

ヒノキ材の横引張による変形について

金谷 紀行*・山田 正*

Noriyuki KANAYA* and Tadashi YAMADA* : The Deformation of HINOKI
(*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) Wood by Transverse Tensile Tests

はじめに

木材の構造がその力学的性質に関係があることはよく知られてきているところである。ことに、木材の横方向の弾性異方性におよぼす細胞の円筒状構造の寄与は多くの研究者によつて検討されてきたが、はじめて等質材料からなる円筒状模型を用いて木材の仮道管集合構造に近似してみかけのヤング率計算を行なつたのは PRICE¹⁾ である。次いで、BARKAS は PRICE の模型に横弾性異方性におよぼす放射組織の項を加えるために半径方向に放射組織に対応する円筒を含めて解析した²⁾。また、BOUTELJE は放射組織のない春材部の異方性をプレキングラスのような等質材料を用いて拡大模型により検討した³⁾。

このように木材のもつ多孔構造に着目するときには、まず、木材の比重に対応する細胞の形状について検討する必要がある。前報⁸⁾において、木材の比重と径接両方向のヤング率を両対数にプロットし (Fig. 1), これを外挿したとき、細胞膜実質の比重を 1.5 とすると、径接両方向のヤング率に異方性は認められないが、細胞膜の比重を 1 としたときには両者にはすでに多少の弾性異方性がみとめられ、比重が小さくなるほど両者の異方性は大きくなることがわかり、次のような結論に達した。すなわち、

1. 細胞膜実質の横方向における弾性異方性はみとめられない。
2. 細胞膜の横方向における弾性異方性は若干みとめられ、その平均値はほぼ 1.3 となる。
3. 低比重になるにつれて異方性は大きくなる。

2, 3 のように弾性異方性があることは、おもに、各方向における細胞の配列の違いに帰因されるとして解析を単純にするために、Fig. 2 に示すような仮道管だけからなる矩形状の模型を考えた。おもに、接線方向に垂直に力を受けたときに生ずる変形を 3 つに分けて細胞の形状を考慮した接線方向のヤング率の計算式は次のように表わされる。

$$E = \frac{1}{(a+b) \left\{ \sum \frac{d_i}{E_s \cdot b_i} + \sum \frac{1}{3E_s I_i} \left(\frac{a_{1i}}{a_i^2} - \frac{a_{1i}^2}{a_i^2} \right)^3 a_i^3 + \sum \frac{6}{5} \frac{1}{GC_i} \frac{a_{1i}}{a_i} \left(1 - \frac{a_{1i}}{a_i} \right)^2 a_i \left(1 + \frac{2a_{1i}}{a_i} \right) \right\}} \quad (1)$$

また、比重について佐伯の報告¹⁴⁾を用いて検討すれば、細胞膜の厚さ、細胞の形状を考えて次のように表わされる。

* 木材物理部門 (Division of Wood Physics)

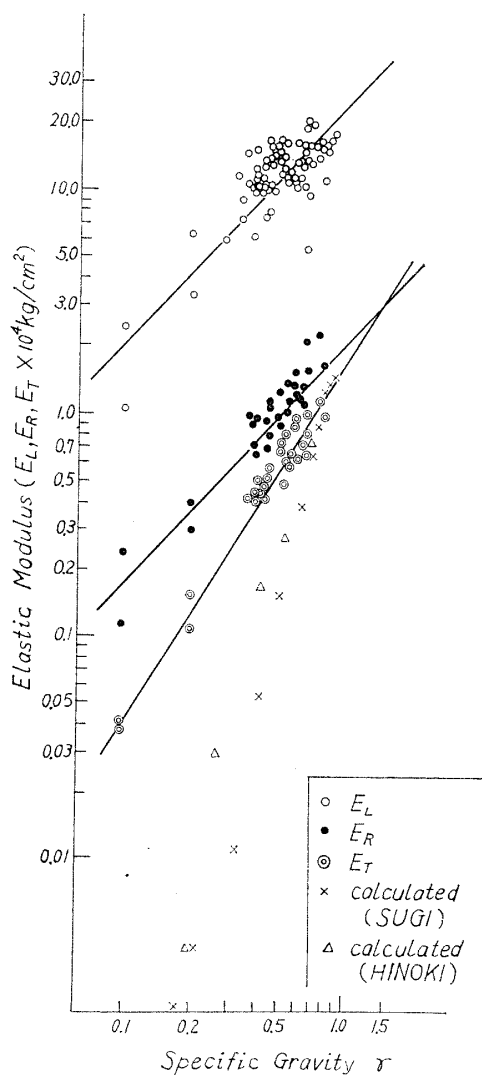


Fig. 1. The relation between the specific gravity and elastic modulus in three directions.

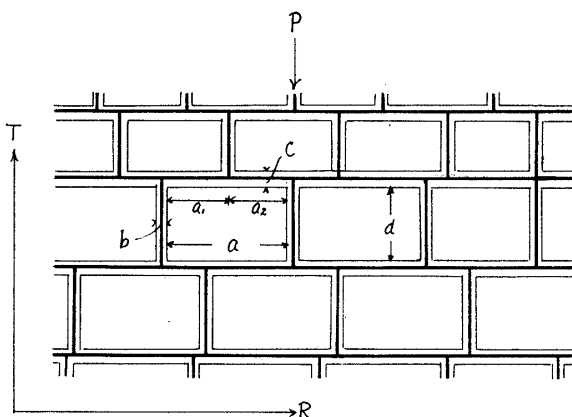


Fig. 2. The model of the coniferous wood tissue used for the calculations of elastic modulus and specific gravity.

$$r = \left\{ 1 - \frac{ad}{(a+b)(c+d)} \right\} \cdot r_0 \quad (2)$$

(1) (2) 両式を用いた計算値と実測値とを比較した場合、比重の大きいときにはほぼ両者は一致するが、低比重の場合、理論式はかなりづれてくる。しかしいずれにしても種々の細胞の織り成すネットワーク構造の寄与は大きい。前報で報告したごとく、木材切片についてほぼわれわれの導いた式が妥当性をもったことから、本報では果して細胞の構成するネットワーク構造がどのような変形の型をとるものかをIに、また、応力の分布はどのようなものかを知るために光弾性実験法により検討した結果をIIに報告する。

なお、実験について御教示いただいた、杉原彦一教授、木材研究所佐々木光助教授に謝意を表します。

I ヒノキ材の横引張の変形について

試験材料および試験方法

材料 供試試料はヒノキ正常材 (Japanese cypress, *Chamaecyparis obtusa* ENDL.) で年輪幅のほぼ一樣なものより連続ブロックを作成し、これより接線方向、半径方向および年輪に対して 30°, 45°, 60° 方向に木取りし、蒸留水に浸漬、放置後、各ブロックより 20, 50, 100 ミクロンの各切片を連続してとり、curling を防ぐためにスライドグラス上におき、カバーグラスをのせて気乾し、実験に供する際 20 ミクロン切片は短冊状に、50, 100 ミクロン切片は引張試験片状に方眼紙上にてカミソリ刃で仕上げた。またマイクロームによる切削の傷などで細胞

