

木質小片断熱材の防火性能に関する基礎的研究

関野 登*・葭葉 恵*・谷内博規**・山内 剛***

Fundamental study on the fire resistance of
binder-less wood shaving insulation panels

Noboru SEKINO*, Megumi YOSHIBA*,
Hironori TANIUCHI** and Go YAMAUCHI***

1. はじめに

最近の木質系断熱材の研究には、スギ樹皮を用いた低密度ボード¹⁾、合成樹脂ファイバーを結合剤とした低密度ファイバーボード²⁾、低密度厚物ファイバーボードをコアとするサンドイッチパネル³⁾、波形段ボールの交差複層板をコアとするサンドイッチパネル⁴⁾、などがある。これらは面材料として強度性能を併せ持つが、本研究で開発中の“木質小片断熱材”は木造住宅の構造部材間（間柱、根太、垂木など）へ施工するもので、現在最も一般的な断熱材であるグラスウールの代替を目的とした非構造用の断熱部材である。

本断熱材は木材加工の残廃材を原料とし、型枠中で常温圧縮された小片マットをMDF製の側板で挟み、これら全体を建築用防湿フィルムで被覆して完成となる⁵⁾。図1(a)はマット圧縮後に型枠を除去した様子を示すが、常温圧縮で発生する小片間摩擦力により、接着剤無使用でパネル形状を維持することが最大の特徴である。さらに、断熱材幅方向の弾性力で自ら柱側面に密着するため施工や解体が容易であり、残廃材の有効利用、熱圧不要による省エネルギー製造といった環境配慮設計が織り込まれている。

本断熱材の開発は2001年に着手され、端材から調製した各種小片、モルダー層、プレーナー

Received January 12, 2007

Accepted February 13, 2007

* 岩手大学農学部農林環境科学科森林科学講座

** 岩手県林業技術センター林産利用部

*** (株)ヤマウチ

本研究は平成18年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）課題番号18580160）の一部として行った。

屑、樹皮などの原料について、本断熱材への適性が検討された⁶⁻¹⁰⁾。その結果、衝撃に対する壊れ難さや断熱性能の観点から、プレカット加工や集成材製造におけるプレーナー屑が最適と判断された。そこで、2005年以降はプレーナー屑を用いた本断熱材について、各種性能の実証研究（断熱性に及ぼす含水率の影響⁸⁾、蓄熱効果⁹⁾、吸音性と遮音性¹¹⁾）に取り組むと同時に、実用化に向けた製造プラントの開発を進め、一般の施主によるモニター使用（図1(b)）の段階を迎えている。

さて、本断熱材を使用する上で最も懸念されるのは防火性能であろう。被覆材、小片とも可燃性であり、小片間隙が火炎伝播を助長する可能性があるためである。しかし、木質系断熱材の防火性能に関する知見は、ホウ素系薬剤で処理されたセルロースファイバー^{21、22)}や低密度ファイバーボード²⁾に関するものが多く、低密度小片マットの燃焼を扱った報告はほとんど見当たらない。さらに、本断熱材は全体が防湿フィルムで被覆されており、従来の知見から防火性能を類推することは難しい。そこで本研究では、本断熱材の燃焼挙動に関する基礎資料を得る目的で、小型試験体を用いた加熱試験を行った。試験に用いた加熱炉は後述する表面燃焼試験用であり、本断熱材を片面から加熱して遮熱性能を調べた。また、一般に木造住宅の防火の基本は、可燃性の木造軸組みを不燃性の内外装で被覆することにより¹²⁾、構法自体もなるべく密閉構造（例えば、枠組み壁工法のファイヤーストップ材の機能）として火炎の拡大を防ぐことが重要とされる¹³⁾。したがって、不燃性材料を介した加熱によって本断熱材の防火性能を検討することは、より現実的な性能評価と考えられる。そこで、石膏ボードを介した加熱試験を行い、その遮熱性能について代替対象であるグラスウールと比較した。

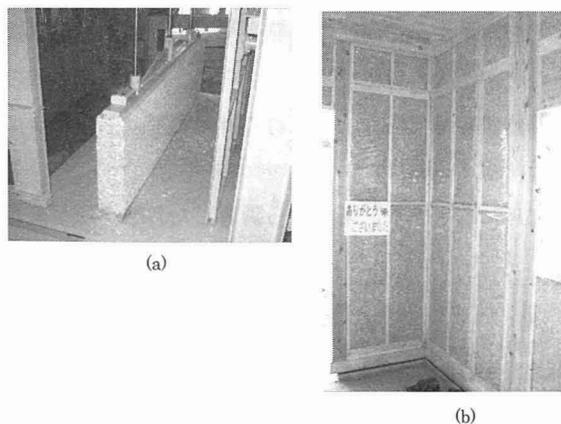


図1 木質小片断熱材の製造工程の一部(a)と新築住宅への施工例(b)

II. 実 験

1. 燃焼装置と試験体

岩手県林業技術センターに設置された建築材料燃焼性試験装置（東洋精機社製、図2（a））を用いた。この装置はJIS A1321(1994)に規定される表面燃焼試験用で、加熱炉、集煙箱、光量測定装置などで構成されるが、本実験では図2（b）に示す加熱炉のみを使用した。加熱炉には主熱源の電熱線2本と副熱源のガスバーナが設置されている。図2（c）は加熱炉の背面を覆う裏蓋であり、（d）は裏蓋を加熱炉に取り付けた様子を示す。本実験では、この裏蓋に収容可能な寸法（160×160×50mm）の断熱材に対して、表面加熱を行った。

供試した本断熱材のマット嵩密度は100kg/m³であり、上記寸法の試験体を既報⁶⁻⁸⁾と同様の方法で多数作製した。原料小片はプレカット加工で排出されたプレーナー屑（ベイマツとベイヒの混合、篩目3mm以下を除去、含水率は10.6%）で、側板には厚さ2.6mm、密度783kg / m³のMDFを、被覆材には厚さ0.15mm、密度992kg/m³のポリエチレンフィルム（建築用防湿フィルム）を用いた。

2. 加熱曲線と温度測定

JIS A1321の表面燃焼試験では、はじめに副熱源（ガスバーナ）で3分間の炉内加熱を行った後、更に主熱源（電熱線）を加えて炉内加熱を行う。その際のガス流量と電力は、加熱10分

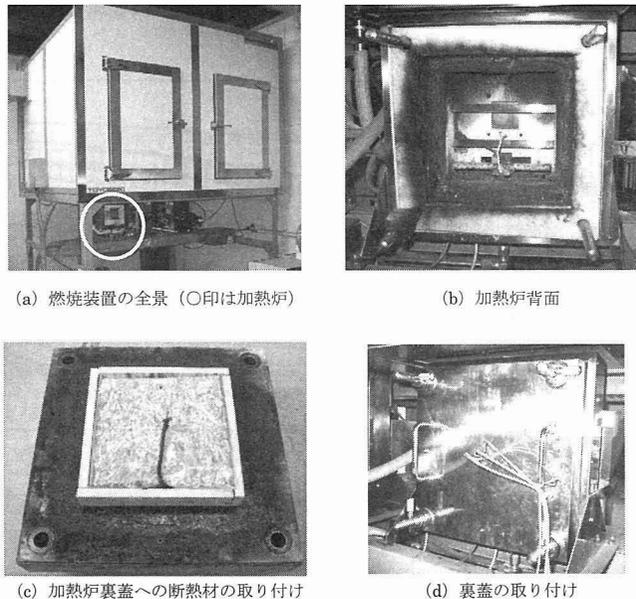


図2 燃焼装置および試験体の取り付け

間の排気温度が規定値を満たすように設定され、本装置の場合、270cc/分、1.5kW となっている。本実験では上記JISを参考とし、それよりも若干高めの加熱条件を採用した。すなわち、ガス流量と電力は上記と同様の値であるが、最初から主・副熱源を同時に作動させた。この条件で得られた加熱温度曲線を図3に示す。現在、建築物の防火性能はISO 834に規定される標準加熱温度曲線（図3参照）に準じた加熱試験で評価されているが、本実験で採用した加熱温度はISOの許容上限と下限をほぼ満たす条件となっている。

