

住宅構造用部材の強度測定試験

—正角材における非破壊的強度測定方法の確立—

杉山 正典、富田 守泰、長谷川良一、古川 邦明

目 次

はじめに	52	2.2.2 乾燥材の動的曲げヤング係数	60
試験 I (明宝村産スギ材の強度性能)	52	2.2.3 栈積状態での	
1 試験方法	52	動的曲げヤング係数の測定	60
1.1 供試原木	52	2.2.4 原木と乾燥材の曲げヤング係数	64
1.2 供試原木の曲げヤング係数	52	2.3 曲げ強度	64
1.3 供試材	54	2.3.1 測定因子間の相関関係	64
1.4 製材品・乾燥材の曲げヤング係数	54	2.3.2 動的曲げヤング係数と	
1.5 曲げ強度	54	曲げ強度の関係	64
1.6 含水率補正	54	2.3.3 植栽密度別曲げ強度	64
2 結果と考察	54	2.4 非破壊パラメーターによる	
2.1 曲げヤング係数	54	曲げ強度の推定	68
2.1.1 供試原木の曲げヤング係数	54	2.4.1 因子間の類似性	68
2.1.2 供試材の動的曲げヤング係数	54	2.4.2 乾燥材における曲げ強度の推定	68
2.1.3 乾燥材の動的曲げヤング係数	56	2.4.3 原木における曲げ強度の推定	68
2.1.4 試験実施時における			
曲げヤング係数の関係	56	試験 III (東濃ヒノキ材の強度性能)	70
2.2 曲げ強度	56	1. 試験の方法	70
2.2.1 乾燥材の曲げ強度	56	1.1 供試材	70
2.2.2 測定因子間の相関関係	56	1.2 曲げヤング係数の測定	70
2.2.3 原木の動的曲げヤング係数と		1.3 曲げ強度の測定	70
曲げ強度の関係	56	2. 結果と考察	70
試験 II (下呂町産スギ材の強度性能)	58	2.1 供試材	70
1 試験の方法	58	2.2 曲げヤング係数	70
1.1 供試原木	58	2.3 曲げ強度	70
1.2 供試材	58	2.4 測定因子間の相関関係	70
1.3 曲げヤング係数および曲げ強度測定	58	2.5 動的曲げヤング係数と	
2 結果と考察	60	曲げヤング係数の関係	70
2.1 供試原木	60	2.6 曲げヤング係数と曲げ強度	70
2.1.1 供試原木の性状	60	2.7 曲げ強度の推定	70
2.1.2 等級区分	60	まとめ	75
2.1.3 原木の動的曲げヤング係数	60	謝辞	76
2.2 製材品の動的曲げヤング係数	60	引用文献	76
2.2.1 製材品の動的曲げヤング係数	60	参考文献	76

は じ め に

木材の強度は、樹種・品種・生育状況・節等の欠点の有無により異なる。そこで、建築用部材として有効に利用するためには、個々に強度を推定し、それに応じた部材として利用する必要がある。

最近、集成材ラミナの強度等級区分技術を応用して正角材の強度等級区分を行うグレーディング・マシンが数機種開発されているが、いまだ高価であるため一部のメーカーに導入されているのみである。

このような状況の中で非破壊的に木材の強度を推定する方法の1つに基本振動周波数を測定し、動的曲げヤング係数を測定することにより木材の強度を推定する方法がある。この方法は比較的容易に測定が可能であり非破壊的強度測定方法の中で最も期待されている方法である。

しかし、本県産スギ材の強度測定データは少なく、非破壊的強度推定方法による曲げ強度測定データもないのが現状である。そこで、スギ材の建築用材としての利用拡大を図るため、岐阜県内で植栽された品種別スギ原木および心持ち正角材の強度性能に関する試験を実施した。

試験の順序として、まずスギ原木、製材品における動的曲げヤング係数および曲げ強度を測定し、非破壊的強度推定方法について検討した(試験Ⅰ)。続いて品種別の強度性能の比較を行うために、原木・正角材の曲げヤング係数・および曲げ強度の測定の測定を行い、比較・分析した(試験Ⅱ)。

また、ヒノキ正角材についても曲げヤング係数と曲げ強度との相関関係を分析したので、その結果についてもあわせて報告する(試験Ⅲ)。

試 験 Ⅰ (明宝村産スギ材の強度性能)

1 試 験 方 法

1.1 供試原木

供試原木には、明宝村産のヒズモスギ19本、ボカスギ8本、およびイトシロスギ3本を供し、計30本とした。材長は、すべて4mとした。なお、平均末口径は17.5cm、平均年輪巾4.0mmであった。

1.1.2 供試原木の曲げヤング係数

供試原木の強度を推定するために基本振動周波数による曲げヤング係数の測定を行った。供試原木をホイスト及びロードセルにより材長方向中央部で吊り下げ、重量の測定を行った。元口の木口面をハンマーにより打撃し、末口側の木口においてR社製マイクロフォンNK-20により周波数を測定した。測定した周波数をA社製FFTアナライザAD3524により分析し、基本振動周波数を求めた(図-1、写真-1)。基本振動周波数の測定は、1試験体につき3回打撃し、各測定値にばらつきのないのを確認した後、その平均値を測定データとした。

基本振動周波数から動的曲げヤング係数Efrを求めるにあたっては式1を用いた(2)。なお、比重の算出にあたっては、ロードセルにより測定した原木重量を末口自乗法により求めた原木材積により除して求めた。

$$Efr = \frac{4L^2 \cdot \rho \cdot f^2}{g} \dots\dots (1)$$

ただし、f：基本振動周波数(Hz, 1/S), g：重力の加速度(9.8m/sec), L：試験材の材長(cm), ρ ：試験材の比重(g/cm³), Efr：基本振動周波数によって得られたヤング係数(10³kgf/cm²) なお、原木の重量測定は、ホイストおよびフォークリフト等を用いて作業の簡便化を図った場合でも面倒な作業であり、現場で簡単に実施することは難しい。そこで、重量測定を省略するため、式(2)によりEfr/ ρ を算出した。

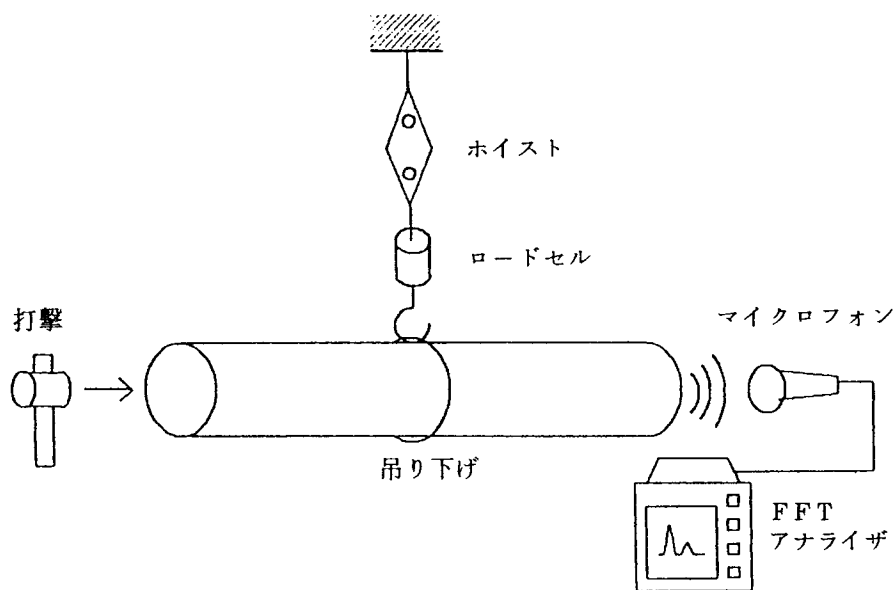


図-1 原木のヤング係数測定方法



写真-1 原木のヤング係数測定方法

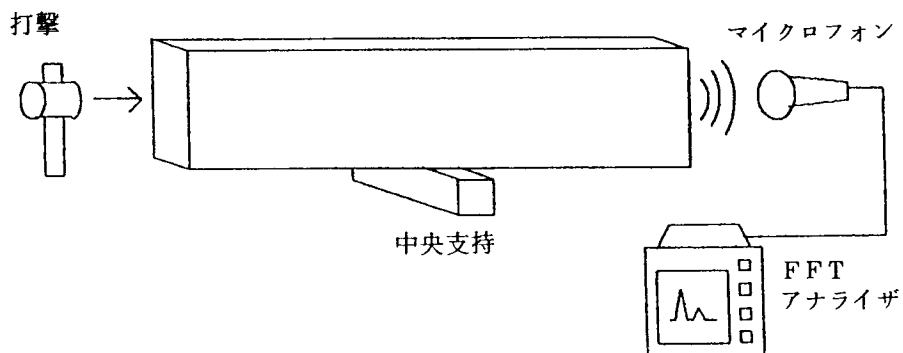


図-2 製材品のヤング係数測定方法

$$\frac{Efr}{\rho} = \frac{f^2 4 L^2}{g} \dots\dots (2)$$

1.2 供試材

供試原木の性状および重量測定を行った後、仕上り寸法10.5cm正角材に製材し、背割りを行い、供試材とした。なお、供試材の両木口より75cm内側に入った部分において切断し、その外側の部分より含水率を採取した。なお、含水率測定用試験片は、1昼夜105℃で全乾とした後、含水率を算出した。

