

大分県産スギ材の強度特性(第2報) : 製材品の曲げ 強度性能

城井, 秀幸
九州大学大学院生物資源環境科学府

藤本, 登留

村瀬, 安英

河野, 貴可

他

<https://doi.org/10.15017/4333>

出版情報 : 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 59 (2), pp.137-151, 2004-10-01. 九州大学大学院農学
研究院
バージョン :
権利関係 :

大分県産スギ材の強度特性 (第2報)

— 製材品の曲げ強度性能 —

城井秀幸¹・藤本登留・村瀬安英*
河野貴可・芦原義伸²・井上正文³

九州大学大学院農学研究科森林資源科学部門生物材料機能学講座木質資源工学研究室
(2004年5月10日受付, 2004年7月13日受理)

Strength Properties of Sugi (*Cryptomeria Japonica*) Grown in Oita Prefecture (II)

— Bending Strength Performance of Lumber —

Hideyuki KII¹, Noboru FUJIMOTO, Yasuhide MURASE*,
Takayoshi KAWANO, Yoshinobu ASHIHARA² and Masafumi INOUE³

Laboratory of Wood Material Technology, Division of Biomaterial Science,
Department of Forest and Forest Products Science, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

国産材の代表樹種であるスギは、今や間伐期を経て主伐期を迎え、全国的にその蓄積量が大きく増加しており、特にスギ材産地である九州においてはその需要拡大が緊急で重要な課題となっている。この需要拡大を図る方法の一つに、大型建築物の構造材としてのスギ材の利用、すなわちエンジニアリングウッドとしての利用法が挙げられる。そして、この実現の促進には、スギの材質、特にヤング係数を中心とした強度性能を明らかにし、その材質に適した製品開発を行うことが重要と考えられる。

上記の観点から、筆者らは前報(城井ら, 2003)において、大分県におけるスギ丸太の動的ヤング係数の分布等を非破壊評価法である縦振動法により明らかにするとともに、スギ品種や目視等による強度区分の可

能性及び現場における実用的な強度区分方法を考察した。

本報では、前報の大分県産スギ丸太から製材した構造用製材品の実大曲げ試験を行い、その強度性能と材質因子の関係を検討するとともに、丸太から製材品に至る過程でのヤング係数の変動についても検討を行った。

材料と方法

1. 試験体

試験体は、大分県産スギ丸太から製材した正角材(12cm×12cm×300cm)250本及び平角材(12cm×24cm×400cm)100本を供試した。

正角材は前報(城井ら, 2003)のアヤスギ、タノアカ、ウラセバル、アオシマアラカワの4品種の丸太から製材した250本であり、平角材は県西部(日田市内)

¹九州大学大学院生物資源環境科学府森林資源科学専攻生物材料機能学講座木質資源工学研究室

²大分県林業試験場木材部

³大分大学工学部

¹Laboratory of Wood Material Technology, Division of Biomaterial Sciences, Department of Forest and Forest Products, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

²Lumber Department, Oita Prefectural Forestry Experimental Station

³Department of Human Welfare Engineering, Faculty of Engineering, Oita University

*Corresponding author (E-mail: ymurase@agr.kyushu-u.ac.jp)

及び県南部（佐伯市内）の各原木市場から購入した2番玉以上のスギ丸太（各50本）から製材した100本である。

2. 試験方法

(1) 試験方法のフロー

試験方法のフローを Fig. 1 に示す。試験体は先ず丸太の段階で縦振動法による動的ヤング係数 (E_{frl}) が測定される。次いで、製材後の正角材及び平角材は生材状態において同様な動的ヤング係数 (E_{frg}) が測定される。その後、これらの正角材及び平角材は蒸気式人工乾燥機（乾球温度80℃以下）で乾燥され、乾燥材としての動的ヤング係数 (E_{frd}) が同様に測定される。最後に、針葉樹の構造用製材の日本農林規格 (JAS) に準拠して等級区分が行われた後、曲げ試験に供される。

(2) 動的ヤング係数の測定

丸太及び製材品の動的ヤング係数 (E_{fr}) は、リオ

打撃音法による1次の固有振動数（周波数の読取精度：2.5Hz）を測定し、次式 (1) 式から算出した。

$$E_{fr} = 4 L^2 f^2 \rho \quad (1)$$

ここに、 E_{fr} : 動的ヤング係数 (N/m^2), L : 材長 (m),
 f : 固有振動数 (Hz), ρ : 密度 (kg/m^3).

丸太の体積算出では、丸太を末口径 (D_t) と元口径 (D_b) の平均直径の円柱体と仮定して求めた。

(3) 曲げ試験

曲げ試験は、(株) 島津製作所製の木材実大曲げ試験機 (AG-10型及びUH-100A型) を用いて、荷重点変位速度一定 (正角材20mm/min, 平角材5mm/min) の3等分点4点荷重方式で行った。支点間スパンは正角材が270cm, 平角材が360cmとした。なお、曲げヤング係数 (MOE) 及び曲げ強度 (MOR) は、(2) 及び (3) 式により算出した。

$$MOE = 23 L^3 \Delta P / (108 B H^3 \Delta Y) \quad (2)$$

ここに、 MOE : 曲げヤング係数 (N/mm^2),

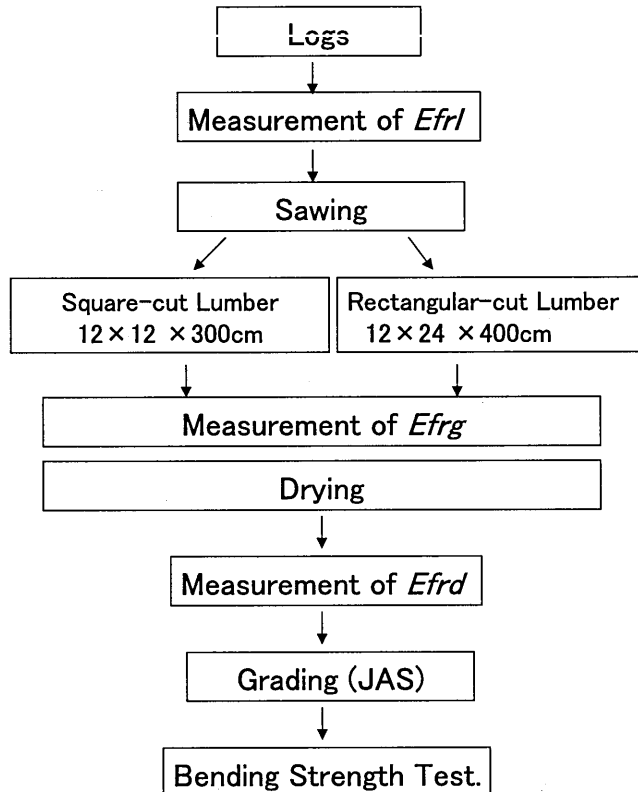


Fig. 1. Flow chart of test method.

