



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	壓縮及び捻り実験による木材の剪断弾性係数の比較に就て
Author(s)	金, 俊三
Citation	北海道大學工學部彙報, 1, 144-156
Issue Date	1948-12-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40439
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_144-156.pdf



壓縮及び捻り實驗による木材の剪斷 彈性係數の比較に就て

金 俊 三*

The comparative study upon the modulus of rigidity of
wood by the methods of compression and torsion.

Tosizô KON.

Synopsis.

For the flexural deformation and the failure of a wooden structural member, the shear modulus is of so great a significance that the determination of its magnitude shall be very prudent and scientific. In the present study, the author treats the wood material as an orthogonally anisotropic, that is, as an orthotropic body, and he tries to obtain three shear moduli in the directions of three symmetrical axes which are perpendicular to each other, through two quite different ways, the one by means of the compression of 45° -specimens, and the other by the torsion. Under the comparative study of these results thus obtained, he gives some conclusions, one of which says that values from the 45° -compression tests are greater than those from the torsion in the most scope, another says that G_y shows the minimum value of three shear moduli for both sorts of tests, and so on; furthermore, he has pointed out some new relations between the apparent shear moduli G'_x, G'_y, G'_z and the shear elastic constants s_{44}, s_{55}, s_{66} . As the material three species are selected from the structural timbers in Hokkaido.

目 次

I. 緒 言	145
II. 剪斷彈性係數の理論	145
1. 壓縮の方法の理論	145
2. 捻りの方法の理論	147
III. 實 驗	151
1. 45° -試験片の壓縮實驗	151
2. 捻りの實驗	152
VI. 結 論	153

* 北大教授, 北海道大學工學部構造工學研究室.

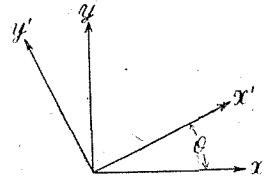
I. 緒 言

木製構造に普通に見られる木材の木取方法によると、梁などの $E/G^{1)}$ は潤葉樹で約 15 内外、針葉樹で約 25 内外の大きな値を示すので、剪斷曲げ部材に於ける曲げ剛さに對する剪斷項の影響は最早無視できないものとなつて來る。又破損に就ても Mises-Hencky-Schleicher の學說に徴して明かな様に、剪斷歪エネルギーが非常に大きくなつて早く破損を招くことになる。従つて剪斷彈性係數 G の有する力學的意義は木材では特に重大で、其の量的決定は細心を要するものである。この研究では木材を、年輪に切線方向、纖維方向、年輪に直角な半徑方向の相互に直交する方向に對稱軸を有する直交異方性體 (orthotropic body) と見なして、北海道産構造用主要樹種中潤葉樹よりマカンバ、ナラ、針葉樹よりエゾマツの 3 樹種をえらむで、その各々について 3 個の對稱軸方向の剪斷彈性係數を、一つは壓縮の方法により、他は捻りの方法によつて求めて、その結果を比較してみた。

II. 剪斷彈性係數の理論

1. 壓縮の方法の理論

この方法は 2 次元直交異方性體の平面應力問題として解析することが出来る。今この平面内の直交異方性體の對稱軸を x, y とし、この對稱軸系に對して、同一平面内に於て任意角 θ だけ傾く座標系を (x', y') とすれば (圖—1)、3 次元直交異方性體の彈性理論の特殊化により (方向餘弦 $l = \cos \theta, m = \sin \theta$)、新座標軸 x' に關する彈性係數、ポアソン比、剪斷彈性係數は次のやうに表はし得る。



圖—1

$$\frac{1}{E_{\theta}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_x} + \frac{\sin^4 \theta}{E_y} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots (1. 1)$$

$$\nu_{\theta} = \frac{\frac{\nu_{xy}}{E_x} (1 + \tan^4 \theta) + \left(\frac{1}{G} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} \right) \tan^2 \theta}{\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} \tan^4 \theta + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \tan^2 \theta} \quad \dots\dots\dots (1. 2)$$

$$\frac{1}{G_{\theta}} = \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \sin^2 2\theta + \frac{1}{G} \cos^2 2\theta \quad \dots\dots\dots (1. 3)$$

但し E_x, E_y : 夫々對稱軸 x, y 方向の彈性係數.

$G \equiv G_{xy} \equiv G_z$: x, y 方向に剪斷應力を受けた場合の z 軸の周りの剪斷彈性係數.

ν_{xy} : x 方向の垂直應力による歪みに對する y 方向の歪みを表すポアソン比.

$E_{\theta} \equiv E_{x'}$: x' 方向の彈性係數.

1) E : 梁の長軸方向の彈性係數.

G : 梁の長軸を含む鉛直面に垂直な軸の周りの剪斷彈性係數.

