

(昭和36年5月造船協会春季講演会において講演)

木船構造継手の基礎的研究

正員 竹 鼻 三 雄*

Basic Study on the Joints of Wooden Ship

By Mitsuo Takehana, *Member*

Summary

In order to obtain basic data on the strength of wooden ship, the strength of timber is investigated taking into consideration of micro-structure in wood.

At first, a large number of fine copper wires are gathered together and soldered into a circular cylinder. These models (57 pieces all) are tested in compression, and shows very much close resemblance to the compression failure of wood. It is explained that the mode of failure is governed by the binding strength of each elements.

Then, hollow rectangular tubes made up of paper laminates (vellum paper type B, 80 lb) are gathered together and cemented by Cemedine C (232 pieces total). These models are tested in tension, compression and bending, and compared to wood. It is shown that the compressive strength, the surface compression phenomenon, the relation between compressive strength and the orientation of fibers, stress distribution on the section in bending, and mode of failure are all simulated very well.

In short, these simulated models show very close resemblance to wood, and contribute very much toward the analysis of the strength of wood.

1 緒 言

工業用材料をその材料力学的取扱いの面より分類してみると、等方性体と異方性体とに分けられ、後者に相当するものの組織を見ると、層状（一次元）、または繊維状（二次元）、のエレメントが集合して成り立っていることを知る。木材は繊維の集合によつて構成されていることは周知のとおりである。従つて木材の強度はこれらの繊維の物理・化学的結合力によつて構成されており、またその構造を巨視的に見れば波板、補強板、強化プラスチック板などと同じく、均質直交異方性体としての材料力学的取扱いが可能となる。

木材の強度の構成は

1. 単繊維自体の強度（引張による切断）
2. 繊維相互間の接着力と摩擦力（引張による抜け、剪断強さ、圧縮による破損）

の2要素に分解できる。しかし、木材は天然のものであるから、これらの要素は樹木自体の成育条件による無数の因子の影響を強く受けて、木材の強度を非常に複雑なものとしていて、個別的にこれらを論ずることは、実際の木材についてはほとんど不可能である。また木材中には、樹種によつて異なる多種の繊維が混在し、これらが温度・湿度等の環境によつて支配されるので、材料力学的取扱いを一層難しくしている。

木材中の微細組織を深く追求し、細胞膜質の超顕微鏡的組織におよぶ研究は、木材組織学の分野であり、この方面の研究の発展により、セルローズその他の化学物質がどのように細胞膜を構造しているかについては、ほぼ定説（房状ミセル説）が得られているようである¹⁾。

一方木材利用の面から、木材の物理的、機械的性質を巨視的に研究するのは、木材理学²⁾ または木材強弱論³⁾

原稿受付 昭和35年12月20日

* 東京大学工学部

の分野であつて、天然物であるため非常に個別的な木材の諸性質から、いかなる方法で、諸因子を含めて樹種と材質に応じた特性値の指標値と安定域を得て、木材構造物設計の基礎資料とするかについてが研究の主眼となっている⁴⁾。また、木材の破損法則を材料強度論の立場から求めた研究があるが⁵⁾、これは木材組織を概念的に導入しただけで、木材の組織を深く考えたものではない。木材を弾性学的に均質直交異方性体と考へて、代表的樹種について9個の弾性常数の全部を求めた弾性論的な研究⁶⁾があり、木材の平面弾性問題の解決に一步を踏み出している。

木材の微細組織を考慮して物理的性質を求めた例としては、収縮異方性に関する一連の研究⁷⁾があり、個別的な木材微細構造を丹念に解析し、収縮異方性の原因を探究している。また機械的性質を定性的に説明した例としては、細胞膜をつる巻パネの組合せ円筒で類似させた構造模型によつて、木材の弾性常数を求めた研究がある⁸⁾。

著者⁹⁾はさきに、木材の微細構造を構造力学的に模型化した紙筒の集合模型によつて、木材のヤング係数の異方性と面圧現象についての説明を試み、木材と紙筒模型とが密接な類似関係を有することを確めた。本論文はこれを拡張し、木材を繊維集合体としてみた場合の弾性および強度の異方性を紙筒模型その他によつて構造力学的に解明した研究のうち実験結果を主として説明したものである。従つて本論文の内容は直交異方性体としての木材の力学的特性を、構造力学的な手法によつて説明したものであつて、木材組織学と木材強弱学との間に連繫を設けるものである。また、この方法は、ひとり木材のみに止らず、強化プラスチックその他の新しい構造用材料の力学的解明にも寄与するものであると信ずる。

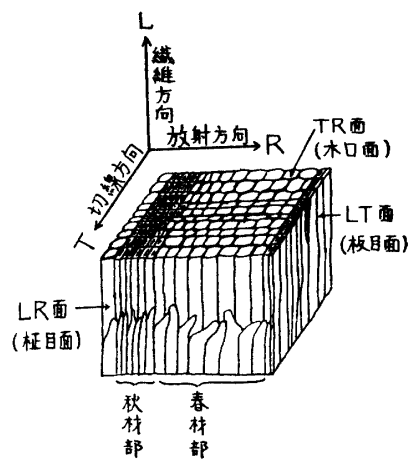
本研究の研究費の一部は、昭和34年度文部省科学研究費に仰いだことを記して謝意を表する。

2 木材の微細構造とその類似模型

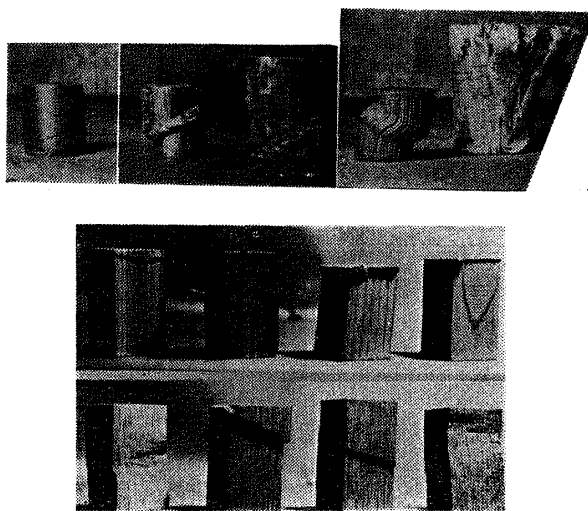
木材の木部細胞は、fiber-group (仮導管、木繊維)、vessel-group (導管) および ray (射出線) に区分され、最初の2groupは細胞長軸が木材の縦方向に配列し、rayは細胞長軸が木材の放射方向に配列している。これらの構成要素のうち fiber-group は針葉樹材で90~95%、広葉樹材で45~60%を占めており、木材の主要強度要素である。これには形状および膜厚を異にする春材および秋材細胞を含み、これらが交互に同心円状に重なつて年輪を構成している。薄膜大細胞の vessel-group および柔細胞からなる ray は強度に重要な役割を果していないと考えられる。