温度測定位置は図4(a)に示す1から4までの4点、すなわち、内装材加熱面（炉内温度として扱う）、内装材裏面（断熱材表面）、断熱材厚さ中央および断熱材裏面を基本とした。いずれも試験体平面の中央位置であり、温度測定には線径0.65mmのK熱電対（アルミナ長繊維被覆で耐火温度は850℃）を用いた。測定値は5秒間隔でデータロガー（㈱キーエンス製NR600）に記録された。なお、厚さ中央部の熱電対は断熱材側面から挿入して、裏面の被覆材に損傷はない。また、試験中に火炎が炉外に広がるのを防ぐため、厚さ10mmの不燃板（珪酸カルシウム板、図2（c）参照）で断熱材の四側面を保護した。

3. 直接加熱試験

この試験では、炉内のガスバーナによる火炎の直接的な影響および炉内下部からの空気流入のため、断熱材表面は燃焼しやすい状態にある。試験体を加熱炉に取り付ける際、図4(b)に示す穴開き不燃板（厚さ10mmの珪酸カルシウム板、直径125mmの穴）を、裏蓋と炉内の堰板として用いた。その目的は、断熱材の炉内への脱落防止および火炎の炉外への伝播防止である。

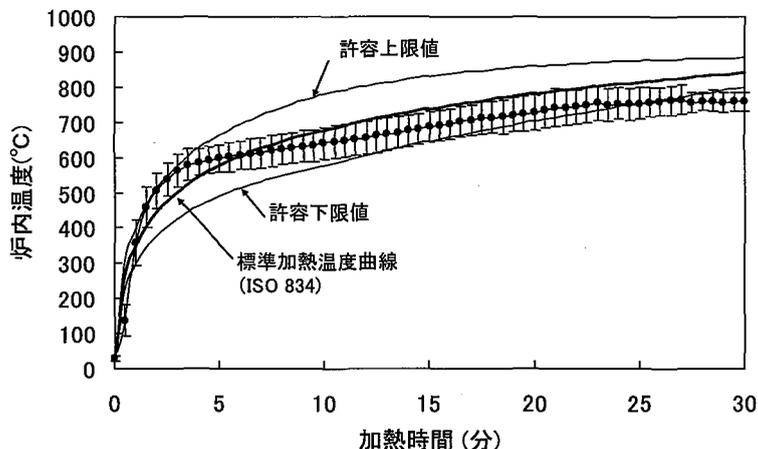


図3 本実験の加熱温度曲線とISO834標準加熱温度曲線との比較
（間接加熱試験で得られた25試験の平均値と標準偏差）

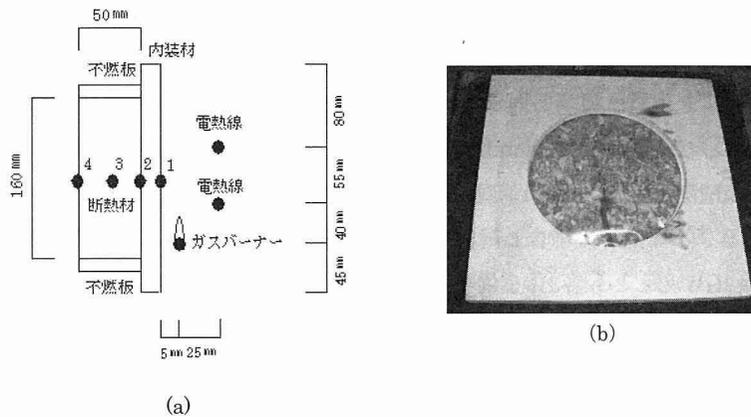


図4 温度測定的位置 (a) および直接加熱試験における試験体加熱面の様子 (b)

また、炉内温度は図4(a)の位置1、すなわち断熱材表面から約1cm離れた位置で測定された。加熱試験は、以下に示すA、Bの2種類を行った。

A試験： 加熱時間と断熱材各部の温度上昇の関係を調べる目的で、約12分の加熱を行った。試験数は3体とし、加熱終了後、直ちに断熱材を取り出して炭化状態などの観察を行った。

B試験： 加熱時間を2、4、6、8、10分の5条件とし、1条件につき1体の加熱を行った。各加熱の終了後、直ちに断熱材の重量を0.1g精度で測定して重量減少率を算出するとともに、断熱材表面付近の小片を約2g採取して含水率を測定した。また、被覆材の損傷状態や小片の炭化状態などの観察を行った。

4. 間接加熱試験

この試験では本断熱材の通常の使用状態、すなわち断熱材が不燃性の内装下地である石膏ボードで被覆された状態を想定している。供試した石膏ボードは、厚さ12.5mm、密度660kg/m³であり、寸法220×220mmに裁断したものを多数用意した。加熱試験は、以下に示すA、Bの2種類を行った。

A試験： 加熱時間と試験体各部の温度上昇の関係を調べるため、断熱材表面温度が500℃に達して5分経過するまで加熱した(約32分)。試験数は3体とし、加熱終了後、直ちに断熱材を取り出して炭化状態を観察した。

B試験： 加熱時間を段階的に変化させ、直接加熱B試験と同様に重量減少率と含水率の測定とともに炭化状態を観察した。加熱停止は、断熱材表面温度が200から500℃まで50℃刻みで7段階とし、試験体数は各2体とした。

5. グラスウールの間接加熱試験

対照材料として市販のグラスウール断熱材（密度 16kg/m^3 および 32kg/m^3 、以下GW16k、GW32kと記す）を用い、前項と同様の間接加熱試験を行った。グラスウールは寸法 $160\times 160\text{mm}$ に裁断され、GW16kでは 100mm 製品の厚さを半減させて 50mm に、GW32kでは 70mm 製品から 20mm 削除して厚さ 50mm に整えた。なお、グラスウールの被覆フィルムは製品状態に戻して供試し、本断熱材の場合と同様に四側面は不燃板で保護された。加熱時間は30分であり、GW16k、GW32kとも各3体を供試した。ただし、温度測定は断熱材厚さ中央を省く3点とした。

III. 結果および考察

1. 直接加熱における燃焼挙動

1) 各部の温度上昇

直接加熱A試験の温度測定結果を3試験体の平均値で図5に示す。断熱材の表面温度は、加熱約20秒以降で炉内温度よりも高くなった。これは被覆フィルムの燃焼発熱に起因することが、観察により確認されている。続いて、露出した表面小片が燃焼しており、表面温度と炉内温度の差はさらに拡大した。燃焼による表面温度上昇の影響を受けて、炉内温度はISO標準曲線より $100\sim 150^\circ\text{C}$ ほど高い温度で推移した。

