

スギの木部材質の成熟化について

山下力也*・古川郁夫**

The Maturity of Wood Quality in Sugi Trees (*Cryptomeria japonica* D. Don)

Rikiya YAMASHITA * and Ikuo FURUKAWA **

Summary

It is well known that the wood quality of the juvenile wood portion is inferior to that of the adult wood portion.

The purpose of this study was to clarify the maturity of wood quality through a detailed investigation of the differences in variation of annual rings, as determined by various factors such as morphological aspects of the cell wall, and mechanical properties between the juvenile wood and the adult wood in a sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) stem.

The conclusions reached were as follows:

1. Young's modulus was strongly affected by the following three factors : the specific gravity, the fibril angle of the middle (S₂) layer of the secondary wall and the quality of the microfibril of tracheids. These factors played a significant role in the mechanical behavior of the late wood of the adult wood portion, because of a high specific gravity, a small fibril angle, and a high quality of the microfibrils.
2. Large elastic strain will depend on promoting splitting-fractures of the cell wall, and such a fracture mode was clearly observed in the juvenile wood portion.
3. The maturity of the wood quality is governed by the amount of the special types of cells with a fibril angle below 10° and with a very thick cell wall.

I 緒言

我が国の人工林資源は、戦後造林木を中心として年々増加傾向にあり、中でも主要な造林樹種であるスギは、国産材供給量の4割近くを占めている。そのような背景から、国産材の主要な需要先である木造軸組工法住宅の構造用部材にスギを使用する要望は年々高まっている。しかし、現在供給量が増加している若齢木は、その樹幹の大部分が材質的に劣等な未成熟材によって占められており、樹幹内での未成熟材の分布状態などに影響されて、強度性能に大きなバラ

*鳥取大学大学院 農学研究科 農林環境科学専攻
Department of Environmental Science, Graduate School of Agriculture, Tottori University

**鳥取大学農学部 農林総合科学科 生存環境科学講座
Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University

ツキが見られる。このような樹幹内での材質の変動を調べるには、微小試験片を用いての様々な材質試験を行う必要があり、古くから多くの研究が行われてきた(2,3,6)。しかし、未成熟材の材質特性を完全に解明するには至っておらず、さらに形成層の成熟化に伴う木部材質の変化については、年輪内での詳細な変動を成熟部と未成熟部で体系的に比較した研究は少ない。

そこで本研究では、スギの未成熟材部ならびに成熟材部における強度的性質の年輪内変動を、微小試験片を用いて詳細に調べた。あわせて材質に影響を及ぼす因子である比重(密度)、フィブリル傾角、仮道管長の年輪内変動を調べ、さらに細胞壁の破壊形を観察することによって、細胞の形態的・構造的特徴と力学的特性との関連性についても検討した。

II 供試材料

供試材として、鳥取県若桜産の約55年生のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)の地上高4 m付近の材部(45年輪)を用いた。供試材の選定に当たっては、幹が通直であり、横断面に目立った傷害や偏心が認められないものを選んだ。

供試材の4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 43の各年輪部(髄からの年輪数)から、一年輪を完全に含むように厚さ100 μ m程度の連続板目切片をミクロトームを用いて切削した。切削前の軟化処理は、材質の劣化を考慮して煮沸せずに減圧飽水処理のみとした。また早材部では仮道管の直径が大きいため、切片厚さを200 μ m程度とした。

III 実験方法

1. 縦引張試験による力学的諸特性の測定

切片は十分な期間、室内に保存して気乾状態にした後、長軸方向と繊維方向とが一致するようにして矩形にトリミングした。切片の両端にはケント紙を貼り合わせて引張試験時のつまみ部を補強した。試験片の寸法は標準サイズを0.1mm \times 3mm \times 30mm(R \times T \times L)とし、樹幹内で髄に近い材部の年輪では年輪の曲率が大きいため、試験片内で材質が均質になるように考慮して、接線(T)幅を2mm以下、軸方向(L)長さは20mm程度とした。

引張試験はアイコーエンジニアリング製の小型材料試験機を用い、クロスヘッド速度3mm/min、室温(約25 $^{\circ}$ C)、気乾条件(約75%RH)下で行った。破壊強度はロードセルによって検出し、ひずみ量はつまみ部での滑りはないものとしてクロスヘッドの移動量から算出した。またヤング率はオートグラフで得られた応力-ひずみ曲線から求めた。

