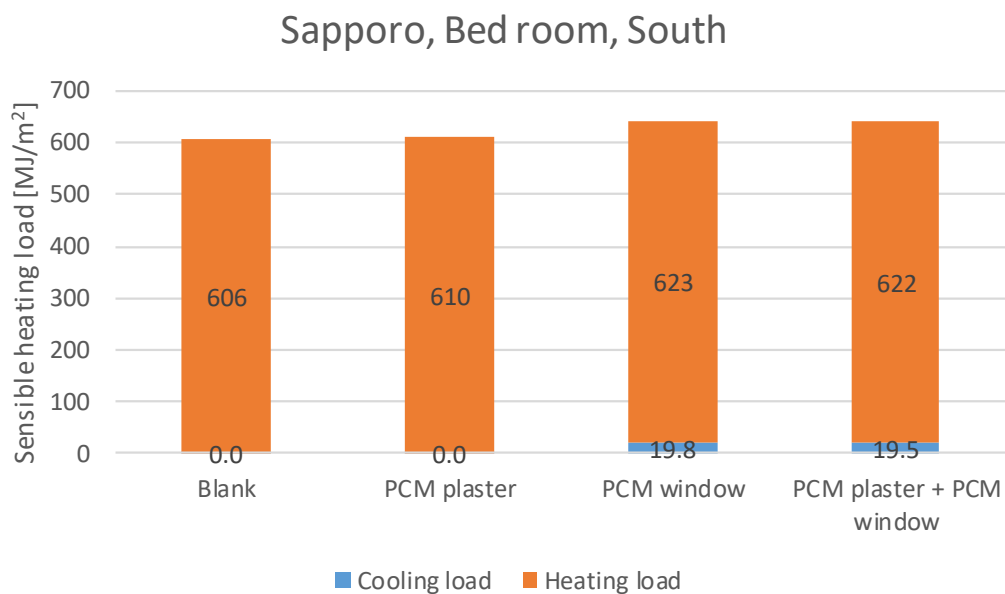


図 9.5 札幌の寝室における PCM 建材の効果

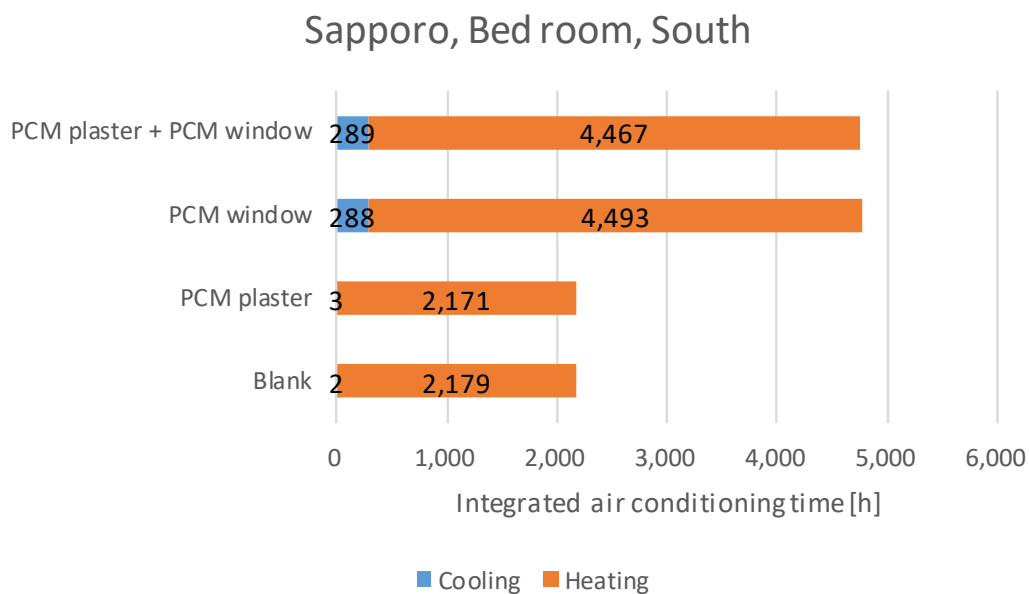


図 9.6 札幌の寝室における空調時間

9.2.3 那覇

図 9.7 に那覇の寝室における PCM 建材の効果を示し、図 9.8 に那覇の寝室における空調時間を示す。

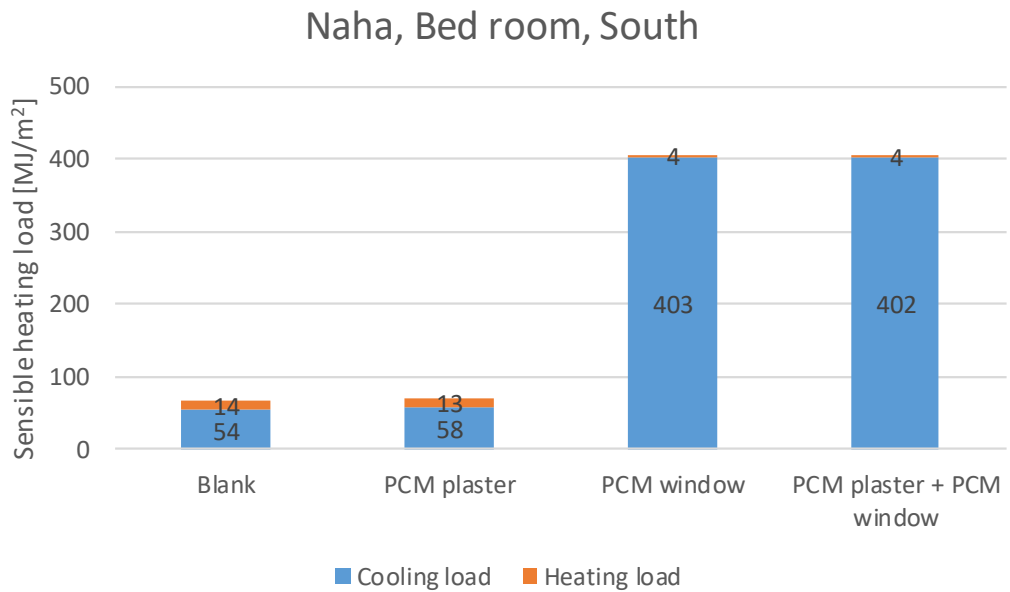


図 9.7 那覇の寝室における PCM 建材の効果

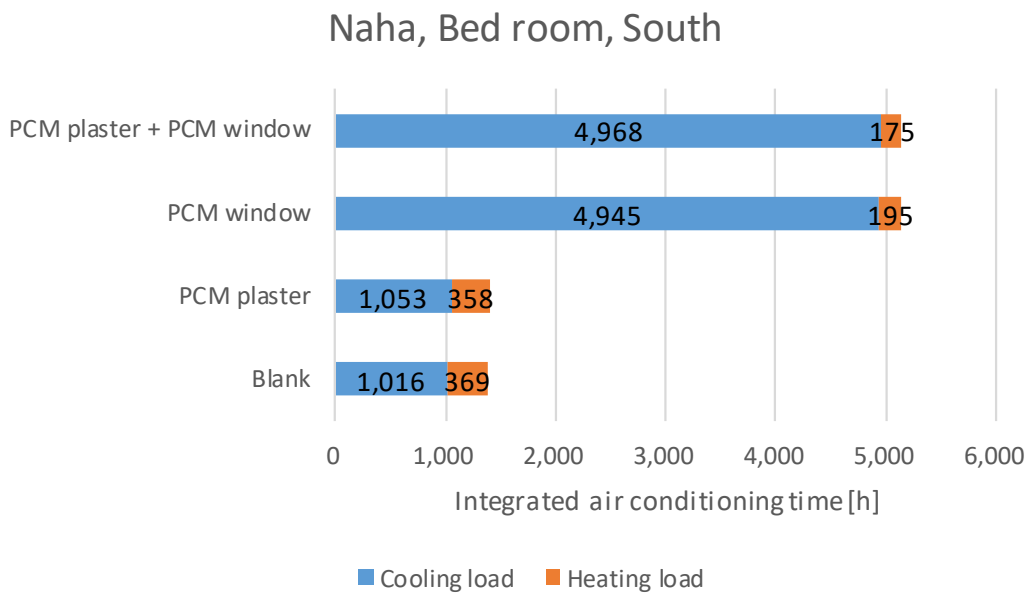


図 9.8 那覇の寝室における空調時間

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

PCM 建材を施工することにより、冷房負荷が大きく増加しているものの、東京、札幌とは異なり、僅かではあるが那覇では PCM による暖房負荷削減効果が確認できる。図 9.9 に 12 月の冬季の 1 週間のグラフを示すが、窓表面温度は 40°C を超えていることが多く、PCM の融解挙動の特性もよく現れていることがわかる。温暖な地域では PCM の蓄放熱がなされることにより、寝室でもその効果が見られることがわかる。

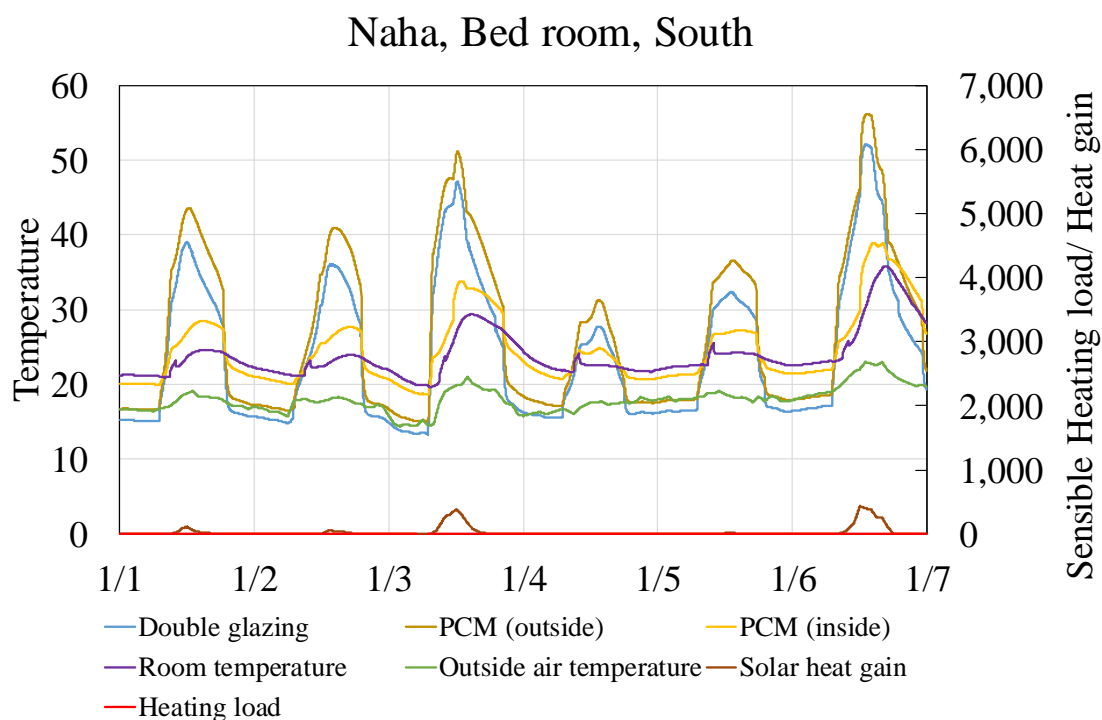


図 9.9 那覇の寝室における空調時間

9.3 リビングにおける PCM 建材の効果

9.3.1 東京

図 9.10 に東京のリビングにおける PCM 建材の効果を示し、図 9.11 に東京のリビングにおける空調時間を示す。PCM 内装左官材は、リビングにおいて顕熱負荷がやや削減できているものの、PCM 窓を施工すると、冬季の暖房負荷及び暖房時間は増大する。夏季には日射遮蔽効果により 15%程度の冷房負荷削減効果が確認できた。

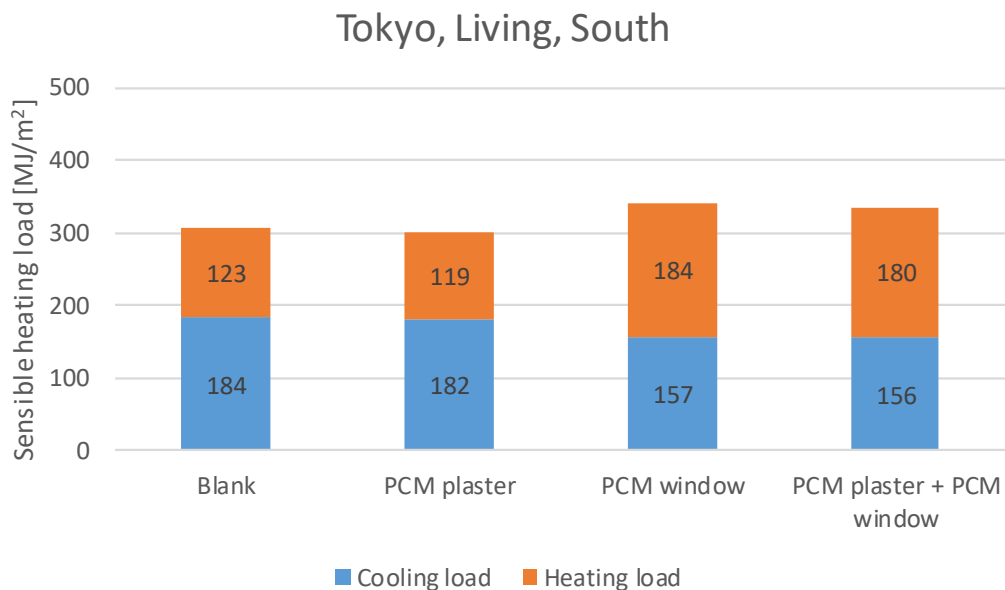


図 9.10 東京のリビングにおける PCM 建材の効果 (南)

