

木材のねじり疲労特性*1

安藤幸世*2, 山崎真理子*3, 渡辺純子*2, 佐々木康寿*2

Torsional Fatigue Properties of Wood*1

Kosei ANDO*2, Mariko YAMASAKI*3,
Junko WATANABE*2 and Yasutoshi SASAKI*2

The torsional fatigue properties of two woods (Japanese beech and white cedar) under controlled torque were investigated experimentally. Pulsating torsional loading was applied about the longitudinal direction of wood. The pattern of repetitive loading was the reversed cyclic sine-waveform loading and the applied frequencies were 0.1 Hz and 1 Hz. The following results were obtained. 1) A negative correlation was observed between the shear stress level and the logarithm of the number of cycles to failure (N_f). 2) The N_f at the frequency of 1 Hz was larger than that at 0.1 Hz. 3) The average energy loss per unit cycle was inclined to converge to a certain value with increasing N_f . This value was considered to be equal to a quantity which was not related to the initiation and propagation of micro-fractures in the specimen. We estimated the converged values at 0.7 kJ/m³ for Japanese beech and 0.5 kJ/m³ for white cedar. From these results, the torsional fatigue limits of both species were assumed to be about 30% of stress levels.

Keywords: torsional fatigue, energy loss, frequency, S-N curve, shear stress.

ブナ、ベイヒの繊維方向を軸とするねじり疲労特性について検討した。ねじりモーメント制御、両振り正弦波形で繰り返し周波数0.1 Hzと1 Hzで実施し、樹種による違い、応力レベルおよび繰り返し周波数の影響を調べた。さらに、1サイクル毎のエネルギー損失の特性から木材のねじり疲労特性を検討した。得られた主な知見は以下の通りである。(1) せん断強さに対するせん断応力の比(応力レベル)が30%~100%の範囲では応力レベルと疲労寿命回数の対数とに負の直線関係があった。(2) 周波数が高い方が疲労寿命回数の多い傾向にあった。(3) 1サイクル毎のエネルギー損失の平均値は疲労寿命回数が延びるにつれ或る一定値に収束する傾向が得られた。この収束値は微視破壊の発生および進展に関与しない量と推測でき、およそブナで0.7 kJ/m³、ベイヒで0.5 kJ/m³であった。このときの応力レベルの限界値は疲れ限度と考えられ、およそ30%と予測した。

1. 緒 言

一般に材料の変形と破壊は、その材料固有の力学・強度的特性とその時の負荷条件の双方に依存する。従って、構造部材あるいは構造物を安全にかつ合理的に設計するためには、材料固有の特性についての理解を深めると共に当該材料の実際に想定される力学環境下での挙動についても検討する必要がある。

繰り返し性の荷重に対してはエネルギー吸収で対抗するのが最も合理的である。繰り返し荷重環境下、すなわち、木材の疲労環境下での挙動については、

*1 Received April 19, 2004; accepted September 15, 2004.

本研究の一部は第48回日本木材学会大会(1998年4月、静岡)で発表した。

*2 名古屋大学大学院生命農学研究科 Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601

*3 名古屋工業大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555

近年、解放されるエネルギーを焦点にした幾つかの研究が行われている¹⁻¹¹⁾。今山ら¹⁻⁴⁾は両振り曲げ疲労過程において、弾性的性質の変化は少ないが塑性的性質には変化が大きいことを見出し¹⁾、材表面または材中の温度上昇曲線の変曲点と微視亀裂の開始点とが一致することを明らかにしている^{1,2,4)}。また、年輪構造を持つ木材に特徴的な亀裂進展様式を検討している³⁾。Okuyamaら⁵⁻⁷⁾、小原ら⁸⁻¹¹⁾は引張および圧縮疲労に及ぼす繰り返し周波数、波形、破壊までの時間あるいは破壊速度等の影響を検討^{5-8,10)}すると共に、引張り片振り疲労において、1サイクル毎のエネルギー損失が微視破壊に関与しない量と関与する量との単純な和で表せることを実験的および理論的に明らかにしている^{5-7,9,10)}。さらに、AE計測結果によりそのことを裏付けている¹¹⁾。しかしながら、ねじり疲労に関する研究は、ねじり一軸応力複合疲労¹²⁾に関するもの以外見あたらず、ねじりが単独で作用したときの挙動、すなわち疲労におけるねじり成分の特性については不明の点が多い。