の破壊されたものは低倍率顕微鏡下でチェックし，なるべく完全なものを試験に供するように努めた。

試験方法 Photos. 1, 2 は20ミクロン切片についての引張試験装置である。Photo. 2, Aに試片をとりつけ，Bを手動回転させて引張る。

この装置の難点は荷重量を測定出来ないことで，単に目安としてCのバーニヤを読みとることによりどれだけ伸長させたかを知るのみである。50ミクロン以上の試片については東洋測器社製 TENSILON UTM-II型 を用いて試験した。

ポアソン比測定にあたっては，試片に標点をしるし，写真によつてこれを求めた。

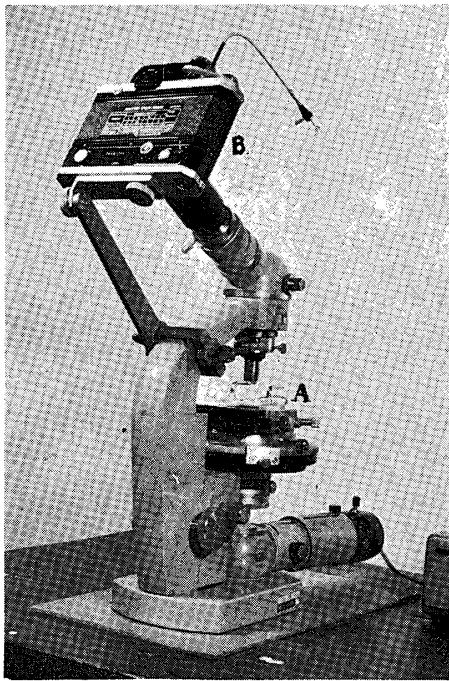


Photo. 1. Microscopy with microtensile testing apparatus.
A. micro tensile testing apparatus
B. camera

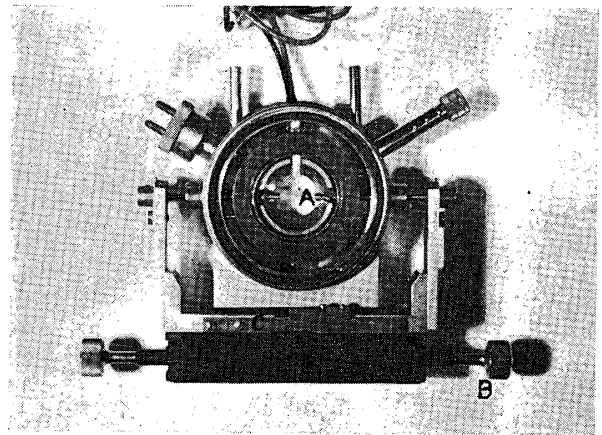


Photo. 2. Microtensile testing apparatus.
A. specimen B. handle
C. vernier

結果および考察

実験結果は Photos. 3~6 および Figs. 3~6, Tables 1, 2 に示す通りである。紙面の都合上，写真については極く一部だけにとどめた。

Photos. 3, 4 は年輪に対し 45°および 60° 方向に引張した場合の細胞ネットワーク構造の変形を，また，Figs. 3, 4 はその拡大図を，Figs. 5, 6 は弾性定数と年輪走向角の関係を，Photo. 5 は破断部をそれぞれ示すものであり，これらの結果を以下に考察する。

1) 各荷重方向における変形

年輪構造が木材の外形の変位におよぼす影響は従来より注目されているところであるが，この研究では横方向の引張について年輪に対する荷重方向を5段階に分けて微小切片の変形を観

察した。径接両方向に引張した場合、急激な脆性破断を生ずるために細胞の網目の著しい構造変形は観察しにくい。これは径接両方向においては、春材、夏材、放射組織など弾性的性質の異なる帯状構造要素が互いに拘束しあうためと考えられる。春材部の変形は径接以外の荷重方向については著しく、放射組織、夏材部の変形におよぼす拘束は大きいことが観察された。径接両方向の変形を木材ブロックで試験した結果^{9,10)}と比較してみた場合、切片の変形は前述したごとく顕著ではなかつたが恐らく非常に類似した型をとるであろう。

また、年輪に対し 30°, 45°, 60° の各方向に引張したときの変形が Photos. 3, 4 に示されて

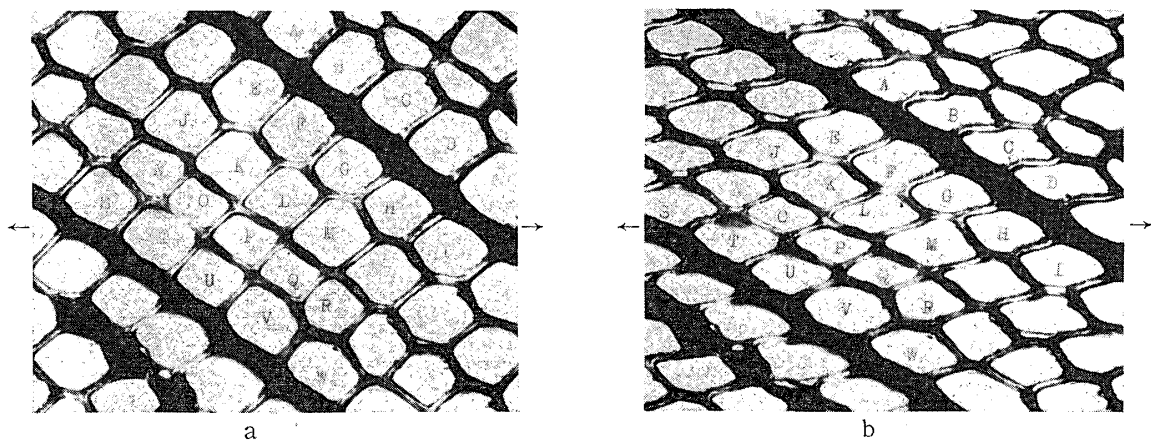


Photo. 3. Anatomical structure of HINOKI wood section under no load (a) and nearly ultimate load (b) in direction of 45° to annual ring (×200). arrow: tensile direction.

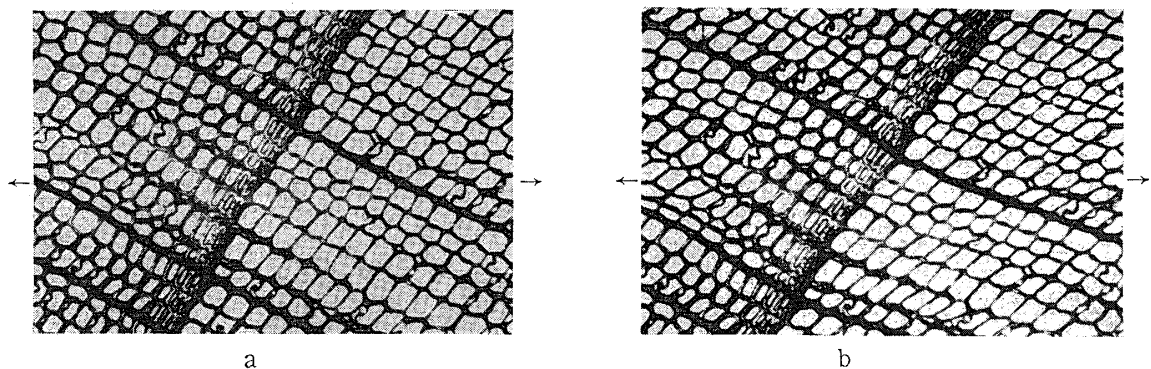


Photo. 4. Anatomical structure of HINOKI wood section under no load (a) and nearly ultimate load (b) in direction of 60° to annual ring (×140). arrow: tensile direction.

