

潜熱蓄熱材を含有した木材の熱物性に関する研究

佐々木 章・渡 部 宙*・佐藤 直人**

The Study of Thermo Physical Properties of Woods Contained Thermal Storage Material

Akira SASAKI, Hiroshi WATANABE* and Naoto SATO**

(2007年11月20日受理)

In this experiment, the thermo-physical properties of woods contained thermal storage material. To evaluate the thermo-physical properties the method of minimizing the sum of squares based on a forward-difference equation was used. As experimental sample, cedar, birch, horse chestnut and oak were used. The result shows that the apparent thermal capacity and thermal diffusivity change a lot in the vicinity of a phase change temperature.

1. 緒言

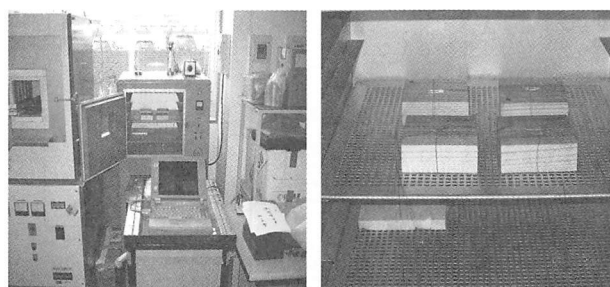
雪国に住む我々にとって暖房は必要不可欠であり、冬季私たちは石油ストーブ、ファンヒーター、エアコン、スチームヒーターなどの暖房装置を用いて暖かさを得ている。これらの装置から、対流（自然・強制）、輻射および伝導の形態で熱が移動し、室内を暖めることになる。しかし、これら装置から生じた暖房熱も住宅の窓や壁を介して外気へ逃げてしまい、室内の温度は低下し寒く感じることになる。それに伴ない、暖房の日安となる温度も高めに設定されてしまい、過剰暖房となってしまいがちである。そのため、省エネルギーを目的にした高断熱高気密住宅の施工が促進されている。また、地球温暖化による世界各地での異常気象、そして最近の原油価格の高騰を考えると、より一層の省エネルギー対策が要求されているといえる。一方、住宅の材料となる木材は一般に防腐処理がなされるが、それに用いるポリエチレングリコールは常温付近で固相から液相へと相変化し、潜熱を吸収・放出する潜熱蓄熱材である。この特性を利用すると、暖房装置から発生した熱で室温が上昇しすぎたとき、その熱を木材内の潜熱蓄熱材に蓄えて温度の上がり過ぎを防ぎ、室温が下がってくると蓄えた熱を放出し、再び暖房熱として利用することが可能と考えられる。

そこで、本研究では冬季の暖房費節約とエネルギーの有効活用を目的として、潜熱蓄熱材を含ませた木材を床材として利用した場合の保温効果を調べるとともに熱物性値の測定を行い、検討を加えた。

2. 実験装置と実験方法

2.1 蓄放熱実験の装置と方法

本研究では導入実験として、始めに木材の蓄熱量を把握するため蓄放熱実験を行った。この実験で使用した実験装置を図1(a)、(b)に示す。図1(a)の中央にある直方体の装置が乾燥炉である。乾燥炉内には、図1(b)のように含液率の異なる同種の木材が配置されている。したがって、数個の木材を同一加熱条件で設定温度まで加熱することができる。木材中心および表面には熱電対が取り付けられており、図1(a)手前にあるパソコンで木材が加熱お



(a) (b)

図1 蓄放熱実験装置

* 秋田高専卒業生

** 株式会社アルコン

よび自然冷却されたときの温度を記録し検討する。実験は以下の手順で行った。

- 1) 木材の両表面と中心に熱電対を取り付ける。
- 2) 木材を乾燥炉に入れ、約50℃まで加熱する。
- 3) 加熱を止め、乾燥炉の扉を全開にする。
- 4) 木材が室温に戻るまで木材の表面、中心部、および室温を5分間隔で計測する。

2.2 熱物性値の測定原理と実験装置

熱物性値の測定原理は、既報⁽¹⁾と同じである。以下に測定原理の概略を説明する。

温度伝導率は、熱伝導方程式の差分変換に基づく繰り返し計算法により求めた。具体的には、試料の両表面温度を境界条件として用い、温度伝導率を仮定してある時間（本研究では5分）後の試料中心部の温度を差分計算により推定する。推定値が測定値とよく一致するまで、温度伝導率を変化させて繰り返し計算を行う。また、熱容量は試料容器の上下の亚克力板(熱量計)を標準板として用い温度伝導率を求める時間内に試料に流入する熱量を求め、その間における試料平均温度の変化量より算出した。熱伝導率は、求められた温度伝導率および熱容量の比として求めた。