既往の報告によると、一般に針葉樹材においては髄からの年輪数が約15年未満の材は未成熟材であるとされている(5)。そこで本研究では、引張試験に供した年輪部の中から偽年輪を含むものを除外し、髄から4年輪部を未成熟材部、40年輪部を成熟材部、そして10年輪部を未成熟から成熟への移行部を代表する試料として比較に供した。

2. 比重(密度)、フィブリル傾角、ならびに仮道管長、壁厚、内腔径の測定

4, 10, 40年輪部の全切片の一部分を用いて比重、フィブリル傾角ならびに仮道管長を測定した。さらに補足として、同年輪部で仮道管の壁厚および内腔径を測定した。

比重(密度)は、気乾状態の切片の寸法と重量を測定して、気乾状態の密度を算出した。これを本報では比重と呼ぶことにした。

フィブリル傾角の測定には、まずジェフレー氏液で脱リグニン処理した仮道管を3~4%ヨー

ド・ヨードカリ溶液に浸漬した後、硝酸を滴下することによって二次壁中層 (S₂層) のフィブリルの間にヨウ素の針状結晶を析出させた (ヨード法)。この針状結晶の走向が仮道管軸となす角度をフィブリル傾角とし、約30本の仮道管の接線壁で測定を行って平均値を算出した。

仮道管長は、ジェフレ氏液で解繊した仮道管50本を万能投影機を用いて測定し、平均値を求めた。

仮道管の壁厚および内腔径は、まず切片採取部分付近の材部を用いて木口面を光学顕微鏡で写真撮影し、一放射列 (ラディアルファイル) を任意に選択して全ての仮道管について測定を行った。この結果から各板目切片に該当する部分の仮道管を推定し、壁厚および内腔径の平均値を算出した。

3. 細胞壁破壊形態の観察

観察試料としては、成熟材 (40年輪部) および未成熟材 (4年輪部) の早材と晩材から各1試料ずつ、計4試料を選定した。引張試験後の破壊先端部分を試料台に固定し、金を蒸着した後、SEM (日立製作所製X-650) を用いて細胞壁の破壊形態を観察した。

IV 結果と考察

1. 材質に影響を与える基本因子について

針葉樹材では木部構成要素の95%以上を仮道管が占めており、木部の材質は仮道管の微細構造と形状および配列等に依存していると言える。特に比重、フィブリル傾角、仮道管長は、針葉樹材の材質に強く影響を与える基本因子として古くから材質指標として用いられてきた (7)。これらの指標は、年輪部分の代表値 (例えば、晩材部での数値) を用いて年輪間で材質を比較する場合には、大変有効であるということが知られている。しかし、一年輪内でこれら3つの基本因子が強度、ヤング率、ひずみ量といった力学的諸特性とどのような関係にあるのかは詳

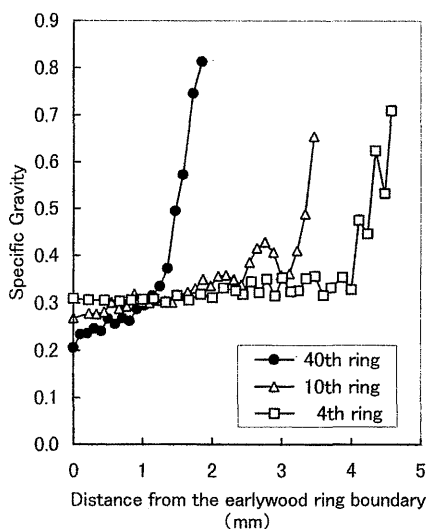


Fig.1 Specific gravity variation in annual rings.

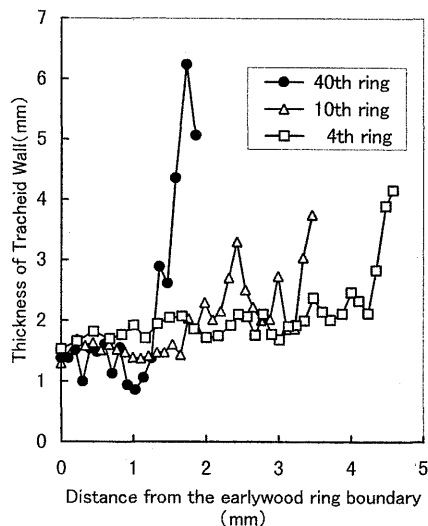


Fig.2 Thickness of tracheid wall variation in annual rings.

