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

REPLACEMENT MODEL OF PHASE CHANGE MATERIALS IN THERMAL LOAD CALCULATION

Part.1 Study on introduction of phase change materials into a simple building model

芹川 真緒*, 佐藤 誠**, 前 真之***
Mao SERIKAWA, Makoto SATOH and Masayuki MAE

The purpose of this research is proposing a simplification method of calculation for temperature of rooms without air conditioning by using a replacement model of Phase Change Materials (PCM) at inner thermal storage wall and floor. Regarding the replacement of PCM with furniture model, replaced PCM temperature and room temperature effect on each other.

The method of replacing PCM into adjoining rooms are based on heat transfer coefficient of the wall or the floor surfaces, U-value of the inner wall or floor, solar absorptance on surface and others.

Lastly, the results room temperature of detailed calculation and replacement model are compared. As a result, it confirmed that room temperature of replacement model showed similar tendency with detailed calculation.

Keywords : PCM, Thermal storage, Residential house, Room temperature

PCM, 蓄熱, 住宅, 自然室温

1. はじめに

潜熱蓄熱材 (Phase Change Materials、以下「PCM」) は、相変化温度域で大きな潜熱容量を有する。そのため、空調温度付近で相変化する PCM を熱容量の小さい木造住宅等に導入することにより、室温の安定効果が期待される。また、建物の性能や PCM の相変化温度域、設置位置等の組合せが適切な住宅においては、自然エネルギーを PCM に蓄熱させることによる空調エネルギー削減効果が期待される。特に、近年、住宅の高断熱・高気密化に伴い、冬期の日中の日射熱取得を PCM に蓄熱して夜間の暖房負荷軽減に活用することが期待されている。

PCM を住宅に導入するにあたっては、適切な相変化温度域、適切な蓄熱容量の PCM を選択する必要がある。事前にこれらの検討を行うためには、精度を有するシミュレーションにより、検討対象の PCM を導入した条件下で、自然室温計算や暖冷房熱負荷計算を行い評価する必要がある。なおかつ、基本計画段階において相変化温度域や蓄熱容量を検討する際には、できる限り短時間で室温や暖冷房熱負荷を計算できることが求められる。

既往研究における PCM を導入した際の室温・熱負荷計算法は、PCM の温度に応じて比熱が変化するような見かけの比熱を用いて非定常熱伝導計算を行うモデル化が採用されることが多い。また、差分法や応答係数法を用いた伝熱計算により、自然室温計算や熱負

荷計算がなされている。例として、武田¹⁾、佐藤ら²⁾、藤田ら³⁾、坂本ら⁴⁾、斎藤ら⁵⁾、足永ら⁶⁾の研究が挙げられる。そのうち、武田の研究¹⁾では、PCM 内蔵壁体の熱流は差分法により、PCM を内蔵しない通常の壁体の熱流は応答係数法により求め、室温は差分法と応答係数法を併用した重み係数を定義して求めている。佐藤らの研究²⁾では、試験家屋における屋外実験により PCM が室温変動に与える影響を把握し、冬期の日射の多い日の夕方の空気温度に差が生じることを確認するとともに、差分法の数値シミュレーションソフトを用いて、高い精度で室温変動測定結果を再現している。また、藤田らの研究³⁾では、蓄熱型床下暖房を導入した実大実験棟における PCM、床下、居室温度の測定結果について、前進型有限差分法を用いた非定常熱伝導シミュレーションによりおよそその挙動を再現している。しかしながら、これらの計算は、PCM の設置部位等の詳細な情報がなければ計算を行うことができないため、基本計画段階でのシミュレーションは難しい。

一方、蓄熱容量に関する評価という観点から、周波数応答に基づく部位の有効熱容量の導出方法が示されている⁷⁾。また、永田の研究⁸⁾では、部位の有効熱容量から室全体、建物全体の有効熱容量を算出する方法が提案されている。これらは、線形関係が前提となっており比熱の温度依存性はないものとして扱っているため、PCM への応用は困難である。

* 東京大学大学院工学系研究科 大学院生

** 佐藤エネルギーリサーチ 代表取締役・博士(工学)

*** 東京大学大学院工学系研究科 准教授・博士(工学)

Grad. Student, Graduate School of Engineering, the Univ. of Tokyo

Sato Energy Research Co., Ltd., Ph. D.

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

本研究では、壁体内設置型 PCM をシミュレーションする際に、PCM を家具熱容量に置換してシミュレーションすることで、既存の熱負荷計算プログラムの軽微な改変で室温・熱負荷計算が可能となるモデル（以下、「置換モデル」）の構築を目的とする。特に、PCM 熱容量を家具熱容量として扱うことにより、壁体非定常熱伝導計算は応答係数法とし、家具熱容量としての PCM と重ね合わせた計算^{注1)}とすることで計算速度を維持したシミュレーションが可能となる。また、PCM の設置部位など詳細な仕様が決められない基本計画の段階であっても、PCM の相変化温度域や見かけの比熱といった基本的な物性情報があれば、室温安定性の効果を推定できる可能性もある。武田¹⁾の提案する PCM を含む部位のみ差分法で計算する場合の煩雑さが解消されるとともに、一定条件を満たす既存の応答係数法の熱負荷計算プログラムに容易に PCM モデルを組み込むことが可能となる。第一報では、検討の第一段階として、日射の入る 2 室の簡易な建物モデルの内部の壁・床・天井（以下、「内壁等」）に PCM を導入した条件について、PCM 導入に伴う室全体の見かけの熱容量の変化と日射の蓄熱効果を、置換モデルにより再現する検討を行う。置換モデルでの自然室温計算結果を、壁体熱伝導を見かけの比熱を用いた差分法で解く精緻なシミュレーション（以下、「詳細計算」）の結果と比較することで、自然室温計算におけるモデル化の精度の確認を行う。

2. 置換モデルの提案

2.1 置換モデルの概念

図 1 に、提案する置換モデルの概念図を示す。

住宅に建材として PCM を導入する場合、建物外皮や内壁等への設置が想定されるが、本報では、内壁等への設置を前提とする。

置換モデルでは、内壁等へ設置した PCM を、内壁等が隣接する 2 室への分配設置に置換する方法を考える。なお、最終的には多数室モデルで住宅全体を扱えることが望ましいが、本論文では検討の第一段階として、2 室の簡易な建物モデルを選定している。多数室モデルを 2 室の集合体と捉え、本論文における検討を多数室モデルへ拡張する方法や、その精度の確認は、今後の課題とする。

