HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	樹木の凍裂発生要因の研究
Author(s)	佐野, 雄三; SANO, Yuzou
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 19(8), 565-648
Issue Date	1996-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12171
Type	departmental bulletin paper
File Information	19(8)_p565-648.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大農邦文紀要 19(8):565 ～648, 1996

樹木の凍裂発生要因の研究*

佐 野 雄 三
(北海道大学農学部木材生物学講座)
(平成8年2月8日受理)

Study of the cause of frost crack occurrence in living trees

Yuzou SANO
(Laboratory of Wood Biology, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

目　次

I. 序　論 ……565
A. 研究の背景と意義 ……566
B. 従来の仮説とその問題点 ……567
C. 本論文の範囲と目的 ……569
II. 凍裂発生の時期と気温 ……570
A. 概　説 ……570
B. 試験地と方法 ……571
a. 標準地の概要 ……571
b. 調査方法 ……572
C. 結　果 ……572
a. 古い凍裂の再割裂 ……572
b. 新凍裂の発生 ……575
D. 考　察 ……575
a. 古い凍裂の再割裂 ……575
b. 新凍裂の発生 ……576
III. 凍裂樹幹の内部構造 ……577
A. 概　説 ……577
B. 研究方法 ……578
a. 材　料 ……578
b. 凍裂樹幹の水分分布 ……578
c. 樹幹の内部構造の観察 ……578
d. 一凍裂木樹幹内での水食い材と内部割れの分布の変動 ……579
e. 凍裂割裂部付近の傷害組織 ……580
C. 結　果 ……580
a. 凍裂樹幹の含水率 ……580
b. 凍裂の深さと内部割れの発生形状 ……580
c. 一凍裂木樹幹内での内部構造の変動 ……582
d. 傷痕との関連 ……582
e. 凍裂木の樹幹形態 ……585
D. 考　察 ……586
a. 高含水率心材や内部割れとの関連 ……586
b. 傷痕や樹幹形態との関連 ……586
c. 凍裂の深さと内部割れの発達形状の関連 ……587
d. 凍裂発生時の割れの進展方向 ……588
IV. 凍結・融解過程での凍裂樹幹心材部の膨張・収縮の挙動 ……588
A. 概　説 ……588
B. 材料と方法 ……589
a. 材　料 ……589
b. 凍結・融解過程での凍裂開閉の挙動 ……589
c. 凍結・融解過程での水食い材部の膨張・収縮の挙動 ……589
C. 結　果 ……590
a. 凍結・融解過程での凍裂開閉の挙動 ……590
b. 凍結・融解過程での凍裂樹幹心材部の膨張・収縮の挙動 ……591
D. 考　察 ……593
V. 凍結状態の水食い材部 ……596
A. 概　説 ……596
B. 研究方法 ……597
a. 実体顕微鏡観察 ……597
b. Cryo-SEM 観察 ……597
C. 結　果 ……598
a. 実体顕微鏡観察 ……598
b. Cryo-SEM 観察 ……599

* 北海道大学博士論文 (1995)

D．考　察 ……600
a．凍裂と内部割れの関連 ……600
b．内部割れでの氷晶析出機構 ……601
Ⅵ．凍裂及び内部割れの破壊形態 ……601
A．概　説 ……601
B．研究方法 ……602
a．材　料 ……602
b．光学顕微鏡観察 ……602
c．SEM 観察 ……602
d．Cryo-SEM 観察 ……602
C．結　果 ……602
a．破断の走行 ……602
b．破断面の SEM 観察 ……603
D．考　察 ……605
a．放射状の内部割れの成因 ……605
b．目回りの成因 ……605
Ⅶ．人工凍裂の誘発実験による発生要因の検討 ……606
A．概　説 ……606
B．実験方法 ……607
a．放射方向の温度勾配の付与による誘発試験 607
b．含水処理した円板の冷却による誘発試験 …607
c．木口面上での内部割れの面積占有率の測定 608
C．結　果 ……608
a．放射方向の温度勾配の付与による試験 ……608
b．含水処理した円板の冷却による試験 ……608
D．考　察 ……609
Ⅷ．総合考察と結論 ……610
謝　辞 ……614
引用文献 ……614
Summary ……617

I. 序　論

A. 研究の背景と意義

林木は長い年月にわたり林野で生立する間に様々な損傷を受ける。これには，風害や寒害，雪害などの気象害，動物による食害といった天然下で生育するうえで宿命的に避けることのできない損傷もあれば，近接する立木の伐倒や土木工事の際に被る人為的な損傷もある。風倒や幹折れ，環状剝皮状に形成層帯まで食害されたような場合を除き，これらの損傷は樹木にとって致命傷となるわけではない。損傷部に近接する材部ではチロースの形成や抗菌物質の生成が起こり，損傷部は新たに形成される材組織によりやがて巻き込まれ，それ以降も長年月にわたり生存を続ける[1-4]。しかし，材の損傷自体，ならびに二次的に引き起こされる材の変色や菌害により，用材としての用途は著しく限定される。従って，林業ならびに林産業上無視できない問題である。その防除，あるいは損傷を受けた林木の有効利用のために，適切な処置を講じていかなければならない。そのためには，その実態や損傷のしくみについて究明する必要がある。

寒冷地に生育する林木が被る損傷のひとつに凍裂（あるいは霜裂け，霜割れ）がある。凍裂とは，寒冷時に樹幹がその放射縦断面を破断面として割裂する現象である*1)。厳寒期の早朝や夜間のような著しく冷え込みの厳しいときに銃声に似た大きな音を伴って発生するといわれている[4-7]。

割裂の深さは変化に富んでおり，樹幹外層部にとどまる浅いものもあれば，内部深く髄付近まで割裂するものもある[8]。ときには髄を超えて反対側の形成層まで割裂する場合もある[8]。樹軸方向の割裂部の長さは1～2 m のものが多いが[8-11]，数十 cm にとどまる短いものから 10 m を超えるような非常に長いものまで確認されている[8,12]。

一般には，春期に温暖になると凍裂の割裂部は閉塞し，成長期には新たに形成される材組織により巻き込まれる。しかし，翌冬には再び同一箇所で割裂を起こす。こうして，冬期の割裂と成長期の材形成による巻き込みを繰り返しながら長年月にわたり生育を続ける間に，凍裂樹皮やへびさがりと呼ばれる特徴的な形状を呈する縦長の痕跡が樹幹表面に認められるようになる[6,13,14]。凍裂樹皮部はときに健全部の樹幹表面よりも著しく隆起することがあり，この場合にはとくに霜腫れと呼ばれる[6,15,16]。

発生頻度は樹種間で大きく異なっており，特定の樹種に多発する。国内では，北海道のトドマツ［*Abies sachalinensis*（Fr. Schm.）Masters］*2)天然林で約20%の頻度で凍裂が発生していることがふるくに報告されており[10,17,18]，近年では同人工林でも15～30%の頻度で凍裂が多発している実態が報告されている[19-22]。また北海道や東北地方のヤチダモ（*Fraxinus mandshurica* Rupr. var. *japonica* Maxim.）[18,23-26]，九州から東北地方までのスギ［*Cryptomeria japonica*（Linn. fil.）D. Don］[12,27-36]にも多発することが報告され，40%を超える高頻度で発生している林分があることも報告されている。欧米では，広葉樹に凍裂が多発するといわれており[8,13]，なかでもとくにコナラ属（*Quercus*）の樹種に凍裂が多い。その発生実態調

査[11,37-39]や樹幹内部の観察[40,41]をはじめとして，コナラ属の樹種の凍裂に関する報告や記載，写真は文献によくみられる[13,14,42-44]。また，ウクライナ地方では，セイヨウグルミ（*Juglans regia* L.）林のなかに80%を超える高率で凍裂が発生している林分もあることが報告されている[45]。このほかにも，国内外を問わず，ハコヤナギ属（*Populus*）の樹種[18,44,46]，ハンノキ属（*Alnus*）の樹種[18,46]，ニレ属（*Ulmus*）の樹種[17,18,47]，クリ属（*Castanea*）の樹種[18,44]，シナノキ属（*Tilia*）の樹種[18,48]，シラカンバ［*Betula platyphylla* Sukatchev var. *japonica*（Miq.）Hara］[18,49]，イヌエンジュ［*Maackia amurensis* Rupr. et Maxim. var. *buergeri*（Maxim.）C. K. Schn.］[50]，ヒノキ［*Chamaecyparis obtusa*（Sieb. et Zucc.）Sieb. et Zucc., apud Endl.］[51]など，発生頻度は必ずしも明らかにはなっていないが，数多くの樹種で凍裂は発生しているようだ。

凍裂を起こした樹幹から寸法の大きな良材を得ることは望めず，用途は著しく限定される[6,27,31,52]。そのため，大きな欠点として扱われており，木材を利用する立場からみると好ましいものではない[6,16]。また，凍裂は樹木にとって致命傷となるわけではないものの，凍裂の割裂部より樹幹内部の材組織へ腐朽菌や病原体が侵入し，腐朽や病害が発生しやすい。凍裂木は比較的短命で枯死するという指摘もある[14]。樹木の健康上好ましいものではないことも明かだろう。

このように，凍裂害は寒冷地における育林上の大きな問題のひとつである。しかし，その被害を抑止，あるいは軽減するための有効な手段は確立されていない。そればかりではなく，凍裂の発生実態や発生機構については依然として不明の点が数多く残されたままになっている。凍裂に関する研究は，林木の寒害の範疇に分類される領域のなかで最も進展が遅れているという指摘さえある[5]。今後，様々な視点から凍裂の発生実態に関する知見を蓄積し，さらにその発生機構について検討していく必要がある。以上のような背景から，凍裂の発生要因を検討することを目的として本研究を行った。

B. 従来の仮説とその問題点

石田[10]ならびにSCHIRP[8]は，執筆当時から1700年代にまで遡って凍裂に関する総説を著している。このような詳細な凍裂に関する文献調査は類例がない。このうち石田[10]は，執筆当時までに公表された凍裂の発生機構の仮説についてとくに詳しく解説している。一方，SCHIRP[8]の総説では，凍裂の発生機構についてはほとんど触れておらず，文献に記載されている内容をもとに，凍裂が多発する樹種，凍裂の発生部位や寸法，発生時の気温条件などの凍裂の発生実態の解説に主眼をおいている。

両者の総説によると，凍裂についての記載はすでに1700年代に公表された文献のなかにみられる。しかし，1960年以前に公表された凍裂に関する文献については，石田[10]とSCHIRP[8]による詳細な総説がある。そのため，ここでは1960年以前に提案された凍裂の発生要因，発生機構に関する仮説については，とくに実験や観察に基く根拠をもち，重要であると判断されるものだけを取り上げ，主としてそれ以降に公表された比較的新しい研究について概説する。

凍裂は寒冷時に樹幹の放射縦断面に沿って割裂することから，温度低下の際に限って引き起こされる樹幹接線方向の引張り応力がその発生要因であると考えられている。これまでに提案されている凍裂の発生機構，発生要因についての仮説では，温度低下の際に引き起こされる樹幹接線方向の引張り応力の発生のしくみについての解釈に違いがあるということができる。

比較的最近まで教科書にもよく引用され[7,16,53,54]，ひと頃一般に認められていた凍裂の発生機構の仮説として，(1)樹幹の放射方向よりも接線方向の方が熱収縮率が大きいという異方性に起因して，温度低下の際に樹幹内に引き起こされる接線方向の引張り応力，あるいは(2)急激な温度低下によって樹幹の内・外層で大きな温度勾配が生じた際に，樹幹外層部が局所的に接線方向に大きく熱収縮することにより凍裂が発生するという説がある（以下，熱収縮説）。ふるくには，CASPARY[55,56]が，この説を提案している。しかし，温度低下によって引き起こされる木材の収縮機構に関する知見が，CASPARY[55,56]がその仮説を提案した1800年代半ばに得られていたわけではない。氷点下の温度領域において，温度低下により木材が収縮を起こすのには，細胞壁を構成する分子の振動（熱運動）低下に基づくいわゆる熱収縮[57]，率先的に凍結した細胞内腔の氷晶へ結合水が析出することにより引き起こされる乾燥収縮（以下，低温乾縮）[58-60]の二つのしくみがあると現在では考えられているが，CASPARY[55,56]がその仮説を提案

した当時には，これらの木材物性学的知見は得られてはいなかった。従って，CASPARY[55,56]の説については，収縮異方性や樹幹内での放射方向の温度勾配を凍裂の発生要因であるとしている点では間違いないが，熱収縮説に含めることには問題があるかも知れない。後年，KOLLMANN[61]は，その収縮が細胞壁を構成する分子の振動（熱運動）低下に基づくいわゆる熱収縮によるものであるという見解を示している。

この仮説の問題点として，冬季に野外で経時的に実測された凍裂幅の変化量は，熱収縮説に基いて計算されたそれとは一致せず，理論値よりも実測値の方がはるかに大きいことが指摘されている[10,44]。さらになぜ特定の個体の特定の樹幹部位にだけ凍裂が発生するのかを，この説では明瞭に説明できないという指摘がある[10]。

第二の仮説として，材が凍結するときに，率先的に凍結した細胞内腔の氷晶へ細胞壁内の分子レベルの微細空隙中にある不凍水，あるいは結合水が析出することにより引き起こされる低温乾縮の異方性が原因であるとする説（以下，低温乾縮異方性説）がある。この説は，MAYER-WEGELIN ら[62]によって最初に提案された。低温乾縮には異方性があり，接線方向の方が放射方向よりも乾縮率が大きい。そのため，樹幹が氷点下の温度に長時間にわたり暴露され，材部での低温乾縮が進むにつれて，樹幹の内部には次第に大きな接線方向の引張り応力が引き起こされる。こうして引き起こされる樹幹接線方向の引張り応力が凍裂の発生要因であると指摘しているのが，低温乾縮異方性説である。

KUBLER[13,14,63]は，MAYER-WEGELIN ら[62]以降に得られた凍裂の発生実態に関する知見及び木材物性学的知見を加味し，この説をさらに発展させている。寒冷とは別の原因によって引き起こされた樹幹内部の損傷部より“wound crack”という割れがまず発生し，この割れの末端部で応力集中が起こること，あるいは気温が急激に低下したときに樹幹内で大きな放射方向の温度勾配が生じること，などの低温乾縮以外の要素も凍裂の発生に寄与する場合があるという見解をKUBLER[13,14]は述べている。しかし，いずれにせよ凍裂発生の主因は，低温乾縮の異方性により樹幹内に引き起こされる接線方向の引張り応力であると見做している点では変わりはない。

欧米では，この低温乾縮異方性説が受け入れられつつあるようである。NEELY・HIMELICK[64]は，アケリフォリアスズカケノキ［*Platanus acerifolia* (Ait.) Willdenow］の凍裂木について，凍裂の割裂幅や樹幹周囲長の変動を厳冬期の数日間にわたり計測し，それらの結果と秋季に凍裂の割裂部が開く前に測定しておいた樹幹周囲長の値を基にして，凍裂樹幹の材組織実質の収縮率を算出する解析を行っている。さらに，凍裂の発生していない樹幹についても厳冬期及び秋季に樹幹周囲長を同様に計測し，材組織実質の収縮率を算出している。その結果，凍裂の発生している樹幹の方が凍裂の発生していない樹幹よりも材組織実質の収縮率は大きいことを根拠として，低温乾縮異方性説を支持している。このほかに低温乾縮異方性説を実験的に検討した研究例は見あたらないが，木材科学や林学に関する教科書や成書でも，低温乾縮異方性説を引用するものが多くなってきた[7,43,54,65]。

しかし，他の樹種と比較して低温乾縮率が高いとされているコナラ属の樹種[59]を含む数樹種の広葉樹材の円板を，生材状態で長時間にわたり－40℃で冷却し続けることによって人為的に凍裂を誘発させようとした試みは不成功に終わっている[66]。また，熱収縮説に対する石田[10]の指摘と同様に，なぜ凍裂は特定の樹幹の特定の部位にだけ発生するのか，という点を明瞭には説明できないことも問題点として指摘できる。

第三の説として，樹幹が凍結するときに樹芯部に位置する水食い材部*3)の凍結に基く内部膨張により樹幹の外層部で接線方向の引張り応力が生じ，これに厳冬期の著しい低温に基く樹幹外層部の局所的な収縮が加わることによって凍裂が発生するとする説（以下，内部膨張説）が挙げられる。石田[10,17]は，トドマツ凍裂木の樹幹内部には例外なくよく発達した水食い材部が認められるという広範な観察結果，水食い材が多発しない樹種では凍裂の発生頻度が低いという調査結果，凍裂樹幹において水食い材部の占有率と凍裂幅との間には極めて高い正の相関が認められるという測定結果，などのいくつかの根拠を踏まえて，この内部膨張説を提案した。木材科学，樹木生理学に関する成書のなかには，この説を紹介しているものも少なくない[5,15,67]。

国内では，この仮説が論拠としている観察結果と同様な樹幹の構造的特徴が他の樹種の凍裂木にも認

められており，さらにこの仮説を支持するような実験結果も得られている。今川ら[23,24]は，ヤチダモの凍裂樹幹の内部構造的特徴や破壊形態を組織学的に調べている。その結果，ヤチダモ凍裂木の多湿心材部を凍結状態で観察すると氷の詰まった数多くの内部割れが認められることを報告している。また，1970年代以降，スギの造林木に凍裂が多発していることが相次いで報告されるようになった[12,27,28,31-36]。それに伴って，スギの凍裂樹幹の内部にも，高含水率心材（水食い材）部が発生していること，高含水率心材部に数多くの内部割れが発生していることなどが明らかにされている[27,34,68-71]。さらに，スギの凍裂の割裂部は，樹芯部の凍結・融解に応じてそれぞれ開口・閉塞するという野外観測結果[72,73]や物性試験の結果[74]が得られている。同様な結果は，トドマツの凍裂木について再確認されている[22,75]。

しかし，上述のようないくつかの妥当な実験的根拠をもつ内部膨張説にしても，水食い材部の凍結による膨張が凍裂の原因となることはあるが，それは特殊な場合であるという指摘[14]，辺材よりも高含水率の心材を樹種特性として本来的にもっているヤチダモに凍裂が必ずしも発生しないという疑問点の指摘[24]などがあり，あいまいさが残されている。

このほかにも，(1)風により樹幹が曲げられた際に，樹軸方向に圧縮される風下側の樹幹において，地際部の複数の根張りの間の窪みの部分に凍裂の原因となる応力が生じ，凍裂が発生するという説[42]，(2)凍裂は最終的に著しい気温の低下を契機として発生するが，その発生の内部因子として樹幹の損傷が大きく寄与しているという説[4,40]などがある。しかし，これらの仮説は実験的根拠あるいは木材物性学的知見の裏付けを欠いている。

C. 本論文の範囲と目的

上述のように，凍裂の発生機構についての仮説のうち実験的根拠や木材物性学的裏付けをもつ仮説として，(1)熱収縮説[55,56,61]，(2)低温乾縮異方性説[13,14,62,63]，(3)内部膨張説[10,17]がある。また，このほかにも風による機械的な作用が原因であると指摘している説[42]や樹幹の損傷部が凍裂の発生に不可欠な遠因になっているという説[4,40]等がある。KUBLER[14,63]が指摘しているように，これまでに凍裂の原因として指摘されているこれらの複数の要素のうち特定のものだけが凍裂の発生に寄与するのではなく，複合して作用する場合があるのかも知れない。本研究の目的は，それらの複数の要素のうち，凍裂発生の要因，つまり凍裂の発生に最も大きく寄与する，凍裂の発生に不可欠な要素を検討すること

