

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360235

研究課題名(和文)窓や日射制御・潜熱蓄熱を最適化した低コストで快適性の高い太陽熱暖房の開発

研究課題名(英文)Development of solar heating system of high-comfort and low-cost by optimizing of window, solar radiation control and latent heat storage.

研究代表者

前 真之(MAE, Masayuki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90391599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：開口部で近赤外域日射を天井面に照射させ、オーバーヒートを防ぎつつも有効に蓄熱量を確保できるダイレクトゲイン方式の提案・検証を行った。その際の室内温熱環境および省エネルギー性能を検討した。効率よく日射を取得するため、可視光は透過し、近赤外域は天井方向に反射する近赤外域反射ブラインドを提案、作成した。

また、ダイレクトゲインで快適な室内環境を得るには、窓からの日射取得性能、その熱を蓄えるための蓄熱性能、蓄えた熱を逃がさない断熱性能のバランスが重要となる。提案DGシステムは潜熱蓄熱材を広く敷設し、開口部に設けたブラインドで直達日射を室全体に分散させ、蓄放熱による安定した熱環境を目指すものである。

研究成果の概要(英文)：In winter, direct solar gain system to get solar heat directly to the floor from the windows has been taken as simple and effective technique, but tended not to be able to use all of heat storage capacity because of the obstacles such as the furniture or floor finishing materials. So we proposed the blind dividing near-infrared range to the ceiling and it can improve of indoor thermal environment and energy saving.

Furthermore, it is important the balance of heat gain of solar energy through window, heat storage and insulation for preventing the heat loss for comfort indoor environment. The suggested direct gain system is installing the phase change material in wide surface, and dispersing the solar radiation by blind of window. There will be made comfort thermal environment by heat storage and radiating.

研究分野：熱環境

キーワード：環境設計 自然エネルギー 省エネルギー 太陽熱暖房 潜熱蓄熱材(PCM) 近赤外線

1. 研究開始当初の背景

<住宅における省エネ推進・災害時対応における太陽熱暖房の優位性>

先の震災時にエネルギー供給が絶たれた住戸において、極端な室温の低下により健康を害する事例が多く報告された。その後のエネルギー事情逼迫の中、建物の高断熱・高气密化と合わせ、適切に設計された太陽熱暖房を導入することで、全体の3分の1程度を占める暖房の大幅な省エネのみならず、災害時においても住民の健康と生命の保護に益することが期待できる。

<太陽熱暖房の普及に向けた課題>

太陽熱暖房は様々な方式が提案されているが、以下のような問題点から普及していない。

- ・費用対効果が十分に検証されておらず、過度に重装備で高コストな例が見られる。
- ・ダイレクトゲイン方式はシンプルで無電力でも稼働できるが、蓄熱部位が床のコンクリート等に限定され、顕熱蓄熱のために室温が安定しない。
- ・大量の日射を居室に直接導入するので室内の温度・照度輝度に極端なムラができ、温熱・光環境的に不快となる。
- ・昨今の自然エネルギーへの注目から、太陽光発電(PV)とエアコンの組み合わせが広く普及しているが、初期コストが非常に高く、また停電時の暖房は困難である。

2. 研究の目的

窓ガラス・日射制御・蓄熱部位・蓄熱体を適切に組み合わせ、室内の温熱・光環境の質を確保した、シンプルで低コストな住宅用太陽熱暖房を開発する。あわせて、代表的な条件の最適仕様と効果を整理したガイドライン、および詳細設計時設計最適化のための支援ツールを設計者に提供することで普及を促進し、我が国の住宅における省エネと住民の健康増進に寄与する。

3. 研究の方法

1)人工太陽および屋外における実証試験

実証実験により、新方式の太陽熱暖房に最適な各部位の選択および室内環境の把握を行う。

(1a)人工太陽装置による窓ガラスの日射透過・照射面吸熱の検証実験

東京大学の人工太陽装置により安定した光線照射状況を再現し、ガラスの日射透過率や照射面部の日射吸収・放熱を検証することで、最適なガラス種類や照射面を明らかにする。日射制御装置についても、外ブラインド・内ブラインドや遮蔽スクリーンなど多様な種類を検証する。

