HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トドマツ造林木における凍裂発達の観察
Author(s)	佐野, 雄三; 今川, 一志; 大谷, 諄; 深沢, 和三
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 46(2), 315-341
Issue Date	1989-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21291
Type	bulletin (article)
File Information	46(2)_P315-341.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

トドマツ造林木における凍裂発達の観察

佐野雄三*　今川一志**
大谷　諄*　深沢和三*

Observations of Frost Crack Development in the Plantation trees of *Abies sachalinensis*

By

Yuzou SANO *, Hitoshi IMAGAWA **, Jun OHTANI *,
and Kazumi FUKAZAWA *

要　旨

トドマツ造林地において，約19%の造林木に凍裂が発生していた。12月末の調査では当シーズンに発生したと考えられる凍裂が確認されたが，2月半ばの調査では12月末以降新たに発生したとみなされる凍裂は確認されなかった。当シーズンに発生したと考えられる凍裂と典型的な古い凍裂の材部を観察した。2本の供試木にはいずれも水食い材が存在していた。一樹幹内において，凍裂は水食い材が水平方向に広く且つそれが軸方向に長く連続している箇所に存在していた。凍裂の割れ目に沿った材部の含水率分布は，凍裂が存在しない材部の含水率分布と比較して大きく変動していた。当シーズンに発生したと考えられる凍裂の破断面はササクレていた。これに対し、古い凍裂の破断面には樹脂が存在し，ササクレはほとんどみられなかった。水食い材部には多くの内部割れが存在し，その割れ目中には例外なく氷が充満していた。凍裂の髄側の末端は，辺材に最も近くまで広がっている水食い材の外縁に存在する比較的小さな内部割れと連続していた。凍裂と内部放射割れの破断の仕方に相違は認められなかった。

キーワード：　トドマツ造林木，凍裂，内部割れ，水食い材，破断。

1988年8月31日受理　Received August 31, 1988.

*　北海道大学農学部林産学科木材理学講座
Laboratory of Structure and Physical Properties of Wood, Dept. of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

**　農林水産省森林総合研究所東北支所
Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute.

目　　次

1. 緒　　言……316
2. 調査林地の概要と供試木……317
3. 研究方法……318
3.1 凍裂木の発生状況……318
3.2 一冬期間における凍裂発生の時間的推移……318
3.3 凍裂樹幹内部の状態……318
3.4 含水率分布……318
3.5 割れ目部の巨視的観察……318
3.6 割れ目部の光顕観察……318
3.7 凍裂および内部割れ破断面の走査電子顕微鏡観察……318
4. 結果および考察……319
4.1 凍裂木の発生状況……319
4.2 一冬期間における凍裂発生の時間的推移……319
4.3 凍裂樹幹内部の状態……320
4.4 含水率分布……320
4.5 割れ目部の巨視的観察……324
4.5.1 凍裂の割れ目部……324
4.5.2 水食い材内の割れ目部……325
4.6 割れ目部の光顕観察……326
4.6.1 割れ目の状態……326
4.6.2 割れ目付近の組織……326
4.7 凍裂および内部割れ破断面の走査電子顕微鏡観察……327
4.7.1 放射破断面……327
4.7.2 接線破断面……328
5. 結　　言……328
謝　　辞……329
文　　献……329
Summary……330
Explanation of photographs……331

1. 緒　　言

トドマツは郷土樹種であることに加え，造林上見逃せないすぐれた特性を有するため北海道において盛んに造林されてきた。近年，植栽後数十年を経過したそれら造林木において高頻度の凍裂の発生が確認された（栗林・稲垣 1984）。一方，東北地方のスギ造林木，道北のヤチダモ造林木においても高頻度の凍裂の発生が相次いで報告された（及川ら 1986，笹ら 1986）。

北海道のトドマツに凍裂が多発することは知られていた（石田 1952）が，このように酷寒地に限らず広い地域にわたり，その地域の有用な造林樹種に高頻度で凍裂が発生している。しかも，手入れを重ね伐期に達しようかという頃、頻発している。この現状は寒冷地の林業にとって深刻な事態であり，対策が望まれ，急がれるところである。

現在凍裂を起こしにくいとされている樹種についても，実際には不明な点が多い。最近になって凍裂の多発が知られるようになったヤチダモの例もある。特に，今後盛んに行われていくであろう広葉樹造林において，ヤチダモと同様な多湿心材を有する樹種には，凍裂の多発が強く懸念される。そのようなことから，凍裂木の有効利用について真剣に取り組む一方，凍裂についての知見を蓄積していくことには大きな意義があると考える。

凍裂の発生実態についての知見は徐々に蓄積されつつある（井上 1984，石田 1952，栗林ら 1984，三上ら1986，中田ら1984，西村1985，及川ら1986，笹ら1986，千葉1965）。しかし，天然林と人工林の相違などについては充分に明らかにされているとはいえず，更に広範な調査が必要であると考える。

一方，凍裂現象についての研究は少なく，石田（1950，1952，1955，1963），今川ら（1988），及川ら（1986，1987）の研究以外には系統的といえるものは見あたらない。それらの研究により，凍裂現象はかなりの程度明らかにされてはいるが，まだ不明な点も多い。

以上のことを踏まえ，筆者らは 1986～87 年の冬期にトドマツ人工林における凍裂発生の実態調査を行った。加えて，その際に入手した当シーズンに発生したとみなされる凍裂と古い凍裂をもつトドマツの材部の巨視的，微視的な観察を行った。特に，当シーズンに発生した凍裂木に関する報告は過去になく，研究の結果，興味深い知見も幾つか得られたので以下に報告したい。

2. 調査林地の概要と供試木

調査林地は，旭川林務署当麻事業区 73 林班のトドマツ人工林である。本林地は，標高差約 150 m，斜度約 10～25 度，東～北向きの傾斜地である。1931 年に植栽され，その後 1975，79，84 年にそれぞれ間伐が実施されている。

供試木として，当シーズンに発生したと考えられる凍裂をもつものと典型的な古い凍裂をもつものを 1 本ずつ採取した。

第一回の調査時（1986 年 12 月 24 日）に，割れ目付近に霜腫れや変色，凍裂による樹脂の浸出がみられない当シーズンに発生したと考えられる凍裂（Photo 1）をもつものを伐採し，1 号木とした。樹高 22.5 m，胸高直径 29 cm であり，凍裂は樹幹の東側に，地上高 10 cm から 100 cm の間にわたってみとめられた。外観上，凍裂以外の欠点はみられなかった（Photo 2）。

第二回の調査時（87 年 2 月 13 日）には，割れ目付近に霜腫れや変色，樹脂浸出などの割れが古いことを示す痕跡がみとめられる凍裂（Photo 3）をもつものを伐採し，2 号木とした。樹高 23 m，胸高直径 30 cm，凍裂は地上高 25 cm から 225 cm の間にわたって認められた。樹幹表面には凍裂以外の傷害はみられなかった（Photo 4）。

伐倒後直ちに 1，2 号木ともに 5 cm 厚の円板を凍裂の上端，下端から 1 枚ずつと中央部付近から 2 枚，それぞれ計 4 枚ずつ顕微鏡観察用として採取し，凍結状態のまま実験室に移送，

低温恒温室に保存した。残りの丸太も地際より凍裂上端，および更に約1 m上までの範囲すべてについて同様に保存し，その他の観察を行った。

3. 研 究 方 法

3.1 凍裂木の発生状況

凍裂の発生状況を明らかにするために毎木調査を行った。12月末の試料採取時に調査区域（面積約2 ha，東北東向き約20度の傾斜地）を設定し，区域内すべてのトドマツ（370本）について凍裂の有無を調査した。この際，当シーズンに発生したと考えられる凍裂をもつ個体にはマーキングをしておいた。

3.2 一冬期間における凍裂発生の時間的推移

2月の試料採取時には，12月末の調査時以降に新たに発生した凍裂の有無を調査した。これによって一冬期間内における凍裂発生の時間的推移を明らかにしようとした。

3.3 凍裂樹幹内部の状態

1，2号木ともに，地際から凍裂が認められる範囲，および更に上部までの範囲にわたって，断続的に木口面の観察を行った。

電動カンナで平滑に仕上げられた円板木口面上に透明プラスチックシートをかけ，肉眼的にみとめ得る割れ，水食い材，辺・心材の境界，枝節，樹皮，その他変色した部位などを写し取った。これら断面トレース図を縮小コピーにかけ，整理，検討することにより凍裂木樹幹の内部状態を明らかにしようとした。

3.4 含水率分布

凍裂の中央部付近より5 cm厚の円板を採取し，割れを含む6 cm幅の帯状の試料をとった。1号木では放射方向に0.5 cm間隔，2号木では同様に1 cm間隔に分割して各々の試験片の含水率を測定し，割れに沿った材部の水分状態を調べた。

3.5 割れ目部の巨視的観察

断面トレース図の作成と同時に，幾つかの円板について凍結状態での割れ目を観察し，写真撮影を行った。特に，水食い材内にみられる割れと樹幹表面に達する割れの特徴，相違点にポイントを絞った。撮影には大型マクロ写真装置（ニコンマルチフォト）を用いた。

3.6 割れ目部の光顕観察

1，2号木ともに，光顕観察用として採取した4枚ずつの円板を小材片に分割し，F. A. A.で固定した。固定試料の中から割れを含む更に小さな材片をとり，木口面切片を作成した。切片は常法通りサフラニンで染色後，永久プレパラートとされ，光学顕微鏡によって観察された。

3.7 凍裂および内部割れ破断面の走査電子顕微鏡観察

光顕観察に用いた固定試料の中から，外部凍裂，内部割れの破断面を含む小ブロック（約5 mm×5 mm×3 mm）を作成した。それらをアルコール置換乾燥または臨界点乾燥後，SEM

観察用試料台に導電性接着剤(D-550，藤倉化成)により接着した。真空蒸着装置により観察表面に炭素と金の二重蒸着を行い，走査電子顕微鏡(JSM-35 CF II)を用いて加速電圧 15 KV で検鏡，写真撮影を行った。

4. 結果および考察

4.1 凍裂木の発生状況

調査区域内のトドマツ総本数は 370 本であった。そのうち 65 本に凍裂がみとめられた。出現率は約 19%であった。

栗林ら (1984) による足寄のトドマツ人工林の調査では，本調査地と同様な傾斜地，22-32 cm という径級で凍裂の出現率は 8 %となっている。本調査地ではそれをはるかに上回った。一方，石田 (1952) によれば，旭川のトドマツ天然林における凍裂の出現率は 23%である。西村 (1985) によると，足寄のトドマツ天然林における凍裂の出現率は 8 %である。足寄と旭川では，天然林の凍裂出現率に相違が認められることに加えて，その発生頻度と相関があるとされている地形，径級(栗林ら 1984，西村 1985)が同様な人工林の凍裂出現率にも同様な相違がみられることから，地域差を認めることができる。この地域差が生じた要因は，天然林，人工林ともに同様な傾向が認められることから，施業法の相違などの人工的なものではなく，立地条件など自然的なものであると考えられる。