細な報告がなされていない。そこで、まず各基本因子の一年輪内での変動を4, 10, 40各年輪部で比較検討した。

比重の結果をFig. 1に示した。早材では未成熟材の方が成熟材よりも大きい値を示したが、早材側年輪界から約1.5mm付近を境として成熟材の比重が急激に増大し、晩材では成熟材の方が大きい値を示した。この変動は仮道管壁厚 (Fig. 2) と高い正の相関 ($r=+0.97$)、仮道管内腔径 (Fig. 3) とは高い負の相関 ($r=-0.96$) が認められたことから、簡便な方法で算出した気乾比重ではあっても、細胞壁の実質率を推定するには十分に有効であると考えられる。

フィブリル傾角の結果をFig. 4に示した。フィブリル傾角は細胞壁の骨格成分であるミクロ

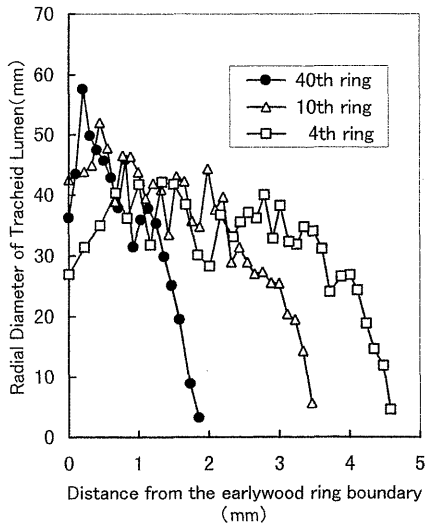


Fig.3 Radial diameter of tracheid wall variation in annual rings.

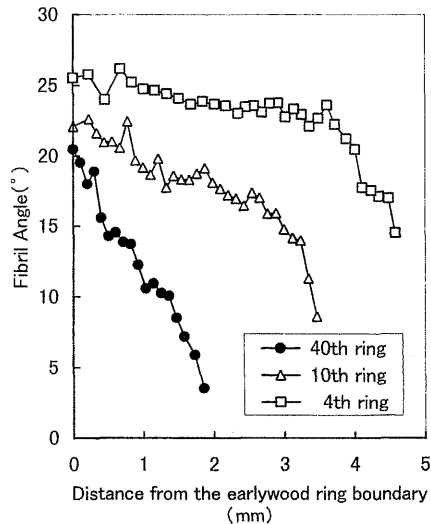


Fig.4 Fibril angle variation in annual rings.

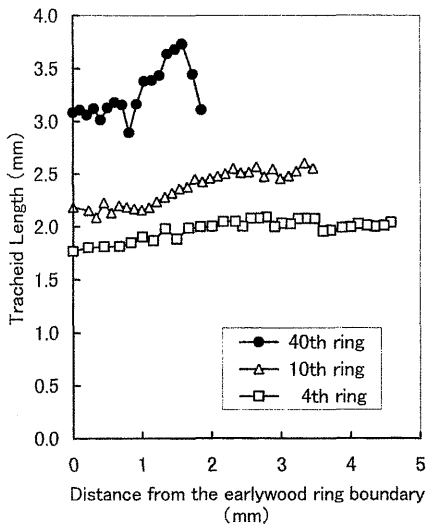


Fig.5 Tracheid length variation in annual rings.

フィブリルの繊維軸に対する傾きを表した数値であるので、フィブリル傾角が小さいほど細胞壁の剛性が高いと考えられる。早材と早材、晩材と晩材というように各年輪内の相対的な位置で比較した場合、髄からの年輪数が大きくなる程小さい値を示した。また、早材から晩材にかけては $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 程度小さくなっており、成熟材部の方が早材と晩材の差が大きかった。

仮道管長の結果をFig. 5に示した。一年輪を通じて、髄からの年輪数が大きくなる程大きい値を示した。また未成熟材ならびに移行部では、一年輪を通じて数値の変動がほとんどみられないのに対して、成熟材では早材から晩材にかけて最大で約30%伸長した後、年輪界に向かって長さは減少し、早材と同程度の長さを示した。

