

論 文

木質系材料の安全性に関する研究 (I)

フラクトグラフィック的手法による材質劣化度の評価

古川 郁夫

Studies on Safety in Timbers and Woody Materials (I)

Fractographic Approach to Evaluating the Brashness of Wood

Ikuo FURUKAWA

Summary

The purpose of this study is to evaluate the degree of brashness of timbers and woody materials by use of the fractographic method.

The morphological characteristics of the fractured portions of sound wood, and those of wood deteriorated by means of heat, chemicals or external forces, were examined by optical and electron microscopy.

Fractographic features of the sound wood and the deteriorated wood were quite different. It is possible to estimate the degree of brashness based on the characteristic patterns on the ruptured surfaces of the cell walls and/or from the manner of crack propagation within or between the individual composite elements such as earlywood and latewood, thin-wall fibers and thick-wall fibers, matrix and fibrils, ray and axial fibers, and so on.

The fracture patterns of the tracheal walls in sound wood were classified into two main categories, namely, 'cross fracture' (transfibril fracture) and 'split fracture' (interfibril fracture). These two wall-fractures were subdivided into six fracture types based on the crack-propagating-mode within the S_2 layer, that is, C- I, II, III

* 鳥取大学農学部 農林総合科学科 森林生産学講座

* Department of Forestry Science, Faculty of Agriculture, Tottori University

and S-I, II, III, as already proposed by the author (FURUKAWA, 1978). The fracture manner of the sound-wood tissues were divided into two main types, that is, 'transverse fracture' (transfiber fracture) and 'lateral fracture' (interfiber fracture). The following types of fracture, C-III, S-I, S-II, S-III and lateral fractures were typically observed at the broken ends of the sound-wood specimens.

In contrast to sound wood, the heat deteriorated wood showed the following features : a darkening of the color, a decrease in strength, flattening of the fracture surface, and disappearance of lateral fracture. These tendencies were particularly noticeable at 200°C or higher thermal exposure. However, there were no fractographic changes under exposure at 155°C or below. This must be due to the thermal degradation of the cellulose chains and of the matrix polymers.

The wood deteriorated by longitudinal compression loading was ruptured by both types of fracture modes : transfibрил and transfiber fractures. These fractures must depend on the existence of minute compression failure (slip planes) within the S_2 layer. The transfibрил-fractured surface usually was of the C-II type.

The delignified walls were fractured with the C-I type, and lamellar structures frequently appeared on the fracture surface. After both treatments of delignification and alkaline extraction, however, the shape of the fiber became round, and the S_2 was fractured with C-II type. Furthermore, minute splinters like the broken ends of fibrils were observed on the fracture surface. These fractographs suggest the structural arrangement of microfibrils, hemicelluloses and lignins within the S_2 layer. This evidence is consistent with the submicrostructure model of the S_2 layer proposed by RUEL et al.

I 緒言

木材素材および木質材料（木質系材料）は居住環境を構成するうえで必要不可欠である。これらの住宅用材料が具備しなければならない条件は、大きく分けて快適性 (amenity) と安全性 (safety) の2つに集約できる。近年、木質系材料の快適性に関する研究は多く、「木質環境科学」と称される新しい分野を形成しつつある。例えば、木質系居住空間の温度や湿度の調節機能に関するもの、木質系材料の音響特性や熱伝導特性、衝撃特性に関するもの、接触感とか木目模様の視覚特性などの感覚的特性、さらに人体や動物に対する生理的影響に関するものなどである。これらのことについては、既に成書¹⁾として刊行されているのでそれを参照されたい。

これに対して、木質系材料の安全性に関する研究は少ない。木質系材料は、他の住宅用材

料と異なり、生物材料であるため、熱や微生物などの環境因子による材質劣化を受け易い。このような因子による材質劣化の程度(材質劣化度)を正確に評価することは、木質系材料の安全性を評価するうえで重要である。ところが、現行の評価手法や評価基準(JISやJAS規格試験等)では、実際の木質系材料の強度的寿命や安全性を評価するには十分でないことが多い。そのため、もっと可使用環境条件に即し、しかも木質系材料に特有の劣化機構²⁾を考慮した評価方法の確立が望まれる。

著者は、以前から木材に固有の複合材料的特性に着目し、これが木質系材料の破壊挙動と密接に関係していることから、木質系材料の破壊には非木質系材料に見られない独特の破壊様式が存在することを指摘してきた^{3,4)}。したがって、これらの破壊様式または破壊形態を指標として木質系材料の劣化度を評価することができるのではないかと考えてきた⁵⁾。

材料の破壊形態の特徴から、その材料の劣化の状態、破壊の原因と防止に関する知見を得る手法はフラクトグラフィ(fractography)または破面解析と呼ばれている。この手法は、材料の安全性を評価する方法として最も重要なものの一つである。木質系材料のフラクトグラフィ研究は、著者らの研究⁶⁾以降多くの報告があり⁷⁾、文部省科学研究費補助金によってもいくつかのプロジェクト研究が実施されてきた⁸⁾。

そこで、本研究では、まず、これまでに著者らが観察してきた木材の破壊形態の特徴を系統的に整理したうえで、正常な木材に特有な破壊形態を明確にする。次に、木材が可使用の環境条件下で劣化した場合、その破壊形態の特徴的な変化を明らかにする。これらから、木材の破壊形態と材質劣化度の関連性を検討し、木質系材料の安全性評価のための手掛りを得ることを目的とする。

なお、本研究の一部は、昭和56年度文部省科学研究費補助金(一般研究(C)、課題番号56560185)を受けて行ったものであり、成果の一部は、第17回ユフロ世界大会(1981年、京都)及び第32回日本木材学会大会(1982年、福岡)において口頭発表した。

II 材料と方法

本研究では、走査電子顕微鏡(SEM)および光学顕微鏡(OM)によるフラクトグラフィ的手法を用いて、正常材および劣化材の細胞壁レベルと高次構造レベルにおける縦引張破壊と壁破断形態の特徴について調べた。とくに劣化材は、加熱処理もしくは外力(縦圧縮荷重)による物理的劣化材ならびに脱リグニン処理もしくは脱ヘミセルロース処理による化学的劣化材について調べた。

1. 試材の調製

供試材料は主にスギ(*Cryptomeria japonica*)の成熟材部を用いた。他にアカマツ(*Pinus densiflora*)、カラマツ(*Larix kaempferi*)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)の成熟材部も

用いた。

化学的材質劣化については、単繊維化した晩材仮道管試料を用いて検討した。すなわち、単繊維試料は、供試材からマッチ軸木大の小片を採り、これを水だけで煮沸処理したもの(正常材試料)、木材化学分析法に準じて脱リグニン処理したもの、脱リグニン処理につづいて20℃、17.5%の苛性ソーダ水溶液で処理し α -セルロース化したものの3種類の処理小片から注意深く単繊維化したものを用いた。

また、物理的材質劣化については、まさ目および板目の切片試料を用いて検討した。切片試料は、飽水状態の供試材ブロックから厚さ80 μ m、幅約5mm、繊維軸方向に長さ約50mmのまさ目と板目の切片をマイクロームで切削し、これらから幅2mm、長さ10mmに切り揃えたものを供試した。なお、正常材切片試料の他に、縦圧縮破損によって材中に多数の微小なもめ(slip plane)が存在する材からも正常材と同様の切片試料を作製し、これを用いて外力による材質劣化を検討した。さらに、正常材切片をスライドガラスで挟み、これを155℃、200℃、240℃にそれぞれ設定した乾燥器内に17時間から183時間放置したものを用いて熱による材質劣化を検討した。