従つて木部の強度に寄与するものは、すべて材の縦方向に配列する繊維であり、木材の諸強度はこれらの繊維の膜質、膜厚、外形寸法および配列方法と相互の接着度合に支配されるものと推定することができる。

木材中の直交3軸のとり方を第1図に示すように定めることとし、木口面に垂直にかかる荷重を



第1図 木材の直交3軸のとり方



第2図 銅線束と木材との圧縮破損形状の比較
上段：銅線束
左より、むく丸棒、0.18mm ハンダ結合のもの2個、0.5mm ハンダ結合、0.18mm ポリエステル結合
中段：スギ
左より、端面座屈、中央座屈、端面圧潰2個
下段：ナラ
左より、中央圧潰、端面座屈、中央座屈、端面圧潰

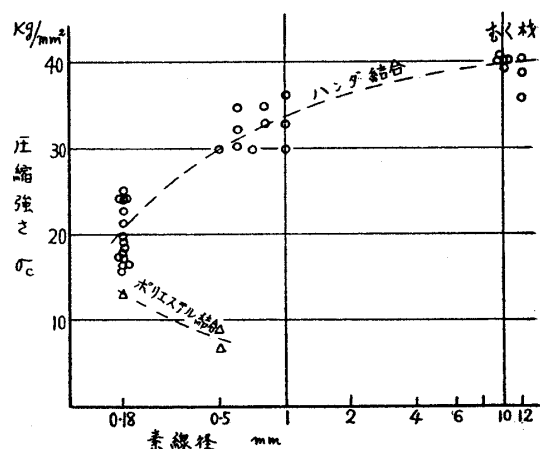
L方向荷重とよび、荷重が順次柁目面の方向に回転した場合には、 $LT-\theta^\circ$ とよび、柁目面に直角となればT方向と称するように定める。

木材強度が構成繊維の寸法および接着度合に支配されることを実証するために次の実験を試みた。すなわち、錫メッキ銅線（直径 0.18mm, 0.5mm, その他）をハンダおよびポリエステル接着剤で結合し、直径 10~20mm, 高さ 20~30mm の円柱形に仕上げたものの圧縮試験を行なった。その破壊形状を木材と比較したのが第2図である。スギは繊維自体とその間の接着力が弱いので、端面で圧潰するものが多く、これは図右上のポリエステル結合銅線束に類似している。スギの圧縮試験片の中央附近に 1mm 程度の小孔を明けると中段左から2番目のように、中央で繊維の座屈破損（gross failure line）を起すが、その縦軸となす角は 90° に近い。これに反し広葉樹材であるナラは端面が圧潰することではなく、全体の座屈破損または、gross failure line による局部座屈によつて最高荷重に達し、gross failure line が縦軸となす角は 70° 附近である。図の下段のナラの破壊形式は、上段の中央3個のハンダ結合銅線束の破壊形式と類似している。なお、むくの銅円柱の圧縮実験を行なうと端面の摩擦による拘束のために太鼓状に変形するか（上段左）、またはオイラー座屈をするかのいずれかで、決して gross failure line は現われない。

これら試験片の圧縮強さ σ_c と素線径との関係を第3図に示した。ハンダ結合の場合は素線径が大きくなるに従つて強度は向上するが、ポリエステル接着の場合は、結合度が弱いために、素線径が大きくなると強度はかえつて低下することがよく示されている。

以上のように銅線束によつても破壊形態の一応の類似は得られたのであるが、木材の繊維は普通中空であり、また春材と秋材の区別があるので、これらを類似させるためには、膜厚と寸法の変更できるものでなければならないので、紙を巻いて筒としたものを集束して模型を作ることとした。

針葉樹材の仮導管の寸法は春材で膜厚 2μ 、平均直径 30μ 、秋材で膜厚 6μ 、平均直径 20μ 、長さはいずれも $3,000\mu$ の程度である。従つてこれと寸法的に相似なものを平均直径 5mm の程度で得ようとする、長さが非常に



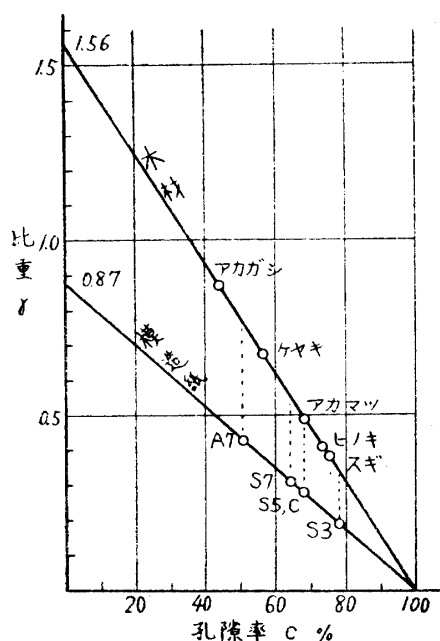
第3図 銅線束の圧縮強さと素線径との関係

第1表 紙筒エレメント要目

使用した紙	B模造紙 140 ポンド (厚 0.15~0.17 mm) および 同上 80 ポンド (厚 0.10 mm)
巻芯の寸法	春材用 7 mm×7 mm および 5.5 mm×5.5 mm 秋材用 5 mm×2 mm および 4.9 mm×2 mm
層数	2~7 層
エレメントの長さ	90 mm, 136 mm, 272 mm の3種
エレメント集束数 (最大のもの)	216 本
エレメントの総数	140 ポンド紙のもの 約 2,300 本 80 ポンド紙のもの 約 22,000 本
80 ポンド模造紙の特性	
比重	0.875
ヤング率 縦方向	46,000 kg/cm²
ヤング率 横方向	18,400 kg/cm²
引張強さ 縦方向	26.6 kg/cm²
引張強さ 横方向	13.3 kg/cm²