供試材は室内において約4ヶ月間天然乾燥を行い、平均含水率約20%とし、重量および断面寸法を測定し、実大曲げ試験材とした。

1.3 製材品・乾燥材の曲げヤング係数

製材品および乾燥材の基本振動周波数を測定する方法は、試験体を材長方向の中央で支える以外は、原木の基本振動周波数の測定方法と同様に行い(図-2)、動的曲げヤング係数Efrを算出した。

1.4 曲げ強度

曲げ破壊試験は、当センターのアムスラー式万能試験機により実施した。3等分点4点荷重とし、下部スパン210cmとした。曲げ強度MORは(3)式に従って算出した。

$$MOR = \frac{3 P_{max} \cdot l}{b h^2} \dots\dots (3)$$

ただし、Pmax: 最大荷重(kg), l: スパン(cm)

b: 試験材の巾(cm), h: 試験材の高さ(cm),

MOR: 曲げ強度(kgf/cm²)

曲げ破壊試験終了後に3mの試験材の中央部において切断し、厚さ約3cmの試験片を採取し、曲げ試験実施時の含水率を求めた。

1.5 含水率補正

含水率15%時の強度を算出するため、(4)式(ASTM D2915)により含水率補正を行った。

$$P_2 = P_1 \times \frac{\alpha - \beta M_2}{\alpha - \beta M_1} \dots\dots (4)$$

ただし、P₁: 含水率M₁%時の強度性能値, P₂: 含水率M₂%時の強度性能値

M₁, M₂: 含水率(M₁が22%を越える時はM₁=22とする)

α: 含水率補正係数(曲げヤング係数:1.44, 曲げ強度:1.75)

β: 含水率補正係数(曲げヤング係数:0.0200, 曲げ強度:0.0333)

2 結果と考察

2.1 曲げヤング係数

2.1.1 供試原木の動的曲げヤング係数

供試原木の基本振動周波数fおよび動的曲げヤング係数Efr(LOG)を測定した結果を表-1に示す。供試原木の基本振動周波数の平均値は355.1Hzであり、動的曲げヤング係数Efr(LOG)の平均値は75.7tf/cm²であった。なお、供試原木の比重の平均値は0.82g/cm³であった。

2.1.2 供試材の動的曲げヤング係数

製材直後の供試材の動的曲げヤング係数Efr(Gr)の測定結果を表-2に示す。基本振動周波数の平均値は622.5Hzであった。基本振動周波数が、原木時の測定値より高くなっているのは、材長が短くなっているためである。

算出された動的曲げヤング係数の平均値は66.8tf/cm²であった。このため、製材品の動的ヤング係数が原木時に測定した動的曲げヤング係数より低くなった原因としては比重が低くなったためと考え

表-1 原木における動的曲げヤング係数測定結果

区 分	基本振動周波数 f (Hz)	比 重 R (g/cm ³)	動的曲げヤング係数 Efr (tf/cm ²)
本 数	30	30	30
平 均 値	355.1	0.82	75.7
標 準 偏 差	27.73	0.063	11.78
最小値～最大値	310～435	0.72～1.00	55.2～109.1

表-2 スギ柱材（仕上り10.5cm正角材）における動的曲げヤング係数測定結果

区 分	基本振動周波数 f (Hz)	比 重 R (g/cm ³)	動的曲げヤング係数 Efr (tf/cm ²)
本 数	30	30	30
平 均 値	622.5	0.68	66.8
標 準 偏 差	69.31	0.091	11.24
最小値～最大値	515～755	0.53～0.34	43.0～94.5

表-3 スギ乾燥材（仕上り10.5cm正角材）における曲げ強度測定結果

区 分	基本振動周波数 f (Hz)	比 重 R (g/cm ³)	動的曲げヤング係数 Efr (tf/cm ²)	曲 げ 強 度 MOR (kgf/cm ²)
本 数	30	30	30	30
平 均 値	925.8	0.36	63.5	426.2
標 準 偏 差	69.43	0.006	11.19	64.30
最小値～最大値	720～1,010	0.35～0.37	47.6～96.3	319.7～521.7

表-4 各試験実施時の曲げヤング係数と曲げ強度の相関関係（単相関関係）

因子	原木		製材品		乾燥材	
	Efr (LOG)	$\frac{\text{Efr (LOG)}}{\rho}$	Efr (Gr)	$\frac{\text{Efr (Gr)}}{\rho}$	Efr (MC20)	$\frac{\text{Efr (MC20)}}{\rho}$
MOR	0.61	0.79	0.76	0.73	0.59	0.58

られる。製材品の比重は $0.68\text{g}/\text{cm}^3$ 、平均含水率は105%であった。

2.1.3 乾燥材の動的曲げヤング係数

天然乾燥後の製材品の動的ヤング係数 $E_{fr}(\text{MC20})$ の測定結果を表-3に示す。基本振動周波数の測定値の平均は825.8Hzであった。基本振動周波数が、製材時の測定値より高くなった原因としては、曲げ強度が増加したためと考えられる。

算出した動的曲げヤング係数 E_{fr} の平均値は、 $63.5\text{tf}/\text{cm}^2$ であり、製材直後とほぼ同様の値となった。なお、乾燥材の比重は $0.36\text{g}/\text{cm}^3$ であった。

2.1.4 試験実施時におけるヤング係数の関係

原木の動的曲げヤング係数 $E_{fr}(\text{LOG})$ と製材品の動的曲げヤング係数 $E_{fr}(\text{Gr})$ の関係を図-3に示す。相関係数は0.78であり、原木の動的曲げヤング係数より製材品の動的曲げヤング係数を推定することが可能である。

乾燥前後における動的曲げヤング係数 E_{fr} の関係は、順相関を示し、相関係数0.75となった。

原木の動的曲げヤング係数 $E_{fr}(\text{LOG})$ と乾燥材の動的曲げヤング係数 $E_{fr}(\text{MC20})$ の関係を図-4に示す。相関係数は0.85となり、製材品の動的曲げヤング係数 (Gr) との関係より相関が高くなっている。つまり、動的曲げヤング係数は原木で測定しただけでも心持ち柱として利用するならば柱のヤングを推定することができることを意味している。

2.2 曲げ強度

2.2.1 乾燥材の曲げ強度

乾燥材の曲げ強度の平均値は $426.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。最小値は $319.7\text{kgf}/\text{cm}^2$ であり、建築基準法に示された材料強度の $225\text{kgf}/\text{cm}^2$ を満足していた。最大値は $512.7\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、標準偏差は64.30であり、ばらつきは大きい。

2.2.2 測定因子間の相関関係

原木時、製材時および曲げ試験実施時の動的曲げヤング係数 E_{fr} および E_{fr}/ρ と曲げ強度 MOR との関係を調査した結果を表-4に示す。

各測定因子と曲げ強度 MOR との相関関係は0.58以上を示した。このことより原木時、製材時に動的曲げヤング係数 E_{fr} あるいは E_{fr}/ρ を測定することにより乾燥材の曲げ強度をおおよそ推定することが可能といえる。

2.2.3 原木の動的曲げヤング係数と乾燥材の曲げ強度の関係

原木の動的曲げヤング係数 E_{fr} と曲げ強度との関係を図-5に示す。相関係数は0.61、回帰直線は $\text{MOR} = 127.2 + 3.38 E_{fr}(\text{LOG})$ となった。

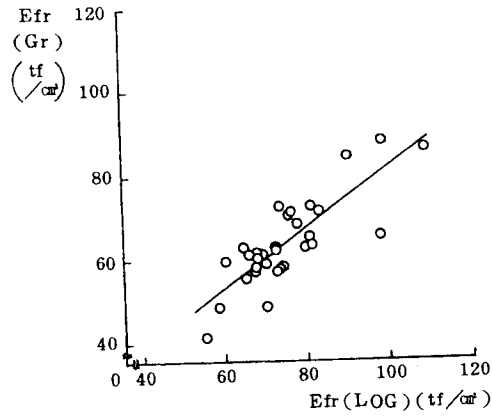


図-3 原木のヤング係数 $E_{fr}(\text{LOG})$ と
製材品のヤング係数 $E_{fr}(\text{Gr})$ の関係
(単位: tf/cm^2)

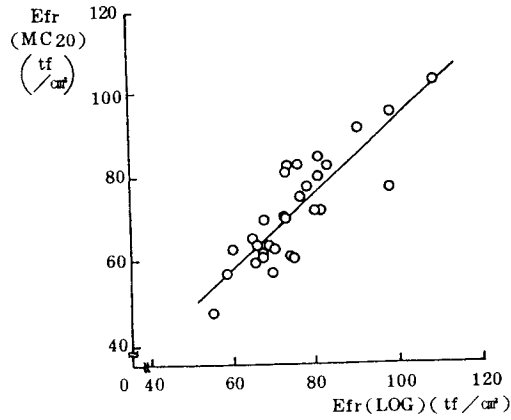


図-4 原木のヤング係数 $E_{fr}(\text{LOG})$ と
乾燥材のヤング係数 $E_{fr}(\text{MC20})$ の関係
(単位: tf/cm^2)

