

愛知県産スギ・ヒノキ製材の曲げ強度特性

山崎真理子¹・杉本貴紀²・佐々木康寿²・榊原勝己³・山本勝洋⁴・鴨下直史⁴

地域産木材の利用推進とその強度上の信頼性の保証を目的として、現在市販されている愛知県産スギ、ヒノキの製材および比較対照としてベイマツ製材について実大曲げ試験による性能評価を行った。得られた知見は次の通りである。

1. 製材の曲げヤング率を機械等級区分法により評価すると、ヒノキはE90とE110がそれぞれ約40%を占め、スギはE70が約60%、E90が約40%を占めた。
2. ヒノキとスギの曲げ破壊強度はそれらの曲げヤング率との間に相関関係が見受けられ、ヒノキの曲げ破壊強度はスギ、ベイマツと比べて大きかった。
3. ベイマツの曲げ破壊強度は、ヒノキやスギと比べてヤング率のわりに小さく、また個体間の差が大きかった。これに対して、スギは曲げヤング率は小さいものの、曲げ破壊強度はベイマツと同程度であった。
4. 製材の曲げ挙動における「ねばり」の性能に関して、たわみエネルギーおよびエネルギー吸収率を用いて検討した結果、スギは高い「ねばり」性能を有するのに対して、ベイマツは「ねばり」性能が低く、むしろ脆性的であることが示された。
5. 応力波伝播速度を用いたヤング率と曲げヤング率の間には高い相関関係が認められ、応力波を用いたヤング率の測定方法の有効性が示唆された。

キーワード：地域産製材，実大曲げ試験，MOE，MOR，機械等級区分

1. 緒言

現在、我が国の森林資源は人工林を中心にその蓄積量が充実し、利用段階に入っている（農林水産省林野庁 2006a）。しかしながら、国内の木材自給率は用材全体で2割程度（平成16年18.4%、平成17年20.0%）と低い水準である（農林水産省林野庁 2006b）。国産材の利用の停滞が林業の衰退や間伐の遅れを悪化させ、その結果森林の公益的機能の発揮にも悪影響が生じている。一方で、輸入材はその輸送等に多大なエネルギー消費を伴っており、国産材の利用と比べて高い環境負荷を及ぼすものである。京都議定書目標達成計画においては、森林吸収源対策として木材及び木質バイオマス利用の推進を図ることが求められているが（農林水産省林野庁 2006a）、CO₂排出量を削減するためには、とりわけ国産材の一層の利用推進に取り組む必要性が高まっている。

こうした背景から、現在、地域産材の積極的な活用を促す活動が国内各地で起こっている（たとえば、飯島 1983；飯島ら 1997；小泉ら 1997；朱ら 2003；津島ら 2005）。一方で、近年の

建築基準法の改正および品確法の施行により、住宅業界では構造性能の保証に対する取り組みが重要となっており、製材の強度保証においても従来の目視区分法から機械等級区分法への移行が求められている。特に、人工林の中で蓄積量が増加し、利用拡大が急務となっているスギ材は、その基本的な物性や力学的性質が地域や産地によって大きく異なることが指摘されており（飯島 1983；日本木材学会スギ分科会 1991）、構造用材として利用するためには各地域でその特性を把握することが重要である。

本研究は、地域産材の活用を促進することにより、地域林業の活性化と健全な森林資源の育成を目的として、地域産針葉樹材が有する構造用材としての性能を明らかにし、強度上の信頼性を保証しようとするものである。具体的には、愛知県産スギ・ヒノキ製材の実大曲げ試験を実施し、これらの材の曲げ性能を明らかにした。

¹名古屋大学大学院生命農学研究科 生物材料工学研究分野（現 名古屋工業大学）

¹ Laboratory of Biomaterial Engineering, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan
(Present address: Nagoya Institute of Technology)

² 名古屋大学大学院生命農学研究科 生物材料工学研究分野

² Laboratory of Biomaterial Engineering, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

³ 株式会社 明城

³ Meijyou Co., Ltd., Anjo 444-1202, Japan

⁴ 愛知県森林・林業技術センター

⁴ Aichi Prefectural Institute of Forestry and Forest Products, Shinshiro 441-1622, Japan

(受理：2006年12月1日)

2. 試験方法

2.1. 試験体

実験には、愛知県産スギ (Japanese cedar: *Cryptomeria japonica* D. Don) (平均年輪幅 5.0 ± 1.3 mm), 同ヒノキ (Japanese cypress: *Chamaecyparis obtusa* Endl.) (平均年輪幅 3.4 ± 1.0 mm), およびこれらの比較対照としてベイマツ (Douglas-fir: *Pseudotsuga menziesii*) (機械等級区分法の E110 認定材, 平均年輪幅 4.8 ± 1.2 mm) の各製材 (表面仕上げ加工, いずれも市場流通品) 合計 71 体を供した。試験体の寸法は 120 mm (材幅 b) \times 200 mm (材背 h) \times 4000 mm (材長) である。供試材の乾燥条件について, 愛知県産ヒノキ材およびスギ材については高温乾燥法 (新柴設備製蒸気式乾燥機を用いた 7 日間の釜入れによる) (ヒノキ: HHD, スギ: SHD), 180 日以上天然乾燥法 (ヒノキ: H180, スギ: S180), および 30 日以下の天然乾燥法 (ヒノキ: H30, スギ: S30) の 3 種類の方法で行われており, また比較対照のベイマツ材は高温乾燥法 (新柴設備製蒸気式乾燥機を用いた 14 日間の釜入れによる) (BHD) で行われたものである。表 1 に, 各試験条件に供した試験体の試験体数, 密度, 材料表面の含水率 (以後, 含水率とする) の平均値と標準偏差を示す。含水率は, 差込式 4 針センサーを有する直流電気抵抗式水分計 (Kett 製 MT-8A 型, 測定範囲 7 ~ 35%, 測定精度 $\pm 0.5\%$) を用いて, 1 試験体について材料上面 3 箇所 (材幅方向の中央部, 材端より 100 mm, 2000 mm, 3900 mm の位置) と材料側面 3 箇所 (材背方向の中央部, 材端より 100 mm, 2000 mm, 3900 mm の位置) の計 6 箇所を測定した。表 1 には, 各個体内の含水率 (6 箇所の測定値) の標準偏差および変動係数についても試験条件ごとに平均値と標準偏差をまとめた。なお, 表 1 に示すよ

うに試験条件によっては含水率の高いものもあるため, 参考として全乾密度 (含水率 0% への補正值) を併せて示す。

2.2. 曲げ試験

実大曲げ試験は ISO 標準試験法による 3 等分点 4 点荷重方式で行った (日本建築学会 2003)。試験体は単純支持とし, 支持点間距離 (曲げ試験のスパン L) は梁背の 18 倍である 3600 mm とした。また, 負荷点間距離は 1200 mm, 試験体の張出し部分は 200 mm とした。荷重は, 実大強度試験機 (島津製作所製 UH-G1000kNA, 最大容量: 1000 kN) を用いて定速変位速度 20 mm/min のストローク制御で行い, 最大荷重に達するまでに要した時間は 3 ~ 5 分であった。試験機付属のロードセルから曲げ荷重を, 試験体中央下部に設置した変位計から曲げたわみをそれぞれデータロガーを介して測定し, これらをパーソナルコンピュータに取り込み記録した。