近年の木質構造物における新しい構法の開発・発展に伴い、非対称型の構造、あるいは、ラーメン構造のように接合部を剛とする事例が数多く現れ、こうした構造における構成部材がねじれを起こすことが十分に想定されるようになってきた。さらには、セルローズ繊維強化による天然の複合材料である木材の優れた特性は、例えば新しい材料の開発に際し有益な情報となり得るので、そのねじり疲労特性を明らかにすることは意義のあることと考えられる。

本研究では、木材のねじり疲労に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、樹種による違い、応力レベルおよび繰り返し周波数の影響を調べた。さらに、1サイクル毎のエネルギー損失の特性から木材のねじり疲労のメカニズムを検討した。

2. 実 験

2.1 試験体

供試材料にはブナ (*Fagus crenata* Blume) とベイヒ (*Chamaecyparis lawsoniana* Parlatores) の辺材部を使用した。試験体形状は Fig. 1 に示した全長330 mm (繊維方向) の中実丸棒状である。試験機のチャックでつかむために設けられた両端部分の長さは105

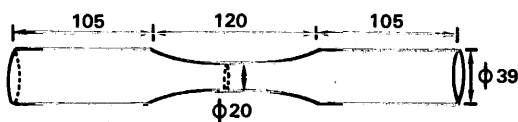


Fig. 1. Test specimen (unit: mm).

mm で、中央部分の長さ120 mm の範囲はテーパ形状となっている。テーパ部の中央部30 mm の区間に直径20 mm の平行部分を設けた。試験体は温度25℃、相対湿度57%で調湿後、材料試験に供した。試験体の平均密度はブナが617 kg/m³、ベイヒが455 kg/m³、平均含水率はブナが11.6%、ベイヒが9.5%であった。

2.2 試験方法

2.2.1 静的試験

せん断強さを求めるために静的ねじり試験を行った。材料試験には島津製作所製、島津サーボパルス引張圧縮・ねじり複合疲労試験機 (EHF-ED10/TD1-20L) を用いた。試験は変位制御で行い、チャックの回転速度は0.05 deg/sec とした。ロードセルにより検出されたねじりモーメントの最大値から式(1)によりせん断強さを算出した。

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、 T はねじりモーメント、 d は最小断面部分の直径である。なお、式(1)は木材の異方性を考慮していない。また、最も高いせん断応力が発生する試験体外周部における応力である。ブナ、ベイヒ20体ずつ静的ねじり試験を行い、それぞれの平均値をせん断強さとした。得られた結果はブナ20.0 MPa、ベイヒ16.3 MPaであった。

2.2.2 疲労試験

疲労試験は静的試験と同じ材料試験機を用いて行った。ねじりモーメント振幅一定の両振り正弦波で、平均ねじりモーメントはゼロである。繰り返し周波数はブナでは0.1 Hzのみ、ベイヒでは0.1および1 Hzに設定した。

試験体は中実丸棒であるが、試験体中央テーパ部の平行部分のLT、LR面に相当する表面にそれぞれ3軸ロゼットゲージ (東京測器研究所製 FRA-3-11、ゲージ長3 mm) を貼り、軸方向 (繊維方向) 縦ひずみおよびLT面、LR面それぞれのせん断ひずみを求めた¹³⁾。

試験は25℃、相対湿度57%の雰囲気で行った。

3. 結果と考察

3.1 破壊性状

Fig. 2 に疲労試験における最終破断後の破壊形状の典型例を示す。本研究の範囲では樹種、周波数、応力レベルの違いに関わらず、繊維方向にほぼ平行に数本の亀裂が生じるといった破壊性状を示した。目視により初めて亀裂が観察されるのは破壊までの繰り返し数の90%時以降であった。

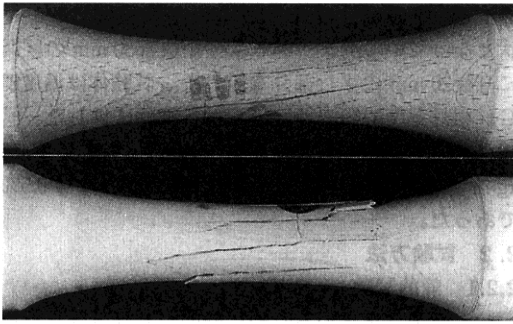


Fig. 2. Examples of failure mode in torsional fatigue tests.
Legend: Upper: Japanese beech, 0.1 Hz at a stress level of 83%, Lower: White cedar, 0.1 Hz at a stress level of 90%.