以上の結果から、仮道管長だけは未成熟材ならびに移行部において、一年輪内でほとんど変動せず、成熟材においても変動の傾向が比重およびフィブリル傾角とは明瞭に異なっていた。また、比重が細胞壁の実質率、フィブリル傾角が細胞壁の微細構造と直接関わっていることから、以後の考察では、比重ならびにフィブリル傾角と力学的諸特性との関係から、木部材質の成熟化を検討した。

2. 力学的諸特性と基本因子との関連性について

木材に任意の方向から負荷がかかると、木材はまず可逆的な変形すなわち弾性変形をする。弾性変形中は荷重と変形量は比例関係にあり、引張試験においてはこの比例係数と試験体の寸法からヤング率を求めることができる。さらに負荷をかけ続けて荷重が比例限度を越えると、木材は不可逆的な変形すなわち塑性変形を始め、最終的に破壊に至る。

本研究では、縦引張変形での弾性域と塑性域では、その挙動に関わる基本因子の影響が異なっていると考え、分けて考察した。

まず、力学的諸特性の一年輪内での変動を検討した上で、基本因子との関係を調べた。

(1) 弾性域における挙動

弾性域での挙動を最も顕著に示す指標はヤング率である。ヤング率は材料が弾性変形、すなわち可逆的な変形を行っている間の「変形し難さ」を表しており、塑性変形中のように試料形状や周囲の環境といった要因による影響を受けにくいと考えられる。

ヤング率の結果をFig.6に示した。変動パターンの傾向は比重のそれと類似しているが、晩材における成熟材と未成熟材との差が比重よりも大きい。そこで、比重とヤング率との関係について調べた(Fig.7)。各年輪部において $r=+0.9$ 以上の高い相関関係が認められ、成熟材と移行部とは回帰直線の傾きがほぼ一致していた。しかし未成熟材だけは、

回帰直線の傾きが他の2つの年輪部より小さく、ヤング率に与える比重の影響が未成熟材ではやや小さいと考えられる。

次に、もう一つの基本因子であるフィブリル傾角とヤング率との関係について調べた(Fig.8)。各年輪部ともにこれらの間にも $r=-0.9$ 前後の高い相関関係が認められたが、フィブリル傾角が約 10° 以下のところでは、ヤング率に与えるフィブリル傾角の影響がより大きく現れているよ

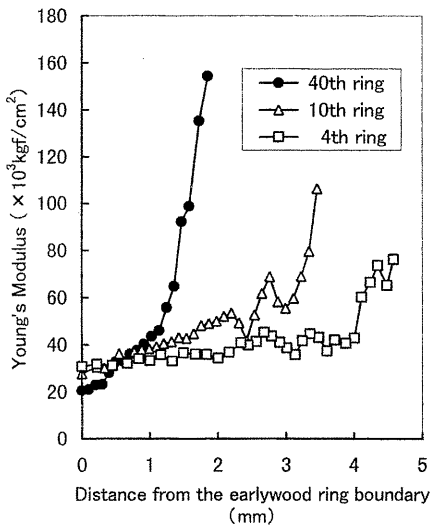


Fig.6 Young's modulus variation in annual rings.

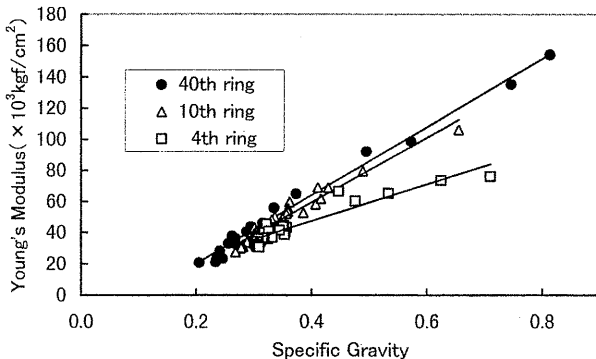


Fig.7 Effect of specific gravity on Young's modulus.

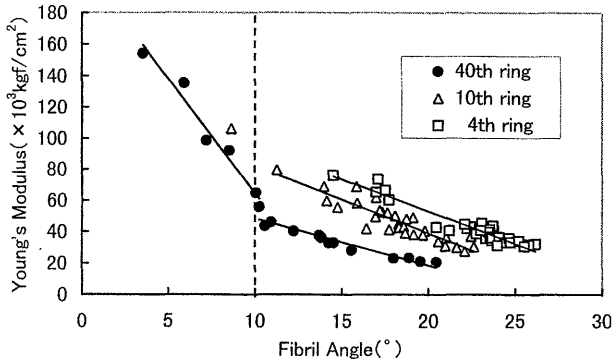


Fig.8 Effect of fibril angle on Young's modulus.

