

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450223

研究課題名(和文) カーボンブラック添加による木片断熱材の性能改善

研究課題名(英文) Improvement of thermal insulation capacity on wood shaving insulation mats by the addition of carbon black

研究代表者

関野 登 (Sekino, Noboru)

岩手大学・農学部・教授

研究者番号：30171341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：簡易な手法による木質系マット断熱材の断熱性改善を目的として、原料小片へのカーボンブラック(CB)の添加(物理的な付着)による断熱性改善の有無とその程度を調べた。4種類のCBを用い、添加量をパラメータとしてマットの熱伝導率を比較した結果、添加率0.25%という微量添加でも熱伝導率は最大で14%低下することが明らかとなった。CB添加による熱伝導率低下メカニズムをマットの伝熱メカニズムから考察した結果、主たる要因として小片間粗大空隙の伝熱特性の変化が示唆され、CB添加前後での表面性状の変化による対流伝熱や放射率の変化など、今後、検討すべき課題が整理された。

研究成果の概要(英文)：In order to decrease the thermal conductivity of wood shavings mats, a simple way of adding carbon black (CB) to wood shavings was investigated by the use of four kinds of CBs as a function of additive rate from 0 to 12%. The results showed that CB addition with a rate of only 0.25% reduced the mat thermal conductivity by 14%. Also, the mechanisms behind the reduction of thermal conductivity were discussed from aspects of the mode of heat transfer in the mat. Three types of mode, namely, conduction through an individual wood shaving, conduction at connecting points between wood shavings, and convective and radiant heat transfer in the space surrounded by wood shavings (coarse pores). Calculation of apparent thermal conductivity of coarse pores revealed that the addition of CB significantly reduced the heat transfer in coarse pores, which suggests that a new wood shaving's surface developed by CB addition reduces both a degree of convection and a radiation factor.

研究分野：木質材料学

キーワード：木質系断熱材 熱伝導率 カーボンブラック 粗空隙 対流伝熱 放射伝熱 平衡含水率

1. 研究開始当初の背景

(1) 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ったが、1990年代後半より欧州で低密度の乾式繊維板が断熱材として開発され、日本国内でもライセンス生産されている。この乾式繊維板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固化させるが、本研究課題申請者はこれとは全く異なる製法で乾式製造の木質系断熱材の研究開発を行った (H18-19 科研 C)。

(2) その木質系断熱材とは、住宅部材のプレカットで発生する鉋屑・モルダ屑を型枠中で3次元的に絡み合わせた圧縮マットであり、周囲被覆による成形で、バインダーを使用しない製造が可能となった (特許第 3607254 号)。ただし、断熱性の指標である熱伝導率は 0.055W/mK 程度で、建築用断熱材の中では最下位クラスに留まった。その主たる要因は、マットの熱伝導解析により原料間粗空隙の対流熱伝達の影響であることが判明した。

(3) そこで、断熱性改善策の一つとして、予め2倍程度の密度で木片断熱材を製造し、これを炭化することで密度を元の状態に戻すとともに、原料間粗空隙の細分化を試みた (H21-23 科研 C)。その結果、熱伝導率は 0.044W/mK に低下し、また、熱伝導モデルを用いた理論計算により、この改善は粗空隙の見かけの熱伝導率 0.045 から 0.031W/mK への減少に起因することが明らかとなった。

2. 研究の目的

(1) 上述の炭化による断熱性改善において、粗空隙の見かけの熱伝導率の低下は、対流熱と輻射熱の両方の影響を受けると考えられる。これらはいずれも原料の表面性状に由来するものであるから、断熱材自体の炭化を行わなくても、原料表面に炭化物を付着させるだけでも、ある程度の対流抑制や輻射抑制につながる可能性がある。

(2) そこで本研究では、木質系断熱材 (小片マット) の簡易な手法による断熱性改善方法として、炭化物の微粒子であるカーボンブラック (CB) を断熱材の原料に添加し、断熱材の熱伝導率に及ぼす影響を調べた。CB の種類や添加量を変化させ、実効性のある添加条件を見出すことを研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) はじめに、実験室で作製した寸法が均一な3種の小片に市販の膠系練墨液を全乾重量比で最大12%添加し、CB添加による断熱性改善効果の有無、原木密度の違いによる改善効果への影響、最適添加量を検討した。続いて、その結果を踏まえ、練墨よりも吸湿性が