(1b)屋外試験装置における実証実験

東京大学の屋外試験装置(方位可変)において実際の太陽光を室内に取り入れ、窓ガラスや日射制御方式を変更した際の室内の温熱・光環境の分布を詳細に検証する。蓄熱部

位や蓄熱体については、床・天井における潜熱蓄熱体を含む石膏ボードを主に想定し、研究協力者であるJSR株式会社から最適となる部材の提供を受ける。

2)熱負荷・温熱環境および光環境のシミュレーションによる予測手法の構築

1の結果と比較しつつ、気象や部位仕様が変更された場合の温熱・光環境の予測技術を構築する。

(2a)熱流体数値計算による放射を考慮した室内温熱環境の予測

熱流体計算ソフトにより、窓から入射する日射や壁面の蓄熱を含めた温熱環境の予測手法を構築する。窓ガラスや日射制御部材の挙動を詳細に再現しつつ人体モデルによる熱収支を算出することで、実居住時の快適感を把握する。

(2b)光環境数値計算による自然光を考慮した光環境の予測

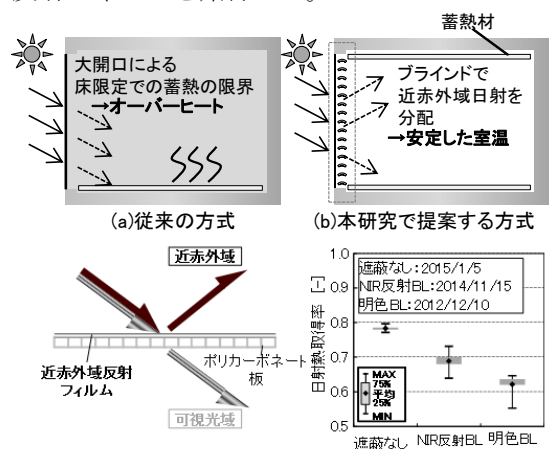
光環境数値ソフトにより、窓からの日照による室内の光環境の予測手法を構築する。輝度分布や明るさ感による検討により、人間の認知を考慮した光環境の評価を行う。

(2c)日射制御や蓄熱を考慮した自然室温・熱負荷シミュレーションソフトの開発

研究代表者の研究室で独自に開発している熱負荷計算ソフト”ExTLA”を拡充。窓ガラスや日射制御・蓄熱方式を変更した場合の自然室温や熱負荷を算出する。

4. 研究成果

開口部で近赤外域日射を天井面に照射させ、オーバーヒートを防ぎつつも有効に蓄熱量を確保できるDG方式の提案・検証を行った。その際の室内温熱環境および省エネルギー性能を検討した。効率よく日射を取得するため、可視光は透過し、近赤外域は天井方向に反射する近赤外域反射ブラインド(以下NIR反射BL)を提案、作成した。スラット材にはポリカーボネート板を使用し、近赤外域反射フィルムを貼付した。



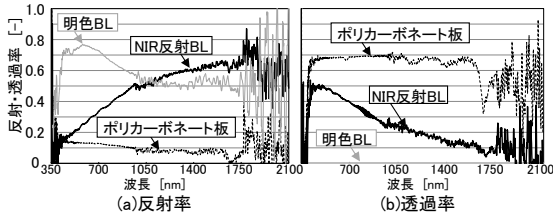
1) 近赤外域反射ブラインドの性能

①日射熱取得率

NIR反射BL併用窓の取得熱量を把握するため、日射熱取得率を計測した。NIR反射BLの

日射熱取得率は 0.69 と高い値であり、一般的な明色ブラインド(以下明色 BL)より高い日射熱取得性能であることを示した。

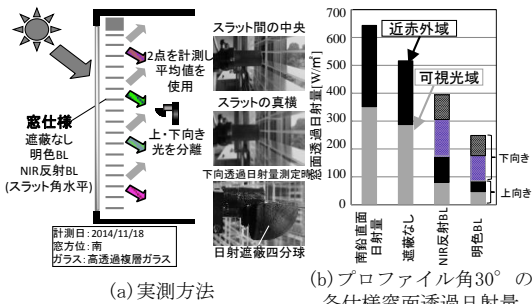
②ブラインドスラットの分光特性



IR 反射 BL の波長ごとの反射・透過率の実測結果を示す。ポリカーボネート板に近赤外域反射フィルムを貼付することで反射率が向上し、特に近赤外域において高い反射率を示した。透過性は可視光域において高く、近赤外域は低いことを確認した。また明色 BL は可視・近赤外域ともに高い反射率を示しているが、NIR 反射ブラインドとは異なり、透過性は持ち合わせていない。