木材の熱物性値を測定するために使用した実験装置の概略を図2に示す。実験は厚さ5mmの亚克力製容器に木材を挟み込み、銅製伝熱面を有するジャケットを上下から押し当て温水により加熱する。上下のジャケットにはパイプ口が取り付けられており、ヒーターにより加熱された温水を、ポンプにより循環させることができる。また、試験部からの熱損失を軽減させるために周囲には厚さ50mmの断熱材(スタイロフォーム)を設けてある。

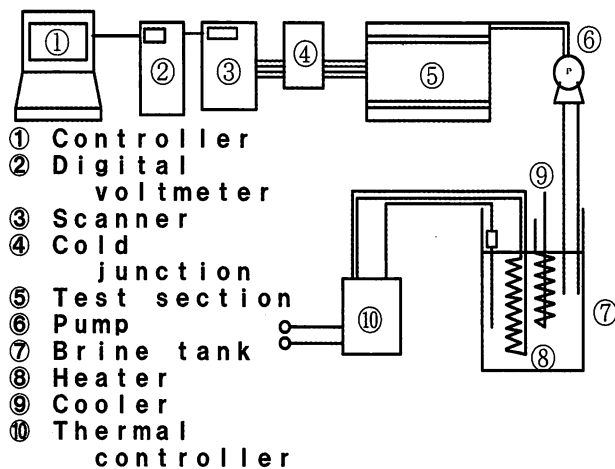


図2 熱物性値測定のための実験装置

亚克力板温度と試料温度を測定するために直径0.1mmの銅-コンスタンタン熱電対を使用した。亚克力板の上下両表面と試料の中心にそれぞれ設置した。特に亚克力板の温度測定にはアルミ箔を用いて表面に貼り付け、試料を広く覆うことにより局所的な不均一性の影響を少なくするよう考慮した。熱電対からの測定データは零接点を介してパソコンに表示され、データを収集、保存する。本研究で標準板として用いた亚克力板の熱伝導率 λ_a は蒸留水を基準物質として定常比較法で測定した結果、次式⁽¹⁾により表すことができた。

$$\lambda_a = 0.1592 (1 + 0.00062T) \text{ (kcal/mh}^\circ\text{C)}$$

同じく温度伝導率 a はラプラス変換法で測定した結果、次式⁽¹⁾で表すことができた。

$$a = 0.471 (1 - 0.0063T) \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{/h)}$$

実験を始める前に、タンク内の水を銅製ジャケットに循環させて亚克力板および試料の温度が一樣になっているか確認する。その後、木材の温度を約80℃まで上昇するように循環水をヒーターで加熱する。実験時間は約180分である。木材に取り付けられた熱電対の出力はパソコンにより記録され、測定終了後に計算処理が行われ、熱物性値(温度伝導率、熱容量、熱伝導率)が求められる。

2.3 実験に用いた試料

本研究で使用した木材はスギ(S)、ナラ(N)、カバ(K)、トチ(T)の4種類である。各木材の寸法は、おおよそ縦10cm、横10cm、厚さ3cmである。なお各木材の寸法は誤差の原因となることから、測定の都度各部の寸法をノギスで測定した。これらの木材の含液率等を表1に示す。蓄熱材にはポリエ

表1 実験試料の詳細

試料 No.	密度[g/cm ³]	体積含有率[%]	湿潤含有率[%]
スギ-0-1	31.89	0	0
スギ-3-1	50.04	23.1	103
スギ-5-1	65.68	38.8	185
スギ-7-1	80.96	53.3	262
カバ-0-1	64.41	0	0
カバ-3-1	72.53	11.1	20.2
カバ-5-1	79.63	18.8	35.2
トチ-0-1	62.97	0	0
トチ-3-1	69.52	10.2	19.2
トチ-5-1	74.20	16.7	33
ナラ-0-2	67.33	0	0
ナラ-3-2	72.07	11.9	22.2
ナラ-5-2	80.00	17.5	31.6

チレングリコールを用いた。蓄熱材の融点は30~32℃である。ここで湿潤（重量）含液率 u は以下の(1)式で定義される。

$$u = \frac{G_u - G_0}{G_0} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

G_u : 蓄熱材を含有した木材の質量 (kg)

G_0 : 全乾質量 (kg)