---

*1) 凍裂の定義について

凍裂の定義は，文献により細部では異なっている。例えば，"厳寒時に，立木樹幹の外部から内方に向かって発生する縦長い割目[76]"，あるいは"厳冬期太い幹の内部から樹皮部分まで縦方向の割れを生じる現象[5]"のように，割れの進展の方向や樹幹の径級について加味している定義がある。一方"(氷点下の低温度によって）立木の基部近くの師部からその内方の木部にわたって，放射方向に生ずる樹軸方向の裂け[16]"のように，割れの進展の方向などに触れず，凍裂の形状のみについて記している定義もある。本論文では，凍裂は大径の樹幹にだけ発生するわけではないこと，凍裂の割れの進展方向についてはこれまでに明らかにはされていないことから，"寒冷時に樹幹がその放射縦断面を破断面として割裂する現象"と独自に定義した。

*2) 樹種名と学名について

樹種名の記載は，"北海道の樹種とその学名[77]"に記されている標準和名に従った。学名の記載は"新日本植物誌顕花篇[78]"に従い，"新日本植物誌顕花篇"に記載されていない外国産の樹種については上述の"北海道の樹種とその学名"に従った。しかし，文献を引用する際に"新日本植物誌顕花篇"と"北海道の樹種とその学名"のいずれにも記載されていない植物種もあった。その場合には引用文献に記載されていた学名をそのまま記載した。

*3) 水食い材，多湿心材，高含水率心材の用語について

国内では，"通常含水率の低い心材をもつ樹種であるのに，なんらかの原因で，心材およびときには内側の辺材が隣接の辺材部より高い含水率を示す"材部を水食い材として定義し，特定の広葉樹材にみられる"辺材より含水率の高い心材"を多湿心材として定義している[79]。近年では，とくにスギに発生する水食い材状の材部に"高含水率材"という用語を適用している報告例がある[80]。一方，欧米では，両者を区別せずに"wetwood"として扱っている[81]。このように，これらの用語については現在でも一定せず，混乱もみられる。本論文では，水食い材，多湿心材のふたつの用語については，日本木材学会による定義[79]に従った。トドマツの心材部に出現する含水率の著しく高い材部については"水食い材"とし，ヤチダモの含水率の高い心材については，樹種特性によるものであることが明らかにされている[82,83]ため，"多湿心材"を適用した。また，広葉樹材の中で，これまでに含水率分布が充分に解明されていない樹種の心材部にみられた高含水率の材部，及び"水食い材"と"多湿心材"の総称として，"高含水率心材"という用語を適用した。

である。

そのために，第一に，天然下に生立する林木には冬季のいつ頃，どの程度の低温下で凍裂が発生するのかを野外調査により実際に調べ，凍裂発生の温度条件を検討した。第二に，形態学的手法により凍裂樹幹の構造的特性を調べ，なぜ凍裂は厳寒地の林木すべてに発生するのではなく，特定の樹幹の特定の部位にだけ発生するのかについて推定した。第三に，なぜ凍裂は特定の樹幹の特定の部位にだけ発生するのかをさらに詳しく検討するために，凍裂樹幹より採取した材そのものについて物性試験を行い，凍裂樹幹の物性的特性を検討した。第四に，凍裂をもたない円板に人工的に凍裂を誘発する実験を行い，凍裂が誘発された円板の構造的特徴と天然下で発生した凍裂樹幹の構造的特徴の一致を確認し，最終的に凍裂の発生に不可欠な要因について結論した。本論文ではこれらの結果を6つの章（II～VII）に区分して記述し，その結果を踏まえて最終的に凍裂発生の要因についての総合考察および結論（VIII）を記した。

II. 凍裂発生の時期と気温

A. 概　　説

これまで，凍裂発生の直接の外部因子は氷点を大きく下回る極端な低温，あるいは気温の急激な低下であると考えられてきた。凍裂の発生機構についていくつかの仮説が提案されているが，いずれの仮説でも凍裂は最終的に著しい温度低下を契機として発生すると見做している点では変わりはない。木材科学ならびに林学に関する成書でも，凍裂はよく晴れた厳冬期の早朝や夜間などの著しく冷え込みの厳しいときに銃声に似た大きな音を伴って発生するという旨の記載が多くみられる[4-7,16]。

しかし，凍裂は北海道内陸部のような酷寒地に限って発生する現象ではない。1970年代後半より，本州各地のスギ造林地が北海道のトドマツと同頻度，ときにはそれよりもはるかに高頻度で凍裂害を受けている実態が相次いで報告されている[12,27,28,31,33,34,36]。さらに，九州地方の山間部でさえも，スギ造林地で凍裂の発生が確認されている[32,35]。従って，少なくとも凍裂を引き起こす直接の外部因子が極端な低温であるという見方には再検討が必要であり，(1)冬期間のいつ頃凍裂は割裂するのか，(2)そのときの気温はどの程度なのかを実際に確かめる必要がある。

凍裂は，一般に翌成長期には新たに形成された材組織の層により巻き込まれる。この場合，凍裂により一旦はく離した材部が癒合することはなく，その割裂部では翌成長期に形成された一成長輪分の材組織により材の連続性が保持されているに過ぎない。そのため，接線方向の引張り強度が小さく，比較的温和な低温下で容易に再割裂を起こすと推定されている[6,13,14,63,65]。これに対して，新たに凍裂が発生する場合，古い凍裂の再割裂の場合と比較してはるかに厚い材組織の層が裂けることから，古い凍裂の再割裂の場合よりもさらに低い温度下で発生すると一般には考えられている[6,13,14,63,65]。従って，凍裂発生の時期と気温条件を検討する場合には，新たに凍裂が発生する場合と古い凍裂が再割裂する場合を区別して考える必要がある。

このうち，古い凍裂の再割裂については，樹芯部の凍結が重要な意味をもつことを示唆する報告が多い。石田[10,17]は，凍裂をもつトドマツの丸太を凍結・融解させた際の凍裂の割裂幅の変化を調べ，凍裂の開閉が直接には外気温ではなく樹芯部の水食い材部の凍結・融解に応じて起こることを示唆する結果を得ている。NEELY・HIMELICK[64]は，アケリフォリアスズカケノキの凍裂の割裂幅の変化と外気温との対応を観測し，日平均気温が氷点下まで低下すると凍裂が開口することを報告している。今川[84]，今川ら[73]，並びに及川ら[72]は，スギ造林木の凍裂の開閉の挙動や辺・心材別の樹幹温度，外気温を一冬期間にわたり観測し，凍裂の開口には樹芯部の凍結が重要な意味をもつことを明らかにしている。佐野・深沢[25]は，ヤチダモの場合古い凍裂の再割裂が初冬のそれほど寒さの厳しくないときに集中的に発生することを明らかにしている。

また，古い凍裂については，すでに割裂部の開いた凍裂の割裂幅が厳冬期の数日～数週間の限られた期間内で気温や樹幹温度の変動とどのように対応して変化するのかを調べた研究例が報告されている[10,44]。それらの研究により，凍裂幅の拡大・縮小は気温や樹幹温度のそれぞれ低下・上昇によく一致して起こること，凍裂幅の変化量が木材の接線方向の熱収縮量よりもはるかに大きいことなど，凍裂の発生機構を検討する上で有益な知見が得られている。

一方，新たに凍裂が発生する時期やそのときの気

温条件については不明の点が多い。−28℃というかなり低い外気温下で凍裂が発生したという記載[85]がある一方，−7℃[86]，−10℃[8]で凍裂が発生したという記載もみられる。しかし，これらの報告では，いずれも新たな凍裂の発生のことを指すのか，それとも古い凍裂の再割裂のことを示すのかが明記されてはいない。また，国内のスギの凍裂に関する報告のなかに，凍裂発生時の気温について触れているものがある。富田・滝尻[87]は，三重県内で確認された凍裂害を受けているスギ造林地に近い気象台で公表している気温の観測記録を手掛かりに，それらのスギ造林木で凍裂が発生したときの気温を−7.6〜−7.8℃と推定している。松田ら[12]は，福井地方でスギの凍裂害が発生している地域では，真冬日が10日以上続くこと，及び年最低気温が−13〜−15℃に達することを，気象台の公表した気温データから明らかにしている。元村[32]は，福岡県でスギの凍裂害が発生している林分に近接する地点で，冬期の最低気温が−10.5℃まで低下したのを観測し，そのときに凍裂が発生したものと推定している。高木・西山[35]も，凍裂害が発生している大分県山間部のスギ造林地で冬期の最低気温が−10.5℃まで低下したのを観測している。また，中田・右田[51]は，ヒノキの凍裂の調査を行い，被害を受けている林分では冬期の最低気温が約−10℃まで低下することがあることを報告している。

いずれにせよ，凍裂は酷寒地に生育する林木に限って発生するわけではなく，冬季の最低気温が−7〜−10℃の地域でも発生することは確かである。従って，新たに凍裂が発生する場合でも，必ずしも氷点を大きく下回るような厳しい低温により発生するとは断定できない。凍裂が冬期間のいつ頃，どの程度の気温下で発生するのかという点については検討を加える必要がある。

以上のような背景から，筆者は凍裂の発生が冬期間のいつ頃に起こり，そのときの気温はどの程度なのかを明らかにすることを目的として道北及び札幌近郊の林野で3回にわたり野外調査を行ってきた[25,88]。本章では，その観察結果について述べる。

B. 試験地と方法

a. 標準地の概要

北海道大学天塩地方演習林（タンタシャモナイ標準地），森林総合研究所北海道支所実験林(月寒標準地)，野幌森林公園（野幌標準地）の3調査地で，それぞれ1988〜1989年，1992〜1993年，1993〜1994年の冬期に調査を行った。各試験地の概要は次のとおりである。

1）タンタシャモナイ標準地

天塩地方演習林の2，3林班の境界に位置する熊の沢沿いのヤチダモ造林地（昭和2年植栽）に約1haの標準地を設定した。この造林地は標高150〜300mの丘陵地帯の南麓に位置し，南向きの緩斜面となっている。北方向へは徐々に傾斜を増しながら丘陵へと続いており，南方向へはほぼ平坦となり天塩川沿いの平地へと続いている。林床は高さ2〜3mのチシマザサ［*Sasa kurilensis*（Rupr.）Makino et Shibata］に覆われていた。標準地内にはヤチダモ植栽木だけではなく，ヤチダモやシナノキ［*Tilia japonica*（Mig.）Simonkai］などの広葉樹の天然木が混在していた。このうちヤチダモの天然木と植栽木だけを観察対象とし，他樹種は観察対象から除外した。観察対象としたヤチダモの樹高は10〜20mであった。胸高直径は10〜40cmであったが，そのほとんどは10〜20cmの小径木であった。標準地内の観察対象木数は179本であった（表1）。

表1　タンタシャモナイ標準地のヤチダモの凍裂数

樹種	本数	凍裂木[1]	古い凍裂の数	新凍裂の発生
ヤチダモ	179	19(22)	19	4

1）括弧内は，最終調査時の数である。調査期間中に発生した4本の新凍裂のうち1本は，古い凍裂の発生している樹幹に発生したため，3本増加している。

2）月寒標準地

標高100〜300mの丘陵地帯に位置する森林総合研究所北海道支所実験林内の二地点に標準地を設定した。ひとつは尾根筋の広葉樹二次林に設定し，もうひとつは沢沿いに設定した。但し，この実験林一帯の丘陵地の地形は概してなだらかであり，両標準地はそれぞれ顕著な尾根筋や谷筋に位置するわけではなく，むしろ北向きの緩やかな同一斜面上に位置するといった方が適切かも知れない。

尾根筋の標準地は，シラカンバが優占し，そのほかにもミズナラ［*Quercus mongolica* Fischer var. *grosseserrata*（Blume）Rehd. et Wils.］やハリギリ［*Kalopanax pictus*（Thunb.）Nakai］などの落葉広葉樹が混在する広葉樹二次林であった。谷筋の標

準地は，ケヤマハンノキ（*Alnus hirsuta* Turcz.）やヤチダモ，ハルニレ［*Ulmus japonica*（Rehd.）Sargent］を主とする渓畔林であった。両標準地内の生立木のうち，シラカンバ，ハルニレ，ミズナラ，ドロノキ（*Populus maximowiczii* A. Henry），ヤチダモ，イタヤカエデ（*Acer mono* Maxim.；変種を含む）の6樹種について，胸高直径が10 cmを超える生立木だけを観察対象とした。観察対象とした立木の樹高は10～25 mであった。胸高直径はおよそ10～40 cmの範囲にあったが，その多くは20～30 cmの中径木であった。標準地内の観察対象木は773本であった（表2）。

表2 月寒標準地の樹種構成と凍裂数

樹種	本数[1]	凍裂木	古い凍裂の数	新凍裂の発生
シラカンバ	598	2	2	0
ハルニレ	28	4	4	0
ミズナラ	94	1	3	0
ドロノキ	41	2	2	0
ヤチダモ	8	3	5	0
イタヤカエデ	14	2	4	0
計	773	14	20[2]	0

1） 胸高直径や樹高については，本文を参照。
2） 一樹幹あたりに複数の凍裂が発生している場合があったため，凍裂木数よりも数が多くなっている。

3）野幌標準地

野幌森林公園内に標準地を設定した。当森林公園は石狩平野の只中に位置し，標高約50 mのほぼ平坦な地形をもつ。公園内には原生に近い状態の天然林，小径の広葉樹からなる二次林，トドマツやヤチダモの人工造林地などの林分が含まれている。このうち，構成樹種の多い天然の針広混交林内に調査林地を設定した。この天然林内を通る林道沿いで，ウダイカンバ（*Betula maximowicziana* Regel），ハルニレ，ミズナラ，ナナカマド（*Sorbus commixta* Hedl.），ヤチダモ，トドマツ，ホオノキ（*Magnolia obovata* Thunberg）の7樹種，計50本の立木を選定し，経時観察を行った（表3）。観察対象とした立木は，樹高10～15 m，胸高直径10～25 cmの小～中径木であった。

b. 調査方法

晩秋～初冬に標準地を設定し，同時に第一回目の毎木調査を行った。このとき，凍裂をもつ個体にマーキングを行い，その割裂部の開閉の状態を観察した。その後，数日～数十日間隔で数回にわたり標準地の毎木調査を行い，新たな凍裂の発生や第一回目の調査の際にマーキングした古い凍裂の開閉の状態を観察した。調査日は，各調査期間中の気温変動をまとめた図1～3にそれぞれ記したとおりである。

表3 野幌標準地の樹種構成と凍裂数

樹種	本数[1]	凍裂木	古い凍裂の数	新凍裂の発生
ウダイカンバ	2	1	2	0
ハルニレ	6	2	2	0
ミズナラ	4	1	1	0
ナナカマド	3	1	2	0
ヤチダモ	13	1	1	0
トドマツ	19	1	1	0
ホオノキ	3	1	2	0
計	50	8	11[2]	0

1） 胸高直径や樹高については，本文を参照。
2） 一樹幹あたりに複数の凍裂が発生している場合があったため，凍裂木数よりも数が多くなっている。

調査期間中の標準地内の気温については，いずれの調査でも標準地に最寄りの気温観測施設で公表している気温データを利用した。タンタシャモナイ標準地での調査では，標準地よりも内陸側約4.5 kmに位置する問寒別の天塩地方演習林の庁舎の庭で常時観測している気温変動記録を利用した。月寒標準地での調査では，標準地から約0.5 kmの地点に位置する森林総研北海道支所庁舎で常時観測している気温変動記録を利用した。野幌標準地での調査では，標準地から約1.5 kmの距離に位置する気象庁アメダス観測地・西野幌で観測された気温変動記録[89]を利用した。

C. 結　果

a. 古い凍裂の再割裂

1）タンタシャモナイ標準地での調査

総数179本のヤチダモのうち19本に古い凍裂が認められた。いずれの凍裂木にも凍裂は1本ずつ発生していた（表1）。

10月22日の第1回目の調査の際，19本の凍裂はすべて閉塞していた。その後翌年1月30日までの3回にわたる調査で，再割裂が確認された古い凍裂の数は，19本のうち15本であった。これら15本のうち10本は12月13日，4本は12月24日，1本は1月30日の調査のときに再割裂していることが確認

された。残りの4本はいずれの調査のときにも閉塞していた。

図1に，間寒別で観測された気温変動の記録をまとめた。各棒線は各日の最低気温と最高気温を結んだものであり，一日の気温がこの棒線の範囲内で変動していたことを示す。19本の古い凍裂のすべてが閉塞していた10月22日から10本の再割裂が確認された12月13日までの期間をみると，11月19日から同23日にかけて顕著な寒波がみられ，その間の気温は−14〜+6℃で変動している。12月13日以降，さらに4本の再割裂が確認された12月24日までの期間をみると，12月21日から調査当日の12月24日までの間に気温が大きく低下しており，−19〜−2℃の範囲で変動している。12月24日以降さらに1本の再割裂が確認された1月30日までの期間では，1月中旬および同下旬に−20℃を下回る強い寒波が認められる。

2）月寒標準地での調査

総数773本の観察対象木のうち，14本に古い凍裂が認められた(表2；写真1〜6)。凍裂木の出現率は1.8%である。これら14本の凍裂木のうち11本には，1樹幹あたり1本の凍裂が認められた。残りの3本には，1樹幹に3本ずつの凍裂が認められた。従って，試験地内の凍裂の総数は20本であった(表2)。

これら20本の古い凍裂のうち，10本は12月20日の第1回目の調査のときに割裂状態であり（写真2，5)，残りの10本は閉塞していた。12月27日の第2回目の調査のときには，12月20日の時点では閉塞していた10本のうち6本の凍裂が再割裂していた。古い凍裂の再割裂が確認されたのは12月27日までであり，残りの4本はそれ以降4月3日までの数回にわたるいずれの調査時にも閉塞していた。

この標準地での調査では，再割裂を起こした凍裂が再び完全に閉じるまでの間観察を継続した。12月27日までに再割裂を起こした計16本の凍裂のうち2本は，1月15日から同月30日の期間中に閉塞したことが確認され，それ以降4月3日までのいずれの調査のときにも，閉じていた。この2本はいずれもイタヤカエデの凍裂であった。残りの14本は，3月20日から4月3日までの2週間の期間中に閉塞した（写真3，6)。

当標準地から約0.5 kmの距離にある森林総合研究所北海道支所庁舎の庭で観測された気温変動の記録を図2に示す。12月の気温をみると，12月14日から第1回目の調査を行った同月20日までの期間が，丁度この冬最初の本格的な寒波にあたっており，この期間中の気温は−11〜+2℃の範囲内で変動している。その後同月27日までの間，同月22日及び24日に日最高気温が+5℃近くまで上昇しているものの，概して気温が氷点下で推移するいわゆる真冬日が続いている。