L : スパン (mm), B : 幅 (mm),
 H : 高さ (mm),
 ΔP : 比例限度域における2点間の荷重差 (N),
 ΔY : ΔP に対応するたわみ差 (mm).

$$MOR = PL / (BH^2) \quad (3)$$

ここに, MOR : 曲げ強度 (N/mm²), L : スパン (mm),
 B : 幅 (mm), H : 高さ (mm),
 P : 最大荷重 (N).

曲げ試験終了後には, 破壊箇所近傍の両サイドから繊維方向に厚さ2cmの板を採取し, 全乾法によりその板の含水率を測定した.

(4) MOE , MOR の補正

曲げ試験で得られた MOE , MOR は, 構造用木材の強度試験法 (財) 日本住木・木材技術センター, 2003) に基づき, 含水率15%, 梁せい15cmの標準寸法, 基準荷重条件 (スパン270cm, 荷重点スパン90cm) の3等分点4点荷重試験値への補正を行い, それらを各々 MOE (A), MOR (A) と表示した. また, MOE (A) や MOR (A) の統計的処理は, 木材の強度データの確率・統計手法 (堀江, 1997) に基づくプログラム「強度データ解析シート (mini)」により行った.

結果と考察

1. 正角材の強度性能について

(1) 曲げ強度性能

正角材の曲げ試験結果を Table 1 に示す. 4品種の丸太から製材した250本の製材品における MOE (A) の平均値は7.86kN/mm² (CV: 20.8%), MOR (A) の平均値は40.3N/mm² (CV: 18.8%) を有した. したがって, 信頼度75%における MOE (A) と MOR (A) の5%下限信頼限界値はそれぞれ5.06kN/mm², 27.3N/mm² になり, 前者の MOE (A) は JAS の機械等級区分の最低等級である E50等級に相当し, 後者の MOR (A) は建設省告示1452号 (平成12年5月31日) に定めるスギ無等級材の基準強度である22.2N/mm² の値を上回ることがわかった.

(2) JASによる等級区分と曲げ強度性能の関係

JASによる目視等級区分と曲げ強度性能の関係を Table 2 及び Figs. 2, 3 に示す. JASによる目視等級区分は, 節径比, 集中節径比および平均年輪幅に基づく乙種構造材としての区分法を採用した. 各等級の出現割合は, 1級52.8%, 2級36.8%, 3級9.6%, 等級外0.8%となり, 1級の占める割合が高い. また, MOE (A) と MOR (A) はいずれも上位等級ほど大きな値を示し, MOE (A) は1級では8.64kN/mm² (CV: 14.5%), 2級では7.33kN/mm² (CV: 19.5%), 3級では5.85kN/mm² (CV: 26.4%) であった. 一方, MOR (A) は1級では43.4N/mm² (CV: 15.3%), 2級では37.9N/mm² (CV: 18.5%), 3級では32.7N/mm² (CV: 15.2%) となり, 目視等級区分の有効性も明らかである.

次に, 機械等級区分と曲げ強度性能の関係を

Table 1. Quality of lumber and bending test result. (Square-cut)

Legend: n : Number of lumber, SD : Standard deviation, CV : Coefficient of variation, Min : minimum, Max : maximum, MC : Moisture content, ARW : Average of ring width, KD : Ratio of knot diameter, SKD : Ratio of sum knot diameter, MOE (A): Modulus of elasticity corrected by the standard testing condition, SPL (A): Strength of proportional limit corrected by the standard testing condition, MOR (A): Modulus of rupture corrected by the standard testing condition.

| | MC (%) | Density (g/cm ³) | ARW (mm) | KD (%) | SKD (%) | MOE (A) (kN/mm ²) | SPL (A) (N/mm ²) | MOR (A) (N/mm ²) |
|-------|-------------|---------------------------------|---------------|-------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Mean | 16.5 | 0.392 | 6.0 | 19.9 | 36.1 | 7.86 | 26.6 | 40.3 |
| SD | 2.7 | 0.033 | 1.4 | 4.5 | 8.2 | 1.63 | 5.6 | 7.6 |
| CV | 16.5 | 8.4 | 24.0 | 22.4 | 22.7 | 20.8 | 21.1 | 18.8 |
| Min | 11.9 | 0.328 | 3.2 | 10.8 | 19.2 | 3.8 | 14.8 | 25.5 |
| Max | 34.1 | 0.504 | 10.4 | 38.3 | 70.0 | 13.4 | 40.6 | 70.0 |

$n=250$

Table 3 及び Figs. 4, 5 に示す。機械等級区分における各等級の出現割合は、E50が9.2%，E70が34.0%，E90が46.4%，E110が7.6%，E130が1.6%，等級外(E30)が1.2%となり、E70とE90の合計が全体の80%を占めた。また、 $MOR(A)$ は上位等級ほど大きな値を示し、E50では 30.2N/mm^2 ($CV: 7.3\%$)、E70では 36.6N/mm^2 ($CV: 14.1\%$)、E90では 43.2N/mm^2 ($CV: 11.5\%$)、E110では 48.4N/mm^2 ($CV: 12.6\%$)、E130では 63.2N/mm^2 ($CV: 8.4\%$)であった。

以上の目視等級区分と機械等級区分を比較すると、後者の方が等級ごとの変動係数が小さく、機械等級区分の優位性が明らかになった。

(3) 材質因子と曲げ強度性能の関係

正角材の材質因子(気乾密度、平均年輪幅、節径比、集中節径比、 $MOE(A)$)と $MOR(A)$ の関係を調べるため各因子間の単相関係数をTable 4に示す。また、 $MOR(A)$ と気乾密度、平均年輪幅、集中節径比、 $MOE(A)$ の関係をFigs. 6～9に示す。

$MOR(A)$ は $MOE(A)$ と最も高い相関を示し、次に平均年輪幅、気乾密度の順であった。しかし、節との相関では、節径比とは5%の危険率でも有意性はなく、集中節径比は1%の危険率で有意性は認められるものの、その相関係数の値は低い。このように、実大心持ち正角材の強度は節の影響をあまり受けないこ

Table 2. Test result by Visual stress grading.

Legend: n , CV , $MOE(A)$ and $MOR(A)$: The same as Table 1.

| Visual stress grading | n | Relative frequency (%) | $MOE(A)$ | | $MOR(A)$ | |
|-----------------------|-----|------------------------|---------------------------|----------|--------------------------|----------|
| | | | Mean (kN/mm^2) | CV (%) | Mean (N/mm^2) | CV (%) |
| 1st grade | 132 | 52.8 | 8.64 | 14.5 | 43.4 | 15.3 |
| 2nd grade | 92 | 36.8 | 7.33 | 19.5 | 37.9 | 18.5 |
| 3rd grade | 24 | 9.6 | 5.85 | 26.4 | 32.7 | 15.2 |
| Out of grade | 2 | 0.8 | 5.17 | 21.8 | 30.1 | 11.7 |
| Total | 250 | 100 | | | | |

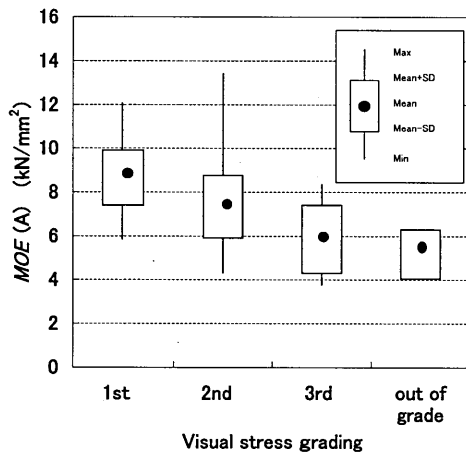


Fig. 2. Relationships between Visual stress grading and $MOE(A)$.
Legend: $MOE(A)$: The same as in Table 1.

