

# 改質層の付与によるCLTの多機能化に関する研究

中原 亨\* , 南 晃\*

## Study on multifunctionalization of CLT by adding modified layer

Toru NAKAHARA and Akira MINAMI

CLTラミナの代替として一部の層に炭化コルクボードの改質層を設け、構造強度に加えて断熱性能の高い建材としてのCLTを開発するために、炭化コルクの熱伝導率測定、箱型試験体による断熱性能実証試験および改質層をもつCLTの強度試験を行った。その結果、炭化コルクで代替することで断熱性能は約2割向上し、箱型試験体による断熱性能実証試験においては、改質層をもつCLTで作製した空間のほうがスギのみのCLTに比べて温度変化が抑えられることが確認された。また、改質層をもつCLTの強度試験を行った結果、せん断強度は国土交通省の基準強度告示を上回っており、強度面でも使用上問題ないことがわかった。

**Keyword** : CLT, 熱伝導率, 炭化コルク, せん断試験

### 1. 緒 言

Cross Laminated Timber(以下、CLT)は、欧州で開発された木質材料で、ラミナを並べた層を各層で互いに直交するように積層し接着した厚型パネルである(図1, 2)。これまで木材があまり使用されていなかった中層・大規模建築物などを木造化することができ、普及が進めば新たな木材需要を創出することが期待され、国や県の施策として積極的な利用が推進されている。

CLTの特徴として、直交積層のため高い寸法安定性が得られる、大判のパネルとして利用することで高い耐震性を確保することができ、軽量なので輸送コストや基礎工事のコストを抑制できるなど多くのメリットがある。

また、スギは比重が小さく熱伝導率が低く、CLTに適していることも考えられ、国産スギの需要拡大の1つとして期待される。

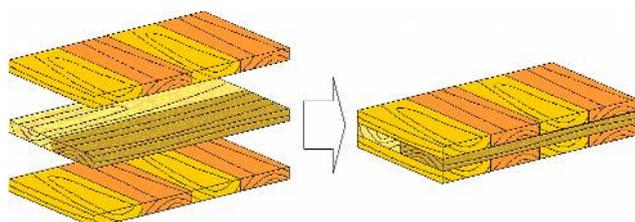


図1 CLTの構造



図2 CLTパネル

その一方で、現在は流通量が少ないので製造コストが従来の材料に比べ割高であり、コストを低減するには流通量を増加させる必要がある。また、構造部材を露出させる「現し」として使用するには断熱性や耐火性などのさらなる向上が必要である。

本研究は、CLTが厚手のラミナの積層構造であることに着目し、ラミナの代替として一部の層に炭化コルクボード等の改質層を設けることで、構造強度に加え、断熱・耐火等、付加価値の高い建材としてのCLTを開発することを目的として行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験の概要

熱伝導率測定により、従来CLTの材料として使用されているスギと改質層に用いる材料との熱伝導率の差を確認し、また、材料の加工や接着による熱伝導率への影響について検討した。次に、箱型の試験体を作製し、同じ温度環境に設置した時に箱の内部温度の変化にどのような違いが生じるか確認した。最後に、改質層を付与した場合でも建築構造材として問題なく使用できるか、面内せん断試験を行うことでせん断強度を確認した。

#### 2.2 熱伝導率測定

熱伝導率( $\lambda$ )は「厚さ1mの板の両端に1℃の温度差がある時、その板の1m<sup>2</sup>を通して1秒間に流れる熱量」と定義され、単位は[W/(m・K)]で示される。熱伝導率測定法は定常法と非定常法に分けられ、定常法は材料中に定常的な一方向の熱流を作り熱伝導率を測定する方法で、正確な測定が可能である。非定常法は材料に温度変化を与え、その後、ある位置における温度の時間変化を測定し、熱伝

\* 地域資源部

導率を測定する方法である。

図3に当センター保有の熱伝導率測定装置(FOX 314 SN)を示す。本装置は定常測定法の1つである熱流計法(JIS-A1412-2, ASTM-C518, ISO8301準拠)により熱伝導率を測定する。図4に示すように試料を加熱板と冷却板に挟み、定常状態に達した後、式(1)より熱伝導率を求める。