測定した荷重 P と中央部曲げたわみ δ の関係から, 曲げヤング率 MOE および曲げ破壊強度 MOR は以下の式で算出した。

$$\text{曲げヤング率 MOE: } \text{MOE} = a(3L^2 - 4a^2) \cdot (P_2 - P_1) / \{48I(\delta_2 - \delta_1)\}$$

$$\text{曲げ破壊強度 MOR: } \text{MOR} = aP_{\text{ult}} / (2Z)$$

ここで,

I: 断面二次モーメント。長方形断面では材幅を b, 材背を h として $bh^3/12$

$P_2 - P_1$: 荷重-たわみ曲線の直線部分の荷重の増分

$\delta_2 - \delta_1$: $P_2 - P_1$ に対応する部分のたわみの増分

a: 支点から荷重点までの距離 (=1200 mm)

L: スパン (=3600 mm)

P_{ult} : 最大荷重

表 1. 供試材の物理的・機械的性質

Table 1. Physical and mechanical properties of each testing condition

Group	Species	Drying process	Number of specimens	Density (kgf/m ³)	Absolute dry density (kgf/m ³)	MC (%)	S.D. of MC (%)	C.V. of MC (%)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	P_{ult} (kN)	δ_{ult} (mm)	$\delta_{\text{B.P.}}$ (mm)	Deflection energy (kN·mm)	Absorptivity of energy	E_v (GPa)	E_v (GPa)
HHD	Japanese cypress	High temperature drying	10	568.4	481.8	18.0	3.8	20.8	10.5	43.5	57.6	109.5	179.4	4532	0.7	12.7	10.8
				29.5	28.3	2.0	1.6	8.8	1.6	6.8	8.9	35.9	78.5	1009	0.1	1.4	1.3
H180	Japanese cypress	Natural drying for 180 days	10	544.2	456.6	19.2	0.9	4.8	10.3	38.2	50.8	61.5	95.4	2596	0.4	11.5	9.6
				33.1	25.3	3.8	0.6	3.2	1.2	5.6	7.4	16.0	50.9	1216	0.2	1.2	1.0
H30	Japanese cypress	Natural drying for 30 days	10	562.0	459.1	22.5	0.9	4.0	10.1	41.6	55.1	81.7	105.7	3362	0.5	11.7	9.6
				18.2	20.8	2.8	0.8	3.3	1.1	7.5	9.6	27.7	50.9	1678	0.2	0.9	0.8
SHD	Japanese cedar	High temperature drying	10	540.3	445.4	21.5	7.1	33.7	8.0	35.4	47.0	104.0	231.3	3691	0.7	8.6	7.1
				59.0	51.0	5.5	3.3	14.0	0.5	3.1	4.2	24.0	79.2	869	0.1	0.6	0.7
S180	Japanese cedar	Natural drying for 180 days	11	561.8	440.2	27.5	4.3	15.7	7.4	35.2	46.8	118.2	184.1	3505	0.6	7.9	6.2
				70.8	52.2	2.6	1.7	6.0	1.0	3.9	5.1	30.5	70.8	771	0.1	0.9	0.6
S30	Japanese cedar	Natural drying for 30 days	10	603.7	482.4	26.6	3.6	13.9	7.9	37.3	49.5	96.2	154.8	3634	0.6	8.2	6.5
				72.1	48.1	3.2	1.9	7.9	1.6	5.6	7.4	25.0	58.1	1047	0.1	1.6	1.5
BHD	Douglas fir	High temperature drying	10	507.9	444.2	14.3	1.1	7.9	12.6	34.8	46.7	50.3	71.8	1972	0.3	14.5	12.6
				48.1	42.1	0.9	0.5	3.3	2.1	9.8	13.2	17.3	39.2	1565	0.2	2.8	2.5

Note: Upper case numbers indicate average values and lower case numbers indicate standard deviations.

Legend: Absolute dry density: Density corrected by moisture content (MC=0%)

MC: Moisture content

S.D. of MC: Standard deviation of measurements values of moisture content for each specimen

C.V. of MC: Coefficient of variation of measurements values of moisture content for each specimen

P_{ult} : Ultimate load

δ_{ult} : Deflection at ultimate load

$\delta_{\text{B.P.}}$: Deflection at breaking point

Deflection energy: Deflection energy before 120mm deflection

Absorptivity of energy = Deflection energy before 120mm deflection / ($P_{\text{ult}} \times 120\text{mm}$)

Z: 断面係数。長方形断面では $bh^2/6$ である。

2.3. 統計解析

本報では、試験条件間の性能の差異について等分散性の検定、分散分析（等分散性が認められた場合のみ）、および多重比較を行った。等分散性が認められた場合の多重比較法には Bonferroni 法を、等分散性が有意に棄却された場合の多重比較検定法には Dunnett T3 法を用いた。以上の統計解析には、SPSS 社製統計解析ソフト「SPSS for Windows (Version 10)」を用いた。

樹種特性に関する検討では高温乾燥法を用いた条件群間 (HHD, SHD, BHD) における差異を、また乾燥条件間の差異の検討ではヒノキ 3 条件群間 (HHD, H180, H30) およびスギ 3 条件群間 (SHD, S180, S30) におけるそれぞれの差異を調べた。

3. 結果と考察

実験の結果得られた、曲げヤング率 MOE、曲げ破壊強度 MOR、最大荷重 P_{ult} 、最大たわみ（最大荷重時のたわみ） $\delta_{P_{ult}}$ 、

破壊たわみ（最大荷重到達後の試験体破壊時のたわみ） $\delta_{B.P.}$ 、たわみエネルギー（3.2.4 項で詳説）、エネルギー吸収率（3.2.4 項で詳説）、および応力波伝播速度測定によるヤング率として、含水率補正を行っていない密度を用いて計算した E_v と全乾密度（含水率 0% とする補正值）を用いて計算した E_v' のそれぞれについて、平均値と標準偏差を表 1 に示す。また、表 2 には、各特性値における樹種間の差異および乾燥条件間の差異を統計解析により調べた結果を示す。なお、全試験体の個別の性能を付表にまとめた。

以下に各性能について詳述する。ここで、本報では箱ヒゲ図 (box and whisker plot) を用いた図示を行うが、箱ヒゲ図の定義は次の通りである。各ボックスはデータの 50% を囲み、ボックス中のラインはデータの中央値を表示する。ボックスの上下ラインはデータ母集団の $\pm 25\%$ の限界を示し、これらをそれぞれ上四分位値 (UQ)、下四分位値 (LQ) とする。また、これらの差 (UQ - LQ) を四分位点間距離 (IQD) とする。バー (縦線) の上下ラインは、それぞれ (UQ + 1.5 × IQD) 値と (LQ - 1.5 × IQD) 値を示し、この範囲外にある値を外れ値として個々のプロットで表示する。

表 2. 物理的・機械的性質の差異に関する統計解析結果

Table 2. Results of statistical analysis

Property	Comparative item	Homogeneity	Analysis of variance	Multiple comparison	
MC	Species	1%	-	HHD-BHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	NS	1%	HHD-H30 (1%)
		Japanese cedar	5%	-	SHD-S180 (5%)
C.V. of MC	Species	5%	-	HHD-SHD (5%), HHD-BHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	1%	-	HHD-H180 (1%), HHD-H30 (1%)
		Japanese cedar	NS	1%	SHD-S180 (5%), SHD-S30 (1%)
MOE	Species	5%	-	HHD-SHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	NS	NS	
		Japanese cedar	5%	-	
MOR	Species	1%	-	HHD-SHD (5%)	
	Drying process	Japanese cypress	NS	NS	
		Japanese cedar	NS	NS	
$\delta_{P_{ult}}$	Species	5%	-	HHD-BHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	5%	-	HHD-H180 (1%)
		Japanese cedar	NS	NS	
$\delta_{B.P.}$	Species	NS	1%	HHD-BHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	NS	1%	HHD-H180 (5%), HHD-H30 (5%)
		Japanese cedar	NS	NS	
Deflection energy	Species	NS	1%	HHD-BHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	NS	5%	HHD-H180 (1%)
		Japanese cedar	NS	NS	
Absorptivity of energy	Species	NS	1%	HHD-BHD (1%), SHD-BHD (1%)	
	Drying process	Japanese cypress	5%	-	HHD-H180 (1%)
		Japanese cedar	NS	NS	

Note: 1% and 5% mean the differences between the two are at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ level of significance, respectively. NS means the difference of them is not statistically significant.