一方、厚さ中央部（表面深さ 25mm ）では、表面温度の急激な上昇にも拘わらず、緩やかな温度変化を示した。これは小片が断熱材表面から徐々に炭化し、形成された炭化層が断熱層と

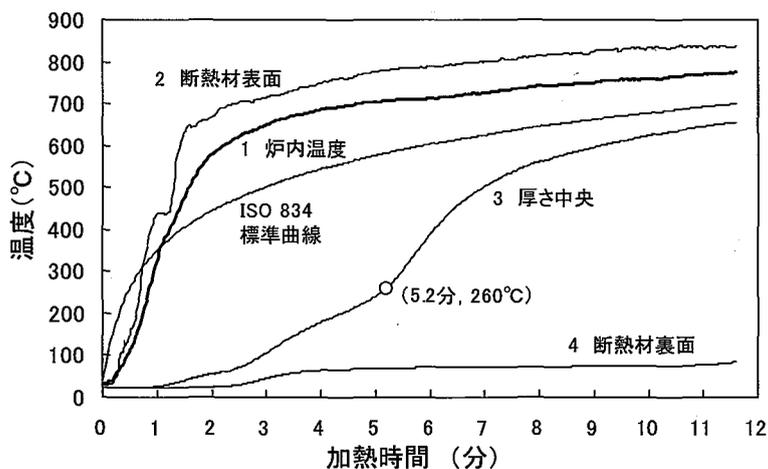


図5 直接加熱における各部の温度上昇（3試験体の平均値）

なり、遅燃性が発揮されたためと言える。一般に木材の炭化速度は、260℃（防火上の出火危険温度）に達した内部断面位置まで炭化すると仮定のもとに、表面からその位置までの深さを加熱時間で除して得られる¹²⁾。図5を見ると、厚さ中央部（深さ25mm）が260℃に達した時間は5.2分であり、炭化速度は4.8mm/分となる。この値は、針葉樹製材や集成材の柱や梁の炭化速度約0.6mm/分^{12, 13)}の8倍、合板やOSBの炭化速度約0.8-1.0mm/分¹⁴⁾の5-6倍である。

上記の炭化速度だけを見れば、本断熱材は他の木質製品と比べて遅燃性に劣ることになる。しかし、図5の裏面温度に着目すると、加熱約3.5分で60℃程度に達した後は、極めて緩慢な温度上昇であり、11.6分時点で84℃であった。炭化速度4.8mm/分が持続すれば10.4分で裏面温度は260℃に達するが、実際の裏面温度は100℃を下回った。すなわち、加熱後半の炭化速度は前半に比べて小さく、本断熱材に特有の遮熱メカニズムが存在することを示唆する。これは、断熱材内部の水分状態に関係すると考えられるが、詳しくは次項で検討する。

2) 裏面付近の水分状態

直接加熱A試験終了直後（加熱12分後）の観察写真の例を図6(a)と(b)に示す。断熱材の側面に見られた炭化深さは25mm程度であった。また、裏面フィルムの内側には多量の水分が凝結しており、裏面小片には炭化が全く認められなかった。本断熱材は建築用防湿フィルムで被覆されているため、水蒸気の流失はかなり抑制される。したがって、裏面付近で水蒸気飽和や凝結状態が継続すれば、供給エネルギーは主として凝結水分の蒸発潜熱に消費される。これが、裏面温度の上昇を緩慢にし、炭化の進行を遅延させた要因と考えられる。

直接加熱B試験で得た裏面付近の小片含水率を図6(c)に示す。初期含水率10.6%が加熱6分後には20.5%に上昇し、10分後には22.6%になった。プロットに添えた数値は、その加熱時間における裏面温度と、その裏面温度における水蒸気飽和状態での平衡含水率¹⁵⁾（ここでは便宜的に“飽和含水率”と呼ぶ）である。加熱4分時点での飽和含水率29%に対して実測値は17%程度であり、この時点では裏面付近は水蒸気不飽和にあると見られる。しかし、加熱6分以降の実測含水率は飽和含水率に近く（小片採取の際の蒸発により、含水率は若干過小評価された可能性がある）、また、断熱材裏面に凝結水が観察されたことより、水蒸気飽和状態にあると見なせる。裏面付近のこのような含水率増加は、100℃付近までの昇温で発生する結合水の蒸発と、その後の熱分解で生成する水分の両者に由来すると考えられる。

3) 炭化深さおよび炭化速度の推定

直接加熱B試験直後の試験体の様子を図7に示す。加熱4分まで、不燃堰板で覆われた部分は未炭化であったが、その後は表面全体に炭化が広がった。内部の炭化状態を観察するため断熱材の解体を試みたが、解体すると急激な酸素供給により発火したため、内部の炭化深さは測定不能であった。このため、炭化深さに関するデータが不十分な状況にあるが、本断熱材の遮熱

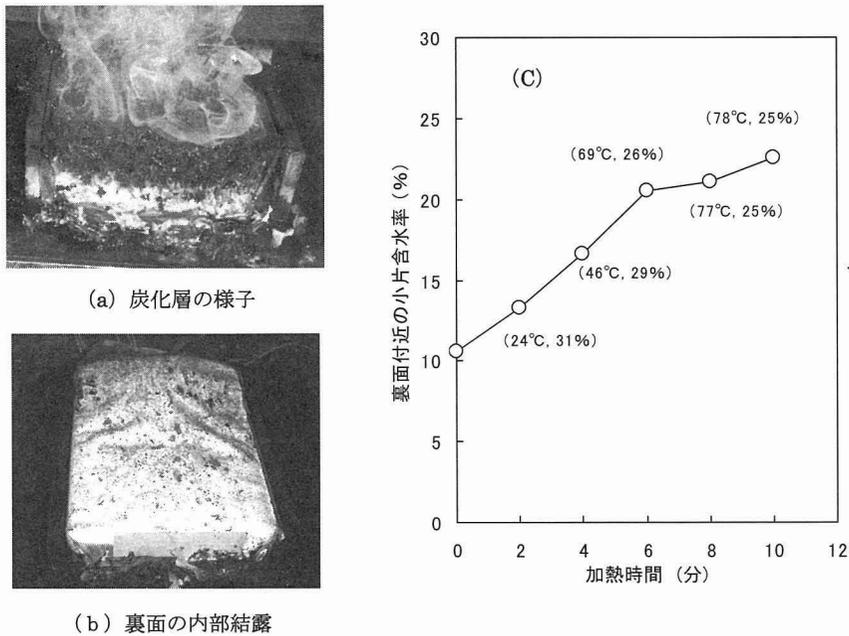


図6 直接加熱A試験終了直後の断熱材の様子 (a, b) および直接加熱B試験で得られた加熱時間と裏面付近の小片含水率の関係 (c)

メカニズムを理解する上で、加熱時間と炭化深さの関係は重要である。そこで、加熱過程における厚さ方向の温度分布の推移より、炭化深さおよび炭化速度の推定を試みる。

ただし、測定した3点（表面、厚さ中央、裏面）のみで温度分布を求めることは難しい。そこで、未知の内部温度1点を以下に示す方法で推測し、計4点の温度座標によって温度分布を決定した。その手順は下記①～④のとおりであり、重量損失の実測値を木材炭化の文献データによる計算値と比較する手法を取った。