③窓面における上下方向への透過日射量

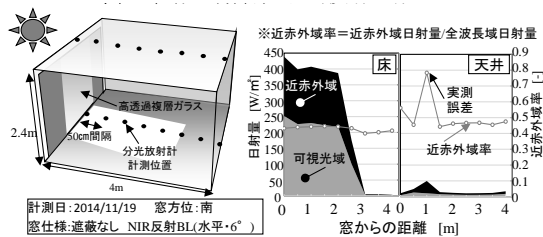
東京大学工学部 1 号館屋外試験装置の南窓面において、NIR 反射 BL の上下方向への透過日射量の把握を行った。分光放射計を用い、各窓仕様での鉛直面透過日射量を計測した。透過日射計測概要と結果を示す。



ブラインド併用時、計測位置により透過日射量が変化するため、スラットの真横とスラット間中央の平均値を用いた。また、上下方向への分配性を評価するため窓面透過日射を日射遮蔽四分球により上下方向に分けて計測した。NIR 反射 BL は全波長域において日射量を大きく減らすことなく上向きに導入できる。特に近赤外域を多く上向き方向に、可視光域は下向き方向に分配できていることも確認した。明色 BL は拡散反射性が高く、透過性を有さないため透過日射量が小さくなることを示した。

④天井・床の日射量分布

室内天井・床面への日射量分布を検討した。計測概要と計測結果を示す。



遮蔽なしの場合、床面への日射量が多く、天井面への日射量が少ないが、NIR 反射 BL を

水平に併用することで天井への入射日射量が大きく増えていることがわかる。NIR 反射 BL は床への近赤外域率が 0.35 程度、天井面は 0.6 程度であることから近赤外域を天井面に分配できていることを示した。またスラット角度を 6° とすると天井の窓から 1m の日射量は増えたものの室内への入射日射量が少なくなっていたことから、冬期南中時の適切なスラット角度は水平とした。

2) 屋外試験装置を用いた NIR 反射 BL の効果検証

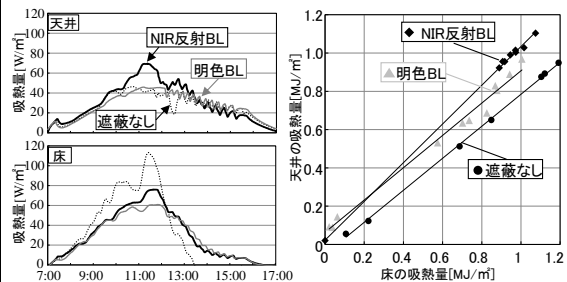
東京大学工学部 1 号館屋上にある屋外試験装置に提案した NIR 反射 BL を導入し、実気象条件下においてその効果を検証した。床・天井・には厚さ 10 mm、相変化温度が 20°C の潜熱蓄熱材(以下 PCM)アルミパック入りを敷設した。PCM は 20~25°C で相変化する際に高い潜熱量を有する。電気ヒーターを 18°C 設定とし、各仕様の夜間の暖房負荷を比較できるようにした。また実際の住宅での運用時には、オーバーヒート時の窓開けが想定されるが、これを FCU による冷房を用いて模擬した。

① 天井・床への入射日射量

天井・床に設置した日射計により、1 日に入射する日射量を把握する。天井・床にそれぞれ 2 つの日射計の計測値を平均して日積算した値を図 13 に示す。遮蔽なしはほとんどが床への入射であることがわかるが NIR 反射 BL は窓から入射する日射の総量を大きく減少させずに天井面に全体の半分程度を分配できることを示した。明色 BL も全体の半分程度を天井へ分配できているが、NIR 反射 BL よりも照射する日射の総量が大きく減少している。

② 吸熱量・吸熱率

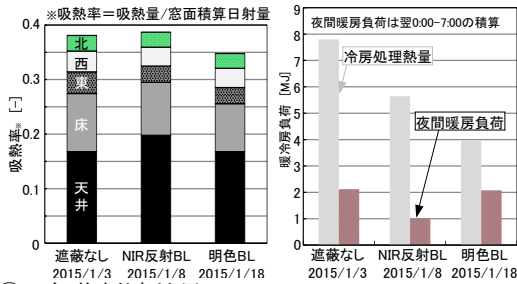
NIR 反射 BL は天井面で多くの日射を吸収していることがわかる。遮蔽なしは床面において 11:30 頃吸熱量のピークを迎え、13:30 には吸熱がなくなっており、床の潜熱蓄熱容量を超えたと考えられる。明色 BL は床面、天井面に大きな吸熱が見られなかった。



