

第 3 章

針葉樹、広葉樹両材の孔紋膜の構造に関する研究

第 1 節 概 説

木材の構造上の大きな特質の 1 つは多孔体であるということである。すなわちその空隙は、大きいものは肉眼で認められるような広葉樹材の導管から、小さいものは細胞膜中の超顕微鏡的な微細なものにまでわたっている。このような空隙の存在が、木材の長所や短所を生起せしめる種々の物理的および機械的性質の場として働き、また木材の加工や処理の上に大きな関連をもつものであることは周知のことである。

このような木材の空隙は従来その大きさによつて 3 つに区分されているのであるが、そのうちの 1 つに孔紋膜の孔隙がある。木材を構成している諸細胞の細胞膜は一般に肥厚成長をなすものであるが、細胞相互間には養分や水分の通路が必要であるから第 2 次膜の成長に際して、小さい孔隙ないしは凹みを中葉（細胞間層＋第 1 次膜）（compound middle lamella）の両側に残して——すなわち第 2 次膜がその部分だけ肥厚しないで——この要求に応ずるものであつて、この細胞膜の中葉の部分を孔紋膜（pit membrane）と称している。孔紋膜は、その形は細胞の種類によつて異なるにせよ、相接する 2 つの細胞間の隔壁であると同時に通路である。このように孔紋膜は木材の細胞膜の一部ではあるが、木材の特徴的構造の 1 つとして木材の形態学または利用上従来から重要視されてきた。さて液体の通路という見地からみると、孔紋膜は生きている樹木中では水分輸送上の閥門となつていることはもちろん、木材加工の場合には木材乾燥における水分移動の、また木材中への液体（防腐剤、合成樹脂等）注入上における液体浸透の 1 つのあい路となつていることはいうまでもない。それゆえに木材の孔紋特に孔紋膜の微細構造に関する知見をうることは、木材中における液体の移動機構の解明上大きな意義をもつものと考えられる。

以上の理由から、過去においては光学顕微鏡的観察による研究が孔紋膜の構造の追究にむけられたのであるが、孔紋膜の構造の概形はとらえることはできた¹³⁵⁾としても、その微細構造は光学顕微鏡の分解能限度以下の大きさであるから、詳細については明らかではなかつた。それゆえに、もつぱら間接的方法による研究¹³⁶⁾¹³⁷⁾が行われた。そのうち最も新しい研究は STAMM¹³⁷⁾による報告であるが、かれの得た結果も材全体についてある仮定のもとに平均的な孔紋膜の孔隙（pore）の大きさを与えたにすぎなかつた。それゆえに個々の孔紋膜自体についてその微細構造を明らかにすることが必要になつたのであるが、電子顕微鏡的な観察方法の採用によつて著しい研究の進歩がもたらされた。孔紋膜は細胞膜の一部であるが、以上のような重要性にかんがみ章をわけて詳述することとした。

本章においては、まず第 2 節において針葉樹材の仮導管の、つぎに第 3 節において同じく針葉樹材の射出線細胞の、最後の第 4 節において広葉樹材の諸細胞の、それぞれ孔紋膜の構造特にそのマイクロフィブリルの排列状態およびすき間の性質について述べる。

第2節 針葉樹材の仮導管の孔紋膜の構造

1. ま え が き

針葉樹材においては、広葉樹材におけるようにその機能上組織の分化がなく、材の約90%を占める仮導管が樹体の強固性をつかさどるのみでなく水分等の通導性をもつかさどっている。そして生材の乾燥における水分移動の場合にも、また木材中への防腐剤または合成樹脂等の液体注入における浸透流入の場合にも、仮導管は最も重要な通路である。しかもこれらの相接する仮導管相互間の孔紋の孔紋膜は、液体移動の閥門として重要な役目を果たすものである。相接する仮導管相互間の孔紋は重孔紋対をなしているが、その大部分は柃目面の細胞膜に存在し、板目面の細胞膜では一般にわずかに年輪界の春・秋両材仮導管に存在するにすぎない。また柃目面の細胞膜においても、その大部分は春材仮導管に存在し、秋材仮導管ではその数は著しく少ない。

さて重孔紋の孔紋膜は、すでによく知られているように中央の肥厚部分すなわちトールス (torus, 円節) と、これを取り巻く部分すなわちマルゴ (margo, closing membrane) とに区分されるが、孔紋膜の中央に存在するトールスは通常円盤状でその直径は孔紋口の直径よりも大であるから、生きている樹木中では相接する2つの仮導管の間に液圧の差が生じた場合には圧力の高い方から円節を押しつけると自然に孔紋膜が引き伸ばされて液体の通過が容易となり圧力の差は緩和せられる。もし圧力の差が大に過ぎるとトールスは孔紋口に密着するまで押しつけられてそれを閉鎖し、液体の通過を阻止する仕かけになっていると解されている。仮導管が死亡すると孔紋膜が弛緩してトールスがどちらかの側に偏したままになるから、心材部においてはトールスは一般にこのような状態におかれているのを見る。また乾燥材においても孔紋膜はどちらかの側に偏し、重孔紋の輪帯表面に密着し、その孔紋口を閉鎖するのが普通である。

従来、木材防腐剤の注入機構の解明のための基礎的研究として、重孔紋の孔紋膜が注目されたのであるが、それは主として孔紋膜が相接する仮導管相互間のいずれか一方の仮導管の重孔紋の輪帯表面に密着して孔紋口を閉鎖する度合、すなわち重孔紋の孔紋口の閉鎖率のみが強調され、孔紋膜自体の構造についてはあまり研究されなかつた。Russov¹³⁸⁾ は孔紋膜上に、その周縁部より起り円節にむかつて隆起し放射状をなしている無数の褶を Kiefer および Lärche の両材に発見し、WRIGHT¹³⁹⁾ はこれを spider-like torus とよびルテニウムレッド、ヘマトキシリンあるいはエオシン等の染色剤にて濃厚に染色されているが、兼次¹⁴⁰⁾ もトドマツ材にこれを観察したとしており、これらの孔紋膜の修飾的変形構造は木材識別の拠点としてとりあげられていた。筆者ら¹⁴¹⁾ は電子顕微鏡的研究の予備的観察として、位相差顕微鏡によつてアカマツ、ヒノキおよびスギの各材についてその孔紋膜の構造を観察し、いずれの材にも同様な放射状の構造を確認し、このような修飾的構造は樹種の特徴とはならないことを指摘した。BAILEY¹⁴²⁾ は同じく光学顕微鏡的研究によつて孔紋膜に数多くの放射状に長く伸長したすき間の存在することを推定し、*Larix* 材についてそのすき間の幅は $0.5 \sim 3.0 \mu$ であるとした。しかしながら、以上のような光学顕微鏡的研究によつては、その機械的性能上の理由から孔紋膜の構造に関する詳細な知見は得られず、ましてマルゴに存在するすき間の大きさについても推定の域を出ないものであつた。そして結局、KERR と BAILEY¹⁴³⁾ は細胞膜の形成の過程から推定して、孔紋膜は細胞分裂後その細胞相互間に形成される細胞間層とその両側に最初に形成される2つの第1次膜とを合して、しかもその中央の部分が肥厚した模式図 (Fig. 4) を提案したにすぎなかつた。

KERR と BAILEY¹⁴²⁾ の研究以後 40 年を経て、電子顕微鏡的な観察手段が木材の微細構造の研究に応用されるに至り、仮導管の個々の重孔紋の孔紋膜の構造について研究が行われてきた。LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ は Kiefer 材について、主としてレプリカ試料を用い孔紋膜の構造を研究しいわゆる Fäden 構造説を提案した。Fäden 構造とはトールスを中心としてこれから径約 400~600 Å の直径をもつ Fäden, すなわちマイクロフィブリルの集束したものが孔紋環 (pit annulus) に走っており、これによってトールスをつり上げ支持しており、このいわゆる Fäden の間には細胞間層は存在せずすき間であり、したがって生材中では、このいわゆる Fäden のすき間を通って液体の流動は容易に行われるであろうというのである。筆者ら¹⁴¹⁾¹⁴⁵⁾ は LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ の研究とは全く別個に、最初アカマツおよびヒノキ両材のアテ材について、後にはヒノキおよびエゾマツ材について、その仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造をレプリカ試料について研究し、かれら¹⁴⁴⁾ とほぼ一致した結果を得た。その後 FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ は、LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者ら¹⁴¹⁾¹⁴⁵⁾ の得た結果は樹木の分類学、生理学および発生学、さらに木材中への液体の注入性の見地からみて矛盾があり、しかもこのような誤った結果を得た原因は試料作製法の欠陥に基くものであると批判し、Fichte および Tanne の両材 (幼令樹材) の超薄切片試料について研究しいわゆる Ultrafilter 構造説を提案した。Ultrafilter 構造とは、マルゴの領域にはまず非セルローズ物質からなる細胞間層が存在し、その上に無数のマイクロフィブリルが編まれて形成されたいわゆる網目状構造が存在し、そのうちの一部はこれらのマイクロフィブリルが集束して太くなり、これがトールスから放射状に孔紋環に連結し、あたかもトールスをつり上げるとき構造をもっているのであるが、マルゴの領域は細胞間層および密に編まれたマイクロフィブリルからなっているから LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者ら¹⁴¹⁾¹⁴⁵⁾ の報じたような大きさのすき間は存在しないというのである。ついで EICKE¹⁴⁷⁾ はレプリカ試料について追試し、LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ のいわゆる Fäden 構造説を支持した。さらに LIESE と JOHANN¹⁴⁸⁾ は、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の批判に反バクすべく他の物理化学的方法によつて孔紋膜のマルゴにおけるすき間の存在および大きさを調べ、このような方法によつて得られた結果は自分たちによる電子顕微鏡的な観察結果とほぼ一致するとし、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ による結果は承認できないとした。

以上のように孔紋膜の微細構造特にマルゴの構造については論議のわかれるところとなつた。筆者らは、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の報告において、筆者ら¹⁴¹⁾¹⁴⁵⁾ の研究に対する批判の論点の中心が電子顕微鏡の検鏡試料であるレプリカ作製の不手ぎわによるものであるという点に対してなつてできなかったということ、さらに FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の研究が超薄切片写真のみによる論議で

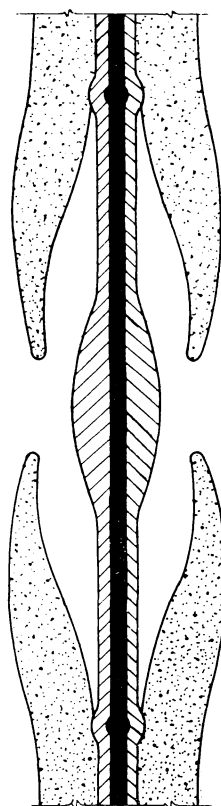


Fig. 4 針葉樹材仮導管の重孔紋対の模式図; 黒帯線は細胞間層, 斜線は第1次膜を示す (KERR and BAILEY¹⁴³⁾). Diagrammatic representation illustrating the type of a bordered pit pair of softwood tracheids in sectional view (the intercellular substance is indicated by solid black, the primary wall by cross-hatching.) (KERR and BAILEY¹⁴³⁾)

あるのに反し, LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾, 筆者ら^{141) 145)} および EICKE¹⁴⁷⁾ の研究が主としてレブリカ写真のみによっているから, これら相互間の論議は水かけ論になるということの 2 つの点から, レブリカおよび超薄切片両法を併用して孔紋膜の構造に関する 相異なる 見解の再検討を行い, その結果を発表した^{149) 150)}。

本節においては, 針葉樹材の仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造について, すでに発表した報告およびその後得られた成績をとりまとめて記述する。

2. 試料の作製

1) 供 試 材

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) — (I) 宮崎県産 樹令 45 年

スギ (") — (II) 当場本場苗圃産 樹令 5 年

ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* S. et Z.) 長野県産 樹令 250 年

アカマツ (*Pinus densiflora* S. et Z.) 鹿児島県産 樹令 100 年

トドマツ (*Abies Mayriana* MIYABE et KUDO) 北海道産 樹令 84 年

エゾマツ (*Picea jezoensis* CARR.) — (I) 北海道産 樹令 93 年

エゾマツ (") — (II) 北海道産 樹令 35 年

以上の各材のうち, スギ—(I), ヒノキ, アカマツ, トドマツおよびエゾマツ—(I) の各材は, 当場木材部木材材料科強度研究室において強度試験用材として採取された正常材であつて, これらの材の第 20 年輪以上の部分から試片を選んだ。スギ—(II) 材は同じく当場保護部樹病科樹病研究室から供与された材で, 幼令樹材の観察のために用いた。さらにエゾマツ—(II) 材は, 北海道野幌試験地から供与された材で生材の観察のために選んだものである。

スギ—(I), ヒノキ, アカマツ, トドマツおよびエゾマツ—(I) の各材についてはその気乾材から, エゾマツ—(II) 材についてはその生材から, それぞれほぼ $1 \times 1 \times 1.5 \text{ cm}$ の試片を作製し, さらにスギ—(II) 材についてはその気乾材をそのままて試片として用いた。

レブリカ作製のためには木材の次のような表面を試片として用いた。

i) 人工的に破壊して得た気乾材 (または生材) の裂開面 (柾目および板目面) : 木材の縦方向の裂開は仮導管相互間の細胞間層に近い部分において生起し, しかも重孔紋対を 2 分断することが知られており, このような表面では孔紋膜が輪帯表面に密着している場合においてもまたそうでない場合においても, 孔紋膜の表面のレブリカをうるのに適切であると推定して選んだ。

ii) 生材 (辺材) をアセトンによつて水と置換せしめて気乾材とし, これを人工的に破壊して得た裂開面 (柾目面) : これは, 孔紋膜の位置による変化, すなわち孔紋膜が孔紋室の中央に位置したままの状態における, 孔紋膜の構造を観察するために選んだ。

iii) 気乾材をパラフィンで包埋し, ミクロトームで切斷脱パラフィンして作製した厚さ約 40μ の切片の表面 (柾目および板目面) : パラフィン包埋は第 1 章第 2 節 2 において述べたものと同じである。人工的に生起せしめた裂開面では, 破壊によつて孔紋膜が変形をうけ素材 (未処理材) 本来の構造を示さないかもしれぬと考えられるので, このような変形の原因を除くためにこのような試片を選んだ。

iv) 気乾材を人工的に破壊して得た裂開面を脱リグニン処理¹⁵⁴⁾ した表面 (柾目面) : トールス表面の介在物またはミクロフィブリルの除去によつてその内部構造を明らかにするために用いた (この化学処

理は東京大学農学部木材化学教室において実施していただいた)。

超薄切片作製のためにはスギ(I)およびヒノキ両材を用いたが、小ブロック試片の作製方法は第1章第2節2において述べたものと全く同じである。

2) 検鏡用試料の作製

レプリカ法および超薄切片法によつたのであるが、試料の作製方法は第1章第2節2において述べたものと全く同じである。

3) 検 鏡

第1章第2節2において述べたものと全く同じである。

3. トールス (円節, torus) の構造^{141) 145) 149) 150)}

過去の光学顕微鏡的研究においては、トールス自体の構造に関する研究はきわめて少なく、ルテニウムレッドによつて美しく染色されるからペクチン質を含むものとされているほかは、すでに Fig. 4 の模式図に示すようにトールスは1つの細胞間層と2つの第1次膜とからなり、このうち第1次膜の部分がマルゴの部分に比較して特別に肥厚し、これを木口または板目面でみると凸レンズ状を呈し柎目面ではほぼ円形を示すことが知られているにすぎなかつた。

電子顕微鏡による研究は最初 LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ および筆者らによつて全く別個に行われたのであるが、LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ は気乾材の重孔紋の輪帯表面に密着した孔紋膜の表面をレプリカ試料について観察し、トールスの中央の部分に重孔紋の卵形の孔紋口の刻印が見られるから、トールスは薄い円板であろうと推定した (LIESE, FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾: Bild, 5, 6)。

筆者らは最初の研究においては、アカマツおよびヒノキのアテ材やヒノキ、エゾマツおよびアカマツ各材の気乾材の裂開柎目面のレプリカ試料について観察を行つた。Phot. 84 および 85 はそれぞれエゾマツおよびアカマツ材の気乾材のレプリカ写真であるが、いずれも春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の表面の構造を示すものと判定される。その理由は、試料作製の項においてもふれたように針葉樹材を乾燥すると、仮導管の重孔紋の孔紋膜は一般にどちらかの側にかたより、一方の重孔紋の輪帯表面に密着することがよく知られているが、このような気乾材の裂開柎目面では仮導管は一般に細胞間層またはその近くの膜層の部分で相互の分離が生起することが予想されるから、このような裂開面では孔紋膜は重孔紋の輪帯表面に密着した状態で、そのどちらかの側の表面をむき出していると考えられる。そしてこのような裂開柎目面のレプリカをうれば確実になら変形をうけていない孔紋膜の表面の構造をとらえることができるはずであり、しかも周辺の構造たとえば孔紋膜が密着している部分は、重孔紋の輪帯表面の構造を示すことは明らかであるから、これらの写真は孔紋膜の表面の構造を示すものと見なしてよい。写真によるとトールスは楕円形を示しているが、いずれもその中央の部分に卵形 (Phot. 84) またはほぼ円形 (Phot. 85) のようなおちこみ線がみられ、特に Phot. 85 では顕著である。これは LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ が Kiefer 材の仮導管について示したと全く同じように孔紋膜が密着閉鎖している側の重孔紋の孔紋口の刻印であつて、レプリカ作製の際の圧着によつて円形の重孔紋の孔紋口がトールスに刻印されたものと考えられる。トールスの表面の構造をみると、一般に等方質な非セルローズ物質でおおわれているが、Phot. 85 をみるとトールスの周縁部分ではかなり平行度のよいマイクロフィブリルが楕円形のトールスの周縁に沿つて平行排列し、トールスの中央の部分では仮導管の長軸方向に対して約 70~80° の傾角をもつた平行度のよいマイクロフィブリルの排列状態が認められる。すなわち、トールスの表面においては比較的平行度

のよいマイクロフィブリルがその中央部では仮導管の長軸方向に対してある傾角をもつて、またその周縁部では縁に沿ってそれぞれ平行排列しており、これらのマイクロフィブリルは非セルローズ物質と思われる介在物によつて密に充てんされているものと考えられる。しかしながら、このような素材（未処理材）のレプリカ写真のみからではトーラスの内部構造を明らかにすることはできなかった。

その後 LIESE と FAHNENBROCK¹⁵⁵⁾ は同じくレプリカ試料について Fichte および Kiefer 両材について研究し、筆者らと全く同様な結果を確認している (LIESE, FAHNENBROCK¹⁵⁵⁾ Fig. 1, 5)。ついで FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ は Fichte および Tanne 両材の超薄切片試料について研究した結果、トーラスは光学顕微鏡的な研究結果から推定された KERR と BAILEY¹⁴³⁾ の模式図のように、1つの細胞間層と2つの第1次膜とからなることを確認したとし、さらに第1次膜の上には第2次的肥厚ともいふべき構造を認めたというのである (FREY-WYSSLING, BOSSHARD¹⁴⁶⁾: Bild. 2 (c), 3)。すなわち、これは第1次膜の上をおおつて平行度のよいマイクロフィブリルがトーラスの周縁に沿つて円状の排列をしていることを認めたということであり、これは筆者らや LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ がレプリカ試料について得た結果を超薄切片試料について確認したものといえる。しかしながら、かれらは第1次膜の構造については、形成初期の細胞について単にいわゆる網目状構造をもつとしたにすぎず、成長を完成した仮導管のトーラスの第1次膜の構造についてはなんらふれていなかった。

次にはトーラスの内部構造特にそのマイクロフィブリルの排列状態を明らかにするために、化学処理材のレプリカ試料について研究した結果を記述する。Phot. 86, 87 および 88 は、いずれもアカマツ材の裂開証目面を脱リグニン処理したその表面のレプリカ写真であるが、孔紋膜のトーラスの構造を示すものである。Phot. 86 は2時間、Phot. 87 は4時間、Phot. 88 は6時間、それぞれ脱リグニン処理を施したものである。Phot. 85 にみるように、素材（未処理材）においてはトーラス表面にはかすかにマイクロフィブリル構造を認めうるにすぎず、マイクロフィブリルが介在物によつて密に充てんされているものと推定されたのであるが、Phot. 86 ではトーラス表面のこのような介在充てん物が若干除去されることによつて、このようなマイクロフィブリル構造をさらに顕著に示すことができた。すなわち、トーラスの表面には比較的平行度のよいマイクロフィブリルの排列状態が認められるのであるが、このようなマイクロフィブリルはトーラスの周縁部ではトーラスの縁に沿つて排列しており、中央部では仮導管の長軸方向に対してある緩な傾角をもつて排列している。さらに Phot. 87 および 88 では化学処理時間の増加によつてやや強度の処理を受けたものと推定されるが、トーラスの周縁部には Phot. 86 にみるような平行度のよい円状のマイクロフィブリルの排列状態 (S) が Phot. 86 よりも一層顕著に認められる。ところがトーラスの中央部では網目状のマイクロフィブリルの排列構造 (P) が認められる。これは化学処理によつて表面に存在する平行排列のマイクロフィブリルが除去され、その下側すなわち細胞間層に近い部分の膜層の構造が現われたものと判断される。すなわち Phot. 87 および 88 にみるように、トーラスは比較的平行度のよいマイクロフィブリル排列をもっている膜層の下に、網目状の排列をもつたマイクロフィブリル構造が存在するということができる。そして、このようなマイクロフィブリル排列をもつ膜層は第1次膜と判定されるものであり、このようないわゆる網目状構造はこれをおおつて存在する平行構造とは明らかに区別されるものである。また Phot. 89 は、スギ材の裂開証目面を4時間脱リグニン処理して得た表面のレプリカ写真であるが、トーラスの構造を示すものである。この場合にはトーラスの表面をおおうマイクロフィブリルの平行構造は全く除去され、いわゆる網目状構造のみが認められる。

以上から、トールスはまず1つの細胞間層の両側に第1次膜が形成され、その第1次膜をおおつて第2次の肥厚が行われたものと考えられる。第1次膜は重孔紋部以外の仮導管の細胞膜の第1次膜の構造と類似してマイクロフィブリルが不規則に編みあげられたいわゆる網目状構造をもっており、第2次的な肥厚膜層は重孔紋部以外の仮導管の細胞膜についていえば第2次膜外層に相当すると推定され、比較的平行度のよいマイクロフィブリルがトールスの周縁部では縁に沿つて、また中央部ではある一定の方向に平行排列しているといえる。そしてこれらの第1次膜および第2次の肥厚膜層を構成するマイクロフィブリルは介在物によつて密に膠着充てんされているものといえる。

その後 Bosshard¹⁵²⁾ は筆者らの研究とは別個に、さらに Kiefer 材の仮導管を化学的処理によつて分離し、ミキサーによつて解体した細薄片を試料としてトールスの構造を研究した結果、トールスは細胞間層、第1次膜および第2次的な肥厚膜層からなり、第1次膜ではマイクロフィブリルは網目状排列をもっており、第2次の肥厚膜層ではマイクロフィブリルは平行排列をもちその周縁において円状排列をもっている。そしてこのようなトールスのマイクロフィブリルの排列状態は化学的に細胞膜を解体した試料についてのみ認められるから、トールス中ではこれらのマイクロフィブリルは介在物によつて強度に包埋されているものであろうとしている (Bosshard¹⁵²⁾: Bild. 19, 21)。このように筆者らのレプリカ試料による研究結果は、Bosshard¹⁵²⁾ の解体試料による研究によつても確認された。

以上述べたうち、トールスの縁端部の構造に関しては記述が不充分であるが、これに関しては「4. マルゴの構造」の項において関連せしめて記述することとし、ここでは省略した。

以上の観察および考察の結果、トールスは2つの第1次膜およびその第1次膜の表面をおおつて形成された第2次的肥厚膜層とからなり、第1次膜ではマイクロフィブリルはいわゆる網目状構造を、第2次的肥厚膜層ではいわゆる平行構造(中央部では仮導管の長軸方向に緩な傾角をもつ一定方向、周縁部では円状の排列)をもっており、これらのマイクロフィブリルは介在物によつて強度に包埋されているということが明らかになった。

これらの重孔紋の孔紋膜のトールスは、木材の乾燥によつて孔紋膜がいずれか一方の側の重孔紋の輪帯表面に密着した場合、完全にその孔紋口を閉鎖するものであることは明らかである (Phot. 84~88) から、かりにこのような閉鎖が行われた場合には重孔紋を通る液体の移動は著しい障害をうけるものと推定される。

4. マルゴ (margo, closing membrane) の構造^{141) 145) 149) 150)}

仮導管の重孔紋の孔紋膜はトールスとこれを取り巻く部分マルゴとからなり、この両者は別個に独立して存在する構造ではなく、密接な関連をもつものであるが、ここではマルゴの構造について述べる。すでに「まえがき」においても述べたように、液体の移動という見地からすると、すき間が存在するという点においてこのマルゴの構造はきわめて重要なものである。そして電子顕微鏡的な研究においても、今まで最もよく研究の行われた問題の1つであり、かつ今なお論争のつづけられているところのものである。

本項においては、マルゴの構造に関する諸研究者の研究結果をその発展の順を追つて記述し、その過程のなかにおいて、筆者らの研究結果およびこの問題に対する見解を述べることにする。

1) Fäden 構造説および Ultrafilter 構造説

筆者らは最初アカマツ、ヒノキおよびエゾマツの各気乾材の裂開端面のレプリカ試料について研究した。Phot. 90 および 91 はアカマツおよびエゾマツ各材のレプリカ写真であるが、Phot. 84 および 85

と同じく重孔紋の輪帯表面に密着し、トールスが孔紋口を閉鎖した状態にある春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すものである。ここではトールスを中心として、そのトールスから放射状の微小繊維が派生し、これが重孔紋の孔紋環に至りあたかもトールスをつり上げるような状態をたもっており、この微小繊維はさらに極微小繊維の交さによつて編まれている (Phot. 91 および 92)。後者の極微小繊維の太さはほぼマイクロフィブリル 1 本の太さに相当するものとみられ、前者の微小繊維はこのようなマイクロフィブリルが数本集束した太さと推定される (ここでは以下、前者を集束マイクロフィブリル (aggregated microfibril), 後者を非集束マイクロフィブリル (unaggregated microfibril) とよぶこととする)。すなわちマルゴの領域においては、このような集束マイクロフィブリルが放射状にトールスと重孔紋の孔紋環とを連結し、さらに集束マイクロフィブリルは不規則に編まれた非集束マイクロフィブリルによつて埋められているといふことができる。次に Phot. 93 および 94 はスギ材の裂開断面を脱リグニン処理した表面のレプリカ写真であるが、同じく孔紋膜のトールスおよびマルゴの構造を示すものである。トールスの構造についてはすでに述べたのであるが、Phot. 93 および 94 においてはトールスの平行なマイクロフィブリル排列をもつた第 2 次的肥厚膜層は脱リグニン処理によつて全く除去され、第 1 次膜のいわゆる網目状構造が認められる。そして、上述のトールスをつり上げているようにトールスから放射状に派生している集束マイクロフィブリルは、トールスの第 1 次膜を構成している個々のマイクロフィブリルと連結していることがわかる。さらに注目すべきことは、このような集束マイクロフィブリルはトールスの第 1 次膜に源を発するマイクロフィブリルが数本集束して構成されているということが認められることである。すなわち、この集束マイクロフィブリルはトールスの第 1 次膜を構成する網目状のマイクロフィブリルから派生し、これらのマイクロフィブリルが数本集束した直径約 $600 \sim 1,000 \text{ \AA}$ のものと推定される。Phot. 94 ではトールスおよびマルゴの集束マイクロフィブリルの実体 (物そのもの) がレプリカ作製時に付着してきたもの——いわゆるブソイドレプリカ——をも同時に示すものであつて、明らかに $1,000 \text{ \AA}$ 前後の直径をもつものとみられ、×印の部位ではトールスのマイクロフィブリルが集束して集束マイクロフィブリルに至るのを知ることができる。また Phot. 92 に示されるように、非集束マイクロフィブリルはトールスの第 1 次膜から派生したものもあるけれども、他のものはトールスとは無関係に存在していて、重孔紋の孔紋環の部分において重孔紋以外の部分の細胞膜の第 1 次膜のマイクロフィブリルと連結していると推定される。すなわち細胞分裂直後の細胞膜形成の初期における状態は別として、少なくとも仮導管の細胞膜の生長が完成した状態においては、マルゴには重孔紋以外の部分の細胞膜やトールスの第 1 次膜にみるようなマイクロフィブリルの密集した網目状構造は存在しないといふことができる。

ところが次には重要なことを述べねばならない。それは、すなわちマルゴにおけるすき間の存在についてである。Phot. 91 および 92 に示されるように、マルゴの集束マイクロフィブリルや非集束マイクロフィブリルのすき間からこれらのマイクロフィブリルを通して重孔紋の輪帯表面の構造が認められるということである。重孔紋の輪帯表面の構造については、すでに述べたようにエゾマツ材では円状のマイクロフィブリル構造 (Phot. 15) の、またアカマツ材では円状のマイクロフィブリル構造をおおつてイボ状構造 (Phot. 44) のそれぞれ存在することが明らかであるから、このようなマルゴの集束マイクロフィブリルや非集束マイクロフィブリルの間から輪帯表面の構造がとらえられたものであるということは明らかである。すなわち、マルゴには電子顕微鏡によつて明りように認識できるすき間が存在するといふことができる。このような複雑な状態でもつて存在し、しかもレプリカ写真であるこれらの写真からでは、そのすき間の大きさ

を数値的に正しく示すことは困難であるけれども、少なくとも従来考えられていたように孔紋膜の孔隙 (pore) というよりはむしろすき間という表現の方が適切であろう。ところでこのマルゴの集束、非集束両マイクロフィブリルのすき間から重孔紋の輪帯表面に存在するイボ状突起が認められるから、少なくとも部位によっては、 $0.1\sim 0.3\mu$ 程度の粒子であれば容易に通過しうるすき間がマルゴには存在しているといえることができるであろう。

以上の結果から、孔紋膜のマルゴには予想に反して、KERR と BAILEY¹⁴³⁾ がその模式図 (Fig. 4) に示したような1つの細胞間層と2つの第1次膜とからなるというような構造ではなくて、細胞間層に相当する非セルローズ物質によつて構成されているような膜層は全く存在せず、また第1次膜と考えられる集束、非集束両マイクロフィブリルの構造もトールスや重孔紋以外の部分の細胞膜の第1次膜の構造のように密集したマイクロフィブリルの排列構造をもたず、またマイクロフィブリルを充てんする介在物のような物質は全く存在しないことが明らかになった。

LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ はほとんど同時に、筆者らとは別個に Kiefer 材の仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造をレプリカ試料について研究し、筆者らとはほぼ同様な見解を発表した。すなわち「トールスの周縁はふさ状になっており漸次重孔紋の孔紋環に近づくにしたがつて糸状となつている。これらの糸 (Fäden) によつてトールスはつり上げ保持されていることとなる。その糸の直径は $0.04\sim 0.06\mu$ 、糸の数はトールス1個当たり平均200本を数え、これらの Fäden は交差している。またこの場合、糸と糸とのすき間がいわゆる孔紋膜の孔隙 (pit membrane pore) であつて、その大きさはトールスの周縁部から孔紋環に近づくにしたがつて大となるから、孔紋膜の孔隙を通る液体の流動抵抗は同じであると考えられ、孔紋膜が重孔紋の2つの輪帯表面のいずれの側にもかたよらず孔紋室の中央部に位置していると考えられる生材中では液体の移動はこれらの糸 (Fäden) の間を通つて支障なく行われよう。」とし、さらに若干の超薄切片写真によつてこの結果を確認したとしている。そして重孔紋の孔紋膜構造の模式図を提案し、このような構造を“Fäden 構造”と名づけた (LIESE, FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾: Bild. 5, 6)。

ところが、ついで FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁵⁾ は、LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者らのこのような孔紋膜の構造特にマルゴの構造に関する見解を批判し反論を加えた。すなわち批判の理由として、まず第1には LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ の報告中の写真から測定するとトールスをつり上げているとみられるマルゴの糸 (Fäden) と糸との間のすき間の大きさはほぼ $1\times 4\mu$ となり、これらのすき間は拡大した光学顕微鏡的な大きさをもっているから、もしこのようなすき間が存在しているとすると光学顕微鏡下においてもとらえうるはずであるから、このような点から考えると矛盾している。第2には木材の分類学上の原則に反するという点である。すなわち導管を有する広葉樹材と導管をもたない針葉樹材とでは著しくその構造が異なる。広葉樹材ではその両端が開いている導管の穿孔によつて通導が行われるが、針葉樹材では仮導管が通導組織をも兼ねており、これらの仮導管は孔紋膜によつて互に閉鎖分離されると見るべきである。さて針葉樹材仮導管の重孔紋の孔紋膜のマルゴに上述のような大きなすき間が存在するものとする、これらの仮導管はもはや広葉樹材の導管となんら相違がないということになりこのようなことはあり得ない。第3には発生学的な見地からみると KERR と BAILEY¹⁴³⁾ による模式図に示されるように孔紋膜のマルゴは1つの細胞間層と2つの第1次膜とからなつていないはずであり、もしこのマルゴの領域内の細胞膜層の一部が消失したとすると第2に述べたようにこのような針葉樹材の仮導管を導管と見なさなければならないから矛盾をきたすこととなる。第4には FRENZEL¹³⁶⁾ の研究によると金の粒子

は孔紋膜を透過したが、光学顕微鏡的な大きさをもつ墨の粒子は透過しなかつたとされているから、マルゴにはこのような大きなすき間は存在するとは考えられないというのである。そして LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者らによる研究の結果がこのような矛盾をもたらした原因は、これらの研究に用いられた検鏡試料がレプリカであることによるものであろうとし、かれらは Fichte および Tanne の 1, 2 年生材について超薄切片試料について研究した。その結果、まず木口の切片写真についてみると孔紋膜のマルゴには LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者らが指摘したようなすき間は認められないし、発生学的な見地からの推定のようにマルゴの領域の細胞膜は 1 つの細胞間層と 2 つの第 1 次膜とからなっており、このうち第 1 次膜は典型的なマイクロフィブリル排列をもついわゆる網目状構造を示す (FREY-WYSSLING, BOSSHARD¹⁴⁶⁾: Bild. 2)。つぎに柾目の切片写真についてみると LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ の述べたようなトールスをつり上げている Fäden (かれらはこれを “Haltefäden” とよんでいる。これは筆者らのいう “集束マイクロフィブリル” に相当するものである) は存在するが、このような Haltefäden によつて囲まれた大きなすき間はマイクロフィブリル (これは筆者らのいう “非集束マイクロフィブリル” に相当する) によつて充てんされていることが明らかである (FREY-WYSSLING, BOSSHARD¹⁴⁶⁾: Bild. 4)。そしてトールスを保持している Haltefäden はマイクロフィブリルの横方向の結合によつて形成されたものである。また細胞膜形成の初期における孔紋膜についてみるとトールスの肥厚以前にすでに第 1 次膜が形成されていることは明らかであつて、マルゴはマイクロフィブリルのいわゆる網目状構造によつて充てんされている。そしてここに用いた試料は細胞膜の形成過程の研究を対象としたものを除いては細胞膜の成長が完成し水分通導を 1 年以上行つた材から採取したものであるから、生熟材の構造と見なしてさしつかえない。すなわち LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者らによつて報告されたように、マルゴにはこのような大きさのすき間は存在しないで密集したマイクロフィブリルによつて充てんされた構造をもっており、液体の通導に対しては、Ultrafilter としてのみ働くというのである。それゆえに、生材 (辺材) の場合のように孔紋膜が重孔紋のどちらかの側の輪帯表面にも密着しないで、孔紋室の中央に位置しているとしても、孔紋膜を通過する液体の移動速度は著しく制限され通過する粒子の大きさも著しく制限されるであろう。そして LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ や筆者らがマルゴの構造に関していわゆる Fäden 構造の見解をとつたという誤謬の原因は電子顕微鏡による検鏡試料に存するのであろう。いいかえれば、レプリカ試料は忠実度の点において満足すべきものでないから、このようなレプリカ写真においてはマルゴの Haltefäden のみが主としてとらえられ、この間を埋めるマイクロフィブリル構造はほとんどとらえ得なかつたことによるものであろうと解釈した。

このようにマルゴの構造に関しては FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の報告によつて問題化するにいたつた。EICKE¹⁴⁷⁾ はレプリカ法によつて Kiefer 材の孔紋膜をプソイドレプリカ試料として立体写真について研究し、マルゴはその細胞膜の形成初期には重孔紋以外の仮導管の細胞膜のように細胞間層の上に網目状のマイクロフィブリル排列をもっている第 1 次膜が形成されるのであるが、その後細胞間層は酵素作用によつて消失し、マイクロフィブリル構造も疎となるものであるとし、LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ のいわゆる Fäden 構造説を支持するとした (EICKE¹⁴⁷⁾: Fig. 1~6)。

その後 LIESE と JOHANN¹⁴⁸⁾ は、このようなマルゴの構造特にすき間の大きさに関する FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の批判に対して、まず FREY-WYSSLING らが LIESE らの報告した写真においてそのマルゴのすき間の大きさを約 $1 \times 4 \mu$ であるとしているのは曲解であり、トールスをつり上げている Fäden

(Haltefäden, 集束ミクロフィブリル)の間にはこれと交さして排列しているミクロフィブリル(非集束ミクロフィブリル)が存在しており,これらのミクロフィブリルの間は $0.13\sim 0.20\mu$ 程度のすき間であるとし, Kiefer, Fichte, Tanne, Lärche および Douglasie の各生材の辺材について木口面から既知の直径をもつ粒子を滲透させ孔紋膜を通過したと考えられる粒子の直径を電子顕微鏡下において測定した。その結果, 直径約 0.24μ 程度の粒子であればなんらの困難なしにマルゴを通過することが認められたのでマルゴには約 0.24μ までの直径をもつたすき間が存在していると考えられ, しかもこのような測定値はレプリカ写真から得られた結果とほぼ一致しているから, マルゴのすき間の大きさに関する FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾の見解は承認することができないとした。

以上述べたようにマルゴの構造に関しては論議のわかれるところとなつたのであるが, これらの論議中の問題点を解説要約すると次のようになる。すなわちまず第1の筆者ら, LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾, EICKE¹⁴⁷⁾および LIESE と JOHANN¹⁴⁸⁾の見解の重点は, マルゴには等質な非セルローズ物質からなると目される細胞間層は存在しないでミクロフィブリル構造のみからなつてい。そしてこれらのミクロフィブリルはトールスに起源し, 重孔紋の孔紋環に至る放射状の集束ミクロフィブリル(直径 $600\sim 1,000\text{Å}$)とこれと交さして編まれた非集束ミクロフィブリルとから構成され, これらのミクロフィブリルの間には $2,000\text{Å}$ 程度の粒子を透過せしめうるすき間が存在するというのであるのに対し, 第2の FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾の見解は, マルゴは細胞間層と2つの第1次膜とからなつており, トールスをつり上げるように存在する集束ミクロフィブリルのすき間は非集束ミクロフィブリルによつて密に充てん閉鎖されており, 電子顕微鏡的に認識される程度のすき間は存在しないというのである(しかしながら, かれらの得ている写真からでは細胞間層の存在は確認することはできない)。

2) Fäden 構造および Ultrafilter 構造両説の検討

(1) 検討—I

筆者らは, 前述の筆者らを含めての諸研究者のマルゴの構造に関する研究結果を考察した結果, 筆者らの見解に対する FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾の批判の論点である試料作製法の不備, すなわちレプリカ法によつてはマルゴの微細構造は明らかにできないという点に, 疑問をもつた。さらにいいかえれば, このことはレプリカの忠実度の問題に関連するものである。FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾のマルゴの超薄切片写真(FREY-WYSSLING, BOSSHARD¹⁴⁶⁾: Bild. 4)からみて, マルゴの集束ミクロフィブリルの間を充てんして存在する非集束ミクロフィブリルはミクロフィブリルに相当する太さであるから, レプリカの忠実度からしても, もしかかりにこのような密集したミクロフィブリル構造が存在しているとすれば, 必ずこのような構造はレプリカ写真によつてもとらえうるであろうということは従来の研究結果からしても疑いのないところである。しかもここに重要と考えられる点は, Phot. 91 および 92 に示されるようにマルゴの集束, 非集束両ミクロフィブリルのすき間を通して向い側の重孔紋の輪帯表面の構造が認められるということであつて, このことはレプリカの忠実度のすぐれていることを示すとともにマルゴには少なくとも輪帯表面の構造がみられうる程度のすき間が存在しているということとなり, FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾による批判の論点であるレプリカ法の不備が集束ミクロフィブリル間に存在する非集束ミクロフィブリルの構造を充分にはとらえることができなかったのであるという指摘には承服できない。しかしながらかれらは, 超薄切片写真によつてマルゴは集束, 非集束両ミクロフィブリルによつて密に充てんされていることを示しているのであるから, このようなマルゴの構造に関する見解の差

はレプリカ試料の忠実度の問題に存するのではなくてレプリカ試料の作製以前の問題、すなわちレプリカを作製するための供試材においてすでになんらかの変形をうけていたものと考えざるを得ない。いいかえればかれらの唱えるようないわゆる Ultrafilter 構造が本来固有の構造であるとしても、このような固有構造がレプリカを作製するための供試材の表面においてすでに変化をうけており、レプリカはこのような変化をうけたマルゴの構造をとらえたものでないかということである。

それゆえに、このようなレプリカをうるための供試材の表面作製による変化を検討するために、次の 3 つの条件について検討した。

(a) レプリカ用の供試材表面の作製による変化、すなわち材の裂開面をうるために孔紋膜の構造が変形したのではないか：今まで述べてきた観察においては、孔紋膜の表面のレプリカをうるためには裂開した柱目面を用いることが好適であるからこのような裂開面を作製することにつとめてきたのであるが、このような供試材の裂開作用によつて孔紋膜特にマルゴの構造に変化をうけたのでないかと考えられるので、次のような方法によつて検討した。気乾材をパラフィンで包埋し、これからミクローム切片を作製、脱パラフィンし、この表面のレプリカをとり孔紋膜の構造を観察した。このような方法によるときは、孔紋膜に直接ミクロームの刃先があたらないかぎり、比較的孔紋膜自体の構造は変形しないであろうと推定されるからである。Phot. 95 および 96 はアカマツおよびエゾマツ両材のこのような切片のレプリカ写真であるが、春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すものである。Phot. 95 および 96 に示されるように、マルゴはトールスから放射状に派生している集束マイクロフィブリルと、これに交差している非集束マイクロフィブリルとからなっているが、これらのマイクロフィブリルのすき間から重孔紋の輪帯表面のイボ状構造や円状のマイクロフィブリル構造が認められるから、このようなマルゴのすき間の存在に関しては Phot. 91 および 92 と比較してなんらの差異が認められない。すなわちマルゴの構造に関しては、パラフィン包埋供試材からミクローム切片を作製する場合の切断の際、孔紋膜が変形をうけなかつたものと仮定すると、前述のようなすき間をもつマルゴの構造は供試材の裂開という作用によつて生じたものとは考えられない。それゆえに、レプリカ用の供試材表面の作製によつて孔紋膜の構造が変形するというようなことは否定してもよいのではないかと考えられる。

(b) 供試材の乾燥状態による変化、すなわち生材が乾燥することによつて孔紋膜の構造が変形したのではないかということが考えられる：これを確かめるために、生材のままの供試材の裂開面から水中でレプリカを作製して孔紋膜の構造を観察した。Phot. 97 はエゾマツのこのような生材の裂開柱目面のレプリカ写真であるが、春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すものである。この写真に示されるようにマルゴにはいぜんとして前に述べたようなすき間が存在し、気乾材の場合のマルゴの構造と比較してなんらの変化が認められない。それゆえに気乾材について得られたマルゴのすき間をもつ構造は、生材が乾燥することによつてその構造が変形したものとは考えられない。

