

# 博士論文

潜熱蓄熱建材の熱的挙動の測定および計算の方法ならびに  
計算による住宅の温熱環境およびエネルギー性能の評価方法の提案

芹川 真緒

## 目次

1.	研究の背景および目的ならびに論文構成	1-1
1.1	研究の背景および目的	1-1
1.2	本論文の構成	1-2
2.	既往研究等に関する調査	2-1
2.1	PCMに関する研究	2-1
2.1.1	PCMの試験に関する研究	2-1
2.1.2	PCMの計算モデルに関する研究	2-13
2.1.3	PCMの負荷削減効果、省エネルギー効果に関する研究	2-32
2.2	温熱環境の評価に関する研究	2-35
2.2.1	健康面	2-35
2.2.2	温熱感・快適性	2-38
2.3	住宅の電力料金、電力使用、蓄熱に関する研究	2-44
2.4	住宅の性能評価に関する研究	2-47
2.4.1	住宅のエネルギー性能や温熱環境を考慮した評価指標の算出方法	2-47
2.4.2	実住宅における省エネルギー性能や温熱環境に関する居住者の重視度や満足度	2-47
3.	ペルティエ装置を用いたPCMの熱特性の測定に関する提案	3-1
3.1	測定概要	3-1
3.1.1	目的	3-1
3.1.2	測定および装置の概要	3-1
3.1.3	見かけの比熱およびエンタルピーの算出方法	3-2
3.1.4	測定対象のPCM試験体	3-4
3.2	熱伝導率の測定	3-5
3.3	見かけの比熱測定	3-7
3.4	降温／昇温、昇温／降温の繰り返し測定	3-17
3.5	まとめ	3-32
4.	非定常熱伝導計算へのPCMの組み込み	4-1
4.1	見かけの比熱・見かけの熱伝導率を用いた差分法による計算	4-1
4.2	計算によるペルティエ装置を用いた測定の再現	4-3
4.2.1	見かけの比熱測定結果の再現	4-3
4.2.2	温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返しの測定の再現	4-11
4.3	測定条件を再現した計算による見かけの比熱測定の温度変化条件の検討	4-17
4.3.1	目的	4-17
4.3.2	検討手法	4-17



4.3.3	計算条件 .....	4-19
4.3.4	計算結果 .....	4-21
4.4	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の提案 .....	4-24
4.4.1	置換モデルの提案の目的 .....	4-24
4.4.2	置換モデルの提案 .....	4-25
4.4.3	詳細計算との比較による置換モデルの検証 .....	4-30
4.4.4	まとめ .....	4-42
5.	熱箱・実験棟測定との比較による計算精度の検証 .....	5-1
5.1	熱箱を用いた測定結果との比較による計算精度の検証 .....	5-1
5.1.1	目的 .....	5-1
5.1.2	測定概要 .....	5-1
5.1.3	計算条件 .....	5-3
5.1.4	測定結果と計算結果の比較 .....	5-7
5.2	実験棟測定結果との比較による計算精度の検証 .....	5-35
5.2.1	実験棟I .....	5-35
5.2.2	実験棟II(実験棟内部への PCM 設置量の少ない状態での比較検証) .....	5-43
5.2.3	実験棟II(実験棟内部への PCM 設置量の多い状態での比較検証) .....	5-47
6.	温熱環境およびエネルギー性能の面からの住宅の性能評価 .....	6-1
6.1	温冷感・快適性・健康性を考慮した適切な温熱環境 .....	6-1
6.1.1	健康性に関する評価 .....	6-1
6.1.2	快適性に関する評価 .....	6-5
6.1.3	人体モデルを使用した温冷感に関する評価 .....	6-6
6.2	エネルギー消費量およびエネルギーコスト .....	6-19
6.2.1	暖冷房負荷のエアコン消費エネルギーへの換算 .....	6-19
6.2.2	エネルギーコスト .....	6-21
7.	住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価 .....	7-1
7.1	住宅全体の計算の精度の確認 .....	7-1
7.1.1	目的 .....	7-1
7.1.2	比較対象 .....	7-1
7.1.3	計算条件 .....	7-2
7.1.4	計算結果 .....	7-5
7.2	PCM 見かけの比熱測定結果の精度が住宅全体の熱負荷計算の結果に及ぼす影響の確認 .....	7-6
7.2.1	目的 .....	7-6
7.2.2	計算条件 .....	7-6
7.2.3	計算結果 .....	7-9

7.3	住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価 .....	7-16
7.3.1	目的 .....	7-16
7.3.2	計算条件 .....	7-16
7.3.3	計算結果 .....	7-22
8.	住宅性能に関する試行的な評価 .....	8-1
8.1	概要 .....	8-1
8.2	温熱環境とエネルギー性能の統合的な評価方法の提案 .....	8-1
8.2.1	複数の指標を用いた評価 .....	8-1
8.2.2	ひとつの指標に集約した評価 .....	8-4
9.	まとめ .....	9-1

## 第1章 研究の背景および目的ならびに論文構成

## 1. 研究の背景および目的ならびに論文構成

本章では、研究の背景および目的を示すとともに、本論文の構成を示す。

### 1.1 研究の背景および目的

5 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、暖冷房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、潜熱量、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暖冷房エネルギーの削減効果が期待される。特に、近年、住宅の高気密・高断熱化に伴い、冬期の日中の取得日射熱をPCMに蓄熱して夜間の暖房負荷軽減に活用するとともに、室温の安定効果を得ることが期待されている<sup>注1,1)</sup>。

PCMを住宅に導入するにあたっては、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、導入効果の把握を行うとともに、適切な導入量、設置位置、相変化温度等を決定することが望ましい。

15 一方で、既往研究の中でPCMの潜熱を含んだ比熱(以下、見かけの比熱)の測定方法は様々に提案されているものの、住宅に導入されるPCMのスケールや温度変化速度での測定方法は確立されていない。また、測定結果をPCMの熱的挙動の計算へ反映させる方法について、融解と凝固の見かけの比熱曲線が一致しないPCMの計算を扱う既往研究はあるものの、その扱いについて十分な検討がなされていないといった課題が見られる。

20 本研究では、PCM導入の効果を算出するための非定常熱伝導計算に入力するPCM物性値の測定方法の提案、および、標準的な住戸へのPCM導入を想定した室温計算、熱負荷計算を可能とすることを、第一の目的とする。

また、居住者への訴求性を鑑み、PCMが住宅内の温熱環境や熱負荷に与える影響を、快適性・健康性やエネルギー使用の経済性の面から評価する方法の提案を行うことを、第二の目的とする。



図 1.1.1 (左)熱容量が小さい住宅と(右)熱容量が大きく温度が安定している住宅のイメージ

<sup>注1</sup> 例えば、既往研究<sup>1)</sup>では、部分間歇空調の住宅モデルで暖房負荷計算を行い、日射の多い代表日においては、PCMを導入していない住宅と比較し、PCMを導入した住宅で日中の室温上昇が抑制され、夕方から夜間にかけては相変化に伴うPCMの放熱により、暖房負荷が削減されることを示している。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成を、以下に示す。

本論文は、PCM の測定および計算に関する内容、ならびに、住宅の温熱環境およびエネルギー性能の評価に係る内容を、大きな柱とする。

5 2章で、PCM の測定および計算、温熱環境の評価、住宅内でのエネルギー使用やその費用に関する既往研究に関する整理を行う。

3～5章で、PCM の見かけの比熱測定法等に関する提案、計算への測定結果の組み込み、および、その検証を行う。

10 6章では、住宅の温熱環境が健康性・快適性に与える影響の評価方法について考察する。また、住宅の熱負荷が電力使用や電力コストに与える影響の評価方法について考察する。

7章では、PCM 導入有無等の条件で、住宅全体の計算を行い、その結果を健康性・快適性・エネルギー性能の観点から評価する。

8章では、7章での計算結果を用いて、健康性・快適性・エネルギー性能を集約したひとつの指標で住宅性能評価を行う方法の提案を試行的に実施する。

15 なお、PCM を含む非定常熱伝導計算について、4章では、柔軟な検討を可能とするため、収束計算機能を有する表計算ソフトを用いて検討を実施する。5章および7章では、計算に要する時間を考慮し、既存の熱負荷計算ソフト<sup>2</sup>に PCM 計算機能が追加されたバージョンで、検討を実施した。

表 1.2.1 論文の構成

PCM の測定・計算	住宅評価 (温熱環境・エネルギー)
1. 研究の背景および目的ならびに論文構成	
2. 既往研究等に関する調査	
3. PCM 熱特性の測定に関する提案	6. 温熱環境およびエネルギー性能の面からの住宅の性能評価
4. 非定常熱伝導計算への PCM の組み込み	
5. 熱箱・実験棟測定との比較による計算精度の検証	
7. 住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価	
8. 住宅性能に関する試行的な評価	
9. まとめ	

20

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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

## 第2章 既往研究等に関する調査

## 2. 既往研究等に関する調査

本章では、既往の研究について言及し、PCM や住宅の温熱環境、エネルギー性能の評価に関する知見を整理するとともに、課題の把握を行う。

### 5 2.1 PCM に関する研究

#### 2.1.1 PCM の試験に関する研究

##### (1) 既往研究における PCM の試験

PCM の試験は、世界各国で行われている。また、試験の方法についても、単体で微量での測定を行う DSC (示差走査熱量測定、Differential scanning calorimetry) から、実使用に近い状態で建物に設置した実験まで、様々な規模や測定時間で行われている。

ここでは、Cabeza らによる、PCM 測定法を纏めた論文<sup>1</sup>をもとに、主な PCM 試験法について示す。下図は、Cabeza らによる論文の目次である。3 章で、代表的な 10 種類の試験方法の紹介がされている。

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

25

図 2.1.1 Cabeza らによる論文の目次(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

30 以下に、Cabeza らによる論文をもとに、10 種類の試験方法の概要を示す。

10 番目を除いては、主に、PCM の温度と見かけの比熱の関係や、温度とエンタルピーの関係を求めるものが多い。また、それよりも単純に、リファレンスとの温度変化の差を見るものや、比熱・エンタルピー以外に熱伝導率等を測定するものもみられる。10 番目は、実使用を想定したもので、実際の室に近い規模での試験である。

35 なお、本研究では、壁体に近い構成での評価を行うため、5～7 番目に近い方法を検討する。

① DSC

微量の単体の試験体を使用し、動的(dynamic method)またはステップ状(step method)に昇温、降温を行い、測定される温度と熱流より、温度とエンタルピーの関係を求める試験である。エンタルピーは、顕熱と潜熱の合計の値である。試験結果は、温度変化の速度<sup>2</sup>や、試験体の熱伝導率、試験体の大きさ<sup>3</sup>の影響を受ける。

5

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.2 DSC 温度と熱流測定結果の例 (左)dynamic method (右)step method(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization, Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

20

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

図 2.1.3 DSC 温度と比熱の関係の測定結果の例(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization, Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

35



② Twin bath method.

PCMを挿入した水槽とPCMを挿入していない水槽の2つを加熱して、PCMの有無による温度変化の差や、ヒーターの電力を確認するものである。2つの水槽のヒーター電力負荷の差より、PCM熱容量が求められる。

5

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.4 試験装置(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

20

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

図 2.1.5 (左)2つの水槽の温度とその差 (右)2つの水槽の電源負荷の差(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

35

③ T-history

試験管中の試験体を水槽等で冷却することにより、PCM 熱容量等を簡易的、経済的に把握可能な試験である。

試験体は、測定対象の PCM を入れたものと、比較用の水を入れたものの複数を加熱・冷却する。

5 水の比熱を既知とし、まず、水の試験体より、試験管と周囲の熱伝達率  $h$  を求める。その熱伝達率  $h$  を使用し、PCM に流入する熱流を求め、次いで、PCM の熱容量を求める。

なお、T-history 試験では、PCM 熱伝導率等の測定も可能である。

10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

25

図 2.1.6 (上)試験装置(下)有機系と無機系の PCM の温度とエンタルピーの関係の測定結果(出典:  
Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials  
(PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

④ T-t comparative curves

建材としての PCM と、PCM と比較する対象を試験装置に設置し、両側のヒーターで加熱した後、冷却過程の温度を測定する。

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

図 2.1.7 (左)試験装置 (右)試験体中温の温度測定点における熱的応答(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization, Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

15

⑤ Panel test experimental set-up

建材としての PCM の試験である。PCM を熱交換用の 2 つのプレートで挟み込み、プレートと PCM パネルの間の熱流を温水・冷水で制御した際の温度変化を測定する。

20

複数の機関で同様の方法で試験が実施されており、ペルティエ素子を使用したものもある。

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

図 2.1.8 フラウンホーファーISE における試験装置(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization, Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

35

5  
他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10  
図 2.1.9 スイス連邦材料試験研究所における装置の構成(出典: Luisa F. Cabeza et al,  
Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM)  
characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

15  
他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20  
図 2.1.10 スイス連邦材料試験研究所における試験装置(出典: Luisa F. Cabeza et al,  
Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM)  
characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

⑥ Simple thermal analyzer

40 cm<sup>3</sup>の試験体をヒーター一定出力で加熱し、相変化温度、熱容量、過冷却の挙動を測定する。

5 周囲への熱の漏れを防ぐため、断熱を行い、その外側に銅線のヒーターを設置して出力を制御することによりアクティブインシュレーションを行っている。更にその外側にも断熱材を設置している。それでも熱の漏れが無視できないので、物性既知の物質でキャリブレーションを実施する。

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.11 装置の構成(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

図 2.1.12 測定結果の例(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

30

⑦ Thermal test device

試験装置の熱箱の上下方向中央に PCM 試験体を設置し、上下の空間を冷温水で温度制御することにより、試験体の熱的特性を把握する。上下の空間温度により、下記のような特性を把握可能である。

- 5      • 両側を異なる温度に固定して熱貫流率測定
- 両側を同じ温度で変動させて比熱を測定
- 動的な温度変動を与えて温度や熱流を測定

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

20      図 2.1.13 装置の構成(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30      図 2.1.14 測定結果の例（左）比熱測定（右）動的な温度変動を与えた際の熱的応答遅れ(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

⑧ Energy balance setup

PCMと空気間の熱伝達の分析のために設計された装置だが、T-historyより大きなサンプルの温度-エンタルピー曲線の測定にも使用可能である。循環空気温度をPID制御し、試験体の設置されたStorageの出入口温度と風量を測定する。

5

10

15

20

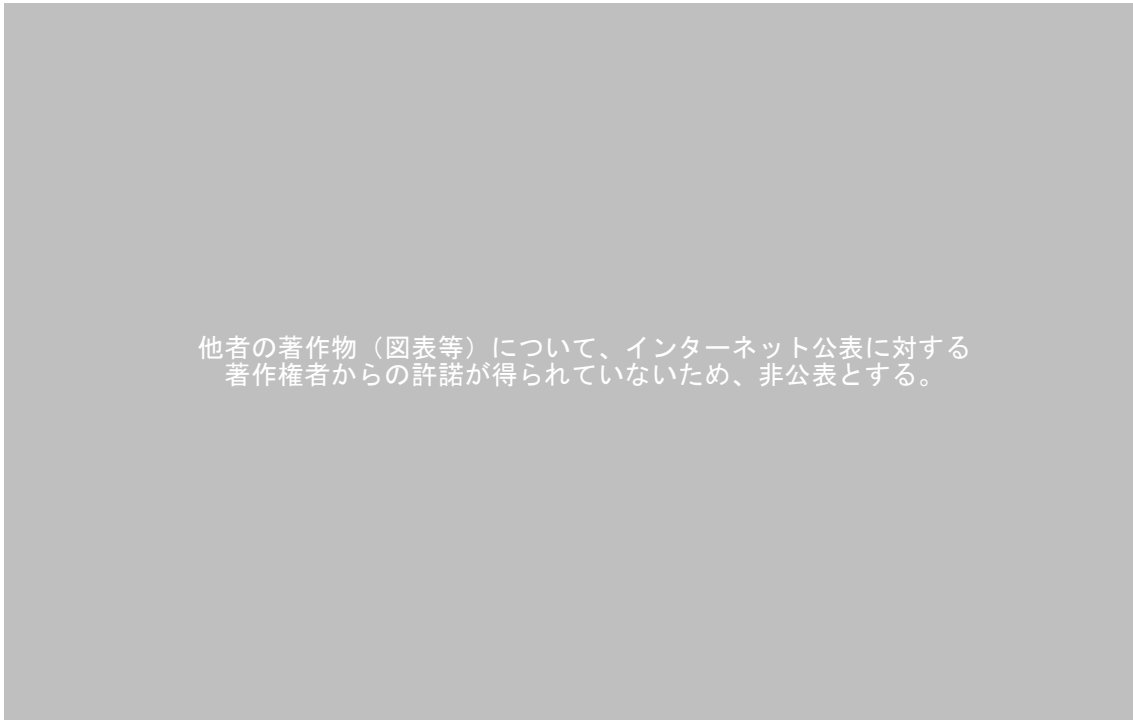


図 2.1.15 試験装置(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1)</sup>)

⑨ PCM-air heat exchangers set-up

PCM と空気との熱交換の研究のために設計された装置。ANSI/ASHRAE STANDARD94.1-2002<sup>4</sup>に基づいて設計されている。試験より、以下が評価可能となる。

- 5 • 温度の関数としての装置に蓄積されたエネルギー
- 数値モデルの検証
- 装置と空気温度の関数としての熱伝達率のもとでの実証的なモデル

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.16 試験装置(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

図 2.1.17 試験とシミュレーションの結果の比較(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

30



⑩ フラウンホーファーISE の試験室

特に床暖房と天井冷房の条件下における、実大の建築部材としての PCM 評価のための試験室である。試験室のサイズは、EN 14240:2004<sup>5</sup>、DIN 4715<sup>6</sup>に基づき、4×4×2.7 m<sup>3</sup>としている。PCM の動的な挙動の把握や、システムとしての熱容量の把握が行われている。

5

10

15

20

25



図 2.1.18 PCM が設置された天井冷房の様子(出典: Luisa F. Cabeza et al, Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties<sup>1</sup>)

## (2) 既往研究における PCM の試験に関する課題

### ① 建材として適切な形態、大きさ、温度変化速度での測定

見かけの比熱測定にあたっては、建築分野においても、数 mg 程度の少量の試験体を用いる示差走査熱量測定 (DSC) が採用されることが多い<sup>例えば 11</sup> が、PCM の蓄放熱挙動は、その大きさや温度変化速度の影響を受ける可能性があるため<sup>23</sup>、実際の建材スケールや温度変化速度で蓄放熱挙動を把握することが望ましい。また、DSC による PCM 単体での測定結果から、建物に導入された PCM 建材の蓄放熱挙動の予測が出来るとは限らない。PCM 建材として、例えば、カプセル化された PCM が混入された壁材や、合板と PCM を積層した複合建材が挙げられるが、製品化された PCM 建材は必ずしもその構成や詳細な熱伝導の挙動が明らかになっていない。従って、このような PCM 建材は、非定常伝熱計算等により PCM や付属する部材単体の物性値を用いて数値的に壁体の熱性能を評価することが難しく、PCM 建材一体としての挙動を測定により把握することが望ましい。

### ② 試験体の代表温度の取り方

2.1.1 (1) の試験には、建築物に導入される状態に比較的近い大きさ、形状の建材の非定常状態での比熱測定を行うものも含まれ、2.1.1 (1) ⑤では PCM 表面温度の測定を行っているが、潜熱変化を伴う場合には一般に試験体内部の温度勾配が一定とはならないため、試験体の代表温度として試験体表面温度を使用することが適切か、中心部の温度を加味すべきか等を考慮すべきと考えられる。

### ③ 融解過程と凝固過程で異なる見かけの比熱を示す PCM の挙動の把握

PCM の見かけの比熱の測定結果は一般に融解過程と凝固過程で異なるものの、測定は融解過程、凝固過程の単調な温度変化条件で行うものが多く、融解途中に凝固過程に移行する条件や、その逆の温度変化条件での測定を行った例は少ない。しかしながら、融解過程と凝固過程で異なる相変化温度を有する PCM を導入した建物での年間熱負荷計算を想定すると、日単位で完全に相変化温度域を跨ぐとは限らない。例えば、日中に外気温上昇や日射のために融解過程にあった PCM が完全に融け切らない内に、夜となり外気温の低下に伴い凝固過程に移行する状態が発生し得る。このような現象を計算により再現する際、融解過程から凝固過程への移行時において、融解過程の見かけの比熱特性を凝固過程に移行した後も使用可能か、もし凝固過程移行後に凝固過程の見かけの比熱特性を使用すべきであれば移行時にどのように熱収支を担保するか、もしくは移行時には融解過程と凝固過程の中間的な見かけの比熱特性曲線を使用すべきか、などの検討が必要である。このような検討にあたっては、融解過程から凝固過程へ、また、凝固過程から融解過程へ移行する条件での測定を行い、移行過程に関する情報を蓄積する必要がある。

## 2.1.2 PCMの計算モデルに関する研究

### (1) 既往研究におけるPCMのモデル化

PCMを含むシミュレーションの実施にあたっては、どのようにPCMをモデル化するかを決定する必要がある。計算結果や計算時間等はモデル化の方法の影響を受けるため、様々なモデル化のうち、適切なモデルを選択する必要がある。

ここでは、モデル化を実施するにあたり、既往研究におけるモデル化について整理した。

大きく分けて、比熱を温度の関数としてモデル化する方法と、エンタルピーを温度の関数としてモデル化する方法が見られる。熱負荷計算を行う際には、計算に比熱を使用するため、エンタルピーをモデル化する方法を用いた場合でも、そのモデルを微分して求められる比熱を使用する必要がある。比熱を温度の関数としてモデル化する場合、相変化温度のピークや幅を視覚的に把握しやすい。エンタルピーを温度の関数としてモデル化する場合、潜熱量を把握しやすい。また、過冷却の記述は、エンタルピーで扱われることが多い。

シミュレーションにモデルを導入するにあたっては、温度が変化した際にも比熱が連続的に変化する方法が、非連続の場合よりも扱いやすい。例えば、潜熱変化域で比熱が一定とするモデルでは、固相域、潜熱変化域、液相域のそれぞれの記述は容易であるが、固相域や液相域から潜熱変化域に変化したり、潜熱変化域から固相域や液相域に変化したりする際に、比熱を表す関数として異なる関数を使用する必要がある。ただし、シミュレーションにモデルを組み込むにあたり、関数の切り替えが適切に行われるよう留意し、切り替えに伴う熱収支のずれが生じないように出来れば、非連続モデルでも計算可能である。

対称性は、比熱やエンタルピーを温度の関数としてモデル化する際に、ピーク温度に対して対称な形状となるかどうかを示す。非対称のモデルの方が、非対称な見かけの比熱測定結果等を再現する際に再現性が高くなると考えられるが、記述はより複雑になる傾向がある。

モデル化の方法によらず、昇温時と降温時で異なる係数を使用する場合が見られるが、詳細な切り替え方法は不明である場合が多い。

モデル化の提案と合わせて、そのモデルを使用して計算した結果を、実測等と比較した既往研究も見られる。実測等の再現の精度は、研究により様々である。しかしながら、必ずしもモデル化自体の精度を反映しているわけではなく、それ以外の要因が多分に含まれるものと推察される。検証に使用される実測結果等が、壁体単体であったり、建物全体であったり、様々なためである。複数のモデルの再現性を比較するのであれば、モデル化以外の条件を揃えた上で比較する必要がある。

30

表 2.1.1 PCM のモデル化に関する論文の例

	式	モデル化に関する論文	シミュレーションの検証					連続性	対称性	備考			
			冬	夏	自然室温	空調	日射利用				再現対象		
比熱をモデル化 潜熱変化域比熱一定	$c(T) = \begin{cases} C_s & T \leq T_m - \epsilon \\ \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{L}{2\epsilon} & T_m - \epsilon < T < T_m + \epsilon \\ C_l & T \geq T_m + \epsilon \end{cases}$	Energy and Buildings 92 (2015) 374-388 Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure Saleh Nasser Al-Saadi, Zhiqiang (John) Zhai <sup>7</sup>						実験棟	非連続	左右対称	TRMSYS Energy+		
		Energy and Buildings 84 (2014) 287-298 Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio Shilei Lu, Shangbao Liu, Jingyu Huang, Xiangfei Kong <sup>8</sup>			○	○	○		実験棟				
二等辺三角形		日本建築学会環境系論文集 第 77 巻 第 678 号, 651-659, 2012 年 8 月 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 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林禎彦, 石黒成紀 <sup>11</sup>		○				○	○	試験家屋	非連続	左右対称	
ガウス関数	$C_{\text{eff}} = C_s + ae^{-0.5\left(\frac{T-T_m}{b}\right)^2}$	Applied Thermal Engineering 26 (2006) 853-858 Simulation of phase change drywalls in a passive solar building K. Darkwa, P.W. O' Callaghan <sup>12</sup>								連続	左右対称		
		Energy and Buildings 40 (2008) 148-156 Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation Frédéric Kuznik, Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux <sup>13</sup>									非連続	左右対称	
誤差関数	$c_p(T) = \Delta h \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(T-T_m)^2}{2\sigma^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta h(T-T_m)}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right] + c_{p, \text{solid}}$	Energy Procedia 78 (2015) 1690-1695 Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications Vasken Dermardiros, Yuxiang Chen, Andreas K. Athienitis <sup>15</sup>								連続	非対称		
関数 双曲線	$c_p(T) = c_{p, \text{solid}} + \frac{h_2 - h_1}{2} \times \frac{\frac{2\beta}{\tau}}{\cosh^2\left[\frac{2\beta}{\tau}(T - T_m)\right]}$	1995 Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard Helmut E. Feustel <sup>16</sup>								壁	連続	左右対称	
		Fifth National Conference of IBPSA-USA Madison, Wisconsin August 1-3, 2012 NUMERICAL THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS OF PCMS INTEGRATED WITH RESIDENTIAL ATTICS Ali Fallahi, Nitin Shukla, Jan Kosny <sup>17</sup>									連続	非対象	ESP-r
エンタールピー 関数 三次スプライン	$\frac{\partial h_s}{\partial T} = \theta_0 \rho_s (T_m - T_s) + \int_{T_s}^1 S_{T_s}(T_s - T_s) dT + S_{T_m}(T_m - T_s)$	Procedia Engineering 102 (2015) 877-886 Modeling and experiments of energy storage in a fluidized bed with PCM M. A. Izquierdo-Barrientos, C. Sobrino, J. A. Almendros-Ibáñez <sup>19</sup>								非連続	非対称		

## 1) 見かけの比熱のモデル化

### ① 潜熱変化域比熱一定

$$C(T) = \begin{cases} C_s & T \leq T_{m-} - \epsilon \\ \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{L}{2\epsilon} & T_{m-} - \epsilon < T < T_{m+} + \epsilon \\ C_l & T \geq T_{m+} + \epsilon \end{cases}$$

5

潜熱変化域で比熱が一定とするモデルである。Saleh Nasser Al-Saadi ら<sup>7)</sup>の研究で扱われている他、モデル化自体は簡単なため、様々な研究やシミュレーションソフトで使用されている。

温度域が変化する際に、比熱が不連続な挙動を示す。顕熱については、固相域と液相域で異なる比熱を与える場合、このモデルに限らず、潜熱変化域では、固相域と液相域の比熱の平均値を与える方法や、潜熱変化開始時と終了時の温度と比熱を線形補完する方法が一般的である。

10

温度や固層率は、以下のように表現される。

$$T_p = \begin{cases} \frac{h_p}{C_s}, & h_p \leq C_s \times (T_{m-} - \epsilon) \\ \frac{h_p + [((C_l - C_s)/2) + (L/(2 \times \epsilon))] \times (T_{m-} - \epsilon)}{[(C_l + C_s)/2] + (L/(2 \times \epsilon))}, & C_s \times (T_{m-} - \epsilon) < h_p < C_l \times (T_{m+} + \epsilon) + L \\ \frac{h_p - (C_s - C_l) \times T_{m-} - L}{C_l}, & h_p \geq C_l \times (T_{m+} + \epsilon) + L \end{cases}$$

$$f_l = \begin{cases} 1, & \text{if } T > T_L \\ \frac{(T - T_s)}{(T_L - T_s)}, & \text{if } T_s \leq T \leq T_L \\ 0, & \text{if } T < T_s \end{cases}$$

15

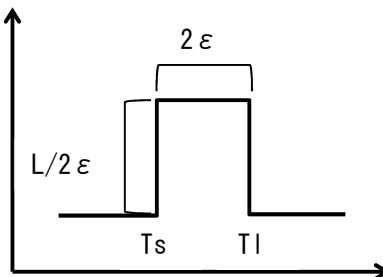


図 2.1.19 見かけの比熱モデルのイメージ(横軸)PCM 温度(縦軸)見かけの比熱

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

図 2.1.20 理想的・一般的な PCM のエンタルピー曲線（出典: Saleh Nasser Al-Saadi et al,

15 Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced  
building enclosure<sup>7)</sup>

20 潜熱変化域で比熱が一定とするモデルでは、通常、固相域や液相域から潜熱変化域に変化したり、  
潜熱変化域から固相域や液相域に変化したりする際に比熱の変化が大きく、対策なしでは計算誤差が  
大きくなることが多い。Saleh Nasser Al-Saadi ら<sup>7)</sup>の研究では、1 計算ステップ内で収束させる操作を行っ  
ている。下図(b)→(c)は、液相域から潜熱変化域に変化する際に、前ステップの温度より求めた比熱を  
使用するとエンタルピー曲線からのずれが生じるため、温度を修正している。

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

図 2.1.21 計算ステップ内での温度の修正（出典: Saleh Nasser Al-Saadi et al, Systematic evaluation  
of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure<sup>7)</sup>

35

Shilei Lu らの研究<sup>8</sup>では、潜熱変化域で比熱が一定とするものの、昇温と降温で潜熱変化域をそれぞれ与えるモデルを使用して、熱負荷計算ソフト TRNSYS による計算を行っている。しかしながら、昇温過程の途中で降温になる場合や、その逆の場合の詳細な切り替え方法は不明である。

また、TRNSYS による計算結果と、実験棟での測定結果の比較を行っている。実験棟は、2m×2m×2.4m の大きさで、南面にドアが設置されている。実験棟に導入された PCM は、プリン酸と1-ドデカノールの混合物であり、アルミニウムボードにカプセル化して入れられた PCM を壁・天井に設置している。北面には 0.8m×0.5m の単板ガラスの窓がある。測定は夏期に行い、開口部閉の状態での自然室温(5/29～6/5)と、夜間空調時(7/3～7/9)の測定を行っている。

応答性や表面温度の再現性に課題が見られる。

表 2.1.2 実験棟に導入された PCM の性能(出典: Shilei Lu et al, Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio<sup>8</sup>)

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.1.22 自然室温での測定結果と計算結果との比較(出典: Shilei Lu et al, Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio<sup>8</sup>)

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.1.23 夜間空調時の測定結果と計算結果との比較(出典: Shilei Lu et al, Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio<sup>8</sup>)

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

15

図 2.1.24 自然室温での測定結果と計算結果との比較(出典: Shilei Lu at al, Establishment and experimental verification of PCM room' s TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio<sup>8)</sup>)

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

図 2.1.25 夜間空調時の測定結果と計算結果との比較(出典: Shilei Lu at al, Establishment and experimental verification of PCM room' s TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio<sup>8)</sup>)

35



熱負荷計算ソフト EnergyPlus<sup>9</sup>でも、潜熱変化域で比熱が一定のモデルに近いが使用可能である。正確には、ある温度におけるエンタルピーをテーブル入力する方法であり、数点の入力について、ソフト上では線形補完を行う。入力する点数を増やすことで、DSC 等の結果を詳細に入力することも可能である。

5

10

15

20

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.1.26 入力の例とそれに対応する温度とエンタルピーの関係(出典: Input Output Reference, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output<sup>9</sup>)

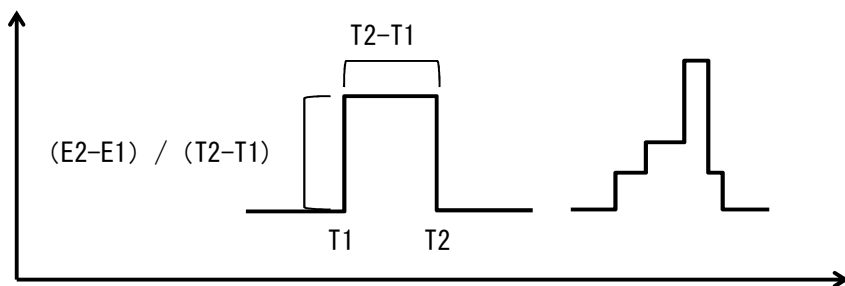


図 2.1.27 見かけの比熱モデルのイメージ(横軸)PCM 温度(縦軸)見かけの比熱

30

EnergyPlus での PCM を含む計算結果例が、Som Shrestha らの研究<sup>10</sup>で示されている。2 階建の住戸を計算対象としたもので、応答性や表面温度の再現性に課題が残る。論文中では、一次元モデルの影響ではないかとの考察がされている。

5  
10  
15  
20  
25

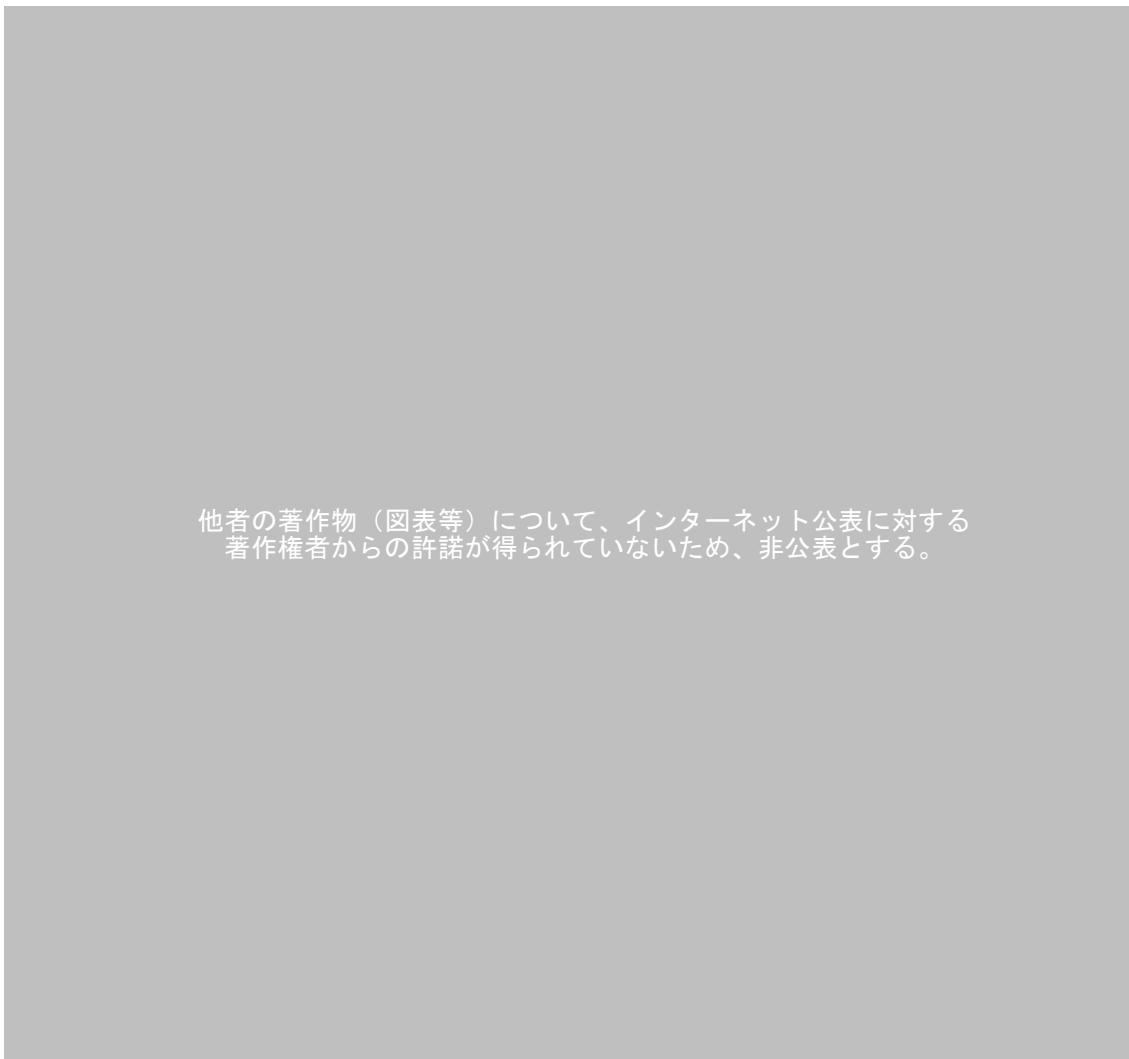


図 2.1.28 測定結果とシミュレーション結果の比較(出典: Som Shrestha et al, Modeling PCM-enhanced insulation system and benchmarking Energyplus against controlled field data<sup>10</sup>)

② 二等辺三角形

比熱を直線的に表現する方法のひとつに、佐藤らによる研究<sup>11)</sup>がある。ここでは、見かけの比熱の形状より、二等辺三角形によるモデル化と表現する。

潜熱容量と固液相変化域が与えられれば、潜熱が温度の関数として決定される。

5 これにピーク温度の情報を追加すると、非対称の三角形のモデル化も可能となる。

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.29 PCM 見かけの比熱のモデル化(出典: 佐藤友紀ら, 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<sup>11)</sup>)

このモデルを使用して計算された室温と、実測を比較した結果が、同論文中で報告されている。

20 使用する試験体は、木質基材と PCM(パラフィン)を PE フィルムでラッピングしたものを一体化した内装建材である。冬期に測定を行い、ダイレクトゲインについて扱っている。

PCMを含む計算で、実測結果の再現の精度が高い。この要因のひとつとして、PCMを含まない実測結果での検証の精度が高く、PCM以外に起因する誤差要因が大方排除されているためと推察される。

25 表 2.1.3 PCM 建材の物性値(出典: 佐藤友紀ら, 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<sup>11)</sup>)

30

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

35

表 2.1.4 試験家屋の概要(出典: 佐藤友紀ら, 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<sup>11)</sup>)

5

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

15

20

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

図 2.1.30 実測値と計算値の比較(出典: 佐藤友紀ら, 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<sup>11)</sup>)

35

③ ガウス関数

$$C_{\text{eff}} = C_s + ae^{-0.5\left(\frac{T-T_m}{b}\right)^2}$$

- 5 K. Darkwa らの研究<sup>12</sup>等で用いられる、潜熱をガウス関数を用いて表現したモデルである。温度帯によらず、比熱が連続のモデルであり、比熱はピーク温度を対称軸とした左右対称な形状である。係数により、潜熱量や潜熱変化域を調整する。

10

15

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

図 2.1.31 温度と比熱の関係(出典: K. Darkwa et al, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building<sup>12</sup>)

$$C = \begin{cases} 4250 + 10,750 e^{-((22.6-T)/4)^2} & \text{if } T \leq 22.6^\circ\text{C} \\ 4250 + 10,750 e^{-((22.6-T)/3)^2} & \text{if } T > 22.6^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

Frédéric Kuznik らの研究<sup>13</sup>では、見かけの比熱ピーク温度の前後でモデルの係数を変更している。測定で把握される見かけの比熱をより忠実に再現できる一方、モデルの切り替えが必要となる。

5

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.32 温度と比熱の関係 実測値とモデルの比較(出典: Frédéric Kuznik et al, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard<sup>13</sup>)

20

$$\begin{cases} c = c_s + (c_{\max} - c_s) \cdot e^{-[(T_{peak}-T)/a_s]^2} & \text{if } T \leq T_{peak} \\ c = c_l + (c_{\max} - c_l) \cdot e^{-[(T_{peak}-T)/a_l]^2} & \text{if } T > T_{peak} \end{cases}$$

Ylenia Cascone らの研究<sup>14</sup>では、一般化された表現がされている。Inverse model により見かけの比熱の推定が行われており、試験結果の再現では、高い再現性が得られている。

5

10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

25

図 2.1.33 (上)比熱推定値と DSC 試験結果を使用した熱流予測値の比較 (下)温度と比熱の関係  
DSC 試験結果と見かけの比熱推定値の比較(出典: Ylenia Cascone et al, Estimation of the thermal  
properties of PCMs through inverse modelling<sup>14</sup>)

30

④ 誤差関数

$$C_p(T) = \Delta h \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(T - T_c)^2}{2 \cdot \omega^2}\right) \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\operatorname{skew} \cdot (T - T_c)}{\sqrt{2} \cdot \omega}\right)\right] + C_{p,average}$$

5 Vasken Dermardiros らの研究<sup>15</sup>で示されているモデルである。誤差関数を含むモデルであり、5 つのパラメータを用いる。ピーク温度に対して非対称で連続的な関数のモデルであり、見かけの比熱の再現性が高い。

昇温時と降温時で係数を別々に与えているが、昇温過程の途中で降温になる場合や、その逆の場合の詳細な切り替え方法は不明である。

10

15

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.1.34 温度と比熱の関係 実測値とモデルの比較(出典: Vasken Dermardiros et al, Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications<sup>15</sup>)



⑤ 双曲線関数

$$c_p(T) = c_{p,const} + \frac{h_2 - h_1}{2} \times \frac{\frac{2\beta}{\tau}}{\cosh^2\left[\frac{2\beta}{\tau}(T - T_m)\right]}$$

Helmut E. Feustel<sup>16)</sup>による双曲線関数  $\cosh$  を使用したモデル化であり、温度帯によらず連続的な関数として表現される。あわせて、エンタルピーでの記述も示されている。

$$h(T) = c_{p,const} T + \frac{h_2 - h_1}{2} \times \left\{ 1 + \tanh\left[\frac{2\beta}{\tau}(T - T_m)\right] \right\}$$

潜熱容量  $h_2-h_1$ 、ピーク温度  $T_m$ 、潜熱変化域に関するパラメータ  $2\beta/\tau$  により潜熱が記述されており、連続的な関数のモデルの中では、比較的、パラメータの意味を直感的に把握しやすいモデルである。

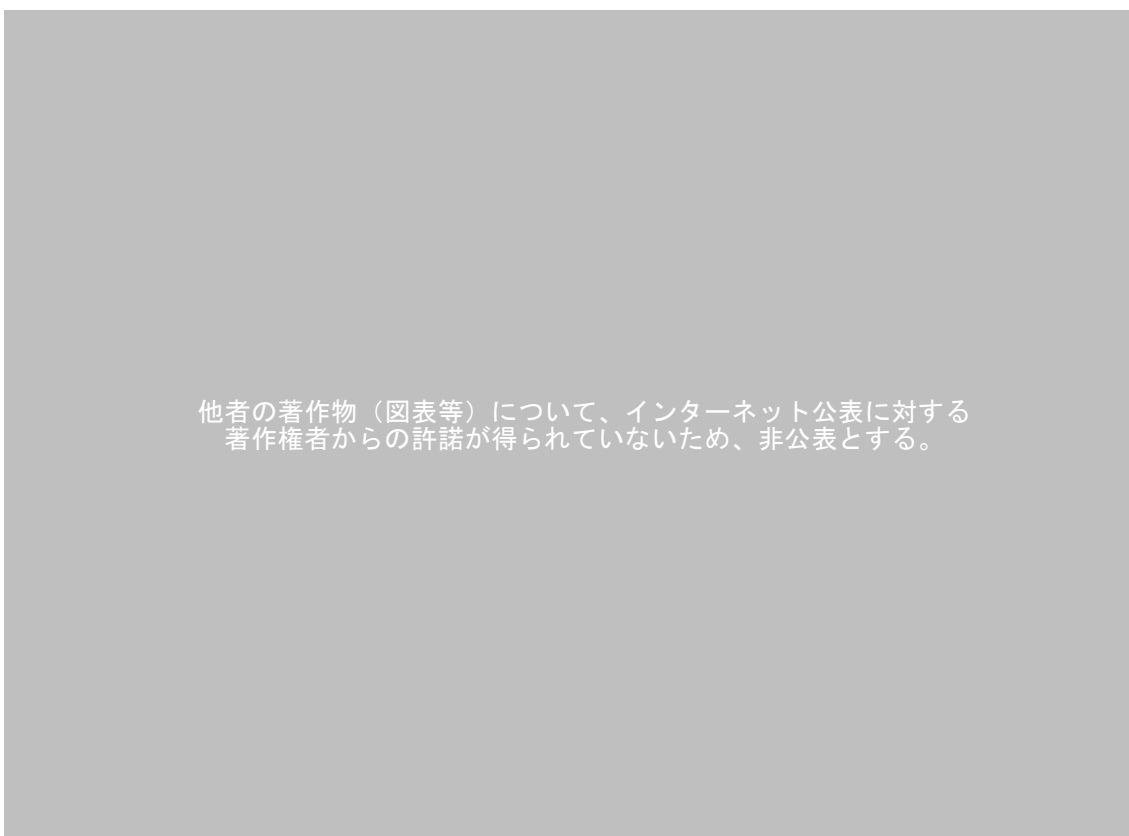


図 2.1.35 双曲線関数を使用して表現される比熱とエンタルピー（上）潜熱（下）全熱（出典: Helmut E. Feustel: Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard<sup>16)</sup>）

⑥ ESP-r におけるモデル

$$LH(T) = \int_{T_1}^{T_2} T^f \left( \frac{a + cT + dT^2}{1 + b + eT^2} \right) dt$$

5 シミュレーションソフト ESP-r では、様々なモデルが選択可能であり、そのひとつとして上式<sup>17</sup>が使用可能である。このモデル化により表される比熱の例が、下図である。

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.1.36 温度と比熱の関係（上）融解時（下）凝固時（出典: Ali Fallahi et al, Numerical thermal performance analysis of PCMs integrated with residential attics<sup>17</sup>）

20

このモデルを使用し、室空気温度や外表面温度等を入力して壁面の熱流を計算した結果を、実測と比較した結果が示されている。実測結果の熱流の再現性が高いが、計算対象が壁体のみであるため、建物全体を解く場合と比較して不確定要素が小さいことが要因の一つとして考えられる。

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

図 2.1.37 壁体を通過する熱流 測定と計算の比較（出典: Ali Fallahi et al, Numerical thermal performance analysis of PCMs integrated with residential attics<sup>17</sup>）

他に、ESP-rでは、下図のモデル<sup>18</sup>も使用可能である。



図 2.1.38 ESP-rで使用可能なモデルの例(出典: Anna Machniewicz et al, Modelling of latent heat storage in PCM modified components<sup>18</sup>)

30

## 2) エンタルピーのモデル化

### ① 三次スプライン関数

$$\frac{\partial \hat{i}_d}{\partial \hat{t}} = \hat{U}_d R_{a-s} (\hat{T}_{in} - \hat{T}_d) + \int_0^1 St_{b-s} (\hat{T}_b - \hat{T}_d) d\hat{x} + St_{wi-s} (\hat{T}_w - \hat{T}_d)$$

5

M.A. Izquierdo-Barrientos らによる研究<sup>19)</sup>において、以下の熱平衡式をエンタルピー*i*に関して記述したものである。

$$(\rho_a \varepsilon c_{p,a} + \rho_s (1 - \varepsilon) c_{p,s}) A_d L \frac{\partial T_d}{\partial t} = G_d \rho_a c_{p,a} (T_{in} - T_d) + \int_0^L H_{bc} \delta A (T_b - T_d) dx + A_{wi} h_w (T_w - T_d)$$

10

温度とエンタルピーの関係は、DSC より得られる結果を、三次スプライン補完で補完して使用する。

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 2.1.39 (左)DSC による比熱測定結果 (右)三次スプライン関数で補完したエンタルピー(出典:  
M.A. Izquierdo-Barrientos et al, Modeling and experiments of energy storage in a fluidized bed with  
PCM<sup>19)</sup>)

25

(2) 融解過程と凝固過程で異なる見かけの比熱やエンタルピー曲線を用いる場合の課題

PCM の見かけの比熱の測定結果は一般に融解過程と凝固過程で異なるものの、測定は融解過程、凝固過程の単調な温度変化条件で行うものが多く、融解途中に凝固過程に移行する条件や、その逆の温度変化条件での測定を行った例は少ない。例として Xing らの研究<sup>20</sup>が挙げられ、1種類の PCM 5 について測定を行い、加熱または冷却の単調な温度変動時の見かけの比熱を測定する DSC よりも正確に融点温度を決定する方法が提案されているが、測定結果を計算に反映させる段階には至っていない。また、2.1.2(1)のモデルは融解過程と凝固過程で同一のモデルを使用するものが多く、中にはモデルの係数を融解過程と凝固過程で区別して記載した研究も見られるが、融解過程と凝固過程の切り替えの詳細は不明である。過冷却を扱う研究<sup>21</sup>も存在するが、融解過程と凝固過程での相変化温度の差 10 や、過冷却とその解除を考慮したモデルとなっているものの、融解過程と凝固過程の切り替えの詳細や、過冷却解除後に完全に凝固し切らないうちに融解に移行する場合の扱いについては、明確になっていない。

しかしながら、融解過程と凝固過程で異なる相変化温度を有する PCM を導入した建物での年間熱負荷計算を想定すると、日単位で完全に相変化温度域を跨ぐとは限らない。例えば、日中に外気温上昇や日射のために融解過程にあった PCM が完全に融け切らない内に、夜となり外気温の低下に伴い凝固過程に移行する状態が発生し得る。このような現象を計算により再現する際、融解過程から凝固過程への移行時において、融解過程の見かけの比熱特性を凝固過程に移行した後も使用可能か、もし凝固過程移行後に凝固過程の見かけの比熱特性を使用すべきであれば移行時にどのように熱収支を担保するか、もしくは移行時には融解過程と凝固過程の中間的な見かけの比熱特性曲線を使用すべきか、などの検討が必要である。このような検討にあたっては、融解過程から凝固過程へ、また、凝固過程から融解過程へ移行する条件での測定を行い、移行過程に関する情報を蓄積し、計算へ反映させる必要がある。

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.1.40 既往研究における、融解過程と凝固過程での相変化温度の差や過冷却の考慮(出典: 都合奈津子ら, 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)<sup>21</sup>)

### 2.1.3 PCMの負荷削減効果、省エネルギー効果に関する研究

既往研究において、PCMによる建物の負荷削減効果や省エネルギー効果は、実験棟実測により把握されている例が多い。

例えば、実験棟を用いた測定<sup>22</sup>では、PCMを床に配置(特に南側開口部正面部に重点的に配置)した棟について、代表日において、電気ストーブによる暖房の消費電力量がBlank棟に対して10%程度削減されたとの効果が示されている。

別の実験棟を用いた測定<sup>23</sup>では、連続暖房運転での測定において、PCM室の期間平均暖房量削減率は26%であるとの結果が示されている。

5章において測定結果を計算との比較に使用する実験棟では、暖房およびオーバーヒート時の排熱処理を行う条件で、測定およびシミュレーションを行っている<sup>24,25</sup>。その結果、床・天井併用蓄熱による冬期3か月の暖房負荷削減効果は、床蓄熱のみと比較し、25%程度であることが示されている。

これらの実験棟は、比較的、断熱性能の水準が高く、床面積に対して開口部が大きく日射熱取得性能が高い傾向がある。そのため、暖房負荷や暖房エネルギーの削減効果が比較的大きいものと推察される。また、暖房設定温度よりも相変化温度の高いPCMを導入し、暖房連続運転とすることで、日射熱取得を暖房負削減に有効に活用しているものと推察される。なお、相変化温度が暖房設定温度よりも低いPCMを導入すると、間歇暖房運転の暖房停止時に温度低下を抑制する効果を有するが、暖房負荷が増大する可能性があるかと推察される。

20

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

図 2.1.41 既往研究における、PCMの暖房消費電力量削減効果とその把握に用いられた実験棟概要  
(出典:佐藤友紀ら, 潜熱蓄熱建材の効率的利用に関する研究<sup>22</sup>)

30

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

図 2.1.42 既往研究における、PCM の暖房量削減効果とその把握に用いられた実験棟概要（出典：  
草間友花ら，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 2<sup>23</sup>）

15

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

図 2.1.43 既往研究における、PCM の暖房負荷削減効果とその把握に用いられた実験棟概要（出典：  
堀内耀介ら，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<sup>25</sup>）

30

一方、既往研究において、PCM 導入が住宅の暖房負荷やエネルギーへ与える影響は、シミュレーションにより検討されている。

実大 4 室モデルによるシミュレーション<sup>26</sup>では、断熱性能が現行省エネルギー基準を上回る条件 (TYPE3) で、蓄熱なしの暖房負荷が 2600MCal/年程度であるのに対し、PCM 導入のケースでは  
5 2200MCal/年程度となっている。PCM 導入による暖房負荷削減率は、15%程度である。

空気循環に動力を使用する方式としては、床下に設置した PCM に、小屋裏日射熱や 1 階居室の余剰熱を蓄熱させるシステムの検討について、検討が実施されている<sup>27</sup>。空気循環回数や床下の蓄熱容量にもよるが、シミュレーションにより、最大で 30%程度の暖房負荷削減効果が示されている。ただし、暖房負荷削減割合が最大となるケースは、床下の PCM 設置量が床下容積の 100.0vol%であり、実用的な設置条件下での暖房負荷削減割合は、これより低下するものと推察される。  
10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 2.1.44 既往研究における、PCM の住宅暖房量削減効果(出典: 松岡大介ら, 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<sup>26</sup>)

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

35

図 2.1.45 既往研究における、PCM の住宅暖房量削減効果(出典: 名倉哲志ら, パラフィン系材料の  
潜熱蓄熱による住宅暖房負荷の軽減 その 2<sup>27</sup>)



## 2.2 温熱環境の評価に関する研究

### 2.2.1 健康面

#### (1) 健康リスク要因の評価指標

近年、住宅の温熱環境が居住者の健康に与える影響について、関心が高まっている。

5 スマートウェルネス住宅研究企画委員会では、住宅の温熱環境が居住者の健康に与える影響について、調査を行っている。

下表は、住宅の温熱環境がどのような家庭内事故や疾患と関連があるかについて纏められたものである。これによると、様々な疾患や事故が、冬季の室温の影響を受けており、冬季の室温を適切に保つ必要があると言える。

10

表 2.2.1 家庭内事故、疾患等と関連する温度指標の検討(出典: スマートウェルネス住宅研究企画委員会第3回シンポジウム資料<sup>28)</sup>)

15

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

25

維持すべき冬季の適切な室温の参考として、海外の公的機関による温度指針、規定が示されている。地域により、基準となる温度や、その温度を維持すべき室や時間帯が異なることが確認される。温度については13~21℃が許容値、規定値、推奨値として示されている。室については居間、寝室、居住に使用されている屋内のすべての部分が挙げられる。時間帯について、昼間や夜間の指定のあるものや、  
30 時間帯の区別はないものが見られる。

表 2.2.2 イギリスの例: 冬期住宅内温度指針(英国保健省年次報告書(2010.3))(出典: スマートウェルネス住宅研究企画委員会第3回シンポジウム資料<sup>28)</sup>)

5

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

表 2.2.3 アメリカの例: 東北部8州の室温規程(出典: スマートウェルネス住宅研究企画委員会第3回シンポジウム資料<sup>28)</sup>)

15

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

25

スマートウェルネス住宅研究企画委員会では、これらを参考に、基準値を18°Cと仮に定めて健康リスク要因の評価指標を算出し、住宅内の温熱環境評価を行っている。

本研究でも、これを参考に、暫定的に18°Cを基準温度として、健康に関する評価を行うこととする。

(2) CASBEE 健康チェックリストの暖かさに関する設問の得点

高柳らによる既往研究<sup>29</sup>において、CASBEE 健康チェックリスト<sup>30</sup>の暖かさに関する設問の得点と、主観的健康性の関係が示されている。

CASBEE 健康チェックリストは、居住者自らが住宅性能を評価できることが意図された、居住者の健康維持増進に向けた住環境評価ツールとして開発されている。全 50 項目の設問に対し居住者が「よくある(0点)」、「たまにある(1点)」、「めったにない(2点)」、「ない(3点)」で回答し、住宅の健康度の診断が行われる。このうち暖かさに関する7項目を以下に示す。

表 2.2.4 CASBEE 健康チェックリスト 暖かさに関する設問(出典: 一般社団法人日本サステナブル建築協会, CASBEE 健康チェックリスト, すまいの健康チェックリスト<sup>30</sup>)

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

既往研究<sup>29</sup>では、暖かさに関する得点と主観的健康感の相関が示されている。性別、年代、地域の属性別に集計を行っており、属性にもよるが、概ね、暖かさの得点が0点で冬の風邪の発症率の予測値が80%程度、満点の21点で発症率20~30%程度である。0点と21点では、発症率には、大よそ50~60%の差が生じている。住宅の温熱環境シミュレーション結果を用いて住宅の暖かさに関する得点を算出できれば、健康性の評価(得点に対応する冬の風邪の発症率の予測)ができると考えられる。

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.2.1 暖かさの得点と冬の風邪の発症率(出典: 高柳絵里ら, 健康維持増進に向けた住環境評価ツールの有効性の検証<sup>29</sup>)

## 2.2.2 温熱感・快適性

PCM が温熱環境に与える影響について評価するために、温熱環境評価のための指標に関する既往研究調査を行った。

PCM は、壁・床等の建築躯体に蓄熱を行うため、対流式の空調と比較して、暖房期の放射環境改善に効果があると推察される。また、床に蓄熱する場合は、足下の温熱環境が改善される可能性があると推察されるため、局所的な温熱環境評価のための指標が必要となる。

また、蓄熱容量の増加に伴い、急激な室温変動が抑制される可能性があるため、その評価には、許容可能な温度変動に関する指標が必要となる。

本研究では、7章のケーススタディにおける住宅の温熱環境評価において、以下の全身温冷感、不均一環境下の熱的快適感、非定常な温熱環境の評価のうち、全身の快適感を表す指標である PPD、許容可能な床面範囲、許容可能な作用温度の変化  $1.7^{\circ}\text{C}/30$  分、人体モデルを用いた温冷感や快適感予測を適用した評価を行う。

### (1) 全身温冷感

全身温冷感の予測や評価については、ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup> に示されている。

快適な作用温度と湿度の範囲は、下図の通りである。湿度にもよるが、0.5Clo では作用温度が  $24\sim 28^{\circ}\text{C}$  程度、1.0Clo では  $20\sim 26^{\circ}\text{C}$  程度が許容可能な範囲である。

20

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

35

図 2.2.2 許容可能な作用温度と湿度の範囲(出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

温熱感および快適感の予測指標として広く使用される PMV および PPD の関係は、下図の通りである。PPD が 10% 未満となる範囲は、PMV の絶対値 0.5 未満である。

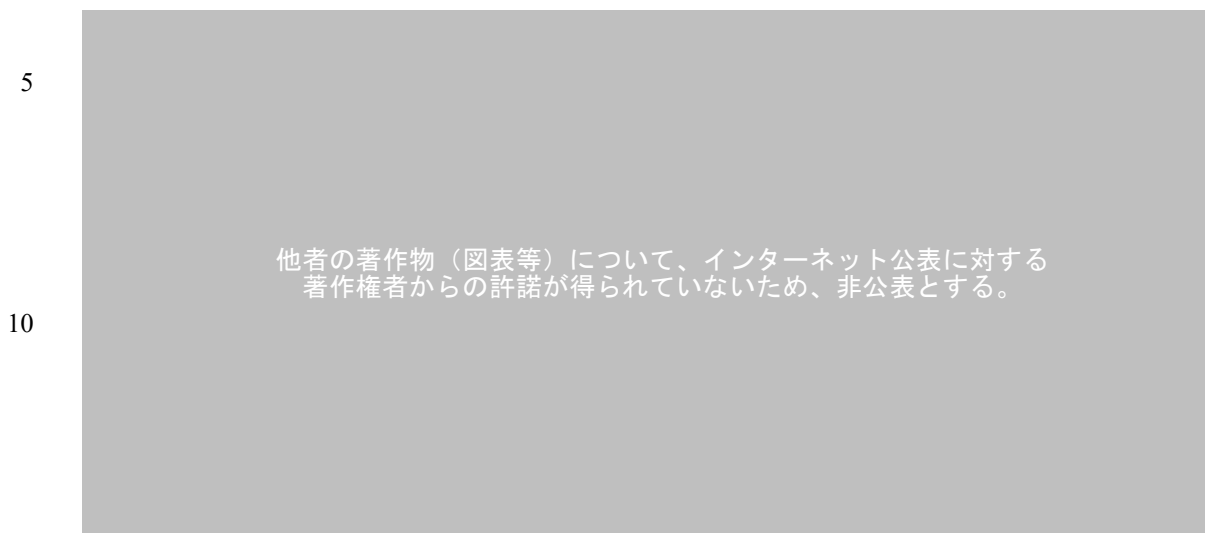
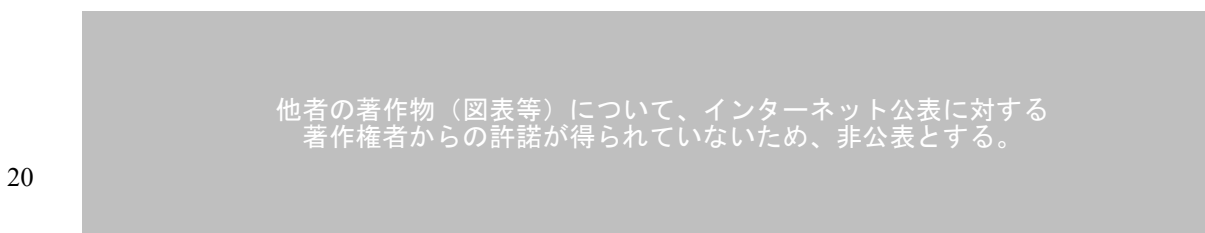


図 2.2.3 PMV の関数として予測される PPD (出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

表 2.2.5 許容可能な全身快適感の範囲 (出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)



快適な作用温度と風速の範囲は、下図の通りである。風速が大きくなるほど、快適な作用温度の範囲は高くなる。暖房時は、空気式暖房の吹出空気が直接人体にあたる場合や隙間風を除いては、風速は 0.1m/s 程度以下と予想される。

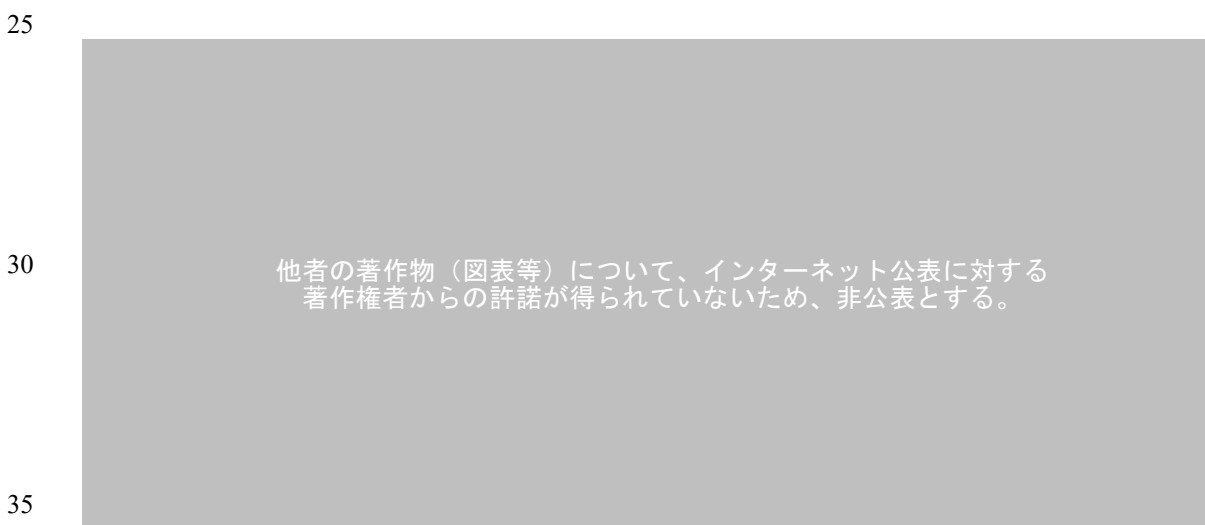


図 2.2.4 許容可能な作用温度と風速の範囲 (出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

## (2) 不均一環境下における熱的快適感

不均一な環境の評価については、ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>に、不均一な放射温度、空気温度の上下温度差、床面温度による局所的な熱的不快感等が示されている。

不均一な放射温度によりもたらされる局所的な熱的不快感は、下図の通りである。不均一さが増すほど、不快を感じる割合も増加する。特に天井の温度が高い場合に不快を感じやすい。

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 2.2.5 不均一な放射温度によりもたらされる局所的な熱的不快感(出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

20

空気温度の上下温度差によりもたらされる局所的な熱的不快感は、下図の通りである。温度差が大きくなるほど、不快を感じる割合も増加する。6°Cの温度差で、不快を感じる割合は40%程度となる。

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

35

図 2.2.6 空気温度の上下温度差によりもたらされる局所的な熱的不快感(出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

床面によりもたらされる局所的な熱的不快感は、下図の通りである。これは、軽量の室内用の靴着用時について示されたものである。24℃程度で最小値をとり、床面温度が低下する側と上昇する側でほぼ対称に、不快を感じる割合も増加する。

5

10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.2.7 床面温度による局所的な熱的不快感（軽量の室内用の靴着用時）（出典：ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31)</sup>

表 2.2.6 許容可能な床面温度範囲（軽量の室内用の靴着用時）（出典：ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31)</sup>

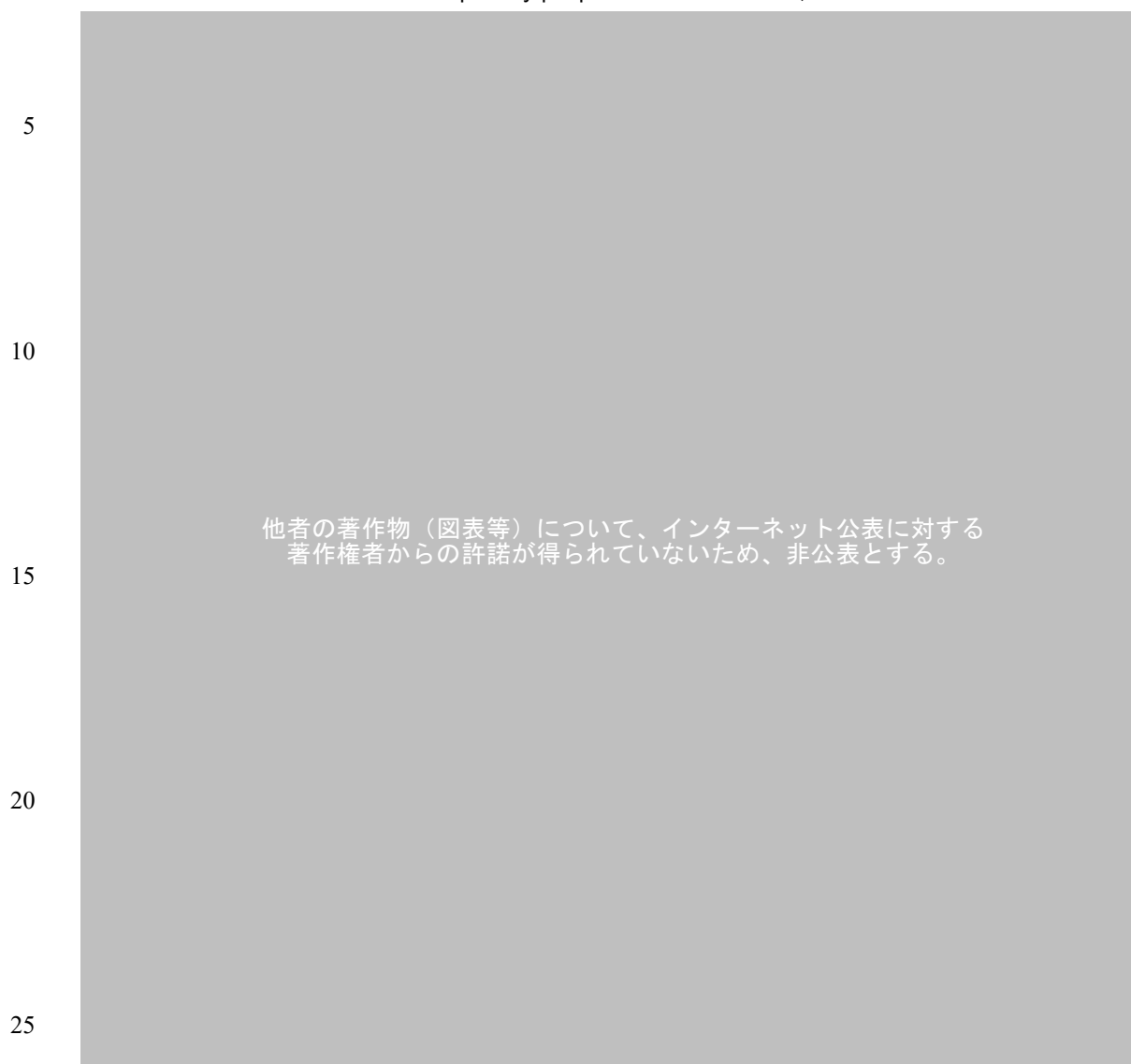
20

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

裸足時の快適な床温度範囲については、既往研究<sup>32)</sup>に示されている。

表 2.2.7 快適な床面温度範囲(裸足時)(出典: B.W. Olesen, Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet <sup>3132</sup>)



上記のうち、床面によりもたらされる局所的な熱的不快感は、住宅の温熱環境の評価に使用可能であると期待される。

30 空気温度の上下温度差について評価するためには、CFD 等により詳細な空気温度分布の予測が必要である。



### (3) 非定常な温熱環境の評価

許容可能な非定常温熱環境については、ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup> に許容可能な作用温度が示されている。15 分以下の周期変動と、それ以外の場合について分けて示されているが、PCM 評価については、主に昼間に蓄熱し夜間に放熱する日単位での変動を扱うため、15 分以下の周期変動以外の指標が使用可能である。許容可能な作用温度の範囲は、15 分で 1.1℃、30 分で 1.7℃、1 時間で 2.2℃、2 時間で 2.8℃、3 時間で 3.3℃となっている。

上記の温度変化を超えない状態が望ましいものとみなして、住宅の温熱環境の評価に適用が可能である。

表 2.2.8 許容可能な作用温度の周期変動(出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

表 2.2.9 許容可能な作用温度の低下(drift)と上昇(ramp)(出典: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010<sup>31</sup>)

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

### (4) 人体モデルを用いた温冷感、快適感の予測

人体モデルを用いた温冷感予測手法として、Gagge の提案した 2-node モデルにより算出される SET\* が広く使用されている<sup>33</sup>。更に、不均一環境の評価が可能となるよう、部位分割を行ったモデルが、多数、提案されている。例えば、既往研究<sup>34</sup>では、2層17部位と中央血液溜まりからなる人体熱数値計算モデル COM が提案されている。また、それを改良する形で、AVA 血管<sup>35</sup>や体躯・年齢・性別<sup>36</sup>が考慮されたモデル JOS が開発されている。

体温変動より温冷感や快適感を予測する手法として、Zhang モデル<sup>37,38,39,40</sup>等が提案されている。Zhang モデルは、環境の非定常性・不均一性を考慮したモデルであり、人体モデルの計算結果を使用することにより、住宅内の非定常温熱環境の評価に使用可能であると考えられる。なお、Zhang モデルの改良の提案に関する研究<sup>41,42,43,44</sup>等も行われている。

## 2.3 住宅の電力料金、電力使用、蓄熱に関する研究

住宅における電力料金とエネルギー使用の関係について、整理を行う。

既往研究<sup>45,46,47</sup>では、電力料金や各種介入と節電行為や電力使用の関連性が指摘されている。

- 5 対象世帯を複数の世帯群にランダムに割り付けを行い、一部の世帯群に対し、30 分間の電力使用量別に 3 段階の電力料金単価を設定と宅内モニタシステムの設置、省エネルギーアドバイスレポートの実施、節電アラートの実施といった介入を行っている。そして、これらの介入が、居住者の節電行動や電力使用に与える影響の確認を行っている。

- 10 例えば、高圧一括受電のもとでの独自料金体系「30 分逓増型料金」では、30 分使用量別に 3 段階の料金単価を設定しており、0.4kWh/h 以下の使用量は約 22 円/kWh(税抜)、0.4~1.5kWh/h は約 28 円/kWh、1.5kWh/h 以上は約 38 円/kWh として課金する仕組みとなっている。各料金ゾーンには「グリーンゾーン」「イエローゾーン」「レッドゾーン」という名称が付けられている。また、宅内モニタは、電力使用の瞬時値が 1.5kW を超えると、外縁部に埋め込まれた赤い LED ランプが自動点灯する仕組みとなっている。調査結果では、レッドゾーンにならないよう意識する世帯が、「そう思う」「まあそう思う」の合計  
15 で約 9 割を占めていた(図 2.3.1)。レッドゾーンは料金単価が最も高く、連動して LED ランプが点灯することが、電気利用の工夫の意識づけに機能していると、指摘されている。

また、節電アラートが、夏期の節電行為や電力使用に影響を与えることが指摘されている(図 2.3.2)。

20

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

図 2.3.1 30 分逓増型料金に対する居住者の反応(出典: 西尾健一郎ら, 集合住宅節電実証で採用した各種介入の評価分析 その 1<sup>45</sup>)

30

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

35

図 2.3.2 節電アラートと節電行為、電力使用の関係(出典: 向井登志広ら, 集合住宅節電実証で採用した各種介入の評価分析 その 3)<sup>47</sup>

上記のように、居住者は電力料金や各種介入の影響を受けて節電行為を実施する傾向が示されている一方、必ずしも省エネルギーな住まい方を選択しているとは言えない側面がある。

既往研究<sup>48</sup>によると、電気系の暖房方式では、エアコンの使用率が最も高いものの、電気ファンヒーター・オイルヒーター・パネルヒーター、電気カーペット、電気こたつ、電気温水パネルヒーター、電気蓄熱式暖房機、電気温水式床暖房といった COP が 1 以下の暖房方式も比較的多く採用されている(図 2.3.3)。

仮に電気ファンヒーター等でエアコンと同じ室内温熱環境を実現しようとする、エアコンの数倍の瞬時の消費電力が発生し、数倍の消費電力量を要することとなる。

10

15

20

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 2.3.3 暖房機器使用率(出典: 石婷ら, アンケートによる住宅設備・機器の使用状況に関する実態調査 その 2<sup>48</sup>)

30

電力料金と蓄熱の関係については、既往研究<sup>49</sup>で言及されている(図 2.3.4)。床下への PCM 設置と、1 階と床下空間の空気循環の組合せにより、昼間の暖房負荷の軽減を図ったものであり、シミュレーションによりその効果の確認を行っている。蓄熱量や空気循環階数にもよるが、最大で、4 割程度の電力料金の削減効果が得られるとの結果が示されている。

- 5 しかしながら、当該既往研究は PCM のアクティブ利用を想定しており、蓄熱に伴う電力料金の低減は期待されるものの、昼間と夜間の合計の暖房負荷は逆に増加しており、省エネルギーが意図されたものではない。

10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 2.3.4 床下蓄熱と空気循環による暖房負荷削減における、空気循環回数および床下蓄熱容量と電気料金の関係(出典: 小野公平ら, パラフィン系材料の潜熱蓄熱による住宅暖房負荷の軽減 その

1<sup>49</sup>)

25

以上を踏まえ、居住者にコスト面でのメリットがあり、かつ、省エネルギーとなる暖房の方式や蓄熱の活用方法の提案が望まれる。

## 2.4 住宅の性能評価に関する研究

住宅の温熱環境や省エネルギー性能が、住宅の性能評価にあたりどのように考慮されているか、居住者にどの程度重視されているかを、既往研究をもとに確認を行う。

### 5 2.4.1 住宅のエネルギー性能や温熱環境を考慮した評価指標の算出方法

住宅を含め、建築物のエネルギー性能や室内環境等を総合的に評価するため、様々な指標が提案されている。以下に例を挙げる。

複数の評価項目を評価に使用する際、複数の評価項目を均等な重みで考慮して総合的を行うものとして、例えば、CASBEE 健康チェックリスト<sup>50</sup>が挙げられる。これは、健康への悪影響が懸念される住まいの状態について、居住者が自己診断を行うために活用することが意図されたものである。また、建物内の人の健康や快適性に焦点を当てた建物・室内環境評価システム WELL Building Standard™ (WELL 認証)<sup>51</sup>では、必須項目と加点項目が存在するものの、各項目に対する重み付けは行われない。

一方、項目の重み付け係数を用いた評価を行うとして、建築物等に係わる環境性能の総合的な評価ツール CASBEE が挙げられる。CASBEE-建築(新築)<sup>52</sup>や CASBEE-戸建(新築)<sup>53</sup>等では、建築物や戸建住宅の環境品質を、環境負荷で除して、環境効率を算出する。環境品質や環境負荷の算出にあたっては、重み係数を用いて各項目の重み付けを行うが、CASBEE-建築(新築)の重み係数は AHP 法により算定されている<sup>54,55</sup>。なお、CASBEE-戸建(新築)に関する既往研究<sup>56</sup>の著者の一人に確認したところ、大項目(QH1~QH3、LHR1~LHR3)は AHP 法により重み係数が算定されており、中項目、採点項目などの細かい項目の重み係数は専門家による議論のもとに決定しているとのことである。

WELL 認証や CASBEE に関連した、日本の執務者の健康に着眼した建物環境評価指標<sup>57,58</sup>の重み係数も、AHP 法により決定されている。

### 2.4.2 実住宅における省エネルギー性能や温熱環境に関する居住者の重視度や満足度

実住宅の居住者の温熱環境の満足度や、温熱環境重視度については、既往研究<sup>59</sup>において調査が実施されている。住宅の温熱環境の評価にあたっては、温熱環境重視度や、満足度に改善の余地のある温熱環境因子の把握を行う必要がある。

住宅設計段階における施主の「冬の暖かさ」の重視度は、1 点刻みで-3 点(全く重視しなかった)から +3 点(非常に重視した)の 7 段階での回答のところ、平均値で 1.46 点であった。同様に、「省エネ・省コスト」の重視度に対する回答は、平均値で 1.26 点であった。

居住開始後の冬季の室用途ごとの室内環境の不満者率(「やや当てはまる」「当てはまる」の回答割合の合計値)について、リビング・ダイニング「床が冷たい」は 24%、リビング・ダイニング「暖房をつけても、なかなか暖まらない」20%、「脱衣室、浴室など暖房していない部屋の温度が低い」48%、「暖房していない寝室で夜から朝にかけて室温が低い」42%である。

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

図 2.4.1 住宅設計段階における住宅性能の重要度(出典: 新富凌汰ら, 新築戸建住宅を対象としたアンケート調査 空間構成の違いを考慮した住宅の温熱環境の満足度に関する研究 その1<sup>59</sup> 評価対象に対応する日本語を追加)

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

25

図 2.4.2 室用途ごとの室内環境の不満(出典: 新富凌汰ら, 新築戸建住宅を対象としたアンケート調査 空間構成の違いを考慮した住宅の温熱環境の満足度に関する研究 その1<sup>59</sup>) 評価対象に対応する日本語を追加

30

8章では、以上を参考に、住宅の総合的な評価を行う方法について、検討を実施する。

35

- 
- <sup>1</sup> Luisa F. Cabeza, Camila Barreneche, Ingrid Martorell, Laia Miró, Sana Sari-Bey, Magali Fois, Halime O. Paksoy, Nurten Sahan, Robert Weber, Mariaella Constantinescu, Elena Maria Anghel, Marta Malikova, Igor Krupa, Mónica Delgado, Pablo Dolado, Piotr Furmanski, Maciej Jaworski, Thomas Haussmann, Stefan Gschwander, A. Inés Fernández: Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, pp. 1399-1414, 2015
  - <sup>2</sup> Xing Jin et al.: Determination of the PCM melting temperature range using DSC, *Thermochimica Acta*, 595, pp.17-21, 2014. 11
  - <sup>3</sup> 山岸康志, 菅野智久, 武内洋, ピアテンコ A.T.: 過冷却を伴ったマイクロカプセル化相変化物質の熱的特性, *Japan journal of thermophysical properties*, 12(1), pp.10-17, 1998. 1
  - <sup>4</sup> ANSI/ASHRAE STANDARD94.1-2002: Method of Testing Active Latent-Heat Storage Devices Based on Thermal Performance
  - <sup>5</sup> EN 14240: 2004, Ventilation for buildings. Chilled ceilings. Testing and rating
  - <sup>6</sup> DIN 4715-1, Cooling/Surfaces for Rooms; Part 1: Measuring of the Performance with Free Flow
  - <sup>7</sup> Saleh Nasser Al-Saadi, Zhiqiang (John) Zhai: Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure, *Energy and Buildings* 92, pp. 374-388, 2015
  - <sup>8</sup> Shilei Lu, Shangbao Liu, Jingyu Huang, Xiangfei Kong: Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio, *Energy and Buildings* 84, pp. 287-298, 2014
  - <sup>9</sup> Input Output Reference, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, *Energy Plus マニュアル*, 2013. 11. 26
  - <sup>10</sup> Som Shrestha, William Miller, Therese Stovall, Andre Desjarlais, Kenneth Childs, Wallace Porter, Mahabir Bhandari, Steven Coley: Modeling PCM-enhanced insulation system and benchmarking Energyplus against controlled field data, *Proceedings of Building Simulation 2011, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, 14-16 November.
  - <sup>11</sup> 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
  - <sup>12</sup> K. Darkwa, P.W. O'Callaghan: Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, *Applied Thermal Engineering* 26, pp. 853-858, 2006
  - <sup>13</sup> Frédéric Kuznik, Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux: Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard, A full-scale experimental investigation, *Energy and Buildings* 40, pp.148-156, 2008
  - <sup>14</sup> Ylenia Cascone, Marco Perino: Estimation of the thermal properties of PCMs through inverse modelling, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015
  - <sup>15</sup> Vasken Dermardiros, Yuxiang Chen, Andreas K. Athienitis: Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications, *Energy Procedia* 78, pp. 1690-1695, 2015
  - <sup>16</sup> Helmut E. Feustel: Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard, 1995
  - <sup>17</sup> Ali Fallahi, Nitin Shukla, Jan Kosny: Numerical thermal performance analysis of PCMs integrated with residential attics, *Fifth National Conference of IBPSA-USA Madison, Wisconsin*, August 1-3, 2012
  - <sup>18</sup> Anna Machniewicz, Dariusz Heim: Modelling of latent heat storage in PCM modified components, 2013. 11. 15
  - <sup>19</sup> M.A. Izquierdo-Barrientos, C. Sobrino, J.A. Almendros-Ibáñez: Modeling and experiments of energy storage in a fluidized bed with PCM, *Procedia Engineering* 102, pp. 877-886, 2015
  - <sup>20</sup> Xing Jin, Xiaodong Xu, Xiaosong Zhag and Yonggao Yin: Determination of the PCM melting

---

temperature range using DSC, *Thermochimica Acta*, Vol. 595, pp. 17-21, 2014

- <sup>21</sup> 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, pp. 221-224, 2008. 5
- <sup>22</sup> 佐藤友紀, 尾崎明仁, 林禎彦, 三箇山茜: 潜熱蓄熱建材の効率的利用に関する研究, 日本建築学会第46回熱シンポジウム資料, pp. 79-84, 2016. 10
- <sup>23</sup> 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2 潜熱蓄熱材を適用したパッシブ住宅における性能評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 539-540, 2014. 9
- <sup>24</sup> 永桶卓朗, 井上隆, 前真之, 佐藤誠, 高瀬幸造, 崔榮晋, 江口剛史, 向島希, 堀内耀介: 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. 7
- <sup>25</sup> 堀内耀介, 井上隆, 前真之, 佐藤誠, 高瀬幸造, 崔榮晋, 江口剛史, 向島希, 永桶卓朗: 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. 7
- <sup>26</sup> 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, pp.671-672, 1994. 7
- <sup>27</sup> 名倉哲志, 小野公平, 尾崎明仁, 松岡大介: パラフィン系材料の潜熱蓄熱による住宅暖房負荷の軽減 その2 年間に亘る小屋裏日射熱による冬季暖房負荷の軽減, 日本建築学会九州支部研究報告, pp. 281-284, 2004. 3
- <sup>28</sup> スマートウェルネス住宅研究企画委員会第3回シンポジウム資料
- <sup>29</sup> 高柳絵里, 伊香賀俊治, 村上周三, 清家剛, 中野淳太: 健康維持増進に向けた住環境評価ツールの有効性の検証, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻, 第670号, pp. 1101-1108, 2011. 12
- <sup>30</sup> 一般社団法人日本サステナブル建築協会: CASBEE健康チェックリスト, すまいる健康チェックリスト
- <sup>31</sup> ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- <sup>32</sup> B.W. Olesen: Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, 1997
- <sup>33</sup> A.P. Gagge, A.P. Fobelets L.G. Berglund: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, *ASHRAE Trans*, Vol. 92, Part 2, pp.709-731, 1986. 1
- <sup>34</sup> 田辺新一, 小林弘造, 小川一晃: 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発, 日本建築学会環境系論文集, 第599号, pp.31-38, 2006年1月
- <sup>35</sup> 徐莉, 佐藤孝広, 小川一晃, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その22): 体温調節モデルJOSの開発-AVAを含む血管系の考慮, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.361-362, 2002年6月
- <sup>36</sup> 佐藤孝広, 小川一晃, 徐莉, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その23): 体温調節モデルJOSの開発-体躯・年齢・性別の考慮, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.363-364, 2002年6月
- <sup>37</sup> H. Zhang: Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments, 2003.
- <sup>38</sup> Hui Zhang, Edward Arens, Charlie Huizenga, Taeyoung Han: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts, *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 380-388, 2010. 2
- <sup>39</sup> Hui Zhang, Edward Arens, Charlie Huizenga, Taeyoung Han: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts, *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 389-398, 2010. 2
- <sup>40</sup> Hui Zhang, Edward Arens, Charlie Huizenga, Taeyoung Han: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort, *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 399-410, 2010. 2
- <sup>41</sup> 尾関義一, 中村俊太, 尾方壮行, 宮嶋裕基, 鈴木雅一, 田辺新一: 体温調節モデルを用いた局所温冷感予測手法の開発, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第727号, pp. 795-802, 2016.



