

ホットディスク法による潜熱蓄熱材を配合した パーティクルボードの熱物性の評価†

前田啓^{*1,2}、恒次祐子^{*1}、福家正志^{*3}、今城丈治^{*3}、鳥山重隆^{*4}、鶴田祐二^{*4}、
秋津裕志^{*5}、朝倉靖弘^{*5}、宮本康太^{*6}、渋沢龍也^{*6}

Evaluation of Thermal Properties of Particleboard Containing Phase Change Materials by Hot Disk Method.

Kei Maeda^{*1}, Yuko Tsunetsugu^{*1}, Masashi Fuke^{*2}, Takeharu Imajo^{*2},
Shigetaka Toriyama^{*3}, Yuji Tsuruta^{*3}, Hiroshi Akitsu^{*4}, Nobuhiro Asakura^{*4},
Kohta Miyamoto^{*5}, Tatsuya Shibusawa^{*5}

^{*1} Graduate School of Agricultural and Life Sciences, the University of Tokyo,

^{*2} OKURA Industrial Co.,Ltd., ^{*3} ENEOS Corporation,

^{*4} Hokkaido Research Organization, Forest Products Research Institute,

^{*5} Forestry and Forest Products Research Institute

Building materials with improved thermal storage performance using phase change materials (PCM) are being developed to achieve energy conservation by reducing the air conditioning load. In order to expand the production and use of these materials, it is necessary to establish a method for rapid measurement of thermal properties. In this paper, the thermal properties of particleboard containing PCM pellets with a melting point of about 20°C were evaluated by the Hot Disk Method at different temperatures. The specific heat was also calculated using these thermal properties and the ratio of thermal conductivities along the in-plane and out-of-plane directions. Comparing the results under the different conditions where PCM was not to melt, the thermal conductivity became larger when the sample temperature was below the melting point of PCM than when it was above the melting point. This was thought to be due to the difference in thermal conductivity of PCM between solid and liquid state, which is not directly reflected in the thermal conductivity obtained by the steady-state method. The specific heat of the specimen with its surface layer removed was close to those of the components. Even with the same amount of PCM pellets contained, some specimens showed increasing thermal diffusivity and specific heat while others showed decreasing ones along as the temperature rose toward the melting point.

1. はじめに

木造住宅の熱性能の課題の一つとして、他の構

† 本研究の一部は第 69 回日本木材学会大会にて発表した。

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科

*2 現森林総合研究所 *3 大倉工業株式会社

*4 ENEOS 株式会社 *5 北海道立総合研究機

構林産試験場 *6 森林総合研究所

Corresponding author : K. MAEDA

造と比較して熱容量が小さいため、空調利用時に室温が安定しないことが挙げられる。近年、物質の潜熱により高い熱容量を実現する潜熱蓄熱材 (Phase Change Materials、以下 PCM) を導入することで、日射熱による蓄熱により冬季の日中と夜間の温度変化の抑制や夜間の暖房負荷の低減の取り組みが行われており¹⁾、木造建築物においても暖房負荷の低減効果に関する検討²⁾が行われている。また、PCM を活用して熱容量を高めた材料 (潜熱蓄熱建材) の開発も行われており、木質材料に

においても融解した PCM が溶出ししないようなペレット（以下ペレット）を配合したパーティクルボード（以下蓄熱 PB）の開発³⁾などの取り組みが行われている。

潜熱蓄熱建材の利用を実現するためには、建築材料の基本的な熱物性である熱伝導率 λ (W/mK) に加え、蓄熱性能の把握も必要不可欠である。一般に材料の λ と熱拡散率 α (m²/s)、比熱 C (J/kgK)、密度 ρ (kg/m³) の間には式(1)の関係が成り立つ。

$$\lambda = \alpha \rho C \quad (1)$$

その中で潜熱蓄熱建材の蓄熱性能は、材料温度を段階的⁴⁾・連続的⁵⁾に変えながら温度変化に必要な熱量（見かけの比熱）を測定することで評価する手法が規格化されている。一方、これらの手法は測定に必要な時間が長いため、製造管理のような場面での測定においては、非定常法のような短時間で測定可能な手法による蓄熱性能の評価手法の実現も必要とされている。

