

## スギおよびヒノキの磨き丸太の曲げ強度試験

中田欣作・森本定雄\*

丸太径級140～220mm、長さ3000～6000mmのスギ磨き丸太32本および丸太径級140～240mm、長さ3000～6000mmのヒノキ磨き丸太32本について、グレーディングマシンでヤング係数を測定するとともに、曲げ試験および縦振動試験を行った。

スギおよびヒノキ丸太の曲げヤング係数と縦振動ヤング係数は良好な相関関係を示し、後者の平均値は前者のそれより7～8%高くなった。そこで、縦振動ヤング係数が曲げヤング係数と同等の値になるように両者の実験回帰式を用いて補正ヤング係数を求めた。

スギおよびヒノキ丸太では、密度に比例して曲げヤング係数および曲げ強さが高くなった。また、平均直径に比例して曲げヤング係数および曲げ強さが低くなった。

縦振動ヤング係数区分毎のスギおよびヒノキ丸太の曲げ強さは、日本農林規格に示された構造用製材の基準強度より高くなった。すべての縦振動ヤング係数区分において、スギおよびヒノキ丸太の曲げ強さの下限値は構造用製材の基準強度より高く、一つ上位の区分の基準強度と同等かそれ以上であった。

## 1. はじめに

奈良県では、密植して枝打ちや間伐等の綿密な手入れを施した丸太を磨き丸太として商品化してきた。磨き丸太は和室の床柱などの非構造材や桁丸太などの構造材として利用されてきたが、その強度性能は特に問題とされなかった。

近年では、和室の減少により磨き丸太の床柱等での利用が激減しているが、店舗や住宅において現しとして磨き丸太を柱や梁として使用する例も増えてきている。製材品や集成材等の木材はヤング係数を明記してその強度性能を保証する動きが活発になってきているが、磨き丸太においてもヤング係数を測定し強度性能を保証する必要がある。

そこで、製材品のヤング係数を測定するためのグレーディングマシンを用いて磨き丸太のヤング係数測定の可能性について検討した。グレーディングマシンには曲げ式と打撃式があるが、前者は測定できる断面寸法が比較的小さいことと、測定する材料を静置して荷重を加える必要があるため、丸太の測定には適していない。一方、後者は、丸太での測定が可能である<sup>1)</sup>ため、実用的なグレーディングの方法を検討することとした。

本研究では、スギおよびヒノキ磨き丸太について、グレーディングマシンでヤング係数を測定するとともに、丸太の曲げ試験を行って強度性能を測定し、丸太のグ

レーディングの可能性および強度性能の保証についての検討を行った。

なお、本試験は森庄銘木産業株式会社からの受託研究として行ったものである。

## 2. 材料および方法

## 2.1 供試材料

丸太径級140～220mm、長さ3000～6000mmのスギ磨き丸太32本および丸太径級140～240mm、長さ3000～6000mmのヒノキ磨き丸太32本を用いた。丸太は皮むき後に背割り加工を行い、土壁の倉庫内で天然乾燥した。丸太表面には節は認められなかった。

## 2.2 曲げ試験の方法

図1および表1に曲げ試験の方法を示す。曲げ試験は東京衡機製造所製実大木材強度試験機を用いて、丸太の背割り面を上面にした状態で行い、荷重  $P$  とスパン中央のたわみ変位  $\delta$  との関係測定した。また、輪尺で丸太の両木口面における幅方向の直径  $b$  および厚さ方向の直径  $h$ 、鋼製巻尺で試験体の長さ  $l$  を測定した。

式 (1) および式 (2) を用いて曲げヤング係数  $E_B$  および曲げ強さ  $\sigma_B$  を算出した。

$$E_B = \frac{4Pa(3L^2 - 4a^2)}{3\delta\pi bh^3 \times 10^3} \quad (\text{kN/mm}^2) \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{16Pa}{\pi bh^2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

\* 森床銘木産業株式会社

ただし、 $L$ ：スパン、 $a$ ：支点と荷重点の距離、 $b$ ：丸太の幅方向の直径、 $h$ ：丸太の厚さ方向の直径。丸太の幅方向および厚さ方向の直径は、それぞれ末口側と元口側の測定値の平均値とした。

ここで、製材の曲げ試験では、スパンは製材の厚さの18倍、支点と荷重点の距離は厚さの6倍で行うのが一般的である<sup>2)</sup>。しかし、丸太では製材の厚さに相当する直径が一定でなく、荷重点での圧縮破壊が生じやすいため、長さ3000mmのスギ以外では、表1に示すように支点と荷重点の距離を直径の7~9倍に設定した。

