数値計算を用いた潜熱蓄熱材の見かけの比熱測定精度に関する検討

STUDY ON ACCURACY OF SPECIFIC HEAT MEASUREMENT OF PHASE CHANGE MATERIALS BY CALCULATION

芹川真緒 ——— *1 佐伯智寛 ——— *2
前 真之 ——— *3

Mao SERIKAWA ——— *1 Tomohiro SAEKI ——— *2
Masayuki MAE ——— *3

キーワード：
PCM, 建材測定, 熱伝導計算, ピーク温度

Keywords:
PCM, Measurement of building material, Thermal conductivity analysis, Peak temperature

The purpose of this research is proposing relevant conditions for the heat specific measurement of Phase Change Materials (PCM) by calculating thermal conductivity. It was found that the accuracy of the measurement was low when the thermal resistance of PCM was high. On this condition, the temperature change should be slow for higher accuracy.

1. はじめに

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

PCM を住宅に導入するにあたっては、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、配置、相変化温度域等を決定することが望ましい。既往研究における PCM を導入した際の室温・熱負荷計算では、「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¹⁾等。見かけの比熱は、本来の比熱に相変化による潜熱の効果を加えたもので、PCM の温度に応じて比熱が変化するよう計算のモデル化を行う。適切な計算結果を得るためには、測定により、検討対象の PCM の見かけの比熱を適切に把握する必要がある。

見かけの比熱の測定にあたっては、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¹⁾等が、実際の建築物に導入される状態に近い大きさ、形状での測定ではない。壁体に近い形状での測定の例として、板状、面状での測定を行う、ASTM に規定された試験方法 (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²⁾および熱流計法を応用した比熱測定³⁾) が挙げられる。これは、試験体を 1.5℃刻みで準定常状態にすることで見かけの比熱を測定するが、準定常状態の確保に時間を要する。非定常状態の測定の例としては、建築材料の比熱測定法 (断熱型熱量計法⁴⁾) があるが、一般的な建築材料の測定を前提としており、試験体の表層部と中心部の間の温度勾配を一定

に保つ条件での試験を推奨している。しかしながら、相変化を伴う場合、一般には温度勾配が一定とはならず、試験体内部の温度分布が温度変化速度の影響を受けるため、PCM を対象とする際には適切な温度変化の設定条件の検討を行う必要がある。また、見かけの比熱を温度の関数として扱う際、分布を有する試験体温度を代表するものとして採用する試験体の「代表温度」は、試験体表層部と中心部のいずれが適切か等を考慮すべきである。宮城⁵⁾らは、ペルティエ素子を用いた 2 つの加熱・冷却用熱源およびその制御装置等からなる T-h 特性測定装置を提案している。PCM を挟むように設置された熱源の一方を断熱境界となるよう制御し、もう一方を加熱・冷却して PCM の見かけの比熱を測定しているが、相変化域における代表温度は断熱とした側の表面温度を使用している。試料の種類や厚さ、熱流束を変更して測定を行い、これらが測定結果へ与える影響を確認している。

本研究では、筆者らの一部が提案を行っている測定装置⁶⁾や壁体熱特性測定装置⁷⁾のように、一次元的な熱移動を想定して、板状、面状の PCM の両側表面を一定の温度変化速度で加熱または冷却し、非定常状態で見かけの比熱測定を行う装置を想定し、測定条件や代表温度の取り方、PCM の物性値が測定結果の精度に与える影響を計算により確認する。また、その結果より、必要な精度を得るために十分な温度変動の与え方を考察する。既往研究⁵⁾や筆者らの一部による研究⁸⁾では複数の PCM 試験体を用いて測定が実施されているが、計算により、温度変化の設定条件等の測定条件や、PCM の熱伝導率、相変化温度幅等の複数の要因を、独立に検討することが可能となる。なお、ここでは、測定の精度の確認を目的とし、測定に求められる精度は別途検討される必要がある。

2. 検討手法

計算により、温度変化の設定条件等の測定条件や、PCM の熱伝導率、潜熱量、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

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科 大学院生 (当時)・博士 (工学)
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 1 号館)
²⁾ (一財) 建材試験センター
³⁾ 東京大学大学院工学系研究科 准教授・博士 (工学)

⁴⁾ Former Graduate Student, Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Ph.D.
⁵⁾ Japan Testing Center for Construction Materials
⁶⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Ph.D.