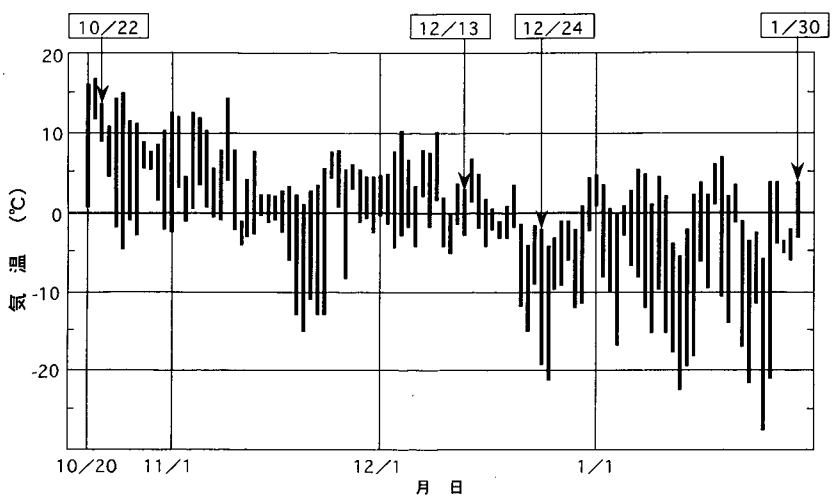


図1　1988年10月20日〜1989年1月30日の間寒別の気温変動，及びタンタシャモナイ標準地で毎木調査を行った月日

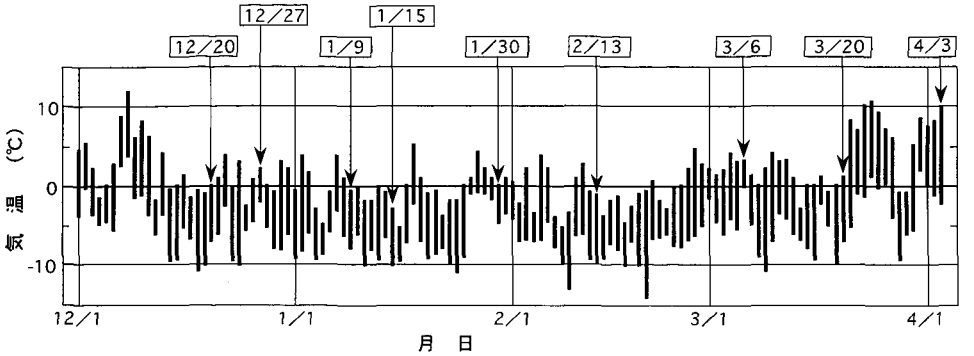


図2　1992年12月1日～1993年4月3日の月寒標準地の気温変動，及び毎木調査を行った月日

一方，再割裂を起こした凍裂が再び閉塞した頃の気温をみると，14本が再閉塞を起こした3月20日から4月3日までの2週間の期間中では，3月21日の日中から同月27日の日中にかけての気温が比較的高く，－2～＋11℃の範囲で変動している。しかし，12月中～下旬に一旦再割裂を起こした2本のイタヤカエデの凍裂が再閉塞した1月15日から同月30日の期間中，1月18日及び同27日の両日の気温が比較的高くなっているものの，概して気温は低く，真冬日が続いており，再割裂が起こった12月下旬と同程度の気温の日が多い。

3）野幌標準地での調査

50本の観察対象木のうち，8本に古い凍裂が認められた（表3；写真7～13）。これら8本の凍裂木のうち，5本には1樹幹あたり1本の凍裂が発生し，残りの3本には1樹幹あたり2本の凍裂が発生していた。従って，標準地の凍裂の総数は11本であった。

12月5日の第1回目の調査のときには，いずれの凍裂も閉塞していた。12月12日の第2回目の調査では，11本のうち1本が再割裂を起こしているのが確認されたが，残りの10本はまだ閉塞状態であった（写真7，12）。12月19日には，12月12日の時点でまだ閉塞していた10本のうち9本の再割裂が確認された（写真8，13）。翌年1月8日には，12月19日の時点では閉塞していた1本がさらに再割裂しているのが確認された。

西野幌で観測された気温変動記録[89]を図3にまとめた。11本の古い凍裂すべてが閉塞していた12月5日から，そのうちの1本の再割裂が確認された

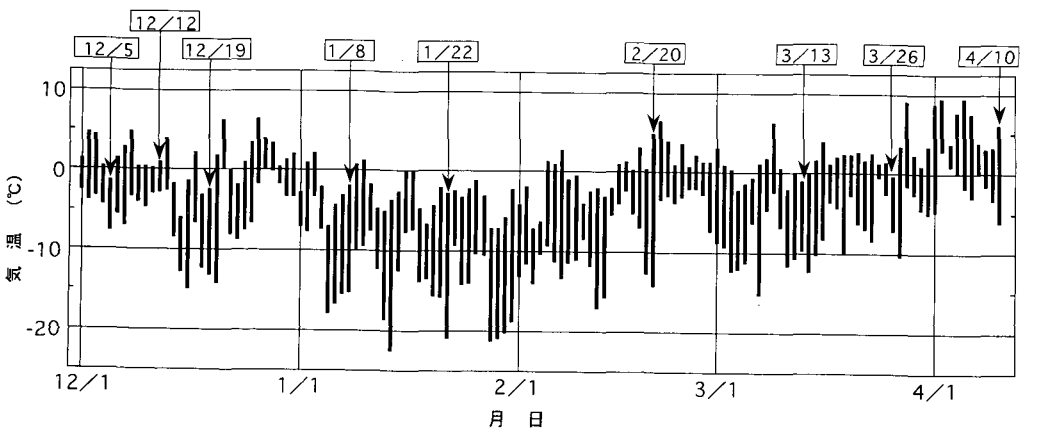


図3　1993年12月1日～1994年4月10日のアメダス観測地・西野幌での気温変動，及び野幌標準地で毎木調査を行った月日

同月12日までの期間中，気温は−7〜＋6℃の範囲内で変動している。12月12日以降，さらに9本の再割裂が確認された同月19日までの期間中，気温は−15〜＋5℃の範囲内で変動している。そして，それ以降，残りの1本の再割裂が確認された翌年1月8日までの期間では，−18〜＋7℃の範囲内で気温が変動している。

この標準地での調査でも，再割裂した凍裂が完全に閉塞するまでの間，観察を継続した。再割裂した凍裂は，再割裂が確認された月日以降，3月26日までのいずれの調査のときにも割裂部は開いていた。そして，1月8日に再割裂が確認された凍裂（ヤチダモ；表3）を除く10本は，12月19日の調査のときに割裂幅が最大を示し，それ以降では調査を重ねる毎に，概して徐々に割裂幅が減少する傾向が認められた。

写真7〜10は，ハルニレの凍裂の同一部位を，それぞれ12月12日，同月19日，1月8日，3月13日に撮影した写真である。第3回目の調査を行った12月19日直前の数日間と第4回目の調査を行った1月8日直前の数日間では，それほど大きな気温差はなく，むしろ1月8日の直前の数日間の方が幾分低い範囲で変動している（図3）。にも拘わらず，1月8日のとき（写真9）の方が12月19日のとき（写真8）よりも凍裂の割裂幅は幾分小さい。また，1月8日に再割裂が確認されたヤチダモの凍裂の割裂幅は，1月8日に最大を示し，これ以降では概して徐々に減少する傾向が認められた。

再割裂を起こした凍裂は，いずれも3月26日から4月10日までの期間中に閉塞したことが確認された。この期間中，4月1日以降の気温が概して高くなっており，とりわけ4月1日の日中から同月5日の日中までの間では気温は氷点下に低下せず，ずっとプラスの範囲内で変動している。

b. 新凍裂の発生

写真14は，タンタシャモナイ標準地での調査期間中に新たに発生した凍裂（以下，新凍裂と略記する）をもつヤチダモである。この割裂部の接写写真を写真15に示す。正常な樹皮表面に凍裂が発生しており，樹幹表面の凍裂の割裂部沿いには古い凍裂の割裂部付近（写真1〜13）で認められるような凍裂樹皮部が全く認められない。このように，新凍裂とは，凍裂樹皮部が認められないという外観に基き判断している。

タンタシャモナイ標準地での調査期間中，標準地内の179本の観察対象木のうち，4本に新凍裂が発生した。これら4本の新凍裂は，いずれも別々の立木に発生した。このうち3本は古い凍裂をもたない樹幹に発生したが，残りの1本は古い凍裂をもつ樹幹に発生した。従って，本調査期間中，標準地内では凍裂木が3本増えたことになる。計4本の新凍裂のうち，1本は12月13日，1本は12月24日，残りの2本は翌年1月30日の調査のときに，それぞれ発生していることが確認された。

月寒標準地，及び野幌標準地での調査では，調査期間中に新凍裂の発生は認められなかった。

D. 考　　察

気温は，地形や風向き，雲量などの微気象的要因により近接地点間で大きく異なる場合がある。3回にわたり行った野外調査では，いずれも調査地の気温そのものを観測したわけではなく，最寄りの気象観測施設の記録を利用している。そのため，調査地の実際の気温と本研究で利用した記録との間には開きがあることが考えられる。従って，古い凍裂は気温がある一定の臨界温度よりも低下したときに再割裂するのか，といった定量的な評価を本結果から行うことは困難である。しかし，一冬期間内における凍裂発生の時期，並びに凍裂発生の気象条件について，本結果を手掛かりに以下のとおりにいくつかのことを指摘できるだろう。

a. 古い凍裂の再割裂

タンタシャモナイ標準地の調査では，標準地内で認められた19本の古い凍裂のうち15本が調査期間中に再割裂を起こしたことが確認された。これら15本のうち12月13日に再割裂しているのが確認された10本は，10月22日の第1回目の調査の際には閉じていたことから，10月22日から12月13日までの期間に発生したことが明かである。この期間中，11月19日から同23日にかけて顕著な寒波がみられ（図1），問寒別で気温は−14〜＋6℃の範囲で変動し，いずれも日最低気温が−10℃を下回っている。これらの10本はこの寒波のときに再割裂を起こしたことが考えられる。

12月24日の調査の際には，さらに4本が再割裂を起こしているのが確認された。これらの4本については，12月13日から同24日の期間中に再割裂を起こしたことが第一に考えられる。しかし，11月19〜同23日の寒波のときに一旦再割裂を起こしな

がらも，それ以降11月末から12月初めにかけての比較的温暖なときに閉じ，その後12月24日近くになって割裂部が開いた可能性もある。

1月30日の調査の際に再割裂が確認された1本についても，12月24日に再割裂が確認された4本の場合と同様に，(1)12月24日から1月30日の期間中に再割裂を起こしたこと，(2)12月中旬までに一旦再割裂を起こしながらも，それ以降の比較的温暖なときに閉じ，その後12月末から1月下旬にかけて割裂部が開いたこと，が考えられる。しかし，12月24日直前の数日間の気温は−2〜−15℃で変動しており，かなり低くなっていることから，12月中旬までに再割裂を一旦起こしながらもこのときに閉じていたことは考え難い。12月24日から1月30日の期間中に再割裂を起こした可能性が強い。

月寒標準地での調査では，20本の古い凍裂のうち16本で再割裂が認められた。このうち，12月20日の第1回目の調査のときにすでに割裂部が開いていた10本の凍裂については，秋季に凍裂の割裂部が閉じていることを確認していないことから，夏期にも閉じることなく開いた状態のままで経過していた可能性を否定できない。しかし，(1)露出した破断面やササクレた材組織が木材の木肌本来の色調を呈し，変色を起こしていないこと（写真2；矢印），(2)3月末から4月初めにかけての期間の気温の上昇により，いずれも完全に閉塞した（写真3，6）ことから，前成長期に一旦癒合した古い凍裂が，この第1回目の調査の直前に再割裂を起こしたものと判断される。一方，12月27日に再割裂が確認された6本は，明らかに12月20日以降同月27日の期間に再割裂を起こしたものと判断される。月寒標準地で古い凍裂の再割裂が起こったと考えられるこの12月中旬〜12月27日の期間中，気温は−11〜+4℃の範囲内で変動している。

野幌標準地の調査では，標準地でみられた計11本の古い凍裂すべてが調査期間中に再割裂を起こした。このうち12月12日に再割裂が確認された1本は，12月5日から同月12日までの1週間の期間中に発生したものと判断される。12月19日に再割裂が確認された9本は，12月12日から同月19日までの1週間の期間中に再割裂を起こしたものと推定される。12月5日から同月12日までの期間中の気温は−7〜+6℃の範囲内で変動しており，続いてさらに9本が再割裂を起こしたと推定される12月12日から同月19日までの1週間の期間中の気温は−15〜+5℃の範囲内で変動している。

いずれにせよ，この調査期間中に再割裂を起こした古い凍裂の多くは，12月中旬までに再割裂を起こしている。古い凍裂の再割裂は初冬の数日〜数十日の期間内に集中的に起こる傾向があることは確かである。

これら古い凍裂の再割裂は，1晩や1日といった非常に限られた時間内に一斉に再割裂を起こしているわけではない。数日〜数十日の比較的長時間内に徐々に再割裂を起こしている。その期間中，いずれの調査地でも−20℃を下回るような著しく気温の低い日があったことは考え難い(図1〜3)。また，とくにタンタシャモナイ（図1）及び野幌（図3）の調査では，古い凍裂の多くが再割裂を起こした初冬の期間中の気温の日較差は，厳冬期の気温の日較差と比較して小さい傾向がある。従って，古い凍裂の再割裂には，一時的に著しく気温が低下することよりも，−数〜−10℃程度の気温がある程度長い期間（数日間）にわたり継続することが大きく寄与していると判断される。

今川[84]，今川ら[73]，及川ら[72]は，スギの古い凍裂の再割裂はある程度の低温が長時間にわたり積算されたときに引き起こされると見做している。今川ら[73,74]，石田[6,10,17]は，古い凍裂の再割裂には樹芯部の凍結が大きく寄与していることを示唆している。また，NEELY-HIMELICK[64]は，古い凍裂は樹幹の凍結・融解に応じてそれぞれ開口・閉塞を起こすという観測結果を得ている。そして，その結果を基にして，凍裂（frost crack）のことを“feeze-crack”と呼ぶ方が適切であると提案している。これらの指摘のとおりに，古い凍裂の再割裂には，気温の急激な低下による樹幹外層部の局所的な材の熱収縮や低温乾縮よりも，樹幹の凍結が大きく寄与していると考えられる。

b. 新凍裂の発生

新凍裂の発生は，タンタシャモナイ標準地でのみ認められ，他の2標準地での調査では認められなかった。タンタシャモナイ標準地での調査で認められた計4本の新凍裂のうち，12月13日に発生していることが確認された1本は，気温が−14〜+6℃の範囲内で変動していた11月19日から同月23日にかけてのこの冬最初の寒波のときに発生したものと判断される（図1)。12月24日に確認された1本

は，12月21日から始まったこの冬2回目の本格的寒波の際に発生した可能性が強い(図1)。1月30日に新たに確認された2本は，12月24日の調査直後，または1月中～下旬の－20℃を下回る著しい低温により引き起こされた可能性が強い。

12月13日にすでに1本の新凍裂の発生が確認されたことは，とりわけ重要な結果である。新凍裂は，古い凍裂の再割裂の場合よりもはるかに低い温度下で発生するという旨の記載が，文献に見られる[6,10,65]。しかし，12月13日に確認された新凍裂が発生した期間中には，気温が－14～＋6℃の範囲内で変動していた11月19日から同月23日にかけての寒波のほかには，際立った寒波は認められない。新凍裂は決して氷点を大きく下回るような著しい低温下で発生するとは限らず，古い凍裂の多くが再割裂するのと同時期（初冬）に，－10度を幾分下回る程度の気温条件下で発生する場合があることは確かである。

このように，新凍裂の発生は，気温が著しく低下するとき，あるいは急激に大きく低下するときに限って発生するわけではない。従って，気温の著しい低下，あるいは気温の急激な低下が凍裂発生の不可欠の要因になっているとは考え難い。凍裂の発生に不可欠の要因として，さらに別の因子を検討する必要がある。

III. 凍裂樹幹の内部構造

A. 概　説

凍裂は冬期に著しく気温が低下するようなある地域のすべての林木に発生するわけではない。また，樹種間でその発生頻度に差異が認められ，凍裂が多発する樹種があることは確認されているが，凍裂は特定の樹種のすべての立木に必ず発生するわけでもない。さらに，凍裂は地際から梢端までの樹幹の全域にわたり一続きの割裂として発生するわけではない。一凍裂木内においても，地際などの特定の部位に1～2 mの限られた長さをもつ割裂として発生することが多い[6,8-12]。

石田[10]は，気象条件が同一であると考えられる相隣接する個体群のなかでも，一部の立木だけが凍裂を起こしていること，及び凍裂は特定の樹幹の限られた部位にだけ発生することから，凍裂の発生要因は気温などの気象条件だけでは説明できないという見方を述べている。そして，凍裂の発生要因として，凍裂が多発する樹種と凍裂が発生し難い樹種との間での樹幹の内部構造の違い，あるいは同一樹種でも凍裂をもつ樹幹と凍裂をもたない樹幹との間での内部構造の相違などについて検討すべきであるという見解を述べている。この指摘のとおりに，凍裂の発生要因を解明するためには，気温条件などの外部因子や木材の一般的な熱膨張・収縮理論だけから検討するのではなく，凍裂木だけに備わっている単木的な構造的，物性的特性，あるいは一凍裂木の樹幹内部のなかでも凍裂が発生している部位に限って局所的に備わっている構造的，物性的特性を検討していくことは不可欠なことだろう。そのための基礎的知見を得ることを目的として，本章では，凍裂木の内部構造や樹幹形態の特徴について検討する。

これまでに，凍裂の発生と樹幹の内部構造，あるいは凍裂の発生と樹幹形態との関連に言及している報告は数多く見られる。そのうち，凍裂の発生と高含水率心材との関連を示唆する報告は少なくない。石田[9,10,17]は，トドマツやオヒョウの凍裂木の樹幹内部には，例外なく著しく発達した高含水率心材部が形成されていること，並びに高含水率心材部を凍結状態で観察すると氷の詰まった内部割れが数多く発生していることを報告している。加納・蕪木[90]は，トドマツの凍裂木についてほぼ同様な観察結果を報告している。後年，これと同様な特徴が同じくトドマツの凍裂木で再確認され[22,75]，さらにスギの凍裂木[27,68-71,87]やヤチダモの凍裂木[23,24]でも観察されている。

これに対し，凍裂の発生と樹幹内部の傷痕との間には密接な関連があるという見方も根強い。ふるくには，CASPARY[55]が両者の密接な関連について述べており，近年ではBUTIN・SHIGO[40]，BUTIN・VOLGER[41]が，コナラ属の樹種の凍裂樹幹の内部には例外なく傷痕が認められることを確認し，その結果から凍裂の発生と傷痕との間には密接な関連があると結論している。後藤・中村[27]は，スギ凍裂木の樹幹内部の特徴を多くの凍裂木について調べた結果，多くの凍裂木で傷痕が認められること，その傷痕の樹幹内での存在位置から，初めて凍裂が発生する以前に凍裂木の樹幹は何らかの損傷を受けていたと判断されることを報告している。KUBLER[63]は，凍裂木の内部には一般には氷の詰まった内部割れは認められていないという文献調査の結果を述べ，一方で樹幹の損傷については，損傷部でまず“wound

crack”という内部割れが発生し，この割れの末端部で応力集中が起こるなど，力学的に弱点として作用することにより凍裂の発生に大きく寄与するという見解を表明している。