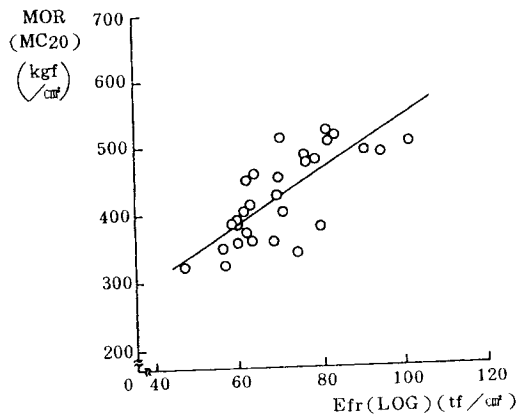


図-5 原木のヤング係数 $E_{fr}(\text{LOG})$ と
曲げ強度 $\text{MOR}(\text{MC20})$ の関係

試 験 II （下呂町産スギ材の強度性能）

1 試 験 の 方 法

1.1 供試原木

岐阜県益田郡下呂町において胸高直径16cm～25cmの根曲りや凍裂等の損傷の少ないスギ中径材72本を選木し、供試原木とした。選木を行った林分は、昭和39年に設置された実験林であり（図-6）、実験林内は施業方法、品種等の違いによる差を検討するためそれぞれの区画に区切られている。水平距離約400mの実験林内の地形・気象等の環境条件は、ほぼ等しい状況といえる。なお、品種間の比較を同一条件で行うため、すべて無施肥区において選木を行った。

供試原木の品種名と供試本数を表-5に示す。供試木は、品種別比較を行うため、すべて、挿木スギとし、すべて1番玉で4mに採材した。11品種、計72本とした。

なお、イトシロスギについては、植栽密度の違いによる強度性能の差を分析するため、植採本数2,000～3,000本/haの疎植～中庸植区画において13本、4,500本/haの多植区画より10本の供試木を選木した。

1.2 供試材

供試原木の性状および重量測定を行った後、仕上がり寸法10.5cm正角材に採材し、背割りをを行った。その後、両木口より50cmずつ切断し、材長を3mとし、供試材とした。厚さ3cmの小試験体による含水率は約100%であった。

供試材は当センターI F式乾燥室において、人工乾燥を行った。乾燥条件については、初期条件は、乾球温度64℃湿球温度62℃、最終条件は、乾球温度78℃湿球温度59℃とした。この設定条件によりすべての品種について欠点の発生少なく平均含水率約18%まで乾燥した。乾燥後は、2～3ヶ月間の養生を行った。

1.3 曲げヤング係数および曲げ強度測定

原木時、製材時、乾燥後に、打撃音測定による動的曲げヤング係数を測定した。

曲げ試験は3等分点4点荷重により行い、下部スパンは270cmとし、曲げ強度を測定した曲げ破壊試験実施時に、全スパンに対応したたわみより算出した曲げヤング係数ELおよび、モーメント一定区間におけるたわみにより算出した曲げヤング係数EIを測定した。その他は試験Iと同様である。なお、曲げ試験実施時の平均含水率は約13%、樹心から1/3を除いた部分の年輪巾は平均4.1mmであった。

表-5 供試木の品種名と供試本数（総本数72本）

№	品 種 名	産 地 名	供試本数
1	キチクスギ	熊 本 県	2
2	クモトオシ	熊 本 県	5
3	シンスギ	熊 本 県	3
4	アヤスギ	北九州一円	4
5	メアサスギ	大 分 県	5
6	ボカスギ	富 山 県	7
7	サンブスギ	千 葉 県	6
8	ミヤチスギ1号	岐 阜 県	3
9	マシタ2号	岐 阜 県	4
10	ヒズモスギ	岐 阜 県	10
11	イトシロスギ	岐 阜 県	23

下呂実験林 スギ品種の適地域性を検討するため昭和39年植栽（岐阜県林セ指導）
 基岩：石英班岩 標高：400～600m 土壌：適潤性褐色森林土～乾性褐色森林土
 気温：平均13.3℃（最高35.7℃，最低-9.9℃） 年間降雨量：2,530mm 積雪：17～30cm

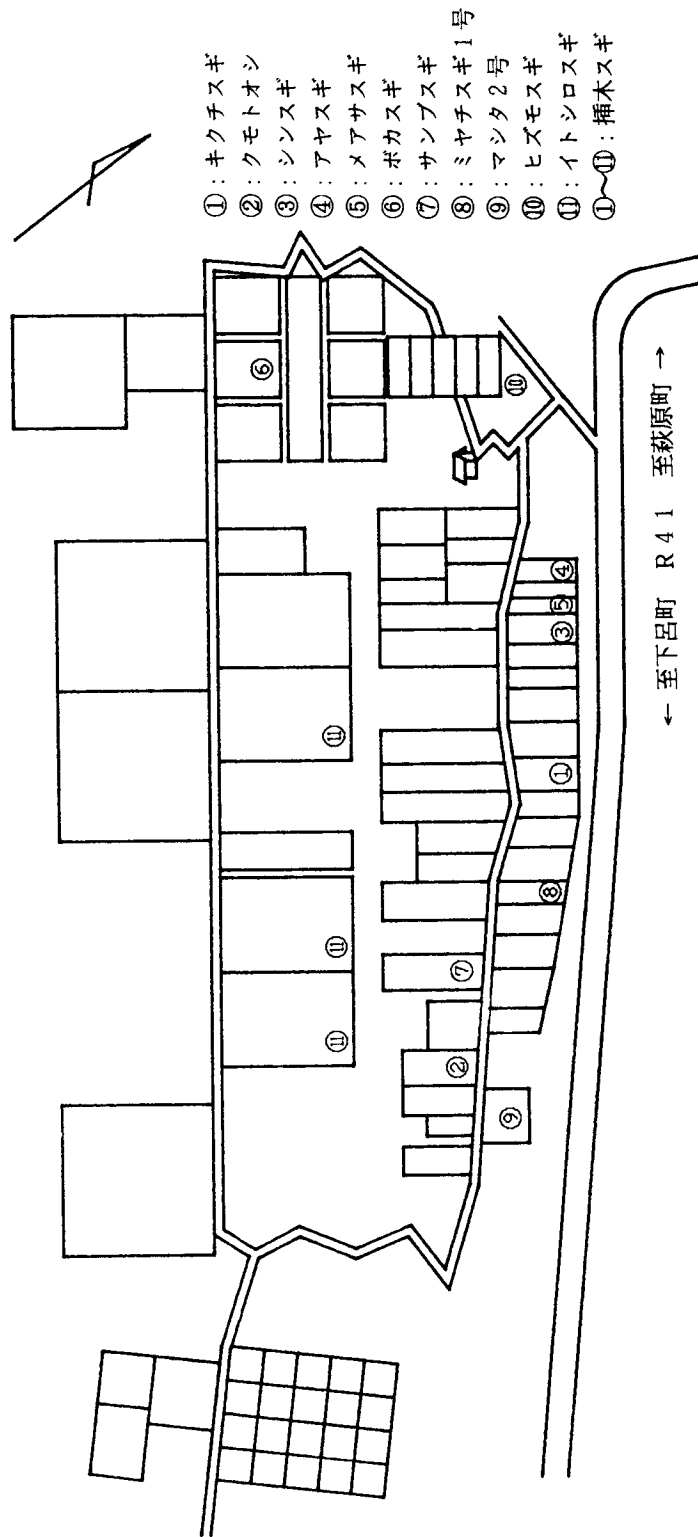


図-6 試験木の選木林分の概況

2 結果と考察

2.1 供試原木

2.1.1 供試原木の性状

原木の性状を測定した結果を表-6に示す。

末口および元口における真円率の平均値は、93.4%であった。

完満度の算出は、末口直径(地上高4.1m)を元口直径(地上高0.1m)で除した百分率で求めた。また、細りについては元口径より末口径を減じ、材長で除した値である。単位面積当たりの植栽本数の違うイトシロスギにおいても完満度・細りに大きな差はみられなかった。

曲りについては曲り量を末口径で除した百分率で示したが平均5.9%と小さな値であった。心材率の平均値は、53.8%であったが、その範囲は38.7%~72.7%であり、ばらつきは大きかった。年輪巾については、平均値は4.4mmであったが、イトシロスギ、ボカスギにおいて6mmを越える原木があった。

偏心度は、中心からの長さを測定し、長径を短径で除した値により求めたが、ボカスギにおいて4.0と大きな値があるもののその他の品種においては最大1.3程度であり、偏心は少ないといえる。

節については個数および節径の平均値はそれぞれ、2.5個、35mmであった。元玉ということもあり節数は少なく、大きさも小さい。

2.1.2 等級区分

供試原木の性状調査を行い、目視による等級区分を行った結果、1等が60本(80%)、2等が15本(20%)であり、3等および等外品はなかった。

2.1.3 原木の動的曲げヤング係数

供試原木71本について動的ヤング係数を測定した結果、平均値は、83.1tf/cm²、最小値は57.3tf/cm²、最大値は106.7tf/cm²であった(図-7)。

2.2 製材品の曲げヤング係数

2.2.1 製材品の動的曲げヤング係数

製材品71本の動的曲げヤング係数を測定した結果、平均値80.4tf/cm²、最小値59.8tf/cm²、最大値103.3tf/cm²であった(図-7)。

原木の動的曲げヤング係数と製材品の動的曲げヤング係数の関係を図-8に示す。相関係数は0.74、回帰直線は $Y = 21.64 + 0.707X$ であった。

2.2.2 乾燥材の動的曲げヤング係数

乾燥材71本について、動的曲げヤング係数を測定した結果、平均値90.4tf/cm²、最小値67.8tf/cm²、最大値113.6tf/cm²であった。木構造計算規準(日本建築学会編)に示されたスギ材の標準値70tf/cm²を下回った材は、ボカスギにおける1体のみであった。

