

カナ屑マットの熱伝導率に及ぼす原料サイズの影響

佐々木紫乃*・関野 登**

Effects of wood shavings' dimensions on the thermal conductivity
of wood shaving insulation mats

Shino SASAKI* and Noboru SEKINO**

1. はじめに

近年、建設リサイクル法が施行されるなど、廃棄物などとして処理していたものを再資源化することが強く求められるようになった。また京都議定書の第二約束期間において、住宅などに使用されている木材に貯蔵されている炭素量の変化を、温室効果ガスの吸収量または排出量として計上することとなった。これにより国際ルールの中で木材製品（伐採木材製品：HWP）による炭素蓄積量の増加が地球温暖化防止に効果を有することが評価されることとなった(1)。

現在、日本の住宅に用いられる断熱材の主流は無機繊維系・発泡系等の化学系で、供給割合は施工面積比で約99%にのぼる(2)。しかし残り1%の天然系のうち、特に木質系断熱材は、木質資源のカスケード利用や、国際ルールの中でのHWPによる炭素蓄積量に貢献できるなどの利点がある。

木質系断熱材で代表的なものはセルローズファイバーや湿式製造の繊維板であるインシュレーションボードであるが、1990年代後半より欧州で低密度の乾式繊維マットが断熱材として開発され、現在では日本国内でもライセンス生産されている(3)。この乾式繊維マットは原料チップを繊維化・乾燥し、ポリエステル繊維バインダーで繊維間を接着する。一方、これとは全く異なる製法の木質系断熱材の研究開発も行われている。それは住宅部材のプレカットで発生す

Received February 28, 2015

Accepted June 9, 2015

* 岩手大学院農学研究科共生環境専攻

** 岩手大学環境学系

本研究は、平成26年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号26450223 研究代表者：関野 登)の一部として実施され、また、日本木材加工技術協会第32回年次大会(2014年10月、秋田)において発表した。

るカンナ屑・モルダー屑を型枠内で3次元的に絡み合わせて周囲被覆するもので、原料間摩擦力によりバインドレス成形が可能になった(4)(特許第3607254号, 商品名:サーモカール)。ただし、断熱性の指標である熱伝導率 λ は0.055W/mK程度で、建築用断熱材の中では最低クラスに留まっている(5, 6)。

サーモカール®の λ が比較的高い値をとる要因として、 λ の高い木材の繊維方向が断熱材の熱流方向に近づく確率が高いことが挙げられる。これはバインドレスの成形技術とトレードオフの関係にあり、サーモカール®の特性となっている。原理的には木材の繊維直交方向が熱流方向と一致する場合にマット断熱材の λ は最少となるから、上述の乾式繊維マットの方がサーモカール®よりも断熱性が優れることになる。ただし製造エネルギーすなわち環境負荷の視点からは、簡易な製法での木質系断熱材が望まれる。

そこで、セルローズファイバーによる建築現場での断熱施工と同様に、カンナ屑などの木質小片を天井裏や壁体内部に吹き込むまたは敷き込む方式や、工場生産における壁パネル・床パネルの内部に吹き込む・敷き込む方式であれば、繊維方向がランダムに配向したマットとなり、原理的にはサーモカール®よりも断熱性に優れると考えられる。しかしながら、吹き込み・敷き込み式のマットの λ に関する報告例は殆ど見当たらないため、本研究ではこのようなマットの λ に関する基礎知見の収集を目的とした。具体的には、原料サイズ(小片寸法と厚さ)の異なる小片で同一密度のカンナ屑マットを作製し、熱橋の総量一定で小片間空隙の大きさを変化させた時に λ がどのように変化するかを調べた。また同一小片を用いて異なる密度のカンナ屑マットを作製し、熱橋の総量を変化させた時の λ の変化を調べた。

さらに、小片間空隙の等価熱伝導率 λ_w の算出を試みた。小片間空隙における伝熱は、①伝導、②対流、③小片界面における輻射の三形態の複合であり、個別に算出することは困難である。関野ら(7)は小片間空隙の3つの伝熱形態を「等価熱伝導率 λ_w 」と定義し、4要素(吸湿水分、小片間空隙、小片実質、細胞内孔)の直列・並列モデルの複合則を用いた算出方法を提案した。これは、直列・並列モデルの混合比率は比較的狭い密度帯では一定値をとると仮定し、数値計算により λ_w の最適値を決定する方法である。本研究ではこの手法を用いて、原料サイズの影響を λ_w の観点から検討した。

II. カンナ屑の粒度分布とマット作製条件

1. カンナ屑の粒度分布

住宅部材のプレカット工場から発生したスプルー、アカマツ等が混合したカンナ屑(以下、原料と称す)を入手し、ロータップ型フルイ振盪機で分級した。JIS篩の網目(mesh)を2.36, 1.70, 1.00, 0.50mmと0.50mm未満(約0.5mm刻み)の5段階に設定して原料約500gを篩い、各フラクションの重量比率を求めた。分級小片の外観を写真1に、重量比率を表1に示す。ま