2. 破壊過程の観察と引張試験

破壊過程の観察は、切片試料について行った。正常材切片試料および劣化材切片試料は、スパン長に相当する4mmの穴が中央にあいた台紙に接着剤で固定した。これを、本研究のために特別に試作した小型引張試験機(写真1)のチャック部に取り付けた後、台紙の穴の両側を切り離し、切片試料だけを引張った。切片の片側中央部に切り込み長さ0.2mmの鋭いノッチ(切り欠き)を入れ、破壊過程の観察を容易にした。試料は毎分50 μ m(ひずみ速度に換算して毎分約1.25%)の定速で引っ張り、その時の試料にかかる荷重を検出し、記録した。また引張試験機はOMの試料載物台の上に取り付け、試料の破壊過程をOMに接続した16ミリシネカメラ(ボレックス社製H16RX-5, ASA400コダックネガフィルム7224を使用)で撮影し、記録した。試験・観察装置の概観を写真2に示す。

3. 破壊形態の観察

切片試料および単繊維試料の破壊形態はSEM(日立製作所製X-650型)で観察した。単繊維試料の破壊先端の細胞壁破断形態の観察は既報の方法⁹⁾に依った。切片試料の破壊部についても、常法に従って、破壊部を白金でスパッターコーティングした後、SEMの二次電子像(加速電圧15KV)で観察した。この際とくに、二次壁外層(S₁)および中層(S₂)に注目して観察を行った。

III 結果

1. 正常材の破壊の特徴

スギ正常材のまさ目切片（早材部分）の破壊過程を写真3に示した。ノッチの先端から生長したき裂は、隣接する仮道管との境界付近で繊維軸方向に沿った短い破壊と一時的な停止を繰り返しながら、仮道管を横切って進行するのが観察された（直交破壊）。写真4は、スギ正常材まさ目切片の早・晩材境界付近におけるき裂の発達過程を示す。き裂は、細胞壁の厚い晩材部に近づくとつれて複雑な挙動を示した。細胞壁は斜め、もしくはとげ状に破壊し、細胞境界付近では、繊維軸方向に沿った長い破壊（縦裂破壊）が観察された。写真5は、スギ正常材まさ目切片試料の破壊先端の全体像を示したものである。早材部分は直交破壊していたのに対し、晩材部分では繊維の切断と繊維間での縦裂破壊が見られた。さらに早・晩材境界部では典型的な縦裂破壊が見られた。このような破壊先端を肉眼で観察すれば、凹凸が激しく、ささくれたとげ状の破壊形として見る事ができた。これが正常材破壊形態の巨視的特徴であった。

次に、上記の破壊先端の一部を拡大したものが写真6, 7, 8である。写真6は早材部の、写真7は早・晩材移行部分の、また写真8は晩材部の破断先端を示す。壁（とくに S_2 ）破断面上には、放射状あるいは渦巻き状の襞状模様（pleat pattern）および S_2 繊維方向に沿った裂け（splitting）やとげ状破壊部（splinter）が認められた。さらに、細胞境界に沿った縦裂破壊が見られ、その破面上には S_1 もしくは S_1 - S_2 移行層が認められた（写真9）。これらが正常材の壁破壊形態の微視的特徴であった。

単繊維試料の壁破断形態については、既に詳しく報告している⁹⁾ので、ここでは正常材から単繊維化したスギ晩材仮道管の典型的な破断先端の1例を示す（写真10）。壁破断部には切片試料で見られたのと同じ様な破壊形態の他に、 S_2 がその繊維配列方向に垂直な面で破断したところもあった。これらはいずれもこれまでの観察事実と一致していた。

2. 熱劣化材の破壊の特徴

スギまさ目切片試料を155℃, 200℃, 240℃の各温度条件下に17時間（約0.5日）から168時間（7日間）暴露したときの強度（切片の破壊荷重）変化を図1に示した。155℃までの温度では、7日間暴露しても強度の低下は全くなかったが、200℃を超えると急激に強度は低下（劣化）した。材の色も155℃では正常材と全く同じであったが、200℃では17時間で少し黄褐色に、7日間では茶褐色に変色した。240℃では、わずか2時間で茶褐色に、25時間で黒褐色に変化した。これらの熱劣化切片試料を偏光顕微鏡で調べた結果、材色が茶褐色に変色しているも複屈折性は細胞壁のあらゆるところで正常材と同じように明瞭に認められたが、黒褐色

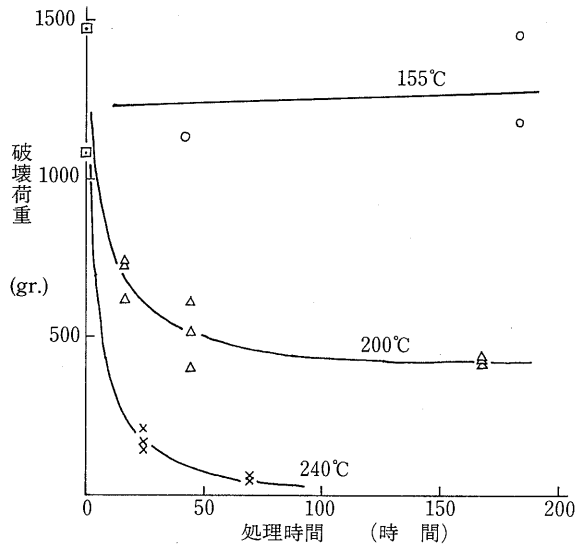


図1 155°C, 200°C, 240°Cに暴露したスギまさ目切片
試料の破壊荷重の変化

に変色した試料では正常材のそれと著しく異なっていた。

熱劣化したスギまさ目切片試料の破壊先端の全体像を写真11, 12, 13, 14に示した。写真11は155°Cに183時間, 写真12は200°Cに17時間, 写真13は200°Cに168時間, 写真14は240°Cに70時間, それぞれ暴露した試料である。155°Cに暴露したものは, 正常材の破壊形態(写真5参照)と同様であった。ところが, 200°Cに暴露したものでは, 早材部, 晩材部ともに直交破壊によって破断し, しかも暴露時間が長くなると早・晩材境界部での縦裂破壊もほとんど見られないなど劣化は急激に進行していた。240°Cに暴露した試料では, 外観だけは木材組織の特徴的な形態を残していたが, 破壊先端の形状は組織構造と全く無関係に直線的であった。

これらの熱劣化切片試料の壁破断部を写真15, 16, 17, 18に示した。これらの写真は, それぞれ写真11, 12, 13, 14に示した破壊先端の強拡大像である。壁破断形態からも壁劣化の様子を明瞭に読み取ることができた。すなわち, 155°Cでは S_2 破断面上に正常材で見られたのと同様な壁状模様(写真15)が認められたが, 200°C以上に暴露した試料では, それが全く認められなかった。さらに, 200°C以上の温度では, S_1 - S_2 境界での縦裂破壊や S_2 フィブリル配列方向に沿った裂け破壊も観察されなかった。壁破断面は, 繊維軸に対してほぼ垂直で平坦であり(写真16), 破面上には正常材で全く見られなかった微小な凹凸(写真17)が観察された。しかも, 200°Cで長時間暴露したものや240°Cに暴露したものでは, 壁と中間層とが融着しているようであった(写真17, 18)。とくに, 240°Cに暴露したものでは, 壁内の微細構造を見ることができなかった(写真18)。