Legend: MC: Moisture content

C.V. of MC: Coefficient of variation of measurements values of moisture content for each specimen

$\delta_{P_{ult}}$: Deflection at ultimate load

$\delta_{B.P.}$: Deflection at breaking point

Deflection energy: Deflection energy before 120mm deflection

Absorptivity of energy = Deflection energy before 120mm deflection / ($P_{ult} \times 120\text{mm}$)

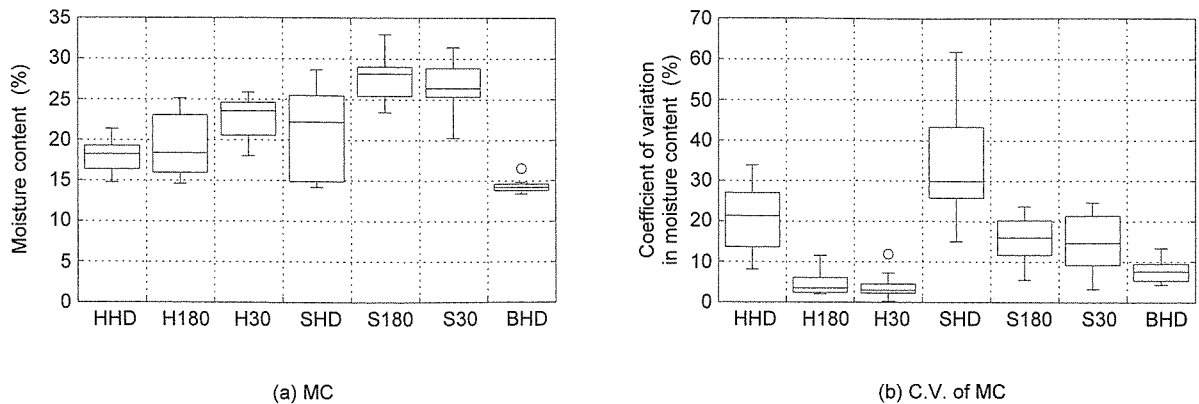


図1. 含水率

Fig. 1. Moisture content of each test condition

3.1. 含水率

図1は各試験条件の含水率に関する箱ヒゲ図を示す。図1(a)は平均値に関する図、図1(b)は個体内の測定値の変動係数に関する図である。

図1(a)より、ヒノキ、スギともにベイマツと比べて含水率の高いことがわかる(表2より1%有意)。特に、天然乾燥法によるものとスギにおいてその傾向が顕著である。スギはいずれの乾燥条件によるものも平均含水率が20%を超えており(表1)、また、天然乾燥法により180日を経過しても30日のものと比べて含水率に違いは見られない。スギは水分が抜けにくく乾燥が難しいといわれているが、今回用いた試験体からもその傾向が視われた。これらの材は曲げ破壊後の破面にぬれが確認されており、未乾燥状態であった可能性が高い。一方、ヒノキでは、いずれの乾燥条件においてもスギより平均含水率が低く、また、天然乾燥法により180日を経たものは30日のものより含水率が低くなる傾向が見られた(表1)。ただし、これらの傾向に有意差は認められない(表2)。

表1および図1(a)によれば、ヒノキ、スギともに高温乾燥法による試験体の平均含水率は天然乾燥法によるものと比べて低いものの、一方では、図1(b)に示すように、高温乾燥法による試験体は個体内の測定値のバラツキが大きかった。

3.2. 曲げ性能

3.2.1. 荷重とたわみの関係

全試験体の荷重-たわみ関係を図2に示す。これより、曲線の形状、すなわち荷重に対する試験体の変形挙動に関して、乾燥条件間の差異は見られないが、樹種特性の影響は大きいようである。概して、スギは最大荷重到達後すぐに崩壊せず徐々に荷重が低下するような挙動を示しており、「ねばり」があると判断される。これに対して、ベイマツは最大荷重到達後急激に折損、破壊に至っており、「脆い」性状を示すと判断される。また、樹種によらず、曲げ試験の引張側に大きな節が存在するとほぼ決定的に「脆い」性状を示しており、変形挙動に及ぼす節の配置の影響が見られた。

3.2.2. 曲げヤング率

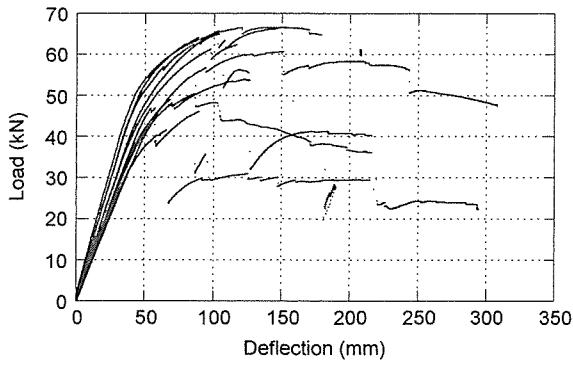
図2の荷重-たわみ曲線の初期傾斜より曲げヤング率(MOE)を算出し、これに関する箱ヒゲ図を図3に示す。なお、本実験に用いたベイマツはあらかじめJASによる機械等級区分法によりE110と認定された製材品である。

図3および表2より、曲げヤング率に関して乾燥条件間の差異は見受けられない。ヒノキの曲げヤング率は乾燥条件によらず約10 GPa程度(平均値±標準偏差で 10.3 ± 1.3 GPa)であり、スギは約7.5~8 GPa(同 7.7 ± 1.1 GPa)である。また、JASによる機械等級区分では、ヒノキはE90が全30体中の40.0%、E110が同43.3%、E130が同16.7%となり、スギはE70が全31体中の58.1%、E90が38.7%、E110が3.2%となった。このように、スギは全体にヤング率が小さく、ヒノキ、ベイマツに対して有意な違いが認められた(表2より1%有意)。一般にスギのヤング率はヒノキと比べて小さいことが知られているが、本実験でも同様の結果となった。