2.3 縦振動試験の方法

図2に縦振動試験の方法を示す。縦振動試験では、丸太の末口側の木口面をプラスチックハンマーで打撃し、同位置においてリオン社製FFTアナライザ-SA-77を用いて打撃音の縦振動周波数 $f$ を測定した。重量 $w$ はロードセル式はかりで測定した。また、スギおよびヒノキ丸太各20本について、エーティーエー社製グレーディングマシンHG-2001を用いて縦振動ヤング係数を測定した。

式(3)を用いて縦振動ヤング係数 $E_L$ を算出した。

$$E_L = \frac{16Lf^2w}{\pi d^2 \times 10^6} \quad (\text{kN/mm}^2) \quad (3)$$

ただし、 $d$ ：末口面の幅方向の直径と厚さ方向の直径の平均値と元口面のそれとの平均値（以下、平均直径と略す。）。

試験後の丸太から2個の円盤を切り出して全乾法により含水率を測定し、その平均値を丸太の含水率とした。

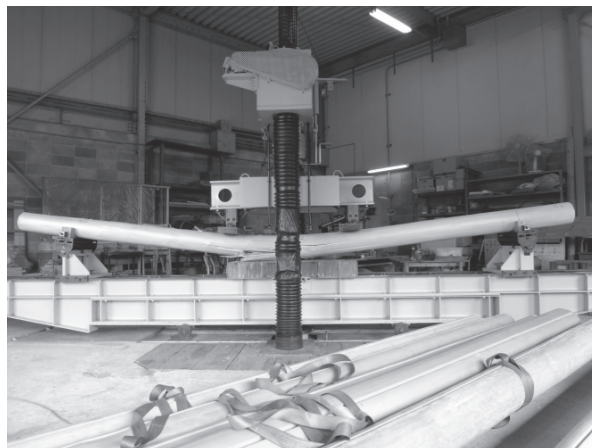
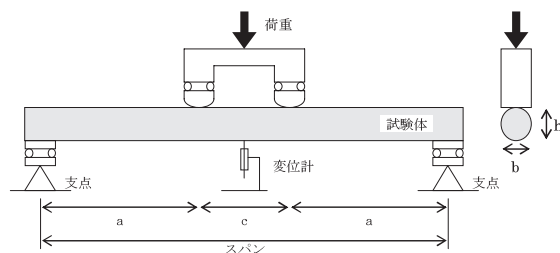


図1 曲げ試験の方法

a：支点と荷重点の距離、c:荷重点間距離、  
b:丸太の幅方向の直径、h:丸太の厚さ方向の直径

表1 曲げ試験の条件

樹種	本数	長さ (mm)	平均直径		荷重条件			平均直径に対する比		
			範囲 (mm)	平均値 (mm)	スパン (mm)	a (mm)	c (mm)	スパン	a	c
スギ	12	3000	181 ~ 216	199	2800	1100	600	14.0	5.5	3.0
	12	4000	171 ~ 205	189	3800	1600	600	20.2	8.5	3.2
	2	6000	184 ~ 189	187	4200	1450	1300	22.5	7.8	7.0
	2	6000	188 ~ 200	194	4400	1450	1300	22.7	8.0	6.7
	4	6000	224 ~ 251	234	4800	1750	1300	20.5	7.5	5.5
ヒノキ	12	3000	150 ~ 171	157	2800	1100	600	17.6	7.0	3.8
	10	4000	160 ~ 192	169	3400	1400	600	20.1	8.3	3.6
	2	4000	171 ~ 177	174	3800	1400	600	21.9	9.2	3.5
	5	6000	189 ~ 200	193	4200	1450	1300	21.7	7.5	6.7
	3	6000	232 ~ 263	246	4800	1750	1300	19.5	7.1	5.3

a：支点と荷重点の距離、 c：荷重点間距離



縦振動試験



グレーディングマシンによる測定

図2 縦振動試験の方法

### 3. 結果

#### 3.1 曲げ試験および縦振動試験の結果

図3にスギおよびヒノキ丸太の曲げ試験での荷重-中央たわみ曲線を示す。長さ3000mm、4000mmおよび6000mmのスギ丸太では、それぞれ中央たわみが70~107mm、92~212mmおよび92~257mmで曲げ破壊した。長さ3000mm、4000mmおよび6000mmのヒノキ丸太では、それぞれ中央たわみが121~189mm、104~248mmおよび144~334mmで曲げ破壊した。長さ3000mmのスギおよびヒノキ丸太では、荷重点付近でめり込みが発生するとともに圧縮破壊が発生した。これは、支点と荷重点の距離の直径に対する比が小さいために、曲げ破壊に要する荷重が大きくなるとともに荷重点でのめり込みが大きくなったためである。また、圧縮破壊が発生したために、最大荷重時の中央たわみが小さくなった。