3. 外力による劣化材の破壊の特徴

縦圧縮破損したスギ材から作製したまさ目切片試料の破壊先端の全体像を写真19に、またその一部弱拡大像を写真20に示した。この場合の破壊形態も正常材のそれと著しく異っていた。すなわち、試料は早・晩材の存在と無関係にほぼ直線的に破断していた。これは、写真20にも示したように、繊維軸方向に対してはほぼ直角方向に発生していた圧縮破損部（写真でしわのように見えるところ）に沿ってき裂が伝ばしたためであろう。

写真19の試料の晩材部の壁破断部を写真21, 22に示す。壁（とくに S_2 ）の破断面は平坦であり、しかも繊維軸に対して傾斜しているのが特徴であった（写真21）。破面上にはフィブリル状の微小な凹凸が観察された（写真22）。

4. 化学的劣化材の破壊の特徴

木材を脱リグニン処理もしくは α -セルロース化処理すると、中間層が溶脱して単繊維状となるため、これらの処理による劣化は、単繊維試料を用いて調べた。

脱リグニン処理した晩材仮道管の破壊先端を写真23に示した。壁は繊維軸にほぼ垂直に破断し、破面は破断部全体にわたって平坦であった。正常材の破壊形態（写真10参照）に比べて、 S_2 フィブリル配向に沿ったとげ状破壊が少なかった。しかも、脱リグニン処理した S_2 破断部には、写真24に示したようなラメラ状の破壊が観察された。

次に、 α -セルロース化したスギ晩材仮道管の破壊先端を写真25に示す。この処理によって、もともと矩形断面であった仮道管が円筒状に変形した。しかも、壁破面は繊維軸に対して傾斜し、平坦な場合が多かった。この破面を詳しく調べると、 S_2 フィブリルの破断先端と思われる微細な針状突起物が多数認められた（写真26）。

これらの破壊形態は、いずれも正常材のそれと著しく異っていた。

IV 考 察

木材は、微細構造レベルにおいても、また高次構造レベルにおいても典型的な積層複合構造をもつ材料であり、その破壊形態は、極めて複雑な様相を呈する。そのため、木材の破壊形態は、現在でも体系的に整理されていない。

著者は、かつて単繊維試料の壁破壊形態の観察結果に基づいて、 S_2 の破壊様式を6つに分類することを提案した（図2）³⁾。その後、種々の単繊維試料、切片試料の破壊部の観察を行った⁹⁾。さらに、本実験において、正常材だけでなく、物理的・化学的に劣化した木材の破壊形態についても調べた。これらいずれの場合においても、壁の破壊形態は図2に示した破壊形のいずれかに属し、これら以外のものを見出すことはできなかった。したがって、これらの6つの壁破壊様式は、単繊維試料に限らず、木材細胞壁が破断するときの基本的な破壊

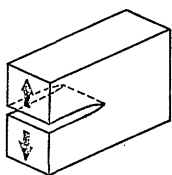
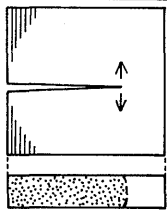
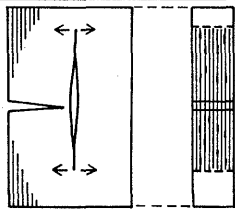
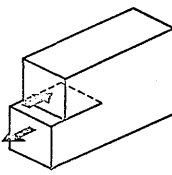
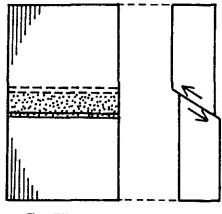
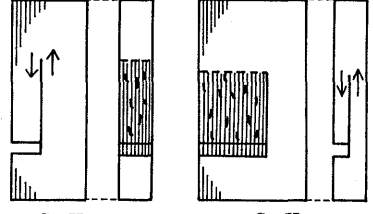
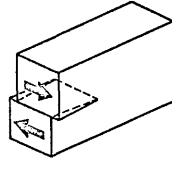
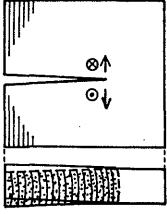
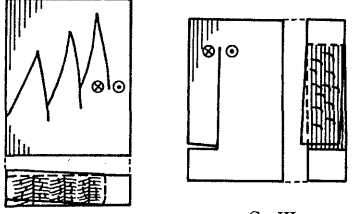
破壊モード	フィブリル切断破壊(切断破壊)	フィブリル間破壊(裂け破壊)
 モード I	 C-I	 S-I
 モード II	 C-II	 S-II _R S-II _T
 モード III	 C-III	 I M-III S-III

図2 木材細胞壁の基本的破壊様式(古川, 1978)

様式と考えていいことが分った。

壁の破壊は主としてS₂の破壊と考えてよく、S₂の破壊は基本的に、S₂フィブリルの切断破壊 (cross fracture) とS₂フィブリル間での裂け破壊 (split fracture) の2に分けることができた。前者をフィブリル切断破壊 (transfibril fracture), 後者をフィブリル間破壊 (interfibril fracture) と定義することができる。さらに、これらはS₂中のき製の伝ば様式 (fracture mode) に応じて、それぞれ3つに分類でき、それらを切断のI型 (C-I型), II型 (C-II型), III型 (C-III型) 破壊および裂けのI型 (S-I型), II型 (S-II型), III型 (S-III型) 破壊と称した。裂けのII型破壊には、半径面内破壊 (S-II_R) と接線面内破壊 (S-II_T) の2つの型が存在し、脱リニグニン処理したS₂破断部でみられたようなラメラ間破壊 (interlamella fracture) は、後者に属する破壊である。また壁破断面上に鬚状模様の見られた破壊は、C-III型破壊であり、長いとげ状破壊もこれと同じ型に属すると考えられるが、裂け破壊成分の多いことからC-III型とS-III型の間中型 (I M-III型) に分類した。これらの壁破壊

形態のうち、とくに裂け破壊（フィブリル間破壊）および切断のIII型、中間型破壊は、正常材に常に見られる破壊型であった。

次に、正常材の高次構造レベルにおける破壊の特徴について考察する。高次構造レベルでは、隣接細胞にき裂がどのように伝ばするかが問題であり、これには隣接細胞の種類と配列が深く関与していた。切片試料中のき裂の伝ば方向と隣接細胞壁の種類との間には、図3に示したような関係が認められた。すなわち、薄壁の早材部では隣接する一対の壁（重複細胞壁、double wall）がずれることなく同じところで破断した。ところが、厚壁の晩材部では、重複細胞壁のそれぞれの壁がC-III型破壊もしくはC-III型破壊とS-II_R型破壊で破断していることが多く、しかも破断した両細胞壁界（S₁-S₂境界）で縦裂破壊（lateral fracture）が必ず発生していた。また、切片試料中のき裂の伝ばと組織配列との関係については、図4に示したとおりである。このように、切片中のき裂の伝ば様式には2つの型が認められた。すなわち、早材部中のように細胞を横切ってき裂が繊維軸とほぼ直角方向に伝ばする場合と、晩材部中もしくは早・晩材境界部のように細胞間をき裂が繊維軸に沿って伝ばする場合とがあった。前者を直交破壊もしくは垂直破壊（transverse fracture）、後者を縦裂破壊と称した。これらはまた、壁切断破壊（trans-wall fracture）および壁界破壊（inter-wall fracture）と定義することができる。これら2種類の破壊は、木材中において、放射組織の辺縁部のところで直交破壊から縦裂破壊に、またはその逆に変化することがしばしば観察された。

ところで、鬚状切断破壊面や種々の裂け破壊面、さらに壁界での縦裂破壊面は、いずれも正常材の破壊部にしか存在しないことから、これらの破壊様式は木材の組織構造と密接に関