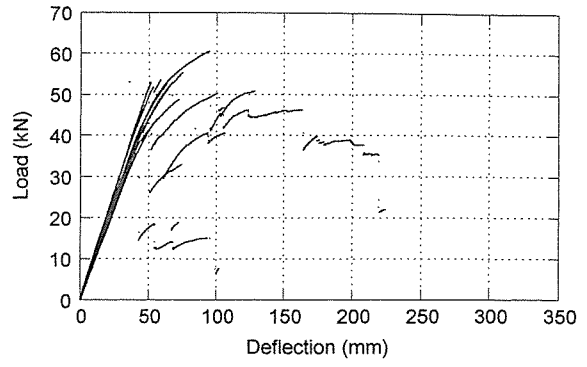
3.2.3. 曲げ破壊強度

図4には曲げ破壊強度(MOR)に関する箱ヒゲ図を、また図5には曲げヤング率と曲げ破壊強度の関係を示す。

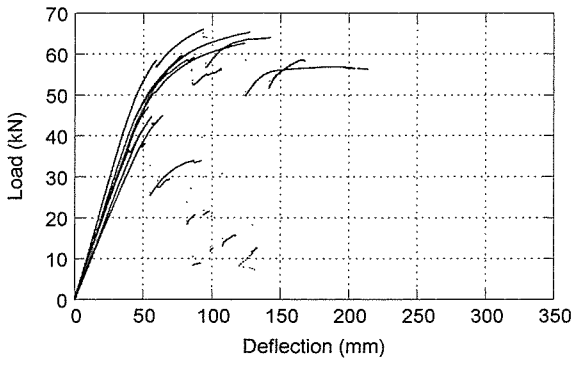
図4および表1に示した曲げ破壊強度の標準偏差をみると、曲げ破壊強度は図3に示した曲げヤング率と比べて大きいバラツキを示すことがわかる。これは、材質に加えて節の配置といった個々の試験体が有する欠点が影響したためと考えられる。曲げ破壊強度に関して、乾燥条件間の差異は曲げヤング率の場合と同じく認められず、また、曲げヤング率についてはスギとヒノキ、スギとベイマツの間で有意な違いが認められたが、曲げ破壊強度についてはスギとヒノキの間でのみ有意な違いが認められた(表2より5%有意)。すなわち、ベイマツはヤング率が大きいわりに曲げ破壊強度が小さいといえる。建築基準法ではベイマツの基準強度特性値を同程度の曲げヤング率を持つヒノキやスギと比べて小さく規定しており、本実験結果もこれに即したものとなった。さらに、図5(a)および表1に示すように、ベイマツは曲げ破壊強度のバラツキが全試験条件の中で最も大きく、全試験体中の最小値と最大値がともにベイマツ



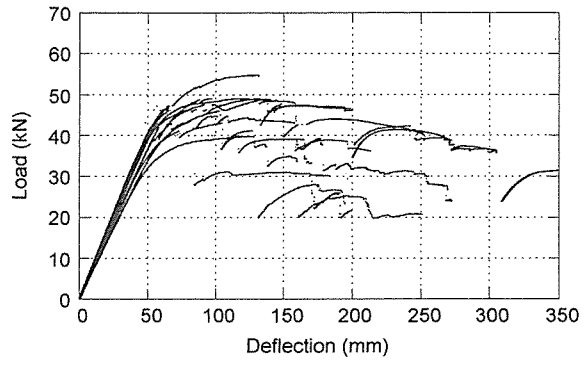
(a) HHD



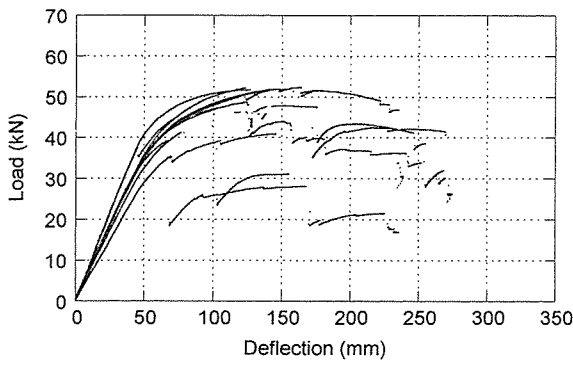
(b) H180



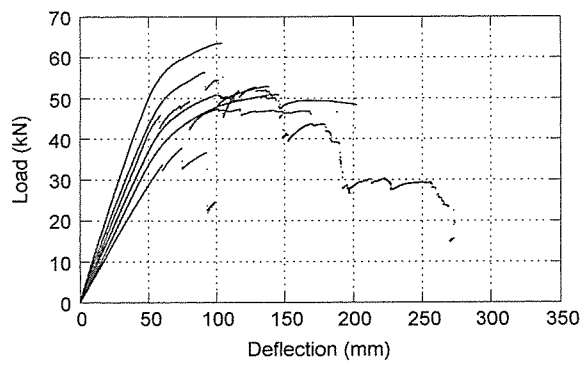
(c) H30



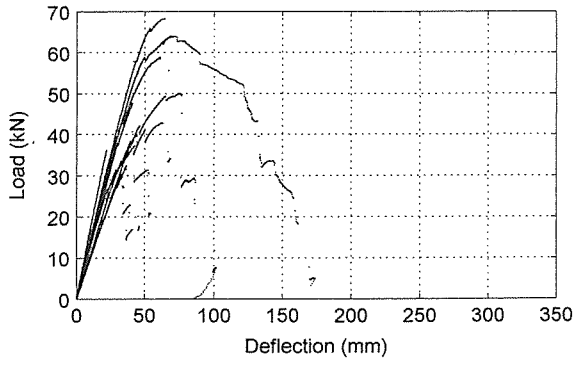
(d) SHD



(e) S180



(f) S30



(g) BHD

図 2. 曲げ試験時の荷重—たわみ関係

Fig. 2. Relationships between load and deflection in the bending tests

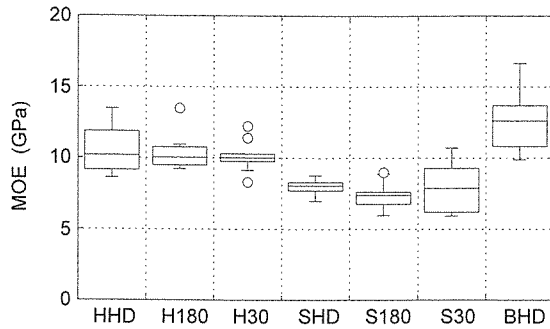


図 3. 曲げヤング率

Fig. 3. Modulus of elasticity (MOE) of each test condition

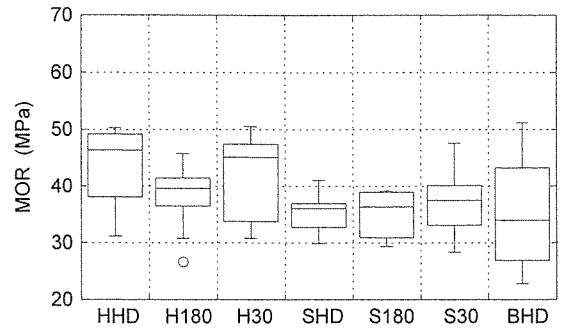
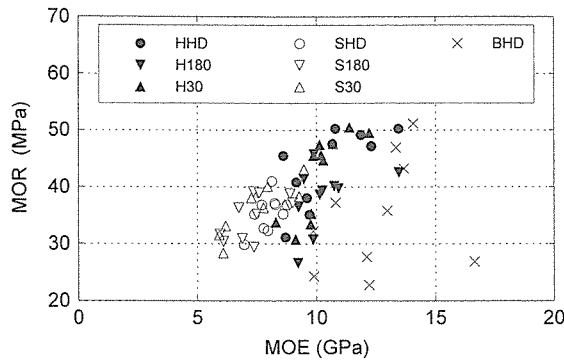
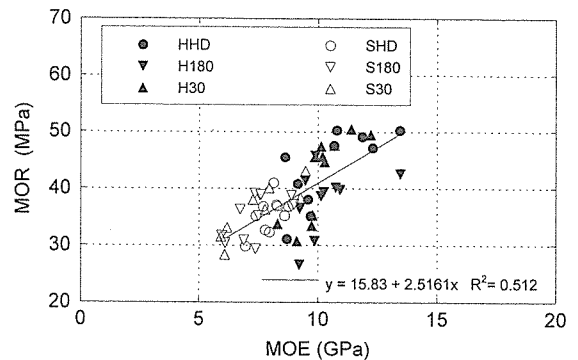


