針葉樹材の弾性および強度的性質と

細胞構造の関係について

鈴木正治"

はじめに

主要な用材とされる針葉樹(ヒノキ,スギ,アカマツ,カラマツ,モミ)の性質は,これまでしだいに 明らかにされてきたが,今後ますます量産されるこれらの材の性質と各種用途上での性能を適確に把握す る理論が必要である。

針葉樹材の強度性がまだ不明りょうな一,二の原因として,弾性や強度値が年輪内で広範囲に分散し, きわめて不均一であること,丸太断面の未熟部と成熟部の年輪で著しい差異があること,樹種の特徴が明 らかでないことなどがあげられる。これは弾性および強度性が材の細胞・組織構造にきわめて多く依存し ていることをあらわす。したがって針葉樹材の性質・性能を明らかにするには,年輪内の不均質の程度, 未熟部と成熟部の差を各樹種別に細胞構造に立脚して説明できる基礎資料が必要とされ,本研究はこれを 得ることを目的とした。

本実験においては、微小な試料による強度および弾性の測定を行なったが、このため試料作成上の諸条 件や試料の寸法効果についての予備実験が必要であった。また細胞膜のミセル傾角のX線的な測定法につ いても従来若干の問題があったので、この際これらについて検討を行ない、一応の結論をえて実験に着手 した。これらの予備実験についても有用な資料がえられたので、本報に含めて報告することにした。

実験を進める際,京大の中戸莞二先生,原田 浩先生のご助力を受けた。供試料を集めるのに宮崎木材 K.K.の坂本工場長,京大演習林の池本彰夫氏,農学部の加藤弘之氏らのお世話になった。実験の取りま とめに便宜を与えられた上村部長と加納科長をはじめ,蕪木自輔室長からは常におはげましをいただい た。以上の皆様に厚く謝意を表します。

I 実験法についての検討

1. ミクロ引張試片の形状

Table 1 に示した各樹種の樹心より外周に至る適当な年輪(たとえば3年輪,5年輪…のごとく)を選 び,各年輪について早材より晩材に至るまで,できるだけ同形・同質の仮道管で構成されるような厚みで 切片(板目裁片,繊維軸に平行)を切り出す。切り出しはミクロトームによるから,切片は切削の損傷を 受けないことが望ましい。この切片が JIS に定めた通常の試験片での実験値と同じ程度の値か,もしく はそれ以上の数値を得るために必要な試料厚さ,試料長さを見いだす必要がある。

針葉樹早材仮道管の半径方向の 直径を仮りに 40μ とすれば、同形・同質で少なくとも 5~6 細胞を含 む場合の試料厚さは 200μ を越える。試料厚さは一定であることが望ましいが、晩材で 200μ を越える

⁽¹⁾ 木材部材料科物理研究室·農学博士

試料は,移行領域や形態の異なる晩材を含むから,厳密な意味での晩材の強度特性が失われてくる。ゆえ に6細胞を含む晩材が120μの試料厚さとすれば、少なくとも150μ程度で切り出さねばならない。

切り出し前のブロックの軟化処理は熱水、水ーグリセリンなどあるが、抽出成分や微細構造の変化が考 えられるからすべて減圧浸水によった。

これらの試料は切削過程で切削方向の主分力に対する抗力,切刃線にそって垂直な背分力,水平分力を 受けるので,その応力によって材の接線面にそって微小な傷が生ずる可能性がある。スギの早・晩材の, 厚みが $100 \sim 200 \mu$,幅が $3 \sim 5 \text{ nm}$ の板目切片より,厚みが約 30μ の横断セクション,また板目切片よ り厚み 40μ の柾目セクションを切り出し,横断面と縦断面のミクロな割れの有無を調べた。この結果切 削面にあたる接線面より割れが生じた例はほとんどなく ミクロトーム刃がすぐれた切れ味を有する間は 裁断された膜壁より進行する割れはないとしてよい。

ミクロトームによる裁断過程の試片の繊維軸方向に圧縮,また直角に剪断力が働く。この力に対して細胞膜の微小部分が塑性変形を起こし、ミセルの軸の方向がかわる可能性がある。この slip line は切削さ れる試料の厚さ、切刃線と繊維軸との角度によって発生の程度と量に差が生ずると考えられるので、厚み 範囲が $30\sim150\,\mu$ の種々なセクションについて、切刃線と繊維軸の角度が 5° または 10° で裁断された 板目試料の柾目面をさらに十数ミクロンで切り出し、クロスニコル下で検鏡した。この結果、早材細胞 では slip line はほとんど生じないが、晩材細胞では、繊維軸方向の長さ約 8 mm,幅が 5~6 細胞では 数個散在するのが認められた。しかし、その量がかなり少ないので negligible とした。しかし早材で約 400 μ を越えると裏割れも考えられ、晩材では前記の形態的、質的制約のほかに厚い試料を切り出すと、 材中への刃先のくい込み、厚みむらが生じやすい。

ヒノキ材について厚みの範囲が、100~350 μ にわたる板目試料(幅は約 3 mm)と柾目試料(幅は1年輪)の引張強度を求めた。この結果板目試料では厚みが 100~250 μ ではその強度値に有意性はなく、350 μ ではやや小さい。しかし 100~250 μ の範囲では薄い試料の方が強度値もやや増加するようであった。一 方柾目試料では 160 μ 付近が最も大きく、厚みが 300 μ を越えて増加すると強度値のばらつきが大きい。 この結果切刃線と繊維軸を 10°前後で、板目試片の場合早材を 200 μ ~250 μ 、晩材を 150 μ 以下、柾目試 片では 160 μ 程度と定めた。

試料の裁断長, すなわち繊維軸方向の長さはできるだけ短い方が切削しやすい。ヒノキの早材の板目試料の, 繊維方向の有効長をそれぞれ 25, 30, 35, 38 mm にして引張強度を求めた。この結果, 短いほど 強度値が増加したので, オートグラフ(島津製, 引張試験機)による場合は 25~30 mm の範囲とし, テ ンシロン(東洋測器製)ではチャックの関係で 30~34 mm 程度にした。

これらの条件下で、ミクロトームの刃面を水平に対して約7°の傾斜で、ヒノキ、スギの柾目切片(幅 は1年輪)を作り、テストスピードが、5、10、20 mm/minの場合について、引張強度を求めた。この結 果、テストスピードの早いほど引張強度が大きいが、木材のひずみが少ないため、高速ほどヤング率が求 めにくいので、引張速度は全実験を通じて 5 mm/min を選ぶことにした。

試料の幅で特に早材で問題になるのは、それが 5 mm 以上になると、チャックによる固定が不適当な とき引張過程で試料面にしわが現われ、応力集中を起こすから、早材では 3~5 mm、晩材では 2~3 mm 程度がよいが、特に支障のない場合は早晩材で一定とした。以上の予備実験の結果供試料の寸法は次のよ うに定めた。

2. 供試料と引張試験

Table 1 に示す針葉樹 5 樹種(正常材とアテ材)について、樹心より外周に至る接線方向の長さ 4~ 5 mm,繊維方向 42 mm の薄板を切り、3、5、10 年輪…ごとに早材では(半径方向,厚み)180~240 μ , 晩材では同様に 100~160 μ で、繊維方向に長い短冊状の切片を連続して切り出した。このミクロ試料の 幅はしたがって 4~5 mm であるが、ロードセルの最大荷重の制約もあるから、晩材では切片作成後 2~ 3 mm に切り取ることにした。早材では試料厚を予備実験の場合より小さくしたのもあるが(約180 μ)、 これは年輪幅の小さいヒノキなどで、しかも仮道管径も小さいものに限ることにした。

晩材で厚みをしだいに小さくした理由はすでに述べたが、これによって Mork's definition を満たす切 片の強度性を知ることができる。

試料長は予備実験の結果より,主として ^{€0} mm(オートグラフ),34 mm (テンシロン)とし,残った両端(各 4~5 mm)を厚紙でT字状に補強して,チャックによるしめつけにて損傷しないようにした。

これらの連続切片は含水率を気乾に 調整し (抜き取り検査の結果, 気乾含水率 13.0~15.5%), スパ ン, 幅 (3か所の平均), 厚み (3か所の平均) を測定した。スギ, アカマツ (一部), ヒノキ, それらの アテ材では 14~24℃, RH 60~74%, アカマツ, カラマツ, モミ, それらのアテ材は恒温恒湿 20℃, RH 75% で, オートグラフおよびテンシロンで測定した。

引張試験機の測定条件は

	樹 種 Species	採取地 Growing place	円板齢 Ages	丸太半径 Radius of log (cm)	採取地上高 Height above ground (m)
	ス ギ SUGI Cryptomeria japonica	京 都 KYOTO	59	19	6~7
正 常 材 Normal wood	ヒノキ HINOKI Chamaecyparis obtusa	長 野 NAGANO	300	28	1~2
	アカマツ AKAMATSU Pinus densiflora	広 HIROSHIMA	60	14	4
	モ ミ MOMI Abies firma	不 祥 unknown	44	14	2~3
	カラマツ KARAMATSU Larix leptolepis	長 野 NAGANO	60	19	2~3
	ス ギ SUGI Cryptomeria japonica	京 都 KYOTO	60	長径(LR)*1 20.0 短径(SR)*2 11.5	<1 45°の傾斜山地
アテサ	ス ギ SUGI 枝 Main branch	京都 KYOTO	30	長径(LR) 4.8 短径(SR) 3.2	6 幹より 1 m の位置
Compression	フカマツ AKAMATSU Pinus densiflora	岡 OKAYAMA	66	長径(LR) 17.0 短径(SR) 13.0	1
	モ ミ MOMI Abies firma	不 祥 unknown	40	16	不 祥 unknown
	カラマツ KARAMATSU Larix leptolepis	長 野 NAGANO	60	長径(LR) 21.5 短径(SR) 19.5	2

Table 1. 供 試 樹 種 Species used for tests

*1, *2 (LR), (SR) denote the long radius or the short radius of eccentric log.

林業試験場研究報告 第212号

ロードセル 20kg フルスケール (記録倍率1)

クロスヘッド速度 (引張速度): 5 mm/min

レコーダー記録紙速度: 500 mm/min

記録図形倍率: 100 倍

引張強度値の計算

引張実験前に行なったミクロ試片の平均的断面積では,破壊部の引張強度が不正確になる。したがって ヤング率は平均的断面積を用い,引張強度は破壊部近傍の断面積を再度はかり,平均的断面積と比較して 大差のない場合は,この断面積によって計算した。この結果厚みむらの生じやすい晩材部試料の引張強度 は平均的断面積によるより一般に大きく算出された(晩材は先に切り取った残余部分の厚みで代用した)。

破壊ひずみの算出

比例限および破壊ひずみは記録図形とその倍率より,当初測定したスパンを用いて計算した。試料によっては,負荷過程の破壊点近くで,試料の一部が破断し,荷重曲線が低下したのち,残余の部分に荷重がかかり,ふたたび荷重曲線が増加していく。この現象は晩材部の試料に多いが,本実験では当初の試料の一部が切れたところをもって破壊ひずみとした。したがって Fig. 17~32 の主として晩材部の ε_b は情況 によってはさらに大きくなる。

供試樹種は Table 1に産地,採取位置などを示す。

3. 仮道管の寸度と細胞膜面積率

前述の引張試験用切片に含まれる仮道管の特徴,早・晩材の区分,強度計算の基礎資料などに必要な仮 道管の直径,内腔径と接線膜厚さ,細胞膜面積率(膜面積率),繊維長を次の方法で求めた。

(i) 仮道管の寸度

引張試料の末端を主として手切法によって切り取り,半径径を顕微鏡下で測定した。内腔径と膜厚は永 久プレパラートによったが,固定の過程で脱水乾燥して,しばらく気乾で放置し,膜の膨潤をできるだけ 減少せしめた。

繊維長の測定では SCHURZ 液, その他の強酸による解じょ法があるが, 試薬によって長さが変わる可能 性もある。この点 Ladell 法, ステーブルダイヤグラム¹⁾によると解じょを要しないので都合がよい。しか し, 引張切片の末端よりこれに適した良好なセクションを得にくいので, 本実験では SCHURZ 液にて緩 慢な条件で解じょした。

(ii) 膜面積率の測定

測定年輪の横断面写真より,各引張試料に対応する細胞膜面積率を求めた。晩材仮道管では,できるだ け同じ形態のものにより分けて膜面積率を求める必要があるが,強度試験の制約のため半径方向を 100~ 150 μ にした。

膜面積率は写真フィルムにトレーシング紙を重ねて型取る方法と印画紙に焼つける法によった。後者で は印画紙上に不溶脱の薬品が残ったり、細胞膜縁の不明りょうさ、印画紙の乾燥性の影響があり誤差を生 ずる。前者はこれらの問題はないが、多くの時間を費すうらみがある。一方任意の断面で切られた膜量が この引張試料の断面の平均的な膜量とどのように関係するかも不明であるので、本実験ではスギ、アカマ ツについて前記の両測定を行ない、大略の一致をみたので、ヒノキ、カラマツ、モミは焼つけ法によっ た。

4. フィブリル傾角の測定

後述する X 線によるミセル傾角との対応を調べるため, ヨード結晶にて S₂ の傾角を求めた。ヨード 結晶によるのは BAILEY²) や原田ら³による Cl₂ ガスを用いる方法と、SCHURZ 液による小林⁴⁾の方法が ある。

フィブリル自身の定義が明確でない現状であるから,筆者の場合脱リグニンして,セルロースを部分的 に溶解せしめ,この面に結晶せしめたヨードの傾角を求めることになるが,セルロース膜の腐蝕がフィブ リルまたはミクロフィブリルにそって走行するとすれば,これをもってフィブリル傾角を推定してよいで あろう。

 Cl_2 法, SCHURZ 法で脱リグニンしたあとヨード・ヨードカリの水溶液より結晶せしめる場合,処理条件によっては長時間を要するので次の方法によった。 厚み約 25 μ (早材), 15 μ (晩材) の板目または柾目セクションを Cl_2 ガス中に約 10 分放置し,5% アンモニア水でリグニンを溶脱せしめる。これを 2~3 回くり返し,水洗後 5% のヨード四塩化炭素溶液で処理して,ヨード結晶を形成せしめた。従来のヨード・ヨードカリ液によるよりも,四塩化炭素が貧溶媒であるから,短時間で測定ができる。

5. X 線によるミセル傾角の測定

赤道線のアークを利用したミセル傾角の測定は,古来多くの試みがある。本実験ではこれと異なり子午 線の反射を利用した。筆者の知見の範囲では木材についての試みがないので,赤道線法について検討を加 えながら子午線による方法と特徴を記述する。