表2に曲げ試験および縦振動試験の結果を示す。スギおよびヒノキ丸太において、グレーディングマシンで測定した縦振動周波数および重量は、本試験での測定結果と一致した。これらの測定結果から計算された縦振動ヤング係数および縦振動ヤング係数区分は本試験の結果と一致した。

図4および図5にスギおよびヒノキ丸太の丸太径級および密度の出現頻度を示す。なお、丸太径級は丸太直径の最小値を20mm割約したものである。スギおよびヒノキ丸太の丸太径級は140~220mmおよび140~240mmであり、丸太直径の最小値の平均値はそれぞれ179および160mmであった。スギ丸太およびヒノキ丸太の密度の平均値は、それぞれ0.41および0.48g/cm<sup>3</sup>であった。

図6に曲げヤング係数と縦振動ヤング係数との関係を示す。スギおよびヒノキ丸太の曲げヤング係数と縦振動

ヤング係数は良好な相関関係を示し、後者の平均値は前者のそれより7~8%高くなった。そこで、縦振動ヤング係数  $x$  が曲げヤング係数と同等の値になるように式(4)の回帰式を用いて補正ヤング係数  $y$  を求めた。図7に曲げヤング係数と補正ヤング係数との関係を示す。

$$y = ax + b:$$

$$a = 0.9553(\text{スギ}), 0.9902(\text{ヒノキ}),$$

$$b = -0.1896(\text{スギ}), -0.7111(\text{ヒノキ}) \quad (4)$$

図8に曲げヤング係数と密度との関係、図9に曲げ強さと密度との関係を示す。スギおよびヒノキ丸太では、密度に比例して曲げヤング係数および曲げ強さが高くなった。

図10~15に曲げヤング係数と曲げ強さについて、平均直径、平均年輪幅および年輪数との関係を示す。スギおよびヒノキ丸太では、平均直径に比例して曲げヤング係数および曲げ強さが低くなった。これは、平均直径に比例して密度が小さくなるためである。平均年輪幅および年輪数については、曲げヤング係数および曲げ強さとの関係が認められなかった。

#### 3.2 ヤング係数区分毎の曲げ強さ

図16および図17にスギおよびヒノキ丸太の曲げ強さと補正ヤング係数との関係を示す。スギおよびヒノキ丸太では、補正ヤング係数に比例して曲げ強さが高くなった。スギ丸太において補正ヤング係数から求めた縦振動ヤング係数区分(以下、補正ヤング係数区分と記す)毎に、表3に示す製材の日本農林規格に対応した基準強度と比較すると、Ef90の1本を除いて、Ef70、Ef90およびEf110の丸太はそれぞれE70、E90およびE110のスギ構造用製材の基準強度を満足していた。ヒノキ丸太においては、