れは前報⁹⁾で面圧現象の解明のために製作したものと同様の製法によつたもので、芯のまわりに模造紙をセメダインCによつて接着しながら巻き付け、あとで芯を抜き取つたものである。これを適当な数だけ集束しセメダインで接着した後、傾斜圧縮のものは切断加工し、引張り、曲げ試験用のものは両端に木製のチャックを取付ける。

このようにして集成したものの比重と孔隙率との関係を第4図に示す。S3, S5, S7 はそれぞれ春材の3層、5層、7層のエレメントを集束したものを意味し、A7 は秋材の7層のもの、Cは S3 と A7 を合わせて集束



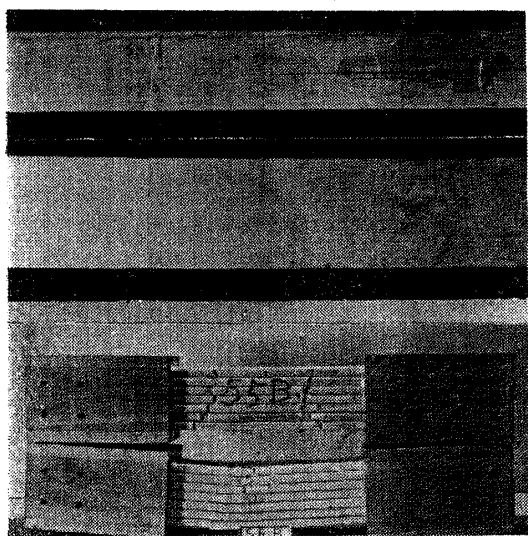
第4図 紙筒の比重と孔隙率との関係、および木材との比較

したものを示す。比較のため木材の実質比重を 1.56 とした場合の比重と孔隙率との関係を示す。同一孔隙率で比較すると S3 はスギ, S5, S7, C はアカマツ, A7 はケヤキに近い孔隙率を有している。

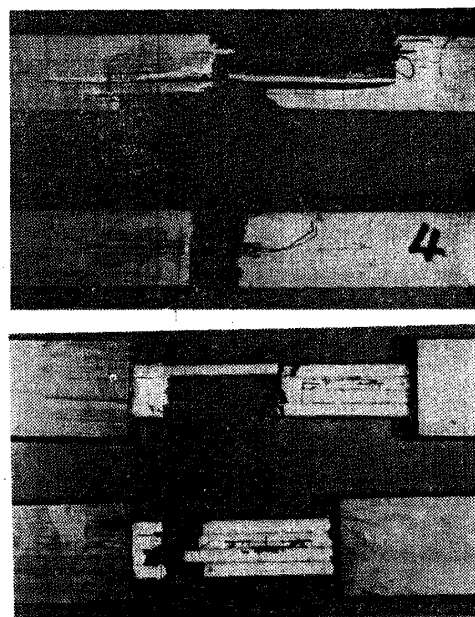
3 引張圧縮および曲げにおける類似

ヒノキ (平均年輪幅 1mm) の引張破壊状況と、紙筒を 8 本集成したものの引張破壊状況とを比較したのが、第5図である。繊維の抜けによるもの (上段) と切断によるもの (下段) のいずれもがそれぞれよく似ている。

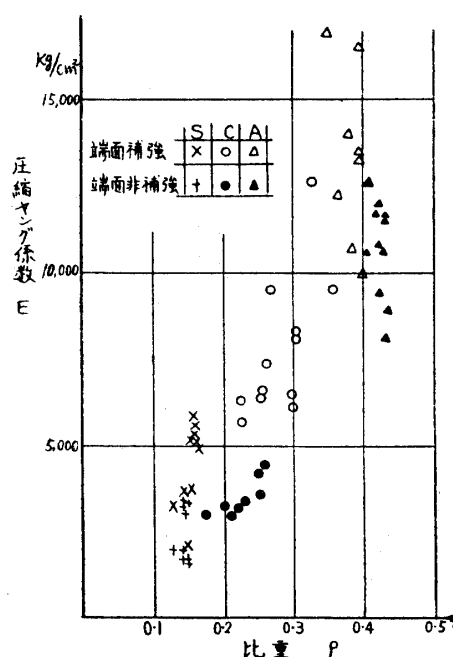
ヒノキ (同上) と紙筒 (49 本集束) との曲げ破壊状況は第6図に示す。木材では荷重は 4 点曲げを加えているので、荷重点において圧縮による破壊が見られるが、中央にも圧縮の破壊線が見られる。紙筒では一様曲げモーメントを受ける部分の圧縮側の壁面座屈によって破壊し、さらに荷重を増すと引張側で切断する。