(i) 赤道線回折による場合の検討

赤道線干渉による場合,木材を含めて繊維素繊維では(002)のアークを用いている。このアークは最強 であるから,実験的容易さが最も大きい利点になる。

呉・久保⁵)によれば、(002) アークの干渉強さの分布曲線より、山の高さの 1/2 の半価幅(角度範囲で *φ*)を求め、繊維軸に対する平行度 *II* を下式より算出した。

$$II = \left(\frac{90 - \varphi/2}{90}\right) \times 100$$

これによると赤道干渉がいずれの型であれ, ラセン角の分布の多様性にかかわらず, 実用的見地より比較するのが主目的である。

SISSON⁶) は繊維軸に対する微結晶の傾斜角とその微結晶の数はフィルム上で,赤道線上より傾斜角 に対する角距離だけずれて現われるという立場から,ラセン角分布と実測される強度分布曲線として現わ れる全分布曲線の関係を調べ,全分布が single peak の場合と double peak の場合について検討した。 SISSON の理論的強度分布では、ラセン角が大きく(例 15°)、その分布がせまいと、ラセン角のピークと 全分布のそれが一致するが、ラセン角が10°のとき、場合によっては両ピークがずれるから、全分布のピ ークの角度でもって平均のラセン角とできないことがある。また、ラセン角が小さく(例 10°以下)全分 布が single peak になる場合、これよりラセン角の判定はむずかしくなる。

木材のX線写真を調べると、赤道線上の黒化の様子から単純な結晶構造を思わせるのもあるが、複雑で 見当のつけにくいのもあるから⁷)、予備的検討なくしてこの干渉を用いるのは危険がある。しかしミセル 傾角について詳細に検討した PRESTON⁸) も X 線法ではピーク値の 40% 点を習慣的なものとし、近年 の MEYLAN⁹)、CAVE¹⁰)の改良方法も同じ干渉を使っている。 半価幅法では、一般的には分布曲線より back ground を差引いて、半価幅を求め、その 1/2 を平均の ミセル傾角とするが、田中¹¹⁾は半価幅の代わりにアークの末端を見込む角の 1/2 より最大のミセル傾角と したが、これはミセル傾角の測定法としては比較的簡単である。

HERMANS はこれとは別に セルロース繊維について、(101)、(101)の面配向を利用した,いわゆる sin²β 法を導いた。 丹沢¹²⁾らはこれと半価幅法を比較しており,すでに理論的な解も与えられている。し かし木材の場合,この結晶面の分布曲線が小さいから,今後の検討に待たねばならない。

前述の MEYLAN の考え方は、従来のピーク値を用いた50%法、または40%法では、分布曲線の頂点 が平坦になったり、double peak になると、その適用が困難になる。これの改良としてピーク値を用い ず、分布曲線の両側の変曲点に立てた接線と back ground の軸の交点の間の角の 1/2 を平均のミセル傾 角とした。これによって求めたミセル傾角と40%法の場合をヨード結晶法によって比較・吟味し、40% 法では20°以上でしたいに誤差があるのに対し、かれの方法ではそれがなくなることを示した。

しかし呉, MEVLAN らも認めるように (002) の赤道線干渉を用いると, 平均のミセル傾角を求めるま でにいくつかの仮定を置くから種々の疑問が起きる。

これに対して繊維軸に対してり軸がある統計的分布をなすとき,子午線干渉にそった強度分布が全くそのまま微結晶の配向の分布を与えるから,実験的には赤道干渉よりやや困難ではあるが Diatrope の斑点をとらえ,これによって平均のミセル傾角を導出した方が理論的である。



(1) 網面帯,(2) 反射円,(3) 位置球,(4) 干渉弧,α: ラ
 セン角,β: b 軸と網平面の垂線のなす角,OY:対称軸,θ: ブラ
 ッグ角

Fig.1 X線の干渉条件とラセン角

The interference condition of X-ray and spiral angle.

(1) net plane band, (2) reflection circle, (3) Lagenkugel, (4) interference arc, α : spiral angle, β : angle between *b* axis and perpendicular line of lattice plane, *OY*: axis of symmetry, θ BRAGG's angle. (ii) 子午線 干渉による ミセル傾角の測定

子午線干渉より b 軸の分布, 平均の ミセル傾角の求め方につ いては次 の よ う に 説 明 で き る。¹³⁾¹⁴⁾

Fig. 1 は位置球の 1/8 片を 水平方向より見たもので、 3つ の軸、OX, OY, OZ (この軸 は左図では紙面に垂直に立てた 垂線上にある)を持つ 1/8 の球 体である。いま中心 O にある 結晶体のすべての微結晶を集 め、OY 軸を繊維軸と合わせ る。たとえば仮道管の場合、仮 道管軸を OY に重ね、ミセル を O 点へ平行移動すればよ

い。したがって b 軸は OY 軸のまわりに分布するので,両者のなす角を α とする。この結晶のある格 子面 (*hkl*) への微結晶の中心 (すなわち, O) からの垂線と b 軸のなす角を β とし, b 軸に対して傾斜 β をもつ直線が位置球を切る点群は, α と β の大小関係によって種々の大きさの網面帯を形成する (図 中網面帯は点で囲む帯状の領域)。

— 94 —

 \overline{ZO} 方向, すなわち前ページ図の O 点に立てた垂線上の Z よりの入射 X 線によって, 作図された反 射円が網面帯と交わるとき, 反射条件を満足するから, この 1/8 球の後方にフィルムを置くならば, その 上に回折像 M'N'が現われる。Z 点より網面帯上の MN を見込む角をそれぞれ φ_1 , φ_2 とすれば, 球面 片 YMZ, YNZ について Bragg 角 θ との間に下の関係がある。

網面帯と交わる反射円が存在する場合, α , β , θ の大小関係によってアーク M'N' は中心 O に対し て種々の角度位置に現われる。いま β が 0 のような (*hkl*) 面は b 軸と垂直に交わるから, これにて子午 線干渉を生ずる。上式より $\beta=0$ とすると

ただし $\varphi_i = \varphi_1 = \varphi_2$ であるから, フィルム上は 1 つの斑点になるが, 実際はラセン角 α に分布があるの で, α の分布のため Fig. 1 と同じ網面帯 (いま末端の角度を α , $\alpha + 4\alpha$ とする) が考えられ, 斑点は弧 状に伸びてくる。ゆえに 4α の中の回折強度の程度を計数管で追跡すれば, 繊維軸に対する b 軸の分布 が強度分布曲線として描かれる。 4α 中に存在する 分布頻度の大なるところが 平均のミセル傾角をあらわ す。

 α より $\alpha + 4\alpha$ に存在する b 軸の総数を $4N_{1}$ 密度を 4n とすれば¹¹)

 $\Delta N = 2\pi \sin \alpha \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta n \dots (3)$

An は干渉強度 I に比例することから

 $\Delta N/\Delta \alpha \propto \sin \alpha \cdot I \cdots (4)$

いま $dN/d\alpha$ を微分とみて、 $dN/d\alpha = D$ は $d\alpha$ 中において b 軸をもつ微結晶の数、 つまり $= \nu$ 角の分 布関数を与える。

 $\alpha > \theta$ のとき, 網面帯に対して反射円が交わり干渉が起きるので, 任意の φ を φ_i とすれば前述の関係 $\cos \theta \cdot \cos \varphi_i = \cos \alpha$ (ここで α は網面帯中の任意のラセン角) が成立するから, これに φ_i と θ を代入し て α を求め

 $D = \sin \alpha \cdot I$ (5)

より D を算出し、D の最大値における α を求めて平均のミセル傾角とすればよい。

ここで注意すべきは θ に対して α が小さいことは木材では起こりがちであるので, この場合は網面帯 に反射円は交わらないから干渉を生じない。反射を生ぜしめるためには ZO 軸を O を中心にして現在の 位置より向って下側に θ だけ回転すればよい (Fig. 1 参照)。この結果弧 YZ を張る角は 90°- θ とな るから, 球面三角形の公式より φ_i と α の関係は

上式より

「シスト」というであった。「おおお」というないというないでは、「おおおおお」

 $\cos\alpha = 1 - (1 - \cos\varphi_i) \cos^2\theta \quad \dots \quad (7)$

上式より φ_i , θ を代入して α を求め、前出の $D \ge \alpha$ の関係曲線を描き、その最大値より平均のミセ ル傾角が求められる。実際の実験手順について次に記述する。

(ⅲ) 実 験 法

X線測定は島津自記記録式X線装置によった。供試料は引張試料と対応させるため、 厚み(半径方向) は 100~240 μ(早・晩材)の範囲で、ミクロトームによって 裁断した。 採取位置は引張試料の近傍であ る。晩材は前述の理由によって 100~160 μ の厚み範囲であるが、 回折強度は微結晶の数に 比例するか ら、早材よりも高い強度分布曲線になる。

X線束の投射方向とガイガー計数管を直線に並べ、ゴニオメーターに回転試料台をとりつけ、X線との 垂直を調整してから、試料をとりつけた。しかるのち計数管を 2 θ =34.8°, 試料台を BRAGG 角だけ回 転させてセットし、X線を投射しながら、試料を $-20\sim50^\circ$ にわたって垂直に回転せしめた。回転角は前 もって記録紙上で調べておく。この手順によって得られる回折曲線の例(スギ、早材(後期)と晩材)を Fig. 2 に示す。測定条件は図中に示されるが、管球の対陰極は Cu, Ni フィルター付きで K_{e1} 線が入 射される。全測定を通じて管電圧 35 kV, 管電流 16 mA 一定とした。

まず Fig. 2 に示される回転角 φ_i に対する回折強度 *I* を求め (Fig. 2 の計数範囲 100 cps, *I* を求め るには back ground の補正をする), $\varphi_i \ge \theta$ を (7) 式または (2) 式に代入して α を求めたのち, (5) 式にて *D* を計算する。次に $\alpha \ge D$ の関係曲線を作り, *D* の最大値に対応する α を求めてミセル傾角



Fig. 2 スギの早材 (後期形成) と晩材の (040) 結晶面の回折曲線 Diffraction pattern of (040) lattice plane of early wood (formed at late time) and late wood of *Cryp!cmeria japonica*.

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木)

— 97 —

の最確値とする。Fig. 3~10 はスギ, アカマツ, それらのアテ材の α と D の関係を示す。

Ⅱ結果と考察

1. ミセル傾角とフィブリル傾角

I-5 で記述した方法によって D と α の関係曲線 (Fig. 3~10) を得るが, 横軸はフィブリル傾角 (α_f) と区別するため α_m とし, 図示した曲線はそのままミセル傾角の分布曲線を示す。中央のピークは 平均のミセル傾角をあらわす。

正常材ではスギ,アカマツともに、早材 $E1 \rightarrow Ei$ 晩材 $L1 \rightarrow Li$ の順に α_m は小さくなるが、アテ材で は E1→C (圧縮アテの仮道管を含むミクロ試片を示す)の順に逆に α, が増加する。 ピークの 1/2 の値 よ り α, の半価幅(角度)を求めると、正常材では早材が晩材に比べて大きいので、 ミセル傾角の分布 は前者が広いことをあらわす。アテ材では Fig. 7~10 にみるように早材よりアテ材部の半価幅が大きい - 場合もある。 アテ材試片の平均のミセル傾角が 大きい 上に その分布が広いことは種々の要因が考えられ る。仮道管がアテ化してゆく段階には過渡的な状態のものがしばしば見いだされる。各図の C1, C2… は 「アテの領域より任意に選んだ,厚みが約200μの試料の1例にすぎないから,この試料に含まれるアテ細 胞でもその程度が種々であるから、分布曲線を広くしているとも考えられる。後述するが1つの試料の中 でアテ細胞を含む割合 γ を顕微鏡で求めた。アカマツ8 年輪 (Fig. 9) では γ が 16→80% と増大しても 分布はかわらず,22年輪(Fig. 10)では 7=0 でも早材とアテ材部の接するところの試料 E3 の分布は, · ア=72%の C1 の分布と大差をみない。スギ30年輪 (Fig. 7) では、ア が 21, 27% でも分布の広い ·C1, C2 に対して、 r=93% の C3 は分布がせまくなるから、過渡的な細胞の混在の1つの理由にもなる が、C3の平均のミセル傾角が C1・C2 より小さくなっている。さきのアカマツの例、スギ 50 年輪(Fig. 8)の例より 7 に差があっても分布は類似し、分布曲線はほぼ対称性を有するから、早材の細胞とアテの ・細胞の混在とは考え難い。試片中のアテ細胞の判定は細胞横断面の形状的特徴によったが、アが小さい、 .あるいは0の試料の細胞には、すでに内的にアテの素因を有し、α_mも大きく分布も広くなると考えた方 .が妥当であろう (Fig. 34, 35, 42 の Ei・Ci 参照)。

ミセル傾角は子午線の干渉より求めるのが理論的であることはすでに記述した。ここではヨード結晶法 との対比を試みた。

Photo. 1~7 は各供試樹種についてのフィブリルの配列状態を示す。滴下した硝酸が浮遊して焦点が明 いらかでないが、本実験の方法によると短時間に多数の計測ができる。

Photo. 1 のスギ 58 年輪(辺材)の例では,(a)の早材(初期: 成長期の初期に形成された意)のフィ ·ブリル傾角 α_f は、大きいところで 15°程度、右側の周辺では 10°以下になる。 仮道管は中空円筒に近 いから、この写真では左右の半径膜に近いふちで沈積したヨード結晶の傾角は多少とも小さく見えるので :課差の原因になる。ゆえに傾角は接線または半径膜の中央部で測角されねばならない。しかし、早材初期 の仮道管でも中には (b)のように α_f が小さいものがあり、測定の順序や測定値の平均法が重要になる。 ミセル傾角測定試料の厚みが約 200 μ とすれば、 α_f の試料の厚さを 20 μ 前後とすれば、少なくとも 10 '個のセクションについて測定して平均を求める必要がある。ここでは 30 μ おきに 3 試料を作りおのおの の平均を求めることにとどめた。(c) は早材中期で α_f は約 15°, (d) は広義の晩材部(後述)の細胞で5~ :10°と判断される。



Fig. 3 スギ20年輪内の早・晩材(E, L)の ミセル傾角(a_m)の分布(D)

Distribution (D) of the angle of micellar orientation (α_m) of early wood (E) and late wood (L) within No. 20 annual ring of SUGI.



Fig. 4 スギ56年輪内の早・晩材 (E.L)のミセ ル傾角(a_m) の分布 (D)

Distribution (D) of α_m of early wood (E) and late wood (L) within No. 56 annual ring: of SUGI.



Fig. 5 アカマツ 30 年輪内の早・晩材 (E, L) のミセル傾角 (a_m) の分布 (D)

Distribution (D) of α_m of early wood (E) and late wood (L) within No. 3 annual ring of AKAMATSU.



Fig. 6 アカマツ 54 年輪内の早・晩材 (E, L) のミセル傾角 (a_m) の分布 (D)

Distribution (D) of α_m of early wood (E) and late wood (L) within No. 54 annual ring of AKAMATSU.



Fig. 7 スギ (アテ材) 30 年輪内の早材 (E), アテ材 (C) のミセル傾角 (α_m) の分布 (D)Distribution (D) of α_m of early wood (E) and compression wood (C) within No. 30 annual ring of SUGI compression wood.

Note (1)

Note (2) E1→E2→C1→C2→C3: 30 年輪内の成長の推移 Growth increment within No. 30 annual ring. Fig. 42 参照 Reference to Fig. 42.