非定常法の中でホットディスク法（以下 HD 法）⁶⁾は、等方性材料の熱伝導率と熱拡散率を同時に測定可能という特徴を持ち、木材を測定した際の測定値が各方向の値のべき乗の積としてあらわされることが明らかとなっている^{7,8)}。定常法で得られる熱伝導率との関係など今後解明が待たれる課題はあるものの、一度の測定で複数の測定値が得られるという特徴を持つ同法は、熱伝導率と蓄熱性能が共に重要な潜熱蓄熱建材の測定法として有用である可能性がある。

そこで本研究では、HD 法による蓄熱 PB の熱伝導率ならびに蓄熱性能の評価について検討を行った。具体的には、ペレットの配合量（配合量）を変えて蓄熱性能を変化させた蓄熱 PB に対して HD 法と平板比較法による異なる材料温度での測定を実施し、材料温度や配合量との関係について検討を行った。

2. 実験

2.1 測定試料

試料はペレットを心層に配合した3層12mm厚、目標密度 770kg/m³、JIS A5908 パーティクルボード（素地パーティクルボード、曲げ強さ 13 タイプ、耐水 2 (P タイプ)）相当の蓄熱 PB³⁾とし、配合量

を 0~2.5kg/m²として製造した6条件の試験体 (B, P-0.5~P-2.5) を試験に供した（第1表）。ペレットは直径約 2mm、長さ約 5mm の円柱状で、融点約 20°C のパラフィン系樹脂を同量のオレフィン系樹脂と混練して射出成形したものである（第1図）。上述の蓄熱 PB から作成した 100mm 角の試験片 4 枚を 1 セットとして、B と P-2.0 は 8 組、他の条件は 4 組ずつの試験体を作成した。また、層構成が測定値に与える影響を検討するため、B と P-2.0 について、表層をグラインダーにより削り落として心層のみとした蓄熱 PB (B-C、P-2.0-C) も 4 組作成し、併せて試験に供した。

第1表 試験体の配合量と寸法、密度

試験体名	配合量 (kg/m ²)	厚さ* (mm)	密度* (kg/m ³)	PCM 分の密度** (kg/m ³)
B	0	12.0 (0.11)	743 (27)	0
P-0.5	0.5	12.1 (0.04)	734 (19)	21
P-1.0	1.0	12.1 (0.05)	732 (18)	42
P-1.5	1.5	12.1 (0.05)	731 (26)	62
P-2.0	2.0	12.0 (0.12)	756 (27)	83
P-2.5	2.5	12.1 (0.02)	734 (21)	104
B-C	0	9.3 (0.11)	685 (6)	0
P-2.0-C	2.0	9.3 (0.10)	730 (8)	108

*: カッコ内は標準偏差。

** : 配合量を厚さで除し、0.5 倍して算出。



第1図 ペレット（左）と蓄熱 PB の側面（右）

2.2 平板比較法による熱伝導率測定

熱伝導測定装置 (HC-J 型、英弘精機株式会社製) とシリコンゴム標準板（厚さ 19.9mm、熱伝導率 λ_0 (W/mK) は式(2)の通り) を用い、B、B-C、P-2.0、P-2.0-C の試験体について、面内方向の熱伝導率 λ_x と面外方向の熱伝導率 λ_z の測定を行った。試験体には、 λ_z の測定では前述の試験体を 2 枚ずつ重ねたものを、 λ_x の測定では蓄熱 PB を幅 20mm に切り出して 100mm 角に並べたものを、それぞれ 3 組ずつ使用した。試料は標準板とともに 2 枚の熱板

で挟み、熱板と標準板間の温度 T_1 、標準板と試料間の温度 T_2 、試料と熱板間の温度 T_3 が一定になった後、式(3)より熱伝導率を算出した。

$$\lambda_0 = 0.23 - 0.000057(T_1 + T_2)/2 \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_0 \times \frac{l}{l_0} \times \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} \quad (3)$$