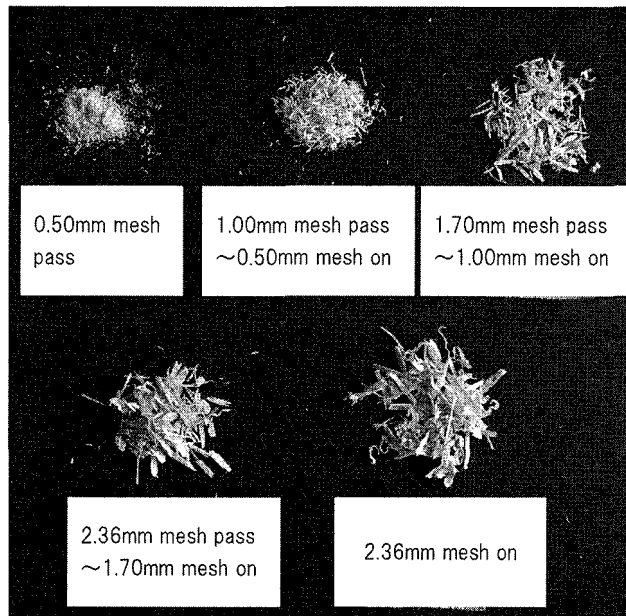


写真1 分級された原料小片

表1 原料性状

| 略号 | 分級区分 | 重量比率 (%) | 小片厚さ (mm) (N=100) | マット嵩密度 (kg/m ³) | 気乾含水率 (%) |
|-----|----------------------------------|----------|-------------------|-----------------------------|-----------|
| F1 | 2.36mm mesh on | 28.6 | 0.27 ± 0.39 | 118 | - |
| F2 | 2.36mm mesh pass ~1.70mm mesh on | 30.2 | 0.29 ± 0.29 | 122 | - |
| F3 | 1.70mm mesh pass ~1.00mm mesh on | 22.8 | 0.15 ± 0.14 | 116 | - |
| F4 | 1.00mm mesh pass ~0.50mm mesh on | 10.6 | 0.09 ± 0.06 | 136 | - |
| F5 | 0.50mm mesh pass | 7.8 | - | 205 | - |
| 未分級 | | - | 0.24 ± 0.28 | 134 | 6.49 |

た、図1に累積相対度数を示すが、meshが1.00mm以下の微細な小片が全体重量の約50%を占めていることが分かった。

一方、各フラクションと未分級のものから小片100個を無作為に抽出し、デジタルノギスで小片厚さを測定した。ただし、0.50mm mesh passの小片はほぼ粉末状であったため、厚さの測定が不可能であった。表1に示すように小片厚さは約0.1~0.3mmであり、meshが大きくなるにつれて小片は厚くなる傾向がみられた。

また原料の嵩密度を以下の方法で求めた。原料を内径19cm×高さ20cmの亚克力製円筒容器に摺り切り状態で満杯にし、テーブル上で軽くタッピングした後、亚克力製の落し蓋により面圧3g/cm²の負荷状態で原料容積を算出し、その値と投入重量からマット嵩密度を算出した。表1に示すようにmeshが小さくなり小片サイズが小さくなるにつれてマット嵩密度は高くなった。mesh 1.00mm以上では約120kg/m³であるが、0.50~1.00mmの小片ではマット嵩密度

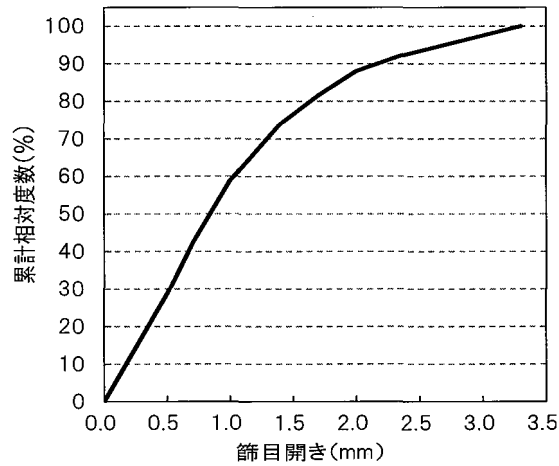


図1 原料の累積相対度数

は約1割増の 136 kg/m^3 となった。一方、 0.50mm 以下の微細な小片になると 200kg/m^3 以上となった。

2. マット作製の条件設定

F1～F5の小片のうち、F1, F3, F4の3種類（以下、それぞれをL小片, M小片, S小片と称す）に着目した。L小片を基準にすると、M小片, S小片のmesh（以下、寸法）はそれぞれ約 $1/2$, 約 $1/3$ である。また小片厚さに関しても、L小片を基準にすると、M小片, S小片はそれぞれ約 $1/2$, 約 $1/3$ である。これらのマット嵩密度はほぼ同程度であるため、同じ容積内における小片の個数はL小片を1とするとM小片は4, S小片は9となる。小片個数が増加することによって小片間の空隙は細分化される。

この小片間空隙の細分化がマットの λ に与える影響を調べることを目的に、同一密度のマットをL小片, M小片, S小片で作製した。密度条件は 140 kg/m^3 とした。密度条件設定の理由は以下のとおりである。本カンナ屑マットは住宅等の壁体に手で敷き込むことを想定しているため、住宅の壁体等の施工に支障のない反発力の範囲内でマット断熱材を作製することが要求される。しかしマット断熱材の密度をマット嵩密度以下とすると自重で沈降し、壁体内に小片が充填されない空間が発生してしまい、十分な断熱性が発揮されなくなってしまう。そこで、3種の小片のマット嵩密度を上回り、かつ手で敷き込むことが容易である 140 kg/m^3 をマット密度とした。

