

異なる試験方法によるスギ正角材の強度特性及び含水率の評価

本多琢巳

Evaluation of the mechanical properties and moisture content of square sawn Sugi timbers by different test methods

Takumi HONDA

Summary : Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) boxed-heart square timber in high temperature drying were tested for mechanical properties including bending strength. Static bending tests were conducted by loading at two one-third points of the span after measuring dynamic Young's modulus by the tapping methods. Dynamic Young's modulus was measured by longitudinal vibration. The relations between modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) are highly significant and can be expressed by the equation $MOR = 4.02MOE + 12.0$. The dynamic MOE value of square timber is approximately equal to the static MOE value. The correlation is not so high between MOR and the maximum single knot size ratio, the maximum group knots size ratio. Variation in MOR decreased when square timber was classified by mechanical grading. The moisture contents were measured by the microwave penetrating method, a non-destructive and convenient method. The moisture content distributions in the timbers were measured by the microwave penetrating method during seasoning after high temperature drying. The moisture content values obtained by the microwave penetrating method have mostly the same precision in comparison with the exact values obtained from the oven-drying method. In the early stage of seasoning, there are any heartwood moisture content distributions in the radial direction. The moisture gradients were obtained non-destructively by the microwave penetrating method.

要旨：高温セット法により乾燥されたスギ正角材を供試材とし、3等分点4点荷重式、小荷重載荷式及び打撃式による曲げ強度試験を行い、各方式による曲げ強度性能を評価した。曲げ強さ(MOR)と曲げヤング係数(MOE)の間に強い相関($r=0.67$)が認められ、次式により MOE だけから MOR を精度良く推定できる。 $MOR=4.02MOE+12.0$ 。動的ヤング係数も曲げヤング係数にほぼ等しかった。一方、MORと最大節径比及び最大集中節径比との相関は低かった。機械等級により区分を行うと MORの変動が減少することがわかった。次にマイクロ波式、高周波式及び電気抵抗式の3方式で水分測定を行った。マイクロ波式では養生の有無に関わらず含水率との誤差が最も小さかった。養生前の厚さ方向の水分傾斜をもつ場合は、マイクロ波式の最大値と最小値の差を用いて、高周波式で測定された材を区分することによって、危険側に評価された材の95%を抽出可能であった。また、養生後の水分傾斜が平準化された状態の測定においても、マイクロ波式では高周波式で危険側に評価された材の75%を安全側に評価できた。

1 はじめに

「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」(平成22年法律第36号)の制定を受け、「木造計

画・設計基準」(平成23年国土交通省大臣官房官庁営繕部)が策定された。これによると、建築構造の設計に当たり、製材は、原則として日本農林規格(JAS)に適合するものを使用することと規定されている。このため、公共建築物等への県産材の利用を推進するには、JAS認

本研究は、山梨県森林総合研究所研究課題「針葉樹構造用製材の効率的な品質管理技術の開発」(平成24~26年度)の一部として実施した。

定工場から JAS 製品を安定的に供給する必要がある。県内でも数工場が JAS 認定を希望しているものの、品質の安定性に改善する余地があり、強度、含水率の基準に対応できる技術開発が必要である。

県産構造用製材の製造現場における具体的な課題として、以下のことが挙げられる。製材の JAS 規格に基づく試験方法で測定した製品レベルのデータを収集する必要がある。また、グレーディング・マシン等で等級区分を行う場合、機械から得られたヤング係数と製材の JAS 規格で規定された曲げヤング係数との関係を確認する必要がある。一方、水分計の使用では、厚い材や水分傾斜が大きい場合には、大きな測定誤差が生じる可能性がある。そのため、製品ごとに水分計による測定値と全乾重量法による値との誤差を求めておき、補正する必要がある。

本研究では、品質の安定した構造用製材の供給に必要とされ、強度と含水率に基づく選別を効率的に行える品質管理技術を確立するため、機械等級区分やマイクロ波による水分測定信頼性に関するデータを収集した。