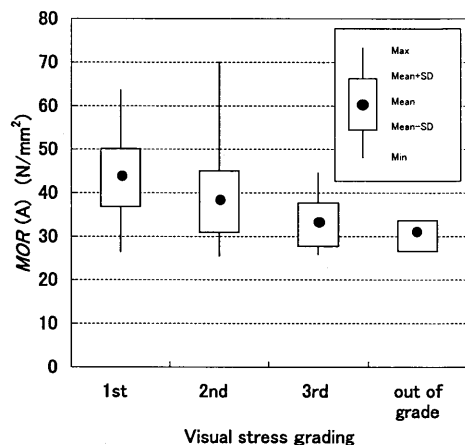


Fig. 3. Relationships between Visual stress grading and $MOR(A)$.
Legend: $MOR(A)$: The same as in Table 1.

とが明らかであり、これは既報 (スギ分科会, 1991) の結果と一致した。また、 $MOR (A)$ を目的変数に設定して、 $MOE (A)$ と節径比を除いた材質因子との間で重回帰分析を行った結果、その重相関係数は 0.711 となり、上述の $MOR (A)$ と $MOE (A)$ の単相関係数 0.801 より小さい値を示した。以上のことから、曲げヤング係数で等級区分する機械等級区分の優位性が確認された。

(4) ヤング係数の変動について

丸太から正角材に至る過程でのヤング係数の変化を Table 5, Fig. 10 に示す。動的ヤング係数は丸太段階

から製材後の生材状態で大きく減少し、丸太の動的ヤング係数 (E_{frl}) に対する生材状態の製材品の動的ヤング係数 (E_{frg}) の比 (E_{frg}/E_{frl}) は平均値で 0.77 ($CV: 16.4\%$) を示した。この低下については、丸太からの製材において主に心持ち正角材が木取られるため、ヤング係数が低い未成熟材部の占める割合が製材品で高くなり、製材品の平均ヤング係数が丸太全体のそれよりも相対的に低くなったと考えられる。加えて、今回の供試丸太は製材現場での適寸丸太と比較してやや径級の大きい丸太が含まれたことにもよると考えられる。

Table 3. Test result by Machine stress grading.

Legend: n , CV , $MOE (A)$ and $MOR (A)$: The same as Table 1.

| Machine stress grading | n | Relative frequency (%) | $MOE (A)$ | | $MOR (A)$ | |
|------------------------|-----|------------------------|--------------------|----------|-------------------|----------|
| | | | Mean (kN/mm^2) | CV (%) | Mean (N/mm^2) | CV (%) |
| E-30 | 3 | 1.2 | 3.80 | 1.2 | 27.3 | 4.1 |
| E-50 | 23 | 9.2 | 4.89 | 11.1 | 30.2 | 7.3 |
| E-70 | 85 | 34.0 | 6.99 | 7.9 | 36.6 | 14.1 |
| E-90 | 116 | 46.4 | 8.64 | 7.0 | 43.2 | 11.5 |
| E-110 | 19 | 7.6 | 10.35 | 4.6 | 48.4 | 12.6 |
| E-130 | 4 | 1.6 | 12.35 | 5.8 | 63.2 | 8.4 |
| Total | 250 | 100 | | | | |

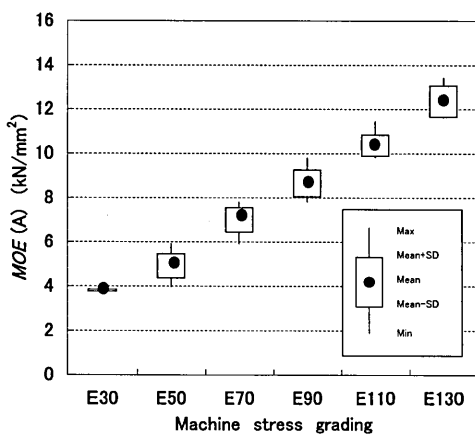


Fig. 4. Relationships between Machine stress grading and $MOE (A)$. Legend: $MOE (A)$: The same as in Table 1.

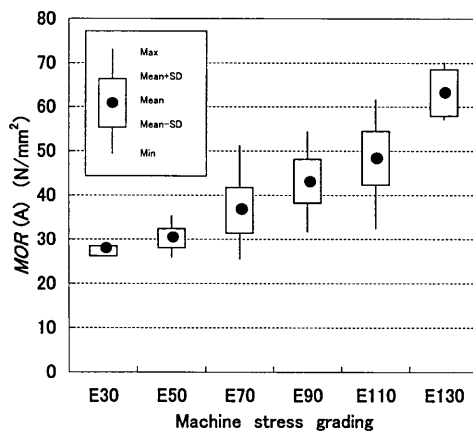


Fig. 5. Relationships between Machine stress grading and $MOR (A)$. Legend: $MOR (A)$: The same as in Table 1.

Table 4. Single correlation coefficient between factors.
Legend: *ARW*, *KD*, *SKD*, *MOE* (A) and *MOR* (A): The same as Table 1.

| | Density | <i>ARW</i> | <i>KD</i> | <i>SKD</i> | <i>MOE</i> (A) | <i>MOR</i> (A) |
|----------------|----------|------------|-----------|------------|----------------|----------------|
| Density | 1 | | | | | |
| <i>ARW</i> | -0.289** | 1 | | | | |
| <i>KD</i> | 0.044 | 0.012 | 1 | | | |
| <i>SKD</i> | 0.078 | 0.220** | 0.661** | 1 | | |
| <i>MOE</i> (A) | 0.307** | -0.702** | 0.033 | -0.146* | 1 | |
| <i>MOR</i> (A) | 0.525** | -0.588** | -0.120 | -0.218** | 0.801** | 1 |

Level of significance *5% **1%

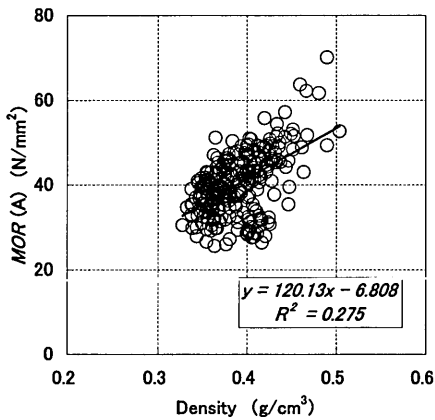


Fig. 6. Relationships between Density and *MOR* (A).
Legend: *MOR* (A): The same as in Table 1.