図 4. 曲げ破壊強度

Fig. 4. Modulus of rupture (MOR) of each test condition



(a) All data



(b) Japanese cypress and Japanese cedar

図 5. 曲げヤング率と曲げ破壊強度の関係
Fig. 5. Relationships between MOE and MOR

であるなど、品質の安定性に欠けていた。一般に、曲げヤング率と曲げ破壊強度の間には比例的な関係があるといわれているが、図 5(a) ではベイマツの結果がその相関性を低減させている (決定係数 $R^2=0.15$)。これに対して、図 5(b) に示すように、ベイマツの結果を除いてヒノキとスギの結果だけで曲げヤング率と曲げ破壊強度の相関性を調べたところ、決定係数は $R^2=0.51$ となり、曲げヤング率と曲げ破壊強度の間にある程度の比例関係が認められた。

個々の試験体について曲げ性能を詳細に調べるために、建築基準法で規定された基準強度特性値 (森林総合研究所 2001) との比較を行った。その結果、基準強度特性値を下回った試験体数はヒノキ 3 体 (全 30 体中の 10%)、スギ 2 体 (全 31 体中の 6.5%)、ベイマツ 4 体 (全 10 体中の 40%) であり、また、これらの試験体の基準強度特性値に対する強度比は、ヒノキ 80.1~91.0%、スギ 92.9~96.4%、ベイマツ 74.5~90.5% であった。以上のことから、ベイマツは品質の安定性が低く、これに比べて特にスギは品質安定性が高いといえる。

3.2.4. 曲げ挙動における「ねばり」の評価

以上の結果から、ベイマツは曲げヤング率と比べて曲げ破壊強度が小さく、かつ脆性的な挙動を示すのに対して、スギは曲げヤング率は小さいものの曲げ破壊強度はベイマツと同程度で

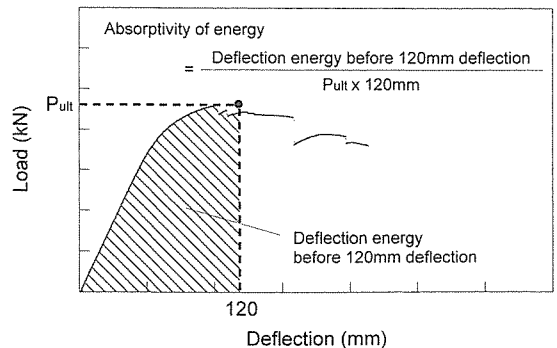


図 6. 所定たわみ (120 mm) に到達するまでのエネルギー吸収率に関する模式図

Fig. 6. Schema of deflection energy before 120 mm and absorptivity of energy

あり、かつその変形挙動はねばりの強い (靱性が高い) のものであることが本実験でも確認された。

このような変形挙動の違いに関して、「ねばり」を数値化することは難しく、標準化された評価方法はない。そこで、本研究では、ある一定の曲げ変形量 (ここでは、曲げ試験のスパン 3600 mm の 1/30 に相当する 120 mm とした) に達するまでに吸

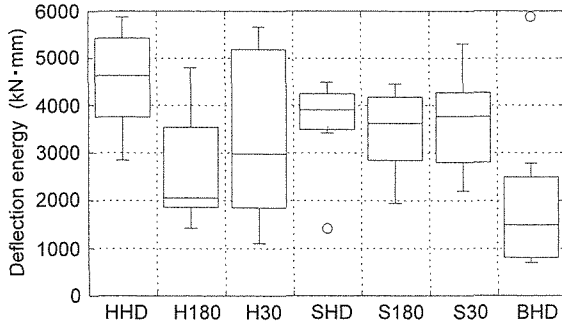


図7. たわみエネルギー

Fig. 7. Deflection energy before 120 mm deflection of each test condition

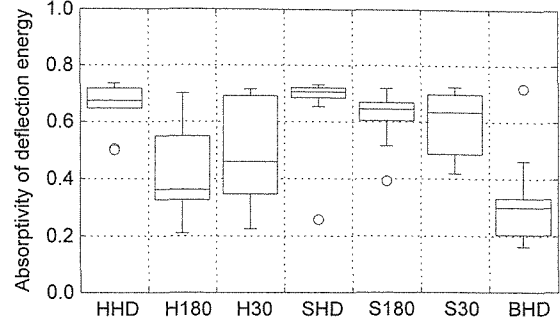


図8. エネルギー吸収率

Fig. 8. Absorptivity of energy of each test condition

Legend: Absorptivity of energy

$$= \text{Deflection energy before 120 mm deflection} / (\text{Ultimate load} \times 120 \text{ mm})$$

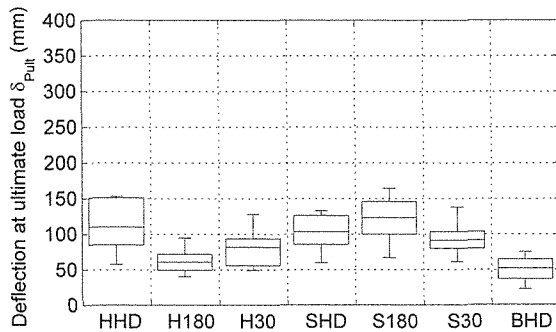
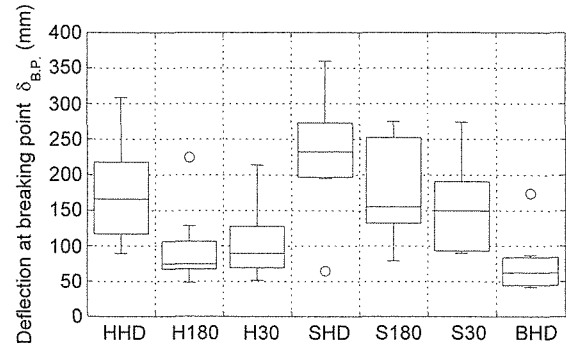
(a) Deflection at ultimate load $\delta_{P_{ult}}$ (b) Deflection at breaking point $\delta_{B.P.}$

図9. 最大たわみおよび破壊たわみ

Fig. 9. Deflection at ultimate load and deflection at breaking point of each test condition

収するエネルギー（たわみエネルギー＝荷重－たわみ曲線をたわみで積分した値＝図6に示す模式図中の斜線で囲まれた部分の面積）を計算し、そのエネルギー吸収率を評価して、樹種特性と乾燥条件間の差異を調べた。エネルギー吸収率は以下のように定義する。

エネルギー吸収率

$$= \text{たわみ量 120 mm までのたわみエネルギー} / (\text{各試験体の最大荷重} \times \text{たわみ量 120 mm})$$

図7にたわみエネルギーに関する箱ヒゲ図を、図8にエネルギー吸収率に関する箱ヒゲ図を示す。また、これに関連して、図9(a)には最大たわみ（最大荷重到達時のたわみ量） $\delta_{P_{ult}}$ 、図9(b)には破壊たわみ（最大荷重到達後の試験体破壊時のたわみ） $\delta_{B.P.}$ に関する箱ヒゲ図を示す。図7, 8および表1より、たわみエネルギーおよびエネルギー吸収率に関して最も高い性能を示したのはヒノキの高温乾燥材（HHD）である。HHDは、最大荷重 P_{ult} 、最大たわみ $\delta_{P_{ult}}$ 、破壊たわみ $\delta_{B.P.}$ のいずれも大きく、その結果として高い性能を示したと考えられる。樹種でみる