天井・床面の吸熱量の相関を示す。各仕様で高い相関がみられた。遮蔽なしと明色 BL に比べ、NIR 反射 BL は床の吸熱量に対する天井の吸熱量が多いことが示された。明色 BL も NIR 反射 BL には劣るが天井面への吸熱量の上昇に寄与していることがわかった。

各部位の吸熱率(積算窓面日射量に対する各壁面の吸熱量)を示す。PCM が敷設されている天井と床面が吸熱率の多くを占めており、

どの仕様も概ね 25~30%を天井と床で吸収していることがわかった。NIR 反射 BL は天井面の吸熱率が高く、壁面全体としても吸熱率が高くなることがわかった。

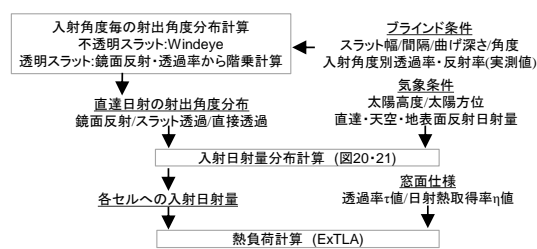


③ 負荷削減効果

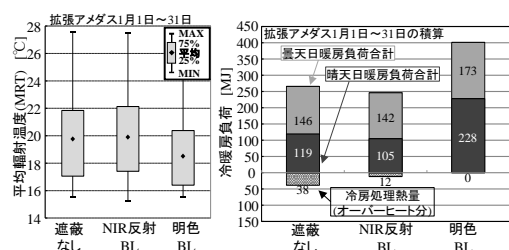
各仕様での FCU 処理熱量と夜間(0:00~7:00)暖房負荷の積算値を示す。FCU 処理熱量が最も小さい白色 BL が最もオーバーヒートしづらく、NIR 反射 BL は遮蔽なしよりはオーバーヒートしづらいことが示された。また夜間暖房負荷は白色 BL と遮蔽なしが同程度の暖房負荷であることがわかった。NIR 反射 BL は暖房負荷が小さく抑えられており、天井面への吸放熱量の違いが暖房負荷に影響していると考えられる。

3) シミュレーションによる温熱環境評価

ブラインドモデルを熱回路網計算に導入するまでのフローチャートを示す。既往の研究より、ブラインドスラットの性状(スラット幅、曲げ深さ、透過・反射率等)から入射角毎の射出角度分布を算出することが可能である。そこで実際の気象条件を入力し、屋外試験装置モデルの各面を細かく分割した各セルへの入射日射量を算出した。算出した各時間の入射日射量を熱回路網計算に組み込むことで、各仕様での室内温熱環境をシミュレーションし、冷暖房負荷と室内温熱環境の把握を行った。



窓仕様での冷暖房負荷を示す。NIR 反射 BL は遮蔽なしより冷房処理熱量に抑えることが出来た。また暖房負荷を全期間で比較すると遮蔽なしに比べ NIR 反射 BL は 7%程度、さらに晴天日のみの暖房負荷を比較した際には約 30%の負荷削減効果があることを示した。



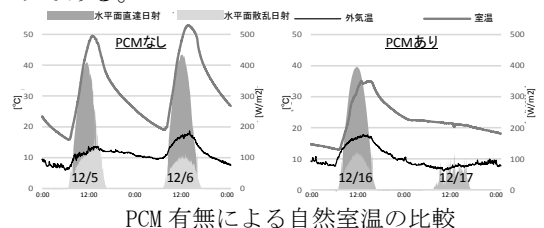
屋外試験装置での PCM 建材の性能評価

PCM 建材の効果を、屋外試験装置における実測結果から確認する。

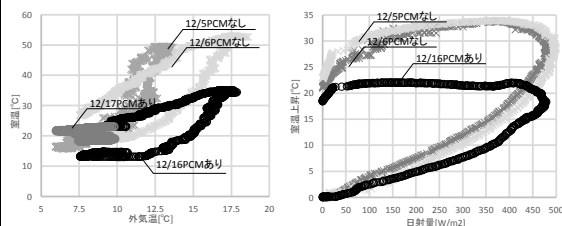
外観	
床面積	15.9m ²
Q値	2.67W/m ² ・K
相変化温度	融解時20-23℃ 凝固時20-22℃
建材形態	ゲル状PCM
合計潜熱量	アルミバック封入 34MJ
特徴	・潜熱蓄熱建材の敷設量 ・窓面積 を変更して検討