また，樹幹の外部形状と凍裂の発生との関連について指摘している報告例もある。BUSSE[42]は，凍裂の発生パターンとして，地際に発達する複数の根張りの間の窪みの部分が割裂する傾向が強いことを述べている。石田[9,10]は，樹幹の折損部や二股部などに関連して凍裂が発生している場合が比較的よくみられることを報告している。後藤・中村[27]は，先折れや幹曲がりなどの多い林分では凍裂の発生率が高いことを報告している。

以上のように，凍裂の発生と樹幹の内部構造，樹幹形態との関連についてはいくつかの報告があるが，一致した見解が得られているわけではない。(1)水食い材や内部割れ，(2)傷痕，(3)樹幹形態，と凍裂の発生との関連がこれまでに指摘されている。本章では，筆者がこれまでに観察する機会をもった凍裂木の樹幹形態や内部構造の特徴についてまとめ，さらに一凍裂木のなかでも凍裂が発生している部位とそれが発生していない部位との間の内部構造の違いなどについても整理し，これまでに指摘されている(1)水食い材や内部割れ，(2)傷痕，(3)樹幹形態，と凍裂の発生との関連について検討を行った。

B. 研究方法

a. 材　料

観察試料は，トドマツ，ヤチダモ，エゾニワトコ[*Sambucus sieboldiana* var. *miquelii* (Nakai) Hara]，ミズナラ，シラカンバ，ユリノキ(*Liriodendron tulipifera* L.)の6樹種，22本の凍裂木である(表4)。この観察のために伐採した凍裂木に加え，凍裂発生の時期と気温の調査(II章)のとき，凍結・融解過程での水食い材部の膨張・収縮の挙動を明らかにするための実験(IV章；後述)やCryo-SEM観察(V章；後述)のための試料採取のとき，そのほかにも全く別の目的で立木を伐採したときなど，これまでに機会がある毎に観察と写真撮影を行った凍裂木を含んでいる。各試料の概要は，表4のとおりである。

b. 凍裂樹幹の水分分布

計22本の供試木うち，円板の状態で入手した試料を除く16本の凍裂木について(表4)，凍裂を含む樹幹の水分分布を検討した。それぞれの凍裂木について，凍裂を含む樹幹部位の1～4箇所での水平方向の水分分布を，全乾法による含水率の測定，または軟X線写真観察により調べた。含水率の測定，並びに軟X線写真観察の手順は次のとおりである。

1) 含水率測定

凍裂を含む丸太より，厚さ約5 cmの円板を鋸で切断した。この円板から，凍裂の割裂部に沿って，髄を通り反対側の樹皮部までを含む，接線方向の幅が約5 cm，樹軸方向の厚さが約5 cmの帯状の材片を鉈で割り取った。これを放射方向に0.5～1 cm間隔でブロック分割し，各ブロックの生材重量を測定した。続いて，105℃，48～72時間の条件で乾燥し，全乾重量を測定した。これらの測定値より，各ブロックの全乾重量基準の含水率を算出し，放射方向の含水率変動を検討した。

2) 軟X線写真観察

凍裂をもつ丸太より厚さ約15 cmの円板を鋸で切断した。この円板から，さらに凍裂部を含むように接線方向の幅が約8 cmの帯状の材片に分割した。この帯状材片から丸鋸で樹軸方向の厚さが2～4 mmの薄材片を作製した。この際，一部の試料については丸鋸で切断する前に帯状材片を液体窒素中に浸漬して極低温まで冷却しておき，鋸断のときに試料が融解するのをできるだけ防ぐようにした。こうして得られた薄材片を軟X線フィルム(X-ray FR；FUJI)の入ったフィルムケースに上に載せ，管電圧20 kV，管電流5 mA，照射距離1.3 m，照射時間2分～3分30秒の条件で軟X線発生装置(IE型；大日本ソフテックス)により軟X線の照射を行った。フィルムを現像(Rendol；FUJI；20℃，5～8分)した後，印画紙に反転し，得られた写真の濃淡により水分分布を検討した。

c. 樹幹の内部構造の観察

6樹種，22本のすべての試料について観察を行った。厚さ10～30 cmの円板の状態で入手した試料は半ば乾燥した状態で観察を行ったが，残りの試料については生材状態で観察を行った。生材状態で観察した試料のうち，トドマツ1～5，ヤチダモ6～8，エゾニワトコ1，2(数字は供試木の個体番号を示す，表4参照)については，凍結状態で観察し，このほかの試料については融解状態で観察を行った。いずれも，円板や丸太の木口面を電動カンナやノミで平滑に仕上げ，凍裂の割れの深さ，高含水率心材の分布，内部割れの分布，損傷や枝節などの欠点の

表4　供試木の概要

樹種	個体番号	胸高直径(cm)	樹高(m)	凍裂[2]	凍裂の出現地上高部位(m)	高含水率心材部の有無[3]	内部割れの発生 放射状	内部割れの発生 目回り	樹幹形態
トドマツ	1	29	25	新	0.1～1	有(水食い材)	○	○	
	2	25	23	旧	0.3～2.3	有(水食い材)	○	○[5]	
	3	14	9	旧	0.9～1.3	有(水食い材)	○	○[5]	被圧木，枝痕が多い
	4	20	16	旧	0～1.5	有(水食い材)	○	○[5]	
	5	38	15	旧	7～8	有(水食い材)	○	○	
ヤチダモ	1	28	22	新	0.1～0.9	有(多湿心材)	○		
	2	35	24	新	0～0.5	有(多湿心材)	○	○	
	3	26	21	旧	0～1.3	有(多湿心材)	○		
	4	16	18	巻	0.5～1.8	有(多湿心材)	○	○	
	5	32	23	旧	0～1.4	有(多湿心材)	○	○	
	6	17	—	旧	0～1.8	有(多湿心材)	○	○	折損木
	7	13	9	旧	0.3～1.8	有(多湿心材)	○	○	
	8	11	—	旧	0.7～1.1	有(多湿心材)	○	○[5]	大きな枝痕をもつ
	9[1]	—	—	旧	—	—	○		
	10[1]	—	—	旧	—	—	○		
	11[1]	—	—	旧	—	—	○	○	
	12[1]	—	—	巻	—	—	○	○[5]	
エゾニワトコ	1	3	2	旧	1.0～1.3	有[4]	○	○	
	2	8	3	旧	0.1～1.2	有[4]	○		枯枝が多い
ミズナラ		12	—	旧	1～2.2	有(水食い材)	○		
シラカンバ[1]		—	—	旧	—	—	○		
ユリノキ[1]		—	—	旧	—	—	○	○	

1)　これらの試料は円板で入手したため，胸高直径，樹高などは不明である。また，高含水率心材部の有無を実験的に確認していない。

2)　新；凍裂樹皮が認められない凍裂。
　　旧；凍裂樹皮が形成されている凍裂。
　　巻；凍裂の巻き込みが完了しているもの。

3)　含水率測定または軟X線写真観察によりその有無を確認したものについてのみ記載した。

4)　エゾニワトコについては，多湿心材樹が否かは不明である。

5)　これらの凍裂木には，心材の中～外層部に目回りが著しく発達し，凍裂の内端がその目回り部に位置する，という特徴が認められた。

分布について，観察と写真撮影を行った。

d. 一凍裂木樹幹内での水食い材と内部割れの分布の変動

一凍裂木樹幹内において，凍裂が発生している部位と凍裂が発生していない部位との間で内部構造に違いがあるのか否かを検討するために，この観察を行った。

材料として，2本のトドマツ凍裂木を使用した(表4；トドマツ1，2)。トドマツ1には，樹幹東側の地上高10 cmから1 mの範囲に凍裂が発生していた。樹幹表面の凍裂割裂部近辺には凍裂樹皮や樹脂の浸出がみられないことから，この凍裂は試料採取を行った冬季に新たに発生した凍裂であると判断された。トドマツ2には樹幹南東側の地上高30 cmから2.3 mの範囲に凍裂が発生していた。樹幹表面の凍裂割裂部近辺に樹脂の浸出や凍裂樹皮が認められ，この凍裂は発生後少なくとも数年は経過しているものと推定された。

トドマツ1は1986年12月末に採取し，トドマツ2は1987年2月中旬に採取した。いずれの供試木

も，伐採後直ちに地際から地上高約3mまでの範囲の樹幹を5～50cm間隔に玉切りし，そのまま凍結状態で保存した。

採取後3日以内のとくに寒い日を選び，屋外で以下の作業を行った。まず，樹幹の地際部から地上高約3mの部位までの範囲にわたり，15～50cm間隔で円板を採取し，凍結状態のまま木口面を電動カンナで平滑に切削した。各円板の木口面に透明なプラスチックシートをかけ，肉眼的に認め得る割れや水食い材部や枝節，着色材部などの輪郭を，油性の極細マジックペンにより手書きで写し取り，断面トレース図を作成した。尚，辺材や水食い材のような含水率の高い材部は乾燥心材とは異なる色調と光沢をもつことが報告されている[9,10]うえ，本研究でも含水率の測定によりそれが確認されたため（後述），水食い材部の輪郭は目視により写し取った。この原図を縮小コピーにかけ，整理し，凍裂や水食い材，内部割れの樹幹内での3次元的な分布状態を検討した。

e. 凍裂割裂部付近の傷害組織

供試木は，トドマツ凍裂木2本（トドマツ1，2；表4），及びヤチダモ凍裂木3本（ヤチダモ1～3；表4）である。トドマツ1，2については，4部位（凍裂の上・下端および凍裂の中央部付近2箇所）について観察を行った。ヤチダモ1～3については，1部位（凍裂の中央部付近）で観察を行った。検鏡試料の作製～写真撮影の手順は次のとおりである。

厚さ約5cmの円板から，凍裂の割裂部を完全に含むように接線方向の幅が約5cmの帯状材片を採取し，FAA（50%エタノール：ホルマリン液：酢酸＝90：5：5）で固定した。流水で洗浄した後，30%エタノール水溶液に保存した。保存試料より凍裂の割裂部を含む小ブロック（接線方向の幅約1cm，放射方向の長さ約2cm，軸方向の厚さ約2cm）に整形し，このブロックよりスライディング式ミクロトームで厚さ10～25μmの木口面切片を薄切した。得られた切片を1%サフラニン水溶液で染色し，水で洗浄の後，エタノールシリーズで脱水した。続いてキシレンで透撤の後，スライドグラス上に載せ，ビオライトで封入し，永久プレパラートを作製した。大型マクロ写真装置及び通常の光学顕微鏡により，検鏡と写真撮影を行った。

C. 結　果

a. 凍裂樹幹の含水率

含水率の測定または軟X線写真観察により，この実験に供試した4樹種16本の凍裂木すべてに，水食い材部や多温心材部が認められた。軟X線写真観察では，それらの高含水率心材部に目回りや放射状の内部割れが数多く発生している状態も観察された。以下に，トドマツとヤチダモの凍裂樹幹を例として挙げ，詳述する。

図4に，トドマツ1（表4）の含水率測定結果，及びこの測定のための試料を採取した部位に近接する地上高部位の木口面を凍結状態で撮影した写真を示す。辺材部では含水率の値が一定して高く，200%前後である。辺材から心材部へ進むと含水率は，50%以下まで急激に低下している。さらに髄近くまで進むと含水率の値は再び上昇し，材部の色調も変化している。凍裂が発生している側では，含水率が200～250%で変動しており，凍裂の発生していない側よりも一定して多湿になっている。

写真16は，伐採以降一度も融解させずに凍結保存しておき，撮影用の薄材片を作製する際にもできるだけ融解を防ぐ処置を行ったトドマツ凍裂樹幹（トドマツ4；表4）の軟X線写真である。辺材部では，凍裂の割裂部付近を除き，軟X線吸収が一定して高い。心材部では，最外の数年輪の範囲で層状に軟X線吸収の低い領域が認められる。しかし，心材部のこのほかの領域では軟X線吸収が辺材部よりもさらに一定してムラなく高くなっている。軟X線吸収の高い水食い材部には，数多くの放射状の内部割れ（小矢印）や目回りが認められ，水食い材部の外層部にはとりわけよく発達した目回り（大矢印）が認められる。

写真17，18は，それぞれヤチダモの新凍裂木（ヤチダモ1；表4），古い凍裂木（ヤチダモ3；表4）の生材軟X線写真である。これらの軟X線写真は，融解状態で撮影したものである。いずれも，多湿心材部が認められる。多湿心材部には，凍裂とは別に，比較的サイズの大きい放射状の内部割れ（矢印）が認められる。

b. 凍裂の深さと内部割れの発生形状

6樹種，22本の供試木について観察を行った結果，すべての試料で例外なく，心材部には目回りや放射状の内部割れが発生しているのが認められた。とくに生材・凍結状態でこれらの内部割れを観察すると，その空隙には氷が詰まっていた。内部割れの発達形状は様々であり，微少な放射状の内部割れが

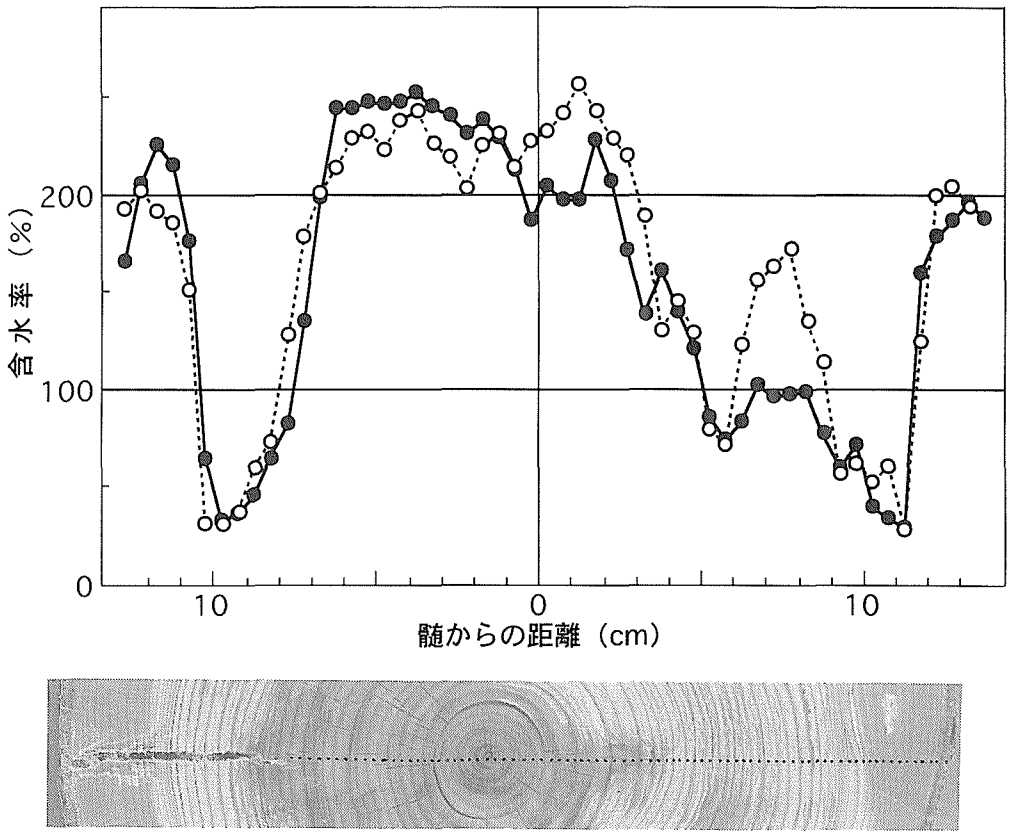


図4　トドマツ凍裂樹幹（トドマツ1；表4参照）の含水率。写真は含水率の測定部位に相当する樹幹横断面である
—●—；写真の点線よりも上側の材部の含水率
—○—；写真の点線よりも下側の材部の含水率

数多く発生するもの（写真19，20），比較的サイズの小さい目回りと放射状の内部割れの両者が数多く発生するもの（写真21，22），比較的サイズの大きい放射状の内部割れが少数発生するもの，高含水率心材部の外～中層部に目回りが著しく発達するもの（写真23），などが認められた。

内部割れの発達形状と凍裂の深さとの間に関連が認められ，とくに目回りの出現位置とサイズが凍裂の深さに影響を与えているようであった。水食い材部の外～中層部に目回りが著しく発達する場合，凍裂の内端がその目回り部にとどまり，それよりも内部深くには達しないという特徴が認められた（写真23）。これに対して，目回りが形成されていない，あるいは目回りの発達程度が小さい場合には，凍裂の内端部が水食い材部の外層部にとどまっている場合が多かったものの（写真19～22），凍裂が髄付近まで達している場合も観察され，凍裂の深さは変化に富んでいた。

このような特徴は，小径の低木の場合でも同様に認められた。写真24，25は，エゾニワトコ凍裂木（エゾニワトコ1；表4）の凍裂割裂部のそれぞれ中央部，上端部付近の樹幹横断面である。髄，及び髄と二次木部の境界部付近にジクザグに走行する目回りが認められ，凍裂の内端がこれらの目回り部にとどまっている（矢印）。凍裂の発生している側とは反対側の材部でも年輪境界部に走行の滑らかな目回りが発生しており，いずれの目回りの空隙にも氷晶が詰まっている。また，凍裂の上端部付近では，髄の一部が欠落した空洞の部分に氷晶が充満している（写真27）。

c. 一凍裂木樹幹内での内部構造の変動

両供試木ともに，一凍裂木樹幹内において，凍裂の発生している部位と凍裂の発生していない部位との間で，内部構造的な違いが認められた。凍裂の発生している部位では，凍裂の発生していない部位と比較して，水食い材がよく発達しており，水食い材部には目回りや放射状の内部割れが数多く発生していた。

図5は，トドマツ1(新凍裂木)の断面トレース図である。各断面図において，最外部の幅の狭い層は樹皮，その内側の樹皮と同心円状に走行する実線は辺・心材の境界，さらに内側の実線で囲まれた不定形の領域は水食い材部，散在する点線部は枝節や着色材部を示している。また，矢印は凍裂，矢尻は樹幹北側，数字は地上高を示している。

いずれの断面でも水食い材が認められる。水食い材の発達程度は，凍裂を含む地際から地上高約1m付近までの地上高部位とそれよりも上部とでは，大きく異なっている。凍裂を含む範囲(地上高5，30，50，60，80 cm)では，水食い材がよく発達し，その輪郭が類似している。これに対して，凍裂の上端付近にあたる地上高105 cmでは，水食い材はよく発達しているものの，その分布形状は若干異なっている。さらに上部の地上高155，205 cmの地上高部位では，それよりも下部の領域と比較して水食い材の発達がはるかに小さく，形状も不規則である。水食い材部には多くの内部割れが発生しており，内部割れの発達程度にも地上高1mよりも低い凍裂を含む領域とそれよりも上部の凍裂を含まない領域との間で，違いが認められる。凍裂を含む領域では，凍裂を含まない領域と比較して，内部割れの数が多い。

また，凍裂の上端部付近に相当する地上高1mの樹幹横断面では，凍裂の割れが樹幹表面までは達していず，形成層付近にとどまっている状態が観察された。地上高1mの樹幹横断面については断面トレース図を作製していないため，この状態について写真26に写真で示した。