$G_\theta \equiv G_{x'y'} \equiv G_{x''}$: x', y' 方向に剪断応力を受けた場合の x'' 軸 (このときは x 軸と一致する) の周りの剪断弾性係数.

$\nu_\theta \equiv \nu_{x'y'}$: x' 方向の垂直応力による歪みに對する y' 方向の歪みをあらはすポアソン比.

従て (1), (2) 式より

$$\frac{4\nu_\theta}{E_\theta} = \frac{4\nu_{xy}}{E_x} + \left\{ \frac{1}{G} - \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \right\} \sin^2 2\theta \quad \dots\dots\dots (a)$$

故に (a) 式から

$$\frac{\nu_\theta}{E_\theta} = \frac{\nu_{\theta+90^\circ}}{E_{\theta+90^\circ}} \quad \dots\dots\dots (1. 4)$$

これは對稱軸 x, y に関して成り立つ法則 $\nu_{ex}/E_x = \nu_{yx}/E_y$ と同様の法則が任意の直交方向にも一般的に成り立つことを示す. (3), (a) 式から

$$\frac{1}{G_\theta} + \frac{4\nu_\theta}{E_\theta} = \frac{1}{G} + \frac{4\nu_{xy}}{E_x} = \frac{1}{G} + \frac{4\nu_{yx}}{E_y} = \text{不変量 (invariant)} \quad \dots\dots (1. 5)$$

(1) より $1/E_{\theta+90^\circ}$ を作り, これと (1) より

$$\frac{1}{E_\theta} + \frac{1}{E_{\theta+90^\circ}} - \frac{2\nu_\theta}{E_y} = \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} = \text{不変量} \quad \dots\dots\dots (1. 6)$$

$$\frac{1}{E_\theta} - \frac{1}{E_{\theta+90^\circ}} = \left(\frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} \right) \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (1. 7)$$

(3) に $\theta = 45^\circ$ 及び $\theta + 45^\circ$ を代入すると

$$\frac{1}{G_{45^\circ}} = \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \quad \dots\dots\dots (1. 8)$$

$$\frac{1}{G_\theta} + \frac{1}{G_{\theta+45^\circ}} = \frac{1}{G} + \frac{1}{G_{45^\circ}} = \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} + \frac{1}{G} = \text{不変量} \quad \dots\dots (1. 9)$$

(9) 式右邊は (5), (6) 式の和であるから結局次の關係を得る.

$$\frac{1}{G_{\theta+45^\circ}} = \frac{1}{E_\theta} + \frac{1}{E_{\theta+90^\circ}} + \frac{2\nu_\theta}{E_\theta} \quad \dots\dots\dots (1. 10)$$

これは直交する任意 2 方向 ($\theta, \theta + 90^\circ$) の弾性係数によつて ($\theta + 45^\circ$) 方向の剪断弾性係数を表した式で, (8) 式の一般化である. (10) 式に $\theta = 45^\circ$ を入れると

$$\frac{1}{G_{90^\circ}} = \frac{1}{E_{45^\circ}} + \frac{1}{E_{135^\circ}} + \frac{2\nu_{45^\circ}}{E_{45^\circ}}$$

然るに (3) 式により $G_{90^\circ} = G$, (7) 式により $E_{135^\circ} = E_{45^\circ}$ となり, 従つて¹⁾

1) 日本航空學會誌, 第 8 卷, 第 79 號, 1139 頁, (昭 16).

$$G = \frac{E_{45^\circ}}{2(1 + \nu_{45^\circ})} \quad \dots\dots\dots (1.11)$$

即ち 2 次元直交異方性體では $\theta = 45^\circ$ なる特殊の場合に限つて、等方性體と全く同型の關係が G , E_{45° , ν_{45° の間に成立することを知る。

今これを對稱軸 x, y, z 方向について一般的に表すと

$$\begin{bmatrix} G \end{bmatrix}_{\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}} = \begin{bmatrix} \frac{E_{45^\circ}}{2(1 + \nu_{45^\circ})} \end{bmatrix}_{\begin{pmatrix} xy \\ yz \\ zx \end{pmatrix}} \quad \dots\dots\dots (1.11. a)$$

となる。従つて (x, y) , (y, z) , (z, x) 平面内に於て對稱軸が試験平面應力方向と 45° の傾きをなす 45° -試験片を作り、之に壓縮應力或は引張應力を加えて應力方向の彈性係數 E_{45° 及びこれと直角方向のポアソン比 ν_{45° を測定するときは (11. a) によつて G_x, G_y, G_z を夫々求めることを得るのである。本研究では壓縮應力を用ひることとした。