装置外観 試験体挿入部

図3 熱伝導率測定装置

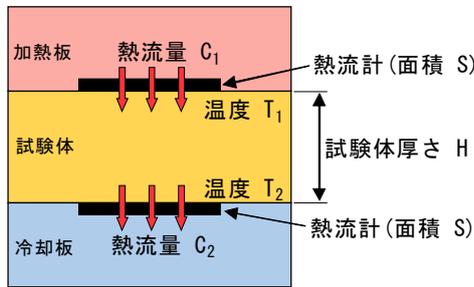


図4 熱伝導率の測定方法

$$\lambda = \frac{(C_1 + C_2) \cdot H}{2 \cdot S \cdot (T_1 - T_2)} \dots (1)$$

- λ : 熱伝導率 (W/(m·K))      H : 試験体厚さ (m)
- C<sub>2</sub> : 冷却板側熱流量 (W)      S : 熱流計面積 (m<sup>2</sup>)
- C<sub>1</sub> : 加熱板側熱流量 (W)
- T<sub>1</sub> : 加熱板側の試験体温度 (K)
- T<sub>2</sub> : 冷却板側の試験体温度 (K)

2. 2. 1 材料単体での熱伝導率測定

積層する材料の熱伝導率を把握するため、各材料の単体における熱伝導率を測定した。また、定常法と非定常法で測定し、測定法による差違を検討した。定常法は熱流計法、非定常法はプローブ法を用いた。測定する試験体は、スギCLT、断熱材として発泡ポリスチレン、押出發泡ポリスチレン、断熱層として考えられる材料として炭化コルク、キリ、ファルカタ、OSBを使用した。試験体寸法を表1に示す。

測定装置は、プローブ法には昭和電工株式会社製の迅速熱伝導率計(ShothermQTM)を、熱流計法にはTA Instruments製の熱伝導率測定装置(FOX 314 SN)をそれぞれ使用した。熱流計法では、上部温度13℃、下部温度33℃に設定して測定を行った。また、断熱材2種については、プローブ法に

おける熱線温度までの耐熱性がなく、測定により熱線部が溶解するため、熱流計法での測定とした。

表1 試験体一覧 単位 : mm

	厚さ	幅	長さ
スギCLT (3層3プライ)	36	300	300
炭化コルク	30		
キリ (幅はぎ材)	13		
ファルカタ (幅はぎ材)	13		
OSB	13		
発泡ポリスチレン	30		
押出發泡ポリスチレン	30		

※各3体ずつ測定

2. 2. 2 空気層を含んだ場合の熱伝導率測定

空気は断熱性が高いことはよく知られている。改質層に多く空間を設けることで空気層を設け、断熱性能を向上できないか検討を行った。

試験体は、スギCLT (3層3プライ、厚さ36mm)を3体用い、そのうち2体は中間層に15mm間隔で直径7mmの孔加工を行ったラミナを使用した(図5)。測定は、熱流計法にて行った。

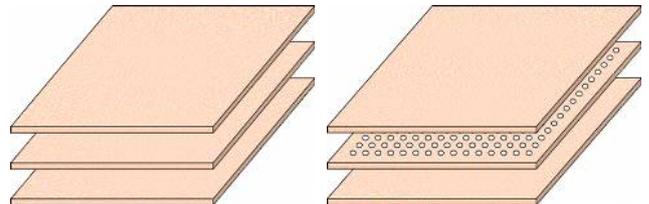


図5 試験体の層構成 (左 : 無孔, 右 : 有孔)

2. 2. 3 積層材の熱伝導率測定と熱伝導率の合成

CLTは使用するラミナの厚さや積層数によってさまざまな厚さのものが製品化される。これらのCLTの断熱性を評価するため熱伝導率を測定する必要があるが、CLTをその都度測定しては非効率的である。

そこで、複数材料を積層して測定した熱伝導率と材料毎の測定結果から計算して得られる推定値の比較を行い、層毎の測定による積層物の熱伝導率推定の妥当性について確認を行った。

熱伝導率は(2)式により合成することができ、これを用いて推定を行った。

試験体は3. 1. 1で用いた表1に示す試験体のうち、スギCLT、キリ、ファルカタ、OSB、押出發泡ポリスチレンを用い、図6に示すように組合せ、それぞれ熱流計法にて測定を行った。その後、測定に用いた材料毎の熱伝導率測定結果を用いて(2)式に代入し、算出された結果と今回の測定結果を比較した。