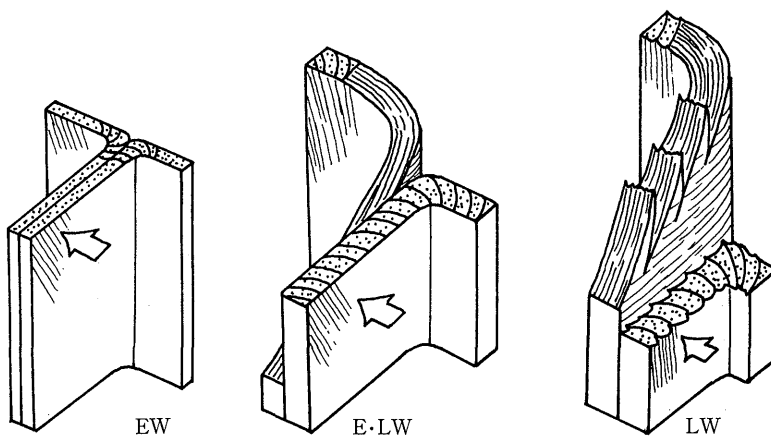


図3 木材中の重複細胞壁のところでき裂の伝ば様式

(矢印はき裂進行方向, EW: 早材, E·EW: 早・晩材移行部, LW: 晩材)

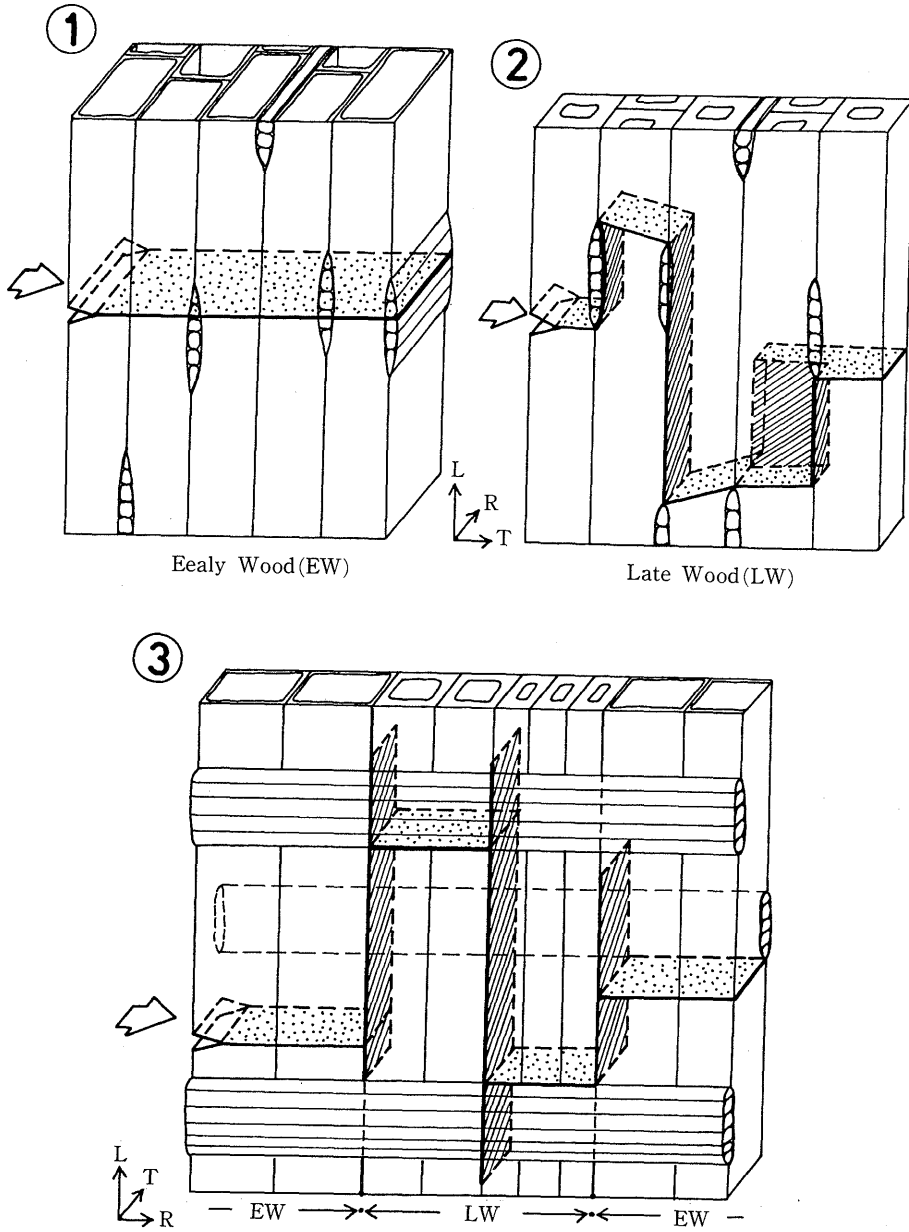


図4 木材中のき裂の伝播様式 (①, ②は板目切片, ③はまさ目切片)

直交破壊部

縦裂破壊部

係していると思われる。すなわち、微細構造レベルでは、骨格物質である結晶性マイクロフィブリルとこれを充填しているマトリックス物質（ヘミセルロース類とリグニン）とでは、その力学的特性や構造が異っており、これによる力学的異方性¹⁰⁾が壁内での破壊様式を決定する主因子と考えられる。また、高次構造レベルでは、繊維細胞の種類、配列、形状、さらに壁厚などの違いによる力学的異方性¹⁰⁾が存在する。正常材に存在するこのような力学的異方性（複合材料特性）は、破壊に際して、フィブリルの切断とフィブリル間での破壊が交互に発生することによって形成されたと考えられる襞状切断破壊や種々のフィブリル間での裂け破壊、さらに早・晩材境界部や壁界部での縦裂破壊という形で発現するものと思われる。

木材が熱的劣化を受けると、その複合材料的特性は著しく損われた。すなわち、セルロース分子の主鎖結合の切断による結晶性マイクロフィブリルの脆化およびマトリックス物質の熱分解による応力分散能力の低下などの微視的複合特性の低減または消失、さらに早・晩材間とか繊維軸方向とそれに直角方向での力学的異方性の消失などである。その結果、木材自体は異方性が失われ均質化すると同時に脆くなった。そのため、壁破断面は平坦になり、フィブリル間や壁界での破壊もなくなったのであろう。

細胞壁の主要構成成分の除去に伴う壁破壊形態の変化は、塩素系薬品による骨格物質の劣化とマトリックス物質の除去のために、熱劣化材と同様の傾向（破面の平坦化）を見ることができた。ただし、本実験に用いた脱リグニン、脱ヘミセルロース処理は、木材化学分析に準じた方法のため、セルロース骨格物質の崩壊は少なかった。この処理では、リグニン、ヘミセルロース類などの充填物質が段階的に除去されたことによって、これらの壁内における存在状態に関する知見が得られた。すなわち、脱リグニン処理では、細胞の外形はほとんど変わらず、平坦な壁破面上にラメラ状もしくは蜂の巣状（honey-comb）の破壊形が見られた。これは、マイクロフィブリルがヘミセルロース類によって横方向（lateral）に結合して薄いラメラを形成していることを示唆している。さらに、これをアルカリ処理（脱ヘミセルロース処理）すると、細胞の外形は円筒状となり、その壁破面には緩く束ねたような状態のフィブリル破断先端が観察された。このことは、マイクロフィブリルがアルカリ処理によってばらばらになり、乾燥によって再び凝集した結果生じたものと思われる。これらの事実から、壁(S₂)中では、マイクロフィブリルはヘミセルロースによって薄いシート状に結合してラメラを形成しており、各ラメラ間はリグニンによって充填されていると推定された。このような構造はRUELらの提案したモデル¹¹⁾と矛盾するものではなかった。

