

木材の圧縮異方性に関する研究

山 井 良 三 郎⁽¹⁾

目 次

はしがき	58
1. 供試材の材料条件	58
2. 弾性常数の記号と試験片の形状	59
2.1 弾性常数の記号	59
2.2 圧縮試験片の形状	60
3. 試験方法	61
4. 圧縮応力—歪曲線の基本型	62
4.1 繊維軸方向圧縮応力—歪曲線 (L)	62
4.2 接線 (板目) 方向圧縮応力—歪曲線 (T)	64
4.3 放射 (柃目) 方向圧縮応力—歪曲線 (R)	68
4.4 45° 方向圧縮応力—歪曲線	69
4.5 荷重方向の圧縮歪と横方向の伸び歪	71
4.6 鏡式歪計とダイヤルゲージによる応力—歪関係の比較	71
5. 弾性常数とその相互関係	73
5.1 ヤング係数 (E)	73
5.2 ポアソン比 (μ)	75
5.3 セン断弾性係数 (G)	76
5.4 E と G の関係	77
5.5 弾性常数の総括と体積圧縮歪係数	77
6. 比例限度力 (基準応力) の異方性	78
7. 平面問題における特性値	81
7.1 $k_r, k_s; e, g$ の値について	83
7.2 円孔を有する木材平板の応力集中率について	83
7.3 C_{ik} の値について	84
8. 弾性常数および圧縮比例限度力におよぼす木理傾角の影響	86
8.1 弾性常数の変化	86
8.2 圧縮比例限度力の変化	90
8.2.1 セン断試験結果	90
8.2.2 圧縮比例限度力の実測値と計算値の比較	93
8.2.3 圧縮比例限度力の変化	96
むすび (摘要)	97
文 献	100
Résumé	101
Plate	(Fig. 3, 5, 9~13, 20) (1~2)
付 図	(Fig. 21~24) 103

(1) 木材部木材材料科強度研究室員

は し が き

木材は一般に、繊維方向（L）、放射方向（R）、接線方向（T）の3つの弾性対称軸をもつ均質直交異方性材料と考えられ、この想定のもとに外国ではかなり詳細な理論的ならびに実験的研究がすすめられてきた^{1)~7),20)}。わが国でもこの種の研究^{8)~16)}がこころみられつつあるが、常用されている木材材料に対してさえ、各種の弾性常数、すなわちヤング係数（ E_L , E_R , E_T ）、ポアソン比（ μ_{LT} , μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{TL} , μ_{RT} , μ_{TR} ）、せん断弾性係数（ G_{LR} , G_{LT} , G_{RT} ）などを統一的に求めた資料はほとんどなく、理論の適用にさいしては外国の資料にもつら依存してきた。また、材料の変形特性を総合的に表現し、強度性能を評価する基礎となる応力—歪曲線の資料^{16),17),18)}もきわめて微々たる現状である。

しかし、木材の力学的諸性質を究明し、木材平板の弾性的挙動、各種の構造用合板の構成、切欠けによる応力集中、目切れによる弾性常数や強度の低減などを適正に評価するためには、この種の応力—歪関係を明らかにすることが基礎要件となることはいうまでもない。したがって、ここではわが国で広く常用されている樹種11種、すなわち、針葉樹材ではスギ、トドマツ、エゾマツ、アカマツの4種、広葉樹材では散孔材のブナ、アビトン（南洋材）、マカバ、輻射孔材のイチイガシ、環孔材のヤチダモ、ミズナラ、ケヤキなど計7種をえらび、この研究の実験材料とした。全樹種を通じての気乾比重は0.33から0.84におよび、含水率は約14%から16%の範囲である。なお、この実験では各樹種の安定した標準値を求めるのではなく、むしろ、樹種特性による指標値を検討することを目的としたので試験片の個数は僅少である。

この研究での主なる検討事項はつぎの諸項目であるが、その一部についてはすでに発表^{14),15)}したものである。

1. 圧縮応力—歪曲線の分類とその数値的表現方式
2. 弾性常数の決定と相互間の関係
3. 比例限応力の決定と相互間の関係
4. 木材平板の特性値と応力集中問題
5. 弾性常数および比例限応力におよぼす目切れ影響

この研究を行うにあたり、終始御懇切なる御指導と御援助をいただいた林業試験場木材部長小倉武夫氏、顧問研究員倉西正嗣氏、強度研究室長沢田稔氏、また観測に協力された児玉芳郎氏はじめ室員各位に対し心から感謝の意を表する。

1. 供試材の材料条件

供試材料としては第1表に示すごとく、わが国で一般に各種の用途に使われている手持ちの樹種11種をえらんだ。学名、出所については同表に示すが、アビトンはフィリツピン産の散孔材で、比較的油脂分の少ないものである。また、アカマツはいわゆるキリシマアカマツで、アカマツとしてはやや比重が低い方である。

材料は粗木取りののち、しばらく恒温恒湿室で調整された気乾材である。圧縮試験片で求めた基礎関係材質を平均値で示すと第2表のごとくなる。試験片数は同表に示すごとく僅少であるから、この値をもつてその樹種の安定した標準値ということとはできないが、含水率（ u ）が14%から16%、気乾比重（ R_n ）

第1表 試験材の名称と産地
Table 1. Names and sources of material tested

樹種名 Common name			学名 Botanical name	産地 Place of growth of material
スギ	Sugi	1	<i>Cryptomeria japonica</i> D. DON	Nibuna, Akita
トドマツ	Todomatsu	1	<i>Abies sachalinensis</i> FR. SCHMIDT	Nopporo, Hokkaido
エゾマツ	Yezomatsu	1	<i>Picea jezoensis</i> CARRIERE	Rikubetsu, Hokkaido
アカマツ	Akamatsu	1	<i>Pinus densiflora</i> SIEBOLT et ZUCCARINI	Kagoshima, Kagoshima
ブナ	Buna	2	<i>Fagus crenata</i> BLUME	Numata, Gunma
アピトン	Apitong	2	<i>Dipterocarpus</i> sp.	Mindanao, Philippine
マカバ	Makaba	2	<i>Betula Maximowicziana</i> REGEL	Urakawa, Hokkaido
イチイガシ	Ichiiigashi	3	<i>Quercus gilva</i> BLUME	Obi, Miyazaki
ヤチダモ	Yachidamo	4	<i>Fraxinus mandshurica</i> RUPRECHT	Urakawa, Hokkaido
ミズナラ	Mizunara	4	<i>Quercus crispula</i> BLUME	Numata, Gunma
ケヤキ	Keyaki	4	<i>Zelkova serrata</i> MAKINO	Meguro, Tokyo

1=Softwood (=conifer wood) 2=Diffuse porous wood 3=Radial porous wood
4=Ring porous wood

第2表 圧縮試験片の関係材質と個数
Table 2. Related properties and number of specimens in compression tests

Species	Related properties						Number of specimens					
	b mm	φ_n %	S_w mm	u %	R_n g/cm ³	R_0 g/cm ³	L	R	T	LR-45	LT-45	RT-45
Sugi	6.1	8	0.50	14.9	0.33	0.29	5	3	4	5	3	5
Todomatsu	4.6	9	0.40	15.0	0.35	0.30	5	4	5	5	4	5
Yezomatsu	1.6	14	0.20	14.7	0.39	0.34	5	4	5	4	4	5
Akamatsu	1.7	28	0.45	14.2	0.46	0.41	4	4	5	3	3	5
Buna	1.9	12	0.20	15.3	0.62	0.53	5	5	5	5	5	5
Apitong	—	—	—	15.4	0.66	0.57	5	5	5	5	5	4
Makaba	1.7	—	—	15.4	0.71	0.62	5	5	5	—	5	—
Ichiiigashi	2.8	—	—	14.3	0.84	0.73	4	5	5	5	5	5
Yachidamo	1.8	49	0.90	14.6	0.59	0.51	5	5	5	—	5	—
Mizunara	1.3	65	0.80	15.4	0.65	0.56	4	4	4	5	5	5
Keyaki	6.7	85	0.60	14.4	0.71	0.62	5	5	5	3	5	5

b=Width of annual ring, φ_n =Summerwood at cross section of specimen, S_w =Width of summerwood, u=Moisture content, R_n =Specific gravity at test, R_0 =Specific gravity, based on weight when oven-dry and volume at test.

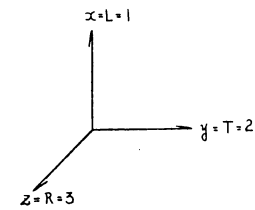
が 0.33 から 0.84 程度におよんでおり、かつ、針葉樹、広葉樹散孔材、輻射孔材、環孔材、南洋材などが含まれているので、樹種特性の指標値をうるにはかなり妥当のものであると思う。

なお、平均年輪幅 (b)、平均秋材幅 (S_w) は 1/10mm 精度の計測用ルーペを用いて、1 木口面における全年輪にわたって測定したものの平均値であり、秋材率 (φ_n) はいわゆる断面秋材率である。比重は試験時重量を試験時容積で除した気乾比重 (R_n) と全乾重量を試験時容積で除した R_0 を求めた。

2. 弾性常数の記号と試験片の形状

2.1 弾性常数の記号

第1図からもわかるように、木材は互いに直交する3つの主軸、すなわち、繊維方向軸=繊維軸 (Longitudinal axis=L=x=1)、板目方向軸=接線軸 (Tangential axis=T=y=2)、柃目方向軸=放射軸



第 1 図 木材の直交 3 軸
Fig. 1

Three perpendicular
co-ordinate axes of wood

(Radial axis= $R=z=3$) をもち、かつ、これらの 2 軸はそれぞれ弾性対称の 3 つの主要面、すなわち、板目面 (LT plane= xy plane)、柃目面 (LR plane= zx plane)、木口面 (RT plane= yz plane) を形成している。

しかし、板目面についてみれば、年輪がそれぞれ固有の初期曲率をもっているため、厳密には平面でなく、また、柃目面、木口面でも、樹木の成長過程における局所的な不規則がみられるので、必ずしも均質ではないが、巨視的には均質直交異方性材料と想定しても差し支えないようである。

いま弾性体の応力—歪関係を一般化された Hooke の法則でかけばつぎのごとくなる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= S_{11} \sigma_x + S_{21} \sigma_y + S_{31} \sigma_z + S_{41} \tau_{yz} + S_{51} \tau_{zx} + S_{61} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= S_{12} \sigma_x + S_{22} \sigma_y + S_{32} \sigma_z + S_{42} \tau_{yz} + S_{52} \tau_{zx} + S_{62} \tau_{xy} \\ &\dots\dots\dots \\ \gamma_{xy} &= S_{16} \sigma_x + S_{26} \sigma_y + S_{36} \sigma_z + S_{46} \tau_{yz} + S_{56} \tau_{zx} + S_{66} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ε は軸歪、 σ は軸応力、 γ はせん断歪、 τ はせん断応力であり、 S_{ik} ($i, k=1, 2, 3, 4, 5, 6$) はそれぞれの状態に対しての歪係数で、 $S_{ik}=S_{ki}$ なる関係がある。

ところが、木材のように斜方晶系とみなされる直交異方性体の弾性的挙動は、つぎの 9 つの独立な歪係数で完全にあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_L} & S_{21} &= -\frac{\mu_{TL}}{E_T} = -\frac{\mu_{LT}}{E_L} = S_{12} \\ S_{31} &= -\frac{\mu_{RL}}{E_R} = -\frac{\mu_{LR}}{E_L} = S_{13} & S_{22} &= \frac{1}{E_T} \\ S_{32} &= -\frac{\mu_{RT}}{E_R} = -\frac{\mu_{TR}}{E_T} = S_{23} & S_{33} &= \frac{1}{E_R} \\ S_{44} &= \frac{1}{G_{RT}} & S_{55} &= \frac{1}{G_{LR}} & S_{66} &= \frac{1}{G_{LT}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E_L = L 方向のヤング係数

μ_{LT} = L 方向の軸応力をうけた場合の $\frac{\text{T 方向の歪}}{\text{L 方向の歪}}$ = ポアソン比

G_{LT} = L と T 方向のせん断応力に対するせん断弾性係数

したがって、実験的には $E_L, E_T, E_R, \mu_{LT}, \mu_{LR}, \mu_{RT}, G_{LT}, G_{LR}, G_{RT}$ の 9 つの弾性常数を求めればよいことになる。あとで述べるごとく、ヤング係数 (E) やポアソン比 (μ) の値は 3 軸方向の圧縮試験片で測定できるが、せん断弾性係数 (G) については直接試験によらないで、JENKIN 方式を採用した。すなわち、第 2 図に示すような 45° 目切れ試験片によるヤング係数 E_{45} を求め、次式で算出した。

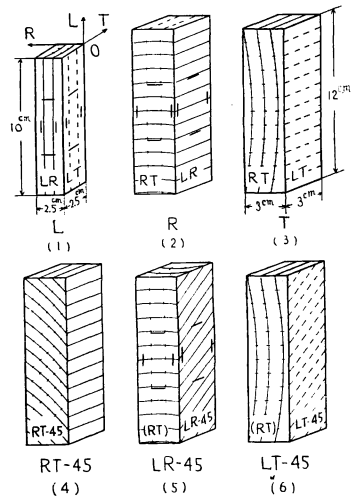
$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{G_{LT}} &= \frac{4}{E_{LT-45}} - \frac{1}{E_T} - \frac{1}{E_L} + \frac{2\mu_{LT}}{E_L} \\ \frac{1}{G_{LR}} &= \frac{4}{E_{LR-45}} - \frac{1}{E_R} - \frac{1}{E_L} + \frac{2\mu_{LR}}{E_L} \\ \frac{1}{G_{RT}} &= \frac{4}{E_{RT-45}} - \frac{1}{E_R} - \frac{1}{E_T} + \frac{2\mu_{RT}}{E_R} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

2.2 圧縮試験片の形状

圧縮試験片の形状は第2図に示すごとく直六面体で、その寸法は第3表のごとくである。

繊維軸, 放射軸, 接線軸方向に圧縮する場合の試験片をそれぞれ L, R, T 試験片とする。2つの主軸とそれぞれ 45° をなす試験片を LT-45, LR-45, RT-45 試験片とするが、図からも明らかのごとく、LT-45 試験片は、L 試験片の LT 面が、これと直交する R 軸のまわりに 45° 回転した場合であり、板目面の木理傾角 (繊維傾角 $= \alpha$) は 45° となつている。同様に LR-45 試験片では柾目面の木理傾角が 45° となつている。RT-45 試験片では R 試験片 (または T 試験片) の RT 面が、これと直交する L 軸のまわりに 45° 回転した状態であり、木口面の年輪傾角は 45° となつている。

試験片の寸法は第3表のごとく L 試験片は $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ に統一したが、その他の試験片はやや不統一となつた。これは、手持ち挽材の原寸法に制限されたことや、年輪のもつ矢高をできるだけ小さくし、かつ対応する各試験片の年輪構成状態をできるだけ均等にするよう配慮して仕上げたためである。



第2図 圧縮試験片の種類と寸法

Fig. 2

Classification and dimensions of specimens for compressive tests

第3表 試験片の寸法
Table 3. Dimensions of specimens

Species	L		R		T		LR-45		LT-45		RT-45	
	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)
Sugi	10.0	2.5	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	11.5	3.0
Todomatsu	10.0	2.5	11.5	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	11.5	3.0
Yezomatsu	10.0	2.5	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	11.0	3.0
Akamatsu	10.0	2.5	9.0	2.7×	8.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	6.0*	3.0
Buna	10.0	2.5	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0
Apitong	10.0	2.5	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	7.5	3.0
Makaba	10.0	2.5	9.0	3.0	12.0	3.0	—	—	12.0	3.0	—	—
Ichiigashi	10.0	2.5	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	9.5	3.0
Yachidamo	10.0	2.5	7.0	2.7×	10.0	2.5×	—	—	12.0	3.0	—	—
Mizunara	10.0	2.5	10.0	2.5×	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0
Keyaki	10.0	2.5	10.0	2.5×	10.0	2.5×	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0

L.: Axial gage length=4 cm Lateral gage length=2 cm

Others: Axial gage length=4 cm Lateral gage length=2.5 cm

× Lateral gage length=2 cm * Axial gage length=3 cm

3. 試験方法

圧縮試験に使用した試験機は能力 1 ton オルゼン型材料試験機と A. S. T. M. 型圧縮装置をとりつけた能力 10 ton アムスラー型材料試験機である。加圧方式は第3図からもわかるように、ポアソン比、ヤング係数の測定具をとりつけ、弾性域内で等荷重間隔に 10 刻み加圧したのち、同じ経過で荷重を除去した。その後さらに変形量を測定する面をとりかえ、所要の荷重—変形線図が得られるまでふたたび荷重を

加えた (第 23 図参照)。

変形量測定具は全長に関する場合は $1/100\text{ mm}$ 精度のダイヤルゲージであるが、その他の場合は鏡式歪計 (Mirror extensometer) を用いた。

鏡式歪計の場合は標点距離を試験片の中央部に定め、繊維軸方向圧縮試験片では荷重軸方向を 4 cm 、荷重軸に直角の横方向を 2 cm とした。読みの精度はスケール 1 mm の読みが、荷重軸方向で $1/1,000\text{ mm}$ 、横方向で $1/3,000\text{ mm}$ の変形量に対応するようにした。その他の試験片では第 3 表に脚注したように、若干の例外はあるが、荷重軸方向の標点距離を 4 cm 、横方向を 2.5 cm とし、読みの精度はそれぞれ $1/1,000\text{ mm}$ 、 $1/4,000\text{ mm}$ とした。なお、どの場合もスケールの 0.5 mm までかなり正確に目測した。

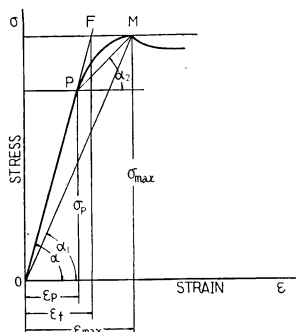
荷重速度はポアソン比測定のための繰返し試験では、負荷および除去をあわせて約 7 分前後であるが、破壊試験の場合については、のちに平均荷重速度 ($L\dot{\epsilon}$) で示すことにする。

4. 圧縮応力—歪曲線の基本型

応力—歪曲線は材料の各種の荷重条件に対する変形特性を総合的に表現したものであり、これにより材料の弾性ならびに塑性域における応力—歪関係が定量的に把あくできる。したがって、木材の力学的挙動を究明する場合はもちろん、木材を各種の強度部材として設計利用する場合にもきわめて重要な役割を果すことは当然であるが、この種の研究資料はきわめて少ない。すなわち、静的曲げや、縦圧縮、縦引張などについてはかなり検討⁽¹⁾⁽¹⁷⁾ されつつあるが、横圧縮⁽¹⁸⁾ その他についての研究はきわめてきん少の現状である。ここでは主として、各樹種の各方向の圧縮応力—歪曲線を求め、木材の力学的異方性を検討するとともに、応力—歪曲線の分類と数値的表現を試みることにする。なお、鏡式歪計による比例限の異方性については別項で述べることにする。

4.1 繊維軸方向圧縮応力—歪曲線 (L)

各樹種の縦圧縮 応力—歪 曲線 の 実 例 を 第 21 図 に 示 す が、21—1 は針葉樹材、21—2 は散孔材と輻射孔材、21—3 は環孔材の応力—歪曲線である。この場合の歪は、試片の端末影響をのぞくため、相対する両端面の中央部に設けられた標点距離 4 cm の区間で求めた平均歪である。各樹種の材料特性の差異に



第 4 図 繊維方向圧縮応力—歪曲線の基本型

Fig. 4 Typical stress-strain curve of specimen in compression parallel to grain (L)

より、直線部分の傾斜や長さ、曲線部分の型や大きさなどは厳密にはかなり異なっているが、これを模式的に示せば、第 4 図のごとくなる。この線図 OPM がいわゆる応力—歪曲線であり、OP 部分が直線域、PM 部分が曲線域と呼ばれるものである。P 点における応力が比例限応力 ($\sigma_p\text{ kg/cm}^2$)、その歪が比例限歪 ($\epsilon_p\%$) であり、直線の傾斜角 α からヤング係数 ($E\text{ kg/cm}^2$) が決定される。また M 点における応力が破壊応力 (破壊強さ、または極限強さ、 $\sigma_{max}\text{ kg/cm}^2$)、その歪が破壊歪 ($\epsilon_{max}\%$) である。M 点をこえたのちは、歪は増大するが、応力は一般に減少してゆく傾向を示す。その様相はダイヤルゲージによる全長に関する応力—歪曲線の場合に顕著にみられる。いま、第 4 図のような応力—歪曲線を破壊点 M に至るまでの区間につき数値的表現をしてみよ

う。図から、

$$E = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_p} = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_f} = \tan \alpha$$

なお、 ε_f は M 点を通り歪軸に平行に引いた直線が、OP の延長と交わる点 F に対する歪である。また、

$$E_1 = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} = \tan \alpha_1 \quad E_2 = \frac{\sigma_{max} - \sigma_p}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_p} = \tan \alpha_2$$

ここで、比例限度力の破壊応力に対する比を K_σ 、比例限度歪の破壊歪に対する比を K_ε とし次式であらわす。

$$K_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_{max}} \quad K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{max}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、

$$E_1 = \frac{K_\varepsilon}{K_\sigma} E \quad E_2 = \frac{1-K_\sigma}{1-K_\varepsilon} E_1 = \frac{(1-K_\sigma)K_\varepsilon}{(1-K_\varepsilon)K_\sigma} E \quad \dots\dots\dots (5)$$

この $1-K_\varepsilon$ の値は曲線域の大きさを示すことは当然である。また、 ε_{max} に対する ε_f の値を K_f とすれば、

$$K_f = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{max}} = \frac{K_\varepsilon}{K_\sigma}$$

となるので、(5) 式はつぎのごとくあらわされる¹⁶⁾。

$$E_2 = \frac{1-K_\sigma}{1-K_\sigma K_f} E_1 = \frac{(1-K_\sigma)K_f}{1-K_\sigma K_f} E \quad \dots\dots\dots (6)$$

これらの関係数値が樹種と材質とに応じて安定したものであれば、このような応力—歪曲線の特性を定量的に表現できるばかりでなく、相互間の数値の推定にも有効である。なお、曲線部分については、曲線型を決定するか、または同様の手続で折線をつくり、 E_n を決定してゆけばよい。ただ、 ε_{max} の値の確認は他の数値にくらべ実験技術的に困難な場合が多い。とくに低比重の針葉樹材で、端面付近における二次応力の影響をつよくうけるような破損を伴う場合は問題があると思う。これらの数値を第4表に示すが、 L_v ($kg/cm^2/min$) は平均荷重速度である。

針葉樹材 針葉樹材のなかでもアカマツの応力—歪曲線は他の材と異なり、むしろ広葉樹散孔材に類似

第4表 縦圧縮における応力—歪関係
Table 4. Stress-strain relations in compression parallel to grain

Species	E_L $10^3 kg/cm^2$	σ_{max} kg/cm^2	$K_\sigma =$ σ_p / σ_{max}	ε_{max} $\cdot 10^{-2}$	$K_\varepsilon =$ $\varepsilon_p / \varepsilon_{max}$	$1 - K_\varepsilon =$ $\frac{\varepsilon_f}{E}$ $\cdot 10^{-2}$	$K_f =$ $\frac{K_\varepsilon}{K_\sigma} = \frac{(1-K_\sigma)K_\varepsilon}{(1-K_\varepsilon)K_\sigma}$	L_v $kg/cm^2/min$
Sugi	89.2	284	0.81	0.36	0.72	0.28	0.32	33
Todomatsu	105	299	0.86	0.32	0.77	0.23	0.28	35
Yezomatsu	111	347	0.80	0.36	0.70	0.30	0.31	42
Akamatsu	101	411	0.68	1.36	0.21	0.79	0.41	37
Buna	136	486	0.66	1.23	0.20	0.80	0.36	70
Apitong	219	647	0.73	0.48	0.47	0.53	0.30	77
Makaba	160	499	0.64	0.93	0.22	0.78	0.31	73
Ichiigashi	169	655	0.72	1.20	0.24	0.76	0.39	78
Yachidamo	130	367	0.71	1.23	0.17	0.83	0.28	38
Mizunara	109	393	0.61	2.43	0.09	0.91	0.36	43
Keyaki	112	559	0.62	2.18	0.14	0.86	0.50	72

している。すなわち、 K_σ の値は小さく 0.68 程度であり、 $1-K_\epsilon$ の値は 0.79 となり曲線域はかなり大きい。また、 E_1 の値は E の 0.30、 E_2 は E の 0.12 となっている。他の樹種は一般に K_σ の値が大きく、0.80~0.86 であり、 $1-K_\epsilon$ の値はわずか 0.23~0.30 程度で曲線域はきわめて小さい。なお、 E_1 の値は E の 0.88~0.90 で、 E_2 は E の 0.55~0.60 程度となっている。これらを試験片の破損形と対応してみると、板目面にあらわれる破損線は、アカマツでは荷重軸とやや鋭い角をなしているが、他の針葉樹材では比較的鈍角をなし、とくにスギやトドマツでは端面付近で二次応力による局部的座屈現象を伴う場合が多い。

広葉樹散孔材および輻射孔材 散孔材のなかでも南洋材のアピトン他は他の樹種と異なり、針葉樹に類似の曲線型を示している。すなわち、 K_σ の値はやや大きく 0.73、 $1-K_\epsilon$ の値は 0.53、 E_1 は 0.64 E 、 E_2 は 0.33 E となっている。その他の材では K_σ の値は針葉樹材よりやや小さく、約 0.65、 $1-K_\epsilon$ の値は逆にやや大きくなり 0.79 となっている。また、 E_1 は 0.32 E 、 E_2 は 0.15 E となっている。なお、板目面にみられる破損線は局部的に集中し、荷重軸と鋭い角をなし、急激な迂り変形を伴う座屈を生じやすい。

輻射孔材はイチイガシのみであるが、応力—歪曲線は散孔材に類似し、応力—歪関係数値もほぼ同様の傾向を示している。

広葉樹環孔材 この応力—歪曲線は第 21 図からもわかるように曲線域がきわめて大きい。すなわち、 K_σ の値は 0.65 で散孔材とほぼ同じであるが、 $1-K_\epsilon$ の値は 0.83~0.91 程度となっている。また、 E_1 は E の 0.15~0.24、 E_2 は E のわずか 0.06~0.10 となりきわめて特徴的である。この材の板目面における破損線は、破壊点に近づくにつれて、全面にタスキ状に細かく分散してあらわれ、しだいに 1 カ所に集中して破壊する傾向がある。とくに、ケヤキではこの傾向が明りようで、試験片全体がねじられるような現象を示すことがある。これらの破損形を第 5 図に示す。

4.2 接線（板目）方向圧縮応力—歪曲線（T）

各樹種の応力—歪曲線の実例を第 22 図に示す。この図には鏡式歪計による中央部の歪とダイヤルゲージによる全長に関する歪とが一語に示されている。どの樹種もダイヤルゲージによる線図は端末影響をうけるためか、直線域をはさんでやや S 字型になる傾向が強い。

第 5 表 T 試片の応力—歪関係（ダイヤルゲージ測定）
Table 5. Stress-strain relation of T specimen (dial gage reading)

Species	E_T $10^3 kg/cm^2$	σ_p kg/cm^2	ϵ_p %	D_p mm	D_p' mm	σ_{1mm} kg/cm^2	$\sigma_{1.5mm}$ kg/cm^2	σ_{2mm} kg/cm^2	σ_{3mm} kg/cm^2	$\sigma_{1\%-M}$ kg/cm^2	$\sigma_{1\%-L}$ kg/cm^2	$ L_v $ $kg/cm^2/min$
Sugi	1.24	7.90	0.65	0.77	0.87	9.14	12.8	15.5	18.8	10.6	19.3	2.6
Todomatsu	1.94	10.4	0.57	0.63	0.71	14.3	19.3	23.1	28.4	16.1	24.3	4.
Yezomatsu	3.09	14.3	0.47	0.56	0.59	22.0	28.4	32.3	34.4	24.7	32.3	3.6
Akamatsu	3.68	25.7	0.70	0.56	0.61	37.6	45.2	47.0	45.5	32.4	45.7	5.3
Buna	5.19	27.8	0.54	0.64	0.68	38.3	45.6	47.5	—	41.8	42.7	10.8
Apitong	3.92	23.9	0.61	0.73	0.80	28.6	37.5	42.2	44.5	32.8	35.6	3.0
Makaba	6.31	39.3	0.60	0.72	0.79	49.5	66.0	73.2	76.4	57.2	67.7	5.9
Ichigashi	8.15	56.2	0.69	0.82	0.88	63.0	86.2	102	—	74.8	80.9	6.3
Yachidamo	5.38	36.8	0.68	0.68	0.76	47.7	64.7	76.4	88.7	47.4	53.6	8.0
Mizunara	4.60	26.3	0.60	0.67	0.71	34.8	44.8	50.6	54.8	39.4	39.2	5.6
Keyaki	11.0	67.1	0.62	0.61	0.69	96.6	124	132	134	96.0	116	14.0

