

スギ素材丸太から正角仕上げ材に至る 過程におけるヤング係数の変動

永井 智

Satoshi NAGAI

Variation of Young's modulus of Sugi during the process
from log into planed square lumber

要旨：永井 智：スギ素材丸太から正角仕上げ材に至る過程におけるヤング係数の変動 兵庫森林技研報48号：5～10、2000 スギ正角仕上げ材の曲げヤング係数（MOE）を予測する方法について検討するため、素材丸太から粗挽き材、乾燥材、そしてプレーナ仕上げ材に至る過程において、縦振動法による動的ヤング係数（Efr）の測定を行うとともに、仕上げ材について、「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」（JAS）による目視等級区分、さらに「構造用木材の強度試験法」による実大曲げ試験を行った。素材丸太を粗挽きした段階で、Efrは概して減少する傾向にあったが、材を乾燥することにより、すべての材のEfrは乾燥前よりも大きくなった。しかし、乾燥材をプレーナにより仕上げると、Efrは再び減少する傾向にあった。仕上げ材におけるJAS目視等級と曲げ試験から得られたMOEの関係は不明確であった。一方、素材丸太から仕上げ材の各過程において測定したEfrと仕上げ材のMOEの間にはいずれもきわめて高い相関が認められたうえ、素材丸太のEfrと仕上げ材のMOEはほぼ同様の値を示していた。以上のことから、素材丸太のEfrを測定することにより、そこから得られる仕上げ材のMOEを精度よく予測することが可能であると考えられた。

I はじめに

平成12年4月から「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（品確法）が施行され、建築材として木材を利用する側では、木材の強度的品質の保証に対する意識が高まり、木材を構造材に利用する際、エンジニアードウッド（I）を用いようとする動きが盛んに見られるようになってきた。その結果として、製材業者は、施主・住宅メーカー・設計士などから、製材品、とくに構造材の強度的な品質保証を要求されるようになってきた。それに対処する方法、すなわち材を壊さずに強度を予測する方法としては、現在のところ、製材品に荷重を加えて曲げヤング係数を測定する方法、または製材品の木口面をハンマーで打撃し、材中を伝播した縦振動波をFFTアナライザにより分析して動的ヤング係数を測定する方法の2つが「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」（JAS）の機械等級区分製材の基準に採用されている。

しかしながら、素材丸太を購入し、製材、乾燥した後、製材品のヤング係数を測定してみると、その値が納入先から要求された数字に達しておらず、納品を拒否されるようなケースが生じることは十分に考えられる。このような場合、素材丸太の段階で製材品のヤング係数を予測できれば、その後の製材を効率よく行うことが可能とな

り、歩留りの向上にもつながると考えられる。

そこで本試験では、素材丸太から粗挽き材、乾燥材、そしてプレーナ仕上げ材に至る過程において縦振動法による動的ヤング係数を測定するとともに、仕上げ材についてJASによる目視等級区分、さらに実大曲げ試験を行うことにより、仕上げ材の曲げヤング係数を予測する方法について検討した。

II 試料と方法

1. 供試丸太

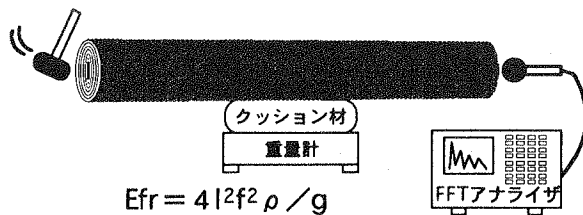
供試木には、宍粟郡安富町関に成育するスギ（混品種、林齢約30年）を用いた。林地において約50本を間伐した後、胸高部位より樹高方向に長さ約2mの素材丸太を3体ずつ（計約150体）切り出し、実験室に持ち帰った。そして、柱適寸丸太（末口平均直径16～18cm、約40体）を選択し、供試丸太とした。

