様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ４ 月　 ９ 日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2015～2017
課題番号：１５Ｈ０４０８５

研究課題名（和文）開口部と日射制御・潜熱蓄熱建材の最適化による普及型ダイレクトゲイン住宅の開発

研究課題名（英文）Development of popular direct gain house by optimizing openings, solar control, and latent heat storage building materials

研究代表者
前　真之（MAE, Masayuki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：９０３９１５９９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　12,900,000円

研究成果の概要（和文）：住宅における自然エネルギーや再生可能エネルギーの活用手法は数多くあるが、東日本大震災以降の電力エネルギー自給率の向上やゼロエネルギーハウス等の推進を背景として、太陽光発電が普及してきている。他方、太陽熱利用技術の普及と発展については停滞気味ともいえるが、温暖地における住宅の消費エネルギーの内、暖房と給湯のいわゆる熱需要は過半数を占めることから、太陽熱利用の普及は現在においても重要な検討課題の１つである。本研究では、最もシンプルなダイレクトゲインであり、窓からの日射熱取得を最大限活用することで、極力暖房設備に頼らず室内温熱環境を向上させる手法の確立を目的とする。

研究成果の概要（英文）：Heating energy accounts for approximately 25% of residential energy consumption in Japan. In this study, we focused on direct solar heat gain into the room through the windows to reduce heating energy consumption. In order to use direct gain effectively, it is essential to balance heat insulation and heat gain and thereby stabilize room temperature by storing heat. Latent heat storage material was used in this study. It was expected to have high room-temperature stabilizing effect by performing phase change in the vicinity of the setting temperature and showing a grasp of heat storage effect. We also proposed NIR film (Near-infrared reflective film) that distributes solar radiation in the near-infrared range upward in order to use the ceiling as the main thermal storage and thus stabilize room temperature. Furthermore, we conducted some studies by actual measurements and numerical calculations from a full-scale test building to test the feasibility of solar-heating by direct gain.

研究分野：熱環境

キーワード：太陽熱暖房　ダイレクトゲイン　PCM　シミュレーション　近赤外域反射フィルム

１．研究開始当初の背景

「ダイレクトゲイン」は低コストで従来から検討された方式であるが、近年の開口部や蓄熱技術の進歩により実用段階に入りつつある。申請者らは「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(科研費基盤Ｂ　平成24～26年)」において、ダイレクトゲインに最適化された開口部と日射制御部材・低融点の潜熱蓄熱(Phase Changing Material: PCM)建材の活用手法を開発し、暖房負荷の大幅低減の可能性を示した。またエネマネハウス２０１４においてダイレクトゲインに最適化した実証棟を建設。東京のように冬期に日射が豊富な気候では実質的に暖房を要さない「無暖房住宅」が実現可能であることを示した。

一方で、昼の日射取得時において室温の急激な上昇や光環境の不均質性が発生し、また大面積の開口部や大量のPCM建材による導入コストの高さが課題として残された。本研究では、開口部と日射制御部材・PCM 建材の最適化とシミュレーション手法の構築を通し、実住宅で利用可能な室内環境を快適に保ちつつ低コストなダイレクトゲイン暖房の設計手法を確立する。

２．研究の目的

DG 太陽熱暖房による暖房負荷低減と快適な室内温熱・光空間を両立させるため、以下を開発する。

A: 高断熱（熱貫流率U値：低)・高透過（日射取得率η値：高）を実現する開口部の開発

B: 各季節で快適な熱・光環境を両立させる日射制御部材の検討

C:PCM建材の実使用下での吸放熱効率の試験方法構築および最適特性を有する建材の開発

D: 上記の高性能開口部と日射制御部材・潜熱蓄熱建材を活用した最適設計法の構築

３．研究の方法

(1). 日射取得率を高めた高断熱ガラスの開発および実験的検証

２重および３重ガラスを対象に YKKap(株)および日本板硝子(株)の協力の下、Low-e(低放射)コーティングの素材と厚さの最適化、フィルムによる空気層の分割などにより、高断熱を保ちつつ日射取得率を高めた開口部を試作する。試作品は、人工太陽装置（東京大学)、および分光指向特性計測装置（理科大）により、可視光線および近赤外線の配光特性を含めて詳細に分析し、最適化する。

