

Summary

From the fractographic point of view, the fracture mechanism of tracheidal walls under longitudinal tensile load was examined by optical and scanning electron microscopy. In this article, the following three subjects are discussed : (1) the fracture behavior of the single cell wall of individual coniferous tracheid ; (2) the fracture behavior of the double cell wall present in the several kinds of microtomed sections involving single edge notch ; (3) the fracture behavior of the bordered pits relating to their structure of pit border to crack propagation.

In Chapter 1, the fracture behavior of single tracheids was described. As a result of the establishment of visualizing methods of fracture process and of fracture surface at the electron microscopic level, some new information about the fracture of cell walls was obtained. In the fracture process of a single tracheid prepared from normal wood, it was found that the failure frequently occurred at the ray-tracheid pit(R-T pit) near the end of the ray crossing, and the crack advanced in the wall through two characteristic stages. At the first fracture stage, which is called the "cross fracture" stage in this article, the crack propagated across the cell axis ; exactly speaking, perpendicular to the direction of the microfibrillar orientation of the S_2 layer. And in the following stage, which is called the "splitting fracture" stage, the crack extended mainly along the cell axis; strictly speaking, parallel to the direction of the S_2 -microfibrillar orientation.

On the basis of the topographic features on the fracture surface of the S_2 layer of the single tracheids prepared without chemical treatment, the

(ii)

appearance of the surface could be classified into six types, *i.e.*; the cross-fracture type I (C-I), II (C-II) and III (C-III) and the splitting-fracture type I (S-I), II (S-II) and III (S-III) respectively. These various types of fracture were estimated to be strongly dependent on the kinds and the directions of the acting main stress at the tip of an advancing crack in a S₂ layer. However, the whole fracture surface of the broken end always contained two or more kinds of fracture types. Then, it was possible to classify the whole appearance of the broken ends into three large groups, *i.e.*; the predominant cross-fracture group (G-1), the predominant splitting-fracture group (G-2), and the intermediate group (G-3), containing both types of fractures nearly equally.

When lignin and/or hemicellulose was removed from the cell wall, the whole appearance of the fracture surface began to show indications of the G-1 group, and especially the C-I and the C-II types of fractures were observed on the fracture surface of the S₂ layer. Moreover, the presence of a lamellar structure in the S₂ layer was concluded from the fact that the concentric patterns always appeared on the delignified S₂ layer.

In Chapter 2, the fracture behavior of a double cell wall within several kinds of sliced sections of SUGI wood was described. The crack propagating system in the double cell wall, and the topographic features of the fracture surface in relation to the direction of crack propagation, were investigated by use of single-edge-notched sections of a few cells with a thickness of 60~120 microns prepared from an early wood, the intermediate portion between an early and a late wood and a late wood respectively.

In the failure process of the section, it was found that the crack always occurred at the tip of a notch and developed through two characteristic phases. At the first phase of failure, the growth of the crack was

relatively slow (SCP phase). At the second phase, however, the crack propagated rapidly in the unfailed part of the section (RCP phase). The SCP phase was clearly observed in the tangential-longitudinal sections. In contrast with these sections, the greatest part of the failure process of the thin-walled sections was occupied by the RCP phase.

When the crack propagated from one wall in a double cell wall to the other one, it was found that there were three propagating manners, that is, the early-wood type, the intermediate-wood type and the late-wood type respectively. In the early wood section, it was observed that both wall of the double cell wall were fractured simultaneously by the cross fracture mode. One of the fundamental propagating manners in the double cell wall was found in the intermediate wood sections, that is, the new crack parallel to the S_2 -microfibrillar orientation in the one side of the double wall was generated at the tip of an advancing crack on the other side of it. In the late wood sections, the propagating crack often generated separation between the double wall.

The shape of the failure line, which is the path of the crack within the section, showed a straight line perpendicular to the cell axis as the rate of crack propagation was increased or the thickness of the cell wall was decreased. However, the failure line showed a wavy or a stepwise pattern when the cell wall in the section was thick or the rate of crack growth was small. During the SCP phase, it was detected that the splitting fracture mainly occurred in the S_2 layer, and the separation between the cell wall layers was generated at the vicinity of the S_1 layer. At the RCP phase, both types of fractures, that is, the splitting and a cross fracture types, were recognized. Moreover, the ridgy pattern was usually observed on the cross-fractured surface. From this pattern, it was possible

(iv)

to estimate the direction of crack propagation within the section.

In Chapter 3, the fracture behavior of bordered pits in the tracheidal wall was discussed based on the structural features of the pit border, especially the one of the R-T pit. In the case of the R-T pit, some new information about pit-border formation was obtained, *i.e.*; the microfibrils of the S_1 and the S_2 layers laid down in the pit-border region maintained their original orientation, and the individual pit borders of the S_1 and the S_2 layers developed perpendicular to their original orientation, especially, the deposition of the S_2 -microfibrils mainly contributed to form the pit border.

The differences between the fracture behavior of the R-T pit and that of the intertracheidal pit (T-T pit) can be explained in terms of the structural difference between their pit border. The T-T pit border has some resistance to crack propagation in comparison with the R-T pit border because of the presence of a thicker S_1 layer and a lining layer of so-called BT or "initial border thickening". However, the R-T pit border seems to be mechanically weak because of the lack of BT and the unequal development of the pit border consisting mainly of the S_2 layer.

緒 言

木材が梁とか柱などの構造用材料として優れているのは次の2つの破壊特性に因るものである。すなわち、木材は繊維軸方向の引張り（以下これを縦引張りと言略記）に対して大きな比強度と破壊靱性を有していることである。いいかえれば前者は軽くて強いということであり、後者は急激に破損しないということである。このような木材の破壊特性は、木材を構成している種々の微視的ならびに巨視的構造単位の巧みな幾何学的配列、すなわち複合構造に起因することが近年次第に明らかにされつつある。それ故に、一見迂遠と思われる木材細胞壁の縦引張破壊現象をその構造と関連させて究明することは、木材を構造用材料として加工・利用する場合のみならず、木質系材料の特性をより高度に活かした新しい材料の開発・設計を目指す場合において、その基礎的知見を与えるものとして必要不可欠である。

ところで、木材に限らず一般に固体材料の破壊現象は材料中における亀裂（crack）の伝播現象であり、これを解明していくうえで従来から2つのことが指摘されている。その1つは、亀裂は必ず固体材料中に潜在的に存在する欠陥部を起点として発生するということであり、他の1つは、発生した亀裂の伝播は亀裂を取り巻く限られた領域内のエネルギーバランスに支配されるということである。このような概念は GRIFFITH（1920）によって始めて提唱された。まず第1の指摘によって、破壊は特定の部位に生ずる現象であることが認識されるようになったが、金属以外の材料についてはこの点に関する研究が少なく、依然として破壊開始部位に相当する欠陥部の不明なものが多い。第2の指摘は破壊基準（criterion）を規定したものである。材料を均質連続体とみなせば、材料中における亀裂の挙動をある程度予測することができるが、この手法では実際の材料に即した亀裂の真の挙動を知るとは困難である。なぜならば材料にはそれに特有の微視的ならびに巨視的な組織構造があるため、亀裂はそれぞれの材料に特有の伝播様式（破壊様式）をとると考えられるからである。

そこで、このような種々の材料中における亀裂の伝播に関する直接的な知見を得る手法としてはフラクトグラフィ（fractography）、とくに電子顕微鏡（以下電顕と言略記）によるエレクトロンフラクトグラフィ（electron fractography）と呼ばれる破面解析法が有効である。すなわち、フラクトグラフィは材料内部における亀裂の伝播過程の三次元的様相を直接知り得る手法として、他の手法では得難い知見が入手できるとともに、亀裂伝播の理論を取り扱う破壊力学（fracture mechanics）の実験的裏づけを与えるものとして、近年その重要性が認められるようになってきた。

木材の縦引張破壊時の亀裂の挙動に関してはごく最近に至るまでほとんど調べられなかった。その理由としては、破壊までの変形量が小さくかつ破壊が瞬間的に生じることと、破壊先端は凹凸が激しくしかも壊れやすいためその直接可視化が困難であったことの2点を挙げることができる。これらのうち、とくに後者については走査電子顕微鏡（scanning electron microscope 以下SEMと言略記）の登場によりほとんど問題とならなくなった。何故ならばSEMは、光学顕微鏡（以下光顕と言略記）レベ

(2)

ルから透過電子顕微鏡 (transmission electron microscope 以下TEMと略記) レベルの観察が連続的にでき、しかも焦点深度が極めて深く、試料もバルクのままで見ることができると従来の観察機器では持ち得なかった種々の特性を有しているからである。SEMを木材の縦引張破壊部の観察に適用したのはIFJU (1964) および佐伯ら (1972) である。しかしながら、これらの研究は木材細胞壁の破壊形態をフラクトグラフィー的に解釈するまでには至らなかった。これはフラクトグラフィー自体の学問的性格にも一因がある。すなわちフラクトグラフィーが材料の組織学的、物性論的、力学的学問分野の境界領域に属する学際的 (interdisciplinary) な性格を有する以上、木材細胞壁や木材組織の破壊現象をフラクトグラフィー的にアプローチする場合には、これまでに集積されてきた木材の微視的ならびに巨視的な組織構造や力学的諸性質に関する知見を整理統合し、総合的な見地から検討することが必要である。

このような観点から、本論文の目的は木材 (とくに針葉樹材) を構成する細胞壁、すなわち細胞間層からの拘束の影響をうけていない単一な状態の仮道管 (以下これを単一仮道管と称する) の細胞壁 (single wall, 以下単一細胞壁と称する) と組織中に在って細胞間層をはさんで相接する1対の細胞壁 (double wall, 以下重複細胞壁と称する) の縦引張破壊挙動をフラクトグラフィー的に解明することである。

本論文の構成とその概要を示せば以下のとおりである。

第1章では針葉樹材の単一仮道管壁の縦引張破壊について述べる。まずSEMレベルで単一仮道管の破壊過程を直接可視化する方法を検討し、この方法でもって破壊の開始部位ならびに亀裂の伝播過程を明らかにする。つぎに単一仮道管壁の破壊先端をSEMレベルで詳細に観察する方法を確立することにより、仮道管壁の破壊形態をフラクトグラフィー的に解釈するとともに破壊形態に関与するいくつかの因子 (化学組成, ミクロフィブリル傾角, 水分) との関連性を明らかにする。

第2章では針葉樹材の切片における仮道管壁の縦引張破壊について述べる。まず光顕レベルで切片の破壊過程を直接可視化する方法を検討し、この方法でもって切片中の亀裂の挙動を明らかにする。さらに破壊先端の光顕ならびにSEM観察より、亀裂の伝播と破壊形態との関連性を明らかにする。

第3章では仮道管壁の縦引張破壊とかかわりの深い壁孔での破壊と壁孔構造との関連性について述べる。とくにこれまで研究の少なかった分野壁孔 (放射柔細胞と仮道管相互間の壁孔ということ以下R-T壁孔と略記) の壁孔縁の構造を明らかにするとともに、仮道管相互間の有縁壁孔 (以下T-T壁孔と略記) の構造とも比較しながら、これら両壁孔の破壊の相違を構造学的立場から検討する。

第1章 針葉樹材の単一仮道管壁の縦引張破壊

1.1 概 説

木材の縦引張破壊現象は木材が本来有している微視的構造（マイクロフィブリル構造や壁層構造）から巨視的構造（構成要素の配列や年輪構造）に至る種々の構造レベルでの破壊現象が重畳して発現したものと考えられるので、いきなりバルク状の木材の縦引張破壊現象を解明するには相当の困難が予想される。そこでまず個々の構造レベルでの破壊現象を明らかにし、その後各構造レベル間の相互関係について明らかにするのが至当と考えた。

ところで木材は種々の形態および機能を異にする細胞の集合体である。とくに樹体保持の役割を担っていた仮道管と木部繊維は木材の強度的性質に直接関与する構成要素であり、なかでも仮道管は針葉樹材の90～97%を占める構成要素であり、しかも針葉樹材が構造用部材として広く利用されていることを思うとき、針葉樹材仮道管の縦引張破壊挙動を究明することは重要なことと考える。このような観点から、ここでは単一仮道管壁の縦引張破壊を調べることにした。

単一仮道管壁の縦引張破壊を研究するための手法は大別して2つある。1つはMARK (1967)らによって始められた細胞壁力学 (cell wall mechanics) 的手法であり、他の1つは近年急速に発展しつつある破壊力学的手法である。後者の手法にはさらに亀裂近傍の応力分布やエネルギーバランスを工学的手法によって調べる方法 (線形破壊力学) (岡村 1976) とフラクトグラフィー (北川・小寺沢 1977) の2つがある。これらの方法のうちフラクトグラフィー的な手法によって細胞壁の縦引張破壊挙動を調べた研究は少ない。そこで本章では単一仮道管壁の縦引張破壊機構をフラクトグラフィー的手法を用いて明らかにすることが主たる目的である。

この目的を達成するためには予備知識として仮道管壁の構造および細胞壁力学、さらに細胞壁と相似的な構造をした複合材料 (composite material) の破壊機構に関する既往の研究成果について理解しておくことが必要である。

<仮道管壁の構造に関する研究>

仮道管壁の構造に関するこれまでの研究を大別するとマイクロフィブリルの構造に関する超微細構造レベルのものと壁層構造に関する微細構造レベルのもの2つになる。

マイクロフィブリルの構造については、まずその大きさ (とくに幅) と断面形状に関して多くの関心が払われてきた (RANBY・RIBI 1950, FREY-WYSSLING 1954, 1976, MÜHLETHALER 1960, FENGEL 1970, 後藤ら 1972, 1975, HANNA・CÔTÉ 1974, PRESTON 1974, GOTO 1976)。ところでマイクロフィブリルを細胞壁中の骨格物質 (framework substance)、すなわち強度の担い手と考えて細胞壁の縦引張破壊を考察する場合には、マイクロフィブリルの長さ方向の構造とかマイクロフィブリルとそれ以外の構成成分 (リグニンとヘミセルロース) との関係に関する知見が必要である。X線

(4)

回折法を用いた初期の研究では、長さ方向に50~70nmの周期構造があり、そのつなぎ目に当る部分は結晶学的にみてセルロース分子の配列の乱れた領域と考えられていた。MÜHLETHALAR (1960)は負染色法を用いて調べたところ、長さ方向に沿って染め分けられる部分のないことや直線的に折れ曲がったところのあることから、マイクロフィブリルは長さ方向にほぼ一様に高い結晶性を有し、かつそのところどころに分子の末端(chain end)や乱れたところ(dislocation)が存在すると推定している。マイクロフィブリル内部の結晶欠陥部については最近電顕による暗視野観察法によっても確認されている(PETERLIN・INGRAM 1970, LAZARO・CHIAVERINA 1973)。またFENGEL(1970)は細胞壁を物理・化学的に解体処理してTEM観察したところ30nmの周期構造を見出ししている。他方、マイクロフィブリルと他の構成成分との関係については銅イオンを吸着させたマイクロフィブリルの電子線回折法(PRESTON 1965)とか酸加水分解処理前後のマイクロフィブリル幅の変化(後藤ら 1972)から、マイクロフィブリルはセルロースと分離しがたいヘミセルロースでそのまわりが取り巻かれていると考えられている。近年ALBERSCHEIM(1975)はシカモアアカエデ(*Acer pseudoplatanus*)の培養細胞(一次壁)を解体後、酵素処理してこれの糖組成を厳密に分析し、さらにこれらの糖類の結合様式を調べた結果、セルロースマイクロフィブリルはヘミセルロースを介してペクチン多糖類と結合しており、しかも水素結合はマイクロフィブリルとヘミセルロースの間でのみ認められることを明らかにしている。二次壁の場合はこれにさらにリグニンが加わるが、マイクロフィブリルとヘミセルロースの結合様式は一次壁のそれと同じであろうと推定されている(PAGE 1976)。

仮道管壁の壁層構造については古くから多数の研究があり、その構造はほぼ解明されている。仮道管壁はその発達の順序に従って一次壁と二次壁に分けることができ、二次壁はさらに堆積の早いものから順に二次壁外層(以下S₁と略記)、二次壁中層(以下S₂と略記)、それに二次壁内層(以下S₃と略記)の3つの壁層に区分でき、最内層にしばしば層が存在するものもある。一次壁は形成層から分裂した直後の細胞壁で、細胞の形状の定まらない段階であるため、その構造はマイクロフィブリルの配列と関連させて興味深いものであるが(ROELOFSEN 1959, FREY-WYSSLING 1976)、強度的にはほとんど無視しても差しつかえない壁層と考えられる。これに対して二次壁は仮道管壁中で量的にも多く、そのマイクロフィブリルの配列にも特徴があるため、仮道管壁の破壊を考える場合、その壁層構造には十分注意を払う必要がある。S₁はマイクロフィブリルが繊維軸に対して大きい角度で配列した横巻き(flat helix)構造をしており、しかもマイクロフィブリル配列が互いに逆向きをしたいくつかの薄層(ラメラ)から成るとされている(WARDROP・HARADA 1965, DUNNING 1968, 1969)。今村ら(1972b)は分化中の仮道管壁の内表面のレプリカ観察から、S₁の交差構造はヘリックスを異にするマイクロラメラ(マイクロフィブリル1本分の厚さのラメラ)の堆積によって形成されるとしている。S₂はマイクロフィブリルが繊維軸に小さい角度で配列した急ならせん巻き(steepest helix)構造をしたZ-ヘリックスをしており、そのマイクロフィブリルはリグニンやヘミセルロースで密に充填されている。またS₂のラメラ構造の存在の有無については研究者によって意見が分れており、WARDROP(1964), DUNNING(1969), KERRとGORING(1975), RUELら(1978)らは存在を主張し、HEYN(1969)は存

在を否定している。S₃は量的にも少なく、そのマイクロフィブリルは横巻き構造をしており、しかもラメラ構造をしているとされている(WARDROP・HARADA 1965, DUNNING 1969)。ところでS₁とS₂、S₂とS₃の間ではマイクロフィブリルが急激に走向方向を変えるのではなく、逐次方向を変えながら次第に次の壁層が堆積することを示すような移行層(veering layer)の存在が認められている(原田ら 1958)。しかしこれらの層をS₁やS₂やS₃の各壁層と区別して独立の壁層として扱うのか(原田ら 1958)、それともS₁やS₂に帰属するラメラとして取り扱う(DUNNING 1969, 今村ら 1972_b)のかは現在でも定説を得ていない。このような仮道管壁の壁層構造に関する電頭的知見をもとに種々の細胞壁模型が提案されているが(原田ら 1958, WARDROP・BLAND 1959, FORGACS 1963, WARDROP・HARADA

1965, DUNNING 1968), 図1にはDUNNINGの提案した模型を示す。

以上に述べた仮道管壁の構造はすべて壁孔を除いた細胞壁部分(unpitted wall)についてである。しかし実際の単一仮道管の縦引張破壊を調べるうえでは壁孔を無視することはできない。とくにこれらの部分の構造は破壊と密接な関係があると考えられるため、この点については章を改めて述べることにする。

<細胞壁の力学的研究>

細胞壁の強度もしくは壁内部の応力分布を予め知ることができれば、細胞壁の破壊をある程度予測することができる。

COWDREYとPRESTON(1965)はS₂のマイクロフィブリルを円筒巻きばね(helical spring model)とみなして仮道管壁の強度的性質を調べた結果、S₂中のマイクロフィブリルは縦引張応力のもとでは互いに強固に膠着した(これをlarge aggregateと称している)“フィブリル”として挙動すると推定している。ここでいうフィブリルはマイクロフィブリルが10⁶本程度凝集したものをさし、これはちょうどS₂の断面積のほぼ半分に相当し、S₂の破壊に際してはこれらのフィブリル間に迂りが生じるのであろうと彼らは指摘している。この概念を正常な単一仮道管の縦引張破壊に適用するには、フィブリルという構造単位の実在性ならびにマイクロフィブリル間の充填物質の力学的評価がなされていないことなどからかなり問題はあがるが、圧縮あて材仮道管の破壊の解釈にはある程度適用できるかもしれない。MARK(1965, 1967, 1972)は仮道管壁をセルロースマイクロフィブリルの骨格物質とリゲニン・ヘミセルロースの充填物質(matrix substance)とから成る2相系均質直交異方性薄板(壁層に相当)

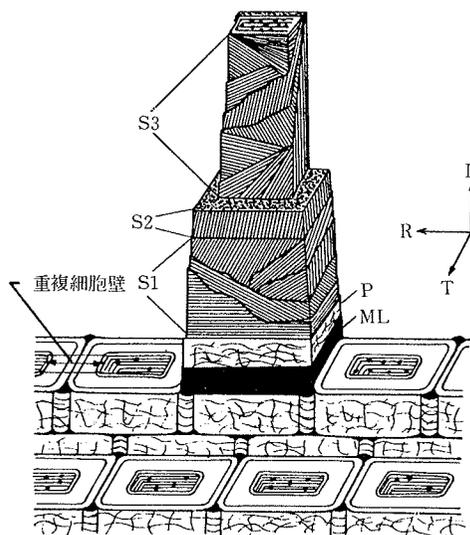


図1. ロングリーフパイン (*Pinus palustris*) の晩材仮道管壁の構造モデル (DUNNING 1968)

(6)

の連続積層体と見なして仮道管の各壁層内部に発生する応力分布を弾性定数などの実測値をもとに計算した結果、最大せん断応力は S_1 内部に生じ、しかもこの値はミセルの理論せん断応力値を上回ることで、さらに S_1 以外の各壁層内部に発生する応力はすべてそれらの理論値を下回ることを明らかにした。このことから、彼は単一仮道管が縦引張破壊するときは S_1 がせん断応力によってまず破壊するであろうと主張している。 S_1 につづく破壊については詳しく述べられていないが、 S_1 の破壊によって壁内部では応力の再分散が図られ、未破壊部の S_2 や S_3 は別の機構によって破壊するのであろうと述べている。細胞壁内部の応力分布に関しては、MARKのこの研究を契機としてその後多数の成果が報告されている(SCHNIEWIND 1972, TANG 1972, 1973, BARRETT・SCHNIEWIND 1973)。

<複合材料の破壊に関する研究>

仮道管壁は2相系複合材料の一種と見なすことができ、その構造は繊維強化複合材料(以下FRCMと略記)と基本的に同じである。ここでは仮道管壁中で最厚層の S_2 が縦引張りされる場合と対比させる意味で、FRCMのうち最も構造の単純な一方向強化材を一軸引張りした場合の破壊について述べる。FRCMの破壊に関する研究を大別すると、骨格物質である繊維(fiber)とこれを充填している母材(matrix)との相互作用に関する研究(微視的挙動)と板状もしくは円筒状をしたFRCMそのものの外力に対する挙動に関する研究(巨視的挙動)の2つがある。

繊維と母材の相互作用とは基本的には外力によって生じる繊維・母材界面のせん断応力(もしくは摩擦力)とこれに対応して繊維内部の軸方向に発生する応力(軸応力)との釣り合いであり、この釣り合いが崩れると繊維もしくは母材内部で破壊が生じる。この問題についてはCox(1952)によって始めて取り組まれて以来、複合材料の発展にもなって多数の研究がなされてきた(OUTWATER 1956, COHEN・ROMUALDI 1967, CARRARA・Mc GARRY 1968, 林 1969, ROSEN・ZWEBEN 1972, OWEN 1972, CHEN 1973)。ところでKELLYとTYSON(1965)は途中で切れ目のある繊維(不連続繊維)もしくは短繊維が引張破壊する際に、破断面から一定の範囲内に末端をもつ繊維は切断することなく母材から抜け出る(これをpull-out機構と呼んでいる)ことに着目し、このような機構はFRCMの破壊の際に亀裂の先端で繊維を引き抜くために余分な仕事をしなければならないことを意味しており、これがFRCMの破壊靱性を高めている一因であろうと指摘している。また最近では不連続繊維の末端部とか繊維と母材の界面における亀裂の微視的挙動についても次第に明らかにされつつある(福田・河田 1974_b, FOWLKES 1974)。

一方向強化材の巨視的破壊挙動については、引張方向と繊維方向のなす角度(θ)によって破壊基準が決定される。すなわち、 θ の小さいときは繊維自体の切断による破壊が考えられ、 θ が少し大きくなると繊維と母材間のせん断による破壊に変わり、さらに θ が大きくなると繊維と母材の界面もしくは母材中で繊維に直角方向の破壊が生じるようになる。また θ がかなり大きい場合には繊維軸のまわりに生じるせん断力による破壊も考えられる。これらの関係は円筒状のFRCM、すなわち一方向ヘリカル巻きフィラメントワインディング材(FW材)においてもほぼ当てはまることが認められている(山脇・植村 1970_{a, b})。

以上、単一仮道管壁の縦引張破壊を論議するうえで参考となる既往の研究成果について述べた。ところが縦引張破壊時の単一仮道管壁中の亀裂の挙動に関する直接的でしかも再現性のある知見はこれまで報告されていない。したがって、ここまではまず単一仮道管の破壊過程の直接可視化を試み、次に壁破断面の形態を詳細に調べることにより、単一仮道管壁中における亀裂の挙動を明らかにするとともに、壁中での最厚層 S_2 の破壊様式を推定し、 S_2 の破壊形態に関与する2, 3の因子の影響について明らかにしようとして行った研究成果について述べる(古川 1973, 1978_a, FURUKAWAら 1973, 1974_a, 古川ら 1974_b, 1975)。

1.2 単一仮道管の破壊過程

1.2.1 はじめに

単一仮道管を縦引張りしたときの強度についてはVAN DEN AKKERら(1958)の報告を契機として種々の因子との関連性、例えば樹種や早・晩材による差違(JAYNE 1959, 1960)、化学組成とくにヘミセルロースの影響(LEOPOLD・McINTOSH 1961, SPIEGELBERG 1966)、測定方法(JAYNE 1960, HARTLERら 1963)やパルプ化法による相違(LEOPOLD 1966, 臼田ら 1966)、 S_2 のミクロフィブリル傾角の影響(TAMOLANGら 1967, PAGEら 1972)、含水率の影響(KERSAVAGE 1973)などについて多数の報告をみるが、破壊時の挙動に関するものは2, 3の報告をみるにすぎない(臼田ら 1966, PAGEら 1971, 1972)。これにはいくつかの原因が指摘されている。第1は試料が小さくその取り扱いが困難なこと、第2は試料の変形が微少でそのコントロールが困難なこと、第3は破壊が瞬時に起こることなどである。したがって、単一仮道管の破壊過程を調べるためには、まずこれらの技術的障害を克服しなければならない。そこで本研究ではこのような試料の特性に適合し、かつ試料中における亀裂の挙動を直接可視化できるような研究手法を確立するのが第1の目的である。

ところで亀裂が材料中を伝播するときの亀裂の先端には基本的に3つの応力状態(これを亀裂の変形様式もしくは破壊モードと呼んでいる)が存在しうる(横堀 1974)。すなわち図2によって理解できるように、モードⅠは開口型とも呼ばれ、平面応力状態、平面ひずみ状態のいずれにおいても応力は亀裂の進行面に垂直に作用している。モードⅡは面内せん断型とも呼ばれ、平面応力状態、平面ひずみ状態のいずれにおいても応力は亀裂先端に垂直にしかも亀裂の進行面に平行に作用している。モードⅢは面外せん断型とも呼ばれ、応力が亀裂先端べりに平行に作用している。実際の材料の破壊ではこれらの破壊モードが亀裂の先端で単独にもしくは複合して作用していると考えられる。このような破壊モー

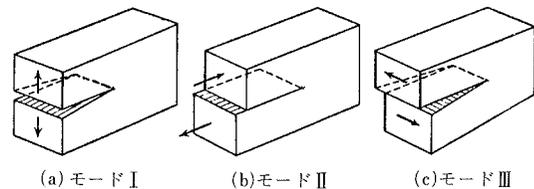


図2. 亀裂の変形様式(破壊モード)(横堀 1974)

(8)

ドは伝播中の亀裂の先端を注意深く観察することができれば、ある程度識別できるのではないかと思われる。そこで本研究では単一仮道管壁中を伝播している亀裂を直接観察することにより、亀裂先端に発生している破壊モードを推定し、さらに破壊の開始から完了までの間における破壊モードの変化を把握することが第2の目的である。

1.2.2 試料の調製と動的観察法

1.2.2.1 試料の調製

1) 供試材

材料としてはスギ (*Cryptomeria japonica* D. DON) の正常木 (樹令 67 年, 鳥取県産) と雪害木 (樹令 25 年, 鳥取県産) を用いた。雪害木中には多量の圧縮あて材が含まれていた。

2) 解織用小片の作製

図3に示すように、胸高部位の成熟材部から二方まさ木取の小ブロックを作製し、これをさらに厚さ 1~2 mm のまさ目の薄片に分割し、この薄片の所定の年輪部 (ここでは第 49 年輪部) から実体顕微鏡のもとで早材と晩材の解織用小片を切り出す。雪害木のあて材部からも同様に小片を切り出す。これらの小片は解織に先だって脱脂処理を施した。

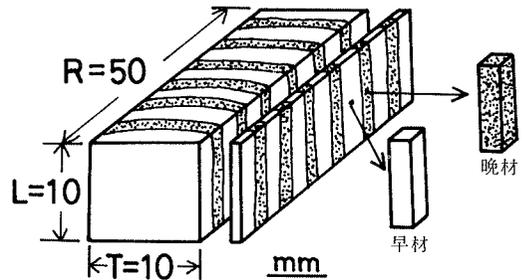


図3. 解織用小片の作製

3) 解織

単一仮道管を小片から単離する方法 (解織法, maceration method) はいくつかあるが、代表的な方法としては亜塩素酸塩法 (JAYME 1942, WISE ら 1946), 塩素-エタノール法 (VAN BECKUM · RITTER 1937), 過酢酸法 (POLJAK 1948) の3つがある。これらの方法のうち、薬液の調整が簡単で、しかもホロセルロースをほとんど劣化することなくリグニンをほぼ完全 (残存率 1%以下) に除去できる WISE らの方法を少し改良した JAYNE (1959) や THOMPSON と KAUSTINEN (1964) の方法が解織法としてよく用いられている。したがってここでも、早材と晩材の小片の解織にはこの方法を用いた。ただし処理回数は晩材小片で 3 回、早材小片で 2 回とした。

ところで小片を処理しただけでは仮道管は依然として互いにかなり強く結合されたままの状態にあるので、これを単離するための方法としてボールミルを用いる方法が提案されている (JENTZEN 1964_a) が、これは仮道管に折損の入るおそれがあるため、ここでは処理した小片を実体顕微鏡で見ながら、先の鋭いピンセットを用いて小片の端から、注意深く仮道管を 1 本ずつ引き抜く方法を用いた (FURUKAWA ら 1973, 1974_a)。

また圧縮あて材単一仮道管は、処理後の小片から仮道管を単離するのにほとんど外力を必要としな

い解織法である希釈した JEFFREY 氏液を使用する方法を用いた (古川 1973)。

4) 乾 燥

脱リグニン処理した単一仮道管を飽水状態からそのまま大気中で乾燥すると、振れや落ち込みやしななど処理前にはみられない様々な変形が生じる。ところが単一仮道管の強度を測定する研究においてはこの点に関してほとんど注意が払われていない。ここではできる限り木材中での形状を保持した単一仮道管を調製するため、乾燥には特に注意を払った。乾燥にともなうこのような変形を防ぐには表面張力の影響の少ない乾燥法を用いることが必要であり、このための方法としては、溶媒置換乾燥法 (MERCHANT 1957, THOMAS・NICHOLAS 1966), 凍結乾燥法, 臨界点乾燥法 (ANDERSON 1951) などがある。溶媒置換乾燥法は試料中の水を逐次表面張力の小さな溶媒に置き換えた後、最終溶媒を揮散させる方法で、操作は容易であるが十分な効果は期待できない。臨界点乾燥法は試料中の水を常温高圧下で液化二酸化炭素に置換した後、二酸化炭素を臨界点 (このときの表面張力はほぼゼロである) で揮散させる方法で、乾燥法としては理想的であるが高価な装置を必要とする。したがってここでは比較的簡単な装置 (古川 1973) でかなりの効果が期待できる凍結乾燥法を用いた。この方法の要点は、試料を液体ちっ素中で急速に凍結した後、試料を真空系の内部に置き、試料の温度を徐々にあげながら試料中の水を昇華させることと、氷の昇華している間 (すなわち真空度の低下している間) は試料の温度を必ず氷点以下に保つことである。氷の昇華が終り真空度が再び元の状態に回復すると試料の温度を室温付近にまであげ、試料を真空系から取り出す。乾燥試料は吸湿しやすいので取り扱いには十分気をつける必要がある。

5) 保 持 法

単一仮道管のような小さな試料を正確に引張るためには試料の両端をどのようにして保持するかが問題となるが、これについてはパルプ単繊維の強度測定のためにいくつかの方法が考案されている。これらを大別すると試料の両端を特殊なチャックで機械的に直接把む方法 (以下直接法と略記, 例えば JAYNE 1959 の方法) と、試料の両端を穴のあいた保持体 (tab) に接着剤で固定した後、保持体を装置のチャック間に取り付ける方法 (以下間接法と略記) の 2 つがある。作業性の点からは間接法の方が優れており (HARTLER ら 1963), ここでも間接法を用いることとした。保持体の材料としては加工が容易で周囲の環境による伸縮が少なくしかも電子線に対して安定で電気伝導性の良いアルミニウムの薄板を用いることにした。また接着剤としては接着力が優れていて、硬化時に収縮が少なくしかも適当な粘度を有するエポキシ樹脂系接着剤 (商品名アラルダイト) を用いることにした。

これらを用いて単一仮道管を保持体に固定したところを図 4 に示す。試料を固定した保持体は引張試験装置 (後述) に取り付けした後、試料の両側の保持体に切り込みをつけた部分をかみそりで切り離す。

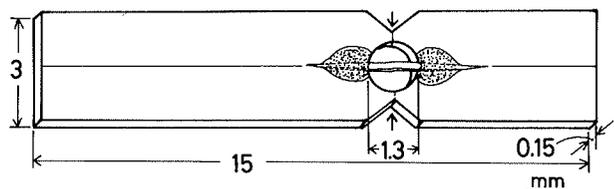


図 4. 動的観察用試料プレート

6) 蒸着

単一仮道管のような非導電性試料をSEM観察する場合には試料の表面に適当な導電性を付与することが必要である。このための方法としては、試料表面を蒸着金属によって被覆する方法と帯電防止剤を吹き付ける方法(SIKORSKIら 1968, MCKEE・BEATTIE 1970)とがあるが、後者の方法は操作は容易であるが解像度が劣る。したがってここでは前者によることとし、蒸着金属として導電性がよく、二次電子放出能の大きい金を用い、これを10~35nm蒸着することにした。ただしこの場合には金が試料の自由な変形を拘束することなくしかもこの変形を完全に追従するかどうかという問題がある。この点について金の蒸着膜と仮道管壁のそれぞれの断面積と弾性定数から、蒸着膜の単一仮道管に及ぼす力学的影響を試算した結果、これはほぼ無視できることが分った。また、金蒸着膜の厚さが8~14nmの場合は300%以上の試料の可逆の変形にも耐えることが知られており(田川・森 1971)、単一仮道管の変形に対する追従性の点でも問題はないと考えられる。

1.2.2.2 動的観察法

試料に加えられた刺激に対応する微視的ならびに巨視的応答の経時的な変化を連続的に可視化する方法をここでは動的観察法(dynamic observation method)と呼ぶことにする。動的観察法を単一仮道管の破壊過程に適用することにより、亀裂の発生部位ならびに壁中における亀裂の挙動を直接見ることができる。しかしこの場合次の3つの点を解決しておかねばならない。すなわち、第1は単一仮道管のままでも微細構造レベルで観察することができる観察機器が必要なこと、第2はそのような観察機器に装着できしかもよく制御された状態のもとで単一仮道管を破壊できるような引張試験装置が必要なこと、第3は観察した動的現象をいつでも記録・再生できる装置の必要なことの3点である。第1点と第3点についてはSEMおよびKIMOTOら(1969)の開発したテレビ走査装置、それにビデオテープレコーダー(VTR)を用いることによってほとんど問題とならなくなった。ところが第2点に関しては該当する装置がこれまでになく、新しく考案しなければならなかった(FURUKAWAら 1974a)。したがってここでは考案した装置についてまず述べ、次にこの装置をSEMに取り付けて観察する方法について述べる。

1) 引張試験装置

テレビ走査装置とVTRが市販されるようになり、1970年以降急速にSEMを用いた動的観察のための試験装置が考案されるようになった(CLARKら 1970, MCKEE・BEATTIE 1970, CROSS・SANDS 1971, 田川・森 1971, McMILLIN 1974a, b)。本研究のために考案した引張試験装置の特徴は次のとおりである(FURUKAWAら 1974a)。(1)装置の大きさはSEM(JSM-U3, 日本電子製)のゴニオステージ上で使用できる大きさとした(35(幅)×37(奥行)×38(高さ)mm)。(2)装置は観察中にたえず電子線にさらされるため電気伝導性がよく、しかも磁性を帯びたり帯電したりすることのない材質(銅, 真ちゅうまたはアルミニウム)を用いた。(3)単一仮道管の破壊はずみが気乾状態で2~4%(JAYNE 1960)であることを考えると、SEM鏡体中は高真空であるから

試料はほぼ全乾状態となり、破壊ひずみはさらに小さくなると考えられる。したがってクロスヘッド（移動端）の動きは十分小さくかつ滑らかでなければならない。このため本装置の移動端の動きは固定端との間に張った金属線（ステンレス線）の熱膨脹によって制御する（井村 1970）ことにした。この方式では金属線に流す電圧を変えることによって $1\mu\text{m}/\text{mm}$ 以下の超低速引張りも可能である。(4) 単一仮道管の引張破壊の際の異常の有無をチェックするとともに、破壊の開始時期を予測するために試料の荷重と変位量を常時検出できるようにした。本装置の検出感度は荷重で約 0.5gr. 、変位置で約 $0.5\mu\text{m}$ で、最大荷重は約 500gr. 、最大変位量は約 $200\mu\text{m}$ である。なお、本装置によって検出された荷重および変位量は単一仮道管の力学的性質を検討するうえで興味深いものであるが、本論文では割愛することにした。(5) 試料保持体の着脱を容易に行なえるようにした。すなわち、保持体は移動端および固定端に瞬間接着剤（シアノアクリレート樹脂系接着剤の一種で商品名アロンアルファ）で接着し、取りはずす時には樹脂をアセトンで溶脱する。(6) 本装置全体の移動や傾斜、および荷重や変位量の測定はすべて鏡体の外から操作できるようにした。(7) 本装置の作動中に金属線から発生する磁界や熱の影響を遮断するために、金属線のまわりをアルミニウム板で遮へいした。

2) 観察、測定および記録

観察と記録にはTV走査装置と市販のVTRを用いた。またVTR再生画像からのこま撮りはブラウン管上から直接市販のカメラで撮影した。撮影の際にシャッター速度を $\frac{1}{60}$ 秒より遅くすると、フィルムの1こまに再生画像の2こまが同時に記録されることがある。観察時の加速電圧は10KVを用いた。

ところでこの方式の観察では；(1)観測しうる速度に限界があること、(2)通常の二次電子像の観察より解像度が劣ること、(3)チャージアップ（charge-up）が発生すること、(4)電子線による試料の損傷（beam damage）が生じやすいなどの問題がある。(1)については1画像の走査速度が $\frac{1}{60}$ 秒であるため、これより速い動きを追跡することが不可能である。また(2)、(3)および(4)については試料面上を走査する電子ビームの走査速度が通常のSEM観察に比べてかなり大きく、画面上で必要なコントラストを得るためにビーム電流を強くせざるを得ないことによって生じる問題点である。しかし、解像度も数千倍までなら問題とならず、また破壊開始部に生じるわずかなチャージアップは逆に破壊開始部をいち早く見つけ出す手掛りとなるが多かった。また電子線による損傷の有無については試料の切断荷重の値ならびに破壊後の破面を詳しく調べることによってチェックすることができた（FURUKAWAら 1974_a）。

試料の荷重および変位量はひずみゲージと動ひずみ測定器（DS6/R Y型、新興通信製）により測定し、電磁オシログラフ（RMV-33 UC型ラピコーダ、共和電業製）に記録した（渡辺 1968）。ちなみに動的観察に供したスギの晩材単一仮道管の切断荷重は28～38gr.であり、この値は同じ部位から採取し同じ処理を施したスギの晩材単一仮道管の気乾状態での平均切断荷重27.0gr.（試験本数70本の平均値、古川ら 1975）と比べて劣るものではなかった。ところが観察途中で電子線により損傷を受けたスギの晩材単一仮道管の切断荷重は14gr.となり、著しく低い値を示した（FURU

1.2.3 早材単一仮道管の破壊過程

まず観察に供した試料の外観について述べ、つぎに典型的な破壊過程(古川ら 1975)について述べる。

写真1は観察に供したスギの早材単一仮道管の外観を示す。放射組織との交差域(分野)は放射柔細胞の形状にならなくてくびれており、そこにはR-T壁孔が存在する。R-T壁孔には壁孔壁が破損することなく付着していることから考えて、仮道管はほぼ細胞間層のところで分離されたものと判定できる。したがって供試仮道管壁の壁層構成はほぼ元のままの状態にあるものと見なせるであろう。さらに、試料の外形も損われておらず表面にしわなども少ないことから、試料作製時における人工産物(artefact)はほとんどなかったものと思われる。動的観察では試料がスパン全長にわたってこのような状態を保持しているもののみについて行った。

写真2はスギの早材単一仮道管の典型的な破壊過程をVTR再生画像からこま撮りしたものである。写真2-①は破壊開始直前の仮道管の外観、とくに放射組織との交差域周辺を示す。仮道管の接線壁が内こうに向って落ち込んでいる(矢印)。これはPAGEら(1971)が指摘しているように引張りにともなうbuckling現象であろうと考えられる。PAGEらは単一仮道管を一方向らせん巻きの円筒とみなし、これが引張られるにしたがって仮道管は繊維軸のまわりに捩れを生じ、遂にはらせん巻きに沿ってbucklingを生じるという考え方を提案している。bucklingの発生を支配する因子として彼らは細胞壁の弾性定数、らせん角(とくに S_2 のマイクロフィブリル傾角)および厚さを挙げている。この考え方にしたがえば、早材単一仮道管は晩材のそれに比べて S_2 のマイクロフィブリル傾角が大きく、細胞壁も薄く、仮道管の直径も大きいなどbucklingの生じやすい試料であると言えよう。

また、放射組織との交差域の外力による変形の有無はこの写真では判定できなかった。

写真2-②は破壊が開始した直後、亀裂の進展が一旦停止したときの破壊部を示している。早材単一仮道管の破壊のここまでの段階を破壊の第1段階(first stage of fracture)と呼ぶことにする。この段階では3つの特徴が認められた。すなわち、(1)亀裂は放射組織との交差域の端に位置するR-T壁孔に生じること、(2)発生した亀裂は瞬間的に分野を横切って進み、この場合分野の細胞壁は繊維軸に対してほぼ直角方向に破断されること、および(3)分野を横切って進んだ亀裂は一旦停止し、このとき破断部は横方向に互いにずれていることである。

早材単一仮道管の縦引張破壊において、破壊はまず放射組織との交差域の端に位置する2つのR-T壁孔をつなぐようにして生じる(破壊の開始)。これはこの部分(分野域)の細胞壁がこの部分以外の細胞壁と比べてなんらかの構造的異性をもつことを示唆するものであろう。とくにこの場合問題となるのはR-T壁孔の構造であろう。R-T壁孔の構造のうち壁孔壁に関してはいくらか知見が得られている(IMAMURA 1974, HARADAら 1976)が、壁孔縁に関する研究はほとんどない。したがって、R-T壁孔の壁孔縁の構造を調べることは、構造学的見地からだけでなく、仮道管壁に

おける破壊の開始部位として破壊学的見地からも重要かつ興味深いことと言えよう。しかしながら本節では R-T 壁孔が破壊開始点となることを強調しておくにとどめ、その構造学的、破壊学的検討は第 3 章で行うことにする。一方、分野での破壊発生頻度については動的観察からだけでは十分な結論が下せない。というのは、動的観察では 1 本の仮道管を試験するのにその準備から観察までに要する時間が長く、被検試料数が少なくならざるを得ないからである。これを補うためには次節 (1.3) で述べる破壊形態の観察結果と突き合わせて調べる必要がある。

早材単一仮道管の場合、破壊の第 1 段階における亀裂は瞬間的に伝播するためその過程を追跡することはできなかった。またこの場合の細胞壁の破壊形状は短いとげが並んだ鋸歯状を呈し、全体的には繊維軸に対してほぼ直角である。このことは壁中(とくに S_2 中)を亀裂はマイクロフィブリル間の短い裂けとマイクロフィブリルの切断を交互に繰り返しながら伝播したことを示すとともに、破壊の第 1 段階ではマイクロフィブリルの切断(このような破壊を以下切断破壊(cross fracture)と称する)が優先的に生じていたことを示唆するものであろう。

亀裂発生直後にみられる破断部のずれは、破壊直前の壁中、とくに S_2 中には繊維軸のまわりに S_2 のマイクロフィブリル間を引き離すような方向(時計まわり方向)のせん断応力が作用していたことを示唆するものであろう。このようなせん断応力が単一仮道管の縦引張りの際に S_2 中に発生することは、細胞壁の力学的研究からも明らかにされている(SCHNIEWIND 1972)。

すなわち、単一仮道管を縦引張りすると S_2 にはこのようなせん断応力が生じ、このため仮道管は繊維軸のまわりに沿って振れようとし、このような状態で S_2 に亀裂が入れば亀裂によって解放されたせん断応力に相当する変形分がずれとして生ずるものと推定される。Mc MILLIN (1974 a) は単一仮道管を繊維軸のまわりに時計まわり方向に振ることによって生じる破壊を SEM で動的に観察した結果、3つの破壊タイプを見出ししているが、そのうちの1つのタイプ(これを彼は type II と称している)の破壊直後の形態がここで問題としている早材単一仮道管の第 1 段階の破壊形態と酷似しているのは興味深いことである。

破壊の第 1 段階の後、さらに引張りをつづけると一旦停止していた亀裂は再び生長し出し、遂には仮道管を 2 分する最終的な破断に至る。この段階をここでは破壊の第 2 段階(second stage of fracture)と呼ぶことにする。この段階の亀裂の挙動には 2 つの特徴が認められた。すなわち、(1) 写真 2-③にも示されているように破壊の第 1 段階に生じた亀裂(以下これを一次亀裂と呼ぶ)と離れたところに別の亀裂(矢印; 以下これを二次亀裂と呼ぶ)の発生が観察されることと、(2) 仮道管の隅(cell corner)において特異な挙動が認められることである。

ところで観察した試料のなかには、一次亀裂が破壊の第 2 段階でもそのまま発達し最終的な破断にまで達するものもあったが、多くの場合二次亀裂の発生が認められた。二次亀裂の発生位置は R-T 壁孔とは関係なく一次亀裂から離れたところに発生する。これは一次亀裂の先端に集中している応力が、その先端に接してらせん状(Z-ヘリックス)に走向する S_2 のマイクロフィブリルに伝達され、これらのマイクロフィブリルが強く引張られることにより、一次亀裂の先端とは別のところ、例えばミ

クロフィブリルが小さな曲率で配列せざるを得ない仮道管の隅などに応力が集中することによって生じるものかもしれない。また次のようにも考えられる。すなわち一次亀裂によって破断した部分の S_2 のマイクロフィブリルはその全長にわたって負荷が解除され、代わりに壁中では応力の再分散が図られ、負荷は未破壊部の S_2 が負担することになる。未破壊部の S_2 は先に破断した部分とは関係なく挙動し、未破壊部の内で最も弱いところから破壊が始まると考えればこれが二次亀裂ということになり、二次亀裂は一次亀裂と全く異なる位置から発生することも十分考えられる。しかし、二次亀裂の発生の機構については不明の部分が多く更に検討を要する。しかしいずれにしても、一次亀裂と二次亀裂の発生によって仮道管壁中に蓄積されていた応力(ひずみエネルギー)はほとんど解放され、実質的な荷重負荷能力はほぼゼロになるものと推定される。しかしながら二次亀裂の発生した段階では仮道管はまだ完全に2分されておらず一部でつながっている。このような部分の破壊の様子が写真2-④と⑤に示されている。この場合の破壊は写真からも明らかなように仮道管壁の裂けを主にした破壊が生じるのが特徴である。すなわち、一次亀裂と二次亀裂の先端同志が互いに引き合うことにより、両亀裂にはさまれた部分の S_2 中にはそのマイクロフィブリル配列方向に沿ったせん断応力が働くと考えられ、そのため亀裂は一次亀裂もしくは二次亀裂の先端から相手方の亀裂の先端に向かってマイクロフィブリル間を裂きながら拡大するものと考えられる(以下このような破壊を裂け破壊(split fracture)と称する)。ただし写真2-④、⑤では裂け破壊の途中で切断破壊も生じているため階段状の破壊形が認められるが、このような亀裂の発達によって仮道管は最終的に2分される(写真2-⑥)。

ところで早材単一仮道管の破壊の際には亀裂が仮道管の隅に沿って進行するのが観察された。この原因については現在明らかでないが、ただ単一仮道管をモデル化して扱う場合単なる円筒パイプと見なすことには問題があろう。したがって今後仮道管壁の破壊をモデル化して考えるときには、仮道管の形状とか仮道管の隅においてマイクロフィブリルの曲率が急激に変化することや各壁層の厚さが変化することなども考慮する必要がある。

