HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 走査電子顕微鏡内での針葉樹材の横圧縮破壊過程の観察：Ⅱ．仮道管壁の縦断面における破壊形態 |
| Author(s) | 相内，泰三；石田，茂雄 |
| Citation | 北海道大學農學部 演習林研究報告，36(3)，623-631 |
| Issue Date | 1979-11 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/21018 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 36(3)_P623-631.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# 走査電子顕微鏡内での針葉樹材の横圧縮破壊過程の観察*

## II. 仮道管壁の縦断面における破壊形態**

相内泰三*** 石田茂雄***

# An Observation of the Failure Process of Softwood under Compression perpendicular to the Grain in the Scanning Electron Microscope*

## II. Morphology of the Failure as observed in Longitudinal Section of Tracheid Wall**

By

Taizo AIUCHI*** and Shigeo ISHIDA***

目　　次

1. はじめに …… 623
2. 材料と実験方法 …… 624
3. 結　　果 …… 624
3.1 半径方向圧縮による仮道管壁の破壊形態 …… 624
3.2 45度方向圧縮による仮道管壁の破壊形態 …… 625
3.3 接線方向圧縮による仮道管壁の破壊形態 …… 626
3.4 二次壁の破壊形態 …… 626
4. 考察と結論 …… 626
5. 要　　約 …… 628
文　　献 …… 628
Summary …… 629
写真説明 …… 630
写　　真

## 1. はじめに

木材の横圧縮破壊についてのこれまでの解剖学的研究は，材の木口面（試料表面）における破壊形態の巨視的[1),2)]ならびに顕微鏡的観察[3)~5)]に限られており，繊維軸方向における破壊状

* 1979年1月31日受理
** Mokuzai Gakkaishi **24**, 507 (1978) をもって第I報とする.
*** 北海道大学農学部林産学科　木材理学教室
Laboratory of Wood Physics, Dept. of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

態（縦断面における破壊状態）については，ほとんど調べられていない。著者らは走査電子顕微鏡（SEM）を用いて，横圧縮荷重を受ける針葉樹材の木口面における細胞・組織の変形・破壊過程の直接観察[6),7)]を行ってきたが，この木口面における観察と併せて，これらの仮道管の縦断面における破壊状態について調べることは，一本の仮道管の全体的な変形・破壊の機構を知るうえで重要であると思われる。

そこで本実験では，SEMの鏡筒内で横圧縮破壊された針葉樹材試験体の破壊部から試料をとり，変形・破壊した仮道管壁の内表面（縦断面）の状態についてSEMを使って調べた。

なお，本報告の一部は第11回日本木材学会北海道支部大会（1978年11月，旭川）において発表した。

## 2. 材料と実験方法

試料として，木口面における細胞の変形・破壊過程を動的に観察するためにSEMの鏡筒内で特別の加圧装置により半径，接線および年輪に対して45度方向にそれぞれ横圧縮された試験体（トドマツ材，*Abies sachalinensis*）を用いた。木口面における仮道管の変形・破壊が，その軸方向においてどのような状態にあるかを細胞の内こう側から調べるために，破壊後除荷した各試験体から，破壊部を含む半径断面（半径方向圧縮）または接線断面（接線方向，45度方向圧縮）の小片を実体顕微鏡下でカミソリの刃を用いて作成した。

観察試料にはイオンスパッタ装置を用いて金をできるだけ薄く蒸着した。SEM観察は，木口面での仮道管壁の変形・破壊と軸方向における内表面での状態を，ある程度同時に対比・観察できるように傾斜試料台を用い，15 kVの加速電圧で行った。

## 3. 結　　果

横圧縮荷重を受ける針葉樹材の木口面における仮道管の変形・破壊についてのSEMによる動的および静的観察から，仮道管壁が細胞コーナーに働く曲げモーメントにより変形・破壊することが認められた。曲げられた仮道管壁の代表的な例をFig. 1に示す。壁の引張側では引張応力の作用により壁に対してほぼ垂直に微小な割れを生じ（Fig. 1, 矢印），その反対側すなわち圧縮側では圧縮応力の作用により圧縮破壊を生じている。このように曲げられた壁の破壊がさらに進行した場合，Fig. 2に示されるように壁の引張側に生じた割れは拡大し，圧縮側では二次壁中層（S 2）と二次壁内層（S 3）の間ではく離（矢印）およびS 3層の折りたたみ（円内）がしばしばみられた。

木口面でみられるこのような仮道管壁の変形・破壊がその軸方向にどのように発達，存在しているかを，以下に半径方向，45度方向および接線方向圧縮の場合についてそれぞれ述べる。

### 3.1 半径方向圧縮による仮道管壁の破壊形態

半径方向圧縮の場合，木口面における仮道管の破壊は主として半径壁の折損により生じた。

Fig. 3 は木口面でみて曲げ破壊された半径壁の, 木口面と軸方向における内表面の状態を示す。引張側には, 仮道管軸に対して斜めに走向し, かつそれぞれ独立した割れが軸方向に並んでいるのがみられる。また, この割れは有縁壁孔のところではそのまわりに生じ, 壁孔自体の顕著な破壊はみられない。この半径壁のさらに内方 (写真の下方) の破壊状態を Fig. 4 に示す。木口面付近の割れの状態と比較して短く, 幅のせまい割れがみられる。これは試料表面付近とその内部における応力状態の違いを示すものである。Fig. 4 の下部にみられる分野での破壊状態の詳細を Fig. 5 に示す。分野壁孔の孔口から割れ (矢印) が発達しているのがみられる。