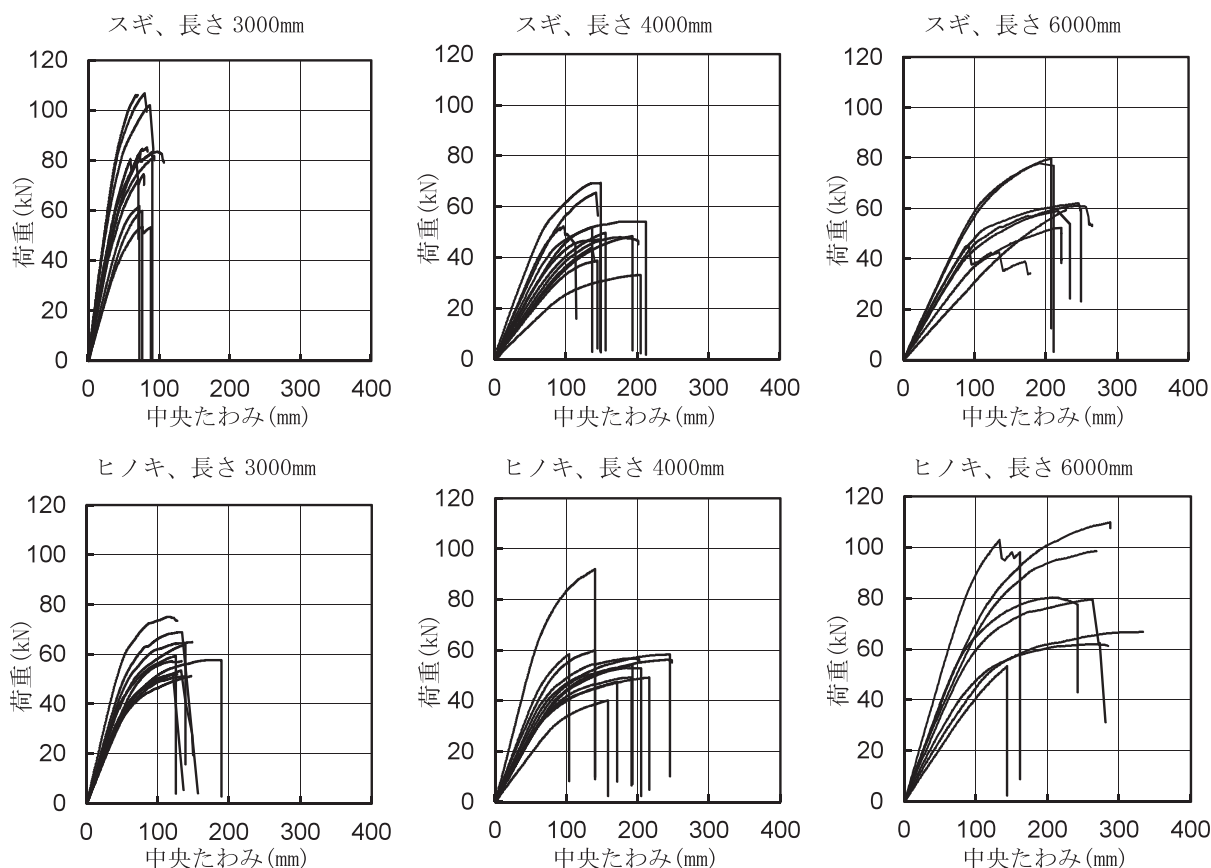


図3 スギおよびヒノキ丸太の荷重-中央たわみ曲線

表2 曲げ試験および縦振動試験の結果

項目	単位	スギ		ヒノキ	
		範囲	平均値	範囲	平均値
末口年輪数		19 ~ 51	34	21 ~ 91	35
平均直径	(mm)	171 ~ 251	199	150 ~ 263	176
平均年輪幅	(mm)	1.7 ~ 4.2	2.8	1.2 ~ 3.7	2.4
真円度		0.92 ~ 1.00	0.97	0.89 ~ 0.99	0.96
細り	(cm/m)	0.44 ~ 1.32	0.83	0.22 ~ 0.98	0.63
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	0.33 ~ 0.49	0.41	0.40 ~ 0.54	0.48
含水率	(%)	15.9 ~ 30.8	19.1	15.4 ~ 23.0	18.3
曲げ比例限度	(N/mm <sup>2</sup> )	14.5 ~ 41.7	32.2	28.6 ~ 55.6	41.9
曲げ強さ	(N/mm <sup>2</sup> )	32.9 ~ 72.8	58.7	52.5 ~ 93.1	79.7
曲げヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	6.3 ~ 12.2	8.9	7.8 ~ 13.9	11.7
縦振動ヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	7.2 ~ 11.9	9.6	9.3 ~ 14.1	12.5