① 温度分布は、図8(a)に示す直線補間で決定し、推定する内部温度1点はパターンAまたはBのどちらかとした。パターンAは、表面と厚さ中央の温度差すなわち厚さ前半の温度差が後半よりも大きい場合であり、深さ10mmにおける温度を推定した。一方、パターンBは、厚さ後半の温度差の方が大きい場合であり、中央温度からの直線が、裏面温度を通る傾きゼロの直線と交差する位置を推定した。ここでは、裏面付近は水蒸気の存在のため温度傾斜は小さいと推測し、温度一定区間として扱った。

② 直接加熱B試験で得た各加熱時間での表面温度、厚さ中央温度、裏面温度、温度推定パターンおよび重量損失(WL)を表1に示す。重量損失には、被覆フィルムの焼失、木質小片の熱分解および側板(MDF)の燃焼が含まれるが、観察によればフィルム焼失は断熱材表面のみであり、側板の炭化焼失は微少であった。そこで、断熱材の重量構成比（木質小片74.0%、側板19.5%、フィルム6.5%（表面部は1.6%））から、次式によって木質小片のみの重量損失

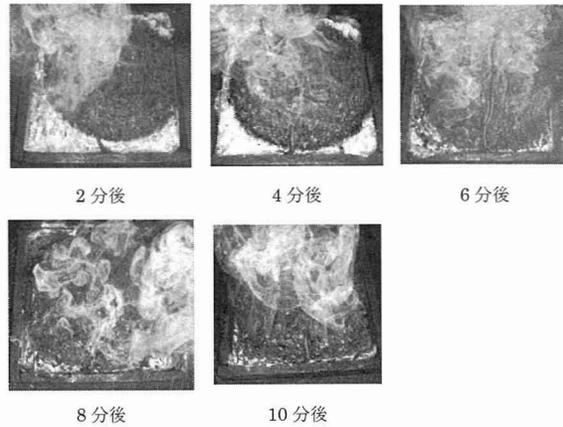


図7 直接加熱B試験直後の断熱材の様子

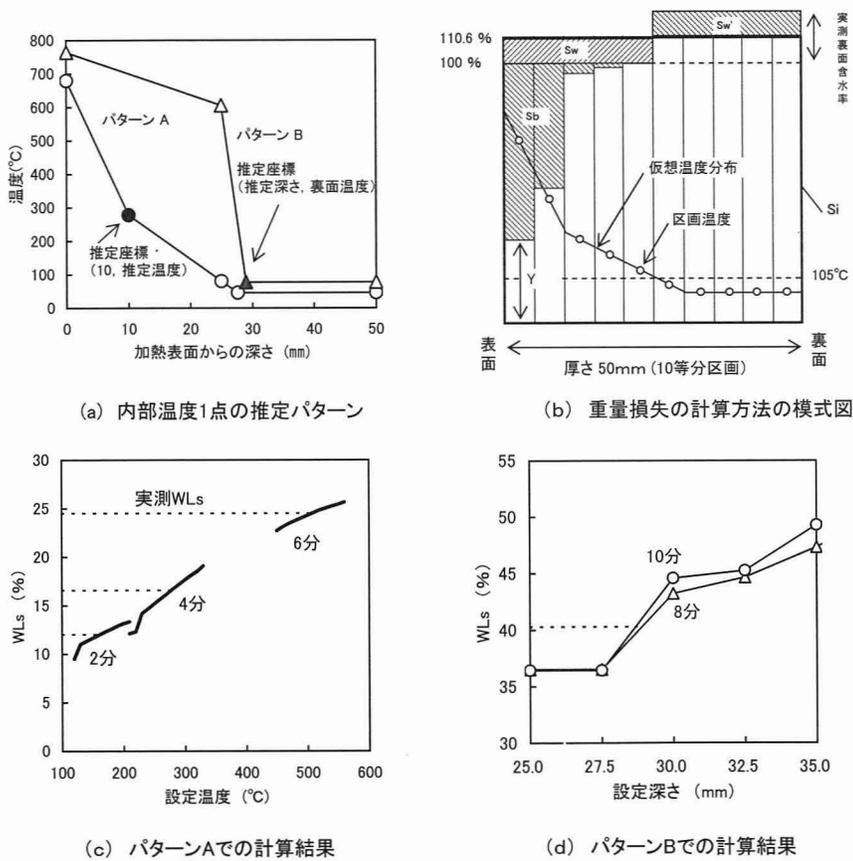


図8 直接加熱試験における温度分布の推定方法

表1 直接加熱試験での厚さ方向温度分布の推定に用いたデータ

加熱時間 (分)	温度 (°C)			推定 パターン	重量損失 (%)*	
	表面	中央	裏面		WL	WLs
2	611	80.9	24.3	A	10.5	12.0
4	679	80.2	45.7	A	13.9	16.6
6	685	83.5	69.2	A	19.7	24.5
8	764	606	77.7	B	31.4	40.3
10	758	742	76.6	B	31.4	40.3

* WL: 断熱材全体の測定値、WLs: 小片のみの重量損失に換算した値

(WLs) を算出し、表1中に掲げた。ただし、側板の重量損失は0%と仮定した。

$$WLs = (WL - 1.6) / 74.0 \times 100 \quad (\%)$$

③ 重量損失の計算方法を図8(b)に示す模式図 (パターンAの場合) で説明する。横軸は断熱材の厚さ、縦軸は全乾重量を100%とした重量割合である。まず、深さ10mmで任意の温度を設定し、仮想の温度分布を得た。次に、全体厚さを5mm毎に10区画し、各区画の中心位置の温度を、その区画の温度とした (区画温度と呼ぶ)。続いて、表2に示す木材の熱処理温度と炭化物の収率の関係のうち資料3-③を用いて、区画温度に対応する収率Y (%) を直線補間により決定した。模式図上の面積Sbは、各区画における100-Y(%)の積算値であり、重量損失の主たる構成要素となる。一方、木質小片の結合水 (初期含水率10.6%) は105°C以上の区画で蒸発すると仮定し、これに相当する面積Swも重量損失の構成要素となる。また、蒸発した結合水の一部および熱分解で生成された水分の一部は105°C未満の区画に移動し、面積Sw'の重量増加をもたらすと考える。ただし、105°C未満の区画の含水率は、図6(c)に示す実測の裏面含水率と同一であると仮定して、Swが決定された。以上より、WLsの計算値は模式図の各面積を用いて次式で求められる。ただし、Siは加熱前の模式図全体の面積である。

$$WLs = (Sb + Sw - Sw') / Si \times 100 \quad (\%)$$

④ 深さ10mmでの温度を10°C刻みで変化させて上記③の計算を繰り返し、設定温度とWLsの計算値の関係を求めた (図8(c))。また、パターンBの場合は、直線の交差位置 (設定深さ) を2.5mm刻みで変化させて上記③の計算を繰り返し、交差位置とWLsの計算値の関係を求めた (図8(d))。これらの関係の内挿補間によって実測のWLsと一致するように、パターンAにおける推定温度およびパターンBにおける推定深さが決定された。

決定された温度分布を図9 (a) に示す。また、各加熱時間の温度分布で、260°Cに達した深さを直線内挿から求めて炭化深さとし、これを図9 (b) に示した。また、炭化深さを加熱時間で除して炭化速度を求め、同図中に示した。炭化深さは加熱8分までほぼ直線的に増加し、加熱4分と6分後の炭化深さは、それぞれ、12mm、19mmと試算された。しかし、図5に示した直接加熱A試験の結果では、厚さ中央位置は加熱5.2分で260°Cに達しており、加熱5~6分で炭