又應力方向歪みと直角方向歪みが異符號の場合は ν_{45° に正符號を附して (11. a) 式に入れる。反對に同符號の場合は、これに負符號を附する。後者は結晶體やベニヤ合板の場合に次の條件が成り立つときにのみ稀に起り得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{2E_x}{E_{45^\circ(xy)}} &< \frac{E_x}{E} + (1 - 2\nu_{xy}) \\ \frac{2E_y}{E_{45^\circ(yz)}} &< \frac{E_y}{E} + (1 - 2\nu_{yz}) \\ \frac{2E_z}{E_{45^\circ(zx)}} &< \frac{E_z}{E} + (1 - 2\nu_{zx}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (1.12)$$

今木材の纖維方向を y , 年輪に切線方向を x とすると、斯る (x, y) 2 次元板或は合板の場合にのみ、針、潤葉兩樹種に互る多くの種類に就て (12) の最初の式の右邊の第 1 項は第 2 項に比べて殆ど無視することを得て、従つて

$$E_{45^\circ} > \frac{2E_x}{1 - 2\nu_{xy}} \quad \dots\dots\dots (1.12. a)$$

がその條件となる。然しそれ以外の場合では一般に (12) の形を適用すべきである。

2. 捻りの方法の理論

G を求むるために壓縮應力或は引張應力を 45° -試験片に用ひる方法は直交異方性體に特有なものである。本節で述べむとする捻りの方法は直交異方性體のみならず、等方性體に於ても普通に用ひられるものであり、唯前者の場合に於て剪斷彈性係數を求むる理論は異方性體であるだけに複雑である。

捻り試験では普通に試験片に圓斷面或は正方形斷面などを用ひるが、圓斷面試験片の捻りから

剪断弾性係数を求める理論は斜方晶系 (即ち直交異方性體) のみならず一般結晶系にも適用され得るものであつて、従つて木材が嚴密な直交異方性體の條件から若干偏位したり、或は又試験片軸が木材を直交異方性體と見た場合の對稱軸に嚴密には一致しなくても (これらは普通に起り得ることである)、大きな實驗誤差の起る危険が少ない。之に對して正方形斷面試験片の捻りから剪断弾性係数を求める理論は斜方晶系にのみ特有な理論で、従つて上記誤差が大きく起り得る危険は正方形斷面では大きい。故に木材の捻り試験は成る可く圓斷面試験片によるべきである¹⁾。しかして圓斷面捻りの G の理論は (2. 1), (2. 2) 式であらはされる (對稱軸 x, y, z については 圖—2 参照。 G の添字。印を以て圓斷面なることを示す)。

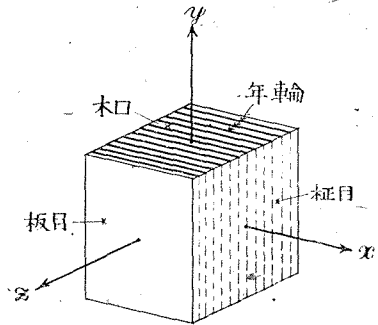


圖 — 2

$$\left. \begin{aligned} G'_{x_0} &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right)_x = \frac{1}{a_0}, & a_0 &= \frac{s_{55} + s_{66}}{2} \\ G'_{y_0} &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right)_y = \frac{1}{b_0}, & b_0 &= \frac{s_{66} + s_{44}}{2} \\ G'_{z_0} &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right)_z = \frac{1}{c_0}, & c_0 &= \frac{s_{44} + s_{55}}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 1)^2)$$

但し N : 捻りモーメント
 l : 捻り角測定長
 φ : 捻り角
 r : 圓斷面の半径

従つて剪断弾性係数は次式の如くして求められる。

$$\left. \begin{aligned} s_{41} &= \frac{1}{G_x} = b_0 + c_0 - a_0, \\ s_{55} &= \frac{1}{G_y} = c_0 + a_0 - b_0, \\ s_{66} &= \frac{1}{G_z} = a_0 + b_0 - c_0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 2)$$

G_x, G_y, G_z は剪断弾性係数 („Gleitmodul”), G'_x, G'_y, G'_z は見掛けの剪断弾性係数 („Drillungsmodul”) であり、異方性體では両者は等しくないが等方性體では $s_{44} = s_{55} = s_{66}$, 従つて $a_0 = b_0 = c_0$ となり両者は等しくなる。即ち

1) H. Hörig: Ingenieur-Archiv, VI, H. 1. (1935), S. 8/14.