原木および製材品と乾燥材の動的曲げヤング係数の頻度分布を比較すると(図-7)、乾燥により、ピーク値が右へ移行した。頻度分布についても含水率が減少したことにより高い曲げヤング係数に移行した。

2.2.3 栈積状態で動的曲げヤング係数の測定

乾燥終了時に乾燥室内に栈積みしたまま、(写真-2)で乾燥材の48本について基本振動周波数を測定した場合の動的曲げヤング係数と1本1本盤木にのせ測定した場合の動的曲げヤング係数の関係を図-9に示す。相関係数は、0.99であり、回帰直線の傾きは0.993、Y切片は、-1.057であった。この結果より1本1本盤木に乗せなくても、栈積み状態のままでも測定が可能であるといえる。なお、栈積み状態における測定においては1人で、ハンマーを右手、マイクを左手に持ち、測定を実施した結果である。打撃する木口と集音する木口は同一面であっても測定が可能といえる。

表-6 品種別スギ原木の性状

品 種 名	真円率	完満度	細 り	曲	心 材 率	年輪巾	偏 心 度	節 径	
	平均値	0.1~4.1m		割	平均比率	平 均	平均偏心	最 大	総個数
	%	%	cm/m	%	%	mm	%	mm	個
ク モ ト オ シ	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	95.2	63.6	0.91	6.1	48.0	4.1	1.1	14	0.8
	87.5	56.3	0.73	2.8	45.0	3.9	1.0	0	0
	100.0	77.1	1.20	13.3	50.4	4.5	1.2	30	2
マ シ タ 2 号	3	4	4	4	4	3	3	3	4
	91.4	57.4	57.4	1.23	4.0	56.3	6.0	1.1	2.8
	83.3	54.5	54.5	0.98	1.7	52.3	5.3	1.0	1
	100.0	60.0	60.0	1.48	6.0	60.7	7.2	1.3	5
サ ン プ ス ギ	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	94.7	62.4	0.82	6.0	57.2	4.1	1.1	28	2
	80	60.0	0.50	2.8	48.8	3.3	1.0	0	0
	100.0	67.5	0.98	12.5	63.8	5.3	1.2	50	3
ミ ヤ チ ス ギ 1 号	2	3	3	3	2	2	2	3	3
	98.6	59.4	1.23	3.4	59.7	4.7	1.0	33	2.3
	94.4	55.4	0.98	1.7	57.4	4.3	1.0	30	2
	100.0	61.4	1.47	5.6	62.0	5.1	1.0	40	3
キ ク チ ス ギ	1	2	2	2	1	1	1	2	2
	83.7	56.2	1.33	9.0	62.8	4.1	1.1	40	3.5
	79.2	53.1	0.97	5.9	62.8	4.1	1.1	40	3
	88.2	59.2	1.69	12.0	62.8	4.1	1.1	40	4
シ ン ス ギ	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	90.8	59.7	0.80	8.2	57.8	4.9	1.2	37	2.7
	84.2	56.3	0.68	4.3	50.9	3.3	1.0	30	2
	94.4	61.8	0.98	15.0	65.7	7.2	1.3	40	3
メ ア サ ス ギ	4	5	5	5	4	4	4	5	5
	87.5	58.5	1.11	7.6	59.6	5.3	1.0	34	2.6
	82.6	51.1	0.48	4.6	49.9	4.4	1.0	20	2
	92.0	68.5	1.70	14.7	72.7	5.9	1.0	50	4
ア ヤ ス ギ	2	5	5	5	2	2	2	5	5
	93.5	61.0	0.87	7.0	46.5	4.0	1.1	44	3.6
	90.5	53.6	0.48	2.9	41.7	3.8	1.0	30	3
	95.0	67.1	1.45	10.0	51.3	4.2	1.1	50	5
イ ト シ ロ ス ギ 2,000 本	6	7	7	7	6	6	6	7	7
	95.1	58.6	1.04	3.7	57.1	3.9	1.0	33	1.7
	87	55.3	0.72	1.2	53.1	2.2	1.0	20	1
	100.0	61.8	1.23	6.7	62.5	4.6	1.1	50	3
イ ト シ ロ ス ギ 3,000 本	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	94.7	55.6	1.04	4.4	46.0	3.5	1.0	43	3.3
	88.9	51.6	0.97	2.5	38.7	3.0	1.0	40	2
	100.0	58.3	1.22	10.0	52.1	3.9	1.0	60	5
イ ト シ ロ ス ギ 4,500 本	4	9	9	10	4	4	4	10	10
	93.8	58.6	0.97	4.5	54.4	5.4	1.1	34	2.6
	85.7	55.3	0.71	0.0	46.3	4.4	1.0	20	2
	100.0	63.2	1.20	10.6	62.8	8.3	1.3	50	4
イ ト シ ロ ス ギ 計	17	23	23	24	17	17	17	24	24
	93.9	57.7	1.01	4.3	51.9	4.1	1.0	36	2.5
	85.7	51.0	0.71	0.0	38.7	2.2	1.0	20	1
	100.0	63.2	1.23	10.6	62.8	8.3	1.3	60	5
ボ カ ス ギ	5	7	7	7	5	5	4	7	7
	90.2	58.1	1.24	9.8	48.3	5.2	1.8	41	3.3
	80.8	51.1	0.73	6.8	43.0	3.8	1.0	30	2
	100.0	63.2	1.71	15.3	56.3	8.6	4.0	50	5
ヒ ズ モ ス ギ	5	9	9	9	5	5	5	9	9
	92.9	59.2	1.00	6.0	57.6	4.0	0.9	31	2.2
	83.3	53.6	0.73	2.1	51.9	3.7	0.5	0	0
	100.0	63.8	1.46	9.3	64.0	4.4	1.1	40	3
総 計	54	74	73	75	54	54	53	75	75
	93.4	59.1	1.03	5.9	53.8	4.4	1.1	35	2.5
	79.2	51.1	0.48	0.0	38.7	2.2	0.5	0	0
	100.0	77.1	1.71	15.3	72.7	8.6	4.0	60	5

備考:表中の数字は上段より本数、平均値、最小値、最大値を表す。

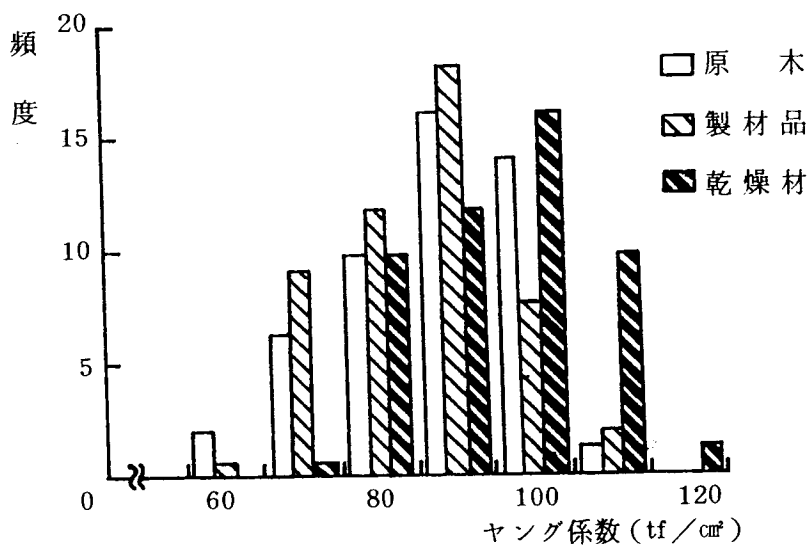


図-7 原木、製材品および乾燥材の
動的ヤング係数の頻度分布

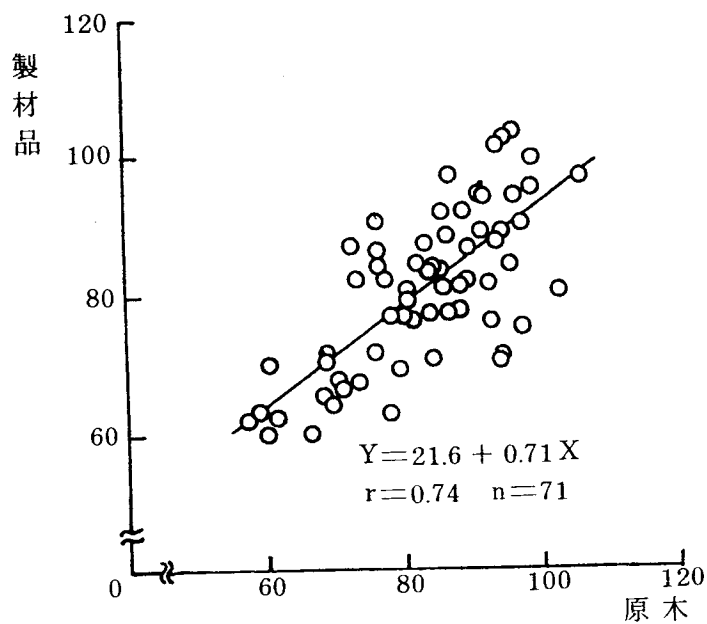


図-8 原木と製材品の
動的ヤング係数の関係
(単位: tf/cm^2)