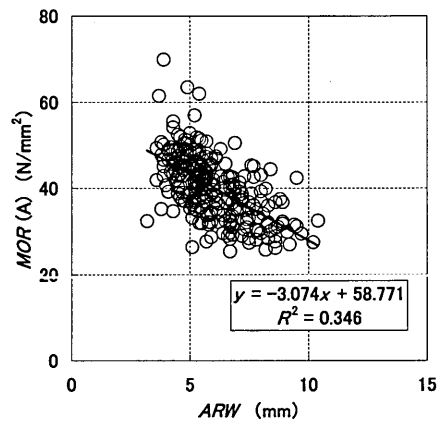


Fig. 7. Relationships between *ARW* and *MOR* (A).
Legend: *ARW*, *MOR* (A): The same as in Table 1.

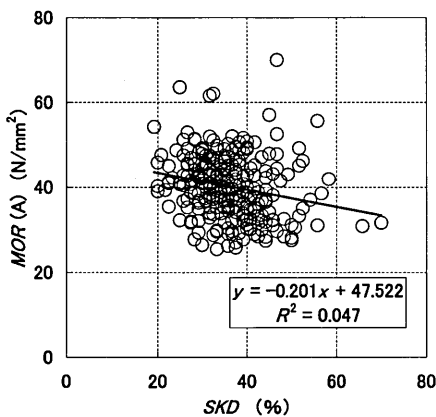


Fig. 8. Relationships between *SKD* and *MOR* (A).
Legend: *SKD* and *MOR* (A): The same as in Table 1.

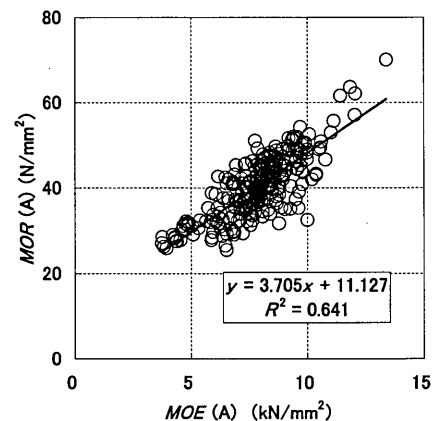


Fig. 9. Relationships between *MOE* (A) and *MOR* (A).
Legend: *MOE* (A) and *MOR* (A): The same as in Table 1.

ところで、今後中径材の出材増加が予想されており、上記のような製材木取りの機会も増えると考えられることから、本実験における製材歩留まりと前述の動的ヤング係数の比 (E_{frg}/E_{frl}) との関係を図. 11に示す。製材歩留まりが低くなるとヤング係数の低下率が大きくなる傾向が認められる。製材歩留まりとヤング係数の変化については、木取り方法や部位によっても異なるので十分なデータの蓄積が必要であるが、今後の製材品のエンジニアリングウッド化に向けて考慮すべき項目と考えられる。

次に、生材状態の製材品の動的ヤング係数 (E_{frg}) に対する乾燥後の製材品の動的ヤング係数 (E_{frd} (15)) の比 (E_{frd} (15)/ E_{frg}) を求めると平均値で1.13 (CV: 3.6%) となり、乾燥により動的ヤング係数は13%の増加を示した。ここに、 E_{frd} (15) は構造用木材の強度試験法に示される ASTM-D2915式により含水率15%に補正した製材品の動的ヤング係数である。なお、本実験で得られたこの値は ASTM 式による生材 (22%) から乾燥材 (15%) までの変化率 1.14にほぼ一致する値であった。

また、この E_{frd} (15) と曲げ試験で得られた MOE (A) の間には高い相関が認められ、 E_{frd} (15) から MOE (A) の推定が可能であることがわかった。

2. 平角材の強度性能について

(1) 曲げ強度性能

平角材の曲げ試験結果を Table 6 に示す。MOE (A) の平均値は8.12kN/mm² (CV: 20.6%), MOR

(A) の平均値は47.7N/mm² (CV: 21.0%) であった。また、信頼度75%における MOE (A) と MOR (A) の5%下限信頼限界値はそれぞれ5.18kN/mm², 31.1N/mm²になり、正角材と同様に、平角材の MOE (A) は JAS の機械等級区分の最低等級である E50 の等級に相当し、MOR (A) も建設省告示に定めるスギ無等級材の基準強度である22.2N/mm²の値を上回った。

(2) JAS による等級区分と曲げ強度性能の関係

JAS による目視等級区分と曲げ強度性能の関係を Table 7, Figs. 12, 13に示す。目視等級区分は甲種

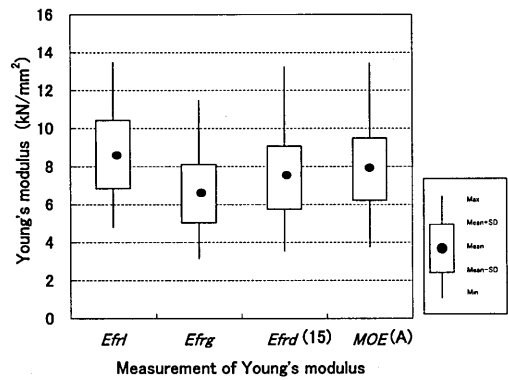


Fig. 10. Variation of the distribution of Young's modulus in each measurement. Legend: MOE (A): The same as in Table 1. Legend: E_{frl} , E_{frg} , E_{frd} (15): The same as in Table 5.

Table 5. Variation of the distribution of Young's modulus in each measurement. Legend: E_{frl} : Dynamic modulus of elasticity of log by longitudinal vibration, E_{frg} : Dynamic modulus of elasticity of green lumber by longitudinal vibration, E_{frd} (15): Dynamic modulus of elasticity of corrected (MC=15%) dried lumber by longitudinal vibration, n , SD , CV , Min , Max and MOE (A): The same as Table 1.

| | E_{frl} (kN/mm ²) | E_{frg} (kN/mm ²) | E_{frd} (15) (kN/mm ²) | MOE (A) (kN/mm ²) |
|------|------------------------------------|------------------------------------|---|----------------------------------|
| Mean | 8.64 | 6.57 | 7.41 | 7.85 |
| SD | 1.79 | 1.54 | 1.67 | 1.64 |
| CV | 20.73 | 23.49 | 22.53 | 20.83 |
| Min | 4.80 | 3.16 | 3.55 | 3.76 |
| Max | 13.47 | 11.46 | 13.22 | 13.41 |

n=248

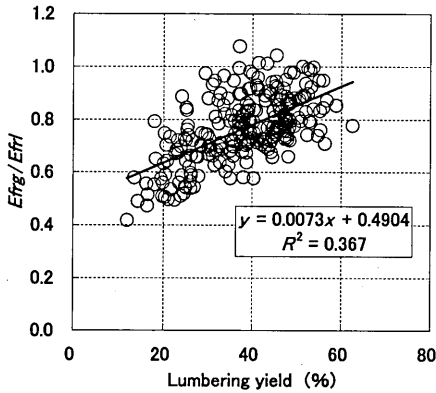


Fig. 11. Relationships between Lumber yield and E_{frg}/E_{frl} .
Legend: E_{frl} , E_{frg} : The same as in Table 5.