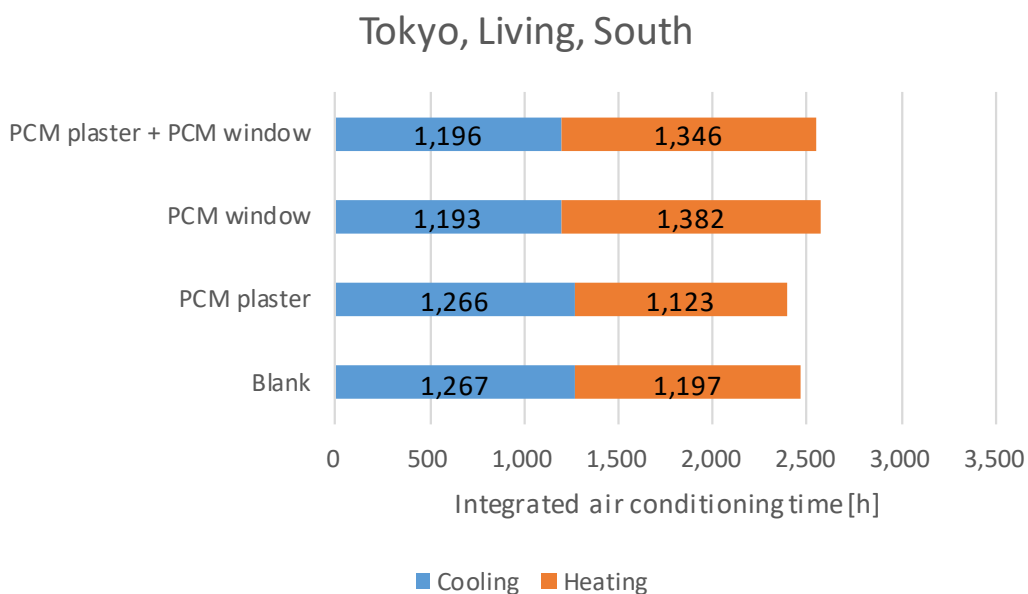


図 9.11 東京のリビングにおける空調時間 (南)

図 9.1 の平面図を 180 度回転させ、開口部を北側に配置したときの東京のリビングにおける PCM 建材の効果を図 9.12 に示す。また、図 9.13 に東京のリビングにおける空調時間 (北) を示す。

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

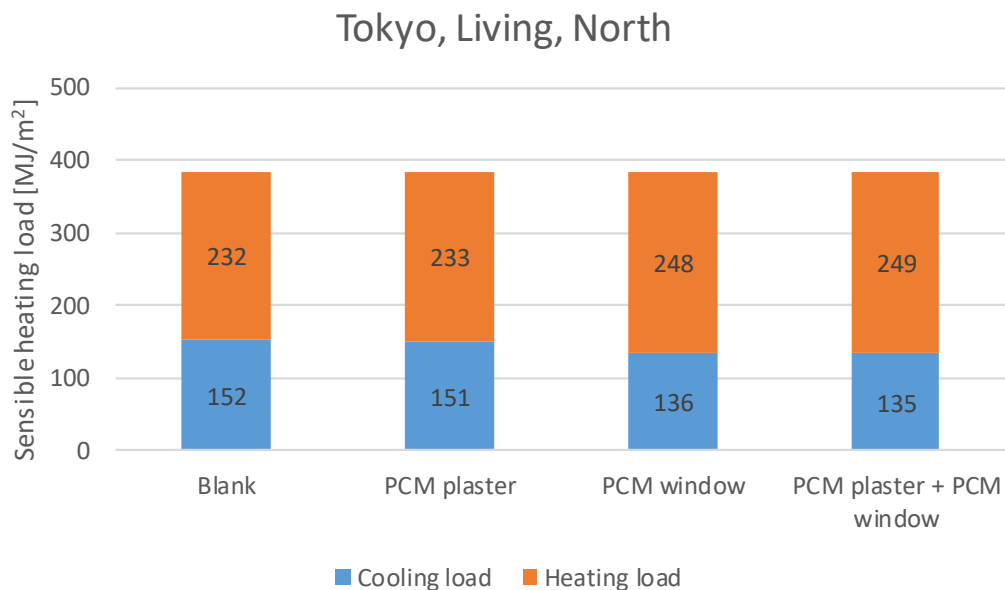


図 9.12 東京のリビングにおける PCM 建材の効果 (北)

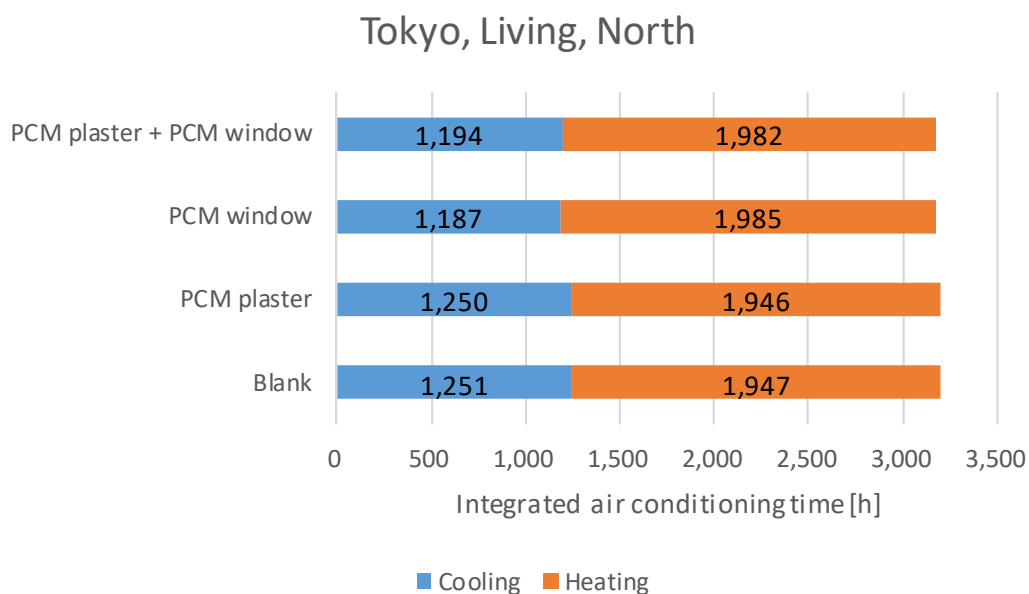


図 9.13 東京のリビングにおける空調時間 (北)

冷房負荷はやや減少しているものの、冬季の暖房負荷は増大しており、年間での負荷は概ね一定である。図 9.14 に東京のリビングにおける PCM 建材の効果 (東) を示し、図 9.15 に東京のリビングにおける空調時間 (東) を示す。

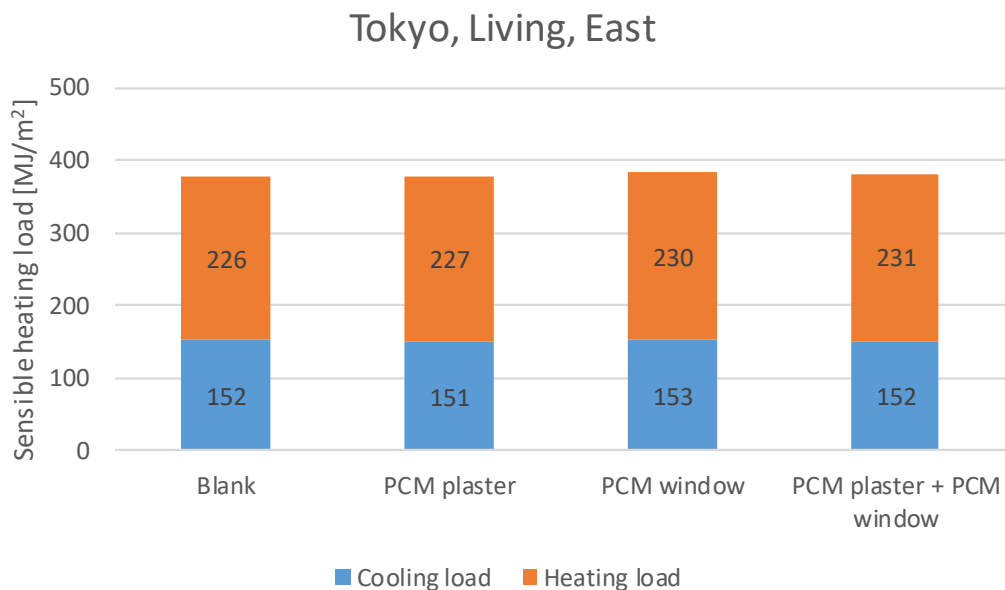


図 9.14 東京のリビングにおける PCM 建材の効果 (東)

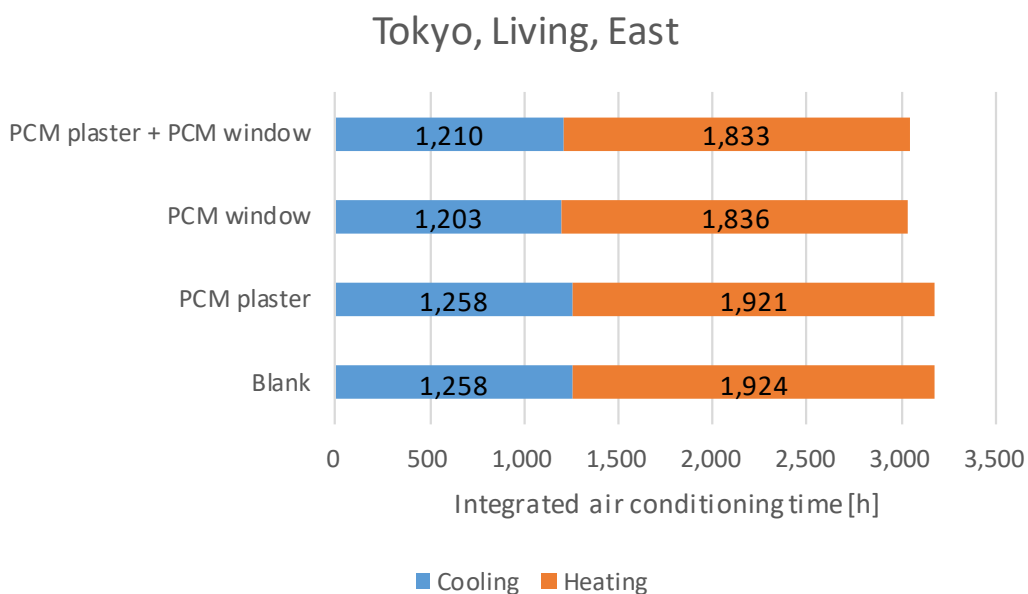


図 9.15 東京のリビングにおける空調時間 (東)

PCM 建材により年間での顕熱負荷は増大しているが、蓄熱効果により空調時間は減少していることがわかる。図 9.16 に東京のリビングにおける PCM 建材の効果 (西) を示し、図 9.17 に東京のリビングにおける空調時間 (西) を示す。

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

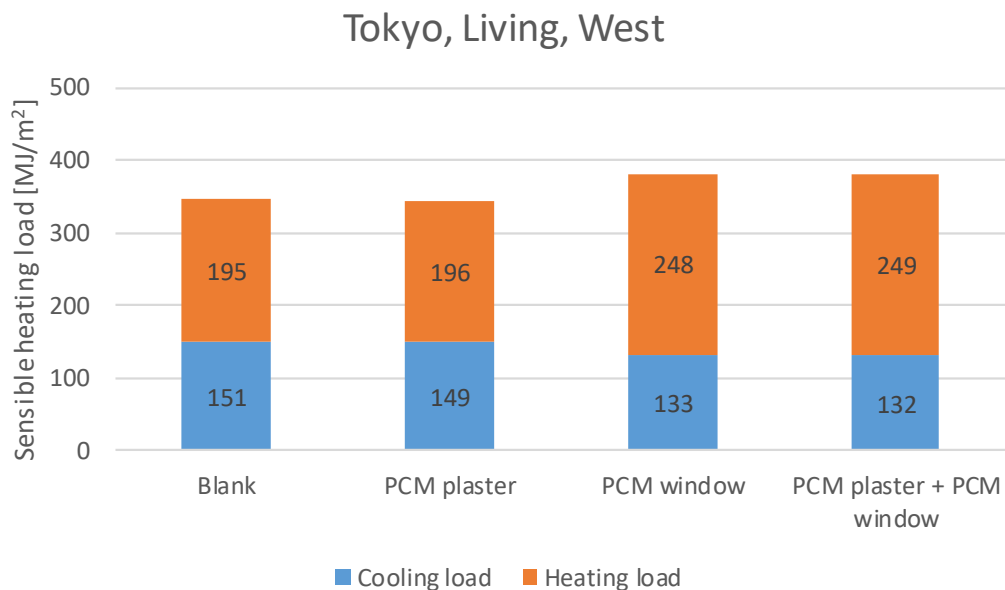


図 9.16 東京のリビングにおける PCM 建材の効果 (西)

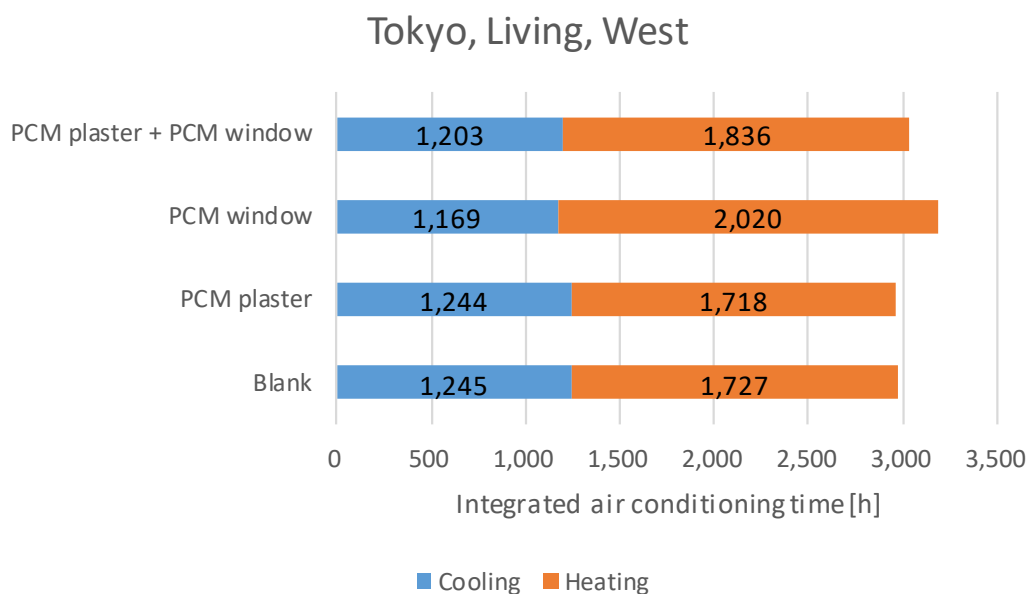


図 9.17 東京のリビングにおける空調時間 (西)