一般に丸棒にねじりモーメントがかかると軸に平行および直角な面に沿ってせん断応力が生じ、同時に45度方向の螺旋面に引張りおよび圧縮応力が生じる。本研究で観察された繊維方向に走る亀裂は木材のねじり破壊に典型的なものと考えられる¹²⁾。これらの亀裂はせん断応力の最も高い外周部で発生し、疲労の経過と共にせん断応力の低い円心方向に進展するものと推測できる。軸に45度方向に生じる亀裂も数体観察されたが、いずれも最終破断時に形成されるものであった。

3.2 S- N_f 関係

繰り返しせん断応力 (S) と疲労寿命回数 (N_f) との関係を図 3 および Fig. 4 に示す。せん断応力は式 (1) より求めた。

Fig. 3 は同じ周波数 (0.1 Hz) で異なる樹種、ブナとベイヒについての関係図である。縦軸は静的試験によって求めたせん断強さに対する比 (%) で表し、以後応力レベルと定義する。ベイヒのばらつきがやや大きい。本研究での繰り返し応力レベルの範囲内では、両樹種とも負の直線関係が認められた。すなわち、応力レベルが小さくなると疲労寿命回数の対数が直線的に増加する結果が得られた。このような傾向は木材の曲げ、引張りおよび圧縮などの疲労試験でも数多く報告されている^{1,5,6,8,9)} が、ねじり疲労でも同様であった。

同じ応力レベルで比較するとブナの方がやや長寿命側にプロットされているが、最小二乗法で回帰した回帰直線の傾きはほぼ同じであった。このことから、ブナ、ベイヒでねじり疲労寿命の応力依存性が同等であると考えることができる。今山ら¹⁾ はスギ中央集中荷重による両振りの曲げ疲労試験 (40 Hz) により $S-N_f$ 関係を求めているが、 N_f の常用対数に対する応力レベルの回帰直線の傾きを求めてみる

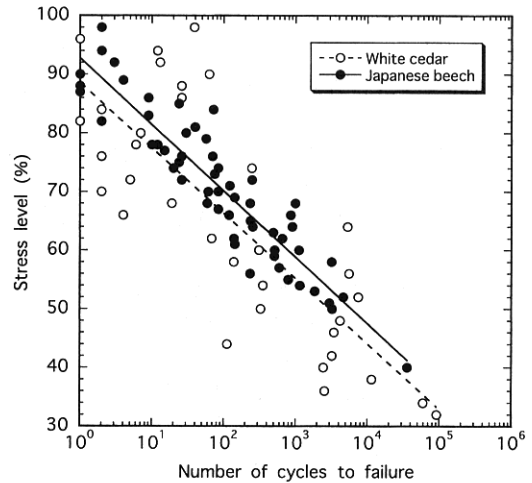


Fig. 3. Relationships between stress level (S) and number of cycles to failure (N_f) under 0.1 Hz cyclic tests.

Notes: Stress level was defined by the ratio of the shear stress to the shear strength estimated from static tests. Shear stress was obtained by Equation (1).
Japanese beech: $S = 92.8 - 11.3 \log N_f$, $r = -0.927$.
White cedar: $S = 88.6 - 11.1 \log N_f$, $r = -0.803$.

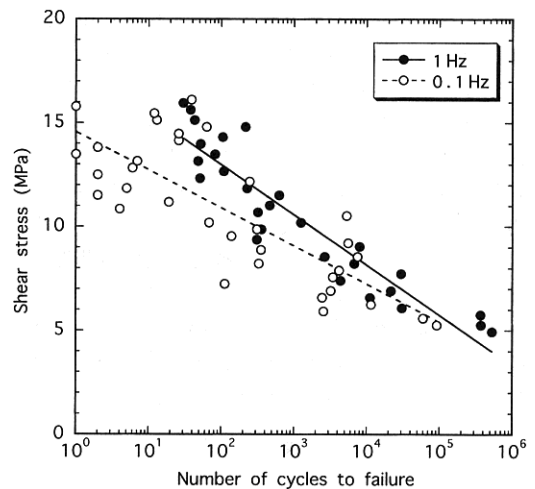


Fig. 4. Relationships between shear stress (τ) and number of cycles to failure (N_f) of white cedar.