表2 木材の熱処理温度と炭化物の収率の関係（文献値）

熱処理温度 (°C)	炭化物の収率 (%)					
	資料1 中里 ¹⁶⁾	資料2 三浦ら ¹⁷⁾	資料3 (栗本ら ¹⁸⁾)			
			①	②	③	④
105	100	—	100	100	100	100
200	99	—	99	—	—	—
300	67	55	73	65	57	42
400	34	31	37	36	33	21
500	30	26	30	29	26	10
600	28	—	28	26	21	5
700	26	—	26	25	19	1
800	25	—	26	24	17	0
実験条件	ミズナラ小片、酸素無供給、温度ステップは昇温15分、保持15分	シラカバ小片、酸素無供給、保持時間は30~60分	窒素雰囲気下 スギ木粉	酸素濃度 1%	酸素濃度 3%	酸素濃度 10%
			熱天秤計測、昇温速度10°C/分、保持時間60分			

化深さは25mm程度になると見るべきであろう。このような炭化深さの過小評価は、主としてA試験とB試験で測定された厚さ中央温度の差に起因すると考えられる。たとえば、表1に示す加熱6分時点の中央温度は約84°Cで、図5に示す温度よりかなり低い。B試験は1条件1試験体であるため、熱電対挿入位置の誤差が温度測定結果に直接反映したと思われる。

一方、加熱8分と10分後の炭化深さは、ともに約28mmと試算された。直接加熱A試験で加熱12分後の炭化深さ（断熱材側面）が25mm程度であったことを考慮すると、加熱8分から12分までの炭化は、緩やかに進行するものと推測される。また、加熱10分時の炭化速度は2.8mm/分と算出され、図5で言及した加熱前半の炭化速度4.8mm/分に対して、ほぼ半分の値となっ

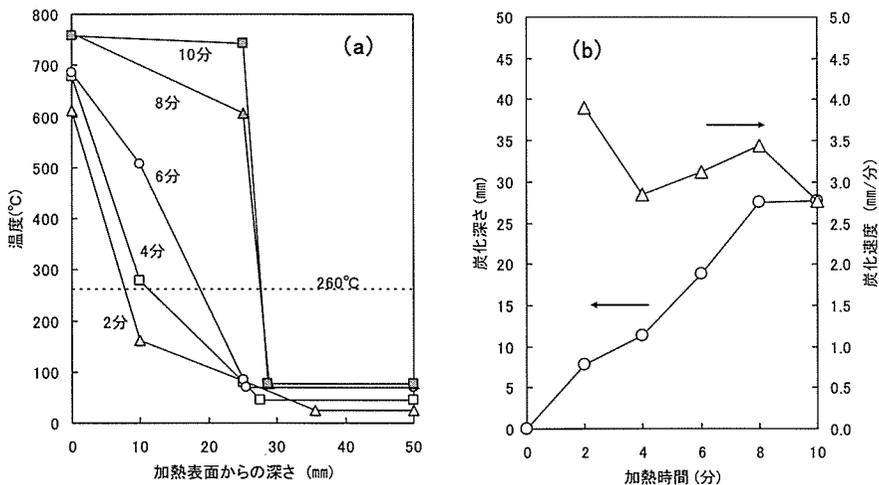


図9 直接加熱における推定温度分布 (a) および加熱時間と炭化深さ・炭化速度の関係 (b)

た。

このような炭化速度の減少は、前述のような裏面付近の水分に起因すると考えられる。その水分は、図8(b)のSwで示した結合水蒸発分の一部とSbで示した熱分解生成物由来の水分の一部が断熱材に残存したものである。三浦ら¹⁷⁾の実験結果を用いると、熱分解生成物の水分収率は、分解温度300℃で21%、400℃で28%と試算される。これらの値を直線補間してSbに占める水分割合を求め（ただし、200℃で0%、400℃以上で28%一定と仮定）、これにSwを加えた発生水分の全体量に対して、残存水分Sw'の割合（水分残存率）を試算すると、加熱時間2分で19%、4分で26%、6分で31%、8分で19%、10分では22%となった。すなわち、発生水分の約2割が断熱材に残存し、遮熱効果に寄与したと考えられる。

以上の考察により、本断熱材の遮熱効果は、下記3点の複合により発揮されると解釈できる。

1) 燃焼で形成された炭化層の断熱効果、2) 小片が保有する結合水および燃焼による発生水分の一部が裏面付近に残存するため供給エネルギーは凝結水の蒸発潜熱に消費され、裏面付近は比較的長時間にわたって100℃以下に保持される、3) その結果、炭化速度も減少する。

2. 間接加熱における燃焼挙動

1) 各部の温度上昇

間接加熱A試験の温度測定結果を図10に示す。断熱材表面（石膏ボード裏面）の温度は、加熱2.5分後に約100℃に達した後、しばらく100℃が保持された。これは石膏ボード特有の遮熱効果、すなわち熱分解によって石膏の結晶水が蒸発している間は、供給エネルギーが主として蒸発潜熱に消費されるためである。その後、加熱13分前後には石膏ボードにクラックが観察され、21分前後（断熱材表面温度：約260℃）にはクラックを通じて炉内に火炎が噴出するのが観察された。被覆フィルムは約150℃で溶融を開始し、170℃では収縮応力で亀裂が発生するこ

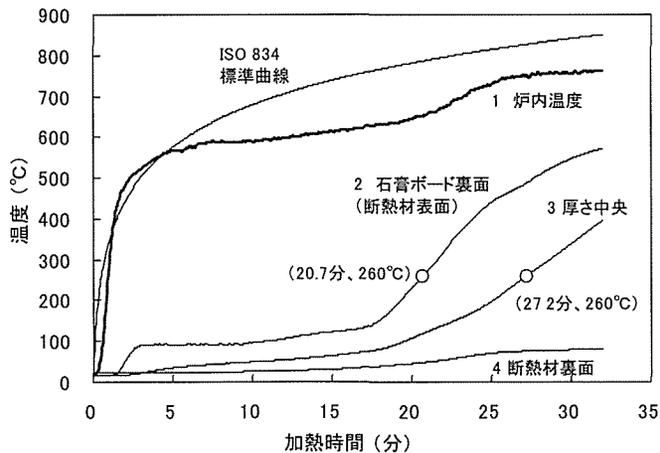


図10 間接加熱A試験における各部の温度上昇（3試験体の平均値）

とが予備実験で確認されている。これを考慮すると、クラックからの火炎はフィルムの燃焼および露出された小片の燃焼に起因すると思われる。断熱材表面温度は、その後もほぼ直線的に増加し、加熱27.7分後に500℃に達した。

厚さ中央の温度を見ると、加熱18分時点で約80℃に達するまでは極めて緩慢な昇温であり、その後は表面温度の急速な上昇に影響されて昇温速度がやや増した。ちなみに、炭化速度算出の目安である260℃への到達時間は27.2分であった。したがって、“厚さ12.5mmの石膏ボード被覆”という限定条件では、本断熱材の炭化速度は0.92mm/分(25mm/27.2分)と算出される。この値は直接加熱の場合の1/3程度であり、石膏ボードの遮熱効果の大きさを物語る。

一方、裏面温度の上昇は厚さ中央部よりも緩慢で、加熱25分に約70℃に達した後は、一層緩慢となった。加熱終了時(31.9分)の裏面温度は80.4℃で、厚さ中央部との温度差は316℃であった。同じ時点での表面と中央の温度差は176℃であり、厚さ中央から裏面にかけての遮熱効果が著しく大きいことが読み取れる。

