

カーボンブラック添加による木片断熱材の性能改善

(岩手大農) ○佐々木紫乃、関野 登

I. はじめに

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¹⁾。しかし残り1%の天然系のうち特に木質系断熱材について、木質資源のカスード利用や、国際ルールの中で伐採木材製品による炭素蓄積量に貢献できるなどの利点がある。木質系断熱材には繊維系として新聞古紙を粉砕したセルローズファイバー、木質チップを繊維化した湿式ボードや乾式マット(Homatherm社等)、原料を加工しない小片系としてカンナ屑を分級し活用したサーモール²⁾などがある。

木質小片系断熱材内において熱の移動形態は①小片細胞壁(熱橋)による熱伝導、②小片間空隙における対流、③小片界面における放射の3つがある(図1)。①熱橋、②対流は原木密度や断熱材密度を変化させることで抑制が可能であるが、③界面放射については小片表面を改善することのみ対応できる。炭素などの黒体には放射抑制効果があり、発泡系断熱材ビーズ法ポリスチレンフォーム(EPS)にカーボンブラック(CB)を添加することで従来のEPSより20%の性能向上することが分かっている²⁾。しかし、木質系断熱材にCBを添加した研究結果は報告されていない。本研究ではプレカット加工等で生じるカンナ屑(以下、小片)を敷き込んだカンナ屑マットに着目し、小片にCBを添加し放射抑制による断熱性能改善の有無を検討した。

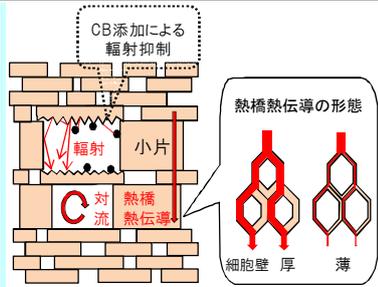


図1 木質小片系断熱材内における熱の移動形態

II. 実験

1. CB添加方法

3種の原木密度の木材を用いて、小片サイズがほぼ同一の小片を作製した(表1)。市販のトリガー式霧吹きを用いて小片にCB(市販懸濁液:固形分54%)を表1の添加条件で付着させた。添加率は小片全乾重量に対するCB固形分の割合を示す。また小片へのCBの均一付着を促すため、P540については原液10倍希釈の条件も追加した。添加後の小片は実験室で3日以上乾燥して気乾状態にした後、供試した。なお、小片表面積あたりのCB固形分は1.1~5.8g/m²の範囲にある(表2)。

表1 供試原料の仕様

実験室製小片(手押しカンナ盤)			
原料の略号	P350	P440	P540
樹種(密度kg/m ³)	スギ(350)	スギ(440)	カラマツ(540)
小片サイズ(mm) Ave.±Std	5.5±0.8 × 6.8±2.1	5.3±1.0 × 7.7±2.8	5.1±2.0 × 9.9±4.9
小片厚さ(mm) Ave.±Std	0.14±0.04	0.12±0.05	0.11±0.06
小片高密度ρ ₀ (kg/m ³)	34	42	50
試験体密度(kg/m ³) ^a	40, 45.9, 50	50, 56.7, 65	60, 67.5, 75
CB添加率(%)	4, 8, 12	4, 8, 12 ^b	2, 4, 8 ^{b,c}
練墨液希釈倍率	2	2 ^b	2 ^{b,c} , 10

a:小片高密度ρ₀の1.2倍、1.35倍、1.5倍の3条件、b:EMC測定、c:含水率依存性測定

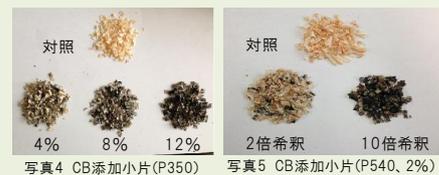
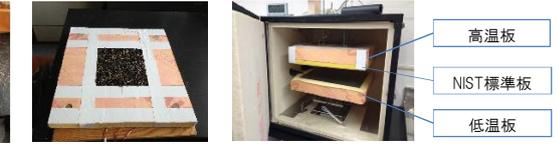


表2 小片表面積あたりのCB固形分

	小片表面積あたりのCB固形分(g/m ²)			
	2%	4%	8%	12%
P350	-	1.8	3.6	5.4
P440	-	1.9	3.5	5.8
P540	1.1	2.2	4.3	-

2. 熱伝導率測定方法

気乾状態の小片(含水率9~11%)を内寸200×200×30mmの型枠内に敷込み、所定の密度の試験体とした(写真7)。試験体密度は小片高密度ρ₀の1.2倍、1.35倍、1.5倍の3条件である。熱伝導率(λ)の測定は平板比較法(JIS A 1412に準拠)を採用し、標準板にアメリカ国立標準技術研究所(NIST)認定のグラスウール(ρ=118kg/m³, SRM1450d)を用いた。高温板40°C、低温板25°Cとしてマット試験体の平均材温27~29°Cでのλを求めた(N=3)。測定後の試験体より8g程度の小片を採取し、全乾法により含水率を求めた(N=3)。