Fig. 6 は木口面でみて逆対称に曲げ破壊された半径壁の, 木口面と軸方向における内表面の状態を示す。壁の引張側に生じている割れの状態は Fig. 3 でみられた状態と類似している。一方, 圧縮側には仮道管軸にほぼ平行に走る微細な褶曲 (矢印) がみられる。木口面に生じた仮道管壁の割れは, 軸方向には斜めに進行している。

Fig. 7 は Fig. 6 に示した仮道管壁よりさらに強く曲げ破壊された半径壁の軸方向の内表面に生じた割れの状態を示す。Fig. 7 の枠内の拡大を Fig. 8 に示す。内側の S 3 層の破断の間からそれに隣接する S 2 層がそのフィブリル走向に沿って裂けているのがみられる。S 3 層の破壊は隣接する S 2 層の裂けに沿っており, その破断面は鋸歯状を示している。

曲げ破壊された半径壁の圧縮側 (Fig. 7, 矢印) では, 壁孔のおしつぶれがみられ (Fig. 9), 引張側では壁孔のまわりで割れがうかいするのはみられるが, 壁孔自体の顕著な破壊はみられない (Fig. 10)。

### 3.2 45 度方向圧縮による仮道管壁の破壊形態

年輪に対して 45 度方向圧縮の場合, 木口面における仮道管の破壊は主として接線壁の曲げ破壊により生じた。Fig. 11 は木口面でみて逆対称に曲げ破壊されている接線壁の, 木口面と軸方向における内表面の状態を示す。壁の引張側には, 仮道管軸に対して斜めに走向し, かつそれぞれ独立した割れが軸方向に並んでいるのがみられる。木口面に生じた仮道管壁の割れ自体も軸方向に斜めに進行している。Fig. 11 の枠で囲まれた部分の詳細を Fig. 12 に示す。S 2 層がそのフィブリル走向に沿って裂け, 隣接する S 3 層の破壊もそれに沿って生じている。この破壊形態は半径方向圧縮で観察されたもの (Fig. 8) と類似している。Fig. 13 (Plate V) も木口面でみて逆対称に曲げ破壊された接線壁の軸方向における内表面の状態を示しているが, 壁の引張側では Fig. 11 でみられるような激しい S 2 層の裂けは起きておらず, S 2 層が浅く裂けているのが S 3 層の破断の間からみられる。写真の下方では, S 3 層が引張応力により破断しているのがみられる。一方, 壁の圧縮側では仮道管軸にほぼ平行に走る微細な褶曲 (矢印) が明らかにみられる。木口面で仮道管壁に生じた割れは仮道管軸に対して斜めに進行し, S 2 層のフィブリル走向に沿っていた。Fig. 14 (Plate IV) はFig. 13 の枠に囲まれた部分の拡大を示す。S 3 層は, S 2 層の裂けに沿って破断するとともに, S 3 層のフィブリル間でも小さな裂けを生じている。S 3 層が S 2 層の裂けに沿って破断する場合は, そのフィブリル

走向にほぼ垂直なため破断面は鋸歯状を示し，S3層のフィブリルにほぼ平行な裂けの場合は，それは比較的平滑である。

### 3.3 接線方向圧縮による仮道管壁の破壊形態

接線方向圧縮の場合，木口面における仮道管の破壊は主として接線壁の曲げ破壊により生じた。Fig. 15は木口面でみて逆対称に曲げ破壊された接線壁の，木口面と軸方向における内表面の状態を示す。壁の引張側には，仮道管軸に対して斜めに走向し，かつそれぞれ独立した割れが軸方向に並んでいるのがみられる。Fig. 15の枠に囲まれた部分の拡大をFig. 16に示す。引張応力によるS3層の破断は認められるが，S2層の破壊は不明瞭である。これはFig. 13で示されたようにS2層の破壊が浅いことによるものと思われる。木口面で仮道管壁に生じた割れは，仮道管軸に斜めに進行し，木口面近くで停止しているのがみられる (Fig. 15)。

### 3.4 二次壁の破壊形態

これまでは変形・破壊された仮道管壁の状態について軸方向における内表面の観察結果からその様相を述べてきた。ここでは，仮道管壁を構成する各壁層それぞれの破壊形態についてS2層を中心に観察結果を述べる。Fig. 17は45度方向圧縮において，強く曲げ破壊された接線壁の内表面での状態を示す。壁の引張側でS3層の割れが斜め方向に発達し，その間から隣接するS2層が束状に裂けているのがみられる。S2層はそのフィブリル走向に沿って束状に裂けているが，それらは仮道管軸にほぼ平行に配列している (Fig. 18)。このようなS2層の破壊は他の二方向の圧縮においてもみられ，Fig. 19は接線方向圧縮における接線壁のS2層の束状の裂けを示す。

Fig. 20は局部的に束状に裂けたS2層が曲げられている状態を示す。この詳細をFig. 21に示す。このようなS2層の束状のものがさらに細かく分離しているのがみられる。

Fig. 22は45度方向圧縮において曲げ破壊された接線壁の内表面の状態を示す。S3層は仮道管軸にほぼ沿って破断し，隣接するS2層 (矢印) はそのフィブリル走向に沿って裂けているのがみられる。このようにS2層とS3層がそれぞれ独立した破壊形態を示す例は少なかった。

## 4. 考察と結論

半径方向，45度方向および接線方向圧縮において，それぞれ曲げ破壊された仮道管壁の軸方向における内表面の破壊状態については顕著な差異は認められなかった。すなわち，曲げられた壁の引張側には，仮道管軸に対して斜めに走向し，かつそれぞれ独立した割れが軸方向に並んでいた。この割れは引張側の局部的な破壊であった。木口面で引張側の壁に生じた割れそのものは，内方でみられたものとほぼ同様の走向を示し，木口面近くの局部的な破壊であることが認められた。Fig. 3, 4で示された木口面付近と仮道管の奥における破壊の程度の差は，1本の仮道管の内方では先端が閉じており，かつ必ずしも一様の大きさをしてないことや放射