2. 試験方法

まず、各供試丸太について、元口・末口周囲長、材長、重量を測定し、次式により丸太の密度を算出した。

$$\rho = 16\pi w / (P_1 + P_2)^2 / l \quad (1)$$

ρ ：密度（g/cm³）、 π ：円周率、 w ：重量（g）、



$$E_{fr} = 4l^2 f^2 \rho / g$$

E_{fr} : 縦振動法による動的ヤング係数

l : 材長、 f : 一次固有振動数、 ρ : 密度、 g : 重力加速度

図-1 Efr測定方法

P_1 : 元口周囲長 (cm)、 P_2 : 末口周囲長 (cm)、

l : 材長 (cm)

次に、図-1に示すように、中央部で支持された供試丸太の一方の木口面をハンマーで打撃し、もう一方の木口面付近でマイクロフォンによりとらえた縦振動波をFFTアナライザ(リオン(株)製SA-74)に取り込み、一次の固有振動数を求め、次式により縦振動法による動的ヤング係数(E_{fr})を算出した。

$$E_{fr} = 4l^2 f^2 \rho / g \quad (2)$$

E_{fr} : 縦振動法による動的ヤング係数 (gf/cm²)

l : 材長 (cm)、 f : 一次固有振動数 (Hz)、

ρ : 密度 (g/cm³)、 g : 重力加速度 (cm/s²)

次に、供試丸太を116mm正角材に粗挽きした後、生材状態において(2)式により E_{fr} を算出した。これらの供試材を人工乾燥し、さらに20°C・75%RHの条件で材の重量変化がほぼなくなるまで十分に調湿を行った後、(2)式により E_{fr} を算出した。その後、供試材をプレーナにより105mm正角材に仕上げ、(2)式により E_{fr} を算出するとともに、JASによる目視等級区分を行った。そして、材料試験機(インストロン(株)製5582型)により、「構造用木材の強度試験法」(2)による実大曲げ試験(スパン1800mm・3等分点4点荷重)を行い、曲げヤング係数(MOE)および曲げ強さ(MOR)を測定した。

試験終了後、供試材の両端から約15cmの部位より含水率測定用に板材を2枚ずつ採取し、1枚については板材のまま、残る1枚については材縁部、中層部、中心部に分割した後、全乾法によりそれぞれの含水率を求めた。

III 結果と考察

1. 各過程における E_{fr} の変動傾向

素材丸太、粗挽き材、乾燥材、プレーナ仕上げ材に至る過程において E_{fr} を測定した結果を図-2に示す。

これによれば、まず、供試丸太を粗挽きした段階で、多くの供試材において E_{fr} が小さくなっていることがわかる。この理由としては、丸太内半径方向において、ヤング係数は髓から樹皮側に向かって大きくなる傾向にある(3、4)ため、粗挽きを行った段階で、比較的ヤ

ング係数の大きい背板の部分が取り除かれた結果、材内の平均的ヤング係数を示す(5、6)とされる E_{fr} が減少したと思われる。一方、いくつかの材では、粗挽き後、わずかではあるが E_{fr} が増加するという結果が得られた。これについては、素材丸太の E_{fr} を測定する場合、樹皮付きで測定される E_{fr} は、剥皮丸太、すなわち木材実質のみの状態で測定される E_{fr} と比較して過小に計測される(7)ことにより生じた結果であると考えられる。すなわち、本試験では樹皮付きで素材丸太の E_{fr} を測定したため、その値は丸太実質の E_{fr} よりも小さい値を示していると考えられた。また、剥皮による丸太の E_{fr} の増加率は個体の径級に関わらずほぼ一定である(7)ことから、粗挽き後に認められた E_{fr} の増加や減少には、粗挽き時に取り除かれた背板の量の多少が影響しているものと考えられた。

次に、粗挽き材を人工乾燥・調湿した後、再び E_{fr} を測定すると、それはすべての材において乾燥前よりも大きくなっていった(図-2)。しかし、乾燥による E_{fr} の大幅な増加は認められなかった。乾燥によるヤング係数の増加率については本章の3.において考察する。