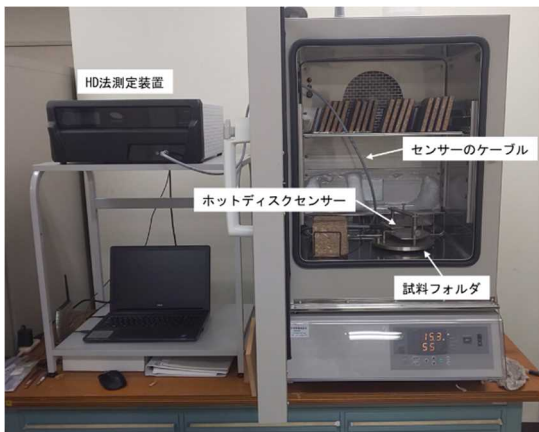
ここで、 l は測定試料の厚さ(mm)、 l_0 は標準試料の厚さ(mm)である。熱板の温度設定は、P-2.0 と P-2.0-C については固相と液相のPCMの熱物性の違いが与える影響を検討するため、 T_2 と T_3 の平均で与えられる材料平均温度 T_a が 10、20、30 °C (B と B-C は 20 °C のみ) となるよう、条件ごとに設定した (第2表)。

第2表 熱板温度と材料平均温度の平均値

試料	方向	目標の T_a (°C)	T_1 (°C)	T_3 (°C)	実際の T_a (°C)
3層	λ_r	10	24.1	5.1	10.0
		20	4.9	25.9	20.6
		30	10.2	36.7	29.9
	λ_z	10	23.6	5.0	11.3
		20	5.0	27.7	19.9
		30	12.8	39.0	30.1
心層のみ	λ_r	10	24.1	5.1	10.1
		20	5.0	25.8	20.4
		30	10.2	36.5	29.8
	λ_z	10	22.9	5.1	10.7
		20	5.0	27.3	20.1
		30	10.3	39.0	30.0

2.3 HD法による熱伝導率・熱拡散率の測定

HD法熱物性測定装置 (京都電子(株)、TPS500) を用い、HD法による異なる温度における熱伝導率、熱拡散率の測定を実施した。測定には半径 6.4mm のセンサー(C5501)を使用し、測定時間は 160 秒、加熱量 P_0 は 100mW とした。



第2図 測定風景 (実際は扉を閉じて測定)

測定はあらかじめ試験体と試料フォルダ、センサーを恒温恒湿器 (ヤマト科学(株)、IG420) 内で養生して実施した (第2図)。温度履歴の影響を統一するため、試験体は測定前に 5 °C 52%RH で 3 時間養生し、その後 10 °C / h で所定 (10 °C, 15 °C, 17 °C, 18 °C, 19 °C, 20 °C, 22 °C, 25 °C) の温度 (以下初期温度) に到達させ、1 時間以上経過した後に測定を実施した。試験体は 4 枚のうち 2 枚目と 3 枚目の間にセンサーに挟んだ状態でフォルダにセットし、上部のねじにトルクレンチで 200 Nm のトルクをかけて試料とセンサーを密着させた。温度変動の影響を低減するため、以上の操作は恒温恒湿器内で素早く実施した。その後扉を閉め、15 分経過かつ庫内の温湿度が初期温度で一定になっていることを確認したうえで測定を開始した。

測定開始 40 ~ 160 秒後のセンサーの温度上昇の推移 $\Delta T(t)$ のデータを用い、式(4)の直線性が最も高くなる λ と α を算出した。

$$\overline{\Delta T(\tau)} = \frac{P_0}{2\pi^{3/2}r\lambda} D(\tau) \quad (4)$$

ここで r はセンサーの半径、 τ は特性時間 (式(5))、 $D(\tau)$ はセンサー形状に関する無次元パラメータ (詳細は文献^{6,9)} を参照のこと)。

$$\tau = \sqrt{\alpha t} / r \quad (5)$$

2.4 HD法により得られた熱伝導率・熱拡散率を用いた蓄熱PBの比熱の算出

異方性を持つ材料について HD 法で測定を行った場合、得られる熱拡散率は面内方向の熱拡散率 α_r であり、熱伝導率は λ_r と λ_z の相乗平均となることが理論的に導き出されている¹⁰⁾。この事実と式(1)の関係をふまえ、今回の論文では平板比較法で求めた熱伝導率から求めた λ_r と λ_z の比率を用い、HD法で得られる熱伝導率 λ_h と熱拡散率 α_h をもとにした比熱の算出を実施した (式(6))。