2) Voigt: Lehrbuch der Krystallphysik, § 316, 1928, Leipzig. Voigt は $\frac{s_{ii} + s_{kk}}{2}$ のことを “Drillungsmodul” と稱し、普通の表し方とは逆数の關係になつてゐるから注意を要する。

$$G = \frac{2}{\pi} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right) \dots\dots\dots (2. 2. a)$$

正方形断面捻りのときの G の理論は、正方形の邊長を $2r$ とすると次の様になる¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} G_{x\Box} &= \frac{1}{g} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right)_x = \frac{1}{a_{\Box}} , & a_{\Box} &= \frac{1}{2} R_x (s_{55} + s_{66}) \\ G_{y\Box} &= \frac{1}{g} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right)_y = \frac{1}{b_{\Box}} , & b_{\Box} &= \frac{1}{2} R_y (s_{66} + s_{44}) \\ G_{z\Box} &= \frac{1}{g} \left(\frac{Nl}{\varphi r^4} \right)_z = \frac{1}{c_{\Box}} , & c_{\Box} &= \frac{1}{2} R_z (s_{44} + s_{55}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 3)$$

$$g = 2.2492^{2)}$$

従つて

$$\left. \begin{aligned} s_{44} &= \frac{1}{G_x} = -\frac{a_{\Box}}{R_x} + \frac{b_{\Box}}{R_y} + \frac{c_{\Box}}{R_z} , \\ s_{55} &= \frac{1}{G_y} = +\frac{a_{\Box}}{R_x} - \frac{b_{\Box}}{R_y} + \frac{c_{\Box}}{R_z} , \\ s_{66} &= \frac{1}{G_z} = +\frac{a_{\Box}}{R_x} + \frac{b_{\Box}}{R_y} - \frac{c_{\Box}}{R_z} , \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 4)$$

上式に於て

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{g}{q_x} , & R_y &= \frac{g}{q_y} , & R_z &= \frac{g}{q_z} , \\ \left. \begin{aligned} q_x \\ q_y \\ q_z \end{aligned} \right\} &= \frac{16}{3} - \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{s_{kk}}{s_{ii}}} f_{ii, kk} + \sqrt{\frac{s_{ii}}{s_{kk}}} f_{kk, ii} \right) , & i, k &= \begin{cases} 6, 5 \\ 4, 6 \\ 5, 4 \end{cases} \dots\dots\dots (2. 5) \\ f_{ii, kk} &= \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \operatorname{Eg} \left[\frac{(2n+1)\pi}{2} \sqrt{\frac{s_{ii}}{s_{kk}}} \right] \end{aligned} \right\}$$

双曲線級数について

$$f_{ii, kk} = \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 S_{i, kk} , \quad f_{kk, ii} = \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 S_{kk, ii} \dots\dots\dots (2. 6)$$

- 1) Voigt: Kristallphysik, Kapt. VII, §§ 319/323. Love: Elasticity, p. 324, 1934. Hörig: Ing.-Arch., IV, (1933), S. 570/576.
- 2) Föppl は $g = 2.281$ とし、等方性體に對して $G = 7.014 \frac{Nl}{\varphi d^4}$ (d = 邊長) とし、多くの文献にこの式が記載されてゐるが、これは $G = 7.1135 \frac{Nl}{\varphi d^4}$ とした方が正確である。Roark: Formulas for stress and strain, p. 154, 1938. の表の $K = 0.1406 d^4$ などとも正確な値である。この $g = 2.2492$ は Hörig の計算値である。

と置くと

$$\left. \begin{aligned} s_{kk,ii} &= \frac{p^3 - p + \kappa s_{ii,kk}}{\kappa p^4} \\ \text{但し } \sqrt{\frac{s_{ii}}{s_{kk}}} &= p, \quad \frac{3}{16} \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 = \kappa \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 7)$$

なる関係があるので、 $f_{ii,kk}$ がわかれば $f_{kk,ii}$ は直ちに與えられる。今

$$\left. \begin{aligned} p_x \\ p_y \\ p_z \end{aligned} \right\} = \sqrt{\frac{s_{ii}}{s_{kk}}}, \quad i, k = \begin{cases} 6, 5 \\ 4, 6 \\ 5, 4 \end{cases} \dots\dots\dots (2. 8)$$

として $p > 1$ である如く i, k をえらぶと、

$$R \left(\begin{smallmatrix} x \\ y \\ z \end{smallmatrix} \right) = f \left[p \left(\begin{smallmatrix} x \\ y \\ z \end{smallmatrix} \right) \right]$$

で、従つて p の値を與えると R は (5), (6), (7) 式によつて計算することが出来る。 $p = 1 \sim 10$ の値に對して R -値を HÖRIG は 1 個の表に整備して居る¹⁾。吾々の目的は s_{44}, s_{55}, s_{66} の値を正しく求めるにあるが、これが與えられなければ p を與えることが出来ない事情にあるので、之に對して次に述べる所謂 $R(p)$ -方法を採用する。