第6図 曲げ破壊状況の比較
上段: ヒノキ, 上は試験片の上面 (圧縮側), 下は試験片の側面を示す。
下段: 紙筒, 上は上面, 下は側面を示す。

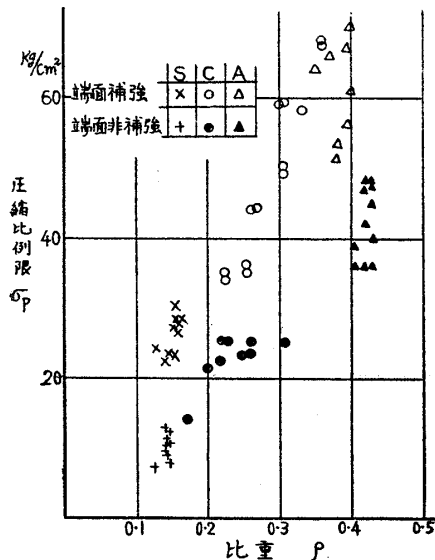


第5図 引張破壊状況の比較
上段 2 個: ヒノキ, 下段 2 個: 紙筒
いずれも上は繊維の抜け, 下は繊維の切断を示す。

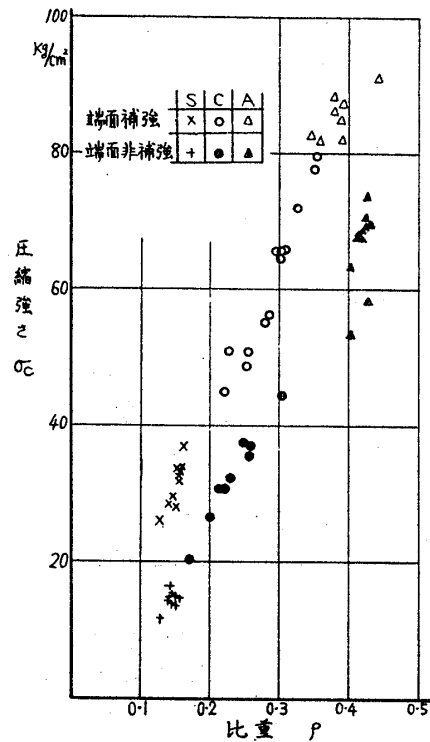


第7図 紙筒圧縮試験, 圧縮ヤング係数と比重との関係

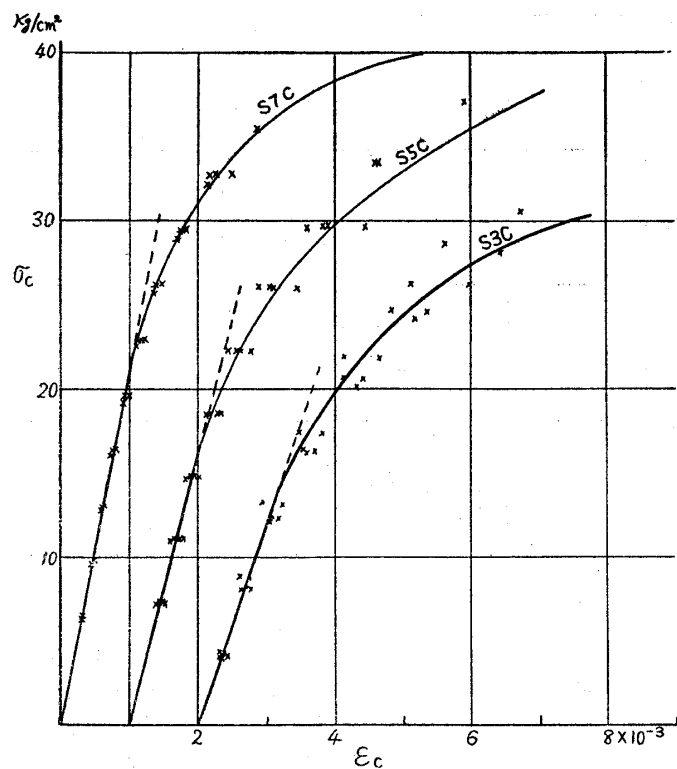
つぎに紙筒の圧縮試験において圧縮ヤング係数、圧縮比例限および圧縮強さが、比重（紙筒の層数と集成数によつて可変）によつていかに変化するかを、第7, 8, 9図に示す。端面を切断したままの紙筒では、端面の圧潰による破損が起り、諸値はやや低いが、端面をセメダインCで補強したものは諸値がよく揃い、比重に比例していることが認められる。春材の圧縮で層数による応力ひずみ曲線の変化を第10図に示す。第11図には引張試験における応力—ひずみ曲線の状況を示す。