2 実験

2.1 外観特性調査

実験には、製材の JAS 認定を取得予定の工場で日常的に製造されているスギ正角材 (10.5x10.5x300cm) を供試材料として用いた。工場では高温セット法による乾燥が行われており、その乾燥工程の概要は以下の通りである。初期蒸煮の後、高温低湿 (乾球温度 120°C、湿球温度 90°C) の条件で高温セット処理を施し、さらに高温乾燥で仕上げる標準的なスケジュールが採用されていた。

目視等級区分構造用製材規格で制限されている強度に影響を及ぼす欠点 (集中節、節、割れ、繊維走行傾斜、平均年輪幅、腐朽など) について、規定の方法で測定し、乙種構造材の基準に従って目視等級区分を行った。

2.2 曲げ性能試験

油圧式強度試験機 (A&D, UTA-250KN) を用いて、スパン/梁背比を 18 として 3 等分点 4 点荷重条件により実大材曲げ強度試験を行った。集中節又は節の最大値のある面を引張り側に配置した。曲げ強度試験終了後に、破壊位置近傍から採取した試験片から求めた比重の平均値は 0.39 であり、標準偏差 (± 0.04) も小さかった。なお、「構造用木材の強度試験マニュアル」(日本住宅・木材技術センター 2011)により試験データの調整を行った。

静的ヤング係数の他に、縦振動法 (静岡製機, WODY) による動的ヤング係数も測定した。常法 (Sobue 1986) により試験体中央部をウレタン樹脂製クッション材で支持した状態で木口面を打撃した。

次に、これらのヤング係数を用いて、機械等級区分構造用製材規格の基準に従って等級区分を行った。ヤング係数だけでは評価することが困難な節等 (局部的な欠点) は、目視により評価した。また、両ヤング係数の測定の有効性を確認するため、規格に規定されている重錘法による曲げヤング係数を測定し比較を行った。

2.3 水分測定試験

水分の測定には、携帯式タイプの高周波式水分計 (Kett, ダーク HM-520) 及び電気抵抗式水分計 (Kett, ダーク H) を用いた。また、マイクロ波式水分計 (エーティーエー, MC-3200EX) で水分傾斜の有無を確認した。これらの値を製材の JAS 規格に規定されている全乾質量法による含水率と比較し、補正方法を検討した。なお、測定は、養生後並びに高温乾燥中の水分傾斜の大きい時 (以下、養生前) に行った。

3 結果及び考察

3.1 外観特性

外観特性の調査結果を表 1 に示す。各因子の平均値は、集中節径比 40.3%、節径比 20.2%、繊維傾斜 1.7%及び年輪幅 4.6mm となり、県産スギ正角材の材面の特徴を明らかにした。高温セット法によるスギ乾燥材の外観特性データは、これまでにない情報であり、今後県産材を構造用製材として生産するための貴重な資料である。

なお、各因子の最大値はいずれも基準未満であり、構造材としての材面の品質を満足した。

表 1 外観特性

	集中節径比	節径比	繊維傾斜	年輪幅
	(%)	(%)	(%)	(mm)
平均	40.3	20.2	1.7	4.6
標準偏差	13.8	5.3	0.7	1.1
JAS基準	≤90.0	≤70.0	≤16.7	≤10.0

3.2 水分計による含水率の測定

製材工場では、含水率の管理において各種の水分計が用いられている。そこで、マイクロ波式、高周波式及び電気抵抗式の各水分計の測定値と全乾法による含水率との比較試験を行った。その結果を表 2 に示す。測定時期

に関わらず測定値と含水率の間に強い相関 ($r > 0.7$, $p < 0.01$) が認められた。ただし、養生前の測定においては、高周波式及び電気抵抗式で測定値が含水率を下回り、相関も低くなることが確認された。これは、水分傾斜が影響したことによると考えられた。

なお、含水率の平均値は 11.7% であり、製材の JAS 規格に規定する仕上げ材の SD20 (含水率 20% 以下) に相当する材が約 95% となり、良好な乾燥状態であった。

表 2 含水率計の測定結果

測定条件	測定方法	平均値 (%)	標準偏差 (%)	回帰式 (%)	相関係数 $p < 0.01$
養生後	全乾法	11.7	4.23	-	-
	マイクロ波式	13.1	4.91	$Y = 0.78X + 1.57$	0.90**
	高周波式	12.4	3.67	$Y = 0.95X + 0.11$	0.83**
	電気抵抗式	9.7	3.97	$Y = 0.98X + 2.22$	0.92**
養生前	全乾法	26.6	6.93	-	-
	マイクロ波式	27.1	3.19	$Y = 1.88X - 24.35$	0.86**
	高周波式	19.5	5.44	$Y = 0.94X + 8.27$	0.74**
	電気抵抗式	16.8	5.99	$Y = 0.84X + 12.54$	0.72**