次にこれらの観察結果から、各破壊段階における亀裂の変形様式(破壊モード)について考察する。

破壊の第1段階では、亀裂はまずR-T壁孔のところで繊維軸にほぼ直角方向に生じ、つづいてR-T壁孔の周囲の壁(半径壁)中およびこれに接する接線壁中の一部を繊維軸にほぼ直角方向に伝播するとともに破断部にずれを生じさせる。このことから亀裂はまずモードIによってR-T壁孔を切断破壊した後、モードIIもしくはモードIIIによって半径壁および接線壁の一部を切断破壊するものと推定される。ただしこの段階の亀裂の伝播は速く、モードIの段階とモードIIやIIIの段階とを明瞭に区別して観察することはできなかった。しかし、もしこのように破壊モードが伝播の途中で変化しているのであれば、仮道管壁破断面にはこれら変遷の跡が何んらかの形でしるされているであろう。この点については次節(1.3)で詳しく検討する。

破壊の第2段階では、一次亀裂とは別のところに二次亀裂が繊維軸に直角方向に生じ、つづいてこれらの亀裂の先端をつなぐように裂け破壊が生ずることにより仮道管は2分される。このことから二

次亀裂も一次亀裂と同様にモード I によって生じた後、モード II もしくはモード III によって仮道管壁を切断破壊した後、両亀裂の先端をつなぐようにモード II の裂け破壊が生じて仮道管は最終的に破断されるものと推定される。

以上から、スギの早材単一仮道管の破壊過程を模式的に描くと図 5 のようになる。図の(a)と(b)は破壊の第 1 段階を、(c)と(d)は破壊の第 2 段階を示す。

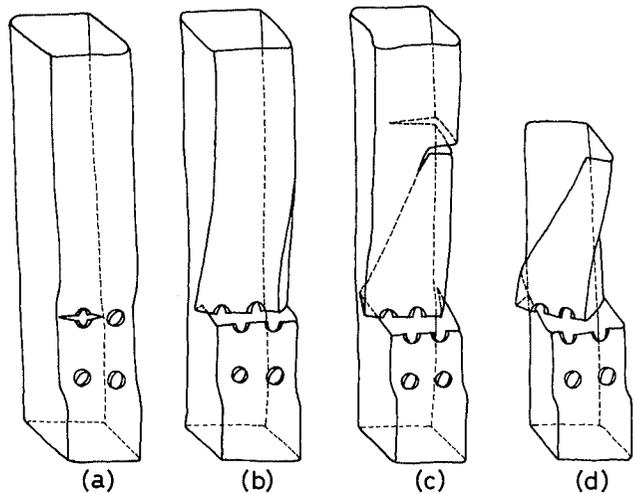


図 5. 早材単一仮道管の破壊過程

1.2.4 晩材単一仮道管の破壊過程

晩材単一仮道管の縦引張破壊のメカニズムについては細胞壁の力学的研究 (MARK 1965, 1967, 1972) によって間接的に推定されてはいるものの、その破壊過程を直接観察した例は少ない (FURUKAWA ら 1974, 古川ら 1975)。ここではまず観察に供した試料の外観について述べ、次に典型的な破壊過程について述べる。

写真 3 は供試したスギの晩材単一仮道管の外観を示す。写真 3 - ① は同一年輪内で早材部に近い晩材の、また写真 3 - ② は典型的な晩材の単一仮道管の放射組織との交差域のところを示している。これらの仮道管は、横断面形状が前者ではほぼ方形であるのに対し後者では狭い内こうを有する矩形であることと、壁が後者で著しく厚いことから区別できる。またこれらの試料も早材仮道管の場合と同様に R-T 壁孔の壁孔壁が残っていることから、試料は解繊の際に細胞間層付近で分離されたものと推定される。したがって試料の壁層構成はほぼ元の状態を保持しているものと考えられる。さらに、晩材仮道管の場合は放射組織との交差域で著しくくびれているのも特徴の 1 つである。

写真 4 と 5 はスギの同一年輪内で早材部に近い晩材単一仮道管の、また写真 6 と 7 は同じくスギの晩材単一仮道管の典型的な破壊過程または破壊のある段階を示したものである。

晩材単一仮道管では引張り荷重下における壁の buckling は認められなかった。これは S_2 のマイクロフィブリル傾角が小さく、壁も厚くしかも内こうが狭いことによるものであろう。しかし、半径壁のくびれた部分 (放射組織との交差域) は引張りによって引き伸ばされるのが観察された。写真 4 - ① は引張り開始前の放射組織との交差域を板目方向から見たところを示す。写真 4 - ② にはこの部分で破壊の開始した直後の状態 (左の仮道管) と破壊開始直前の状態 (右の仮道管) が同時に写っている

(これはVTR再生画像のちょうど2こま分が1視野に撮影されたものである)。これらの比較からくびれた部分が伸ばされることが推定される。

晩材単一仮道管の破壊過程も早材のそれと同様に2つの破壊段階をもつ。すなわち亀裂が発生し、それが S_2 を切断破壊しながら伝播する段階と、これにつづいて亀裂が S_2 を裂け破壊しながら伝播し最終的に仮道管を2分するまでの段階とであり、これらをそれぞれ破壊の第1段階、第2段階と呼ぶことにする。

破壊の第1段階では、亀裂の発生箇所ならびに亀裂の拡大の仕方において特徴が認められた。すなわち晩材単一仮道管の縦引張破壊においては亀裂はまず壁孔(R-T壁孔とT-T壁孔の両者)のところに発生する。このことは動的観察済の試料の破壊部を再度金蒸着してSEMで観察することにより一層はっきりと見ることができる。例えば写真8は写真4の、写真9は写真6の、また写真10は写真7の破壊先端をそれぞれ示している。この場合写真8と10の試料はR-T壁孔(矢印)から、また写真9の試料はT-T壁孔(矢印)から破壊が生じたことが分る。ところで壁孔に亀裂が生じる場合は写真5からも明らかなように孔口(pit aperture)の中央付近の壁孔道(pit canal)側から発生する。このことは晩材仮道管のT-T壁孔の孔口の最終形状がIMAMURA(1974)の指摘するように S_2 の堆積によって決定されているものであれば、 S_2 中に最初から亀裂が生ずることを示唆するものである。このような破壊の開始は細胞壁力学的な手法では全く予測のできなかったことである。またこのように壁孔が破壊の開始と関係していることについては壁孔縁の構造になんらかの原因があるものと考えられるが、この点については第3章で改めて検討する。また破壊の第1段階では、亀裂は繊維軸に対してほぼ垂直な面(とくに壁孔を横切る面)に生じ、そのまま拡大生長する(写真7-②, 8, 9, 10)。これは繊維軸にほぼ平行に配列している S_2 のマイクロフィブリルが互いに亘ることなく切断破壊されることを示すものであろう。さらにこの段階ではすでに破壊したところが、早材仮道管でみられたようにずれることはなかった。これは S_2 のマイクロフィブリル傾角が小さいため繊維軸のまわりに生じるせん断応力が小さいからであろう。

つづいて亀裂は壁中をしばらく伝播した後、一旦停止するかに見えその先端付近で S_2 の裂け破壊を引き起こすことがよく観察される(写真6-③, 7-②, 10)。このような亀裂の挙動の原因については、COOKとGORDON(1964)の提案した考え方によってある程度説明することができる。彼らはモードIの亀裂の先端近傍の応力分布を調べたところ、先端近傍で亀裂面に垂直なしかも剥離しやすい界面(weak interface)が存在すれば、このような界面は亀裂が到着する前に剥離する可能性のあることを指摘している。このような界面の剥離は、最初の亀裂による破壊とは別の破壊と考えられる。この剥離の発生によって、最初の亀裂の先端に集中していた応力は緩和され、亀裂の生長が鈍化するとともに、亀裂の伝播方向も変るものと考えられる。晩材仮道管壁の縦引張破壊ではマイクロフィブリルとこれを取り巻くマトリックス物質(主にヘミセルロース)との界面がここで言う剥離しやすい界面に相当するものと見なせば、晩材仮道管壁を切断破壊しながら伝播している亀裂が途中で裂け破壊を引き起こすことは十分考えられる。このように、破壊の第2段階では S_2 の裂けを主にし

た破壊に変わることが特徴である。この場合の裂け破壊は仮道管壁表面に対してほぼ垂直な面内もしくは平行な面内、さらにこれらの中間的な不規則な面内で生じる（写真10）。

次にこれらの観察結果から各破壊段階における亀裂の変形様式（破壊モード）について考察する。まず破壊はR-T壁孔もしくはT-T壁孔の壁孔縁を繊維軸にほぼ直角方向に2分するようなかたちで開始し、そのまま繊維軸を横切って進行する。このことから亀裂はまずモードIによって壁孔を切断破壊し、そのまま同じモードで伝播すると考えられる。つづく破壊は仮道管壁の裂け破壊が主になることから考えて、亀裂はモードII（もしくはモードIIIも多少含まれるかもしれない）によって壁（とくに S_2 ）中を伝播すると考えられる。ところで破壊が切断破壊から裂け破壊に変るときにはその変り目のところで横引張り（繊維軸に対して直角方向の引張り）に似たモードIの裂け破壊の生ずる可能性も考えられる。このように晩材単一仮道管の破壊過程においても、早材単一仮道管の場合と同様に破壊の開始から完了までの間には種々の破壊モードが生じていると推定され、これらの各破壊モードが壁（とくに最厚層の S_2 ）の破壊形態を特徴づけているものと考えられる。

以上から、スギの晩材単一仮道管の破壊過程を模式的に示したものが図6である。図の(a)と(b)は破壊の第1段階を、(c)は破壊の第2段階を表す。

ところでMARK (1967)は細胞壁力学的な手法によって、レッドシーダー (*Juniperus virginiana*) の同一年輪内で早材部に近い晩材単一仮道管の縦引張破壊のメカニズムを推定しているが、彼の推定結果とここに観察された事実との間には、いくつかの点において相違が認められる。まず彼は破壊の開始点を S_1 内部としているが、観察では破壊は壁孔のところに生ずる。つぎに破壊の進行について彼は S_1 が破壊した後、応力の再分散が図られ S_2 は別の破壊

機構によって破壊するであろうとしているが、観察からは S_1 だけが先に破壊してしまうということではなく、亀裂は破壊の最初の段階から S_2 内に生じ、 S_2 以外の壁層は S_2 の破壊に付随して生じるものと考えられる。さらに S_2 の破壊形態を彼はbrash type（早材仮道管壁のように脆い破壊形）とtough type（晩材仮道管壁のような強靱な破壊形）の2つに区分することを提唱しているが（MARK 1967; Fig. 11-2），むしろ S_2 の破壊形態は基本的にはマイクロフィブリルの切断破壊とマイクロフィブリル間の裂け破壊の2つに分けるべきであろう。

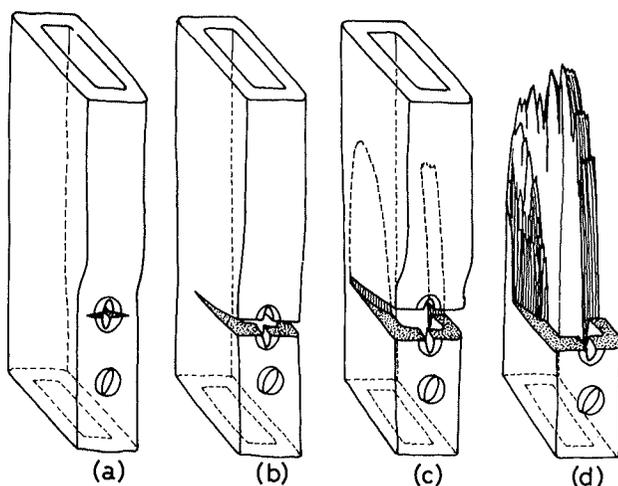


図6. 晩材単一仮道管の破壊過程

1.2.5 圧縮あて材単一仮道管の破壊過程

圧縮あて材 (compression wood) は正常材に比べて、仮道管は丸味を帯び、細胞間隙が多く、二次壁は S_1 と S_2 のみからなり S_3 を欠き、 S_1 は正常材のそれより厚くその内側の S_2 の周縁の部分が著しく木化 (lignification) しており、 S_2 のマイクロフィブリルは繊維軸と $35 \sim 45^\circ$ をなして配列し、しかもこれに平行して S_2 にはらせん状の裂目 (spiral check) が存在するなど特異な構造をしている (CÔTÉ・DAY 1965)。したがって圧縮あて材の強度的性質および破壊時の亀裂の挙動はこれらの特異な構造の影響を強く受けるものと考えられる。

圧縮あて材の強度に関してはこれまでも多くの研究があり、その特性はほぼ明らかにされている (PANSHIN・DE ZEEW 1970)。これに反してその破壊特性については 2, 3 の報告があるにすぎない。沢田 (1958) は気乾状態の圧縮あて材を縦引張破壊したとき破壊先端が特徴的な形状 (これを平面的破断と称している) を示すことを見出し、古野ら (1969) もこれを確認している。さらに古野らは湿潤状態で縦引張破壊した圧縮あて材の破壊先端についても調べたところ、破壊部はささら状を呈し、そこには多数の引き抜けた仮道管が認められ、しかもこれらの仮道管は細胞間層で分離していることを明らかにしている。佐伯ら (1972) は圧縮あて材の破壊先端を SEM で調べ、 S_2 にはらせん状裂目に沿った裂けとらせん状のうね (spiral rib, 個々のらせん状裂目の間のうね状の S_2 をさす) を切断する 2 つの破壊パターンを見出し、しかしながら圧縮あて材仮道管の破壊過程については完全には解明されていない。したがってここでは圧縮あて材単一仮道管の破壊過程について述べる。

写真 11-1 はスギの圧縮あて材単一仮道管の代表的な破壊過程を VTR 再生画像からこま撮りしたものである。写真 11-① は破壊直前の試料の外観を示す。 S_2 のらせん状裂目は試料の外表面からは白っぽい縞模様として観察される。これは裂目が S_2 中に深く切れ込んでいるため、この部分の壁が薄く SEM でコントラストがついたことによるものであろう。

ところで圧縮あて材単一仮道管の破壊過程も 2 つの段階から構成されている (古川 1973)。これらの破壊段階は佐伯ら (1972) の指摘している 2 つの破壊パターンにそれぞれ対応するものである。すなわち亀裂がらせん状裂目に発生し、それが裂目に沿って発達する段階と、これにつづいてらせん状のうねが切断する段階である。ここでは前者を破壊の第 1 段階、後者を第 2 段階と呼ぶことにする。

写真 11-② は破壊の開始した直後を示している。亀裂はまずらせん状裂目に沿って発生する (矢印)。これは S_2 のマイクロフィブリル傾角が大きいためマイクロフィブリル間で互いに沁ろうとするようなせん断応力が発生し、しかもこのせん断応力が S_2 に多数存在する深い切れ込み (裂目) の底の部分に集中的に作用することによって発生するものと推定される。したがって圧縮あて材仮道管の破壊開始部位としては壁孔 (写真 11-②にも観察される) よりむしろらせん状裂目の方がより関係が深いものと考えられる。とくに亀裂はこれらの裂目のうちで切れ込みの最も深いところに発生するのであろう。

写真 11-③と④は発生した亀裂がらせん状裂目に沿って発達する過程を示したものである。この場

合亀裂は比較的ゆっくりと進み、繊維軸のまわりをほぼ2回転したところで停止し、それ以上拡大することはあまりなかった。このようにして裂けた部分は引張られるにしたがってリボン状となり、ちょうどらせん巻きの帯状円筒コイルが引き伸ばされたときのような形状を呈する。このリボン状の部分が引き伸ばされることによって、この部分の S_2 のマイクロフィブリル傾角は見掛け上小さくなり、すなわち S_2 のマイクロフィブリル配列がフラットヘリックスからステープヘリックスに変わり、リボン内部の S_2 にはマイクロフィブリル配列方向に沿った引張応力成分が次第に増大するものと推定される。またこの間の仮道管の変位量(ひずみ量)は、リボン状部分の変形により正常材のそれに比べてかなり大きいであろう。古野ら(1969)が湿潤圧縮あて材の縦引張試験において報告している著大なひずみもこうして発現したものと推定される。

写真11-⑤と⑥は破壊の完了直後を示している。破壊の第2段階では引き伸ばされたリボン状の部分が瞬間的に破断するのが観察された。しかも破断先端では個々のらせん状うねがそのマイクロフィブリル配列方向に対してほぼ直角に切断破壊されているのが認められた。これはリボン状部分の S_2 のマイクロフィブリルがその配列方向に沿った引張応力によって破断したことを示唆するものであろう。

これらの観察結果から、各破壊段階における亀裂の変形様式(破壊モード)について考察する。破壊の第1段階では破壊はらせん状うね間の沁りとして発生し、つづいてリボン状に変形することから、亀裂はまずモードIIによる裂け破壊として発生し、つづいてモードIIもしくはモードIIIによる裂け破壊として拡大するものと推定される。つづく破壊の第2段階ではリボン状部分が S_2 のマイクロフィブリルの配列方向にほぼ直角に切断されることより、亀裂はモードIによる切断破壊として生じ最終的に仮道管を2分するものと推定される。ただし破壊の第2段階では破壊先端の形状(写真11-⑥)からみて、 S_2 の切断破壊の際にらせん状うね間の短い裂け破壊も伴うようである。

以上から圧縮あて材単一仮道管の破壊過程を模式的に描いたものが、図7である。図の(a)と(b)は破壊の第1段階を、(c)は第2段階を、(d)は破壊先端をそれぞれ表している。

ところで圧縮あて材仮道管のように S_2 のマイクロフィブリル傾角の大きい仮道管では、各破壊段階が正常材の仮道管のそれらに比べて逆の関係になっていることに注目したい。すなわち S_2 のマイクロフィブリル傾角の比較的小さい仮道管では破壊は切断破壊で始まり、裂け破壊で終わっているのに対して、圧縮あて材仮道管で

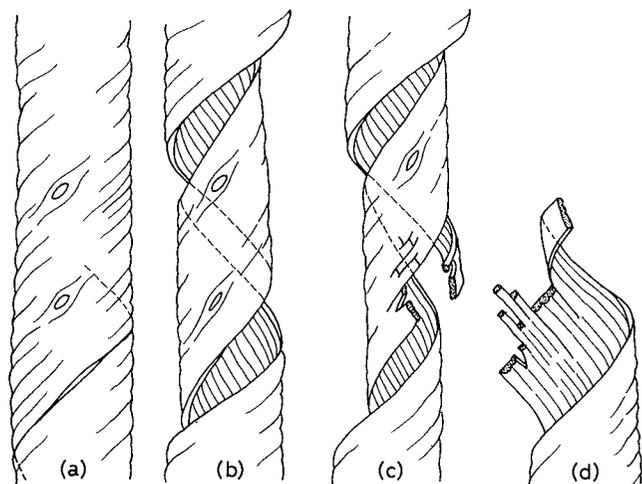


図7. 圧縮あて材単一仮道管の破壊過程

は裂け破壊に始まり切断破壊で終る。このように圧縮あて材仮道管では S_2 のマイクロフィブリル傾角が壁中の亀裂の挙動に関与している。このことは一方向強化FRCM材の破壊(山脇・植村 1970b)とも対応するものであろう。

1.3 単一仮道管の破壊形態

1.3.1 はじめに

木材の破壊特性の発現機構を究明していくうえで、単一仮道管壁の縦引張破壊形態をフラクトグラフィー的に解析することは重要であると考ええる。本論に入る前に近年急速な発展を遂げつつあるフラクトグラフィーの概要について簡単に述べる(小寺沢 1971a, b, c, 1974, 北川・小寺沢 1977)。

フラクトグラフィーは通常その観察手段によって2つに分けられる。すなわち肉眼観察や低倍率での光顕観察による破面の巨視的形態の解析(マクロフラクトグラフィー)と、高倍率での光顕や電顕観察による破面の微視的形態の解析(マイクロフラクトグラフィー)である。とくにSEMやTEMを用いた解析をエレクトロンマイクロフラクトグラフィー、あるいはエレクトロンフラクトグラフィーと呼ぶこともある。このようにフラクトグラフィーは、その対象とする破面が電顕レベルの微細なものから肉眼レベルの巨大なものまで広範囲にわたっており、材料の破壊機構を研究するうえでマイクロな破壊機構とマクロな破壊機構の間を埋めるべき役割を担っているだけでなく、材料内部の亀裂伝播に関する三次元的様相を直接捉え得る点において他の研究方法では得難い知見を得ることができる。

ところで実際の破面は極めて複雑な様相を呈するが、破面にはその材料に特有な破壊様式(破壊機構)に対応する種々の特徴的な模様が含まれている。しかもこれらの模様形成には材料固有の組織構造も関与しているであろう。したがって破壊機構の未知な材料の破面をフラクトグラフィー的に調べようとすれば、破面写真からその材料に固有の特徴的な模様を読み取ることと、読み取られた種々の模様を体系的に類別することの2点が重要である。ところでこれらの破面模様を記述する際には独特の比喩的表現を用いることが多く、この中にはすでに科学的表現として認められているものもある。例えば金属の延性破壊した破面はディンプル(dimple; 元の意味はくぼ)模様によって特徴づけられている。しかし木材細胞壁の破面模様については、わずかに佐伯ら(1972)の報告をみるのみである。

また、材料の破壊機構をフラクトグラフィー的に調べるうえでの問題は、小寺沢(1974)が指摘しているように、破壊途中の破面を観察するのではなく破壊完了後の破面、すなわち亀裂の伝播の痕跡しか観察できない点にある。したがって破面には必ずしも亀裂の挙動のすべてがそのまま証拠として残されている訳ではないので、他の方法、例えば破壊の動的観察法とか亀裂先端の応力分布の解析などから得た知見と突き合わせて総合的に破面を解析することが必要であろう。そこで、ここでは破壊の動的観察法に対してこのようなフラクトグラフィーのための観察法を静的観察法(static observation method)と呼ぶことにする。

静的観察法を用いてここでは次の3つの点について検討した。まず第1は、単一仮道管の破壊挙動を支配していると考えられる最厚層 S_2 の破面の特徴的模様を明確にし、これを類別するとともに、動的観察により得た知見とも突き合わせながら、 S_2 の破壊様式を推定する。第2は、 S_2 の破壊様式に関与すると思われる2, 3の因子(例えば壁の化学組成・マイクロフィブリル傾角・水分)について破壊形態との関連性を明らかにする。さらに第3は、仮道管壁の破面に現れる特徴的な模様を利用して仮道管壁構造に関する知見を得る。

1.3.2 試料の調製と静的観察法

1.3.2.1 試料の調製

1) 供試材

本邦産針葉樹材のうち代表的な次の9樹種を用いた。すなわち、イチイ(*Taxus cuspidata* SIEB. et ZUCC.), カヤ(*Torreya nucifera* SIEB. et ZUCC.), ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* ENDL.), スギ(*Cryptomeria japonica* D. DON) 鳥取県産樹令67年, コウヤマキ(*Sciadopitys verticillata* SIEB. et ZUCC.), カラマツ(*Larix kaempferi* SARG.), エゾマツ(*Picea jezoensis* CARR.), モミ(*Abies firma* SIEB. et ZUCC.), アカマツ(*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.)である。スギ以外の各材は京都大学農学部附属上賀茂演習林より譲渡された材鑑ならびに日本木材加工技術協会作製の材鑑を用いた。また、靱皮繊維の供試材としてはコウゾ(*Broussonetia Kazinoki* SIEB.) (京都市郊外で採取)を用いた。

2) 解 織

1.2.2.1の2)と同じ要領で解織用小片を作製した。解織は仮道管壁の化学的組成を変えるため次の3つの方法で行った。まず第1は、壁の化学的組成や形態ができる限り天然状態に近い単一仮道管(ここではこれを未処理単一仮道管と呼ぶことにする)を得る方法である。第2は壁中からリグニンのみを除去したいいわゆるホロセルロース化した単一仮道管を得る方法である。第3は壁中からリグニンとヘミセルロースを除去したいいわゆる α -セルロース化した単一仮道管を得る方法である。

(a) 未処理単一仮道管の単離法

本法は化学的処理を用いないでしかもできるだけ木材中に在る状態を保持した単一仮道管を得る方法である。単一仮道管の諸性質を調べるときには、まずこのような未処理の仮道管について調べておくことが必要であろう。それにもかかわらずこのような試料の単離法についてはほとんど検討されておらず、わずかにWOOTENら(1965)の簡単な報告があるにすぎない。ここで用いた方法は次のとおりである。

解織用小片を30分から1時間蒸留水で煮沸して飽水状態とする。次に蒸留水を入れたペトリ皿中に小片を移し、双眼実体顕微鏡で見ながら小片の端をピンセットでほぐす。ほぐし出されてきた仮道管の端をピンセットでつかんで慎重に小片から引き剥がす。この場合強い力で引き剥がすと仮道管は折

(22)

れ曲がるので、折れ曲がらないように気をつけて、引き抜くようにしながら引き剥がすのがその要領である。ところでこの方法では早材仮道管を採取するのは困難であり、ここで採取した仮道管はほとんど晩材もしくは晩材に近い仮道管である。

またコウゾの靱皮繊維は飽水状態の樹皮の小片を実体顕微鏡で見ながら、その中から靱皮繊維のみをピンセットで引き抜いて採取した。

(b) ホロセルロース化単一仮道管の単離法

1. 2. 2. 1の3)と同じ方法を用いた。

(c) α -セルロース化単一仮道管の単離法

ここでは木材の化学分析法として一般に用いられている α -セルロースの定量法(林産化学実験書1965)に準拠して行った。すなわち脱リグニンした気乾のホロセルロース化小片を20°Cで17.5%のNaOH水溶液で所定の処理を行った後、蒸留水と希酢酸水溶液で洗浄した。ところでホロセルロース化した小片をNaOH水溶液に浸漬すると直ちに小片はふさ状にほぐれ、溶液を軽く振とうするだけで仮道管は完全に単離した。このことは個々の仮道管はリグニンだけでなくヘミセルロースによっても互いに結合されていることを示すものであろう。しかもこのようなヘミセルロースによる仮道管壁相互の結合の強さは半径壁間よりも接線壁間で強いようであった。というのは脱リグニン処理によって半径壁間は容易に分離するが接線壁間は接合したままであり、これをさらに脱ヘミセルロース処理することによって接線壁間は容易に分離するからである。

4) 乾 燥

ホロセルロース化および α -セルロース化した単一仮道管は凍結乾燥法(1. 2. 2. 1の4))により乾燥した。

未処理単一仮道管は水から直接乾燥してもわずかな振れがみられる程度なので、この程度の変形を防ぐには溶媒置換乾燥法で十分であると考え、未処理試料だけはこの方法で乾燥した。ここではTHOMASとNICHOLAS(1966)の方法に準じて行った。すなわち試料中の水分をエタノール、アセトン、*n*-ペンタンへと逐次置換した後、最終溶媒を真空中で揮散させて乾燥した。この方法で乾燥したスギの未処理晩材単一仮道管の外観を1例として写真12に示す。仮道管表面には隣接する放射柔細胞の一部や仮道管壁の一部(S₁)が付着しており、S₂の収縮に伴って生じたと考えられるわずかな縦じわが認められる。しかしこれらはいずれも破壊時の亀裂の挙動にはほとんど影響しなかった。

5) 保 持 法

試料は間接法によって保持した。用いた接着剤および保持体の材質は1. 2. 2. 1の5)と同じである。ただし、ここでは図8に示すように1枚の保持体に4~15本の試料を貼付した。なお引張破壊する直前に偏光顕微鏡を用いて試料の損傷の有無を調べ、損傷のあるものや振れて取り付けられているものはすべて除去した。

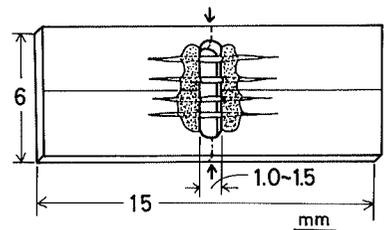


図8. 静的観察用試料プレート

1.3.2.2 静的観察法

1) 引張装置

単一仮道管を引張破壊するために引張装置を考案した (FURUKAWAら 1973, 古川ら 1975)。この装置の特徴は、(1)単一仮道管を同時に20本程度引張れるよう、チャック部は最大負荷重(約2kg)に耐えられるようにしたこと、(2)単一仮道管の破壊ひずみが小さいのでクロスヘッドの動きを μm オーダー(50 $\mu\text{m}/\text{min}$ の定速)で制御できるようにしたこと、(3)試料をガラスデシケータ内もしくは真空蒸着装置のベルジャー内で破壊する必要があるため、装置はこれらの空間におさまるような大きさ(約70(幅) \times 90(奥行) \times 55(高さ)mm)としたこと、(4)さらに試料保持体の着脱が容易で確実に行え(1.2.2.2の1)と同じ)、装置の操作性を容易にしたことなどである。

2) 観察と記録

試料の破壊は主に乾燥雰囲気中で行った。この場合の乾燥雰囲気としては乾燥剤(五酸化リン)を入れたガラスデシケータもしくは真空蒸着装置のベルジャーを用いた。予備実験の結果、いずれの雰囲気において破壊しても破壊形態に相違は認められなかった。ここではガラスデシケータ内で1週間乾燥した後破壊した破面について述べる。他方、試料の一部は飽水状態で破壊した。この場合破壊の数分前に水を十分含ませた沔紙の小片で試料を覆うようにし、試料に水を含ませた状態で引張破壊を行った。ただし、試料を固定しているエポキシ樹脂系接着剤は耐水性が劣るため、接着部を必要以上に長く濡らさないようにした。

破壊先端の観察は、試料保持体をSEM用試料台(stab)に図9のように取りつけて、常法どおり金もしくは金と炭素で蒸着してからSEM(JSM-U3, 日本電子製)で観察した。金だけの蒸着にはイオンスパッタ装置(FC-1100, 日本電子製)も用いた。

また通常の観察の他に、立体観察およびマッチング観察を行った。立体観察とは同一場所を数度傾けて2枚の写真を撮り、これらを立体鏡のもとで観察する方法であり、マッチング観察とは相対する破面の同一場所をそれぞれ写真にとり、比較観察する方法である。これらの観察と通常観察の併用により、複雑な破面の解析をより正確に行うことができた。

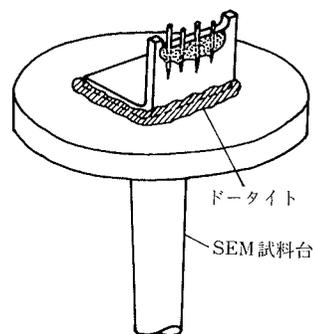


図9. 静的観察用試料のSEM試料台への取り付け

1.3.3 S_2 にみられる破壊様式

単一仮道管の縦引張破壊において壁中の最厚層である S_2 の果す役割は重要と考えられるにもかかわらず、 S_2 の破壊機構に関する研究は少ない。MARK(1967)は S_1 の破壊機構については詳細に述べているが、 S_2 のそれについてはほとんど言及していない。また、単一仮道管の引張強度と S_2 のマイクロフィ

ブリル傾角の関係については多数報告されているが (SCHNIEWIND 1966, PAGEら 1972, MARK・GILLIS 1973), その破壊形態についてはほとんど注意が払われていない。HEARLEとSPARROW (1971) は綿毛 (cotton hair) の二次壁の引張破壊形態をSEMで調べた結果, 破壊はマイクロフィブリルのらせん配列に沿って生じる傾向のあることを見出し, これは植物細胞壁に特有な破壊形態であろうと指摘している。その後, ARMSTORONGら (1977) はHEARLEらの研究にヒントを得てオウシュウアカマツ (*Pinus sylvestris*) のパルプ化した単一仮道管の破壊先端のSEM観察から S_2 のマイクロフィブリル傾角の測定を試みている。彼らはこの研究において S_2 が裂け破壊したところや切断破壊したところ, さらに分野で破断したところなどを多数観察しているが, これら破壊形態のフラクトグラフィー的考察はしていない。ところが近年, GORDONとJERONIMIDIS (1974) およびJERONIMIDIS (1976) は木材や単一仮道管が縦引張破壊するとき著大な破壊靱性を発揮することに注目し, この原因は木材中の繊維間の剥離および S_2 のマイクロフィブリルのらせん配列構造に沿った裂けに由来するという考え方を提案している。

本項では未処理の晩材単一仮道管の S_2 の破壊先端にみられる種々の破壊形態を類別し, それらにフラクトグラフィー的解釈を試みる (古川 1978_a)。これまでにも指摘したように S_2 の破壊形態を特徴づける原因としては S_2 の構造だけでなく, S_2 中における亀裂の挙動 (変形様式) が問題である。ここでは S_2 の破面に残された形態から亀裂の先端に支配的に作用していた応力の種類や方向, すなわち S_2 の破壊様式を推定する。

S_2 の破壊様式は1.2で指摘したように基本的には切断破壊 (cross fracture) 様式と裂け破壊 (split fracture) 様式の2つに大別することができる。以下これらの破壊様式によって生じた破面について検討する。

1.3.3.1 切断破壊様式

切断破壊した S_2 の破面上にみられる模様および破面の傾斜の状態から切断破壊様式をさらに3つに区分し, これらをそれぞれ切断のI型 (以下C-Iと略記), 切断のII型 (以下C-IIと略記), 切断のIII型 (以下C-IIIと略記) 破壊と名づける (古川 1978_a)。

写真13はスギの未処理晩材単一仮道管の破壊先端で観察された典型的なC-I破面のマッチング写真である。C-I破面の特徴は破面が S_2 のマイクロフィブリル配列方向に垂直でしかも平坦であり, 破面上には相手方の破面から長く引き抜けたようなマイクロフィブリルは認められないことである。このような平坦な破面を強拡大 (1万倍以上) して調べると, さらにいくつかの特徴的な模様を見出すことができる。その1は写真14 (カラマツ) に見られるとおり, ガラスの破面のように平滑である。そして破面上には仮道管壁の表面 (S_1 と S_3 側) から S_2 内部に向かって幾筋かの不規則な線状の模様 (矢印) が認められる。この模様は金属の脆性破面を特徴づける川模様 (river pattern) に似ている (北川・小寺沢 1976)。その2は写真15 (カラマツ) に見られるように, 破面上に粒状 (矢印1) と島状 (矢印2) の模様が見られる。粒状の模様はマイクロフィブリルの切断先端が蒸着金属で

被覆されて実際の大きさよりかなり大きくなったことによるのであろう(佐伯ら 1972)。また鳥状の模様は $0.1\mu\text{m}$ 程度以下の微小な段丘(step)を形づくっている。その3は写真16(スギ)に見られるように、破面全体が微小なとげ状のもので覆われており、しかもこれらのとげ状のものは一定の方向(写真上で左方向)へなびいているようにみえる。これは S_2 のマイクロフィブリルが破断の際にマイクロフィブリルのわずかな引き抜けを伴って切断したことによると推定され、またとげ状のものなびく方向は亀裂の伝播方向を示唆するものであろう。

以上がC-I破面にみられる特徴的な模様で、この型の破壊では S_2 のマイクロフィブリルは相互にはほとんど乱らず、マイクロフィブリル配列方向に垂直でしかもほぼ平坦に切断されるものと推定される。すなわちこの場合の亀裂の先端ではマイクロフィブリルの配列方向に沿った引張応力が支配的に作用していると考えられる。したがって、C-I破面は S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対して直角に進むモードIの亀裂によって引き起こされた破面であらう。

写真17はヒノキの、写真18はアカマツの、写真19はスギのそれぞれ未処理晩材単一仮道管の破壊先端で観察された代表的なC-II破面を示す。C-II破面は平坦で、破面上に見られる模様はC-I破面のそれに似ているが、破面が S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対して垂直でなく傾斜している点でC-I破面と異なる。写真17の破面には放射状に延びる線状の模様が見られる。このような模様は脆性材料の破面においてしばしば観察されている(北川・小寺沢 1976)。写真18は傾斜した破面を正面からみたところを示す。破面上には S_2 のマイクロフィブリルが短く引き抜けた微小なとげ状のものが多数認められ、これらは一定の方向になびいている。

このような破面の模様ならびに破面の傾斜方向から推定して、この型の破面は仮道管壁の厚さ方向(以下この方向を放射方向と称する)に作用するせん断応力が S_2 のマイクロフィブリルを切断することによって生じたものと思われる。したがってC-II破面は S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対してこれを斜めに横切って進むモードIIの亀裂によって引き起こされた破面であらう。

写真20はスギの、写真21はカヤのそれぞれ未処理晩材単一仮道管の破壊先端において観察された典型的なC-III破面を示す。この場合の破面も S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対してほぼ垂直で、しかもおおむね平坦であることから切断破壊型に属する破面と見なすことができる。この型の破面にはひだ状模様が認められるのが特徴である。

このようなひだ状模様は、観察した限り、カヤ以外の破面では局部的、例えば仮道管の隅などの限られた場所にしか認められなかった。ところが木材や竹の試片の壁破断面ではごく一般的に観察されている。例えば佐伯ら(1972)はアカマツ、スギ、ヒノキ各材の曲げ破壊した引張側破壊部で、古川(1978_b)はスギの切り欠き付切片の縦引張破壊部で(詳細は2章で述べる)、さらにFURUNOら(1977)はメチルメタクリレート樹脂を充填したアカマツ切片の縦引張破壊部で、またPARAMESWARANとLIESE(1976)は竹の繊維の破壊部でそれぞれ観察している。これらはすべて単一仮道管の場合とは異なる力学的境界条件のもと、すなわち繊維軸のまわりの自由な回転が拘束された状態で生じている点に着目したい。そこでひだ状模様はこのような状態下の壁中を亀裂が断続的に進展することによって生じ

たものと推定される。単一仮道管の場合でも仮道管の隅 (cell corner) とかカヤの S_2 ではこのような拘束状態に近い状態が存在するのかもしれない。カヤの S_2 では、よく発達したらせん肥厚 (spiral thickening) によって内側からも自由な変形が拘束されるのではないかと考えられる。これらのことから、この場合の亀裂の先端には繊維軸のまわりに捩れようとする力がかなり作用していると考えられ、このため S_2 は絞られるように切断されるものと推定される。すなわち、捩られるようにしながら引張られている S_2 中の亀裂の先端にはその先端べりに沿ったせん断応力が生じているであろう。このせん断応力が亀裂先端べりに集中することによって亀裂先端では短い裂け破壊が生じ、これによって捩れを引き起こしている応力は一時的に緩和される。それとともに亀裂先端には S_2 のマイクロフィブリル配列方向の引張応力が大きくなってマイクロフィブリルを切断破壊する。こうして亀裂が少し進むと再び亀裂先端べりにはせん断応力が集中し裂け破壊が生じる。このような亀裂先端での S_2 のマイクロフィブリル間の裂けとマイクロフィブリルの切断を断続的に、しかも交互に繰り返すことによってひだ状模様は形成されることが考えられる。

したがって、C-III破面は S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対して直角に進むモードIIIの亀裂によるマイクロフィブリル間の短い裂けとモードIの亀裂によるマイクロフィブリルの切断とが交互に組み合わせられて生じた破面と推定される。

1.3.3.2 裂け破壊様式

裂け破壊は細胞壁に限らず繊維強化複合材料 (FRCM) においても特有な破壊様式であり、近年複合材料中の亀裂先端におけるひずみエネルギーの吸収機構の1つとして破壊力学的見地からも興味もたれている (JERONIMIDIS 1976)。このような裂け破壊による破面も切断破壊の場合と同様に破面上の模様、とくに破面上にほつれ出たフィブリル (ここではマイクロフィブリル束の向きやめくり出された S_2 の微小片の向きなどから3つに区分でき、これらをそれぞれ裂けのI型 (以下S-Iと略記)、裂けのII型 (以下S-IIと略記)、それに裂けのIII型 (以下S-IIIと略記) 破壊と呼ぶことにする (古川 1978_a)。

写真22はアカマツの未処理晩材単一仮道管の破壊先端で観察されたS-I破面を示す。破面には裂けが進行する際にめくれあがった S_2 の微小片 (矢印) が観察される。これらの微小片の破面上での状態から判断して、この場合、ちょうど竹を縦に割ったときのように、裂けた面が互いに擦れ合うことなく S_2 が割裂 (cleavage) されることによって裂けが進行したものと思われる。このような裂けの発生はCOOKとGORDON (1964) の考え方によっても説明できる。すなわち、 S_2 を横切って進行している亀裂 (例えばC-I型の亀裂) について考えると、マイクロフィブリルとこれを取り巻く充填物質 (ヘミセルロースやリグニン) との界面がCOOKとGORDONの言う弱い界面に相当し、この場合亀裂の先端がこのような界面に近づくとそこで S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿った横引張応力成分による裂け、すなわちS-I型の裂けが生ずるものと思われる。このような機構によって発生したと思われる裂けの1例を写真23 (スギ) に示す。このようにS-I型の裂けはC-I破面の端のところ

に生ずるのが特徴であろう。

したがって、S-I 破面は S_2 のマイクロフィブリルの配列方向に沿って進むモード I の亀裂によって生じた破面であろうと推定される。

写真24はエゾマツの、写真25はカラマツの未処理晩材単一仮道管の破壊先端で観察されたS-II 破面を示す。破面上では S_2 のマイクロフィブリル配列に沿って裂けたことを示す多数の平行な線状の模様(写真24)の他に、 S_2 の微小片やほつれ出たフィブリルの先端が観察される。ここではこれらの微小片やフィブリルの先端が S_2 のマイクロフィブリル配列に沿って折れ返すようにめくれあがっていることに注目したい(写真24, 25の矢印)。これは裂けによって生じた破面が S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿って互いに逆方向に擦れ合っていたことを示すものであろう。また、S-II 破面は単一仮道管の破壊先端では、異なる位置にある2つの切断破面の境界部(写真24の場合)とか、 S_2 の一部が塊状になって引き抜けたような部分の側面(写真25の場合)において観察されることが多い。

このような破面の特徴から、S-II 破面は S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿った面内で互いに逆方向に迂るようなせん断応力、すなわちモード II の亀裂による裂け破壊によって生じた破面と推定される。

写真26はスギの、写真27はカラマツの未処理晩材単一仮道管の破壊先端で観察されたS-III 破面を示す。この型の破面は S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿って生じる場合(写真27)と、 S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対して小さな角度で横切ることにより大きなとげ状を呈して生じる場合(写真26)とがあった。いずれの破面上においても S_2 の微小片やほつれ出たフィブリルが多数認められ、しかもこれらの先端が裂け破面の進行方向とは直角に近い方向を指している。これは裂け自体は S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿って進行するが、その際亀裂の先端で新生された裂け破面は亀裂の進行方向に対してほぼ直角方向に互いにずれ、しかもそのところで擦れ合っていたことを示すものであろう。すなわちこの場合の S_2 は壁の放射方向のせん断力によって引き裂かれるようにしながら裂けるものと思われる。いいかえれば、亀裂の先端では先端べりに平行なせん断応力が作用していたことが推定される。

したがってS-III 破面はほぼ S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿って進むモード III の亀裂によって生じた破面と推定される。

ところでこの型の破面の発生にはS-II 型の応力も亀裂の先端に同時に作用しているものと思われるがこの点についてはここでは明らかにすることができなかった。

以上、未処理晩材単一仮道管の縦引張破壊先端の S_2 にみられる6つの破壊様式とそれらに対応する破面の形態の特徴を述べたが、これを模式的に描くと図10のようになる。図には亀裂の先端周辺から切り取った S_2 の一部を模式化して描いてあり、 S_2 のマイクロフィブリル配列は繊維軸と平行に描いてある。 S_2 の破壊様式は、まず切断破壊型と裂け破壊型の2つに大別でき、さらにこれらは基本的な3の破壊モード(亀裂の変形様式)にそれぞれ対応する6つの破壊様式、すなわちC-I, C-II, C

-IIIとS-I, S-II, S-IIIに類別することができる。

ところで単一仮道管壁の縦引張破壊した破面は特定の1つの破壊様式による破面だけで構成されることは少なく、一般には複数の破壊様式によって生じた種々の破面で構成されている。これは単一仮道管に外力として単軸方向の負荷を与えても、壁中を伝播する亀裂の先端では種々の応力が発生していることが推定される。そこで次項では晩材単一仮道管の S_2 の破面がどのような破壊様式によって構成されているのかを検討する。

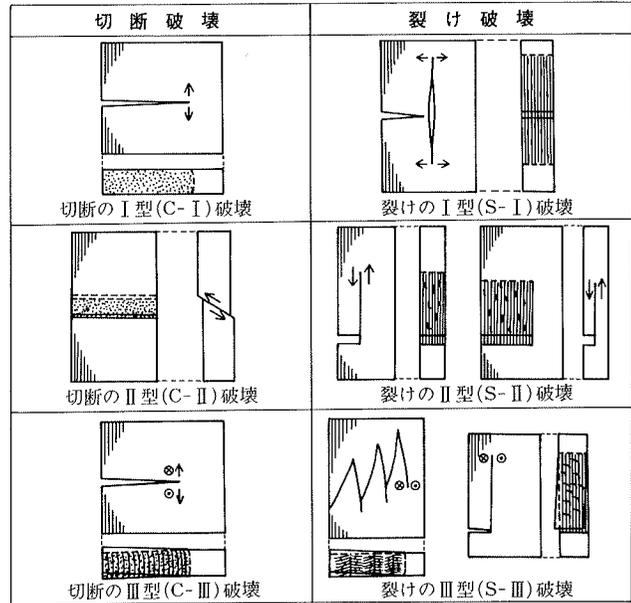


図10. 晩材単一仮道管の S_2 に見られる破壊様式の模式図。矢印(→, ⊙, ⊗)は亀裂の先端に支配的に作用している応力の推定作用方向を示す。

1.3.4 S_2 破面の構成

前項で示した6つの破壊様式に対応する破面が S_2 の破面全体においてどのように現れるかを調べることは、 S_2 中における亀裂の伝播の三次元的様相や破壊時における S_2 内部の応力状態を推定するうえで重要であると考えられる。

このためには S_2 の破面全体を観察することが必要である。とくにSEMは焦点深度が深い奥にある構造物が浮き上がって見え、かえって本来の立体的位置関係を見誤る恐れがあるので、これを防ぐためには同一破壊部を種々の角度から観察するか、立体写真を撮るかすることが必要である。ここでは主として前者の方法により観察し、写真撮影に際しては破面全体の立体的特徴を最も正確に把握できるような位置、すなわち破面の斜め上方約 45° の位置から撮るようにした。

ところで実際に破面が形成されるときには、前述の破壊様式がそれぞれ独立して作用する場合と複合して作用する場合とがあろう。しかしこの点を破面の形態的特徴からだけで識別することは困難なため、ここでは全ての破面が独立的に作用した破壊様式によって生じたものと見なすことにした。そして、それらの破面はそれぞれ前項にならってC-I, C-II, C-III, S-I, S-II, S-III破面と呼ぶことにする。

こうして観察した晩材単一仮道管の S_2 の破面をその構成から分類すると3つに区分できることが分かった。すなわち、 S_2 の破面が(1)主として切断破壊型の破面で構成されている切断破壊優先型破面と、(2)主に裂け破壊型の破面から構成されている裂け破壊優先型破面と、(3)切断破壊型の破面と裂け破壊型の破面が入り混った混合型破面の3つである。

1.3.4.1 切断破壊優先型破面

この型に属する破壊先端は破面全体がほぼ S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対して垂直であり、しかも破面上にはC-I, C-II, C-IIIのいずれかの破面を認めることができる。

写真28はスギの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。破面はR-T壁孔を横切って生じており、破面全体がほぼC-I破面だけで構成されている。**写真29**はアカマツの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。この場合もR-T壁孔のところで破断しており、その破面は壁孔の近くではC-I破面を呈するが、壁孔から遠ざかるにつれてC-II破面に変化しているのが認められる。**写真30**はカラマツの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。破面はほとんどC-I破面で構成されている。この場合の破面は繊維軸に垂直ではないが、 S_2 のマイクロフィブリル配列方向に対しては垂直となっている。このようにカラマツでは典型的な晩材仮道管であっても S_2 のマイクロフィブリル傾角はかなり大きいようである。**写真31**はモミの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。この場合もR-T壁孔を横切って破断しており、その破面は壁孔の近くでC-I破面を示し、壁孔から離れたところではC-II破面が認められる。とくにこの場合のC-II破面は仮道管の内、外各表面に接して生じており、これは脆性破面の周辺部で見られるシャーリップ (shear rip) (北川・小寺沢 1976) と似ている。**写真32**はコヤマキの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。破面は主としてC-II破面で構成され、一部にC-III破面も見られる。

したがって、この型の破面はR-T壁孔を横切って生じることが多く、しかも壁孔の近くではC-I破面を、また壁孔から離れたところではC-IIやC-III破面を呈することが特徴であると言えよう。このことはR-T壁孔から破壊が開始する場合には、亀裂はまず破壊モードIの切断破壊によって進行することと一致する(1.2.4参照)。

1.3.4.2 裂け破壊優先型破面

この型に属する破壊先端は破面全体がほとんど S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿った裂け破面で構成されている。しかし裂け破面は多くの場合、切断破面とともに存在し、裂け破面だけで破面が構成されることは少ない。

写真26 (前掲) と**33**はスギの、**写真34**はカラマツの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。このように裂け破壊だけで破面が構成される場合は、 S_2 は長いとげ状を呈するのが特徴である。このようにとげ状の裂け破壊は晩材単一仮道管の破壊の第2段階においてしばしば観察される(1.2.4参照)。したがってこの場合の破面は、破壊の動的観察では十分観察することができなかったが、破面の形態から判断する限り、 S_2 がS-III型(もしくはS-II型)の亀裂で破壊することによって生じたものと推定される。

ところでS-IやS-II破面はいずれも切断破壊とともに生じることが多く(例えば前掲の**写真23**, **24**, **30**を参照)、これらだけで S_2 の破面全体が構成されることはなかった。

1.3.4.3 混合型破面

この型の破面は動的観察結果（1.2.4参照）からも明らかなように、晩材単一仮道管の破壊先端において最もよく観察される破面である。S₂の破面全体を厳密に区分すればすべてこの型に属するが、ここではS₂の破面において明瞭な切断破面と裂け破面の両者が認められるものを混合型破面と呼ぶことにする。