Fig. 8 スギ (アテ材) 50 年輪内の早材 (E), アテ材 (C) のミセル傾角 (α_m) の分布 (D) Distribution (D) of α_m of early wood (E) and compression wood (C) within No. 50 annual ring of SUGI compression wood. Note E1→E2→C1→C2→C3: 50 年輪内の成長の推移 Growth increment

within No. 50 annual ring.

- 99 -





Distribution (D) of α_m of early wood' (E) and compression wood (C) within No. 8 annual ring of AKAMATSU compression wood.

Note E1→E2→C1→C2→C3:8年輪 内の成長の推移 Growth increment within No.8 annual ring. Fig. 34 参 照 Reference to Fig. 34.

Fig. 10 アカマツ (アテ材) 22 年輪内 の早材 (E), アテ材 (C) のミ セル傾角 (α_m)の分布 (D)

Distribution (D) of α_m of early wood (E) and compression wood (C) within No. 22 annual ring of AKAMATSU compression wood.

Note. $E1 \rightarrow E2 \rightarrow E3 \rightarrow C1 \rightarrow C2$: 22 年 輪内の成長の推移, Growth increment within No. 22 annual ring. Fig. 35 参 照 Reference to Fig. 35.

Photo. 2 (a) はスギ4年輪の早材(初期)の半径膜の α_f を示す。その値は 30° に近いが,(b)のよう に 31年輪になると、早材初期の半径膜でも約15°と観察せられたので、この検鏡後の切片をただちに γ ロトームでその接線面を切り出した。これは同じ位置の仮道管の接線膜を調べるためである。(c) はこれを示し、 α_f は 11~12° が多いから、半径膜の傾角より小さい。なお(c)のセクションは仮道管 1 個程度の微小なものであるから、接線膜と半径膜の判別は放射組織の状態によった。写真右下に開口した放射組織がみられる。(d) は半径膜の有縁膜孔の周囲でフィブリルが迂回し、傾角も大きい様相を示す。

Photo. 3 のヒノキの例では、(a) が半径膜で、(b) が同じ方法で得た(a) の仮道管近傍の接線膜の傾角

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木)



(a) 早材(初期)接線膜,58年輪 Early wood (early time), tang. wall. No.58 annu. ring.



早材(初期)接線際, 58年輪 Early wood(early time), tang. wall. No. 58 annu. ring.



て 早材(中期)接線膜, 58年輪 Early wocd (middle time), tang. wall. No. 58 annu. ring.



晚材(広義)接線膜, 58年輪 Late wood, (ang. wall. No. 53 annu. ring.

Phcto. 1. スギニ次膜のフィブリルの配列 Phctomicr:graph of fibrillar arrangement of secondary wall of *Cryptomeria japonica*. (×650)



(a) 早材(初期)半径膜,4年輪 Early wood(early time), rad. wall. No.4 annu. ring.



(b) 早材(初期)半径膜, 31年輪 Early wood(early time), rad. wall. No. 31 annu. ring.





(c) 早村(初期)接線膜, 31年輪 (b) と同じ位置の仮道管 有 Early wood(early time), tang. wall. ti No. 31 annu: ring, tracheid of same part to (b). bo

(d) 早材(中期)半径膜, 21年輪 有緑膜孔の附近 Early wood (middle time), rad. wall. No. 21 annu. ring, near bordered pit.

Photo. 2. スギニ次膜のフィブリルの配列 Photomicrograph of fibrillar arrangement of secondary wall of *Cryptomeria japonica*. (×650)

- 101 -

- 102 -

林業試験場研究報告 第212号



(a) 早材(初期)半径膜,71年輪 Early wood(early time), rad. wall. No. 71 annu. ring.

Nc. 5 annu. ring.



(b) 早材(初期)接線膜,71年輪 (a) と同じ位置の仮道管 Early wood(early time), tang. wall. No. 71 annu. ring, tracheid of same part to (a). Photo. 3. ヒノキ二次膜のフィブリルの配列

(c) 早材(初期)接線膜,71年輪 (b)の仮道管の末端近傍 Early wood(early time), tang. wall. No. 71 annu. ring, near the end of (b) tracheid.



(d) 晩材 接線膜,71年輪 Late wood, tang. wall. No. 71 annu. ring.

Photomicrograph of fibrillar arrangement of secondary wall of Chamaecyparis obtusa. (×650)



No. 17 annu. ring. No. 17 annu. ring. Photo. 4. カラマツ二次膜のフィブリルの配列

Photomicrograph of fibrillar arrangement of secondary wall of Larix leptolepis. (×650)

No. 20 annu. ring.

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木)

- 103 -



(a) 早材(初期)接線膜, 20年輪 Early wood(early time), tang. wall. No. 20 annu. ring.



(b) 早村(初期)半径膜,20年輪 (a) と同じ位置の仮道管 Early wood(early time), tang. wall. No. 20 annu. ring, tracheid of same part to (a).



(c) 早材(初期)接線膜, 20年輪 Early wood(early time), tang. wall. No. 20 annu. ring.



(d) 早材(中期)接線膜, 20年輪 Early word (middle time), tang. wall. No. 20 annu. ring.

Photo. 5. モミニ次膜のフィブリルの配列 Photomicrograph of fibrillar arrangement of secondary wall of *Abies firma*. (×650)



(a) 早材(初期)接線膜, 26年輪 Early wood(early time), tang. wall. No. 26 annu. ring.



(b) アテ材仮道管接線膜,26年輪 Compression wood tracheid, tang. wall. No. 26 annu. ring.



(c) アテ材仮道管接線膜, 26年輪 Compression wood tracheid, tang. wall. No. 26 annu. ring.

Photo. 6. モミアテ材の二次膜のフィブリルの配列

Photomicrograph of fibrillar arrangement of secondary wall of compression wood of *Abies firma*. $(\times 650)$



(a) 早材(初期)接線際, 55年輪 Early wood (early time) tang. wall. No. 55 annu. ring.



(b) 早材(中期)接線膜, 55年輪 Early wood (middle time), tang. wall. No. 55 annu. ring.



晚材 接線膜, 55年輪 Late wood, tang. wall. No. 55 annu. ring.

Photo. 7. アカマツの二次膜のフィブリルの配列 Photomicrograph of fibrillar arrangement of secondary wall of *Pinus densiftora*. (×650)

を示す。前者は 14~15°,後者は写真の下端では 15° もあるが 11~12° が多いから, 両膜の傾角はほとんど同じか後者がわずかに小さい。さらに (c) は (b) の末端に近いところの傾角をあらわし, a_f は約 10° であるから, 1 つの仮道管でも軸方向の位置によって傾角を異にするのがわかる。X線法で求められたミセル傾角はこれらすべてを含み,分布曲線として与えられる。(a) (b) (c) は早材初期のそれであるが, (d) は晩材の接線膜である。 a_m は繊維軸にほとんど平行に近く約 5° と認められる。

Photo. 4 はカラマツの例を示す。(a) は 5 年輪の早材初期で α_f は約 20° と大きいのに対し, (b) は 20° 年輪で約 13~15° であるが、 S_1 膜が複雑に走行している。カラマツ早材は後期のものでも α_m の大きいのも見いだされ (c), (d) は晩材で α_f は約 7~8° とみられる。

Photo. 5 はモミの例で, (a) (b) は早材初期における接線膜と半径膜の場合で, 試料の作製は前述のと おりであり, α_f は 13° と 20° 前後を示す。(c) は早材初期, (d) は中期で, α_f はそれぞれ 13~15° とみ. られる。接線膜ではこのように減少が少ない場合もある。

Photo. 6 はモミのアテ材の例を示す。(a) は早材初期の仮道管で,この横断面の観察では、アテの形状的特徴を有しないが、この傾角はすでに 18°を示す。(b) はアテが進行している付近よりとったセクションで、傾角は 25~30°であり、この付近には膜面に裂開線をみることがある。(c) のように晩材でも 23~25°と大きい傾角を示している。

Photo. 7 はアカマツの例を示す。塩素化による脱リグニン, セルロースの分解の際, 樹種や膜(半径 または接線)によって抵抗性が相違する。アカマツは抵抗性が強いようであり, 半径膜の測定はしばしば 困難を伴うことがある。

以上のようにフィブリル傾角でも、仮道管軸にそって求め、適当な集団ごとに、接線・半径膜について

Fig. 11. スギ 4 年輪内の平均のミセル 傾角 (α_m) と接線膜および半径膜の平均のフ ィブリル傾角 (α_t) の関係

Relationship between mean angle of micellar orientation (α_m) and mean fibrillar angle of tangential or radial cell wall (α_f) within No. 4 annual ring of SUGI.

Note tang. wall: 接線膜 Tangential cell wall

rad. wall: 半径膜 Radial cell wall





Fig. 12. スギ31年輪内の平均 のミセル傾角 (a_m) と接線膜およ び半径膜の平均のフィブリル傾角 (a_f)の関係

Relationship between mean angle of micellar orientation (α_m) and mean fibrillar angle of tangential or radial cell wall (α_f) within No. 31 annual ring of SUGI.

Fig. 13. スギ55年輪内の平均のミセル傾 角 (*a_m*) と接線膜および半径膜の平均のフィ ブリル傾角 (*a_f*) とその分布の関係

Relationship between mean angle of micellar orientation (α_m) and mean fibrillar angle (α_f) and its distribution of tangential or radial cell wall within No. 55 annual ring of SUGI.

Note:()は測定の変動の範囲を示す。

Parentheses denotes the distribution of α_f .



- 105 -

その分布

Note: (



annual ring of AKAMATSU.

と接線膜および半径膜の平均のフィブリル傾角 (a_f) と

Relationship between mean angle of micellar orientation (α_m) and mean fibrillar angle (α_f) and it's distribution of tangential or radial cell wall within No. 45

)は測定値の変動の範囲を示す。

Parentheses denotes the distribution of α_{f} .



Fig. 15. アカマツ(アテ材)22年輪内の平 均のミセル傾角 (α_m) と接線膜のフィブリル 傾角 (α_l) の関係

Relationship between mean angle of micellar orientation (α_m) and mean fibrillar angle of tangential cell wall (α_f) within No. 22 annual ring of AKAMATSU compression wood.

Fig. 16. スギ(アテ材) 30年輪内の平均の
 ミセル傾角(a_m)と接線膜のフィブリル傾角
 (a_f)の関係

Relationship between mean angle of micellar orientation (α_m) and mean fibrillar angle of tangential cell wall (α_f) within No. 30 annual ring of SUGI compression wood.



- 106 ----

平均してゆけば、ミセル傾角の正規分布に似た型のものが得られることが予想される。すでにみてきたように両者の相関は密接であると考えられるので、次に α_m と α_f の関係を直交座表であらわした。

Fig. 11~16 のタテ軸はミセル傾角, ヨコ軸はフィブリル傾角で, 〇, △印は接線面の平均, ●, ▲印 は半径面での平均をあらわす。また Fig. 13 のスギ, Fig. 14 のアカマツでは極端な値を除いて, 両膜の 最大値と最小値を合わせて示し分布を表現した。各図にみられる直線は傾斜が 45°であるから, この直線 よりのずれが大きいのは両測定値 (α_m , α_f) の差が大きいことを示す。

		w	早材幅 Width of eary wood (%)				晚 材 幅 Width of late wood (%)		
		0~25	25~50	50~75	75~100	0~65	80~100		
	S ₂	17.4	15.8	13.6	11.5	9.6	8.2		
Tangential cell	S ₁	60	63	65	64	70	72		
wall (°)	$S_2 + S_1$	77	78	78	75	79	80		
半 径 暄	S ₂	20.7	17.3	15.2	13.4	9.2	6.6		
Radial cell	S ₁	67	67	68	70	73	80		
wall (°)	wall (°) $S_2 + S_1$	87	84	83	83	82	86		
半径径/接線径 民	半径径/接線径 R/T*1 0.99		1.23	1.22	1.01	0.70	0.42		
接線膜厚 (μ) Cell wall thickness* ²		2.5	2.5	2.8	2.8	3.5	4.6		

Table 2. ヒノキ (70 年輪) の二次膜の平均フィブリル傾角と仮道管寸度 Mean fibrillar angle of secondary wall within No. 70 annual ring of HINOKI and dimensions of tracheid

*1. R/T: Radial diameter / Tangential diameter.

*2. Tangential cell wall thickness.

Note 年輪幅 Width of this annual ring: 1.05 mm

Table 3. スギ (25 年輪) の二次膜の平均フィブリル傾角と仮道管寸度

Mean fibrillar angle of secondary wall within No. 25 annual ring of SUGI and dimensions of tracheid

	W	早 标 'idth of ear	晚 材 幅 Width of late wood (%)				
	0~25	25~50	50~75	75~100	0~70	80~100	
按 線	S ₂	14.2	13.6	12.2	11.0	10.4	8
Tangential cell	S ₁	74	77	74	73	75	81
wall (°)	$S_2 + S_1$	88	90	86	84	85	89
光 径 瞠	S ₂	19.3	18.7	14.4	13.2	9.0	6.7
Radial cell	S_1	72	72	72	75	80	87
wall (°)	$S_2 + S_1$	91	90	86	88	89	93
半径径/接線径 R/T*1		1.19	1.48	1.42	1.19	0.75	0.36
接線膜厚 (µ) Cell wall thickness*2		1.8	2.2	2.3	2.5	3.1	4.8

*1. R/T: Radial diameter / Tangential diameter.

*2. Tangential cell wall thickness.

Note 年輪幅 Width of this annual ring: 4.4 mm.



Fig. 17. ヒノキ第10年輪内, 早 → 晩 材の変化に 対するミクロ試片の繊維方向の引張強度 (σ), ヤング 率 (E), 仮道管の半径径 (R), 膜面積率 (A), ミセル 傾角 (α_m), 比例限ひずみ (ε_b), 破壊ひずみ (ε_b)の変 化

Variations of tensile strength (σ), YOUNG'S modulus (*E*), radial diameter (*R*), percentage of cell wall area (*A*) and mean angle (α_m) of micellar orientation, strain at proportional limit (ε_p) and ultimate (breaking) strain (ε_b) of micro-specimen across growth increment from early wood to late wood within No. 10 annual ring of HINOKI.

Note (1) -*EW*-: 早材のミクロ試片のグループ Group of early wood micro-specimen.

<u>LW:</u> MORK の定義を満足する晩材仮道管を含むミクロ試 片 Late wood micro-specimen, containing late wood tracheids of MORK's definition.

<u>LW</u>: 膜厚の著増した仮道管よりなる晩材 <クロ試片の /ループ Group of late wood micro-specimen, representing considerable increment of cell wall-thickness.

 (T.Z): 移行領域(半径径の急減) Transitional zone, showing a sharp decrease of radial diameter.

Note (2) 横軸の数字は各ミクロ試片の厚み(半径方向) を示す。Each number of the axis of abscisses denotes the thickness (radial direction) of each micro-specimen. Note(3) 以下の図で α_m の代わりにフィブリル傾角(α_f) を用うることがある。 α_f used in other figures denotes mean fibrillar angle.