σ_{1mm} = Stress at 1 mm compression $\sigma_{1\%-M}$ = Stress at 1% strain by mirror extensometer reading D_p = Deformation at P. L. (corrected)

このような場合は直線部の延長が歪軸と交わる点を原点として、比例限歪の補正をおこなった。第5表に主としてダイヤルゲージによる応力—歪関係値を示す。同表の ε_p は前述のごとく補正した比例限歪であり、 σ_p は比例限応力、 E はヤング係数である。なお、ダイヤルゲージ測定の場合は圧縮変形量に対応する応力も求めた。すなわち、 D_p' は比例限に達するまでの補正しない圧縮変形量であり、 D_p は補正した比例限変形量である。また、 σ_{1mm} (kg/cm^2) は試験片の全長が $1mm$ 圧縮されたときの応力であり、 $\sigma_{1.5mm}$ (kg/cm^2)、 σ_{2mm} (kg/cm^2) についても同様である。なお、 $\sigma_{1\%-D}$ (kg/cm^2) とあるのは試験片の全長を 1% 圧縮したときの応力で、 $\sigma_{1\%-M}$ (kg/cm^2) は中央部の標点距離間を 1% 圧縮したときの応力である。

この応力—歪曲線を模式的に示すと第6図のごとくなる。直線域をこえてからのいわゆる弾塑性域は拋物線的で、明確な降伏点を示さずに漸進的に塑性域に移行してゆくが、縦圧縮のような破壊点は明らかでない。これを試験片の破損様相と対応してみれば、比例限を越えると年輪固有の初期曲率に支配され、木裏側では圧縮応力が増加するが、木表側では増加の割合が減少し、軸圧縮と曲げとが組み合わされたような応力状態になる。さらに荷重がすすむと、端末近くで座屈を生じたり、ときには木表側で割裂をおこすことがある。

このような応力—歪曲線の数値的表現を試みてみよう。まず、比例限をこえてからある特性点 σ_f に至る曲線域を n 次の拋物線とし、 σ_f から先を直線域と仮定すれば、歪が ε_p から ε_f の区間にある ε_i に対する応力 σ_i は次式によつて算出できる。

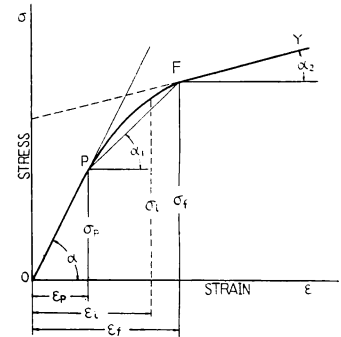
$$\sigma_i = \sigma_f - E_2(\varepsilon_f - \varepsilon_i) - (E_1 - E_2) \frac{(\varepsilon_f - \varepsilon_i)^n}{(\varepsilon_f - \varepsilon_p)^{n-1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{ここに,} \quad E_2 = \tan \alpha_2, \quad E_1 = \tan \alpha_1, \quad n = \frac{E - E_2}{E_1 - E_2}, \quad E = \tan \alpha$$

ここで問題となるのは、 σ_f 、 E_2 をどのようにきめるかである。とくに、 E_2 については、実例からもわかるように、 σ_f をこえてからの領域を直線とみなすことにも問題があるので、安定した数値を決定することは困難である。

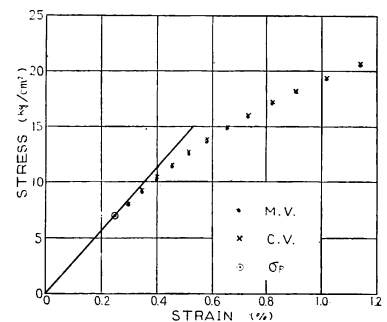
ここでは、 σ_f を試験片の中央部歪に関する $\sigma_{1\%-M}$ にとり、 E_2 については $n = 3$ とおくことにより、 E 、 E_1 の値から算出した。このようにして求めた σ_i と実測値とを比較すれば第7図のごとくなる。各樹種ともかなりよく適合している。

つぎに、ダイヤルゲージによる全長測定の場合についても、応力と変形量の関係を検討した。この場合の σ_f としては σ_{2mm} (kg/cm^2) を採用した。なお、 E に当る諸量は応力を変形量で除した β 、 β_1 、 β_2 を用い、 β_2 は $n = 3$ として β 、 β_1 から計算した。 σ_{1mm} 、 $\sigma_{1.5mm}$ の計算値と実測値を比較すれば第6表のごとくなり、どの樹種でもかなりよく適合していることが



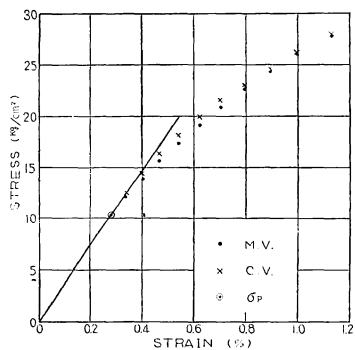
第6図 接線方向圧縮応力—歪曲線の基本型

Fig. 6 Typical stress-strain curve of specimen in compression tangential to growth rings (T)

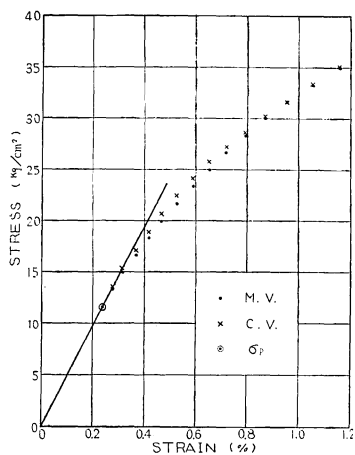


第7図—1 スギ Sugi

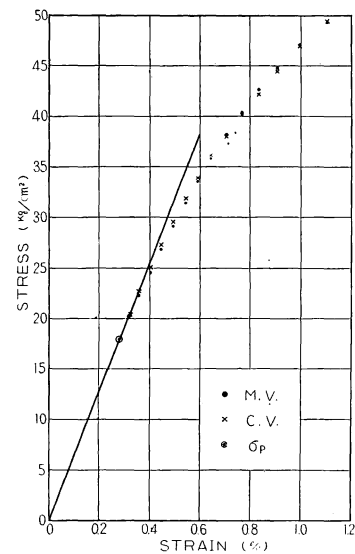
第7図 実測値と計算値の比較 (7式)
Fig. 7 Comparison of measured and calculated values (Eq. 7)



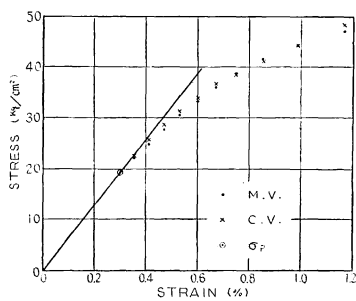
第7図-2 トドマツ Todomatsu



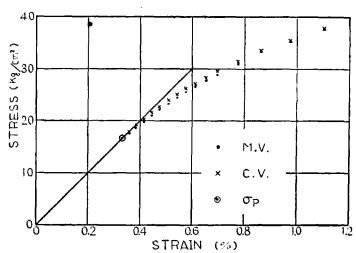
第7図-3 エゾマツ Yezomatsu



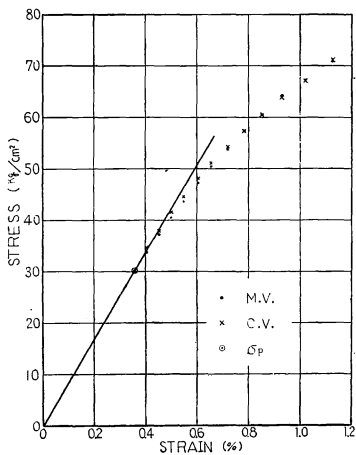
第7図-4 アカマツ Akamatsu



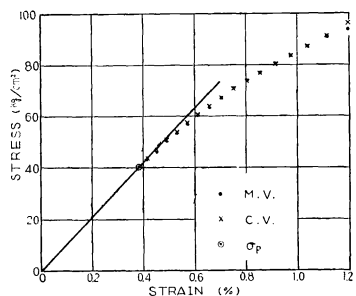
第7図-5 ブナ Buna



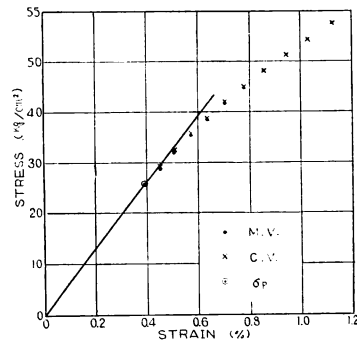
第7図-6 アピトン Apitong



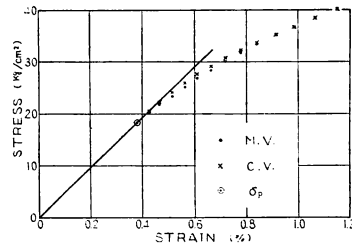
第7図-7 マカバ Makaba



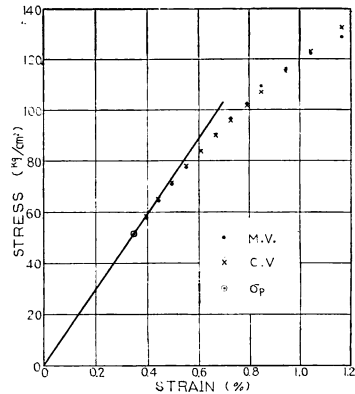
第7図-8 イチイガシ Ichiigashi



第7図—9 ヤチダモ Yachidamo



第7図—10 ミズナラ Mizunara



第7図—11 ケヤキ Keyaki

第6表 σ_{1mm} および $\sigma_{1.5mm}$ の実測値と計算値の比較 (ダイヤルゲージ測定)

Table 6.

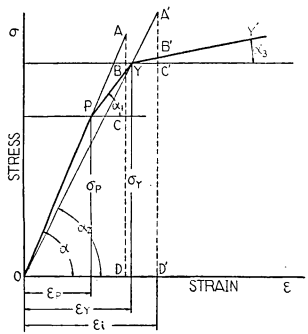
Comparison of measured and calculated values of σ_{1mm} and $\sigma_{1.5mm}$ by dial gage reading

Species	β	β_1	β_2	σ_{1mm}			$\sigma_{1.5mm}$		
	kg/cm ² /mm	kg/cm ² /mm	kg/cm ² /mm	C. V.	M. V.	C. V./M. V.	C. V.	M. V.	C. V./M. V.
Sugi	10.3	6.18	4.12	10.0	9.15	1.09	13.2	12.8	1.03
Todomatsu	16.5	9.27	5.66	15.5	14.3	1.08	20.0	19.3	1.04
Yezomatsu	25.5	12.5	6.00	23.2	22.0	1.05	28.9	28.4	1.02
Akamatsu	45.9	14.8	-0.75	40.3	37.7	1.07	46.4	45.2	1.03
Buna	43.5	14.5	0	39.7	42.0	0.95	46.5	45.6	1.02
Apitong	32.7	14.4	5.25	31.3	28.6	1.09	38.9	37.5	1.04
Makaba	54.6	26.5	12.5	52.2	49.1	1.06	65.9	66.0	1.00
Ichigashi	68.6	38.8	23.9	67.4	64.1	1.05	89.7	86.2	1.04
Yachidamo	54.1	30.0	18.0	51.5	47.6	1.08	66.6	64.7	1.03
Mizunara	39.3	18.3	7.8	36.9	39.4	0.94	46.0	44.8	1.03
Keyaki	110	46.7	15.1	100.6	96.3	1.05	122.4	124	0.99

第7表 R試片の応力-歪関係 (ダイヤルゲージ測定)

Table 7. Stress-strain relation of R specimen (dial gage reading)

Species	E_R	σ_p	ϵ_p	D_p	D_p'	σ_{1mm}	$\sigma_{1.5mm}$	σ_{2mm}	σ_{3mm}	$\sigma_{1\%}-D$	$\sigma_{1\%}-M$	L_v
	10^3 kg/cm^2	kg/cm ²	%	mm	mm	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ² /min.
Sugi	5.01	20.9	0.41	0.49	0.54	30.0	32.4	33.6	34.1	31.8	33.4	4.3
Todomatsu	6.73	25.5	0.38	0.43	0.50	40.6	40.9	40.8	40.8	40.9	41.0	5.0
Yezomatsu	5.69	26.8	0.47	0.56	0.61	36.7	38.5	39.1	38.6	37.6	37.7	5.6
Akamatsu	10.9	37.1	0.34	0.39	0.43	44.5	46.6	46.6	46.0	45.0	45.6	5.7
Buna	9.84	44.8	0.46	0.56	0.59	66.6	77.1	79.1	—	72.6	69.9	9.0
Apitong	8.02	38.1	0.48	0.57	0.65	54.4	65.0	67.8	68.2	60.0	65.2	5.2
Makaba	8.04	51.4	0.64	0.56	0.64	75.1	93.1	100	103	67.3	80.1	7.5
Ichigashi	16.6	88.0	0.53	0.64	0.70	123	164	190	214	141	153	24.7
Yachidamo	9.40	56.0	0.60	0.41	0.50	75.1	72.5	70.5	71.8	73.0	75.0	15.2
Mizunara	12.2	64.2	0.53	0.53	0.57	95.2	104	106	—	95.2	95.1	11.0
Keyaki	21.5	94.2	0.44	0.44	0.50	171	216	234	246	169	166	16.6



第 8 図 針葉樹材の放射方向圧縮応力—歪曲線の基本型

Fig. 8 Typical stress-strain curve of softwood specimen in compression parallel to rays (R)

わかる。したがって、これらの常数が樹種と材質に応じかなり安定したものであれば、2 mm 程度の圧縮範囲では、荷重と変形量の相互関係が数値的に推定できるわけである。

4.3 放射（柱目）方向圧縮応力—歪曲線（R）

各樹種の応力—歪曲線の実例を第 22 図に、また主としてダイヤルゲージによる全長測定の場合の応力—歪関係数値を第 7 表に示す。この場合は樹種の構造特性にもとづく明りような差異がみられる。すなわち、広葉樹材の多くは前項の板目方向に類似した曲線型を示すが、散孔材のアピトン、環孔材のヤチダモ、針葉樹材の全部は全く特異な応力—歪曲線を示している。

これらを模式的に表現すると第 8 図のごとくなる。比例限をこえ、歪が少し進むと明確な降伏点を持ち、その点から応力—歪曲線は急激に分岐し、歪軸とほぼ平行になるが、その後の縦圧縮の

ような破壊点の確認は困難である。

これを試験片の破壊型と対応してみると第 9 図のごとく、針葉樹材では細胞膜が薄く、かつ、放射方向の配列性が不規則な春材部で年輪に沿う迂り座屈をおこしている。また、ヤチダモでも、大きな導管が密集している孔部で針葉樹材と同様の迂り座屈をおこしている。ところが、アピトンは年輪が不明なうえ、木口面にみられる組織構造が比較的均等になっているためか、中央部がいくぶん太鼓状になるが、その後第 10 図にみられるようなセン断破壊を伴う場合が多い。

このような曲線型の数値的表現を考えてみよう。いま ϵ_p と ϵ_y の区間にある ϵ_i に対応する応力を σ_i とすれば、

$$\sigma_i = E \epsilon_i \left[1 - \lambda_0 \left(1 - \frac{\epsilon_p}{\epsilon_i} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ここに、} \quad E = \tan \alpha, \quad \lambda_0 = \frac{E - E_1}{E}, \quad E_1 = \tan \alpha_1$$

また、 $\epsilon_i > \epsilon_y$ なる区間の σ_i は、

$$\sigma_i = E_y \epsilon_i \left[1 - \lambda_y \left(1 - \frac{\epsilon_p}{\epsilon_i} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (8')$$

$$\text{ここに、} E_y = \tan \alpha_3 = \sigma_y / \epsilon_y, \quad \lambda_y = \frac{E_y - E_3}{E_y}, \quad E_3 = \tan \alpha_3$$

したがって、これらの値がわかれば σ_i の計算ができるわけである。

しかし、実例からもわかるように、実際の曲線図はこのような斜線部分のみで連結されているとは限らず、比例限 P から降伏点 Y に至る区間はやや曲線的であり、また、 E_3 についても塑性域であるため、材料の破壊特性や実験条件に影響され、安定した数値をうることはやや困難である。

比例限と降伏点における応力—歪関係を鏡式歪計による中央部測定の場合と、ダイヤルゲージによる全長測定の場合につき示せば第 8 表のごとくなる。降伏点応力 $\sigma_y (kg/cm^2)$ の値はどの場合も同じであるが、降伏点における歪 ϵ_y は全長測定の場合が大きく、そのときの圧縮変形量 $D_y (mm)$ は針葉樹材で約 1 mm 前後である。 σ_y / σ_p の値は鏡式歪計の場合が約 2.0、ダイヤルゲージの場合が約 1.4 となっている。

第 8 表 比例限および降伏点における応力—歪関係 (柁目方向圧縮)
Table 8. Stress-strain relation of proportional limit and yield point (R-Specimen)

Species	Mirror extensometer reading						Dial gage reading					
	σ_y kg/cm^2	ε_y %	E_y $10^3 kg/cm^2$	σ_y/σ_p	$\varepsilon_y/\varepsilon_p$	E_y/E	σ_y kg/cm^2	ε_y %	E_y $10^3 kg/cm^2$	D_y mm	σ_y/σ_p	E_y/E
Sugi	31.0	0.654	4.76	2.29	3.05	0.750	31.0	0.874	3.36	1.10	1.48	0.707
Todomatsu	39.8	0.478	8.34	2.02	2.48	0.813	39.8	0.816	4.97	1.00	1.25	0.735
Yezomatsu	36.9	0.555	6.67	1.98	2.76	0.779	36.9	0.838	4.47	1.03	1.38	0.784
Akamatsu	43.7	0.415	10.7	1.77	2.01	0.878	43.7	0.789	5.71	0.75	1.18	0.526
Apitong	63.3	0.885	7.16	2.20	3.73	0.588	63.3	1.07	5.96	1.36	1.67	0.743
Yachidamo	73.7	0.749	9.89	1.89	2.32	0.819	73.7	0.864	8.55	0.68	1.32	0.910

また、 E_y/E の値は鏡式歪計の場合、針葉樹材で約 0.80、アビトンで約 0.60、ヤチダモで約 0.80 となつてゐるが、ダイヤルゲージの場合は針葉樹材で約 0.70、アビトンで約 0.75、ヤチダモで約 0.90 となつてゐる。

4.4 45° 方向圧縮応力—歪曲線 (LR-45, LT-45, RT-45)

これは荷重方向が 2 軸とそれぞれ 45° をなす場合であるから、軸応力は圧縮分応力とせん断分応力とに分けられる。

LR-45 試験片 これは柁目面が 45° に目切れてゐる場合であり、この応力—歪曲線の実例を第 22 図に、また、主としてダイヤルゲージによる応力—歪関係数値を第 9 表に示す。

第 9 表 LR-45 試片の応力—歪関係 (ダイヤルゲージ測定)
Table 9. Stress-strain relation of LR-45 specimen (dial gage reading)

Species	E_{LR-45} $10^3 kg/cm^2$	σ_p kg/cm^2	ε_p %	D_p mm	D_p' mm	σ_{1mm} kg/cm^2	$\sigma_{1.5mm}$ kg/cm^2	σ_{2mm} kg/cm^2	σ_{3mm} kg/cm^2	$\sigma_{1\% - D}$ kg/cm^2	$\sigma_{1\% - M}$ kg/cm^2	L_v $kg/cm^2/min$
Sugi	10.3	43.2	0.42	0.50	0.54	68.9	74.9	77.4	79.7	72.3	72.7	12.8
Todomatsu	10.5	47.9	0.46	0.55	0.61	72.3	76.8	77.3	77.5	76.0	77.9	11.8
Yezomatsu	10.5	45.0	0.43	0.51	0.58	70.1	79.0	80.1	80.7	77.2	77.4	10.6
Akamatsu	12.9	68.2	0.52	0.62	0.71	78.7	79.3	82.5	84.9	79.7	81.0	12.6
Buna	20.3	100	0.49	0.59	0.64	144	176	195	210	160	163	23.7
Apitong	14.4	64.4	0.45	0.54	0.68	91.5	—	—	—	103	106	15.0
Ichiigashi	26.2	133	0.51	0.61	0.68	187	245	282	326	211	237	24.3
Mizunara	21.1	113	0.54	0.65	0.70	154	196	212	229	173	183	23.1
Keyaki	23.2	148	0.64	0.76	0.83	176	243	280	—	206	229	37.0

第 10 表 比例限および降伏点における応力—歪関係 (LR-45 試片)
Table 10. Stress-strain relation of proportional limit and yield point (LR-45 specimen)

Species	Mirror extensometer reading						Dial gage reading					
	σ_y kg/cm^2	ε_y %	E_y $10^3 kg/cm^2$	σ_y/σ_p	$\varepsilon_y/\varepsilon_p$	E_y/E	σ_y kg/cm^2	ε_y %	E_y $10^3 kg/cm^2$	D_y mm	σ_y/σ_p	E_y/E
Sugi	64.7	0.604	10.8	1.93	2.32	0.834	70.4	0.834	8.46	1.04	1.64	0.820
Todomatsu	76.0	0.698	11.0	2.28	2.98	0.776	76.0	0.848	8.96	1.08	1.59	0.856
Yezomatsu	76.5	0.877	8.77	2.20	3.32	0.676	76.5	0.925	8.28	1.17	1.70	0.787
Akamatsu	77.6	0.430	18.0	1.52	1.69	0.900	77.6	0.616	12.6	0.82	1.14	0.977
Apitong	129	0.749	14.2	3.02	4.09	0.743	129	0.905	14.3	1.22	2.01	0.995

曲線の基本型としては特別のものがなく、広葉樹材の多くは板目方向圧縮の基本型に類似しているが、アピトンおよび針葉樹材の全部は柾目方向圧縮の基本型に類似しており、降伏点が明確である。したがって、降伏点と比例限における応力—歪関係を示すと第 10 表のごとくなる。スギ以外は鏡式歪計とダイヤルゲージによる降伏点応力の差はみられない。

また、ダイヤルゲージによる降伏点の圧縮変形量 D_y は柾目方向圧縮の場合とほぼ等しく、約 1 mm 前後である。破損形は第 13 図のごとく、エゾマツのように春材の最弱部で年輪方向と繊維方向に同時に欠つていものや、アピトン、ミズナラ、ケヤキのように試験片の中央部でセン断破壊をしているものとある。以上のことから、この場合の圧縮応力—歪曲線は、柾目方向の圧縮変形特性の影響をかなり支配的にうけていることがわかる。

LT-45 試験片 これは板目が 45° に目切れている場合であるが、各樹種の応力—歪曲線の実例を第 22 図に、また、主としてダイヤルゲージによる応力—歪関係数値を第 11 表に示す。この曲線型は板目方向圧縮の基本型に類似しており、板目方向の圧縮変形特性が支配的であることがわかる。破損型は針葉樹材や第 11 図に示すヤチダモのごとく欠りを伴う曲げ座屈をおこしているものや、アピトンのごとく中央部でセン断破壊をしているものがある。

RT-45 試験片 これは木口面における年輪が荷重方向と 45° をなしている場合であるが、応力—歪曲

第 11 表 LT-45 試片の応力—歪関係 (ダイヤルゲージ測定)
Table 11. Stress-strain relation of LT-45 specimen (dial gage reading)

Species	E_{LT-45} $10^3 kg/cm^2$	σ_p kg/cm^2	ε_p %	D_p mm	D_p' mm	σ_{1mm} kg/cm^2	$\sigma_{1.5mm}$ kg/cm^2	σ_{2mm} kg/cm^2	σ_{3mm} kg/cm^2	$\sigma_{1\% - D}$ kg/cm^2	$\sigma_{1\% - M}$ kg/cm^2	L_v $kg/cm^2/min$
Sugi	3.96	19.6	0.50	0.63	0.69	28.1	37.6	43.5	48.5	32.3	44.8	6.8
Todomatsu	4.75	21.5	0.44	0.55	0.66	35.5	44.3	52.5	—	38.0	47.9	7.6
Yezomatsu	8.65	34.6	0.40	0.48	0.53	60.3	76.5	80.9	80.3	68.0	68.7	11.1
Akamatsu	10.7	54.4	0.51	0.61	0.66	79.2	101	—	—	89.0	93.2	17.0
Buna	12.8	64.7	0.52	0.62	0.68	89.9	114	128	146	101	106	15.7
Apitong	9.25	44.9	0.49	0.58	0.67	65.7	84.7	96.6	99.1	75.6	84.9	13.2
Makaba	13.7	67.6	0.49	0.59	0.73	92.1	—	—	—	106	—	14.2
Ichiigashi	15.2	101	0.67	0.80	0.87	116	161	192	227	136	153	22.2
Yachidamo	12.7	61.8	0.49	0.58	0.63	104	138	160	183	126	141	16.3
Mizunara	12.0	67.6	0.54	0.67	0.69	88.7	115	130	147	99.9	108	17.6
Keyaki	17.8	115	0.65	0.77	0.83	136	187	222	260	157	171	31.7

第 12 表 RT-45 試片の応力—歪関係 (ダイヤルゲージ測定)
Table 12. Stress-strain relation of RT-45 specimen (dial gage reading)

Species	E_{RT-45} $10^3 kg/cm^2$	σ_p kg/cm^2	ε_p %	D_p mm	D_p' mm	σ_{1mm} kg/cm^2	$\sigma_{1.5mm}$ kg/cm^2	σ_{2mm} kg/cm^2	σ_{3mm} kg/cm^2	$\sigma_{1\% - D}$ kg/cm^2	$\sigma_{1\% - M}$ kg/cm^2	L_v $kg/cm^2/min$
Sugi	0.63	3.49	0.55	0.63	0.69	5.03	5.33	9.17	12.0	5.70	5.48	1.3
Todomatsu	0.72	3.82	0.53	0.61	0.67	5.50	7.71	9.55	12.8	6.15	5.96	1.6
Yezomatsu	0.63	5.28	0.82	0.90	0.95	5.44	7.72	9.67	12.7	5.95	6.15	1.6
Akamatsu	1.69	11.0	0.66	0.38	0.53	22.2	29.3	32.6	35.4	13.2	15.7	4.0
Buna	6.11	27.7	0.46	0.53	0.55	41.6	49.8	52.5	—	45.5	42.7	5.5
Apitong	5.38	26.4	0.49	0.34	0.44	51.1	—	—	—	42.7	45.9	4.8
Ichiigashi	10.1	65.7	0.63	0.61	0.66	95.4	128	144	163	92.3	105	15.2
Mizunara	4.83	25.2	0.52	0.62	0.65	35.3	44.3	49.7	53.0	39.6	37.5	5.5
Keyaki	10.3	54.8	0.53	0.64	0.70	76.0	101	112	—	88.6	103	14.7

線の実例を第22図に、また、主としてダイヤルゲージによる応力—歪関係数値を第12表に示す。この曲線型はほぼ板目方向圧縮の基本型に類似しているが、針葉樹材の曲線はやや特徴的である。すなわち、針葉樹材の比例限度はきわめて小さいが、比例限度は他の場合にくらべかなり大きくなっている。これを破損形と対応してみると、針葉樹材では柾目方向圧縮のときのように、春材の最弱部で年輪に沿って迂りをしている。

また、散孔材、輻射孔材では明りような破損線はみられないが、環孔材では第12図のごとく、大きな導管が密集している孔圍部で年輪に沿って迂っている。第13図にエゾマツ、ブナ、アビトン、イチイガシ、ミズナラの破損形を示す。

4.5 荷重方向の圧縮歪と横方向の伸び歪

縦圧縮試験片を圧縮すると、試験体は繊維方向にちぢみ、放射方向および接線方向に伸びるわけであるが、この場合の圧縮歪と引張歪の関係を実験にしたがつて示すと第23図のごとくなる。この図では圧縮歪と引張歪を便宜上同符号で表わした。横方向の歪と縦方向の歪が一定の関係をもつて変化していることがわかる。比例域における両歪の関係がいわゆるポアソン比であり、この値についてはあとで詳しく述べる。また、放射方向に圧縮した場合の放射方向圧縮歪と接線方向引張歪の関係、接線方向に圧縮した場合の接線方向圧縮歪と放射方向引張歪との関係、なお、LR-45試験片、LT-45試験片の木口面に相当する面で求めた縦歪と横歪の関係、RT-45試験片の木口面で求めた縦歪と横歪の関係などを示す。

RT-45試験片の場合、針葉樹材では縦歪と横歪がほとんど同じぐらいになっているが、広葉樹材では横歪の約半分になっており特徴的である。

4.6 鏡式歪計とダイヤルゲージによる応力—歪関係の比較

応力—歪曲線の基本型は、中央部測定の場合も全長測定の場合も同じであるが、ただ、全長に関する応力—歪曲線は比例域と呼ばれる直線部分が原点をとらないで、その部分をはさんでややS字型を示す傾向がつよい。これは前にも多少述べたように、

変形量測定具の精度が異なることより、試験片の仕上げ精度、試験機の加圧部における機構上の精度、試験片の接触面およびその付近における二次応力による局部的破損などが関連していると考えられる。ここに、両測定具による応力—歪関係数値を比較してみよう。まず、鏡式歪計による σ_{p-M} に対するダイヤルゲージによる σ_{p-D} の値を比で示すと第13表のごとくなる。全樹種のどの方向でもダイヤルゲージ測定の値が大きく、全平均としては約1.37となっている。このことは、中央部の変形がすすみやすいというよりは、むしろ変形量測定具の精度差に原因があると思う。すなわち、鏡式歪計の精度ではすでに比例限をこえていても、ダイヤルゲージの精度ではまだ変形量の増加がみかけ

第13表 鏡式歪計とダイヤルゲージによる圧縮比例限度の比較

Table 13.