2) 裏面付近の水分状態

図10で示した加熱25分以降の裏面温度の停滞とそれがもたらす遮熱効果は、先に論じた残存水分に起因すると考えられる。事実、間接加熱A試験直後の試験体には、図6に示した直接加熱の場合と同様に裏面フィルム内側で多量の水滴が観察された。そこで、間接加熱B試験で測定した小片含水率から、加熱時間と裏面付近の水分状態の関係を検討してみる。

図11(a)は、含水率の測定結果を加熱時間との関係で示している。いま、加熱20分での含水率を回帰式より求めると18.0%となり、初期含水率10.6%よりも7.4%増加した。しかし、この時点の裏面温度は約43℃であり、これに対応する“飽和含水率”は29%であるから、裏面付近は水蒸気不飽和の状態と判断される。同様の検討を加熱25分の場合に行うと、小片含水率は23.4

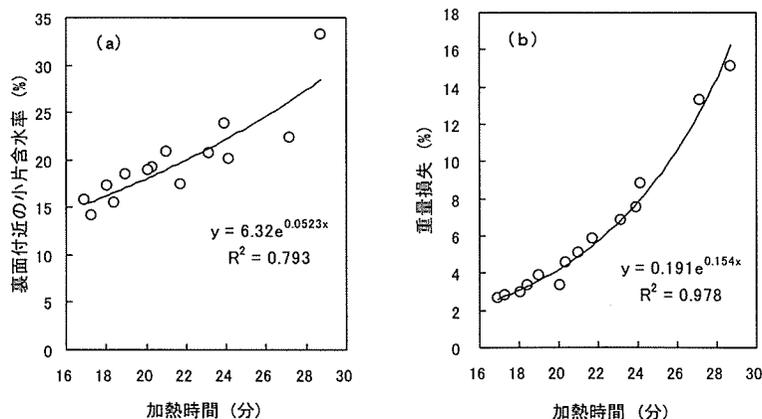


図11 間接加熱B試験で得られた裏面付近の小片含水率 (a) および断熱材の重量損失 (b)

%で飽和含水率28% (70℃) に近づいた。さらに加熱30分では、小片含水率は30.4%で飽和含水率26% (79℃) よりも高く、毛管凝縮水の存在が示唆される。

以上の検討より、裏面付近では加熱25分頃から水蒸気飽和状態が継続したと推測され、供給エネルギーは主として水分の蒸発潜熱に消費された結果、温度が停滞したと解釈できる。

3) 炭化状態および炭化深さの推定

間接加熱A試験直後 (加熱約32分) に、断熱材側面で観察された炭化深さは約25mmであった。また、B試験で観察された炭化状態を図12に示すが、表面温度400℃ (加熱23.9分) に達するまでは表面に未炭化の部分が観察され、炭化部分の深さは目視の限りでは数mm以内であった。さらに、表面温度450℃ (加熱24.2分) では、深さ5~10mmの炭化が表面からの目視で観察された。一方、表面温度500℃ (加熱約27分) の時点では、側面で約20mmの炭化深さが観察されたが、解体すると発火したため内部の炭化深さは測定不能であった。

加熱時間と炭化深さの関係をj知る目的で、厚さ方向の温度分布の推定を試みた。推定は加熱時間20分から30分まで2分毎に行ったが、各時点での表面温度、中央温度、裏面温度には、A試験とB試験で得た全データの平均値を用い、重量損失と裏面含水率は図11に示した回帰式上の値を用いた (表3参照)。さて、推定の原理と手順は前述と同様であるが、炭化物の収率データの扱いと内部温度1点の推定パターンが変更された。その経緯を以下に示す。

まず、直接加熱と同様の炭化物収率データを用い、パターンAにより加熱20分と22分に深さ10mmの温度を推定したところ、設定温度を中央温度と同一までに下げても、計算された重量損失は実測値を大きく上回った。その原因として、間接加熱は直接加熱と異なり炉内からの酸

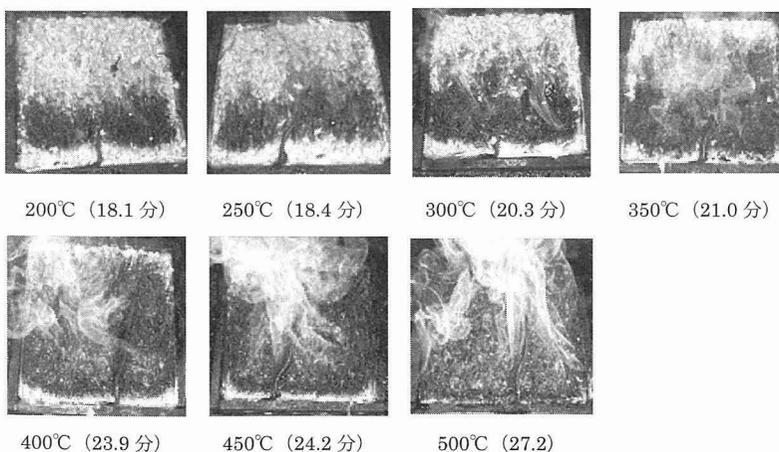


図12 間接加熱B試験直後の断熱材の様子

素供給が少ないため重量損失も少ないことが推測された。そこで、炭化物の収率データを表2の資料3-①に変更して重量損失を計算したが、依然として実測値を若干上回った。このため、260℃に達する深さを推定する方法（パターンC；深さは2.5mm刻みで設定）に変更した。加熱時間20、22、24分について、この方法で得た温度分布を図13に、炭化深さ（260℃到達した深さ）を表3に示す。加熱24分で炭化深さは約6mmと試算され、上述の観察結果とほぼ一致した。また、表3に示すように水分残存率は5割程度と試算された。直接加熱が約2割であったことを考慮すると、間接加熱では断熱材がより"蒸し焼き状態"に近いことを示唆する。

一方、加熱26分以降では中央温度が約260℃以上のため、パターンBで重量損失を計算したところ、裏面温度と同一となる深さをどのように設定しても計算値は実測値を上回った。この

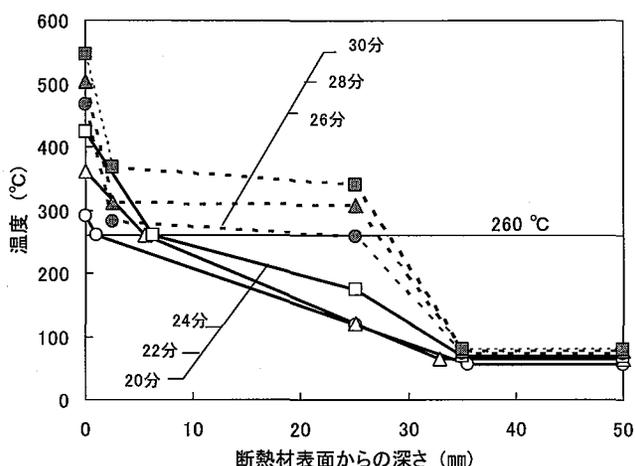


図13 間接加熱における推定温度分布

表3 間接加熱試験での厚さ方向温度分布推定に用いたデータおよび推定された炭化深さ

加熱時間 (分)	断熱材の温度 (°C)				重量損失 (%) ^{b)}		推定 パターン ^{c)}	炭化深さ (mm) ^{d)}	水分残存率 (%) ^{e)}
	表面	中央	裏面	N ^{a)}	WL	WLS			
20	290	119	56.7	12	4.2	3.5	C	1.0	54.2
22	361	121	63.9	8	5.7	5.5	C	5.5	54.0
24	423	173	69.5	6	7.8	8.4	C	6.2	42.9
26	467	259	73.3	5	10.6	12.2	D	(25)	(28.5)
28	503	307	77.5	4	14.4	17.3	D	(27)	(26.0)
30	547	339	79.2	3	19.6	24.4	D	(28)	(27.9)