(c) 孔紋膜の孔紋室内における位置による変化：生材の辺材部においては重孔紋の孔紋膜はいずれの側の重孔紋の輪帯表面にもかたよらず孔紋室の中央に位置しているが、材が乾燥して気乾状態になると一般に孔紋膜は一方の側の重孔紋の輪帯表面に密着し、トールスはその孔紋口を閉鎖するものとみられている。筆者らが気乾材について観察してきたのは、一般にこのような輪帯表面に密着した状態にある孔紋膜の構造であると見られる。すなわち、このような閉鎖状態にある孔紋膜と孔紋室の中央に位置する孔紋膜とでは同じ乾燥材であつたとしても、その構造特にマルゴの構造に差異を生じたのではないかという疑問

がおこる。この点を検討するために次のような供試材について観察した。生材を乾燥する場合、生材をアルコールやアセトンでもつてその水と置換させて乾燥させるときは、アセトンの表面張力によつて一般に孔紋膜は孔紋室の中央に位置したままの状態で気乾材となることが報告されている¹⁵⁶⁾ から、このような材の裂開面のレプリカ試料について観察した。**Phot. 98** および **99** はアセトンを水と置換させることによつて乾燥したエゾマツおよびトドマツ両気乾材のレプリカ写真であるが、春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すものである。特に **Phot. 99** は孔紋膜の実体そのものが付着してきたもの、すなわちブソイドレプリカを示すものである。両写真に示されるように孔紋膜のマルゴにはそのマイクロフィブリルの間にはすき間が存在するのであつて、**Phot. 91** および **92** の気乾材について得られた結果となんらの差異は認められない。このように孔紋膜が孔紋室の中央に位置していると見られる気乾材においてもマルゴの構造に変化は認められないから、孔紋膜が孔紋室の中央に位置しているかまたは輪帯表面に密着した状態にあるかというような孔紋膜の位置の変化によつてマルゴの構造が変形をうけたものとは考えられない。

以上 (a), (b) および (c) の検討結果からすると、少なくとも筆者らの実験の範囲内では孔紋膜の構造特にそのマルゴの構造は、レプリカをうるための供試材作製の過程において変化をうけたものとは考えられないで、マルゴは本来このような構造として存在しているものと推定される。

(2) 検討-II

ところがその後、スギ、アカマツおよびヒノキの各気乾材の裂開証目面のレプリカ試料の観察中、仮導管の重孔紋の孔紋膜特にマルゴの構造について **Phot. 100** および **101** に示すような構造が得られた。**Phot. 100** および **101** はいずれもスギ材のレプリカ写真であつて、**Phot. 100** は春材から秋材への移行部分の、**Phot. 101** は秋材のそれぞれ仮導管から得られたものと推定された。これらの写真においては、孔紋膜のうちマルゴはトールスから派生して重孔紋の孔紋環に至っている放射状の集束マイクロフィブリルおよびこれらの間に存在する非集束マイクロフィブリルからなつていのであるが、放射状の集束マイクロフィブリルはすこぶる密集しているばかりでなく、また非集束マイクロフィブリルも密に編まれており、**Phot. 92** に示されるようにマルゴのこれらのマイクロフィブリル構造を通してはもはや重孔紋の輪帯表面のイボ状構造や円状のマイクロフィブリル排列構造は全く認められないということである。すなわち、マルゴに存在するすき間は **Phot. 91** および **92** にみるような大きなすき間ではないといえることである。**Phot. 100** および **101** に示すマルゴの構造に関しては、この領域における細胞間層の存在という点は別としてマイクロフィブリル構造のみについていうならば、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の提案した Ultrafilter 構造に類似しているといわねばならぬ (類似という意味は、FREY-WYSSLING らの報ずるようにマルゴの領域がマイクロフィブリルによつて全く充てん閉鎖されているというのではなく、すき間と判断される構造は認められるのであるが、そのすき間はレプリカ写真においてその向い側の重孔紋の輪帯表面の構造が認められない程度にマイクロフィブリルが密集して存在する構造であるというわけである)。

以上の結果から、検討-I においては筆者らは、マルゴには比較的大きなすき間をもっているという構造が、仮導管の重孔紋の孔紋膜に本来固有の構造として存在するということを明らかにしたのであるが、今またマルゴに存在するすき間はきわめて小さいという孔紋膜の構造をもとらえたことになった。すなわち、少なくとも筆者らの観察した範囲内では、針葉樹材の仮導管の孔紋膜には比較的密集したマイクロフィブリル構造をもっている、いかえればマルゴを構成するマイクロフィブリルのすき間を通して重孔紋の輪帯表面の構造を認め得ない程度に密な構造 (以下これを密構造 (dense structure) とよぶこととする)

と、比較的疎なマイクロフィブリル構造をもっている、いかえればマルゴを構成するマイクロフィブリルのすき間を通して重孔紋の輪帯表面の構造を確認しうる程度に疎な構造（以下これを疎構造（coarse structure）とよぶこととする）の2つの種類の構造が存在することとなつた。しかればこのような密構造および疎構造は、どのような条件下において認められるのであろうか、これを明らかにするために次のような事項について検討した。

（a）樹種による差：

LIESE と FAHNENBROCK¹⁵⁵⁾ は Kiefer, Lärche, Tanne, Fichte および Douglasie の各材についていずれもそのマルゴは Fäden 構造すなわち疎構造であることを認めたのであるが、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ は LIESE が疎構造であるとした Fichte および Tanne の両材について Ultrafilter 構造、いわゆる密構造（ただしFREY-WYSSLING らのいう構造はマルゴに細胞間層の存在することを強調するものであるが、筆者らのいう密構造は細胞間層の存在は認めないで、マルゴはすき間をもっているがこのすき間が疎構造のように大きくないことを意味するものである）を確認したとしているから、このような見地にたつと樹種の差によつてマルゴの構造が密構造であつたり疎構造であつたりするようなことはあり得ないと思われる。また筆者らの観察したスギ、ヒノキおよびアカマツの各材についても密構造はわずかに少数のみ認められたのであつて、その他の大部分の孔紋膜のマルゴについては疎構造を確認しているのであるから、樹種の特徴としてマルゴが疎構造であつたり密構造であつたりするというようなことは考えられない。

（b）材の部位およびその他による差：

（イ）辺材と心材による差：第 30 年輪以上のスギおよびアカマツ材について観察した。Phot. 102 および 103 はアカマツの辺材および心材の春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すものであるが、いずれもマルゴは疎構造である。また Phot. 104 はスギの辺材の春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すが、ここにおいてもマルゴは疎構造である。ところが同じスギの辺材ではあるが Phot. 100 では密構造が認められる（ただし Phot. 100 では春材から秋材への移行部分の仮導管の孔紋膜を示すものと判断されている）。すなわち Phot. 102 および 103 によると辺・心両材部の春材仮導管にともに疎構造が認められ、また Phot. 100 および 104 によると同じ辺材部でも疎構造と密構造の両構造が存在することとなるから孔紋膜のマルゴの疎構造や密構造は辺材および心材の差によるものではないと考えられる。

（ロ）幼令樹材と壮（老）令樹材による差：筆者らの既往の結果は、仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造に関してはいずれもほぼ 20 年生以上の材について研究してきたものであつた。ところがFREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ は Fichte および Tanne 両材の 1, 2 年生という幼令樹材について研究し、マルゴの構造に関して Ultrafilter 構造を得たのであつた。それゆえに、このような供試材が幼令樹材であるか壮（老）令樹材であるかということによつて、マルゴの構造に変化が認められるのではないかという点が問題となる。ここでは供試材採取の都合上スギ材のみについて、その幼令樹材（樹令 3 年生）について研究した。Phot. 105 および 106 はいずれも第 2 年輪部の春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すが、Phot. 105 ではマルゴは密構造を呈している。すなわち、このような幼令樹材の場合には壮（老）令樹材の場合に比較して比較的多数の密構造が認められた。しかるに一方、Phot. 106 に示されるように疎構造の存在をもまた認められたから、このような密構造は幼令樹材のみに存在するとはいえない。しかしながら、少なくとも壮令樹材に比較して幼令樹材における方が、一般に密構造の存在が多いことが認められる。

(ハ) 1個の仮導管中における重孔紋の位置による差: 1個の仮導管をみると、一般に2つの仮導管がその上下間において接合していると見られる仮導管の先端に近い部分においては重孔紋は多数互に相接して存在しているのであるが、これに反して仮導管の中央部付近においては重孔紋の数も少なく、その相互間の距離も大きいことが知られている。このような重孔紋の偏在性を水分移動の見地からみると、仮導管の先端に近い部分において重孔紋の数の多いということは、樹木の幹軸の方向への水分通導の要求に応ずるためと推定されるが、このような観点からすると、重孔紋の孔紋膜特にマルゴの構造についても仮導管の先端部分に存在するものと中央部に存在するものとは差異が存在するのではないかと考えられる。このような1個の仮導管中における重孔紋の位置によるマルゴの構造の差を検討するためにスギおよびエゾマツ両材の春材仮導管の孔紋膜について観察したのであるが、仮導管の中央部に存在する場合と先端に存在する場合とで密・疎両構造の存在の差異は認められなかつた。それゆえにマルゴの疎・密両構造の存在の差は、1個の仮導管中における重孔紋の位置による差とも考えられない。

(ニ) 春材仮導管と秋材仮導管との差: 既往の光学顕微鏡的研究の結果によると、秋材仮導管の重孔紋の孔紋膜は春材仮導管のそれに比して厚膜であるとされている¹⁵⁷⁾。ところで筆者らは、前述の孔紋膜のレプリカ試料についての研究においては、レプリカ試料作製の制約性のために孔紋膜の横および縦両断面の構造をとらえることができず、もっぱらその表面構造のみについて観察してきた。そして、このような表面の構造は供試材の裂開断面について得られやすいので、ほとんどこのような裂開断面のレプリカ試料について研究したのであるが、春材仮導管においては秋材仮導管の場合に比較して重孔紋の形が大きいのみでなくその数も著しく多い。それゆえにレプリカ試料の観察においても、春材仮導管については多数の重孔紋の孔紋膜についてマルゴの構造を観察することができたのであるが、秋材の仮導管やさらに春材から秋材へ移行しつつある部分の仮導管の孔紋膜についてはその位置を区別して観察することが困難であり、主として春材仮導管について孔紋膜の構造を観察していたうみがあつた。そこでこのような春・秋両材仮導管における孔紋膜の構造について検討を加えることが必要となつた。年輪幅広く比較的秋材部の多いオビスギ材、ならびに春・秋材の差顕著なヒノキ材等について注意深くレプリカを作製し、春材仮導管と秋材仮導管とを区別して孔紋膜の構造を観察した。また断面についてのみでなく、板目面にも重孔紋の存在する裂開板目面の秋材仮導管についても観察した。Phot. 107, 108 および 109 はスギ、ヒノキおよびエゾマツの各材のレプリカ写真であつて、秋材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示すものである。Phot. 107, 108 および 109 においては秋材仮導管の孔紋膜のマルゴは Phot. 101 に示すと同様に密構造をもっている。さらに Phot. 100 に示されるように春材から秋材に移行している秋材よりの仮導管では、重孔紋の孔紋膜のマルゴは密構造をもっていることが認められた。

以上のように、観察個数の少ないうみはあるが、このような研究の範囲内では、一般に春材仮導管の重孔紋の孔紋膜のマルゴは疎構造をもち、春材から秋材に移行するにしたがつてマルゴは密構造となる傾向があると判断される。このように春材仮導管のマルゴが疎構造であるということは、孔紋膜の形成過程から推測して、細胞の伸長成長に比して直径成長の比較的大である春材仮導管では水分および養分の通導の要求が著しいためマルゴは疎構造となり、主として樹体の強固性をつかさどる秋材仮導管では通導要求は少ないから密構造となるのであらうと考えてもさしつかえないのではなからうか。

ところが、Phot. 110 および 111 のような重孔紋の孔紋膜の構造が、アカマツおよびスギ材の仮導管から得られた。この写真によると、マルゴのミクロフィブリル構造を通して重孔紋の輪帯表面の構造が認

められないという点からすると密構造であるが、マイクロフィブリルのすき間は介在物によつて充てんされている。Phot. 110 は春材仮導管の、Phot. 111 は板目面の秋材仮導管の孔紋膜の構造と判定されるのであるが、このような構造についてはいまだ解釈できない段階にある。

以上の (a) および (b) における検討の結果、観察した樹種や各樹種の個体数および供試材の部位等少数でしかも限定された範囲内の観察結果であるが、筆者らの観察した範囲内では、一般に春材仮導管の孔紋膜のマルゴはいわゆる疎構造であり、春材から秋材に移行するにしたがつて密構造となる傾向がある。しかしながら 1, 2 年生の幼令樹材においては春材仮導管にも密構造の存在が認められる。

(3) 検討—III

筆者らの最初の研究および LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾155), さらに EICKE¹⁴⁷⁾ の研究は主としてレプリカ試料について観察した結果から Fäden 構造説 (疎構造) を唱えたのであるのに反し、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の研究は超薄切片試料の観察結果から Ultrafilter 構造説を唱えるというように、各別個の試料作製法によつて得た結果についてそれぞれ自己の見解を固執してきた観がある。それゆえに筆者らは今までレプリカ試料を作製した供試材片から作製した超薄切片試料についてマルゴの構造を検討した。スギ、アカマツおよびエゾマツの各材について観察を試みたのであるが、スギの春材部を除いては検鏡に適する超薄切片を作製することができなかつたので、ここではスギの春材仮導管の重孔紋の孔紋膜についてのみ行つた。Phot. 112~117 はスギの春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の超薄切片写真を示すものである。Phot. 112 はほぼ正板目の切片写真であるが、孔紋膜が重孔紋の輪帯表面のいずれの側にもかたよらず、孔紋室の中央に位置することを示し、また Phot. 113 はやや斜の板目の切片写真であつて同じく孔紋膜の構造を示すものである。Phot. 112 および 113 から、孔紋膜はトールスとマルゴに区別され、マルゴにおけるマイクロフィブリルはレプリカ写真に認められたように集束、非集束両マイクロフィブリルに明りようには区分することはできないけれども、これらのマイクロフィブリル構造には明らかにすき間の存在が認められるから、マルゴには細胞間層は存在しないといえる。また Phot. 114 および 115 はやや斜の柃目の切片写真であり、また Phot. 116 および 117 は柃目の切片写真であつていずれも孔紋膜の構造を示すものである。Phot. 114 ではマルゴの一部分のみが切片写真として認められ、また Phot. 115 および 116 もマルゴの構造の一部は切片作製の際除かれたものと推定されるのであるが、これらの写真によつても、マルゴの領域はすけて見え、細胞間層の存在は認められない。そしてマルゴの構造は、すでにレプリカ写真によつて得られたように、トールスから派生して重孔紋の孔紋環に至る放射状の集束マイクロフィブリルと、これと交さした非集束マイクロフィブリルとからなり、これらの集束、非集束両マイクロフィブリルの間には明らかにすき間が存在する。そしてここに示すマルゴの構造は一般に疎構造である。Phot. 116 および 117 ではマルゴにはすき間の存在することは明らかであるが、そのすき間は比較的小さくマイクロフィブリルによつてかなり密に埋められているように思われるが、これらの重孔紋の孔紋膜は春材からやや秋材に移行した部分の仮導管の孔紋膜の構造を示すものであろう。たびたび引用するように、FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ はマルゴはマイクロフィブリルによつて密に充てん閉鎖され電子顕微鏡的なすき間の存在を認められない写真を示しているのであるが、筆者らの観察結果からはそのような写真は得られなかつた。

上述のように、筆者らが 45 年生のスギ材の第 30 年輪付近の春材仮導管の重孔紋の孔紋膜について観察した範囲内では、マルゴには細胞間層は存在せず、マルゴは放射状の集束マイクロフィブリルと非集束ミ

クロフィブリルとから構成されているといえよう。

(4) 考察

その後 JAYME¹⁵¹⁾ は, Fichte 材のバルブをレプリカ試料について観察し, 重孔紋の孔紋膜の構造に関して FREY-WYSSLING と BOSSHARD¹⁴⁶⁾ の唱える Ultrafilter 構造に類似した構造と, LIESE と FAHNENBROCK¹⁴⁴⁾ の提案した Fäden 構造との2つの構造を認めたが, このような2つの相異なる結果をどのように説明すべきかは今後の研究にまかしたいとしている。

また FREY-WYSSLING と MÜHLETHALER と BOSSHARD¹⁵³⁾ は, Pinus 属の材の仮導管のイボ状構造をレプリカ試料について研究した際, 春材仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造をブソイドレプリカとしてとらえたが, ここではマルゴを構成している非集束マイクロフィブリルの密度は少なく筆者らのいう疎構造を認めている (FREY-WYSSLING, MÜHLETHALER, BOSSHARD¹⁵³⁾: Bild. 4)。

ところが最近, FREY-WYSSLING と BOSSHARD と MÜHLETHALER^{152), 153)} は, かれらが前に報告した結果の再検討の必要を認め, 超薄切片試料のみにたよることをさけ, 解体およびレプリカの両方法をも併用して, Kiefer および Tanne 両材の孔紋膜特にマルゴの構造について研究した。その結果マルゴの構造について, Ultrafilter および Fäden の両構造が認められる原因は供試材の樹令の差によるものであるとし, Kiefer および Tanne 両材については第4年輪までの仮導管では Ultrafilter 構造を示すが, 第5~8年輪になると集束マイクロフィブリルの間を埋める非集束マイクロフィブリルの数は減少し, レプリカによつてその向い側の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造を認めうる程度の大きさのすき間が存在し, さらに非集束マイクロフィブリルの数は樹令とともに減少し, 第14~15年輪に至つてほとんどなくなる。そして第17~18年輪になると, このような放射状の集束マイクロフィブリルの間には他の物質の介在によつてふたたび充てんされる。これをかれらは mineralization とよんでいる。すなわち樹令によつてマルゴの構造は変化し, 第5~6年に至つて疎構造, 第14~15年に至つて非集束マイクロフィブリルは消失するというのである (FREY-WYSSLING, BOSSHARD, MÜHLETHALER¹⁵³⁾: Fig. 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12)。

しかしながら, すでに述べたように, 筆者らの観察した供試材は幼令樹材のものを除いてはいずれも20年生以上の材の第20年輪以上の部分についてであり, しかもこのような年輪の仮導管についても疎構造, すなわち放射状の集束マイクロフィブリルの間にはこれと交さする非集束マイクロフィブリルが存在していることは明らかであつて, FREY-WYSSLING らの報ずるように第14~15年輪以上の年輪では非集束マイクロフィブリルは消失するとはいえない。また幼令樹の第1~2年輪の仮導管には密構造の存在が認められることが多いが, また疎構造の存在をも認められるから, 疎構造が樹令の増大するにしたがつて密構造の変化によつて現われたとは考えられず, ましてや筆者らのいう密構造においてもマルゴにおける細胞間層の存在は認められない。ゆえに FREY-WYSSLING らの見解をそのまま容認することはできない。しかしながら, かれらがその初期の Ultrafilter 構造説を固執することをすてて, 修正した見解を報告したことは興味あることと考えられる。

以上の観察および考察の結果から, マルゴの構造に関する筆者らの見解を要約すると次のとおりである。まず第1には, 成長を完成した仮導管の重孔紋の孔紋膜のマルゴには細胞間層は存在しない。第2には, マルゴはトールスに起源し重孔紋の孔紋環に至る放射状に排列した太さ約 600~1,000 Å の集束マイクロフィブリルと, これに交さして存在する 200 Å 程度の太さの非集束マイクロフィブリルとからなり, これらの集束, 非集束両マイクロフィブリルの間にはすき間が存在する。第3にはマルゴのすき間は, 一般に

春材仮導管では約 2,000 Å の直径をもつ粒子なら容易に透過しうる程度の疎構造であるが、春材から秋材に移行してゆくにしがたつてミクロフィブリルの密度は大となり、そのすき間は小さくなる傾向がある。またこのような小さいすき間は、一般に幼令樹材のマルゴにも存在する。

すなわち、春材仮導管にその大部分の重孔紋が存在する針葉樹材においては、その孔紋膜のマルゴには細胞間層は存在しないで、すき間をもっているから、孔紋膜が孔紋室の中央に位置する場合には、このすき間の大きさ以下の直径をもつ粒子であるならば比較的容易にこのすき間を通過するであろう。ゆえに木材に液体を注入する場合には、孔紋膜特にトールスの重孔紋の孔紋口閉鎖ということがいざんとして液体注入に対する障害として働くことが予想される。

第3節 針葉樹材の射出線細胞の孔紋膜の構造

1. まえがき

射出線細胞は樹木の生育上、主として養分の貯蔵組織、または胚目方向の水分等の通導溝としての働きをしているものと解されているが、針葉樹材においてはこのような射出線細胞と相接している仮導管との間に存在する孔紋特にその孔紋膜の構造は、射出線細胞と仮導管との間の通路として水分移動上重要な位置を占めておるのみでなく、また木材中への液体の注入の場合においてもこのような孔紋膜は重要な意義をもつものと考えられる。

射出線細胞は射出柔細胞 (ray parenchyma) と射出仮導管 (ray tracheid) とからなるのであるが、射出柔細胞が相接する仮導管と接合している領域は分野 (cross-field) とよばれ、針葉樹材の識別上重要な拠点となつていることは周知のことである。たとえばスギ、ヒノキおよびエゾマツのような材では分野

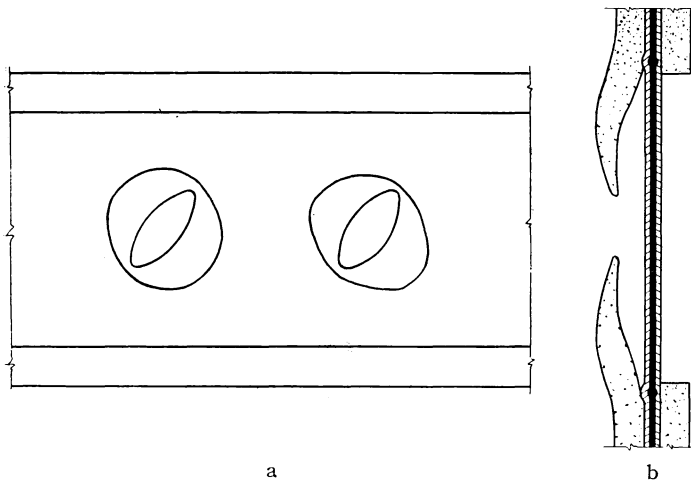


Fig. 5 a. ヒノキ (*Chamaecyparis*) 属材の分野 (cross-field) におけるクプレソイド孔紋対 (cupressoid pit pair) の模式図

b. 針葉樹材の仮導管と射出柔細胞との間の半重孔紋対の模式図

黒帯線は細胞間層、斜線は第1次膜を示す
(BROWN, PANSHIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾).

a. Cupressoid pit pairs occurring in the "cross-field" of *Chamaecyparis* wood.

b. Schematic drawing illustrating the type of a half-bordered pit pair in sectional view (the intercellular substance is indicated by solid black, the primary wall by cross-hatching)

(BROWN, PANSHIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾)

に存在する射出柔細胞の孔紋口はいずれも円形または楕円形の単孔紋であるが、これと対をなしている仮導管の側の孔紋は広い楕円形または凸レンズ状の孔紋口をもつ重孔紋であつて、いわゆる半重孔紋対 (half bordered pit pair) を形成している (Fig. 5 a)。そして BROWN と PANSHIN と FORSAITH¹⁵⁹⁾ は、こ

のような孔紋特に孔紋膜の縦断面の構造を Fig. 5 b のように模式的に示している。またアカマツ材の射出柔細胞では、春材部の場合スギやヒノキ材の射出柔細胞の構造とは異なり、射出柔細胞側にも仮導管側にも、ともに輪帯

をもたずいわゆる単孔紋対 (simple pit pair) を形成し、その孔紋口は窓状 (window-like) または不規則な長円形をなしている (Fig. 6a)。そして、このような単孔紋対の孔紋膜の縦断面の構造は Fig. 6b のように模式的に示される。すなわち、これらの孔紋膜は1つの細胞間層と2つの第1次膜とからなるという点では、すでに述べた仮導管の重孔紋対の孔紋膜の構造の模式図と同様であるが、ここでは重孔紋の孔紋膜構造に示されたような中央の肥厚部——トールス——は存在しないものと考えられている。次には射出仮導管が仮導管と相接する部分の孔紋はその形は

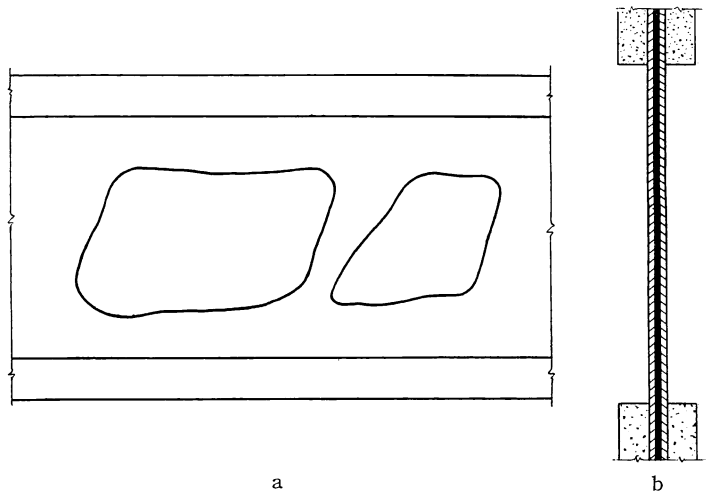


Fig. 6 a. マツ (*Pinus*) 属材の分野における窓状孔紋対 (window-like pit pair) の模式図

b. 針葉樹材の仮導管と射出柔細胞との間の単孔紋対の模式図
黒帯線は細胞間層、斜線は第1次膜を示す
(BROWN, PANSIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾)。

a. Window-like pit pairs occurring in the "cross-field" of *Pinus* wood.

b. Schematic drawing the type of a simple pit pair in sectional view (the intercellular substance is indicated by solid black, the primary wall by cross-hatching)
(BROWN, PANSIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾)

小さいが重孔紋対と見られており、その孔紋膜の構造については仮導管の孔紋膜の構造と全く同じ模式図が与えられている (Fig. 4)。ところが、以上のような孔紋膜の構造の模式図は細胞膜の形成過程上の推定から提案されたものであつて、その微細構造についてはまだ電子顕微鏡的な観察は行われていなかった。

本節においては2, 3の針葉樹材の射出線細胞と仮導管との間に存在する孔紋膜の構造について、すでに報告した結果を中心としてその後得られた結果を付加し、とりまとめて記述する。

2. 試料の作製

1) 供試材

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 宮崎県産 樹令 45 年

ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* S. et Z.) 長野県産 樹令 250 年

アカマツ (*Pinus densiflora* S. et Z.) 鹿児島県産 樹令 100 年

エゾマツ (*Picea jezoensis* CARR.) 北海道産 樹令 93 年

以上の各材は、當場木材部木材材料強度研究室において強度試験用材として採取された正常材であるが、これらの気乾材の材片からはば $1 \times 1 \times 1.5 \text{ cm}$ のブロックを二方柱木取として作製した。これとは別に同強度研究室において横引張試験によつて破壊したヒノキ材の材片の一部をも用いた。

レプリカ作製のためには材片の次のような表面を用いた。

i) 人工の破壊および乾燥による自然破壊によつて得られた裂開面 (柱目面) : 木材の縦方向の裂開面には射出線細胞の存在が、肉眼またはミクロ的によく観察されているから、このような裂開面においては

射出線細胞と仮導管との間の孔紋膜の構造をとらえることができるであろうと予想して選んだ。

ii) 同上の裂開面を脱リグニン処理¹⁵⁴⁾した面：孔紋膜のミクロフィブリル構造を明らかにすることを目的として行った。

iii) 横引張試験によつて破壊して得た裂開面（柾目面）：沢田¹⁶⁰⁾は木材の細胞長軸（幹軸）方向に対して直角で、かつ板目方向の引張試験においては、その破壊は射出線細胞に沿つて生じやすいことを認めているから、i)と同様に射出線細胞と仮導管との間の孔紋膜の構造をとらえるであろうと予想して選んだ。

iv) 気乾材を蒸煮軟化し、ミクロトームで切断作製した厚さ約 20~40 μ の切片の乾燥した表面（柾目面）：射出線細胞と仮導管との間の孔紋膜特に単孔紋対の孔紋膜の構造を仮導管のルーメンサイド側からとらえることを目的として選んだ。

v) 同上の切片を脱リグニン処理¹⁵⁴⁾した表面：孔紋膜のミクロフィブリル構造を明らかにすることを目的として選んだ。

2) 検鏡試料の作製

レプリカ法によつたが、この方法は第 1 章第 2 節 2)において述べたものと全く同じである。

3) 検 鏡

第 1 章第 2 節 2)において述べたものと全く同じである。

3. 射出柔細胞の孔紋膜の構造^{150) 161) 162)}

Phot. 118 はスギ材の、また **Phot. 74** はヒノキ材のそれぞれ裂開柾目面のレプリカ写真で、いずれも射出柔細胞と仮導管との間に形成されている半重孔紋対の仮導管側の重孔紋の構造を、射出柔細胞の側からみているものと判定されるが、重孔紋の輪帯表面および凸レンズ状の孔紋口の構造が認められる。ここで問題となるのは、このような重孔紋の輪帯表面をおおつて存在すると考えられる孔紋膜の構造である。

Phot. 119 および **120** は同じくスギおよびヒノキ両材の裂開柾目面のレプリカ写真であるが、射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対の孔紋膜の構造を示すものと判定される。その理由は、**Phot. 121** においてはこのような孔紋膜の一部が破れて、これと相接している向い側すなわち仮導管側の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造の一部が認められたものと推定されることによる。**Phot. 119** および **120** に示されるように、孔紋膜は仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造のようにトールズとマルゴの区別はなく、単一な膜であつて、その表面にはミクロフィブリル構造がほとんど認められないから、これらの孔紋膜は介在物によつて強度に包埋されているものと考えられる。筆者らはこのような孔紋膜の構造を単一な膜 (simple membrane) 構造とよぶこととした。

Phot. 122 はアカマツ材のミクロトーム切片の柾目面のレプリカ写真であつて、春材仮導管のルーメンサイドおよびこれと射出柔細胞との間のいわゆる窓状の単一孔紋対の孔紋膜の構造を示すものである。また **Phot. 123** は秋材におけるこのような孔紋膜の構造を示すものと判定されるのであるが、その理由は **Phot. 124** との比較から明らかである。**Phot. 124** はアカマツ材の射出柔細胞との間に孔紋対を形成している秋材仮導管の重孔紋の輪帯表面および孔紋口の構造を示すが、春材部では単孔紋対であるのに、秋材部では半重孔紋対をなしており、このような重孔紋の輪帯表面をおおつて存在する膜構造であるから、孔紋膜と判断されるわけである。すなわち、このような単孔紋対を形成している部分においても、その孔紋膜は単一な膜構造であつて、**Phot. 119** および **120** の孔紋膜の構造とほとんど同じである。

以上の結果はいずれも素材（未処理材）の観察によつて得られたものであるが、このような孔紋膜がど

のようなマイクロフィブリルの排列構造をもっているかを明らかにするために裂開柱目面, およびマイクローム切片の柱目面を脱リグニン処理した表面のレプリカについて観察した。Phot. 125, 126 および 127 はいずれもアカマツの春材部の射出柔細胞と仮導管との間の単孔紋対の孔紋膜の構造を示すものであるが, Phot. 125 および 126 は射出柔細胞側から, また Phot. 127 は仮導管の内腔側から孔紋膜の構造をとらえたものである。Phot. 125 の左下から左上を通つて右上に至る窓状形を描く帯状の刻印, および Phot. 126 の右上方にみられるもり上り(矢印)は, 孔紋口の周縁部を示すものである。Phot. 125 によると, 孔紋膜のマイクロフィブリル排列の状態が顕著に認められるが, ここでは個々のマイクロフィブリルは不規則に排列しており, 仮導管の第1次膜においてみられるようないわゆる網目状構造を呈している。さらに Phot. 126 においてはこのような孔紋膜の不規則なマイクロフィブリルは, 孔紋膜以外の射出柔細胞の第1次膜のいわゆる網目状構造(Phot. 45)のマイクロフィブリルと連結していることが認められる。すなわち孔紋膜の1つの表面の観察においては孔紋膜は網目状構造的なマイクロフィブリル排列からなるといことができる。そしてこのようなマイクロフィブリル構造は, 仮導管の内腔側から観察した孔紋膜の構造, すなわち Phot. 127 からも明らかである。なおここに注意しなければならぬことは Phot. 126 および 127 において孔紋膜の網目状のマイクロフィブリル排列の上に重なつてマイクロフィブリルの平行排列構造がみられるのであるが, これを第2次的な肥厚と考えてよいかどうかは今後の研究にまたねばならぬ。この実験においては, 孔紋膜における細胞間層の存在をとらえることはできなかつたのであるが, 以上の観察結果からみて, 射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対や単孔紋対の孔紋膜の構造は, Fig. 5 b および Fig. 6 b の模式図に示されるように, 1つの細胞間層とその両側に形成された2つの第1次膜とからなっており, そして第1次膜を構成しているマイクロフィブリルは介在物の充てんによつてきわめて強度に包埋されているものと推定される。すなわち以上の観察結果からすると, このような射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対および単孔紋対の孔紋膜の構造は仮導管の重孔紋の孔紋膜とは異なり, トールスという肥厚部分をもたず, 孔紋膜は単一な膜であつて, これは1つの細胞間層と2つの第1次膜とから構成され, そしてこのような孔紋膜を構成するマイクロフィブリルは介在物によつて強度に包埋されているといことができる。しかもこのような孔紋膜には, 仮導管の重孔紋の孔紋膜のマルゴにみられるようなすき間は全く存在しないから, 射出柔細胞と仮導管相互間の通導は拡散のみによつて行われると推定され, その通導はきわめて困難であることが予想される。

LIESE¹⁶³⁾ からの通信によると, 彼は Kiefer 材の射出柔細胞のいわゆる窓状単孔紋対の孔紋膜について筆者らと同様な構造を確認したとしており, また FREY-WYSSLING と BOSSHARD と MÜHLETHALER の最近の報告¹⁵³⁾ によると, Kiefer 材の解体試料の観察によつて, このような孔紋膜は網目状のマイクロフィブリルによつて構成された単一な膜構造であることを認めている (FREY-WYSSLING, BOSSHARD, MÜHLETHALER¹⁵³⁾: Fig. 4)。

以上の観察および考察の結果, 射出柔細胞が仮導管と相接する間に存在する半重孔紋対および単孔紋対の孔紋膜の構造は, いわゆる単一な膜 (simple membrane) 構造であり, これは1つの細胞間層と網目状のマイクロフィブリル排列構造をもつ2つの第1次膜とからなり, これらのマイクロフィブリルは他の介在物によつて強度に包埋されており, トールスのような肥厚部をもたない。このような単一膜であるという点においては, 既往の光学顕微鏡的研究から推定された構造が正しいことを確認することができた。

4. 射出仮導管の孔紋膜の構造^{161) 162)}

射出仮導管が射出柔細胞と異なる点は相接する仮導管との間に重孔紋対を形成していることであり、また仮導管と異なる点は、その長さが短いということのほかには重孔紋の小さいという点である。このように射出仮導管はその相接する仮導管との間に重孔紋対を形成しているから、その孔紋膜の構造に関して、筆者らは前の報告においては仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造と同一と見なしてもよいとしたのであるが、その後の研究によつてその特徴的な構造を明らかにすることができたので、ここではそれらの結果をアカマツ材について記述する。

Phot. 128 は裂開柱目面のレプリカ写真であるが、射出仮導管と春材仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜の構造を示すもので、射出仮導管の側からみたものと判定される。**Phot. 128** によると、孔紋膜はトールスとマルゴとに区別されるが、トールスは肥厚しており、マルゴはトールスから派生し重孔紋の孔紋環に至る放射状の集束ミクロフィブリルと、これと交さしている非集束ミクロフィブリルからなっていると推定されるが、トールスやマルゴはともに介在物の充てんによつてそのミクロフィブリルは顕著でなく、また仮導管の重孔紋の孔紋膜のマルゴに認められたようなかなり大きなすき間は存在しない。すなわち、マルゴのミクロフィブリル構造をとおしては、その向い側の重孔紋の輪帯表面の構造を認めることはできないということである。次にはこのような孔紋膜のミクロフィブリル排列の状態を明らかにするために、脱リグニン処理を施した材片のレプリカ試料について観察を行つた。**Phot. 129, 130** および **131** はいずれも裂開柱目面を 2 時間 (**Phot. 129**) または 4 時間 (**Phot. 130** および **131**) 脱リグニン処理した表面から得られた、射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜の構造を示すものである。**Phot. 129** ではトールスとマルゴの区別はさらに明りように認められ、またトールスやマルゴのミクロフィブリル構造もより顕著に示される。ところが **Phot. 130** および **131** では、脱リグニン処理がさらに強度に行われたために、**Phot. 130** ではトールスやマルゴのミクロフィブリルの一部が除かれ、また **Phot. 131** では孔紋膜を構成する 2 つの第 1 次膜 (トールスについていう) のうちの 1 つが除去され、もはやトールスの肥厚構造は認められないが、トールスやマルゴのミクロフィブリル排列構造は一層明りようにとらえられた。**Phot. 129, 130** および **131** から、トールスは仮導管の重孔紋の孔紋膜のトールスの構造と同じく、まず細胞間層の上に第 1 次膜の網目状のミクロフィブリル排列構造が形成され、その上に第 2 次的に平行度のよいミクロフィブリルが増加肥厚し、これらが介在物によつて充てんされたものと考えられる。またマルゴはトールスをつり上げるようにトールスから放射状に派生した集束ミクロフィブリルと、この間を埋める非集束ミクロフィブリルとからなっているが、ここに注目しなければならぬのはマルゴはミクロフィブリルによつてすこぶる密に充てん閉鎖されており、その向い側の重孔紋の輪帯表面の構造が認められないから、筆者らが重孔紋の孔紋膜のマルゴについて述べた密構造に類似した構造と考えられる。すなわち、このような孔紋膜のマルゴでは、春・秋材のいかんを問わず密構造であるといえるが、細胞間層は存在しないものと推定される。

以上の観察および考察の結果、射出仮導管と仮導管との間に重孔紋対を形成する孔紋膜の構造は、仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造に類似しているが、マルゴはトールスから派生した集束ミクロフィブリルおよび非集束ミクロフィブリルによつて密に充てん閉鎖されており、いわゆる密構造であるといえよう。

第4節 広葉樹材の孔紋膜の構造

1. ま え が き

広葉樹材は、その組織上針葉樹材よりも進化していると考えられ、特に水分等の通導のための組織と樹体の強固性保持のための組織とに機能上分化しているものとみられている。すなわち、前者に属するものは主として導管(vessel)であり、後者に属するものは木繊維(wood fiber)である。そして特に導管ではその長軸方向の相互間の接合部は穿孔(perforation)となつていて孔紋膜を欠くのであるが、柃目方向や板目方向の導管相互間や導管と他の細胞との間および他の同種細胞相互間、異種細胞間には孔紋膜が存在しており、針葉樹材の場合と同様水分移動や液体注入上重要な役目を果しているものと考えられる。

このような広葉樹材の諸細胞間に存在する孔紋膜の構造に関しては、従来あまり重大な関心がはらわれておらず、ただ光学顕微鏡の研究の結果、孔紋膜は1つの細胞間層と2つの第1次膜とからなり、肥厚部分すなわちトールスをもたないということが推定されているにすぎなかつた。また電子顕微鏡の研究としては、BOSSHARD¹⁶⁴⁾ が *Esche (Fraxinus excelsior L.)* 材について細胞膜の形成過程の研究の立場から解体試料について行つた結果をみるのみである。

本節においては、広葉樹材における液体移動機構解明のための構造上の基礎的知見の1に資することを目的として、2、3の広葉樹材の導管、仮導管、木繊維および射出柔細胞の孔紋特に孔紋膜の構造について研究した報告を中心として、その後得られた若干の結果を加え、これらをとりまとめて記述する。なお、孔紋膜の構造に関連をもつ重孔紋の輪帯表面や、孔紋口の構造についてもあわせて記述する。

2. 試料の作製

1) 供 試 材

ブ ナ (*Fagus crenata* BLUME) 群馬県産 樹令175年

ミズナラ (*Quercus crispula* BLUME) 群馬県産 樹令約90年

ナガバノヤマグルマ (*Trochodendron aralioides* var. *longifolium* MAXIM.) 長野県産 樹令93年

モクマオウ (*Casuarina Cunninghamiana* MIQ.) 当场苗圃産 樹令3年

以上の各材のうち、ブナ材は当场木材部材質改良科防腐研究室において防腐試験用材として採取された材から、ミズナラ材は同じく木材部木材材料科強度研究室において強度試験用材として採取された材から、いずれもこれらの第20年輪以上の部分から試片を選んだ。またナガバノヤマグルマ材は、同じく木材部木材材料科組織研究室の木材識別用材鑑の一部から、モクマオウ材は同じく土壤調査部土壤肥料科土壤微生物研究室における試験材から試片を選んだ。

これらの気乾材からはほぼ $1 \times 1 \times 1.5$ cm のブロック試片を二方柃木取として作製した。

レプリカ作製のためには材の次のような表面を試片として用いた。

i) 人工的破壊および乾燥による自然破壊によつて得られた裂開面(柃目および板目面)：このような裂開面では、第2および第3両節において記述したように、導管はじめ諸細胞間の孔紋膜の表面構造をとらえるのに適切であると考えて選んだ。

ii) 同上の裂開面を軽度の脱リグニン処理¹⁵⁴⁾した表面：孔紋膜におけるミクロフィブリルの排列状態を明らかにするために選んだ(化学処理は東京大学農学部木材化学研究室において実施していただいた)。

2) 検鏡試料の作製

レプリカ法によつたが、この方法は第 1 章第 2 節 2) において述べたものと全く同じである。

3) 検 鏡

第 1 章第 2 節 2) において述べたものと同じである。

3. 導管の孔紋膜の構造^{150) 165) 166) 167)}

光学顕微鏡的研究^{168) 169)}の結果によると、ブナ材の導管側壁の孔紋は対列状 (opposite pitting)、ときに階段状 (scalariform pitting) の排列をもっており、またミズナラ材の導管側壁の孔紋は交互状排列 (alternate pitting) をもっているが、いずれも重孔紋を形成し、各重孔紋の輪帯は円形、卵形または横方向に伸長した楕円形を呈しており、さらに孔紋口は凸レンズ状または横方向に線状である。Phot. 132 はブナ材の導管側壁の対列状排列の、また Phot. 133 は同じく階段状排列のそれぞれ重孔紋の構造を示すものである。ここには重孔紋の輪帯表面および孔紋口の構造が示されているが、孔紋口の長径の方向が細胞膜の第 2 次膜の厚層 (導管細胞膜の場合には外層および内層と考えられている) のマイクロフィブリル排列の方向を示すという仮定にしたがうと、導管細胞膜の第 2 次膜の厚層のマイクロフィブリルは、細胞の長軸方向に対してほぼ直角に排列しているものと考えねばならぬのであるが、Phot. 132 および 133 にみるように重孔紋の輪帯表面以外の膜層に示されている第 2 次膜外層のマイクロフィブリル排列の方向とはほぼ一致している。また輪帯表面 (第 2 次膜外層) においては、そのマイクロフィブリルは孔紋口の周縁に沿つて平行ないわゆる円状排列を示している。Phot. 134 はブナ材の導管のルーメンサイドの構造を示すものであるが、細胞膜の表面の構造は平滑であつてマイクロフィブリルは導管の長軸方向に対してほぼ直角の排列をとっている。

