

残廃材を原料とした建築用バインダレス小片 断熱パネル (第4報)[†] プレーナー屑を原料とした実大厚さパネルの蓄熱効果^{*1}

関野 登^{*2}, 河村義大^{*2}, 山内 剛^{*3}

Binder-less Wood Chip Insulation Panel for Building Use Made from Wood Processing Residues and Wastes IV.[†] Heat storage capacity of full-scale thick panels manufactured using wood shavings^{*1}

Noboru SEKINO^{*2}, Yoshihiro KAWAMURA^{*2} and Go YAMAUCHI^{*3}

This paper describes thermal properties of binder-less wood chip insulation panels, focusing especially on the effect of panel thickness and on comparisons with the glass wool and phenolic foam panels commonly used as insulation material for buildings. Insulation panels with a density of 100 kg/m³ and thicknesses ranging from 50 to 150 mm were manufactured using wood shavings derived from a wood processing factory. Our panels were measured for thermal conductivity and diffusivity by analyzing heat flux through a simple wall model under an unsteady temperature schedule. The results obtained are as follows: 1) Thermal conductivity of our panel was about 0.060 W/mK for the practical thicknesses of 100 to 150 mm. 2) Heat inflow to the wall with our insulation panel was less than that of the glass wool and phenolic foam panels when compared at the same thermal resistance level. 3) Thermal diffusivity of our panels (0.41×10^{-6} m²/s) was about half the value of the glass wool and three quarters of that of the phenolic foam panels since our panels have higher density and specific heat than the others. The results characterize our panels as having thermal insulation capacity that can be superior to that of glass wool and phenolic foam panels due to greater heat storage capacity.

Keywords: insulation panel, wood shavings, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat storage capacity.

プレーナー屑を原料とする建築用バインダレス断熱パネル (密度100 kg/m³) を、厚さ50~150 mmの範囲で製造した。非定常温度スケジュールにおける壁内一次元熱流を測定し、断熱性と蓄熱性に及ぼすパネル厚さの影響を調べると同時に、本断熱パネルの熱的性質を市販のグラスウールおよびフェノールフォームと比較した。得られた結果を要約すると、1) 実用的な厚さ範囲 (100~150 mm) ではほぼ一定の熱伝導率 (0.060 W/mK) を示した。2) 同一熱抵抗を持つグラスウールやフェノールと比較して壁体への流入熱量が抑制され、保温性の優位性が示唆された。3) 熱拡散率 (0.41×10^{-6} m²/s) はグラスウールの約 1/2、フェノールフォームの約 3/4 となり、蓄熱効果による保温性が期待できる。

[†] Report III: This journal 50, 397-403 (2004).

^{*1} Received January 17, 2005; accepted June 8, 2005. 本研究の一部は第54回日本木材学会大会 (2004年8月、札幌) で発表した。

^{*2} 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 020-8550

^{*3} ㈱ヤマウチ Yamauchi Co. Ltd., Miyako 027-0025

1. 緒 言

木材産業における残廃材の再資源化は、産業廃棄物の法規制強化やゼロ・エミッション推進の観点から、一段と重要性を増している。本研究では、このような背景から残廃材を用いた建築用断熱材の実用化を目指し、以下の特徴をもつ断熱パネルを考案し

た¹⁾。1) 木材, 樹皮, その他農産廃棄物などの小片マットを型枠中で適度に常温圧縮し, これを周囲被覆することで接着剤を用いずにパネル形状を維持する, 2) 熱圧不要および接着剤不要のため, 製造エネルギーが少なく低環境負荷製品となり得る, 3) パネル幅方向の弾性力を利用して簡易施工が可能, 4) 手作業解体の簡略化や小片再資源化の自由度が高く, リサイクル設計が考慮されている。

一連の本研究²⁻⁷⁾では種々の原料でパネルを製造し, 断熱性と壊れ難さが両立する最適パネル密度を検討してきた。その結果, プレカットや集成材製造過程で排出されるプレーナー層が有望な原料であり, パネル密度 100 kg/m^3 程度が最適条件と判断された。しかし, 得られた熱伝導率は最小でも 0.06 W/mK 程度であり, 熱伝導率から判断される断熱性は住宅建築で多用されるグラスウールよりも劣る。したがって実際には, 壁体等の断熱設計に必要な熱抵抗値 (= 厚さ/熱伝導率) を厚さ増加で確保する必要がある。その際, 厚物化による質量増と木質特有の大きな比熱によって, 鉱物系や石油系断熱材よりも格段に大きな熱容量が確保され, 蓄熱効果による保温性が期待できる。しかし, 既報²⁻⁷⁾では厚さ 50 mm での熱伝導率測定に留まり, 厚物パネルの蓄熱性は未検討であった。

