

クスノキ間伐材からの合板試作とその物理的性質

前田啓^{*1}・信田聡^{*1}・鴨田重裕^{*2}・岡野健^{*3}

Trial manufacture of plywood made of thinned *Cinnamomum camphora* wood and its physical properties

Kei MAEDA^{*1}, Satoshi SHIDA^{*1}, Shigehiro KAMODA^{*2}, Takeshi OKANO^{*3}

1. 緒言

東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林樹芸研究所（静岡県賀茂郡南伊豆町）に100年生のクスノキ人工林が存在する。クスノキの材の特徴としては樟脳に代表される抽出成分を多く含むことがあげられ、それに由来する独特の芳香や防虫性を保持することが知られている¹⁾。またかつて樟脳はセルロイドの原料としても利用されており、この人工林は樟脳の採取を目的として造林された。しかしながら、プラスチック材料の原料が石油系に変化していき樟脳の利用が見込まれなくなったため、材としての利用はされてこなかった。

その一方、現在日本の林業における大きな問題の一つがニホンジカによる食害である。シカの食害に対する対策としては防護資材が有効²⁾であるが、このような対策は手間とコストがかかるため、今後の日本の林業においてはシカに食害されにくい樹種による営林についても模索していくことが必要不可欠である。その中で、クスノキは比較的シカに食害されにくい樹種の一つであると言われている³⁾。実際、千葉県内のシカ食害が激しい調査地に植栽された15樹種の苗木の食害調査では、クスノキはシキミと並んで全く食害が発生しないという結果が得られており⁴⁾、クスノキはシカ食害という観点から見て今後の造林木として大きな期待をもたれている樹種の一つである。しかしながら、先述した通り現代において樟脳の原料としてのクスノキの利用価値は無く、利用方法としては社寺建築や合板の化粧材⁵⁾といった大きな需要が見込まれにくい利用が主流であるため、クスノキを用いた林業を進めるためには住宅等の構造用部材などの大きな需要が見込まれる利用先の開拓が必要である。

以上のような背景が有る中で、先述したクスノキ人工林に対して間伐を行うことになった。そこで本研究では、その間伐材を利用したクスノキ材の建材・家具用材としての利用適性を評価することとした。対象となる材は枝打ちなどの管理が積極的になされていなかったことから利用方法は合板とし、合板の基本的な性質として曲げ性能、接着耐久性、熱物性の評価を行った。また合板を試作する段階において学校関係の机に対しての利用が想定されたが、カラマツ合板を使用して同様の検討を行った際に表面の傷つきやすさが問題となった⁶⁾ことから、本研究において

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科生物材料科学専攻
Department of Biomaterial Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*2 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林樹芸研究所
Arboricultural Research Institute, The University of Tokyo Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*3 公益財団法人 PHOENIX 木材・合板博物館
Wood & Plywood Museum, PHOENIX Foundation

も合板表面の傷つきやすさを JIS Z2101⁷⁾ に規定されている衝撃めり込み抵抗による評価を行った。

2. 実験方法

2.1 クスノキ合板の試作

合板の原木は、静岡県賀茂郡南伊豆町青野（東京大学樹芸研究所，青野研究林，3・4 林班内）のクスノキ林（Fig. 1）から，2015 年 1 月 23 日に樹齢およそ 100 年（1908 年植栽開始）のクスノキ（*Cinnamomum camphora* Sieb.）を間伐したうちの 5 本を合板用の原木とした。原木は玉切りして長さ 2m または 4m，末口径 10~50cm の丸太とし，(株)キーテック（千葉県木更津市）に運び同所の工場において 2015 年 4 月 3 日に 910mm × 1820mm × 21mm の 9 層 9 プライの合板（Fig. 2）を 28 枚試作した。以後本論文では，合板を構成する単板について最外層から順に第 1 層，第 2 層，・・・第 9 層と称する。奇数層の単板については，単板の繊維方向が長軸と平行になるように 2.1mm 厚の単板を配置した。また偶数層の単板厚は 3.2mm 厚として単板の繊維方向と合板の長軸が直交するようにした。接着剤はメラミン・ユリア樹脂（(株)オーシカ製）を 422g/m²（38g/尺²）の割合で塗布し，プレスの条件は熱圧温度 125℃，圧力 0.78MPa（8kgf/cm²），プレス時間 730 秒とした。最終的には両面をサンダーによって仕上げることで厚さを 21mm とした。本研究では，試作合板から切り出された 910mm 角合板 4 枚を供試材料とした。



Fig. 1 東京大学樹芸研究所の青野研究林 3・4 林班内のクスノキ林

Fig. 1 *Cinnamomum camphora* forest in the Arbicultural Research Institute of the University of Tokyo Forest