次にはこれらの重孔紋の孔紋膜の構造について述べねばならぬ。導管側壁における孔紋膜の構造につい

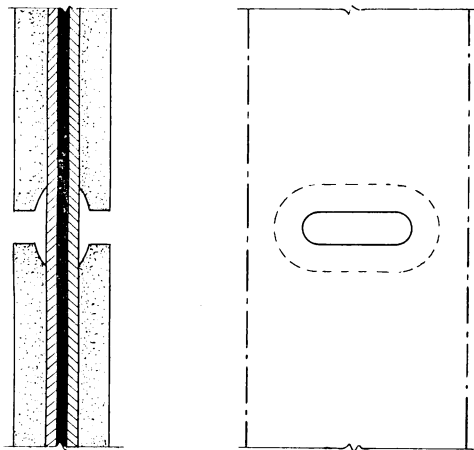


Fig. 7 広葉樹材の導管の重孔紋 (対) の模式図
黒帯線は細胞間層、斜線は第 1 次膜を示す
(BROWN, PANSHIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾)。

Schematic drawing illustrating the bordered pit pair of hardwood vessels. (the intercellular substance is indicated by solid black, the primary wall by cross-hatching)
(BROWN, PANSHIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾)

ては、光学顕微鏡的に Fig. 7 のような模式図が提案されている。すなわち孔紋膜は、細胞膜形成の過程から考えると 1 つの細胞間層 (黒帯の部分) と 2 つの第 1 次膜 (斜線の部分) とからなつていて、針葉樹材仮導管の重孔紋の孔紋膜にみるような肥厚部 (トールス) をもたないということである。Phot. 135 はブナ材の、Phot. 136 および 137 はミズナラ材のいずれも導管側壁の孔紋膜の表面の構造を示すものと判定される。その理由は、たとえば Phot. 135 と Phot. 133 とを比較すると、Phot. 135 では Phot. 133 に示されたような重孔紋の輪帯表面が、ある細胞膜層 (すなわち孔紋膜) でおおわれていると推定されるからである。これらの写真によると、孔紋膜はトールスとマルゴの区別をもたない単一な膜 (simple membrane) であるといえる。そして Phot. 137 に示されるように、孔紋膜にはかすかに網目状に

排列したミクロフィブリル構造が認められる。また **Phot. 138** および **139** は、モクマオウ材の導管側壁の重孔紋の輪帯表面および孔紋膜の構造を示すものであるが、孔紋膜は同じく単一な膜構造をもっており、孔紋膜の表面にはいわゆる網目状構造のミクロフィブリル排列の状態がきわめて顕著に認められる。

以上の写真から、このような導管側壁の孔紋膜の構造の特徴は、まず第1には針葉樹材仮導管の重孔紋の孔紋膜のようにツールのような肥厚部をもたず、孔紋膜全面にわたって一様な構造のいわゆる単一な膜構造であるということであるが、この点に関しては **Fig. 7** に示すような模式図の構造と一致しており、光学顕微鏡的な研究結果を確認したものと見える。第2には孔紋膜の表面には **Phot. 137** においてかすかに網目状のミクロフィブリル排列構造が認められ、**Phot. 139** ではこのようなミクロフィブリルの排列状態は顕著であり、このようなミクロフィブリルの排列構造は孔紋以外の部分の細胞膜の第1次膜の構造とほぼ一致する。すなわち、孔紋膜は **Fig. 7** の模式図に示すように、細胞間層とその両側に形成された第1次膜とからなるものと考えられる。そして **Phot. 135, 136** および **137** では、このようなミクロフィブリルが他の介在物質によつて密に充てんされたものと推定され、そのために個々のミクロフィブリルは顕著には認められない。ところが **Phot. 139** においてこれらのミクロフィブリルが顕著に認められるのは、供試材がモクマオウの3年生というような幼令樹材の第2～3年輪から得られたものであるために介在物の充てん度が充分でないのではなかろうか。**Bosshard¹⁶⁴⁾** は *Esche* 材の導管の細胞膜の形成過程の研究において、細胞膜の解体試料について観察し、導管側壁の孔紋膜においてはまず細胞間層が形成され、その上にいわゆる網目状構造をもつ第1次膜が形成されると報告している点からみても、このような推定は誤りないものと思われる。第3には孔紋膜におけるすき間の存在についてであるが、すでに第1および第2において述べたように孔紋膜は全域にわたって一様な構造であり、1つの細胞間層と2つの第1次膜とから構成されているとみられ、第1次膜の網目状排列のミクロフィブリルは介在物によつて密に充てんされており、写真からも電子顕微鏡的なすき間の存在は全く認められない。

また山林と須藤と金沢¹⁷⁰⁾も本邦産の豆科植物であるネムノキ (*Albizia julibrissin* DURAZZ), サイカチ (*Gledits japonica* MIQ.), エンジュ (*Sophora japonica* LINN), イヌエンジュ (*Maackia amurensis* RUPR. et MAXIM var. *Buergeri* G. K. SCHN), ニセアカシヤ (*Robinia Pseudo-Acacia* LINN) の各材の導管についてその孔紋膜は単一な膜構造であることを確認している。

以上の観察および考察の結果、導管側壁の孔紋膜はツールとマルゴのような区別はなく単一な膜 (simple membrane) であつて、1つの細胞間層と2つの第1次膜とから構成されており、第1次膜ではそのミクロフィブリルはいわゆる網目状構造をもっており、これらのミクロフィブリルは介在物によつて包埋されている。すなわち、次に述べる仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造と同様に、たとえ重孔紋対に存在する孔紋膜であつても、針葉樹材仮導管の重孔紋の孔紋膜とは異なり、針葉樹材の射出柔細胞と仮導管との間に形成される半重孔紋対または単孔紋対の孔紋膜の構造と同一であるといえる。

4. 仮導管および木繊維の孔紋膜の構造^{150) 165) 166) 167)}

光学顕微鏡的研究^{168) 169)}によると、仮導管はその形態に変化性が多いが、その細胞膜は一般に木繊維よりも薄い。仮導管が木繊維と著しく異なるのはその孔紋の構造であつて、前者が重孔紋であるのに比して後者では単孔紋である。また仮導管の孔紋口はその仮導管の長軸方向に対して傾斜した凸レンズ状または線状である (**Fig. 8**)。 **Phot. 140** はブナ材の、 **Phot. 141** はミズナラ材のいずれも仮導管の重孔紋の構造を示すものであるが、円形および楕円形の重孔紋の輪帯表面および凸レンズ状の孔紋口がみられる。

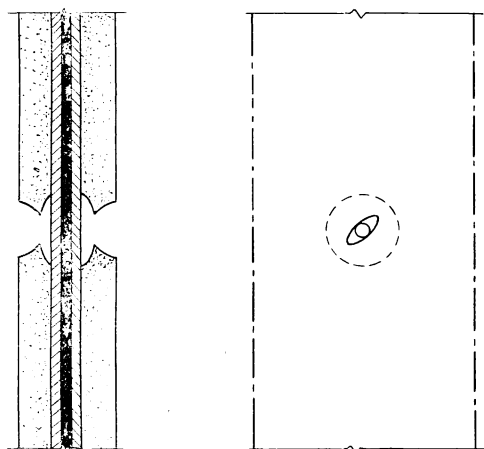


Fig. 8 広葉樹材の仮導管の重孔紋(対)の模式図
黒帯線は細胞間層, 斜線は第1次膜を示す
(BROWN, PANSIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾)

Schematic drawing illustrating the bordered pit pair of hardwood tracheids (the intercellular substance is indicated by solid black, the primary wall by cross-hatching)
(BROWN, PANSIN and FORSAITH¹⁵⁹⁾).

構造とみられる。広葉樹材仮導管においては、仮導管相互間に重孔紋対を形成しているにもかかわらず、孔紋膜の構造は針葉樹材仮導管のそれとは全く異なる構造であるということが出来る。そしてまた、2つの細胞相互間に単孔紋対を形成しているとみられる木繊維の孔紋膜についても、これと全く同様な単一な膜構造が認められた。すなわち、Fig. 8 の模式図に示すような構造が確認されたこととなる。

すでに述べた導管側壁の場合においても同様であるが、広葉樹材ではその孔紋膜は密に閉鎖された単一な膜構造であるから、針葉樹材仮導管の重孔紋の孔紋膜のように木材の乾燥状態や心・辺材の差というような条件によつて孔紋膜の一部が孔紋口を閉鎖し、それに伴つて木材中の通導過程に著しい差異を生ぜしめるというような現象は起らないで、水分の通導はこれらの孔紋膜の部分においてはすべて拡散によつて行われるであろう。これは広葉樹材では機能上組織の分化があり、水分等の通導は主として導管の穿孔によつて行われると推定されるから、導管、仮導管および木繊維の同種細胞相互間および異種細胞間の通導はこのような単一な膜でもつて充分その役割を果すことができると考えてよいのではなかろうか。

Phot. 144 および **145** はナガバノヤマグルマ材の裂開面のレプリカ写真であつて、**Phot. 144** は仮導管の、**Phot. 145** は繊維状仮導管の孔紋膜の構造を示すものと判定される。光学顕微鏡的研究¹⁷¹⁾の結果によると、ナガバノヤマグルマ材は広葉樹材ではあるが導管をもたず広葉樹材のうちでは原始的なものとみられているのであるが、その孔紋膜は他の広葉樹材の仮導管の孔紋膜と同様な単一な膜構造であつて、その表面には不規則に編まれたいわゆる網目状構造をもつ第1次膜のマイクロフィブリル排列の状態が顕著に示される。すなわち、孔紋膜の構造が単一な膜構造であるという見地からみると、導管をもつていないナガバノヤマグルマ材も明らかに広葉樹材の区分にいれるべきであると考えられ、このような単一な膜であるという孔紋膜の構造は、次の射出柔細胞の孔紋膜の構造をも含めて広葉樹材の特徴といえよう。

以上の観察および考察の結果、仮導管および木繊維の孔紋膜の構造もまた単一な膜構造であつて、電子

Phot. 141 では、重孔紋の輪帯表面の側からみているため輸出している孔紋口の内開口 (inner aperture) は全域にわたつては認められないで、重孔紋の輪帯表面の領域の部分のみ示されているが、これは表面構造のみをとらえるというレプリカの特徴を示すものとして興味がある。また孔紋口の内開口の長径の方向は、針葉樹材仮導管の第2次膜について知られたと同じく中層(最厚層)のマイクロフィブリル排列の方向を示すことが確認された。

Phot. 142 および **143** はブナおよびミズナラ材の仮導管の重孔紋の孔紋膜の表面の構造を示すものと判定されるが、これは **Phot. 140** および **141** に示す重孔紋の輪帯表面をおおつてある細胞膜すなわち孔紋膜が存在すると認められるからである。**Phot. 142** および **143** によると、孔紋膜は導管側壁の孔紋膜の構造と全く同様な単一な膜

顕微鏡的に認識されるようなすき間は存在しない。

5. 射出柔細胞の孔紋膜の構造^{150) 165) 166)}

射出柔細胞相互間の孔紋は小さくかつ単孔紋対であるが、射出柔細胞が導管と接している孔紋部分では半重孔紋対をなしている^{163) 169)}。Phot. 146 はブナ材の、Phot. 147 はミズナラ材のそれぞれ分野の部分の孔紋膜の表面構造を導管の内腔側からみたものと判定される。すなわちこれらの写真から、孔紋膜は導管、仮導管および木繊維の孔紋膜の構造と同様単一な膜構造であることが認められる。ただし、これらの写真では孔紋膜は介在物によつて密に充てんされているほか、細胞内容物が堆積しているものとみられ、ミクロフィブリル構造は認められない。

ところが、このような孔紋膜におけるミクロフィブリル排列の状態については、最近筆者らの研究室において行われた右田と細井¹⁷²⁾の研究によつて明らかにされた (Phot. 148 (細井撮影))。Phot. 148 はブナ材の裂開征目面を軽度の脱リグニン処理¹⁵⁴⁾した表面のレプリカ写真であつて、射出柔細胞と導管との間の半重孔紋対の孔紋膜を示すものと判定されるが、これは片複孔紋対 (unilaterally compound pitting) であつて、孔紋膜には射出柔細胞側の孔紋口の刻印が認められる。

また射出柔細胞と接する他の細胞との間の孔紋の孔紋膜の構造もまた、同一構造である。

以上の観察結果から、射出柔細胞と他の細胞との間に存在する孔紋膜は単一な膜構造であつて、「3 および 4」において記述した導管、仮導管および木繊維の孔紋膜の構造と全く同じである。

第5節 要 約

本章において得られた結果を要約すると次のとおりである。

1. 針葉樹材の仮導管の孔紋膜の構造をレプリカおよび超薄切片両試料について観察した結果、次のことが明らかになった。

1) 孔紋膜は、中央の肥厚部分すなわちトールスと、これを取り巻く部分すなわちマルゴとに区別され、両者は異なる構造をもっている。

2) トールスは1つの細胞間層とその両側に形成された2つの第1次膜およびその第1次膜の表面をおおつて形成された第2次的肥厚膜層とからなり、第1次膜ではミクロフィブリルはいわゆる網目状構造を、第2次的肥厚膜層ではいわゆる平行構造 (中央部では仮導管の長軸方向に緩な傾角をもつ一定方向、周縁部では円状の排列) をもっており、これらのミクロフィブリルは介在物によつて強度に包埋されている。

3) (イ) マルゴには細胞間層は存在しない。(ロ) マルゴは、トールスの第1次膜に起源し重孔紋の孔紋環に至る放射状に排列した直径 600~1,000 Å 程度の集束ミクロフィブリルと、これに交さして存在する直径 200 Å 程度 of 非集束ミクロフィブリルとからなり、これらの集束、非集束両ミクロフィブリルの間にはすき間が存在する。(ハ) マルゴのすき間は一般に春材仮導管では、そのすき間から重孔紋の輪帯表面の構造を認めうる程度の大きさでいわゆる疎構造であるが、秋材仮導管に移行するにしたがつてすき間は小となりいわゆる密構造となる。

2. 針葉樹材の射出線細胞と仮導管との間の孔紋膜の構造をレプリカ試料について観察した結果次のことが明らかになった。

1) 射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対および単孔紋対の孔紋膜は単一な膜であり、細胞間層と第1次膜とから構成され介在物によつて充てんされているが、電子顕微鏡的に認められるすき間は存在しない。

い。

2) 射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜は、仮導管の重孔紋の孔紋膜と同じくトールスとマルゴとに区分されるが、マルゴを構成するマイクロフィブリルは著しく密集しておりいわゆる密構造である。

3. 広葉樹材の諸細胞の相互間の孔紋膜の構造をレプリカ試料について観察した結果次のことが明らかになった。

1) 導管、仮導管、木繊維、射出柔細胞等の同種細胞相互間ならびにこれらの異種細胞間の孔紋膜は、トールスとマルゴのような区別はなく単一の膜であつて、1つの細胞間層と2つの第1次膜とから構成されており、第1次膜ではマイクロフィブリルはいわゆる網目状構造をもっており、これらのマイクロフィブリルは介在物によつて包埋されている。そして、針葉樹材の射出柔細胞と仮導管との間の孔紋膜の構造と同一である。

2) ナガバノヤマガルマ材のように仮導管のみから構成されている材においても、孔紋膜は単一の構造であるから、このような孔紋膜の単一の膜構造は広葉樹材の孔紋膜の特徴的構造といふことができる。

結 言

本報告はすべての木材の研究および利用の基礎をなす木材の細胞膜の微細構造に関して、電子顕微鏡的な観察によつて研究した結果について過去数年間の研究成績をとりまとめたものであるが、従来光学顕微鏡やX線廻折によつて間接的に推定されていた事項を直接に可視化実証し、さらにまだ全く知られていなかった事項をあらたに発見するなど、木材の細胞膜の微細構造に関する知見を拡大発展せしめた。

本報告においては、電子顕微鏡による検鏡用プレパラートの作製方法の大部分をレプリカ法によつているのであり、しかも木材の利用上の基礎的知見についても2、3の事項について系統だてたにとどまつており、今後の問題こそ大きいといえる。しかしながら、このような報告が今後のこの方面への研究の道案内となり、さらに木材の利用上の諸問題解明の一助ともならば筆者ら望外のよろこびである。

筆者らの研究もちろんこれで終つたのではなく、今後は検鏡用プレパラート作製に主として超薄切片法を採用し、既往の知見の確認や新知見の究明に精進する考えである。

総 括

木材の利用上の長所や短所となつている木材の諸特性は、木材を構成する組成物質および木材の構造に起因するものであるが、なかんずく木材を構成する種々の細胞の主体をなす細胞膜の構造によつて大きな影響をうけるものと考えられる。それゆえに一見はなほだ迂遠と思われる木材の細胞膜の微細構造に関する研究が、実は木材の利用上に不可欠の基礎となるものである。今までは木材の細胞膜構造に関する研究は、その観察手段の制約によつて足踏みしている状態にあつた。ところが、電子顕微鏡という有力な研究手段の出現によつて、今まで未知であつた領域の微細構造を直接に可視化して明らかにすることができるようになった。

この報告は、電子顕微鏡的な観察によつて、木材の細胞膜の構造的な特質を明らかにし、木材の利用上の基礎的な知見たらしめることを目的として、過去数年間にわたつて行つた研究成績のうち次の3つの項目、すなわち（I）針葉樹材の細胞膜の膜層の構造、（II）針葉樹材仮導管のイボ状構造、（III）針葉樹、広葉樹両材の孔紋膜の構造についてとりまとめたものである。

本研究の結果を要約すると次のとおりである。

I 針葉樹材の細胞膜の膜層の構造

1. 仮導管の細胞膜の構造特にそのマイクロフィブリルの排列を、主としてレプリカ試料について観察した結果、

1) 既往の光学顕微鏡（偏光顕微鏡を含む）的研究によつて大体推定されていた構造の存在すること、特に第2次膜の孔紋およびその周辺部の構造を可視化実証した。

すなわち第1次膜では、マイクロフィブリルはいわゆる網目状構造をもっており、第2次膜の外、内両層ではマイクロフィブリルは仮導管の長軸方向に対してほぼ直角（ $70\sim 80^\circ$ ）の排列傾角をもつて排列している、いわゆる横巻き構造をもっており、また中層ではマイクロフィブリルは仮導管の長軸方向に対して比較的急な排列傾角（ $10\sim 30^\circ$ ）をもっている。マイクロフィブリルの平行度は中層で最も良く、外層でもかなり良いが、内層では著しく悪い。さらに孔紋およびその周辺部分についてみると、まず第2次膜外層ではいわゆる横巻き構造のマイクロフィブリルが重孔紋の輪帯表面を周回して偏異し、ふたたび合一する排列をもっているが、輪帯表面ではいわゆる円状構造をもっている。次に中層では、仮導管の長軸方向に対して比較的急な傾角をもつて排列しているマイクロフィブリルが、主方向としてはそのような排列傾角を保ちながら、孔紋口の周辺で周回偏異し、ふたたび合一する排列をもっているが、特にこのような孔紋口や射出柔細胞との間に存在する半重孔紋対の仮導管側の孔紋口の長径の方向は、中層のマイクロフィブリル排列の主方向とはほぼ一致している。最後に、内層ではいわゆる横巻き構造のマイクロフィブリルが、孔紋口の周辺で周回偏異してふたたび合一するのであるが、この場合には孔紋口の周辺でその走行方向を逆転している。なお射出柔細胞との間に形成される半重孔紋の凸レンズ状孔紋口の部分においては、局部的にマイクロフィブリルは偏異排列している。

2) 第2次膜におけるラメラの移行構造については、小林と内海²⁶⁾の研究結果を確認するとともに、さらにその見解を発展させた。すなわち第2次膜の外、中および内の各層はそれぞれ同傾角、同走行方向のマイクロフィブリル排列をもつラメラからなるが、外層から中層へ、また中層から内層への各層間においては、マイクロフィブリルはその排列傾角を順次変化するのみでなく、ついにはその走行方向が逆転するに至

るラメラが存在する。そして外、中および中、内の各層間ではそのミクロフィブリル排列の走行方向は交差しており、また中層は第2次膜中の最厚層である。

2. 射出柔細胞の細胞膜の構造特にそのミクロフィブリルの排列を、主としてレプリカ試料について観察した結果、

1) 第1次膜はそのミクロフィブリルはいわゆる網目状構造をもっていることを実証した。

2) 第2次膜は細胞の長軸方向に対して約40°のミクロフィブリルの排列傾角をもつ膜層の存在するという光学顕微鏡的研究結果を実証するとともに、さらにその他に新たに細胞の長軸方向にはほぼ平行なミクロフィブリル排列をもつ膜層、およびミクロフィブリルが不規則に編まれた膜層の存在することを見出した。

3. アテ材 (compression wood) の仮導管の細胞膜の構造、特にそのミクロフィブリルの排列を主としてレプリカ試料について観察した結果、

1) 第1次膜および第2次膜各層におけるミクロフィブリルの排列状態を可視化し、既往の光学顕微鏡的な研究結果を実証した。すなわち、第1次膜はそのミクロフィブリルは網目状構造をもっており、第2次膜はそのミクロフィブリルが仮導管の長軸方向に対してほぼ直角の排列傾角をもっている外層と、比較的急な傾斜をもつて螺旋状に排列している内層とからなっている。アテ材の仮導管の細胞膜に特有の螺旋状のさけ目の方向は、第2次膜内層のミクロフィブリル排列の主方向と一致している。

2) アテ材の仮導管にも、ある種の針葉樹材では正常材の仮導管の場合と同じく、そのルーメンサイドに特異構造 (イボ状構造) の第3次膜の存在することを見出した。

Ⅱ 針葉樹材仮導管のイボ状構造

1. 針葉樹材仮導管のイボ状構造をレプリカおよび超薄切片試料について研究した結果、次のことが明らかになった。

1) イボ状構造はある種の針葉樹材の仮導管の細胞膜に固有の構造として、仮導管のルーメンサイドおよび重孔紋の輪帯表面に存在する。

2) イボ状構造はある種の針葉樹材の樹種の特徴として、同一樹種に普遍的に存在する。

3) イボ状構造は、仮導管のルーメンサイドおよび重孔紋の輪帯表面をおおうフィブリル状でない薄膜と、それが部分的に突出したいわゆるイボ状突起とから構成されており、そのうち特にイボ状突起の分布密度には著しいバラツキがある。またイボ状突起の大きさについては、同一樹種内でも大きなバラツキがあるが、ヒノキおよびスギ両材について計測した結果、その直径は 0.04~0.28 μ 、高さは 0.02~0.20 μ であった。

4) 仮導管の細胞膜の区分上からは、イボ状構造は第2次膜よりも後に形成され、しかもその性質が全く第2次膜と異なるという点から、第3次膜とよぶ小林と内海¹¹⁾の見解を支持する。

2. 針葉樹 29 属 55 樹種の材について、レプリカ試料によつてイボ状構造の存否を調べ、その分類表を作成した。その結果、次のことが明らかになった。

1) 針葉樹材の仮導管にイボ状構造が存在するか存在しないかということは、樹種の特徴として針葉樹材の分類学的価値をもっている。

2) 仮導管にイボ状構造が存在するか存在しないかということは、*Pinus* 属を除いては針葉樹材の属 (genus) の特徴となつている。

3) *Pinus* 属内ではイボ状構造が存在するか存在しないかは亜属 (subgenus) の特徴となつている。

4) イボ状構造が存在する科 (属) は *Ginkgoaceae* (*Ginkgo*), *Araucariaceae* (*Araucaria*, *Agathis*), *Sciadopitaceae* (*Sciadopitys*), *Taxodiaceae* (*Cryptomeria*, *Cunninghamia*, *Taxodium*, *Sequoia*, *Glyptostrobus* および *Taiwania*), *Cupressaceae* (*Chamaecyparis*, *Thuja*, *Thujopsis*, *Juniperus*, *Libocedrus* および *Cupressus*) *Pinaceae* の一部 (*Abies*, *Tsuga*, *Cedrus*, *Keteleeria* および *Pinus* (ただし *Diploxylon* 亜属のみ))。

5) イボ状構造が存在しない科 (属) は *Taxaceae* (*Taxus*, *Torreya* および *Cephalotaxus*), *Podocarpaceae*, (*Podocarpus*), *Pinaceae* の一部 (*Pseudotsuga*, *Picea*, *Larix* *Pseudolarix* および *Pinus* (ただし *Haploxylon* 亜属のみ)) である。

Ⅲ 針葉樹, 広葉樹両材の孔紋膜の構造

1. 針葉樹材の仮導管の孔紋膜の構造をレプリカおよび超薄切片両試料について観察した結果, 次のことが明らかになった。

1) 孔紋膜は中央の肥厚部分すなわちトールスと, これを取り巻く部分すなわちマルゴとに区別され, 両者は異なる構造をもっている。

2) トールスは1つの細胞間層とその両側に形成された2つの第1次膜およびその第1次膜の表面をおおつて形成された第2次的肥厚膜層とからなり, 第1次膜ではマイクロフィブリルはいわゆる網目状構造を, 第2次的肥厚膜層ではいわゆる平行構造 (中央部では仮導管の長軸方向に緩な傾角をもつ一定方向, 周縁部では円状の排列) をもっており, これらのマイクロフィブリルは介在物によつて強度に包埋されている。

3) (イ) マルゴには細胞間層は存在しない。(ロ) マルゴは, トールスの第1次膜に起源し重孔紋の孔紋環に至る放射状に排列した直径 $600\sim 1,000\text{ \AA}$ 程度の集束マイクロフィブリルと, これに交さして存在する直径 $200\text{ \AA}$ 程度 of 非集束マイクロフィブリルとからなり, これらの集束, 非集束両マイクロフィブリルの間にはすき間が存在する。(ハ) マルゴのすき間は一般に春材仮導管では, そのすき間から重孔紋の輪帯表面の構造を認めうる程度の大きさでいわゆる疎構造であるが, 秋材仮導管に移行するにしたがつてすき間は小となりいわゆる密構造となる。

2. 針葉樹材の射出線細胞と仮導管との間の孔紋膜の構造をレプリカ試料について観察した結果, 次のことが明らかになった。

1) 射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対および単孔紋対の孔紋膜は単一な膜であり, 細胞間層と第1次膜とから構成され, 介在物によつて充てんされているが, 電子顕微鏡的に認められるすき間は存在しない。

2) 射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜は, 仮導管の重孔紋の孔紋膜と同じくトールスとマルゴとに区分されるが, マルゴを構成するマイクロフィブリルは著しく密集しておりいわゆる密構造である。

3. 広葉樹材の諸細胞の相互間の孔紋膜の構造をレプリカ試料について観察した結果, 次のことが明らかになった。

1) 導管, 仮導管, 木繊維, 射出柔細胞等の同種細胞相互間ならびにこれらの異種細胞間の孔紋膜は, トールスとマルゴのような区別はなく単一な膜であつて, 1つの細胞間層と2つの第1次膜とから構成されており, 第1次膜ではマイクロフィブリルはいわゆる網目状構造をもっており, これらのマイクロフィブリルは介在物によつて包埋されている。そして針葉樹材の射出柔細胞と仮導管との間の孔紋膜の構造と同一である。

2) ナガバノヤマガルマ材のように仮導管のみから構成されている材においても, 孔紋膜は単一な膜構造であるから, このような孔紋膜の単一な膜構造は広葉樹材の孔紋膜の特徴的構造といふことができる。

文 献

緒 言

- 1) 小林恵之助：京大電子顕微鏡講演集，1 (1949)
- 2) 小林恵之助・内海暢生：日本化学纖維研究所講演集，No. 12, (1955) p. 159.
- 3) 小林恵之助・近土 隆：日本化学纖維研究所講演集，No. 8, (1943) p. 1.
- 4) 小林恵之助・内海暢生：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 56, (1951) p. 93.
- 5) FREY-WYSSLING A., MÜHLETHALER K. and WYCKOFF R. W. G.: *Experientia*, 4, (1948), p. 475.

第 1 章

- 6) NÄGELI C. V.: *Die Stärkekörner*, Schulthub, Zürich (1858).
- 7) MEYER K. H.: *Hoch Polymere Chem.*, 2, (1940) p. 235.
- 8) STAUDINGER H. und SIGNER R.: *Z. f. Kristallogr.*, 70, (1929) p. 193.
- 9) MARK H.: *Z. Physik, Chem.*, 36, (1937) p. 129.
- 10) MAHL H.: *Kolloid Zt.*, 96, (1941) p. 7.
- 11) WUHLMANN K., HEUBERGER A. und MÜHLETHALER K.: *Experientia*, 2, (1946) p. 3.
- 12) HUSEMANN E.: *Makromol, Chem.*, 1, (1947) p. 158.
- 13) FREY-WYSSLING A. and MÜHLETHALER K.: *Textile Research J.*, 17, (1947) P. 32.
- 14) KINSINGER W. G. and HOCK C. W.: *Ind. Eng. Chem.*, 40, (1948) p. 1,711.
- 15) PRESTON R. D., NICOLAI E., REED R. and MILLARD A.: *Nature*, 162, (1948) p. 665.
- 16) FREY-WYSSLING A. and MÜHLETHALER K.: *Mikroskop*, 4, (1949) p. 257.
- 17) FREY-WYSSLING A., MÜHLETHALER K. and WYCKOFF R. W. G.: *Experientia* 4, (1948) p. 475.
- 18) FREY-WYSSLING A.: *Makromol, Chem.*, 6, (1951) p. 7.
- 19) HODGE A. J. and WARDROP A. B.: *Nature* 165, (1950) p. 272.
- 20) HODGE A. J. and WARDROP A. B.: *Aus. J. Sci. Research*, 3, (1950) p. 265.
- 21) RANBY B. G. and RIBI E.: *Experientia*, 6, (1950) p. 12.
- 22) MÜHLETHALER K.: *Bioch, Biophys, Acta*, 3, (1949) p. 15.
- 23) FREY-WYSSLING A.: *Science*, 119, (1954) p. 80.
- 24) 小林恵之助・内海暢生：日本化学纖維研究所講演集，No. 10~11, (1954) p. 113.
- 25) 小林恵之助・内海暢生：日本化学纖維研究所講演集，No. 12, (1955) p. 173.
- 26) 小林恵之助・内海暢生：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 56, (1951) p. 93.
- 27) KERR T. and BAILEY I. W.: *J. Arnold Arboretum*, 15, (1934) p. 327.
- 28) PRESTON R. D.: *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 224, (1934), p. 131.
- 29) PRESTON R. D.: "The Molecular Architecture of Plant Cell Walls", London (1952).
- 30) 小原亀太郎：人絹界，7, (1939) p. 1.
- 31) 久保輝一郎・呉 祐吉：工業化学雑誌，46, (1941) p. 651.
- 32) WARDROP A. B. and PRESTON R. D.: *Nature*, 160, (1947) p. 911.
- 33) WARDROP A. B. and PRESTON R. D.: *J. Exp. Bot.*, 2, (1951) p. 20.
- 34) WARDROP A. B.: *Holzforschung.*, 8, (1954) p. 12.
- 35) 尾中文彦：日本林学会誌，18, 588, (1936).
- 36) BAILEY I. W. and VESTAL M. R.: *J. Arnold Arboretum*, 18, 196, (1937).

- 37) 尾中文彦・原田 浩：日本林学会誌，33，(1951) p. 60 (ONAKA F. and HARADA H.: The micellar orientation in the secondary wall of coniferous tracheids. J. Jap. Forest. Soci. 33, (1951) p. 60.)
- 38) BAILEY I. W. and VESTAL M. R.: J. Arnold Arboretum, 18, (1937) p. 186.
- 39) 原田 浩・貴島恒夫・梶田 茂：木材研究，No. 6, (1951) p. 34 (HARADA H., KISHIMA T. and KADITA S.: The micellar orientation in the secondary wall of coniferous tracheids (II) "Wood Research" Bull. Wood Research Instit. Kyoto Univ. No. 6, (1951) p. 34.)
- 40) 小林恵之助・近土 隆：日本化学繊維研究所講演集，No. 8, (1943) p. 1.
- 41) FISCHBEIN I. W.: J. Applied Phys., 21, (1950) p. 1, 199.
- 42) 上村 武：九大農学部学芸誌，13, (1951) p. 225.
- 43) 駒形 治・木村良平：パルプ紙工業誌，6, (1952) p. 194.
- 44) 原田 浩・宮崎幸男：日本林学会誌，34, (1952) p. 350 (HARADA H. and MIYAZAKI Y.: The electron microscopic observation of the cell wall of conifer tracheids. J. Jap. Forest. Soci. 34, (1952) p. 350.)
- 45) LIESE W. und FAHNENBROCK M. H.: Holz als Roh-und Werkstoff, 10, (1952) p. 197.
- 46) LIESE W. und FAHNENBROCK M. H.: Bioch. Biophys. Acta., 11, (1953) p. 190.
- 47) WARDROP A. B. and DADSWELL H. E.: Holzforschung, 7, (1953) p. 33.
- 48) WARDROP A. B.: HOLZFORSCHUNG, 8, (1954) p. 17.
- 49) 小林恵之助・駒形 治・原田 浩：国際電子顕微鏡学会 (ロンドン) における報告 (1954)
- 50) MEIER H.: Holz als Roh-und Werkstoff, 13, (1955) p. 323.
- 51) 原田 浩：第 65 回日本林学会大会講演集，(1956) p. 1. (HARADA H.: The electron microscopic investigation of wood—On the fine structure of the wart-like structure and of the pit membrane—Transact. 65th Meeting Jap. Forest. Soci. (1956) p. 1.)
- 52) 原田 浩：第 12 回日本電子顕微鏡学会において発表 (未印刷) (1956) (HARADA H.: Unpublished)
- 53) 篠達喜人：“植物細胞学実験法” 生物学実験法講座 (第 4 巻) (1937).
- 54) HEIDENREICH R. D. and PECK V. G.: J. Applied Phys., 14, (1943) p. 23.
- 55) 只野文哉：応用物理，16, (1947) p. 113.
- 56) 小林恵之助・駒形 治：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 55, (1950) p. 129.
- 57) 深見 章・安達公一・中川重明：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 55, (1950) p. 114.
- 58) 深見 章・串田 弘：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 56, (1951) p. 126.
- 59) 赤堀 宏：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 56, (1951) p. 138.
- 60) 深見 章：電子顕微鏡総合研究委員会資料，No. 58, (1951) p. 136.
- 61) 深見 章：電子顕微鏡，2, (1951) p. 59.
- 62) MENNENÖH S. und FAHNENBROCK M. H.: Zets. wiss. Mikroskop. und mikroskop. Tech. 60, (1951) p. 203.
- 63) 土倉秀次・赤堀 宏：電子顕微鏡，2, (1952) p. 127.
- 64) 深見 章：電子顕微鏡，3, (1954) p. 16.
- 65) 深見 章：電子顕微鏡，4, (1955) p. 274.
- 66) 原田 浩・若島妙子：(未発表) (HARADA H. and WAKASHIMA T.: Unpublished)
- 67) 深見 章・四本晴夫：電子顕微鏡，4, (1956) p. 166.
- 68) 土倉秀次：電子顕微鏡，3, (1954) p. 131.
- 69) 深見 章：電子顕微鏡，3, (1954) p. 134.
- 70) 日比忠俊：電子顕微鏡，3, (1954) p. 137.
- 71) MÜHLETHALER K.: Umschu Wissenschaft und Tech., 10, (1952) p. 1.

- 72) FREY-WYSSLING A. und BOSSHARD H.H.: Holz als Roh-und Werkstoff, 11, (1953) p. 417.
- 73) RIBI E.: Experiment. Cell Research. 5, (1953) p. 161.
- 74) ASUNMAA S.: Svensk Papperstidning, Nr. 10, (1954) p. 1.
- 75) ASUNMAA S.: Svensk Papperstidning, Nr. 2, (1955) p. 1.
- 76) 串田 弘: 電子顕微鏡, 3, (1954) p. 199.
- 77) 串田 弘: (未発表)
- 78) FREY-WYSSLING A.: Mikroskop. 47. (1930) p. 1.
- 79) 小原亀太郎・野原栄一: 繊維, 7, (1940) p. 1.
- 80) BROWN H. P., PANSHIN A. J. and FORSAITH C. C.: "Textbook of Wood Technology, Vol. 1" (1949) p. 93.
- 81) 小原亀太郎: 生物学綜報, 1, (1947) p. 10.
- 82) 山田 正・梶田 茂: 木材研究, No. 9, (1952) p. 42.
- 83) WARDROP A. B.: Aus. J. Bot., 2, (1954) p. 154.
- 84) BOSSHARD H. H.: Bericht. Schweiz. Bot. Gesellschaft. 62, (1952) p. 482.
- 85) 原田 浩: 日本林学会誌, 35, (1953) p. 393 (HARADA H.: Electron-microscopic investigation on the wart-like (particle) structure of conifer tracheids. J. Jap. Forest. Soci. 35, (1953) p. 393.)
- 86) 原田 浩: 木材学会誌, 1, (1955) p. 85, (HARADA H.: Electron-microscopic investigation on the wart-like structure of conifer tracheids (II). J. Jap. Wood Research Soci. 1, (1955) p. 85.)
- 87) 原田 浩: (未発表) (HARADA H.: Unpublished)
- 88) BARKAS W. W.: Trans. Faraday Soc., 37, (1941) p. 535.
- 89) CLARKE S. H.: Forestry. 4, (1930) p. 93.
- 90) GREENHILL W. L.: Aust. Tech. Pap., 21, (1936).
- 91) GREENHILL W. L.: Aust. Tech. Pap., 35, (1940)
- 92) McINTOSH D. C.: For. Prod. J. 4, (1954) p. 39.
- 93) McINTOSH D. C.: For. Prod. J. 5, (1955) p. 67.
- 94) McINTOSH D. C.: For. Prod. J. 5, (1955) p. 355.
- 95) 梶田 茂・中戸莞二: 日本林学会誌, 35, (1953) p. 51.
- 96) TUSZON J.: Bericht. Deut. Bot. Gesellschaft. 21, (1903) p. 276.
- 97) RITTER G. J. and MITCHEL G. L.: Paper Trade J., 108, (1939) p. 33.
- 98) GROSS S. T., CLARKE G. L. and RITTER G. J.: Paper Tr. J., 109, (1939) p. 303.
- 99) WARDROP A. B. and DADSWELL H. E.: Aus. J. Sci. Res., 5, (1952) p. 223.
- 100) 沢田 稔: (未発表)
- 101) 原田 浩: 日本林学会誌, 35, (1953) p. 194 (HARADA H.: The electron-microscopic observation of xylary ray cells of conifer woods. J. Jap. Forest. Soci. 35, (1953) p. 194.)
- 102) 原田 浩: (未発表) (HARADA H.: Unpublished).
- 103) HARTIG R.: "Holzuntersuchungen alles und neues" Berlin (1901).
- 104) PILLOW M. Y. and LUXFORD R. R.: U. S. Dep. Agr. Tech. Bul., 546, (1937) p. 1.
- 105) MÜNCH E.: Flora (N. S.), 32, (1937~1938) p. 357. p. 424.
- 106) 兼次忠蔵: 青森林友, 182, (1930) p. 21.
- 107) 尾中文彦: 日本林学会昭和 14 年春季大会講演集, (1939) p. 578.
- 108) 尾中文彦: 木材研究, No. 1, (1949) p. 1.
- 109) DADSWELL H. E. and HAWLEY L. F.: Ind. Eng. Chem., 21, (1929) p. 773.

- 110) BAILEY I. W. and KERR T.: J. Arnold Arboretum, 18, (1937) p. 261.
- 111) DADSWELL H. E. and ELLIS D. J.: J. Coun. Sci. Ind. Res., 13, (1940) p. 44.
- 112) WARDROP A. B. and DADSWELL H. E.: Aus. J. Sci. Res., 3, (1950) p. 1.
- 113) 原田 浩・宮崎幸男: 林試研究報告, No. 54, (1952) p. 101 (HARADA H. and MIYAZAKI Y.:
Electron-microscopic observation of compression wood. Bull. Govt. Forest. Exp. Stat.
No. 54 (1952) p. 101.)

第 2 章

- 114) 小林恵之助・内海暢生: 電子顕微鏡総合研究委員会資料, No. 56, (1951) p. 95.
- 115) 上村 武: 九大農学部学芸誌, 13, (1951) p. 225.
- 116) 土倉秀次: 電子顕微鏡, (1951) p. 198.
- 117) 駒形 治・木村良平: パルプ紙工業誌, 6, (1952) p. 194.
- 118) 原田 浩・宮崎幸男: 日本林学会誌, 34, (1952) p. 350 (HARADA H. and MIYAZAKI Y.:
The electron microscopic observation of the cell wall of conifer tracheids. J. Jap.
Forest. Soci. 34, (1952) p. 350)
- 119) LIESE W. und FAHNENBROCK M.: Holz als Roh-und Werkstoff, 10, (1952) p. 197.
- 120) LIESE W. und FAHNENBROCK M.: Bioch. Biophys., Acta. 11, (1953) p. 190.
- 121) 原田 浩: 日本林学会誌, 35, (1953) p. 393 (HARADA H.: Electron-microscopic investi-
gation on the wart-like (particle) structure of conifer tracheids. J. Jap. Forest. Soci.
35, (1953) p. 393.)
- 122) 原田 浩: 第 65 回日本林学会大会講演集, (1956) p. 1 (HARADA H.: The electron micros-
copic investigation of wood—On the fine structure of the wart-like structure and the
pit membrane—. Transact. 65th meeting Jap. Forest. Soci. (1956) p. 1.)
- 123) 原田 浩: 木材学会誌, 1, (1955) p. 85 (HARADA H.: Electron-microscopic investigation
on the wart-like structure of conifer tracheids (II). J. Jap. Wood Research. Soci., 1,
(1955) p. 85.)
- 124) 小林恵之助・内海暢生: 日本化学繊維研究所講演集, No. 12, (1955) p. 173.
- 125) LIESE W. und JOHANN I.: Planta. 44, (1954) p. 269.
- 126) 原田 浩・宮崎幸男: 林試研究報告, No. 54, (1952) p. 101 (HARADA H. and MIYAZAKI Y.:
Electron-microscopic observation of compression wood. Bull. Govt. Forest. Exp. Stat.
No. 54, (1952) p. 101.)
- 127) FREY-WYSSLING A., MÜHLETHALER K. und BOSSHARD H. H.: Holz als Roh-und Werkstoff.
13, (1955) p. 245.
- 128) FREY-WYSSLING A., MÜHLETHALER K. und BOSSHARD H. H.: Holz als Roh-und Werkstoff.
14, (1956) p. 161.
- 129) 原田 浩: (未発表) (HARADA H.: Unpublished).
- 130) 岩田利治・草下正夫: “邦産松柏類図説,” (1952)
- 131) 金平亮三: 台湾中研林業報告, No. 4, (1926) p. 261.
- 132) 小林弥一: 林試研究報告, No. 98, (1957) p. 1.
- 133) HODGE A. J. and WARDROP A. B.: Aus. J. Sci. Res., 3, (1950) p. 265.
- 134) PILGER R.: Natürl Pflanzenfamilien von Engler u. Prantl. 2. Aufe., Bd. 13,
Leipzig (1926).