Notes: 1 Hz: $\tau = 17.8 - 2.42 \log N_f$, $r = -0.932$. 0.1 Hz: $\tau = 14.6 - 1.83 \log N_f$, $r = -0.803$.

と、およそ -10 であり、本研究での結果 (ブナ: -11.3, ベイヒ: -11.1) はそれと類似した値であった。

Fig. 4 は同一樹種 (ベイヒ) で周波数の違いを調べた図である。縦軸はせん断応力で表した。高い周波数 (1 Hz) の方が疲労寿命回数の多い傾向であった。Okuyama ら⁵⁾ はスプリースの片振り一定負荷

により引張りと圧縮での周波数の影響を10 Hzと0.1 Hzで調べているが、いずれも周波数の高い方が疲労寿命回数は多いとしている。本研究でのねじり疲労においては、特に高負荷時にそれらの結果と一致した。

3.3 せん断ひずみ振幅の経時変化

試験体は中実丸棒であるが、LT, LR面に相当する表面にそれぞれ3軸ロゼットゲージを添付しせん断ひずみ (γ) を測定した。 γ はLT面で得られるせん断ひずみ (γ_{LT}) とLR面で得られるせん断ひずみ (γ_{LR}) の平均値とした。

Fig. 5にはブナ0.1 Hzおよびベイヒ0.1 Hzの、せん断ひずみ振幅の経時変化をそれぞれ示す。両振り疲労試験であるので、計測されたひずみの二倍に相当する値となる。横軸は繰り返し数 (N) を疲労寿命回数 (N_f) で除した値である。全体の傾向として、

試験開始後やや減少し、その後かなりの期間に渡ってほぼ一定ないし極僅かの増加または減少をもって進行し、振幅増加率が緩やかに増加する期間を経てから急増して最終破断に至った。本研究の範囲内では応力レベルによる推移の仕方の違いは認められなかった。

3.4 エネルギー損失

疲労試験時の1サイクル毎のせん断応力—せん断ひずみヒステリシスループの面積からエネルギー損失を求めた。Fig. 6にはブナ0.1 Hzおよびベイヒ0.1 Hzの、エネルギー損失の経時変化をそれぞれ示す。横軸は繰り返し数 (N) を疲労寿命回数 (N_f) で除した値である。エネルギー損失は最初からほぼ一定で推移し、破断間際 (ほぼ $N/N_f=0.9$ 以降) で増加していることが分かる。応力レベルが大きいものほどエネルギー損失は大きな値で推移しているが、応力レベルが大

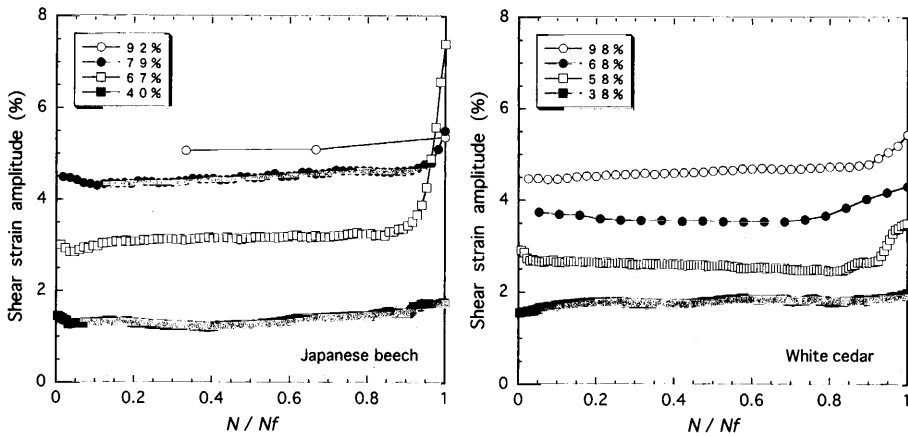


Fig. 5. Progression of shear strain amplitudes during torsional fatigue tests under 0.1 Hz cyclic tests. Notes: Percentages in the figure represent the stress levels. N/N_f is the ratio of number of cycles to N_f .