Fig. 2 試作したクスノキ合板の外観

Fig. 2 Appearance of manufactured Kusunoki plywood

2.2 曲げ性能の評価

作成した公称厚さ 21mm のクスノキ合板 4 枚全てを恒温恒湿室（20℃ 65% RH）で調湿した後，幅 100mm，長さ 770mm の試験体を表層の単板の繊維方向に対して 0° と 90° になるように 3 枚の合板から各方向 3~4 枚，計 10 体ずつ切り出した。試験にはインストロン 4204 型万能試験機を用い，曲げスパン (l) 700mm，荷重点間距離 (s) 234mm，クロスヘッドスピード 10mm/min の条件で 4 点曲げ試験を行った（Fig. 3）。曲げモーメント一定区間の変位 y_b は，クロスヘッド直下の変位の平均と試験体の中央部の変位の差として求めた。曲げモーメント一定区間の変位から得られた荷重変位曲線を基に，曲げヤング率 E (GPa) と曲げ強度 σ (MPa) をそれぞれ (1)，(2) 式より算出した。

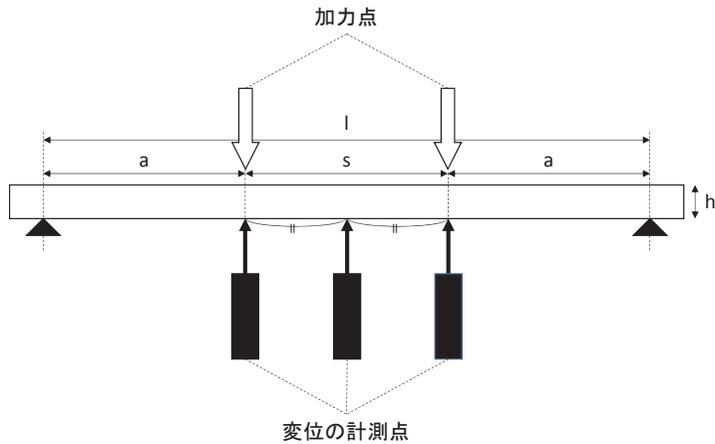


Fig. 3 4点曲げ試験の模式図

Fig. 3 Schematic diagram of the bending test

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta y_b} \cdot \frac{as^2}{16l} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{aP_{max}}{2Z} \tag{2}$$

ここで $\Delta P / \Delta y_b$ は比例域における荷重と曲げモーメント一定区間の変位の傾き (N/mm), a は支点と加力点間の距離 (233mm), h と b はそれぞれ試験体の厚さと幅の実測値 (mm), I は試験体全体の断面 2 次モーメント $bh^3/12$ (mm⁴), Z は断面係数 $bh^2/6$ (mm³), P_{max} は最大荷重 (N)。

また, 得られた合板の強度性能から平行層理論⁹⁾ による単板の強度性能の算出を行った。平行層理論では単板の繊維直交方向の強度性能を無視して合板の強度性能を評価する。単板の強度性能を一定とした場合, 合板の強度性能は平行層理論に基づき (3) ~ (6) 式のように表すことができる。ここで曲げ試験においては加力面の単板を第 1 層とする。

$$E_0 = \frac{E_v I_0}{I} \tag{3}$$

$$E_{90} = \frac{E_v I_{90}}{I} \tag{4}$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v I_0}{I} \tag{5}$$

$$\sigma_{90} = \frac{I_{90} h}{I(h - h_1 - h_9)} \sigma_v \tag{6}$$

E_0, E_{90} は 0°, 90° 方向における合板の曲げヤング率, E_v, σ_v はそれぞれ単板の繊維方向の曲げヤング率と曲げ強度, I_0, I_{90} は繊維方向が 0° 方向, ないし 90° 方向となる単板の合板の中立軸に関する断面 2 次モーメント ((7), (8) 式), h_n は第 n 層の単板厚。ここで最外層以外の単板厚は公称値を用い, 最外層の単板厚は試験体の厚さから最外層以外の単板厚の合計を引くことで求めた。

$$I_0 = b \left(h^3 - \left(\sum h_{2,3,\dots,8} \right)^3 + \left(\sum h_{3,4,\dots,7} \right)^3 - \left(\sum h_{4,5,6} \right)^3 + h_5^3 \right) / 12 \quad (7)$$

