

木材の強度異方性に及ぼす温度の影響(第1報)

繊維に直角方向の曲げについて^{*1}奥山 剛^{*2}, 鈴木滋彦^{*2}, 寺沢 真^{*2}

Effect of Temperature on Orthotropic Properties of Wood. I.

On the Transverse Anisotropy in Bending^{*1}Takashi OKUYAMA^{*2}, Shigehiko SUZUKI^{*2}
and Shin TERAZAWA^{*2}

Some drying defects such as surface check are discussed relating with the strength properties perpendicular to the grain. The influence of the temperature on the mechanical properties of wood has been examined by many researchers, however the effects of the temperature on the orthotropic properties of wood have not been investigated in detail.

In this paper, the effect of the temperature on the orthotropic properties of wood in RT plane was investigated in bending test under green condition. Ramin (*Gonystylus* sp.) and Red Meranti (*Shorea* sp.) wood were tested at various temperatures and at various angles to the radial direction.

1) Equation (1) agreed to the experimental values of the modulus of elasticity at various angles in RT plane and at various temperatures under bending load. The behaviour of the relative shear modulus calculated by Eq. (1) agreed with the experimental values estimated by torsion test at various temperatures.

2) The following empirical formula shows the relation between the bending strength F_θ in RT plane at various temperatures and the angle (θ).

$$F_\theta = \frac{F_R \cdot F_T}{F_R \sin^{n1} \theta + F_T \cos^{n2} \theta}$$

where F_R and F_T indicate the bending strength in the radial and the tangential directions, respectively. The indexes $n1$ and $n2$ are the experimental coefficients.

Norris's equation (2) and Hankinson's formula (3) agreed insufficiently to the experimental values in RT plane under the bending.

木材のRT面での曲げ強さ異方性に及ぼす温度の影響について、ラミン材とレッドメランチ材の生材を用いて実験した。その結果の現象論的な検討を行いつぎの結論を得た。

1) 直交異方性弾性物質の弾性係数間を理論的にあらわす(1)式は、曲げヤング率の異方性の温度依存性をもよく表現する。

曲げ試験結果から(1)式を用いて計算した G_{RT} の値と、別途行ったねじり試験から、Hörićの方法によって得られた G_{RT} の温度による変化の傾向は両樹種ともよく一致した。

2) 曲げ強さ異方性の温度依存性について、Norrisの理論式およびHankinsonの実験式は実験結果にうまくあてはまらなかった。従って、今回は両樹種につき温度依存性をも含めてよくあてはまる実験式(4)を求めた。

1. 緒 言

木材の人工乾燥初期に発生する表面割れなどは、繊維と直角方向の強度的性質および収縮率の大小と深い関係がある。そして、表面割れが発生する位置は強度異方性の温度依存性および収縮率の異方性と密接に関係するも

^{*1} Received July 12, 1977. 本報の一部は、第27回日本木材学会大会(1977年4月京都)において発表した。

^{*2} 名古屋大学農学部 Faculty of Agriculture, Nagoya University, Chikusa, Nagoya

のと思われる。

木材の機械的性質が温度の影響を受けることは多くの研究結果から明らかであるが、異方性との関係を明確にとりあげたものは少ない¹⁾。温度変化を伴わない強度異方性に関する研究はNorris²⁾, Goodman³⁾などにその例をみることができるが、多くは板目(LT)面、柃目(LR)面をとりあつかっており、繊維と直角方向、すなわち木口(RT)面における異方性に着目して研究した例は少ない⁴⁾。ところが、乾燥割れは木口(RT)面に関する強度異方性の温度依存性と最も関係が深いものと考えられる。

本研究では、乾燥時に初期割れの発生程度が非常に大きいラミン材と、その程度が普通であるレッドメラント材を用い、生材状態で繊維と直角方向の曲げ試験を行った。そして、強度異方性に及ぼす温度の影響について、樹種間の比較をも含めて検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験材は、ラミン材(*Gonystylus* sp., 実験時の含水率61%, 全乾比重0.59, 中部カリマンタン産), レッドメラント材(*Shorea* sp., 実験時の含水率48%, 全乾比重0.46, サバ州産)である。