分配設置された PCM を置換 PCM と呼び、室空気とは異なる 1 質点を設けた家具のように扱う。PCM の 2 室への分配比率を、PCM 分配割合と呼ぶ。PCM が設置された内壁等における貫流熱につい

ては、PCM と熱抵抗が等しく熱容量が十分に小さい部材に置換することで考慮する。室への入射日射量は各部位への日射分配比率に応じて分配されるが、このうち内壁等の表面で吸収される分の日射量は、更に、その室の置換 PCM、その室の内壁等以外の部位、隣室へ分配する。即ち、ここで提案する置換モデルにより考慮される置換 PCM の効果は、室全体としての見かけの熱容量の変化と、日射の入る室における日射の蓄熱の 2 点であり、2 室間の貫流熱の遅れは考慮されない。

2.2 置換 PCM の熱収支

置換 PCM は、室温との温度差に応じ吸放熱して温度変化すると仮定すると、その熱収支式は式(1)となる。後述の置換 PCM に分配される吸収日射は、置換 PCM 内部での発熱として扱う。

$$a_i \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{d C_p(T_{pi}) \cdot T_{pi}}{dt} = \frac{T_{ri} - T_{pi}}{R_{pi}} + Q_{pi} \quad (1)$$

a_i : 室 i への PCM 分配割合 [-]

ρ : 内壁等に設置された PCM の密度 [g/m³]

V : 内壁等に設置された PCM の容積 [m³]

$C_p(T_{pi})$: 内壁等に設置された PCM の見かけの比熱 [J/(g・K)]
(詳細計算と同じ見かけの比熱のモデルとする)

T_{ri} : 室 i の空気温度 [°C]

T_{pi} : 室 i の置換 PCM 温度 [°C]

R_{pi} : 室 i の空気と室 i の置換 PCM の間の熱抵抗 [K/W]

Q_{pi} : 室 i の置換 PCM に分配される日射量 [W]

2.3 内壁等の吸収日射の分配モデル

室の透過日射のうち PCM が設置された内壁等の吸収日射については、図 2 に示す考え方で置換 PCM、内壁等以外の部位、隣室へ分配する。入射日射は、部位の日射吸収比率に応じ、部位の表面発熱として扱う。ただし、内壁等の部位の表面で吸収される分の日射については、まず、裏面の室の温度変化に影響を与える熱量を、定常想定時の熱収支を参考に求める。即ち、室 1 に日射が入る場合について、室 1 と室 2 の間の貫流熱について記述した式(2)右辺第 2 項のように、表面吸収日射 q_{s1} は、総合熱伝達率 h_l を用いて、 $\frac{q_{s1}}{h_1}$ の等価

温度上昇で表現する。式(2)最終項が図 2 の $q_{s1,p2}$ に相当し、室 2 の置換 PCM 内部での発熱とする。

$$\begin{aligned} q_{t1} &= U \cdot (T_{e1} - OT_{w2}) = U \cdot \left\{ (OT_{w1} + \frac{q_{s1}}{h_1}) - OT_{w2} \right\} \\ &= U \cdot (OT_{w1} - OT_{w2}) + \frac{q_{s1}U}{h_1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$OT_{wi} = \frac{\frac{h_{ci}}{h_{ci} + h_{ri}} T_{ri} + \frac{h_{ri}}{h_{ci} + h_{ri}} T_{wi}}{h_{ci} + h_{ri}} \quad (3)$$

q_{t1} : 室 1 側の内壁等吸収日射を考慮した室 1 から室 2 への貫流熱 [W/m²]

q_{si} : 内壁等の部位の室 i 側表面での吸収日射 [W/m²]

図 1 置換モデル概念図

	値、式
部位の室1側表面総合熱伝達率 [W/(m ² ・K)]	$\dot{h}_1$
部位の熱貫流率[W/(m ² ・K)]	U
部位の室1側表面-PCM表面間の 熱貫流率[W/(m ² ・K)]	U_{p1}
②部位の室1側表面での 吸収日射量[W/m ²]	q_{s1}
③②のうち室2の置換PCMに分配 される日射量[W/m ²]	$q_{s1,p2} = \frac{q_{s1}U}{\dot{h}_1}$
②のうち室1側へ与える日射量 [W/m ²] (=②-③=④+⑤)	$q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1})$
④②のうち、室1側へ与える日射量 で、更に室1の置換PCMに分配 される日射量[W/m ²]	$q_{s1,p1} = q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1}) \frac{U_{p1}}{\dot{h}_1 + U_{p1}}$
⑤②のうち、室1の置換PCM・内壁等 以外に分配される日射量[W/m ²]	$q_{s1,r1} = q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1}) \frac{\dot{h}_1}{\dot{h}_1 + U_{p1}}$

図2 モデル化に伴う貫流成分の扱いおよび日射の分配

(i=1,2)

- U : 内壁等の部位の熱貫流率 [W/(m²・K)]
 $\dot{h}_i$: 部位の室i側表面の総合熱伝達率 [W/(m²・K)]
 $\dot{h}_{ci}$: 部位の室i側表面の対流熱伝達率 [W/(m²・K)]
 $\dot{h}_{ri}$: 部位の室i側表面の放射熱伝達率 [W/(m²・K)]
 OT_{wi} : 内壁等の部位に対する室i側の作用温度 (日射を含まない) [°C]
 T_{wi} : 内壁等の部位に対する室i側の平均放射温度 (日射を含まない) [°C]
 T_{ei} : 内壁等の部位に対する室i側の等価室温 (日射を含む) [°C]

次に、吸収日射 q_{s1} のうち $q_{s1,p2}$ を差し引いた残りの $q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1})$ は、

室1の置換PCMと内壁等以外の部位に分配するとすれば、式(4)で表される。

$$q_{s1,p1} + q_{s1,r1} = q_{s1} - q_{s1,p2} = q_{s1} \cdot \left(1 - \frac{U}{\dot{h}_1}\right) \quad (4)$$

$q_{si,pj}$: 室i側の内壁等の表面吸収日射のうち、室jの置換PCM

に分配される日射量 [W/m²]