これは木材内の蓄熱材質量（液体量）を乾燥時の木材の質量で除し、百分率であらわしたものである。木材の空隙率 ε は(2)式⁽³⁾により求めることができる。求めた空隙率の結果を表2にまとめた。

$$\varepsilon = \left(1.00 - \frac{\gamma_0}{1.50}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

ここで、 γ_0 は比重である。

湿潤含液率を用いると、蓄熱材の割合が100%を超える場合があるため理解しにくい。そのため本研究では湿潤含液率に代わり、以下の(3)式で定義される体積含液率 ϕ を用いることにした。体積含液率は蓄熱材の体積を試料である木材の体積で除するため、含液率が100%を超えることがなく、理解しやすい。

$$\phi = \frac{V_p}{V} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

ここで、 V_p は蓄熱材の体積(m³)である。

表2 各試料の空隙率

試料	全乾質量 G_0 [kg]	全乾体積 V_0 [m ³]	比重 γ_0	空隙率 ε [%]
S-0-1	0.0887	2.781×10^{-4}	0.319	78.7
K-0-1	0.167	2.593×10^{-4}	0.644	57.1
T-0-1	0.172	2.732×10^{-4}	0.630	59.3
N-0-1	0.186	2.763×10^{-4}	0.673	55.1

3. 実験結果と考察

3.1 放熱特性について

各実験試料の温度の経時変化を図3~図5にまとめた。放熱時の変化である。図では各試料の表面温度の比較を行っている。図3は杉、図4はナラ、図5はカバの場合の結果を示している。図3より、杉は少量 ($\phi = 23.1\%$) の蓄熱材混入でも4時間程室温以上の温度を保ち、保温効果を有することがわかった。また、体積含有率が53.1%の場合、6時間

余りにわたって室温以上の温度を維持できることが確認できた。また、いずれの体積含液率においても、木材の温度は30℃付近までは急激に温度低下し、その後は温度勾配が緩やかになっている。これは木材に含まれる蓄熱材が30℃~32℃付近で相変化する特性を有するためである。