3.3 曲げ強度性能

これまで、高温セット法による県産スギ乾燥材については、構造用製材の製造に活用できる強度性能データが無かった。そこで、曲げ強さ及び曲げヤング係数の出現頻度の分布 (図 1, 2) を明らかにした。曲げ強さの範囲は 21.9Mpa~74.7Mpa であり、無等級材の基準強度 (平成 12 年 建設省告示第 1452 号) 22.2Mpa を下回るものは、僅かに 1 本であった。また、曲げ強さと曲げヤング係数の平均値は、それぞれ 41.6Mpa、8.69Gpa であった。これを既往データ (木構造振興株式会社 2011) の平均値 (曲げ強さ 42.3Mpa、曲げヤング係数 7.21Gpa) と比較すると、曲げ強さにおいて多少下回るものの、構造材として十分な強度性能を有していることが認められた。

なお、曲げヤング係数を載荷式による値と比較したところ、非常に強い相関 ($r = 0.98$, $p < 0.01$) が認められ、本実験の有効性を確認した。

3.4 信頼性の高い等級区分技術の開発

目視等級区分製材乙種構造材の基準による等級区分の結果を表 3 に示す。因子のうち集中節径比だけで 93% の等級が決定された。平均年輪幅により下位の等級に区分されるものが 13 本あり、丸太の選別を徹底することが必要と考えられた。このようにデータの分析を通して、コストの削減に向けた製造上の問題点を明らかにした。

出現頻度は、1 級と 2 級を併せて 92% であった。曲げ強さの平均値は、1 級、2 級、3 級でそれぞれ 46.7Mpa、

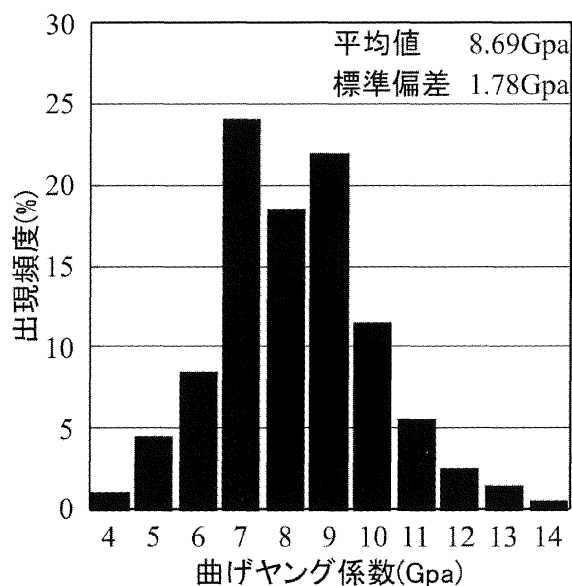


図 1 曲げヤング係数の分布

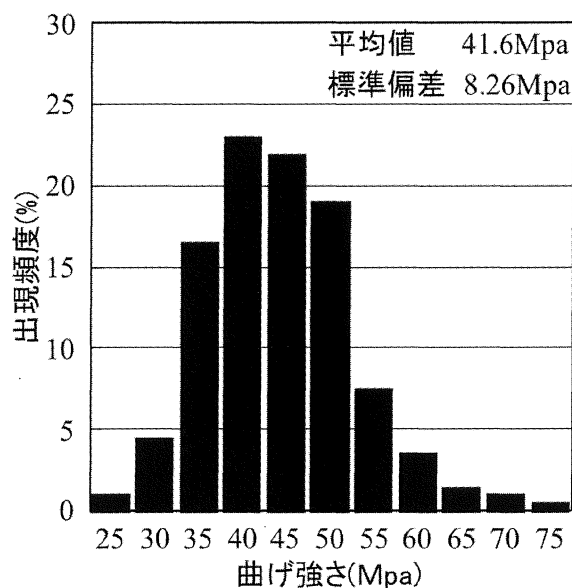


図 2 曲げ強さの分布

40.9Mpa、43.4Mpa となり、1 級と 3 級の差は見られず、目視等級区分の有効性は明確ではなかった。これは、集中節径比と曲げ強さの間の相関 (図 3) が低い ($r = 0.31$) ことが理由と考えられる。2 級の曲げ強さの平均値は、データ集 (木構造振興株式会社 2011) の目視等級区分の値よりも下回っていた。なお、等級ごとに定められる基準強度未満の材は、ゼロ本であった。