第 3 章

- 135) RECORD S. J.: “Identification of the timbers of temperate North America” New

- York. (1934) p. 18.
- 136) FRENZEL P.: *Planta*, 8, (1929) p. 642.
- 137) STAMM A. J.: U. S. Dept. Agr. Tech. Bull., 929, (1946) p. 1.
- 138) RUSSOW C.: *Bot. Zbl.*, 13, (1883) p. 29.
- 139) WRIGHT J. G.: *R. S. C.*, 22, (1928) p. 63.
- 140) 兼次忠蔵：日本林学会誌, 13, (1931) p. 243.
- 141) 原田 浩・宮崎幸男：林試研究報告, No. 54, (1952) p. 101 (HARADA H. and MIYAZAKI Y.: Electron-microscopic observation of compression wood. *Bull. Govt. Forest Exp. Stat.* No. 54, (1952) p. 101.)
- 142) BAILEY I. W.: *Forestry Quart.*, 11, (1913) p. 12.
- 143) KERR T. and BAILEY I. W.: *J. Arnold Arboretum*, 15, (1934) p. 327.
- 144) LIESE W. und FAHNENBROCK M.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, 10, (1952) p. 197.
- 145) 原田 浩・宮崎幸男：日本林学会誌, 34, (1952) p. 350 (HARADA H. and MIYAZAKI Y.: The electron microscopic observation of the cell wall of conifer tracheids. *J. Jap. Forest. Soci.* 34, (1952) p. 350)
- 146) FREY-WYSSLING A. und BOSSHARD H. H.: *Holz als Roh und Werkstoff*, 11, (1953) p. 417.
- 147) EICKE R.: *Bericht. Deut. Bot. Gesellschaft*, 67, (1954) p. 213.
- 148) LIESE W. und JOHANN I.: *Naturwissenschaften*, 41, (1954) p. 579.
- 149) 原田 浩・宮崎幸男・若島妙子：第1回日本木材学会大会講演会において発表(未印刷)(1955) (HARADA H., MIYAZAKI Y. and WAKASHIMA T.: Unpublished).
- 150) 原田 浩：第65回日本林学会大会講演集, (1956) p. 1 (HARADA H.: The electron microscopic investigation of wood—On the fine structure of the wart-like structure and of the pit membrane—*Transact. 65 th meeting Jap. Forest. Soci.* 1956, p. 1)
- 151) JAYME G. und HUNGER U. G.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, 13, (1955) p. 212.
- 152) BOSSHARD H. H.: *Schweiz. Zeit. Forstwes.*, 107, (1956) p. 1.
- 153) FREY-WYSSLING A., BOSSHARD H. H. und MÜHLETHALER K.: *Planta*, 47, (1956) p. 115.
- 154) WISE L. E., MURPHY M. and D'ADDIECO A.: *Paper Trade J.*, 123, (1946) p. 35.
- 155) LIESE W. und FAHNENBROCK M.: *Bioch. Biophys. Acta.*, 11, (1953) p. 190.
- 156) 古沢 清：林試研究報告, No. 76, (1954) p. 170.
- 157) KOLJO B.: Report “Svensha Träforskningsinstitutet” (1951).
- 158) FREY-WYSSLING A., MÜHLETHALER K. und BOSSHARD H. H.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, 13, (1955) p. 245.
- 159) BROWN H. P., PANSHIN A. J. and FORSAITH C. C.: “Textbook of Wood Technology. Vol. 1” (1949) p. 79, 151.
- 160) 沢田 稔：(未発表)
- 161) 原田 浩：日本林学会誌, 35, (1953) p. 194 (HARADA H.: The electron-microscopic observation of xylary ray cells of conifer woods. *J. Jap. Forest Soci.* 35, (1953) p. 194.)
- 162) 原田 浩：(未発表) (HARADA H.: Unpublished)
- 163) LIESE W.: (未発表)
- 164) BOSSHARD H. H.: *Bericht. Schweiz. Bot. Gesellschaft*, 62, (1952) p. 482.
- 165) 原田 浩：第63回日本林学会大会講演集, (1954) p. 258 (HARADA H.: Electron-microscopic investigation on the pits of Buna-wood (*Fagus crenata* Blume). *Transact. 63 th Meeting Jap. Forest. Soci.* (1954) p. 258.)
- 166) 原田 浩：木材工業, 9, (1954) p. 375 (HARADA H.: Electron-microscopic investigation

- on the pit of “Buna” (*Fagus crenata* Blume and “*Quercus crispula*” Blume) wood. Wood Industry, 9, (1954) p. 375.)
- 167) 原田 浩: (未発表) (HARADA H.: Unpublished).
- 168) SHIMAJI K.: Bull. Tokyo Univ. Forest., 46, (1952) p. 181.
- 169) SHIMAJI K.: Bull. Tokyo Univ. Forest., 46, (1954) p. 193.
- 170) 山林 暹・須藤彰司・金沢啓悟: 第 64 回日本林学会大会講演集, (1955) p. 304.
- 171) 金平亮三: 台湾中研林業報告, No. 4, (1926) p. 189.
- 172) 右田伸彦・細井駿雄: 東京大学演習林報告, No. 52, (1956) p. 119.

(Résumé)

The physical and mechanical properties of wood, which bring good or bad results on wood technological methods, result from the chemical components and the structure of wood, especially the cell wall structure of it. The study on the cell wall structure of wood gives us the basic knowledge on which the immense field of wood technology is based. Numerous photomicrographs of wood sections and of isolated wood fibers obtained by using ordinary light and polarized light as well as X-ray investigations, have led to much fundamental knowledge concerning the cell wall structure of wood. Recently, the electron microscope has made possible the direct observation of the more minute structural elements. Thus, the submicroscopic cellulose fibrils (i. e. microfibrils) of which the wood cell wall is supposed to be formed, can be observed with the electron microscope.

In this article, the authors' views on the cell wall structure of wood obtained by the electron microscopic investigation in the past few years are summarized.

The extent to which the observations with the electron microscope are capable of recording the minute structure in the cell wall of wood is determined by the technique used in making the preparations and by the resolving power of the electron microscope. Thus, the results of this investigation depended on the preparation of surface replica mainly, and of thin section ((1) replica technique: two-step method (ethylmetacrylate-carbon (or Al), Cr-shadowed) and one-step method (collodion, Cr-shadowed), (2) thin sectioning technique: KUSHIDA's method (the original glass knife and the new model sliding microtome)). The specimens were observed in the Shimazu C₂ Type Electron Microscope of 50 KV.

I. The cell wall structure of softwood

1. On the microfibrillar orientation in the cell wall layer of tracheids⁽⁴⁴⁾⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾⁽⁸⁵⁾⁽⁸⁶⁾

87)

1) It was demonstrated that the cell wall of the mature tracheid consisted of the same walls and layers as presumed under the microscopic investigations by ordinary or polarized light. In other words, in the primary wall the chief microfibrillar orientation was approximately transverse to the longitudinal tracheid axis, and the microfibrils showed the so-called “net-work” structure (Photos. 4, 5 and 6). The microfibrillar orientation in either of the outer or the inner layer of the secondary wall was at a large angle (about 70~80°) to the longitudinal tracheid axis, and the structure of this

microfibrillar orientation was named the “flat-helix” structure (Photos. 7, 8(S₁), 9(S₁), 12, 13 and 14). In the central layer of the secondary wall the microfibrillar orientation was relatively steep (about 10~30°) to the longitudinal tracheid axis and formed a helix around it (Photos. 8(S₂), 9(S₂), 10 and 11). In the secondary wall, the microfibrills had a higher parallelity of their own arrangement in the central than in the outer layer, but they were a little dispersed in the inner layer.

In the part of the bordered pit of the secondary wall, the microfibrillar orientation presented the so-called “circular” structure in the outer layer, and it curved around the inner aperture of the bordered pit having a steep-helix structure in the central layer, and a flat-helix structure in the inner layer (Photos. 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 and 25).

2) The veering structure in the secondary wall was shown. In the secondary wall, the outer layer, as well as the central or the inner layer, consisted individually of some lamellae having almost the same microfibrillar orientation to the longitudinal tracheid axis and the same running direction of it (Photos. 28, 29, 30, 37, 38 and 40). Between the inner layer and the central layer as between the outer layer and the central layer, there were some lamellae in which the microfibrillar orientation to the longitudinal tracheid axis veered step by step and turned its running direction finally (Photos. 31, 32, 33, 34, 35 and 41). The central layer was the thickest layer in the secondary wall (Phot. 39).

3) The tertiary wall (the so-called “wart-like” structure) was shown as the peculiar structure in the inner surface and the outer surface of the pit border of tracheids wall (Photos. 42, 43 and 44).

4) A model of the microfibrillar orientation in the primary wall, the secondary wall and the tertiary wall of tracheids are given in Fig. 3 (cf. Table 1).

2. On the microfibrillar orientation in the cell wall layer of ray parenchymas⁵¹⁾¹⁰¹⁾¹⁰²⁾

It was demonstrated that the cell wall of ray parenchymas consisted of the primary and the secondary wall. In the primary wall the microfibrills were interwoven to form a net-work (Phot. 45). In the secondary wall, there were the three layers having different microfibrillar orientation to the longitudinal ray parenchyma axis, that is, the first layer the microfibrillar orientation was relatively steep (about 40°) to the longitudinal ray cell axis (Photos. 46 and 49(a)), in the second one parallel to the longitudinal ray cell axis (Photos. 47, 48 and 49(b)), and in the third one the microfibrills presented the so-called “net-work” structure (Photos. 54(S) and 55).

3. On the microfibrillar orientation in the cell wall layer of compression wood tracheids⁵¹⁾¹¹³⁾

1) It was shown that the cell wall of compression wood tracheids consisted of the primary wall and the secondary wall as presumed in the optical investigation. In the primary wall the chief microfibrillar orientation was approximately transverse to the longitudinal tracheid axis, and it had the so-called “net-work” structure (Photos. 56 and 57). In the outer layer of the secondary wall the microfibrillar orientation was at a large angle to the longitudinal tracheid axis (Phot. 58). In the inner layer of the secondary wall the microfibrillar orientation was relatively steep (about 40°) to the longitudinal tracheid axis (Phot. 59) and was parallel to the running direction of the spiral crack which made a special feature in the cell wall of compression wood tracheids.

2) The tertiary wall (the so-called “wart-like” structure) was shown in the inner surface of the tracheid wall of the wood of some species (Phot. 60).

II. The wart-like structure of softwood tracheids

1. On the presence and the structural features of the wart-like structure^{115), 121), 122), 123), 126)}

1) The wart-like structure was demonstrated as the peculiar (characteristic) structure in the softwood of some species in the inner surface of the tracheid wall neighbouring the lumen and in the outer surface of the pit-border of tracheids (Photos. 42, 43, 44, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 81 and 82).

2) The presence of the wart-like structure in softwood tracheids was shown as evidence in the softwood of some species.

3) The so-called “wart” of the wart-like structure was found to be a small mound standing out on a thin non-fibrillar layer that covered the inner layer of the secondary wall of tracheids and the outer layer of the secondary wall in the part of the pit-border (Photos. 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 and 70). The diameter, the height, and the distributing development of the warts had apparent variation as the diameter was about $0.04\sim 0.28\mu$, and the height about $0.02\sim 0.20\mu$ for the samples of *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica*.

4) It was presumed that the wart-like structure layer was separated easily from the neighbouring layer (the inner layer of the secondary wall or the outer layer of the secondary wall in the part of the pit border) (Photos. 64, 65, 66, 79 and 80), and that this layer was distinguished from the inner layer (the outer layer in the part of the pit-borders) of the secondary wall as shown in Phot. 82. Accordingly, this structure has been assumed to be the tertiary wall of the softwood tracheids.

2. On the role of the wart-like structure for the identification of softwood (cf. Table 2)^{121), 122), 129)}

1) The presence of the wart-like structure in softwood tracheids was found to be one of the features about every individual genus except *Pinus* genus.

2) (1) Families and genera which had the wart-like structure were those such as *Ginkgoaceae* (*Ginkgo*), *Araucariaceae* (*Araucaria*, *Agathis*), *Sciadopitaceae* (*Sciadopitys*), *Taxodiaceae* (*Cryptomeria*, *Cunninghamia*, *Taxodium*, *Sequoia*, *Glyptostrobus* and *Taiwania*), *Cupressaceae* (*Chamaecyparis*, *Thuja*, *Thujopsis*, *Juniperus*, *Libocedrus* and *Cupressus*), and 5 genera in *Pinaceae* (*Abies*, *Tsuga*, *Cedrus*, *Keteleeria* and *Diploxylon* subgenus of *Pinus*). (2) Those in which the wart-like structure disappeared were such as *Taxaceae* (*Taxus*, *Torreya* and *Cephalotaxus*), *Podocarpaceae* (*Podocarpus*), and 5 genera in *Pinaceae* (*Pseudotsuga*, *Picea*, *Larix*, *Pseudolarix* and *Haploxyylon* subgenus of *Pinus*).

III. The pit membrane structure of softwood and hardwood

1. On the pit membrane structure of the bordered pit in softwood tracheids^{141), 145), 149), 150)}

1) The pit membrane consisted of a torus and a margo (the part surrounding the torus in the pit membrane) (Photos. 84 and 85).

2) The torus consisted of one intercellular layer, two primary walls and two secondary thickened layers. In the primary wall the microfibrils were interwoven to

form a net-work (Phots. 87 (P), 88 (P) and 89), and in the secondary thickened layer the microfibrillar orientation showed the so-called “parallel” structure (the flat orientation to the longitudinal tracheid axis at the central part of it and the circular orientation at the marginal part of it) (Phots. 86, 87 (S) and 88 (S)). And the microfibrils were embedded with non-cellulosic substances.

3) (a) The margo had not the intercellular layer.

(b) The margo consisted of the aggregated microfibrils (diameter 600~1,000 Å) which arranged radially from the primary wall of the torus to the pit annulus, and of the unaggregated microfibrils (diameter about 200 Å) which crossed with the aggregated microfibrils. There were pores in the margo (Phots. 90, 91 (M), 92 (M), 93 and 94).

(c) In the earlywood tracheids the margo displayed the coarse fibril-system (named the “coarse structure”), and in the latewood tracheids had the dense fibril-system (named the “dense structure”) (Phots. 95, 96, 99, 100, 101, 107, 108, 109, 112, 113, 115, 116 and 117).

2. On the pit membrane structure of the half bordered—the simple—and the bordered pit pairs in the softwood ray cells^{150) 161) 162)}

1) The pit membrane of the half bordered—and the simple pit pairs between ray parenchymas and tracheids displayed the “simple membrane” structure, which were formed of the middle lamellae and the adjacent primary walls and embedded with non-cellulosic substances (Phots. 119, 120, 121, 122, 123, 125, 126 and 127).

2) The pit membrane of the bordered pit between ray tracheids and tracheids consisted of a torus and a margo as shown in the case of the pit membrane of a bordered pit of the softwood tracheids, and the margo had the so-called “dense structure” (Phots. 128, 129, 130 and 131).

3. On the pit membrane structure of the hardwood^{150) 165) 166) 167)}

1) The pit membranes of the bordered—, the half bordered—and the simple pit pairs (f. i. intervessel, intertracheal, vessel to tracheid, vessel to ray parenchyma cell etc. pits) were shown as the “simple membrane” structure, which made up the middle lamellae and the adjacent primary walls, and were embedded with non-cellulosic substances (Phots. 133, 135, 136, 137, 139, 142, 143, 144, 145, 146, 147 and 148).

2) In the wood of *Trochodendron aralioides* var. *longifolium* MAXIM. that is formed of only tracheids, the pit membrane displayed also the “simple membrane” structure. And, thus, it was concluded that the “simple membrane” structure of the pit membrane in hardwood was one of the submicroscopic features in hardwood.

The authors are indebted to Dr. H. H. BOSSHARD (Laboratorium für Holzuntersuchung, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich), Dr. A. FREY-WYSSLING (Pflanzenphysiologisches Institut, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich), Dr. W. LIESE (Forstbotanisches Institut, Universität Freiburg) and Dr. A. B. WARDROP (Division of Forest Products, C. S. I. R. O. Melbourne) for their helpful advice during these investigations.

写真の説明 (Explanation of plate)

Phot. 1: スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の細胞間層の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the amorphous structure of the intercellular layer (Tracheid axis↓)

Phot. 2: アカマツ (*Pinus densiflora* S. et Z.) 材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の細胞間層の構造を示す (膜層 S_1 は細胞間層の一部が剥がれて現われた下側の第2次膜の構造を示す) (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the intercellular layer and a part of the outer layer in the secondary wall (S_1) (Tracheid axis↓)

Phot. 3: スギ材の木口のミクロトーム切片のレプリカ写真; 4個の秋材仮導管の接合部分の横断面における細胞間層の構造 (×印) を示す。

Cryptomeria japonica. Transverse surface (**replica-method**) of four latewood tracheids showing the amorphous structure of the intercellular layer (×).

Phot. 4: エゾマツ (*Picea jezoensis* Carr.) 材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第1次膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the primary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 5: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第1次膜およびその上に重なって存在する第2次膜外層 (S_1) の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the primary wall and a part of the outer layer in the secondary wall (S_1) (Tracheid axis↓)

Phot. 6: アカマツ材のサルフェイトパルプのレプリカ写真; 春材仮導管の第1次膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid taken from "sulphate pulp" showing the net-work (woven) structure of the primary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 7: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 秋材仮導管の第2次膜外層の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 8: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜の外層 (S_1) と中層 (S_2) の構造を同時に示す (仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer (S_1) and the central layer (S_2) of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 9: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜外層 (S_1) と中層 (S_2) の構造を同時に示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood

tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer (S_1) and the central layer (S_2) of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 10: スギ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 秋材仮導管の第 2 次膜中層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the microfibrillar orientation of the central layer in the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 11: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 秋材仮導管の第 2 次膜中層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the microfibrillar orientation in the central layer of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 12: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第 2 次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 13: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 秋材仮導管の第 2 次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 14: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第 2 次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 15: エゾマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面 (孔紋室に接する面) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the circular microfibrillar orientation in the outer surface of a pit border (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 16: エゾマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 秋材仮導管の重孔紋の輪帯表面の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 15 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 17: コノテガシワ (*Thuja orientalis* L.) 材の柾目の超薄切片写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面および周辺部 (第 2 次膜外層) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Thuja orientalis. Radial longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer of the secondary wall at the part of the bordered pit (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 18: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋および周辺部における第 2 次膜外層 (S_1) ならびに中層 (S_2) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer (S_1) and the central

layer (S_2) of the secondary wall at the part of the bordered pit (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 19: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋および周辺部における第2次膜外層 (S_1) ならびに中層 (S_2) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 18 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 20: アカマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋部における第2次膜中層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the spindle-shaped microfibrillar orientation in the central layer of the secondary wall at the part of the bordered pit (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 21: スギ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋部における第2次膜中層の構造を示す (ただし T はイボ状構造, S_3 は第2次膜内層の構造を示す) (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 20 (Note; T-the wart-like structure, S_3 -the inner layer of the secondary wall) (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 22: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋部における第2次膜中層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 20 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 23: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の孔紋口周辺における第2次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall at the part of the bordered pit (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 24: アカマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の孔紋口周辺におけるルーメンサイドの構造 (イボ状構造) を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the tertiary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 25: スギ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の孔紋口の周辺部において、ルーメンサイドのイボ状構造 (T) が剥がれて現われた第2次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall presented by stripping off the wart-like structure (T) (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 26: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 射出柔細胞との間に半重孔紋対を形成している春材仮導管の重孔紋の孔紋口周辺における第2次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall at the part of the half-bordered pit contacting with a ray parenchyma (Tracheid axis $\downarrow$)。

Phot. 27: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 射出柔細胞との間に半重孔紋対を形成している春材仮導管の重孔紋の孔紋口周辺における第2次膜内層 (S_3) およびその一部が剥がれて現われた中層 (S_2) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3), and in the central layer (S_2) presented by stripping off the inner layer, of the secondary wall at

the same part as shown in Phot. 26 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 28: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管のルーメンサイドの第 2 次膜内層 (S_3) の構造および内層の一部が剝離反転して現われた膜層 (a) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3) and in a layer (a) presented by stripping off the inner layer, of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 29: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管のルーメンサイドの第 2 次膜内層 (S_3) の構造および内層の一部が剝離反転して現われた膜層 (a) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 28 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 30: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管の第 2 次膜内層 (S_3) の構造および内層が剝離反転して現われた中層 (S_2) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3) and the central layer (S_2) presented by stripping off the inner layer, of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 31: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管の第 2 次膜内層 (S_3) の構造、内層が剝がれて現われたある膜層 (a) の構造およびさらにある膜層 (a) の剝離反転によつて現われた中層 (S_2) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3), one layer (a) and the central layer (S_2) presented by stripping off the inner layer, of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 32: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管の第 2 次膜内層 (S_3) の構造および内層が剝離反転して現われた 2 つの膜層 (a および b) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3) and two layers (a and b) presented by stripping off the inner layer, of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 33: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管の第 2 次膜内層の構造 (S_3) および内層が剝離反転して現われた 4 つの膜層の構造 (a, b, c および d) を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3) and four layers (a, b, c and d) presented by stripping off the inner layer, of the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 34: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管の第 2 次膜内層 (S_3) の構造および内層が剝がれて現われたミクロフィブリルの排列傾角が順次変化した構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the veering structure from the inner layer (S_3) to the central layer (S_2) in the secondary wall (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 35: アカマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真；春材仮導管のルーメンサイドの構

造(イボ状構造)(T)およびイボ状構造の膜層が剝離除去されて現われたマイクロフィブリルの排列傾角が順次変化した構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure (T) and the same structure as shown in Phot. 34 (Tracheid axis↓)

Phot. 36: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜内層(S_3)の構造および内層が剝がれて現われた中層(S_2)の構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer (S_3) and the central layer (S_2) of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 37: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜中層(S_{2a})の構造およびその上に重なって存在するある膜層(S_{2b})の構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the almost same microfibrillar orientation in two layers (S_{2a} and S_{2b}) of the central layer of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 38: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜内層の構造および内層が剝がれて現われた中層(S_{2a} および S_{2b})の構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall and the same structure (S_{2a} and S_{2b}) as shown in Phot. 37 (Tracheid axis↓)

Phot. 39: ヨノテガシワ材の板目の超薄切片写真; 春材仮導管の細胞膜の縦断面の構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Thuja orientalis. Tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the outer layer (S_1), the central layer (S_2) and the inner layer (S_3) of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 40: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜外層の構造およびその膜層の一部が剝離反転して現われた膜層(a)の構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer and a layer (a) presented by stripping off the outer layer of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 41: エゾマツ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の第2次膜外層(S_1)の構造および外層が剝がれて現われたある膜層(a)の構造を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer (S_1) and a layer (a) presented by stripping off the outer layer, of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 42: スギ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドの第3次膜の構造(イボ状構造)を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the tertiary wall (i. e. the wart-like structure) in the lumen-side of a tracheid (Tracheid axis↓)

Phot. 43: スギ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドの第3次膜の構造(イボ状構造)を示す(仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 42 (Tracheid axis↓)

Phot. 44: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造

を示す（仮導管の長軸方向 $\updownarrow$ ）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the outer surface of a pit border (Tracheid axis $\updownarrow$)

Phot. 45: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞の第 1 次膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Pinus densiflora. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma after chemical treatment showing the microfibrillar orientation in the primary wall (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 46: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真； 射出柔細胞のルーメンサイドの構造およびこれが剥がれて現われた第 2 次膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Picea jezoensis. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the surface neighbouring the lumen, and the microfibrillar orientation in a layer of the secondary wall (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 47: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞の第 2 次膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the microfibrillar orientation in a layer of the secondary wall (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 48: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞のルーメンサイドの構造およびこれが剥がれて現われた第 2 次膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the surface neighbouring the lumen (left), and the microfibrillar orientation in a layer as shown in Phot. 47 (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 49: ヒノキ材の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞の第 2 次膜の 2 つの膜層（a および b）の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Chamaecyparis obtusa. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the microfibrillar orientation in two layers (a and b) of the secondary wall (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 50: スギ材（辺材）の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真； 射出柔細胞のルーメンサイドの構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma (sapwood) showing the surface neighbouring the lumen (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 51: ヒノキ材（辺材）の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞のルーメンサイドの構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Chamaecyparis obtusa. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma (sapwood) showing the same surface as shown in Phot. 50 (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 52: エゾマツ材（辺材）の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞のルーメンサイドの構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Picea jezoensis. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma (sapwood) showing the same surface as shown in Phot. 50 (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 53: ヒノキ材（心材）の柾目の裂開面のレプリカ写真； 射出柔細胞のルーメンサイドの構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Chamaecyparis obtusa. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma (heartwood) showing the same surface as shown in Phot. 50 (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 54: スギ材 (辺材) の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 射出柔細胞のルーメンサイドの構造を示す (射出柔細胞の長軸方向↔)。

Cryptomeria japonica. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma (sapwood) showing the surface structure neighbouring the lumen (Ray parenchyma axis↔)

Phot. 55: スギ材 (辺材) の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 射出柔細胞のルーメンサイドの構造を示す (射出柔細胞の長軸方向↔)。

Cryptomeria japonica. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma (sapwood) showing the microfibrillar structure in a layer of the secondary wall (Ray parenchyma axis↔)

Phot. 56: アカマツアテ材のサルフェイトバルブのレプリカ写真; アテ材仮導管の第1次膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Surface (**replica-method**) of a tracheid taken from “sulphate pulp” of compression wood showing the microfibrillar structure in the primary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 57: アカマツアテ材の板目の裂開面のレプリカ写真; アテ材仮導管の第1次膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a compression wood tracheid showing the structure in the primary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 58: アカマツアテ材の板目の裂開面のレプリカ写真; アテ材仮導管の第2次膜外層の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a compression wood tracheid showing the microfibrillar orientation in the outer layer of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 59: エゾマツアテ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; アテ材仮導管のルーメンサイドすなわち第2次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a compression wood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 60: アカマツアテ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; アテ材仮導管のルーメンサイドすなわち第3次膜の構造 (イボ状構造) を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a compression wood tracheid showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis↓)

Phot. 61: アカマツアテ材の板目のミクロトーム切片のレプリカ写真; アテ材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造が剥がれて現われた第2次膜内層の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a compression wood tracheid showing the microfibrillar orientation in the inner layer of the secondary wall (Tracheid axis↓)

Phot. 62: スギ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis↓)

Phot. 63: ヒノキ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋輪帯表面のイボ状構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Chamaecyparis obtusa. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the outer surface of the pit border (Tracheid axis ↓)

Phot. 64: スギ材の板目の超薄切片写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す（仮導管の長軸方向 ↓）。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis ↓)

Phot. 65: スギ材の柾目の超薄切片写真； 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造を示す（仮導管の長軸方向 ↓）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the outer surface of the pit border (Tracheid axis ↓)

Phot. 66: スギ材の柾目の超薄切片写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す（シャドウイングを施してある）（仮導管の長軸方向 ↓）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Cr-shadow) (Tracheid axis ↓)

Phot. 67: スギ材の柾目の超薄切片写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す（シャドウイングを施してある）（仮導管の長軸方向 ↓）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the same wart-like structure as shown in Phot. 66 (Tracheid axis ↓)

Phot. 68: コノテガシワ材の木口の超薄切片写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造特にイボ状突起の縦断面の構造を示す。

Thuja orientalis. Transverse section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure especially the longitudinal profile of the warts in the inner surface of cell wall.

Phot. 69: ヒノキ材の板目の超薄切片写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造特にイボ状突起の縦断面の構造を示す（仮導管の長軸方向 ↓）。

Chamaecyparis obtusa. Tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the same wart-like structure as shown in Phot. 68 (Tracheid axis ↓)

Phot. 70: スギ材の斜板目の超薄切片写真； 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造を示す（仮導管の長軸方向 ↓）。

Cryptomeria japonica. Oblique tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the outer surface of the pit border (Tracheid axis ↓)

Phot. 71: エゾマツ材の板目の超薄切片写真； 春材仮導管のルーメンサイドにイボ状構造の存在しないことを示す（仮導管の長軸方向 ↓）。

Picea jezoensis. Tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the absence of the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis ↓)

Phot. 72: スギ材（心材部）の柾目のマイクローム切片のレプリカ写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す（仮導管の長軸方向 ↓）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood

tracheid (heartwood) showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis ↓)

Phot. 73: スギ材 (辺材部) の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid (sapwood) showing the same structure as shown in Phot. 72 (Tracheid axis ↓)

Phot. 74: ヒノキ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 射出柔細胞との間に半重孔紋対を形成している仮導管の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Chamaecyparis obtusa. Longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the wart-like structure on the pit border of a half-bordered pit pair of a tracheid contacted with a ray parenchyma (Tracheid axis ↓)

Phot. 75: ヒノキ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造および射出柔細胞との間の半重孔紋対の仮導管の孔紋口を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Chamaecyparis obtusa. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis ↓)

Phot. 76: スギ材の斜板目の超薄切片写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Oblique tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the outer surface of the pit border (Tracheid axis ↓)

Phot. 77: コノテガシワ材 (古材) の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Thuja orientalis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid (olden wood) showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis ↓)

Phot. 78: アカマツ材のレーヨンパルプのレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面 (S_1) および孔紋口を通してみられるルーメンサイド (S_3) の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Pinus densiflora. Surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid taken from "rayon pulp" showing the absence of the wart-like structure in the outer surface of the pit border (S_1), and on the inner surface (S_3) of cell wall seen through the pit aperture (Tracheid axis ↓)

Phot. 79: モミ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真; 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造 (T) およびその膜層が剝離反転して現われた第2次膜内層の構造 (S_3) を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Abies firma. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure (T) in the inner surface and the inner layer (S_3) of the secondary wall presented by stripping off the wart-like structure (Tracheid axis ↓)

Phot. 80: コノテガシワ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造 (T) およびその膜層の一部が剝がれて現われた第2次膜外層 (S_1) の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Thuja orientalis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure (T) in the outer surface of the pit border and the outer layer (S_1) of the bordered pit (Tracheid axis ↓)

Phot. 81: ヒノキ材の板目の超薄切片写真; 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面およびルーメンサイドに

イボ状構造が存在することを示す（仮導管の長軸方向↓）。

Chamaecyparis obtusa. Tangential longitudinal section (**section-method**) showing the wart-like structure in the outer surface of the pit border and in the inner surface of cell wall (Tracheid axis↓)

Phot. 82: ヒノキ材の板目の超薄切片写真； 春材仮導管の重孔紋の輪帯表面およびルーメンサイドのイボ状構造を示す（左上は模式図）（仮導管の長軸方向↓）。

Chamaecyparis obtusa. Tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 81 (Schematic drawing at outer left corner) (Tracheid axis↓)

Phot. 83: アスナロ (*Thujaopsis dolabrata* S. et Z.) の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真； 春材仮導管のルーメンサイドのイボ状構造を示す（仮導管の長軸方向↓）。

Thujaopsis dolabrata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the wart-like structure in the inner surface of cell wall (Tracheid axis↓)

Phot. 84: エゾマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真； 春材仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜の構造を示す（仮導管の長軸方向↓）。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the pit-membrane of a bordered pit in a surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 85: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真； 春材仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜の構造を示す（仮導管の長軸方向↓）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 84 (Tracheid axis↓)

Phot. 86: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真（ただし、クロライト法によつて脱リグニン処理を 2 時間施したもの）； 春材仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜のトーラスの表面特にトーラスの第 2 次的肥厚膜層の平行排列のマイクロフィブリル構造を示す（仮導管の長軸方向↓）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 2 hrs.) showing a torus of a pit membrane—especially the microfibrillar orientation in the secondary thickened layer—of a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 87: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真（ただし、クロライト法によつて脱リグニン処理を 4 時間施したもの）； 春材仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜のトーラスの表面特にトーラスの第 2 次的肥厚膜層の構造（S）およびそれが除去されて現われた第 1 次膜の網目状構造（P）を示す（仮導管の長軸方向↓）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 4 hrs.) showing a torus of a pit membrane—especially the parallel microfibrillar structure in the secondary thickened layer (S) and the net-work microfibrillar structure in the primary wall (P)—of a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 88: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真（ただし、クロライト法によつて脱リグニン処理を 6 時間施したもの）； 春材仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜のトーラスの表面特にトーラスの第 2 次的肥厚膜層の構造（S）およびそれが除去されて現われた第 1 次膜の網目状構造（P）を示す（仮導管の長軸方向↓）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 6 hrs.) showing the same structure as shown in Phot. 87 (Tracheid axis↓)

Phot. 89: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて脱リグニン処理を 4 時間施したもの); 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜のトールスの表面特にトールスの第 1 次膜の網目状構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 4 hrs.) showing a torus of a pit membrane—especially the net-work structure in the primary wall—of a bordered pit in surface view. (Tracheid axis↓)

Phot. 90: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜のトールスおよびマルゴの構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 91: エゾマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜のトールス (T) およびマルゴ (M) の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing a torus (T) and a margo or membrane (M) of a pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 92: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造特にマルゴ (M) はトールスを上につけている集束ミクロフィブリルおよびこれと交差した非集束ミクロフィブリルとからなることを示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the pit membrane—especially the margo or membrane (M) consisted of the aggregated microfibrils supporting the torus and of the unaggregated microfibrils—of a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 93: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて脱リグニン処理を 4 時間施したもの); 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜のトールスの網目状構造およびトールスをつり上げているマルゴの集束ミクロフィブリル (矢印) はトールスから派生したミクロフィブリルが数本集束して形成されたものであることを示す (仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 4 hrs.) showing the net-work structure in the primary wall of a torus, and the aggregated microfibrils (←) of a margo formed by aggregating some microfibrils resulted from a torus, in a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 94: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて脱リグニン処理を 4 時間施したもの); 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜のトールスおよびマルゴの構造について Phot. 93 と同様なことを示す。ただしその一部はブソイドレプリカである (仮導管の長軸方向↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 4 hrs.) showing the same structure as shown in Phot. 93 (Tracheid axis↓)

Phot. 95: アカマツ材の柾目のミクロトーム切片 (パラフィン包埋材から得られた) のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid taken from a microtome section of paraffin-embedded wood showing the pit-membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis↓)

Phot. 96: エゾマツ材の柾目のミクロトーム切片 (パラフィン包埋材から得られた) のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid taken from a microtome section of paraffin-embedded wood showing the pit-membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 97: エゾマツ材 (辺材部) の生材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid taken from green sapwood showing the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 98: エゾマツ材 (生材をアセトンで乾燥した材) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid taken from dried-wood by acetone showing the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 99: トドマツ材 (*Abies Mayriana* MIYABE et KUDO) (生材をアセトンで乾燥した材) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜 (ブソイドレプリカ) の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Abies Mayriana. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid taken from dried-wood by acetone showing the pit membrane (pseudo-replica) of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 100: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材から秋材への移行部分の仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造特にマルゴのいわゆる密構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of a tracheid in the veering part from earlywood to latewood showing the pit membrane—especially the so-called “dense structure” of a margo or membrane—of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 101: スギ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 秋材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造特にマルゴのいわゆる密構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of a latewood tracheid showing the pit-membrane—especially the so-called “dense structure” of a margo or membrane—of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 102: アカマツ材 (辺材) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid (sapwood) showing the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 103: アカマツ材 (心材) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid (heartwood) showing the same structure as shown in Phot. 102 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 104: スギ材 (辺材) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 $\downarrow$)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica**-method) of an earlywood tracheid (sapwood) showing the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 105: スギ材 (樹令 2 年) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid (two years old wood) showing the so-called “dense structure” of a margo or membrane of a pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis ↓)

Phot. 106: スギ材 (樹令 2 年) の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid (two years old wood) showing the so-called “coarse structure” of a margo or membrane of a pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis ↓)

Phot. 107: スギ材の板目の裂開面のレプリカ写真; 秋材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the so-called “dense structure” of a margo or membrane of a pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis ↓)

Phot. 108: ヒノキ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 秋材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Chamaecyparis obtusa. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 107 (Tracheid axis ↓)

Phot. 109: エゾマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 秋材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Picea jezoensis. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 107 (Tracheid axis ↓)

Phot. 110: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the pit membrane of a bordered pit pair (Tracheid axis ↓)

Phot. 111: スギ材の板目の裂開面のレプリカ写真; 秋材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal surface (**replica-method**) of a latewood tracheid showing the same structure as shown in Phot. 110 (Tracheid axis ↓)

Phot. 112: スギ材の板目の超薄切片写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the pit membrane of a bordered pit in sectional view (Tracheid axis ↓)

Phot. 113: スギ材の斜板目の超薄切片写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Oblique tangential longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing the pit membrane of a bordered pit in sectional view (Tracheid axis ↓)

Phot. 114: スギ材の斜柾目の超薄切片写真; 春材仮導管の重孔紋 (対) の孔紋膜のマargoの一部の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Cryptomeria japonica. Oblique Radial longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing a part of a margo of the pit membrane of a bordered pit

in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 115: スギ材の斜桁目の超薄切片写真；春材仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜の構造を示す（仮導管の長軸方向 $\downarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Oblique Radial longitudinal section (**section-method**) of an earlywood tracheid showing a part of the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 116: スギ材の桁目の超薄切片写真；春材から秋材への移行部分の仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜の構造を示す（仮導管の長軸方向 $\downarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal section (**section-method**) of a tracheid in the veering part from earlywood to latewood showing the pit membrane of a bordered pit in surface view (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 117: スギ材の桁目の超薄切片写真；春材から秋材への移行部分の仮導管の重孔紋（対）の孔紋膜の構造を示す（仮導管の長軸方向 $\downarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal section (**section-method**) of a tracheid in the veering part from earlywood to latewood showing the same structure as shown in Phot. 116 (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 118: スギ材の桁目の裂開面のレプリカ写真；射出柔細胞側からみた射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対の仮導管の重孔紋の輪帯表面および孔紋口の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the pit border and pit aperture of a half-bordered pit from a tracheid to a ray parenchyma (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 119: スギ材の桁目の裂開面のレプリカ写真；射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対の孔紋膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Cryptomeria japonica. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the pit membrane of a half-bordered pit between a ray parenchyma and a tracheid (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 120: ヒノキ材の桁目の裂開面のレプリカ写真；射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対の孔紋膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Chamaecyparis obtusa. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the same structure as shown in Phot. 119 (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 121: ヒノキ材の桁目の裂開面のレプリカ写真；射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対の孔紋膜および孔紋膜の 1 部が破れてみられる仮導管側の重孔紋の輪帯表面のイボ状構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Chamaecyparis obtusa. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma cell showing the same structure as shown in Phot. 119 (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 122: アカマツ材の桁目のミクロトーム切片のレプリカ写真；射出柔細胞と春材仮導管との間の窓状単孔紋対の孔紋膜の構造を示す（仮導管の内腔側からみたもの）（仮導管の長軸方向 $\downarrow$ ）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid showing the pit membrane of a windowlike simple pit (pair) between a tracheid and a ray parenchyma (Tracheid axis $\downarrow$)

Phot. 123: アカマツ材の桁目の裂開面のレプリカ写真；射出柔細胞と秋材仮導管との間の孔紋膜の構造を示す（射出柔細胞の長軸方向 $\leftrightarrow$ ）。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the pit membrane between a ray parenchyma cell and a tracheid (Ray parenchyma axis $\leftrightarrow$)

Phot. 124: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 射出柔細胞側からみた射出柔細胞と仮導管との間の半重孔紋対の仮導管の重孔紋の輪帯表面および孔紋口の構造を示す(射出柔細胞の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma showing the pit border of a tracheid contacting with a ray parenchyma (Ray parenchyma axis ↔)

Phot. 125: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて軽度の脱リグニン処理を施したもの); 射出柔細胞と仮導管との間の単孔紋対の孔紋膜の構造を示す(射出柔細胞の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma after chemical treatment (delignified by “chlorite method”) showing the net-work structure in the primary wall of a pit membrane of a simple pit (pair) between a ray parenchyma and a tracheid (Ray parenchyma axis ↔)

Phot. 126: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて軽度の脱リグニン処理を施したもの); 射出柔細胞と仮導管との間の単孔紋対の孔紋膜の構造を示す(射出柔細胞の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray parenchyma after Chemical treatment (delignified by “Chlorite method”) showing the same structure as shown in Phot. 125 (Ray parenchyma axis ↔)

Phot. 127: アカマツ材の柾目のミクロトーム切片のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて軽度の脱リグニン処理を施したもの); 射出柔細胞と仮導管との間の単孔紋対の孔紋膜の構造を示す(仮導管の内腔側からみたもの) (仮導管の長軸方向 ↓)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of an earlywood tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”) showing the same structure as shown in Phot. 125 (Tracheid axis ↓)

Phot. 128: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜の構造を示す(射出仮導管の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray tracheid showing the pit membrane of a bordered pit between a ray tracheid and a tracheid (Ray tracheid axis ↔)

Phot. 129: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて脱リグニン処理を2時間施したもの); 射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜の構造を示す(射出仮導管の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 2 hrs.) showing the pit membrane between a tracheid and a ray tracheid (Ray tracheid axis ↔)

Phot. 130: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて脱リグニン処理を4時間施したもの); 射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜の構造を示す(射出仮導管の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray tracheid after chemical treatment (delignified by “chlorite method”, 4 hrs.) showing the same structure as shown in Phot. 129 (Ray tracheid axis ↔)

Phot. 131: アカマツ材の柾目の裂開面のレプリカ写真 (ただし, クロライト法によつて脱リグニン処理を4時間施したもの); 射出仮導管と仮導管との間の重孔紋対の孔紋膜の構造を示す(射出仮導管の長軸方向 ↔)。

Pinus densiflora. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a ray tracheid

after chemical treatment (delignified by “chlorite method”. 4 hrs.) showing the same structure as shown in Phot. 130 (Ray tracheid axis ↔)

Phot. 132: ブナ (*Fagus crenata* BLUME) 材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管側壁の対列状排列の重孔紋の輪帯表面および孔紋口の構造を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the pit borderes and the pit apertures of intervessel opposite pitting (Vessel axis ↓)

Phot. 133: ブナ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管側壁の階段状排列の重孔紋の輪帯表面および孔紋膜の一部を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the pit borderes and the pit apertures of intervessel scalariform pitting. (Vessel axis ↓)

Phot. 134: ブナ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管のルーメンサイドの構造を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the inner surface contacted with the vessel lumen and the inner apertures of a bordered pit (Vessel axis ↓)

Phot. 135: ブナ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管側壁の孔紋膜の構造を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the pit membrane of a bordered pit (Vessel axis ↓)

Phot. 136, 137: ミズナラ (*Quercus crispula* BLUME) 材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管側壁の孔紋膜の構造を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Quercus crispula. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the same structure as shown in Phot. 135 (Vessel axis ↓)

Phot. 138: モクマオウ (*Casuarina Cunninghamiana* Miq.) 材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管側壁の重孔紋の輪帯表面および孔紋口の構造を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Casuarina Cunninghamiana. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the pit borderes and the pit apertures of bordered pits (Vessel axis ↓)

Phot. 139: モクマオウ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 導管側壁の孔紋膜の構造を示す (導管の長軸方向 ↓)。

Casuarina Cunninghamiana. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the net-work structure in the primary wall of the pit membranes of a bordered pit (Vessel axis ↓)

Phot. 140: ブナ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 仮導管の重孔紋の輪帯表面の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a tracheid showing the pit border of a bordered pit (Tracheid axis ↓)

Phot. 141: ミズナラ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 仮導管の重孔紋の輪帯表面および孔紋周辺部における第 2 次膜中層の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Quercus crispula. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a tracheid showing the pit border of a bordered pit and the microfibrillar orientation in the secondary wall (Tracheid axis ↓)

Phot. 142: ブナ材の柾目の裂開面のレプリカ写真; 仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向 ↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a tracheid showing

the pit membrane of a bordered pit (Tracheid axis↓)

Phot. 143: ミズナラ材の桁目の裂開面のレプリカ写真; 仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Quercus crispula. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a tracheid showing the pit membrane of a bordered pit (Tracheid axis↓)

Phot. 144: ナガバノヤマグルマ (*Trochodendron aralioides* var. *longifolium* MAXIM) 材の桁目の裂開面のレプリカ写真; 仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Trochodendron aralioides. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a tracheid showing the net-work structure in the primary wall of a pit membrane of a bordered pit (Tracheid axis↓)