構造用 (II) 材としての区分法を採用した。各等級の出現割合は 1 級 20.0%, 2 級 72.0%, 3 級 8.0% となり, 2 級が全体の 7 割を占めて高い。また, MOE (A) と MOR (A) はいずれも上位等級ほど大きな値を示し, MOE (A) は 1 級では 9.00kN/mm^2 ($CV: 11.8\%$), 2 級では 8.04kN/mm^2 ($CV: 21.0\%$), 3 級では 6.56kN/mm^2 ($CV: 24.6\%$) であった。一方, MOR (A) は 1 級では 52.7N/mm^2 ($CV: 16.8\%$), 2 級では 47.4N/mm^2 ($CV: 20.8\%$), 3 級では 38.0N/mm^2 ($CV: 17.7\%$) となり, 平角材においても目視等級区分の有効性が明らかである。

次に, 機械等級区分と曲げ強度性能の関係を

Table 8, Figs. 14, 15 に示す。機械等級区分における各等級の出現割合は, E50 が 15.0%, E70 が 25.0%, E90 が 45.0%, E110 が 14.0%, E130 が 1.0% となり, E70 と E90 の合計が全体の 70% を占めた。また, 正角材と同様に, MOR (A) は上位等級ほど大きな値を示し, E50 では 34.4kN/mm^2 ($CV: 9.8\%$), E70 では 42.5N/mm^2 ($CV: 19.6\%$), E90 では 51.7N/mm^2 ($CV: 13.3\%$), E110 では 56.7N/mm^2 ($CV: 9.2\%$), E130 では 70.0N/mm^2 となり, 機械等級区分の有効性も明らかである。

なお, 平角材は高い曲げ剛性が要求される横架材としての利用頻度が高いので, 平角材の等級区分ではヤング係数が不明な機械等級区分法が目視等級区分法に比べると構造設計精度の観点からも優れていると言える。

(3) 材質因子と曲げ強度性能の関係

平角材の材質因子 (気乾密度, 平均年輪幅, 節径比, 集中節径比, MOE (A)) と MOR (A) の関係を調べるため各因子間の単相関係数を Table 9 に示す。また, MOR (A) と気乾密度, 平均年輪幅, 集中節径比, MOE (A) の関係を Figs. 16~19 に示す。

平角材の MOR (A) は, 正角材の場合と同様に, MOE (A) と最も高い相関を示し, 次いで平均年輪幅, 気乾密度の順で, いずれも 1% の危険率で有意であった。節との相関では, 広い材面側の材端部集中節径比との相関が 5% の危険率で有意となったが, その相関係数の値は低く, 平角材の強度に及ぼす節の影響は正角材と同様に小さいことがわかった。

Table 6. Quality of lumber and bending test result. (Rectangular-cut)

Legend: NKD : Ratio of knot diameter in narrow plane, $NSKD$: Ratio of sum knot diameter in narrow plane, $WEKD$: Ratio of edge knot diameter in wide plane, $WCKD$: Ratio of center knot diameter in wide plane, $WESKD$: Ratio of sum edge knot diameter in wide plane, $WCSKD$: Ratio of sum center knot diameter in wide plane.
 n , SD , CV , Min , Max , MC , ARW , MOE (A), SPL (A) and MOR (A): The same as Table 1.

| | MC (%) | Density (g/cm^3) | ARW (mm) | NKD (%) | $WEKD$ (%) | $WCKD$ (%) | $NSKD$ (%) | $WESKD$ (%) | $WCSKD$ (%) | MOE (A) (kN/mm^2) | SPL (A) (N/mm^2) | MOR (A) (N/mm^2) |
|-------|----------|-----------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Mean | 22.3 | 0.383 | 5.4 | 20.4 | 15.5 | 12.0 | 18.0 | 10.7 | 29.3 | 8.12 | 32.9 | 47.7 |
| SD | 8.5 | 0.038 | 1.5 | 6.5 | 4.1 | 2.3 | 16.8 | 12.1 | 6.9 | 1.68 | 6.1 | 10.0 |
| CV | 38.1 | 10.0 | 27.8 | 32.1 | 26.5 | 19.3 | 93.0 | 113.6 | 23.7 | 20.6 | 18.7 | 21.0 |
| Min | 12.8 | 0.268 | 2.9 | 0 | 0 | 7.5 | 0 | 0 | 11.7 | 4.83 | 20.0 | 28.7 |
| Max | 59.9 | 0.508 | 9.1 | 36.7 | 23.8 | 18.8 | 51.7 | 42.5 | 49.0 | 12.12 | 47.5 | 72.5 |

$n=100$

Table 7. Test result by Visual stress grading.

Legend: *n*, *CV*, *MOE* (A) and *MOR* (A): The same as Table 1.

| Visual stress grading | <i>n</i> | Relative frequency (%) | <i>MOE</i> (A) | | <i>MOR</i> (A) | |
|-----------------------|----------|------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| | | | Mean (kN/mm ²) | <i>CV</i> (%) | Mean (N/mm ²) | <i>CV</i> (%) |
| 1st grade | 20 | 20 | 9.00 | 11.8 | 52.7 | 16.8 |
| 2nd grade | 72 | 72 | 8.04 | 21.0 | 47.4 | 20.8 |
| 3rd grade | 8 | 8 | 6.56 | 24.6 | 38.0 | 17.7 |
| Total | 100 | 100 | | | | |

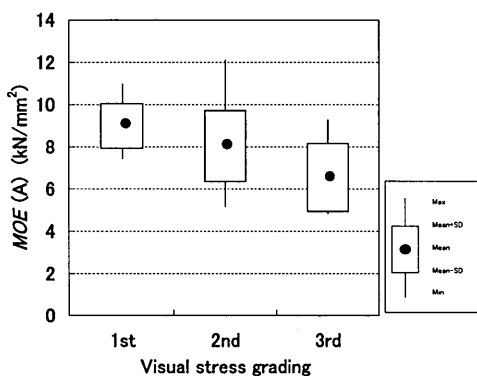


Fig. 12. Relationships between Visual stress grading and *MOE* (A).
Legend: *MOE* (A): The same as in Table 1.

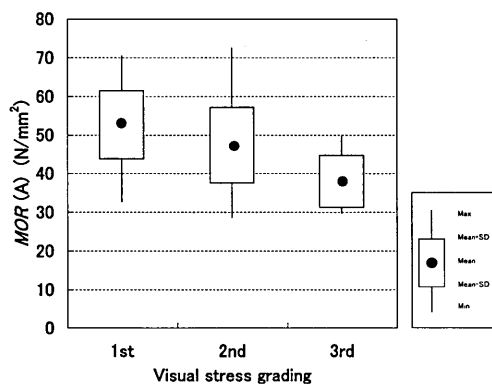


Fig. 13. Relationships between Visual stress grading and *MOR* (A).
Legend: *MOR* (A): The same as in Table 1.