次に、曲げ強度試験で得られた曲げヤング係数を用いて機械等級区分を行った結果を表 4 に示す。出現した等級の範囲は E50~E130 で、出現頻度は E50 が 7.0%、E70 が 32.0%、E90 が 46%、E110 が 13.5%、E130 が 1.5% となり、全体として E70 以上の等級に区分された材が 93%

表3 目視等級ごとの曲げ性能

等級	本数 (本)	出現頻度 (%)	曲げヤング係数(Gpa)			曲げ強さ(Mpa)			基準強度未満 の本数 (本)
			平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	
1級	119	59.5	8.30	12.46	4.53	46.7	74.7	21.9	0 (<21.6Mpa)
2級	65	32.5	7.66	10.72	4.74	40.9	54.0	30.2	0 (<20.4Mpa)
3級	16	8.0	8.30	10.72	4.98	43.4	51.2	25.4	0 (<18.0Mpa)

表4 機械等級区分ごとの曲げ性能

等級	本数 (本)	出現頻度 (%)	曲げヤング係数(Gpa)			曲げ強さ(Mpa)			基準強度未満 の本数 (本)
			平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	
E130	3	1.5	12.13	12.46	11.96	57.2	68.5	49.3	0 (<46.2Mpa)
E110	27	13.5	10.29	11.76	9.47	55.8	74.7	38.3	1 (<40.8Mpa)
E 90	92	46.0	8.56	9.47	7.77	45.3	65.5	21.9	5 (<34.8Mpa)
E 70	64	32.0	6.91	7.73	5.93	40.4	53.5	30.2	0 (<29.4Mpa)
E 50	14	7.0	5.27	5.86	4.53	34.4	44.7	25.4	0 (<24.0Mpa)

となった。各等級の曲げ強さの平均値は、等級が上がる
と高くなっており、機械等級区分の有効性が認められた。
これは、図4に示すように、曲げヤング係数と曲げ強さ
の間の相関が強い ($r=0.67$) ことが理由と考えられる。
曲げ強さの平均値は、各等級ともデータ集 (木構造振興
株式会社 2011) の機械等級区分の値と大きな差は見られ
なかった。なお、等級ごとに定められる基準強度未満の
材は、E110で1本、E90で5本あった。

ここで、グレーディング・マシンなどを用いるよりも、
非破壊的、簡便かつ短時間にヤング係数が測定できる縦
振動法の適用について検討した。その結果、動的ヤング
係数と曲げヤング係数との間には、図5に示すように非
常に強い相関 ($r=0.95$, $p<0.01$) が認められた。曲げヤン