各図で共通的なものは早材部(傾角が大きい)ほど変動が大きく、半径面より接線面の傾角が小さいこと、45°の直線には接線面の測定値がのりやすい傾向を示す。 晩材部(傾角の小なる群)ではアカマツ、 カラマツで判然としないものもあるが、他の樹種では半径面の測定値が小さくなり、ヒノキ、モミでは細 胞軸に平行に近いものも見られた。スギ晩材では両者の差を見いだし難い例もあり、特に辺材部において データの集積を必要とする。

 $S_1 \geq S_2$ 関係は原田ら³⁾によって求められており、両傾斜角の和はほとんど 90° とされている。本測 定では Table 2, 3 に示す関係になる。また尾中ら¹⁵⁾は腐朽孔の走行より半径膜と接線膜のミセルの配列 を調べている。

2. 早·晩材の区分

供試5樹種について未成熟部と成熟部(年輪間における未熟, 成熟の判別はここでは15年輪を境界と した)より1~2例ずつ, typical な年輪を選んで早・晩材を区分したのが Fig. 17~32 である。

図中横軸は左より右へ年輪内での早材より晩材への推移をあらわす。横軸目盛はおのおの引張試料切片 に対応し、目盛の数字は各試料の厚み(半径方向, μ)をあらわす。晩材に近接すると、厚みが小さくな るのは晩材部の細胞の主として形態的構造の変化が十数細胞でも著しく変わることがあるから、厚みを薄



Fig. 18. ヒノキ35年輪内(早材→晩材)に おける強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 35 annual ring of HINOKI.



Fig. 19. ヒノキ 200 年輪内(早材→晩材)に おける強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 200 annual ring of HINOKI.

くしてできるだけ均一なものを得るためである。早・晩材の区分を明らかにすることによって,供試切片 の強度特性の相違を明確なものにすることができる。

針葉樹の年輪構造については,たとえば佐伯¹⁶)によれば,肉眼的色調と仮道管の寸度,細胞膜面積率と の関係をくわしく吟味した。本報のように 100~240 μ の厚みを有する切片の早晩材の判別は,晩材を意 味づけることにして次の立場で取り扱った。晩材の形成は生理的には植物ホルモン,酵素,光合成,外囲 条件の相互作用によって制御されるが,晩材は形成層より分裂した新生細胞の半径径が伸長せず,細胞膜 の増厚が著しいから,縦断構造よりも横断構造に変化があり,簡単には微細構造よりも光顕で査定できる ことが便であるから,晩材形成の特徴として

1. 半径径が小さくなること

2. 細胞膜厚(接線膜)が増厚すること

— 109 —





3. ミセル傾角,フィブリル傾角が小になること

この3点のほか,たとえば繊維長なども早・晩材によって僅少の差異を示すが,上記第3項目のミセル傾 角は Fig. 31, 32 のスギの例より知られるように,早材でも 15°以下で晩材との境界も必ずしも明確な ものばかりでないから,これによるのは樹種や部位によっては困難をともないやすい。

Fig. 17~32 を通じて材の形成に対応して半径径の変化を調べると、ほとんどの年輪で半径径の変化勾 配の急なものが見出される。これは各ミクロ試料の厚みに含まれる仮道管の半径径の変化を平均した結果 あらわれてくる傾向である。図中には示さないが、この領域の仮道管の接線膜厚はヒノキ、モミ、スギで は漸次的増加をしているが、カラマツ、アカマツでは顕著な増加を示す。膜厚の漸増の程度やその始点は 調査のつど変動することがあり、調査の客観性と完全さを意図する場合、膜厚の増厚が顕著な領域の仮道 管をもって晩材とした方が本実験の場合には適当に思われる。したがって前記の生理学的な立場のものを 実験との対応で整理した場合、晩材の判別は

a. 半径径の減少勾配が著しい。移行領域。



Fig. 21. アカマツ22年輪内(早材→晩材)に おける強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 22 annual ring of AKAMATSU. Fig. 22. アカマツ43年輪内(早材→晩材)に おける強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 43 annual ring of AKAMATSU.

b. 接線膜厚の増厚が著しい。晩材,記号:----

c. MORK's definition を満たす。晩材, 記号:----

したがって (a) のみの場合は完全な晩材でないが, 広義のそれに属すとし, (b) は多くの場合 (a) を満た すから晩材とし, (c) は (a) (b) を満たす横断面であり, 完全な晩材とする。

- 111 -

Fig. 23. モミ6年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 6 annual ring of MOMI.

Fig. 24. モミ10年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 10 annual ring of MOMI.

Fig. 25. モミ20年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化
 Variations of strength properties and cell structure across growth within No.
 20 annual ring of MOMI.

Fig. 26. モミ35年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 35 ;annual ring of MOMI.

Fig. 27. カラマツ7年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 7 annual ring of KARAMATSU.

Fig. 28. カラマツ20年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 20 annual ring of KARAMATSU.

Fig. 29. カラマツ48年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化
 Variations of strength properties and cell structures across growth within No.
 48 annual ring of KARAMATSU.

Fig. 30. スギ3年輪内(早材→晩材)における強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 3 annual ring of SUGI.

Fig. 32. スギ30年輪内 (早材→晩材) における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 30 annual ring of SUGI.

— 121 —

•. *

アカマツの場合,条件の (a) (b) は満たすが, 年輪界に近い晩材でも (c) を満足しない場合がある。 た とえば、3年輪(Fig. 20)のそれは、Mork's definition (内腔径)/(接線膜厚)が2以上であるから(c)を 満たさないが、 膜厚の著増があるから (b) にもとづいて晩材とした。 22 年輪 (Fig. 21), 43 年輪 (Fig. 22) では年輪界に接する晩材が(c)を満足するが、ミクロ試料断面の中で約1/3量がこの仮道管であれば Мокк の領域とした。Fig. 21 に見られるように半径径の急減したあとは年輪界まで変化が少ない。半径 径の急減と対応して膜面積率は大きくなり、最終には 70~80% に達する。

ヒノキでは (c) を満足するものは年輪界に近い少数の晩材仮道管に限られる。しかしアカマツに比較し て半径径は年輪界に近づいてもますます小さくなるから (Fig. 17~19), 早材部では比較的変化の少なか った膜面積率も著増する。また移行域 (T.Z.: Transitional zone) の存在も認めやすい。晩材の膜面積率 が他樹種に比べて小さいのは図示した晩材部の試料厚みの中には、半径径の小さいものと大きいのが混在 して、少なくとも 70~85% と評価せられる年輪界の晩材の膜面積率を平均化によって低減せしめたので あろう。ヒノキ、アカマツとも膜面積率が 50% 近傍では半径径の減少が著しく移行域(または晩材域) に入る。

モミ (Fig. 23~26) では ヒノキに比べて 半径径の漸減は広域にわたる。 半径径の急減による移行域は 明りょうであり、年輪界に近づいてさらに半径径が減少するのはヒノキと類似する。膜の増厚域はヒノキ に比べて長いので、MORK の領域はその約半分をしめている。

カラマツ (Fig. 27~29) はアカマツ (3年輪を除く)と同じく移行域がないが、半径径の減少はアカマ ッに比べて不連続になる。他樹種に比べて長い晩材域で Mork の 領域も大きく, 膜面積率は成熟材で 80% を越える。カラマツ, アカマツの成熟材では早材後期の半径径の減少は大きく, 減少勾配の大きい ところでは膜面積率は階段的な増加を示す。

スギ (Fig. 30~32)の場合、移行域は比較的明確で、これを過ぎても半径径は減少してゆく。しかし 成熟材では(b)(c)を満たす領域が少なく、晩材率が小さい。

3. 年輪内の繊維方向の比例限ひずみと破壊ひずみとミセルまたはフィブリル傾角

2 で記述した基準(a)(b)(c)によって供試ミクロ試片を区分した横軸に対して、縦軸に繊維方向の比例 限ひずみ(ϵ_p)と 破壊ひずみ(ϵ_b), ミセル傾角 (α_m), またはフィブリル傾角 (α_t)を正常材では Fig. 17~32 に, アテ材では Fig. 34~43 にそれぞれ示す。

ε,は正常材では早材より晩材になるに従って変動しながらわずかに増加する。しかしスギ3年輪 (Fig. 30), モミ6年輪 (Fig. 23) などの未熟材ではほとんど一定か, ときにはわずかに減少する。ヒノキ, ア カマツ,カラマツの & は未熟材でも成熟材の年輪と同じ傾向をもつが,特にアカマツの各年輪 (Fig. 20 ~22) では早材の後期に形成された試片の ε, は最大を示す傾向がみられる。

ε, はスギを除いて早材の初期部が大きく, 早材末期か晩材部へ進むに 従って 変動しながら小さくなっ ていく。しかし年輪界に接する晩材ミクロ試片でふたたび増大する場合がしばしば見いだされる。アカマ ツは後期の早材部まで次第に減少していくが, ε, の最大のところで最小となり晩材部では増加する。 ス ギは他樹種と異なり, ε, は晩材部の方が大きく, かつ, アカマツ, カラマツの未熟部の年輪に比べて, スギの3年輪 (Fig. 30) の ϵ_b の変動はきわめて大きい。

α_m または α_fの横軸, すなわち 年輪内での 成長変化との関係は各図に みられるように早材では 大き く, 次第に漸減して晩材で最も小さくなる。これは ε, が一部の例外を除けば早材→晩材によって大→小

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木) — 123 ---

と変化するのと同じ傾向をもつ。アカマツ,モミ,ヒノキ,カラマツの各年輪で ϵ_b と α_m , α_f の関係は この対応をよく示すが,スギでもたとえば3 年輪 (Fig. 30) をみると,ほぼ中央部までの ϵ_b の山と谷は α_m のそれによく対応している。スギの12 年輪 (Fig. 31),30 年輪 (Fig. 32) の ϵ_b と α_m は例外的に 負の相関を示し、この原因はまだ明らかでないが、早材部仮道管のミセル傾角の最大は、12 年輪で15°, 30 年輪 13° で、晩材のそれはそれぞれ 8°、6° であるから、他の樹種に比べてその差が小さい。したがっ て早・晩材のミセル傾角の差が少ないから、 ϵ_b に顕著にその影響が現われず、他の原因によって早材の破 壊ひずみが低減されたのであろう。 α_m または α_f と ϵ_b の密接な関係は後述するアテ材の場合にさらに明 りょうになる。

樹種・年輪別に ϵ_{p} , ϵ_{b} と α (α_{m} と α_{f})の関係値を示したのが Table 4 である (ϵ_{p} , ϵ_{b} は各図の左端, 右端の値であるが,その値が特異な場合は付近の 2-3の試料の平均を求めた)。 α_{m} または α_{f} は年輪数が大きくなるにつれて減少する。早材の ϵ_{b} も同様に小さくなるが,晩材でも多少の不規則はあるが減少の様子を示す。このように ϵ_{b} は年輪内を問わず年輪間でも α_{m} または α_{f} と相関を示す。未熟材部に属する年輪の ϵ_{b} や α は成熟材部より大きいが,特に ϵ_{b} はモミ (Fig.23),スギ(Fig.30) で成熟材部の 2倍

樹種	年 輪 No. of	早材 Early wood of	(初期刑 d formed at growing sea	尨 成) early time son	晚材 Late woo of	晚 材 (末 期 形 成) Late wood formed at late time of growing season			
Species	ring from pith	比例限ひずみ ε _p *1×10 ⁻²	破壊ひずみ €,* ² ×10 ⁻²	ミセル傾角 or フィブリ ル 傾 角 a _m *3, a _f *4 (比例限ひずみ	破壊ひずみ ɛ,*²×10 ⁻²	ミセル傾角 or フィブリ ル 傾 角 a _m *3, a _f *4 (°)		
ヒノキ HINOKI	10 35 200	0.64 0.55 0.65	2.22 1.60 1.60	$\begin{array}{ccc} 20 & \alpha_m \\ 16 & '' \\ 15 & \alpha_f \end{array}$	0.90 0.70 0.83	1.60 1.40 1.40	9 α _m 8 '' 7.5 ''		
フカマツ AKAMATSU	3 22 43	0.65 0.72 0.60	1.65 1.47 1.33	24.5 α _f 17.0 " 13.0 "	0.92 0.81 0.65	1.43 1.35 1.30	9 α _f 7 " 5.5 "		
モ NOMI	6 10 20 35	0.65 0.68 0.74 0.62	3.60 2.10 1.52 1.68	$25 \alpha_f$ 27 " 20 " 17 "	0.62 0.80 0.74 0.80	2.50 1.98 1.40 1.50	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		
カラマツ KARAMATSU	7 20 48	0.62 0.67 0.72	1.52 1.48 1.32	$22 \alpha_f$ 25 " 17 "	0.80 0.80 0.82	1.40 1.18 1.25	5 α _f 8 " 5 "		
ス ギ SUGI	3 12 30	0.88 0.80 0.90	3.65 1.10 1.35	18 α _m 15 " 11 "	0.72 1.20 1.05	3.02 1.52 1.52	13 α _m 8 " 6 "		

Table 4. 年輪界近傍の早・晩材ミクロ試片のひずみとミセルまたはフィブリル傾角 Strain and mean micellar or fibrillar angle of micro-specimen of early wood and late wood near the boundary of annual ring

*1. ε_p : Strain at proportional limit.

*3. α_m : Mean angle of micellar orientation.

*2. ε_b : Ultimate strain (Breaking strain).

*4. α_f : Mean fibrillar angle.

以上の差のあるものもあるが,カラマツ,アカマツではその差が少ない。 ϵ_b に限定した場合, α_f または α_m では見いだし得ない未成熟と成熟の性質の差がモミ,スギで現われてくることがわかる。伸びやすい という意味での弾性あるいはじん性はここにあげないデータもあわせて検討するとアカマツ,カラマツは やや欠ける結果であるのに対し,ヒノキは中庸的な性質を示す。 α_m または α_f と ϵ_b の関係はバネのラセ ン角と最大変形量との関係に類似する。

アテ材の場合:本実験の供試アテ材は偏心度の高いスギもあるが、多くは偏心の少ない、普通の丸太断 面としてしばしばみられるものである。

モミ・アテ仮道管 Compression wood tracheids of Abies firma.

(c) アカマツ・移行的アテ仮道管 Transitional compression wood tracheids of *Pinus* .*densiflora*.

カラマツ・移行的アテ仮道管 Transitional compression wood tracheids of *Larix leptolepis*. (×130)

(d) スギ枝・上側断面の辺材晩材部 Main branch of *Cryptomeria jabonica*, upper (tension) side of traverse section, sap wood, region of late wood.