低く、特性の異なる3種の工業用CBを添加率2%以下で添加し、CBの特性と添加量が断熱性の改善効果に与える影響を検討した。

(2) CB添加による断熱性改善効果を小片間の粗空隙の伝熱特性から考察した。具体的には、小片間空隙の伝熱を等価熱伝導率 (cp) と扱い、5成分系直列・並列モデルを用いてCB添加前後での cp の変化を推算した。

(3) 実験室製小片による断熱材で認められたCB添加効果が、現実の工場排出小片 (プレカットのカンナ屑) を用いた断熱材でも認められるかを検証するため、実大サイズのカンナ屑マットを作製して熱伝導率を測定した。さらに、断熱性改善のメカニズムをマット内で生じうる様々な伝熱形態の観点から考察した。

4. 研究成果

(1) 原木密度の異なる3種類の実験室製カンナ屑 (原木密度: 350、440、540kg/m³) を対象に、CBとして市販の膠系練墨液を全乾重量比2~12%の範囲で添加したカンナ屑マットを3水準のマット密度 (カンナ屑高密度の1.20倍、1.35倍、1.50倍) で作製し、熱伝導率を平板比較法により測定した。その結果、周囲相対湿度40%の使用環境下では、添加率2%の微量添加CB添加においても、原木密度やマット密度に関わらずマットの断熱性は改善された。その改善率は7~9%であり、熱伝導率は0.040~0.041 W/mKとなった。しかしながら、周囲相対湿度80%の使用環境下では断熱性改善が認められない場合もあった。この要因として、練墨液に含まれる膠成分の吸湿性が木材よりも高いこと推察され、吸着等温線の測定によりそれが明らかとなった。したがって、添加するCBには吸湿能の小さいものを選択することが重要となる。

(2) 前項の研究結果すなわちCB添加量は2%程度の微量添加でもマットの熱伝導率の低減に効果があること、そして吸湿性の小さなCBが有利であることを受けて、印刷用原料として工業的に流通しているCBの中から特性の異なる3種類 (A、B、C) を選択し、マットの熱伝導率に及ぼすCBの種類と添加率の影響を調べた。供試した原料木片は前項3種のうちの1つ (原木密度: 440kg/m³) であり、CB添加率は0.25、0.5、2%の3水準、マット密度は50、57、65 kg/m³ (マット高密度の約1.2、1.35、1.5倍) の3水準とした。熱伝導率はマット含水率をパラメータとして測定し、含水率3~15%程度の範囲における含水率と熱伝導率の関係を得た。その関係をCBの種類ごとに図1に示す。供試CBの特性として、Aは水分散性良好で平均粒子径

は 25nm、窒素吸着比表面積は 80m²/g、B は A と同等の粒子径と比表面積であるが水分散性が A よりも劣り、C は粒子径が A の半分で、比表面積が A の 4 倍という特性をもつ。供試した 3 種類のいずれの CB においても CB 添加による熱伝導率の有意な低下が認められ、添加率 0.25% という微量添加でも 2% 添加と同様な効果が認められた。また、CB-C を 2% 添加した場合は、含水率の上昇につれて断熱性の改善効果小さくなり、これは CB-C の吸着比表面積が大きいことによる CB 界面近傍での毛管凝縮水が要因と推測された。