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。なお、計算の精度については、測定との比較により、別途、確認を行っている⁹⁾。

2. 1 PCMを含む一次元熱伝導計算

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。表1中に断面図を示す装置のように、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¹⁰⁾に基づき、以下の式(1)～(5)により、式(1)については後退差分で離散化して、計算を行った。

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

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

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

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

- ρ : 密度 [kg/m³]
 λ : 熱伝導率 [W/(m・K)]
 Δx : 壁体分割幅 [m]
 T_m : 現在時刻における節点 m の温度 [°C]
 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/(m²・K)]
 R : 節点間の熱抵抗 [m²・K/W]
 $c(T)$: 温度 T [°C] におけるみかけの比熱 [J/(g・K)]
 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¹⁰⁾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、本研究では、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の厚みの比熱を計算する(図1)。これは、節点に対して流入/流出する熱量より求め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。

節点 m+1 より節点 m に流入する熱流密度は、式(6)により算出される。節点 m-1 より節点 m に流入する熱流密度は、 $-q_{m-1,m}$ となる。

$$q_{m,m+1} = \frac{T_{m+1} - T_m}{R_{m,m+1}} \quad (6)$$

$q_{m,m+1}$: 節点 m+1 から節点 m へ流入する熱流密度 [W/m²]

計算の精度については、別途、確認を行っている⁹⁾。PCM試験体の

特性等によっては、測定時に面方向の温度分布が生じる可能性があるが、計算上は理想的な一次元熱伝導を仮定している。

2. 2 計算結果より見かけの比熱を求める方法

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(7)～(10)に基づき、1K刻みで算出する。例えば、30°Cの見かけの比熱は、昇温時には代表温度が30°Cから31°Cに上昇する間、降温時には31°Cから30°Cに低下する間の熱流密度等より求める。代表温度は、PCMの外側表面または内側表面(表1参照)、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。

図1 計算におけるPCMの見かけの比熱の決定方法

表1 計算条件

項目	内容
計算時間間隔	10 秒
物性値等	<p>PCM試験体: 厚 10mm (計算上は10層に分割) × 2枚 密度 1000kg/m³、 顕熱比熱 1J/(g・K) 熱伝導率は表2参照 潜熱量は表2参照 見かけの比熱は表2、 図2参照</p> <p>熱流計: 厚 1mm × 2枚 容積比熱 0kJ/(m³・K) 熱伝導率 0.1W/(m・K)</p> <p>PCM内側表面温度 (計算上断熱境界) 温度制御面 PCM試験体 断熱材 計算上10分割 計算対象範囲 境界温度を与える位置 PCM外側表面温度 熱流計</p>
境界温度条件	<p>↑境界温度 [°C] 50°C 10°C 温度変化の設定条件 5, 10, 15, 30, 60分/K 相変化温度範囲 時間</p>

表2 想定するPCM物性値

PCM 番号		見かけの比熱ピーク温度/相変化温度幅					
		30℃/1℃			30℃/10℃		
		潜熱量					
		50J/g	100J/g	200J/g	50J/g	100J/g	200J/g
熱伝導率 [W/(m・K)]	0.1	①	④	⑦	⑩	⑬	⑯
	0.2	②	⑤	⑧	⑪	⑭	⑰
	0.3	③	⑥	⑨	⑫	⑮	⑱

図2 計算に入力したPCMの温度(横軸)と見かけの比熱と密度の積(縦軸)の関係

$$c_{PCM,h}(T) = \frac{A}{M\Delta T} \cdot \int_{t=t_T}^{t_T+\Delta T} q_{po} dt \quad (7)$$

$$c_{PCM,c}(T) = \frac{A}{M\Delta T} \cdot \int_{t=t_T+\Delta T}^{t_T} (-q_{po}) dt \quad (8)$$

$$H_{PCM}(T) = \int_{t=t_{TS}}^{t_T} q_{po} dt \quad (9)$$

$$h_{PCM}(T) = \frac{A \cdot H_{PCM}(T)}{M} \quad (10)$$

T : 代表温度 [°C]

