

【研究報告】

木片炭化マットの断熱性発現メカニズム —粗空隙の見かけの熱伝導率からの考察—

関野 登****, 山口晃輔***

概要: プレーナー層をマット化した住宅用の木質小片断熱材 (サーモカール®) を炭化することで、断熱性の改善、耐蟻・耐腐朽性および吸着能の付与を目指した新たなマット断熱材 (木片炭化マット) の開発を進めている。木片炭化マットの熱伝導率の最小値は木質小片断熱材のその約 2/3 であり、この断熱性改善の主たる要因として、マット粗空隙の細分化による対流抑制や粗空隙表面の輻射の低下が考えられた。本報告では、その影響度合いを定量化する目的で、熱伝導の複合則を適用してマット粗空隙の見かけの熱伝導率を試算し、マットの断熱性との関係を論じた。炭化温度 400°C のマットでは、粗空隙の見かけの熱伝導率は 0.031 W/mK であり、静止空気の熱伝導率 0.025 W/mK の 2 割増し程度であった。この値は木質小片断熱材での値 0.045 W/mK の約 2/3 であり、小片間粗空隙の細分化による対流抑制や輻射低減の現れと言えらる。一方、炭化温度 700°C の場合、粗空隙の見かけの熱伝導率は 0.042 W/mK となった。この要因として、炭化の進行で比較的小さな粗空隙が連続して大きな粗空隙が形成された可能性あるいは微細表面の物理的变化による輻射伝熱の増加が推察される。

キーワード: 木片炭化マット, 見かけの熱伝導率, 粗空隙, 輻射伝熱, 対流伝熱

Mechanisms behind better thermal insulation capacity of carbonized binder-less wood shaving insulation panels -Investigation from apparent thermal conductivity of coarse pore-

Noboru Sekino****, Kosuke Yamaguchi***

Abstract: By carbonizing binder-less wood shaving insulation panels (Thermo-cur1®), a new mat-type insulator (carbonized wood shaving mat; CWSM) has been developed. Minimum thermal conductivity of CWSM was about two-thirds of that of Thermo-cur1®, which was based on the theory that coarse pore changes caused by carbonization may provide the panels with better insulation capacity in terms of reducing convective and radiant heat transfer. In this report, apparent thermal conductivity of coarse pores (λ_{app}) which includes the effects of convective and radiant heat transfer was calculated by the use of a mix law of layer arrangement parallel and perpendicular to direction of heat flow and these values were discussed with relation to mat thermal conductivity. The value of λ_{app} obtained for a mat carbonized at 400°C was 0.031 W/mK, it was only 1.24 times the thermal conductivity of the static air. It was also about 0.7 times the value for Thermo-cur1® (0.045 W/mK) and this suggests that reducing coarse pores play a role to depress convective and radiant heat transfer. On the other hand, the value of λ_{app} was 0.042 W/mK when carbonized at 700°C. This suggests that excessive carbonized temperature causes continuous coarse pores which allow greater convective heat transfer or causes physical changes on the carbonized wood surface which increase radiant heat transfer.

Keywords: carbonized wood shaving mat, apparent thermal conductivity, coarse pore, radiant heat transfer, convective heat transfer

1. 緒言

木質小片断熱材 (サーモカール®) はプレカット工

場のプレーナー層を原料とし、接着剤無添加の原料
マットを型枠中で常温圧縮したのち、防湿フィルムで

* 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University

** 現在: 大建工業株式会社 Daiken corporation

*** 連絡先: 020-8550, 岩手県盛岡市上田 3 丁目 18-8 e-mail: sekino@iwate-u.ac.jp

Corresponding author: Ueda 3-18-8, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

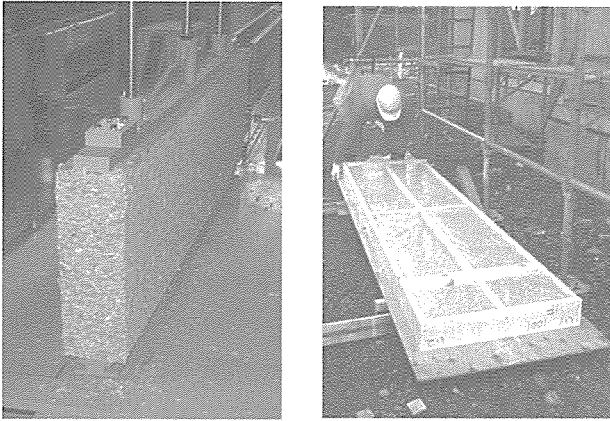


図1 木質小片断熱材 (左)とそのパネル施工 (右)