4.2 一冬期間における凍裂発生の時間的推移

12 月末の調査の際，凍裂をもつことが確認された 65 本のトドマツのうち 5 本に当シーズンに発生したと考えられる凍裂がみとめられた。しかし，2 月の調査の際には新たな凍裂の発生は認められなかった。

凍裂は厳寒時に大きな音を伴って発生するといわれる (石田 1963，1986，SHIGO 1986) が，本結果からはそれほど寒さの厳しくない初冬に発生することも考えられる。その可能性について次に考察する。

石田 (1950，1963，1986) によると，内部の水分が融解状態にある凍裂丸太を過冷却状態におくと，樹幹温度の低下に伴って凍裂の割れ目幅を広げようとする応力が増大し続ける。特に，水食い材部の水分の凍結が始まってから完了するまでの数十時間は，凍結前，完了後と比較してその増大の仕方が非常に急速である。一般に，より急速な応力状態の変化が起こる間はそれだけ多くの歪みが発生すると考えられ，樹幹内でより急速な応力状態の変化が起こる時，つまり過冷却状態が数十時間続いて水食い材部の水分が完全に凍結するまでの間の凍裂の発生数が多くなることは充分に考えられる。従って，一冬期間内で最初に過冷却状態が数十時間続く時，すなわち真冬日が数日間続くような時に凍裂が発生することは考えられ得る。

一方，石田 (1963，1986) によると，水食い材をもたないトドマツ円板の外周部では，常温時に作用している接線方向の圧縮応力 (ARCHER 1986，渡辺 1978) は－10℃前後で消滅し，

更に温度が低下すると引張りの応力が発生し増大していく。樹幹外周部の接線方向の引張り応力はまさに放射割れを引き起こす要因であり，それが増大する厳寒時はより凍裂が発生し易いと考えられる。

以上のことから，凍裂には，水分凍結と共に発生して凍結が完了するまでの間急速に増大し続ける水食い材の膨圧のみで引き起こされる凍裂と，それに上述した圧縮の生長応力が消滅するレベル以下の温度条件下で発生する接線方向の引張り応力が加わることによって引き起こされる凍裂のふたつのタイプがあると推定する。しかし，本調査は2回のみの予備的なものであったこと，気象データと比較できなかったことから，12月に確認された5本の凍裂木が実際にどの様な条件下で発生したのかを検討するには至っていない。上記の推論を確かめるのには晩秋から厳寒明けまでにわたる詳細な調査とそれに並行した気象観測が必要であり，今後の研究にまたざるを得ない。

4.3　凍裂樹幹内部の状態

Fig. 1に1号木の断面トレース図とその採取位置を示す。断面図において，最外部の幅が狭い部分は樹皮，その内側の樹皮とほぼ同心円になっている線は辺・心材の境界，更にその内側の模様状の線は水食い材，散在する点線部は枝節や局所的な変色部を示している。断面はいずれも上からみた状態である。また，クサビ印は樹幹の北側，数字は地上高を示している。

凍裂は，水食い材の髄から樹皮方向への広がりが最も大きい箇所に存在している。また，凍裂を含んでいる地上高35，50，60，80 cmの断面では水食い材の広がりが似通っているのに対し，凍裂の上端の数cm上に当たる地上高105 cmの断面ではその広がりが大きく変化している。

Fig. 2には2号木の結果を示す。凍裂を含む地上高80，85，135，190，195 cmの断面の水食い材の広がり方には，1号木と概ね一致した傾向がみとめられる。凍裂の上端より上の断面では水食い材の広がりが減少している。円板によっては水食い材の広がり方に大きな変化もみられる。この変化は凍裂が発生した後に起こったものとも考えられ，2号木の凍裂の発生時，水食い材と割れには1号木のように明瞭な関係があったと推定する。

石田（1952，1963）によると凍裂木には例外なく水食い材が存在するが，本観察においてもそれが確認された。更に，上述した水食い材と凍裂の分布状態から，凍裂は水食い材が水平方向に広く，且つそれが軸方向に長く連続している箇所で発生することが考えられる。

4.4　含水率分布

1号木の含水率分布をFig. 3に示す。含水率は材色とよく一致している。30～60%の材部は完全な明色になっている。一方，200～250%の材部は完全な暗色になり，100～200%の材部は部分的に明色の心材を含んでいる。凍裂の存在する側の水食い材の含水率が凍裂の存在しない側のそれと比較して高く，水食い材部の中でも約250%という非常に高い含水率値を示す材部の外縁と凍裂の末端がほぼ一致している。この現象がこの箇所だけでみられる偶発的なもの

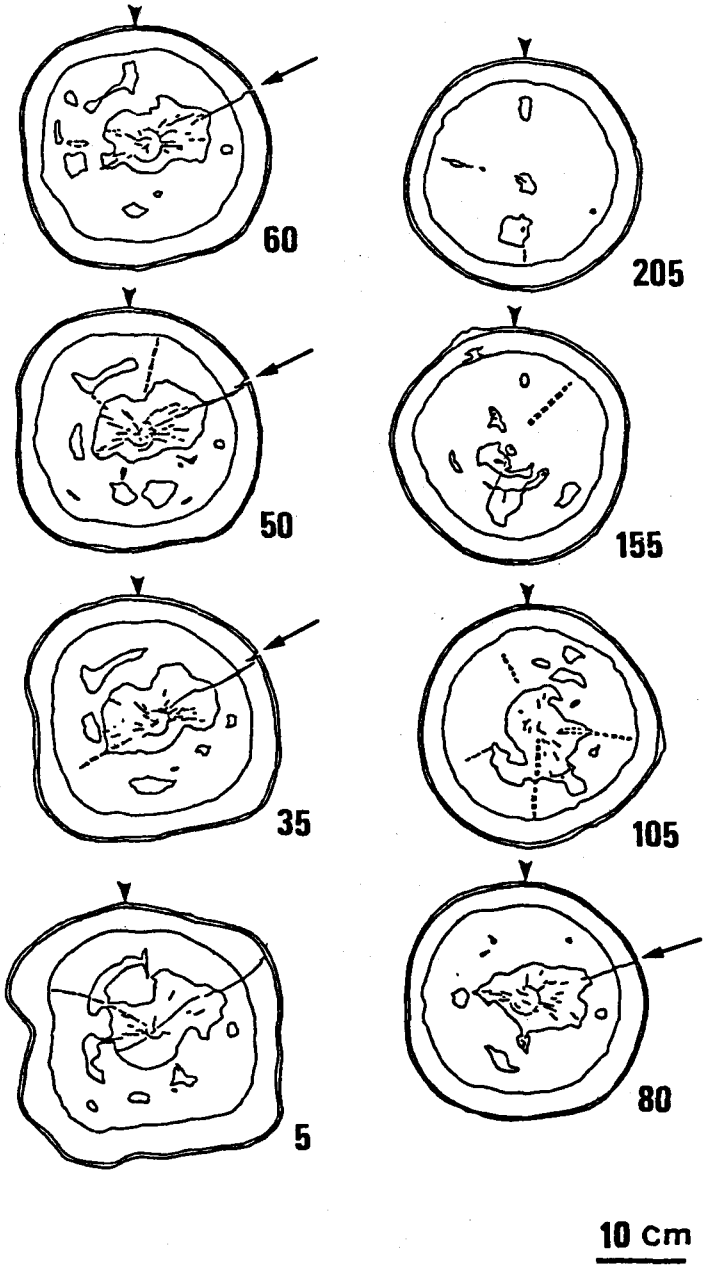


Fig. 1. Cross sections of the trunk at different heights of the tree No. 1. Wedges show the north side of stem. Arrows show the frost cracks. Numbers show the heights from ground level (cm). Solid lines in the heartwood show wetwood part and internal cracks. Dotted lines show knot.

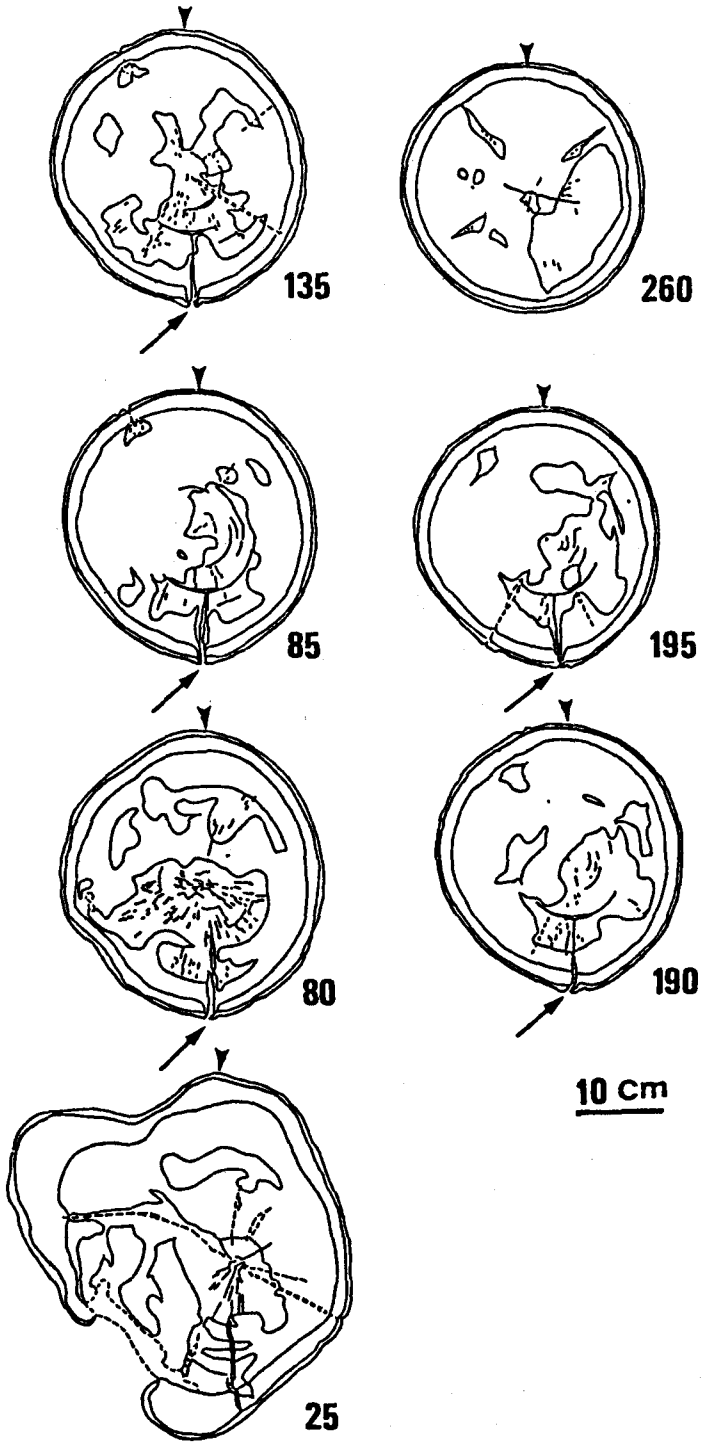


Fig. 2. Cross sections of the trunk at different heights of the tree No. 2. Signs and lines are same as Fig. 1.