そこで本報では, 厚さ $50 \sim 150 \text{ mm}$ の範囲でプレーナー層を原料とする断熱パネルを製造し, 非定常温度スケジュールにおける壁内一次元熱流の計測を行って断熱性と蓄熱性に及ぼすパネル厚さの影響を調べた。また, 市販のグラスウールおよびフェノールフォームを対照材料として同様の測定を行い, 本断熱パネルの熱的性質の位置づけを考察した。

2. 実験

2.1 断熱パネルの製造

原料小片はプレカット工場から排出されたベイマツ・ベイヒ混合のプレーナー層 (重量比 $6:4$) で, 目開き 3 mm の篩で微粉が除去されている。小片寸法 (平均値 \pm 標準偏差, $n=50$) は $13.3 \pm 4.8 \times 14.8 \pm 6.1 \times 0.21 \pm 0.15 \text{ mm}$ である。小片は供試前に $20^\circ\text{C} 60\% \text{ RH}$ の恒温恒湿室内で十分に養生され, 供試時の含水率は 11% であった。また, 既報²⁻⁴⁾と同様の方法で測定したマット嵩密度は 44 kg/m^3 となった。

パネルの両側面に配置する形状安定板および周囲被覆材は既報²⁻⁴⁾と同様であり, それぞれ市販薄物MDF (厚さ: 2.6 mm , 密度: 783 kg/m^3 , 熱伝導率: 0.133 W/mK , MOE: 3.61 GPa , MOR: 59.1 MPa), ポリエチレンフィルム (厚さ: 0.15 mm , 密度: 992

kg/m^3 , 熱伝導率: 0.34 W/mK) を用いた。

既報²⁻⁴⁾に示した手順で, パネル密度 100 kg/m^3 , 平面寸法 $490 \times 340 \text{ mm}$ の断熱パネルを5水準の厚さ ($50, 75, 100, 125, 150 \text{ mm}$) で各3体製造した。ただし, 厚さ 50 mm では, 幅と厚さの関係から座屈しやすく製造が困難であるため, 製造できた1体のみを供試した。なお, 平面寸法は後述する小型環境チャンバーの寸法制約から決定された。

2.2 対照材料

Table 1に示す厚さ4水準の市販グラスウール (密度: 32 kg/m^3 , 熱伝導率カタログ値: 0.036 W/mK) および市販フェノールフォーム (密度: 27 kg/m^3 , 同上: 0.020 W/mK) を, 上記と同様の平面寸法に切断して試験体 (各厚さ1体) とした。ただし, グラスウールは厚さ 70 mm の試験体を 10 mm 毎に順じ厚さ減少させて用いた。なお, 厚さ設定に際し, 熱抵抗の範囲が本断熱パネルのそれ ($0.9 \sim 2.6 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) に近接するよう留意した。

2.3 熱流計測および熱伝導率, 熱拡散率の算出

恒湿室内 (20°C) に設置した小型環境チャンバー (いすゞ製作所: 水晶 μ -2001) を用いた。その概観と試験体の様子 (断面図) を Fig. 1に示す。試験体は高精度熱流計 (英弘精機: MF-160, $310 \times 310 \times 0.7 \text{ mm}$) で挟まれ, さらに熱流計の密着確保のため熱伝導率既知の市販パーティクルボード (厚さ: 9 mm , 密度: 828 kg/m^3 , 熱伝導率: 0.16 W/mK) で挟まれた。また, 温度測定 (Fig. 1中の測温点1~7) には熱電対 (JIS T型 0.32 mm ϕ) を用いた。なお,

Table 1. Specifications of the test specimens.

Samples	Density (kg/m^3)	Thickness, d (mm)	λ_p^{a1} (W/mK)	R_p^{d1} ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)
Binder-less wood chip insulation panel	100	50	0.058 ^{b1)}	0.9
		75		1.3
		100		1.7
		125		2.2
		150		2.6
Glass wool panel	32	40	0.036 ^{c1)}	1.1
		50		1.4
		60		1.7
		70		1.9
Phenolic foam panel	27	25	0.020 ^{d1)}	1.3
		35		1.8
		45		2.3
		55		2.8

^{a1)} Thermal conductivity.