いるが、前述したごとく春材部でちょうど魚網を引張したときのような著しい変形を起している。この変形の1部分を投影機を用い拡大したものが Figs. 3, 4 に示されており、1細胞要素をみたとき細胞節合部からはほぼ3分の1のところ折れを生じ、S字型の変形すなわち長柱を挫屈させたときの挙動に類似している。夏材部においては、春材部においてみいだされたような個々の細胞に著しい変形はみとめにくい、夏材帯として弯曲あるいは春材部の変形に伴なつて変位しているとおもわれる。

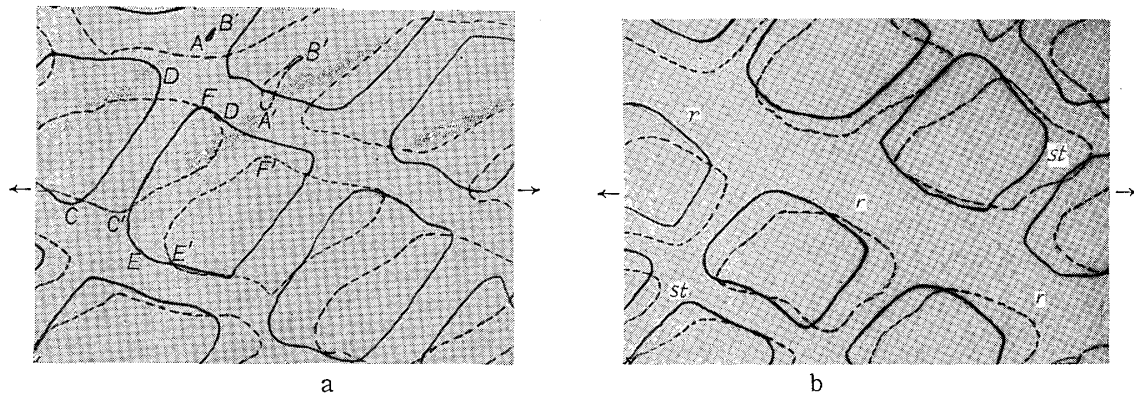


Fig. 3. Magnified sketch from photo. 3. showing the anatomical changes of springwood tracheids (*st*) and ray tissue (*r*).

full line : under no load
dotted line : nearly ultimate load
arrow : tensile direction
× : basic point

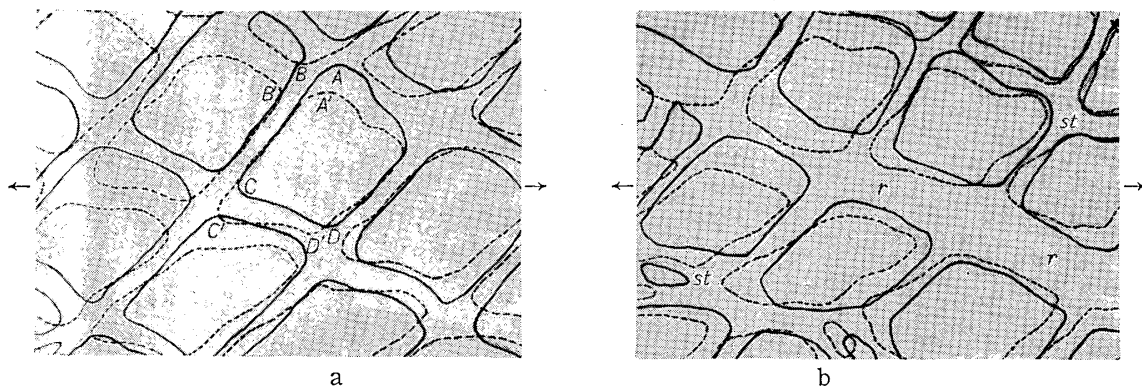


Fig. 4. Magnified sketch from photo. 4. showing the anatomical changes of springwood tracheids (*st*) and ray tissue (*r*).

full line : under no load
dotted line : nearly ultimate load
arrow : tensile direction
× : basic point

木材の変形について考える場合、BOUTELJE, FREY-WYSSLING や STÜSSI⁵⁾らが指摘してきたように、木材を構成する種々の細胞要素が外力に対して複雑な変形を示したり、また、細胞の大小、形状、配列などの違いがとくに横方向における低弾性率に支配的な要因となつているものと考えられる。また、PRICE や BARKAS らは独立した細胞の変形について解析してきたが、むしろ細胞の「連続的からみあい」が変形に関して大きな意義をもつものであることが言えよう。

2) 放射組織の変形

放射組織は仮道管に次いで重要な構造要素であり、変形に対してもこの存在の有無は大きく効いてくる。SCHNIEWIND は径接両方向における弾性異方性は半径方向における放射組織の高い弾性率に寄与されることが大きいと結論している⁷⁾。本報において観察した放射組織の変形

は、Photo 4 にみられるように負荷前ほぼ直線的にあつたものが外力を受けることによつて春材部の著しい変形、夏材部の変位に伴つて波状に変形している。また、放射組織周辺の仮道管の変形の様子から、放射組織の剛さの作用による拘束が考えられ、これが放射組織と隣接した仮道管の変形を折れ型にしているように思われる。すなわち放射組織の拘束作用は少なくとも局部的に木材の変形に影響をおよぼしていることが認められた。

3) 弾性定数におよぼす厚さおよび年輪走向角の影響

木材ブロックと切片とでどのように弾性的性質に差異がみられるか、年輪走向角別に厚さの効果をとり上げ検討した。その結果が Fig. 5, に示されている。一般に TR 面に平行な応力を与えたとき、 T 軸と角 θ をなす方向のヤング率 E_θ は次の JENKIN の式によつて表わされる。

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{1}{E_T} \cos^4 \theta + \frac{1}{E_R} \sin^4 \theta + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\mu_{TR}}{E_T} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

また、 θ 方向の伸びに対する $\theta+90^\circ$ 方向のポアソン比 μ_θ は

$$\mu_\theta = \frac{\frac{\mu_{TR}}{E_T} (1 + \tan^4 \theta) + \left(\frac{1}{G} - \frac{1}{E_T} - \frac{1}{E_R} \right) \tan^2 \theta}{\frac{1}{E_T} + \frac{1}{E_R} \tan^4 \theta + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\mu_{TR}}{E_T} \right) \tan^2 \theta}$$

で表わされ、 G は

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

で表わされる。

これらの式を用いて切片およびブロックについて試験してえられたデータについて検討してみると Table 1 のような結果が得られた。spruce で行なつた JENKIN の値と比較してみると、JENKIN の式を満足するものもあるが、切片について成り立たない場合がある。木材ブロックと切片では一般の等質等方体の異方性弾性論で解析しにくい場合があり、とくに木材切片の場合にはネットワーク構造体などの模型を用いるなどして不均質異方体弾性論を確立していく必要があるように思われる。厚さ、ポアソン比および年輪走向角の関係が Fig. 6 に示されているが、ポアソン比は厚さが増すに従つて減少する傾向がある。たとえば 45° 方向に引張した場