- <sup>42</sup> 尾関義一, 宮嶋裕基, 尾方壮行, 浅賀潤一, 野元彬久, 田辺新一: 人間—熱環境系快適性数値シミュレータ(その 58) 非定常部位別温冷感予測モデル開発のための被験者実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 251-252, 2017. 7
- <sup>43</sup> 宮嶋裕基, 尾関義一, 尾方壮行, 浅賀潤一, 野元彬久, 田辺新一: 人間—熱環境系快適性数値シミュレータ(その 59) 非定常部位別温冷感予測モデル開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 253-254, 2017. 7 人間—熱環境系快適性数値シミュレータ(その 59) 非定常部位別温冷感予測モデル開発
- <sup>44</sup> 浅賀潤一, 宮嶋裕基, 尾方壮行, 尾関義一, 野元彬久, 田辺新一: 人間—熱環境系快適性数値シミュレータ(その 60) 体温調節モデル JOS-2 の予測結果を用いた全身温冷感検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 255-256, 2017. 7
- <sup>45</sup> 西尾健一郎, 向井登志広, 小松秀徳, 内田鉄平, 石田恭子: 集合住宅節電実証で採用した各種介入の評価分析 その 1 電力使用量見える化システムと料金体系, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 817-818, 2015. 9
- <sup>46</sup> 小松秀徳, 向井登志広, 西尾健一郎, 内田鉄平, 石田恭子: 集合住宅節電実証で採用した各種介入の評価分析 その 2 省エネルギーアドバイスレポート, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 819-820, 2015. 9
- <sup>47</sup> 向井登志広, 小松秀徳, 西尾健一郎, 内田鉄平, 石田恭子: 集合住宅節電実証で採用した各種介入の評価分析 その 3 節電アラート, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 821-822, 2015. 9
- <sup>48</sup> 石婷, 桑沢保夫, 三浦尚志, 岸田真一, 中村美紀子: アンケートによる住宅設備・機器の使用状況に関する実態調査 その 2 暖房機器の使用状況に関する分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 989-990, 2010. 7
- <sup>49</sup> 小野公平, 名倉哲志, 尾崎明仁, 松岡大介: パラフィン系材料の潜熱蓄熱による住宅暖房負荷の軽減: その 1 計算条件及び夜間電力利用による経済効果, 日本建築学会九州支部研究報告, pp. 277-280, 2004. 3
- <sup>50</sup> [http://www.ibec.or.jp/CASBEE/casbee\\_health/index\\_health.htm](http://www.ibec.or.jp/CASBEE/casbee_health/index_health.htm) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会: CASBEE 健康チェックリスト, すまいの健康チェックリスト
- <sup>51</sup> [https://www.gbj.or.jp/well/about\\_well/](https://www.gbj.or.jp/well/about_well/)
- <sup>52</sup> [http://www.ibec.or.jp/test/CASBEE/CASBEE\\_outline/new\\_building.html](http://www.ibec.or.jp/test/CASBEE/CASBEE_outline/new_building.html)
- <sup>53</sup> [http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas\\_home/cas\\_home.htm](http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas_home/cas_home.htm)
- <sup>54</sup> 半澤久, 村上周三, 佐藤正章, 伊香賀俊治, 秋元孝之, 小野寛也: 建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究(その 21) AHP 法による「CASBEE:新築」の評価項目の重み係数の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1107-1108, 2004. 07
- <sup>55</sup> 伊香賀俊治, 佐藤正章, 高井啓明, 吉澤伸記, 遠藤純子, 溝口奈穂: 建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究 その 77 : AHP 法による評価項目間の重み係数の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1087-1088, 2008. 07
- <sup>56</sup> 清家剛, 村上周三, 秋元孝之, 近田智也, 山中 裕二: 建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究 (その 51) : (仮称)「CASBEE-戸建住宅」の評価項目, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 949-950, 2006. 07
- <sup>57</sup> 藤澤順太, 對馬聖菜, 伊藤安里, 高橋周平, 久保隆太郎, 田辺新一: 執務者の健康を考慮した建物環境性能評価に関する研究 (その 1) 日本における健康評価指標の提案および実オフィス評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, pp. 345-348, 2016. 9
- <sup>58</sup> 伊藤安里, 對馬聖菜, 高橋周平, 藤澤順太, 久保隆太郎, 田辺新一: 執務者の健康を考慮した建物環境性能評価に関する研究 (その 2) 日本オフィスを対象とした WELL 認証評価項目の適用と健康向上度分析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, pp. 349-352, 2016. 9
- <sup>59</sup> 新富凌汰, 大石幸奈, 鈴木信恵, 佐藤誠, 前真之: 新築戸建住宅を対象としたアンケート調査 空間構成の違いを考慮した住宅の温熱環境の満足度に関する研究 その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 744 号, pp. 149-157, 2018. 2

### 第3章 ペルティエ装置を用いた PCM の熱特性の測定に関する提案

### 3. ペルティエ装置を用いた PCM の熱特性の測定に関する提案

5 本章は、測定により、建築物に導入される状態に近い状態での PCM の挙動の把握を行うことや、測定方法に関する提案を行うことを目的とする。また、次章において、本章で得られた測定データを、一次元熱伝導計算に使用する。建材試験センターにおいて実施された、PCM の見かけの比熱等の熱物性の測定について、以下に測定概要および結果を示す。なお、本章は、既発表<sup>1</sup>の内容を含む。

#### 3.1 測定概要

##### 3.1.1 目的

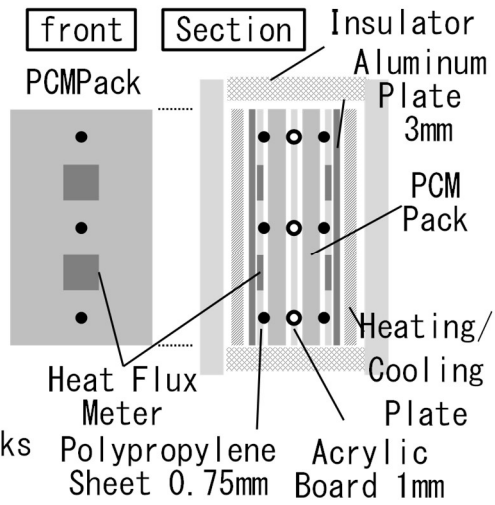
10 建築物に導入される状態に比較的近い、パックに封入された状態での PCM の測定を行い、実使用に近い状態での PCM の挙動の把握を行う。また、測定方法に関する提案を行う。測定で得られた結果は、次章で熱伝導計算の精度の確認に使用する。計算での PCM の熱伝導率や見かけの比熱の与え方、融解時と凝固時で異なる見かけの比熱曲線の切り替え方法等について、測定結果をもとに次章で検討する。

##### 15 3.1.2 測定および装置の概要

測定は、一般財団法人建材試験センターの中央試験所にて実施した。

20 測定には、面材の建材の測定が可能な、図 3.1.1 左に示す装置<sup>2</sup>(以下、「ペルティエ装置」)を使用した。ペルティエ装置は 300mm 角の 2 枚の加熱冷却板(以下、熱板)で試験体を挟む構造となっており、それぞれの熱板は 2×2 に配置された 4 つのペルティエ素子により加熱・冷却される。熱板表面に白金測温抵抗体 Pt100 を埋め込んだ 3mm 厚のアルミ板を重ねており、この制御用温度センサーと目標温度入力値からペルティエ素子に電圧を与えている。試験体の周囲は外部との熱移動を防ぐため、小口を断熱材で覆っている。

25 層間温度および熱流の測定点を以下に示す。それぞれ、T 型熱電対(径 0.2mm)と 50mm 角の熱流計を用いて測定を行った。PCM 代表温度の取り方の検討のため、PCM 外側表面温度に加え、2 枚の PCM の中間の温度(以下、「中心温度」または「内側表面温度」)を測定している。熱流計と温度測定点は、試験体により、数の変更や、平面方向への測定位置の移動を行っている。



- Temperature of PCM Surface
- Temperature between PCM Packs
- Heat Flux Meter 50mm×50mm

図 3.1.1 ペルティエ装置概要

### 3.1.3 見かけの比熱およびエンタルピーの算出方法

5 見かけの比熱およびエンタルピーは以下の式により、見かけの比熱は 0.5°C 刻みで、算出を行う。

$$c(T) = \frac{A}{M\Delta T} \sum_{t=t_T-\Delta T/2}^{t_T+\Delta T/2} q\Delta t \quad (3-1)$$

$$E(T) = \frac{A}{M} \sum_{t=t_{Ts}}^{t_T} q\Delta t \quad (3-2)$$

$T$  : 代表温度 [°C] PCM 外側表面温度、PCM 中心温度、もしくはその重み付け平均温度を用いる。複数の測定点の測定結果の平均値を用いる。

10  $\Delta T$  : 代表温度の温度変化 [K]

$c(T)$  : 代表温度  $T$  [°C] における見かけの比熱 [J/(g·K)]

$E(T)$  : 基準温度  $T_s$  [°C] におけるエンタルピー (0J/g) に対する、代表温度  $T$  [°C] におけるエンタルピー [J/g]

15  $q$  : 熱流 [W/m<sup>2</sup>] 2 枚重ねた試験体外側のそれぞれの側についての合計値。同一面の熱流を複数枚の熱流計で測定を行っている場合は、各面について平均をとった上で、合計した値。試験体に流入する熱流を正とする。

$A$  : 試験体が熱板に接する面積 [m<sup>2</sup>]

$M$  : 2 枚の試験体の合計の質量 [g]

$t$  : 時刻 [s]

20  $t_T$  : 代表温度が  $T$  [°C] となる時刻 [s]

$\Delta t$  : 時間間隔[s]

なお、ASTM C518-10<sup>3</sup>(熱流計法による定常状態における板状、面状の試験体の熱伝導率の測定)では、熱流計の熱容量や小口からの熱損失等を考慮した補正を行っている。より正確な測定のために  
5 は同様の補正が必要であるが、本研究では潜熱量の絶対値よりも潜熱が発生する温度に着目していること、熱流計の厚さが PCM と比較し小さいため見かけの比熱測定結果への影響が小さいと推察されること、小口からの熱損失は PCM へ流入する熱量と比較し小さいことより、ここでは補正を省略する。

PCM 外側表面温度、PCM 中心温度、もしくはその重み付け平均温度を用いる。重み付け平均温度  
10 は、中心温度割合に応じ、以下の式により算出する。

$$T_w(a) = (1 - a)T_{sPCM} + a T_{cPCM} \quad (3-3)$$

a : 中心温度割合[-]

$T_w(a)$  : 中心温度割合 a における重み付け平均温度[°C]

15  $T_{sPCM}$  : 外側表面温度[°C]

$T_{cPCM}$  : 中心温度[°C]

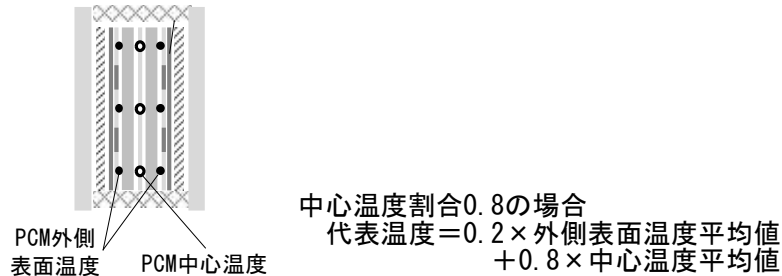


図 3.1.2 外側温度と中心温度の重み付け平均温度の取り方

20

ここで、比較的熱伝導率が高く見かけの比熱のピークがシャープな PCM の見かけの比熱測定を想定し、PCM 体積平均温度と重み付け平均温度が一致する中心温度割合について、簡単に考察する。

PCM の相変化中は、PCM 厚み方向の温度分布は時々刻々変化するため、PCM 体積平均温度と重み付け平均温度を一致させる中心温度割合は時々刻々変化する。相変化開始からの経過時間が短い  
25 内は、温度制御面に近い外側表面付近を除き、PCM の多くの部分が相変化温度付近の温度を取るため、同じく相変化温度付近の温度を取る中心温度の割合が高くなる。時間が経過するほど、相変化温度から外れる部分が多くなり、相変化温度付近の温度を取る中心温度の割合は低くなると推察される。

PCM 厚み大きい場合には、相変化開始からの経過時間が短い内は、外側表面温度は温度制御面の温度につられて変化するのに対し、PCM 内部は相変化温度付近の温度を取る部分が多く、中心  
30 温度割合は大きい値を取り得ると推察される。

### 3.1.4 測定対象の PCM 試験体

対象とした PCM は、以下のとおり。いずれも PCM がフィルムパックに封入されている。

表 3.1.1 対象とした PCM

	PCM 種類	呼称		備考
		ゲルなし	ゲルあり	
見かけの比熱ピークが単数の PCM	パラフィン（ノルマルオクタデカン）	PCM① ゲルなし	PCM① ゲルあり	昇温時と降温時のエンタルピー曲線が比較的一致することを想定
降温時の見かけの比熱ピークが複数の PCM	パラフィン（オクタデカンとヘキサデカンの混合物）	PCM② ゲルなし	PCM② ゲルあり	昇温時と降温時のエンタルピー曲線が異なることを想定
顕著な過冷却が生じる PCM	硫酸ナトリウム水和物	—	PCM③ ゲルあり	昇温時と降温時のエンタルピー曲線が異なり、過冷却が生じることを想定

5



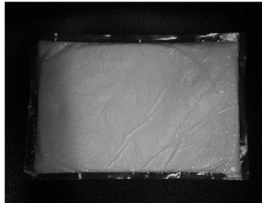
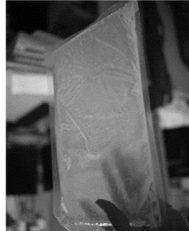


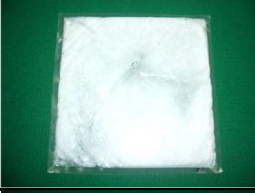



	固相時	液相時
PCM① ゲルなし		
PCM① ゲルあり		
PCM② ゲルなし		
PCM② ゲルあり		
PCM③ ゲルあり		

図 3.1.3 対象とした PCM の概観

### 3.2 熱伝導率の測定

非定常熱伝導計算に使用するため、PCM 熱伝導率の測定を実施した。

#### (1) PCM①ゲルなし

- 5 PCM①ゲルなしの熱伝導率について、ペルティエ装置を用いて測定を行った。特に、液相域で、熱流方向の違いによる差の有無の確認を行った。上下の熱流方向の違いについては、ペルティエ装置を水平に設置して測定を行い、水平方向の熱流は、ペルティエ装置を縦に設置して測定を行った。

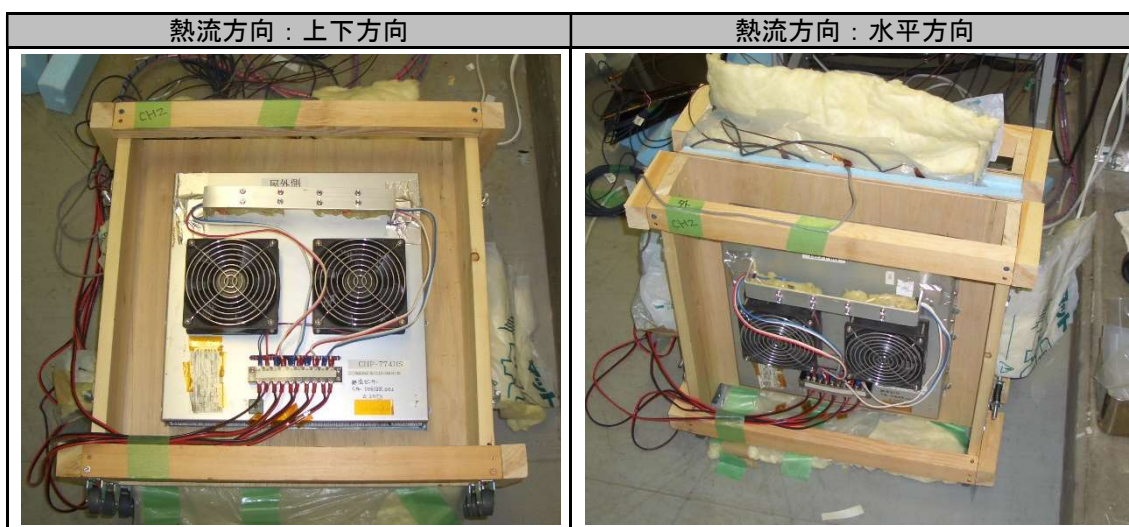


図 3.2.1 熱伝導率測定状況

10

測定結果は以下のとおり。熱流向きにより、熱伝導率が大きく変化することが確認される。そのため、計算により PCM の相変化挙動の予測を行う際には、液相時の熱流向きによる熱伝導率の差を考慮すべきであることが示唆される。

15

表 3.2.1 熱伝導率測定結果 PCM①ゲルなし

PCM①ゲルなし	厚さ	平均温度	温度差	熱流密度	熱伝導率
	mm	°C	°C	W/m <sup>2</sup>	W/(m・K)
液相 下向熱流	17	37.7	12.7	137.9	0.18
液相 上向熱流	17	38.3	8.1	352.2	0.74
液相 水平熱流 (右→左)	17	38.3	9.4	346.2	0.62
液相 水平熱流 (左→右)	17	38.0	9.2	350.0	0.65

※熱伝導率 2 桁目は参考値

また、固相時を熱流計法 (JIS A 1412-2) により測定したところ、0.25W/(m・K) (厚さ 16.5mm、平均温度 12.3°C、温度差 10.4°C、熱流密度 154.75W/m<sup>2</sup>) であり、固相時と液相時の熱伝導率の差についても、計算において考慮すべきことが示唆される。

20

(2) PCM①ゲルあり

PCM①ゲルありの熱伝導率について、熱流計法熱伝導率測定装置(試験体寸法 300 角用)で測定を行った。

固相域で液相域よりも熱伝導率が大きく、熱伝導率は熱流向きの影響を受けないことが確認される。

5

表 3.2.2 熱伝導率測定結果 PCM①ゲルあり

PCM①ゲルあり	厚さ	平均温度	温度差	熱流密度	熱伝導率
	mm	°C	°C	W/m <sup>2</sup>	W/(m・K)
液相 下向熱流	15.7	37.6	7.3	75.8	0.16
液相 上向熱流	15.7	37.3	7.7	81.0	0.17
固相 水平熱流 (右→左)	13.9	10.0	6.3	139.1	0.31
固相 水平熱流 (左→右)	13.9	10.1	6.3	143.1	0.32

※試験体の表面に大きな凹凸があるため、参考値

(3) PCM②ゲルなし・PCM②ゲルあり

PCM②ゲルなし、PCM②ゲルありの熱伝導率の測定結果を以下に示す。測定は、ペルティエ装置を用いて行った。

ゲルなしの液相時の熱流向きによる熱伝導率の差や、液相時と固相時の熱伝導率の差に注意が必要である。

10

表 3.2.3 熱伝導率測定結果 PCM②

PCM②ゲルなし	厚さ	平均温度	温度差	熱流密度	熱伝導率
	mm	°C	°C	W/m <sup>2</sup>	W/(m・K)
液相 上向熱流	20	34.9	8.6	259.9	0.60
液相 下向熱流	20	35.1	10.1	85.0	0.17
液相 水平熱流	20	33.8	10.4	213.1	0.41
固相 水平熱流	20	9.7	9.7	92.3	0.19
PCM②ゲルあり	厚さ	平均温度	温度差	熱流密度	熱伝導率
	mm	°C	°C	W/m <sup>2</sup>	W/(m・K)
液相 水平熱流	20	35.6	11.1	77.3	0.14
固相 水平熱流	20	10.6	10.3	74.4	0.14
固液混相 水平熱流	20	15.2	6.4	47.7	0.15

15

(4) PCM③ゲルあり

PCM③ゲルありの熱伝導率の測定結果を以下に示す。測定は、ペルティエ装置を用いて行った。

液相時と固相時の熱伝導率の差が小さいことが確認される。

20

表 3.2.4 熱伝導率測定結果 PCM③

PCM③ゲルあり	厚さ	平均温度	温度差	熱流密度	熱伝導率
	mm	°C	°C	W/m <sup>2</sup>	W/(m・K)
液相 水平熱流	19	40.2	8.6	233.8	0.52
固相 水平熱流	19	10.1	8.9	254.1	0.54

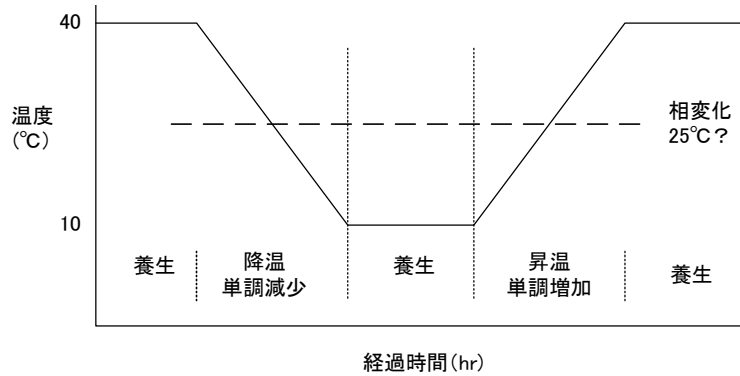


### 3.3 見かけの比熱測定

見かけの比熱の測定を行い、PCMの熱特性を把握するとともに、PCM代表温度の取り方を検討した。

#### (1) PCM①ゲルなし

5 見かけの比熱の測定では、境界温度として、以下の温度変動を与えた。



測定条件	養生	降温	養生	昇温	養生
① 5min/°C	3 時間	2 時間 30 分	3 時間	2 時間 30 分	3 時間
② 10min/°C	3 時間	5 時間 00 分	3 時間	5 時間 00 分	3 時間
③ 15min/°C	3 時間	7 時間 30 分	3 時間	7 時間 30 分	3 時間

図 3.3.1 見かけの比熱測定 境界温度条件 PCM①ゲルなし

10 測定結果は以下のとおり。

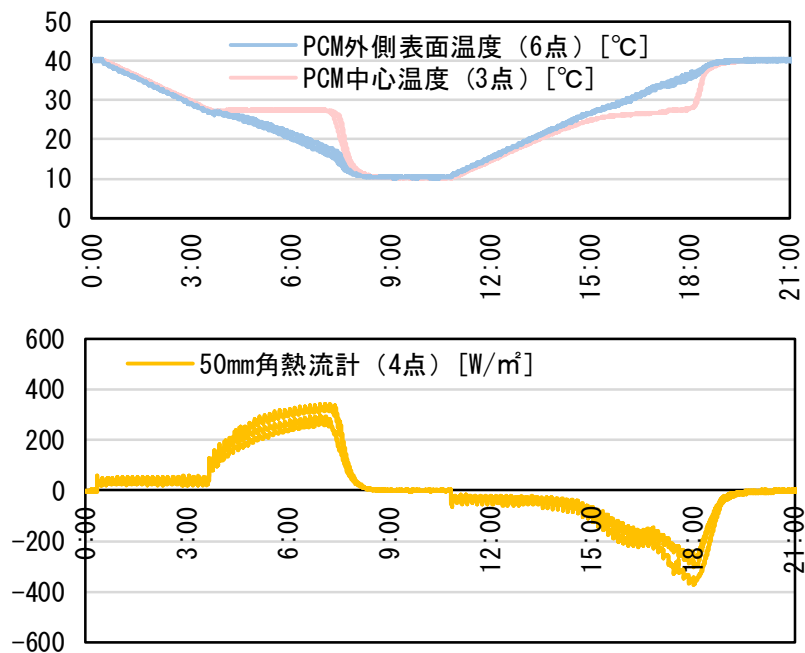
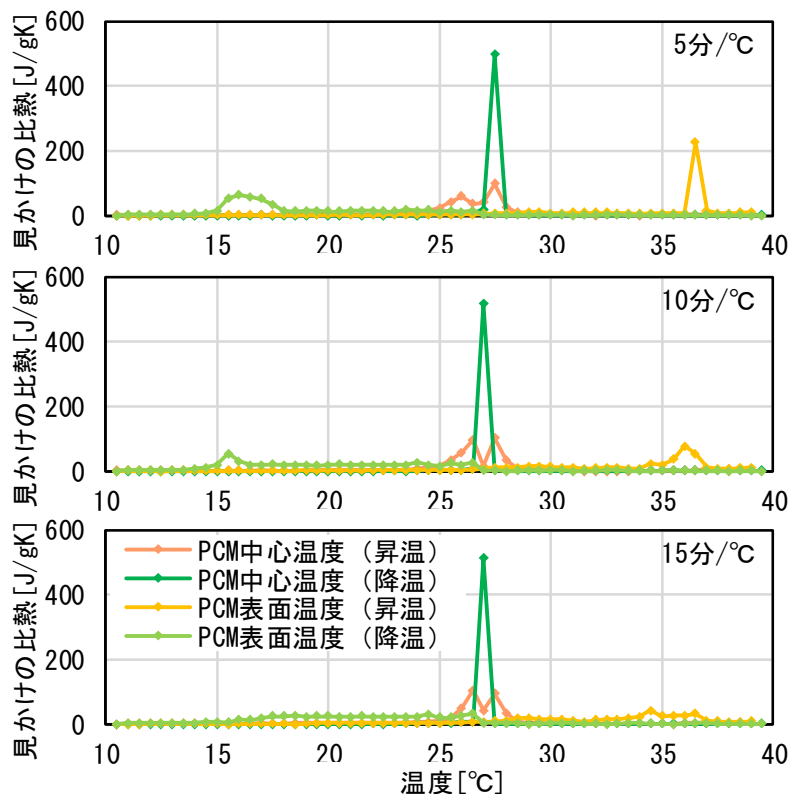


図 3.3.2 見かけの比熱測定 温度と熱流の測定結果 PCM①ゲルなし 15分/°C

温度と熱流の測定結果より算出する見かけの比熱について、横軸の代表温度を、PCM 外側表面温度とする場合より、PCM 中心温度とする方が、温度変化速度の影響が小さく、PCM の物性値の指標としては適していると言える。また、横軸の代表温度をPCM 中心温度とする方が、昇温と降温での相変化温度の差が小さくなる。

5



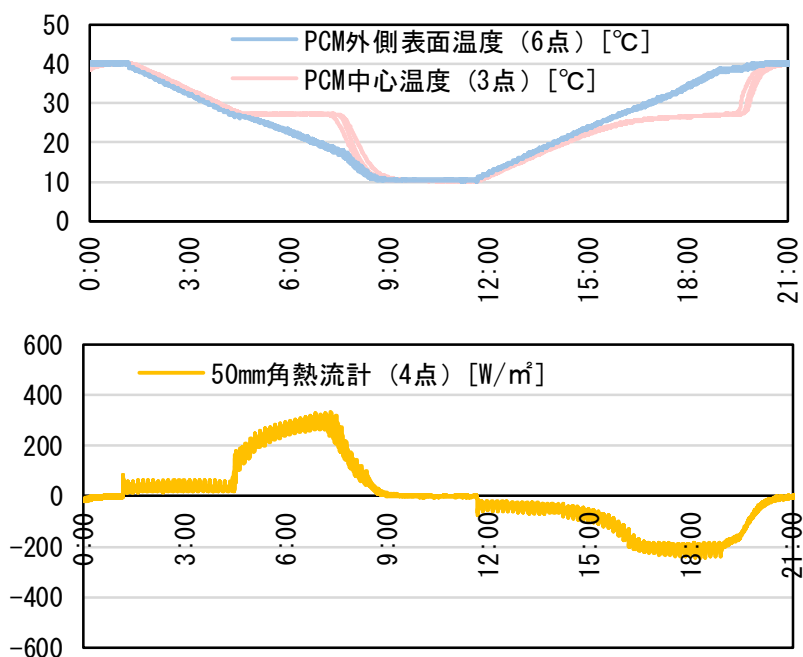
0.5°C刻みで集計		ピーク温度 [°C]		相変化温度範囲 [°C] (10J/ (g・K) 以上)	
		PCM 外側表面温度	PCM 中心温度	PCM 外側表面温度	PCM 中心温度
5 分/°C	昇温	36.5	27.5	29.0~39.0	24.0~28.5
	降温	16.0	27.5	15.0~26.5	27.0~27.5
10 分/°C	昇温	36.0	27.5	27.5~39.0	24.5~28.0
	降温	15.5	27.0	14.5~26.5	27.0
15 分/°C	昇温	34.5	26.5	27.5~37.5	25.0~28.0
	降温	26.5	27.0	16.0~26.5	27.0

図 3.3.3 見かけの比熱測定結果 PCM①ゲルなし

(2) PCM①ゲルあり

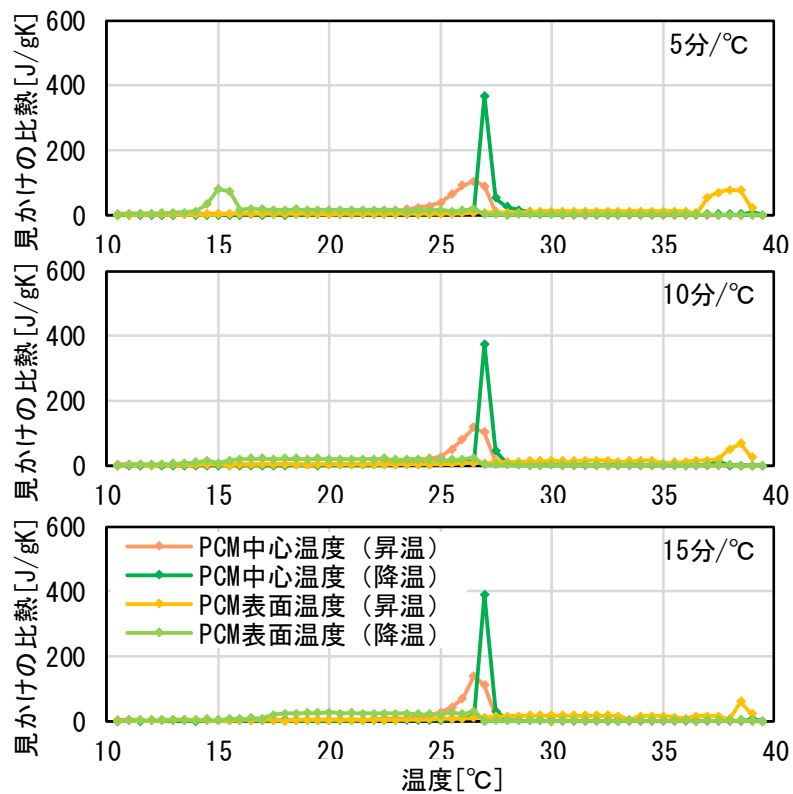
見かけの比熱の測定では、最低温度 10℃と最高温度 40℃の間を、5 分/℃、10 分/℃、15 分/℃の温度変化割合で単調に昇温、降温するような温度変動を境界温度として与えた。

- 5 測定結果は以下のとおり。なお、代表温度は、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.9 で重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。



10

図 3.3.4 見かけの比熱測定 温度と熱流の測定結果 PCM①ゲルあり 15 分/℃



0.5°C刻みで集計		ピーク温度[°C]		相変化温度範囲[°C] (10J/(g・K) 以上)	
		PCM 外側表面温度	PCM 中心温度	PCM 外側表面温度	PCM 中心温度
5分/°C	昇温	38.0	26.5	29.0~39.0	22.5~27.5
	降温	15.0	27.0	14.0~26.5	26.0~29.0
10分/°C	昇温	38.5	26.5	27.5~39.0	23.5~27.5
	降温	26.5	27.0	14.0~26.5	26.0~37.5
15分/°C	昇温	38.5	26.5	26.5~39.0	24.0~27.5
	降温	26.5	27.0	16.5~26.5	26.5~27.5

図 3.3.5 見かけの比熱測定結果 PCM①ゲルあり

### (3) PCM②ゲルなし

見かけの比熱の測定では、最低温度 5℃と最高温度 40℃の間を、5 分/℃、10 分/℃、15 分/℃の温度変化割合で単調に昇温、降温するような温度変動を境界温度として与えた。

- 5 PCM①で、代表温度を PCM 外側表面温度とした場合より、中心温度とした場合の方が、PCM の見かけの比熱を適切に表すことが確認された。ここでは、更に、代表温度を、PCM 中心温度の割合を 1.0 とした場合と、PCM 中心温度の割合を 0.8 とし PCM 外側表面温度の割合を 0.2 とした場合について、比較を行った。

測定結果は以下のとおり。PCM 中心温度の割合を 0.8 とした場合に、温度とエンタルピーの相関が  
10 高くなった。

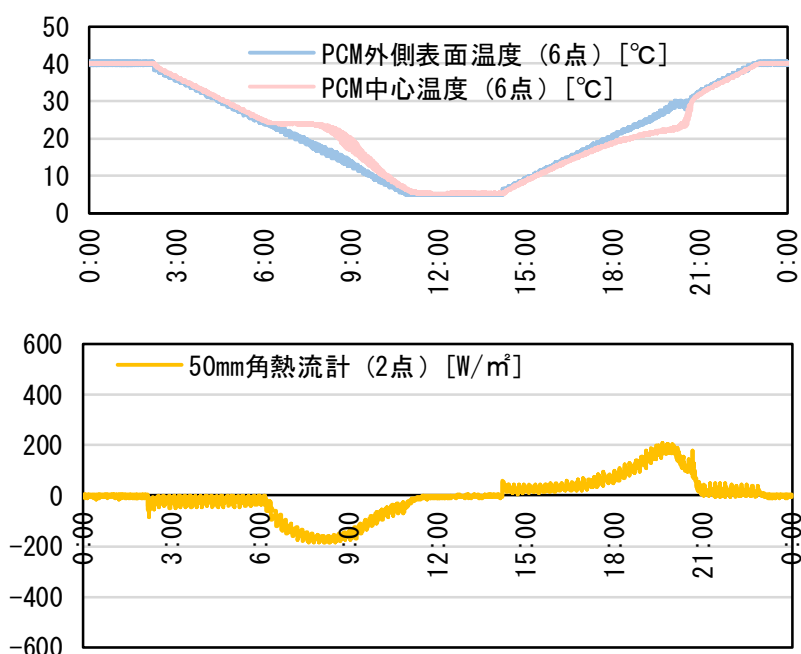
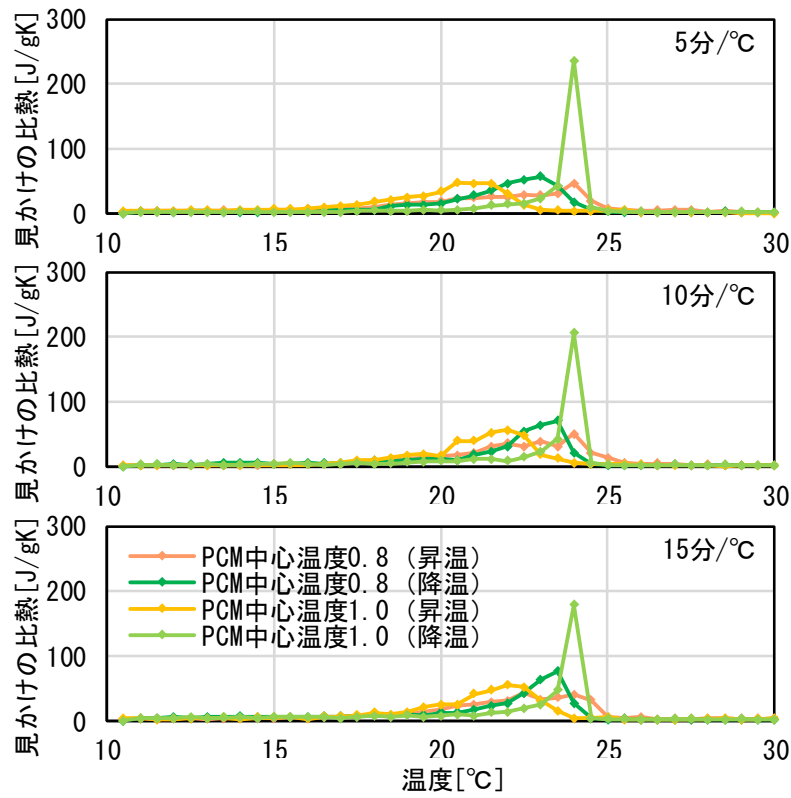


図 3.3.6 見かけの比熱測定 温度と熱流の測定結果 PCM②ゲルなし 15 分/℃



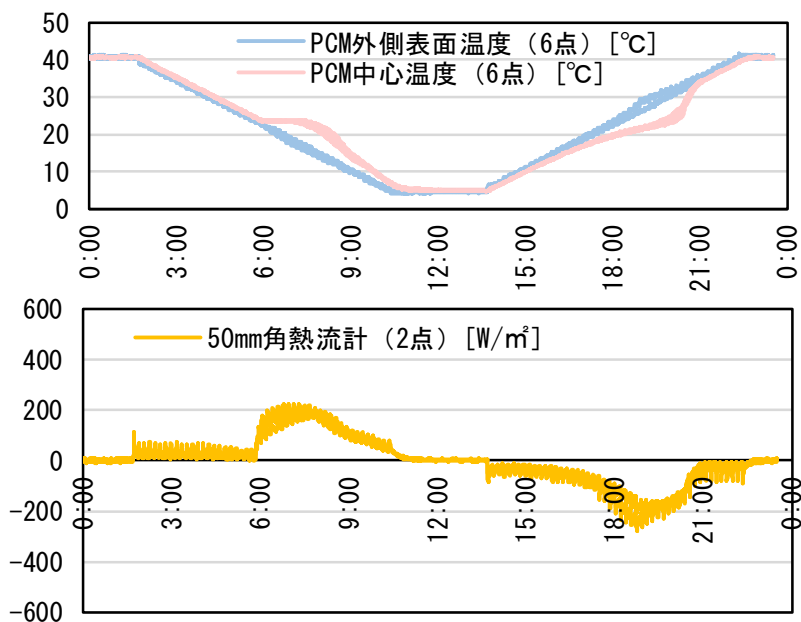
0.5°C刻みで集計		ピーク温度[°C]		相変化温度範囲[°C] (10J/(g・K) 以上)	
		PCM 中心温度 1	PCM 中心温度 0.8	PCM 中心温度 1	PCM 中心温度 0.8
5 分/°C	昇温	20.5	24.0	17.0~22.5	18.0~24.5
	降温	24.0	23.0	21.5~24.5	18.5~24.0
10 分/°C	昇温	22.0	24.0	18.5~23.5	19.0~25.0
	降温	24.0	23.5	21.0~24.0	19.0~24.0
15 分/°C	昇温	22.0	22.5	18.0~23.5	18.5~24.5
	降温	24.0	23.5	20.5~24.0	19.0~24.0

図 3.3.7 見かけの比熱測定結果 PCM②ゲルなし

#### (4) PCM②ゲルあり

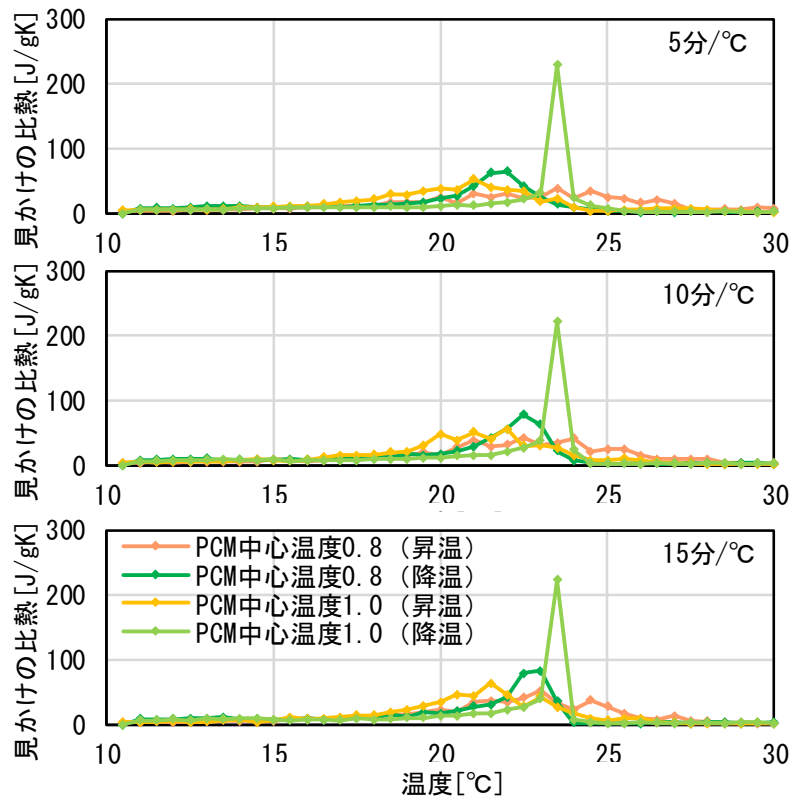
見かけの比熱の測定では、最低温度 5°Cと最高温度 40°Cの間を、5 分/°C、10 分/°C、15 分/°Cの温度変化割合で単調に昇温、降温するような温度変動を境界温度として与えた。

- 5 測定結果は以下のとおり。代表温度は、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8 で重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。



10

図 3.3.8 見かけの比熱測定 温度と熱流の測定結果 PCM②ゲルあり 15 分/°C



0.5°C刻みで集計		ピーク温度[°C]		相変化温度範囲[°C] (10J/(g・K) 以上)	
		PCM 中心温度 1	PCM 中心温度 0.8	PCM 中心温度 1	PCM 中心温度 0.8
5 分/°C	昇温	21.0	23.5	15.0~23.5	16.5~27.0
	降温	23.5	22.0	16.5~24.5	13.0~24.0
10 分/°C	昇温	22.0	22.5	16.5~25.5	17.0~27.0
	降温	23.5	22.5	13.5~24.0	12.0~23.5
15 分/°C	昇温	21.5	23.0	15.5~25.5	17.5~27.0
	降温	23.5	23.0	14.0~23.5	12.5~23.5

図 3.3.9 見かけの比熱測定結果 PCM②ゲルあり



(5) PCM③ゲルあり

見かけの比熱の測定では、最低温度 10℃と最高温度 45℃の間を、5 分/℃、10 分/℃、15 分/℃の温度変化割合で単調に昇温、降温するような温度変動を境界温度として与えた。

- 5 測定結果は以下のとおり。代表温度は、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8 で重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。ただし、降温過程では、過冷却が生じている。

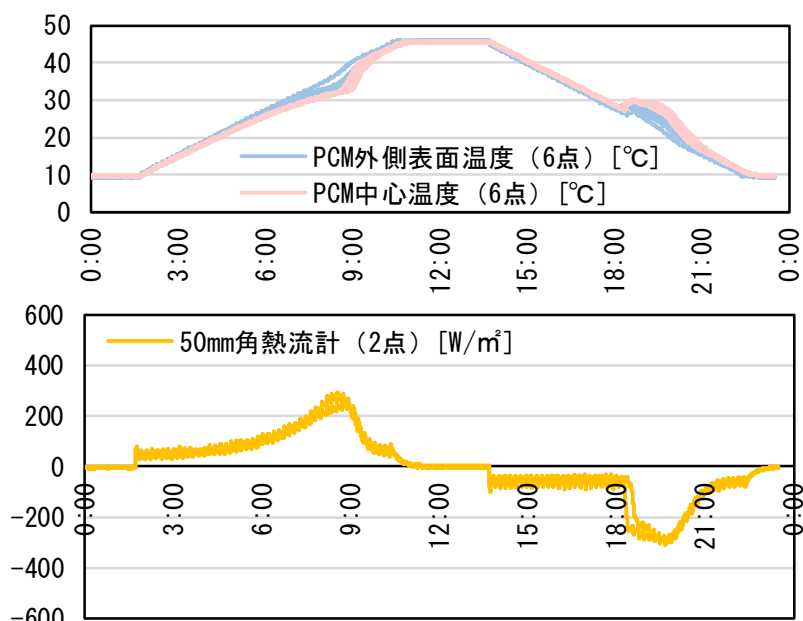
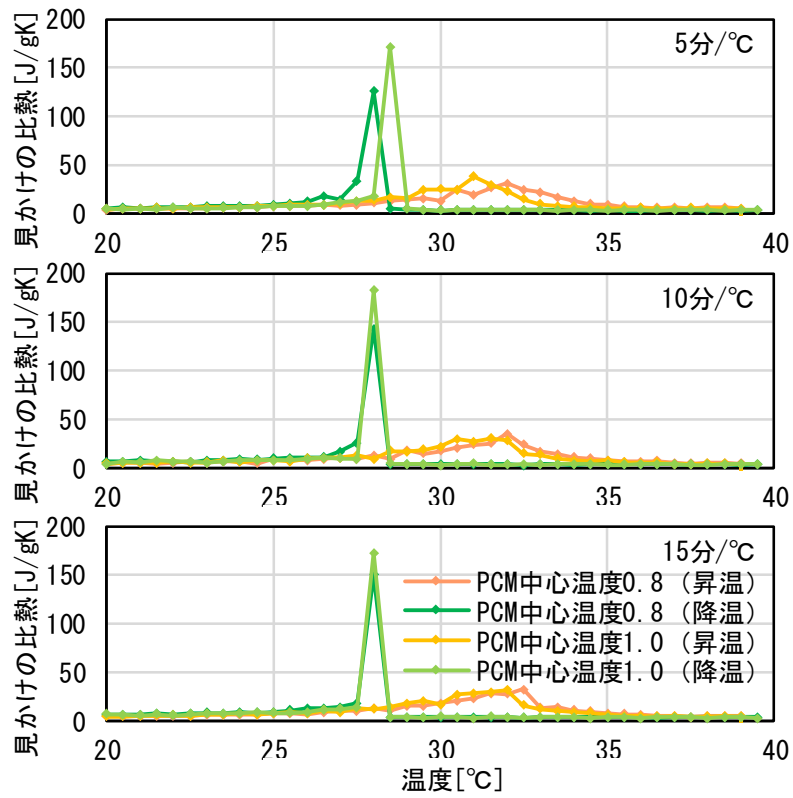


図 3.3.10 見かけの比熱測定 温度と熱流の測定結果 PCM③ゲルあり 15 分/℃



0.5°C刻みで集計		ピーク温度[°C]		相変化温度範囲[°C] (10J/(g・K)以上)	
		PCM 中心温度 1	PCM 中心温度 0.8	PCM 中心温度 1	PCM 中心温度 0.8
5分/°C	昇温	31.0	32.0	27.0~32.5	28.0~34.0
	降温	28.5	28.0	27.0~28.5	25.5~28.0
10分/°C	昇温	31.5	32.0	26.5~33.0	27.0~34.0
	降温	28.0	28.0	26.5~28.0	25.5~28.0
15分/°C	昇温	32.0	32.5	26.5~33.5	27.0~34.0
	降温	28.0	28.0	26.5~28.0	25.5~28.0

図 3.3.11 見かけの比熱測定結果 PCM③ゲルあり

### 3.4 降温／昇温、昇温／降温の繰り返し測定

見かけの比熱測定では、相変化温度域を跨ぐように、単調な昇温、もしくは降温の温度変動を境界温度として与える。一方、実際の建物に導入される PCM は、1 日の室温変動の間に、相変化温度域で昇温途中に完全に融解しないうちに降温に転じたり、逆に、降温の途中で完全に凝固しないうちに昇温に転じたりする場合がある。このような場合に、見かけの比熱の単調な温度変動の測定結果がシミュレーションに使用可能かどうかは、検証が必要である。ここでは、降温と昇温、もしくは昇温と降温を繰り返す境界温度条件を与えて測定を行い、見かけの比熱測定結果の比熱を入力したシミュレーションで測定結果の再現が可能かの確認に使用する。また、測定結果より、PCM の温度とエンタルピーの関係を表すエンタルピー曲線を作成し、その傾向を把握する。

10

#### (1) PCM①ゲルなし

境界温度変動は、以下のように与えた。

##### 【降温／昇温の繰り返し】

15

実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 30℃設定

30℃→29℃→30℃→30℃→28℃→30℃→30℃→27℃→30℃→30℃→26℃→30℃→  
30℃→25℃→30℃→30℃→24℃→30℃

20

##### 【昇温／降温の繰り返し】

実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 5℃設定

21℃→22℃→21℃→21℃→23℃→21℃→21℃→24℃→21℃→21℃→25℃→21℃→  
21℃→26℃→21℃→21℃→27℃→21℃→21℃→28℃→21℃

25

測定結果を以下に示す。横軸の温度を、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8～1.0 として重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。

【降温／昇温の繰り返し】

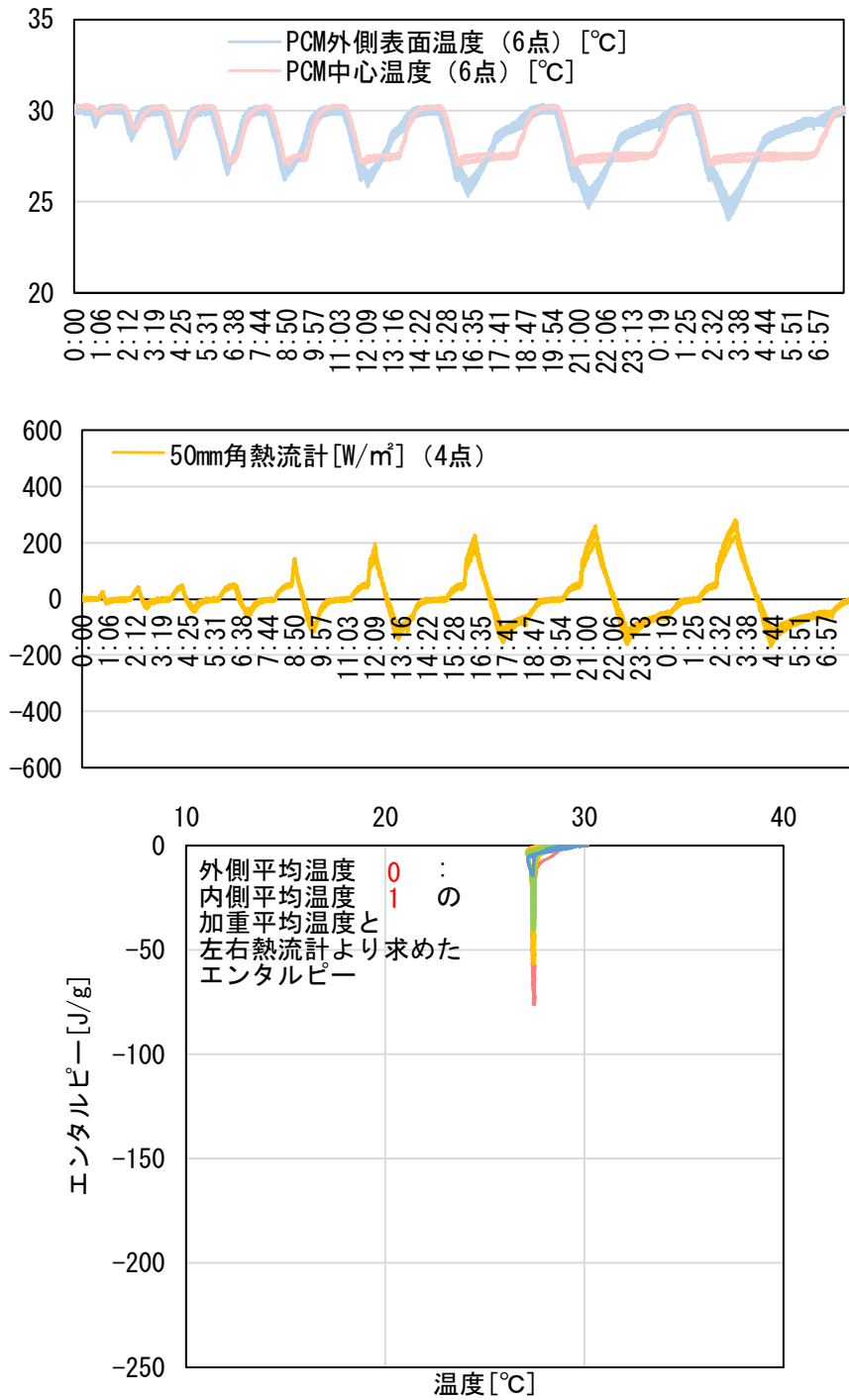


図 3.4.1 PCM①ゲルなし 降温／昇温の繰り返し測定

【昇温／降温の繰り返し】

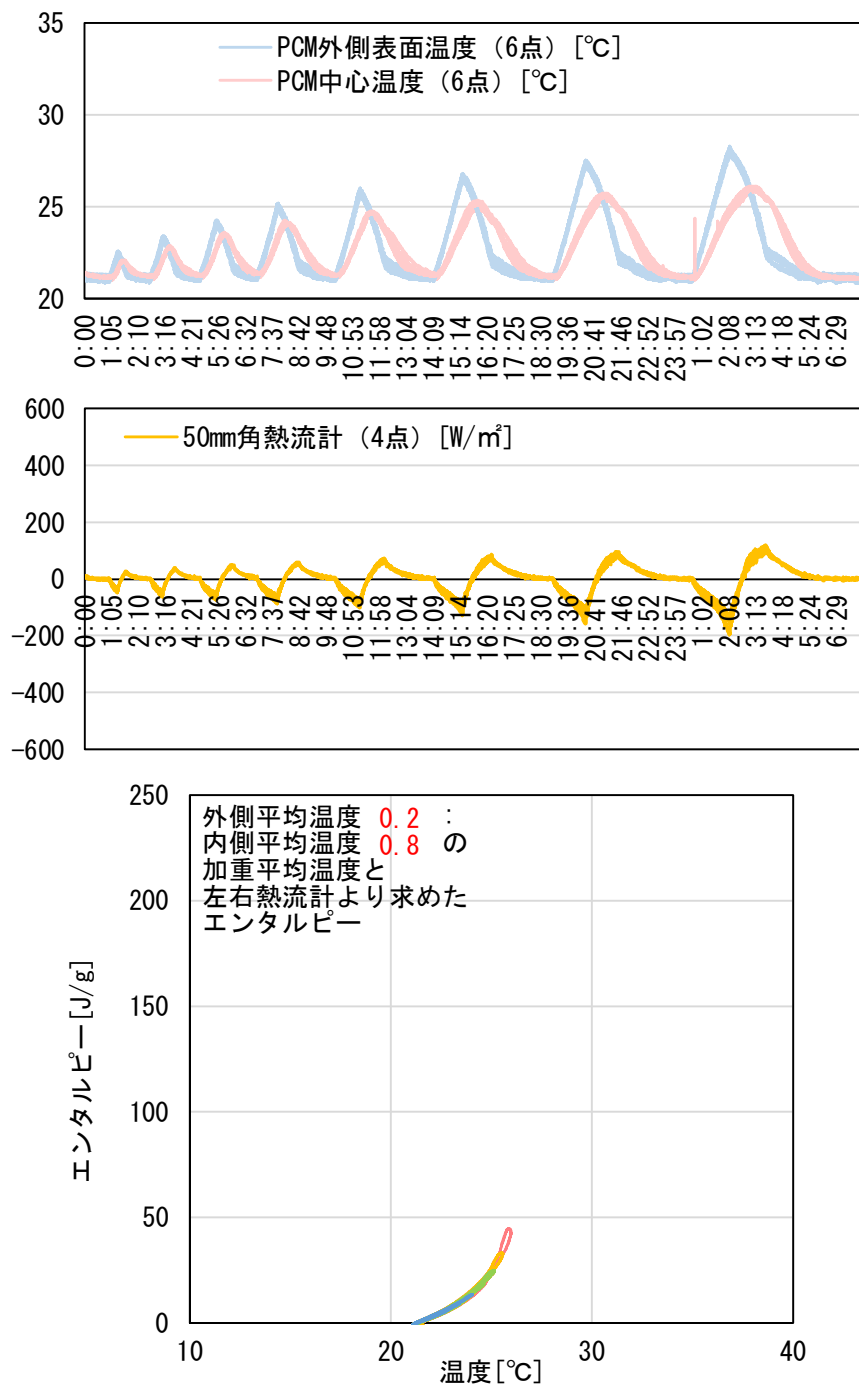


図 3.4.2 PCM①ゲルなし 昇温／降温の繰り返し測定

(2) PCM①ゲルあり

境界温度変動は、以下のように与えた。

【降温／昇温の繰り返し】

5 実施条件 10分/℃ 各ステップ間は60分間30℃設定

30℃→29℃→30℃→30℃→28℃→30℃→30℃→27℃→30℃→30℃→26℃→30℃→  
30℃→25℃→30℃→30℃→24℃→30℃

10 【昇温／降温の繰り返し】

実施条件 10分/℃ 各ステップ間は60分間5℃設定

21℃→22℃→21℃→21℃→23℃→21℃→21℃→24℃→21℃→21℃→25℃→21℃→  
21℃→26℃→21℃→21℃→27℃→21℃→21℃→28℃→21℃

15 測定結果を以下に示す。横軸の温度を、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8～0.9として重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。

【降温／昇温の繰り返し】

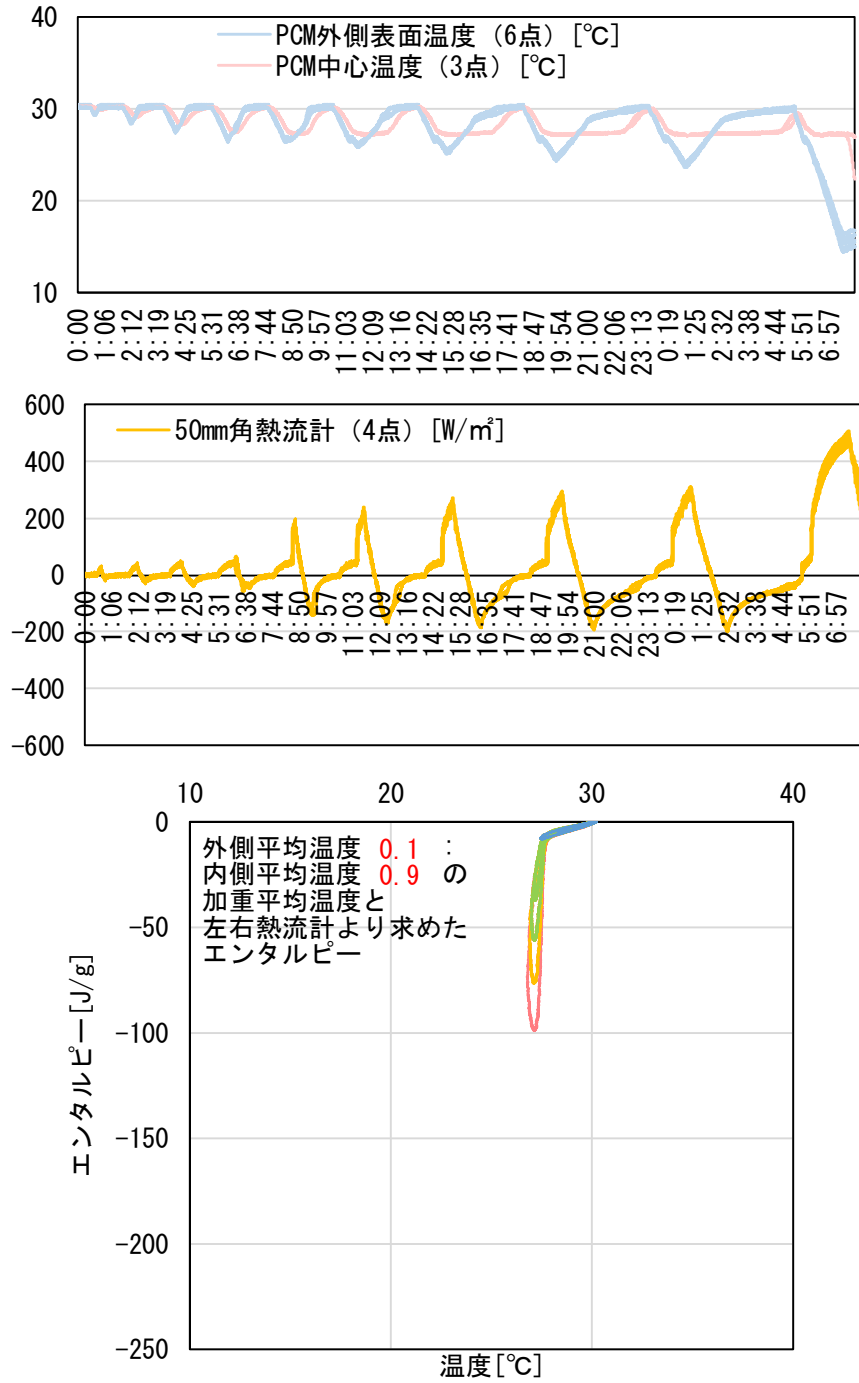


図 3.4.3 PCM①ゲルあり 降温／昇温の繰り返し測定

【昇温／降温の繰り返し】

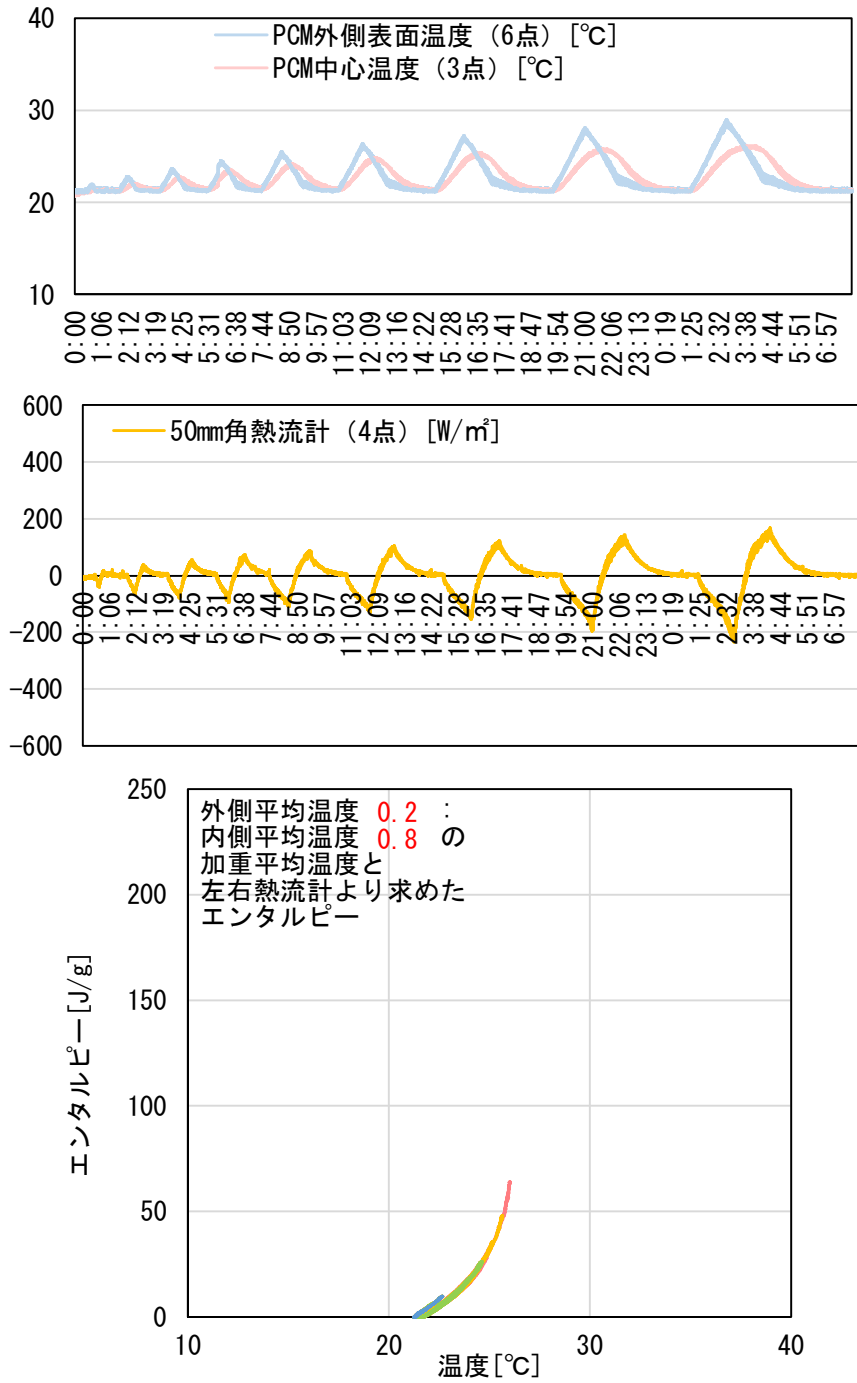


図 3.4.4 PCM①ゲルあり 昇温／降温の繰り返し測定



(3) PCM②ゲルなし

境界温度変動は、以下のように与えた。

【降温／昇温の繰り返し】

5 実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 30℃設定

30℃→25℃→30℃→30℃→20℃→30℃→30℃→19℃→30℃→30℃→18℃→30℃→  
30℃→17℃→30℃→30℃→16℃→30℃→30℃→15℃→30℃→30℃→14℃→30℃→  
30℃→13℃→30℃→30℃→12℃→30℃→30℃→11℃→30℃→30℃→10℃→30℃→  
30℃→5℃→30℃→30℃→0℃→30℃

10

【昇温／降温の繰り返し】

実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 5℃設定

10℃→15℃→10℃→10℃→20℃→10℃→10℃→21℃→10℃→10℃→22℃→10℃→  
10℃→23℃→10℃→10℃→24℃→10℃→10℃→25℃→10℃→10℃→26℃→10℃→  
15 10℃→27℃→10℃→10℃→28℃→10℃→10℃→29℃→10℃→10℃→30℃→10℃→  
10℃→35℃→10℃→10℃→40℃

測定結果を以下に示す。横軸の温度を、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8 で  
重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。

20

【降温／昇温の繰り返し】

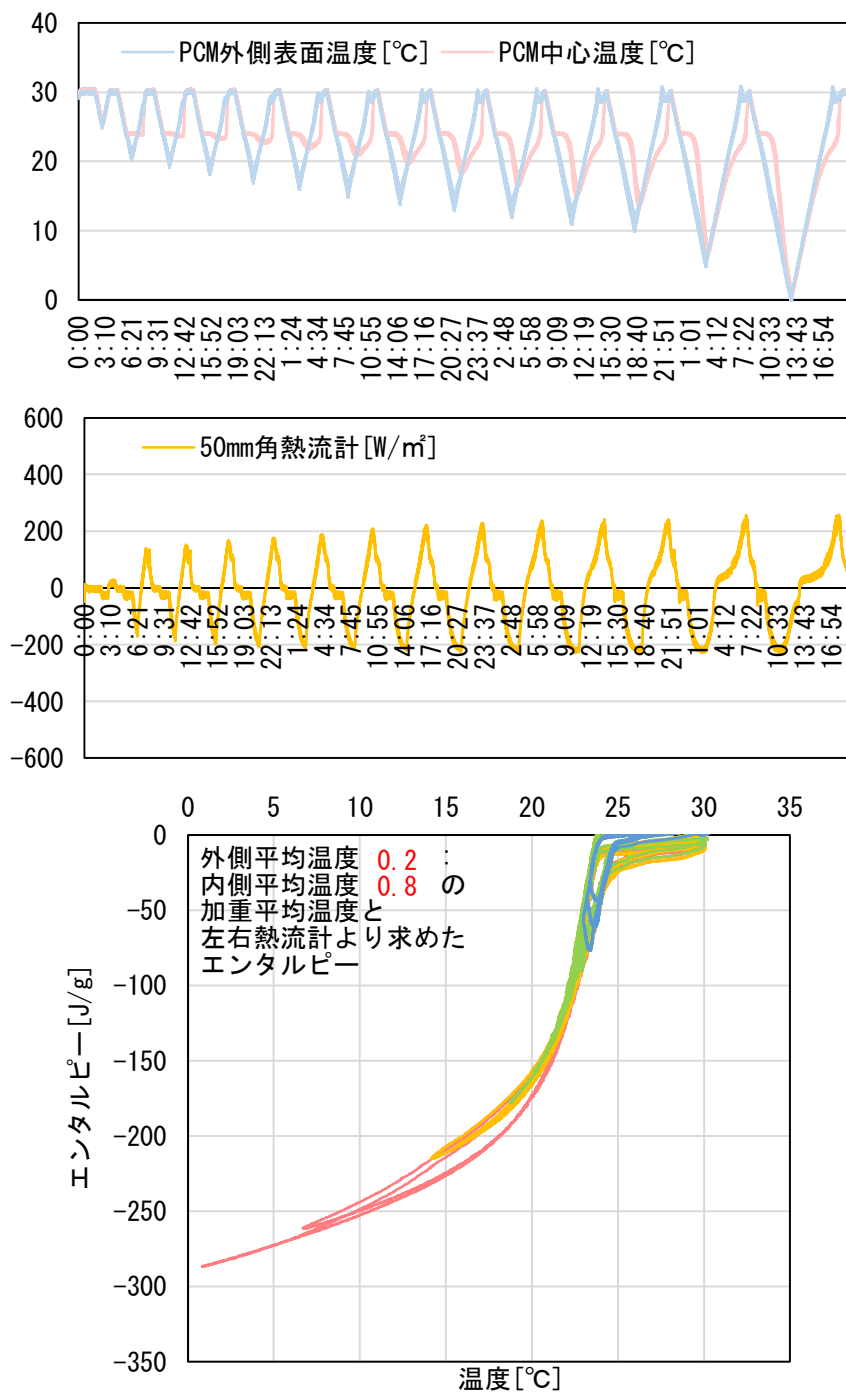


図 3.4.5 PCM②ゲルなし 降温／昇温の繰り返し測定

【昇温／降温の繰り返し】

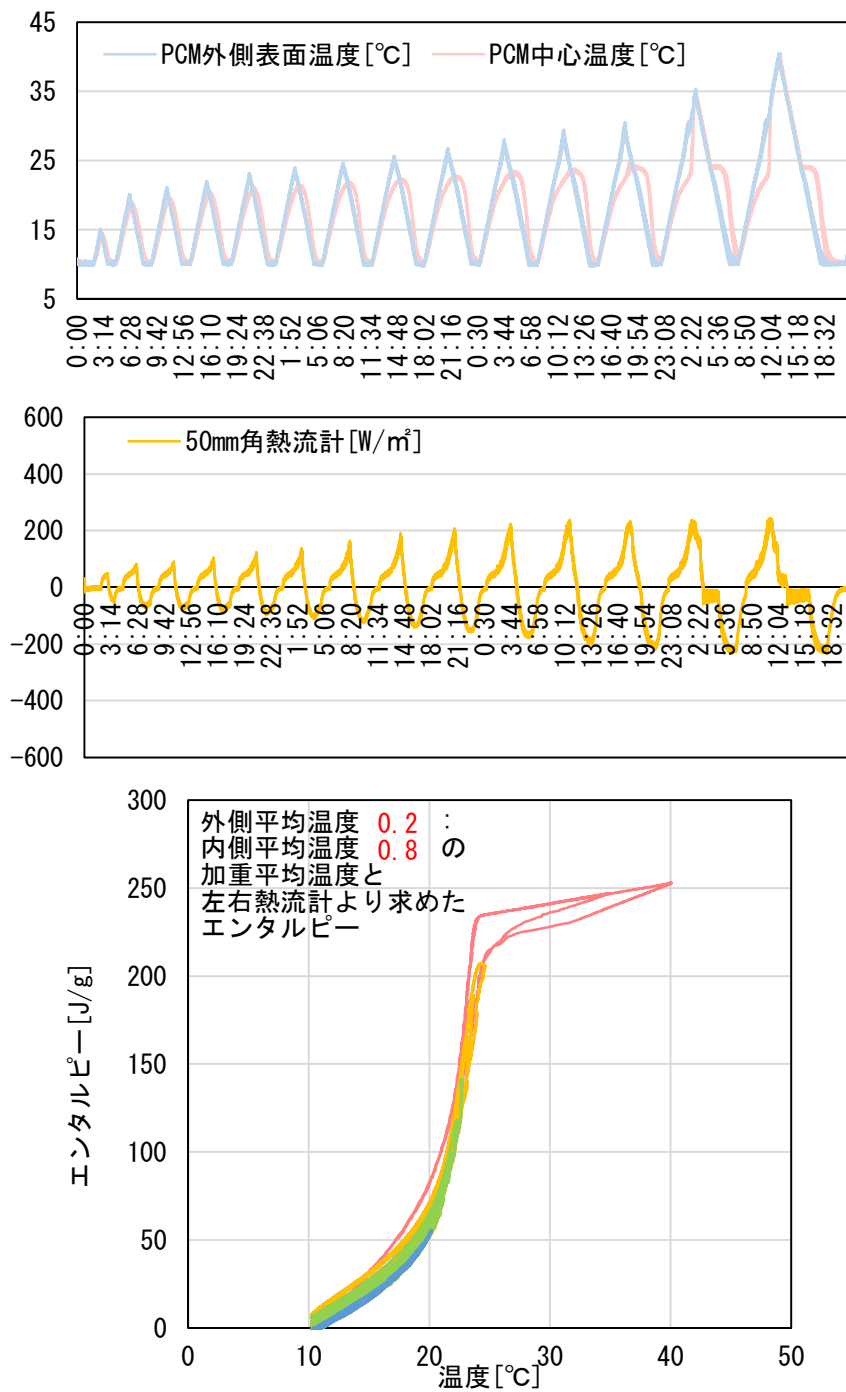


図 3.4.6 PCM②ゲルなし 昇温／降温の繰り返し測定

(4) PCM②ゲルあり

境界温度変動は、以下のように与えた。

【降温／昇温の繰り返し】

5 実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 30℃設定

30℃→25℃→30℃→30℃→20℃→30℃→30℃→19℃→30℃→30℃→18℃→30℃→  
30℃→17℃→30℃→30℃→16℃→30℃→30℃→15℃→30℃→30℃→14℃→30℃→  
30℃→13℃→30℃→30℃→12℃→30℃→30℃→11℃→30℃→30℃→10℃→30℃→  
30℃→5℃→30℃→30℃→0℃→30℃

10

【昇温／降温の繰り返し】

実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 5℃設定

10℃→15℃→10℃→10℃→20℃→10℃→10℃→21℃→10℃→10℃→22℃→10℃→  
10℃→23℃→10℃→10℃→24℃→10℃→10℃→25℃→10℃→10℃→26℃→10℃→  
15 10℃→27℃→10℃→10℃→28℃→10℃→10℃→29℃→10℃→10℃→30℃→10℃→  
10℃→35℃→10℃→10℃→40℃

測定結果を以下に示す。横軸の温度を、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8 で  
重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。

20

【降温／昇温の繰り返し】

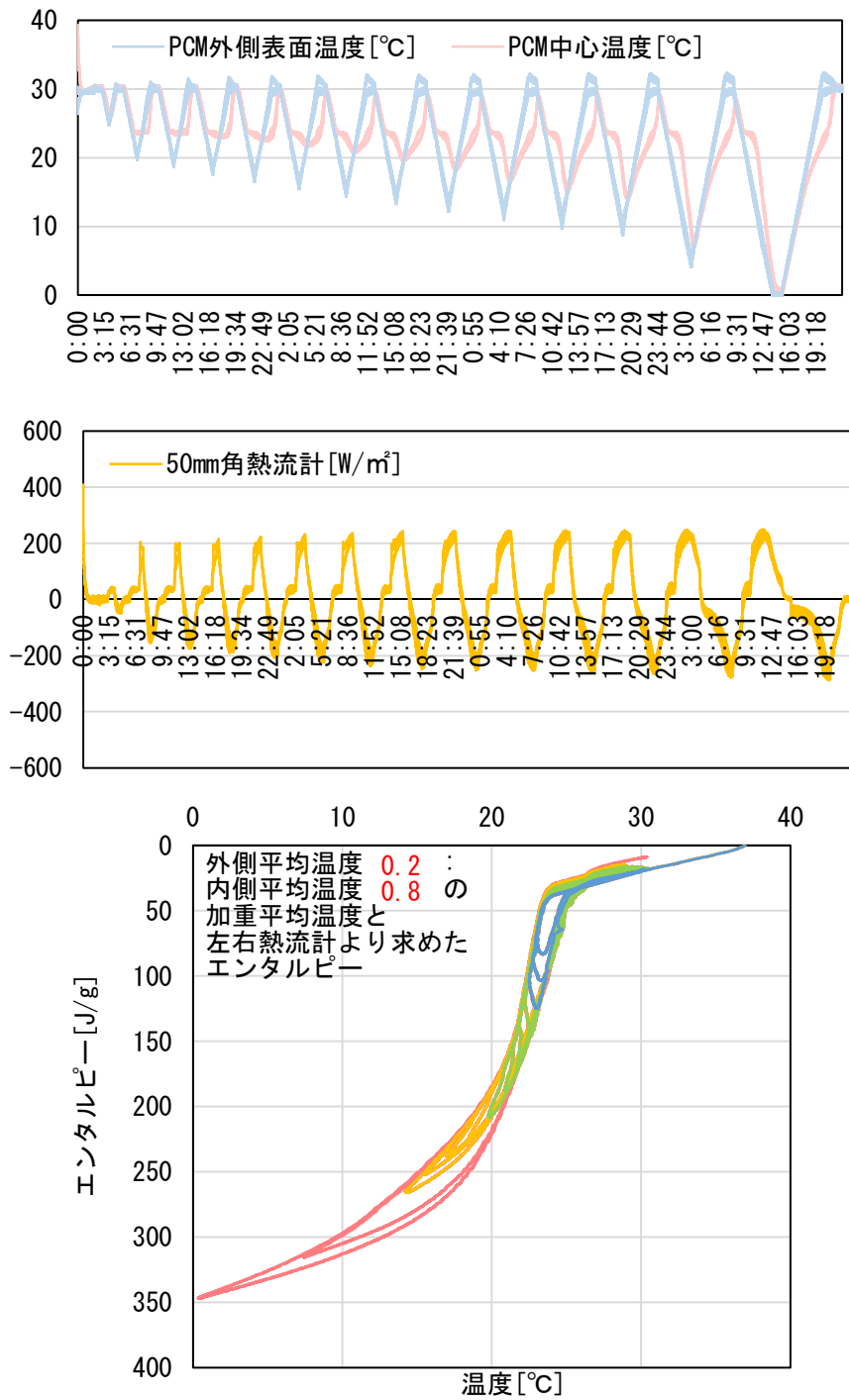


図 3.4.7 PCM②ゲルあり 降温／昇温の繰り返し測定

【昇温／降温の繰り返し】

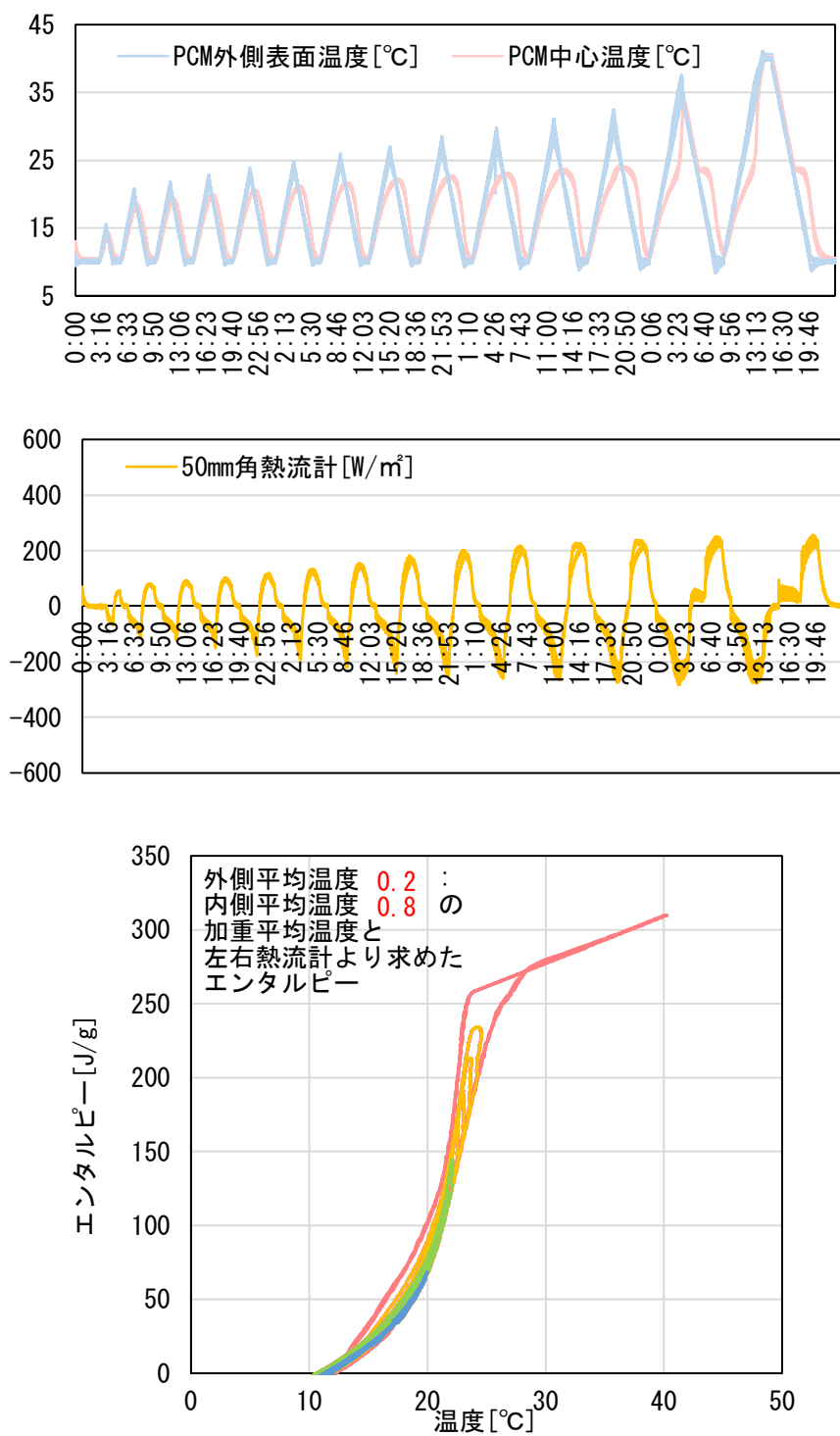


図 3.4.8 PCM②ゲルあり 昇温／降温の繰り返し測定

(5) PCM③ゲルあり

境界温度変動は、以下のように与えた。

【降温／昇温の繰り返し】

5 実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 40℃設定

40℃→30℃→40℃→40℃→29℃→40℃→40℃→28℃→40℃→40℃→27℃→40℃→  
40℃→26℃→40℃→40℃→25℃→40℃→40℃→24℃→40℃→40℃→23℃→40℃→  
40℃→22℃→40℃→40℃→21℃→40℃→40℃→20℃→40℃→40℃→15℃→40℃→  
40℃→10℃→40℃

10

【昇温／降温の繰り返し】

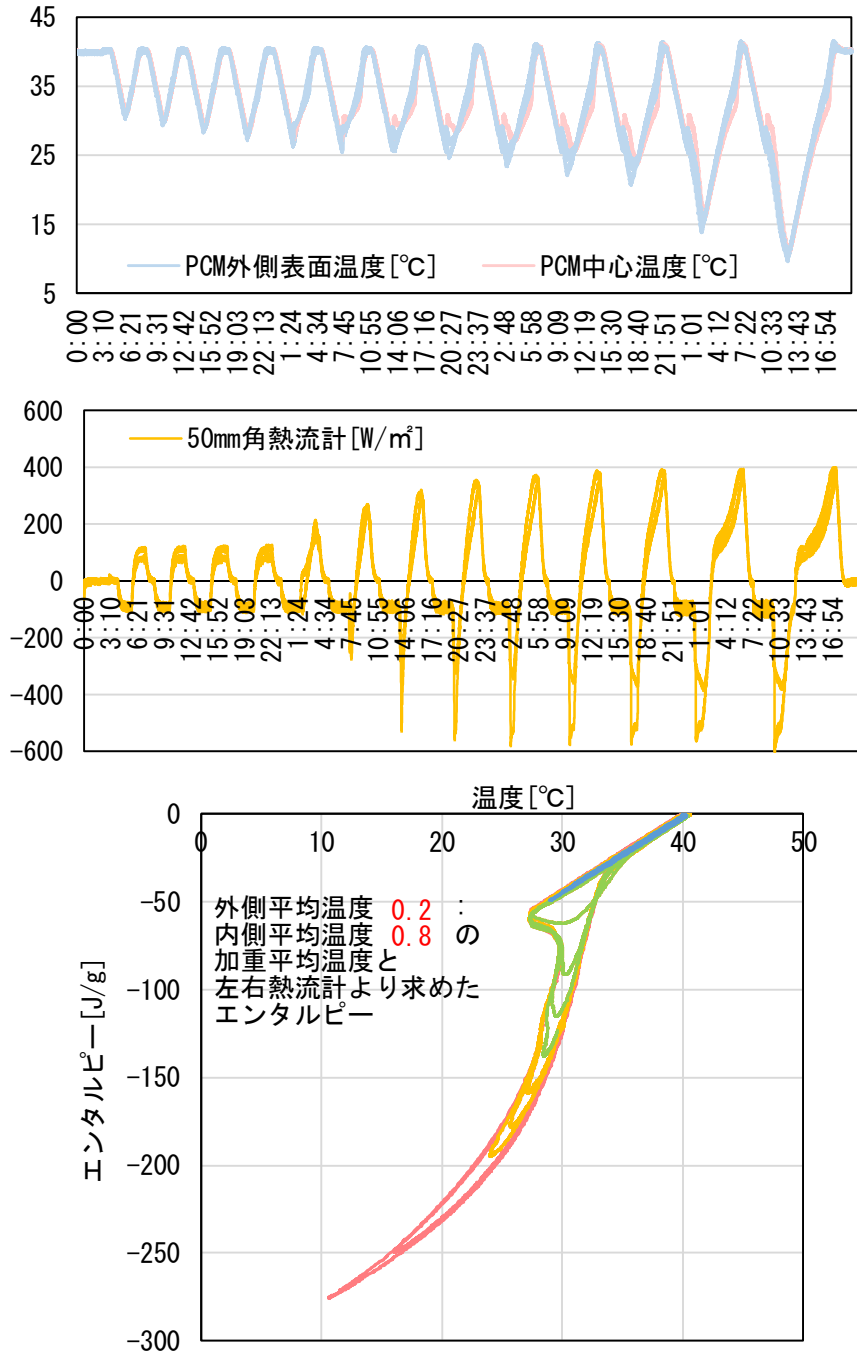
実施条件 10 分/℃ 各ステップ間は 60 分間 5℃設定

15℃→25℃→15℃→15℃→30℃→15℃→15℃→31℃→15℃→15℃→32℃→15℃→  
15℃→33℃→15℃→15℃→34℃→15℃→15℃→35℃→15℃→15℃→36℃→15℃→  
15 15℃→37℃→15℃→15℃→38℃→15℃→15℃→39℃→15℃→15℃→40℃→15℃→  
15℃→45℃→15℃

測定結果を以下に示す。凝固時に過冷却の挙動が見られる。横軸の温度を、代表温度は、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8 で重み付け平均温度を取った値とした場合に、温度とエンタルピーの相関が高くなった。

20

【降温／昇温の繰り返し】



5

図 3.4.9 PCM③ゲルあり 降温／昇温の繰り返し測定



【昇温／降温の繰り返し】

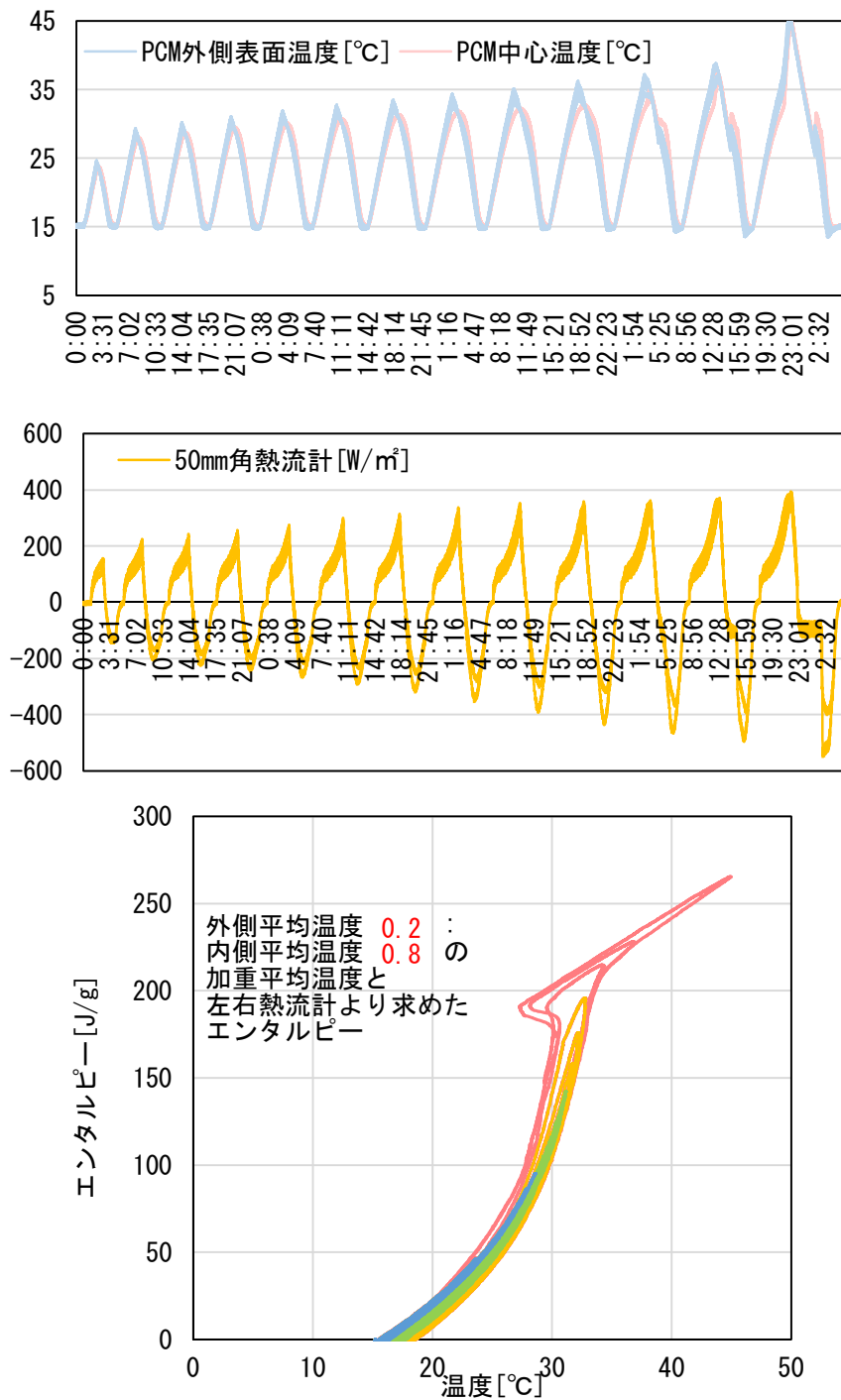


図 3.4.10 PCM③ゲルあり 昇温／降温の繰り返し測定

### 3.5 まとめ

建材試験センターにおいて実施された、PCM の見かけの比熱測定等の熱特性の測定より、PCM の挙動の把握を行った。

5 熱伝導率が、固相時と液相時で、また、液相時の熱流向きにより変化する場合があります、計算への反映が必要であることが確認された。

見かけの比熱測定や、降温／昇温、昇温／降温の繰り返し測定では、PCM 内側表面温度と外側表面温度を中心温度割合 0.8～1.0 として重み付け平均温度を取った値を横軸として、エンタルピー曲線のグラフを作成すると、温度とエンタルピーの相関が比較的高くなる傾向があることが確認された。

10 見かけの比熱ピークが複数の PCM や、過冷却が生じる PCM では、融解時と凝固時の挙動に差があることが確認された。

---

<sup>1</sup> 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, 第 82 巻, 第 740 号, pp.853-862, 2017. 10

<sup>2</sup> 芹川真緒, 堀内耀介, 崔榮晋, 佐藤誠, 前真之: 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 ー壁体構成を考慮した潜熱蓄熱建材の蓄熱性能の比較 その1ー, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 56 号, pp.247-252, 2018. 2

<sup>3</sup> ASTM C518-15: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus

## 第4章 非定常熱伝導計算へのPCMの組み込み

#### 4. 非定常熱伝導計算への PCM の組み込み

本章では、計算に関連する検討を行い、PCM 含む非定常熱伝導計算を可能とすることを目的とする。

1 節では、2 節で用いる PCM を含む非定常熱伝導計算の方法について、整理する。2 節で、前章の測定結果を用い、計算の妥当性の確認を行う。3 節では、計算により、PCM の見かけの比熱測定における境界温度変動の条件の検討を行う。4 節では、計算の実用性向上を目的とし、PCM 熱容量を家具熱容量として扱う置換モデルの提案を行う。

なお、本章は、既発表<sup>1,2</sup>の内容を含む。

##### 4.1 見かけの比熱・見かけの熱伝導率を用いた差分法による計算

10 次節において、PCM の相変化時の熱的挙動の測定結果の再現を目的とした計算を行う。計算は、一次元熱伝導を仮定し、PCM 試験体 1 枚を 5 層、PCM 間のアクリル板を 2 層に分割し、壁体両端温度として PCM 外側表面温度測定値(各面 3 点の平均値)を与えた。壁体内部温度は、文献<sup>3</sup>に基づき、以下の式を後退差分で離散化した式により計算する。計算ステップ間隔を 10 秒とし、PCM の見かけの比熱は、現在時刻と 1 ステップ前の温度よりそれぞれ求めた見かけの比熱の平均値を用いることで、離散化に伴う誤差を小さくする。なお、同様の目的で、崔らの研究<sup>4</sup>では 1 ステップ前と 2 ステップ前の温度より比熱を算出し、Saleh Nasser Al-Saadi ら<sup>5</sup>の研究では 1 計算ステップ内で温度の修正を行っている。

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{0.5(CAP_{m-1,m} + CAP_{m,m+1})} \left\{ \frac{1}{R_{m,m+1}} (T_{m+1} - T_m) - \frac{1}{R_{m-1,m}} (T_m - T_{m-1}) \right\} \quad (4-1)$$

$$CAP_{m-1,m} = \frac{c_{m-1,m}(T_m^*) + c_{m-1,m}(T_m)}{2} \cdot (1000\rho_{m-1,m}) \cdot \Delta x_{m-1,m} \quad (4-2)$$

$$CAP_{m,m+1} = \frac{c_{m,m+1}(T_m^*) + c_{m,m+1}(T_m)}{2} \cdot (1000\rho_{m,m+1}) \cdot \Delta x_{m,m+1} \quad (4-3)$$

$$R_{m,m-1} = \frac{\Delta x_{m,m-1}}{\lambda_{m,m-1}(T_m)} \quad (4-4)$$

$$R_{m,m+1} = \frac{\Delta x_{m,m+1}}{\lambda_{m,m+1}(T_m)} \quad (4-5)$$

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

20  $\lambda$  : 見かけの熱伝導率 [W/(m・K)]