図6には，トドマツ2(古い凍裂木)の断面トレース図を示す。水食い材の分布状態には，上述の新凍裂木のそれと概ね同様な傾向が認められる。しかし，新凍裂木のそれと比較して，凍裂が発生している樹幹部位(地上高195 cm以下の断面)での水食い材の分布形状が不規則であり，地上高毎に水食い材部の輪郭の形状がかなり異なっている。そのうえ，凍裂の認められない地上高260 cmの断面でも，水食い材がよく発達している。一方，内部割れの発達の仕方は新凍裂木のそれとほぼ同様であり，凍裂を含む領域では，凍裂を含まない領域と比較して，内部割れの数が多く，サイズの大きいものが認められる。

d. 傷痕との関連

一部の試料で枝節や変色が認められたほかには，傷痕はほとんど認められなかった。樹芯部に枝節や変色が認められる場合でも，その発生の仕方は散発的であり，これらの欠点から樹皮方向へ凍裂が発生するなどの，凍裂との一定の位置関係を示す傷痕は認められなかった。また，古い凍裂木の霜腫れ部には特徴的な傷害組織や年輪構造が認められた。霜腫れ部以外でも凍裂の割裂部に沿って軽微な傷害組織が認められる場合があった。以下に観察例を示しながら詳述する。

1) 肉眼的特徴

古い凍裂木の霜腫れ部に変色，年輪構造の異常，傷害組織の発生が認められた(写真18，21，23)。樹幹表面の凍裂の割裂部に凍裂樹皮が認められないことから新凍裂であると判断された凍裂をもつ樹幹でも，凍裂の割裂部付近の材組織で着色や年輪構造の異常，傷害組織の発生が認められるものがあった(図4；写真17 b，19)。いくつかの試料では，樹芯部に顕著な傷痕が認められた(写真23，アステリスク)。しかし，このように傷痕が認められた場合でも，樹芯部に著しい傷痕が存在し，凍裂がその傷痕部から進展するなどの，位置的に関連があると判断されるような場合は観察されなかった。

2) トドマツ凍裂木の凍裂部近辺の傷害組織

トドマツ凍裂木の霜腫れ部の年輪構造の特徴として，(1)年輪イニシャル部の割裂部付近での傷害柔組織と傷害樹脂道の出現，(2)仮道管径の減少，(3)放射組織の走行変化と複列化，が観察された。写真27は，トドマツ2(古い凍裂木)の霜腫れ部と正常材部との境界部付近の光顕写真である。矢印を境として，年輪構造が著しく異なっている。矢印から樹皮側へ向かって1つめの年輪では，年輪幅が凍裂の割裂部付近で局所的に著しく変動している。年輪のイニシャル部では，凍裂破断面に近接する領域に傷害柔組織が形成されており，これよりもさらに凍裂破断面から遠ざかると傷害樹脂道となって続いてい

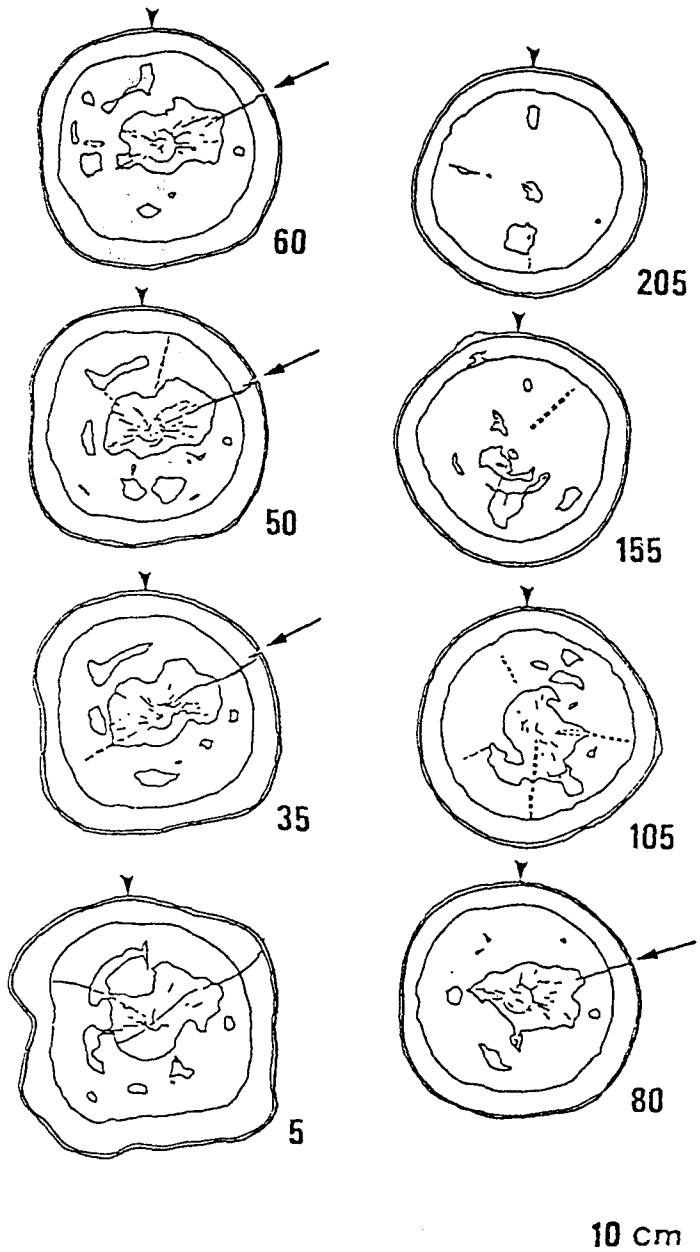


図5　トドマツ1（新凍裂木）の断面トレース図
数字；各断面の地上高（cm）
矢印；凍裂
矢尻；樹幹北側

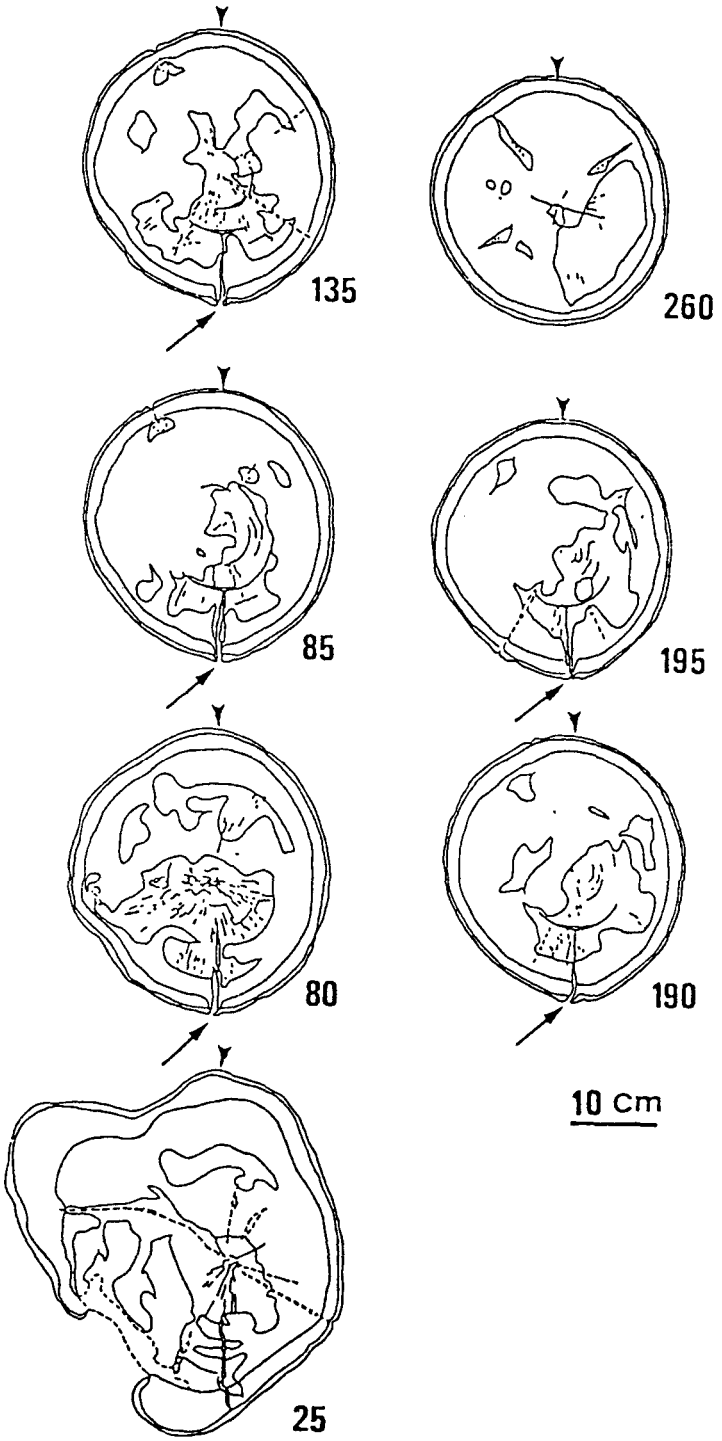


図6 トドマツ2（古い凍裂木）の断面トレース図
数字；各断面の地上高（cm）
矢印；凍裂　　矢尻；樹幹北側

る。これらの傷害組織よりも樹皮側では，年輪の中央付近に傷害樹脂道が発生しているほかには，傷害組織は認められず，トドマツ材の本来の構成要素である仮道管と放射組織から構成されている。しかし，仮道管径が正常材部のそれと比較して減少してるうえ，放射組織の走行が扇のかなめ状に変化している。矢印から2つめの年輪では，年輪中央部で傷害樹脂道が発生していないことを除き，矢印から1つ目の年輪と同様な特徴が認められる。

写真28は，同じくトドマツ2（古い凍裂木）の霜腫れ部の中央部の光顕写真である。上述の特徴的構造が認められ，そのほかにも複列の放射組織(矢印)が認められる。

一方，霜腫れ部よりも髄側の正常材部の凍裂破断面付近でも，傷害組織が散発的に発生していた。但し，霜腫れ部に認められた上述のような顕著で特徴的なものと比較して，いずれも軽微なものであった。写真29に，写真27と同一樹幹の別の地上高部位の霜腫れ部と正常材部との境界部付近の光顕写真を示す。割裂部の年輪イニシャル部に軽微な傷害組織が認められる（写真29，矢印)。写真30は，この傷害柔組織の拡大像である。

写真31，32には，写真27と同一切片のさらに髄側の領域を示す。霜腫れ部と正常材部との境界（写真27，矢印）よりも8年輪髄側の年輪のイニシャル部の割裂部付近に，傷害樹脂道が認められる（矢印)。しかし，その出現範囲は狭く，凍裂の破断面から接線方向へごく限られた範囲にだけ発生している。また，割裂部に沿った局所的な年輪幅の拡大や傷害柔組織の発生などの，霜腫れ部に認められた顕著で特徴的な年輪構造の異常は認められない。

これと同様な軽微な傷害樹脂道は，凍裂樹皮が認められないことから新凍裂木であると判断したトドマツ1において，樹幹表面に近い部位の割裂部付近の材組織でも認められた。写真33に，その一例を示す。最外年輪の年輪幅が一定せず，割裂部付近で局所的に拡大している。そのうえ，早材から晩材への移行部付近で，傷害樹脂道が形成されている（写真33，矢印)。一方，仮道管径の著しい減少や放射組織の走行変化などの，霜腫れ部で認められた顕著で特徴的な異常構造のいくつかは認められない。

3）ヤチダモ凍裂木の凍裂部付近の傷害組織

ヤチダモ凍裂木の霜腫れ部の年輪構造の特徴として，(1)年輪イニシャル部の割裂部付近での傷害柔組織の出現，(2)軸方向要素の細胞径の減少，(3)木繊維や道管の細胞内腔の充塡，(4)放射組織の走行変化，が観察された。写真34に，ヤチダモ3（古い凍裂木）の霜腫れ部と正常材部との境界部を含む凍裂割裂部近辺の材組織を示す。この写真には完全な年輪が二つ含まれるが，このうち上側の年輪の構造は正常材とは明らかに異なっている。年輪イニシャル部の割裂部近辺に傷害柔組織が認められる（矢印）のに加えて，割裂部に近い領域で，孔圏道管径の減少や放射組織の走行の変化などの異常構造が認められる。

写真35は，霜腫れの中央部の光顕写真である。上述と同様な組織構造的特徴が認められるのに加えて，割裂部に近付くのにつれて年輪幅が拡大している。

写真36は，写真35の一部を拡大したものである。年輪イニシャル部の傷害柔組織が薄壁の細胞から構成されること，割裂部からやや距離を隔てた領域で多くの細胞内腔がサフラニンに強く染色される物質で充塡されていることなどが特徴として認められる。

霜腫れ部は，以上のような特徴的な傷害組織や構造をもつ年輪から構成されていた。一方，トドマツの新凍裂木の場合と同様に，凍裂樹皮が認められないことから新凍裂木であると判断されたヤチダモでも，このような霜腫れ部で認められた顕著で特徴的な傷害組織とは別に，凍裂割裂部付近の材組織に軽微な傷害組織が発生している場合があった。

写真37，38は，ヤチダモ1の凍裂部近辺の材組織である。この新凍裂木では，凍裂の割裂部近辺での傷害柔組織の形成や道管径の減少などの，古い凍裂木の霜腫れ部にみられたのと類似する年輪構造の異常は全く認められない。

写真39，40は，ヤチダモ2の凍裂割裂部近辺の材組織を示す。この新凍裂木の場合，最外年輪の凍裂割裂部付近に，傷害柔組織（矢印)，道管径の減少，放射組織の走行変化といった，古い凍裂木の霜腫れ部の場合と類似する異常構造が認められる。しかし，古い凍裂木の霜腫れ部（写真34～36）と比較して，その程度は軽微である。

e. 凍裂木の樹幹形態

一部の凍裂木で，著しくサイズの大きな枝痕が発生している，あるいは数多くの枯枝や枝痕が発生している，などの樹幹形態の特徴が認められた（表

4)。しかし，このように樹幹表面に著しい欠点や損傷部をもつ凍裂木は少なく，多くの凍裂木の樹幹表面には凍裂以外の著しい欠点や損傷部は認められなかった。前章で示した凍裂木の写真（写真1，4，11，14）でも，樹幹表面にはとくに際立った枝痕や損傷は認められない。また，大径で根張りがよく発達している凍裂木において，複数の根張りの隆起の間の窪みの部位に発生するなどの，樹幹形態と凍裂の発生との一定の関連は認められなかった。

D. 考　察

a. 高含水率心材や内部割れとの関連

含水率の測定，または軟X線写真観察により樹幹内の水分分布を調べた4樹種，16本の凍裂樹幹には，いずれも水食い材部や多湿心材部が認められた。そして，樹幹の内部構造の観察に使用した6樹種，22本の試料のすべてに，凍裂とは別に目回りや放射状の内部割れが認められた。さらに，トドマツの一凍裂木内においても，凍裂の発生している部位では凍裂の発生していない部位と比較して，水食い材がよく発達し，その内部には数多くの内部割れが発生しているという特徴が認められた。凍結状態で観察すると，それらの高含水率心材部の内部割れの空隙には，氷が詰まっているのが認められた。これと同様な特徴は，オヒョウ[17]，トドマツ[9,10,17,22,75]，スギ[27,68-71,91]，ヤチダモ[23,24]の凍裂木でも認められている。

本観察において，上述した凍裂樹幹の内部構造的特徴が直径約3 cmのエゾニワトコの凍裂木にも認められたことは興味深い。というのは，凍裂の発生率は，一般に樹幹の径級が増加するのに従い増加する傾向がある[8,10]。樹幹の径級と凍裂の発生率との関係を調べた近年の研究でも，大径のものほど発生頻度が高いという単純な関係ではないものの，ある程度の樹齢，径級に達すると発生し始めるという知見が得られている[12,19,36]。従って，このエゾニワトコの凍裂木は，小径であるという点では例外的な凍裂木だといえる。このように，例外的に小径の凍裂木も含めて，観察したすべての凍裂木に同様な特徴が観察された。

発生後間もないと判断される新凍裂をもつトドマツ凍裂樹幹でも，一樹幹内において，凍裂が発生している部位の樹幹内部では凍裂が発生していない部位の樹幹内部と比較して，水食い材や内部割れが著しく発達していることが認められたことも，本観察の重要な結果のひとつである。水食い材の存在が原因となって凍裂が引き起こされたのではなく，逆に凍裂の発生に応じて水食い材が形成されたという可能性があるからである。実際に，水食い材は樹幹の損傷に応じて形成されるという見解がこれまでに報告されており[4]，人為的に樹幹に穿孔することにより穿孔部の周辺の材組織で水食い材が形成されることも実験的に確認されている[92]しかし，新凍裂をもつ樹幹でも樹芯部によく発達した高含水率心材が認められた（図4；写真17，19）ことから，凍裂樹幹の樹芯部に認められた水食い材は，凍裂の発生に先行して存在していたものと判断される。

このように，凍裂の新旧や樹幹の径級によらず，すべての凍裂樹幹で一致して認められたことから，水食い材や内部割れの存在は凍裂の発生に対して大きく寄与していると判断される。

b. 傷痕や樹幹形態との関連

1) 傷　痕

霜腫れ部の材組織で，変色，年輪構造の異常，傷害組織の発生などの特徴的で顕著な異常構造が認められた。トドマツ凍裂樹幹の霜腫れ部の年輪の組織構造的特徴として，(1)年輪イニシャル部の割裂部付近での傷害柔組織と傷害樹脂道の出現，(2)仮道管径の減少，(3)放射組織の走行の変化と複列化，を挙げることができる。ヤチダモ凍裂木の霜腫れ部の年輪の組織的特徴として，(1)割裂部付近での傷害柔組織の出現，(2)軸方向要素の細胞径の減少，(3)細胞内腔の充塡，(4)放射組織の走行変化，を挙げることができる。

凍裂樹幹の霜腫れ部にみられたこれらの特徴は，穿孔などの傷害や樹幹の割裂に応じて形成される材組織の特徴と類似点が多い[1,93,94]。これまでに指摘[6,10]されているように，これらの特徴をもつ年輪は凍裂が発生した翌成長期にその割裂部が巻き込まれる過程で形成されたものと考えられる。初めて凍裂が発生する以前に凍裂とは別の原因によって形成され，その損傷が凍裂の原因になっていることは考え難い。

一方，凍裂に応じて発達したと考えられる霜腫れ部で認められた上述のような顕著で特徴的な傷害組織とは別に，凍裂の割裂部沿いに軽微な傷害組織が発生しているのが，一部の凍裂木で散発的に認められた（写真31～33，39，40）。散発的にみられたこれらの傷害組織は，凍裂の割裂部に沿って形成され

ている。従って，凍裂の発生と密接な関連があると考えられる。

凍裂樹皮が認められないことから新凍裂木であると判断されたトドマツ1の凍裂割裂部付近の材組織の最外年輪部に認められた傷害樹脂道の場合（写真33），早材から晩材への移行部に発生していたことから，夏期に樹幹がなんらかの損傷を受けたのに応じて形成された可能性が強い。しかし，樹幹での傷害樹脂道の形成は，距離を隔てたクローネの損傷に応じて形成される場合もあることが報告されている[95]。霜腫れ部でも，傷害樹脂道は年輪イニシャル部にだけ出現するのではなく，年輪の中央部に形成されている場合もあった（写真27）。従って，その成因を推定することは困難である。