① 屋外試験装置

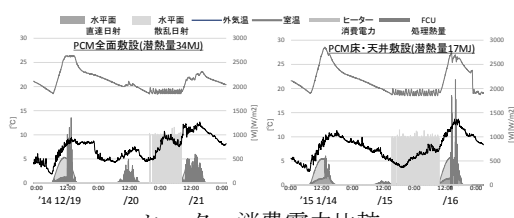
2012年12月から2015年1月の3年間に渡り冬期実測を行った。その間、日射取得(窓面積)、蓄熱性能(PCM量)を変化させ比較を行った。なお、PCM 建材として、アルミバックにゲル状PCMを充填したものを使用した。建材として使用するためには内装仕上げの検討が必要となるが、筆者らの研究より、熱伝導率と日射吸収率が高い仕上げ材において高い室温安定性能が得られることが確認されているため、熱伝導率の高いフレキシブルボードを黒く塗装したものを内装材として使用した。PCM 有り無しの自然室温の比較では、PCM により温度上昇幅が 7.9℃低減、温度下降幅が 13.3℃低減していることが確認された。次に気象条件による差を考慮し外気温と室温の関係を示すが、PCM ありにおいては外気温に対する室温上昇が低減出来ていることが分かる。日射量と室温上昇の関係で、PCM 有りでは同日射量に対しての室温上昇が抑制でき、室温低下も防止できていることが読み取れる。PCM の敷設量の比較においては、PCM による室温安定効果を定量的に把握するため、FCU26℃、ヒーター18℃設定とした。これはFCUによる除去熱量を計測することで室がどれだけオーバーヒートしたか、ヒーター消費電力を計測することでどれだけ室の冷え込みを防止できたかを把握するためである。



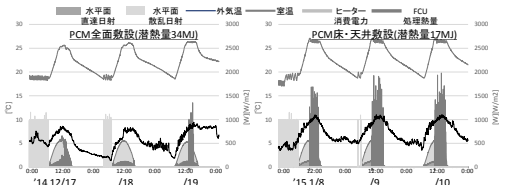
PCM 有無による自然室温の比較



外気温と室温の関係、日射量と室温上昇の関係



ヒーター消費電力比較



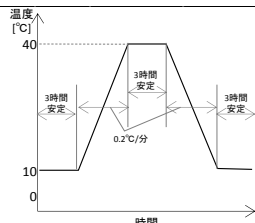
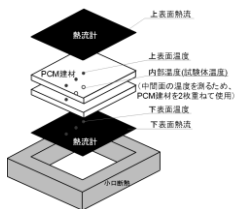
FCU処理熱量比較

PCM 建材の評価手法の検討

PCM の性能評価には DSC 試験の結果が用いられることが多い。しかし DSC 試験は微量かつ単体の潜熱蓄熱量を測定できるものの、複合材料である PCM 建材を評価することができないだけでなく、PCM を建材として使用できる形状にした場合に DSC 試験結果と同一の性能を示すとは限らないため、PCM 建材そのものの熱物性値を測定する必要がある。そこで本章においては 30cm 角の PCM 建材サンプルの評価を試みた。

① 見かけの比熱の算定と得られた実験結果のモデル化

No	PCM相変化温度 融解温度/凝固温度	PCM含有量(試験体あたり)	潜熱量	PCM種類	分類
①	25℃/15℃	900g/m ²	130J/g	マイクロカプセル	表面集中型
②	20℃/19℃	うちカプセル重量60wt%	85J/g	マイクロカプセル	表面集中型
③	26℃/24℃	120g/m ²	160J/g	ミリカプセル	均等分散型
④	26℃/24℃	うちカプセル重量60wt%	160J/g	ミリカプセル	均等分散型
⑤	23℃/20℃	660g	170J/g	ゲル状	アルミバック充填
⑥	27℃/24℃	660g	200J/g	ゲル状	アルミバック充填