$$I_{90} = I - I_0 \quad (8)$$

2.3 接着耐久性の評価

今回のクスノキ合板の接着剤（メラミン・ユリア樹脂）の選択は屋内での利用を想定して行われた。そこで今回は、合板の JAS 規格⁸⁾ で普通合板の 2 類に対して適用されている温冷水浸せき試験によって接着耐久性の評価を行うこととした。まずクスノキ合板試料から 25×77mm の試験片を長軸が 0° 方向になるように切り出し、最外層から偶数番目の層の両側の面がせん断面になるように切り込みを入れた (Fig. 4)。この時接着力試験に用いる試験機の都合上、試験体の切り出す際にかんな盤にて 4 層分削り出してから作業を行った。試験体は各せん断面につき 8 体ずつ、計 32 体とした。心板の裏割れの向きと加力方向の関係については、試験体加工の段階で順と逆 (Fig. 4) が 4 体ずつになるように設定したが、裏割れの様子がはっきりしない試料も多かったため接着力試験の後に改めて順逆の判定を行った。また、上に挙げた試験体の他に対照として温冷水浸せき試験に供さないで接着力試験を行う試験体を心板の層ごとに順逆 1 体ずつ計 8 体用意した。作成した試験片は 60 ± 3℃ の温水中に 3 時間浸せきさせた後に冷水に浸して冷まし、インストロン 4204 型万能試験機を用いてクロスヘッドスピード 2mm/min の条件で接着力試験を行った。試験終了後、最大荷重 P_{max} と接着面の面積 A から (9) 式に従ってせん断強さ τ を求め、あわせて破断面の観察を目視にて行った。

$$\tau = \frac{P_{max}}{A} \quad (9)$$

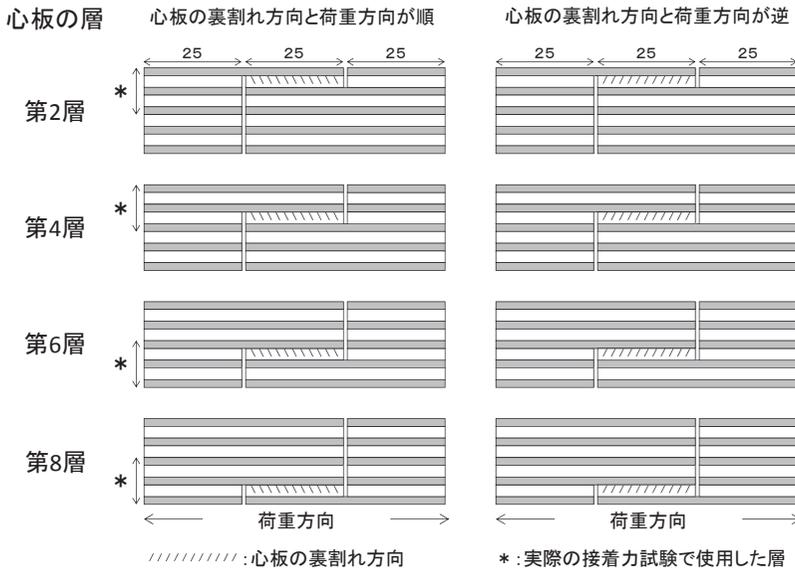


Fig. 4 接着耐久性試験体の縦断面模式図

Fig. 4 Schematic vertical cross-sectional diagram of bond durability test specimens

2.4 熱物性の評価

試作した合板の熱物性として、熱伝導率、比熱の測定を行った。また、この両者と密度を基に算出される熱拡散率についても評価の対象とした。

熱伝導率 λ (W/mK) については原板1枚から切り出した200mm×200mm×21mmのクスノキ合板4枚を試料として測定を行った。測定は平板比較法¹⁰⁾に従い、装置には熱伝導測定装置((株)英弘精機製)を、標準板にはシリコンゴム板を使用した。

$$\lambda = \lambda_0 \frac{h(\theta_1 - \theta_2)}{h_0(\theta_2 - \theta_3)} \quad (10)$$

ここで λ_0 は標準板の熱伝導率、 h_0 は標準板の厚さ(20mm)、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 はそれぞれ高温熱板と試料、試料と標準板、標準板と低温熱板の間の温度(°C)。標準板の熱伝導率 λ_0 は標準板の平均温度より(11)式から求めた値を使用した。

$$\lambda_0 = 0.212 - 0.0002 \frac{(\theta_2 + \theta_3)}{2} \quad (11)$$

含水率が熱伝導率に与える影響を評価するため、熱伝導率の測定は全乾時に加えて温度20°C、相対湿度30、50、65、90%に設定した恒温恒湿装置内で調湿した状態についても行った。

クスノキ合板の比熱 C (J/kgK) は混合法に基づくレニョー熱量計(株島津理化製)により測定した。本手法は加熱された試料を水に投入した時の水温変化から比熱を測定する手法であり、水の比熱を C_w (4186J/kgK) として下式より比熱を求める。

$$C = C_w \frac{(M_w + w_1 + w_2 + w_3) \times (\theta_{max} - \theta_w)}{M_s \times (\theta_s - \theta_{max})} \quad (12)$$