Photo. 8. アテ材およびその移行材 Photomicrograph of compression wood and transitional one to it. (×560)

アテ材の引張ミクロ試片の横断面を調べると Photo. 8 のように形態的にアテの特徴を表わすもの(a)か ら,低倍率の観察ではアテと判断されるが,倍率を高めると写真(c)のように完全にアテとは断言しにくい 過渡的なものまで含まれることがわかる。Fig. 34~43 で r 値は引張試片断面内に含まれるアテ細胞の割 合(後述)であるが,年輪内で r が左へゆくにしたがって減少し0になる試片に接する – EW – の試片の 右端の4~5 個の α_m または α_f を正常材の最大のもの(早材・左端の試片, Table 4)と比較すると(Table 5),ほぼ一致するかもしくは前者が大きい。したがって,正常材の早材中期のミクロ試片の α_m , α_f が正常材の 成熟

-124 -

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木)

compression wood tracheids 最小の比 最大の破 年輪内アテ部 アテ率40%以 年輪内最大 例限ひずみ 扱 加 x of ε_{s}^{*1} ×10⁻² ×10⁻² ×10⁻²

 $23 \sim 24$

 $24 \sim 28$

20~28

22~28

22~27

 $21 \sim 33$

 $27 \sim 32(\gamma > 30)$

 $19 \sim 35(r > 30)$

 $21 \sim 38(\gamma > 20)$

 $19 \sim 33(r > 20)$

 $10 \sim 13$

 $15 \sim 18$

14~17

 $20 \sim 25$

 $20 \sim 30$

 $20 \sim 25$

17~22

 $18 \sim 24$

 $27 \sim 33$

 $23 \sim 26$

Table 5.	アテ材仮道管を含むミクロ試片のひずみとミセルまたはフィブリル傾角									
Strain	and mean micellar or fibrillar angle of micro-specimen containning									
compression wood tracheids										

3.45

3.40

2.70

2.10

2.70

2.82

2.20

4.30

2.80

3.55

*1. ε_p : Strain at proportional limit.

年

No. of annual

ring from

pith 8

22

56

12

26

12

26

20

30

54

樹

モ

ス

Species

アカマツ

AKAMATSU

MOMI

カラマツ

KARAMATSU

SUGI

З

種

謚

0.4

0.4

0.5

0.5

0.5

0.5

0.4

0.6

0.65

0.70

*5. C. W. T.: Compression wood tracheid.

*2. ε_b : Ultimate strain.

ギ

*3. α_m : Mean angle of micellar orientation.

*6. γ: Percentage of compression wood tracheids to all tracheids.

*4. α_f : Mean fibrillar angle.

材部に比べて大きいから,この領域(r値=0で,アテ材部に近い早材)の細胞でもアテの素因を有して 移行的なものと考えられる。

しかし、本報ではこの領域の細胞はその形態が正常であるからアテとせず、細胞内胚縁や外壁の角隅が 顕著に丸味をおびるものよりアテとした。図中rは横断面の全細胞数に対して上記の定義にもとづくもの の数量を%で示すことにした。Fig. 36 にみられるアカマツのごとく、早期の早材よりアテが現われるの もあるが、多くは中後期より晩材にかけて顕著になり、Fig. 37,39,40 にみられるように年輪界の晩材で やや正常化していく。内胚縁や角隅が丸味をおびると、カラマツ、アカマツは半径径と接線径の比が急速 に1に近づき円形化したまま継続するが、スギ、モミは両直径の比が1を過ぎても半径径がさらに小さく 丸味をおびながら偏平化が進む。rは仮道管の横断面の形態より導かれたものであるが、アテの微妙な判 別は α_m などの微細構造によってなされねばならない。

rの年輪内でのあらわれ方はアカマツ,カラマツのようにピークを持つもの, モミのようにピークが多 数あるものなどあるが,これも樹種間の特徴よりも生育条件と生理現象によるものであろう。カラマツ, アカマツは偏心は少なく,年輪幅もそれほど大きくないから,各試料におけるrの分布は小さい(アカマ ッ56年輪を除く)が,偏心のあるスギではやはり分布が広くなっている。

供試アテ材の肉眼的特徴は、スギでは年輪幅が広く、暗褐色でアテと判断しやすいが、カラマツでは晩材 部がやや厚い以外は正常材とかわらず、アカマツ、モミは晩材部が厚いので色調も濃色と見うけられた。

アテ材の各図にみられるように、 $\gamma \ge \alpha_m$ 、 α_f が大略同じ傾向のもの (Fig. 36, 41) もあるが、 α_m 、 α_f が早期に大きくなるのも (Fig. 43) あるから一致しない場合が多い。たとえばモミ12年輪 (Fig. 37)、 スギ30 (Fig. 42)、54年輪 (Fig. 43) ではむしろ α_m 、 α_f の減少過程で、 γ が最大値を示す。

24 α_m

28 "

28 "

28 a,

 $32 \alpha_f$

35 "

33 α_m

38

33 "

11

27 · ″

アテ材の比例限ひずみ (ϵ_p) は正常材とは異なり、1年輪の形成過程を通じて右下りの傾向を持つ。換 言すればアテが顕著になると材の比例限は小さくなる。これに対して破壊ひずみ (ϵ_b) は ϵ_p が小な るほ ど大きくなる。 アテが顕著になるに従って材は伸びやすくなる。 この関係は Fig. 35 のアカマツに みら れるように、早材中期で ϵ_b が極大値を持ち、 ϵ_p が極小値をもつなど密接な対応をあらわすが、さらに ϵ_b が α_m とすぐれた相関を示すことに注意を要する。 ϵ_b の最大値は α_m 、 α_f のそれと一致するのはアカマツ の各年輪(Fig. 34~36)、カラマツ12年輪(Fig. 39)、スギ20、54年輪(Fig. 41, 43) のごとく全樹種にわ たっている。しかし ϵ_b の最大値と ϵ_p の最小値(必ずしも最右端の晩材とは限らない) はアカマツ 8年 輪 (Fig. 34)、モミ 12、26 年輪(Fig. 37, 38)、カラマツ 26 年輪(Fig. 40)、スギ 20、30 年輪(Fig. 41, 42) のごとく必ずしも一致せず、 ϵ_p の最小値が右へずれることが多い。

Fig. 33. スギ枝辺材・20 年輪内の上側,下側部位における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 20 annual ring of main branch of SUGI.

24 22 20 18 σ (x10² kg/cm²) 16 E,Es - Es 14 (X10⁴ kg/m²) 6 Ĕ 12 10 8 6 4 10 λ 8 AON 8 6 (X10%) 4 2 0 30 ç2 ۲) د 0 E3 dm 25 o (°) 20 E₂ E1 è 0 0 a 15 10 - E b 0- Ep Е (x10²) 0 0 24 23 25 24 26 20 22 20 23 20 18 12 13 12 (×104) - E.W L.W — C.W -

Fig. 34. アカマツ(アテ材) 8 年輪内 (早材→ 晩材)における強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 8 annual ring of AKAMATSU compression wood.

- Note (1)-CW-: 7% のアテ仮道管を含むミクロ試 片 Group of micro-specimens containing γ percentage of compression wood tracheids.
 - γ: ミクロ試片中に含まれる アテ細胞の全細胞 数に対する比 γ denotes percentage of compression wood tracheids to all tracheids of micro-specimen.
 - E_s : 細胞膜 (繊維方向) のヤング率 E_s denotes Youvo's modulus of cell wall parallel to tracheid axis
 - Note (2) E1, E2, C1, C2, C3: Fig. 9 参照 Reference to Fig. 9.

Fig. 35. アカマツ (アテ材) 22 年輪内 (早 材→晩材) における強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 22 annual ring of AKAMATSU compression wood.

Note. E1, E2, E3, C1, C2: Fig. 10 参照, Reference to Fig. 10.

Fig. 36. アカマツ (アテ材) 56 年輪 内(早材→晩材) における強度性と細胞 構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 56 annual ring of AKAMATSU compression word.

Fig. 37. モミ(アテ材)12年輪内(早材→晩材)にお ける強度性と細胞構造の変化

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 12 annual ring of MOMI compression wood.

成熟材部についての正常材とアテ材の ε_0 の比較は Table 4,5 よりわかる。正常材の ε_0 の最小は 早材 (左端) であるが、アテ材では晩材かもしくはその近傍に現われる。最小値の大きさはアテ材の方が小さ い。一方 ε_0 の最大値は正常材ではスギを除いて早材部 (図の左端またはこれに近いところ) に現われる が、これとアテ材の最大値はかなりの差をもって後者が大きい。また α_m 、 α_f の最大値は正常材では早 材に現われ、その値はアテ材の最大値よりはるかに小さい。

γが 40 %以上(20%, 30%以上としたのもある)のアテ・ミクロ試片の α_m, α_fの値は 25~27°のものが

- 129 -

Fig. 38. モミ (アテ材) 26年輪内 (早材→晩材) における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 26 annual ring of MOMI compression wood.

-多い。これに対して正常材の早材部は 20°以下が多いから,両者の区別をつけることができる。しかし未 熟部では 25° 近傍の値もしばしば存在し得ること,また半径膜では前記のごとく α,が大きいことなどの -場合がある。

枝材について:幹に現われたアテ材の α_m, α_f は正常材より大きいが, 枝のアテ材はさらに大きく最大 であった。針葉樹の枝のアテは枝断面の下側に発達するが, 供試材の下側の年輪を調査すると, 一年輪内 で 70~90 %がアテ化しており, 年輪によっては早材初期よりアテ細胞が見いだされる。

Fig. 33 のスギ枝材(採取位置: I 実験,供試料のところ)の α_m は 45°にも達するから,幹のアテ材(例 27°)とは大きく異なる。 α_m は晩材になるほど大きく, ϵ_b もよく対応して著増する。 この付近の $\epsilon_b = 14 \times 10^{-2}$ に対して,幹の成熟材の1例(晩材) 1.8×10^{-2} と比較すれば8倍近く,幹アテ材の1例 4×10^{-2}

Fig. 39. カラマツ (アテ材) 12 年輪内 (早材→ 晩材)における強度性と細胞構造の変化

晩材) における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell struc-

Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 12 annual ring of tures across growth within No. 26 annual ring of KARAMATSU compression wood.

KARAMATSU compression wood.

と比較すれば3.5倍に達する。枝の強じん性は e,によっているが,強度値は幹のアテ材の 1/3 程度である。 枝アテ部の細胞膜面積率は Fig. 33 のように早材初期より 50 %以上に達する。 これは細胞膜の増厚よ りも Table 6 のように、幹材より小型の細胞が形成されることによる。

枝の上側部は検鏡の結果、いわゆるアテ細胞の様相を呈しないが、内腔縁や角隅では丸味をおびて膜の・ 増厚が認められる(Photo. 8(d))。α_mは下側部位のアテと同じくかなり大きいことは注目すべきである。 膜面積率は早材部より50%を越える。 さらに特殊なのは ε, が早材で 23~24×10⁻², 晩材でも 12~13×: 10⁻² ときわめて大きい。 しかし引張強度値は 950 kg/cm² (晩材), 下側断面のアテのそれ 440 kg/cm² の・ 約2倍であるが、幹材の例2600 kg/cm²には遠く及ばない。

4. 細胞膜面積率

2では晩材の定義にもとづいて、主として晩材部付近の膜面積率(A)の経過を記述した。ここではヤング

— 131 —

Fig. 41. スギ (アテ材) 20年輪内 (早材→晩材) における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 20 annual rring of SUGI compression wood.

Note E1, E2, C1, C2, C3: Fig. 7 参照 Reference to Fig. 7.

— 132 —

Fig. 43. スギ (アテ材) 54 年輪内 (早材→晩材) における強度性と細胞構造の変化 Variations of strength properties and cell structures across growth within No. 54 annual ring of SUGI compression wood.

	卓 Ste	幹 em	枝(下) Branch(則断面) lower side)	枝(上 側 断 面) Branch (upper side)		
	早 材 Early wood	晚 材 Late wood	早 材 Early wood	アテ材 Compression wood	早 材 Early wood	晚 材 Late woc d	
半 径 径 Radial diameter (µ)	32~ 37 ~41	9~ 13 ~15	17~ 20 ~22	8~ 10 ~11	15~ 18 ~21	8~ 10 ~12	
ミセル傾角(°) Angle of micellar orientation	15	6.5	- 29	44	40	42	

Table 6. 枝と幹の仮道管の直径

Radial diameter of tracheids of main branch and stem of Cryptomeria japonica

率や強度を説明するため、年輪構成の全域について簡単にまとめ、アテ材の年輪と比較する。

半径径と接線膜厚,内腔径/接線膜厚によって晩材の判別を試みてきたが,膜面積率には半径径の減少 と膜の増厚の効果が相乗的に働くことが考えられる。しかし膜の増厚が漸次的である場合は,増厚の効果 は晩材部付近で膜面積率に影響するので,正常材では膜面積率の経過は半径径のそれに類似する場合が多 いから,次に半径の大小などを考えながら,膜面積率の経過を調べる。

ヒノキの未熟・成熟の年輪に共通して、半径径の減少に対して Aは増加するが、10 年輪 (Fig. 17)では A=50%を越えるのが晩材のみであるのに対し、35 および 200 年輪 (Fig. 18, 19)では (T.Z.)で50% を越える。晩材の Aが小さい理由は試料厚のとり方 (大・小)に原因することはすでに述べた。早材で は Aは 30%以上であり、特に 10年輪では 40%に近く、半径径も他樹種に比べて小さい。また半径径の 変化がアカマツ、カラマツに比べて少ないから材質的には緻密、均質になる。しかしフィブリル傾角がす でにみたように、早材初期で 15~20°のものが多く(ここにあげない他のデータも含めて)、本実験のス ギの値よりは大きい。

アカマツの3年輪(Fig. 20) も小型の細胞で, A は 40 %に近く, 50 %前後で(T.Z.) に達する。22, 43 年輪(Fig. 21, 22) では晩材で 60 %を越えるから, A が 50~60 %の値は(T.Z.), 晩材の境界にほぼ 一致する。すでに記述したように,(T.Z.) と晩材を含めて広義の晩材部とすれば, A の値より概略の見 当がつけられる。早材初期で A の変化がないところでは,半径径も変動が少ない(Fig. 20, 22)。半径径 の変化が次第に大きくなる早材中期より, A も増加を現わし,やがて急増点に達する。

モミ 6 年輪 (Fig. 23) ではヒノキと同じく早材初期より Aは 40 %に近く,中期より 40 %を越え, (T.Z.) で 50 %前後になる。晩材では著増して 78 %に達する。10, 20, 35 年輪 (Fig. 24~26) になると Aは (T.Z.) で 50 %を越えるから,晩材では 80 %を越える。早材部でAが漸次増加するのはモミ各年 輪に共通であり,同じマツ科のカラマツ,アカマツとは相違している。

カラマツ 7,48 年輪 (Fig. 27,29) でも早材中期で半径径が大きくなるから,A は初期よりやや減少 気味であり,晩材部で不連続的に急増する。20 年輪では A の減少はないが,早材初期で A=20 % に 近 く,晩材との境界で 50→75 %と急増する。これらの例のように A の小さい状態から著増するのは Photo. 9をみても明らかである。写真より隣接する 2つの仮道管によって膜の増厚が顕著に相違するのがわかる。

スギの場合では3年輪 (Fig. 30) では (T.Z.) に達するまでに A が 50 %以上になり, 他樹種 では見 られない。早材の初期でもところどころに 40 %を越えるものもある。12 年輪 (Fig. 31) でも (T.Z.)の

— 134 —

Photo. 9. カラマツの早・晩材の境界 The boundarly of eary wood and late wood of *Larix leptolepis*. (×150)

