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

STUDY ON THE PASSIVE SOLAR HEATING DESIGN OF RESIDENTIAL BUILDINGS WITH ADAPTABLE TIME RATE ESTIMATION

川島 宏起^{*1}, 佐藤 誠^{*2}, 高瀬 幸造^{*3}, 中川 あや^{*1}
石綿 麻矢^{*4}, 前 真之^{*5}

*Hiroki KAWASHIMA, Makoto SATOH, Kozo TAKASE,
Aya NAKAGAWA, Maya ISHIWATA and Masayuki MAE*

On the Pacific side of Japan, we can take advantage of rich solar energy in winter times to design the low cost passive solar heating system by the direct solar gain through glazing. To keep the room air temperature warm and comfortable only by the passive way, it is important to design the balance among heat gain, heat loss, thermal mass, and thermal mass area. First, we focused on PCM (Phase Change Material), light enough for Japanese wood structure houses to have greater heat capacity, and proved its performance by the actual space experiment. Based on this result, we made the numerical model to simulate the room air temperature with PCM. Finally, we proposed an easy evaluation method to find the better combination of the four, using Southern window area to Q-value charts with adaptable time rate estimation.

Keywords : Direct Solar Gain, Building Thermal Mass, Phase Change Material(PCM), Evaluation Method, Design Principle

ダイレクトゲイン, 躯体蓄熱, 潜熱蓄熱材(PCM), 評価法, 設計指針

1 はじめに

1.1 研究の背景

日本の戸建住宅は古来より木造を基本として発達し、高温多湿な夏の快適性を重視した設計手法が伝統的に取り入れられてきたが、2010年に施行された住宅エコポイント制度や、2020年度までに全ての新築住宅・建築物について省エネルギー基準への適合を段階的に義務付ける方針を国の政策目標としていること、住宅における暖房用エネルギー消費は東京(IV地域)^{注1)}のような比較的温暖な地域であっても全体の20%以上を占める²⁾ことから、木造高断熱住宅における快適性と省エネルギー性を両立した暖房方法の開発とその評価法の整備が必要である。省エネルギーの観点から最も大切にすべきは窓を透過して室内に入射する日射熱取得(ダイレクトゲイン, 以降 DG)で、日本の太平洋側地域の多くは冬期の日射量が豊かであるため、1970年代のオイルショック以降、太陽熱を利用した住宅暖房技術の開発が行われてきた。中でも DG 利用には、導入コストが低く簡便な技術として多数の研究^(例えば 2)~4)がある。昨今では熱容量の小さい木造住宅の高断熱化が進んだことにより、昼間の過剰な室温上昇も懸念されており、昼間の日射を効率良く吸熱し夜間に放熱をする、室内熱容量の確保のための手法が求められている。

室内熱容量確保の際には、DG をまず蓄熱体に吸熱させて昼間の過度な温度上昇を抑制し、高い断熱性能の躯体によって熱の損失を

減らし、蓄熱体からの放熱だけで朝方まで室温を高く保つことが理想である。日射熱取得のみで快適性の高い室温変動を得るためには、図1に示すように躯体の断熱性能、窓からの日射熱取得性能、蓄熱体の量と敷設面積の4点のバランスを取る必要があり、その手法は住まい方や地域、敷地の特性によって変わる。

熱容量を付加する手法として簡便なのは、建材として一般的なコンクリートを用いることだが、木造住宅の場合は重量の問題から床面等への付加に限定されることが多い。そこで、木造に代表される軽量建物に熱容量を付加する材料として広く研究が行われているのが潜熱蓄熱材(Phase Change Material, 以降 PCM)である。PCM は製造時に任意に選択可能な相変化温度帯で融解・凝固熱を利用して蓄熱・放熱することが可能な素材であり、中でも20~30℃の温度帯に相変化温度を持つものは、暖房利用の際に軽量ながら大きな熱容量を持ち得る。

PCM と DG を利用した暖房システムの既往の研究として、射場本、鎌田ら⁵⁾や尾崎ら⁶⁾、Athienitis, Feldman ら⁷⁾による潜熱蓄熱材を練り込んだ石膏ボードや、Kuznik ら⁸⁾によるゲル化した PCM のアルミサンドイッチパネルの室温調整性能に関する研究があげられる。しかし、研究の主眼は限定された気象・躯体条件での性能評価にとどまり、実際の住宅に敷設するためのガイドラインは未だ整備の途上である。

*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 工修
*2 佐藤エネルギーリサーチ 代表取締役・博士(工学)
*3 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)
*4 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程
*5 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., the Univ. of Tokyo, M. Eng.
CEO, Satoh Energy Research Co., Ltd., Dr. Eng.
Assistant Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., the Univ. of Tokyo
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

1. 2 研究の目的と概要

本研究では、図1に示す4つの要素のバランスが取れた太陽熱暖房住宅の評価法に基づいた設計指針を提示すべく、多様な気象・敷地条件と躯体性能の組み合わせにおける、蓄熱体が温熱環境に与える影響の検証と、実用上適切な蓄熱体敷設量・面積の検討を行う。