と、スギはいずれの乾燥条件でも最大たわみに比べて破壊たわみがかなり大きく、その結果、たわみエネルギー 3500 kN・mm以上、エネルギー吸収率 0.6以上の性能を示した（表1）。したがって、スギの「ねばり」の性能は全体に高いと評価できる。これに対して、ベイマツは、図2に示した荷重－たわみ曲線および図9(a), (b)からも分かるように、最大たわみと破壊たわみがほぼ同程度であり、最大荷重到達後ほぼすぐに試験体の破断に至った。その結果として、ベイマツはたわみエネルギー（図7）、エネルギー吸収率（図8）ともにヒノキ、スギと比べて小さく（表2より1%有意）、すなわち、「ねばり」の性能は低いと判断される。

図7, 8に関して乾燥条件間の差異をみると、ヒノキ、スギともに高温乾燥と比べて天然乾燥では「ねばり」の性能が低いようである（ただし、有意差が認められたのはHHDとH180の間だけである）。この原因として、天然乾燥法による試験体の含水率の高さが考えられるが、表1では必ずしも含水率と最大荷重や破壊ひずみの間に明確な傾向は見受けられない。

4. 応力波伝播速度によるヤング率と曲げヤング率の関係

ところで、材料中を伝播する応力波の速度と材料の密度が分かればヤング率を求めることができる。応力波伝播速度は、市販のハンディタイプの測定機により非常に簡便かつ正確に（測定誤差や人的変動が少ない）測定することが可能であり、もしこれにより製材品の曲げ性能を評価することができれば、製材品の品質保証化を促進する上でその有用性は高いと考えられる。そこで、本実験では曲げ試験前に応力波伝播速度を測定し、これと密度を用いて得られたヤング率について曲げヤング率との関係を調べた。

4.1. 応力波伝播速度の測定およびヤング率の算出方法

応力波伝播速度の測定には、ハンディタイプの応力波伝播時間測定機（FAKOPP）を使用した。本機は、2個の共鳴式センサー（打ち込み専用、受信用）を有し、打ち込み専用センサーに衝撃を加えることにより発生したエネルギー（応力波）が受信用センサーに到達するまでの時間（ μs ）を測定するものである（測定精度 $\pm 1 \mu\text{s}$ ）。応力波伝播速度の測定は、2個のセンサーをそれぞれ材料上面の両端（木口面）から各 100 mm、材幅方向の中央部の位置に打ち込み、行った。センサー間距離 l は 3800 mm である。

2個のセンサー間の距離 l と応力波伝播時間 t から応力波伝播速度 v を求め、これと試験体の密度 ρ から材料のヤング率 E_v は以下の式で得られる。

$$E_v = \rho \cdot v^2 = \rho \cdot (l/t)^2$$

ここでは、本実験に供した試験体の多くが含水率の高い状態であったことを考慮して、試験時の重量と試験体の体積から算出した密度を用いたヤング率 E_v と、含水率 0% に補正した密度を用いたヤング率 E_v' を求めた。

4.2. 応力波伝播速度によるヤング率と曲げヤング率の比較

応力波伝播速度によるヤング率と曲げヤング率との関係を図 10 に示す。図 10(a) は試験時の密度によるヤング率 E_v と曲げヤ

ング率の関係、図 10(b) は含水率 0% に補正した密度によるヤング率 E_v' と曲げヤング率の関係である。図 10(a), (b) のいずれの場合も、応力波伝播速度によるヤング率と曲げヤング率の間には非常に高い相関関係が認められ（決定係数 $R^2=0.89$ ）、応力波を用いた測定方法の有効性が示唆される。

図 10(a) と図 10(b) を比較すると、図 10(a) では応力波伝播速度によるヤング率 E_v は曲げヤング率に対して若干過大評価になる傾向が見受けられるのに対して、図 10(b) ではその傾向が是正されて両者（ E_v' と曲げヤング率）の適合度が向上しているようである。しかし、個々の試験体の結果を詳細に調べると、試験時の密度を用いたヤング率 E_v に対する曲げヤング率の比は全試験体の平均 \pm 標準偏差で 0.90 ± 0.07 （最小値 0.72 ~ 最大値 1.06）となるのに対して、含水率 0% に補正した密度によるヤング率 E_v' に対する曲げヤング率の比は同 1.09 ± 0.11 （最小値 0.84 ~ 最大値 1.38）であり、 E_v と E_v' のいずれの適合性がより高いかは言及できない。

5. 結論

地域産木材の利用推進を目的として、現在市販されている愛知県産スギおよびヒノキの製材について実大曲げ試験による性能評価を行った。得られた知見は次の通りである。

1. 製材の曲げヤング率を機械等級区分法により評価すると、ヒノキは E90 と E110 がそれぞれ約 40% を占め、スギは E70 が約 60%、E90 が約 40% を占めた。
2. ヒノキとスギの曲げ破壊強度はそれらの曲げヤング率との間に相関関係が見受けられ、ヒノキの曲げ破壊強度はスギ、ベイマツと比べて大きかった。
3. ベイマツの曲げ破壊強度は、ヒノキやスギと比べてヤング率のわりに小さく、また個体間の差が大きかった。これに対して、スギは曲げヤング率は小さいものの、曲げ破壊強度はベイマツと同程度であった。
4. 製材の曲げ挙動における「ねばり」の性能に関して、たわみエネルギーおよびエネルギー吸収率を用いて検討した結

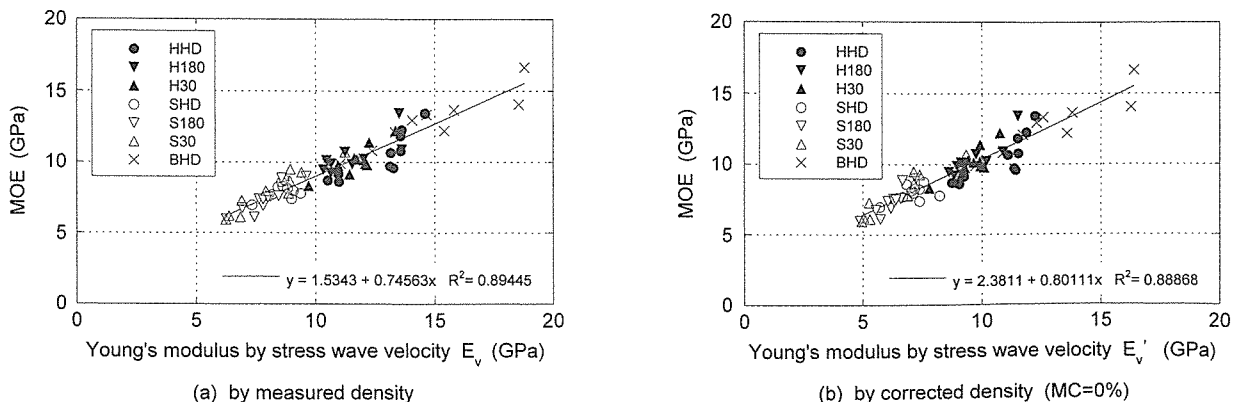


図 10. 応力波伝播速度に基づくヤング率と曲げヤング率の関係
Fig. 10. Relationships between Young's moduli obtained by stress wave velocity and MOE