合成した伝熱層の熱伝導率  $\lambda$ 

$$\lambda = \frac{H}{H_1/\lambda_1 + H_2/\lambda_2 + \dots + H_n/\lambda_n} \dots (2)$$

$H = H_1 + H_2 + \dots + H_n$  : 合成した厚さ

$H_1, H_2, \dots, H_n$  : 各伝熱層の厚さ

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  : 各伝熱層の熱伝導率



(a) (b) (c)

図6 試験体の組合せ

(a) スギCLT+ファルカタ

(b) スギCLT+OSB+キリ

(c) スギCLT+押出発泡ポリスチレン+キリ

## 2. 2. 4 接着による熱伝導率への影響確認

CLTを製造する際は接着剤を用いて積層接着を行う。熱伝導率の合成で積層材の熱伝導率を推定する際における、接着層が熱伝導率に及ぼす影響について確認を行った。

試験体にはスギ幅はぎ板と炭化コルク（共に厚さ30mm, 250mm四方）を用いた。材料を接着せず3層に重ね、熱流計法により熱伝導率を測定した。その後、表2に示す条件にて接着を行い、一体化した状態で再び熱伝導率を測定し接着前の測定結果と比較した。

表2 接着条件

接着剤	水性高分子-イソシアネート系接着剤
配合比	主剤：硬化剤=100：15
塗布量	200～250g/m <sup>2</sup>
圧縮圧力	0.8MPa
圧縮時間	40分

## 2. 2. 5 実証実験

CLTの1層を炭化コルクに代替し、空間内温度変化の抑制効果を確認する試験を行った。

試験体の製作方法を図7に示す。相対する側方2面が解放された押出発泡ポリスチレン製管体を2つ作製した。1つは5層5プライの全層スギCLT（厚さ150mm, 250mm四方）で2面を塞ぎ、もう1つは2層目を炭化コルクで代替したCLTで2面を塞いで試験体とした。

この2つの試験体を大型恒温恒湿機内（エスペック株式会社製）に並べて設置し、高温環境（80℃, 17時間）および低温環境（0℃, 21時間）における試験体内外の温度を測定することで、実際の温度変化にどの程度の差が生じるかを検証した（図8～10）。

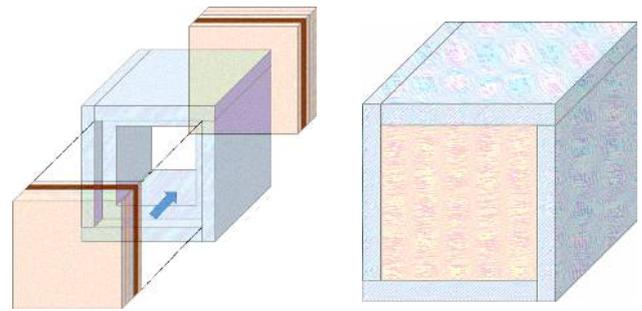


図7 試験体作製方法



図8 大型恒温恒湿機

図9 試験体設置状況

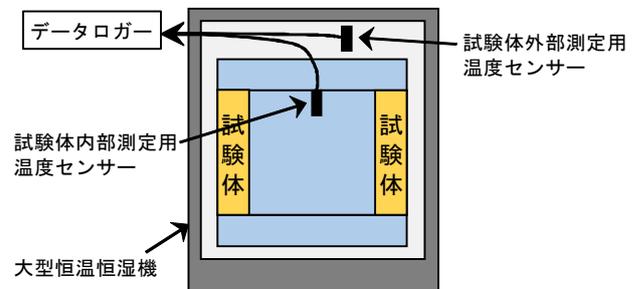


図10 温度測定概要

## 2. 3 強度試験

建築物に用いる際の材料強度に問題がないか確認するために、面内せん断試験を行った。

試験体は5層5プライのCLT（幅150mm, 長さ500mm, 厚さ150mm, 強軸方向）で、全層スギ構成CLTを3体、弱軸層のうち1層を炭化コルク（厚さ30mm）で代替したCLTを3体、それぞれ作製した（図11）。