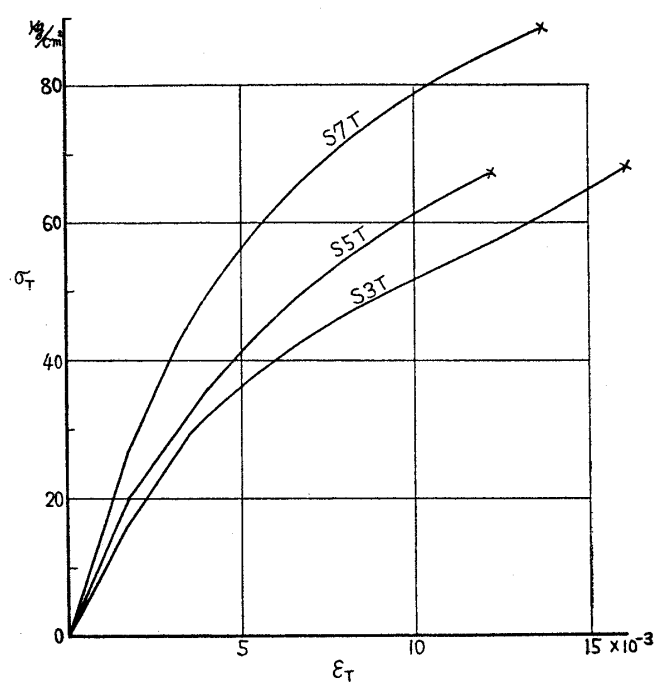
第8図 紙筒圧縮試験，圧縮比例限と比重との関係



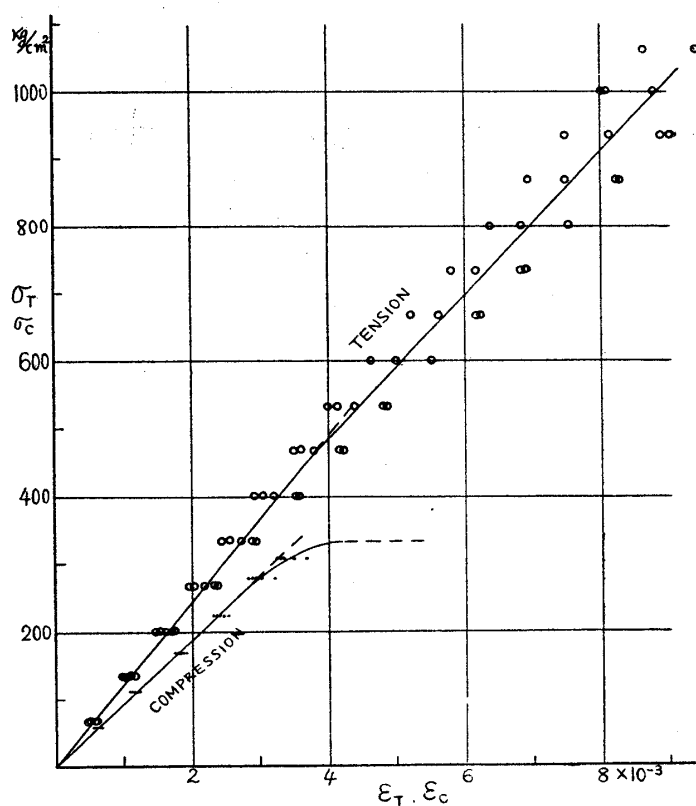
第9図 紙筒圧縮試験，圧縮強さと比重との関係



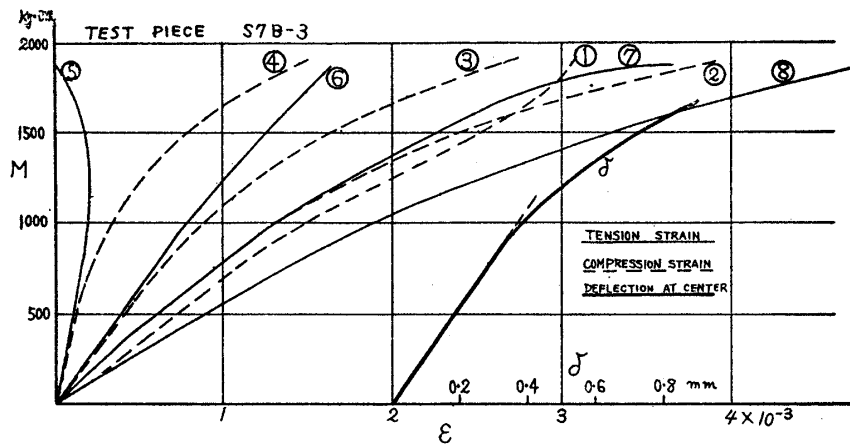
第10図 紙筒圧縮試験，応力—ひずみ曲線
S3Cは3層，S5Cは5層，S7Cは7層のもののそれぞれの平均を示す。



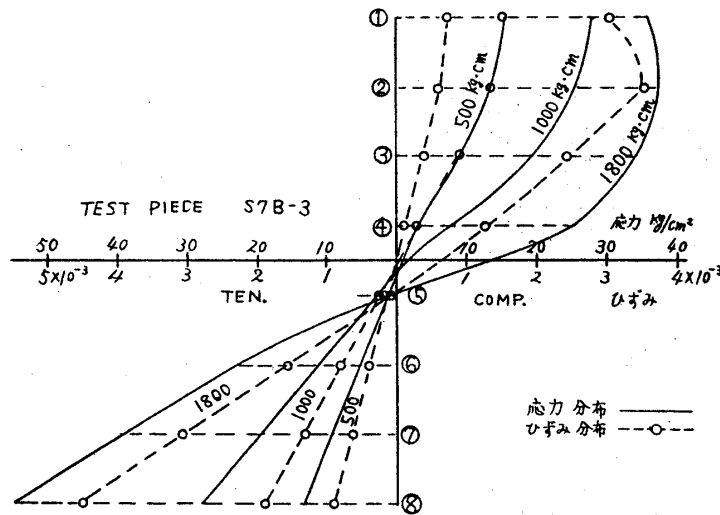
第 11 図 紙筒引張試験，応力—ひずみ曲線
S3T は3層，S5T は5層，S7T は7層のものを示す。×印は切断点を示す。



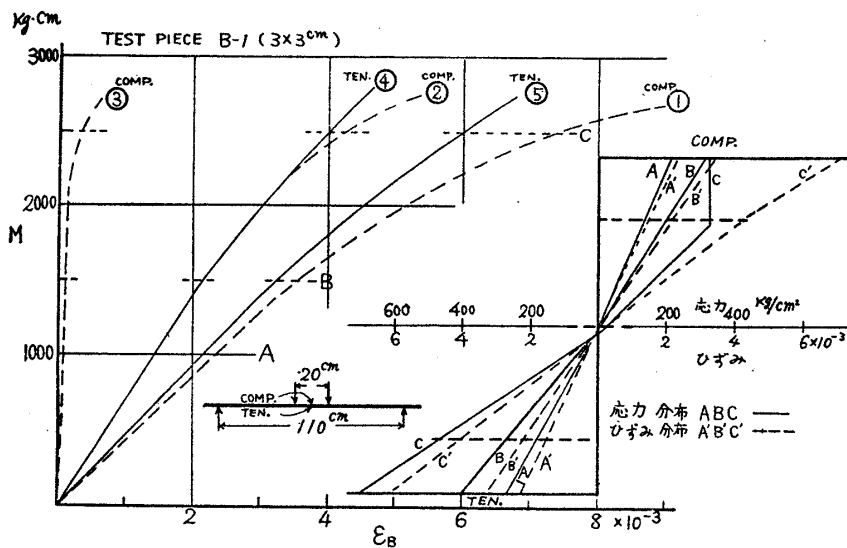
第 12 図 木材の引張，圧縮試験（ヒノキ）
それぞれ平均値を示す。



第 13 図 紙筒曲げ試験, 断面のひずみ変化状況および中央たわみ δ



第 14 図 紙筒曲げ試験, 断面のひずみ, 応力分布
実線は応力, 鎖線はひずみ分布を示す



第 15 図 木材曲げ試験 (ヒノキ), 断面のひずみ, 応力分布
およびひずみの変化状況

これによると、弾性限内の直線部分が2段に折れていることがみられる。このことは第12図に示すヒノキの引張応力—ひずみ曲線が450 kg/cm² 附近で折れていることとよく類似している。この折曲点を下方から第1折点、と名付けると、第1折点で繊維相互の接着が一部破損し、第2折点で繊維相互の接着が大部分剥離するのではないかと考えられる。第12図にはヒノキの圧縮応力—ひずみ曲線を図示した。

紙筒の曲げ試験において、各エレメントの表面に抵抗線ゲージを貼りつけておき、各層のひずみを測定した結果が第13図である。附記のたわみ曲線 δ が900 kg-cm あたりから曲りはじめるが、その点から、中立軸に貼付けた⑤ゲージが圧縮側に増してゆき、また最上面のゲージはそれより少し高い所で、附近にしわが生じたために、圧縮ひずみが解放されるのが見られる。第14図に断面のひずみ分布と応力分布を示す。圧縮側の応力は降伏応力に達し、塑性ビームとしての応力分布が判然と示されている。