試験片は、心材部の欠点のない部分から生材状態で採取し、曲げ試験片の寸法は、1.0×1.0×17 cmとした。

試験片の長軸方向が半径方向のものを角度0度、接線方向のものを角度90度として、その間を7~8段階にとった。なお、負荷面は木口面以外である。

ねじり試験片は、ねじり軸が繊維方向、接線方向および半径方向になるように三種類木取った。寸法は1.0×1.0×12.5 cmである。

2.2 試験方法

曲げ試験は、スパン間隔が15 cmの中央集中負荷により恒温水槽中で行った。温度条件は、20, 40, 60, 80 および97℃の5段階とし、±0.5℃の範囲の精度で温度調節をした。なお、一温度条件および一角度条件につき試験片7~10本をあてた。試験機は定たわみ速度制御装置を有する小型曲げ試験機で0.5 cm/minのたわみ速度で試験をした。

ねじり試験のスパン間隔は10 cmであり、20, 40, 60 および80℃の温度条件について恒温水槽中で行った。なお、ねじり角はチャック間のねじり角とした。

3. 実験結果

3.1 曲げヤング率異方性に及ぼす温度の影響

実験結果をFig.1に示す。図の(a)はラミン材について、(b)はレッドメラント材についての結果である。なお、図中の実線は、後述する(1)式中の係数を実験値で定めたものによる曲線である。

ラミン材は各角度とも20℃での値が97℃での値の約

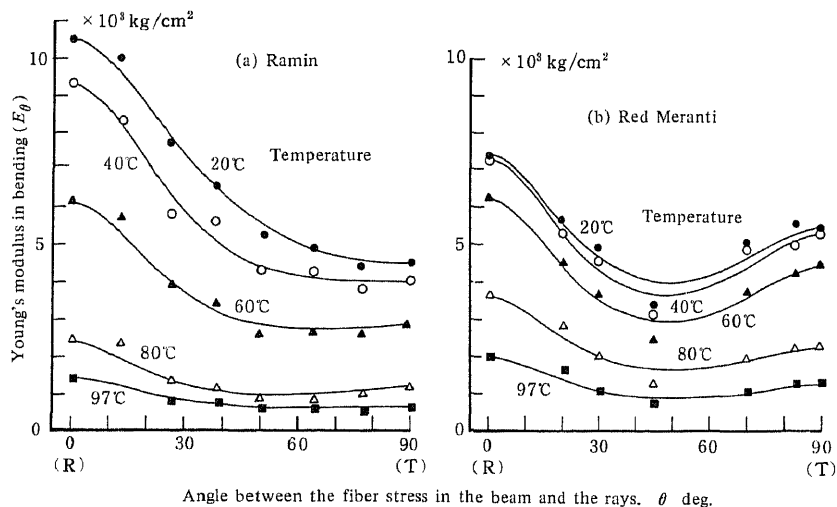


Fig. 1. The relationships between Young's modulus in bending (E_θ) and angle θ at various temperatures.

Note,

θ ; The angle between the fiber stress in the beam and the direction of the rays.

—; The values calculated by Eq (1).

Each plot is the mean of 7-8 values.