次に、これらの乾燥材をプレーナにより仕上げ、再び E_{fr} を測定すると、ほぼすべての材においてそれは小さくなった(図-2)。これは、素材丸太から粗挽き材を製材した時と同様、心持ち材の表面は髓付近よりも比較的ヤング係数が大きいため、その表面を削り仕上げるこ

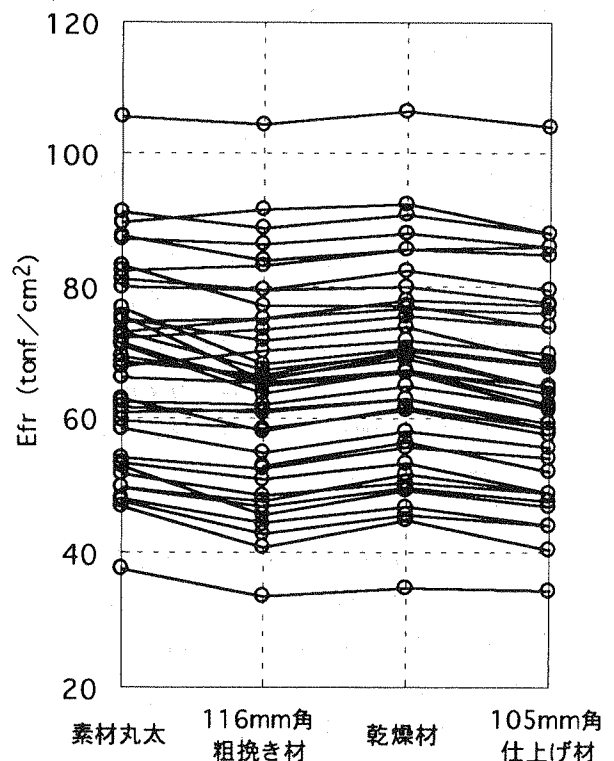


図-2 素材丸太～プレーナ仕上げ材に至る過程での E_{fr} の変動

E_{fr} : 動的ヤング係数。

とによって、材内の平均的ヤング係数が減少した結果であると考えられる。

2. 実大曲げ試験

図-3に、素材段階で測定したEfrと、実大曲げ試験により測定した仕上げ材のMOEの関係を示す。これらの間には、きわめて高い相関が認められた。また、図-3から、同形状の柱適寸丸太を用いた場合でも、そのヤング係数は40tonf/cm²以下から100tonf/cm²以上までばらついており、材ごとに強度的性質が大きく異なることがわかる。つまり、素材段階でEfrを測定し、その値を指標とすることによって、構造材としての需要が期待できない丸太は造作材に挽く、といったような効率的な対応が可能であると考えられる。

図-4に、実大曲げ試験により測定したMOEとMORの関係を示す。図中の太い実線は本結果の回帰直線、対して細い実線は全国の国公立の試験研究機関から収集されたスギ実大材の曲げ試験結果(8)の回帰直線である。MOEが60tonf/cm²をこえる供試材では、全国的なデータとほぼ同様の傾向を示している一方で、MOEが60tonf/cm²以下では、MOEの値に対応するMORの値がすべての供試材で大きくなった。この原因には、供試材の品種特性が影響していると考えられるが、その詳細な検討は今後の課題とする。

なお、試験終了後に全乾法により測定した全体含水率の平均値は17.1%であった。

参考として、JASの機械等級区分製材に対して与えられている曲げの長期許容応力度の3倍値(材料強度)を図-4に記した(図-4の破線)。今回供試したすべての材が各機械等級に定められている材料強度をクリアし