写真35と前掲の写真23はスギの、写真36はカラマツのそれぞれ未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。破面上にはC-I, S-I, S-II, S-IIIなどの破面が認められる。これらの破面の発生順序を動的観察結果から推定すると、まずC-I破面が生じ、つづいてS-I, S-II破面が生じ、最後にS-III破面が生じたものと思われる。写真37はカヤの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。破面上にはカヤに特有のC-III破面が認められる。この場合、破壊はR-T壁孔のところで生じているにもかかわらず破面にはC-I破面が認められないことから、カヤのS₂中には破壊前から繊維軸のまわりのせん断応力がかなり大きいのではないかと推定される。写真38はイチイの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。S₂の破面上ではC-IとS-II（もしくはS-III）各破面が交互に生じているのが認められる。ところで、カヤもイチイもらせん肥厚を有するが、カヤの方がらせん肥厚に沿ってS₂が切断破壊する傾向が強く認められた。らせん肥厚の破壊挙動に及ぼす影響については、その構造とも関連させて今後更に検討することが必要であろう。

以上、未処理晩材単一仮道管を乾燥雰囲気中で縦引張破壊したときのS₂の破面の特徴について述べた。これらの破面の形態は、試験条件や試料の調製条件（すなわち化学組成）が変れば当然変化すると予想される。したがって次項からはこの点について述べる。

1.3.5 S₂の破壊形態に及ぼすリグニンおよびヘミセルロースの影響

仮道管壁、とくにS₂の破壊形態に関与する因子としては、(1)S₂中における亀裂の変形様式、(2)S₂固有の構造、(3)破壊時の環境条件などが重要であろう。これまでは主として(1)について論じてきた。本項では(2)について、とくにS₂の破面形態とS₂の主要構成成分であるリグニンおよびヘミセルロースとの関連性について述べる。ここではこれらの成分を除去することによって単一仮道管壁の外観および破面の形態と構成がどのように変化するかを明らかにするとともに、変化をひきおこす原因について考察する。

1.3.5.1 リグニン除去の影響—ホロセルロース化晩材単一仮道管の破壊形態

ここではアカマツおよびスギの脱リグニン処理した晩材単一仮道管（以下ホロセルロース化晩材単

一仮道管と称する)の破壊形態について、未処理晩材単一仮道管のそれと比較する(古川ら 1974b)。脱リグニン処理の効果はアカマツにおいてとくに顕著に認められた。

写真39から45はほぼ全乾状態で破壊したアカマツのホロセルロース化晩材単一仮道管の破壊先端の全体像および一部を拡大したところを示す。アカマツ晩材単一仮道管は脱リグニン処理をすることによって、仮道管表面に太い縦じわが現れるとともに、仮道管全体が少し丸味を帯び、壁が厚くなり、しかも内こうの横断面形状が矩形からやや丸味をもった方形に変るなど、外観上に変化が認められた。

外表面に見られる太い縦じわはリグニンの除去によって壁中に生じた空隙が乾燥によってつぶれ、壁が収縮した結果生じたものであろう。しかもじわの方向からみて、これは S_2 のマイクロフィブリルの横方向の凝集によるものと考えられる。したがってこのじわの方向から S_2 のマイクロフィブリル傾角をかなり正確に知ることができる(TANG・SMITH 1975)。

また、仮道管横断面での形状変化は脱リグニン処理にともなう壁の膨潤によってもたらされたものと推定される。とくに内こうの形状変化の大きいことから膨潤は内こう側に向って生じたものと思われる。最近STOLLとFENGEL(1977, 1978)はオウシュウトウヒ(*Picea abies*)を亜塩素酸塩法で段階的に脱リグニンして仮道管の横断面形状の変化を調べたところ、壁中のリグニン残存量が15%以下では壁がゆるんだり(loosening)、膨潤したりするが、24%以上では全く変化のないことを明らかにしている。写真40に示されている仮道管はじわも比較的小さく、仮道管の横断面形状もあまり変化していないことから、壁中にはまだかなりのリグニンが残留しているものと思われる。このような仮道管は解繊用小片の中心部に在って、葉液の浸透が不十分だったことに起因するものであろう。

リグニンを除去したアカマツ晩材単一仮道管の破面(とくに S_2)は、写真39に示されているようにほとんど切断破壊型の破面で構成されており、裂け破面は局部的にみられる程度である。切断破面もC-I、C-II破面のみで、C-III破面は本実験に関する限り観察されなかった。しかもこれらの切断破面上では独特の同心円状もしくはこれに近い模様(ラメラ状模様)が認められた。また局部的にみられる裂け破面もほとんどS-II(もしくはS-I)破面であった。このようにリグニンを除去することによって S_2 の破面の構成は未処理晩材単一仮道管のそれに比べて単純化するとともに切断破壊優先型に変る傾向が認められた。これは壁を構成する主要構成成分のうちセルロースやヘミセルロースとは全く異質なリグニンが除去されることによって、壁が均質化したためと考えられる。この傾向はホロセルロース化単一仮道管からヘミセルロースを除去することによって一層顕著となることから理解できる(後述)。

ところでラメラ状模様をさらに詳しく観察したところ、次の3つのパターンが認められた。まず第1は写真41と42に示されているように、 S_2 が同心円状の極めて薄いシート状に抜け出たり裂けたりする場合である。この場合のシートの数は写真から判読した限り100~150枚程度であった。第2は写真42や43にみられるように、 S_2 が同心円状に、しかも先程の薄いシートの数枚~十数枚分の厚さで層状に裂けたり、そのような層状の模様がC-I破面上にみられる場合である。第3は写真

4.4に示されているように、同心円状というよりむしろ蜂の巣状に S_2 が裂けたり、引き抜けたりする場合である。

このような仮道管壁の S_2 のラメラ構造は BAILEYと KERR (1935) によって発見されて以来、これが S_2 の本来の構造なのかそれとも試料作製中に生じた人工産物なのかという点で多くの議論を招いた。 S_2 のラメラを本来の構造であると主張する見解としては、(1)ラメラを多糖類およびリグニンの生物代謝周期に起因する一種の生長輪 (growth ring) と見なす考え方 (NEČESANÝら 1965)、(2)二次壁の肥厚がラメラの堆積として行われるという考え方 (WARDROP・HARADA 1965、今村ら 1972_b) などがあり、これらの他にも(3)仮道管壁のX線回折法 (FREY - WYSSLING 1976)や(4)木口超薄切片のSTEM (scanning transmission electron microscope) による直接観察 (KERR・GORING 1975、RUELら 1978) などからもラメラ構造の存在の可能性が支持されている。これに対して、HEYN (1969) はカリビアマツ (*Pinus caribaea*) の脱リグニン処理前後の仮道管壁をTEMによって注意深く調べたところ、 S_2 ではマイクロフィブリルが均一に分散した構造しか見られず、 S_2 は本来連続した均一な構造であろうと指摘している。さらに近年パルプ化した仮道管壁でしばしばラメラ状構造が観察されているが、これについてSTONEとSCALLAN (1965) は化学的および機械的にパルプ化する工程において生じるのであろうとし、同様のことがリファイニング (refining) するとき (MC INTOSH 1967) とか叩解 (beating) するとき (PAGE・DE GRÂCE 1967) に認められている。このようなパルプ化した仮道管壁にみられるラメラ構造の発現機構については多くの解釈が試みられているが、それらの解釈はすべて(1) S_2 にはもともとラメラ構造があり、これらのラメラ間が薬剤の作用によって緩められ、(2)ひきつづいて機械的な力が働くことによって完全にラメラ化 (delamination) するという2つの点で共通している (STONE・SCALLAN 1965、MC INTOSH 1967、PAGE・DE GRÂCE 1967、SCALLAN 1974)。

したがってここで観察されたラメラ状構造も次の2つの段階を経て発現したものと思われる。すなわちまず第1段階では、脱リグニン処理された S_2 が乾燥されるときに、 S_2 中のマイクロフィブリル同志がヘミセルロースを介して横方向 (接線方向) に凝集することにより微視的なラメラ化が生ずるのであろう。したがって、もし脱リグニン処理した S_2 中のマイクロフィブリル相互の移動を完全に固定することができれば、このような S_2 ではラメラ状構造を見ることができないであろう (例えば HEYN (1969) の観察)。つづいて第2段階では微視的なラメラ化の生じている S_2 に機械的な力 (ここでは縦引張応力) が作用することにより、各ラメラ間が剥離し可視的なラメラ状構造が発現するのであろう。この場合のラメラ間の剥離には、壁中とくに S_2 の放射方向の応力傾斜 (TANG 1972、BARRETT・SCHNIEWIND 1973) とともに、 S_2 中の亀裂先端近傍の応力分布 (COOK・GORDON 1964) が関与するであろう。ところで写真45は写真40の破面の一部を拡大したところを示す。この試料はすでに述べたようにリグニンが完全に除去されていないと考えられ、そのため S_2 中で微視的なラメラ化が十分発達せず、破面にラメラ状構造が現れなかったものと推定される。しかし未処理試料の切断破面に比べて微小なとげ状のものが明瞭にみられることから、マイクロフィブリル間の結合は処理によって緩

められているものと思われる。

写真46から49はスギのホロセルロース晩材単一仮道管をほぼ全乾状態で縦引張破壊したときの破壊先端の全体像およびその一部拡大像を示す。スギの場合も基本的にはアカマツの場合とほぼ同じであった。

脱リグニン処理によってスギ晩材単一仮道管の表面にも太い縦じわが多数観察されたが、仮道管の横断面形状はあまり変化しなかった(写真46, 47)。

S₂の破面はアカマツのそれと同様に切断破壊優先型の破面を呈し、裂け破壊は局部的にみられる程度である。また破面はR-T壁孔を横切って発生することが多かった(写真46の矢印)。その場合の破面はR-T壁孔の近くではC-I破面を呈するが、R-T壁孔から離れたところではC-II破面も観察された。しかしC-III破面は観察されなかった。このようにスギのホロセルロース化晩材単一仮道管壁の破面の構成も未処理のそれにくらべて単純化する傾向が認められた。

また切断破面上ではアカマツの場合程顕著なラメラ状構造は観察されなかったが、写真48に示されているように、それに近い構造を見ることができた。さらにスギでは写真49に示すような典型的なC-I破面がしばしば観察された。

1.3.5.2 リグニンとヘミセルロースの除去の影響— α -セルロース化晩材単一仮道管の破壊形態

ここでは脱リグニン処理と脱ヘミセルロース処理とを施したアカマツおよびスギの晩材単一仮道管(以下 α -セルロース化晩材単一仮道管と称する)の処理による外観の変化ならびに縦引張破壊による破面の形態と構成について、すでに述べた未処理およびホロセルロース化晩材単一仮道管のそれらと比較する(古川 1974b)。

写真50と51はほぼ全乾状態で縦引張破壊したアカマツの α -セルロース化晩材単一仮道管の破壊先端を示す。仮道管は α -セルロース化されることにより、その外観は著しく変化する。すなわち壁は膨潤し、肉厚円筒状を呈する。このような変化はナトリウムイオンによるミセル膨潤だけでなく、ヘミセルロースの除去にともなうマイクロフィブリルの再配列によってもひきおこされている可能性が大きい。また仮道管表面には太い縦じわが多数みられる。これは壁構成成分の大半が除去されることによって生じた空隙が乾燥の際にコラップスすることによって生じたものであろう。

α -セルロース化したアカマツ晩材単一仮道管のS₂の破面は、写真50と51からも明らかなように切断破壊優先型の破面であり、しかもその破面上にはC-II破面の多いことが特徴である。これはS₂中のマイクロフィブリル間を充填している物質が除去されることによって、S₂がかなり均質となり、その結果均質な材料の引張破壊でしばしばみられる純粋なせん断破壊(引張軸に対して45°の面内での破壊)に近い破壊が生じるものと推定される。またS₂の破面上で裂け破壊による破面は局部的にしか見られなかった。

写真52, 53および54は写真50と51に示した破面の一部を拡大したところを示す。この場合

の破面では、未処理およびホロセルロース化晩材単一仮道管の破面と比べて、破面全体が微小なとげ状のもので覆われていることおよびラメラ状構造がほとんどみられず消失していることなどの特徴が認められる。

破面上にみられる微小なとげ状のものは個々のマイクロフィブリルもしくはフィブリルの切断先端を示すものであろう。破面が平坦とならずこのようなとげ状を呈するのは、マイクロフィブリル同志を結合している力が弱く、マイクロフィブリルが S_2 中で個々に破断したためと思われる。すなわち α -セルロース化した S_2 は、マイクロフィブリル同志が緩く結合し、隙間の多い構造をしていると推定される。ところで、 α -セルロース化した S_2 がこのような構造をしていることは、SEM観察中に切断破面が電子線による損傷を受けやすいことから推察することができる(写真54の矢印)。すなわち蒸着膜を突き抜けて S_2 内部に侵入した電子はそこで熱を発生し、これが試料に熱的变化を付与すると考えられる。 S_2 のマイクロフィブリルがリグニンとかヘミセルロースで強固に結合されている場合には、このような熱的变化を受けにくい。ところがこのような充填物質のない場合はマイクロフィブリル同志で直接結合しなければならず、この場合はかえって結合が弱く、熱による影響を受けやすくなると推定される。写真54にみられる裂け目はこのような原因で発生したと思われる。同様の電子線による損傷がコウゾ韌皮繊維のセルロースに富む壁層においてもしばしば観察されたことは興味深い(後述)。

また α -セルロース化した S_2 の切断破面ではラメラ状模様がほとんど観察されなかった。写真55は α -セルロース化したアカマツ晩材単一仮道管の S_2 の破面の一部であるが、ラメラ状模様はわずかに認められる程度である(矢印)。ホロセルロース化した S_2 の破面で見られていたラメラ状模様が α -セルロース化することによって見られなくなることから考えて、 α -セルロース化した S_2 中のマイクロフィブリルは微視的なラメラ状構造(1.3.5.1参照)を形成しないものと推定される。すなわち S_2 が α -セルロース化されることにより、 S_2 中のマイクロフィブリルは S_2 内部でランダムに分散した状態になると考えられる。このことは S_2 の有する複合材料的特性が失われることを意味する反面、材料的にはより均質化したことを意味するものであろう。

写真56と57はほぼ全乾状態で縦引張破壊したスキの α -セルロース化晩材単一仮道管の破壊先端を示す。仮道管の外観の変化および破面の構成はアカマツの場合と同様である。すなわち外観は肉厚円筒状を呈し、その表面には太い縦じわが多数みられる。破面の構成は切断破壊優先型で、とくにC-II破面が顕著に見られる。写真58と59はそれぞれ写真56と57の破壊先端の一部を拡大したものである。破面上にラメラ状模様は見られず、破面全体が微小なとげ状のもので覆われているなどアカマツで見られたと同様の破壊形態が認められた。

以上に示した α -セルロース化晩材単一仮道管の外観および破壊形態と前述の未処理ならびにホロセルロース化晩材単一仮道管のそれらとを比較することによって、 S_2 中の主要構成成分であるセルロースマイクロフィブリルとヘミセルロースおよびリグニンの結合状態をある程度推定することができる。すなわちリグニンだけを除去した S_2 の切断破面はかなり平滑であるのに対して、リグニンとヘミセルロースを除去した S_2 の切断破面は平坦であるが微細なとげ状のもので覆われている。これはリグニン

を除去した段階ではマイクロフィブリル同志がヘミセルロースによってまだかなり強固に結合されているが、ヘミセルロースまで取り除かれるとセルロースマイクロフィブリルだけではかえって相互の結合が悪くなることを示唆するものである。これらのことから S_2 のマイクロフィブリルはそのまわりを取巻くヘミセルロースを介してリグニンと強固に結合していると推定される。

1.3.5.3 コウゾ靱皮繊維壁（内層）の破壊形態

ここでコウゾの靱皮繊維 (bast fiber) 壁、とくに内層（この呼び方については高橋らの研究 (1973) にしたがった）の縦引張破壊形態をとりあげた理由は、その構造が化学組成やマイクロフィブリル傾角の点で α -セルロース化晩材単一仮道管の S_2 に似ており、これらの破壊形態を比較することによって α -セルロース化した S_2 の破壊の特徴をより明確にできるとともに、ヘミセルロースやリグニンといったマイクロフィブリル間充填物質の破壊形態に及ぼす影響も合せて推定できると期待したからである。

写真60はコウゾ靱皮繊維内層の外表面を示す。マイクロフィブリルは集束し、これらの間には隙間が存在する。これらの隙間は電子線があたると容易に広がって裂け目状を呈し、そこからチャージアップを生ずるのが観察された。このことから内層中のマイクロフィブリル相互の結合力は弱いものと推定した。

写真61と**62**はほぼ全乾状態で破壊したコウゾ靱皮繊維の典型的な破壊先端を示す。破面の構成は切断破壊優先型であり、しかもほとんどC-I破面である。この場合内層がほとんど同一平面内で切断破壊される場合（**写真61**）と、裂け破面（S-II破面と推定される）をはさんで異なる2つの平面で切断破壊される場合（**写真62**）とが観察された。また**写真63**は**61**の、**写真64**は**62**の破壊先端を一部拡大したところを示す。破面は全面が微小なとげ状のもので覆われており、しかもその太さがほぼ均一であることから、これらは内層を構成する個々のマイクロフィブリルの切断先端を示していると思われる。このような破面の形態からも、内層はマイクロフィブリルが相互に強く結合した構造ではなく、隙間の多い構造であることが推定される。このようにコウゾ靱皮繊維の内層の破壊形態は α -セルロース化した晩材単一仮道管の S_2 のそれと酷似している。

このようにほとんどセルロースマイクロフィブリルだけから成る壁層は破面の形態や構成が単純で、その強度的性質もほとんど個々のマイクロフィブリルだけに依存していると考えられるのに対し、セルロースマイクロフィブリルがヘミセルロースやリグニンで充填されている壁層は、これらの複合効果によって破面の形態や構成が複雑となり、その分だけ強度や破壊靱性が高くなっていると考えられる (SPIEGELBERG 1966)。したがって、これらのヘミセルロースやリグニンは細胞壁中に在ってマイクロフィブリルがその強度を十分発揮できるように個々のマイクロフィブリルにスムーズに応力を伝達する役割を果たしているものであろう。

1.3.6 S₂の破壊形態に及ぼすマイクロフィブリル傾角の影響

ここでは単一仮道管壁の破壊形態に関与する構造的因子のうちとくに最厚層であるS₂のマイクロフィブリル傾角を取りあげ、これとS₂の破壊形態との関連性について述べる。

木材細胞壁の強度的性質とS₂のマイクロフィブリル傾角の関係を調べた研究は多い。例えばMARKとGILLIS(1973)は理論的に、またARMSTRONGら(1977)やPAGEら(1972)は実験的にこれらの関連性を検討した。それらの結果によると、S₂のマイクロフィブリル傾角(もしくは平均フィブリル傾角)が比較的大きい場合(約25°以上)、壁中の充填物質の影響を強く受け、強度、弾性率ともに小さいが、マイクロフィブリル傾角が小さくなると(約10°以下)マイクロフィブリルそのものの強度が発揮され、強度、弾性率ともに大きくなることを認めている。一方、VAN DEN AKKER(1970)はパルプ単繊維の引張破壊様式をその平均フィブリル傾角によって3つに分類している。すなわち、彼は平均フィブリル傾角が0~15°ではフィブリルの切断破壊が、15~28°ではフィブリル間のせん断破壊が、28°以上ではフィブリル間の横引張による分離破壊が生じるとしている。

ところで晩材単一仮道管のようにS₂のマイクロフィブリル傾角の小さい場合(例えば本研究に用いたスギの晩材仮道管の平均フィブリル傾角は1~4°である(古川ら 1975))でも、その破面には切断破壊による破面と裂け破壊による破面の両者がみられるのが普通である。このことはS₂のマイクロフィブリル傾角が小さいからといってマイクロフィブリルの切断破壊だけが生じるとは一概に言い切れないことを意味するものであろう。そこで本項では晩材単一仮道管の中でとくにS₂のマイクロフィブリル傾角の大きい単一仮道管の破壊形態について、これまでに得られた知見との比較を試みる。ところでここに1つ問題がある。それは、同じ樹種で形状や壁厚や壁層構成割合などの構造的特徴が等しくしかもS₂のマイクロフィブリル傾角のみが異なるような単一仮道管を試料に選ぶことが困難なことである。したがってここでは、できるだけこれまでの晩材単一仮道管に近い構造的特徴をそなえ、しかもS₂のマイクロフィブリル傾角の大きい仮道管ということで、早材と晩材の間にある仮道管(これを以下中間材仮道管と称する)および未成熟材部の晩材仮道管を試料として選んだ。

写真65と66および前掲の写真38はいずれもイチイの未処理の中間材単一仮道管の、また写真67はアカマツのホロセルローズ化した未成熟材の晩材単一仮道管の破壊先端を示す。これらのS₂のマイクロフィブリル傾角をARMSTRONGら(1977)の方法(SEM fracture observation method)で測定してみると20~25°となり、典型的な晩材仮道管のそれに比べてかなり大きいことが分る。これらの写真からも明らかなようにS₂のマイクロフィブリル傾角が大きい場合にも、小さい場合と同様に2つの破面すなわち切断破面と裂け破面を見ることができる。ただしこの場合には、裂け破壊がS₂のマイクロフィブリル配列方向に沿って長く生じているのが特徴である。このため破壊先端はしばしばリボン状(仮道管壁が帯状に裂けてカールした状態を指す)を呈することがある(写真66)。またS₂の切断破壊はS₂のマイクロフィブリル配列方向にはほぼ直角に生じていることも特徴である。さらにこのような裂け破壊したところと切断破壊したところが階段状を呈することもある(写真65と

66)。

このように S_2 のマイクロフィブリル傾角の大きい晩材単一仮道管の破壊形態は、破面の構成の点では基本的に典型的な晩材単一仮道管のそれと同じであるが、破壊先端の全体的な形態はむしろ圧縮あて材単一仮道管のそれと類似している。したがってこの場合の破壊過程も圧縮あて材単一仮道管のそれに似ているのかもしれない。ところでVAN DEN AKKER(1970)の提案しているマイクロフィブリル傾角と破壊様式に関連性に関する考え方は、 S_2 のマイクロフィブリル傾角が異なる晩材単一仮道管の破壊過程(ここでは壁孔などの構造上変異の影響を無視する)のうち、とくにその発生段階において当てはまるものと解釈できる。すなわち、晩材単一仮道管の破壊の開始および初期段階においては S_2 のマイクロフィブリル傾角の影響を強く受け、マイクロフィブリル傾角が大きい場合は裂け破壊、また小さい場合は切断破壊で開始すると考えられる。しかし破壊がある程度進行した段階では亀裂先端の応力状態にも変化が生じ、破壊は必ずしも発生した時と同じ状態で進行するとは限らないであろう。これが破壊の初期と後期における破面の形態的相違となって現れるものと考えられる。

1.3.7 S_2 の破壊形態に及ぼす水分の影響

木材細胞壁は吸湿性に富むため、その強度的諸性質は水分の影響を強く受ける(梶田 1967, 北原 1966, KOLLMANN・CÔTÉ 1968)。単一仮道管の縦引張破壊時の諸性質と水分の関係について調べた研究もいくつかある。WARDROP(1951)およびWARDROPとADDO-ASHONG(1963)はラジアータマツ(*Pinus radiata*)の単一仮道管の場合、全乾状態より飽水状態の方が引張強度は高いことを見出ししている。これについて彼らは、全乾状態では鎖状セルロース分子間の横方向の結合において局部的な応力集中源が生じ、これが強度の低下を招く。これに対して飽水状態ではミセル間が水分によって相互に動きやすく、外力がミセルの再配列を促す(このことはJENTZEN(1964_{a, b})の実験によって確認されている)ことにより壁内部の応力分布の均一化が図られ、局部的な応力集中源が除かれることによって、強度が大きくなるのであろうとしている。最近KERSAVAGE(1973)はベイマツ(*Pseudotsuga menziesii*)のホロセルロース化晩材単一仮道管の場合、含水率12%で引張強度が最大となることを明らかにしている。これについて彼はセルロース自体は乾燥時よりも湿潤時の方が強度は大きい、ヘミセルロースは湿潤状態では塑性を増し弱くなるため、これら両成分の相互作用によるとしている。ところで細胞壁の縦引張破壊形態と水分の関係についてはこれまでほとんど調べられておらず、わずかに綿毛(cotton hair)について行ったHEARLEとSPARROW(1971)の研究があるにすぎない。彼らは、0%RH(SEM鏡体中)で破壊した綿毛の破面は繊維軸に対してほぼ垂直となるのに対し、20°C, 65%RH中で破壊した破壊先端では二次壁のマイクロフィブリル配列方向に沿って長く裂けた部分を観察し、さらに飽水状態で破壊した破面ではマイクロフィブリルが束となって長いとげ状を呈することを観察している。このように含水率が高くなるにしたがって、細胞壁の破壊様式が切断破壊から裂け破壊を主体とした破壊に変わることが綿毛繊維では見出されている。

本論文ではこれまですべて全乾状態で破壊した破面の形態について述べてきたので、ここでは飽水

状態で縦引張破壊した晩材単一仮道管壁，とくに S_2 の破壊形態について述べる。

写真68と69は飽水状態で破壊したスギの未処理晩材単一仮道管の破壊先端の全体像と一部拡大像を示す。写真からも明らかなように破面の構成は裂け破壊優先型であることが分る。しかも S_2 の破面では比較的太くて長い多数のとげ状のものが観察される。これらは S_2 中においてほぼそのマイクロフィブリル配列方向に沿ってランダムに生じた多数の裂け破面の集合したものと見なすことができる。したがって，このような裂けはマイクロフィブリルとこれを取り巻く充填物質，とくにヘミセルロースとの間の二次結合（多分水素結合）が水分子の侵入によって緩められ，そこに外力が作用することによって生じたものと推定される。

また写真70も飽水状態で破壊したスギの未処理晩材単一仮道管の破壊先端を示す。 S_2 の破面には裂け破面とともに，粗いひだ状模様が認められる。このような模様の発生についてはすでに述べたように，亀裂の先端べりに沿ったせん断応力に一因があると思われる。飽水状態では S_2 のマイクロフィブリルが相互に動きやすく，しかも S_2 のマイクロフィブリルは晩材仮道管でもわずかながらせん状に配列しているため，これが引張られると S_2 は乾燥状態に比べて繊維軸のまわりに振れやすく，この振れが亀裂の先端べりに沿ったせん断応力を発生させるのであろう。したがって飽水状態の S_2 では，切断破壊が生じる時にもこのようなせん断力による裂け破壊を伴った破壊が生じるものと推定される。

いずれにしても，飽水状態の S_2 の破壊時には裂け破壊が顕著に認められることが特徴である。

1.3.8 早材単一仮道管の破壊形態

早材仮道管と晩材仮道管の構造的ならびに強度的諸性質の相違についてはこれまでに多数の研究成果が報告されている。まず構造的相違についてみれば，早材仮道管は晩材仮道管に比べて，薄壁で内こうが広く，仮道管の横断面形状は六角形ないし長方形で，半径壁（radial wall）には多数の有縁壁孔を有する（滝沢 1979）。さらに早材仮道管の方が平均フィブリル傾角は大きく（ $10\sim 30^\circ$ ），ミセルの配列性もやや劣る（原田・谷口 1971）。また主要構成成分の組成については，早材仮道管は晩材仮道管に比べてヘミセルロースやリグニンの含有量はほぼ等しいが，セルロース含有量は常に低い（FENGEL 1969）。壁層構成割合は，早・晩材仮道管とも S_2 が圧倒的に多く（ $80\sim 90\%$ ），壁厚が厚くなる程 S_2 の占める割合もやや高くなることが知られている（FENGEL 1969，佐伯 1970 a, b）。つぎに早材および晩材単一仮道管の強度的相違についてみれば，早材の方が晩材に比べて破壊（切断）荷重，引張強度ともに小さく（JAYNE 1959, 1960, LEOPOLD・Mc INTOSH 1961, JENTZEN 1964 a, b, 白田ら 1966, PAGEら 1972），この相違は S_2 のマイクロフィブリル傾角と S_2 の壁中に占める割合に起因するものとされている（SCHNIEWIND 1966, PAGEら 1972）。

したがって，ここでは仮道管の幾何学的形状， S_2 のマイクロフィブリル傾角，壁孔（第3章で詳述）などの点に着目して，これまでに述べた晩材単一仮道管の破壊形態とも比較しながら，スギのホロセルロース化早材単一仮道管ならびにスギの未処理早材単一仮道管（被検試料数は少ない）を乾燥雰囲気中で縦引張破壊したときの破壊形態について述べる。本項で示す写真は特に断らない限りすべてホ

ロセルローズ化仮道管である。

写真71は典型的な切断破面を示す。このように壁は繊維軸とほぼ直角方向に破断し、その破面（とくに S_2 ）には短いとげ状のものが多数観察される。これは破壊時に S_2 中を進む亀裂の先端でマイクロフィブリル間の短い裂けを伴いながらマイクロフィブリルが切断されることによって生じたものであろう。このような破壊は早材単一仮道管の破壊過程の観察からも推定されているように、仮道管が繊維軸のまわりに振れながら切断するときに生じるものであろう。したがって、早材単一仮道管でこのような破面を呈する破壊様式はC-III型の破壊であろう。

写真72は切断破面の一部を拡大したところを示す。破面は平坦でやや傾斜していることから、この場合の破壊様式はC-IもしくはC-II型であろう。しかしながらこの型の破面は早材単一仮道管の切断破面では局部的にしか観察されなかった。

写真73は典型的な裂け破面を示す。 S_2 は晩材仮道管に比べてかなり薄いため裂け破面を詳細に観察することは困難であった。したがってこのような裂け破壊の様式は破面の形態的特徴からだけで推定するのは困難であるが、破壊過程の観察結果を参考にすることによって、この場合の裂け破壊様式はS-IIもしくはS-III型の裂けのいずれかであろうと推定される。また裂け破壊の際には S_2 以外の壁層、とくに $P+S_1$ は S_2 の裂けに伴って帯状に引き裂かれるが、 S_3 は S_2 の裂けに沿って破断する。これらのことから $P+S_1$ は S_2 の裂け破壊の進行を若干阻止すると思われるが、 S_3 は裂けの進行の障害にはならないと思われる。

写真74は破壊先端のマッチング写真である。以下に示す破壊先端もすべてマッチング写真によって検討したが、ここでは紙面の都合上いずれか一方のみを示すことにする。

早材単一仮道管の切断破壊は放射組織との交差域を横切って生じていることが多い。このことは検鏡した試料の8割以上の破壊先端において認められた（古川ら 1975）。この場合破壊は交差域の端付近で生じることが多く、その際R-T壁孔は繊維軸方向に2分されるか、もしくは孔口に沿って破断されることが多い。これらのことから放射組織との交差域は早材単一仮道管の強度上の弱点部と考えて差つかえないであろう。また半径壁には多数のT-T壁孔が存在する。しかし写真74にも示されているように、T-T壁孔が破壊の際に2分されることはなく、むしろ破壊はこれを避けて生じているように見える。このようにR-T壁孔とT-T壁孔はいずれも壁孔縁（pit border）を有する壁孔でありながら、その破壊時の挙動は著しく異なる。

写真75は典型的な切断優先型破面を示す。しかし破面全体がこのように切断破面だけで構成されることは少なく、多くの場合裂け破面も同時に観察される。

写真76から**79**は混合型破面を示す。写真76では裂けが仮道管壁の陥没に沿って生じている（矢印）。これはPAGEら（1972）の提案しているように、 S_2 のマイクロフィブリルのらせん状配列に沿って生じた裂けかもしれない。写真77では放射組織との交差域で切断破壊が生じているが、それ以外のところでは裂け破壊によって破壊している。これは、破壊がまず放射組織との交差域で始まり、つづいて仮道管が繊維軸のまわりに振れながら破壊することによって生じたものと推定される。写真

78と79では、裂け破壊が仮道管の隅に沿って生じているのが特徴である。このような裂け破壊は晩材単一仮道管では観察されない。この原因については薄い細胞壁が仮道管の隅で急激に折れ曲がっているという単なる幾何学的形状によるものか、またこのところにおける S_2 のマイクロフィブリル配列上の変異などの構造上の変化によるものか、それともこれらとは別の原因によるものか現在のところ不明である。

写真80と81は裂け破壊優先型破面を示す。これらの破面には放射組織との交差域が含まれておらず、壁孔と壁孔の間の細胞壁(unpitted wall)で破壊している。このような場合は、VAN DEN AKKER(1970)の提案しているように、 S_2 のマイクロフィブリル間のせん断破壊によって破壊が開始したことを示すものかもしれない。ところで写真81では S_2 の裂け破壊がT-T壁孔の縁を周回するように生じている。これは早材仮道管のT-T壁孔が裂け破壊に対しても抵抗性のあることを示すものであろう。

写真82は早材単一仮道管の典型的な縦引張破壊形態の1つで、破壊過程の観察結果でも示したように、異なる2つの亀裂によって破壊した破壊先端を示す。この場合はまず最初の亀裂(一次亀裂)が放射組織との交差域の端付近(矢印)に生じ、つづいて別の亀裂(二次亀裂)が一次亀裂から少し離れたところに生じ、その後これらの2つの亀裂の間を裂け破壊が進行することによって仮道管は破断されたものと推定される。この型の破壊先端には2つの亀裂にはさまれた部分が途中まで破壊した状態で破壊先端に付着しているのが特徴である。

写真83はスギの未処理早材単一仮道管の破壊先端を示す。この場合は S_2 のマイクロフィブリルのらせん状配列に沿った長い裂け破壊が特徴である。このような裂けの発生は、 S_2 のマイクロフィブリル傾角が大きいためマイクロフィブリルの切断破壊に先だってマイクロフィブリル間のせん断による裂け破壊が生じたためであろう。

これらの観察から、早材単一仮道管の縦引張破壊形態の特徴は、(1)放射組織との交差域の端付近で切断破壊が生じやすいこと、(2)R-T壁孔とT-T壁孔での破壊には相違が認められること、(3)仮道管壁は切断破壊と裂け破壊の両者によって破断され、とくに裂け破壊は S_2 のマイクロフィブリルのらせん配列ならびに仮道管の隅に沿って生じることが多いことなどを挙げることができる。

1.4 要 約

1. 木材単繊維の細胞壁(単一細胞壁)中における縦引張破壊時の亀裂の挙動を直接可視化するための方法(動的観察法)を検討するとともに、この方法をスギの早材、晩材および圧縮あて材単一仮道管の破壊過程の観察に適用した結果、以下のことが明らかとなった。

1) SEM鏡体内に装着できるような小型で高精度の引張試験装置を考案するとともに、テレビ走査装置とVTRを用いることにより、単一仮道管の破壊過程をSEMレベルで直接可視化することが可能である。

2) 早材単一仮道管の破壊過程は特徴的な2つの破壊段階をもつ。すなわち破壊の第1段階では、亀裂は放射組織との交差域の端に近いR-T壁孔ならびに分野の細胞壁を繊維軸に対してほぼ直角方向

に切断するように発生し、これと同時に破壊したところにずれが観察される。破壊の第2段階では最初に発生した亀裂とは異なる場所に別の亀裂が発生し、これら2つの亀裂の端と端をつなぐように仮道管壁の裂けを主とする亀裂が発達することによって仮道管は2つに分断される。早材単一仮道管壁中を伝播する亀裂の先端における破壊モードは伝播の途中で変化するものと推定される。

3) 晩材単一仮道管の破壊過程も2つの破壊段階をもつ。破壊の第1段階ではR-T壁孔もしくはT-T壁孔に発生した亀裂が S_2 のマイクロフィブリルを切断するように繊維軸に対してほぼ直角方向に伝播し(このような破壊を切断破壊と名づける)、つづく破壊の第2段階では S_2 のマイクロフィブリル間を引き離すような仮道管壁の裂けを主とする亀裂が発達する(このような破壊を裂け破壊と名づける)のが認められる。

4) 圧縮あて材単一仮道管の破壊過程は正常な単一仮道管のそれと異なり、まず亀裂はらせん状うね間の溝に沿った裂け破壊で発生し、つづいて裂けたところがリボン状に変形し、最終的に各うねが切断破壊されることによって仮道管は破断する。

2. 針葉樹材単一仮道管の縦引張破壊形態をフラクトグラフィ的に研究するための観察方法(静的観察法)を検討するとともに、この方法を代表的な9種の針葉樹材単一仮道管、主として晩材単一仮道管の S_2 の破面形態の観察に適用し、仮道管壁の破壊機構ならびに破壊形態に関与する2, 3の因子について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

1) 化学的処理を受けていない単一仮道管(未処理単一仮道管)を調製することにより、木材中に存在する状態に最も近い状態の単一仮道管壁の破壊形態を観察することが可能である。また単一仮道管を引張破壊するのに適した引張装置を考案した。

2) 未処理晩材単一仮道管の S_2 の破壊形態をSEMで詳細に調べたところ、切断破壊および裂け破壊した破面はさらにそれぞれ次の3つの破壊様式に類別できることが分かった。すなわち切断のI型(C-I)、切断のII型(C-II)、切断のIII型(C-III)、および裂けのI型(S-I)、裂けのII型(S-II)、裂けのIII型(S-III)破壊である。これら6つの破壊様式の発生は S_2 中における亀裂の先端に支配的に作用する応力の種類(引張応力とせん断応力)とその作用方向(S_2 のマイクロフィブリル配列方向に平行もしくは直角方向)によって決定されるものと推定した。

3) 晩材単一仮道管の破面全体はいくつかの破壊様式によって生じた破面で構成されており、これらの破面の構成を大別すると、切断破壊優先型、裂け破壊優先型、混合型の3つに分類することができる。

4) リグニンを除去(ホロセルロース化)することによって晩材単一仮道管の S_2 の破面の構成は切断破壊優先型に変わり、とくにC-I, C-II破面が顕著に現れる。またこれらの破面上では独特の同心円状模様が観察されることから、 S_2 には潜在的にラメラ構造が存在すると推定される。さらにリグニンとヘミセルロースの両者を除去(α -セルロース化)した晩材単一仮道管の外観には著しい変化(肉厚円筒状に変形)が認められるばかりでなく、破面の構成も切断破壊優先型となって、C-II破面が顕著に出現し、破面上は微細なとげ状のもので覆われているのが認められる。 α -セルロース化

した S_2 の切断破面はコウゾ韌皮繊維の内層の破面と似ている。

5) 晩材単一仮道管の S_2 の破壊形態に及ぼす S_2 のマイクロフィブリル傾角の影響は、 S_2 のマイクロフィブリル傾角が大きい程裂け破壊が顕著に現れる。ただしこの場合の破面の形態や構成は基本的にはマイクロフィブリル傾角の小さい場合と同じである。

6) 晩材単一仮道管の S_2 の破壊形態に及ぼす水分の影響は、含水率の高い場合（飽水状態）にはC-III破面および裂け破壊による破面が多く見られる傾向がある。

7) 早材単一仮道管の破壊形態も基本的には晩材単一仮道管のそれと同じである。切断破壊はR-T壁孔を含む分野で生じることが多く、裂け破壊は S_2 のマイクロフィブリルのらせん配列ならびに仮道管の隅に沿って生じることが多い。

第2章 針葉樹材の切片の縦引張破壊

2.1 概 説

木材の縦引張破壊は木材を構成する個々の構成要素の破壊と、これらの構成要素相互の破壊の2つが合わさった挙動と考えられる。そこで木材の縦引張破壊機構を明らかにするためには、まず個々の構成要素の細胞壁が周囲からなんらの拘束も受けずに縦引張破壊するときの亀裂の挙動について調べ、次に細胞間層をはさんで隣接壁による周囲からの拘束を受けて縦引張破壊するときの亀裂の挙動から拘束の効果について調べることが必要であろう。前者の状態の細胞壁が単一細胞壁 (single wall) であり、後者の状態の細胞壁が重複細胞壁 (double wall) である。単一細胞壁の破壊については針葉樹材単一仮道管を用いて第1章で検討したので、ここでは重複細胞壁の破壊について調べる。試料には、構造用部材として広く用いられ、構成要素の配列も比較的単純で、しかも破壊の解析を容易にするため構成要素の量のある程度限定した針葉樹材切片を用いることにした。

ところで前章でも明らかなように単一細胞壁では繊維軸のまわりの捩れによるせん断変形が自由であるのに対し、重複細胞壁ではマイクロフィブリル傾角のほぼ等しい各壁層が細胞間層をはさんで逆傾斜して接合されているためせん断変形がある程度拘束されている。このように単一細胞壁と重複細胞壁とではその力学的境界条件を異にするため、このことが破壊挙動、とくに重複細胞壁中の亀裂の挙動に影響するものと考えられる。これら両タイプの細胞壁の縦引張破壊を直接可視化して調べた研究はほとんど発表されていないが、間接的に調べた研究は多い。したがって本研究を遂行するうえでこれらの研究成果を予め理解しておくことは有益なことと考え、以下にその概略を述べる。

<切片の縦引張破壊に関する研究>

針葉樹材のマイクローム切片による縦引張破壊については、KLOOT (1952) によって始められて以来多数の研究成果が報告されている (WARDROP 1951, IFJU・KENNEDY 1962, WELLWOOD 1962, 1965, IFJU 1964, IFJUら 1965, WILLSON・WELLWOOD 1965, SAIKI 1970b)。これらの研究によって切片の強度と1年輪内における位置、繊維長、平均フィブリル傾角、密度、セルロースやリグニンの含有量それに平均重合度などとの関連性が明らかにされた。それと同時に切片の破壊先端の形状 (WARDROP (1951) はこれを line of failure と称しており、ここでは破壊線と呼ぶことにする) についても簡単に調べられ、その結果早材切片の破壊線は繊維軸に対しほぼ直角方向に直線状であるのに対し、晩材切片では破壊線が不規則なさざら状を呈し、破壊先端には引き剥がれたような仮道管が見られることを明らかにしている。この点について、WARDROP と ADDO-ASHONG (1963) および DAVIES (1968) はラジアータマツ (*Pinus radiata*) の 80 μm 厚さ切片の縦引張破壊部の TEM 観察から、切片中の仮道管は S_1 と S_2 の境界で剥離破壊しやすいことを見い出している。

一方、FUTÓ (1969) はオウシュウトウヒ (*Picea abies*) の 20 μm 厚さのまさ目切片の縦引張破壊過程

の光顕観察から、亀裂は晩材中では放射組織に沿って進む傾向があるが、早材中では放射組織と関係なく進むことを明らかにしている。

<細胞壁の力学的研究>

MARK (1967) によって始められたこの方面の研究は、その後細胞壁の放射方向の応力分布の計算、さらに重複細胞壁中の応力分布の計算へと発展した (TANG 1972, SCHNIEWIND 1972, BARRETT・SCHNIEWIND 1973, 祖父江・浅野 1976)。これらの計算に用いられた重複細胞壁では、相対する細胞壁の各壁層の厚さが等しくそのマイクロフィブリル傾角は対称的に逆傾斜しているため、細胞壁間のせん断変形は拘束されたものとして計算されている。一方、祖父江と浅野 (1976) は、単一細胞壁相互間の変形の拘束が不完全な場合について検討している。このことは重複細胞壁の各壁間では相互にかなりの力学的影響を及ぼし合っていると、細胞間層の力学的評価が重要であることを示唆するものである。

<破壊力学的研究>

木材中を亀裂が繊維を横切って伝播する場合、すなわち縦引張破壊の場合の破壊靱性は約 10^4 J/m^2 であり (TATTERSALL・TAPPIN 1966, GORDON・JERONIMIDIS 1974, CHAPPELL・MORLEY 1976)、この値は延性金属 (約 10^5 J/m^2) や FRCM ($10^3 \sim 10^4 \text{ J/m}^2$) のそれに匹敵する。ところが木材中を亀裂が繊維に平行に進む場合、すなわち横引張破壊の場合の破壊靱性は約 10^2 J/m^2 と小さい (ATAK 1961, PORTER 1964, DEBAISE 1966, SCHNIEWIND・POZNIAK 1971)。したがって木材中を亀裂が繊維を横切って伝播する場合には、亀裂の先端において大きなエネルギーを吸収するようななんらかの機構が存在するものと考えられる。FRCMの縦引張破壊においては繊維と母材の相界面における裂け (splitting behavior)、もしくは相界面に沿った剥離による繊維の引き抜けや繊維自体の亀裂の進行妨害作用 (crack arrestor mechanism) が (FOWLKES 1974, 福田・河田 1974a, b, 藤井・座古 1978)、また延性金属では亀裂先端近傍における金属原子相互の迂りによる塑性変形 (TETELMAN・MC EVILY 1967) が破壊靱性の向上に大きく寄与していることが知られている。しかし木材の縦引張破壊では破壊ひずみが小さく、金属でみられるような塑性変形は考えられない。また破壊先端において仮道管や木部繊維が木材中から抜け出たり、壁破断面においてマイクロフィブリルが長く抜け出て破断しているなどの例はこれまでに報告されていない。これらのことから、木材中や細胞壁中における繊維状の構成要素は、FRCM中の繊維とは破壊時における挙動を異にするものと思われる。この点について JERONIMIDIS (1976) は、COOKとGORDON (1964) の提案した機構による亀裂先端付近での細胞間の剥離破壊 (S_1 近傍で生じるとしている) と、PAGEら (1971) の提唱した S_2 のらせん配列構造に沿った陥没に伴う裂け破壊の2点を挙げ、これらが破壊靱性を高めているとしている。

<フラクトグラフィ的研究>

木材を横引張破壊した破面のSEMもしくはTEMによる観察側はいくつかあるが (ATAK 1961, DEBAISE 1966, KORÁN 1967, 1968)、縦引張破壊した破面の観察例は少ない (佐伯 1972,

1973)。DERAISEら(1966)はウエスタンホワイトパイン (*Pinus monticola*) の横引張破壊において、亀裂は仮道管間 (S_1 附近) では比較的ゆっくりと進むが、放射組織との交差域や仮道管先端の重なり部のところでは一時的に運動が阻止されるため、これらの部位を通過後は急激に進むであろうと指摘している。また佐伯ら(1972)は針葉樹材中の仮道管壁の縦引張破壊形態には、壁が繊維軸にほぼ直角に破断される cross fracture type (切断破壊タイプ) と壁を斜めに破壊してとげ状を呈する splintering fracture type (裂け破壊タイプ) の2つの型があり、さらに前者には破面が平滑な場合と独特のひだ状模様を呈する場合とがあり、後者には S_2 のフィブリルに沿って裂ける場合ととげ状に引き抜けてささら状を呈する場合とがあることを見出ししている。

以上のような種々のアプローチによって木材の縦引張破壊に関する知見は集積されつつあるが、依然として縦引張破壊時の木材組織中における亀裂の挙動に関する直接的な知見は少ない。

したがってここでは、まず木材切片の縦引張破壊過程の直接可視化を試み、つぎに破壊先端の形態を詳細に調べることによって、破壊の相変化と壁の破壊形態、重複細胞壁における亀裂の伝播様式、細胞の配列と亀裂伝播経路の関連性、壁構造変異部における亀裂の挙動などについて明らかにすることが目的である。これらの目的に対して行った結果(古川 1976, 1978b) を述べる。

2.2 切片の破壊過程

2.2.1 はじめに

木材切片の縦引張破壊過程における切片中の亀裂の挙動を明らかにすることは、木材が本来有する優れた破壊特性の発現機構を解明するうえで重要である。ところが木材切片の縦引張破壊現象は破壊ひずみが小さくしかも短い時間内に生起する現象であるため、亀裂の伝播している途中の状態を直接可視化して調べることは困難なものとされてきた。Furó(1969)はオウシュウトウヒ (*Picea abies*) の $20\mu\text{m}$ 厚さ切片の縦引張破壊過程の直接観察を光顕によって試みているが、切片中における亀裂の挙動を明らかにするまでには至らなかった。

そこでこの現象をモデル的に生起せしめる方法として、従来の縦引張切片(これを平滑切片と称する)にノッチ(notch; 切り欠き)をつけ、ノッチからの亀裂の伝播を直接観察する方法を考案した(古川 1976, 1978b)。この方法によって観察される破壊現象は以下に示す理由から、実際の木材もしくは平滑切片で生じる破壊現象を十分再現するものと考えられる。すなわち第1は、ノッチ付き切片で観察された破壊線の形状は従来から平滑切片で観察されているものと矛盾しないことである。第2は、平滑切片の縦引張破壊もなんらかの原因によって切片中にもともと存在する欠陥部から生じる亀裂の伝播現象であると考えられ、ノッチはこれらの欠陥部と同質のものと考えられるからである。ここに言う欠陥部には、樹木として生育している間に自然に生じたもの(例えば風雪害や生長応力によって発生する微小な圧縮破損など)もあれば、切片作製時に人為的に生じたもの(例えば引掻き傷や

微小な圧縮破損など), さらに本来から有する構造上の変異部(例えば壁孔や仮道管の重なり部, 放射組織との交差域など)など種々なものがある。しかもこれらの欠陥部は切片作製中にランダムに混入するおそれがあるため, 切片の破壊開始場所を限定することができず, これが切片の破壊過程の観察を困難にしている原因であろうと考えた。したがって, ここでは切片に初めから破壊の起点となるような欠陥部に相当するノッチを入れることにより, 破壊の開始場所を限定し, 観察を容易にするとともに, 発生した亀裂の切片中における進行方向や伝播経路をも明確にすることができると期待した。

2.2.2 切片の調製と観察法

2.2.2.1 切片の調製

1) 供試材

材料としては樹令15年(鳥取県産)のスギ(*Cryptomeria japonica* D. DON)の胸高部位から12~13年輪を含むブロック(板目切片作製用は5(T)×20(R)×40(L)mm, まさ目切片作製用は20(T)×5(R)×40(L)mm)を切り出し, これを水で煮沸飽水にした後, ミクロトーム切削に供した。