Values for $\sigma_{p-D}/\sigma_{p-M}$ in compression test

Species	R	T	RT-45	LR-45	LT-45
Sugi	1.54	1.13	1.11	1.29	1.08
Todomatsu	1.29	1.04	1.24	1.44	1.12
Yezomatsu	1.45	1.19	1.58	1.29	1.29
Akamatsu	1.50	1.43	1.36	1.33	1.38
Buna	1.25	1.28	1.44	1.50	1.25
Apitong	1.32	1.37	1.63	1.50	1.25
Makaba	1.41	1.56	—	—	1.28
Ichiigashi	1.55	1.53	1.65	1.50	1.50
Yachidamo	1.43	1.39	—	—	1.28
Mizunara	1.38	1.37	1.44	1.48	1.29
Keyaki	1.38	1.30	1.33	1.53	1.53
Mean	1.41	1.32	1.42	1.43	1.30

σ_{p-D} : Stress at proportional limit by dial gage reading

σ_{p-M} : Stress at proportional limit by mirror extensometer reading

第14表 鏡式歪計とダイヤルゲージによる $\sigma_{1\%}$ の比較
Table 14. Values for $\sigma_{1\%}-D/\sigma_{1\%}-M$ in compression test

Species	R	T	RT-45	LR-45	LT-45
Sugi	0.95	0.55	1.04	0.99	0.72
Todomatsu	1.00	0.66	1.03	0.98	0.79
Yezomatsu	1.00	0.76	0.97	1.00	0.99
Akamatsu	0.99	0.71	0.84	0.98	0.95
Buna	1.04	0.98	1.07	0.98	0.95
Apitong	0.92	0.92	0.93	0.97	0.89
Makaba	0.84	0.84	—	—	—
Ichiigashi	0.92	0.92	0.88	0.89	0.89
Yachidamo	0.97	0.88	—	—	0.89
Mizunara	1.00	1.00	1.06	0.95	0.93
Keyaki	1.02	0.78	0.86	0.90	0.92
Mean	0.97	0.82	0.96	0.96	0.89

$\sigma_{1\%}-D$: Stress at 1% strain by dial gage reading

$\sigma_{1\%}-M$: Stress at 1% strain by mirror extensometer reading

第15表 鏡式歪計とダイヤルゲージによるヤング係数の比較
Table 15. Values for E_D/E_M

Species	R	T	RT-45	LR-45	LT-45
Sugi	0.79	0.47	1.09	0.80	0.58
Todomatsu	0.66	0.57	1.04	0.74	0.69
Yezomatsu	0.67	0.65	0.95	0.81	0.91
Akamatsu	0.90	0.58	0.95	0.64	0.88
Buna	0.95	0.97	0.95	0.94	0.97
Apitong	0.66	0.80	0.75	0.75	0.78
Makaba	0.73	0.74	—	—	0.76
Ichiigashi	0.82	0.79	0.76	0.73	0.75
Yachidamo	0.78	0.82	—	—	0.75
Mizunara	0.97	0.88	0.98	0.94	0.95
Keyaki	0.96	0.76	0.74	0.73	0.82
Mean	0.81	0.73	0.91	0.79	0.80

E_D : Young's modulus by dial gage reading

E_M : Young's modulus by mirror extensometer reading

上比例的に観測されるからである。ところが、変形量がすすんで歪が1%程度になるとこの関係は異なってくる場合が多い。いま、中央部に関する $\sigma_{1\%}-M$ (kg/cm^2) と全長に関する $\sigma_{1\%}-D$ とを比較すると第14表のごとくなる。全試験片の長さが必ずしも同一でないので、多少問題はあるが、全般的には両者の値は接近している。ただ、板目方向試験片や LT-45 試験片では $\sigma_{1\%}-D$ が小さく、とくにこの傾向はスギやトドマツで顕著である。これは試験片の端末付近で前述のごとく曲げ座屈をおこしやすいことによると思う。

また、柎目方向試験片や RT-45 試験片では樹種により $\sigma_{1\%}-D$ の方が若干大きくなっているものがあるが、これは圧縮変形がすすむと試験片の端部の変形は加圧盤に制限されるのに対し、中央部の年輪は自由に迂り変形がおこせる状態におかれているためと考えられる。

つぎに、ヤング係数についても鏡式歪計による E_M とダイヤルゲージによる E_D とを比較し第15表に示す。ただ、全試験片の標点距離が同一でないので、必ずしも良好な比較といえないが、一般に E_D の

方が小さくなり、 E_D/E_M の値は全体としては約 0.80 となつている。ただ、針葉樹材の RT-45 試験片では両者の値がきわめて接近し、場合によつては E_D の方が若干大きくなつてゐることもある。これはあとにも述べるように、針葉樹材のセン断弾性係数 G_{RT} が非常に小さいことや、端部より中央部の年輪の方が通りやすい条件におかれてゐることなどが考えられる。なお、吉識・竹鼻両氏¹⁹⁾はこの比の逆数 E_M/E_D を全面圧係数と称し、面圧問題をとり扱う 1 つの特性値としているが、 E_D については接触応力のみならず、変形量測定精度、試験片形状、材質と荷重方向による破損特性などが関連してくるので、どのような実験条件で求めた値が面圧特性としてもつとも安定した数値を与えるかは今後にのこされた問題であると思う。

5. ヤング係数とその相互関係

木材の弾性的挙動を決定するにはさきに述べたごとく、ヤング係数、ポアソン比、セン断弾性係数を求めることが必要であるが、これらの測定結果について述べることにする。

5.1 ヤング係数 (E)

第 16 表 ヤ ン グ 係 数
Table 16. Summary of Young's modulus (E)

Species	L	R	T	LR-45	LT-45	RT-45
	$10^3 \cdot \text{kg/cm}^2$	$10^3 \cdot \text{kg/cm}^2$	$10^3 \cdot \text{kg/cm}^2$	$10^3 \cdot \text{kg/cm}^2$	$10^3 \cdot \text{kg/cm}^2$	$10^3 \cdot \text{kg/cm}^2$
Sugi	89.2	6.35	2.65	12.9	6.80	0.58
Todomatsu	105	10.3	3.35	14.1	7.05	0.69
Yezomatsu	111	8.55	4.80	13.0	9.50	0.66
Akamatsu	101	12.2	6.35	20.0	12.2	1.75
Buna	136	10.4	5.40	21.6	13.3	6.45
Apitong	219	12.2	4.90	19.2	12.0	7.15
Makaba	160	11.0	8.55	—	18.0	—
Ichiigashi	169	20.4	10.3	36.1	20.3	12.9
Yachidamo	130	12.1	6.60	—	16.8	—
Mizunara	109	12.6	5.25	22.5	12.7	4.95
Keyaki	112	22.3	14.4	31.8	21.6	14.0

第 17 表 ヤング係数の相互関係比
Table 17. Ratios between Young's moduli

Species	$\frac{E_R}{E_L}$	$\frac{E_T}{E_L}$	$\frac{E_{LR-45}}{E_L}$	$\frac{E_{LT-45}}{E_L}$	$\frac{E_{RT-45}}{E_L}$	$\frac{E_R}{E_T}$	$\frac{E_{LT-45}}{E_T}$	$\frac{E_{LR-45}}{E_R}$	$\frac{E_{LR-45}}{E_{LT-45}}$	$\frac{E_{LT-45}}{E_R}$
Sugi	0.071	0.030	0.145	0.076	0.007	2.39	2.57	2.03	1.90	1.07
Todomatsu	0.098	0.032	0.134	0.067	0.007	3.07	2.10	1.37	2.00	0.68
Yezomatsu	0.077	0.043	0.117	0.086	0.006	1.78	1.98	1.52	1.37	1.11
Akamatsu	0.121	0.063	0.198	0.121	0.017	1.92	1.92	1.64	1.64	1.00
Buna	0.077	0.040	0.159	0.098	0.047	1.93	2.46	2.08	1.62	1.28
Apitong	0.056	0.022	0.088	0.055	0.033	2.49	2.45	1.57	1.60	0.98
Makaba	0.069	0.053	—	0.113	—	1.29	2.11	—	—	1.64
Ichiigashi	0.121	0.061	0.214	0.120	0.076	1.98	1.97	1.77	1.78	1.00
Yachidamo	0.093	0.051	—	0.129	—	1.83	2.55	—	—	1.39
Mizunara	0.116	0.048	0.206	0.117	0.045	2.40	2.42	1.78	1.77	1.01
Keyaki	0.199	0.129	0.284	0.193	0.125	1.55	1.50	1.43	1.47	0.97
Mean	—	—	—	—	—	2.06	2.18	1.69	1.68	1.10

3 軸方向のヤング係数および 45° 方向のヤング係数を第 16 表に総括し、これらの相互関係比を第 17 表に示す。いま 3 軸方向のみについてみれば、どの樹種でも繊維方向 (L) が最大で、放射方向 (R) がこれにつき、接線方向 (T) が最小となっている。 E_R/E_L の値はアピトンの 0.056 からケヤキの 0.199, E_T/E_L の値はアピトンの 0.022 からケヤキの 0.129 の範囲に分散している。また、 E_R/E_T の値はマカバの 1.29 からトドマツの 3.07 の範囲にあり、全樹種を通じてみると、 E_R は E_T の約 2 倍前後となっている。2 軸とそれぞれ 45° をなす目切れ試験片では、柁目面が 45° に目切れている方が板目面の場合より大きく、 E_{LR-45}/E_{LT-45} の値はエゾマツの 1.37 からトドマツの 2.00 の範囲に分散し、全樹種の平均値は約 1.68 となっている。木口面の年輪走向が荷重方向と 45° をなしている場合のヤング係数 E_{RT-45} は応力—歪曲線からもわかるように、針葉樹材と広葉樹材とはややその傾向が異なる。すなわち、針葉樹材では比例限度が小さいにもかかわらず、比例限度がきわめて大きいので、ヤング係数は非常に小さく、 E_T の約 20% 前後で、スギ、トドマツ、エゾマツなどでは E_L のわずか 1% にも満たない値となっている。広葉樹散孔材、輻射孔材では E_T より約 30% 前後大きな値となり、環孔材では E_T とほとんど同じか、あるいはわずかに小さくなっている。

なお、 E_{LT-45} と E_R の値は結果的にはかなり接近しており、全樹種を通じての E_{LT-45}/E_R の値は 1.10 である。また、 E_{LR-45}/E_R の値は 1.69 となり、 E_{LT-45}/E_T の値は 2.18 となっている。

つぎに、ヤング係数を測定する鏡式歪計をとりつける面を変えた場合のヤング係数を比較すると第 18 表のごとくなる。 E_L についてみれば、どの樹種でも板目面で求めた値と柁目面で求めた値はほとんど差を示さない。 E_R , E_T については、木口面で求めた値と柁目面または板目面で求めた値とはほぼ近似しているが、トドマツの E_R , スギ、トドマツ、ミズナラの E_T などは木口面測定の値がやや大きくなっている。 E_{RT-45} についても、木口面で求めた値とこれと直角をなす他の面で求めた値とは接近しているが、アカマツでは木口面の値が小さくなっている。なお、この報告におけるヤング係数は E_L は柁目面、その他は木口面で求めた値を採用した。

ヤング係数 (E_L) と比重 (R_n) の関係を第 14 図に示すと、一般に比重が増加するにつれてヤング係数も大きくなる傾向はみとめられる。しかし、必ずしも比重のみにより一義的に定まらないで、木材の構造

第 18 表 測定面の差異によるヤング係数の比較
Table 18. Effect of measured plane on Young's modulus

Species	E_L	E_R	E_T	E_{RT-45}
	LT-plane LR-plane	RL-plane RT-plane	TL-plane TR-plane	Another plane RT-45 plane
Sugi	1.04	0.99	0.75	0.95
Todomatsu	1.01	0.81	0.81	0.96
Yezomatsu	0.98	0.90	0.95	0.98
Akamatsu	0.99	0.94	0.97	1.14
Buna	0.98	0.97	0.98	1.00
Apitong	1.04	1.03	1.05	1.06
Makaba	1.01	1.00	1.01	—
Ichiigashi	1.00	1.03	1.03	1.04
Yachidamo	1.00	1.05	1.00	—
Mizunara	1.04	1.01	0.87	1.00
Keyaki	1.02	1.01	1.01	0.98

組織の特性差に依存する場合がある。すなわち、比重がほぼ等しいマカバとケヤキを比較すれば、 E_L の値はマカバが大きく、 E_R および E_T の値はケヤキの方がいじりしく大きくなっている。また、比重のほぼ等しいアピトンとミズナラを比較すると、 E_L はアピトンが大きく約 2 倍となつてゐるが、 E_R 、 E_T はむしろアピトンの方がわずかであるが小さくなつてゐる。

5.2 ポアソン比 (μ)

さきに述べたごとく基礎常数としては 6 つのポアソン比があるが、 $S_{ik}=S_{ki}$ なる関係式をつかえば、実験的には絶対値の大きな μ_{LR} 、 μ_{LT} 、 μ_{RT} などを求めればよいことになる。そこでまず、 μ_{TR}/E_T と μ_{RT}/E_R の値を実測値から求め、 $S_{23}=S_{32}$ の関係を検討してみた。その結果を第 19 表に示すが、スギ、トドマツ、マカバ以外は概して良好な適合がみられ、全樹種につ

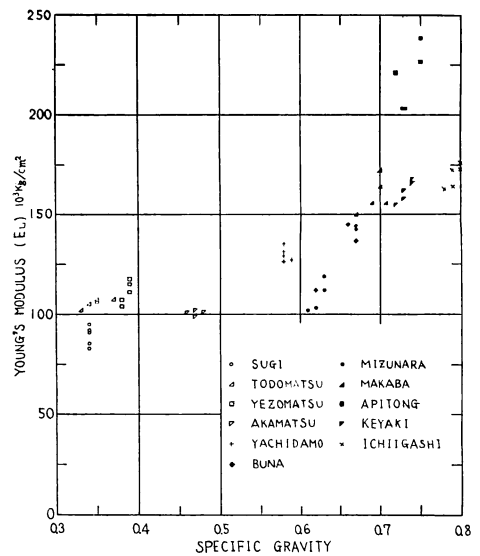
いての S_{23}/S_{32} の値は約 0.96 となつてゐる。しかし、 μ_{TL} 、 μ_{RL} の値は絶対値がきわめて小さいため、この実験条件では安定した数値を得ることができなかつたので $S_{ik}=S_{ki}$ なる関係式から算出した。これら 6 つのポアソン比を総括すれば第 20 表のごとくなる。

全樹種を通じてみれば、 μ_{LT} の値はイチイガシの 0.36 からマカバの 0.51、 μ_{LR} の値はヤチダモの 0.51 からアカマツの 0.63 の範囲に分散しているが、針葉樹材と広葉樹材の差や、比重の大小による影響がほとんどみられない。

第 20 表 ポアソン比および相互関係比
Table 20. Summary of Poisson's ratio (μ)

	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RL}^*	μ_{TL}^*	μ_{RT}	μ_{TR}	$\frac{\mu_{LT}}{\mu_{LR}}$	$\frac{\mu_{RT}}{\mu_{TR}}$
Sugi	0.405	0.580	0.0288	0.0172	0.901	0.307	1.44	2.94
Todomatsu	0.378	0.566	0.0371	0.0181	0.884	0.245	1.50	3.61
Yezomatsu	0.385	0.570	0.0297	0.0246	0.638	0.356	1.48	1.79
Akamatsu	0.415	0.628	0.0501	0.0395	0.671	0.315	1.51	2.13
Buna	0.419	0.525	0.0320	0.0208	0.662	0.353	1.25	1.88
Apitong	0.405	0.546	0.0226	0.0122	0.906	0.349	1.35	2.60
Makaba	0.512	0.567	0.0352	0.0303	0.735	0.486	1.11	1.51
Ichiigashi	0.357	0.543	0.0431	0.0331	0.682	0.343	1.53	2.05
Yachidamo	0.388	0.511	0.0361	0.0259	0.650	0.361	1.32	1.80
Mizunara	0.370	0.497	0.0428	0.0239	0.592	0.267	1.35	2.22
Keyaki	0.406	0.576	0.0808	0.0741	0.603	0.414	1.43	1.46
Mean	0.404	0.555					1.39	2.18

μ_{RL}^* 、 μ_{TL}^* =Calculated value



第 14 図 E_L と R_n の関係

Fig. 14 Relation between E_L and R_n

第 19 表 S_{32} と S_{23} の比較

Table 19. Values for S_{23}/S_{32}

Species	S_{32}	S_{23}	S_{23}/S_{32}
	$\frac{\mu_{RT}}{E_R}$ ($10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}$)	$\frac{\mu_{TR}}{E_T}$ ($10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}$)	
Sugi	141.9	115.8	0.82
Todomatsu	85.8	73.1	0.85
Yezomatsu	74.6	74.2	0.99
Akamatsu	55.0	49.6	0.90
Buna	63.7	65.4	1.03
Apitong	74.3	71.2	0.96
Makaba	66.8	56.8	0.85
Ichiigashi	33.4	33.3	1.00
Yachidamo	53.7	54.7	1.02
Mizunara	47.0	50.9	1.08
Keyaki	27.0	28.8	1.07
Mean	—	—	0.96

μ_{LT}/μ_{LR} の値はマカバの 1.11 からイチイガシの 1.53 までであるが、平均すれば約 1.4 程度になっている。また、 μ_{RT} の値は大きく、ミズナラの 0.59 からアピトン の 0.91 におよんでいるが、 μ_{TR} の値は比較的小さく、トドマツの 0.25 からマカバの 0.49 の範囲にある。 μ_{RT}/μ_{TR} の値はマカバの 1.51 からトドマツの 3.61 におよび、平均すれば約 2.2 となっている。なお T 試験片は R 試験片より年輪の曲率影響を受けやすいと考えられるので、実験的には μ_{RT} を求める方がよいと思う。

5.3 セン断弾性係数 (G)

セン断弾性係数の実測法としては、円形または正方形断面棒を振る場合と平板による方法¹¹⁾があるが、ここではさきに述べたごとく、主として JENKIN 方式¹¹⁾を採用し、(3) 式から求めた。なお、 G_{LT} 、 G_{LR} については、 $\frac{1}{E_L}$ の値と $\frac{2\mu_{LT}}{E_L}$ または $\frac{2\mu_{LR}}{E_L}$ の値とがきわめて近似しており、そのうえこれらの値は他の項にくらべてきん少であるので省略し、次式¹¹⁾で求めてもほとんど変わらない。すなわち、

$$G_{LT} \approx \frac{E_{LT-45}}{4 - \frac{E_{LT-45}}{E_T}} \quad G_{LR} \approx \frac{E_{LR-45}}{4 - \frac{E_{LR-45}}{E_R}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

また、今氏¹²⁾ は $\theta = 45^\circ$ の場合に限つて G 、 E_{45} 、 μ_{45} の間に等方性体と同型の関係が成り立つことからセン断弾性係数を求めているが、いま、その方式を G_{RT} について検討してみよう。すなわち、次式

$$G = \frac{E_{45}}{2(1 + \mu_{45})} \quad \dots\dots\dots (10)$$

に E_{RT-45} と μ_{RT-45} の値を代入すれば G_{RT} の値が得られる。これらの結果を第 21 表に総括して示す。 G_{RT} と G_{TR} とはもともと同一のものであり、 S_{23} と S_{32} が等しければ計算値は一致するはずである。この報告では特別の記載がない限り、 S_{32} が関与した G_{RT} を採用することにする。

G_{LR} と G_{LT} を比較すれば、どの樹種でも G_{LR} の値が大きく、 G_{LR}/G_{LT} の値はアピトンの 1.02 からイチイガシの 1.67 に分散し、平均的には 1.36 となっている。(3) 式と (9) 式から求めた G_{LT} および G_{LR} を比較すれば同表の (6)、(8) 欄に示すごとく、きわめて近似している。また (10) 式から求めた G_{RT}^* と (3) 式から求めた G_{RT} 、 G_{TR} の平均値 G_{RT}^+ とを比較すると同表の (11) 欄のごとききわめて

第 21 表 45° 試片から求めたセン断弾性係数
Table 21. Summary of rigidity modulus obtained from oblique compression test

Species	G_{LT} $10^3 kg/cm^2$ (1)	G_{LR} $10^3 kg/cm^2$ (2)	G_{RT} $10^3 kg/cm^2$ (3)	G_{TR} $10^3 kg/cm^2$ (4)	G_{LT}^x $10^3 kg/cm^2$ (5)	G_{LT}^x/G_{LT} (6)	G_{LR}^x $10^3 kg/cm^2$ (7)	G_{LR}^x/G_{LR} (8)	G_{RT}^* $10^3 kg/cm^2$ (9)	G_{RT}^+ $10^3 kg/cm^2$ (10)	G_{RT}^+/G_{RT}^* (11)	G_{LR}/G_{LT} (12)
Sugi	4.70	6.64	0.150	0.151	4.76	1.01	6.55	0.99	0.153	0.151	0.99	1.41
Todomatsu	3.70	5.43	0.179	0.178	3.71	1.00	5.36	0.99	0.173	0.179	1.03	1.47
Yezomatsu	4.67	5.30	0.170	0.170	4.70	1.01	5.24	0.99	0.165	0.170	1.03	1.13
Akamatsu	5.78	8.59	0.464	0.464	5.87	1.02	8.47	0.99	0.495	0.464	0.94	1.49
Buna	8.64	11.4	2.15	2.13	8.64	1.00	11.3	0.99	2.14	2.14	1.00	1.32
Apitong	7.72	7.97	2.37	2.41	7.74	1.00	7.90	0.99	2.36	2.39	1.01	1.02
Makaba	9.43	—	—	—	9.52	1.01	—	—	—	—	—	—
Ichiiigashi	9.96	16.6	4.33	4.34	10.0	1.00	16.2	0.98	4.38	4.34	0.99	1.67
Yachidamo	11.5	—	—	—	11.6	1.01	—	—	—	—	—	—
Mizunara	8.05	10.4	1.58	1.56	8.04	1.00	10.1	0.97	1.63	1.57	0.96	1.29
Keyaki	8.54	12.6	4.43	4.37	8.64	1.01	12.4	0.98	4.36	4.40	1.01	1.48
Mean	—	—	—	—	—	1.01	—	0.99	—	—	1.00	1.36

G_{LT}^x , G_{LR}^x = Value calculated by E_q . 9 G_{RT}^* = Value calculated by E_q . 10

$$G_{RT}^+ = \frac{1}{2}(G_{RT} + G_{TR})$$

接近している。なお、 μ_{RT-45} の値は第 22 表からもわかるように、その値が大きいため実験も容易であり、かつ計算値ともよく一致しているが、 μ_{LT-45} 、 μ_{LR-45} の値は同表の計算値からもわかるように、樹種や試験片によつて符号が変つたり、その絶対値も小さいので、測定を試みたが安定した値をうることができなかつた。以上のごとく、 45° 試片によるせん断弾性係数の結果を述べたが、振り試験により求めた数値とどのような適合度を示すかが今後にのこされた重要な問題であると思う。

5.4 E と G の関係

梁の剛性や異方性板の特性値を決定するに重要な関連をもつものに E/G の値がある。これらを総括したのが第 23 表である。 E_L/G_{LT} の値は針葉樹材ではアカマツの 17.5 からトドマツの 28.4 におよび、平均値は約 22 となつていいる。広葉樹材ではアピトンの 28.4 を除けば、ヤチダモの 11.3 からマカバの 17.0 の範囲で、平均値は約 15 となつていいる。 E_L/G_{LR} の値は針葉樹材の平均値が約 16、広葉樹材はアピトンの 27.5 をのぞいて平均すれば約 10 となつていいる。アピトンは繊維方向のヤング係数や、圧縮および引張強度などが強いにもかかわらず、 E/G の値が非常に大きいので、梁の剛性に対しては不利であることがわかる。

E_R/G_{RT} 、 E_T/G_{RT} などの値は針葉樹材と広葉樹材とで明りような差異がある。すなわち、針葉樹材では E_R/G_{RT} の値が 26.3~57.5、 E_T/G_{RT} の値が 13.7~28.2 となつていいるのに対し、広葉樹材では E_R/G_{RT} の値が 4.71~7.98、 E_T/G_{RT} の値が 2.07~3.33 と小さくなつていいる。なお、 E_T/G_{LT} 、 E_R/G_{LR} の値は針葉樹材と広葉樹材の差異が少なく、 E_T/G_{LT} の値は針葉樹材で 0.56~1.10、広葉樹材で 0.63~1.69、 E_R/G_{LR} の値は針葉樹材で 0.96~1.61、広葉樹材で 0.91~1.77 となつていいる。

5.5 弾性常数の総括と体積圧縮歪係数

この実験で求めた弾性常数を (2) 式の歪係数 S で整理すると第 24 表のごとくなる。なお、 S_{23} と S_{32} は理論的には一致すべきものであるが、実験的には異なつた値となつていいるので両者を表に併示することにした。これらの値を使つて、単位体積 V の木材が静水圧 P をうけ、体積歪 $\delta V/V$ を生ずる場合の体積圧縮歪係数 (Compressibility) K や、この場合のボアソン比に相当する μ_K の値を次式で求めてみよう。

第 22 表 μ_{45} の 値
Table 22. Values of μ_{45}

Species	μ_{RT-45}		M.V./ C.V.	μ_{LR-45}	μ_{LT-45}
	M.V.	C.V.		C.V.	C.V.
Sugi	0.899	0.927	0.97	-0.029	-0.277
Todomatsu	0.998	0.923	1.12	0.299	-0.048
Yezomatsu	1.006	0.942	1.07	0.226	0.018
Akamatsu	0.767	0.887	0.87	0.164	0.055
Buna	0.508	0.502	1.01	-0.052	-0.230
Apitong	0.513	0.509	1.01	0.205	-0.222
Makaba	—	—	—	—	-0.045
Ichiigashi	0.473	0.489	0.97	0.086	0.019
Yachidamo	—	—	—	—	-0.271
Mizunara	0.514	0.565	0.91	0.081	-0.211
Keyaki	0.606	0.579	1.03	0.261	0.265

M. V. = Measured value

C. V. = Calculated value

第 23 表 ヤング係数とせん断弾性係数の関係
Table 23. Summary of values for E/G

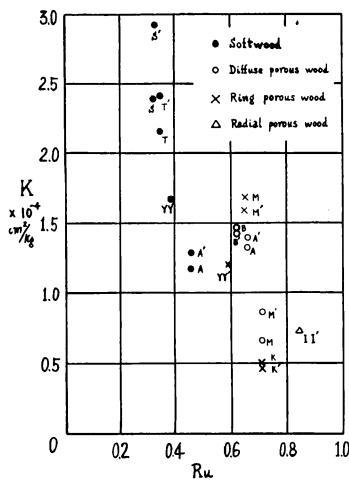
Species	E_L G_{LT}	E_T G_{LT}	E_L G_{LR}	E_R G_{LR}	E_R G_{RT}	E_T G_{RT}
Sugi	19.0	0.56	13.4	0.96	42.3	17.7
Todomatsu	28.4	0.91	19.3	1.90	57.5	18.7
Yezomatsu	23.8	1.03	20.9	1.61	50.3	28.2
Akamatsu	17.5	1.10	11.8	1.42	26.3	13.7
Buna	15.7	0.63	11.9	0.91	4.84	2.51
Apitong	28.4	0.63	27.5	1.53	5.15	2.07
Makaba	17.0	—	—	—	—	—
Ichiigashi	17.0	1.03	10.2	1.23	4.71	2.38
Yachidamo	11.3	—	—	—	—	—
Mizunara	13.7	0.65	10.5	1.21	7.98	3.33
Keyaki	13.1	1.69	8.9	1.77	5.03	3.25

第 24 表 歪係数 S_{ik} および K, μ_K の値

Table 24.