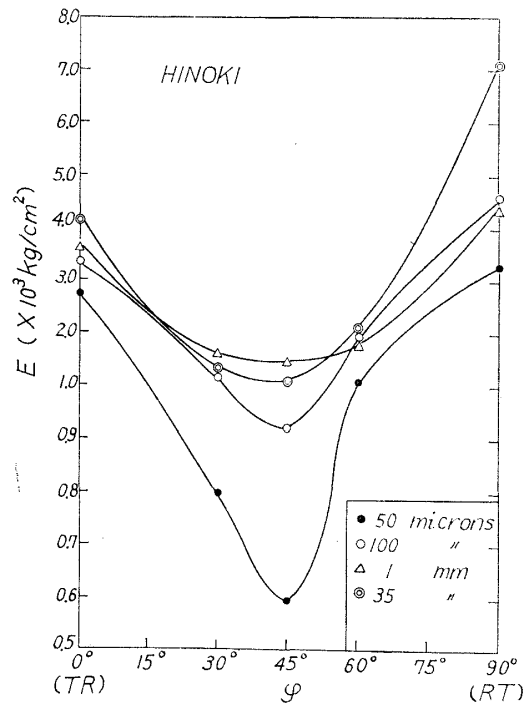


Fig. 5. The relation between the Young's modulus (E) and the angle (ϕ) of annual ring with respect to the tensile direction.

Table 1. Relation between elastic constant and thickness of specimen.

$$\left(\begin{array}{l} G_{TR} : \times 10^2 \text{ kg/cm}^2 \\ \mu/E : \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg} \end{array} \right)$$

thickness of specimen	50 μ	100 μ	1 mm	35 mm	Reference
G_{TR}	1.25	2.41	3.50	2.71	Authors
	3.20 for spruce (bulk wood)				JENKIN
μ_{TR}/E_T	1.85	1.39	1.17	0.78	Authors
μ_{RT}/E_R	2.41	1.64	1.65	0.90	
$\mu_{TR}/E_T=0.64$ $\mu_{RT}/E_R=0.68$ for spruce (bulk wood)					JENKIN

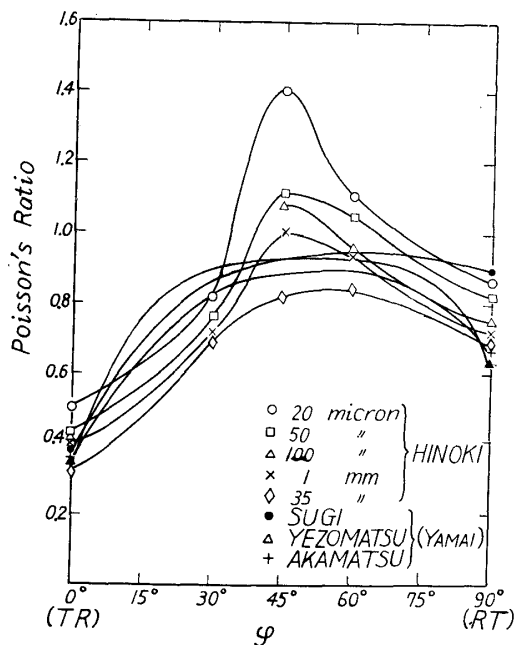


Fig. 6. The relation between the angle (φ) and the Poisson's ratio for bulk wood and wood section.

合の切片のポアソン比は1.4という大きな値をとり、これとは逆に木材ブロックでは0.9という値を示す。これ以外のものについてもブロックと比較して非常に大きな値をとる。この差異は切片ではほとんど無視しうる厚さであるためその変形は単に細胞膜の織り成すネットワーク構造だけの変形とみなされる。したがってこのような構造体を引張るとき、単純な剪断が変形に大きな支配力をもつ。これを紡錘状の繊維の集合体、繊維間相互の結合強さの大きいもの、overlapping areaの存在の大きなものである木材ブロックと比較した場合、木材ブロックのように立体的構造の外力に対する相殺作用があるものと違ってくることは当然とおもわれる。すなわち、切片が平面的な構造要素であるのに反して、木材ブロックでは立体的要素としての構造が変形にある程度拘束をもちながら

効くという次元の差によると解釈される。年輪走向角の点から考えると、とくに剪断の大きい45°方向でピークが現われ、異常な値を示すことは注目すべき問題であり、多孔体の特性として今後の検討にまきたい。

4) 破断部の観察

木材の failure については多くの研究とともに諸説があるが、failure zone は微細構造からみて二次膜の中層、外層にあることは一般に知られているところである¹¹⁾。この failure

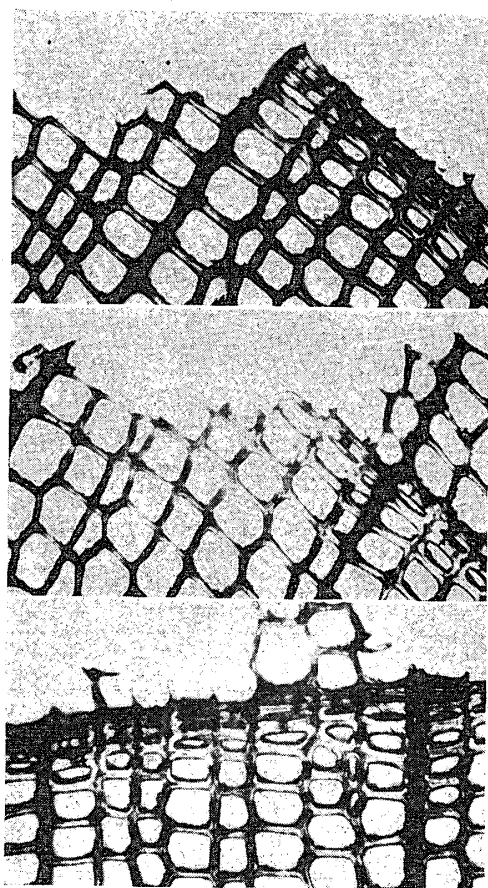


Photo. 5. Tensile fractures of wood section in each loading direction.

a and b: 45°, c: 60°

は細胞繊維末端の overlapping zone の応力伝播に依存するものであろう。この報文では Photo. 5 に破断部の低倍率の顕微鏡写真を示しているが、

- a もつとも早く破壊する部位は年輪層，すなわち春材部と夏材部の境界の明瞭な薄い春材仮道管部に対応する。引張方向によつて著しい破壊の発生部に差はみられないが，外力の伝播いかんによつては放射組織部と仮道管との隣接部位あるいはこれらと全く関係のない位置にもみられる場合もある。

II 光弾性実験法による多孔構造体の応力解析への試み

木材の弾性は直交異方性弾性論で解析されてきたが，木材のもつ構造特性，すなわち，高次構造，微細構造が非常に複雑なところから簡単に直交異方性弾性論で扱えない場合があり，前節でとくに横方向における弾性変形には多孔積層構造の影響が大きいと考えて検討してきた。たとえば，細胞膜自体の変形について考えてみてもこのネットワーク構造が外力によつて変形した後にその内部構造に影響してゆくと考えられるから，変形を検討するにあたって，まず，高次構造の変形