2) 切片の切削と供試切片の作製

切片はユング型ミクロトームによって切削した。切削に際しては, 切片中の仮道管が目切れを起こさないようにすることと, 切削時のナイフによって仮道管壁中に微小な圧縮破損の入らないようにすることの2点に注意を払った。前者の点については, WELLWOOD(1962)の方法を用いて仮道管の配列方向をチェックし, 後者の点についてはKEITHとCÔTÉ(1968)の提案に従ってナイフの刃先と繊維軸方向のなす角度をほぼ 0° に, またナイフ刃先の逃げ角を 11° に設定して切削を行った。

切片の厚さは, 予め木口切片によって仮道管の寸法を測定したうえで, 切片の厚さ方向に完全な仮道管が2~4個含まれる程度とした。すなわち, 板目晩材切片は $60\sim 80\mu\text{m}$, 板目早材切片は $100\sim 120\mu\text{m}$, まさ目切片は $50\sim 100\mu\text{m}$ の厚さとした。

板目切片はブロックの早材部と晩材部, それに早材と晩材の中間部(この部分をここでは中間材と称する)の3つの部位から切り出した。まさ目切片は所定の1年輪分(早材から晩材まですべて含まれる状態)を切り出した後, 早材部分と中間材を含む晩材部分の2つに切り分けた。こうして5種類の切片を作製した。飽水状態の切片は1枚あてスライドガラスにはさんで 40°C で乾燥した。

切片は新しいかみそりの刃で長さ(繊維方向)約20mm, 幅(板目もしくはまさ目方向)2~4mmに切り揃えて供試用とした。かみそりは常に新しいものを用いて, 切り口がささくれないようにするとともに, 仮道管が目切れしないよう繊維方向に沿ってできるだけ正確に切った。

供試用の切片は, スパンに相当する穴(幅4mm)のあいた台紙にエポキシ樹脂系接着剤(商品名アラライト)で中央に固定してから引張装置(後述)に取り付けた。台紙にあけた穴の両側は引張りに先だって小さなヒーターで焼き切った。

3) ノッチの入れ方

切片を引張装置に取り付けてから、切片の中央付近の片側の縁辺部にノッチ（このようなノッチは single edge notch と呼ばれている）を入れた。ノッチは割箸の先に新しいかみそりの割片を取り付けた道具を用いて、切片を万能投影器で見ながら入れた。ノッチの長さは繊維軸と直角方向に1～数仮道管分とした。

2.2.2.2 観察と記録

切片の破壊過程の観察には光顕を用いた。切片内部の仮道管の破壊の様子を直接観察する手段としては現在のところ透過光による通常の光顕観察法が最も有効であろう。

切片の破壊過程を光顕で観察できるようにするため、光顕の試料載物台上に装着できる引張装置を試作した（古川 1976）。この装置はマイクロメーターを手で回すことによってクロスヘッドが片方に移動し、このとき固定端との間に取り付けられた切片が引張られる仕組みになっている。

破壊はすべて温度 15～22°C、相対湿度 55～75%の室内で行い、同一種類の切片について 15～20 回繰り返し行った。

光顕観察する際に、切片中の亀裂の挙動を観察しようとするときには 10 倍の対物レンズ（開口数 0.25）を用い、切片の破壊の全体像を観察しようとするときには 4 倍の対物レンズ（開口数 0.1）を用いた。この場合の視野の深さは、10 倍の接眼レンズを用いた場合、前者では約 14 μm 、後者では約 88 μm となる（田中 1971）。したがって 10 倍の対物レンズを用いて観察する場合には、何度も焦点を合わせながら切片の厚さ方向における位置関係を確認することが必要である。この確認作業を注意深く行えば、逆に切片の厚さ方向における個々の仮道管別の亀裂の挙動をとらえることも可能である。

撮影はすべて光顕にとりつけた通常の写真撮影装置により行った。

2.2.3 破壊の相変化

一般に材料が破壊するときには 3 つの特徴的な相（phase、もしくは破壊段階）を経て最終的な破断に至ることが知られている（金丸 1977）。すなわち破壊の第 1 相は亀裂の形成もしくは発生（crack nucleation）段階であり、第 2 相は亀裂が比較的安定してゆっくりと伝播する（stable crack growth、もしくは slow crack propagation、以下 SCP と略記）段階であり、第 3 相は亀裂が不安定な状態で急速に伝播する（unstable crack extension、もしくは rapid crack propagation、以下 RCP と略記）段階である。

木材の破壊において、破壊の第 1 相については切片もしくは試験体中に既存の欠陥部が関与しているものと推定されているにすぎず（PORTER 1964, DEBAISE ら 1966）、第 2 相についても AE（acoustic emission）法による試片中の微小破壊の発生頻度や（DEBAISE ら 1966）亀裂が準静的（ 10^{-1} ～ 10 mm/sec）に伝播するときの破壊靱性（MAI 1975）が測定されているにすぎない。また木材の破壊についてこれまでに測定されている破壊靱性や観察されている破面の形態は、いずれも破壊の第

3相についてなされたものと思われるが、とくに各相毎に区別して行っている訳ではない。しかもこれらの研究の多くは木材の横引張破壊についてなされているため、木材の縦引張破壊に関するこれらの知見はほとんどないのが現状である。そこで以下、スギのノッチ付き切片の縦引張破壊において観察された破壊の3つの相の特徴について述べる。

写真84は板目中間材切片でみられた典型的な破壊の第1相を示す。写真には負荷前(①)、破壊直前(②)、破壊開始直後(③)が示されている。このように切片が引張られるにしたがってノッチはくさび状に開口し、その周辺の縁辺部がわずかに突出するのが観察される。このようなノッチ周辺の変形は早材、晩材ともに板目切片においては顕著に認められたが、まさ目切片においてはほとんど観察されなかった。これは板目面とまさ目面における仮道管の配列の仕方の違いによって、ノッチ周辺に発生する応力分布に相違があるものと推定される。

また、ここに供試したすべての切片において亀裂は必ずノッチの先端に発生した。例えばノッチの長さが1仮道管分の幅に達しないような場合でも亀裂はノッチの先端に発生するのが観察された。このことは木材切片の縦引張破壊では切片の縁辺部の切り口の形状が破壊開始の一因となり得ることを示唆するものであろう。

亀裂の発生につづいて、亀裂の伝播過程では、破壊の第2相および第3相に相当すると思われる亀裂の伝播速度の異なる2つの破壊段階が観察された。**写真85**は板目中間材切片でみられた典型的なノッチ付き切片の破壊の第2相と第3相を示す。ノッチ先端に発生した亀裂は初めのうち比較的ゆっくりと伝播する(写真85の②と③)が、その後急速に伝播することによって切片は2つに破断される(写真85の④)。そこで本研究では破壊の初期にみられる亀裂のゆっくりと伝播する段階をSCP段階(もしくは緩徐亀裂伝播段階)と呼び、これに続く亀裂の急速に伝播する段階をRCP段階(もしくは急速亀裂伝播段階)と呼ぶことにする。したがってノッチ付き切片の縦引張破壊ではSCP段階を破壊の第2相、RCP段階を破壊の第3相と見なすことができる。

このようにSCP段階では切片中における亀裂の挙動を直接可視化することも可能であるが、RCP段階では亀裂の挙動を観察することは困難であろうと思われる。しかしながら、RCP段階は必ずSCP段階の後に続いて発生することから、SCP段階の破壊部を予め確認しておけば、RCP段階の破壊部においても亀裂の伝播方向を把握することは可能であろう。したがって、SCP段階における亀裂の挙動の直接観察やRCP段階における亀裂の伝播方向を踏まえたるまでの破壊形態の観察は木材の縦引張破壊のメカニズムに関する知見を得るための有益な手掛りとなる。

写真86は板目早材切片の破壊過程を示す。早材切片では破壊の第1相にみられる特徴は中間材や晩材の切片のそれと同じであるが、破壊の第2相すなわちSCP段階が極端に少なく、切片のほとんど全てがRCP段階で破断するのが特徴である。

また晩材切片では亀裂の先端付近でしばしば繊維軸方向に沿って仮道管間で長い裂けが生じ、しかも裂けに続く亀裂の挙動がとらえ難いため、破壊過程の観察には成功しなかった。しかしながら破壊がノッチから開始することだけは確認できた。したがって破壊先端でのおおよその亀裂の伝播方向

を推定することはできた。

以上の観察から、板目およびまさ目のいずれの切片においても、壁の比較的厚い中間材切片でSCP段階の破壊（SCP破壊と略記）が最も明瞭に認められ、壁の薄い早材切片ではSCP破壊が数仮道管も進行しないうちにRCP段階の破壊（RCP破壊と略記）に移行するのが認められた。

中間材切片および晩材切片では亀裂の伝播している途中で亀裂の生長が一時的に停止することがあった。この場合亀裂は停止した場所から再びSCP破壊を経てRCP破壊に移行するのが観察された。このように亀裂が伝播途中で停止するのは、亀裂先端に集中していた応力がなんらかの原因によって緩和されたためであろうと考えられるが、この点については破壊先端の観察結果と合わせて次節で検討する。

2.2.4 重複細胞壁中の亀裂の伝播様式

縦引張破壊時における木材中の亀裂の挙動、とりわけ個々の構成要素間を亀裂が如何にして伝播するかといったことに関する知見はこれまで報告されていない。ここでは単一仮道管の縦引張破壊過程の観察から明らかになった仮道管壁の2つの基本的な破壊様式、すなわち切断破壊と裂け破壊がその周囲を拘束された状態にある壁中でどのように発生し、またこれらが隣接仮道管にどのようにして伝播するのかということについて、ノッチ付き切片の破壊過程（とくにSCP段階）の顕微鏡観察から得た結果について述べる。

写真87は板目中間材切片のSCP段階において亀裂が1対の重複細胞壁（この場合は重複接線壁）中を伝播する過程を段階的に示したものである。写真①、②では亀裂は1対の重複接線壁の片方の壁（写真に向って奥の側の接線壁）中を繊維軸にほぼ直角方向に生長しており、その亀裂が写真③でみられるように、壁の中央を少し越えた時に亀裂の先端のところでもう一方の壁（写真では手前側の接線壁）中に別の亀裂、それも S_2 のマイクロフィブリル配列方向に沿った裂けを誘発するのが認められる。その後は両者の亀裂が拡大し、さらに次々と隣接する仮道管壁に伝播することによって切片の最終的な破断にまで至ったものと思われる（写真④～⑥）。ところで、ここで観察している重複細胞壁（重複接線壁）が1対であることと亀裂がそれぞれ別の接線壁に発生したものであることは次のような理由から判定できる。まず前者については、ここで使用した対物レンズ（10倍）と観察倍率から計算される視野の深さは約 $14\mu\text{m}$ であり、一方この切片の仮道管の半径方向の直径は約 $23\mu\text{m}$ であることから、この切片中の2対の重複接線壁に同時に焦点を合わせることは不可能である。したがってここで観察されているのは1対の重複接線壁であると判定できる。次に後者については、最初の亀裂（写真②）は隣接接線壁に亀裂を発生させた後裂け破壊に変化しており、この裂けの方向と隣接接線壁に生じた裂けの方向とは互いに逆傾斜している（写真⑥）ことから、これらの裂け破壊はそれぞれ別々の接線壁の S_2 に生じたものであることが分る。

写真88も写真87と同様に板目中間材切片のSCP段階において亀裂が1対の重複接線壁中を伝播

する過程を示したものである。この場合は、写真でみて手前側の壁中を進展してきた亀裂（写真①）が仮道管の隅に達したとき（写真②）、そこで隣接する壁（写真では向う側の接線壁）中の S_2 に裂け破壊を発生させる（写真③）ことによって亀裂が隣接の仮道管に伝播する様子が示されている。

重複細胞壁におけるこのような亀裂の挙動は、木材中の各木材構成要素間の基本的な亀裂の伝播様式の1つと考えられる。すなわち、重複細胞壁の片側の壁中を進行している亀裂がその先端のところで隣接細胞壁に裂け破壊を発生させることによって各構成要素間を伝播するというのがこの場合の特徴である。

写真89は板目早材切片のSCP段階において亀裂が重複接線壁中を伝播する様子を示したものである。この場合、亀裂は各壁中に裂け破壊を発生させることなく繊維軸に対してほぼ直角方向に伝播し、しかも重複接線壁は亀裂の先端で両壁がほぼ同時に切断破壊されるのが認められる。このことについては次のように考える。すなわち早材切片中の重複細胞壁は細胞間層をはさんで相接する仮道管壁が薄く、しかもその厚さおよびマイクロフィブリル傾角がほぼ逆対称になっているため、各壁内部のせん断変形は細胞間層によってほぼ完全に固定されていると考えられ、そのため重複細胞壁は個々の壁として挙動するのではなく、重複細胞壁があたかも1枚の壁（しかもこの場合の弾性主軸はほぼ繊維軸に平行と考えられる）のように挙動するものと考えられる。このため早材切片中の重複細胞壁は亀裂に対しても、その先端でほぼ同時に両細胞壁が切断破壊されるのであろう。したがってこの場合は重複細胞壁の個々の壁中を亀裂が別々に進むのではなく、亀裂は両細胞壁をほぼ同時に破壊（主として切断破壊）しながら進行するのが特徴である。これと対照的なのが晩材切片の破壊挙動である。

写真90は板目晩材切片の破壊過程の一部を示す。晩材切片では、晩材仮道管の内こうが狭く、仮道管の半径方向の径も小さく（約 $11\mu m$ ）、しかも壁が厚いため、壁中の亀裂の挙動を詳しく観察することはできなかつた。しかし晩材切片では亀裂の進行している途中で繊維軸方向に沿った長い裂け（顕微鏡観察では仮道管間で剥離しているように見える）が生じることがしばしば観察される（写真②の矢印）。このような裂けはノッチの先端近くで発生することもあれば、亀裂が切片中を伝播している途中で生じることもある。しかもこの裂けの特異な点は、切片中を伝播する亀裂によって生じた裂けであるにもかかわらず、切片の最終的な破断がこの裂けのところで生じるとは限らないことである。したがってこの裂けは亀裂（最終的破断に直接関与している亀裂）が切片中を伝播する際に二次的に発生することもあると考えられる。

ところで木材の縦引張破壊先端、とくに晩材部においてこのような裂け（以下本論文では細胞壁の裂け破壊の裂けとの混同を避けるため、これを剥離もしくは剥離破壊と呼ぶことにする）の存在することはかなり前から注目されており、このような剥離破壊の発生部位は S_1 と S_2 の境界近傍であることが明らかにされている（WARDROP・ADDO-ASHONG 1963, DAVIES 1968, SAIKI 1970b, 佐伯ら 1972）。ところがこの剥離破壊の発生のメカニズムについては不明な点が多い。この点についてMARK(1967)は S_1 内部で破壊の生じやすいことを仮道管壁内部の応力解析結果から示しているが、このような剥離破壊がノッチ（もしくは切片を横切って進む亀裂）の先端付近で発生する二次的な破

壊であることを説明するには、さらに別の要因についても考慮する必要がある。JERONIMIDIS (1976) は木材中において繊維を横切って進展している亀裂(もしくはノッチ)の先端が S_1 に近づくと、COOKとGORDON(1964)の提案している機構によって剥離しやすい状態にある(MARKの指摘) S_1 が繊維方向に沿って剥離破壊するのであろうと述べている。JERONIMIDISの解釈は剥離破壊が二次的に発生することを説明するには都合がいい。一方、FOWLKES(1974)はFRCM中の繊維と母材の界面における亀裂の挙動と破壊靱性の関係をモデル的に調べたところ、繊維と母材の界面に沿った裂け(splitting)の発生が破壊靱性の向上に大きく寄与することを明らかにしている。とくに裂けの発生については、母材中にある亀裂が繊維との界面に近づく場合には、界面に沿って裂けが急速に広がり、この裂けがある長さに達したときに始めて繊維中に亀裂が生じて繊維が切断されるとし、逆に繊維中にある亀裂が母材との界面に近づく場合には、亀裂は界面でしばらく停止した後界面に沿った裂けがゆっくりと広がり、しかもこのような挙動は母材に対する繊維の弾性率の比が大きい程顕著であることを指摘している。FOWLKESの示したこの結果は木材の縦引張破壊時にみられる仮道管間(もしくは本部繊維間)での剥離破壊の発生と大きな破壊靱性の発現との関連性のある程度説明しうるものと思われる。すなわち針葉樹材切片の場合、仮道管をFOWLKESの言う繊維とみなし、細胞間層を母材とみなせば、これらの弾性率の比は早材で約5~15、晩材で約15~25となり、晩材部では仮道管間の剥離破壊(FOWLKESの言う裂け)の生じやすいことが理解できる(ただしFOWLKESは繊維と母材の弾性率の比を20として調べており、ここに挙げた弾性率の比は、細胞間層の弾性率を $2 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、仮道管の弾性率を早材単一仮道管で $10 \sim 30 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、晩材単一仮道管で $30 \sim 50 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、としたときのものである。(MARK 1967))。

以上から、重複細胞壁中における亀裂の伝播様式は次の3つに分けることができる。

第1は早材型伝播様式と称すべきもので、この場合は重複細胞壁が細胞間層によって強く固定されており、あたかも1枚の壁のように挙動し、両仮道管壁をほぼ同時に破壊しながら亀裂は伝播する。そしてこの場合の仮道管壁は主として切断破壊によって破断される。

第2は中間材型伝播様式と称すべきもので、これを模式的に描くと図11のようになる。図は重複細胞壁の一部(S_2 のみ)を模式化して描いてある。亀裂は重複細胞壁中の片側の壁(W_1)を裂け破壊(S)もしくは切断破壊(C)しながら伝播している途中で隣接細胞壁(W_2)の S_2 中に裂け破壊(A-B)を引き起こすことによって隣接細胞壁に伝播する。その後はこれらの2つの亀裂が同時に進行するとともに、さらに周囲の細胞にも裂け破壊を発生させながら亀裂は切片中を拡大するものと推定される。

第3は晩材型伝播様式と称すべきもので、重複細胞壁の片側の壁

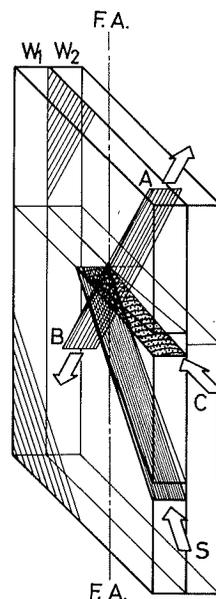


図11. 重複細胞壁中における亀裂の伝播様式の模式図。F.A.は繊維軸方向を示す。

中の亀裂が隣接細胞壁中に伝播する前に、細胞間（仮道管間）で長い剥離破壊が生じるのが特徴である。この場合は剥離破壊がある程度発達した後仮道管壁の破断が生じるものと思われる。

これらの亀裂の挙動から、木材の縦引張破壊時に測定されている大きな破壊靱性の発現には、亀裂の先端に発生する S_2 の裂け破壊や細胞間（多分 S_1 近傍）での長い剥離破壊が大きく寄与しているものと推定される。

2.2.5 切片中の変異部における亀裂の挙動

木材切片の縦引張破壊において、切片中の亀裂の挙動に影響を及ぼすと思われる組織構造上の変異部、とくにここでは放射組織との交差域と壁孔における亀裂の挙動について述べる（古川 1978b）。

DEBAISE ら（1966）は木材の横引張破壊の際には放射組織との交差域および仮道管の先端（重なり部）が亀裂の進展に関与していることを指摘している。さらに KORÁN（1967, 1968）は、横引張破壊の際には上記の2つの変異部の他に壁孔についても注目している。いずれの場合にも亀裂の生長がこれらの場所で変化することを指摘している。しかし木材の縦引張破壊に関するこれらの知見は少ない。

写真91は板目中間材切片のSCP段階および破壊完了直後を示す。板目切片のSCP段階では亀裂が切片中に散在する放射組織の端のところ（写真中矢印）を選択的につなぐように伝播するのが観察された。しかし板目切片でも、仮道管壁の薄い早材切片や亀裂が速く伝播したRCP破壊部などでは必ずしもそうではなく、亀裂はむしろ放射組織を横切って伝播することがしばしば観察された。したがって板目切片中における放射組織は、切片中を亀裂が比較的ゆっくりと伝播するときに限って、放射組織の端と亀裂の先端との間でなんらかの相互作用が働くものと考えられる。このように亀裂の先端とそれ以外の応力集中源との相互作用（横堀 1974）については、木材の破壊現象に関する限りほとんど研究されていない。木材の縦引張破壊の場合にも、亀裂先端以外の応力集中源としてマイクロなもの（例えばマイクロフィブリル内部のディスロケーション部とか壁孔部）からマクロなもの（例えば放射組織との交差域とか早晩材部の境界、節など）まで種々のものが考えられる。これらの部位における応力集中と亀裂先端との相互作用については今後の研究課題である。

ところで、板目切片中における放射組織との交差域の端のところでの亀裂の挙動として、上述したのとは別の特異な挙動が観察された。**写真92**に示すように、板目切片（とくに中間材と晩材切片）では放射組織細胞が分断されていることがしばしば観察された。これは亀裂が放射組織の端に達したとき、そこで伝播方向を繊維軸方向に転じることによって生じたものと考えられる。このような亀裂の挙動が板目切片でもとくに壁の比較的厚い切片においてよく観察されることから、亀裂先端での仮道管間での剥離破壊（2.3.4 参照）はこのような放射組織との交差域でとくに発生しやすいものと推定されるが、この点については放射組織細胞壁構造（島地・須藤・原田 1976, HARADA・WARDROP 1960, 今村ら 1974, 藤川 1974）とも関連させて今後さらに検討を要する。

写真93はまさ目切片（中間材部）のSCP段階におけるT-T壁孔付近での亀裂の挙動を示す。この場合ノッチ先端に発生した亀裂は S_2 の裂け破壊によって壁中を伝播し、その先端がT-T壁孔に

達し
裂は
道管
働き
HAR
ろで
と考
以
を示
解明

2.3

2.

木材
元的準
ところ
れは1
導入は
佐伯
べ、破
模様）
ロフィ
は、切
連性を
そこ
いたス
びにS
関連性

2.3

2.

試料

達したとき、亀裂の生長は一時的に停止するのが観察された(写真①)。さらに切片を引張ると、亀裂は停止したところ(T-T壁孔)で隣接仮道管壁の S_2 に裂け破壊を発生させることによって隣接仮道管に伝播するのが観察された(写真②)。このようにT-T壁孔は切片中の亀裂の生長を阻止する働きのあることが認められた。これはT-T壁孔の壁孔縁の特異な構造(島地・須藤・原田 1976, HARADA・CÔTÉ 1967, 原田・今村 1978)に起因するものであろう。したがってT-T壁孔のところでは亀裂の先端に応力が集中しやすく、このところで亀裂は隣接仮道管に伝播することが多いものと考えられる。

以上のことから木材切片の縦引張破壊時における切片中の亀裂は組織構造上の変異部で特異な挙動を示すことが明らかとなった。しかしこのような挙動をひきおこす原因については、変異部の構造の解明とともに今後更に検討する必要がある。

2.3 切片の破壊形態

2.3.1 はじめに

木材切片の縦引張破壊形態をフラクトグラフィー的に研究することは、切片中における亀裂の三次元的挙動に関する知見が得られるだけでなく、木材の縦引張破壊機構を解明するうえで重要である。ところが切片の縦引張破壊形態、とくに破壊先端における壁破断面の形態を調べた研究は少ない。これは1つには破断面の観察が技術的に困難であったことにもよる。しかしこの点についてはSEMの導入によりほぼ問題とならなくなってきた。

佐伯ら(1972, 1973)は数種の針葉樹材および広葉樹材切片の縦引張破壊先端をSEMで詳細に調べ、破壊形態には切断破壊タイプと裂け破壊タイプの2つがあり、その破面には特有な模様(ひだ状模様)の現れることを見出ししている。そしてこれらの破壊形態に関与する因子として各壁層のマイクロフィブリルの配列方向と外力(引張力)の負荷方向とを挙げている。しかしながら佐伯らの研究では、切片中の亀裂の挙動(例えば亀裂の伝播方向、伝播速度など)と破壊形態(破面の特徴)との関連性を明らかにするまでには至らなかった。

そこで本節では、亀裂の伝播方向や壁中における亀裂の挙動が予め確認されている試料(前節に用いたスギのノッチ付き切片)の破壊先端の形態(マクロな破壊形態とマイクロな破壊形態)を光顕ならびにSEMを用いて観察することにより、亀裂の伝播速度、伝播方向、伝播様式などと破壊形態との関連性を調べた結果について述べる(古川 1976, 1978b)。

2.3.2 試料の調製と観察法

2.3.2.1 試料の調製

試料としては前節(2.2)の観察に供した破壊後の切片を用いた。したがって材料および切片の調整

法は 2. 2. 2. 1 と同じである。

2.3.2.2 観察と記録

1) 光顕観察

切片の破壊先端のマクロな形態、すなわち破壊線の形状の観察には光顕を用いた。切片は無染色のまま、破壊直後の先端をそのまま観察した。

2) SEM観察

破壊後の切片を台紙(2.2.2.1の2)から切り取り、L字型の金具(図9参照)に導電性のペースト(商品名ドータイト)で貼りつけ、金具をSEM用の試料台に同じく導電性ペーストで固定した後、常法どおり炭素と金もしくは金のみを蒸着して、SEM(JSM-U3)で観察した。

2.3.3 破壊線の形状—マクロな破壊形態

平滑切片の破壊線の形状についてはこれまでも光顕観察によって多く調べられている(WARDROP 1951, WELLWOOD 1962, IFJU・KENNEDY 1962, IFJU 1964, FUTÓ 1969, SAIKI 1970b)。この場合とくに早材切片と晩材切片の破壊線の相違に多くの関心が払われてきた。すなわち早材切片の破壊線は繊維軸にはほぼ直角方向の直線状であるのに対し、晩材切片のそれは不規則な鋸歯状もしくはさざら状を呈することが認められている。しかしこのような相違を発現させる原因については不明なことが多く、とくに切片中の亀裂の挙動と関連させた論議は行われていない。ここでは、各種のノッチ付き切片においてみられる破壊線の形状について、フラクトグラフィ的解釈を試みるとともに、平滑切片のそれとも比較検討した結果について述べる(古川 1978b)。

2.3.3.1 亀裂の伝播速度と破壊線

ここでは亀裂の伝播速度の異なる破壊部としてSCP破壊部およびRCP破壊部に限定する。

写真94は板目中間材(写真①と②)および板目早材(写真③)各切片のSCP破壊部とRCP破壊部を示す。中間材切片のSCP破壊部ではとげ状の不規則な破壊線を示す(写真①)が、RCP破壊部では比較的単調な凹凸の少ない破壊線を示す(写真②)。一方、早材切片ではSCPおよびRCP破壊部ともにほとんど繊維軸に直角方向の直線状の破壊線を示す(写真③)。中間材切片の場合、亀裂の伝播の遅いところでは仮道管壁の裂け破壊を主とした亀裂が伝播し、伝播速度が大きくなると仮道管壁の切断破壊を主とした亀裂の伝播に変わるものと推定される。これに対して早材切片の場合、すでに述べたように薄い仮道管壁が細胞間層によって十分に固定されているため、仮道管間での剥離や壁の裂け破壊は生じ難く、壁はほとんど切断破壊によって破断するものと思われる。しかも早材切片中の重複細胞壁の見掛けの弾性主軸方向は繊維軸にほぼ平行と考えられるため(2.2.3参照)、壁は繊維軸にほぼ直角に切断されることが多いのであろう。

これらの観察から、針葉樹材切片の破壊線は亀裂の伝播速度が大きい程、また壁が薄い程、壁の切

断破壊が多く生じるため、凹凸の少ない直線状となる傾向があると言えよう。

2.3.3.2 仮道管壁の厚さと破壊線

ここでは仮道管壁の厚さの異なる切片として同一年輪内の早材部から晩材部にかけての4つの部位から採取した4種類の板目切片を用い、これらのRCP破壊部の破壊線の形状について比較検討する。

写真95は早材(写真①)、早材部に近い中間材(写真②)、晩材部に近い中間材(写真③)それと晩材(写真④)の各切片の典型的な破壊先端を示す。写真④以外はすべて切片の破壊直後を示す(④は破壊先端を見やすくするため破壊先端を互い少し引き離して撮影した)。破壊直後の向い合った破壊先端が引張方向に対して全くずれていないことから判断して、これらの切片はいずれも正確に引張破壊されたと考えて差しつかえないであろう。また破壊はすべてノッチ先端から開始(写真中矢印)したことは言うまでもない。写真からも明らかなように、壁の薄い早材切片の破壊線は繊維軸に対してほぼ直角方向に直線状であるのに対し、中間材から晩材切片へと壁が厚くなるにしたがって、破壊線は波状から階段状へと変化する。しかもここで観察された早材切片および晩材切片の破壊線はこれまでに平滑切片で観察されている破壊線と同じである。

仮道管壁の厚さと破壊線の形状の関係について、SAIKI(1970b)はスギの場合、接線壁の厚さが $2.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ までは早材型の破壊線を、 $3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 以上では晩材型の破壊線を示すと報告している。このように壁が厚くなる程破壊線の形状が複雑になるのは、前項(2.2.3)でも指摘したように、重複細胞壁のところで壁の裂け破壊や壁間での剥離破壊が発生しやすくなるためであろう。しかしこのように破壊線が複雑になればなる程切片中を亀裂が伝播するのに要するエネルギーも多くなり、破壊靱性が大きくなると考えられる。

また、ここで観察される破壊線が平滑切片のそれと同じであることから、ノッチ付き切片の破壊の機構も平滑切片のそれと基本的に同じであると考えられる。したがってノッチ付き切片のノッチは本実験の当初の目論どおり平滑切片中に既存の欠陥部と同質のものとみなして差しつかえないであろう。

2.3.3.3 亀裂の伝播方向と破壊線

これまでではすべて亀裂が接線方向に伝播する場合の破壊線について述べた。ここでは亀裂が半径方向に伝播することによって生じる破壊線(すなわちまさ目切片の破壊線)の特徴を板目切片のそれと比較する。

写真96および97はまさ目の早材切片(写真96の①)と中間材を含む晩材切片(写真96の②と写真97)の代表的な破壊線を示す。

まさ目早材切片の破壊線の形状は板目早材切片のそれと同じである。すなわち破壊線はノッチの先端からほぼ直線状に繊維軸と直角方向に生じている。しかもこの場合、ノッチを放射組織のあるところに入れても、放射組織と放射組織の間の仮道管だけのところ(写真96の①)に入れても、破壊線の形状に変化は認められなかった。このことは早材切片では放射組織と亀裂の伝播との間にはなんら

関連性はないものと考えられる(板目切片の場合も同じ)。また破壊先端の形状から判断して、この場合の重複細胞壁中における亀裂の伝播様式も板目早材切片のそれと同じであろう。

ところが、まさ目切片の中間材および晩材部では破壊線の形状にいくつかの特徴を認めることができた。まず第1は放射組織に沿った破壊線が多いことであり、第2は典型的な晩材部とそれ以外の部分との境界部に繊維軸に沿った長い破壊線(これを平井(1947)の呼び方にしたがって縦裂線と呼ぶ)が認められることである。

写真96の②はノッチを放射組織と放射組織の間の部分に入れたにもかかわらず亀裂は放射組織に沿って伝播したことを示す。また写真には示していないが、ノッチを初めから放射組織のところに置いておいた場合は、亀裂は必ず放射組織に沿って伝播するのが観察された。これについては、放射柔細胞と接している部分の仮道管壁とそれ以外の仮道管壁との構造的もしくは強度的相違が早材に比べて晩材では大きいものと考えられる。

写真97はまさ目切片でよくみられる縦裂線の1例を示したものである。このような縦裂線はノッチを早材側(ここでは中間材中)に入れた場合(写真97の①)も晩材側に入れた場合(写真97の②)もいずれにおいても晩材との境界部付近で観察された。ところでこのような縦裂線はこれまでも指摘したように仮道管壁が縦に裂けたのではなく、仮道管間(多分 S_1 近傍)が剥離破壊することによって生じたものと思われる。とくにまさ目切片では縦裂線の発生部位が晩材部との境界付近に限定されていることは、この部分での仮道管壁の厚さおよびマイクロフィブリル傾角(とくに S_2)の急激な変化に伴って、この部分の重複細胞壁間には大きな層間応力が発生していると考えられ、これと亀裂先端での応力集中とが相まってこのようなところに縦裂線を生じさせるものと思われる。したがって縦裂線は早材から晩材への移行が急な木材程顕著に現れるものと予想されるが、現在のところ縦裂線の発生位置と仮道管壁厚さの変化との関連性を定量的に把握するまでには至っていない。

ところでまさ目切片にみられる縦裂線についてもう1つ注意すべきことは、この縦裂線が必ずしも切片の最終的な破断に導く破壊線とは限らないことである(写真97の①)。しかしこの縦裂線の発生は破壊力学的にみれば、板目晩材切片で見られた仮道管間の剥離破壊(2.2.4参照)と同様に、亀裂先端に集中したエネルギーがこの裂けによって緩和されることにより、亀裂が再び生長しだすためにはさらに余分なエネルギーを必要とし、その分だけ破壊靱性を高める役割を果しているものと解釈できる。

以上の観察から、まさ目切片の破壊先端では、放射組織に沿って現れる破壊線と晩材との境界付近で繊維方向に沿って現れる縦裂線の2つの特徴的な破壊線が認められ、これらはいずれも仮道管壁の比較的厚い部位(中間材, 晩材)で顕著に現れるのが特徴である。

2.3.4 仮道管壁破面の形態—マイクロな破壊形態

ここではノッチ付き切片の破壊先端における仮道管壁の破面形態について亀裂の伝播速度および伝播方向との関連性をSEMで観察した結果について述べる(古川 1976)。

2.3.4.1 亀裂の伝播速度と破面形態

1) SCP破壊部の破面

写真98, 99と100は板目中間材切片のノッチ先端付近においてみられた典型的なSCP破壊部を示す。このように亀裂がゆっくりと伝播したところでは、仮道管壁の S_2 が主に裂け破壊されることによって、個々の仮道管壁は長いとげ状もしくはリボン状を呈する。

破壊先端にみられる仮道管には引き抜けたような格好で裂け破壊しているもの(写真99の矢印)もあれば、隣接する壁が互いに逆傾斜をなして裂け破壊しているもの(写真100の矢印)もある。いずれにしても裂け破壊したところの壁の側面では剥離破壊が観察される。すなわちSCP破壊では仮道管壁は剥離破壊を伴いながら裂け破壊されるものと推定される。その際、仮道管壁の剥離と裂けのうちどちらが先に発生するかということが問題であるが、この点についてMARK(1967)は剥離が生じた後壁が破壊すると指摘している。ところが重複細胞壁中の亀裂の挙動を直接観察した限りでは、そのようなことはなく、むしろ切片中の仮道管壁は隣接壁中の亀裂によって最初に裂け破壊が引き起こされるものと思われる(古川 1978b)。このように、中間材切片のSCP段階では、ノッチ先端から裂け破壊が生じ、この裂けの先端でさらに隣接する壁に裂け破壊を発生させ、これが次々と隣接壁中を伝播することによって破壊は進行するものと推定される。

写真101は板目晩材切片のノッチ先端およびそれにつづくSCP破壊部の一部を示す。晩材切片においても破壊形態は中間材のそれと基本的に同じで、 S_2 の裂け破壊と仮道管間での剥離破壊が観察される。ただしこの場合はこれらの破壊が繊維方向に沿って長く生じるため、仮道管が引き抜けて破壊したように見える。

写真102は板目早材切片のノッチ先端とそれにつづくSCP破壊部の一部を示す。ノッチ先端では短いとげ状を呈する S_2 の裂け破壊が生じており、SCP破壊部でも S_2 の裂け破壊は部分的にしか認められない。しかし早材切片のSCP破壊部では、中間材や晩材切片の場合と異なり、仮道管間での剥離はほとんど認められない。このことは隣接する仮道管壁同志のせん断変形が十分拘束されていることを示唆するとともに、剥離破壊に伴う余分な仕事をしなくてすむため、亀裂先端での破壊に要する仕事量も中間材や晩材切片の場合より小さいと考えられるから、この場合の破壊はかなり脆性的に進行するものと推定される。

2) RCP破壊部の破面

写真103と104は写真98に示したのと同じ切片(板目中間材)のRCP破壊部の一部を示す。RCP破壊した破壊先端の破面では、SCP破壊部でみられたのと同じような裂け破壊や剥離破壊の他に S_2 の切断破壊したところがみられ、しかもその破面上にはひだ状模様が観察される。裂け破壊した部分の破壊形態はSCP破壊部のそれと同じである。

ところでRCP破壊部の切断破面において見られるひだ状模様については、これと同様の模様がこれまでにも観察されている(佐伯ら 1972, 奥山 1977, FURUNOら 1977)。さらに未処理単一

仮道管の縦引張破壊した破面においても局部的ではあるが^{ひだ}状模様が観察されている(古川 1978a)。これらの観察例から推測して、^{ひだ}状模様の発生には壁のせん断変形がある程度拘束された状態で壁が切断破壊されることが必要条件の1つと思われる。すなわち縦引張りをうけている重複細胞壁の各壁、とくに S_2 中にはせん断変形しようとする力が働いているが、破壊しない時は各壁が細胞間層によって固定されているため、見かけ上はそのような力が存在しないように見える。ところが重複細胞壁の片側に破壊が生じると、各壁間での力学的平衡状態は崩れ、亀裂の先端には単一仮道管の破壊でみられるようなせん断応力が作用することによって裂けを伴った切断破壊が進行するものと推定される。このような裂け破壊と切断破壊が小刻みに交互に進行することによって^{ひだ}状模様は形成されるのであろう。

以上中間材切片のRCP破壊部の破面の形態について述べたが、晩材切片および早材切片のRCP破壊部でも同様の特徴を認めることができた。これらの切片の破面形態は亀裂の伝播方向とも関連するので次のところで述べる。

2.3.4.2 亀裂の伝播方向と破面形態

RCP破壊部では切片中の亀裂の伝播方向(各写真中⇒印)と個々の仮道管壁の破面の形態との間には一定の規則性を認めることができた。まず第1は前掲の写真103にも見られるように、切片中の個々の仮道管内において裂け破壊は必ず亀裂の伝播方向に対して手前側で生じており、しかも切断破壊はこの裂け破壊に続く部分で生じていることである。このことは個々の仮道管内での破壊はまず裂け破壊によって始まり、続いてこの裂けの両端から切断破壊が生じることを示唆するものであろう。このことは2.2.4で示した観察結果とも矛盾しない。すなわち、ここで観察される裂け破壊は隣接壁中の亀裂によってじゃっ起されたものと考えられ、この裂け破壊がRCP段階では途中から切断破壊に変化するものと推定される。第2は個々の仮道管中において生じる裂けの上端に見られる切断破面上の^{ひだ}の方向と下端に生じる破面上の^{ひだ}の方向が異なることである。これは個々の仮道管中における亀裂の伝播方向に関係していると思われる。すなわち、1個の仮道管壁中において破壊は裂け破壊から切断破壊へと変化するものと考えれば、仮道管を上から見下したとき、裂けの上端に生じる切断破面では亀裂は反時計まわり方向に伝播するものと考えられ、一方裂けの下端に発生する切断破面では亀裂は時計まわり方向に伝播すると考えられる。もっとも実際の破壊時にはこれらの切断破壊が裂け破壊したところの両端から同時に発生することもあれば、片方だけから生じることもあろう。このような亀裂の生長を想定したうえで実際の切断破面(例えば前掲の写真102)を観察すれば、裂けの上端の切断破面での^{ひだ}の方向は、上から見て反時計まわり方向となっているのが分る。これらのことから切片中における個々の仮道管壁の切断破面の^{ひだ}の方向は壁中における亀裂の伝播方向を、さらに各仮道管において裂け破壊している部分は切片中における破壊の進行方向を示唆していると考えられる。

ところでRCP破壊した破壊先端の重複細胞壁の破断面では、前掲の写真103にも示されているよ

うに、両壁が同じ破壊様式によって破壊されていることは少なく、多くの場合裂け破壊した壁と切断破壊した壁とが対をなしている。しかも RCP 破壊部では、亀裂の伝播方向に対して手前側の壁は切断破壊によって、それに隣接する壁は裂け破壊によって破壊されていることが多い。このことは重複細胞壁中における亀裂の伝播様式からも推定されるように、破壊の RCP 段階では片側の壁が切断破壊しているときに隣接壁に裂け破壊をじゃっ起することを示唆するものであろう。

前掲の写真 104 も 103 と同じく板目中間材切片の RCP 破壊した破壊先端の一部を示す。破壊形態の特徴は写真 102 と同じであるが、この写真では裂け破壊した仮道管の側面（剥離破壊した部分）に S_1 と S_2 の一部が現れている。すなわち裂け破壊に伴って発生する剥離破壊は S_1 内部もしくは S_1 と S_2 の境界付近に生じることがこの写真からも明らかであろう。

写真 105 と 106 は板目晩材切片の RCP 破壊部の一部を示す。個々の仮道管壁および重複細胞壁の破壊形態と亀裂の伝播方向との関係は中間材切片のそれとほとんど同じである。ただし晩材切片では壁の破壊とともに壁間での剥離破壊が顕著である。また写真 106 では裂け破壊したところの下部で発生した切断破壊の破面上にひだ状模様が観察され、この場合のひだの方向は上から見て時計まわり方向となっている。

写真 107 は板目早材切片の RCP 破壊部の一部を示す。仮道管壁の破壊形態と亀裂の伝播方向との間には中間材切片でみられたのと同様の傾向を認めることができる。ただし早材切片では裂け破壊した部分は少なく、ひだ状模様を有する切断破面も仮道管の隅などの限られたところでしか観察されず、他の破面はすべて平坦な切断破面を呈する。また仮道管間での剥離破壊もほとんど観察されない。

写真 108 と 109 はまさ目切片の中間材および晩材部の RCP 破壊したところの一部を示す。個々の仮道管壁には裂け破壊したところと切断破壊したところが認められ、裂け破壊は破壊の進行方向に対して手前側で生じており、さらに切断破壊した破面上には顕著なひだ状模様が観察されるなど、まさ目切片の破面においても板目切片のそれとほぼ同じ特徴を認めることができる。このような破面の形態から、まさ目切片中の重複細胞壁のところにおける亀裂の伝播様式は板目切片のそれと同じであろう。

以上の観察結果をもとに、図 12 は中間および晩材各材のノッチ付き切片の RCP 段階における切片中の破壊の進行方向（2 重線矢印）ならびに壁中の亀裂の伝播方向（矢印）と壁の破面形態との関係を模式的に示したものである。中間材や晩材各切片中では亀裂は個々の仮道管壁を裂け破壊および切断破壊しながら伝播し、とくにその切断破面上には亀裂の伝播方向を示唆する独特の

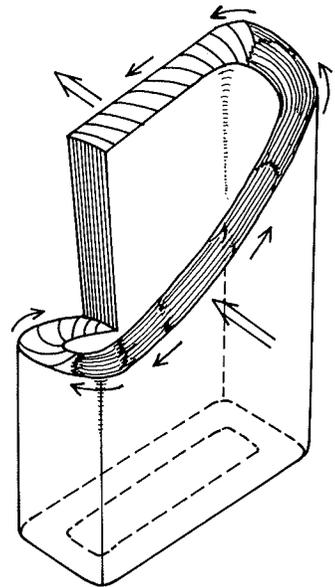


図 12. 木材切片中の仮道管壁の破壊形態と切片中における破壊の進行方向(⇒)ならびに壁中の亀裂の伝播方向(→)との関係を示す模式図

ひだ状模様が見られる。

2.4 要 約

1. 木材切片中の細胞壁（すなわち重複細胞壁）における縦引張破壊時の亀裂の挙動を直接可視化するための方法を検討するとともに、この方法をスギの厚さ 60～120 μm の板目とまさ目の早材，中間材それに晩材の各切片の縦引張破壊過程の観察に適用した結果，以下のことが明らかとなった。

1) ノッチを入れた切片（ノッチ付き切片）を光顕の試料載物台上で操作できる引張装置によって引張りながらその破壊過程を観察することによって，重複細胞壁中の亀裂の挙動を直接可視化することができる。

2) ノッチ付き切片の破壊過程では3つの特徴的な破壊段階，すなわち亀裂の発生段階とSCP（緩徐亀裂伝播）段階およびRCP（急速亀裂伝播）段階が存在する。

3) 重複細胞壁中における亀裂の伝播様式について，早材切片中では重複細胞壁が同時に切断破壊されるのに対して，中間材切片中では重複細胞壁の片側の壁中を裂け破壊もしくは切断破壊で進行している亀裂の先端で隣接細胞壁の S_2 に裂け破壊をじゃっ起することによって亀裂は隣接仮道管に伝播する。晩材切片では亀裂が伝播する途中で重複細胞壁間に剥離破壊が生じる。

4) 仮道管壁の比較的厚い切片においては亀裂は放射組織のところを選択的に伝播する傾向が認められる。

2. 切片中における破壊の進行方向を規制した切片，すなわちノッチ付き切片の破壊先端を光顕ならびにSEMで観察することにより，以下のことが明らかとなった。

1) 切片の破壊線の形状（破壊先端のマクロな形状）は平滑切片のそれとほぼ同じである。さらに破壊線の形状は亀裂伝播速度の大きい場合や仮道管壁の薄い場合には，主に仮道管の切断破壊によって直線状となるのに対して，伝播速度の小さい場合や仮道管壁の厚い場合には，仮道管の裂け破壊や仮道管間の剥離破壊などによって波状もしくは階段状などの複雑な形状を呈する。

2) SCP破壊部では S_2 の裂け破壊とともに S_1 近傍での剥離破壊が存在する。RCP破壊部では S_2 の裂け破壊と切断破壊の両者が存在し，切断破面上には独特のひだ状模様が見られる。さらにRCP破壊部の個々の仮道管壁では破壊の進行方向に対して手前側で裂け破壊が生じ，それにつづいて切断破壊が生じる。しかも裂けの上端の切断破面上でのひだは反時計まわり方向に並び，裂けの下端に生じる切断破面上のひだは時計まわり方向に並ぶことから，これらのひだの方向は壁中における亀裂の伝播方向を示唆するものであろう。

第3章 針葉樹材仮道管の壁孔構造と縦引張破壊

3.1 概 説

木材に限らず種々の固体材料の破壊時における亀裂の挙動は、それらの材料が本来有している微視的ならびに巨視的な組織構造、とりわけ材料中の構造上の変異部と密接な関係がある。このような構造上の変異部は、破壊時において一見矛盾するような2つの働きを有している。第1は材料中において応力集中源として作用する場合である。この場合は変異部を材料中における不均一な部分とみなし、この部分は応力が集中しやすく、破壊の開始部位となることが多いことから材料中における欠陥部と考えられる。したがってこの場合、材料の強度は欠陥部の存在によって低下する。これに対して第2は材料中において亀裂の伝播を阻止し、亀裂先端に集中した応力の緩和源として作用する場合である。例えばFRCMのような異種材料の相界面では、亀裂が近づくとそこが剥離し、亀裂先端に集中した応力が緩和されることにより、亀裂の急速な伝播が妨げられるとともに、その分だけ余分にエネルギーを吸収するので材料に靱性が賦与される。したがってこの場合は変異部が存在することによってかえって材料の靱性は向上する。このように材料中の変異部は応力集中源であるとともに応力緩和源でもあることに注目したい。

木材も本来不均一な材料であると言われている。このような不均一性は木材を構成する種々の大きさの構造上変異部に起因するものであろう。すなわち、セルロースマイクロフィブリル内部のディスロケーションやマイクロフィブリルの末端部、マイクロフィブリルとそれを取り囲むマトリックス物質との境界部、さらにマイクロフィブリルが特異的に配列した壁孔部、各壁層の境界部や壁と細胞間層との界面、その他異種構成要素間の接合部（とくに放射組織との交差域）や早材と晩材の境界部分、節の部分などが変異部と考えられる。これらはいずれも木材が本来有する正常な構造である。この他木材が立木時の生長応力や環境などによって、また加工時に受ける種々の損傷や異常材なども変異部の一種と考えられる。

これらの木材中の変異部のうち、応力緩和源として作用する変異部付近での亀裂の挙動については第1章と第2章において既に論述した。したがって本章では応力集中源として作用する変異部のうちとくに針葉樹材仮道管の有縁壁孔（その中でもとくにR-T壁孔）における亀裂の挙動を取りあげ、壁孔縁の構造と関連させて論議する。

3.2 壁孔の構造

3.2.1 はじめに

針葉樹材仮道管の有縁壁孔は樹液や化学薬剤の移動の通路としてだけでなく、縦引張破壊時に亀裂

が特異的に挙動する部位として重要である。すなわち、R-T壁孔は単一仮道管の破壊開始と、また針葉樹材切片の破壊では亀裂の伝播と密接に関係している(古川 1975, 1978_b)。これに対してT-T壁孔は単一仮道管および針葉樹材切片において、破壊が直接そこから始まるようなことはほとんどなく、むしろ亀裂の拡大を阻止するような働きがあることからして、破壊に対してかなりの抵抗性を有しているものと推定されている(古川 1975, 1978_b)。このような2つの型の有縁壁孔での破壊挙動の相違は、これらの壁孔の壁孔壁(pit membrane)の構造よりはむしろ壁孔縁(pit border)の構造に起因するものであろう。