$q_{si,ri}$: 室i側の内壁等の表面吸収日射のうち、室i側へ与える日射量で、更に室iの置換PCMおよび内壁等以外に分配される日射量 [W/m²]

式(5)のとおり、室1側の内壁等の表面吸収日射のうち室1側へ与える日射量 $q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1})$ [W/m²]が、熱伝達率や熱貫流率に応じて、右边第1項の室1の置換PCMおよび内壁等以外の部位と、右边第2項の室1置換PCMに分配されると想定した。更に、簡単のため、室1側の作用温度 OT_{w1} とPCMの室1側表面温度 T_{ps1} が等しいと仮定する^{注2)}と、式(5)右边第1項は $q_{s1,r1}$ となり内壁等以外の部位に、式(5)右边第2項は $q_{s1,p1}$ となり置換PCMに、それぞれ $q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1})$ が $\dot{h}_1$ と U_{p1} との比で案分して分配されるとみなされる。

$$q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1}) = \dot{h}_1 \cdot (T_{s1} - OT_{w1}) + U_{p1} \cdot (T_{s1} - T_{ps1}) \quad (5)$$

$OT_{w1} = T_{ps1}$ とおくと

$$q_{s1,r1} = \dot{h}_1 \cdot (T_{s1} - OT_{w1}) = q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1}) \frac{\dot{h}_1}{\dot{h}_1 + U_{p1}} \quad (6)$$

$$q_{s1,p1} = U_{p1} \cdot (T_{s1} - T_{ps1}) = q_{s1}(1 - \frac{U}{\dot{h}_1}) \frac{U_{p1}}{\dot{h}_1 + U_{p1}} \quad (7)$$

U_{pi} : 内壁等の部位の室i側表面からPCMの室i側表面までの熱貫流率 [W/(m²・K)]

T_{si} : 内壁等の部位の室i側の表面温度 [°C]

T_{psi} : PCMの室i側の表面温度 [°C]

2. 4 置換PCMの2室へのPCM分配比率

内壁等に設置されたPCMの2室へのPCM分配比率について、各室の置換PCMへ分配する日射量(式(8)~(11))をもとに、日射量の期間積算値に比例するように分配する(式(12))^{注3)}。

$$q_{si,p1} = q_{si}(1 - \frac{U}{\dot{h}_i}) \frac{U_{pi}}{\dot{h}_i + U_{pi}} \quad (8)$$

$$q_{si,pj} = \frac{q_{si}U}{\dot{h}_i} \quad (i \neq j) \quad (9)$$

$$Q_{p1} = A(q_{s1,p1} + q_{s2,p1}) \quad (10)$$

$$Q_{p2} = A(q_{s2,p2} + q_{s1,p2}) \quad (11)$$

$$a_i = \frac{\sum_t Q_{pi}}{\sum_t \sum_{j=1}^2 Q_{pj}} \quad (12)$$

A : 内壁等の部位の面積 [m²]

$\sum_t$: 期間についての総和

実際には、各室への日射量に応じて置換PCMに分配される日射量は時々刻々変化するが、PCM分配比率は、熱負荷計算の開始前に決定する必要がある。そのため、実用的な方法として、各室へ入射する日射量を開口部面積および開口部方位に応じた方位係数⁹⁾注4)

より事前に求め、更に室へ入射する日射量のうち各部位に入射する日射量をもとに、各室への置換 PCM の分配比率を決定する方法が想定される。

2. 5 置換 PCM と室空気間の熱抵抗

置換 PCM と室空気間の熱抵抗については、以下のように、PCM 表面または内壁等表面と各室との間の抵抗を、各室から置換 PCM に分配される日射量に応じて重み付けする方法で求めることとした。まず、室 1 への入射日射に着目し、PCM の室 1 側表面から室 1 への熱抵抗 $r_{p1,r1}$ と、室 1 側表面から室 2 までの熱抵抗 $r_{s1,r2}$ はそれぞれ、式(13)と式(14)となる。

$$r_{p1,r1} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{U_{p1}} \tag{13}$$

$$r_{s1,r2} = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_1} \tag{14}$$

$r_{pi,ri}$: PCM の室 i 側表面から室 i への熱抵抗 [㎡ K/W]
 $r_{si,rj}$: 部位の室 i 側表面から室 j への熱抵抗 [㎡ K/W]

室 2 への入射日射に着目すると、PCM の室 2 側表面から室 2 への熱抵抗 $r_{p2,r2}$ と、室 2 側表面から室 1 までの熱抵抗 $r_{s2,r1}$ もそれぞれ、 U 、 U_{p2} 、 h_2 を用いて同様に表される。これらの逆数[W/(㎡・K)]を、各室から各室の置換 PCM に分配される日射量に応じて重み付け平均した値を、内壁等の部位の抵抗の逆数 [W/(㎡・K)] (単位面積あたり)とする。この値に部位面積を掛けた値の逆数[K/W]を、置換 PCM と室温の間の熱抵抗として扱う (式(15)、(16))。

$$\frac{1}{R_{p1}} = A \cdot \frac{\frac{1}{r_{p1,r1}} \sum_t q_{s1,p1} + \frac{1}{r_{s2,r1}} \sum_t q_{s2,p1}}{\sum_t q_{s1,p1} + \sum_t q_{s2,p1}} \tag{15}$$

$$\frac{1}{R_{p2}} = A \cdot \frac{\frac{1}{r_{p2,r2}} \sum_t q_{s2,p2} + \frac{1}{r_{s1,r2}} \sum_t q_{s1,p2}}{\sum_t q_{s2,p2} + \sum_t q_{s1,p2}} \tag{16}$$

室空気と置換 PCM の間の熱抵抗についても、2. 4 で述べた PCM 分配比率と同様、熱負荷計算の開始前に決定する必要がある。そのため、PCM 分配比率と同様に、各室へ入射する日射量を事前に求め、室へ入射する日射量のうち各部位に入射する日射量をもとに、室空気と置換 PCM の間の熱抵抗を決定する。

3. 詳細計算との比較による置換モデルの検証

3. 1 検証方法

3. 3 で示す全 1,728 ケースについて、詳細計算および置換モデルでの計算を実施して比較を行い、置換モデルの妥当性を検証する。本論文では年間の自然室温計算を行い、詳細計算と置換モデルでの室温計算結果を比較する。室温の比較にあたっては、3. 5. 2 で述べるとおり、年間での室温の頻度分布の差に着目した指標と、時々刻々の室温の差に着目した指標の 2 指標を使用した。