典型的な凍裂樹皮をもつトドマツ2において，霜腫れ部と正常材部との境界よりもさらに8年輪髄側の凍裂割裂部付近の年輪イニシャル部で観察された軽微な傷害樹脂道の場合（写真31，32），年輪内での存在位置から，形成層での材形成が停止している時期にその成因となる刺激があったものと判断される。また，凍裂樹皮が認められないことから新凍裂木であると判断されたヤチダモ2の凍裂割裂部付近の材組織の最外年輪のイニシャル部で認められた傷害組織の場合（写真39，40）も，年輪内での存在位置から，形成層での材形成が停止している時期にその成因となる刺激があったものと判断される。(1)これらの傷害組織が発生している年輪が形成された成長期の前冬に，すでにごく僅かに凍裂が発生していたこと，(2)同じく前冬に，凍裂の割裂が形成層まで達するにとどまり，樹幹表面までは達しなかったこと（例えば，写真26のような状態），(3)冬季間の限られた短期間だけ開口していた凍裂（例えばII章；月寒標準地のイタヤカエデの凍裂）に応じて形成されたことなどが，考えられる。

凍裂の割裂部付近の材組織で散発的にみられたこれらの軽微な傷害組織の成因は不明である。従って，少なくともこのような軽微な傷害組織が発生していた一部の凍裂については，その発生以前に樹幹が凍裂以外の損傷を受け，それが凍裂の発生に寄与していた可能性を否定できない。

いずれにせよ，水食い材や内部割れの場合とは異なり，凍裂の発生以前に凍裂とは別の成因により形成された可能性のある軽微な傷害組織はすべての凍裂木に認められた特徴ではない。また，樹芯部に枝節や変色，損傷部が認められることはあったものの，凍裂の発生に樹幹の損傷が関与しているとするBUTIN・SHIGO[40]，BUTIN・VOLGER[41]が指摘しているような，損傷部から樹皮方向へ凍裂が発生する，などの凍裂との一定の位置関係は認められなかった。従って，樹幹の損傷やそれにより樹幹内部に取り残された傷痕が凍裂の発生に寄与することはあっても，それが凍裂の発生に不可欠な要因であるとは考え難い。

2）樹幹形態

一部の凍裂木で，数多くの枝痕が認められる，あるいはサイズの大きな枝痕が発生している，などの樹幹形態と凍裂発生との関連が示唆された。しかし，このような樹幹形態的特徴の場合も，傷痕の場合と同様に，一部の凍裂木にだけ認められた特徴であり，すべての凍裂木に例外なく認められた特徴ではない。従って，これらの樹幹の外部形態的な欠点が凍裂の発生に不可欠な要因になっているとは考え難い。

c．凍裂の深さと内部割れの発達形状の関連

観察した限り，凍裂の割れが樹幹の内部深く髄まで達している事例は少なく，凍裂の内端部は水食い材部や多湿心材部の外層～中層部にとどまっている場合の方が多く観察された。とくに，水食い材部の外層～中層部に目回りが著しく発達する場合には，凍裂の内端がその目回り部にとどまり，それよりも内部深くには達しないというはっきりとした特徴が認められた。

これに対して，SCHIRP[8]は，1700年代にまで遡る文献調査の結果として，凍裂の深さは様々だが，多くの場合髄まで達することを記載している。KUBLER[14,63]は，典型的な凍裂木の樹幹横断面の模式図として，凍裂の割れの内端が髄まで達している状態を描き，とくに“V-shaped crack”という呼称を用いて木口面で見た凍裂の形状を特徴づけている。一方，石田[10,17]は，トドマツ，オヒョウなどの数樹種の凍裂木の樹幹内部の観察を行った結果として，水食い材部や多湿心材内部での内部割れの発達の仕方は多様であり，目回りが著しく発達する場合もあれば，氷の詰まった内部割れが僅かしか発達しない場合もあることを報告している。さらに，石田[10]は，凍裂樹幹の横断面で見たときのトドマツの凍裂の形状の特徴として，(1)一般的には凍裂が直線的に髄付近まで達することはなく，目回りや放射

状の内部割れと接続するなどして曲折している場合が多いこと，(2)被圧された小径の凍裂木の場合，凍裂が樹幹の中心付近まで直線的に走行する場合があること，を述べている。今川ら[69]は，新凍裂をもつスギの樹幹内部で，心材の外層部に氷の詰まった目回りが発達し，凍裂の内端部がこの目回りと連結しているという事例が認められたことを報告している。しかし，いずれも内部割れの発達形状と凍裂の深さとの関連については触れていない。

内部割れの発達形状と凍裂の形状との関連については，これまで充分な注意が払われてこなかった。これに対して，水食い材部の外層～中層部に目回りが著しく発達する場合には，凍裂の内端がその目回り部にとどまり，それよりも内部深くまでは達していないという特徴を本観察結果から指摘できる。一方，目回りが認められない，あるいはその発達程度が小さい場合には，凍裂の内端部は水食い材部の外層部にとどまっている場合が多かったものの，凍裂が髄付近まで達している場合も観察され，凍裂の深さは変化に富む，という特徴があることも指摘できる。

d. 凍裂発生時の割れの進展方向

凍裂樹幹の傷害組織の光顕観察において，凍裂の割裂部沿いに軽微な傷害組織が散発的に出現するのが一部の凍裂木で認められた（写真31～33，39，40）。このような軽微な傷害組織の成因として，前年の冬期にすでに木部では凍裂が内部的に発生し，形成層付近まで達していた（例えば，写真26の状態）のに応じて形成されたという可能性を指摘した（本章D-b）。

木材科学関係の用語集や成書にみられる凍裂の定義のなかには，樹幹表面から内部へ向かって裂けるなどの，凍裂の裂けの発生の方向性を加味した記載がよくみられる[76]。また，凍裂が初めて樹幹表面まで達する場合には，一旦閉塞した古い凍裂が再割裂を起こすときと比較してはるかに厚い材組織の層が裂けると考えられている[6,10,14,65]。しかし，可能性のひとつとして前述したように，仮に一部の凍裂木の凍裂割裂部付近に見られた軽微な傷害組織が，形成層や師部まで達する割れに応じて形成されるのだとしたら，このような見方や定義に修正を加える必要が生じる。

この軽微な傷害組織の成因を解明することは，凍裂が樹幹表面まで達する経過を推定するうえで大きな意味をもつ可能性がある。今後，さらに詳しく検討を加えてみる必要がある。

IV. 凍結・融解過程での凍裂樹幹心材部の膨張・収縮の挙動

A. 概　説

前章で述べたように，凍裂樹幹には，凍裂が発生していない樹幹と比較して高含水率心材部が著しく発達し，その高含水率心材部に数多くの内部割れが発生している，という内部構造上の特性があることが明らかになった。とくに凍結状態で水食い材部を観察すると，これらの内部割れの空隙には氷晶が詰まっているのが認められた。新凍裂木であると判断された樹幹でもそのような特徴が認められたことはとりわけ重要な結果であり，この結果から，少なくとも凍裂樹幹の樹芯部に認められたよく発達した水食い材部での多湿化，及びその内部に認められた氷の詰まった内部割れの形成は凍裂の発生に先行しており，その発生要因として寄与していることが推定される。

これと同様な結果及び見解は，これまでにもトドマツ[10,17]，スギ[27,68-71]，オヒョウ[17]，ヤチダモ[23,24]の凍裂木についての研究により得られている。石田[10,17]は，凍裂をもつ樹幹において凍裂の割裂幅と樹幹横断面での水食い材面積との関連を地上高別に測定することにより両者の関連を定量的に調べ，両者には極めて高い正の相関があることをさらに明らかにしている。その上，石田[10,17]は，凍裂をもつ丸太を凍結・融解させたときの凍裂の開閉と樹幹温度変化の挙動を調べ，凍裂の開閉が樹芯部に位置する水食い材部の凍結・融解によく対応して起こることも明らかにしている。それらの結果から，凍裂発生の内部的条件として凍結に伴う水食い材部の膨張を挙げている。

しかし，凍裂をもつ樹幹部位の水食い材部が凍結に伴い実際に膨張を起こすのかどうかという点については，凍裂樹幹より採取した水食い材部そのものについて実験的に確認されているわけではない。また，仮に実際に凍結に伴い膨張を起こすとしても，その膨張機構については不明の点が多い。今川ら[24]は，ヤチダモは多湿心材樹であるのにも拘わらず，必ずしも凍裂が発生するわけではないという事実から，ヤチダモの場合には凍裂発生の要因として心材含水率以外の因子についても検討を加えるべきであ

るという見解を述べている。

以上のことから，本章では凍裂が発生している樹幹部位の高含水率心材部の凍結・融解過程での膨張・収縮の挙動の特性を調べ，内部膨張説[10,17]をさらに検討することにした。まず，凍結・融解過程でのトドマツ凍裂の開閉の挙動を調べ，その開閉の挙動が樹芯部の凍結・融解に対応しているかどうかを確認した。次に，トドマツ凍裂木のなかでも，凍裂が発生している樹幹部位（凍裂部）の樹芯部に位置する水食い材部の凍結・融解に伴う膨張・収縮の挙動を調べ，凍裂の開閉の挙動との対応を調べた。さらに，凍裂をもたない樹幹部位の高含水率心材部などについても同様に凍結・融解過程での膨張・収縮の挙動を調べ，凍裂部のそれと比較した。

B. 材料と方法

a. 材　料

供試木として，北海道大学天塩地方演習林の造林地より採取したトドマツ凍裂木2本（トドマツ3，4；表4），および同じく天塩地方演習林の造林地より採取したヤチダモ1本（樹高約22 m；胸高直径21 cm）を使用した。トドマツ3には，地上高1 m付近の樹幹の南側に長さ約40 cmの凍裂が発生していた（表4）。トドマツ4には，樹幹南東側の地際から地上高約1.5 mまでの範囲にわたり凍裂が発生していた（表4）。両凍裂木ともに，樹幹表面の凍裂の割裂部近辺に凍裂樹皮が形成され，割れが古いことを示す樹脂の浸出が認められた。ヤチダモ供試木は比較実験のために採取したものであり，凍裂木ではない。

トドマツ3，4は1月末に，ヤチダモ供試木は5月半ばに伐採された。いずれの供試木も，伐採後直ちに約1 m長の丸太に玉切りし，防水のために直ちに木口面にワセリンを塗布し，さらにアルミ箔とポリ袋で覆った。この状態で，約−10℃で凍結保存し，適宜実験に使用した。

b. 凍結・融解過程での凍裂開閉の挙動

トドマツ3の保存丸太（直径約14 cm）から，凍裂部を含む長さ約50 cmの丸太を鋸で切断した。直ちに，木口面にワセリンを塗り，さらにアルミホイルを被せて防水した。これを常温（約20℃）の室内に2日間静置し，完全に融解後，試験体とした。

試験体を常温の室内から−20℃の冷凍庫に移し，樹芯部の温度と凍裂幅の変化を経時的に測定した。続いて，樹芯部の温度が−20℃で一定した後，試験体を約20℃の室内に戻し，融解過程での挙動を同様に測定した。

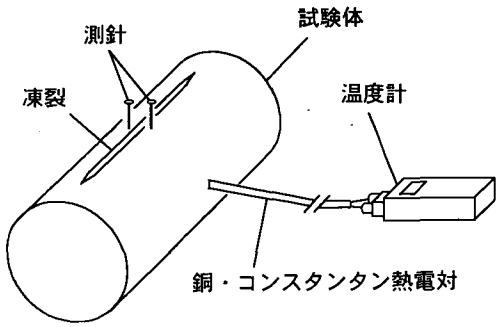


図7　凍裂幅の測定法

凍裂幅の測定は，石田[10,17]，今川ら[74]に従った。その方法の概要は図7に示したとおりであり，手順は次のとおりである。凍裂の両側に測針として釘を打ち込み，この測針間距離の変化を30〜60分間隔で最小目盛り1/100 mmのデジタルノギスにより測定した。融解時，肉眼的に凍裂が閉じていたことから，このときの測針間距離を基準（ゼロ）とし，この値と測定時の測針間距離の差（増加量）を凍裂幅とした。樹芯部温度の測定には，丸太中央部の樹皮表面から髄に達する孔（径4 mm，深さ7 cm）をあけ，この穴の最深部の温度を銅・コンスタンタン熱電対温度計により測定した。

c. 凍結・融解過程での水食い材部の膨張・収縮の挙動

この実験では，水食い材部の膨張・収縮の挙動を明らかにするために，図8のとおりに，樹芯材部を8角柱形に整形し，この試験体の半径（髄から8角柱形の試験体の側面までの距離；最小で2.5 cm，最大で6.2 cmであった）の寸法変化を計測した。トドマツ3，4とヤチダモの凍結保存試料より，1）トドマツ丸太のうち凍裂を起こしている部位の水食い材部（トドマツ凍裂部水食い材部），2）トドマツ丸太のうち凍裂を起こしていない部位の心材部（トドマツ正常心材部），3）2）と同部位の正常心材に水没状態で煮沸と冷却を繰り返すことにより含水処理を行った材部（含水処理したトドマツ正常心材部），4）ヤチダモ供試木の心材部（ヤチダモ多湿心材部），に区分して試験体を作製し，実験を行った。トドマツ凍裂部水食い材部の試験体については，凍裂が発

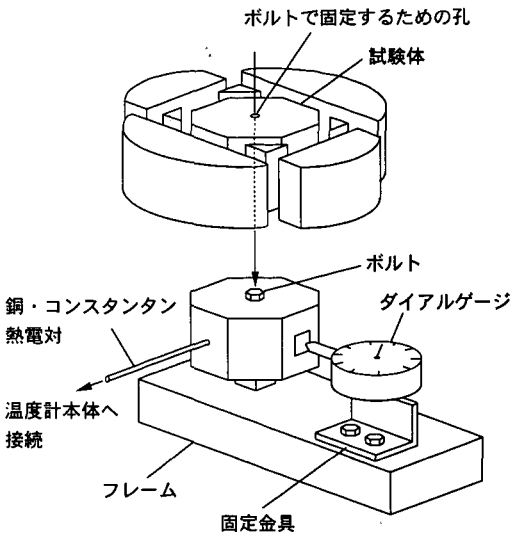


図8　樹芯材部の半径方向の寸法変化の測定法

生していた側を測定部とした。2）～4）の試験体については，測定部の方位を一定させてはいない。

実験装置の概要を図8に示す。測定の手順は次のとおりである。冷凍庫から取りだし，八角柱形に整形した試験体をアルミホイルで包み，その状態で常温（約20℃）の室内に1昼夜静置し，室温と温度平衡させた。試験体の髄に径8 mmのドリルで穿孔を行ない，この孔にボルトを通して装置のフレームに固定した。試験体の側面には，深さがこの側面と髄の中間部まで達する直径4 mmの孔をあけ，この孔に銅・コンスタンタン熱電対を挿入した。温度計本体を除く測定装置一式を－10℃の冷凍庫に移し，試験体の半径方向の寸法変化と温度を経時的に測定した。試験体温度が庫内温度で平衡した後，測定装置一式を約20℃の室内に移して同様に測定を続け，融解過程の挙動を調べた。試験体の半径方向の寸法変化については，最小目盛り1/100 mmのダイアルゲージにより測定し，とくに寸法の小さい（測定部の長さ；試験体の髄から側面までの長さ）試料について測定する際には，最小目盛りの5分の1まで目視で読み取った。

実験終了後，各試験体の全乾重量基準，及び最大含水量基準の含水率を測定した。試験体の測定部より表層の材部を除去して約2×2×2 cmのブロックを作製し，電子天秤（最小目盛り1/1000 g）で直ちに試料の重量を測定した(生材重量)。次に，試料を水没状態で約2時間煮沸してから常温の室内に静置した。1～3週間で試料の重量が一定した後，表面の水滴を拭き取り，重量を測定した(飽水重量)。最後に，飽水させた試料を105℃で48～72時間，ブロックの重量が一定するまで乾燥させ，重量を測定した(全乾重量)。これらの重量測定値より，全乾重量基準および最大含水量基準の含水率を算出した。

C. 結　果

a. 凍結・融解過程での凍裂開閉の挙動

結果を図9にまとめた。この結果について，以下に詳述する。

まず，凍結過程での樹芯部の温度と凍裂開閉の挙動について述べる。樹芯部の温度は，丸太を－20℃の冷凍庫に移すと間もなく低下をはじめ，2時間ほどで－1℃付近まで達して停滞した。その後，約4時間停滞を続けてから再びゆっくりと低下をはじめ，最終的に庫内温度で平衡した。凍裂は，－1℃付近で温度停滞がはじまるまでの間，閉塞してい

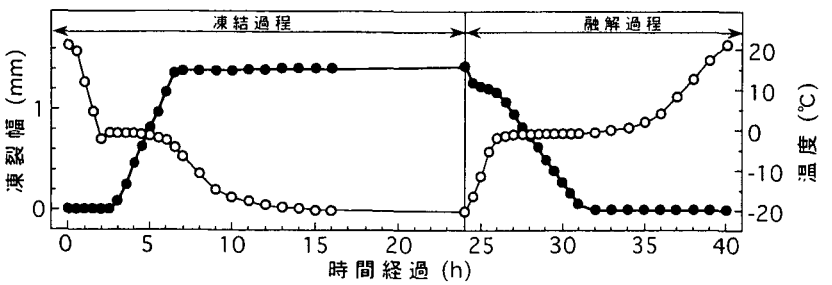


図9　凍結・融解過程でのトドマツ凍裂の開閉の挙動
—●—；凍裂幅
—○—；樹芯部の温度

た。温度停滞がはじまると間もなく開きはじめ，−1℃で温度停滞が継続する間，ほぼ一定のペースで拡大を続けた。この凍裂幅の拡大は樹芯部の温度の再下降がはじまるとほぼ止み，凍裂はその後非常にゆっくりとわずかに拡大するにとどまった。

次に，融解過程での挙動について述べる。樹芯部の温度は，試験体を室温に戻すと間もなく上昇しはじめた。2時間ほどで約−1℃に達し，5時間ほど停滞を続けた。その後再び上昇をはじめ，最終的に室温で平衡した。凍裂幅は，試験体を室温に戻すと速やかに減少しはじめた。この減少は間もなく止み，ほぼ一定したが，樹芯部の温度が約−1℃で停滞を始めると再び速やかに減少し始めた。以降，樹芯部の温度が再上昇をはじめるまでの間，ほぼ一定のペースで減少し続け，最終的に，温度の再上昇がはじまって間もない時点で閉塞を完了した。

b. 凍結・融解過程での凍裂樹幹心材部の膨張・収縮の挙動

以下に，1）トドマツ凍裂部水食い材部，2）トドマツ正常心材部，3)含水処理したトドマツ正常心材部，4)ヤチダモ多湿心材部，に分けて測定結果を詳述し，続いて4種類の試験体間で見られた凍結・融解過程での寸法変化の挙動の違いの原因を検討するうえで重要な試験体の構造的特徴についての所見を5）最大膨張量と試験体の構造で述べる。

1）トドマツ凍裂部水食い材部

トドマツ凍裂部水食い材部については，5個の試験体を作製し，測定を行った。温度変化，半径方向の寸法変化ともに，いずれの試験体も同様な挙動を示した。測定結果の典型例を図10に示し，その温度変化と寸法変化の挙動について以下に述べる。