針葉樹材仮道管、とくに早材仮道管のT-T壁孔縁の構造については多くの研究がなされている。その結果、壁孔縁は二次壁のみで構成されており、S₁のマイクロフィブリルは円状に配列するのに対し、S₂とS₃は本来の配列方向を保持しながら孔口を周回して配列すること(BAILEY・VESTAL 1937, 原田ら 1958)、また壁孔縁のうち壁孔室に面した表面にはS₁とは異なる別の層、すなわちマイクロフィブリルが同心円状に配列した特異な層(これはborder thickeningと呼ばれBTと略記されることが多い)が存在すること(WARDROP 1954, 1964, HARADA・CÔTÉ 1967)、さらに壁孔縁のS₁は壁孔以外の部分に比べて厚く、その断面像でうろこ状の模様が観察されること(HARADA・CÔTÉ 1967)などが明らかにされている。今村と原田(1972_b, 1973, 1974, 1978)はアカマツ(*Pinus densiflora*)の早材および晩材仮道管のT-T壁孔の壁孔縁の形成過程をレプリカ法で調べ、次のような結論を得ている。すなわち、早材仮道管の壁孔縁はS₁の堆積によってその輪郭(孔口の最終形状)がまずつくられ、その上にS₂とS₃が堆積して壁孔縁の肥厚が完了する。この場合S₁のマイクロフィブリルはラメラ状に堆積し、形成途上の孔口をまたぐように堆積した各ラメラ(これをマイクロラメラと呼んでいる)は壁孔縁の先端に沿って壁孔室側に回り込むようにして孔口の縁に堆積することによって、孔口の径を次第に小さくする。壁孔縁の断面像にみられるS₁のうろこ状の模様は壁孔縁の先端におけるS₁のこのような特異な堆積過程を反映したものである。またS₂やS₃は壁孔縁の拡大、すなわち孔口の径を小さくすることには寄与せず、単にS₁で形づくられた孔口を迂回するようにマイクロフィブリルは流線形に配列してS₁上に堆積する。ところが晩材仮道管の壁孔縁では、S₁ばかりでなくS₂のマイクロフィブリルも孔口に沿って回り込み、壁孔縁の輪郭決定に寄与している。そのため孔口の長径方向はS₂のマイクロフィブリルの走行方向を示唆してレンズ状となる。さらにBTについてはS₁の堆積と同時に壁孔室側から壁孔縁を裏打ちするように付加されるのであろうと述べている。

針葉樹材仮道管のR-T壁孔については、その孔口の形が針葉樹材識別の重要な拠点となるため光顕による観察例は多い。本邦産針葉樹材のR-T壁孔にはつぎの4つの型がある(島地 1964)。すなわち、マツ、コウヤマキ両属に見られる窓状壁孔(window-like pit)と、トウヒ、カラマツ、トガサワラ各属に見られるトウヒ型壁孔(Piceoid pit)と、スギ、モミ、ネズコ各属に見られるスギ型壁孔(Taxodioid pit)と、それにヒノキ、アスナロ、ビャクシン、カヤ各属に見られるヒノキ型壁孔(Cupressoid pit)の4つである。このようにR-T壁孔の光顕的特徴は明らかにされているが、これらの壁孔縁の構造を電顕的に調べた研究は少ない。HARADA(1965)はスギの早材のR-T壁孔の壁孔縁の縦断面写

真(同論文中 Fig. 21)を示しているが、これについては言及していない。この写真では T-T 壁孔で見られたようなうろこ状の様相がその断面像において観察されている点で興味深い。惜しいことにはこの写真ではこの部分が S_1 なのか S_2 なのか判定しがたい。また OKUMURA ら(1976)は二次壁堆積中のアカマツ晩材仮道管の R-T 壁孔の木口断面像(同論文中 Fig. 20)を示しているが、この部分での壁層構成についてはふれていない。これらの写真、および顕微鏡観察によって得られている知見から推定すると、R-T 壁孔の壁孔縁の構造は T-T 壁孔のそれと類似している点もあるが、かなり異っている点があるように思われる。

したがってここでは針葉樹材の典型的な R-T 壁孔の壁孔縁をレプリカ法および超薄切片法によって、それを構成する各壁層のマイクロフィブリルの配列ならびに層構成の特徴を調べた結果について述べる(古川 1978, 1979)。

3.2.2 試料の調製と観察法

3.2.2.1 試料の調製

1) 供試材

材料としてはスギ(*Cryptomeria japonica* D. DON)の幼苗、樹令 18 年それに樹令 67 年の各木部、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* SIEB. et ZUCC.)の材鑑、エゾマツ(*Picea jezoensis* CARR.)の材鑑およびアカマツ(*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.)の樹令 35 年の木部を用いた。ただしスギの幼苗からは超薄切片用の小ブロックを、また樹令 18 年生木からは形成層を含む早材分化段階の小ブロックを採取した。他の材はすべて気乾状態の成熟材部を供試した。

2) レプリカ観察用試料の作成

形成を完了した R-T 壁孔の観察には成熟材部から切り出した気乾状態の木材ブロックを、また形成段階の R-T 壁孔の観察には分化段階の木材小ブロックを用いた。

気乾状態の各材の小ブロック(約 2(T)×0.5(R)×1(L)cm)を新らしいかみそりの刃を用いてまさ目面で切削もしくは割裂することによって露出した表面をレプリカ観察用に供した。この場合割裂面は細胞間層から S_1 にかけての壁層間で生じることが多く(KORÁN 1967)、このような表面では壁孔縁の壁孔室側に面した表面(以下このような表面を壁孔縁の外表面と称する)の構造がとらえられることを期待した。一方切削した表面には仮道管の内こうもしくは内こう側から壁層が一部剥ぎ取られた表面が露出することが多いため、このような表面では壁孔縁の内こう側(これを以下壁孔縁の内表面と称する)の構造が観察できるものと期待した。さらにこれらの表面を希釈した JEFFREY 氏液で軽く処理することによってマイクロフィブリルを取り囲む物質を溶脱除去し、マイクロフィブリルの配列状態を明瞭に見ることができるようにした。

一方、早材分化帯を含む木材小ブロックの採取および試料の作製法は今村らの方法(1972a)に準拠して行った。すなわち、小ブロック(約 1(T)×1(R)×1.5(L)cm)を採取後直ちに 0.8 モルのしょ

糖の高張液に浸漬して、原形質分離を促すとともに、ブロックは冷蔵保存しておいた。ブロックから新しいかみそりの刃を用いて早材分化帯を含むまき目切片を切り出し、切り出された切片は水洗した後、溶媒置換乾燥してレプリカ観察に供した。この場合新生された仮道管内表面のマイクロフィブリルの配列を明瞭に見えるようにするため、切片の表面を5%のKOH水溶液で軽く処理した。

3) 超薄切片観察用試料の作製

R-T壁孔の断面の観察には、スギの幼苗の幹材部およびスギ、ヒノキ、エゾマツ各気乾材の成熟材部を用いた。

幼苗は根元で伐採後直ちに3%グルタルアルデヒドで灌流固定した後、小片(約0.5(T)×0.5(R)×2(L) mm)を切り出し、常法にしたがって脱水処理後、エポキシ樹脂に包埋した。

また各気乾材の早材部から小片を切り出し、これを2%KMnO₄水溶液で染色した後、常法にしたがって脱水処理後、エポキシ樹脂で包埋した。

3.2.2.2 観察法

1) レプリカ観察法

レプリカ観察はCôtéらの開発したDirect Carbon Replica法(1964)に準拠して行った。すなわち試料表面を繊維軸方向から白金-パラジウムでシャドウィングした後、炭素を真空蒸着した。試料表面をポリスチレン板で補強した後、試料を72%H₂SO₄水溶液と10%JEFFREY氏液で完全に溶脱し、つづいてポリスチレンをトルエンで溶解した。こうして得られたレプリカ膜をグリッドにすくいあげて検鏡した。観察は主として早材部について行った。

2) 超薄切片観察法

KMnO₄染色した試料はウルトラマイクロトームで薄切した後、グリッドにすくいあげ、そのままもしくはクエン酸鉛で後染色して検鏡した。一方、固定包埋した試料はウルトラマイクロトームで薄切した後、グリッドにすくいあげ、さらにその上から白金-パラジウムでシャドウィングしてから検鏡した。観察は主に早材部について行った。

3) 検鏡

レプリカ膜観察はHS-7, H-500(いずれも日立製作所製)で、また超薄切片の観察はJEM-7, JEM-100C(いずれも日本電子製)で行った。

3.2.3 R-T壁孔の壁孔縁の構造

3.2.3.1 R-T壁孔の周囲の壁構造

R-T壁孔は分野にのみ存在する壁孔であるため、R-T壁孔の壁孔縁の構造について検討するまえに、まずR-T壁孔の周囲の分野の壁構造について調べておくことが必要であろう。

写真110はスギのR-T壁孔を含む分野の端付近からこれに最も近いT-T壁孔にかけてを細胞間

層側から見たところを示す。この写真で両壁孔間の壁表面は交差構造をもつ S_1 のところで割裂が生じている。そしてこの場合 S_1 のマイクロフィブリルの配列は、分野のところも分野以外のところも同じであり、 S_1 のマイクロフィブリルが分野域もしくは分野の端付近でとくに変異して配列することは認められない。

さらにこの写真から、T-T壁孔とR-T壁孔では壁孔縁の大きさやその形状、さらに壁孔縁の外表面上でのいぼの分布などの点において相違が認められる。とくに壁孔縁の張り出し方は両壁孔で著しく異なっている。すなわちT-T壁孔では壁孔縁が均等に張り出しているのに対して、R-T壁孔では楕円形をした孔口の長径方向では張り出しが少なく、短径方向では張り出しが顕著である。このような相違は壁孔縁の壁層構成に起因するものであるが、この点については後で述べる。

写真111はスギの分野を内こう側からみたところを示す。写真にはR-T壁孔周辺の S_2 のマイクロフィブリルの走向状態が示されている。 S_2 のマイクロフィブリルの配列についても S_1 のそれと同様に、孔口の近傍におけるわずかな変異を除けば、分野以外の壁の S_2 のマイクロフィブリル配列とほとんど同じである。

これらの観察から分野の壁構造は、壁を構成する主な壁層である S_1 と S_2 について見る限り、分野以外の壁構造とほぼ同じであると考えて差しつかえないであろう。

3.2.3.2 R-T壁孔の壁孔縁における各壁層のマイクロフィブリル配列と層構成

1) 形成を完了したR-T壁孔のレプリカ観察

写真112はスギの典型的なR-T壁孔を内こう側から観察したところを示す。写真の左上半分では S_2 から内側の壁層が剥ぎ取られ S_1 が露出している。このようにR-T壁孔を含む分野のところでも、分野以外の壁の場合と同様に S_1 と S_2 の境界付近で剥離しやすく、しかも S_2 が取り除かれた後に見られるR-T壁孔の開口部の形状は本来の孔口の形状とかなり異なることが特徴である。これはR-T壁孔の壁孔縁の層構成がT-T壁孔のそれとはかなり異なっていることを示唆するものであろう。

写真113はスギのR-T壁孔の孔口近傍における S_2 のマイクロフィブリルの走行状態を内こう側から見たところを示す。 S_2 のマイクロフィブリルはその走行方向に沿って孔口の縁にまわり込むようにして配列しているのが見られる。これはIMAMURAとHARADA(1973)が指摘しているように、T-T壁孔の壁孔縁の拡大の際にみられる S_1 のマイクロフィブリルの配列様式と同様のものと思われる。したがってR-T壁孔の壁孔縁では S_2 がその拡大に寄与しているものと推定される。

写真114は S_2 と S_1 の境界付近で割裂したエゾマツのR-T壁孔を内こう側から見たところである。スギの場合と同様に S_2 が取り除かれることによって孔口の形が大きく変化するのが認められる。すなわちスギやエゾマツのR-T壁孔の本来の孔口の形は長楕円形でその長径方向が S_2 のマイクロフィブリルの配列方向とほぼ一致している(実際は写真113からも明らかなように多少ずれている)が、 S_2 が取り除かれた後の S_1 だけによって形づくられる孔口の形は S_1 のマイクロフィブリルの配列方向に長径を有する広楕円形を呈する。このことはR-T壁孔の壁孔縁の張り出した部分はほとんど S_2 によって

構成されていることを示唆するものであろう。

写真115は S_1 のところで割裂したヒノキの、また写真116は細胞間層付近で割裂したスギのR-T壁孔を内こう側から見たところを示す。壁孔壁の輪郭はほぼ円形(写真116)であるのに対し、 S_1 によって形づくられる孔口の形が広楕円形(写真115)であることから、 S_1 もわずかながら壁孔縁の構成に関与しているものと思われる。

写真117はPと S_1 の境界付近で、写真118は S_1 内で、また写真119は S_1 と S_2 の境界付近で、写真120は S_2 内でそれぞれ割裂したスギのR-T壁孔を細胞間層側から見たところを示す。これらの一連の写真からR-T壁孔の壁孔縁に関するいくつかの知見を得ることができる。まず第1は、細胞間層側から S_2 に向かって S_1 が逐次取り除かれるにしたがって、壁孔縁のうち上縁と下縁の部分(すなわち孔口の上端と下端に接する部分)が消失することである。このことはR-T壁孔の壁孔縁では S_1 は壁孔縁の上縁部と下縁部に口唇形状に存在することを示唆するものである。第2は壁孔縁のまわりの S_1 がほとんど取り除かれても壁孔縁の外表面上には依然としていぼ状層が存在し、壁孔縁の大部分は元の形のまま残り、しかも孔口の形もほとんど変化しないことである。このことはR-T壁孔の壁孔縁の構造には S_1 はほとんど関与せず、しかもT-T壁孔で見られるようなBTも存在しないことを示すものである。何故ならR-T壁孔の壁孔縁中の S_1 がT-T壁孔のそれのように壁孔縁の先端にまで入り込んで壁孔縁を構成しているとすれば、壁孔のまわりの S_1 がなんらかの外力によって引き剥がされるような場合には壁孔縁中の S_1 もこれと一緒に引き剥がされると考えられ、その際当然 S_1 より壁孔室側に存在する(もし存在すれば)いぼ状層やBTは S_1 の剥離とともに取り除かれる可能性が大きいと考えられるからである。実際、写真121(スギ)にみられるようにT-T壁孔の壁孔縁では壁孔の周囲の S_1 の剥離とともに壁孔縁上のいぼ状層やBTが剥ぎ取られることが多い。第3は孔口の最終的な形状はほとんど S_2 によって決定されるであろうということである。すなわち写真120に示されているように、ほとんど S_2 のみから成ると思われるR-T壁孔の壁孔縁の開口部の形状は、壁孔の細胞間層側の開口部では S_1 によって形づくられたと思われる広楕円形(長径方向は繊維軸に対してほぼ直角方向である)を呈するのに対して、内こう側の開口部(すなわち最終孔口)は長楕円形(長径方向はほぼ S_2 のマイクロフィブリルの走行方向である)を呈する。このことは S_1 の形づくった孔口の上に S_2 が堆積することによって孔口が次第に狭められ最終的な孔口に達するものと思われる。しかも S_2 は S_1 より量的に多いことから S_2 の堆積によってつくられる張り出し部の方が S_1 のそれより大きいものと推定される。そしてこの場合の S_2 の張り出し方は S_1 の場合と同様に、 S_1 の形づくった孔口上に左右から覆いかぶさるような形(口唇形状)で張り出すものと推定される。ところで壁孔縁のこのような張り出し方はT-T壁孔の S_1 堆積によってみられるものとはかなり様相を異にするが、これらの張り出し方のうちどちらが本来の有縁壁孔の壁孔縁の拡大の仕方なのかは、今後更に検討を必要とする。

以上、形成を完了したR-T壁孔のレプリカ観察から、壁孔縁を構成する主たる壁層である S_1 と S_2 について、 S_1 は壁孔縁の付け根付近にやや肥厚して局在し、張り出し部は少ないのに対して、 S_2 は

張り出した壁孔縁の主体をなすものであろう。したがってR-T壁孔の最終的な孔口の形状は早材仮道管であってもS₂の堆積に大きく依存していると思われる、しかも壁孔縁にBTは存在しない。

2) 形成途上のR-T壁孔のレプリカ観察

写真122は一次壁(P)形成段階のR-T壁孔を細胞間層側から見たところを示す。この段階では壁孔縁は形成されておらず、壁孔壁(一次壁孔域 primary pit field)の輪郭は円形に近い広楕円形を呈することが多い。

写真123はS₁堆積中のR-T壁孔を内こう側から見たところを示す。S₁は今村ら(1972b)の指摘しているように、交差ラメラとして堆積し、壁孔のところではS₁のマイクロフィブリルは本来の走行方向からほとんど変異することなく、開口部の縁に接するように配列する。**写真124**はS₁の堆積が完了した直後と思われるR-T壁孔を内こう側から見たところである。S₁は壁孔の開口部の上縁と下縁のところ(矢印)にやや厚く堆積し、しかもこのときの開口部の大きさは一次壁孔域の大きさに比べて相対的にやや小さくなっているのが認められる。このことからR-T壁孔の場合もわずかではあるがS₁の堆積によって壁孔縁が形成されるものと思われる。

写真125はS₂堆積中のR-T壁孔を内こう側から観察したところを示す。S₂はS₁で形づくられた開口部の上から、S₂本来のマイクロフィブリルの走行方向をほとんど維持した状態で堆積することによって開口部を次第に狭め、最終的な孔口を形づくる。したがってこの場合、S₂のマイクロフィブリル配列方向と直角方向にのみ壁孔縁は張り出し、配列方向に沿った方向では壁孔縁の張り出しはほとんど認められない。そのため最終的な孔口の形状は平行四辺形に近い独特の形状を呈する(写真112参照)。

3) R-T壁孔の超薄切片観察

次にこれまでのレプリカ観察によって推定されたR-T壁孔の壁孔縁の構造について、さらに壁孔縁中の各壁層の層構成およびBTの有無についてより明確な知見を得るために壁孔縁の断面形態について調べた。

写真126はエゾマツ、**写真127**はヒノキ各材のR-T壁孔の木口面の超薄切片像である。これらの写真から明らかなように、張り出した壁孔縁はほとんどS₂のみで構成されており、S₁は壁孔縁の付け根のところ壁孔以外の壁部分のそれよりやや厚く堆積している程度で、T-T壁孔のS₁のように張り出した壁孔縁の先端にまで入り込んでいるというようなことはない。壁孔縁におけるS₁とS₂のこのような層構成はこれまでに示したレプリカ像とも一致する。さらに壁孔縁の外表面側で、これらのS₁やS₂と区別されるような壁層(すなわちBT)は認められない。これらのことからR-T壁孔の壁孔縁における各壁層の堆積の仕方(層構成)は壁孔の存在しない壁部分(unpitted wall)のそれと同様に、各壁層が順次単純に堆積した構造であることが分かる。

写真128はスギのR-T壁孔を繊維軸方向に沿って上から下に向かって連続して薄切した木口面の超薄切片像を示す。すなわち写真①は孔口の上端近くで、②は上端と中央部の中間で、③は孔口の中央部で、④は下端近くで薄切した断面像を示す。壁孔縁中におけるS₁とS₂の層構成は前掲の写真

126, 127と同じであるが, S_2 の張り出しの程度が孔口の端(上端と下端)と中央部で著しく異なることに注目したい。このことは, S_2 はそのマイクロフィブリル配列に対して直角方向にのみ張り出した壁孔縁を形成することを示すものである。このようにR-T壁孔の壁孔縁では S_1 と S_2 が全く独自にしかも特定の方向(マイクロフィブリル配列方向に直角方向)にのみ堆積することによって壁孔縁を形づくっており, T-T壁孔の壁孔縁形成で見られるように厚い S_1 やBTが均等に張り出して壁孔縁を形づくるのとは異っている。

4) R-T壁孔の壁孔縁の模式図

R-T壁孔に関する以上のレプリカ観察および超薄切片観察によって得られた知見をもとに, R-T壁孔の壁孔縁における主たる壁層である S_1 と S_2 のマイクロフィブリルの配列ならびに層構成を模式的に示すと図13および図14のようになる。とくに図14はR-T壁孔を種々の断面で切断した場合の断面像にみられる S_1 と S_2 を模式的に表したものである。

各壁層の堆積によって形づくられる開口部の形状は, P形成段階(すなわち一次壁孔域の輪郭)では円形に近い広楕円形を呈し, S_1 が堆積することによってそれがほぼ相似的に小さくなった広楕円形(長径方向は繊維軸に直角方向である)となり, さらに S_2 が堆積することによって S_2 のマイクロフィブリル配列方向に長径を有する平行四辺形的な長楕円形へと変化する。このようにR-T壁孔の孔口の形状は, 早材仮道管であっても, T-T壁孔のそれのように S_1 の堆積のみによって円形の開口部が相似的に小さくなるというのではなく, S_1 と S_2 の両者の堆積によって形づくられるのが特徴である。

開口部(孔口)の近傍における S_1 と S_2 のマイクロフィブリルは, いずれも本来の走行方向からあまり変異することなく, 開口部の縁に接するようにして配列するのが特徴である。ただし S_2 のマイクロフィブリルは開口部の縁にまわり込むようにして配列するのが観察された。

また壁孔縁中における S_1 と S_2 の層構成については, S_1 と S_2 はそれぞれのマイクロフィブリル配列方向と直角方向で口唇形状に堆積し, S_1 は壁孔縁の付け根付近に

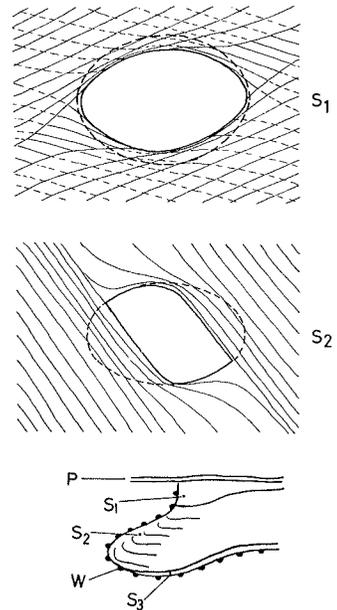


図13. R-T壁孔の壁孔縁の各壁層のマイクロフィブリル配列と木口断面における壁層構成の模式図

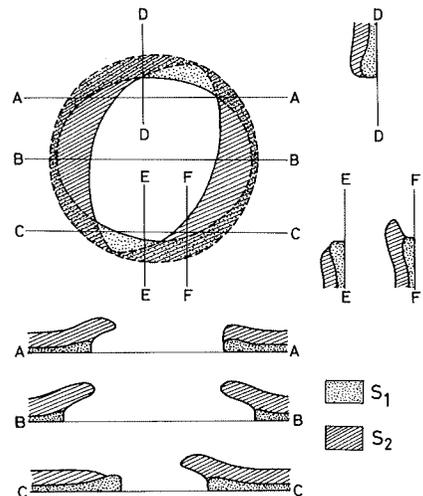


図14. R-T壁孔の壁孔縁の種々の断面で見られる S_1 と S_2 の層構成モデル

やや厚く堆積するのに対して S_2 は明瞭に張り出した壁孔縁を形成する。さらにR-T壁孔の壁孔縁ではその外表面側において S_1 や S_2 と区別されるような特別の壁層は観察されず、このことからBTは存在しないものと考えられる。

このようにR-T壁孔の壁孔縁における S_1 と S_2 は特定の部位に偏異して存在するため、それらの断面像は切断部位によってかなり変化するのが認められた。とくに孔口の上端部と下端部の付近では S_2 の堆積のほとんどない部分が存在することが分かった。

3.3 壁孔における破壊

3.3.1 はじめに

針葉樹材仮道管壁の構造とその強度的性質との関係については多くの研究成果が報告されているが、これらはいずれも壁孔の存在しない壁を想定している場合が多く、壁孔の強度的役割についてはこれまであまり詳しく調べられていない。しかしR-T壁孔を含む放射組織との交差域が強度的に弱い部分(weak region)であることはかなり以前から注目されてきている。例えばパルプ化した単一仮道管ではこの部分で折れ曲りや切断あるいは薬液によって膨潤しやすいこと(FORGACS 1961, 臼田ら 1966), 他方この部分が集中的に圧縮破損を受けやすいこと(GREEN 1962, DINWOODIE 1968, KEITH 1971, 1974, DELORME・VERHOFF 1975)などが明らかにされている。さらに単一仮道管の縦引張破壊においてR-T壁孔が破壊の開始部位となることの多いことも判明している(古川 1975)。ところがT-T壁孔については破壊の開始部位となることも少なく、むしろ亀裂の生長を阻止するような働きのあることが認められている(古川 1975, 1978_b)。このように針葉樹材仮道管壁の破壊と壁孔とは密接な関係を有している。

したがってここでは仮道管壁に存在するT-T壁孔とR-T壁孔の破壊形態の特徴ならびにこれらの破壊挙動と壁孔の構造との関連性について検討した結果について述べる(古川 1978_c)。

3.3.2 試料の調製と観察法

3.3.2.1 試料の調製

1) 供試材料

壁孔およびその付近における破壊形態観察のための材料としては本邦産主要針葉樹材9種を用いた。それらの材料は1.3.2に掲げたものと同じである。

2) 試料の作製

試料としては主に未処理単一仮道管およびホロセルロース化した単一仮道管を用いた。これらの試料の作製法および破壊方法は1.2.2および1.3.2と同じである。

3.3.2.2 観 察 法

単一仮道管の壁孔付近における破壊形態はSEMを用いて観察した。その観察方法は1.2.2および1.3.2と同じである。

3.3.3 壁孔部の破壊形態

3.3.3.1 T-T壁孔の破壊形

写真129はホロセルロース化したスギの中間材的な単一仮道管が破壊されたときに生じたT-T壁孔の典型的な破壊形態の1つを示したものである。この場合壁孔周辺の仮道管壁は繊維軸にはほぼ平行に破壊していることから S_2 の裂け破壊によって破壊したことが分る。ところがこの場合、T-T壁孔の壁孔縁を構成する1つの壁層であろうと思われるドーナツ状を呈する部分だけは、 S_2 の裂け破壊によっても破断せずにそのまま壁孔縁から剥離している。このドーナツ状の部分は、その表面にわずかではあるがいぼ状層の痕跡(脱リグニン処理をしているためいぼはかなり溶脱している)や壁孔壁のマルゴの一部分とみられるフィブリルが付着していることから、これは壁孔室に面した壁孔縁の最外層であることが分る。しかもこのドーナツ状の部分に入っている亀裂の状況や表面の微細なしわの状態から判断して、これはマイクロフィブリルが同心円状に配列した壁層の一部とみなすことができる。これらのことから、このドーナツ状の部分はWARDROP(1954)の提案しているBTと判定される。また写真130はホロセルロース化したスギの晩材単一仮道管の S_2 の切断破壊部にみられたT-T壁孔の破壊形を示す。この場合も壁孔縁を構成するBT以外の壁層は壁孔の周囲の仮道管壁と同様に切断破壊されているが、BTと思われる部分だけは破壊されずにそのまま残っている(矢印)。

これらの写真から、晩材仮道管のT-T壁孔の壁孔縁では、BTを除く他の壁層はすべて壁孔の周囲の壁と同様な様式で破壊されるが、BTだけは破壊に対して若干の抵抗性をもっていることが推定される。しかし晩材仮道管のT-T壁孔の壁孔縁では S_2 が圧倒的に多いため、破壊に際してBTはほとんど問題にならないであろう。

写真131および132はホロセルロース化したスギの早材単一仮道管の破壊先端においてみられたT-T壁孔の破壊形を示したものである。この場合は前述の晩材仮道管のT-T壁孔の破壊と異なり、壁孔縁が壁孔の周囲の壁の切断破壊もしくは裂け破壊によって2分されるようなことはなく、破壊は常に壁孔の周囲を迂回(壁孔縁の付け根に沿って迂回)するように生じるのが特徴であった。このような破壊は壁孔縁の構造(とくに壁層構成割合)に起因するものと思われる。すなわち早材仮道管のT-T壁孔の壁孔縁では同心円状にマイクロフィブリルが配列したBTと主方向はフラットヘリックスで孔口で変異したマイクロフィブリル配列をもつ厚い S_1 が存在することによって壁孔縁は壁孔以外の壁部分よりも強固な構造物であろうと考えられる。

このようにT-T壁孔の縦引張破壊時の挙動は壁孔縁の構造に強く依存していることが推定される。

すなわち晩材仮道管のT-T壁孔の破壊挙動は壁孔縁中で最も量的に多い S_2 の挙動によって決定されるのに対して、早材仮道管のT-T壁孔はBTと S_1 によってその破壊挙動が決定されるものと考えられる。

3.3.3.2 R-T壁孔の破壊形

写真133は未処理のスギの晩材単一仮道管の破壊先端において観察されたR-T壁孔の典型的な破壊形の1例を示したものである。同様な破壊形態は前掲の写真10, 28, 29においても認められる。このようにR-T壁孔のところでは壁孔の中央付近で切断破壊されることが多く、しかも壁孔縁の部分とそれ以外の壁部分の破面の形態的特徴は同じである。さらにR-T壁孔の切断破壊部にはBTのような特異な壁層が破壊しないで残っているというようなことはない。これは先に述べたR-T壁孔の壁孔縁の構造からも明らかなように、R-T壁孔の壁孔縁の壁層構成が壁孔部以外の壁のそれに近いことを裏づけるものであろう。

写真134はホロセルローズ化したスギの早材単一仮道管の破壊先端でよく見られるR-T壁孔の破壊形を示したものである。同様な破壊形態は前掲の写真74や77においても認められる。早材仮道管の場合も晩材仮道管の場合と同様にR-T壁孔のところでは切断破壊されることが多く、しかも壁孔縁のところも壁孔の周囲の壁のところも破面の形態は全く同じである。

このようにR-T壁孔の壁孔縁、すなわち S_2 の張り出し部分は壁孔以外の壁の部分に比べて破壊しやすい部分であると考えられる。

3.3.3.3 壁孔縁の構造と壁孔部での破壊挙動の関係

以上の観察から明らかなように針葉樹材仮道管の縦引張破壊の際のT-T壁孔とR-T壁孔の破壊挙動にはかなりの相違が認められ、これは両壁孔の壁孔縁の構造の相違に基づくものと推定される。

R-T壁孔の壁孔縁で張り出した部分はほとんど S_2 のみから成り、他の壁層(主に S_1)を欠いている。しかも壁孔縁は均等に張り出しているのではなく、 S_2 のマイクロフィブリルの配列方向と直角方向にだけ張り出している。しかもこの部分の厚さは壁孔以外の壁の部分の S_2 の厚さに比べて同じか、むしろ薄くなっている。そのうえ S_2 のマイクロフィブリルは孔口を迂回するように変異して配列している。このような構造をもったR-T壁孔の壁孔縁の張り出し部分(S_2 部分)は、壁孔以外の壁の S_2 に比べて、壁層構成およびマイクロフィブリル配列の点から機械的作用に対して弱い構造であると言える。

これに対してT-T壁孔の壁孔縁は壁孔以外の壁部分よりも S_1 が厚く堆積し、しかも S_1 のマイクロフィブリルは孔口で変異し、その主方向はフラットヘリックスのまま堆積することによって均等に張り出した壁孔縁を形成している。しかもこのような S_1 の内側(内こう側)には壁孔以外の壁と同程度に S_2 が堆積し、一方 S_1 の外側(壁孔室側)は同心円状にマイクロフィブリル配列したBTと呼ばれる特異な壁層で裏打ちされている。このような構造を有するT-T壁孔の壁孔縁は壁層構成およびミク

ロフィブリル配列の点からみて壁孔以外の壁部分よりもむしろ破壊しにくい構造であると言える。

このような壁孔縁の構造の相違がR-T壁孔とT-T壁孔の破壊の違いを生み出す原因と考えられる。

3.4 要 約

1. 針葉樹材の早材仮道管の代表的なR-T壁孔(スギ, ヒノキ, エゾマツ, アカマツの各材)の壁孔縁の構造について, レプリカ法ならびに超薄切片法を用いてTEMで調べた結果, 次のことが明らかとなった。

R-T壁孔の壁孔縁の壁層構成および各壁層のマイクロフィブリルの配列はT-T壁孔の壁孔縁のそれとはかなり異なっている。すなわちR-T壁孔の壁孔縁形成における S_1 と S_2 はそれぞれのマイクロフィブリルの配列方向に対して直角方向で壁孔の開口部を狭めるように, 言い換えれば口唇形状に堆積し, とりわけ S_2 の堆積が壁孔縁の形状決定(最終孔口の形定)に大きく寄与しているのが特徴である。また壁孔縁における各壁層の構成はT-T壁孔のそれとは異なる。

2. 針葉樹材仮道管壁の構造上の変異部である壁孔部(T-T壁孔とR-T壁孔)の縦引張破壊挙動について, 壁孔部の破壊形態をSEMで調べるとともに, 壁孔縁の構造との関連性について考察した結果, 次のことが明らかとなった。

T-T壁孔とR-T壁孔は破壊挙動を異にし, とくにR-T壁孔(早材, 晩材とも)は壁孔中央部から切断破壊されることが多いのに対して, T-T壁孔(とくに早材の場合)は破壊に対して抵抗性のあることが認められる。この原因としては, T-T壁孔の壁孔縁には主方向はフラットヘリックスで孔口で変異したマイクロフィブリル配列をもつ S_1 が厚く均等に張り出し, しかもこれが同心円状にマイクロフィブリルが配列したBT(ボーダーシッキング)で裏打ちされているため, あらゆる方向からの外力に対して破壊しにくい構造であるのに対して, R-T壁孔の壁孔縁(張り出した部分)にはそのような S_1 やBTを欠き, ほとんど S_2 のみから構成されており, しかも S_2 のマイクロフィブリルの配列は孔口の付近で変異しているため, 壁孔以外の壁部分よりも弱い構造であろうと考えられる。

結 言

木材の縦引張破壊時の特性を理解することは、木材を材料として有効に利用する際の基本的な問題の1つであり、その重要性は近年次第に認められつつある。ところが木材の縦引張破壊機構についてはほとんど解明されないままで今日に至っている。

本研究は、木材の1つの構造単位である単一細胞壁（ここでは針葉樹材単一仮道管の細胞壁）と重複細胞壁（ここでは針葉樹材切片中の細胞間層をはさんだ1対の細胞壁）の縦引張破壊機構を木材の組織構造学的立場からフラクトグラフィ的に検討することを目的として行った。その結果、針葉樹材仮道管壁中における亀裂の挙動を直接可視化するとともに、得られた知見をもとに仮道管壁の破壊機構に関する一提案を行い、さらに破面の形態的特徴を利用することによって仮道管壁構造に関する知見を発展させることができた。またこの研究を遂行するために2,3の研究手法を確立した。すなわち細胞壁レベルでの亀裂の挙動を直接可視化するための動的観察法ならびに静的観察法である。

本研究により縦引張破壊時の木材細胞壁中における亀裂の挙動をある程度明らかにし、細胞壁レベルのミクロな破壊現象と細胞集合体としての木材レベルのマクロな破壊現象との間隙を埋める1つの手掛りを得ることができた。しかしながら本研究はSEMとか光顕による破壊の形態学的研究であるため、結論には多くのスペキュレーションを含まざるを得ず、したがって定性的、現象論的把握にとどまっており、今後に残された問題こそ大きいと言えよう。例えば木材細胞壁中の亀裂先端近傍のモデル化による応力分布の数量的把握、そのために必要な主要構成成分、とくにリグニンやヘミセルロースの壁内分布様式の解明とこれらの弾性定数の決定、さらにミクロフィブリルレベルでの破壊形態の可視化、その他仮道管以外の木材構成要素の壁構造の解明とか実物大試験片の破壊現象との関連性の究明などである。しかしながら本研究がこれからのこの方面への研究の足掛りとなり、さらに木材の有する優れた材料特性の解明の一助ともなれば、筆者望外の喜びである。

総 括

木材の縦引張破壊時にみられる特性の発現には、木材を構成する種々の微視的ならびに巨視的構造単位の巧みな幾何学的配列（複合構造）が密接に関与しており、このことから細胞壁レベルでの破壊機構を組織構造的見地から研究することは、木材を加工・利用する場合のみならず、木材の特性を活かした新しい材料の開発を目指す場合の基礎的見知を与えるものとして重要と考える。それにもかかわらず、この方面の研究がこれまでほとんどなされなかったのは、現象の複雑さに加えて、現象を直接可視化検証する手段が確立されていなかったことによるものである。

本論文はSEMを主とする形態学的観察手段を用いて、木材細胞壁の縦引張破壊をフラクトグラフィ的に究明し、木材利用上の基礎的知見を得ることを目的として次の3項目、すなわち(1)針葉樹材単一道管における単一細胞壁の縦引張破壊、(2)針葉樹材切片における重複細胞壁の縦引張破壊、(3)針葉樹材仮道管の有縁壁孔の構造と縦引張破壊についてとりまとめたものである。本研究の結果を総括すると以下のとおりである。

1. 木材単繊維の縦引張破壊、すなわち単一細胞壁中の亀裂の挙動と破壊先端の形態を電顕レベルで直接可視化する方法を検討するとともに、この方法を針葉樹材の単一仮道管の破壊の観察に適用し、次のことが明らかとなった。

単一仮道管の破壊過程をSEMで直接観察する動的観察法と、単一仮道管の破壊先端をSEMで詳細に観察する静的観察法を確立することにより、単一仮道管壁中における亀裂の挙動を可視化することが可能である。

単一仮道管の破壊過程は特徴的な2つの破壊段階で構成されている。すなわち S_2 のマイクロフィブリルの切断を主とする破壊（切断破壊）の段階と、 S_2 のマイクロフィブリル間の裂けを主とする破壊（裂け破壊）の段階の2つである。早材および晩材単一仮道管では、破壊は切断破壊で始まり、裂け破壊へと移行することが多いのに対して、圧縮あて材単一仮道管では逆の傾向が認められる。また破壊の開始部位としては早材および晩材単一仮道管ともに放射組織との交差域の端に近いR-T壁孔が、また圧縮あて材単一仮道管ではらせん状裂目が多い。さらに早材単一仮道管では破壊開始直後、破断部が繊維軸のまわりに捩れてずれたり、別の新しい亀裂が発生することなどが観察される。これらの観察から単一仮道管壁中の亀裂は、破壊開始時とその後では亀裂先端の応力状態に変化がある（すなわち破壊モードが変化する）と推定される。

単一仮道管壁の最厚層 S_2 の破壊形態は基本的に6つに類別できる。これらの破壊形態は、 S_2 中での亀裂の先端に支配的に作用する応力の種類とその作用方向によって決定される6つの破壊様式、すなわち切断のI、II、III型（C-I、C-II、C-III）と裂けのI、II、III型（S-I、S-II、S-III）破壊によって生じる破壊形態にそれぞれ対応するものと推定される。しかも S_2 全体の破面は複数の破壊様式によって生じる破面で構成されることが多いことから、これを切断破壊優先型、裂け破壊優先型、混合型の3つに分類することができる。単一仮道管壁からリグニンやヘミセルロー

スを除去すると破面の構成は切断破壊優先型（とくにC-I, C-II破面が顕著になる）となるのに対し, S_2 のマイクロフィブリル傾角が比較的大きい場合や湿潤状態では S_2 は裂け破壊優先型の破面を呈する傾向がある。なおリグニンを除去した S_2 の破面上には独特の同心円状模様が現れることから, S_2 には潜在的にラメラ構造が存在すると推定される。早材単一仮道管壁の破壊形態は基本的に晩材のそれと同じである。

2. 木材の縦断切片の縦引張破壊, すなわち重複細胞壁中の亀裂の挙動と破壊先端の形態を直接可視化する方法を検討し, これを厚さ60~120 μm のスギの早, 中間, 晩各材のノッチ付き切片の破壊の観察に適用し, 次のことが明らかとなった。

ノッチ付き切片の破壊過程では, 亀裂は必ずノッチの先端に発生し, つづいて亀裂の伝播速度の異なる2つの破壊段階, すなわち緩徐亀裂伝播(SCP)段階と急速亀裂伝播(RCP)段階が認められる。SCP破壊は比較的仮道管壁の厚い中間材切片に最も明瞭に見られ, 薄壁の早材切片ではRCP破壊が顕著である。重複細胞壁中における亀裂の伝播様式は, 早材切片では重複細胞壁を同時に主として切断破壊によって, 中間材切片では重複細胞壁の片側の壁中を進んでいる亀裂がその先端のところで隣接壁中の S_2 に裂け破壊をじゃっ起することによって, それぞれ進行する。また晩材切片では亀裂が隣接壁へ伝播する途中で重複細胞壁間に剥離破壊を生じる。さらに亀裂は晩材切片中の放射組織のところを選択的に進行する。

ノッチ付き切片の破壊線の形状はノッチのない平滑切片のそれと同じであることを確認するとともに, 亀裂の伝播速度が大きい程単純(直線状)となり, また壁厚の厚い切片程複雑(波状, 階段状)となる。またまさ目切片では早材部と晩材部の境界付近で仮道管間に剥離破壊(縦裂線)が生じる。SCP破壊では S_2 の裂け破壊と S_1 近くでの剥離破壊が存在する。RCP破壊では S_2 の裂け破壊と切断破壊ならびに仮道管間(S_1 近傍)での剥離破壊が存在し, 破面上にはひだ状模様がみられる。さらにRCP破壊した個々の仮道管壁では破壊の進行方向に対して手前側で裂け破壊が生じており, それにつづく切断破面上のひだの方向は壁中における亀裂の伝播方向と対応すると推定される。

3. 仮道管壁の構造上の変異部である壁孔の壁孔縁(とくにR-T壁孔)の構造について調べるとともに, 壁孔(T-T壁孔とR-T壁孔)での縦引張りに対する寄与を壁孔縁の構造と関連させて検討したところ, 次のことが明らかとなった。

R-T壁孔の壁孔縁における S_1 と S_2 はそれぞれのマイクロフィブリルの配列方向と直角方向において壁孔の開口部を狭めるように堆積し, なかでも S_2 の堆積が壁孔縁(孔口)の形状決定に大きく寄与している点で, T-T壁孔の壁孔縁の構造とかなり異なる。

T-T壁孔とR-T壁孔は破壊に対する寄与を異にする。すなわち, R-T壁孔は壁孔中央部で切断破壊されることが多いのに対し, T-T壁孔は破壊に対して抵抗性がある。これはT-T壁孔の壁孔縁が均等に張り出し, しかも厚い S_1 とこれを裏打ちするBT(ボータシクニング)によって構成された破壊しにくい構造であるのに対し, R-T壁孔の壁孔縁はほとんど S_2 から成り, しかも張り出しが不均等なため, 壁孔以外の壁部分よりも強度的に弱い構造であることが原因と推定される。

謝 辞

本論文は京都大学農学研究科在籍中から現在（鳥取大学在職中）に至るまでの研究成果をとりまとめたものであるが、本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたって、研究科在籍中の恩師 京都大学教授 原田 浩博士には研究全般にわたって終始変らぬ激励と懇切な指導を賜った。また学部在籍中の恩師 京都大学教授 中戸莞二博士ならびに京都大学木材研究所教授 山田 正博士には論文のとりまとめに際して多くの教示と指導を賜った。また京都大学助教授 佐伯 浩博士にはSEMの手ほどきを受けて以来、本研究実施上有益かつ的確な多くの助言と激励とをいただいた。さらに鳥取大学教授 岸本 潤博士ならびに同助教授 作野友康博士には本研究の遂行ととりまとめに際して多大な援助と便宜とを与えられた。

また、京都大学助手 藤田 稔氏ならびに同農学研究科 岸 恭二氏（元鳥取大学農学部専攻生）には試料の作製および超薄切片観察において多くの援助をいただいた。農林省林業試験場木材加工技術科 藤原勝敏博士（元京都大学助手）には動歪測定法について有益な助言をいただいた。また京都大学教授 杉原彦一博士は動歪測定器の使用を快く許可され、研究遂行上の便宜を与えられた。また鳥取大学工学部工作場ならびに株式会社岩本製作所の各位には本研究実施に必要な装置の試作にあたり適切な技術的助言をいただいた。さらに京都大学農学部林産工学科木材構造学研究室の各位ならびに鳥取大学農学部林学科林産研究室の各位、同農学部附属演習林の関係各位には本研究の実施ならびにとりまとめに際して多くの援助と便宜とを与えられた。

以上の方々に対して、ここに謹んで深甚な謝意を表する。

参 考 文 献

- ALBERSCHEIM, P. (太田次郎訳), (1975), サイエンス, No. 6, 80-93.
- ANDERSON, T. F., (1951), Trans. N. Y. Acad. Sci., Ser. II, **13**, 130-134.
- ARMSTRONG, J. P., KYANKA, G. H., THORPE, J. L., (1977), Wood Sci., **10**, 72-80.
- ATAK, D., MAY, W. D., MORRIS, E. L., SPROULE, R. N., (1961), Tappi, **44**, 555-567.
- BAILEY, I. W., KERR, T., (1935), J. Arnold Arboretum, **16**, 273.
- BAILEY, I. W., VESTAL, M. R., (1937), *ibid.*, **18**, 185-195.
- BARRETT, J. D., SCHNIEWIND, A. P., (1973), Wood & Fiber, **5**, 215-225.
- CARRARA, A. S., MCGARRY, F. J., (1968), J. Comp. Mat., **2**, 222.
- CHAPPELL, M. J., MORLEY, J. G., (1976), J. Mater. Sci., **11**, 57-70.
- CHEN, C. H., (1973), Fiber Sci. Tech., **6**, 1.
- CLARKE, D. R., BREAKWELL, P. R., SIMS, G. D., (1970), J. Mater. Sci., **5**, 873-880.
- COHEN, L. J., ROMUALDI, J. P., (1967), J. Franklin Inst., **284**, 388-406.
- COOK, J., GORDON, J. E., (1964), Proc. Roy. Soc., **A282**, 508-520.
- CÔTÉ, W. A. Jr., DAY, A. C., (1965), In Cellular Ultrastructure of Woody Plants, CÔTÉ, W. A. Jr. (ed.), Syracuse Univ. Press, 391-418.
- CÔTÉ, W. A. Jr., KORÁN, Z., DAY, A. C., (1964), Tappi, **47**, 477-484.
- COWDREY, D. R., PRESTON, R. D., (1965), In Cellular Ultrastructure of Woody Plants, CÔTÉ, W. A. Jr. (ed.), Syracuse Univ. Press, 473-492.
- COX, H. L., (1952), Brit. J. Appl. Phys., **3**, 72-79.
- CROSS, J. D., SANDS, A., (1971), Text. Res. J., **41**, 629-631.
- DAVIES, G. W., (1968), Holzforschung, **22**, 177-180.
- DEBAISE, G. R., PORTER, A. W., PENTONEY, R. E., (1966), Mater. Res. Stand., **6**, 493-499.
- DELORME, A., VERHOFF, S., (1975), Holz als Roh- und Werkstoff, **33**, 456-460.
- DINWOODIE, J. M., (1968), J. Inst. Wood Sci., **21**, 37-53.
- DUNNING, C. E., (1968), Wood Sci., **1**, 65-76.
- DUNNING, C. E., (1969), Tappi, **52**, 1326-1335.
- FENGEL, D., (1969), Wood Sci. Technol., **3**, 203-217.
- FENGEL, D., (1970), Tappi, **53**, 497-503.

- FORGACS, O. L., (1961), *ibid.*, **44**, 112-119.
- FORGACS, O. L., (1963), *Pulp Paper Mag. Can.*, **64**, T 89-T 118.
- FOWLKES, C. W., (1974), *J. Adhesion*, **6**, 49-84.
- FREY-WYSSLING, A., (1954), *Science*, **119**, 80-82.
- FREY-WYSSLING, A., (1976), *The Plant Cell Wall*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 7-29, 89-100.
- 藤井太一, 座古 勝, (1978), 複合材料の破壊と力学, 実教出版
- 藤川清三, (1974), 第24回日本木材学会大会研究発表要旨, 50.
- FUKUDA, H., KAWATA, K., (1974_a), *Fukugo Zairyo Kenkyu*, **3**, 21-25.
- 福田 博, 河田幸三, (1974_b), *東大宇宙航空研報*, **10**, 464-470.
- 古川郁夫, (1973), *木材工業*, **28**, 10-15.
- 古川郁夫, (1978_a), *木材学会誌*, **24**, 369-374.
- 古川郁夫, (1978_b), *ibid.*, **24**, 598-604.
- 古川郁夫, (1978_c), *鳥大農研報*, **30**, 171-179.
- 古川郁夫, 岸 恭二, (1976), 第26回日本木材学会大会研究発表要旨, 57.
- FURUKAWA, I., SAIKI, H., HARADA, H., (1973), *Mokuzai Gakkaishi*, **19**, 399-402.
- FURUKAWA, I., SAIKI, H., HARADA, H., (1974_a), *J. Electron Microscopy*, **23**, 89-97.
- 古川郁夫, 佐伯 浩, 原田 浩, (1974_b), *京大演習林報*, No.46, 170-178.
- 古川郁夫, 佐伯 浩, 原田 浩, (1975), *材料*, **24**(264), 855-861.
- 古川郁夫, 岸本 潤, 作野友康, (1979), 第29回日本木材学会大会研究発表要旨, 45.
- 古野 毅, 佐伯 浩, 原田 浩, (1969), *木材学会誌*, **15**, 104-108.
- FURUNG, T., NAGATOMI, W., GOTO, T., (1977), *Mokuzai Gakkaishi*, **23**, 89-98.
- FUTÓ, L. P., (1969), *Holz als Roh- und Werkstoff*, **27**, 192-201.
- GORDON, J. E., JERONIMIDIS, G., (1974), *Nature*, **252**, 116.
- GOTO, T., (1976), 京大学位論文
- 後藤俊幸, 原田 浩, (1975), *繊維学会誌*, **32**, 353-358.
- 後藤俊幸, 原田 浩, 佐伯 浩, (1972), *京大演習林報*, No.44, 176-182.
- GREEN, H. V., (1962), *Pulp Paper Mag. Can.*, **63**, T 155-T 168.
- GRIFFITH, A. A., (1920), *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A**221**, 163-198.
- HANNA, R. B., CÔTÉ, W. A. Jr., (1974), *Cytobiologie*, **10**, 102-116.
- HARADA, H., (1965), In *Cellular Ultrastructure of Woody Plants*, CÔTÉ, W. A. Jr. (ed.). Syracuse Univ. Press., 215-233.
- HARADA, H., CÔTÉ, W. A. Jr., (1967), *Holzforschung*, **21**, 81-85.
- 原田 浩, 今村祐嗣, (1978), *電子顕微鏡*, **13**, 41-47.