$$C = \lambda_h \sqrt{\lambda_r / \lambda_z} / \alpha_h \rho \quad (6)$$

3. 結果と考察

3.1 初期温度とセンサーの温度上昇の関係

HD法の測定において、測定開始 160 秒後のセンサー温度は、測定開始時に比べて 5.3K ~ 9.8K 上昇していた。試料の温度上昇がセンサーより小さいことを踏まえると、PCMの融点 (以下融点) よ

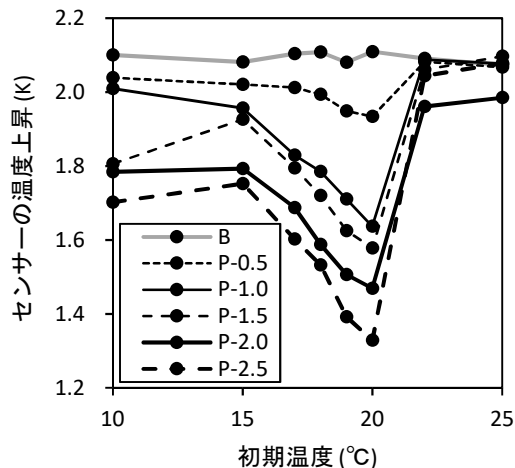
り高い初期温度 22 °C、25 °C での測定に加え、10 °C での測定も PCM の相転移（以下相転移）の影響がほとんど見られなかったと考えることができる。一方、15 °C ~ 20 °C での測定では、測定中にセンサー温度が 20 °C を超えるため、測定値は相転移の影響を受けていると考えられる。

次に、実際の熱物性値の算出に用いた測定開始 40 秒後から 160 秒後にかけての温度上昇について、配合量と初期温度の関係を第 3 図に示す。相転移の影響が考えられる 15 °C ~ 20 °C での測定では、配合量の増加ならびに初期温度が 20 °C に近づくに従って温度上昇が小さくなっていった。一方、相転移の影響を受けていないと考えられる測定については、10 °C では 15 °C ~ 20 °C と同様に配合量の増加に伴った温度上昇の低下が見られたが、融点以上である 22 °C、25 °C での温度上昇は配合量によらず同程度で、異なる傾向となった。

3.2 測定温度と HD 法で得られる熱伝導率、熱拡散率、比熱の関係

HD 法により求めた熱伝導率を第 4 図に示す。15 °C ~ 20 °C での測定においては、配合量と初期温度の増加に伴って熱伝導率が増加していることがわかる。相転移が生じていない条件での測定においては、10 °C において配合量による違いが見られたが、22 °C と 25 °C では配合量による差は認められなかった。

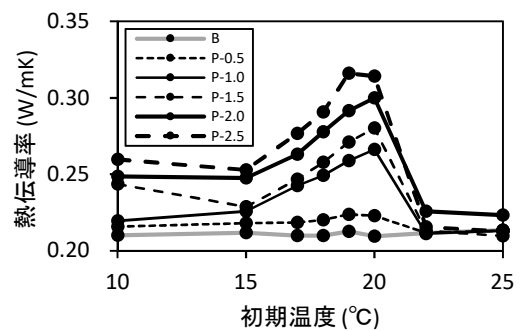
一方、平板比較法による測定では T_a の違いによる熱伝導率の変化は認められなかった（第 5 図）。測定方向の影響については、 λ_r/λ_z が P-2.0 で 1.68、P-2.0-C で 1.71、B で 1.84、B-C で 1.98 となり、異