Phot. 145: ナガバノヤマグルマ材の桁目の裂開面のレプリカ写真; 繊維状仮導管の重孔紋の孔紋膜の構造を示す (仮導管の長軸方向↓)。

Trochodendron aralioides. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of fiber tracheid showing the same structure as shown in Phot. 144 (Tracheid axis↓)

Phot. 146: ブナ材の桁目の裂開面のレプリカ写真; 射出柔細胞と導管との間の半重孔紋対の孔紋膜の構造および導管のルーメンサイドの構造を示す (導管の長軸方向↓)。

Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel showing the pit membrane of a half bordered pit between a vessel and a ray parenchyma (Vessel axis↓)

Phot. 147: ミズナラ材の桁目の裂開面のレプリカ写真; 射出柔細胞と導管との間の半重孔紋対の孔紋膜の構造および導管のルーメンサイドの構造を示す (導管の長軸方向↓)。

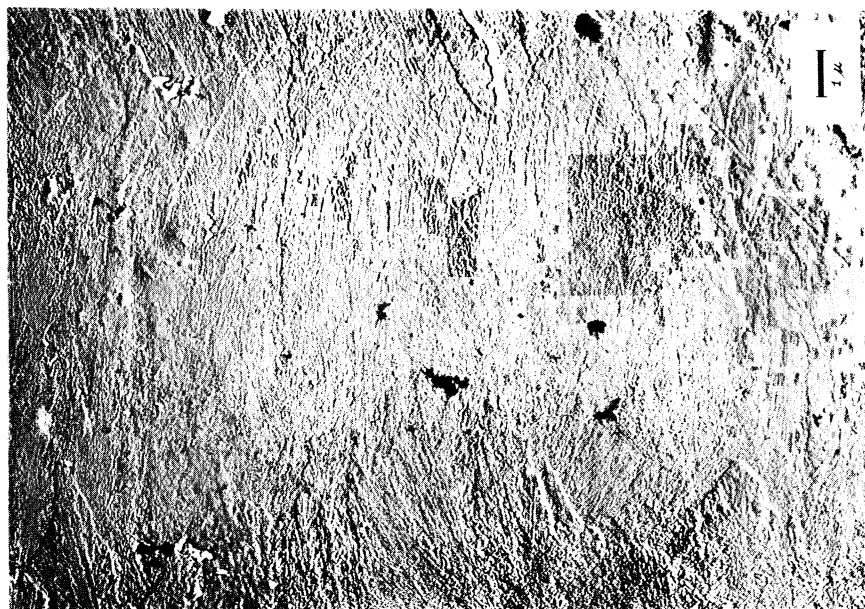
Quercus crispula. Radial longitudinal surface (**replica-method**) a vessel showing the same structure as shown in Phot. 146 (Vessel axis↓)

Phot. 148: ブナ材の桁目の裂開面のレプリカ写真 (ただし、クロライト法によつて軽度の脱リグニン処理を行つたもの); 射出柔細胞と導管との間の片複孔紋対の孔紋膜の構造を示す (孔紋膜のミクロフィブリル構造が認められる) (導管の長軸方向↓) (右田・細井¹⁷²⁾)。

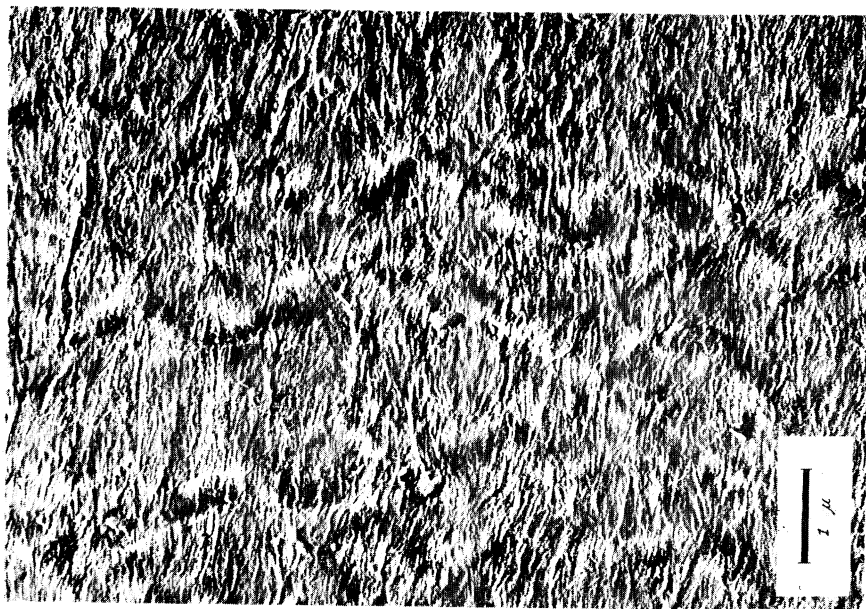
Fagus crenata. Radial longitudinal surface (**replica-method**) of a vessel after chemical treatment (delignified by “chlorite method”) showing the net-work microfibrillar structure in the primary wall of a pit membrane between a vessel and a ray parenchyma (Vessel axis↓)