ここで θ_s : 試験直前の試料温度(°C)、 M_s : 試験直前の試料重量(g)、 θ_w : 試験直前の水温(°C)、 M_w : 試験直前の水の重量(g)、 θ_{max} : 試料を投入後の最高水温(°C)、 w_1 、 w_2 、 w_3 : 装置内の熱量計、攪拌器および温度計の水当量でそれぞれ7.315g、0.174g、0.019g。試料には平均 M_s が4.6gのクスノキ合板(20mm×20mm×20mm)を使用した。寸法・全乾重量の測定後に θ_s が100°Cになるように熱し、平均 θ_w と M_w がそれぞれ25.5°C、98.4gの水が入った熱量計に投入した。その後、水温変化から θ_{max} を測定し、得られた結果から比熱を求めた。

クスノキ合板の熱拡散率 α (m²/s) は比熱 C と熱伝導率 λ 、および全乾密度 ρ (kg/m³) から(13)式に従って算出した。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (13)$$

2.5 衝撃めり込み抵抗

試料には今回試作したクスノキ合板のほかに、比較として木質材料の代表として広葉樹合板(厚さ12.0mm)とパーティクルボード(12.3mm)、各種仕上げ材の代表としてオレフィンシート貼りMDF(中密度繊維板)(15.6mm)、メラミン樹脂貼りMDF(9.3mm)についても測定を

行った。実験は JIS Z2101⁷⁾ の規定に従い、試験体の短軸方向の中心に向かって直径 25mm、質量 $M_b = 6.37 \times 10^{-2} \text{kg}$ の鋼球 (JIS G4805) を高さ $h_s = 0.5 \text{m}$ から自由落下させ、カーボン紙 (パイロット社製) を載せた試験体に衝突させてめり込みを形成させた。試験は一種類につき 6 回行い、めり込み量はカーボン紙によって試験体に残されためり込み痕から試験体の長軸方向の長さ d_1 (mm) および短軸方向の長さ d_2 (mm) を測定し、(14) 式から衝撃めり込み抵抗 H_y (kJ/m^2) を算出した。

$$H_y = \frac{4000M_b g h_s}{\pi d_0^2} \quad (14)$$

ここで g は重力加速度 ($9.8 \text{m}/\text{s}^2$)、 d_0 (mm) はめり込みの平均直径で d_1 と d_2 より (15) 式から求めた。

$$d_0 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad (15)$$

3. 結果と考察

3.1 製造したクスノキ合板の外観、香り、密度、平衡含水率

作成したクスノキ合板の外観 (Fig. 2) を観察したところ、最外層の合板表層の単板については生き節や割れが若干確認できた程度で切断時に生じた切断面の近くの傷以外に欠点は確認されず、利用上は特に問題ないと思われた。また、クスノキ材の特徴として樟腦 ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$) による独特の香りが挙げられるが、今回製造したクスノキ合板についてもクスノキ材と同様の香りが感じられた。香りの強さについては、製造直後は保管を行った恒温恒湿室内でかなり強い香りがしたものの、3 か月間の養生後は室内で香りをほとんど感じられず、合板自体も切断や削り出しといった加工をしなければほとんど香りは感じられなかった。

比熱測定に用いた試験体で求めたクスノキ合板の全乾密度、気乾密度はそれぞれ $598 \text{kg}/\text{m}^3$ と $656 \text{kg}/\text{m}^3$ であり、試験体の重量から算出した平衡含水率 (20°C 65%RH) は 9.7% であった。気乾密度の値はクスノキ材の文献値¹¹⁾ より高い値を示した。

3.2 曲げ性能について

Fig. 5 にクロスヘッド移動量を変位量とした場合の荷重変位曲線を、Fig. 6 に破壊時の試験体の様子を、Table 1 に得られた強度性能をそれぞれ示す。今回作成した合板の破壊は、 90° 方向の試験体では加力点間の曲げモーメント一定区間で第 8 層の破断によって破壊が生じていた。それに対して 0° 方向の試験体では加力点からわずかに端部によった部分で破壊が生じていた。破壊箇所を考慮すると、各試験体の破壊形態は 90° 方向の試験体は第 8 層の曲げ破壊、 0° 方向の試験体は第 9 層ないし第 8 層が曲げとせん断の影響を受けて破壊が生じたと考えられる。荷重変位曲線については 0° 方向と 90° 方向いずれの場合においても破壊に伴う急激な荷重の低下が確認された。

曲げ性能については、曲げヤング率平均値が 0° 方向で 4.8GPa、 90° 方向で 7.3GPa であり、曲げ強度平均値が 0° 方向で 24.1MPa、 90° 方向で 52.1MPa であった。今回作成したクスノキ合板は 0° 方向に用いた単板の厚さが 90° 方向に用いた単板厚よりも薄く、さらに仕上げの影響で