比熱測定実験の計測点 実験で与えた温度変動

PCM 建材の見かけの比熱計測のため、槽内を指定した温度に保つことが出来る恒温槽を用いた実験を行った。2 枚の試験体を用い、内部の温度を「試験体温度」とし、試験体上下を熱流計で挟むことにより試験体に流出入する熱流を計測、試験体を 1℃昇降温させるために必要な熱量から見かけの比熱を算定した。温度変動は PCM の相変化温度を十分にまたぐ 10-40℃とし、過去の研究から 10 分かけて 1℃昇降温させるスピードとした。次に実験から得られた比熱曲線を次章においてシミュレーションに組み込むために、Feustel の近似式により近似を行った。この比熱の近似式を後述する熱負荷計算シミュレーションに代入する。

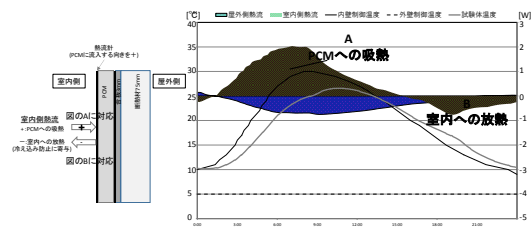
$$C_p = C_{p\text{const}} + \frac{h}{2} \frac{\frac{2}{T}}{\cosh^2(\frac{2}{T}(T - T_m))}$$

ただし Cp: 見かけの比熱 [J/gK], C_{pconst}: 見かけの比熱の顕熱成分 [J/gK], T: 温度 [°C]

有効蓄熱率の算定

相変化温度を十分にまたぎ十分な時間間隔の昇降温速度を与えることで PCM 建材の潜熱量が最大限機能した際の性能の計測を行ったが、実環境において、特に日中の日射を積極的に活用する DG においては、PCM 建材の潜熱量を使い切れるほど十分に緩やかな昇降温速度が与えられることは少なく、試験体内部における温度勾配も実験条件とは異なる。ここでは試験体に発生する温度勾配も含めて実環境に近づけるため 30cm 角の壁体のカットモデル (PCM 建材-合板 3mm-断熱材 75mm) を試験体とし、それを外壁側と内壁側にそれぞれ異なる温度変動を与えることが可能なペルティエ装置内部に設置した。温度変動も実環境を想定し、DG による室温変動を模擬した 10-30℃24 時間サイクルの温度変動を試験体に加え、その際の吸放熱特性を把握する。今回は簡単のため、屋外側は冬期の外気温を想定した 5℃一定とする。

今回は評価指標として、PCM 建材が吸熱した熱のうちどれだけ室内に放熱されたかを「有効蓄熱率」として評価する (図の A÷B に対応)。等潜熱量の場合 PCM が室内側に集中している建材が PCM を効果的に用いることが出来ることが確認できた。相変化温度帯が温度変動幅により長時間収まる試験体のほうの有効蓄熱率が高い結果となった。試験体の潜熱量が異なるが、吸熱量を潜熱量で除した値の比較においても同様の傾向が見られた。



有効蓄熱率の比較

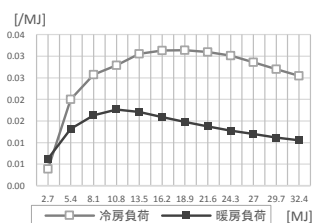
	①	②	③	④	⑤	⑥
PCMへの吸熱量[kJ]	53.8	55.1	53.6	49.4	61.3	61.3
潜熱量あたりの吸熱量[-]	5.1	5.2	4.7	4.3	0.5	0.5
PCMからの室内側への放熱[kJ]	-12.7	-13.3	-11.6	-9.8	-10.6	-10.6
有効蓄熱率[%]	23.6	24.1	21.6	19.8	17.2	17.2

シミュレーションによる PCM 建材導入手法に関する考察

関数近似した見かけの比熱を前研究室が開発した熱回路網計算ツール ExTLA に組み込み、室温変動、暖冷房負荷のシミュレーションを行う。PCM の効果の推定においては多くのシミュレーションが試みられているものの、①断熱、日射取得、蓄熱のバランス、②建材同士の比較、③最適敷設部位への言及が少ないのが現状である。また敷設部位について言及があった場合も、④日射の分配は考慮されていないことなどが課題である。ここでは①~④も含めた検討を行う。④については当研究室における既往研究における日射分配の結果を、ExTLA に組み込んだ。今回は屋外試験装置のモデルを用い、①の検討を行い建物における熱バランスを確認したうえで、②~④を考慮し敷設部の検討を行う。気象条