から検討してゆく必要がある。それには前節で述べたような変形を示すのは細胞要素が連続して形作る多孔体にどのような応力の分布状態があらわれるか，また，春夏両材部，放射組織などが応力の分散にどのように影響するかなどを知る必要がある。それには，ひずみ分布と破壊形態，年輪内のひずみと弾性率の分布などを検討するのに光弾性皮膜法を用いた高橋ら¹⁵⁻¹⁷⁾や，応力塗膜法，凍結法を用いた佐々木ら¹⁸⁾の研究方法があげられるが，筆者らは等質等方なエポキシ樹脂板で細胞の拡大模型を作り，単に多孔構造の点にのみ着目してその応力分布の概観を光弾性法によつて調べた。木材本来のもつ構造特性から1つの近似として，まず形態上の類似点に着目してこの方法を用いて応力状態を検討し，ここに2，3の知見を報告する。

材料および試験方法

材料 木材の比重—ヤング率曲線から細胞膜の比重をほぼ1と考えた場合，多少の異方性がみられるが，これには多孔性すなわち細胞の形状，大きさが効くものであると考え，径接両方向のヤング率を等しいと仮定した。そこで等質等方エポキシ樹脂板である市販の Kakenlite を用いた。これは感度 $\alpha=1.00\text{mm/kg}$ ，ヤング率 $E=280\text{kg/mm}^2$ ，引張強度 $\sigma_z=2.5\text{kg/mm}^2$

である。この樹脂板にヒノキ木口の顕微鏡写真を投影し、木綿針にてケガキを行ない、糸鋸によつてケガキ線 1 mm 以内のところまで切り抜いた後、ヤスリにて丁寧に仕上げ、約 2000 倍の細胞模型を作つた。加工の際に生じた応力、吸湿などを除くために焼鈍しを行なう必要があり、エポキシ樹脂板について普通行なわれている Fig. 7 のサイクルで焼鈍した。

試験方法

上記のようにして作製した模型を使つて、圧縮試験および引張試験を行なつた。圧縮試験では、高荷重に対しては模型自体が弯曲、挫屈して不都合なため低荷重で行なつた。

圧縮試験には、小型のホットプレスを使用し、引張試験は、Photo. 6 に示すような簡易な装置を作り、引張アタッチメントに模型を取付けるために 9 ply 合板を両端にアルルダイト D で接着し、恒温乾燥器 (50°C) 中で硬化させた後、放冷して試験に供した。光弾性実験装置は Photo. 6 に示すような、透過型の光学系を用いた。Fig. 8 に示すように、試験体 T を直交偏光子の場合 (P_1, P_2) におくとスクリーンに暗黒点となつて現われる。この暗黒の縞模様は主応力の方向の等しい点の集合で、等傾線 (isoclinics) といい、これにより主応力線が求まる。Fig. 8 のように、直交偏光子の場合に 2 枚の 4 分の 1 波長板 (Q_1, Q_2) を挿入して円偏光を作り、単色光を透過すると縞模様がえられる。

これを等色線 (isochromatics) と称し、これにより、周辺における応力の集中状態を知ることができる¹⁹⁻²²⁾。

Table 2. The elastic constants for bulk wood and wood section of HINOKI in each loading direction.

	thickness of specimen	loading direction to annual ring				
		0° (TR)	30°	45°	60°	90° (RT)
Young's Modulus* ($\times 10^3$ kg/cm ²)	50 μ	2.75	0.80	0.59	1.05	3.39
	100 μ	3.31	1.15	0.92	1.91	4.56
	1 mm	3.52	1.55	1.43	1.86	4.30
	35 mm	4.10	1.30	1.04	2.07	7.10
Poisson's Ratio**	20 μ	0.50	0.82	1.40	1.11	0.87
	50 μ	0.43	0.76	1.11	1.05	0.82
	100 μ	0.42		1.08	0.97	0.76
	1 mm	0.40	0.71	1.00	0.94	0.72
	35 mm	0.32	0.70	0.82	0.84	0.69

* Average of thirty specimens.

** Average of twenty specimens.

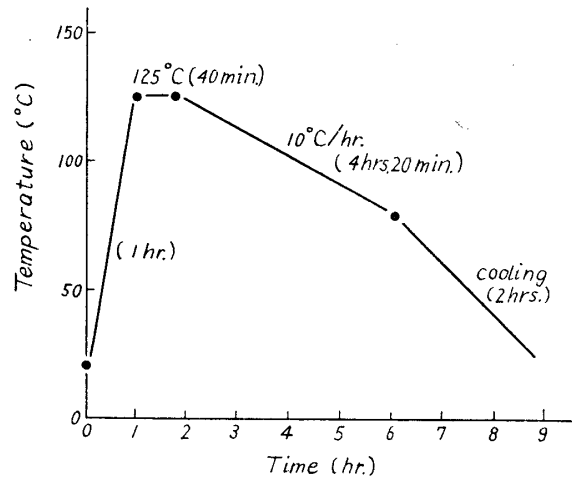


Fig. 7. Annealing cycle of model.

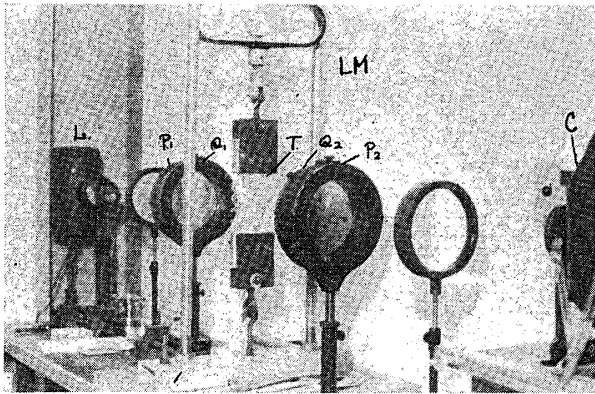


Photo. 6. Main polariscope and loading machine.

L : light source P₁ : polarizer
P₂ : analyzer Q₁, Q₂ : quarter plate
T : test sample C : camera
LM : tensile loading machine

本実験では、最初の試みとして、応力の分布状態の態様を知るため、等傾線から主応力線 (stress trajectories) を作図し、主応力の働く方向を知るとともに、等色線縞次数の分布から、周辺における応力の集中状態の概要を観察した。

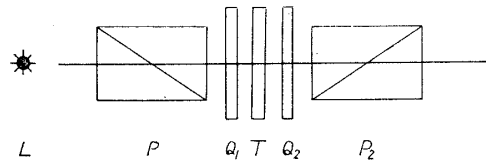


Fig. 8. Schematic diagram of polariscope.