^{b1)} The value at 10°C obtained by part II of this study.

^{c1)} The values shown in the specifications of the products.

^{d1)} Thermal resistance calculated by d/λ_p .

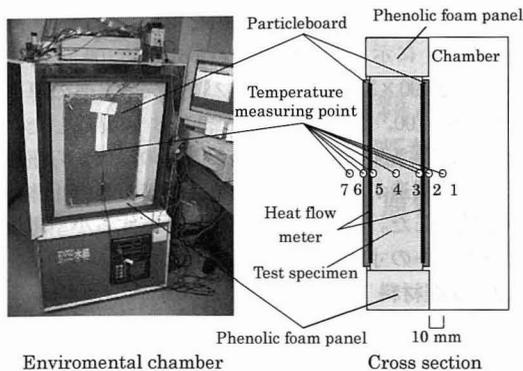


Fig. 1. Measuring device and sample set-up.

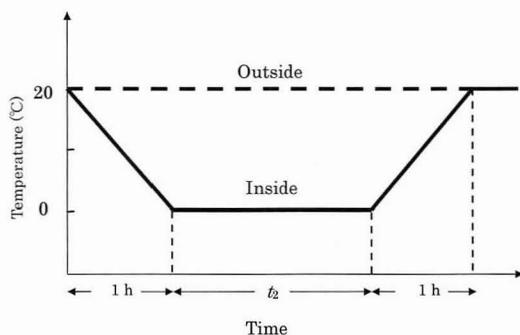


Fig. 2. A schedule of temperature change in the chamber.
 Note: t_2 shows the time until two hours after a steady state of heat flow was observed.

熱流方向は水平であるが、一次元熱流に極力近づけるため試験体一式の周囲は厚さ50 mmのフェノールフォーム（既出の対照材料と同一仕様）で断熱された。

チャンバー開口部に試験体一式を取り付けた後、試験体およびチャンバー内部の温度が恒温室内と同一の20°Cとなるまで養生した。その後、チャンバー内部の温度を Fig. 2 に示す台形波で変化させ、両面の熱流および各点の温度を5秒毎に記録した。ただし、チャンバー内部0°Cの保持は、定常熱流に到達して更に2時間経過するまでとした。測定は1試験体につき2回（表裏の逆転）で、1条件に6回とした。ただし、1試験体となる厚さ50 mmの本断熱パネルでは3回とした。

2.3.1 熱伝導率の算出方法

定常到達後2時間の平均熱流 q_s 、断熱材両面の平均温度差 dT （測定点3と5）および断熱材の厚さ dx から、式(1)を用いて熱伝導率 λ を算出した。

$$\lambda = q_s \frac{dx}{dT} \quad (1)$$

2.3.2 熱拡散率の算出方法

一次元非定常熱伝導方程式(2)を適用し、差分陽解法により熱拡散率 α を求めた。以下にその手順を示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$T(x_i, t_{n+1}) = pT(x_{i-1}, t_n) + (1-2p)T(x_i, t_n) + pT(x_{i+1}, t_n) \quad (3)$$

$$p = \alpha \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (5)$$

式(2)において、温度 T は位置 x と時間 t の関数であるが、差分化すると式(3)が得られる⁸⁾。ここで、添字 i 、 n はそれぞれ差分格子における空間および時間の格子点位置、 Δx および Δt はそれぞれの格子点間隔を示す。測温点3、4、5の初期温度、時間経過にともなう測温点3と5の温度変化を境界条件として与え、式(3)により試験体内部の温度分布の経時変化を計算した。まず、式(5)より求めた α の概算値を式(4)に代入して温度分布の経時変化を求めた。さらに、この α を1%ずつ変化させて計算を繰返し、厚さ中央部の温度変化の計算値と実測値（測温点4）の平均平方誤差⁹⁾の平方根が最小となる α を決定した。計算範囲は降温開始から升温終了後の定常状態に達するまでとした。なお、発散を防ぐため、式(4)において $p \leq 0.5$ に設定する必要がある⁸⁾。そこで、本断熱パネルの Δt は20秒とし、 Δx は5 mmとした。また、フェノールフォームの Δt は5秒、 Δx は3 mm、グラスウールの Δt は5秒、 Δx は4 mmとした。