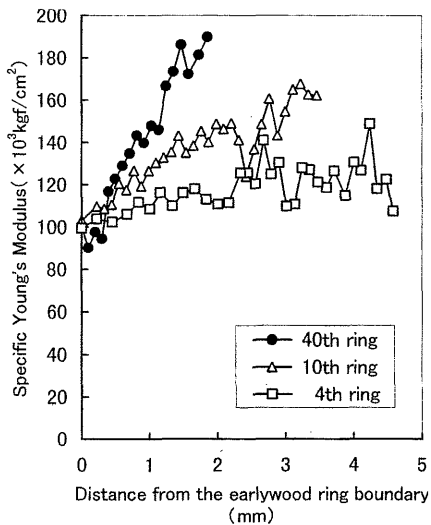


Fig.9 Specific Young's modulus variation in annual rings.

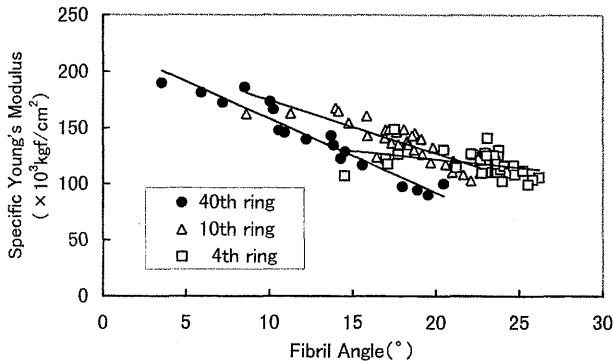


Fig.10 Effect of fibril angle on specific Young's modulus.

うに思われる。これらの部分は、比重が著しく大きくなっている部分とほぼ一致していたため、ヤング率から比重の違いによる影響を除去するために各試験片ごとに比ヤング率（ヤング率／比重）を算出した。比重は細胞壁の実質率と高い相関関係があるため、比ヤング率は細胞壁自体のヤング率であると考えられることができる。

比ヤング率の年輪内変動をFig.9に示した。未成熟材では、早材から

晩材にかけて比ヤング率に大きな変化は見られなかったが、髄からの年輪数が増加するに従って晩材部で高い値を示し、早材と晩材との差も大きくなった。

上述したように、比ヤング率は細胞壁自体のヤング率と考えられるため、細胞壁の微細構造に強く影響を受けると考えられる。そこで比ヤング率とフィブリル傾角との関係を調べた (Fig.10)。成熟材では、フィブリル傾角と比ヤング率との間には高い負の相関が見られたが、未成熟材では、フィブリル傾角は比ヤング率にほとんど影響を与えていないことが分かる。

以上のことから、ヤング率を決定する要因としては、比重とフィブリル傾角が最も重要な因子であると言えるが、その他にも別の要因の存在が考えられる。太田(4)は比ヤング率をフィブリル傾角の余角で除した値が、

マイクロフィブリルの品質 (quality) を表す指標であるとし、さらにその数値の年輪間での変動が、セルロース結晶化度の変動傾向に類似していることを報告している。これを本報告の年輪内での変動に当てはめて考えると、未成熟材部では、一年輪内でセルロース結晶化度にあまり変化がないのに対して、成熟材部では早材から晩材に向かって、フィブリル傾角の減少に伴いセルロース結晶化度も向上していると考えられ、そのことが比ヤング率が早材と晩材とで

大きく異なった原因の一つと考えることができる。

以上、弾性域での挙動をまとめると、縦引張変形におけるヤング率には、比重、フィブリル傾角、そしてセルロース結晶化度に代表されるようなマイクロフィブリル自体の品質あるいは性能が、一年輪内を通じて強く影響を与えていると言えよう。

(2) 塑性域における挙動について

塑性変形は、木材の変形過程の終盤で生じるため、最終破壊に至るまでの全ひずみ量から弾性ひずみ量を差し引いたものが塑性ひずみ量である。しかし、前述したように塑性域では、試料の形状の微妙な違いや、試験中の振動などといった周囲環境に影響を受けやすくなっているため、弾性域と比べると結果にバラツキが多くみられた。