Summary of elastic coefficient S_{ik} , compressibility coefficient K and value of μ_K

Species	S_{11} 10^{-6} cm^2/kg	S_{22} 10^{-6} cm^2/kg	S_{33} 10^{-6} cm^2/kg	S_{12} S_{21} 10^{-6} cm^2/kg	S_{13} S_{31} 10^{-6} cm^2/kg	S_{23} S_{32} 10^{-6} cm^2/kg	S_{44} 10^{-6} cm^2/kg	S_{55} 10^{-6} cm^2/kg	S_{66} 10^{-6} cm^2/kg	K 10^{-4} cm^2/kg	μ_K	R_u
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Sugi	11.21	377	157.5	-6.50	-4.54	$\begin{cases} -141.8 \\ -115.8 \end{cases}$	6670	151	213	$\begin{cases} 2.40 \\ 2.92 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.280 \\ 0.232 \end{cases}$	0.33
Todomatsu	9.52	299	97.1	-5.39	-3.60	$\begin{cases} -85.8 \\ -73.1 \end{cases}$	5590	184	270	$\begin{cases} 2.16 \\ 2.41 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.234 \\ 0.203 \end{cases}$	0.35
Yezomatsu	9.01	208	117.0	-5.14	-3.47	$\begin{cases} -74.6 \\ -74.2 \end{cases}$	5880	189	214	$\begin{cases} 1.68 \\ 1.68 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.249 \\ 0.248 \end{cases}$	0.39
Akamatsu	9.90	157	82.0	-6.22	-4.11	$\begin{cases} -55.0 \\ -49.6 \end{cases}$	2160	116	173	$\begin{cases} 1.18 \\ 1.29 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.262 \\ 0.241 \end{cases}$	0.46
Buna	7.35	185	96.2	-3.86	-3.08	$\begin{cases} -63.7 \\ -65.4 \end{cases}$	465	87.7	116	$\begin{cases} 1.47 \\ 1.44 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.245 \\ 0.251 \end{cases}$	0.62
Apitong	4.57	204	82.0	-2.49	-1.85	$\begin{cases} -74.3 \\ -71.2 \end{cases}$	422	125	130	$\begin{cases} 1.33 \\ 1.40 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.270 \\ 0.282 \end{cases}$	0.66
Makaba	6.25	117	90.9	-3.54	-3.20	$\begin{cases} -66.8 \\ -56.8 \end{cases}$	—	—	106	$\begin{cases} 0.671 \\ 0.871 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.343 \\ 0.297 \end{cases}$	0.71
Ichiigashi	5.92	97.1	49.0	-3.21	-2.11	$\begin{cases} -33.4 \\ -33.3 \end{cases}$	231	60.2	100	$\begin{cases} 0.746 \\ 0.748 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.255 \\ 0.254 \end{cases}$	0.84
Yachidamo	7.69	152	82.6	-3.93	-2.98	$\begin{cases} -53.7 \\ -54.7 \end{cases}$	—	—	87	$\begin{cases} 1.21 \\ 1.19 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.241 \\ 0.254 \end{cases}$	0.59
Mizunara	9.17	190	79.4	-4.56	-3.39	$\begin{cases} -47.0 \\ -50.9 \end{cases}$	633	96.2	124	$\begin{cases} 1.70 \\ 1.61 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.197 \\ 0.211 \end{cases}$	0.65
Keyaki	8.93	69.4	44.8	-5.14	-3.63	$\begin{cases} -27.0 \\ -28.8 \end{cases}$	226	79.4	117	$\begin{cases} 0.516 \\ 0.480 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.291 \\ 0.305 \end{cases}$	0.71

第 15 図 K と R_u の関係Fig. 15 Relation between K & R_u

$$K = \frac{\delta V}{V} = S_{11} + S_{22} + S_{33} + 2(S_{23} + S_{31} + S_{12}) \dots (11)$$

$$\mu_K = -\frac{S_{12} + S_{13} + S_{22}}{S_{11} + S_{22} + S_{33}} \dots (12)$$

計算結果は第 24 表に併示するが、 K の値は針葉樹材がやや大きく、アカマツの 1.18 からスギの 2.92、広葉樹材ではケヤキの 0.48 からブナの 1.47 になっている。

これを比重との関連でみれば第 15 図のごとくなり、比重が増加するほど K の値は小さくなり、圧縮されにくくなる傾向を示している。 μ_K の値は比重の大小や、針葉樹材、広葉樹材の別による影響が少なく、針葉樹材ではトドマツの 0.203 からスギの 0.280、広葉樹材ではミズナラの 0.197 からマカバの 0.343 の範囲に分散している。弾性常数の相互間の関係値がかなり安定した数値で求められると相互間の推定に役だつばかりでなく、理論式の数値計算において有効な場合が多い。

6. 比例限度力（基準応力）の異方性

強度部材の設計における基準応力としてはいろいろ考えられるが、圧縮試験で 3 軸方向とも統一的に決定できるのは比例限度力のみである。すなわち、応力—歪曲線の項で述べたごとく、繊維方向圧縮試験では破壊応力の決定が容易であるが、接線方向および放射方向の圧縮試験では破壊応力の確認が困難であ

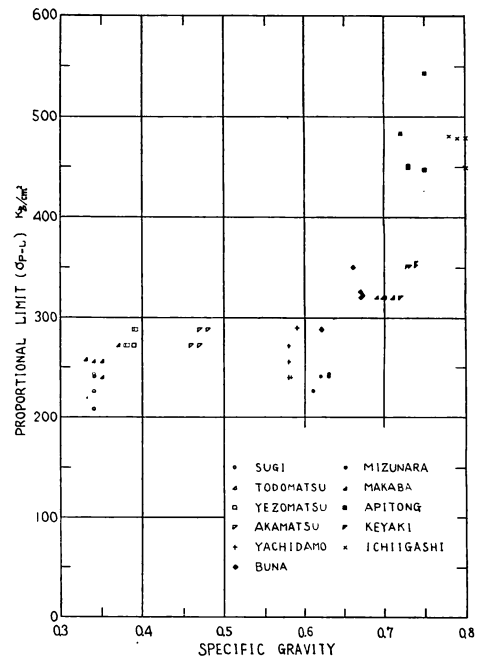
第 25 表 比例限応力と相互関係比
Table 25. Summary of stress at proportional limit (σ_p)

Species	Average						Ratio						
	L	R	T	LR-45	LT-45	RT-45	R	T	LR-45	LT-45	RT-45	R	LR-45
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	L	L	L	L	L	T	LT-45
Sugi	231	13.5	7.05	33.7	18.0	3.15	0.058	0.031	0.146	0.078	0.014	1.92	1.87
Todomatsu	256	19.8	10.0	33.5	19.5	3.10	0.077	0.039	0.131	0.076	0.012	1.98	1.72
Yezomatsu	278	18.5	12.0	34.9	26.9	3.60	0.067	0.043	0.126	0.097	0.013	1.54	1.30
Akamatsu	280	25.0	18.0	51.1	39.4	8.10	0.089	0.064	0.183	0.141	0.029	1.39	1.30
Buna	321	35.9	21.8	66.6	52.0	19.3	0.112	0.068	0.207	0.162	0.060	1.65	1.28
Apitong	476	28.8	17.5	42.9	35.9	16.3	0.061	0.037	0.090	0.075	0.034	1.65	1.19
Makaba	320	36.6	32.2	—	53.0	—	0.114	0.101	—	0.166	—	1.14	—
Ichigashi	472	57.0	36.8	89.0	68.3	37.8	0.121	0.078	0.188	0.145	0.080	1.55	1.30
Yachidamo	260	39.3	26.5	—	48.4	—	0.151	0.102	—	0.186	—	1.48	—
Mizunara	238	46.6	19.2	77.6	52.9	17.6	0.196	0.081	0.326	0.222	0.074	2.43	1.47
Keyaki	346	68.4	51.7	96.4	75.1	41.3	0.198	0.149	0.279	0.217	0.119	1.32	1.28

る。また、放射方向圧縮の場合は、針葉樹材および広葉樹材の一部はかなり明確な降伏点をもつが、広葉樹材の多くはその点を確認することが困難である。さらに、接線方向圧縮の場合はどの樹種でもこのような特性点の確認は一般に困難である。45° 試験片でも、破壊応力や降伏応力の確認できる場合はきわめて少ない。

したがって、ここでは基準応力として比例限応力を採用することにする。なお、この実験における比例限の決定法¹⁸⁾は JIS によらないで、応力—歪曲線の直線域における上限の応力を比例限応力とし、それに対応する歪を比例限歪としている。鏡式歪計で求めた値を総括し、相互間の比を求めると第 25 表のごとくなる。主軸の方向では L, R, T の順に低減してゆき、R/T の値はマカバの 1.14 からミズナラの 2.43 に分散しているが、平均値は約 1.64 となる。R/L の値は針葉樹材およびアピトンが小さく、散孔材、輻射孔材、環孔材の順に大きくなっている。45° 試験片では LR-45, LT-45, RT-45 の順に低減し、LR-45/LT-45 の値はアピトンの 1.19 からスギの 1.87 に分散し、平均値は 1.41 となつている。なお、針葉樹材の RT-45 の値はきわめて小さく、T 方向の 1/2~1/3 程度で、L 方向のわずか 1~3% となつているが、広葉樹材の RT-45 の値はケヤキ以外は T 方向の値に接近している。

比例限応力と比重の関係を示せば第 16 図のごとくなり、比重が増加するにしたがつて、比例限応力も大きくなるが、必ずしも比重のみで一義的に決定することはできない。たとえば、比重のほぼ等しいアピトンとミズナラをくらべると、L 方向ではアピトンが大きく約 2 倍程度となつているが、R 方向ではケヤ



第 16 図 σ_{p-L} と R_u の関係
Fig. 16 Relation between σ_{p-L} and R_u

第 26 表 比例限歪と相互関係比
Table 26. Summary of strain at proportional limit (ϵ_p)

Species	Average						Ratio						
	L %	R %	T %	LR-45 %	LT-45 %	RT-45 %	R L	T L	LR-45 L	LT-45 L	RT-45 L	R T	LR-45 LT-45
Sugi	0.259	0.214	0.266	0.260	0.268	0.539	0.83	1.03	1.00	1.03	2.08	0.80	0.97
Todomatsu	0.245	0.193	0.297	0.236	0.278	0.447	0.79	1.21	0.96	1.13	1.82	0.65	0.85
Yezomatsu	0.251	0.216	0.251	0.268	0.284	0.540	0.86	1.00	1.07	1.13	2.15	0.86	0.94
Akamatsu	0.279	0.207	0.284	0.255	0.324	0.460	0.74	1.02	0.91	1.16	1.65	0.73	0.79
Buna	0.238	0.347	0.408	0.309	0.400	0.299	1.46	1.71	1.30	1.68	1.26	0.85	0.77
Apitong	0.218	0.237	0.357	0.224	0.302	0.227	1.09	1.64	1.03	1.39	1.04	0.66	0.74
Makaba	0.201	0.333	0.377	—	0.294	—	1.66	1.88	—	1.46	—	0.88	—
Ichiigashi	0.280	0.286	0.356	0.247	0.336	0.293	1.02	1.27	0.88	1.20	1.05	0.80	0.74
Yachidamo	0.201	0.325	0.403	—	0.289	—	1.62	2.00	—	1.44	—	0.81	—
Mizunara	0.220	0.370	0.367	0.346	0.419	0.359	1.68	1.67	1.57	1.90	1.63	1.01	0.83
Keyaki	0.309	0.307	0.358	0.303	0.348	0.295	1.00	1.16	0.98	1.13	0.95	0.86	0.87

キの方が大きく約 1.6 倍となっている。

比例限歪 (ϵ_p) 歪の大小は部材の設計や破損機構を取り扱う場合に重要な因子となるが、この平均値および相互間の比を示すと第 26 表のごとくなる。ヤング係数や、比例限応力にくらべるとその異方性は明確ではない。針葉樹材の L 方向と T 方向とはほぼ近似しているが R 方向は両者よりやや小さくなっている。広葉樹材では L 方向が小さく、R, T の順に大きくなっている。R/T の値はトドマツの 0.65 からミズナラの 1.01 におよんでいるが、平均値は約 0.81 となっている。45° 試験片についてみれば、針葉樹材では RT-45 がもつとも大きく、LT-45, LR-45 の順に小さくなるが、広葉樹材では LT-45 がもつとも大きく、LR-45 と RT-45 の値はイチイガシ以外は近似している。

比例限仕事量 (W_p) これは単位体積当りの弾性エネルギーで、材料の衝撃荷重に対する抵抗上重要なものであり、次式で計算される。

$$W_p = \frac{1}{2} \sigma_p \epsilon_p = \frac{1}{2} \frac{\sigma_p^2}{E} = \frac{1}{2} E \epsilon_p^2$$

第 27 表 比例限仕事量と相互関係比
Table 27. Summary of work to proportional limit (W_p)

Species	Average						Ratio						
	L $\frac{kg \cdot cm}{cm^3}$	R $\frac{kg \cdot cm}{cm^3}$	T $\frac{kg \cdot cm}{cm^3}$	LR-45 $\frac{kg \cdot cm}{cm^3}$	LT-45 $\frac{kg \cdot cm}{cm^3}$	RT-45 $\frac{kg \cdot cm}{cm^3}$	R L	T L	LR-45 L	LT-45 L	RT-45 L	R T	LR-45 LT-45
Sugi	0.300	0.0145	0.0094	0.0438	0.0243	0.0084	0.048	0.031	0.146	0.081	0.028	1.54	1.80
Todomatsu	0.314	0.0191	0.0148	0.0395	0.0274	0.0069	0.061	0.047	0.126	0.087	0.022	1.29	1.44
Yezomatsu	0.349	0.0200	0.0151	0.0469	0.0382	0.0097	0.057	0.043	0.134	0.109	0.028	1.32	1.23
Akamatsu	0.391	0.0259	0.0256	0.0652	0.0637	0.0187	0.066	0.065	0.167	0.163	0.048	1.01	1.02
Buna	0.380	0.0625	0.0449	0.1030	0.1029	0.0289	0.164	0.118	0.271	0.271	0.076	1.39	1.00
Apitong	0.520	0.0342	0.0313	0.0481	0.0542	0.0185	0.066	0.060	0.093	0.104	0.036	1.09	0.89
Makaba	0.322	0.0611	0.0608	—	0.0787	—	0.190	0.189	—	0.245	—	1.01	—
Ichiigashi	0.661	0.0818	0.0658	0.1099	0.1153	0.0569	0.124	0.100	0.166	0.174	0.086	1.24	0.95
Yachidamo	0.262	0.0643	0.0536	—	0.0699	—	0.245	0.204	—	0.267	—	1.20	—
Mizunara	0.262	0.0864	0.0352	0.1351	0.1112	0.0318	0.330	0.134	0.516	0.425	0.121	2.45	1.21
Keyaki	0.534	0.1053	0.0925	0.1461	0.1305	0.0610	0.197	0.173	0.274	0.244	0.114	1.14	1.12

この平均値および相互間の比を示すと第 27 表のごとくなる。3 軸方向についてみれば、L 方向が最も大きく、R、T の順に小さくなり、R/T の値はマカバの 1.01 からミズナラの 2.45 に分散しているが、平均値は約 1.33 となつている。45° 試験片ではどの樹種でも RT-45 が最も小さく、L 方向のわずか 2~12% 程度となつている。LR-45/LT-45 の値はアビトンの 0.89 からスギの 1.80 に分散しているが、平均値は約 1.18 となつている。

7. 平面問題における特性値

木材の平面問題については外国ではかなり広範な研究^{2), 5), 7), 20)}がなされているが、わが国でも池田氏¹¹⁾、樋口氏¹⁰⁾らの貴重な研究成果がある。いま、x, y を平面応力状態にある直交異方性板の主軸の方向に一致させると、応力と歪の関係は次式で簡単にあらわされる。

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \sigma_y \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_x} \sigma_x \quad \gamma_{xy} = -\frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy} \quad \dots\dots (13)$$

そして、この場合の応力分布を支配する適合方程式は次式、

$$\frac{1}{E_y} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \left(-\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\mu_{xy}}{E_x} \right) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_x} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad \dots\dots (14)$$

であらわされ、問題はこの式を境界条件にしたがつて解くことにきずる。ここに、F は AIRY の応力函数で、平均応力が次式で与えられるような x, y の函数である。

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$$

いま、(14) 式中の弾性常数から導かれる新しい 2 つの常数を α_1, α_2 とすれば (14) 式は便宜的に次のごとくあらわされ、

$$\left(\alpha_1 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right) \left(\alpha_2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \dots\dots (14')$$

これらの α_1, α_2 によつて異方性板の特性を示すことができる。すなわち、池田氏¹¹⁾はこの α_1, α_2 をつぎのように e, g であらわし、STAMER, HÖRIG の資料を使つて計算値を得ている。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 \alpha_2 &= e^2 \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= e(2+g) \\ \therefore e &= \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \\ g &= \frac{\sqrt{E_x E_y}}{G_{xy}} - 2\sqrt{\mu_{xy} \mu_{yx}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (15)$$

また、樋口氏¹⁰⁾はこの α_1, α_2 をつぎのごとく k_r, k_s であらわし、これらを示性数と称し、直交二次弾性論の境界値問題を解くとともに、KEYLWERTH の資料を使つて LT 面における計算値を得ている。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 \alpha_2 &= k_r^2 k_s^2 = \frac{E_x}{E_y}, \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= k_r^2 + k_s^2 = \frac{E_x}{G_{xy}} - 2\mu_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots (16)$$

なお、樋口氏は平面歪における示性数も次式であらわしている。

$$\left. \begin{aligned} k_r^2 k_s^2 &= \frac{1 - \mu_{yz} \mu_{zx}}{1 - \mu_{xz} \mu_{zy}} \cdot \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \end{Bmatrix} \\ k_r^2 + k_s^2 &= \frac{1}{1 - \mu_{xz} \mu_{zx}} \left\{ \frac{E_x}{G_{xy}} - 2(\mu_{xy} + \mu_{xz} \mu_{zy}) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

第 28 表 $k_r, k_s; e, g$ の値 (板目板)

Table 28. Characteristic coefficients of wooden plate (LT-plate)

Species	Plane stress (平面応力)							Plane strain (平面歪)			
	k_r	k_s	$1/k_r$	$1/k_s$	e	$1/e$	g	k_r	k_s	$1/k_r$	$1/k_s$
Sugi	3.959	1.466	0.253	0.682	5.802	0.172	1.071	3.965	1.252	0.252	0.799
Todomatsu	5.103	1.097	0.196	0.912	5.599	0.179	2.865	5.099	0.979	0.196	1.021
Yezomatsu	4.643	1.036	0.215	0.965	4.809	0.208	2.706	4.654	0.916	0.215	1.092
Akamatsu	3.895	1.024	0.257	0.977	3.988	0.251	2.066	3.892	0.772	0.257	1.295
Buna	3.565	1.408	0.281	0.710	5.018	0.199	0.927	3.578	1.236	0.279	0.809
Apitong	5.052	1.323	0.198	0.756	6.684	0.150	2.080	5.058	1.098	0.198	0.911
Makaba	3.814	1.134	0.262	0.882	4.326	0.231	1.660	3.810	0.913	0.262	1.095
Ichiigashi	3.843	1.054	0.260	0.949	4.051	0.247	1.921	3.843	0.930	0.260	1.075
Yachidamo	2.781	1.596	0.360	0.627	4.438	0.225	0.317	2.830	1.382	0.353	0.724
Mizunara	3.253	1.401	0.307	0.714	4.557	0.219	0.750	3.261	1.292	0.307	0.774
Keyaki	3.357	0.831	0.298	1.203	2.789	0.358	2.289	3.367	0.730	0.297	1.370

第 29 表 $k_r, k_s; e, g$ の値 (柁目板)

Table 29. Characteristic coefficients of wooden plate (LR plate)

Species	Plane stress (平面応力)							Plane strain (平面歪)			
	k_r	k_s	$1/k_r$	$1/k_s$	e	$1/e$	g	k_r	k_s	$1/k_r$	$1/k_s$
Sugi	3.375	1.111	0.296	0.900	3.748	0.267	1.368	3.391	0.945	0.295	1.058
Todomatsu	4.244	0.752	0.236	1.330	3.193	0.313	3.820	4.248	0.669	0.235	1.495
Yezomatsu	4.417	0.815	0.226	1.227	3.603	0.278	3.599	4.419	0.722	0.226	1.385
Akamatsu	3.179	0.905	0.315	1.105	2.877	0.348	1.798	3.184	0.813	0.314	1.230
Buna	3.123	1.158	0.320	0.864	3.616	0.277	1.067	3.132	1.016	0.319	0.984
Apitong	5.097	0.829	0.196	1.206	4.227	0.237	4.294	5.098	0.688	0.196	1.453
Ichiigashi	2.914	0.988	0.343	1.012	2.878	0.347	1.289	2.916	0.872	0.343	1.147
Mizunara	2.958	0.994	0.338	1.006	2.941	0.340	1.312	2.958	0.918	0.338	1.089
Keyaki	2.720	0.824	0.368	1.214	2.241	0.446	1.604	2.722	0.729	0.367	1.372

第 30 表 $k_r, k_s; e, g$ の値 (木口板)

Table 30. Characteristic coefficients of wooden plate (RT plate)

Species	Plane stress (平面応力)							Plane strain (平面歪)			
	k_r	k_s	$1/k_r$	$1/k_s$	e	$1/e$	g	k_r	k_s	$1/k_r$	$1/k_s$
Sugi	6.362	0.243	0.157	4.115	1.548	0.646	24.296	6.397	0.242	0.156	4.132
Todomatsu	7.465	0.235	0.134	4.255	1.753	0.570	29.885	7.515	0.234	0.133	4.274
Yezomatsu	6.999	0.191	0.143	5.236	1.334	0.749	34.731	7.037	0.189	0.142	5.291
Akamatsu	4.987	0.278	0.201	3.597	1.386	0.721	15.834	5.034	0.275	0.199	3.636
Buna	1.664	0.863	0.601	1.159	1.436	0.696	0.519	1.668	0.862	0.600	1.160
Apitong	1.486	1.062	0.673	0.942	1.578	0.634	0.138	1.488	1.062	0.672	0.942
Ichiigashi	1.606	0.876	0.623	1.142	1.407	0.711	0.380	1.609	0.873	0.622	1.145
Mizunara	2.533	0.612	0.395	1.634	1.549	0.645	2.352	2.547	0.609	0.393	1.642
Keyaki	1.835	0.678	0.545	1.475	1.244	0.804	1.046	1.847	0.670	0.541	1.493

等方性材料に対しては、 $e=1$ 、 $g=0$ であり、 $k_r=k_s=1$ であるから、計算値がこれら等方性の値と離れるほど異方性の程度が高いと判断してもよいかもしれない。各樹種の3主要面につき計算した結果を第28, 29, 30表に示す。表中の逆数は問題となつている平面において、直交する関係軸をとりかえて計算した場合の特性値である。なお、両氏の係数の間には当然 $e^2=k_r^2 k_s^2$ 、 $e(2+g)=k_r^2+k_s^2$ なる関係があるので、主として k_r 、 k_s の値について述べることにする。

7.1 k_r 、 k_s 、 e 、 g の値について

平面応力における k_r の値はアビトンのをのぞけば、どの主要面でも広葉樹材より針葉樹材の方が1より離れているが、 k_s の値は区々としている。また、同一樹種の k_r の値は LR 面より LT 面の方が1より離れているが、 k_s の値は区々としている。ただ、RT 面では k_r 、 k_s の両方とも針葉樹材の方が広葉樹材より1から離れ、木口面における異方性の程度は針葉樹材の方が高いことを示している。アビトンについては、LT、LR 面では針葉樹材に類似の値を示しているが、RT 面では比較的1に近づいている。平面歪における k_r 、 k_s の値は平面応力の場合の値に近似しているので、同様の傾向を示している。なお、 e の値についてみれば、LT 面の値がもつとも大きく、LR 面、RT 面の順に小さくなり、1に近づいてゆく。どの面でもケヤキの値がもつとも小さくなっている。しかし、 g の値については区々としており、ケヤキでも0からかなり離れている。針葉樹材の g の値がきわめて大きいのは第23表で示したごとく、 E_R/G_{RT} の値が非常に大きいためである。

7.2 円孔を有する木材平板の応力集中率について

ここで求めた特性値を用いて、第17図に示すような、1つの円孔のある十分広い板を、孔からかなり遠いところで1方向に一樣に引張る場合の孔縁の応力集中率を考えてみよう。

一樣の引張力 P_0 が板の繊維方向と一致するとき、孔縁の点 N に最大の引張応力 (σ_x) を生じ、その値は示性数 k_r 、 k_s を用いればつぎの式であらわされる。

$$\sigma_x = (1 + k_r + k_s) P_0 \dots\dots\dots (18)$$

同じ場合の最大の圧縮応力 (σ_y) は点 M におこり、

$$\sigma_y = -\frac{1}{k_r k_s} P_0 \dots\dots\dots (19)$$

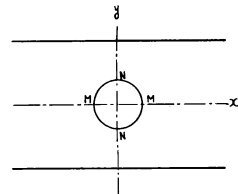
となる。

また、その板の繊維に直角方向に引張れば、

$$\sigma_y = \left\{ 1 + \frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_s} \right\} P_0 \text{ (引張)} \dots\dots\dots (20)$$

$$\sigma_x = -k_r k_s P_0 \text{ (圧縮)} \dots\dots\dots (21)$$

となる。ただ、ここで注意すべきことはこれらの応力の集中はきわめて局部的であるということである。等方性材料では周知のごとく $\sigma_x = +3 P_0$ 、 $\sigma_y = -P_0$ であるが、異方性材料では第31表に示すごとく、樹種によりかなり異なっている。すなわち、板目板 (LT plate) を L 方向に引張るときに集中係数は N 点で 5.19 から 7.38、M 点で -0.150 から -0.358 となり、これを T 方向に引張るときは M 点で 1.93 から 2.50、N 点で -2.79 から -6.68 となる。柎目板 (LR plate) についてもほぼ同様のことがいえるが、木口板 (RT plate) では針葉樹材と広葉樹材の差が明りようとなり、広葉樹材の方が針葉樹材より



第17図 円孔のある直交異方性板の一樣引張 (P_0)

(x = 繊維方向, y = 接線方向)

Fig. 17 Effect of circular hole on stress distribution in orthotropic plate subjected to uniform tension (P_0) ($x=L$, $y=T$)

第 31 表 円孔を有する木材平板における応力集中度

Table 31. Stress concentration coefficients on edge of small hole in wooden plate subjected to uniform tension

Classification Direction of tension Quantity Species	LT-plate				LR-plate				RT-plate			
	L		T		L		R		R		T	
	$1+k_r$ $+k_s$	1 $k_r k_s$	$1+\frac{1}{k_r}$ $+\frac{1}{k_s}$	$-k_r k_s$	$1+k_r$ $+k_s$	1 $k_r k_s$	$1+\frac{1}{k_r}$ $+\frac{1}{k_s}$	$-k_r k_s$	$1+k_r$ $+k_s$	1 $k_r k_s$	$1+\frac{1}{k_r}$ $+\frac{1}{k_s}$	$-k_r k_s$
Sugi	6.43	-0.172	1.93	-5.80	5.49	-0.267	2.20	-3.75	7.61	-0.646	5.27	-1.55
Todomatsu	7.20	-0.179	2.11	-5.60	6.00	-0.313	2.57	-3.19	8.70	-0.570	5.39	-1.75
Yezomatsu	6.68	-0.208	2.18	-4.81	6.23	-0.278	2.45	-3.60	8.19	-0.749	6.38	-1.34
Akamatsu	5.92	-0.251	2.23	-3.99	5.08	-0.348	2.42	-2.88	6.27	-0.721	4.80	-1.39
Buna	5.97	-0.199	1.99	-5.02	5.28	-0.277	2.18	-3.62	3.53	-0.696	2.64	-1.44
Apitong	7.38	-0.150	1.95	-6.68	6.93	-0.237	2.40	-4.23	3.55	-0.634	2.61	-1.58
Makaba	5.95	-0.231	2.14	-4.33	—	—	—	—	—	—	—	—
Ichiigashi	5.90	-0.247	2.21	-4.05	4.90	-0.347	2.36	-2.88	3.48	-0.711	2.76	-1.41
Yachidamo	5.38	-0.225	1.99	-4.44	—	—	—	—	—	—	—	—
Mizunara	5.65	-0.219	2.02	-4.56	4.95	-0.340	2.34	-2.94	4.15	-0.645	3.03	-1.55
Keyaki	5.19	-0.358	2.50	-2.79	4.54	-0.446	2.58	-2.24	3.51	-0.804	3.02	-1.24
Isotropic Plate	3.00	-1.000	3.00	-1.00	3.00	-1.000	3.00	-1.00	3.00	-1.000	3.00	-1.00

等方性材料の値に近づき、とくにケヤキでこの傾向が顕著である。なお、e, g の値を使うと、(16) 式および (17) 式はつぎのごとくなり、全く同一の結果が得られることはいうまでもない。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \left[1 + 2\sqrt{e(1+g/4)} \right] P_0 \\ \sigma_y &= -\frac{1}{e} P_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

SMITH⁷⁾ は異方性材料のこの種の問題の解析を試み、計算値と実験値がかなりよく適合したと述べているが、切欠けをもつ異方性材料の応力分布問題は今後の重要な研究課題であると考える。

7.3 C_{ik} の値について

(13) 式の応力を歪の項で整理すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= C_{11} \varepsilon_x + C_{21} \varepsilon_y \\ \sigma_y &= C_{12} \varepsilon_x + C_{22} \varepsilon_y \\ \tau_{xy} &= C_{66} \gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