ΔT : 代表温度の温度変化の刻み幅 [K] ここでは昇温時、降温時とも 1K (正の値) とする。

$c_{PCM,h}(T)$, $c_{PCM,c}(T)$: 計算結果より求める、温度 T [°C] 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 [°C] とした場合の、温度 T [°C] における PCM の単位面積あたりのエンタルピー [J/m²]

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

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密度 [W/m²] (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 [m²] 計算上は、単位面積 1 m² 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。

t_T : 代表温度が T [°C] となる時刻 [s]

熱流密度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。

ピーク温度: 計算結果より求める、温度 1K 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温度 [°C]

相変化温度幅: 温度 1K 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 1K を掛けた値 [°C]

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) (表 1)) 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。

3. PCM 物性値等が測定精度に与える影響の確認

計算により、熱伝導率等の PCM 物性値が測定精度に与える影響を把握し、十分な精度を有する測定条件の範囲を検討する。

3. 1 計算条件

表 1、表 2 に、主な計算条件および想定する PCM の物性値を示す。一次元熱伝導を想定し、表 1 のように、PCM 試験体およびその外側

の熱流計を計算対象とした。計算は PCM 試験体を熱流方向に 10 層に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、同表内の装置の断面構成の図に示す。この両側の、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密度を用いて、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。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。なお、昇温時と降温時で式 (7)、(8) の集計方法の差はあるものの、見かけの比熱のピーク温度および相変化温度幅について、計算の入力と結果の差の大きさの傾向は、昇温時と降温時で概ね一致する。

温度変化の設定条件は、測定における装置や計測機器の能力等を勘案し、5、10、15、30、60 分/K の 5 水準とした。これらの逆数で表される温度変化速度が小さい場合には、測定上、温度制御の不安定さや熱流計での測定値の不確かさが増大する。逆の場合には、PCM 試験体の厚さ方向に大きな温度分布が生じ、測定上、面方向にも温度分布が生じる可能性がある。実際の建築物に導入される PCM について、設備により加熱・冷却される場合等には、表 1 の設定条件よりも温度変化の速度が大きくなり得る。しかしながら、本研究では、厚みのある PCM 試験体の測定を想定した計算の結果としての見かけの比熱は温度変化速度の影響を受け得るものの、入力段階や計算段階での節点単位の挙動では、見かけの比熱は温度変化速度によらない物性値であると想定している。このような想定のもとでは、実際と測定における温度変化速度の差は問題とならない。ただし、実際の PCM の見かけの比熱の挙動が温度変化の速度の影響を受ける場合には、実際と測定の温度変化速度の整合性に留意が必要である。

PCM の熱伝導率、潜熱量、相変化温度幅について、表 2 に示す複数の水準で計算を行う。見かけの比熱のピーク温度は 30°C としているが、本研究では計算の入力と結果におけるピーク温度および相変化温度幅の差という相対値に着目しており、ピーク温度の絶対値は特段の意味は持たない。ピーク温度が 30°C から外れる場合でも、相変化温度範囲に応じて表 1 の境界温度条件を適切に与えると、他の条件が揃っていればピーク温度の絶対値によらず、計算の入力と結果におけるピーク温度および相変化温度幅の差は、計算上は一致する。

見かけの比熱の入力値は、図 2 に示すように与える。

3. 2 代表の PCM 物性値における計算結果

図 3 に、表 2 中の PCM④ の 15 分/K における計算結果を示す。

図 3 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、後述の代表温度の取り方の検討における参考のため、内側表面温度割合を示す。内側表面温度割合は、PCM の体積加重平均温度を、PCM 外側・内側表面温度のみの加重平均温度で再現するように、内側表面温度の加重の割合を調整した値であり (式 (11))、時々刻々変化するものである。体積加重平均温度は、計算上 10 層に分割された PCM 試験体内部の節点の温度も考慮して求める。なお、外側と内側の表面温度が等しいときには式 (11) により内側表面温度割合が算出できないため、外側・内側表面温度の差が 0.01°C 未満の場合は、内側表面温度割合を 0.5 とする。測定では分解能 0.1°C 程度の熱電対等の使用が想定されるが、計算の精度はそれよりも高いため、ここでは計測機器の分解能よりも小さい値で、外側・内側表面温度差を判定している。内側表面温度