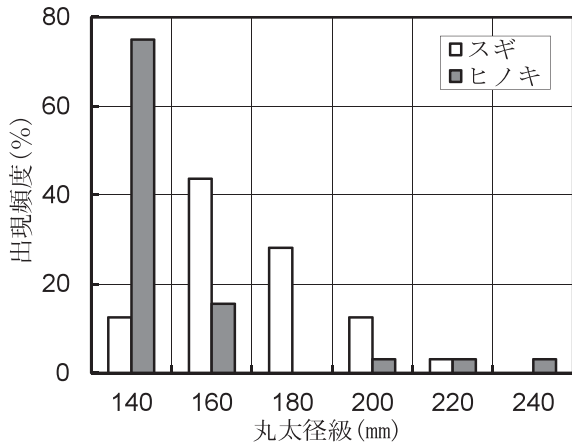


図4 丸太径級の出現頻度

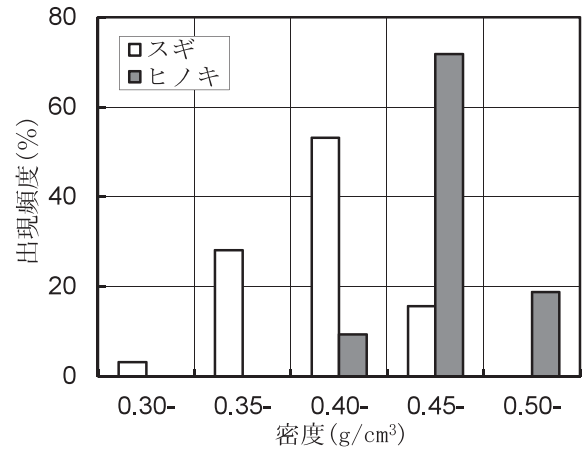


図5 密度の出現頻度

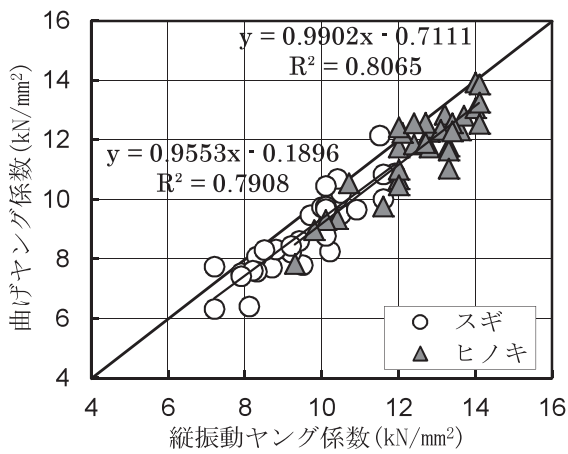


図6 曲げヤング係数と縦振動ヤング係数との関係

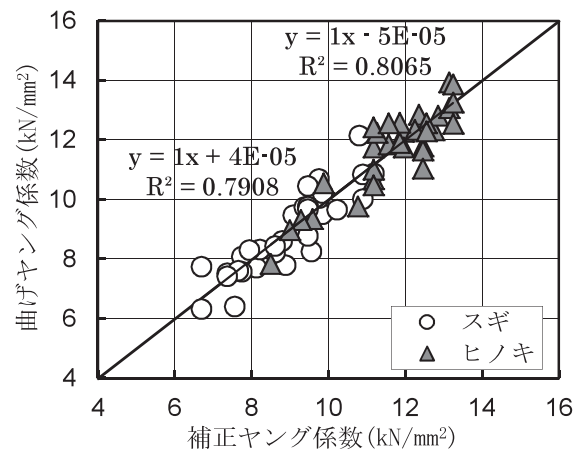


図7 曲げヤング係数と補正ヤング係数との関係

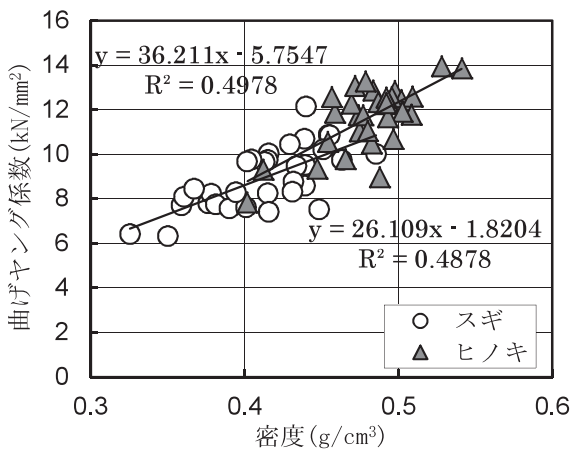


図8 曲げヤング係数と密度との関係

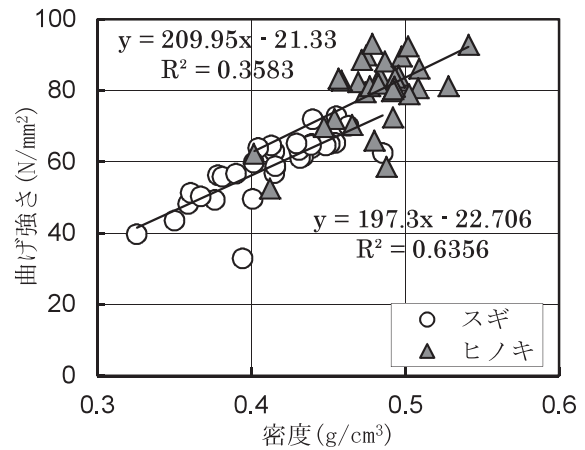


図9 曲げ強さと密度との関係



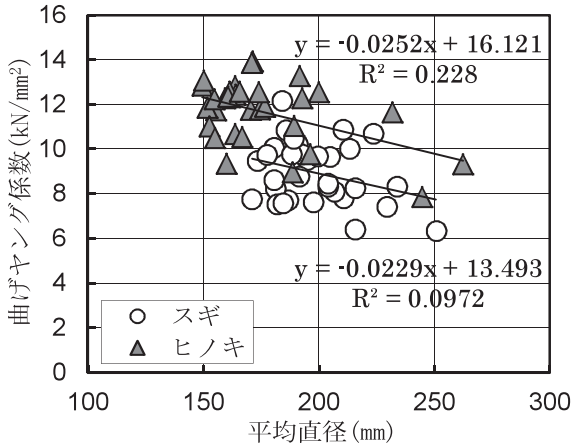


図10 曲げヤング係数と平均直径との関係

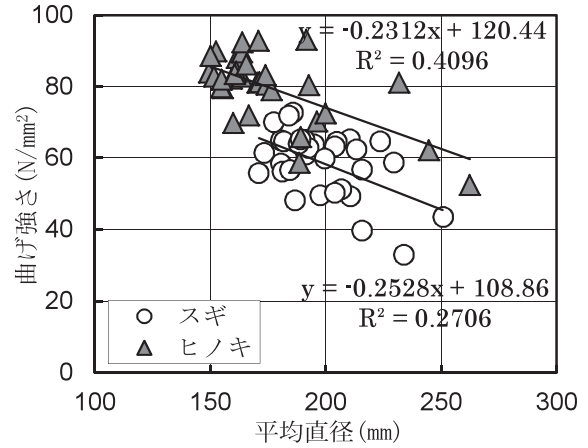


図11 曲げ強さと平均直径との関係

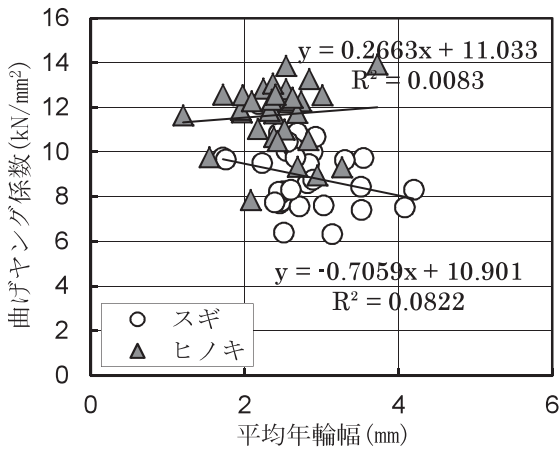


図12 曲げヤング係数と平均年輪幅との関係