L : light source P₁ : polarizer
P₂ : analyzer T : test piece
Q₁, Q₂ : quarter plate

結果および考察

半径方向の圧縮、接線方向の圧縮および 45° 方向の引張における等傾線模様を求めた結果を Figs. 9~11 に示す。装置の関係で、モデルの寸法を大きくすることができなかつたので、これらの等傾線模様は十分に正確なものとはいえないが、これらを用いて作図された主応力線 (Figs. 9~11 に併記) は多孔体の内部に生ずる主応力の方向の概要を知るのに役立つとおもわれる。

図は主として、3 ないし 4 細胞の接合する点 (以下 node と呼ぶ) の例を示したものであるが、この node のあたりで、いわゆる特異点 (sp) が数個現われるものが多い。これは、これら特異点を中心として、その周辺の主応力の方向が急激に変わることを示すもので、node における応力状態の複雑さを物語っている。また、Fig. 11 c 全体および Fig. 10 c の下部に現われているように、細胞壁が曲げ応力を受けるとともに、細胞壁の層間にせん断応力の発生するのがみられ、このような層間ではすべりが生ずるものと思われる。また、これら node 近辺の代表的な等色線縞模様の写真を Figs. 9~11 に付記してある。等色線縞の性質から、試験片の自由境界においては、 $\sigma_2=0$ または $\sigma_1=0$ であるから、縞次数そのものが、直接、 σ_1 または σ_2 の集中の度合を示すことになる。したがって、これらの写真から明らかなように、node の部分の細胞内腔のコーナーに、きわめて大きな圧縮、または引張応力が集中していることがわかる。この応力集中位置は node の形によつて多少異なり、node の形が荷重方向に対して対称的な場合は、ほぼ切欠き底にくるが、対称性の乏しい場合では、切欠き底から離れた位置に現われることが多い。この応力集中率は、Figs. 9~11 を通じて、荷重が等しくとられていないことと、細胞壁の厚さが等しくないことから、これらの写真からすぐには結論づけられないが、45° 方向の試験片における応力集中度は、他の 2 方向のそれに比して大きいことが推測できる。

以上、単純なモデルについての結果を述べたが、これらは、木材のように、細胞膜各層で弾

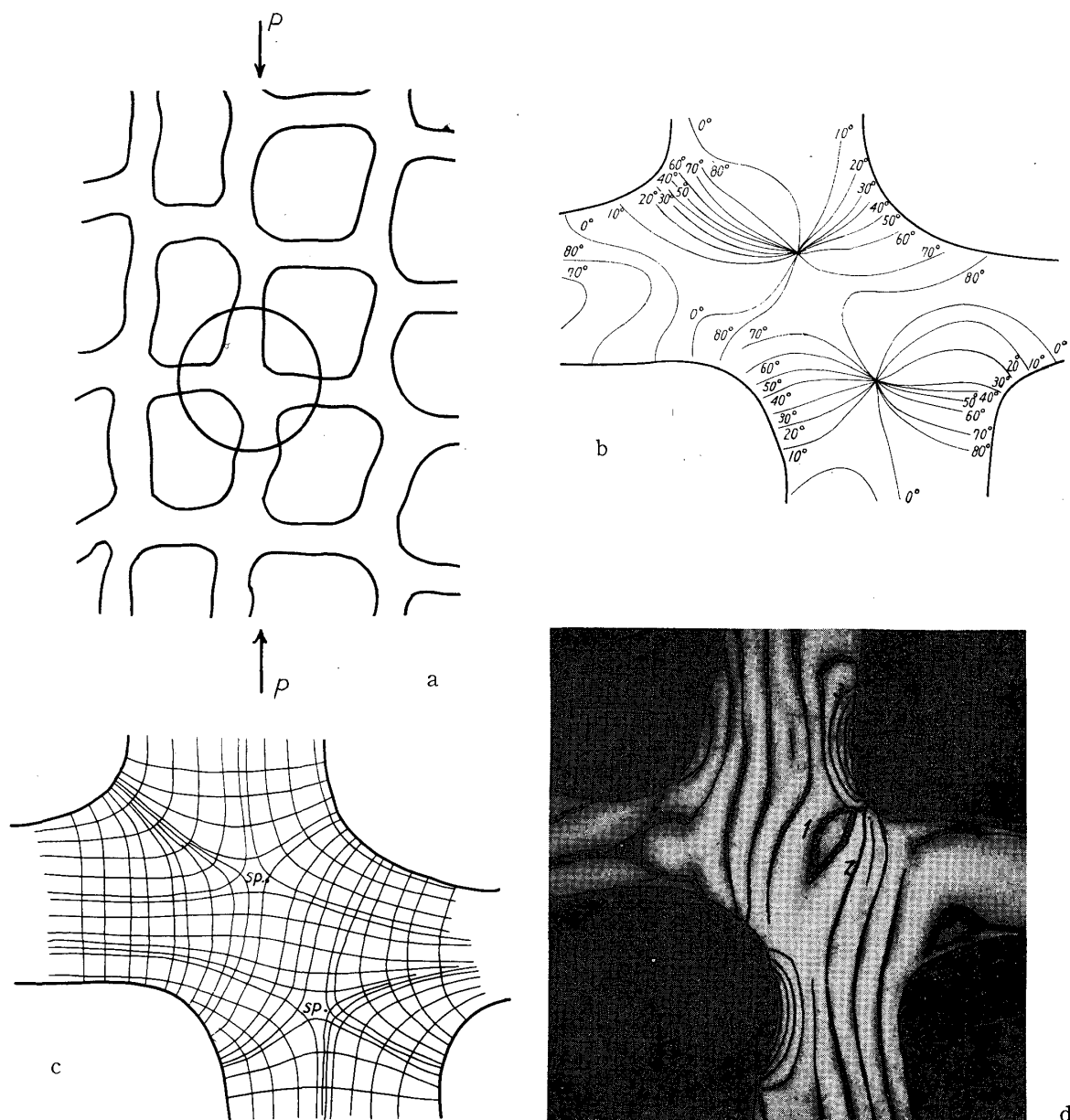


Fig. 9. Photoelasticity for isotropic model of cells subjected to radial compression.

- a: model P : loading direction
 b: isoclinics
 c: stress trajectories sp : singular point
 d: isochromatics number shows fringe order

性的性質の異なる積層構造の材料の場合と非常に違ったものであるから、これを木材の応力分布状態、応力の伝播の仕方に、直接適用しえないが、少なくとも細胞の織り成す形態構造に主眼をおいた場合は、この結果を木材中の応力状態を解析するいくつかの仮定の設定に役立てられ、理論的な扱いの足がかりとすることができると思う。