試験は株式会社島津製作所製の実大試験機（UH-25）を用いて、支点間距離450mmの中央集中荷重方式で実施した（図12）。



図11 せん断試験体



図12 せん断試験風景

## 3. 結果と考察

## 3. 1. 熱伝導率測定

## 3. 1. 1 材料単体での熱伝導率測定

測定結果を表3に示す。どの試験体についても、プロー

ブ法による測定結果が熱流計法による測定結果より高い数値となっていた。どちらの測定方法も、板目板における接線方向（プローブ法）と半径方向（熱流計法）という違いはあるものの材料の繊維とは直交方向であり、浦上らによれば繊維直交方向であれば、いずれの測定法であっても熱伝導率は同じであるとされている。また、KOLLMANによれば、含水率12%における木材の比重と熱伝導率との間には(3)式が成り立つことが確認されている<sup>1)</sup>。

$$k_{\perp} = 0.022 + 0.168r_{12} \quad \dots (3)$$

$k_{\perp}$  : 繊維直交方向の熱伝導率

$r_{12}$  : 比重 (ただし,  $0.2 < r_{12} < 0.8$ )

これによれば、今回比重測定を行っているスギCLT (0.38)、キリ (0.31)、ファルカタ (0.38) およびOSB (0.57) の熱伝導率は表3最右列の計算値になる。このことから、今回の熱伝導率測定は理論式から導かれる数値に近い熱流計法のほうが適していると考えられた。

表3 熱伝導率測定結果および理論式から導かれた計算値

(単位: W/mK)

試験体	プローブ法	熱流計法	計算値
スギCLT (3層3プライ)	0.108	0.100	0.086
炭化コルク	—	0.043	—
キリ (幅はぎ材)	0.099	0.087	0.074
ファルカタ (幅はぎ材)	0.122	0.094	0.086
OSB	0.222	0.101	0.124
発泡ポリスチレン	—	0.045	—
押出發泡ポリスチレン	—	0.040	—

### 3. 1. 2 空気層を含んだ場合の熱伝導率測定

測定結果を表4に示す。スギの有孔ラミナ入れることによって熱伝導率はわずかに低くなっていたが、今回の有孔面積率16.1%で想定していた熱伝導率0.076W/mKとは大きく異なる結果となった。積層接着の際に接着剤が孔に流れ込み、期待した結果にならなかったのではないかと考えられた。これを防ぐためには、積層接着の際にフィルムのようなもので孔を塞ぐ必要があるが、製造の手間を考えると現実的な手段ではないと判断した。

表4 有孔ラミナ挿入CLT熱伝導率測定結果

単位: W/mK

試験体	熱伝導率
孔加工無し	0.107
有孔ラミナ使用	0.096

### 3. 1. 3 積層材の熱伝導率測定と熱伝導率の合成

実測値と計算値との関係は表5に示す通り、推測値と実測値はほぼ一致していた。よって、装置では測定できない厚さの熱伝導率も、それぞれの層を測定することにより推定可能であることが確認された。

表5 熱伝導率合成確認試験結果 (単位: W/mK)

試験体	測定値	理論値
スギCLT+ファルカタ	0.099	0.098
スギCLT+OSB+キリ	0.097	0.097
スギCLT+押出發泡ポリスチレン+キリ	0.064	0.063

### 3. 1. 4 接着による熱伝導率への影響確認

測定結果を表6に示す。スギCLTおよび炭化コルク代替CLTのどちらにおいても、接着した試験体の熱伝導率は非接着試験体に比べ約5%高くなっていた。接着層自体は0.5mm程度の厚さではあるが、密度はスギや炭化コルクに比べると大きいうえに、接着剤中に微量に残されている水分の影響もあり熱伝導率が高くなったのではないかと考えられた。

表6 CLTの接着前後における熱伝導率測定結果

単位: W/mK

試験体	非接着	接着
スギCLT	0.115	0.120
炭化コルク代替CLT	0.084	0.089

### 3. 1. 5 実証実験

実験結果を図13に示す。また、図14に両試験体の内部温度の差を示し、この値はスギCLT試験体の内部温度から炭化コルク代替CLT試験体の内部温度を引いて求めている。80℃試験では両試験体とも雰囲気から試験体を通して温度が伝わり徐々に内部温度が上がったが、炭化コルク代替CLT試験体のほうがその度合いは緩やかで、80℃試験開始から335分経過時点で最大の温度差1.27℃ (スギCLT: 60.24℃, 炭化コルク代替CLT: 58.97℃) となった。0℃試験でも同様に両試験体とも徐々に内部温度が下がったものの、炭化コルク代替CLT試験体のほうがその度合いは緩やかで、0℃試験開始から275分経過時点で最大の温度差-2.24℃ (スギ: 29.65℃, 炭化コルク: 31.89℃) となった。今回は試験機の都合上250mmサイズの試験体を2面とした筐体での試験だったため温度差は小さかったが、実際の壁(910×2730mm)に使用した場合そのサイズは約40倍にもなるため、大きな温度差が生じると考えられた。