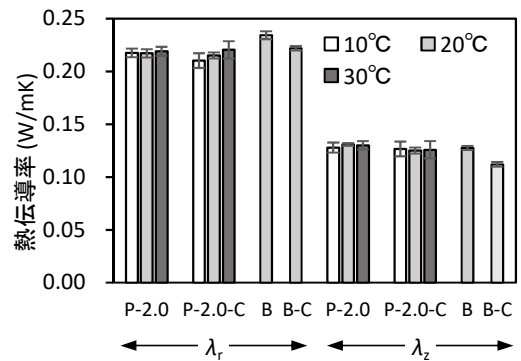
第 3 図 初期温度とセンサーの温度上昇の関係

方性の程度は蓄熱 PB の方が若干小さかった。

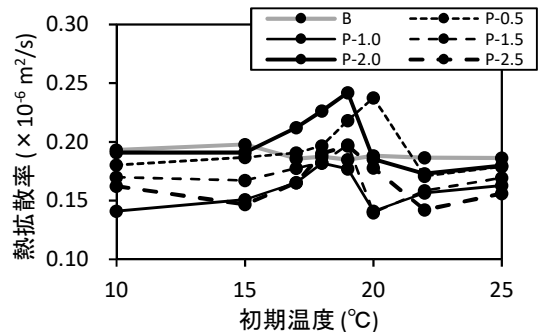
第 6 図に HD 法で測定した熱拡散率を示す。17 °C ~ 20 °C での測定においては、初期温度に対して熱伝導率と同様の傾向を示した一方、配合量との関係は明確でなかった。20 °C における配合量と熱拡散率の関係（第 7 図）を見ると、ペレットの配合によりばらつきが大きくなっており、同じ配合量でも 25 °C における熱拡散率 (0.14 ~ 0.21 × 10⁻⁶ m²/s) より大きくなる試験体と小さくなる試験体の双方が存在していることがわかる。以上を踏まえると、HD 法で得られる熱拡散率は



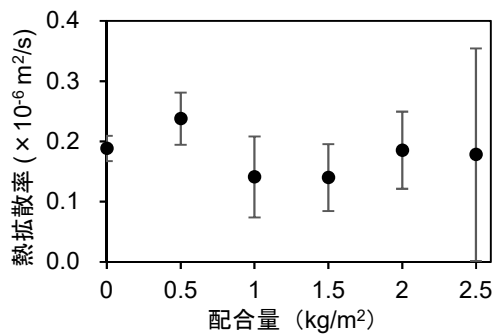
第 4 図 初期温度と HD 法で得られる熱伝導率の関係



第 5 図 平板比較法で測定した熱伝導率 (エラーバーは標準誤差を示す)



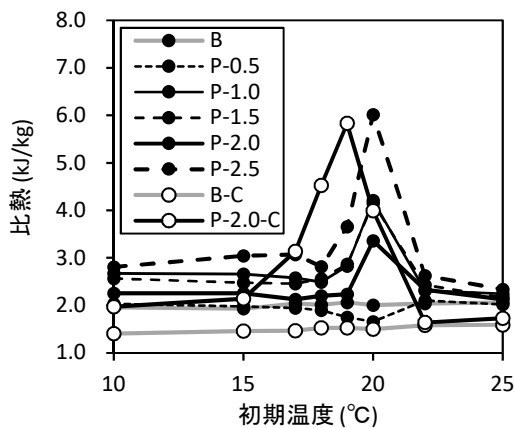
第 6 図 初期温度と HD 法で得られる熱拡散率の関係



第7図 初期温度 20 °C における配合量と HD 法で得られる熱拡散率の関係

PCM の融解の影響を受けて変化していたが、その挙動は配合量のみでは説明できないことがわかる。

上記で得られた熱伝導率、熱拡散率、 λ_x/λ_z から式(6)によって求めた比熱を第8図に示す。相転移の影響を受けていないと考えられる初期温度 (10 °C、22 °C、25 °C) について B と B-C、P-2.0 と P-2.0-C の比熱を比較すると、ペレットの有無に関わらず表層を含む試験体 (B、P-2.0) の方が大きな比熱となっていた。また表層を含む試験体で比較すると、10 °C での測定では配合量が多くなるにつれて比熱も大きくなっていったが、25 °C の場合は配合量による違いは見られなかった。