本研究のフローを図2に示す。本研究では断熱境界の内側に蓄熱体を設けるよう、内壁の下地材と内装仕上げ材の間に蓄熱体を挿入する仕様を前提としており、その蓄放熱性状に影響を与える要素として、PCMの敷設量・面積とともに仕上げ材の検討を行うものである。検討2の屋外実験装置を用いた検討ではコストや実験期間が限られ、複数のPCM敷設手法の検討を行うことができないため、検討1で模型箱と人工太陽を用いて、複数のPCM敷設手法と仕上げ材の比較検討を行うことで、屋外実験装置に敷設する仕様を決定する。続く検討3では、実気象条件下で観測された結果を用い、実験結果の再現性の高い計算モデルの構築を行い、PCMの敷設量・面積による温熱環境に与える影響の違いを検討する。最後に、日本の代表的な地域の気象条件下において、躯体の断熱性能、窓からの日射熱取得性能、蓄熱体の敷設量・面積の計4点について、検討3で作成された計算モデルを用いて複数の組み合わせの評価を行うことによって、顕熱・潜熱双方の蓄熱手法におけるDGを用いた太陽熱暖房住宅の評価法と設計指針の提案を行う。

2. ダイレクトゲインとPCMを用いた躯体蓄熱の特性把握実験

2. 1 検討1：模型箱と人工太陽を用いた蓄放熱性状の把握

東京大学工学部1号館地下に設けられた暖冷房ブースをエアコン制御で16から18℃に保ち、内寸335mm立方体のうち1面を開口として作成した模型箱を、縦670mm横470mmのすりガラスを押し当て、人工太陽光^{注2)}を図3に示す方式で水平照射^{注3)}した。模型箱の詳細平面図、測定点を図4に、実験装置、模型箱の写真を図5、6に示す。照射の強度を決めるにあたっては、実際に有り得る室温変動の中でのPCMの蓄放熱挙動を検証することを目的とし、人工太陽光の強度はガラス透過後で300W/m²(ガラス面全体で33.2W)とすることで、冬期のDGによる室温変動を模擬した(図7)。左が屋外実験装置で実測された11月の晴れの日々の室温変動を示しており、本実験では最寒期の2月を模擬するため、2つの月の平均気温の差を考慮し、最高最低ともに7℃程度低い温度変動をするものとして模擬した。また検証には多くの実験ケースを必要としたため、4時間照射・8時間非照射と、半日で1サイクルの実験とした。PCMは表1に示す物性値で、縦横300mmの正方形のアルミパックに封入したものを、PCMの潜熱の敷設熱容量を1.4MJ/(m²・K)^{注4)}として箱の奥面の1面に15mm厚のPCMパックを敷設した場合、奥面・上面・右面の3面に5mm厚を敷設した場合、PCM敷設なしの場合の3種の蓄熱方式ごとに、熱抵抗や塗装を変えた仕上げ材3種(表2)と組み合わせ、計9種の実験を行うことで敷設面積や仕上げ材により異なるPCMの蓄放熱性状を比較した。

図8には室内部位への入射日射量の測定値に、表2の日射吸収率を乗じた仕上げ材・部位別の表面日射吸収量を示す。すりガラスによる拡散があるものの、全ての仕上げ材において光源に正対する奥面の吸収量が多い。白アルミ仕上げの場合は他壁面に比べて奥面の吸収量は1.6倍、黒アルミ仕上げの場合は4.0倍と、日射吸収率が

図1 本システムでバランスを取るべき4つの要素

ダイレクトゲインと躯体蓄熱を用いた太陽熱暖房システムの構築

本システムの設計指針の提案

図2 本研究のフロー

図3 実験室平面図

図4 模型箱部分詳細平面図・測定点位置図

図5 実験装置写真

図6 模型箱外観

図7 室温変動実測値と箱内温度の模擬

表1 PCMの物性値

PCM	相変換温度 ℃	潜熱量 kJ/kg	熱伝導率 W/(m・K)		顕熱比熱 kJ/(kg・K)		密度 g/cm ³	
			固相	液相	固相	液相	固相	液相
加熱	20~23	170	0.4	0.2	1.9	2.6	0.9	0.8
冷却	20~22	170						

※用いたPCMはパラフィン(直鎖型のn-オクタデカン)

表2 仕上げ材の物性値

仕上げ材	熱伝導率 W/(m・K)	日射 吸収率%	熱容量 kJ/K	熱抵抗 (m ² ・K)/W	厚さ mm
黒アルミ	237.3	95.7	0.02	8.4×10 ⁻⁶	2
白アルミ		17.2			
合板(無塗装)	0.13	31.9	0.01	3.1×10 ⁻²	4

高い仕上げほど、奥面と上下左右面の日射吸収量に違いがある。これは、明色の仕上げ材の場合は入射日射が他壁面へ反射することで日射が分配されるためである。次に、箱内温度と PCM の床面積あたり合計吸放熱量の時刻変動の比較結果を図 10 に示す。PCM なしの場合は黒アルミ仕上げで 38.2℃と、仕上げの日射吸収率が大きいほど箱内最高温度が高いことがわかる。これは明色の仕上げ材の場合、入射した人工太陽光のうちガラスを通して箱外部へ再放出された日射量が多いためである。また、3 種の仕上げ材共通で、PCM3 面敷設は 1 面敷設と比較して箱内最高温度が 1.2～1.7℃低下し、非照射 4 時間後の箱内温度が 1～1.5℃上昇した。これは、PCM3 面敷設は 1 面敷設と比較して、照射時の吸熱量および非照射時の放熱量がそれぞれ最大で 35～41W/m²、8～15W/m²大きいと考えられる。仕上げ材による違いでは、照射時では、黒アルミ仕上げは他と比較して吸熱量が 5～66W/m²大きく、非照射時ではアルミ仕上げは合板仕上げと比較して放熱量が 9～17W/m²大きい。黒アルミ仕上げ・3 面敷設では、照射開始 2 時間半後に箱内温度の上昇が急になった。これは奥面の PCM(5mm 厚)が吸収した日射熱によって、PCM が完全に液相になったためであると考えられる。