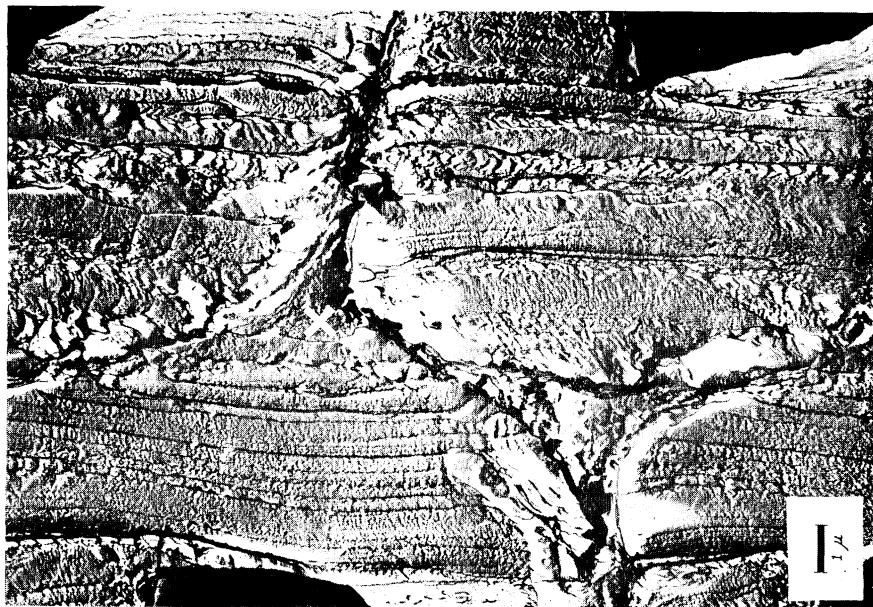
Phot. 2



Phot. 1



Phot. 4



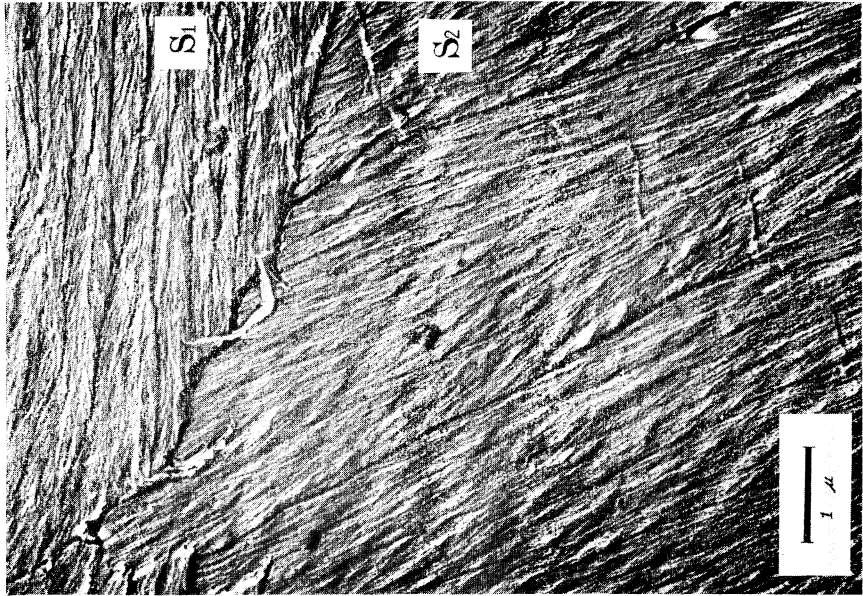
Phot. 3



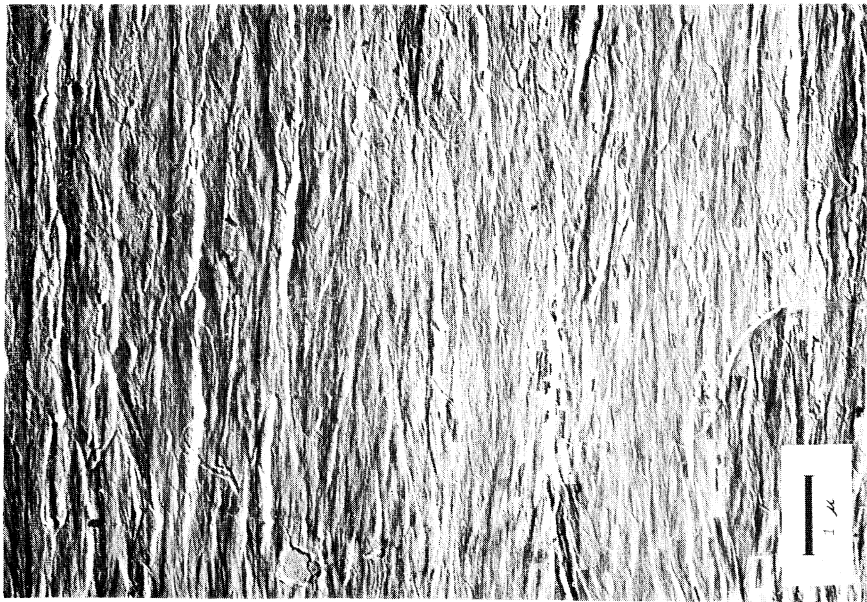
Phot. 5



Phot. 6



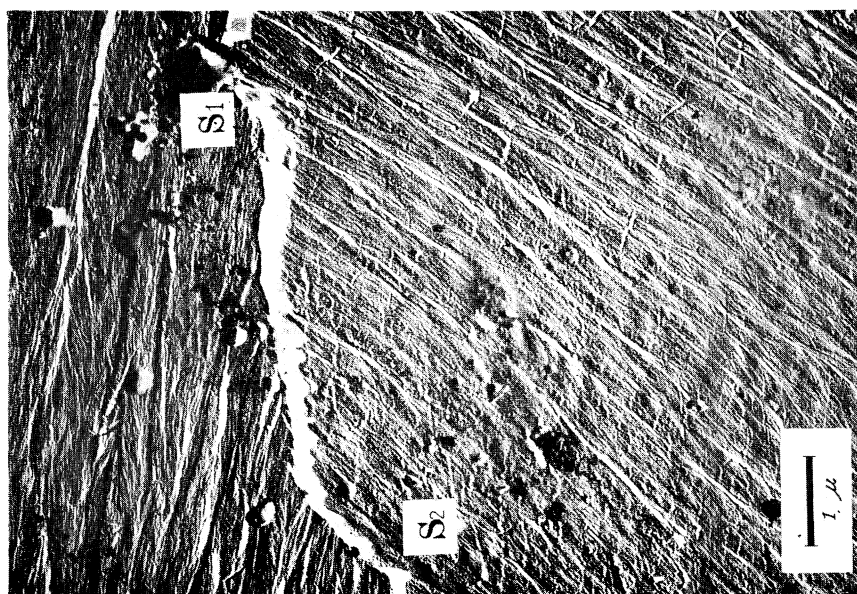
Phot. 8



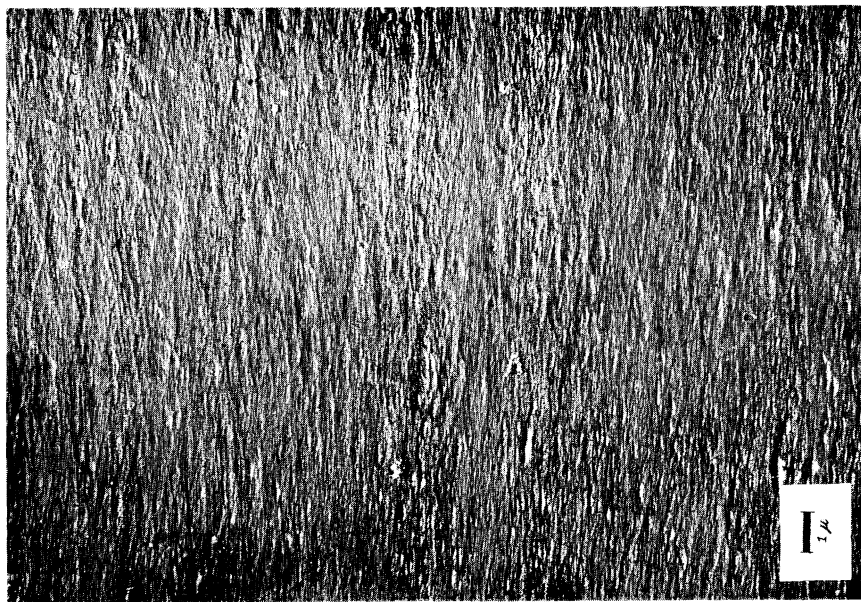
Phot. 7



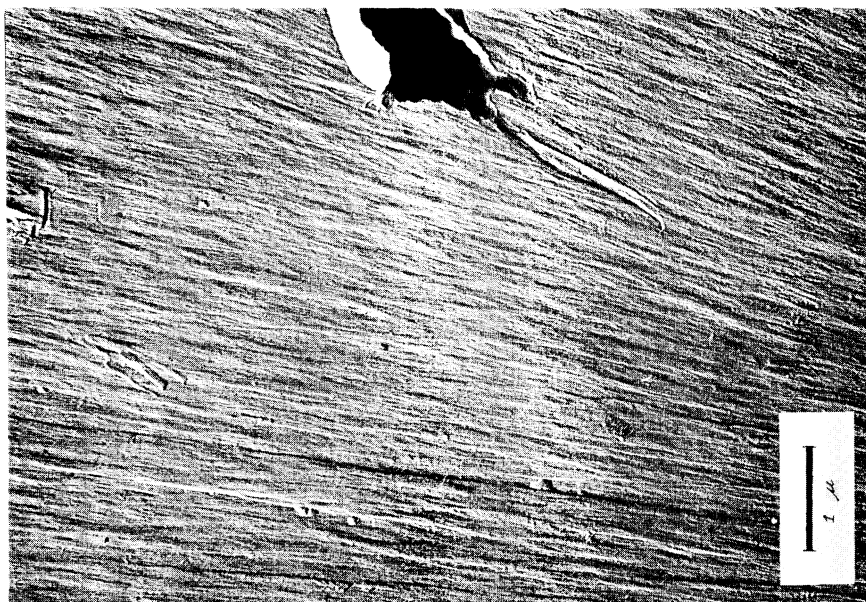
Phot. 10



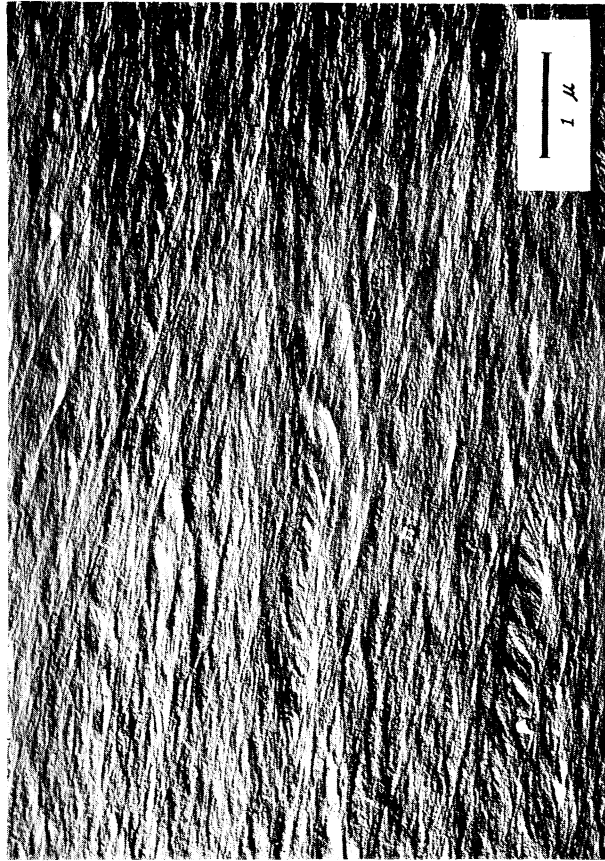
Phot. 9



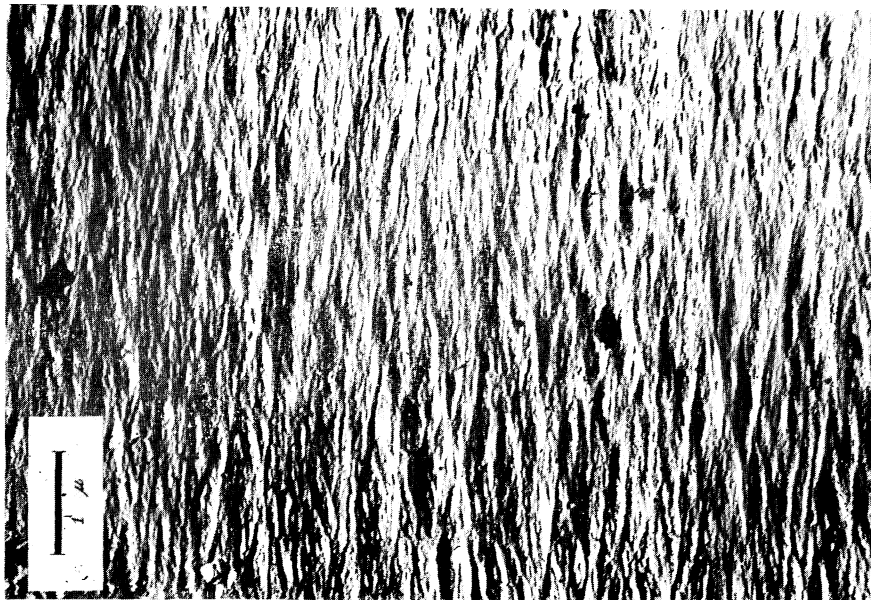
Phot. 12



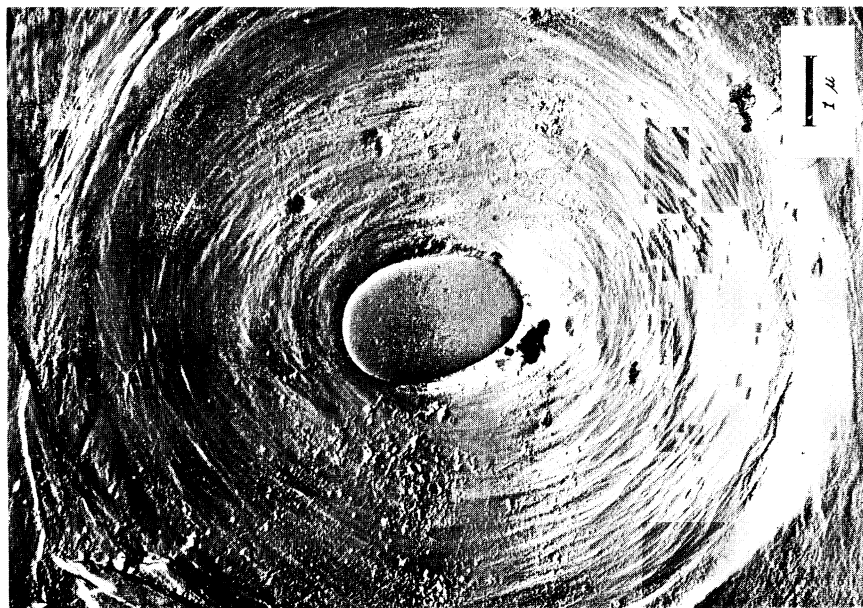
Phot. 11



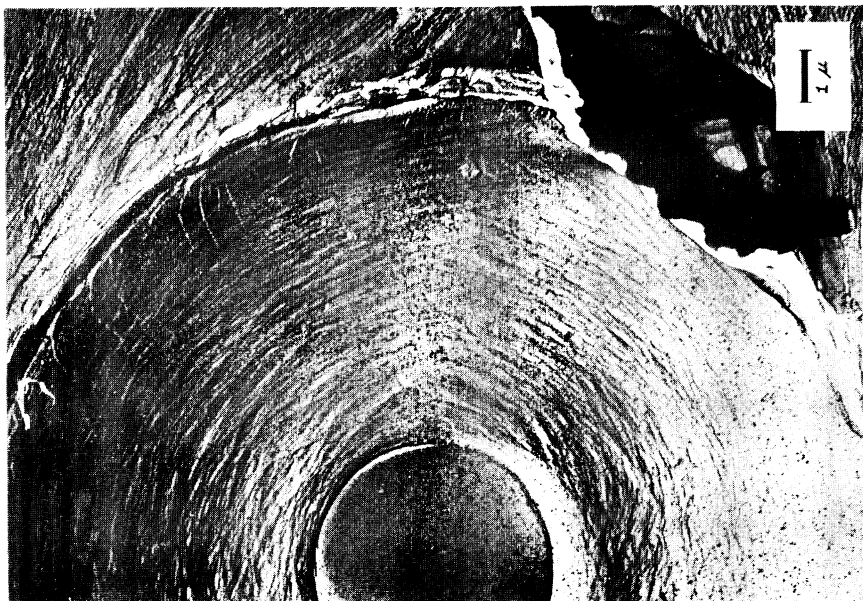
Phot. 14



Phot. 13



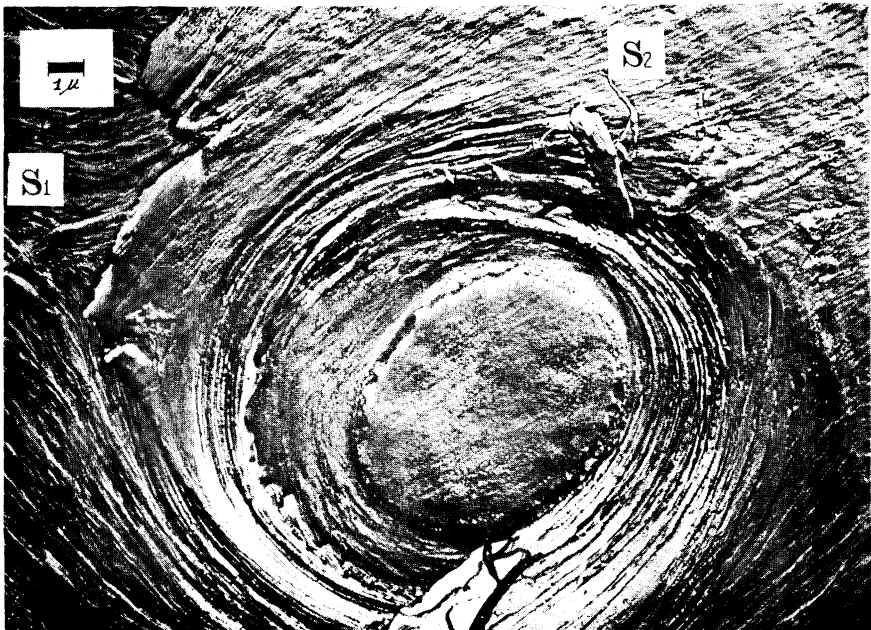
Phot. 16



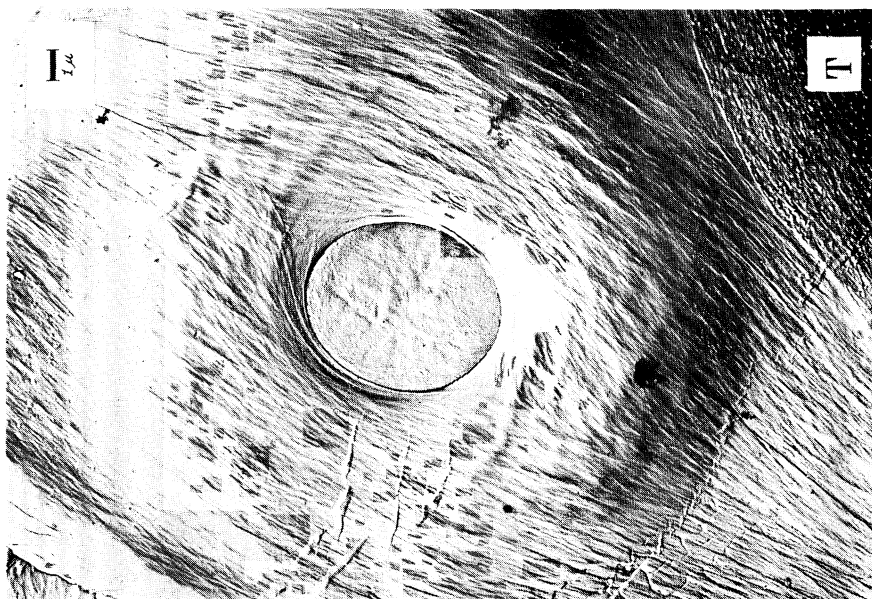
Phot. 15



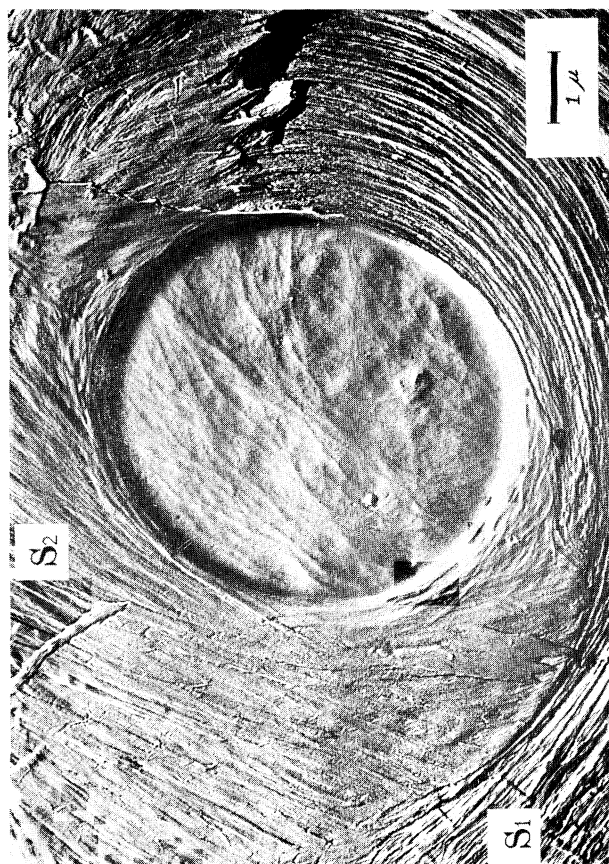
Phot. 17



Phot. 18



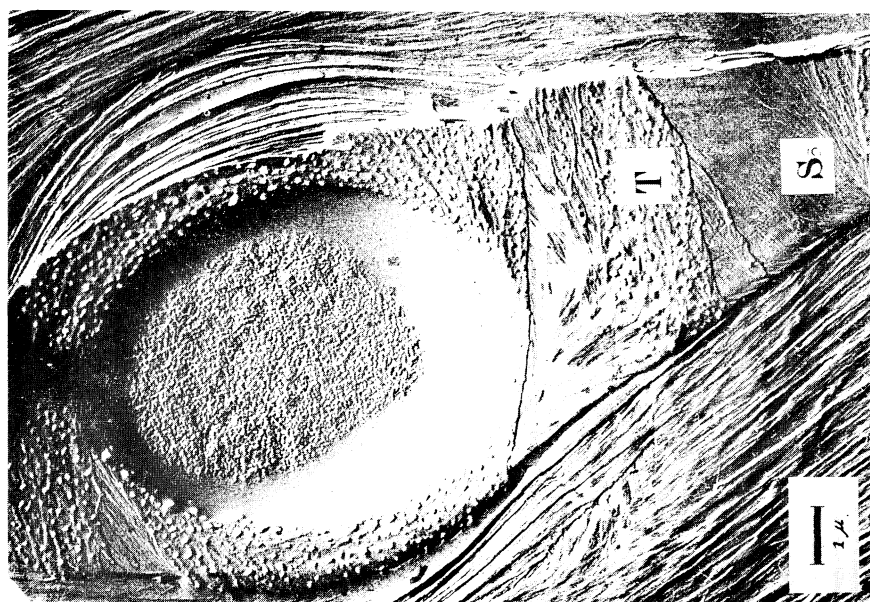
Phot. 20



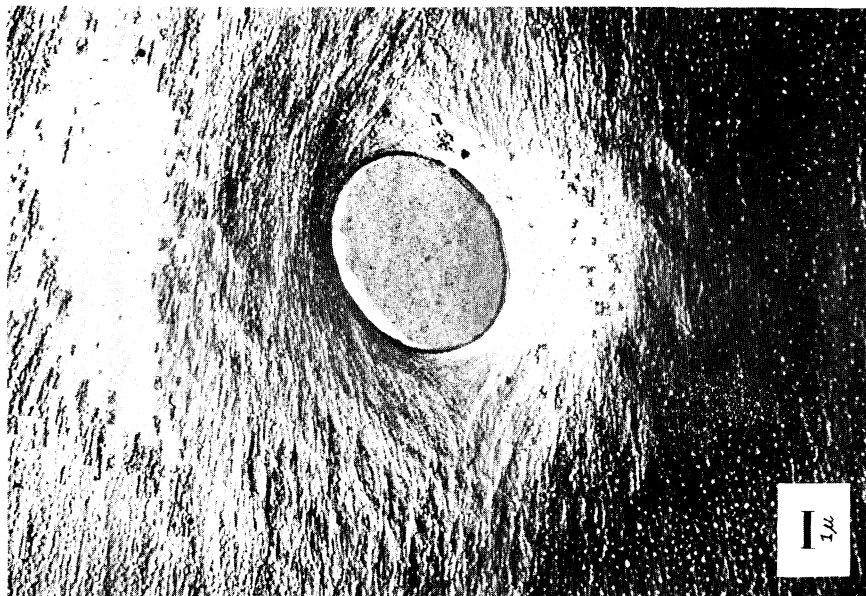
Phot. 19



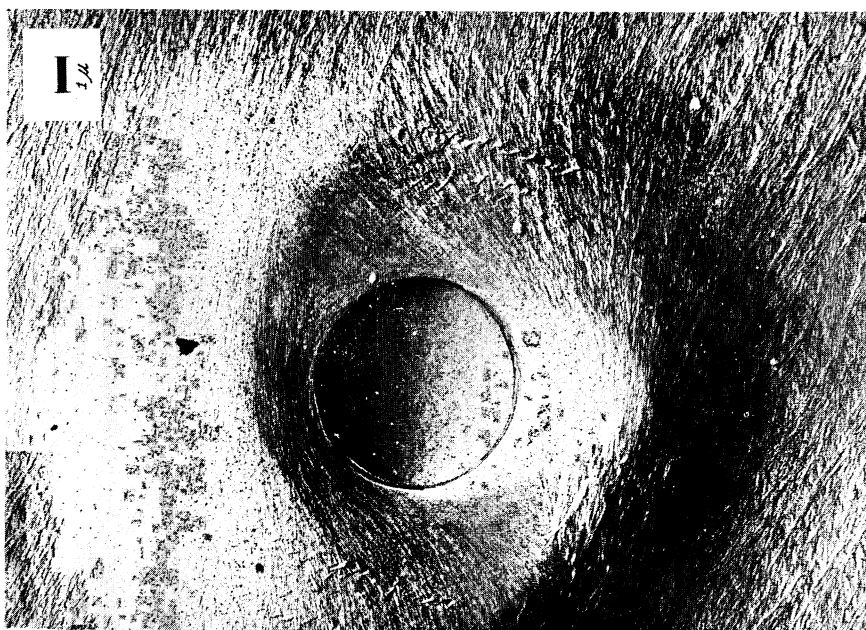
Phot. 22



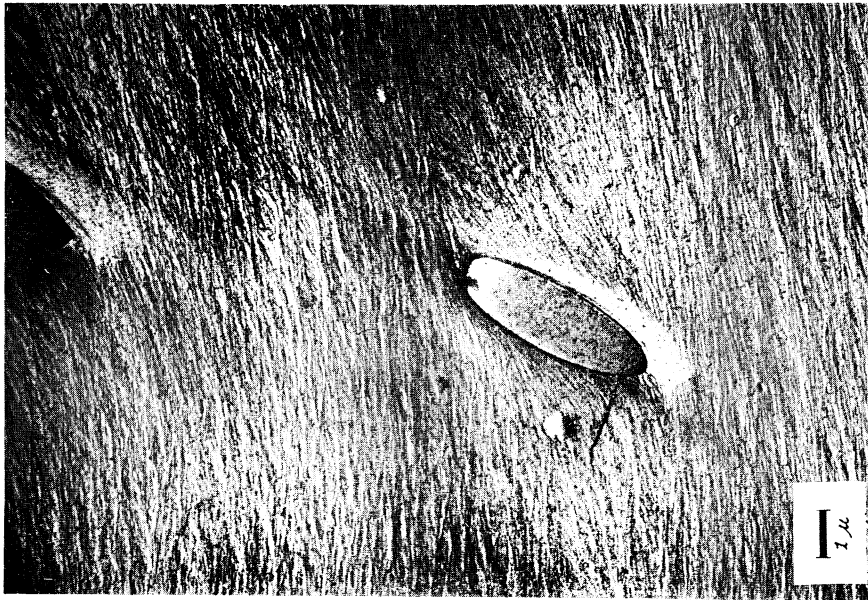
Phot. 21



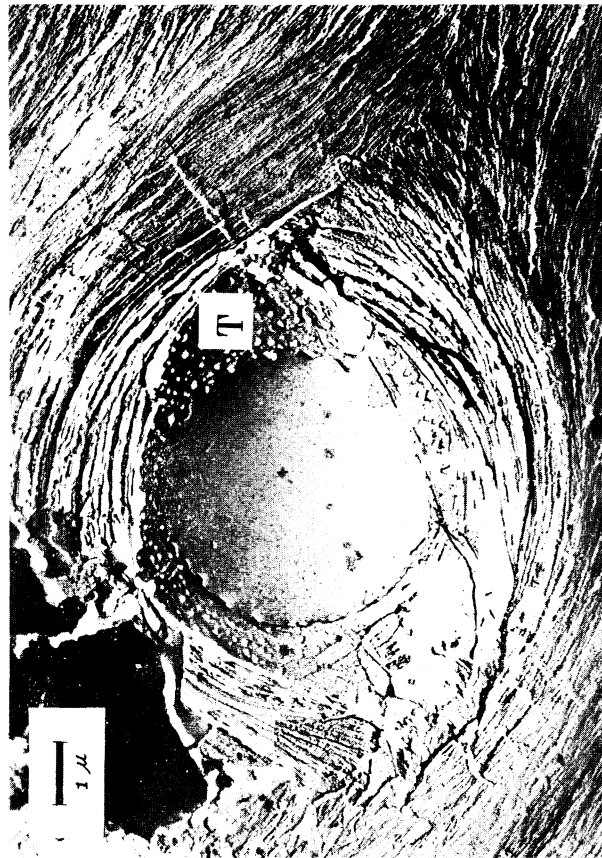
Phot. 24



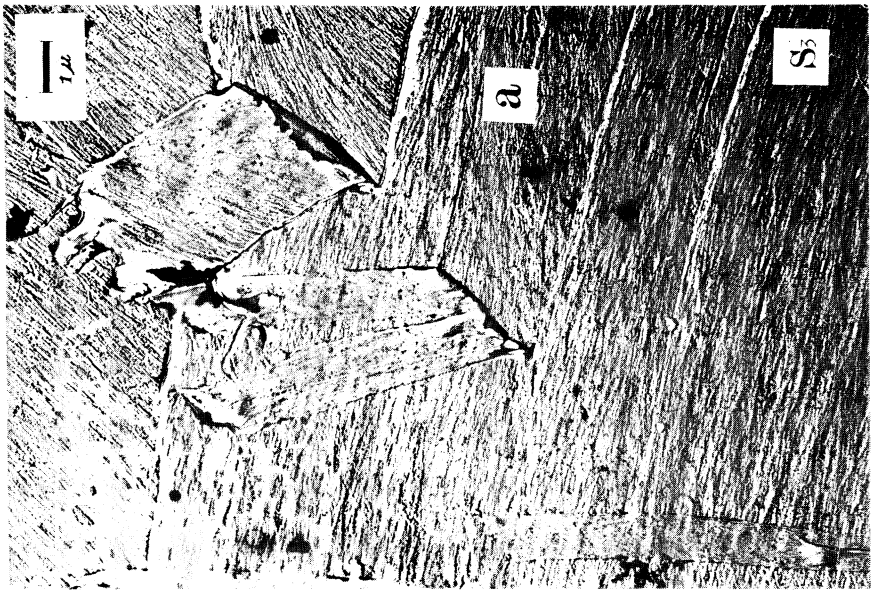
Phot. 23



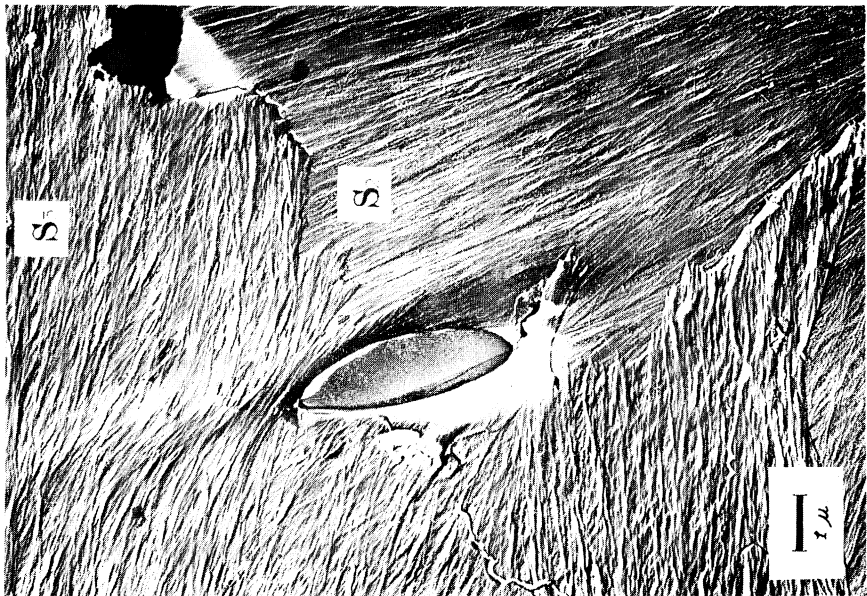
Phot. 26



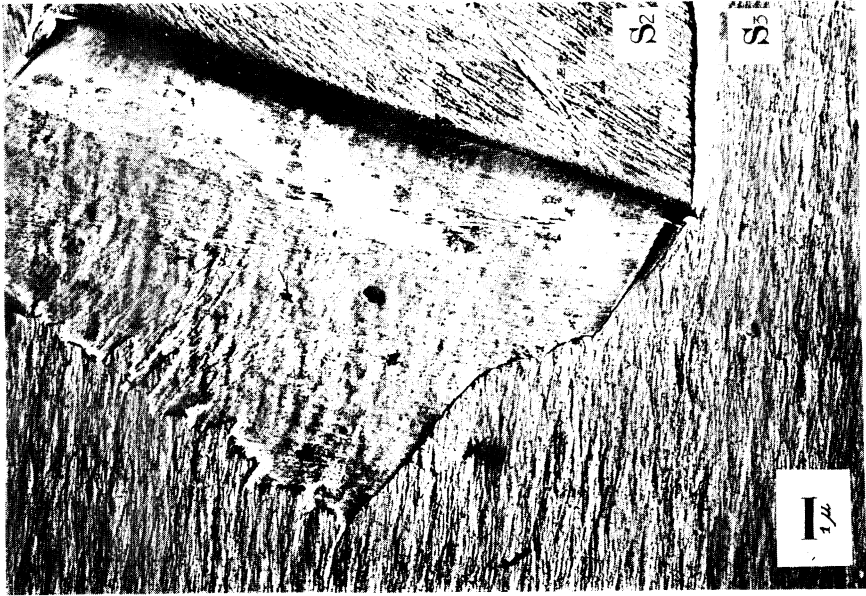
Phot. 25



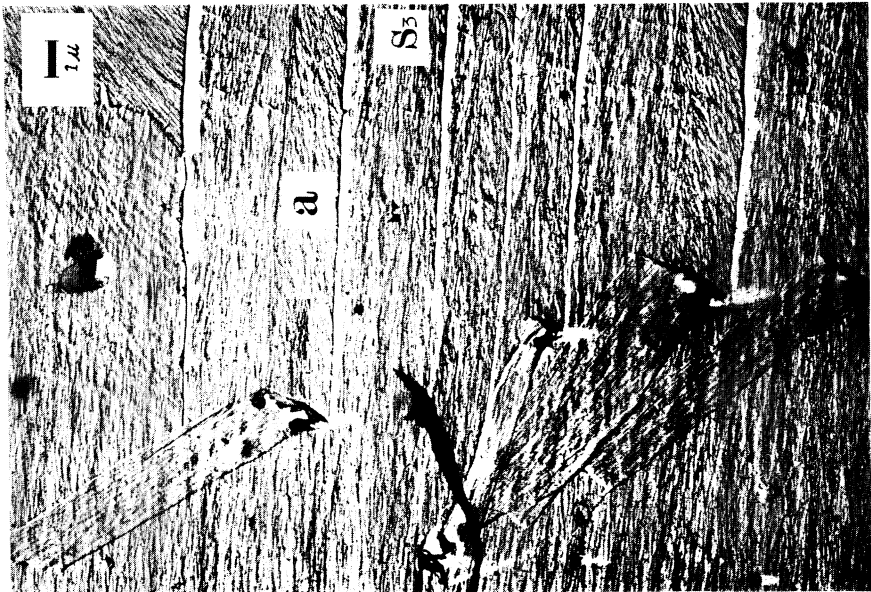
Phot. 28



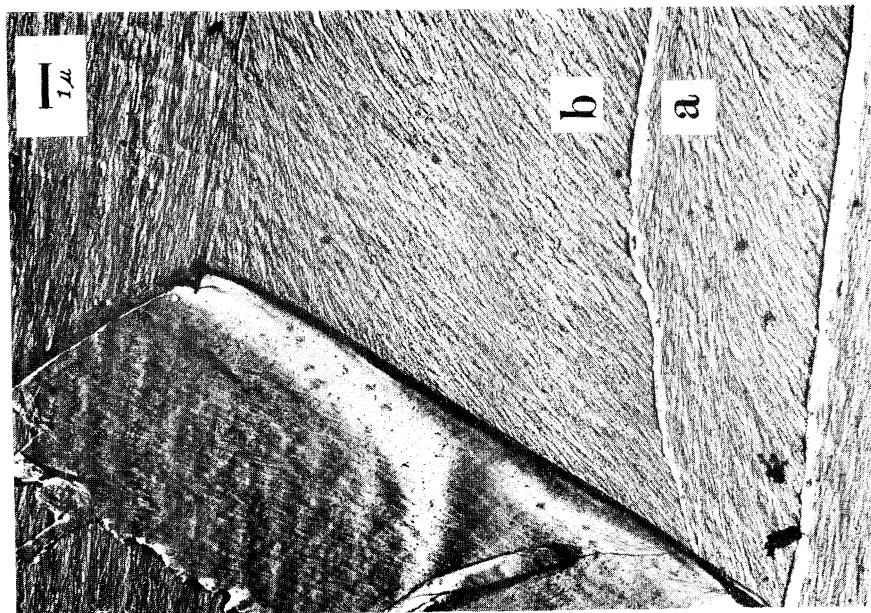
Phot. 27



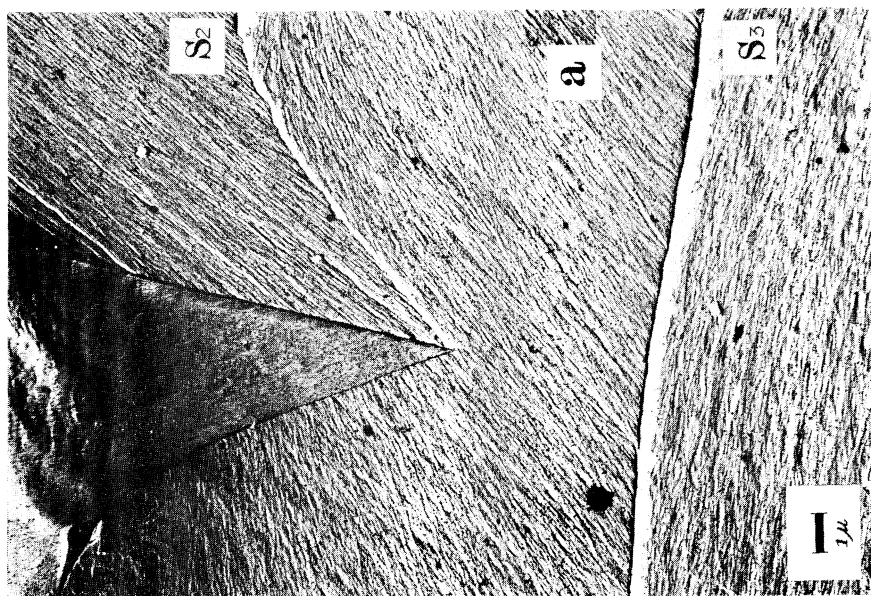
Phot. 30



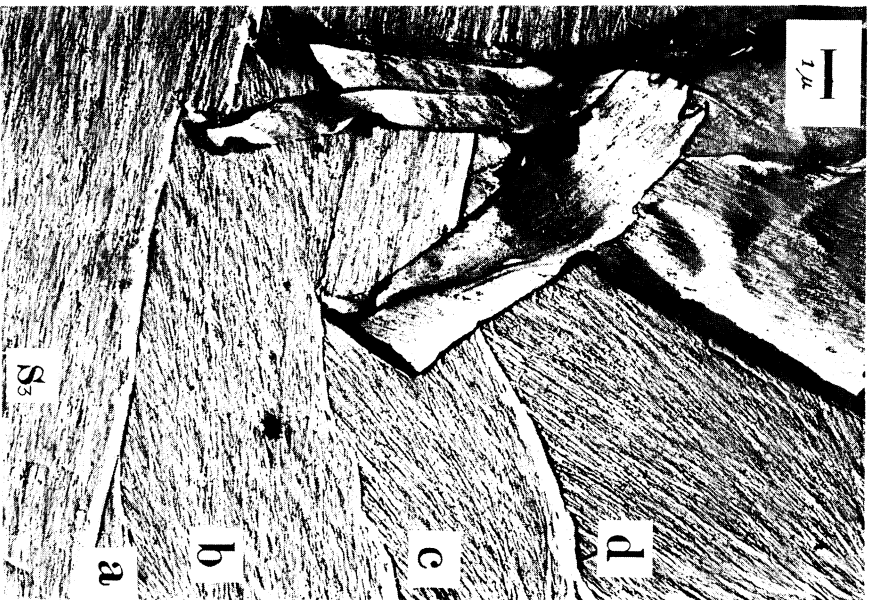
Phot. 29



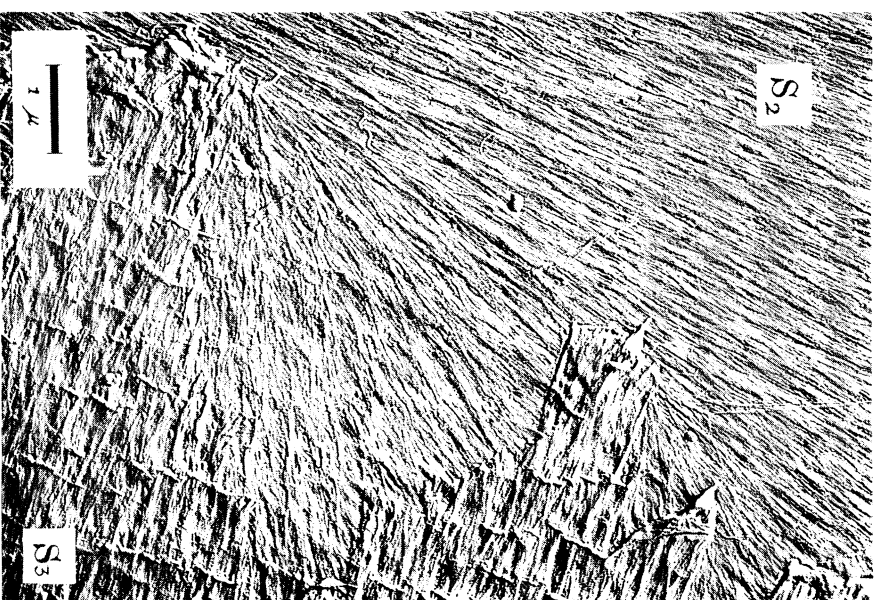
Phot. 32



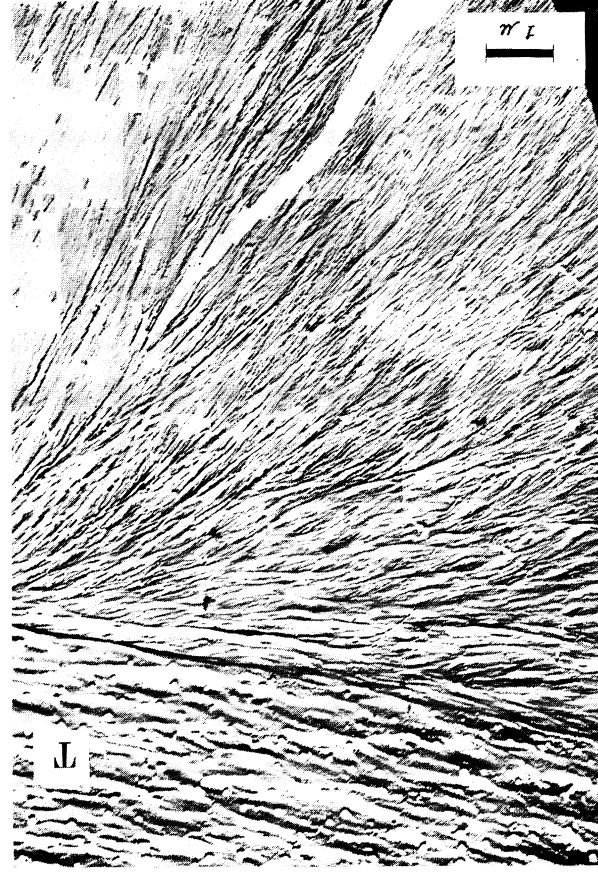
Phot. 31



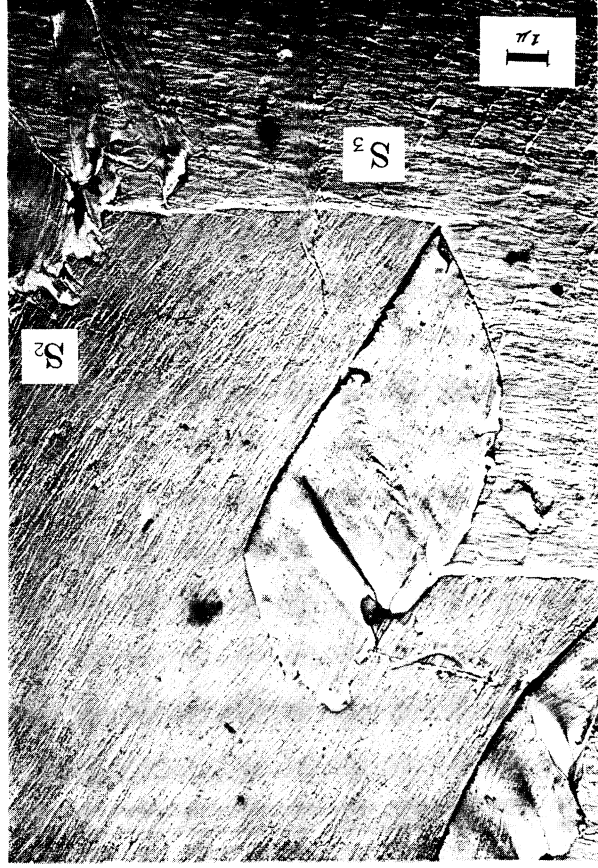
Phot. 33



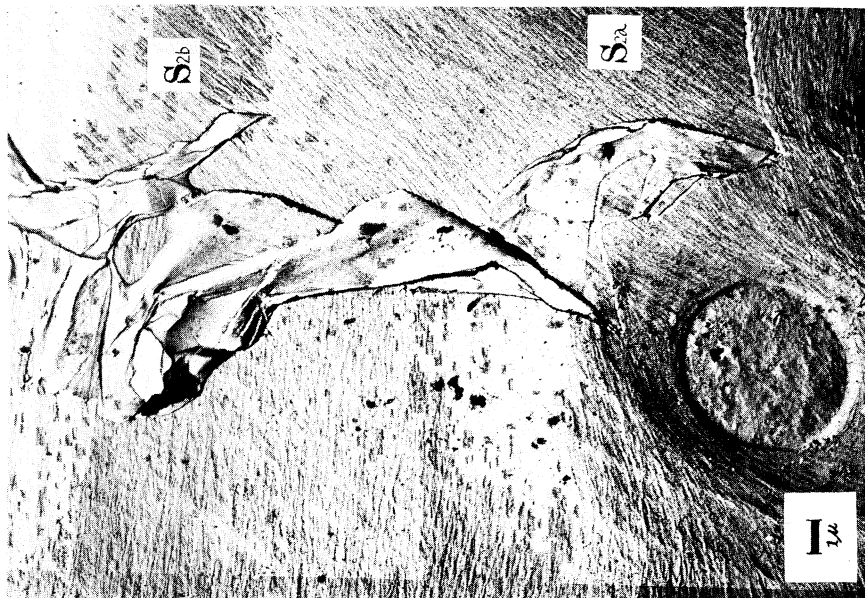
Phot. 34



Phot. 33



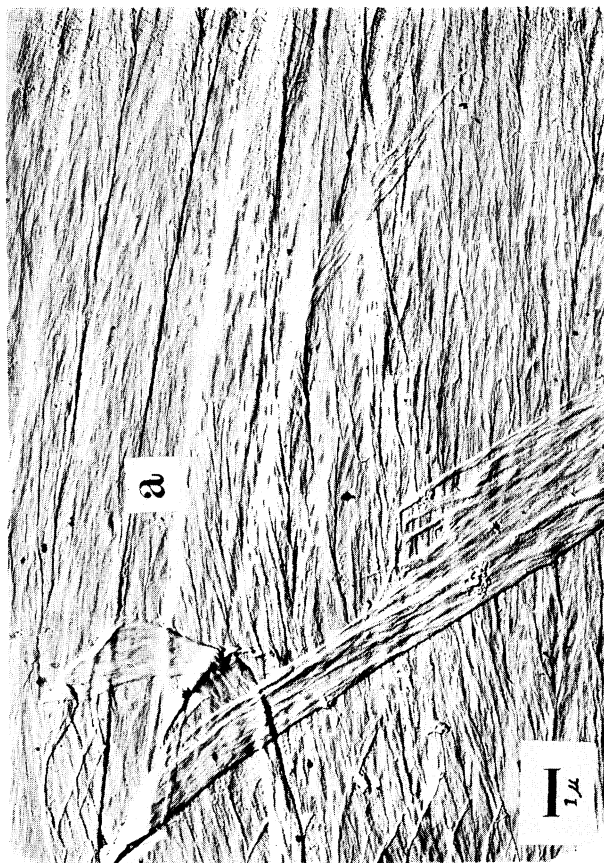
Phot. 34



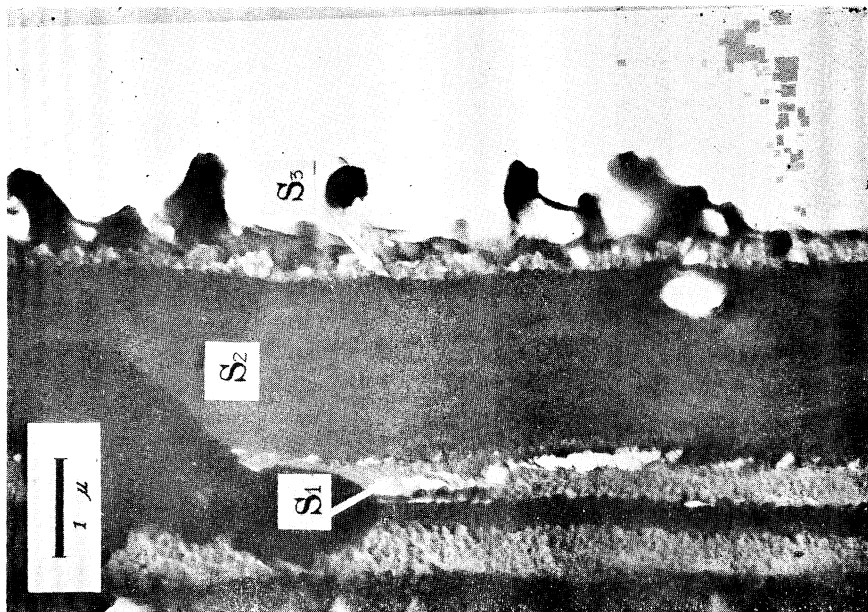
Phot. 38



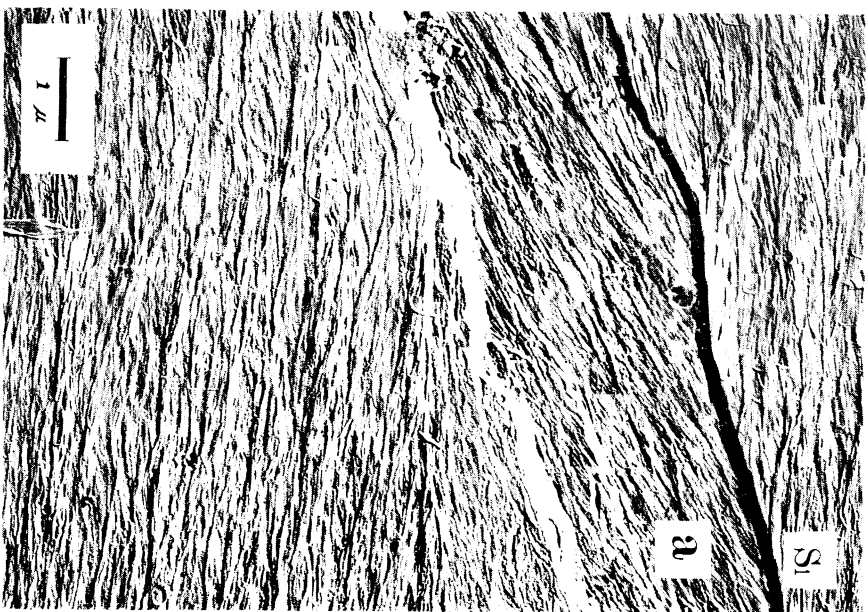
Phot. 37



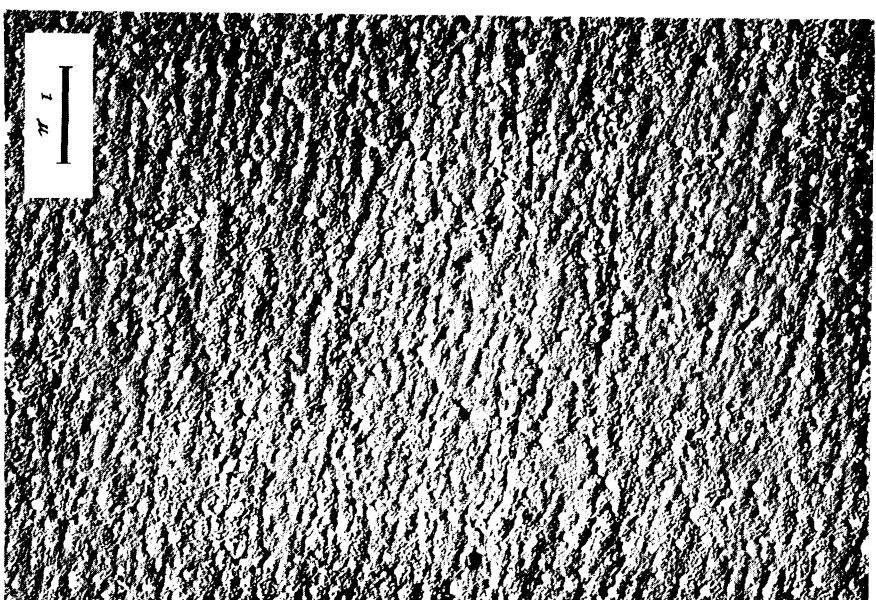
Phot. 40



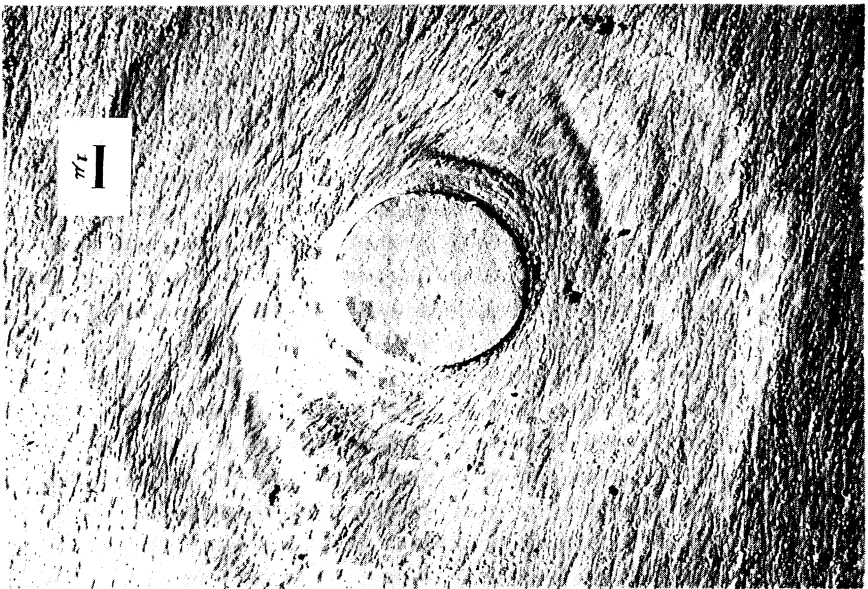
Phot. 39



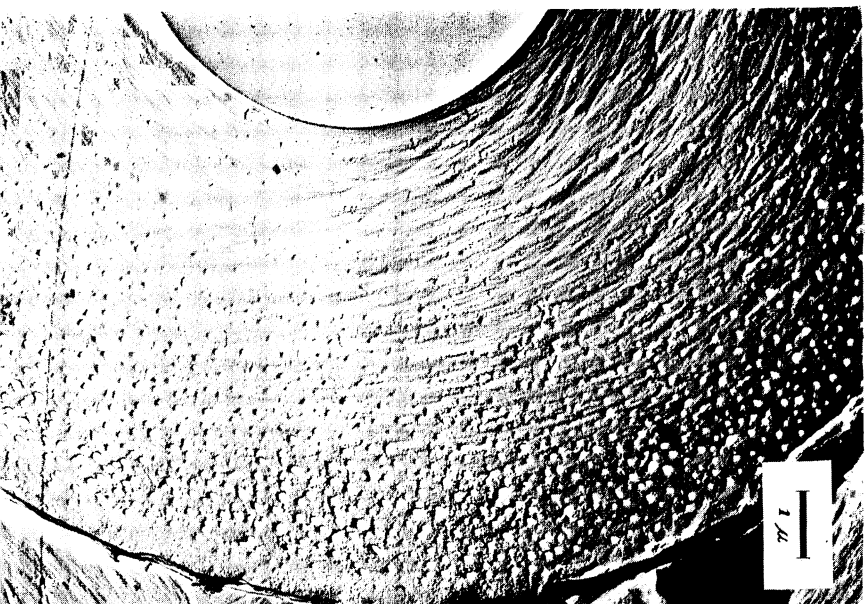
Phot. 41



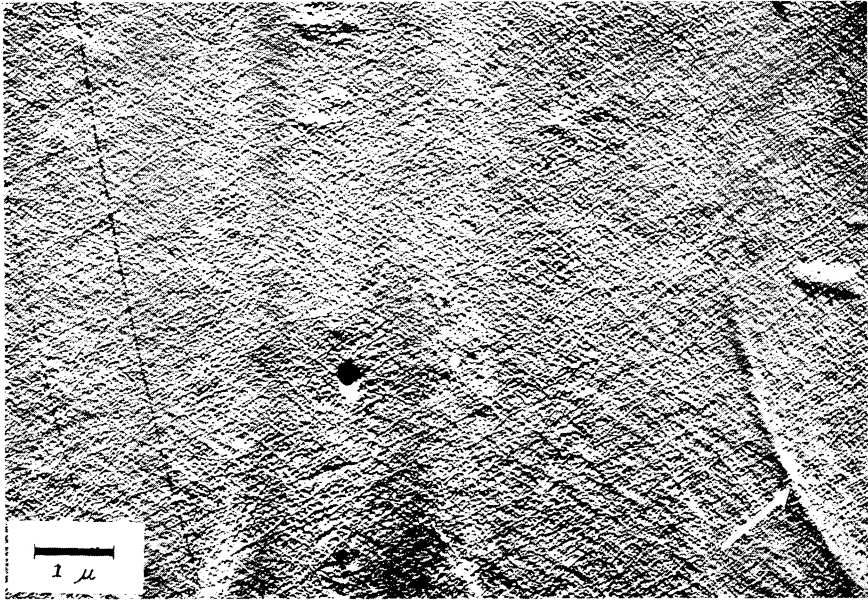
Phot. 42



Phot. 44