Table 8. Test result by Machine stress grading.

Legend: *n*, *CV*, *MOE* (A) and *MOR* (A): The same as Table 1.

| Machine stress grading | <i>n</i> | Relative frequency (%) | <i>MOE</i> (A) | | <i>MOR</i> (A) | |
|------------------------|----------|------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| | | | Mean (kN/mm ²) | <i>CV</i> (%) | Mean (N/mm ²) | <i>CV</i> (%) |
| E-50 | 15 | 15 | 5.49 | 6.1 | 34.4 | 9.8 |
| E-70 | 25 | 25 | 6.89 | 8.9 | 42.5 | 19.6 |
| E-90 | 45 | 45 | 8.90 | 6.0 | 51.7 | 13.3 |
| E-110 | 14 | 14 | 10.32 | 4.1 | 56.7 | 9.2 |
| E-130 | 1 | 1 | 12.12 | — | 70.0 | — |
| Total | 100 | 100 | | | | |

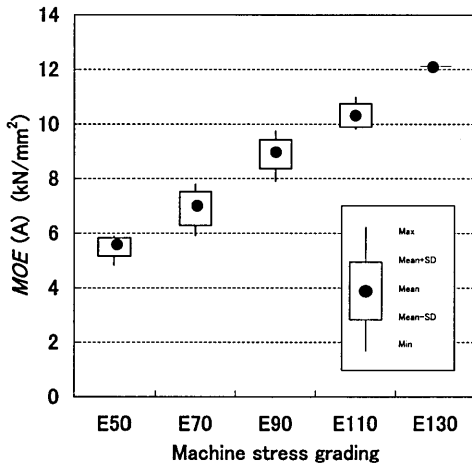


Fig. 14. Relationships between Machine stress grading and MOE (A).
Legend: MOE (A): The same as in Table 1.

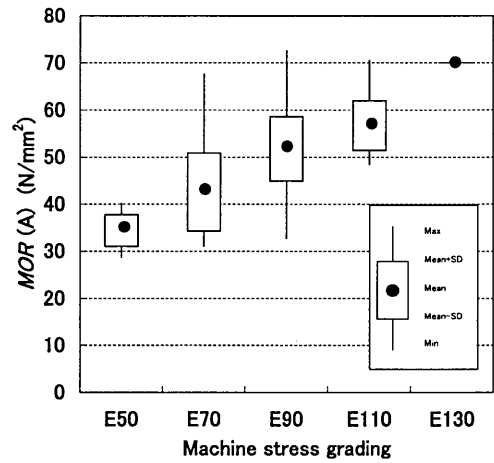


Fig. 15. Relationships between Machine stress grading and MOR (A).
Legend: MOR (A): The same as in Table 1

Table 9. Single correlation coefficient between factors.

Legend: ARW, MOE (A) and MOR (A): The same as Table 1.

NKD, NSKD, WEKD, WCKD, WESKD, WCSKD: The same as Table 6.

| | Density | ARW | NKD | WEKD | WCKD | NSKD | WESKD | WCSKD | MOE(A) | MOR(A) |
|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|------------------|--------|--------|
| Density | 1 | | | | | | | | | |
| ARW | -0.176 | 1 | | | | | | | | |
| NKD | 0.261** | 0.081 | 1 | | | | | | | |
| WEKD | 0.123 | 0.131 | 0.467** | 1 | | | | | | |
| WCKD | 0.070 | -0.105 | 0.280** | 0.234* | 1 | | | | | |
| NSKD | 0.370** | 0.379** | 0.474** | 0.280** | 0.066 | 1 | | | | |
| WESKD | -0.048 | 0.305** | 0.143 | 0.200* | -0.091 | 0.198* | 1 | | | |
| WCSKD | 0.157 | 0.332** | 0.417** | 0.575** | 0.312** | 0.377** | 0.276** | 1 | | |
| MOE(A) | 0.279** | -0.728** | -0.085 | -0.125 | 0.111 | -0.380** | -0.207* | -0.235* 1 | | |
| MOR(A) | 0.464** | -0.640** | -0.066 | -0.138 | 0.054 | -0.127 | -0.206* | -0.170 0.793** 1 | | |

Level of significance *5% **1%

また、MOR (A) を目的変数に設定して、単相関係数が比較的高い気乾密度と平均年輪幅との間で重回帰分析を行った結果、その重回帰係数は0.733となり、MOR (A) と MOE (A) の単相関係数0.793より小さい値を示した。以上のことから、平角材においても、曲げヤング係数で等級区分する機械等級区分の優位性が確認された。

(4) ヤング係数の変動について

丸太から平角材に至る過程でのヤング係数の変化を Table 10 に示す。また、丸太の動的ヤング係数 (E_{frl}) と生材状態の製材品の動的ヤング係数 (E_{frg}) の関

係を Fig. 20 に、製材歩留まりと上記の動的ヤング係数の比 (E_{frg}/E_{frl}) との関係を図 21 に示す。平角材における動的ヤング係数の比 (E_{frg}/E_{frl}) は 0.91 (CV: 10.1%) を示し、正角材の場合に比較してその値が高く、バラツキは変動係数の値から小さいことがわかる。これは、本実験での丸太の径級が平角材を製材できる最小径に近い上に、径級のバラツキが少ないことにより製材歩留まりが比較的揃ったためと考えられる。したがって、製材品に占める未成熟材部の割合が比較的小さくなり、平角材の平均ヤング係数が丸太全体のそれよりも大きく低下しなかったと考え

られる。

次に、生材状態の製材品の動的ヤング係数 (E_{frg}) に対する乾燥後の製材品の動的ヤング係数 (E_{frd} (15)) の比 (E_{frd} (15)/ E_{frg}) を求めると平均値で 1.19 (CV: 2.8%) となり、乾燥により平角材の動的ヤング係数は19%の増加を示した。これは正角材の場合と比較して6ポイントほど高いが、この違いについては現在のところ不明である。

次に、この E_{frd} (15) と曲げ試験で得られた MOE

(A) の関係を Fig. 22 に示す。平角材においても E_{frd} (15) と MOE (A) の間には高い相関が認められ、 E_{frd} (15) から MOE (A) の推定が可能であることがわかる。

3. 基準強度との関係について

前章では、正角材、平角材別の実験結果を示したが、曲げ試験で得られた MOE , MOR は、構造用木材の強度試験法に基づく標準試験条件に補正しているの

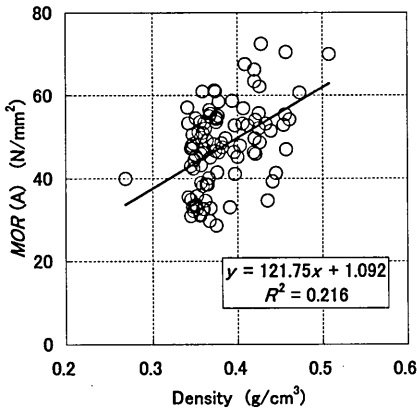


Fig. 16. Relationships between Density and MOR (A).
Legend: MOR (A): The same as in Table 1

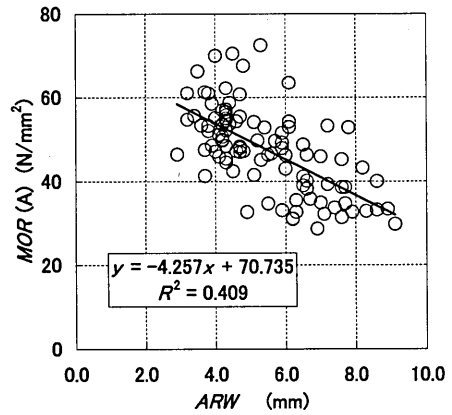


Fig. 17. Relationships between ARW and MOR (A).
Legend: ARW , MOR (A): The same as in Table 1.