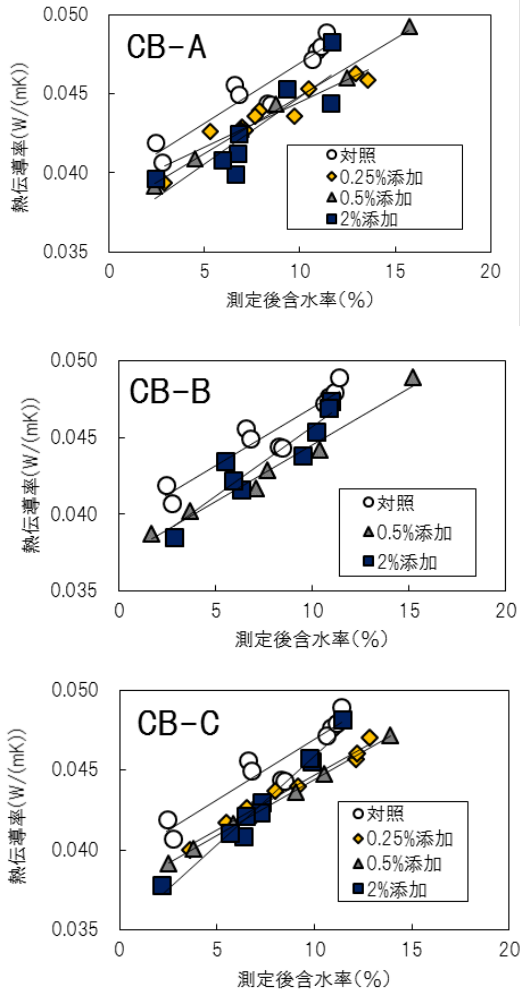


図 1 熱伝導率とマット含水率の関係 (CB の種類と添加率の影響)

(3) CB 添加による熱伝導率の低下を小片間の粗大空隙の伝熱特性から考察した。具体的には粗大空隙における対流と放射の複合熱伝達を熱伝導と見なし、その複合熱伝達の指標を“等価熱伝導率”で扱い、モデル計算により CB 添加前後で等価熱伝導率の差異を調べた。用いた伝熱モデルは木材を細胞壁(木材実質)と細胞内孔(空隙)の 2 成分に分けて考える Kollmann の直列・並列モデルを基本としており、木質マットの熱伝導率解析のための 4 成分(木材実質、細胞内孔、吸着水分、粗大空隙)に発展させたモデルをベースとしている。この 4 成分モデルは CB 添加前

のカンナ屑マットに適用され、そして CB 添加マットには図 2 に示す 5 成分モデルに拡張して行った。熱伝導率が最小となる直列要素と最大となる並列要素の配合割合が一定値を取ると仮定し、マットの熱伝導率の実測値と個々の成分の特性値(熱伝導率および占有容積)から小片間の粗大空隙の等価熱伝導率(λ_{cp})を算出した。その結果、CB 添加の前後で λ_{cp} は 0.045 W/mK から 0.042 W/mK へと約 7% 低下したが明らかとなった。