圧縮破損材の破壊形態は、壁中に多数存在する微小な圧縮破壊部（slip plane）と密接に関係していると思われた。この場合の破壊は、破面が傾斜した平面状（切断のII型破面）を呈することから、slip planeの面に沿って発生したものと考えられる。Slip planeは縦圧縮荷重だけでなく、曲げ荷重やこれらの繰り返し荷重が作用した場合にも発生し、木材の強度的寿命を支配する重要な因子と考えられる。これと材質劣化の関連性については、DINWOODIE

の一連の研究¹²⁻¹⁴⁾があるだけで、あまり研究されていない。

木材の劣化には、上記の外にも、紫外線や放射線による劣化、種々の薬品による劣化、微生物の酵素による劣化、樹木の生育環境による劣化など多くの因子が関係しているが、これらによる材質劣化と破壊形態との関連性については今後の研究に待たねばならない点が多い。

ところで、木質系材料に限らず材料の劣化度を評価する方法には、各種の規格試験法にみられるような破壊試験法 (destructive testing method) の他に、材料自体を破損することなく試験する非破壊試験法 (non-destructive testing method) がある。ただし、非破壊試験法の欠点は、材料中に局在する欠陥部を限定できないことと、欠陥部における材質劣化度を過小評価する傾向のあることである。このことは材料の安全性を評価するうえで極めて重大な問題である。これに対して、フラクトグラフィー的手法は材料の最終的な破断に係る直接的な原因の解析を行うため、材料中の欠陥部の評価をかなり正確に行うことができる。ところが、フラクトグラフィーも一種の破壊試験法であるから、材料の最終的破断時点 (限界寿命) を予測することは困難である。したがって、将来はフラクトグラフィーによって評価された材質劣化度を用いて非破壊的に材料の寿命を予測できるような手法の開発が望まれる。

V 結 論

物理的もしくは化学的に劣化した木材 (劣化材) と正常材の縦引張破壊形態を比較することによって、木材の劣化状態をフラクトグラフィー的に評価することを試みた結果、以下の結論を得た。

- (1) 正常材と劣化材では、その微視的 (細胞壁レベル) ならびに巨視的 (高次構造レベル) 破壊形態が著しく異っていたことから、これらを指標として木材の劣化度を評価することが可能である。
- (2) 正常材の破壊様式は、細胞壁レベルでは6つの破壊型 (切断破壊のⅠ型、Ⅱ型、Ⅲ型と裂け破壊のⅠ型、Ⅱ型、Ⅲ型) に、高次構造レベルでは2つの破壊型 (直交破壊と縦裂破壊) に類型化できた。とくに、切断破壊のⅢ型や各種の裂け破壊、さらに縦裂破壊は正常材で典型的にみられた破壊様式である。
- (3) 熱による材質劣化は155℃以下では全くみられなかったが、200℃以上では材色の変化、強度の低下、壁破断面の平坦化、裂け破壊や縦裂破壊の消失など顕著な変化がみられた。これらの変化は、セルロース分子主鎖の切断、充填物質の熱分解に依る微視的・巨視的構造レベルでの複合材料的特性の低減と消失に起因するものであろう。
- (4) 脱リグニンおよび α -セルロース化処理によって、壁破断面は平坦化した。しかも、それらの壁破面上ではラメラ状破壊形、フィブリルの破断先端が見られるなど、壁中における

- リグニンやヘミセルロース類やマイクロフィブリルの存在様式を示唆する知見が得られた。
- (5) 縦圧縮破損によって slip plane の存在する材の破壊形態は、壁が切断のII型破壊で破断し、縦裂破壊が少ないなどの特徴を示した。これは、壁中に存在する slip plane が破断の開始点となっていることを示唆するものである。

引用文献

- 1) 山田 正編：木質環境の科学，pp.1~484，海青社 (1987)
- 2) Dinwoodie, J. M. : Causes of Brashness in Timber, in Leiden Botanical Series, No.3, pp.238~252 (1976)
- 3) 古川郁夫：晩材単一仮道管の2次壁中層の縦引張破壊部にみられる種々の破壊様式，木材学会誌，**24**，pp.369~374 (1978)
- 4) 古川郁夫：ノッチ付き木材切片の縦引張破壊に関する光学顕微鏡的研究，木材学会誌，**24**，pp.598~604 (1978)
- 5) 古川郁夫：木材の破壊のフラクトグラフィー，木材工業，**36**，pp.160~166 (1981)
- 6) 佐伯 浩，古川郁夫，原田 浩：木材の縦引張破断面の走査電子顕微鏡による観察，京大演習林報，No.43，pp.309~319 (1972)
- 7) 例えば，Côté, W. A. and R. B. Hanna ; Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces, Wood Fiber Sci., **15**，pp.135~163 (1982)
- 8) 例えば，木材および木質材料の破壊機構に関する研究(昭和51年度，総合研究B，代表：浅野猪久夫)，構造用材料としての木材および木質材料の強度と破壊機構に関する研究(昭和57年度，58年度，総合研究A，代表：浅野猪久夫)，木材および木質材料の破壊過程と破面形態の研究(昭和61年度，62年度，総合研究A，代表：佐伯 浩)など。
- 9) 古川郁夫：針葉樹材の縦引張破壊のフラクトグラフィー的研究，鳥大演習林報，No.12，pp.1~118 (1980)
- 10) 山田 正編：木材物性における複合理論の研究，pp.1~45 (1979)
- 11) Ruel, K., F. Barnoud and D. A. I. Goring : Lamellation in the S₂ layer of softwood tracheids as demonstrated by scanning transmission electron microscopy, Wood Sci. Technol., **12**，pp.287~291 (1978)
- 12) Dinwoodie, J. M. : Failure in Timber, Part 1 : Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure, J. Inst. wood Sci., **2**，pp.37~53 (1968)
- 13) Dinwoodie, J. M. : Failure in Timber, Part II : The angle of shear through the cell wall during longitudinal compression stressing, Wood Sci. Technol., **8**，pp.56~67 (1974)

- 14) Dinwoodie, J. M. : Failure in Timber, Part III : The effect of longitudinal compression on some mechanical properties, Wood Sci. Technol., **12**, pp.271~285 (1978)