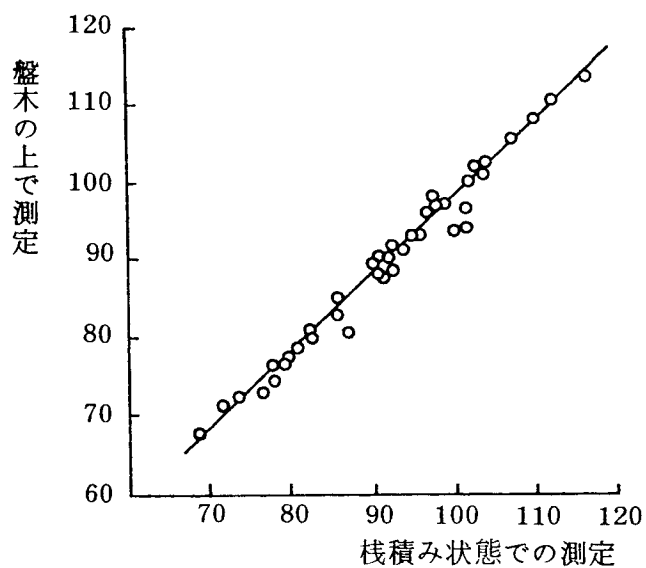


図-9 栈積み状態と盤木の上で1本ずつ測定した動的曲げヤング係数 E_{fr} の関係
(単位: tf/cm^2)

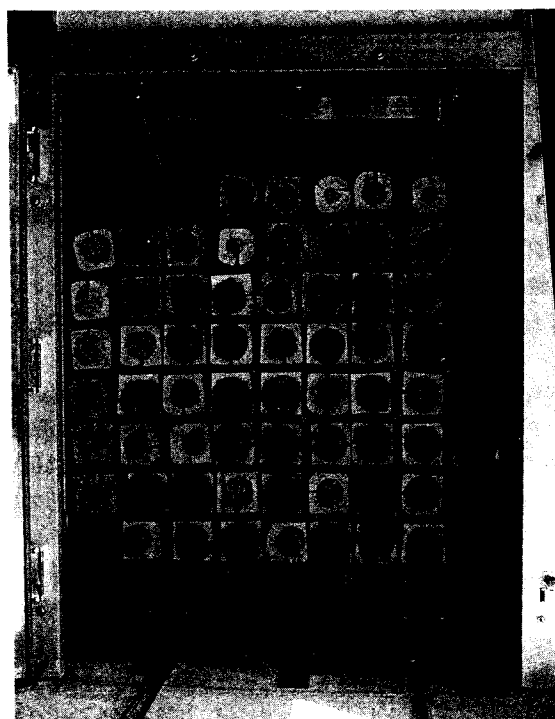


写真-2 栈積み状況

2.2.4 原木と乾燥材の曲げヤング係数

原木の動的曲げヤング係数と乾燥材の動的曲げヤング係数の関係を図-10に示す。原木と製材品の関係とはほぼ同様の傾向を示し、相関係数0.71、回帰直線のX係数0.686、Y切片33.43であった。原木の動的曲げヤング係数より乾燥材の動的曲げヤング係数をおおよそ推定することが可能といえる。

2.3 曲げ強度

試験材72本の平均値は447.7kgf/cm²、最低値は302.6kgf/cm²であり、建築基準法施工令第95条の材料強度225kgf/cm²をすべが満足していた。頻度分布を図-11に示す。強度性能の異なる多品種の試験体の分布であったため左裾広がりとなり、正規分布とはいえなかった。

品種別の曲げ強度測定結果を図-12、表-7に示す。図中の曲げ強度MORの値は、各試験材の含水率を15%に補正した値を示し、以後MOR(MC15)と記す。

品種により曲げ強度のばらつきがあり、ボカスギ・マシタ2号、クモトオシ、メアサスギの曲げ強度が若干低く、シンスギ、アヤスギ、サンプスギにおいては他品種に比べて高い曲げ強度が得られた。

2.3.1 測定因子間の相関関係

各測定因子間の順位相関係数(単相関係数)を調査した結果を表-8に示す。なお、曲げ強度の頻度分布は正規分布とは異なった傾向を示していたので、各因子の順位により相関を求めた。なお、乾燥材の曲げヤング係数、曲げ強さは、含水率15%に換算した値である。

原木の動的曲げヤング係数と乾燥材の曲げヤング係数は0.64~0.70と高い値になったが、原木の動的曲げヤング係数と曲げ強度との相関係数は完満度等の影響を受け、0.40と若干低い値となった。

原木の完満度とMOR(MC15)の相関係数は0.42であり、有意水準0.01で有意であった。完満度が低い材は、末口径に対し元口径が大きい材であり、この原木から製材される材は完満度の高い材と比較し、材縁部に強度の低い心材部分の占める割合が高くなる。このため、完満度の低い材は完満度の高い材と比較し、曲げ強度が低くなったと考えられる。

年輪巾と曲げヤング係数、曲げ強度との相関係数は年輪巾のばらつきが少なく、他の要因の影響もあり約0.10と低い値となった。年輪巾により曲げ強度を推定することは難しいと考えられる。

乾燥材の動的曲げヤング係数E_{fr}と曲げヤング係数E_L、E_Iとは、0.88以上の順位相関係数が得られ、動的曲げヤング係数E_{fr}により曲げヤング係数E_L、E_Iを推定することが可能といえる。

なお、曲げ強度との相関が有意水準0.01で有意であった因子は原木の動的曲げヤング係数E_{fr}、完満度TD、比重R、乾燥材の曲げヤング係数E_{fr}、E_L、E_Iであった。

2.3.2 動的曲げヤング係数と曲げ強度の関係

動的曲げヤング係数E_{fr}と曲げ強さMORの関係を図-13に示す。E_{fr}、MOR共に含水率15%に補正した値を用いた。

動的曲げヤング係数E_{fr}と曲げ強度MORの相関係数は0.54と若干低い値となった。この原因としては品種により曲げヤング係数E_{fr}(MC15)と曲げ強度MOR(MC15)の関係が若干異なっていることが考えられる。ボカスギについては動的曲げヤング係数、曲げ強度共に低い値であった。これに対し、アヤスギについては動的曲げヤング係数が低い割に高い曲げ強度を有している。また、クモトオシについては動的曲げヤング係数が比較的高い値であったが曲げ強度は低くなっていた。これらのことより動的曲げヤング係数E_{fr}により曲げ強度MORを推定する場合、品種によっては、異なった関係を示す場合もあるので、十分にデータを蓄積してから推定を行う必要があると考えられる。

2.3.3 植栽密度別曲げ強度

植栽密度の異なる同一品種のスギ材の強度を測定した結果を図-14に示す。疎植~中庸区画および多植区画の曲げ強度の平均値は、それぞれ411.3kgf/cm²、453.0kgf/cm²であった。多植区画におけるスギ材の曲げ強度は疎植~中庸区画と比較し、約1割程度強い曲げ強度を有していた。

植栽密度を上げることにより曲げ強度の強い製材品を生産することが可能と考えられる。

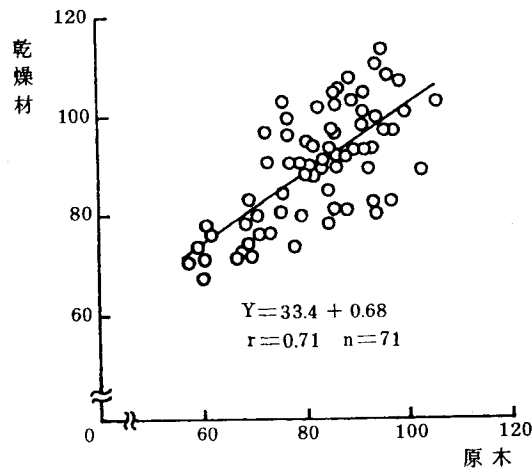


図-10 原木と乾燥材の
動的ヤング係数の関係
(単位: tf/cm^2)

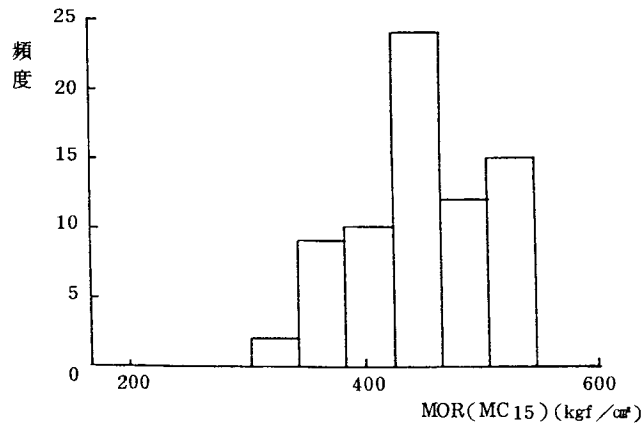


図-11 曲げ強度MOR(MC15)の頻度分布

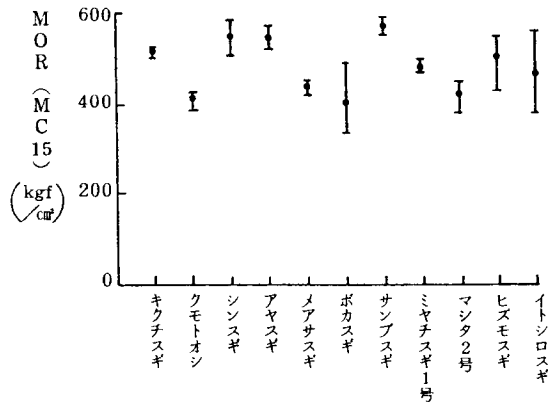


図-12 品種別強度特性(曲げ強度)