Photo. 10. 引張破壊部近傍の横断面 (モミ ・早材後期)

The transverse section near the portion broken by tensile test (Abies firma). $(\times 560)$

前で50%に近い。半径径の減少は漸次的であるが比較的明りょうであり、A も漸次増加していく。成熟材 の年輪では早材はA=30%に近い。(T.Z.)におけるAは 60%を越える場合が多い。

アテ材の場合: アカマツ8, 22 年輪 (Fig. 34, 35) にみられるように, アテの分率 r が 20 %を越える 付近では, A はすでに 50 %に達して増加していくから, 正常材の年輪には見いだせないほど膜面積率が 大きい。また年輪界に近づくまでに, A に最大値があることはアカマツの 3 つの年輪で共通している。

モミの12, 26年輪 (Fig. 37, 38) でも, γ=20 %になれば, Aは 40~50 %と大きくなり, アテの顕著 ∴な領域になると, 比較的長く 50~70 %の領域がつづく。

供試したカラマツではアテの程度が少ないから,正常材と似ているが,早材の中後期よりAの漸増が .あり,Aが40%を越えるのが多くなるから,正常材のように著しい不連続点は現われない。

スギ20年輪 (Fig. 41) では、年輪幅の約半分までA=50%を越え、 γ が大きいところでAも大きくなる。この年輪ではアテの領域でピークが3つほど見られるが、アテ化した細胞が小型化し、膜が増厚するのが必ずしも一様に進まないためであろう。30、54年輪 (Fig. 42, 43) でも、 $\gamma=0$ すなわち、形態的、にアテの特徴を有しないところでもAは40%を越え、この領域が長いことは、正常材に比べて細胞径の一減少と膜の増厚が少しずつ進むためと考えられる。すでに記述したように、この領域ではミセル傾角は20°を越えている。

5. 年輪内の繊維方向のヤング率と引張強度の分布

(i) ヤング率

4 で記述した膜面積率(A)とヤング率(E),引張強度(σ)の年輪内での推移を正常材について調べると, アカマツ3年輪,モミ6年輪,スギ3年輪など未熟部に属する年輪では, E, σ の増加の様子に多少の相 違はあるが,他の例では増加の様子や程度もよく似ている。たとえば E と σ の関係について, Fig. 28, 29 のカラマツ, 20,48 年輪の晩材部で,全く同位置に最大値が存在する。ヒノキ 200 年輪(Fig. 19),ア カマツ3年輪(Fig. 20),モミ 10,35 年輪(Fig. 24,26),カラマツ 7,48 年輪(Fig. 27,29)など早 材~晩材の区間で, E と σ の凹凸の関係がほとんど類似する。また E, σ と A との関係もカラマツでは対 応がよい。モミの各年輪は晩材部の増加は3者とも共通しているが, A の増加が早材の中後期で少し小さ いこともある(Fig. 23~25)。しかし年輪の全域の推移よりみればおのおの増加の傾向はかわらない。

これまでの Ε と σ の関係を求めた実験では、両者の相関が高いという立場ではあるが、 ばらつきが多

いため十分な結論を得なかった。これにはたとえば針葉樹では早晩材を含んで不均質度の高い素材での結果であったから、むしろ変動するのが当然かも知れないが、たとえば本報のような方法でその原因を追求 して一般の素材の場合のばらつきの意味づけをしておく必要がある。

E, σ の増加の様子のタイプはカラマツはS字型で晩材でピーク値をもつ。アカマツではAはS字型 が多いが、E, σ も微弱ながらこの傾向をもつ。他の樹種の傾向では右上りの指数型になる。

アテ材の場合:アテ材の場合も *E*, σ , さらには *A* の関係は正常材と同様によい一致を示す。たとえば アカマツの 22 年輪(Fig. 35)のごとく *E* と σ , さらには *A* との関係が途中で最大値を持ったり、極小 値を持ったりして変動する場合でも、3 者の対応はきわめてよい。同じく 56 年輪(Fig. 36)でも最大値 の周辺の 3 者の関係は似ている。

カラマツの例を除けば、アテ材部(図の横軸下側に <u>CW</u> としてあらわす)で、*E*、 σ 、*A* に小さい極大 値が現われてくる。正常材では晩材に近いところで右上りの傾向が多いのに対して、アテ材の *E*、 σ は飽 和型で、いくつかのピークを持っている。アテ材の *A* はすでにみたように早材の初期より漸次増加 する から、 σ 、*E*もこれに対応して早材初期よりなだらかな増加を示している。

ヤング率は従来ミセル傾角に依存することが指摘されているが、ミセル傾角の小さいほどヤング率も高いことは正常材の各図で共通して見いだされる現象である。

アテ材ではアテ化が進むにつれて、ミセルまたはフィブリル傾角が次第に増加していくにもかかわらず、さきにみたように E は次第に増加し、その増加の様子は A にほぼ比例する。このように E とミセル傾角がいわゆる正の相関にあることは正常材では見いだせない現象である。

たとえばカラマツ 20 年輪 (Fig. 28) の例のごとく、A が 50~75 %と急増すると、E もこれまでの経 過より不連続的に急増する例のごとく、正常材とアテ材に共通したものに、E と A に正の相関があるこ とであり、ヤング率もみかけ上膜面積率に依存することになる。ヤング率は次元に〔面積〕⁻¹をもつから、 E の特性を追求する場合、空隙の効果を排除せねばならない。これは

 $E/A = E_s$ (細胞膜のヤング率)

によって与えられる。

アテ材の場合,アカマツ8年輪 (Fig. 34) では, E_s は早材とアテ材の境界付近まで変動しながら増加 する。この領域では α_m は変化が少ない。アテの領域に入って α_m が著増すると E_s は顕著に減少し始め, ついには早材の E_s より小さくなる。同 22年輪 (Fig. 35) でも γ および α_m の大きい, すなわち 顕著な アテのところでは早材の E_s より小さいことがわかる。同 56年輪 (Fig. 36) では E_s は $E(または\sigma)$ の 関係をずらせた型であるが,左端より7番目の試料まで E_s は増加していく。この範囲の α_m は変動して いるが,これを過ぎると α_m が増加していくのに対して E_s は減少する。

モミ12年輪(Fig. 37) では E_s は E と同じ傾向をもつ。モミ 26 年輪(Fig. 38) もこの傾向はかわらな いが、7 が値を持つ前までは α_f は変動が大なるわりに増加は少ない。この領域では E_s は増加して最大値 をなし、以後小さくなるがその差は少ない。

カラマツ 12 年輪 (Fig. 39) では早材初期よりやや増加を示し極大をもつ。 α_f の最大の あたりで ふた たび小さくなったあと、 α_f の急減に対応して E_s は著増する。しかし 26 年輪 (Fig. 40) では α_f が最大 値になるまで、 E_s はほぼ一定か、微弱ながら漸増し、 α_f が最大値を過ぎて減少すると、 E_s はその程度は 小さいが増加していく。

- 136 -

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木) — 137 —

スギの各年輪では Ε_s は増加をたどるから, α_m との関係は Ε と同様とみられる。

アテ材の E_s はアカマツを除くと、スギ、モミのように α_m 、 α_f が増加して最大になっても E_s の減少 をみないから、 α_m 、 α_f に反比例的に E が変化すると考える一般則より違ってくる。しかしアテは全く同 じものを見出せないほど多様であるから、 α_m 、 α_f と E を簡単に結合させることが危険であるかも 知れな い。たとえば E, E_s は初期接線モジュラスであるが、接線モジュラスをとれば、 α_m 、 α_f の関係が説明で きる可能性がある。

正常材の E_s は各図の E_s A の大きさの程度より、E と同じ傾向をもつことがわかる。Teble 7、8 には 早村(左端の試片より、 第3または第5試片までの平均値)における E と晩材部における最大の E につ いて E_s を求めて示されている。 E_s は早材より晩材が大きいので、E と同じ傾向 とみられる。 正常材 で は E_s E_s は α_m 、 α_f に対して負の相関を示し、その関係はすでに記述した一般即に適合する。

(ii) 引張強度と早・晩材の破壊型

引張強度は記述のごとく(I.2参照)破壊部近傍の断面積によったので、主として晩材部ではより正確な値とみられる。引張強度 σ はすでにEとの関係で調べてきたように、Aと密接な関係をもって右上りに増加する。正常材の場合早材より晩材にかけて σ の変動が大きいのはばらつきよりも膜面積率、すなわち単位面積に存在する膜実質量のちがいが主因であり、さらには α_m 、 α_f 、膜の多層構造、結晶性などが関与するのであろう。

樹 種 Species	年 輪 No. of annual ring from pith	ヤング率 Young's modulus ×104kg/cm ²	引張強度 Tensile strength kg/cm²	細胞膜 面積率 Percentage of cell wall area %	細胞膜の ヤング率 Young's modulus of cell wall ×10 ⁴ kg/cm ²	細胞膜の 引張強度 Tensile strength of cell wall kg/cm ²
ヒノキ HINOKI	10 35 200	6.1 6.7 6.6	770 790 880	35 34 34	17.4 19.7 19.4	2200 2320 2590
アカマツ AKAMATSU	3 22 43	5.0 5.4 5.5	650 640 650	38 33 32	13.2 16.4 17.2	1710 1880 2030
र १ MOMI	6 10 20 35	2.8 2.7 3.0 3.0	430 380 370 370	38 35 32 28	7.4 7.7 9.4 10.7	1130 1090 1160 1320
カラマツ KARAMATSU	7 20 48	2.5 2.6 2.0	330 300 300	29 26 25	8.6 10.0 8.0	1140 1150 1200
ス ギ SUGI	3 12 30	1.8 3.4 3.5	320 - 340 440	38 32 30	4.7 10.6 11.7	840 1060 1470

Table 7. 年輪界近傍の早材ミクロ試片の繊維方向のヤング率と引張強度 Young's modulus and tensile strength parallel to grain of micro-specimens of early wood tracheids near the boundary of annual ring

樹種別にみた早材(Eと同じく,当初より3ないし5試片の平均)のσは Table 7 のごとく, ヒノ キ,アカマツが大きいのに対して,モミ,カラマツ,スギは300~400 kg/cm² 程度になる。年輪別にみる と,スギ,ヒノキのように未熟より成熟になるに従って増加するものもあるが,モミ,カラマツは 減少 し,アカマツではその差は少ない。早材の同位 置の 膜面積率は各樹種共通して減少するので,膜強度 σ/A=σ。は年輪の増加によって大きくなる。

晩材の厳密な意味での強度は次年輪に接する微小な晩材を切りだして求める必要がある。しかし最端の 晩材数細胞を残したり、次年輪の早材をわずか合併することがあったから、各図にみられる σ の最大をも って一応各樹種の晩材部の強度としたが、この値は違いうる可能性がある。晩材の σ は試料のとり方に問 :題があるから、相互に比較できないが、供試年輪別にみると(Table 8)、年輪数の多いほど σ は 増加す るのが認められる。膜面積率はスギ、カラマツ以外は同様に増加がみとめられ、 σ_s も増大していく。 σ は ここにあげた例ではモミ35年輪が最大であるが、 σ_s ではヒノキ、アカマツが大きくなる。ここに示 さな い例の中にはスギの晩材でも 3000 kg/cm² をこえるものもあることを付記しておく。

早材,晩材の破壊の型は前者がななめ切れ(繊維軸に対して30~90°)であるのに対して,後者は繊維 軸にそって長く,ささら状に切れるから,破壊の型は全く異なる。このように破線の角度とミセルまたは フィブリル傾角の傾向が一致するので,両者を関連づけようとする試みもあるが,筆者の実験では両者に 厳密な関係を見いだし得なかった。ミクロ試片の破壊部を脱リグニンし,光顕下で破面を見ると,早材は

´樹種 Species	年 輪 No. of annual ring from pith	ヤング率 Young's modulus ×10 ⁴ kg/cm ²	引張強度 Tensile strength kg/cm²	細胞膜 面積率 Percentage of cell wall area %	細胞膜の ヤング率 Young's modulus of cell wall ×10 ⁴ kg/cm ²	細胞膜の 引張強度 Tensile strength of cell wall kg/cm ²
ヒノキ HINOKI	10 35 200	14.2 17.1 18.8	1720 2560 2620	59 63 70	24.0 27.2 26.8	2920 4060 3740
フカマツ AKAMATSU	3 22 43	14.5 20.2 22.0	2000 2800 3060	70 74 76	20.7 27.3 29.0	2860 3780 4020
ج ۽ MOMI	6 10 20 35	11.7 17.6 21.0 22.8	2100 2580 2880 3330	77 79 84 88	15.2 22.3 25.0 25.9	2730 3260 3420 3780
カラマツ KARAMATSU	7 20 48	15.2 25.8 28.6	1840 2880 2960	76 87 83	20.0 29.6 34.4	2420 3910 3600
ス ギ SUGI	2 12 30	7.2 18.5 23.0	1600 2580 2840	82 76 84	8.8 24.4 27.4	1950 3400 3380

Table 8. 年輪界近傍の晩材ミクロ試片の繊維方向のヤング率と引張強度 YouNG's modulus and tensile strength parallel to grain of micro-specimen of late wood tracheids near the boundary of annual ring

- 138 -

仮道管軸に 40~80°の角で膜のななめ切れ, 晩材は約 10°で長い剪断的膜切れと 80~90°で横断される場: 合がある。別に破壊部近傍をパラフインで固定して得た横断面: Photo. 10 より, 中間層またはやや内側, の S₁ 付近での剪断破壊の発生がわかる。これらより仮道管中の力の伝達は, S₂ 層の引張荷重が中間層を主. 体とする剪断荷重と釣合う機構が考えられ早・晩材仮道管では両者のうち弱い方が破壊の始点になる。晩材 は α が小さく, ヒノキの例で晩材の1本の仮道管(二次膜+内腔)の引張強度は 6,000kg/cm²、ミクロ試片 は2,500kg/cm² であるから剪断的破壊が優先する。早材初期の1本の仮道管とミクロ試片の強度は同じく 700~1,000kg/cm² であるから, いずれが優先するか明らかでないが S₂ の破壊も十分考えられる(8 参照)。

6. 年輪の繊維方向のヤング率と比例限応力

E, σ あるいは ε₆ に分布をもつ仮道管が集まって1年輪を形成する。この年輪が適当な数だけ 集まっ、 て、単板から種々の大きさの角材になるから、1年輪の特徴を把握しておけば、単板、角柱の断面調査よ. り、その性能を判定することも可能になる。

強度試験機の記録紙上に現われる図形より、比例限内では、

$$P = a \cdot \varepsilon \tag{8}$$

 $P:荷重, a: 比例定数, <math>\varepsilon:$ ひずみ,数式を簡単にするため,年輪を2成分(早材添字 E,晩材添字 L), に分けて,それぞれが荷重を受けもつとすれば,

 $P = \sigma_E S_E + \sigma_L S_L = (E_E S_E + E_L S_L) \varepsilon \cdots (9).$

ここに σ_{E} , σ_{L} , S_{E} , S_{L} , E_{E} , E_{L} を早材部と晩材部の応力,断面積,ヤング率とする。 (8)式, (9)式より