此の方法では、捻りの實驗値から

$$a'_\square = g \left(\frac{\varphi r^4}{Nl} \right)_x, \quad b'_\square = g \left(\frac{\varphi r^4}{Nl} \right)_y, \quad c'_\square = g \left(\frac{\varphi r^4}{Nl} \right)_z \dots\dots\dots (2. 9)$$

を求める。圓斷面實驗でも、正方形斷面實驗でも G' は可成り接近した値であることが考えられるので、先づ圓斷面の條件及び $R = 1$ を假定して (R は 1 に極めて近い)、

$$s_{44} = b'_\square + c'_\square - a'_\square, \quad s_{55} = c'_\square + a'_\square - b'_\square, \quad s_{66} = a'_\square + b'_\square - c'_\square \dots\dots\dots (2. 10)$$

によつて $s_{44} \dots s_{66}$ の第 1 近似値を求める。従つて (8) 式で p が決まるから R が (5), (6), (7), 或は HÖRIG の表によつて與えられる。かく R が決まると (4) 式によつて $s_{44} \dots s_{66}$ の第 2 近似値が計算され、第 1 近似値よりも正確なものを得る。以上を $s_{44} \dots s_{66}$ の所要の精度を得るまで繰返すのである。斜方晶系でも異方性の強いものほど $R(p)$ -方法の收斂が悪い。従つて木材ならば針葉樹が闊葉樹よりも異方性が強いので $R(p)$ -方法をより多く繰返す必要があることになる。

等方性體の場合には $s_{44} = s_{55} = s_{66}$, $q_x = q_y = q_z = g$, $R_x = R_y = R_z = 1$ となり、従つて次の周知の關係が得られる。

1) HÖRIG: Ing.-Arch., IV. (1933), S. 570/576. 曲線 $R(p)$ は $p = 1$ で水平切線、 $p = 2.2$ の邊で反曲點をもち、 $p = \infty$ で $R(p) = 0.84346$ である。即ち $R(p)$ はかなり 1 に近い値である。

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{1}{g} \left(\frac{Nl}{\phi r^4} \right), \\ g &= \frac{16}{3} - \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \phi g \frac{(2n+1)\pi}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.10) \\ = 2.2492$$

III. 實 験

1. 45° 試験片の壓縮實驗

試験片は 圖—3 に見る如き木取りをなして製作し、45° 回轉軸によつて X-, Y-, Z-試験片と稱する。試験片寸法は日本標準規格により壓面 30 × 30 mm, 高さ 60 mm とした。試験片の内容を表—1 に示す。

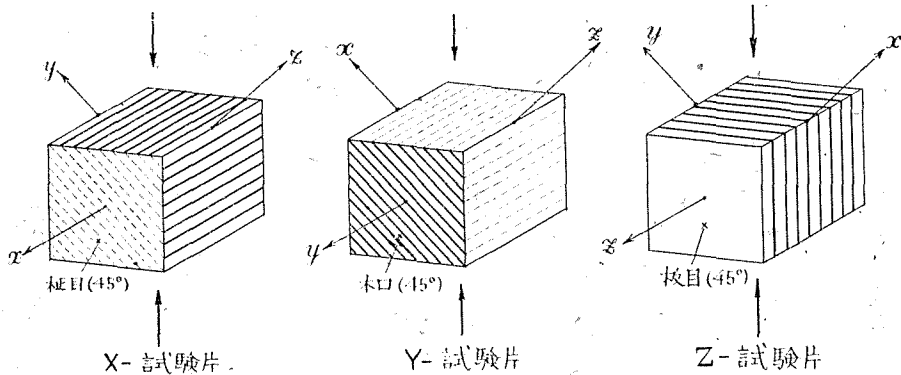


圖 — 3

表 — 1

樹 種	實驗種類	X-試験片		Y-試験片		Z-試験片		本數計
		本 數	比重 { 最小 最大 }	本 數	比重 { 最小 最大 }	本 數	比重 { 最小 最大 }	
マカンバ	破 壊*	1		1		1		3
	弾 性	3	0.668 690	3	0.656 668	3	0.668 682	9
ナ ラ	破 壊	1		1		1		3
	弾 性	3	537 566	3	490 532	3	489 516	9
エゾマツ	破 壊	1		1		1		3
	弾 性	3	435 460	3	420 429	3	432 438	9

*) 破壊試験は 1 本と限らず補充實驗をしたものもある。

破壊試験により彈性試験の荷重段階を表—2 の如くに豫定した。

表 — 2

樹 種	マ カ ン バ			ナ ラ			エ ゾ マ ツ		
試 験 片	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
破 壊 荷 重 (kg)	2930	4450	4650	2750	700	1950	1120	550	1300
$\frac{1}{4} \times$ (破 壊 荷 重) (kg)	732.5	1112.5	1162.5	687.5	175.0	487.5	280.0	137.5	325.0
弾性試験荷重刻み (kg)	50	20	50	30	10	20	10 20	10	10
同 上 段 階 数	14	31	18	23	17	25	24 12	13	25