図4のナラと図5のカバにおいては、両者とも同様な温度変化を示している。放熱開始後、2時間までは含液率が大きい程、温度低下速度は小さいこと

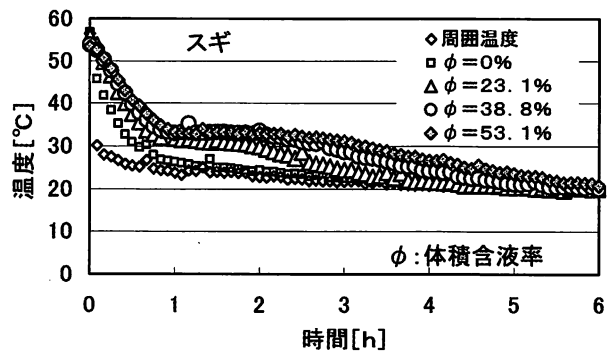


図3 スギの放熱特性

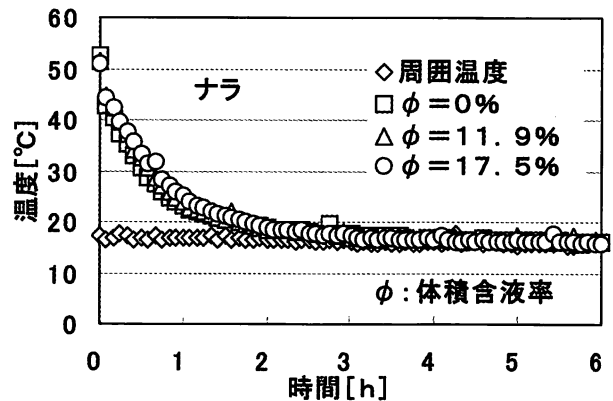


図4 ナラの放熱特性

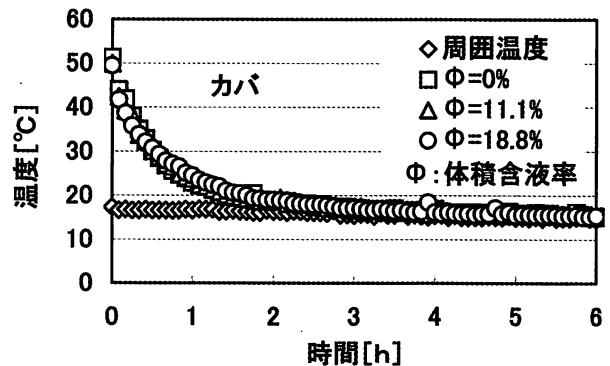


図5 カバの放熱特性

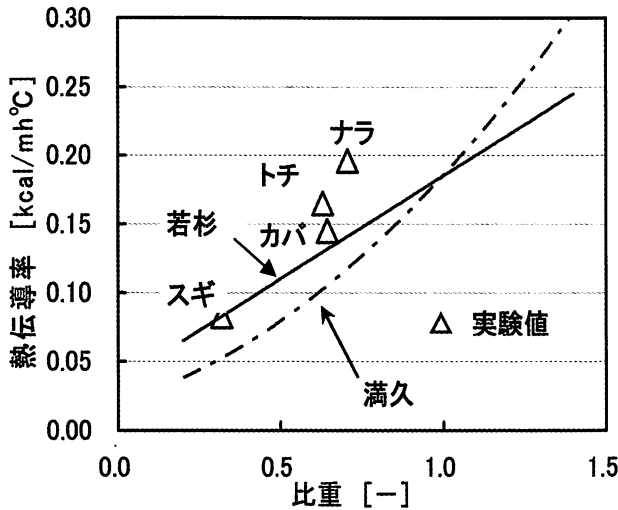


図6 満久と若杉の比較

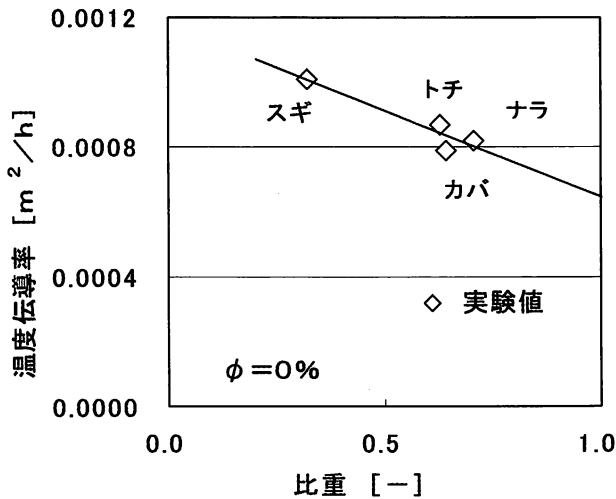


図7 温度伝導率と比重

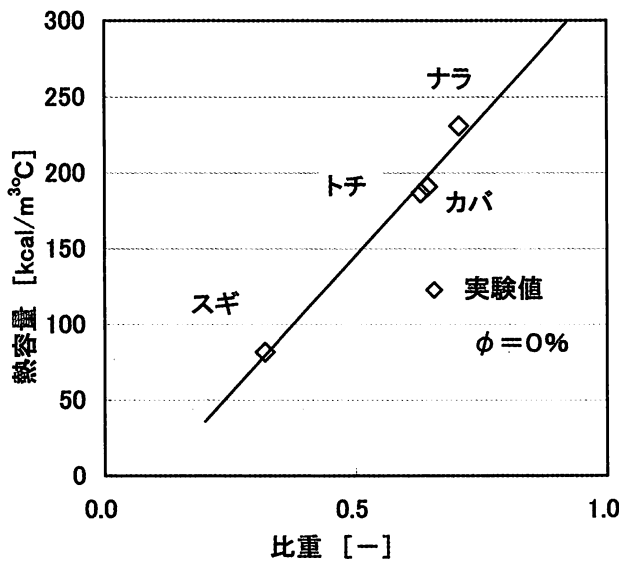


図8 熱容量と比重

がわかる。しかし、2時間以降では $\phi=11.9\%$ 、 17.5% と変化しても顕著な保温効果は見られない。スギの $\phi=23.1\%$ の場合の結果とナラの $\phi=17.5\%$ 、カバの $\phi=18.8\%$ の場合を比較すると含液率がほぼ同じにも関わらず、ナラ、カバの温度低下が早く、蓄熱効果が小さいことがわかる。これは空隙率が杉に比べて小さいため、蓄熱材の含水量が少ないことに起因しているといえる。また、スギ、ナラ、カバでは組織の構造が異なるのではないかと予想される。