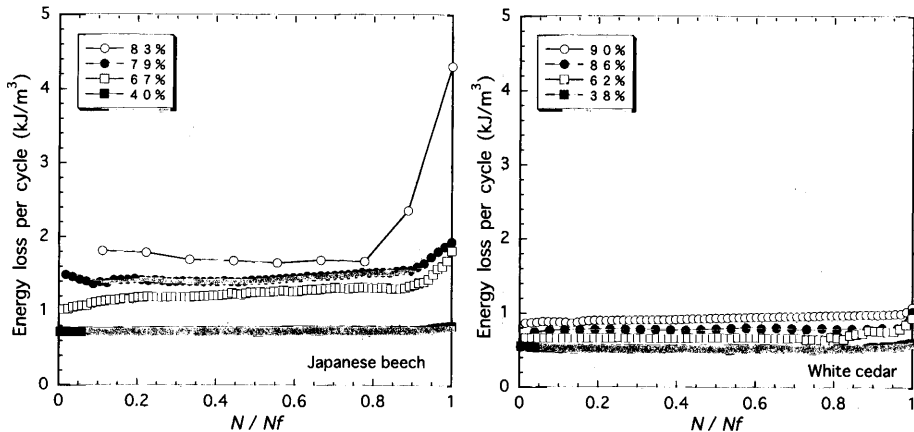


Fig. 6. Progression of energy loss per cycle during torsional fatigue tests under 0.1 Hz cyclic tests. Note: Same as in Fig. 5.

きいものほど材料内の微視的損傷発生量が多いことが主因であると考えられる。

Fig. 7には、 $N/N_f=0.9$ までの累積エネルギー損失を縦軸に取り疲労寿命回数との関係を調べた図である。 $N/N_f=0.9$ までに限定したのは最終破断に直接起因すると推測できる量を除くためである。ブナとベイヒでほぼ一致した傾向を示し、両対数グラフで正の直線関係があった。

ところで、材料の破壊は蓄積されたダメージが或る一定量に達すると起こると考えられる。もし、測定されたエネルギー損失が材料内でのダメージ量を定量するものならば、Fig. 7の縦軸（累積エネルギー損失）は疲労寿命回数（または応力レベル）によらず一定値を示すはずであるが、実際には示さない。従って、測定されたエネルギー損失（サイクル毎の応力-ひずみヒステリシスループの面積）にはダメージ生成に起因する量とともに起因しない量、すなわち、材料内の内部摩擦に起因する量も含まれていると推測できる。

Fig. 8には $N/N_f=0.9$ までのエネルギー損失の平均値と疲労寿命回数との関係を示す。疲労寿命回数が大きくなるにつれ、平均エネルギー損失は小さくなって或る値に収束するようである。Okuyamaら⁵⁻⁷⁾、Koharaら⁹⁻¹¹⁾は木材の引張疲労において、1サイクル毎のエネルギー損失が、線形粘弾性によって説明される破壊に関与しない内部摩擦に由来する量(H_a)と微視亀裂の発生と進展に由来する量(H_b)との和で表されることを示し、破壊までの平均 H_b がゼロ

と考えられる応力振幅の限界値が疲れ限度とほぼ一致するとして、その値を応力レベル25%程度と考察している⁶⁾。さらに、 H_b が材料内の損傷発生に起因する量であることをA E計測結果より裏付けた¹¹⁾。Okuyamaら、Koharaらにより提案されたこの疲労メカニズムが本研究のねじり疲労の場合にも当てはまるとすると、まさに収束する平均エネルギー損失値は、破壊に関与しない内部摩擦に由来する量(H_a)と一致する。その値をFig. 8から見積もるとブナで 0.7 kJ/m^3 、ベイヒで 0.5 kJ/m^3 程度であった。このときの応力レベルの限界値は疲れ限度と考えられるが、およそ30%であると推測できた。

以上のことから、エネルギー損失値は木材のねじり疲労現象と密接な関係のあるパラメータであると予想する。従って、繰り返し周波数、波形などの条件を様々に変えてエネルギー損失を詳細に検討することは、木材のねじり疲労メカニズムの更なる解明にとって不可欠なものと考えられる。

4. 結 論

木材の繊維方向を軸とするねじり疲労特性について中実丸棒を用いて検討した。ねじりモーメント振幅一定、両振り正弦波形で繰り返し周波数0.1 Hzと1 Hzで実施し、樹種による違い、応力レベルおよび繰り返し周波数の影響を調べた。さらに、1サイクル毎のエネルギー損失の特性から木材のねじり疲労特性を検討した。