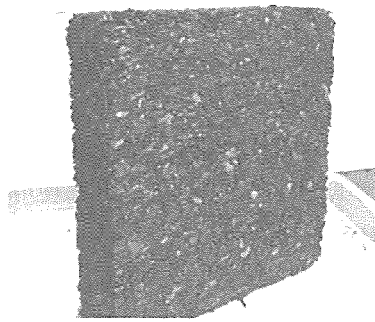


図2 木片炭化マット (寸法 :約20 cm × 20 cm × 5 cm)

表1 木片炭化マットの熱伝導率 (W/mK)

製造条件	炭化温度 (°C)				
	400	500	600	700	
初期 密度 (kg/m ³)	200	0.046 (92)	0.051 (77)	0.048 (71)	0.054 (68)
	250	0.044 (113)	0.051 (91)	0.049 (85)	0.054 (81)
	300	0.050 (138)	0.055 (121)	0.056 (116)	0.060 (115)

注: 下段のカッコ内は炭化後のマット密度(kg/m³)

被覆して製造される (図1)^{1,2)}。この断熱材は製造エネルギーが少なく³⁾、火災時の遮熱性にも優れるが⁴⁾、断熱材の中では熱伝導率が比較的大きく、また、生物劣化の懸念など、いくつかの改善点が指摘されている⁵⁾。これらの改善を図るため、木質小片断熱材を通常の2~3倍の密度で成形し、これを炭化することでマット密度を木質小片断熱材と同じ程度 (約100 kg/m³) に戻す“木片炭化マット” (図2) が考案された⁵⁾。木片炭化マットは被覆材を用いずに形状が維持でき、これまで、製造条件と熱伝導率の関係^{5,6)}、ホルムアルデヒ

ドおよびアンモニア吸着能⁷⁾、などが検討されてきた。

木片炭化マットの熱伝導率⁵⁾を表1に示す。同一の初期密度 (炭化前) で比べると、炭化温度400°Cで熱伝導率は最小、700°Cで最大であった。最小の熱伝導率は、初期密度350kg/m³、炭化温度400°Cという製造条件 (炭化後の密度:113 kg/m³) で得られ、その値は0.044 W/mKであった。密度113 kg/m³の木質小片断熱材の熱伝導率は0.069 W/mK程度⁸⁾であるから、3~4割程度の断熱性向上となる。この断熱性改善の要因として、吸湿性の低下、マット粗空隙の細分化による対流伝熱の抑制、粗空隙表面の輻射の低下、などが考えられた^{5,6)}。吸湿性の差異に起因する影響を炭化前後の水分吸着等温線と熱伝導率の含水率依存性から検討した結果、断熱性向上の3割程度が説明できるが、残り7割は他の要因、すなわちマット構造に基づく物性と結論づけられた^{5,6)}。そこで、マット粗空隙の顕微鏡観察とその画像解析を行い、図3に示すような粗空隙の断面積分布を得た⁹⁾。木質小片断熱材では、断面積10 mm²以上が空隙全体の50%を超えるが、木片炭化マットのそれは5%未満と少なく、断面積2 mm²以下の空隙が相対的に多かった。このような粗空隙構造の相違は、対流伝熱の差異に起因する断熱性向上を推察するデータとなり得るが、その解釈は定性的な域を脱しない。

そこで本研究では、上記の断熱性向上に関する定量的な解釈を目的に、伝熱モデルを基にしたマット粗空隙の“見かけの熱伝導率”の算出と、算出された値とマットの断熱性との関係を論じる。ここで、“見かけ”とは、粗空隙の空気の伝導伝熱、対流伝熱および粗空