次に、各ケース・面に敷設された PCM 蓄放熱の短波・長波・対流別の熱収支を図 9 に示した計算方法で算出し時間変動のグラフを作成した(図 11)。黒アルミ仕上げ・3 面敷設の奥面 PCM については、照射 2 時間半後に蓄熱量が小さくなり、仕上げ材表面の吸収日射熱のうち PCM に蓄熱されなくなった熱量が長波・対流熱伝達成分として箱内へ再放熱し、箱内温度上昇の原因となっている。一方で、黒アルミ仕上げ・1 面敷設の場合は PCM (15mm 厚)が固相、

液相が混在した状態を維持していたとみられ、安定した蓄熱が確認された。白アルミ仕上げの場合に対流熱伝達成分による熱取得が大きいのは、箱内温度と比較して表面温度が低く保たれたためである。合板仕上げの場合に仕上げ表面で吸収される日射熱を PCM が全て吸収することができないのは、熱抵抗が大きく、表面で吸収された熱が箱内へ再放熱されやすいためである。以上の結果から、蓄熱手法については、一般に言われていることではあるが、敷設する PCM を厚くすること、PCM が同容量であれば敷設面積を広くすること、PCM 敷設箇所の内装材の日射吸収率を大きく、熱抵抗を小さくすることが、恒温性の高い PCM 敷設手法であると確認できた。

図 8 照射時各面吸収日射量展開図

図 9 PCM 蓄放熱収支の計算の概要

図 10 仕上げ材・蓄熱手法別箱内温度変動・PCM 蓄放熱

図 11 仕上げ材・蓄熱手法別の蓄放熱収支

2. 2 検討2：屋外実験装置を用いた蓄放熱性状の把握

検討1の結果を受け、南に正対して6.1㎡の開口を持つ床面積15.9㎡の屋外実験装置⁹⁾に、検討1で用いたPCM(表1に示す)をアルミパックに10mmの厚みで封入し、熱伝導率が高く黒色に塗装した繊維強化セメント板を仕上げ材として、床・壁・天井で合計32.7㎡敷設し、蓄放熱性状の把握を行った。図12には仕上げ材敷設前、図13には敷設後のPCMと計測点^{注5)}の様子、表3には屋外実験装置の仕様、表4には外皮の構成を示す。実験はPCM敷設の有無の蓄熱条件について比較検討した。

図14,15に取得日射、PCMの吸放熱流、温度の時間変動の結果をまとめた。PCM敷設ありなしの比較では、PCMの日中の吸熱に

※点線で囲った範囲にPCMパックを設置し、黒色仕上げ材を施工した

図12 壁面におけるPCMパック・測定点設置状況

図13 屋外実験装置内部設置状況

表3 屋外実験装置仕様

床面積	15.9㎡	
PCM敷設面積	床	5.4㎡ (敷設率: 32.9%)
	天井	10.8㎡ (敷設率: 65.9%)
	東壁	6.2㎡ (敷設率: 66.7%)
	西壁	6.1㎡ (敷設率: 65.6%)
	北壁	4.2㎡ (敷設率: 44.7%)
	合計	32.7㎡, 熱容量: 0.29MJ/(㎡・K) 敷設面積/床面積: 199%
仕上げ材	床	高伝導フローリング t=3.0mm 日射吸収率: 95.7% 熱抵抗: 0.024㎡K/W
		フレキシブルボード t=4.0mm 日射吸収率: 95.7% 熱抵抗: 0.011(㎡・K)/W
	天井、壁面	
窓方位	真南	
窓ガラス	6.1㎡(窓面積/床面積: 38.6%)	
	WFL5-Ar12-WFL5, U値= 2.9W/(㎡・K)	
	高透過複層ガラス(Arガス入り) 日射透過率: 0.81, 日射熱取得率: 0.84	
実験期間	2012年12月~2013年2月	

表4 外皮層構成

天井 (外部より)	銅板	t= 0.5mm
	構造用合板	t= 24mm
	空気層	
	発泡ポリエチレンフォーム3種	t= 75mm
	合板	t= 5.5mm
	PCM	t= 10mm
壁面 (外部より)	繊維強化セメント板	t= 4.0mm
	銅板	t= 0.5mm
	発泡ポリエチレンフォーム3種	t= 30mm
	合板	t= 12mm
	発泡ポリエチレンフォーム3種	t= 45mm
	合板	t= 12mm
床面 (外部より)	PCM	t= 10mm
	繊維強化セメント板	t= 4.0mm
	発泡ポリエチレンフォーム3種	t= 225mm
	構造用合板	t= 24mm
	発泡ポリエチレンフォーム3種	t= 45mm
	銅板	t= 2.4mm
	高伝導フローリング	t= 3.5mm

※PCM非敷設部には網掛部の仕上げを省略

図14 PCMなし日射量・温度変動 12/12/5-6

図15 PCMあり日射量・温度変動 12/12/16-17

図16 日中の室温上昇寄与熱量とPCM蓄熱量の関係

図16 日中の室温上昇寄与熱量とPCM蓄熱量の関係

より最高気温に至る温度上昇幅が7.9℃低減し、夜間の放熱により翌朝日の出の時刻に至る温度下降幅が13.3℃低減した。また、PCMを敷設した場合は、快晴日の翌日の日射熱取得が少量でも、快晴日の日没から翌日の日没までの24.8時間、室温が20℃以下とならないことが確認できた。しかし、窓を透過した日射熱が床に集中することが原因で、床に敷設されたPCMの内部温度が午前11時に相変温度帯を超え、その後50℃まで達している。このことから、床面等、入射日射が集中する部位のPCM敷設量を増加させることで、恒温性が向上すると考えられる。