ヒノキの曲げ試験における応力とひずみ分布およびひずみの変化状況を第15図に示す。塑性ビームの分布を示していることは同様であるが、紙筒よりも更らにシャープである。

4 傾斜圧縮における類似

第16図に一部示すように荷重方向が繊維方向または年輪層に対してある角度をもつた傾斜圧縮を行ない、圧縮諸値と角度との関係を求め、木材と比較した。木口面にあらわれた破壊形状は第17図に示すとおりで、左方の



第16図 紙筒圧縮試験片

- 第1段：混合型，L方向2個
 第2段：混合型，左側はLR-60°，右側はLT-60°
 第3段：混合型，左側はR，右側はT
 第4段：左側は春材3層TR-5°，中央は混合型，TR-5°，右側は秋材7層，TR-5°

T方向圧縮では荷重は主として秋材層で受けもち、中央のR方向圧縮では春材層の座屈が次々と伝播してゆく様子があらわれている。TR- θ 方向圧縮では右方にみられるように菱形に変形して破壊する。これら試験片の圧縮荷重—縮み曲線の数例を第18, 19, 20図に示す。L方向はシャープな破壊点を示すが、T方向では春材層が一層座屈する毎に大きな荷重の変動があり、平均して荷重は一定のまま変形が流れてゆく傾向を示す。また秋材層のT方向は荷重が一定したまま流れあまり変動はなく、R方向は細胞の偏平化が進んで空洞が押しつぶされると荷重が急激に上昇するのが見られる。混合型では木材の圧縮破壊によく似た曲線形状を示す。

つぎに、木材の傾斜圧縮の場合の中間角度の強度 σ_θ を主軸方向 σ_0 および σ_{90} であらわす諸公式中で最もよく実験値と合うといわれているHankinsonの式

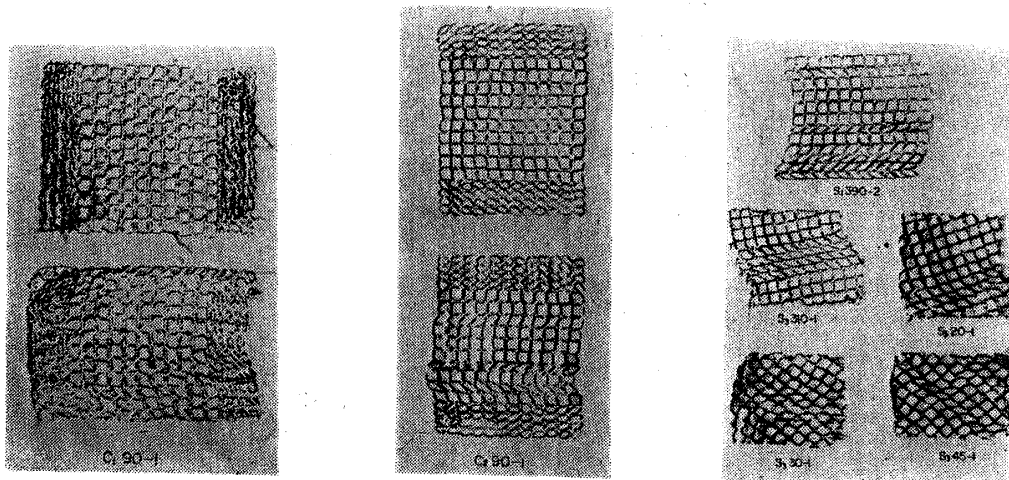
$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_0 \cdot \sigma_{90}}{\sigma_0 \sin^n \theta + \sigma_{90} \cos^n \theta}$$

(n は圧縮の場合に2.5~3.0)

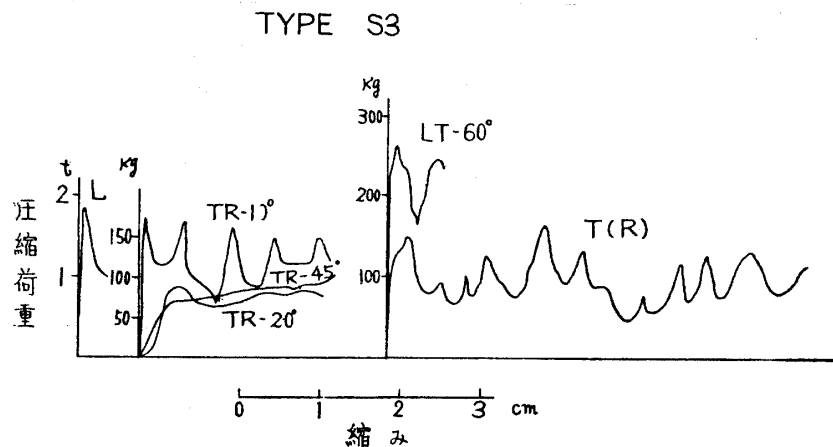
にあてはめて比較してみよう。

第21図に $n=1\sim3$ の場合の圧縮比例限についての σ_{90}/σ_0 と σ_{45}/σ_0 の値を比較してみた。附記の木材の値は木材工業ハンドブックによつたもので、木材は $n=1.5\sim3$ で、軟い木ほど n は概して大であるように考えられる。紙筒の実験値は $n=2.5\sim3$ の間におさまる、圧縮比例限については、木材と共にHankinsonの式によく合致していることが判明した。

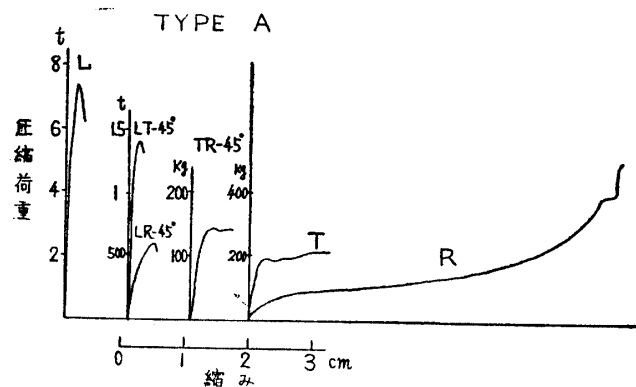
紙筒の圧縮比例限の θ による変化をTYPE S (春材3~7層)，TYPE A (秋材7層)，TYPE C (春秋材混合)について示し、Hankinsonの式と比較したのが、第22, 23, 24図である。 $\theta > 20^\circ$ については大体よく合致するが θ の小さい所で実験値がやや下まわるのは、端面