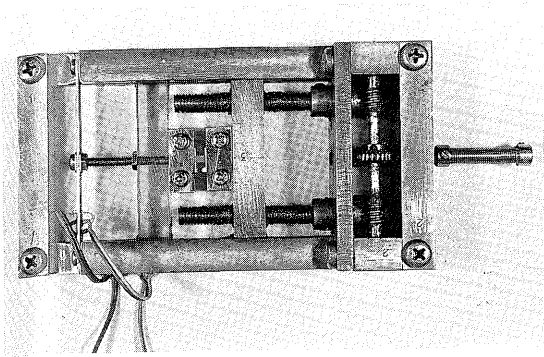


写真1 小型引張試験機

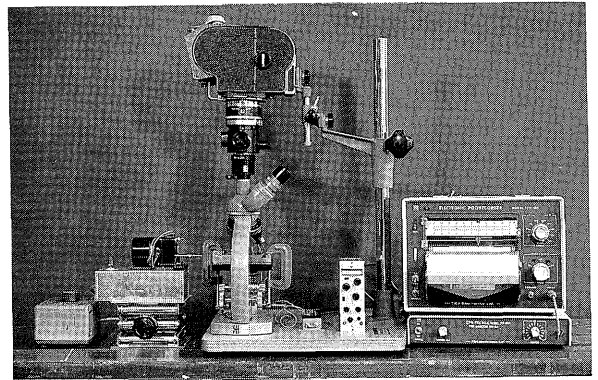


写真2 引張試験・観察装置の概観

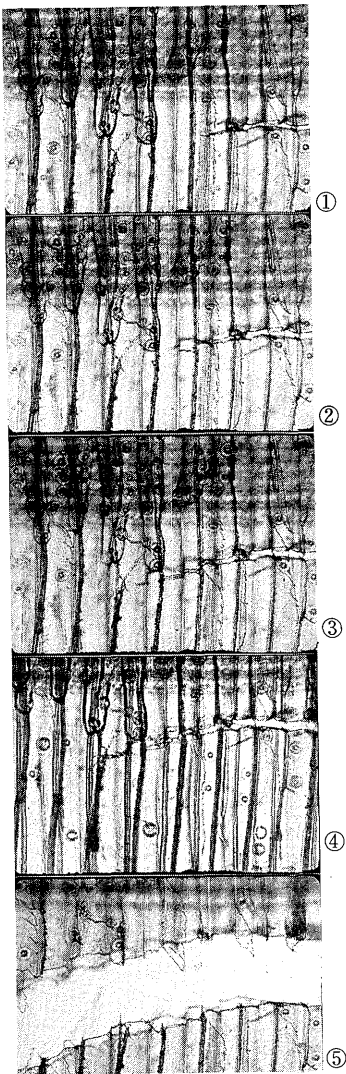


写真3 スギ正常材まさ目切片(早材部分)の破壊過程 (撮影倍率×200)

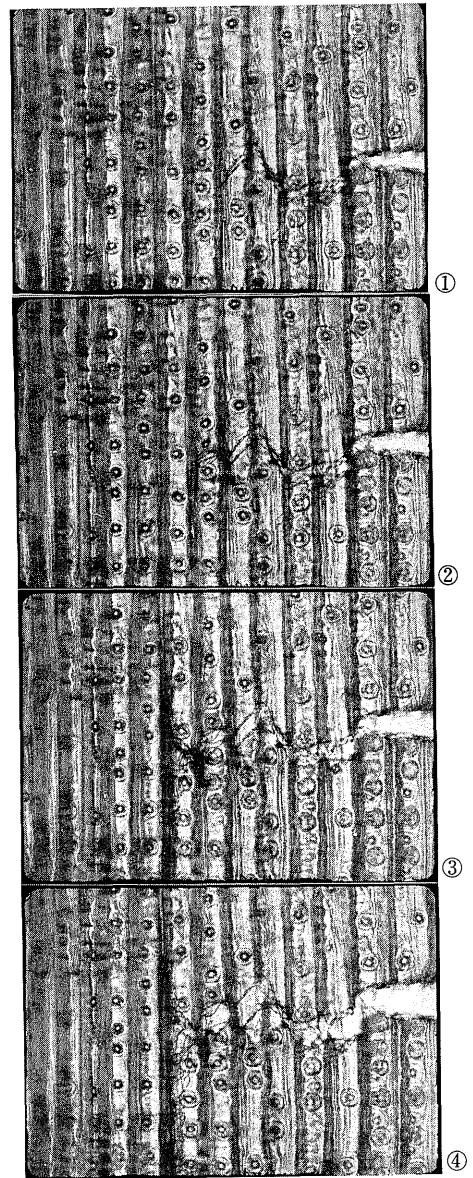


写真4 スギ正常材まさ目切片(早・晩材境界付近)の破壊過程 (撮影倍率×200)

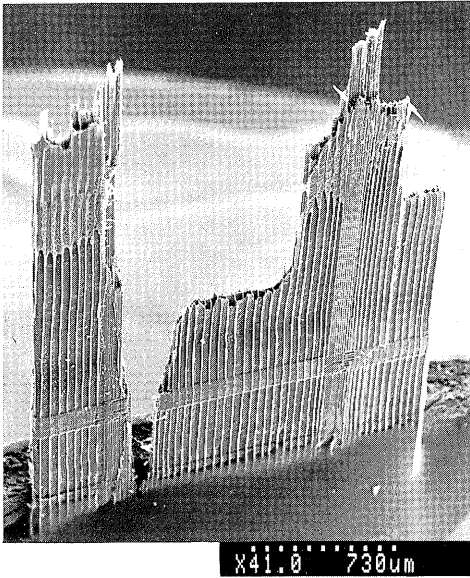


写真5 スギ正常材まさ目切片の破壊先端

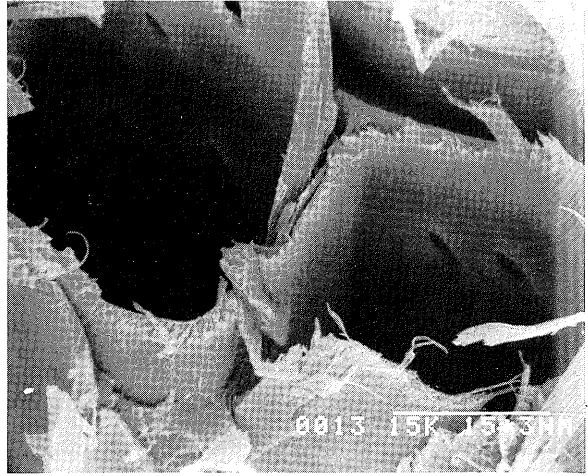


写真6 スギ正常材まさ目切片，早材部の破断先端

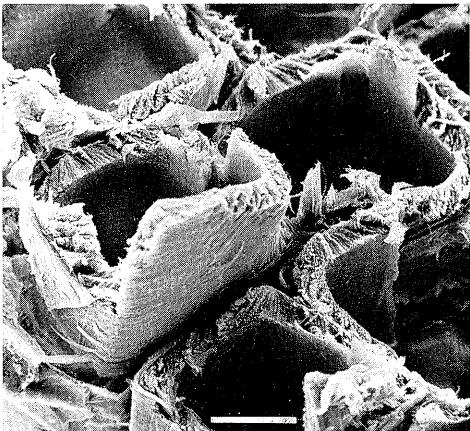


写真7 スギ正常材まさ目切片，早・晩材移行部の破断先端，スケールバーは10μm.