組織が仮道管に隣接していることなどが影響しているものと思われる。

一方，曲げ破壊された仮道管壁の圧縮側では，木口面ではS2層とS3層の間でのはく離やS3層の折りたたみ (Fig. 2) がみられた。縦断面の観察でみられた軸方向にほぼ平行に走る褶曲はこのような木口面の状態と対応する。従って，この褶曲はS3層が圧縮応力を受ける結果生じたものであり，S2層との間ではく離を起こしていると思われる。

曲げ破壊された仮道管壁の引張側における軸方向の破壊形態は，壁を構成する骨格構造としてのフィブリルの配向に強く影響されるものと思われる。中間層によって固く結合されている重複細胞壁が曲げモーメントにより曲げられた場合，引張側の壁のS3層およびS2層には仮道管軸に対して垂直な引張応力が作用する。S3層のフィブリルは仮道管軸に対してほぼ垂直に配向しているので[8]，その破壊形態は軸方向にほぼ平行な破断（フィブリルの切断）を示し (Fig. 22)，一方，S2層はフィブリル傾角が仮道管軸に対して小さいため[8]，その破壊形態はフィブリル走向に沿った裂け（フィブリル間の破壊）を示す (Fig. 22, 矢印)。しかし，本実験の観察ではS2層とS3層の各々が Fig. 22 にみられるように独立した破壊を示す例は非常に少なく，壁の引張側の内表面には，仮道管軸に対して斜めに走向する割れが軸方向に並んでいた。これはS3層の破断より先にS2層が局部的に裂けるため (Fig. 8, 12)，S3層はそれに従って破断しその結果，S2層のフィブリル走向に沿った割れが内表面でみられる。S3層は，試料がほぼ全乾状態にあり隣接するS2層と強く結合された状態にあるので，S2層とS3層との間ですべることなくS2層の裂けに付随して破断するものと考えられる。

一方，曲げ破壊された仮道管壁の圧縮側では仮道管軸に対して垂直な圧縮応力がS2層とS3層に作用する。木口面でみられた壁の圧縮側でのS3層のはく離は，S2層の圧縮破壊が相当進行した場合に生じ，破壊の程度が軽い場合はほとんどみられない。また，縦断面観察で認められたS3層の褶曲は圧縮応力の作用方向とS3層のフィブリル走向がほぼ平行なため，S3層が座屈を起こす結果生じたものと思われる。

曲げ破壊された仮道管壁の引張側の内表面では，S2層がそのフィブリル走向に沿って束状に裂け，それが仮道管軸にほぼ平行に配列される場合がみられた。これはS2層のフィブリル走向 (Zらせん)[8] から判断して，裂けたS2層がさらに二次的な応力の影響を受けて配列されたためである。すなわち，Fig. 18 のS2層の破壊形態に示されるように，局部的に裂けたS2層の束状のものが壁の曲げによりさらに曲げられ，その結果仮道管軸にほぼ平行な配列に近づく。

有縁壁孔は引張応力に対して強い抵抗性を示した (Fig. 10)。これは壁孔における二次壁外層の円状配列[8] の影響によるものと思われる。しかし，分野壁孔の場合は孔口から割れが発達している (Fig. 5) が，これは応力が集中すると思われる孔口の主軸がS2層のフィブリル走向にほぼ近く，円状配向部が少ないためであろう[9]。

本実験では，一つの仮道管の変形・破壊を全体にわたって観察することは，試料作成の困

難さのためにできなかったが，仮道管の先端部での破壊状態は割れの伝ぱと関連して興味ある問題である。

横圧縮により変形・破壊した細胞の軸方向における破壊形態をできるだけそのままの状態で観察するためにSEMを利用したが，SEMによれば細胞の変形・破壊を近似的に3次元的に観察することが可能であることが明らかになった。

## 5. 要　　約

横圧縮荷重を受ける針葉樹材の木口面における仮道管の変形・破壊がその縦断面においてどのように発達しているかを，走査電子顕微鏡を用いて細胞の内こう側から観察した。試料は走査電子顕微鏡の鏡筒内で加圧装置により圧縮破壊された試験体の破壊部から半径または接線断面の小片を作成し，金を蒸着して観察された。

半径，45度および接線方向のそれぞれの横圧縮において，曲げ破壊された仮道管壁の軸方向における内表面には，壁の引張側で仮道管軸に対して斜めに走向し，かつそれぞれ独立した割れが軸方向に並んでいるのがみられた。この内表面での割れは，引張応力によりS2層がそのフィブリル走向に沿って裂けるために生じたものである。曲げ破壊された壁の内表面では，S2層がそのフィブリル走向に沿って裂け，また隣接するS3層はS2層の破壊に付随して破断しているのが認められた。

一方，曲げ破壊された仮道管壁の圧縮側では仮道管軸にほぼ平行に走る褶曲がみられた。この破壊形態と木口面で壁の圧縮側にみられたS3層のはく離や折りたたみは対応し，これはS3層が圧縮応力を受けたために生じたものである。

木口面でみられた仮道管壁の引張側に生じる割れは，S2層のフィブリル走向に沿って進行する局部的な破壊であることが縦断面の観察から示された。

有縁壁孔はおしつぶされた壁の圧縮側では，その変形が認められたが，引張側では，壁孔のまわりに割れを生じ，それ自体の顕著な破壊はみられなかった。分野では，分野壁孔の孔口からS2層のフィブリル走向に沿って発達する割れがみられた。

曲げ破壊された仮道管壁の引張側の内表面ではS2層がそのフィブリル走向に沿って束状に裂け，さらにそれらは曲げられ，結果として束状に裂けたS2層が仮道管軸にほぼ平行に配列されるのがみられた。

## 文　　献

1) 山井良三郎：木材の応力—歪曲線（第1報）．横圧縮応力—歪曲線(1)．林業試験場研究報告，**77**，103–152 (1955).