$\Delta x$  : 壁体分割幅 [m]

$T_m$  : 節点 m の温度 [°C]

$T_m^*$  : 1 計算ステップ前の節点 m の温度 [°C]

$t$  : 時間 [s]

25  $CAP$  : 節点間の層の単位面積あたり熱容量 [J/(m<sup>2</sup>・K)]

$R$  : 節点間の熱抵抗 [m<sup>2</sup>・K/W]

添字 m : 差分における節点を示す

添字 m<sub>m-1,m</sub>, m<sub>m+1</sub> : それぞれ節点 m と節点 m-1 の間の層、節点 m と節点 m+1 の間の層を示す

文献<sup>3</sup>では、層単位で、材料の比熱の値を与えることが想定されている。一方、本研究では、見かけの比熱が変化するPCMの比熱は、質点の温度を使用し、質点の両側の層それぞれの1/2の厚みの見かけの比熱を使用する(図4.1.1)。これは、質点に対して流入/流出する熱量より求まる質点でのエンタルピーと、質点温度の関係が、一意となることを意図している。なお、石田の研究<sup>6</sup>では質点を層の中心に設けているが、PCMを含まない部位は質点が層境界部に設けて計算されることが多いことを考慮すると、本研究の考えの方がPCMを含まない部位との連続性は高いものと推察される。

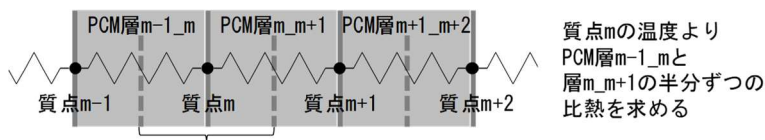


図 4.1.1 比熱の決定方法

10

次節において、見かけの比熱は、測定結果の見かけの比熱の形状およびDSC等での融解潜熱をもとに与える。前章で測定に使用したPCMの挙動をよく再現する見かけの比熱を確認するため、既往研究において提案されている代表的な見かけの比熱(表4.1.1)のうち、係数の決定が困難であるモデルGを除いたモデルでPCM①の計算を行い、結果の比較を行う。

15

表 4.1.1 既往研究における主な見かけの比熱のモデル

	モデル式	連続性	対称性	備考
モデルA <sup>5</sup>	相変化温度範囲内： $C_l(T) = \frac{L}{2\varepsilon}$ 相変化温度範囲外： $C_l(T) = 0$	非連続	左右対称	潜熱一定
モデルB <sup>7</sup>	相変化温度範囲内： $C_l(T) = \frac{2L}{\varepsilon} - \frac{4L}{\varepsilon^2}  T - T_m $ 相変化温度範囲外： $C_l(T) = 0$	非連続	左右対称	$T_m$ は相変化範囲の中心温度
モデルC <sup>8</sup>	$C_l(T) = ae^{-0.5\left(\frac{T-T_m}{b}\right)^2}$	連続	左右対称	ガウス関数(対称)
モデルD <sup>9</sup>	$\leq T_{peak} : C_l(T) = ae^{-\left(\frac{T-T_m}{b_s}\right)^2}$ $> T_{peak} : C_l(T) = ae^{-\left(\frac{T_m-T}{b_l}\right)^2}$	非連続	左右対称	ガウス関数(非対称)
モデルE <sup>10</sup>	$C_l(T) = \frac{L}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T-T_m)^2}{2\omega^2}} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\operatorname{skew} \cdot (T - T_m)}{\sqrt{2}\omega}\right) \right]$	連続	非対称	誤差関数
モデルF <sup>11</sup>	$C_l(T) = \frac{L}{2} \times \frac{\frac{2\beta}{\tau}}{\cosh\left[\frac{2\beta}{\tau}(T - T_m)\right]^2}$	連続	左右対称	双曲線関数
モデルG <sup>12</sup>	$C_l(T) = T^f \frac{a + cT + eT^2}{1 + bT + dT^2}$			

モデルは、既往研究から、詳細を変更している場合がある。

【記号】 $C_l(T)$ : 比熱[J/(g・K)],  $L$ : 潜熱量[J/g],  $\varepsilon$ : 相変化温度範囲[°C],  $T_m$ : 相変化ピーク温度[°C]  
 $\tau, \beta, \omega, \operatorname{skew}, a, b, c, d, e, f, b_s, b_l$ : 係数、定数

PCMは、相変化に伴い、比熱のみでなく、熱伝導率も変化する可能性があるため、式(4-4)、式(4-5)において、熱伝導率を温度の関数としている。

20

## 4.2 計算によるペルティエ装置を用いた測定の再現

### 4.2.1 見かけの比熱測定結果の再現

#### (1) PCM①ゲルなし・ゲルあり

PCM①の見かけの比熱の測定結果について、計算での再現を試みた。

- 5 ゲルなしの見かけの比熱は、表 4.1.1 を参考に、測定結果の見かけの比熱の形状および DSC での融解潜熱をもとに、以下のとおり与えた。

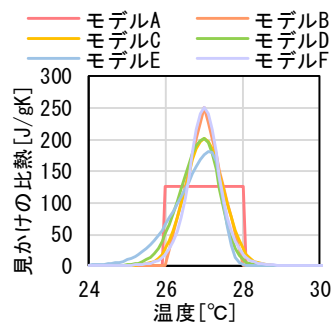


図 4.2.1 計算に使用する見かけの比熱 PCM①ゲルなし

10

PCM①ゲルなしの見かけの熱伝導率について、温度依存性を考慮しない計算では固相時の測定結果  $0.25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  を使用し、温度依存性を考慮する計算では、固相時  $0.25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、液相時  $0.62\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、固液混相では藤田らの研究<sup>13</sup>を参考に融解割合に応じた重み付け平均(融解割合は温度に対して線形を仮定)とした。また、測定結果の再現性が高まるよう、固液混相の温度範囲は、融解時  $28\sim 30^\circ\text{C}$ 、  
15 凝固時  $23\sim 27^\circ\text{C}$  としたが、固液混相における PCM の状態の確認は、今後の課題である。

15

PCM①ゲルなしについて、見かけの比熱を考慮し、見かけの熱伝導率は固相時の値を使用した場合の中心温度の計算結果を図 4.2.2 に示す。融解、凝固過程とも、測定に対し、計算の相変化に要する時間が長くなっている。融解過程では測定での PCM 中心温度は測定開始より 10:30 程度経過後に相  
20 変化完了に伴う急激な温度変動が見られるが、計算では同様の変動が 11:30 程度経過後に見られ、約 1 時間の差が見られる。

20

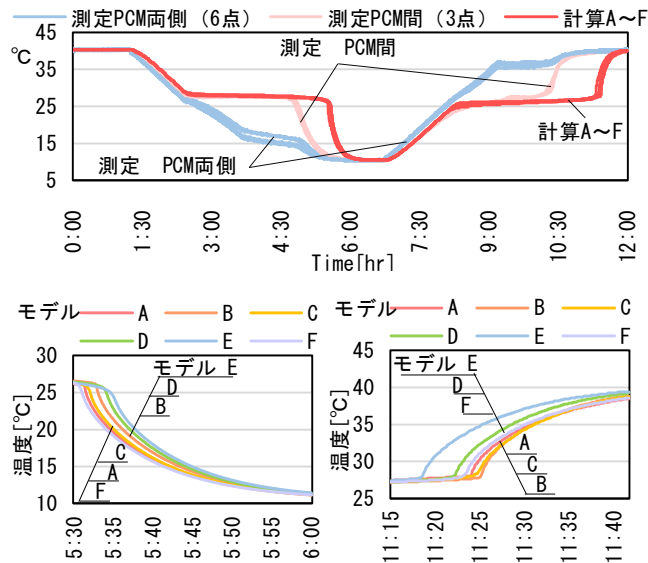


図 4.2.2 計算による見かけの比熱測定の再現 熱伝導率一定 PCM①ゲルなし 10分/°C

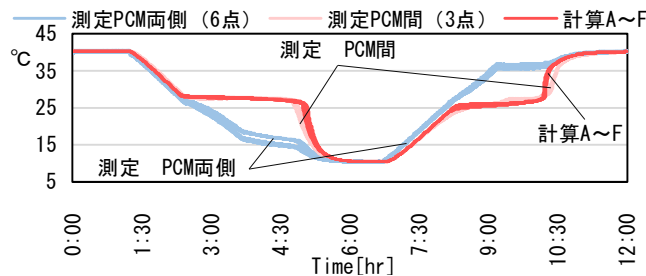
5

相変化に要する時間に測定と計算で差が生じる理由として、対流による熱移動の影響が考えられる。例えば、融解途中では、熱板により加熱される PCM 外側表面と、相変化温度域付近で温度が安定する PCM 内側温度の間で、厚さ方向に温度分布が生じる。このとき、実現象では融解途中には液相の PCM が存在するため、温度分布の影響を受けて液相 PCM の対流が生じると推察される。対流により、外側表面

10

で加熱された液相 PCM が、内側の固相 PCM に熱を伝えるため、融解が促進されると推察される。次に、見かけの熱伝導率の温度依存性を考慮した場合の PCM①ゲルなしの中心温度計算結果を、図 4.2.3 に示す。対流を考慮することにより、相変化完了に伴う急激な温度変動が 10:10 程度経過後に見られるようになり、融解に要する時間の再現性が向上していることが確認される。相変化の温度や熱流の挙動に、測定と計算で多少の差が見られるものの、傾向が概ね再現できていることが確認される。このことより、PCM①ゲルなしのように、流動性の高い PCM の計算においては、液相域において対流を考慮した見かけの熱伝導率の測定を行い、計算に反映させることが必要であると言える。

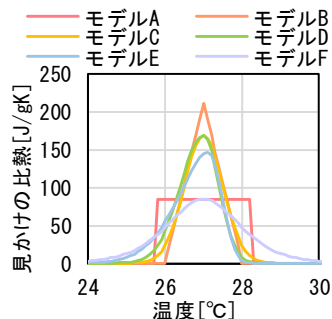
15



20

図 4.2.3 計算による見かけの比熱測定の再現 熱伝導率温度依存 PCM①ゲルなし 10分/°C

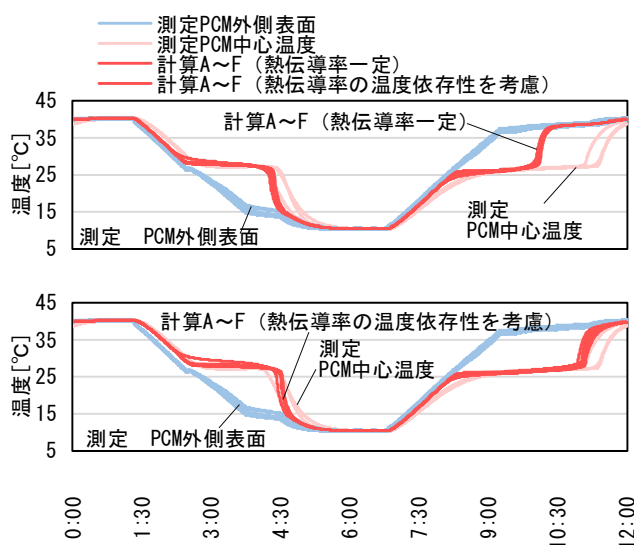
PCM①ゲルありの見かけの比熱は、表 4.1.1 を参考に、測定結果の見かけの比熱の形状および DSC での融解潜熱をもとに、以下のとおり与えた。



5 図 4.2.4 計算に使用する見かけの比熱 PCM①ゲルあり

PCM①ゲルありの見かけの熱伝導率について、温度依存性を考慮しない計算では固相時の測定結果  $0.32\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  を使用し、温度依存性を考慮する計算では、固相時  $0.32\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、液相時  $0.17\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、固液混相では融解割合に応じた重み付け平均（融解割合は温度に対して線形を仮定）とした。また、測定結果の再現性が高まるよう、固液混相の温度範囲は、融解時  $26\sim 29^\circ\text{C}$ 、凝固時  $23\sim 27^\circ\text{C}$  とした。固液混相における PCM の状態の確認は、今後の課題である。

PCM①ゲルありでも同様に、図 4.2.5 に全温度帯で固相時の熱伝導率を使用した場合と、熱伝導率の温度依存性を考慮した場合の中心温度の計算結果を示す。PCM①ゲルありでは、液相時に熱伝導率が小さくなり、対流が生じない場合でも相変化に伴う熱伝導率の温度依存性を考慮する必要があることが確認される。見かけの比熱については、PCM①ではモデルによる差が殆ど見られない。以降は、見かけの比熱測定結果を比較的良く再現できるモデル E を採用する。



20 図 4.2.5 計算による見かけの比熱測定の再現 PCM①ゲルあり 10 分/°C

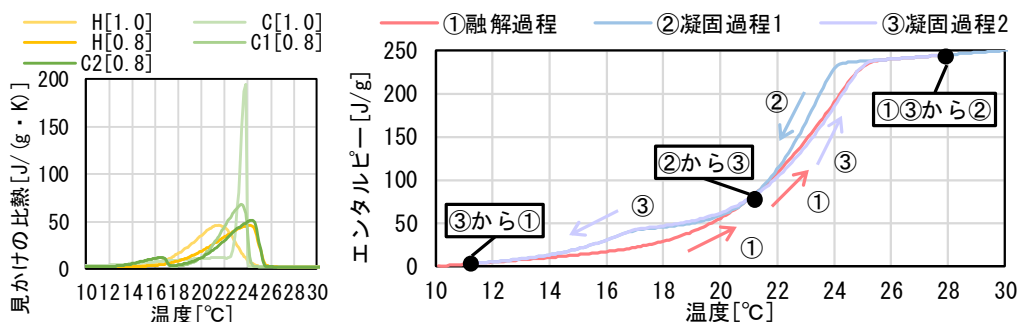


## (2) PCM②ゲルなし・ゲルあり

PCM②の見かけの比熱の測定結果について、計算での再現を試みた。ゲルなしの見かけの比熱の入力は、見かけの比熱測定における代表温度の取り方の検討のため、代表温度を算出の際の中心温度割合を変更した場合や、融解時と凝固時の見かけの比熱曲線の切り替え有無について、計算結果の比較を行った。

PCM②ゲルなしの計算における見かけの比熱は、図 4.2.6 のとおり与えた。全温度領域で連続的な関数であり、温度に対して非対称な形状を扱える、誤差関数を含むモデル E を用いた。見かけの比熱測定の中心温度割合の検討のため、中心温度割合を 1 とした場合(凡例[1.0])と 0.8(同[0.8])とした場合のそれぞれをもとに見かけの比熱の設定を行い、計算結果の比較を行う。また、融解時と凝固時の見かけの比熱曲線の切り替えに関し、融解時(凡例 H)のみの曲線を使用する場合と、凝固時(同 C、C1)や凝固途中に融解へ移行する際(同 C2)の曲線も使用する場合の両方で計算を行い、比較を行った。曲線の切り替えを行う場合、切り替えの判定は、現在時刻の PCM 温度により行った。即ち、収束計算により現在時刻の温度と見かけの比熱を求める際、温度が切り替えの判定温度に達していれば、現在時刻の見かけの比熱は切り替え後の見かけの比熱曲線を用いて算出することとした。例えば、図 4.2.6 の昇温過程において、温度が切り替えの判定温度 28°Cを跨ぐ計算ステップにおいては、1計算ステップ前の見かけの比熱は①融解過程の曲線により算出し、現在時刻の見かけの比熱は②凝固過程 1 の曲線により収束計算を行い算出する。

PCM②ゲルなしの見かけの比熱の入力は、誤差関数を含むモデルとし、中心温度割合を 1 とした場合には、融解過程の潜熱量 200J/g、ピーク温度 23.0°C、 $\omega$  3.0、skew-3.0、凝固過程の高温側の潜熱量 125J/g、ピーク温度 24.0°C、 $\omega$  0.5、skew-10、凝固過程の低温側の潜熱量 75J/g、ピーク温度 23.0°C、 $\omega$  6.0、skew-10 とした。中心温度割合を 0.8 とした場合には、融解過程の潜熱量 200J/g、ピーク温度 25.0°C、 $\omega$  3.5、skew-10、凝固過程 1 の高温側の潜熱量 175J/g、ピーク温度 24.0°C、 $\omega$  2.05、skew-10、凝固過程 1 の低温側の潜熱量 25J/g、ピーク温度 17.0°C、 $\omega$  2.0、skew-10、凝固過程 2 の高温側の潜熱量 175J/g、ピーク温度 25.0°C、 $\omega$  2.75、skew-10、凝固過程 2 の低温側の潜熱量 25J/g、ピーク温度 17.0°C、 $\omega$  2.0、skew-10 とした。見かけの比熱モデルのパラメータの決定方法について、見かけの比熱を積分して求められるエンタルピー曲線が、3章での測定で得られたエンタルピー曲線と概ね一致するよう、パラメータの値を与えた。



30 図 4.2.6 計算への(左)見かけの比熱の入力と(右)中心温度割合 0.8 での切り替え PCM②ゲルなし

PCM②融解時と凝固時の見かけの比熱曲線の切り替えについて、前章の測定結果をもとに、融解・凝固が完了した温度で切り替えを行うこととした。融解時から凝固時、融解時から凝固時への切り替えはそれぞれ、PCM②ゲルなしで、中心温度割合を1とした場合には、11℃と28℃で行うこととした。また、中心温度割合を0.8とした場合には、図 4.2.6 のとおり、21℃で融解時と凝固時の見かけの比熱曲線が重なる位置でも、曲線の切り替えが生じるものとした。昇温過程では、融解が完了するまで(ここでは28℃)、①融解時の曲線を用いる。融解が完了すると、②凝固時1の曲線に移行する。降温過程に転じ凝固が進むと(ここでは21℃)、③凝固時2の曲線に移行する。③凝固時2から、融解が完了すれば(ここでは28℃)、②凝固時1の曲線に移行し、凝固が完了すれば(ここでは11℃)、①融解時の曲線に移行する。なお、凝固時に、例えば、23℃まで降温して昇温に転じる場合や、16℃まで降温して昇温に転じる場合には、それぞれ②と①、③と①の中間的な曲線の挙動を取り得るが、モデル化の簡略のため、曲線は固定のものを使用することとした。

PCM②ゲルなしの見かけの熱伝導率は、既往研究<sup>14</sup>を参考に、凝固時は固相部と液相部が並列の熱抵抗となり、融解時は固相部と液相部が直列の熱抵抗となると仮定して、計算により求めた。ただし、既往研究<sup>14</sup>では、固相部と液相部の合成熱伝導率は比エンタルピーをもとに算出しているのに対し、本研究では見かけの比熱を温度より直接求める都合上、合成熱伝導率を温度の関数として算出している。凝固開始/完了温度、融解開始/完了温度を仮定し、PCM温度に対して線形に固相部と液相部の割合が変化する計算としている。

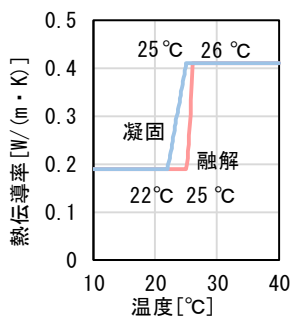


図 4.2.7 計算への熱伝導率の入力 PCM②ゲルなし

20

PCM②ゲルなしの計算結果を以下に示す。

見かけの比熱曲線の入力について、代表温度の中心温度割合を 1 (凡例[1.0])として測定結果より求めた見かけの比熱を参考にした場合と、中心温度割合を 0.8 とした場合 (同[0.8])のそれぞれの計算結果を示す。また、それぞれの中心温度割合で、融解時の見かけの比熱曲線のみを使用した場合 (凡例 H)と、凝固時や凝固途中に融解へ移行する際の曲線も使用した場合 (同 C)の両方の結果を示す。融解時の曲線のみを使用 (H[1.0]、H[0.8])では、凝固時に中心温度がほぼ一定の温度で安定する挙動を再現できない。一方、凝固時の曲線への切り替えを行う場合 (C[1.0]、C[0.8])には、凝固時に中心温度がほぼ一定し、計算精度が高まることより、融解時と凝固時の曲線の切り替えの必要性が確認される。中心温度割合については、0.8 とした場合の見かけの比熱曲線を入力した方が、計算による PCM 中心温度の測定の再現性が高い。特に、融解過程 (H[0.8])における相変化時の中心温度の再現精度が高くなっている。これは、測定時に試験体内部の厚さ方向に温度分布が生じており、試験体の代表温度としては、中心温度よりも、中心温度と外側表面温度を一定割合で重み付け平均をした値の方が望ましいことを示唆している。ただし、試験体内部の体積加重平均温度を、中心温度と外側表面温度の重み付け平均値で表す場合、相変化時の重み付け割合は時々刻々変化するものである。なお、15 分/℃での熱板温度の高温開始から昇温完了までの時間帯について、中心温度の測定結果と計算結果の差の絶対値の時間平均を取ったところ、H[1.0]で 0.59℃、H[0.8]で 0.55℃、C[1.0]で 0.61℃、H[0.8]で 0.49℃であり、中心温度割合 0.8 として見かけの比熱曲線の切替を行う場合に計算精度が高くなった。

以上を踏まえ、PCM②と PCM③ゲルありでは、中心温度割合を 0.8 とした見かけの比熱測定結果をもとに、融解時と凝固時の見かけの比熱曲線の切り替えを行うこととする。

20

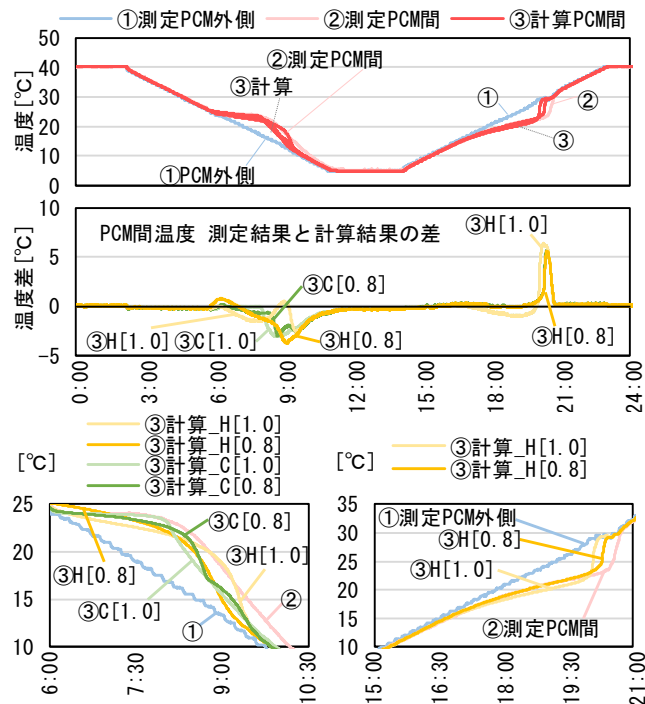


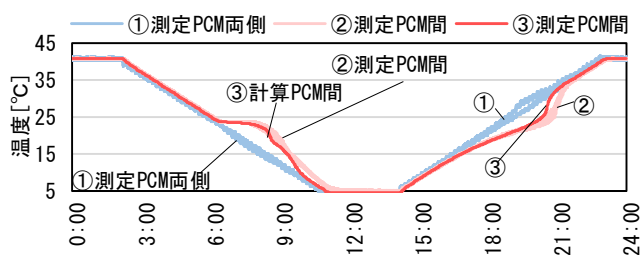
図 4.2.8 計算による見かけの比熱測定の再現 PCM②ゲルなし 15 分/℃

PCM②ゲルありの見かけの比熱の入力は、誤差関数を含むモデル E、融解過程の潜熱量 175J/g、ピーク温度 25.5°C、 $\omega$  5.0、skew-5.0、凝固過程 1 の高温側の潜熱量 130J/g、ピーク温度 23.5°C、 $\omega$  1.73、skew-10、凝固過程 1 の低温側の潜熱量 45J/g、ピーク温度 18.0°C、 $\omega$  3.0、skew-10、凝固過程 2 の高温側の潜熱量 130J/g、ピーク温度 25.5°C、 $\omega$  3.15、skew-5.0、凝固過程 2 の低温側の潜熱量 45J/g、ピーク温度 18.0°C、 $\omega$  3.0、skew-10 とした。見かけの比熱モデルのパラメータの決定方法について、見かけの比熱を積分して求められるエンタルピー曲線が、3章での測定で得られたエンタルピー曲線と概ね一致するよう、パラメータの値を与えた。見かけの比熱曲線の切り替えの方法は、PCM②ゲルなしと同様とした。

10 熱伝導率は、温度によらず 0.14W/(m・K)とした。

PCM②ゲルありの計算結果を以下に示す。

中心温度の測定結果と計算結果がほぼ一致していることが確認される。



15

図 4.2.9 計算による見かけの比熱測定の再現 PCM②ゲルあり 15分/°C

### (3) PCM③ゲルあり

PCM③の見かけの比熱の測定結果について、計算での再現を試みた。

20 PCM③ゲルありの見かけの比熱の入力は、モデル E、融解過程の潜熱量約 190J/g、ピーク温度 33.0°C、 $\omega$  4、skew-5、凝固過程 2 の潜熱量約 190J/g、ピーク温度 30.5°C、 $\omega$  2、skew-10 とした。見かけの比熱モデルのパラメータの決定方法について、見かけの比熱を積分して求められるエンタルピー曲線が、3章での測定で得られたエンタルピー曲線と概ね一致するよう、パラメータの値を与えた。曲線の切り替えを行う場合、切り替えの判定は、現在時刻の PCM 温度により行った。即ち、収束計算により現在時刻の温度と見かけの比熱を求める際、温度が切り替えの判定温度に達していれば、現在時刻の見かけの比熱は切り替え後の見かけの比熱曲線を用いて算出することとした。ただし、過冷却の解除を伴う②凝固過程 1 から③凝固過程 2 への移行は、前時刻の PCM 最低温度により、判定を行った。

25

PCM③ゲルありの見かけの熱伝導率は、既往研究<sup>14</sup>を参考に、凝固時は固相部と液相部が並列の熱抵抗となり、融解時は固相部と液相部が直列の熱抵抗となると仮定して、計算により求めた。ただし、既往研究<sup>14</sup>では、固相部と液相部の合成熱伝導率は比エンタルピーをもとに算出しているのに対し、本研究では見かけの比熱を温度より直接求める都合上、合成熱伝導率を温度の関数として算出している。凝固開始/完了温度、融解開始/完了温度を仮定し、PCM温度に対して線形に固相部と液相部の割合が変化する計算としている。

PCM③ゲルありの計算結果を以下に示す。

中心温度の測定結果と計算結果がほぼ一致していることが確認される。

10

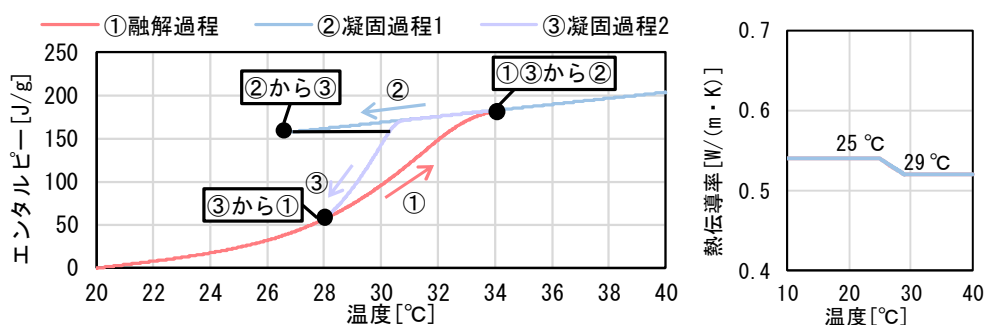


図 4.2.10 計算への(左)見かけの比熱と(右)熱伝導率の入力 PCM③ゲルあり

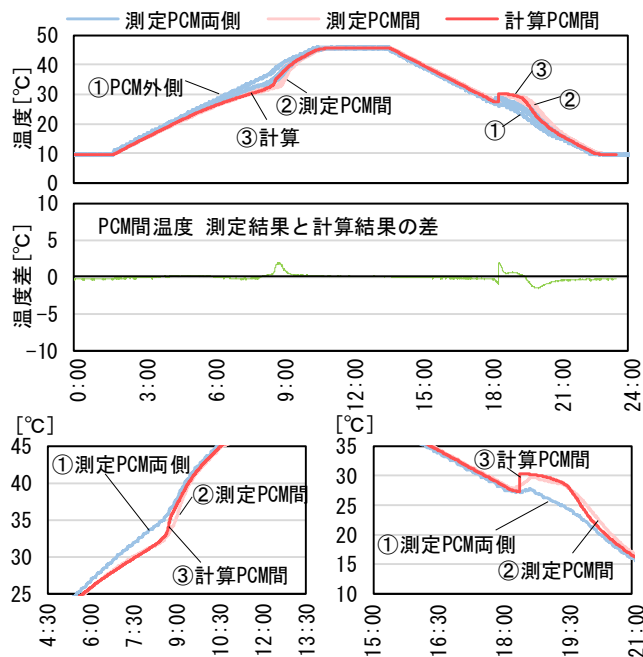


図 4.2.11 計算による見かけの比熱測定の再現 PCM③ゲルあり 15分/°C

15

#### 4.2.2 温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返しの測定の再現

##### (1) PCM①ゲルなし・ゲルあり

見かけの比熱測定の再現を踏まえ、見かけの比熱および見かけの熱伝導率を考慮し、温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返しの測定条件で、PCM 熱挙動再現のための計算を行った。

5 見かけの比熱の測定結果の再現で、PCM①では見かけの比熱モデルの影響が小さいことが確認されたため、ここでは、全温度領域で連続的な関数であり、非対称を扱える見かけの比熱モデルであるモデル E (誤差関数を含むモデル) を代表として用いた(ゲルなし:250J/g、27.5°C、 $\omega$  1、skew-5、ゲルあり:210J/g、ピーク温度 27.5°C、 $\omega$  1、skew-4)。

10 見かけの熱伝導率について、PCM①ゲルなしは、固相時 0.25W/(m・K)、液相時 0.62W/(m・K)、固液混相では融解割合に応じた重み付け平均(融解割合は温度に対して線形を仮定)とした。また、固液混相の温度範囲は、融解時 28~30°C、凝固時 23~27°Cとした。PCM①ゲルありは、固相時 0.32W/(m・K)、液相時 0.17W/(m・K)、固液混相では融解割合に応じた重み付け平均(融解割合は温度に対して線形を仮定)とした。また、固液混相の温度範囲は、融解時 26~29°C、凝固時 23~27°Cとした。

15

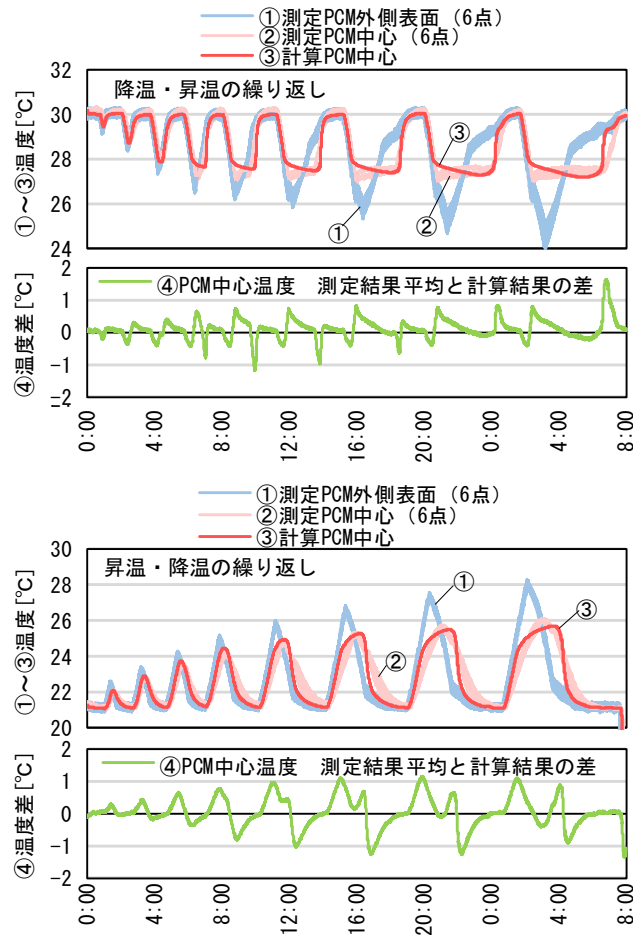
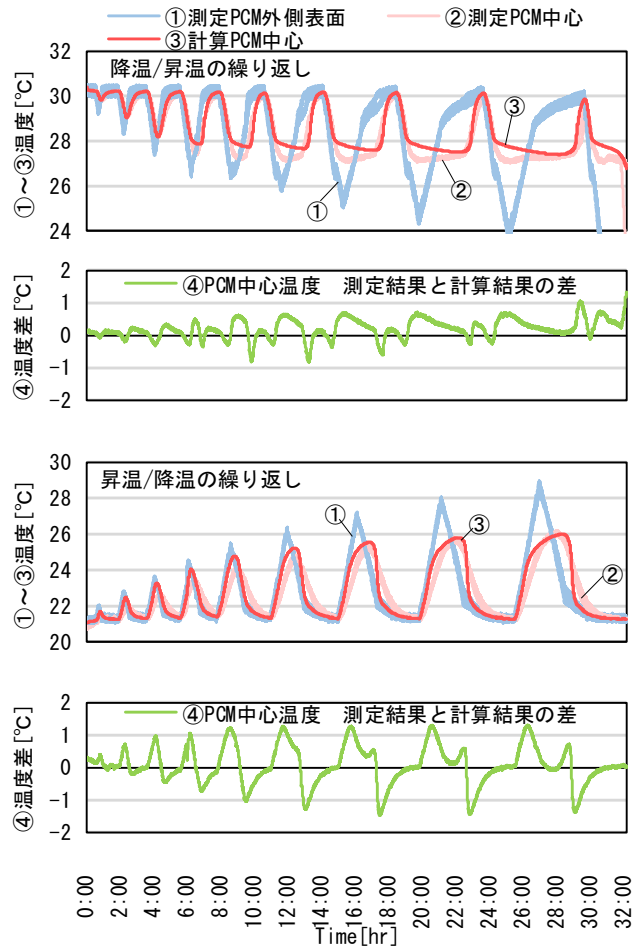


図 4.2.12 温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返し測定の計算による再現 PCM①ゲルなし

図 4.2.12 PCM①ゲルなしでは、一部、融解後の再凝固に要する時間に測定と計算で多少の差が生じている他、測定の PCM 中心温度で若干の過冷却が見られる状態を計算では再現できていない。また、図 4.2.13 の PCM①ゲルありの温度変動でも、融解後の再凝固に要する時間に測定と計算で多少の差が生じている。しかしながら、測定の大よその温度変動を、計算で比較的良好に再現できている。このことより、PCM①については、建材として使用される大きさや形状に近い状態において、見かけの比熱および見かけの熱伝導率を適切に与えることで、計算による挙動の再現が可能であると言える。

5



10

図 4.2.13 温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返し測定の計算による再現 PCM①ゲルあり

15



(2) PCM②ゲルなし・ゲルあり

PCM②の温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返しの測定について、計算での再現を試みた。

PCM②ゲルなしの見かけの比熱の入力は、誤差関数を含むモデル E、融解過程の潜熱量 200J/g、ピーク温度 25.0°C、 $\omega$  3.5、skew-10、凝固過程 1 の高温側の潜熱量 175J/g、ピーク温度 24.0°C、 $\omega$  2.05、skew-10、凝固過程 1 の低温側の潜熱量 25J/g、ピーク温度 17.0°C、 $\omega$  2.0、skew-10、凝固過程 2 の高温側の潜熱量 175J/g、ピーク温度 25.0°C、 $\omega$  2.75、skew-10、凝固過程 2 の低温側の潜熱量 25J/g、ピーク温度 17.0°C、 $\omega$  2.0、skew-10 とした。

熱伝導率は、凝固時には固相部と液相部が並列の熱抵抗となるよう、融解時には直列の熱抵抗となるよう、算出した。

10

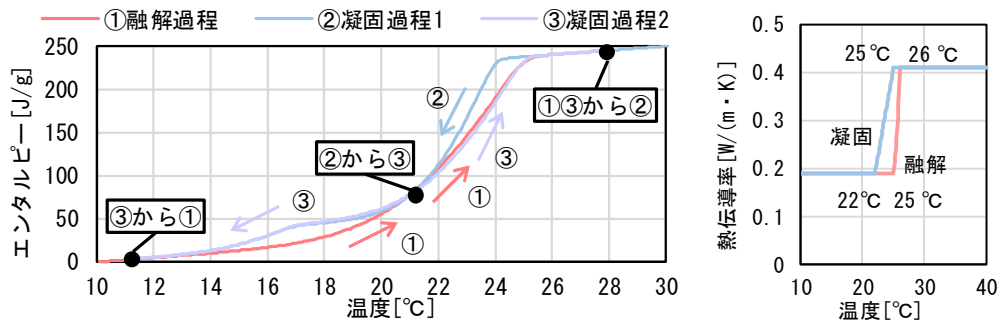


図 4.2.14 計算への(左)見かけの比熱と(右)熱伝導率の入力 PCM②ゲルなし

PCM②ゲルなしの計算結果を以下に示す。

15

中心温度の測定結果と計算結果がほぼ一致していることが確認される。

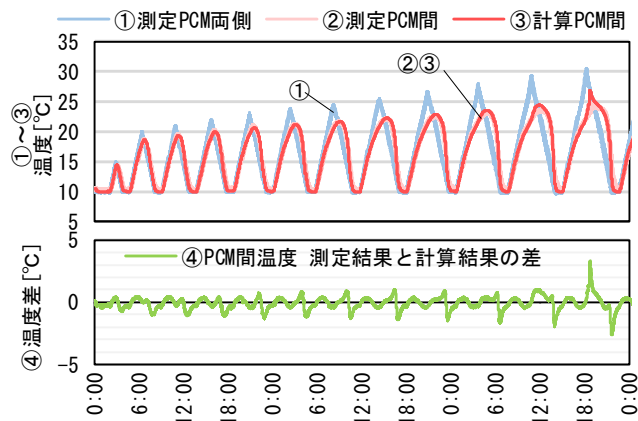


図 4.2.15 計算による温度の上昇・下降の繰り返しの測定の再現 PCM②ゲルなし



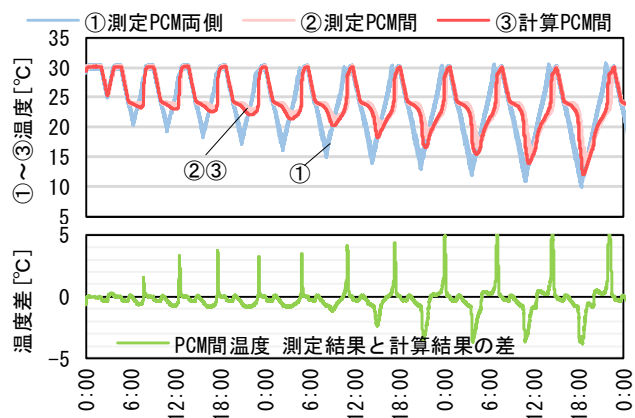


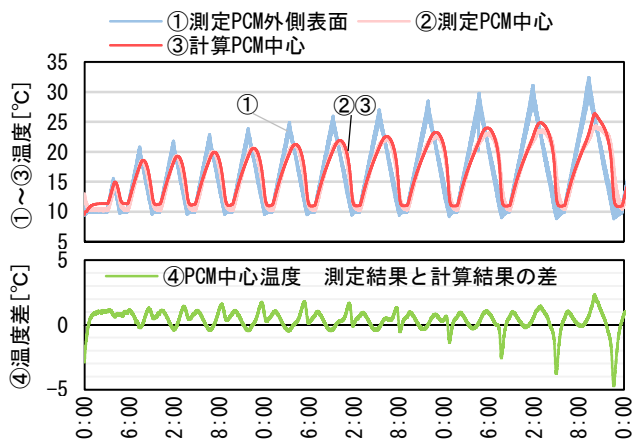
図 4.2.16 計算による温度の下降・上昇の繰り返しの測定の再現 PCM②ゲルなし

PCM②ゲルありの見かけの比熱の入力は、誤差関数を含むモデルE、融解過程の潜熱量 175J/g、ピーク温度 25.5°C、 $\omega$  5.0、skew-5.0、凝固過程 1 の高温側の潜熱量 130J/g、ピーク温度 23.5°C、 $\omega$  1.73、skew-10、凝固過程 1 の低温側の潜熱量 45J/g、ピーク温度 18.0°C、 $\omega$  3.0、skew-10、凝固過程 2 の高温側の潜熱量 130J/g、ピーク温度 25.5°C、 $\omega$  3.15、skew-5.0、凝固過程 2 の低温側の潜熱量 45J/g、ピーク温度 18.0°C、 $\omega$  3.0、skew-10 とした。見かけの比熱曲線の切り替えの方法は、PCM②ゲルなしと同様とした。

10 熱抵抗は、温度によらず 0.14W/(m・K)とした。

PCM②ゲルありの計算結果を以下に示す。

中心温度の測定結果と計算結果がほぼ一致していることが確認される。



15

図 4.2.17 計算による温度の上昇・下降の繰り返しの測定の再現 PCM②ゲルあり

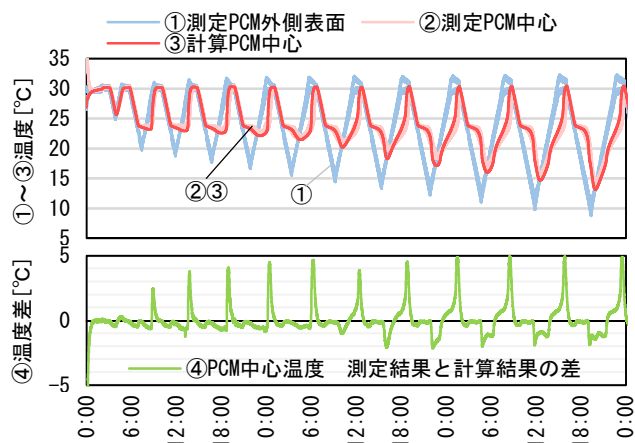


図 4.2.18 計算による温度の下降・上昇の繰り返しの測定の再現 PCM②ゲルあり

### (3) PCM③ゲルあり

5 PCM③の温度の上昇・下降、下降・上昇の繰り返しの測定について、計算での再現を試みた。

PCM③ゲルありの見かけの比熱の入力は、誤差関数を含むモデルE、融解過程の潜熱量約 190J/g、ピーク温度 33.0°C、 $\omega$  4、skew-5、凝固過程 2 の潜熱量約 190J/g、ピーク温度 30.5°C、 $\omega$  2、skew-10 とした。

10 PCM③ゲルありの見かけの熱伝導率は、既往研究<sup>14</sup>を参考に、凝固時は固相部と液相部が並列の熱抵抗となり、融解時は固相部と液相部が直列の熱抵抗となると仮定して、計算により求めた。ただし、既往研究<sup>14</sup>では、固相部と液相部の合成熱伝導率は比エンタルピーをもとに算出しているのに対し、本研究では見かけの比熱を温度より直接求める都合上、合成熱伝導率を温度の関数として算出している。凝固開始/完了温度、融解開始/完了温度を仮定し、PCM 温度に対して線形に固相部と液相部の割合が変化する計算としている。

15

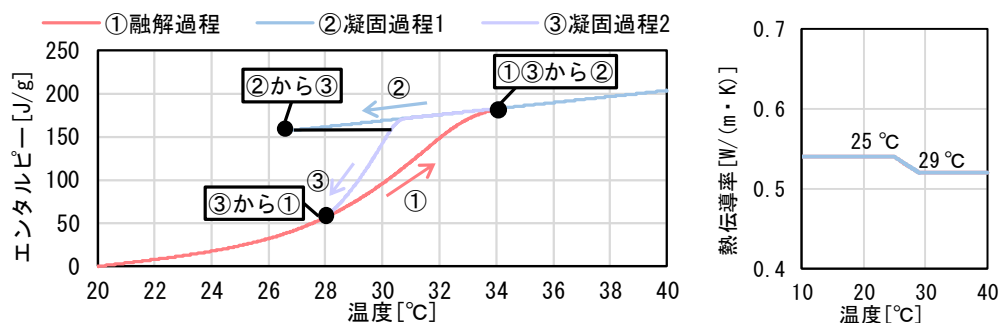
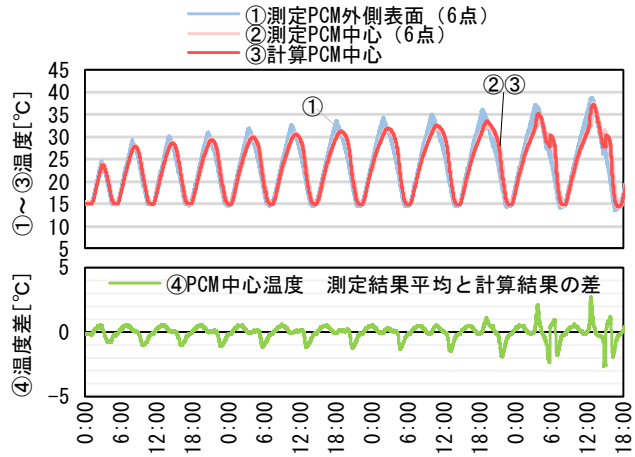


図 4.2.19 計算への(左)見かけの比熱と(右)熱伝導率の入力 PCM③ゲルあり

PCM③ゲルありの計算結果を以下に示す。

中心温度の測定結果と計算結果がほぼ一致していることが確認される。



5 図 4.2.20 計算による温度の上昇・下降の繰り返しの測定の再現 PCM③ゲルあり

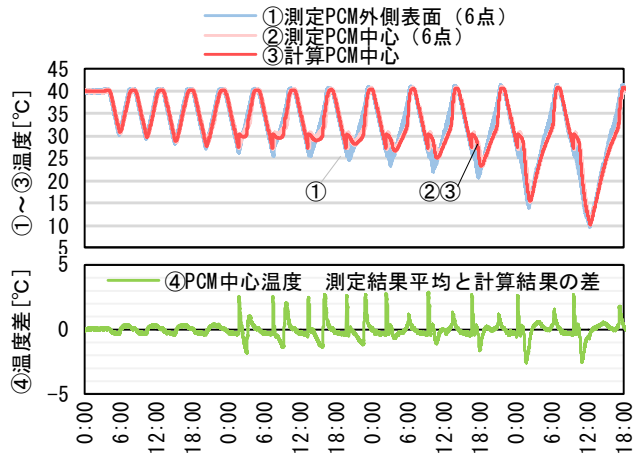


図 4.2.21 計算による温度の下降・上昇の繰り返しの測定の再現 PCM③ゲルあり

### 4.3 測定条件を再現した計算による見かけの比熱測定の温度変化条件の検討

#### 4.3.1 目的

計算により、温度変化の設定条件等の測定条件や、熱伝導率、相変化温度幅といった要因が、見かけの比熱の測定結果の精度に与える影響を確認する。ここでは、PCM の見かけの比熱は、温度の関数として計算に入力した値を正とし、計算結果より得られる見かけの比熱について、入力値の再現性を確認する。

#### 4.3.2 検討手法

計算は、板状、面状の PCM 試験体に対して垂直な方向の一次元熱伝導を仮定した。2つの PCM 試験体は試験体同士の接触面に対して対称な温度分布になると想定されるため、計算対象範囲を図 4.3.1 (左) の左半分とし、温度制御面により制御された左端の温度を境界温度として与え、PCM 内側表面は断熱境界として扱う。壁体内部の温度は、文献<sup>3</sup>に基づき、以下の式(4-6)～(4-10)により、式(4-6)については後退差分で離散化して、計算を行った。

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{0.5(CAP_{m-1,m} + CAP_{m,m+1})} \left\{ \frac{1}{R_{m,m+1}} (T_{m+1} - T_m) - \frac{1}{R_{m-1,m}} (T_m - T_{m-1}) \right\} \quad (4-6)$$

$$CAP_{m-1,m} = \frac{c_{m-1,m}(T_m^*) + c_{m-1,m}(T_m)}{2} \cdot (1000\rho_{m-1,m}) \cdot \Delta x_{m-1,m} \quad (4-7)$$

$$CAP_{m,m+1} = \frac{c_{m,m+1}(T_m^*) + c_{m,m+1}(T_m)}{2} \cdot (1000\rho_{m,m+1}) \cdot \Delta x_{m,m+1} \quad (4-8)$$

$$R_{m-1,m} = \frac{\Delta x_{m-1,m}}{\lambda_{m-1,m}} \quad (4-9)$$

$$R_{m,m+1} = \frac{\Delta x_{m,m+1}}{\lambda_{m,m+1}} \quad (4-10)$$

15

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\lambda$  : 熱伝導率 [W/(m・K)]

$\Delta x$  : 壁体分割幅 [m]

$T_m$  : 現在時刻における節点 m の温度 [°C]

20  $T_m^*$  : 1 計算ステップ前における節点 m の温度 [°C]

$t$  : 時間 [s]

$CAP$  : 節点間の層の単位面積あたり熱容量 [J/(m<sup>2</sup>・K)]

$R$  : 節点間の熱抵抗 [m<sup>2</sup>・K/W]

$c(T)$  : 温度 T におけるみかけの比熱 [J/(g・K)]

25 添字 m : 差分法における節点を示す

添字 m-1, m, m+1 : それぞれ節点 m-1 と節点 m の間の層、節点 m と節点 m+1 の間の層を示す

文献<sup>3</sup>では、比熱は、層ごとに与えることが想定されている。しかしながら、ここでは、見かけの比熱が変化するPCMの比熱は、節点の温度を使用し、節点の両側の層それぞれの1/2の厚みの比熱を使用する。これは、節点に対して流入／流出する熱量より求まる節点でのエンタルピーと、節点温度の整合性を取るためである。

- 5 節点 m+1 より節点 m に流入する熱流は、式(4-11)により算出される。節点 m-1 より節点 m に流入する熱流は、 $-q_{m-1,m}$ となる。

$$q_{m,m+1} = \frac{T_{m+1} - T_m}{R_{m,m+1}} \quad (4-11)$$

$q_{m,m+1}$  : 節点 m+1 から節点 m への流入熱流[W/m<sup>2</sup>]

10

熱伝導計算結果より求める見かけの比熱、エンタルピー、比エンタルピーはそれぞれ、式(4-12)～(4-15)に基づき、1℃刻みで算出する。例えば、30℃の見かけの比熱は、昇温時には代表温度が 30℃から 31℃に上昇する間、降温時には 31℃から 30℃に低下する間の熱流等より求める。代表温度は、PCM の外側表面または内側表面、もしくは外側・内側表面の平均温度(単純平均)とし、見かけの比熱の再現精度への影響を確認する。

15

$$c_{PCM,h}(T) = \frac{A}{M\Delta T} \cdot \int_{t=t_T}^{t_T+\Delta T} q_{po} dt \quad (4-12)$$

$$c_{PCM,c}(T) = \frac{A}{M\Delta T} \cdot \int_{t=t_T+\Delta T}^{t_T} (-q_{po}) dt \quad (4-13)$$

$$H_{PCM}(T) = \int_{t=t_{Ts}}^{t_T} q_{po} dt \quad (4-14)$$

$$h_{PCM}(T) = \frac{A \cdot H_{PCM}(T)}{M} \quad (4-15)$$

$T$  : 代表温度[℃]

$\Delta T$  : 代表温度の温度変化の刻み幅[℃]ここでは1℃とする。

20

$c_{PCM,h}(T), c_{PCM,c}(T)$  : 計算結果より求める温度  $T$ [℃]における昇温時/降温時のPCMの見かけの比熱 [J/(g・K)]

$H_{PCM}(T)$  : 計算結果より求める、基準温度を  $T_s$ [℃]とした場合の、温度  $T$ [℃]におけるPCMの単位面積あたりのエンタルピー[J/m<sup>2</sup>]

$h_{PCM}(T)$  : 計算結果より求める、基準温度を  $T_s$ [℃]とした場合の、温度  $T$ [℃]におけるPCMの単位質量あたりの比エンタルピー[J/g]

25

$q_{po}$  : 境界温度を与える節点から、試験体外側表面の節点への熱流[W/m<sup>2</sup>](熱流計での測定値に対応することを想定)試験体に流入する熱流を正とする。

$A$  : 試験体が温度制御面に接する面積[m<sup>2</sup>]計算上は、単位面積1m<sup>2</sup>を想定。

$M$  : 試験体質量[g]ここでは、試験体の密度と厚より求められる単位面積あたりの質量を想定。

30

$t_T$  : 代表温度が  $T$ [℃]となる時刻[s]

熱流の計算結果より求める見かけの比熱の特性を示す値として、ピーク温度および相変化温度幅の計算結果を以下のように定義する。

- 5 ピーク温度 : 計算結果より求める、1℃刻みで集計した見かけの比熱が、最も大きい値をとるとき  
の温度[℃]
- 10 相変化温度幅 : 温度 1℃刻みで集計した見かけの比熱が、相変化温度範囲内にあるとみなされる  
温度の刻みの数に、刻み幅である 1℃を掛けた値[℃]見かけの比熱が相変化温度  
範囲内にあることの判断について、相変化温度範囲外の比熱(ここでは 1J/(g・K))  
が正確に得られているとして、その 2 倍の値(ここでは 2J/(g・K))よりも、計算結果より  
求める見かけの比熱が大きい場合に、見かけの比熱に対応する温度が相変化温度  
範囲内にあるとみなした。

### 4.3.3 計算条件

表 4.3.1 に、主な計算条件および想定する PCM の物性値を示す。

- 15 PCM の熱伝導率、潜熱量、相変化温度幅について、表 4.3.1 に示す複数の水準で計算を行う。  
一次元熱伝導を想定し、図 4.3.1 のように、2 つの PCM の層および PCM 外側の 2 枚の熱流計を計  
算対象とした。計算は PCM の各層を熱流方向に 10 分割して行うものの、測定で温度情報が得られる  
点は、PCM の外側と内側の表面温度に限られる。また、測定で熱流計が設置されると想定される位置  
を、同図中に示す。この外側の、境界温度を与える節点から、試験体外側表面の接点への熱流を用い  
て、見かけの比熱の算出を行う。熱流計の比熱は、簡単のため、無視出来る程小さいものとみなした。  
20 境界温度変動は、降温時について扱い、PCM 相変化温度範囲を十分に跨ぐよう設定した。  
見かけの比熱の入力値は、図 4.3.1 に示すように与える。

表 4.3.1 計算条件

項目	項目	水準	
計算間隔	10 秒		
境界条件	PCM 両側温度変動 (降温)	5 分/℃、10 分/℃、15 分/℃、30 分/℃、60 分/℃	
物性値等	PCM	厚	10mm (10 分割) × 2 枚
		密度	1000kg/m <sup>3</sup>
		熱伝導率	0.1W/(m・K)、0.2W/(m・K)、0.3W/(m・K)
		顕熱容積比熱	1J/g
		潜熱量	50J/g、100J/g、200J/g
		見かけの比熱ピーク/幅	30℃/1℃、30℃/10℃
	熱流計	厚	1mm (2 分割)
		熱伝導率	0.1W/(m・K)
		容積比熱	0kJ/(m <sup>3</sup> ・K)

25

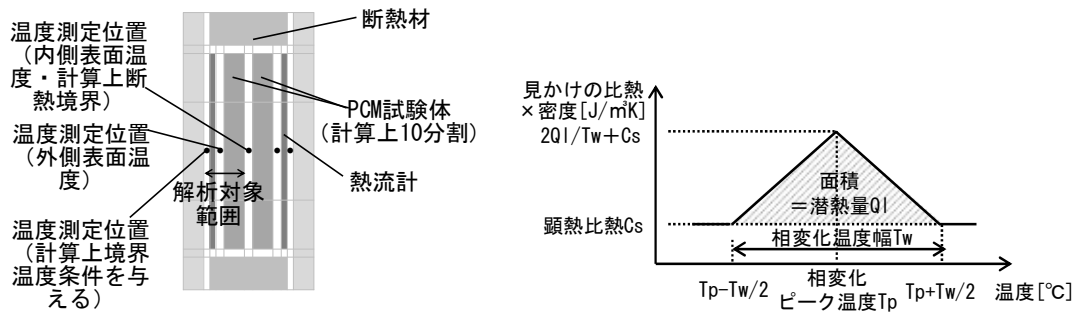


図 4.3.1 (左)解析対象範囲と境界条件(右)計算に入力した PCM の温度と見かけの比熱の関係

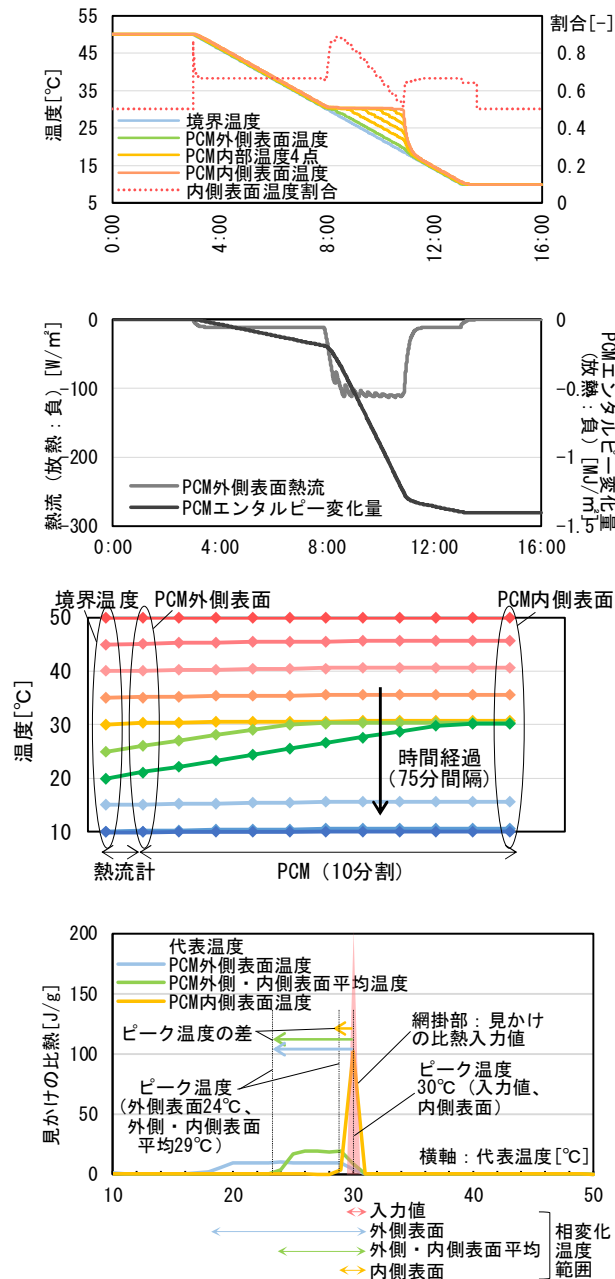


図 4.3.2 熱伝導率  $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、潜熱量  $100\text{J}/\text{g}$ 、相変化温度幅  $1^\circ\text{C}$  の  $15^\circ\text{C}$  における計算結果

#### 4.3.4 計算結果

図 4.3.2 に、熱伝導率  $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、潜熱量  $100\text{J}/\text{g}$ 、相変化温度幅  $1^\circ\text{C}$  の  $15\text{分}/^\circ\text{C}$  における計算結果の例を示す。

同図上から 1 段目の温度変動のグラフについて、相変化温度域において温度変動が緩やかになることが確認される。また、同図上から 2 段目の熱流および PCM 吸放熱量の変動のグラフの通り、相変化に伴い大きな熱流が生じ、PCM が放熱していることが確認される。PCM 吸放熱量は、 $50^\circ\text{C}$  の時点を基準としている。同図上から 3 段目の降温時の熱流方向の温度分布のグラフについて、境界温度は一定の温度勾配で変化している。一方、中心部の温度は、相変化温度付近で一時的に安定している。

代表温度と見かけの比熱の関係について、同図上から 4 段目のグラフのとおり、代表温度を内側表面温度とした場合には、ピーク温度は  $30^\circ\text{C}$ 、相変化温度幅  $2^\circ\text{C}$  であった。入力値と比較的近い値を示すことが確認される。一方、代表温度を外側表面温度や、外側・内側表面温度の平均値とした場合には、見かけの比熱の入力値との差が大きくなることが確認される。これは、温度や熱流の時系列変化のグラフや、降温時の熱流方向の温度分布のグラフからも確認される。相変化に伴う熱流の増加は、計算上は、外側表面が相変化温度域の上限に達して凝固を開始してから、内側表面まで温度低下が進み、さらに内側表面温度が相変化温度域の下限に達するまで継続する。この間、計算上は、外側表面温度は低下を続けるのに対し、内側表面温度は相変化温度付近に止まるため、相変化温度の入力値に近いピーク温度を示すのは、内側表面温度となる。ただし、一般に PCM は過冷却等の影響により、融点より凝固点温度の方が低い傾向があるが、内側表面温度を代表温度とした場合には、内側表面温度は試験体中で最も高い温度となっているため、実際と逆の傾向の結果となり得る点に留意すべきである。

ピーク温度および相変化温度範囲が見かけの比熱における特徴を表すとみなし、図 4.3.3 および図 4.3.4 に、各温度変動における検討対象の全ての物性値の PCM について、計算の入力と結果のピーク温度の差と、相変化温度幅の差の結果を示す。代表温度を、外側表面温度、外側・内側表面温度、内側表面温度とした場合について、それぞれ結果を示す。

ここでは、判定条件を、仮に、ピーク温度については  $2^\circ\text{C}$ 、相変化温度については  $5^\circ\text{C}$  とし、各温度変動における検討対象の各 PCM に対し、計算の入力のピーク温度と変化温度幅の差が、それぞれ、判定条件以内の差に収まるか否かの判定を行っている。また、検討対象の各 PCM に対し、計算の入力のピーク温度と変化温度幅の差がそれぞれ判定条件を満たす温度変動のうち、最も変動の大きな速度と、その速度におけるピーク温度と相変化温度幅について、計算の入力と結果の差を示す。

温度変動が緩やかになる程、判定条件を満たしやすくなる傾向が見られる。相変化温度幅  $1^\circ\text{C}$  では、代表温度を内側表面温度とした場合に判定条件を満たしやすくなる傾向が確認される。



判定条件

ピーク温度	2℃以内
ピーク幅	5℃以内

- 上から、①ピーク温度のずれ (-4℃ならばピーク温度 30-4=26℃)  
 ②ピーク幅のずれ (7℃ならばピーク幅 1+7=8℃)  
 ③ピーク温度、ピーク幅の入力値とのずれが、判定条件に収まるか

温度変化

↑速  
熱抵抗  
小↑

熱抵抗  
大↓

10分/℃

15分/℃

30分/℃

60分/℃

↓遅  
温度変化

		外側表面			外側・内側表面平均			内側表面		
		500kJ/m <sup>2</sup>	1000kJ/m <sup>2</sup>	2000kJ/m <sup>2</sup>	500kJ/m <sup>2</sup>	1000kJ/m <sup>2</sup>	2000kJ/m <sup>2</sup>	500kJ/m <sup>2</sup>	1000kJ/m <sup>2</sup>	2000kJ/m <sup>2</sup>
5分/℃	降溫 潜熱量	50J/g	100J/g	200J/g	50J/g	100J/g	200J/g	50J/g	100J/g	200J/g
0.03mK/W	0.30W/mK	-1 8	-1 11	-3 17	-1 4	-1 5	-2 8	0 1	0 1	0 1
	0.20W/mK	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK	OK	OK
	0.10W/mK	-1 10	-3 15	-17 20	-1 5	-4 7	-5 9	0 1	0 1	0 1
0.05mK/W	0.30W/mK	-1 6	-1 8	-1 11	-1 3	-1 4	-1 6	0 1	0 1	0 1
	0.20W/mK	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK	OK	OK
	0.10W/mK	-1 7	-1 10	-3 15	-1 4	-1 5	-1 7	0 1	0 1	0 1
0.10mK/W	0.30W/mK	-1 5	-1 6	-1 9	-1 3	-1 3	-1 5	0 1	0 1	0 1
	0.20W/mK	OK	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	0.10W/mK	-1 9	-1 9	-2 17	-1 4	-1 4	-2 8	0 1	0 1	0 1
0.03mK/W	0.30W/mK	-1 3	-1 5	-1 7	-1 2	-1 3	-1 3	0 1	0 1	0 1
	0.20W/mK	OK	OK	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	0.10W/mK	-1 4	-1 6	-1 9	-1 2	-1 3	-1 4	0 1	0 1	0 1
0.05mK/W	0.30W/mK	-1 2	-1 3	-1 5	-1 2	-1 2	-1 3	0 1	0 1	0 1
	0.20W/mK	OK	OK	NG	OK	OK	NG	OK	OK	OK
	0.10W/mK	-1 4	-1 6	-1 8	-1 2	-1 3	-1 8	0 1	0 1	0 1
0.10mK/W	0.30W/mK	-1 2	-1 3	-1 5	-1 2	-1 2	-1 3	0 1	0 1	0 1
	0.20W/mK	OK	OK	NG	OK	OK	NG	OK	OK	OK
	0.10W/mK	-1 4	-1 6	-1 8	-1 2	-1 3	-1 8	0 1	0 1	0 1
ピーク温度	0.30W/mK	15分/℃	30分/℃	60分/℃	5分/℃	5分/℃	15分/℃	5分/℃	5分/℃	5分/℃
	0.20W/mK	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	0.0℃	0.0℃	0.0℃
	0.10W/mK	5.0℃	5.0℃	5.0℃	4.0℃	5.0℃	5.0℃	1.0℃	1.0℃	1.0℃
ピーク幅	0.30W/mK	30分/℃	60分/℃	NG	5分/℃	10分/℃	30分/℃	5分/℃	5分/℃	5分/℃
	0.20W/mK	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	0.0℃	0.0℃	0.0℃
	0.10W/mK	4.0℃	4.0℃	4.0℃	5.0℃	5.0℃	4.0℃	1.0℃	1.0℃	1.0℃
ピーク温度	0.30W/mK	10分/℃	10分/℃	NG	10分/℃	10分/℃	10分/℃	5分/℃	5分/℃	5分/℃
	0.20W/mK	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	0.0℃	0.0℃	0.0℃
	0.10W/mK	5.0℃	5.0℃	5.0℃	5.0℃	5.0℃	5.0℃	2.0℃	2.0℃	2.0℃
ピーク幅	0.30W/mK	15分/℃	30分/℃	60分/℃	5分/℃	5分/℃	15分/℃	5分/℃	5分/℃	5分/℃
	0.20W/mK	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	-1.0℃	0.0℃	0.0℃	0.0℃
	0.10W/mK	5.0℃	5.0℃	5.0℃	4.0℃	5.0℃	5.0℃	1.0℃	1.0℃	1.0℃

- 上から、①判定条件を満たす速度で最も速い速度  
 ②その速度でのピーク温度のずれ  
 ③その速度でのピーク幅のずれ

図 4.3.3 計算結果 相変化温度幅 1℃

判定条件	
ピーク温度	2 °C以内
ピーク幅	5 °C以内

	外側表面				外側・内側表面平均				内側表面				
	降温	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g
5分/°C	0.03mK/W 0.30W/mK	-3 2 NG	-3 5 NG	-3 9 NG	0.30W/mK 50J/g	-1 0 OK	-1 2 OK	-1 4 OK	0.30W/mK 50J/g	0 -2 OK	1 -1 OK	1 -1 OK	1 -1 OK
	0.05mK/W 0.20W/mK	-4 3 NG	-3 7 NG	-3 14 NG	0.20W/mK 50J/g	-2 0 OK	-1 3 OK	0 6 NG	0.20W/mK 50J/g	1 -2 OK	1 -2 OK	2 -1 OK	2 -1 OK
	0.10mK/W 0.10W/mK	-4 8 NG	-6 13 NG	-18 14 NG	0.10W/mK 50J/g	-1 2 OK	-2 4 OK	-9 6 NG	0.10W/mK 50J/g	2 -2 OK	2 -2 OK	3 0 NG	3 0 NG
10分/°C	0.03mK/W 0.30W/mK	-2 0 OK	-2 2 OK	-3 6 NG	0.30W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 1 OK	-1 2 OK	0.30W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	1 -1 OK	1 -1 OK
	0.05mK/W 0.20W/mK	-3 1 NG	-3 4 NG	-3 9 NG	0.20W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 1 OK	-1 3 OK	0.20W/mK 50J/g	0 -1 OK	1 -1 OK	1 -1 OK	1 -1 OK
	0.10mK/W 0.10W/mK	-4 3 NG	-3 8 NG	-4 14 NG	0.10W/mK 50J/g	-1 0 OK	-1 3 OK	-1 6 NG	0.10W/mK 50J/g	1 -2 OK	1 -2 OK	2 -1 OK	2 -1 OK
15分/°C	0.03mK/W 0.30W/mK	-2 0 OK	-2 1 OK	-3 4 NG	0.30W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 0 OK	-1 2 OK	0.30W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	0 -1 OK	0 -1 OK
	0.05mK/W 0.20W/mK	-2 0 OK	-3 2 NG	-3 6 NG	0.20W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 1 OK	-1 2 OK	0.20W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	1 -1 OK	1 -1 OK
	0.10mK/W 0.10W/mK	-3 2 NG	-4 5 NG	-4 10 NG	0.10W/mK 50J/g	-1 0 OK	-1 2 OK	-1 4 OK	0.10W/mK 50J/g	0 -2 OK	1 -1 OK	2 -1 OK	2 -1 OK
30分/°C	0.03mK/W 0.30W/mK	-1 -1 OK	-2 1 OK	-2 2 OK	0.30W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 0 OK	-1 1 OK	0.30W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	0 -1 OK	0 -1 OK
	0.05mK/W 0.20W/mK	-2 -1 OK	-2 1 OK	-3 3 NG	0.20W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 0 OK	-1 1 OK	0.20W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	0 -1 OK	0 -1 OK
	0.10mK/W 0.10W/mK	-3 0 NG	-3 2 NG	-4 6 NG	0.10W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 1 OK	-1 2 OK	0.10W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	1 -1 OK	1 -1 OK
60分/°C	0.03mK/W 0.30W/mK	-1 -1 OK	-1 0 OK	-2 1 OK	0.30W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 0 OK	-1 0 OK	0.30W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 0 OK	0 0 OK	0 0 OK
	0.05mK/W 0.20W/mK	-1 -1 OK	-2 0 OK	-2 1 OK	0.20W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 0 OK	-2 1 OK	0.20W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 0 OK	0 0 OK	0 0 OK
	0.10mK/W 0.10W/mK	-2 -1 OK	-2 0 OK	-3 3 NG	0.10W/mK 50J/g	-1 -1 OK	-1 0 OK	-3 3 NG	0.10W/mK 50J/g	0 -1 OK	0 -1 OK	0 0 OK	0 -1 OK
	外側表面	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g	外側・内側表面平均	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g	内側表面	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g	1000kJ/m <sup>2</sup> 100J/g	2000kJ/m <sup>2</sup> 200J/g	500kJ/m <sup>2</sup> 50J/g
	0.03mK/W ピーク温度	10分/°C -2.0°C	10分/°C -2.0°C	30分/°C -2.0°C	0.30W/mK 5分/°C	-1.0°C	5分/°C -1.0°C	5分/°C -1.0°C	0.30W/mK 5分/°C	5分/°C 0.0°C	5分/°C 1.0°C	5分/°C 1.0°C	5分/°C 1.0°C
	0.05mK/W ピーク温度	15分/°C -2.0°C	30分/°C -2.0°C	60分/°C -2.0°C	0.20W/mK 5分/°C	-2.0°C	5分/°C -1.0°C	10分/°C -1.0°C	0.20W/mK 5分/°C	5分/°C 1.0°C	5分/°C 1.0°C	5分/°C 2.0°C	5分/°C 2.0°C
	0.10mK/W ピーク温度	60分/°C -2.0°C	60分/°C -2.0°C	NG 1.0°C	0.10W/mK 5分/°C	5分/°C -1.0°C	5分/°C -2.0°C	15分/°C -1.0°C	0.10W/mK 5分/°C	5分/°C 2.0°C	5分/°C 2.0°C	10分/°C 2.0°C	10分/°C 2.0°C
	ピーク幅	0.0°C	2.0°C	2.0°C	0.30W/mK 5分/°C	0.0°C	2.0°C	4.0°C	0.30W/mK 5分/°C	-2.0°C	-1.0°C	-1.0°C	-1.0°C
	ピーク幅	0.0°C	2.0°C	2.0°C	0.20W/mK 5分/°C	0.0°C	2.0°C	3.0°C	0.20W/mK 5分/°C	-2.0°C	-1.0°C	-1.0°C	-1.0°C
	ピーク幅	0.0°C	2.0°C	2.0°C	0.10W/mK 5分/°C	0.0°C	2.0°C	4.0°C	0.10W/mK 5分/°C	-2.0°C	-2.0°C	-1.0°C	-1.0°C

図 4.3.4 計算結果 相変化温度幅 10°C

## 4.4 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の提案

### 4.4.1 置換モデルの提案の目的

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<sup>15</sup>、佐藤ら<sup>7</sup>、藤田ら<sup>16</sup>の研究が挙げられる。そのうち、武田の研究<sup>15</sup>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<sup>7</sup>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<sup>16</sup>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<sup>17</sup>。また、永田の研究<sup>18</sup>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。

本節では、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<sup>注1</sup>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まら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<sup>15</sup>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。本研究では、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

<sup>注1</sup> 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。

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。

## 5 4.4.2 置換モデルの提案

### (1) 置換モデルの概念

図 4.4.1 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、本研究では、内壁等への設置を前提とする。

10 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。

15 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  
20 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。

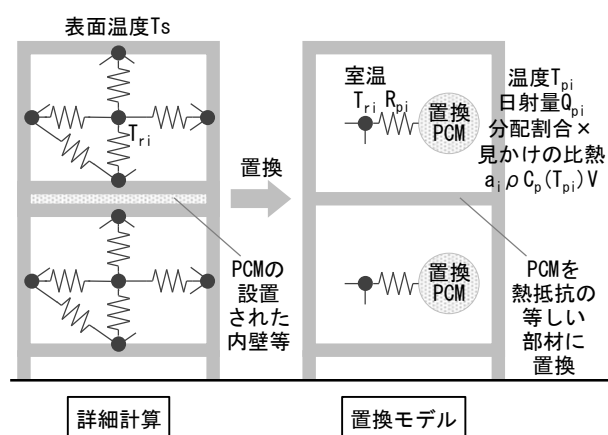


図 4.4.1 置換モデル概念図

### 25 (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(4-16)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。

$$a_i \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{d C_p(T_{pi}) \cdot T_{pi}}{dt} = \frac{T_{ri} - T_{pi}}{R_{pi}} + Q_{pi} \quad (4-16)$$

- $a_i$  : 室 i への PCM 分配割合[-]  
 $\rho$  : 内壁等に設置された PCM の密度[g/m<sup>3</sup>]  
 $V$  : 内壁等に設置された PCM の容積[m<sup>3</sup>]  
 5  $C_p(T_{pi})$ : 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]  
 10  $Q_{pi}$  : 室 i の置換 PCM に分配される日射量[W]

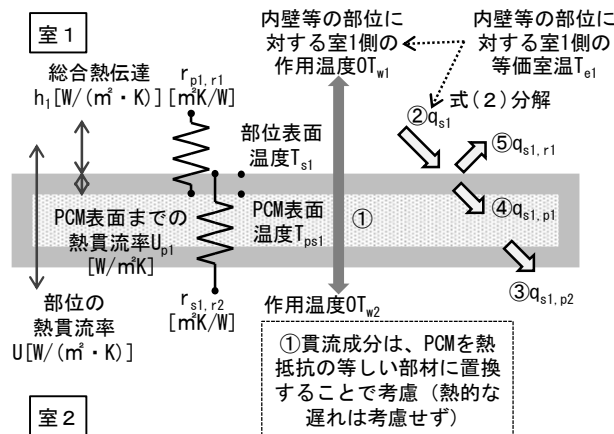
### (3) 内壁等の吸収日射の分配モデル

- 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 4.4.2 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(4-17)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、 $q_{s1}/h_l$  の等価温度上昇で表現する。式(4-17)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。

$$q_{t1} = U \cdot (T_{e1} - OT_{w2}) = U \cdot \left\{ \left( OT_{w1} + \frac{q_{s1}}{h_1} \right) - OT_{w2} \right\} = U \cdot (OT_{w1} - OT_{w2}) + \frac{q_{s1} U}{h_1} \quad (4-17)$$

$$OT_{wi} = \frac{h_{ci} T_{ri} + h_{ri} T_{wi}}{h_{ci} + h_{ri}} \quad (4-18)$$

- $q_{t1}$  : 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/m<sup>2</sup>]  
 $q_{si}$  : 内壁等の部位の室 i 側表面での吸収日射[W/m<sup>2</sup>] (i=1,2)  
 $U$  : 内壁等の部位の熱貫流率[W/(m<sup>2</sup>・K)]  
 25  $h_i$  : 部位の室 i 側表面の総合熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]  
 $h_{ci}$  : 部位の室 i 側表面の対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]  
 $h_{ri}$  : 部位の室 i 側表面の放射熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・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]  
 30  $T_{ei}$  : 内壁等の部位に対する室 i 側の等価室温(日射を含む)[°C]



	値、式
部位の室 1 側表面総合熱伝達率 $[W/(m^2 \cdot K)]$	$h_1$
部位の熱貫流率 $[W/(m^2 \cdot K)]$	$U$
部位の室 1 側表面-PCM 表面間の熱貫流率 $[W/(m^2 \cdot K)]$	$U_{p1}$
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 $[W/m^2]$	$q_{s1,p2} = \frac{q_{s1}U}{h_1}$
②のうち室 1 側へ与える日射量 $[W/m^2]$ (=②-③=④+⑤)	$q_{s1}(1 - \frac{U}{h_1})$
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 $[W/m^2]$	$q_{s1,p1} = q_{s1}(1 - \frac{U}{h_1}) \frac{U_{p1}}{h_1 + U_{p1}}$
⑤②のうち、室 1 側へ与える日射量で、更に室 1 の置換 PCM・内壁等以外に分配される日射量 $[W/m^2]$	$q_{s1,r1} = q_{s1}(1 - \frac{U}{h_1}) \frac{h_1}{h_1 + U_{p1}}$

図 4.4.2 モデル化に伴う貫流成分の扱いおよび日射の分配

次に、吸収日射  $q_{s1}$  のうち  $q_{s1,p2}$  を差し引いた残りの  $q_{s1}(1-U/h_1)$  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(4-19)で表される。

$$q_{s1,p1} + q_{s1,r1} = q_{s1} - q_{s1,p2} = q_{s1} \cdot \left(1 - \frac{U}{h_1}\right) \quad (4-19)$$

$q_{si,pj}$  : 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  $[W/m^2]$

$q_{si,ri}$  : 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  $[W/m^2]$

式(4-20)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 $q_{s1}(1-U/h_1)[W/m^2]$ が、熱伝達率や熱貫流率に応じて、右辺第1項の室1の置換 PCM および内壁等以外の部位と、右辺第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<sup>注2</sup>と、式(4-20)右辺第1項は $q_{s1,r1}$ となり内壁等以外の部位に、式(4-20)右辺第2項は $q_{s1,p1}$ となり置換 PCM に、それぞれ $q_{s1}(1-U/h_1)$ が $h_1$ と $U_{p1}$ との比で案分して分配されるとみなされる。

$$q_{s1}\left(1 - \frac{U}{h_1}\right) = h_1 \cdot (T_{s1} - OT_{w1}) + U_{p1} \cdot (T_{s1} - T_{ps1}) \quad (4-20)$$

$OT_{w1} = T_{ps}$  とおくと

$$q_{s1,r1} = h_1 \cdot (T_{s1} - OT_{w1}) = q_{s1}\left(1 - \frac{U}{h_1}\right) \frac{h_1}{h_1 + U_{p1}} \quad (4-21)$$

$$q_{s1,p1} = U_{p1} \cdot (T_{s1} - T_{ps1}) = q_{s1}\left(1 - \frac{U}{h_1}\right) \frac{U_{p1}}{h_1 + U_{p1}} \quad (4-22)$$

10  $U_{pi}$  : 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 $[W/(m^2 \cdot K)]$

$T_{si}$  : 内壁等の部位の室 i 側の表面温度 $[^\circ C]$

$T_{psi}$  : PCM の室 i 側の表面温度 $[^\circ C]$

#### (4) 置換 PCM の 2 室への PCM 分配比率

15 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(4-23)～(4-26))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(4-27))<sup>注3</sup>。

<sup>注2</sup> 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。

<sup>注3</sup> 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。

$$q_{si,pi} = q_{si} \left(1 - \frac{U}{h_i}\right) \frac{U_{pi}}{h_i + U_{pi}} \quad (4-23)$$

$$q_{si,pj} = \frac{q_{si}U}{h_i} \quad (i \neq j) \quad (4-24)$$

$$Q_{p1} = A(q_{s1,p1} + q_{s2,p1}) \quad (4-25)$$

$$Q_{p2} = A(q_{s2,p2} + q_{s1,p2}) \quad (4-26)$$

$$a_i = \frac{\sum_t Q_{pi}}{\sum_t \sum_{j=1}^2 Q_{pj}} \quad (4-27)$$

$A$  : 内壁等の部位の面積[m<sup>2</sup>]

$\sum_t$  : 期間についての総和

- 5 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<sup>19,注4</sup>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。

10

#### (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

- 15 までの熱抵抗  $r_{s1,r2}$  はそれぞれ、式(4-28)と式(4-29)となる。

$$r_{p1,r1} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{U_{p1}} \quad (4-28)$$

$$r_{s1,r2} = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_1} \quad (4-29)$$

<sup>注4</sup> 本論文中における検証では、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。



$r_{pi,ri}$  : PCM の室 i 側表面から室 i への熱抵抗 [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ]

$r_{si,rj}$  : 部位の室 i 側表面から室 j への熱抵抗 [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ]

5 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 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] 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 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] (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 [ $\text{K/W}$ ] を、置換 PCM と  
室温の間の熱抵抗として扱う(式(4-30)、(4-31))。

$$\frac{1}{R_{p1}} = A \cdot \frac{\frac{1}{r_{p1,r1}} \sum_t q_{s1,p1} + \frac{1}{r_{s2,r1}} \sum_t q_{s2,p1}}{\sum_t q_{s1,p1} + \sum_t q_{s2,p1}} \quad (4-30)$$

$$\frac{1}{R_{p2}} = A \cdot \frac{\frac{1}{r_{p2,r2}} \sum_t q_{s2,p2} + \frac{1}{r_{s1,r2}} \sum_t q_{s1,p2}}{\sum_t q_{s2,p2} + \sum_t q_{s1,p2}} \quad (4-31)$$

10

室空気と置換 PCM の間の熱抵抗についても、(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。

15

#### 4.4.3 詳細計算との比較による置換モデルの検証

##### (1) 検証方法

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。

20

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、4.4.3(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。

##### (2) 検証の条件

25

###### 1) 建物モデル

計算で使用する簡易な建物モデルを、図 4.4.3 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 of 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。

30

表 4.4.1 に部位別熱貫流率および内壁等の壁体構成を示す。

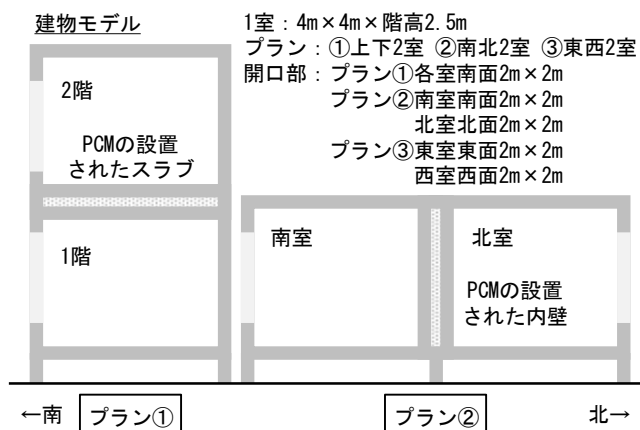


図 4.4.3 建物モデル化

表 4.4.1 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/(m <sup>2</sup> ・K)]			
	無断熱	平成 28 年基準相当 <sup>20</sup>		
外壁	2.85	0.70		
床	3.05	0.70		
屋根	3.03	0.70		
部位	部材	厚	熱伝導率	容積比熱
		mm	W/(m・K)	kJ/(m <sup>3</sup> ・K)
1 階天井 2 階床 プラン①	室内側熱伝達率 (床)	6.67W/(m <sup>2</sup> ・K)		
	仕上材熱抵抗 <sup>※1</sup>	10	-	10
	PCM <sup>※1</sup>	10 <sup>※2</sup>	-	(1 <sup>※3</sup> )
	仕上材熱抵抗 <sup>※1</sup>	10	-	10
	室内側熱伝達率 (天井)	11.11W/(m <sup>2</sup> ・K)		
内壁 プラン ②・③	室内側熱伝達率 (壁)	9.09W/(m <sup>2</sup> ・K)		
	仕上材熱抵抗 <sup>※1</sup>	10	-	10
	PCM <sup>※1</sup>	10 <sup>※2</sup>	-	(1 <sup>※3</sup> )
	仕上材熱抵抗 <sup>※1</sup>	10	-	10
	室内側熱伝達率 (壁)	9.09W/(m <sup>2</sup> ・K)		
開口部	各室 4 m <sup>2</sup> 無断熱：開口部ガラス熱抵抗 0.0 m <sup>2</sup> K/W (境界層含まず。 単板ガラス 6.51W/(m <sup>2</sup> ・K) 想定) 平成 28 年基準相当：ガラス熱抵抗 0.045 m <sup>2</sup> K/W (境界層含まず。 普通複層ガラス 4.65W/(m <sup>2</sup> ・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

## 2) その他の計算条件

シミュレーションの設定条件を、表 4.4.2 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<sup>注5</sup>。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、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、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  $q_{si,pl} [W/m^2]$  については、内壁等の部位の入射日射量を  $(q_{si}U)/h_i [W/m^2]$ 、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<sup>注6</sup>。

<sup>注5</sup> 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なり、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。

<sup>注6</sup> 図 4.4.6 に示す代表ケースでの日射量および PCM の分配を示す。

図 4.4.6 に示す代表ケースでの日射量および PCM の分配

部位	面積 [m <sup>2</sup> ]	詳細 計算	日射分配 (図 4.4.6 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 [m <sup>2</sup> ]		
					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、内壁等の部位の熱貫流率、表面熱伝達率等より求める。

表 4.4.2 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 <sup>21, 注7</sup>
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。

(3) 検討ケース

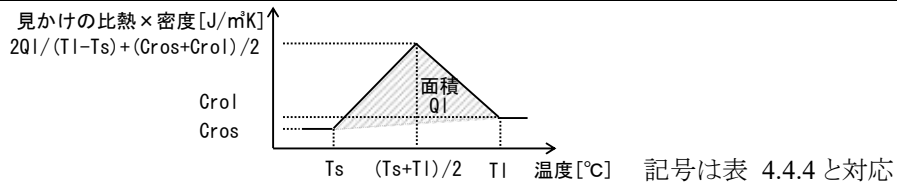
検討を行うケースを表 4.4.3 に示す。置換モデルの精度に影響すると考えられる建物断熱性能、開口部の日射取得性能、仕上材熱抵抗、潜熱蓄熱材の仕様に着目し、全 1,728 のケースを設定した。

表 4.4.3 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	①0.01 m <sup>2</sup> K/W／②0.1 m <sup>2</sup> K/W
F	PCM 潜熱容量	①50MJ/m <sup>3</sup> ／②100MJ/m <sup>3</sup>
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 4.4.4 PCM 物性値

	項目	単位	値または与え方
$Ql$	潜熱量	J/m <sup>3</sup>	=PCM 潜熱容量
$Crol$	液相容積比熱	J/(m <sup>3</sup> ・K)	1,000,000
$Cros$	固相容積比熱	J/(m <sup>3</sup> ・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
$Tl$	相変化上限温度	℃	=PCM 潜熱変化温度 + PCM 潜熱変化温度幅 / 2



10

図 4.4.4 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

注7 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。

#### (4) PCM の物性値

検討に使用した PCM の物性を表 4.4.4 に示す。本論文で使用する見かけの比熱と密度の積は、図 4.4.4 に示すような温度の関数として扱う。

#### 5 (5) 計算結果

##### 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 4.4.5 に示す気象データ期間の結果を、図 4.4.6(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 m<sup>2</sup> K/W」、PCM 潜熱容量「②100MJ/m<sup>3</sup>」、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 4.4.7(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 m<sup>2</sup> K/W」、PCM 潜熱容量「②100MJ/m<sup>3</sup>」、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 4.4.6 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 4.4.7 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 4.4.6、図 4.4.7 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 4.4.6、図 4.4.7 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。