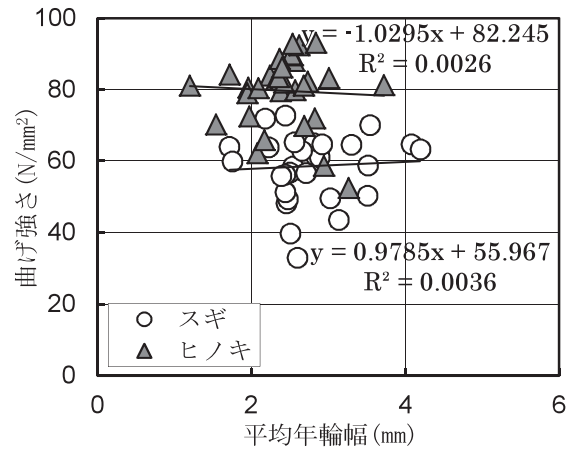


図13 曲げ強さと平均年輪幅との関係

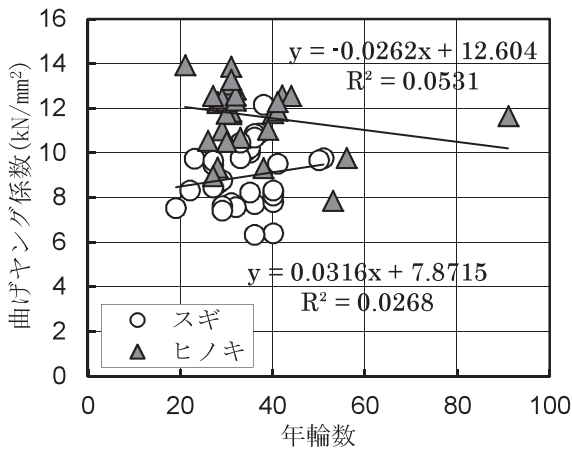


図14 曲げヤング係数と年輪数との関係

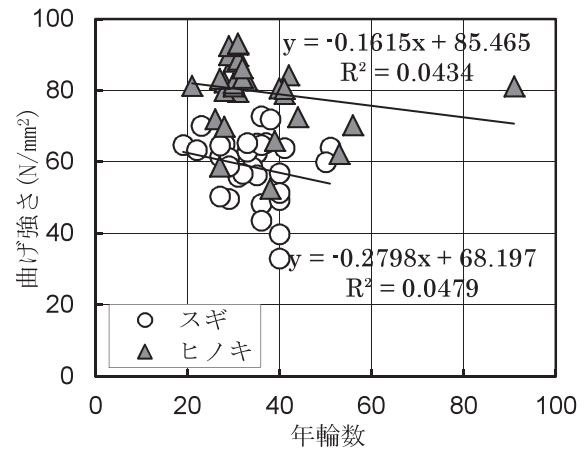


図15 曲げ強さと年輪数との関係

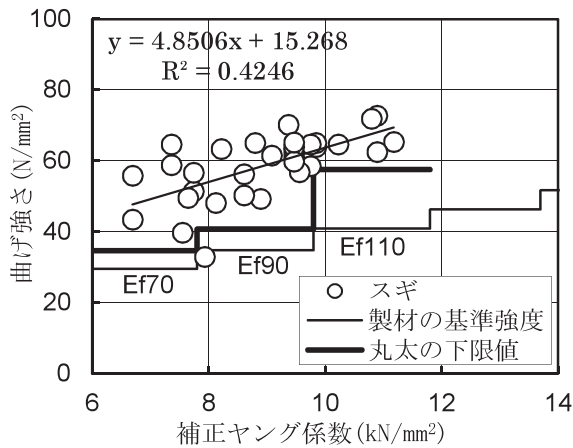


図16 スギ丸太の曲げ強さと補正ヤング係数との関係

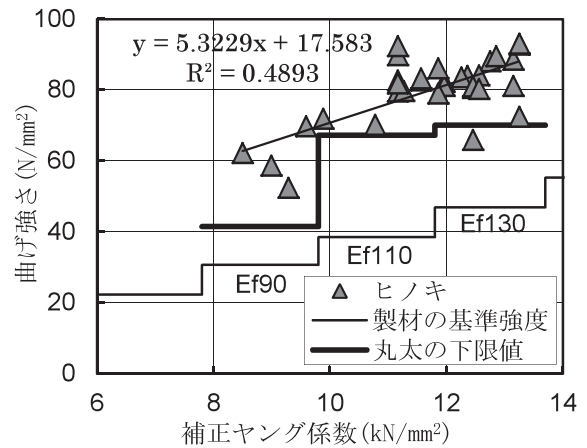


図17 ヒノキ丸太の曲げ強さと補正ヤング係数との関係

Ef90、Ef110およびEf130の丸太はそれぞれE90、E110およびE130のヒノキ構造用製材の基準強度を満足していた。

図18に補正ヤング係数区分毎のスギおよびヒノキ丸太の曲げ強さを示す。式(5)を用いて信頼水準75%のときの95%下側許容限界値(以下、下限値と略す。)を求めた。

$$T = \bar{x} - K \cdot S \quad (5)^3$$

ただし、 $\bar{x}$ : 平均値、 $K$ : 試験体数に依存する定数、 $S$ : 標準偏差。