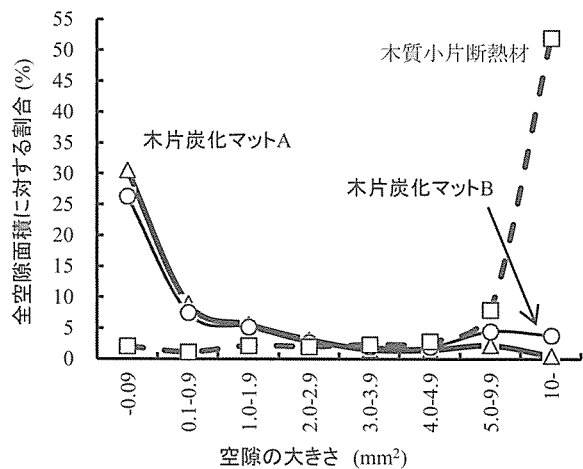


図3 マット粗空隙の断面積分布 (A, Bの条件は図6に記載)

隙表面の輻射伝熱の三形態が反映された伝熱が含まれることを意味する。

2 理論および方法

2.1 熱伝導モデル

木材に適用される伝熱モデルとして、木材を細胞壁（木材実質）と細胞内孔（空隙）の2要素に分けて考える Kollmann の直列・並列モデル⁹⁾がある。本研究では、このモデルを図4に示す4つの要素、すなわち、細胞内孔、炭化あるいは未炭化の木片実質、吸着水分、木片間粗空隙（マット粗空隙）へと拡張して用いた。熱流方向に対して要素が直列に連なる場合（直列モデル：全体厚さD、要素厚さd）、定常時の熱流は熱抵抗最小の要素に支配されるため、このモデルで熱伝導率が最小（ λ_{\min} ）となり、積層系の複合則により λ_{\min} は(1)式で算出できる。一方、各要素が熱流方向と並列になる場合（並列モデル：全体幅F、要素幅f）、このモデルで熱伝導率が最大（ λ_{\max} ）となり、積層系の複合則により λ_{\max} は(2)式で算出できる。ただし、V、 λ は、それぞれ、容積、熱伝導率であり、添え字w、vl、s、vsは、それぞれ、吸着水分、木片間粗空隙、炭化あるいは未炭化の木片実質、細胞内孔を示す。

実際の材料（マット）の熱伝導率は、理論的には λ_{\min} と λ_{\max} の間に存在する。すなわち、マットが多数の直列モデルと並列モデルの混合体と考えれば、マットの熱伝導率 λ は2成分混合系の複合則により、(3)式で算出できる。ただし、Zは材料中の並列モデルの混合比（ $0 < Z < 1$ ）である。

2.2 対象材料および要素の物性値

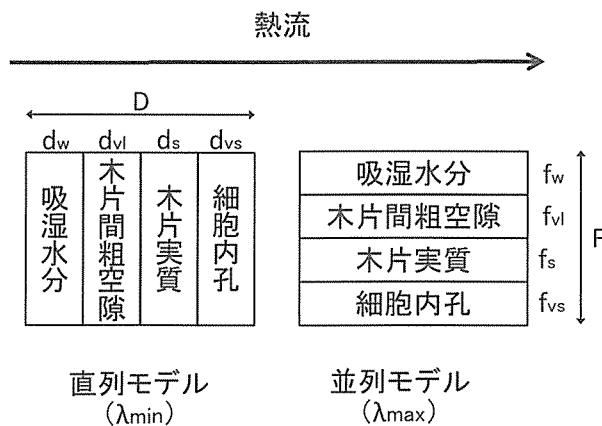


図4 熱伝導の4要素直列・並列モデル

$$\lambda_{\min} = \frac{D}{\sum\left(\frac{d}{\lambda}\right)} = \frac{V}{\frac{V_w}{\lambda_w} + \frac{V_{vl}}{\lambda_{vl}} + \frac{V_s}{\lambda_s} + \frac{V_{vs}}{\lambda_{vs}}} \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum(f \cdot \lambda)}{F} = \frac{V_w \cdot \lambda_w + V_s \cdot \lambda_s + V_{vl} \cdot \lambda_{vl} + V_{vs} \cdot \lambda_{vs}}{V} \quad (2)$$

$$\lambda = Z \times \lambda_{\max} + (1 - Z) \times \lambda_{\min} \quad (3)$$

木片間粗空隙の見かけの熱伝導率（ λ_{vl} ）の算出は、表1に示した12条件の木片炭化マット（初期密度3条件 × 炭化温度4条件）および密度80, 90, 100, 110, 120 kg/m³の5条件の木質小片断熱材を対象とした。ただし、後述するように λ_{vl} はある密度区間における材料定数として求められるため、炭化温度400, 500, 600, 700℃の木片炭化マット群および密度80 ~ 120 kg/m³の木質小片断熱材の計5種類に対して λ_{vl} が算出された。なお、計算に使用したマットの熱伝導率は、炭化マットでは表1に示した値であり、木質小片断熱材では既報¹⁰⁾より以下の値を用いた。0.063 W/mK (80 kg/m³), 0.064 W/mK (90 kg/m³), 0.066 W/mK (100 kg/m³), 0.069 W/mK (110 kg/m³), 0.071 W/mK (120 kg/m³)。