7 倍の値を示す。また、R 方向のヤング率は T 方向のヤング率の約 2 倍の値を示し、角度 $0 \sim 90$ 度の間に最小値を有する凹型を示す。そして底の位置は温度条件の違いによって変化する傾向を示す。すなわち、 20°C においては、角度 80 度近辺に底を有し温度条件が高くなるに従って底の位置は小さい角度の方に移行する。そして、底の型もやや幅広くなり、 97°C においては底の位置が不明確になる。

レッドメランチ材では、 20°C と 97°C の温度条件によるヤング率の比率はラミン材より小さく、約 4 倍の値である。また、R 方向の値は T 方向の約 1.5 倍でありラミン材よりもその比は小さい。

ヤング率と角度との関係において、各温度とも角度 $0 \sim 90$ 度の間に最小値を有する凹型を示すのはラミン材と同様であるが、その底は角度 45 度付近にみられる。しかも、各温度条件とも明らかな凹型を示す点がラミン材と異なる。

上述のように、両樹種間のヤング率異方性の温度依存性は、細部では種々の相異がみられるが、両樹種とも R 方向の値の方が T 方向の値より各温度条件とも大きいこと、ヤング率と角度との関係が、角度 $0 \sim 90$ 度の間に必ずしも底をもつ曲線となり、温度が高くなるほど底の幅が広がる。このことから、両樹種とも、ヤング率異方性の温度依存性に影響する因子が同一であると考えることができる。

3.2 ねじり剛性率におよぼす温度の影響

Fig.2 に、ねじり軸を L, T, R 方向にとったそれぞれの試験片について、ねじり剛性率 $(M/\delta)_{i(L,R,T)}$ の温度による変化の実験結果を示す。なお、 M はねじりモーメント ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)、 δ は比ねじり角 (radian/cm) である。

$(M/\delta)_i$ の値はいずれも温度の上昇に伴って減少する。温度上昇による減少割合はラミン材の方が大である。そして、 50°C までの減少量は、 50°C から 80°C までの減少量より少ない。特にレッドメランチ材では $20 \sim 40^\circ\text{C}$ の間での $(M/\delta)_i$ の減少はほとんどみられない。この傾向は、林¹⁾らのブナのねじり試験の結果と同様である。両樹種とも $(M/\delta)_R$ 、 $(M/\delta)_T$ の値に大きな差はないが、 $(M/\delta)_L$ と $(M/\delta)_R$ 、 $(M/\delta)_T$ との差はレッドメランチ材の方が大きい。

3.3 曲げ強さ異方性に及ぼす温度の影響

Fig.3 は、ラミン、レッドメランチ材についての曲げ強さ異方性と温度との関係である。

ラミン材では、R 方向と T 方向の曲げ強さの差がレッドメランチ材より大きいこと、最小値が T 方向から少し角度の小さいところにあることなど、ヤング率の場合と類似した傾向を示している。

一方、レッドメランチ材の場合は R 方向と T 方向との曲げ強さの差はラミン材より小さく、角度 $60 \sim 70$ 度付近に底をもつ曲線をえがく。

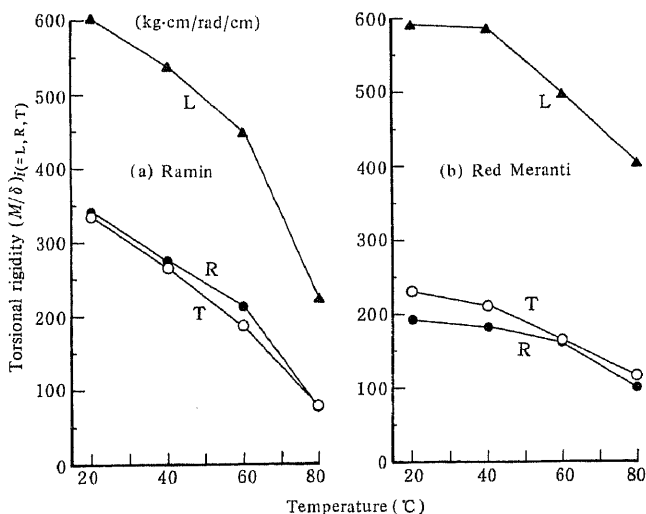


Fig. 2. The relationships between torsional rigidity $(M/\delta)_{i(L,R,T)}$ and temperature.

Note,

M ; torque ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)

δ ; twisting angle (rad/cm)

Each plot is the mean of 7-8 values.