図16、図17および表3にスギおよびヒノキ丸太の曲げ強さの下限值を示す。すべての縦振動ヤング係数区分において、スギおよびヒノキ丸太の曲げ強さの下限值は製材の基準強度より高く、一つ上位の縦振動ヤング係数区分の基準強度と同等かそれ以上であった。一般的に、強度性能が低い未成熟材を多く含み、節および目切れがある心持ち正角の製材品は丸太より曲げ強さが低い<sup>45)</sup>。本試験の丸太は、このような理由に加えて、丸太表面に節がないため、高い曲げ強さを示したと考えられる。

図19および図20に補正ヤング係数区分および曲げ強さの出現頻度を示す。補正ヤング係数区分の出現頻度を見ると、スギ丸太はEf90が最も多く、ヒノキ丸太はEf130が最も多かった。曲げ強さの出現頻度を見ると、スギ丸太は60~70N/mm<sup>2</sup>が最も多く、ヒノキ丸太は80~90 N/mm<sup>2</sup>が最も多かった。

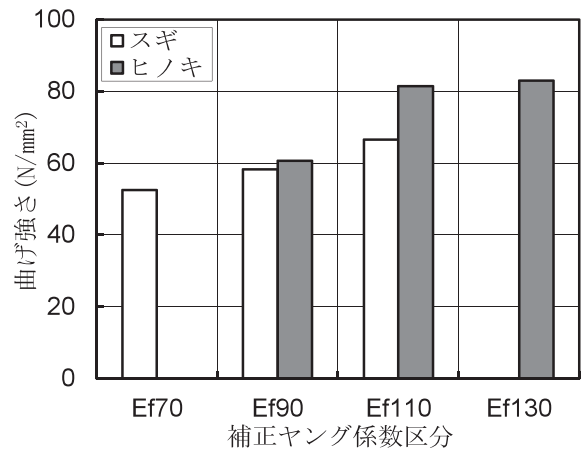
### まとめ

丸太径級140~220mm、長さ3000~6000mmのスギ磨き丸太32本および丸太径級140~240mm、長さ3000~6000mmのヒノキ磨き丸太32本について、グレーディン