表2は、計算に用いた各要素の熱伝導率¹¹⁾および容積の算出に必要な密度などの一覧である。まず、熱伝導率に関して、吸着水分の熱伝導率は通常の水の熱伝導率と同等と仮定した。木片実質の熱伝導率は炭化の前後で値が異なるか否かの文献が見当たらず、本研究では炭化の前後で同等と仮定し、木材実質の値すなわち繊維方向（//）で0.65 W/mK、直交方向（⊥）で0.42 W/mKを用いた。なお、モデルとの対応を考

表2 計算に用いた要素の熱伝導率、密度など

物性値の種類	木片炭化 マット	木質小片 断熱材	備考
熱伝導 (W/mK)			25℃の値
吸着水分	0.60	0.60	水の熱伝導率
木片実質(//)	0.65	0.65	直列モデル用
木片実質(⊥)	0.42	0.42	並列モデル用
細胞内孔	0.025	0.025	静止空気
密度 (g/cm ³)			
吸着水分rw	1.22-1.23	1.21	注1
木片実質rs	1.4-1.6	1.5	注2
気乾木片ra	0.23-0.25	0.38	注3
含水率MC (%)	5.8~7.5	9.5	注4

注1: 炭化温度400-600℃で1.23、700℃で1.22

注2: 炭化温度400℃で1.4、500-600℃で1.5、700℃で1.6

注3: 炭化温度400-500℃で0.23、600℃で0.24、700℃で0.25

注4: 炭化温度400℃で5.8、500-600℃で6.7、700℃で7.5

慮して、前者の値は並列モデルで、後者の値は直列モデルで使用した。また、細胞内孔の熱伝導率は、炭化の有無に拘わらず対流が生じない程度に微細な空隙と仮定し、静止空気の熱伝導率を用いた。

さて、(1)、(2)式の計算には、各要素の容積および積算された全体の容積が必要となる。ここで、材料(マット)中の直列モデルと並列モデルにおいて、各要素の容積比率が両モデルで同じと仮定すると、以下のように各容積の算出が可能となる。

含水率 MC (%) におけるマットについて、密度 r 、重量 W 、容積 V とすると、マット全体および各要素の容積は、(4)～(8)式で表現できる。ただし、添え字 w , vl , s , vs は、前述と同様に、それぞれ、吸着水分、木片間粗空隙、炭化あるいは未炭化の木片実質、細胞内孔を示す。また、細胞内孔と木片間粗空隙の重量は無視し、全重量は実質重量と水分重量から成ると仮定した。

なお、表 2 に示す水分密度、実質密度、木片密度は、

$$V = \frac{W_s + W_w}{r} = \frac{W_s(1 + \frac{MC}{100})}{r} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{vl} &= \frac{W_s + W_w}{r} - \frac{W_s + W_w}{r_a} \\ &= \frac{W_s(1 + \frac{MC}{100})}{r} - \frac{W_s(1 + \frac{MC}{100})}{r_a} \end{aligned} \quad (5)$$

$$V_{vs} = \frac{W_s(1 + \frac{MC}{100})}{r_a} - W_s \left(\frac{1}{r_s} + \frac{MC}{100 \times r_w} \right) \quad (6)$$

$$V_s = \frac{W_s}{r_s} \quad (7)$$

$$V_w = \frac{W_w}{r_w} = W_s \times \frac{MC}{100} \times \frac{1}{r_w} \quad (8)$$

以下の方法で決定された。まず、吸着水分の密度は、含水率に応じた結合水の平均密度¹²⁾を用いた。炭化木片の実質密度は、炭化度が同等の市販木炭における既報値¹³⁾を用いた。炭化木片の気乾密度は、炭化温度に応じた木炭の密度残存率¹⁴⁾および原料の気乾密度から算出した。一方、マットの含水率(熱伝導率測定時の温湿度 25℃、65% RH における平衡値)は炭化および未炭化木片の吸着等温線⁵⁾を用いて算出した。