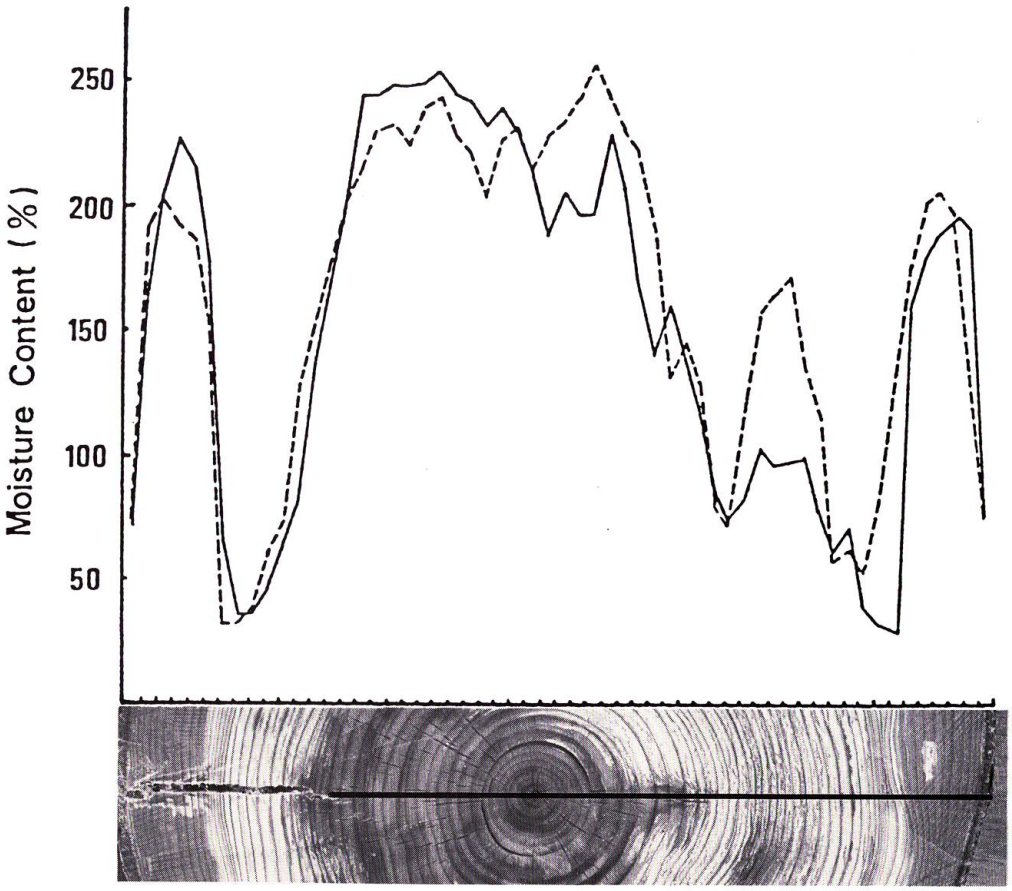


Fig. 3. Moisture content variation of the wood (tree No. 1). Solid line; upper part of the photograph. Dotted line; under part of the photograph.

なのかを検討するため，異なる地上高の円板と比較してみたところ，同様に凍裂の末端は水食い材の外縁付近にとどまっている（Photo 5）。

2号木の含水率分布を Fig. 4 に示す。水食い材内の含水率に局所的に大きな変動がみられることが1号木とは異なるが，ほかは概ね一致した特徴がみとめられる（Photo 6）。含水率が大きく変動している要因として，内部割れ中の氷が1号木よりもよく発達していることが考えられる（Photo 6 の矢印）。

石井（1983），石井ら（1987）によると，トドマツの心材含水率は 60～90%，130～180%の二ケ所にピークをもつ分布を示し，その結果から通常心材と水食い材の境界は 120～140%であると報告した。本供試木では含水率が 200%を大幅に越える水食い材の出現が多く，よく発達した水食い材であるということができよう。

樹幹内部の観察結果から，水食い材が水平方向に広く且つそれが軸方向に長く連続してい

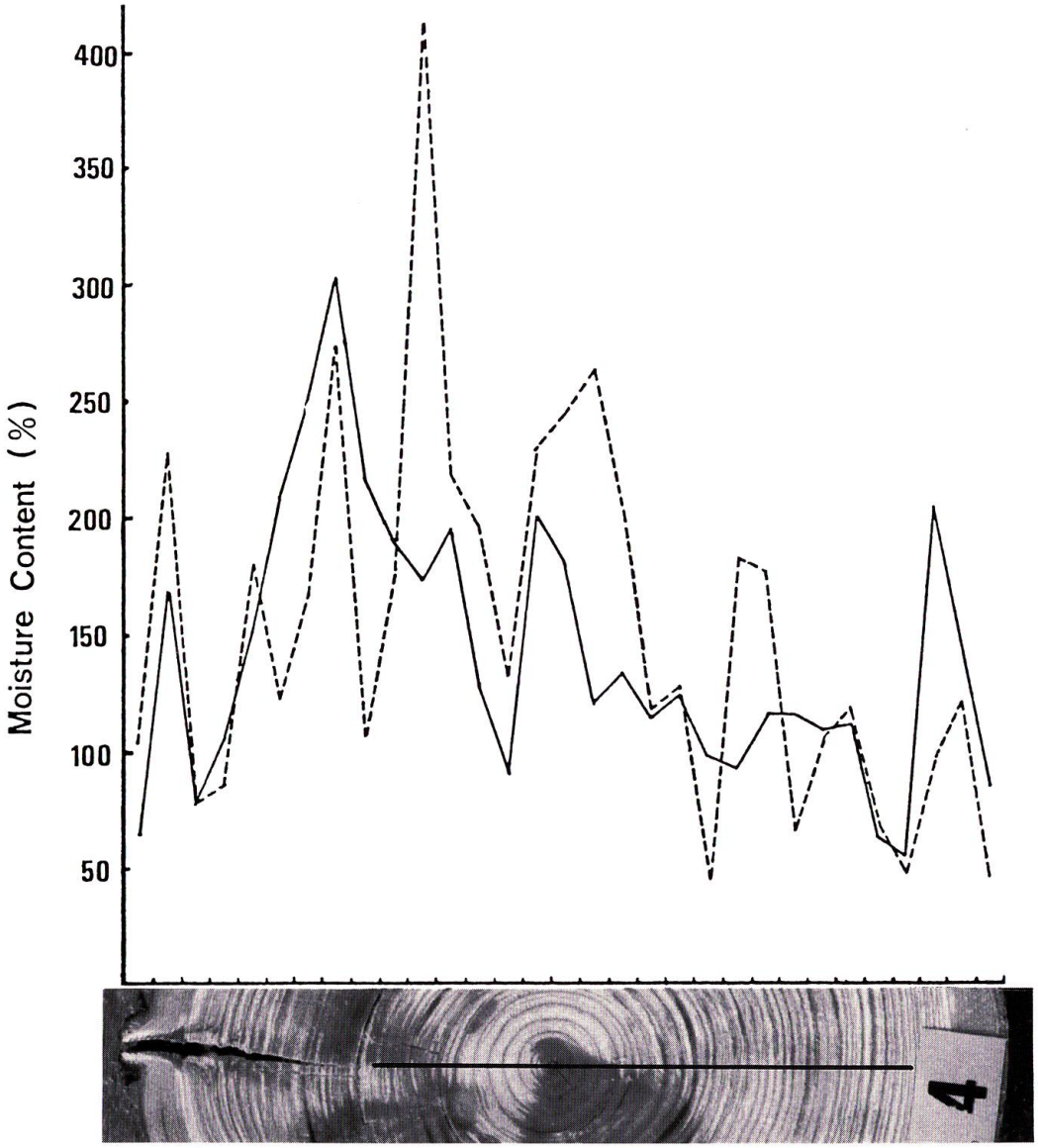


Fig. 4. Moisture content variation of the wood (tree No. 2). Lines are same as Fig. 3.

る箇所で凍裂は発生すると考えられた。しかし，含水率が非常に大きく変動している材部に凍裂が存在していることから，凍裂は含水率が極端に不均衡な箇所で発生するという見方も可能である。あるいはこれらふたつの条件がそろわなければ凍裂は発生し得ないことも考えられる。

4.5 割れ目部の巨視的観察

4.5.1 凍裂の割れ目部

外観上，1号木の凍裂の割れ目付近に霜腫れはみとめられなかった (Photo 1) が，断面観

察の結果，顕微鏡観察用として採取した4枚の円板のうち凍裂の中央部付近より採取した2枚の円板の最外年輪に，年輪幅の部分的な拡大が確認された（Photo 7 白矢印）。破断面に付着物はみとめられず，ササクレていた（Photo 7）。また，辺材の割れ目近傍の材部に白色帯が認められた（Photo 7 黒矢印）。

2号木では，材部の最外数年輪にわたって顕著な霜腫れが認められた（Photo 8）。破断面は樹脂に被覆され，ササクレはほとんど認められなかった（Photo 9 矢印）。

外観からは当シーズンに発生したとしか考えられない1号木に，霜腫れに類似した年輪幅の部分的な拡大がみられたことは興味深い。正に割れ目に沿って起こっていることから凍裂と密接に関わっていることは明らかである。1号木の凍裂が前年に発生したことも考えられる。この原因については，組織観察の結果も含めて判断することが妥当と思われるので後述（6-2）する。

1号木の辺材の割れ目近傍にみられた白色の部分は含水率の低下によるものと思われ，心材化に伴う移行材の現象とよく類似している。しかし，白色帯と正常な色調の辺材部の放射柔細胞の核の形状を比較し，結論するまでに観察は至らなかった。

4.5.2　水食い材内の割れ目部

観察した限り，水食い材内の割れには1，2号木間で相違はみとめられなかった。割れ目内には例外なく氷が詰まっており，氷の中には気泡（Photo 10 小矢印）や細かいササクレ（Photo 10 大矢印）がみとめられた。これら割れの方向は，基本的に放射・接線方向であった（Photo 11）。大きさは微小なものから数年輪にわたるものまで多様であった（Photo 11）。凍裂との連続性は辺材に最も近い水食い材の外縁付近に存在する小さな内部放射割れ（Photo 12）あるいは目回り（Photo 6 矢印）に認められたが，特によく発達した内部放射割れと凍裂が深く関わっているという徴候は認められなかった（Photo 6，12）。