以上の如き計畫にもとづいて實驗を行つたところ剪斷彈性係數に關して表—3の結果を得た。

表 — 3 (含水率 15%, 單位: kg/cm²)

樹 種	マ カ ン バ			ナ ラ			エ ゾ マ ツ		
試 験 片	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
剪斷彈性係數	9273	2388	17842	8290	2519	7326	6466	334	9690

2. 捻りの實驗

研究室保有資材の寸法の關係上、圖—4の捻り試験片中、X、Z—兩種試験片は太さも長さも充

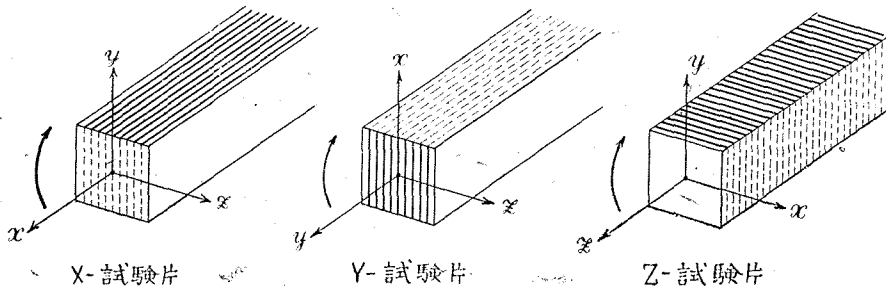


圖 — 4

表 — 4

樹 種	實驗種類	X-試験片		Y-試験片		Z-試験片		本数計
		本 数	比重 { 最小 最大 }	本 数	比重 { 最小 最大 }	本 数	比重 { 最小 最大 }	
マカンバ	破 壊	1		1		1		3
	弾 性	3	0.711 884	3	0.704 843	3	0.669 706	9
ナ ラ	破 壊	1		1		1		3
	弾 性	3	0.522 643	3	0.471 603	3	0.428 551	9
エゾマツ	破 壊	1		1		1		3
	弾 性	3	0.442 478	3	0.437 484	3	0.397 432	9

分大きく木取することは非常に困難であつたのと、試験機のチャックの掴み断面も亦小さい關係から細く且つ短い試験片を採用せねばならなかつた。

しかして細い材料から圓断面試験片を製作するときの材料に與える惡影響を慮つて止むを得ず正方形断面とし、試験片寸法は $10 \times 10 \times 140$ mm, 測點距離 85 mm とした。試験片の内容は表—4の如くである。

破壊試験により弾性試験の負荷段階を表—5の如く豫定した。

表 — 5

樹 種	マ カ ン バ			ナ ラ			エ ゾ マ ツ		
試 験 片	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
破壊荷重 (kgcm)	21.2	62.0	25.7	20.0	33.8	21.0	7.0	23.0	6.8
($\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$) [*] 破壊荷重	5.3 kgcm	12.4 kgcm	6.4 kgcm	13.5°	8.5 kgcm	5.25 kgcm	14.3°	5.8 kgcm	10.4°
弾性試験荷重刻み	1 kgcm	2 kgcm	1 kgcm	0.5°	1 kgcm	0.5 kgcm	0.5°	1 kgcm	0.5°
同 上 段 階 数	6	6	6	10	7	10	14	6	13

^{*}) 破壊荷重の小さいものは實驗の都合上荷重刻みを捻り角度であらした。

弾性實驗の結果、 G'_x, G'_y, G'_z は表

—6 のやうになる。

表 — 6

(含水率 15%, 單位 kg/cm²)

樹 種	G'_x	G'_y	G'_z
マカンバ	3383	11897	3058
ナラ	2598	8244	3014
エゾマツ	535	6241	541

表—6の結果から $R(\rho)$ -方法 を反覆して收斂した R で剪断弾性係数を計算すると表—7のやうになる。

表 — 7

樹 種	$R(\rho)$ 反覆 回数	R_x R_y R_z	s_{44} s_{55} s_{66} (cm ² /kg)	G_x G_y G_z (kg/cm ²)
マカンバ	5	0.95893	0.000110600	9042
		99642	000558330	1791
		97781	000058110	17209
ナラ	5	0.98573	0.000075550	13236
		99443	000612674	1632
		96421	000168414	5938
エゾマツ	11*	0.93145	0.00014917	6704
		99979	00384133	260
		92710	00017135	5836