2.3 λ_{vl} の決定方法

Kollmann⁹⁾は、2要素系の直列・並列モデルを木材、パーティクルボード(PB)、ファイバーボードに適用

した場合、並列モデルの混合比 Z が材料の密度に依存しないことを指摘した。さらに信田ら¹⁵⁾は、密度範囲 0.4～0.9 g/cm³ の単層 PB に対して、木材実質、吸湿水分、接着剤、空隙部の 4 要素からなる熱伝導の直列・並列モデルを適用し、混合比 Z が材料固有の定数であると結論付けた。

そこで本研究では、炭化温度 400℃ で成形した密度範囲 92～138 kg/m³ のマット、同 500℃・77～121 kg/m³、600℃・72～116 kg/m³、700℃・68～115 kg/m³ のマットおよび密度範囲 80～120 kg/m³ の木質小片断熱材の計 5 種類について、それぞれが固有の Z を持つと仮定し、以下の方法により木片間粗空隙の見かけの熱伝導率 λ_{vl} を決定した。

まず、対象材料について、表 2 に示した密度、含水率を用いて、式(4)～(8)より各要素の容積および積算された全体の容積を求める。次に、式(1)、(2)から λ_{vl} をパラメータとして λ_{min} と λ_{max} を求め、これらを λ の実測値と共に式(3)に代入することで、対象とする密度範囲での Z の平均値 ($n=3$ または 5) と変動係数を求める。パラメータ λ_{vl} を刻み幅 0.001 W/mK で変化させ、 Z の変動係数の極小値が得られるまで計算を繰り返す。 Z が固有値であるという仮定から、 Z の変動係数を極小にする λ_{vl} が求める λ_{vl} となる。

3. 結果および考察

3.1 λ_{vl} の算出結果

図 5 に、パラメータ λ_{vl} の変化に対する Z の変動係数の変化を示す。 Z の変動係数を極小とする λ_{vl} が求める値となるから、図 5 の上から順に、木質小片断熱材で 0.045 W/mK、炭化温度 400℃ のマットで 0.031 W/mK、500℃ で 0.039 W/mK、600℃ で 0.033 W/mK (回帰式では 0.032 W/mK)、700℃ で 0.042 W/mK (回帰式では 0.041 W/mK) が最適な λ_{vl} として決定された。

炭化温度 400℃ での値 0.031 W/mK は木質小片断熱材の値 0.045 W/mK の約 7 割であり、静止空気の熱伝導率 0.025 W/mK (20℃)¹¹⁾ に対して 2 割増し程度という低い値となった。一方、炭化温度 500～600℃ での値は 0.033-0.039 W/mK で 400℃ に比べて大きく、さらに 700℃ では木質小片断熱材のそれと近接するほど大きな値であった。この要因として、炭

化の進行で比較的小さな粗空隙が連続してしまい、大きな粗空隙が形成された可能性あるいは微細表面の物理的变化による輻射伝熱の増加が推察される。

さて、マット内部の粗空隙の様子¹⁶⁾を図6に示す。これらの写真は図3のマット粗空隙データに対応するものである。両図を見比べると、木質小片断熱材の粗空隙と比較して炭化温度400℃のマットは粗空隙が小さいこと、炭化温度500℃のマットは400℃に比べて粗空隙が幾分大きいこと伺える(図3でマットBはAより5mm²以上の空隙割合が高い)。このような粗空隙構造の相違はマットの熱伝導率の差異に関する定性的な解釈に役立つが、本研究による λ_{vl} 算出値の評価によって断熱性向上の要因に関する定量的な解釈が深まったと言える。