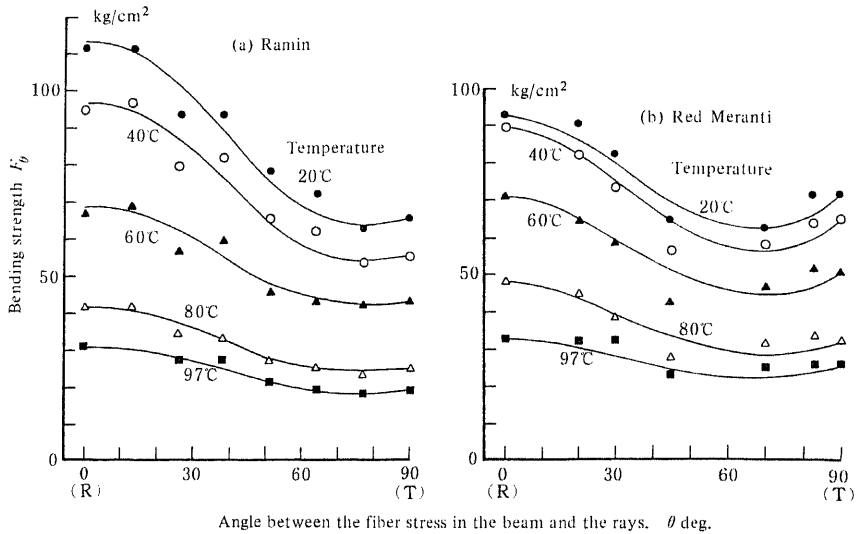


Fig. 3. The relationships between bending strength (E_θ) and angle θ at various temperatures.

Note,

—; The values calculated by Eq (4).

The values of n_1 and n_2 in Eq (4).

	n_1	n_2
Ramin	2.4	1.3
Red Meranti	2.2	0.9

両樹種を比較すれば、曲げ強さ異方性の曲線の傾向が相当異なるように思えるが、R方向の値がT方向の値より各温度とも大きいこと、および角度60～90度の間で曲線の底が必ずあらわれることなどから、ヤング率の場合と同様に、曲げ強さ異方性の温度依存性は両樹種とも同じ因子に支配されているように考えられる。

4. 考 察

4.1 ヤング率について

実験結果の傾向から、曲げヤング率異方性の温度依存性に与える影響因子としては、R方向、T方向のヤング率の温度依存性に加え、せん断弾性係数の温度依存性の因子が考えられる。このことを従来の弾性論から説明することを試みた。

一般に、直交異方性物質のヤング率の角度依存性は、弾性コンプライアンスの座標変換による式で表現することができる。(1)式は、RT面で座標変換した場合のヤング率異方性を示す式である。

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{1}{E_R} \cos^4 \theta + \frac{1}{E_T} \sin^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{RT}} - \frac{2\mu_{RT}}{E_R} \right) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta \quad (1)$$

ここに、 θ は曲げ梁内での応力の方向と放射組織の方向とのなす角度であり、 E_R 、 E_T はそれぞれR、T方向の曲げヤング率 (kg/cm^2)、 G_{RT} はせん断弾性係数 (kg/cm^2)、 μ_{RT} はポアソン比である。実験結果から E_R/E_T の値は温度条件が変化してもほぼ一定値であり、負荷中の試片形状の変化は、温度が異ってもそう変化するとは考えられない。従って、 μ_{RT} は、温度により大きく変化することは考えられない。また、(1)式において μ_{RT} の値の変化が、 E_θ に与える影響は、 G_{RT} の E_θ に与える影響に比し非常に小さい。従って、 E_R 、 E_T および μ_{RT} の値を固定し、 G_{RT} の値を変化させたときの(1)式があらわす曲線をFig.4に示した。図のように、(1)式は G_{RT} の値が小さければ角度0～90度の間に底を有する曲線となり、 G_{RT} の値が大きくなるに従って底の位置が角度の大きい方に移行する。図中黒丸はラミン材の20℃での実験値である。この場合、 $G_{RT} = 2.0 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ がもっとも適合する値である。なお、 E_R 、 E_T の値が小さくなれば、底の型が幅広くなり不明瞭にみえてくる。