20

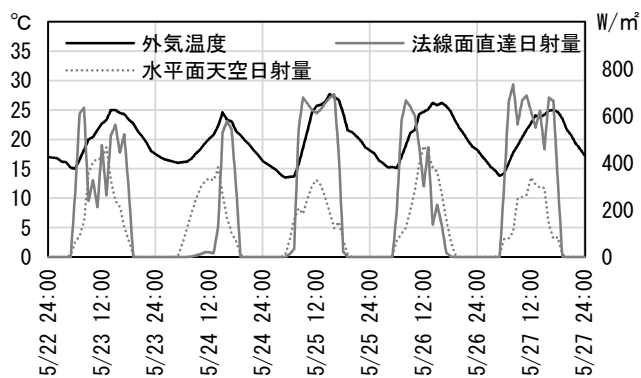


図 4.4.5 図 4.4.6、図 4.4.7 に示す期間の気象データ

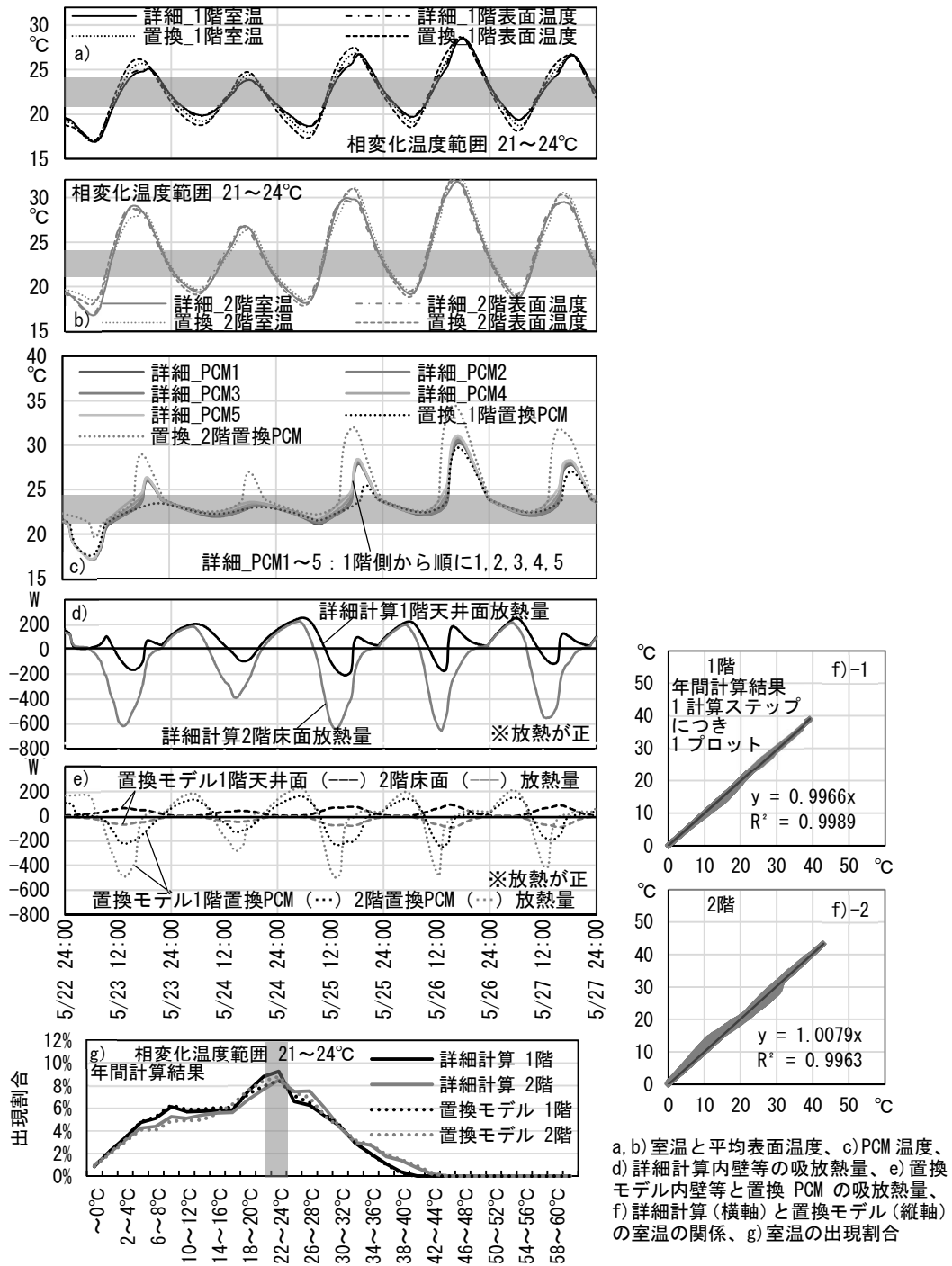


図 4.4.6 詳細計算と置換モデルの比較(室温の度数分布の差が大)

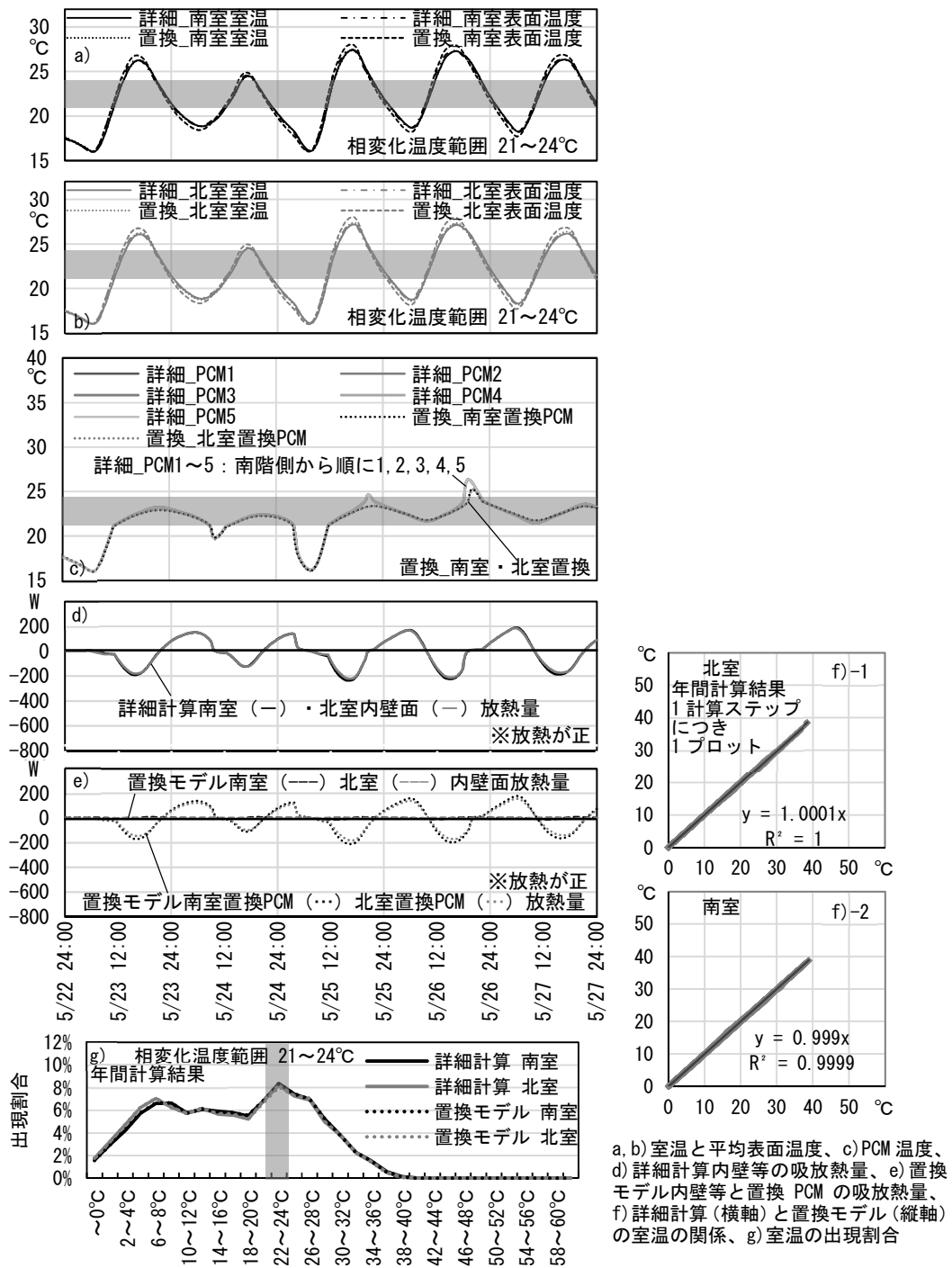


図 4.4.7 詳細計算と置換モデルの比較(室温変動に時間のずれ)

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 は一部位 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 4.4.2 および式(4-17)～(4-27)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 4.4.6 で確認される。図 4.4.6 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 4.4.5 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 4.4.7 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 4.4.6、図 4.4.7 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 4.4.6 で日中に遅れを伴わず発生している。例えば、図 4.4.6 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 4.4.6、図 4.4.7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 4.4.6 の5月23日を例にとると、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 4.4.6a)～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



4.4.2 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、表 4.4.2 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 4.4.6 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 4.4.6、図 4.4.7 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 4.4.6 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 4.4.6、図 4.4.7 の g)に、室温の度数分布を示す。PCM 相変化温度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。

## 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 4.4.8 に示す。図 4.4.8 横軸は、全 1,728 ケースを表 4.4.3 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 4.4.6g)に示すように2℃刻みで出現割合を作成した際に、式(4-32)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。

$$I_{fd,i} = \sum_r |F_{d,i,r} - F_{r,i,r}| \quad (4-32)$$

$I_{fd,i}$  : 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(4-32)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(4-33)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 4.4.9 縦軸に示す。式(4-33)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 4.4.9 横軸は、図 4.4.8 同様に全 1,728 ケースを並べたものである。

$$I_{td,i} = \sum_t |T_{d,i,t} - T_{r,i,t}| / 52560 \quad (4-33)$$

$I_{td,i}$  : 詳細計算と置換モデルの室 i の室温の平均絶対誤差[°C]

$T_{d,i,t}$  : 時刻 t における詳細計算の室 i の室温[°C]

$T_{r,i,t}$  : 時刻 t における置換モデルの室 i の室温[°C]

5  $\sum_t$  : 10 分間隔の年間計算 (合計 52,560 ステップ) の総和

図 4.4.8 度数分布の発生頻度差、図 4.4.9 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。

10

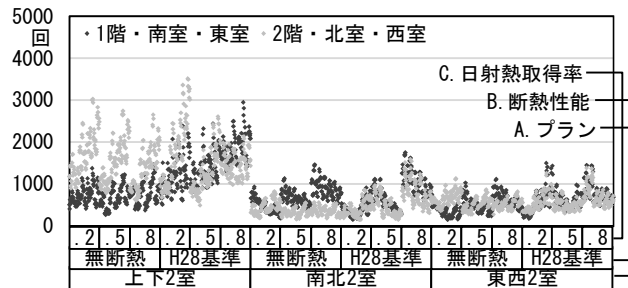


図 4.4.8 詳細計算と置換モデルの室温計算結果の度数分布の発生頻度差

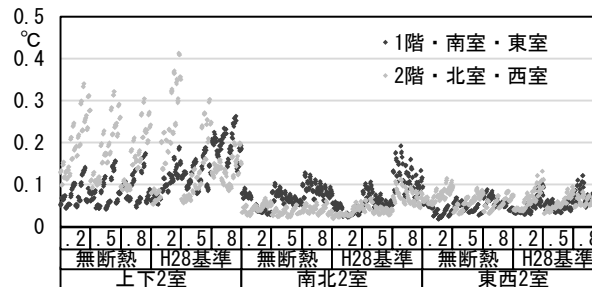


図 4.4.9 詳細計算と置換モデルの室温計算結果の平均絶対誤差

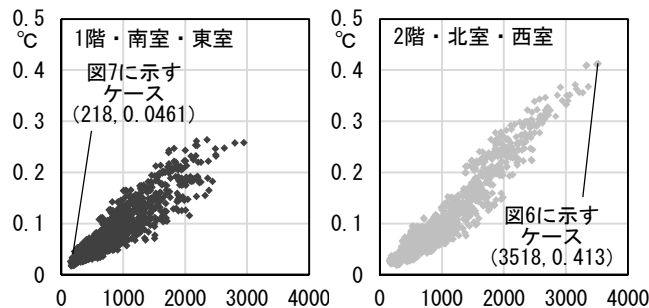


図 4.4.10 詳細計算と置換モデルの室温計算結果の度数分布の発生頻度差(横軸)と平均絶対誤差(縦軸)の関係

15

また、各室について、度数分布の発生頻度差を横軸に、平均絶対誤差を縦軸にとった散布図を、図 4.4.10 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。

- 5 図 4.4.10 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 4.4.6 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 4.4.7 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、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。

10

### 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 4.4.3 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。

- 15 表 4.4.3 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 4.4.11 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 m<sup>2</sup> K/W」、H.PCM 潜熱変化温度「①22.5℃」は図 4.4.6 に示すケースである。

- 20 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。

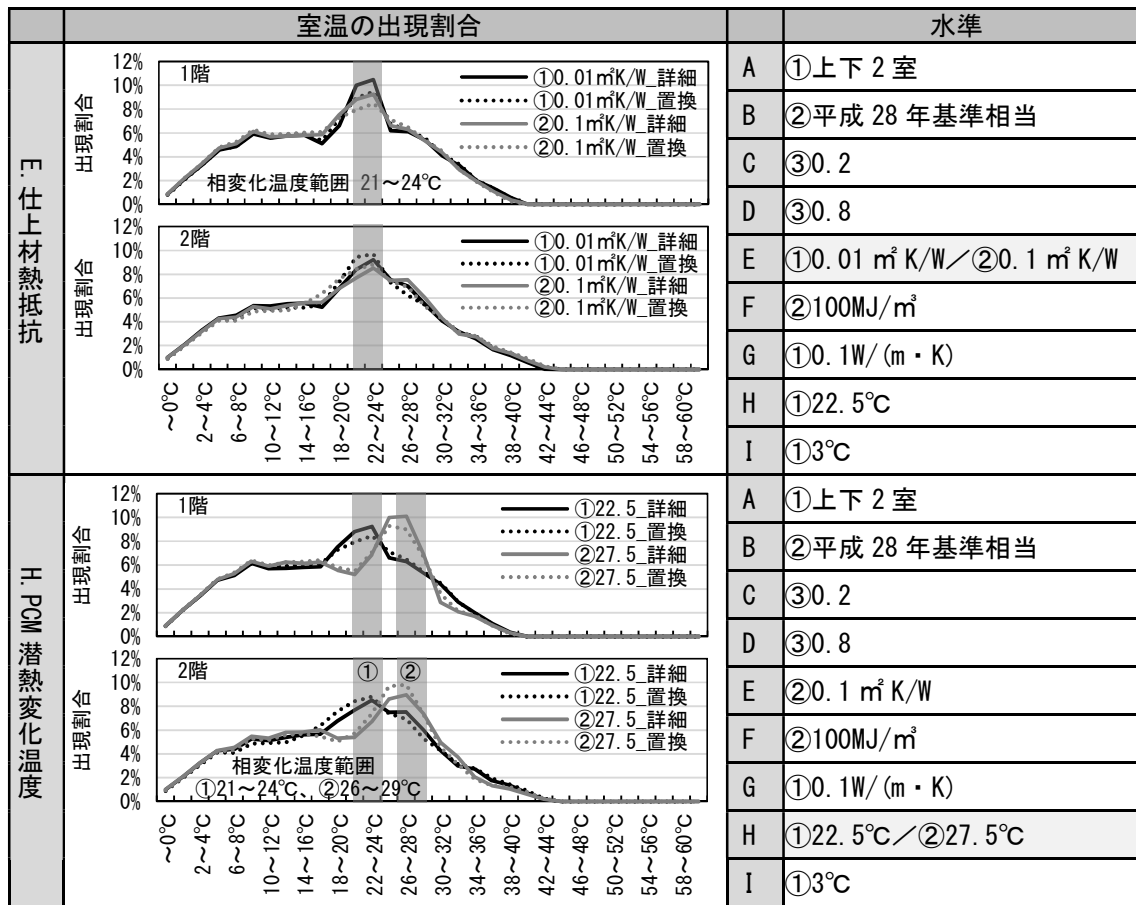


図 4.4.11 条件間の比較 E.仕上材熱抵抗 H.PCM 潜熱変化温度

同様に、結果のグラフは省略するが、以下の傾向が確認された。

- 5
- 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
  - 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. 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
  - 10 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

15 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。

#### 4.4.4 まとめ

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。

5

- ・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。

10

- ・詳細計算結果との比較を行い、2室の建物モデルについて、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。

15

今後の課題として、下記の項目が挙げられる。

- ・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。

20

- ・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。

- ・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。提案した置換モデルでは、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。

25

- ・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。

30

35

- <sup>1</sup> 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, 第 82 巻, 第 740 号, pp.853-862, 2017. 10
- <sup>2</sup> 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. 8
- <sup>3</sup> 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, 1986
- <sup>4</sup> 崔榮晋, 高瀬幸造, 芹川真緒, 江口剛史, 向島希, 佐藤誠, 前真之, 井上隆: 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 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 その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 744 号, pp. 129-138, 2018. 2
- <sup>5</sup> Saleh Nasser Al-Saadi and Zhiqiang (John) Zhai: Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure, Energy and Buildings, pp. 374-388, 2015. 4
- <sup>6</sup> 石田健一: 潜熱蓄熱パネルを用いたふく射暖冷房シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 1041-1044, 1994. 10
- <sup>7</sup> 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
- <sup>8</sup> K. Darkwa and P.W. O'Callaghan: Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 853-858, 2006. 6
- <sup>9</sup> Ylenia Cascone and Marco Perino: Estimation of the thermal properties of PCMs through inverse modelling, Energy Procedia, Vol. 78, pp. 1714-1719, 2015 .11
- <sup>10</sup> Vasken Dermardiros, Yuxiang Chen and Andreas K. Athienitis: Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications, Energy Procedia, Vol. 78, pp. 1690-1695, 2015. 11
- <sup>11</sup> Helmut E. Feustel: Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard, 1995. 5
- <sup>12</sup> Ali Fallahi, Nitin Shukla and Jan Kosny: NUMERICAL THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS OF PCMS INTEGRATED WITH RESIDENTIAL ATTICS, Fifth National Conference of IBPSA-USA, 2012
- <sup>13</sup> 藤田浩司, 松下敬幸: 潜熱蓄熱材の固液混相域における熱移動性状の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp. 55-56, 2013. 8
- <sup>14</sup> 宮城聡, 神谷是行: PCM 蓄熱材の冷却・加熱特性予測方法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.523-526, 2017.9
- <sup>15</sup> 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
- <sup>16</sup> 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
- <sup>17</sup> ISO 13786: 2007, Thermal performance of building components —Dynamic thermal characteristics — Calculation methods, 2007. 12
- <sup>18</sup> 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
- <sup>19</sup> 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
- <sup>20</sup> 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
- <sup>21</sup> 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

## 第5章 熱箱・実験棟測定との比較による計算精度の検証

## 5. 熱箱・実験棟測定との比較による計算精度の検証

熱箱を用いた測定や、実験棟実測との比較により、PCM を含むシミュレーションの精度の確認を行う。熱箱は周囲環境が制御された状態、実験棟はより住宅に近い状態での測定を想定している。

なお、PCM を含む非定常熱伝導計算について、4章3節までは、柔軟な検討を可能とするため、収束計算機能を有する表計算ソフトを用いた。一方、4章4節、本章および7章では、計算に要する時間を考慮し、既存の熱負荷計算ソフト EESLISM<sup>1</sup>に PCM 計算機能が追加されたバージョンを用いた。EESLISM の PCM 計算機能には、見かけの比熱と熱伝導率を温度の関数として収束計算により与える機能、見かけの比熱を質点温度より算出する機能を含み、融解過程と凝固過程での見かけの比熱の切り替えは含まない。

10

### 5.1 熱箱を用いた測定結果との比較による計算精度の検証

#### 5.1.1 目的

熱箱を用いた測定について、計算により実測結果の室温変動の再現を試み、PCM を含んだ熱負荷計算の精度検証を行う。蓄熱建材コンソーシアム温熱環境評価シミュレーション WG において実施された測定のデータの提供を受け、計算との比較を実施している。

15

#### 5.1.2 測定概要

蓄熱建材コンソーシアム温熱環境評価シミュレーション WG の活動の一環として、熱箱を用いた測定が実施された。

20

測定は、コンソーシアム会員企業である DK 社および SC 社の研究所の人工環境試験室において実施された。

熱箱は、約 30cm 角の立方体で、断熱材で作成されたものである。

測定対象の試験体の例を示す。シート系、ボード系、プラスチック容器封入、アルミパック封入など、様々な形態の PCM 建材を対象としている。いずれも、約 30cm 角の熱箱内に設置可能な寸法である。

25

測定点の例を示す。測定点は、試験の実施場所や試験体等により異なるが、基本的に、熱箱内外の空気温度、壁体表面温度、試験体の室内側と屋外側の温度、試験体の室内側と屋外側の熱流等の測定を行っている。

人口環境試験室の温度を変動させ、その際の PCM の挙動の測定を行っている。温度変動は、試験体等により異なるが、例えば、PCM 相変化温度を跨ぐ周期的な温度変動を与えている。

30





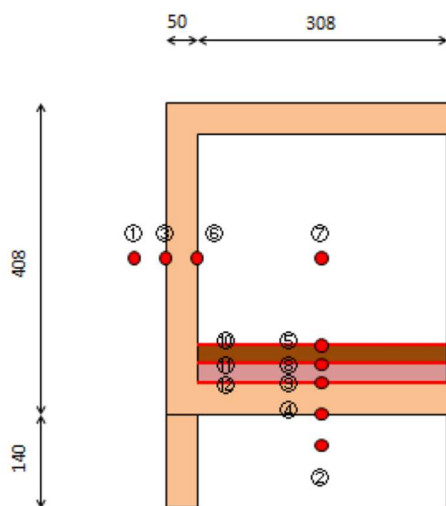
温熱環境評価simWG 第1回 2016.10.30

31

※2017年10月蓄熱建材コンソーシアム温熱環境評価シミュレーションWG資料より

図 5.1.1 測定対象の試験体の例

測定箇所



測定位置
1 外気温度(模型箱近傍)
2 外気温度(模型箱下部)
3 外気側表面温度(模型箱下部以外)
4 外気側表面温度(模型箱下部)
5 床表面温度(PCM部)
6 室内側表面温度(床以外)
7 室内中央空気温度
8 PCM室内側表面温度
9 PCM外気側表面温度
10 床表面熱流量
11 PCM室内側熱流量
12 PCM外気側熱流量
13 床表面温度(断熱材部)

- 合板 12mm
- 試験体
- 熱電対
- 熱流計

5

※2017年11月蓄熱建材コンソーシアム温熱環境評価シミュレーションWG資料より

図 5.1.2 測定点の例

### 5.1.3 計算条件

表 5.1.1 計算条件

項目	設定	備考
測定場所	研究所 1 : DK 社研究所 研究所 2 : SC 社研究所	
測定期間 計算期間	<b>【研究所 1】</b> ①2017 年 9 月 11 日～9 月 14 日 ②2017 年 9 月 28 日～10 月 6 日 ③2017 年 10 月 12 日～10 月 23 日 ④2017 年 10 月 31 日～11 月 10 日 ⑤2017 年 12 月 11 日～2018 年 1 月 4 日 <b>【研究所 2】</b> ①2017 年 10 月 2 日～10 月 10 日 ②2017 年 10 月 20 日～10 月 23 日 ③2017 年 10 月 25 日～10 月 31 日 ④2017 年 11 月 7 日～11 月 10 日 ⑤2017 年 11 月 11 日～11 月 14 日 ⑥2017 年 11 月 16 日～11 月 20 日 ⑦2018 年 2 月 10 日～2 月 13 日	<b>【研究所 1】</b> ①ブランク ②ブランク+PCM ③ブランク+PCM ④ブランク+PCM ⑤ブランク+PCM <b>【研究所 2】</b> ①ブランク+PCM ②ブランク+PCM ③ブランク+PCM ④ブランク+PCM ⑤ブランク+PCM ⑥ブランク+PCM ⑦ブランク+PCM
境界条件	熱箱の近傍と下部の空気温度測定結果を与えた。	床下は 1 室として熱箱の下部の温度測定結果を与えた。
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
計算時間間隔	1 分	
換気	0 回/h	気密が取れているものと想定
内部発熱	なし	
家具熱容量	顕熱容量 : 0kJ/(m <sup>3</sup> ・K)	
対流熱伝達率	熱箱内と床部材の床下側は温度差に応じて計算。 床部材を除く外側表面は総合熱伝達 9.1W/(m <sup>2</sup> ・K)を与えた。	

表 5.1.2 壁・天井の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
押出法ポリスチレンフォーム <sup>注1</sup>	0.029	40	50.0	計算上は2分割

表 5.1.3 床の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
合板 <sup>注2</sup>	0.138	1064	12	計算上は2分割 研究所1期間③B、期間④B、研究所2ではなし
PCM				
押出法ポリスチレンフォーム <sup>注1</sup>	0.029	40	50.0	表5.1.5 計算上は4分割 計算上は2分割

研究所1期間⑤試験体Bでは、試験体側面からの熱損失を考慮し、断熱材厚を37mmとした。床下側・屋外側総合熱伝達率を9.1W/m<sup>2</sup>Kとすると、PCM試験体から床下側・外気側への熱抵抗はそれぞれ1.834m<sup>2</sup>K/W。試験体寸法300mm×300mm×20.7mmより、試験体側面からの熱損失に相当すると思われる分だけ、断熱材の厚を低減している。

5

表 5.1.4 面積表

	面積[m <sup>2</sup> ]	備考
南壁・東壁・西壁・北壁・天井・床	研究所1: 0.094864 研究所2: 0.09	研究所1: 内法308mm角の立方体 研究所2: 内法300mm角の立方体

表 5.1.5 PCMの設定

期間	箱	厚 mm	熱伝導率 W/(m・K)		潜熱 容量 MJ/m <sup>3</sup>	顕熱容量 kJ/(m <sup>3</sup> ・K)		相変化温度域 °C		備考
			固相	液相		固相	液相	低温側	高温側	
研究所1 ①	A~D	ブランク								
研究所1 ②	A	ブランク								
	B: シート	3	0.12	0.11	55/ 40	1800	1800	25	29	MDF5.5mm+蓄熱シート3mm+MDF5.5mm 低温側ピークの潜熱量を考慮する/しない場合
	C: 蓄熱材 内添木質板	13	0.15	0.15	13	925	1000	17	23	

※潜熱比熱は、温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるようにモデル化して与えた。

10

<sup>注1</sup> 測定値は熱伝導率0.029(～0.030)W/(m・K)、密度約30.5kg/m<sup>3</sup>。熱伝導率は測定値を参考に与え、容積比熱は「空気調和・衛生工学会、試して学ぶ熱負荷 HASPEE～新最大熱負荷計算法～、2012年」を参考に設定。

<sup>注2</sup> 測定値は熱伝導率0.138W/(m・K)、密度約800kg/m<sup>3</sup>。容積比熱は、別途測定を行った木質繊維板(インシュレーションボード)の比熱1.33kJ/(kg・K)を参考に、密度800kg/m<sup>3</sup>の合板が同等の比熱を持つと仮定して算出される値1064kJ/(m<sup>3</sup>・K)を使用。

表 5.1.6 PCM の設定

期間	箱	厚 mm	熱伝導率 W/(m・K)		潜熱 容量 MJ/m <sup>3</sup>	顕熱容量 kJ/(m <sup>3</sup> ・K)		相変化温度域 °C		備考
			固相	液相		固相	液相	低温側	高温側	
			Blank							
研究所 1 ②	D: プラスチック容器	20.7	0.3	0.5	120	1500	1500	24	28	PCM 容器上部に空気層熱抵抗 0.1 m <sup>2</sup> K/W 追加
研究所 1 ③	A	Blank								
	B: 塗壁	13	0.24	0.22	25/20	1250	1250	22.5	27.5	低温側ピークの潜熱量を考慮する/しない場合
	C: 蓄熱材内添木質板	13	0.15	0.15	13	925	1000	17	23	②9/28~10/6C と同じ試験体
	D: プラスチック容器	20	類似 PCM の物性値を参考に設定		35	3500	3500	15	21	試験体が 290mm×195m のため、隙間は XPS (熱箱の材質と同等) を充填
研究所 1 ④	A	Blank								
	B: 塗壁	13	0.24	0.22	25/20	1250	1250	22.5	27.5	③10/12~10/23B と同じ試験体 低温側ピークの潜熱量を考慮する/しない場合
	C: シート	0.5	0.2	0.2	45	3200	3200	20	40	熱伝導率は不明のため適当に与えた
	D: アルミパック	21.8	0.23	0.17	見かけの比熱測定結果がないため計算対象外とした					
研究所 1 ⑤	A	Blank								
	B: プラスチック容器	20.7	0.3	0.5	120	1500	1500	24	28	PCM 容器上部に空気層熱抵抗 0.1 m <sup>2</sup> K/W 追加 熱箱底面の断熱材の厚を調整
	C: プラスチック容器	20	類似 PCM の物性値を参考に設定		35	3500	3500	15	21	③10/12~10/23D と同じ試験体 試験体が 290mm×195m のため、隙間は XPS (熱箱の材質と同等) を充填
	D: アルミパック	21.8	0.23	0.17	見かけの比熱測定結果がないため計算対象外とした					
研究所 2 ①	A	Blank								
	B: シート	2.6	0.17	0.18	45	2300	2300	18	42	
研究所 2 ②	A	Blank								

※潜熱比熱は、温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるようにモデル化して与えた。

表 5.1.7 PCM の設定

期間	箱	厚 mm	熱伝導率 W/(m・K)		潜熱 容量 MJ/m <sup>3</sup>	顕熱容量 kJ/(m <sup>3</sup> ・K)		相変化温度域 °C		備考
			固相	液相		固相	液相	低温側	高温側	
			blank							
研究所 2 ②	B : シート	3	0.12	0.11	55/ 40	1800	1800	25	29	低温側ピークの潜熱 量を考慮する/しな い場合
研究所 2 ③	A	blank								
	B : 複合建材	12	0.3	0.13	170	2500	2500	26	28	試験体は平面的に PCM が設置されてい る箇所とされていない 箇所に分かれるため、 計算には別々に 入力 熱伝導率は PCM 部の値
研究所 2 ④	A	blank								
	B : アルミ パック	5	0.43	0.22	120	1900	1900	18	28	試験体は 30cm × 29.5cm 試験体が敷設されて いない範囲の床は断 熱材 50mm のみとし て入力
研究所 2 ⑤	A	blank								
	B : アルミ パック	4.5	0.3	0.13	170	2500	2500	26	28	試験体は平面的に PCM が設置されてい る箇所とされていない 箇所に分かれるため、 計算には別々に 入力 横側からの空気の移 動の抑制のため、4 辺の端部に、長さ 300mm、幅 10mm のウ レタンスポンジテー プを貼付
研究所 2 ⑥	A	blank								
	B : シート	2.6	0.17	0.18	45	2300	2300	18	42	①10/2~10/10B と 同じ試験体
研究所 2 ⑦	A	blank								
	B : シート	2	0.2	0.2	45	3200	3200	20	40	研究所 1④10/31~ 11/10C の試験体 4 枚重ね 熱伝導率は不明のた め適当に与えた

※潜熱比熱は、温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるようにモデル化して与えた。

#### 5.1.4 測定結果と計算結果の比較

熱箱を用いた測定について、測定とその再現を試みた計算の結果を、以下に示す。一部の PCM では計算の設定の見直しが必要であったが、PCM の熱特性や実装形態を考慮した設定の見直しにより、いずれの PCM でも、温度や熱流の測定結果を、計算により一定の精度で再現できることが確認された。

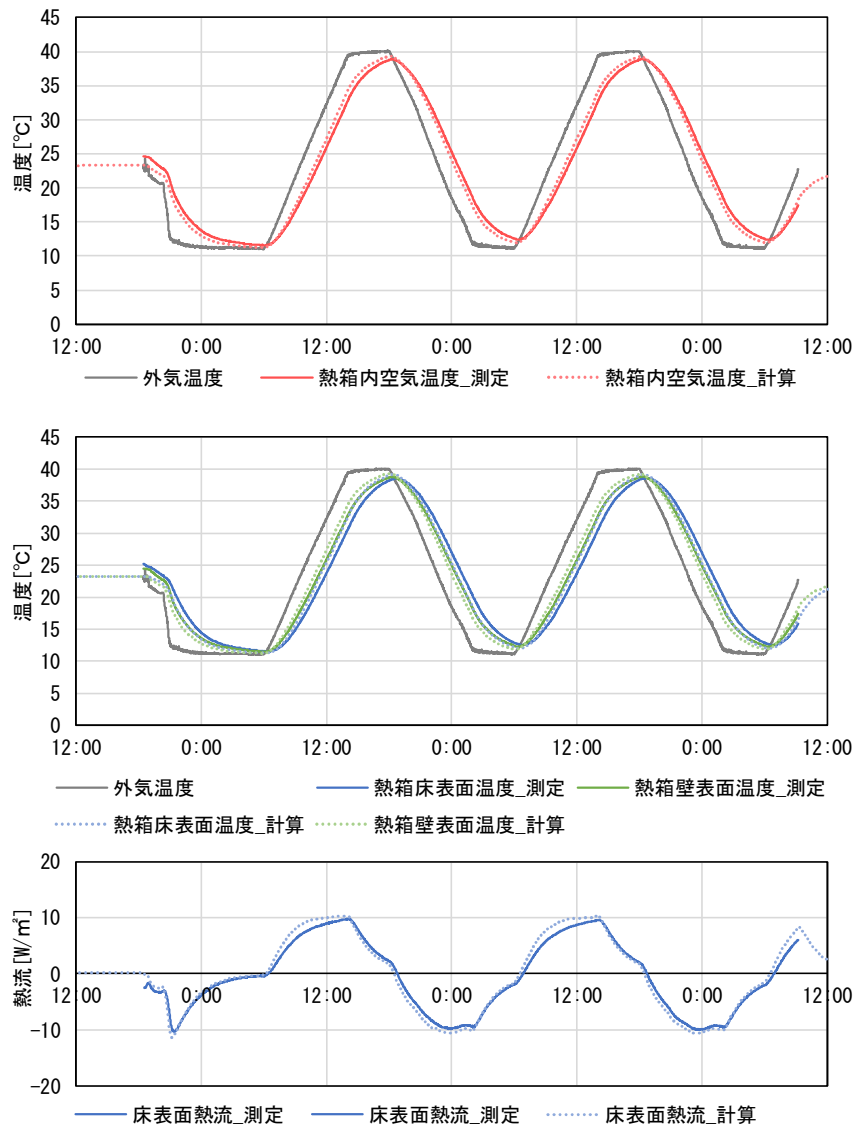
5

##### (1) 研究所 1 期間①2017/9/11~2017/9/14 熱箱 A

PCM 試験体を含まない、ブランクの条件での計算結果を示す。

熱箱の近傍と下部の空気温度測定結果を境界条件与えているが、人口環境試験室の壁面温度は、空気温度と比較し、多少の遅れが生じている可能性がある。しかしながら、ブランクの条件での計算結果は、測定結果を一定の精度で再現しており、計算上、問題ない程度の影響であると推察される。

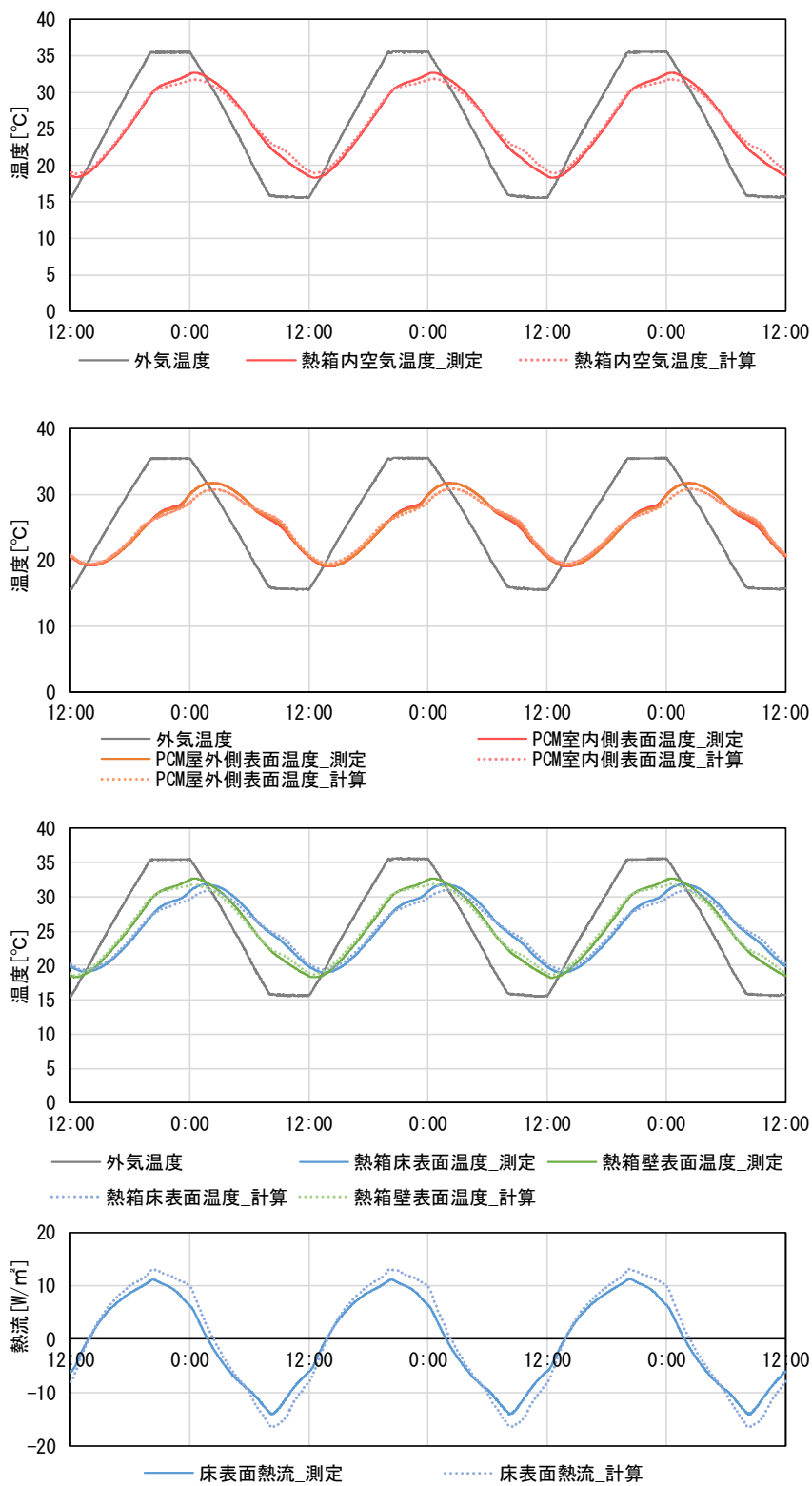
10



15

図 5.1.3 測定結果と計算結果の比較 ブランク

(2) 研究所 1 期間②2017/9/28~2017/10/6 熱箱 B シート



5

図 5.1.4 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート 低温側ピークの潜熱量を考慮する

複数存在する降温時の見かけの比熱のピークのうち、PCM の温度変動範囲に含まれない低温側のピークの潜熱量を考慮しない場合の計算結果は以下のとおり。有効に働く蓄熱容量が適切に評価されるようになったものと推察される。

5

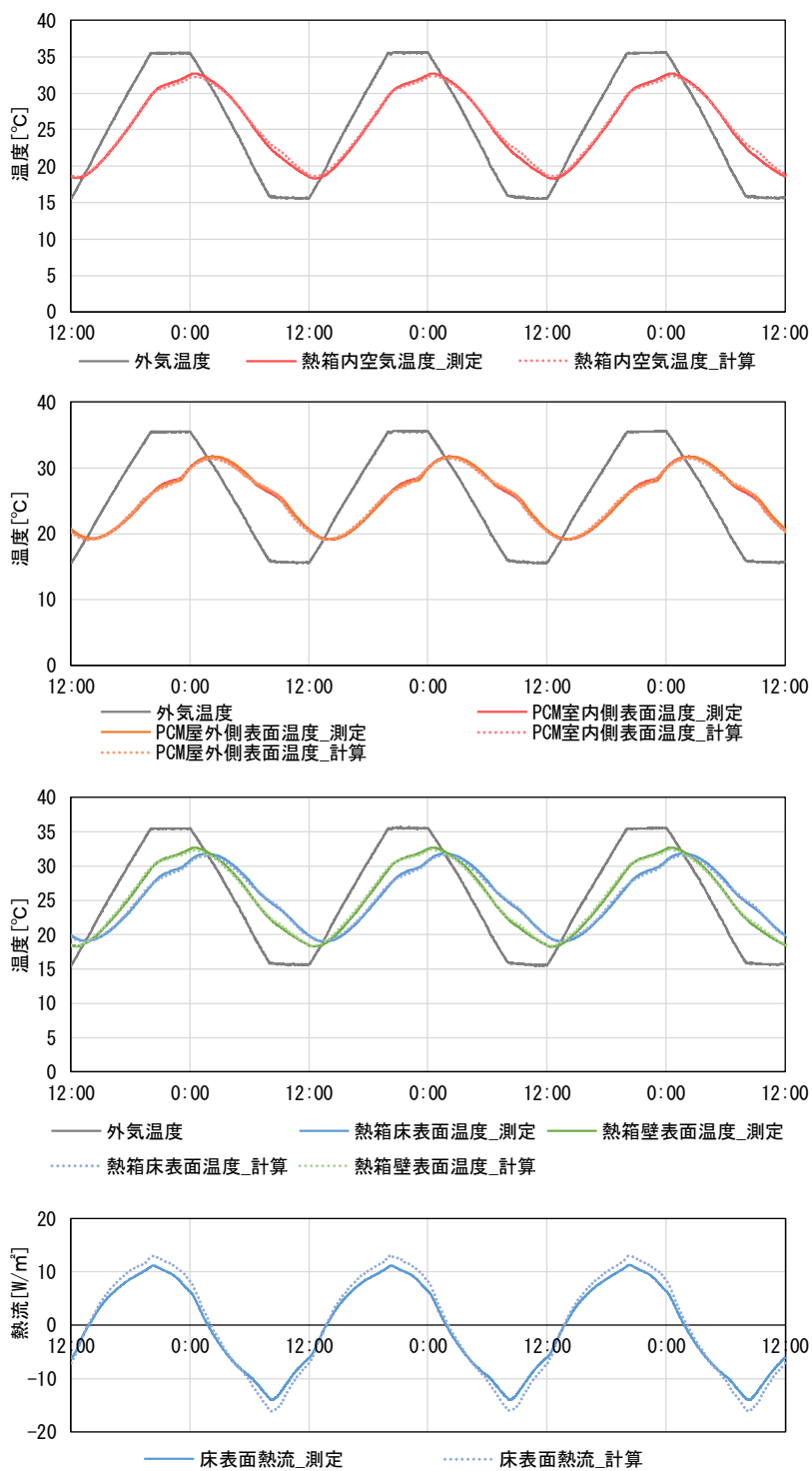


図 5.1.5 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート 低温側ピークの潜熱量を考慮しない



(3) 研究所 1 期間②2017/9/28~2017/10/6 熱箱 C 蓄熱材内添木質板

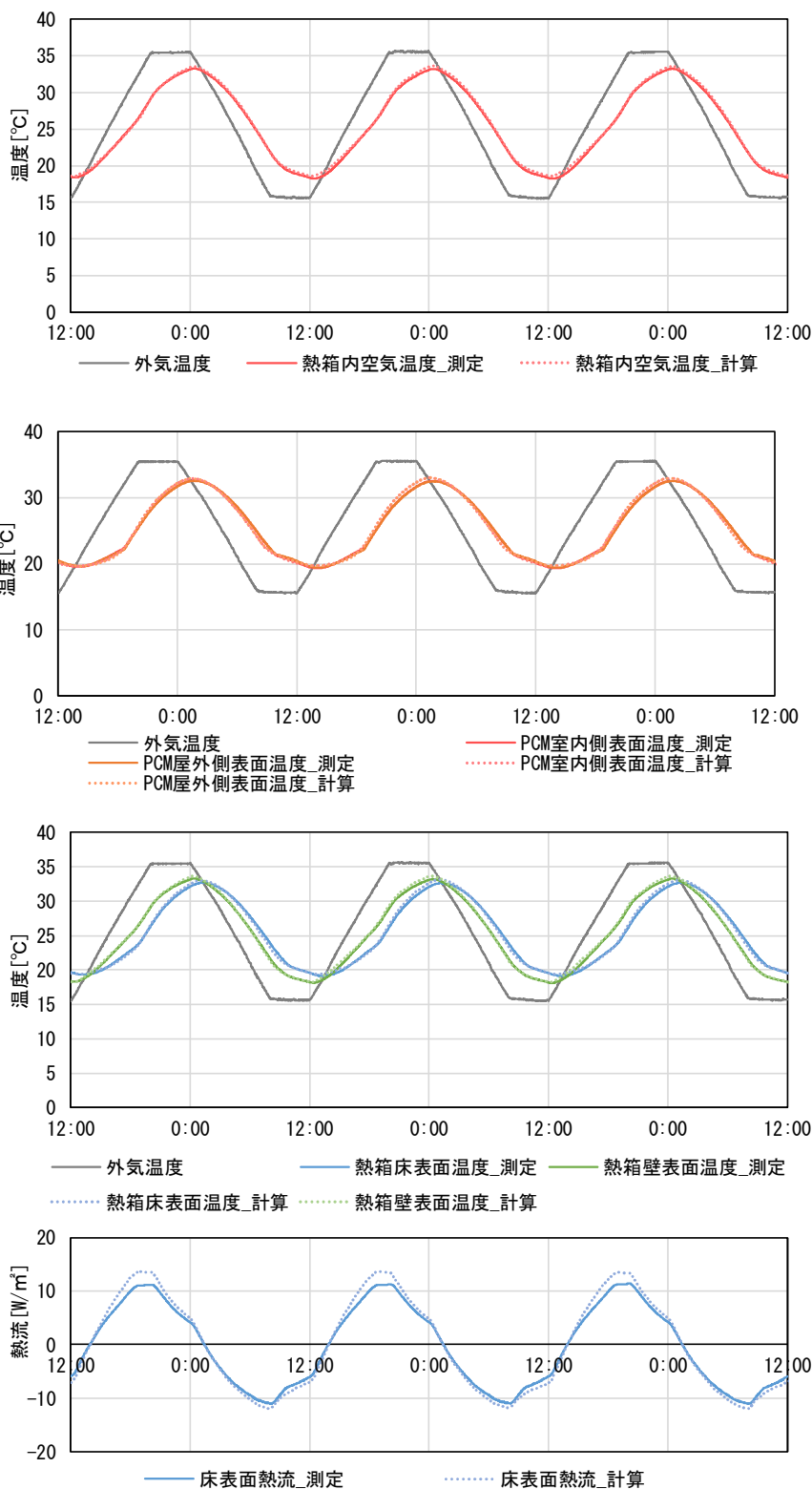


図 5.1.6 測定結果と計算結果の比較 熱箱 C 蓄熱材内添木質板

(4) 研究所 1 期間②2017/9/28~2017/10/6 熱箱 D プラスチック容器

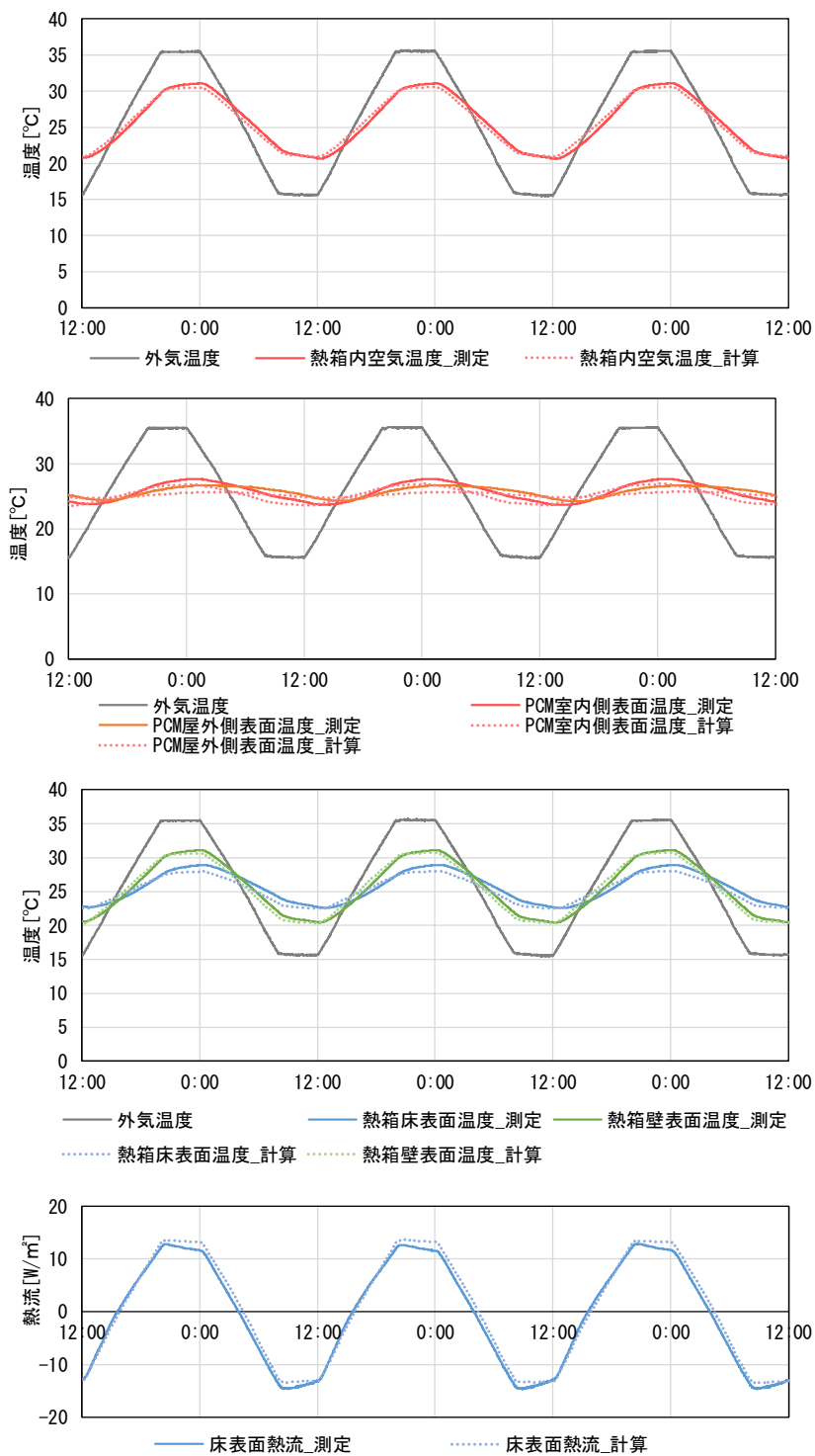


図 5.1.7 測定結果と計算結果の比較 熱箱 D プラスチック容器

プラスチック容器を水平に設置した際、容器は PCM で完全に充填されているわけではないため、容器内部の上方に空隙が生じる。計算では、その熱抵抗を  $0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  として扱っているが、仮に、この熱抵抗を考慮しない場合の計算結果は以下のとおりである。有効に働く蓄熱容量が過大に見積もられる。

5

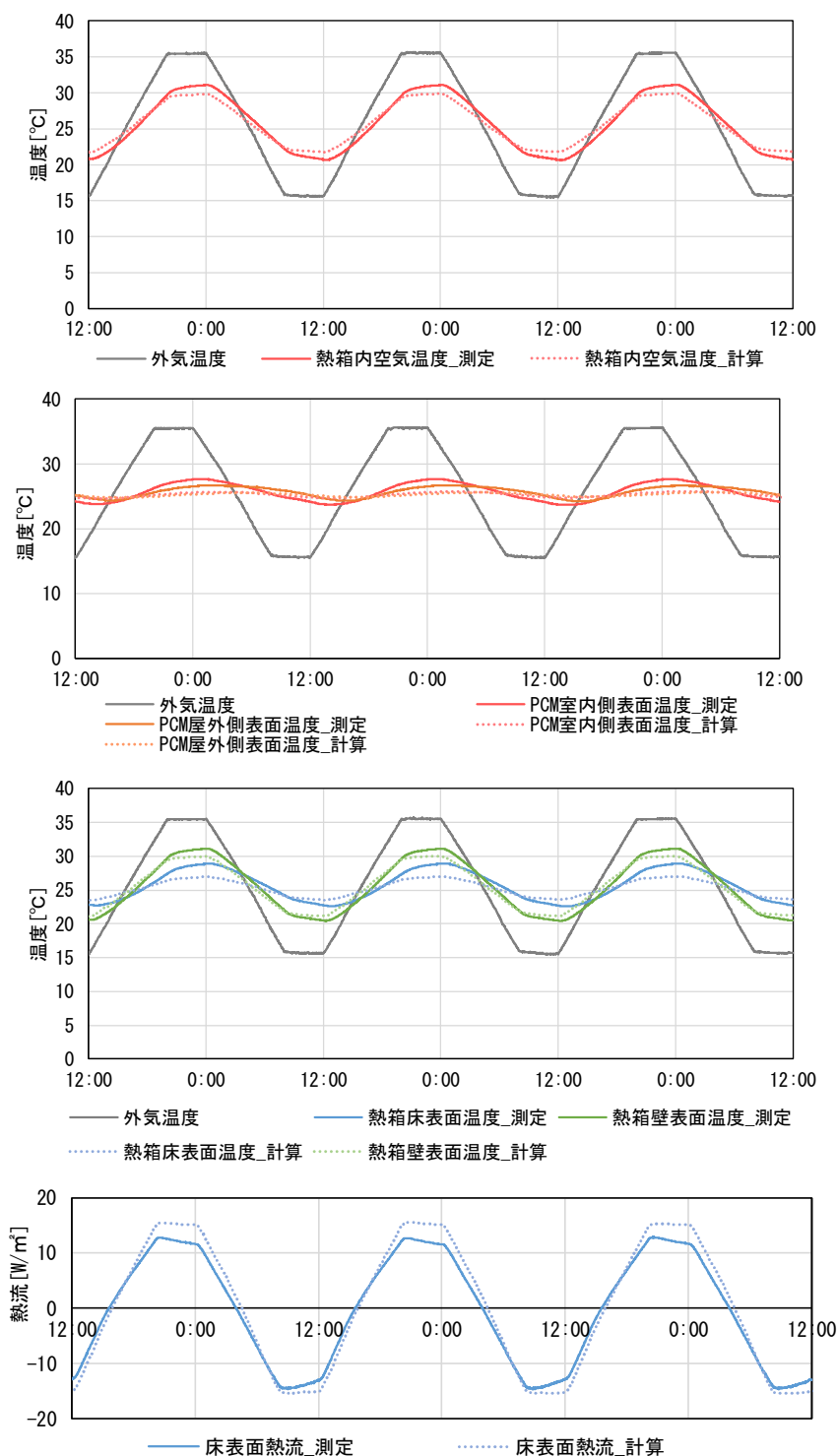
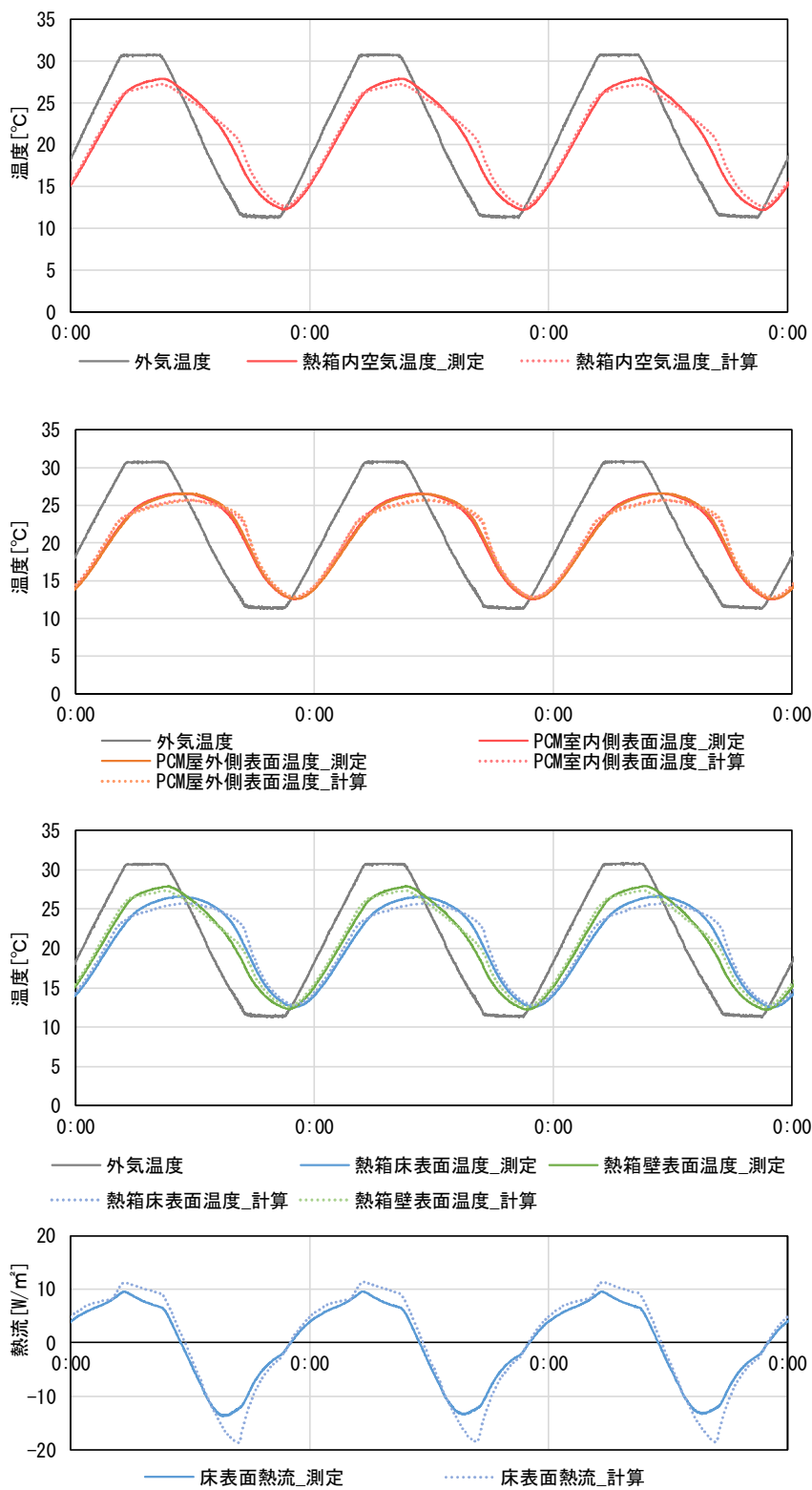


図 5.1.8 (参考)測定結果と計算結果の比較 熱箱 D プラスチック容器 空気層熱抵抗なし

10

(5) 研究所 1 期間③2017/10/12~2017/10/23 熱箱 B 塗壁



5

図 5.1.9 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 塗壁 低温側ピークの潜熱量を考慮する

複数存在する降温時の見かけの比熱のピークのうち、PCM の温度変動範囲に含まれない低温側のピークの潜熱量を考慮しない場合の計算結果は以下のとおり。有効に働く蓄熱容量が適切に評価されるようになったものと推察される。

5

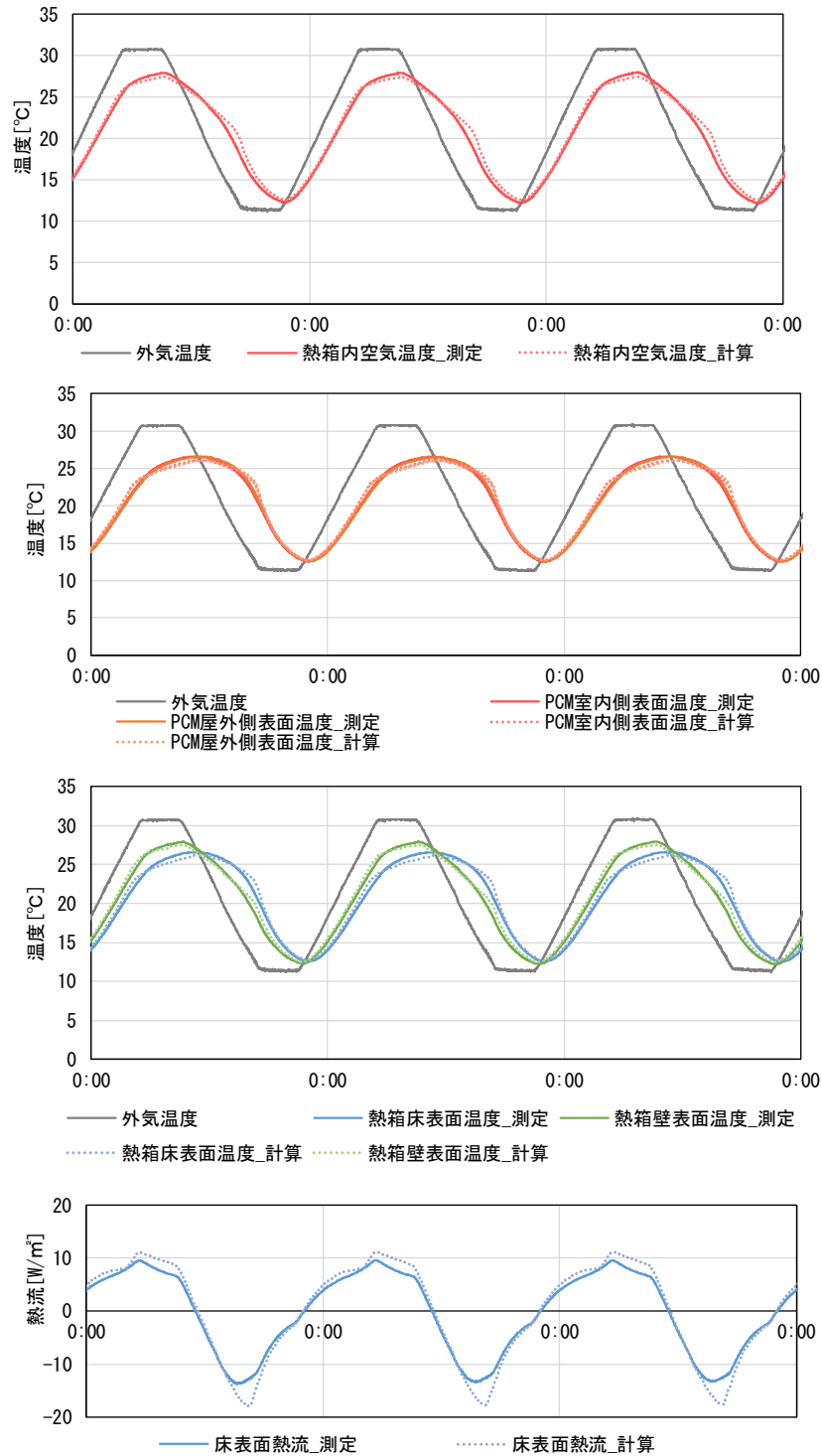


図 5.1.10 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 塗壁 低温側ピークの潜熱量を考慮しない

10

(6) 研究所 1 期間③2017/10/12~2017/10/23 熱箱 C 蓄熱材内添木質板

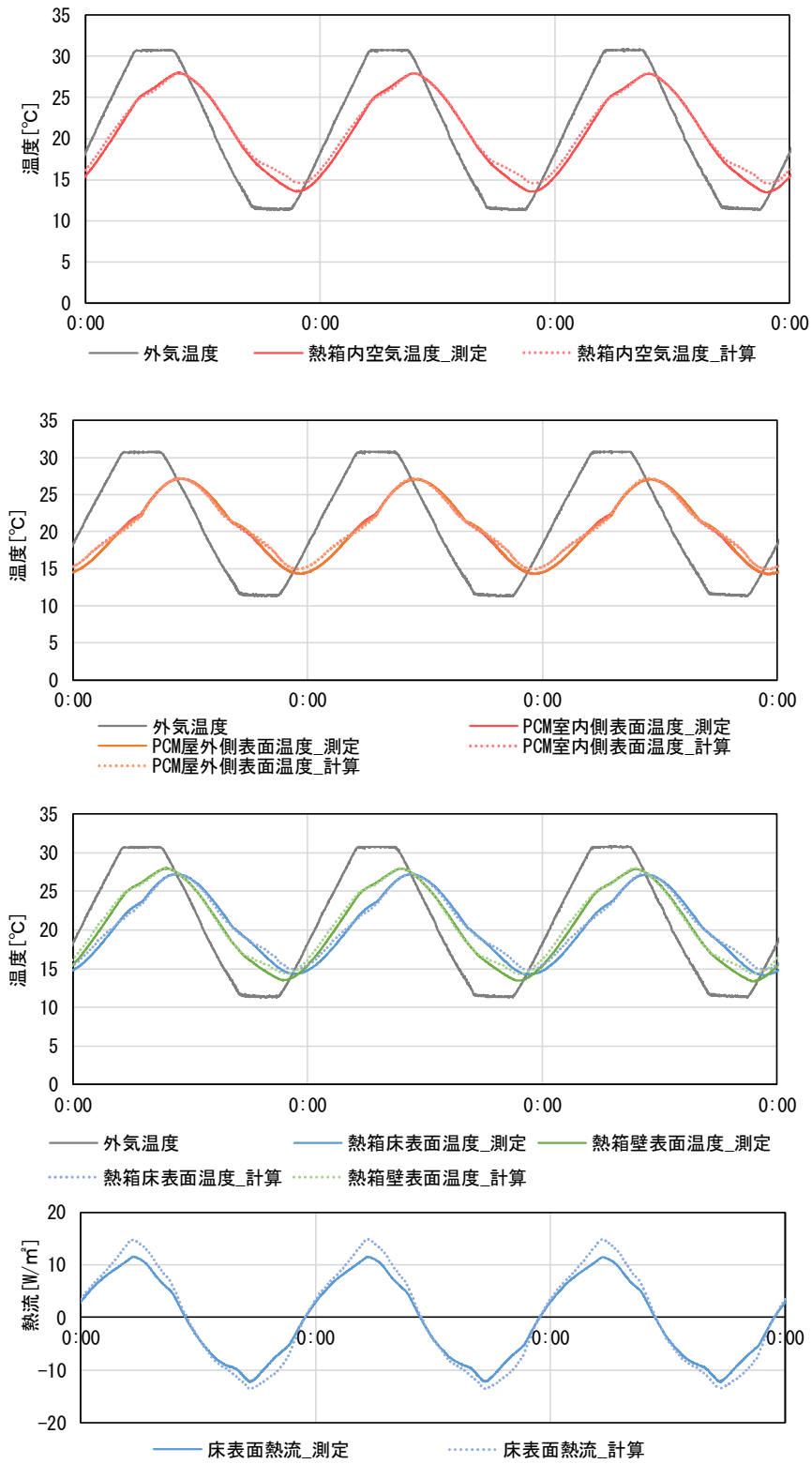


図 5.1.11 測定結果と計算結果の比較 熱箱 C 蓄熱材内添木質板

(7) 研究所 1 期間③2017/10/12~2017/10/23 熱箱 D プラスチック容器

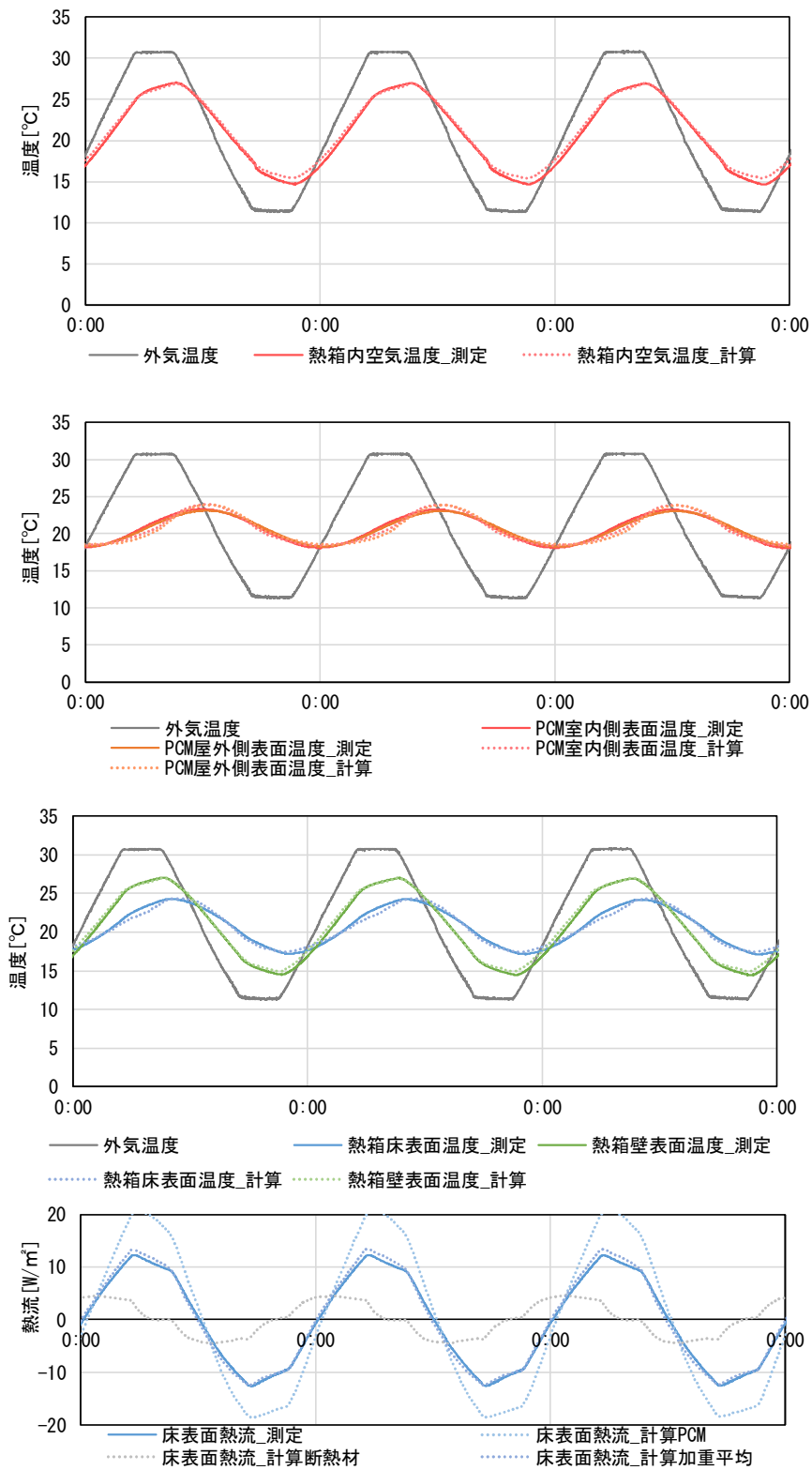
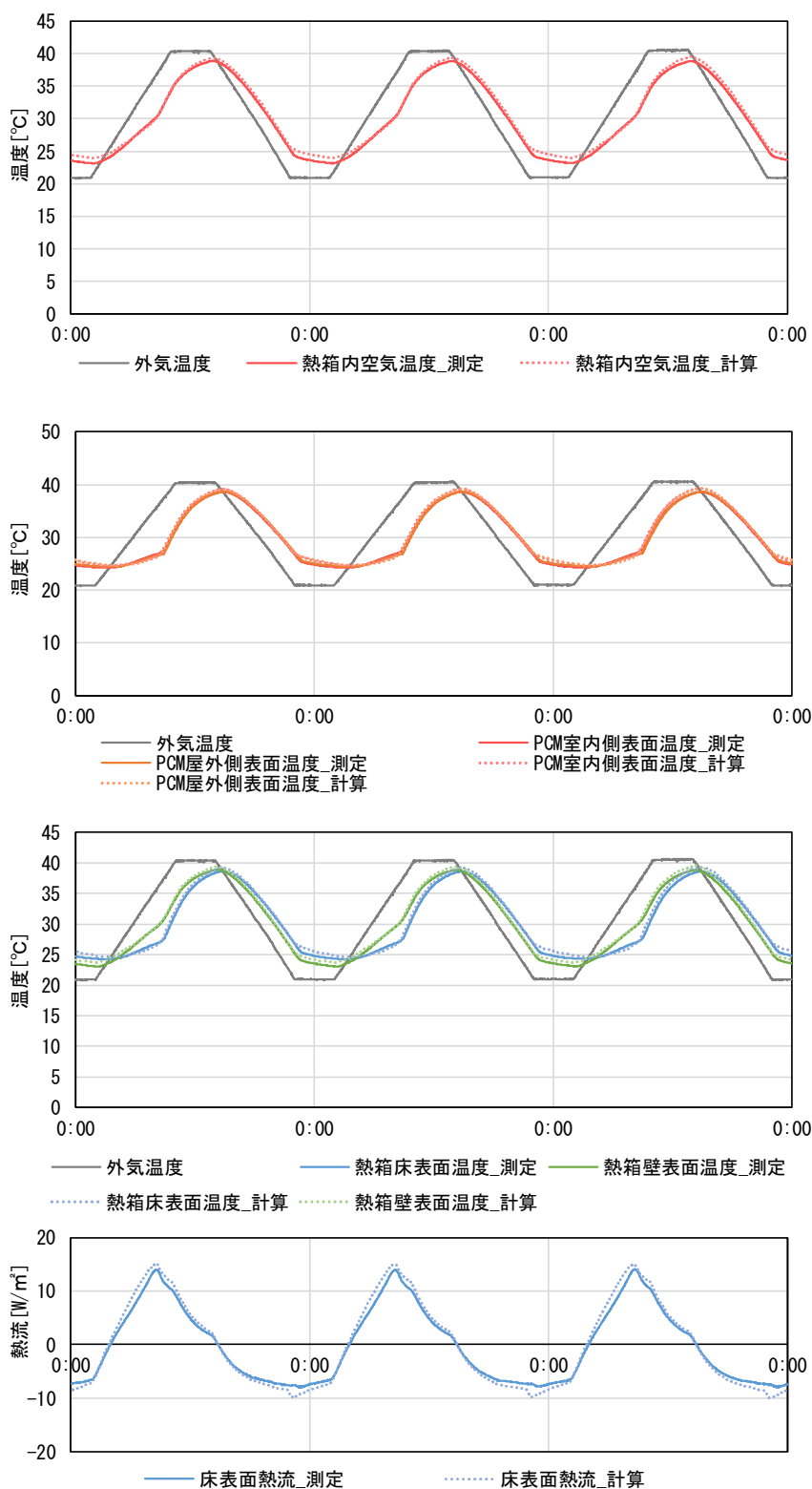


図 5.1.12 測定結果と計算結果の比較 熱箱 D プラスチック容器

(8) 研究所 1 期間④2017/10/31~2017/11/10 熱箱 B 塗壁



5

図 5.1.13 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 塗壁 低温側ピークの潜熱量を考慮しない



(9) 研究所 1 期間④2017/10/31~2017/11/10 熱箱 C シート

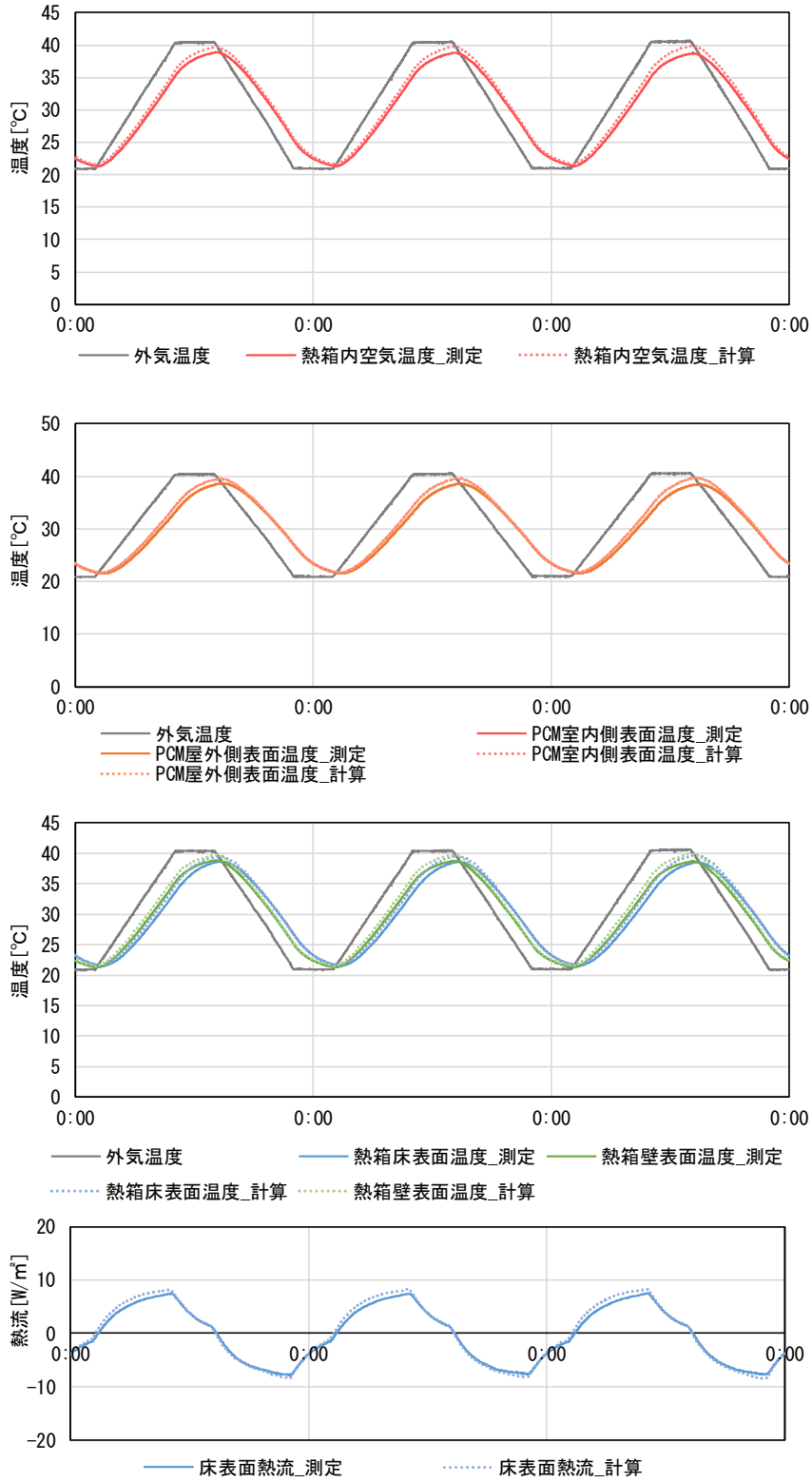


図 5.1.14 測定結果と計算結果の比較 熱箱 C シート

(10) 研究所 1 期間⑤2017/12/11~2018/1/4 熱箱 B プラスチック容器

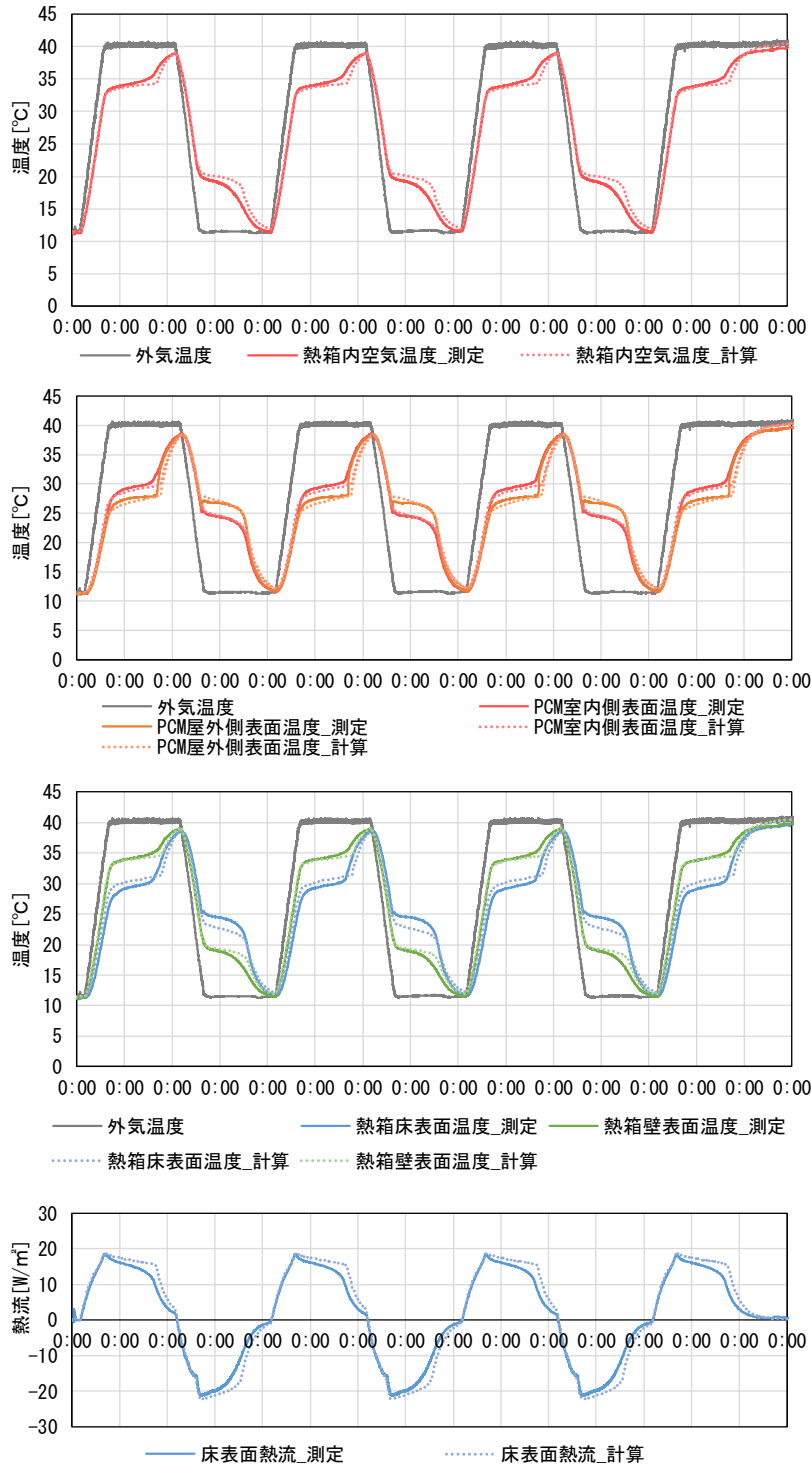
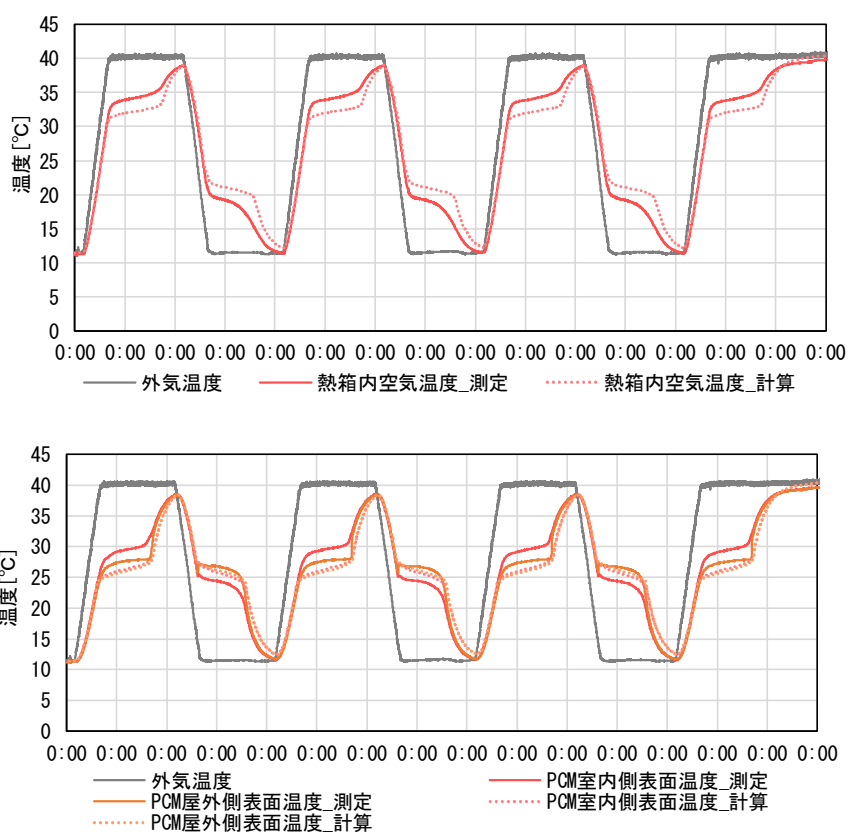


図 5.1.15 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B プラスチック容器

プラスチック容器を水平に設置した際、容器は PCM で完全に充填されているわけではないため、容器内部の上方に空隙が生じる。計算では、その熱抵抗を  $0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  として扱っている。

また、試験体は面積  $30\text{cm}$  角に対し厚さが  $20.7\text{mm}$  あるため、試験体の面方向に垂直な熱流に対し、厚さ方向に垂直な熱流が無視できない割合存在していると推察される。計算では、試験体の面方向に垂直な一次元熱伝導について、厚さ方向に垂直な熱損失に相当すると考えられる分だけ、断熱材の厚を低減している。

仮に、これらを考慮しない場合の計算結果は以下のとおりである。有効に働く蓄熱容量が過大に見積もられる。



10

図 5.1.16 (参考)測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 空気層熱抵抗・断熱厚調整なし

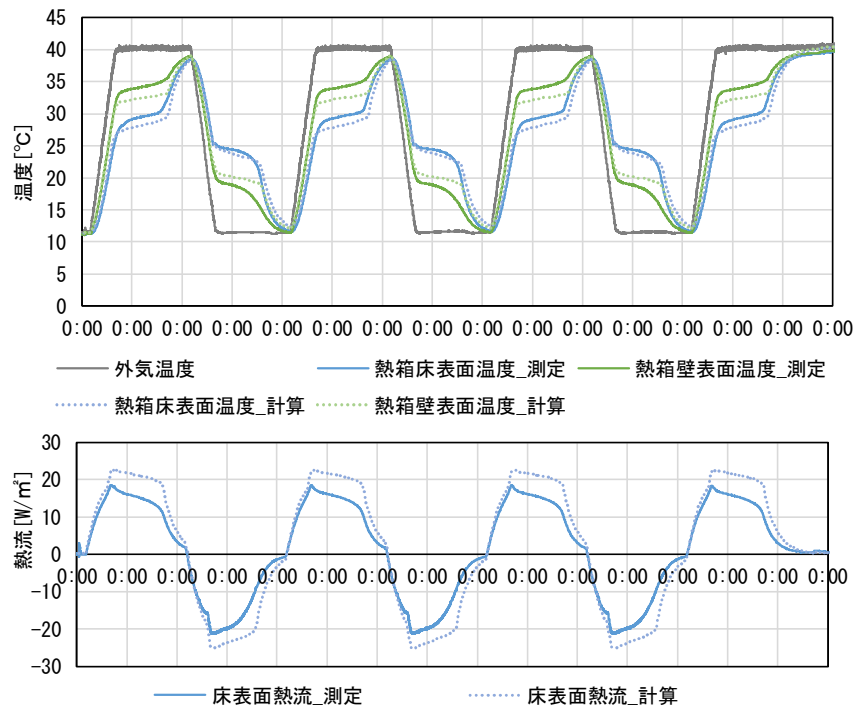


図 5.1.17 (参考)測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 空気層熱抵抗・断熱厚調整なし

(11) 研究所 1 期間⑤2017/12/11~2018/1/4 熱箱 C プラスチック容器

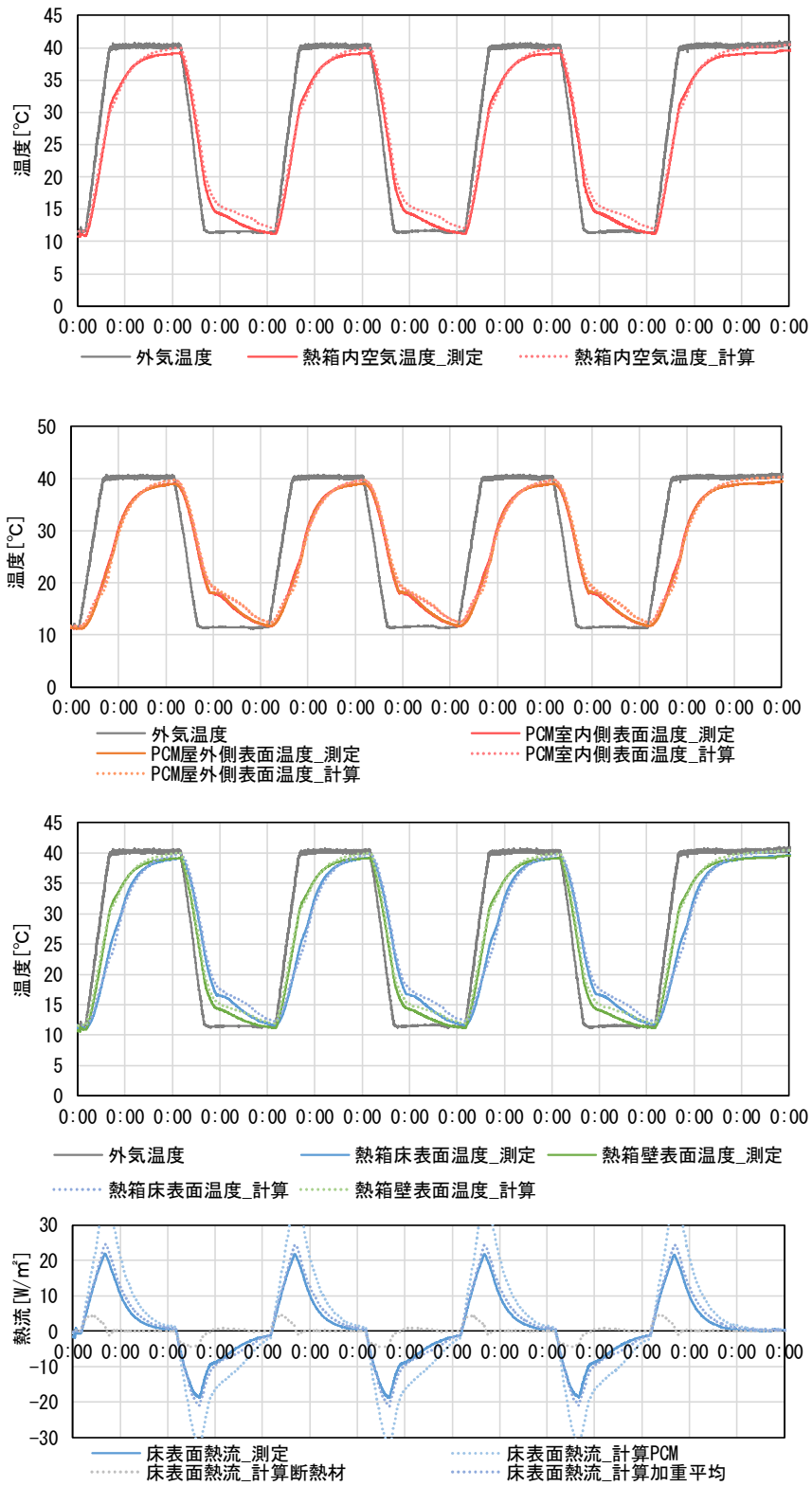


図 5.1.18 測定結果と計算結果の比較 熱箱 C プラスチック容器

(12) 研究所 2 期間①2017/10/12~2017/10/23 熱箱 A ブランク

PCM 試験体を含まない、ブランクの条件での計算結果を示す。

熱箱の近傍と下部の空気温度測定結果を境界条件与えているが、人口環境試験室の壁面温度は、空気温度と比較し、多少の遅れが生じている可能性がある。しかしながら、ブランクの条件での計算結果は、測定結果を一定の精度で再現しており、計算上、問題ない程度の影響であると推察される。