表-7 品種別曲げ強さ (MC15) 測定結果

品 種 名	キクチスギ	クモトオシ	シンスギ	アヤスギ	メアサスギ	ボカスギ	サンプスギ
本数 (本)	2	5	3	4	5	8	6
平均 (kgf/cm ²)	462.76	483.76	504.67	505.69	457.62	366.29	525.86
最小 (kgf/cm ²)	445.1	435.3	463.4	481.2	415.9	302.6	505.0
最大 (kgf/cm ²)	480.4	509.6	541.4	530.0	493.4	435.3	545.3

品 種 名	ミヤチスギ1号	マシタ2号	ヒズモスギ	イトシロスギ
本数 (本)	3	4	9	22
平均 (kgf/cm ²)	435.99	385.93	468.27	429.20
最小 (kgf/cm ²)	419.5	344.0	424.3	354.8
最大 (kgf/cm ²)	460.7	416.7	512.8	509.3

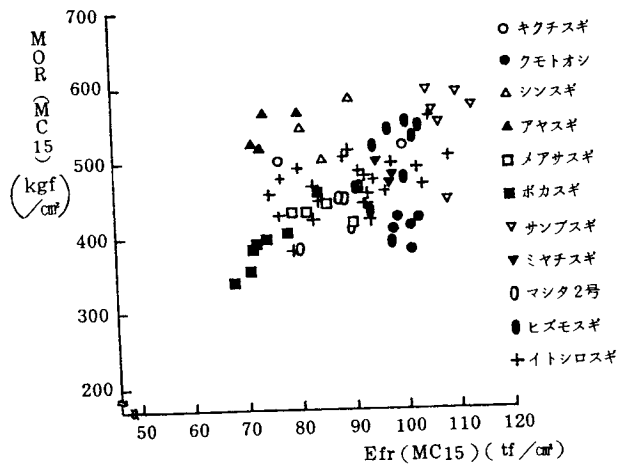


図-13 乾燥材の曲げヤング係数 Efr (MC15) と曲げ強度 MOR (MC15) の関係

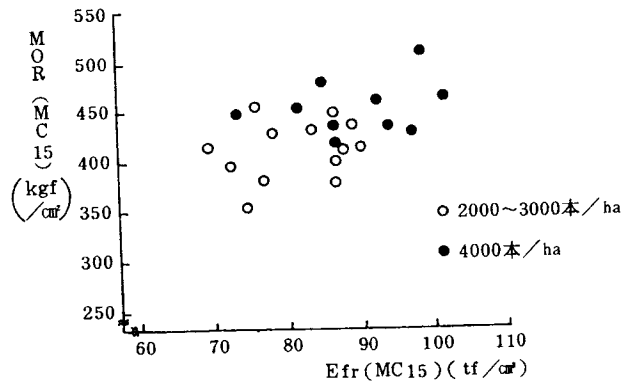


図-14 イトシロスギの植栽密度の違いによる Efr (MC15) と MOR (MC15) の関係

表-8 スギ柱材における各因子間の順位相関関係 (単相関係数)

因 子	E f r (LOG)	末口径	元口径	完満度	比 重 (LOG)	年輪巾	比 重 (MC15)	E f r (MC15)	E L (MC15)	E l (MC15)	M O R (MC15)
E f r (LOG)	1										
末 口 径	-0.09	1									
元 口 径	-0.05	0.79	1								
完 満 度	0.03	0.36	0.03	1							
原 木 比 重	0.46	-0.31	-0.09	-0.14	1						
年 輪 巾	0.04	0.59	0.59	0.12	-0.01	1					
比 重 (MC15)	-0.03	-0.23	-0.28	0.18	0.05	-0.26	1				
E f r (MC15)	0.71	0.12	0.02	0.23	0.20	-0.08	0.12	1			
E L (MC15)	0.74	0.26	0.17	0.26	0.22	0.11	0.05	0.90	1		
E l (MC15)	0.66	0.20	0.18	0.28	0.05	0.07	0.13	0.88	0.88	1	
M O R (MC15)	0.33	-0.04	-0.19	0.42	0.11	-0.13	0.65	0.54	0.57	0.58	1

備考：E fr (LOG)：原木における非破壊試験によるヤング係数

E L (MC15)：曲げヤング係数 (全スパン)

E fr (MC15)：破壊試験による乾燥材 (含水率15%) のヤング係数

E l (MC15)：曲げヤング係数 (モーメント一定区間)

M O R (MC15)：曲げ強度

MC15：含水率15%に換算した値

2.4 非破壊パラメータによる曲げ強度の推定

2.4.1 因子間の類似性

曲げ強度は曲げヤング係数とその他の因子により影響を受けていると考えられる。そこで、非破壊的に曲げ強度を推定する場合のパラメーターを決定するために、各因子間の類似性を検討した。各因子間の順位相関係数行列をもとにクラスター分析（最短距離法）を行い、類似性を調査した結果を図-15に示す。なお、クラスター分析を行う際の因子は、表-8において曲げ強度MORとの相関が有意水準0.01で有意であった因子とした。(1)

デンドログラムにより乾燥材の曲げヤング係数 $E_{fr}(MC15)$ 、 $E_L(MC15)$ および $E_I(MC15)$ の3因子が類似性が最も高く、続いて完満度TD、比重 $R(MC15)$ 、原木の動的曲げヤング係数 $E_{fr}(LOG)$ の順であった。

そこで、製材品において重回帰分析により曲げ強度推定する場合の係数を $E_{fr}(MC15)$ および比重 $R(MC15)$ とし、原木時における係数を原木の $E_{fr}(LOG)$ および完満度TDとした。

2.4.2 乾燥材における曲げ強度の推定

乾燥材における比重 $R(MC15)$ および動的曲げヤング係数 E_{fr} の2変数による重回帰分析を行った結果、関数式(5)が得られた。

$$MOR(MC15) = -240.6 - 1200 \times R(MC15) + 2.00 \times E_{fr}(MC15) \quad \cdots \cdots (5)$$

自由度調整済重相関係数は、0.85であった(図-16)。比重および E_{fr} がMORに影響を与えている割合を示す標準偏回帰係数については、比重(MC15)が0.64、 E_{fr} が0.47であった。なお、重回帰式のあてはまりは有意水準0.01で有意であった。

順位正規化した曲げ強度MOR(MC15)とこれに対応する関係式5により得られた乾燥材の強度推定値の関係を図-17に示す。推定値は実測値と比較して若干のばらつきはあるもののほぼ同様の傾向を示した。このことより、乾燥材の比重および動的曲げヤング係数により動的曲げヤング係数のみの場合よりさらに精度よく曲げ強度を推定することが可能であるといえる。

2.4.3 原木における曲げ強度の推定

原木における動的曲げヤング係数 E_{fr} と完満度TDの2変数による重回帰分析を行った結果、関数式(6)が得られた。

$$MOR(MC15) = 11.0 + 4.87 \times TD + 1.80 \times E_{fr}(LOG) \quad \cdots \cdots (6)$$

自由度調整済重相関係数は、0.53であった。標準偏回帰係数については、完満度が0.40、 E_{fr} が0.41であり、ほぼ同程度MORに影響を与えている。なお、重回帰式のあてはまりは有意水準0.01で有意であった。このことより、原木の完満度および動的曲げヤング係数により原木の動的曲げヤング係数のみの場合よりさらに製材品の曲げ強度に近い値を推定することが可能であるといえる。

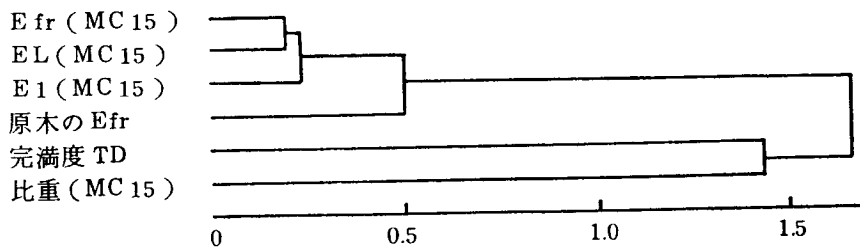


図-15 クラスター分析によるデンドログラム

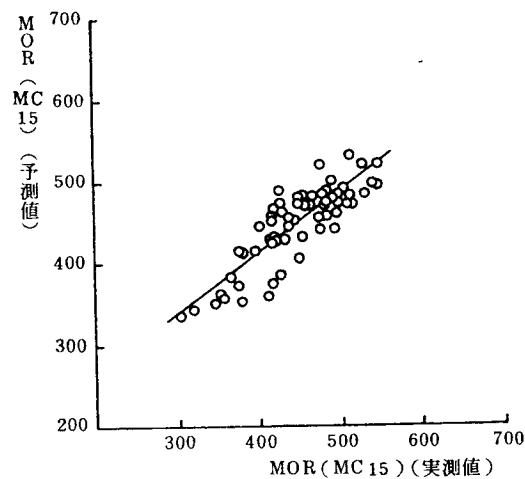


図-16 曲げ強度 MOR (MC 15) の実測値と
比重および曲げヤング係数 Efr により
推定した予測値との関係 (単位: kgf/cm^2)