(2a) 日射制御と自然光利用を両立させる日射制御部材の開発

室内ブラインドまたは屋外ルーバー雨戸など、低コストで耐候性のある日射制御部材を YKKap(株)の協力により試作。日射熱取得計測装置および積分球型センサー（ともに理科大）により、ルーバー形状やコーティング・フィルムの変更により配光特性の最適化を行う。

(2b) 日射制御部材により形成される光環境シミュレーション手法構築

世界的に実績のある光環境数値シミュレーション Radiance を用い、試作ガラスおよび日射制御部材使用時の室内光環境の予測手法を構築。照度・輝度分布や明るさ感の評価より、試作品の改善を行う。

(3a) PCM建材の実効熱容量の計測方法構築および物性の最適化

ペルティエ素子を利用し建材の両面の温度を自由に変更して壁体吸放熱量試験装置（東京大学)により、居住者が許容できる室温(室内側)と外気温(屋外側)の日変動を再現し、実使用下で利用できる吸放熱量の試験方法を構築する。本評価方法でアルミパック・マイクロカプセル含有石膏ボード・漆喰またはフィルムを検証し実効蓄熱量を把握。JSR(株)の協力により、PCM材質や添加剤・基材の物性を変更することで太陽熱利用と室温安定に最適なPCM建材を開発する。

(3b) PCM建材特性の数値モデル化

(3a)で得られたPCM建材の実使用下での吸放熱特性を数値モデル化する。

(4)　屋外実験棟における開口部・制御部材・ＰＣＭ建材の実証試験

方位可変で、入射日射熱と壁体放熱量を詳細に計測可能な屋外実験棟（東京大学）において、(1)(2)(3)で開発された開口部およびPCM 建材を設置し、実気象下での実住宅スケールの温熱・光環境を把握し、開発部材の効果を検証。(2b)(3c)のシミュレーションの比較データとする。

(5a) 数値流体計算(CFD)による温度分布およびPCM建材最適配置決定

熱流体計算ソフト(定常計算:SCRYU/Tetra非定常計算：FlowDesigner)により、窓から日射が入射する状況下での窓ガラスや日射制御部材の特性を考慮した、空気温度および床・壁・天井の表面温度の分布状況を評価。開口部の改善に反映させるとともに、１日の推移の中で吸放熱に最適なPCM建材の設置部位を明らかにする。

(5b)　室温・熱負荷シミュレーションの開発および最適設計のガイドライン構築

東京大学で改良された熱負荷・室温計算プログラムExTLAを用い、ケーススタディを行い、代表的な地域や敷地・建物条件ごとに各部位の最適な仕様を示し、その省エネ効果を明らかにする。合わせて(2b)(3b)(3c)で構築した予測手法により本暖房使用時の温熱・光環境を検証し、必要に応じて改善措置を示すことで居住空間の質を確保する。詳細設計段階に

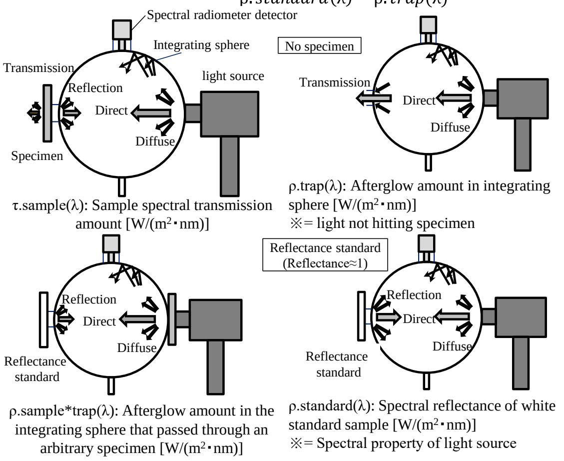
おいて設計者自らによる最適化を可能とすることで、新方式の実効性を確保するとともに普及を促進する。