日射遮蔽効果により冷房負荷削減効果は見られるが、PCM 建材により暖房負荷が増大していることがわかる。

9.3.2 札幌

図 9.18 に札幌のリビングにおける PCM 建材の効果を示し、図 9.19 に札幌のリビングにおける空調時間を示す。

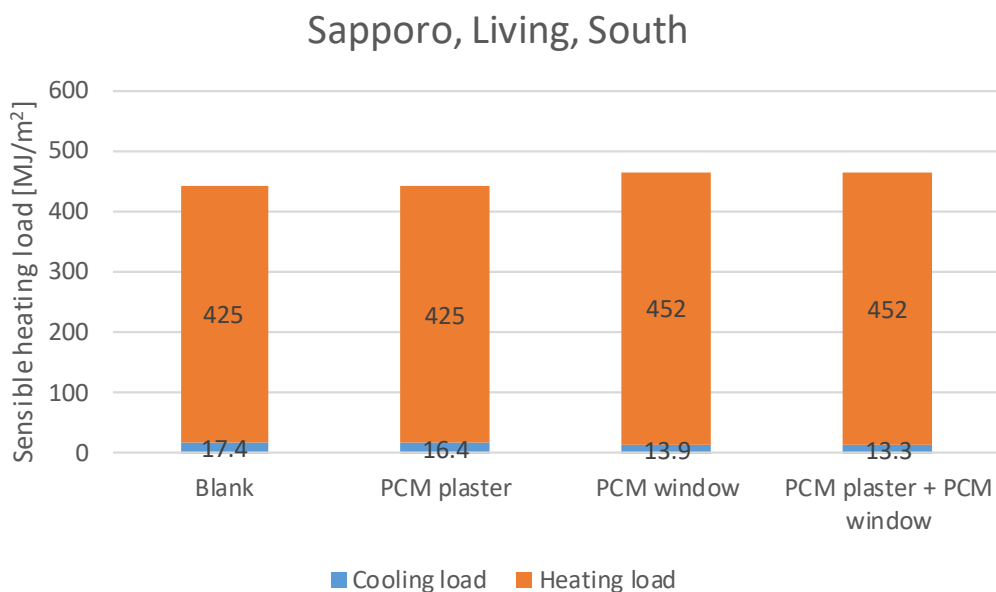


図 9.18 札幌のリビングにおける PCM 建材の効果 (南)

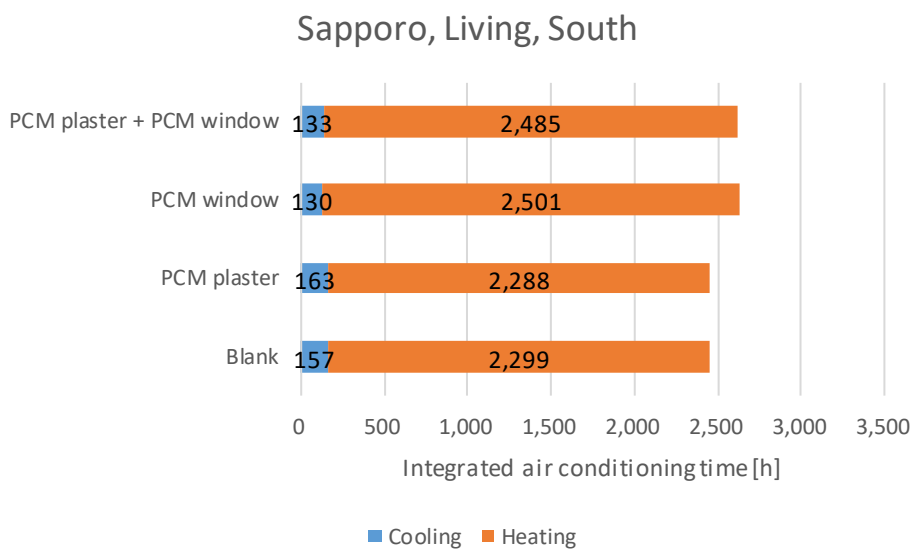


図 9.19 札幌のリビングにおける空調時間 (南)

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における室内環境設計

値は異なるものの、概ね東京と同様の傾向が見られることがわかる。図 9.18 に札幌のリビングにおける PCM 建材の効果（北）を示し、図 9.19 に札幌のリビングにおける空調時間（北）を示す。

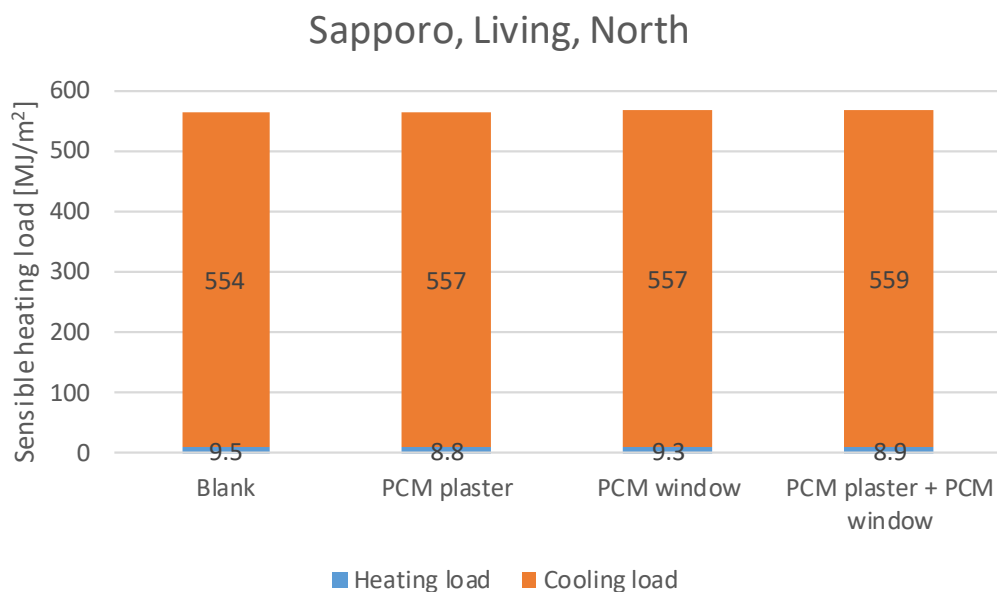


図 9.20 札幌のリビングにおける PCM 建材の効果（北）

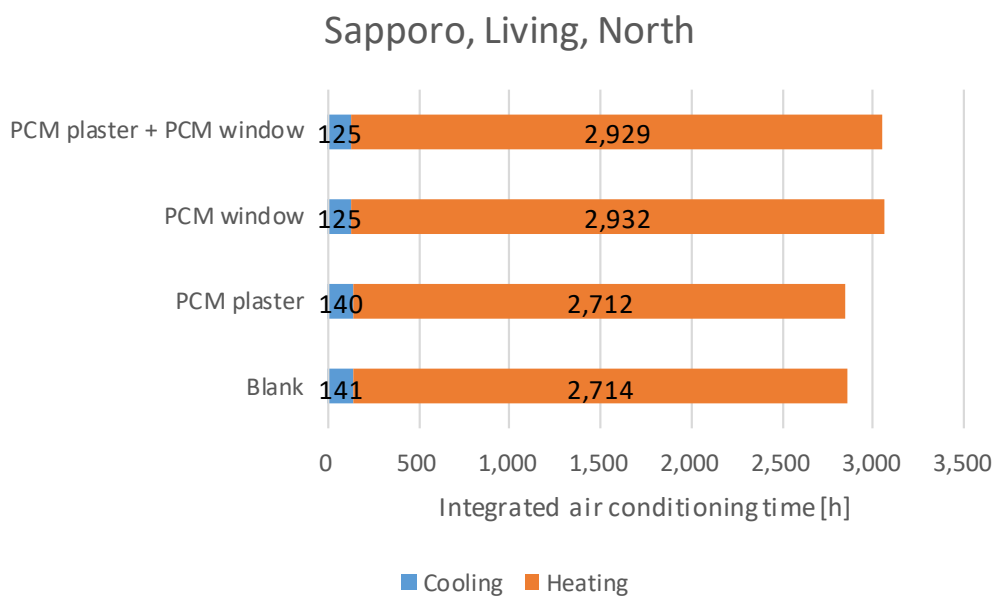


図 9.21 札幌のリビングにおける空調時間（北）

図 9.20 に札幌のリビングにおける PCM 建材の効果 (東) を示し, 図 9.21 に札幌のリビングにおける空調時間 (東) を示す。

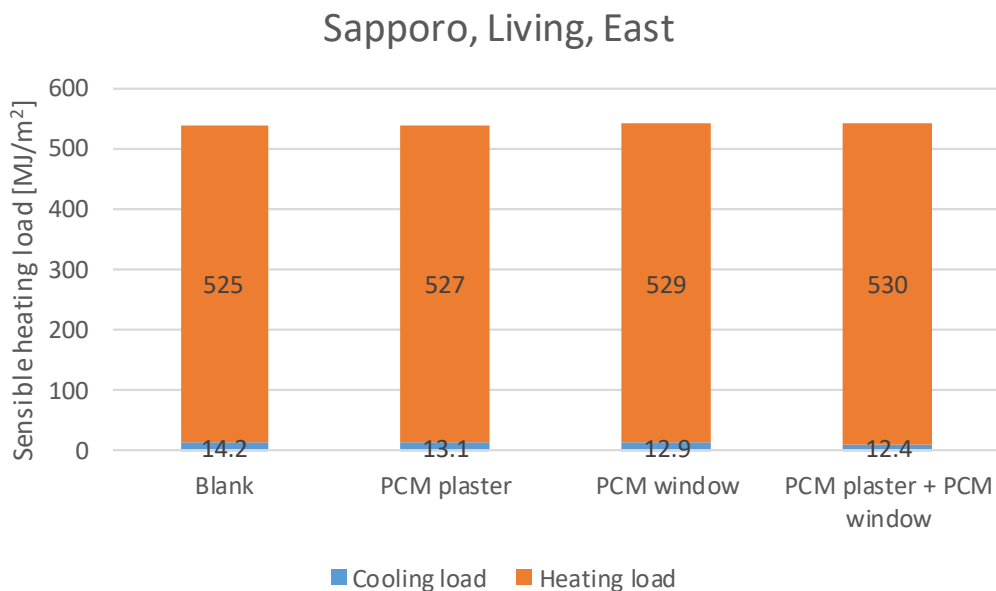


図 9.20 札幌のリビングにおける PCM 建材の効果 (東)

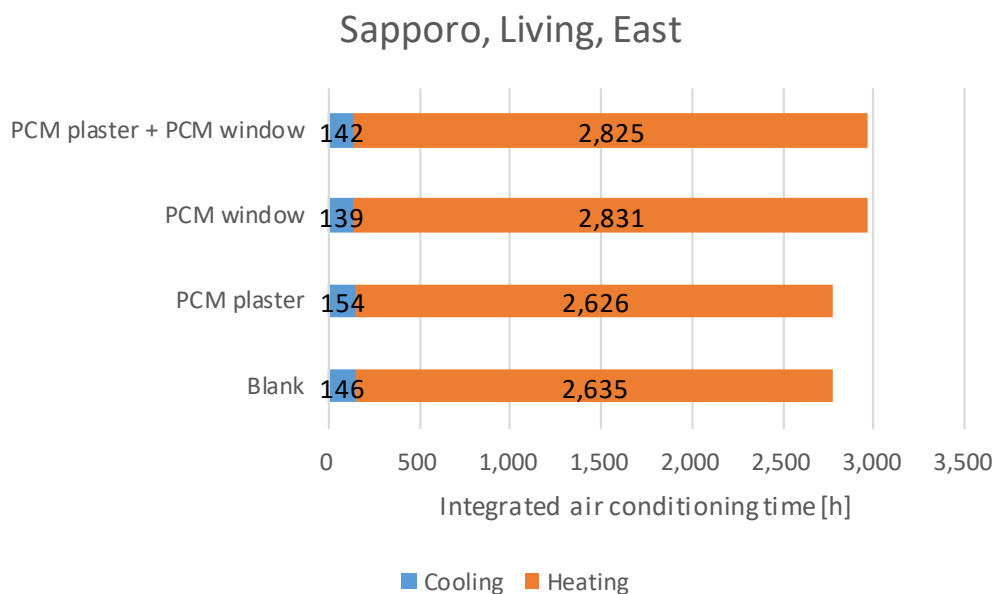


図 9.21 札幌のリビングにおける空調時間 (東)

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

図 9.22 に札幌のリビングにおける PCM 建材の効果 (西) を示し, 図 9.23 に札幌のリビングにおける空調時間 (西) を示す。寒冷地においてはどの方位でも負荷が増大する傾向が見られる。