^{*}) R_y だけは收斂が非常に早かつた。

IV. 結 論

前節の實驗結果を表—8にまとめて比較し、且つ實驗を通じて次の事柄がわかる。

(1) 此の實驗では 45° 壓縮試験より得られた剪断弾性係数は、捻り試験のそれよりも大となる傾向を示し、 G_x についてナラ、エゾマツが逆の現象を示すのみである。兩者の差のかなり大きいもののあるのは次の理由によるものと考えられる。

(a) 試験片を木取つた木材が直径の比較的に小さい原木より製材したものであるため、試験片は厳密な直交異方性の條件に合致してゐない。捻り X-試験片はそれが特に著しい。

(b) 45° 圧縮及び捻り試験片の長軸と 45° 軸及び對稱軸との間の製作上の誤差が可成り大きいものがある。

(c) 捻り試験片を短かくせねばならなかつたために捻りの測點と試験片掴み部分との距離が近くなり、従つて試験片の固定が断面變位を拘束する影響が測點にも相當あつたことと思はれる。この影響は矩形断面は圓断面（異方性體では圓断面の場合にもある）の場合よりも更に悪い。

表 — 8 (含水率 15%)

樹 種	$\left. \begin{matrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{matrix} \right\} = \begin{cases} 1/s_{44} \\ 1/s_{55} \\ 1/s_{66} \end{cases}$ (單位: kg/cm ²)		差 (%)
	45° 圧縮	捻 り	
マカンバ	9273	9042	+ 2.6
	2388	1791	+ 33.3
	17842	17209	+ 3.7
ナ ラ	8290	13236	- 59.7
	2519	1632	+ 54.3
	7326	5938	+ 23.4
エゾマツ	6466	6704	- 3.7
	334	260	+ 28.2
	9690	5836	+ 66.0

(2) 45° 圧縮試験の方が捻り試験よりも實驗操作は簡單であり、(1)―(c) の様な悪い事情もなく、最も好ましいことには荷重の段階数を捻りの場合よりも遙かに多くとり得る。又試験片の製作が容易なので資材に特別な條件は要らない。結局 45° 試験片圧縮の方が信頼度の高い剪斷彈性係数を普通には與えるものと思はれる。

(3) 剪斷彈性係數に關する異方性は、針葉樹（エゾマツ）の方が闊葉樹（マカンバ、ナラ）よりも遙かに顯著である。

(4) いづれの場合を問はず、剪斷彈性係數の對稱軸方向の最小値は G_z である。

(5) マカンバでは 45° 圧縮、捻り試験とも $G_x < G_z$ 、ナラでは兩試験とも $G_x > G_z$ 、エゾマツは 45° 圧縮 $G_x < G_z$ 、捻り $G_x > G_z$ となつてゐる¹⁾。

(6) 見掛けの剪斷彈性係數 („Drillungsmodul”) G'_x, G'_y, G'_z と純正の剪斷彈性係數 G_x, G_y, G_z とは其の値に於ても、亦その値の大小配列の順序に於ても全く異なるものである。

(7) 捻り試験に關する表—6.7 によつて、各樹種に於て G'_x, G'_y, G'_z の大小配列の順序は夫々 s_{44}, s_{55}, s_{66} (即ち剪斷彈性係數の逆數) のそれと全く合致する。この場合 G'_z は常に對稱軸上の最大値であり、且つ G'_x, G'_y は可成り接近した値をもつ。而してこの法則は s_{55} が s_{44}, s_{66} に比して非常に大きい直交異方性體である木材に於て、凡ての樹種を通じて一般的に適用し得るものであることは次の關係が證明する。圓断面に就て²⁾

1) Stamer の捻り實驗では、カバ $G_x > G_z$ 、カシ、ナラの類 $G_x > G_z$ 、トウヒ $G_x > G_z$ となつてゐる。

Stamer: Ing.-Arch., VI (1935), S. 1.; Hörig: Dts., S. 8.

2) Stamer の實驗では G' の圓断面及び正方形断面に於ける差は、大約針葉樹 10% 以下、闊葉樹 5% 以下である (Stamer の前記論文)。

$$\left. \begin{aligned} G'_x &= \frac{2}{s_{55} + s_{66}} = \frac{2}{s_{55}} \left(\frac{1}{1 + \frac{s_{66}}{s_{55}}} \right) \doteq \frac{2}{s_{55}} \\ G'_z &= \frac{2}{s_{44} + s_{55}} = \frac{2}{s_{55}} \left(\frac{1}{1 + \frac{s_{44}}{s_{55}}} \right) \doteq \frac{2}{s_{55}} \\ G'_y &= \frac{2}{s_{44} + s_{66}} \doteq \frac{1}{s_{44}} \quad \text{或は} \quad \frac{1}{s_{66}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4. 1)$$