- 原田 浩, 谷口 隲, (1971), 京大演習林報, №42, 205-209.
- HARADA, H., WARDROP, A. B., (1960), Mokuzaï Gakkaishi, 6, 34-41.
- HARADA, H., IMAMURA, Y., SAIKI, H., (1976), Appl. Polymer Symp., №28, 1239-1253.
- 原田 浩, 宮崎幸男, 若島妙子, (1958), 林試研報, №104.
- HARTLER, N., KULL, G., STOCKMAN, L., (1963), Svensk Papperstidn., 66, 301-308.
- 林 毅, (1969), 日本航空宇宙学会誌, 17, 160.
- HEARLE, J. W. S., SPARROW, J. T., (1971), Text. Res. J., 41, 736-749.
- HEYN, A. N. J., (1969), J. Ultrastructure Res., 26, 52-68.
- 平井信二, (1947), 東大演習林報, 35, 67.
- IFJU, G., (1964), Forest Prod. J., 14, 366-372.
- IFJU, G., KENNEDY, R. W., (1962), *ibid.*, 12, 213-217.
- IFJU, G., WELLWOOD, R. W., WILSON, J. W., (1965), *ibid.*, 15, 13-14.
- IMAMURA, Y., (1974), 京大学位论文
- IMAMURA, Y., HARADA, H., (1973), Wood Sci. Technol., 7, 189-205.
- 今村祐嗣, 原田 浩, 佐伯 浩, (1972_a), 京大演習林報, №43, 303-308.
- 今村祐嗣, 原田 浩, 佐伯 浩, (1974), 第24回日本木材学会大会研究発表要旨, 48.
- 今村祐嗣, 佐伯 浩, 原田 浩, (1972_b), 京大演習林報, №44, 183-193.
- 井村 徹, (1970), 電顕学会誌, 19, 231-244.
- JAYME, G., (1942), Cellulosechem., 20, 43.
- JAYNE, B. A., (1959), Tappi, 42, 461-467.
- JAYNE, B. A., (1960), Forest Prod. J., 10, 316-322.
- JENTZEN, C. A., (1964_a), Tappi, 47, 412-418.
- JENTZEN, C. A., (1964_b), Forest Prod. J., 14, 387-392.
- JERONIMIDIS, G., (1976), In Wood Structure in Biological and Technological Research,
BASS, P., BOLTON, A. J., CATLING, D. M., (eds.), Leiden Univ. Press. 253-265.
- 梶田 茂編, (1967), 木材工学, 養賢堂, 東京, 222-223.
- 金丸 競, (1977), 材料強度論-亀裂と破断-, 共立出版, 東京, 52-90.
- KEITH, C. T., (1971), Wood Sci., 4, 71-82.
- KEITH, C. T., (1974), *ibid.*, 7, 1-12.
- KEITH, C. T., CÔTÉ, W. A. Jr., (1968), Forest Prod. J., 18, 67-74.
- KELLY, A., TYSON, W. R., (1965), J. Mech. Phys. Solids., 13, 329-350.
- KERSAVAGE, P. C., (1973), Wood & Fiber, 5, 105-117.
- KERR, A. J., GORING, D. A. I., (1975), Cellulose Chem. Technol., 9, 563-573.
- KIMOTO, S., SATO, M., ADACHI, T., (1969), Proc. 2nd Annu. SEM Symp., IITRI Chicago, 67.

- 北川英夫, 小寺沢良一共編, (1977), フラクトグラフィ, 培風館, 東京
- 北原覚一, (1966), 木材物理学, 森北出版, 東京, 144 - 145.
- KLOOT, N. H., (1952), Aust. J. Appl. Sci., **3**, 125 - 143.
- 小寺沢良一, (1971_a), 機械の研究, **23**, 1 - 8.
- 小寺沢良一, (1971_b), *ibid.*, 29 - 32.
- 小寺沢良一, (1971_c), *ibid.*, 33 - 38.
- 小寺沢良一, (1974), 材料, **23**(248), 412 - 421.
- KOLLMANN, F. F. P., CÔTÉ, W. A. Jr., (1968), Principles of Wood Science and Technology, I. Solid Wood, Springer-Verlag, N. Y., **199**, 321 - 329,
- KORÁN, Z., (1967), Tappi, **50**, 60 - 67.
- KORÁN, Z., (1968), Svensk Papperstidn., **71**, 567 - 576.
- LAZARO, R., CHIAVERINA, J., (1973), Cellulose Chem. Technol., **7**, 269 - 282.
- Leopold, B., (1966), Tappi, **49**, 315 - 318.
- Leopold, B., Mc INTOSH, D. C., (1961), *ibid.*, **44**, 235 - 240.
- MAI, Y. W., (1975), Wood Sci., **8**, 364 - 388.
- MARK, R. E., (1965), In Cellular Ultrastructure of Woody Plants, CÔTÉ, W. A. Jr. (ed.), Syracuse Univ. Press, 493 - 533.
- MARK, R. E., (1967), Cell Wall Mechanics of Tracheids, Yale Univ. Press.
- MARK, R. E., (1972), In Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials, JAYNE, B. A., (ed.), Syracuse Univ. Press, 49 - 82.
- MARK, R. E., GILLIS, P. P., (1973), Tappi, **56**, 164 - 167.
- Mc INTOSH, D. C., (1967), *ibid.*, **50**, 482 - 488.
- Mc KEE, A. N., BEATTIE, C. L. III, (1970), Text. Res. J., **40**, 1006 - 1016.
- Mc MILLIN, C. W., (1974_a), Svensk Papperstidn. **17**, 319 - 324.
- Mc MILLIN, C. W., BILLINGSLEY, F. C., FRAZER, R. E., (1974_b), Wood Sci., **6**, 272 - 277.
- MERCHANT, M. V., (1957), Tappi, **40**, 771 - 781.
- MÜHLETHALER, K., (1960), Beih. Z. Schweiz. Forstverein., **30**, 55 - 65.
- NEČESANÝ, V., JURÁŠEK, L., SOPKO, R., BOBÁK, M., (1965), Nature, **206**, 639.
- 岡村弘之, (1976), 線形破壊力学入門, 培風館, 東京
- OKUMURA, S., HARADA, H., SAIKI, H., (1976), Mokuzai Gakkaishi, **22**, 543 - 549.
- 奥山 剛, (1977), 走査電子顕微鏡で見た木材の表情, 名古屋大学農学部木材物理学研究室編, 1 - 10.
- OUTWATER, J. O. Jr., (1956), Modern Plastics, 156.

- OWEN, D. R. J., (1972), *Fiber Sci. Tech.*, **5**, 32.
- PAGE, D. H., (1976), *Wood & Fiber*, **7**, 246-248.
- PAGE, D. H., DE GRÂCE, J. H., (1967), *Tappi*, **50**, 489-495.
- PAGE, D. H., EL-HOSSEINY, F., WINKLER, K., (1971), *Nature*, **229**, 252-253.
- PAGE, D. H., EL-HOSSEINY, F., WINKLER, K., BAIN, R., (1972), *Pulp Paper Mag. Can.*, **73**, T 198 - T 203.
- PANSHIN, A. J., DE ZEEUW, C., (1970), *Textbook of Wood Technology*, Vol. 1, 3rd ed., Mc Graw-Hill, N. Y., 289-300.
- PARAMESWARAN, N., LIESE, W., (1976), *Wood Sci. Technol.*, **10**, 231-246.
- PETERLIN, A., INGRAM, P., (1970), *Text. Res. J.*, **40**, 345-354.
- POLJAK, A., (1948), *Angew. Chemie*, **60**, 45.
- PORTER, A. W., (1964), *Forest Prod. J.*, **14**, 325-331.
- PRESTON, R. D., (1965), *Interpretation of Ultrastructure*, Symp. Intl. Soc. Cell Biol., **1**, 325.
- PRESTON, R. D., (1974), *The Physical Biology of Plant Cell Walls*, Chapman and Hall, London, 163-191.
- RÅNBY, B. G., RIBI, E., (1950), *Experientia*, **6**, 12.
- ROELOFSEN, P. A., (1959), *The Plant Cell Wall*, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- ROSEN, B. W., ZWEBEN, C. H., (1972), *NASA CR-2057*.
- RUEL, K., BARNOUD, F., GORING, D. A. I., (1978), *Wood Sci. Technol.*, **12**, 287-291.
- 佐伯 浩, (1970_a), *木材学会誌*, **16**, 244-249.
- SAIKI, H., (1970_b), *Memoirs College Agri. Kyoto Univ.*, No.96, 47-73.
- 佐伯 浩, (1973), *材料*, **22** (241), 894-902.
- 佐伯 浩, 古川郁夫, 原田 浩, (1972), *京大演習林報*, No.43, 309-319.
- 沢田 稔, (1958), *林試研報*, No.108, 115-224.
- SCALLAN, A. M., (1974), *Wood Sci.*, **6**, 266-271.
- SCHNIEWIND, A. P., (1966), *Holz als Roh- und Werkstoff*, **24**, 502-506.
- SCHNIEWIND, A. P., (1972), *In Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials*, JAYNE, B. A. (ed.), Syracuse Univ. Press, 83-95.
- SCHNIEWIND, A. P., POZNIAK, R. A., (1971), *Eng. Fract. Mech.*, **2**, 223-233.
- SIKORSKI, J., MOSS, J. S., NEWMAN, P. H., BUCKLEY, T., (1968), *J. Sci. Instr.*, Ser. 2, **1**, 29.
- 島地 謙, (1964), *木材解剖図説*, 地球出版, 東京, 12-13.
- 島地 謙, 須藤彰司, 原田 浩, (1976), *木材の組織*, 森北出版, 東京, 73-74.

- 祖父江信夫, 浅野猪久夫, (1976), 木材学会誌, **22**, 211 - 216.
- SPIEGELBERG, H. L., (1966), Tappi, **49**, 388 - 396.
- STOLL, M., FENGEL, D., (1977), Wood Sci. Technol., **11**, 265 - 274.
- STOLL, M., FENGEL, D., (1978), Holzforschung, **32**, 10 - 15.
- STONE, J. E., SCALLAN, A. M., (1965), Pulp Paper Mag. Can., **66**, T 407 - T 414.
- 高橋善雄, 今村祐嗣, 佐伯 浩, 原田 浩, (1973), 京大演習林報, No. 45, 163 - 170.
- 田川高司, 森 淳一, (1971), 日本電子顕微鏡学会第 27 回学術講演会, 講演予稿集, 134.
- 滝沢忠昭, (1979), 北林産試研報, No. 68, 1 - 91.
- TAMOLANG, F. N., WANGAARD, F. F., KELLOGG, R. M., (1967), Tappi, **50**, 68 - 72.
- 田中克己, (1971), 顕微鏡の使い方, 改訂第 11 版, 裳華房, 東京, 127.
- TANG, R. C., (1972), Wood & Fiber, **3**, 210 - 219.
- TANG, R. C., SMITH, N. D., (1975), Wood Sci., **8**, 415 - 424.
- TATTERSALL, H. G., TAPPIN, G., (1966), J. Mater. Sci., **1**, 296 - 301.
- TETELMAN, A. S., McEVILY, A. J. Jr., (1967), Fracture of Structural Materials, John Wiley & Sons, N. Y., 56 - 71.
- THOMAS, R. J., NICHOLAS, D. D., (1966), Forest Prod. J., **16**, 53 - 56.
- THOMPSON, N. S., KAUSTINEN, O. A., (1964), Tappi, **47**, 157 - 162.
- 東京大学農学部林産化学教室編, (1965), 林産化学実験書, 産業図書, 東京, 99.
- 白田誠人, 池田成生, ハイメ・R・ナバロ, 中野準三, 右田伸彦, (1966), 紙パ技協誌, **20**, 257 - 264.
- VAN DEN AKKER, J. A., (1970), In The Physics and Chemistry of Wood Pulp Fibers, PAGE, D. H., (ed.), STAP No. 8, TAPPI, N. Y., 166.
- VAN DEN AKKER, J. A., LATHROP, A. L., VOELKER, M. H., DEARTH, L. R., (1958), Tappi, **41**, 416 - 425.
- VAN BECKUM, W. G., RITTER, G. J., (1937), Paper Trade J., **105**, No. 18, 127.
- WARDROP, A. B., (1951), Aust. J. Sci. Res., B **4**, 391 - 414.
- WARDROP, A. B., (1954), Aust. J. Bot., **2**, 165.
- WARDROP, A. B., (1964), In The Formation of Wood in Forest Trees, ZIMMERMANN, M. H. (ed.), Academic Press, N. Y., 87 - 134.
- WARDROP, A. B., ADDO - ASHONG, F. W., (1963), In Proc. Melbourne Univ. Eng. Dept. Symp. on Fracture, 1 - 32.
- WARDROP, A. B., BLAND, D. E., (1959), In Proc. 4th. Intl. Congr. Biochem., **2**, 76 - 81.
- WARDROP, A. B., HARADA, H., (1965), J. Exp. Bot., **16**, 356 - 371.
- 渡辺 理, (1968), ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社, 東京.

- WELLWOOD, R. W., (1962), Pulp Paper Mag. Can., **63**, T 61 - T 67.
- WELLWOOD, R. W., IFJU, G., WILSON, J. W., (1965), In Cellular Ultrastructure of Woody Plants, CÔTÉ, W. A. Jr. (ed.), Syracuse Univ. Press, 539 - 549.
- WILSON, J. W., WELLWOOD, R. W., (1965), *ibid.*, 551 - 559.
- WISE, L. E., MURPHY, M., D'ADDIECO, A. A., (1946), Paper Trade J., **122**, 35 - 43.
- WOOTEN, T. E., BAREFOOT, A. C. Jr., (1965), Forest Prod. J., **15**, 75.
- 山脇弘一, 植村益次, (1970_a), 材料, **19** (206), 968 - 973.
- 山脇弘一, 植村益次, (1970_b), *ibid.*, 974 - 980.
- 横堀武夫, (1974), 材料強度学 (第2版), 岩波書店, 東京.

写真の説明

- 写真1**：スギの早材単一仮道管の外観（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $10\mu m$
- 写真2**：スギの早材単一仮道管の破壊過程（VTR再生画像からのこま撮り）。スケールは $20\mu m$
（①と②）と $50\mu m$ （③～⑥）
- 写真3**：スギの晩材（①は同一年輪内で早材に近い晩材，②は典型的な晩材）単一仮道管の外観（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $25\mu m$
- 写真4**：スギの同一年輪内で早材に近い晩材単一仮道管の破壊過程（VTR再生画像からのこま撮り）。スケールは $50\mu m$
- 写真5**：スギの晩材単一仮道管の破壊開始（VTR再生画像からのこま撮り）。スケールは $25\mu m$
- 写真6**：スギの晩材単一仮道管の破壊過程（VTR再生画像からのこま撮り）。スケールは $25\mu m$
- 写真7**：スギの晩材単一仮道管の破壊の第1段階（VTR再生画像からのこま撮り）。スケールは $20\mu m$
- 写真8**：写真4に示した単一仮道管の破壊先端（SEM写真）。スケールは $3\mu m$
- 写真9**：写真6に示した単一仮道管の破壊先端（SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真10**：写真7に示した単一仮道管の破壊先端（SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真11**：スギの圧縮あて材単一仮道管の破壊過程（VTR再生画像からのこま撮り）。スケールは $25\mu m$
- 写真12**：スギの晩材単一仮道管の外観（未処理，SEM写真）。スケールは $10\mu m$
- 写真13**：スギの晩材単一仮道管の破壊先端で見られる切断のI型（C-I）破面のマッチング写真（未処理，SEM写真）。矢印は対応部の1つを示す。スケールは $2\mu m$
- 写真14**：カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるC-I破面の一種（未処理，SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真15**：カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるC-I破面の一種（未処理，SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真16**：スギの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるC-I破面（未処理，SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真17**：ヒノキの晩材単一仮道管の破壊先端で見られる切断のII型（C-II）破面（未処理，SEM写真）。スケールは $1\mu m$
- 写真18**：アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるC-II破面（未処理，SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真19**：スギの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるC-II破面（未処理，SEM写真）。スケールは $2\mu m$
- 写真20**：スギの晩材単一仮道管の破壊先端で見られる切断のIII型（C-III）破面（未処理，SEM

写真). スケールは $2\mu m$

写真21: カヤの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるC-III破面(未処理, SEM写真). スケールは $2\mu m$

写真22: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られる裂けのI型(S-I)破面(未処理, SEM写真). スケールは $1\mu m$

写真23: スギの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). 矢印はS-I破壊したところを示す. スケールは $5\mu m$

写真24: エゾマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られる裂けのII型(S-II)破面(未処理, SEM写真). スケールは $2\mu m$

写真25: カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるS-II破面(未処理, SEM写真). スケールは $3\mu m$

写真26: スギの晩材単一仮道管の破壊先端(①)とそこで見られる裂けのIII型(C-III)破面(②)(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$ (①)と $1\mu m$ (②)

写真27: カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるS-III破面(未処理, SEM写真). スケールは $2\mu m$

写真28: スギの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真29: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真30: カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真31: モミの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真32: コウヤマキの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真33: スギの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$

写真34: カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $20\mu m$

写真35: スギの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真36: カラマツの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$

写真37: カヤの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真38: イチイの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$

写真39: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真40: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$

写真41: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるラメラ状破面(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $1\mu m$

写真42: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるラメラ状破面(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $1\mu m$

写真43: アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるラメラ状破面(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $1\mu m$

- 写真44：アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるラメラ状破面（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $1\mu m$
- 写真45：写真40で示した破壊先端の一部拡大。スケールは $1\mu m$
- 写真46：スギの晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真47：スギの晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $3\mu m$
- 写真48：スギの晩材単一仮道管の破壊先端で見られるラメラ状破面（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $1\mu m$
- 写真49：スギの晩材単一仮道管の破壊先端の一部（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $1\mu m$
- 写真50：アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理+脱ヘミセルロース処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真51：アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理+脱ヘミセルロース処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真52：写真50で示した破壊先端の一部拡大。スケールは $1\mu m$
- 写真53：写真51で示した破壊先端の一部拡大。スケールは $1\mu m$
- 写真54：アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端の一部（脱リグニン処理+脱ヘミセルロース処理，SEM写真）。矢印はbeam damageを受けたところを示す。スケールは $1\mu m$
- 写真55：アカマツの晩材単一仮道管の破壊先端の一部（脱リグニン処理+脱ヘミセルロース処理，SEM写真）。スケールは $1\mu m$
- 写真56：スギの晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理+脱ヘミセルロース処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真57：スギの晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理+脱ヘミセルロース処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真58：写真56で示した破壊先端の一部拡大。スケールは $1\mu m$
- 写真59：写真57で示した破壊先端の一部拡大。スケールは $1\mu m$
- 写真60：コウゾの靱皮繊維の内層の表面（未処理，SEM写真）。スケールは $1\mu m$
- 写真61：コウゾの靱皮繊維の破壊先端（未処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真62：コウゾの靱皮繊維の破壊先端（未処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真63：写真61で示した破壊先端の拡大。スケールは $2\mu m$
- 写真64：写真62で示した破壊先端の一部拡大。スケールは $1\mu m$
- 写真65：イチイの中間材単一仮道管の破壊先端（未処理，SEM写真）。スケールは $10\mu m$
- 写真66：イチイの中間材単一仮道管の破壊先端（未処理，SEM写真）。スケールは $10\mu m$
- 写真67：アカマツの未成熟材部の晩材単一仮道管の破壊先端（脱リグニン処理，SEM写真）。スケールは $5\mu m$
- 写真68：飽水状態で破壊したスギの晩材単一仮道管の破壊先端（①）とその一部拡大（②）（未処

- 理, SEM写真). スケールは $5\mu m$ (①) と $2\mu m$ (②)
- 写真69: 飽水状態で破壊したスギの晩材単一仮道管の破壊先端(①)とその一部拡大(②)(未処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$ (①) と $3\mu m$ (②)
- 写真70: 飽水状態で破壊したスギの晩材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $2\mu m$
- 写真71: スギの早材単一仮道管の破壊先端の一部(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $2\mu m$
- 写真72: スギの早材単一仮道管の破壊先端の一部拡大(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $1\mu m$
- 写真73: スギの早材単一仮道管の破壊先端の一部(脱クグニン処理, SEM写真). スケールは $2\mu m$
- 写真74: スギの早材単一仮道管の破壊先端のマッチング写真(脱リグニン処理, SEM写真). 矢印は対応部の1つを示す. スケールは $10\mu m$
- 写真75: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真76: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真77: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真78: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $20\mu m$
- 写真79: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真80: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真81: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真82: スギの早材単一仮道管の破壊先端(脱リグニン処理, SEM写真). スケールは $20\mu m$
- 写真83: スギの早材単一仮道管の破壊先端(未処理, SEM写真). スケールは $20\mu m$
- 写真84: スギの板目中間材切片のノッチ周辺の変形(光顕写真). スケールは $100\mu m$
- 写真85: スギの板目中間材切片の破壊過程(光顕写真). 矢印はノッチから発生した亀裂の先端を示す. スケールは $200\mu m$
- 写真86: スギの板目早材切片の破壊過程(光顕写真). スケールは $200\mu m$
- 写真87: スギの板目中間材切片の重複接線壁中における亀裂の伝播過程(光顕写真). スケールは $50\mu m$
- 写真88: スギの板目中間材切片の重複接線壁中における亀裂の伝播過程(光顕写真). スケールは $50\mu m$
- 写真89: スギの板目早材切片中における亀裂の挙動(光顕写真). スケールは $50\mu m$
- 写真90: スギの板目晩材切片中における亀裂の挙動(光顕写真). 矢印は仮道管間で剥離破壊したところを示す. スケールは $100\mu m$
- 写真91: スギの板目中間材切片中の放射組織のところ(矢印)における亀裂の挙動(光顕写真). スケールは $100\mu m$
- 写真92: スギの板目中間材切片の破壊先端の一部(SEM写真). スケールは $20\mu m$

- 写真93: スギのまさ目切片(中間材部分)中のT-T壁孔のところ(矢印)における亀裂の挙動(光顕写真). スケールは $50\mu m$
- 写真94: スギの板目中間材(①と②)および板目早材(③)各切片のSCPおよびRCP破壊した部分(光顕写真). スケールは $50\mu m$
- 写真95: スギの板目早材(①), 板目中間材(②と③)および板目晩材(④)各切片の破壊先端(光顕写真). スケールは $200\mu m$
- 写真96: スギのまさ目早材(①)および中間材を含む晩材(②)各切片の破壊先端(光顕写真). スケールは $200\mu m$
- 写真97: スギのまさ目晩材(中間材を含む)切片の破壊先端(光顕写真). ノッチを①は中間材側に, ②は晩材側に入れた場合を示す. スケールは $200\mu m$
- 写真98: スギの板目中間材切片のSCP破壊部(SEM写真). スケールは $20\mu m$
- 写真99: スギの板目中間材切片のSCP破壊部の一部(SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真100: スギの板目中間材切片のSCP破壊部の一部(SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真101: スギの板目晩材切片のSCP破壊部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真102: スギの板目早材切片のSCP破壊部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真103: スギの板目中間材切片のRCP破壊部の一部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真104: スギの板目中間材切片のRCP破壊部の一部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真105: スギの板目晩材切片のRCP破壊部(SEM写真). スケール $5\mu m$
- 写真106: スギの板目晩材切片のRCP破壊部の一部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真107: スギの板目早材切片のRCP破壊部の一部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真108: スギのまさ目切片(中間材部分)のRCP破壊部(SEM写真). スケールは $10\mu m$
- 写真109: スギのまさ目切片(晩材部分)のRCP破壊部(SEM写真). スケールは $5\mu m$
- 写真110: スギのT-T壁孔およびR-T型孔を細胞間層側から見たところ(無処理, レプリカ写真). 以下の各写真において \updownarrow 印は繊維軸方向を示す.
- 写真111: スギのR-T壁孔を内こう側から見たところ(無処理, レプリカ写真).
- 写真112: スギの分野を内こう側から見たところ(無処理, レプリカ写真).
- 写真113: スギのR-T壁孔を内こう側から見たところ(無処理, レプリカ写真).
- 写真114: トウヒのR-T壁孔を内こう側から見たところ(飽水处理, レプリカ写真). スケールは $2\mu m$
- 写真115: ヒノキのR-T壁孔を内こう側から見たところ(無処理, レプリカ写真). スケールは $2\mu m$
- 写真116: スギのR-T壁孔周辺の S_1 を内こう側から見たところ(無処理, レプリカ写真). スケールは $2\mu m$
- 写真117: スギのR-T壁孔を細胞間層側から見たところ(脱リグニン処理, レプリカ写真). ス

ケールは $2\mu\text{m}$

写真118：スギのR-T壁孔を細胞間層側から見たところ（脱リグニン処理，レプリカ写真）．ス

ケールは $1\mu\text{m}$

写真119：スギのR-T壁孔を細胞間層側から見たところ（脱リグニン処理，レプリカ写真）．ス

ケールは $1\mu\text{m}$

写真120：スギのR-T壁孔を細胞間層側から見たところ（無処理，レプリカ写真）．スケールは

$1\mu\text{m}$

写真121：スギのT-T壁孔を細胞間層側から見たところ（脱リグニン処理，レプリカ写真）．ス

ケールは $2\mu\text{m}$

写真122：スギのR-T壁孔の一次壁孔域（5%KOH処理，レプリカ写真）．スケールは $2\mu\text{m}$

写真123：S₁堆積中のスギのR-T壁孔を内こう側から見たところ（5%KOH処理，レプリカ
写真）．スケールは $2\mu\text{m}$

写真124：S₁堆積完了直後のスギのR-T壁孔を内こう側から見たところ（5%KOH処理，レ
プリカ写真）．スケールは $2\mu\text{m}$

写真125：S₂堆積中のスギのR-T壁孔を内こう側から見たところ（5%KOH処理，レプリカ
写真）．スケールは $2\mu\text{m}$

写真126：ヒノキのR-T壁孔の木口断面像（KMnO₄染色，超薄切片写真）．スケールは $1\mu\text{m}$

写真127：エゾマツのR-T壁孔の木口断面像（KMnO₄染色，超薄切片写真）．スケールは $1\mu\text{m}$

写真128：スギのR-T壁孔の連続木口断面像（Pt-Pd シャドウィング，超薄切片写真）．スケ
ールは $1\mu\text{m}$

写真129：スギの晩材単一仮道管のT-T壁孔における裂け破壊（脱リグニン処理，SEM写真）．

スケールは $2\mu\text{m}$

写真130：スギの晩材単一仮道管のT-T壁孔における切断破壊（脱リグニン処理，SEM写真）．

矢印はBTを示す．スケールは $2\mu\text{m}$

写真131：スギの早材単一仮道管のT-T壁孔における裂け破壊（脱リグニン処理，SEM写真）．

スケールは $3\mu\text{m}$

写真132：スギの早材単一仮道管のT-T壁孔における切断破壊（脱リグニン処理，SEM写真）．

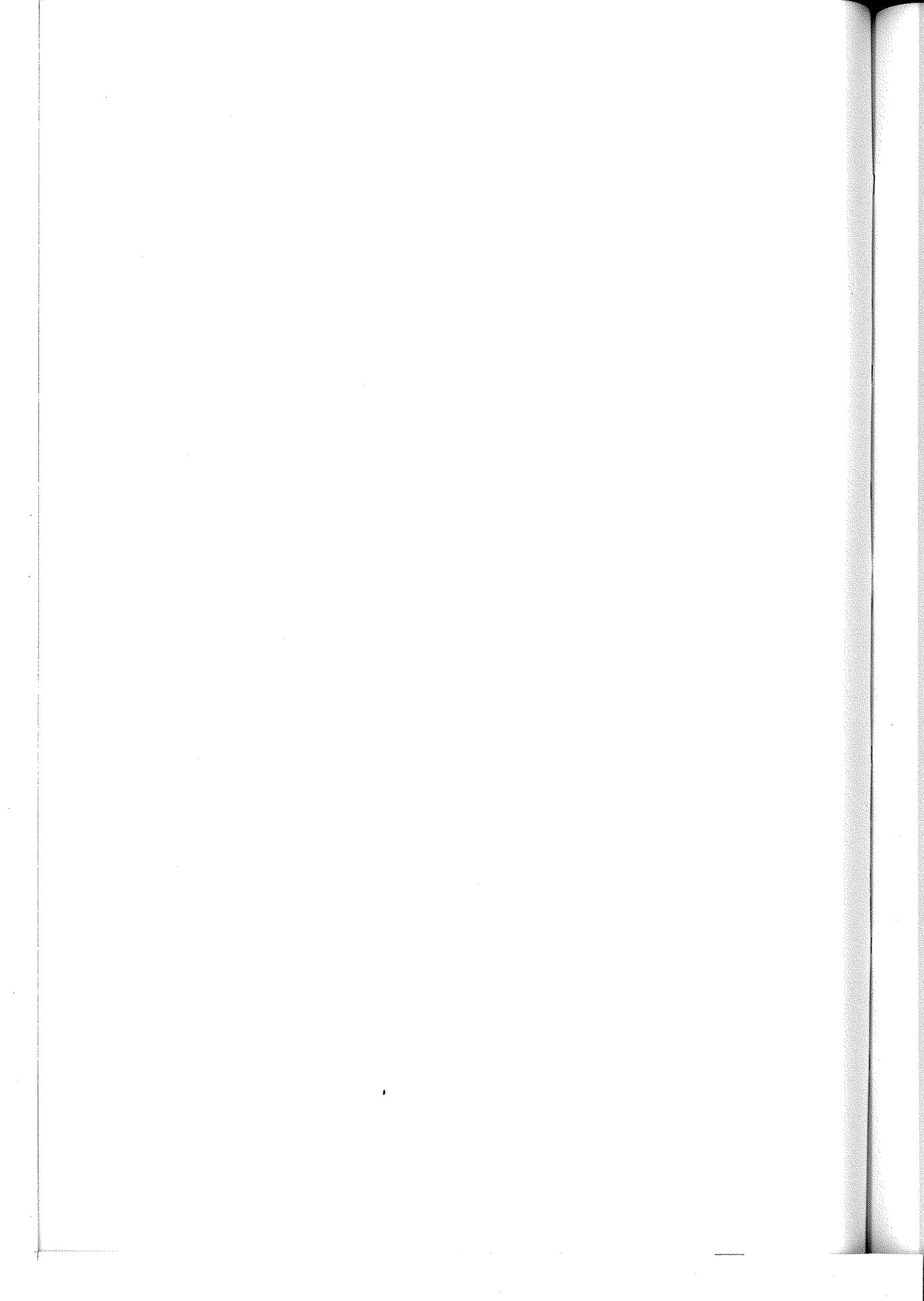
スケールは $3\mu\text{m}$

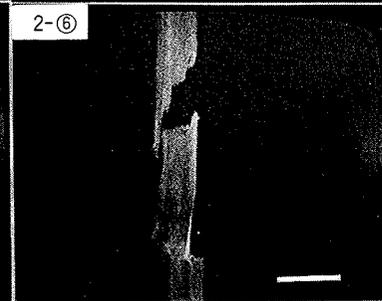
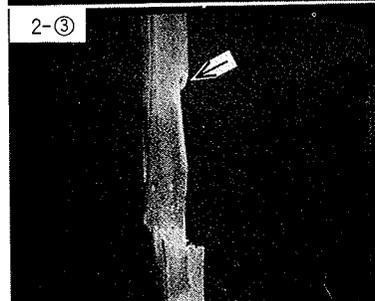
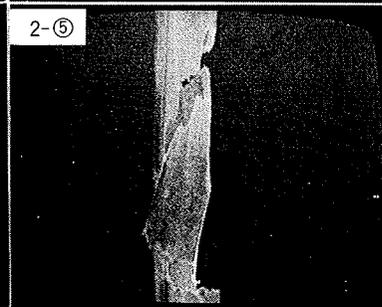
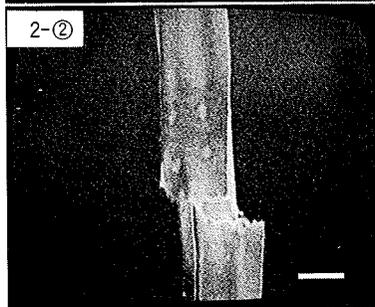
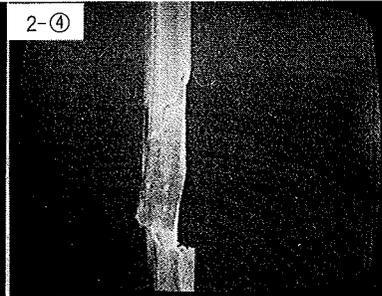
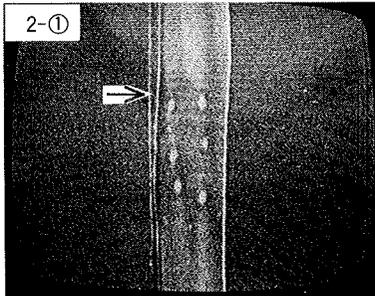
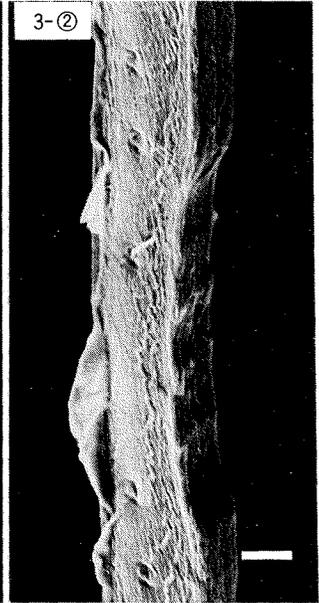
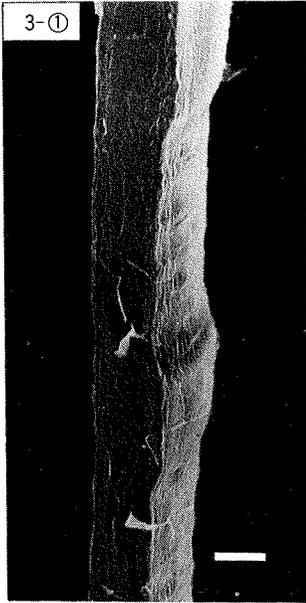
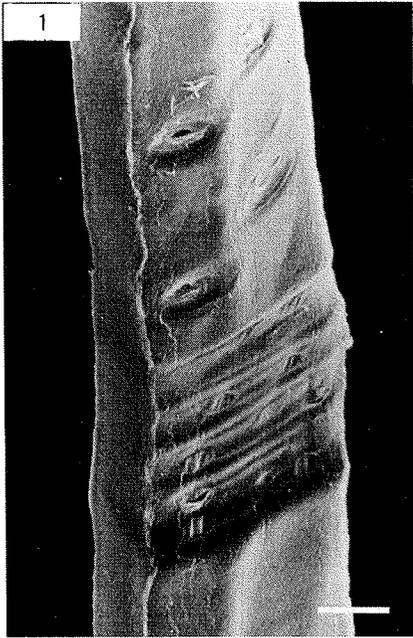
写真133：スギの晩材単一仮道管のR-T壁孔における切断破壊（未処理，SEM写真）．スケ

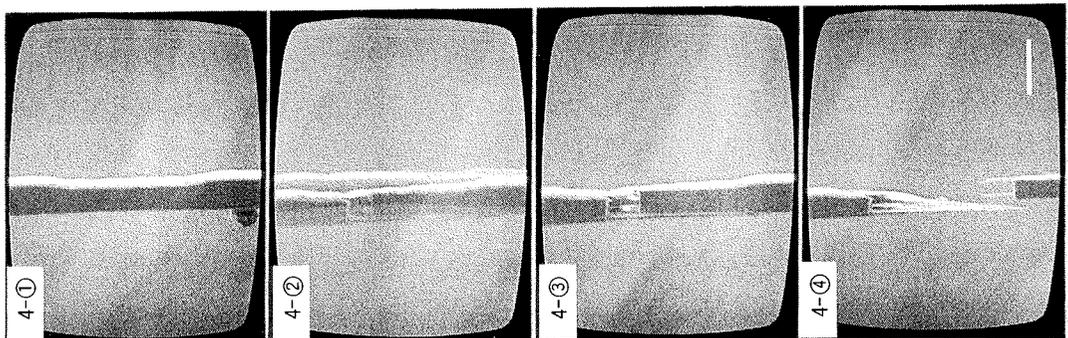
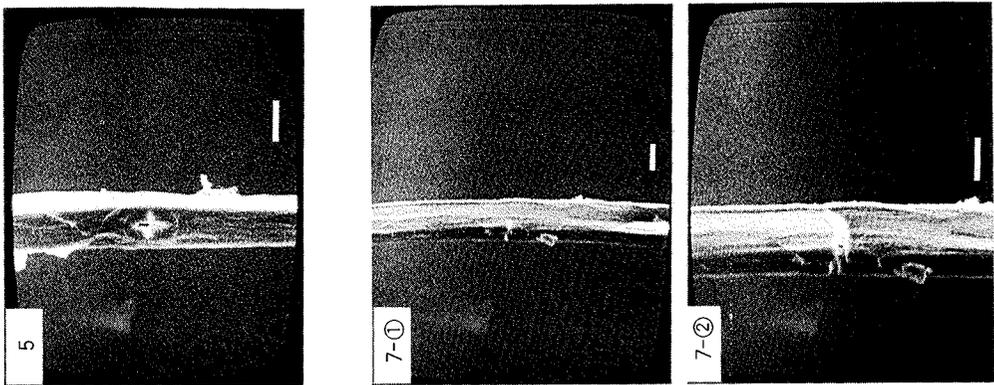
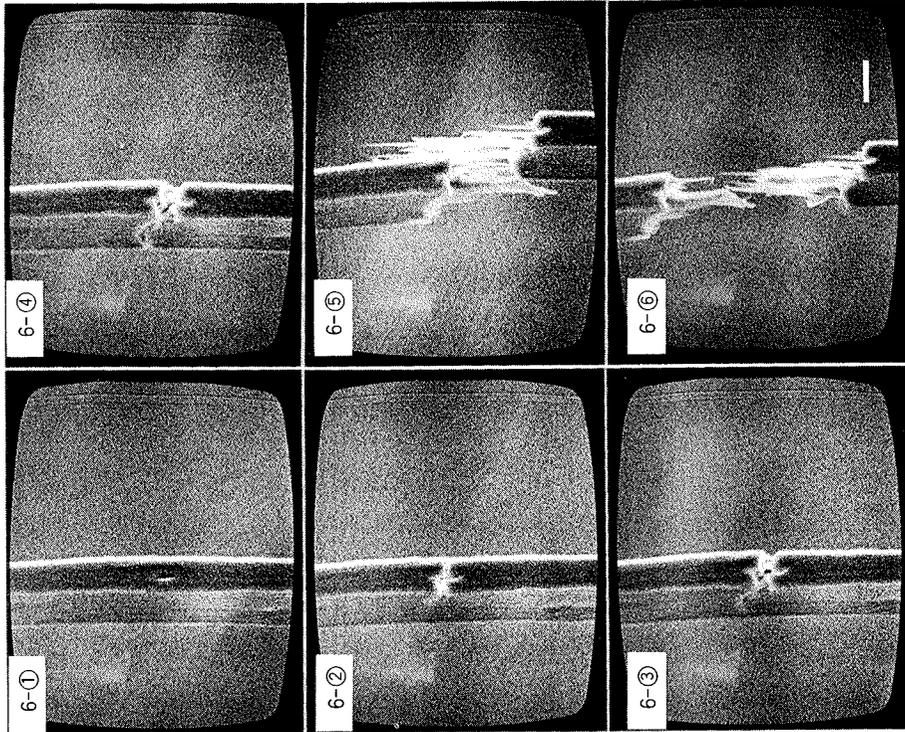
ールは $2\mu\text{m}$

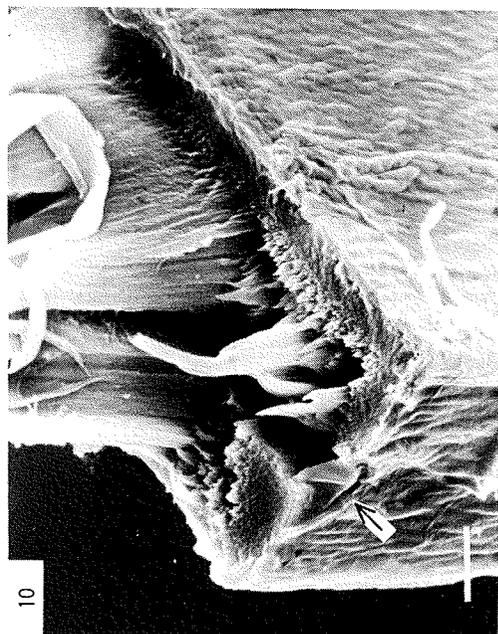
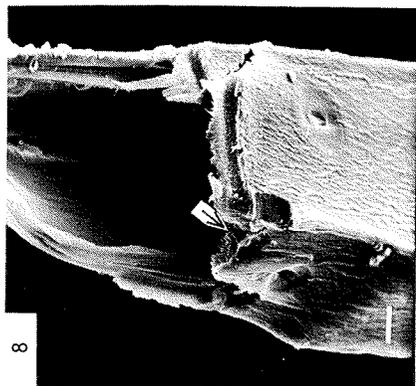
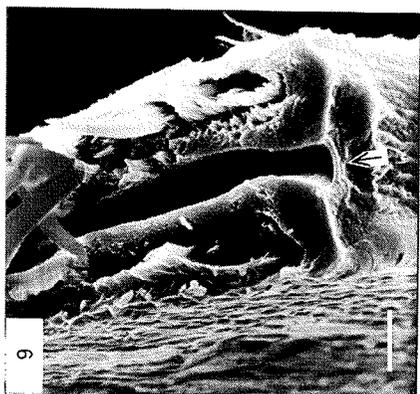
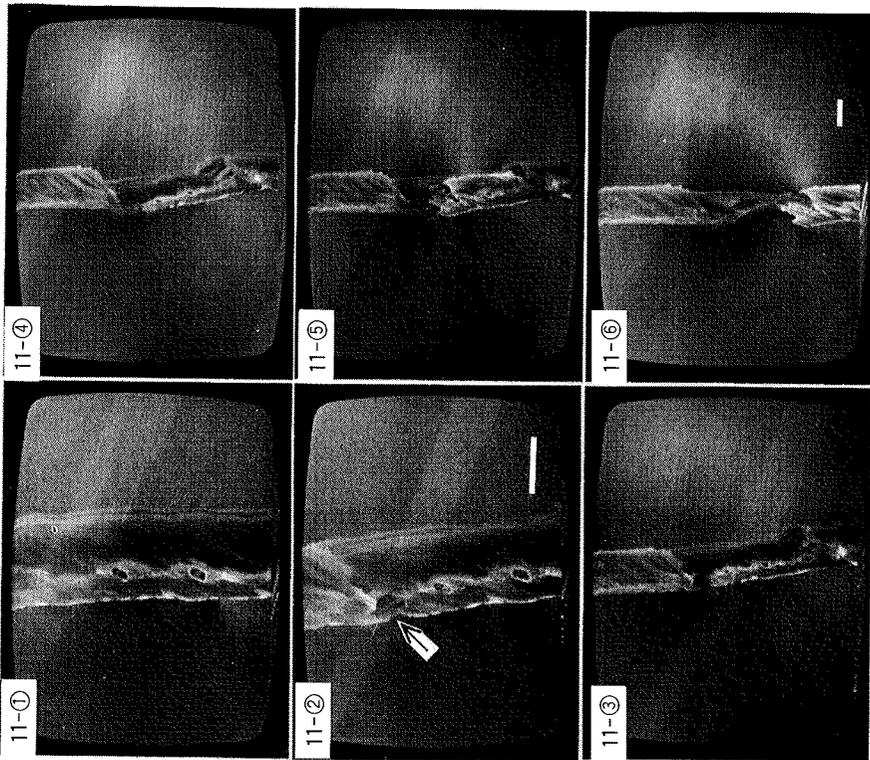
写真134：スギの早材単一仮道管のR-T壁孔における切断破壊（脱リグニン処理，SEM写真）．

スケールは $2\mu\text{m}$

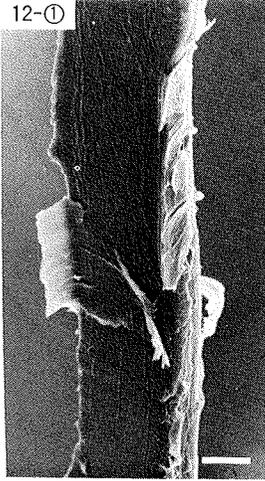




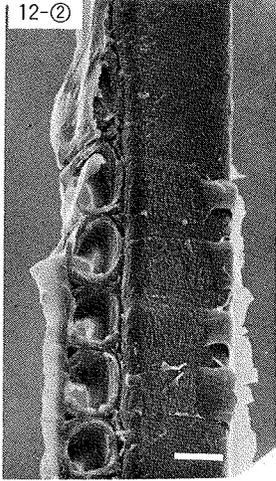




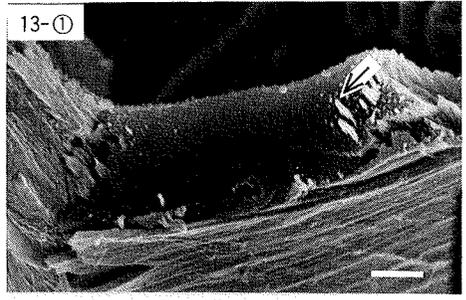
12-①



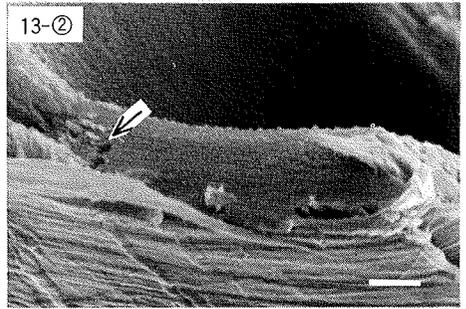
12-②



13-①



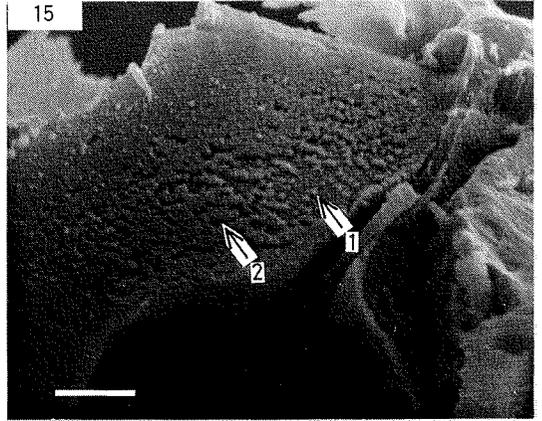
13-②



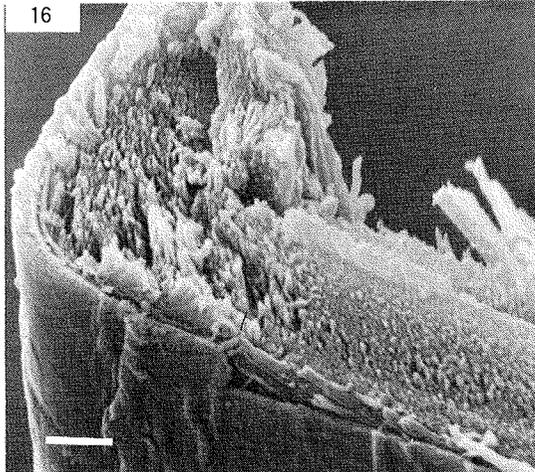
14



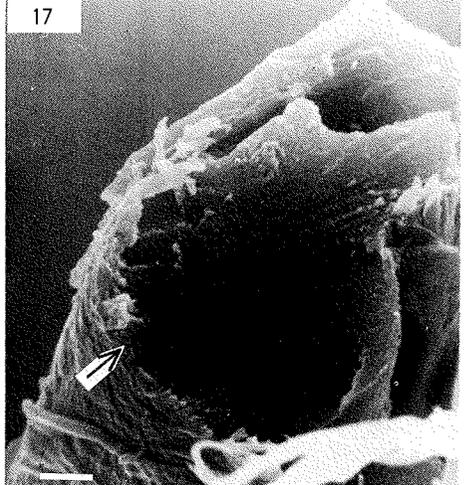
15

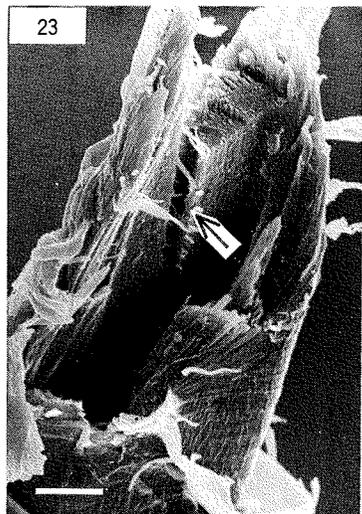
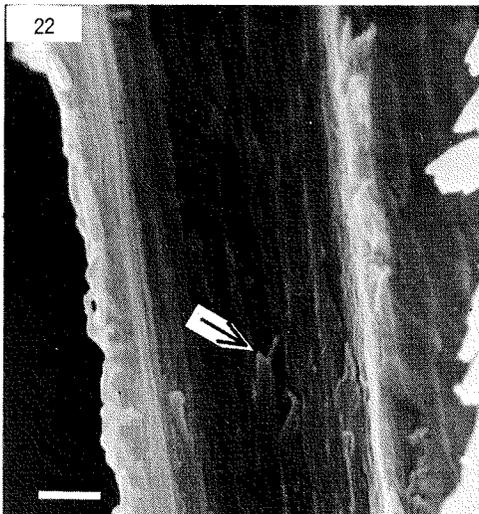
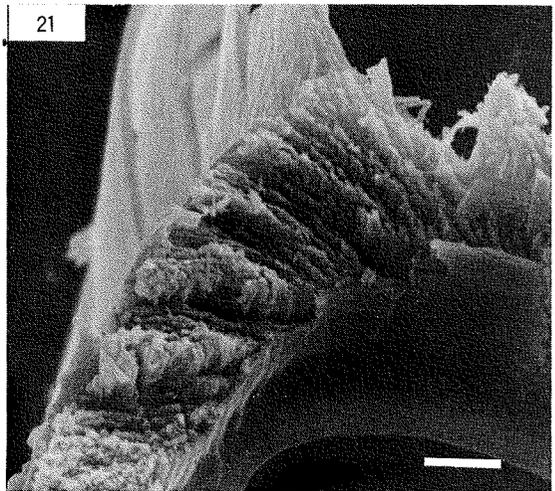
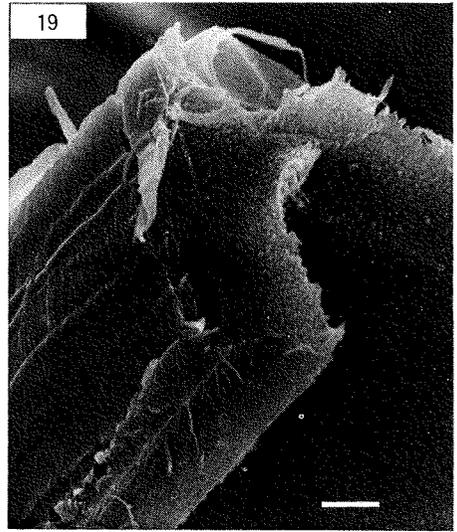
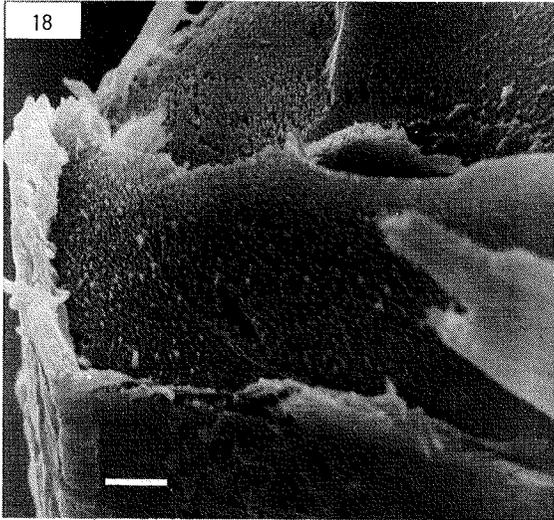