本研究では、弾性域における強度とひずみ量の一年輪内での変動、および髄からの年輪数による差があまり大きくないことを確認した上で、最終破壊に至るまでの挙動をもって、塑性域における挙動の考察を行った。

まず、破壊強度の一年輪内での変動をFig.11に示した。変動の傾向はヤング率と類似しており、両者の相関を調べたところ、各年輪に共通して $r=+0.95$ 以上の高い相関が認められ、さらに回帰式もほぼ一致していた。このことから、破壊強度はヤング率に起因しており、影響を受ける因子も同様であると考えられる。

次に、破壊ひずみの結果をFig.12に示した。一年輪内の大部分では、髄からの年輪数が大きくなるほど数値が小さくなっていった。また未成熟材と移行部は、早材から晩材にかけてバラツキはあるが、平均的に同程度の数値で変動していたのに対して、成熟材では晩材における破壊ひずみがわずかに大きくなっていった。

鈴木(6)は微小試験片による引張試験を行った結果、年輪内と年輪間の双方で、破壊ひずみ量はフィブリル傾角と相関関係にあると報告している。しかし本研究の結果からは、年輪間からは両者に正の相関が見られるが、年輪内では有意な関係は認められなかった。

ここで、塑性ひずみ量の違いが何に起因しているかを調べるために、フラクトグラフィ的

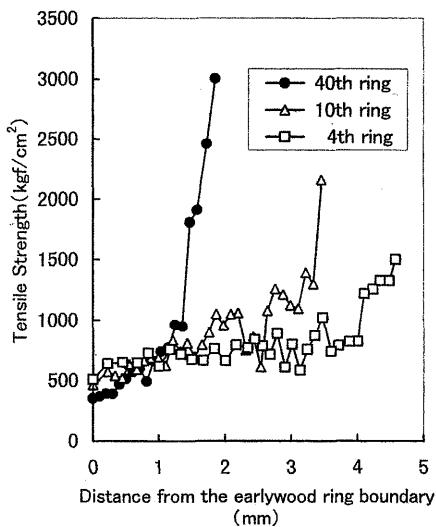


Fig.11 Tensile strength variation in annual rings.

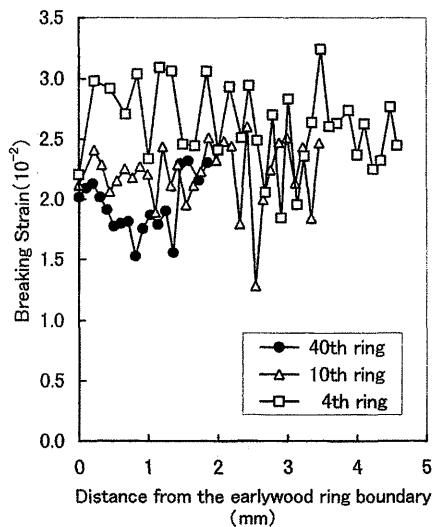


Fig.12 Breaking strain variation in annual rings.

手法を用いた。この手法は材料の破断部を調査することにより、破壊機構あるいは破壊原因に関する情報を得ようとするもので、近年では航空機の事故原因の解明などに用いられている。この方法では、可逆的な変形をする弾性域の挙動を解析することは困難であるが、変形および破壊の痕跡が残る塑性域での挙動を解析するには大変有効であると考えられる。

未成熟材の早材および晩材試験片の破壊先端をPhoto 1, 2に示した。早材と晩材に共通して、細胞壁にフィブリル傾角に沿った裂けがみられた。古川(1)はスギの圧縮アテ材仮道管の引張破壊先端部には、これと同様な細胞壁の裂けによる破壊が多発すると報告している。圧縮アテ材は傾斜地で生育した針葉樹材に多く見られる異常組織であり、フィブリル傾角が約45°と正常材に比べて著しく大きいことが知られている。未成熟材の材質特性は、圧縮アテ材のそれと類似しているということが報告されており(7)、これらのことから、未成熟材の塑性ひずみ量を増大させた原因は細胞壁の裂け破壊の発生にあると考えられる。

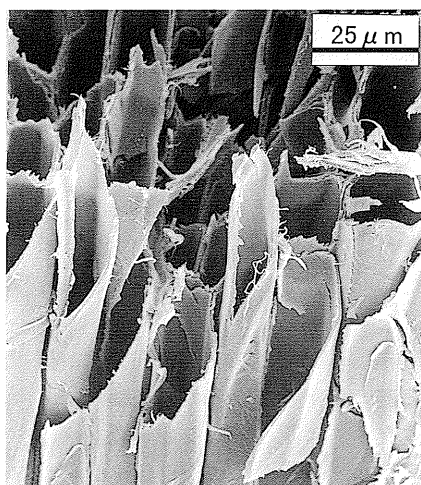


Photo 1 Fracture point of EW of juvenile wood.