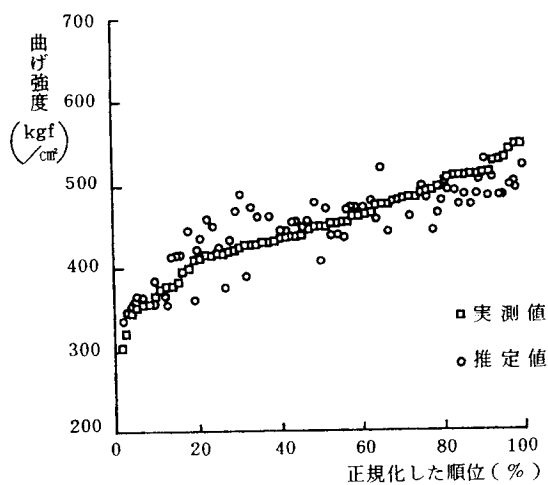


図-17 正規化した曲げ強度の順位と対応する
乾燥材における曲げ強度の推定値の関係
(比重及び Efr による推定)

試 験 III (東濃ヒノキ材の強度性能)

1. 試 験 の 方 法

1.1 供試材

岐阜県東濃地区において製材された東濃ヒノキ材(12cm正角材、材長3m)を、当センター乾燥室において、人工乾燥を行い、平均含水率約15%とし、断面寸法、材長、節等の測定を行った。なお、背割りは行わなかった。

1.2 曲げヤング係数の測定

試験Ⅰと同様の方法で測定した。

1.3 曲げ強度の測定

試験Ⅱと同様の方法で実施した。

2. 結 果 と 考 察

2.1 供試材

供試材の強度測定結果を表-9に示す。

比重測定結果は等級による差はなく、0.49~0.51g/cm³であり、ばらつきは少ない。

2.2 曲げヤング係数

動的曲げヤング係数の頻度分布を図-18に示す。動的曲げヤング係数E_{fr}は正規分布となり、その平均値は127.8tf/cm²であった。また、動的曲げヤング係数E_{fr}および曲げヤング係数E_L、E_Iともに木構造計算規準の許容応力度90tf/cm²をすべて上回っていた。

2.3 曲げ強度

曲げ強度の頻度分布を図-19に示す。正規分布となり、平均値は638.1kgf/cm²であった。最低値は、474.1kgf/cm²であり、建築基準法施工令第95条の材料強度270kgf/cm²をすべて満足していた。等級別にみても1等は2等より約5%高く2等は3等より約10%高い値を示した。

2.4 測定因子間の相関関係

各因子間の相関を調査した結果を表-10に示す。

動的曲げヤング係数E_{fr}、曲げヤング係数E_I、E_Lの間の相関係数はそれぞれ0.93、0.92と高い相関関係が得られた。

曲げ強度MORと有意水準0.01で有意な相関が得られた因子は、E_{fr}、E_L、E_I、eKDC、eKDL、eSKDC、eSKDL、SKDL、KAR、SKARであった。

2.5 曲げヤング係数の関係

乾燥材の動的曲げヤング係数E_{fr}と曲げヤング係数E_Iの関係を図-20に示す。動的曲げヤング係数E_{fr}より曲げヤング係数E_Iを推定することが可能といえる。回帰直線は $E_I = -7.4 + 1.03 \times E_{fr}$ となった。

2.6 曲げヤング係数と曲げ強度の関係

動的曲げヤング係数E_{fr}と曲げ強度MORの関係を図-21に示す。

相関係数は、0.52と若干低い値となった。この原因を探るため、等級別の相関関係を調査した。その結果、1等は0.53、2等および3等材の相関係数は、0.40であり、節等の影響を受け相関が低くなったと考えられる。

2.7 曲げ強度の推定

曲げ強度を推定する場合の重回帰分析の変数を決定するため、表-10をもとにクラスター分析(最

表-9 ヒノキ柱材における強度測定結果

等級	項 目	比 重 g/cm^3	Efr tf/cm^2	EL tf/cm^2	EI tf/cm^2	MOR kgf/cm^2
1等	本 数	16	16	16	16	16
	平 均	0.49	132.8	121.8	127.8	690.4
	標 準 偏 差	0.030	14.48	13.45	15.76	99.60
	最小値~最大値	0.44~0.55	111.3~171.0	104.7~167.0	105.4~178.4	560.7~894.1
2等	本 数	6	6	6	6	6
	平 均	0.49	124.9	117.4	122.5	656.9
	標 準 偏 差	0.022	6.28	7.38	8.42	41.45
	最小値~最大値	0.46~0.53	113.8~132.5	104.8~126.2	109.2~137.1	605.9~719.1
3等	本 数	23	23	23	23	23
	平 均	0.51	125.2	115.5	121.0	596.9
	標 準 偏 差	0.026	11.95	10.12	11.97	77.64
	最小値~最大値	0.46~0.56	104.0~152.1	97.3~140.3	102.9~155.4	474.1~741.5
4等	本 数	45	45	45	45	45
	平 均	0.50	127.8	118.0	123.6	638.1
	標 準 偏 差	0.030	12.76	11.72	14.12	94.05
	最小値~最大値	0.44~0.56	104.0~171.0	97.3~167.0	102.9~178.4	474.1~894.1

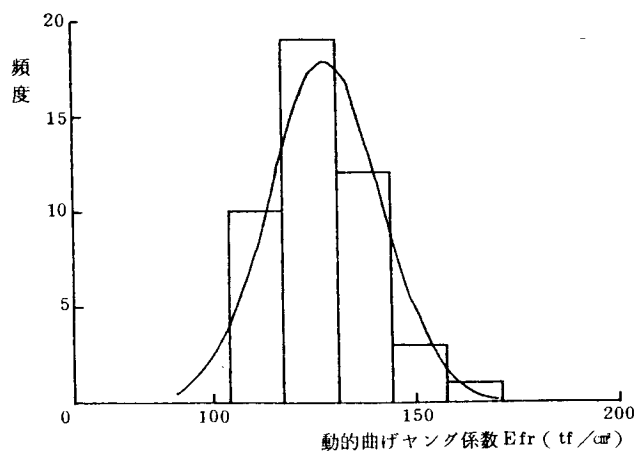


図-18 ヒノキ正角材における
動的曲げヤング係数 Efr の頻度分布

表-10 ヒノキ柱材における各因子間の相関関係 (単相関係数)

因子	Efr	EL	E1	比重	年輪巾	繊維傾斜	SPL	eKDC	eKDL	eSKDC	eSKDL	cKDC	cKDL	cSKDC	cSKDL	KAR	SKAR
MOR	** 0.52	** 0.60	** 0.56	** 0.09	* -0.33	* 0.13	** 0.67	** -0.53	** -0.54	** -0.41	** -0.48	* -0.29	* -0.31	-0.23	-0.20	** -0.40	** -0.46
E1	** 0.93	* 0.96															** -0.47
EL	** 0.92																

備考) : * 5 %水準で有意、** : 1 %水準で有意

Efr : 非破壊試験によるヤング係数

EL : 曲げヤング係数 (全スパン)

E1 : 曲げヤング係数 (モーメント一定区間)

MOR : 曲げ強度

SPL : 曲げ比例限度

eKDC : 材縁部の最大単独節径比 (中央 1 / 3 区間)

eKDL : 材縁部の最大単独節径比 (全区間)

cSKDC : 材縁部のみの最大集中節径比 (中央 1 / 3 区間)

cSKDL : 材縁部のみの最大単独節径比 (全区間)

cKDC : 材巾中央部の最大単独節径比 (中央 1 / 3 区間)

cKDL : 材巾中央部の最大単独節径比 (全区間)

cSKDC : 材巾中央部のみの最大集中節径比 (中央 1 / 3 区間)

cSKDL : 材巾中央部のみの最大集中節径比 (全区間)

SKDL : 材縁部 + 材巾中央部の最大集中節径比 (全区間)

KAR : 単独節径比

SKAR : 単独節面積比

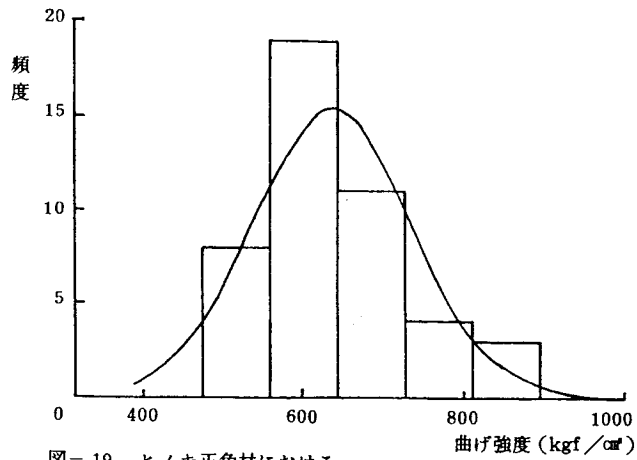


図-19 ヒノキ正角材における
曲げ強度の頻度分布

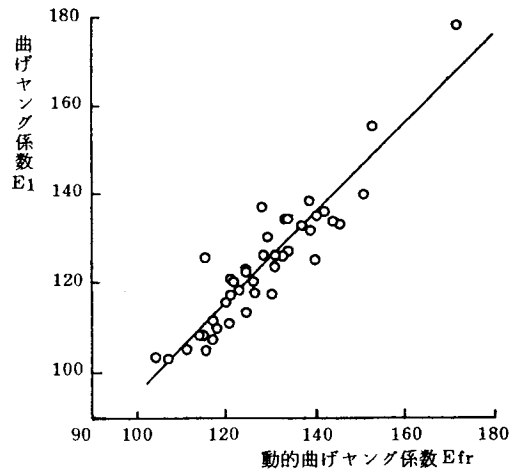


図-20 乾燥材の動的曲げヤング係数 E_{fr} と
曲げヤング係数 E_1 の関係 (単位: tf/cm^2)