割合は温度変化に伴い変化するが、0.5 以上、即ち外側表面温度よりも内側表面温度の割合が高い範囲で推移していることが確認される。

$$r_i T_i + (1 - r_i) T_o = T_{ave} \quad \text{より}$$
$$r_i = \frac{T_{ave} - T_o}{T_i - T_o} = \frac{\sum_m (V_m \cdot T_m) / \sum_m V_m - T_o}{T_i - T_o} \quad (|T_i - T_o| \geq 0.01) \quad (11)$$

- r_i : 内側表面温度割合 [-]
- T_i : 内側表面温度 [°C]
- T_o : 外側表面温度 [°C]
- T_{ave} : 体積加重平均温度 [°C]
- V_m : 節点 m に対応させる PCM の体積 [m³] 図 1 参照。
- Σ_m : PCM を含む節点についての総和を表す

また、図 3 上から 2 段目に示す熱流密度およびエンタルピーの変

図 3 PCM④ 15 分/K 計算結果

動の通り、相変化に伴い大きな熱流密度が生じ、PCM が放熱することが確認される。PCM のエンタルピーは、50°C の時点を目安としている。

図 3 上から 3 段目に、降温時の熱流方向の温度分布の経時変化を示す。横軸方向は、表 1 に示す断面図の計算対象範囲に対応しており、左の 1 層が熱流計、右側の 10 層が PCM 試験体に対応する。左端の境界温度は、一定の速度で変化している。一方、右端に示す PCM 内側表面温度は、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計算結果の関係について、図 3 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°C、相変化温度幅 2°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。この理由は、温度や熱流密度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。相変化に伴う熱流密度の増加は、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、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。

3. 3 検討対象の全ての PCM 物性値での計算結果および考察

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、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を横軸に、相変化温度範囲の差を縦軸にとった散布図を図 4、図 5 に示す。図 4 は代表温度を外側と内側の平均温度とした場合の結果、図 5 は内側表面温度とした場合の結果であり、上から順に、5 分/K、10 分/K、15 分/K、30 分/K、60 分/K の結果である。ただし、図 5 では、温度変化の設定条件が結果に及ぼす影響は比較的小さかったため、10 分/K、30 分/K のグラフは省略している。プロットが原点に近い程、見かけの比熱の再現精度が高いとみなす。なお、代表温度を外側表面温度とした場合には、図 3 のように入力値との乖離が大きいため、ここで扱う対象から除外した。

図 4 に示す代表温度を外側と内側の平均温度とした場合、上から 3 段目の 15 分/K について、熱伝導率の差に着目すると、例えばピーク温度の差は PCM④、⑤、⑥とも 1°C だが、相変化温度幅の差④と⑤は 4°C、⑥は 3°C のように、熱伝導率が高い方が、得られる結果の精度が高くなる傾向が見られる。また、潜熱量について、ピーク温度の差が①と④は 1°C、⑦は 2°C、相変化温度幅の差が①と④は 4°C、⑦は 8°C のように、潜熱量が小さい方が、得られる結果の精度が高くなる傾向が見られる。更に、ピーク温度の差は④と⑬とも 1°C だが、相変化温度幅の差が④は 4°C、⑬は 2°C のように、相変化温度幅が大きい方が、得られる結果の精度が高くなる傾向が見られる。ただし、例えば最上段の 5 分/K において、ピーク温度の差が④は 2°C、⑤は 4°C、⑥は 1°C であり、15 分/K の場合の関係性と異なるように、温度変化速度が大きい場合には、結果の傾向が一部異なる箇所が見られる。また、相変化温度幅 10°C では、潜熱量が小さい PCM で、計算結果の相