a) 温度決定に使用した試験体の数

b) 図11(b)に示す回帰式で算出された断熱材全体の重量損失がWL、それを小片のみの重量損失に換算した値がWLS

c) C：260℃に達する深さを推定、D：深さ2.5mm位置の温度を推定

d) 260℃に達する深さ、カッコ内は参考値

e) 蒸発した結合水および燃焼で生成した水分のうち断熱材内部に残存する割合、カッコ内は参考値

原因は不明であるが、実際は熱分解成生物が裏面付近で冷却されて留出液として残存し、計算値のような重量損損失を生じない可能性もある。なお、図13に破線で示す温度分布は、加熱24分までの結果を参考に裏面温度と同一となる温度を深さ35mmと仮定し、深さ2.5mmの温度を推定する方法（パターンD）で計算したものである。深さ2.5mmの温度は、加熱24分時の温度と同等か下回るという矛盾が発生している。すなわち、実測の重量損失に適合させるために重量損失が小さくなるよう温度が低く算出されたことになる。したがって、間接加熱のように密閉に近く、温度傾斜の大きな条件で重量損失を推測する場合は、炭化物収率データを単純に使用する方法ではなく、冷却された留出液の存在を考慮するなど、複雑な推定方法が必要と思われる。

3. グラスウールの遮熱効果との比較

図14は、グラスウールの間接加熱試験で得た各部の温度上昇を、3試験体の平均値で示している。また、木質小片断熱材の間接加熱試験のうち、炉内温度がグラスウールのそれに近い3体（A試験からの1体とB試験からの2体）を選び、各部の温度上昇を3試験体の平均で同図中に示した。断熱材の遮熱効果を比較する場合、加熱温度が同一であることが望ましいが、図14を見る限り、3者（GW16k、GW32kおよび本断熱材）における炉内温度は近接しており、また、いずれもISO標準加熱曲線の許容範囲をほぼ満たすため、遮熱効果の相対比較および絶対比較が可能と思われる。そこで、以下、断熱材の表面温度（石膏ボード裏面温度）と裏面温度に着目して、本断熱材とグラスウールの遮熱効果を比較検討する。

加熱初期の断熱材の表面温度は、いずれの断熱材においても前述した石膏ボード特有の遮熱効果により100℃程度で停滞したが、グラスウールでは加熱約9分で再上昇を開始し、15分では急上昇に転じた。一方、本断熱材での急上昇は、これより2分ほど遅く始まり、上昇速度もグラスウールより小さくなった。表面温度100℃からの離脱および急上昇の時間差は、両断熱材の熱容量の差に起因すると推測される。すなわち、本断熱材の比熱⁹⁾ (1.16 J/gK) はグラスウールの比熱¹⁹⁾ (0.84 J/gK) の約1.4倍、密度はグラスウールの3~6倍であり、熱容量は両者で6~8倍も異なる。また、本断熱材が保有する水分の影響（潜熱消費）も考えられる。一方、急上昇の速度がグラスウールよりも小さい要因は、本断熱材の表面から順次形成される炭化層による遮熱効果にあると考えられる。

グラスウールの加熱30分後の裏面温度は、GW32kが100℃、GW16kが158℃であった。本断熱材の場合、図14に示した加熱27分後の裏面温度は76℃であり、図10より加熱30分後もほぼ同温度になると推測される。すなわち、断熱材3者の中で本断熱材の裏面温度が最も低く、本断熱材はグラスウールよりも高い遮熱効果を発揮したと言える。これは、表面温度の上昇がグラスウールに比べて抑制されたことに加え、前項までに論じた本断熱材に特有な水分による遮熱効果の現れと言える。

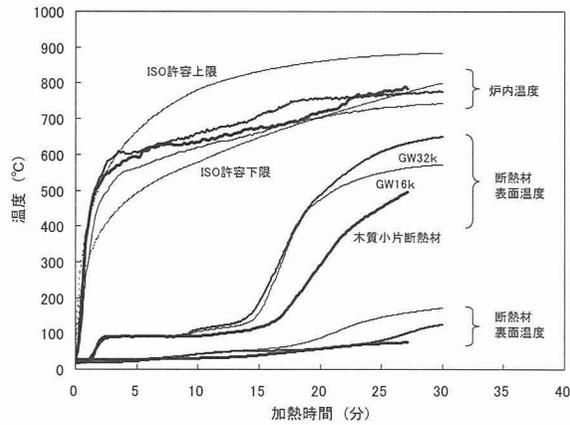


図14 間接加熱におけるグラスウールと本断熱材の温度上昇の比較
(細線：GW16k、中線：GW32k、太線：木質小片断熱材)

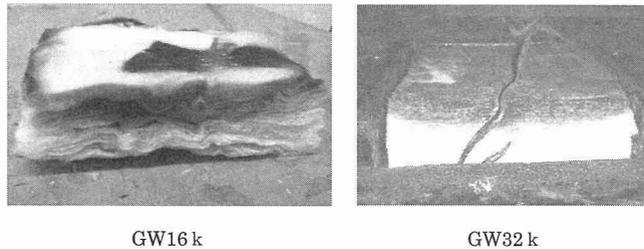


図15 加熱終了直後のグラスウールの様子

参考までに、加熱終了直後のグラスウールの様子を図15に示す。加熱側表面は黒変あるいは白変し、熔融と収縮の程度はGW16kの方が大きかった。重量減少率と厚さ減りを調べた結果、GW16kでそれぞれ、5.9%、6mm、GW32kで7.7%、3mmであった。図14に示す表面温度はGW16kの方がGW32kよりも低くなったが、その要因として、グラスウールの収縮で測温点が石膏ボード裏面から離れ、空気温度が測定された可能性がある。なお、グラスウールの収縮は厚さ方向のみならず平面方向にも認められ、密度の低いGW16kで顕著であった。一方、本断熱材の場合、平面方向の収縮はほとんど認められなかった。その要因として、小片が平面方向に圧縮されていることが挙げられる。

IV. おわりに

本断熱材は、被覆材、小片とも可燃性であり、小片間隙が火炎伝播を助長する可能性があるなどの理由から、開発当初より防火性が懸念されてきた。しかし、今回の実験結果より、代替対象であるグラスウールよりも高い遮熱性が認められた。加熱後の試験体観察や含水率測定の結果、本断熱材の遮熱効果は以下の要因から発揮されると考えられた。1) 燃焼で形成された炭化層の断熱効果、2) 小片が保有する結合水および燃焼による発生水分の一部が裏面付近に残存するため供給エネルギーは凝結水の蒸発潜熱に消費され、裏面付近は比較的長時間にわたって100℃以下に保持される、3) その結果、炭化速度も減少する。