図16に各条件において、室内に入射した日射量のうちで室温上昇に寄与した熱量とPCMに吸収された熱量のグラフを示す。室温上昇寄与熱量は窓面透過日射量からPCMの吸熱量^{注5)}を引いた値として算出している。PCM敷設ありなしの比較では、PCMありの場合に窓面透過日射量のうち63MJが吸熱され、室温上昇寄与熱量が39MJとPCMなしの場合に比べて低減された。また室に敷設したPCMの合計の潜熱蓄熱量が43MJであることから、顕熱による蓄熱がなされ壁表面温度が上昇したために、PCMによる恒温性が低減したと考えられる。以上のことから、室全体にPCMを配した際に恒温性が高まることが確認された。

2. 3 検討3：熱回路網計算を用いたPCM室内導入手法の検証

屋外実験装置における実測では検証パターンに限られるため、非常1次元熱回路網計算プログラム¹⁰⁾を用い、屋外実験装置の熱回路網計算モデルを作成した。モデルの仕様を図17に、計算条件を表5に示す。外皮のモデルは表3,4に準じた。屋外実験装置の窓前

図 17 計算モデル

表 5 計算条件

計算方法	非定常1次元熱伝達	計算時間間隔	10分
気象条件	拡張アメダス(東京都/東京地点) 実測値(精度検証時)	換気回数	0.5回/h 0回/h(精度検証時)

$$\text{顕熱比熱式} \quad C_{p \text{ const}} = \begin{cases} 1.9 (T < 0), 2.6 (T > 40) \\ 1.9 + 0.0175T (0 \leq T \leq 40) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{比熱式(蓄熱)} \quad C_p = \begin{cases} C_{p \text{ const}} + \frac{h_H}{2} \frac{\frac{2}{\tau_H}}{\cosh^2(\frac{2}{\tau_H}(T - T_H))} (T \leq 25) \\ C_{p \text{ const}} (T > 25) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{比熱式(放熱)} \quad C_p = C_{p \text{ const}} + \frac{h_C}{2} \frac{\frac{2}{\tau_C}}{\cosh^2(\frac{2}{\tau_C}(T - T_C))} \quad (3)$$

T : PCM現在温度 [K], C_p : 比熱[kJ/kg・K], h_H, h_C : 潜熱量[kJ/kg・K]

τ_H, τ_C : 相変化温度幅 [K], T_H, T_C : 比熱ピーク温度 [K],

※添字のH,Cは蓄熱、放熱過程を意味する

図 18 蓄放熱過程の近似比熱曲線

図 19 実測・計算値の比較による計算モデルの精度検証

面地面が建物の屋上面であることを反映させるため、アルベドについては既往研究¹¹⁾の実験式を用いた。PCMの蓄放熱を再現するには、固液相の状態量により変化するPCMの見かけの比熱が必要になる。ここでは、温度の関数で表されるFeustel¹²⁾の式を用い、物性値に基づき(1)~(3)式で比熱曲線を近似した。

比熱の近似曲線は図18に示した通りである。蓄熱放熱過程の比熱式の入れ替えは相良、山中ら¹³⁾の過冷却を考慮するアルゴリズムを用いた。図19に計算値と実測値の比較を示す。日射量、気温変動の異なる3日間において室温、床面PCM温度ともに計算値と実測値が精度良く一致することが確認された。

次に、拡張アメダス気象データ¹⁴⁾(東京都東京地点標準年)を用いて冬期の12/1から3/31までの期間でシミュレーションを行った。PCMの蓄放熱性能に与える影響の検証として、蓄放熱面積については0.5倍と1.5倍と、PCMの蓄熱量については0.5倍と2倍と変えて、計算した結果を代表日について図20,21に示す。蓄放熱面積では室温平準化効果に大きな差が見られないこと、蓄熱量では増加

図 20 蓄熱面積による室温の違い

図 21 蓄熱面積と蓄熱容量による室温の違い

図 22 蓄熱面積と蓄熱容量による日較差の違い

することによる恒温性の向上が認められた。

次に、敷設面積・量による恒温性の把握を行うため、敷設面積/床面積(以降、蓄熱面積)3種(1, 2, 3)と蓄熱量/床面積(以降、蓄熱容量)の4種(0.15, 0.3, 0.6, 1.2MJ/(m²・K))の計12ケースで計算した。日較差の違いを図22に示す。蓄熱容量が大きいと蓄熱面積が大きい場合の恒温性を向上させる効果が大きく、屋外実験装置の仕様(0.29MJ/(m²・K)、蓄熱面積/床面積1.99)では蓄熱面積の違いで日較差が変わらないこと、蓄熱量を2倍にして日較差が半減することがわかった。屋外実験装置の断熱性能・窓面積と蓄熱性能のバランスの考察は次章の課題とした。

3. ダイレクトゲインを用いた太陽熱暖房住宅の評価法

3. 1 設計指針の整理とデータベースの作成

以上の実験から、10mm程度の厚さのPCMの敷設とDGだけで、十分に快適性の高い環境の住宅が設計できる可能性が示された。しかし屋外実験装置においては、PCMの潜熱蓄熱量に対して窓からの日射熱取得量が多く、室温は昼間に約35℃まで上昇しオーバーヒートしている。このように実物件にPCMを導入し、窓からの日射熱取得のみで安定した室温変動を得るためには、躯体の断熱性能、窓からの日射熱取得性能、蓄熱容量、蓄熱面積の、計4点のバランスを取るための設計指針が必要とされている。