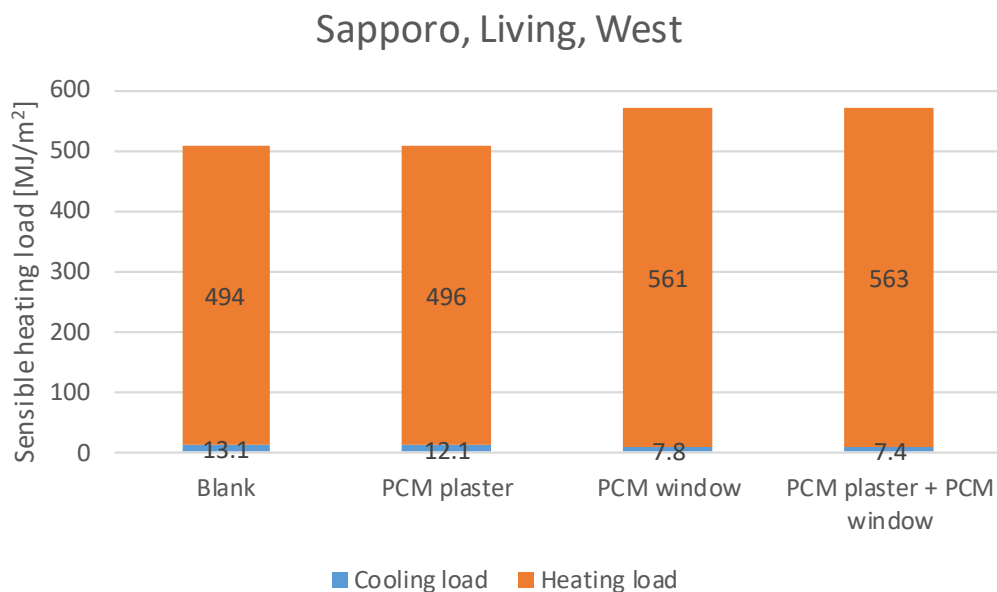


図 9.22 札幌のリビングにおける PCM 建材の効果 (西)

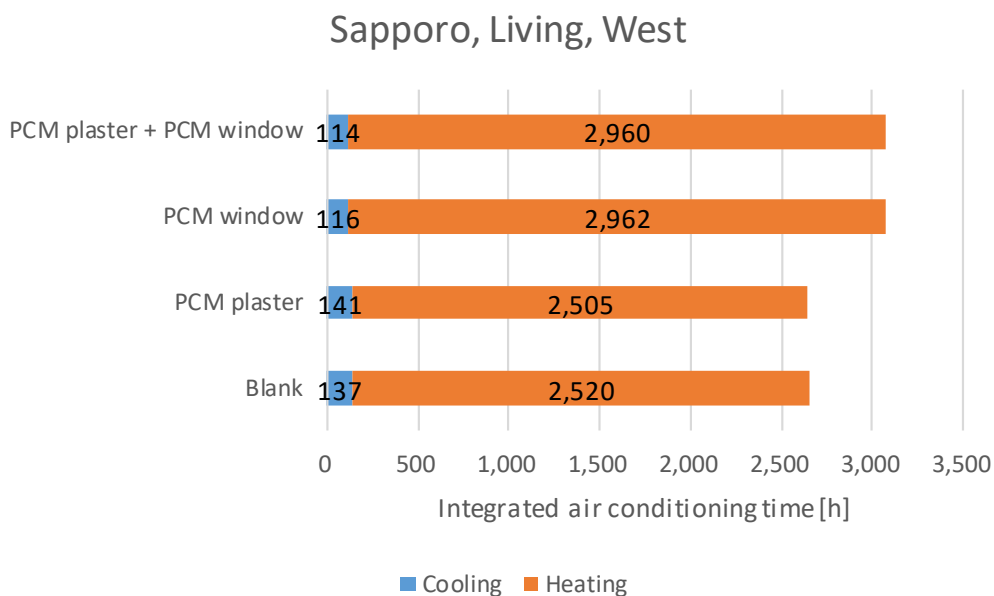


図 9.23 札幌のリビングにおける空調時間 (西)

9.3.3 那覇

図 9.24 に那覇のリビングにおける PCM 建材の効果を示し、図 9.25 に那覇のリビングにおける空調時間を示す。

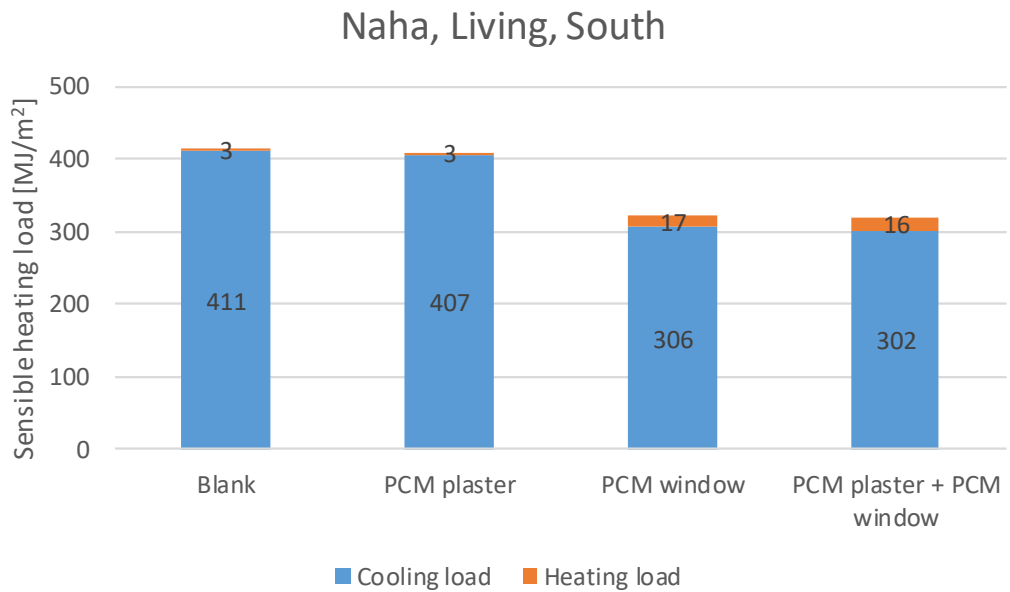


図 9.24 那覇のリビングにおける PCM 建材の効果 (南)

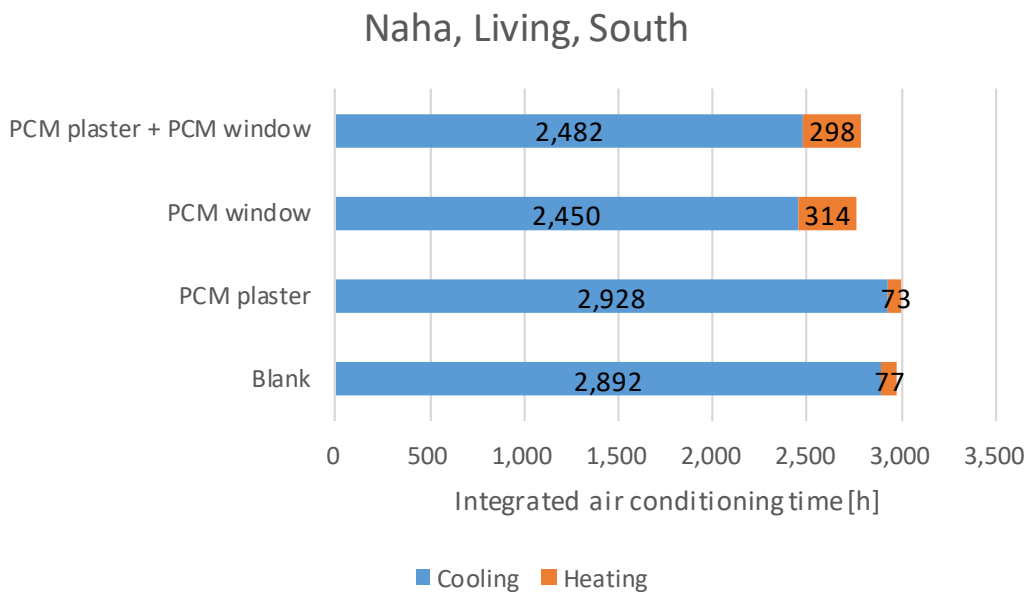


図 9.25 那覇のリビングにおける空調時間 (南)

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における室内環境設計

冷房負荷が支配的な那覇市においては、通年での負荷削減効果が見られた。

図 9.26 に那覇のリビングにおける PCM 建材の効果（北）を示し、図 9.27 に那覇のリビングにおける空調時間（北）を示す。

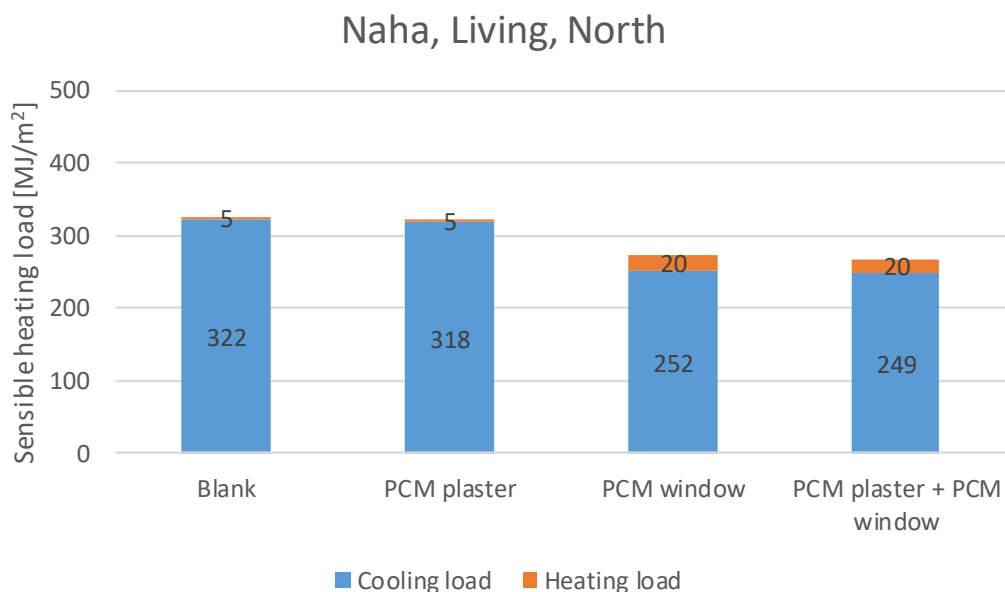


図 9.26 那覇のリビングにおける PCM 建材の効果（北）

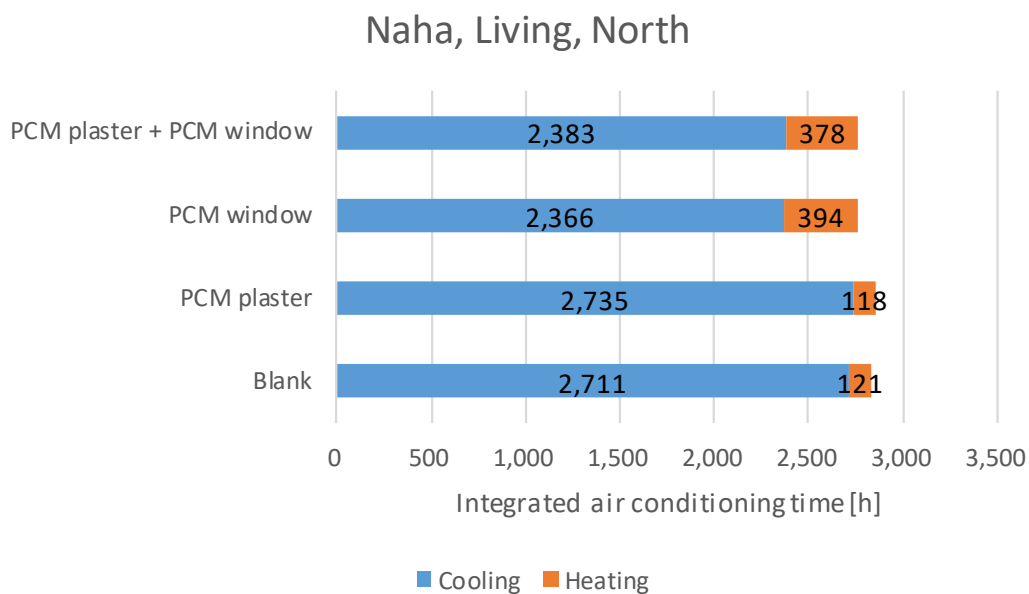


図 9.27 那覇のリビングにおける空調時間（北）

また、図 9.28 に那覇のリビングにおける PCM 建材の効果 (東) を示し、図 9.29 に那覇のリビングにおける空調時間 (東) を示す。

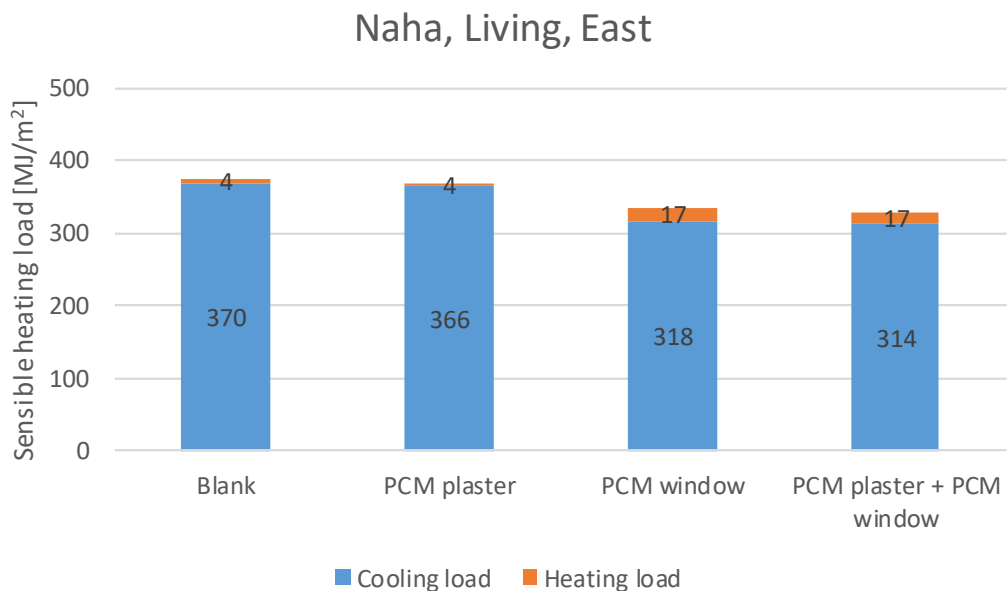


図 9.28 那覇のリビングにおける PCM 建材の効果 (東)