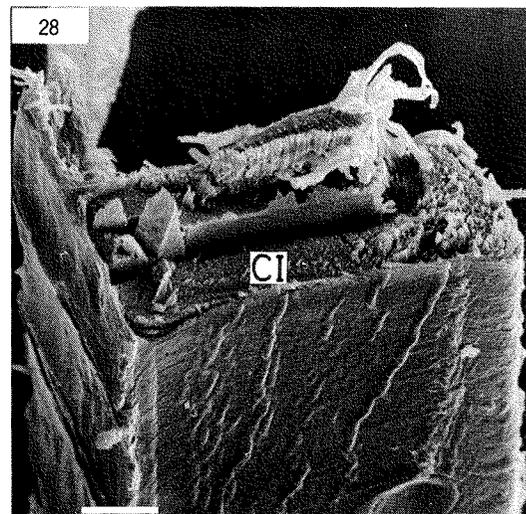
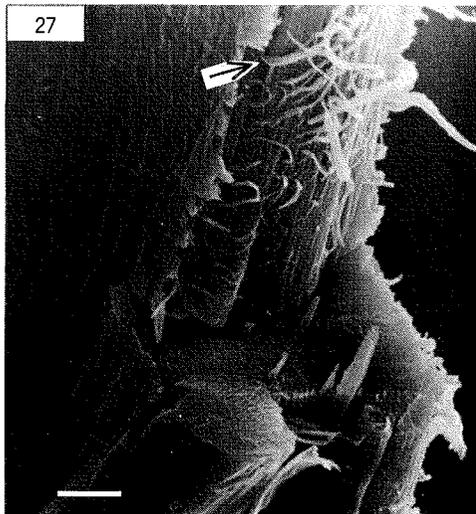
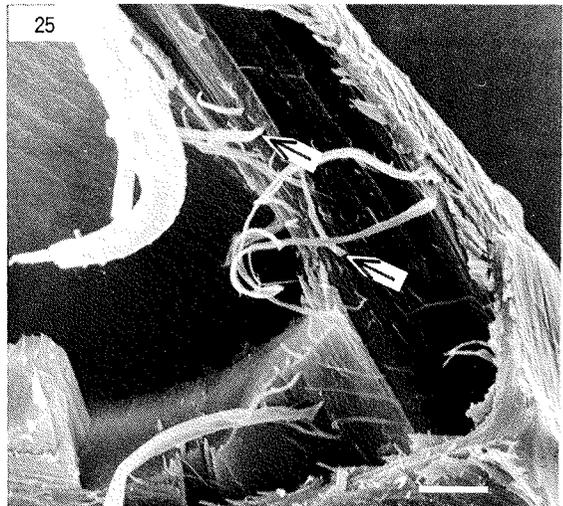
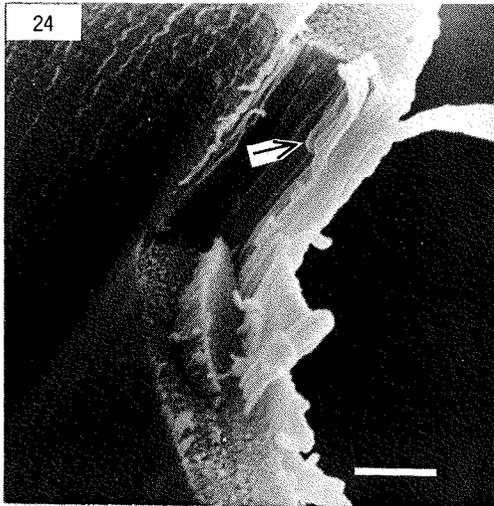
16

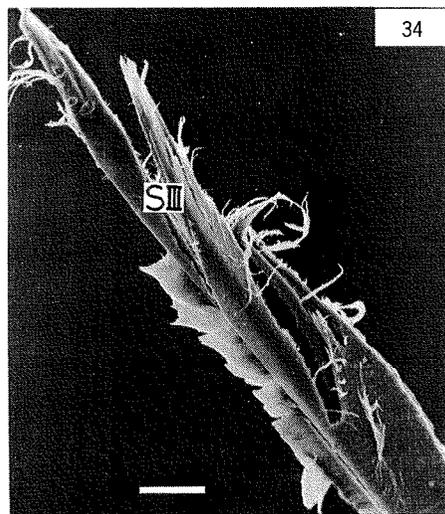
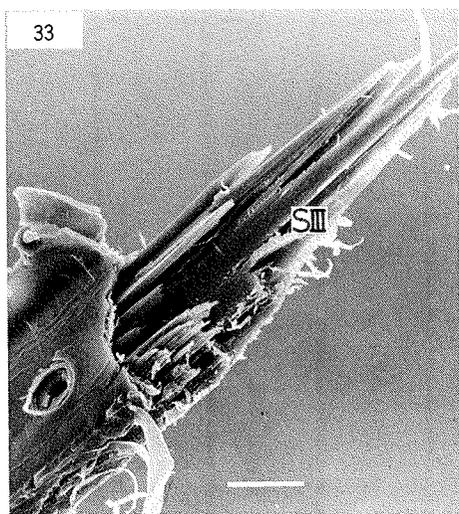
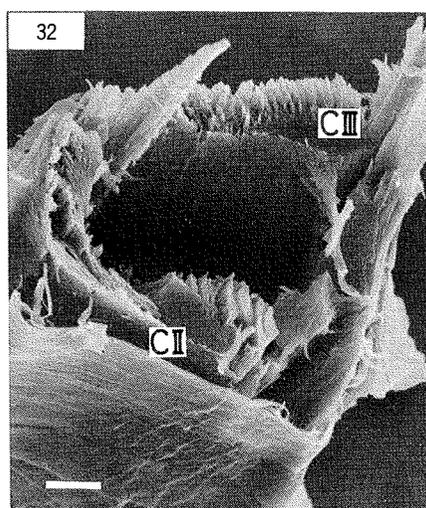
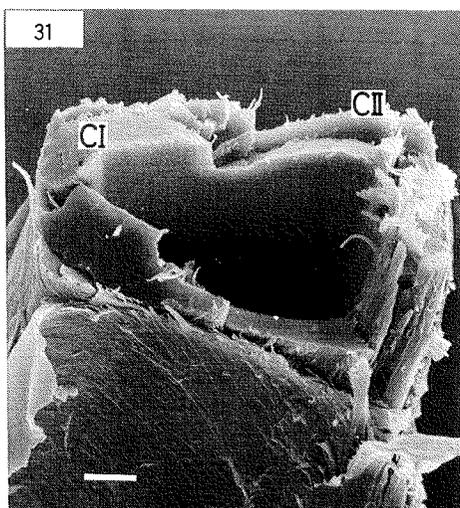
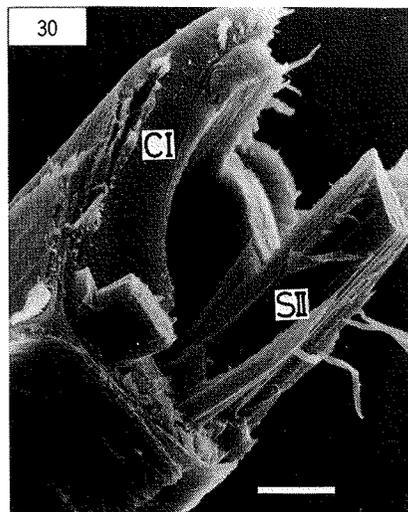
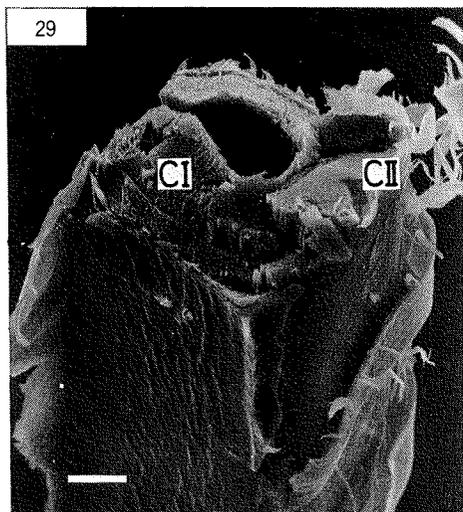


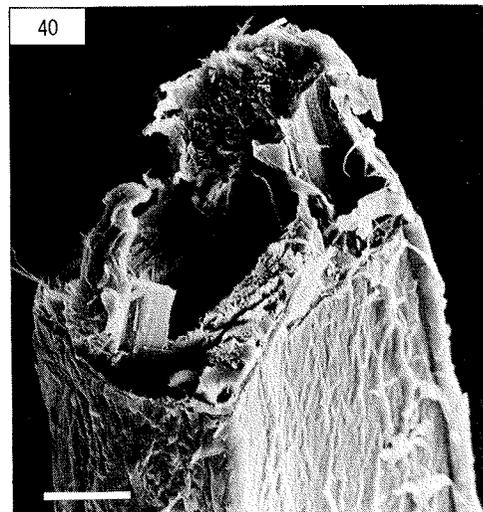
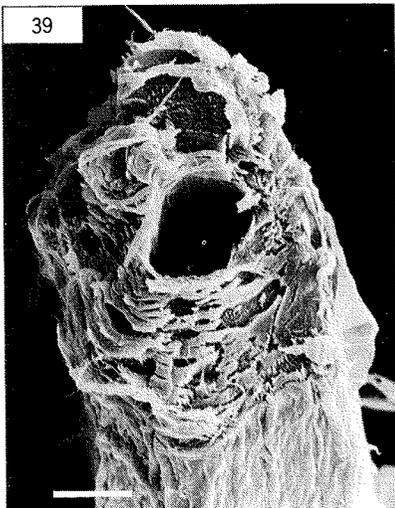
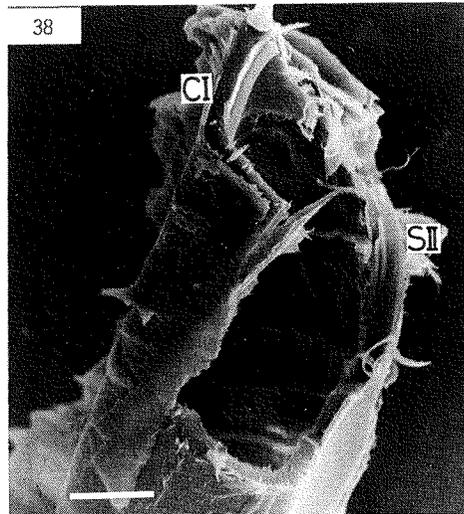
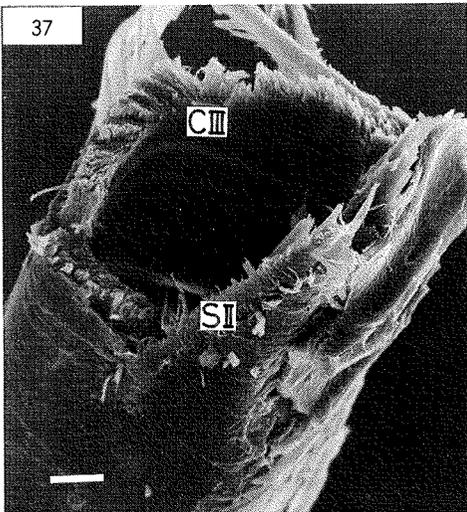
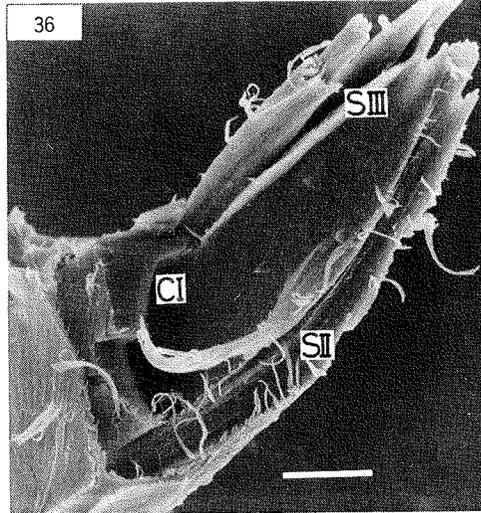
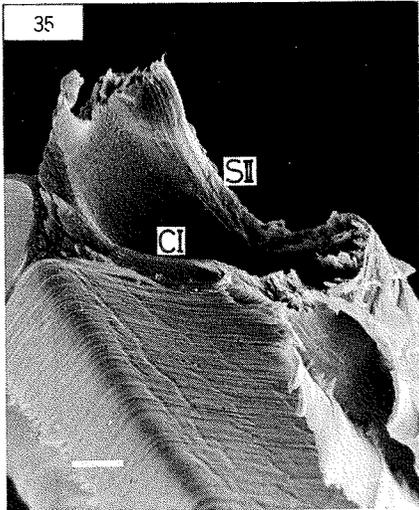
17

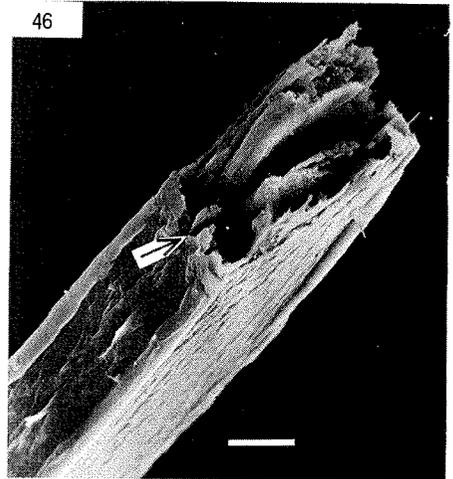
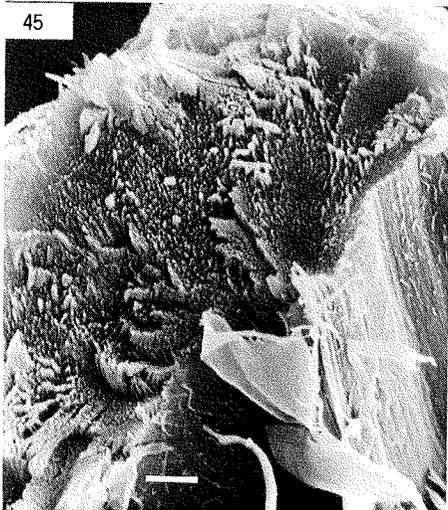
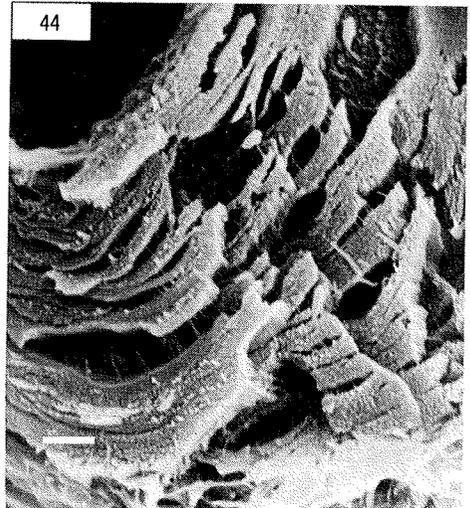
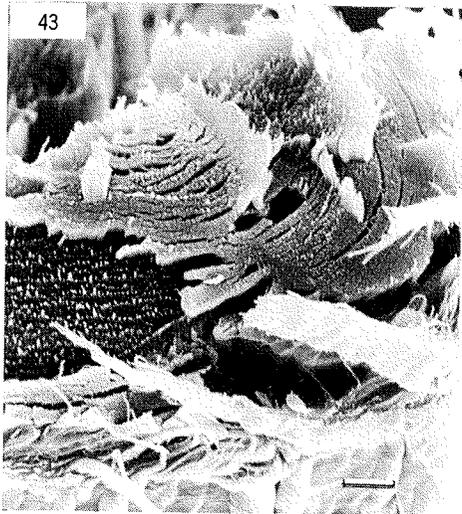
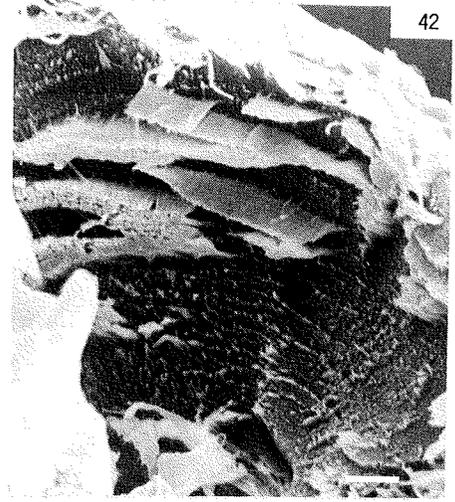
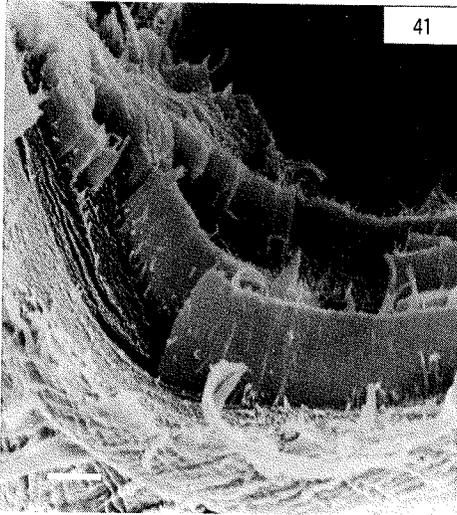


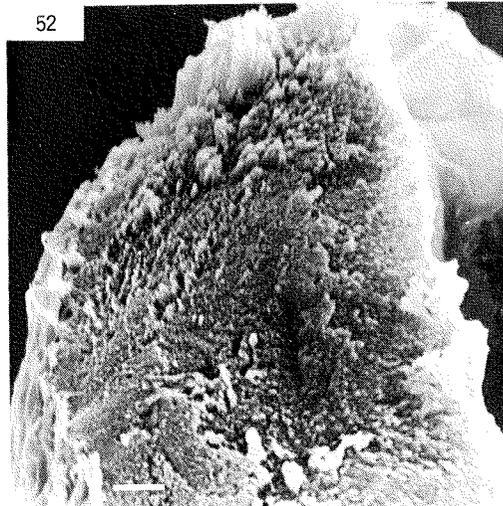
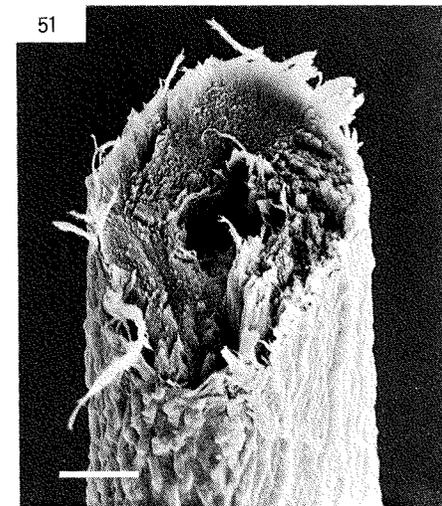
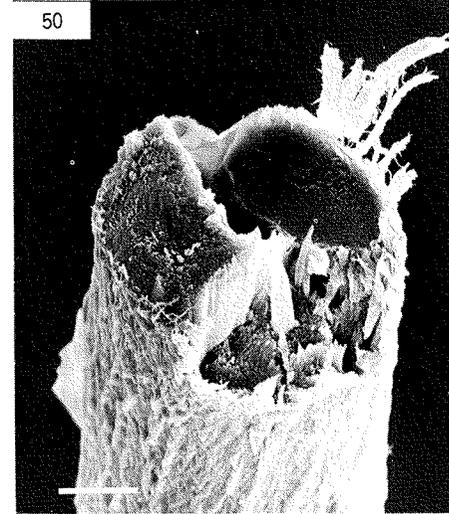
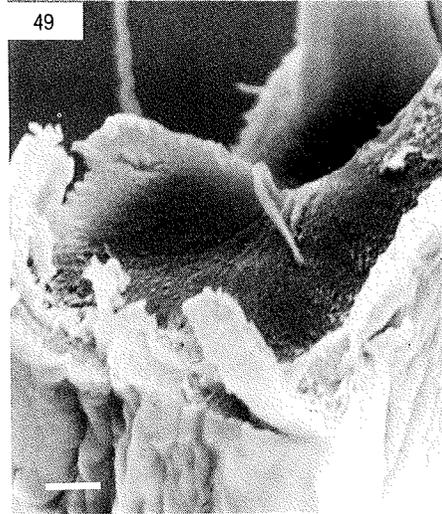
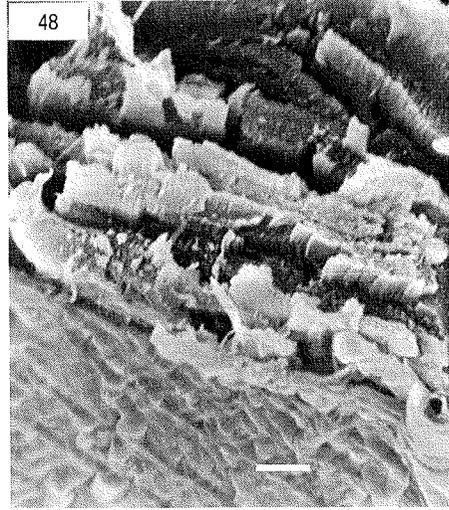
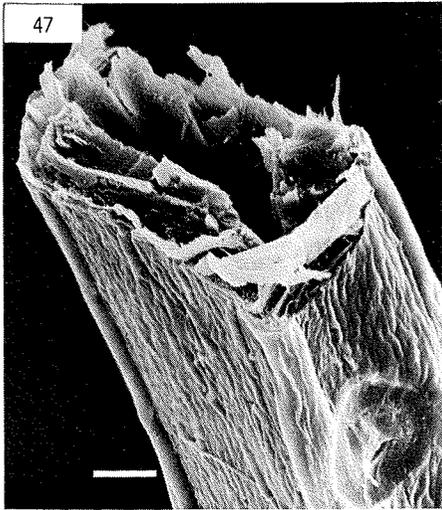


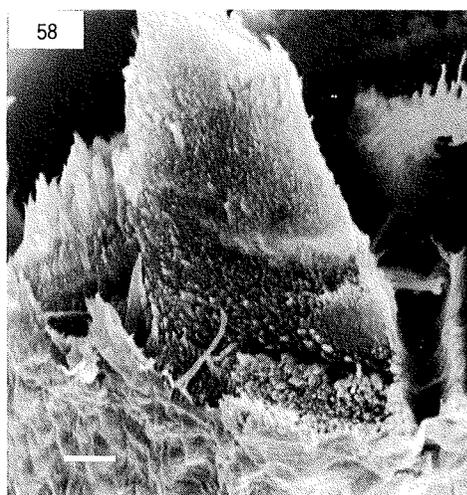
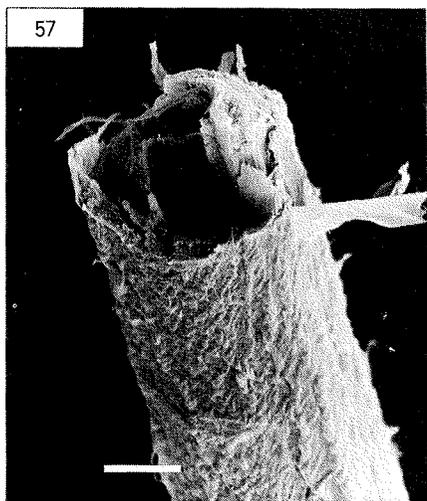
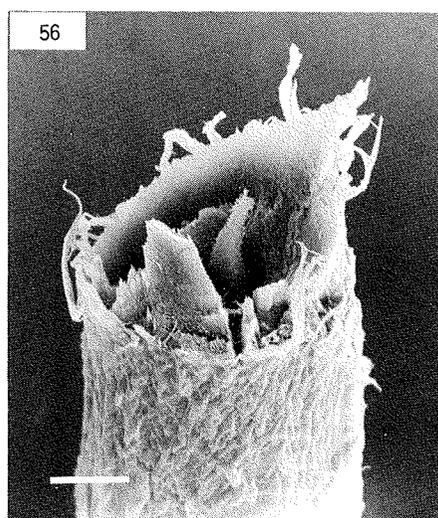
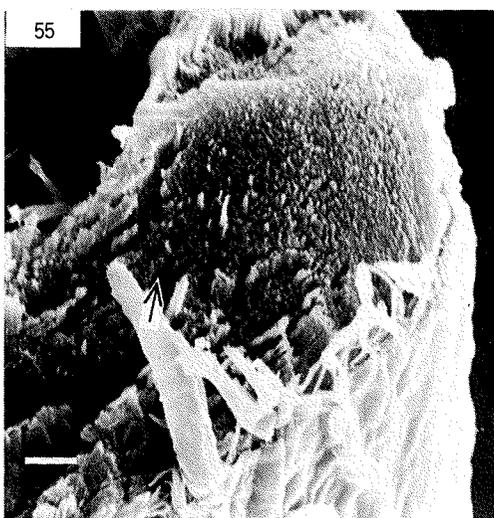
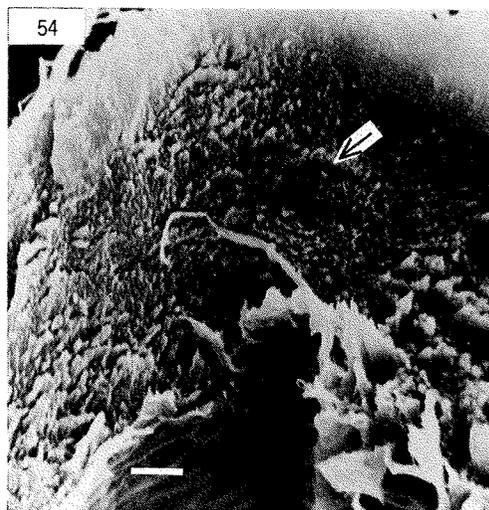
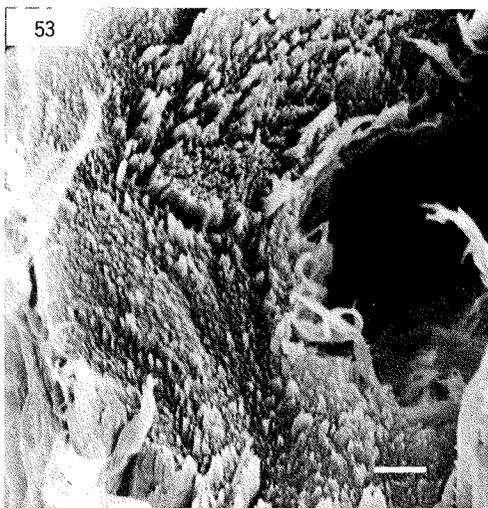


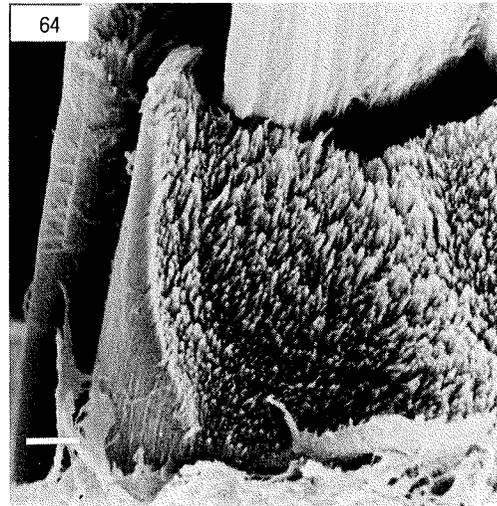
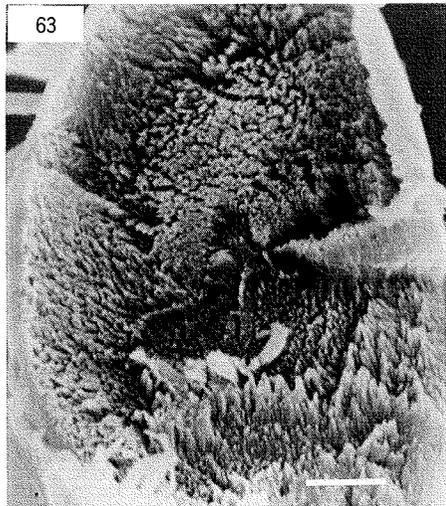
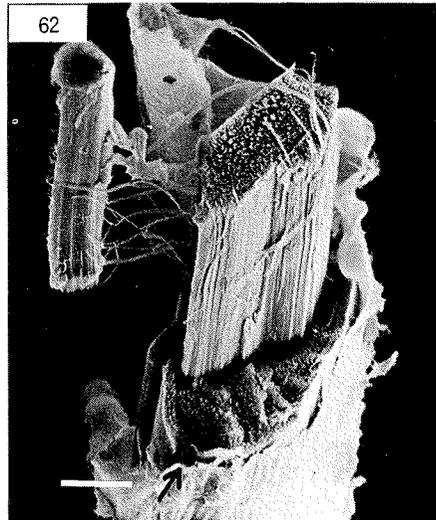
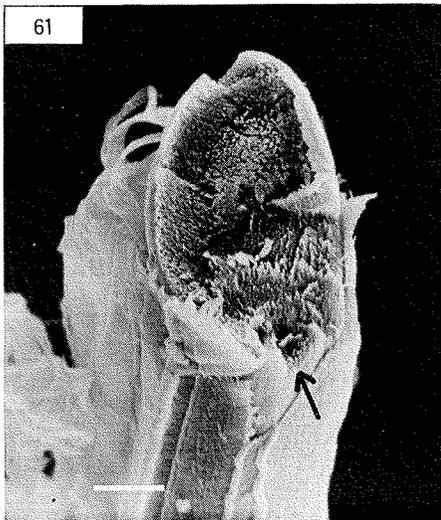
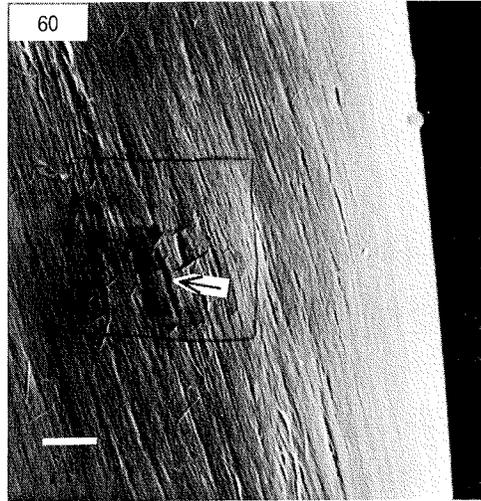
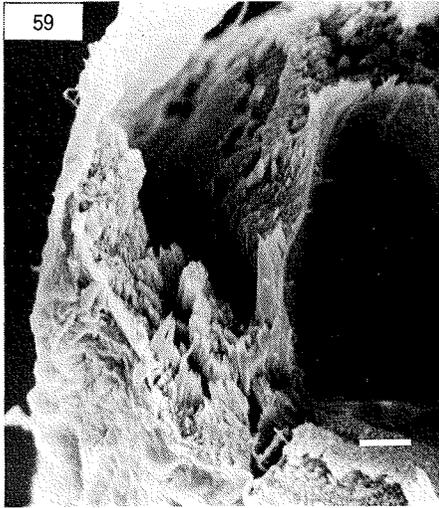


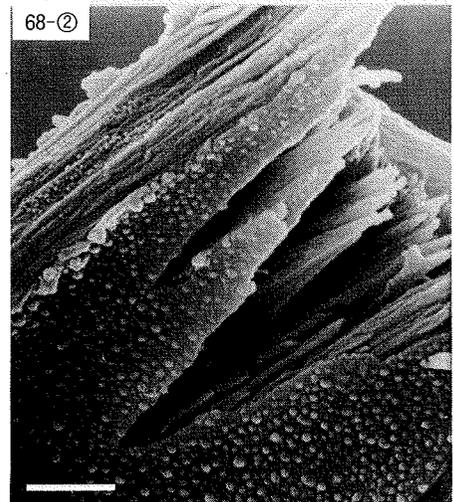
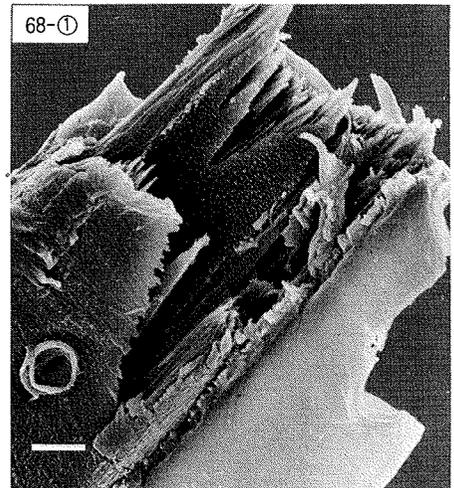
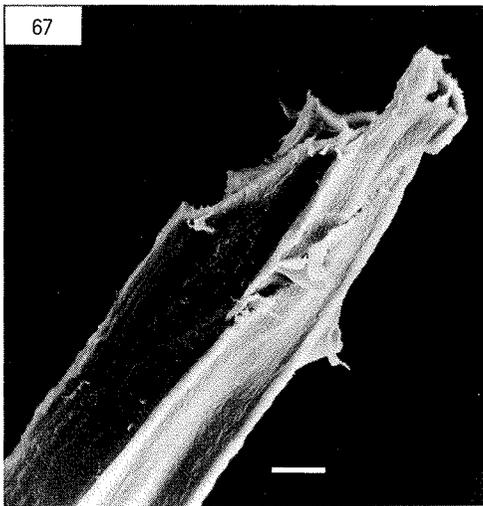
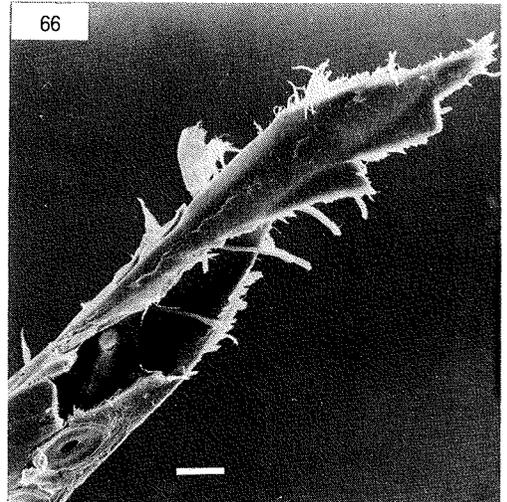
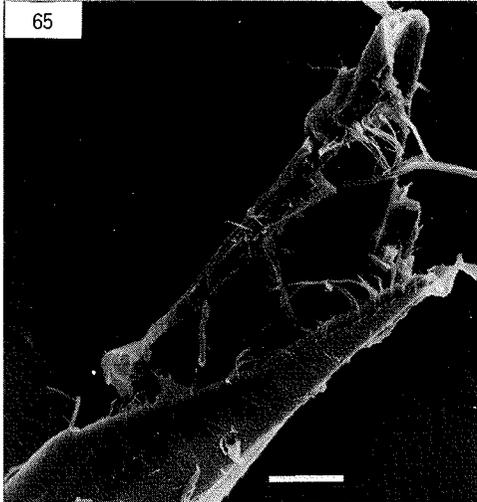


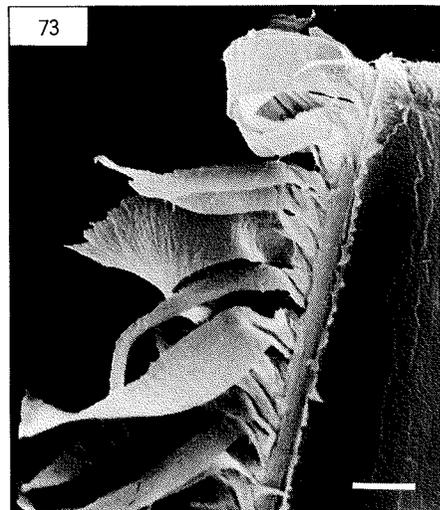
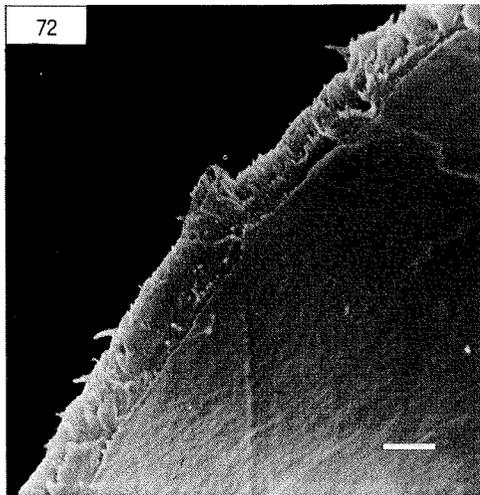
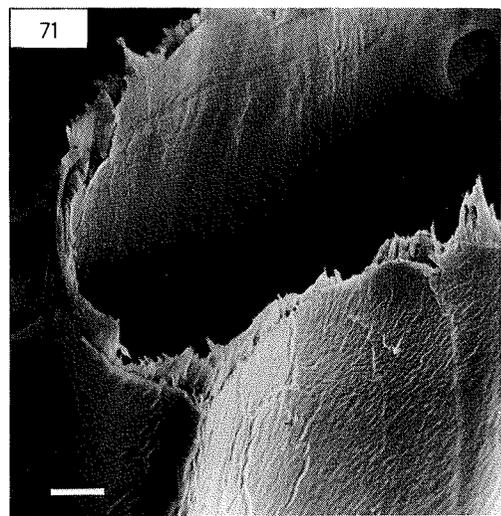
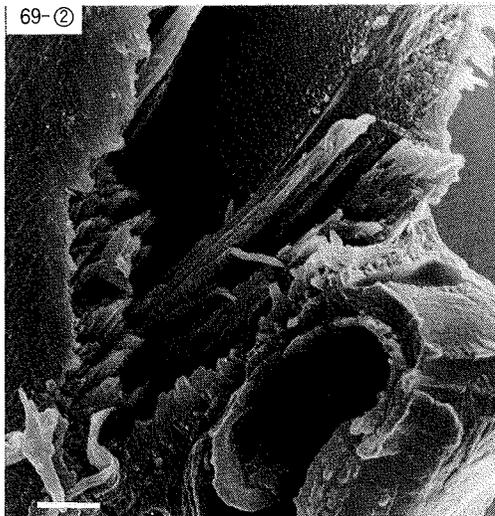
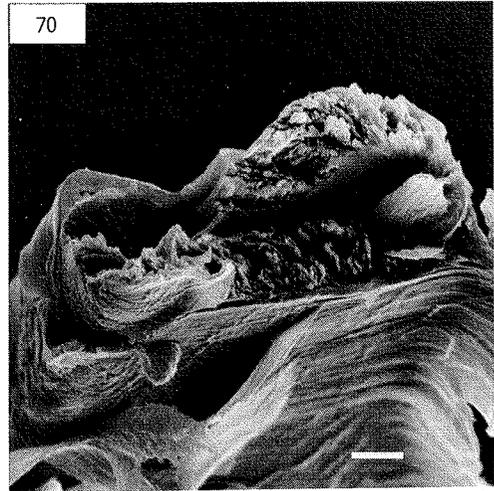
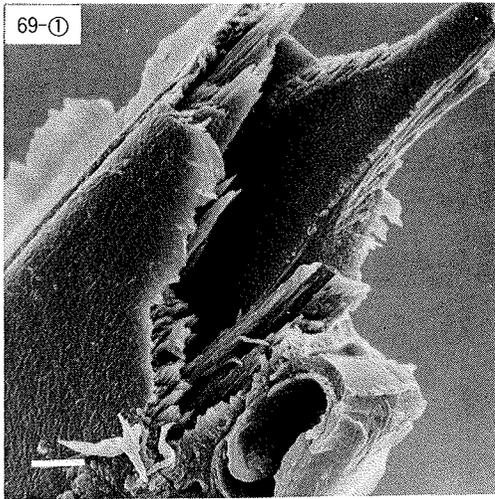


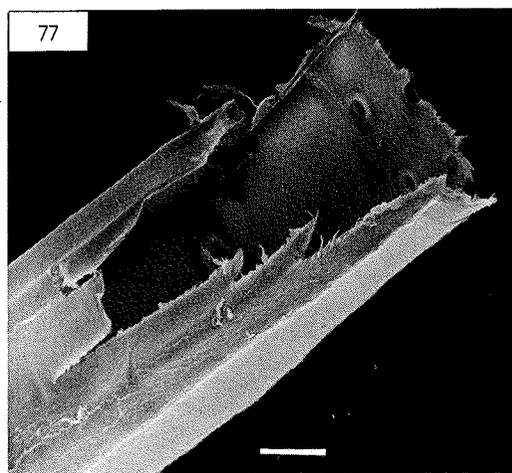
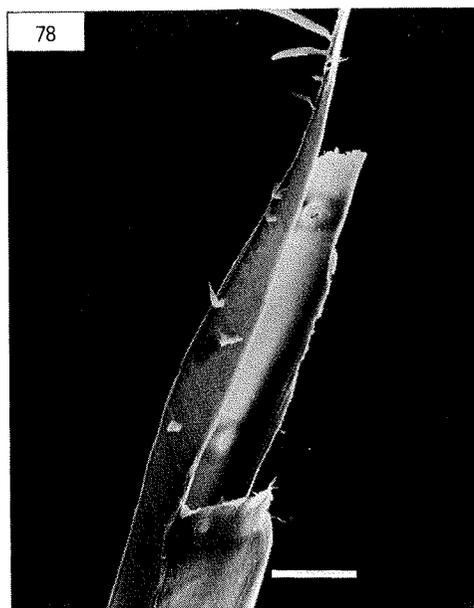
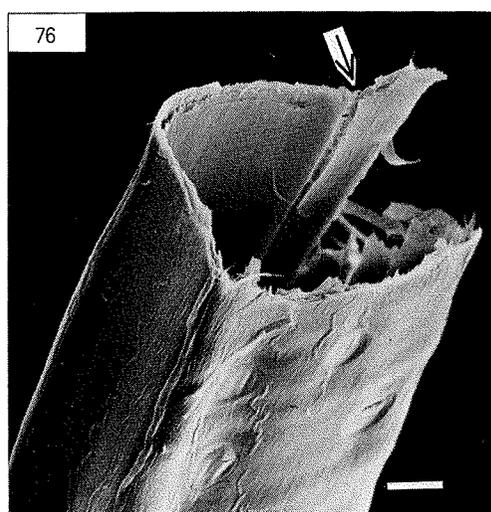
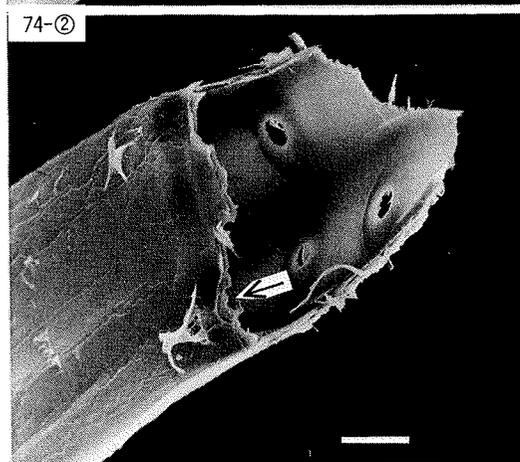
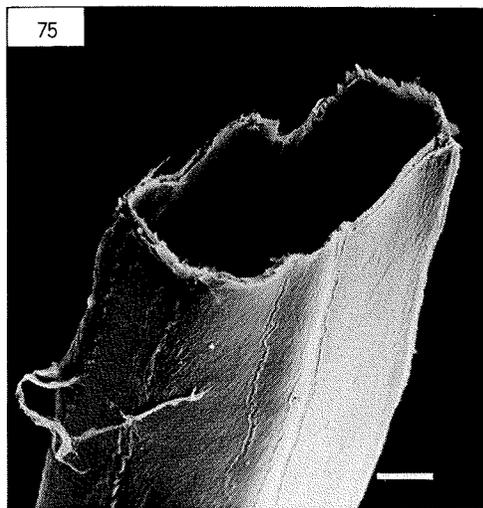
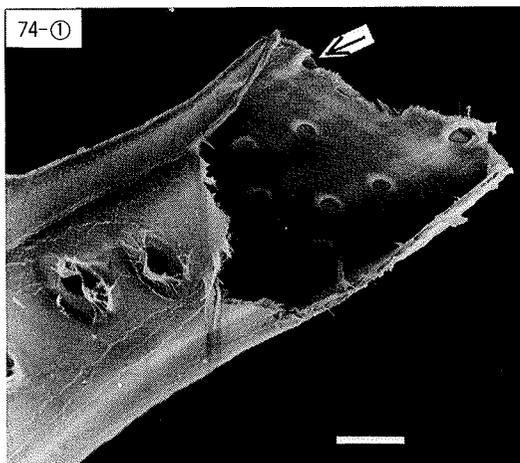


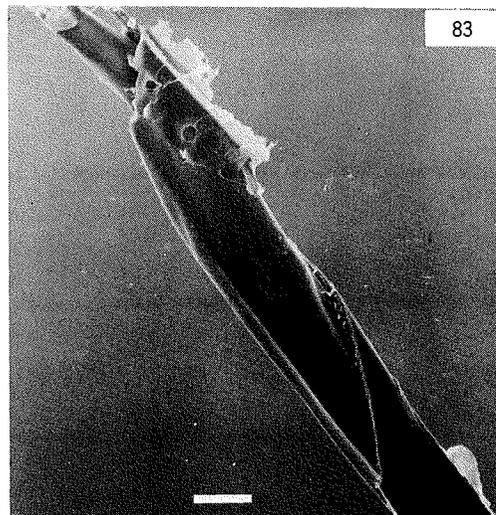
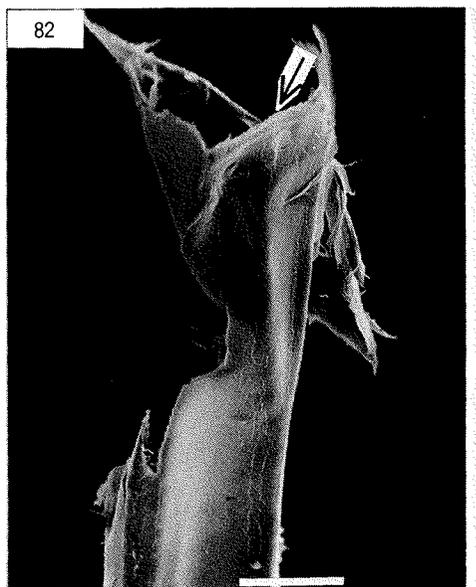
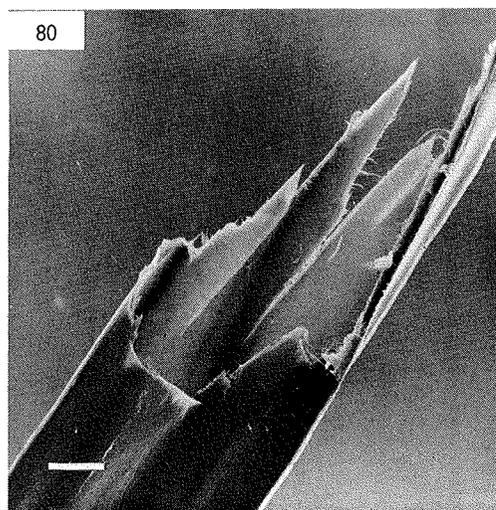
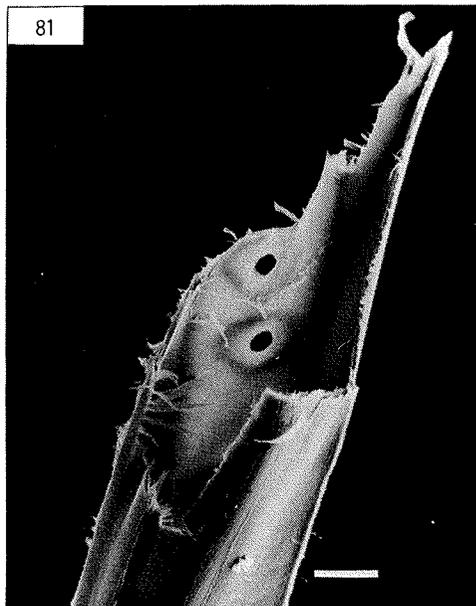
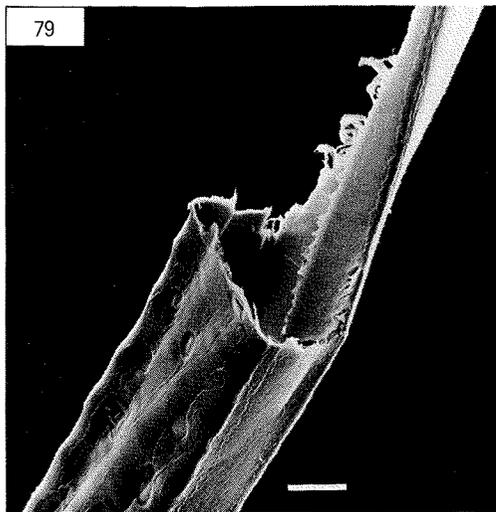