さらに、マット密度を変化させた時の λ の変化を調べる目的で、マット密度を $120, 140, 180\text{kg/m}^3$ の3種に設定した。ただし、用いた小片はマット嵩密度がほぼ同程度であるL小片, M小片とした。この3条件の密度はマット嵩密度を上回り、かつ手で敷き込むことが容易な密度である。2種の小片×3種の密度で計6種類のマット作製条件とした。表2にマット作製条

表 2 熱伝導率の測定条件

| 分級原料の略号 | | プレカット由来カンナ屑 (スプルース、パイン等の混合) | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | L 小片 | M 小片 | S 小片 |
| 原料 サイズ | 小片寸法 (mm) | 2.36mm mesh on | 1.70mm mesh pass ~1.00mm mesh on | 1.00mm mesh pass ~0.05mm mesh on |
| | 小片厚さ (mm) Ave. ±Std (N=100) | 0.27±0.39 | 0.15±0.14 | 0.09±0.06 |
| マット嵩密度 ρ_0 (kg/m ³) | | 118 | 116 | 136 |
| 試験体マット密度 ρ (kg/m ³) | | 120, 140, 180 | 120, 140, 180 | 140 |

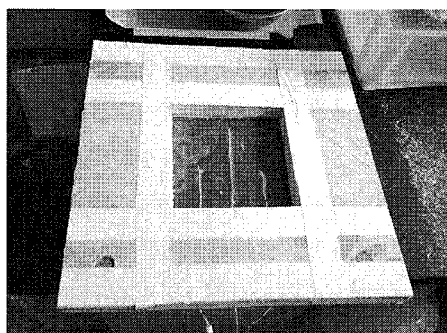


写真 2 試験体の型枠

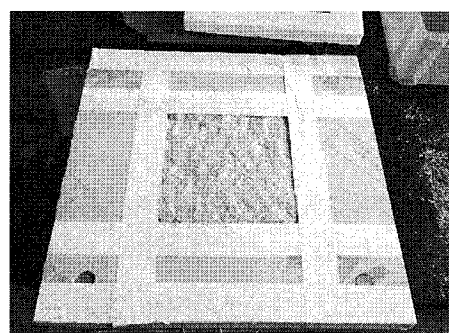


写真 3 カンナ屑マット試験体

件の一覧を示す。

III. カンナ屑マットの熱伝導率

1. 熱伝導率測定試験体

寸法475×475×30mmのフェノールフォームを用意し、その中心部分を200mm×200mmでくり抜き、試験体の型枠とした(写真2)。その型枠に小片を詰め込むことで試験体とした(写真3)。試験体の大きさは200mm×200mm×厚さ30mmである。なお、試験体型枠の四隅付近には木製の支柱を埋め込み、 λ 測定時において熱板に挟んだ際に圧縮され試験体厚さが変化することがないように配慮した。

2. 測定方法

λ 測定には平板比較法(JIS A 1412に準拠(8))を用いた。 λ が既知であるアメリカ国立標準技術研究所(NIST)認定のグラスウール(品番;SRM1450d, 密度;118kg/m³, 以下, 標準板と称す)と試験体を重ね合わせ、高温板と低温板によって鉛直下向きの熱流を与え温度勾配を発生させ、標準板及び試験体の裏表面の温度差を測定し、それらの値と標準板の λ から試験体の λ が算出できる。熱が一次的に流れ定常を保った時、試験体の λ は式(1), (2)から求められる。

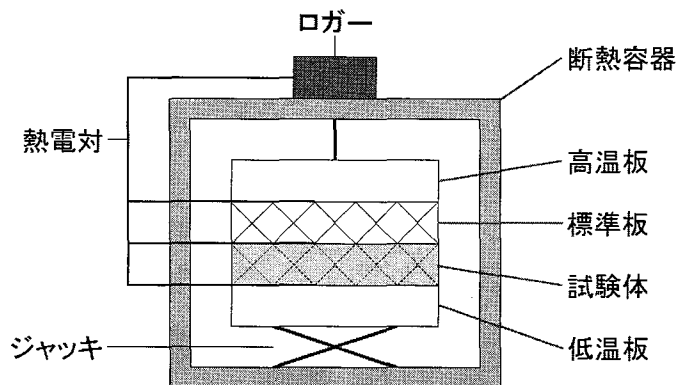


図2 平板比較法 熱伝導率測定装置の模式図

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\Delta\theta_0}{d_0} \cdot \frac{d}{\Delta\theta} \quad (1)$$

$$\lambda = q_0 \cdot \frac{d}{\Delta\theta} \quad (2)$$

- λ : 試験体熱伝導率 (W/mK)
- λ_0 : 標準板熱伝導率 (W/mK)
- $\Delta\theta$: 試験体の温度差(K)
- $\Delta\theta_0$: 標準板の温度差(K)
- d : 試験体厚さ(m)
- d_0 : 標準板厚さ(m)
- q_0 : 標準板に流れた熱流量 (W/m²)

図2に測定装置の模式図を示す。寸法400×400×30mmのステンレス製の高温板・低温板はそれぞれ別個の恒温水循環装置(ADVANTEC社製, TBE009AA)に繋がっており, 循環水は設定温度±0.1℃の精度で恒温に保たれている。また, 熱板は標準板あるいは試験体と接触する面以外は厚さ約30mmのフェノールフォームで断熱されている。周囲断熱された熱板と試験体型枠は平面寸法が一致しているため, 試験体型枠を挟み込むことで試験体は熱板中央部分に設置される。