3.2 熱物性値について

3.2.1 実験結果と文献値の比較

本実験の測定精度を検証するため $\phi=0\%$ の場合について、文献値^{(3),(4)}と実験結果の比較を行う。熱伝導率の比較をした結果が図6である。図6は熱伝導率と比重の関係を示したものである。スギとカバの測定値は若杉の線上に位置し、トチとナラの測定結果は大きな値を示したが、若杉の結果と傾向がよく一致しているといえる。また、熱伝導率が比重の増加とともに増大するのは、比重の増加で木材内で木質部が多くなり、空隙の割合が減少したためである。空気の熱伝導率が $0.02\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ なのに対し、木質の熱伝導率は $0.15\sim 0.25\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ と、空気よりも大きいためである。

図7に温度伝導率と比重の関係を示す。図より、比重が増加すると温度伝導率は低下することがわかる。これは比重の増加により、木材内部の実質的な木の部分が増え、空隙の割合が減るためである。一般に温度伝導率は固体に比べ空気のほうが大きいため固体の割合が多くなれば温度は上昇しにくくなる。

図8は熱容量と比重の関係を示したものである。木質部の熱容量は空気よりも大きいため、比重の増加に伴って熱容量は大きくなる。これも空隙の割合が減少するからである。

3.2.2 熱物性値と温度の関係

図9はスギの場合の温度伝導率と温度の関係を示したものである。本研究で用いた蓄熱材が融解し始める温度は $30^\circ\text{C}\sim 32^\circ\text{C}$ のあたりである。測定結果に示している温度は木材の平均温度である。すなわち、木材の表面と中心の平均値を示す。この図から、蓄熱材を含んだスギは、 25°C 付近から温度伝導率が急激に減少し始め、約 35°C 付近で極小値を示す。これはスギの表面部分で蓄熱材の融解が始まっているからである。融解が始まると加えた熱が蓄熱材の相変化に使われるため、木材が温度変化しにくくなる。よって温度伝導率は小さくなるものと考えられ

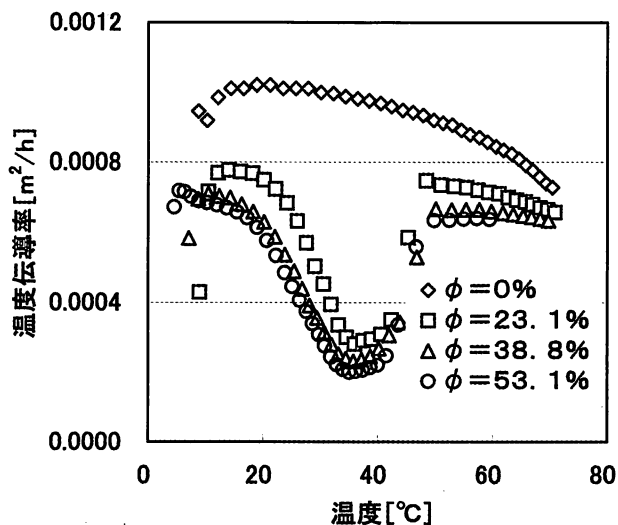


図9 温度伝導率と温度の関係

る。また、35°C付近で極小値をとるのは木材全体に分散している蓄熱材が相変化を起こしているためと考えられる。温度伝導率の極小値は体積含液率が変化しても0.0002 m²/h~0.0003 m²/hであり変化は見られなかった。その後40°C付近で値が上昇しているのは相変化が終りに近づき、試料が再び温度変化するからである。木材の温度が50°C以上では融解がほぼ終り、温度伝導率は一定になる。また、温度伝導率は、含液率が小さいほど大きな値を示すことが分かる。

図10はスギの場合の熱容量と温度の関係を示したものである。この図からも蓄熱材が融解を始める25°C付近で熱容量が急激に増大し、35°C付近で極大値を示していることがわかる。融解が始まると潜熱分だけ熱量が必要になるため熱容量は増加することになる。本研究では相変化時の値を見かけの熱容量と呼ぶこととする。また、体積含液率の増加に伴って多くの潜熱を必要とするため、見かけの熱容量は含液率φ=23.1%の場合の約600kcal/m³°Cに比べ、含液率φ=53.1%の場合では1200kcal/m³°Cと約2倍に増大することがわかる。

図11はスギの場合の熱伝導率と温度の関係を示したものである。図から、温度伝導率や熱容量の場合と同様に、25°C~40°Cの範囲で急激な値の変化が見られ、蓄熱材の相変化の影響が顕著に現れているのがわかる。また、温度が20°C以下の領域(蓄熱材が固体の状態で存在)および、温度が40°C以上の領域(蓄熱材が液体で存在)では体積含液率の増加で熱伝導率は大きくなるのがわかる。熱伝導率の小さな空気(0.02kcal/mh°C)に代わり熱伝導率の大きな蓄熱材(0.2kcal/mh°C)が空隙内に存在するようにな