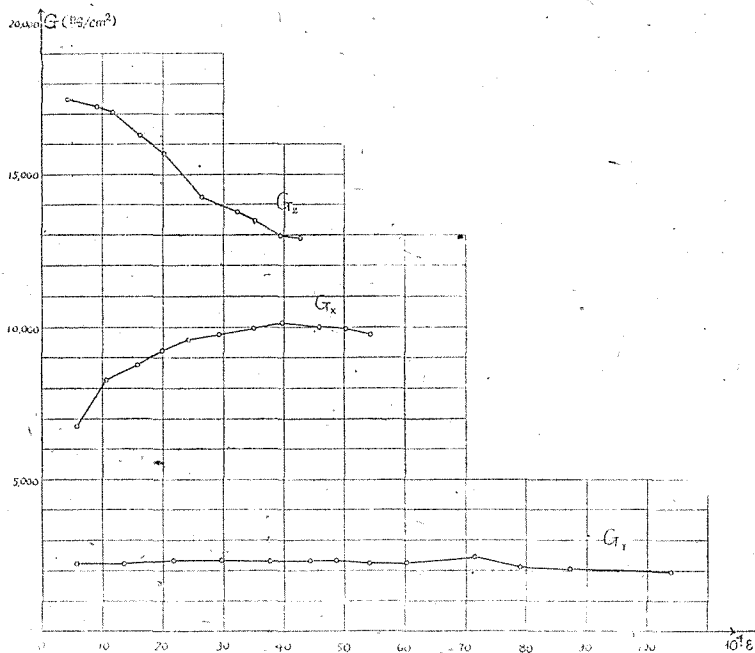
となるから G'_y は、常に最大値となり、他の 2 者にあつては

$$G'_x \geq G'_z, \quad s_{44} \geq s_{66}$$

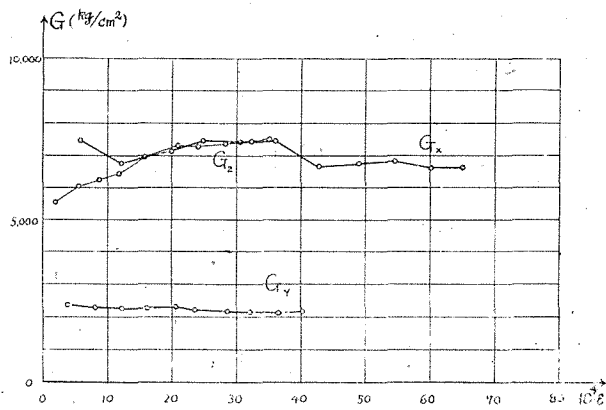
なる對應する關係で G'_x, G'_z の大小の順序が決まり、從つて上の法則が一般的なものであることがわかるのである。

尙ほ参考のために 45°-壓縮試験の剪斷彈性係數-歪曲線を掲げることとした(圖—5, 6, 7)。

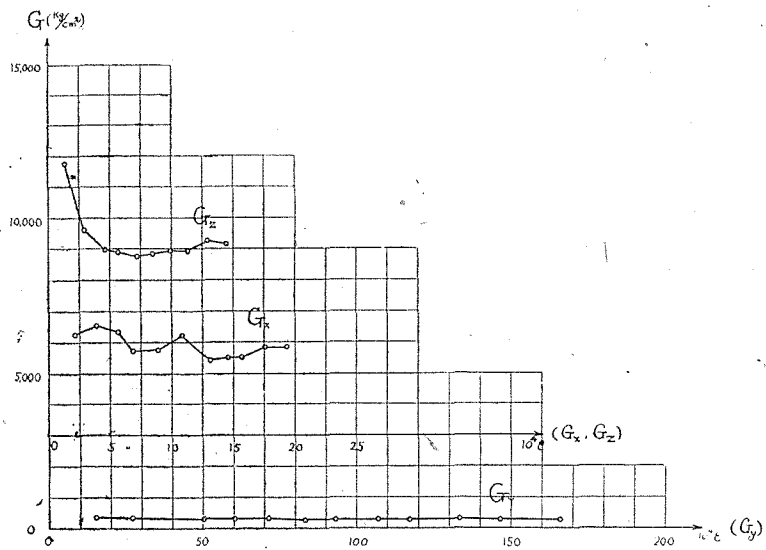
終りに本研究に關する實驗は昭和 23 年 1 月より 2 月に亘つて行はれたが、配電制限の困難とたたかつて終始實驗と其の計算の遂行に盡力された研究室前田幸雄、宮内一彦、加々美定雄の諸氏並に當時學生の小林和郎、山田照一(この實驗の部分は兩君の昭和 23 年度卒論)の兩君に厚く感謝の意を表する次第である。



圖—5 マカンバ剪斷彈性係數-歪曲線



圖一六 ナラ剪断弾性係数 歪曲線



圖一七 エゾマツ剪断弾性係数-歪曲線