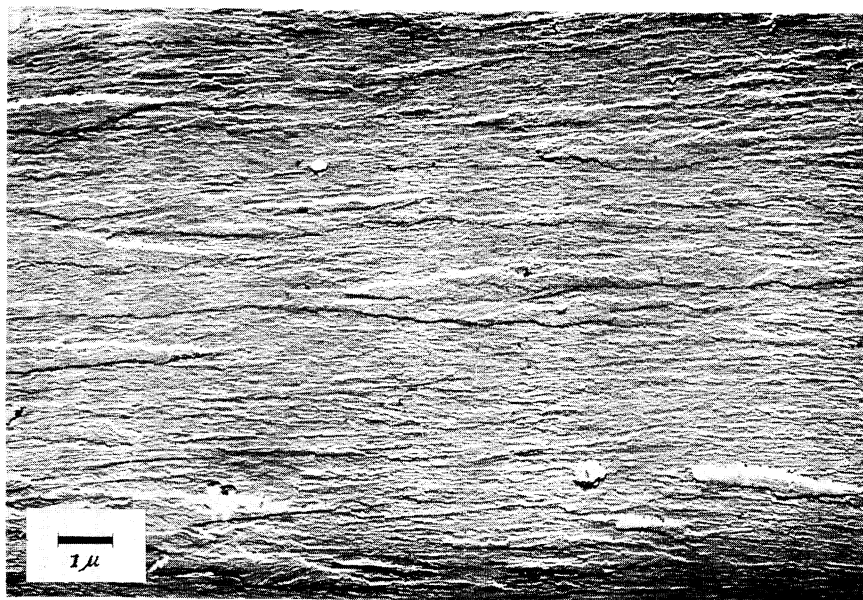
Phot. 43



Phot. 45



Phot. 46



Phot. 47



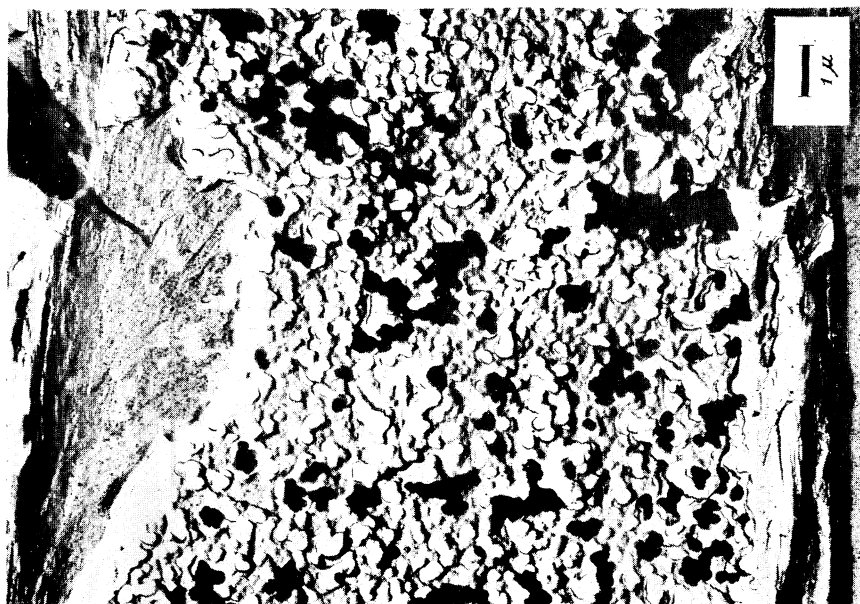
Phot. 48



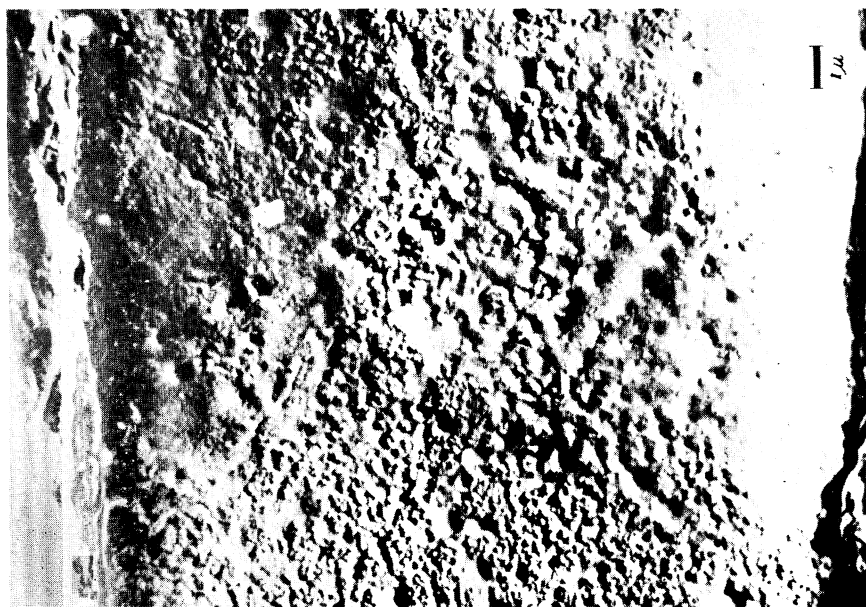
Phot. 49



Phot. 50



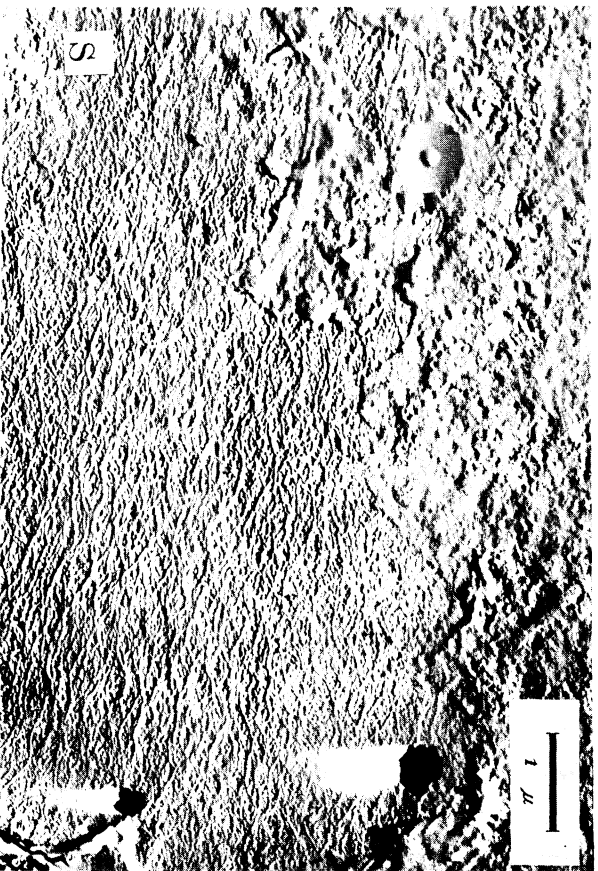
Phot. 52



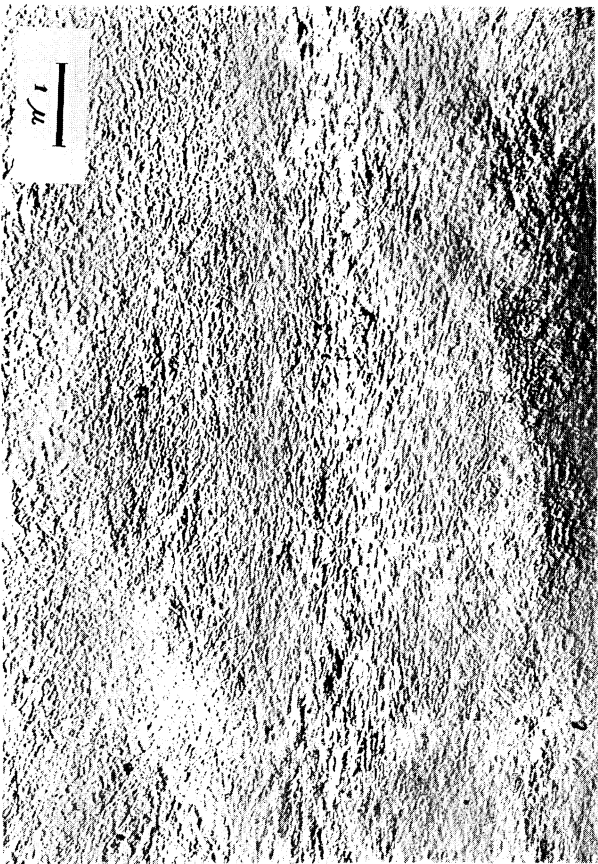
Phot. 51



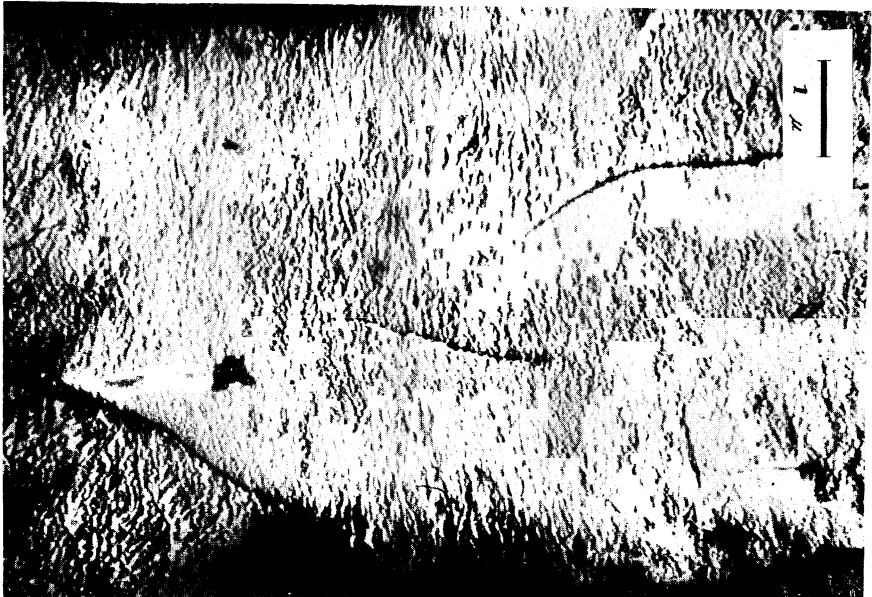
Phot. 53



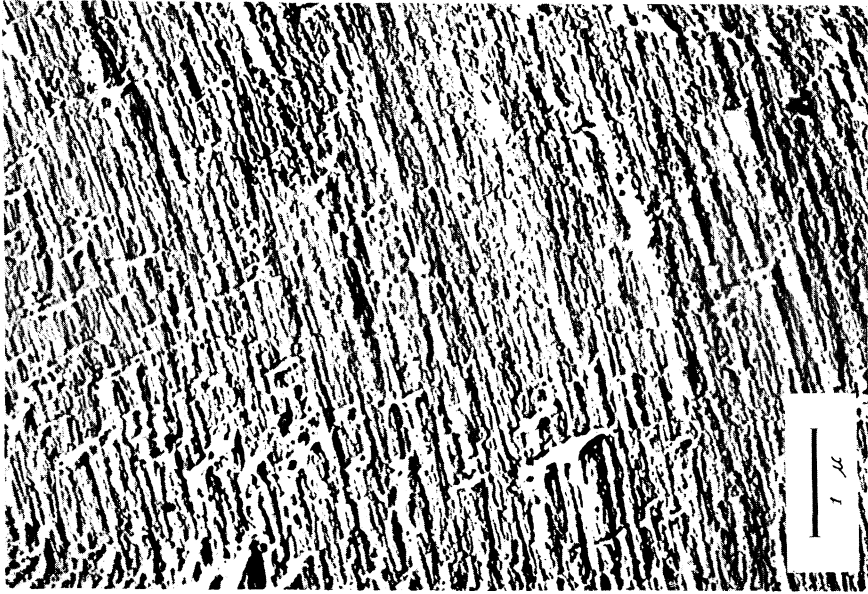
Phot. 54



Phot. 55



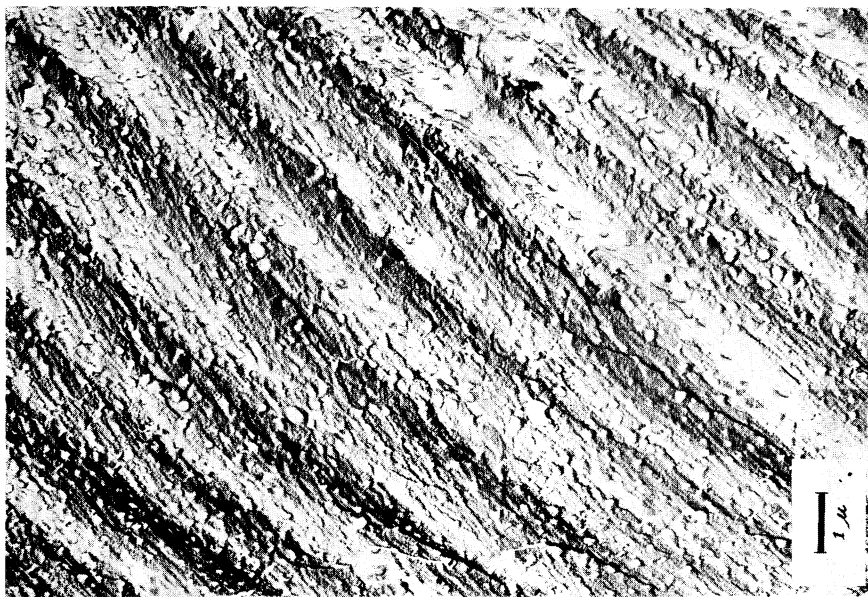
Phot. 56



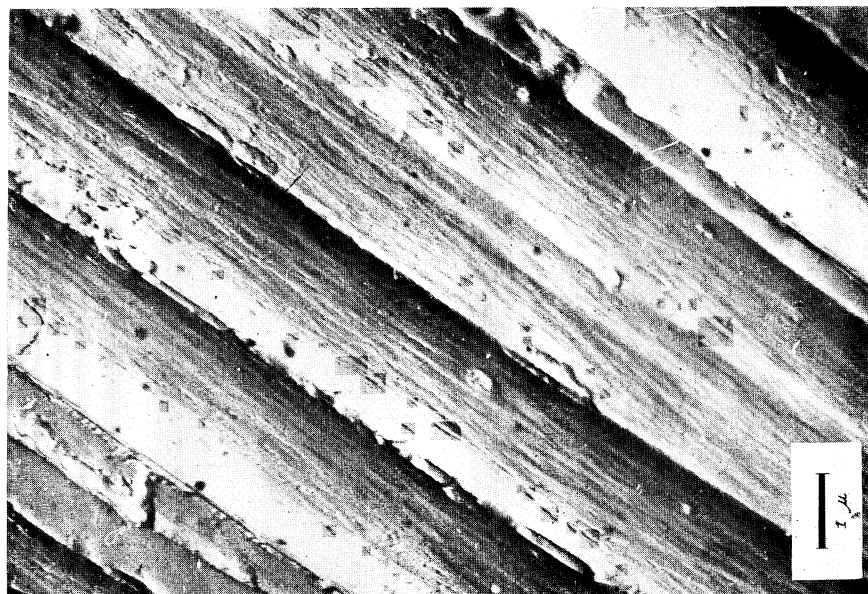
Phot. 58



Phot. 57



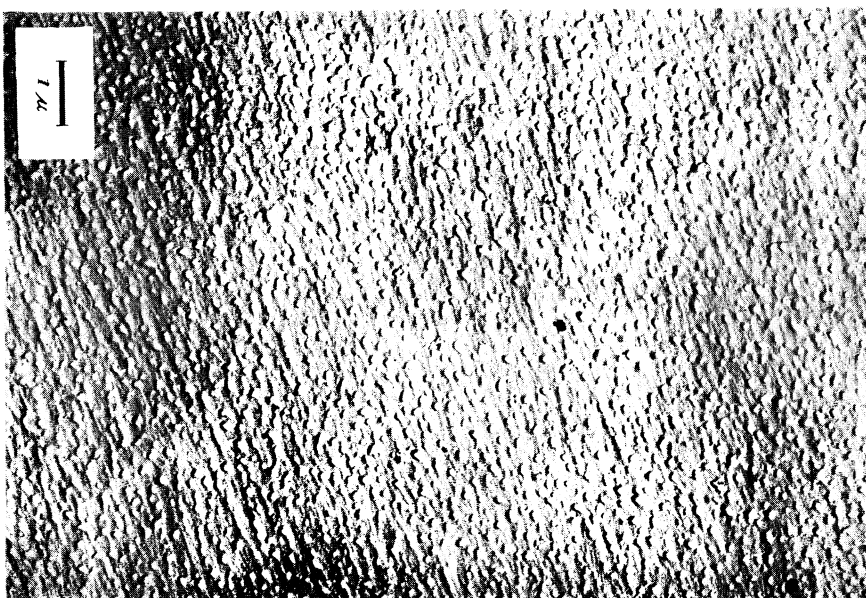
Phot. 60



Phot. 59



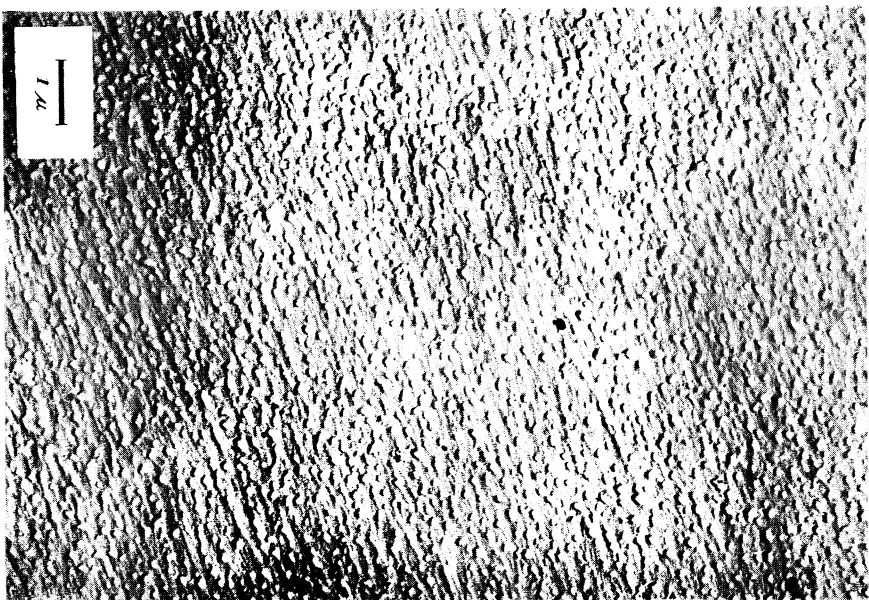
Phot. 61



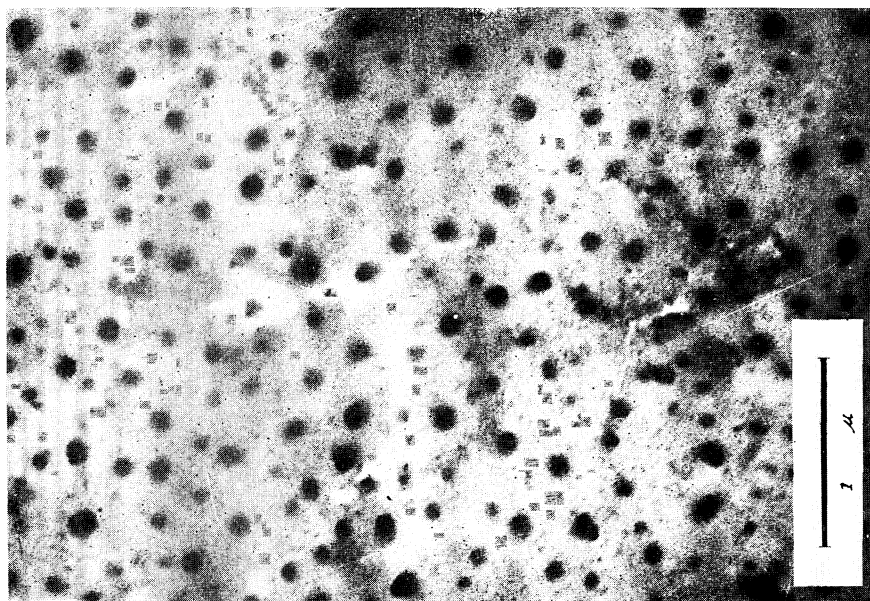
Phot. 62



Phot. 61



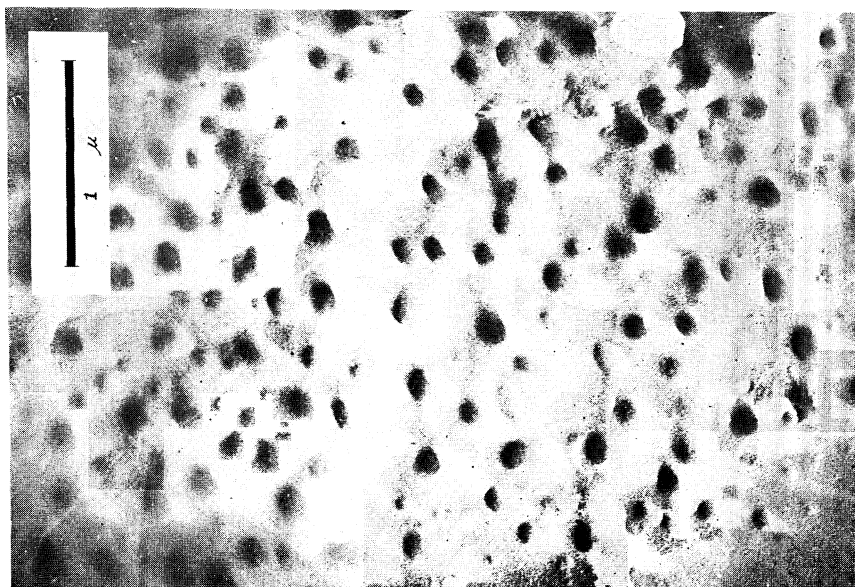
Phot. 62



Phot. 64



Phot. 63



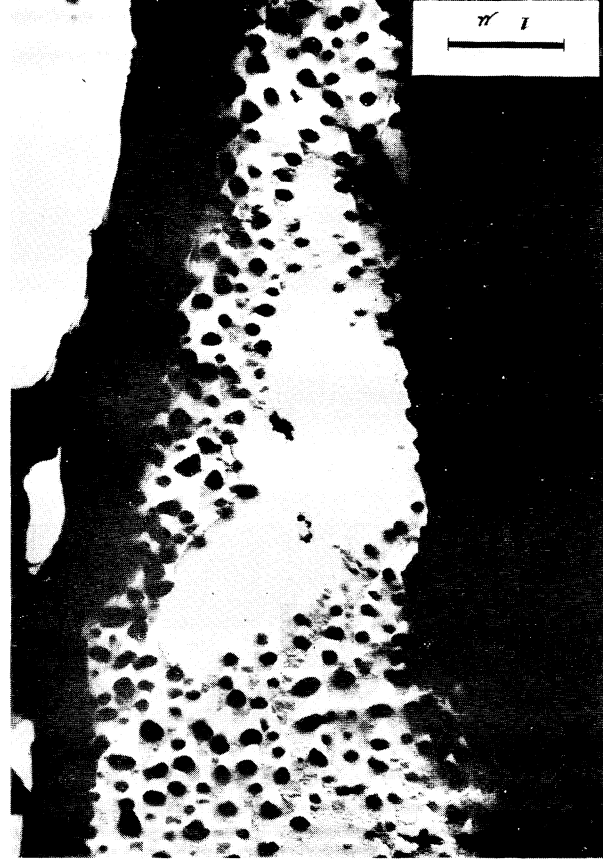
Phot. 66



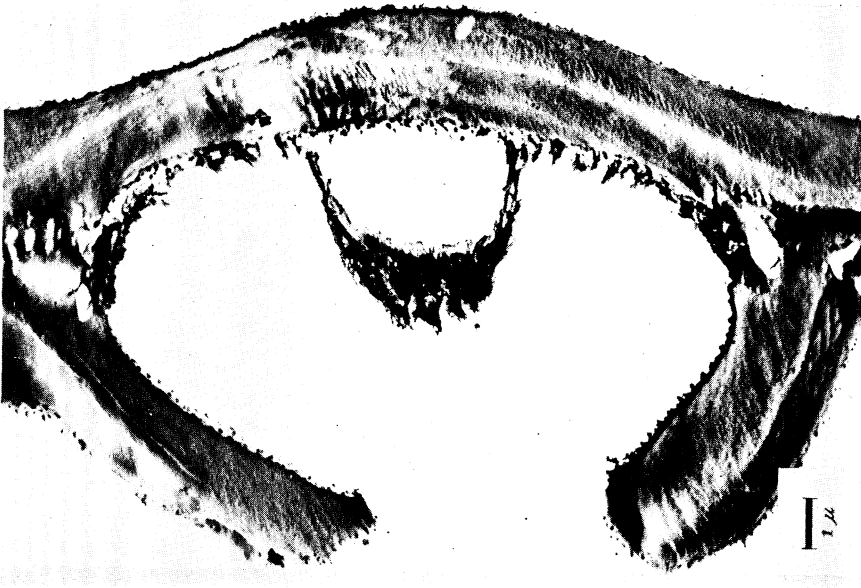
Phot. 65



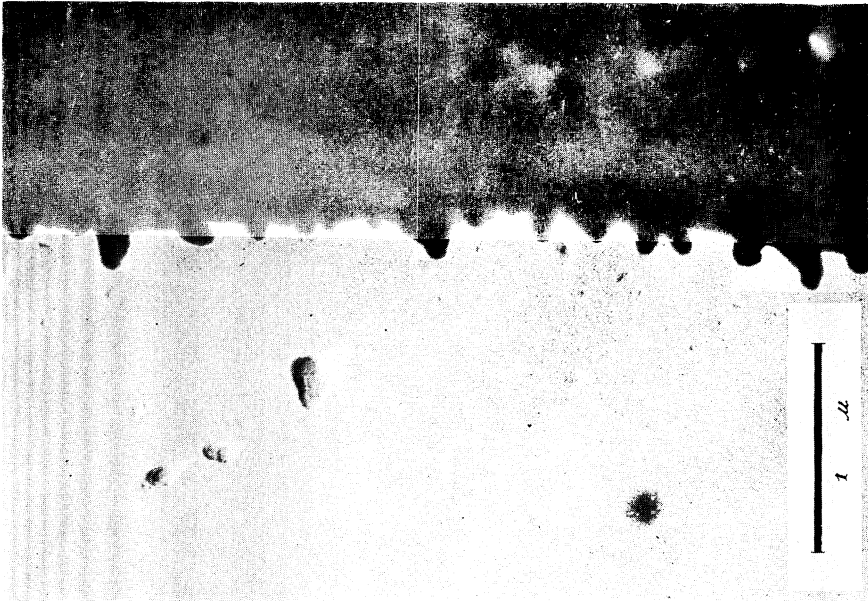
Phot. 68



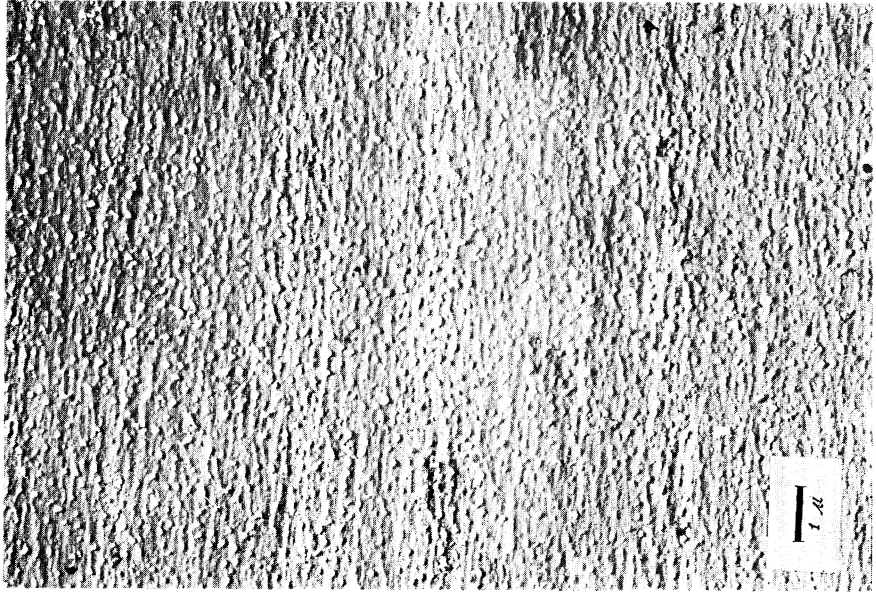
Phot. 67



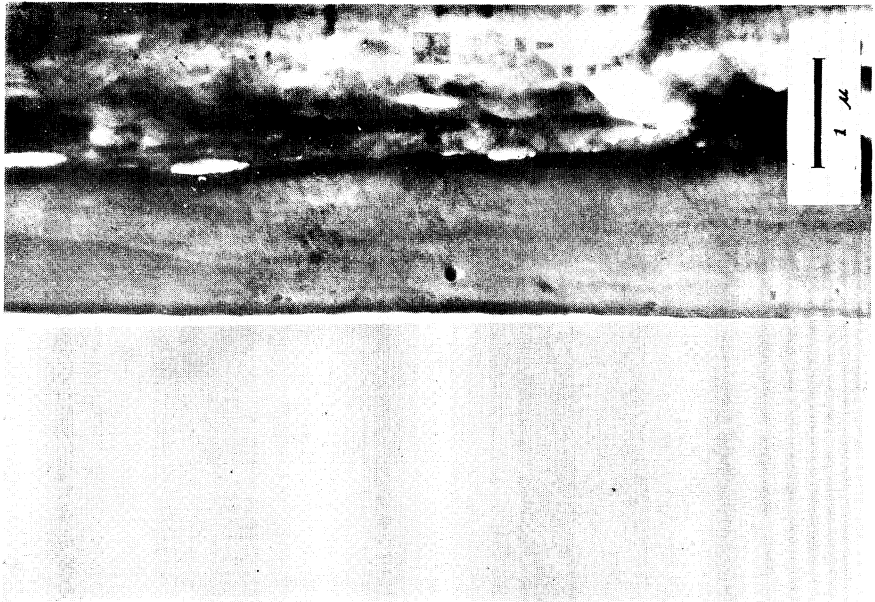
Phot. 70



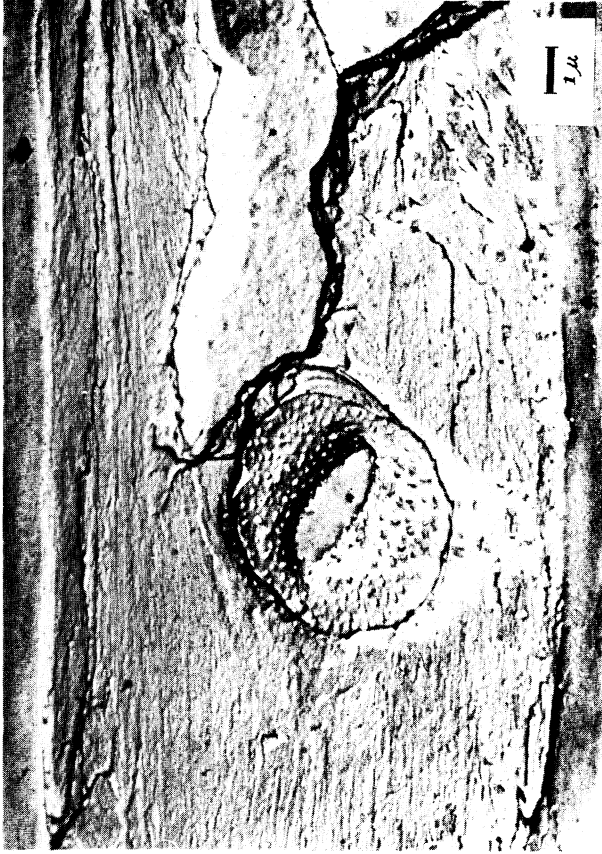
Phot. 69



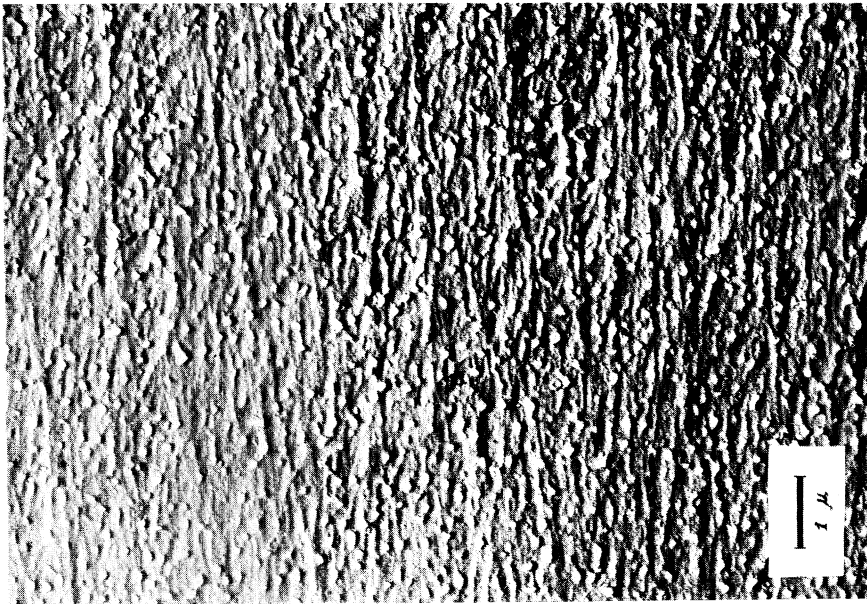
Phot. 72



Phot. 71



Phot. 74



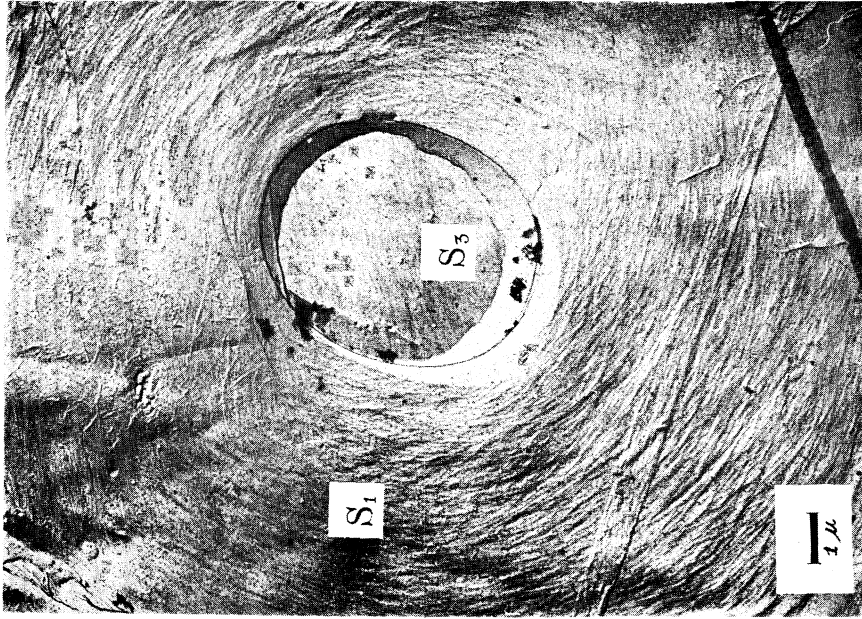
Phot. 73



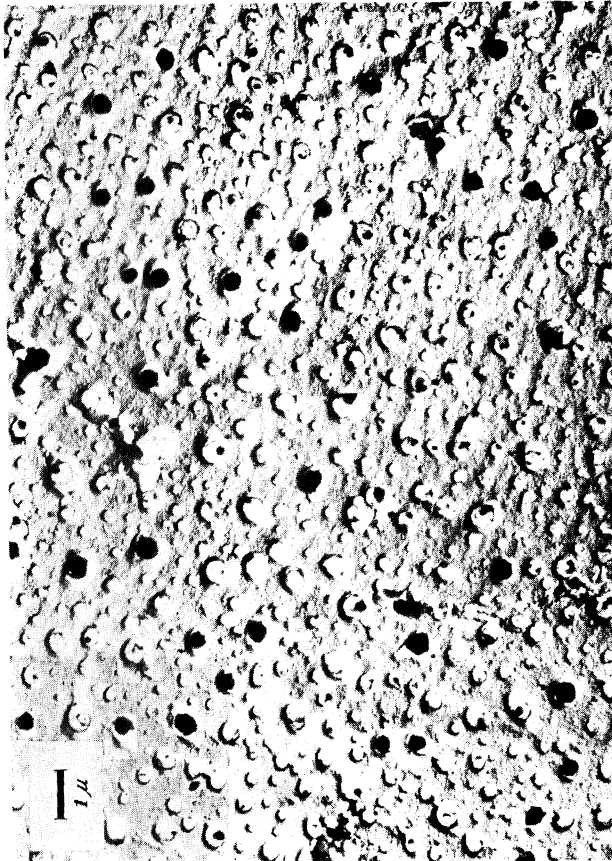
Phot. 76



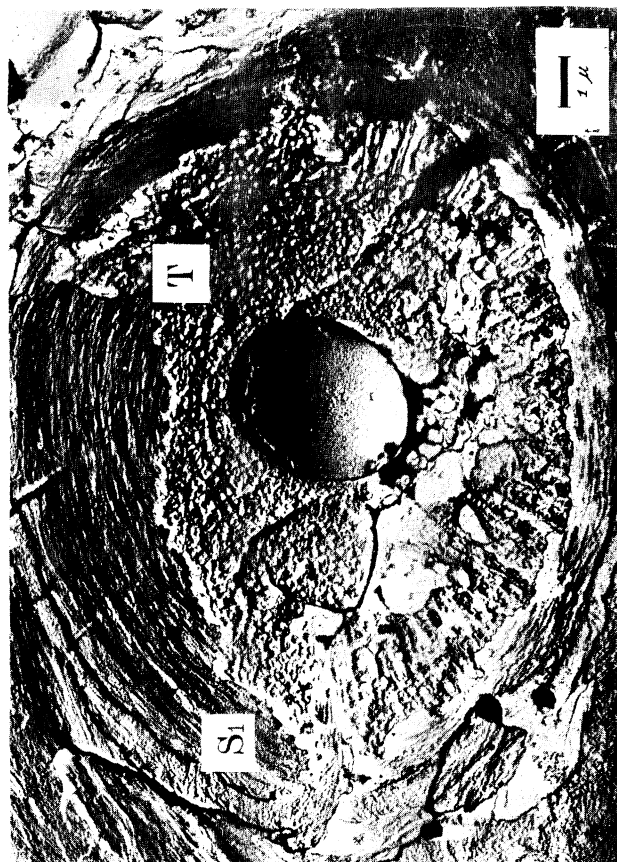
Phot. 75



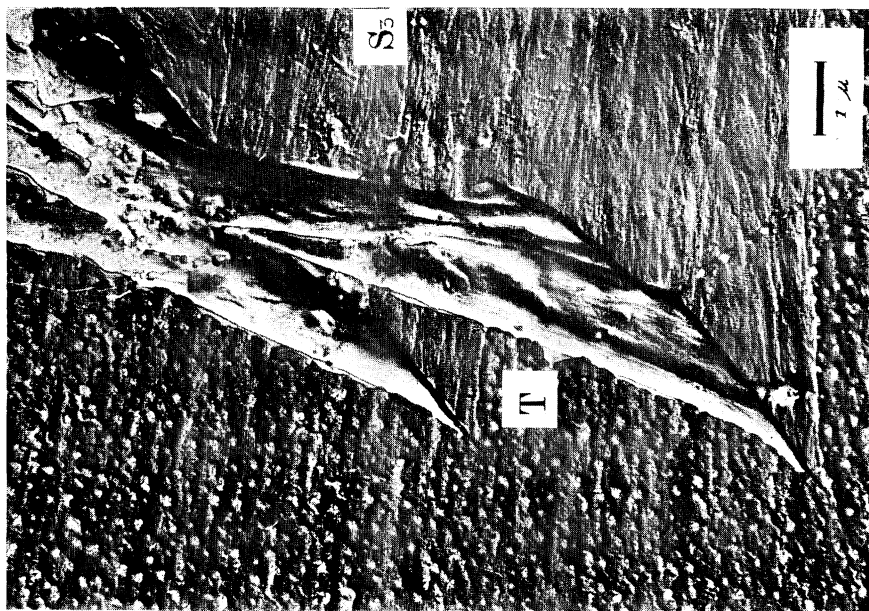
Phot. 78



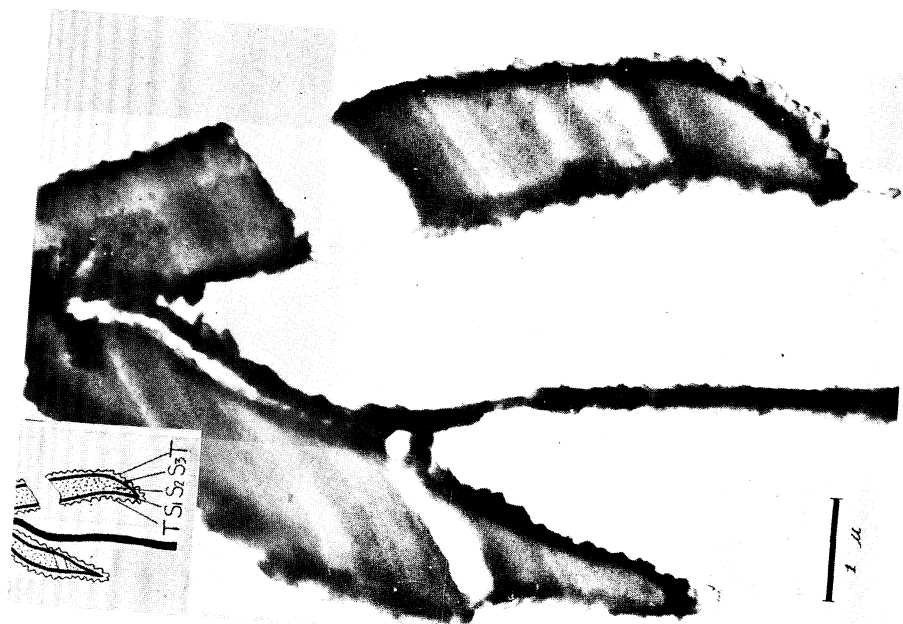
Phot. 77



Phot. 80



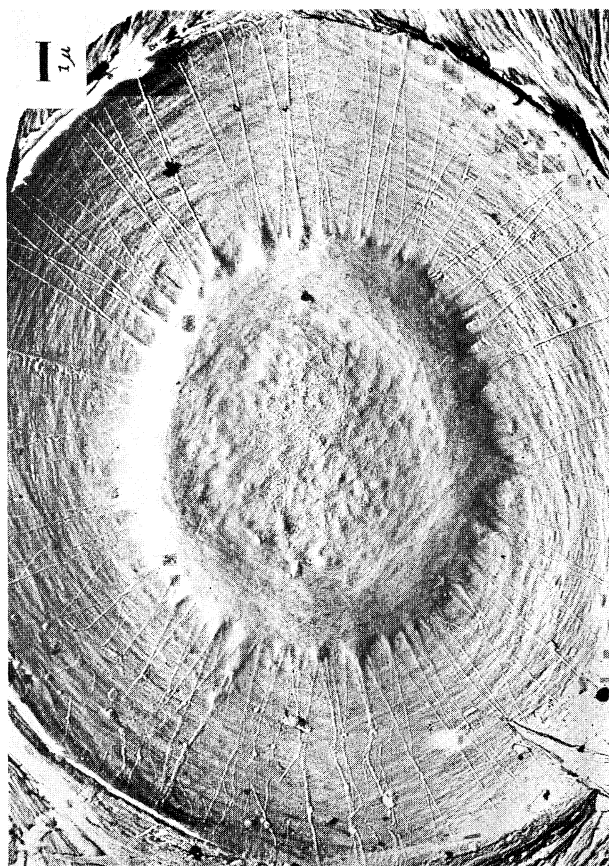
Phot. 79



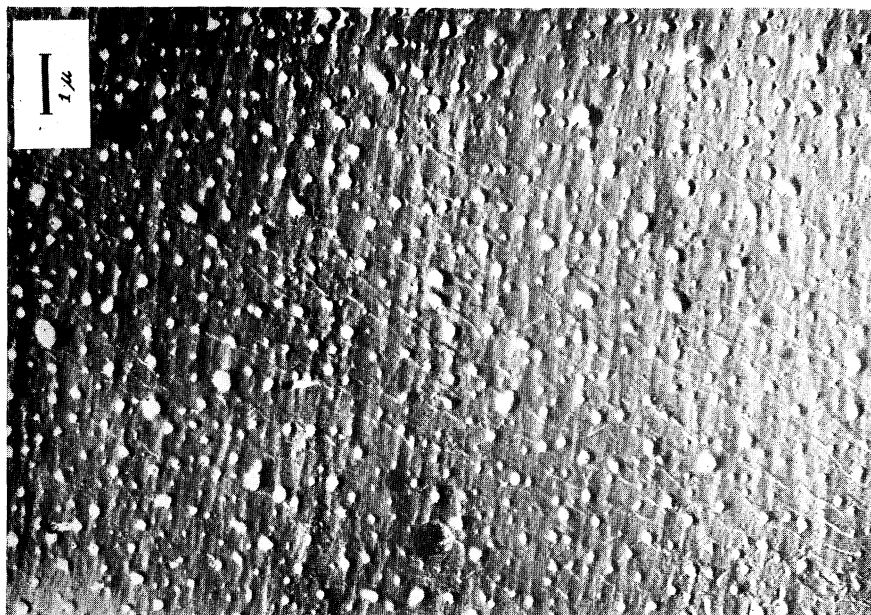
Phot. 82



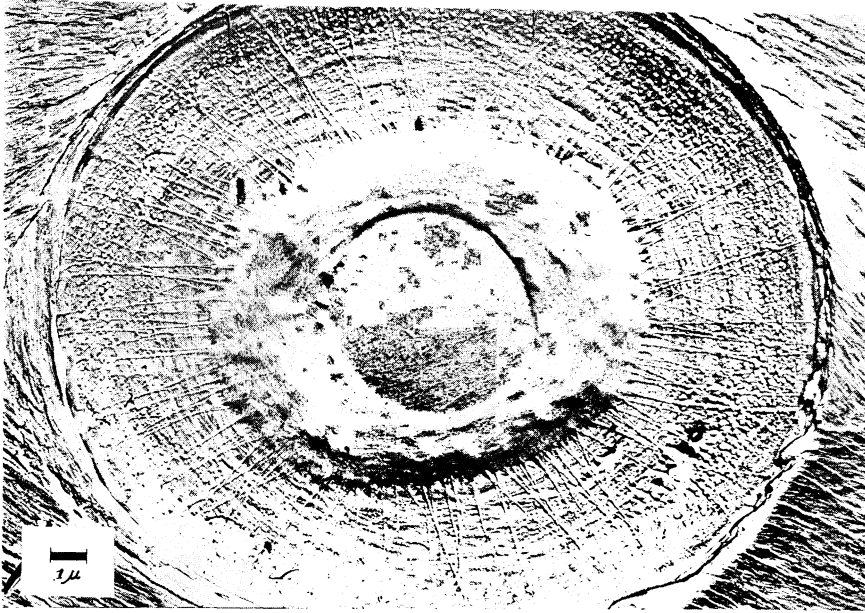
Phot. 81



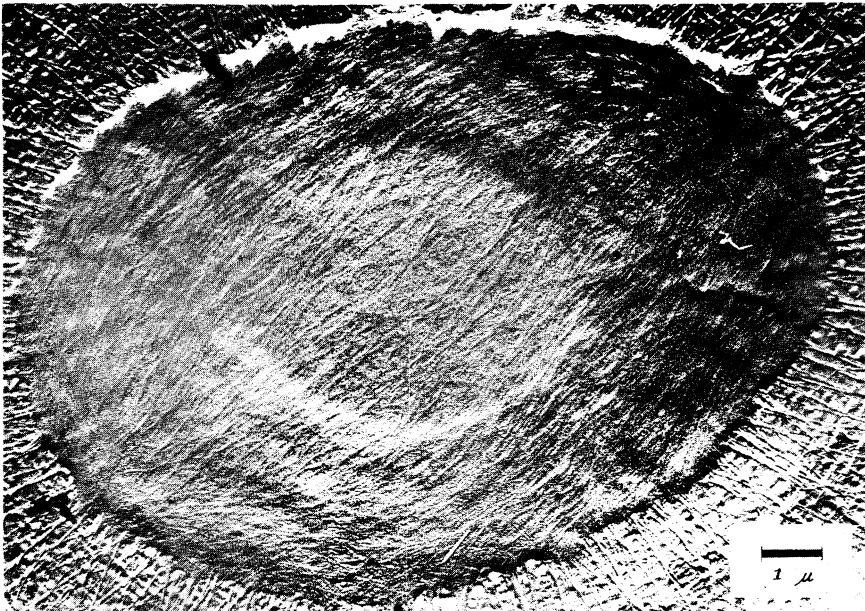
Phot. 84



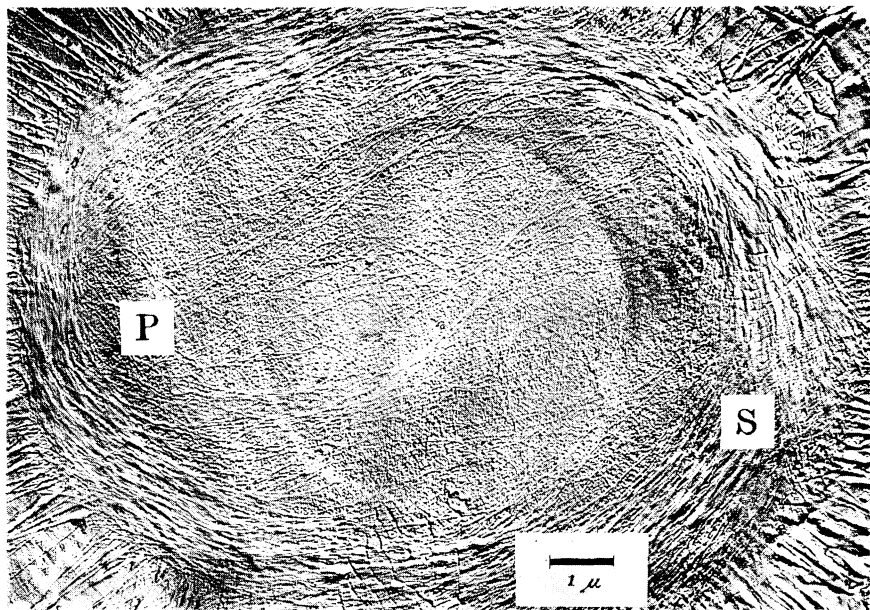
Phot. 83



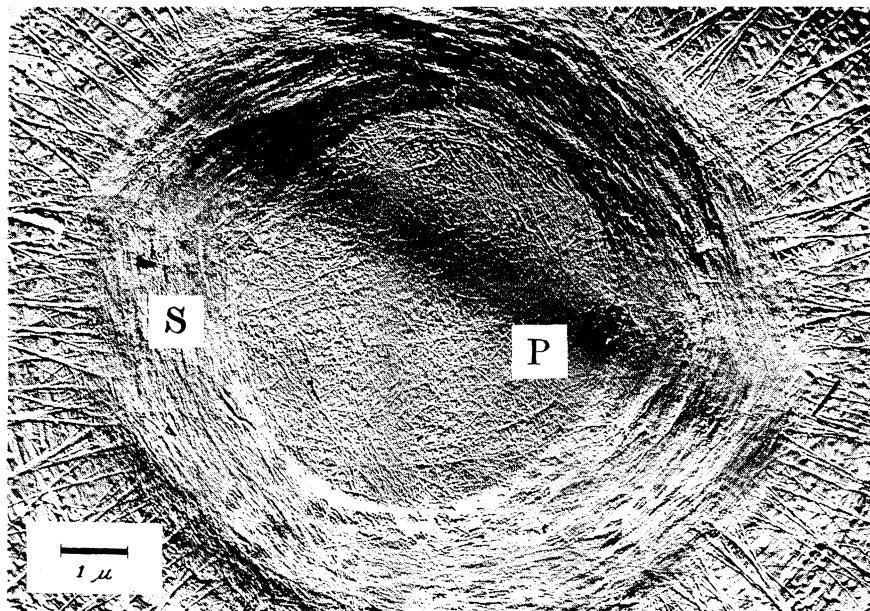
Phot. 85



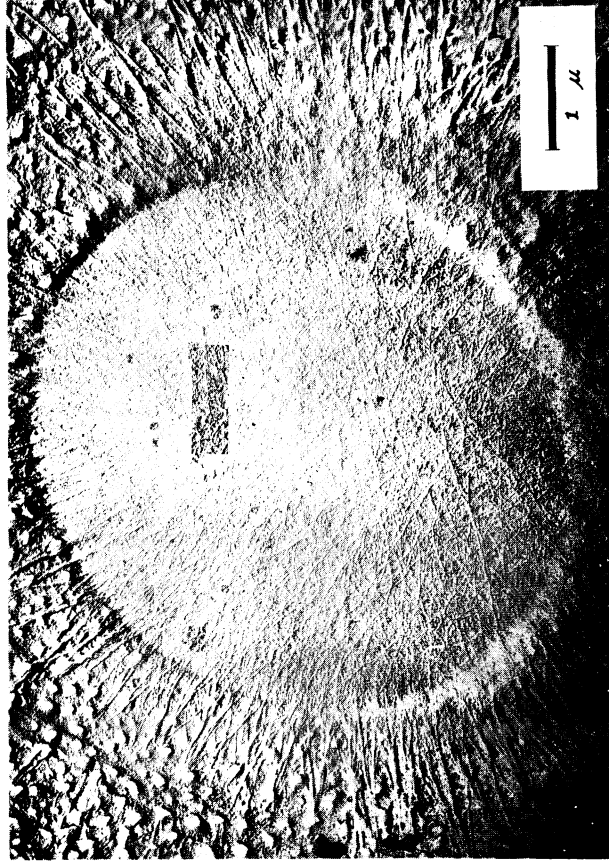
Phot. 86



Phot. 87



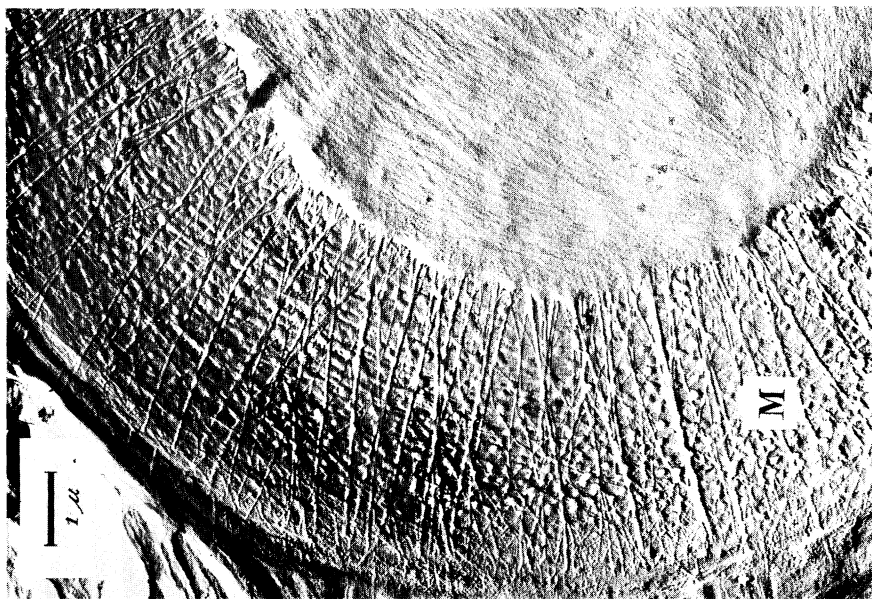
Phot. 88



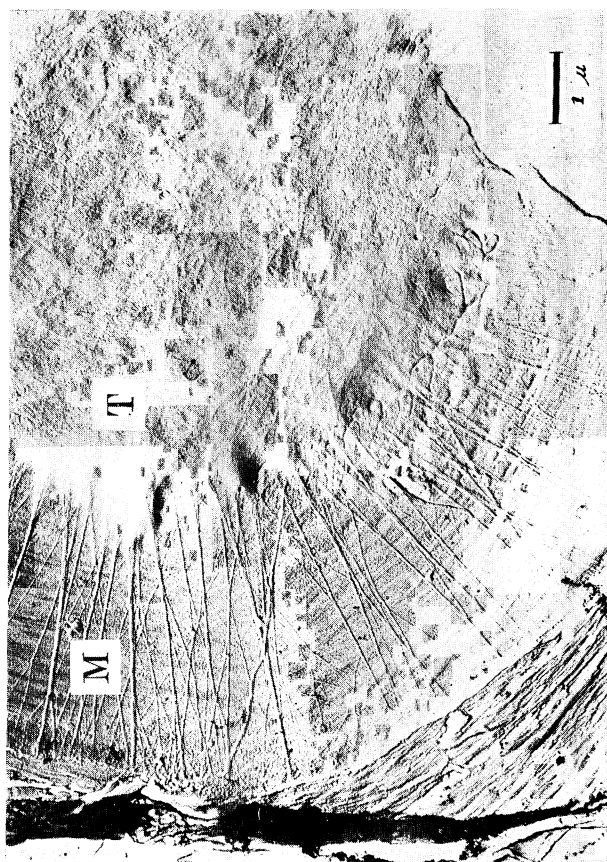
Phot. 89