ところで、木造壁体の防火性能には遮熱性と同時に構造安全性が求められ、建物が火災で倒壊しないように柱の損傷防止が重要となる。グラスウールの場合、溶融・収縮により壁内部の柱側面の損傷が大きいと言われる²⁰⁾。本断熱材では今回の実験で、収縮が少ないことが確認されており、また、断熱材側板は密度が高く燃焼しにくいいため、隣接する柱側面を保護することも期待される。すなわち、本断熱材は、遮熱性に加えて構造安全性の面でもグラスウールに対して優位となる可能性がある。建築基準法は2000年の改定により仕様規定から性能規定へと移行し、ISO834の耐火試験結果が所定の基準を満たせば、改定前に禁止されていた木質系の材料および構造でも、防火構造、準耐火構造および耐火構造として認定している²³⁾。今後は、本断熱材を用いた実大壁体について、遮熱性と構造安全性を検証していく必要がある。

最後に、本研究の取りまとめに当たり、貴重なご助言を頂いた岩手大学農学部の沢辺攻教授および北海道立林産試験場の菊地伸一、平館亮一、河原崎政行の各氏に対し、厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 山内秀文・馬霊飛・O.R. Pulido・佐々木 光・桜庭 司 (2002) スギ樹皮厚物成形ボードを用いた床暖房用基材の開発. 第52回日本木材学会大会研究発表要旨集: 576.
- 2) 菊地伸一・駒沢克己・小橋一哉 (2002) 低密度ファイバーボードの断熱性・吸音性と難燃処理方法. 北海道林産試験場報 16 (3): 1-6.
- 3) Kawasaki, T.・Kawai, S. (2006) Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors. J Wood Sci 52 (1): 75-83.
- 4) 篠原隆重・瀧澤哲男 (2004) 特開2004-183360.
- 5) 関野 登 (2004) 建築用断熱部材、建築用断熱部材の製造方法及び建築用断熱部材の施工

方法. 特許第3607254号.

- 6) 関野 登・河村義大(2003) 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. 木材工業58 (8) : 364-369.
- 7) 河村義大・関野 登・山内英彦(2004) 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2報) 熱伝導率と耐落下衝撃性に及ぼす小片厚さとパネル密度の影響. 木材学会誌50 (4) : 228-235.
- 8) 河村義大・関野 登・山内英彦(2004) 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3報) 熱伝導率と耐落下衝撃性に及ぼす原料密度の影響. 木材学会誌50 (6) : 397-403.
- 9) 関野 登・河村義大・山内 剛(2005) 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. 木材学会誌 51 (6) : 380-386.
- 10) 関野 登・山内 剛 (2007) 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5報) スギ樹皮小片パネルの熱伝導率と耐落下衝撃性. 木材学会誌53 (2) 印刷中
- 11) 関野 登・谷内博規・山内 剛(2006) 木質小片断熱材の保温性、遮音性、防火性. 日本木材加工技術協会第24回年次大会講演要旨集 : 202-203.
- 12) 中村賢一・宮林正幸 (1985) 大断面木材の耐火性(1). 木材工業40(12) : 3-7.
- 13) 今泉勝吉 (1976) 集成材の火災に対する安全性. 木材工業31(11) : 33-35.
- 14) 山田 誠 (2001) 耐火・耐久設計. 有馬孝禮・高橋徹・増田稔編「木材科学講座9木質構造」, 211-219, 青海社, 大津.
- 15) Tsoumis, G. (1991) Science and Technology of Wood. 134, Van Nostrand Reinhold, New York.
- 16) 中里聖一(1963) 木材炭化の基礎的研究. 北大演報 22(2) : 613-618.
- 17) 三浦正勝・西崎寛樹・加我晴生 (1982) 木材熱分解の基礎的研究—熱分解液中の水分の粗分離方法. 木材学会誌28 (11) : 727-732.
- 18) 栗本康司・鹿野厚子・沢辺 攻 (2004) 異なった温度と雰囲気下で熱処理したスギ材の細孔特性. 木材学会誌 50 (2) : 106-115.
- 19) 熱物性ハンドブック (2000) 日本熱物性学会編, 201, 養賢堂, 東京.
- 20) 平館亮一・河原崎政行・菊地伸一・由田茂一・入江雄司 (2003) 高断熱木造外壁の耐火性能 (2) 炭化による柱の断面欠損について. 日本木材学会北海道支部講演集第35号 : 62-65.
- 21) 日本セルロースファイバー工業会 (2004) パンフレット"CELLULOSE FIBER" 04.11.3000(D).
- 22) VTT BUILDING TECHNOLOGY (1999) Determination of ignitability and fire spread and smoke generation properties "VITAL insulation board", TEST REPORT NO.

RTE11648/99:E.

- 23) Harada, T. · Uesugi, S. · Masuda, H (2006) Fire resistance of thick wood-based boards. *J Wood Sci* 52(6): 544-551.

要 旨

本研究で開発中の木質小片断熱材は、プレーナー屑を密度 100kg/m^3 程度に圧縮し、建築用防湿フィルムで被覆して製造される。被覆材、小片ともに可燃性であり、小片間隙が火炎伝播を助長する可能性があるなどの理由から、開発当初より防火性が懸念されてきた。そこで本報告では、本断熱材の燃焼挙動に関する基礎知見を得る目的で、厚さ50mmの小型試験体を用いた加熱試験を行った。加熱はISO 834に規定される標準加熱温度曲線をほぼ満たす条件で行われ、断熱材の片面を直接加熱する場合と石膏ボード（厚さ12.5mm）を介して間接加熱する場合の2通りとした。また、間接加熱ではグラスウールを対照材料とし、遮熱性を比較した。

直接加熱（12分間）の場合、炭化深さは25～30mmで裏面温度は 80°C 程度であった。間接加熱では加熱30分後に、これと同等の炭化深さおよび裏面温度に達した。一方、グラスウール（密度 16kg/m^3 、厚さ50mm）の場合、間接加熱30分後の裏面温度は 158°C に達し、遮熱性は本断熱材の方が優れた。加熱後の試験体観察や含水率測定の結果、本断熱材の遮熱効果は、炭化層の形成に加えて、フィルム被覆による水分残存で発揮されることが分かった。凝結水の蒸発潜熱の消費により、比較的長時間にわたって 100°C 以下の裏面温度に保持されることが本断熱材の特徴と言える。

Summary

The insulation panels developed in this study for building purposes are composed of wood shavings compressed into a mat with a density of 100 kg/m^3 without any binder. This mat is lapped with plastic film that works as a damp-proof course. Fire safety is an important concern because our panels consist of wood shavings with gaps between them and other flammable raw materials. This paper describes fire tests conducted with a 50-mm-thick, small-scale specimen in order to obtain basic information about the fire resistance of our panels.

Two types of fire tests were conducted: one type involved direct heating from one surface, and the other involved indirect heating using a 12.5-mm-thick plaster board as a cover. The small vertical furnace that was used provided a heating temperature that almost satisfied the heating curve specified in the ISO 834 standard. The results revealed

that 12 min of direct heating caused charring to a depth of 25 to 30 mm; however, the unexposed side (rear surface) temperature was approximately 80°C. In the case of indirect heating, such a charring depth required 30 min of heating with the rear surface temperature maintained below 80°C during the heating time.

Fiberglass insulation materials were also tested by indirect heating for the purpose of comparison. The rear surface temperature of a 50-mm-thick fiberglass with a density of 16 kg/m³ was found to be 158°C after heating for 30 min; this suggests that our panels exhibit higher heat shielding performance than the fiberglass. It is clear that the charring layer acted as an insulator. Interestingly, moisture content measurements revealed that some of the water that remained near the rear surface of the panels provided heat shielding.