まず，凍結過程での挙動について述べる。試験体の温度変化は，凍裂の開閉の挙動を調べた丸太（図9)の場合と同様の挙動を示した。試験体の半径の寸法は，約−1℃での温度停滞が始まるまでの間，ほとんど変化を起こさなかった。約−1℃で温度停滞が始まると間もなく膨張をはじめ，温度の再下降が始まるまでの間ほぼ一定のペースで膨張を継続した。温度の再下降がはじまると間もなく逆に緩やかな収縮に転じた。この収縮は試験体の温度が一定した後でも停止せず，長時間にわたり緩やかに継続した。

次に，融解過程での挙動について述べる。温度変化は，凍裂の開閉の挙動を調べた丸太の場合（図9）

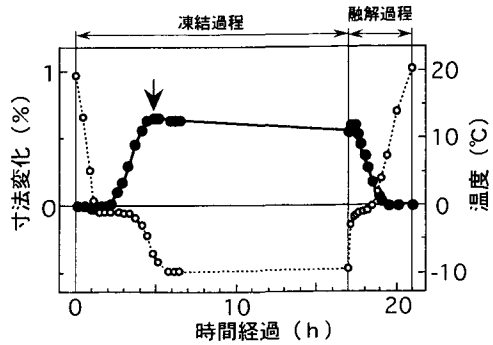


図10　凍結・融解過程でのトドマツ凍裂部水食い材部の半径方向の寸法変化
—●—；寸法変化
…○…；試験体中心部の温度

と同様の挙動を示した。試験体の半径は，温度の上昇にともない直ちに膨張を始めた。しかし，この膨張は長くは継続せず，すぐに収縮に転じた。この収縮は，試験体の温度が約−1℃付近で停滞する間，一定のペースで継続した。そして，約−1℃から温度の再上昇が始まって間もない時点には，試験体の半径方向の寸法は実験開始時の元の寸法にほぼ完全に回復し，その後ほぼ一定したままであった。

トドマツ凍裂部水食い材部の計5つの試験体の全乾重量基準の含水率は216〜243%であった。一方，最大含水量基準の含水率は88〜96%であった（表5)。

2）トドマツ正常心材部

トドマツ正常心材部については，3個の試験体を作製し，測定を行った。試験体の温度変化は，凍結，融解過程ともにトドマツ凍裂部水食い材部の場合（図10）と比較して急激であったが，その挙動は同様であった。これに対して，半径方向の寸法変化の挙動は，凍結・融解過程ともにトドマツ凍裂部水食い材部（図10）の場合とは，異なっていた。3個の試験体はいずれもほぼ同様な挙動を示し，試験体による際立った違いは認められなかった。測定結果の典型例を図11に示し，その寸法変化の挙動について以下に述べる。

凍結過程では，試験体はまず温度の低下にしたがって直ちにわずかに収縮を起こした。この収縮は間もなく止み，それ以降約−1℃での試験体の温度停滞が終了するまでの間，試験体の半径の寸法はほぼ一定したままであった。試験体の温度が約−1℃

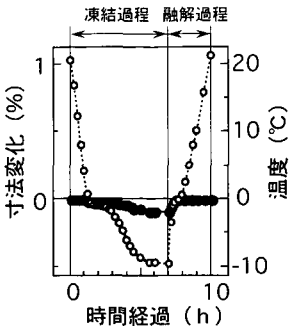


図11　凍結・融解過程でのトドマツ正常心材部の半径方向の寸法変化
—●—；寸法変化
…○…；試験体中心部の温度

で停滞した後に再下降を始めると，試験体は再びゆっくりと収縮を始めた。最終的に，試験体温度が庫内温度で平衡すると収縮をほぼ停止した。

融解過程では，試験体は温度上昇とともに直ちに急速に膨張をはじめた。この膨張は次第に速度を緩めながらも比較的速やかに起こり，−1℃での温度停滞がはじまる時点には，試験体の半径方向の寸法は実験開始時の元の寸法に回復し，一定した。

トドマツ正常心材部の試験体の全乾重量基準の含水率は68〜107%であった。一方，最大含水量基準の含水率は，46〜60%であった（表5）。但し，トドマツ正常心材部の場合，数回にわたり含水率測定用の木片に水没状態で煮沸と冷却を繰り返しても重量が一定せず，含水させることが著しく困難であった。従って，これらの最大含水量基準の含水率の測定値は，誤差を多く含んでいる。

3）含水処理したトドマツ正常心材部

含水処理したトドマツ正常心材部については，計4つの試験体を作製し，測定を行った。凍結・融解過程ともに，温度変化は，いずれもトドマツ凍裂部水食い材部の場合（図10）と同様な挙動を示した。一方，半径の寸法変化の挙動は，トドマツ凍裂部水食い材部（図10）と同様に，凍結過程で試験体の温度が約−1℃で停滞する間に膨張を起こす場合，そのような膨張を起こさず，後述するヤチダモ多湿心材部（図13）とほぼ同様な挙動を示す場合があった。但し，前者のように約−1℃での温度停滞中に膨張を起こす場合でも，その膨張量はトドマツ凍裂部水食い材部の場合（図10；表5）と比較して，著しく小さかった。測定結果の一例を図12に示し，その寸法変化の挙動について以下に述べる。

凍結過程では，試験体はまず温度の低下とともにわずかに収縮した。しかし，この収縮はすぐに止み，寸法は一定した。続いて，−1℃付近での温度停滞が継続する間に，膨張を始めた。この膨張は温度の再下降が始まると間もなく止み，それ以降は時間の経過に従い，温度低下とともにゆっくりと収縮を続けた。この収縮は，試験体の温度が−10℃で平衡した後にもかなり長時間にわたって継続した。

約−1℃での試験体温度の停滞が終了する頃に起こった膨張は，4個の試験体のうち2個に認められ，残りの2個ではこのようなはっきりとした膨張は観測されなかった（表5）。

融解過程では，試験体は温度の上昇とともに直ちに膨張をはじめ，実験開始時の元の寸法よりも膨張した。この膨張は間もなく止み，−1℃付近で温度停滞が始まると逆に収縮に転じた。続いて，間もな

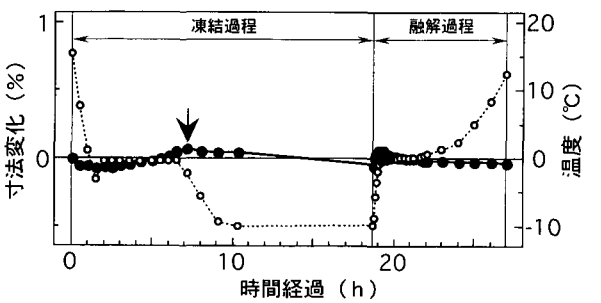


図12　凍結・融解過程での含水処理したトドマツ正常心材部の半径方向の寸法変化
—●—；寸法変化
…○…試験体中心部の温度

くほぼ実験開始時の元の寸法に回復すると収縮は止み，それ以降寸法はほぼ一定したままであった。

含水処理したトドマツ正常心材部の4つの試験体の全乾重量基準の含水率は117～175%であった。最大含水量基準の含水率については，二つの試験体についてだけ算出した。それぞれの値は82%，87%であった（表5）。残りの二つの試験体については，数回にわたり含水率測定用の木片に煮沸と冷却を繰り返しても重量が一定せず，含水が著しく困難であったため，測定を断念した。

4）ヤチダモ多湿心材部

ヤチダモ多湿心材部については，計5つの試験体を作製し，測定を行った。試験体の温度変化の挙動は，凍結・融解過程ともにトドマツ凍裂部水食い材部の場合（図10）と同様であった。これに対して，試験体の半径の寸法変化は，トドマツ凍裂部水食い材部（図10）とは異なる挙動を示した。5つの試験体はいずれも同様な挙動を示し，試験体間での違いは認められなかった。測定結果の典型例を図13に示し，その寸法変化の挙動について以下に述べる。

凍結過程では，半径方向の寸法は−1℃付近での温度停滞が終了するまでの間，ほぼ一定したままか，ごくわずかに膨張を起こした。続いて温度の再下降が始まると，時間の経過に従ってゆっくりと収縮を続けた。この収縮は，試験体の温度が−10℃で平衡した後にも長時間にわたって継続した。1つの試験体については1週間冷凍庫に放置してみたが，収縮は停止しなかった。

融解過程では，径は温度の上昇とともに直ちに膨張を始めた。その後，次第にその速度を減じ，温度が−1℃付近で停滞する時点にはほぼ元の寸法に回復し，一定した。

ヤチダモ多湿心材部の試験体の全乾重量基準の含水率は106～115%，最大含水量基準の含水率は92～96%であった（表5）。

5）最大膨張量と試験体の構造

表5に，測定の間に一時的にでも実験開始時の元の寸法よりも膨張を起こした試験体について，最大膨張を示した時点（図10，12，13の大矢印）での膨張率（以下，最大膨張率）を記した。トドマツ凍裂部水食い材部とヤチダモ多湿心材部を比較すると，最大含水量基準の含水率が同程度なのにも拘わらず，最大膨張率が著しく異なっている。凍結過程で試験体の温度が約−1℃で停滞する時間帯に大きく膨張したトドマツ凍列部水食い材部の試験体には，数多くの目回りや放射状の内部割れが発生しており，その中層～外層部にはとりわけよく発達した目回りが認められた。これらの内部割れの空隙は，融解時には閉じていたが，凍結時には拡大し，その内部に氷が析出しているのが認められた。これに対して，ヤチダモ多湿心材部ではそのような内部割れは認められなかった。

D. 考　察

凍裂をもつトドマツの丸太を凍結・融解させ，丸太の樹芯部の温度変化と凍裂の開閉の挙動を調べた結果，凍裂割裂部の開口と閉塞は，いずれもほぼ試験体の樹芯部の温度が約−1℃で停滞する時間帯に起こった。水分を充分に含む木材を凍結・融解させたときに観測される約−1℃での温度停滞は，その水分の凍結・融解に応じて起こる[96]。従って，凍裂の開閉は樹芯部の凍結・融解と対応して起こっていると判断される。この結果は，この実験と同じトド

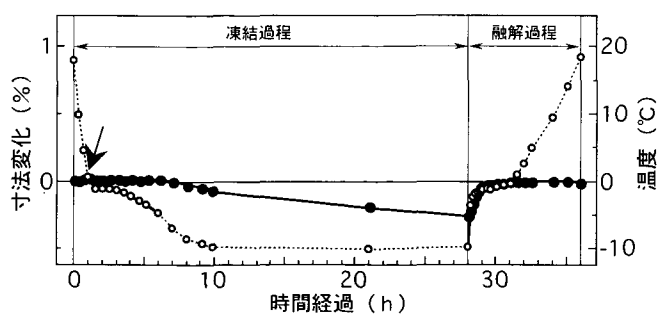


図13　凍結・融解過程でのヤチダモ多湿心材部の半径方向の寸法変化
—●—；寸法変化
…○…；試験体中心部の温度

表5　各試験体の含水率と膨張量

試験体種類		含水率		最大膨張率[3]
		全乾重量基準	最大含水量基準	
トドマツ凍裂部水食い材部	1	243	95	1.00
	2	236	96	0.65
	3	216	88	0.84
	4	222	90	0.79
	5	220	91	0.92
トドマツ正常心材部	1	72	46[1]	—
	2	68	60[1]	—
	3	107	58[1]	—
含水処理したトドマツ正常心材部	1	117	—[2]	—
	2	145	—[2]	0.07
	3	171	82	—
	4	175	87	0.09
ヤチダモ多湿心材部	1	109	93	0.01
	2	107	92	—
	3	110	96	0.02
	4	106	92	—
	5	115	92	—

1)　これらの試験体については，含水率測定用の木片の重量が一定せず，含水させることが困難であった。測定値を算出したため，その値を記載するが，あくまで参考値である。
2)　これらの試験体については，含水率測定用の木片の重量が一定せず，含水させることが困難であったため，測定を断念した。
3)　試験体の寸法が，測定開始時より一時的にでも膨張を起こしたものだけについて記載している。

マツの凍裂について調べた石田[10,17]の結果，並びにスギの凍裂について調べた今川ら[74]の結果とほぼ完全に一致する。

さらに，本実験では，凍裂部水食い材部が凍結により膨張し，続いて融解させると可逆的に元の寸法に回復することが確認された。加えて，凍結・融解過程での凍裂部水食い材部の膨張・収縮の挙動が，凍裂の発生していない樹幹部位より採取した3種の試験体（トドマツ正常心材部，含水処理したトドマツ正常心材部，ヤチダモ多湿心材部）の場合とはっきりと異なり，凍結過程で著しく膨張することが凍裂部水食い材部の特性のひとつであることも確認された。凍裂の発生していない樹幹部位より採取した試験体のなかにも，凍裂木の凍裂部水食い材部と同様に凍結過程で膨張を起こすものもあったが，その膨張率はトドマツ凍裂部水食い材部と比較してはるかに小さかった（表5）。このように，凍裂が拡大する時間帯とその樹芯部の水食い材部が膨張する時間帯がよく一致していること，凍結に伴う著しい膨張は凍裂部水食い材部だけに認められたことから，凍裂の開閉は樹芯部に位置する水食い材部の凍結に伴う膨張・収縮に対応して起こっていると判断される。

ヤチダモ多湿心材部の試験体の全乾重量基準の含水率は，トドマツ凍裂部水食い材部の試験体のそれよりもかなり低い値を示した（表5）。一方，最大含水量基準の含水率で比較すると，ヤチダモ多湿心材部とトドマツ凍裂部水食い材部は同程度の値を示している（表5）。従って，本実験で使用したヤチダモ多湿心材部とトドマツ凍裂部水食い材部は，同程度に飽水に近い状態になっていると判断される。言い換えると，水分が材の空隙を占有する割合（以下，水分空隙占有率）がほぼ等しいといえる。このように，水分空隙占有率がほぼ等しいのにも拘わらず，ヤチダモ多湿心材部とトドマツ凍裂部水食い材部と

では，凍結・融解過程での膨張・収縮の挙動が異なっている（表5；図10，13）ことから判断すると，凍結に伴う凍裂部水食い材部の膨張の要因が凍結による水の体積膨張であることは考え難い。

この実験に供試したトドマツの凍裂木の凍裂部水食い材部には，数多くの目回りや放射状の内部割れが発生しており，これらの内部割れの空隙が凍結時には拡大し，その内部に氷が析出しているのが認められた。とくに，水食い材部の外層部には，氷晶の詰まった目回りが著しく発達し，凍裂の割れがそれよりも内部深くには達していないという状態が観察された（写真16，前章で記載；この軟X線写真のトドマツ凍裂木はトドマツ4)。これに対して，含水処理したトドマツ正常心材部の試料，及びこの実験で使用したヤチダモの多湿心材部には，そのような内部割れはほとんど認められなかった。この実験に使用したトドマツ凍裂木の凍裂部水食い材部の試験体で観測された凍結に伴う膨張には，これらの内部割れ，とくに水食い材部の外層部に認められた著しく発達した目回りの存在が大きく寄与していると考えられる。これらの目回りの空隙に氷晶が析出・融解するのに応じてその空隙が拡大・縮小することが，凍裂部水食い材部の膨張・収縮を引き起こした可能性が強い。

この実験に使用したトドマツ3，4と同様に，水食い材部や多湿心材部の外～中層部に目回りが著しく発達するという特徴をもつ凍裂木は，前章で述べた凍裂樹幹の観察においていくつかの凍裂木で認められた(写真16，23；表4)。このようなタイプの凍裂木では，直接には氷晶析出による目回りの空隙の拡大により，高含水率心材部が膨張することが，凍裂発生の要因になっていると考えられる。

凍裂樹幹の内部には，凍裂のほかにも氷晶の詰まった数多くの内部割れが存在するという事例は，これまでにもトドマツ[10,17,18,22,75]，オヒョウ[17]，スギ[27,68-71]，ヤチダモ[23,24]の凍裂木で報告されている。そして，それらの内部割れと凍裂の発生との関連について議論がなされている。しかし，その多くでは放射状の内部割れの存在にとくに注意を払い，放射状の内部割れが接線方向の引張り応力に対する材の抵抗性を低下させる[10,23]，あるいは“notch effect”[14,63]を引き起こし，強度的に弱点として作用することにより凍裂の発生に寄与するとみなしている。

一方，目回りと凍裂の発生との関連についての論議は少ない。石田[17]は，オヒョウの凍裂について，とくに目回りの氷晶をピンセットで除去した結果，凍裂が閉じたことを根拠として，直接には目回り部での氷晶の発達が凍裂の原因であるという見方を述べている。近年には，今川ら[69]が，スギの新凍裂木では凍裂の割れが氷晶の詰まった目回りと連続していたことから，目回りが凍裂の発生に強く寄与しているという見解を述べている。

仮に氷晶析出による目回りの空隙の拡大による樹芯部に位置する高含水率心材部の膨張が凍裂の要因であるのならば，凍裂木の樹幹周囲長は凍結にともない膨張することが予想される。しかし，凍裂木が凍結により膨張するのか否かを検討した報告例は限られており，しかも一致した見解が得られていない。WINGET・KOZLOWSKI[97]は，冬季間における生立木の樹幹周囲長の変動についての報告のなかで，(1)観測の対象とした立木のうち，大多数は冬季間の寒冷によって樹幹周囲長が減少したこと，(2)一部に樹幹周囲長が増加を起こした立木があり，それがいずれも凍裂木だったこと，を記載している。これに対して，NEELY・HIMELICK[64]は，凍裂木と凍裂をもたない立木について，樹幹周囲長の変動を秋季から冬季にかけて経時的に観測・比較し，WINGET・KOZLOWSKI[97]に反する結果を得ている。NEELY・HIMELICK[64]は，1）アケリフォリアスズカケノキの凍裂木の樹幹周囲長は秋季から冬季にかけて減少すること，2）その減少率は凍裂をもたない立木の樹幹周囲長と比較して小さいこと，3）しかし，材部実質（樹皮部や凍裂の割裂部の空隙を除いた部分；木部の実質）で比較すると，秋季から冬季にかけての凍裂木の材部実質の収縮率は健全木の材部実質の収縮率よりもはるかに大きいことを報告している。

前章で明らかにしたように，凍裂樹幹の高含水率心材部における放射状の内部割れや目回りの発達形状は様々である。このような内部割れの発達形状の違いに応じて，凍裂樹幹は冬季間に異なる膨張・収縮の挙動を示す可能性がある。本実験で使用した材料には，高含水率心材部に著しく目回りが発達するという特徴が認められた。今後，内部割れの発達形状がこれとは異なる凍裂樹幹についても同様に検討を加える必要があるかも知れない。

V. 凍結状態の水食い材部

A. 概　説

前章の実験により，高含水率心材部にサイズの大きな目回りが出現する凍裂木では，高含水率心材部が凍結により実際に膨張を起こすことが確認された。さらに，その膨張の主因が直接には水食い材部に発生していた目回りでの氷晶の析出に基く，目回りの空隙の拡大であることが示唆された。しかし，凍裂樹幹にはこの実験で使用したトドマツ凍裂木のように高含水率心材部の外層部で目回りが著しく発達するものばかりではない。凍裂樹幹の内部構造の観察（III章）では，高含水率心材部に放射状の内部割れだけが発達している凍裂樹幹も認められた。そこで，本章では放射状の内部割れが凍裂の発生にどのように寄与しているのかを検討するとともに，目回りの凍裂発生に対する寄与の仕方について前章の実験により得られた見解についてさらに評価を加える。