４．研究成果

1）窓ガラス、内装仕上げ材、近赤反射フィルムの性能実験

実験棟の窓ガラス、内装仕上げ材、近赤反射フィルムの分光特性を暗室において分光放射計で測定した（測定範囲 350nm から 2100nm の間の 812 波長(平均 2.16nm 間隔)）。窓ガラスと近赤反射フィルムの分光透過率と分光反射率については、日本工業規格（JIS）が定める積分球を用いた試験方法で測定した。測定値に日射の標準スペクトル分布を示す重価係数を乗じて加重平均し、可視域+紫外域（350nm から 780nm）と近赤外域（780nm から 2100nm）それぞれの波長帯における日射透過率と日射反射率を求めた。

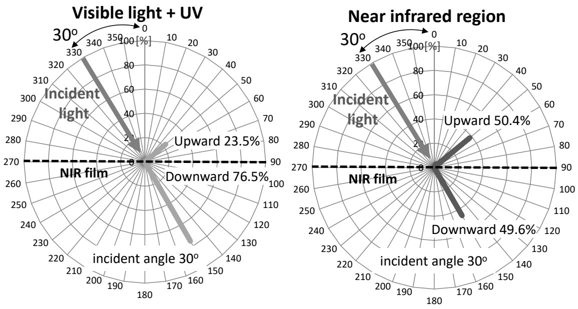
$$Transmittance(\tau) = \frac{\tau.sample(\lambda) - \rho.sample(\lambda) * trap(\lambda)}{\rho.standard(\lambda) - \rho.trap(\lambda)}$$



透過率測定

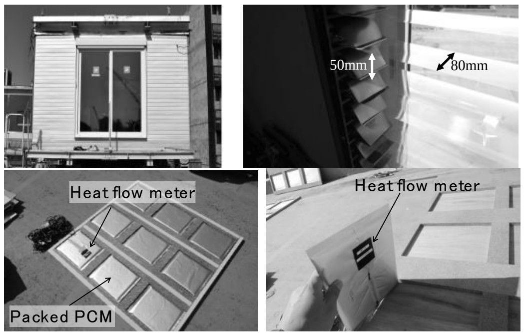
2）近赤反射フィルムの分光指向特性実験

フィルム面法線方向に対する入射角 4 条件（30°，40°，50°，60°）の分光指向角度を測った。0°から 357.5°まで 2.5°間隔で測定し、近赤反射フィルムを基準として上向（反射分）と下向（透過分）とを区分し、可視域＋紫外域および近赤外域に関する指向特性を把握した。近赤反射フィルムによる分光指向特性は、可視光+紫外域の約 27.3%、近赤外域の約 56.6%を上向（天井側）に鏡面反射する結果となった。この結果から近赤反射フィルムによって可視光域と近赤外域の入射角特性が変わることを確認した。