2) 高橋　徹：光弾性皮膜法による木材のひずみ測定（第8報）．横圧縮ひずみ分布の年輪傾角依存性．木材学会誌，**12**，203–209 (1966).

3) KUNESH, R. H.: Strength and elastic properties of wood in transverse compression. For. Prod. J., **18**, 65–72 (1968).

4) BODIG, J.: The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression. For. Prod., J., **15**, 197–202 (1965).
5) 王 松 永: 木材集成体の横圧縮に関する研究 (第4報). スンプ法による素材の組織変形の観察. 木材学会誌, **20**, 172–176 (1974).
6) 相内泰三・石田茂雄: 走査型電子顕微鏡による木材の横圧縮変形・破壊について. 日本木材学会北海道支部講演集, **7**, 1–4 (1975).
7) AIUCHI, T. and S. ISHIDA.: An observation of the failure process of softwood under compression perpendicular to the grain in the scanning electron microscope. Mokuzai Gakkaishi, **24**, 507–510 (1978).
8) 島地 謙・須藤彰司・原田 浩: 木材の組織. 森北出版(株), 1976.
9) HARADA, H.: Ultrastracture and organization of gymnosperm cell walls. In *Cellular Ultrastructure of Woody Plants* (W. A. CÔTÉ, ed.). Syracuse University Press, pp. 223–224 (1965).

## Summary

The specimens to be observed were taken from softwood blocks (*Abies sachalinensis*) compressed perpendicularly to the grain in the radial, tangential and 45° directions in the scanning electron microscope (SEM). The radial and tangential longitudinal sections were prepared by a razor blade in order to examine the failure morphology in the internal surface of the deformed or failed tracheid walls. These specimens were coated with gold in a sputter coating unit and examined by the SEM.

In the radially compressed specimen, cracks running obliquely to the tracheid axis were observed in the internal surfaces in the tension side of the radial walls bent (Figs. 3 and 6). Such cracks appeared to be oriented in the same direction as that of the microfibrils in the S 2 layer. Splitting of the S 2 layer along its fibrillar orientation was observed in the internal surface of the radial wall bent severly (Fig. 8). The scission of the S 3 layer followed the breaks of the adjacent S 2 layer (Fig. 8). The pits in the compression side of the radial wall bent were slightly crushed (Fig. 9). While, the pits subjected to tensile stress were not broken and cracks occurred around them (Fig. 10). In the cross field, cracks (arrows) in the internal surface developed from pit apertures having their major axis oriented nearly parallel to the fibrillar orientation of the S 2 layer (Fig. 5). The minute folding (arrow) running longitudinally was observed on the inner surface in the compression side of the radial wall bent (Fig. 6).

In the 45°-specimen, cracks running obliquely to the tracheid axis were observed in the internal surfaces of the tangential walls bent (Figs. 11 and 13). Such cracks were simillar to those observed in the radial specimens stated above. The minute folding running longitudinally was also observed on the inner surface in the compression side of the tangential wall bent (Fig. 13, arrow). This may be due to the buckling of the inner layer (S 3) caused by lateral compression.

In the tangential specimen, cracks simillar to those observed in both the radial and 45°-specimens were observed in the internal surface in the tension side of the tangential wall bent (Fig. 15).

A separated, fibrillar bundles of the S 2 layer was observed in the internal surfaces of the tracheid walls bent severely (Figs. 18 and 19). Such bundles were found to be nearly parallel to the tracheid axis since the bundles of the S 2 layer were distorted due to bending (Fig. 20).

## Explanation of Figures

**Note**: The tracheid axis in the figures (3–22) is vertical (↕).
All the figures are SEM micrographs.

**Fig. 1.** Deflection of the tangential wall in the transverse surface. Fine cracks (arrows) occur in the tension side of the double wall bent. Peeling of the S3 layer from the adjacent S2 layer is seen in the compression side.

**Fig. 2.** Breaks of the tangential wall. Peeling and folding (circle) of the S3 layer are seen in the compression side of the double wall bent.

**Fig. 3.** Longitudinal failures in the internal surface of the radial wall bent in radial compression. Cracks running obliquely to the tracheid axis occur in the internal surface.

**Fig. 4.** Longitudinal failures in the more inner portion of the tracheid wall shown in Fig. 3. Cracks in the internal surface are smaller than those in Fig. 3. Failures in the cross field are also seen.

**Fig. 5.** Cracks (arrows) in the internal surface of the cross field develop from pit apertures.

**Fig. 6.** Longitudinal failures in the internal surface of the radial wall bent in radial compression. Cracks running obliquely to the tracheid axis occur in the tension side of the radial wall bent. Note minute folding (arrow) of the S3 layer in the compression side.

**Fig. 7.** Longitudinal failures in the internal surfaces of radial walls. The radial wall in the center is bent, while one on the right is crushed.

**Fig. 8.** Higher magnification of the area outlined in Fig. 7. Cracks in the internal surface are severer than those shown in Fig. 6. The S2 layer is split along its fibrillar orientation. The scission of the S3 layer follows the breaks of the adjacent S2 layer.

**Fig. 9.** Higher magnification of the pits (arrows) in the radial wall on the right shown in Fig. 7. The shape of pit apertures is deformed.

**Fig. 10.** A pit in the bent radial wall. Cracks are seen around the pit, but failure of itself is not seen.

**Fig. 11.** Longitudinal failures in the internal surface of the tangential wall bent severely in 45°-compression. Cracks running obliquely to the tracheid axis occur in the tension side of the tangential wall.