放射割れのうち微小なものはほとんど全て年輪界をまたがって存在し，レンズ状を呈していた（Photo 12 矢印）。数年輪にわたる大きなものは，接線方向への破断面の移行を頻繁に起こし，階段状を呈していた（Photo 13）。一見通直にみえるものでも，よくみると階段状になっている（Photo 14）。

接線割れは，破断面の移行部に相当する小さなもの（Photo 13矢印），年輪界に形成されるいわゆる目回り（Photo 15），早材部にまれにみられる鋸歯状の割れ（Photo 16）に大別される。破断面の移行と目回りはふつうにみられたが，鋸歯状の割れは僅かしかみられかなった。

今川ら（1988）は，ヤチダモの凍裂について，一般に凍裂といわれる樹幹表面まで達する割れは多湿心材内にみられる氷の充満した割れが発達したものとみなしている。本観察では上述のように凍裂の髄側の末端は辺材に最も近くまで広がっている水食い材の外縁付近に存在している比較的小さな内部割れ，あるいは接線割れとは連続していたが，特によく発達した内部放射割れとの連続性は認められなかった（Photo 6，12）。従って，今回観察したトドマツの凍

裂発達の過程はヤチダモのそれ（今川ら 1988）と全く同様であるとは判断し難い。また，トドマツ樹幹内の水食い材の存在形態や内部割れの形態，分布の多様性から，凍裂発達の過程には様々なパターンがあることも考えられる。この種の詳細な観察を更に多くの凍裂木について行うことが必要である。

4.6　割れ目部の光顕観察

4.6.1　割れ目の状態

凍裂の割れ目を樹皮から髄側の末端まで観察した結果を述べる。年輪界付近の破断はほぼ完全な放射面で起こっているものが多く，早材部では多くの年輪内で細胞壁の破壊を伴った別の放射面への破断面の移行が起こっていた(Photo 17)。そのため全体的には階段状になっている(Photo 18)。年輪界で破断面の移行を起こしているものもみられたが，早材よりも少なかった（Photo 18 矢印)。

水食い材部の内部割れを観察した結果を述べる。年輪界にみられる小さな放射割れはほぼ完全な放射面で破断していた(Photo 19)。数年輪にわたる放射割れには凍裂と同様な特徴が認められた。年輪界付近ではほぼ完全な放射面で破断していることが多く，別の放射面への破断面の移行は年輪界と比較して早材部で多く起こっていた（Photo 20)。

凍裂と水食い材内の割れの破断の仕方には，光顕で観察した限り相違がみとめられなかった。

4.6.2　割れ目付近の組織

年輪幅に部分的な拡大がみられた1号木の凍裂中央部付近の2枚の円板（それぞれ地上高35，60 cm より採取）において，最外年輪に凍裂の割れ目に沿った傷害樹脂道が認められた（Photo 21 矢印)。一方，凍裂の上，下両端付近より採取した円板では傷害樹脂道は認められなかった。年輪幅の部分的な拡大は霜腫れに類似していることから1号木の凍裂が前年に発生したことも考えられた。しかし，この傷害樹脂道の存在状態から形成時期は夏期であると判断され，直接には凍裂以外の何らかの傷害により誘発されたものと考えられる。そして，この傷害樹脂道を誘発した原因と凍裂の発生には密接な関係があると考えられる。

2号木の霜腫れ材部には，年輪界の早材側で接線方向に連続する配列（イニシャル状）の傷害樹脂道，その他傷害柔組織がみとめられた（Photo 22)。これら傷害組織の樹幹内分布は，地上高 30 cm，85 cm の箇所ではともに最外8年輪，145 cm では 10 年輪，195 cm では 11 年輪にわたって存在していた。また，地上高 30 cm，85 cm の箇所では，16 年前に形成された年輪内にイニシャル状の傷害樹脂道のみがみとめられた（Photo 23 矢印)。

これら傷害組織の存否は，材部が凍裂の発生以前に形成されたものか，それよりも後に形成されたものかを判定する指標になると考えられる。また，16 年前に形成された年輪内にみられた傷害柔組織や霜腫れを伴わない傷害樹脂道は，形成層まで達する内部割れに対応して形成されると考えた。そのような考え方から，2号木の凍裂の発達経過をおおよそ次のように推定

する。

伐採より16年前の冬期，地際付近から地上高約90 cmの範囲にわたり形成層まで達する内部割れが発生した。しかし，以後数年間，その内部割れが発達することはなかった。伐採より11年前の冬期，その内部割れと連続する凍裂が地上高2 m前後の箇所で発生した。10年前にはそれが地上高1 m付近まで，8年前には一気に地際付近まで増大した。その後は大きく発達することなく伐採時の状態に至った。

4.7　凍裂および内部割れ破断面の走査電子顕微鏡観察

凍裂，内部割れそれぞれの放射破断面，接線破断面にみられた幾つかの特徴について以下に述べる。

4.7.1　放射破断面

割れ，裂けのような破断は，細胞間層またはそれに近い細胞壁内での破断（壁界破壊），細胞壁の分断を伴う破断（壁切断破壊）に大別され，壁界破壊は更に細胞間層破壊，壁内破壊に分類される（佐伯 1988）。凍裂，水食い材部の内部割れの放射破断面では，壁界破壊，壁切断破壊ともに認められた。

仮道管間の破断面では壁切断破壊はあまり認められず，破断はほとんど壁界破壊によっていた。壁界破壊による破断面では，放射方向に並ぶ仮道管間の凹部に隣接する仮道管の細胞壁の断片が存在していた。Photo 24に内部放射割れの破断面の一例を示す。隣接している仮道管細胞壁の断片（Photo 24矢印）が，放射方向に並ぶ仮道管間の凹部に存在しているため，接線方向の細胞間層が認められない。

この壁内破壊による破断面には傾角が約70～90度の多数の細かい縞が認められ，それに対応する反対側の破断面にも傾角の全く一致する縞が認められた（Photo 25，26）。破断面に認められるこれらの縞はミクロフィブリル配向を示しており，これらの傾角から破断面はＳ１層であると判断される。更に，対応する反対側の破断面も同様に考えられ，放射方向の仮道管間の破断は，隣接する仮道管への破断面の移行を伴うＳ１層内での壁内破壊であると特定される。

KORÁN（1967）は－190℃から250℃までの範囲の8種類の温度で *Picea mariana* の材片を接線方向に引張り破壊させ，仮道管の放射破断面の詳細な観察を行った。その結果，低温下で破壊された破断面は高温下でのものと比較して，壁切断破壊，壁孔縁の破壊，壁層の切断，壁層レベルでの破断面の移行が多く，そのため全体的によく粗くみえると述べている。本研究では，壁切断破壊の定量，有縁壁孔対の破断まで明らかにするには至らなかったが，壁層の切断，壁層レベルでの破断面の移行が多くみられた点でKORÁNの結果と一致した。

仮道管・放射柔細胞間の破断では，壁界破壊，壁切断破壊ともに認められた。Photo 27にその一例を示す。

壁界破壊による破断面には，仮道管側，放射柔細胞側ともに放射柔細胞軸にほぼ平行な縞が認められた。その一部をPhoto 28と29に示す。これらの対応破断面を対照させた写真から，

ミクロフィブリル配向が放射組織軸に平行になっていること，及び放射柔細胞の細胞壁内で破断していることが判る。放射柔細胞の細胞壁において，ミクロフィブリル配向が放射柔細胞軸に平行な壁層はＰ１である（FUJIKAWA et al. 1975）ことから，仮道管・放射柔細胞間の破断は，放射柔細胞壁Ｐ１層内での壁内破壊であると判断される。

凍裂と内部割れの放射破断面の相違点として，凍裂の破断面は内部割れのそれと比較して付着物が非常に多いことがあげられる。しかし，ほかに異なる点は今回の観察では認められず，破断の仕方は同様とみなされた。

4.7.2　接線破断面

放射割れの破断面の移行部および目回りの観察を行った。

接線方向の破断は仮道管間の破断と放射柔細胞間の破断に分けることができる。目回りの破断においては両者とも壁切断破壊は例外的にしか認められず，ほとんどすべて壁界破壊によっていた。また，特に晩材側の破断面上には，ササクレが非常に多くみられた（Photo 30）。

仮道管間の破断面はＳ１層であると判断され，放射割れの仮道管間の破断面と一致するが，仮道管間の凹部に隣接する仮道管細胞壁の断片が認められないことが相違する（Photo 31矢印）。しかし，この相違は放射・接線方向の仮道管の並び方の違いに基づくものと考えられ，破断の仕方は基本的に全く同様であると判断される。放射柔細胞間の破断は末端壁間または末端壁内で起こっているように見うけられ，破断面上には突出した放射柔細胞が認められた（Photo 32）。これらの形態から，放射柔細胞はその長軸方向に引き抜かれたと考えられ，目回りは単純な放射方向の引張り応力によって生じたと判断される。

凍裂，内部割れを含めた放射割れの破断面の移行部では，仮道管間の破断の多くは壁界破壊によっていたが，壁切断破壊もよくみられた（Photo 33）。壁界破壊による破断面には，目回りの壁内破壊による破断面と同様な特徴が認められた。放射柔細胞間の破断は，早材部，晩材部ともに，ほとんど全て壁切断によっており，目回りとは全く異なっていた（Photo 34）。この細胞壁の切断は，接線方向の引張り応力によるせん断であると考えられ，破断面の移行は放射割れに伴って起こったことが理解される。

5.　結　　言

凍裂現象は，実験室的に再現することが困難な要素を多く含んでいると思う。従って，凍裂現象を解明していくには，多くの凍裂木を観察し，すべての凍裂木に共通する普遍的な事実を抽出していく必要があると考える。本研究はそのような考え方から行われたものである。

本研究において，新しい凍裂木の水食い材と割れの位置関係，含水率分布と割れの存在範囲に，古い凍裂と比較してより明瞭な関係がみられたことは興味深い。古い凍裂木は初めて凍裂を起こしたときのインタクトな状態が損なわれていると考えられ，凍裂現象を解明していくためには，今後新しい凍裂木を用いての研究が行われなければならないと考える。また，観察

したサンプル数が少ないことから，本結果において新しい凍裂木にみられた水食い材と割れの位置関係などが偶発的なものであることも考えられ，それを検証する意味でも今後新しい凍裂木についての更なる研究が必要であると考える。

謝　　辞

本研究を進めるにあたり，北海道大学名誉教授石田茂雄博士には貴重な御教示を多数戴いた。調査，試料採取に際しては，旭川林務署長村上嘉平氏（現北海道林務部参事）に便宜をはかって戴き，同利用課長西村豊彦氏(現北海道立林産試験場企画指導部企画課長)，同当麻事業区の職員の方々，北海道立林産試験場利用部材質科長滝沢忠昭博士には多大なる御協力を戴いた。ここに記して篤くお礼申し上げる次第である。