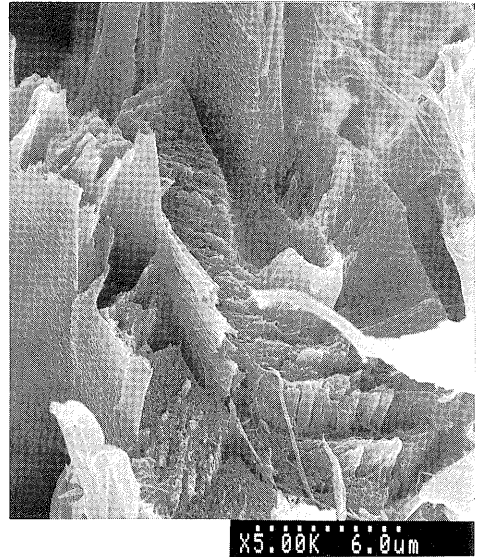


写真8 スギ正常材まさ目切片，晩材部の破断先端

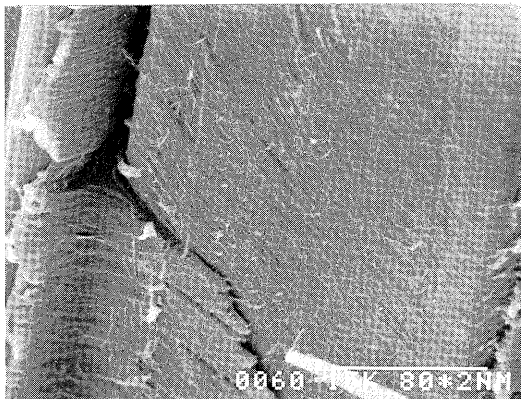


写真9 縦裂破壊した破面（スギ正常材まさ目切片，晩材部分）

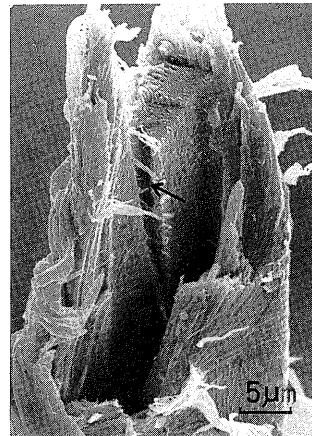


写真10 スギ正常材，晩材単一仮道管の破断先端

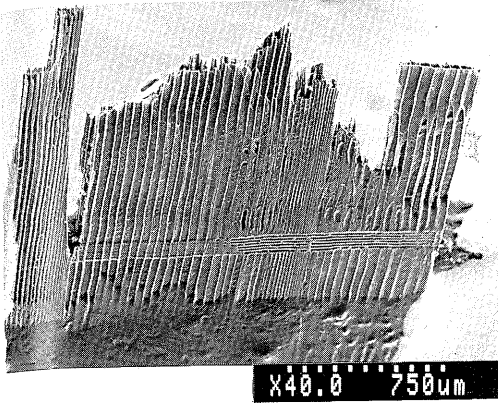


写真11 熱処理したスギまさ目切片の破壊先端
(155°C, 183時間暴露)

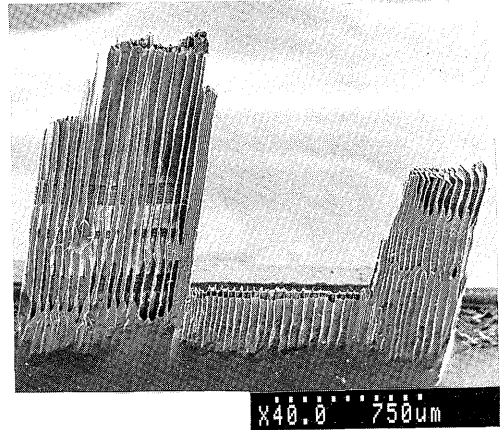


写真12 熱処理したスギまさ目切片の破壊先端
(200°C, 17時間暴露)

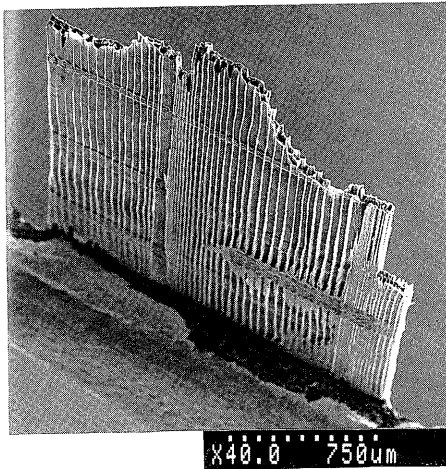


写真13 熱処理したスギまさ目切片の破壊先端
(200°C, 168時間暴露)

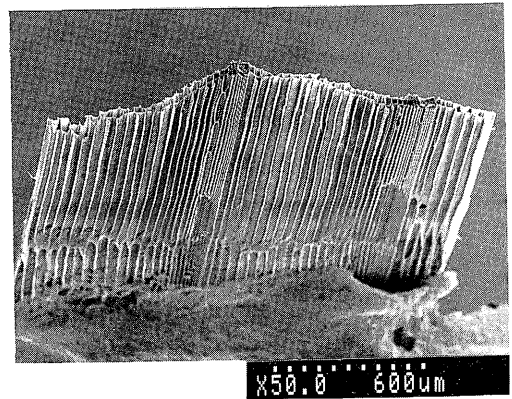


写真14 熱処理したスギまさ目切片の破壊先端
(240°C, 70時間暴露)