**Fig. 12.** Higher magnification of the area outlined in Fig. 11. The S2 layer is split along its fibrillar orientation. The scission of the S3 layer occurs in the same way as shown in Fig. 8.

**Fig. 13.** Longitudinal failures in the internal surface of the tangential wall deflected mildly in 45°-compression. Cracks running zig-zag occur in the tension side of the tangential wall. Note the folding (arrow) of minute sort running longitudinally on the inner surface in the compression side of the tangential wall.

**Fig. 14.** Higher magnification of the area outlined in Fig. 13. The S2 layer is split slightly along its fibrillar orientation. The fracture face of the S3 layer due to splitting of the S2 layer is irregular, while that of the S3 layer along its fibrillar orientation is relatively smooth.

**Fig. 15.** Longitudinal failures in the internal surface of the tangential wall deflected mildly in tangential compression. Cracks running obliquely to the tracheid axis occur in the tension side of the tangential wall.

**Fig. 16.** Higher magnification of the area outlined in Fig. 15. The scission of the S3 layer is seen, but failure of the adjacent S2 layer is not obvious.

**Fig. 17.** The great cracks in the internal surface of the tangential wall bent severely in 45°-compression. The S2 layer is split along its fibrillar orientation.

**Fig. 18.** Higher magnification of cracks shown in Fig. 17. The ruptured S2 layer is oriented parallel to the tracheid axis. The S3 layer is separated from the adjacent S2 layer.

**Fig. 19.** Rupture of the S2 layer simillar to Fig. 18.

**Fig. 20.** The internal surface of the tangential wall bent severely in 45°-compression. The fibrillar bundles of the S2 layer are distorted.