ここに、C_{ik} は S_{ik} であらわされつぎのごとくなる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= \frac{1}{S_{11}\lambda} = \frac{E_x}{\lambda} & C_{22} &= \frac{1}{S_{22}\lambda} = \frac{E_y}{\lambda} \\ C_{66} &= \frac{1}{S_{66}} = G_{xy} & C_{21} &= -\frac{\mu_{yx}}{S_{11}\lambda} = -\frac{E_x \mu_{yx}}{\lambda} \\ C_{12} &= \frac{\mu_{xy}}{S_{22}\lambda} = \frac{E_y \mu_{xy}}{\lambda} = C_{21} & \lambda &= 1 - \mu_{xy} \mu_{yx} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

この C_{ik} の値は木理傾角、年輪傾角 α によつて変化し、C_{ik'} となるが、これらの値から二次元問題、とくに平板の剛性や弾性座屈問題などを取り扱う際に重要な役割をもつ特性値 D_{ik} の計算ができる。すなわち、平板の厚さを Z 方向に h とすれば、

$$D_{ik} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} C_{ik} Z^2 dZ \dots\dots\dots (25)$$

となり、この式と (22) 式からつぎの関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} D_{11} &= C_{11} \frac{h^3}{12} = \frac{h^3}{12 S_{11} \lambda} = \frac{E_x h^3}{12 \lambda} \\ D_{22} &= C_{22} \frac{h^3}{12} = \frac{h^3}{12 S_{22} \lambda} = \frac{E_y h^3}{12 \lambda} \\ D_{66} &= C_{66} \frac{h^3}{12} = \frac{h^3}{12 S_{66}} = \frac{G_{xy} h^3}{12} \\ D_{12} &= C_{12} \frac{h^3}{12} = \frac{\mu_{xy}}{12 S_{22} \lambda} = \frac{E_y \mu_{xy}}{12 \lambda} = D_{21} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

いま、各主要面における λ の値および C_{ik} の値を示せば第 32 表、第 33 表のごとくなる。

λ の値は LT 面および LR 面ではほとんど 1 に近いが、RT 面ではやや小さく約 0.8 程度となつてゐる。したがつて、LT 面および LR 面における C_{11} の値は E_L 、LT 面の C_{22} は E_T 、LR 面の C_{33} は E_R とそれぞれほぼ等しくなつてゐるが、RT 面の C_{22} 、 C_{33} は E_T 、 E_R とはかなり異なつてゐる。また、 C_{66} 、 C_{55} 、 C_{44} の値はいうまでもなく G_{LT} 、 G_{LR} 、 G_{RT} の値である。

第 32 表 λ の値
Table 32. Values of λ

Species	$1-\mu_{LT}^2 \mu_{TL}$ λ_{12}	$1-\mu_{LR}^2 \mu_{RL}$ λ_{13}	$1-\mu_{RT}^2 \mu_{TR}$ λ_{23}
Sugi	0.990	0.988	0.723
Todomatsu	0.990	0.986	0.783
Yezomatsu	0.986	0.989	0.773
Akamatsu	0.975	0.979	0.789
Buna	0.989	0.987	0.766
Apitong	0.993	0.991	0.684
Makaba	0.983	0.982	0.643
Ichiigashi	0.982	0.985	0.766
Yachidamo	0.987	0.986	0.765
Mizunara	0.987	0.984	0.842
Keyaki	0.957	0.967	0.750

このように基礎的に求めたヤング係数、ポア

ソン比、せん断弾性係数などの弾性常数が、異方性材料である木材の弾性的挙動、とくに平板の応力分布や、曲げおよび捩り剛性、弾性座屈などの諸問題を解明するうにきわめて重要な役割をもつことが了解

第 33 表 C_{ik} の値
Table 33. Values of C_{ik}

Species	LT-plane				LR-plane				RT-plane				
	C_{11}	C_{22}	C_{12}	C_{66}	C_{11}	C_{33}	C_{13}	C_{55}	C_{22}	C_{33}	C_{32}	C_{23}	C_{44}
	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$	$10^3 kg/cm^2$
Sugi	90.1	2.67	1.55	4.70	90.3	6.43	2.60	6.64	3.66	8.78	2.69	3.30	0.150
Todomatsu	106	3.42	1.93	3.70	106	10.4	3.95	5.43	4.28	13.1	3.22	3.78	0.179
Yezomatsu	113	4.87	5.84	4.67	112	8.65	3.33	5.30	6.21	11.1	3.94	3.96	0.170
Akamatsu	105	6.51	4.09	5.78	103	12.5	5.17	8.59	8.05	15.5	4.87	6.13	0.464
Buna	137	5.46	2.87	8.64	138	10.5	4.42	11.4	7.05	13.6	4.79	4.66	2.15
Apitong	220	4.93	2.69	7.72	221	12.3	4.99	7.97	7.17	17.8	6.23	6.49	2.37
Makaba	163	8.70	4.93	9.43	163	11.2	5.73	—	13.3	17.1	7.32	9.78	—
Ichiigashi	172	10.5	5.69	9.96	172	20.7	7.39	16.6	13.4	26.6	9.13	9.17	4.33
Yachidamo	132	6.69	3.42	11.5	132	12.3	4.76	—	8.62	15.2	5.71	5.61	—
Mizunara	110	5.32	2.64	8.05	111	12.8	4.74	10.4	6.24	15.0	3.99	3.69	1.58
Keyaki	117	15.0	8.66	8.54	116	28.1	9.36	12.6	19.2	29.7	12.3	11.6	4.43

できると思う。

8. 弾性常数および圧縮比例限度力におよぼす木理傾角の影響

構造用材の品質区分や強度部材の設計にさいしては、フシや目切れなどの欠点影響をどのようにして定量的に評価するかはきわめて重要な課題であるが、さらにまた、構造用合板の設計構成や品質評価にさいしても、その応力—歪関係におよぼす木理傾角の影響は重要な問題点となってくる。ここでは主として、剛性に関するヤング係数、基準応力として重要な圧縮比例限度力などが、木理傾角、年輪傾角 α の変化にしたがつて、各主要面でのどのような値となるかを検討するとともに、ポアソン比やせん断弾性係数についても計算結果を示すことにする。

8.1 弾性常数の変化

いま、L 試験片の LT 面がこれと直交する R 軸のまわりを α° だけ廻転し L'T' 面となつたとすると、(2) 式の S_{11} , S_{12} , S_{66} , S_{23} などとはそれぞれ S_{11}' , S_{12}' , S_{66}' , S_{23}' となりつぎの式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} S_{11}' &= S_{11}m^4 + 2(S_{21} + S_{66})n^2m^2 + S_{22}n^4 = 1/E_{L'} \\ S_{12}' &= (S_{11} + S_{22})m^2n^2 + S_{21}(m^4 + n^4) - S_{66}m^2n^2 = \frac{-\mu_{L'}T'}{E_{L'}} \\ S_{66}' &= 4(S_{11} + S_{22} - 2S_{21})m^2n^2 + S_{66}(m^2 - n^2)^2 = \frac{1}{G_{L'T'}} \\ S_{23}' &= S_{23}m^2 + S_{13}n^2 = \frac{-\mu_{T'}R}{E_{T'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

ここに、 $m = \cos \alpha$, $n = \sin \alpha$ である。なお、LR, RT 主要面についても同様の手続きで計算すればよい。

ヤング係数 (E) LT 面における木理傾角の変化によるヤング係数の値を第 34 表に示す。繊維方向 ($\alpha = 0^\circ$) のヤング係数 E_L を 100 とすれば、 7° をこえたとすでに 20% 前後低減し、 15° 付近ではさらに急激に減少し E_L の 50% 以下になるものが多い。 45° 付近では E_L のわずか 10% 前後となりそれからは徐々に低減しながら板目方向のヤング係数 E_T に近づく。LR 面における E の変化を第 35 表に示す。この場合の低減傾向は LT 面に類似しているが、その低減の程度は LT 面よりやや緩慢である。樹種別にみるとどの場合も針葉樹材やアピトンの低減様相は急激であるが、ケヤキは比較的緩慢で、その他

第 34 表 ヤング係数の変化 (LT 面)
Table 34. Effect of grain angle on Young's modulus (LT plane)

Species	L		Grain angle												T	
	0°	3°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°		
Sugi	100	99	79	47	27	17	11	7.6	5.7	4.5	3.7	3.3	3.0	3.0		
Todomatsu	100	99	70	37	21	13	9.0	6.7	5.3	4.4	3.8	3.4	3.3	3.2		
Yezomatsu	100	99	74	44	25	16	11	8.6	6.9	5.8	5.1	4.6	4.4	4.3		
Akamatsu	100	99	81	51	32	22	16	12	9.8	8.3	7.3	6.7	6.4	6.3		
Buna	100	100	82	56	34	20	14	9.8	7.4	5.9	4.9	4.4	4.1	4.0		
Apitong	100	99	70	36	20	12	7.8	5.5	4.1	3.3	2.8	2.5	2.3	2.2		
Makaba	100	100	81	51	32	21	15	11	8.9	7.4	6.4	5.8	5.5	5.3		
Ichigashi	100	99	81	52	33	22	16	12	9.7	8.2	7.2	6.5	6.2	6.1		
Yachidamo	100	100	87	63	41	27	18	13	9.7	7.7	6.4	5.6	5.2	5.1		
Mizunara	100	100	85	57	37	24	16	13	8.9	7.1	6.0	5.3	4.9	4.8		
Keyaki	100	100	86	61	42	30	24	19	17	15	14	13	13	13		

第 35 表 ヤング係数の変化 (LR 面)
Table 35. Effect of grain angle on Young's modulus (LR plane)

Species	Grain angle														R
	L	0°	3°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°
Sugi	100	100	85	58	39	26	19	15	12	9.7	8.5	7.7	7.3	7.1	
Todomatsu	100	99	82	48	31	21	16	13	12	11	10	10	10	10	
Yezomatsu	100	99	77	46	28	19	15	12	10	9.0	8.3	8.0	7.8	7.7	
Akamatsu	100	100	87	63	44	32	25	20	17	15	14	13	12	12	
Buna	100	100	95	66	42	29	21	16	13	11	9.1	8.3	7.8	7.6	
Apitong	100	99	71	38	23	15	11	8.8	7.4	6.6	6.1	5.8	5.6	5.6	
Ichiiigashi	100	100	89	67	48	35	27	21	18	15	14	13	12	12	
Mizunara	100	100	88	66	47	34	26	21	17	15	13	12	12	12	
Keyaki	100	100	91	72	54	42	34	28	25	23	21	21	20	20	

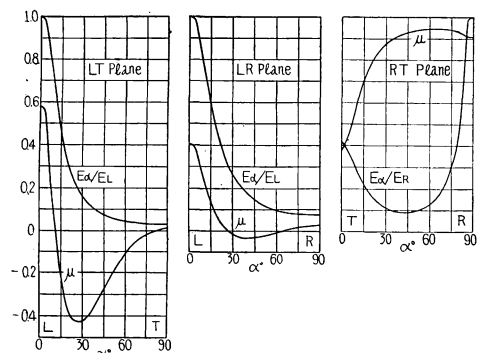
第 36 表 ヤング係数の変化 (RT 面)
Table 36. Effect of grain angle on Young's modulus (RT plane)

Species	R	Grain angle														T
	0°	3°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°		
Sugi Todomatsu Yezomatsu Akamatsu	100	98	61	29	17	12	9.8	9.1	9.5	11	15	22	33	42		
	100	97	53	23	13	8.9	7.2	6.7	7.0	8.2	11	16	26	33		
	100	97	56	25	15	10	8.3	7.7	8.1	9.7	13	22	39	56		
	100	99	72	41	26	19	15	14	15	17	22	31	44	52		
Buna Apitong Ichiiigashi	100	100	98	91	83	75	68	62	58	55	54	53	52	52		
	100	100	98	92	84	75	66	59	53	48	44	42	41	40		
	100	100	98	92	84	76	69	63	59	55	53	52	51	51		
Mizunara Keyaki	100	100	92	77	61	50	43	39	37	37	38	40	41	42		
	100	100	97	90	81	73	67	63	61	61	61	63	64	65		

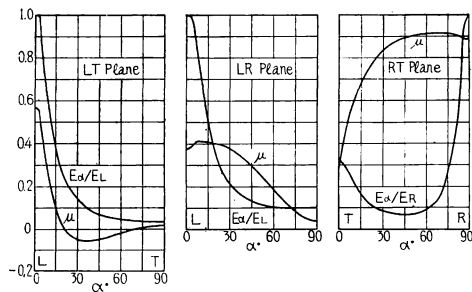
の樹種は中間的傾向を示す。RT 面については第 36 表に示すが、他の場合と異なり、針葉樹材と広葉樹材とで差があるのみならず、広葉樹材でも環孔材と他の材とでは違った傾向を示す。

いま柁目方向 ($\alpha=0^\circ$) のヤング係数 E_R を 100 とすれば、針葉樹材では 7° 付近から急激に低減し、 45° 付近で最小となり、 E_R の約 10% 前後となるがそれからはしだいに増加しながら E_T に近づく。広葉樹材ではどの樹種も 7° 付近ではほとんど低下しないが、その後かなり急に低減し、環孔材では 50° をこえた付近で最小値を示し、それからはきわめてわずかで増加しながら E_T に近づく。ところが、散孔材や輻射孔材で途中では最小値を示さずに徐々に低減しながら E_T に近づく。これらの傾向をポアソン比の変化とともに第 18 図に示すが、RT 面における $\alpha=0^\circ$ の軸が表と図とでは異なっている。

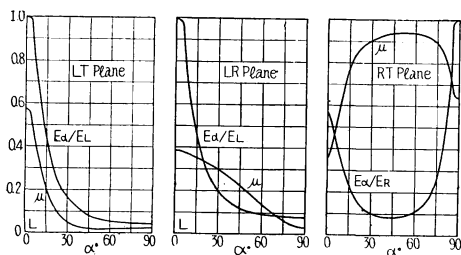
ポアソン比 (μ) 各樹種の主要面におけるポアソン比の変化を示すと第 18 図のごとくなる。LT 面では $\mu_{LT} (\alpha=0^\circ)$ から $\mu_{TL} (\alpha=90^\circ)$ に、LR 面では $\mu_{LR} (\alpha=0^\circ)$ から $\mu_{RL} (\alpha=90^\circ)$ に、RT 面では $\mu_{TR} (\alpha=0^\circ)$ から $\mu_{RT} (\alpha=90^\circ)$ にそれぞれ変化してゆく場合であるが、樹種および面の種類によつて変化曲線の型は区々としている。ただ、LT 面、LR 面では樹種により 30° 付近で負値 (正確には正值) を示すものがあるが、このような場合は 0° から 30° 付近に至る曲線の傾斜はかなり急である。また、RT 面では針葉樹材の変化曲線が特徴的で、ヤング係数の場合とはことなり、 60° 付近で大きな値を示している。 μ_{45} の計算値はすでに第 22 表に示し、G の推定に重要な役割をもつことを指摘したが、



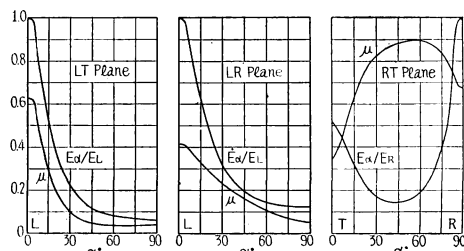
第18図-1 スギ Sugi



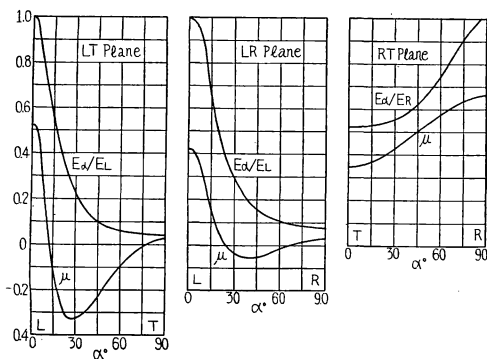
第18図-2 トドマツ Todomatsu



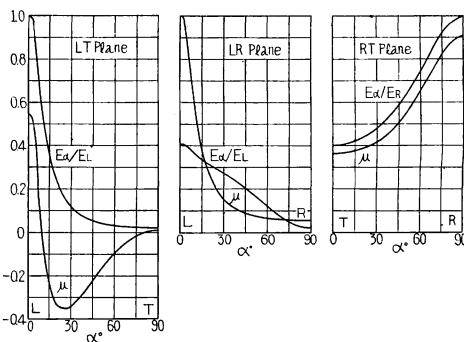
第18図-3 エゾマツ Yezomatsu



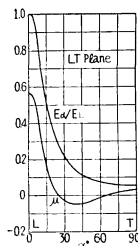
第18図-4 アカマツ Akamatsu



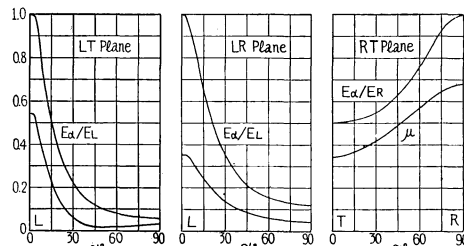
第18図-5 ブナ Buna



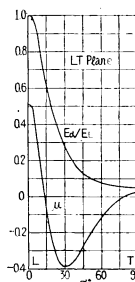
第18図-6 アピトン Apitong



第18図-7 マカバ Makaba

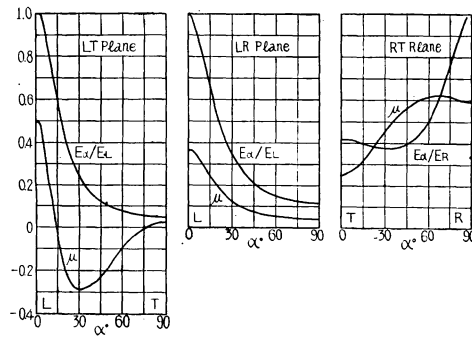


第18図-8 イチイガシ Ichiiigashi

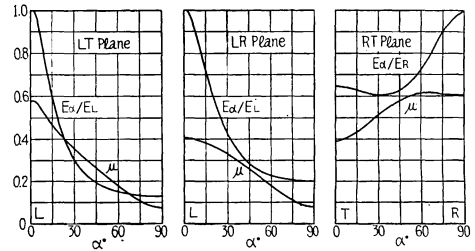


第18図-9
ヤチダモ Yachidamo

第18図 μ および E_a/E におよぼす木理傾角 α の影響
Fig. 18 Effect of grain angle (α) on μ & E_a/E



第 18 図—10 ミズナラ Mizunara



第 18 図—11 ケヤキ Keyaki

μ_{RT-45} の値につきふたたび述べると、実測値と計算値とはかなりよく適合し、針葉樹材ではとくに大きく 0.77 から 1.01 の範囲におよんでいる。これに対し広葉樹材では比較的小さく 0.47 から 0.61 程度で、その平均値は約 0.52 となつている。KEYLWERTH の資料³⁾ から若干の樹種を選び計算した結果を示すと第 37 表のごとくなり、この実験とはほぼ類似の傾向がうかがえる。

さらに、LT-45 試験片および LR-45 試験片の木口面に相当する面でポアソン比 $\mu_{T'R-45}$ および $\mu_{R'T-45}$ を求めた。その実測値と計算値を比較すれば第 38 表のごとくなる。計算値に対する実測値の比は $\mu_{T'R-45}$ で 0.79 から 1.27, $\mu_{R'T-45}$ で 0.89 から 1.18 となり、2, 3 の樹種をのぞいてかなりよく適合していることがわかる。

第 37 表 μ_{RT-45} の値³⁾
Table 37. Calculated values of μ_{RT-45}

せん断弾性係数 (G) これについては直接実験による数値を得ていないので、単に 45° のときの G の値のみを計算し、第 39 表に示す。 G_{LT-45} の値はケヤキ以外は G_{LT} の値より小さく、 G_{LR-45} の値はスギ、ブナ以外は G_{LR} より大きくなつている。また、 G_{RT-45} の値はアビトン以外は G_{RT} より大きくなつている。G の変化については実験をあわせて検討する必要

Species	U %	Ru g/cm ³	μ_{RT-45} C. V.
Douglasie	11...13	0.45...0.51	0.776
Fichte	9.8	0.44	0.816
Spruce	12	0.5	0.883
Kiefer	9.7	0.54	0.813
Birke	8.8	0.62	0.630
Rotbuche	10.5	0.74	0.519
Eiche	11.6	0.67	0.483
Walnuss	11	0.59	0.557

第 38 表 $\mu_{R'T-45}$ および $\mu_{T'R-45}$ の値
Table 38. Values of $\mu_{R'T-45}$ and $\mu_{T'R-45}$

Species	$\mu_{R'T-45}$		S'_{32-45} ($10^{-6} \text{cm}^2/\text{kg}$)		M. V./ C. V.	$\mu_{T'R-45}$		S'_{23-45} ($10^{-6} \text{cm}^2/\text{kg}$)		M. V./ C. V.
	C. V.	M. V.	C. V.	M. V.		C. V.	M. V.	C. V.	M. V.	
Sugi	0.957	0.881	74.2	68.3	0.92	0.409	0.389	60.2	57.2	0.95
Todomatsu	0.643	0.744	45.6	52.8	1.16	0.270	0.345	38.4	48.9	1.27
Yezomatsu	0.518	0.565	39.9	43.5	1.09	0.369	0.361	38.8	38.0	0.98
Akamatsu	0.612	0.646	30.6	32.3	1.06	0.328	0.342	26.9	28.0	1.04
Buna	0.729	0.679	33.8	31.4	0.93	0.455	0.361	34.2	27.1	0.79
Apitong	0.737	0.709	38.4	36.9	0.96	0.438	0.391	36.5	32.6	0.89
Makaba	—	—	—	—	—	0.540	0.562	30.0	31.2	1.04
Ichigashi	0.661	0.585	18.3	16.2	0.89	0.359	0.362	17.7	17.8	1.01
Yachidamo	—	—	—	—	—	0.485	0.436	28.8	26.0	0.90
Mizunara	0.580	0.562	25.8	25.0	0.97	0.344	0.342	27.1	26.9	0.99
Keyaki	0.512	0.607	16.1	19.1	1.18	0.350	0.402	16.2	18.6	1.14

第 39 表 G_{45} の計算値
Table 39. Calculated values of G_{45}

Species	G_{LT-45} 10^3 kg/cm^2	G_{LR-45} 10^3 kg/cm^2	G_{RT-45} 10^3 kg/cm^2
Sugi	2.49	5.62	1.22
Todomatsu	3.14	8.79	1.76
Yezomatsu	4.39	7.52	2.11
Akamatsu	5.56	9.91	2.86
Buna	4.99	9.12	2.45
Apitong	4.68	11.1	2.30
Makaba	7.67	9.65	2.93
Ichiigashi	9.14	16.9	4.70
Yachidamo	6.02	10.5	2.93
Mizunara	4.79	10.5	2.75
Keyaki	11.3	16.4	5.94

がある。

8.2 圧縮比例限応力の変化

木材の強さは弾性常数と同じく、木理傾角、年輪傾角 α によつて変化するが、その関係は一般に HANKINSON 式⁹⁾によつて求められる場合が多い。しかし、ここでは、HENKY VON MISES の歪エネルギー理論にもとづき異方性体の強度を計算する NORRIS 方式²⁰⁾を採用し、両式の比較検討をおこなつてみた。

いま、 xy 面がこれと直交する 2 軸のまわりを α 度だけ廻転したような試験片を圧縮すると、 x, y に関する分応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ が生じ

てくる。 σ_x, σ_y は圧縮応力で、 τ_{xy} はせん断応力である。したがつて、求める圧縮応力 σ_α は HANKINSON によれば次式であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\sigma_\alpha^2} &= \frac{\cos^4 \alpha}{\sigma_x^2} + \frac{2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{\sin^4 \alpha}{\sigma_y^2} \\ \text{または,} \\ \sigma_\alpha &= \frac{\sigma_x \sigma_y}{\cos^2 \alpha \sigma_y + \sin^2 \alpha \sigma_x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

さらに、NORRIS によれば次式であらわされる。

$$\frac{1}{\sigma_\alpha^2} = \frac{\cos^4 \alpha}{\sigma_x^2} + \left[-\frac{1}{\tau_{xy}^2} - \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \right] \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{\sin^4 \alpha}{\sigma_y^2} \dots\dots\dots (29)$$

NORRIS の式にはせん断応力はいつているが、HANKINSON の式にははいっていない。しかし、圧縮応力とせん断応力の間につぎの関係が成立するときは両者は一致するわけである。

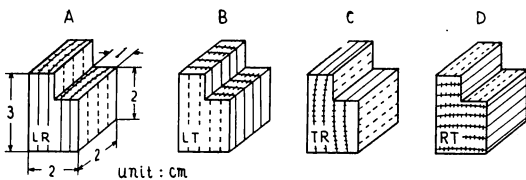
$$\frac{\sigma_x \sigma_y}{\tau_{xy}^2} = 3 \dots\dots\dots (30)$$

いま、ここで問題にしているのは比例限応力であるので、 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の値は比例限応力でなければならないが、せん断における比例限応力の実験結果はほとんど皆無の現状である。したがつて、ここでは第 19 図に示すような 2 cm 型試験片をもちいて、A. S. T. M. 型せん断装置により、せん断荷重—変形曲

線²¹⁾を求め、せん断比例限応力を決定した。順序としてまずせん断試験の結果を述べる。

8.2.1 セン断試験結果

せん断試験の種類は第 19 図の A のごとく、板目面を繊維方向にせん断する場合 (τ_{LT})、B のごとく柃目面を繊維方向にせん断する場合 (τ_{LR})、C のごとく板目面を板目方向にせん断する場合 (τ_{TL})、D のごとく柃目面を放射方向にせん断する場合 (τ_{RL}) の 4 つである。材料の関係材質および試験片の個数は第 40 表に示



第 19 図 セン断試験片の種類と寸法
Fig. 19

Classification and dimensions of specimens for shearing tests

$A = \tau_{LT}$, $B = \tau_{LR}$, $C = \tau_{TL}$, $D = \tau_{RL}$

Double subscript = shearing plane,

Former subscript = direction of Load

第 40 表 セン断試験における関係材質と試験片数
Table 40. Related properties and number of specimens in shearing test

Species	Related properties						Number of specimen			
	b mm	φ_n %	S mm	U %	R _n	R ₀	τ_{LT} (A)	τ_{LR} (B)	τ_{TL} (C)	τ_{RL} (D)
Sugi	4.8	8	0.35	14.3	0.32	0.28	11	10	5	5
Todomatsu	4.0	18	0.70	14.4	0.42	0.37	5	7	6	6
Yezomatsu	1.5	16	0.25	14.2	0.41	0.36	4	4	6	6
Akamatsu	2.1	20	0.45	14.0	0.45	0.39	9	10	10	10
Buna	1.7	14		14.7	0.59	0.50	5	5	6	6
Apitong				13.5	0.56	0.50	11	10	12	12
Makaba	2.5			14.6	0.73	0.63	6	4	5	5
Ichiigashi	2.7			13.9	0.90	0.79	7	8	11	11
Yachidamo	1.5	55		14.4	0.57	0.54	7	4	6	6
Mizunara	1.2	66		14.6	0.64	0.56	5	5	6	6
Keyaki	2.9	85		14.0	0.71	0.63	5	3	5	5

す。試験機はオルゼン型 1 ton 材料試験機で、変形量の測定は 1/100 mm 精度のダイヤルゲージを用いた。各樹種の応力—歪曲線を第 24 図に示すが、曲線型そのものは繊維方向圧縮や板目方向圧縮の場合に類似している。ただ、破壊の様相は試験の種類によりかなり異なっている。板目面および柃目面を繊維方向にセン断するとき (A, B 試験片) はかなり明確な破壊応力を求めることができるが、これらの面を板目方向、柃目方向にそれぞれセン断するとき (C, D 試験片) は明確な破壊応力の決定は困難な場合が多い。すなわち、C 試験片 (τ_{TL}) ではエゾマツ、ブナ、マカバの 3 樹種、D 試験片 (τ_{RL}) ではスギ、トドマツ、エゾマツ、アカマツ、ヤチダモの 5 樹種に対する破壊応力の認定が困難であつた。その他の樹種でもセン断することはしたが、圧縮応力その他の二次応力の影響がつよく、セン断面は平滑にならないで不規則なものが多い。第 20 図からもわかるように、ブナ、マカバの C 試験片では切欠頂部の角において割裂破損をおこしている。この現象は D 試験片のスギ、トドマツ、エゾマツ、アカマツ、ヤチダモ、マカバ、アピトンなどにもみられる。なお、射出線の発達しているミズナラの D 試験片ではセン断面が不規則な階段状を呈することがある。また、第 20 図のスギの C 試験片でみられるように、切欠頂部の角に春材