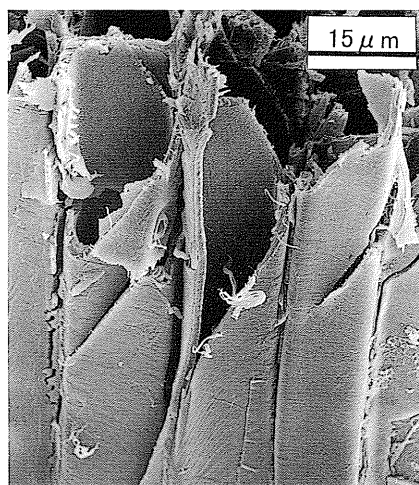


Photo 2 Fracture point of LW of juvenile wood.

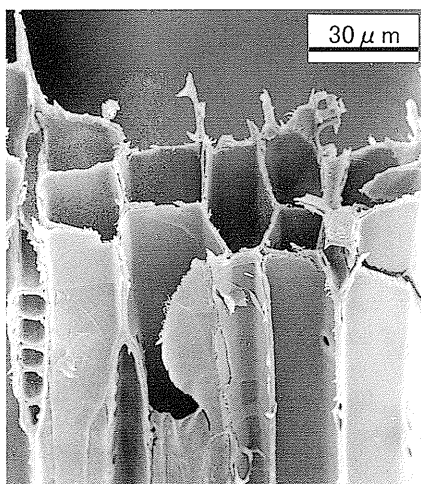


Photo 3 Fracture point of EW of adult wood.

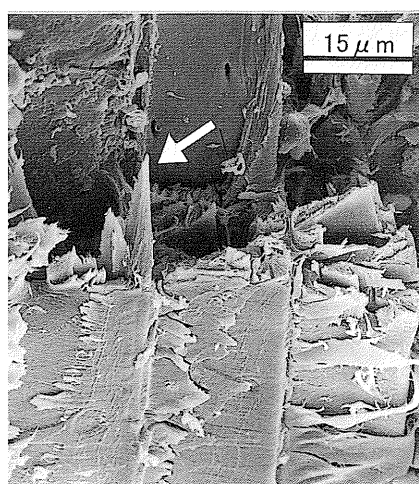


Photo 4 Fracture point of LW of adult wood.

成熟材の早材および晩材試験片の破壊先端をPhoto 3,4に示した。早材と晩材とでは、細胞壁の厚さは著しく異なるが、その破壊形は共通して、仮道管が繊維方向に対してほぼ垂直に切断された様相を呈している。このような細胞壁の切断破壊が大部分を占める場合は、塑性ひずみ量は小さいと考えられる。次に、成熟材の晩材において破壊ひずみ量が増加したことについて考察する。Photo 4の矢印の部分に、フィブリル傾角に沿って裂けたような痕跡が見られる。これは、二次壁内の S_2 層が引き抜けたときに見られる破壊形と類似している(1)。この破壊が発生する時、マイクロフィブリル間にせん断応力が生じ、塑性ひずみ量を増大させた可能性が考えられる。または、厚壁でフィブリル傾角が極めて小さい仮道管では、細胞壁が切断される以前に細胞間層が仮道管間のせん断力によって剥離し、仮道管の引き抜けが生じることが知られている。このときの仮道管間のせん断応力によって塑性ひずみ量が増大するという可能性も考慮するべきであろう。

ここで、成熟材の早材と未成熟材の晩材のフィブリル傾角を比較すると、前者の方が大きい数値を示している (Fig. 4)。しかし、成熟材の早材仮道管では細胞壁の裂け破壊は観察されず、破壊ひずみ量は未成熟材の晩材よりも小さくなっている。すなわち細胞壁の破壊形は、フィブリル傾角のみではなく細胞の形状や配列といった多様な因子が複合して決定されると考えられる。