**Fig. 21.** Separation of lamellae of the S2 layer distorted.

**Fig. 22.** Scission of the S3 layer and splitting of the S2 layer (arrows) along its fibrillar orientation.

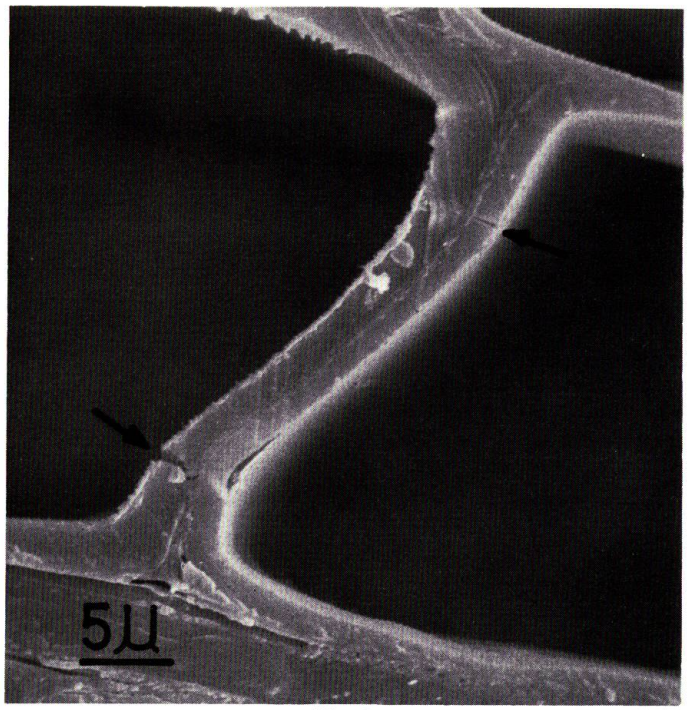


Fig. 1

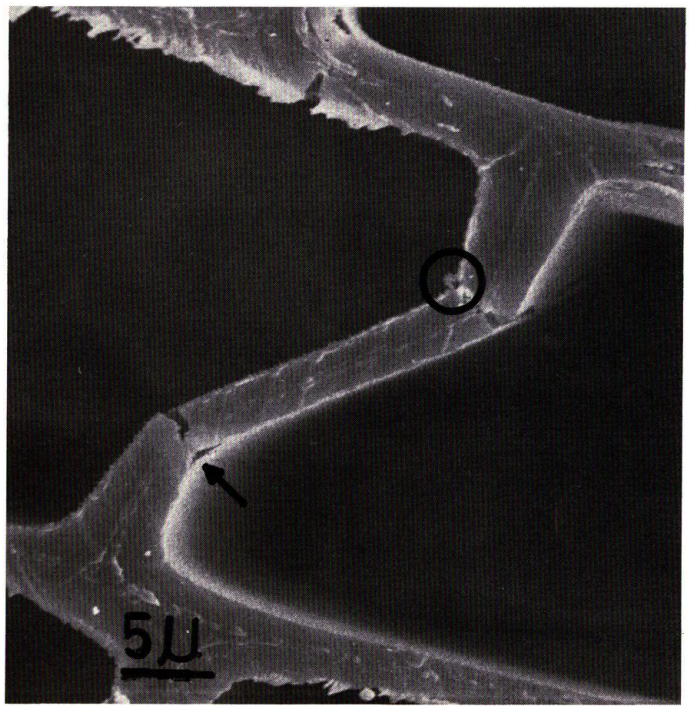


Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