3. 2 検証の条件

3. 2. 1 建物モデル

計算で使用する簡易な建物モデルを、図 3 に示す。木造住宅を想定した。ケースに応じて、上下 2 室、南北 2 室、東西 2 室とした。2 室の間の内壁等への PCM 設置を想定する。上下 2 室は各室南面に、南北 2 室では南室は南面、北室は北面に開口を設けた。東西 2

図 3 建物モデル

表 1 部位別熱貫流率および内壁等の壁体構成

部位	熱貫流率[W/(㎡・K)]			
	無断熱		平成28年基準相当 ¹⁰⁾	
外壁	2.85		0.70	
床	3.05		0.70	
屋根	3.03		0.70	
部位	部材			容積比熱
	厚	熱伝導率	mm W/(m・K) kJ/(㎡・K)	
1階天井 2階床 プラン①	室内側熱伝達率(床)			6.67W/(㎡・K)
	仕上材熱抵抗※1			10
	PCM※1			(1※3)
	仕上材熱抵抗※1			10
内壁 プラン②・③	室内側熱伝達率(天井)			11.11W/(㎡・K)
	室内側熱伝達率(壁)			9.09W/(㎡・K)
	仕上材熱抵抗※1			10
	PCM※1			(1※3)
開口部	仕上材熱抵抗※1			10
	室内側熱伝達率(壁)			9.09W/(㎡・K)
	各室4㎡			
	無断熱: 開口部ガラス熱抵抗0.0㎡K/W (境界層含まず。単板ガラス6.51W/(㎡・K)想定) 平成28年基準相当: ガラス熱抵抗0.045㎡K/W (境界層含まず。普通複層ガラス4.65W/(㎡・K)想定)			

※1 PCMおよび仕上材熱抵抗はケースに応じて与える。
※2 詳細計算では厚方向に5分割している。
※3 簡易モデルでPCMを同じ熱抵抗を持つ熱容量の小さい部材に置換する場合

表 2 シミュレーション設定条件

項目	設定内容
地域	岡山
気象データ	拡張アメダス気象データ 1995 年版標準年
プログラム	EESLISM for Windows 7.2 ¹¹⁾ 注 5)
計算時間間隔	10 分
計算期間	助走計算: 12 月 1 日~12 月 31 日 本計算: 1 月 1 日~12 月 31 日
常時換気	各室 0.5 回/h
地表面日射反射率	0.1
透過日射の室内部位分配	詳細計算では床面 50%、残りは床面も含め、部位表面積で案分。置換モデルでは PCM への日射分配も考慮。

表3 検討ケース

	項目	水準
A	プラン	①上下2室／②南北2室／③東西2室
B	断熱性能	①無断熱／②平成28年基準相当
C	開口部日射熱取得率 1階・南室・東室	①0.2／②0.5／③0.8
D	開口部日射熱取得率 2階・北室・西室	①0.2／②0.5／③0.8
E	仕上材熱抵抗	①0.01mK/W／②0.1mK/W
F	PCM潜熱容量	①50MJ/m ³ ／②100MJ/m ³
G	PCM熱伝導率	①0.1W/(m・K)／②0.5W/(m・K)
H	PCM潜熱変化温度	①22.5℃／②27.5℃
I	PCM潜熱変化温度幅	①3℃／②5℃

表4 PCM物性値

	項目	単位	値または与え方
QI	潜熱量	J/m ³	=PCM 潜熱容量
Crol	液相容積比熱	J/(m ³ ・K)	1,000,000
Cros	固相容積比熱	J/(m ³ ・K)	1,000,000
Ts	相変化下限温度	℃	=PCM 潜熱変化温度 -PCM 潜熱変化温度幅／2
TI	相変化上限温度	℃	=PCM 潜熱変化温度 +PCM 潜熱変化温度幅／2

図4 シミュレーションに使用したPCMの温度（横軸）と
見かけの比熱と密度の積（縦軸）の関係（記号は表4と対応）

室では東室は東面、西室は西面に開口を設けているが、置換モデルが定常想定熱収支をベースに構築していることから、両側の室への入射日射の発生時間帯のずれの影響を確認できる。

表1に部位別熱貫流率および内壁等の壁体構成を示す。

3.2.2 その他の計算条件

シミュレーションの設定条件を、表2に示す。

置換モデルのPCM温度に関しては、1計算ステップ内において収束計算によって求めている^{注6)}。また、室i側の内壁等の表面吸収日射のうち室iの置換PCMおよび内壁等以外に分配される日射量 $q_{si,ri}$ は、対流熱伝達率と放射熱伝達率に応じて、室i空気と室i他の部位（置換PCMおよび内壁等以外の部位）に配分すべきであるが、本論文で使用した熱負荷計算プログラムの制約上、空気に配分すべき日射量も室i他の部位に配分した。更に、本論文で使用した熱負荷計算プログラムの制約上、室の入射日射を、隣室の置換PCMへ直接的に分配する計算は行えない。そのため室i側の内壁等の表面吸収日射のうち室j ($i \neq j$) の置換PCMに分配される日射量 $q_{si,pj}$ [W/m²]については、内壁等の部位の入射日射量を $\frac{q_{si}U}{h_i}$ [W/m²]、内壁等の

部位の日射透過率を1.0とし、隣室への透過日射として与える。それに伴い、各室の各部位への日射分配率を調整している^{注7)}。

3.3 検討ケース

検討を行うケースを表3に示す。置換モデルの精度に影響すると考えられる建物断熱性能、開口部の日射取得性能、仕上材熱抵抗、潜熱蓄熱材の仕様に着目し、全1,728のケースを設定した。