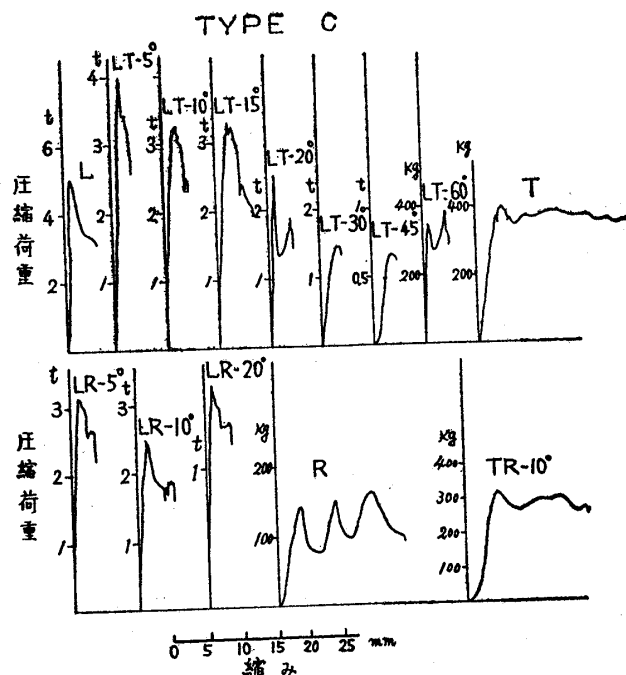
第 17 図 紙筒圧縮試験片の木口面の変形状況
 左側：混合型，T 方向，上は試験前，下は試験後を示す。
 中央：混合型，R 方向，上は試験前，下は試験後を示す。
 右側：春材 3 層，上は R 方向，中左は TR-10°，
 中右は TR-20°，下左は TR-30°，下右は TR-45° を示す。