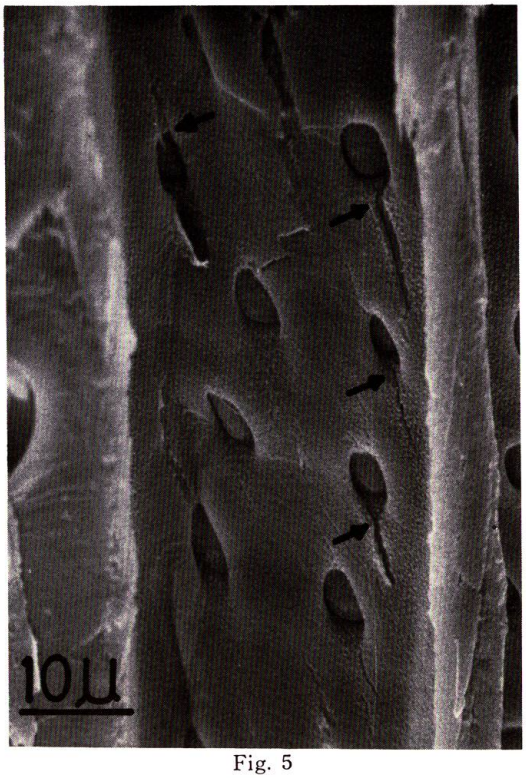


Fig. 5

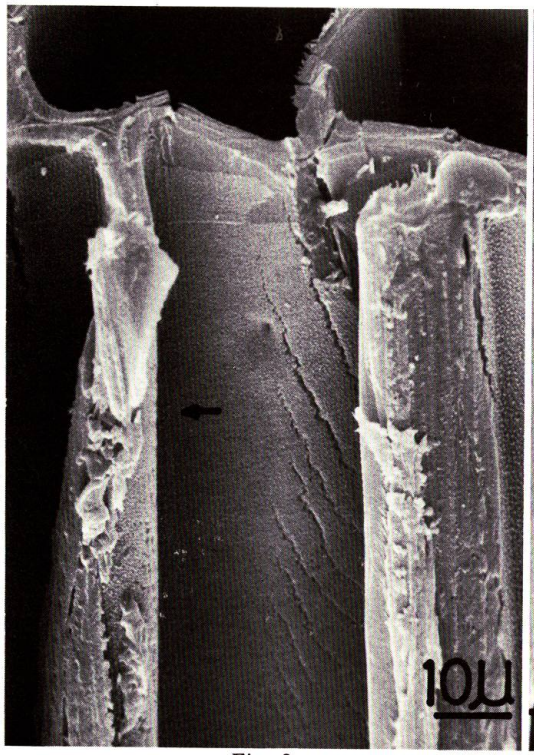


Fig. 6

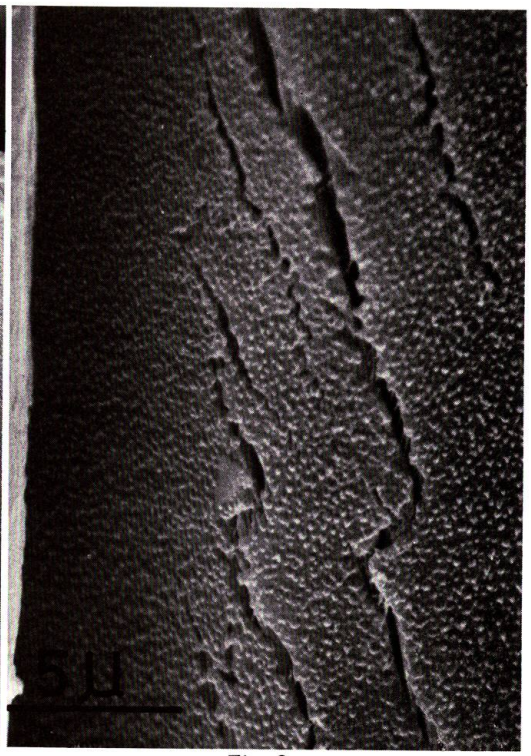

Fig. 8

Fig. 7

Fig. 9

Fig. 10

Fig. 12

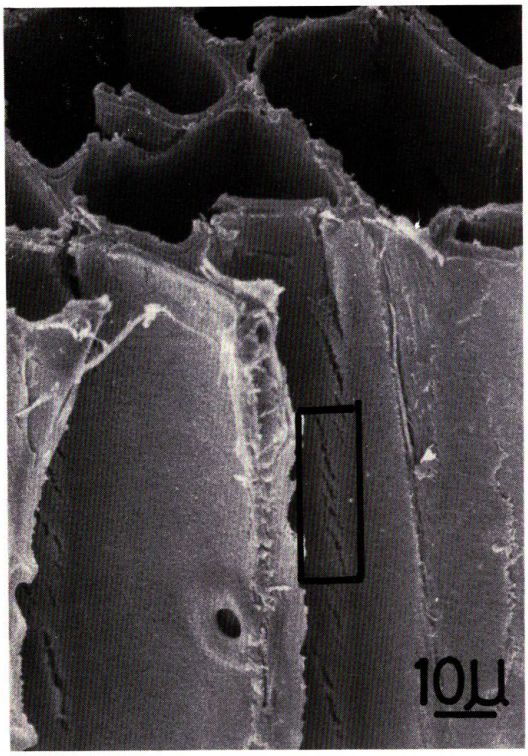


Fig. 11

Fig. 14

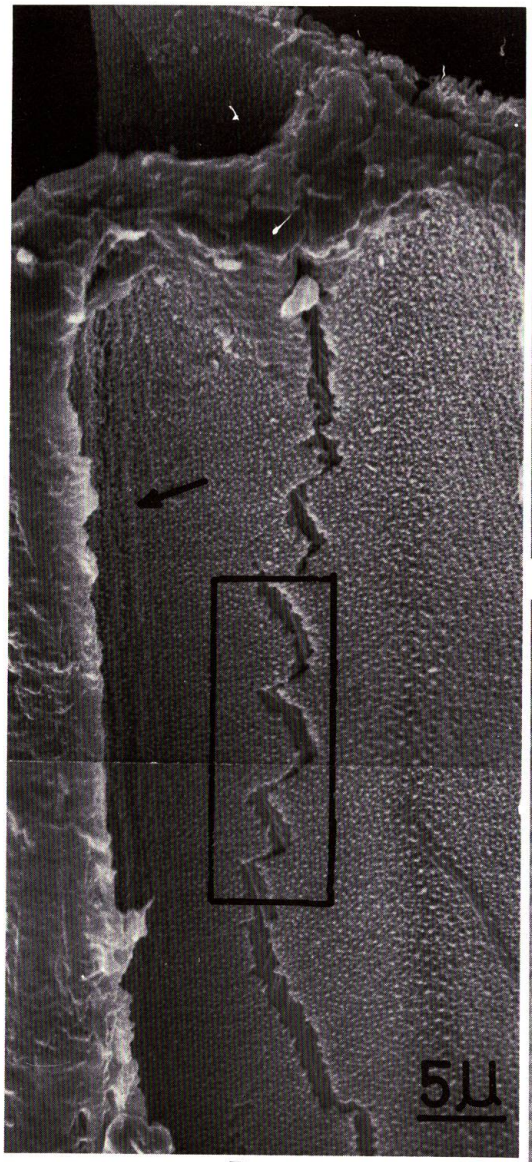


Fig. 13

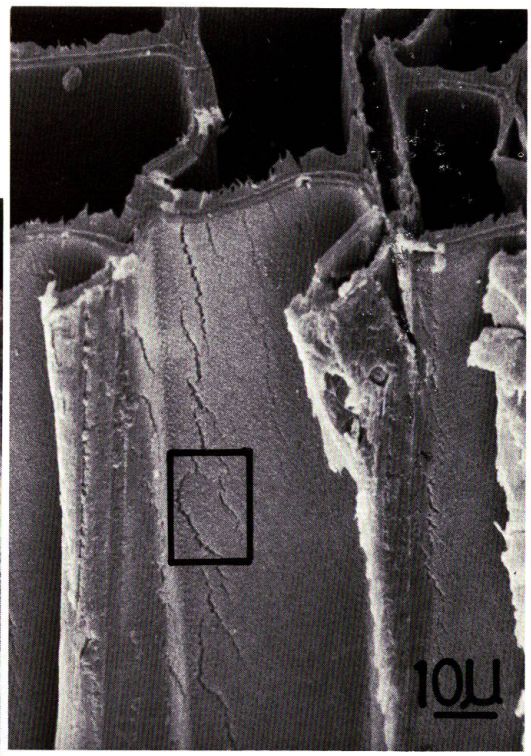


Fig. 15