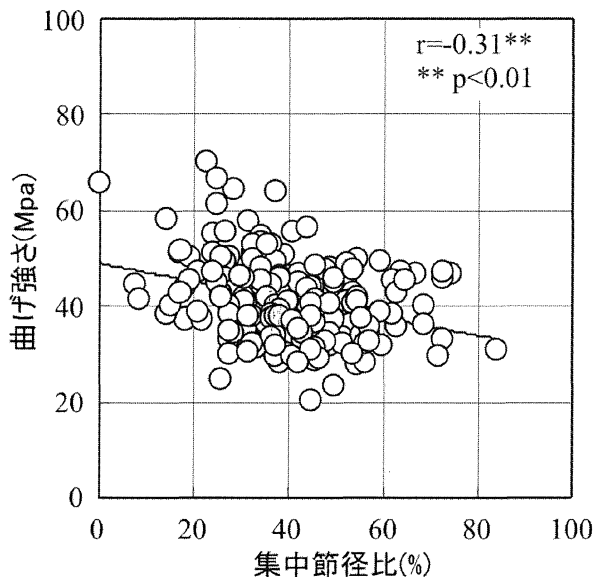


図3 曲げ強さと集中節径比の関係

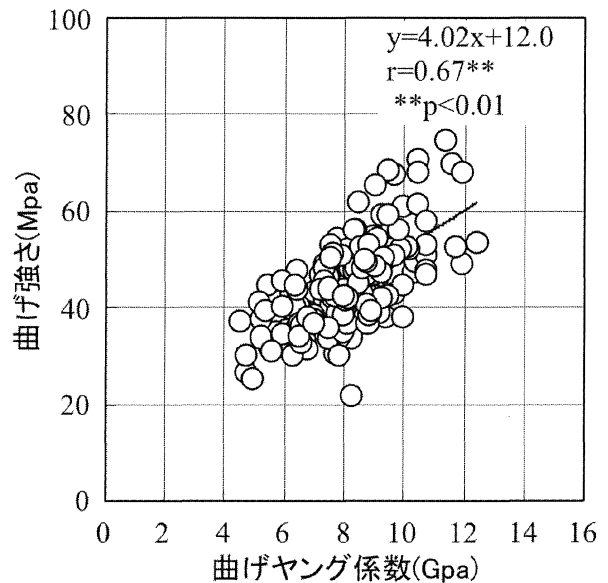


図4 曲げ強さと曲げヤング係数の関係

グ係数の換算値 (=1.03*動的ヤング係数) を指標として
等級区分を行うことは、品質管理上有効な方法であるこ
とが示された。

3.5 測定誤差の少ない水分管理技術の開発

水分計の特性を踏まえた含水率の測定手法を検討す
るため、水分計の測定値と含水率の差がマイナスとなる
割合 (要補正率) 及びその絶対値の最大値 (補正值) を
求め、その結果を表5に示す。マイクロ波式による測定
は、測定時期に関わらず最も要補正率及び補正值が低い
ことが明らかとなった。高周波式では、養生前の水分傾
斜材を測定した時に、要補正率の高いことが分かった。
電気抵抗式では、実に95%以上が低く判定され、測定精
度に問題があった。含水率との誤差が大きい場合には、

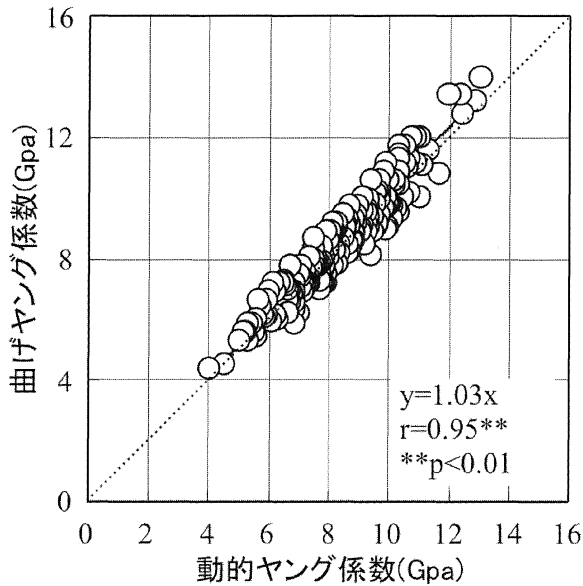


図5 曲げヤング係数と動的ヤング係数の関係

測定値に補正値をプラスして使用する必要がある。

次にマイクロ波式水分計の優位性の検証を行った。養生後に測定した場合の水分計の誤差について、マイクロ波式と高周波式の関係を図6に示す。高周波式水分計を用いると34.8%が危険側の値を示すが、マイクロ波式水分計ではその内74.8%が安全側の値を示した(図の枠内)。また、養生前の水分傾斜材を測定した場合のマイクロ波式水分計の最大最小の差と高周波式水分計の誤差の関係を図7に示す。これからマイクロ波式の最大最小の差の閾値を4%に設定すれば、高周波式で危険側にある材の95%が検出可能であると考えられる。このように、マイクロ波式水分計は、乾燥や養生の過程にある材を測定する場合に最も有効であることが認められた。養生や再乾燥の必要となる乾燥不十分な材を仕分けことができ、効率的な乾燥材の製造が可能になると考えられる。また、養生が進み水分傾斜の少ない材でも安全側に評価