20℃以外の温度条件においても(1)式がなりたつかどうかをたしかめるため上述のことを各温度における実験値に対して行った。 μ_{RT} を0.6とおき、(針葉樹、広葉樹を含め0.4～0.8と計算されている⁶⁾) 先ず各温度の

E_R , E_T の値を(1)式に代入して次に角度別ヤング率 E_θ の実験値とよく一致する G_{RT} の値を逐次法によって求めた。すなわち、各温度条件におけるヤング率と角度の実験データについて $\sqrt{\sum (E_{\theta \text{ measured}} - E_{\theta \text{ theory}})^2}$ の最小値を与える G_{RT} を計算した。

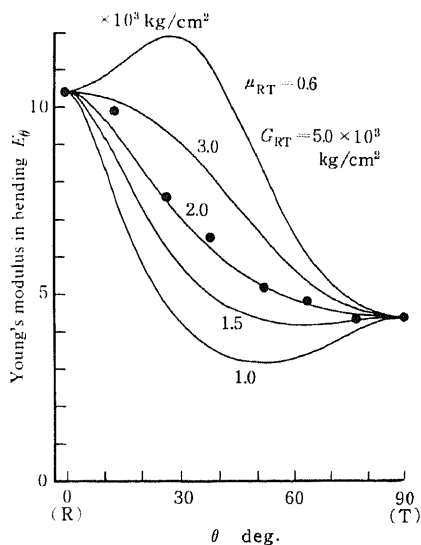


Fig. 4. The calculated values of Eq (1) under various G_{RT} .

Note,

●; The experimental values of Ramin under temperature 20°C.

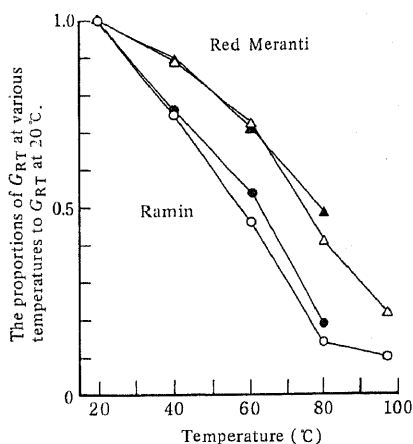


Fig. 5. The proportions of G_{RT} at various temperatures to G_{RT} at 20°C.

Note,

	Ramin	Red Meranti
From torsion tests	●	▲
From Eq (1) and Fig. 1	○	△

上述のようにして計算した各温度での G_{RT} の値を、20°Cの G_{RT} の値に対する比としてFig.5に示した。白丸印はラミン材を、白三角印はレッドメランチの場合である。なお、上述の G_{RT} の値を有する各温度条件での(1)式をFig.1中に実線で示した。

角度別曲げ試験の結果から計算された G_{RT} の温度依存性の妥当性を確かめるために、ねじり試験の結果から得られた G_{RT} の温度依存性とを比較した。

Fig.2に示した $(M/\delta)_i$ の結果から、Hörigの「R(p)法」を適用して G_{RT} を求めた。図式計算の一例をFig.6に示す。この方法によれば、有効数字3桁程度のせん断弾性係数を求めることができる。その結果を20°Cにおける値に対する G_{RT} 比としてFig.5に示した。黒丸印がラミン材、黒三角印はレッドメランチ材の場合である。なお、計算された値は、ラミン材の20°Cの場合、 $G_{RT}=1,650$, $G_{LT}=4,180$, $G_{LR}=4,450$ kg/cm², レッドメランチの20°Cの場合は $G_{RT}=893$, $G_{LT}=8,040$, $G_{LR}=2,820$ kg/cm²であった。本実験でのねじり角測定は、ねじりスパン間のねじり角を用いているため、その絶対値には誤差が入っていると思われる。しかしながら、温度依存性を比較値として知るには充分であると考えられる。図のように、曲げ強さから求めた G_{RT} の比率と、ねじり試験から得られた G_{RT} の比率の温度による変化は両樹種ともよく一致している。このことから、(1)式は、温度条件が変化した場合にもなりたつと考えることができる。