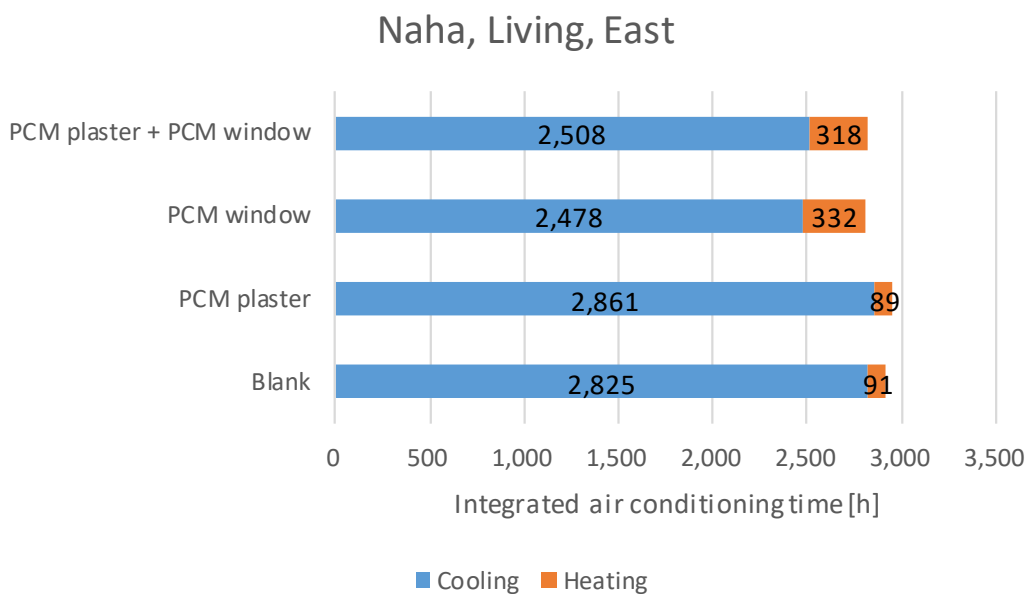


図 9.29 那覇のリビングにおける空調時間 (東)

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

図 9.30 に那覇のリビングにおける PCM 建材の効果 (東) を示し, 図 9.31 に那覇のリビングにおける空調時間 (東) を示す。

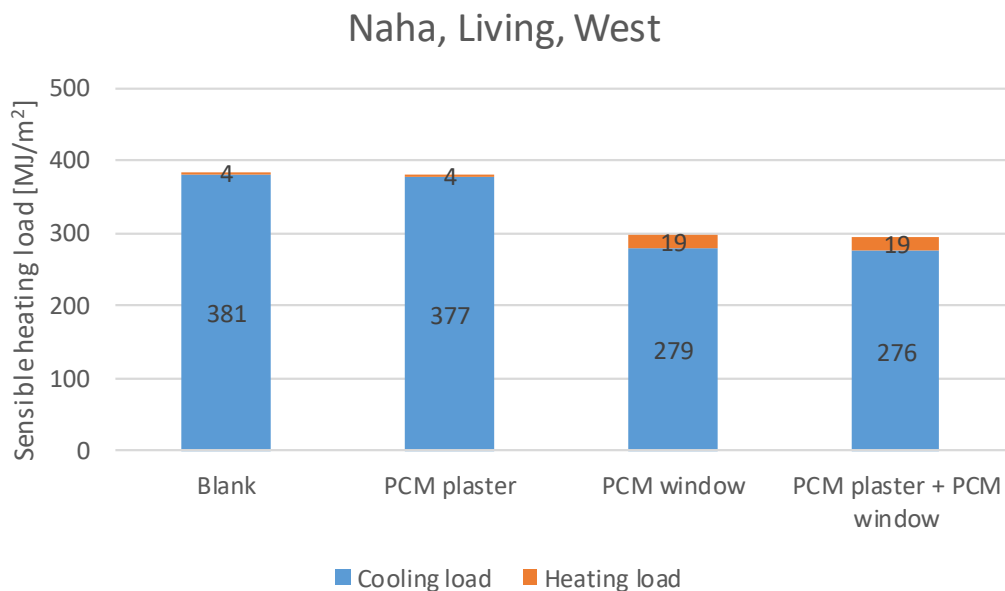


図 9.30 那覇のリビングにおける PCM 建材の効果 (西)

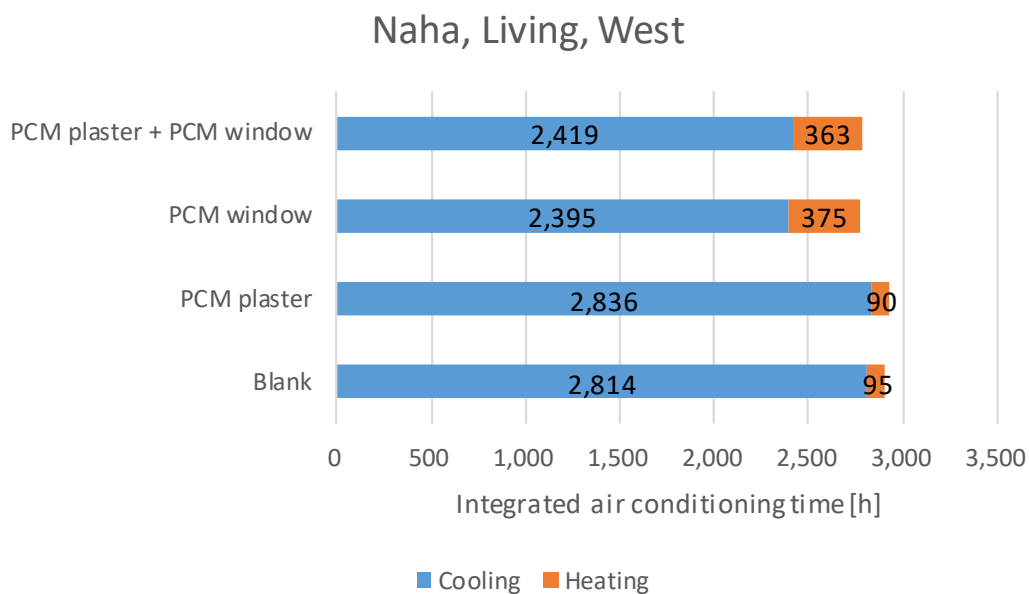


図 9.31 那覇のリビングにおける空調時間 (西)

温暖地の那覇においては、PCM 内装左官材の効果が確認でき、空調時間も減少することがわかる。PCM 窓は、東京、札幌と同様に、暖房負荷が増大する傾向は見られるが、冷房負荷が支配的な那覇市においては、通年での負荷削減効果が高いことがわかる。

9.4 各地での PCM 建材の負荷削減効果

前章までで得られた PCM 建材の負荷削減効果を、Blank と比較した時の削減率としてそれぞれ、東京、札幌、那覇の結果として示す。表 9.1 は Blank と比較した時の各地の寝室における PCM 建材の負荷削減効果を示しており、温暖地の那覇の冬季のみ、負荷削減効果が確認できる。値が負の場合には逆効果であることを示している(単位：%)。

表 9.2 に東京のリビングにおける方位ごとの PCM 建材の負荷削減効果を示す。表 9.3 に札幌のリビングにおける方位ごとの PCM 建材の負荷削減効果を示し、表 9.4 に那覇のリビングにおける方位ごとの PCM 建材の負荷削減効果を示す。

表 9.1 各地の寝室における PCM 建材の負荷削減効果

		Tokyo	Sapporo	Naha
PCM plaster	Summer	-7.6	-92.4	-7.2
	Winter	-0.4	-0.7	2.5
PCM window	Summer	-559.7	-82086.2	-643.7
	Winter	-5.7	-2.8	71.0

表 9.2 東京のリビングにおける方位ごとの PCM 建材の負荷削減効果

		East	West	South	North
PCM plaster	Summer	1.2	1.2	1.0	1.2
	Winter	-0.7	-0.3	3.6	-0.7
PCM window	Summer	-0.2	11.9	14.4	11.0
	Winter	-2.0	-27.4	-48.7	-7.1

表 9.3 札幌のリビングにおける方位ごとの PCM 建材の負荷削減効果

		East	West	South	North
PCM plaster	Summer	7.7	7.2	6.1	7.1
	Winter	-0.4	-0.3	0.0	-0.4
PCM window	Summer	8.9	40.0	20.4	1.8
	Winter	-0.8	-13.6	-6.2	-0.5

表 9.4 那覇のリビングにおける方位ごとの PCM 建材の負荷削減効果

		East	West	South	North
PCM plaster	Summer	1.0	1.2	1.0	1.2
	Winter	5.3	4.1	6.9	2.0
PCM window	Summer	26.7	14.1	25.6	21.7
	Winter	-416.4	-346.2	-442.4	-303.9

PCM 内装左官材は、温暖な地域ほど負荷削減効果が大きく、室に余剰な熱量があるほど、その効果が高いことがわかる。一方 PCM 窓は、どの地域においても夏季の冷房負荷削減効果は高いが、暖房負荷は増大する傾向が見られた。

第 8 章では簡易熱箱モデルのような南面大開口のモデルを用いて算出し、換気や過昇温の影響を考慮していなかったため、室温変動が大きい環境下で検討を行ったときには、寒冷地においても暖房負荷削減効果が得られたが、標準的な居室平面モデルを用いて、換気や運転スケジュール、隣室が非空調のような一般的な住まい方を想定する場合、日中急激な過昇温がみられないと PCM の熱容量は逆効果となる。また、本章で取り扱った PCM は、融点 25 度の PCM であるが、PCM 内装左官材、PCM 窓のそれぞれの熱性能試験結果を用いたため、ピーク融点が 27 度～35 度程度と高い範囲で融解挙動を示すため、全体として暖房負荷削減効果が低い傾向にある。

図 9.32 から図 9.34 に、各地のリビングにおける通年での室内環境を示す。図は外気温、室温、顕熱負荷を示しており、室温は PCM が施工されていないブランクでの値を示している。