第 41 表 セン断試験結果 (繊維方向)
Table 41. Results of shearing tests parallel to grain

Species	柃 目 面 B (τ_{LR})					板 目 面 A (τ_{LT})				
	τ_p	τ_{1mm}	τ_{max}	S _M	τ_p/τ_{max}	τ_p	τ_{1mm}	τ_{max}	S _M	τ_p/τ_{max}
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	10 ³ kg/cm ²		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	10 ³ kg/cm ²	
Sugi	36.6	62.9	63.2	2.46	0.58	43.9	74.6	75.1	2.72	0.58
Todomatsu	52.1	82.4	98.1	2.88	0.53	59.8	86.1	89.2	3.09	0.67
Yezomatsu	47.4	87.6	101	3.04	0.47	45.6	83.6	86.7	2.98	0.54
Akamatsu	57.8	98.7	107	3.17	0.54	61.3	100	107	4.02	0.57
Buna	64.6	122	127	4.79	0.51	82.5	143	155	4.46	0.54
Apitong	70.1	116	118	4.16	0.60	79.8	114	115	4.33	0.69
Makaba	90.9	137	169	5.24	0.54	100	152	188	4.66	0.54
Ichiigashi	113	182	194	5.91	0.58	147	226	247	7.49	0.60
Yachidamo	79.6	138	150	4.59	0.54	78.8	120	122	4.46	0.65
Mizunara	76.6	132	137	4.88	0.56	92.9	138	141	5.67	0.66
Keyaki	84.2	184	200	5.52	0.42	98.0	166	168	6.52	0.58

τ_p = Shearing stress at P. L. τ_{1mm} = Shearing stress at 1 mm deformation

第42表 セン断試験結果 (つづき)
 Table 42. Results of shearing tests (continued)

Species	柱目面 D (τ_{RL})					板目面 C (τ_{TL})				
	τ_p	τ_{1mm}	τ_{max}	S_M	τ_p/τ_{max}	τ_p	τ_{1mm}	τ_{max}	S_M	τ_p/τ_{max}
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	10 ³ kg/cm ²		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	10 ³ kg/cm ²	
Sugi	7.38	13.1	—	0.48	—	8.82	14.4	19.4	0.37	0.46
Todomatsu	7.43	16.1	—	0.54	—	8.75	17.0	28.9	0.52	0.52
Yezomatsu	4.52	11.0	—	0.46	—	6.21	13.8	—	0.42	—
Akamatsu	8.99	19.7	—	0.78	—	11.8	23.5	36.6	0.71	0.32
Buna	24.9	52.0	62.0	2.01	0.40	17.3	38.6	—	1.89	—
Apitong	18.2	29.9	37.3	1.09	0.49	16.4	30.6	36.6	0.93	0.45
Makaba	22.6	46.0	83.5	1.63	0.27	19.6	39.4	—	1.38	—
Ichiiigashi	45.7	95.0	112	2.93	0.40	35.7	72.1	117	2.06	0.33
Yachidamo	17.9	31.5	—	1.25	—	22.7	37.9	42.9	1.24	0.53
Mizunara	25.1	46.4	49.8	1.65	0.51	15.3	37.1	45.3	1.26	0.34
Keyaki	42.6	82.2	112	2.75	0.49	33.6	68.3	89.0	2.03	0.38

 第43表 セン断面の比較
 Table 43. Effect of shearing surface on the stress-strain relations

Species	繊維に平行方向 ($\parallel$)					繊維に直角方向 ($\perp$)					($\parallel$) / ($\perp$)	
	τ_{p-LR}	τ_{max-LR}	S_M-LR	$\tau_p \times \parallel$	$\tau_{max} \times \parallel$	τ_{p-RL}	τ_{max-RL}	S_M-RL	$\tau_{p-\perp}^*$	$\tau_{max-\perp}^*$	$\tau_{p-\parallel}$	$\tau_{max-\parallel}$
	τ_{p-LT}	τ_{max-LT}	S_M-LT	$\parallel$	$\parallel$	τ_{p-TL}	τ_{max-TL}	S_M-TL	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$
Sugi	0.83	0.84	0.90	40.3	69.2	0.84	—	1.30	8.10	—	5.0	—
Todomatsu	0.87	1.10	0.93	56.0	93.7	0.85	—	1.04	8.09	—	6.9	—
Yezomatsu	1.04	1.17	1.02	46.5	93.9	0.73	—	1.10	5.37	—	8.7	—
Akamatsu	0.94	1.00	0.79	59.6	107	0.76	—	1.10	10.4	—	5.7	—
Buna	0.78	0.82	1.07	73.6	141	1.44	—	1.06	21.1	—	3.5	—
Apitong	0.88	1.03	0.96	75.0	117	1.11	1.02	1.17	17.3	37.0	4.3	3.2
Makaba	0.91	0.90	1.12	95.5	179	1.15	—	1.18	21.1	—	4.5	—
Ichiiigashi	0.77	0.79	0.79	130	221	1.28	0.96	1.42	40.7	115.0	3.2	1.9
Yachidamo	1.01	1.23	1.03	79.2	136	0.79	—	1.01	20.2	—	3.9	—
Mizunara	0.82	0.97	0.86	84.8	139	1.64	1.10	1.31	20.2	47.6	4.2	2.9
Keyaki	0.86	1.19	0.85	91.1	184	1.27	0.97	1.36	38.1	87.6	2.4	2.1

$$\tau_{p-\parallel}^{\times} = \frac{1}{2}(\tau_{p-LR} + \tau_{p-LT}) \quad \tau_{p-\perp}^* = \frac{1}{2}(\tau_{p-RL} + \tau_{p-TL})$$

$$\tau_{max-\parallel}^{\times} = \frac{1}{2}(\tau_{max-LR} + \tau_{max-LT}) \quad \tau_{max-\perp}^* = \frac{1}{2}(\tau_{max-RL} + \tau_{max-TL}) \quad S_M = \frac{\text{Shearing stress at P. L.}}{\text{Shearing strain at P. L.}}$$

部がきているときはもちろんであるが、トドマツのごとく多少離れていても春材部を選択してセン断する傾向がつよい。この現象はA試験片 (τ_{LT}) でもしばしば観察される。

ここで求めた値はセン断比例限度力 τ_p (kg/cm²)、この値を荷重方向の歪 (比例限度変形量/セン断長) で除した量 S_M (10³ kg/cm²)、ダイヤルゲージによる変形量が 1 mm になったときの応力 τ_{1mm} (kg/cm²)、破壊応力 τ_{max} (kg/cm²) などである。繊維に平行方向の結果を第 41 表に、C, D 試験片の結果を第 42 表に示す。 τ_{max} に対する τ_p の値はA試験片で 0.54 から 0.69 に分散し、全樹種の平均は約 0.60 である。B試験片では 0.42 から 0.60 で、平均値は約 0.53 となつている。すなわち、 τ_p/τ_{max} の値は柱目面より板目面を繊維方向にセン断する場合の方がやや大きい。CおよびD試験片をセン断するときは前

に述べたごとく破壊応力の決定が困難であつたり、たとえセン断しても圧縮応力その他の二次応力の影響が強いのでその数値にはかなり問題はあつたが、 τ_p/τ_{max} の値はC試験片で 0.32 から 0.53、平均値は約 0.42 となつてゐる。D試験片では広葉樹材のみであり、0.27 から 0.51 に広く分散しているが、平均値は約 0.43 となつてゐる。

繊維方向にセン断する場合、板目面と柾目面とでどのように異なるかを比較すれば第 43 表のごとくなる。比例限応力 τ_p はエゾマツ、ヤチダモではほとんど変わらないが、その他の樹種では板目面セン断の方がつよく、全樹種についての τ_{p-LR}/τ_{p-LT} の値は約 0.88 となつてゐる。破壊応力における結果は区々としてゐる。スギ、ブナ、マカバ、イチイガシでは板目面セン断が大きい、アカマツ、アピトン、ミズナラはほとんど同じであり、その他の樹種は柾目面セン断の方が大きい。 S_M の値はブナ、マカバでは柾目面セン断が大きく、エゾマツ、アピトン、ヤチダモではほとんど同じく、その他の樹種では板目面セン断の方が大きくなつてゐる。C および D 試験片の場合も同表に示してあるが、 τ_p については針葉樹材の全部およびヤチダモは板目面セン断の方が大きい。破壊応力については問題があるが、ミズナラでは柾目面セン断の方が大きく、その他の樹種はほとんど差がない。 S_M については柾目面セン断の方が大きい傾向を示している。いまかりにセン断面の差を無視して、繊維に平行方向と直角方向の比較をすると同表に示すごとくなる。 τ_p については針葉樹材の方が異方性がつよく、直角方向に対する縦方向の比は約 6.6 となり、広葉樹材では約 3.7 となつてゐる。 τ_{max} については広葉樹材のみであるが、 τ_p の場合より小さく約 2.5 となつてゐる。しかし、以上の結果はきわめて少数の試験片で得られたものであり、かつ試験法そのものにも問題があるので今後の検討にまたなければならない。

8.2.2 圧縮比例限応力の実測値と計算値の比較

45° 試験片で求めた圧縮比例限応力の実測値と、NORRIS 式および HANKINSON 式で求めた計算値とを比較検討してみよう。第 44 表、第 45 表、第 46 表はそれぞれ鏡式歪計により、LR-45、LT-45、RT-45 試験片で求めた比例限応力 σ_p の実測値と計算値の比較であるが、第 47 表は RT-45 試験片につきダイヤルゲージで求めた比例限応力と計算値の比較である。各表の (1) 欄は実測値であり、(2) 欄は

第 44 表 $\sigma_{p-LR-45}$ の実測値と計算値の比較
Table 44. Comparison of measured and calculated values of $\sigma_{p-LR-45}$

Species	Measured value kg/cm^2 (1)	Calculated value							
		By Eq. (29)				By Equation (28)			
		kg/cm^2 (2)	C. V./ M. V. (3)	n (4)	kg/cm^2 (5)	C. V./ M. V. (6)	n (7)	kg/cm^2 (8)	C. V./ M. V. (9)
Sugi	33.7	26.5	0.79	2	25.5	0.76	3.0	36.1	1.07
Todomatsu	33.5	38.9	1.16	2	36.8	1.10	1.5	30.9	0.92
Yezomatsu	34.9	35.2	1.01	2	34.7	0.99	2.0	34.7	0.99
Akamatsu	51.1	48.0	0.94	2	45.9	0.90	2.5	54.6	1.07
Buna	66.6	68.8	1.04	2	64.6	0.97	2.0	64.6	0.97
Apitong	42.9	55.6	1.30	2	56.6	1.32	1.5	45.7	1.07
Makaba	—	72.0	—	2	65.7	—	—	—	—
Ichiiigashi	89.0	112	1.26	2	102	1.15	1.5	85.5	0.96
Yachidamo	—	74.2	—	2	68.3	—	—	—	—
Mizunara	77.6	89.1	1.15	2	77.9	1.00	2.0	77.9	1.00
Keyaki	96.4	119	1.23	2	114	1.18	1.5	96.0	1.00
Mean			1.10			1.04			1.01

第45表 $\sigma_{p-LT-45^\circ}$ の実測値と計算値の比較
 Table 45. Comparison of measured and calculated values of $\sigma_{p-LT-45^\circ}$

Species	Measured value kg/cm^2 (1)	Calculated value							
		By Eq. (29)				By Equation (28)			
		kg/cm^2	C. V./ M. V.	n	kg/cm^2	C. V./ M. V.	n	kg/cm^2	C. V./ M. V.
		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Sugi	18.0	16.5	0.92	2	13.7	0.76	3.0	19.4	1.08
Todomatsu	19.5	20.0	1.03	2	19.2	0.98	2.0	19.2	0.98
Yezomatsu	26.9	23.7	0.88	2	23.0	0.86	2.5	27.4	1.02
Akamatsu	39.4	35.4	0.90	2	33.8	0.86	2.5	40.2	1.02
Buna	52.0	42.5	0.82	2	40.8	0.79	2.5	48.5	0.93
Apitong	35.9	34.5	0.96	2	33.8	0.94	2.0	33.8	0.94
Makaba	53.0	63.3	1.19	2	58.5	1.10	1.5	49.2	0.93
Ichiigashi	68.3	72.3	1.06	2	68.3	1.00	2.0	68.3	1.00
Yachidamo	48.4	52.5	1.09	2	48.1	0.99	2.0	48.1	0.99
Mizunara	52.9	38.6	0.73	2	35.5	0.67	3.0	50.3	0.95
Keyaki	75.1	92.5	1.23	2	90.0	1.20	1.5	75.6	1.01
Mean			0.98			0.92			0.99

第46表 $\sigma_{p-RT-45^\circ}$ の実測値と計算値の比較 (鏡式歪計)
 Table 46. Comparison of measured and calculated values of $\sigma_{p-RT-45^\circ}$
 (mirror extensometer reading)

Species	Measured value kg/cm^2 (1)	Calculated value							
		By Eq. (29)				By Equation (28)			
		kg/cm^2	C. V./ M. V.	n	kg/cm^2	C. V./ M. V.	n	kg/cm^2	C. V./ M. V.
		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Sugi	3.15	11.5	3.65	2	9.26	2.94	—	—	—
Todomatsu	3.10	13.3	4.29	2	13.3	4.29	—	—	—
Yezomatsu	3.60	10.0	2.78	2	14.4	4.00	—	—	—
Akamatsu	8.60	18.5	2.15	2	20.9	2.43	—	—	—
Buna	19.3	32.2	1.67	2	27.1	1.40	1.0	19.2	1.00
Apitong	16.3	25.7	1.58	2	21.8	1.34	1.0	15.4	0.94
Makaba	—	35.9	—	2	34.3	—	—	—	—
Ichiigashi	37.8	58.4	1.55	2	44.7	1.18	1.5	37.6	0.99
Yachidamo	—	33.5	—	2	31.7	—	—	—	—
Mizunara	17.6	29.8	1.69	2	27.2	1.55	0.5	16.2	0.92
Keyaki	41.3	63.4	1.54	2	58.9	1.43	1.0	35.0	0.85

NORRIS 式による計算値である。(3) 欄に実測値に対する計算値の比を示すが、LR-45 では 0.79 から 1.30 で、平均値は約 1.10 である。また、LT-45 では 0.73 から 1.23 で平均値は約 0.98 である。これに対し RT-45 の場合は鏡式歪計によるときが 1.54 から 4.29、ダイヤルゲージによるときが 0.96 から 3.51 となり、分散が大きく適合性はよくない。

HANKINSON 式で求めた値は各表の (5) および (8) 欄に示すが、(5) 欄の値は $n=2$ のときであり、(8) 欄の値は n を (7) 欄のごとくえらんだ場合である。 $n=2$ としたときの値と実測値とを比較すると、(6) 欄からわかるように、実測値に対する計算値の比は、LR-45 では 0.76 から 1.32 で平均値は 1.04 であり、LT-45 では 0.67 から 1.20 で平均値は 0.92 である。また、RT-45 では鏡式歪

第 47 表 $\sigma_{p-RT-45^\circ}$ の実測値と計算値の比較 (ダイヤルゲージ測定)
 Table 47. Comparison of measured and calculated values of $\sigma_{p-RT-45^\circ}$
 (dial gage reading)

Species	Measured value kg/cm^2	Calculated value							
		By Eq. (29)				By Equation (28)			
		kg/cm^2	C. V./ M. V.	n	kg/cm^2	C. V./ M. V.	n	kg/cm^2	C. V./ M. V.
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Sugi	3.49	12.1	3.47	2	11.5	3.30	—	—	—
Todomatsu	3.82	13.4	3.51	2	14.8	3.88	—	—	—
Yezomatsu	5.28	10.2	1.93	2	18.6	3.52	—	—	—
Akamatsu	11.0	19.6	1.78	2	30.4	2.76	—	—	—
Buna	27.7	35.2	1.27	2	34.3	1.24	1.5	28.8	1.04
Apitong	30.4	29.2	0.96	2	29.4	0.97	2.0	29.4	0.97
Makaba	—	38.0	—	2	44.5	—	—	—	—
Ichiigashi	62.3	68.7	1.10	2	68.6	1.10	1.5	57.8	0.93
Yachidamo	—	56.5	—	2	44.4	—	—	—	—
Mizunara	25.2	33.6	1.33	2	37.3	1.48	1.0	26.4	1.05
Keyaki	54.8	68.0	1.24	2	78.4	1.43	1.0	55.4	1.01

第 48 表 $\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\tau_{xy}^2}$ の値

Table 48. Values for $\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\tau_{xy}^2}$

Species	$\frac{\sigma_{p-L} \cdot \sigma_{p-T}}{\tau_{p^2-LT}^2}$	$\frac{\sigma_{p-L} \cdot \sigma_{p-R}}{\tau_{p^2-LR}^2}$	$\frac{\sigma_{p-R} \cdot \sigma_{p-T}}{\tau_{p^2-TL}^2}$	$\frac{\sigma_{p-R} \cdot \sigma_{p-T}}{\tau_{p^2-RL}^2}$	$\frac{\sigma_{p-R} \cdot \sigma_{p-T}}{\tau_{p^2-\perp}^2}$	$\frac{\sigma_{p-R} \cdot \sigma_{p-T}}{\tau_{p^2-\perp}^2}$
Sugi	0.12	1.62	1.22	1.75	1.45	2.52
Todomatsu	0.94	1.42	2.59	3.59	3.03	4.05
Yezomatsu	1.48	2.47	5.76	10.9	7.70	13.3
Akamatsu	1.51	1.86	3.23	5.57	4.16	8.81
Buna	1.68	1.69	2.61	1.26	1.76	2.80
Apitong	1.70	2.15	1.87	1.52	1.68	3.04
Makaba	1.25	1.17	3.07	2.31	2.65	4.54
Ichiigashi	1.36	1.25	1.65	1.00	1.27	2.99
Yachidamo	1.09	1.65	2.06	3.25	2.55	5.05
Mizunara	0.78	1.29	3.82	1.42	2.19	4.14
Keyaki	2.52	2.46	3.13	1.95	2.44	4.35

$$\frac{\sigma_{p-R}}{\tau_{p-R}} \cdot \frac{\sigma_{p-T}}{\tau_{p-T}} = \text{dial gage reading} \quad \tau_{p-\perp} = \frac{1}{2}(\tau_{p-RL} + \tau_{p-TL})$$

計によるときは 1.18 から 4.29, ダイヤルゲージによるときは 0.97 から 3.88 に分散し, 適合性はよくない。前に述べたごとく, (30) 式の関係が成立すれば, (2) 欄の値と (5) 欄の値は一致するわけであるが, この実験では第 48 表に示すごとく, 2, 3 の場合をのぞいてはこの関係はほとんど成立しなかった。すなわち, $\sigma_x \sigma_y / \tau_{xy}^2$ の値は LT 面で 0.12 から 2.52, LR 面で 1.17 から 2.47 で 3 から離れているのみならず, かなり分散している。RT 面では鏡式歪計のときが 1.27 から 7.70, ダイヤルゲージのときが 2.52 から 13.3 に分散している。なお, RT 面の場合の τ_{xy} は柃目面を柃目方向にセン断する τ_{p-RL} と板目面を板目方向にセン断する τ_{p-TL} との平均値 ($\tau_{p-\perp}$) を用いて計算した。

圧縮とセン断における比例限度力および破壊応力を比較すると第 49 表のごとくなる。繊維に平行方向のセン断強さ ($\tau_{\parallel}$) は柃目面と板目面セン断の平均値である。 $\sigma_{max} - \parallel / \tau_{max} - \parallel$ の値は 2.70 から 5.54

第 49 表 圧縮応力とせん断応力の関係
Table 49. Relation between compressive stresses and shearing stresses

Species	$\frac{\sigma_{max}}{\tau_{max}}$	$\frac{\sigma_p}{\tau_p}$	$\frac{\sigma_{p-R}}{\tau_{p-RL}}$	$\frac{\sigma_{p-T}}{\tau_{p-TL}}$	$\times \frac{\sigma_{p-R}}{\tau_{p-RL}}$	$\times \frac{\sigma_{p-T}}{\tau_{p-TL}}$
Sugi	4.11	5.73	1.83	0.80	2.83	0.90
Todomatsu	3.19	4.57	2.67	1.14	3.43	1.19
Yezomatsu	3.70	5.98	4.10	1.93	5.93	2.30
Akamatsu	3.84	4.70	2.78	1.53	4.13	2.18
Buna	3.45	4.36	1.44	1.26	1.80	1.61
Apitong	5.54	6.35	1.58	1.07	2.09	1.46
Makaba	2.79	3.35	1.62	1.64	2.27	2.00
Ichiigashi	2.96	3.63	1.25	1.03	1.93	1.57
Yachidamo	2.70	3.28	2.20	1.17	3.13	1.62
Mizunara	2.83	2.81	1.86	1.26	2.56	1.72
Keyaki	3.04	3.80	1.61	1.54	2.21	2.00

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\tau_{max-LR} + \tau_{max-LT}) \quad \sigma_{p-R}, \sigma_{p-T} = \text{Dial gage reading}$$

第 50 表 圧縮比例限応力の変化 (LT 面)
Table 50. Effect of grain angle on compressive stress at P. L. (LT plane)

Species	n	Grain angle													T
		0°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°	
Sugi	3.0	100	96	68	38	21	13	8.4	6.0	4.7	3.9	3.4	3.1	3.0	
Todomatsu	2.0	100	71	38	22	14	9.9	7.5	6.1	5.1	4.5	4.2	4.0	3.9	
Yezomatsu	2.5	100	89	59	34	21	14	9.8	7.5	6.1	5.2	4.7	4.4	4.3	
Akamatsu	2.5	100	93	69	44	29	20	14	11	9.1	7.8	7.0	6.6	6.4	
Buna	2.5	100	94	70	47	30	21	15	12	9.6	8.2	7.4	6.9	6.8	
Apitong	2.0	100	69	36	21	13	9.3	7.1	5.7	4.8	4.3	3.9	3.7	3.7	
Makaba	1.5	100	69	44	31	23	18	15	13	12	11	11	10	10	
Ichiigashi	2.0	100	83	55	37	25	18	15	12	10	9.0	8.3	7.9	7.8	
Yachidamo	2.0	100	87	63	44	31	24	19	15	13	12	11	10	10	
Mizunara	3.0	100	100	89	67	46	30	21	16	12	10	8.9	8.3	8.1	
Keyaki	1.5	100	77	55	41	32	26	22	19	17	16	15	15	15	

となり、 σ_p/τ_p の値は 2.81 から 6.35 となつている。C および D 試験片の場合は比例限応力の比較のみである、 σ_p が鏡式歪計のときは柁目方向で 1.25 から 4.10、板目方向で 0.80 から 1.93、 σ_p がダイヤルゲージのときは柁目方向で 1.80 から 5.93、板目方向で 0.90 から 2.30 となつている。

8.2.3 圧縮比例限応力の変化

繊維傾角、年輪傾角 α の変化による圧縮比例限応力の値は HANKINSON 式によつて計算したが、 n の値は第 44 表、第 45 表、第 46 表の (7) 欄の数字を使つた。LT 面における計算結果を第 50 表に示す。 $\sigma_{p-L}(\alpha=0)$ の値を 100 とすれば、ヤング係数の場合と同様、45° 付近までは急激に低減し、スギ、トドマツ、エゾマツ、アピトンなどの σ_{p-45} は、 σ_{p-L} の約 10% 程度となつている。その後の低減は緩慢となり σ_{p-T} の値に近づく。LR 面の変化を第 51 表に示すが LT 面にほぼ類似している。RT 面では他の場合とことなり、針葉樹材では適当な n の値が決定できなかった。広葉樹材でも n の値が小さくなるが、計算結果を示すと第 52 表のごとくなる。 $\sigma_{R-R}(\alpha=0)$ の値を 100 とすれば 50° から 60° 付近でどの樹種も最小値を示し、その後はきわめてわずかであるが上昇しつつ σ_{p-T} の値に近づいてゆく。

第 51 表 圧縮比例限応力の変化 (LR 面)
Table 51. Effect of grain angle on compressive stress at P. L. (LR plane)

Species	n	Grain angle													R
		L	0°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°
Sugi	3.0	100	99	84	57	36	23	16	11	8.9	7.5	6.5	6.0	5.8	
Todomatsu	1.5	100	62	37	24	18	14	12	10	9.2	8.4	7.9	7.7	7.6	
Yezomatsu	2.0	100	80	52	33	22	16	13	10	8.6	8.2	7.1	6.8	6.7	
Akamatsu	2.5	100	95	77	55	38	26	20	15	13	11	9.7	9.1	8.9	
Buna	2.0	100	73	65	46	34	26	20	17	14	13	12	11	11	
Apitong	1.5	100	57	32	21	15	12	9.6	8.3	7.3	6.7	6.3	6.1	6.1	
Ichiigashi	1.5	100	73	49	35	27	22	18	16	14	13	13	12	12	
Mizunara	2.0	100	93	67	63	49	40	33	28	25	22	21	20	20	
Keyaki	2.0	100	82	62	48	38	32	28	25	23	21	20	20	20	

第 52 表 圧縮比例限応力の変化 (RT 面)
Table 52. Effect of grain angle on the compressive stress at P. L. (RT plane)

Species	n	Grain angle													T
		R	0°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°
Buna	1.0	100	83	72	64	59	56	53	52	52	53	54	57	61	
Apitong	1.0	100	83	72	64	59	56	53	52	52	53	54	57	61	
Ichiigashi	1.5	100	94	87	80	74	69	66	64	63	62	63	64	65	
Mizunara	0.5	100	53	45	41	38	36	35	34	34	34	35	36	41	
Keyaki	1.0	100	86	77	70	66	63	61	60	61	62	65	69	76	

なお、角度別試験片による実測値との比較や理論式の検討はもちろんであるが、さらに実寸法の場合にどの程度の目切れ影響があるかを確かめる必要がある。

む す び (摘要)

この研究の目的は、木材を直交異方性体と考えた場合の力学的諸性質を明らかにし、木材材料の応力等級区分、木材平板の弾性的挙動の評価、各種構造用合板の構成、切欠けおよび目切れによる強度性能の低減などを適正におこなうに役だつ基礎資料をうることである。実験材料としては広く常用されているスギ、トドマツ、エゾマツ、アカマツ、ブナ、アビトン、マカバ、イチイガシ、ヤチダモ、ミズナラ、ケヤキの 11 種をえらんだ。針葉樹材、散孔材、輻射孔材、環孔材、南洋材などあり、かつ気乾比重の範囲も 0.33 から 0.84 におよんでいるので樹種特性による指標値を問題にするかぎりにおいてはかなり妥当なものとする。得られた結果を総括すればつぎのとおりである。

(1) 応力—歪曲線は材料の変形特性を総合的に表現したものであり、これにより弾性変形域および塑性変形域の応力—歪関係が定量的にはあくできる。繊維方向 (L)、接線方向 (T)、放射方向 (R) の 3 軸方向およびこれらの 2 軸とそれぞれ 45° をなす方向、すなわち LT-45°、LR-45°、RT-45° 方向の圧縮応力—歪曲線を求め、これらをその曲線特性にしたがつて 3 つの基本型に分類した。

(2) 繊維方向の圧縮にみられる基本型を第 4 図に示すが、その応力—歪関係は (5) 式で数値的に表現できる。この曲線では明確な破壊点がみられ、破壊点に至るまでの塑性域は環孔材がきわめて大きく、針葉樹材が比較的小さい。

(3) 接線方向の圧縮にみられる基本型を第 6 図に示すが、その応力—歪関係は (7) 式で数値的に表現できる。この曲線では降伏点、破壊点の確認が困難である。この他の方向の圧縮でもこれに類似の曲線型を示すものが多い。

(4) 針葉樹材の放射方向の圧縮にみられる基本型を第 8 図に示すが、その応力—歪関係は第 (8) 式で表現できる。広葉樹材でもこれに類似の曲線型を示すことがある。この曲線は明確な降伏点を持ち、その点から急激に水平方向に分岐移行してゆくが、繊維方向のような破壊点の確認は困難である。この現象は細胞膜が薄く、かつ放射方向の配列性がみだれている春材部で年輪に沿うより挫屈をおこすことに帰せられる。

(5) 弾性常数を歪係数で整理して示すと第 24 表のごとくなる。ヤング係数、せん断弾性係数は比重とともに増加する傾向を示すが、必ずしも比重のみによつて一義的に変動するものでなく、木材の構造組織の特性差に依存する場合が多い。ポアソン比は一般に比重に無関係のようであるが、針葉樹材の μ_{RT-45} の値はとくに大きく特徴的である。

(6) 針葉樹材の $RT-45^\circ$ 方向のヤング係数はきわめて小さく、L 方向のヤング係数の 1% にも満たないことは注目値する。広葉樹材の場合はこれと異なり、環孔材では T 方向のヤング係数とほとんど同じく、散孔材や輻射孔材では T 方向のヤング係数よりやや高くなる傾向を示す。

(7) μ_{RT}/E_R と μ_{TR}/E_T の値を比較すると第 19 表のごとくなり、かなり良好な適合を示している。 μ_{LT}/μ_{LR} の値はマカバの 1.10 からイチイガシの 1.53 までであるが、平均すれば約 1.40 程度になっている。