3. 木部材質の成熟化について

以上のように、未成熟材と成熟材とではその細胞構造から力学的な挙動まで明瞭に異なっており、材質特性を考察するに当たっては両者を区分して取り扱う必要がある。塩倉は針葉樹材において、仮道管の伸長率が前年輪と比べて約1%以下となる年輪を未成熟材と成熟材との区分基準としている(5)。このように、両材部を客観的に区分する方法は、材を実際に使用するに当たって大変有効な指標となる。しかし本研究では、未成熟材と成熟材との区分基準を定義することよりも、形成層の成熟に伴う木部材質の変化を詳細に把握することを目的とした。

まず、本考察に供した4,10,40年輪部の年輪幅、および一放射列を構成している細胞数をTable 1に示した。Table 1と仮道管長の年輪内変動 (Fig. 5) から、未成熟材は年輪形成期に多くの細胞が形成されるため年輪幅は広がっていたが、それら多くの仮道管の軸方向の長さはほとんど変化しない。また仮道管壁厚 (Fig. 2) およびフィブリル傾角 (Fig. 4) の結果から、成熟材と比べると細胞壁構造がより不完全であることが分かる。すなわち未成熟材年輪では、細胞壁構造を強化するよりも、樹体の維持に必要な肥大成長が優先的に行われることが推定された。

それに対して成熟材では、形成される細胞数が少数であるため年輪幅は狭い。また、仮道管

Table 1 Width of annual rings and number of cells in an radial file.

	Ring width (mm)	Number of cells
40th ring	1.98	55
10th ring	3.58	135
4th ring	4.72	197

長は一年輪内において大きく変動し、細胞壁構造は顕著に強化されている。すなわち成熟材年輪では必要以上の肥大成長は行わず、材質の向上が優先されていると言えよう。

ところで成熟材年輪においては、年輪形成の晩期に仮道管長ならびに壁厚の減少が認められる。これは次の年の年輪形成を円滑に始めるための、紡錘形始原細胞による「成長の抑制」であると考えられるが、この点については今後のより詳細な研究を必要とする。

また成熟材を特徴づける特性として、Fig. 8に表れているフィブリル傾角が約 10° の境界線が考えられる。フィブリル傾角が約 10° 以下の仮道管は、壁厚が著しく肥厚している成熟材の晩材部分とほぼ一致しており、この部分の仮道管が年輪全体の材質に大きく影響を与えていると言える。すなわち、このような仮道管が形成されることが、「木部材質の成熟化」を表す指標の一つとなるのではなからうか。

V 結 言

細胞の形状と壁構造に関わる基本因子の年輪内変動、および微小試験片による縦引張強度試験の結果から、未成熟材と成熟材との力学的挙動の違い、ならびに木部材質の成熟化について以下のように結論づけることができる。

1. ヤング率には比重、フィブリル傾角、そしてマイクロフィブリル自体の性質が一年輪を通じて強く影響を与えており、成熟材の晩材は高い比重と小さいフィブリル傾角を有し、マイクロフィブリル自体の性能も高いため高い剛性を示した。
2. 塑性ひずみ量は細胞壁の裂け破壊によって増大しており、このような破壊形は未成熟材に多発している。また、細胞壁の破壊形はフィブリル傾角のみに起因するのではなく、多数の因子が複合して決定されている。
3. 成熟材においては、フィブリル傾角が 10° 以下で細胞壁が著しく肥厚している仮道管が、一年輪全体の材質を支配しており、このような仮道管が形成されることは木部材質の成熟化の指標となる。

文 献

- (1) 古川郁夫 (1979) 針葉樹材の縦引張破壊のフラクトグラフィー的研究. 118pp, 京都大学学位論文.
- (2) Ifju, G. and Kennedy, R.W. (1962) Some Variables Affecting Microtensile Strength of Douglas-Fir. For. Prod. J. 12 : 213-217.
- (3) Mark, R.E. (1967) CELL WALL MECHANICS OF TRACHEIDS. 310pp, 27-58, Yale Univ. Press, New Haven and London.
- (4) 太田貞明 (1972) スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究. 九大農演報45 : 1-78.
- (5) 塩倉高義 (1982) 針葉樹樹幹における未成熟材の区分とその範囲. 木材学会誌28 : 85-90.
- (6) 鈴木正治 (1968) 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. 林試研報212 : 89-149.
- (7) 渡辺治人・堤寿一・小島敬吾 (1963) 未成熟材に関する研究 (第一報) スギ樹幹についての実験. 木材学会誌9 : 225-236.