一方、この図を樹種間で比較すればつぎのようである。すなわち、ラミン材では G_{RT} の値がレッドメランチ材と比較して温度の影響を大きく受ける。このことから、細胞壁および中間層のせん断応力によるすべり易さの温度依存性は、ラミン材の方が大きいと考えられる。また、Fig.1(a)において、ラミン材の場合のヤング率と角度との関係が、温度が高い条件になるに伴ない凹型曲線の底が角度の小さい方に顕著に移行することと、 G_{RT} の温度依存性が大きいことが対応すると考えられる。

レッドメランチ材については、Fig.5から G_{RT} の比率がラミン材のそれよりも温度の影響をうけにくいと言えるが、 G_{RT} の絶対値はラミン材より小さい。このことは、レッドメランチ材のヤング率異方性を示すFig.1(b)の曲線のパターンがどの温度についてもはっきりした凹型を示すことに対応すると考えられる。

4.2 曲げ強さについて

曲げヤング率の温度依存性が、 G_{RT} の温度依存性と対応することが明らかとなったので、次に、曲げ強さの温度依存性についてその影響因子を推定するために、従来の理論の適用を試みた。

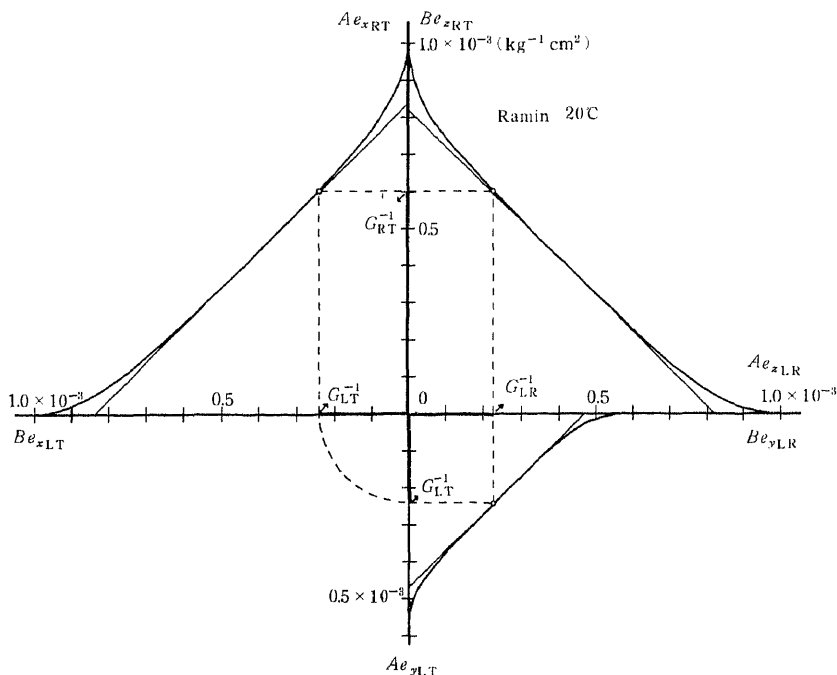


Fig. 6. An example of graphics for estimation of G_{RT} from torsion data. ("R(p) method")