5

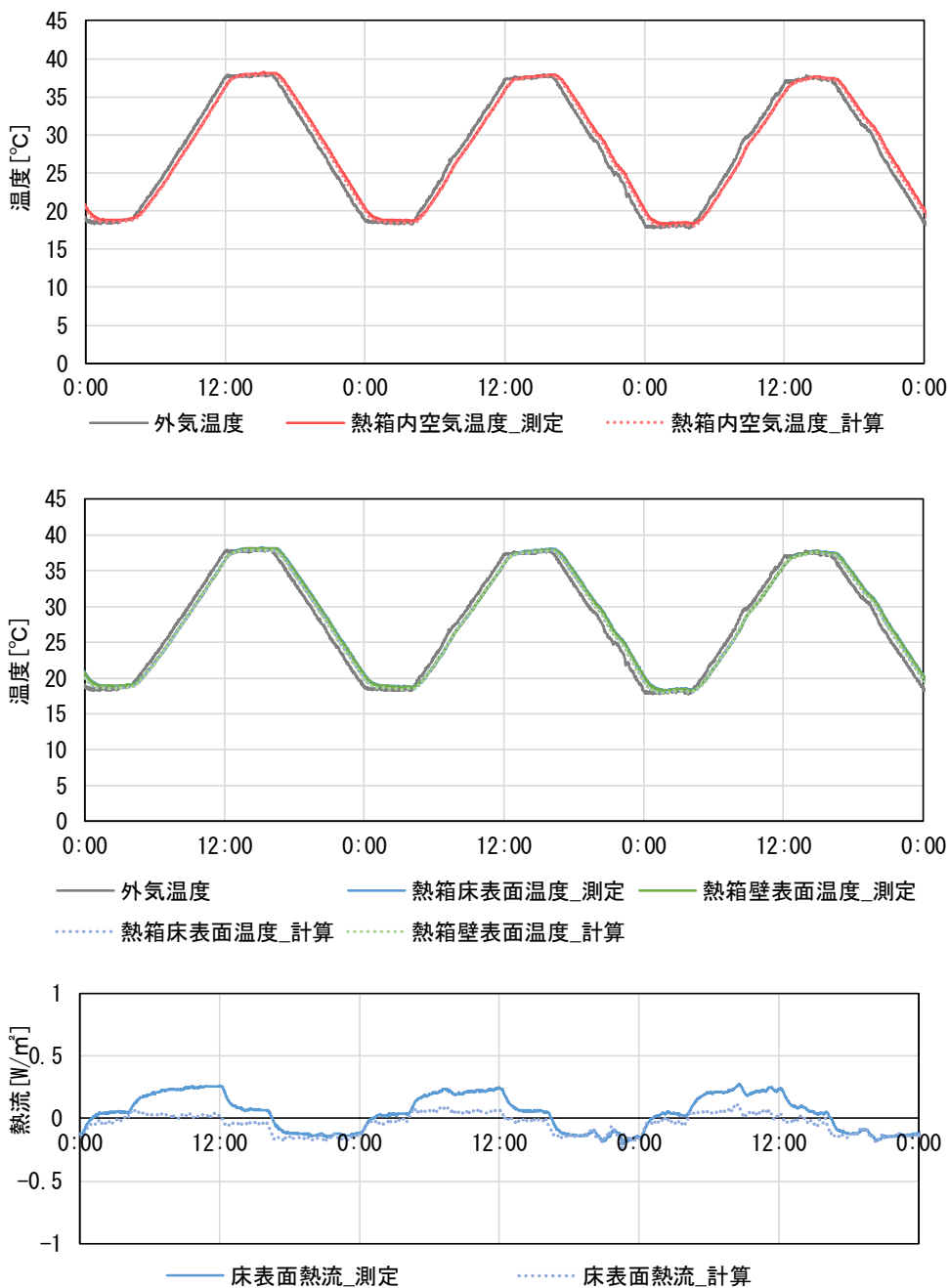


図 5.1.19 測定結果と計算結果の比較 熱箱 A ブランク

(13) 研究所 2 期間①2017/10/12~2017/10/23 熱箱 B シート

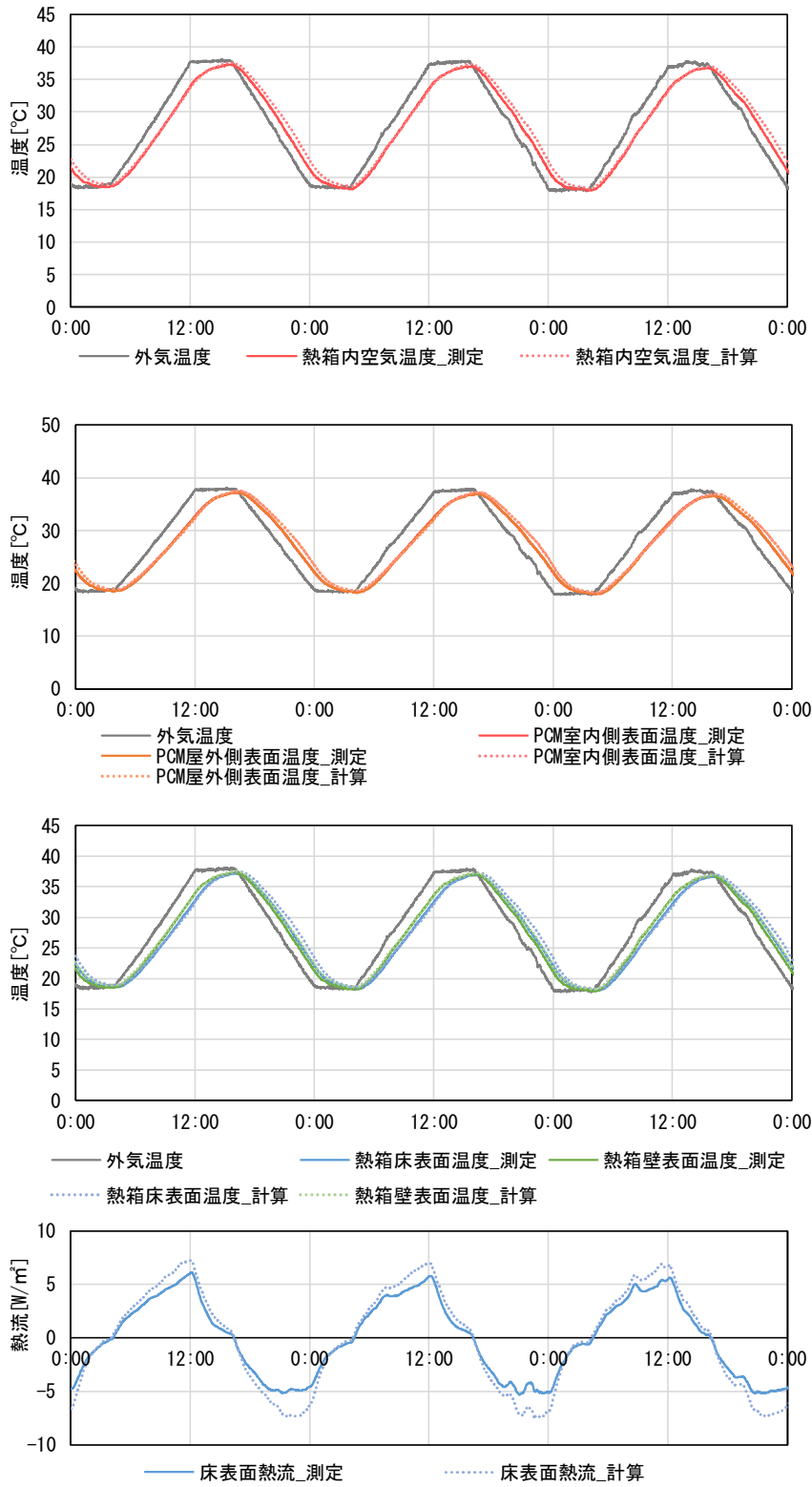
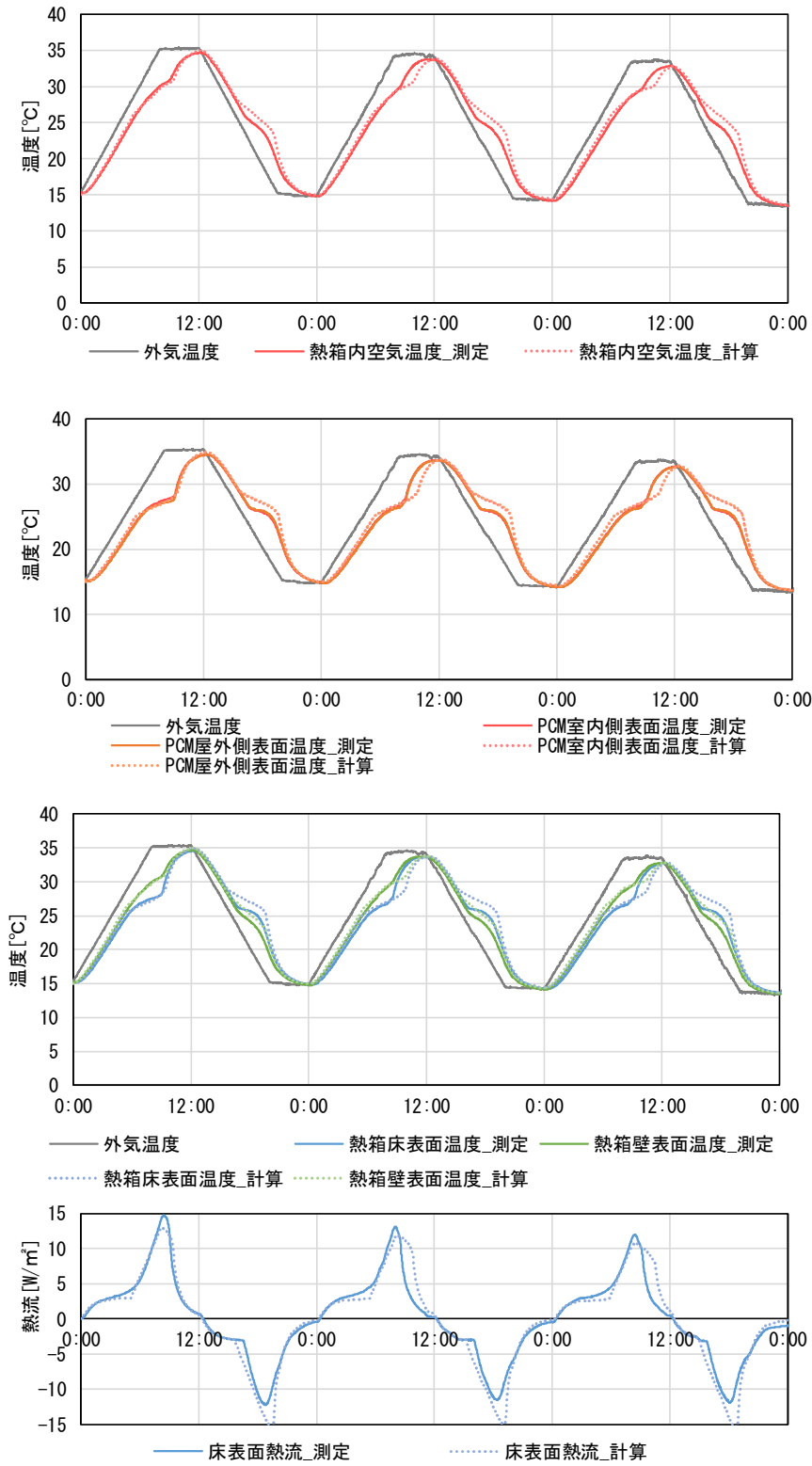


図 5.1.20 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート

(14) 研究所 2 期間②2017/10/20~2017/10/23 熱箱 B シート

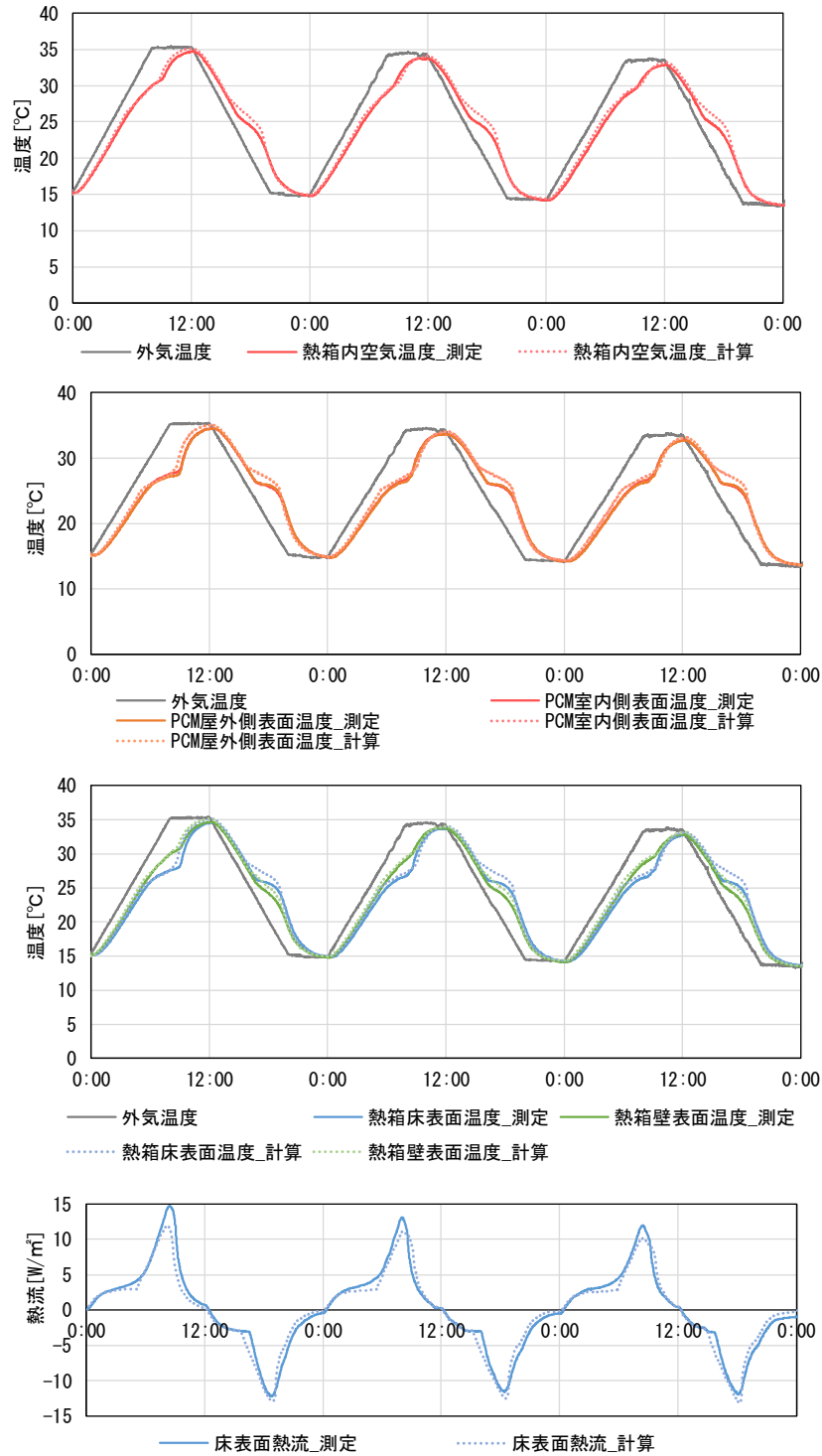


5

図 5.1.21 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート 低温側ピークの潜熱量を考慮する



複数存在する降温時の見かけの比熱のピークのうち、PCM の温度変動範囲に含まれない低温側のピークの潜熱量を考慮しない場合の計算結果は以下のとおり。



5

図 5.1.22 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート 低温側ピークの潜熱量を考慮しない

(15) 研究所 2 期間③2017/10/25~2017/10/31 熱箱 B 複合建材

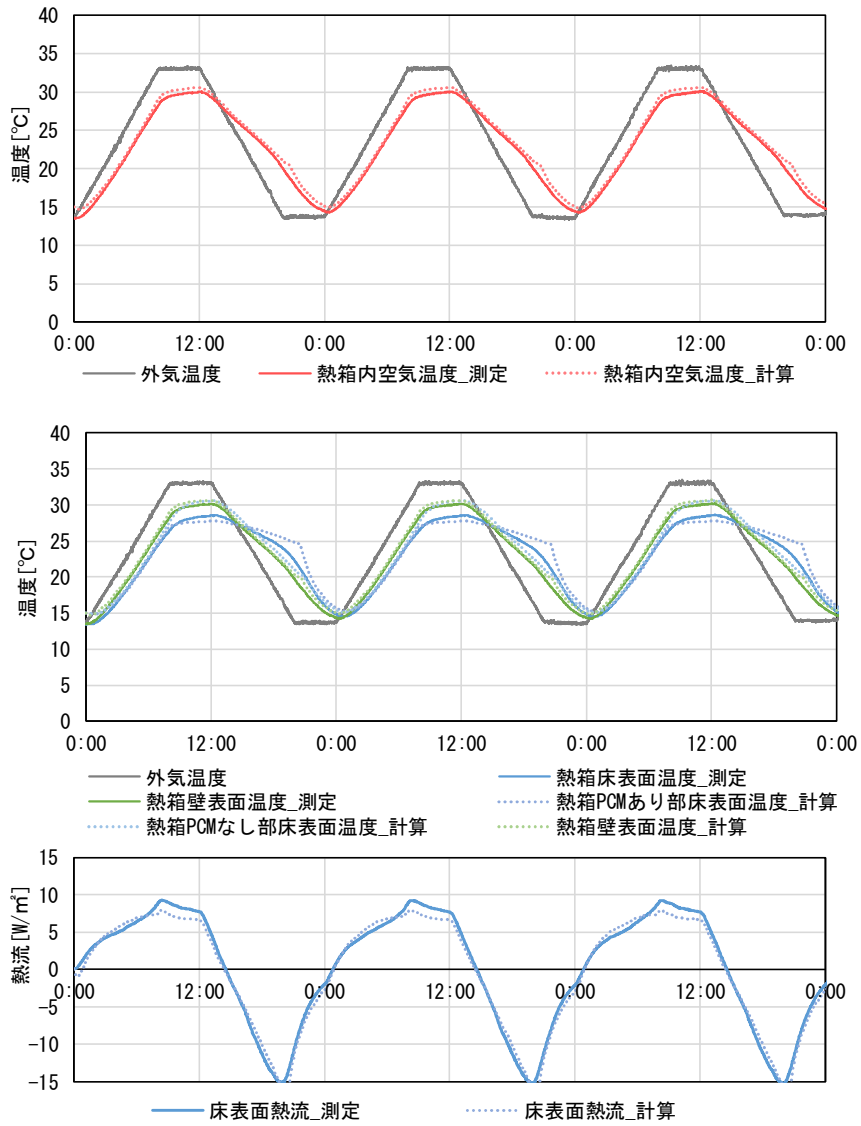
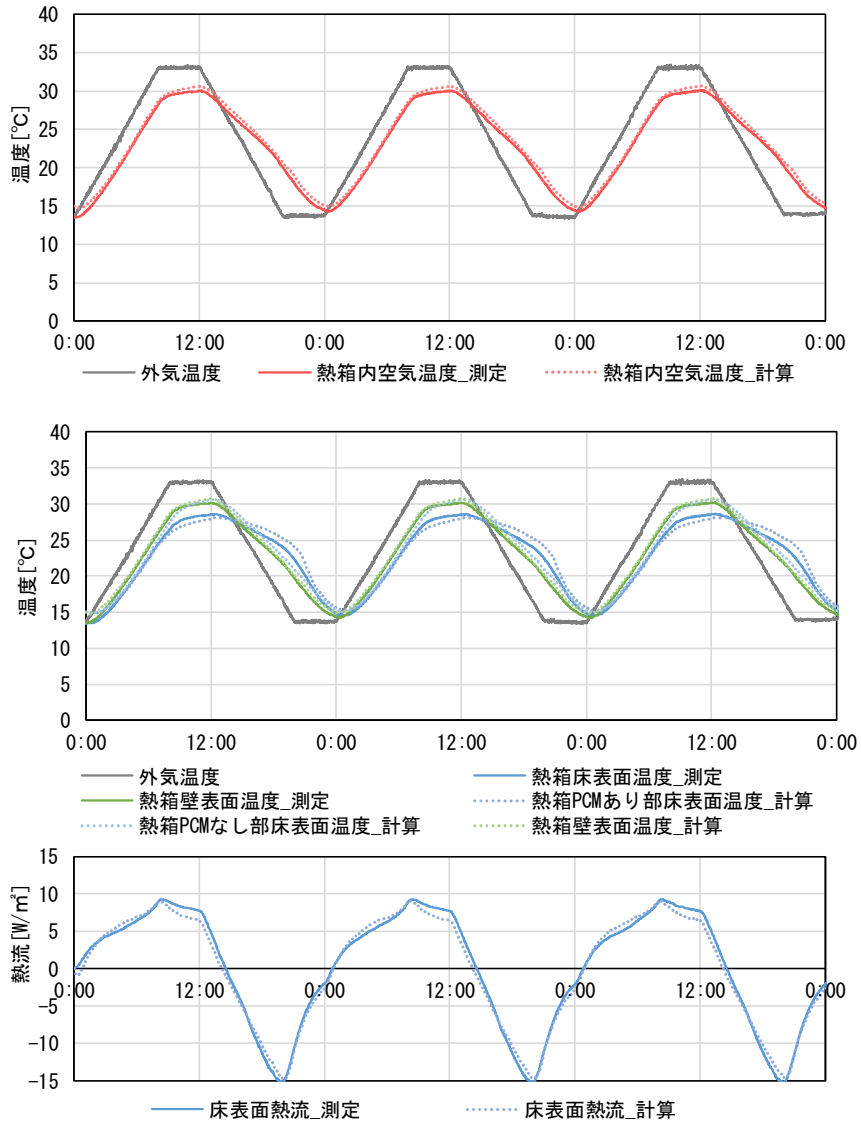


図 5.1.23 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 複合建材

見かけの比熱モデルを誤差関数歪度<sup>2</sup>( $Q_l=85[\text{MJ}/\text{m}^3]$ 、相変化温度範囲=25~29[°C]、 $T_p=29[^\circ\text{C}]$ 、 $\text{skew}=-5.0$ 、 $\omega=2.0$  ※潜熱量 170[ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ]相当)とすると、PCM 温度や熱流の傾向の再現性が高くなる。



5

図 5.1.24 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B 複合建材 見かけの比熱: 誤差関数歪度

(16) 研究所 2 期間④2017/11/7~2017/11/10 熱箱 B アルミパック

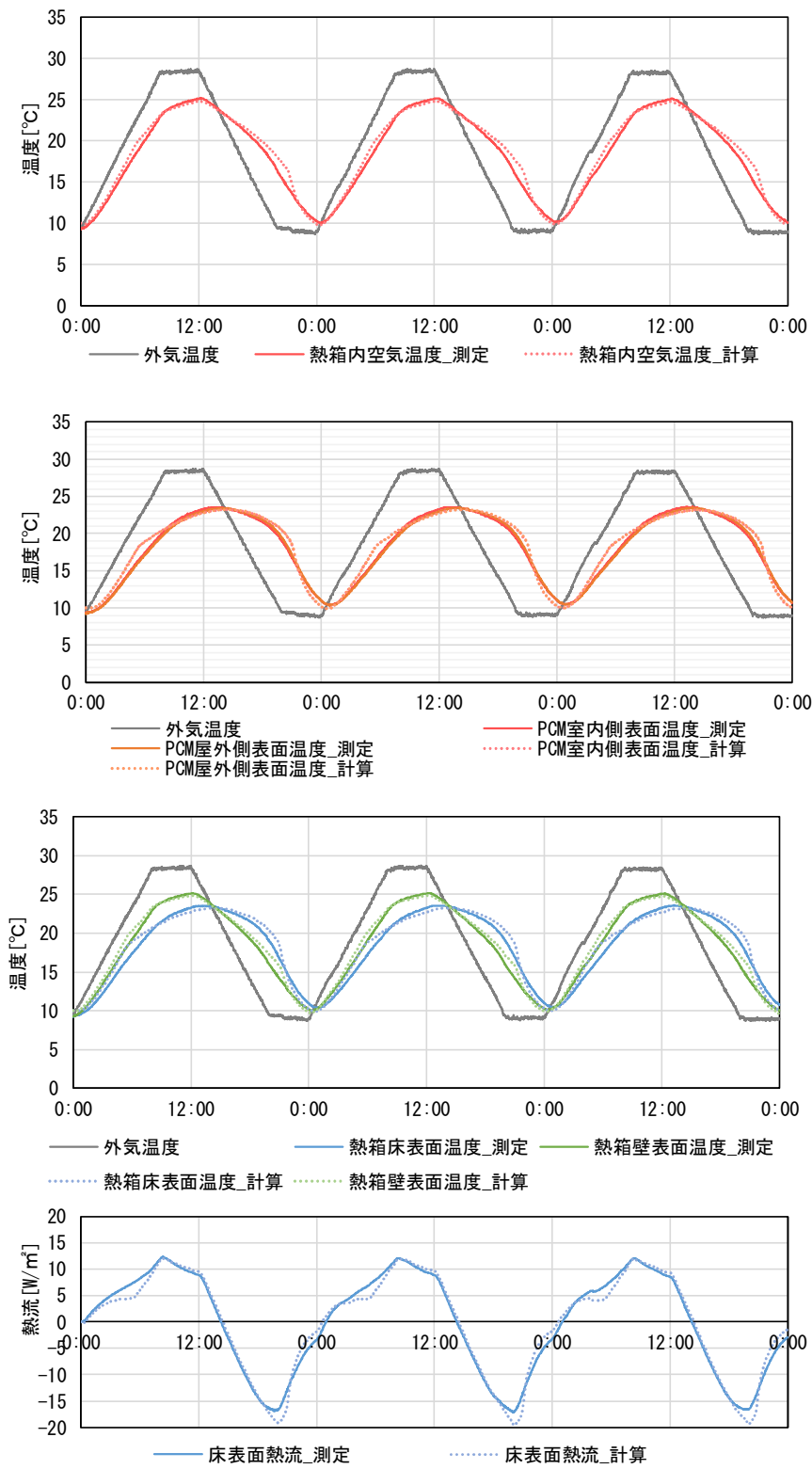
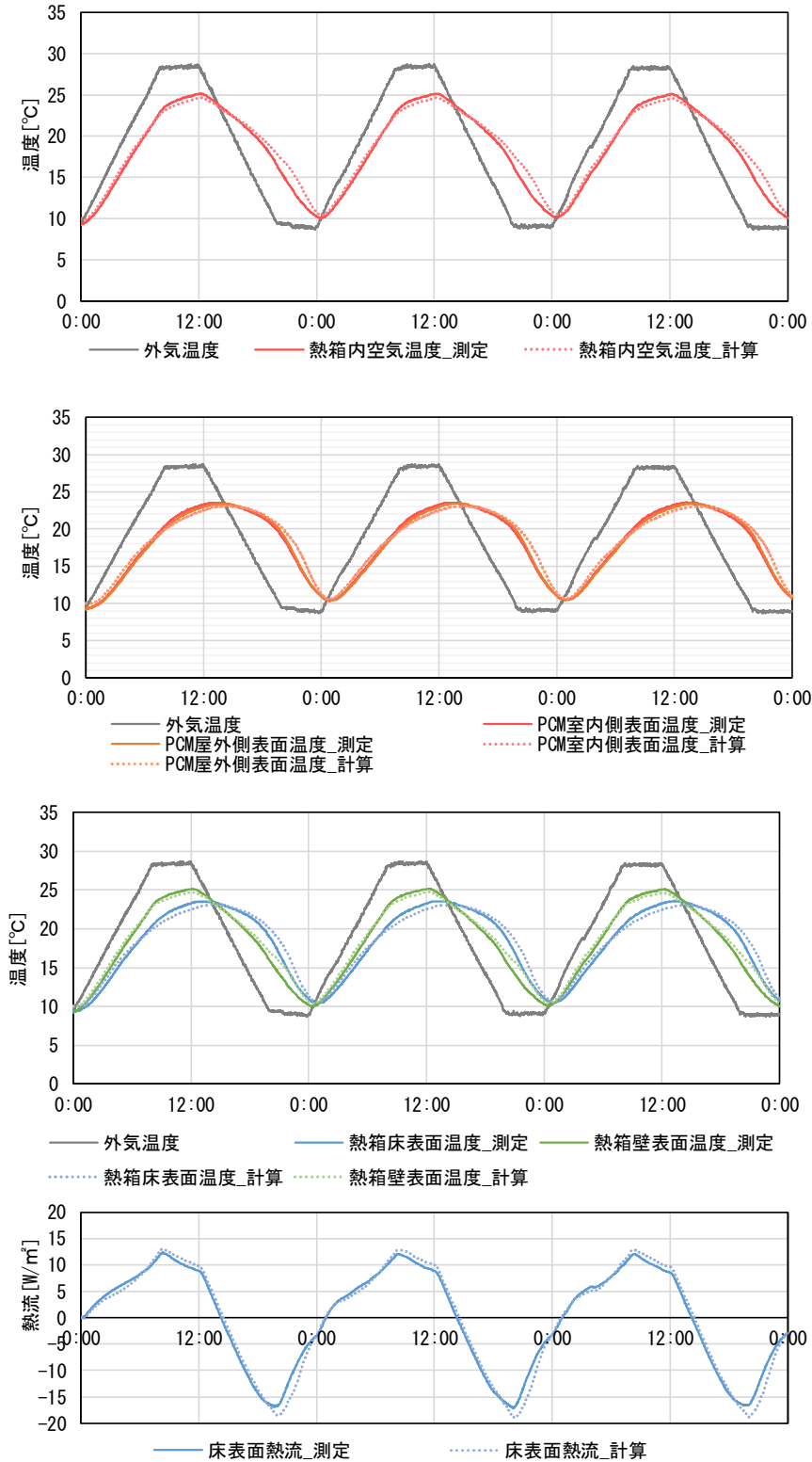


図 5.1.25 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B アルミパック

見かけの比熱モデルを誤差関数歪度<sup>2</sup>( $Q_l=30[\text{MJ}/\text{m}^3]$ 、相変化温度範囲=18~25[°C]、 $T_p=25[^\circ\text{C}]$ 、 $\text{skew}=-5.0$ 、 $\omega=4.0$  ※潜熱量 120[ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ]相当)とすると、PCM 温度や熱流の傾向の再現性が高くなる。



5

図 5.1.26 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B アルミパック 見かけの比熱: 誤差関数歪度

(17) 研究所 2 期間⑤2017/11/11~2017/11/14 熱箱 B アルミパック

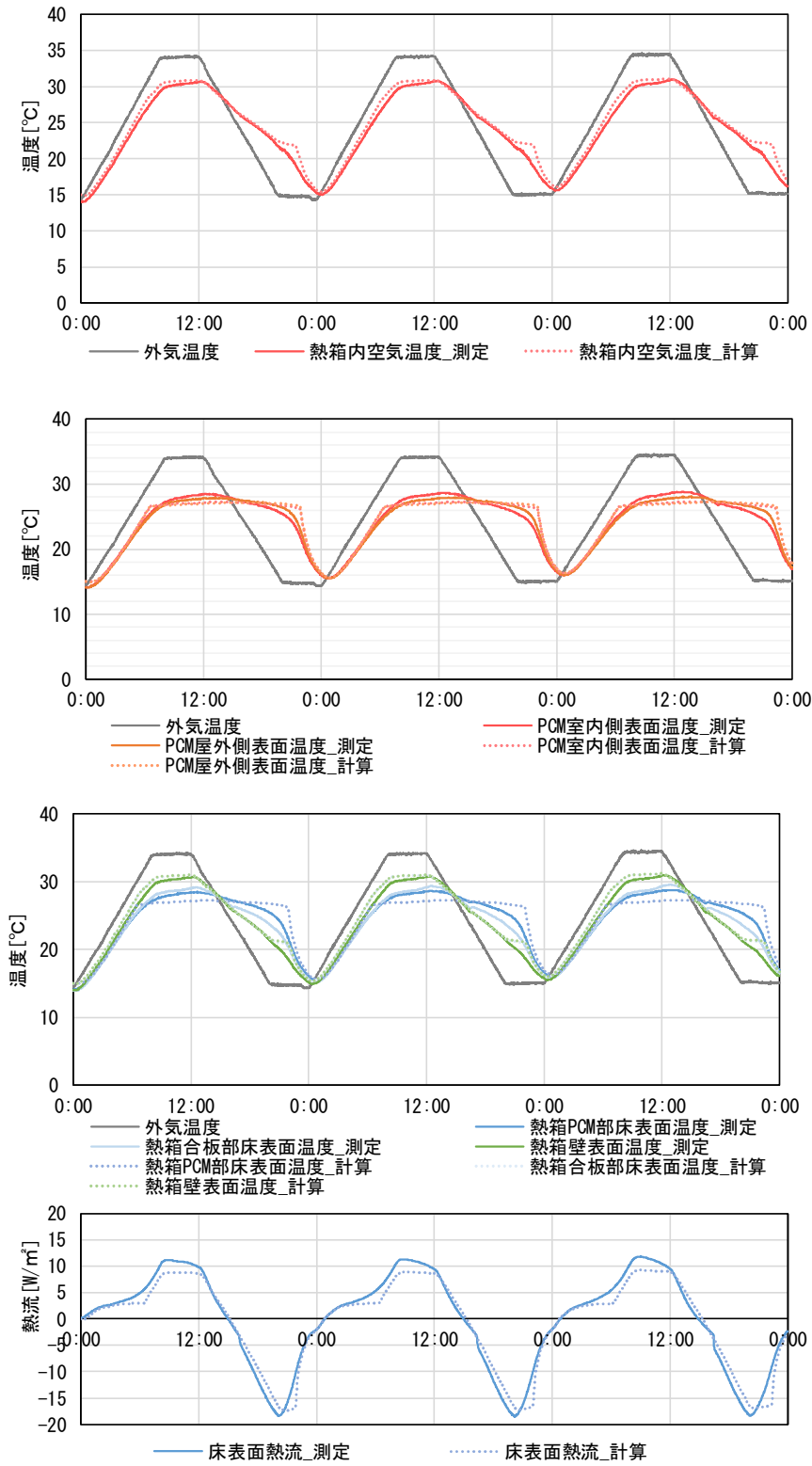
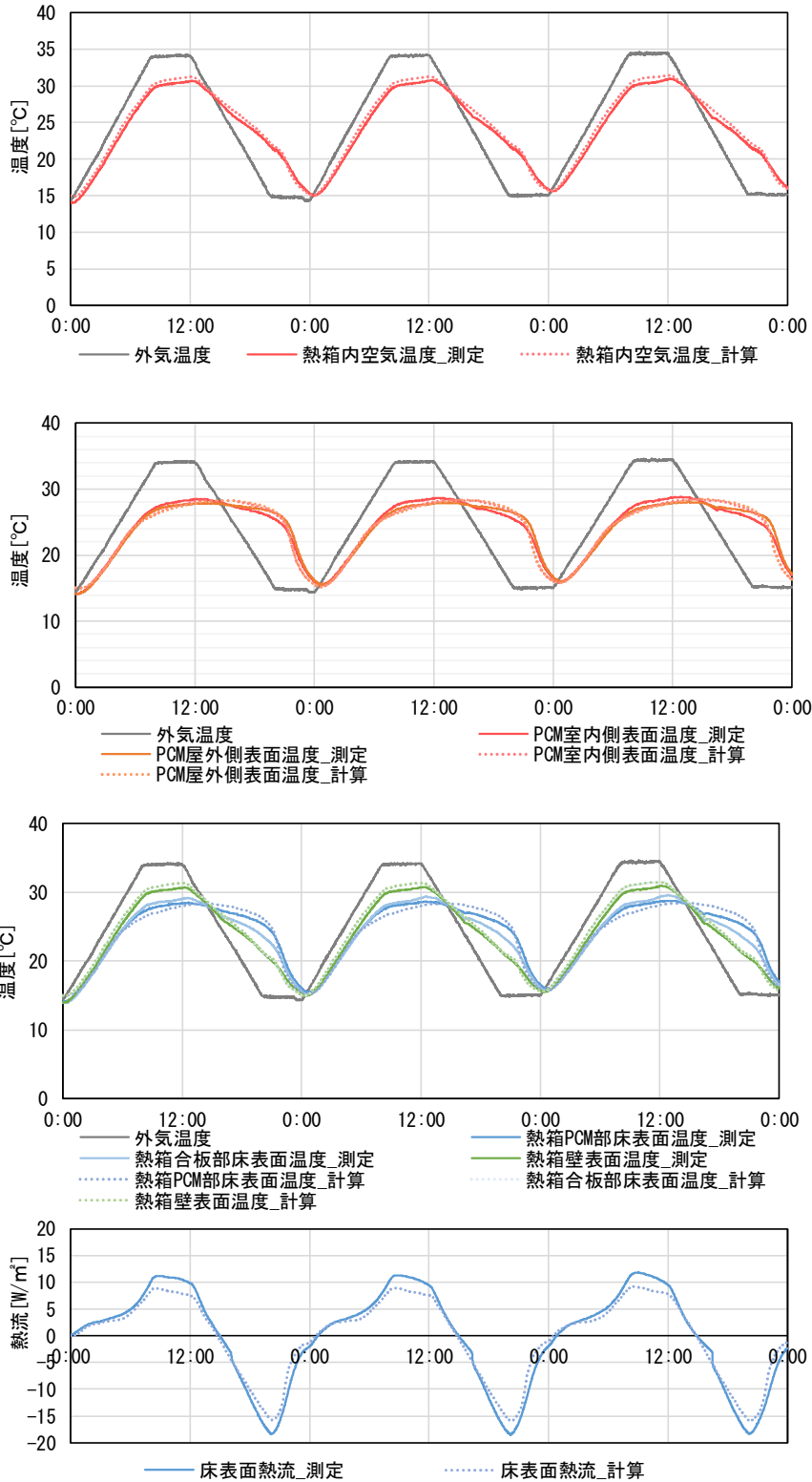


図 5.1.27 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B アルミパック

見かけの比熱モデルを誤差関数歪度<sup>2</sup>( $Q_l=85[\text{MJ}/\text{m}^3]$ 、相変化温度範囲=25~29[°C]、 $T_p=29[^\circ\text{C}]$ 、 $\text{skew}=-5.0$ 、 $\omega=2.0$  ※潜熱量 170[ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ]相当)とすると、PCM 温度や熱流の傾向の再現性が高くなる。



5

図 5.1.28 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B アルミパック 見かけの比熱: 誤差関数歪度

(18) 研究所 2 期間⑥2017/11/16~2017/11/20 熱箱 B シート

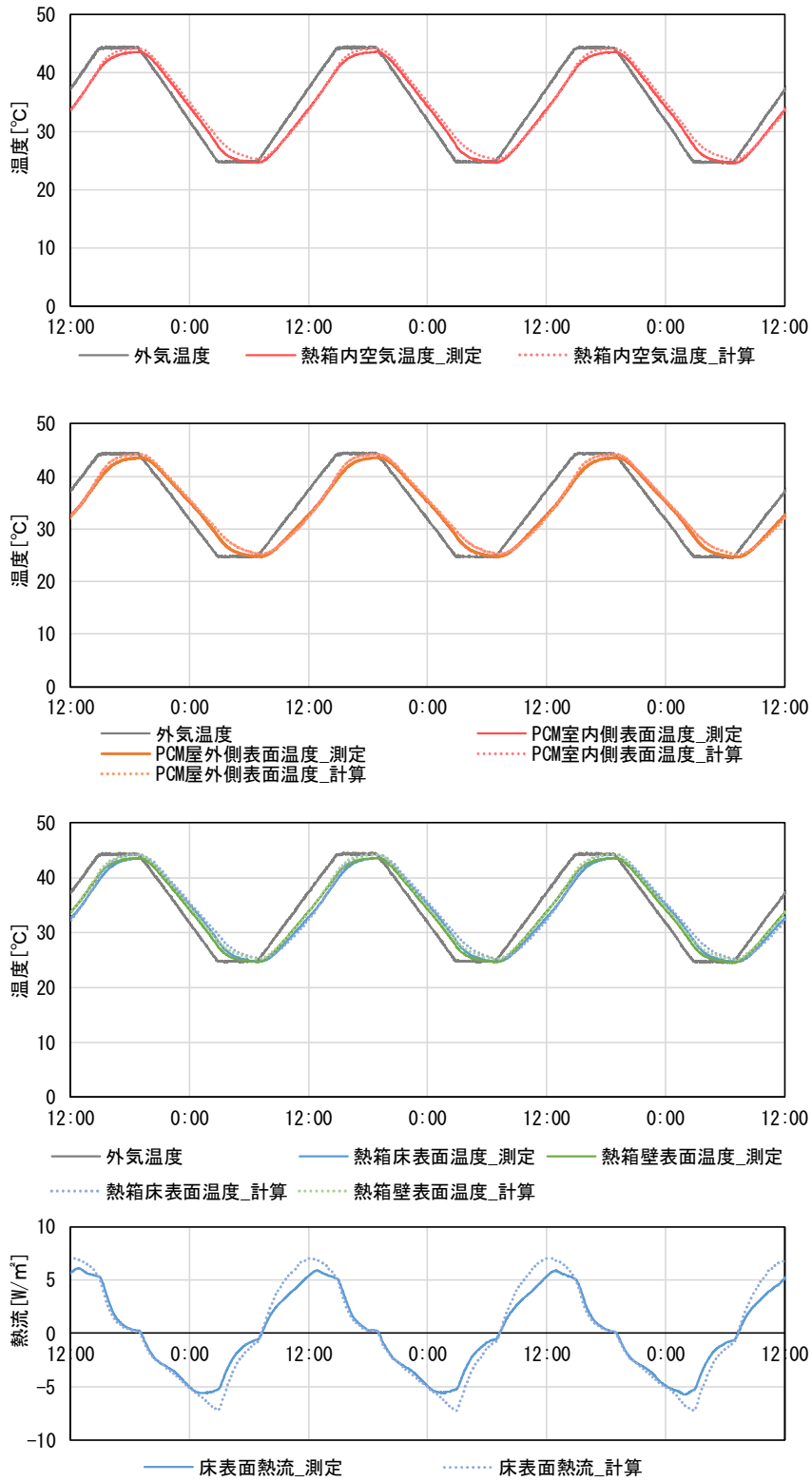


図 5.1.29 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート



(19) 研究所 2 期間⑦2018/2/10~2018/2/13 熱箱 B シート

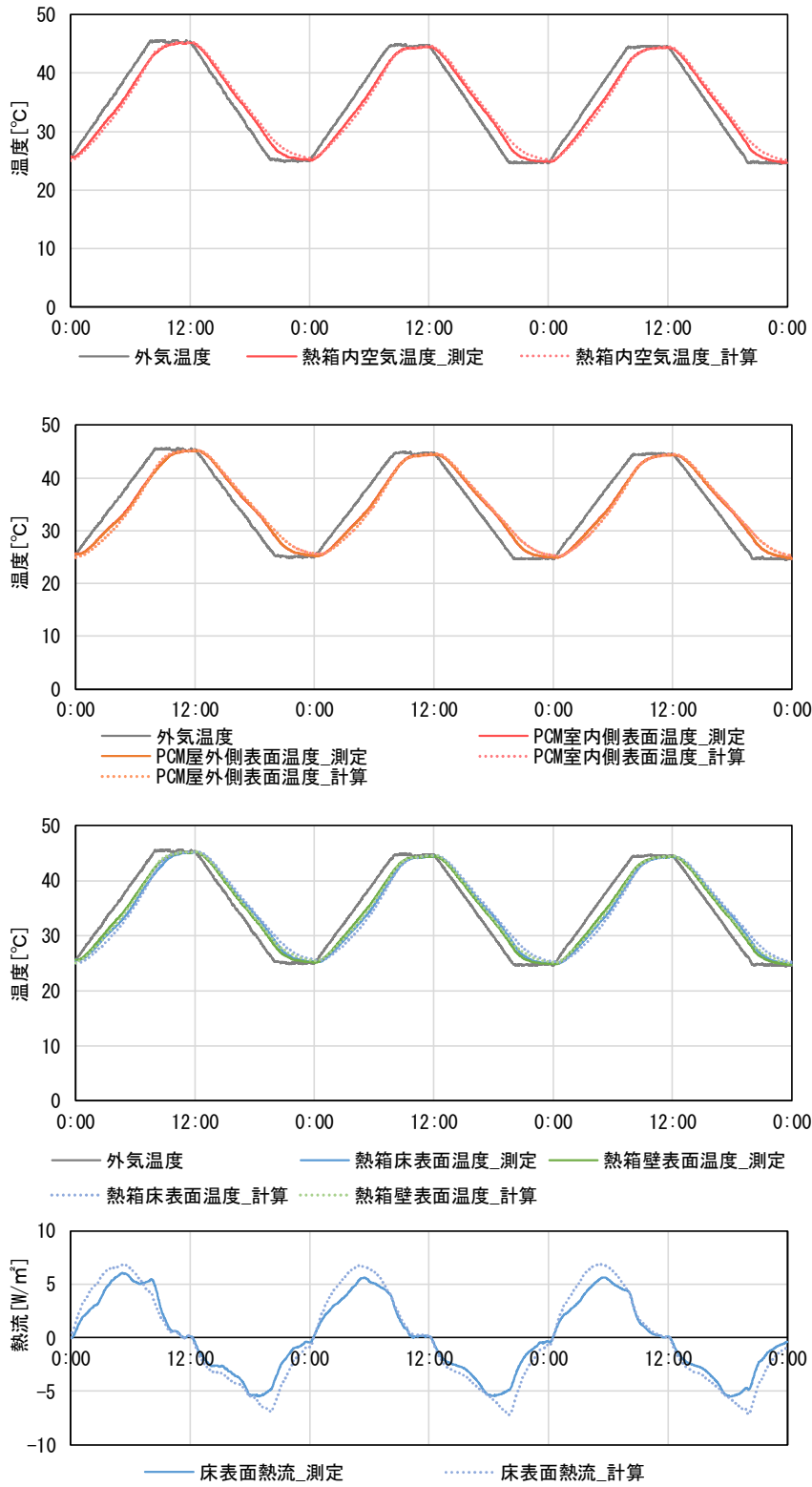


図 5.1.30 測定結果と計算結果の比較 熱箱 B シート

## 5.2 実験棟測定結果との比較による計算精度の検証

実験棟実測について、計算により実測結果の室温変動の再現を試み、計算の精度検証を行う。複数の実験棟で、実験棟毎に異なる仕様のPCMを用いて測定を実施している。

### 5.2.1 実験棟 I

#### (1) 目的

既往研究<sup>3</sup>における実験棟実測について、計算により実測結果の室温変動の再現を試みる。

#### (2) 実験棟概要

10 実験棟は、千葉県山武郡芝山に位置する。

実験棟は、3棟が2mの間隔をあけて東西方向に並んでいる。木造で3棟の建物性能が同一となるよう、設計、施工されている。また東西壁面に当たる日射が中央の棟と東西両側の棟で同じになるように、東西両側2mの位置に外装材を用いた日射除けを設置している。

西側の棟(写真左側)より、A棟、B棟と呼称する。

15

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 5.2.1 実験棟外観(出典: 館林恵介, 室内の温熱環境快適性向上に向けたダイレクトゲイン住宅における潜熱蓄熱建材の設計指針の作成<sup>4</sup>)

25

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

35 図 5.2.2 実験棟平面図・断面図(出典: 館林恵介, 室内の温熱環境快適性向上に向けたダイレクトゲイン住宅における潜熱蓄熱建材の設計指針の作成<sup>4</sup>)

断熱材は押出法ポリスチレンフォーム 3 種(熱伝導率  $0.028\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )を用いており、厚さは床・壁・天井ともに  $170\text{mm}$  である。断熱層の屋外側は通気層を挟んでガルバリウム鋼板を外装材としている。室内側は  $12\text{mm}$  のラワン合板を内装材とし、ここに PCM 建材を敷設する。PCM 建材がない状態での熱損失係数  $Q$  値は  $1.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、外皮平均熱貫流率は  $0.27\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  である。

5 実験棟の南面にアルゴンガス封入のトリプルガラスと樹脂フレーム(YKK:AP431)を用いた開口部を設置している。

### (3) 実測概要

2016 年 12 月における自然室温の測定結果を、計算との比較に用いる。

10 測定点について、計算との比較では、室中央の上下方向 4 点の温度測定結果を用いた。また、床表面温度の測定結果も、比較に使用した。

実測を行った 2016 年度冬期には、試験室の床に、PCM が混入されたパーティクルボードが設置されていた。

15

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30 図 5.2.3 室内空気温度の測定点(出典: 舘林恵介, 室内の温熱環境快適性向上に向けたダイレクト  
ゲイン住宅における潜熱蓄熱建材の設計指針の作成<sup>4)</sup>)

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

15

図 5.2.4 床表面温度の測定点(出典: 舘林恵介, 室内の温熱環境快適性向上に向けたダイレクトゲ  
イン住宅における潜熱蓄熱建材の設計指針の作成<sup>4)</sup>)

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

35

図 5.2.5 PCM 設置状況(出典: 堀内耀介, 日射制御と潜熱蓄を用いたダイレクトゲイン手法に関する  
研究-熱環境光の評価と実住戸へ適用に向けた検討<sup>3)</sup>)

## (4) 計算条件

表 5.2.1 計算条件

項目	設定	備考
地域	成田	実測データ（不足項目は気象庁データ横芝光・千葉を使用）
計算期間	2016年12月1日～12月31日	
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
計算時間間隔	1分	
断熱性能	別途	
開口部	カーテン・ブラインド等なし	
換気	0.15回/h	
空調	12月1日～12月26日：空調なし 12月27日～12月31日：暖房 20℃ 冷房 25℃	
在室者	なし	
照明	なし	
機器発熱	100W程度	ロガー・サーモカメラ・無線ルータ等は実測結果を入力、ファンコイル 72W
家具熱容量	顕熱容量：1.3kJ/(m <sup>3</sup> ・K)	
地盤面反射率	10%	
外壁日射吸収率	60%	
隣棟	考慮	
床の日射吸収比率	一般部（PCMなし）またはPCM敷設部：50%	残り50%は床も含めて面積案分
対流熱伝達率	4.5W/(m <sup>2</sup> ・K)	

表 5.2.2 壁の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚 [mm]			備考
	[W/(m・K)]		[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	熱橋部 1	
ラワン合板	0.160	720	12.0	12.0	12.0	
XPS	0.028	25.12	120.0		120.0	
間柱	0.120	519.1		120.0		
合板	0.160	720	10.0	10.0	10.0	
XPS	0.028	25.12	50.0			
間柱	0.120	519.1		50.0	50.0	
通気層	11.6W/(m <sup>2</sup> ・K)					
窯業系サイディング	0.280	1600	15.0	15.0	15.0	第6回木造計画・設計基準検討会資料 <sup>5</sup> より

5

表 5.2.3 天井の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚 [mm]		備考
	[W/(m・K)]		[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	
せっこうボード	0.220	830	12.5	12.5	
ラワン合板	0.160	720	12.0	12.0	
XPS	0.028	25.12	170.0		
間柱	0.120	519.1		170.0	

表 5.2.4 床の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚 [mm]		備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	熱橋部	
合板	0.160	0.160	12.0	12.0	木質パーチ設置の敷設範囲については表 5.1.5 に示す物性を使用
ラワン合板	0.160	720	6.0	6.0	
構造用合板	0.160	720	24.0	24.0	
XPS	0.028	25.12	170.0		
間柱	0.120	519.1		170.0	

表 5.2.5 開口部

	方位	熱貫流率	日射熱取得率%	備考
窓	南	1.31W/(m <sup>2</sup> ・K)	41.048	熱貫流率は、Wind Eye の計算結果 日射熱取得率は、ガラスの日射熱取得率 0.56×ガラス面積率(100-26.7)%より計算

5

表 5.2.6 面積表

	一般部	熱橋部 1	熱橋部 2	窓	備考
	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	
南	3.852	0.60	0.30	4.758	屋根の勾配は無視した。
東	7.860	0.75	0.90		
西	7.860	0.75	0.90		
北	7.260	1.95	0.30		
天井	13.786	0.685			
床	13.786	0.685			木質パーチ設置のケースでは一般部のうち 12.15 m <sup>2</sup> を木質パーチ敷設範囲とした

表 5.2.7 PCM 物性値

	密度	熱伝導率		潜熱 容量	顕熱容量		温度変化域		備考
		固相	液相		固相	液相	低温側	高温側	
		kg/m <sup>3</sup>	W/(m・K)		W/(m・K)	J/g	J/gK	J/gK	
木質 パーチ	712	0.16	0.16	17.8	1.3	1.5	14	24	熱容量は建材試験センターでの測定値を参考に与えた 熱伝導率は合板の値を使用

※潜熱比熱は、温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるように与えた。

10

表 5.2.8 PCM 設置状況

	床	壁	天井	備考
A 棟	なし	なし	なし	
B 棟	木質パーチ 12mm	なし	なし	木質パーチ敷設範囲 12.15 m <sup>2</sup> について、 合板を木質パーチに置き換える

(5) 実測結果と計算結果の比較

網掛けの期間は、欠測の期間、または、測定条件と計算条件が揃っていない期間である。

室温は、実測では、室中央の空気温度は鉛直方向に 4 点測定しているが、高さによる大きな差は見られない。シミュレーションでは、室空気を一質点として扱い、空間的な分布は考慮していない。

- 5 実測と比較し、シミュレーションでは日中の温度上昇が小さいなどの差が見られるが、明け方の日最低気温はほぼ再現できている。

1) A棟

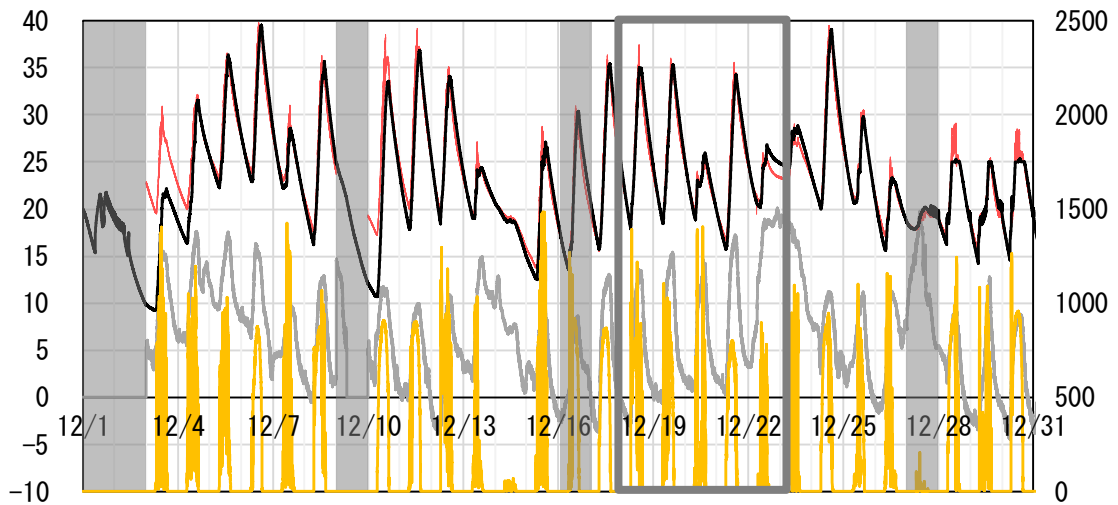


図 5.2.6 測定結果と計算結果の比較 A 棟室温

10

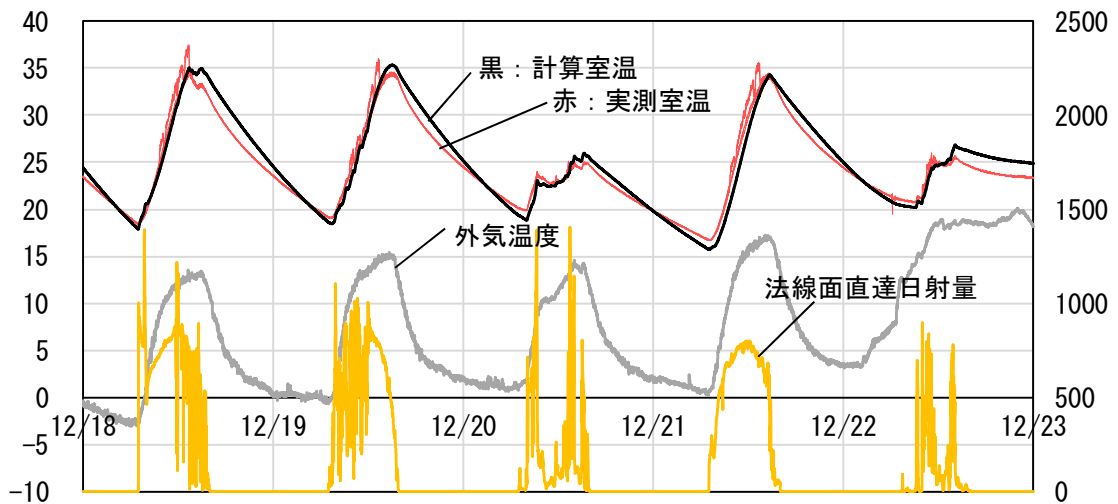


図 5.2.7 測定結果と計算結果の比較 A 棟室温 代表期間

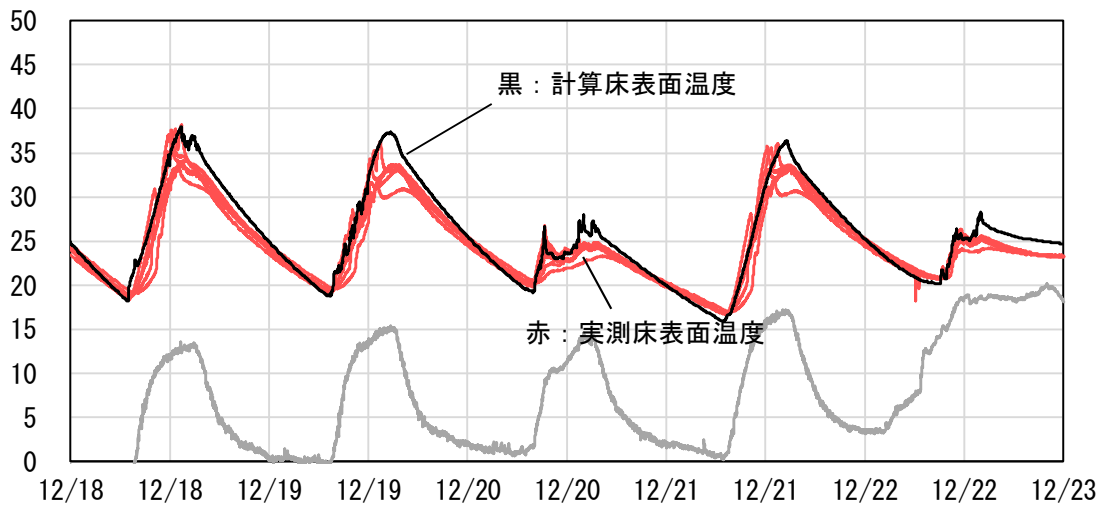


図 5.2.8 測定結果と計算結果の比較 A 棟床表面温度

2) B棟

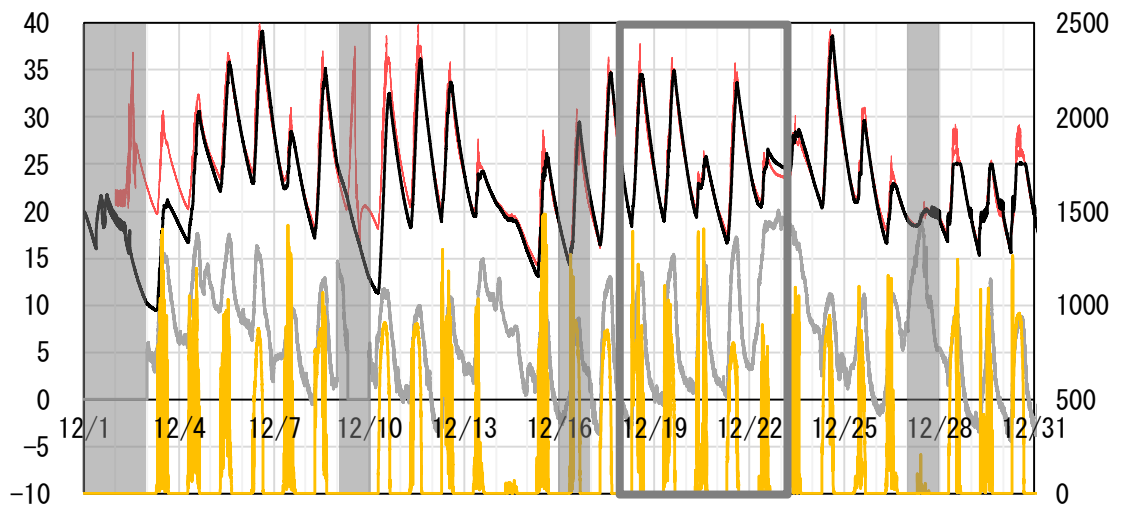


図 5.2.9 測定結果と計算結果の比較 B 棟室温



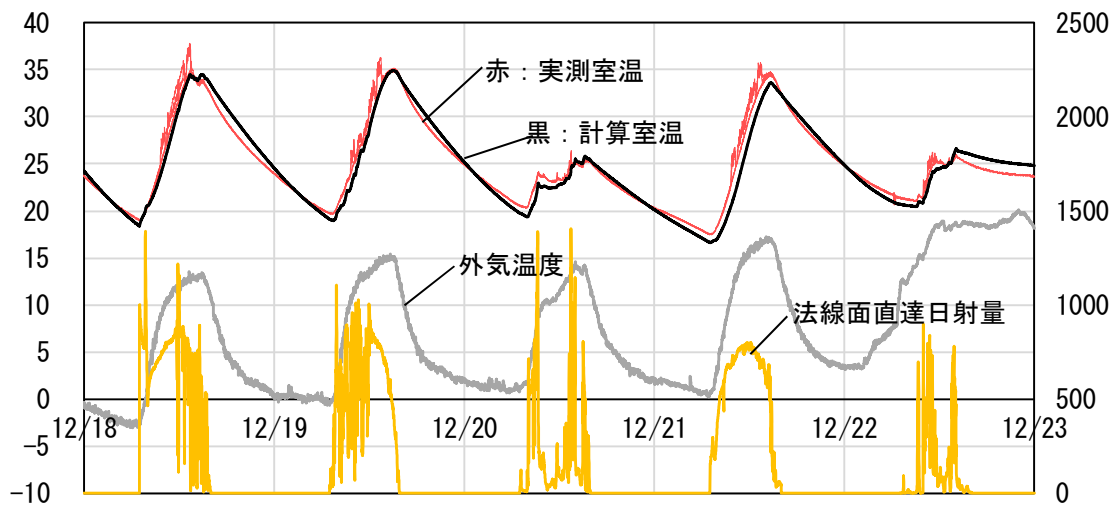


図 5.2.10 測定結果と計算結果の比較 B 棟室温 代表期間

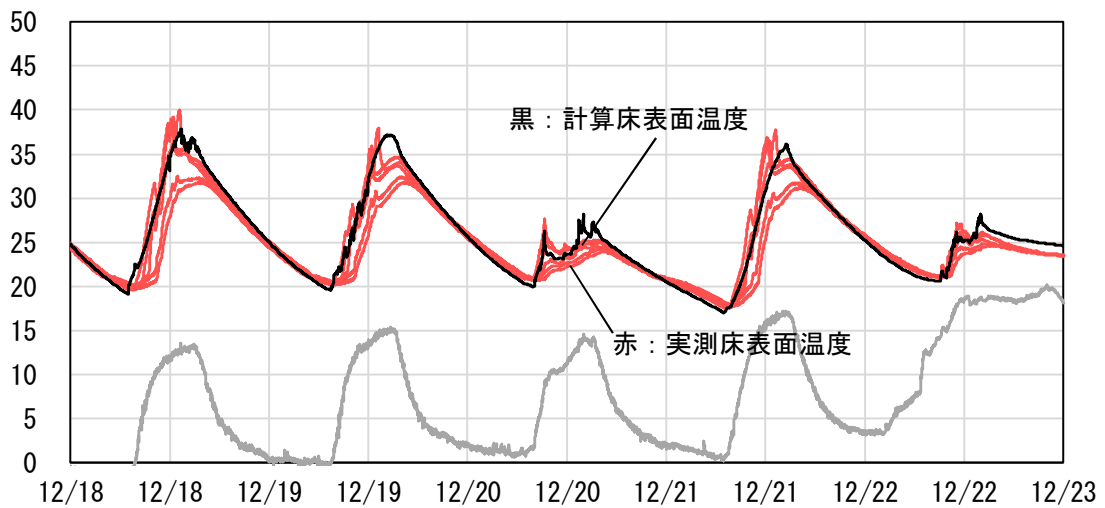


図 5.2.11 測定結果と計算結果の比較 B 棟床表面温度

## 5.2.2 実験棟Ⅱ（実験棟内部へのPCM設置量の少ない状態での比較検証）

### (1) 目的

実験棟内部へのPCM設置量の少ない状態での実験棟実測について、シミュレーションにより実測結果の室温変動の再現を試みる。PCMはカプセル化された状態で塗り壁の塗り材中に混入されているが、  
5 塗り材3mmのうちPCM質量割合20%であり、熱容量が比較的小さいため、ここでは、PCM設置の影響が小さいものとして検証を実施している。

### (2) 実験棟概要

10 東京大学本郷キャンパス工学部1号館屋上に設置された実験棟での自然室温測定の結果を用いる。測定と計算の比較に使用した測定点は、室全体または室中央の平均空気温度、床表面温度である。

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 5.2.12 実験棟外観・内観（出典：山本健太，「ダイレクトゲインを用いる太陽熱暖房住宅における潜熱蓄熱の挙動と評価に関する研究<sup>6)</sup>」）

25

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

30

35

図 5.2.13 測定点（出典：山本健太，「ダイレクトゲインを用いる太陽熱暖房住宅における潜熱蓄熱の挙動と評価に関する研究<sup>6)</sup>」）

## (3) 計算条件

表 5.2.9 計算条件

項目	設定	備考
地域	東京	実測データ
計算期間	2017年4月15日 ～2017年4月30日	
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
計算時間間隔	1分	
断熱性能	別途	
開口部	カーテン・ブラインド等なし	
換気	1.07回/h	換気風量実測値より
空調	なし	
在室者	なし	
照明	なし	
機器発熱	9.25W	実測値
家具熱容量	顕熱容量 : 0kJ/(m <sup>3</sup> ・K)	
地盤面反射率	20%	
外壁日射吸収率	30%	
隣棟	考慮せず	
床の日射吸収比率	80%	残り20%は床も含めて面積案分
対流熱伝達率	4.6W/(m <sup>2</sup> ・K)	

表 5.2.10 壁の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚[mm]			備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	北	南	東・西	
石こうボード	0.22	904			3.0	PCMを含む塗壁の基材を想定。PCMを含む熱物性は、PCM混合割合に応じた加重平均値を用いる。
石こうボード	0.22	904			9.5	
合板	0.160	720	5.5	5.5	5.5	
OSB	0.13	1105	12.0	24.0	24.0	3分割
押出法ポリスチレン フォーム保温板3種	0.028	43.8	39.5	40.3		2分割 一般部45mmについて、熱橋部を考慮して厚を低減している
押出法ポリスチレン フォーム保温板3種	0.028	43.8			56.3	3分割 一般部75mmについて、熱橋部を考慮して厚を低減している
OSB	0.13	1105	12.0	12.0		
押出法ポリスチレン フォーム保温板3種	0.028	43.8	30.0	30.0		2分割
非密閉中空層	11.1W/m <sup>2</sup> K					全方位あり
鋼板	53	3760	0.4	0.4	0.4	

表 5.2.11 天井の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
OSB	0.13	1105	24	2分割
非密閉中空層	11.1W/m <sup>2</sup> K			
押出法ポリスチレン フォーム保温板 3種	0.028	43.8	109.9	3分割 一般部 125mm について、熱 橋部を考慮して厚を低減している
OSB	0.13	1105	24	
合板	0.160	720	5.5	3分割

表 5.2.12 床の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
合板	0.160	720	3	3分割
OSB	0.13	1105	24	
押出法ポリスチレン フォーム保温板 3種	0.028	43.8	75.0	3分割 一般部 225mm について、熱 橋部を考慮して厚を低減している

5

表 5.2.13 開口部

	方位	熱貫流率	日射熱取得率	備考
窓	南	2.87W/(m <sup>2</sup> ・K)	ガラス：73% サッシ：9.8%	熱貫流率は Wind Eye での計算結果 ガラスの日射熱取得率は東京理科大学井上 研究室での測定結果 サッシの日射熱取得率は、省エネルギー基 準を参考に、0.034×熱貫流率により計算

表 5.2.14 面積表

	一般部[m <sup>2</sup> ]	ガラス[m <sup>2</sup> ]	サッシ[m <sup>2</sup> ]	備考
南	5.72	3.22	0.95	
北・東・西	9.89			
天井・床	16.40			

※屋根の勾配は無視した。

10

表 5.2.15 PCM 物性値

	熱伝導率		潜熱 容量	顕熱容量		温度変化域		備考
	固相	液相		固相	液相	低温側	高温側	
	W/(m・K)	W/(m・K)	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	°C	°C	
PCM	0.33	0.16	92	1.6	2.6	15	25	熱容量、熱伝達率はベルテ イエ装置での測定結果より

※潜熱比熱は、誤差歪度関数を用いた温度の関数<sup>2</sup>として与えた。

(ピーク温度 24.5°C、 $\omega=4$ 、skew=-10)

表 5.2.16 PCM 設置状況

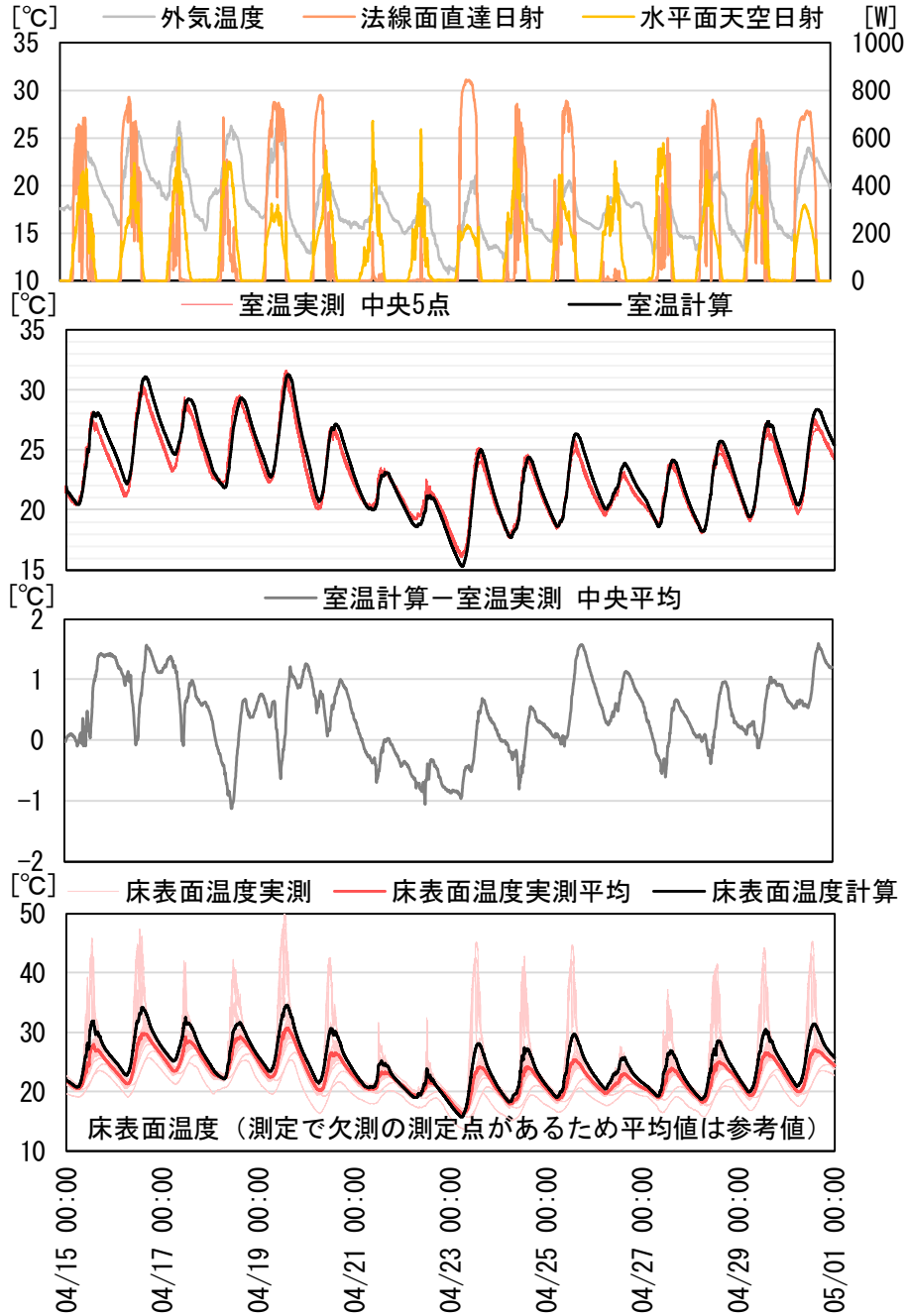
床	壁	天井	備考
なし	塗壁 3mm 中 20%	なし	

15

(4) 実測結果と計算結果の比較

室温実測結果の大よその傾向を再現できており、PCM 設置の影響が小さい状態においては、計算が一定の精度を有することが確認された。

5 なお、室温は、実測では、室中央の空気温度は鉛直方向に5点測定しているが、高さによる大きな差は見られない。シミュレーションでは、室空気を一質点として扱い、空間的な分布は考慮していない。



上段より気象データ、室温、実測と計算の室温の差、床表面温度

図 5.2.14 測定結果と計算結果の比較

### 5.2.3 実験棟Ⅱ（実験棟内部へのPCM設置量の多い状態での比較検証）

#### (1) 目的

既往研究<sup>6)</sup>におけるPCMが設置された状態の実験棟実測について、シミュレーションにより実測結果の室温変動の再現を試みる。

5

#### (2) 実験棟概要

東京大学本郷キャンパス工学部1号館屋上に設置された実験棟での自然室温測定の結果を用いる。計測点は5.2.2同様である。

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

図 5.2.15 実験棟外観・内観（出典：山本健太，ダイレクトゲインを用いる太陽熱暖房住宅における潜熱蓄熱の挙動と評価に関する研究<sup>6)</sup>）

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

図 5.2.16 床躯体層構成・PCM 建材詳細（出典：山本健太，ダイレクトゲインを用いる太陽熱暖房住宅における潜熱蓄熱の挙動と評価に関する研究<sup>6)</sup>）

## (3) 計算条件

表 5.2.17 計算条件

項目	設定	備考
地域	東京	実測データ
計算期間	2017年10月11日 ～2017年10月19日	
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
計算時間間隔	1分	
断熱性能	別途	
開口部	カーテン・ブラインド等なし	
換気	0.0回/h	換気停止
空調	なし	
在室者	なし	
照明	なし	
機器発熱	9.5W	実測値
家具熱容量	顕熱容量：0kJ/m3K	
地盤面反射率	40%	南鉛直面全天日射量、法線面直達日射量、水平面天空日射量、水平面全天日射量の測定結果より算出した期間平均値を参考にした
外壁日射吸収率	30%	
隣棟	考慮せず	
床の日射吸収比率	80%	残り20%は床も含めて面積案分
対流熱伝達率	4.6W/m <sup>2</sup> K	

表 5.2.18 面積表

	一般部 [m <sup>2</sup> ]		開口部 [m <sup>2</sup> ]		備考
	PCM あり	PCM なし	ガラス	サッシ	
南		5.72	3.22	0.95	屋根の勾配は無視した。
東・西	9.341	0.549			
北	8.571	1.319			
天井	5.796	9.942			
床	6.624	9.114			

5

表 5.2.19 壁の構成

仕様	熱伝導率 [W/(m・K)]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	厚 [mm]			備考
			一般部		熱橋部	
			PCM あり	PCM なし		
石こうボード※	0.22	904	3.0			
石こうボード	0.22	904	9.5			
合板	0.160	720		5.5		
OSB	0.13	1105	12.0	24.0		
押出法ポリスチレン フォーム保温板 3種	0.028	43.8	45.0	45.0	熱橋部を考慮し 調整	
OSB	0.13	1105	12.0	12.0		
押出法ポリスチレン フォーム保温板 3種	0.028	43.8	30.0	30.0	熱橋部を考慮し 調整	
非密閉中空層 鋼板	11.1W/m <sup>2</sup> K 53		1.0	1.0		

※PCMを含む塗壁の基材を想定。PCMを含む熱物性はPCM混合割合に応じた加重平均値を使用。

表 5.2.20 天井の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚 [mm]		備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部		
			PCM あり	PCM なし	
合板	0.160	720	2.0		9 分割
PCM			18.0		
合板	0.160	720	4.0		
合板	0.160	720	5.5	5.5	
OSB	0.13	1105	12.0	12.0	
OSB	0.13	1105	12.0	12.0	
押出法ポリスチレン フォーム保温板 3 種	0.028	43.8	107.2	107.2	3 分割 熱橋部を考慮し 実際の厚 125mm から低減
非密閉中空層	11.1W/m <sup>2</sup> K				
合板	0.160	720	12.0		
合板	0.160	720	12.0		
鋼板	53	3760	3.0	3.0	

表 5.2.21 床の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚 [mm]		備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部		
			PCM あり	PCM なし	
合板	0.160	720	6.5		3 分割
非密閉中空層	10W/m <sup>2</sup> K				
PCM			5.5		
合板	0.160	720	3.6		
非密閉中空層	10W/m <sup>2</sup> K				
PCM			12.0		6 分割
合板	0.160	720	24.0	12.0	
合板	0.160	720	24.0	24.0	
合板	0.160	720	24.0	24.0	
押出法ポリスチレン フォーム保温板 3 種	0.028	43.8	142.7	142.7	3 分割 熱橋部を考慮し 実際の厚 225mm から低減

5

表 5.2.22 開口部

	方位	熱貫流率	日射熱取得率	備考
窓	南	2.87 W/(m <sup>2</sup> ・K)	ガラス：73% サッシ：9.8%	熱貫流率は Wind Eye での計算結果 ガラスの日射熱取得率は東京理科大学井上研究室での測定結果 サッシの日射熱取得率は、省エネルギー基準を参考に、0.034×熱貫流率により計算

表 5.2.23 PCM 物性値

	熱伝導率		潜熱 容量	顕熱容量		温度変化域		備考
	固相	液相		固相	液相	低温側	高温側	
	W/(m・K)	W/(m・K)	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	°C	°C	
PCM	0.33	0.16	92	1.6	2.6	15	25	熱容量、熱伝達率はペルティエ装置での測定結果より

※潜熱比熱は、誤差歪度関数<sup>2</sup>を用いた温度の関数として与えた。

(ピーク温度 24.5°C、 $\omega=3$ 、skew=-10)

10



表 5.2.24 PCM 設置状況

床	壁	天井	備考
仕上材 5.5mm 下地材 12mm	塗壁 3mm 中 20%	18mm	

(4) 実測結果と計算結果の比較

室温実測結果の大よその傾向を再現できており、計算が一定の精度を有することが確認された。

- 5 なお、室温は、実測では、室中央の空気温度は鉛直方向に5点測定しているが、高さによる大きな差は見られない。シミュレーションでは、室空気を一質点として扱い、空間的な分布は考慮していない。

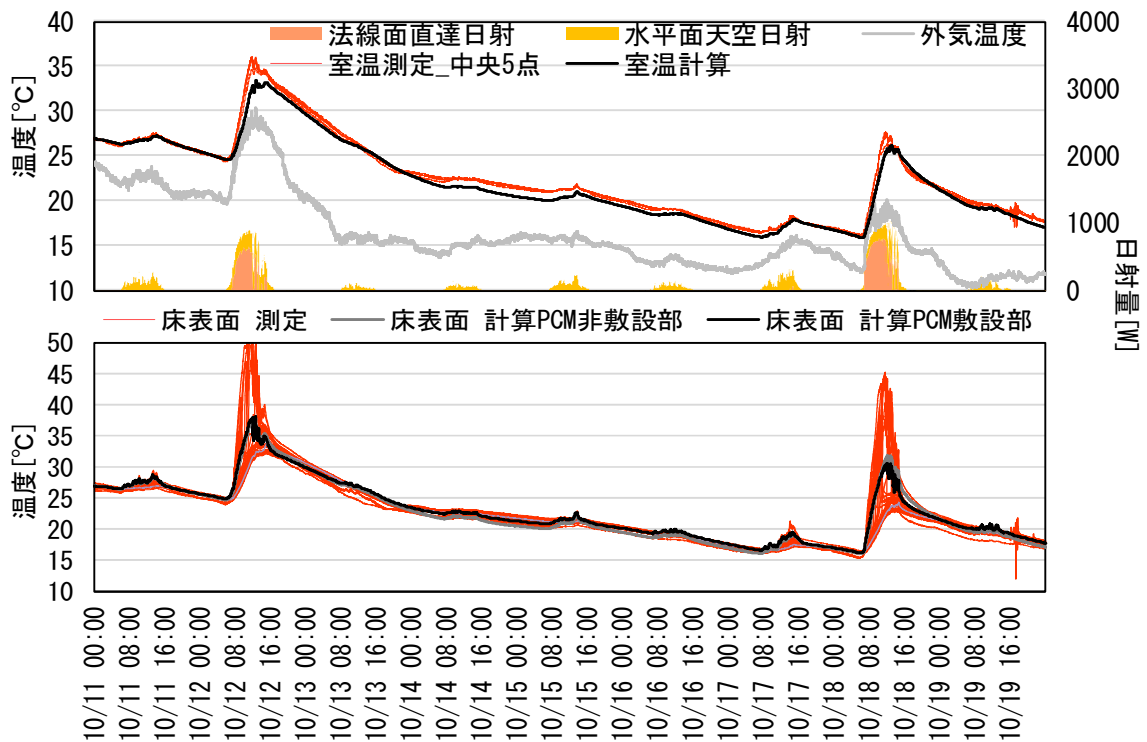


図 5.2.17 測定結果と計算結果の比較

10

- <sup>1</sup> 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
- <sup>2</sup> Vasken Dermardiros, Yuxiang Chen, Andreas K. Athienitis: Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications, Energy Procedia 78, pp. 1690-1695, 2015
- <sup>3</sup> 堀内耀介: 日射制御と潜熱蓄を用いたダイレクトゲイン手法に関する研究-熱環境光の評価と実住戸へ適用に向けた検討, 2018 年 3 月
- <sup>4</sup> 館林恵介: 室内の温熱環境快適性向上に向けたダイレクトゲイン住宅における潜熱蓄熱建材の設計指針の作成, 2017 年 3 月
- <sup>5</sup> 木造庁舎計画・設計基準の熱負荷計算について, 木造計画・設計基準検討会資料, 2011 年 2 月
- <sup>6</sup> 山本健太: ダイレクトゲインを用いる太陽熱暖房住宅における潜熱蓄熱の挙動と評価に関する研究, 2016 年 3 月

## 第6章 温熱環境およびエネルギー性能の面からの住宅の性能評価

## 6. 温熱環境およびエネルギー性能の面からの住宅の性能評価

### 6.1 温冷感・快適性・健康性を考慮した適切な温熱環境

本章では、温冷感、快適性および健康性を考慮した適切な温熱環境の範囲について、検討及び提案を行う。

5

#### 6.1.1 健康性に関する評価

##### (1) 健康リスク要因の評価指標の提案

筆者らの研究<sup>1)</sup>では、入浴時、起床時それぞれの評価対象室について、実現作用温度が目標作用温度を下回る時間帯の実現作用温度と目標作用温度 18℃との差を積算したものを、健康性の評価に繋がるものと考え、温熱環境評価指標案として、暫定的に使用している。各室の目標作用温度は、イギリスの冬期住宅内温度指針<sup>2)</sup>における推奨値を参考に、18℃としている。

10

$$I = \sum \max(0, OT_t - OT_r) \quad (6-1)$$

$I$  : 冬期の温熱環境に関する評価指標案(温熱環境評価指標案) [℃・回]

15

$OT_t, OT_r$  : 目標作用温度、実現作用温度 [℃]

$\Sigma$  : 各室のある時刻(入浴時または起床時)について、暖房期間の総和。

本研究では、上記の温熱環境評価指標案を参考に集計を行った指標を、健康リスク要因の評価指標として使用する。集計の対象室や時刻/時間帯は、関連する事故や疾患等を考慮し、以下のとおりとする。

20

$$I_{h,i} = \sum \max(0, T_{t,i} - T_{r,i}) \quad (6-2)$$

$I_{h,i}$  : 健康リスク要因の評価指標 i [℃・回]または[℃・時]

$T_{t,i}$  : 指標 i の目標温度(OT または室温) [℃]

25

$T_{r,i}$  : 指標 i の実現温度(OT または室温) [℃]

$\Sigma$  : 評価対象室の評価対象時刻/時間帯について、評価対象期間の総和。

表 6.1.1 健康リスク要因の評価指標

	場面	関連する事故、疾患等	集計方法					単位
			期間	時刻／時間帯	室	集計対象	集計方法	
指標 a	入浴時	血圧上昇	暖房期間	平日 20:45 休日 17:00	廊下	OT	基準温度 (18℃) からの差 の積算	℃・回
指標 b					浴室			
指標 c	起床時	高血圧		平日 6:30 休日 7:15	寝室	OT		
指標 d	就寝中	呼吸器系疾患		平日 23:30~6:30 休日 23:15~7:15	寝室	室温		
指標 e		血圧上昇			トイレ	OT		

指標 a、b、c、e に関連し得る疾患である肺炎、脳血管疾患、心疾患は、標準化死亡比全体の 1/4～1/3 程度を占める。指標 d に関連し得る入浴中溺死数は、年間 6000 人程度である。

5

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

20

図 6.1.1 標準化死亡比の都道府県別比較(男性)(出典: 建築建材展・スマートウェルネス住宅シテ  
イ最前線資料<sup>3)</sup>)

25

5

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

10

15

図 6.1.2 不慮の事故死亡数(出典: スマートウェルネス住宅等推進事業シンポジウム資料<sup>4)</sup>)

指標 d は、スマートウェルネス住宅研究企画委員会の調査において、寝室等の室温が低い住宅では  
高血圧症等の有病割合が高くなると指摘されていることを参考に、設定した指標である。

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

35

図 6.1.3 高血圧症の有病割合と室温(出典: 住宅の断熱化と居住者の健康への影響に関する全国  
調査中間報告会～国土交通省スマートウェルネス住宅等推進事業調査の実施状況～講演資料<sup>5)</sup>)

(2) CASBEE 健康チェックリストの暖かさに関する設問を活用した評価

筆者らは、住宅の温熱環境計算結果より、CASBEE 健康チェックリストの暖かさに関する設問7項目の得点を算出する方法の提案を行っている<sup>6</sup>。本研究では、この方法で算出された得点を評価に用いる。

高柳らの研究<sup>7</sup>では、暖かさに関する得点と主観的健康感の相関が示されている。性別、年代、地域の属性別に集計を行っており、属性にもよるが、概ね、暖かさの得点が 0 点で冬の風邪の発症率の予測値が 80%程度、満点の 21 点で発症率 20~30%程度である。0 点と 21 点では、発症率には、大よそ 50~60%の差が生じている。住宅の温熱環境シミュレーション結果を用いて住宅の暖かさに関する得点を算出すれば、その得点に対応する冬の風邪の発症率が予測できると考えられる。

10

表 6.1.2 CASBEE 健康チェックリスト 暖かさに関する設問

暖かさに関する得点の番号	CASBEE 健康チェックリスト	
	部屋・場所	質問内容
①	I. 居間・リビング	3 冬、暖房が効かずに寒いと感じることがありますか？
②	II. 寝室	11 冬、寒くて眠れないことがありますか？
③	II. 寝室	12 冬、起きたときに鼻や喉が乾燥していることはありますか？
④	IV. 浴室・脱衣所・洗面	20 冬、脱衣所が寒いと感じることがありますか？
⑤	IV. 浴室・脱衣所・洗面	21 冬、浴室が寒いと感じることがありますか？
⑥	V. トイレ	27 冬、寒いと感じることはありますか？
⑦	VII. 廊下・階段・収納	33 冬、部屋を出たときに寒いと感じることはありますか？