以上の4点を設計する際、まずは躯体の断熱性能を確保した上で、窓からの適切な日射熱取得を行うべきである。そこで、木造2階建ての住宅への蓄熱体の導入を前提とし、前章で精度が検証されたPCMモデルと図23、表6に示す計算モデルを用い、拡張アメダスデータ(東京都東京地点標準年)の冬期(12/1から3/31)において、蓄熱体を導入しないケースとして、南窓面積/延床面積(以降、南窓/

図 23 モデル建物^{注6)}

表 6 モデル建物外皮層構成

天井 (外部より)	スレート	t= 4mm
	合板	t= 12mm
	硬質ウレタンフォーム 厚みはQ値により調整	
	石膏ボード	t= 12mm
壁面 (外部より)	合板	t= 5.5mm
	サイディング	t= 15mm
	通気層	
	硬質ウレタンフォーム 厚みはQ値により調整	
床面 (外部より)	土壁orPCM 厚みは熱容量により調整	
	石膏ボード	t= 12mm
	硬質ウレタンフォーム 厚みはQ値により調整	
	合板	t= 12mm
窓	土壁orPCM 厚みは熱容量により調整	
	フローリング	t= 12mm
	日射透過率: 0.74	
	日射熱取得率: 0.79	
	熱貫流率: Q値により調整	

※PCM 非敷設部には網掛部は省略する

図 24 許容時間率の評価の方法

床)を5から60%の10種(5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 30, 40, 50, 60), Q値は0.5から5.0W/(m²・K)の10種(0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0)の組み合わせによる, 計100ケースの自然室温計算を行った。各ケースの温熱環境を評価する指標として, 計算期間の自然室温が17~28℃の範囲の時間長さを全時間長さに除した許容時間率(図24)^{注7)}を用いることとした。本研究で対象とした住宅において, 建築プログラムの特性上から厳密な温度制御が必ずしも必要とされるわけではなく, 太陽熱を最大限に活用するためには居住者が多少の室温変動であれば許容して着衣量等を調整しながら生活するといったことも考えられる。そこで今回はなるべく太陽エネルギーに依存した, 補助暖房設備に頼らない住宅の基本設計(建物ボリューム・断熱性能・開口面積・蓄熱性能)を評価するために, 暖房負荷による検討を初期段階から行うのではなく, 無暖房条件下の自然室温を数値計算によって求めた結果から得られる許容時間率を評価指標とすることを提案する。^{注8)}

計算結果について, 横軸にQ値, 縦軸に南窓/床をとった許容時間率の等高線図を作成した(図25, 以降, 許容線図)。Q値が4.0

から5.0W/(m²・K)で断熱性能が不足しており, 南窓/床が10%以下の日射熱取得が少ないケースにおいて許容時間率が10%以下と低いこと, 一方でQ値が0.5から1.0で断熱性能が高く, 南窓/床が40%以上で日射熱取得が多いケースにおいても, 許容時間率が10%以下と低いことがわかる。高温の時間帯が少なく, 許容時間率80,90%以上のケースは図中の白円で囲った狭い範囲に限られる。次に, PCMを導入した場合を考慮するため, 蓄熱面積3種, 蓄熱容量2種の合計6種の蓄熱条件1つにつき, 100ケースの計算を同様に行った(図26)。蓄熱容量・蓄熱面積ともに大きいと許容時間率が高いケースが増加することがわかる。蓄熱容量が多い場合, 蓄熱面積を広げる程, 許容時間率が高まるケースが増える一方で, 蓄熱容量が少ない場合は, 蓄熱面積が小さくても十分な蓄放熱が行えるため, 蓄熱面積による違いが出ないことが明らかになった。

3. 2 許容線図の応用とダイレクトゲインを用いた太陽熱暖房住宅の評価法の提案

前項で作成した許容線図で屋外実験装置の位置づけを分析するためには, 屋外実験装置のQ値, 南窓/床の値を算出する必要がある。計算モデルにおいては障害物のない, 日射熱取得率0.79の複層ガラ

$$A_{swin} = \sum_{i=1}^n A_{win_i} \cdot P_{swin_i} \cdot \frac{\eta_i}{\eta_0} \quad (4)$$

A_{swin} : 南窓面積/延床面積, A_{win_i} : 各窓面積/延床面積,
 P_{swin_i} : 各窓南窓換算率, η_i : 各窓日射熱取得率, η_0 : モデル窓日射熱取得率

図 25 蓄熱なし・東京都東京地点における許容線図

図 26 PCM 蓄熱導入時の許容線図

スの南面窓を用いているため、式(4)を用い屋外実験装置の南窓/床である A_{swin} を算出することとした。^{注9)}

式(4)中の各窓南窓換算率は、障害物のない南面窓と異なる日射熱取得条件にある窓の、冬期(12/1 から 3/31)における積算全天入射日射量について、後者を前者で除した値である。図 27,28 では建物の方位角の絶対値と、隣棟障害物、庇の D/H によって変わる南窓換算率を算出した。これを用い、複数方位の窓や日射熱取得率、屋外障害物の影響を加味した合計の日射熱取得性能を、障害物のない複層ガラスの南面窓面積に補正を行った。

次に Q 値の計算式は汎用式¹⁵⁾を用いているが、それを展開し、許容線図の縦横軸に合わせて展開する^{注10)}と式(5)となる。

$$A_{swin} = P_{swin} \cdot \frac{Q - \{(A_W + A_{win}) \cdot U_W + A_R \cdot U_R + A_F \cdot U_F\} - V}{U_{win} - U_W} \quad (5)$$