3. 結果および考察

3.1 熱流

熱流と温度の測定例を Fig. 3 に示す。また、断熱性の解析指標として、断熱材両面での熱流（低温側 q_L 、高温側 q_H ）の上昇速度 dq_L/dt 、 dq_H/dt 、断熱材両面での熱流発生の時間差 t_0 および定常到達時間 t_s を求め、その一覧を Table 2 に掲げた。ただし、 dq/dt は熱流発生初期の10分間を対象に5秒毎に得た値の平均値である。また、 t_s は $q_H/q_L \geq 0.95$ を満たす最短時間と定義した。

3.1.1 流入熱量

断熱材への単位面積当たりの流入熱量 W_H を式(6)より求め、結果を Table 2 に示した。ただし、積

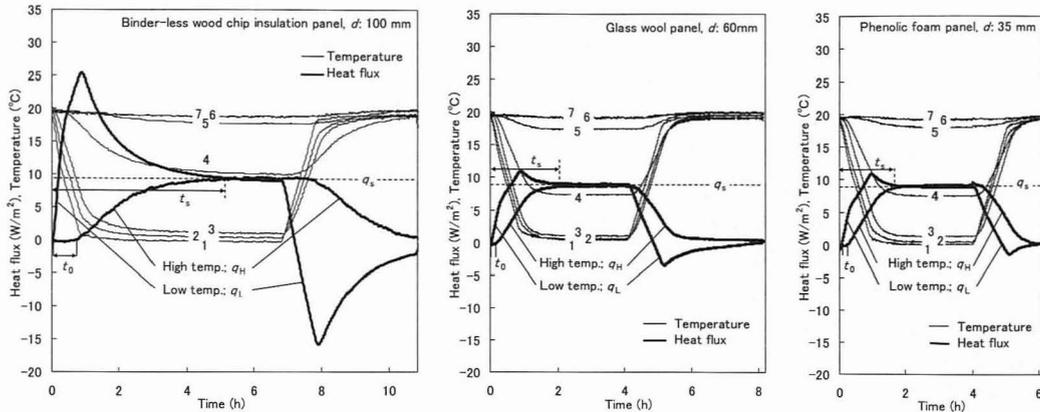


Fig. 3. Examples of changes of temperature and heat flux for panels with a similar thermal resistance ($R \approx 1.8 \text{ m}^2 \text{ K/W}$).

Note: The numbers shown along the temperature curves indicate measuring points; see Fig. 1.

Table 2. Results of the heat flux analysis (values listed are shown as mean \pm std, $N=3-6$).

Samples	Thickness, d (mm)	dq_H/dt^a ($\text{W/m}^2\text{min}$)	dq_L/dt^a ($\text{W/m}^2\text{min}$)	t_0^b (min)	t_s^c (min)	W_H^d (kJ/m^2)	ΔW^e (kJ/m^2)
Wood chip insulation panel	50	0.856 ± 0.015	0.156 ± 0.006	15.3 ± 0.0	137.0 ± 0.8	112.2 ± 0.3	79.9 ± 0.2
	75	0.930 ± 0.034	0.076 ± 0.002	22.0 ± 0.0	212.4 ± 3.9	65.2 ± 1.0	116.8 ± 1.7
	100	0.916 ± 0.002	0.060 ± 0.008	39.6 ± 0.0	287.0 ± 13.4	37.3 ± 1.0	150.7 ± 0.9
	125	0.924 ± 0.012	0.043 ± 0.002	56.0 ± 0.0	360.3 ± 24.5	22.8 ± 0.6	166.8 ± 5.4
Glass wool panel	40	0.352 ± 0.030	0.163 ± 0.014	11.0 ± 0.0	90.8 ± 5.3	103.7 ± 0.4	18.6 ± 0.5
	50	0.321 ± 0.068	0.127 ± 0.010	11.7 ± 0.0	98.1 ± 3.5	83.0 ± 1.6	24.9 ± 0.1
	60	0.414 ± 0.005	0.114 ± 0.012	12.7 ± 0.0	114.9 ± 15.1	67.9 ± 1.3	24.9 ± 2.1
	70	0.381 ± 0.017	0.110 ± 0.008	15.3 ± 0.0	127.4 ± 24.5	59.6 ± 0.6	25.7 ± 1.9
Phenolic foam panel	25	0.378 ± 0.027	0.167 ± 0.029	8.33 ± 0.0	72.4 ± 3.3	100.8 ± 0.5	14.3 ± 0.7
	35	0.308 ± 0.087	0.112 ± 0.029	12.7 ± 0.0	84.4 ± 3.5	73.8 ± 1.4	16.8 ± 1.1
	45	0.399 ± 0.013	0.085 ± 0.018	14.7 ± 0.0	89.8 ± 1.4	58.2 ± 0.1	19.9 ± 0.4
	55	0.387 ± 0.012	0.067 ± 0.014	18.7 ± 0.0	101.3 ± 4.5	43.7 ± 0.5	25.8 ± 0.1