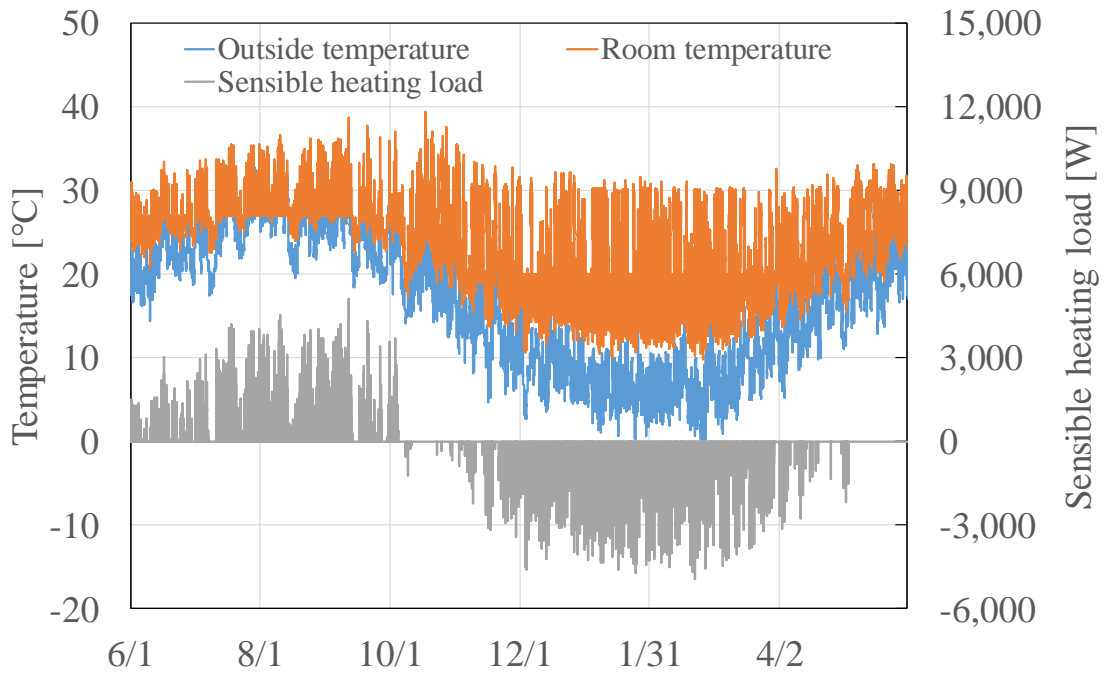


図 9.32 東京のリビングにおける通年での室内環境

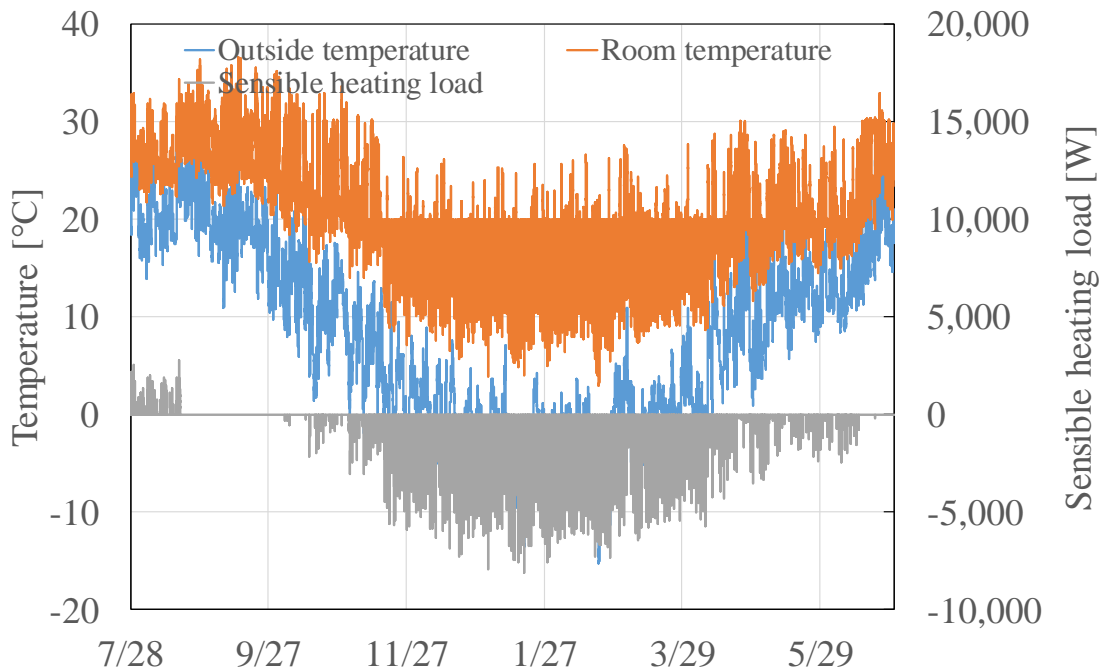


図 9.33 札幌のリビングにおける通年での室内環境

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

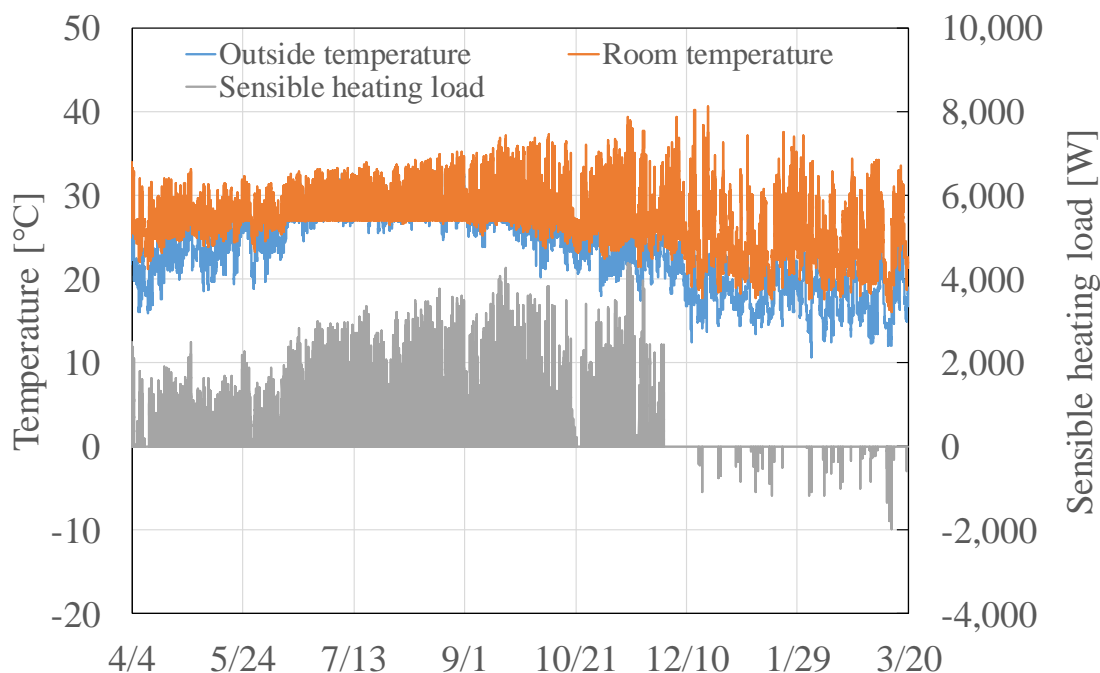


図 9.34 那覇のリビングにおける通年での室内環境

また、顕熱負荷は冷房負荷が正の数、暖房負荷が負の数を示している。暖房負荷削減効果に着目すると、各地でその効果に差異が見られることがわかるが(表 9.2～表 9.4)、各図の暖房シーズンの室温の推移から概ね削減効果が予測できるものと考えられる。

9.5 札幌における連続運転時の効果

前節より、日中の室の余剰な熱が PCM 建材の効果に影響を与えることが示唆されたが、地域特性や断熱性能の違いのみならず、運転スケジュールにも依存するものと考えられる。本節では、札幌における連続運転を行った時の PCM 建材の効果について検討を加える。

図 9.35 に連続暖房時における札幌のリビングでの PCM 建材の効果を示す。PCM 窓については、リビングスケジュール運転時と同様に、負荷が増大する傾向がみられるが、PCM 内装左官材の効果はやや確認できる。図 9.36 に、札幌の連続暖房時における通年での室内環境を示す。

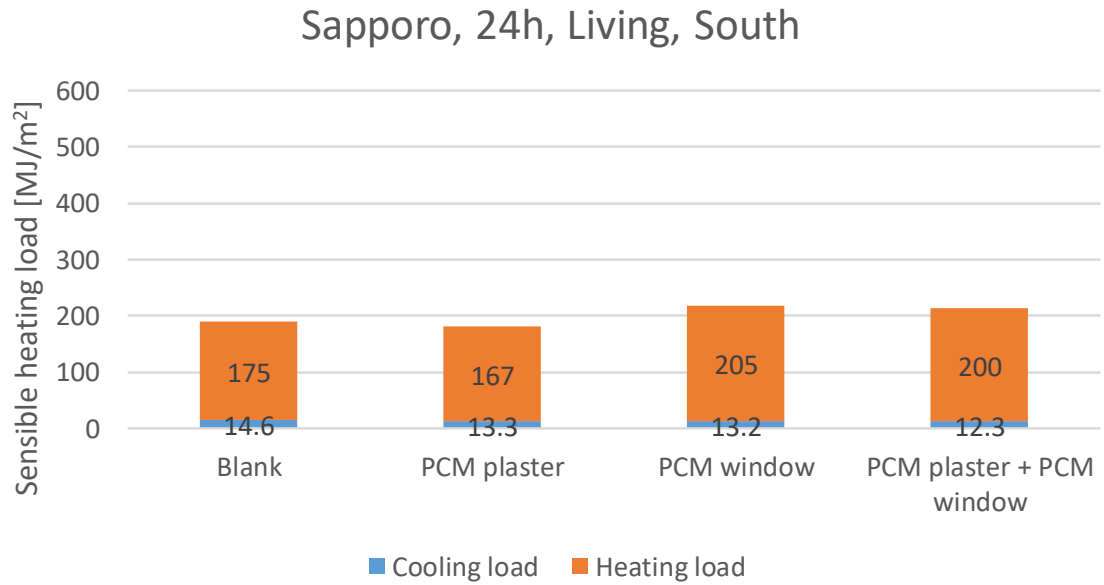


図 9.35 連続運転時における札幌のリビングでの PCM 建材の効果

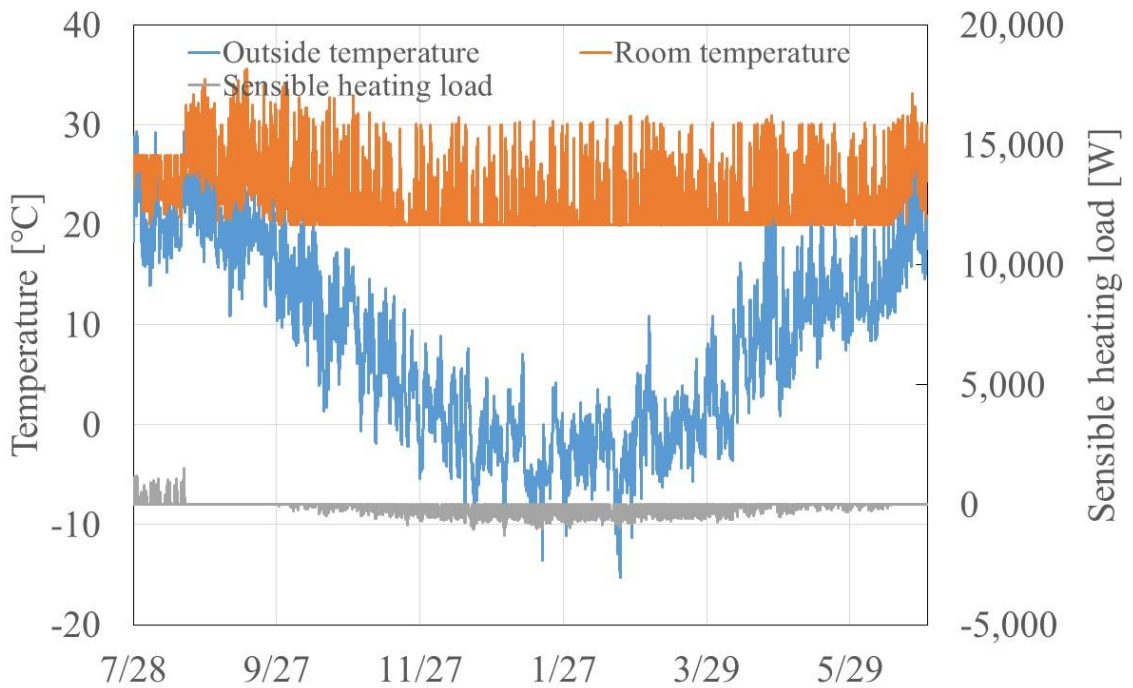


図 9.36 連続運転時における札幌のリビングでの室内環境

9. 潜熱蓄熱 (PCM) 建材を適用した居室における室内環境設計

図 9.33 と比較して、日中の余剰な熱が大きいことから、PCM 内装左官材に効果的に蓄熱できる量が増えていることが考えられる。これらの関係を明らかにするために、図 9.37 および図 9.38 に PCM 内装左官材の日削減率と日最高室温の関係をリビングスケジュール運転と連続運転時においてそれぞれ示す。

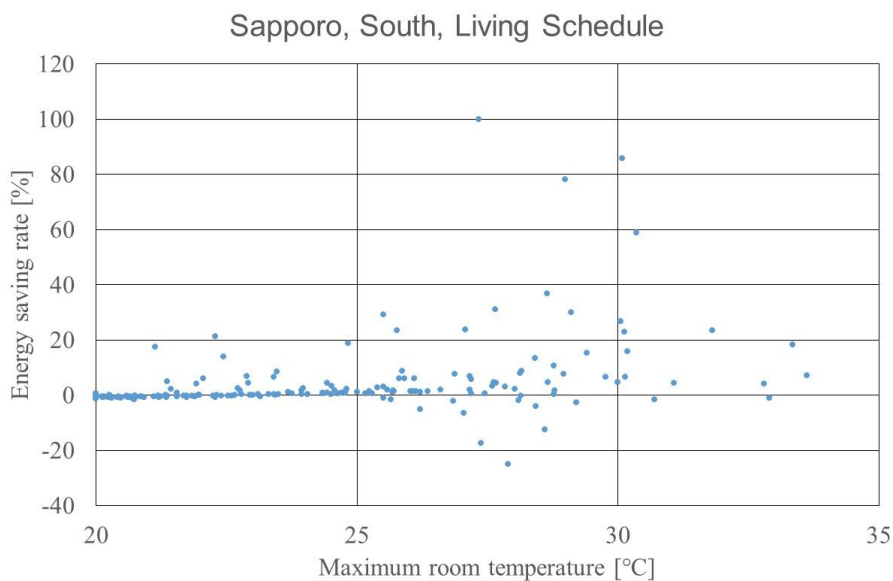


図 9.37 リビングスケジュール運転時における札幌のリビングでの削減率

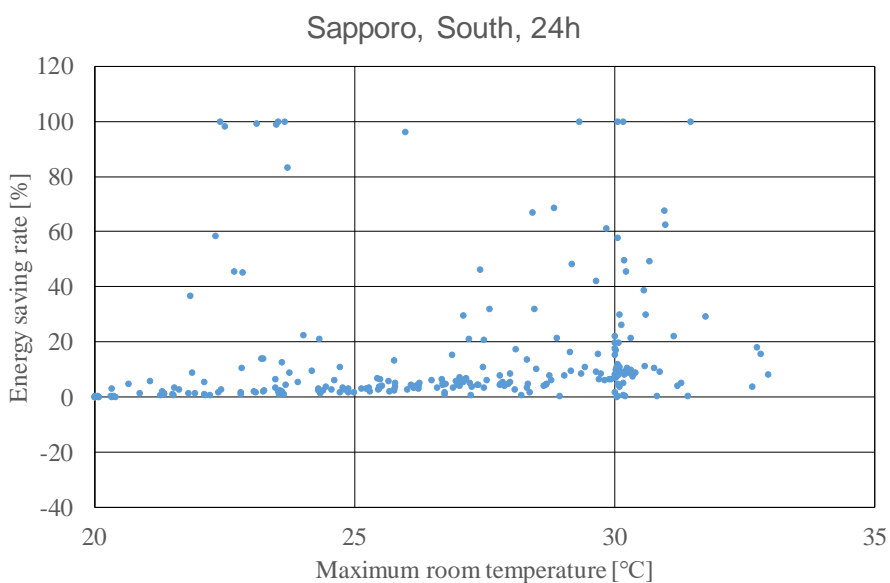


図 9.38 連続運転時における札幌のリビングでの削減率

両図より、どちらもピーク融点である 27°C 近辺で削減率が高まる傾向がみられ、日中の余剰な熱量と PCM への蓄熱量の相関関係が確認できる。また、両図を比較すると、連続運転時の方が最高室温 20~25°C の低い温度域においても高い削減率を示していることから、PCM 内装左官材は連続運転時の方が効率よく蓄放熱できる特性を持つことが示唆された。

また、第 7 章では、札幌において理想的な融解挙動は融点が設定室温に近く、もっとも融解幅が小さいものが理想的であることが明らかになっており、図 9.39 に、矩形波の理想的な融解挙動(融点 20°C, 融解幅 1K)の特性を持つ PCM 内装左官材の効果を示す。冷房負荷削減効果はほぼみられないが、暖房負荷削減効果は約 26% となり高い負荷削減効果が確認できる。地域特性により理想的な融解挙動特性は異なるものの、運転方法や融点により PCM 建材の負荷削減効果は大きく異なり、効果的な利用ができるような PCM の選定が必要となる。今後の材料開発の発展にも期待したい。