(8) E/G の値は第 23 表に示すが、梁の剛性に関係する E_L/G_{LT} の値は針葉樹材で約 22、広葉樹材で約 15、また E_L/G_{LR} の値は針葉樹材が約 16、広葉樹材が約 10 となつている。ただ、アピトンほどの値も大きく約 28 となつている。 E_R/G_{RT} 、 E_T/G_{RT} の値は針葉樹材がいちじるしく大きく、きわめて特徴的である。

(9) 体積圧縮歪係数 K の値は第 15 図に示すごとく比重の増加とともに減小する傾向を示す。 μ_K の値は比重と無関係で針葉樹材が 0.203 から 0.280、広葉樹材が 0.211 から 0.343 の範囲にある。

(10) 圧縮試験における応力の特性値を 3 軸方向とも統一的に決定できるのは比例限応力のみである。比例限応力は 3 軸方向についてみればどの樹種も L、R、T の順に低減してゆく。なお、 $RT-45^\circ$ 方向の比例限応力は針葉樹材ではきわめて小さく、L 方向の 1~3% 程度であるが、広葉樹材ではケヤキ以外は T 方向の値に近似している。比例限歪は針葉樹材の $RT-45^\circ$ 方向がきわめて大きく特徴的である。比例限仕事量は $RT-45^\circ$ 方向の値がどの樹種でも最も小さい。

(11) 異方性板の境界値問題をとりあつかう場合重要な役割をもつ特性値 k_r 、 k_s および e 、 g の値を計算し第 28、29、30 表に示す。等方性材料では $k_r=k_s=1$ 、 $e=1$ 、 $g=0$ であるから、これらの値から離れるほど異方性の程度が高いと判断してよいかもしれない。一般に針葉樹材の方が広葉樹材よりもやや異方性の程度が高いが、とくに RT 面ではその傾向が強い。

(12) 異方性平板の特性値を用いて、1 つの円孔のある十分広い板を、孔からかなり遠いところで 1 方向に一樣に引張る場合の孔縁の応力集中率を計算し、その値を第 31 表に示す。引張力 p_0 が板の繊維方向 x と一致するときは、第 17 図に示す孔縁の点 N に最大の引張応力が生じ、点 M に最大の圧縮応力がおこる。等方性材料ではこの場合、点 N で $3 p_0$ であり、点 M で $-p_0$ であるから、異方性材料の応力集中

が大きいことがわかる。しかし、この応力集中は局所的である。なお、どの場合もケヤキがもつとも等方性材料の値に近いことは興味がある。

(13) 平板の曲げ、振り、弾性座屈問題などを取り扱う際に重要な役割をもつ特性値 D_{ik} を計算する場合に必要な量 C_{ik} を板目、柾目、木口の3主要面につき求め第33表に示す。

(14) 木理傾角、年輪傾角の変化が弾性常数におよぼす影響を検討し、ヤング係数の変化を第34, 35, 36表, 第18図に示す。どの樹種でも柾目面より板目面における異方性が大きく、繊維方向と約 7° 程度の傾斜をもつてもかなりはげしく低減するようである。針葉樹材の木口面では年輪走向が荷重方向と 45° をなす付近でヤング係数は最小値を示すが、広葉材ではこのような傾向はみられない。ポアソン比の変化を第18図に示すが、LT面, LR面では符号が変化する場合がある。針葉樹材のRT面における変化は特徴的で、 45° 付近で最大値を示す。なお、 μ_{45} と E_{45} の値からGの値が計算でき、 G_{RT} につきもまとめた結果第21表に示す。

(15) 比例限度力におよぼす繊維傾角、年輪傾角の影響をHANKINSON式およびNORRIS式で検討し、その結果を第44, 45, 46, 47表に示す。(30)式の関係が成立すれば両氏の式は一致するが、この実験では第48表に示すごとく2, 3の場合をのぞいてほとんど成立しなかつた。これらについては再検討の必要がある。

(16) セン断試験における荷重—変形曲線を示すと付図24のごとくなる。なお、破損形を第20図に示すが、柾目面を柾目方向にセン断する場合や板目面を板目方向にセン断する場合は破壊応力の確認が困難な場合が多い。また、たとえセン断しても、圧縮応力、その他の二次応力の影響がつよく、破壊応力の数値には問題があると思う。柾目面と板目面のセン断応力—歪関係の比較をすると第43表のごとくなり、安定した面条件差を認めることはできなかつた。なお、圧縮応力とセン断応力を比較すると第49表のごとくなる。

(17) 鏡式歪計とダイヤルゲージによる応力—歪関係を比較すると第13, 14, 15表のごとくなるが、一般にダイヤルゲージによる応力—歪曲線は初期において、直線域をはさんでS字型になる傾向がある。これは、試験片の仕上げ精度、試験機の加圧部における機構上の精度などのほかに、試験片の接触面およびその付近の二次応力による局所的破損などが関連していると考えられるが、面圧特性として今後の検討を要する問題である。

(18) これらの実験はきわめて少数の試料でおこなわれたので、これらの結果は単に指標値としての意義をもつにとどまるかもしれない。各樹種の安定した標準値をうることは今後に残された重要な課題である。このほか、弾性常数とくにセン断弾性係数の決定法、セン断試験法、弾性常数および応力値におよぼす水分影響、実大材における剛性および強度におよぼす欠点影響、切欠けによる応力分布の実験的検討、木材平板および合板の力学的性質の究明、接手部材の設計施工における面圧特性などこの研究に関連する多くの課題を今後にもこしている。

文 献

Reference

- 1) JENKIN, C. F.: Report on Materials of Construction Used in Aircraft and Aircraft Engines. Aeronaut. Res. Comm. (British), (1920) p. 95~141
- 2) MARCH, H. W.: Flat Plates of Plywood under Uniform or Concentrated Loads. U. S. Dept. Agric. For. Prod. Lab., Mimeo. No. 1312 (1942) p. 1~98
- 3) MARCH, H. W.: Stress-strain Relations in Wood and Plywood Considered as Orthotropic Materials. U. S. Dept. Agric. For. Prod. Lab., Mimeo. No. 1503 (1944) p. 1~24
- 4) HEARMON, R. F. S.: The Elasticity of Wood and Plywood. For. Prod. Res. Spec. Rep. No. 7, (1948) p. 1~87
- 5) KEYLWERTH, R.: Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer. VDI-Forschungsheft 430, Ausgabe B Band 17 (1951) p. 1~40
- 6) DOYLE, D., DROW, J. and MCBURNEY, R.: Elastic Properties of Wood. U. S. Dept. Agric. For. Prod. Lab., Reports 1528 and 1528 A to H, (1945~1946) p.
- 7) SMITH, C. B.: Effect of Elliptic or Circular Holes on the Stress Distribution in Plates of Wood or Plywood Considered as Orthotropic Materials. U. S. Dept. Agric. For. Prod. Lab. Mimeo, No. 1510 (1944) p. 1~25
- 8) KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Julius Springer, Berlin, (1951) p. 1~1050
- 9) 樋口正一: 異方弾性体としての強化積層材, 九大応用力学研究所報, 2, (1952) p. 3~22
- 10) ———: 直交異方二次元弾性論の境界値問題, 九大応用力学研究所報, 10, (1957) p. 1~62
- 11) 池田 健: 直交異方性板の平面応力に就いて, 東大航空研究所報告, 259, (1943) p. 249~277
- 12) 今 俊三: 圧縮及び捩り実験による木材の剪断係数の比較に就て, 北大工学部彙報, 1, (1948) p. 144~156
- 13) 沢田 稔: 木材のポアソン比の 1 測定法, 日本木材学会誌, 2, 6, (1956) p. 233~236
- 14) 山井良三郎: 木材の圧縮異方性について, 日林誌, 39, 9, (1957) p. 328~338
- 15) ———: 木材の平面問題における特性値について, 日本木材学会, 第 6 回大会研究発表要旨, (1958) p. 15~16
- 16) 沢田 稔: 木材の強度特性に関する研究, 林試報, 108, (1958) p. 115~224
- 17) 北原覚一・蕪木自輔・村木正男: 木材の圧縮に関する研究, 東大演習林報告, 47, (1954) p. 1~64
- 18) 山井良三郎: 木材の応力——歪曲線 (第 1 報), 横圧縮応力——歪曲線 (1), 林試報, 77 (1955) p. 103~152
- 19) 吉識雅夫・竹鼻三雄: 木船構造接手の研究 (第 2 報), 造船協会論文集, (1957) p. 253~258
- 20) NORRIS, C. B.: Strength of Orthotropic Materials Subjected to Combined Stresses. U. S. Dept. Agric. For. Prod. Lab., Rep. 1816 (1950) p. 1~19
- 21) WERREN, F. & NORRIS, C. B.: Directional Properties of Glass-Fabric-Base Plastic Laminate Panels of Sizes that do not Buckle. U. S. Dept. Agric. For. Prod. Lab., Rep. 1803(1949) p. 1~19

Studies on the Orthotropic Properties of Wood in Compression

Ryozaburo YAMAI

(Résumé)

The purpose of this report is to determine the elastic constants and the stress-strain relations of 11 important species used in Japan, to classify the typical types of stress-strain curves of specimens in compression, to discuss the characteristic values, to specify the elastic behaviour of wooden plate, and to examine the effect of grain angle on the elastic constants and the stresses at proportional limit in compression. The names and the related properties of material tested are represented in tables 1 and 2. Materials were air-dried to moisture content values of approximately 14 to 16 percent. The dimensions of specimens tested are represented in table 3. Particular care was taken in preparing the specimens to choose material with minimum ring curvature and maximum freedom from defects, and to align the grain and growth rings parallel and perpendicular to the axes of specimen.

Wood is considered to be the orthotropic material which possesses three mutually perpendicular planes of elastic symmetry, and its elastic behaviour is specified by the nine independent elastic coefficients for the general three dimensional case. These coefficients are:

$$S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{22}, S_{32}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66}.$$

If we identify the longitudinal direction (parallel to the axis of the tree) with the x axis (=L=1), the tangential direction (tangential to the growth rings) with the y axis (=T=2), and the radial direction (parallel to the rays) with the z axis (=R=3) as shown in figure 1, these coefficients are expressed by equations (2). In the equations, E_L is Young's modulus in the L-direction, μ_{LT} is Poisson's ratio for a strain in the T direction caused by a normal stress in the L direction, and G_{LT} is the modulus of rigidity associated with the directions L and T.

The Young's moduli and Poisson's ratios were measured by means of the instruments shown in figure 3. The extensometers employ the same optical-lever principle as the other extensometer with mirrors and knife edges. The compressive deformation to full length of specimen was measured by means of a dial gage (1/100 mm unit). The moduli of rigidity were calculated from the equations (3) for transforming Young's moduli to an angle of 45° in principal planes (E_{15-LT} , E_{15-LR} , E_{15-RT}). The results of shearing tests were obtained by the A. S. T. M. type's shearing tool. The results obtained in this study are as follows:

1) The stress-strain curves of specimens in compression may be classified as follows: The typical curve of L specimen in compression parallel to the grain is illustrated in figure 4, and the stress-strain relation may be expressed by equation (5). The characteristic values to specify this relation are represented in table 4. The plastic region to the breaking point is very large in ring porous woods.

2) The typical curve of T specimen in compression tangential to the growth rings is illustrated in figure 6, and the stress-strain relation may be expressed by equation (7). The transition from the domain of elastic deformation into that of plastic state is gradual, and consequently the definite yield point is not recognized. Moreover, it was difficult to recognize the maximum crushing strength such as we could determine in the L specimen. The comparison of the calculated values with the measured values are given in figures (7). In these cases, the values of E_2 were estimated from the values of E and ν by assuming $n=3$.

3) The typical curve of R specimen of conifer woods in compression parallel to rays is illustrated in figure 8, and the stress-strain relation may be expressed by equation (8). This curve has a well-defined yield point, and at this point the transition to horizontal branch of curve is very sharp. This phenomenon may be due to the buckling by sliding failure of weakness zones in spring wood. The curves of R specimens of hard woods, except a few species, are similar to the type of T specimen.

4) The elastic coefficients and compressibility coefficient are summarized in table 24. Young's moduli and moduli of rigidity show tendency to increase with the increase in specific gravity although, because of the small number of specimens, the relations are not well defined. But Poisson's ratios show no relationship to specific gravity. The

relation $S_{23}=S_{32}$ was experimentally examined; the results make it possible to confirm this relation within experimental errors as shown in table 19. The values of E/G are summarized in table 23; the values of E_L/G_{LT} are 11 to 28, and they are larger than those of E_L/G_{LT} . The values of E_R/G_{RT} of conifer woods are very much larger than values of others. It is due to the smallest values of G_{RT} of conifer woods. The values of compressibility coefficient K show some tendency to decrease with the increase in specific gravity. The approximate values of μ_k defined by equation (12) are 0.20 to 0.28 for conifer woods, and 0.20 to 0.34 for hardwoods.

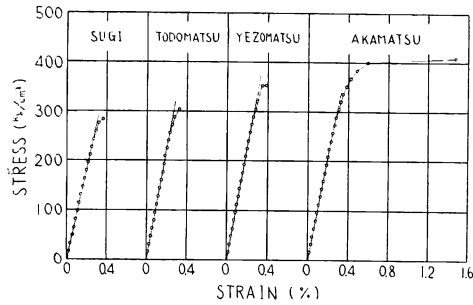
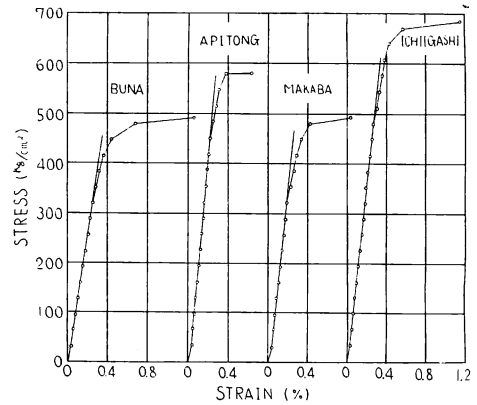
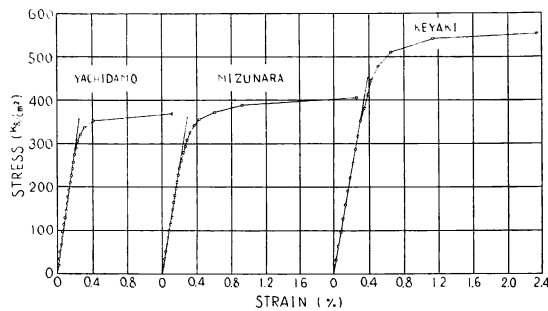
5) The summary of compressive stresses at proportional limit, strain at P. L. and work to P. L. are represented in tables 25, 26 and 27. The stresses at P. L. show tendency to increase with specific gravity, but the relations are not well defined. The values of strain at P. L. of RT-45 specimens of conifer woods are very large, but their work to P. L. are very small.

6) The characteristic coefficients (k_r , k_s or e , g) to specify the elastic behaviour of wooden plate under plane stress or plane strain are calculated by equations (15), (16) and (17); these values are represented in tables 28, 29 and 30. For isotropic materials $k_r=k_s=1$; $e=1$, $g=0$, therefore, the calculated values may indicate the degree of orthotropic characteristics of plate. The effect of a small circular hole on the stress distribution in a large, rectangular wooden plate subjected to a uniform tension (P_0) can be calculated by equations (18) to (22). The maximum stress occurs on the edge of the circular hole at the ends of diameter perpendicular to the direction of the uniform tension. When uniform tension is applied in the direction of the grain, the stress concentrations are considerably higher than that found in isotropic materials as shown in table 31, but it is much more sharply localized. The constants C_{ik} defined by equations (24) are in table 33; these values are important in calculating the flexural and torsional rigidities of plate D_{ik} defined by equations (25) and (26).

7) The effect of grain angle (α) on elastic constants is calculated by equation (27). The results are shown in tables 34, 35 and 36, and in figures 18. The effect of varying the grain angle on Young's modulus in LT plane is greater than that in LR plane. The minimum value of Young's modulus in RT plane of conifer woods is obtained at the neighbourhood of 45° , whereas for hardwoods such a relation is not found. The Poisson's ratios for some angles of some species become negative in LT plane, even in LR plane. The Poisson's ratios at 45° in RT plane (μ_{RT-45}) of soft conifer woods are greater than those of hardwoods. The value of G_{RT} may be estimated by measuring E_{RT-45} and μ_{RT-45} , the comparison of calculated values of G_{RT} by the third equation of equations (3) and equation (10) represented in table 21.

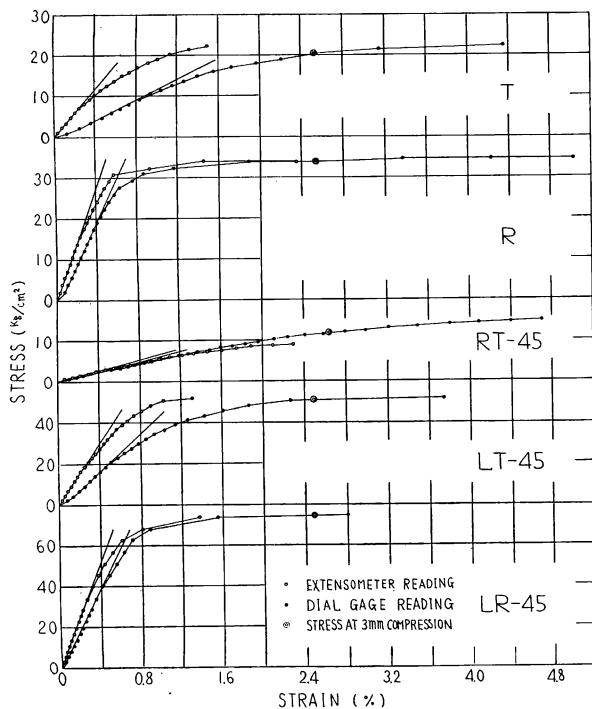
8) The effect of grain angle on compressive stresses at P. L. is examined by equations 28 and equation 29, the results are represented in tables 44 to 47. If $\sigma_x\sigma_y/\tau_{xy}^2=3$, the Norris equation (29) reduces to the first equation of the Hankinson equations (28). The values of $\sigma_x\sigma_y/\tau_{xy}^2$ are represented in table 48. The load-deformation curves of specimens in shearing tests as shown in figure 19 are illustrated in figure 24, and the manner of failure of specimens is shown in figure 20. The relations between compresses and shearing stresses are represented in table 49.

9) These tests were conducted at only air dry condition, therefore no information relative to the effect of moisture content on the elastic constants and stresses can be obtained. Furthermore, the conclusions from this study are based on the results from a comparatively small number of solid specimens, and must be considered as indicative only.

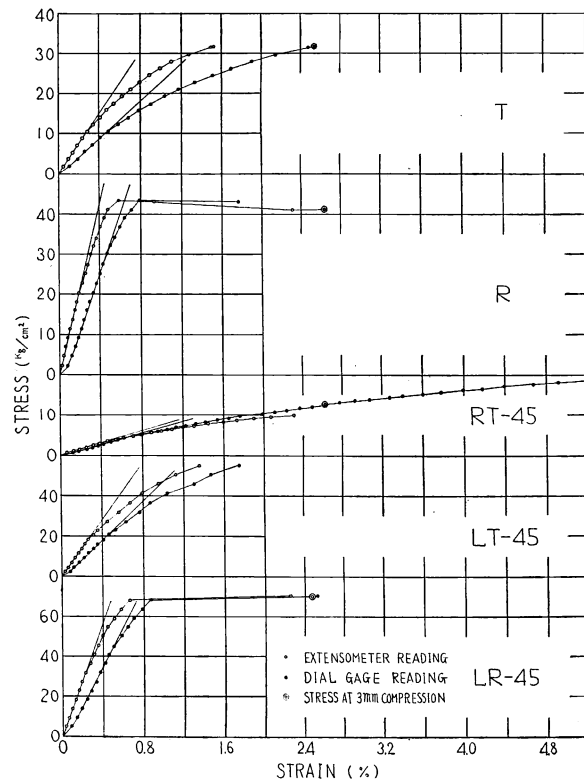
第 21 図-1 針葉樹材
Softwood第 21 図-2 散孔材・輻射孔材
Diffuse porous wood & radial porous wood第 21 図-3 環孔材
Ring porous wood

第 21 図 繊維方向圧縮試験片の応力-歪曲線

Fig. 21 Stress-strain curves of specimens in compression parallel to grain (L)



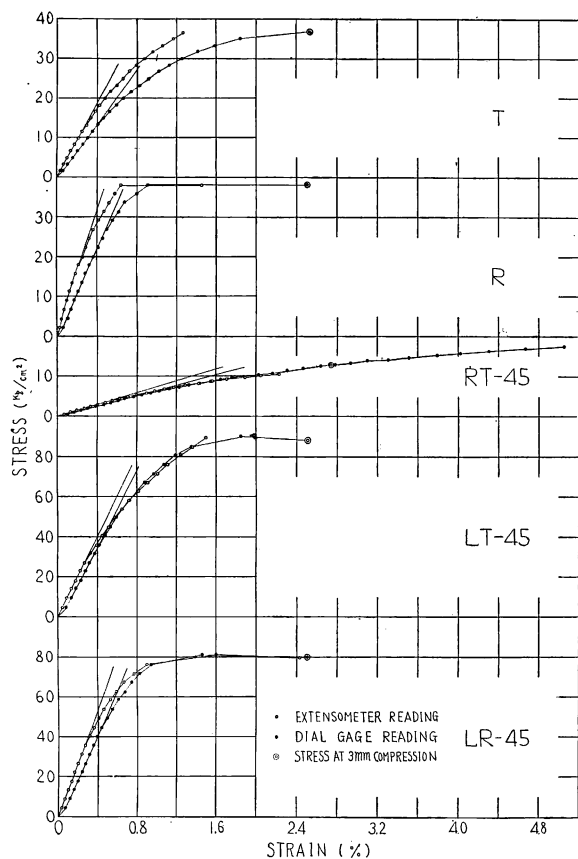
第 22 図-1 スギ Sugi



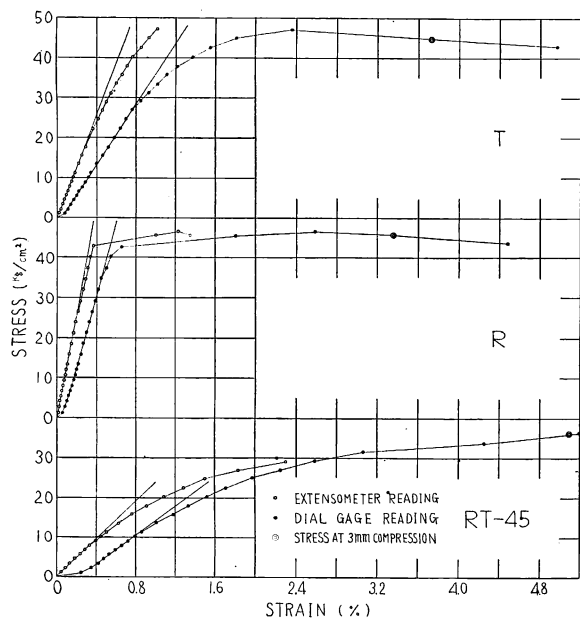
第 22 図-2 トドマツ Todomatsu

第 22 図 圧縮応力-歪曲線

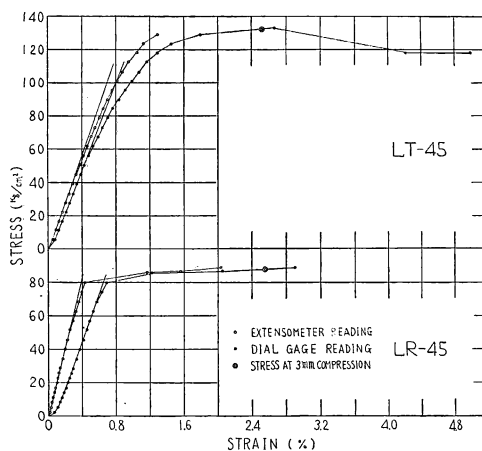
Fig. 22 Stress-strain curves of specimens in compression