^{a)} The increased speed of heat flux (q_L ; outflow, q_H ; inflow).

^{b)} The difference of initiation time between q_L and q_H .

^{c)} Time required for both heat fluxes to become steady state (see Fig. 3).

^{d)} The amount of heat defined by Eq. 6.

^{e)} The difference between outflow heat and inflow heat defined by Eq. 7.

分領域の上端 t' は 3 時間とし、シンプソン法¹⁰⁾ を用いて時間刻み 5 秒で積分した。なお、設定した $t' = 3$ 時間とは、昇温開始までの最短時間よりも若干短い便宜的な値である。

$$W_H = \int_0^{t'} q_H dt \quad (6)$$

いずれの断熱材も流入熱量 W_H は、厚さ増加に伴ってほぼ直線的に低下した。厚さ増加により単位面積あたりの熱容量が増えるため、外乱によって室内から奪われる熱量 (= 流入熱量) が低下するのは当然の結果と言えよう。

さて、本断熱パネルは対照材料に比べて熱伝導率

が大きいため、現実的には厚物化で熱抵抗 R_p を確保する必要がある。そこで、 R_p が同等の場合の流入熱量 W_H を比較することで、本断熱パネルの特徴を検討してみる。たとえば、厚さ 100 mm の本断熱パネルは、厚さ 60 mm のグラスウールおよび厚さ 35 mm のフェノールフォームと同等の R_p (約 $1.8 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) を有するが、本断熱パネルの W_H は約 37 kJ/m^2 であり、他 2 者と比べて流入熱量が約 1/2 に抑制されている。主たる理由は後述する熱容量の差異にあるが、Fig. 3 および Table 2 に示す熱流変化の視点からは、流入熱流発生が遅延 (t_0 が他 2 者の約 3 倍) および流入熱流の上昇速度の低減 (dq_H/dt が他 2 者

の約6割)が挙げられる。

さらに、 $t' = 6$ 時間として W_H の試算を行った。ただし、熱流定常値 q_s が6時間まで一定として扱った。この試算は、就寝前に暖房を止めた場合、朝方までに損失する室内空気の熱量を想定している。得られた W_H は、厚さ100 mmの本断熱パネルが135 kJ/m²であるのに対し、同一熱抵抗をもつ厚さ60 mmのグラスウールおよび厚さ35 mmのフェノールフォームでは、それぞれ162 KJ/m²、175 KJ/m²となった。すなわち、本断熱パネルへの流入熱量は他2者の約2割減となっており、保温性に有利であることを示唆する。

3.1.2 流出入熱量の差

熱流が定常に到達するまでの流出熱量と流入熱量の差 ΔW を式(7)より求め、それらの値をTable 2中に示した。なお、積分方法は前述と同様である。

$$\Delta W = \int_0^{t_s} (q_i - q_o) dt \quad (7)$$

いずれの断熱材とも、厚さ増加につれて ΔW はほぼ直線的に増加した。厚さ増加により単位面積あたりの熱容量が増えるため、流出熱量が増加する一方で流入熱量が低下することの現れと言えらる。前項と同様に、同等の熱抵抗と比較すると、厚さ100 mmの本断熱パネルは厚さ60 mm グラスウールの6.1倍、厚さ35 mm フェノールフォームの9.0倍の ΔW となった。これを熱流変化の観点から見ると、本断熱パネルの熱流上昇速度 dq_i/dt が他2者の約2倍(Table 2参照)で流出熱量が大きい反面、前述のように流入熱量 W_H が抑制されている点が要因であり、根本的には熱容量の差異に起因すると考えられる。