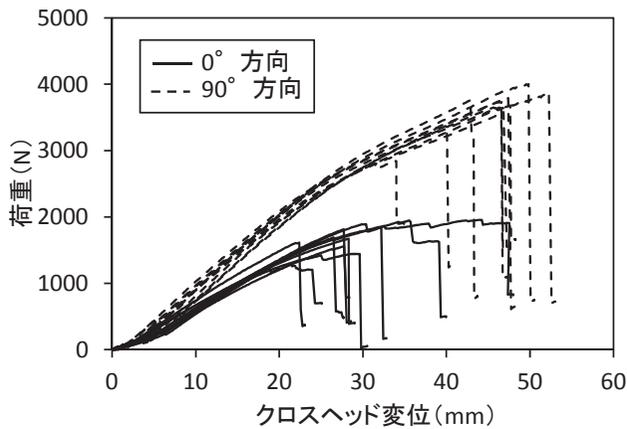


Fig. 5 曲げ試験におけるクスノキ合板の荷重変位曲線

Fig. 5 Load-displacement curves for Kusunoki plywood obtained in the bending test

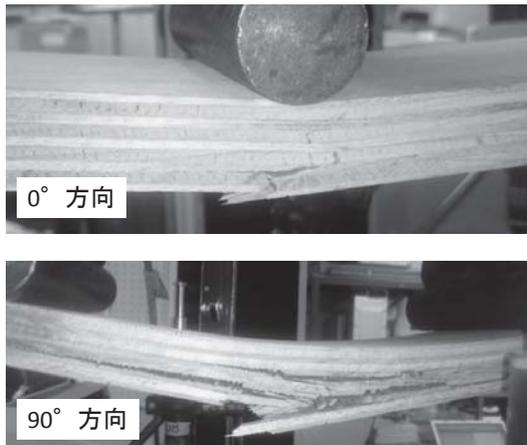


Fig. 6 曲げ試験終了時の試験体写真

Fig. 6 Pictures of specimens after the bending test

Table 1 合板の曲げ試験結果

Table 1 Results of the bending test

	ρ (kg/m ³)	u (%)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
0° 方向	646 (12.0)	9.5 (0.73)	4.8 (0.44)	24.1 (3.28)
90° 方向	635 (9.2)	9.3 (0.78)	7.3 (0.45)	52.1 (4.69)

(カッコ内は標準偏差)

(Standard deviations are in parentheses.)

曲げ性能に大きく影響する最外層の単板厚さが1mm程度となっているため I_0 に比べて I_{90} のほうが大きな値となっており、両者の違いは単板構成に由来する可能性がある。

曲げ試験結果から平行層理論によって得られたクスノキ単板の強度性能を Table 2 に示す。今

Table 2 クスノキ単板の平行層理論による強度推定値と同理論で推定されたスギ、ヒノキ、カラマツ、ラワン単板の強度性能の文献値

Table 2 Estimated MOE and MOR of Kusunoki veneer and literature values of Sugi, Hinoki, Karamatsu and Lauan veneer

		クスノキ	スギ ¹²⁾	ヒノキ ¹²⁾	カラマツ ¹²⁾	ラワン ¹³⁾
0°*	MOE (GPa)	12.0 (1.09)	9.09	11.5	12.3	10.2
	MOR (MPa)	59.7 (8.13)	42.3	62.8	54.4	82.0
90°**	MOE (GPa)	12.2 (0.76)	12.6	13.2	5.63	10.6
	MOR (MPa)	79.4 (7.14)	70.8	83.9	47.3	153.9

*: 合板の0°方向曲げ性能を基に推定した結果。

** : 合板の90°方向曲げ性能を基に推定した結果。

*: Bending properties of plywood in the parallel axis were used for the estimation.

** : Bending properties of plywood in the horizontal axis were used for the estimation.

回と同様に4点曲げ試験から算出されたスギ、ヒノキ、カラマツの単板強度¹²⁾と比較すると、ヤング率はこれらの樹種と同程度であり、曲げ強度についてはスギ、カラマツより値が大きくヒノキより若干小さな値となった。また、5~9層(厚さ13.2~27mm)のラワン合板の曲げ試験文献値¹³⁾から著者らが平行層理論により推定したラワン単板強度(単板厚は公称値を使用)との比較では、クスノキ単板の方がヤング率は10%ほど大きい一方で曲げ強度は0°方向と90°方向共に小さな値を示した。

また、0°方向と90°方向の単板の強度性能についてt検定を行ったところ、曲げヤング率については両者の間に有意差が認められなかった(自由度=18, t=0.52)。このことから、0°方向と90°方向に用いられた単板は基本的に同等であると言え、曲げ試験体で見られたヤング率の違いは単板構成のみに由来することが確認できた。その一方で単板の曲げ強度では1%水準で有意差が認められ(自由度=18, t=5.78)、90°方向のほうが大きな値を示した。この傾向は単板強度の文献値¹²⁾や合板の曲げ性能¹³⁾から推定した結果でも同様に確認されている。この傾向には先述した破壊形態の違いが影響している可能性も考えられ、更なるデータの蓄積による定量的な検討が待たれる。