年輪の断面 $(S_{E}+S_{L})$ にかかる平均的応力 σ は

(10)式, (11)式より

この E_{ac} は (11) 式より弾性率と定義できる。本実験のように年輪を細かく区分した場合,おのおのミ クロ試片のヤング率と断面積を, E_1 , E_2, S_1 , S_2とすれば (12) 式より

(13) 式を用いて図示した各年輪について計算した結果と別に行なった早晩材を含む 柾目ミクロ 試片の。 それを Teble 9 に示す。実測値の範囲よりややずれるのも あるが, 近似的に(13) 式の成立するのがわっ かる。

建築設計の場合,破壊応力の他に比例限度が重要なことも多い。比例限度の大きさやこれを規制するの, はいずれの仮道管によるのであろうか。

いま早・晩材を含んだ通常の年輪の比例限応力 σ ,が存在し、このときのひずみを ϵ ,とすれば、

この ε, が発生したとき,区分された各ミクロ試片要素で,近似的に次式が成立する。

Table 9. 1年輪のヤング率と引張強度

樹種	年 輪 No. of	年輪のヤング率 Younc's modulus of an annual ring ×10 ⁴ kg/cm		年輪の Proport of an a kg	比例限度 ional limit nnual ring g/cm ²	年輪の引張強度 Tensile strength of an annual ring kg/cm ²		
Species	ring from pith	13式より 計 算 calculated from eq. 13	·実験値 from experiment	20式より 計 算 calculated from eq. 20	実 験 値 from experiment	24式より 計 算 calculated from eq.24	実験値 from experiment	
ヒノキ	10	7.6	6.7~ 7.1	530	550~610	960	910~ 970	
	35	8.0	6.8~ 7.4	530	520~660	1110	· 980~1100	
HINOKI	200	8.9	8.4~ 8.9	620	680~790	1230	1200~1400	
アカマツ	3	8.1	8.1~ 8.6	660	580~630	1000	1010~1250	
AKAMATSU	22	9.3	10.0~10.9	770	850~890	1150	1000~1140	
	43	10.4	9.8~10.7	730	760~840	1250	1200~1410	
	6	5.9	4.7~ 5.6	370	370 310~360		650~ 810	
王 ?	10	5.7	$4.9 \sim 5.6$	370	330~460	940	660~ 780	
MOMI	20	6.2	6.1~ 6.6	430	370~450	950	830~ 880	
	35	7.4	6.8~ 7.3	530	480~580	1020	890~ 950	
カラマツ	7	5.0	4.6~ 5.5	310	260~310	640	580~ 670	
	20	8.9	9.0~ 9.6	670	640~750	1050	1010~1260	
KARAMAISU	48	9.7	10~11.3	780	630~760	1070	910~1140	
スギ	3	2.8	3.2~ 4.4	220	220~260	540	390~ 480	
	12	5.7	4.9~ 5.6	340	290~310	770	580~ 730	
SUGI	30	7.7	6.5~ 7.2	770	490~610	1060	760~ 810	

Young's modulus and tensile strength of an annual ring

また

(15), (16)式を連立して解くと,

(17) 式の右辺の分母子を ∑S_i で除せば

分母 (右辺) =
$$\frac{S_n}{\Sigma S_i}$$
 + $\frac{E_1 S_1 + \dots + E_{n-1} S_{n-1} \cdots}{\Sigma S_i}$ · $\frac{1}{E_n}$ (18)

(18) 式の右辺第1項は0.1以下の小さいものであるから negligible: 0 とし、第2項のはじめの式は年輪の平均のヤング率を示すから、これを E_{ac} とすれば

分母(右辺)=
$$\frac{E_{ac}}{E_{n}}$$
....(19)

いま E_n を各ミクロ試片要素の中で、 E_{ac} とほぼ等しいものを選べば、分母は近似値的に1になる。ゆえ に (17) 式は

$$\frac{P_{p}}{\sum S_{i}} = \sigma_{p} = \sigma_{n}$$
(20)

この結果, さきに求めた E_{ac} に近いヤング率 E_n をもつ要素をみつけ, この要素の ϵ_n とより σ_n を算 出すればよい。

Table 9 には早晩材を含む柾目試料の比例限応力と(20)式の σ_n より求めた値を示す。この結果 σ_n についての検討が比較的妥当であることがわかる。

7. 年輪の破壊

1年輪の破壊の始点(原点)が構成仮道管の $\sigma や \epsilon_b$ とどのように関係するかについて、次の仮定をもうけた。

Fig. 44 は早材と晩材の応力一ひずみ図を模式図として表わしたものである。 正常材では E は早材< 晩材, σ は早材<晩材, ϵ_{a} はスギを除くと早材>晩材であることはすでにみた。

Fig. 44 早・晩材ミクロ試片の応力 (σ)一ひずみ (ε) 図 (a), 早材部と晩材部の荷重 (*p*)一ひず み (ε) 図 (b, c)

Schematic diagram of stress (σ) —strain (ε) curve of micro-specimen of early and late wood (a), load (p)—strain (ε) curve of early and late wood layer (b, c).

Note E_E , E_L , S_E , S_L , P_E , P_L : 早材部と晩材部のヤング率, 断面積, 負荷重 E_E , E_L , S_E , S_L , P_E and P_L denote Young's modulus, cross section area and load of early and late wood layer.

年輪に負荷を与えるとひずみが生ずるが、(a) にみるように晩材の方が早く破壊 ϵ_{b} (図では任意の要素 を指すから ϵ_{ib} とした)に達する。仮想的に晩材率が極めて小さい年輪では(b) に示されるような荷重-ひずみの関係があり得るので、このときは晩材が破壊しても、断面積の大きい早材部(S_E) で晩材の荷重 が受け持たれて、ひずみが著増する場合である。(c) のように $S_E < S_L$ であるというまでもなく早材は晩 材が破壊すると同時に破壊する。その他 $S_E = S_L$, $S_E > S_L$ の場合でも、両者の破壊が同時であることが予 想される。早・晩材の破壊ひずみ ϵ_{bE} と ϵ_{bL} に差があるときは上述の仮定が成立するが、その差が少な い場合は必ずしも ϵ_{bL} が破壊の起点にならず、その他の要因によるであろう。図示した試料でスギを除く と、広義の晩材部は 15~30% の面積率になり、また早・晩材の応力ひずみ図にて塑性域の接線モジュラ スが、初期接線モジュラス E と大略比例しているから、 ϵ_{bn} を破壊の始点として年輪の強度について次 式が導ける (ϵ_{ib} の最小値を ϵ_{nb} とする)。

年輪が破壊寸前のときの平均応力 σ_a,は、各ミクロ試片要素のその時点の応力を σ₁, σ₂…σ_n… とすれば

$$\sigma_{ac} = \frac{1}{\sum S_i} (\sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2 \cdots + \sigma_n S_n \cdots) \cdots (21)$$

この年輪で ϵ_b の最小のものを ϵ_{nb} とすれば、ある要素が破壊点に達したとき他の要素内で発生している 応力を近似的に σ_i であらわすと、

 ϵ_{ib} 、 σ_{ib} は任意の要素の破壊時のひずみと応力を表わす (Fig. 44 (a) 参照)。

(22) 式を(21) 式に代入すれば

(23) 式は応力ひずみ図が Fig. 44 (a) の場合,主として早材の中・後期,晩材のそれに適当であるが,同 図の早材の初期および中期,未熟材では誤差が大きい。この場合はむしろ

$$\sigma_{\sigma c} \stackrel{i}{=} \frac{\sum \sigma_{i b} S_i}{\sum S_i} \qquad (24)$$

の方が簡単である。年輪内では2つの取扱いができるが, Table 9 には後者によって計算した((23) 式に よる計算値は(24) 式のそれより数 %~十数 % 小さい)。モミ, スギで相違があるが, ほぼ近似を満足 する。 σ_{ac} についてより正確な値を望む場合,伸長過程で容積が変化しないとし、 ϵ_{nb} における断面を求め,

ただし σ, 」は各要素のひずみが年輪内での最小のそれ ε, 。に達したときの発生応力である。

8. 仮道管寸度の引張強度に及ぼす影響

5の(ii)で記述したごとく,二次膜を主体とする引張荷重と中間層を主体とする剪断荷重との釣合いについて仮道管寸度と次のように関連づけられる。

Fig. 45 は試片の縦断の顕微鏡的模型図であり、いま XX' 断面において仮道管軸方向に微小長さ dl の 中空角柱(仮道管は6角形断面、4角形断面の中間型であるが、ここでは近似的に4角形断面とする)を とり、角柱の外囲に dl 方向の剪断力 τ が働いたとする。この τ が増加して τ_{max} (破壊値)に近づき、 これに対して仮道管断面(dl の長さの角柱断面)に抗応力 $\sigma \cdot R \cdot T \cdot A$ が生じたとすると、両者の釣合い

Fig. 45 (a) 仮道管の縦断面(略図)

. (b) 単一仮道管より横断方向に切り出された微小片

(a) Schematic diagram of longitudinal section of conifer tracheid.

(b) A micro-piece cut from single tracheid.

から

R, Tは 4 角形の辺長であるが, 仮道管の半径径, 接線径に対応している(細胞間層の厚みは含まない)。 この際 σ は破壊値 σ_{max} に達しないものであり, かつ RT・A も σ を破壊値に達せしめない大きさを持 つものとする。

この角柱が仮道管末端より連続して存在し、末端より距離 l_0 に達した断面 ($X_0 X_0'$) で σ_{max} が現われ たとする。(26) 式の積分によって

(1)

X_uX_u' 断面の位置は下の場合が考えられる。

① τ_{max} が小さく, *l*₀ が大きい (Fig. 46-1)

 で_{max} が比較的大で、 l₀ が比較的
小さい (Fig. 46-2)

ゆえに 仮道管末端 よりσの 応力分布 は Fig. 46-(1~3) が考えられる。

外力に対して木材の強度を大きくする ためには、 仮道管つまり S₂ 層の強度を

生かすことにあるから, Fig. 46-(4) より平均応力 σ を求める。

 $(1-l_0/l)$ は繊維強度の有効度を表わす。 l_0 が小さく, l が大きいほど σ_{max} は有効である。 (27) 式より

$$l_0 = \frac{RT \cdot A}{2(R+T)} \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} \quad \dots \tag{29}$$

(29) 式にて σ_{max} , τ_{max} がある仮道管について与えられるとすれば,

断面寸法効果 RT/R+T=M

断面寸法効果+細胞膜の増厚効果 *RT*・*A*/*R*+*T*=*K* が小さいほどよい。

上記の両効果+繊維長の効果 $l \Big| \frac{RT \cdot A}{(R+T)} = J$

が大きいほど σ_{max} が有効になり、 σ が大きくなる。早材の初期部と晩材について、上式の諸効果を算出 したのが Table 10 である。M は早材>晩材、K は早材<晩材となる。

J 値について調べると、早材の引張強度とその細胞膜の強度はすでに Table 10 に示したように、ヒノキ>アカマツモミ≧スギカラマツの順位になる。成熟材の早材の J 値 は 前 述 の 順 番で記すと、ヒノキ

(2)

Fig. 46 単一仮道管の軸方向に作用する仮定的応力分布 A hypothetical longitudinal stress distribution in single tracheid.

林業試験場研究報告 第212号

樹 種 Species	年 輪 No. of annual rings from pith	早・晩材 Early or ^{late} wood	半径方 向直径 Radial diameter (μ)	接線方向直径 Tangential diameter (µ)	仮道管 長(L) Tracheid length (mm)	$\frac{RT}{R+T}$ (M) (μ)	$\begin{array}{c} \frac{RT}{R+T} \cdot A \\ (K) \\ (\mu) \end{array}$	$\frac{L}{K}$ (J) × 10 ²
	10	E L	24 13	21 16	2.96 3.11	11.2 7.2	3.9 4.2	7.6 7.4
ヒノキ HINOKI	35	E L	28 15	25 19	3.50 3.74	13.2 8.4	4.5 5.3	7.8 7.1
Initoiti	200	E L	29 16	26 22	3.62 3.81	13.7 9.3	4.7 6.5	7.7 5.9
	3	E L	32 16	26 25	1.28 1.57	14.3 9.8	5.4 6.8	2.4 2.3
アカマツ AKAMATSU	22	E L	38 20	30 28	3.70 4.00	16.8 11.7	5.6 8.6	6.7 4.6
	43	E L	42 18	31 32	4.21 4.30	17.8 11.5	5.6 8.8	7.4 4.9
	6	E L	27 16	23 22	1.82 2.21	12.4 9.3	4.6 7.1	4.0 3.1
モミ	10	E L	32 17	31 28	2.88 3.16	15.8 10.6	5.5 8.4	5.2 3.8
MOMI	20	E L	36 16	31 28	3.35 3.43	16.7 10.2	5.3 8.6	6.3 4.0
	35	E L	41 14	32 29	3.61 3.96	18.0 9.5	5.0 8.3	7.2 4.8
	7	E L	41 17	34 28	2.31 2.50	18.7 10.6	5.4 8.0	4.3 3.1
カラマツ KARAMATSU	20	E L	48 17	37 30	3.22 3.41	21.0 10.8	5.5 9.4	5.9 3.6
	48	E L	58 17	38 35	3.68 3.90	23.2 11.5	5.8 9.5	6.3 4.1
_	3	E L	34 11	25 22	1.32 1.64	14.4 7.3	5.5 6.0	2.4 2.7
ス ギ SUGI	12	E, L	36 11	30 26	2.80 3.08	16.4 7.7	5.2 5.9	5.3 5.2
5001	30	E L	39 12	31 27	2.96 3.30	17.3 8.3	5.2 7.0	5.7 4.7

Table 10. 早・晩材の仮道管寸度とミクロ試片の引張強度との関係 Relationship between dimensions of early and late wood tracheid and tensile strength of micro-specimen

(7.7~7.8), アカマツ (6.7~7.4), モミ (5.2~7.2), スギ (5.7), カラマツ (5.9~6.3) となるから, $\sigma \geq J$ は全く同じ傾向になる。 すなわち早材では仮道管の寸度がその引張強度に関係しているのがわか る。同樹種で年輪が大きいほどほぼ J 値も 増加するから, 早材の細胞膜の引張強度の年輪間の変化の傾 向と一致する。晩材の細胞膜の引張強度は成熟材部を比較すると, ヒノキ, アカマツが大きく, 次にカラ マツ, モミ, スギとつづく。J 値はヒノキ (5.9~7.1), アカマツ (4.6~4.9), モミ (4.0~4.8), カラ マツ (3.6~4.1), スギ (4.7) であるから, ヒノキ, アカマツは仮道管の寸度効果が現われている。29式 の l_0 を早晩材で比較するため, τ_{max} を早・晩材で同じとしヒノキを例にとる。 5 で記したヒノキ単離 仮道管の強度値と 200 年輪の膜面積率 A (Table 7, 8) と K を用いて 29式の右辺を計算すると, 晩材