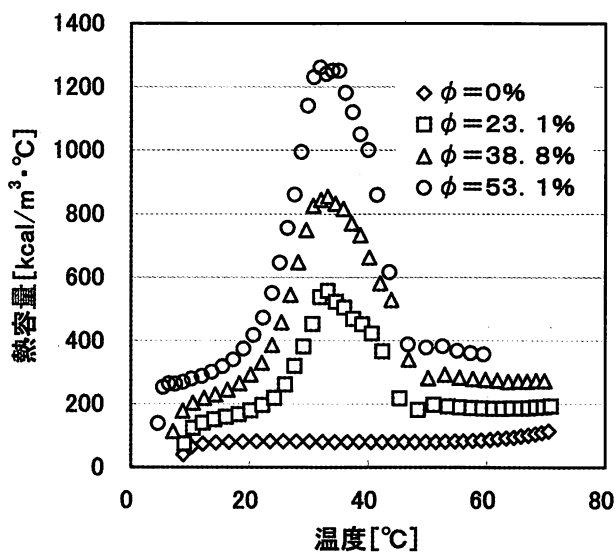


図10 熱容量と温度の関係

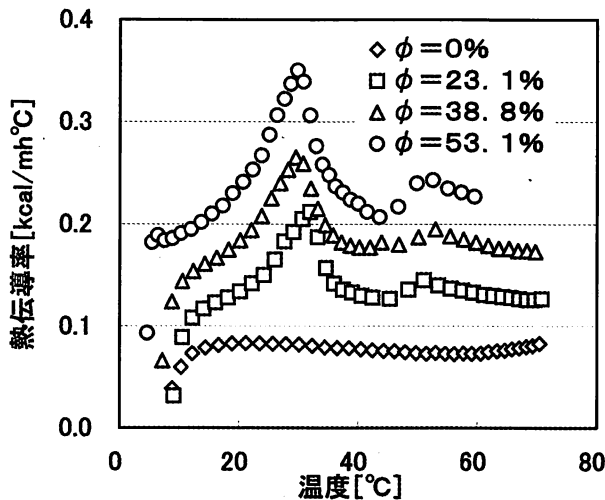


図11 熱伝導率と温度の関係

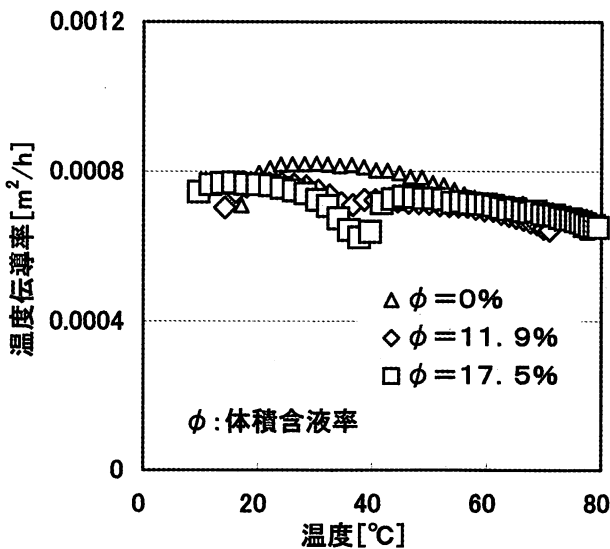


図12 温度伝導率と温度の関係

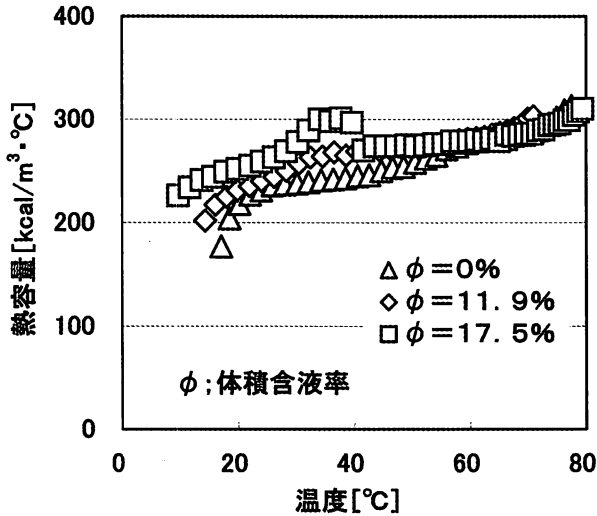


図13 熱容量と温度の関係

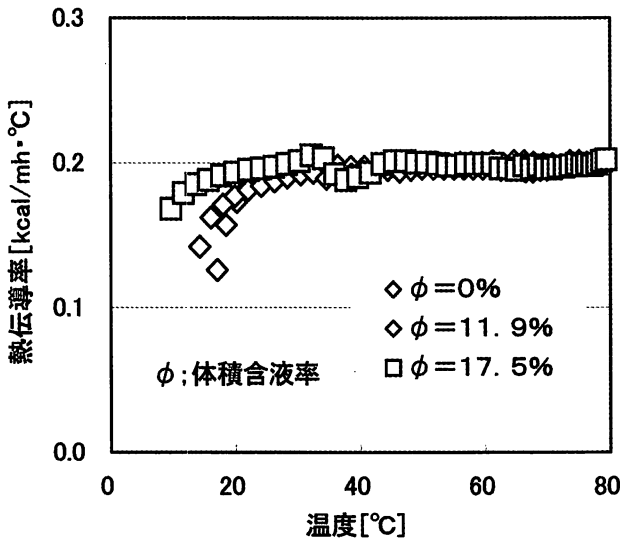


図14 熱伝導率と温度の関係

るためである。また、50°C付近に小さな極大値が見られるが、これについてはさらに検討する必要がある。

ナラを用いたときの結果を図12～図14に示す。図12は温度伝導率と温度の関係を示したものである。図より、蓄熱材を含んでもスギの場合のような大きな変化は見られない。これはナラの空隙率が小さく、蓄熱材を多く含むことができないためと考えられる。図13は熱容量と温度の関係を示している。図より、スギの場合に比べ熱容量の値が極値を示す温度が40°C付近と高温側に移動しているのがわかる。