以上のような観点から、ここではまず細胞の形態的な面から1つの試みを行なったが、今後

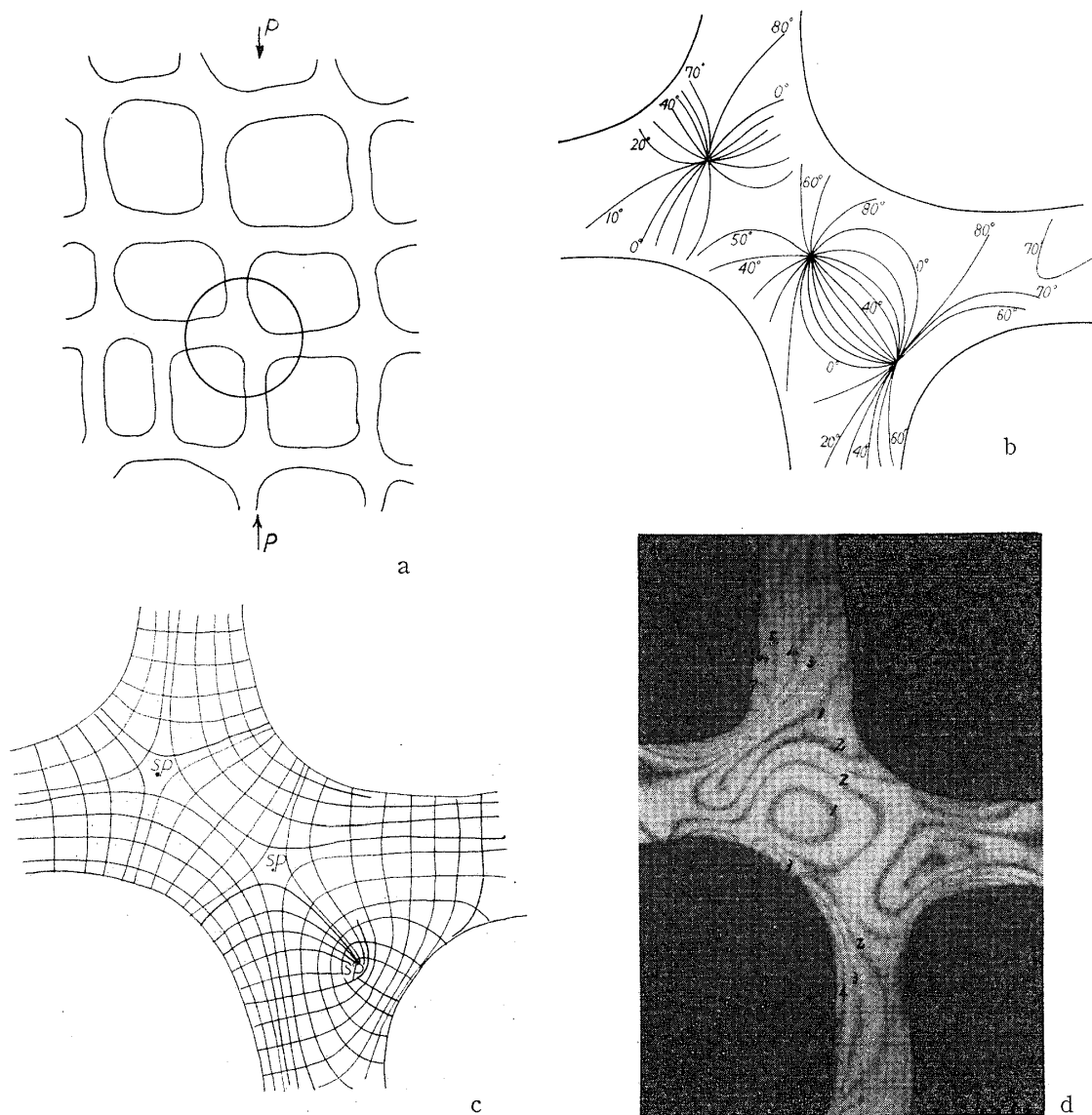


Fig. 10. Photoelasticity for isotropic model of cells subjected to tangential compression.

- a: model P : loading direction
 b: isoclinics
 c: stress trajectories sp : singular point
 d: isochromatics

は、さらにこれを発展させて、木材との密接な結びつきをもたせるため、春材、夏材両部、放射組織などの組み込まれた場合の応力分布、あるいは細胞各層を模型に取り入れた木材特性などのモデル化を試みなければならないと思う。

摘 要

木材の横引張試験を行ない、その顕微鏡的構造変化を観察し、さらに、試片の厚さのちがいが弾性定数にどのように効くかを検討した結果および細胞の拡大模型を用いて光弾性実験を行なった結果から次のようなことがみとめられた。

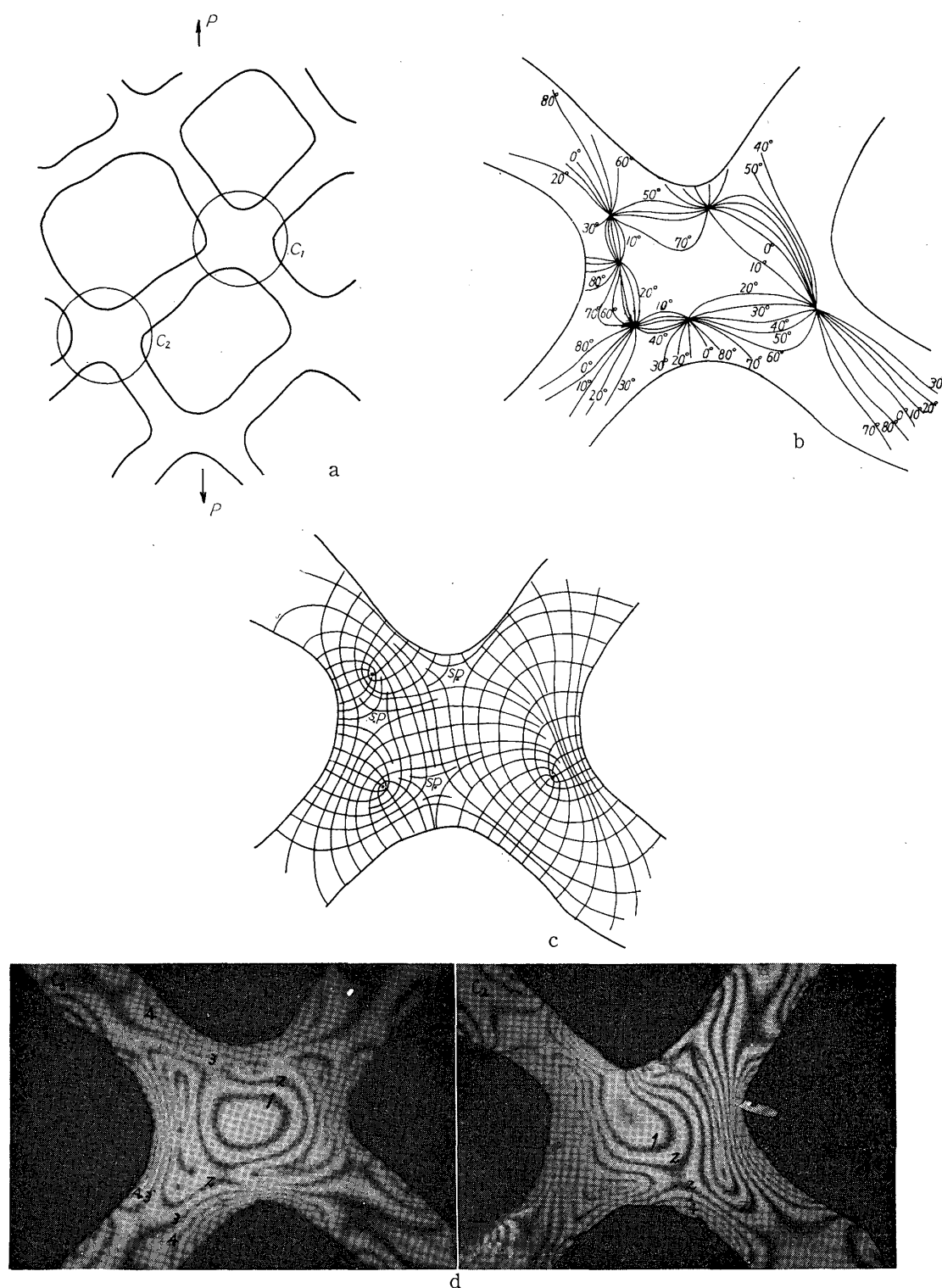


Fig. 11. Photoelasticity for the isotropic model of cells for tension in 45° direction.