文　　献

1) ARCHER, R. R.: "Growth stress and strain in trees", Springer-Verlag, 1986, p. 147-151.
2) 千葉　茂：ポプラの品種およびヤマハンノキの凍裂について，北海道の林木育種，8，9-15（1965）.
3) FUJIKAWA, S.; ISHIDA, S.: Ultrastructure of ray parenchyma cell wall of softwood, Mokuzai Gakkai-shi, **21** (8), 445-456 (1975).
4) 今川一志，大谷　諄，笹賀一郎：ヤチダモの凍裂について（予報），日木北支講，**18**，5-8（1986）.
5) 今川一志，笹賀一郎，大谷　諄：ヤチダモ造林木の凍裂に関する研究一凍裂の発生状況とその組織学的研究一，北大演研報，**45**，599-636，（1988）.
6) 井上　晋：イヌエンジュ二次林の群落生態について(III)一凍裂の実態一，日林北支講，**33**，172-175(1984).
7) 石井哲男：トドマツ生立木の樹幹内の含水率分布，北海道大学卒業論文（1984）.
8) 石井哲男，深沢和三：トドマツ水食い材の水分移動に関する研究一樹液成分と壁孔閉鎖一，北大演研報，**44**，1277-1305（1987）.
9) 石田茂雄：寒さのために樹木が割れる現象について，低温科学，**5**，61-73（1950）.
10) 石田茂雄：北海道における凍裂の発生状況，北大演研報，**15**，303-341（1952）.
11) 石田茂雄：トドマツ樹幹の凍裂の形態について，北大演研報，**17**，473-512（1955）.
12) 石田茂雄：トドマツ樹幹の凍裂の発生機構一とくにその水喰材との関係について一，北大演研報，**22**，273-373（1963）.
13) 石田茂雄："トドマツの凍裂"，北方林業会，1986，p. 57-58，78，94-102.
14) KORÁN, Z.: Electron microscopy of tracheid surface of black spruce separated by tensile failure at various temperatures, Tappi, **50** (2), 60-67 (1967).
15) 栗林盛三，稲垣敬一：トドマツ人工林の凍裂の実態，昭和58年度帯広営林支局業務研究発表集，89-95（1984）.
16) 三上　進，及川伸夫，伊藤喜悦：スギ造林地における凍裂の発生実態（I）一岩手県安代地区スギ造林地における凍裂の発生状況一，日林東北支誌，**38**，142-144（1986）.
17) 中田清二，上田富茂：吉野材の生産技術体系改革に関する研究，凍裂実態調査，奈良林試業報，20-21(1984).
18) 西村英三：トドマツ天然林の凍裂木の実態について，昭和59年度帯広営林支局業務研究発表集，64-70，（1985）.
19) 及川伸夫，三上　進，田沢光次，工藤広治：スギ造林地における凍裂の発生実態（II）一秋田県小坂地区スギ造林地における凍裂の発生状況一，日林東北支誌，**38**，145-147（1986）.
20) 及川伸夫，三上　進：スギ造林地における凍裂の発生実態（III）一凍裂木と健全木における生育期間中の

材の含水率—, 日林東北支誌, **38**, 148-150 (1986).
21) 及川伸夫, 三上 進, 田沢光次, 工藤広治：スギ造林地における凍裂の発生実態 (IV) —スギ凍裂木樹幹の内部形態—, 日林東北支誌, **39**, 95-96 (1987).
22) 佐伯 浩：木材の破壊形態—木材の構造から見た基本形と用語—, 材料, **37**, 529-534 (1988).
23) 笹賀一郎, 今川一志：ヤチダモ造林地における凍裂の発生状況, 北大演習林試験年報, **4**, 12-13 (1986).
24) SHIGO, A. L.: "A new tree biology", Durhum, 1986, p. 471-489.
25) 渡辺治人："木材理学総論", 農林出版, 1978, p. 33-38.

Summary

Frost cracks in two planted trees of the species *Abies sachalinensis* were investigated macro- and microscopically. The development process of the frost cracks was described using the following results obtained in the present study.

1. In the first survey carried out at the end of December, frost cracks were found to occur in the trunks of about 19 % of the 370 trunks in the study area. New frost cracks occurred in 5 trunks of the trees. In the second survey conducted in the middle of February, no new frost cracks were detected in the stand. These facts suggest that frost cracks probably occur in early winter.

2. The location of frost cracks upon the trunks of the trees was closely related to the distribution of wetwood. The inner edges of frost cracks were located at the outer margin of the wetwood which had expanded outward the most and which showed especially high moisture content.

3. Many fine pieces of teared xylem were found on the fractured surface of new frost crack (tree No. 1), but not on that of old one (tree No.2) because of the resin layer covering the surface. Various internal cracks occurred in the wetwood. They were divided into radial and tangential cracks. They were packed with ice in which many air bubbles and fine pieces of teared xylem were found immediately after the sampling.

4. The surface of long radial cracks showed stair-like fracturing when viewed by transverse section under the light microscope. In many cases, radial fractures occurred near the annual ring boundary, and tangential cracks with cell wall failure occurred in the earlywood. Traumatic resin canals formed last summer were found on both sides of the new frost crack in tree No. 1. Traumatic resin canals and traumatic tissues were found in the initial parts of all the annual rings of the frost rib of tree No. 2, and traumatic resin canals were found to have also developed in the 16th annual ring from the bark. The development of the frost cracks within the trunk was discussed in reference to the distribution of the traumatic tissues described above.

5. Transwall and interwall failures were found in the radial fractures. The latter occurred within the S 1 layer with the shifting of the fracture faces to the adjacent cell in the case of fractures between the tracheids, and within the P 1 layer of ray parenchyma cells in the case of fractures between tracheids and ray parenchyma cells. Transwall and interwall failures were also found in the tangential fractures between tracheids. Interwall failures occurred also within the S 1 layer with the shifting of fracture faces to the adjacent cell. Interwall failures between ray parenchyma calls were found in the ring shake, but transwall failure between ray parenchyma cells was found in the shifting zone of radial cracks.

Explanation of photographs

Photo 1. Close-up of the outer surface of new frost crack (tree No. 1).

Photo 2. A new frost crack on the trunk (Tree No. 1).

Photo 3. Close-up of the outer surface of old frost crack (tree No. 2).

Photo 4. A typical old frost crack on the trunk (tree No. 2).

Photo 5. Transverse sectional view of the frost crack of the tree No. 1. The inner end of the frost crack is located near the outer margin of wetwood.

Photo 6. Transverse sectional view of the frost crack of tree No. 2.

Photo 7. Transverse sectional view of new frost crack. Black arrow shows splintering surface of the crack. White arrow shows remarkable abnormal thickening growth.

Photo 8. Transverse sectional view of old frost crack having typical frost rib.

Photo 9. Transverse sectional view of old frost crack. Its surface is covered with resin layer (arrows).

Photo 10. Transverse sectional view of the tangential internal crack. Air bubbles (small arrow) and fine pieces of teared xylem (large arrow) are seen in the ice existing in the crack.

Photo 11. Transverse sectional view of the wetwood showing the occurrence of various radial and tangential internal cracks.

Photo 12. Transverse sectional view of inner end of new frost crack. The inner end of the frost crack is connected to the radial internal crack in the outer margin of wetwood. Many of small radial cracks occur in the region from latewood to next earlywood (arrows).

Photo 13. Transverse sectional view of internal cracks. Arrow shows a tangential crack formed by development of radial cracks.

Photo 14. Transverse sectional view of well developed radial internal crack.

Photo 15. Transverse sectional view of part of ring shake occurring along the annual ring boundary.

Photo 16. Transverse sectional view of irregular tangential internal crack occurring in the earlywood.

Photo 17. Transverse section of frost crack. Tangential fracture (arrow) in the earlywood.

Photo 18. Transverse section of frost crack having many steps of fracture.

Photo 19. Transverse section of small radial internal crack occurring in the region from latewood to next earlywood. Fracture occurs along the radial cell wall.

Photo 20. Transverse section of a part of well developed radial internal crack. Arrow shows tangential stair-like fracture.

Photo 21. Transverse section of the outermost annual ring of the tree No. 1. Arrow shows traumatic resin canals.

Photo 22. Transverse section of frost rib. Traumatic resin canals of initial ring and traumatic tissue occur in the all annual rings of frost rib.

Photo 23. Transverse section showing a part of surface profile of old frost crack (tree No. 2) and traumatic resin canals of initial ring (arrows) occurring 16th annual ring from bark.

Photo 24. Fractured surface of radial internal crack. Arrows show the cell wall fragments of adjacent tracheids.

Photos 25 and 26. Matching fractograph of frost crack surface showing intra-S1 layer failure between tracheids.

Photo 27 Fractograph of radial internal crack intra-and transwall failure between tracheids and ray parenchyma cells.

Photos 28 and 29. Matching fractograph of frost crack surface. Intrawall (intra-P1 layer of ray parenchyma cells) failure between tracheids and ray parenchyma cells.

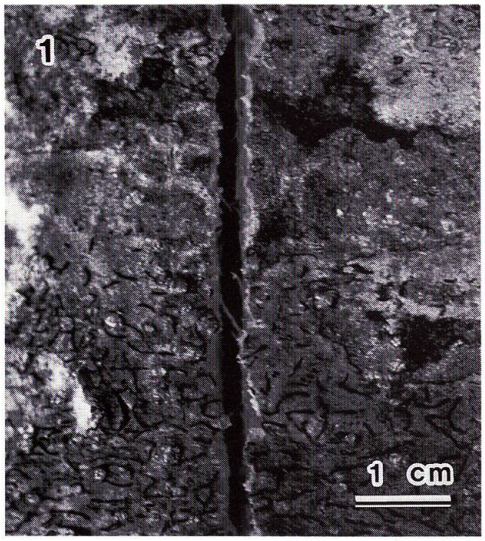
Photo 30. Fractograph of latewood surface of ring shake.

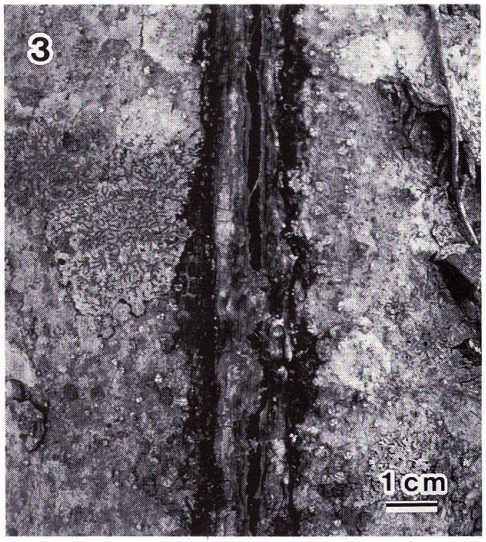
Photo 31. Fractograph of ring shake surface showing intrawall (intra-S1 layer) failure between tracheids.