3.2 混合比 Z

決定された最適 λ_{vl} を用いて計算した λ_{max} と λ_{min} 、および λ 実測値、混合比 Z について、5種類の対象材料ごとに示したのが図7である。混合比 Z は木質小片断熱材で0.61、炭化温度400℃で0.34、500℃で0.46、600℃で0.52、700℃で0.57となった。Zは熱流が最大となる並列モデルの存在の程度を示すから、要素の設定が同じで物性値が同等であれば、Zの値が小さいほど、材料の熱伝導率は小さいことになる。対象材料の熱伝導率は、木質小片断熱材で0.063 - 0.071 W/mK、炭化温度400℃で0.044 - 0.050 W/mK、500℃で0.051 - 0.055 W/mK、600℃で0.048 - 0.056 W/mK、700℃で0.054 - 0.060 W/mKであった。物性値 λ_{vl} は材料ごとに若干異なるため厳密には直接比較できないが、上記の熱伝導率の序列はZの序列と一致していた。ちなみに、信田ら¹⁵⁾が密度範囲0.4 ~ 0.9 g/cm³の単層PBを対象に木材実質、吸湿水分、接着剤、空隙部の4要素モデルを適用して得たZは0.35であった。要素の設定が異なるため直接比較は難しいが、材料内部の粗空隙において静止空気相当の断熱性が期待できないマット系断熱材(木質小片断熱材や木片炭化マット)では、Zが比較的大きな値となる可能性が示唆される。

4. 結言

木片炭化マットの断熱性が木質小片断熱材よりも優れる主な理由は、マット構造に起因すると指摘されていた^{5,6)}。すなわち、マット粗空隙の細分化による対

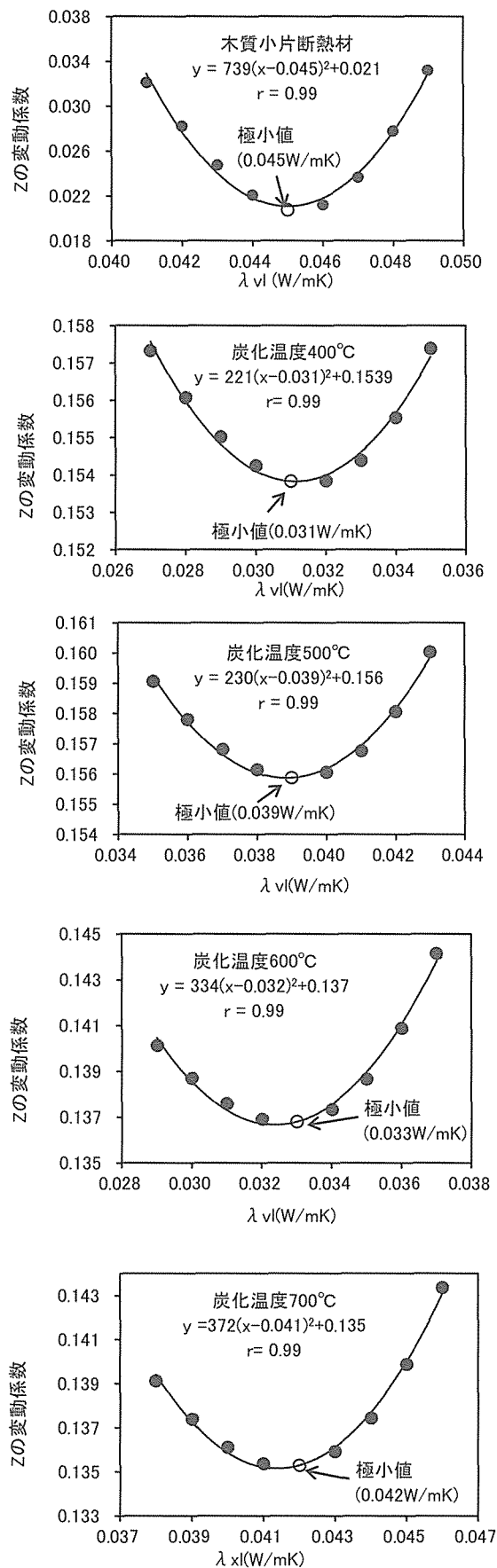
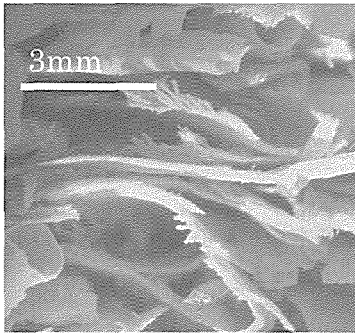
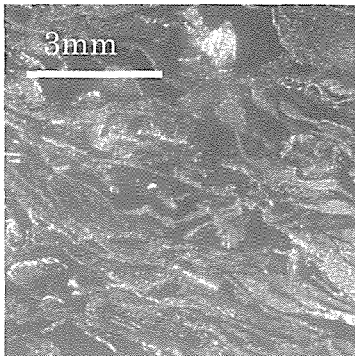