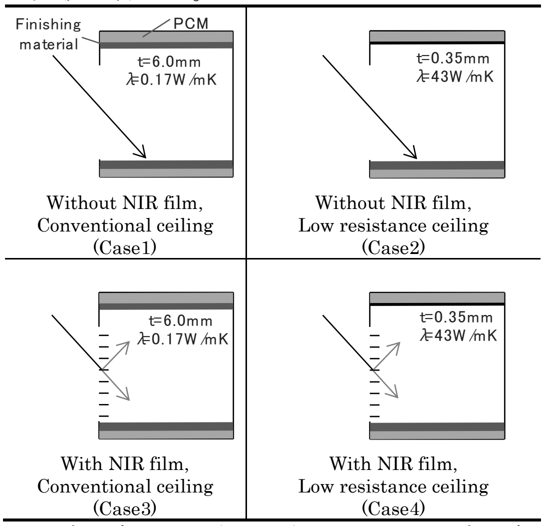
分光指向特性

3）近赤反射フィルムと仕上げ材熱抵抗削減の効果検証実験



実験棟、近赤反射フィルム、PCM

実験条件は日射制御部材について、近赤反射なしと近赤反射ありの 2 種、また一般天井仕上げと低熱抵抗天井の 2 種、計 4 種の条件で実験を行った。



近赤反射なし（Case1）と比べ、近赤反射フィルムの使用（Case3）により日中のオーバーヒートが 1.1℃、夜間の室温低下が 0.7℃改善された。また Case1 と 4 を比較すると、近赤外域フィルムと低熱抵抗天井により日中のオーバーヒートが 1.9℃改善され、効率良く蓄熱できていることによる室温安定効果を確認した。また、近赤反射と低熱抵抗天井による天井 PCM 表面の温度上昇や天井 PCM の吸放熱量増加を確認し、天井 PCM 有効利用可能性を示した。

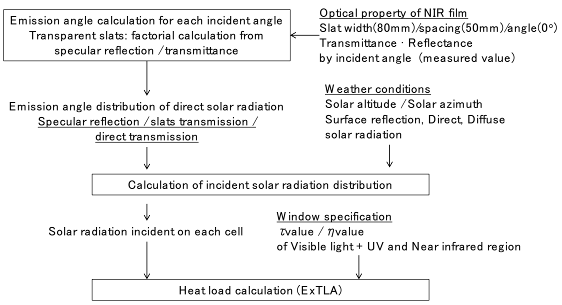
4）近赤反射フィルムの効果を考慮した数値計算

実験では同一気象条件下での比較ができないため、定量的な比較をするためにはシミュレーションによる検討が必要である。本研究では本システムの特徴である近赤反射フィルムによる日射分配や PCM 計算モデルを熱負荷シミュレーションに導入し、その精度を確認した。

(1)近赤反射フィルムによる室内日射分配

本研究ではまず窓から入射した日射が近赤反射フィルムに当たった際の多重反射計算を幾何学計算により求める。計算では可視域と近赤外域のそれぞれプロファイル角度毎

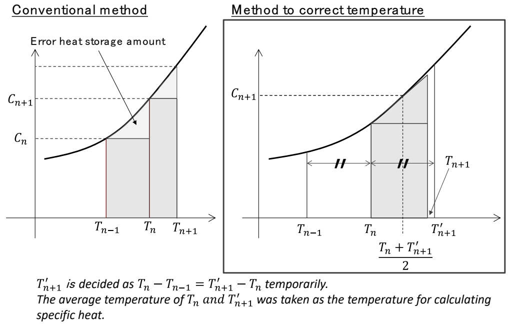
（5°間隔）の日射透過率と日射反射率の測定結果を実際の入射角で線形補間して入力した。多重反射計算により、日射の鏡面反射・拡散反射・透過成分の割合を計算する（近赤反射フィルムの場合、拡散反射成分は無いものとした）。また、それぞれ直達・天空・地表面反射成分に分けて計算を行う。多重反射計算により鏡面反射・拡散反射・透過成分の割合を計算したため、9 通りの成分に分離したことになる。ガラス入射角特性の計算は郡らの研究における「複層・透明二重」の式を参考にした。多重反射計算後、射出方向の分布を計算する。



シミュレーションの計算フロー

(2) 熱負荷計算における PCM 伝熱計算方法

一般に PCM は温度によって比熱が急激に変化する特性を持つため、反復計算を用いて温度と比熱を連立して解こうとすると反復回数・計算時間への影響が膨大になってなる。本研究で採用する PCM 計算手法は簡易的かつ実用的な精度を要するものとして検討する。本研究で扱うモデルは等価比熱法を採用し、見かけ比熱を温度の関数として変化させる手法を取っている。2 つ前のステップと 1 つ前のステップから次のステップの温度を推定し、比熱を決定するための補正温度として採用している。



T'_{n+1} is decided as $T_n - T_{n-1} = T'_{n+1} - T_n$ temporarily.
The average temperature of T_n and T'_{n+1} was taken as the temperature for calculating specific heat.