そこで、式(8)に示す熱容量の関係式¹¹⁾より、本断熱パネルの ΔW が他2者に比べて大きい要因を熱容量の観点から検討する。

$$\Delta W = mc\Delta T \quad (8)$$

ただし、 m は単位面積あたりの質量、 c は比熱、 ΔT は断熱材の初期温度(約20℃)と時刻 t_s における平均材温(測温点3と5の平均値:約10℃)との差である。

熱抵抗 R_p が同等ならば ΔT も同等であり、式(8)より ΔW は mc に依存する。単位面積あたりの質量 m は、断熱材の密度 ρ とパネル厚さの積で示される。本断熱パネルの ρ (100 kg/m³)は、グラスウールおよびフェノールフォームのそれぞれ3.1倍、3.7倍、同様にパネル厚さは1.6倍、2.9倍であり、結果として m はそれぞれ、5.0倍、10.7倍となる。次に、比熱の差に着目する。本断熱パネルを構成するプレー

ナー層、形状安定板(MDF)および周囲被覆材の質量比は85:11:4(厚さ100 mmの場合)であり、これら3者の比熱に大差がなければ本断熱パネルの比熱はプレーナー層の比熱とほぼ同等と見なせる。プレーナー層の比熱は木材と同等とすべきであるから、Kollmannら^{12, 13)}が示した(9)および(10)式を用いて温度10℃、含水率11%における比熱を求めると、1.46 kJ/kgKが得られる。

$$c_d = 1.114 + 0.0046 \cdot T \quad (9)$$

$$c_w = (4.19 \cdot u + c_d) / (1 + u) \quad (10)$$

ただし、 c_d は摂氏 T ℃における全乾木材の比熱(kJ/kgK)、 c_w は含水率 u (全乾基準の重量比)における比熱(kJ/kgK)である。本断熱パネルの比熱1.46 kJ/kgKは、グラスウールの比熱¹⁴⁾ 0.84 kJ/kgKおよびフェノールフォーム(フェノール樹脂¹⁵⁾)の比熱1.34 kJ/kgKの比熱に対して、それぞれ1.7倍、0.92倍となる。

上記で求めた m の比率と c の比率を合算すると、本断熱パネルの mc は、グラスウールの8.5倍、フェノールフォームの9.9倍と試算できる。これらは前述した ΔW の比率と類似しており、本断熱パネルの ΔW が他2者よりも大きくなる要因は熱容量の差異に基づくことが確認できる。

3.2 熱伝導率

算出された熱伝導率 λ (平均材温9.3~10.2)、算出に必要な測定諸値および熱抵抗 R をTable 3に掲げた。

本断熱パネルでは原料小片が型枠中で圧縮される際に側圧が生じ、定量的には未確認であるがパネル表面付近は厚さ中央部に比べて若干高密度化する傾向がある。そのため、厚物化に際し厚さ方向の密度分布が変化し、熱伝導率に影響する可能性が示唆された。しかし、測定値を見る限り、厚さ100 mm以上で λ はほぼ一定である。したがって、実用的な厚さ範囲における本断熱パネルは、ほぼ一定の熱伝導率0.060 W/mKを持つことが確認された。

一方、グラスウールの λ は、0.034~0.037 W/mKの範囲にあり、本断熱パネルの約1/2であった。熱流計との密着を確保するため、測定時のグラスウールの密度は40 kg/m³となったが、得られた λ は当該製品のカタログ値(0.036 W/mK)と大差はなかった。ただし、厚さ40 mmおよび50 mmでは若干大きな値を示しており、厚さ調整による表層高密度層の除去が影響している可能性がある。一方、フェノールフォームの λ は、当該製品のカタログ値(0.020 W/mK)とほぼ同等であり、本断熱パネルの約1/3であった。

Table 3. Thermal properties of the test specimens (values listed are shown as mean \pm std, $N=3-6$).