3.3 接着耐久性について

接着力試験の結果をTable 3に示す。無処理試験体(平均含水率8.7%)の平均せん断強さが1.77MPaであったのに対して温冷水浸せき処理を受けた試験体のせん断強さは1.33MPaであった。また、温冷水浸せきを行った試験体において接着力試験前に目視にて剥離を確認したところ、多くの試験体で剥離は確認されず、確認された試験体でも剥離は最大1mm程度であった。今回の接着力試験における破壊は、ほぼ全ての試験体でFig. 4の1層しかない方の0°方向単板の引張りによるものであった。

せん断強度について詳しく見てみると、浸漬処理の有無に関わらず第2層や第8層が心板となった場合に比べて第4層や第6層が心板の場合の方がせん断強さが大きかった。心板が第4層や第6層の場合はFig. 4の1層しかない方の平行層は第5層であるが、心板が第2層や第8層の場合は第5層より薄い第1層や第9層であった。そのため、心板が第2層や第8層の試験体のせん断強度が小さい理由の一つとして破壊の生じた層が薄かったため、この層の引張強度が

Table 3 接着力試験で得られたせん断強さ
Table 3 Result of the adhesive strength test

		せん断強さ (MPa)		
		全試験体	裏割れの向き	
			順	逆
	無処理	1.77 (0.32)	1.71 (0.34)	1.81 (0.35)
温 冷 水 浸 せ き 処 理	全試験体	1.33 (0.27)	1.41 (0.26)	1.23 (0.25)
	心板が第2層	1.33 (0.25)	1.23 (0.31)	1.42 (0.15)
	心板が第4層	1.49 (0.21)	1.58 (0.12)	1.21 (0.16)
	心板が第6層	1.33 (0.31)	1.54 (0.14)	1.20 (0.35)
	心板が第8層	1.17 (0.25)	1.25 (0.30)	1.09 (0.20)

(カッコ内は標準偏差)
(Standard deviations are in parentheses.)

小さかったことが考えられる。

その一方で、得られたせん断強さは心板の層に関わらず JAS 規格における普通合板 2 類のせん断強さの基準 (クスノキの場合 0.7MPa 以上) をクリアすることが出来ていた。このことから、今回作成した合板は普通合板 2 類程度の接着力を保有することが確認できた。

3.4 熱物性について

Table 4 に全乾時の熱物性測定値を示す。木材の熱伝導率 λ (W/mK) と含水率 u (%) の間には正の相関があることが知られている¹⁴⁾が、クスノキ合板の熱伝導率と含水率の関係 (Fig. 7) についても同様に危険率 1% の検定により有意な相関が得られた ((16) 式)。

$$\lambda = 0.0016 \times u + 0.113 \tag{16}$$

Table 4 全乾クスノキ合板の熱物性
Table 4 Thermal properties of oven-dried Kusunoki plywood

	全乾密度 (kg/m ³)	測定値・計算値
熱伝導率	592 (6.7)	1.12 × 10 ⁻² W/mK (0.041 × 10 ⁻² W/mK)
比熱	598 (13.6)	1187 J/kgK (141 J/kgK)
熱拡散率	598*	1.58 × 10 ⁻⁷ m ² /s

*: 熱拡散率の算出には比熱試験体の全乾密度値を使用。(カッコ内は標準偏差)
*: Density of specific heat test specimens after oven-drying were used for thermal diffusivity calculations. (Standard deviations are in parentheses.)

全乾時の熱伝導率の平均値は 0.112 W/mK となったが、この値はクスノキ材の全乾時の熱伝導率の文献値 (0.095W/mK)¹¹⁾ よりやや大きな値となった。この理由としては接着層の影響と試料の密度がクスノキの文献値¹¹⁾ より大きかったことが考えられる。一方で、合板の熱伝導率設計値は気乾密度 420~660 (kg/m³) の範囲で 0.16W/mK¹⁵⁾ が示されている。(16) 式を基に気

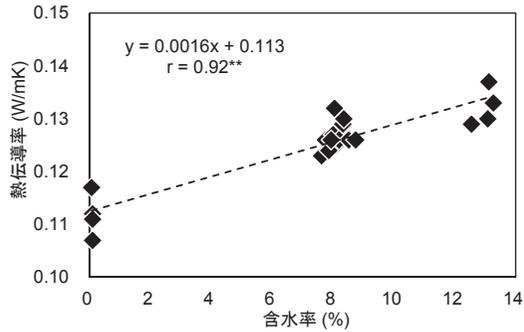


Fig. 7 クスノキ合板の熱伝導率と含水率の関係 **: $p < 0.01$

Fig. 7 Relationship between thermal conductivity and moisture content of Kusunoki plywood **: $p < 0.01$