計算方法概要

$$T'_{n+1} = \begin{cases} T_n & if\ (T_{n+1}-T_n)\cdot(T_n-T_{n-1}) \leqq 0 \\ T_n + \dfrac{T_n - T_{n-1}}{2} & if\ (T_{n+1}-T_n)\cdot(T_n-T_{n-1}) > 0 \end{cases}$$

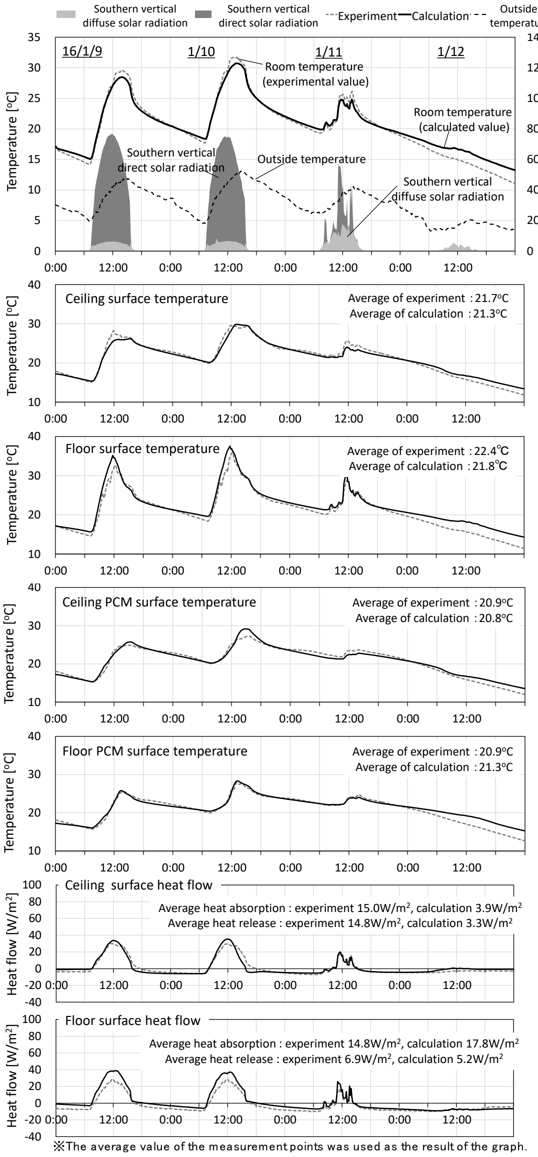
T_{n-1}: Temp. of two previous steps, T_n: Temp. of previous step,
T_{n+1}': Temp. of current step (predicted), T_{n+1}: Temp. of current step (actual)

補正温度の計算

(3)実験データによる数値計算の検証

実験時の気象条件をシミュレーションに入力し、室内の実験結果との比較を行い、シミュレーションの精度を検討した。Table6 に計算条件を示す。PCM の比熱を測定するため、30cm 角の PCM 試験体を挟み、試験体両側に温度変動（5～35℃、温度変動設定：1℃/20 分）を与えることによる試験体の熱流変動から PCM 見かけ比熱を算出した。融解過程では 17.0～26.5℃、凝固過程では 17.0～23.5℃で相変化しており、融解過程では 24.4℃、凝固過程では 21.8℃で見かけ比熱のピークが見られた。

実験棟の計算値と実験値の比較では室温変動が概ね再現でき、表面温度も日射の当たるタイミングの温度上昇を精度よく再現していると考えられる。また、床と天井面の熱流については昼間に最大約 10W/m2 の差があるが、これは 6 ヶ所の測定値の単純平均による影響と考えられる。しかし、熱流変化に関する実験結果と同様の傾向が確認されたため、十分な精度のシミュレーションができていると判断する。



※The average value of the measurement points was used as the result of the graph.