Samples	Thickness, d (mm)	q_s^{a1} (W/m^2)	dT^{b1} ($^{\circ}C$)	λ^{c1} (W/mK)	R^{d1} (m^2K/W)	α^{e1} ($\times 10^{-6} m^2/s$)
Binder-less wood chip insulation panel	50	16.2 ± 0.0	14.4 ± 0.0	0.056 ± 0.000	0.9	0.35 ± 0.02
	75	12.4 ± 0.1	16.0 ± 0.1	0.058 ± 0.001	1.3	0.39 ± 0.04
	100	10.1 ± 0.0	16.6 ± 0.0	0.061 ± 0.000	1.7	0.48 ± 0.01
	125	8.5 ± 0.2	17.4 ± 0.1	0.060 ± 0.001	2.1	0.45 ± 0.03
	150	7.3 ± 0.0	17.8 ± 0.2	0.060 ± 0.002	2.5	0.54 ± 0.01
Glass wool panel	40	13.7 ± 0.1	14.8 ± 0.2	0.037 ± 0.000	1.1	1.14 ± 0.09
	50	11.6 ± 0.0	15.8 ± 0.1	0.037 ± 0.000	1.4	1.04 ± 0.03
	60	9.7 ± 0.1	16.4 ± 0.1	0.035 ± 0.000	1.7	1.11 ± 0.01
	70	8.3 ± 0.1	17.3 ± 0.1	0.034 ± 0.000	2.1	1.05 ± 0.04
Phenolic foam panel	25	12.6 ± 0.1	16.1 ± 0.1	0.020 ± 0.000	1.3	0.63 ± 0.03
	35	9.6 ± 0.1	16.8 ± 0.1	0.020 ± 0.000	1.7	0.57 ± 0.01
	45	7.7 ± 0.0	17.6 ± 0.1	0.020 ± 0.000	2.3	0.51 ± 0.01
	55	6.2 ± 0.1	17.7 ± 0.1	0.019 ± 0.000	2.9	0.56 ± 0.00

^{a1} Heat flux at steady state (see Fig. 3).

^{b1} The difference of temperature between measuring points 3 and 5 at steady state (see Fig. 1 and 3).

^{c1} Thermal conductivity calculated by $q_s \times d / dT$.

^{d1} Thermal resistance calculated by d / λ .

^{e1} Thermal diffusivity obtained from the numerical calculation by Eq. 3.

3.3 熱拡散率

差分計算により決定された熱拡散率 α を Table 3 中に示す。本断熱パネルの α は $0.35 \sim 0.54 \times 10^{-6} m^2/s$ の範囲にあり、厚さ増加につれて大きくなる傾向を示した。その要因は特定できないが、①計算対象時間の増加(ステップ数増加)による計算誤差の蓄積の差、②熱容量が厚さで大きく異なる試験体に対し同一温度スケジュールを採用したために、実際に作用した熱的境界条件が厚さで異なる、などが推察される。ちなみに、熱拡散率を定義する式(5)に、 $\lambda = 0.060 W/mK$, $\rho = 100 kg/m^3$, $c = 1.46 kJ/kgK$ を代入すると $\alpha = 0.41 \times 10^{-6} m^2/s$ が得られ、上記測定値の範囲内にある。

一方、グラスウールおよびフェノールフォームの α は、それぞれ $1.04 \sim 1.14 \times 10^{-6} m^2/s$, $0.51 \sim 0.63 \times 10^{-6} m^2/s$ の範囲にあり、バラツキの程度は本断熱パネルよりも小さかった。上記同様に式(5)より α を算出すると、グラスウールで $1.07 \times 10^{-6} m^2/s$ ($\lambda = 0.036 W/mK$, $\rho = 40 kg/m^3$, $c = 0.84 kJ/kgK$), フェノールフォームで $0.55 \times 10^{-6} m^2/s$ ($\lambda = 0.020 W/mK$, $\rho = 27 kg/m^3$, $c = 1.34 kJ/kgK$) が得られ、いずれも測定値の範囲内にある。

本断熱パネルの熱拡散率は、グラスウールの約1/2, フェノールフォームの約3/4となっており、これは非定常状態における断熱性あるいは保温性の優位性を示唆する。換言すれば、本断熱パネルが有する対照断熱材よりも大きな比熱と密度が、熱伝導率の劣勢を補って余りある効果を生み出したと見てよ