Photo 32. Fractograph of ring shake surface showing intrawall failure in the end wall of ray parenchyma cells.

Photo 33. Fractograph of tangential fracture surface in frost crack showing intra-and transwall failures.

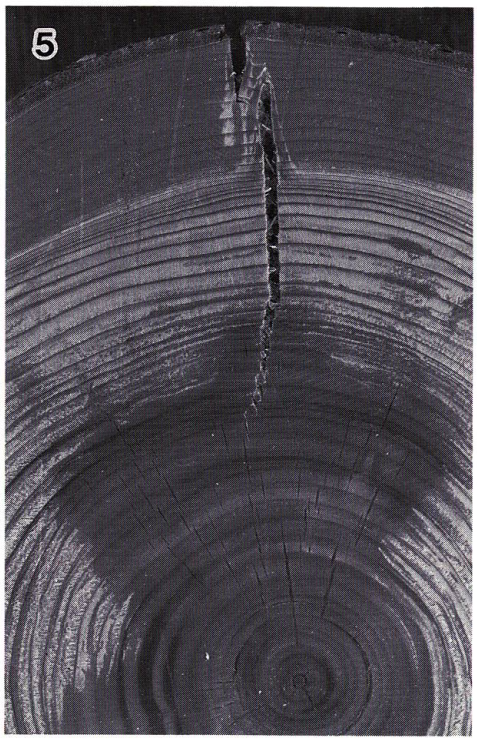
Photo 34. Fractograph of tangential fracture surface in frost crack showing transwall failure in ray parenchyma cells.