無断熱\_基準      暖かさ      6.1点/21点      涼しさ      5.5点/15点      空調一次エネ      27.0 GJ/年

			$t_o$		$t_g$	$t_f$		$\Delta t$	$U_A$	備考	
			$t_{o,m}$	$t_{o,e}$		$t_{f,b}$	$t_{f,t}$	$t_{o,i}-t_{o,b}$			
冬の代表日 (2月1日夜~2月2日朝)	①	居間	合計点数 1.59点	0点   2点	12°C   23°C	-	17°C   25°C	-	-	6:00→朝暖房を付ける直前 20:45→入浴開始	
				点数配分	0.5点		1.0点				
				計算結果	6.4°C		17.7°C				
				点数	0.00点		0.09点				
	②	寝室1 (寒さ)	合計点数 0.72点	0点   3点	0°C   18°C	-	17°C   25°C	-	-	23:30→就寝時刻	
				点数配分	1.5点		1.5点				
				計算結果	8.7°C		9.0°C				
				点数	0.72点		0.00点				
	③	寝室2 (乾燥)	合計点数 1.50点	0点   3点					$U_A$	1.5点	
				点数配分					3.0点		
				計算結果					3.0W/m <sup>2</sup> K		
				点数					1.50点		
	④	脱衣所	合計点数 1.15点	0点   3点	8°C   15°C	-	17°C   25°C	14°C   6°C	-		
				点数配分	1.5点		1.0点	0.5点			
計算結果				11.7°C		11.0°C	8.3°C				
点数				0.79点		0.00点	0.36点				
⑤	浴室	合計点数 0.19点	0点   3点	8°C   15°C	-	17°C   25°C	14°C   6°C	-			
			点数配分	1.5点		1.0点	0.5点				
			計算結果	8.2°C		8.4°C	11.8°C				
			点数	0.05点		0.00点	0.14点				
⑥	トイレ	合計点数 0.50点	0点   3点	8°C   15°C	-	17°C   25°C	14°C   6°C	-	魔のイベント ※2階		
			点数配分	1.5点		1.0点	0.5点				
			計算結果	6.5°C		8.5°C	0.7°C				
			点数	0.00点		0.00点	0.50点				
⑦	廊下	合計点数 0.50点	0点   3点	8°C   15°C	-	17°C   25°C	14°C   6°C	-	魔のイベント ※2階		
			点数配分	1.5点		1.0点	0.5点				
			計算結果	7.9°C		8.5°C	-0.7°C				
			点数	0.00点		0.00点	0.50点				
添え字凡例		a	o	f	.m	.n	.b	.l	.s	.t	.c
		空気温度	OT	床表面	朝	夜間	入浴時	リビング	寝室	トイレ	廊下

図 6.1.4 暖かさに関する得点の算出方法

## 6.1.2 快適性に関する評価

### (1) PPD を用いた全身温冷感に関する評価

快適性に関する評価について、評価対象の室、期間、時間帯の PPD の平均値を、評価指標として使用する。集計対象は、温熱環境評価指標の代表的なものとして PMV や PPD が想定されるが、暑い側／寒い側の評価を纏めて行える PPD を使用する。評価対象の室、期間、時間帯については、暖房期の居室の在室時を想定し、以下のとおりとする。暖房時間帯も評価対象としているのは、設定温度において PMV=0 程度とならない可能性や、オーバーヒート発生の可能性があるためである。

$$I_{c,i} = \overline{PPD}_i \quad (6-3)$$

- 10  $I_{c,i}$  : 快適性の評価指標 PPD 平均値[%]  
 $PPD_i$  : 指標 i の評価対象室の評価対象時刻／時間帯についての実現 PPD[%]

表 6.1.3 PPD を用いた快適性に関する評価指標の集計方法

	集計方法			
	室	期間	時刻／時間帯	集計方法
指標 a	居間	暖房 期間	平日：6～10、12～14、16～24 時 休日：8～14、16～23 時	PPD 平均値
指標 b	寝室		平日：0～7、23～24 時 休日：0～8、23～24 時	
指標 c	子供室 1		平日：0～7、20～21、22～24 時 休日：0～12、16～19、20～24 時	
指標 d	子供室 2		平日：0～7、18～19、21～24 時 休日：0～8、9～13、20～24 時	

- 15 なお、ISO 7730: 2005<sup>8</sup>の Annex H において、作用温度や PPD がその許容範囲を上回る／下回る場合に、上回る／下回る度合いについて、時間積算した指標が扱われている。

### (2) 床表面温度を用いた局所温冷感に関する評価

- 20 軽量の室内用の靴着用時の許容可能な床面温度範囲(19～29℃)<sup>9</sup>、裸足時の快適な床温度範囲(木質フローリング 23～28℃)<sup>10</sup>を参考に、暖房期の各室の在室時間帯について、床表面温度がこれらの温度範囲外となる時間割合を算出する。なお、ここでは、熱負荷計算で算出される床表面温度を評価に使用するが、接触温冷感は足等が床に接触した際の熱流との関連性が高いことが示されている<sup>11</sup>ため、より精緻な接触温冷感の評価のためには熱流等を用いることが好ましいと推察される。

### (3) 作用温度を用いた非定常温熱環境に関する評価

- 25 ANS/ASHRAE Standard 55-2010 に示された許容可能な作用温度を参考に、次章のケーススタディでの温熱環境計算結果より、許容可能な作用温度の変化の範囲を超える回数を算出する。次章のケーススタディは30分間隔での計算とするため、30分での許容可能な作用温度の範囲1.7℃を閾値とする。集計は、暖房期の各室の在室時間帯について行う。作用温度は、次章では、室温と室内平均表面温度の平均値として算出する。
- 30

### 6.1.3 人体モデルを使用した温冷感に関する評価

熱負荷計算の室温計算結果を評価するために、既往研究の人体モデルの再現を試みた。

#### (1) 既往研究における人体モデル

5 既往研究<sup>12</sup>では、2層17部位と中央血液溜まりからなる人体熱数値計算モデル COM が提案されている。また、それを改良する形で、AVA 血管<sup>13</sup>や体軀・年齢・性別<sup>14</sup>が考慮されたモデル JOS が開発されている。

以下に、既往研究で提案されている人体モデルの概要を示す。なお、単位系や記号等は、適宜変更している。

10

#### 1) 各部の熱平衡式

人体は17部位に分割され、各部位は更に Core 層と Skin 層の2層からなる円筒形でモデル化され、各層の熱平衡式は以下で表される<sup>13</sup>。

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = M_{cr} + M_{shiv} + \rho c V_{ar-cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K_{cr-sk} (T_{cr} - T_{sk}) + K_{ar-cr} (T_{ar} - T_{cr}) + K_{ve-ar} (T_{ve} - T_{ar}) - Q_{res} \quad (6-4)$$

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = M_{sk} + \rho c V_{ar-sk} (T_{ar} - T_{sk}) + K_{cr-sk} (T_{cr} - T_{sk}) + K_{sv-sk} (T_{sv} - T_{sk}) - Q_{sk} \quad (6-5)$$

15

$C$  : 熱容量[Wh/K]

$K_{a-b}$  : aとbとの間の有効熱コンダクタンス[W/K]

$M$  : 基礎代謝量と外部仕事による産熱量との和[W]

$M_{shiv}$  : ふるえ産熱量[W]

20

$Q_{res}$  : 呼吸による熱損失量[W]

$Q_{sk}$  : 皮膚からの対流・放射・蒸発による熱損失量[W]

$t$  : 時間[h]

$T$  : 温度[°C]

$V_{c-d}$  : c から d への血流量[L/h]

25

$\rho c$  : 血液の体積比熱[Wh/(L・K)](=4.186kJ/(L・K))

添字 ar : Arterial Flow

添字 cr : Core 層

添字 sk : Skin 層

添字 sv : Superficial Vein Flow

30

添字 ve : Venous Flow



Arterial Flow、Venous Flow、Superficial Vein Flow および中央血液溜まりにおける熱平衡式は以下で表される<sup>13</sup>。

$$C_{ar} \frac{dT_{ar}}{dt} = \rho c V_{ar^*-ar} (T_{ar^*} - T_{ar}) - K_{ar-cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K_{ar-ve} (T_{ar} - T_{ve}) \quad (6-6)$$

$$C_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = \rho c V_{cr-ve} (T_{cr} - T_{ve}) + \rho c V_{sk-v} (T_{sk} - T_{ve}) + \rho c V_{ve^*-ve} (T_{ve^*} - T_{ve}) - K_{ve-cr} (T_{ve} - T_{cr}) + K_{ar-ve} (T_{ar} - T_{ve}) \quad (6-7)$$

$$C_{sv} \frac{dT_{sv}}{dt} = \rho c V_{AVA} (T_{ar} - T_{sv}) + \rho c V_{sv^*-sv} (T_{sv^*} - T_{sv}) - K_{sv-sk} (T_{sv} - T_{sk}) \quad (6-8)$$

$$C_{cb} \frac{dT_{cb}}{dt} = \sum_{\text{血流の前部位}} \rho c V_{ve^*-cb} (T_{ve^*} - T_{cb}) \quad (6-9)$$

- 5  $V_{AVA}$  :AVA 血流量[L/h]
- 添字 cb :中央血液溜まり
- 添字 ar\* :血流の前部位の Arterial Flow
- 添字 sv\* :血流の前部位の Superficial Vein Flow
- 添字 ve\* :血流の前部位の Venous Flow

10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 6.1.5 (左)腕の血管系模式図(右)各部の熱交換図(出典: 徐莉ら, 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 22)<sup>13</sup>)

25 各部位の産熱量  $M[W]$ は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

$$M_{cr} = M_{b,cr} + W \quad (6-10)$$

$$M_{sk} = M_{b,sk} \quad (6-11)$$

$$W = (58.2met \cdot A_{total} - M_{b,total})Metf \quad (6-12)$$

$met$  : 活動の種類により推定される全身の代謝量[Met]

$W$  : 外部仕事による熱産生量[W]

$M_b$  : 各部位の基礎代謝量[W]

5  $M_{b,total}$  : 全身の基礎代謝量[W]

$A_{total}$  : 全身の体表面積[m<sup>2</sup>]

血液による熱輸送について、Core 層の血流量  $V_{ar-cr}$ [L/h]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

$$V_{ar-cr} = V_{b,cr} + 0.860(W + M_{siv}) \quad (6-13)$$

10

$V_b$  : 基礎血流量[L/h]

呼吸による熱損失  $Q_{res}$ [W]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

$$Q_{res} = 58.2met \left( 0.0014(34 - T_{a,head}) + 0.0173(5.87 - p_{a,head}) \right) A_{total} \quad (6-14)$$

15

$T_{a,head}$  : Head での空気温度[°C]

$p_{a,head}$  : Head での水蒸気圧[kPa]

各部位の Skin 層における蒸発熱損失量  $E_{sk}$ [W]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

20

$$E_{sk} = E_{dif} + E_{sw} \quad (6-15)$$

$$E_{dif} = 0.06E_{max}(1 - E_{sw}/E_{max}) \quad (6-16)$$

$$E_{max} = A\dot{h}_e(p_{s,sk} - p_a) \quad (6-17)$$

$$\dot{h}_e = LR \cdot i_{cl} / \left( 0.155I_{cl} + i_{cl} / (\dot{h}_c \cdot f_{cl}) \right) \quad (6-18)$$

$E_{dif}$  : 各部位の不感蒸泄による熱損失量[W]

$E_{sw}$  : 各部位の発汗による蒸発熱損失量[W]

$E_{max}$  : 各部位の最大蒸発熱損失量[W]

25

$A$  : 各部位の体表面積[m<sup>2</sup>]

$\dot{h}_c$  : 各部位の着衣外表面から環境までの対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\dot{h}_e$  : 各部位の皮膚表面から環境までの潜熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>·kPa)]

	$p_{s,sk}$	:各部位の皮膚表面での飽和水蒸気圧[kPa]
	$p_a$	:各部位の環境の水蒸気圧[kPa]
	$I_{cl}$	:各部位の着衣熱抵抗[Clo]
	$f_{cl}$	:各部位の着衣面積比[-]
5	$i_{cl}$	:係数[-](=0.45)
	$LR$	:ルイス係数[K/kPa](=16.5°C/kPa)

皮膚表面の顕熱交換について、皮膚表面と環境の対流及び放射熱交換量  $Q_t$ [W]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。なお、ここでは、Skin 層と外部物質の間の接触を考慮しない。

10

$$Q_t = A \dot{h}_t (T_{sk} - t_o) \quad (6-19)$$

$$\frac{1}{\dot{h}_t} = 0.155 I_{cl} + \frac{1}{f_{cl}(\dot{h}_c + \dot{h}_r)} \quad (6-20)$$

$$\dot{h}_c = \dot{h}_{c,c} \cdot Mod_c = \dot{h}_{c,c} \cdot \max\left((8.6 \cdot v_{ave}^{0.53})/\dot{h}_{c,ave}, 3.0/\dot{h}_{c,ave}\right) \quad (6-21)$$

$$\dot{h}_r = \dot{h}_{r,c} \cdot Mod_r = \dot{h}_{r,c} \cdot 4.7/\dot{h}_{r,ave} \quad (6-22)$$

15

$t_o$  :作用温度[°C]

$h_t$  :各部位の Skin から環境までの総合熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$h_r$  :各部位の着衣外表面から環境までの線形放射熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$h_{c,c}$  :静穏気流下(0.13m/s 以下)における各部位の着衣外表面から環境までの対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$h_{r,c}$  :静穏気流下(0.13m/s 以下)における各部位の着衣外表面から環境までの線形放射熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$h_{c,ave}$  :面積重み付け平均した全身の対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

20

$h_{r,ave}$  :面積重み付け平均した全身の線形放射熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$v_{c,ave}$  :面積重み付け平均した全身の相対気流速度[m/s]

## 2) 制御系

各部位のエラーシグナル  $Err$ [°C]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

25

$$Err = (T - T_{set}) + RATE \cdot F \quad (6-23)$$

$$Wrm = Err, \quad Cld = 0 \quad (Err < 0) \quad (6-24)$$

$$Clds = -Err, \quad Wrm = 0 \quad (Err > 0) \quad (6-25)$$

$Err$  :各部位のエラーシグナル[°C]

$T_{set}$  : 各部位のセットポイント温度[°C]  
 $RATE$  : 温度受容器の動的感度[h](ここでは 0h とする)  
 $F$  : 微小温度変化量[°C/h]

5 各部位の Skin からのセンサーシグナルは中枢にて統合されると考えられ、皮膚温受容器からの重み付け出力、皮膚冷受容器からの重み付け出力は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

$$Wrms = \sum_{各部位} (SKINR \cdot Wrm_{sk}) \quad (6-26)$$

$$Clds = \sum_{各部位} (SKINR \cdot Cld_{sk}) \quad (6-27)$$

$Wrms$  : 皮膚温受容器からの重み付け出力[°C]  
 $Clds$  : 皮膚冷受容器からの重み付け出力[°C]  
 $SKINR$  : Skin からのセンサーシグナルを統合するための部位別重み付け係数[-]

### 3) 体温制御方法

各部位の皮膚血流量  $V_{sk}$ [L/h]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

15

$$V_{sk} = km_{bf} \cdot \frac{V_{b,sk} + SKINV \cdot DL}{1 + SKINC \cdot ST} \quad (6-28)$$

$$DL = CdlErr_{cr,head} + Sdl(Wrms - Clds) + PdlWrm_{cr,head} Wrms \quad (6-29)$$

$$ST = -CstErr_{cr,head} - Sst(Wrms - Clds) + PstCld_{cr,head} Clds \quad (6-30)$$

$$km_{bf} = 2.0^{Err_{sk}/RT_{bf}} \quad (6-31)$$

$Cld_{cr,head}$  : Head の Core における Cold シグナル[°C]  
 $Cdl$  : Head の Core からの血管拡張制御係数[L/(h・°C)] (=117.0L/(h・°C))  
 $Sdl$  : Skin からの血管拡張制御係数[L/(h・°C)] (=7.5L/(h・°C))  
 $Pdl$  : Head の Core と Skin からの血管拡張制御係数[L/(h・°C)] (=0.0L/(h・°C))  
 $Cst$  : Head の Core からの血管収縮制御係数[1/°C] (=10.8°C<sup>-1</sup>)  
 $Sst$  : Skin からの血管収縮制御係数[1/°C] (=10.8°C<sup>-1</sup>)  
 $Pst$  : Head の Core と Skin からの血管収縮制御係数[1/°C] (=0.0°C<sup>-1</sup>)  
 $km_{bf}$  : 皮膚血流量に関するイフェクター動作量[-]  
 $RT_{bf}$  : 皮膚血流に関するイフェクター動作量が 2 となるための必要温度幅[°C]  
 ( $RT_{bf}=6°C$ とする)  
 $Err_{sk}$  : 各部位の Skin におけるエラーシグナル[°C]

25

- $Err_{cr,head}$  : Head の Core におけるエラーシグナル[°C]  
 $Wrm_{cr,head}$  : Head の Core における Warm シグナル[°C]  
DL : 血管拡張に関するシグナル[L/h]  
ST : 血管収縮に関するシグナル[-]  
5  $SKINV$  : DL についての各部位の Skin 層の全身に対する相対比[-]  
 $SKINC$  : ST についての各部位の Skin 層の全身に対する相対比[-]

各部位の AVA 血管血流量  $BF_{AVA}$ [L/h]は、以下の式により算出される<sup>15</sup>。

$$V_{AVA} = V_{max,sk} \cdot O_{AVA} \quad (6-32)$$

10 (手部)

$$O_{AVA} = 0.265 \cdot \{T_{mean,sk} - (T_{set,mean,sk} - 0.43)\} + 0.953 \cdot \{T_{bcr} - (T_{set,bcr} - 0.1905)\} + 0.9126 \quad (6-33)$$

(足部)

$$O_{AVA} = 0.265 \cdot \{T_{mean,sk} - (T_{set,mean,sk} + 0.997)\} + 0.953 \cdot \{T_{bcr} - (T_{set,bcr} - 0.0095)\} + 0.9126 \quad (6-34)$$

- $V_{max,sk}$  : 手部または足部の最大皮膚血流量[L/h]  
 $O_{AVA}$  : AVA 開大度(0~1)[-]  
15  $T_{mean,sk}$  : 全身の Skin 平均温度[°C]  
 $T_{set,mean,sk}$  : 全身の Skin 平均セットポイント温度[°C]  
 $T_{mean,sk}$  : 体幹 (chest、back、Pelvis) の Core 平均温度[°C]  
 $T_{set,mean,sk}$  : 体幹 (chest、back、Pelvis) の Core 平均セットポイント温度[°C]

20 各部位の蒸発熱損失量  $E_{sw}$ [W]は、以下の式により算出される<sup>12</sup>。

$$E_{sw} = SKINS \cdot km_{sw} \cdot \{CswErr_{cr,head} + Ssw(Wrms - Clds) + PswWrm_{cr,head} Wrms\} \quad (6-35)$$

$$km_{sw} = 2.0^{Err_{sk}/RT_{sw}} \quad (6-36)$$

- $Csw$  : Head の Core からの発汗制御係数[W/°C](=371.2W/°C)  
 $Ssw$  : Skin からの発汗制御係数[W/°C](=33.6W/°C)  
25  $Psw$  : Head の Core と Skin からの発汗制御係数[W/°C](=0W/°C)  
 $km_{sw}$  : 発汗に関するイフェクター動作量[-]  
 $RT_{sw}$  : 発汗に関するイフェクター動作量が 2 となるための必要温度幅[°C]  
( $RT_{sw}=10^{\circ}C$ とする)  
 $SKINS$  : 発汗についての各部位の Skin 層の全身に対する相対比[-]



表 6.1.5 人体モデルにおける各種パラメータの設定<sup>12,15</sup>

部位名	K : Node間の熱コンダクタンス[W/K]								
	Core-Skin	Arterial Flow-Venous Flow	Core-Arterial/Venous Flow	Superficial-Skin					
Head	3.422								
Neck	0.909								
Chest	1.782								
Back	1.640								
Pelvis	2.247								
L. Shoulder	1.501	0.537	0.586	57.735					
L. Arm	0.982	0.351	0.383	37.768					
L. Hand	2.183	0.762	1.534	16.634					
R. Shoulder	1.501	0.537	0.586	57.735					
R. Arm	0.982	0.351	0.383	37.768					
R. Hand	2.183	0.762	1.534	16.634					
L. Thigh	2.468	0.826	0.810	102.012					
L. Leg	1.326	0.444	0.435	54.784					
L. Foot	3.370	0.992	1.816	24.277					
R. Thigh	2.468	0.826	0.810	102.012					
R. Leg	1.326	0.444	0.435	54.784					
R. Foot	3.370	0.992	1.816	24.277					
部位名	M <sub>b</sub> : 各部位の基礎代謝量[W]		Metf	V <sub>b</sub> : 基礎血流量[L/h]		h <sub>c,c</sub> , h <sub>r,c</sub> [W/(m <sup>2</sup> ·K)] 静穏気流下(0.13 m/s以下)想定		各部位の初期及びセットポイント温度[°C]	
	Core	Skin		Core	Skin	h <sub>c,c</sub>	h <sub>r,c</sub>	Core	Skin
Head	16.896	0.104	0.000	32.228	5.725	4.5	4.9	37.14	35.99
Neck	0.274	0.028	0.000	15.240	0.325	4.5	4.9	36.72	35.06
Chest	24.287	0.179	0.091	89.214	1.967	3.0	4.3	36.93	34.62
Back	21.737	0.158	0.080	87.663	1.475	2.9	4.1	36.98	34.52
Pelvis	12.921	0.254	0.129	33.518	2.272	2.9	4.3	37.04	34.62
L. Shoulder	1.215	0.050	0.026	1.808	0.910	3.6	4.5	36.25	34.30
L. Arm	0.346	0.026	0.014	0.940	0.508	3.6	4.4	35.77	33.95
L. Hand	0.090	0.050	0.005	0.217	1.114	3.7	4.2	35.01	34.43
R. Shoulder	1.215	0.050	0.026	1.808	0.910	3.6	4.5	36.25	34.30
R. Arm	0.346	0.026	0.014	0.940	0.508	3.6	4.4	35.77	33.95
R. Hand	0.090	0.050	0.005	0.217	1.114	3.7	4.2	35.01	34.43
L. Thigh	1.318	0.122	0.201	1.406	1.456	2.8	4.8	36.69	34.21
L. Leg	0.357	0.023	0.099	0.164	0.651	2.0	5.3	36.41	34.05
L. Foot	0.212	0.100	0.005	0.080	0.934	2.0	6.1	34.73	34.26
R. Thigh	1.318	0.122	0.201	1.406	1.456	2.8	4.8	36.69	34.21
R. Leg	0.357	0.023	0.099	0.164	0.651	2.0	5.3	36.41	34.05
R. Foot	0.212	0.100	0.005	0.080	0.934	2.0	6.1	34.73	34.26
Total	84.656		1.000	290.003		3.0	4.7		

表 6.1.6 人体モデルにおける各種パラメータの設定 <sup>12,15</sup>

部位名	SKINR : 皮膚からのセンサーシグナルを統合するための部位別重み付け係数 [-]	SKINS : 発汗についての各部位のSkin層の全身に対する相対比 [-]	SKINV : 血管拡張に関するシグナルDLについての各部位のSkin層の全身に対する相対比 [-]	SKINC : 血収縮に関するシグナルSTについての各部位のSkin層の全身に対する相対比 [-]	Shivf : ふるえ熱産生についての各部位のCore層の全身に対する相対比 [-]
Head	0.0549	0.0640	0.1043	0.0213	0.0339
Neck	0.0146	0.0170	0.0277	0.0213	0.0436
Chest	0.1492	0.1460	0.0980	0.0638	0.2739
Back	0.1321	0.1290	0.0860	0.0638	0.2410
Pelvis	0.2122	0.2060	0.1380	0.0638	0.3875
L. Shoulder	0.0227	0.0510	0.0313	0.0213	0.0024
L. Arm	0.0117	0.0260	0.0163	0.0213	0.0014
L. Hand	0.0923	0.0155	0.0605	0.1489	0.0002
R. Shoulder	0.0227	0.0510	0.0313	0.0213	0.0024
R. Arm	0.0117	0.0260	0.0163	0.0213	0.0014
R. Hand	0.0923	0.0155	0.0605	0.1489	0.0002
L. Thigh	0.0501	0.0730	0.0920	0.0213	0.0039
L. Leg	0.0251	0.0360	0.0230	0.0213	0.0018
L. Foot	0.0167	0.0175	0.0500	0.1489	0.0004
R. Thigh	0.0501	0.0730	0.0920	0.0213	0.0039
R. Leg	0.0251	0.0360	0.0230	0.0213	0.0018
R. Foot	0.0167	0.0175	0.0500	0.1489	0.0004
部位名	各部位の初期及びセットポイント温度 [°C]				
	Core	Skin			
Head	37.14	35.99			
Neck	36.72	35.06			
Chest	36.93	34.62			
Back	36.98	34.52			
Pelvis	37.04	34.62			
L. Shoulder	36.25	34.30			
L. Arm	35.77	33.95			
L. Hand	35.01	34.43			
R. Shoulder	36.25	34.30			
R. Arm	35.77	33.95			
R. Hand	35.01	34.43			
L. Thigh	36.69	34.21			
L. Leg	36.41	34.05			
L. Foot	34.73	34.26			
R. Thigh	36.69	34.21			
R. Leg	36.41	34.05			
R. Foot	34.73	34.26			



## (2) 人体モデル計算結果

前述の COM に AVA を考慮した人体を使用し、皮膚表面温度を計算した結果を以下に示す。

本研究で用いる「既往研究をもとに計算した人体モデル」の計算結果が、参考とした既往研究<sup>13</sup>の人体モデルの AVA を考慮した計算結果を再現するか確認を行い、「既往研究をもとに計算した人体モデル」の妥当性を確認する。

点線で示す「既往研究をもとに計算した人体モデル」が、既往研究<sup>13</sup>の「AVA あり」の人体モデルの皮膚温計算結果をほぼ再現していることが確認される。本研究で用いる「既往研究をもとに計算した人体モデル」の妥当性が確認されたものとして、次章における評価に使用する。

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 6.1.6 皮膚表面温度計算結果(出典: 徐莉ら, 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ(その22))<sup>13</sup> 既往研究をもとに計算した人体モデルを追加)

## (3) Zhang モデルを用いた温冷感予測

本研究では、非定常温冷感の予測手法として、Zhang モデル<sup>16</sup>を用いる。Zhang モデルは、環境の非定常性・不均一性を考慮したモデルであり、人体モデルの計算結果を使用することにより、入浴前等の非定常性を考慮できると考えられる。

Zhang モデルとは、人体を 19 部位に分割し、コア温度、各部位の皮膚温度に関するセットポイント温度から、定常状態、非定常状態における全身および部位別温冷感を予測する。さらにこれをもとに、部位別快不快感を予測し、部位別快不快感から全身快不快感の予測を行う。予測モデルの構築に際し、環境試験室にて 109 名を対象とした被験者実験を実施し、環境温度を 22.1°C から 31.8°C まで 5 段階で変化させ、評価したい部位のみ、局所的に環境温度を変更したときの皮膚温度分布と温冷感の関係を求めている。温冷感・快適感申告スケールとして、-4 から +4 までの 9 段階のスケールを採用している。快適感に関しては、0 で不連続になっている。以下に、Zhang モデルにおける部位別温冷感・部位別快適感・全身温冷感・全身快適感の予測方法を述べる。

① 部位別温冷感予測式

非定常過程における局所温冷感は、下式により表される<sup>16</sup>。

$$\begin{aligned}
 Local\ Sensation &= Sensation_{static} + Sensation_{dynamic} \\
 &= 4 \left( \frac{2}{1 + e^{-C_1(T_{skin,local} - T_{skin,local,set}) - K_1[(T_{skin,local} - \bar{T}_{skin}) - (T_{skin,local,set} - \bar{T}_{skin,set})]}} - 1 \right) \quad (6-38) \\
 &\quad + C_{2i} \frac{dT_{skin,local}}{dt} + C_{3i} \frac{dT_{core}}{dt}
 \end{aligned}$$

- 5      ここで、 $T_{skin,local}$  は評価部位の皮膚温、 $T_{skin,local,set}$  は全身中立状態時の部位皮膚温である。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $K_1$  は各部位に設定された定数である。第 1 項の係数の 4 は、温冷感申告指標が-4(非常に冷たい)から+4(非常に温かい)であることを受けており、0 で中立となる。「皮膚温に対する感度は暖かい側の方が冷たい側より高く、部位の皮膚温が同じでも他の部位が温かいとより冷たく、他の部位が冷たいとより温かく感じる。皮膚温が上昇中はより温かく、下降中はより冷たく感じる」「深部温が上昇中はより冷たく、下降中はより温かく感じる部位がある」という被験者実験の結果を反映したモデルとなっている。
- 10

15

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

20

図 6.1.7 部位別温冷感予測モデル(出典: H. Zhang, Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments<sup>16</sup>)

② 部位別快適感予測式

局所快適感は、下式により表される<sup>16</sup>。

25

$$\begin{aligned}
 Local\ Comfort &= \left[ \frac{-4 - (C_6 + C_{71}|S_o^-| + C_{72}|S_o^+|)}{|(-4 + C_{31}|S_o^-| + C_{32}|S_o^+| + C_8)|^n} - \frac{-4 - (C_6 + C_{71}|S_o^-| + C_{72}|S_o^+|)}{|(4 + C_{31}|S_o^-| + C_{32}|S_o^+| + C_8)|^n} \right. \\
 &\quad \left. \frac{e^{15(S_t + C_{31}|S_o^-| + C_{32}|S_o^+| + C_8)} + 1}{e^{15(S_t + C_{31}|S_o^-| + C_{32}|S_o^+| + C_8)} + 1} \right] \times |S_t + C_{31}|S_o^-| + C_{32}|S_o^+| + C_8|^n \\
 &\quad + C_6 + C_{71}|S_o^-| + C_{72}|S_o^+| \quad (6-39)
 \end{aligned}$$

ここで、入力変数  $S_l$  は局所温冷感、 $S_o$  は総合的な温冷感で、添え字の+は温かい場合で-は冷たい場合である。また、 $C_{31}$ 、 $C_{32}$ 、 $C_6$ 、 $C_{71}$ 、 $C_{72}$ 、 $C_8$ 、 $n$  は 19 部位に設定された定数である。入力の温冷感スケールは、-4(非常に冷たい)から+4(非常に熱い)で、0 で中立である。出力の快適感のスケールは、-4(非常に不快)から+4(非常に快適)である。「局所の温冷感が非常に熱いまたは非常に冷たい場合、局所の快適感是非常に不快である」「局所の快適感がピークとなる局所の温冷感、総合的な温冷感が温かいと冷たい側に、冷たいと暖かい側に移動する」「局所の快適感のピークレベルは、総合的な温冷感が温かい、または冷たいほど上昇する」「以上の特性は局所の温冷感が中立から必ずしも対称ではない」という、被験者実験から得られた部位別温冷感の特性を反映している。

10

### ③ 全身温冷感予測式

全身快適感は、下式により表される<sup>16</sup>。

$$S_{overall} = \frac{\sum (weight_i S_{local,i})}{\sum weight_i} \quad (6-40)$$

15      ここで、 $weight_i$  は、全部位の温冷感の平均値と各部位の温冷感との差に、部位ごとに決められた定数を掛けて求められる値であり、全身温冷感、全身快適感、各部位の温冷感より求められる。

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

図 6.1.8 全身温冷感予測モデルにおける各部位の温冷感の重み付け例(出典: H. Zhang, Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments<sup>16</sup>)

④ 全身快適感予測方法

自分で環境を調整できない定常状態においては、全身快適感に対して不快側の申告をする局所快適感の影響が大きいことを反映させ、「全身快適感は、最も不快な部位と2番目に不快な部位の快適感の平均値で与えられる<sup>16</sup>。ただし、この2部位が左右の手、または左右の足である場合には、3番目に不快な部位の平均とする」としている。

自分で環境を調整できる場合、もしくは非定常過程の場合は、「全身快適感は、最も不快な部位、2番目に不快な部位、最も快適な部位の快適感の平均値とする<sup>16</sup>。ただし、最も不快な2部位が左右の手、または左右の足である場合には、3番目に不快な部位の平均とする」としている。

- 10 なお、Zhang モデルの検証は、入浴被験者実験における入浴開始前の温冷感、快適感について、既に実施している<sup>17</sup>。

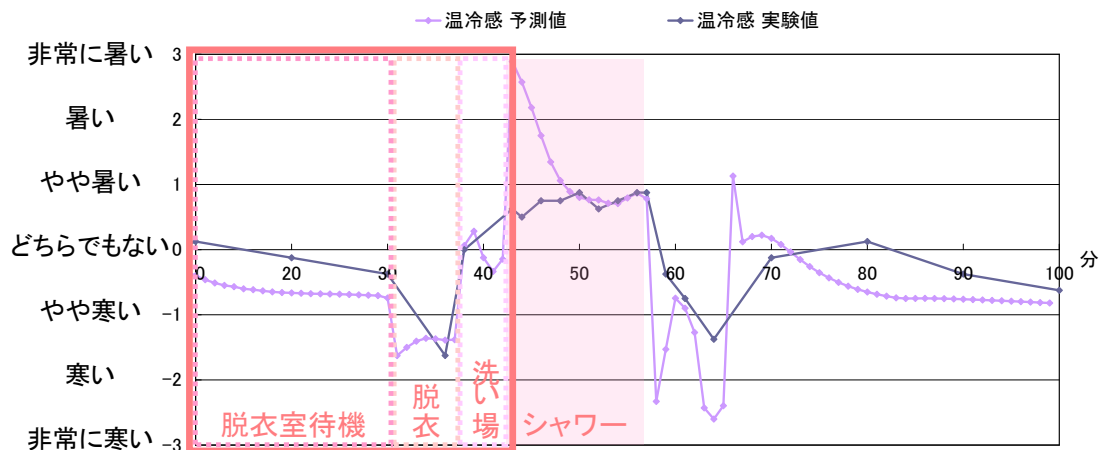


図 6.1.9 被験者の温冷感申告平均値と温冷感予測値の比較(出典: 芹川真緒, 浴室における温熱感・快適感の予測と改善および入浴にともなう消費エネルギー低減に関する研究<sup>17</sup>)

15

## 6.2 エネルギー消費量およびエネルギーコスト

本節では、熱負荷計算により求めた暖冷房負荷をエネルギー消費量に換算する方法、および、エネルギー消費量をコスト換算する方法について検討する。

### 5 6.2.1 暖冷房負荷のエアコン消費エネルギーへの換算

熱負荷計算結果を消費エネルギーへ換算するために、既往研究のエアコン消費エネルギー計算モデルを使用する。

#### (1) 既往研究におけるエアコン消費エネルギー計算モデル

- 10 既往研究<sup>18</sup>では、任意の室内外の温湿度条件、任意の室内熱負荷条件における熱源の成績係数と消費電力を算出できる、冷房運転時のエアコンの熱源特性モデルが提案されている。また、既往研究<sup>19</sup>では、暖房運転時にも使用可能なモデルに拡張されている。

本研究では、上記の既往研究のモデルを、暖冷房負荷をエネルギー消費量に換算する際に用いる。

#### 15 (2) エアコン消費エネルギー計算モデル計算結果

前述の既往研究におけるエアコン消費エネルギー計算モデルを使用し、処理全熱量に応じた COP を外気温度別に計算した結果を以下に示す。

計算結果の実線が、プロットの公称値をほぼ再現していることが確認される。

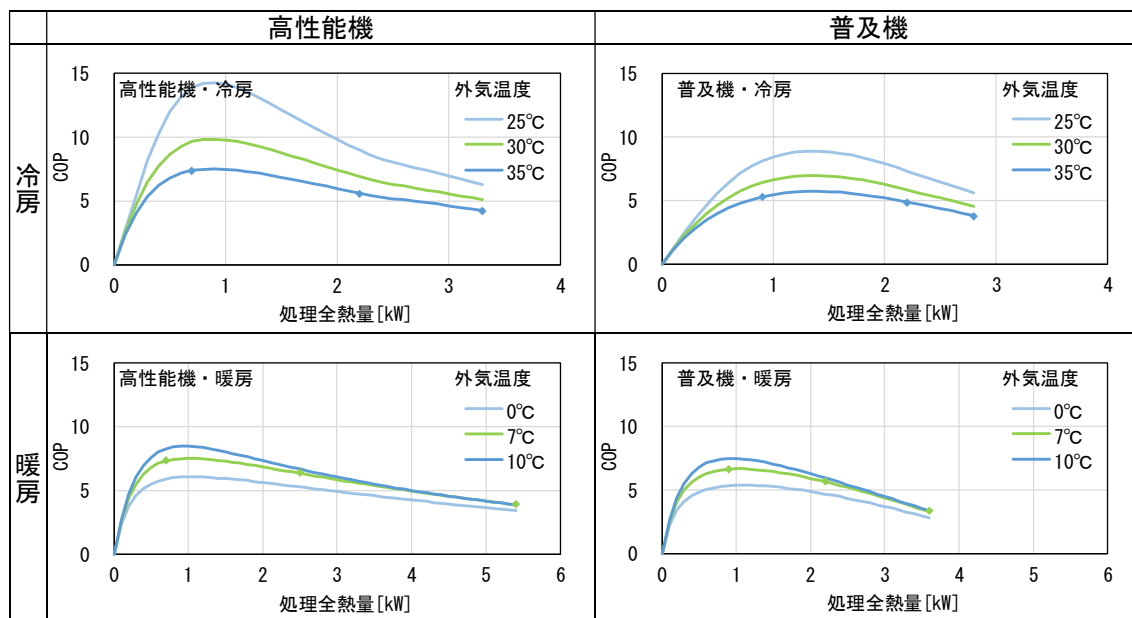


図 6.2.1 エアコン COP 計算結果

### (3) ケーススタディにおける暖冷房処理熱量をエネルギー消費量に換算する方法

次章のケーススタディにおける熱負荷計算で得られる暖冷房処理熱量より、エアコンの消費電力を算出する方法を示す。

事前に、室内機入口空気乾球温度を暖房 20℃および 25℃、冷房 27℃固定として、暖房は負荷率、  
5 外気乾球温度、外気相対湿度別に、冷房は負荷率(全熱)、室内湿球温度、外気乾球湿度別に、COP  
比のマップを作成した。負荷率は、エアコンの定格能力に対する暖冷房負荷の比率である。本論文に  
おいては、次章のケーススタディにおける暖冷房処理熱量の算出結果を、暖冷房定格能力で除して求  
めることを想定している。

マップの作成にあたっては、6.2.1(1)の方法により、6.2.1(2)の高性能機と同様の計算を行った。既  
10 往研究<sup>18,19</sup>の機器同様の部分負荷特性となることを想定し、バイパスファクタ、室内機風量、室外機風  
量、ファン等消費電力、機器固有パラメータは文献中の値を用いている。

マップは、暖房の負荷率は 0.0 から 2.2 まで 0.05 刻み、外気乾球温度は-25℃から 20℃まで 5℃刻  
み、外気相対湿度は 10%から 100%まで 10%刻みで作成した。負荷率、外気乾球温度、外気相対湿  
15 度がこの上限を上回る場合は上限での COP 比を、下限を下回る場合は下限での COP 比を用い、刻み  
の間の値を取る場合には線形補間して COP 比を算出する。冷房も同様の方法で COP 比を算出する  
が、負荷率は 0.0 から 1.5 まで 0.05 刻み、室内湿球温度は 14℃から 27℃まで 1℃刻み、外気乾球温  
度は 20℃から 45℃まで 5℃刻みで作成した。

最小負荷率と最大負荷率はそれぞれ、既往研究<sup>18,19</sup>の機器の最小能力、最大能力と定格能力より  
算出した。定格暖房能力と最大暖房能力の差が大きく、暖房の最大負荷率が 2 を超える。これは、定格  
20 能力の測定は全負荷運転(「機器及び制御が、製造業者が指定し、かつ、機器の制御が許容する最大  
連続冷房能力、又は最大連続暖房能力となる負荷での運転。」<sup>20</sup>)で実施されるが、製造業者が指定す  
る定格能力測定時の制御(圧縮機回転数など)が、最大能力測定時のものと差がある可能性があるた  
めと推察される。

作成したマップの一部を以下に示す。処理熱量の潜顕熱比や出口空気状態は成り行きである点に  
25 注意を要する。また、冷却側の熱交換器で凝縮水が生じる際に熱交換効率が低下する現象やデフロ  
ストは、モデル上、考慮されていない。凝縮水やデフロストが生じる状態での計算精度に、注意を要する。

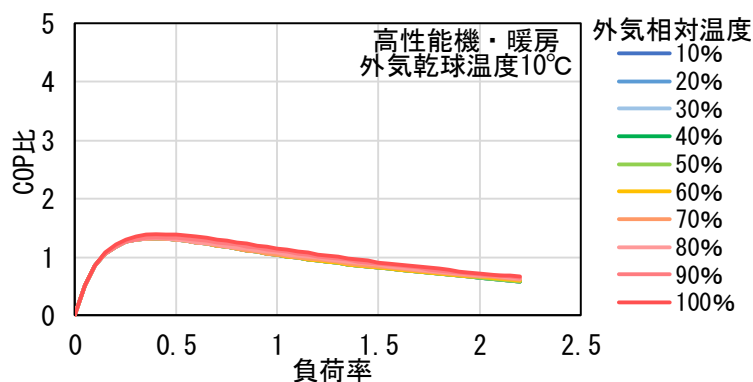


図 6.2.2 エアコン COP 比マップの例(室内機入口空気乾球温度を暖房 20℃、冷房 27℃)

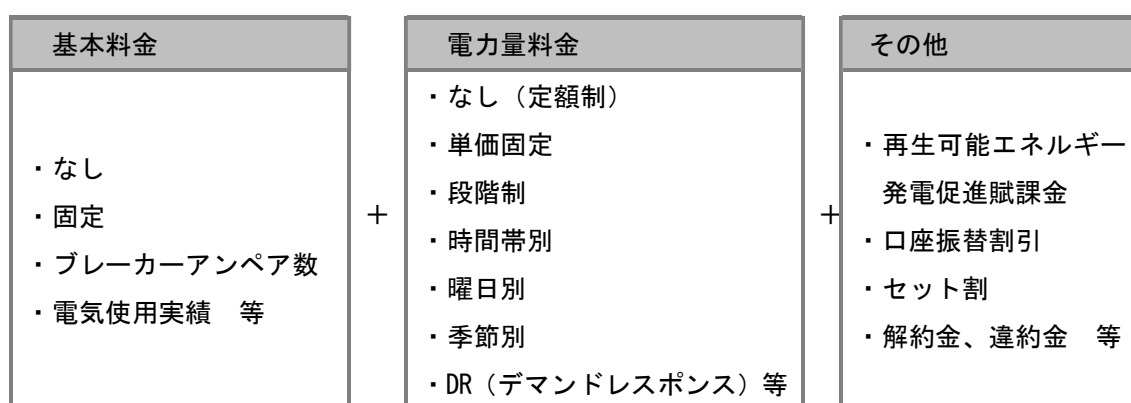
## 6.2.2 エネルギーコスト

### (1) 日本の電力体系に関する調査

PCM 導入の効果のひとつに、暖冷房用電力のピークカット、ピークシフトの可能性が挙げられる。ここでは、PCM 評価方法のひとつに電力料金を含めるため、電力料金プランに関する調査を行った。

5 2016 年 4 月の電力完全自由化に伴い、家庭向け電力について、様々な企業から様々な料金プランが提示されるようになった。

電力使用から電力コストへの換算について、日本での一般的な電力料金体系は、下図のとおりである。これは、(2)等の事例をもとに、整理を行ったものである。



10 図 6.2.3 日本での一般的な電力料金体系

電気料金や、それに関連する費用は、大きく、基本料金、電力量料金、その他に分類される。

基本料金は、電力料金プランにより、基本料金がかからないプランや、完全に固定のプラン（基本料金がつかないプランをこの一種とみなすことも出来る）、ブレーカーのアンペア数に応じて決定するプランや、電気使用実績に応じて変動するプランなどがある。

電気使用実績に応じて変動するプランの例として、東京電力では、過去 1 年間の最大 W 数 (30 分平均) で基本料金を決定するスマートプランを提案している。

20 電力量料金は、基本的には、電力使用量に応じて支払う料金であり、電力使用量と単価の積で求められる。

単価は、完全に一定のプランも見られるが、段階制や時間帯別など、変動するものが多い。段階性では、「月〇kWh 以下の使用までは〇円/kWh、月〇kWh から〇kWh 以下の使用までは〇円/kWh、月〇kWh 超の使用では〇円/kWh」というように、使用量に応じて単価が変動する。通常、使用量が増加するほど、単価は高くなる。時間帯、曜日、季節に応じて単価が設定されるプランもあり、通常、電力平準化に働く方向に単価が設定される。即ち、夜間より昼間、休日より平日、中間期より空調時期の方が、電力単価が高く設定される傾向にある。いわゆるオール電化の住宅において深夜電力料金が適用される場合などが見られる。時間帯のみに応じて単価が決定される場合もあれば、季節別曜日別に時間帯別料

金が設定される場合など、複雑に組み合わせられる場合もある。

また、電力量料金定額のもの（基本料金のみで電力量料金がかからないとみなすことも出来る）もある。

更に、これらを組み合わせて、一定電力量料金までは定額で、一定量を超過すると使用量に応じた電力量料金が加算される場合など、様々なプランが見られる。

5

基本料金、電力量料金に該当しないその他の部分については、プランにより様々であり、住宅のエネルギー消費と直接的に関連しない費用も含まれるため、本研究では評価対象外とする。

具体的な内容は、プランにより様々であるが、一例として、再生可能エネルギー発電促進賦課金、口座振替割引、セット割、解約金、違約金等が挙げられる。

10

セット割とは、例えば携帯電話やインターネット通信、ガスの契約等と組み合わせたものがある。

解約金、違約金については、契約内容により、定められた一定の契約期間の途中で解約する場合に費用が発生する場合などがある。

他にも、買物で使用できるポイントが貯まるプランなどもある。

15



## (2) 電力料金プランの例

電力会社各社のウェブサイトの家庭向けのページに示された、電力料金プランの例を以下に示す。  
旧一般電気事業者、新規参入の小売電気事業者の両方を含む。

### 5 1) 東京電力 従量電灯B

東京電力 従量電灯B	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（ブレーカーアンペア数）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/old01.html">http://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/old01.html</a>

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

## 2) 東京電力 従量電灯C

東京電力 従量電灯C	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金(kVA) + 電力量料金(段階制) + 再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/old01.html">http://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/old01.html</a>
<p>他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

### 3) 東京電力 スタANDARD S/L

東京電力 STANDARD S/L	
調査時期	2017年12月時点
料金体系	基本料金（ブレーカーアンペア数）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2">http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2</a>

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

#### 4) 東京電力 スタANDARD X

東京電力 STANDARD X	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（電力使用実績[kW]）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/jiyuuka/service/plan/kanto/standard/index-j.html">http://www.tepco.co.jp/jiyuuka/service/plan/kanto/standard/index-j.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

5) 東京電力 プレミアムS/L

東京電力 プレミアム S/L	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（ブレーカーアンペア数、kVA）＋電力量料金 （定額料金＋単価固定従量料金）＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2">http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

6) 東京電力 夜トクプラン

東京電力 夜トクプラン	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（電力使用実績[kW]）＋電力量料金（時間帯別） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2">http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2</a>

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

7) 東京電力 スマートライフプラン

東京電力 スマートライフプラン	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（電力使用実績[kW]）＋電力量料金（時間帯別） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金 総容量が1kVA以上の夜間蓄熱式機器またはオフピーク蓄熱式電気温水器を使用の場合に適用可能
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/jiyuuka/service/plan/smartlife/index-j.html">http://www.tepco.co.jp/jiyuuka/service/plan/smartlife/index-j.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

8) 東京電力 アクアエナジー100

東京電力 アクアエナジー100	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（ブレーカーアンペア数）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://www.tepco.co.jp/ep/eco/plan/private/detail.html">http://www.tepco.co.jp/ep/eco/plan/private/detail.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	



9) 関西電力 従量電灯A

関西電力 従量電灯 A	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（15kWhまで最低料金）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="https://kepcoco.jp/ryokin/menu/dento_a">https://kepcoco.jp/ryokin/menu/dento_a</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

10) 関西電力 eおとくプラン

関西電力 eおとくプラン	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（6kWまで定額、以降kWに応じて）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="https://kepcoco.jp/ryokin/menu/eotoku">https://kepcoco.jp/ryokin/menu/eotoku</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

11) 関西電力 時間帯別電灯

関西電力 時間帯別電灯	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（10kWまで定額、以降kWに応じて）＋電力量料金（時間帯別＋段階制）＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="https://kepcO.jp/ryokin/menu/jikanbetsu_201604">https://kepcO.jp/ryokin/menu/jikanbetsu_201604</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

12) 関西電力 はぴeタイム

関西電力 はぴeタイム	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（10kWまで定額、以降kWに応じて）＋電力量料金 （時間帯別＋季節別＋曜日別）＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="https://kepcoco.jp/ryokin/menu/hapie_201604">https://kepcoco.jp/ryokin/menu/hapie_201604</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

## 13) 関西電力 eスマート10

関西電力 eスマート10	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金(6kWまで定額、以降kWに応じて) + 電力量料金 (時間帯別 + 季節別 + 曜日別) + 再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="https://kepcoco.jp/ryokin/menu/esmart10">https://kepcoco.jp/ryokin/menu/esmart10</a>
他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。	

14) 関西電力 季時別電灯PS

関西電力 季時別電灯 PS	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（10kWまで定額、以降kWに応じて）＋電力量料金（時間帯別＋季節別＋曜日別＋段階制）＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="https://kepcoco.jp/ryokin/menu/kijibetsu-ps_201604">https://kepcoco.jp/ryokin/menu/kijibetsu-ps_201604</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

15) 東京ガス ずっとも電気1 ガス・電気セット割

東京ガス ずっとも電気1 ガス・電気セット割	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（ブレーカーアンペア数）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金 ガスとセットで契約
ウェブサイト	<a href="http://home.tokyo-gas.co.jp/power/ryokin/menu_waribiki/menu1.html">http://home.tokyo-gas.co.jp/power/ryokin/menu_waribiki/menu1.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

16) 大阪ガス ベースプランA

大阪ガス ベースプラン A	
調査時期	2017 年 7 月時点
料金体系	基本料金（固定）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金 ＋オプション割引（ガスセット割引・長期 2 年割引）
ウェブサイト	<a href="http://home.osakagas.co.jp/electricity/price/plan_a.html">http://home.osakagas.co.jp/electricity/price/plan_a.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	



17) 大阪ガス ベースプランA-G

大阪ガス ベースプラン A-G	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（固定）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金 GAS得プラン「もっと割料金」「床暖料金」「ハウス空調料金」を契約の家庭向けプラン
ウェブサイト	<a href="http://home.osakagas.co.jp/electricity/price/plan_ag.html">http://home.osakagas.co.jp/electricity/price/plan_ag.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

18) 大阪ガス 家庭用ガス発電プラン

大阪ガス 家庭用ガス発電プラン	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（固定）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金 エネファーム・エコウィルを使用の家庭向けプラン
ウェブサイト	<a href="http://home.osakagas.co.jp/electricity/price/home_plan.html">http://home.osakagas.co.jp/electricity/price/home_plan.html</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

19) HTBエナジー 東京 大江戸プラン 従量電灯B5

HTB エナジー 東京 大江戸プラン 従量電灯 B5	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（固定）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://htb-energy.co.jp/teiatsu/">http://htb-energy.co.jp/teiatsu/</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

20) HTBエナジー 東京 大江戸プラン 従量電灯C5

HTB エナジー 東京 大江戸プラン 従量電灯 C5	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（固定）＋電力量料金（段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金
ウェブサイト	<a href="http://htb-energy.co.jp/teiatsu/">http://htb-energy.co.jp/teiatsu/</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

21) HTBエナジー 東京 大江戸プラン 従量電灯B ママトクコース

HTB エナジー 東京 大江戸プラン 従量電灯B ママトクコース	
調査時期	2017年7月時点
料金体系	基本料金（固定）＋電力量料金（時間帯別＋段階制） ＋再生可能エネルギー発電促進賦課金 夜 19:00～20:59 の間に使用した分の料金が無料 （無料時間帯の使用量が全体の 16.6%を超えた場合、料金が発生）
ウェブサイト	<a href="http://htb-energy.co.jp/teiatsu/">http://htb-energy.co.jp/teiatsu/</a>
<p>他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する 著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。</p>	

(3) エネルギー消費量のコストへの換算方法

- 2017年7月時点での東京電力のアンペア数に基づく契約（スタンダード S/L<sup>21</sup>）、ピーク電力に基づく  
5 契約（スタンダード X<sup>22</sup>）の電力料金を示す。

次章におけるケーススタディでは、この単価を使用する。

ピーク電力に基づく契約では、基本料金が瞬時の電力使用量による影響を受けるため、住宅にPCM  
を導入した際などに最大電力使用量が低減されれば、コストメリットが生じる可能性がある。

10 表 6.2.1 ケーススタディに用いる電力料金（出典：東京電力ウェブサイト<sup>21,22</sup>）

電力料金単価 [円]	料金単価	単位
<b>基本料金</b>		
アンペア数に基づく契約 (50A)	1404.00	1 契約
ピーク電力に基づく契約	561.60	1kW
<b>電力量料金</b>		
120kWh まで	19.52	1kWh
120kWh 超過 300kWh まで	25.98	1kWh
300kWh 超過	30.02	1kWh

#### (4) 海外の電力体系に関する調査

海外では、電力使用予測量の多い日に高い電力料金とするプランなど、より柔軟な電力料金プランが見られる。

2016年1月に、アメリカ カリフォルニア州の PG&E 社を訪問した際の、同社の料金体系についての調査結果を以下に示す。

カリフォルニア州は、アメリカの中でも、DR(デマンドレスポンス)に積極的に取り組んでいる地域であり、数年にわたる DR の実績を有している。そのため、調査対象として選定した。

同社では、住宅向けに複数の電力料金プランを用意しており、各プランの詳細は以下を示す。

日本における電力料金プランと目立って異なる点は、電気自動車用のプランや、電力使用予測量の多い日に高い電力料金とするプランがある点である。また、ピークカットのための空調制御を実際に実施している点も、先進的な取り組みと言える。

##### 1) Tiered Base Plan

月々の電力使用量の増加に伴い料金が增加する、段階制プランである。

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 6.2.4 Tiered Base Plan(出典: PG&E ウェブサイト<sup>23</sup>)

## 2) Time of Use Plan

季節と時間帯により、電力料金に変化するプランである。夏期の日中が最も高く、次いで夏期の午前と夕方、冬期の夕方が高く、それ以外の時間帯は Tiered Base Plan よりも安価である。Tiered Base Plan と同様に、月々の電力使用量の増加に伴い、料金が增加する。



### 3) Electric Vehicles Plan

電気自動車用のプランである。季節、曜日、時間に応じた電気料金となっている。

ピーク時間帯: 平日 14:00～21:00、土日祝日 15:00～19:00

準ピーク時間帯: 平日 7:00～14:00、21:00～23:00

オフピーク時間帯: 上記以外

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 6.2.6 Electric Vehicles Plan(出典: PG&E ウェブサイト<sup>23</sup>)

### 4) Smart Rate

Smart Day と呼ばれる電力使用予測量の多い日に、高い電力料金とするプランである。6～9 月の Smart Day 以外の日は通常より電力料金が安く設定されている。Smart Day は年間 15 日以下である。前日の 14:00 までに Smart Day の連絡が電話またはメールで行われる。Smart Day への対応方法の提案として、プレクーリング、家事の時間帯の移動、エアコンのプログラミング制御、不要な照明の消灯等が紹介されている。Smart Day の履歴を確認する限り、2011 年にはこのレートが採用されている。

### 5) 電力ピークカットのための取組 SmartAC™ Program

SmartAC と呼ばれる装置をエアコンやエアコンの近くに設置する。SmartAC は、Event Day SmartAC と呼ばれる電力不足が予想される日には、リモートで作動し、エアコンのコンプレッサーのオンオフ回数を増加させ、トータルで 30 分中 15 分以下のコンプレッサー稼働時間となるよう制御を行う。継続時間は 2 時間程度で、長くても 6 時間以下。多くの参加者は、SmartAC が作動していることに気が付かないという。参加者は、参加開始時に \$50 のベネフィットを受け取る。エアコンを止めたくない日には、電話等で SmartAC の制御をやめるように指定することができる。

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 6.2.7 SmartAC(出典: PG&E ウェブサイト<sup>23</sup>)

- <sup>1</sup> 芹川真緒, 佐藤誠, 長井達夫, 秋元孝之:住宅のエネルギー消費量と健康性の評価に関する研究 熱負荷シミュレーションを使用した戸建住宅の高断熱・高气密化に関する検討 その1, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻 第 733 号, pp.227-235, 2017.3
- <sup>2</sup> Office of the Deputy Prime Minister:Housing Health and Safety Rating System Guidance (Version 2) , 2004.11z
- <sup>3</sup> 建築建材展・スマートウェルネス住宅シティ最前線資料, 2016 年 3 月
- <sup>4</sup> スマートウェルネス住宅等推進事業シンポジウム資料, 2017 年 2 月
- <sup>5</sup> 住宅の断熱化と居住者の健康への影響に関する全国調査中間報告会～国土交通省スマートウェルネス住宅等推進事業調査の実施状況～講演資料, 2017 年 1 月
- <sup>6</sup> 芹川真緒, 秋元孝之, 田辺新一: CASBEE 健康チェックリストの暖かさに関する設問を活用した温熱環境評価法の提案熱負荷シミュレーションによる温熱環境計算結果を用いた住宅の健康性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 748 号, pp.533-542, 2018. 6
- <sup>7</sup> 高柳絵里, 伊香賀俊治, 村上周三, 清家剛, 中野淳太, 健康維持増進に向けた住環境評価ツールの有効性の検証, 日本建築学会環境系論文集 第 76 巻 第 670 号, pp.1101-1108, 2011 年 12 月
- <sup>8</sup> ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
- <sup>9</sup> ANSI/ASHRAE Standard 55-2010
- <sup>10</sup> B.W. Olesen: Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, 1997
- <sup>11</sup> 松井勇: 模擬足による床の接触温熱感の評価方法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 841-844, 1991. 10
- <sup>12</sup> 田辺新一, 小林弘造, 小川一晃:温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発, 日本建築学会環境系論文集, 第 599 号, pp.31-38, 2006 年 1 月
- <sup>13</sup> 徐莉, 佐藤孝広, 小川一晃, 田辺新一:人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 22): 体温調節モデル JOS の開発-AVA を含む血管系の考慮, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.361-362, 2002 年 6 月
- <sup>14</sup> 佐藤孝広, 小川一晃, 徐莉, 田辺新一:人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 23): 体温調節モデル JOS の開発-体躯・年齢・性別の考慮, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.363-364, 2002 年 6 月
- <sup>15</sup> Yutaka Kobayashi, Shin-ichi Tanabe: Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system, Building and Environment, Vol. 66, pp. 1-10, 2013. 8
- <sup>16</sup> H. Zhang:Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments, 2003.
- <sup>17</sup> 芹川真緒:浴室における温熱感・快適性の予測と改善および入浴にともなう消費エネルギー低減に関する研究, 2012 年
- <sup>18</sup> 上野剛, 北原博幸, 宮永俊之:家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発 その 1 :冷房運転時モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, No.190, 2013 年 1 月
- <sup>19</sup> 上野剛, 北原博幸, 宮永俊之:家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発 その 2 :暖冷房運転時モデルへの拡張と汎用性の検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No.204, 2014 年 3 月
- <sup>20</sup> JIS B 8615-1:2013 エアコンディショナー第1部 直吹き形エアコンディショナー及びヒートポンプ-定格性能及び運転性能試験法
- <sup>21</sup> <http://www.tepco.co.jp/ep/gas-jiyuuka/plan/index-j.html#plan2>
- <sup>22</sup> <http://www.tepco.co.jp/jiyuuka/service/plan/kanto/standard/index-j.html>
- <sup>23</sup> <http://www.pge.com/>

## 第7章 住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価



## 7. 住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価

3節において、PCM 導入有無等の条件で住宅全体の計算を行い、その結果を健康性・快適性・エネルギー性能の観点から評価することを、本章の目的とする。それに先立ち、1節で、省エネルギー基準の暖冷房負荷データとの比較により、本章で用いる負荷計算データの精度確認を行う。次いで、2節で、PCM の見かけの比熱の入力などが、住宅全体の熱負荷計算の結果に及ぼす影響の確認を行う。

### 7.1 住宅全体の計算の精度の確認

#### 7.1.1 目的

住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価に先立ち、PCM を含まない住宅全体の計算の精度の確認を行う。精度の確認のため、比較対象として、省エネルギー基準の暖冷房負荷データ<sup>1</sup>を使用する。

#### 7.1.2 比較対象

本研究で用いる EESLISM の熱負荷計算ソフトでの計算結果の精度の確認のため、比較対象として、省エネルギー基準の暖冷房負荷データ<sup>1</sup>の以下の条件のファイル(6x\_12\_05\_112\_1SS)を使用する。なお、計算時間間隔は1時間である。

- ・地域区分:6 地域(標準年拡張アメダス気象データ(岡山、1995 年))
- ・運転モード:居室間歇運転
- ・断熱水準・熱交換換気の有無 :平成 11 年基準相当、熱交換換気あり
- ・日射遮蔽レベル:小(参考仕様:開口部遮蔽なし)
- ・通風設定:通風なし
- ・熱容量付加:蓄熱なし

他者の著作物(図表等)について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 7.1.1 省エネルギー基準 暖冷房負荷データの公開状況(出典: 国立研究開発法人建築研究所、建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報<sup>1)</sup>)

### 7.1.3 計算条件

基本となる条件は、住宅事業建築主の判断基準<sup>2</sup>(以下、「事業主基準」) に準じる。

5

10

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

15

20

図 7.1.2 計算対象住戸の平面図・断面図(出典: 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<sup>2</sup>)

25

表 7.1.1 計算条件

項目	設定	備考
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
地域	岡山	標準年拡張アメダス気象データ (1995年版)
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	
計算時間間隔	1時間	
建物モデル	自立循環型住宅モデル <sup>2</sup> (木造住宅)	
延床面積	120 m <sup>2</sup>	
断熱性能	別途	
開口部	カーテン・ブラインド等なし	開口部面積 32.2 m <sup>2</sup>
家具熱容量	12.6kJ/(m <sup>3</sup> ・K)	
常時換気	第3種換気：事業主基準に準じ居室に設置した給気口より給気、1階は玄関、トイレと洗面所、2階は廊下とトイレより排気。	
局所換気	台所、1階トイレ、浴室に事業主基準の風量、スケジュールに則り設定。	
隣室間換気 <sup>2</sup>	リビング-台所間：5000 m <sup>3</sup> /h 1階廊下-2階ホール間：273 m <sup>3</sup> /h	
暖冷房期間	暖房：11月4日～4月21日 冷房：5月30日～9月23日	
暖冷房方式	空調するLD、寝室、子供室にルームエアコンを設置。	
暖冷房設定温度	暖房：室温 20℃設定 冷房：起床時室温 27℃設定 就寝時室温 28℃設定	
暖冷房スケジュール	事業主基準における居室間歇空調	
内部発熱スケジュール	人体、照明、機器を事業主基準に示されるスケジュールに準じて平日と休日を別々に設定。機器の顕熱発熱は対流成分 50%、放射成分 50%として入力した。潜熱発熱は人体と調理を設定。	
床の日射吸収比率	30%	計算プログラムのデフォルト値。残りは床も含めて面積案分。
地盤面反射率	10%	
隣棟	考慮せず	
室内側対流熱伝達率	床面 2.2W/(m <sup>2</sup> ・K) 天井面 6.6W/(m <sup>2</sup> ・K) 壁面 4.6W/(m <sup>2</sup> ・K)	

表 7.1.2 外壁の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
石こうボード	0.22	830	12	
グラスウール断熱材 16K 相当	0.045	13	66	
密閉中空層	6.67W/m <sup>2</sup> K			
合板	0.16	720	12	

表 7.1.3 天井の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
石こうボード	0.05	830	10	
非密閉中空層	14.29W/m <sup>2</sup> K			
合板	0.160	720	9	
押出法ポリスチレンフォーム 保温板 3 種	0.028	40	107	
小屋裏空間				一室として計算
合板	0.16	720	12	
瓦	1	1500	12	

5

表 7.1.4 1階床の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	[mm]	
合板	0.16	720	12	
グラスウール断熱材 16K 相当	0.045	13	80	

表 7.1.5 開口部

	熱貫流率	日射熱取得率	備考
開口部	4.65W/(m <sup>2</sup> ・K)	ガラス：79% ドア：16%	ドアの日射熱取得率は、省エネルギー基準を参考に、0.034×熱貫流率[W/(m <sup>2</sup> ・K)]により計算

### 7.1.4 計算結果

計算結果を以下に示す。省エネルギー基準と比較し、本研究で用いる EESLISM の熱負荷計算ソフトでの計算結果が、代表期間の暖冷房負荷変動と年間の暖冷房負荷とも比較的近い傾向を示すことが確認される。従って、EESLISM の熱負荷計算ソフトでの設定等に大きな問題はなく、計算結果は十分な精度を有すると判断し、次節以降の検討を行う。

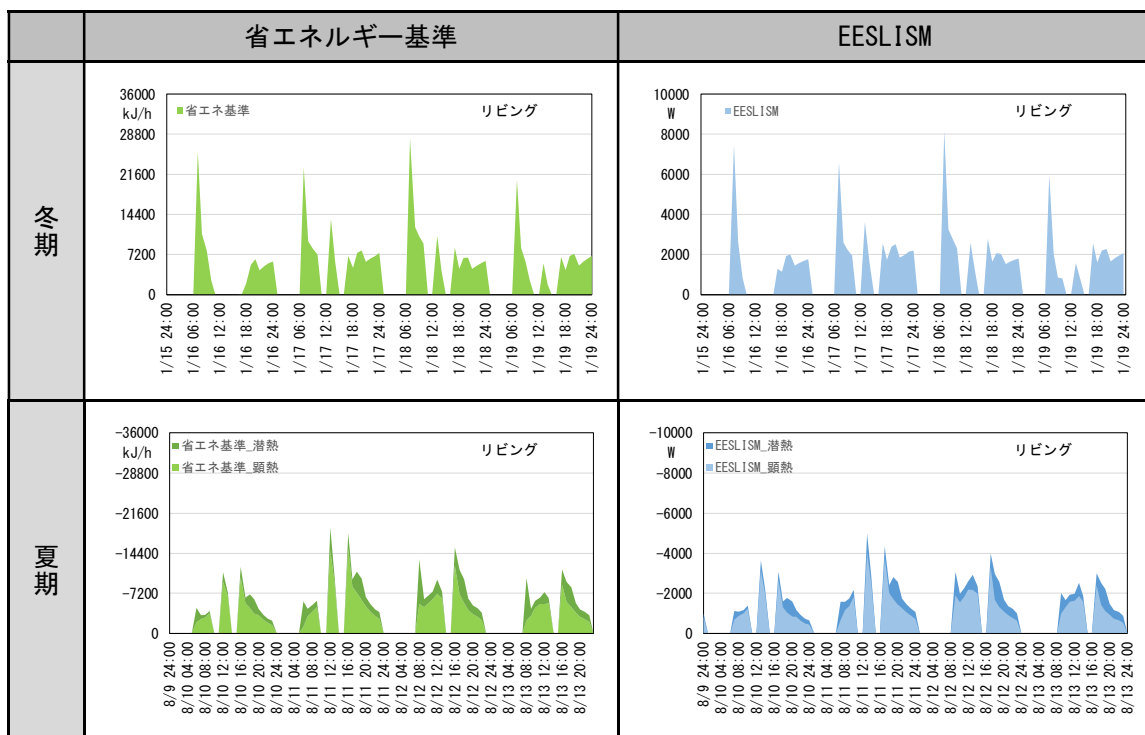


図 7.1.3 計算結果 代表期間暖冷房負荷

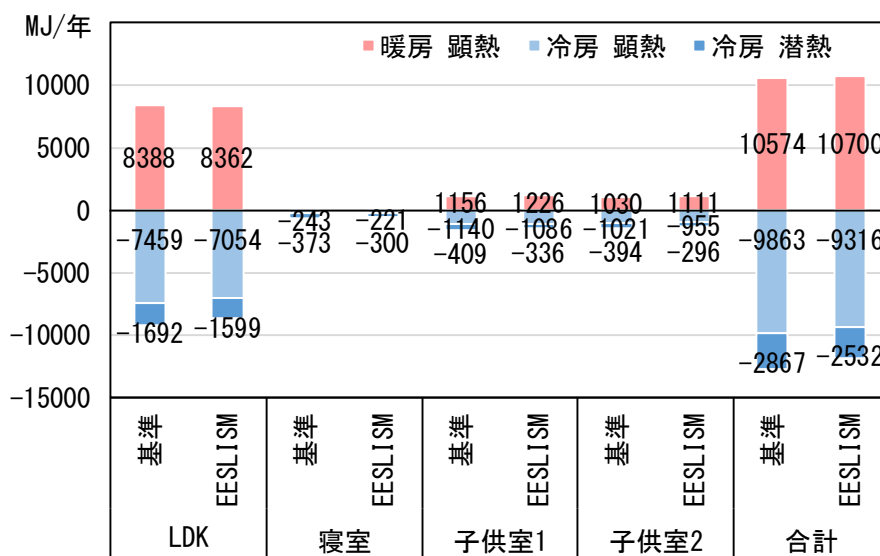


図 7.1.4 計算結果 年間暖冷房負荷

## 7.2 PCM 見かけの比熱測定結果の精度が住宅全体の熱負荷計算の結果に及ぼす影響の確認

### 7.2.1 目的

PCM の見かけの比熱の測定結果の精度が、住宅全体の熱負荷計算の結果に及ぼす影響の確認を行う。そのために、熱負荷計算に入力する PCM の見かけの比熱のピーク温度や相変化温度幅を変更させた複数のケースで計算を行い、結果の比較を行う。また、5章の熱箱を用いた測定との計算の比較において確認された、PCM の計算上留意すべき点の影響の程度の確認もあわせて実施する。

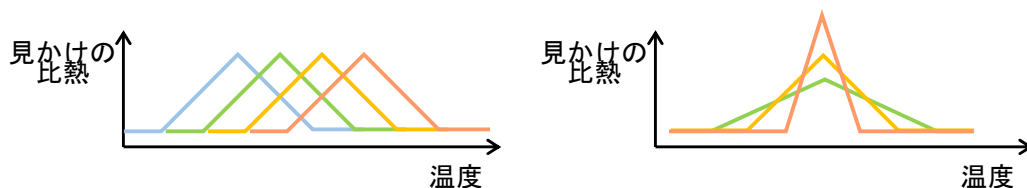


図 7.2.1 測定精度が熱負荷計算結果に及ぼす影響の確認における見かけの比熱の入力のイメージ

10

### 7.2.2 計算条件

基本となる条件は、事業主基準<sup>2</sup>に準じる。

15

20

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する  
著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

25

30

図 7.2.2 計算対象住戸の平面図・断面図(出典: 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<sup>2</sup>)

表 7.2.1 計算条件

項目	設定	備考
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
地域	岡山	標準年拡張アメダス気象データ (1995年版)
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	
計算時間間隔	1時間	
最大収束回数	100回	
建物モデル	自立循環型住宅モデル <sup>2</sup> (木造住宅)	
延床面積	120 m <sup>2</sup>	
断熱性能	別途	
開口部	カーテン・ブラインド等なし	開口部面積 32.2 m <sup>2</sup>
家具熱容量	12.6kJ/(m <sup>3</sup> ・K)	
常時換気	第3種換気：事業主基準に準じ居室に設置した給気口より給気、1階は玄関、トイレと洗面所、2階は廊下とトイレより排気。	
局所換気	台所、1階トイレ、浴室に事業主基準の風量、スケジュールに則り設定。	
隣室間換気 <sup>2</sup>	リビング-台所間：5000 m <sup>3</sup> /h 1階廊下-2階ホール間：273 m <sup>3</sup> /h	
暖冷房期間	暖房：11月4日～4月21日 冷房：5月30日～9月23日	
暖冷房方式	空調するLD、寝室、子供室にルームエアコンを設置。	
暖冷房設定温度	暖房：室温 20℃設定 冷房：起床時室温 27℃設定 就寝時室温 28℃設定	
暖冷房スケジュール	事業主基準における居室間歇空調	
内部発熱スケジュール	人体、照明、機器を事業主基準に示されるスケジュールに準じて平日と休日を別々に設定。機器の顕熱発熱は対流成分 50%、放射成分 50%として入力した。潜熱発熱は人体と調理を設定。	
床の日射吸収比率	30%	計算プログラムのデフォルト値。残りは床も含めて面積案分。
地盤面反射率	10%	
隣棟	考慮せず	
室内側対流熱伝達率	床面 2.2W/(m <sup>2</sup> ・K) 天井面 6.6W/(m <sup>2</sup> ・K) 壁面 4.6W/(m <sup>2</sup> ・K)	

表 7.2.2 外壁の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚[mm]	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	
石こうボード	0.22	830	12	
グラスウール断熱材 16K 相当	0.045	13	66	
密閉中空層	6.67W/(m <sup>2</sup> ・K)			
合板	0.160	720	12	

表 7.2.3 天井の構成

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚[mm]	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	
石こうボード	0.05	830	10	
非密閉中空層	14.29W/(m <sup>2</sup> ・K)			
合板	0.160	720	9	
押出法ポリスチレンフォーム 保温板 3 種	0.028	40	107	
小屋裏空間				一室として計算
合板	0.160	720	12	
瓦	1	1500	12	

5

表 7.2.4 1階天井-階間床の構成

仕様	熱伝導率 [W/(m・K)]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	厚[mm]		備考
			一般部		
			PCM あり	PCM なし	
石こうボード	0.22	830		10	
鋼	55	3600	3		
(空気層熱抵抗)	0.1 m <sup>2</sup> K/W				考慮する ケースのみ
PCM	1	5000	10		5 分割

表 7.2.5 1階床の構成

仕様	熱伝導率 [W/(m・K)]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	厚[mm]		備考
			一般部		
			PCM あり	PCM なし	
合板	0.160	720	6		
(空気層熱抵抗)	0.1 m <sup>2</sup> K/W				考慮する ケースのみ
PCM			10		5 分割
合板	0.160	720	12	12	
グラスウール断熱材 16K 相当	0.045	13	80	80	

表 7.2.6 開口部

	熱貫流率	日射熱取得率	備考
開口部	4.65W/(m <sup>2</sup> ・K)	ガラス：79% ドア：16%	ドアの日射熱取得率は、省エネルギー基準を参考に、0.034×熱貫流率[W/(m <sup>2</sup> ・K)]により計算

10



表 7.2.7 PCM 物性値

	密度 [Kg/m <sup>3</sup> ]	熱伝導率 [W/(m・K)]		潜熱 容量 [J/g]	顕熱容量 [J/(g・K)]		温度変化域 [°C]		備考
		固相	液相		固相	液相	ピーク 温度	相変化 温度幅	
PCM	1000	0.3	0.3	200	1	1	20/21/ 22/23	1/5/10	潜熱比熱は、温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるように与えることを基本とした。 誤差関数を含む見かけの比熱モデルでの計算も実施した。
							ω0.5/1.0/2.0 skew-10		

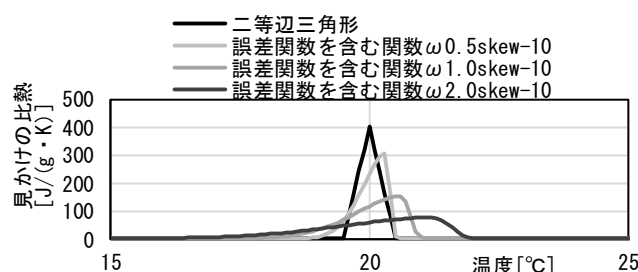


図 7.2.3 誤差関数を含む見かけの比熱モデル<sup>3</sup>の入力

5

表 7.2.8 PCM 設置状況

室	床	壁	天井	備考
リビング	10mm	なし	10mm	合計 86.12MJ (=21.53 m <sup>2</sup> × 0.01m × 2 × 200J/g × 1000000g/m <sup>3</sup> )
リビング以外	なし	なし	なし	

### 7.2.3 計算結果

#### (1) 見かけの比熱のピーク温度および相変化温度幅の入力の影響に関する考察

10 計算結果を以下に示す。

見かけの比熱のピーク温度や相変化温度幅の入力は、年間のリビングの暖冷房処理熱量の計算結果に影響を与えるが、その程度は大きくはない。ただし、時々刻々の処理熱量には影響を与えるため、エアコンの部分負荷特性を考慮して暖冷房エネルギーを算出する場合には、エネルギー消費量に影響を与える可能性がある。また、ピーク電力に基づく契約の電気料金、時間帯別電力料金、デマンドレスポンスなどを採用する場合には、電気料金に差が生じる可能性があるものと推察される。

15

一方、暖房期間の明け方の冷え込み温度など、室温変動には影響を与え、相変化温度幅よりもピーク温度の感度が高い。1°Cのピーク温度の差で室温の差が 2°C程度生じることもあるため(5/5 ピーク温度 20°C幅 1°Cとピーク温度 21°C幅 1°C)、見かけの比熱測定におけるピーク温度は精度よく求める必要があることが確認される。また、昇温時と降温時に異なる挙動を示す PCM については、計算に詳細に

20

反映させる必要があることが確認される。

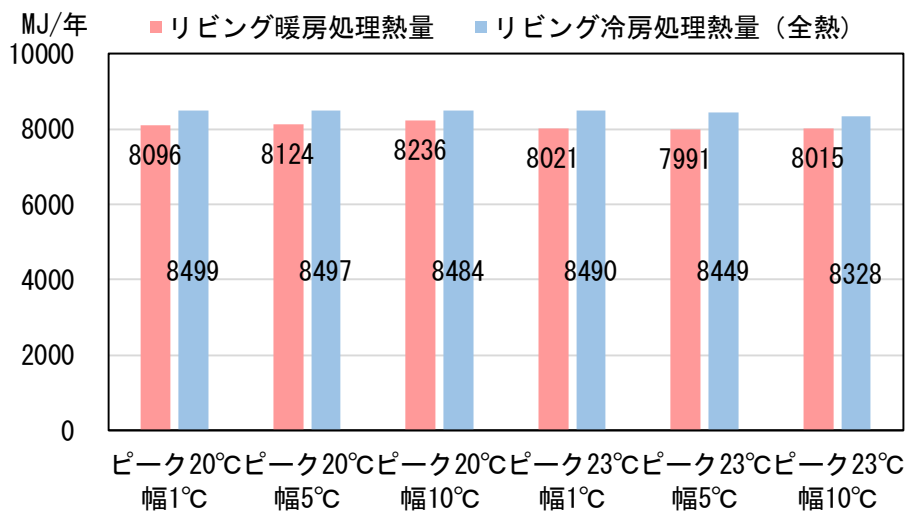
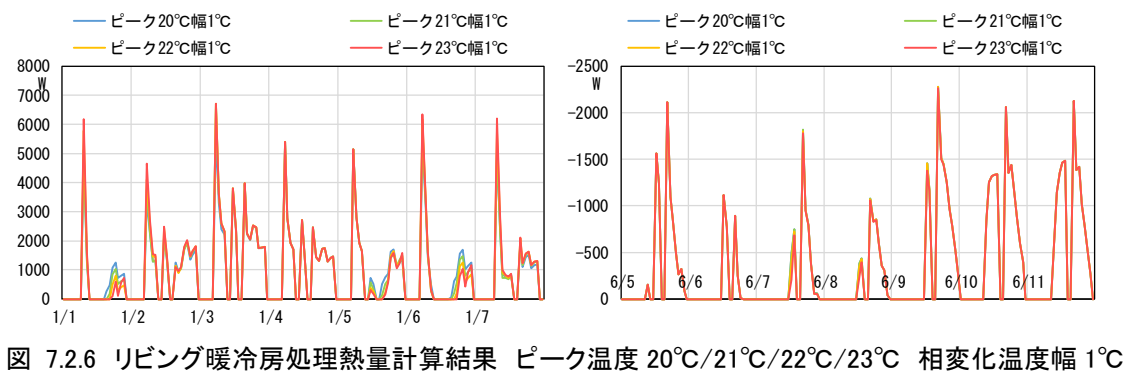
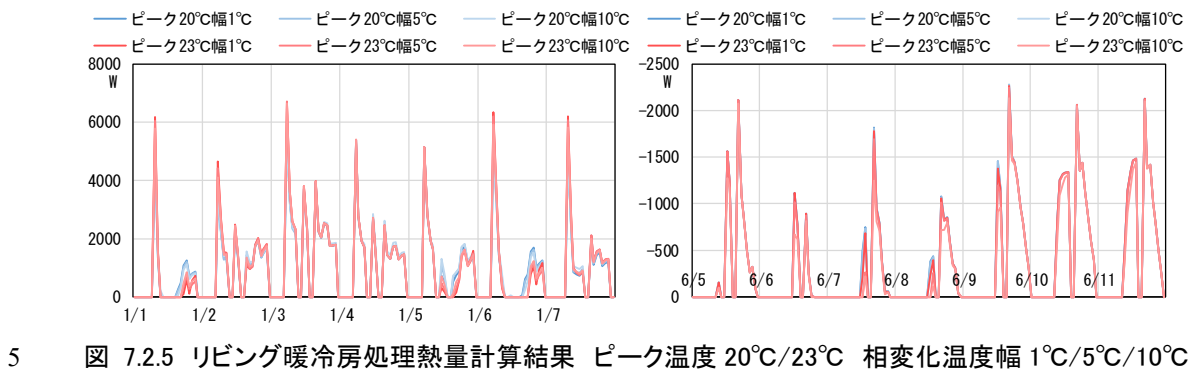
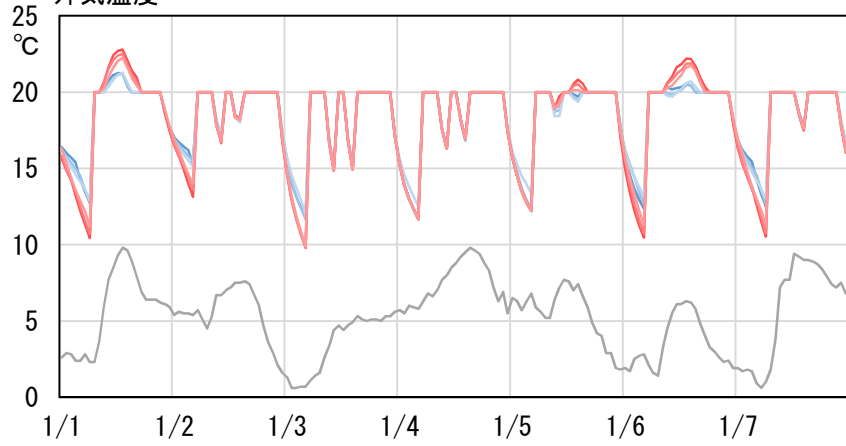


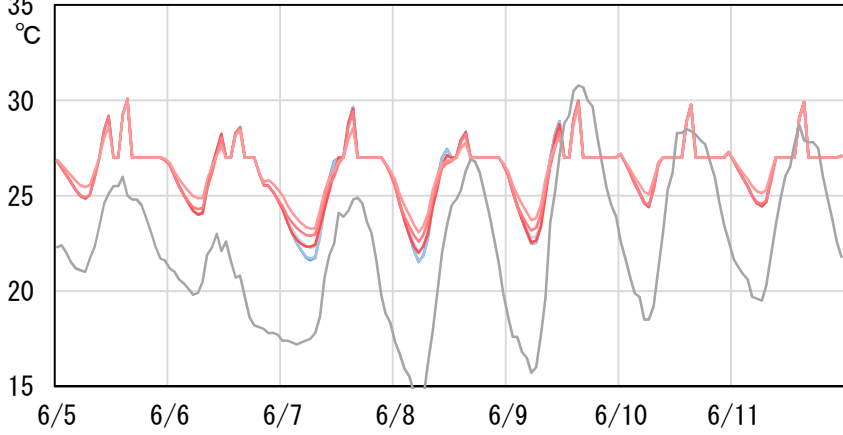
図 7.2.4 リビング暖冷房処理熱量計算結果



— ピーク20°C幅1°C    — ピーク20°C幅5°C    — ピーク20°C幅10°C  
— ピーク23°C幅1°C    — ピーク23°C幅5°C    — ピーク23°C幅10°C  
— 外気温度



— ピーク20°C幅1°C    — ピーク20°C幅5°C    — ピーク20°C幅10°C  
— ピーク23°C幅1°C    — ピーク23°C幅5°C    — ピーク23°C幅10°C  
— 外気温度



— ピーク20°C幅1°C    — ピーク20°C幅5°C    — ピーク20°C幅10°C  
— ピーク23°C幅1°C    — ピーク23°C幅5°C    — ピーク23°C幅10°C  
— 外気温度

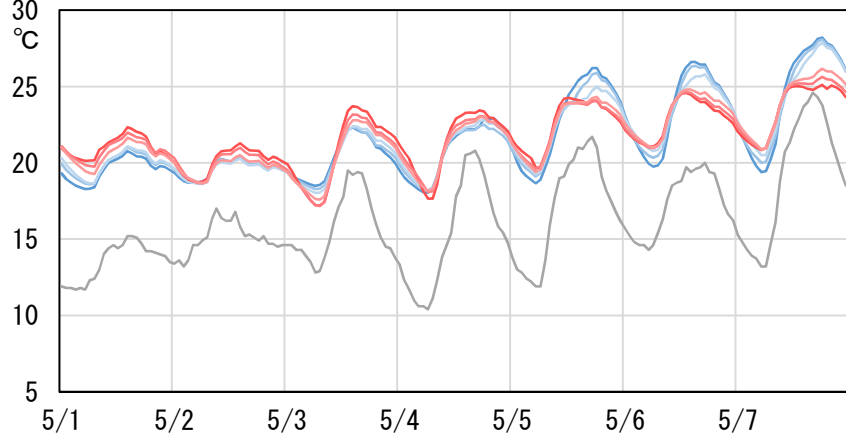
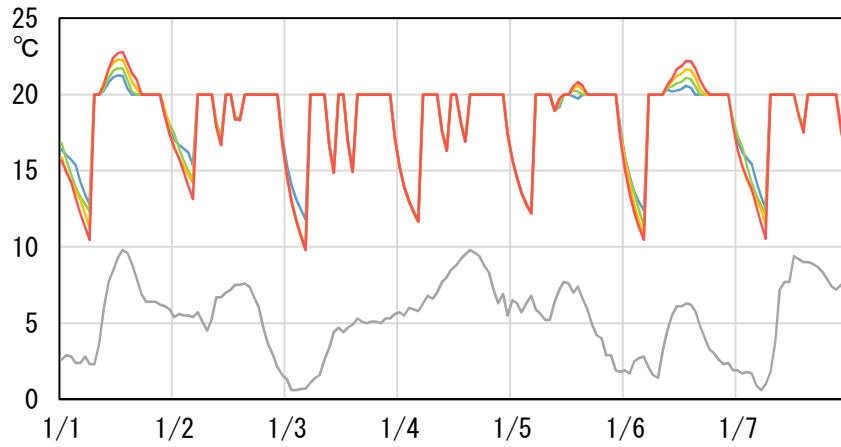
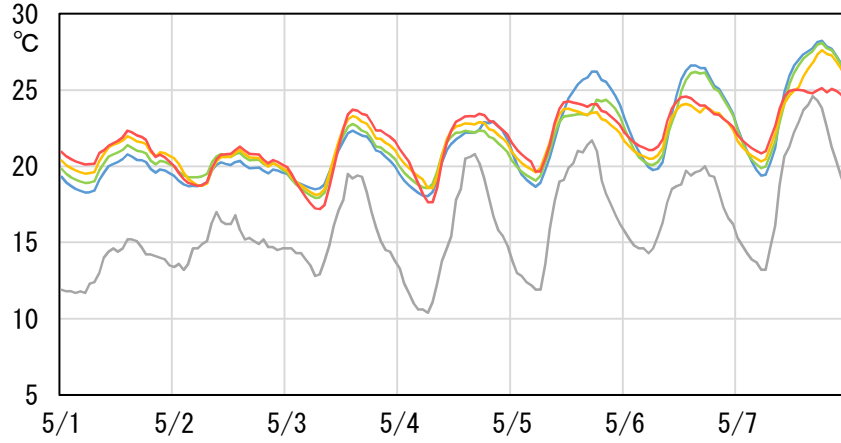


図 7.2.7 LD 室温計算結果 ピーク温度 20°C/23°C 相変化温度幅 1°C/5°C/10°C

— ピーク20°C幅1°C    — ピーク21°C幅1°C    — ピーク22°C幅1°C  
— ピーク23°C幅1°C    — 外気温度



— ピーク20°C幅1°C    — ピーク21°C幅1°C    — ピーク22°C幅1°C  
— ピーク23°C幅1°C    — 外気温度



— ピーク20°C幅1°C    — ピーク21°C幅1°C    — ピーク22°C幅1°C  
— ピーク23°C幅1°C    — 外気温度

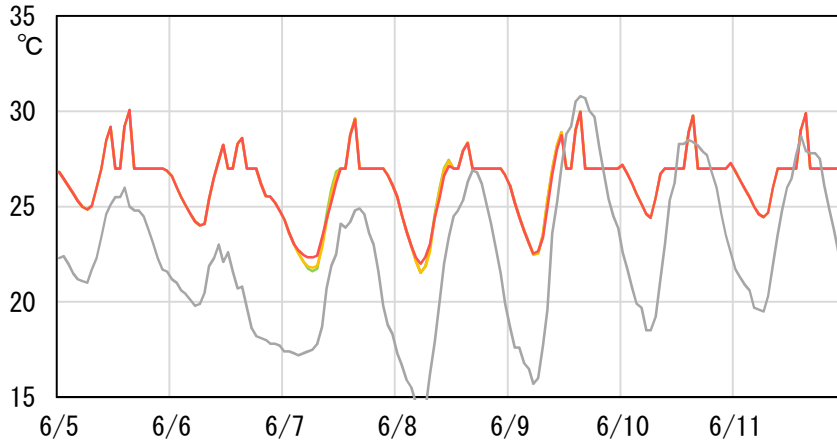


図 7.2.8 LD 室温計算結果 ピーク温度 20°C/21°C/22°C/23°C 相変化温度幅 1°C

#### (4)(2) 見かけの比熱モデルの影響に関する考察

潜熱比熱は、本章では、温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるように与えることを基本とした。ただし、本節では、比較のため、誤差関数を含む見かけの比熱モデル<sup>3</sup>での計算も実施した。