Q: Q 値[W/($m^2 \cdot K$)], A_W : 壁面積/延床面積, A_R : 屋根面積/延床面積, A_F : 床面積/延床面積, A_{win} : 窓面積/延床面積, A_{swin} : 南窓面積/延床面積, U_W : 壁熱貫流率[W/($m^2 \cdot K$)], U_R : 屋根熱貫流率[W/($m^2 \cdot K$)], U_F : 床熱貫流率[W/($m^2 \cdot K$)], U_{win} : 窓熱貫流率[W/($m^2 \cdot K$)], V: 換気負荷[W/($m^2 \cdot K$)], P_{swin} : 全体南窓換算率

表 3 をふまえ、屋外実験装置と同等の蓄熱量・面積である許容線図に、表 3、4 と式(5)を用いて躯体性能をプロットした(図 29)。式(5)をプロットした図中の直線 1 が示すのは、躯体の部位性能・建物全体の形状と敷地条件が変わらない条件で、窓面積のみを拡大縮小した時に、その物件がとり得る許容時間率の範囲である。現状の仕様では、高温の時間が多く許容時間率が 40%にとどまる。その改善案 1 として、躯体性能・敷地条件をそのままに、南窓/床を 12%に落とすと高温な時間帯が減少し、許容時間率が 90%に向上することがわかる。また、改善案 2 として主開口の正対する方位を南東へ 45° ずらした場合でも同様にプロット(図中直線 2)を行うと、高温の時間が短くなり、許容時間率が 80%に向上する。以上のように、屋外実験装置を例として、躯体の断熱性能、窓からの日射熱取得性能、蓄熱量、蓄熱面積の、計 4 点のバランスを取るための設計評価が可能となる。

ここで述べた手法は DG を用いた太陽熱暖房住宅の評価法として活用ができる。設計要素を前節に即して整理すると、図 30 のようになる。このうちの気象条件については、各地域の同じ期間の気象データに対して同様に許容線図を描くことができる(図 31)。計算は冬期の日射量と平均気温別を考慮し選定した 10 地点で行い、そのうち旭川・山形・東京・宮崎の気象データを用いて計算した結果を示す。許容時間率の高い躯体性能の組合せが、日射量が小さい旭川、山形では限られているが、日射量が大きく温暖な東京・宮崎ではより多くの Q 値と南窓/床の組み合わせが許容されることがわかる。つまり、この線図を用いればどの地域でどのような躯体性能にすれば、許容時間率の高い DG を用いた太陽熱暖房住宅の設計が可能かを把握できる。また、許容線図は複数の国・地域の省エネルギー住宅の躯体性能基準の分析にも用いることができる。ここでは、世界各国の住宅の省エネルギー基準値^{注11)}と標準住宅¹⁶⁾の躯体形状を用い、冬期に同等の平均気温を持つ各地域の線図上にプロットを行った。この時、直線が許容時間率の高い領域をより多く通る場合は、断熱規定がその気候に適合していると判断できる。寒冷地においてはドイツの基準、温暖地においてはカリフォルニアの基準が該当する一方、日本は窓の断熱基準値が低く、建物形状の工夫のみによる

図 27 拡張アメダス東京における障害物距離窓面方位別南窓換算率

図 28 拡張アメダス東京における庇長さ窓面方位別南窓換算率

拡張アメダス東京:PCM 蓄熱面積 2 容量 0.25[MJ/($m^2 \cdot K$)]

図 29 許容線図による屋上実験装置の分析

図 30 DG を用いた太陽熱暖房住宅の設計要素の整理

図 31 地域別の許容線図と各国・地域の基準

図 32 蓄熱面積 2、蓄熱量 0.25[MJ/(m²・K)]での蓄熱体の比較
気象条件：拡張アメダスデータ東京都東京地点(標準年)

図 33 設計プロセスの一例

許容時間率の向上が多く地域で見込めないことがわかる。

蓄熱体の性質の違いについても許容線図を用いて考察することができる。ここでは、土壁、RC による蓄熱についても、PCM と同様の計算を行った。結果の一部を図 32 に示す。同等の熱取得、南窓/床のバランス、同等の蓄熱面積、蓄熱容量であっても、PCM 導入の場合は土壁・RC に比べ許容時間率が高い。これは土壁・RC と同等の蓄放熱量であっても、PCM を敷設したことで、室温と共に許容温度帯で安定する時間が長くなるためである。結果として、許容時間率の高い躯体性能の組合せが多くなり、PCM はダイレクトゲインを用いた太陽熱暖房住宅の、躯体性能の設計の自由度を広げるものとして期待できることが明らかとなった。

これまでで説明した線図を用いれば、以下のような手順での太陽熱暖房住宅の設計プロセスの提案も可能である。①敷地に該当する気象条件で計算した許容線図を用意する。②設計対象住宅のプランや断熱仕様等が決まった段階で、Q 値と南窓/床を計算し、許容線図上に式(4)を用いてプロットし許容時間率を把握する。③許容時間率を高めるように、建物形状や躯体性能の調整を行う。④蓄熱を利用する場合は、該当する気象・蓄熱条件で計算された線図を用意し再度プロットする。⑤許容時間率の把握と建物形状や躯体性能の調整を行うという手順となる。例として、東京で PCM を用い蓄熱面積 2、蓄熱量 0.25MJ/(m²・K)の DG を用いた太陽熱暖房住宅が設計されるまでのプロセスを図 33 に示した。

4 まとめ

これまでの検討から、以下の結論及び課題を挙げることができる。

- 1) 熱箱と人工太陽を用いた実験により、熱伝導率、日射吸収率の異なる仕上げ材共通で、PCM3 面敷設は 1 面敷設と比較して箱内最高温度が 1.2～1.7℃低減され、非照射 4 時間後の箱内温度が 1～1.5℃上昇した。