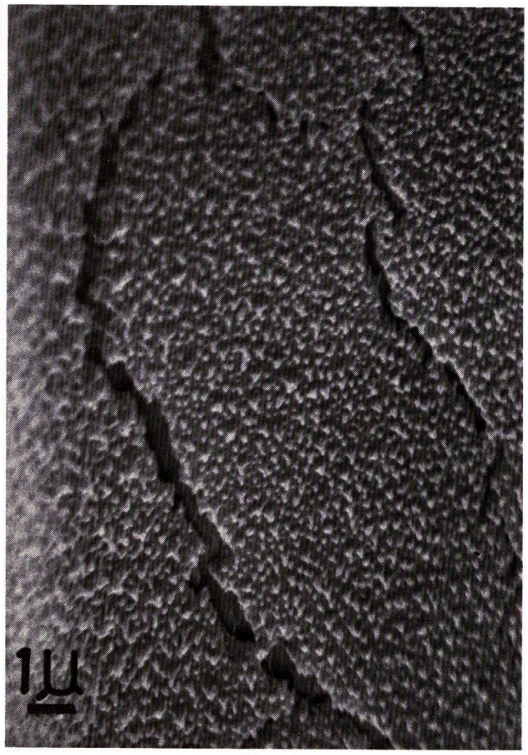


Fig. 16

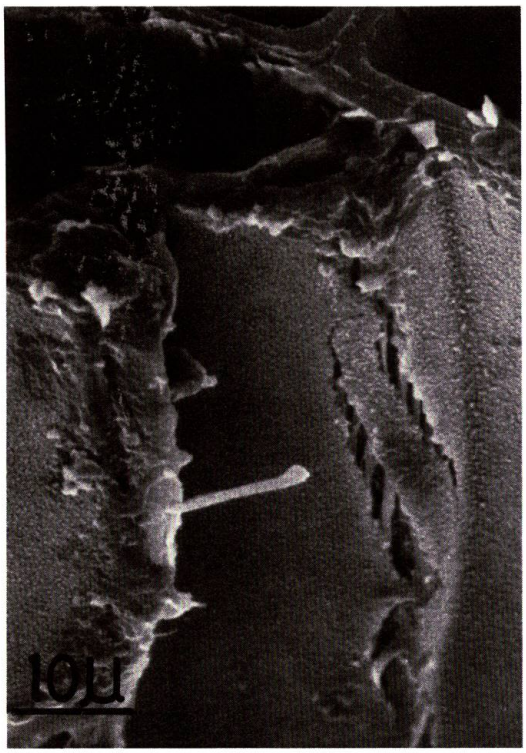


Fig. 17

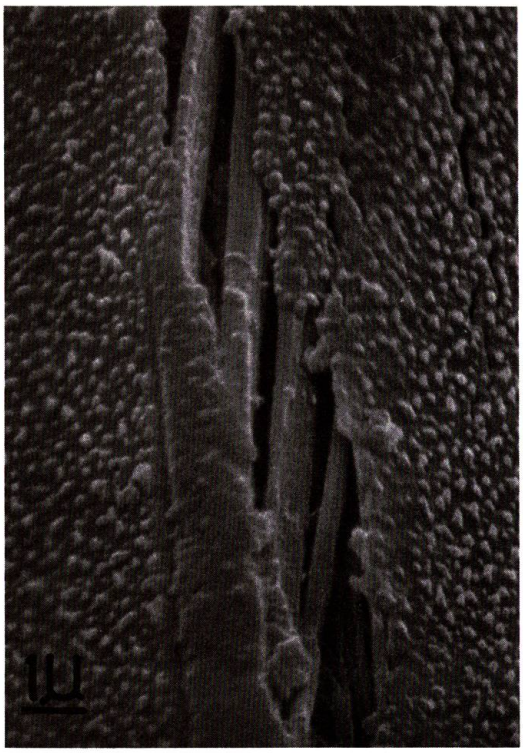


Fig. 19

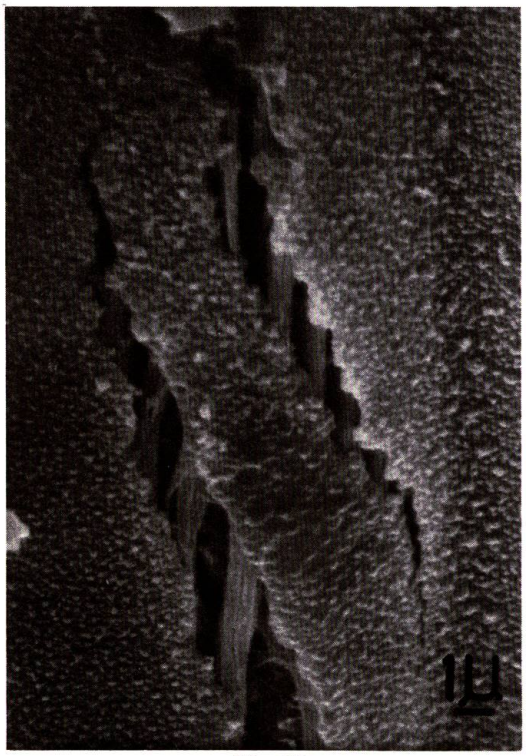


Fig. 18

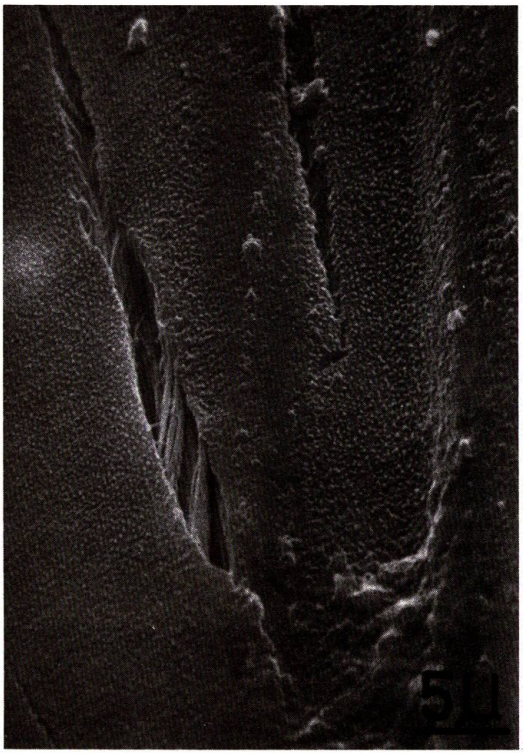


Fig. 20

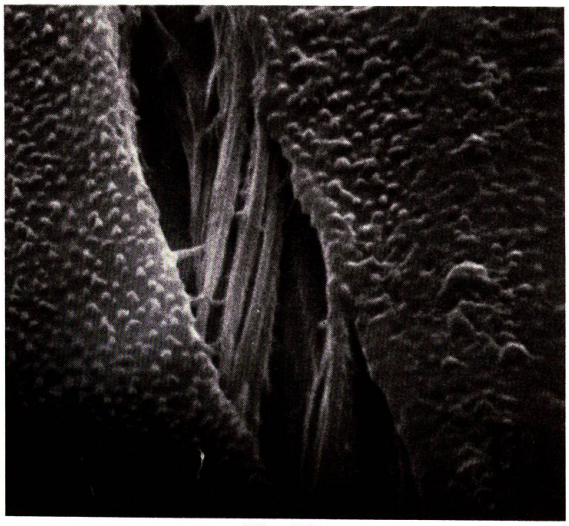

Fig. 21

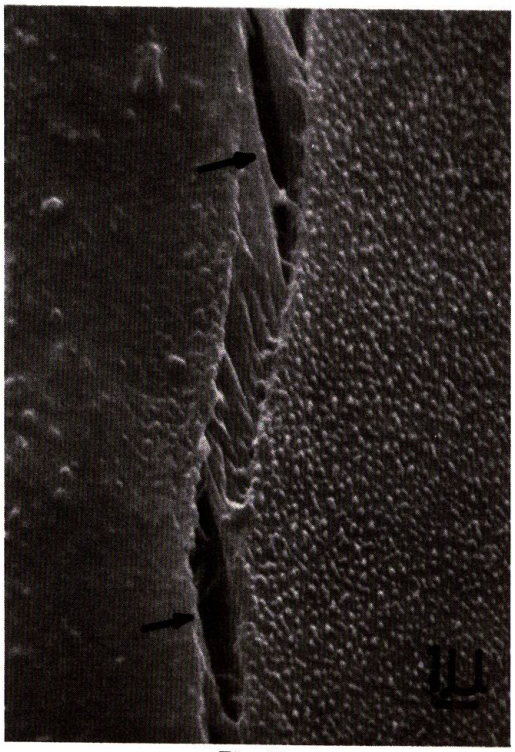

Fig. 22