近赤反射あり・低熱抵抗天井の条件での計算値と実験値の比較

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計５件）
①崔榮晋，高瀬幸造，前真之，井上隆，他 4 名：日射制御部材と潜熱蓄熱建材を活用したパッシブソーラーハウスに関する研究、その１ 波長特性を考慮した日射分配と仕上げ材の熱抵抗による PCM 蓄熱性能の検討，日本建築学会環境系論文集，第 83 巻 第 744 号，pp.129-138，2018 年２月
②芹川真緒，崔榮晋，前真之，他２名：壁体熱特性測定装置を用いた部位の吸放熱特性の評価法の提案、その１ 壁体構成を考慮した潜熱蓄熱建材の蓄熱性能の比較，日本建築学会技術報告集，第 24 巻 第 56 号，pp.247-252，2018 年２月
③芹川真緒，崔榮晋，前真之，他２名：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、その１ パラフィンを対象とした見かけの比熱測定およびシミュレーションモデルの構築，日本建築学会環境系論文集，第 82 巻 第 740 号，pp.853-862，2017 年 10 月
④芹川真緒，佐藤誠，前真之：潜熱蓄熱材の熱負荷計算の実用性向上を目的とした置換モデルに関する研究 簡易建物モデルの内壁等への潜熱蓄熱材の設置に係る提案および自然室温計算における精度の検証 第 1 報，日本建築学会環境系論文集，第 82 巻，第 738 号，pp.727-737，2017 年８月
⑤島田佳樹，井上隆，前真之，高瀬幸造，他 4 名：日射の波長特性を考慮した住宅のダイレクトゲイン手法に関する研究，日本建築学会技術報告集，第 22 巻 第 51 号，pp.603-607，2016 年６月

〔学会発表〕（計８件）
①永桶卓朗，井上隆，前真之，高瀬幸造，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（第８報）効率的な吸放熱を行う天井仕様の検討とその暖房負荷削減効果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.253-256，2017 年９月
②永桶卓朗，井上隆，前真之，高瀬幸造，他 5 名：波長特性を考慮した日射制御と潜熱蓄熱材によるダイレクトゲイン手法に関する研究、その３ 効率的な吸放熱を行う建材仕様の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.495-496，2017 年 8 月
③堀内耀介，井上隆，前真之，崔榮晋，他 4 名：波長特性を考慮した日射制御と潜熱蓄熱材によるダイレクトゲイン手法に関する研究、その４ 実測とシミュレーションによる暖房負荷削減効果とオーバーヒート抑制効果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.497-498，2017 年 8 月
④江口剛史，井上隆，前真之，高瀬幸造，他 6 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 7 報）実大実験棟における実測とシミュレーションによる温熱環境向上と暖房負荷削減効果の検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.73-76，2016 年９月
⑤舘林恵介，前真之，他４名：潜熱蓄熱体を含む壁体建材の吸放熱特性評価に関する研究、その１ ペルティエ素子を用いた壁体熱特性測定装置の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.171-172，2016 年 8 月
⑥向島希，井上隆，前真之，高瀬幸造，他 6 名：波長特性を考慮した日射制御と潜熱蓄熱材によるダイレクトゲイン手法に関する研究、その１ 床･天井併用蓄熱による効率的な蓄熱方式の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.351-352，2016 年 8 月
⑦江口剛史，井上隆，前真之，高瀬幸造，他 6 名：波長特性を考慮した日射制御と潜熱蓄熱材によるダイレクトゲイン手法に関する研究、その２ 温熱環境向上と暖房負荷削減効果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.353-354，2016 年 8 月
⑧由井智輝，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 6 報）実験棟における実測とシミュレーションによる近赤外域反射ブラインドの日射分配効果の検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.225-228，2015 年９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

吉澤　望（YOSHIZAWA, Nozomu）
首都大学東京・都市環境科学研究科・教授
研究者番号： 40349832

高瀬　幸造（TAKASE, Kozo）
東京理科大学・理工学部建築学科・助教
研究者番号： 20739148

崔　榮晋（CHOI, Youngjin）
東京大学・大学院工学系研究科・
特任研究員
研究者番号： 50740114