図5 図6、図7に示す期間の気象データ

3.4 PCMの物性値

検討に使用したPCMの物性を表4に示す。本論文で使用する見かけの比熱と密度の積は、図4に示すような温度の関数として扱う。

3.5 計算結果

3.5.1 代表ケースにおける温度および熱流の時刻変動の比較

詳細計算と置換モデルの自然室温の差が大きいケースにおける、図5に示す気象データ期間の結果を、図6（プラン「①上下2室」、断熱性能「②平成28年基準相当」、日射熱取得率1階「①0.2」、日射熱取得率2階「③0.8」、仕上材熱抵抗「②0.1 mK/W」、PCM潜熱容量「②100MJ/m³」、PCM熱伝導率「①0.1W/(m・K)」、PCM潜熱変化温度「①22.5℃」、PCM潜熱変化温度幅「①3℃」）と図7（プラン「②南北2室」、断熱性能「②平成28年基準相当」、日射熱取得率南室「①0.2」、日射熱取得率北室「①0.2」、仕上材熱抵抗「②0.1 mK/W」、PCM潜熱容量「②100MJ/m³」、PCM熱伝導率「②0.5W/(m・K)」、PCM潜熱変化温度「①22.5℃」、PCM潜熱変化温度幅「①3℃」）のa)～e)に示す。差の考え方は、3.5.2で示すが、図6のケースは室温の度数分布が詳細計算と置換モデルで異なる。図7のケースは室温の度数分布のずれに対して、時々刻々の差が大きい。即ち、室温変動に時間のずれがあると考えられるケースである。

図6、図7のa)～e)は、室温がPCM潜熱変化温度域付近となる代表期間の例である。a)とb)の室温変動について、図6、図7とも、非常によく一致している。また、図中の表面温度とは、壁・床・天井の室内側表面温度の面積加重平均値であるが、室温と大きな差は見られない。

室温の挙動に多少の差が見られる要因として、c)に示すPCM温度の差が影響していると推察される。詳細計算ではPCMは一部10mm設置されているものを厚方向に5層に分割して層間の熱伝導を解いているのに対し、置換モデルでは2分割してそれぞれ日射と室との間の熱移動のみを考慮している。置換モデルでは、図2および式(2)～(12)で部位の吸収日射量やPCM等の温度が定常であると想定した熱収支に基づき、吸収日射の分配モデルやPCM分配比率を決定しているが、非定常の計算過程において定常想定時と差が生じた際に、2室の置換PCM間の熱移動は考慮されないため、2室間の置換PCM温度に差が生じやすいものと推察される。また、詳細計算では内壁等の貫流熱がPCMの温度変動に直接的に影響を与えるが、置換モデルは、内壁等の貫流熱が置換PCMの温度変動に与える影響を直接的には考慮しないモデルとしているため、2室間

上より a,b)室温と平均表面温度、c)PCM 温度、d)詳細計算内壁等の吸放熱量、e)置換モデル内壁等と置換 PCM の吸放熱量、f)詳細計算（横軸）と置換モデル（縦軸）の室温の関係、g)室温の出現割合
図 6 詳細計算と置換モデルの比較（室温の度数分布の差が大）

上より a,b)室温と平均表面温度、c)PCM 温度、d)詳細計算内壁等の吸放熱量、e)置換モデル内壁等と置換 PCM の吸放熱量、f)詳細計算（横軸）と置換モデル（縦軸）の室温の関係、g)室温の出現割合
図 7 詳細計算と置換モデルの比較（室温変動に時間のずれ）

の室温の差が大きい時間帯には、室温が高い室側では置換 PCM の温度が高く、逆に室温が低い室側では置換 PCM の温度が低くなる方向に計算されることが影響していると推察される。特に、相変化温度域の上端／下端を跨ぐ付近で、2 室間の置換 PCM の温度差が大きくなるように見える。これは、置換 PCM が相変化温度の範囲内にある時間帯では熱容量の大きさのために、吸放熱量の差が温度差として表れにくかったが、相変化温度範囲外では温度差として表れやすいため、相変化温度域の上端／下端を跨ぐ付近で 2 室間の置換 PCM の温度差が大きく見えるものと推察される。しかしながら、詳細計算の PCM 温度は概ね、置換モデルの 2 室の置換 PCM 温度の間に位置しており、特に相変化温度域では概ね詳細計算の傾向を再現している。

d) に示す、詳細計算の PCM を含む内壁等の表面の吸放熱量の挙動について、日中に日射取得率の大きい室側の表面で多く吸熱し、夜間に両側の室へ放熱される様子が、図 6 で確認される。図 6 の 5 月 23 日では、日中の吸熱量のピークは 1 階天井面約 200W、2 階床面約 600W を示し、夜間の放熱量のピークは 1 階天井面、2 階床面とも約 200W を示す。なお、図 5 の期間では日中の太陽高度が比較的高く、鉛直面窓からの日射取得は天空日射の割合が大きくなるため、図 7 における南室と北室の日射熱取得量はともに天空日射の割合が高く、両室の室温に大きな差は見られない。

図 6、図 7 の e) 置換モデルの内壁等の表面および置換 PCM の吸放熱量の挙動について、内壁等の貫流熱が PCM により遅れて生じる影響を加味しないため、日射取得率の大きい室側で吸熱し、日射取得率の小さい室側で放熱する現象は、図 6 で日中に遅れを伴わず発生している。例えば、図 6 の 5 月 23 日の置換モデル 1 階天井面の放熱量と 2 階床面の吸熱量は、13 時頃にピークを迎え、それぞれ 60W と 70W 程度である。一方、日射の遅れは考慮するため、図 6、図 7 とも、日中に各室の置換 PCM へ配分された日射が、夜間に遅れを伴い室に放熱される様子が確認される。図 6 の 5 月 23 日を例に取ると、日中の吸熱量のピークは 13 時頃に 1 階置換 PCM 約 200W、2 階置換 PCM 約 500W を示しており、放熱量のピークは翌朝 5 時頃に 1 階置換 PCM 約 140W、2 階置換 PCM 約 190W を示す。置換モデルでは 2 室間の貫流成分の遅れを考慮していないが、この値がピーク時の内壁等の表面での吸収日射量の数分の 1 程度のために、室温変動への影響は限定的であったものと推察される。置換モデルの提案において、室 i 側の作用温度 OT_{wi} と PCM の室 i 側表面温度 T_{psi} が等しいと仮定したが、実際には PCM 熱容量の影響により、図 6 a)～c) の日射取得のある時間帯には、詳細計算における PCM 温度が室温や室の表面温度より低くなる傾向が見られる。そのため、表 2 のとおり 2 階床面への日射分配割合が他の部位より高いにも関わらず、日射取得のある時間帯には 2 階室側から床面への熱流が生じている。一方、置換モデルでは、前述の仮定により、室 2 の内壁等以外の部位に日射を分配するが、分配された日射により温度が上昇した内壁等以外の部位より、一部は室空気を介して、置換 PCM や室 2 側への熱流が生じる。そのため、前述のとおり、図 6 の 5 月 23 日では、d) 詳細計算の 2 階床面の日中の吸熱量のピーク約 600W に対し、e) 置換モデルで 2 階置換 PCM の吸熱量約 500W、2 階床面の吸熱量約 70W となり、e) の 2 階置換 PCM と床面の吸熱量の合計が、d) の 2 階床面吸熱量に近い値を示すものと推察される。