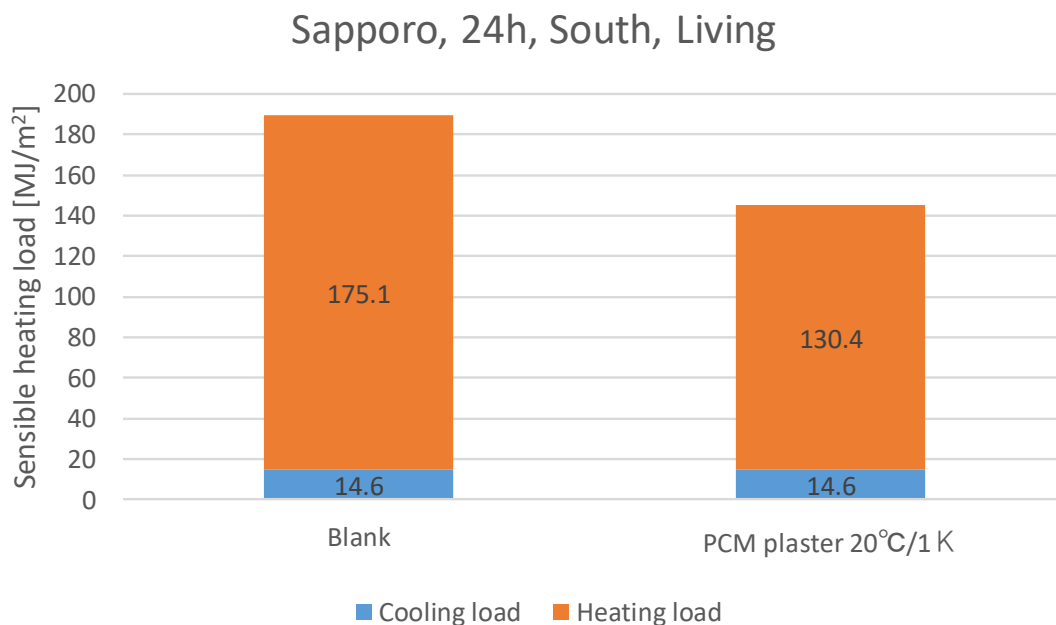


図 9.38 札幌のリビングにおける理想的な融解挙動特性を持つ PCM 内装左官材の削減率(連続運転時)

9.6 摘要

本章では、PCM 内装左官材及び PCM 窓の居室の一室を対象に、方位、地域ごとの効果を示した。

東京、札幌の寝室に PCM 建材を設置した場合、PCM 内装左官材、PCM 窓ともに逆効果となるが、那覇においては、冬季の暖房負荷削減効果が顕著であった。暖房負荷の支配的な地域では、日中の冷え込みを夜間に立ち上げるために熱容量が逆効果になることがあるが、温暖な地域では、夜間間欠運転でも冬季の暖房負荷削減に寄与することがわかる。

また、リビングで同様の検討をしたところ、寒冷地である札幌はどの方位においても PCM 建材の効果は低い。夏季にはやや冷房負荷削減効果が得られることがわかる。第3章や第5章の実住宅での実測結果のように、高断熱・高气密で、内部発熱の大きい場合では寒冷地でも PCM 建材の効果は期待できるが、換気を十分に行いオーバーヒートしていない環境下においてはその効果は低い。東京、那覇では、特に PCM 窓の日射遮蔽効果により、夏季の冷房負荷削減効果が顕著に見られた。

本章で与えた PCM の比熱は、実際の PCM 建材の熱性能試験から得られた結果を近似して与えたが、比熱の与え方や PCM の選定に関しては今後もさらなる検討が必要であるといえる。また、計算方法に関しては、今回は PCM 建材の内部の温度分布を考慮しておらず、より詳細な検討を行う必要がある。PCM 建材は、日中の過昇温を抑制するための機能建材としての役割を果たす一方で、省エネルギー建材としての役割を果たすことから、室の余剰な熱量を熱源として捉えパッシブ住宅の設計に繋げていきたい。

PCM 建材の効果は、地域特性だけではなく、設計された室に余剰な熱が存在するかどうか最も重要なパラメータであり、換気方式や運転スケジュールも加味して PCM 建材を選定していく必要がある。

PCM 窓が融解している時間は、晴天日の日中から日没までの時間帯であることが多く、夜間にはカーテンのような役割を果たすことを考えると、PCM 窓の熱的、デザイン的な特性を考慮しながら選定される材料になりえよう。

体積膨張や経年劣化などの PCM の持つ技術的な課題が残されているものの、居住環境の設計における自由度を高めるため、PCM 建材の材料技術的な今後の発展にも期待したい。新たな物性をもつ材料開発や、室の快適性と省エネルギー効果の向上に関しては、今後も検討を重ねたい。

9. 潜熱蓄熱（PCM）建材を適用した居室における室内環境設計

参考文献

- 9.1) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説

10. 総括

10.1	本論文の総括	340
10.2	今後の課題	342

10. 総括

10.1 本論文の総括

本論文は PCM を適用した住宅における環境設計の指針を示すものである。各章で得られた知見を以下に示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、PCMの概要及び本研究の位置づけを明確にし、本論文の概要を示した。

第2章では、PCM内装左官材の物性及び熱的諸性能を求めめるために種々の基本的物性試験を行った。PCM内装左官材の基本的熱性能試験の測定にあたり、試験方法からの検討を行い、加熱方法に対流加熱法を採用し、昇温速度は加熱時で10min./K、冷却時で20min./Kを要する。固相域・液相域の比熱及び潜熱量の測定には5min./Kでも十分な測定結果を得ることができていることを明らかにした。PCM内装左官材の比熱を調和解析法によって定式化したところ、10°C～40°Cの範囲で測定値を精度よく再現でき、多峰性状を有するPCMの固液混相域における等価的な比熱の、精度の高い定式化を可能にした。

第3章では、PCM内装左官材の冬季のパッシブ蓄熱効果について、箱型の小型サイズから実験住宅規模までそれぞれ実験的な検討を行った。PCM内装左官材の有効利用の指標として有効熱容量を提案し、断熱性能や暖房方法、PCMの施工方法による違いについて実験的に明らかにした。今回検討対象とした3室において、有効熱容量が高い程、年間積算暖房負荷は低い値を示し、自然温度差は高い値を示した。また、2棟の実験住宅にPCM内装左官材を住宅に適用してダイレクトゲインシステムを構築することにより、室内環境の実測調査を行ったところ、薪ストーブを熱源とした場合でも室温20°C程度の上下温度分布のない、快適で安定した環境が得られた。

第4章では、新規の日射遮蔽材料である高耐候性不織布(NWF)を用いて実証実験棟でPCMの有無での比較を行い、日射遮蔽を行うと日最高室内温度は4K程度抑制され、さらに外気冷房を併用することで日最高室内温度を7K程度まで抑制できることを確認した。夏期の冷房負荷は日射遮蔽と外気冷房を行わない時に比べ、外気冷房単独で10%、日射遮蔽単独で88%削減できることを確認した。さらに、日射遮蔽と外気冷房

を併用することで寒冷地の北海道では冷房負荷が実質ゼロになることを確認した。高断熱・高气密住宅は、冷房負荷の大部分が日射取得熱であり、計算した17地域全てで高耐候性不織布NWFの設置による冷房負荷の削減効果が高いことを確認した。

第5章では、PCM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。太陽熱集熱器と組合わせたハイブリッド壁暖冷房システムはPB室と比較して期間積算値で52%の暖房量抑制効果が確認できた。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。2棟の実験住宅における通年での実測を行ったところ、外気温が35°Cに達するような日でも室温は26°C付近で推移したことから、本システムは北海道など冷涼な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。実験住宅の暖房熱量は、一般的な高断熱・高气密住宅の約4割~6割に削減され、暖房期間の短縮も確認でき、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。

第6章では、開口部に蓄熱性能を付与するために新規のPCM建材であるPCM窓及びPCMブラインドを提案し、熱的・光学的な性能評価試験を行った。ゲル状PCMは融解すると透明度が高くなり、固相域、固液相、液相域ごとに透過率を測定して、試験体全体での温度依存性を示した。PCM窓を設置した室の暖房開始時刻はblankよりも遅く、暖房時間を短縮できることを確認した。また、融点ごとのPCMブラインドの蓄熱性能を定量化し、実験にて、表面温度抑制効果、透過日射量削減効果や夜間換気駆動力の促進効果が確認された。

第7章では、非定常熱負荷計算により、PCM内装左官材の断熱性能・融解挙動による顕熱負荷抑制効果を東京・札幌・那覇の3地域において検討した。どの地域も、24時間連続運転の時には、夏季、冬季ともに省エネルギー効果がみられた。暖房負荷が支配的な東京と札幌では、冬季の設定室温と融点が近いほど通年での負荷削減効果が高いことがわかった。また、融解幅が大きくなるほど、融点が低い方が負荷削減効果は高い。夏季には冷房の設定室温を超えず、やや低い温度で融解する方が冷房負荷削減効果は高く、冷房負荷が支配的な那覇では、東京や札幌よりもやや高い融点を選定した方が年間での負荷削減効果が期待できる。それぞれの地域での年間負荷削減量は、

断熱性能によらず、概ね一定となった。

第8章では、非定常熱負荷計算により、PCM窓の融解挙動による顕熱負荷抑制効果を東京・札幌・那覇の3地域において検討した。まず、外付けと内付の設置方法による違いを検討したところ、内付にした時にPCMの融解・凝固の挙動が顕著に見られ、負荷削減効果も高いことから、PCM窓は内付けに設置することが妥当であるといえる。どの地域も、夏季、冬季ともに設定温度に近いほど顕熱負荷抑制効果が高く、PCM窓の厚みが大いほど効果的であることがわかった。

第9章では、リビング及び寝室の1室を対象に、PCM内装左官材およびPCM窓の負荷削減効果について検討を行った。また、東京・札幌・那覇の3地域における、開口部の方位を変え、地域毎、方位ごと、に整理することで、蓄熱建材を適用した住宅における顕熱負荷及び空調時間を示した。

第10章では、本論文で得られた知見をまとめ、総括とした。

10.2 今後の課題

本研究では、潜熱蓄熱材を適用したPCM建材として、PCM内装左官材、PCM窓、ハイブリッド壁暖冷房システム、PCMブラインドを開発し、その基本的な熱物性を明らかにした。

PCM建材は、状態変化することによりその効果を発揮する物質であるという特徴から、どのようにPCMを内包し、適用するかによってその効果は異なることから、PCMのみの物性から評価することにとどまらず、建材全体の熱物性を測定し、評価することが必要であることを主張している。

一方、測定方法の最適化や比熱の定式化については、最適な方法はPCMの種類や融解挙動特性によっても異なることが予測されることから、今後も検討を重ねる必要がある。特に、本論文では、ヒステリシスの影響を考慮していないが、実現象として起こり得るヒステリシス現象を踏まえた上で、最適な融解挙動を検討するという課題も残されている。

また本論文では、顕熱負荷のみでPCM建材を評価したが、例えばPCM内装左官材は母材の石膏や漆喰等は調湿効果を持つことが知られており、今後、湿分移動も考慮したうえで室内環境改善効果をさらに広い観点から評価することができるよう、更な

10. 総括

る検討が必要である。

数値計算に関しては、PCM 建材内部で生じる温度分布や、換気量と対流熱伝達など、より実条件に近い範囲での検討が必要となろう。室の余剰な熱量を熱源として捉え、パッシブな環境設計ができるように詳細な検討を進める予定である。

PCM 建材の開発の観点からは、融解挙動ごとの特性や熱伝達速度の改善により更なる効果が見込まれることから、今後の技術の進展に期待したい。

社会の持続可能性を高め、快適で健康的な都市環境を創造するためには、自然エネルギーを有効活用することが求められており、本論文で提案したパッシブシステムに係る研究が促進されていくことが望まれる。

設計者や居住者が、経済性、快適性、デザインも含めた PCM 建材の環境設計が実現できるよう、今後も検討を重ねたい。

【課程博士】

研究活動リスト

学生証番号	37-147202
氏名	草間 友花
博士論文題目	潜熱蓄熱(PCM)建材を適用した住宅の環境設計に関する研究

1. 査読付き論文（筆頭著者）

- [1] **草間友花**, 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材を適用した蓄熱ブラインドによる日射利用空調システムに関する研究, 第1報—ダブルスキン内に設置した蓄熱ブラインドの日射遮蔽効果及び夜間換気駆動力, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 218, pp. 11-18, 2015.5
- [2] **草間友花**, 石戸谷裕二：ゲル状潜熱蓄熱材を適用した開口部の熱的・光学的挙動に関する研究, 日本建築学会技術報告集第, 21 (48), pp. 715-718, 2015.6
- [3] **草間友花**, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宇佐美大将：潜熱蓄熱材を適用した蓄熱ブラインドによる日射利用空調システムに関する研究, 第2報—融点及び形態の異なる蓄熱材を充填した蓄熱ブラインドの熱特性, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 224, pp.1-8, 2015.11
- [4] **草間友花**, 石戸谷裕二：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, 81(720), pp. 173-180, 2016.2
- [5] **草間友花**, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宮崎智仁：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, 81(722), pp.367-374, 2016.4
- [6] **草間友花**, 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材の施工位置が省エネルギーと環境改善効果に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 22(52), pp.1027-1030, 2016.10
- [7] **草間友花**, 石戸谷裕二：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, 81(729), pp. 931-938, 2016.11
- [8] **草間友花**, 石戸谷裕二：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, 日本建築学会環境系論文集, 81(730), pp.1085-1093, 2016.12
- [9] **Yuka Kusama**, Yuji Ishidoya : Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster

under different insulation and heating scenarios, *Energy and Buildings*, Volume 141, pp. 226-237, 2017.4