果、スギは高い「ねばり」性能を有するのに対して、ペイマツは「ねばり」性能が低く、むしろ脆性的であることが示された。

5. 応力波伝播速度を用いたヤング率と曲げヤング率の間には高い相関関係が認められ、応力波を用いたヤング率の測定方法の有効性が示唆された。

引用文献

- 飯島泰男 (1983) 構造用木材一強度データの収集と分析. 日本木材学会木材強度・木質構造研究会: 1-41.
- 飯島泰男・小泉章夫・岡崎泰男・佐々木貴信・中谷 浩 (1997) 秋田県産スギ材の強度特性 (第3報) 丸太とひき板材質の関連. 木材学会誌 43: 159-164.
- 小泉章夫・飯島泰男・佐々木貴信・川井安生・岡崎泰男・中谷 浩 (1997a) 秋田県産スギ材の強度特性 (第1報) 丸太のヤング率. 木材学会誌 43: 46-51.
- 小泉章夫・飯島泰男・佐々木貴信・岡崎泰男 (1997b) 秋田県産スギ材の強度特性 (第2報) 挽板の強度. 木材学会誌 43: 210-214.
- 日本建築学会 (2003) 木質構造限界状態設計指針 (案)・同解説. pp. 336-342. 丸善, 東京.
- 日本木材学会スギ分科会 (1991) 木材の科学と利用技術 II 5. スギ. pp. 1-130. 日本木材学会.
- 農林水産省林野庁 (2006a) 森林・林業白書 平成18年版. 日本林業協会, 東京.
- 農林水産省林野庁企画課 (2006b) 平成17年 木材需給表.
- 朱 建軍・高田克彦・飯島泰男・平川泰彦 (2003) 秋田県産スギ造林木の成長と材質 (第1報) 材質指標の樹幹内変動. 木材学会誌 49: 138-145.
- 森林総合研究所強度性能研究会 (2001) 「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集 <5>. 茨城.
- 津島俊治・古賀信也・小田一幸・白石 進 (2005) 九州産スギ在来品種の成長と木材性質. 木材学会誌 51: 394-401.

Bending Properties of Commercial Lumber of Japanese cedar and Japanese cypress Planted in Aichi Prefecture

Mariko YAMASAKI, Takanori SUGIMOTO, Yasutoshi SASAKI, Katsumi SAKAKIBARA, Katsuhiko YAMAMOTO, Naofumi KAMOSHITA

It is increasingly necessary to promote the use of wood, especially domestic wood with the increase in forests ready for harvest, and the interest to use of wood because of global warming countermeasures. It is also required to give the guarantee of strength performance in lumber for structural use. In this report, bending properties of commercial lumber of Japanese cedar and Japanese cypress planted in Aichi prefecture were examined by full-size bending test. The results obtained were as follows:

1. According to the segment by machine stress-rating using MOE, in the case of Japanese cypress, about 40% specimens were classified in E90 and the same amount was classified in E110. On the other hand, about 60% and 40% specimens were classified in E70 and E90, respectively, in the case of Japanese cedar.
2. MOR of Japanese cypress was larger than those of Japanese cedar and Douglas-fir.
3. MOR was correlative to MOE in the cases of Japanese cypress and Japanese cedar, whereas MOR of Douglas-fir was small for its MOE.
4. Because the strength of Douglas-fir varied widely, it was lacking in stability of quality.
5. Young's modulus obtained by stress wave velocity was agreeable to MOE obtained by bending test.

Keywords: local lumber, full-size bending test, modulus of elasticity, modulus of rupture, machine stress-rating