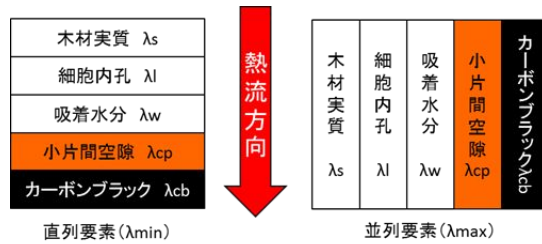


図 2 CB 添加小片マットに適用したモデル

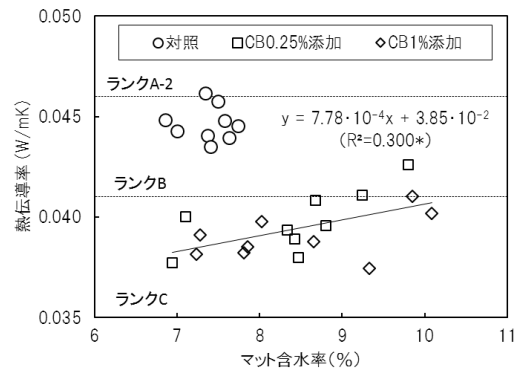


図 3 実大マットの熱伝導率

(4) プレカット工場から排出された実際のカンナ屑(ベイマットとベイヒの混合)を原料として、CB 添加による断熱性改善の検証を行った。供試カンナ屑の嵩密度は 43 kg/m³ であり、その 1.5 倍の密度 65 kg/m³ のマットを 1000mm x 1000mm x 厚さ 50mm の実大サイズで作製し、熱流計法により熱伝導率を測定した。用いた CB は前述の CB-A であり、添加率は 0.25% および 1% の 2 水準とした。測定結果を図 3 に示すが、CB 添加前(対照)の熱伝導率は 0.045 ± 0.001 W/mK (平均値 ± 標準偏差、以下、同様)であり、含水率は 6.9 ~ 7.7% の範囲にあった。一方、CB 添加マットは含水率が 7 ~ 10% に分布したが、熱伝導率は対照よりも明らかに低くなった。CB0.25% 添加マットのは 0.040 ± 0.002 W/mK、CB1% 添加マットは 0.039 ± 0.001 W/mK であったが、これらの平均値の間に有意差は認められなかった。これより、CB 添加による断熱性改善は全乾重量比 0.25% という微量な量で十分と言える。図中の回帰式を用いて対照マットの含水率平均

値（7.4%）における熱伝導率を算出すると0.039W/mKとなり、これは対照の平均値0.045W/mKよりも約14%低い値となった。通常、断熱材は熱伝導率に応じて性能ランクが設けられており、0.041以上0.046W/mK未満はランクB、0.035以上0.041W/mK未満はランクCに属するが（図3の補助線を参照）この結果よりCB添加によって断熱材の性能ランクが一段階向上することが明らかとなった。ただし、前述のように実験室製の小片を用いた実験ではCB添加による断熱性の改善効果が1割未満であったのに対し、実大サイズの実験では約14%の改善となった。その理由は不明であるが、現実に工場から排出される小片を用いた実大カナ屑マットにおいて一層の改善効果が認められたことは、好ましくもあり興味深い。

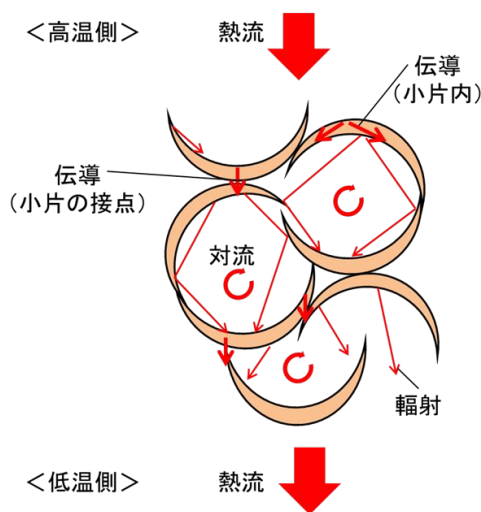


図4 カナ屑マットの内部構造と伝熱形態

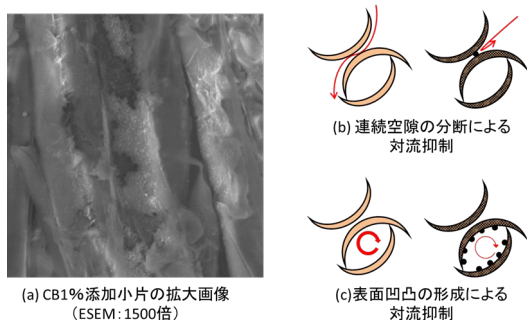


図5 小片表面の拡大画像および伝熱メカニズムの模式図

(5) CB添加によるマットの熱伝導率の低下の要因については小片間粗空隙の等価熱伝導率のモデル計算から検討したが、それ以外の要因として、図4に示す小片接点の熱伝導、小片内の熱伝導など、カナ屑マットの内部構造と伝熱形態から見て、CB添加がどのように影響するかを考察した。