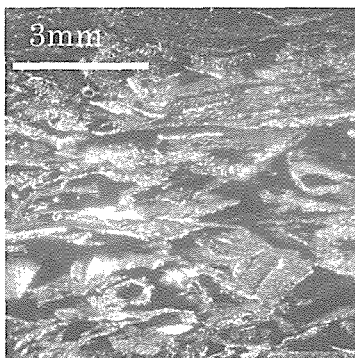
図5 パラメータ λ_{vl} とZの変動係数の関係



(上)
【木質小片断熱材】
 マット密度：90 kg/π
 熱伝導率：0.064 W/π



(中)
【木片炭化マット A】
 初期密度：200 kg/m³
 炭化温度：400°C
 マット密度：92 kg/π
 熱伝導率：0.046 W/π



(下)
【木片炭化マット B】
 初期密度：250 kg/m³
 炭化温度：500°C
 マット密度：91 kg/π
 熱伝導率：0.051 W/π

図6 マット内部（深さ5 mm）の粗空隙の様子¹⁶⁾

流伝熱の抑制，粗空隙表面の輻射の低下が主要因に挙げられた。そこで本研究では，マット粗空隙の空気の伝導伝熱，対流伝熱および粗空隙表面における輻射伝熱の三形態が反映された伝熱の指標を“見かけの熱伝導率”とし，細胞内孔，木炭実質，吸着水分，小片間空隙の4要素からなる直列・並列モデルと熱伝導の複合則を適用し，マット内の粗空隙の見かけの熱伝導率 λ_{vi} を試算した。

得られた λ_{vi} の値は，炭化温度 400°C のマットで 0.031 W/mK であり，静止空気の熱伝導率 0.025 W/mK の 2 割増し程度であった。この値は木質小片断熱材の値 0.045 W/mK の約 2/3 であり，小片間粗空隙の細分化による対流抑制や輻射低減の現れと言える。また，炭化温度の上昇とともに λ_{vi} の値は増加する傾向があり，炭化温度 700°C で 0.042 W/mK となった。

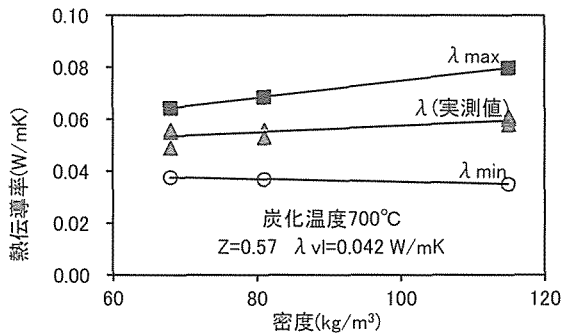
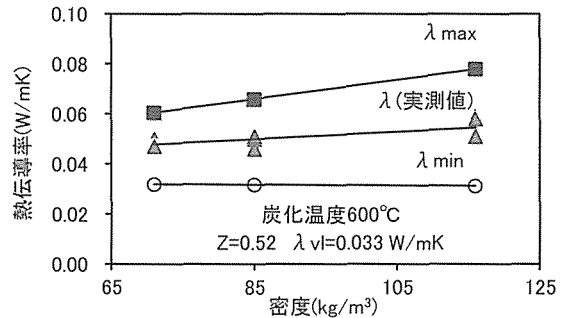
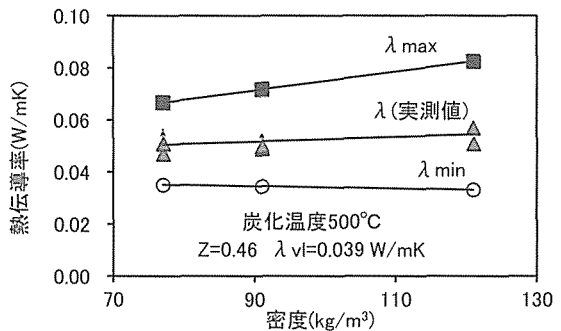
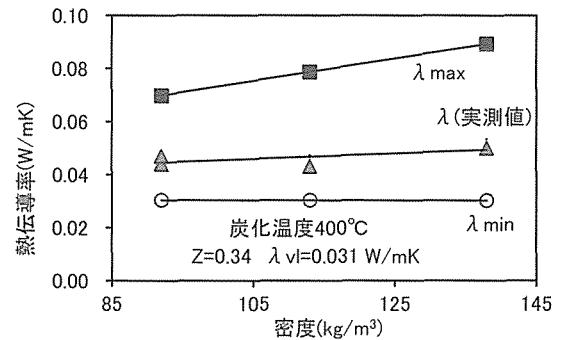
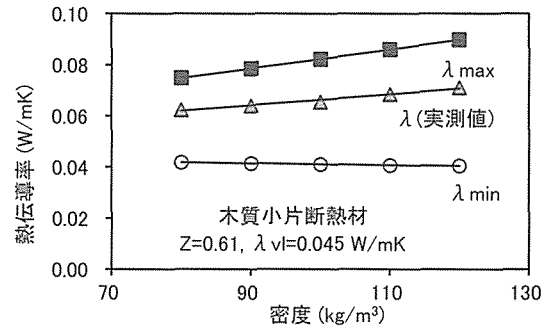