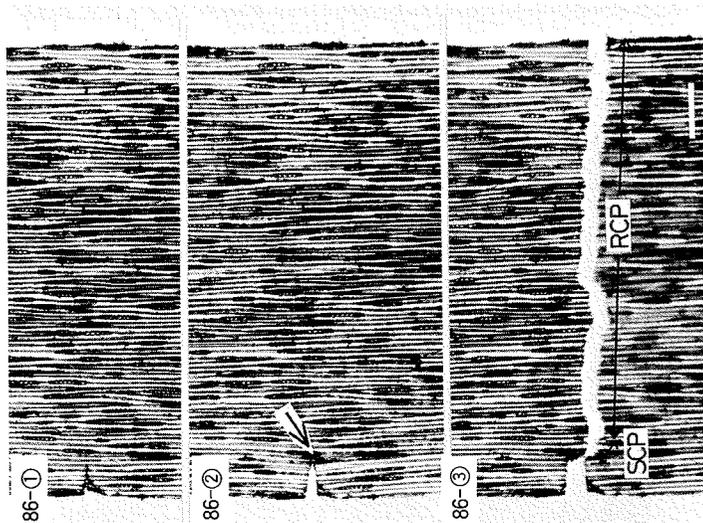
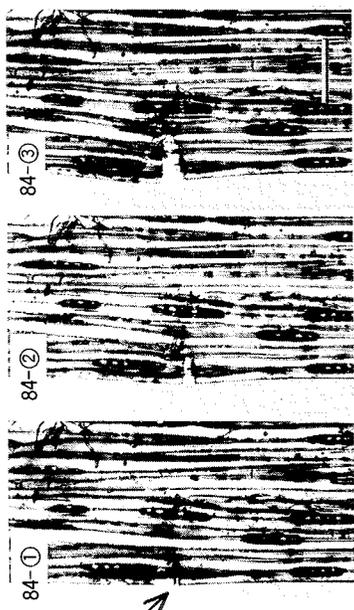
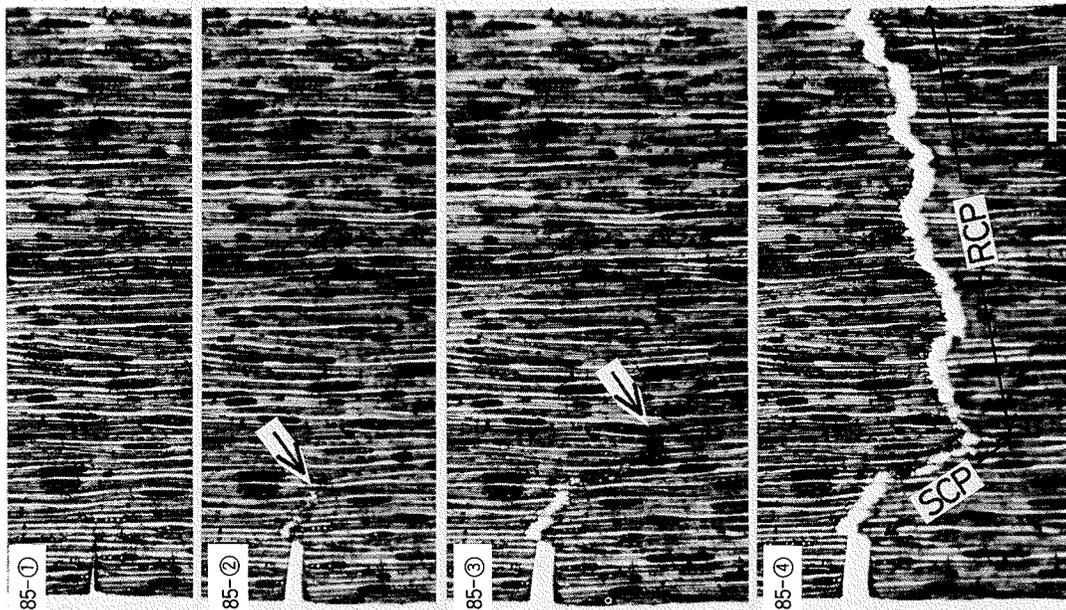


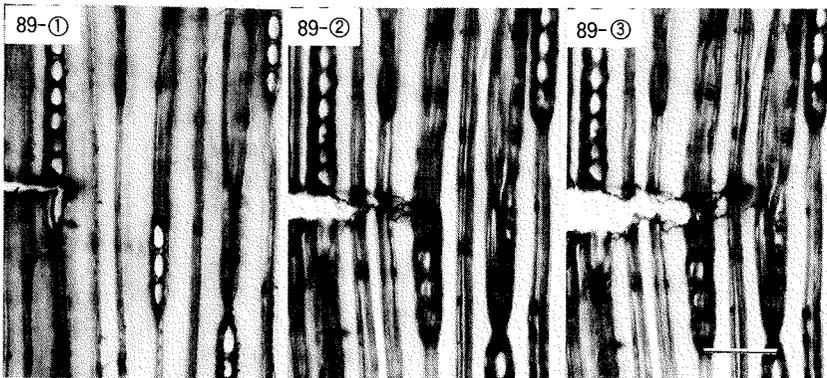
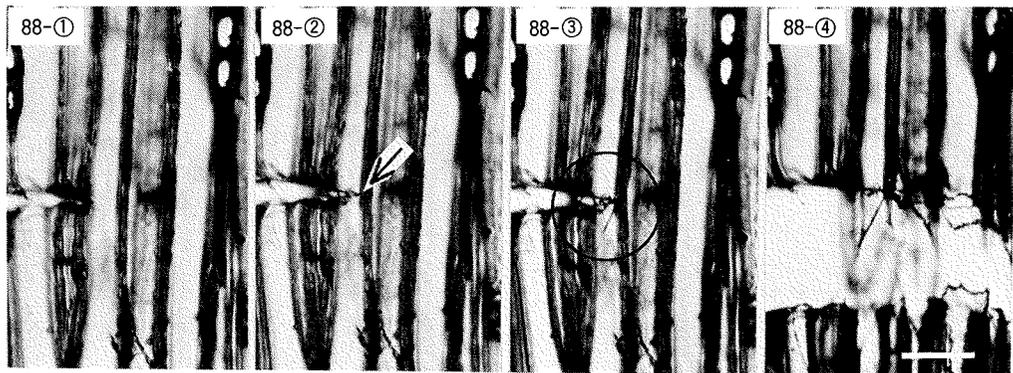
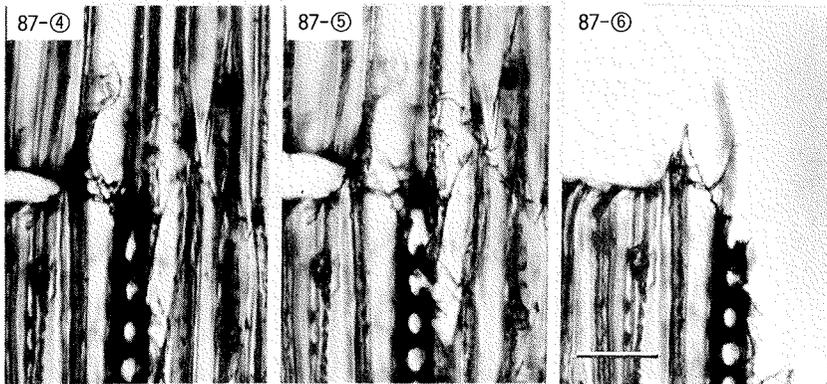
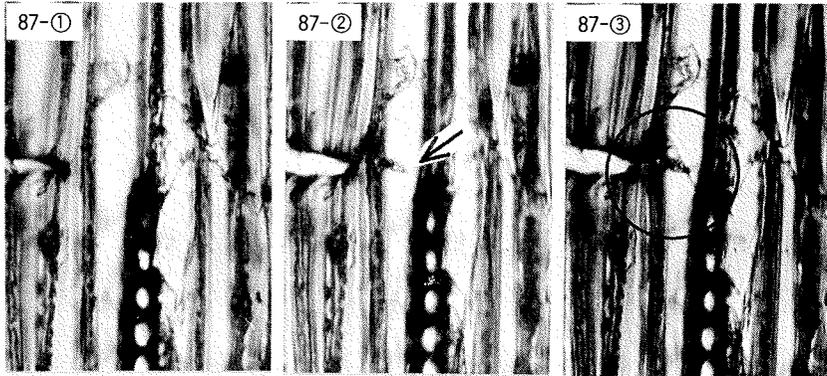


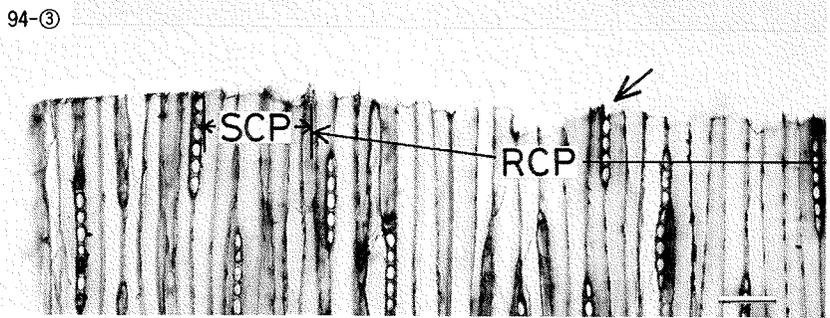
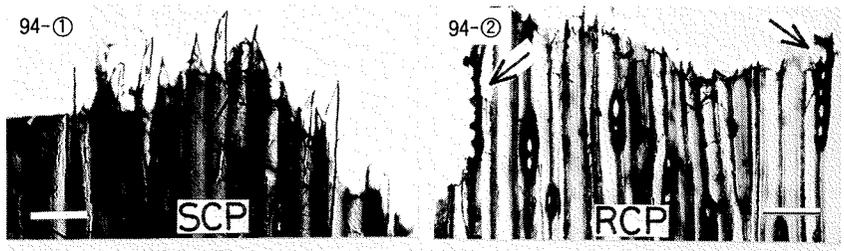
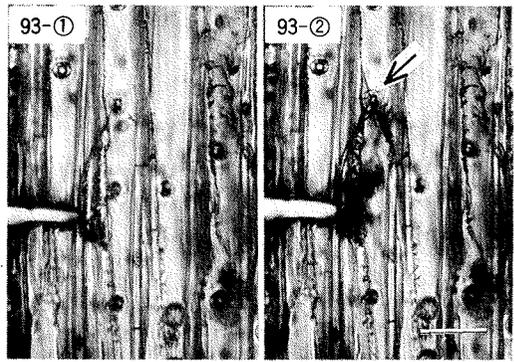
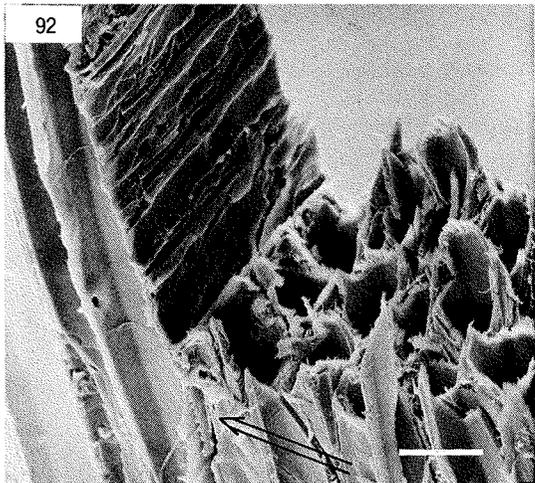
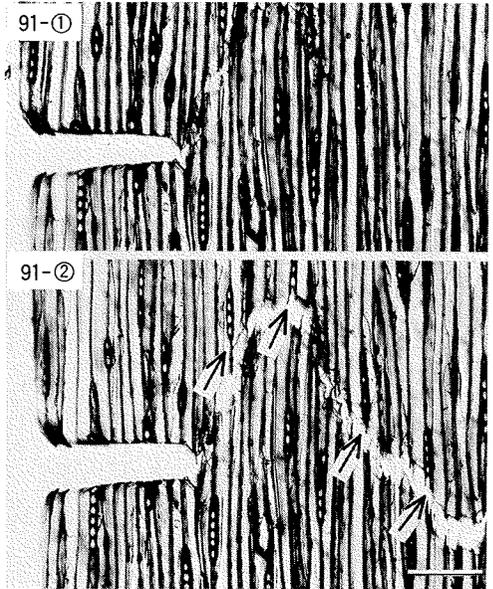
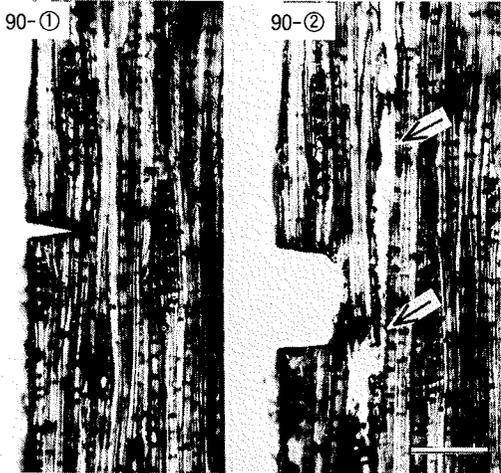


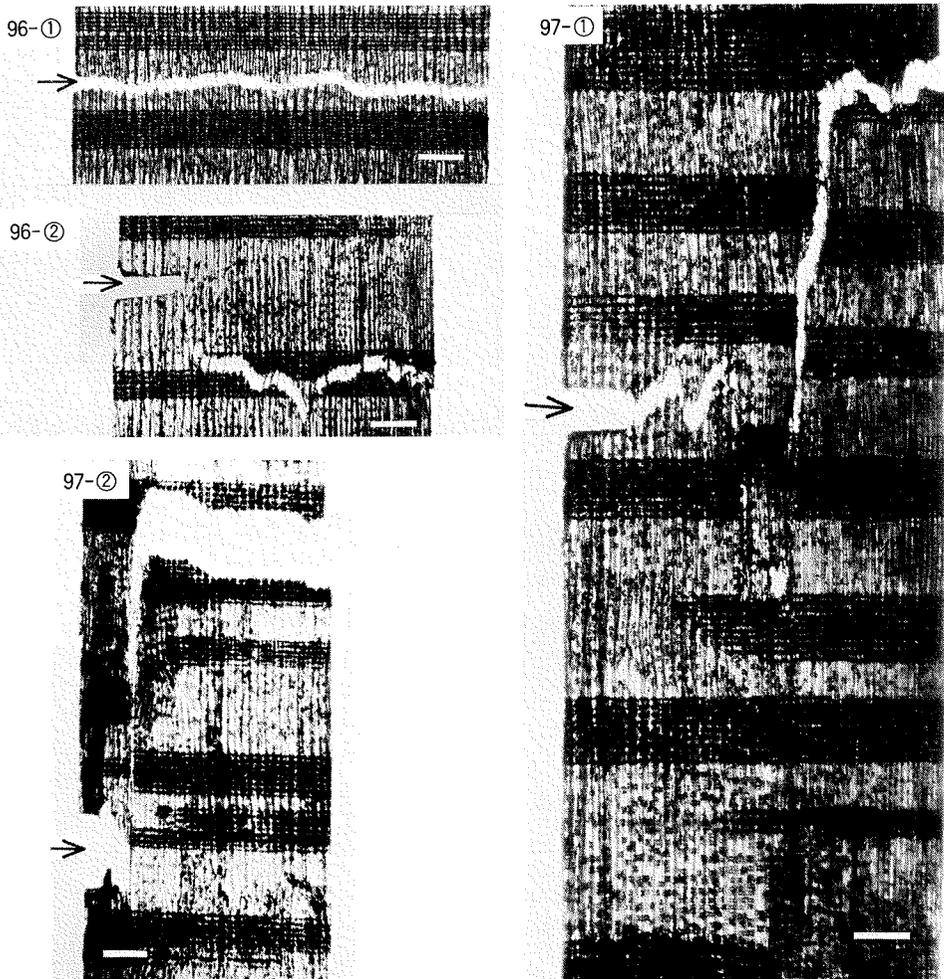
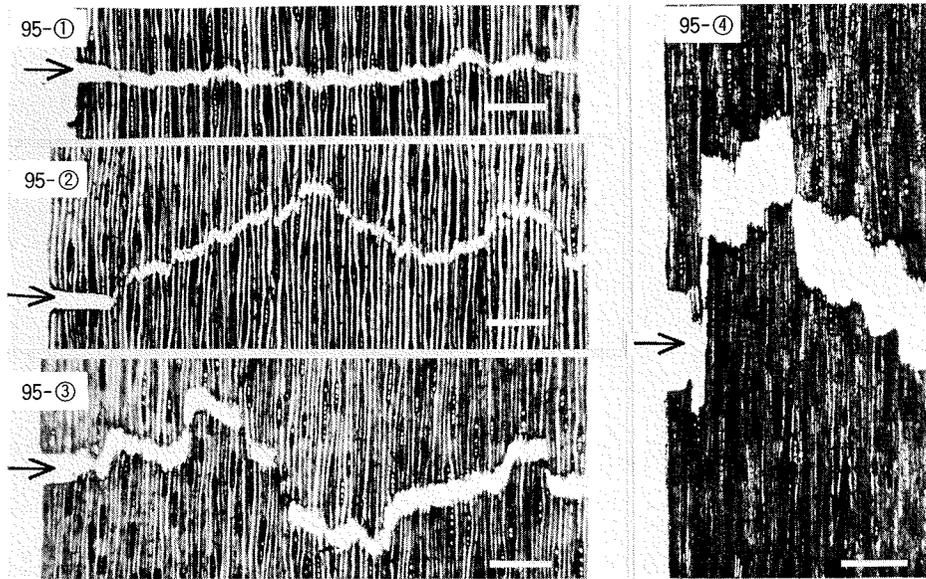


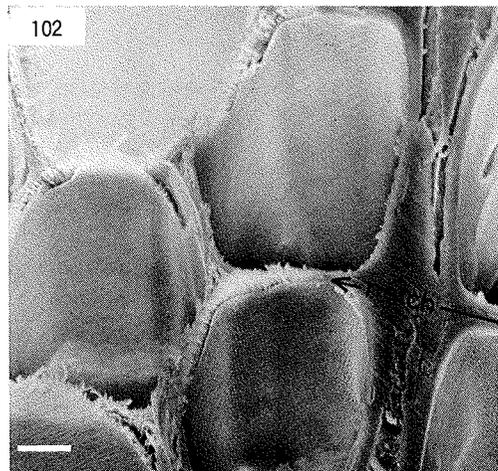
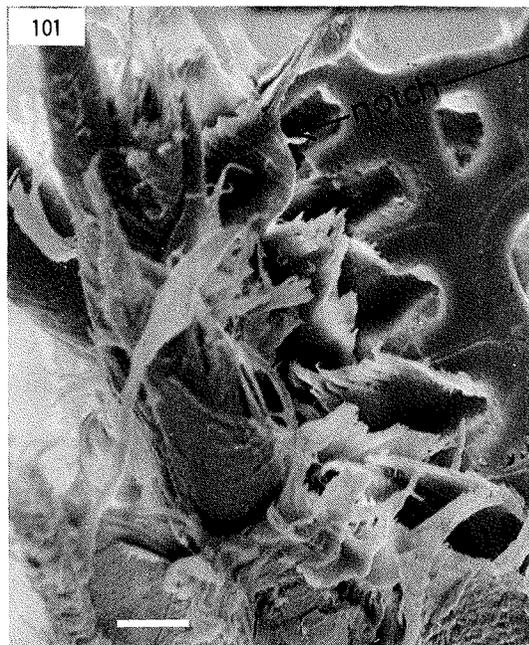
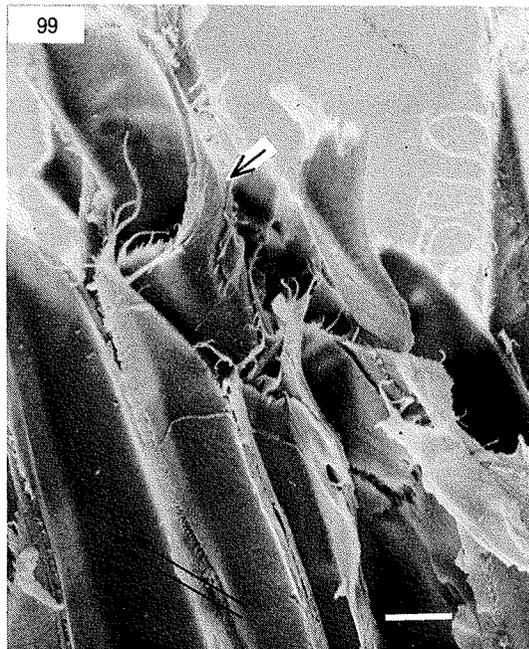
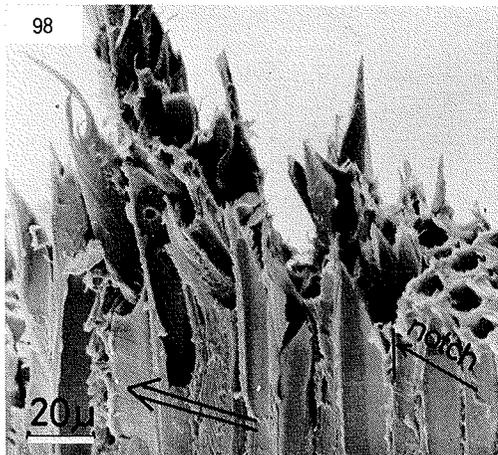


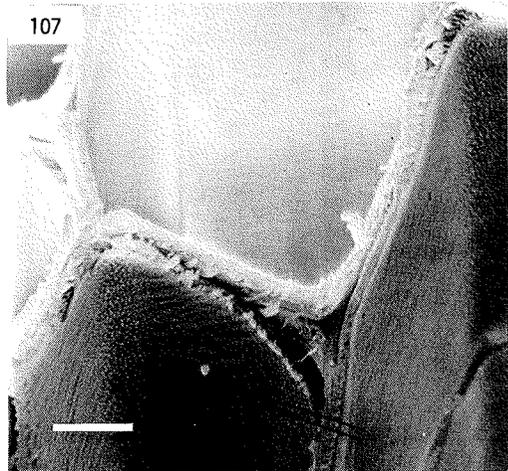
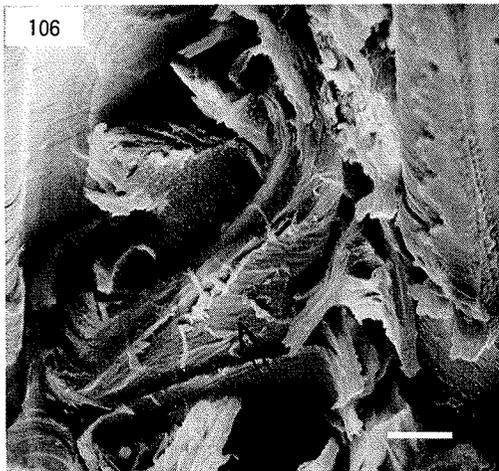
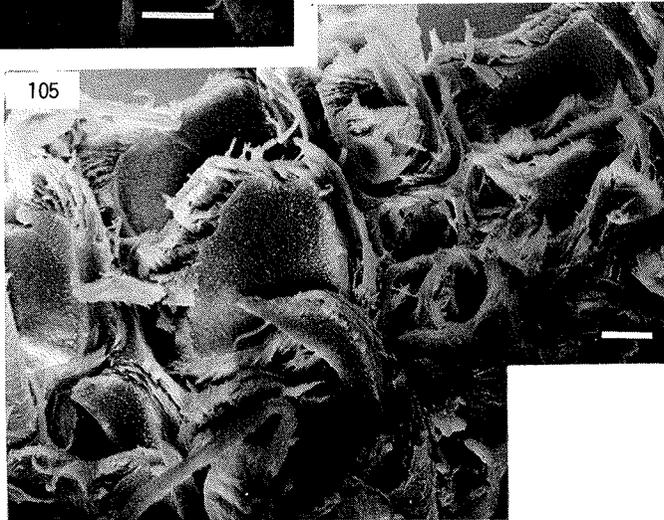
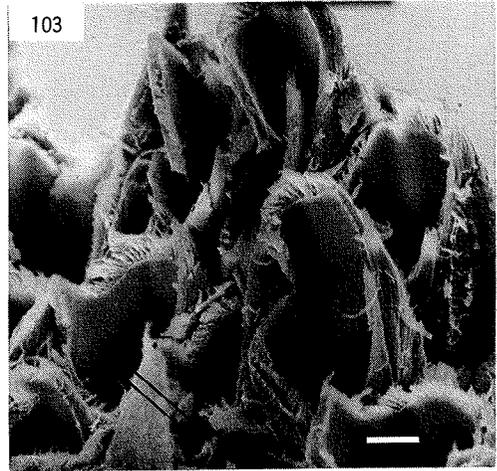




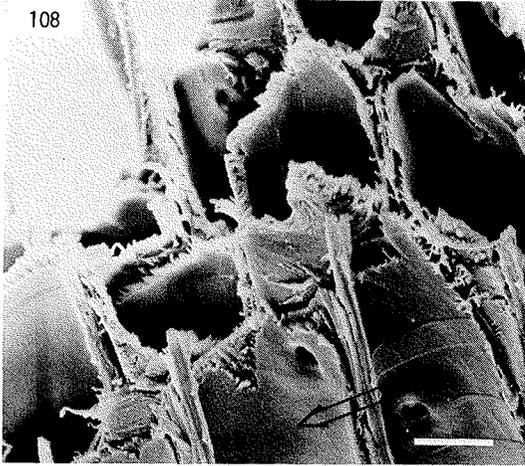




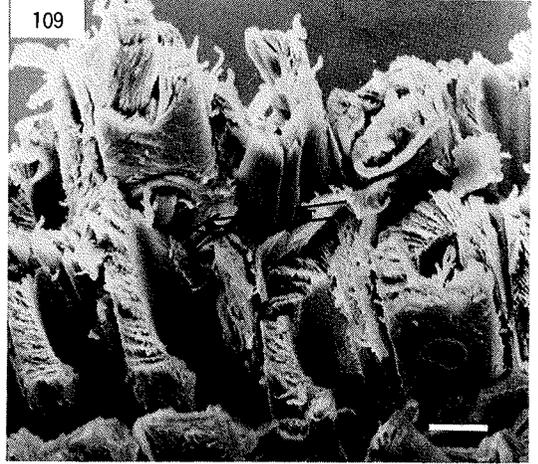




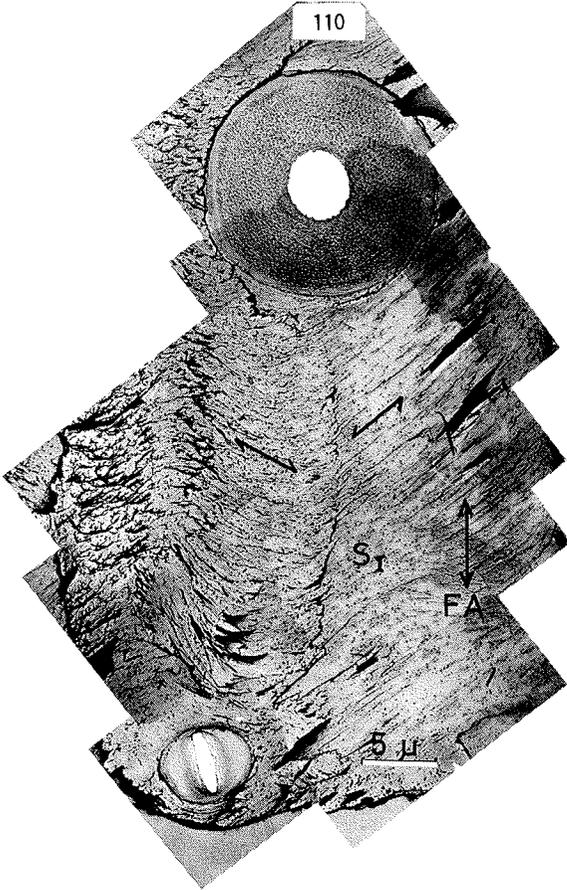
108



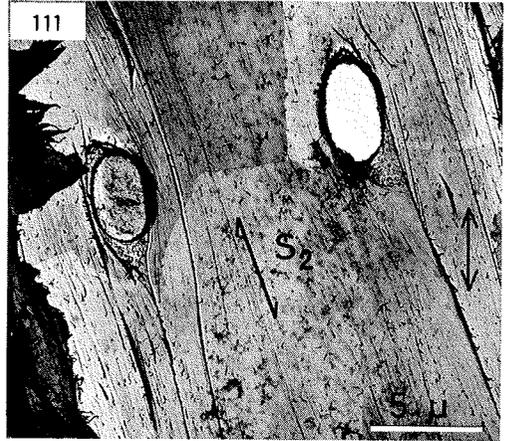
109



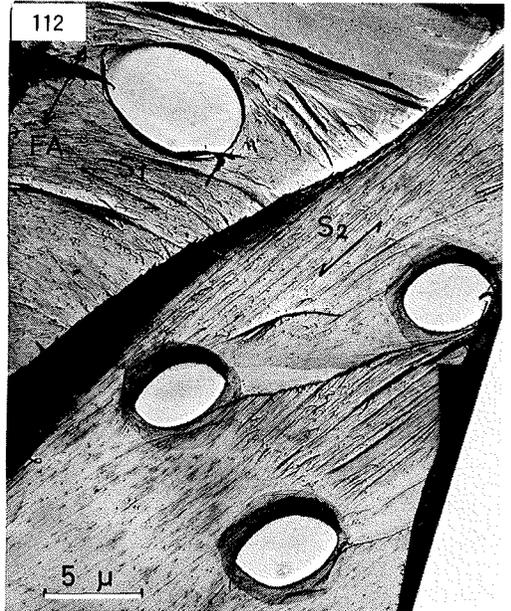
110

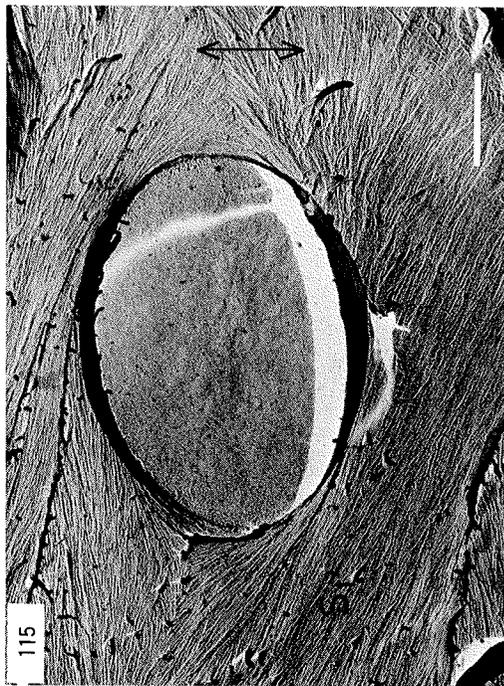
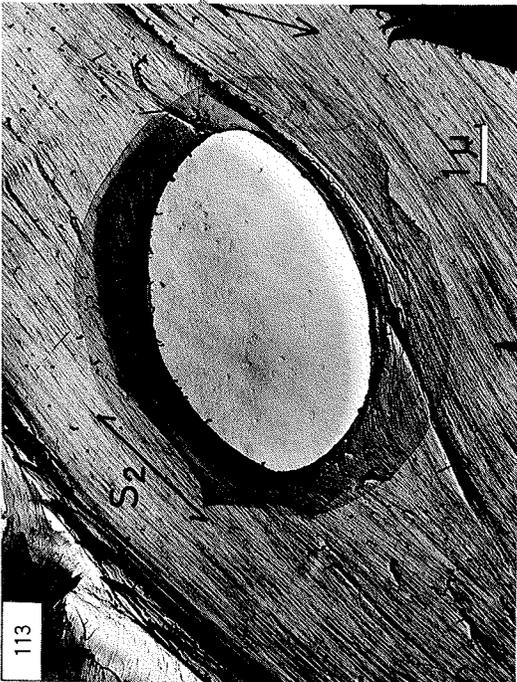


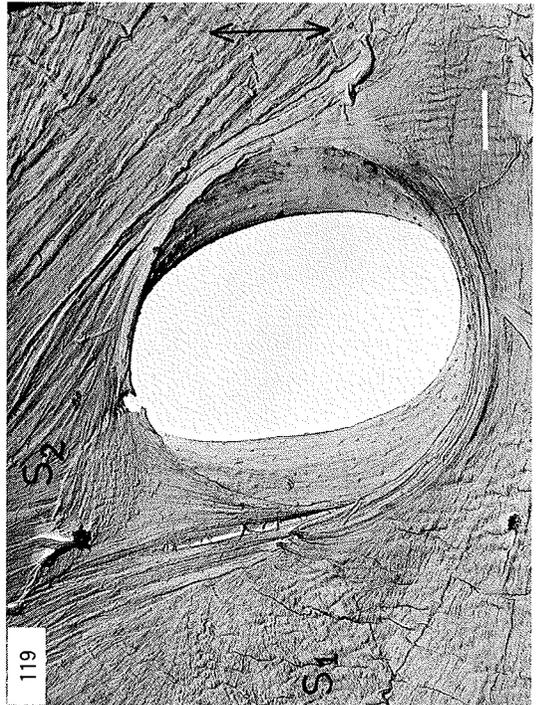
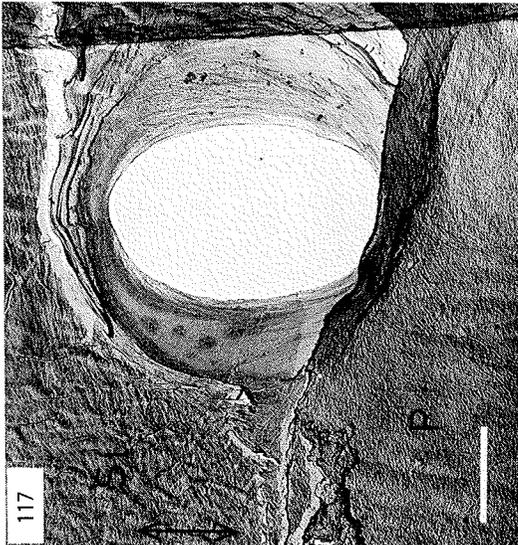
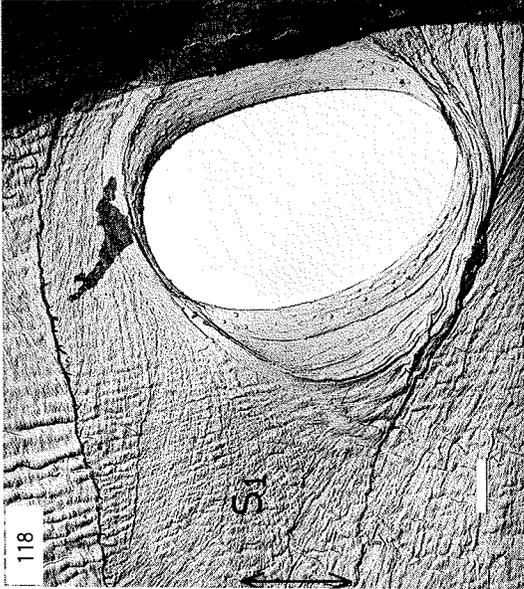
111

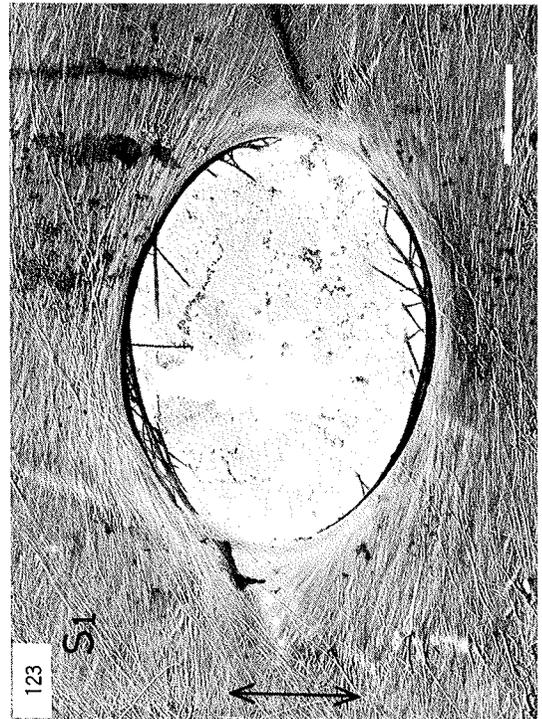
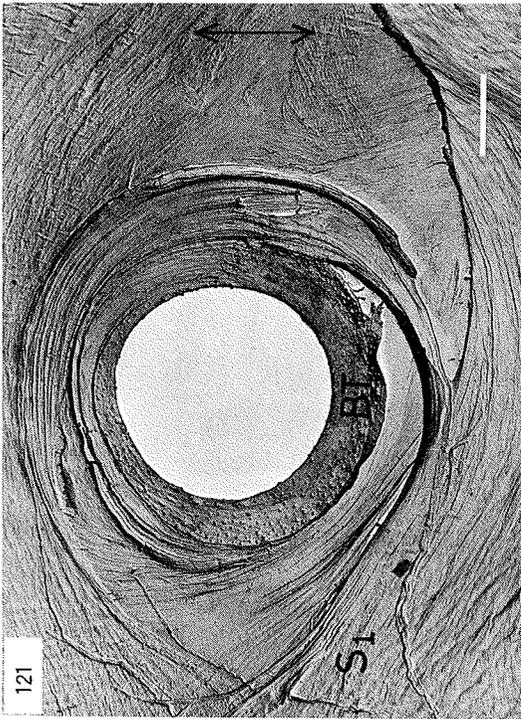
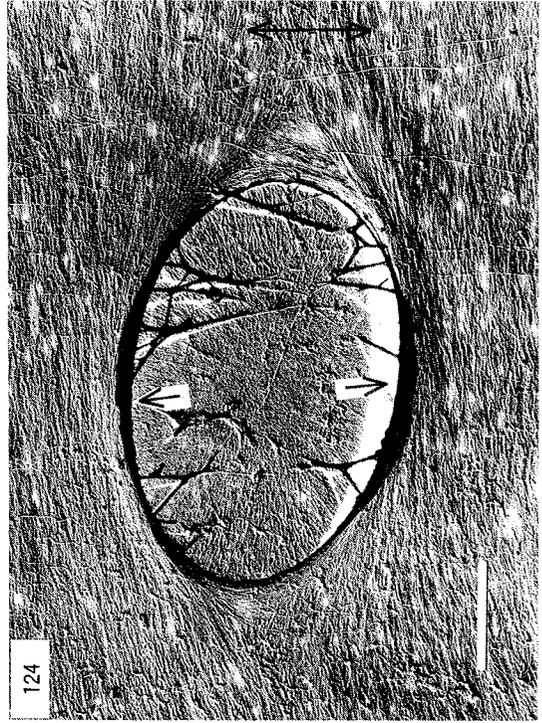


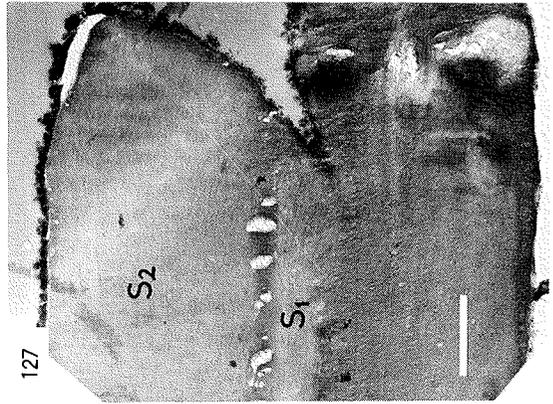
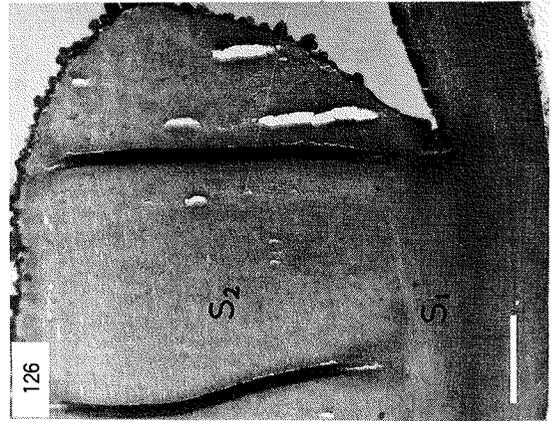
112



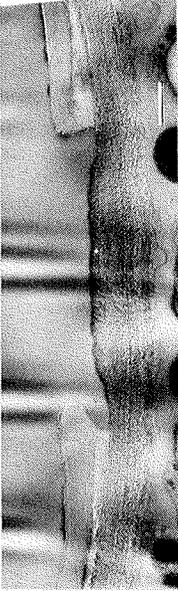




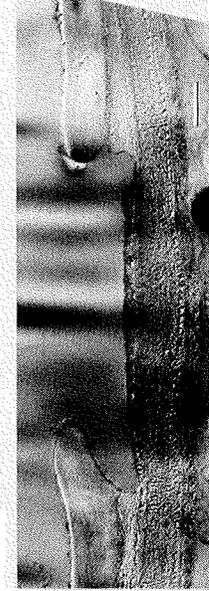




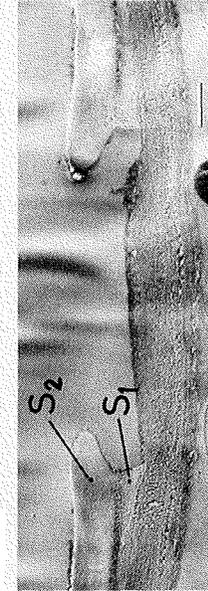
128-①



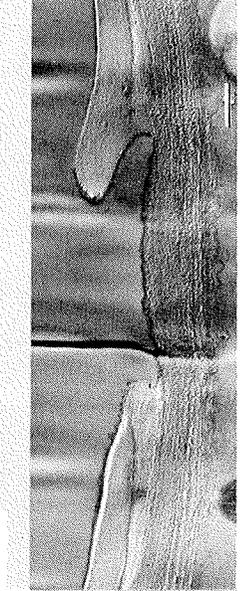
128-②

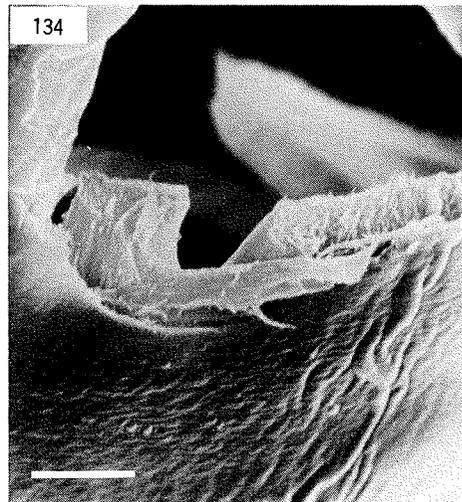
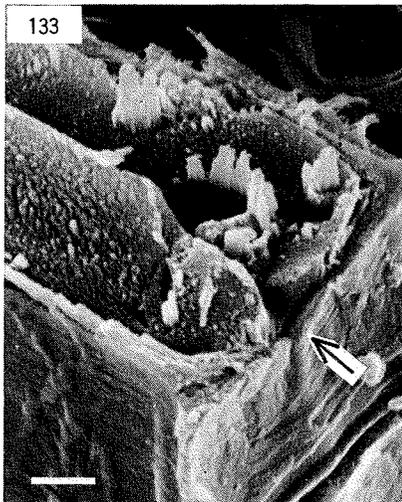
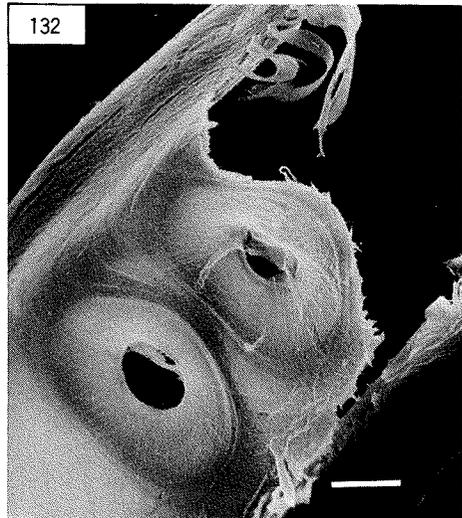
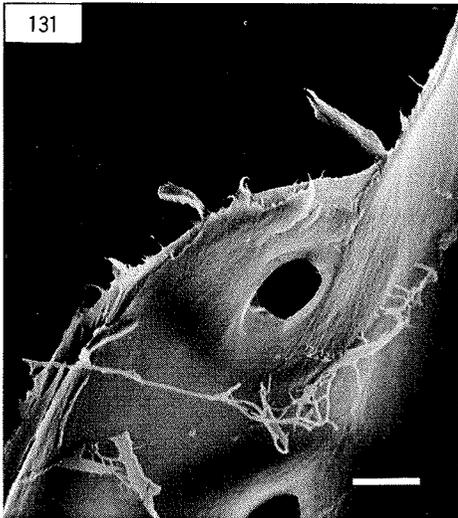
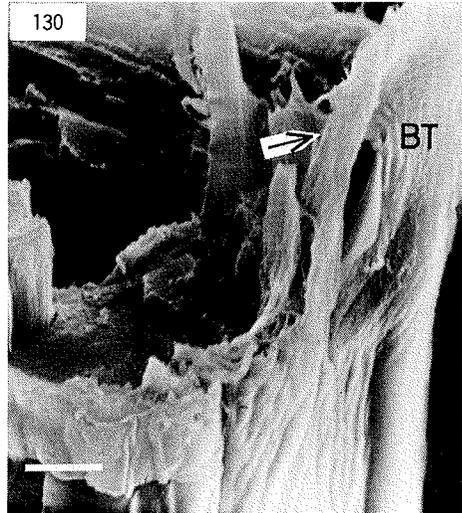
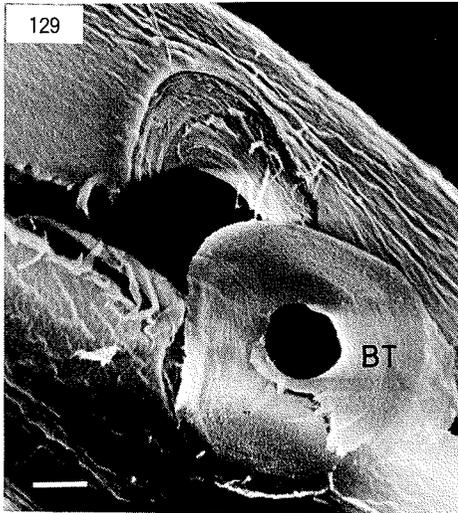


128-③



128-④





正 誤 表 (演習林報告№12)

頁	行	誤	正
P.11	上から6行目	変位置	変位置
P.14	上から9行目	しかし <u>ら</u> がら	しかし <u>な</u> がら
P.16	下から11行目	見えその	見えてその
P.21	上から12行目	<u>Obtusa</u>	<u>obtusa</u>
P.22	上から18行目	<u>4</u>)	<u>3</u>)
P.22	下から7行目	<u>5</u>)	<u>4</u>)
P.26	下から14行目	フィブリル束の	フィブリル束)の
P.58	下から6行目	写真10 <u>2</u>	写真10 <u>3</u>
P.59	上から7行目	写真10 <u>2</u>	写真10 <u>3</u>
P.74	上から5行目	<u>見知</u>	<u>知見</u>
P.74	上から10行目	単一道管	単一仮道管

鳥取大学農学部演習林報告 第12号

昭和55年1月29日 印刷

(無断転載を禁ず)

昭和55年1月29日 発行

編集兼
発行者

鳥取大学農学部附属演習林

鳥取市湖山町南4丁目101

印刷所 総合印刷出版株式会社

鳥取市西町1丁目215