— 144 —

針葉樹材の弾性および強度的性質と細胞構造の関係について (鈴木) — 145 —

・の 1。は早材の4倍となり、逆に J は小さいから、S2 の強度が生かされず、剪断的破壊が早材より起こ りやすいことをあらわす。8の取扱いは東大林毅氏の強化材料に関する講演より一部ヒントを得た。

Ⅲ要 約

用材として現今あるいは将来使用度の高いヒノキ,アカマツ,カラマツ,モミ,スギの細胞構造的,弾 性的,強度的特徴をそれらの相互関係のもとに追求し,各種用途上での各材の性能を前もって正確に導出 するための基礎資料を得ることを主目的とした。実験方法と結果の検討の進め方は,従来のそれと異なる ところが多い。その内容は次の項目に要約される。

(1) 樹心より樹皮に至る各年輪の細胞構造的,弾性的,強度的特徴を明らかにするため,樹心より3 "年輪,5年輪……のごとく年輪をとりだし,年輪内をできるだけ同質同形の仮道管の切片に分離し(ミク ¤試片の作成),ミクロ試片の細胞構造と機械的性質の関係を年輪内の分布としてあらわしながら追求し た。これによって特定年輪の特徴を見いだし得れば,これらの年輪の集まりである単板,角材の性質まで :求め得る可能性がある。

ミクロ試片作成の際の切削上での check (例えば縦断面での細胞間層にそった微小な割れ)を検討し, 裁断条件を定めた,試料の大きさは通常のそれと異なるので,寸法効果を調べ,約 100~240 µ の 厚 み ((早材)>晩材),ゲージ長さ 30 mm 程度の板目ミクロ試片が適当なことを認めた。

(2) ミクロ試片の細胞構造は、ミセル傾角、仮道管の半径径と接線径、膜厚、細胞膜面積率、繊維長の測定を行なった。ミセル傾角はX線回折で行なったが、従来の赤道線干渉によらず頂面(040)の干渉 によった。これにて理論的に根拠のあるミセル傾角の分布とその平均値が求められる。一方ヨード結晶法 によって接線膜と半径膜のフィブリル傾角を求め、早材では接線膜の傾角が半径膜より小さく、晩材では ヒノキ、モミ、スギでは両者の関係が逆になる。板目試片のX線干渉によって得たミセル傾角とフィブリ ル傾角を対比すると比較的良好な相関が認められた。

ミセル傾角とフィブリル傾角の年輪内の変化は、早材→晩材で大→小であった。しかしスギでは採取位 "置にも関係するが早・晩材の差が少ない。年輪間では未熟部→成熟部によって傾角は小さくなる。アテ材 では年輪内でアテが顕著になる少し前より傾角は著増しはじめ、アテ細胞が多くなる領域でピークをつく る。

(3) 仮道管の半径径はこのミクロ試料の厚みを単位としたとり方をした場合,早・晩材の境界で,径 の急減するのがみられる。晩材を膜厚の著増, Mork's definition より区分し,これに半径径の減少を考 !慮に入れ,横軸に示した。晩材では膜面積率は 50~60% を越え,最大は 80% 以上になる。膜面積率の (減・増) は半径径の(増・減)と対応がよく,早材の未熟材の年輪では成熟材のそれより全試料を通して 大きく,樹種間ではカラマツの早材が最も小さい。早・晩材の境界ではカラマツ,アカマツで膜面積率の '変化が大きい。

(4) 仮道管の変形性を比例限ひずみと破壊ひずみによってあらわした。比例限ひずみは早→晩材によってわずかに増加するのに対し,破壊ひずみはスギを除いてだいたい減少がみられるが,アカマツでは晩 水材部で再び増加し,他の樹種でも年輪界に接する晩材ではふたたび増加する場合も多い。未熟部の年輪で は成熟部のそれより破壊ひずみが大きい。注目すべきは破壊ひずみの変動とミセルまたはフィブリル傾角 の変動がよく一致することであり,破壊ひずみが大きいと傾角も大きいことが正常材,アテ材について共 通してみとめられた。アテ材の破壊ひずみは正常材より大きく、とくに枝材では幹材に比較して極度に増 大し、強いじん性を示す。

(5) 年輪内の繊維方向のヤング率と引張強度は、ミクロ試片での実験では相関がきわめてよく、正常、 材、アテ材とも年輪内での変動はほぼ一致するのが認められた。またこれの年輪内での変動が膜面積率の それと対応がよく、膜面積率の増加によってヤング率、引張強度に増加がみとめられる。ミクロ試片のヤ ング率、比例限応力、引張強度より、それらで構成される1年輪の値を算出し、別に行なった1年輪の実 験結果と比べると大きい差異はない。樹種間では成熟材部の年輪を比較すると、ヤング率、引張強度はヒ ノキ、アカマツが大きく、次にモミ、カラマツ、スギであった。年輪間では、晩材のそれは年輪数が大き いほど大きくなるが、早材では樹種によって異なる。しかし細胞膜(繊維方向)のヤング率、引張強度は、 早・晩材とも年輪数が大きいほど大きくなる傾向をもつ。アテ材の年輪内でアテ細胞が増加するにつれミ セルまたはフィブリル傾角は大きくなるが、ヤング率や引張強度も増加する。アテ材でもヤング率や引張 強度は膜面積率に依存しているから、細胞のヤング率、引張強度を算出するとアカマツでは早材の値が 大きいが、スギ、モミでは小さい。移行的なアテ材では正常材よりミセル、フィブリル傾角が一般に大き く、アテ材の要因をもつものであろう。

(6) 仮道管の寸度と引張強度の関係を剪断力との釣合いから求め、特に早材では引張強度に及ぼす仮 道管長の影響が著しいこと、早晩材の破壊型も異なることがわかった。

文 献

- 古野 毅・原田 浩・鈴木正治: 針葉 樹材仮道管長の ステーブル・ダイヤグラムによる測定法, 木材学会要旨, 17, p. 87, (1967)
- 2) 山林 暹: 木材組織学, 森北, p. 73, (1964)
- 原田 浩・貴島恒夫・梶田 茂: 針葉樹仮道管第二次膜のミセル配列(2),木材研究, 6, p. 34, (1951)
- 小林弥一:木材細胞膜のフィブリル傾角度測定用試料作製上の一簡便法,日林誌,34, p. 392, (1952)
- 5) 呉 祐吉・久保輝一郎:繊維の内部構造とその機械的性質との関係(1),工化誌,**39**, p. 929, (1936)
- SISSON, W.A.: X-Ray Studies of Crystallite Orientation in Cellulose Fibers. I.E.C., 27, p. 51,. (1935)
- 7) 仁田 勇: X線結晶学, 丸善, 2, p. 111, (1941)
- 8) PRESTON, R.D.: Cellular Ultrastructure of Woody Plants. p. 18, (1964)
- MEYLAN, B.A.: Measurement of Microfibril Angle by X-Ray Diffraction, F.P.J., 17, p. 51, (1967)
- CAVE, I.D.: Theory of X-Ray Diffraction Method for the Measurement of Microffbril Anglein Wood, F.P.J. 16, p. 37 (1966)
- 11) 田中晋輔·室 善助:木材組織のX線的研究,日本学術協会報告,12, p. 42, (1937)
- 12) 丹沢 宏: X線による再生セルロースの配向度測定, 工化誌, 64, p. 202 (1961)
- 13) 柿木二郎: 実験化学講座 8, 丸善, pp. 4~21, (1957)
- 14) 渡辺貞良・井上貞行: 繊維素繊維のラセン角の決定, 工化誌, 64, p. 42, (1961)
- 15) 尾中文彦・原田 浩: 針葉樹仮道管細胞膜のミセル配列, 日林誌, 33, p. 60, (1951)
- 16) 佐伯 浩: 針葉樹材の年輪構造に関する研究 (2), (3), 木材誌, 9, p. 231, 237, (1963),

The Relationship between Elasticity and Strength Properties and Cell Structure of Coniferous Wood

Masaharu Suzuki

(Résumé)

The complexity of strength properties of soft wood arises from the variability of cell structure of tracheids. This investigation was made in order to clear up many questionable points about the effects of individual cell structure of conifer tracheids on elasticity and strength of wood.

Mechanical tests of micro-specimen were performed to measure the variation of YOUNG'S modulus, tensile strength, ultimate strain across growth increment of early wood to late wood within an annual ring. Micro-specimens were made 40 mm longitudinally, $3\sim5$ mm tangentially, and the thickness of them to radial direction of wood axis was $180\sim240 \mu$ in early wood, $100\sim150 \mu$ in late wood. They were cut parallel to the grain from the macerating block using a sliding microtome.

The gauge length of micro-specimens was 30 to 34 mm, and they were placed between two jaws, clamped tightly. Mechanical tests were performed with the tension test machine of autograph or tensilon, having the equipment to record load and elongation of specimen. All test were -carried out air-dried samples under room temperature.

The measurements of structure were done about the angle of micellar orientation, the inclination of fibrillar arrangement, radial and tangential diameter of cross section of tracheids, thickness of cell wall, tracheid length and the percentage of cell wall area.

The angle of micellar orientation was determined by a new method to estimate the spread of (040) arc of diatrope. X-ray beam was directed on wood surface of the incline angle of θ (BRAGG's angle) from perpendicular to the beam, and GEIGER counter was fixed at the angle of $2\theta = 34.8$ degrees. The diffraction of (040) lattice plane of meridian was shown in Fig. 2, Based on the revolution angle and intensity distribution I of Fig. 2, the distribution of micellar orientation D was calculated from equations 5 and 7. The distribution curves were made to the micell angle axis as shown in Fig. 3~10 and the mean micell angle was obtained. The thickness of specimen of X-ray measurement was the same as the mechanical measurement, cutting the tangential section parallel to the grain across growth from early wood to late wood within an annual ring.

To compare the result of X-ray measurement with fibrillar arrangement by iodine staining, the longitudinal, tangential sections of $20 \sim 30 \,\mu$ thickness were cut from the same block from which X-ray sample was obtained. The method of iodine staining was slightly different from the Bailey technique, in that carbon tetrachloride was used to resolve the iodine crystal. The fibrillar arrangements of secondary wall were shown in Photo. $1 \sim 7$. The percentage of cell wall area was determined by the weighing method, dividing cell wall substance from lumen of light micro-graph of cross-section. The measurements above mentioned were performed on the micro-specimen from -early wood to late wood about many annual rings of pith to bark.

The results obtained are summarized as follows:

(1) Fig. 11~16 present the comparison between the mean micellar angle and the mean fibrillar angle. The inclination of straight line of figures is 45 degrees. The deviation from this line denotes the difference of angles measured from two methods above mentioned. Figures show

林業試験場研究報告 第 212 号

fairly some deviation among them. The mean fibrillar angles of tangential wall of early wood are smaller than those of radial wall, but there is an inverse relationship between them of late wood (Table 2, 3). From these Figures, a comparatively high degree of correlution seems to exist between micellar angle and the fibrillar angle of tangential wall.

(2) The maximum of radial diameter appears within the region of early time of early wood formation. The axis of abscisses of Fig. $17 \sim 43$ shows the growth direction from early wood to late wood within annual ring. The radial diameter of each micro-specimen decreases gradually across growth increment, followed by a sharp drop near the end of an annual ring. After this point, that of *Pinus densiflora* decreases slightly, but those of *Cryptomeria japonica*, *Abies firma* and *Chamaecyparis obtusa* appear to decrease largely toward the boundary of an annual ring. In this report, late wood may be determined by the rapid decreasing point of radial diameter of tracheid, but the distinguishable region of late wood is determined by both remarkable thickness of cell wall and checking MORK's criterion. These results are indicated on the axis of abscisses of Fig. $17 \sim 33$. On the other hand, the percentages of cell wall area reveal high increment over 50 percent in the region of reliable formation of late wood. The 50 percent point of cell wall area agrees with the considerably changing portion of radial diameter. The percentages of cell wall area of juvenile wood are larger than those of matured wood in early wood layer, and that of *Larix leptolepis* is smaller than the others.

(3) The mean miciellar angle or mean fibrillar angle decrease fairly from early wood to latewood, and there is a decreasing tendency with increment of annual ring-number, that is, from pith. to bark (Table 4), but the mean micellar angle or mean fibrillar angle of compression wood increase largily across an annual ring and maximum of the angle seems to be present within the region. containning comparatively much of compression wood tracheids.

(4) The strains at proportional limit of each micro-sample are increased slightly from early wood to late wood, but ultimate (breaking) strains of each micro-sample are decreased with change from early wood tracheid to late wood tracheid (except for late wood formed at late time of growing season), so that an inverse relationship between proportional strain and ultimate strain is taking: place (Fig. 17~29). The ultimate strains of 3 age-annual ring of *Cryptomeria japonica* vary considerably. It is interesting to note that the variations of ultimate strain across an annual ring are observed to be of quite similar tendency to the variation of the micellar or fibrillar angle. The ultimate strains of proportional limit of each micro-sample are decreased and the ultimate strain noticeably increased accompanied with the formation of compression wood tracheids within an annual ring; the micellar or fibrillar angles of this region show a great increase as revealed in Fig. $34\sim43$. The results obtained from normal and compression wood give close correlation between the ultimate strain and the micellar or fibrillar angle.

(5) Both YOUNG's modulus and tensile strength of longitudinal direction increase acrossgrowth increment from early wood to late wood within an annual ring. The rapiadly changeable points of mechanical properties appear near the end of annual ring of *Larix leptolepis* and *Pinus densiflora*. (Fig. 27~29 and 20~22). These tendencies of YOUNG's modulus and tensile strength within annual ring are similar to the variation of percentage of cell wall area. With increase of number of annual ring, YOUNG's modulus and tensile strength of early wood, late wood and whole ring showmeaningful increase except for some instances (Table 7~9). YOUNG's modulus and tensile strength of cell wall of fiber direction (*Es*, σ_1) are given by

$$Es = E/A$$
 $\sigma_s = \sigma/A$

- 148 -

where A=percentage of cell wall area. From calculating results mounted on Table 7 and 8, Young's modulus and tensile strength of cell wall of late wood are larger than that of early wood.

In the case of compression wood, YOUNG's modulus and tensile strength increase as well as percentage of cell wall area across growth increment of annual ring, but they are smaller than normal wood (Fig. $17 \sim 33$ and $34 \sim 43$). As shown in Fig. $34 \sim 36$, YOUNG's modulus of micro-specimen containning compression wood tracheids is smaller than that of early wood formed in early time of growing season.

(6) Young's modulus of annual ring E_{ac} may be calculated from that of micro-specimens as follows.

$$E_{ac} = \frac{\sum E_i S_i}{\sum S_i}$$

where E_i , S_i represent Young's modulus, traverse area of each micro-specimen respectively. The results of calculations are compared with experimental value of whole ring as shown in Table 9, and a good agreement is seen among them.

The stress of proportional limit can be calculated from mean YOUNG's modulus of micro-specimen within annual ring (by some appropriate mathematical treating). The comparisons between calculations and experimental values are mounted on Table 9.

(7) The strength of an annual ring is approximately calculated from that of each micro-specimen, using the same equation of YOUNG'S modulus, and the results are mounted on Table 9.