年間の室温の比較を行う。図 6、図 7 の f) に、横軸に詳細計算の室温計算結果を、縦軸に置換モデルの室温計算結果を取った散布図を示す。図 6 のケースで 2 階の室で差が見られるものの、非常に高い相関係数が得られた。図 6、図 7 の g) に、室温の度数分布を示す。PCM 相変化温度域付近で多少の差が見られるものの、比較的良く傾向を反映している。

3. 5. 2 全ケースにおける室温計算結果の差

全 1,728 ケースについて、詳細計算と置換モデルの計算結果の室温度数分布の発生頻度差を図 8 に示す。図 8 横軸は、全 1,728 ケースを表 3 の A～I の項目を①から順に並べたものである。縦軸は、10 分間隔の自然室温年間計算結果について、図 6 g) に示すように 2℃刻みで出現割合を作成した際に、式(17)のとおり各温度範囲での出現頻度の差の絶対値を各室、全温度範囲にわたって積算した値である。自然エネルギーを活用した住宅の熱的性能評価にあたっては、非暖房時の室温が分布する範囲が重要となるため、この指標を用いる。

$$I_{fd,i} = \sum_r |F_{d,i,r} - F_{r,i,r}| \quad (17)$$

$I_{fd,i}$	: 室 i における度数分布の発生頻度差[回]
$F_{d,i,r}$	: 温度範囲 r における詳細計算結果の室 i の室温の出現回数[回]
$F_{r,i,r}$	: 温度範囲 r における置換モデル計算結果の室 i の室温の出現回数[回]
$\sum_r$	: 全温度範囲の総和

式(17)で示した度数分布の発生頻度差では、室温の発生時刻の概念が無視されており、蓄熱による室温変化の位相差は考慮されない。そこで、式(18)により求められる詳細計算と置換モデルの時々刻々の室温の平均絶対誤差を図 9 縦軸に示す。式(18)右辺は、詳細計算と置換モデルの時々刻々の室温計算結果の差の絶対値について、計算時間間隔 10 分で年間計算を行う際の合計 52,560 ステップの総和を取り、ステップ数で除して平均化している。図 9 横軸は、図 8 同様に全 1,728 ケースを並べたものである。

$$I_{td,i} = \sum_t |T_{d,i,t} - T_{r,i,t}| / 52560 \quad (18)$$

$I_{td,i}$	: 詳細計算と置換モデルの室 i の室温の平均絶対誤差[℃]
$T_{d,i,t}$	: 時刻 t における詳細計算の室 i の室温[℃]
$T_{r,i,t}$	: 時刻 t における置換モデルの室 i の室温[℃]
$\sum_t$	: 10 分間隔の年間計算 (合計 52,560 ステップ) の総和

図 8 度数分布の発生頻度差、図 9 平均絶対誤差とも、A.プランの「①上下 2 室」が、「②南北 2 室」や「③東西 2 室」よりも大きくなっている。「①上下 2 室」では、透過日射が集中的に分配される床に PCM が設置されており、置換モデルの影響が生じやすいためと推察される。

また、各室について、度数分布の発生頻度差を横軸に、平均絶対

図8 詳細計算と置換モデルの室温計算結果の
度数分布の発生頻度差

図9 詳細計算と置換モデルの室温計算結果の平均絶対誤差

図10 詳細計算と置換モデルの室温計算結果の度数分布の
発生頻度差（横軸）と平均絶対誤差（縦軸）の関係

誤差を縦軸にとった散点図を、図10に示す。縦軸の値が同じであれば横軸の値が小さいほど度数分布の差が小さい、即ち同じような温度域で推移するが位相差があると考えられる。逆に横軸の値が大きければ度数分布の差が大きい、即ち時間的なずれよりも絶対値のずれが大きいと考えられる。

図10に示す結果では、度数分布の発生頻度差と平均絶対誤差がともに大きい図6のケースでは、2階の発生頻度差約3500回、平均絶対誤差約0.41℃となっている。平均絶対誤差に対する度数分布の発生頻度差が小さい図7のケースでは、南室の発生頻度差約220回、平均絶対誤差約0.046℃である。しかしながら、3.5.1で確認したとおり、室温変動の傾向は概ね再現できている。今回の条件設定の範囲では、置換モデルによる一定程度の予測精度が期待される。

3.5.3 置換モデルを活用したPCM仕様等の検討の可能性

基本計画段階におけるPCM仕様等の検討が、置換モデルにより適切に行われるかの確認を行う。即ち、詳細計算と置換モデルにおける室温計算結果について、表3の項目の水準を変更した際に、水準の差に起因する室温変動の差について同様の傾向が得られるか、確認を行う。

表3のパラメータを変更した代表のケースの詳細計算と置換モデルの室温計算結果の出現割合を、図11に示す。度数分布の発生頻度差が大きいケースを選定しており、E.仕上材熱抵抗「②0.1 m² K/W」、H.PCM 潜熱変化温度「①22.5℃」は図6に示すケースである。

E.仕上材熱抵抗、H.PCM 潜熱変化温度とも、潜熱変化温度域付近で、詳細計算と置換モデルの差が生じている。しかしながら、E.仕上材熱抵抗の置換モデルでは、仕上材熱抵抗が大きい条件よりも小さい条件において潜熱変化温度域付近で室温が安定する傾向が見られるが、これは詳細計算における傾向と一致している。また、H.PCM 潜熱変化温度は各潜熱変化温度域付近で室温が安定する傾向が、詳細計算、置換モデルともに確認される。同様に、紙面の都合上、結果のグラフは省略するが、以下の傾向が確認された。