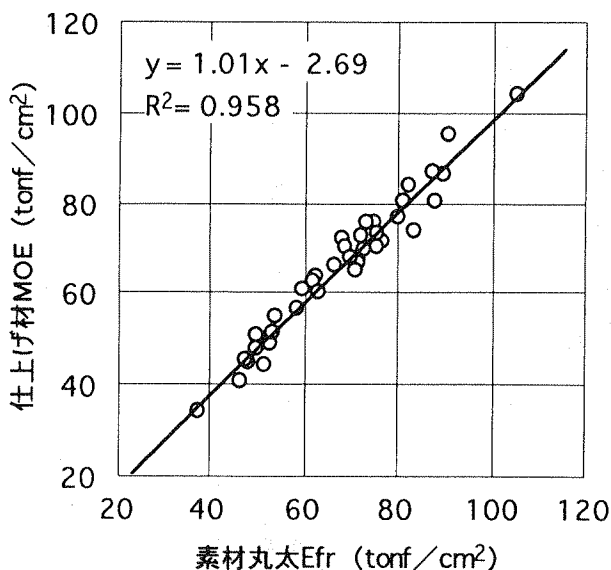


図-3 素材丸太のEfrとプレーナ仕上げ材のMOEの関係

Efr: 動的ヤング係数, MOE: 曲げヤング係数.

ていることがわかる(ただし、MOEが40tonf/cm²未満の材はJAS機械等級区分製材としては認められない)。

3. 全過程におけるヤング係数の比較

素材丸太から仕上げ材に至る過程において測定したEfr、および実大曲げ試験により測定した仕上げ材のMOEをまとめて表-1に示す。

素材丸太のEfrの平均値が68.0tonf/cm²であり、以降、粗挽き材、乾燥材、プレーナ仕上げ材の各過程においてそれは変動しているものの、平均値の大幅な増減は認められなかった。また、試験過程における前過程のEfrに対する各過程のEfrの増減比率をみると、粗挽き後あるいは仕上げ後においてEfrはやや減少し、乾燥後においてそれはやや増加する傾向にあった。

ここで、乾燥によるEfrの増加率について、既往の知見と比較してみる。本試験において得られた乾燥によるEfrの増加比率(1.04、表-1)は、スギひき板におけるEfrおよびMOEの測定結果(9)やスギ10cm心持ち正角材におけるMOEの測定結果(10)と比較して低いものであった。一方、藤田らがスギ12cm心持ち正角材において乾燥前後のMOEおよびEfrを比較した結果(11)では、乾燥後(平均含水率17%)におけるMOEの増加比率が1.14であったのに対し、Efrの増加比率は1.05であったとされており、本結果と同様に低い比率を示している。藤田らは、Efrは断面寸法が大きいほど乾燥による増加比率が低かったのに対し、MOEは断面寸法に関係なく一

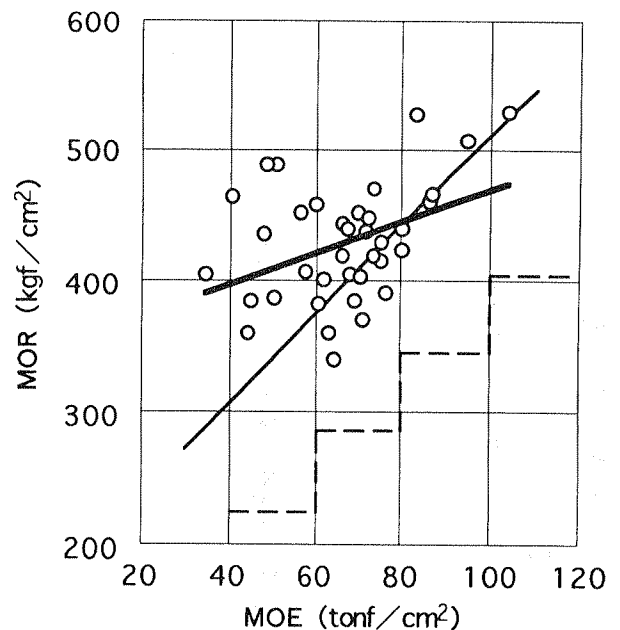


図-4 プレーナ仕上げ材のMOEとMORの関係

—: 本試験結果における回帰直線.
 —: 「製材品の強度性能に関するデータベース」(8) スギ実大材の曲げ試験における回帰直線.
 ---: JAS機械等級区分製材に与えられている材料強度.
 MOE: 曲げヤング係数, MOR: 曲げ強さ.