第8図 式(6)から求めた比熱

相転移の影響を受けた初期温度での測定では、融点に近い 19 °C、20 °C で得られた比熱が、P-1.0 ~2.5 では他に比べて大きな値、P-0.5 では小さな値を示していた。融点近くの初期温度で得られた比熱が他より小さくなった試験体は P-1.0~2.5 の中にも存在しており、同じ配合量でもばらつきが大きい結果となった。

3.3 PCM の存在が HD 法により得られる熱伝導率に与える影響

3.3.1 相転移が影響しない測定での検討

HD 法による 10 °C と 22 °C、25 °C での測定では配合量とセンサーの温度上昇や熱伝導率の関係に違いがみられたが、平板比較法による測定では λ_x と λ_z のいずれも T_a の違いによる影響は見られなかった。HD 法の結果については、20 °C (293.15K) の融点を持つ n-ヘキサデカンの熱伝導率が 280K 付近 (固体) で 0.3W/mK 程度、300K 付近 (液体) で 0.15W/mK 程度¹¹⁾ であることが示すように、PCM の熱伝導率が液体時に比べて固体時に大きくなっていることが原因と考えられる。

一方、蓄熱 PB がパーティクルボード (PB) と PCM の 2 要素で構成されると考えた時、平板比較法で得られる熱伝導率 λ は Kollmann らの木材・木質材料の熱伝導率に関する繊維と熱流の直交モデル¹²⁾ と同様に表されると考えられる (式(7))。

$$\lambda = \frac{\lambda_{PB}\lambda_{PCM}l}{\lambda_{PB}l_{PCM} + \lambda_{PCM}(l - l_{PCM})} \quad (7)$$

l は蓄熱 PB の厚さ、 l_{PCM} は蓄熱 PB 中の PCM の厚さ、 λ_{PB} と λ_{PCM} は PB と PCM の熱伝導率である。ここで配合量 2.0 kg/m² の蓄熱 PB の λ_z について、P-2.0 の密度の中で PCM の占める割合 (第1表) が l と l_{PCM} の比率と同じと考え、 λ_{PB} に B の λ_z (第5図)、 λ_{PCM} の熱伝導率に n-ヘキサデカンの熱伝導率¹¹⁾ を代入したところ、10 °C と 30 °C の λ_z はほぼ同じ値となった (第3表)。すなわち、今回の条件における λ_{PCM} の変化は、定常法で得られる熱伝導率にほとんど影響を与えないことがわかる。

以上の議論は、潜熱蓄熱建材の蓄熱性能の評価のために必要な非定常状態での熱環境の解析を行う際に、定常法で測定される熱伝導率が適さない場合がありうることを示唆している。今後 PCM の居住空間における蓄熱機能を解析していくためには、材料内部の熱伝導率の分布の影響などの検討を通じ、定常法と非定常法で得られる熱伝導率に差がみられるメカニズムの解明が必要といえる。

第3表 蓄熱 PB (配合量 2.0kg/m²) の 10 °C と 30 °C での熱伝導率の試算結果

材料温度 (°C)	l (mm)	l_{PCM} (mm)	λ_{PB} (W/mK)	λ_{PCM} (W/mK)	λ_z (W/mK)
10	12.1	1.4	0.12	0.3	0.129
30	12.1	1.4	0.12	0.15	0.123

3.3.2 相転移が影響を与える測定での検討

相転移が影響を与えた HD 法の測定では、初期温度の上昇により融点に近づくことで熱伝導率が増加していたが、この結果は n-ヘキサデカンの融点 (約 290K) 付近での熱伝導率が 280K の値よりも小さい¹¹⁾ ことが示す構成要素の熱伝導率の変化と異なる傾向であった。ここで式(4)を見ると、HD 法で得られる熱伝導率の増加は、第 3 図で示されたセンサーの温度上昇の抑制によってもたらされたと考えられる。初期温度が融点に近づいた場合の温度上昇の抑制は、融点を超える温度上昇の生じる範囲が広がることで、より多くの PCM が融解して生じたと考えられる。配合量が増加した場合も同様に温度上昇が小さくなったことを併せて考えると、HD 法の熱伝導率は PCM の融解による吸熱の程度を反映している可能性があり、蓄熱性能の指標となりうることを示唆された。