スギのφ=23.1%の結果とナラのφ=17.5%の結果を比較すると、熱容量の変化はスギの場合、60kcal/m³°C～600kcal/m³°Cであるのに対し、ナラは250kcal/m³°C～300kcal/m³°Cと小さい。すなわち、スギに

比べ比重が増大すると蓄熱材による熱容量への影響は少ないことがわかる。

図14は熱伝導率と温度の関係を示したものである。熱伝導率は前者の結果とは異なり、体積含液率が異なってもほぼ同じ値を示すことがわかる。また、蓄熱材の相変化の影響も認められない。

カバやトチの空隙率および蓄熱材の含液率はナラの値と同程度であるが、カバの場合はナラの場合の結果と同様の変化を示したのに対して、トチの場合は、変化の度合いは小さいものスギの結果に似た傾向を示した。

3.2.3 体積含液率と熱物性値

各試料で蓄熱材が固体の状態で存在する場合の熱物性値と体積含液率の関係を図15～図17に示す。図

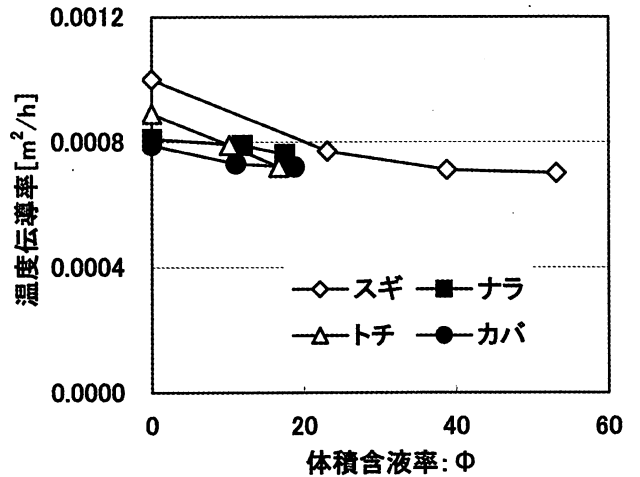


図15 温度伝導率と体積含液率 (凝固状態)

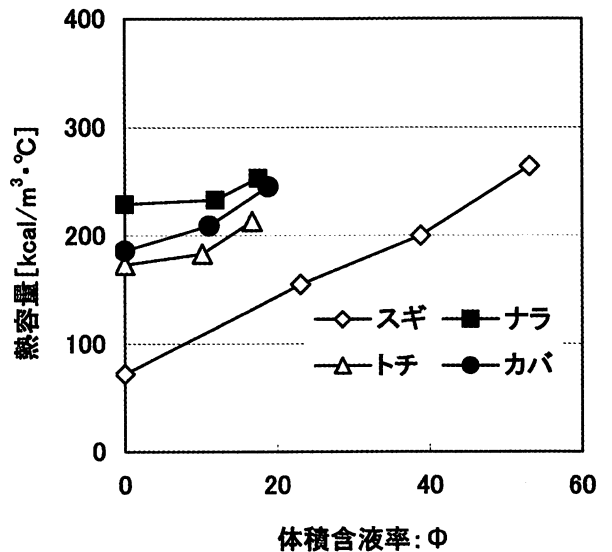


図16 熱容量と体積含液率 (凝固状態)