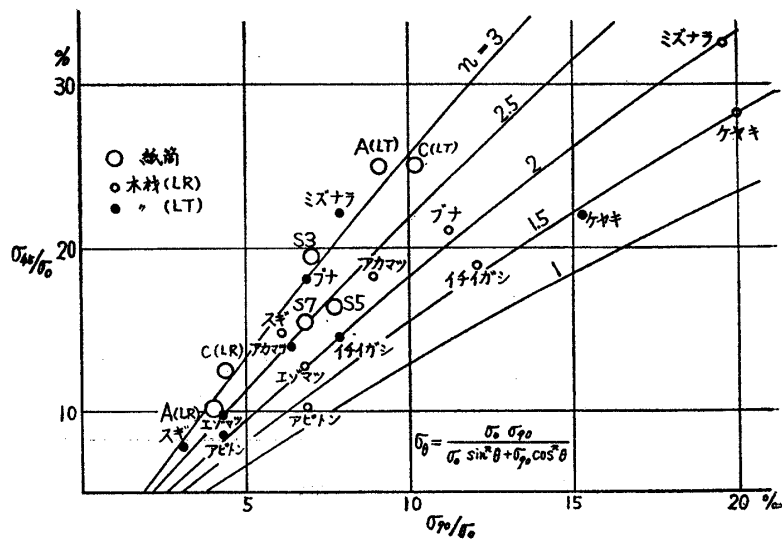
第 18 図 紙筒圧縮荷重—縮み曲線図，春材 3 層



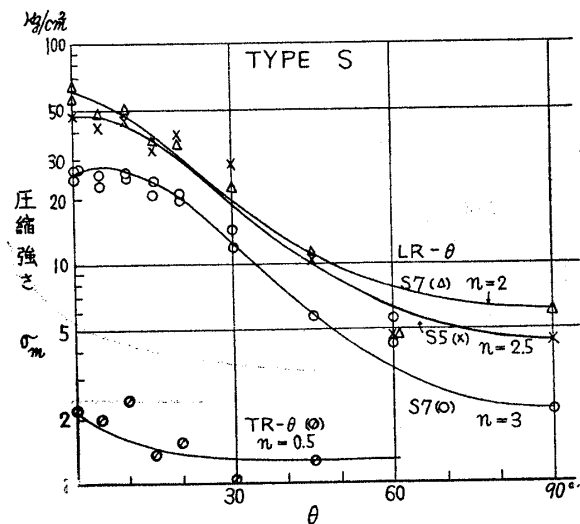
第 19 図 紙筒圧縮荷重—縮み曲線図，秋材 7 層



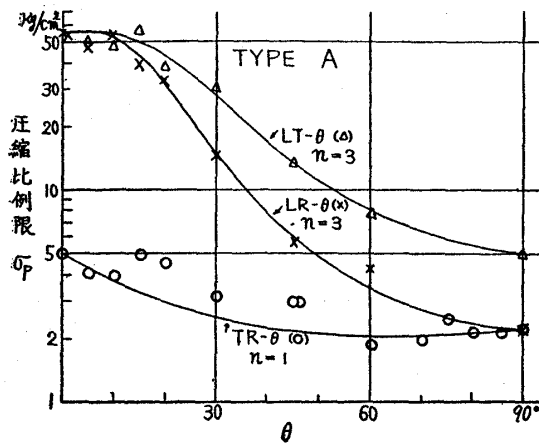
第 20 図 紙筒圧縮荷重—縮み曲線図, 混合型



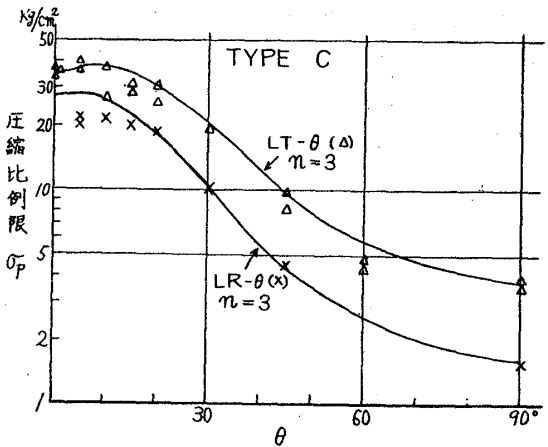
第 21 図 Hankinson 式の係数 n の値, 木材と紙筒との比較



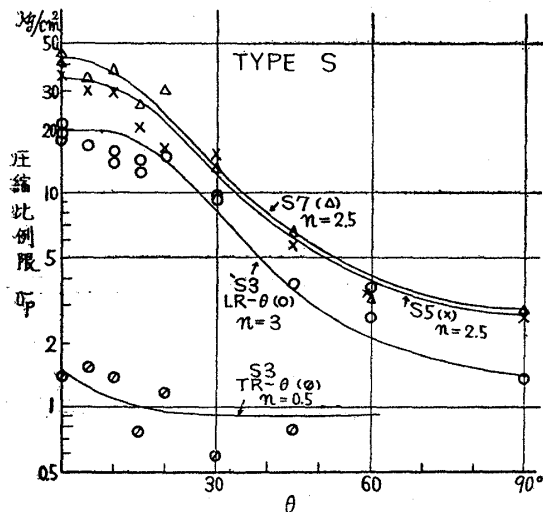
第 22 図 紙筒傾斜圧縮試験, 春材, 圧縮比例限



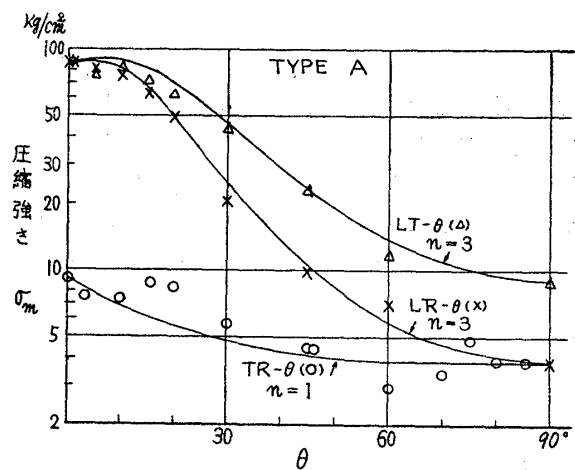
第 23 図 紙筒傾斜圧縮試験, 秋材, 圧縮比例限



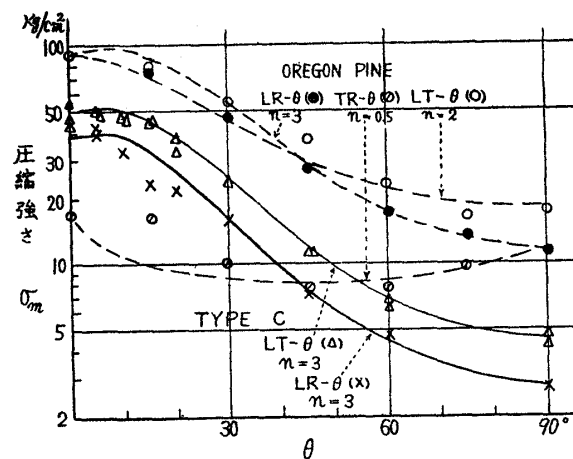
第 24 図 紙筒傾斜圧縮試験, 混合, 圧縮比例限



第 25 図 紙筒傾斜圧縮試験, 春材, 圧縮強さ



第 26 図 紙筒傾斜圧縮試験, 秋材, 圧縮強さ



第 27 図 紙筒傾斜圧縮試験, 混合, 圧縮強さ

仕上の影響が相当効いているものと考えられる。

圧縮強さについて同様の図示をしたのが第 25, 26, 27 図であつて、圧縮比例限よりも、さらによく Hankinson の式に一致するようである。第 27 図には森氏のオレゴンパインによる実験値¹⁰⁾を記入して両者を比較した。紙筒では例外なく T 方向の方が R 方向より大であるが、木材では T 方向の繊維の配列度が R 方向より悪い (R 方向に成育するため) ことが多い (第 1 図参照) ので普通 R 方向が強いことが多い。このことは紙筒でも配列をつらしたものを考えれば容易に類推がつけられる。例示のオレゴンパインは米国産の大材で繊維が非常に規則正しく配列しているために、紙筒模型と同様に T 方向が強いのであると考えられる。

5 結 言

木材の弾性および強度の異方性 (圧縮), 引張りおよび曲げにおける弾性および強度等を定性的に説明するために、銅線束と紙筒集束模型の強度実験を行なつた。その結果、これらの模型は木材の繊維状構造によく類似し、木材の機械的性質を構造力学的に説明することができた。なお、この方法はさらに他の異方性材料の解析に用いることができるであらう。

本研究は昭和 31 年より昭和 35 年に互り東京大学理工学研究所および工学部で行なつたもので、懇切なる御指導を賜つた吉識雅夫教授に深い感謝の意を表します。また有益な御意見と文献を寄せられ、かつ試験模型の加工に御協力を載いた林業試験場沢田稔技官に篤く御礼申上ます。また普通と異なつた困難な模型製作および実験については多数の方々のお手伝を受けたのでここに篤くおん礼を申述べます。

文 献

- 1) 山林 暹 : 木材組織学 (1958), 森北出版
- 2) 平井信二他 : 木材理学 (1953), 朝倉書店
- 3) 関谷文彦 : 木材強弱論 (1939), 賢文館
- 4) 沢田 稔 : 木材の強度特性に関する研究, 林業試験場研究報告 108 (1958)
- 5) C.B. Norris : Strength of Orthotropic Materials subjected to Combined Stresses, F.P.L. Report 1816 (1950)
- 6) 山井良三郎 : 木材の圧縮異方性に関する研究, 林業試験場研究報告 113 (1959)
- 7) 中戸莞二他 : 木材の収縮膨脹に関する異方性の原因に就て (I~Ⅴ報), 日本林学会誌, 木材学会誌 (1953~1957)
- 8) 山井良三郎 : 針葉樹アテ細胞膜の力学的構造模型, 九大農学部学芸雑誌 13 (1951)
- 9) 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 102 (1958)
- 10) 森 徹 : 木材の機械的性質に関する二三の研究, 建築雑誌 45 (1931)