乾状態の含水率を15%とすると今回のクスノキ合板の気乾時の熱伝導率は0.14W/mKとなり、設計値より若干低い値を示した。熱伝導率は値が小さいほうが高い断熱性を示すことから、クスノキ合板を用いた場合の断熱性について設計を行う際には、熱伝導率設計値をそのまま適用できると考えられる。

全乾時の比熱の平均値は1187 J/kgKであった。ここで全乾木材の比熱 C は (17) 式のような温度 θ (°C) との直線関係が見られ、含水率 $u\%$ の木材の比熱 C_u は全乾時の比熱 C_0 と水の比熱 C_w (4186J/kgK) から (18) 式で求められる¹⁶⁾。

$$C = 1122 + 4.89\theta \quad (17)$$

$$C_u = \frac{C_0 + C_w u/100}{1 + u/100} \quad (18)$$

今回測定した値は試料投入前の材温100°Cから投入後の最高水温24.5~28.0°Cへ変化させる熱量である。(17)式のような比熱と温度の関係が合板においても同様に成り立つと仮定すると、得られた比熱は両者の平均である65°C付近の比熱と考えられる。(17)式による65°Cにおける木材の比熱は1439J/kgKであり、クスノキ合板の比熱はこれに比べて小さな値であった。その一方で、気乾時(含水率15%)のクスノキ合板の比熱は(18)式に従うと1578J/kgKであり、合板(480kg/m³)の熱環境を設計する際に用いられる比熱の値1500J/kgK¹⁷⁾とほぼ同等の値であった。

全乾時の熱伝導率と比熱、密度の平均値から算出した気乾時の熱拡散率 a は $1.58 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ であった。ここで全乾密度の平均値には比熱の試験体の結果を用いた。文献¹⁷⁾では合板の熱拡散率は $5 \sim 8 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{h}$ とあり、クスノキ合板の熱拡散率を換算した値 $5.7 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{h}$ を比較すると設計値の範囲であることが確認できた。

以上をまとめると、今回得られた実験時から気乾時の合板の熱物性値を推定したところ、建築物の設計時に用いられる合板の熱物性の設計値と比較して比熱、熱拡散率は同等、熱伝導率はやや小さい値を示した。そのため、熱環境の面から見るとクスノキ合板は現在合板が使用されている場面で同様に使用することができることが明らかとなった。

3.5 衝撃めり込み抵抗について

衝撃めり込み抵抗の測定結果を Fig. 8 に示す。これを見ると、クスノキ合板の衝撃めり込み抵抗は学校用機の天板として利用されているメラミン樹脂貼 MDF などと比べて危険率 1% で有意に値が小さく、広葉樹合板と同程度であった。この結果よりクスノキ合板を機の天板として利用した場合には既往のカラマツ合板で作成した機と同様に傷やへこみが問題となると予想される。そのため、表面の加工を施すかある程度の傷やへこみの影響を覚悟した形での利用形態を考える必要があるであろう。

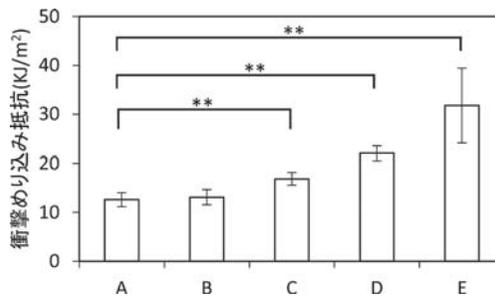


Fig. 8 衝撃めり込み抵抗試験の平均値。A:クスノキ合板, B:広葉樹合板, C:パーティクルボード, D:オレフィンシート貼りMDF, E:メラミン樹脂貼りMDF。(エラーバーは標準偏差を表す。**: $p < 0.01$)

Fig. 8 Results of resistance to impact indentation. A: Kusunoki plywood, B: hardwood plywood, C: particle board, D: medium density fiberboard coated with olefin sheet, E: melamine resin-surfaced medium density fiberboard. (Error bars show standard deviations. **: $p < 0.01$)

4. 結言

クスノキ合板の曲げ性能から試算した単板の強度性能はスギ、ヒノキ、カラマツ、ラワンといった樹種の単板強度性能の文献値に近い値を示した。

また、接着性能については接着剤に対応した基準である普通合板 2 級の水準をクリアした。

熱物性については合板の設計値と比較して熱伝導率はやや小さい値を、比熱、熱拡散率はほぼ同等の値を示した。これらの結果から、今回用いたクスノキ材は合板用材として十分な性能を持つと期待される。

また、衝撃めり込み試験の結果より、機の天板などとして利用する場合には表面にメラミン加工などの処理を施して耐衝撃性をあげる必要があると考えられた。

謝辞

本研究でのクスノキ合板製造における (株) キーテック・井上国雄氏、栗原和久氏の御尽力に対し、ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

1. 磯辺ゆう (2006) 奈良文化女子短期大学構内の植栽プランと主要な樹種について。奈良文化女子短期大学紀要 37: 15-26.