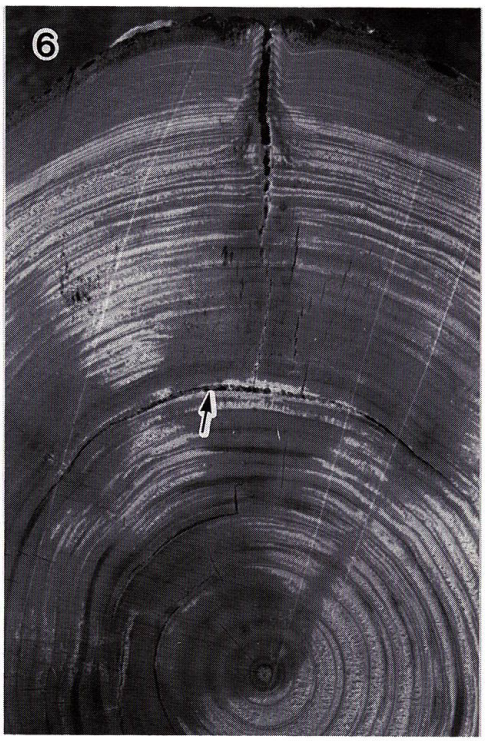

1
1 cm

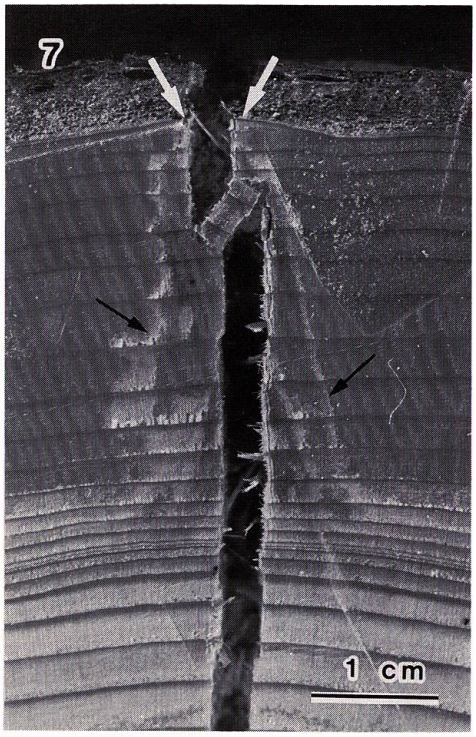

3
1 cm

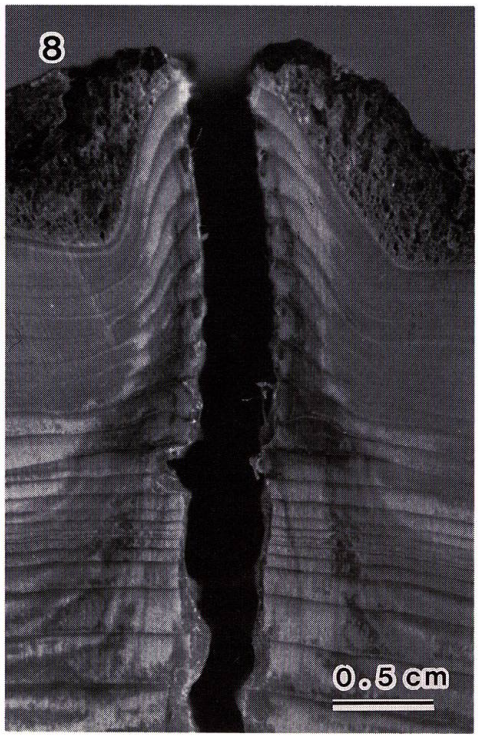
2

4

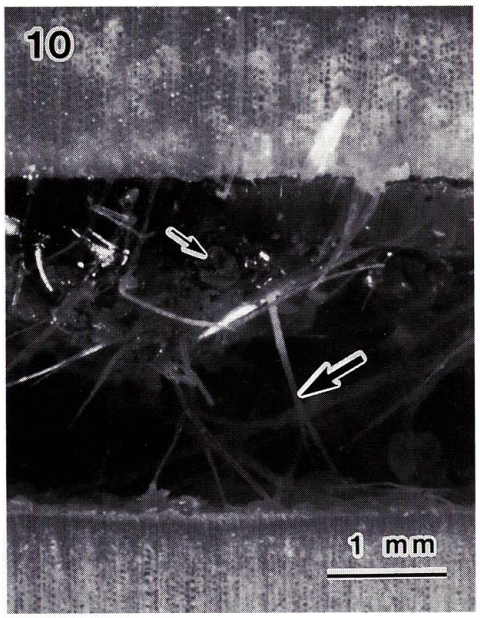

5


6

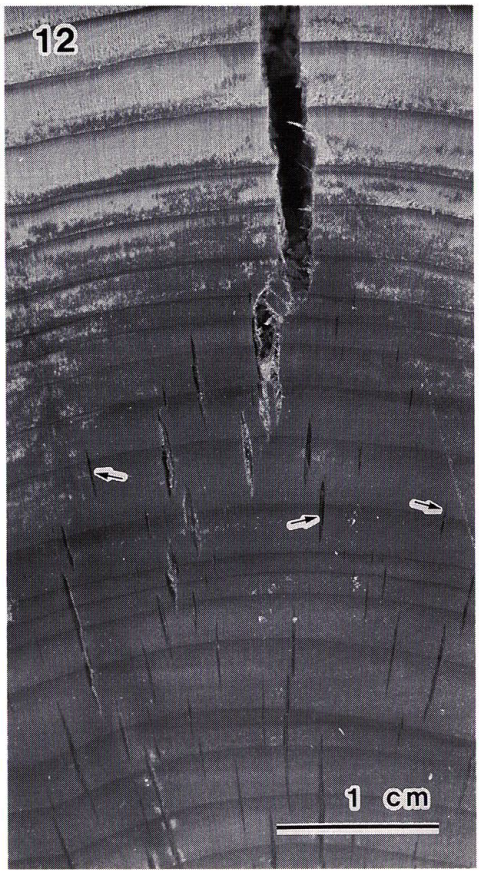

7
1 cm

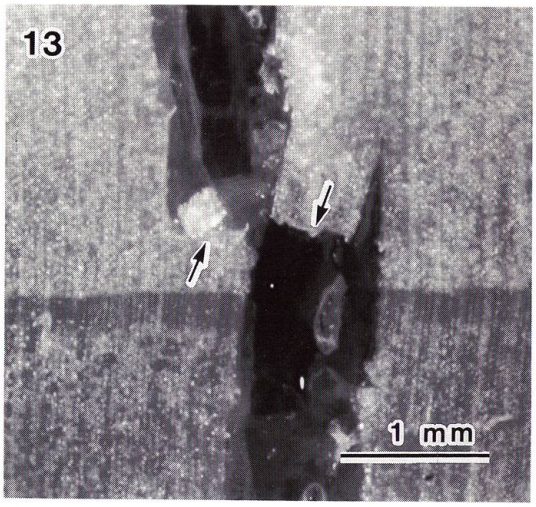

8
0.5 cm

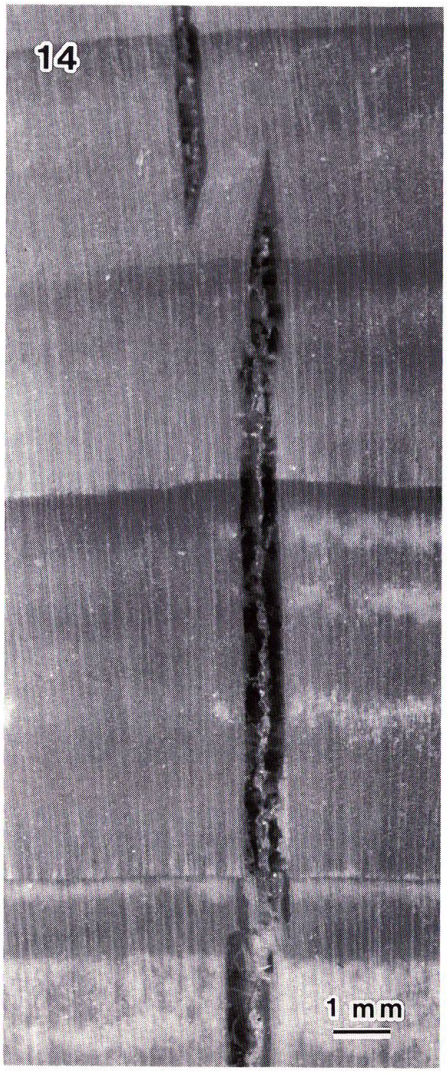
9
1 mm

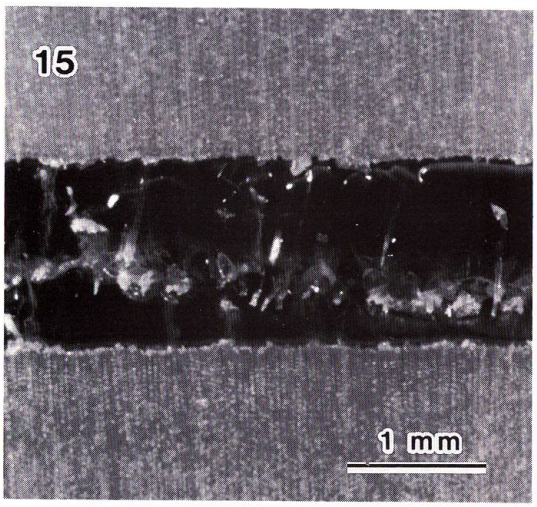

10
1 mm

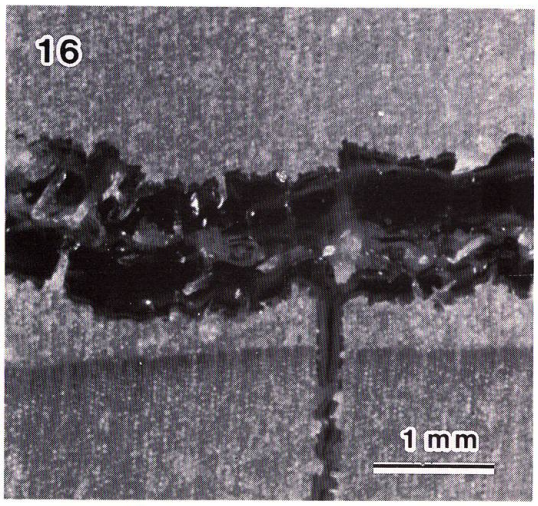
11
1 cm

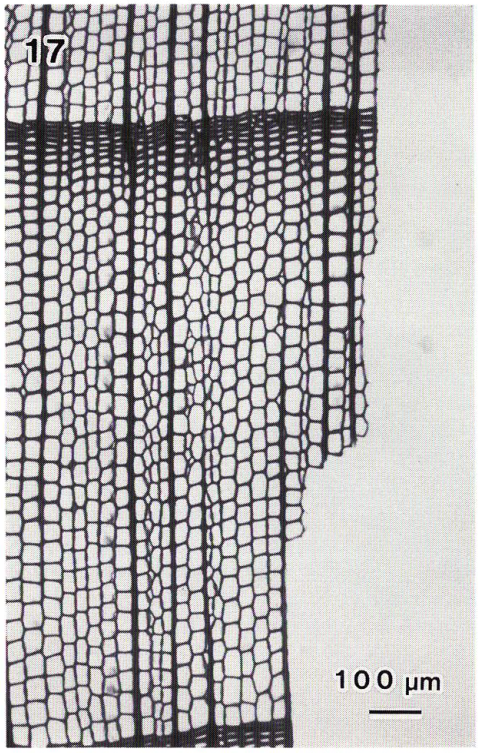

12
1 cm

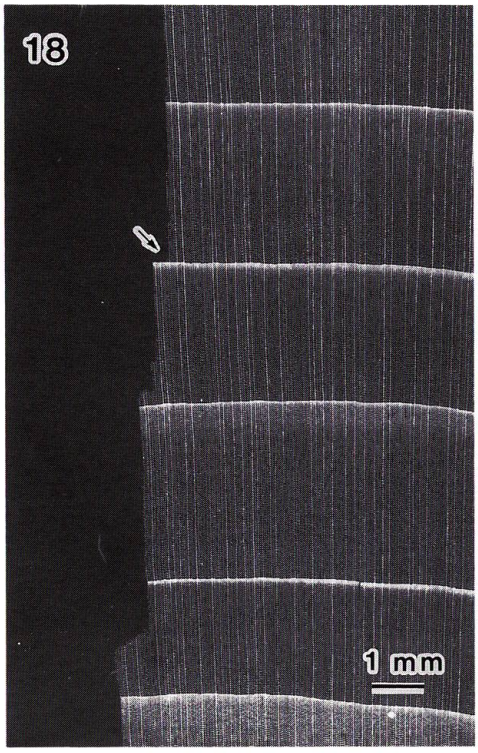

13
1 mm