また、本試験体の熱伝導率から算出される熱貫流率は、スギCLT試験体が0.80W/m<sup>2</sup>Kであるのに対し、炭化コルク代替CLT試験体は0.66W/m<sup>2</sup>Kで、約2割の断熱性能の向上と

なった。国土交通省の建築物エネルギー消費性能基準等を定める省令第1条第1項第2号イ(1)の地域の区分において、地域区分4（北端：青森県青森市）では $0.75\text{W/m}^2\text{K}$ 以下、地域区分5（北端：新潟県村上市）では $0.87\text{W/m}^2\text{K}$ 以下とされており、1層を炭化コルクで代替することによって、より寒冷的な地域でも基準をクリアできる断熱性を付与できることがわかった。

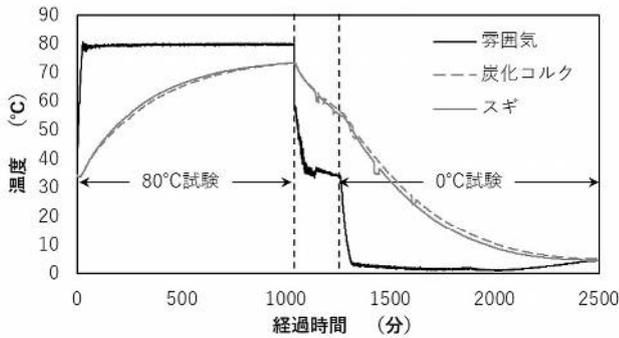


図13 測定結果

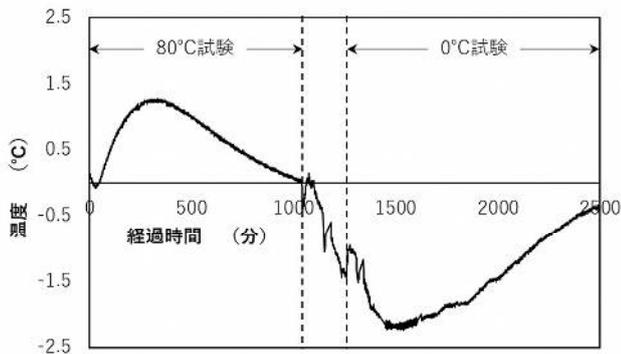


図14 温度差

### 3. 2 強度試験

試験結果を表7に示す。破壊形態について、全試験体せん断破壊となっていたが、炭化コルク試験体はスギ試験体に比べ、大きくめり込みが発生していた（図15）。

せん断強さについては、炭化コルク層を入れることによって、スギのみの試験体より約3割低くなった。炭化コルクはスギに比べ圧縮強度が低く、1層分の圧縮強度がなくなることで圧縮変形が生じやすくなり、せん断耐力の低

下が生じたと考えられた。炭化コルクを用いた試験体の結果から算出される信頼水準75%における95%下限許容限界値は国土交通省の基準強度告示を上回っており、建築構造材としての使用に十分耐えうる強度であることも確認された。

表7 せん断試験結果

試験体	最大荷重 (kN)	せん断強さ (N/mm <sup>2</sup> )
スギCLT	171.1	11.4
炭化コルク代替CLT	115.5	7.7



図15 加力部のめり込み

## 4. 結 言

一部の層に改質層を設け、付加価値の高いCLTを開発することを目的とし、各種材料のプローブ法および熱流計法による熱伝導率測定を行い、CLTの断熱性向上について検討を行った。その結果、次の知見が得られた。

- ・接着することにより、熱伝導率は材料のみで測定した熱伝導率より約5%低下する。
- ・スギCLT5層5プライの弱軸層1層を炭化コルクで代替することにより、断熱性能は約2割向上する。
- ・せん断強度はスギに比べ3割低下するものの、国交省告示の基準強度を上回る。

## 参 考 文 献

- 1) 原田寿郎: 森林総研研報 Bull. For. & For. Prod. Res. Inst. No. 378(2000), p. 8