- [10] **草間友花**, 石戸谷裕二: 可搬型日射蓄熱暖房器の負荷抑制効果に関する研究, 第1報—基本的熱性能試験及びプロトタイプの日射利用特性, *空気調和・衛生工学会論文集*, No. 241, pp. 29-36, 2017.4
- [11] **草間友花**, 石戸谷裕二: 偏向板を有する室内左官仕上げ表面近域の自由対流に関する研究, *空気調和・衛生工学会論文集*, No. 242, pp.1-10, 2017.5
- [12] **草間友花**, 石戸谷裕二: 潜熱蓄熱内装左官材の圧縮強度と施工性に関する研究, *日本建築学会技術報告集*, 23(54), pp.535-538, 2017.6
- [13] **Yuka Kusama**, Yuji Ishidoya: Study on a tankless solar heating system using phase-change material plaster, *Building and Environment*, Volume 127, January 2018, pp. 256-267, 2018.1

2. 査読付き論文 (筆頭著者以外)

- [1] 石戸谷裕二, 三浦誠, **草間友花**, 松川侑矢, 宇佐美大将: ダブルスキン内に設置したPCM充填ブラインドによる日射利用空調システムに関する研究, 第2報 融点及び形態の異なる蓄熱材を充填した蓄熱ブラインドの熱特性, *北海道職業能力開発大学校紀要*, 第30号, pp. 5-12, 2015.3
- [2] 石戸谷裕二, 三浦誠, **草間友花**, 笹原誠, 小沢修也, 鳥海里紗: ポリマーデシカント材を適用した蓄熱・調湿建材に関する研究, 調湿性能の定量化および周囲相対湿度が調湿量に及ぼす影響, *北海道職業能力開発大学校紀要*, 第31号, pp. 1-8, 2016.3
- [3] 三浦誠, 石戸谷裕二, 加藤泰, **草間友花**: ノルボルナジエン(NBD)誘導体の光異性化反応を用いた蓄熱システムに関する研究, その1 光エネルギーの変換・蓄熱機能に関する基礎的検討, *北海道職業能力開発大学校紀要*, 第32号, pp. 1-5, 2017.3

3. 査読無し論文 (国際会議発表論文含む) (筆頭著者)

- [1] ○**Yuka Kusama**, Yasunori Akashi, Jongyeon Lim, and Yuji Ishidoya: Heating Energy Saving Potential of PCM Plastered Wall for Housing with Difference of Thermal Insulation Performance and Regional Climate Characteristics, *IBPSA Asia Conference*, Jeju, Korea, 2016.11
- [2] ○**草間友花**, 赤司泰義, 林鍾衍, 石戸谷裕二: 潜熱蓄熱(PCM)内装左官材の断熱性能・設定室温の違いによる省エネルギー効果と快適性に関する研究, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 第5巻, E-36, 鹿児島, pp. 221-224, 2016.9
- [3] ○**草間友花**, 赤司泰義, 林鍾衍, 石戸谷裕二: 脂肪酸エステル系潜熱蓄熱材(PCM)を適用した蓄熱建材に関する研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 41079, 九州, pp.

169-170, 2016.8

- [4] ○草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宮崎智仁: 潜熱蓄熱材(PCM)を適用した蓄熱建材の評価手法に関する研究: 昇温速度及び温度幅が蓄熱建材の熱性能試験精度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 41047, 関東, pp. 103-104, 2015.9
- [5] ○草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠: 粒状潜熱蓄熱材(gPCM)を適用した蓄熱建材に関する研究, その3 自然室温による室内環境評価及び省エネルギー効果の算出, 日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), 039, pp. 157-160, 2015.6
- [6] ○Yuka Kusama, Yuji Ishidoya: Measurement results of indoor environment and energy-saving in experimental residences constructed with PCM plaster in Hokkaido (Japan), PCM2018, Orford, Canada, 2018.5

4. 査読無し論文 (国際会議発表論文含む) (筆頭著者以外)

- [1] 加藤泰, 三浦 誠, 石戸谷裕二, 草間友花: ノルボルナジエン (NBD) 誘導体の光異性化反応を用いた蓄エネルギーシステムに関する研究, その1 光エネルギーの変換・蓄熱機能に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 042, 北海道, pp.161-164, 2016.6
- [2] 宮崎智仁, 三浦誠, 草間友花, 石戸谷裕二: ゲル状 PCM による日射蓄熱型暖房装置の負荷抑制効果に関する実験的研究, その2 融点の異なる暖房装置の実験棟における蓄放熱特性の把握, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 043, 北海道, pp.165-168, 2016.6
- [3] 田口夏生, 石戸谷裕二, 三浦誠, 草間友花: 粒状 PCM を適用した蓄熱ダクトレス空調システムの負荷削減効果に関する研究, その2 天井吹出し空調への適用性と省エネルギー効果, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 044, 北海道, pp.169-172, 2016.6
- [4] 内田樹, 石戸谷裕二, 草間友花, 三浦誠: ポリマーデシカント材適用した調湿建材に関する研究, その3 吸放湿履歴が調湿性能に及ぼす影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 045, 北海道, pp.173-176, 2016.6
- [5] 宮崎智仁, 石戸谷裕二, 草間友花, 三浦 誠: 粒状潜熱蓄熱材(gPCM)を適用した蓄熱建材に関する研究: その1 蓄熱建材の基本的熱性能の評価法に関する検討(環境 III, 講演研究論文、計画・技術報告), 日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), 037, pp.149-152, 2015.6
- [6] 前田直樹, 石戸谷裕二, 草間友花, 三浦 誠: 038 粒状潜熱蓄熱材(gPCM)を適用した蓄熱建材に関する研究: その2 蓄熱建材の環境改善および省エネルギー効果に関する検討(環境 III, 講演研究論文、計画・技術報告), 日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), pp.153-156, 2015.6

- [7] 小沢修也, 石戸谷裕二, 草間友花, 三浦誠:045 ポリマーデシカント材を適用した調湿建材に関する研究 : その 1 デシカント調湿建材の吸放湿性能に関する検討(環境 IV,講演研究論文、計画・技術報告), 日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), pp.179-182, 2015.6
- [8] 工藤和樹, 森太郎, 石戸谷裕二, 大槻香子, 草間友花, 羽山広文, 菊田弘輝 : 太陽熱空気集熱器と PCM パネルを組み合わせた換気予熱システムの試作, 空気調和・衛生工学会北海道支部, 第 51 回学術講演会論文集, pp.67-70, 2017.3
- [9] 工藤和樹, 森太郎, 石戸谷裕二, 草間友花, 大槻香子, 羽山広文, 菊田弘輝 : 太陽熱空気集熱器と PCM パネルを組み合わせた換気予熱システムの試作 その 2 実大実験によるシステムの検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.90, pp.167-170, 2017.6
- [10] 工藤和樹, 森太郎, 石戸谷裕二, 草間友花, 大槻香子, 羽山広文, 菊田弘輝 : 太陽熱空気集熱器と PCM パネルを組み合わせた換気予熱システムの試作 その 1 PCM パネルの作製と数値モデルによる伝熱特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学Ⅱ (中国), pp.491-492, 2017.8
- [11] 工藤和樹, 森太郎, 石戸谷裕二, 草間友花, 大槻香子, 羽山広文, 菊田弘輝 : 太陽熱空気集熱器と積層 PCM パネルを組み合わせた換気予熱システムの試作 その 1 カスケードシステムの検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 第 2 巻 (高知), pp.225-228, 2017.9

5. その他 (研究活動を示すもの)

- [1] ○Yuka Kusama: A Study on the Energy Saving and Indoor Environmental Improvement of the PCM Plastered Wall, Japan-Asia Youth Exchange Program in Science, SAKURA Exchange Program in Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2015.8
- [2] 2015 年度 日本建築学会北海道支部研究発表会 優秀講演奨励賞
○草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠 : 粒状潜熱蓄熱材(gPCM)を適用した蓄熱建材に関する研究, その 3 自然室温による室内環境評価及び省エネルギー効果の算出, 日本建築学会北海道支部研究報告集 (88), 039, pp. 157-160, 2015.6
- [3] 一般社団法人 日本建築学会, 北海道支部, 環境工学専門委員会, 専門委員, (2015.4~)
- [4] 東京大学大学院工学系研究科, リサーチアシスタント(RA), (2014.10~2016.3)
- [5] 日本学術振興会特別研究員(DC2), 東京大学大学院工学系研究科, (2016.4~2018.3)
「潜熱蓄熱材を適用した蓄熱建材の評価手法に関する研究」
- [6] 2017 年度 日本建築学会北海道支部研究発表会 優秀講演奨励賞
○工藤和樹, 森太郎, 石戸谷裕二, 草間友花, 大槻香子, 羽山広文, 菊田弘輝 : 太陽熱空気集熱器と PCM パネルを組み合わせた換気予熱システムの試作 その 2 実大実験によるシステムの検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.90, pp.167-170, 2017.6

謝 辞

本論文の作成にあたり、多くの方よりご指導、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

本研究を行うにあたり、東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 赤司泰義教授にご指導を頂きました。論文作成にあたり、専門的なご指導だけではなく、研究に対する考え方や研究者としての姿勢など、多くのことを熱心にご指導いただきました。また、建築学会や空気調和・衛生工学会大会での国内発表や、国際会議、同済大学との共同プロジェクト等の国際的な場にも参加させていただき、非常に貴重な経験をさせて頂きました。

北垣亮馬講師には、副指導教官として半期ごとに研究全体において貴重なご助言とアドバイスをいただきました。予備審査や本審査の発表の場においても、同じ材料分野から熱環境の分野まで、幅広い考え方や知見を教授していただきました。

九州大学大学院 人間環境学府 空間システム専攻 建築環境学コースの尾崎明仁教授には、予備審査及び本審査の副査として貴重なご意見をいただきました。また、審査の時だけではなく、熱負荷計算やPCM建材の測定に関する考え方等、多くの貴重なご助言をいただきました。

東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 平手小太郎教授には、本審査の副査として貴重なご意見、ご指摘をいただきました。予備審査や環境系ゼミの発表会においても、研究全体の流れや表現方法に至るまで議論させていただき、個別指導の際には細部に渡りご指導いただきました。

大岡龍三教授には、本審査の副査として貴重なご意見、ご指摘をいただきました。個別説明の際には本論文の様々な部分に関して大変貴重な議論をさせていただきました。また、発表会の際にもモデル化と数式の表現方法などのご指導をいただきました。

林鍾衍助教には、熱負荷計算に関する基礎的な知識や研究方法に関するアドバイスを頂きました。学会発表等、論文作成にあたり、論文の構成や考察方法に至るまで多くの助言をいただきました。Asim 国際会議の時は、通訳やいろいろな手続きをいただき、また現地でも大変お世話になりました。

謝辞

室内気候研究所 石戸谷裕二主席研究員には、北海道職業能力開発大学校での環境工学の授業に始まり、卒業研究におけるゼミ活動で潜熱蓄熱建材の研究についてご指導いただきました。また、修士課程を卒業後、室内気候研究所の研究員として引き続き多くの研究活動に従事させていただきました。これまで約10年に渡り、研究に関する多くの知見を与えていただき、研究者としての生き方についてご教授いただきました。

北海道職業能力開発大学校 建築施工システム技術科 三浦誠教授には、私が室内気候研究所の研究員のときに、北海道職業能力開発大学校でのゼミ活動にてご指導いただきました。潜熱蓄熱材だけではなく、複数の研究プロジェクトにおいて、議論させていただき、論文執筆や実験に関して多くのご助言をいただきました。

本論文の第2章から第6章は、北海道職業能力開発大学校の石戸谷ゼミ(平成19年度～24年度)、三浦ゼミ(平成25年度～平成26年度)における卒業研究で得られた知見を取りまとめています。研究に携わった卒業生の皆様に心より謝意を表します。

平成19年度

大坪未生氏、西垣祐輔氏、村上理沙氏、山際和氏、渡辺譲氏

平成20年度

尾関公敏氏、加藤智美氏、木村雄一郎氏、西條佑紀氏、武田麦氏

平成21年度

黒田真彦氏、佐藤文哉氏、内匠美訪子氏、村上雄軌氏

平成22年度

葛西仁氏、笠島陽子氏、笠原悠氏、佐々木孝彰氏、山崎泰貴氏

平成23年度

鍛冶大使氏、加藤聡一郎氏、鯉渕千里氏、佐々木康平氏、塩田涼氏、土山拓人氏

平成24年度

金湖悠一郎氏、中野有氏、松川侑矢氏、湊谷佳子氏

平成25年度

宇佐美大将氏

平成26年度

小沢修也氏、鳥海里紗氏、前田直樹氏、宮崎智仁氏

また、実験を行うにあたり、多くの企業の方々から試料のご提供をいただき、また、貴重なご助言をいただきました。

三木理研工業株式会社様、JSR 株式会社様、株式会社カネカ様に、潜熱蓄熱材のご提供頂き、貴重なご助言をいただきました。

ピーエス工業株式会社様、吉野石膏株式会社様、株式会社クワザワ工業様、株式会社アスペックコーポレーション様、富士川建材株式会社様、開進コンクリート工業株式会社様、オイレス ECO 株式会社様、YKKAP 株式会社様にサンプルのご提供をいただきました。

有限会社村井左官工業の村井来宏氏には、湿式左官方法の技術的なご援助をいただき、貴重なご指導をいただきました。

実験住宅の建設にあたり、株式会社日和住設様、株式会社豊栄建設様、ミサワホーム北海道株式会社様、株式会社フーム空間計画工房の皆様にご協力頂きました。

赤司研究室の皆様にはゼミ活動を通して、博士論文だけではなく様々なトピックについて多くの議論をさせていただきました。皆様の今後のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

平成 27 年 3 月～平成 30 年 3 月まで東京大学 YMCA 寮で過ごし、スタッフの皆様を初め、寮生の皆様、OB、OG の皆様に大変お世話になりました。学生生活を共に過ごし、キリスト教の精神に触れながら生活することができ、大変貴重な時間を過ごすことができました。

最後に、大学院への進学を受け入れて応援してくれた家族と親戚一同に感謝します。特に祖父母の草間繁氏、徳子氏には生まれた時から現在に至るまで多大なる経済的、物質的な支援をいただきました。

そして本当に多くの方々に支えられ、この博士論文を完成させることができましたことを改めてここに感謝の意として表します。

平成 30 年 2 月 1 日
東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻
草間 友花

謝辭