温度測定を行う熱電対(JIS T型:径0.3mm)は高温板と標準板の間に3本, 標準板と試験体の間に3本, 試験体と低温板の間に3本, そして断熱容器内部の温度測定用に1本の合計10本を設置した。なお, 熱電対は特定の校正温度±0.1℃の温度表示をするものを多数の熱電対から選定し, かつ補正係数を取得しており, 個々の熱電対の出力に補正係数を乗じた値を使用することで温度測定の精度を0.1℃単位で確保している(9)。

今回の測定では高温板を40℃、低温板を25℃に設定しており、試験体の平均材温は28～29℃となった。この温度設定は次の理由による。測定装置は通常の実験室内に設置されており、また断熱容器は完全気密ではないため、夏季の測定時に低温板温度を低くしすぎると熱板面で結露発生恐れがある。結露発生による試験体の含水率上昇は λ に影響するため、結露防止を目的に低温板は25℃とした。また、 λ の測定精度を確保する目的で試験体の上下面に十分な温度差を与えるため、高温板は40℃とした。

温度計測は熱板温度が設定値になったのを確認した後、1分インターバルで30分以上行い、計測された最後の30分間のデータを用いた。熱流が定常に達するまでの時間は、試験体の熱容量に依存する。今回の試験体に対する定常判定の予備試験から、測定開始後240分程度で λ は安定した値となったため、これを根拠に測定時間は安全を見て30分以上とした。なお、試験の繰り返し数は1条件につき3回とした。

λ は含水率の影響を受けるため、型枠に原料を敷き込む前、及び λ 測定後の両時点での含水率を測定した。測定は原料約5gを秤量瓶にとって精秤し、全乾法で行った(N=3)。

3. 結果および考察

(1) 原料サイズの影響

同一密度(140 kg/m³)における小片寸法・厚さの異なるマットの λ を比較すると、L小片マットの平均 λ は0.052 W/mK、M小片マットは0.045 W/mK、S小片マットは0.049 W/mKとなった(図3)。有意差検定を行ったところ、L小片マットとM小片マットには有意水準1%で有意差があったが、L小片マットとS小片マット、M小片マットとS小片マットの λ に有意差は見られなかった。S小片マットの λ のばらつきが大きいことが要因と考えられる。測定値を二次曲線で近似したところ有意水準1%で相関がみられ($R^2=0.72$)、 λ は平均小片厚さ0.17mm付近で極小値をとった。このことから、原料サイズのうち小片厚さの側面のみ注目すると、平均小片厚さ0.17mm付近が最適値である可能性が示唆された。L小片マット、M小片マットに注目すると、小片寸法と厚さの両方を約1/2にすることで λ は約12%低下した。以下、この要因を考察する。

木質小片系断熱材内において熱の移動形態は、①接触する小片を通過する熱伝導(熱橋)、②小片間空隙における対流、③小片界面における輻射の3つがある。L小片のマット嵩密度は118kg/m³、M小片のマット嵩密度は116kg/m³でありほぼ等しいため、熱橋の総量は一定で、上記①に関して、両マットは同じ条件である。また③に関して、原料サイズが異なっても、樹種の混在率や切削による表面性が一樣であると仮定すれば、小片界面における熱線の輻射率と輻射面積は小片のサイズに依存しないものと考えられる。つまり、マットの λ に影響を与えたのは②対流であると考えられる。対流は小片間空隙が大きいほど促進され、小片間空隙が小さくなるほど抑制される(9)。前述のようにM小片マットでは小片間空隙はL小片マットよりも

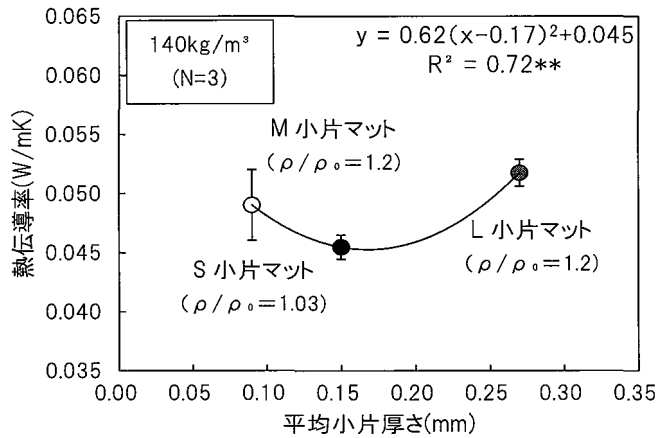


図3 原料サイズと熱伝導率の関係 (図内数値はマット嵩密度からの圧縮倍率)
(密度 140kg/m^3 , $N=3$ 、回帰式は全プロットより算出)
(*…有意水準5%で相関有り, **…有意水準1%で相関あり)

1/4に細分化されるため、これが対流抑制に寄与し、 λ 低下をもたらしたものと考えられる。次項IVでは、原料サイズの影響を小片間空隙の λ に注目して検討する。

(2) 試験体密度の影響

図4にL, M小片マットにおける λ と試験体密度の関係を示す。密度が $120, 140, 180\text{kg/m}^3$ と高くなるにつれてL小片マットの平均 λ は $0.054, 0.052, 0.048\text{W/mK}$, M小片マットの平均 λ は $0.047, 0.045, 0.044\text{W/mK}$ となり、試験体密度が高くなるにつれてL小片マットは有意水準1%で、M小片マットは有意水準5%で有意に λ が低下した。またM小片マットの λ はL小片マットよりも8.6~12.7%低い値をとった。