表-1 全過程におけるヤング係数の測定結果

| | 素材丸太Efr (tonf/cm ²) | 116mm角 粗挽き材Efr (tonf/cm ²) | 乾燥材Efr (tonf/cm ²) | 105mm角 仕上げ材Efr (tonf/cm ²) | MOE (tonf/cm ²) |
|---------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| 平均 | 68.0 | 64.9 | 67.3 | 64.4 | 66.0 |
| 変動係数 (%) | 21.7 | 23.9 | 22.4 | 23.6 | 23.1 |
| 前過程に対する比率 | — | 0.95 | 1.04 | 0.96 | 1.03 |
| 素材丸太Efrに対する比率 | — | 0.95 | 0.99 | 0.95 | 0.97 |

Efr：動的ヤング係数，MOE：曲げヤング係数。

様な増加比率を示したことから、その原因には材内の水分傾斜が影響していると考えている(11)。本試験では、仕上げ材においてすべての試験項目終了後に含水率を測定した。その際における材縁部、中層部、中心部の含水率は、それぞれ16.8、17.2、17.5%であり、十分に調湿を行っていたにもかかわらず、中心部ほどやや高い傾向にあった。すなわち、乾燥材(仕上げ前)の段階ではより断面サイズが大きいため、材内における水分傾斜は多少なりともより大きかったものと考えられる。つまり、MOEの場合、材縁部が応力を負担する(7)のに対し、Efrは材内の平均的ヤング係数を示す(5、6)ため、比較的断面が大きい心持ち正角材の場合、材内における水分傾斜の存在が乾燥によるEfrの増加比率を低くしているものと考えられた。

次に、仕上げ材におけるEfrとMOEの関係について考察する。本試験における仕上げ材のEfrに対するMOEの比率は1.03(表-1)であり、後者でやや大きくなると

いう結果が得られた。一般に、ヤング係数の測定法に関しては、静的測定法では塑性ひずみの影響を受けるため、動的測定法の90~95%の値を示すとされている(12)。一方、比較的断面が大きい心持ち正角材において、本試験結果と同様に、EfrよりもMOEの方が大きかったという報告(11)も認められる。これらの結果には、材内における水分傾斜が影響している(11)だけでなく、材縁部のヤング係数が中立軸付近に比べて高いことが影響していると考えられる(9)。

結果として、素材丸太、粗挽き材、乾燥材、仕上げ材の各過程において測定したEfrと、仕上げ材のMOEの間には、いずれもきわめて高い相関(相関係数はそれぞれ0.979、0.989、0.992、0.985)が認められた。つまり、本結果からは、素材丸太から仕上げ材に至る各過程において測定したEfrの値をもとに、仕上げ材のMOEを精度よく推定することが可能であると考えられた。