3.4 PCM の存在が HD 法で得られる熱拡散率や比熱に与える影響

3.4.1 相転移が影響しない測定での検討

相転移が影響しない初期温度で測定された比熱 (第 8 図) について、蓄熱 PB を構成する木材、オレフィン系樹脂 (ポリエチレン、ポリプロピレン)、PCM (n-ヘキサデカン) の文献値 (第 4 表) と比較すると、ペレットの有無にかかわらず、3 層の試験体は HD 法で測定された比熱が蓄熱 PB の構成要素の比熱より大きな値を示した (B と P-2.0 の比熱を例にとると、初期温度 10℃ で 1.96 J/kgK と 2.26 J/kgK、初期温度 25℃ で 2.06 J/kgK と 2.13 J/kgK)。その一方で B-C と P-2.0-C の比熱 (初期温度 10℃ で 1.41 kJ/kgK と 1.97 kJ/kgK、初期温度 25℃ で 1.59 kJ/kgK と 1.73 kJ/kgK) は、蓄熱 PB の構成要素と近い値を示しており、比較的妥当な測定結果となっていることがわかる。

B と P-2.0 の密度はいずれも B-C と P-2.0-C より小さい (第 1 表) ことから、表層の密度は材量全

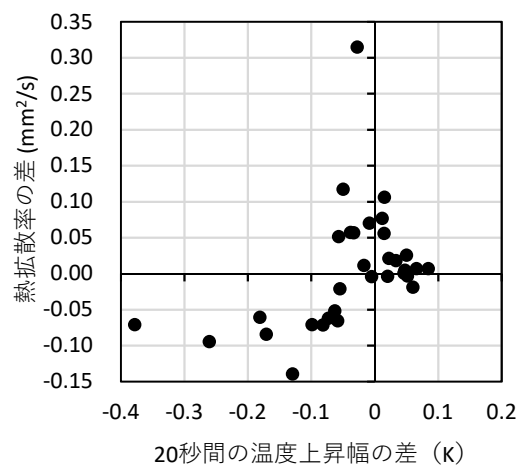
蓄熱 PB の構成要素	比熱 (kJ/kgK)
木材 (含水率 10%)	1.61 ¹³⁾
ポリプロピレン (固体、300K)	1.62 ¹⁴⁾
ポリエチレン (固体、300K)	1.56 ¹⁴⁾
n-ヘキサデカン (固体、270K)	1.86 ¹⁵⁾
n-ヘキサデカン (液体、300K)	2.23 ¹⁵⁾

体の密度より大きいと考えることができる。加熱初期の温度推移から熱物性を算出している HD 法ではセンサー付近の温度分布の影響を強く受けるため、表層と試験体全体の密度の違いが、3 層の蓄熱 PB の HD 法で得られる比熱と試験体全体の比熱の違いをもたらしたと考えられる。

3.4.2 相転移が影響を与える測定での検討

初期温度 15℃ ~ 20℃ での測定においては、同じ配合量の試験体でも熱拡散率・比熱が大きくなる試験体と小さくなる試験体が混在している結果となった (第 7 図)。ここで、20℃ で測定された熱拡散率と測定開始 20 秒後の温度上昇について、25℃ で得られた値からの増減を B と P-0.5 ~ P-2.5 の全試験体について比較を行ったところ、熱拡散率の明確な減少は温度上昇の低下幅が大きい試験体でのみ生じていることから (第 9 図)、温度上昇の違いが熱拡散率のばらつきをもたらした可能性があるといえる。

温度上昇の違いをもたらす要因としては、試験体交換時の恒温恒湿器の開扉といった測定時の温度変動の影響に加え、蓄熱 PB 内部のペレットの分布の影響も考えられる。今回の蓄熱 PB では PCM はペレット内部に局在しており均一に分散しているとはみなせず、センサーの直径 (12.8mm) に対してペレットの長さ (5mm) の差が小さい。そのため、試験体内でのペレットの分布や、測定時のセンサーの位置によって、ペレットとセンサーの距離は変わりうると考えられる。HD 法で測