試験体密度が高くなるにつれて λ が低下したことに関して、カンナ屑マットの λ には密度依存性がないことが先行研究(10)により報告されている。当結果で異なった傾向を示した要因として、先行研究において、試験体密度の範囲はマット嵩密度の約2倍までであり、約 2kg/m^3 刻みで21条件測定しているのに対し、本研究では約1.6倍までの密度範囲で3条件のみ測定を行った。これらの違いが影響したと考えられる。また、先行研究のカンナ屑マットの平均小片寸法は $4.20\text{mm} \times 4.20\text{mm}$ 、平均小片厚さは $0.23\text{mm} \pm 0.18\text{mm}$ であり、本研究で用いた小片の約2倍の大きさである。原料サイズが大きく異なっているため、密度依存性がないと判断できる密度範囲が異なることが考えられる。より正確性のある結果を得るには、密度範囲を広げ、測定条件を増加させる必要がある。

M小片マットについて、測定した密度範囲の λ は $0.044 \sim 0.047\text{W/mK}$ の値をとり、L小片マットよりも平均11.2%低くなった。表3に示すように、断熱材はその λ によってA-1~Fの7段階(Fが最良)にランク分けされるが(5)、木質小片系断熱材サーモカール®はA-1ランクに該当するのに対し、M小片マットは密度 16kg/m^3 のグラスウール(16K・GW)と同じBラン

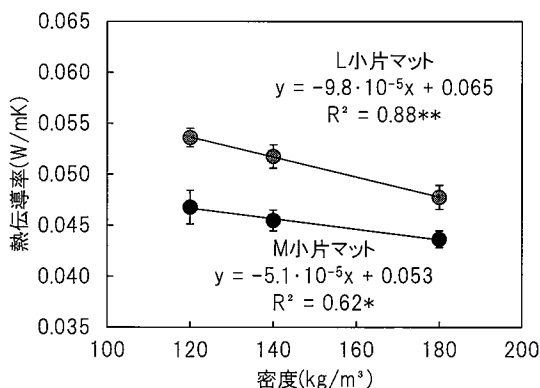


図4 試験体密度と熱伝導率の関係 (N=3, 回帰式は全プロットより算出)
(*…有意水準5%で相関有り, **…有意水準1%で相関あり)

表3 熱伝導率による断熱材ランク (5)

| ランク | 熱伝導率 (W/mK) | 断熱材仕様例 |
|-----|-------------|--|
| A-1 | 0.051~0.052 | 吹込GW、吹込RW35K、S-IB |
| A-2 | 0.046~0.050 | GW10K、吹込RW25K、A-IB |
| B | 0.041~0.045 | GW16K、EPS-4号、PE-B種、T-IB |
| C | 0.035~0.040 | GW24K・32K、高性能GW16K・24K、吹込GW35K 吹込RW30K、RW、XPS-A種、PE-A種 CF25K、CF45K・55K (接着剤併用)、PF-2種1号 |
| D | 0.029~0.034 | EPS特号、XPS 2種 PF-1種1号2号・2種2号 |
| E | 0.023~0.028 | XPS-3種、PUF、吹付PUF |
| F | 0.022以下 | 高性能PF |

- ・無機繊維系 ⇒ GW：グラスウール
RW：ロックウール (35K：密度 35kg/m³)
- ・発泡プラスチック系 ⇒ EPS：ビーズ法ポリスチレンフォーム
XPS：押出法ポリスチレンフォーム
PE：ポリエチレンフォーム
PF：フェノールフォーム
PUF：硬質ウレタンフォーム
- ・木質系 ⇒ CF：セルローズファイバー
IB：インシュレーションボード (A級、S級、T級)

クヤ、密度10kg/m³のグラスウール (10K・GW) と同じA-2ランクに該当した。このことから、同じ木質小片系断熱材においても、バインダレス成形断熱材よりも原料を敷き込むカンナ屑マットの方が断熱性において有利であることが明らかとなった。

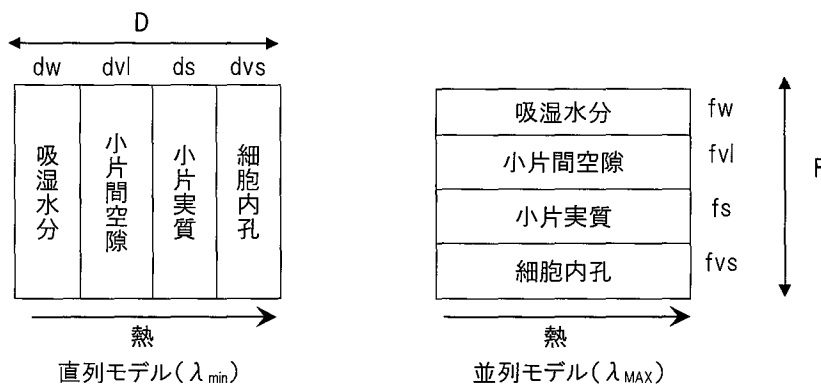


図5 4成分系直列・並列モデル

IV. 小片間空隙における伝熱の考察

1. 等価熱伝導率の定義

木質マットにおいて、関野ら(7)は熱を伝える要素は①細胞内孔、②小片実質、③吸着水分、④小片間空隙の4つであるとし、これら4要素の λ が複合してマットの λ が決定されるとした。これら4要素の中で細胞内孔の静止空気、小片実質、吸着水分の λ は固定値であるが、小片間空隙の λ は小片サイズや小片の詰め込み方などに影響を受けて変化する変数である。つまり、小片間空隙の λ を調べることで、原料サイズの違いがマット試験体の λ に与えた影響を定量化することが可能である。