図4 ピーク温度・相変化温度幅の入力と計算結果の差
(代表温度：外側・内側表面平均温度)

変化温度幅が小さく算出される傾向があるが、入力との差は-1℃以内にとどまる。

一方、代表温度を内側表面温度とした場合には、図5上から2段目の15分/Kで、ピーク温度の差が④は0℃、⑬は1℃、相変化温度幅の差が④は1℃、⑬は-1℃のように、相変化温度幅が小さい方がピーク温度の精度は高い傾向が見られる。また、相変化温度幅10℃では、ピーク温度の差が⑩は0℃、⑬は1℃、⑯は2℃、相変化温度幅の差が⑩は-2℃、⑬と⑯は-1℃のように、潜熱量が小さい方が、ピーク温度の精度は高く、相変化温度幅の精度は低くなる傾向が見られる。特に、潜熱量が小さいPCMで、計算結果の相変化温度幅が小さく算出される傾向がある。ただし、図は省略するが、温度変化の設定条件が30分/Kより遅い場合には、入力との差は-1℃以内にとどまる。

温度変化の設定条件について、例えば図4のPCM④では、ピーク温

図5 ピーク温度・相変化温度幅の入力と計算結果の差
(代表温度：内側表面温度)

度の差が5分/Kでは-2℃、10分/Kから60分/Kでは-1℃、相変化温度幅の差が5分/Kでは7℃、10分/Kでは5℃、15分/Kと30分/Kでは4℃、60分/Kでは3℃のように、温度変化が遅い方が、得られる結果の精度が概ね高くなる。

代表温度の取り方について、外側と内側の表面の平均温度とした場合(図4)より、内側表面温度とした場合(図5)で、ピーク温度や相変化温度幅の差の絶対値が概ね小さい傾向が見られる。一方、図5では、降温時にピーク温度が実際よりも高めに算出されているが、これは、過冷却等の影響により融点より凝固点温度の方が低い場合が多い実在のPCMの性質とは傾向が異なる点に留意する必要がある。

図6、図7に、それぞれ、横軸を入力と計算結果のピーク温度の差、相変化温度幅の差とし、縦軸を式(12)の値とした散布図を示す。

$$I_p = (dT/dt)^{0.5} \cdot Q^{0.5} \cdot R_p^{0.5} \quad (12)$$

I_p : 図6、図7の縦軸の指標[K]

dT/dt : 温度変化速度 [K/s] ここでは温度変化の設定条件5、10、15、30、60分/Kの逆数

Q : 計算に入力した相変化温度範囲におけるPCMの顕熱と潜熱の単位面積あたり熱容量の合計値 [J/m²]

R_p : PCM外側表面から内側表面までの熱抵抗 [m²・K/W]

代表温度を内側表面温度とした場合の相変化温度幅10℃のピーク温度の差と、外側・内側平均表面温度とした場合の相変化温度幅の差で、比較的高い相関を示すことが確認される。計算の入力と結果にお

図6 ピーク温度の差と熱容量・熱抵抗・温度変化速度の関係

図7 相変化温度幅の差と熱容量・熱抵抗・温度変化速度の関係

けるピーク温度や相変化温度範囲の差は、温度変化速度が大きく、PCMの熱容量が大きく、熱抵抗が大きい場合に大きくなる傾向が確認される。従って、熱容量や熱抵抗の大きいPCMの測定を行なう場合には、その分、温度変化速度を小さくすべきであることが示唆される。なお、代表温度を外側・内側平均表面温度とした場合のピーク温度の差と、代表温度を内側表面温度とした場合の相変化温度幅の差については、図は省略するが、後者については差の絶対値が2°C以下と小さく、温度変化速度等の影響を受けにくいことが示唆される。