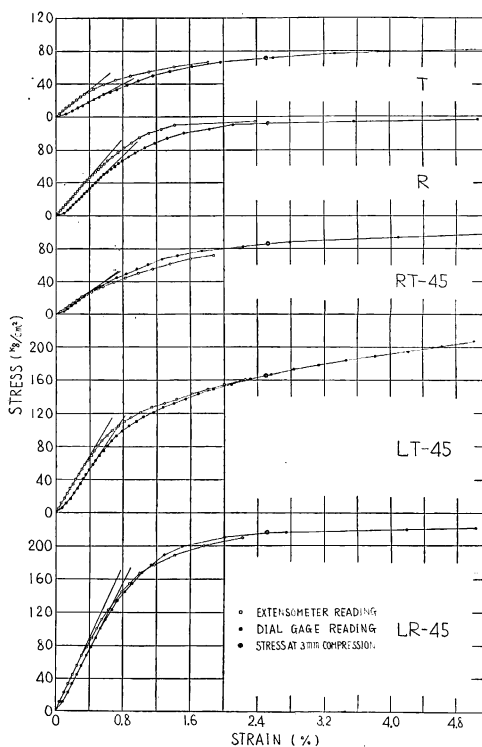
第 22 図-3 エゾマツ Yezomatsu



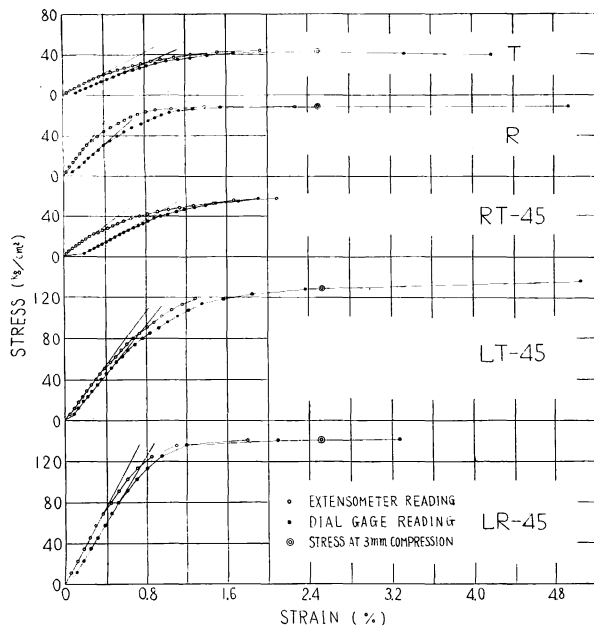
第 22 図-4 アカマツ Akamatsu



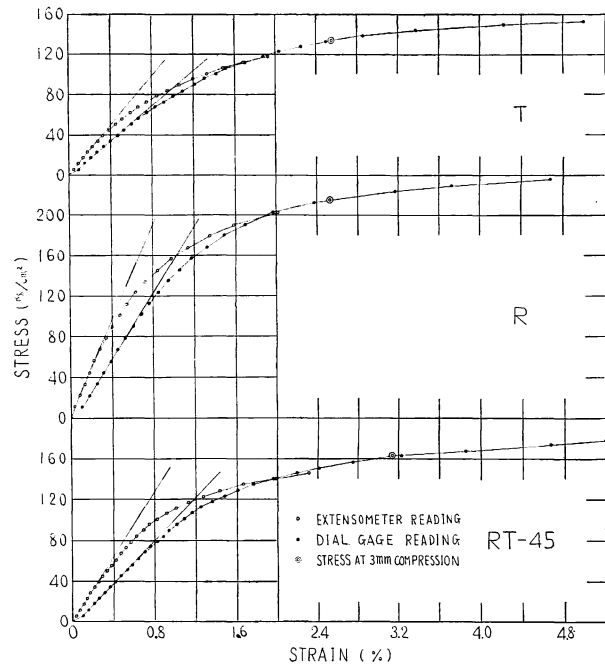
第 22 図-4' アカマツ Akamatsu



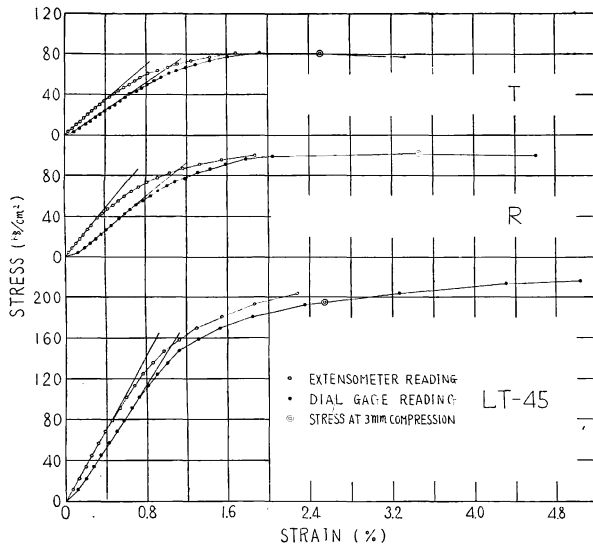
第 22 図-5 ブナ Buna



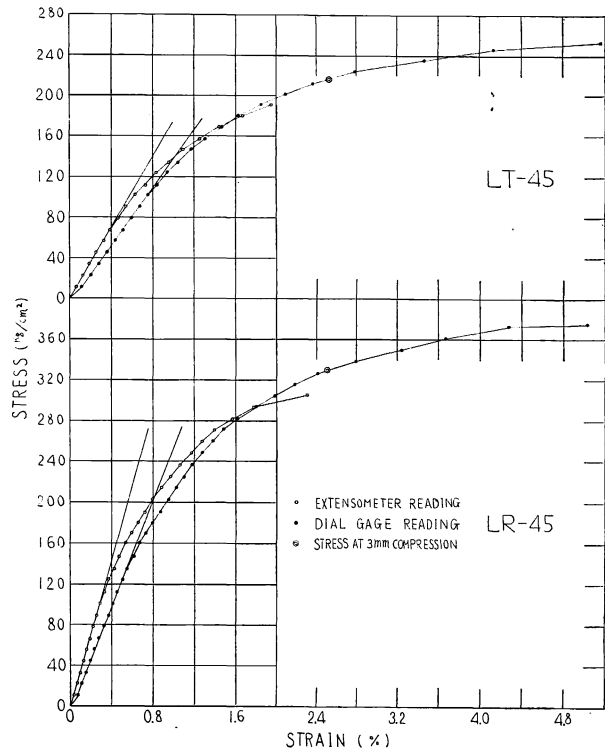
第 22 図—6 アピトン Apitong



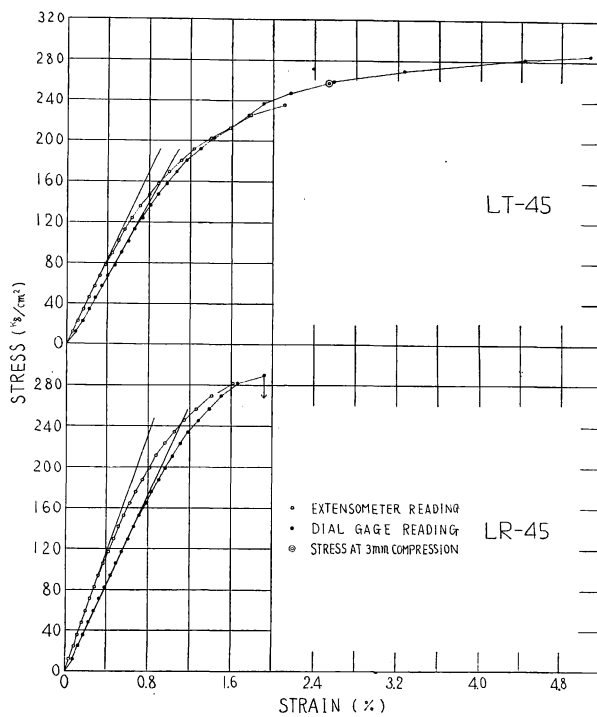
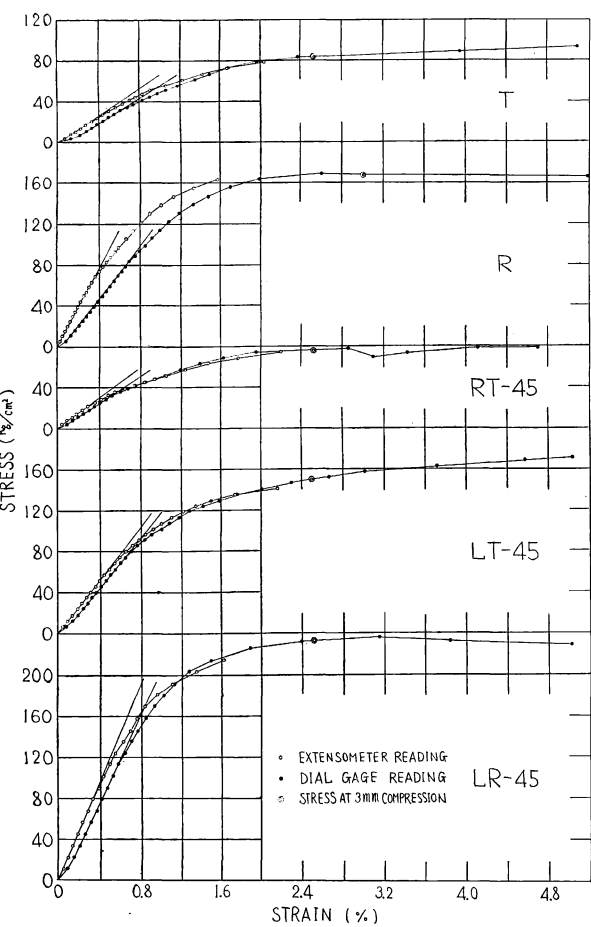
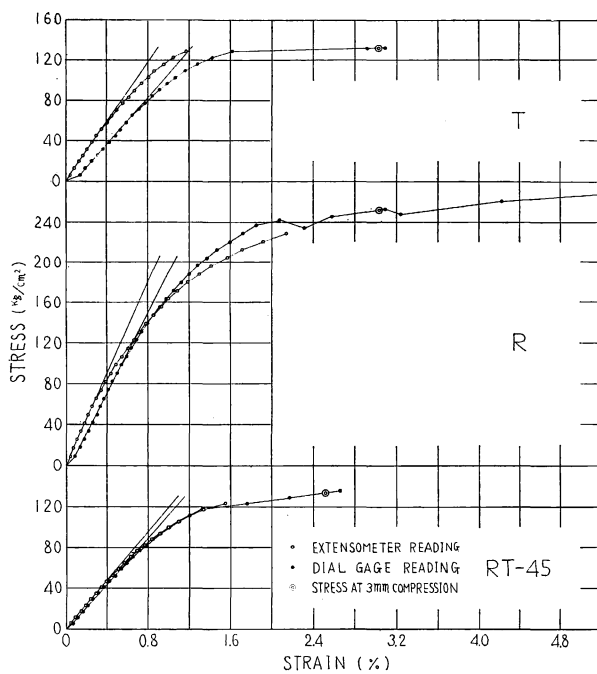
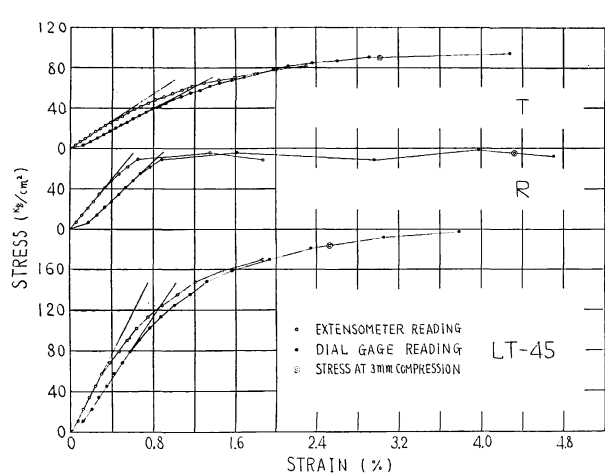
第 22 図—8 イチイガシ Ichigashi

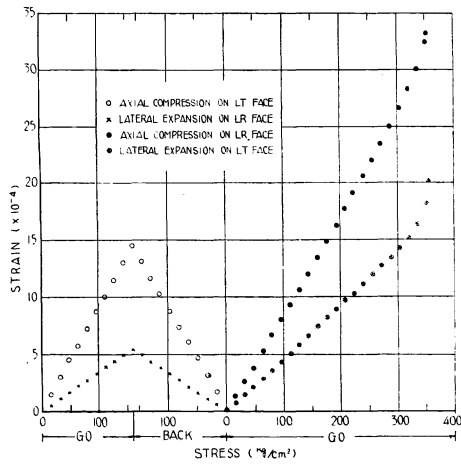


第 22 図—7 マカバ Makaba

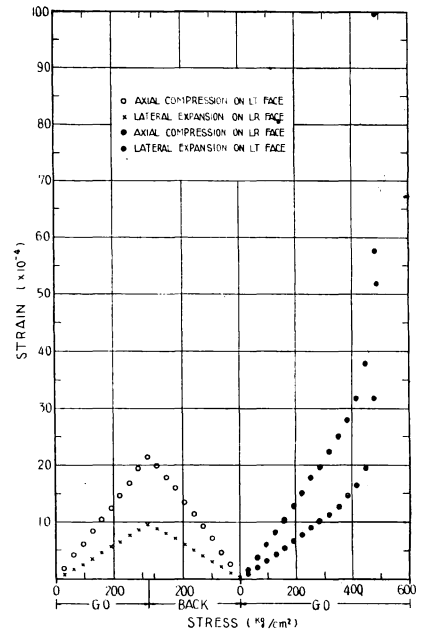


第 22 図—8' イチイガシ Ichigashi

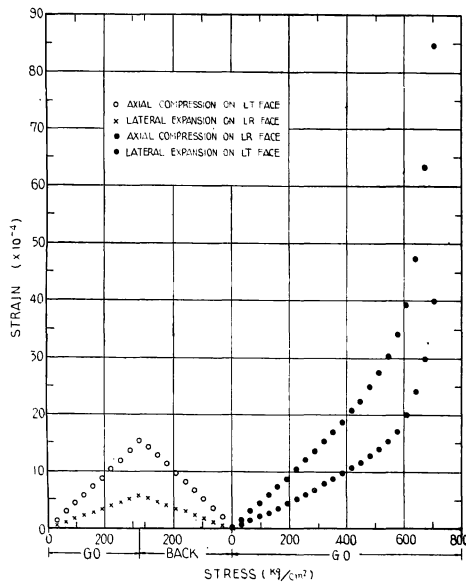




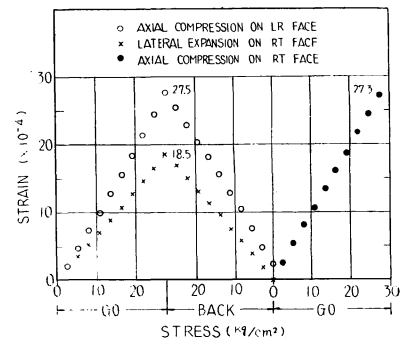
第 23 図—1 エゾマツ L 試験片
Yezomatsu, L-specimen



第 23 図—2 ブナ L 試験片
Buna, L-specimen



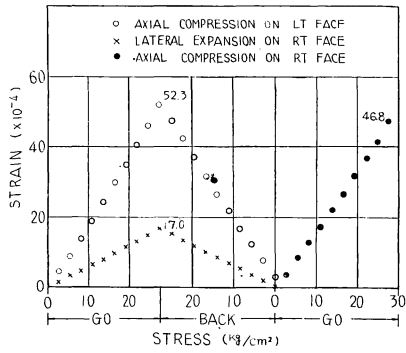
第 23 図—3 ミズナラ L 試験片
Mizunara, L-specimen



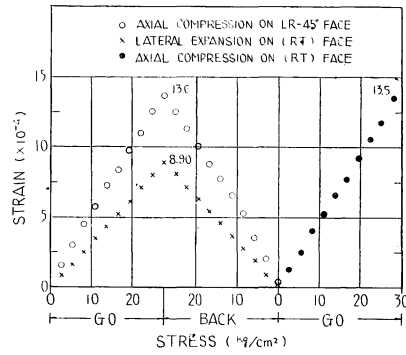
第 23 図—4 ブナ R 試験片
Buna, R-specimen

第 23 図 荷重方向の圧縮歪と横方向の伸び歪の関係

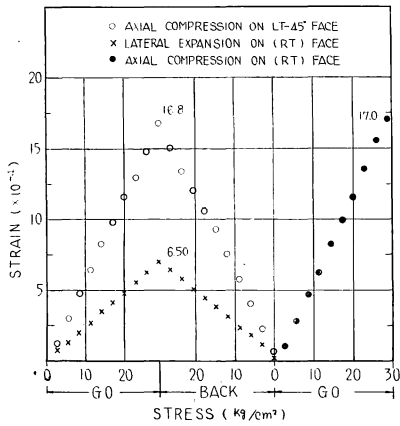
Fig. 23 Relation between axial compressive strain and lateral expansive strain



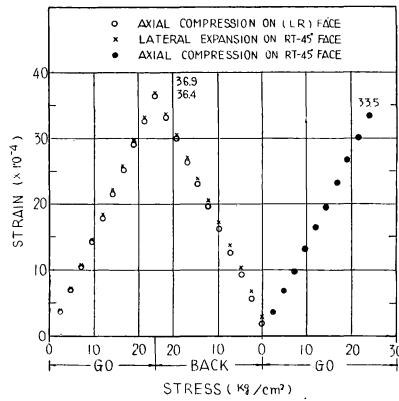
第 23 図—5 ブナ T 試験片
Buna, T-specimen



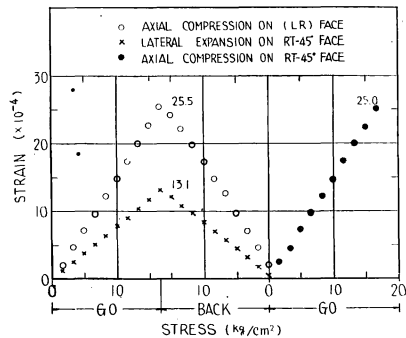
第 23 図—6 ブナ LR-45 試験片
Buna, LR-45 specimen



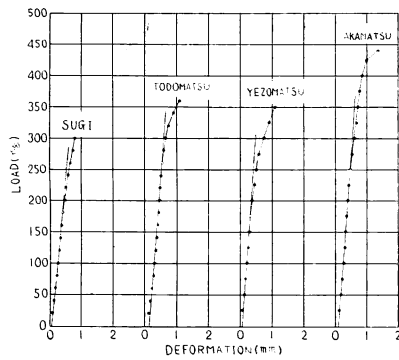
第 23 図—7 ブナ LT-45 試験片
Buna, LT-45 specimen



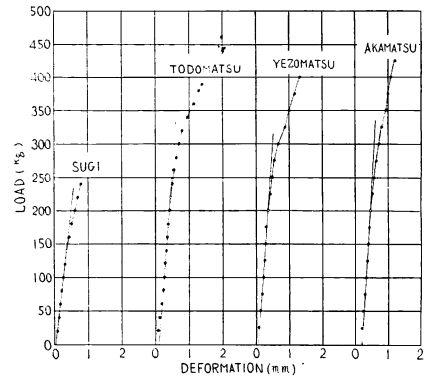
第 23 図—8 エゾマツ RT-45 試験片
Yezomatsu, RT-45 specimen



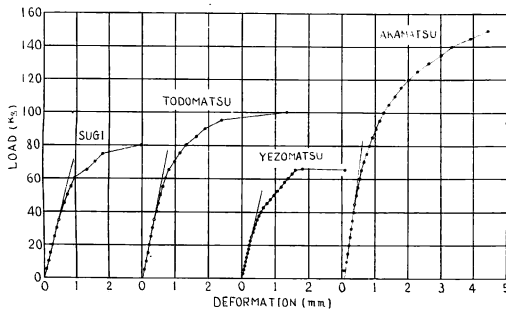
第 23 図—9 ブナ RT-45 試験片
Buna, RT-45 specimen



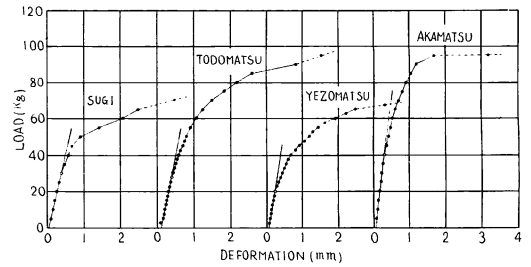
第 24 図—1 針葉樹材 A試験片
Softwood, A-specimens



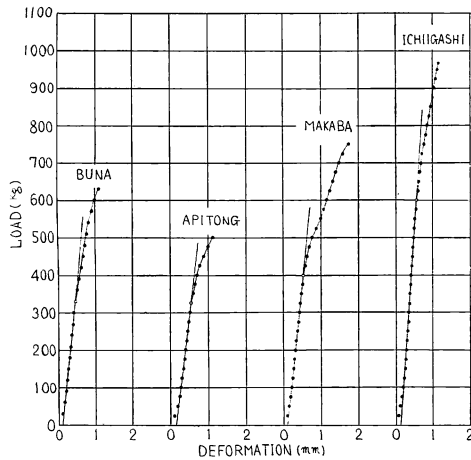
第 24 図—2 針葉樹材 B試験片
Softwood, B-specimens



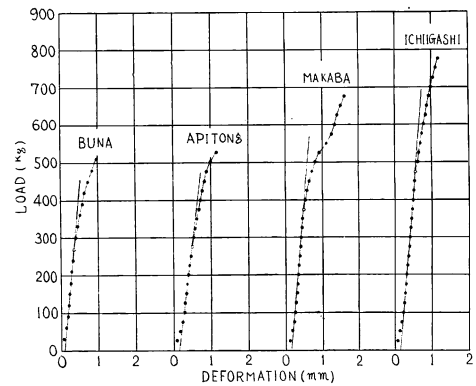
第 24 図—3 針葉樹材 C試験片
Softwood, C-specimens



第 24 図—4 針葉樹材 D試験片
Softwood, D-specimens



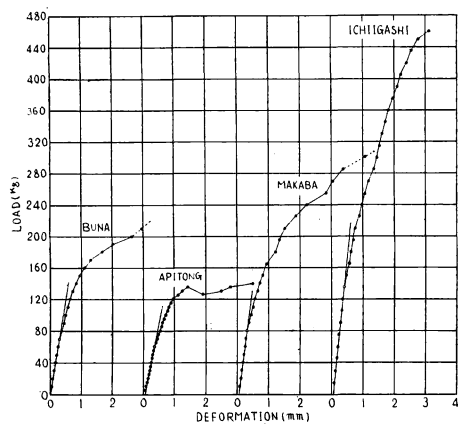
第 24 図—5 散孔材・輻射孔材 A試験片
Diffuse porous wood & radial porous
wood, A-specimens



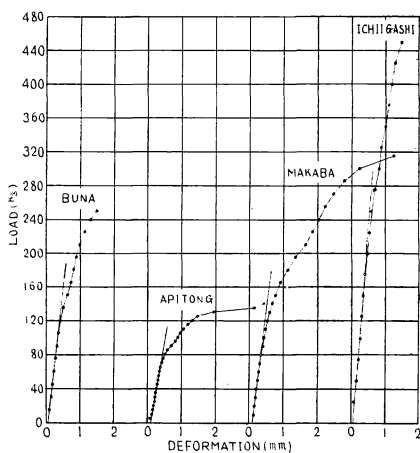
第 24 図—6 散孔材・輻射孔材 B試験片
Diffuse porous wood & radial porous
wood, B-specimens

第 24 図 セン断試験片の荷重—変形曲線

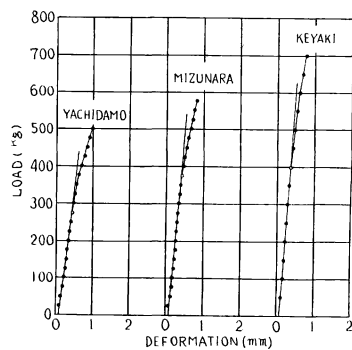
Fig. 24 Load-deformation curve of specimens in shearing tests by A. S. T. M.
type's shearing tool



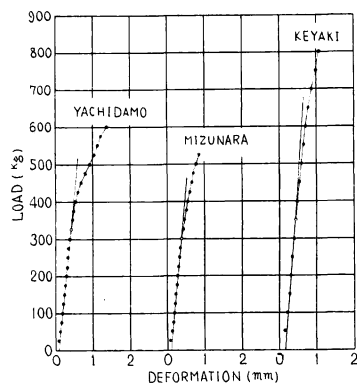
第 24 図—7 散孔材・輻射孔材 C 試験片
Diffuse porous wood & radial porous
wood, C-specimens



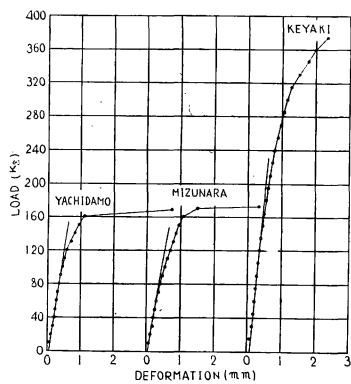
第 24 図—8 散孔材・輻射孔材 D 試験片
Diffuse porous wood & radial porous
wood, D-specimens



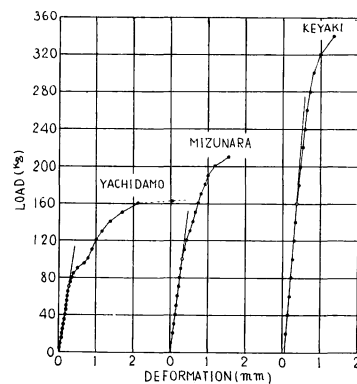
第 24 図—9 環孔材 A 試験片
Ring porous wood, A-specimens



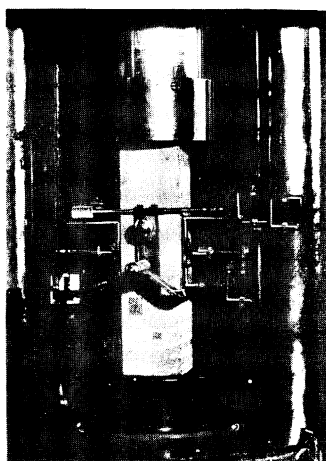
第 24 図—10 環孔材 B 試験片
Ring porous wood, B-specimens



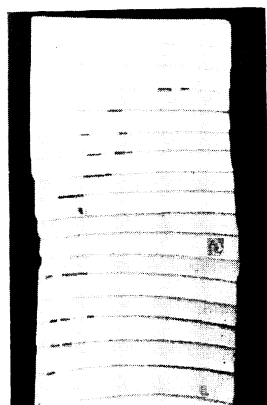
第 24 図—11 環孔材 C 試験片
Ring porous wood, C-specimens



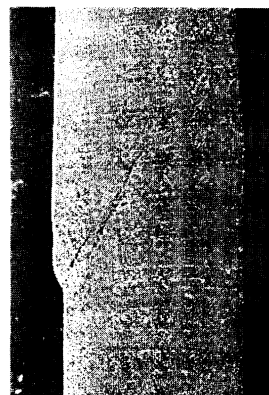
第 24 図—12 環孔材 D 試験片
Ring porous wood, D-specimens



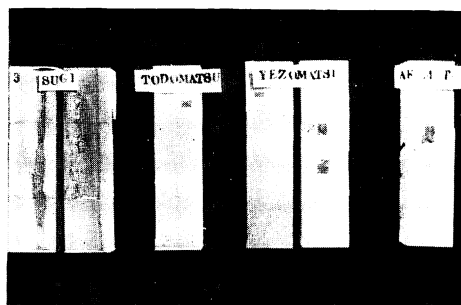
第 3 図 ポアソン比測定装置
Fig. 3 Axial and lateral extensometers used in tests to determine Poisson's ratio



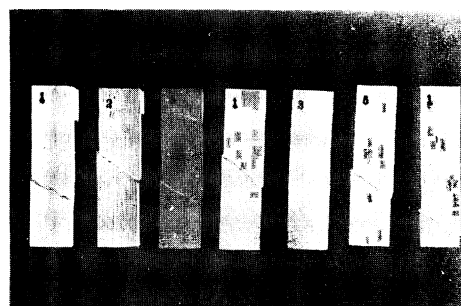
第 9 図 エゾマツの放射方向
圧縮試験片の破損形
Fig. 9
Manner of failure of R
specimen of Yezomatsu
(Sliding of spring wood)



第 10 図 アピトン放射方向
圧縮試験片の破損形
Fig. 10 Manner of failure
of R specimen of Apitong
(Shear)

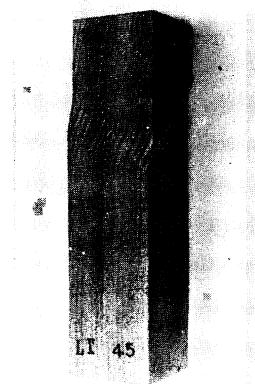


第 5 図—1 針葉樹材 Softwood

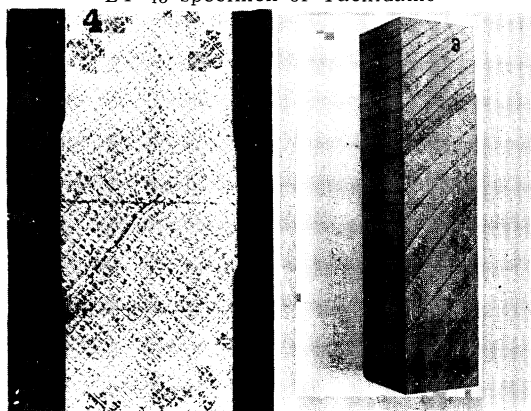


第 5 図—2 広葉樹材 Hardwood

第 5 図 繊維方向圧縮試験片の破損形
Fig. 5 Manner of failure of specimens in
compression parallel to grain

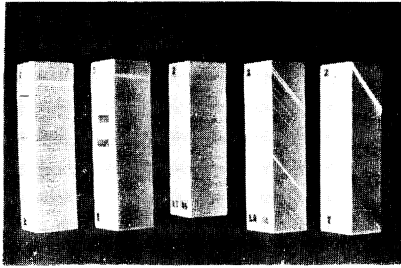


第 11 図 ヤチダモの LT-45 圧縮
試験片の破損形
Fig. 11 Manner of failure of
LT-45 specimen of Yachidamo

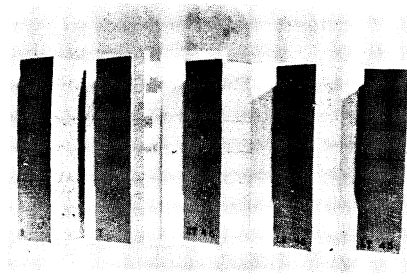


第 12 図—1 ミズナラ 第 12 図—2 ケヤキ
Mizunara Keyaki

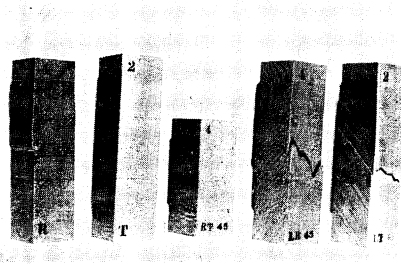
第 12 図 環孔材の RT-45 圧縮試験片の破損形
Fig. 12 Manner of failure of RT-45 specimen
of ring porous woods



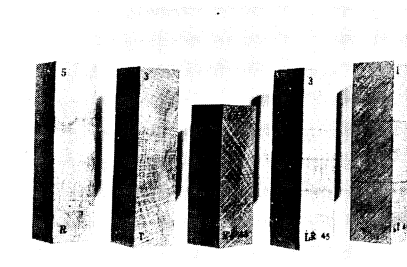
第 13 図—1 エゾマツ Yezomatsu



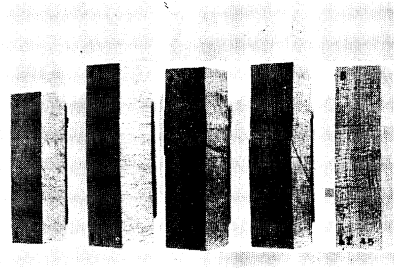
第 13 図—2 ブナ Buna



第 13 図—3 アピトン Apitong



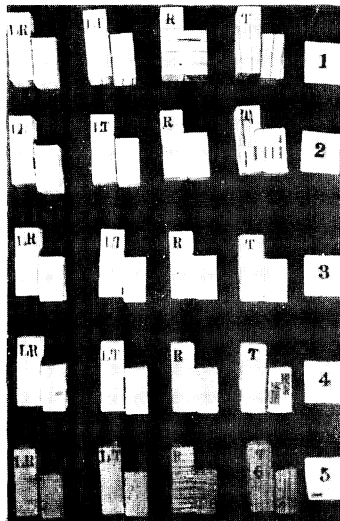
第 13 図—4 イチイガシ Ichiigashi



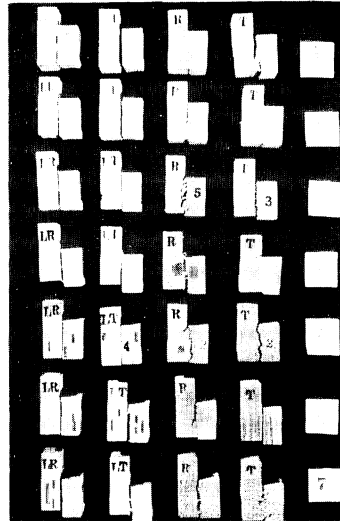
第 13 図—5 ミズナラ Mizunara

第 13 図 圧縮試験片の破損形

Fig. 13 Manner of failure of specimens in compression



第 20 図—1 針葉樹材 Softwood



第 20 図—2 広葉樹材 Hardwood

第 20 図 セン断試験片の破損形

Fig. 20 Manner of failure of specimens in shearing tests

1. ヤチダモ Yachidamo
2. ブナ Buna
3. ミズナラ Mizunara
4. マカバ Makaba
5. アピトン Apitong
6. ケヤキ Keyaki
7. イチイガシ Ichiigashi