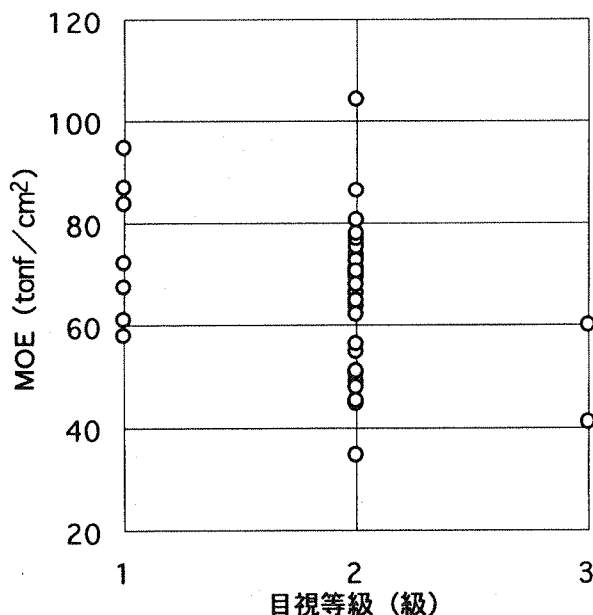


図-5 プレーナ仕上げ材における
JAS目視等級とMOEの関係
MOE：曲げヤング係数。

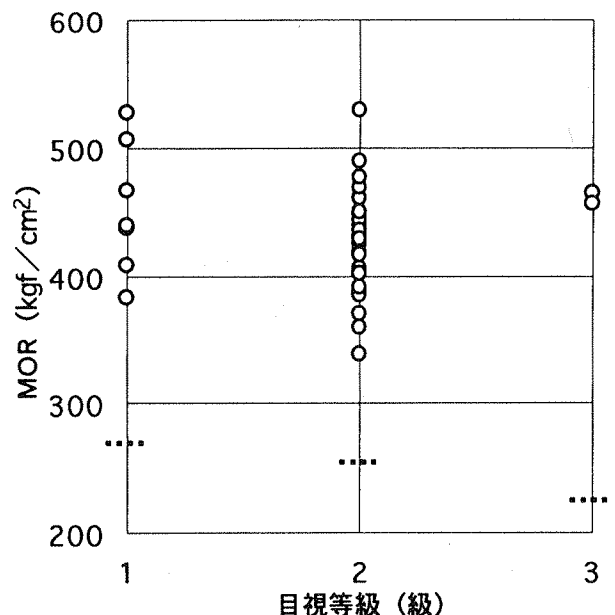


図-6 プレーナ仕上げ材における
JAS目視等級とMORの関係

.....：JAS目視等級区分製材に与えられている材料強度。
MOR：曲げ強さ。

4. JAS 目視等級と MOE、MOR の関係

仕上げ材における JAS 目視等級と MOE の関係を図-5 に、目視等級と MOR の関係を図-6 に示す。

図-5 によれば、目視等級の高い区分ほど MOE が大きいという傾向はうかがえるものの、各目視等級内における MOE のばらつきが大きく、明確な関連性は認められなかった。

また、図-6 においても各目視等級内における MOR のばらつきは大きい。本試験で得られた結果を、JAS の目視等級区分製材に対して与えられている曲げの長期許容応力度と照らし合わせてみる。スギ材では、目視等級が 1 級～3 級までの JAS 目視等級区分製材に対し、90～75 kgf/cm²までの長期許容応力度が与えられている。長期許容応力度の 3 倍値（材料強度）を図-6 にあてはめると（図-6 の破線）、今回供試したすべての材について、目視等級区分をしなくとも、目視 1 級に与えられている材料強度をクリアしていることがわかる。つまり、目視等級と MOR の間にも明確な関連性は認められなかった。

よって、スギ材において、「強度保証された製材品」の供給を行う際、目視等級区分はその有効な指標にはなり難いものと思われた。つまり、目視等級区分については、明らかな欠点の認められる材を除去するという目的により行うことが望ましいと考えられた。

IV 摘 要

スギ正角仕上げ材の曲げヤング係数を予測する方法について検討するため、素材丸太、粗挽き材、乾燥材、プレーナ仕上げ材の各過程において、縦振動法による動的ヤング係数の測定を行うとともに、仕上げ材について、「針葉樹の構造用製材の JAS」による目視等級区分、さらに「構造用木材の強度試験法」による実大曲げ試験を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 素材丸太を 116mm 正角材に粗挽きした段階で、動的ヤング係数は概して減少する傾向にあった。