5 二等辺三角形の見かけの比熱モデルと、誤差関数を含む見かけの比熱モデル<sup>3</sup>での計算結果について、比較を行う。

見かけの比熱モデルは、年間のリビングの暖冷房処理熱量の計算結果に影響を与えるが、その程度は大きくはない。

10 また、本節における設定条件下では、見かけの比熱モデルが室温変動に与える影響も、比較的小さい結果となった。

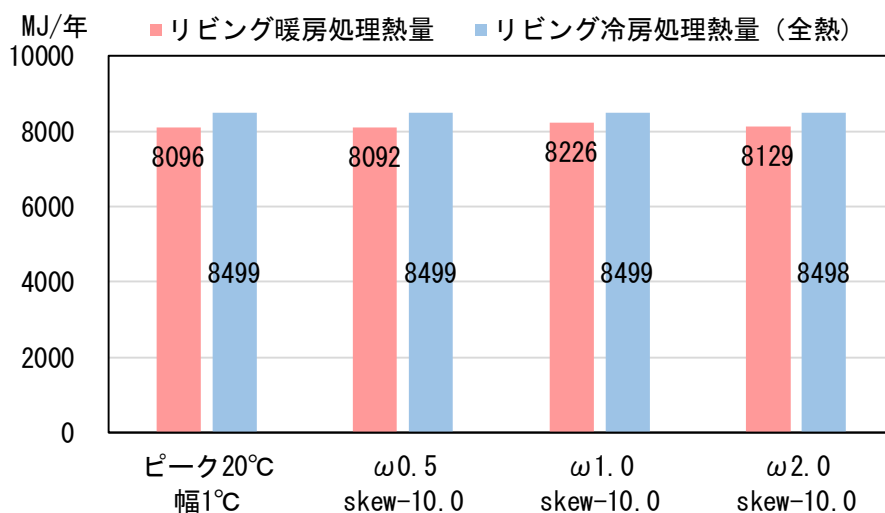


図 7.2.9 リビング暖冷房処理熱量計算結果 二等辺三角形モデル(ピーク温度 20°C、相変化温度幅 1°C)と誤差関数を含むモデル( $\omega=0.5, 1.0, 2.0$ , skew=-10)の比較

15

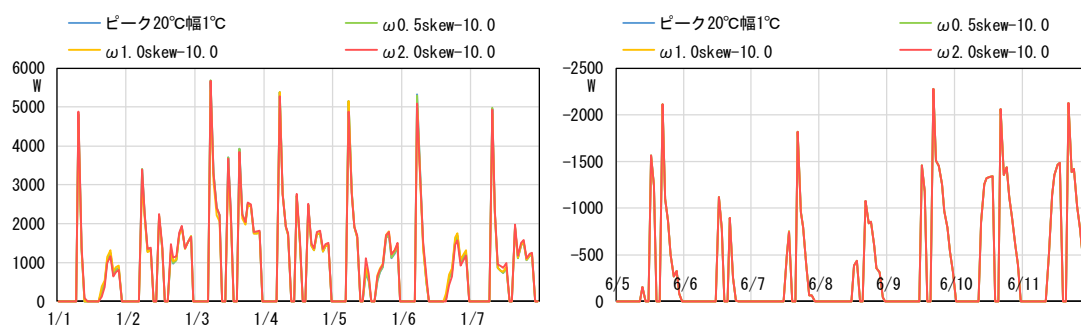


図 7.2.10 リビング暖房処理熱量計算結果 二等辺三角形モデル(ピーク温度 20°C、相変化温度幅 1°C)と誤差関数を含むモデル( $\omega=0.5, 1.0, 2.0$ , skew=-10)の比較

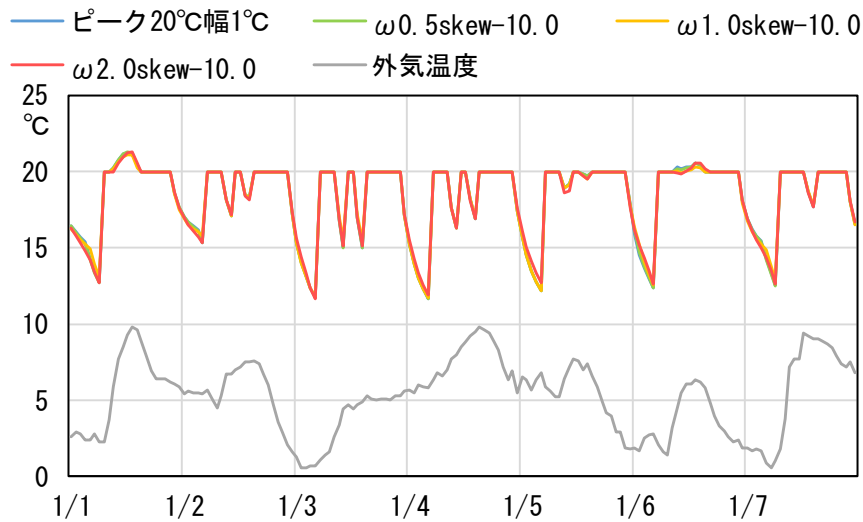


図 7.2.11 LD 室温計算結果 二等辺三角形モデル(ピーク温度 20°C、相変化温度幅 1°C)と誤差関数を含むモデル( $\omega=0.5, 1.0, 2.0$ 、 $skew=-10$ )の比較

### 5 (2)(3) 空気層熱抵抗の考慮の影響に関する考察

空気層熱抵抗や接触床抵抗を考慮するため、床に設置した PCM の上側や、天井に設置した PCM の下側に空気層熱抵抗があると仮定した場合での計算結果を、空気層熱抵抗を含まない場合の計算結果と比較する。

計算結果を以下に示す。

10 年間のリビングの暖冷房処理熱量の計算結果に影響を与えるが、その程度は大きくはない。

一方、暖房期間の室温変動には影響を与える。空気層熱抵抗を考慮する場合は、考慮しない場合と比較し、夜間の室温低下や日中の温度上昇といった室温の変動が大きくなる。

以上より、室温変動に予測にあたっては適切に空気層などの熱抵抗を考慮する必要があること、室温安定効果を得るためには施工時などに PCM と仕上材の間に熱抵抗が生じないよう配慮する必要がある

15 ことが確認される。

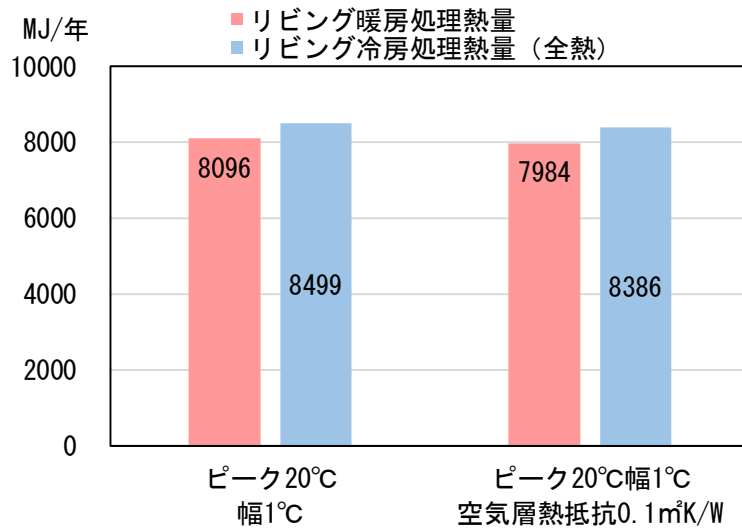
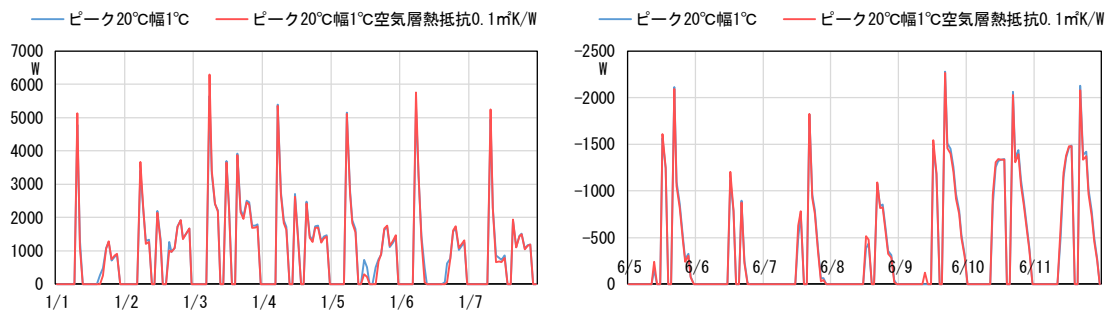
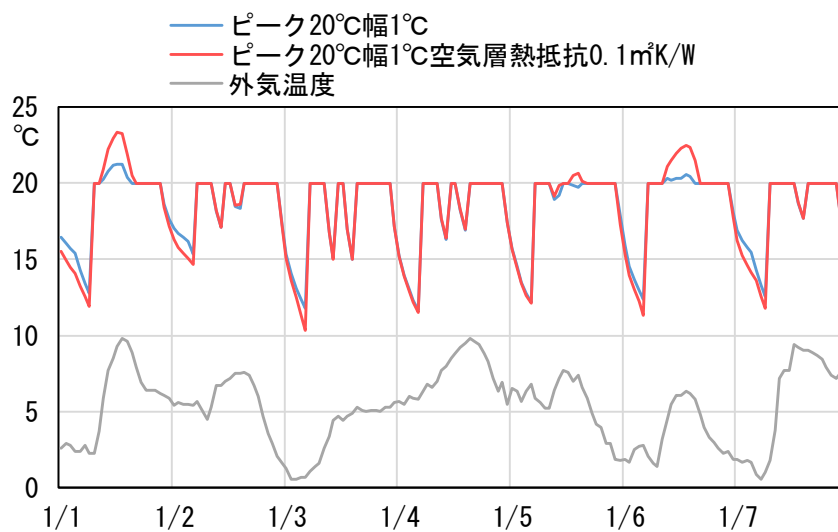


図 7.2.12 リビング暖冷房処理熱量計算結果 LD 床天井 PCM10mm



5 図 7.2.13 リビング暖房処理熱量計算結果 ピーク温度 20°C 相変化温度幅 1°C 空気層熱抵抗考慮有無



10 図 7.2.14 LD 室温計算結果 ピーク温度 20°C 相変化温度幅 1°C 空気層熱抵抗考慮有無

## 7.3 住宅全体の計算を用いた PCM 導入効果の多角的な評価

### 7.3.1 目的

非定常熱伝導計算により、住宅全体の室温や空調エネルギー消費量の計算を行い、快適性や健康性、エネルギー性能を含めて住宅の評価を行う方法の提案を行う。PCM 導入を含め、住宅の性能が評価に与える影響の確認を行い、快適性や健康性、エネルギー性能の面から望ましい住宅を提案する。

### 7.3.2 計算条件

基本となる条件は、事業主基準<sup>2</sup>に準じる。

断熱性能について、平成 28 年省エネルギー基準相当と、高断熱の2水準を想定した。高断熱は、ドイツの基準(EnEV 2014)を参考に設定した。

一部のケースで暖房設定温度を 25℃としている。これは、平成 28 年省エネルギー基準相当の断熱性能で、ケーススタディの条件で、複数の暖房設定温度水準で事前に計算を行い、暖房時に概ね PMV=0 となる設定温度を決定したものである。ただし、PMV は代謝量や着衣量の設定条件等の影響を受ける。ここでは着衣量 1.0Clo、安静状態 1.0Met を想定している(表 7.3.12)点に留意が必要である。なお、サーマルマネキンを用いた測定に関する既往研究<sup>4</sup>において、代謝量 1.1Met 時に熱的中立となるエアコン暖房時の空気温度は 26.5℃程度であるとの結果が示されており、これは暖房設定温度 25℃と比較的近い値であることより、暖房設定温度 25℃の妥当性が確認される。

温熱環境の評価、熱負荷計算結果のエネルギー消費量への換算、電力使用量のコスト換算の方法は、前章に示したものとする。

他者の著作物（図表等）について、インターネット公表に対する著作権者からの許諾が得られていないため、非公表とする。

図 7.3.1 計算対象住戸の平面図・断面図(出典: 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<sup>2</sup>)



表 7.3.1 計算条件

項目	設定	備考
計算プログラム	EESLISM for Windows 7.2	
地域	岡山 標準年拡張アメダス気象データ (1995年版)	一部、東京(2000年版)での計算を実施
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	
計算時間間隔	30分	
最大収束回数	100回	
建物モデル	自立循環型住宅モデル <sup>2</sup> (木造住宅)	
延床面積	120 m <sup>2</sup>	
断熱性能	別途	
開口部	カーテン・ブラインド等なし	開口部面積 32.2 m <sup>2</sup>
家具熱容量	12.6kJ/(m <sup>3</sup> ・K)	
常時換気	第3種換気：事業主基準に準じ居室に設置した給気口より給気、1階は玄関、トイレと洗面所、2階はトイレより排気。	
局所換気	台所、1階トイレ、浴室に事業主基準の風量、スケジュールに則り設定。	
隣室間換気 <sup>2</sup>	リビング-台所間：5000 m <sup>3</sup> /h 1階廊下-2階ホール間：273 m <sup>3</sup> /h	
暖冷房期間	暖房：11月4日～4月21日 冷房：5月30日～9月23日	
暖冷房方式	空調するLD、寝室、子供室にルームエアコンを設置。	
暖冷房設定温度	暖房：室温 20°C/25°C設定 冷房：起床時室温 27°C設定 就寝時室温 28°C設定	暖房 25°C設定は、PMV=0に近い温熱環境となることを想定
暖冷房スケジュール	事業主基準における居室間歇空調もしくは連続運転 (暖房期：居間・子供室、冷房期：居間・寝室・子供室)	
内部発熱スケジュール	人体、照明、機器を事業主基準に示されるスケジュールに準じて平日と休日を別々に設定。機器の顕熱発熱は対流成分 50%、放射成分 50%として入力した。潜熱発熱は人体と調理を設定。	
床の日射吸収比率	30%	計算プログラムのデフォルト値。残りは床も含めて面積案分。
地盤面反射率	10%	
隣棟	考慮せず	
室内側対流熱伝達率	床面 2.2W/(m <sup>2</sup> ・K) 天井面 6.6W/(m <sup>2</sup> ・K) 壁面 4.6W/(m <sup>2</sup> ・K)	

表 7.3.2 1階天井-階間床の構成

仕様	熱伝導率 [W/(m・K)]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	厚[mm]		備考
			一般部		
			PCMあり	PCMなし	
石こうボード	0.22	830		10	
鋼	55	3600	3		
PCM	1	5000	10		5分割

表 7.3.3 外壁の構成(平成 28 年基準相当)

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚[mm]	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	
石こうボード	0.22	830	12	
グラスウール 断熱材 16K 相当	0.045	13	66	高断熱のケースでは、フェノールフォーム保温板 1 種 2 号 (0.022W/(m・K)、43kJ/(m <sup>3</sup> ・K)) 70mm とする。
密閉中空層 合板	6.67W/(m <sup>2</sup> ・K)	720	12	

表 7.3.4 天井の構成(平成 28 年基準相当)

仕様	熱伝導率	容積比熱	厚[mm]	備考
	[W/(m・K)]	[kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	一般部	
石こうボード	0.05	830	10	
非密閉中空層 合板	14.29W/(m <sup>2</sup> ・K)	720	9	
押出法ポリスチレンフォーム保温板 3 種 小屋裏空間 合板	0.028	40	107	高断熱のケースでは、高性能グラスウール断熱材 24K 相当 (0.036W/(m・K)、20kJ/(m <sup>3</sup> ・K)) 170mm とする。 一室として計算
瓦	0.160	720	12	
	1	1500	12	

5

表 7.3.5 1 階床の構成(平成 28 年基準相当)

仕様	熱伝導率 [W/(m・K)]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	厚[mm]		備考
			一般部		
			PCM あり	PCM なし	
合板	0.160	720	6		
PCM			10		5 分割
合板	0.160	720	12	12	
グラスウール 断熱材 16K 相当	0.045	13	80	80	高断熱のケースでは、フェノールフォーム保温板 1 種 2 号 (0.022W/(m・K)、43kJ/(m <sup>3</sup> ・K)) 57mm とする。

表 7.3.6 開口部

	熱貫流率	日射熱取得率	備考
平成 28 年 基準相当	4.65 W/(m <sup>2</sup> ・K)	ガラス： 79% (日射取得型) 38% (日射遮蔽型) ドア：16%	ドアの日射熱取得率は、省エネルギー基準を参考に、0.034×熱貫流率[W/(m <sup>2</sup> ・K)]により計算
高断熱	1.60 W/(m <sup>2</sup> ・K)	ガラス： 54% (日射取得型) 33% (日射遮蔽型) ドア：5.4%	EnEV 2014 では 1.30W/(m <sup>2</sup> ・K) だが、省エネルギー基準での開口部の熱貫流率の最低値 1.60 W/(m <sup>2</sup> ・K) に合わせた。窓の日射熱取得は、省エネルギー基準 Low-E 三層複層ガラス 日射取得型の値を用いた。ドアの日射熱取得率は、省エネルギー基準を参考に、0.034×熱貫流率[W/(m <sup>2</sup> ・K)]により計算。

表 7.3.7 PCM 物性値

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	熱伝導率 [W/(m・K)]		潜熱 容量 [J/g]	顕熱容量 [J/(g・K)]		相変化温度[°C]		備考
	固相	液相		固相	液相	ピーク温度	温度幅	
1000	0.3	0.3	200	1	1	17.5/20.0/ 22.5/27.5	5	潜熱比熱は、温度の関数として グラフ化した際に、温度変化域 内で二等辺三角形となるように 与えた。

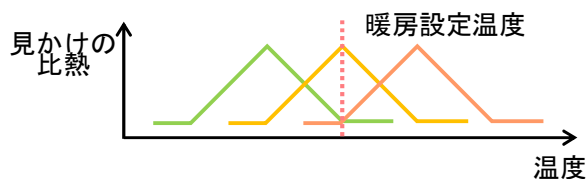


図 7.3.2 見かけの比熱の入力のイメージ

5

表 7.3.8 PCM 設置状況

室	床	壁	天井	備考
リビング	10mm	なし	10mm	合計 86.12MJ (=21.53 m <sup>2</sup> ×0.01m×2×200J/g×1000000g/m <sup>3</sup> )
リビング以外	なし	なし	なし	

表 7.3.9 エアコンの設定<sup>5</sup>

	リビング		子供室		子供室		
	AN71SAP		CS-DX224C		CS-DX254C		
	冷房	暖房	冷房	暖房	冷房	暖房	
定格 COP	-	3.29	4.34	5.79	5.95	5.32	5.71
定格能力	W	7100	8500	2200	2500	2500	2800
定格消費電力	W	2160	1960	380	420	470	490

10

表 7.3.10 電力使用量の計算条件

用途	計算条件
暖冷房	ケーススタディの熱負荷計算結果より、暖冷房機器の効率を考慮して算出したエネルギー消費量を用いる。
家電	熱負荷計算の入力値を用いる。熱負荷計算の入力は、事業主基準の暖冷房負荷計算用の発熱機器スケジュールに基づく。
照明	熱負荷計算の入力値を用いる。熱負荷計算の入力は、事業主基準の暖冷房負荷計算用の照明スケジュールに基づく。
換気	熱負荷計算の入力値の換気風量とスケジュールより、比消費電力 0.3W/(m <sup>3</sup> /h) を用いて算出する。熱負荷計算の入力は、事業主基準の暖冷房負荷計算用の風量とスケジュールに基づく。
調理	考慮しない。
給湯	考慮しない。

表 7.3.11 人体モデルを使用した温冷感に関する評価に関する設定条件

段階	時間	想定する状態	設定条件				
			空気温度	放射温度	相対湿度	風速	着衣量
1	60分	助走計算	PMV=0 となる条件を与える				
2	60分	居間で団欒	室温、室の平均表面温度、室の相対湿度の計算値を与える		0.1m/s	1Clo 程度※	1.0Met
3	5分	入浴			0.1m/s	0Clo	1.0Met
4	5分				0.1m/s	0Clo	1.0Met

※温熱環境評価のための65分割体温調節モデル<sup>6</sup>のNormalの着衣量、着衣面積比を参照。

表 7.3.12 PMV・PPD 算出条件

設定	空気温度	放射温度	相対湿度	風速	着衣量	代謝量
	計算値	室の平均表面温度の計算値	計算値	0.05m/s	1.0Clo	1.0Met

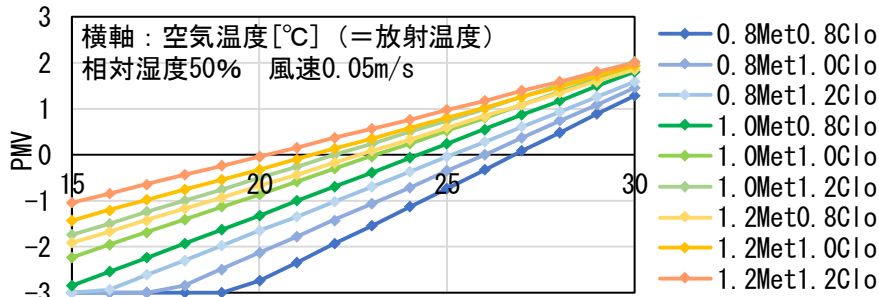


図 7.3.3 (参考)着衣量・代謝量とPMVの関係

表 7.3.13 健康リスク要因の評価指標

	場面	関連する事故、疾患等	集計方法				
			期間	時刻/時間帯	室	集計対象	集計方法
指標 a	入浴時	血圧上昇	暖房期間	平日 20:45 休日 17:00	廊下	O T	基準温度 (18°C) からの差の積算
指標 b				→計算時間間隔と集計の都合上、ここでは平日 21:00、休日 17:00 としている	浴室		
指標 c	起床時	高血圧		平日 6:30 休日 7:15	寝室	O T	
指標 d	就寝中	呼吸器系疾患		平日 23:30~6:30 休日 23:15~7:15	寝室	室温	
指標 e		血圧上昇		→計算時間間隔と集計の都合上、ここでは平日 23:30~6:30 (23:30 を含まず 6:30 を含む。以下同様) 休日 23:30~7:30 としている	トイレ	O T	

10 PMV および PPD の算出の際の着衣量の設定について、本研究では、1.0Clo としている。既往研究<sup>7</sup>における冬季における性別・年齢別の着衣量の分布状況の調査結果では、冬期の住宅内における普段着の着衣量は、0.6Clo 未満から 1.6Clo 以上まで、分布が見られる。既往研究では性別や年代にもよるが 1.0Clo 前後の割合が高いこと、本研究では健康的で快適な住宅の実現を目標としていることを鑑みると、1.0Clo という着衣量の設定は妥当な範囲内であると考えられる。

15

PMV および PPD の算出の際の代謝量の設定について、本研究では安静状態を想定し、1.0Met としている。文献<sup>8</sup>における着席、休息の作業程度に相当する。なお、着席、非常に軽い作業では 1.1Met、事務作業では 1.2Met、軽い立・歩行作業では 1.4Met であり<sup>8</sup>、住宅内で想定される作業でも代謝量に差があること、PMV および PPD は想定する作業の影響を受けることに留意する必要がある。

5

ケース設定は、以下のとおり、断熱性能(平成 28 年基準相当/高断熱)、開口部(日射取得型/日射遮蔽型)、蓄熱(なし/顕熱(水)/PCM)、PCM 相変化温度域(15~20℃/17.5~22.5℃/20~25℃/25~30℃)、個室暖房方式(エアコン/ヒーター)、暖冷房運転スケジュール(間歇運転/連続運転)、暖房設定温度(20℃/25℃)の組合せとする。

10

表 7.3.14 検討ケース

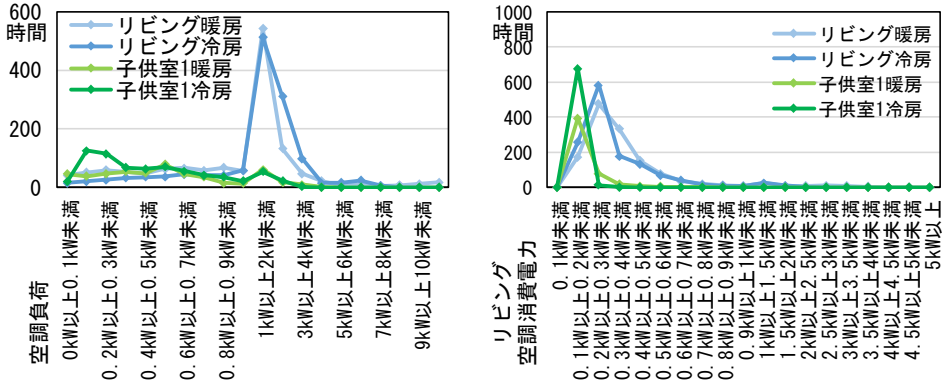
ケース	断熱性能	開口部	蓄熱	PCM			暖冷房			
				相変化温度		熱伝導率	暖房機器		運転スケジュール	暖房設定温度
				ピーク温度 ℃	温度幅 ℃		リビング	個室		
①	H28	日射取得型	なし				エアコン	エアコン	間歇	20℃
②	H28	日射取得型	なし				エアコン	ヒーター	間歇	20℃
③	H28	日射取得型	なし				エアコン	エアコン	連続	20℃
④	H28	日射取得型	なし				エアコン	エアコン	間歇	25℃
⑤	H28	日射遮蔽型	なし				エアコン	エアコン	間歇	25℃
⑥	高断熱	日射取得型	なし				エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑦	高断熱	日射取得型	なし				エアコン	エアコン	連続	20℃
⑧	高断熱	日射取得型	なし				エアコン	エアコン	間歇	25℃
⑨	高断熱	日射遮蔽型	なし				エアコン	エアコン	間歇	25℃
⑩	H28	日射取得型	顕熱				エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑪	H28	日射取得型	潜熱	17.5	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑫	H28	日射取得型	潜熱	20.0	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑬	H28	日射取得型	潜熱	22.5	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑭	H28	日射取得型	潜熱	22.5	5	0.3	エアコン	エアコン	連続	20℃
⑮	H28	日射取得型	潜熱	22.5	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	25℃
⑯	H28	日射取得型	潜熱	27.0	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	25℃
⑰	高断熱	日射取得型	潜熱	17.5	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑱	高断熱	日射取得型	潜熱	20.0	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑲	高断熱	日射取得型	潜熱	22.5	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	20℃
⑳	高断熱	日射取得型	潜熱	22.5	5	0.3	エアコン	エアコン	連続	20℃
㉑	高断熱	日射取得型	潜熱	22.5	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	25℃
㉒	高断熱	日射取得型	潜熱	27.0	5	0.3	エアコン	エアコン	間歇	25℃

- ・ 個室でヒーターを使用するケースでは、暖房負荷を、COP1 のヒーターで処理することを想定した。
- ・ 連続運転のスケジュールのケースでは、リビング、寝室、子供室 1、子供室 2 で暖冷房を連続運転する設定とした。
- ・ PCM の見かけの比熱は、潜熱比熱を温度の関数としてグラフ化した際に、温度変化域内で二等辺三角形となるように与えた。

7.3.3 計算結果

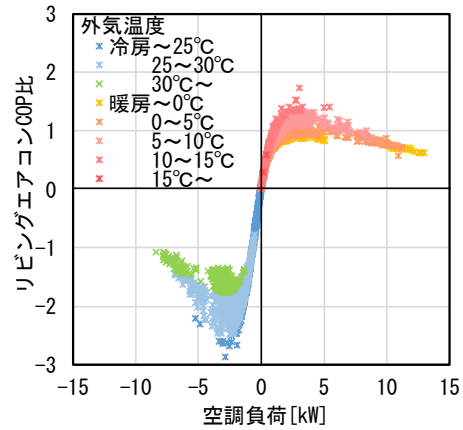
(1) 代表ケースの計算結果

1) ケース⑬H28基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度20°C



	暖房処理 顕熱量 [GJ/年]	冷房処理 全熱量 [GJ/年]	空調用 一次 エネルギー [GJ/年]
リビング	7.8	-8.7	10.4
子供室1	1.3	-1.4	1.8
子供室2	1.1	-1.3	1.5
寝室	0.0	-0.5	0.4
合計	10.2	-11.9	14.1

暖房負荷発生期間  
11/5 09:30 ~ 4/21 07:00



電力料金単価 [円]	料金単価	単位
基本料金		
アンペア数に基づく契約 (50A)	1404.00	1契約
ピーク電力に基づく契約	561.60	1kW
電力量料金		
120kWhまで	19.52	1kWh
120kWh超過 300kWhまで	25.98	1kWh
300kWh超過	30.02	1kWh

	ピーク 時間	オフピーク 時間	夜間時間	合計	アンペア 数に 基づく 契約	ピーク 電力に 基づく 契約	年間最大 電力使用
	平日 13時から 16時まで	ピーク時 間除く 7時から 23時まで	23時から 7時まで				
1月	20	426	190	555	16,084	17,488	5.4
2月	18	387	181	509	14,683	16,087	
3月	20	373	174	493	14,224	15,628	
4月	16	282	113	363	10,325	11,729	
5月	18	268	101	346	9,801	11,205	
6月	22	340	101	423	12,117	13,521	
7月	26	452	164	574	16,647	18,051	
8月	29	448	179	581	16,871	18,275	
9月	21	353	115	442	12,675	14,079	
10月	17	269	101	345	9,785	11,189	
11月	17	281	119	368	10,466	11,870	
12月	18	393	162	505	14,586	15,990	

5 図 7.3.4 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C

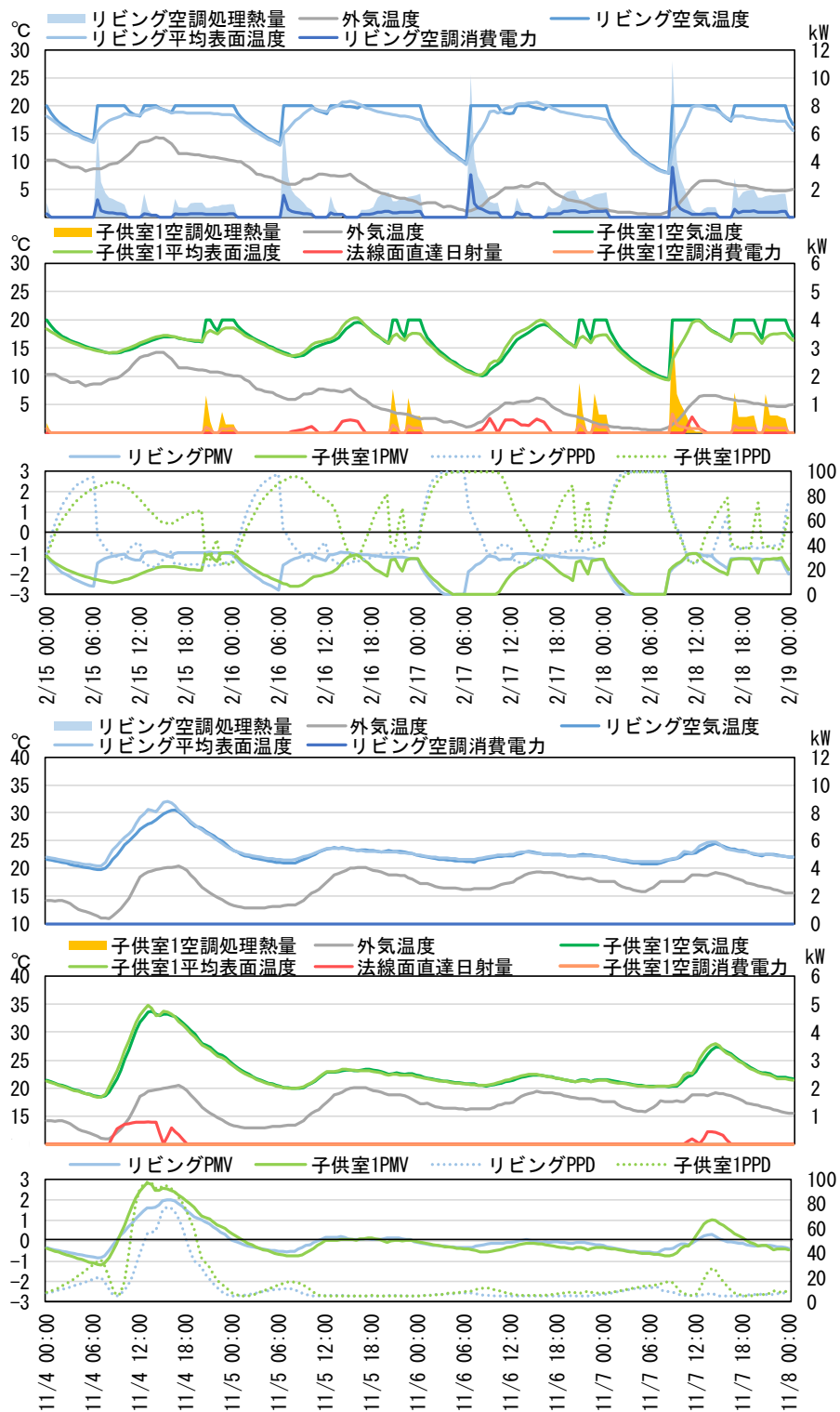
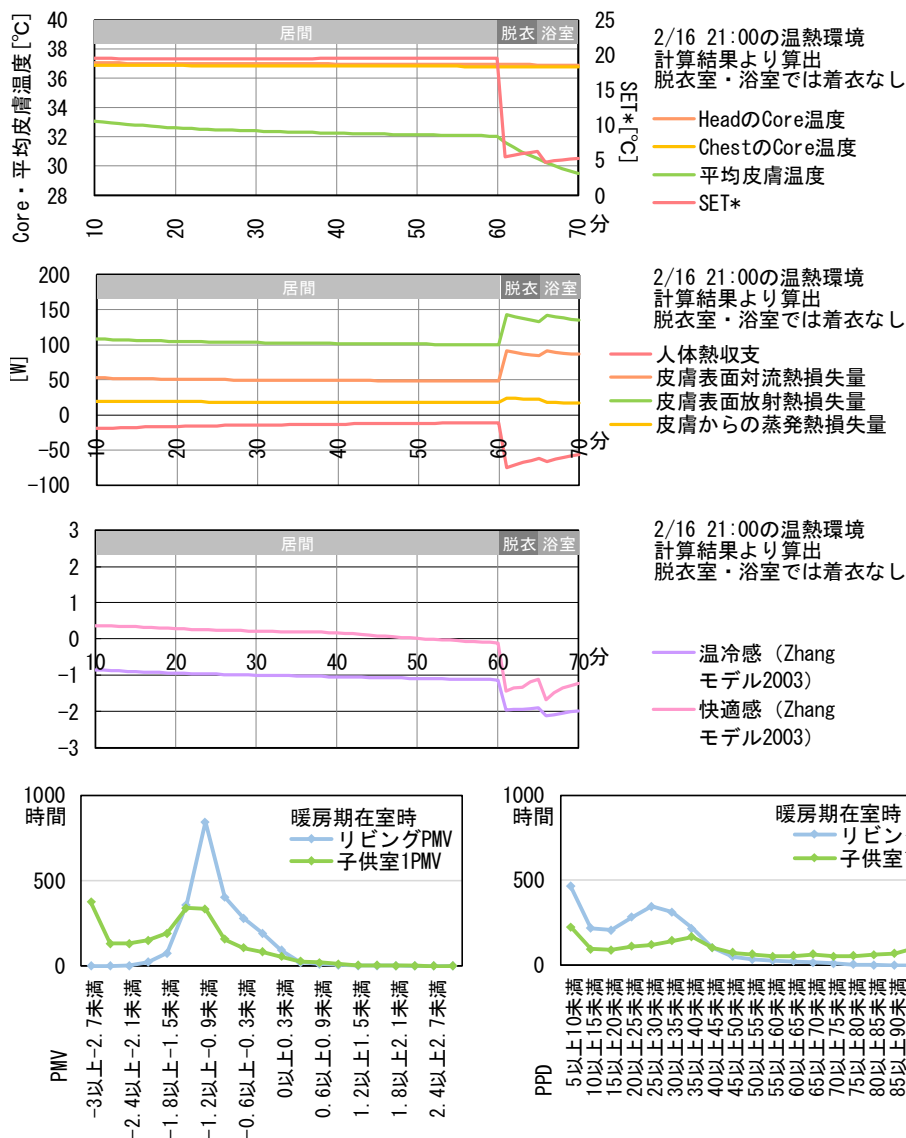


図 7.3.5 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C



快適性	PPD (暖房期在室時平均)	床表面温度が許容可能 (室内履着用時) / 快適 (裸足時) な床温度範囲を外れる時間割合 (暖房期在室時)		作用温度1.7°C/30分超の回数 [回/年] (暖房期在室時)
		許容可能: 19~29°C	快適: 23~28°C	
リビング	24.8	16.7%	75.8%	172
子供室1	53.2	66.1%	91.7%	181
子供室2	57.8	69.7%	93.2%	181
寝室	76.3	84.2%	99.6%	0
健康性 (暖房期)		[°C・回] または [°C・時]		暖かさの得点
				11.8点
指標a	入浴時廊下	112.1		代表日 脱衣室・浴室 SET*最低値
指標b	入浴時浴室	332.8		4.7°C
指標c	起床時寝室	847.7		温冷感 (Zhangモデル2003) 最低値
指標d	就寝中寝室	4405.5		-2.1
指標e	就寝中トイレ	4754.8		快適感 (Zhangモデル2003) 最低値
				-1.7

図 7.3.6 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C



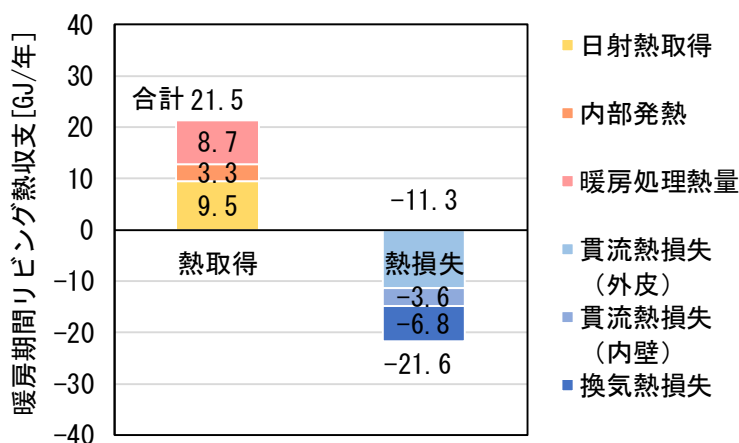
## 2) 断熱性能、日射熱取得性能が暖房室の熱取得、熱損失に与える影響の確認

蓄熱が暖冷房負荷や温熱環境に与える影響の確認に先立ち、住宅の断熱性能や日射熱取得性能が、暖房期間における暖房室の熱取得や熱損失に与える影響の確認を行う。

暖房期間について、リビングの壁体の室内側表面での熱収支を取った結果を以下に示す。熱取得成分として、日射、内部発熱(照明発熱、機器発熱、人体発熱顕熱成分)、暖房処理熱量を考慮している。熱損失成分として、外皮と内壁からの貫流熱損失、換気熱損失を考慮している。壁体の貫流熱損失は、壁体の室内側表面の対流による熱取得、放射による熱取得、壁体表面発熱(日射、照明発熱、機器発熱放射成分、人体発熱放射成分)の合計値とした。このような熱収支の集計方法では、室空気の熱容量や室内側表面の壁体の質点の熱容量の影響を受けるが、集計期間を長めに設定しており、その影響は比較的小さいものと推察される。換気熱損失は、換気による外気の流れに加え、リビングと台所の間の室間換気の影響を考慮している。

暖房処理熱量が小さく望ましいとみなされるのは、熱損失量が小さいケース、日射熱取得量が多いケースである。

基準のケース①では、熱損失のうち、外皮の貫流熱損失が占める割合が半分で、次いで、換気熱損失が占める割合が大きい結果となっている。対して、熱取得は、日射熱取得が占める割合が最も高く、熱損失を日射と内部発熱の熱取得で賄いきれない分が、暖房が処理する熱量となっているという見方が可能である。ケース①では、熱取得のうちの4割程度が、暖房で処理されている。



20 図 7.3.7 暖房期リビング熱収支 ケース①H28 基準相当 日射取得型 間歇運転 暖房 20°C設定

暖房連続運転のケース③や暖房設定温度 25°Cのケース④では、基準のケース①と比較し、室温と外気の温度差が大きくなる傾向がある。従って、熱損失が大きくなり、暖房の処理熱量も大きくなっている。なお、暖房設定温度 25°Cのケース④の内部発熱が基準のケース①よりも小さいのは、室温上昇に伴い、人体発熱の潜熱成分が大きくなり、顕熱成分が小さくなった影響と推察される。

日射遮蔽型の開口部のケース⑤では、日射取得型のケース④と比較し、日射熱取得が小さく、その分、暖房処理熱量が大きくなっている。

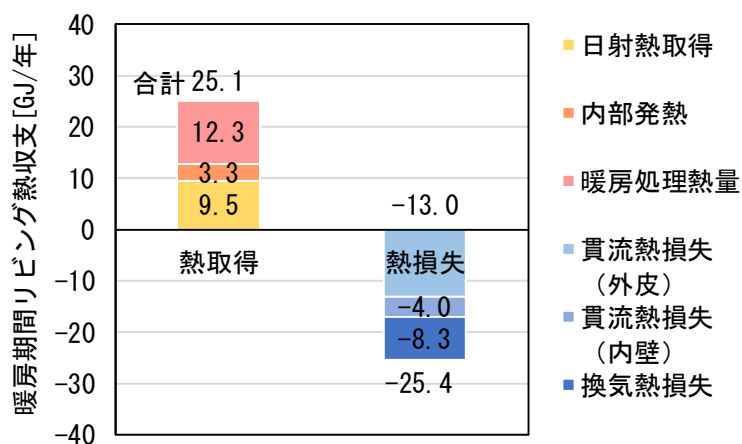
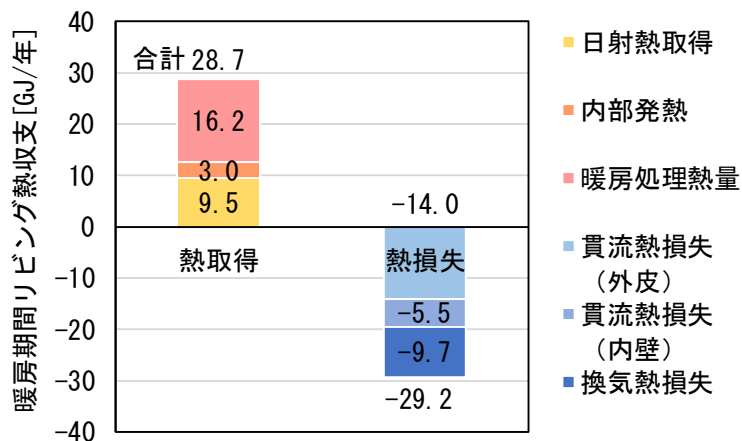


図 7.3.8 暖房期リビング熱収支 ケース③H28 基準相当 日射取得型 連続運転 暖房 20°C設定



5 図 7.3.9 暖房期リビング熱収支 ケース④H28 基準相当 日射取得型 間歇運転 暖房 25°C設定

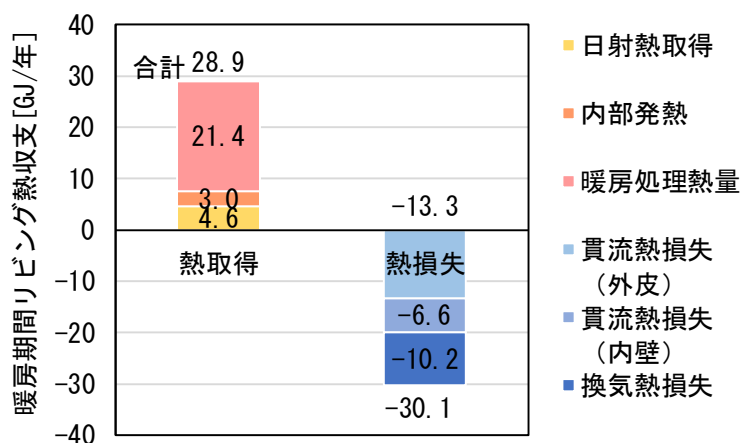
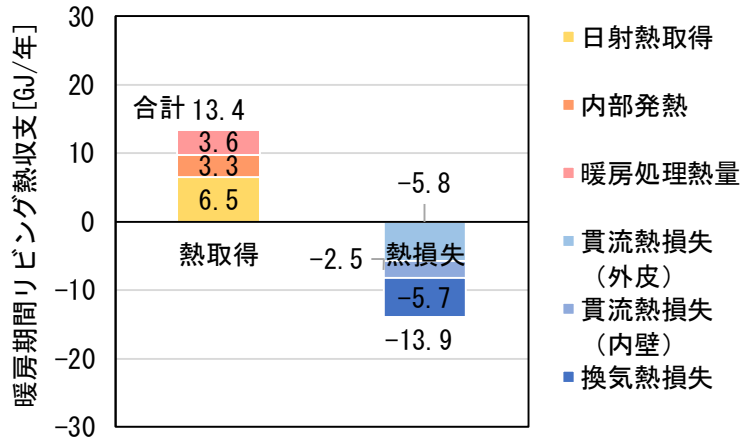


図 7.3.10 暖房期リビング熱収支 ケース⑤H28 基準相当 日射遮蔽型 間歇運転 暖房 25°C設定

高断熱のケース⑥では、基準のケース①と比較し、外皮や内壁の貫流熱損失、室間換気を含む換気の熱損失が低減される。外皮の断熱性能向上と、非暖房室の室温向上の影響と推察される。



5 図 7.3.11 暖房期リビング熱収支 ケース⑥高断熱 日射取得型 間歇運転 暖房 20°C設定

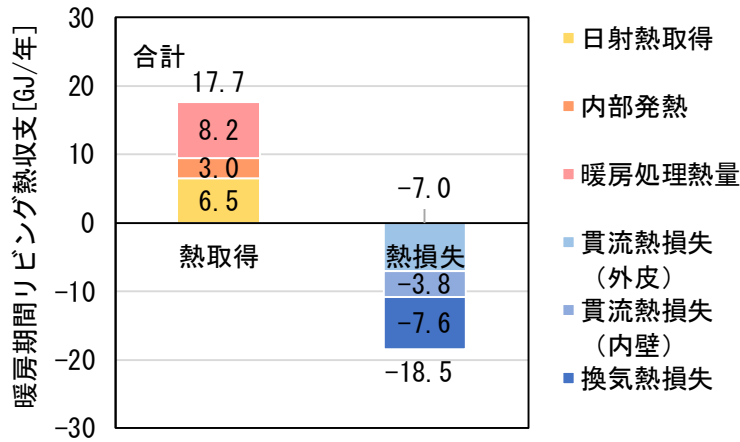


図 7.3.12 暖房期リビング熱収支 ケース⑧高断熱 日射取得型 間歇運転 暖房 25°C設定

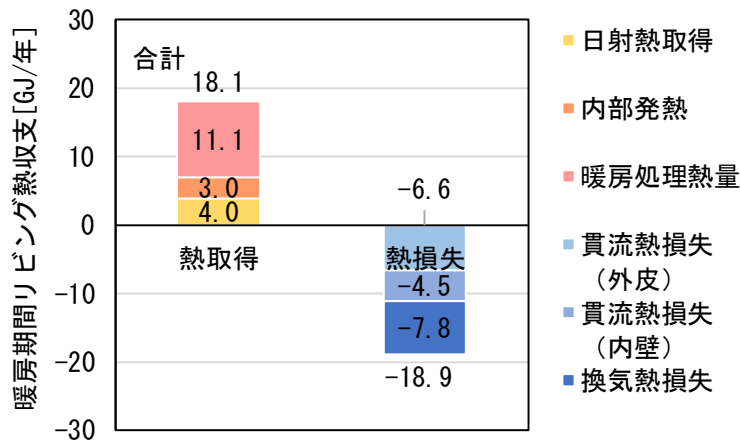


図 7.3.13 暖房期リビング熱収支 ケース⑨高断熱 日射遮蔽型 間歇運転 暖房 25°C設定

### 3) PCM導入有無の比較

平成 28 年基準相当、日射取得型、間歇運転、蓄熱なしで暖房設定温度 20℃のケース①と暖房設定温度 25℃のケース④、相変化温度範囲 20～25℃の PCM 導入で暖房設定温度 20℃のケース⑬と暖房設定温度 25℃のケース⑮の比較を行う。

- 5 暖房期の代表期間のリビングの温度、暖房処理熱量の計算結果を示す。2 月 17 日の明け方の外気温が、1～2 月の平均的な日最低気温と近い値を取る。

図 7.3.15 に示す蓄熱なしで暖房設定温度 25℃のケース④では、2 月 18 日の日中に床表面温度が 30℃程度まで上昇し、軽量の室内用の靴着用時の許容可能な床面温度範囲(19～29℃)<sup>9</sup>や、裸足時の快適な床温度範囲(木質フローリング 23～28℃)<sup>10</sup>を超えていることが確認される。一方、図 7.3.17 に示す相変化温度範囲 20～25℃の PCM 導入で暖房設定温度 25℃のケース⑮では、PCM 導入により、同時間帯の床表面温度の上昇が抑制されていることが確認される。

10

暖房設定温度 20℃のケース①(図 7.3.14)やケース⑬(図 7.3.16)では、この代表期間には、日中のオーバーヒートは見られないことが確認される。

15

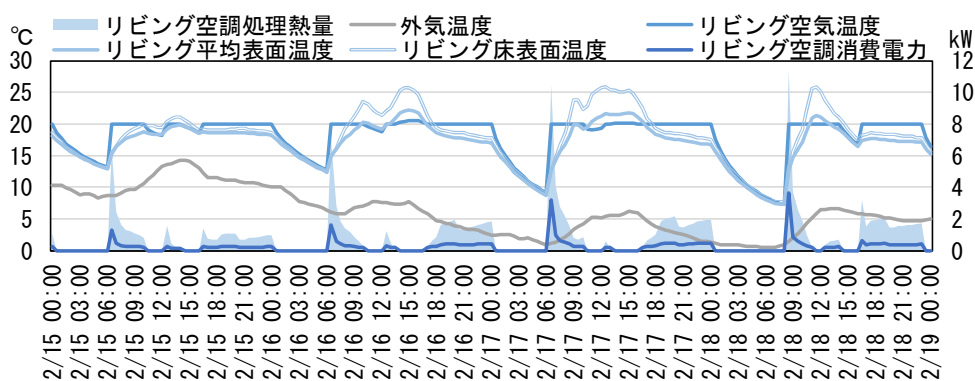


図 7.3.14 計算結果 ①H28 基準相当 日射取得型 蓄熱なし 間歇運転 暖房設定温度 20℃

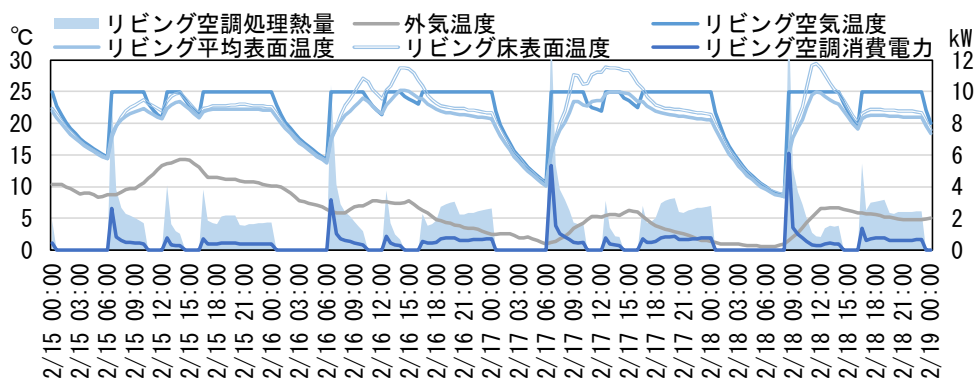


図 7.3.15 計算結果 ④H28 基準相当 日射取得型 蓄熱なし 間歇運転 暖房設定温度 25℃

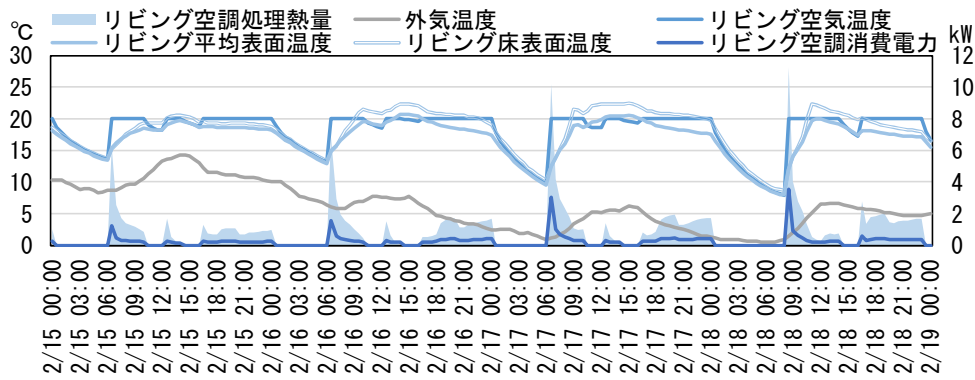


図 7.3.16 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C

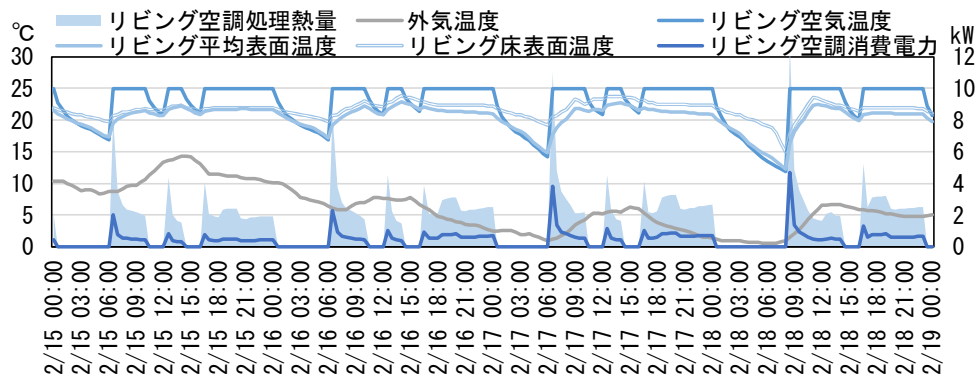


図 7.3.17 計算結果 ⑮H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 25°C

5

暖房期の比較的外気温の高い代表期間のリビングの温度、暖房処理熱量の計算結果を示す。

図 7.3.18、図 7.3.19 に示す蓄熱なしのケース①、④では、11月4日の日中に室温が35°C程度まで上昇する。なお、このときPMVは3程度を示し、オーバーヒートをしていることが確認される。

一方、図 7.3.20、図 7.3.21 に示す相変化温度範囲 20~25°CのPCM導入のケース⑬、⑮では、室温の上昇は30°C程度までに抑えられる。なお、このとき、PMVは2程度を示す。PCM導入により、同時

10

間帯の室温の上昇が抑制されていることが確認される。  
11月7日についても同様に、PCM導入のケースで、日中の室温上昇が抑制され、室温変動が安定していることが確認される。

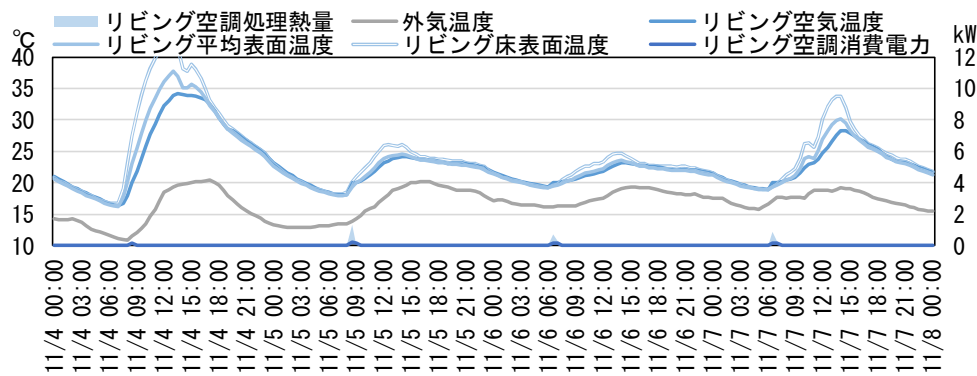


図 7.3.18 計算結果 ①H28 基準相当 日射取得型 蓄熱なし 間歇運転 暖房設定温度 20°C

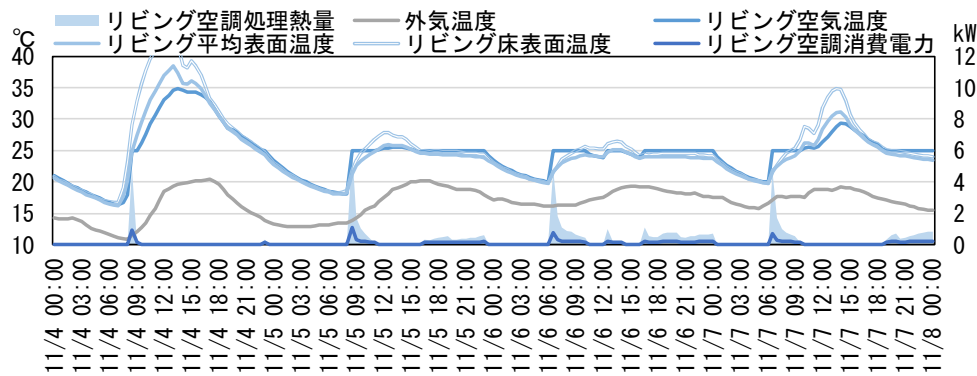


図 7.3.19 計算結果 ④H28 基準相当 日射取得型 蓄熱なし 間歇運転 暖房設定温度 25°C

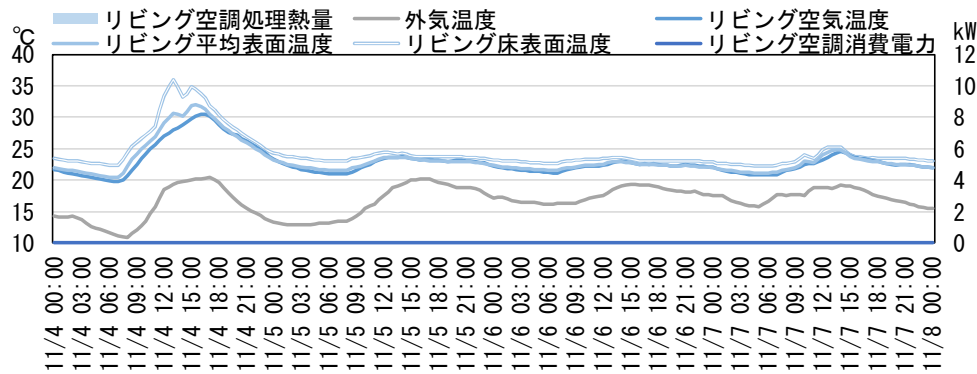


図 7.3.20 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C

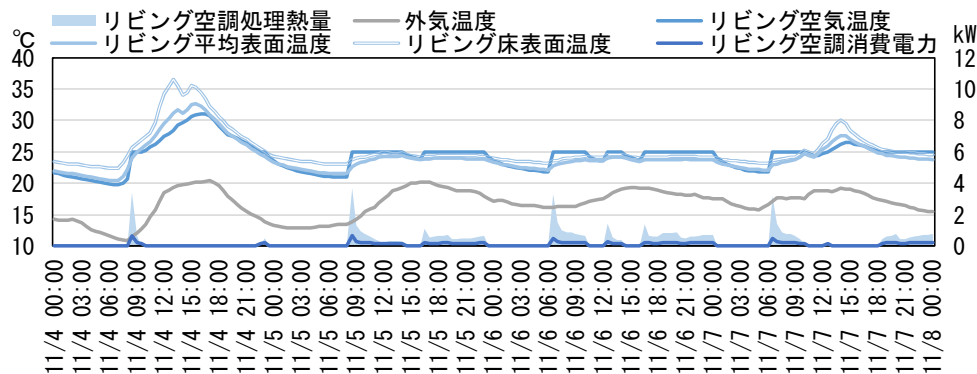


図 7.3.21 計算結果 ⑮H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 25°C

#### 4) PCM相変化温度の比較

平成 28 年基準相当、日射取得型、間歇運転、暖房設定温度 20℃で PCM 相変化温度が異なるケース⑪、⑫、⑬の比較を行う。

暖房期の代表期間のリビングの温度、暖房処理熱量の計算結果を示す。2 月 17 日の明け方の外気温が、1～2 月の平均的な日最低気温と近い値を取る。

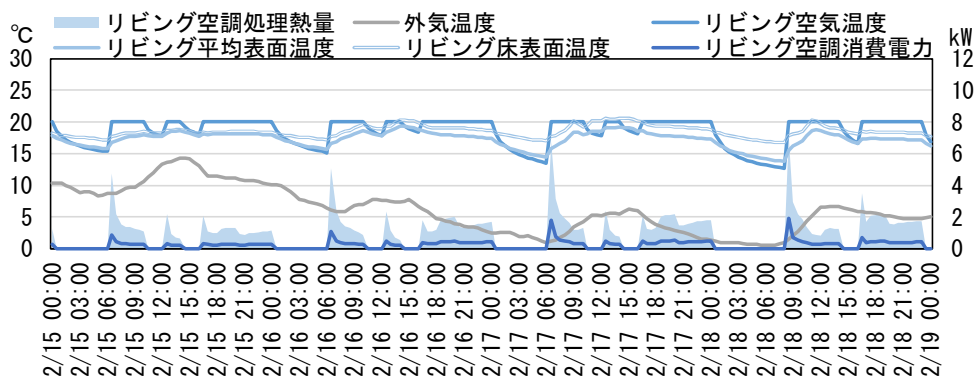


図 7.3.22 計算結果 ⑪H28 基準相当 日射取得型 PCM15～20℃ 間歇運転 暖房設定温度 20℃

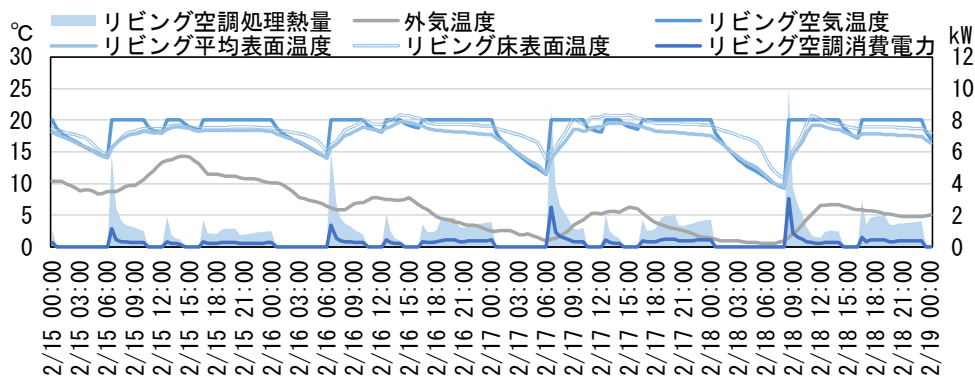


図 7.3.23 計算結果 ⑫H28 基準相当 日射取得型 PCM17.5～22.5℃ 間歇運転 暖房設定温度 20℃

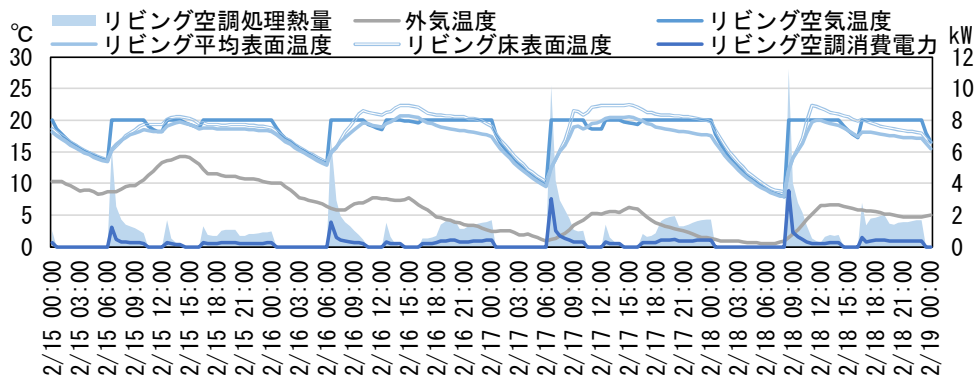


図 7.3.24 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20～25℃ 間歇運転 暖房設定温度 20℃

10

相変化温度範囲が暖房設定温度よりも低い 15～20℃のケース⑪では、PCM 導入による夜間のリビングの室温低下の抑制効果が見られる。

- 5 相変化温度範囲が暖房設定温度よりも高い 20～25℃のケース⑬では、ケース⑪と比較し、夜間のリビングの室温低下が大きく、朝の暖房開始時の暖房処理熱量が大きい。一方、夕方から夜間にかけての暖房処理熱量が抑制されるが、日中の取得日射熱を PCM に蓄熱した影響と推察される。

相変化ピーク温度が暖房設定温度に等しい相変化温度範囲 17.5～22.5℃のケース⑫では、ケース⑪と⑬の中間的な挙動を示す。

暖房期の比較的外気温の高い代表期間のリビングの温度、暖房処理熱量の計算結果を示す。

- 10 相変化温度範囲が 20～25℃と高めのケース⑬では、ケース⑪、⑫と比較し、11月4日や11月7日の日中の温度上昇が抑制されている。ケース⑬の PCM が、この条件において、この時期のオーバーヒート抑制に有効であることが確認される。



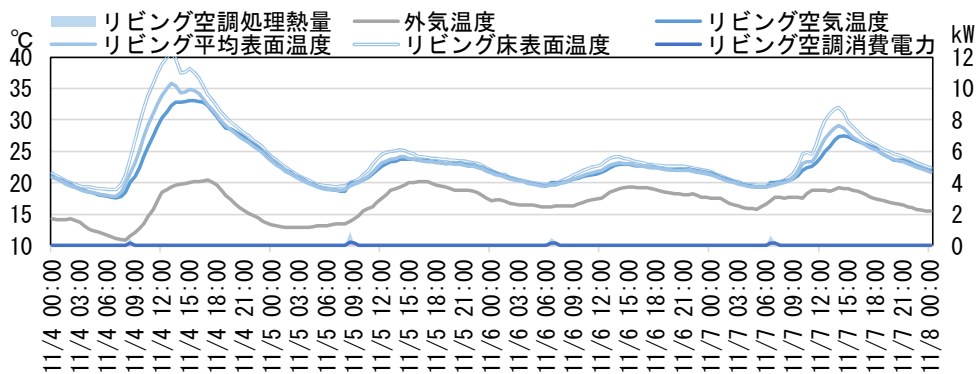


図 7.3.25 計算結果 ⑪H28 基準相当 日射取得型 PCM15~20°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C

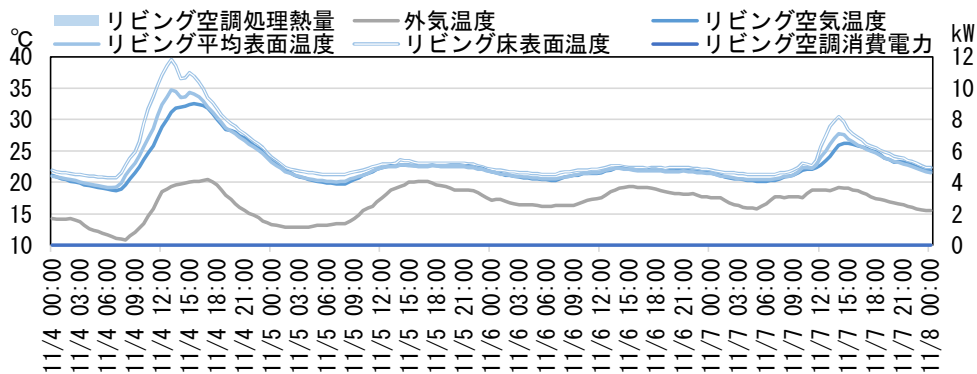


図 7.3.26 計算結果 ⑫H28 基準相当 日射取得型 PCM17.5~22.5°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C

5

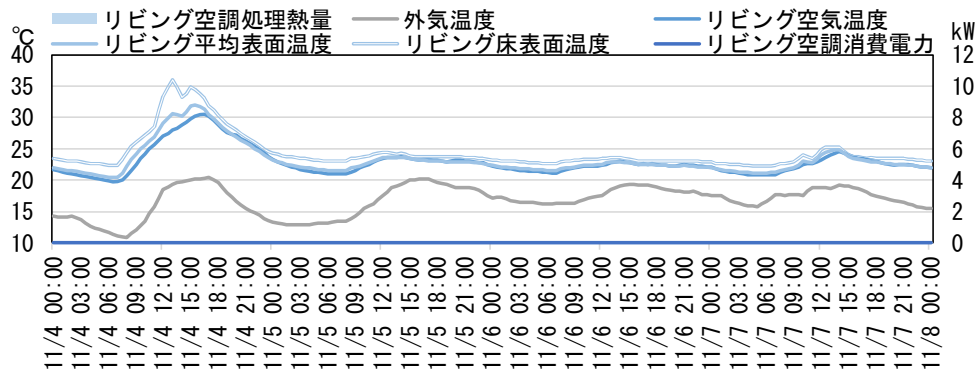


図 7.3.27 計算結果 ⑬H28 基準相当 日射取得型 PCM20~25°C 間歇運転 暖房設定温度 20°C

(2) 全ケースの計算結果

1) 暖房負荷発生期間

全ケースの計算結果における暖房処理熱量の発生期間を示す。

高断熱のケースでは、暖房運転スケジュールや暖房設定温度にもよるが、暖房開始が数日遅くなり、

5 終了時期が数日早くなる傾向が見られる。PCM の導入も、多少の影響を与える。

表 7.3.15 暖房負荷発生期間の計算結果

ケース	断熱性能	開口部	蓄熱	PCM		暖冷房		暖房負荷発生期間	
				相変化温度		運転スケジュール	暖房設定温度	開始	終了
				ピーク温度	温度幅				
①	H28	日射取得型	なし			間歇	20°C	11/4	4/21
②	H28	日射取得型	なし			間歇	20°C	11/4	4/21
③	H28	日射取得型	なし			連続	20°C	11/4	4/21
④	H28	日射取得型	なし			間歇	25°C	11/4	4/21
⑤	H28	日射遮蔽型	なし			間歇	25°C	11/4	4/21
⑥	高断熱	日射取得型	なし			間歇	20°C	11/10	4/20
⑦	高断熱	日射取得型	なし			連続	20°C	11/10	4/20
⑧	高断熱	日射取得型	なし			間歇	25°C	11/4	4/21
⑨	高断熱	日射遮蔽型	なし			間歇	25°C	11/4	4/21
⑩	H28	日射取得型	顕熱			間歇	20°C	11/4	4/21
⑪	H28	日射取得型	潜熱	17.5°C	5°C	間歇	20°C	11/4	4/21
⑫	H28	日射取得型	潜熱	20.0°C	5°C	間歇	20°C	11/5	4/21
⑬	H28	日射取得型	潜熱	22.5°C	5°C	間歇	20°C	11/5	4/21
⑭	H28	日射取得型	潜熱	22.5°C	5°C	連続	20°C	11/4	4/21
⑮	H28	日射取得型	潜熱	22.5°C	5°C	間歇	25°C	11/4	4/21
⑯	H28	日射取得型	潜熱	27.5°C	5°C	間歇	25°C	11/4	4/21
⑰	高断熱	日射取得型	潜熱	17.5°C	5°C	間歇	20°C	11/10	4/20
⑱	高断熱	日射取得型	潜熱	20.0°C	5°C	間歇	20°C	11/10	4/18
⑲	高断熱	日射取得型	潜熱	22.5°C	5°C	間歇	20°C	11/11	4/18
⑳	高断熱	日射取得型	潜熱	22.5°C	5°C	連続	20°C	11/10	4/20
㉑	高断熱	日射取得型	潜熱	22.5°C	5°C	間歇	25°C	11/4	4/21
㉒	高断熱	日射取得型	潜熱	27.5°C	5°C	間歇	25°C	11/4	4/21

## 2) 暖冷房処理熱量、エネルギー消費量、エネルギーコストの計算結果

### ① 暖房処理熱量の計算結果

暖房処理熱量の計算結果を示す。

断熱性能が高いケースで暖房処理熱量は小さくなる(①11.0GJ/年→⑥4.5GJ/年)。

5 暖冷房連続運転や 25℃設定のケースで暖房処理熱量は大きくなる(①11.0GJ/年→③20.0GJ/年、④21.0GJ/年)。

25℃設定では、日射遮蔽型の開口部のケースで暖房処理熱量が大きくなる(④21.0GJ/年→⑤27.9GJ/年)。

PCM 導入による暖房処理熱量の削減効果は、平成 28 年基準相当の間歇運転の暖房スケジュール  
10 で 1GJ/年程度(①11.0GJ/年→⑬10.2GJ/年)、連続運転で 2GJ/年程度(③20.0GJ/年→⑭17.8GJ/年)の  
効果が見られる。削減率は、それぞれ、7.5%と 11.0%である。断熱性能が高いケースでは、さらに削減  
率が大きく、17.3%(⑥4.5GJ/年→⑰3.7GJ/年)と 19.9%(⑦7.6GJ/年→⑳6.1GJ/年)となるが、蓄熱なし  
のケースの暖房処理熱量が小さいことが影響している。

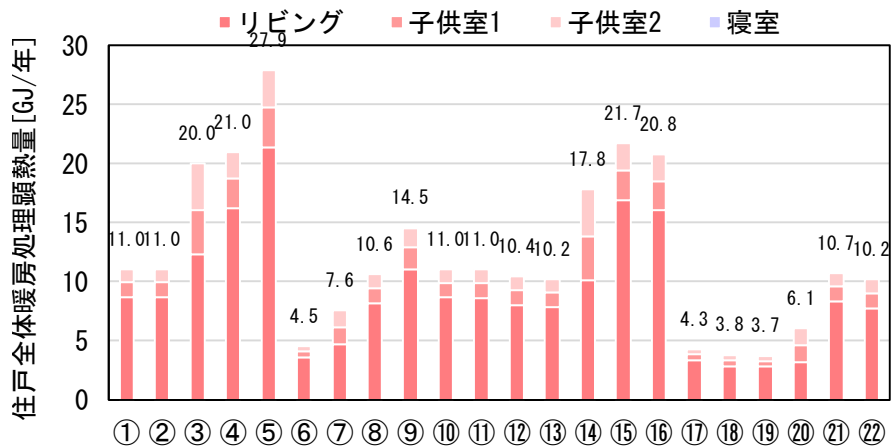


図 7.3.28 暖房処理熱量の計算結果

参考に、ケース①、③、⑥、⑦、⑬、⑭、⑰、⑱について、標準年拡張アメダス気象データ(2000年版)の東京の気象データを用いた暖房負荷結果結果を示す。

岡山より東京での削減率が大きいのは、月平均気温が低く暖房負荷が大きいと考えられる1~2月に、岡山より東京で平均気温が高く、日射量大きいことが影響していると推察される。

5

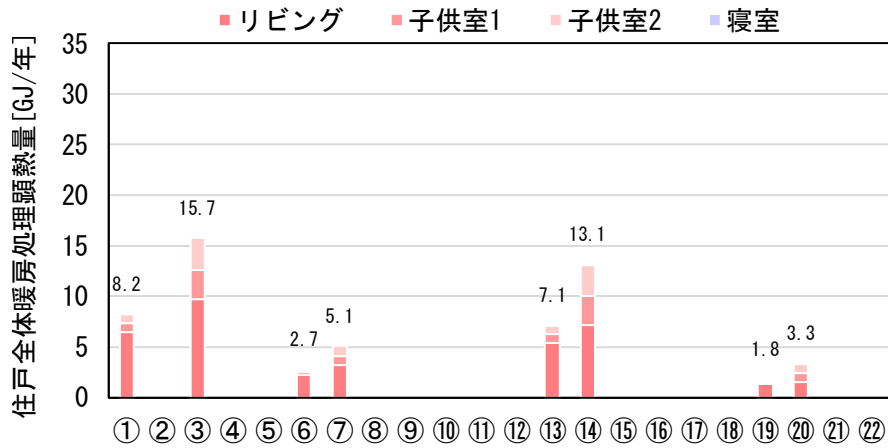


図 7.3.29 暖房処理熱量の計算結果 (参考: 東京)

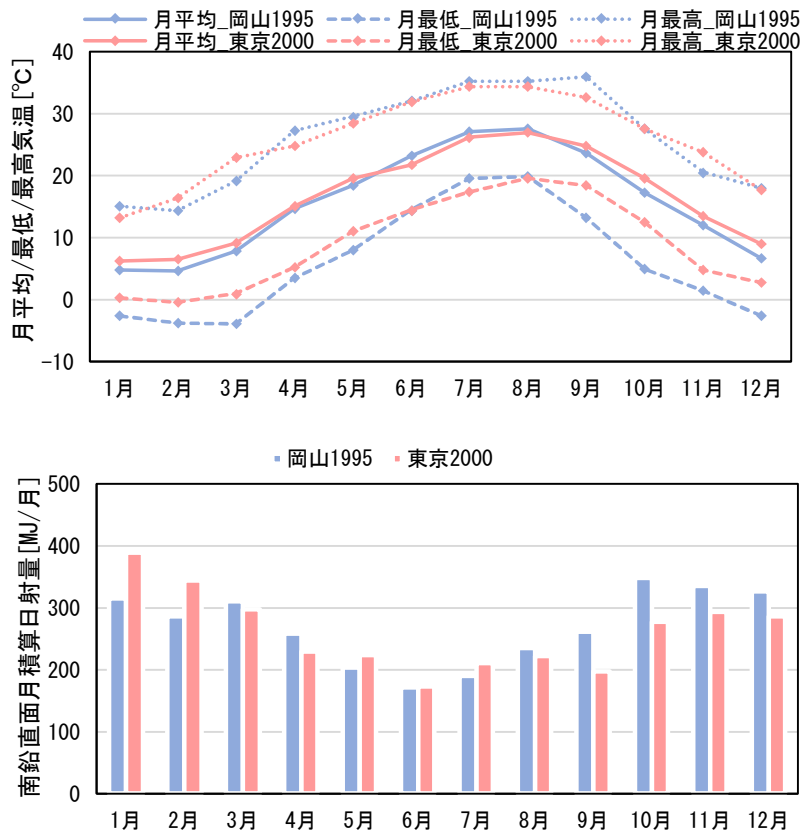


図 7.3.30 標準年拡張アメダス気象データ 1995年版岡山と2000年版東京の気象データ

10

② 冷房処理熱量の計算結果

冷房処理熱量の計算結果を示す。

冷房運転時間の長い連続運転のケース③⑦⑭⑳、日射遮蔽型の開口部のケース⑤⑨を除いては、ケース間の冷房処理熱量の差は小さい。ケーススタディの条件設定の範囲においては、PCMの導入により、冷房負荷が増大するという懸念はないことが確認される。

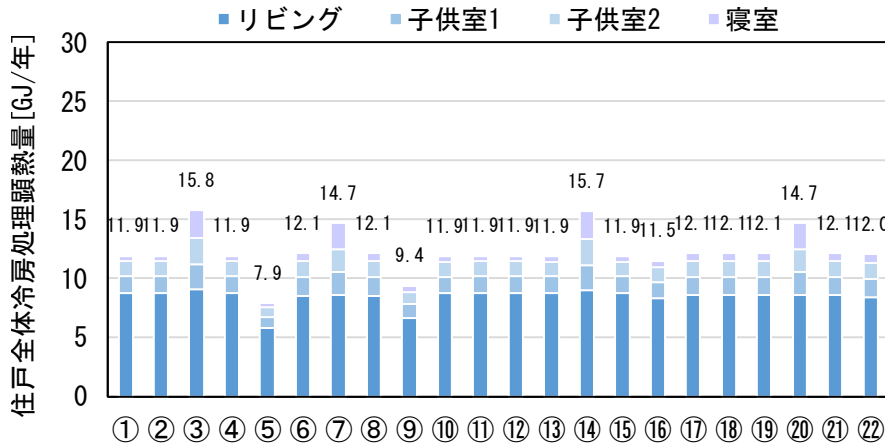


図 7.3.31 冷房処理熱量の計算結果

③ 暖房用一次エネルギー消費量の計算結果

暖房用一次エネルギー消費量の計算結果を示す。

暖房処理熱量と、近い傾向を示す。ただし、個室の暖房にヒーターを使用するケース②12.7GJ/年は、ケース①7.9GJ/年から大幅に暖房用エネルギー消費量が増加している。また、連続運転のケース③⑦⑭⑳では、エアコンの効率の低い低負荷での運転時間が長く、他のケースと比較して、暖房負荷に対する暖房用一次エネルギーが大きい結果となっている。

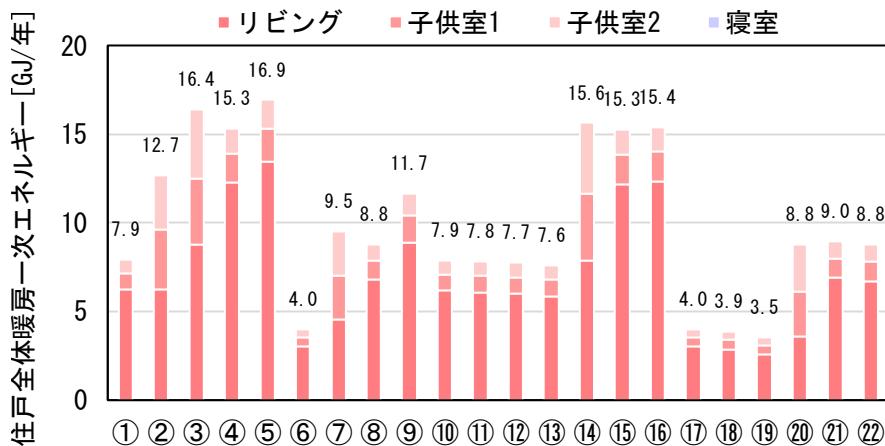
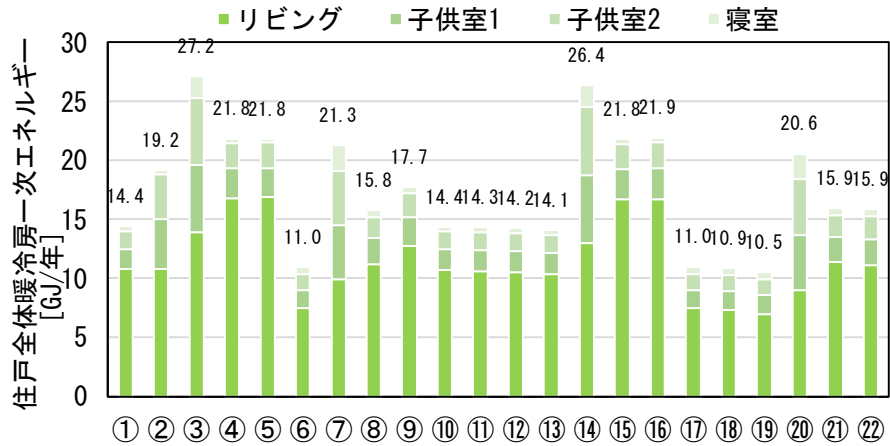


図 7.3.32 暖房用一次エネルギー消費量の計算結果

④ 暖冷房用一次エネルギー消費量の計算結果

暖冷房用一次エネルギー消費量の計算結果を示す。

ケース間の大小関係は、暖冷房用一次エネルギー消費量と、比較的近い傾向を示す。



5

図 7.3.33 暖冷房用一次エネルギー消費量の計算結果

⑤ 年間最大電力使用量の計算結果

年間最大電力使用量の計算結果を示す。

10 個室の暖房にヒーターを使用するケースや 25℃設定のケースで、年間最大電力使用量は大きくなる(①5.5kW→②8.8kW、④8.4kW)。25℃設定の日射遮蔽型の開口部ケースで、更に年間最大電力使用量は大きくなる(④8.4kW→⑤9.3kW)。

暖冷房連続運転のケースで、年間最大電力使用量は小さくなる(①5.5kW→③2.4kW)。

15 PCM 導入の効果について、相変化温度が暖房設定温度以下のケースで、年間最大電力の低減が見られる(①5.5kW→⑩3.9kW、⑫4.9kW、⑬3.3kW→⑰2.4kW、⑱2.5kW)。

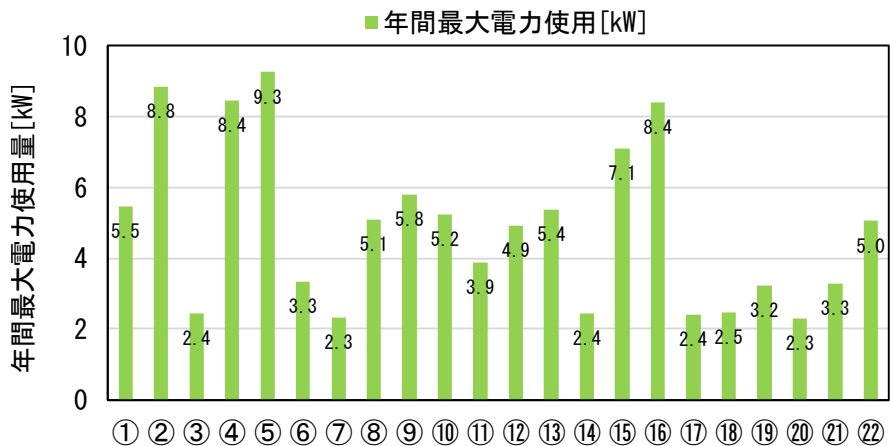


図 7.3.34 年間最大電力使用量の計算結果

⑥ 電力料金の計算結果

年間の電力料金の計算結果を示す。アンペア数に基づく契約と、ピーク電力に基づく契約の両方の計算結果を示す。

アンペア数に基づく契約と、ピーク電力に基づく契約の比較について、空調連続運転や一部の PCM 導入のケースでは、僅かにピーク電力に基づく契約の方が有利である。しかしながら、アンペア数に基づく契約の方が有利なケースが多いため、以降は、アンペア数に基づく契約について議論する。

高断熱のケースで、電力料金は低減される。高断熱のケースでは、暖房処理熱量や暖房用一次エネルギー消費量が低減されることが影響している。

個室の暖房にヒーターを使用するケース、暖冷房連続運転のケース、25℃設定のケースで、電力料金が增加する。これらのケースでは、ヒーターのケースを除き、暖房処理熱量が増加することが影響している。

PCM 導入が電力料金に与える影響は小さい。

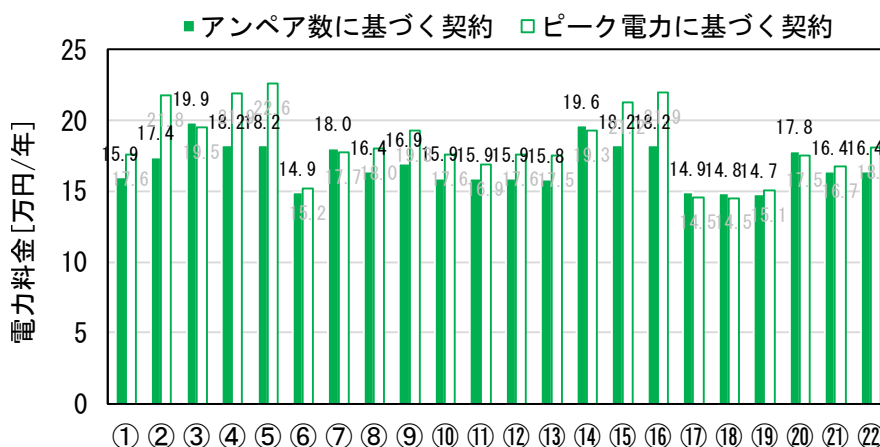


図 7.3.35 電力料金の計算結果

⑦ 住戸全体のエネルギー消費量

PCM 導入による一次エネルギー消費量削減効果を、住戸全体の一次エネルギー消費量と比較する。

以下に、住戸全体の一次エネルギー消費量の計算結果を示す。熱負荷計算の暖冷房設備のエネルギー消費量は、本章における開口部が日射取得型、個室の暖房方式はエアコン、間歇運転の暖房スケジュールで、暖房設定温度 20℃のケーススタディ結果を用いている。PCM ありは、相変化温度ピーク温度 22.5℃の結果を用いている。暖冷房設備および暖冷房設備以外のエネルギー消費量は、いわゆる省エネルギー基準 WEB プログラムとして住宅の評価に適用されている「エネルギー消費性能計算プログラム(住宅版)」<sup>11</sup>を用いて算出した。

PCM 導入の効果と比較を行うため、WEB プログラムでは、デフォルトの設定値のほか、デフォルト設定から、以下の変更を行った場合の計算を行った。熱負荷計算の暖冷房設備のエネルギー消費量を用いたケースでは、暖冷房設備以外のエネルギー消費量は、WEB プログラムのデフォルトの設定値

での計算結果を用いている。

- ・太陽熱温水器を導入した場合<sup>1</sup>
- ・太陽光発電設備を導入した場合<sup>2</sup>

5 本検討の条件では、住戸全体の一次エネルギー消費量のうち大きな割合を占めるのは給湯設備や家電等のその他の設備であり、熱負荷計算の暖冷房設備の一次エネルギー消費量が、住戸全体の一次エネルギー消費量に占める割合は比較的小さい。効率的に住戸全体のエネルギー消費量を削減するためには、屋根には太陽熱温水器や太陽光発電設備を導入することが望ましいと推察される。

10 WEB プログラムと熱負荷計算の暖冷房設備の一次エネルギー消費量に差があるのは、熱負荷計算プログラムの差、エアコンの計算方法の差、断熱性能や日射熱取得に関する設定の差等の影響と推察される。

15 PCM 導入による一次エネルギー消費量の削減効果は 0.3~0.5GJ/年程度である。これは、断熱性能を平成 28 年基準相当やそれを上回る断熱性能とし、暖房期に日射熱取得が十分あることを想定した設定とした上での PCM 導入効果である。高断熱で PCM を導入したケースでの、一次エネルギー消費量は、74.8GJ/年である。

以上より、断熱性能や暖房期の日射熱取得の確保は一次エネルギー消費量の削減に寄与するが、PCM が暖房負荷削減を発揮するような条件においては既に暖冷房設備の消費エネルギーは小さく、エネルギー性能の面での PCM 導入効果は限定的であることが確認される。