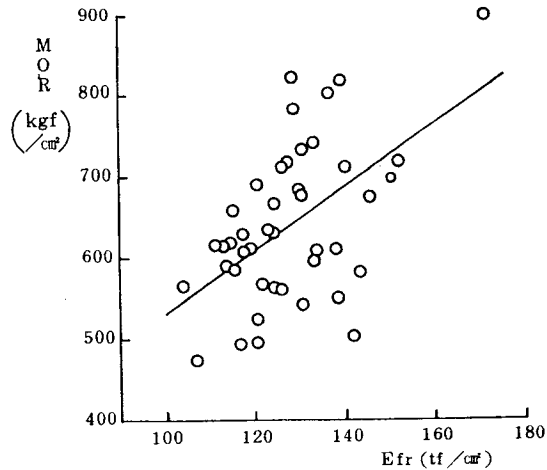


図-21 乾燥材の動的曲げヤング係数 E_{fr} と
曲げ強度 MOR の関係

短距離法)により各因子の類似性を調査した結果を図-22に示す。なお、クラスター分析を行う際の因子は、曲げ強度MORとの相関が有意水準0.01の因子とした。

デンドログラムより主に曲げヤング係数、節径比、集中節径比の3グループに分けられることがわかった。そこで、重回帰分析のための変数として曲げヤング係数のグループにおいては動的曲げヤング係数Efrを選択し、節径比のグループでは、距離が最も近く相関関係が強い材縁部の最大単独節径比eKDLを選択、材縁部の集中節径比のグループではeSKDLを重回帰分析の変数に選択した。3変数により重回帰分析を行った結果、関数式(7)が得られた。

$$MOR = 357.3 - 4.15 \times eKDL - 1.02 \times eSKDL + 2.98 \times Efr \quad \cdots \cdots (7)$$

自由度調整済重相関係数は、0.68であった(図-23)。標準偏回帰係数については、eKDLが-0.38、eSKDLが-0.19、Efrが0.40であり、Efr、eKDLがほぼ同程度、eSKDLが若干MORに影響を与えている。なお、重回帰式のあてはまりは有意水準0.01で有意であった。

このことより、動的曲げヤング係数Efrおよび材縁部の最大単独節径比eKDL、集中節径比eSKDLの3変数により動的曲げヤング係数Efrのみの場合より精度良く推定することができる。

正規化した曲げ強度の順位と対応する乾燥材における式7による曲げ強度推定値の関係を図-24に示す。正規化順位が40~70%の材においては、実測値と推定値はほぼ同じであるが、0~40%の材については推定値の方が高く、70%以上の材は推定値の方が低くなる傾向がみられた。

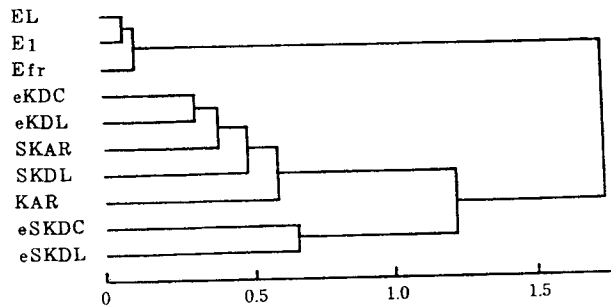


図-22 クラスター分析によるデンドログラム

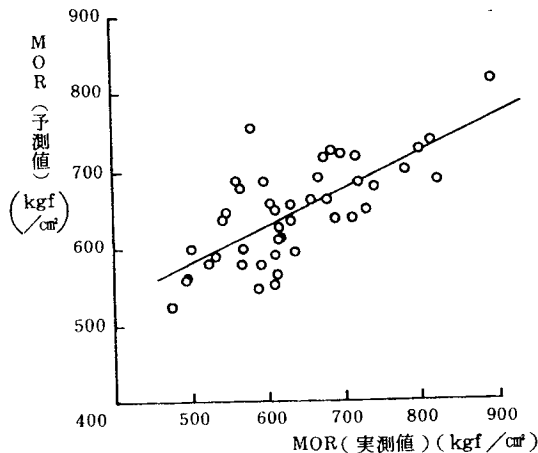


図-23 曲げ強度MORとeKDL、eSKDL、Efrにより推定した予測値との関係

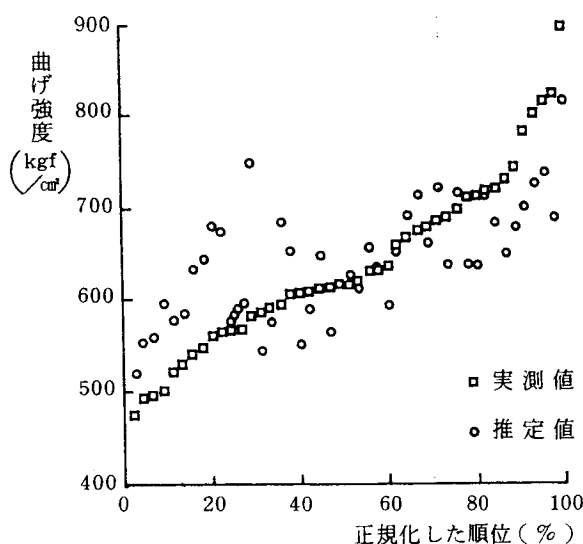


図-24 正規化した曲げ強度の順位と対応する乾燥材における曲げ強度推定値の関係
(eKDL、eSKDL、Efrより推定)

ま と め

本県産スギ中径材において、原木から仕上がり10.5cm正角材を採材し、人工乾燥を行い、原木、製材品および乾燥材の動的曲げヤング係数の関係について分析を行った。また、ヒノキ12cm正角材について曲げヤング係数および曲げ強度を測定し分析を行った。その結果をまとめると次のようになる。

1. 同一林分においてスギ中径材の曲げ強度を測定した結果、品種により強度性能が異なることがわかった。
2. 植栽密度の異なる同一品種のスギ中径材の曲げ強度を測定した結果、多植区画におけるスギ材の曲げ強度は、疎植～中庸植区画における曲げ強度と比較し、約1割高い強度が得られた。
3. スギ原木および製材品において打撃音による曲げヤング係数を測定することにより、曲げ強度をおおよそ推定することが可能である。

また、原木においては、完満度と動的曲げヤング係数、製材品においては比重と曲げヤング係数により曲げ強度をさらに精度良く推定することが可能である。

4. スギ中径材において乾燥材の動的曲げヤング係数Efrと曲げ強度との関係を分析した結果、回帰直線は、品種により異なる可能性があるため、動的曲げヤング係数Efrにより曲げ強度を推定する場合、十分なデータを蓄積した上で推定を行う必要があると考えられる。
5. 本県産ヒノキ12cm正角材について、曲げヤング係数および曲げ強度を測定し、分析を行った結果、動的曲げヤング係数Efrと曲げ強度MORの相関係数は、0.52であり、EfrによりMORをおおよそ推定することが可能である。

また、動的曲げヤング係数Efr、材縁部の最大単独節径比eKDLおよび材縁部の最大集中節径比eSKDLの3つの変数により、曲げ強度MORについて重回帰分析を行った結果、さらに曲げ強度に近い値を推定することが可能である。

謝

辞

供試原木を提供して頂き、また伐採・搬出に当たり、ご協力頂きました下呂町・下呂町森林組合に、試験木の伐採・搬出に当たりご協力いただいた益田県事務所に感謝いたします。

原木、製材品の測定にあたりご指導、ご助言いただいた香川紘一郎（現林業センター育林研究部）、平岡厚雄氏（現林政部自然保護課）、臼井征雄氏（現林政部自然保護課）に感謝いたします。

曲げ試験実施に当たり、曲げ強度試験機の借用および、ご指導、ご助言いただいた長野県林業総合センターおよび三重県林業技術センターに感謝いたします。

引用文献

- (1) 菅 民朗, (1991), 入門 パソコン統計処理(下), 技術評論社
- (2) 東野 正ら, (1990), アカマツ材の強度(1) - 平角材の曲げ強度 -, 第40回日本木材学会大会研究発表要旨集, p378

参考文献

- (1) 江口 篤ら, (1992), 木材加工技術ハンドブック, 奈良県林業試験場, 奈良
- (2) 坂口勝美, (1983), 新版スギのすべて, 社団法人全国林業改良普及協会
- (3) 杉山正典ら, (1993) 梓組壁工法用部材の生産技術開発, 岐阜県林業センター研究報告第21号
- (4) 祖父江信夫, (1989) 振動現象を利用した実大構造材の弾性率測定 - 理論と応用 -, 平成元年度文部省科学研究費(試験研究)資料, p28~p54
- (5) 田中俊成ら, (1990), 各種非破壊試験によるヒノキ正角の曲げ・縦引張り・縦圧縮強度の推定, 第40回日本木材学会大会研究発表要旨集, p385
- (6) 田中 豊ら, (1984), パソコン統計解析ハンドブック I, II, 共立出版株式会社, 東京
- (7) 中井孝ら, (1990), 実大材における動的ヤング係数と静的ヤング係数との関係, 第40回日本木材学会大会研究発表要旨集, p384
- (8) 中井孝ら(1992) スギ中径丸太の曲げ強度性能に及ぼす含水率の影響, 第42回日本木材学会大会研究発表要旨集, p140
- (9) 中井 孝ら, (1990), 林業技術ハンドブック, 社団法人全国林業改良普及協会, 東京
- (10) 菱田重寿, (1991), 丸太状態における強度測定, 日本木材加工技術協会第9回年次大会(名古屋)講演要旨集