付表. 全試験体の物理的・機械的性質
Appendix. Physical and mechanical properties of all specimens

Specimen's No.	Species	Drying process	Group	Density (kgf/m ³)	Absolute dry density (kgf/m ³)	Moisture content			MOE (GPa)	MOR (MPa)	P _{ult} (kN)	δ _{ult} (mm)	δ _{B.P.} (mm)	Deflection energy (kN·mm)	Absorptivity of energy	E _v (GPa)	E _v ' (GPa)
						Average											
						S.D.	C.V.										
HHD-1	Japanese cypress	High temperature drying	HHD	598.0	517.6	15.5	1.3	8.1	9.7	35.1	46.8	57.5	89.3	2839	0.51	13.1	11.4
HHD-2				561.2	489.0	14.8	3.2	21.4	12.3	47.2	62.4	84.8	94.3	3751	0.50	13.6	11.9
HHD-3				519.5	432.1	20.2	2.1	10.1	8.7	31.1	41.5	65.5	217.8	3221	0.65	10.5	8.7
HHD-4				596.5	512.7	16.4	5.5	33.8	9.6	38.0	50.3	86.0	294.3	4370	0.72	13.3	11.4
HHD-5				602.4	496.5	21.3	5.2	24.1	8.6	45.5	60.7	151.3	308.3	4726	0.65	11.0	9.1
HHD-6				549.6	460.8	19.3	5.2	27.0	13.4	50.3	66.5	153.3	179.0	5870	0.74	14.6	12.2
HHD-7				561.2	473.2	18.6	3.9	21.2	10.7	47.6	62.3	116.3	116.8	4995	0.67	13.2	11.1
HHD-8				598.4	507.8	17.8	5.8	32.4	10.8	50.3	66.5	152.3	152.5	5425	0.68	13.6	11.5
HHD-9				533.6	450.1	18.5	2.5	13.6	9.1	40.8	53.9	123.8	216.3	4533	0.70	11.0	9.2
HHD-10				563.9	478.1	17.9	3.0	16.7	11.9	49.2	64.9	104.0	125.8	5586	0.72	13.6	11.5
H180-1	Japanese cypress	Natural drying for 180 days	H180	564.8	479.0	17.9	0.6	3.4	10.2	39.4	52.5	63.0	63.0	1854	0.29	12.0	10.2
H180-2				556.4	452.2	23.0	0.5	2.1	9.2	26.6	35.5	40.3	95.3	1553	0.36	10.9	8.8
H180-3				574.2	458.8	25.1	0.9	3.6	10.9	39.7	53.0	51.0	224.3	4450	0.70	13.6	10.9
H180-4				547.5	456.9	19.8	2.3	11.5	9.5	41.4	55.2	74.5	74.8	2374	0.36	10.3	8.6
H180-5				524.4	441.3	18.8	0.6	2.9	9.9	45.8	60.5	94.5	128.3	4793	0.66	10.6	9.0
H180-6				532.2	462.4	15.1	0.9	6.1	10.7	40.2	53.6	58.5	106.3	3531	0.55	11.2	9.8
H180-7				494.4	431.4	14.6	0.3	2.4	10.1	38.6	51.5	64.5	67.3	2016	0.33	10.5	9.1
H180-8				501.8	432.8	15.9	1.4	8.9	9.2	36.4	48.6	72.0	72.3	2095	0.36	10.6	9.2
H180-9				542.6	436.4	24.3	0.6	2.4	9.9	30.7	41.0	49.0	74.3	1874	0.38	11.5	9.3
H180-10				603.8	514.5	17.4	0.8	4.7	13.5	42.6	56.7	47.8	48.0	1424	0.21	13.5	11.5
H30-1	Japanese cypress	Natural drying for 30 days	H30	579.0	466.0	24.3	2.9	11.9	12.2	49.5	66.0	93.3	167.8	5660	0.71	13.4	10.7
H30-2				586.1	486.3	20.5	0.5	2.4	9.8	35.2	47.0	53.3	92.0	2577	0.46	12.2	10.1
H30-3				570.5	453.3	25.9	1.2	4.5	9.1	30.7	41.0	48.8	51.3	1105	0.22	11.4	9.1
H30-4				559.5	448.2	24.8	0.1	0.2	10.1	47.4	62.6	123.8	213.8	5185	0.69	12.1	9.7
H30-5				564.9	478.7	18.0	1.3	7.2	9.7	33.4	44.6	56.0	69.3	1849	0.35	11.0	9.3
H30-6				567.5	467.2	21.5	0.6	2.8	9.9	45.5	60.7	85.3	106.5	4300	0.59	12.1	10.0
H30-7				551.3	446.1	23.6	0.4	1.7	10.3	44.7	59.1	86.8	87.0	3264	0.46	11.6	9.4
H30-8				525.0	425.1	23.5	0.8	3.4	11.4	50.5	65.3	127.5	127.5	5411	0.69	12.3	9.9
H30-9				573.2	484.2	18.4	0.6	3.2	10.2	45.6	59.6	78.0	78.0	2690	0.38	11.7	9.9
H30-10				542.7	435.5	24.6	0.6	2.3	8.3	33.7	45.0	64.0	64.0	1578	0.29	9.7	7.8
SHD-1	Japanese cedar	High temperature drying	SHD	493.7	431.9	14.3	7.0	48.7	8.2	37.1	49.1	120.3	359.5	4260	0.72	8.4	7.4
SHD-2				537.4	428.4	25.4	5.3	20.9	8.6	35.2	46.5	85.5	195.0	3983	0.71	8.6	6.8
SHD-3				574.0	502.9	14.1	5.0	35.1	7.8	32.7	43.6	81.3	196.8	3413	0.65	9.4	8.2
SHD-4				667.5	547.7	21.9	13.5	61.8	7.4	35.1	46.0	102.3	213.5	3818	0.69	9.0	7.4
SHD-5				530.3	416.1	27.5	11.9	43.3	8.0	32.3	43.1	104.3	199.5	3708	0.72	9.1	7.1
SHD-6				582.9	465.0	25.4	6.9	27.2	8.1	41.0	54.7	131.5	252.5	4489	0.68	8.8	7.0
SHD-7				513.0	446.6	14.9	4.4	29.5	8.8	36.8	49.1	132.5	272.8	4238	0.72	8.7	7.6
SHD-8				551.5	450.2	22.5	6.8	30.2	7.7	36.8	49.1	97.3	308.0	4100	0.70	8.2	6.7
SHD-9				455.1	378.5	20.3	3.0	15.0	8.3	36.9	49.2	59.5	64.8	1420	0.26	8.6	7.2
SHD-10				497.7	387.0	28.6	7.4	25.7	7.0	29.8	39.8	126.0	250.8	3487	0.73	7.3	5.7
S180-1	Japanese cedar	Natural drying for 180 days	S180	629.2	473.3	33.0	6.7	20.3	9.0	37.2	48.7	124.8	252.0	4167	0.71	9.6	7.2
S180-2				566.5	437.1	29.6	5.8	19.7	6.1	30.4	40.9	145.8	145.8	3252	0.66	7.4	5.7
S180-3				498.2	398.8	24.9	1.5	6.0	6.7	36.3	48.4	99.8	99.8	2780	0.51	6.9	5.5
S180-4				577.9	448.8	28.8	3.4	11.7	8.9	38.8	51.7	126.8	274.5	4451	0.72	8.6	6.7
S180-5				624.9	484.4	29.0	1.6	5.5	7.6	38.9	52.3	164.3	270.0	4046	0.64	8.1	6.3
S180-6				587.9	465.6	26.3	4.2	16.0	6.9	30.9	41.2	76.8	79.0	1940	0.39	7.8	6.2
S180-7				440.4	349.0	26.2	4.1	15.8	7.4	29.4	39.2	66.8	235.8	2840	0.60	7.6	6.1
S180-8				471.8	382.3	23.4	5.2	22.4	7.4	39.1	52.2	123.3	132.0	4181	0.67	7.8	6.3
S180-9				528.1	412.2	28.1	4.5	16.2	7.6	38.9	51.9	154.0	235.5	4049	0.65	8.5	6.6
S180-10				671.9	535.7	25.4	6.0	23.7	7.5	35.2	46.9	101.0	155.3	3615	0.64	8.0	6.4
S180-11				583.3	454.6	28.3	4.2	15.0	6.0	31.7	41.9	116.8	145.5	3239	0.64	6.3	4.9
S30-1	Japanese cedar	Natural drying for 30 days	S30	639.4	510.1	25.3	6.2	24.6	9.5	43.1	56.4	90.5	143.8	4722	0.70	8.9	7.1
S30-2				539.9	448.9	20.3	3.5	17.4	10.7	47.6	63.5	103.5	273.8	5305	0.70	11.2	9.3
S30-3				527.9	423.7	24.6	5.2	21.3	8.7	36.9	49.2	79.8	169.3	4267	0.72	8.9	7.2
S30-4				532.6	-	-	-	-	8.0	40.1	52.9	138.0	138.3	4206	0.66	7.9	-
S30-5				681.1	518.4	31.4	3.0	9.5	7.3	38.0	50.7	138.0	202.0	3941	0.65	6.9	5.3
S30-6				573.5	455.2	26.0	5.6	21.5	5.9	31.5	41.7	95.5	190.8	3101	0.62	6.2	5.0
S30-7				755.8	583.7	29.5	2.7	9.2	6.1	28.3	37.8	74.5	93.0	2200	0.48	6.9	5.3
S30-8				584.1	458.3	27.4	0.9	3.3	9.3	38.3	51.1	61.3	155.5	3585	0.58	9.4	7.4
S30-9				610.4	473.8	28.8	0.9	3.3	7.8	36.3	48.0	91.5	91.5	2801	0.49	8.9	6.9
S30-10				592.8	469.1	26.4	3.9	14.6	6.2	33.1	44.1	89.8	89.8	2210	0.42	6.4	5.0
BHD-1	Douglas fir	High temperature drying	BHD	437.1	385.3	13.4	0.6	4.3	9.9	24.3	32.4	36.5	41.5	697	0.18	11.0	9.7
BHD-2				483.3	421.7	14.6	1.2	8.3	13.7	43.2	58.8	60.5	61.0	2215	0.31	15.8	13.8
BHD-3				516.3	451.4	14.4	1.4	9.5	13.0	35.8	47.7	40.8	44.5	1169	0.20	14.1	12.3
BHD-4				484.5	425.3	13.9	1.8	12.9	12.1	27.7	37.3	42.8	53.3	1275	0.28	13.4	11.7
BHD-5				571.8	501.6	14.0	1.9	13.3	14.1	51.1	68.2	64.5	174.0	5880	0.72	18.6	16.3
BHD-6				512.4	450.3	13.8	0.6	4.4	10.8	37.2	50.1	75.3	87.0	2778	0.46	12.4	10.9
BHD-7				590.1	515.0	14.6	0.8	5.4	16.6	26.9	36.2	22.3	84.0	704	0.16	18.8	16.4
BHD-8				526.4	464.4	13.4	1.0	7.5	12.2	22.8	30.4	33.5	43.8	807	0.22	15.4	13.6
BHD-9				449.6	391.6	14.8	0.8	5.4	9.9	32.2	42.9	62.5	63.5	1704	0.33	10.5	9.1
BHD-10				507.6	435.6	16.5	1.3	7.7	13.3	46.9	63.1	64.8	65.0	2489	0.33	14.7	12.6

Legend: Absolute dry density: Density corrected by moisture content

S.D.: Standard deviation

C.V.: Coefficient of variation

P_{ult}: Ultimate loadδ_{ult}: Deflection at ultimate loadδ_{B.P.}: Deflection at breaking point

Deflection energy: Deflection energy before 120mm deflection

Absorptivity of energy = Deflection energy before 120mm deflection / (P_{ult} × 120mm)E_v: Young's modulus by stress wave velocity calculated with measured densityE_v': Young's modulus by stress wave velocity calculated with absolute dry density