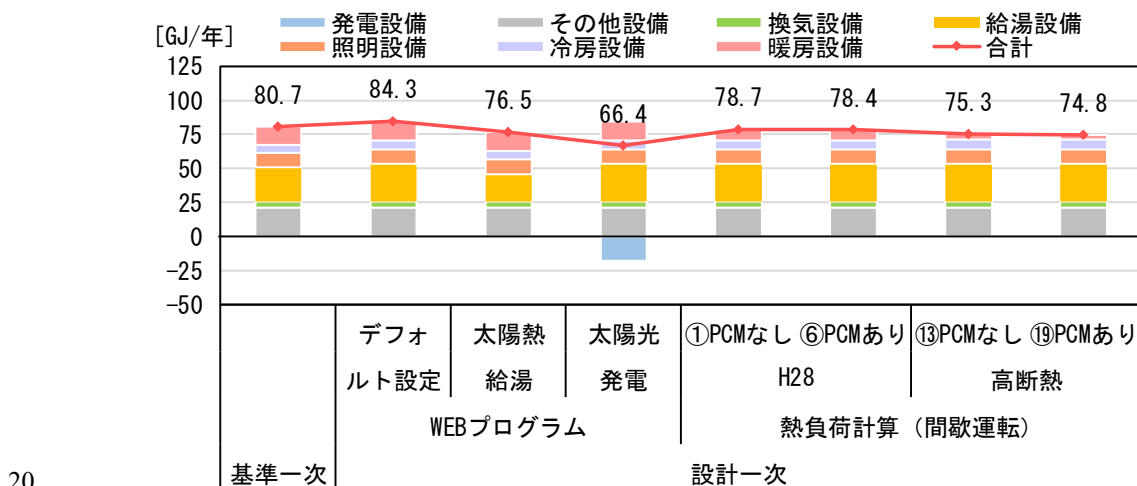


図 7.3.36 一次エネルギー消費量の計算結果

<sup>1</sup> デフォルトの設定からの変更点は、年間日射地域区分:A4 区分とし、液体集熱式太陽熱利用給湯設備について、太陽熱温水器を採用する、集熱部面積又は集熱貯湯部総面積:4 m<sup>2</sup>、集熱部の設置方位角:真南から東および西へ 15 度未満、集熱部の設置傾斜角:30 度とした点。

<sup>2</sup> デフォルトの設定からの変更点は、年間日射地域区分:A4 区分とし太陽光発電について、太陽光発電設備を設置する、方位の異なるパネルの面数:1、パワーコンディショナの定格負荷効率の入力:入力しない、太陽電池アレイのシステム容量:5kW、太陽電池アレイの種類:結晶シリコン系太陽電池、太陽電池アレイの設置方式:屋根置き型、パネル設置方位角:真南から東および西へ 15 度未満、パネル設置傾斜角:30 度とした点。



### 3) 温熱環境の計算結果

#### ① 健康リスク要因の評価指標の計算結果

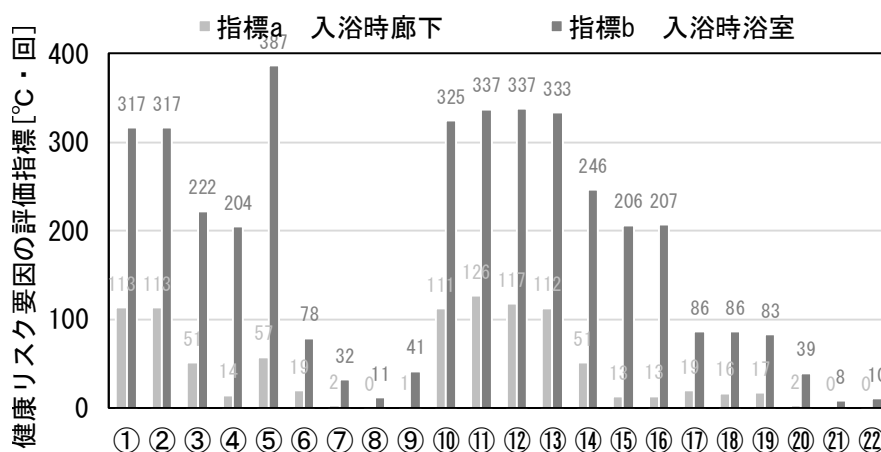
健康リスク要因の評価指標の計算結果を示す。値が大きい方が、暖房期に室温が低温になる、健康性の面で好ましくないケースとみなされる。

5 入浴時の廊下に関する指標 a と、浴室に関する指標 b は、絶対値には差があるものの、ケース間の指標の値の大小関係は、比較的近い傾向を示す。以下、指標 b について考察する。

断熱性能が高いケースで、指標の値は低下する。高断熱化に伴い、非暖房室である非居室の温熱環境も改善することが確認される。

10 25℃設定のケースで、指標の値は低下する。常時換気の上流側にあたる、暖房室の室温が上昇することで、下流側の非居室の環境も改善することが確認される。

日射遮蔽型の開口部のケースで、日射熱取得の低減に伴う室温低下の影響が見られ、指標の値が大きくなる。



15 図 7.3.37 健康リスク要因の評価指標の計算結果(指標 a: 入浴時廊下、指標 b: 入浴時浴室)

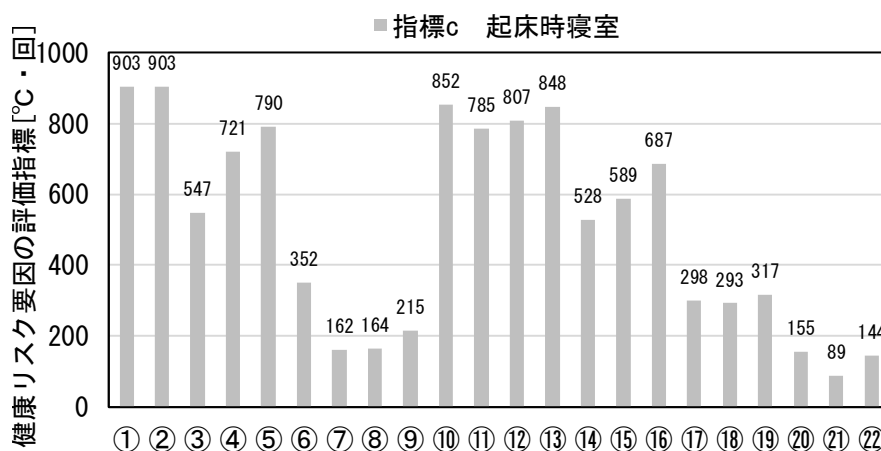


図 7.3.38 健康リスク要因の評価指標の計算結果(指標 c: 起床時寝室)

起床時の寝室に関する指標 c について、断熱性能が高いケースで、指標の値は低下する。高断熱化に伴い、非暖房室である寝室の温熱環境も改善することが確認される。

25℃設定のケースで、指標の値は低下する。寝室は非暖房室であるが、暖房室の室温の影響を受けているものと推察される。

- 5 日射遮蔽型の開口部のケースで、日射熱取得の低減に伴う室温低下の影響が見られ、指標の値が大きくなる。

就寝中の寝室に関する指標 d と、トイレに関する指標 e は、値に多少の差があるものの、近い傾向を示す。以下、指標 d について考察する。

- 10 断熱性能が高いケースで、指標の値は低下する。高断熱化に伴い、非暖房室の温熱環境も改善することが確認される。

25℃設定のケースで、指標の値は低下する。寝室は非暖房室であるが、暖房室の室温の影響を受けているものと推察される。

- 15 日射遮蔽型の開口部のケースで、日射熱取得の低減に伴う室温低下の影響が見られ、指標の値が大きくなる。

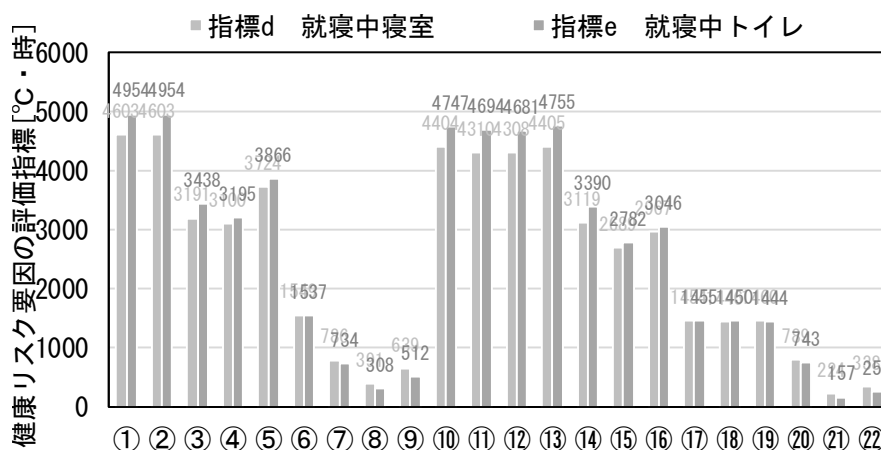


図 7.3.39 健康リスク要因の評価指標の計算結果(指標 d: 就寝中寝室、指標 e: 就寝中トイレ)

- 20 ② 暖かさの得点の計算結果

暖かさの得点の計算結果を示す。暖かさの得点が高い方が、暖かさの主観的評価に優れた、好ましいケースとみなされる。

断熱性能が高いケースで、暖かさの得点が向上する(①11.5点→⑥13.2点)。

25℃設定のケースで、暖かさの得点が向上する。特に、断熱性能が高いケースでの変化が大きい

- 25 (①11.5点→④13.0点、⑥13.2点→⑧15.6点)。

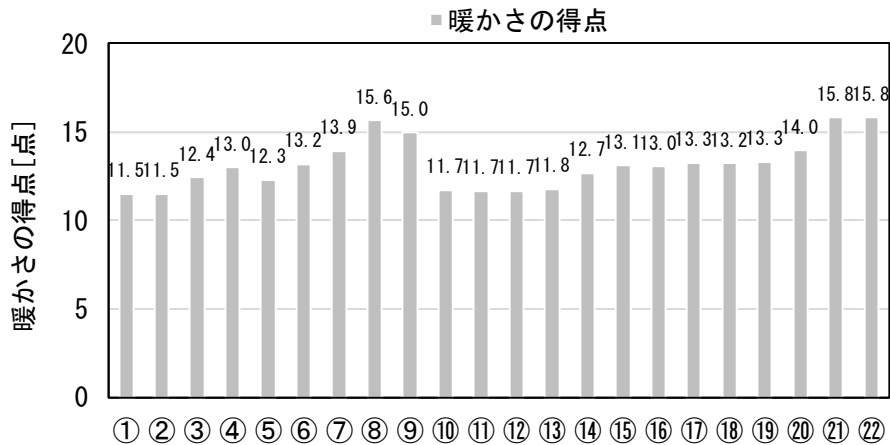


図 7.3.40 暖かさの得点の計算結果

③ リビングの暖房期在室時の平均 PPD の計算結果

5 リビングの暖房期在室時の平均 PPD の計算結果を示す。値が小さい方が、リビングの温熱快適性に優れた、好ましいケースとみなされる。PPD は代謝量や着衣量の設定条件等の影響を受けるが、ここで示す結果は着衣量 1.0Clo、安静状態 1.0Met を想定している点(表 7.3.12)に留意が必要である。

暖房設定温度 20℃では、断熱性能が高いケースで PPD は小さい値を示す(①27.9%→⑥22.5%)。

25℃設定のケースで PPD は小さい値を示す(①27.9%→④12.3%、⑥22.5%→⑧16.2%)。

10 適切な相変化温度の PCM 導入による、PPD の低減効果が確認される(①27.9%→⑬24.8%、⑥22.5%→⑲18.7%)。特に、設定温度 25℃のケースで、PCM 導入による PPD の低減効果が大きい(④12.3%→⑮7.2%、⑯8.4% ⑧16.2%→⑳10.9%、㉑10.1%)。これは、PCM が日中のオーバーヒートの防止に効果を発揮しているものと推察される。

日射遮蔽型の開口部のケースでは、日中のオーバーヒートが抑制されるために温度安定性が得られ、

15 PPD は小さい値を示す(④12.3%→⑤7.1% ⑧16.2%→⑨8.1%)。

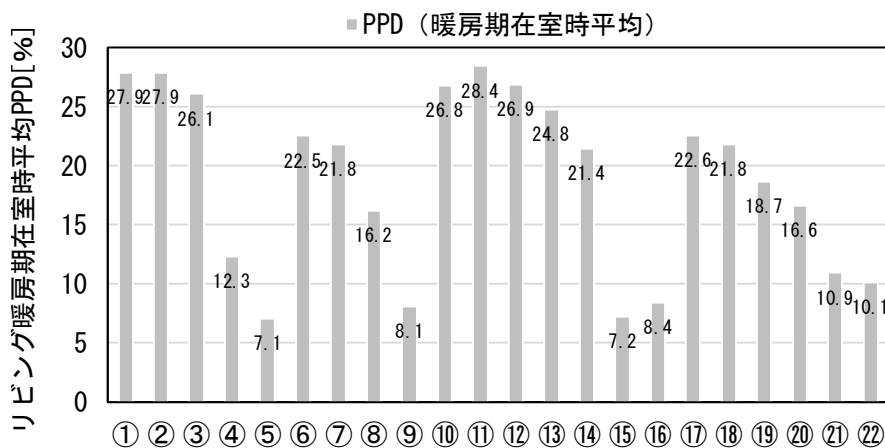


図 7.3.41 リビングの暖房期在室時の平均 PPD の計算結果

④リビングの暖房期在室時の床表面温度が許容可能／快適な床温度範囲を外れる時間割合の計算結果

リビングの暖房期在室時の床表面温度が許容可能な床温度範囲(室内履着用時)と快適な床温度範囲(裸足時)を外れる時間割合の計算結果を示す。値が小さい方が、リビングの温熱快適性に優れた、好ましいケースとみなされる。

暖房設定温度 20℃では、断熱性能が高いケースで小さい値を示す(許容可能①44%→⑥21%、快適①80%→⑥69%)。平成 28 年基準相当では、25℃設定のケースで小さい値を示す(許容可能①44%→④23%、快適①80%→④60%)。

25℃設定のケースで、適切な相変化温度のPCM導入による、低減効果が確認される。特に、許容可能な範囲を外れる時間割合の低減は平成 28 年基準相当で大きく、快適な範囲を外れる時間割合の低減は高断熱で大きい(許容可能①44%→⑮4%、⑯9%、快適⑥69%→⑳14%、㉑17%)。

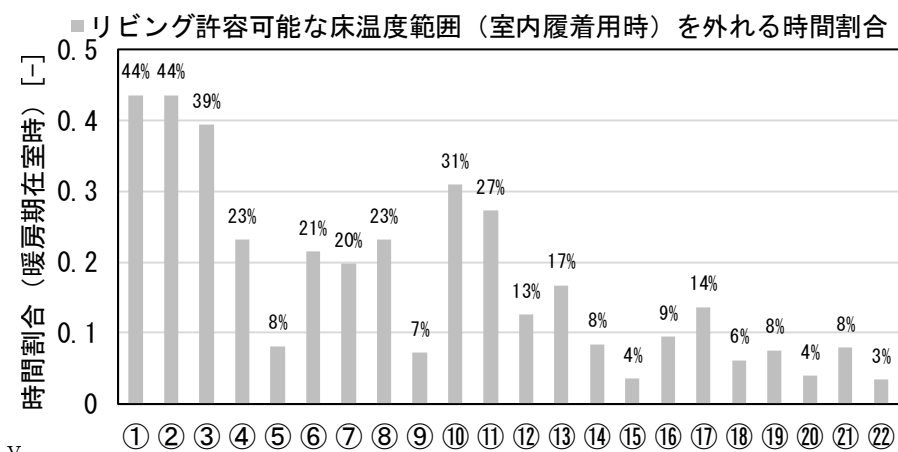


図 7.3.42 リビングの暖房期在室時の床表面温度が許容可能(室内履着用時)な床温度範囲を外れる時間割合(暖房期在室時)の計算結果

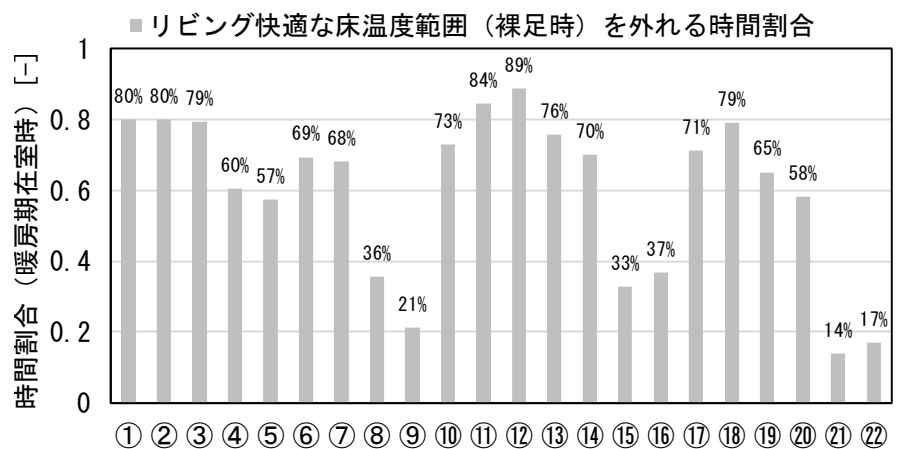
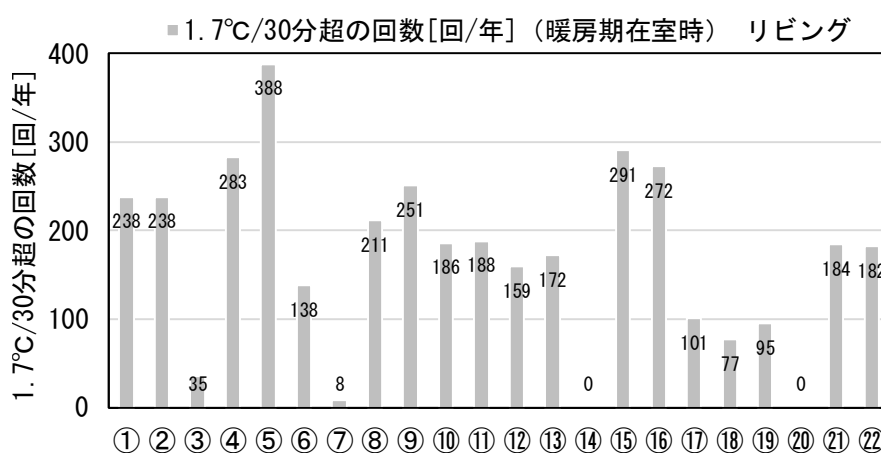


図 7.3.43 リビングの暖房期在室時の床表面温度が快適(裸足時)な床温度範囲を外れる時間割合(暖房期在室時)の計算結果

⑤ リビングの暖房期在室時の 1.7°C/30 分超の回数の計算結果

リビングの暖房期在室時の作用温度の変化が、1.7°C/30 分を超える回数の計算結果を示す。1.7°C/30 分という閾値は、ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 に示された、許容可能な非定常の作用温度を参考に行っている。値が小さい方が、リビングの温熱環境が安定した、好ましいケースとみなされる。

- 5 断熱性能が高いケースで、1.7°C/30 分超の回数は小さい値を示す(①238 回→⑥138 回)。
- 暖冷房連続運転のケースで、1.7°C/30 分超の回数は小さい値を示す(①238 回→③35 回)。
- 25°C設定のケースで、1.7°C/30 分超の回数は大きい値を示す(①238 回→④283 回)。
- 日射遮蔽型の開口部のケースで、1.7°C/30 分超の回数は大きい値を示す(④283 回→⑤388 回)。



10

図 7.3.44 リビングの暖房期在室時の作用温度の変化が 1.7°C/30 分を超える回数の計算結果

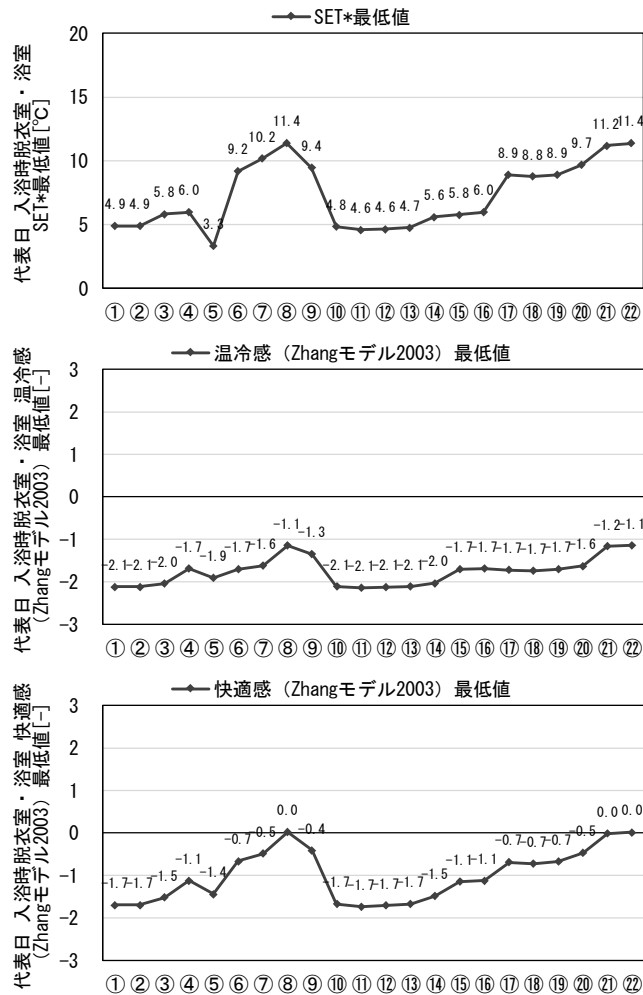
⑥ 代表日の入浴時の脱衣室・浴室での温冷感・快適感の計算結果

人体モデルおよび Zhang モデル(2003)を用いた、代表日の入浴時の SET\*、温冷感、非定常過程における快適感の最低値の計算結果を示す。入浴開始時に、裸体で、5 分間脱衣室に、その後 5 分間浴室に在室することを想定し、その間の各指標の最低値を採用している。

- 5 平成 28 年度基準相当のケースでは、入浴開始時に、5℃程度の SET\*に曝されることとなる(① 4.9℃)。高断熱のケースでは、10℃程度に改善される(⑥ 9.2℃)。

平成 28 年度基準相当のケース①では、入浴開始時に、温冷感が-2.1 程度の値を取る。⑥高断熱のケースでは、-1.7 程度となる。

- 10 平成 28 年度基準相当のケースでは、入浴開始時に、快適感が-1.7 程度の値を取る。高断熱のケース⑥では、-0.7 程度となり、改善が見られる。



15

図 7.3.45 代表日の入浴時の脱衣室・浴室での SET\*、温冷感、快適感の最低値

#### 4) エネルギーと温熱環境の計算結果の関係

##### ① リビングの快適性とエネルギー消費量

快適性の指標としてのリビング暖房期在室時平均 PPD を横軸に、エネルギー性能の指標としての住戸全体の暖房一次エネルギー消費量を縦軸に取った散布図を示す。横軸、縦軸ともに、値が小さい方が好ましいケースである。PPD は代謝量や着衣量の設定条件等の影響を受けるが、ここで示す結果は着衣量 1.0Clo、安静状態 1.0Met を想定している点(表 7.3.12)に留意が必要である。

ケース①を基準とすると、②ヒーターや③連続運転では、平均 PPD の値の変化はない、もしくは小さいが、エネルギー消費量は増加する。ケーススタディの結果より、暖房設定温度 20℃では PMV が負値を取るため、暖房設定温度を高め設定した④25℃設定では、大幅に平均 PPD の値は改善するものの、エネルギー消費量は大幅に増加する。

ケース⑥高断熱は、ケース①平成 28 年度基準相当と比較すると、平均 PPD が改善されるとともに、エネルギー消費量が半分以下に削減される。しかしながら、平均 PPD は 22.5%と比較的大きな値を取るため、⑧25℃設定とすると、エネルギー消費量は増加するものの、平均 PPD は 16%程度となる。⑧高断熱 25℃設定では、④平成 28 年基準相当 25℃設定よりも、平均 PPD が大きい値を取る。これは、断熱性能の高い⑧高断熱 25℃設定では、日中にオーバーヒートが生じやすく、暑くて不快という状態が発生するためと推察される。⑳PCM(相変化温度範囲 20~25℃)や㉑PCM(相変化温度範囲 25~30℃)では、PCM 導入により、日中のオーバーヒートが抑制されるため、平均 PPD は 10%程度まで改善される。このとき、暖房用一次エネルギー消費量は、①平成 28 年基準相当 20℃設定からの増加を抑えつつ、快適感は大幅に改善される。

開口部を日射遮蔽型とするケース⑤、⑨では、日射取得型のケース④、⑧と比較し、それぞれ、平均 PPD は小さくなり、PCM を導入するケース⑱、⑳と同程度以上の快適性となる。一方、暖房用一次エネルギー消費量は、日射取得型のケースと比較して増加する。

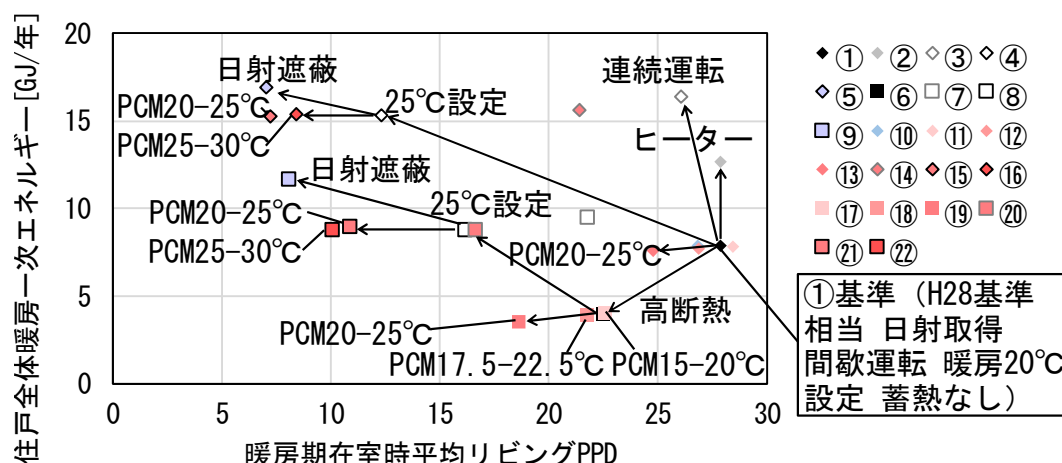


図 7.3.46 リビングの快適性と暖房用エネルギー消費量の関係

快適性の指標としてのリビング暖房期在室時平均 PPD を横軸に、エネルギー性能の指標としての住戸全体の暖冷房一次エネルギー消費量を縦軸に取った散布図を示す。横軸、縦軸ともに、値が小さい方が好ましいケースである。PPD は代謝量や着衣量の設定条件等の影響を受けるが、ここで示す結果は着衣量 1.0Clo、安静状態 1.0Met を想定している点(表 7.3.12)に留意が必要である。

5 縦軸を暖房一次エネルギー消費量とした場合と、近い傾向を示す。

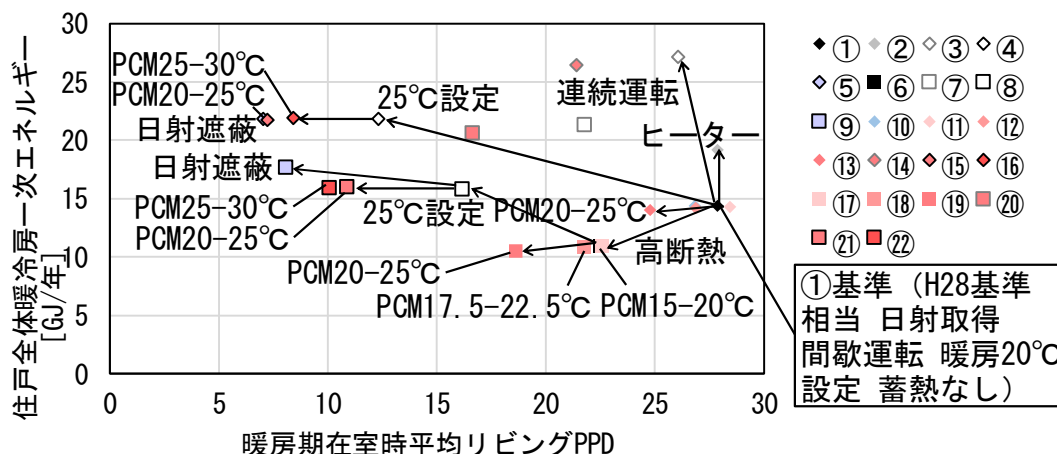


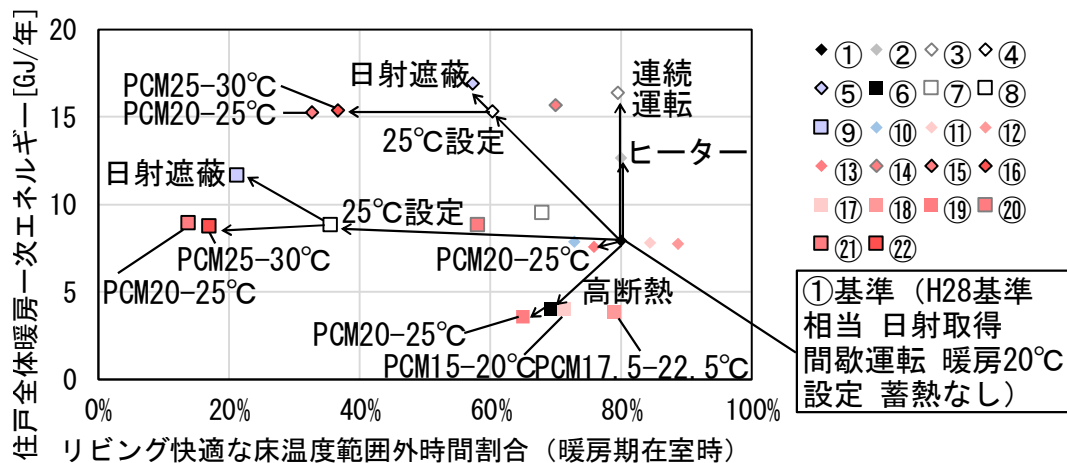
図 7.3.47 リビングの快適性と暖冷房用エネルギー消費量の関係

10 快適性の指標としてのリビング暖房期在室時の床表面温度快適な床温度範囲(裸足時 23~28°C)を外れる時間割合を横軸に、エネルギー性能の指標としての住戸全体の暖房一次エネルギー消費量を縦軸に取った散布図を示す。横軸、縦軸ともに、値が小さい方が好ましいケースである。

ケース①を基準とすると、②ヒーターや③連続運転では、横軸の値の変化はない、もしくは小さいが、エネルギー消費量は増加する。ケーススタディの結果より、暖房設定温度 20°C では PMV が負値を取るため、暖房設定温度を高め設定した④25°C設定では、横軸の値は改善するものの、エネルギー消費量は大幅に増加する。

ケース⑥高断熱は、ケース①平成 28 年度基準相当と比較すると、横軸の値が改善されるとともに、エネルギー消費量が半分程度に削減される。しかしながら、横軸の値は 69%と比較的大きな値を取る。⑧25°C設定とすると、エネルギー消費量は増加するものの、横軸の値は 36%程度となる。⑳PCM(相変化温度範囲 20~25°C)や㉑PCM(相変化温度範囲 25~30°C)では、PCM 導入により、床表面温度が安定し、横軸の値は 20%未満まで改善される。このとき、暖房用一次エネルギー消費量は、①平成 28 年基準相当 20°C設定からの増加を抑えつつ、快適感は大幅に改善される。





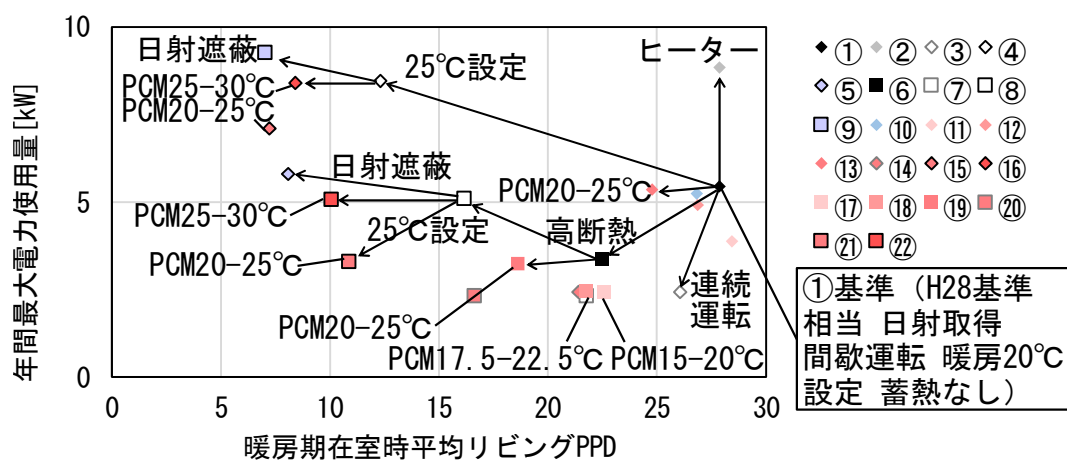
② リビングの快適性と年間最大電力使用量

5 快適性の指標としてのリビング暖房期在室時平均 PPD を横軸に、エネルギー性能の指標としての年間最大電力使用量を縦軸に取った散点図を示す。横軸、縦軸ともに、値が小さい方が好ましいケースである。PPD は代謝量や着衣量の設定条件等の影響を受けるが、ここで示す結果は着衣量 1.0Clo、安静状態 1.0Met を想定している点(表 7.3.12)に留意が必要である。

ケース①を基準とすると、②ヒーターでは、平均 PPD の値の変化はないが、年間最大電力使用量は増加する。③連続運転では、平均 PPD の値の変化は多少小さくなり、年間最大電力使用量は大幅に低減される。④25°C設定では、大幅に平均 PPD の値は改善するものの、年間最大電力使用量は増加する。

ケース⑥高断熱は、ケース①平成 28 年度基準相当と比較すると、平均 PPD が改善されるとともに、年間最大電力使用量も削減される。

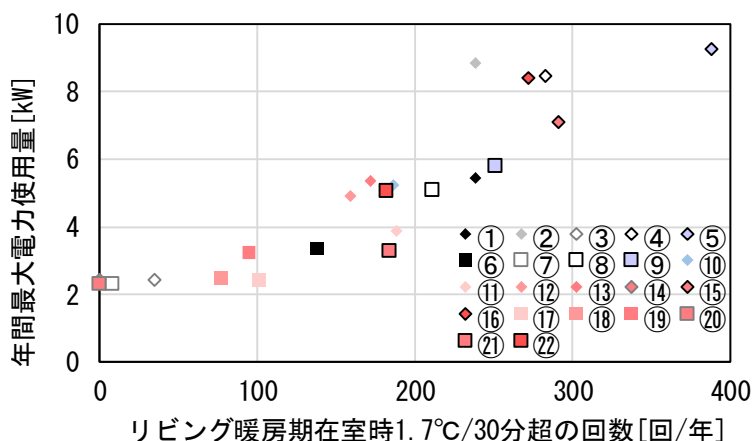
15



③ リビングの温度の安定性と年間最大電力使用量

温度安定性の指標として暖房期在室時のリビング作用温度の変化が 1.7°C/30 分を超える回数を横軸に、エネルギー性能の指標として年間最大電力使用量を縦軸に取った散布図を示す。横軸、縦軸ともに、値が小さい方が好ましいケースである。

- 5 概ね、横軸の値が小さくリビングの室温が安定しているケースで、縦軸の値も小さく、年間最大電力使用量も小さい傾向が確認される。縦軸、横軸の値ともに小さいケースは、暖冷房連続運転のスケジュールのケースである。



10 図 7.3.50 リビングの快適性と年間最大電力使用量の関係

④ 代表日の入浴時の脱衣室・浴室での温冷感・快適感とエネルギー消費量

- 代表日の入浴時の脱衣室・浴室での温冷感・快適感を横軸に、エネルギー性能の指標としての住戸全体の暖房一次エネルギー消費量を縦軸に取った散布図を示す。横軸には、人体モデルおよび Zhang モデル(2003)を用いた、代表日の入浴時の SET\*、温冷感、非定常過程における快適感の最低値の計算結果を示す。入浴開始時に、裸体で、5 分間脱衣室に、その後 5 分間浴室に在室することを想定し、その間の各指標の最低値を採用している。横軸は、温冷感 0 に近づく程、快適感は大い程、好ましいケースである。SET\*については、文献<sup>12</sup>において、空気線図上の冬期の快適範囲の SET\*の下限が 20°Cであることや、ASHRAE の定めた快適域が 22.2~25.6°Cであることが示されている。ケーススタディにおける冬期の代表日の入浴時の脱衣室・浴室の SET\*の最低値の計算結果については、SET\*が高い程、好ましいケースと言える。縦軸は、値が小さい方が好ましいケースである。

- 横軸を SET\*、温冷感、快適感のいずれとした場合でも、日射遮蔽のケース⑤⑨や連続運転のケース③⑦⑭⑳を除き、大きく、平成 28 年基準相当のケース群と高断熱のケース群に分けられる。各郡とも、SET\*、温冷感、快適感と暖房一次エネルギー消費量に正の相関が見られる。暖房設定温度 25°Cのケースで、非暖房室である脱衣室・浴室の温度も上昇していることが影響していると推察される。高断熱のケース群の方が、SET\*、温冷感、快適感の改善に要するエネルギー消費量の増加が小さい傾向が確認される。

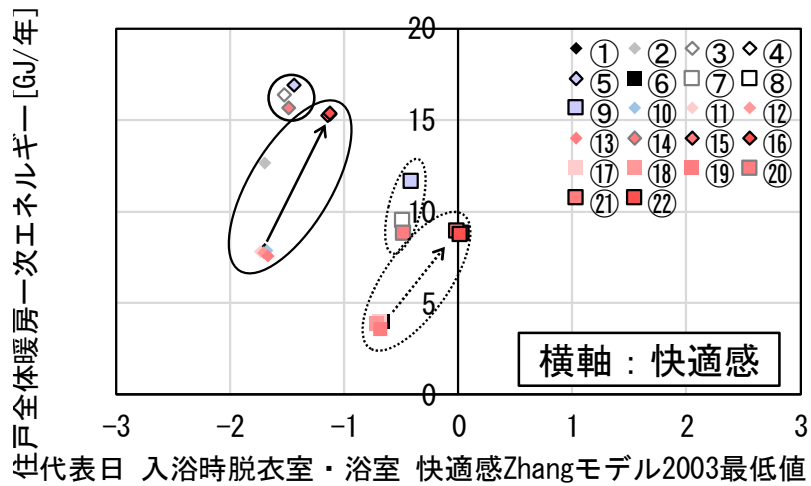
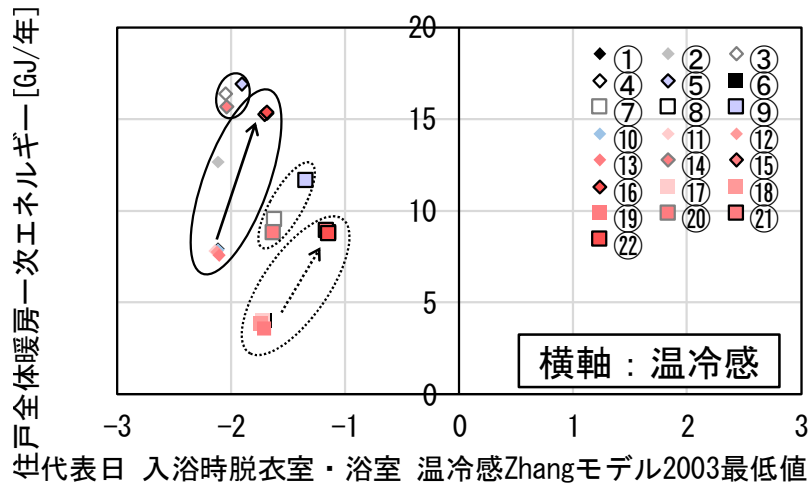
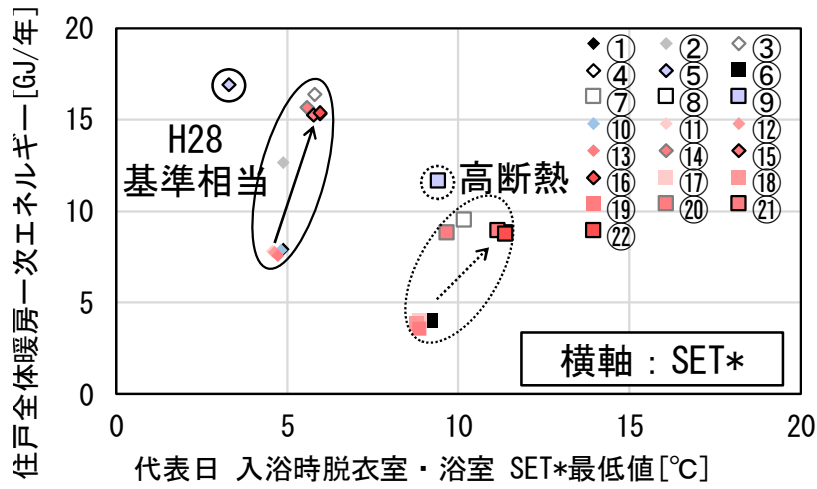


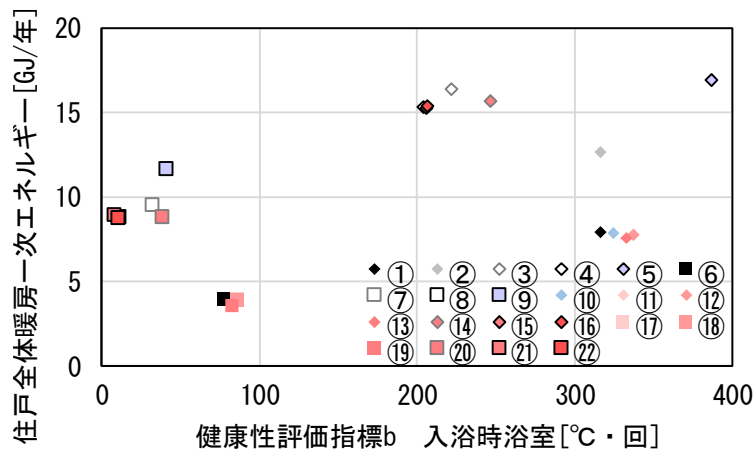
図 7.3.51 代表日の入浴時の脱衣室・浴室での温冷感・快適感と暖房用エネルギー消費量の関係

⑤ 健康リスク要因の評価指標とエネルギー消費量

健康リスク要因の評価指標を横軸に、エネルギー性能の指標としての住戸全体の暖房一次エネルギー消費量を縦軸に取った散布図を示す。横軸、縦軸ともに、値が小さい方が好ましいケースである。

入浴時の浴室に関する指標 **b** について、リビングの蓄熱性能の影響は小さい。ヒーターのケース②、日射遮蔽のケース⑤、⑨を除き、断熱性能が等しければ、指標 **b** と一次エネルギー消費量は相関が強い。エネルギー消費量の増加を抑えつつ指標の改善を図るには、断熱性能の向上が必要である。

就寝中の寝室に関する指標 **d** について、ヒーターのケース②、日射遮蔽のケース⑤、⑨を除き、断熱性能が等しければ、指標 **d** と一次エネルギー消費量は相関が強い。エネルギー消費量の増加を抑えつつ指標の改善を図るには、断熱性能の向上が必要である。⑮PCM(相変化温度範囲 20~25°C) 25°C設定で、④25°C設定や⑯PCM(相変化温度範囲 25~30°C) 25°C設定より指標の値が改善されているのは、暖房設定温度より多少低い温度域で相変化する PCM がリビングの夜間の冷え込み抑制に効果を発揮しているためと推察される。



15 図 7.3.52 健康リスク要因の評価指標と暖房用エネルギー消費量の関係(指標 b:入浴時浴室)

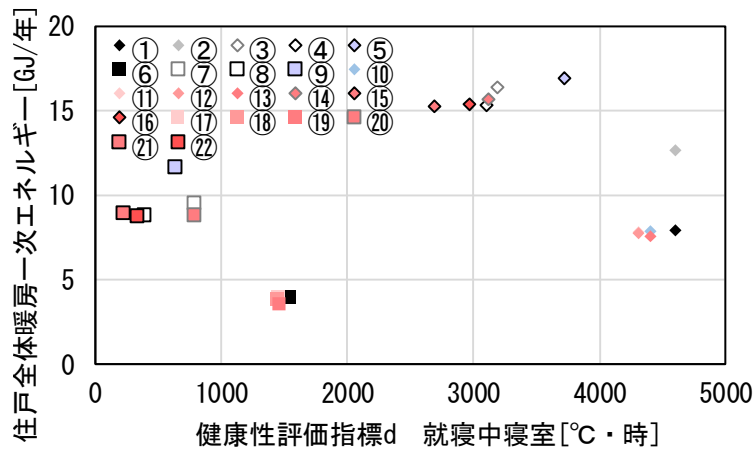


図 7.3.53 健康リスク要因の評価指標と暖房用エネルギー消費量の関係(指標 d:就寝中寝室)

⑥ 暖かさの得点とエネルギー消費量

健康性の指標としての暖かさの得点を横軸に、エネルギー性能の指標としての住戸全体の暖房一次エネルギー消費量を縦軸に取った散布図を示す。横軸は値が大きく、縦軸は値が小さい方が好ましいケースである。

- 5 暖かさの得点について、リビングの蓄熱性能の影響は小さい。ヒーターのケース②、連続運転のケース③、⑦、⑭、⑳、日射遮蔽のケース⑤、⑨を除き、断熱性能が等しければ、暖房用暖かさの得点と一次エネルギー消費量は相関が強い。エネルギー消費量の増加を抑えつつ暖かさの得点を高めるには、断熱性能の向上が必要である。

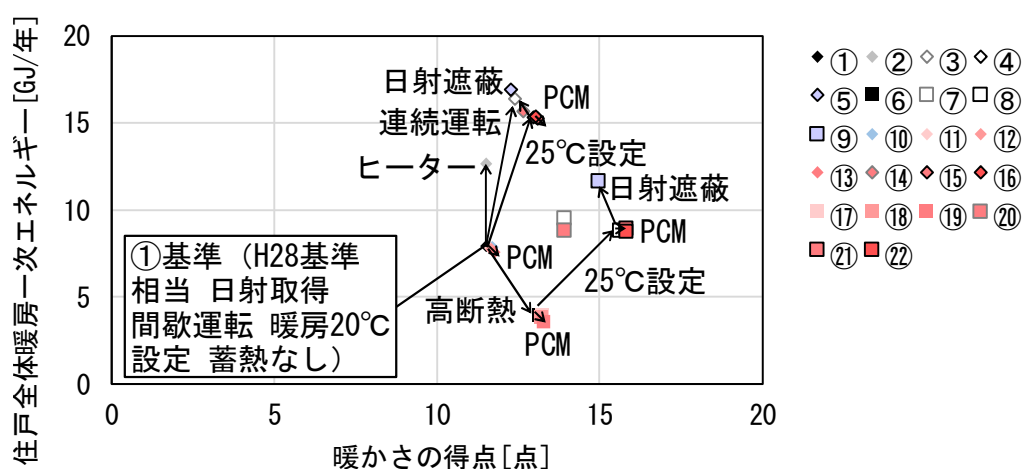


図 7.3.54 暖かさの得点と暖房用エネルギー消費量の関係

<sup>1</sup> [http://www.kenken.go.jp/becc/house\\_h25.html](http://www.kenken.go.jp/becc/house_h25.html)  
<sup>2</sup> 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  
<sup>3</sup> Vasken Dermardiros, Yuxiang Chen, Andreas K. Athienitis: Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications, Energy Procedia 78, pp. 1690-1695, 2015  
<sup>4</sup> 田辺新一, 鍵屋慎一, 松前和則: サーマルマネキンによる各種暖房方式の快適性と投入熱量の評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 473-476, 2008. 8  
<sup>5</sup> 経済産業省・資源エネルギー庁: 省エネ性能カタログ 2014 年冬版  
<sup>6</sup> 早稲田大学理工学部建築学科田辺新一研究室, ユーザーズガイド温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデル, 2001. 3  
<sup>7</sup> 室恵子: 住宅における暖冷房機器の使用および着衣量に関する実態調査, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 56 号, pp. 253-258, 2018. 2  
<sup>8</sup> 田中俊六, 武田仁, 岩田利枝, 土屋喬雄, 寺尾道仁, 秋元 孝之: 最新建築環境工学 改訂 4 版, 井上書院, p. 50, 2014. 2  
<sup>9</sup> ANSI/ASHRAE Standard 55-2010  
<sup>10</sup> B.W. Olesen: Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet, 1997  
<sup>11</sup> <http://house.app.lowenergy.jp/>  
<sup>12</sup> 空気調和・衛生工学会: 快適な温熱環境のメカニズム, 1997. 12

## 第8章 住宅性能に関する試行的な評価

## 8. 住宅性能に関する試行的な評価

### 8.1 概要

前章では、PCM 導入有無等の条件で、住宅全体の計算を行い、その結果を健康性・快適性・エネルギー性能の観点から評価を行った。

5 本章では、前章での計算結果を用い、住宅性能の評価について、更に発展的な評価を行うための提案を試行的に行う。

まず、エネルギー性能に関する2項目、温熱快適性に関する3項目、健康性に関する3項目の合計8項目を評価項目として抽出した。更に、既往研究をもとに8項目の重み付けを行う方法等を検討し、ひとつの指標として集約する方法を提案した。

10 本章における提案内容は、ひとつの指標に集約する基本的な手法であり、集約の際に使用する項目や重み付けの詳細な検討は今後の課題である。

### 8.2 温熱環境とエネルギー性能の統合的な評価方法の提案

15 住宅の温熱環境とエネルギー性能の統合的な評価方法の提案を行う。なお、ここでの目的は評価方法の提案であり、評価において考慮する項目、「良い」「悪い」の判断に用いる値、各項目の重み付け平均を算出する際に使用する重み付け割合については、見直しの余地がある。

#### 8.2.1 複数の指標を用いた評価

20 以下に、評価において考慮した項目、各項目の「良い」「悪い」の判断に用いる値の暫定的な案を示す。これらの見直しは、今後の課題である。

表 8.2.1 評価項目と得点化の際の基準値設定の例

		評価対象項目			基準値		
					良い	悪い	
エネルギー性能	省エネ	暖冷房一次エネルギー		[GJ/年]	10	30	
	ランニングコスト	電力料金		[円/年]	15万	20万	
快適性	リビング	全身	暖房期 在室時 リビング	平均 PPD	[%]	5	30
		足元		快適な床温度範囲 (裸足時)を 外れる時間割合	[%]	0	100
	入浴時	代表日 入浴時脱衣室・浴室 快適感 (Zhang モデル 2003) 最低値		[-]	0	-3	
健康性	入浴時	健康リスク	指標 b	[°C・回]	0	400	
	起床時	要因の評価	指標 c	[°C・回]	0	1000	
	就寝中	指標	指標 d	[°C・時]	0	5000	

評価において考慮した項目は、エネルギー性能に関しては、省エネルギーとエネルギーコストである。省エネルギーの評価には、年間暖冷房一次エネルギーを用いることとした。エネルギーコストの評価には、年間の電力料金を用いる。住宅に導入される PCM の市場価格が明らかではないため、ここではイニシャルコストは評価対象外とする。温熱環境のうち、快適性に関しては、リビングでの全身温冷感、リビングでの足元の温冷感、入浴時の快適感で評価することとした。リビングでの全身温冷感の評価には、暖房期の在室時のリビングの平均 PPD を用いる。リビングでの足元の温冷感の評価には、暖房期の在室時のリビングの床表面温度が、快適な床温度範囲(裸足時)を外れる時間割合を用いる。入浴時の快適感の評価には、人体モデルおよび Zhang モデル(2003)により算出した、代表日の入浴時の脱衣室・浴室での快適感の最低値を用いる。温熱環境のうち、健康性に関しては、入浴時の浴室、起床時の寝室、就寝中の寝室に関する健康リスク要因の評価指標で評価することとした。

各項目の「良い」「悪い」の判断に用いる値は、暫定的なものであり、見直しが必要である。各項目の得点は、式(8-1)、(8-2)により算出する。「悪い」は 0 点、「良い」は 1 点に対応することとし、0~1 点の点数で評価することとした。

15

$I_g < I_b$  のとき

$$I = \max\left(0, \min\left(1, (S_b - S)/(S_b - S_g)\right)\right) \quad (8-1)$$

$I_b < I_g$  のとき

$$I = \max\left(0, \min\left(1, (S - S_b)/(S_g - S_b)\right)\right) \quad (8-2)$$

$I$  : 各ケースにおける各項目の得点

$S$  : 各ケースにおける各項目の値

$S_g$  : 各項目の「良い」基準値

20

$S_b$  : 各項目の「悪い」基準値

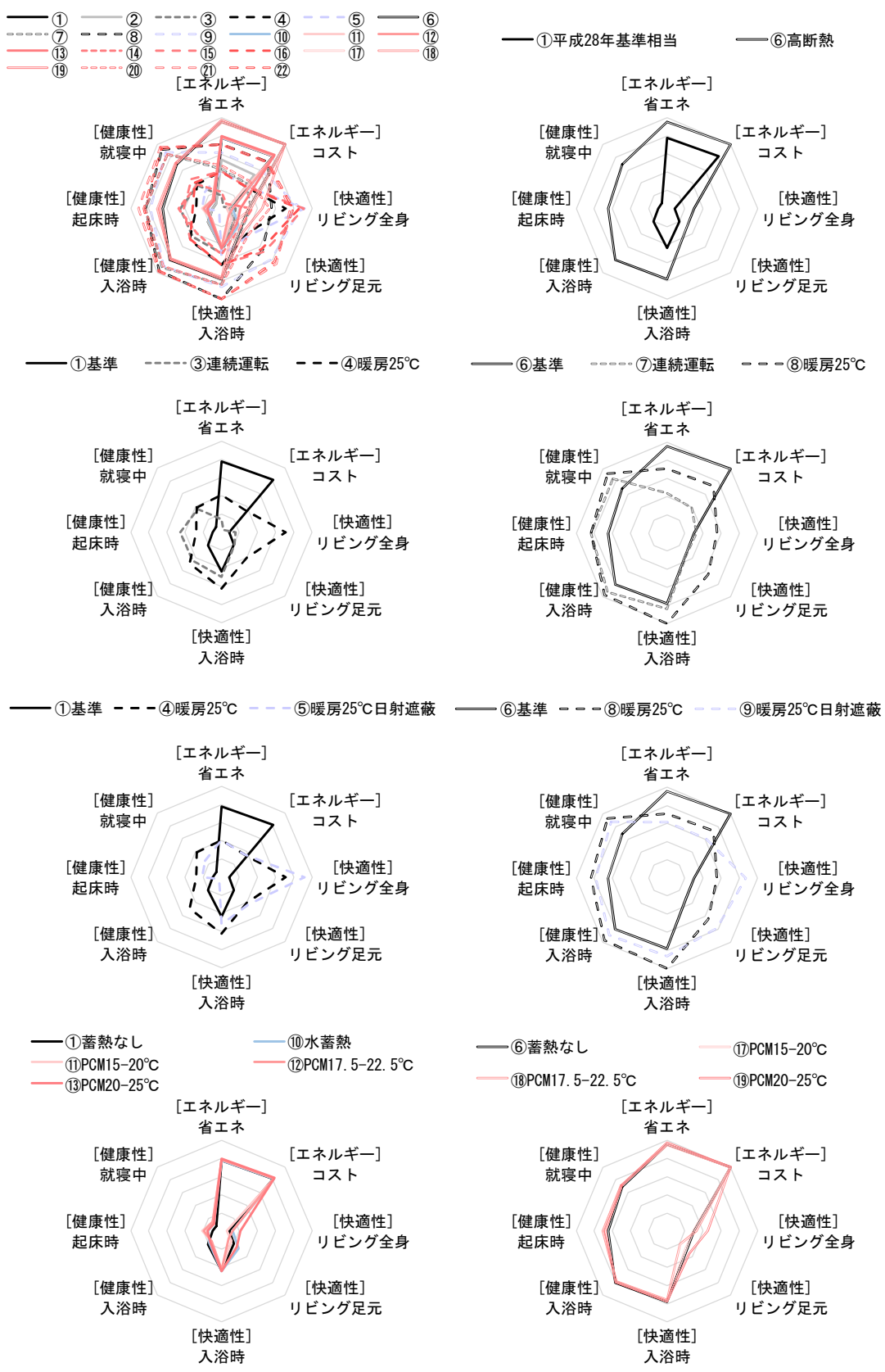
以下に、前章でのケーススタディ結果をもとに算出した各ケースの各項目の得点を示す。

平成 28 年基準相当に対し、高断熱のケースでは、全体的に評価が高い。ただし、イニシャルコストは考慮できていない点に注意を要する。

25

基準の暖房のケースに対し、連続運転や暖房設定温度 25℃では省エネルギー性やエネルギーコストの評価が低下する。しかしながら、温熱環境の評価は向上し、特に 25℃設定での改善が大きい。





5 図 8.2.1 温熱環境とエネルギー性能に関する各項目の得点

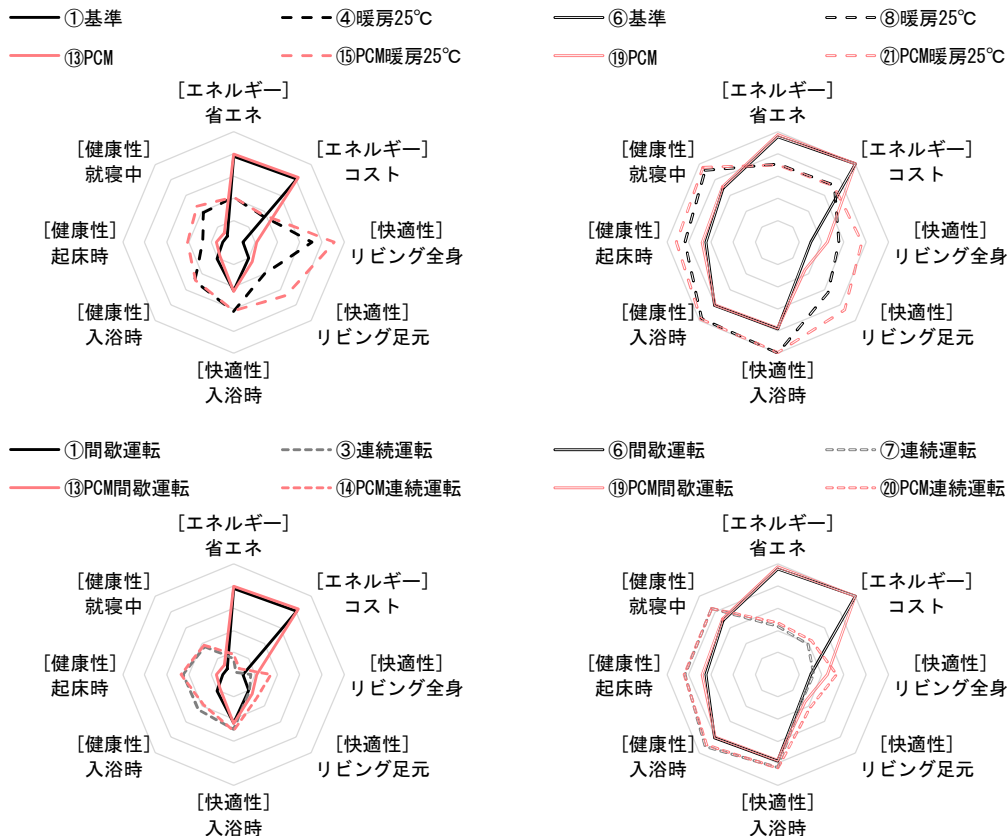


図 8.2.2 温熱環境とエネルギー性能に関する各項目の得点

5 基準の暖房のケースでは、蓄熱の効果が殆ど見られない。しかしながら、連続運転や暖房設定温度 25°C のケースでは、PCM との組み合わせにより、エネルギー性能は変化せずに、温熱環境の改善が見られる。PCM が日射熱を有効に蓄熱できているものと推察される。

### 8.2.2 ひとつの指標に集約した評価

10 表 8.2.1 では項目数が多く、総合的に望ましいケースの判断が困難なため、各項目を考慮した総合的な評価手法の提案を試みる。表 8.2.1 の複数の項目をひとつの指標に集約する方法は、単純平均を取る、重み付け平均を取るなどの方法が考えられる。また、重み付けの方法も、様々な方法が考えられる。ここでは、考えられる複数の方法でひとつの指標の値を算出し、ひとつの指標への集約方法が結果に与える影響の考察を行った。

15

#### (1) CASBEE-戸建(新築)の評価項目による評価

CASBEE-戸建(新築)<sup>1)</sup>の評価項目と重み係数に基づき、表 8.2.2 の重み付けにより、各項目の重み付け平均を算出する。CASBEE-戸建(新築)では、評価対象の項目は、1~5 点で評価され、評価対象により、5 段階の整数の得点で評価される項目や、連続値の得点を取る項目などがある。なお、

20 CASBEE-戸建(新築)に関する既往研究<sup>2)</sup>の著者の一人に確認したところ、大項目(QH1~QH3、LHR1

～LHR3)は AHP 法により重み係数が算定されており、中項目、採点項目などの細かい項目の重み係数は専門家による議論のもとに決定しているとのことである。表 8.2.2 の項目は、CASBEE-戸建(新築)の評価項目のうち、本研究におけるケーススタディのケース設定に関連する項目のみ抽出している。また、CASBEE-戸建(新築)では、戸建の環境効率  $BEE_H$  は、戸建の環境品質  $Q_H$  を戸建の環境負荷  $L_H$  で除して求めているが、ここでは環境品質と環境負荷の得点について重み付け平均した値を算出している。なお、表 8.2.2 の項目について、CASBEE-戸建(新築)の中で占める重み係数の割合は、 $Q_H$  は  $0.45 \times 0.5 \times 0.5 \approx 0.11$ 、戸建の環境負荷  $L_H$  は  $0.35 \times 0.75 \times 0.9 \approx 0.24$  であり、CASBEE-戸建(新築)の評価項目全体に占める割合は比較的小さいことが確認される。

10 表 8.2.2 得点化の際の基準値と温熱環境とエネルギー性能の重み付けの配点の例(参考: CASBEE-戸建(新築))

評価対象項目	本研究での得点算出のための基準値		重み係数	備考
	良い	悪い		
<b><math>Q_H</math> すまいの環境品質</b>				
$Q_H1$ 室内環境を快適・健康・安心にする			0.45	
1 厚さ・寒さ			0.5	
1.1 基本性能			0.5	
1 断熱等性能の確保	5	1	0.8	レベル1: 日本住宅性能表示基準「5-1 断熱等性能等級」等級1相当 レベル2: 等級2、レベル3: 等級3、レベル4: 等級4 レベル5: レベル4を超える水準の断熱等性能
2 日射の調整機能	5	1	0.2	レベル1: レベル3を満たさない。 レベル3: 該当する開口部の日射侵入率を、夏期に0.60以下とできる。 レベル4: 0.45以下 レベル5: 0.30以下かつ冬期には概ね0.6以上とできる。
<b><math>L_R</math> すまいの環境負荷低減性</b>				
$L_RH1$ エネルギーと水を大切に使う			0.35	
1 総合的な省エネ			0.75	
1.1 躯体と設備による省エネ	5	1	0.90	レベル1: BEI1.2以上 レベル2: 1.1、レベル3: 1.0、レベル4: 0.9 レベル5: 0.85以下

以下に、温熱環境とエネルギー性能の重み付けを行った得点を示す。この方法では、「断熱等性能の確保」「日射の調整機能」と比較し「躯体と設備による省エネ」の項目の重み係数が大きいため、得点  
15 はエネルギー消費量の影響を大きく受ける。高断熱で基準の暖房のケース⑥⑦⑧⑨で評価が高くなる。

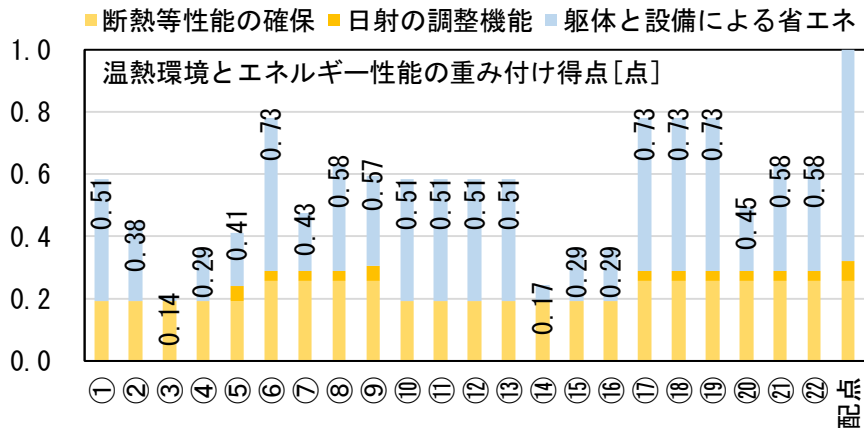


図 8.2.3 温熱環境とエネルギー性能の重み付け得点の例(参考:CASBEE-戸建(新築))

(2) 複数の指標の単純平均値による評価

5 表 8.2.1 の各項目の単純平均値を取り、ひとつの指標へ集約する。なお、複数の評価項目を均等に総合的な評価に用いるものとして、例えば、CASBEE 健康チェックリスト<sup>3</sup>が挙げられる。また、WELL Building Standard™(WELL 認証)<sup>4</sup>では、必須項目と加点項目が存在するものの、各項目に対する重み付けは行われない。

以下に、温熱環境とエネルギー性能の重み付けを行った得点を示す。この方法では、得点の算出結果は、考慮する項目の選定方法の影響を大きく受ける。配点の内訳について、温熱環境に関する指標が6項目あり、エネルギーに関する2項目に対して多いため、温熱環境の示す割合が高い。そのため、断熱性能が省エネルギー基準相当であるケース①～⑤、⑩～⑬では、高断熱のケースと比較して、評価が低くなっている。断熱性能が省エネルギー基準相当のケースの中では、暖房設定温度25℃のケース④⑤⑮⑯の評価が比較的高く、中でもPCM導入のケース⑮⑯の評価が高くなっている。

15

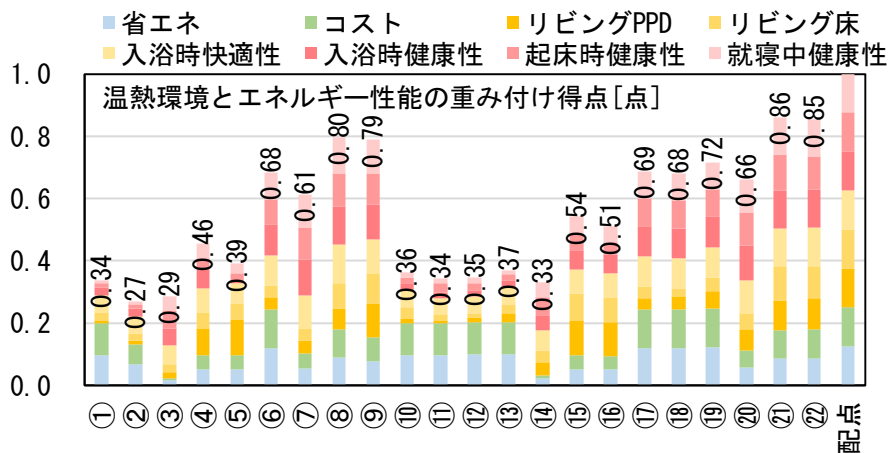


図 8.2.4 温熱環境とエネルギー性能の単純平均による得点の例

### (3) アンケートに基づく重み付け平均値による評価

表 8.2.3 の重み付けをもとに、各項目の重み付け平均を算出する。重み付けは、既往研究<sup>5</sup>を参考に実施する。なお、ここでの目的は複数の項目の重み付けを行いひとつの指標に集約した評価方法の提案であり、評価において考慮する項目、「良い」「悪い」の判断に用いる値、各項目の重み付け平均を算出する際に使用する重み付け割合については、見直しの余地がある。なお、CASBEE-建築(新築)や CASBEE-戸建(新築)等では重み係数を用いて各項目の重み付けを行い、CASBEE-建築(新築)の重み係数は AHP 法により算定されている<sup>6,7</sup>。WELL 認証や CASBEE に関連した、日本の執務者の健康に着眼した建物環境評価指標<sup>8,9</sup>の重み係数も、AHP 法により決定されている。本研究でも同様の手法によることが望ましいと考えられるが、ここでは得られている情報の制約上、以下に示す方法とする。

10 エネルギー性能と温熱環境の重要度は、住宅設計段階における施主の重視度について、1 点刻みで-3 点(全く重視しなかった)から+3 点(非常に重視した)の 7 段階での設問に対する回答の平均値を用いることとした。「冬の暖かさ」の重視度は平均値 1.46 点、「省エネ・省コスト」の重視度は平均値 1.26 点であった。そのため、エネルギー性能:温熱環境の重み付けは、1.26:1.46 とした。

15 エネルギー性能に関する項目のうち、居住者の関心は省エネルギーよりもエネルギーコストに対する方が強い<sup>10,11,12</sup>と想定し、エネルギーコストより得点を算出することとした。

20 温熱環境については、不満者率に比例するよう、配点を行うこととした。不満者率の高い項目ほど改善の余地があり、改善による満足度の向上が得られるものとみなしたためである。居住開始後の冬の室用途ごとの室内環境の不満者率について、リビング・ダイニング「床が冷たい」は 24%、リビング・ダイニング「暖房をしても暖まらない」20%、「非暖房室温度が低い」48%、「夜から朝にかけての非暖房室の寝室の温度が低い」42%であり、この不満者率に比例するよう配点を行う。ただし、「非暖房室温度が低い」「夜から朝にかけての非暖房室の寝室の温度が低い」に関連する項目がそれぞれ 2 項目あるため、関連する各項目には、さらにその逆数の 0.5 の重み付けを行うこととした。

表 8.2.3 得点化の際の基準値と温熱環境とエネルギー性能の重み付けの配点の例(参考:既往研究<sup>5</sup>アンケート結果)

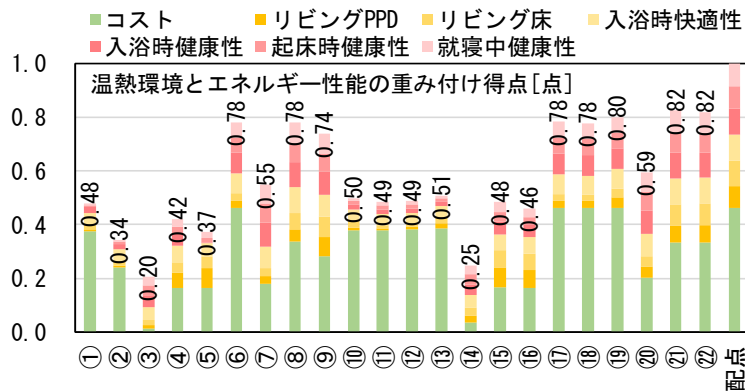
		評価対象項目			基準値		重み付け		
					良い	悪い	重要度 <sup>5</sup>	不満者率 <sup>5</sup>	関連項目数 逆数で重み付け
エネルギー性能	省エネ	暖冷房一次エネルギー		[GJ/年]	10	30	1.26	45	1
	ランニングコスト	電力料金		[円/年]	15万	20万			
快適性	リビング	全身	暖房期 在室時	平均 PPD	[%]	5	30	20	1
		足元	リビング	快適な床温度範囲 (裸足時)を 外れる時間割合	[%]	0	100	24	1
	入浴時	代表日 入浴時脱衣室・浴室 快適感 (Zhang モデル 2003) 最低値		[-]	0	-3	1.46	48	2
健康性	入浴時	健康リスク要因の 評価指標	指標 b	[°C・回]	0	400	42	42	2
	起床時		指標 c	[°C・回]	0	1000			2
	就寝中		指標 d	[°C・時]	0	5000			2

$$I_s = \frac{\sum_i \left( w_i \cdot \frac{\sum_d \left( w_{i,d} \cdot \sum_r \left( \frac{1}{i_{i,d}} \cdot I_{i,d,r} \right) \right) \right)}{\sum_d w_{i,d}} \right)}{\sum_i w_i} \quad (8-3)$$

- $I_s$  : 各項目の値を重み付け平均して得られる、総合的な評価指標の値
- $I_{i,d,r}$  : 重要度  $i$  に関する項目で、不満者率  $d$  に関する項目のうち、関連項目  $r$  に関する項目の値
- $w_i$  : 重要度  $i$  に関する項目の重要度
- $w_{i,d}$  : 重要度  $i$  に関する項目で、不満者率  $d$  に関する項目の不満者率
- $i_{i,d}$  : 重要度  $i$  に関する項目で、不満者率  $d$  に関する項目の関連項目数

5

10 以下に、温熱環境とエネルギー性能の重み付けを行った得点を示す。高断熱、PCM 導入、暖房設定温度 25°C のケース⑮⑯で得点が高くなっている。前述のとおり、エネルギーコストは、ランニングの電力に関するもののみであり、断熱強化に関するイニシャルコストは考慮されていない。断熱強化や蓄熱容量増加に伴うイニシャルコストの増加も詳細に加味した上での総合的な評価は、今後の課題である。



15

図 8.2.5 温熱環境とエネルギー性能の重み付け得点の例(参考: 既往研究<sup>5</sup> アンケート結果)

以下、参考として、住宅に導入される PCM の価格を仮定して、表 8.2.4 に基づき、イニシャルコストを評価に含めた得点の算出を行う。

20 イニシャルコストの重要度について、住宅設計段階における施主の「物件価格」の重視度は平均値 1.52 点であったため、イニシャルコスト: エネルギー性能: 温熱環境の重み付けを 1.52: 1.26: 1.46 とした。

断熱強化や PCM 導入に伴うかかり増し費用は、断熱強化については平成 28 年基準相当を基準として高断熱のケースでは 100 万円、PCM 導入のケースでは導入費用は仮に 100 万円と 300 万円の 2 水準とし、断熱強化と PCM 導入の両方を実施するケースでは合計値を取って、算出を行った。断熱強

化のかかり増し費用は、既往研究<sup>13</sup>において、本研究における平成 28 年基準相当と比較的近い性能の Q 値=2.6W/(m<sup>2</sup>・K)で 100 万円程度、高断熱と比較的近い性能の Q 値=1.4W/(m<sup>2</sup>・K)で 200 万円程度の断熱コストであることより決定した。

5 表 8.2.4 得点化の際の基準値と温熱環境とエネルギー性能の重み付けの配点の例

		評価対象項目		基準値		重み付け			
				良い	悪い	重要度 <sup>5</sup>	不満者率 <sup>5</sup>	関連項目数 逆数で重み付け	
イニシャルコスト		断熱強化・PCM 導入のかかり増し費用		[円]	0	200 万/ 400 万※	1.52	1	
エネルギー性能	省エネ	暖冷房一次エネルギー		[GJ/年]	5	20	1.26	45	
	ランニングコスト	電力料金		[円/年]	12 万	20 万			
快適性	リビング	全身	暖房期 在室時 リビング	平均 PPD	[%]	5	30	20	1
		足元		快適な床温度範囲 (裸足時)を 外れる時間割合	[%]	0	100	24	1
	入浴時	代表日 入浴時脱衣室・浴室 快適感 (Zhang モデル 2003) 最低値		[-]	0	-3	1.46	48	2
健康性	入浴時	健康リスク要因の 評価指標	指標 b	[°C・回]	0	400	42	2	
	起床時		指標 c	[°C・回]	0	1000			
	就寝中		指標 d	[°C・時]	0	5000			

※PCM 導入費用を 100 万円と仮定する場合には「悪い」の基準値を 200 万円、PCM 導入費用を 300 万円と仮定する場合には「悪い」の基準値を 400 万円とした。

イニシャルコストを評価に含めた得点の算出結果を以下に示す。

イニシャルコストを評価に含めた場合と含めない場合で、得点の配点が大きく異なり、得点の算出結果も大きく変化する。評価において考慮する項目、「良い」「悪い」の判断に用いる値、各項目の重み付け平均を算出する際に使用する重み付け割合については、見直しの余地がある。

10

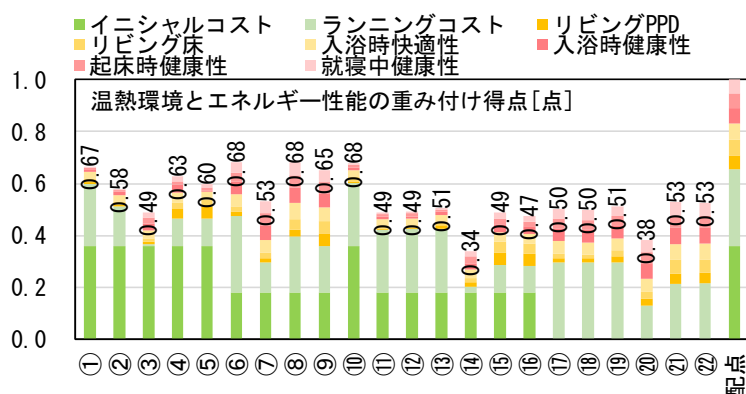


図 8.2.6 温熱環境とエネルギー性能の重み付け得点の例(参考:既往研究<sup>5</sup>アンケート結果、PCM 導入コスト 100 万円と仮定)



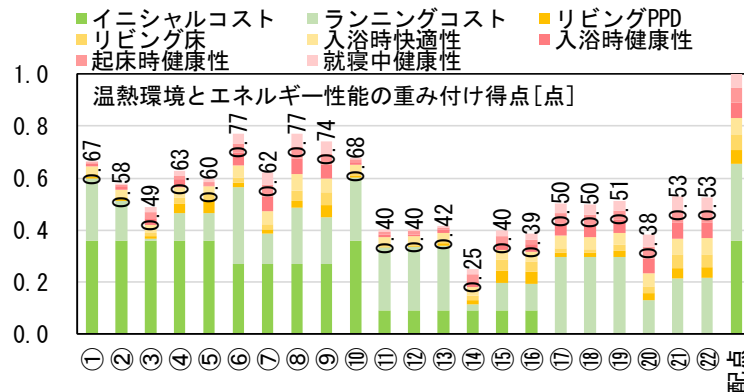


図 8.2.7 温熱環境とエネルギー性能の重み付け得点の例(参考: 既往研究<sup>5</sup> アンケート結果、PCM 導入コスト 300 万円と仮定)

- <sup>1</sup> [http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas\\_home/cas\\_home.htm](http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas_home/cas_home.htm)
- <sup>2</sup> 清家剛, 村上周三, 秋元孝之, 近田智也, 山中 裕二: 建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究 (その 51): (仮称)「CASBEE-戸建住宅」の評価項目, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 949-950, 2006. 07
- <sup>3</sup> [http://www.ibec.or.jp/CASBEE/casbee\\_health/index\\_health.htm](http://www.ibec.or.jp/CASBEE/casbee_health/index_health.htm) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会: CASBEE 健康チェックリスト, すまいの健康チェックリスト
- <sup>4</sup> [https://www.gbj.or.jp/well/about\\_well/](https://www.gbj.or.jp/well/about_well/)
- <sup>5</sup> 新富凌汰, 大石幸奈, 鈴木信恵, 佐藤誠, 前真之: 新築戸建住宅を対象としたアンケート調査 空間構成の違いを考慮した住宅の温熱環境の満足度に関する研究 その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 744 号, pp. 149-157, 2018. 2
- <sup>6</sup> 半澤久, 村上周三, 佐藤正章, 伊香賀俊治, 秋元孝之, 小野寛也: 建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究(その 21) AHP 法による「CASBEE:新築」の評価項目の重み係数の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1107-1108, 2004. 07
- <sup>7</sup> 伊香賀俊治, 佐藤正章, 高井啓明, 吉澤伸記, 遠藤純子, 溝口奈穂: 建築物の総合環境性能評価手法 CASBEE に関する研究 その 77: AHP 法による評価項目間の重み係数の算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1087-1088, 2008. 07
- <sup>8</sup> 藤澤順太, 對馬聖菜, 伊藤安里, 高橋周平, 久保隆太郎, 田辺新一: 執務者の健康を考慮した建物環境性能評価に関する研究 (その 1) 日本における健康評価指標の提案および実オフィス評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, pp. 345-348, 2016. 9
- <sup>9</sup> 伊藤安里, 對馬聖菜, 高橋周平, 藤澤順太, 久保隆太郎, 田辺新一: 執務者の健康を考慮した建物環境性能評価に関する研究 (その 2) 日本オフィスを対象とした WELL 認証評価項目の適用と健康向上度分析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, pp. 349-352, 2016. 9
- <sup>10</sup> 森康浩, 小林翼, 安保芳久, 大沼進: 家庭での省エネルギー行動に対する内発的動機付けの長期的な効果実際のエネルギー使用量と自己申告による省エネ行動を用いた検討, 社会心理学研究, 第 31 巻, 第 3 号, pp. 160-171, 2016
- <sup>11</sup> Eurobarometer (2007). Energy technologies: Knowledge, perception, measures. Special Eurobarometer 262, European Commission.
- <sup>12</sup> Spence, A., Leygue, C., Bedwell, B., & O'Malley, C. (2014). Engaging with energy reduction: Does a climate change frame have the potential for achieving broader sustainable behaviour? Journal of Environmental Psychology, 38, pp. 17-28.
- <sup>13</sup> 中道潤, 岩前篤, 長谷川英司: 温暖地域における戸建て住宅の断熱手法に関する研究(その 1) 断熱に要するイニシャルコストの整理, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 99-100, 2009. 8



## 第9章 まとめ

## 9. まとめ

本研究では、PCM 物性値の測定方法の提案を行い、標準的な住戸への PCM 導入を想定した室温計算、熱負荷計算を実施した。また、居住者への訴求性を鑑み、PCM が住宅内の温熱環境や熱負荷に与える影響を、快適性・健康性やエネルギー使用の経済性の面から評価する方法の提案を行った。

5

1章において、研究の背景および目的を示すとともに、論文の構成を示した。PCM は、住宅への導入による室温安定効果や省エネルギー効果が期待されるものの、その評価のための PCM の物性値の測定や計算方法が確立していない。PCM 物性値の測定方法の提案、および、標準的な住戸への PCM 導入を想定した室温計算、熱負荷計算を可能とすることを、本研究の第一の目的と位置付けた。また、  
10 居住者への訴求性を鑑み、PCM が住宅内の温熱環境や熱負荷に与える影響を、快適性・健康性やエネルギー性能の面から評価する方法の提案を行うことを、第二の目的と位置付けた。

2章では、PCM の測定および計算、温熱環境の評価、住宅内でのエネルギー使用やその費用に関する既往研究の整理を行った。

15 PCM の測定に関して、様々な見かけの比熱測定法が提案されている一方で、広く行われている DSC と比較して、住宅に導入される状態に近い大きさや形状で測定を行うことは一般的でなく、また、見かけの比熱を算出する際の代表温度について議論した論文は少ない。計算に関しては、測定結果の見かけの比熱を計算に反映させるモデルは様々な提案されているものの、昇温過程と降温過程で異なる見かけの比熱曲線を示す PCM の扱いについては十分に検討がなされていない等の課題が見られた。

20 温熱環境の評価に関して、既往研究では健康性に関する温度の基準値を暫定的に 18℃と定めている。また、ASHRAE Standard では、定常、非定常、不均一な温熱環境の評価方法が定められており、本研究ではこれらを参考に、住宅内の温熱環境の評価を実施することとした。

住宅の電力料金や暖房における電力使用について、電力料金等が居住者の節電意識に影響を与えることが示されている。一方で、電気式暖房の使用において、エアコンのみでなく、電気ファンヒーター  
25 やオイルヒーターといったエネルギー効率の低い暖房方式も多く採用されていることが確認された。

3章では、ペルティエ装置を用いて、住宅に導入される状態に近い大きさや形状で見かけの比熱測定を行う方法の提案を行った。

見かけの比熱を算出する際の代表温度は、PCM の厚さ方向の中心温度とすると、見かけの比熱のピークが単数のパラフィンにおいては、温度変化速度によらずほぼ一定の相変化ピーク温度を示すことが  
30 確認された。また、見かけの比熱のピークが単数のパラフィンや無機系の PCM における代表温度は、PCM の外側表面温度と中心温度を中心温度割合 0.8 程度で重み付け平均した温度とすると、温度変化速度によらずほぼ一定の相変化ピーク温度を示すことが確認された。

PCM の熱伝導率については、温度依存性があることが確認された。

35

4章では、PCM の計算に関し、3章の測定結果の反映を行った。計算では、質点に持たせる PCM 熱

容量を求める際に、その質点の温度を使用した。PCM の相変化時の熱的挙動を計算により再現するためには、熱伝導率の温度依存性を考慮する必要があることを確認した。また、降温／昇温、昇温／降温の繰り返し測定をもとに、測定を行った PCM を対象とした融解時と凝固時のエンタルピー曲線の切り替えの方法の提案を行った。更に、計算により、PCM の見かけの比熱測定における境界温度変動の条件の検討を行った。

5 5章では、PCM を含む計算の検証を行った。検証に使用したのは熱箱測定および実験棟での測定の結果であり、PCM なしのブランクの状態と、PCM を設置した状態で、熱箱内の温度や実験棟室温を計算により比較的よく再現できることを確認した。

10

6章では、住宅の温熱環境が健康性・快適性に与える影響の評価方法について考察を行った。既往研究や既発表論文をもとに、温熱環境や快適性の評価指標案の提案を行った。既往研究における人体モデルおよび Zhang モデルを用いた温冷感予測手法について、整理を行った。

15 また、住宅の熱負荷が電力使用や電力コストに与える影響の評価方法について考察を行った。まず、空調負荷をエアコン消費エネルギーへ換算する方法について、既往研究におけるエアコンモデルの適用に関する考察を行った。その後、実際に使用されている電力料金体系をもとに、エネルギー消費量をコストへ換算する方法の整理を行った。

20 7章では、PCM 導入有無等の条件で、住宅全体の熱負荷計算を行い、その結果について健康性・快適性・経済性の観点から評価を行った。住宅への PCM 導入が、一定の条件下において暖房負荷削減効果を有するものの、住宅全体の一次エネルギー消費量の削減効果は限定的であることが確認された。一方で、住宅への PCM 導入による温熱環境改善効果が見られ、高断熱住宅の温熱的な課題の改善には一定の効果を有することが確認された。

25 8章では、住宅性能の評価を、健康性・快適性・エネルギー性能を集約したひとつの指標で行う方法の提案を試行的に行った。

30 まず、エネルギー性能に関する2項目、温熱快適性に関する3項目、健康性に関する3項目の合計8項目を評価項目として抽出した。更に、既往研究をもとに8項目の重み付けを行う方法を検討し、ひとつの指標として集約する方法を提案した。提案内容は、ひとつの指標に集約する基本的な手法であり、集約の際に使用する項目や重み付けの詳細な検討は今後の課題である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、卒業論文、修士論文から長きにわたり、指導教員としてご指導を賜りました東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 前 真之准教授に、心から感謝の意を表します。佐藤 誠特任研究員には、技術的な指導を頂くとともに、社会人博士として論文を執筆するにあたりご配慮を賜りましたこと、深く感謝申し上げます。特任研究員を務められた九州大学 崔 榮晋助教には、学生生活を支えて頂いたこと、お礼申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 赤司 泰義教授には、副担当教員として、毎学期、研究の方向性についてご指導頂くとともに、博士論文の審査を引き受けて頂きましたこと、感謝申し上げます。早稲田大学創造理工学部建築学科 田辺 新一教授、東京大学生産技術研究所 大岡 龍三教授、工学院大学建築学部建築学科 富樫 英介准教授には、大変ご多忙の中、博士論文の審査を引き受けて頂き、貴重なご指摘、ご助言賜りましたこと、心よりお礼申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 柳原 隆司元特任教授には、博士論文の執筆にあたり、ご助言やお気遣いを賜りましたこと、感謝申し上げます。

東京理科大学理工学部建築学科 井上 隆教授、前研究室出身の高瀬 幸造助教には、科研費研究会で研究の方向性について、ご指導賜りました。また、卒業論文、修士論文の給湯に関する研究より、長きにわたりご指導賜りました。心から感謝の意を表します。

芝浦工業大学建築学部建築学科 秋元 孝之教授、東京理科大学工学部建築学科 長井 達夫教授には、平素より、仕事の関係でご指導賜り、心よりお礼申し上げます。仕事を通して学んだ知見は、論文執筆にあたって必要不可欠なものでした。

潜熱蓄熱建材の蓄熱特性試験方法の JSTM 規格作成委員会において、委員長である首都大学東京都市環境学部建築学科 永田 明寛教授に測定にかかるご助言を賜りましたこと、お礼申し上げます。

建材試験センター 佐伯 智寛様には、ペルティエ装置を用いた PCM の測定を実施頂くとともに、測定法に関して専門的なご指導を賜りましたこと、深く感謝申し上げます。

JSR 株式会社、大建工業株式会社には、屋上実験棟の測定に関して、ご協力を頂きました。

JXTG 株式会社の清田 健様をはじめとするご関係者の皆様には、パラフィン試験体の測定にあたり、多大なご協力を頂きました。蓄熱建材コンソーシアムが本格的に始動するまでの重要な期間に、研究を進めることが出来ましたこと、心より感謝申し上げます。

蓄熱建材コンソーシアムの評価法標準化 WG 主査 藤崎 健一様(DIC 株式会社)、測定条件 SWG 前主査 林 禎彦様(大建工業株式会社)および現主査 松岡 敏昭様(菱星システム株式会社)、温熱環境評価シミュレーション WG 前主査 佐藤 友紀様(大建工業株式会社)および現主査 野末 佳伸様(住友化学株式会社)、試験体提供にご協力頂いた齋藤 修様(住化プラスチック株式会社)、松村 良夫様(株式会社カネカ)をはじめとするご関係者の皆様に、心よりお礼申し上げます。コンソーシアム始動時より、様々な活動に関わらせて頂き、多くを学ばせて頂きました。

研究室 PCM 班の後輩の山本 健太君、館林 恵介君、堀内 耀介君、藤原 亮君、毛 源承君、宮森 秀志君、皆さんの測定した実測や実験のデータを、計算の検証に活用させて頂き、ありがとうございます。本当にひたむきに研究に取り組む皆さんの姿に、いつも元気をもらいました。

最後に、研究にご協力頂きました皆様、研究室の皆様、学生生活を支えて下さった皆様、仕事の面も含めましてご指導頂きました皆様にお礼を申し上げ、謝辞とさせていただきます。