3. 熱伝導率の含水率補正データの取得

断熱性を評価する際は、同一使用環境(温湿度環境)でのλ比較が適切と言える。即ち、断熱材のλは含水率に依存するため、断熱材の平衡含水率とλの含水率依存性の2つがあれば、適切な断熱性比較が可能となる。そこで以下に示す2つの測定を行った。

3.1 CB添加小片の含水率依存性の測定

P540-8%~2倍希釈の小片を恒温恒湿器を使用して含水率7~15%の範囲で調整し、75kg/m³の試験体を作製してλを測定した。またCB添加前の小片を3~13%の範囲で調整して同様に75kg/m³の試験体を作製してλを測定、含水率増加1%あたりのλの増加率(Δλ)を算出した。

3.2 CB添加による平衡含水率(EMC曲線)の変化

飽和塩で相対湿度(RH)33, 43, 54, 65, 75, 85, 93%に調湿されたデシケータ(20°C)にCB添加試料(P440-12%)及び未添加試料(対照)を全乾状態に入れ、恒量に達するまで調湿した。練墨液には吸湿性が高いと考えられる膠が含まれている。膠系練墨液の添加によるEMCへの影響を検討する為、膠の主成分であるゼラチン(食品用)を添加した小片(練墨液の割合を考慮した最大値:添加率4.5%)についても同様にEMCを求めた。

III. 結果

1. 熱伝導率の含水率補正データ

図2の回帰直線からΔλを求めると、対照で1.4%、CB添加で2.4%となり、CB添加小片の方がλの含水率依存性が高いことが示された。また図3に示すようにCB添加後のEMCは添加前よりも1割以上高かった。ゼラチン添加後のEMCも上昇したことから、練墨液の膠成分が一要因であると考えられる。

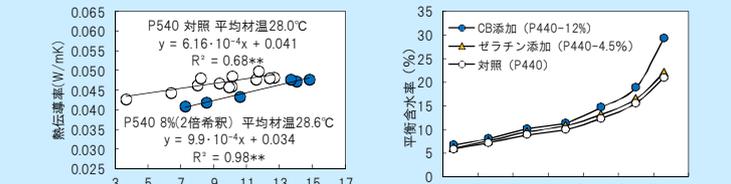


図2 熱伝導率の含水率依存性 (***有意水準5%で相関あり、****有意水準1%で相関あり) 図3 平衡含水率曲線(20°C)

2. 同一湿度環境下における熱伝導率

図3の平衡含水率曲線からRH40%時とRH80%時の平衡含水率を求め、λ測定時の含水率との差を算出し、図2の回帰式を用いて各RHにおけるλに換算した。RH40%(図4上段)ではCB添加後のλの平均値は0.042W/mK、最小値で0.037W/mKとなった。対照からの低下率は平均5.7%、最大14.2%(P350-8%)であり、これは黒体であるCB添加による放射抑制効果であると考えられる。ただし均一付着を目的とした10倍希釈と2倍希釈ではλ低下率に大差はなかった。断熱材はそのλによってA~Fの段階(Fが最良)にランク分けされるが、本研究のカンナ屑マットはRH40%ではグラスウール(密度16kg/m³)と同じBランクに該当した。一方、RH80%(図4下段)では最大5.8%(P350-8%)のλ低下率がみられたが、RH40%と比較しCB添加効果は小さく、悪化する場合は殆どであった(平均λ低下率は-2.7%)。これは高湿度では練墨液の吸湿性が作用し含水率が高まり、λの上昇を招いたためと解釈でき、従ってCBの添加には吸湿能の小さい材料を選ぶ必要がある。

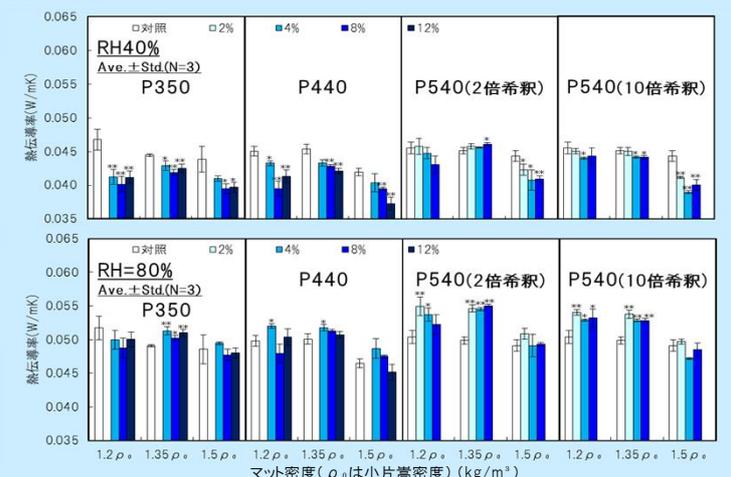


図4 CB添加による熱伝導率の変化(上:RH40%、下:RH80%) (***有意水準5%で対照との有意差あり、****有意水準1%で対照との有意差あり)