第 9 図 熱拡散率と加熱開始 20 秒後の温度上昇幅について、初期温度 20℃ での値から 25℃ での値を引いた差の関係

定される熱拡散率が加熱初期における温度変化の影響を強く受ける¹⁶⁾ことを併せて考えると、20℃での測定において加熱初期の温度上昇の低下が大きい試験体で熱拡散率が小さくなった原因の候補の一つとして、熱源であるセンサーの近くにペレットが存在したため、PCMの融解にともなう吸熱が早く生じたことが挙げられる。

HD法で比熱の測定を実現するためには、HD法で得られる熱拡散率についての理解が必要不可欠である。そのため、今後伝熱解析などにより熱拡散率の挙動を検討し、今回得られた結果の一般性を検討していく必要があると考えられる。

4. まとめ

融点約 20℃のPCMを含むペレットを配合した蓄熱PBについて、HD法と平板比較法による熱伝導率や熱拡散率、比熱の測定を行った。相転移が影響しない初期温度では、融点前後におけるPCMの熱伝導率の違いの影響がHD法でのみ観察され、定常・非定常で熱伝導率のばらつきの影響が異なることが原因と考えられた。相転移の影響を受ける初期温度での測定では、融解による吸熱の増加に伴って熱伝導率は増加した一方、熱拡散率や比熱については融解にともなう変化は観察されたもののばらつきが大きく、センサーとペレットの位置関係が影響している可能性が示唆された。以上より、HD法により得られる熱伝導率が蓄熱PBの蓄熱性能の指標となりうる一方、熱拡散率や比熱も含め、非定常状態での測定に起因した特徴が含まれることが明らかとなった。今後、材料内部のPCMの分布の違いが熱的挙動にもたらす影響などの検討を進めることで、HD法による蓄熱性能の評価の実現につながることを期待される。

謝辞

本研究は農研機構生研支援センター「[知]の集積と活用」による研究開発モデル事業の支援を受けて行った。

文献

1) 横山昌弘: 太陽エネルギー, **46**(4), 15-20 (2020)

- 2) 佐藤友紀、尾崎明仁、中村哲己、林禎彦、石黒成紀: 日本建築学会環境系論文集, **77**(678), 651-659 (2012)
- 3) 福家正志、村上知由、谷脇宏、笠岡英司: 木質ボード及びその製造方法、特開 2018-202710 (2018)
- 4) ASTM C1784-20 : Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products (2020)
- 5) JSTM O 6101 : 潜熱蓄熱材を用いた建築材料の蓄熱特性試験方法 (2020)
- 6) S. E. Gustafsson : *Review of Scientific Instruments*, **62**, 797-804 (1991)
- 7) 前田啓、信田聡、恒次祐子、宮本康太、渋谷龍也: 木材工業, **75**(7), 286-291 (2000)
- 8) K. Maeda, Y. Tsunetsugu, K. Miyamoto, T. Shibusawa : *Journal of Wood Science*, **67**, 20 (2021)
- 9) 前田啓: 木材工業, **75**(1), 2-9 (2020)
- 10) S. E. Gustafsson, M. Gustavsson, J. Gustavsson : Method of Measuring Thermal Properties of Materials with Direction Dependant Properties, WO 00/70333, (2000)
- 11) C. Vélz, M. Khayet, J.M. Ortiz de Zárate : *Applied Energy*, **143**, 383-394 (2015)
- 12) F. Kollmann, L. Malmquist : *Holz als Roh- und Werkstoff*, **14**(6), 201-204 (1956)
- 13) F. Kollmann : *Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood*, Springer-Verlag, 246 (1968)
- 14) J. Wen : *Physical properties of polymers handbook*, Springer, 245-254 (2007)
- 15) G. S. Parks, G. E. Moore, M. L. Renquist, B. F. Naylor, L. A. McClaine, P. S. Fujii, J. A. Hatton : *Journal of the American Chemical Society*, **71**(10), 3386-3389 (1949)
- 16) V. Bohac, M. Gustavsson, L. Kubicar, S. E. Gustafsson : *Review of Scientific Instruments*, **71**(6), 2452-2455 (2000)