図4、図5より、PCMの大よその熱伝導率、潜熱量、相変化温度幅に関する情報が予め得られていれば、PCMの見かけの比熱測定の精度や温度変化速度の検討が可能である。例として、DSC等により熱伝導率0.15W/(m・K)程度、潜熱量100J/(g・K)程度、相変化温度幅が1°C程度と情報が得られているPCMについて、壁体熱特性測定装置により試験を行うことを想定する。このPCMは、本論文でのPCM④と⑤の中間的な挙動を示すと考えられる。このPCMについて、仮に、代表温度を内側表面温度として、相変化ピーク温度の精度1°C以内、相変化温度幅の精度3°C以内の結果を得たい場合には、図5より、5分/Kでも④、⑤ともこの誤差の範囲内にあり、期待する精度の結果が得られると考えられる。相変化温度幅の精度がより厳しい1°C以内の精度の結果を得たい場合には、同図より、15分/Kもしくはそれより緩やかな温度変化の設定条件であれば、④、⑤ともこの誤差範囲内に収まり、期待する精度を有した結果が得られると考えられる。

4. まとめ

一次元熱伝導計算により、測定条件やPCM物性値がPCMの見かけの比熱測定の結果に与える影響を確認した。測定を想定した計算の結果が、入力された見かけの比熱を再現する精度に関して、以下の傾向を得た。ただし、一部、以下の傾向から外れる結果も見られる。

・見かけの比熱を求める際の代表温度としては、内側表面温度を用

いる場合に、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する場合と比較し、ピーク温度や相変化温度幅についての計算の入力と結果の差の絶対値が小さい傾向が見られる。

- ・PCMの熱伝導率が高い程、見かけの比熱の再現精度が高くなる。
- ・代表温度を外側・内側表面温度の平均値とする場合、PCMの潜熱量が小さい程、見かけの比熱の再現精度が高くなる。一方、代表温度を内側表面温度とする場合、PCMの相変化温度幅が大きいと、潜熱量が小さい場合には、見かけの比熱の再現精度が低くなる。
- ・代表温度を外側・内側表面温度の平均値とする場合、PCMの相変化温度幅が大きい方が、見かけの比熱の再現精度が高くなる。代表温度を内側表面温度とする場合、PCMの相変化温度幅が小さい方が、見かけの比熱ピーク温度の再現精度が高くなる。
- ・PCM両側の温度変化の設定条件について、変化の速度が遅い程、見かけの比熱の再現精度が高くなる。

また、PCMの大よその熱伝導率、潜熱量、相変化温度幅に関する情報が予め得られれば、計算結果をもとに見かけの比熱測定の温度変化の設定条件や精度に関する検討が可能である。

今後の課題として、測定を実施し、一般に測定で生じるPCMの昇温時、降温時の見かけの比熱の差が、測定に起因するものか、材料特性として有する性質であるか、測定結果の解釈を行う必要がある。また、熱流計などの測定装置が測定精度に与える影響については、別途検討する必要がある。更に、測定に求められる精度を、建物の熱負荷計算の感度等より検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) ASTM C518-10: 2010. 6
- 3) ASTM C1784-14: 2014. 12
- 4) JSTM H 6107: 2016. 3
- 5) 宮城聡，神谷是行：PCM蓄熱材の冷却・加熱特性測定法，空気調和・衛生工学会論文集，Vol.42，No.240，pp.1-8，2017. 3
- 6) 馬淵賢作，黒木勝一，佐伯智寛：潜熱蓄熱材の性能評価方法に関する研究（その2）見かけの比熱及び蓄熱量の測定方法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学II，pp.45-46，2013. 8
- 7) 館林恵介，前真之，佐藤誠，崔榮晋，芹川真緒，山本健太：潜熱蓄熱体を含む壁体建材の吸放熱特性評価に関する研究 その1 ベルティエ素子を用いた壁体熱特性測定装置の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学II，pp.171-172，2016. 8
- 8) 猪瀬亮，足永靖信，佐伯智寛，兼松学，武田仁，土屋直子：外界気象の変動影響を考慮した潜熱蓄熱材の建築利用に関する研究（その3）示差走査熱量測定の実用性の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学II，pp.111-112，2015. 9
- 9) 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
- 10) 宇田川光弘：パソコンによる空気調和計算法，オーム社，1986

[2017年11月19日原稿受理 2018年5月25日採用決定]