Note,

$$e_{iRT} = e_{iLT} = e_{iLR} = 2a^3 (M/\delta)_i^{-1} \quad (i = x, y, z = T, L, R)$$

at square cross section ($2a \times 2a$ cm)

$$A = \frac{1}{(1+p^2)R(p)}, \quad B = \frac{p^2}{(1+p^2)R(p)}$$

$$R(p) = \frac{2.2492}{(1 + \frac{1}{p^2}) [\frac{8}{3} - \frac{1}{2p} (\frac{4}{\pi})^5 \Sigma(p)]}$$

$$\Sigma(p) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \tanh \left[\frac{(2n+1)\pi}{2} \cdot p \right]$$

The values of A and B are tabulated in Hørig's paper.⁷⁾

From this figure, we can estimate the shear moduli

$$G_{RT} = 1650, G_{LT} = 4180, G_{LR} = 4450 \text{ kg/cm}^2.$$

木材の強さ異方性を理論的に論じた例として Norris²⁾ があげられる。Norris は、Henky-von-Mises の破壊仮説と弾性応力の座標変換式とを組み合わせ、各種負荷条件による比例限度の異方性をあらわす理論式を示した。

本実験データは曲げ試験によって得られたものであるために、単純引張および圧縮負荷による破壊と全く同様にあつかうことには無理があると思われる。しかしながら、繊維に直角方向の曲げ破壊は、高温、生材状態においては梁の引張側の破断によって生じるものであるためその傾向をみるには使えるものと考えられる。従って、Norris の式を RT 面での式に変えた (2) 式において、せん断強さ F_{RT} を任意の係数と考えると、その係数の値を変

化させることにより実験データの表現を試みた。

$$\frac{1}{F_\theta^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_R^2} + \left[\frac{1}{F_{RT}^2} - \frac{1}{F_R F_T} \right] \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{F_T^2} \quad (2)$$

ここに、 F_R , F_T は各温度での R, T 方向の曲げ強さ、 F_{RT} はせん断強さとする。角度 θ は、ヤング率の場合と同様とする。

Fig. 7 (a) は、(2) 式中の F_{RT} を変化させた場合の (2) 式の曲線の変化を示す図である。図中、黒丸印は、レッドメランチ材の 20℃での曲げ強さである。

図のように、Norris の式は、メランチ材の実験結果

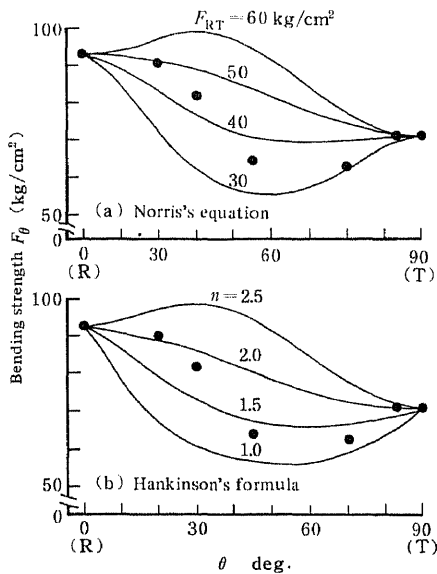


Fig. 7. The calculation curves for the relation between bending strength (F_θ) and angle θ .

note, (a); Norris's equation (2)

(b); Hankinson's formula (3)

●; The experimental values of Red Meranti under temperature 20°C.

のように角度60度付近に極端な底のできる曲線を表現することはできない。この理由としては、RT面における生材状態での曲げ破壊は、長い塑性挙動の後に生じるためHenky-von-Misesの破壊仮説の適合が困難となるためと考えられる。また、RT面の強さ異方性には放射組織の影響が大きく関与する⁴⁾。そして、角度を変化させて破壊させる場合、放射組織と細胞壁および中間層での破壊が複雑に交錯し破壊時の応力に影響するため単純な応力の座標変換のみでは法則化できないものと思われる。この破壊面の観察については続報で述べる。

上述のように、(2)式は今回の実験結果をうまく表現し得なかった。しかし、曲げ強さ異方性の温度依存性を示す実験結果は、曲げヤング率のそれと同様な傾向を示すことから、やはりせん断強さが温度依存性に対して重要な因子として影響していると考えられるが、現在のところその機構を明らかにすることができない。したがって曲げ強さ異方性の温度依存性を実験式で表現するにとどめた。