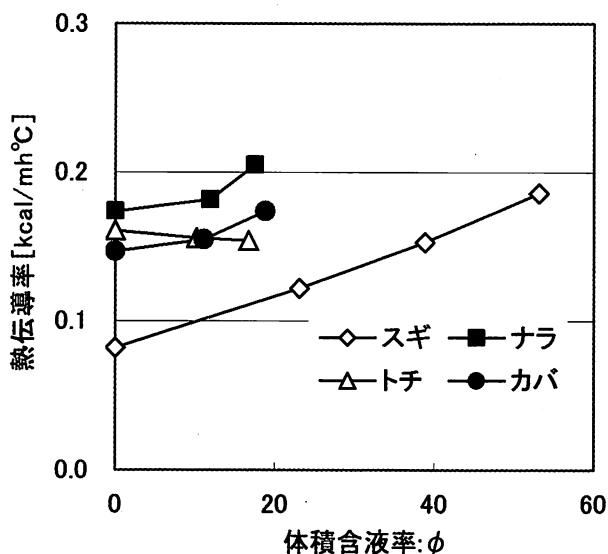


図17 熱伝導率と体積含液率（凝固状態）

15は温度伝導率と体積含液率の関係を示したものである。図より体積含液率の増加に伴って、温度伝導率は小さくなるのがわかる。これは、空隙に存在する温度伝導率の大きな空気に代わり、温度伝導率の小さな蓄熱材が空隙内に入り込むためである。また、空隙率の大きなスギに比べ、空隙率の小さいナラ、トチ、カバの温度伝導率が小さい。

図16は熱容量と体積含液率の関係について示したものである。図より、体積含液率の増加にともない熱容量は大きくなっているのがわかる。特にスギの場合、含液率が0%の時は熱容量が60kcal/m³°Cなのに対して、50%では250kcal/m³°Cを超えている。これは、空隙の割合が減少し、熱容量の大きい蓄熱材が入り込むためである。空隙率がスギに比べて小さい木材は、熱容量の変化が小さい。これは、比重が大きく空隙が少ないためである。

図17は熱伝導率と体積含液率の関係を示したものである。図から体積含液率の増加に伴い各木材の熱伝導率が大きくなるのがわかる。これは木材内部の

空隙に存在する熱伝導率の小さい空気に代わって、熱伝導率の大きな蓄熱材が入っていくためである。この図でもスギに比べて比重の大きな木材は、空隙の割合が少ないため熱伝導率が大きいことがわかる。

また、空隙内の蓄熱材が液体の状態で存在するときの物性値と温度の関係も同様の変化を示した。

6 結 言

本研究は蓄熱材を含んだ木材の熱物性値を測定し、その木材を床材に使用したときの有効性を検証することを目的として行ったものである。体積含液率の異なる木材の温度変化および熱物性値を測定することにより、以下の結論が得られた。

- (1) 蓄熱材混入で木材の保温効果を高めることができた。杉の場合、空隙率が大きく蓄熱材を多く含有できるため、保温効果が大きいことがわかった。
- (2) 蓄熱材が固体または液体で存在する場合、蓄熱材の含有量が増加するに伴って温度伝導率は低下し、熱容量と熱伝導率は増加する。
- (3) 蓄熱材が相変化をするとき、みかけの温度伝導率は低下し、みかけの熱容量と見かけの熱伝導率は増加する。
- (4) 見かけの熱容量は平均温度30°C付近で増加することから、床材に蓄熱材を混入する方法はエネルギーを効率的に活用するための有効な一方法である。

参考文献

- (1) 佐々木 章, 高橋 秀昭, 長里 勝美, 秋田工業高等専門学校研究紀要, No.27, 11, (1992).
- (2) 関 信弘, 伝熱工学, 森北出版, (1988).
- (3) 北原 覚一, 木材の物理, 森北出版, (1968).
- (4) 満久 崇麿, 木材の乾燥, 森北出版, (1977).