3. 小片間空隙の等価熱伝導率による放射抑制効果の定量化

RH40%環境下で認められた放射抑制効果の定量化を小片間空隙の等価熱伝導率の算出により試みた。小片間空隙における伝熱は、伝導、対流、放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³⁾は小片間空隙の三形態による伝熱の程度を等価熱伝導率λ_{vi}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_{vi}の最適値を決定する方法である。本研究では密度帯を小片高密度の1.2倍~1.5倍の範囲に設定し、上記の方法でCB添加前後のマットのλ_{vi}を算出した。ただし、CB粒子の熱橋としての作用の有無は考慮していない。

結果を図5に示す。RH40%環境下ではCB添加後のλ_{vi}は0.033~0.037W/mKで、対照の0.037~0.040W/mKより低かった。その低下率(図6)、平均7.7%、最大15.4%(P440-12%)で、CB添加により、小片界面の放射は割程度抑制されることが明らかとなった。

今、λ_{vi}の低下率とカンナ屑マットのλ低下率の関係を考察する。図7に示すように、両者に相関関係が認められ、回帰式の勾配は約0.7であった。これは、例えば小片間空隙の伝熱が10%抑制されても、マットの断熱性改善は約7%に留まるとを意味する。直列モデルのλは4要素のうち小片間空隙や細胞内孔のλが支配的であるが、並列モデルはλの大きな吸着水分や木材実質のλが支配的となる。つまりλ_{vi}の低下の影響が反映されるのは主に直列モデルである。上記の数値計算で得られた4要素の直列・並列モデルの混合比率は平均で67:33であり、直列モデルの存在率は図7の直線勾配とほぼ一致していることが確認された。

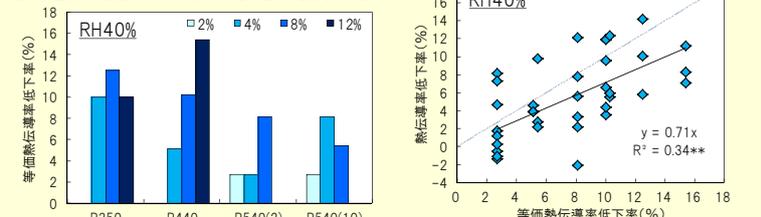


図5 RH40%における小片間の等価熱伝導率 図6 RH40%における小片間等価熱伝導率の低下率 (***有意水準5%で相関あり、****有意水準1%で相関あり) 図7 等価熱伝導率とマット熱伝導率の関係 (***有意水準5%で相関あり、****有意水準1%で相関あり)

IV. まとめ

小片にCB(市販懸濁液)を添加することで断熱性能の向上が認められた。RH40%環境下では熱伝導率λは最大14.2%低下し、木質小片を活用したカンナ屑マットがグラスウール(密度16kg/m³)と同格のBランクに該当する可能性が示された。これは黒体であるCB添加による放射抑制効果であると考えられる。そこで放射抑制効果の定量化を試みた結果、小片間の等価熱伝導率λ_{vi}は平均で7.7%低下したことが明らかとなった。更にλ_{vi}の低下率とカンナ屑マットのλ低下率には有意水準1%で相関があり、回帰式の勾配は約0.7であった。一方、マット内において主にλ_{vi}の低下の影響が反映される直列モデルの存在率は約70%であり、この値と回帰式の勾配はほぼ一致していた。このことから、放射抑制によるマットの断熱性改善は、直列モデルの存在率が大きく関与することが分かった。一方、今回用いた市販の膠系練墨液(書道用)では、高湿度では吸湿能が木材よりも高く、この吸着水分が断熱性改善を阻害することが分かった。これは分散剤及び乾固定剤として用いられている膠の影響であると言える。小片への添加において、CB粒子は霧吹き塗布時のみ分散してしまえばよく、また付着したCB粒子が容易に離脱しなければ十分である。そこで、分散・固着剤を用いずにCB分散液のみを塗布して広範囲の湿度環境における断熱性の改善を検討する必要がある。また、吸湿性の低いCBの選択も必要である。

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 登の一部として行った。
文献 1) (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
2) (株)北葦材工業 TSKラムボード http://www.tsk-kenzai.com/sr/sc1307/ramuda-board.pdf
3) 関野登, 山口晃輔(2013)木質炭化学会誌, 9(2), 68~74