表5 水分計測定値の要補正率¹⁾とその補正値²⁾

測定条件	測定方法	要補正率 (%)	補正値 (%)
養生後	マイクロ波式	26.8	+ 3.6
	高周波式	34.8	+ 6.7
	電気抵抗式	96.5	+ 9.0
養生前	マイクロ波式	38.0	+ 10.3
	高周波式	86.0	+ 14.9
	電気抵抗式	99.0	+ 22.5

注¹⁾ 要補正率: 「測定値-含水率」がマイナスの割合

²⁾ 補正値 : 要補正の絶対値の最大値

されて、その補正値も低いことから、上位等級に格付けできるものと想定される。

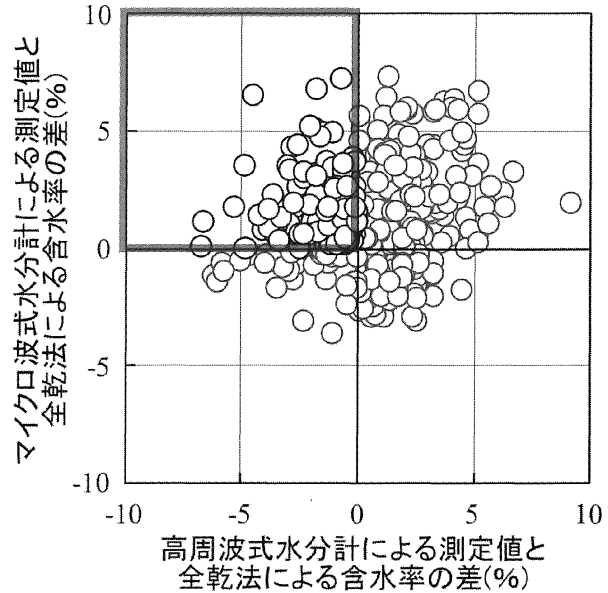


図6 養生後のマイクロ波式水分計による測定

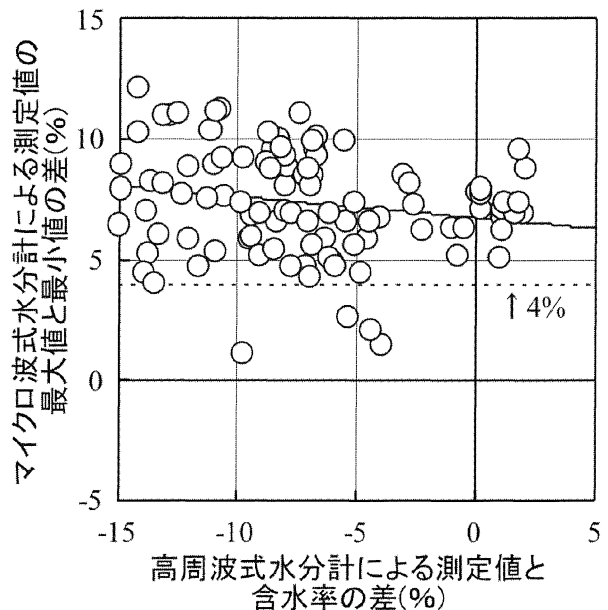


図7 養生前のマイクロ波式水分計による測定

4 まとめ

高温セット法で乾燥した山梨県産スギ正角材の外観特性及び曲げ強度性能を明らかにした。静的ヤング係数による機械等級区分を行い、目視等級区分と比較してその必要性及び有効性を検討した。さらに機械等級区分法の一つである縦振動法の有効性についても検討を行った。

マイクロ波式水分計は、内部水分まで測定可能なため含水率との誤差が最も小さく、水分傾斜材に対しても有効であった。

引用文献

日本住宅・木材技術センター (2011) 構造用木材の強度

試験マニュアル.

Sobue N (1986) Measurement of Young's Modulus by the Transient Longitudinal Vibration of Wooden Beams Using a Fast Fourier Transformation Spectrum Analyzer. Mokuzai Gakkaishi, 32:744-747

木構造振興株式会社 (2011) 木材の強度等データおよび解説