い。

次に、他の木質系断熱材の熱拡散率と比較してみる。まず、基本となる木材素材の熱拡散率(繊維直角方向)は $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.2 \times 10^{-6} m^2/s$ の範囲にあり^{16, 17)}, たとえばスプルース(温度 $20^{\circ}C$ ・含水率9.5%において、 $\rho = 503 kg/m^3$, $\lambda = 0.107 W/mK$, $c = 1.46 kJ/kgK$)では $0.15 \times 10^{-6} m^2/s$ が報告されている¹³⁾。低密度繊維板(温度 $20^{\circ}C$ ・含水率7%において、 $\rho = 259 kg/m^3$, $\lambda = 0.101 W/mK$, $c = 1.22 kJ/kgK$)では、熱拡散率 $0.29 \times 10^{-6} m^2/s$ が報告されている¹³⁾。本断熱パネルよりも密度が高いことに起因して、これらの熱拡散率は本断熱パネルの1/3~2/3の値となっている。

4. 結 言

本報では、非定常温度スケジュールにおける温度熱流解析を行い、前報まで未検討であった実大厚さパネルの熱的性質について検討し、以下の知見を得た。①実用的な厚さ範囲(100~150 mm)ではほぼ一定の熱伝導率(0.060 W/mK)を示した。②同一熱抵抗を持つグラスウールやフェノールフォームと比較して壁体への流入熱量が抑制されることが実験的に明らかとなり、保温性の優位性が示唆された。③差分計算より得た熱拡散率は、 $0.35 \sim 0.54 \times 10^{-6} m^2/s$ の範囲にあり、 $\alpha = \lambda / \rho c$ で算出される値 $0.41 \times 10^{-6} m^2/s$ と近接していた。

熱容量が大きく熱伝導率の小さな断熱材は蓄熱効果による保温性が期待できるが、本断熱パネルでは、

その指標となる熱拡散率がグラスウールの約 1/2, フェノールフォームの約 3/4 であり有利と言える。しかし, さらに熱容量の大きな木材素材や低密度繊維板に比べると熱拡散率は大きいため, これらに対しては蓄熱効果の点で不利な位置づけにある。

謝 辞

MDF をご提供頂いた株式会社ノダに感謝の意を表します。また, 本研究は財団法人さんりく基金平成16年度共同研究「木質小片断熱材の開発 (研究代表者: 岩手大学・関野登)」として行ったものであり, 関係各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 関野 登: 特許第3607254号 (2004).
- 2) 関野 登, 河村義大: 木材工業 **58**, 364-369 (2003).
- 3) 河村義大, 関野 登, 山内英彦: 木材学会誌 **50**, 228-235 (2004).
- 4) 河村義大, 関野 登, 山内英彦: 木材学会誌 **50**, 397-403 (2004).
- 5) Sekino, N., Kawamura, Y.: Proc. 4th International Wood Science Symposium, Serpong, Indonesia, 2002, pp. 223-228.
- 6) Sekino, N., Kawamura, Y.: Proc. IAWPS Vol. 1, Daejeon, Korea, 2003, pp. 306-313.
- 7) Sekino, N., Kawamura, Y.: Proc. 8th WCTE Vol. 3, Lahti, Finland, 2004, pp. 365-368.
- 8) 片岡 勲, 安田秀幸, 高野直樹, 芝原正彦: “数値解析入門”, コロナ社, 東京, 2002, pp. 138-143.
- 9) 池田貞雄, 松井 敬, 富田幸弘, 馬場善久: “統計学 データから現実をさぐる”, 内田老鶴圃, 東京, 1998, p. 184.
- 10) 涌井良幸, 涌井貞美: “Excel で学ぶ微分・積分”, ナツメ社, 東京, 2003, pp. 230-231.
- 11) 岡田 理: “伝熱工学”, 関 信弘編, 森北出版, 東京, 1995, pp. 2-3.
- 12) Kollmann, F., Cote, W.: “Principles of Wood Science and Technology Vol. 1”, Kollmann F. ed. Springer-Verlag, Berlin, 1968, pp. 245-246.
- 13) Adl-zarrabi, B., Bostrom, L.: Proc. 8th WCTE Vol. 2, Lahti, Finland, 2004, pp. 419-424.
- 14) “熱物性ハンドブック”, 日本熱物性学会編, 養賢堂, 東京, 2000, p. 201.
- 15) 村山新一: “プラスチック材料講座15フェノール樹脂”, 日刊工業新聞社, 東京, p. 204.
- 16) 福山萬次郎: “新訂 基礎木材工学”, フタバ書店, 東大阪, 1979, p. 87.
- 17) “Wood Engineering Handbook 2nd ed.”, Forest Products Laboratory ed. Prentice Hall, New Jersey, 1990, pp. 3-25.