A.プラン：南面に開口部が集中しており、透過日射が集中的に配分される床にPCMが設置されている「①上下2室」で、相変化温度付近で室温が安定する傾向

図11 条件間の比較 E. 仕上材熱抵抗 H. PCM 潜熱変化温度

- B.断熱性能：「②平成 28 年基準相当」で「①無断熱」よりも室温が高い傾向
- C.および D.開口部日射熱取得率：開口部日射熱取得率が高くなるほど室温も高い範囲に分布する傾向
- F.PCM 潜熱容量：潜熱容量が大きい方が相変化温度付近で室温が安定する傾向
- G.PCM 熱伝導率：熱伝導率が大きい方が相変化温度付近で室温が安定する傾向
- I.PCM 潜熱変温度化幅：潜熱変化温度幅が小さい方が相変化温度ピークで室温が安定する傾向

従って、基本計画段階におけるおおよその仕様の検討等には、置換モデルが十分有効であると考えられる。

以上より、本論文で扱った条件下では、概ね、置換モデルで詳細計算の傾向を再現することが確認され、置換モデルが設計等に活用される可能性が示唆された。

4. まとめ

本論文では、内壁等に設置された PCM による熱容量増大の効果を家具熱容量に置換することで、比較的簡易に PCM を含む熱負荷計算が可能となるモデルの構築を行った。また、置換モデルの特性から詳細計算との差が生じると考えられる全 1,728 ケースで置換モデルの検証を行い、以下の知見を得た。

- ・内壁等に設置された PCM を内壁等が隣接する 2 室の家具に置換し、PCM による室温安定効果を再現する方法について、定常状態を想定した熱収支式を基礎に提案した。本手法の利用により、既存の室温、熱負荷計算プログラムに対し、軽微な修正を行うことで内壁等に設置された PCM 建材の計算を行うことができる。
- ・詳細計算結果との比較を行い、2 室の建物モデルにおいて、本研究において比較を行った範囲においては、置換モデルで詳細計算の自然室温をおおむね再現することを確認した。詳細計算と置換モデルで最も年間の室温の度数分布の発生頻度差が大きい条件において、PCM が相変化温度域の上端／下端を跨ぐ付近で多少の差が見られるものの、大体の室温の傾向を再現することを確認した。

今後の課題として、下記の項目が挙げられる。

- ・本論文では、検討の初期段階として、内壁等に PCM を導入した条件での検討を行った。今後、PCM を建物外皮に導入した条件についても検討し、外皮の貫流熱を考慮したモデルに拡張する必要がある。
- ・本論文では、検討の初期段階として、一部位に PCM を導入した簡易な建物モデルでの検討を行った。今後、検討対象を、一室に複数の PCM を含む部位を有するモデルに拡張する必要がある。
- ・本論文では、検討の初期段階として、自然室温での検討を行った。今後、空調を行うケースについて精度の確認を行う必要があり、適宜モデルの改良を行う。本論文における置換モデルでは、PCM 導入効果を室全体の見かけの熱容量の変化として扱っているが、

特に、PCM に積極的に蓄熱を行う空調方式において、このような扱いの適用範囲の確認が必要である。

- ・置換 PCM については、室空気との間で吸放熱するモデルを検討したが、室壁体表面との放射も考慮したモデルとすることで計算精度の向上が期待される。

謝辞

本研究は、平成 27～29 年度科学研究費「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」により実施したものである。また、本研究を進めるにあたり、国立研究開発法人建築研究所 西澤繁毅氏に貴重な助言をいただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, 第 80 巻, 第 718 号, pp. 1115-1123, 2015. 12
- 2) 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
- 3) 藤田浩司, 岩前篤, 松下敬幸, 中川浩, 横山弘嗣, 石津京二：潜熱蓄熱材を用いた蓄熱型床下暖房に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 626 号, pp. 479-486, 2008. 4
- 4) 坂本雄三, 荏原幸久：潜熱蓄熱パネルの省エネルギー効果に関する数値シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp. 833-834, 1986. 8
- 5) 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 分冊, pp. 669-670, 1994. 9
- 6) 足永靖信, 佐伯智寛, 兼松学, 猪瀬亮, 武田仁, 土屋直子：外界気象の変動影響を考慮した潜熱蓄熱材の建築利用に関する研究（その 1）数値計算モジュールの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 107-108, 2015. 9
- 7) ISO 13786: 2007, Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods, 2007. 12
- 8) 永田明寛：部位の有効熱容量・有効湿気容量とその合成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 13-14, 2012. 9
- 9) 平成 25 年住宅・建築物の省エネルギー基準解説書編集委員会：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. 3
- 10) 経済産業省, 国土交通省：エネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準の一部を改正する告示, 2016. 4 改正
- 11) 佐藤誠, 宇田川光弘, 樋口佳樹, 盧炫佑：EESLISM の概要と計算事例, 日本建築学会第 39 回熱シンポジウム, pp. 139-146, 2009. 10

注

注 1) 外皮の室内側励振を表面熱流、屋外側励振を温度、応答を表面温度とした応答係数を用い、室空気の熱収支を差分法とした計算法などが想定される。

注 2) 仮に、室 1 側の作用温度 OT_{w1} と PCM の室 1 側表面温度 T_{ps1} が等しいという仮定から外れた状況をする。日射取得時間帯において、PCM の熱容量のために、実際には T_{ps1} が OT_{w1} より低くなる場合、置換モデルでは、 $q_{s1,r1}$ を大きく、 $q_{s1,p1}$ を小さく見積もることとなる。しかしながら、置換モデルでは、 $q_{s1,r1}$ を大きく見積もる影響が室 1 の温度上昇として表れ、室 1 の空気から室 1 の置換 PCM へ熱移動の熱移動および室 1 から室 2 への熱移動が生じるため、結果的に $q_{s1,r1}$ を大きく見積もる影響を打ち消す方向に働く。

そのため、ここでは、実際の温度分布との乖離が生じる可能性があるものの、モデルの簡略化を重視し、室 1 側の作用温度 OT_{w1} と PCM の室 1 側表面温度 T_{ps1} が等しいという仮定を置いた。

注 3) PCM の分配を、各室へ分配する日射量に比例させる理由は以下のとおり。

仮に顕熱を想定した場合、両側の室 1、室 2 の分配後の家具熱容量をそれぞれ C_1 、 C_2 [J/K]、分配される日射量を一定時間について積算したものを Q_1 、 Q_2 [J] としてそれぞれの PCM の温度上昇に寄与するとみなすと、それぞれ Q_1/C_1 、 Q_2/C_2 [K] の各室の家具の温度上昇に相当する。分配する前の家具温度が一樣であるとする、 $Q_1/C_1=Q_2/C_2$ より、各室へ分配する熱容量は、各室へ分配する日射量に比例する。