2. 堺俊彰・吉村武志 (2004) 大苗造林によるシカ食害対策に関する研究 (II) - 簡易な皮剥防護資材の効果 - . 徳島森研報 3 : 1-19.
3. 高槻成紀 (1989) 植物及び群落に及ぼすシカの影響. 日本生態学会誌 39 : 67-80.
4. 岩澤勝巳 (2010) 千葉県におけるシカ食害の樹種間差. 日本森林学会大会発表データベース 121 : 168-168.
5. 平井信二 (1996) 木の百科解説編 (18 クスノキ科, 朝倉書店, 東京). 214-216.
6. 高谷典良 (2000) 単板を硬くして性能に優れた合板を造る (その2) - 複合合板の性能について -. 林産試だより 1月号 : 1-7.
7. JIS Z2101 (2013) 木材の試験方法
8. 日本農林規格協会 (2004) 合板の日本農林規格
9. 森林総合研究所 (2004) 木材工業ハンドブック (9.4 合板の強度性能, 丸善, 東京). 606-609.
10. JIS A1412-2 (1999) 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定法
11. 森林総合研究所 (2004) 木材工業ハンドブック (2.7 主要樹種の性質表, 丸善, 東京). 192.
12. 渋谷龍也, 青木謙治, 戸田淳二, 田村彰, 望月亮, 星島康人, 木下武幸, 川喜多進 (2014) 国産針葉樹剤を用いたコンクリート型枠用合板の単板構成と曲げ性能の検討. 木材工業 69 : 110-114.
13. 浅野猪久夫, 都築一雄 (1963) 合板の強度的異方性について. 材料 12 : 761-768.
14. 平井信之 (1985) 木材の物理 (5.3 熱伝導性, 伏谷賢美, 岡野健編, 文永堂, 東京). 203.
15. 次世代省エネルギー基準解説書編集委員会 (2000) 住宅の次世代省エネルギー基準と指針. 73pp, 住宅・建築省エネルギー機構, 東京.
16. 森林総合研究所 (2004) 木材工業ハンドブック (2.3 木材の物理的性質, 丸善, 東京). 117.
17. 熱物性ハンドブック編集委員会 (1990) 熱物性ハンドブック (C.4.4 建築材料の熱物性値, 養賢社, 東京). 213.

要旨

東京大学の樹芸研究所には 100 年生のクスノキ (*Cinnamomum camphora*) 林がある。クスノキはかつてセルロイドの材料となる樟脳を採取するため需要があったが、現在はあまり利用されていない。本研究ではこのクスノキ林の間伐材の合板としての利用可能性を探るため、21mm 厚の合板を試作した。試作合板の曲げ性能については、最外層単板の繊維方向に平行方向と直交方向の MOR と MOE がそれぞれ 21.1MPa と 4.8GPa, 52.1MPa と 7.3GPa となった。平行層理論に基づきクスノキ単板の曲げ性能を推定したところ、MOE はスギ、ヒノキ、カラマツ、ラワン合板の文献値から推定した単板の曲げ性能と同程度、MOR についてはヒノキと同程度であった。合板の JAS 規格に基づき温冷水浸せき試験を行ったところ、得られたせん断強さは普通合板 2 類の基準を満たすものであった。全乾時の熱伝導率、比熱、熱拡散率はそれぞれ 0.112 (W/mK), 1187 (J/kgK), 1.58×10^{-7} (m²/s) となり、合板の熱環境の設計値と同等以上の値を示した。以上の結果から、今回用いたクスノキ間伐材は合板の原料として十分な性能を持つことが明らかとなった。

キーワード：クスノキ, 合板, 曲げ性能, 接着耐久性, 熱物性

Summary

The Kusunoki (*Cinnamomum camphora*) forest is in the Arbicultural Research Institute of the University of Tokyo Forest. Kusunoki was used as a feedstock for celluloid production, but nowadays, it has no industrial use. To examine the use Kusunoki as plywood, 21mm-thick plywood was manufactured from Kusunoki thinnings. The results obtained in a bending test

were; MOR of 24.1 and 52.1 MPa and MOE of 4.8 and 7.3 GPa in the parallel and horizontal axes respectively. MOE values of Kusunoki veneer were estimated by parallel ply theory, and were almost equal to the literature values of Sugi, Hinoki, Karamatsu and Lauan veneer. Bond durability was sufficient to meet the requirements of the JAS standard for type II plywood. Values of 0.112 (W/mK) thermal conductivity, 1187 (J/kgK) specific heat and 1.58×10^{-7} (m²/s) thermal diffusivity were obtained. These values are equal to or greater than literature values of plywood for dwelling environment design. Thus, Kusunoki plywood shows suitable properties for use in normal situations.

Keywords: *Cinnamomum camphora*, plywood, bending properties, bond durability, thermal properties