- 2) 屋外実験装置を用いて実気象条件下で PCM の恒温性を確認できた。PCM を敷設した場合は快晴の日の翌日の日射量が少なくても、前日の日没からその日の日没までの 24.8 時間、室温が 20℃以下とならないことを確認した。
- 3) 特定の気象条件下で実現する住宅の自然室温を許容時間率で評価することで、太陽熱を最大限利用し得る建物の断熱・日射熱取得・蓄熱性能を検証する、DG と躯体蓄熱を用いた太陽熱暖房住宅の評価法を提案した。
- 4) 東京の気象条件下で PCM を蓄熱体として用いる場合は、蓄熱容量 0.25MJ/(m²・K)と多い場合、敷設面積を広げる程恒温性の向上が見込める。一方、蓄熱容量 0.0625MJ/(m²・K)と少ない場合、敷設面積が小さくても十分な蓄放熱が行え、敷設面積による許容時間率の違いがないことが、3)に記した線図を用いて把握された。
- 5) 屋外実験装置では、南窓の大きさを現状に比べて 6 割小さくすることによって許容時間率が 90%以上になることが 3)に記した線図を用いて把握することができた。
- 6) 本研究が提案する評価法は、ダイレクトゲインを用いた太陽熱暖房住宅における、室内外の熱の授受と蓄熱体内外の熱の授受に影響を与える要素として、躯体の断熱性能、窓からの日射熱取得性能、蓄熱体の量と敷設面積を取り上げ、特定の気象条件下で住宅全体の許容時間率が高い組合せを検討するものである。住宅内部の間仕切り位置や室のプロポーショナル等、居住性に影響を与えるより詳細な要素の検討については今後の課題である。
- 7) 本研究では冬期における太陽熱暖房住宅の快適性の向上を目指した評価法を提案したが、夏期においてはダイレクトゲインのための窓が冷房負荷の増加をもたらす可能性が高く、すだれや外ブラインド等での日射遮蔽が肝要である。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業・基盤 (B)「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」(H24～26 年度、研究代表者：前真之)の研究成果による。多大なるご支援を頂いた井上隆教授、同研究室 (東京理科大学)、一ノ瀬雅之准教授 (首都大学東京)、木下泰斗氏 (日本板硝子株式会社)に感謝の意を表す。

注

- 注1) 本論で用いる地域区分は全て、平成 11 年度省エネルギー基準によるものとした。
- 注2) 人工太陽光源は 2kW のメタルハライドランプを用い、自然太陽光との波長合致度は JIS8912 における等級 B、照射ムラが±10%以内となる有効照射面積は 300mm 角、放射照度の最大出力は 1kW/m²である。
- 注3) 本来は太陽高度を考慮した照射をすべきだが、本実験で用いた 1 灯式の人工太陽光源は距離による減衰が大きく、角度をつけた照射を行うと、各受照面における入射日射量に大きな差がつくと予想された。そのため、水平照射した人工太陽光をすりガラスによって拡散し、できるだけ模型箱の各受照面における入射日射量のむらを無くすことにより、敷設面積や仕上げ材により異なる PCM の蓄放熱性状を比較することとした。
- 注4) 潜熱量を[W/m²・K]で表記する際は、本研究で許容範囲と定めた 17-28℃の間の顕熱量と潜熱量を足しあわせた値を、11℃の温度幅で除すことによって求めた。

注5) 計測点概要は補図 1 の通りである。垂直温度測定点は床から 0(床表面), 50, 100, 500, 750, 1100, 1500, 1800, 2250 (天井表面) mm の高さで計測を行い, 750mm の高さのみグローブ温度もあわせて設置している。表面温度測定点では, 仕上げ材表面, PCM 室内側, 室外側表面温度を測定している。室温は 750mm の高さの温度測定点の平均値を用い, PCM 温度は PCM 室内外表面温度を面積加重で按分して算出した。PCM 吸放熱量は各熱流計測定値に, 代表できる部分の PCM 敷設面積を乗じて算出した。垂直面窓面透過日射計測定値に窓面積を乗じることによって窓面透過日射量を算出した。

注6) 計算モデルにおいて内部発熱を一層につき 125W としたのは, 一般の住

室内空気温度	49点	室外表面温度	13点
室内グローブ温度	9点	室内日射計	7点
仕上げ材表面温度	22点	屋外日射計	3点
PCM室内外側表面温度	44点	室内外開口部表面温度	8点
PCM室内外側表面熱流	44点	外気温湿度、風速風向	4点

補図 1 屋外実験装置計測点概要

$$Q = A_W \cdot U_W + A_R \cdot U_R + A_F \cdot U_F + A_{win} \cdot U_{win} - V \quad (\text{補 1})$$

$$= (A_W + A_{win}) \cdot U_W + A_R \cdot U_R + A_F \cdot U_F + A_{win} \cdot (U_{win} - U_W) - V \quad (\text{補 2})$$

$$= (A_W + A_{win}) \cdot U_W + A_R \cdot U_R + A_F \cdot U_F + \frac{A_{swin}}{P_{swin}} \cdot (U_{win} - U_W) - V \quad (\text{補 3})$$

補表 1 参照した省エネルギー基準

日本	省エネルギー基準(1999)
ドイツ	Passivhaus基準(2007)
スイス	Minergie基準(2008)
米国カリフォルニア	Building Energy Efficiency Standards(2008)
英国	Energy Efficiency Requirements for New Dwellings(2010)