- 注 4) 本論文における検証では、暖房期と冷房期の平均値を使用した。これは、検証には岡山の気象データを使用しており、省エネルギー基準における地域区分 6 地域の岡山では、暖房負荷が発生する期間は 11 月から 4 月の 6 月間程度、冷房は 5 月から 9 月の 4 月間程度と、暖房期間と冷房期間の差が比較的小さいためである。
- 一般的には、暖房期間と冷房期間の日射量の比率に応じた、方位係数の重み付け平均値が望ましいと考えられるが、実用的な範囲では、例えば暖房期間と冷房期間の長さの比率に応じた方位係数の重み付け平均値とすることが考えられる。
- 注 5) 後退差分法を適用したプログラム。ただし PCM の比熱については、詳細計算では前時刻の温度より、置換モデルでは現在時刻の温度も含めた収束計算により求める。
- 注 6) 置換モデルで PCM を家具熱容量として扱う際、置換モデルでは一質点に持たせる熱容量が大きく、熱容量の取り方による誤差が非常に大きな熱収支の誤差に繋がる可能性があるため、収束計算を行っている。
- 注 7) 図 6 に示す代表ケースでの日射量および PCM の分配を示す。

付表 1 図 6 に示す代表ケースでの日射量および PCM の分配

部位	面積 [㎡]	詳細 計算	日射分配（図6のケース）				備考
			簡易モデル				
			室間調整前 開口部日射透過 率×方位係数× 部位別日射分配 率		室間調整後		
			1階	2階	1階	2階	
床	16.0	0.61	0.086	0.093※	0.372	0.169※	※1階へ
天井	16.0	0.11	0.003※	0.089	0.011	0.161	※2階へ
南窓	4.0	0.03	0.006	0.033	0.026	0.059	方位係数 0.69
南壁	6.0	0.03	0.004	0.022	0.019	0.040	
北壁	10.0	0.07	0.011	0.055	0.047	0.101	
東壁	10.0	0.07	0.011	0.055	0.047	0.101	
西壁	10.0	0.07	0.011	0.055	0.047	0.101	
PCM			0.006	0.145	0.431	0.268	
自室へ			0.007	0.097			
合計	72.0	1.00			1.00	1.00	
					1階	2階	
PCM[㎡]					0.064	0.096	
熱抵抗の逆数[W/K]					43.6	63.5	
1. 各室、床に0.5、残りを床を含めて面積案分で部位別に日射を分配する。その際、1階天井、2階床への分配日射は、図2に従い、隣室、自室PCM、自室の他の部位に与える分に分離する。（室間調整前）							
2. 1階天井、2階床への分配日射のうち自室の他の部位に与える分を面積案分で分配する。							
3. 隣室から自室へ与えられる日射相当が自室PCMに分配されるよう、また、各室の日射分配率の合計が1となるよう、各室の日射分配率を調整する。（室間調整後）							
4. PCMを、日射量に応じて各室へ分配する。 ここでは1階（0.006+0.093）：2階（0.145+0.003）。							
5. 熱抵抗の逆数を、各室から各室の置換PCMへの日射量と、内壁等の部位の熱貫流率、表面熱伝達率等より求める。							

REPLACEMENT MODEL OF PHASE CHANGE MATERIALS IN THERMAL LOAD CALCULATION

Part.1 Study on introduction of phase change materials into a simple building model

Mao SERIKAWA^{}, Makoto SATOH^{**} and Masayuki MAE^{***}*

^{*} Grad. Student, Graduate School of Engineering, the Univ. of Tokyo

^{**} Satoh Energy Research Co., Ltd., Ph. D.

^{***} Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

The purpose of this research is proposing a simplification method of calculation for temperature of rooms without air conditioning by using a replacement model of Phase Change Materials (PCM) at inner thermal storage wall and floor.

Chapter 1 is about previous studies and the purpose of this research. Numerous researches were discussed about PCM calculation. However, the previous studies divide PCM into small parts and it is not practical for case study in a design process. Therefore, it is useful to simplify of calculating room temperature of a building model that contains PCM in its wall or floor.

In Chapter 2, the method of simplification of calculation is suggested. It is for temperature of a simple building model without air conditioning that contains PCM in its inner wall or floor. Regarding replacement of PCM with furniture model of adjoining rooms, replaced PCM temperature and room temperature effect on each other. PCM distribution ratios which indicate ratios of PCM distributed into two replaced PCM of adjoining rooms, distribution ratios of solar radiation inside the rooms which indicate ratios of solar radiation distributed to parts inside the rooms including replaced PCM, thermal resistance between room temperature and furniture are decided depending on given conditions. The values of distribution ratios of solar radiation with replaced PCM are calculated from surface heat transfer coefficient, heat transmission coefficient of the inner wall, heat transmission coefficient between the surface of the inner wall and PCM, and inner solar radiation distribution ratio without PCM. Then, PCM distribution ratios are calculated from distribution ratios of solar radiation with replaced PCM. Moreover, the resistances between room temperature and replaced PCM are decided according to the resistance between surface of the inner wall and room air, the resistance between surface of PCM and room air and others.

In term of comparison result, in Chapter 3, the calculation result of 1728 cases of replacement model was verified compared with detailed calculation, and accuracy of simplification was confirmed. As a result, it confirmed that, even in the case that difference of room temperature of detailed calculation and replacement model is the most significant, room temperature of replacement model showed similar tendency with detailed calculation. In other words, the difference of the highest and lowest room temperature for each day between detailed calculation and replacement model is less than 2°C about representative days of the case that difference of room temperature of detailed calculation and replacement model is the most significant. In addition, about the case, the timings of the highest and lowest room temperature of replacement model do not shift so much from that of detailed calculation.

However, there are some issues to apply this replacement model to thermal load calculation of a house. The issues are referred in Chapter 4. In the future, replacement model needs to be extended to a model for air-conditioned condition, a house with more than 2 rooms with PCM in outer walls.

(2016 年 10 月 10 日原稿受理, 2017 年 4 月 25 日採用決定)