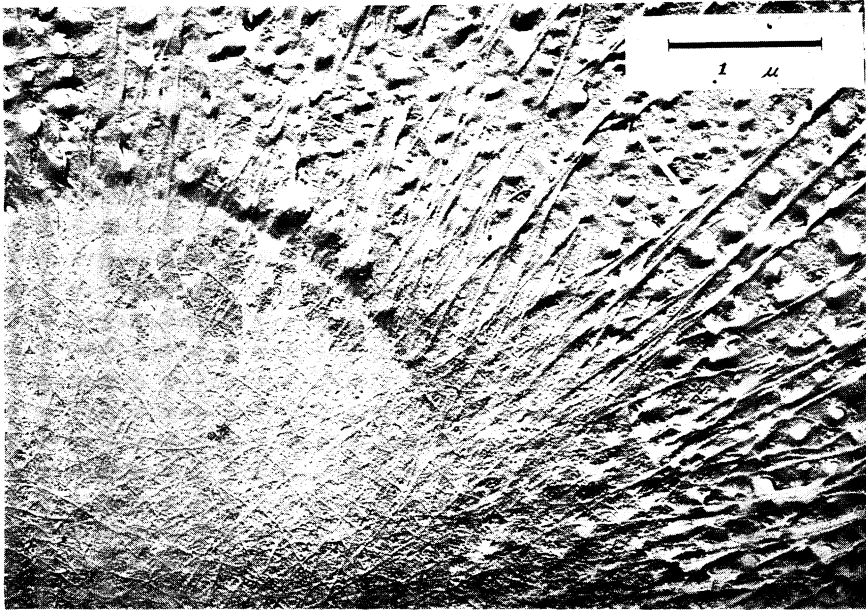
Phot. 90



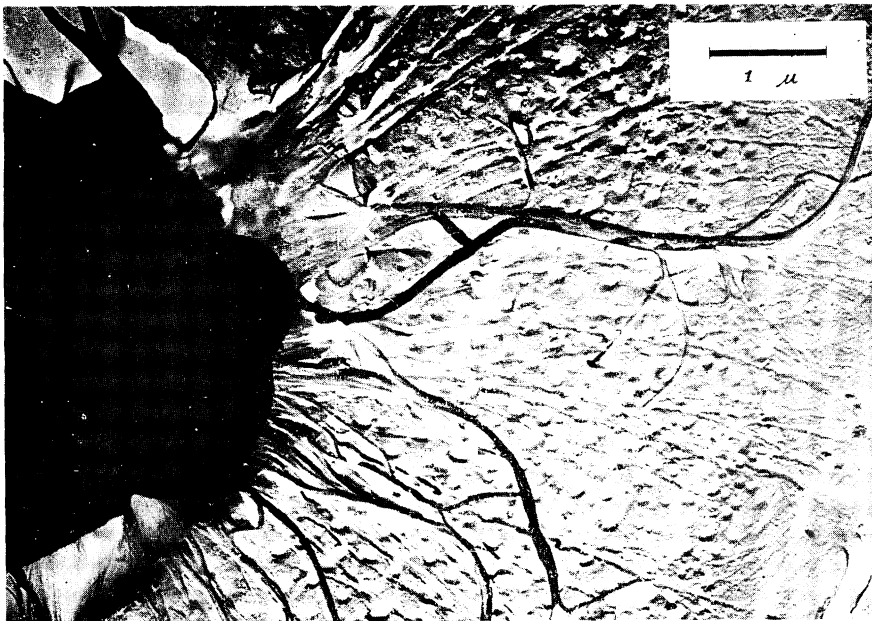
Phot. 92



Phot. 91



Phot. 85



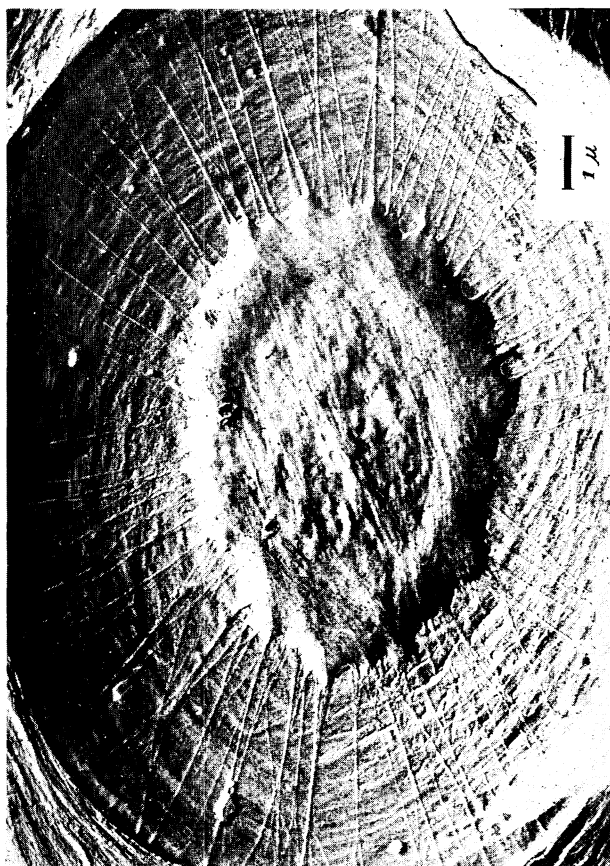
Phot. 86



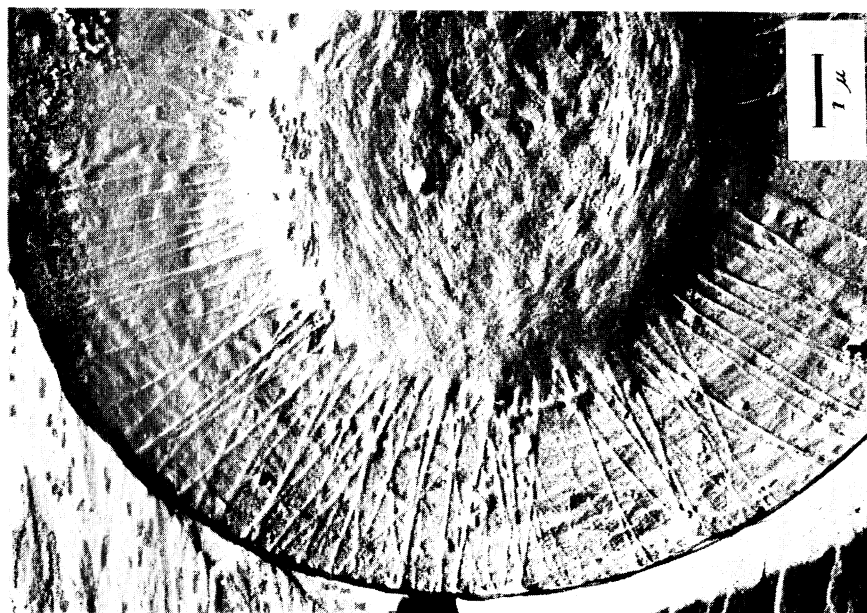
Phot. 96



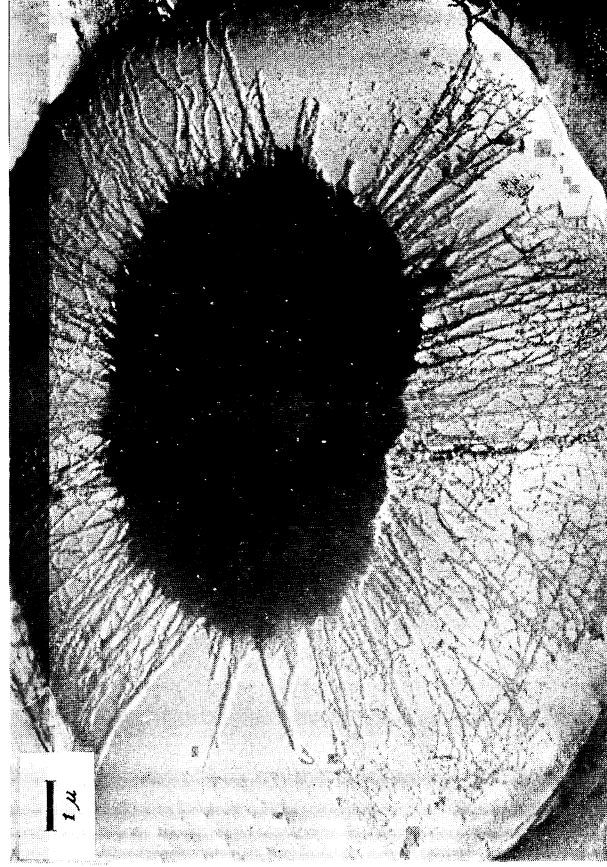
Phot. 95



Phot. 98



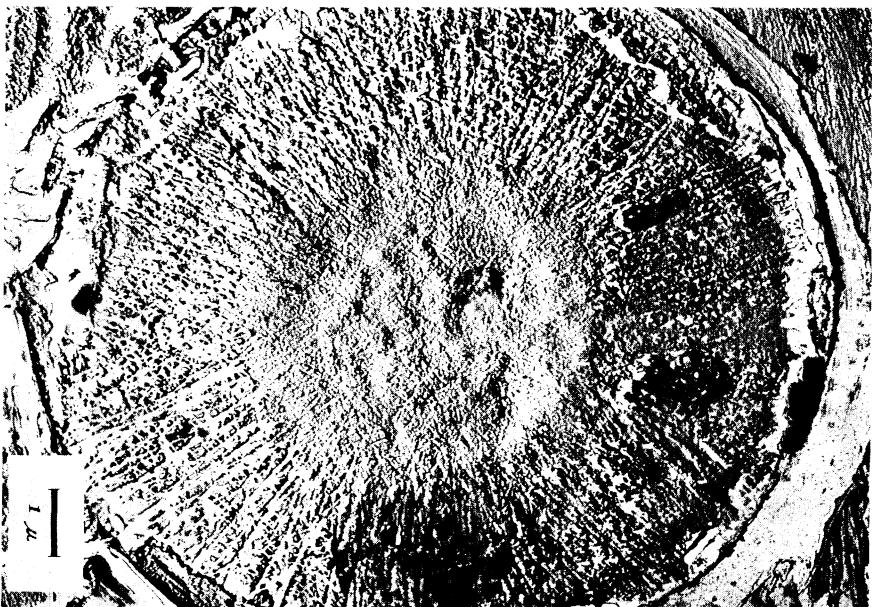
Phot. 97



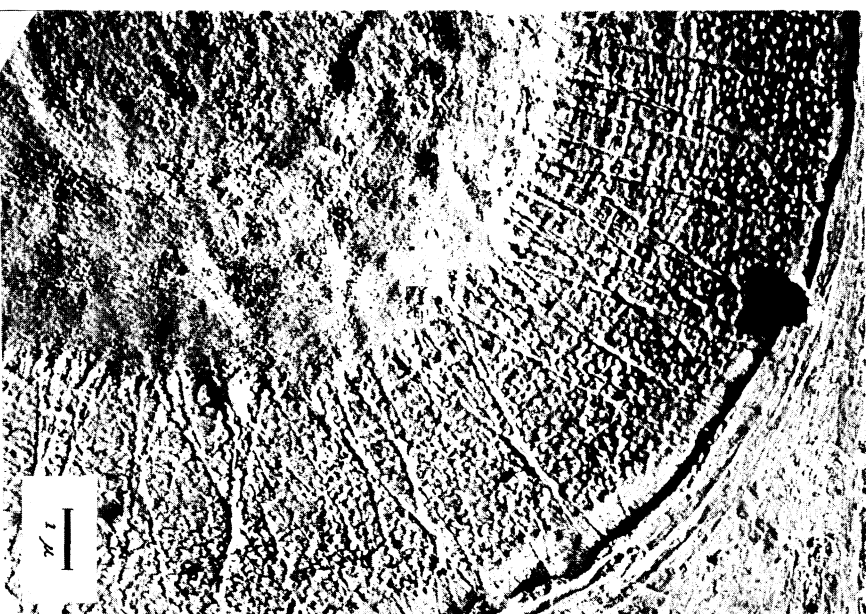
Phot. 99



Phot. 100



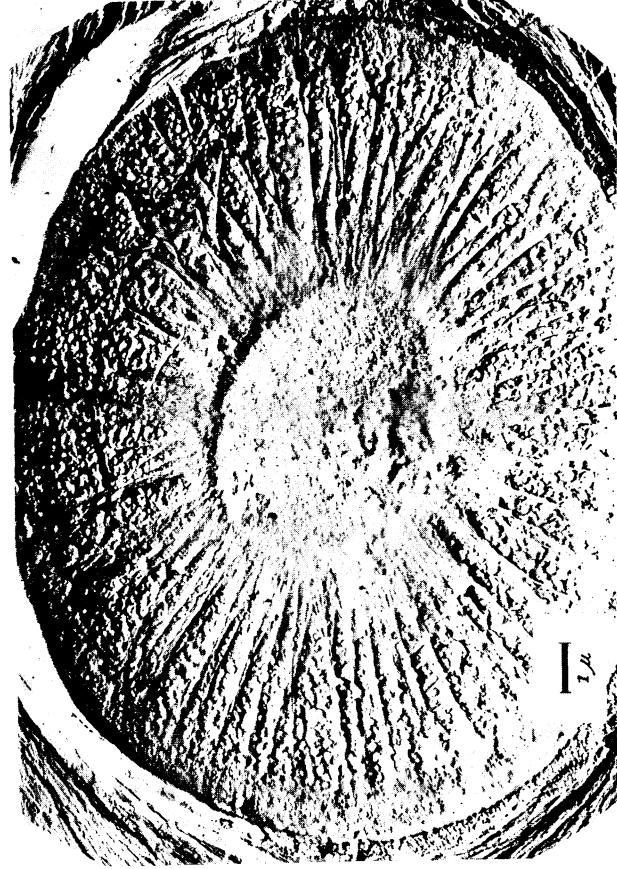
Phot. 101



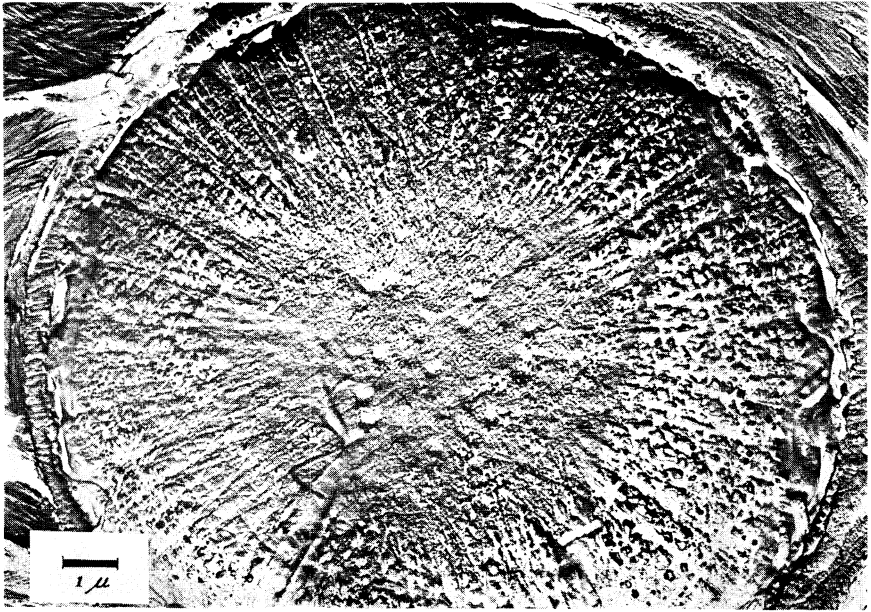
Phot. 102



Phot. 103



Phot. 104



Phot. 105



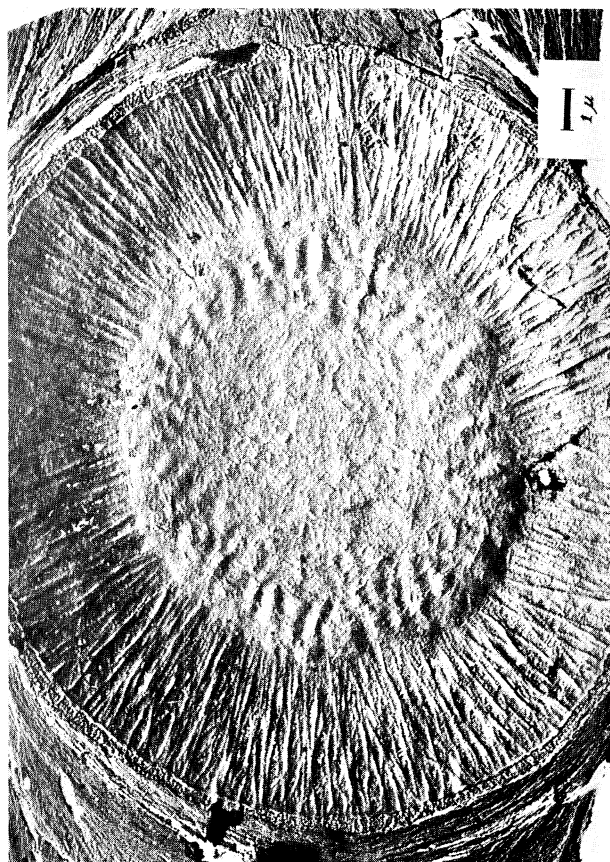
Phot. 106



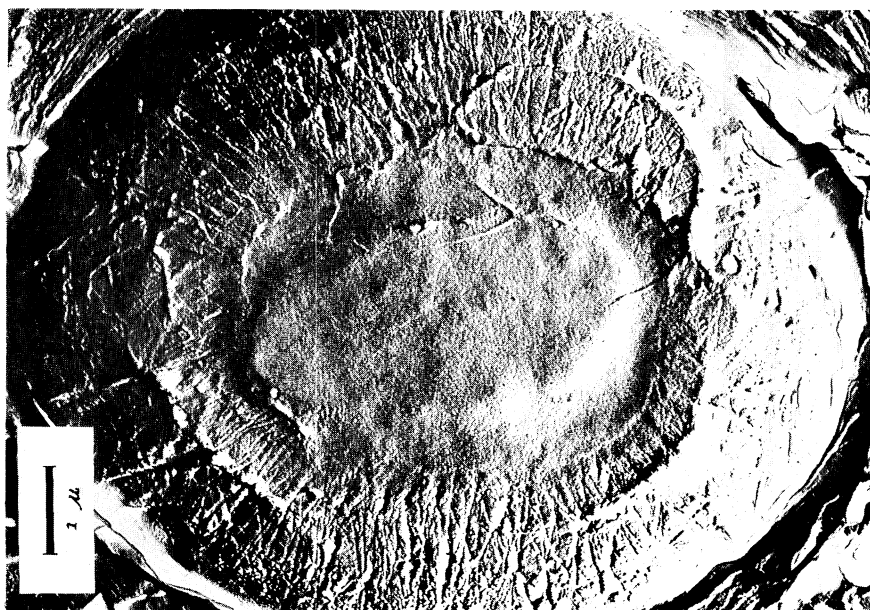
Phot. 107



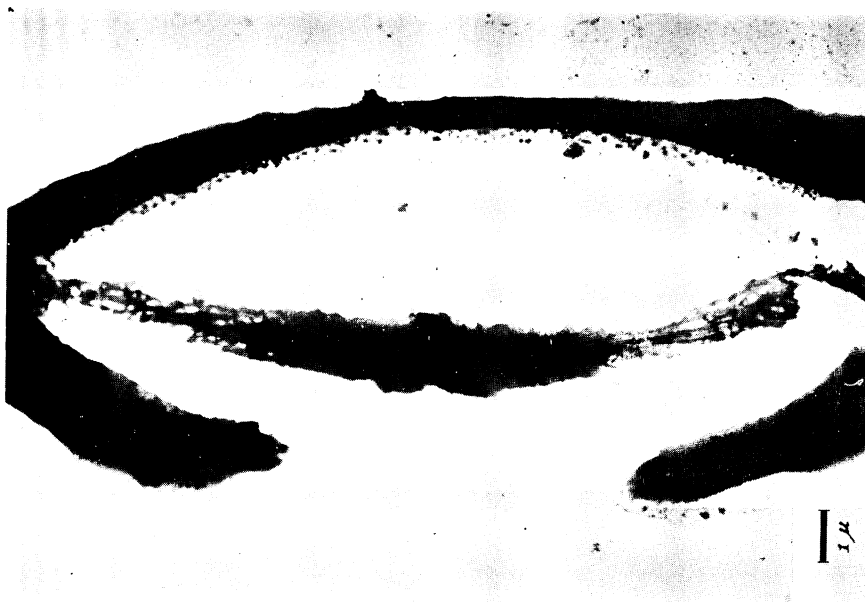
Phot. 108



Phot. 110



Phot. 109



Phot. 112



Phot. 111



Phot. 114



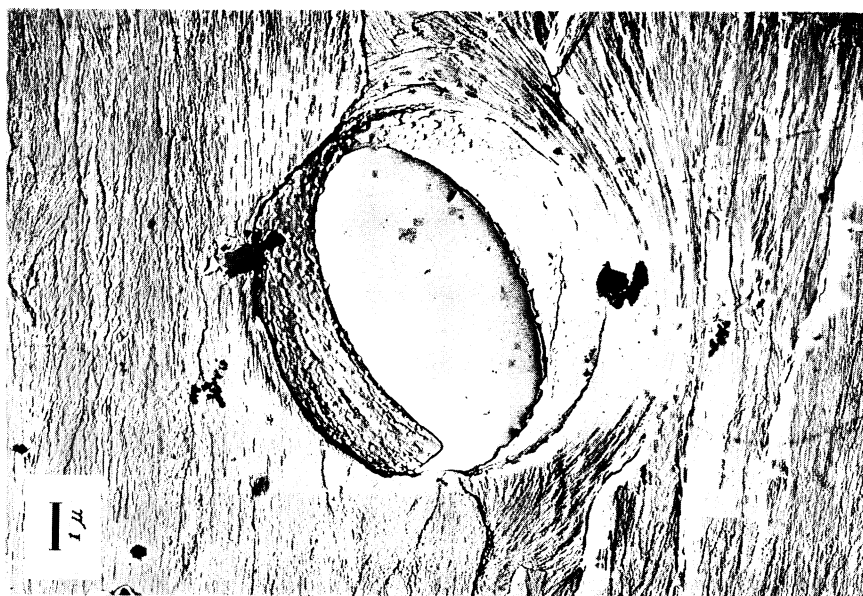
Phot. 113



Phot. 116



Phot. 115



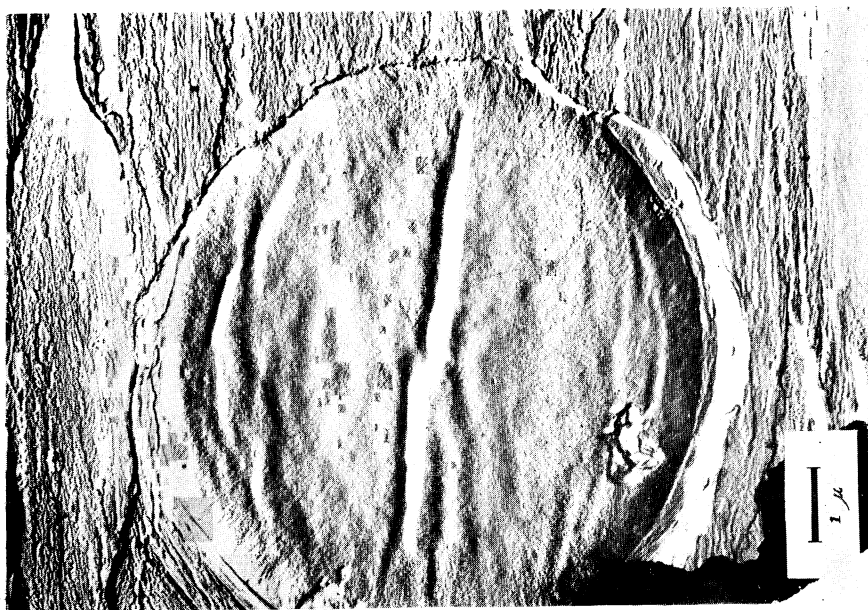
Phot. 118



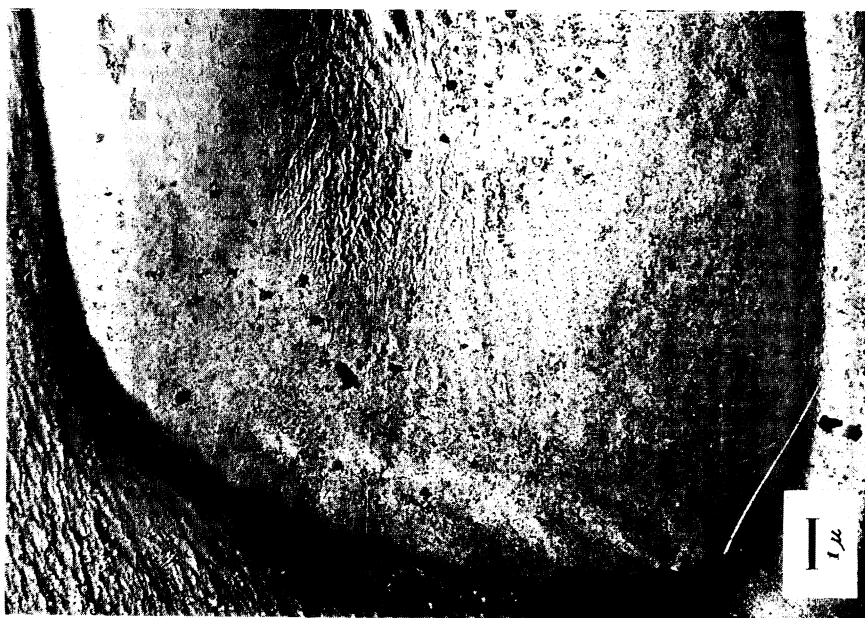
Phot. 117



Phot. 120



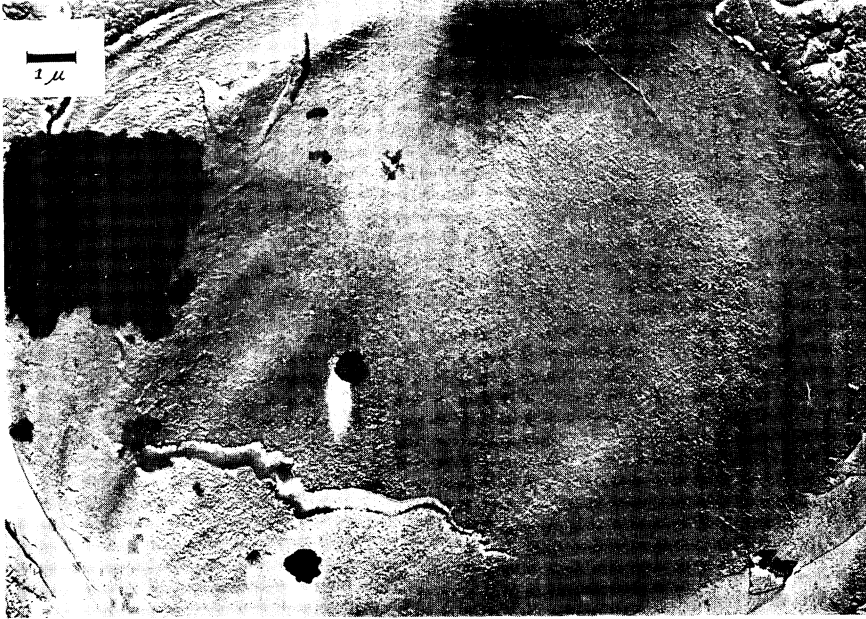
Phot. 119



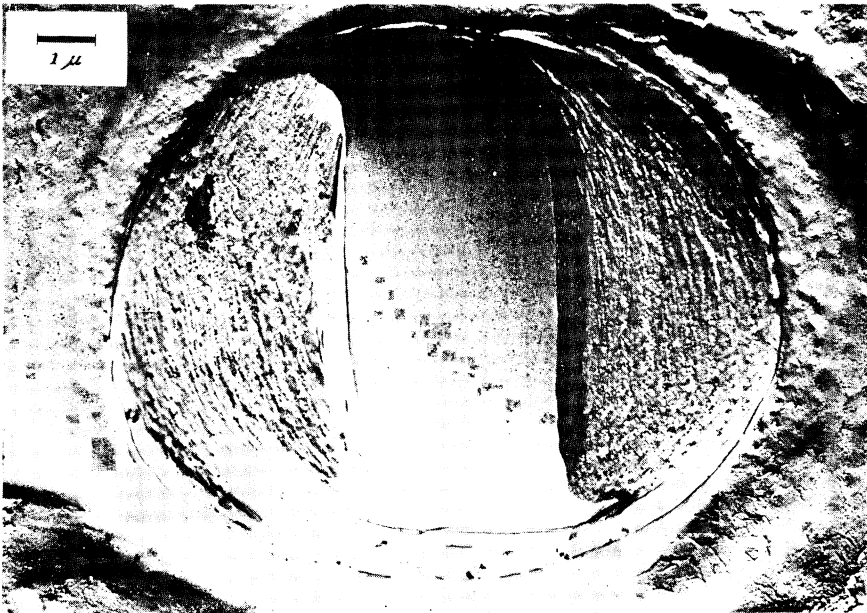
Phot. 122



Phot. 121



Phct. 123



Phot. 124



Phot. 126



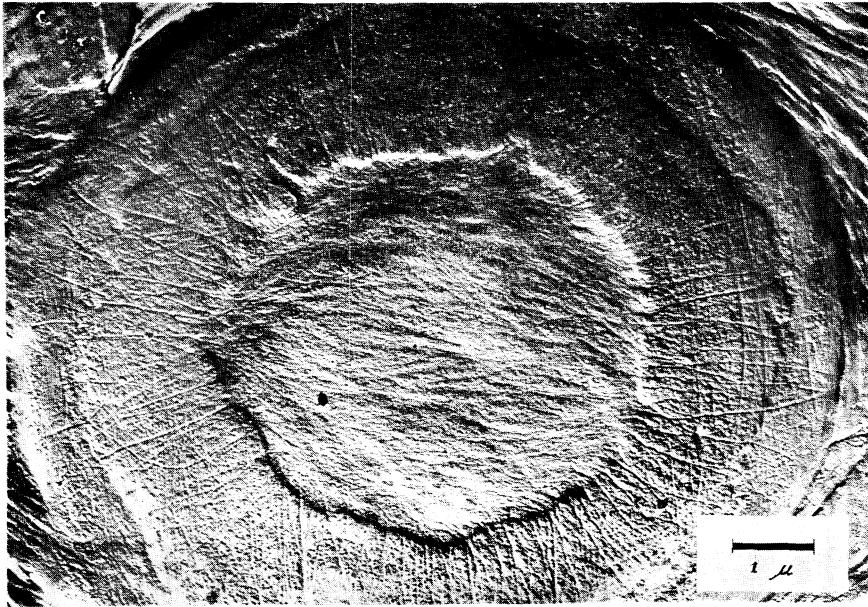
Phot. 125



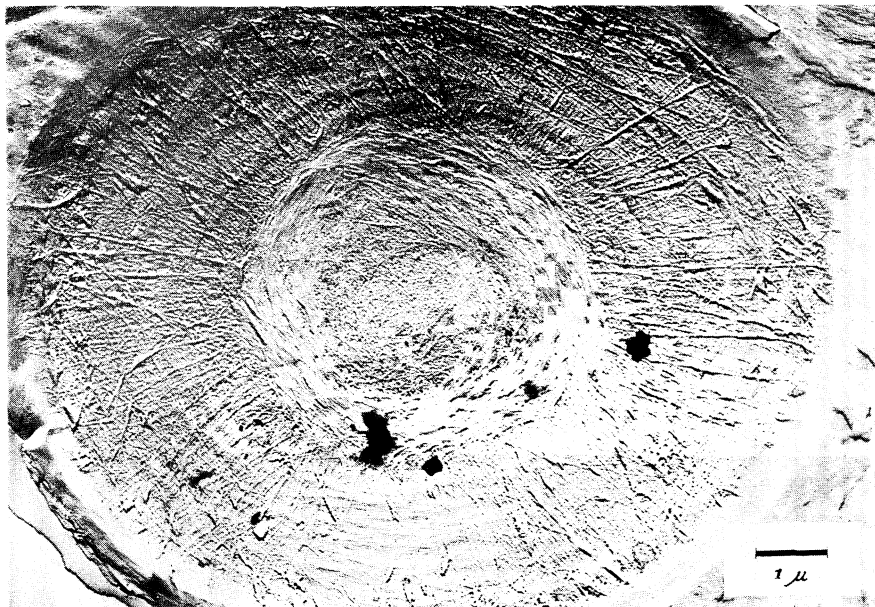
Phot. 127



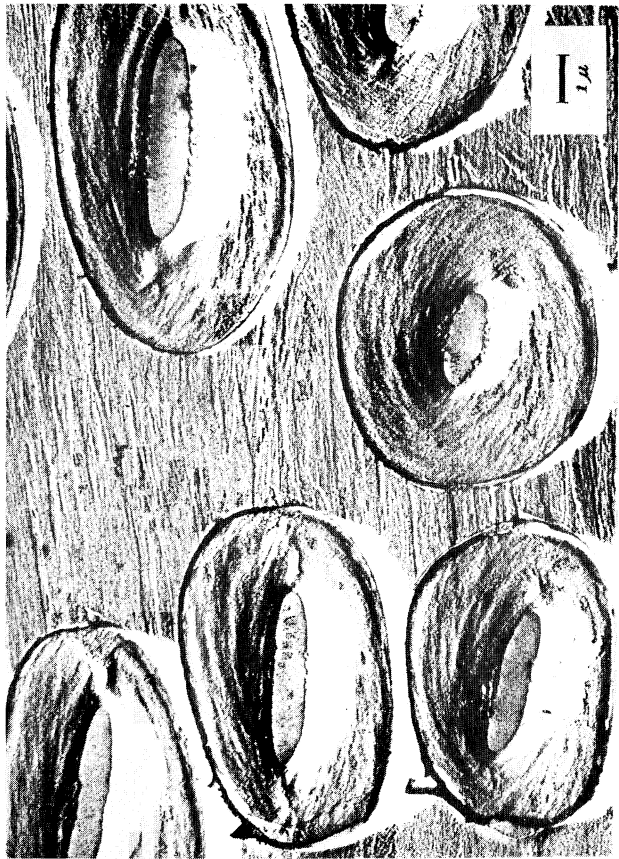
Phot. 128



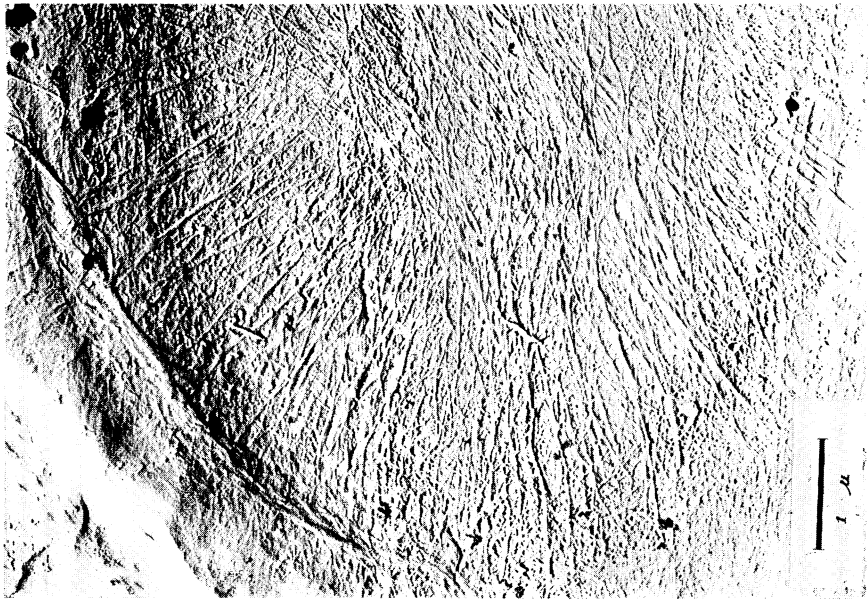
Phot. 129



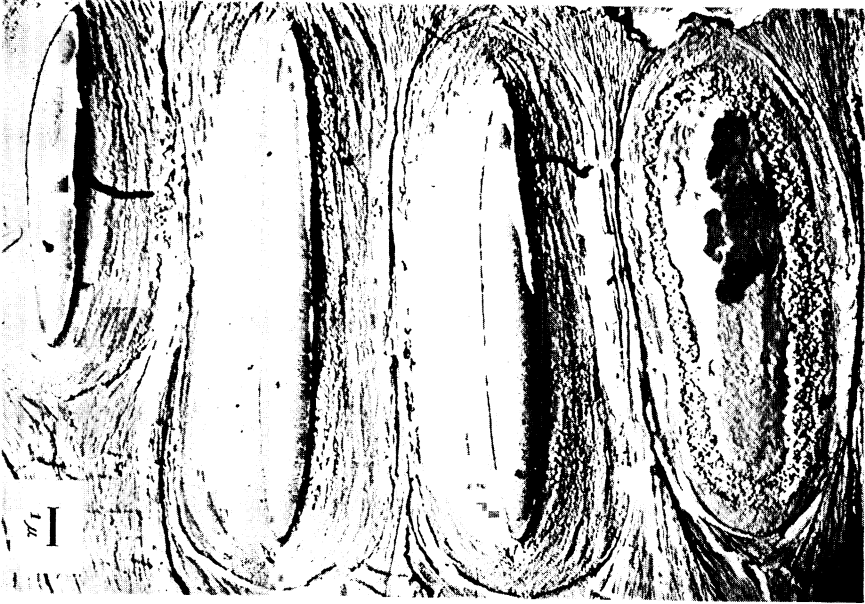
Phot. 130



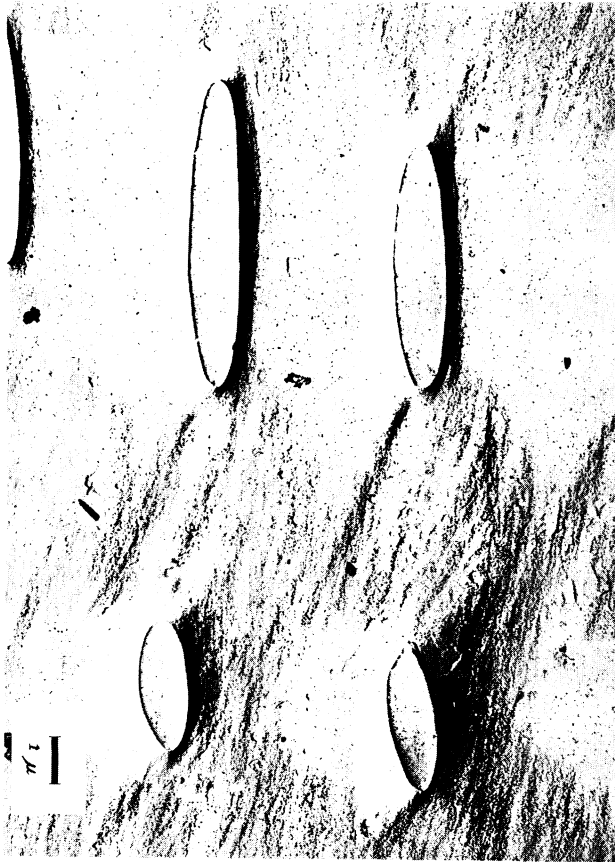
Phot. 132



Phot. 131



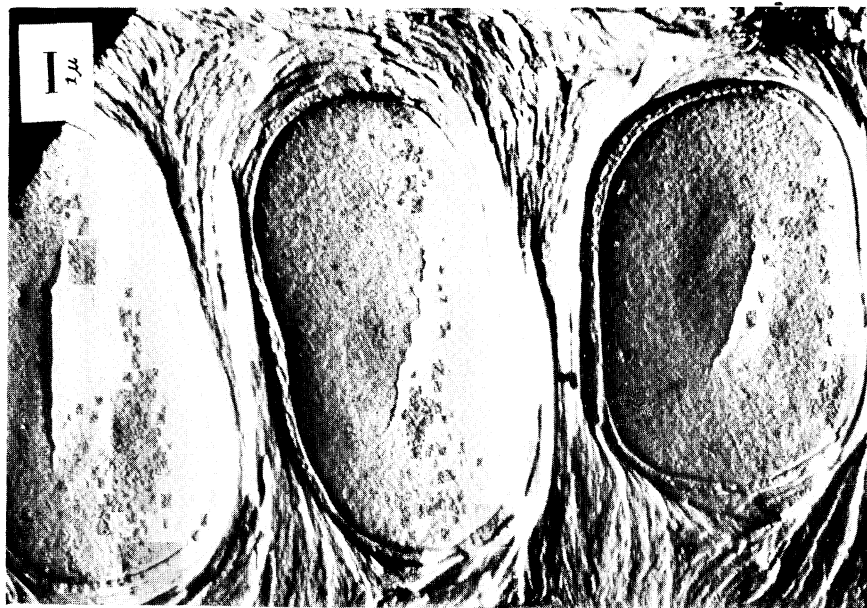
Phot. 133



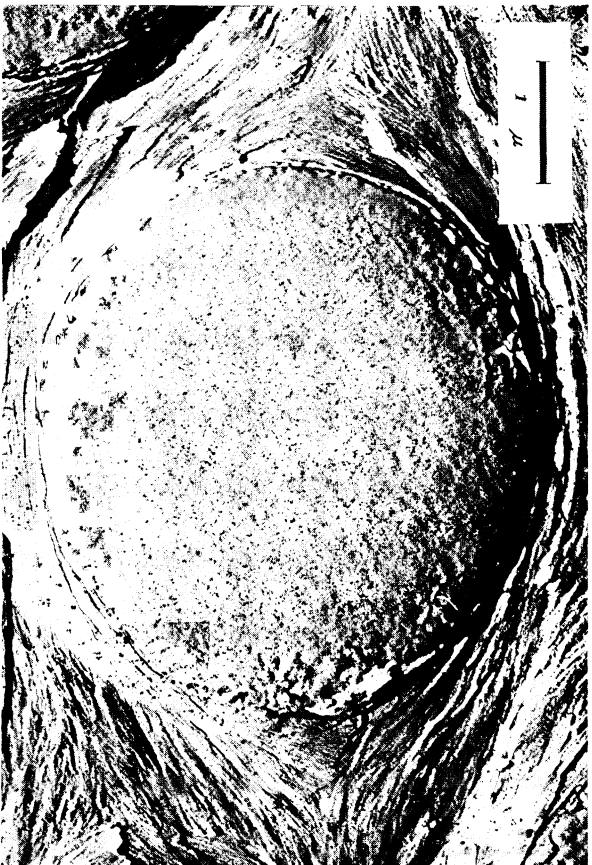
Phot. 134



Phot. 136



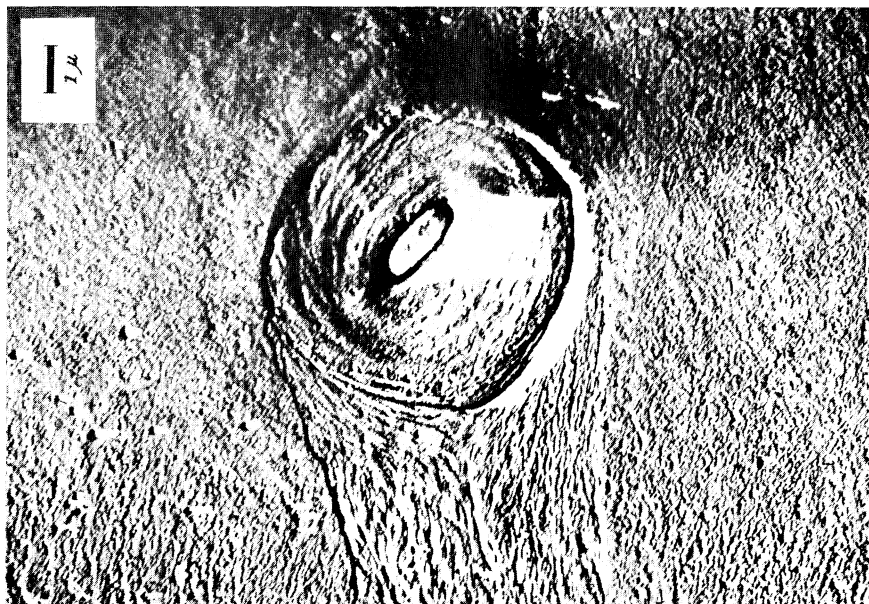
Phot. 135



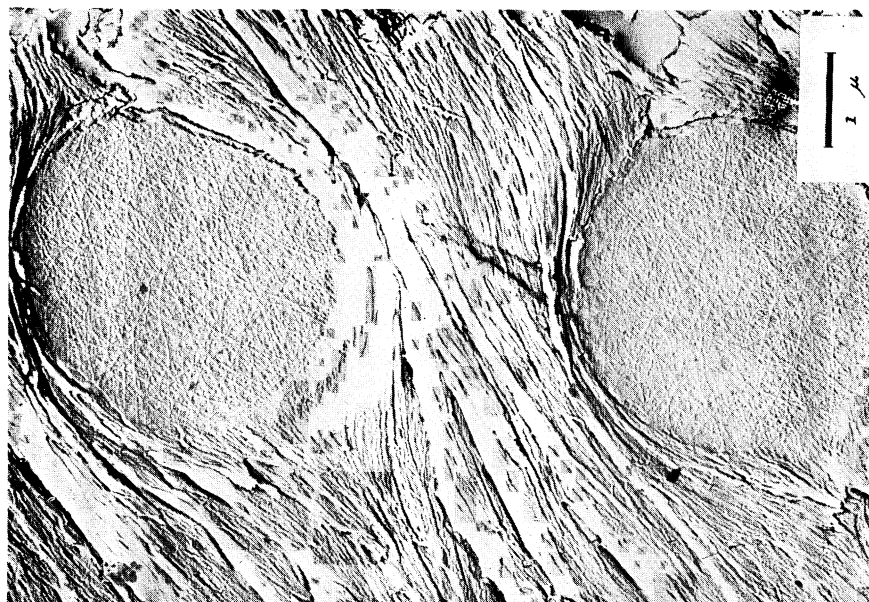
Phot. 137



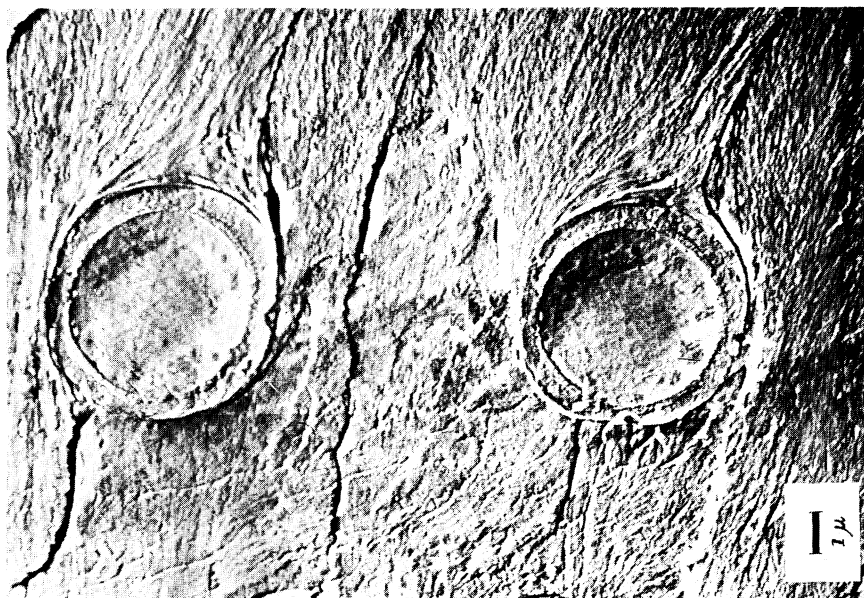
Phot. 138



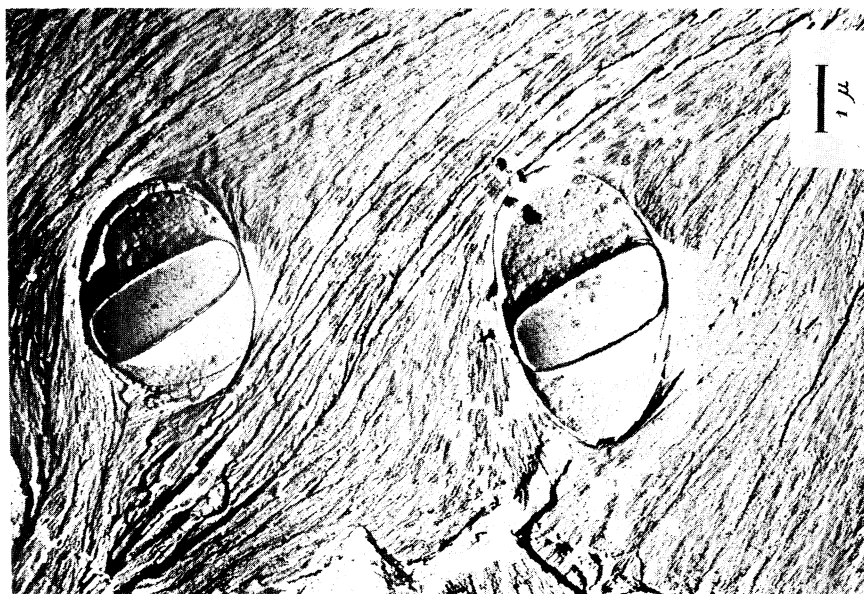
Phot. 140



Phot. 139



Phot. 142



Phot. 141



Phot. 144



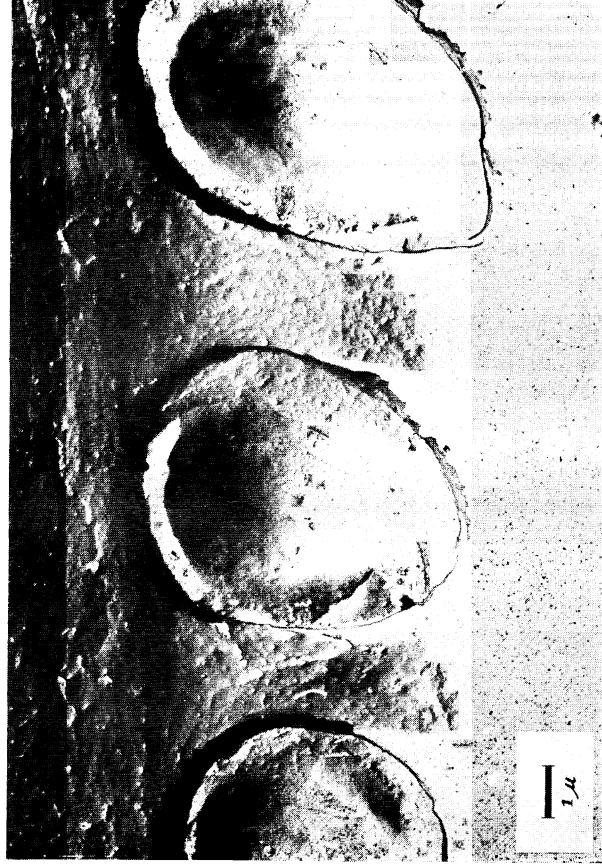
Phot. 143



Phot. 146



Phot. 145



Phot. 147



Phot. 148