小片間空隙における熱の伝わり方は、熱伝導、対流、放射のすべてが同時に起こっている。そのため、それら3つの伝熱を個別に算出することは非常に困難である。そこで小片間空隙の λ をこれら3つの伝熱形態を含んだ λ 、つまり「等価熱伝導率 λ_{vi} 」として捉え、 λ の複合則を用いて小片間空隙の熱伝導率を算出する手法を用いた(7)。この λ_{vi} が高くなればマットの λ は高くなり、 λ_{vi} が低くなればマットの λ は低くなる。本研究では密度範囲 $120\sim 180\text{kg/m}^3$ における小片間空隙の λ_{vi} を算出し、原料サイズの違いがマット試験体の λ に与えた影響を定量化することでM小片マットの λ のほうがL小片マットよりも低い値をとる要因を検討した。

2. 等価熱伝導率の算出方法

等価熱伝導率 λ_{vi} を算出するにあたって、本研究では関野ら(7)の手法を用いて、カンナ屑マットにおける伝熱モデルを、細胞内孔と細胞壁(木材実質)、吸湿水分、小片間空隙の4要素の直列モデルと並列モデルの2つとした(図5)。

直列モデル(全体厚さ D 、要素厚さ d)とはマットを構成する4要素が直列に積層された場合を表しており、熱はそれぞれの要素を直列的に伝わるため、 λ の低い要素が支配的となり、

モデル全体の λ は最も低くなる。このときの λ_{\min} は式(3)で表される。一方、並列モデル(全体幅 F , 要素幅 f)とは、熱がそれぞれの要素を並列的に伝わっていくため、 λ の高い要素が支配的となり、 λ が最も高くなるモデルである。このときの λ_{\max} は式(4)で表される。

$$\lambda_{\min} = \frac{D}{\sum \left(\frac{d}{\lambda} \right)} = \frac{V}{\frac{V_w}{\lambda_w} + \frac{V_{vl}}{\lambda_{vl}} + \frac{V_s}{\lambda_s} + \frac{V_{vs}}{\lambda_{vs}}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum (f \cdot \lambda)}{F} = \frac{V_w \cdot \lambda_w + V_s \cdot \lambda_s + V_{vl} \cdot \lambda_{vl} + V_{vs} \cdot \lambda_{vs}}{V} \quad (4)$$

マットが直列モデル(λ_{\min})と並列モデル(λ_{\max})の混合体と考えると、マットの λ は2成分混合系の複合則により式(5)で算出することができる。ただし、 Z はマット中の並列モデル(λ_{\max})の混合比であり、 $0 < Z < 1$ である。

$$\lambda = Z \times \lambda_{\max} + (1-Z) \times \lambda_{\min} \quad (5)$$

$V \cdot r \cdot \lambda$: 各成分の占有容積・密度・熱伝導率

添え字 $w \cdot vl \cdot s \cdot vs \cdot a$: 吸着水分・小片間空隙・木材実質・細胞内孔・気乾木片

Z : 並列モデル(λ_{\max})の混合比

信田らの先行研究(11)では密度範囲 $0.4 \sim 0.9 \text{g/cm}^3$ のパーティクルボードに対して類似のモデルを適用し、構造がほぼ一定と見なせるボードでは Z が一定値を採ることを確認している。そこで本実験においては、カンナ屑マットでは $120 \sim 180 \text{kg/m}^3$ の密度範囲であれば Z 一定と仮定した。この仮定に基づいた小片間空隙の等価熱伝導 λ_{vi} の算出方法を以下に示す。まず、式(3)、(4)から小片間空隙の λ_{vi} を変数とした λ_{\min} と λ_{\max} を求め、これらを λ 実測値と共に式(5)に代入することで、 $120 \sim 180 \text{kg/m}^3$ の密度範囲における Z の平均値を得た。そして、それぞれの密度範囲ごとにそれぞれ Z 一定という仮定より、 Z の変動係数が最小となる時の λ_{vi} を求めた。ここで得られる λ_{vi} は、 $120 \sim 180 \text{kg/m}^3$ での平均的な小片間空隙の等価熱伝導率を示すことになる。

λ_{vi} の算出に用いた物性値を表4に示す。木材実質の繊維方向と繊維直交方向の λ は木材と同じ値の、 $\lambda_{//} = 0.65 \text{W/mK}$, $\lambda_{\perp} = 0.42 \text{W/mK}$ とした。また、細胞内孔は対流を生じない程度に微細として考え、その λ は静止空気の値を用いた。吸着水分は木材の結合水の存在形態を考慮して、小片の含水比に対応する水の密度を用いた。密度に対応する吸着水分の λ は通常の水の λ と同値とした(12)。原料はスプルース、パインなどの混合であるが、小片の色調からスプルースの割合が大きいと推測されるため、今回の算出にはスプルースの気乾比重から算出した全乾比重を用いた。