補図 2 各国の部位別性能規定の比較

宅(120 m²)の内部発熱は調理 125W, 家電 203W, 換気 53W, 照明 126W, 人体 160W と打ち分けられ, 667W/棟¹⁷⁾であり, 計算モデルが 46.1 m² のため, 256W/棟であるとし, 計算モデルが二層の住宅であるため, 125W/層で妥当と考えた。換気回数を 0.125 回/h としたのは, 今回は, 熱交換効率を 75% と仮定すると, 換気回数 0.5 回/h を確保していても, 0.125 回/h 相当の換気負荷となるためである。本計算モデルにおける透過日射の配分は室のプロポーショナルを考慮しないため, 1/2 を床に, 1/2 を床以外の表面に配分する¹⁸⁾ものとした。また, 多数の条件をシミュレーションすることから, 計算時間間隔を 1 時間とし, PCM のモデルは, 本文 5 ページ 6 行目に明記した過冷却の動作ロジックを省略すること, 計算負荷を軽減した。

注7) 本来, 居住者の温熱環境評価の観点からは空気温度ではなく放射環境を考慮した作用温度のような指標で評価するべきであるが, シミュレーションはすべて非暖房で行っており空気温度と放射温度とに差が無いことから, 空気温度で評価することとしている。なお, 東京都東京地点の気象データで南窓面積率 60%, Q 値 5.0 という条件で空気温度基準の許容時間率と作用温度基準の許容時間率を比較したところ, 30.9% と 31.0% のように違いはわずかであった。また 17℃~28℃ という温度範囲については, ASHRAE の Graphic Comfort Zone Method¹⁹⁾における, 作用温度で 20.8℃~28.2℃ が予測不満足者率 20%, Adaptive Model における, 作用温度で 17.5℃~24.5℃ が予測不満足者率 20%²⁰⁾ということを経験し, 室内環境として許容できる範囲であると考え, 「許容時間率」という言葉を用いた。

注8) 実際の設計では, 本研究で提案する評価法で基本的な仕様を決定した住宅についてさらに暖房負荷計算を実施することで省エネルギー効果の試算も可能である。しかし熱負荷計算は一般の設計者にとってハードルが高く時間もかかるため, 本研究提案の線図を用いた許容時間率による評価は住宅の太陽熱暖房方式の一般化に向け有用と筆者らは考える。

注9) 東側に窓を設けたモデルと, 南窓換算率の計算によって同等の南窓を設けたモデルの許容時間率の比較を行った時, 誤差が 5% 以内に収まったため, この手法で評価において十分な精度が得られると確認した。

注10) Q 値の汎用式は左記の補式 1~3(記号は式 5 と同様)に示す手順で展開を行い, 式 5 を導いた。

注11) 各国の省エネルギー基準における躯体・窓の熱貫流率の比較は左図の通りで, 参照した基準を補表 1 に, 性能規定の比較を補図 2 にまとめた。

参考文献

- 1) 株式会社 住環境計画研究所: 家庭用エネルギーハンドブック(2009 年版), 2009.2
- 2) 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, 室内気候調整における熱容量に関する研究(2), 日本建築学会計画系論文報告集, 第 397 号, pp.38-47, 1989.3
- 3) 武政孝治, 小玉祐一郎: 図表を用いたパッシブソーラーシステムの暖房性能予測(6)実用的な評価手順の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 537-538, 2003.7
- 4) 川井昌裕, 横尾昇剛, 坂本賢一, 岡建雄: 砕石を利用したダイレクトゲインシステムの研究, 空気調和・衛生工学会論文集, (68), pp.45-53, 1998.1
- 5) 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
- 6) 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林慎彦, 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) A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman: Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, Building and Environment, Volume 32, Issue 5, pp.405-410, 1997.9
- 8) F. Kuznik, J. Virgone: Experimental assessment of a phase change material for wall building use, Applied Energy, Volume 86, Issue 10, pp.2038-2046, 2009.10
- 9) 金秀歌, 金田一清香, 赤嶺嘉彦, 前真之, 坂本雄三: 温水ヒートポンプを

- 用いた省エネルギー型床暖房システムに関する研究, 第1報 床暖房パネルの放熱特性の評価, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第637号, pp.379-387, 2009.3
- 10) 福本雅彦, 星川力, 川島宏起, 河野良坪, 佐藤誠, 高瀬幸造, 菱田哲也, 金秀耿, 赤嶺嘉彦, 前真之, 坂本雄三: ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発, その11. 日射の効率的利用を目的としたPCMパネルの性能予測シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.505-506, 2011.7
- 11) 金秀耿, 河野良坪, 佐藤誠, 金田一清香, 赤嶺嘉彦, 前真之, 坂本雄三: 日射ダイレクトゲインとヒートポンプを利用した蓄熱式床暖房システムの省エネルギー性能(第1報)実験システムの紹介と取得日射量の検証, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻, 第660号, pp.169-176, 2011.2
- 12) Helmut E. Feustel: Thermal Performance of Phase Change Wallboard for Residential Cooling Application, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007
- 13) 落合奈津子, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史: PCMを組み込んだソーラーチムニーの換気性能に関する基礎的研究:(その6)換気量予測モデルにおけるPCMの過冷却現象に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境系, (48), pp. 221-224, 2008.5
- 14) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 2005
- 15) 田中俊六, 岩田利枝, 寺尾道仁, 武田仁, 土屋喬雄: 最新建築環境工学改定3版, 2006.3
- 16) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 住宅の省エネルギー基準の解説, 第3版, 2011.11
- 17) 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 平成25年省エネルギー基準に準拠した 算定・判断の方法及び解説II 住宅, 2013.11
- 18) 株式会社 山内設計室: AE-SIM/HEAT 操作マニュアル Ver.3, 2006.09
- 19) ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, pp.5-6, 2010
- 20) ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, pp.11-13, 2010

(2013年9月8日原稿受理, 2014年8月6日採用決定)