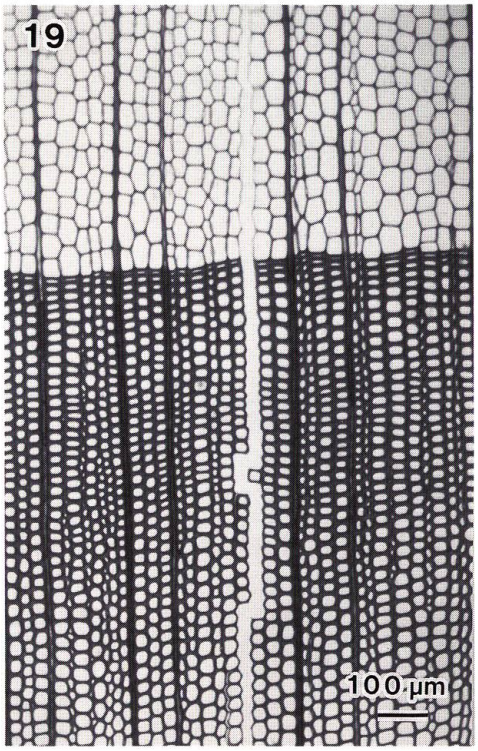

14
1 mm

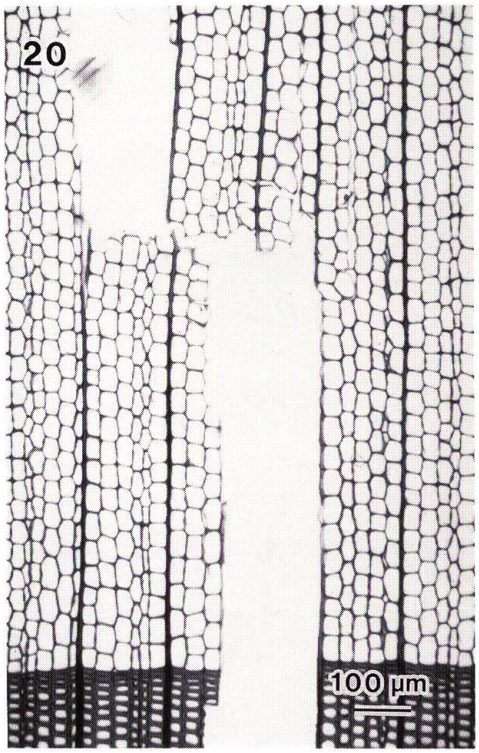

15
1 mm

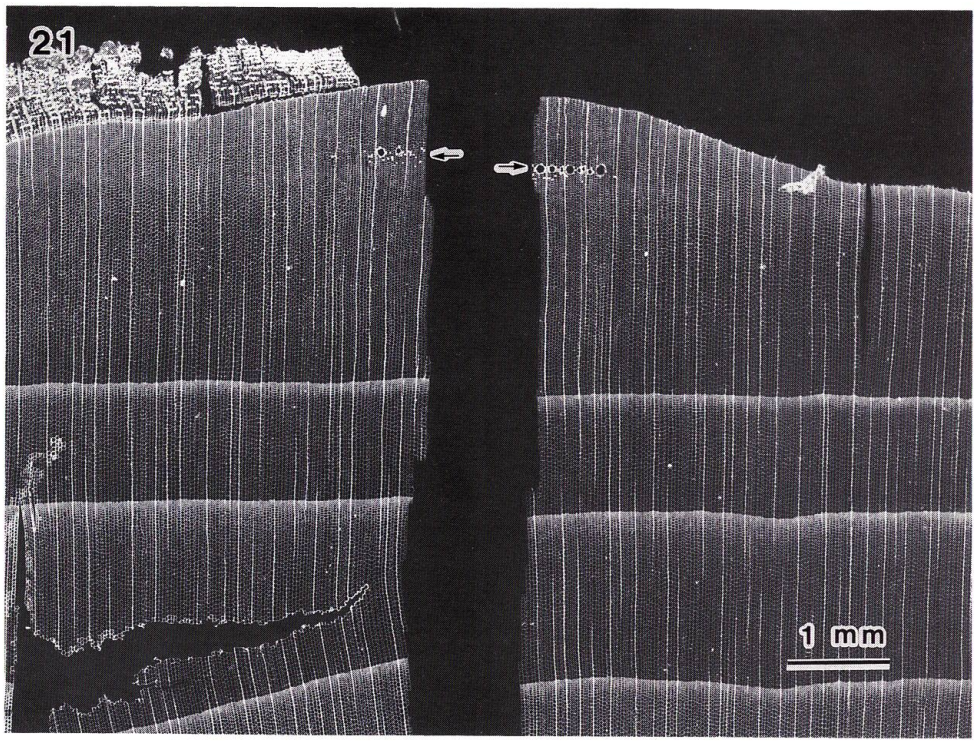

16
1 mm

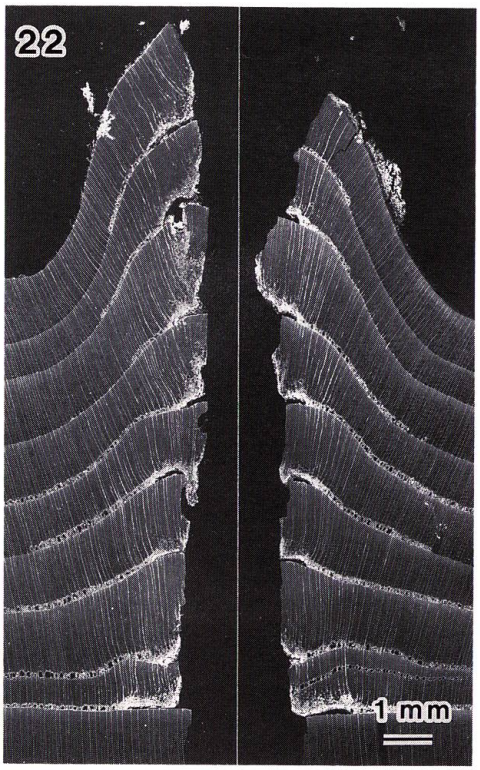

17
100 μm

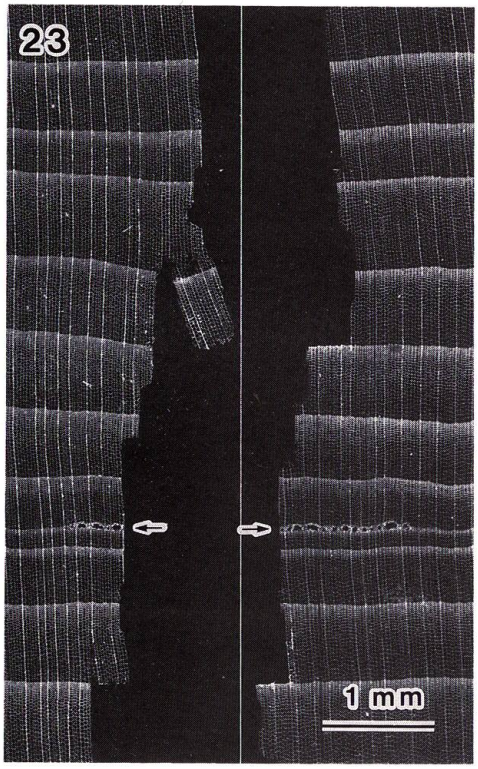

18
1 mm

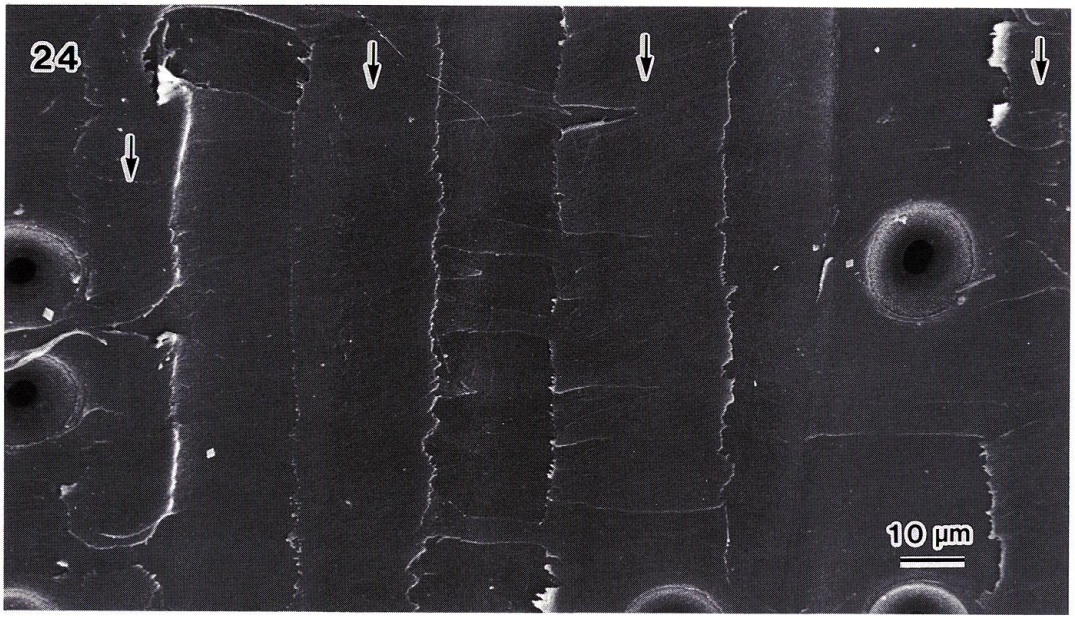

19
100 μm


20
100 μm

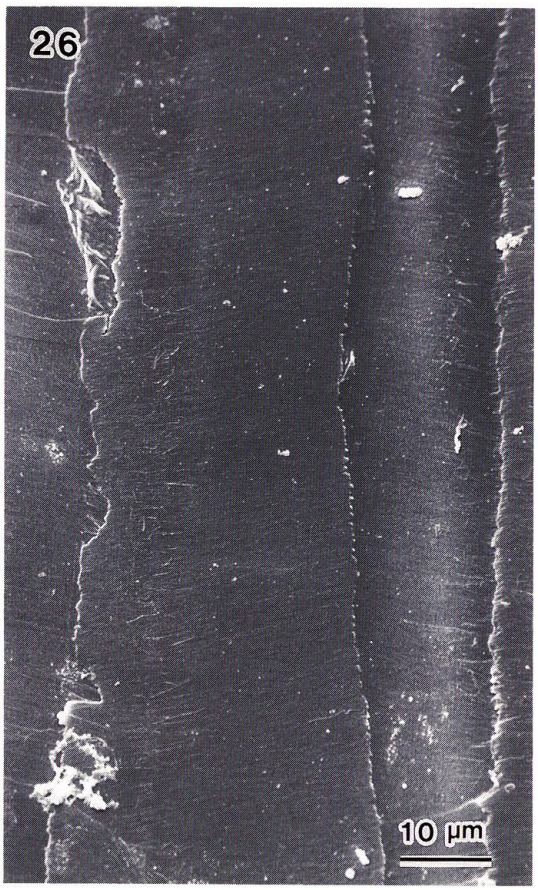

21
1 mm

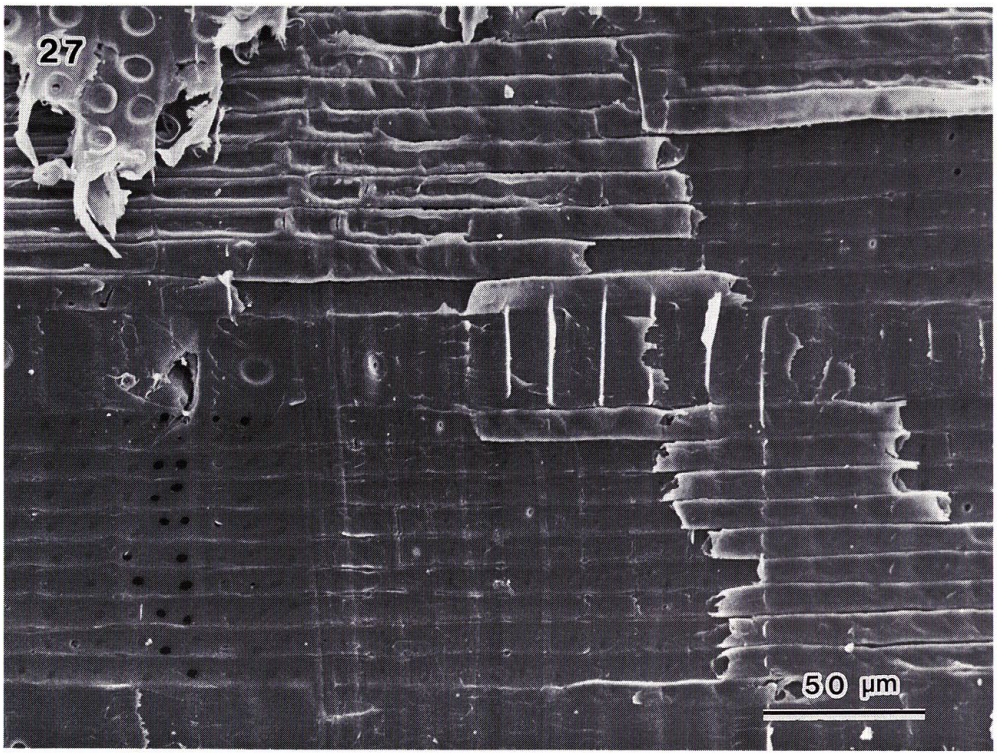

22
1 mm


23
1 mm


24
10 μm

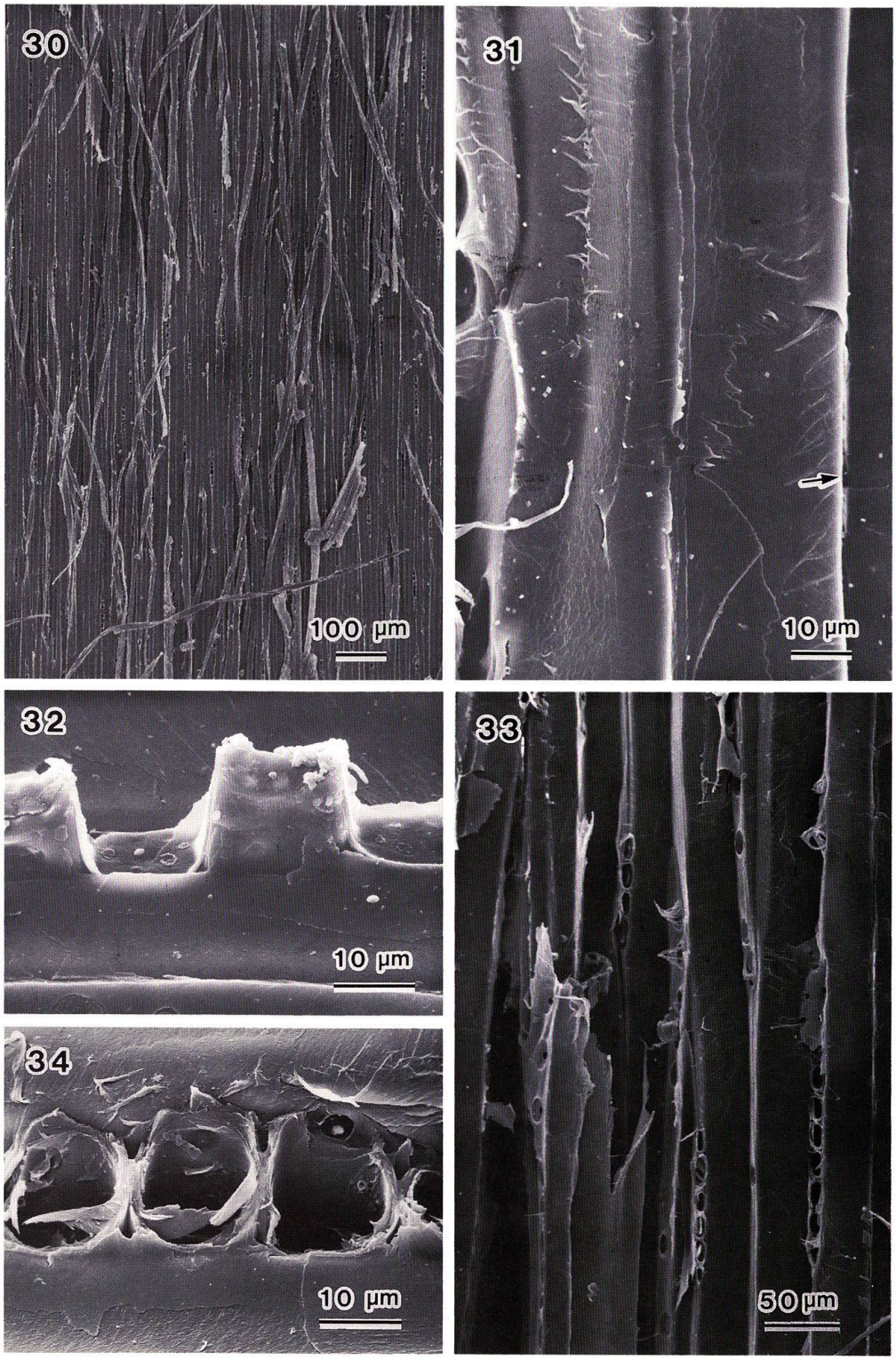
25
10 μm


26
10 μm


27
50 μm

28
10 μm

29
10 μm


30
100 μm
31
10 μm
32
10 μm
33
50 μm
34
10 μm