a: model P : loading direction
 b: isoclinics
 c: stress trajectories sp : singular point
 d: isochromatics in circular portions

1. 切片の横引張による仮道管の変形は薄く弱い春材部から負荷と共に全体の春材部へと拡がる。この場合、変形に寄与するのは主として接線方向膜であつて、半径方向膜は孔紋が存在し、膜厚が幾分厚く、かつ、ほぼ直線的な配列であるためにその寄与は小さい。このとき、接線方向膜は長柱挫屈型の細胞膜の変形を生ずる。これは隣接細胞間の結合部が強く、しかも半径方向膜の変形が小さいために変形を拘束する働きをもつてこのような型をとると考えられる。なお、夏材部は春材部の変形に伴なつて彎曲、変位するにすぎない。

2. 放射組織は春材部の変形および夏材部の変位に伴なつて波状に変形し、放射組織周辺の仮道管の変形の型から考えて、放射組織は局所的な変形に拘束作用をもつと考えられる。

3. 弾性定数（ヤング率およびポアソン比）は試片の厚さの影響を受ける。とくに薄片の場合は特異な弾性挙動を示すものと思われ、ネットワーク構造にとくに、影響されるので、多孔性不均質異方体の新しい弾性理論を確立してゆく必要がある。

4. 木材ブロックと木材切片のポアソン比を比較検討した場合、切片では平面的なネットワークが主に変形に関与すると考えられ、繊維長、細胞相互の結合強度あるいは繊維間の overlapping area が木材ブロックでは外力に対して変形を抑制する働きをもつていると考えられ、木材のような多孔体では PRICE や BARKAS のような単一な要素の独立な変形を考えるのでなくて、組織構造の「からみあい」が力学的挙動に寄与するものと考えられる。

5. 破断部については、主として、春材、夏材の明瞭な境界部と、放射組織周辺に破断が生じ、年輪走向角のちがひによつて、破断部位に若干の相違がある。

6. 多孔構造体の応力分布は、その荷重方向によつて差異がみられるが、応力集中部は細胞節合部、とくに、彎曲したコーナーに多い。

7. 等傾線および主応力線図をみると、節合部に数個の特異点が現われ、このあたりで主応力方向が複雑に急変していることがわかる。

このことから、Iで述べたように、切片のポアソン比が異常に高い値をとるのは、node 近辺の細胞壁の開脚などによる網目構造全体の变形機構が大いに関与しているものと考えられる。

Summary

In previous paper the authors dealt with the relation between the specific gravity and the transverse Young's modulus of wood in terms of its porous structure and derived an equation of apparent tangential Young's modulus for coniferous wood tissues.

Comparing the calculated values with the experiment, it was found that the assumption of deformation of wood in tangential direction was appropriated to the thin wood section.

In this paper the authors observed, in the hope of obtaining intuitive evidence of the derivation of the equation, the tensile deformation of cross section of HINOKI wood by microscopical techniques and investigated the effects of thickness on the elastic

constants. Secondly they tried to analyse the stress distribution of the isotropic cell model by photoelastic method.

The following results were obtained ;

1) When a section is subjected to a gradually increasing tension, it was found that the microscopically visible deformation of cell shape occurred at first in the thinner and weaker portion of springwood cell wall and succeeded to the overall springwood.

The deformation of cell shape is remarkable in tangential wall, but not in radial wall. It would be due to the fact that radial wall was thicker and had more pits than tangential. The latewood bands dislocated or curved with the deformation of springwood. (Photos. 3, 4, Figs. 3, 4)

2) The wave-like deformation of ray occurred with the deformation of springwood and the dislocation of latewood. And the deformation of tracheids in the vicinity of ray seemed to be restricted with the ray tissues. (Photo. 4, Figs. 3, 4)

3) As shown in Fig. 6, the Poisson's ratio of thin section was larger than that of bulk wood. This discrepancy will be attributed to the effects of thickness or dimension of specimen —length, mutual adherence and overlapping area of cell fibres.

4) It is obvious that the deformation of the network structure of the cells has the significant contribution to the mechanical properties of wood than that of the individual unit cell element of PRICE and BARKAS's model. (Figs. 3, 4, Photos. 3, 4)

5) The failure of thin section occurred frequently in boundary layer of annual ring and ray. (Photo. 5)

6) The stress distribution of network structural model varied with loading direction, but the concentrated portion of stress appeared at the corner of node. (Figs. 11~13)

7) It is found that there are two or more singular points at each node. This observation indicates that the deformation of network structure body is relatively affected by shearing and bending in node without regard to loading direction.

文 献

- 1) PRICE, A. T., Phil. Trans. **228**, 1 (1929).
- 2) BARKAS, W. W., Trans. Farad. **27**, 535 (1941).
- 3) BOUTELJE, J. B., Holzforschung **16**, 33 (1962).
- 4) IVANOV, Yu. M., Translated from Russian by the Isreal Program for Scientific Translations P. S. T. Cat., **169**, 36 (1953).
- 5) FREY-WYSSLING, A. and F. STÜSSI, Schweiz. Ztschr. Forstwesen, **99**, 106 (1948).
- 6) AHLBORN, M., Holzforschung **18**, 129 (1964).
- 7) SCHNIEWIND, A. P., Forest Prod. J., **9**, 350 (1959).
- 8) 金谷紀行・山田 正, 木材研究, No. 33, 47 (1965).
- 9) BODIG, J., Forest Prod. J., **15**, 197 (1965).
- 10) NARAYANAMURTI, D. and others, Holzforschung und Holzverwertung, **14**, 47 (1962).
- 11) WARDROP, A. B. and F. W. ADDO-ASHONG, Commonwealth Scientific and Industrial Research

- Organization, Reprinted from "Tewksbury Symposium on Fracture", D. P. F. Reprint, No. 560, 169 (1963).
- 12) 沢田 稔, 木材誌, **2**, 233 (1956).
 - 13) 山井良三郎, 林試報, No. 113, 57 (1959).
 - 14) 佐伯 浩, 木材誌, **8**, 19 (1962).
 - 15) 高橋 徹, 木材誌, **12**, 203 (1966).
 - 16) 高橋 徹, 木材誌, **11**, 83 (1965).
 - 17) 高橋 徹, 木材誌, **11**, 7 (1965).
 - 18) 佐々木光, 木材のひずみおよび応力解析に関する研究 (学位論文), (1966).
 - 19) COKER, E. G. and L. N. G. FILON, A Treatise on Photo-Elasticity, Cambridge at the University Press (1957).
 - 20) FROCHT, M. M., Photoelasticity, Vol. I-II (1961).
 - 21) 応力測定法, 朝倉書店, (1961).
 - 22) 辻他 2, 光弾性実験法, 日刊工業新聞社, (1965).