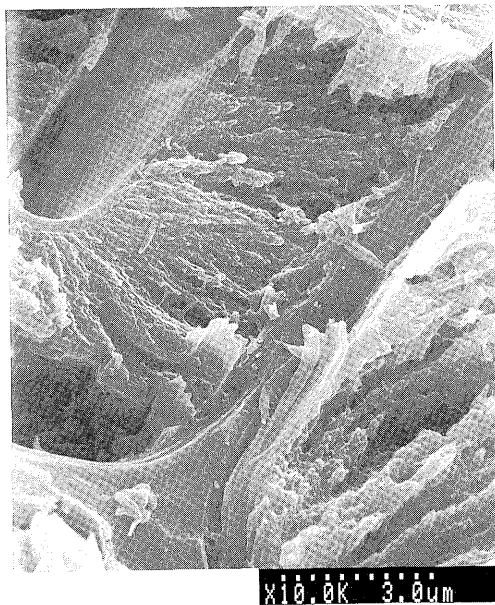


写真15 155°Cに183時間暴露したスギの壁破壊断面

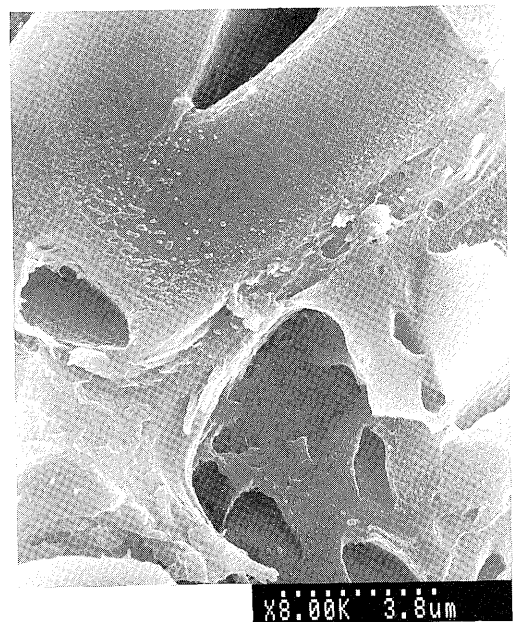


写真16 200°Cに17時間暴露したスギの壁破壊断面

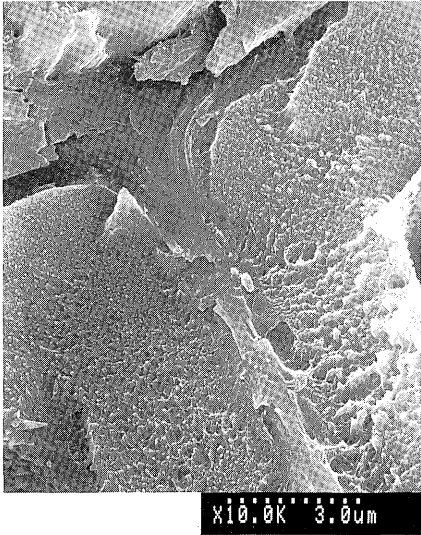


写真17 200°Cに168時間暴露したスギの壁破断部

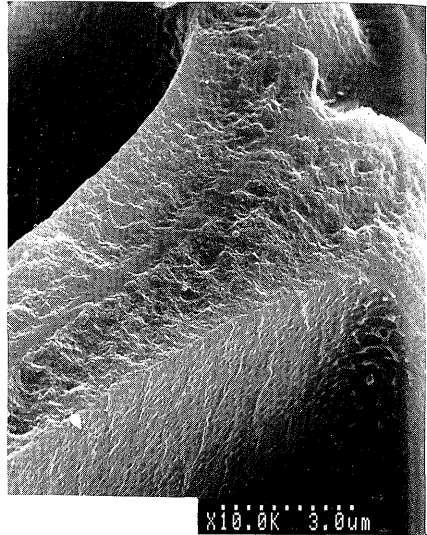


写真18 240°Cに70時間暴露したスギの壁破断部

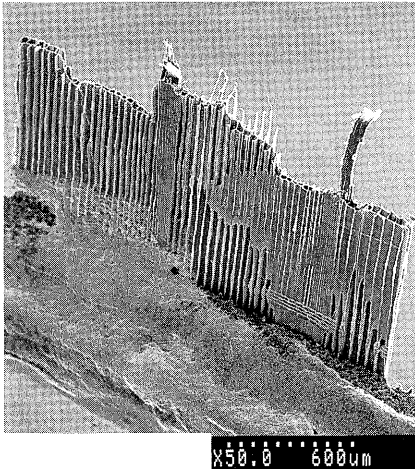


写真19 スギ、圧縮破損材（まさ目切片）の引張破壊先端

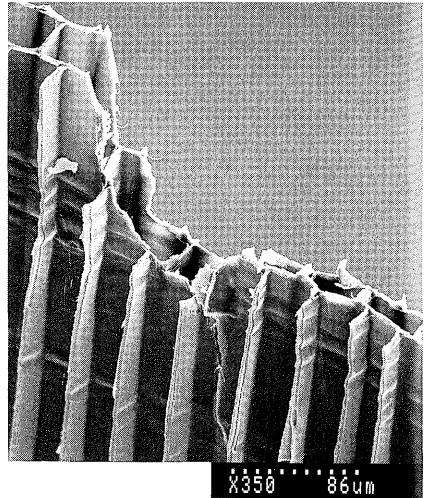


写真20 写真19の一部拡大

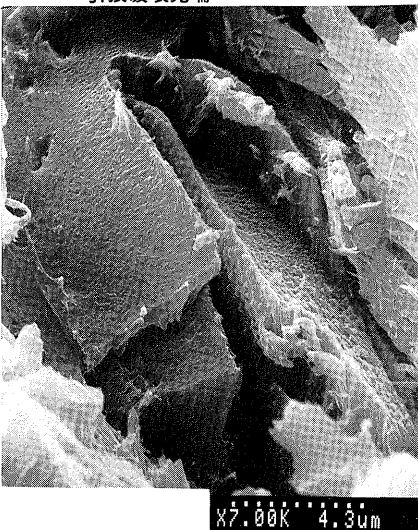


写真21 スギ、圧縮破損材、晩材部の引張破壊による壁破断部

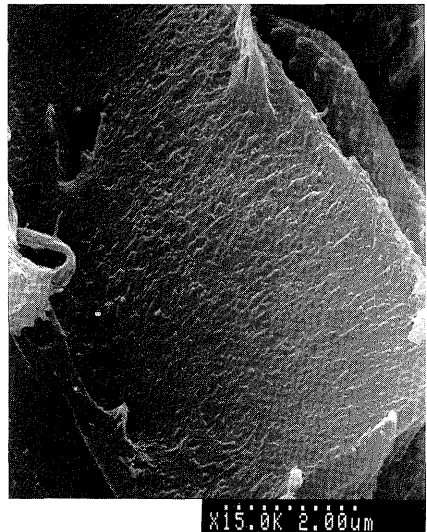


写真22 写真21の一部拡大

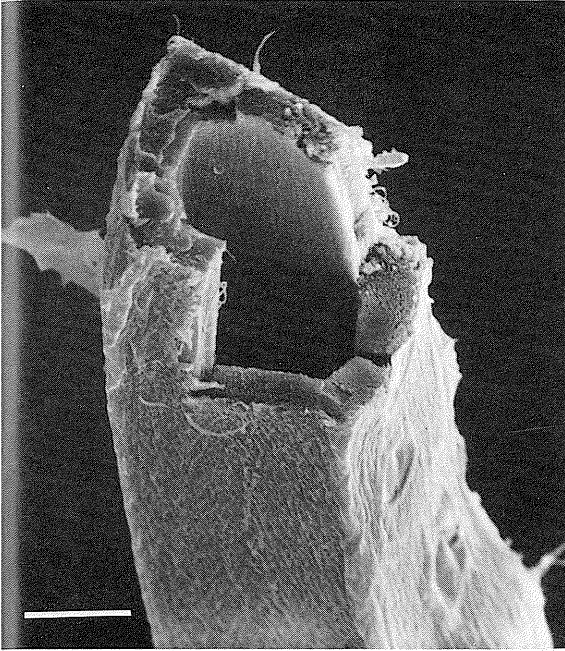


写真23 脱リグニン処理したスギ晩材仮道管の破壊先端 スケールバーは5 μm



写真24 脱リグニン処理した壁の破断部(ラメラ状破壊) スケールバーは1 μm

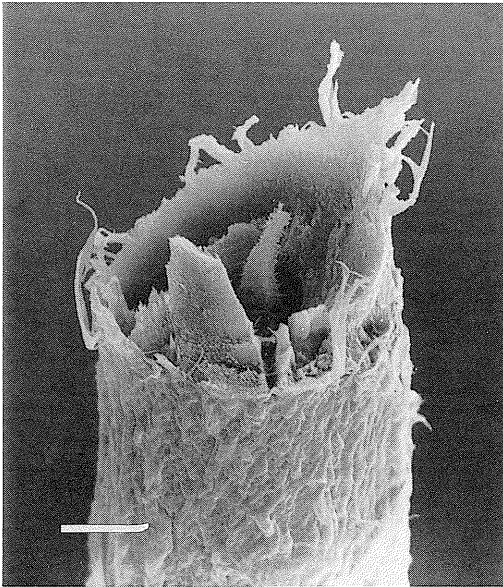


写真25 α -セルロース化したスギ, 晩材仮道管の破壊先端 スケールバーは5 μm

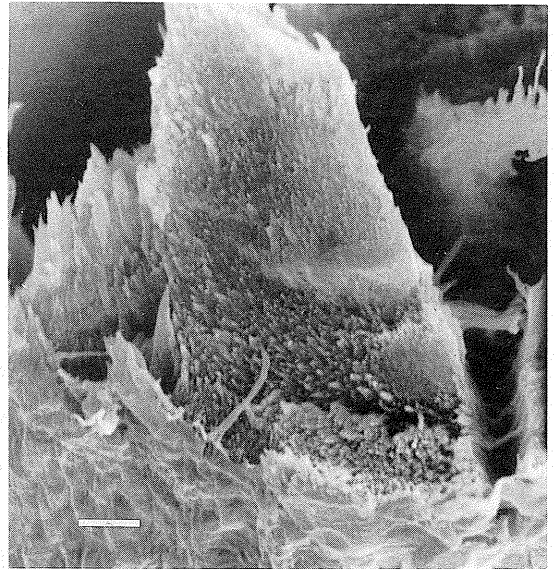


写真26 α -セルロース化した壁の破断部(フィブリル切断先端) スケールバーは1 μm