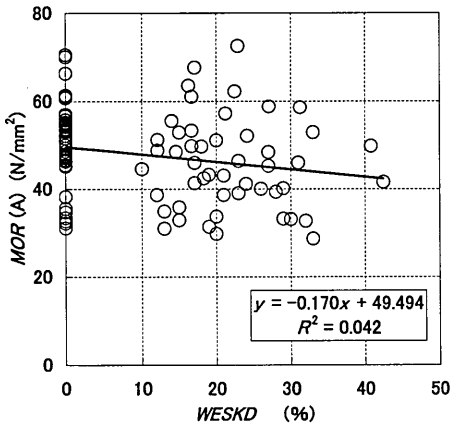


Fig. 18. Relationships between $WESKD$ and MOR (A).
Legend: MOR (A): The same as in Table 1.
Legend: $WESKD$: The same as in Table 6.

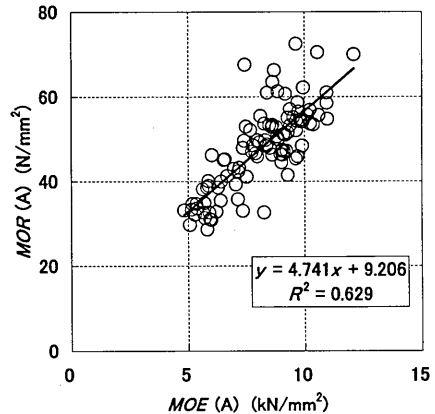


Fig. 19. Relationships between MOE (A) and MOR (A).
Legend: MOE (A) and MOR (A): The same as in Table 1.

両者を同様に取り扱うことができる。そこで、正角材と平角材を含む全製材品 ($n=350$ 本) の MOE (A) と MOR (A) の関係を Fig. 23 に示した。また、各機械等級区分における MOR (A) の信頼度75%の5%下限信頼限界値と基準強度の関係を Table 11 に示す。

正角材と平角材を含む全製材品においても、 MOE (A) と MOR (A) の間には高い相関が認められ、 MOE (A) から MOR (A) の推定が可能であることがわかる。また、全製材品の MOR (A) の5%下限信頼限界値は 27.1N/mm^2 となり、 MOR (A) はスギ材の基準強度 22.2N/mm^2 を上回っている。さらに、 MOE (A) の5%下限信頼限界値は 4.81kN/mm^2 と

なり、 MOE (A) は JAS の機械等級区分の最低等級である E50 等級に相当した。Table 11 から明らかのように、各機械等級区分における5%下限信頼限界値は、E50 と E90 では基準強度を上回り、E70 と E110 では基準強度を若干下回っているが、スギ材の材質の変動を考慮するとヤング係数を基準とした JAS の強度等級区分は基準強度に概ね適合すると言える。したがって、本試験結果は数品種を含むスギ製材品の実大試験結果であり、大分県産スギ製材品の全体を網羅するものではないが、これらの結果は大分県産スギ製材品を機械等級区分して使えば、強度性能上合理的な利用ができることを示唆している。

Table 10. Variation of the distribution of Young's modulus in each measurement.
Legend: n , SD , CV , Min , Max and MOE (A): The same as Table 1.
 E_{frl} , E_{frg} , E_{frd} (15): The same as Table 5.

| | E_{frl} (kN/mm^2) | E_{frg} (kN/mm^2) | E_{frd} (15) (kN/mm^2) | MOE (A) (kN/mm^2) |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| Mean | 7.11 | 6.41 | 7.62 | 8.12 |
| SD | 1.50 | 1.20 | 1.45 | 1.68 |
| CV | 21.08 | 18.73 | 18.96 | 20.64 |
| Min | 4.42 | 4.05 | 4.75 | 4.83 |
| Max | 10.51 | 9.73 | 11.08 | 12.12 |

$n=100$

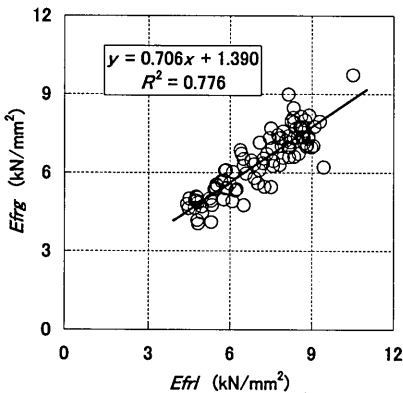


Fig. 20. Relationships between E_{frl} and E_{frg} .
Legend: E_{frl} and E_{frg} : The same as in Table 5.

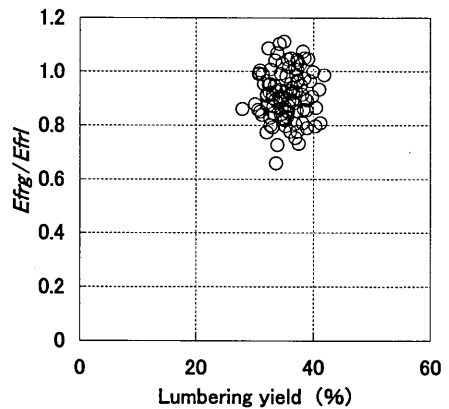


Fig. 21. Relationships between Lumber yield and E_{frg}/E_{frl} .
Legend: E_{frl} and E_{frg} : The same as in Table 5.