表4 算出に用いた物性値

| 要素 | 単位 | L小片マット | M小片マット | 備考 | |
|--------|-------------------|-------------------|--------|-------|---------------|
| 実質 | rs | g/cm ³ | 1.5 | 1.5 | 木材の真比重を1.5と仮定 |
| | $\lambda_{//}$ | W/mK | 0.65 | 0.65 | 木材の値(並列モデル用) |
| | λ_{\perp} | W/mK | 0.42 | 0.42 | 木材の値(直列モデル用) |
| 細胞内孔 | λ_{vs} | W/mK | 0.025 | 0.025 | 静止空気の値 |
| 小片気乾密度 | ra | g/cm ³ | 0.38 | 0.38 | スプルース全乾比重(算出) |
| 吸湿水分 | rw | g/cm ³ | 1.21 | 1.20 | 結合水の平均比重 |
| | λ_r | W/mK | 0.6 | 0.6 | 水の値 |
| 含水比 | MC | - | 0.08 | 0.11 | |

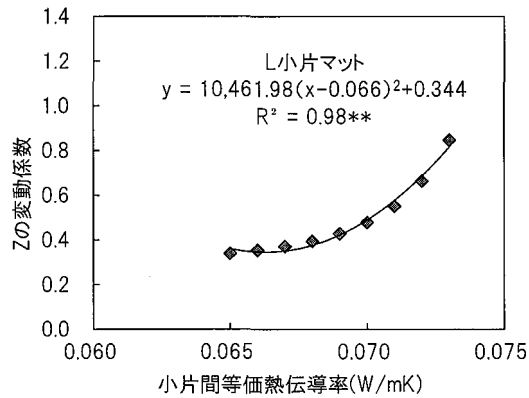


図6 小片Lマットの小片間等価熱伝導率
 (*…有意水準5%で相関有り, **…有意水準1%で相関あり)

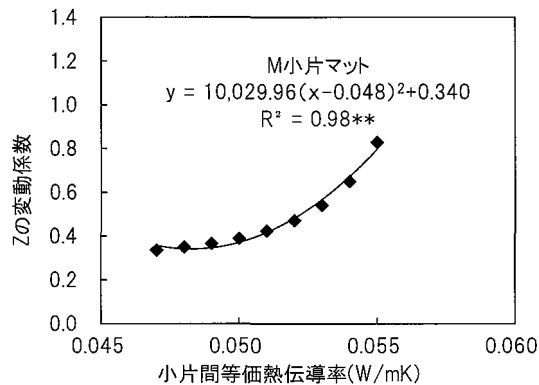


図7 小片Mマットの小片間等価熱伝導率
 (*…有意水準5%で相関有り, **…有意水準1%で相関あり)

3. 等価熱伝導率の算出結果

結果を図6, 7に示す。図中の近似式からZの変動係数が極小値をとる時の λ_v を算出し、その結果を図8に示す。表4に示すように静止空気の λ は0.025W/mKであるのに対し、L小片

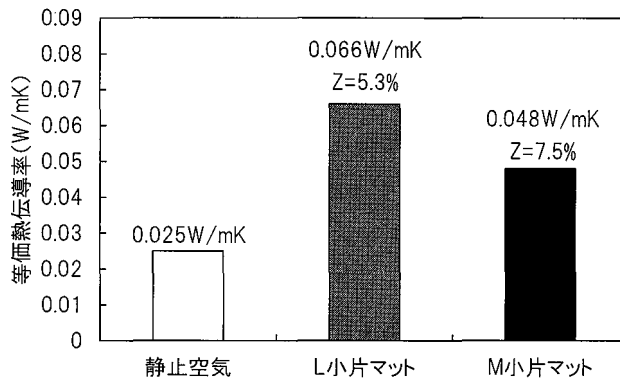


図8 L, M小片マットの小片間等価熱伝導率 (密度範囲120~180kg/m³)

マットの λ_{vi} は0.066W/mKで静止空気の約2.6倍, M小片マットの λ_{vi} は0.048W/mKで静止空気の約1.9倍であった。このように小片間空隙では小片の細胞内孔と異なり, 伝熱が大きく促進されていることが分かる。小片間空隙での伝熱に関して, 前述のように輻射は一樣であると仮定すれば, λ_{vi} の差は対流の程度の差といえる。M小片マットの λ_{vi} はL小片マットよりも約27%低く, 対流が抑制されていることが示された。

一方, マット全体の λ はM小片マットの方がL小片マットよりも約11%低いが, これは λ_{vi} の低下率の半分以下であった。その要因を並列モデル (λ_{MAX}) の割合Zの値から考察する。図5の伝熱モデルのうち直列モデル (λ_{min}) は λ の低い要素が支配的となるため, 4要素のうち細胞内孔の静止空気によってその λ が決定されると言える。一方, 並列モデル (λ_{MAX}) は熱がそれぞれの成分を並列的に伝わっていくため, 各要素の λ が低下した分だけ並列モデル (λ_{MAX}) の λ は低下すると言える。4要素のうち小片間空隙以外の3要素は固定値のため, λ_{vi} のみが並列モデルの λ に影響する。図8にZの値を示すが, マット内の並列モデル割合は1割未満であった。マット全体の1割未満の並列モデル (λ_{MAX}) の4要素のうち, 小片間空隙の約3割低下が, マット全体の λ の約1割低下に反映されたと解釈できる。

VI. まとめ

本研究では, プレカット加工の際に生じるカンナ屑を原料として原料を敷き込むカンナ屑マットを想定して, 分級したカンナ屑を原料としてカンナ屑マットの熱伝導率 λ に及ぼす原料サイズ (小片寸法, 小片厚さ) とマットの密度の影響を調べた。はじめに, プレカット由来のカンナ屑から原料サイズの異なるL, M, S小片を抽出しマット原料とした。L小片を基準にすると, M小片, S小片の寸法, 厚さはそれぞれ約1/2, 約1/3であり, M小片マットの小片間空隙の大きさはL小片マットの1/4程度になっている。