まず、小片における熱伝導について考える。図5(a)に示した写真は、CB1%添加小片の

拡大画像（1500倍）で、細胞内孔の凹面と細胞壁の切断面が拡大されて見えるが、CB粒子の凝集体がその凹面に散在する様子が見て取れる。CB粒子はグラファイト構造（炭素原子六角網平面の規則的積層構造）を採るのは粒子の最外層付近のみであり、グラファイトのような高い熱伝導率（約16W/mK）は持たない。いま、CB粒子の凝集体の熱伝導率を炭素繊維材料の熱伝導率（繊維方向で5.9W/mK、繊維直交方向で0.49W/mK）に近いと仮定した場合、これらの値は木材の細胞壁自体の熱伝導率（繊維方向で0.65W/mK、繊維直交方向で0.42W/mK）と比べて最大で約9倍の大きさとなる。相対的に熱伝導率の大きな粒子が小片表面に付着しているため、CB添加された小片は未添加に比べて熱伝導率が大きくなるが、CB添加量は最大でも小片に対する重量比1%と少なく、かつ、小片表面のみに散在するため、熱伝導を促す効果は小さい。したがって、小片の熱伝導から見たCB添加とは、少なくともマットの熱伝導率を増加させる方向に働き、CB添加によりマットの熱伝導率が低下したという結果とは相反する。

次に、小片の接点（接触面）を介しての熱伝導を考える。マット内には様々な接触状態の小片の接点あるいは接触面が存在するが、その場所にCB粒子の凝集体が存在する場合の影響を考察してみる。図5(b)に示すように、小片の接点が少なく面的に接触しない場合、隣同士の小片間粗大空隙が部分的につながって連続空隙を構成し、対流伝熱を助長させる可能性がある。CB粒子の凝集体が接点付近に存在すれば連続空隙を分断する作用が働き、対流伝熱が抑制されてマット全体の熱伝導率の低下に寄与する可能性がある。しかし、この作用は小片間に新たな熱橋を形成させるマイナス要因でもあり、対流伝熱の抑制と熱橋による熱伝導の促進により効果は相殺させる可能性もある。

続いて、小片に取り囲まれた粗大空隙における伝熱について考える。図5(a)および(c)に示すように、CB粒子が小片表面に付着すれば表面の凹凸は一層増えて表面粗さが増し、それが粗大空隙における対流伝熱を抑制する可能性がある。また、CB粒子の付着によって粗大空隙の表面性状が変化すると、放射伝熱の程度が変わる可能性もある。粗大空隙における伝熱は、対流伝熱と放射伝熱が複合されたものであり、前述と同様のモデル計算を行って実大マットの粗大空隙の等価熱伝導率を求めると、CB0.25%添加で0.039W/mKとなり、対照の0.045W/mKと比べて約13%小さかった。

以上の考察より、断熱性改善の主たる要因として粗大空隙の伝熱特性の変化が示唆され、CB添加前後での表面性状の変化による対流伝熱や放射率の変化など、今後、検討すべき課題が整理された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

関野 登、佐々木紫乃、カーボンブラック添加によるカンナ屑マットの断熱性改善(第2報) 実大マットの熱伝導率および断熱性改善メカニズム、岩手大演報、査読有 48、1-15、2017

佐々木紫乃、関野 登、カーボンブラック添加によるカンナ屑マットの断熱性改善(第1報) カーボンブラックの添加量と特性の影響、岩手大演報、査読有、47、21-47、2016

〔学会発表〕(計4件)

Noboru Sekino, Thermal insulator for building use made of wood shavings: improvement of its insulation capacity by adding carbon black, Abstracts of the 3rd Myanmar-Japan symposium, 3-4th December, Patheingyi University, Myanmar, p.158, 2016

佐々木紫乃、関野 登、カーボンブラックの微量添加によるカンナ屑マットの断熱性改善(第2報) - プレカット由来の原料を用いた大型マットの熱伝導率 -、第66回日本木材学会大会(名古屋) 3月、研究発表要旨集: 205、2016

佐々木紫乃、関野 登、カーボンブラックの微量添加によるカンナ屑マットの断熱性改善、日本木材加工技術協会第33回年次大会(札幌) 9月、講演・研究発表要旨集: 33-34、2015

佐々木紫乃、関野 登、カンナ屑マットの熱伝導率 - 原料サイズとマット密度の影響 -、日本木材加工技術協会第32回年次大会(秋田) 10月、講演・研究発表要旨集: 48-49、2014

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

〔その他〕 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

関野 登 (SEKINO, Noboru)
岩手大学・農学部・教授
研究者番号: 30171341

(2)研究分担者: なし

(3)連携研究者: なし

(4)研究協力者: なし