まず、Hankinsonの実験式(3)の実験結果への適合性を検討した。

$$F_\theta = \frac{F_R F_T}{F_R \sin^n \theta + F_T \cos^n \theta} \quad (3)$$

(n; 実験定数)

この式は、Norrisの式(2)において $F_{RT}^2 = F_R \cdot F_T / 3$ として指数を一般化したものであるが、繊維方向と直角方向すなわちLR、LT面での各種強さ異方性によく適合する実験式である。

Fig.7(b)に、 n の値を変化させた場合の(3)式の曲線を示したが、Norrisの式と同様な型となり、やはり今回の実験データには適合しなかった。

Hankinsonの実験式について、RT面での曲げ強さ異方性に放射組織の影響を考慮した表現を試みた。すなわち、角度別曲げ強さ(F_θ)に因する F_T 、 F_R の影響度を違えるため、(3)式の n の大きさを二種類に分離した。

$$F_\theta = \frac{F_R \cdot F_T}{F_R \sin^{n_1} \theta + F_T \cos^{n_2} \theta} \quad (4)$$

(n_1, n_2 ; 実験定数)

この式を用い、実験値に最も適合する曲線を与える n_1, n_2 を決定し、Fig.3中に実線で示した。図のように、両樹種とも温度条件が異なった場合でも、一定の n_1, n_2 を有する(4)式により実験値をよく表現することができた。 n_1, n_2 の値は、ラミン材ではそれぞれ2.4, 1.3でありレッドメランチ材では2.2, 0.9であった。

5. 結 論

繊維と直角方向における木材の強度異方性に及ぼす温度の影響を、乾燥割れに対する性質が大きく異なるラミン材とレッドメランチ材について生材状態で曲げ試験を行った。その結果の検討からつぎの結論を得た。

1) コンプライアンスの座標変換により得られる(1)式は、本実験のRT面での曲げヤング率異方性の温度依存性のデータをもよく表現することがわかった。また、(1)式と実験データから求められた G_{RT} の温度依存性とねじり試験から得られた G_{RT} の温度依存性とはよく一致した。このことから、木材の曲げヤング率異方性の温度依存性には E_R, E_T に加え G_{RT} の温度依存性が大きく関与すると考えられる。

2) 曲げ強さ異方性について、Norrisの理論およびHankinsonの実験式は、RT面での強さ異方性をうまく表現することはできなかった。本実験データに適合する実験式として(4)式が適当である。(4)式中の係数は、温度条件が変化しても一定の値となり、樹種によって変化する性質を有する。

謝 辞

この研究は、昭和51年度文部省科学研究費(総合研究A)「木材人工乾燥スケジュールに関する研究」の補助を一部受けて行ったものであり、本論文の詳細なデータは、そのとりまとめ⁶⁾に掲載してある。

本実験に使用した小型曲げ試験機製作にあたっては、名南製作所伊藤匠氏に多大な御協力を得た。ここに深く感謝します。

文 献

- 1) R. L. Youngs: F.P.L. Report, No. 2079, 1 (1957)
- 2) C. B. Norris: *ibid.*, No. 1816, 1 (1950)
- 3) J. B. Goodman: Wood Sci., **4**, 83 (1971)
- 4) A. P. Schniewind: For. Prod. J., **9**, 350 (1959)
- 5) 林 和男, 金川 靖, 寺沢 真: 木材工業, **28**, 249 (1973)
- 6) H. Hörig: Ing-Arch., **6**, 8 (1935)
- 7) H. Hörig: Ing-Arch., **7**, 165 (1936)
- 8) 大草克己: 木材誌, **23**, 217 (1977)
- 9) 奥山 剛, 鈴木滋彦: 木材人工乾燥スケジュールに関する研究, 寺沢 真編, p.18 (1977)