件は2014年12/16から2015年1/1の東京大学屋外試験装置における実測値とした。

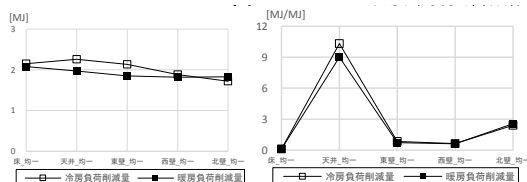
シミュレーションの流れは以下①-③の通りである。①まず建物Q値を高断熱の1.2から次世代省エネ基準の温暖地基準である2.7まで0.3刻みの6通りに定める。②それぞれのQ値に対してa)熱損失と日射取得がバランスする窓面積、b)日射取得が熱損失の0.8倍となる窓面積のそれぞれを決定する。③窓面積が決定されることで日射熱取得量が決まるため、それぞれの日射量に対し、表面集中型PCM建材では0~30%の潜熱量を2%刻み、アルミパック充填型PCMでは、0~50%の潜熱量を5%刻みで導入した場合のそれぞれにおいて自然室温が20~27℃の範囲に収まる時間を(快適時間率とする)算出する。なお窓性能は屋外試験装置のものとし、PCM建材は天井・壁面に敷設するものとする。快適時間率を潜熱量で除した結果より、高断熱の住宅において日射量の10%程度の潜熱量を確保するときにも最もPCM建材が効果的に利用されるこ



とが確認できた。

潜熱量あたりの暖冷房負荷削減率

敷設部位を床に固定して検討を行ったが、最後に敷設部位を壁、天井に拡張して検討を行う。具体的には床に敷設した量を天井、壁に敷設した場合との比較を行い、暖冷房負荷



削減量を各面に照射される日射量で除した値を比較する。床、壁と比べ、天井は日射量あたりの暖冷房削減率が10倍程度まで大きくなった。これは直達日射のほかに、対流により天井付近に集められた熱を吸熱しているためと考えられる。天井は床や壁と比較して障害物が少ないこともあり、敷設部位として効果が高いといえる。

部位別負荷削減量、日射量あたりの負荷削減量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

①川島宏起, 高瀬幸造, 前真之, 他3名: 許容時間率を用いたダイレクトゲイン太陽熱暖房住宅評価法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第79巻第705号, pp. 947-956, 2014年11月

〔学会発表〕(計7件)

①石綿麻矢, 前真之, 井上隆, 高瀬幸造, 他5名: 日射制御と潜熱蓄熱材による住宅用

ダイレクトゲイン手法の提案、(第5報) 近赤外域を反射するブラインドの夏期における日射遮蔽効果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 225-228, 2014年9月

②島田佳樹, 井上隆, 前真之, 高瀬幸造, 他3名: 日射の近赤外域成分を制御・活用するブラインドに関する研究、その2 冬期の実使用下における効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 73-74 2014年9月

③島田佳樹, 井上隆, 前真之, 高瀬幸造, 他5名: 日射制御と潜熱蓄熱材による住宅用ダイレクトゲイン手法の提案、(第4報) 近赤外域を反射するブラインドを用いた蓄熱部位への日射分配の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 221-224, 2014年9月

④石綿麻矢, 前真之, 井上隆, 高瀬幸造, 他3名: 日射制御と潜熱蓄熱材による住宅用ダイレクトゲイン手法の提案、(第1報) 研究概要と日射蓄熱を目的とした潜熱蓄熱材の室内設置方法に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 109-112, 2013年9月

⑤中川あや, 前真之, 井上隆, 高瀬幸造, 他5名: 日射制御と潜熱蓄熱材による住宅用ダイレクトゲイン手法の提案、(第3報) ガラス・ブラインド特性を考慮した開口部周りの熱・光環境の評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 117-120, 2013年9月

⑥五十嵐瞳, 井上隆, 前真之, 他4名: 日射制御と潜熱蓄熱材による住宅用ダイレクトゲイン手法の提案 日射制御と潜熱蓄熱材による住宅用ダイレクトゲイン手法の提案、(第2報) 近赤外域成分の制御・活用による良好な室内環境の形成, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 113-116, 2013年9月

⑦島田佳樹, 井上隆, 前真之, 他3名: 日射の近赤外域成分を制御・活用するブラインドに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp. 473-474, 2013年8月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前真之 (MAE, Masayuki)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 90391599

(2) 研究分担者

井上隆 (INOUE, Takashi)

東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 30151608

一ノ瀬雅之 (ICHINOSE, Masayuki)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授
研究者番号: 00408709