図7 最適 λ_{vi} における λ_{max} , λ_{min} と実測値との比較

この要因として、過度に炭化が進むと粗空隙が連続して対流抑制効果が低下すること、表面の輻射伝熱が増大することが推察された。

さて、本研究の計算では、炭化後の実質の熱伝導率を未炭化と同等の値とした。しかし、一般に木炭は炭化の進行に伴い導電性が高くなり¹⁷⁾、熱エネルギーは原子の振動エネルギーの弾性波としての固体中の輸送とともに、自由電子が固体中を巡ることでエネルギーが輸送される¹⁰⁾。したがって、炭化温度が高いほど実質部の熱伝導率は高くなると推察されるが、報告例は見当たらない。また、その異方性に関しても未知な点が多く、今後の検討課題と言える。ただし、マット全体容積に対する実質容積の割合は5%程度であるため、熱橋となる実質の熱伝導率の変化がマットの熱伝導率に及ぼす影響は小さく、粗空隙の熱物性が支配的と考えられる。

謝辞

本研究は平成23年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）課題番号21580199、研究代表者：関野登）の一部として行った。本研究の一部は、第9回木質炭化学会研究発表会（2011年6月、秋田）で発表した。

文献

- 1) 関野登 (2004) 特許第3607254号
- 2) 株式会社ヤマウチ：“サーモカール”カタログ (2006)
- 3) 関野登 (2009) 木材工業, 64(2), 52-57
- 4) 谷内博規, 関野登, 山内剛 (2008) 木材保存, 34(2), 60-68
- 5) 山口晃輔, 関野登 (2010) 岩手大学演習林報告, 41, pp.1-15
- 6) Sekino N. Yamaguchi K. (2010) Proceedings of 2010 SWST/UNECE-TC Convention, IW-3, Geneva, Switzerland, pp.11-14
- 7) 山口晃輔, 関野登, 栗本康司, 小藤田久義 (2011) 木質炭化学会誌, 7(2), 76-82
- 8) 河村義大, 関野登, 山内英彦 (2004) 木材学会誌, 50(6), 397-403
- 9) Kollmann F.P. (1968) Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood, Springer-Verlag (Berlin), pp.247-249
- 10) 河村義大, 関野登, 山内英彦 (2004) 木材学会誌, 50(4), 228-235
- 11) 日本熱物性学会編 (2000) 熱物性ハンドブック 改訂第2版, 養賢堂 (東京), pp.57-59, 64-67, 210, 595
- 12) 越島哲夫, 杉原彦一, 浜田良三, 福山万次郎, 布施五郎 (1979) 新訂基礎木材工学, フタバ書店 (大阪), pp.59
- 13) 岸本定吉, 阿部房子 (1964) 木材学会誌, 10 (3), 120-122
- 14) 里中聖一 (1963) 北海道大学農学部演習林研究報告, 22(2), pp.614-619
- 15) 信田聡, 大熊幹章 (1981) 木材学会誌, 27(11) 775-781
- 16) 山口晃輔 (2011) 修士学位論文, 岩手大学
- 17) 岩崎訓 (2009) 炭の製造と利用技術, 株式会社エヌ・ティー・エス (東京), pp.113-121

(原稿受付2012年4月27日, 原稿受理2012年6月27日)