要 約

大分県産スギ丸太から製材した構造用製材品の実大曲げ試験を行い、その強度性能と材質因子の関係を検討するとともに、丸太から製材品に至る過程でのヤング係数の変動についても検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

1) スギ正角材の $MOE (A)$ は 7.86 kN/mm^2 ($CV: 20.8\%$)、 $MOR (A)$ は 40.3 N/mm^2 ($CV: 18.8\%$) で、 $MOR (A)$ の 5% 下限信頼限界値は 27.3 N/mm^2 であった。一方、スギ平角材の $MOE (A)$ は 8.12 kN/mm^2

mm^2 ($CV: 20.6\%$)、 $MOR (A)$ は 47.7 N/mm^2 ($CV: 21.0\%$) で、 $MOR (A)$ の 5% 下限信頼限界値は 31.1 N/mm^2 であった。正角材、平角材とも建設省告示に定めるスギ無等級材の基準強度を上回った。

2) JAS による強度等級区分において、目視等級区分と機械等級区分の有効性が正角材、平角材の両者で示されたが、目視等級区分と機械等級区分を比較すると、後者の方が等級ごとのバラツキが小さく、またヤング係数が明らかな点から優れている。

3) 材質因子と強度性能の関係において、正角材、平角材とも $MOR (A)$ は $MOE (A)$ と最も高い相

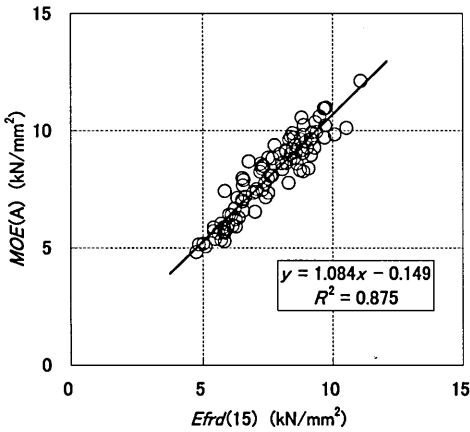


Fig. 22. Relationships between $Efrd (15)$ and $MOE (A)$.
Legend: $MOE (A)$: The same as in Table 1.
Legend: $Efrd (15)$: The same as in Table 5.

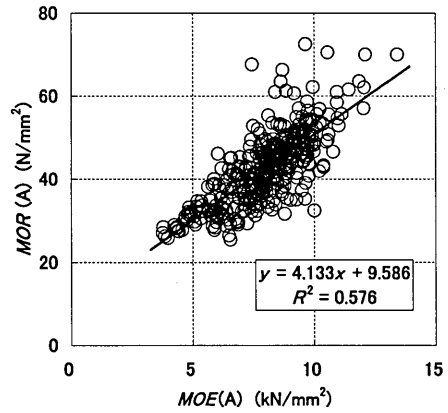


Fig. 23. Relationships between $MOE (A)$ and $MOR (A)$.
Legend: $MOE (A)$ and $MOR (A)$: The same as in Table 1.

Table 11. Lower confidence limit of $MOR (A)$ of all lumber in Machine stress grading.
Legend: n and $MOE (A)$: The same as Table 1.

| Machine stress grading | n | Relative frequency (%) | $MOR (A)$ Lower confidence limit (N/mm^2) | Ministry of Construction Notice No.1452 th (N/mm^2) |
|------------------------|-----|------------------------|--|--|
| E30 | 3 | 0.9 | — | — |
| E50 | 38 | 10.9 | 26.2 | 24.0 |
| E70 | 110 | 31.4 | 28.0 | 29.4 |
| E90 | 161 | 46.0 | 35.1 | 34.8 |
| E110 | 33 | 9.4 | 38.9 | 40.8 |
| E130 | 5 | 1.4 | — | — |
| Total | 350 | 100 | | |

関を示した。また、節との関係では、集中節径比との間に有意性は認められるものの、その相関係数の値は小さく、実大製材品の強度に及ぼす節の影響は正角材、平角材とも小さいことがわかった。

4) 動的ヤング係数は丸太段階から製材後の生材状態で大きく減少し、丸太の動的ヤング係数 (E_{frl}) に対する生材状態の製材品の動的ヤング係数 (E_{frg}) の比 (E_{frg}/E_{frl}) は正角材で0.77 (CV: 16.4%), 平角材で0.91 (CV: 10.1%) を示した。この低下には製材木取り法や未成熟材部の割合などが関与すると考えられた。

一方、生材状態の製材品の動的ヤング係数 (E_{frg}) に対する乾燥後の製材品の動的ヤング係数 (E_{frd} (15)) の比 (E_{frd} (15)/ E_{frg}) は正角材で1.13 (CV: 3.6%), 平角材で1.19 (CV: 2.8%) となり、乾燥により動的ヤング係数は増加した。

また、 E_{frd} (15) と曲げ試験で得られた MOE (A) の間には高い相関が認められ、 E_{frd} (15) から MOE (A) の推定が可能であることがわかった。

5) 正角材と平角材を含む全製材品においても、 MOE (A) と MOR (A) の間には高い相関が認められ、 MOE (A) から MOR (A) の推定が可能である

ことがわった。また、全製材品の MOR (A) の5% 下限信頼限界値は27.1N/mm²となり、 MOR (A) は建設省告示に定めるスギ無等級材の基準強度を上回り、 MOE (A) の5% 下限信頼限界値は4.81kN/mm²となり、 MOE (A) はJASの機械等級区分の最低等級に相当した。

また、ヤング係数を基準としたJASの強度等級区分は基準強度に概ね適合し、これは大分県産スギ製材品を機械等級区分して使えば、強度性能上合理的な利用が可能であることを示唆している。

文 献

- 堀江和美 1997 木材強度データの確率・統計手法。
(有) 木質構造研究所, 北海道
- 城井秀幸・藤本登留・村瀬安英・河野貴可・芦原義伸・木下義文・三ヶ田雅敏・津島俊治・豆田俊治
2003 大分県産スギ材の強度特性 (第1報) 丸太のヤング係数, 九大学芸誌, 58 (1・2): 43-54
- 日本住宅・木材技術センター 2000 構造用木材の強度試験法 住宅資材性能規定化対策事業地域材性能評価事業・報告書
- スギ分科会 1991 木材の科学と利用技術II5. スギ
日本木材学会研究分科会報告書

Summary

Bending tests were performed on full scale structural lumber sawed from sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don.) logs grown in Oita prefecture, and the relationship between the wood's strength performance and material factors, as well as the variation of Young's modulus in the wood in its transformation from log to lumber were examined. The results are summarized as follows.

(1) The mean value of *MOE* (A) (modulus of elasticity corrected by the standard testing condition) and *MOR* (A) (modulus of rupture corrected by the standard testing condition) of the sugi square-cut lumber were 7.86kN/mm² and 40.3N/mm², respectively. On the other hand the mean value of *MOE* (A) and *MOR* (A) of the sugi rectangular-cut lumber were 8.12kN/mm² and 47.7N/mm², respectively. The *MOR* (A) values in both sugi lumber were above the value of standard strengths of non graded lumber of established by the Ministry of Construction notice.

(2) In the relationship between material factors and strength performance, *MOR* (A) showed the highest correlation to *MOE* (A). It was proven that in full-scale boxed heart square-cut structural lumber of sugi the effect of the knots on the strength was small.

(3) The dynamic modulus of elasticity decreased in the transition from log to green lumber. It is considered that sawing pattern and the ratio of juvenile wood in the lumber are involved in the reduction of this value.

(4) The machine stress grading of the JAS (Japanese Agricultural Standard) using modulus of elasticity approximately corresponded with the value established by the Ministry of Construction notice. This suggests that lumber grown in Oita prefecture classified according to the grading scale of the JAS can be utilized in terms of its strength performance.