グマシでヤング係数を測定するとともに、曲げ試験および縦振動ヤング係数試験を行った。

スギおよびヒノキ丸太の曲げヤング係数と縦振動ヤング係数は良好な相関関係を示し、グレーディングマシンで測定された縦振動ヤング係数から曲げヤング係数が予測可能であった。

すべての縦振動ヤング係数区分において、スギおよびヒノキ丸太の曲げ強さの下限值は構造用製材の基準強度より高く、丸太の縦振動ヤング係数を測定することにより曲げ強さを保証することが可能であると考えられる。



区分	曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )	
	スギ	ヒノキ
Ef70	52.6	
Ef90	58.3	60.8
Ef110	66.6	81.5
Ef130		83.0

図18 補正ヤング係数区分ごとの曲げ強さ

表3 日本農林規格におけるヤング係数区分

区分	素材の日本農林規格			製材の日本農林規格			
	縦振動ヤング係数 (k N/mm <sup>2</sup> )	実験より求めた下限値		等級	曲げヤング係数 (k N/mm <sup>2</sup> )	基準強度	
		スギ (N/mm <sup>2</sup> )	ヒノキ (N/mm <sup>2</sup> )			スギ (N/mm <sup>2</sup> )	ヒノキ (N/mm <sup>2</sup> )
Ef50	≥3.9, <5.9	-	-	E50	≥3.9, <5.9	24.0	13.8
Ef70	≥5.9, <7.8	34.6	-	E70	≥5.9, <7.8	29.4	22.2
Ef90	≥7.8, <9.8	40.7	41.4	E90	≥7.8, <9.8	34.8	30.6
Ef110	≥9.8, <11.8	57.5	67.1	E110	≥9.8, <11.8	40.8	38.4
Ef130	≥11.8, <13.7	-	70.0	E130	≥11.8, <13.7	46.2	46.8
Ef150	≥13.7	-	-	E150	≥13.7	51.6	55.2

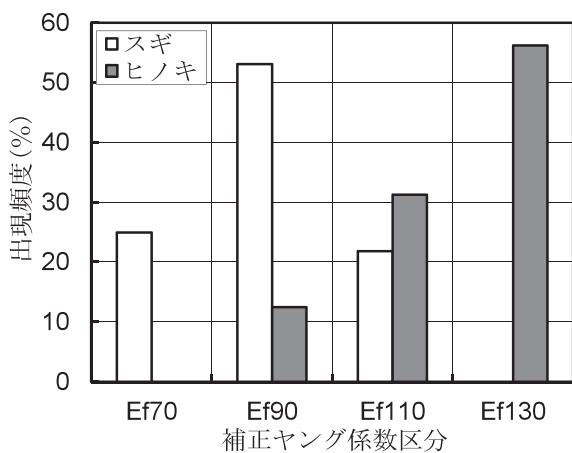


図19 補正ヤング係数区分の出現頻度

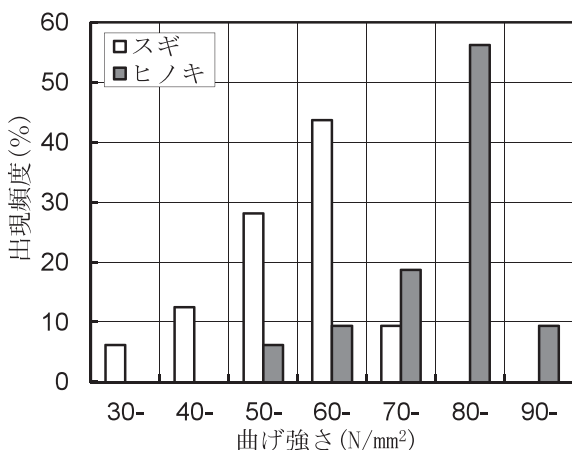


図20 曲げ強さの出現頻度

### 引用文献

- 1) 中田欣作、柳川靖夫：スギ丸太および製材品のヤング係数によるグレーディング、奈良県森技セ研報 38、27-34 (2009)
- 2) (財) 日本住宅木材・技術センター：“構造用木材の強度試験マニュアル”、東京、(財) 日本住宅木材・技術センター、2011、p.8
- 3) (財) 日本建築学会：“木質構造設計基準・同解説”、東京、(財) 日本建築学会、2006、p.374
- 4) 海本 一：スギ、ヒノキ小径丸太の曲げ強度性能、奈良県林試木材加工資料 19、1-6 (1990)
- 5) 工藤 修、千葉宗昭、藤原拓哉、細谷俊人：カラマツ丸太およびたいこ挽材の実大曲げ性能 (第3報)、林産試験場報 8 (3)、4-14 (1994)

(2013年4月12日受理)