続いて、原料サイズの違いが λ に及ぼす影響を調べるため、密度 140kg/m^3 のマットの λ を測定したところ、M小片マットの λ はL小片マットよりも約12%低かった。ただし、S小片マットの λ とその他のマットの λ との間に有意差は見られなかった。マット密度が λ に及ぼす影響を調べるためL、M小片について $120, 180\text{kg/m}^3$ のマット条件を追加したところ、密度が高くなるにつれて両マットとも λ が低下し、M小片マットの λ はL小片マットよりも平均で約11%低かった。

さらに、M小片マットの λ がL小片マットよりも低い要因を検討するため、小片間空隙の熱伝導率 λ_w を4要素の直列・並列モデルを用いて算出した。その結果、M小片マットの λ_w はL小片マットよりも約27%低く、小片間空隙での伝熱の抑制の程度が定量化された。これは、小片間空隙が $1/4$ に細分化された効果の現れであり、主として対流抑制によるものといえる。伝熱モデルのうち、並列モデルでは、 λ_w の低下がモデル全体の λ 低下に寄与する。本研究のマットは並列モデルの存在率が1割未満のため、約3割の λ_w 低下は、マット全体では λ の1割低下として現れたと解釈できる。

木質小片系断熱材において、小片間空隙で発生する伝熱は主に対流と輻射であるため、対流の抑制だけでなく輻射も抑制することで断熱性の改善が図られる。例えば、ビーズ法ポリスチレンフォームにカーボンブラック(CB)を添加した断熱材(13)が開発されているが、木質系でもCB添加の効果が検討されており(14)、輻射抑制の手法開発と効果の検証が望まれる。

引用文献

- (1) 林野庁 (2012) 森林・林業白書 (平成23年版) : 63-65, 林野庁
- (2) (株)野村総合研究所 (2014) 建材等のトップランナー制度導入に伴う熱損失防止建築材料等調査 報告書, (株)野村総合研究所
- (3) (株)木の繊維 木質繊維断熱材 ウッドファイバーLD
<http://www.kinoseni.com/commodity/commodity03.html>
- (4) 株式会社ヤマウチ サーモカール® パンフレット
<http://www.yamauchi-iwate.jp/products001.html>
- (5) 坂本雄三監修 (2004) 住宅の省エネルギー基準早わかりガイド, (財)建築環境・省エネルギー機構・(社)日本建材産業協会
- (6) 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. 木材学会誌51(6) : 380-386
- (7) 関野登, 山口晃輔 (2013) 木片炭化マットの断熱材発現メカニズム —粗空隙の見かけの熱伝導率からの考察—. 木質炭化学会誌9(2) : 68-74
- (8) 日本工業規格JIS A 1412-2 (1999) 熱絶縁体の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 —第2部:

熱流計法 附属書A (規定) 平板比較法

- (9) 佐々木紫乃(2013) 実大厚さ断熱材用の熱伝導率測定装置の作製とそれを用いたカンナ屑マットの断熱性の評価 (岩手大学卒業論文)
- (10) 神 友美 (2010) セルローズファイバーとプレーナー屑マットの熱伝導率およびその密度依存性 (岩手大学卒業論文)
- (11) 信田 聡, 大熊幹章 (1981) パーティクルボードの熱伝導率に及ぼす密度の影響. 木材学会誌27(11) : 775-781
- (12) 山口晃輔 (2010) 炭化による木質小片断熱材の断熱材・吸着性の改善とそのメカニズムの考察 (岩手大学院修士論文)
- (13) (株)東北資材工業 TSKラムダボード
http://www.tsk-kenzai.com/_src/sc1307/ramuda-bord.pdf
- (14) 佐々木紫乃, 関野 登 (2015) カーボンブラック添加による木片断熱材の性能改善. 第65回日本木材学会大会研究発表要旨集. 東京 : 170

Summary

The thermal conductivity (λ) of wood shavings insulation mats was investigated in terms of wood shavings' dimensions and mat density. The raw materials were collected from a timber-precut factory and three fractions, L, M, and S with different dimensions and thickness were obtained by a sieve classification. The bulk density of L and M was almost identical.

In order to investigate the effects of raw material size on mat thermal conductivity, the λ of mats with a density of 140kg/m^3 was compared among L, M, and S fractions. It was found that the λ of M fraction mats (M-mats) was about 12% lower than that of L fraction mats (L-mats). In order to investigate the effects of mat density, the λ of mats with a density of 120 and 180kg/m^3 was also measured for L-mats and M-mats. The results showed that the higher mat densities were, the lower the λ became. Also, the λ of M-mats was found to be 11% lower than that of L-mats on average through this density range.

To quantitate the effects of raw material size on mat thermal conductivity, we calculated the apparent λ of coarse pores in the mats (λ_{cl}), which includes the effects of convective and radiant heat transfer that were calculated with the use of a mix law of two types of layer arrangement models parallel (PA-model) and perpendicular (PE-model) to the direction of heat flow. The results showed that the λ_{cl} of M-mats was 27%

lower than that of L-mats on average. This suggests that using smaller wood shavings makes coarse pores smaller, which consequently inhibits convective and radiant heat transfer. Also, the results revealed that the existence ratio of the PA-model was much smaller than the PE-model. Since changes in λ_{vi} affect only the PA-model, reductions in mat thermal conductivity smaller than in λ_{vi} are explicable by the low existence ratio of the PA-model.