(2) 粗挽き材を乾燥した後に測定した動的ヤング係数は、すべての材において、乾燥前に測定した動的ヤング係数よりも大きくなっていったが、その増加比率は 1.04 であり、乾燥によるヤング係数の大幅な増加は認められなかった。

(3) 乾燥材をプレーナにより 105mm 正角材に仕上げた後に測定した動的ヤング係数は、仕上げ前の動的ヤング係数よりも概して減少する傾向にあった。

(4) 素材丸太、粗挽き材、乾燥材、仕上げ材の各過程において測定した動的ヤング係数と、仕上げ材の曲げヤング係数の間には、いずれもきわめて高い相関が認めら

れた。さらに、素材丸太の動的ヤング係数とそこから得られる仕上げ材の曲げヤング係数はほぼ同様の値を示していた。

(5) 仕上げ材における JAS 目視等級と曲げヤング係数の関係については、各等級内における曲げヤング係数のばらつきが非常に大きく、目視等級区分した結果から仕上げ材の曲げヤング係数を推定することは困難であった。

(6) 仕上げ材における実大曲げ試験結果と JAS 目視等級区分製材に与えられている長期許容応力度の 3 倍値（材料強度）を比較したところ、目視 1～3 級に区分したすべての材が目視 1 級に対する材料強度をクリアしていた。

以上のことから、スギ材において、「強度保証された製材品」かつ「より高い等級に区分される製材品」の供給を効率的に行うためには、まず素材段階で動的ヤング係数を測定し、その値を指標に構造材・造作材のどちらに製材するかを検討し、さらに構造材の場合、最終的な製品の段階で再度機械等級区分を行うこと、そして目視等級区分については、明らかな欠点の認められる材を除去するという目的により行うことが望ましいと考えられた。

謝 辞

本試験の遂行にあたり、兵庫県立森林・林業技術センターの前田雅量、山田直也両氏には、供試木の採取あるいは試験体の作製に多大な協力を頂いた。また、農林水産省森林総合研究所乾燥研究室の齋藤周逸氏には、試験体の調整に際し多大な御助言を頂いた。ここに深謝する。

引用文献

- (1) 林 知行編著 (1998) エンジニアードウッド、218pp, 日刊木材新聞社, 東京。
- (2) (財)日本住宅・木材技術センター (1999) 住宅資材性能規定化対策事業・地域材性能評価事業研修会テキストー構造用木材の強度試験法ー、56pp, 東京。
- (3) 中谷 浩 (1991) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究, 富林技研報 4 : 1-54。
- (4) 永井 智・山田範彦・山田直也・前田雅量 (1998) 兵庫県内産スギ材の材質 (第 1 報) 一年輪幅、容積密度、ヤング率および比ヤング率の樹幹内変動ー, 兵庫森林技研報 45 : 17-29。
- (5) 有馬孝禮・早村俊二・丸山則義・宮沢俊輔・古沢信 (1990) 木材の打撃音分析によるヤング係数と水分変動の評価, 材料 39 : 1228-1234。

- (6) 小泉章夫・飯島泰男・佐々木貴信・川井安生・岡崎泰男・中谷 浩 (1997) 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.
- (7) 高田克彦・平川泰彦 (2000) 剥皮によるニホンカラマツ丸太材の動的ヤング係数の変動. 木材工業 55 : 352-356.
- (8) 強度性能研究会 (1999) 製材品の強度性能に関するデータベース データ集 (3). p.32, 農林水産省森林総合研究所木材利用部材料性能研究室, 茨城.
- (9) 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.
- (10) スギ分科会 (1991) 木材の科学と利用技術Ⅱ 5. スギ. p.75-80, 日本木材学会, 東京.
- (11) 藤田晋輔・宮内正文・服部芳明・山之内清竜・馬田英隆 (1995) 打撃音法によるスギ製材品のヤング係数の評価法 (Ⅲ). 木材工業 50 : 160-165.
- (12) 北原覺一 (1967) 実用木材加工全書 別巻 木材物理. p.113-118, 森北出版, 東京.