応力レベルが30%~100%の範囲では応力レベル

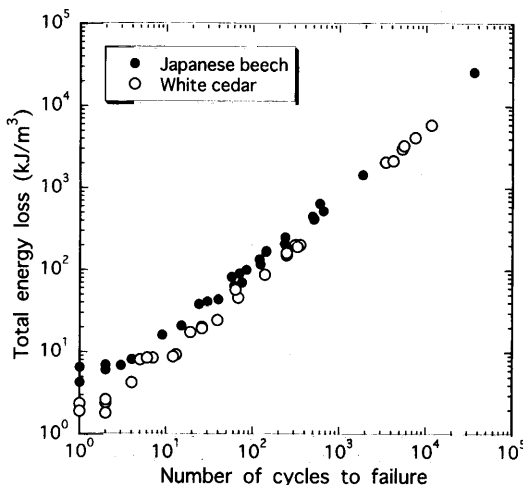


Fig. 7. Relationships between total energy loss at $N/N_f=0.9$ and number of cycles to failure under 0.1 Hz cyclic tests.

Note: N/N_f is the ratio of number of cycles to N_f .

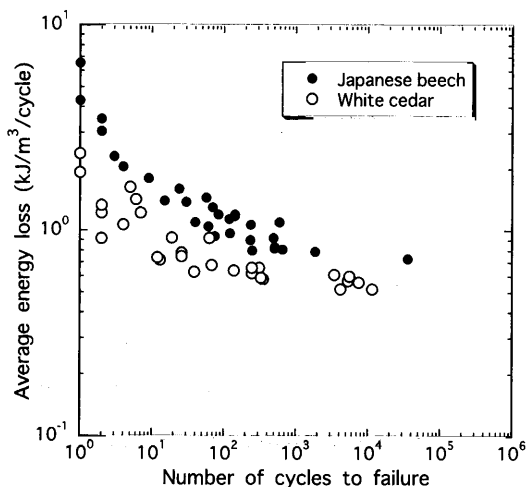


Fig. 8. Relationships between average energy loss per cycle up to $N/N_f=0.9$ and number of cycles to failure under 0.1 Hz cyclic tests.

Note: Same as in Fig. 7.

と疲労寿命回数の対数とに負の直線関係が認められた。その関係は樹種によらずほぼ同じ傾きであった。周波数が大きい方が疲労寿命回数の多い傾向にあった。1サイクル毎のエネルギー損失の平均値は疲労寿命回数が延びるにつれ或る一定値に収束する傾向が得られた。この収束値は微視破壊の発生および進展に関与しない量と推測でき、およそブナで0.7 kJ/m³、ベイヒで0.5 kJ/m³であった。このときの応力レベルの限界値は疲れ限度と考えられるが、およそ30%であると推測できた。

謝 辞

本研究の遂行に当たり有益なご助言をいただいた岐阜大学教育学部の小原光博助教授に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 今山延洋, 松本 昴: 木材学会誌 **16**, 319-325 (1970).
- 2) 今山延洋, 松本 昴: 木材学会誌 **20**, 53-62 (1974).
- 3) 今山延洋: 木材学会誌 **26**, 595-602 (1980).
- 4) 今山延洋: 木材学会誌 **34**, 8-13 (1988).
- 5) Okuyama, T., Itoh, A., Marsoem, S. N.: *Mokuzai Gakkaishi* **30**, 791-798 (1984).
- 6) Marsoem, S. N., Bordonné, P.-A., Okuyama, T.: *Mokuzai Gakkaishi* **33**, 354-360 (1987).
- 7) Bordonné, P.-A., Okuyama, T., Marsoem, S. N.: *Mokuzai Gakkaishi* **33**, 623-629 (1987).
- 8) 小原光博, 奥山 剛: 木材学会誌 **38**, 753-758 (1992).
- 9) Kohara, M., Okuyama, T.: *Mokuzai Gakkaishi* **39**, 1226-1230 (1993).
- 10) Kohara, M., Okuyama, T.: *Mokuzai Gakkaishi* **40**, 491-496 (1994).
- 11) 小原光博, 安藤幸世, 古田裕三, 金山公三, 奥山剛: 木材学会誌 **45**, 208-214 (1999).
- 12) Sasaki, Y., Yamasaki, M.: *Wood Fiber Sci.* **34**(4), 508-515 (2002).
- 13) 菅野 昭, 高橋 賞, 吉野利男: “応力ひずみ解析”, 朝倉書店, 東京, 1986, pp. 7-11.