氷の詰まった放射状の内部割れが凍裂の発生にどのように寄与しているのかを検討するうえで，割れの空隙に詰まった氷晶の状態，及びその近辺の材組織の状態を知ることは，重要なことである。石田[10]は，氷の詰まった放射状の内部割れに接する材組織は接線方向に明らかに圧縮されているという観察結果を述べている。さらに，この内部割れに接する材組織は，周囲の材部と比較して明色を呈することから，含水率が低いと判断している。そして，これらの結果を根拠として，放射状の内部割れの空隙での氷晶の析出は，凍結に伴う水食い材部の膨張には寄与しないという見解を述べている。KUBLER[13]もこれと同様に，凍裂木の樹幹内部には氷の詰まった放射状の内部割れが認められる場合があるが，材組織が低温乾縮により接線方向に大きく収縮するため，放射状の内部割れの空隙で起こる氷晶の析出が，凍裂を引き起こすような大きな内部応力を引き

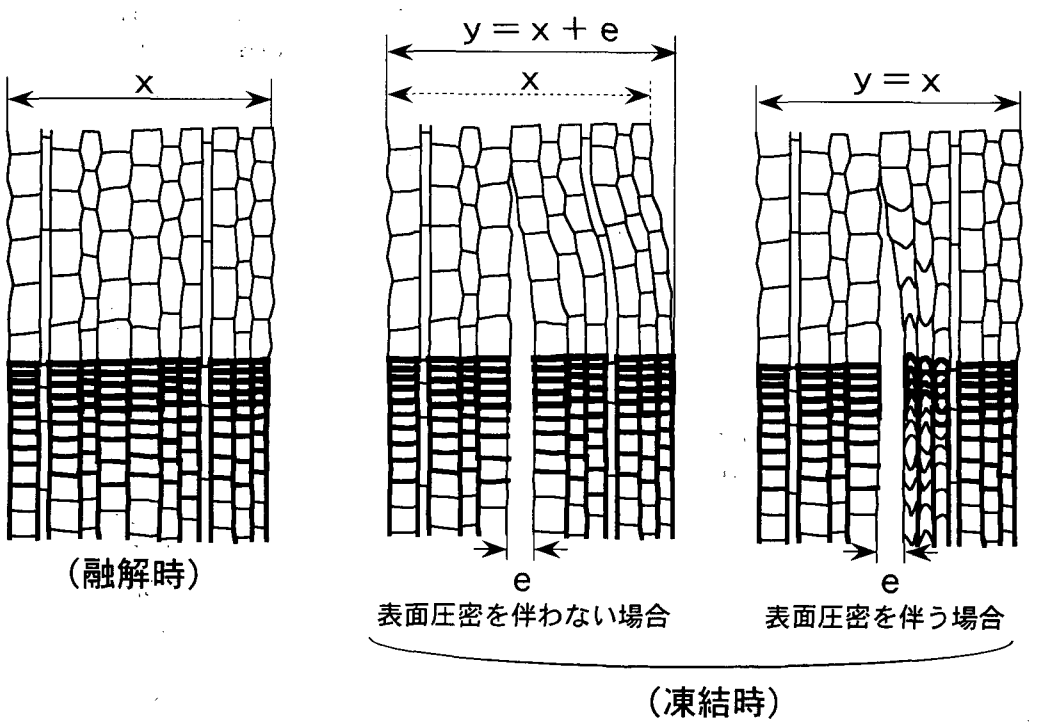


図14　氷晶の析出により放射状の内部割れの空隙が拡大した際の材組織の変形
x；融解時の材組織の接線方向の寸法
e；放射状の内部割れの空隙の拡大幅
y；凍結時の材組織の接線方向の寸法

起こすことは考え難いという見解を述べている。

これらの問題は，図14，15のとおりに模式化し，次のように説明することができる。仮に，これらの図に模式的に示したように，内部割れの空隙が氷晶の析出により拡大するのに応じて，内部割れの破断面に接する材組織で表面圧密が起こるのならば，内部割れの空隙が拡大してもその内部割れを含む材部全体の体積に大きな変化が起こることはないものと判断される。これに対して，仮に内部割れの破断面に接する材組織が表面圧密を起こさず，内部割れよりもかなり距離を隔てた領域にまでその空隙の拡大に応じて変形を及ぼしているとしたら，このような内部割れを含む材部では，体積増加が引き起こされ得ると考えられる。従って，凍結状態で水食い材部を組織学的に調べ，内部割れの空隙内の氷晶やその近辺の材組織の状態を微視的レベルで明らかにすることは，内部割れが凍裂の発生に対してどのように寄与しているのかを推定するうえで，大きな意味があると考える。

以上の考えから，本章ではトドマツ凍裂樹幹の水食い材部に出現する内部割れの空隙に詰まっている氷晶の構造，その近辺の材組織の形態的特徴を石田[10]，KUBLER[13]よりもさらに微視的に解明することを主目的として，実体顕微鏡及び低温走査電子顕微鏡（Cryo-SEM）により観察を行った。

B. 研究方法

a. 実体顕微鏡観察

供試木は，トドマツ1，2（表4参照）である。この供試木はIII章で述べた断面トレース図の作成に使用したものであり，伐採やその後の処理・保存方法については，III章B−cに記載してある。断面トレース図を作成（III章B−cに記載）の後，続けて凍結状態のまま木口面で観察を行った。大型マクロ接写装置を使用し，等倍〜10倍で検鏡及び写真撮影を行った。

b. Cryo-SEM 観察

供試木は，凍結・融解過程での水食い材部の膨張・収縮の挙動を調べるための実験（IV章）に使用したトドマツ4である（表4参照）。供試木の概要は表4，及びIV章B-aのとおりである。供試木は，1月中旬の厳寒期に伐採し，玉切りの後，直ちに防水のため木口面にワセリンを塗布してからアルミホ

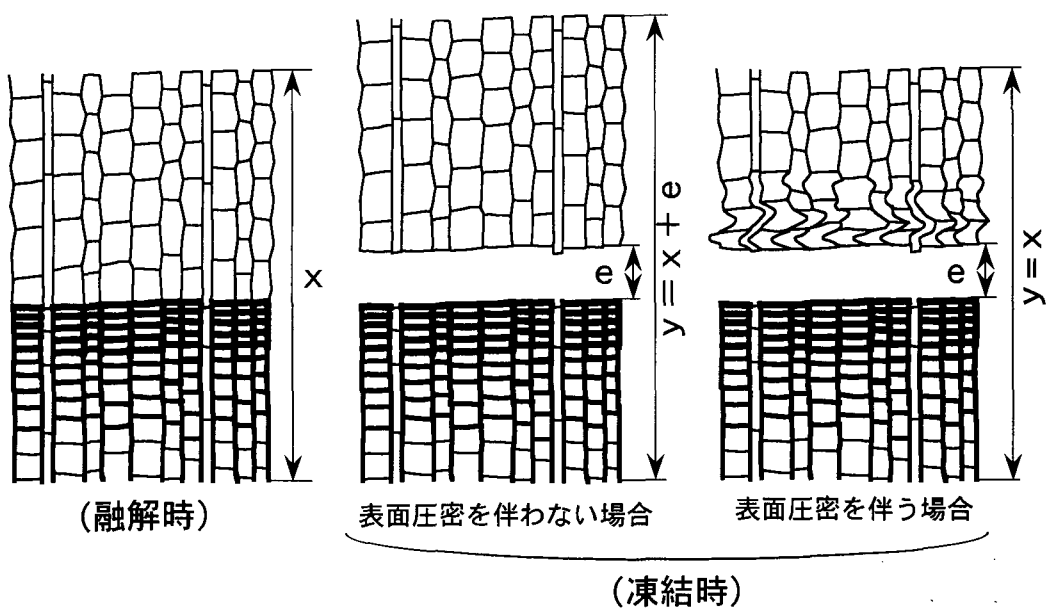


図15　氷晶の析出により目回りが拡大した際の材組織の変形
x；融解時の材組織の放射方向の寸法
e；目回りの空隙の拡大幅
y；凍結時の材組織の放射方向の寸法

イルとポリ袋を被せ，この状態で−10℃で保存した。

観察には，以下に述べる二通りの手法[98,99]により試料作製〜検鏡を行った。それぞれの手順について，以下に分けて述べる。

1）凍結割断法

−20℃の低温室に試料を移し，凍結状態で円柱状の小ブロック（直径3 mm以下）を採取した。これをグリセリンで円筒形の試料台（内径3 mm）に取り付けた状態で液体窒素中に凍結保存しておき，適宜観察に使用した。観察の際には，まず凍結保存試料を液体窒素中で試料ホルダーに固定した。試料への結霜を防ぐために，試料ホルダーを液体窒素で冷却したシリンダで覆いながらCryo-SEM（JSM-840A；日本電子）の予備排気室に移し，続いて蒸着ユニットの試料ステージ上で−105℃に温度平衡させた。装置に付属のコールドナイフで試料を割断し，白金・炭素を真空蒸着した。試料ホルダーをSEM鏡筒の約−160℃の試料ステージに移し，加速電圧3〜5 kVで検鏡及び写真撮影を行った。

2）凍結切削法

−20℃の低温室に丸太を移して数時間〜1日間温度平衡させた後，この低温室内で試料作製を行った。温度平衡後，丸太より立方形の小ブロック（5×5×5 mm以下）を採取し，滑走式ミクロトームにより木口面，まさ目面または板目面を平滑に仕上げた。直ちに液体窒素に保存し，その後適宜観察に使用した。

観察の際には，まず凍結保存試料を液体窒素中で試料ホルダーに固定した。これを凍結割断法の場合と同様にして，Cryo-SEM蒸着ユニットの−105℃に保持した試料ステージに装着した。続いて，試料表面を覆う霜を除去するため，この試料ステージ上で，約1×10^{-5} Torr.，−95℃，2〜5分間の条件に従い，軽度のエッチングを行った。その後，凍結割断法と同様にして，蒸着〜検鏡・写真撮影を行った。

C. 結　果

a. 実体顕微鏡観察

写真41は内部割れの分布や形状の概要を示す写真である。年輪に沿って走行する目回り，これとほぼ直角に走行する放射状の内部割れが認められる。いずれも水食い材部に限って発生し，正常心材部（アステリスクで示した明色の領域）まで進展しているものは認められない。放射状の内部割れの放射方向の長さは様々である。小さいものでも一年輪内に収まるものは少なく，年輪境界を横切って発生しているものが多い。目回りには，年輪境界部に発生しているものと，年輪内に発生しているものがある。年輪境界部に発生しているものはほぼ完全に年輪方向に沿って滑らかに走行しているのに対し，年輪内に発生しているものはジグザグに走行している。以下に，放射状の内部割れと目回りに区別して，観察結果をさらに詳しく述べる。

1）放射状の内部割れとその近辺の材組織

写真42は，サイズの小さな二つの放射状の内部割れが近接している部位である。いずれの割れの空隙にも氷晶が詰まっており，氷晶の内部には数多くの気泡がみられる。気泡の並び方には，割れの空隙の中央部付近で放射方向に連なる傾向がある。二つの割れを隔てている部分の材組織（アステリスク）では，内部割れの空隙の拡大に応じて仮道管の放射列の走行が変化している様子が認められる。仮道管の放射列の走行が波打つなどの，圧縮変形の特徴は認められない。

写真43は，複数の年輪にわたって連続している比較的サイズの大きな放射状の内部割れが近接している部位である。複数の年輪にわたって連続している放射状の内部割れは，放射方向に一直線に走行しているわけではなく，矢印で示した箇所のように階段状に走行している。二つの割れを隔てている部分の材組織（アステリスク）では，写真42の場合と同様に，内部割れの空隙の拡大に応じて仮道管の放射列の走行が変化している様子が認められる。

写真44，45には，いずれも割れの走行が段階状に大きく変化している部分を示す。割れの走行が階段状に大きく変化している部位では，写真44のように材組織の分離を伴わない場合もあれば，写真45のように材組織がまとまって完全に分離する場合もあった。

いずれの写真でも，放射状の内部割れに接する材組織の色調は，放射状の内部割れから離れた領域の色調と同様である（写真42〜45）。また，放射状の内部割れ付近の材組織では，仮道管の放射列や放射組織の走行が，内部割れの空隙の拡大に対応して変化している。

2）目回りとそれに近接する材組織

写真46，47は，目回りの接写写真である。写真46は，年輪境界部に発生している例である。破断

の走行が年輪に沿って滑らかになっており，この倍率の観察ではほぼ完全に年輪境界部で破断しているように認められる。写真47は，明らかに年輪内の早材部に発生している例である。破断の走行がジグザグであり，接線方向から放射方向へ大きく破断面の移行を起こしている部位も認められる。いずれの目回りの空隙にも氷晶が詰まっており，氷晶の内部には数多くの気泡や破断面からはく離した仮道管が認められる。

いずれの写真でも，破断面に接する材組織が表面圧密を起こしている様子は認められない。わずかに破断面付近に明色の部位も認められるが，非常に狭い範囲に限られる（写真46，矢印）。

b. Cryo-SEM観察

以下に，1)内部割れから離れた領域の材組織，2)放射状の内部割れとその近辺の材組織，3)目回りとその近辺の材組織に分けて詳述する。

1）内部割れから離れた領域の材組織

内部割れから離れた領域では，ほとんどすべての仮道管の内腔には氷晶が充満していた。これに対して，放射組織には空洞化した柔細胞がよく認められた。空洞化した放射柔細胞は，水食い材部全域で散発的に認められ，年輪内，あるいは一放射組織内の特定の部位だけに出現する，などの一定の傾向は認められなかった。

写真48は，水食い材部の年輪境界部の木口面のCryo-SEM写真である。すべての仮道管の内腔に氷が充満している。一方，放射組織には空洞化している細胞が認められる（矢印）。

写真49は，早材部の板目面のCryo-SEM写真である。氷の詰まった仮道管の内腔が僅かだけ露出している(アステリスク)。二つの放射組織が認められ，そのうち矢印で示した柔細胞は，明らかに空洞化を起こしている。

2）放射状の内部割れとその近辺の材組織

放射状の内部割れの空隙には，気泡などの小さな空洞が散発的に認められたものの，氷晶がほぼ充満していた。これらの内部割れ近辺の材組織での水分の局在は，内部割れから離れた領域の場合と同様であり，ほとんどすべての仮道管の内腔には氷晶が充満していたが，放射組織には空洞化した柔細胞がよく認められた。内部割れの破断面付近の材組織では，表面圧密などの圧縮変形は認められなかった。

写真50，51は，それぞれ同一の放射状の内部割れの年輪境界付近，樹皮側の末端部のCryo-SEM写真である。放射状の内部割れの空隙には氷晶が充満している。すべての仮道管の内腔に氷晶が充満し，放射組織では空洞化している柔細胞（写真50，矢印）がいくつか認められる。放射状の内部割れに接する材組織では，一部の仮道管で細胞壁の破断が認められるが（写真50，アステリスク），表面圧密のような圧縮変形は観察されず，内部割れの拡大に応じて材組織全体が変形している。放射組織（写真51，矢印）の走行をみるとその状態が判る。放射状の内部割れの破断面の走行とその破断面から7つの仮道管列を隔てた部位に位置する放射組織の走行がほぼ一致している（写真51)。

3）目回りとその近辺の材組織

目回りの空隙には，気泡などの空洞が散発的に認められたものの，氷晶がほぼ充満していた。写真52～55に，目回りの空隙とその近辺の材組織のCryo-SEM写真を示す。目回りの空隙には，小さな気泡が認められものの，氷晶がほぼ充満している状態である。また，目回りの破断面に接する材組織では，表面圧密などの圧縮変形は認められない。

目回り近辺の材組織での水分の局在には，水食い材部の他の領域にはみられない特徴が認められた。目回りに隣接する樹皮側の材組織では，内部割れから離れた領域（写真48）の場合と同様であり，ほとんどすべての仮道管の内腔には氷晶が充満していた。一方，目回りに隣接する髄側の材組織では，目回りの破断面から髄方向へ数細胞～約20細胞の範囲にわたり，目回りに沿って層状に，空洞化した仮道管が集中的に出現する領域がよく認められた。

写真52，53は，氷晶の詰まった目回りの空隙とそれに隣接する樹皮側の材組織である。写真52では，小さな空洞が発生している仮道管がひとつだけ認められる。写真53では，二つの仮道管の内腔が完全に空洞化している。しかし，このような空洞化した仮道管の出現は散発的なものであり，ほとんどすべての仮道管には氷晶が詰まっていた。

写真54は，氷晶の詰まった目回りの空隙とそれに隣接する髄側の材組織である。目回りの破断面に近接する領域で，空洞化した仮道管が集中している。しかし，このような目回り髄側での集中的な仮道管の空洞化は，常に発生していたわけではなく，氷晶の表面に共晶物や沈着物と考えられる物質が多量に認められる部位で発生するという傾向があっ

た。写真55は，目回りとそれに隣接する髄側の材組織である。すべての仮道管の内腔に氷晶が充満している。そして，集中的な空洞化が認められた写真54の場合と比較して，その氷晶の表面は滑らかである。

D. 考　察

a. 凍裂と内部割れの関連

実体顕微鏡観察の結果，放射状の内部割れ付近の材組織の色調は，割れから離れた領域のそれと変わりはなかった（写真41～45）。Cryo-SEM観察では，放射状の内部割れに近接する材組織でも内部割れから離れた領域と同様に水が分布しており，ほとんどすべての仮道管の内腔には氷晶が充満していることが確認された（写真50，51）。また，放射状の内部割れから接線方向へ少なくとも数十仮道管列を隔てた領域でも，仮道管の放射列や放射組織の走行がその内部割れの破断面の走行に対応するように変化しており，放射状の内部割れの空隙の拡大に応じてそれに接する材組織が表面圧密などの圧縮変形を起こしている状態は観察されなかった。これらの結果から，放射状の内部割れを含むトドマツ凍裂木の凍裂部水食い材部では，凍結の際に氷晶析出によって放射状の内部割れの空隙が拡大することにより，図14に模式化したように，水食い材部の体積膨張が引き起こされているものと判断される。

一方，氷晶の詰まった目回り付近の材組織では，目回りに隣接する髄側の材組織で集中的に仮道管が空洞化している領域が認められるという，放射状の内部割れ付近では認められなかった特徴が観察された。しかし，このほかには放射状の内部割れ付近の材組織とほぼ同様な特徴が認められた。目回りに隣接する樹皮側の材組織では，ほとんどすべての仮道管の内腔には氷晶が充満していた。また，目回りの空隙の拡大に応じてそれに隣接する材組織が表面圧密などの局所的な圧縮変形を起こしている状態は，目回りの樹皮側，髄側のいずれの材組織でも，仮道管の内腔が集中的に空洞化しているか否かに拘わらず，全く観察されなかった。これらの結果から，目回りをもつ水食い材部でも，図15に模式化したように，凍結の際に氷晶析出によって目回りの空隙が拡大することにより，水食い材部の体積増加が引き起こされているものと判断される。

凍裂樹幹の内部にみられる氷晶の詰まった放射状の内部割れが，凍裂の発生に対してどのように寄与しているのかという点については，これまでにも凍裂の発生機構について触れているいくつかの論文のなかで論議されてきた。石田[10]は，トドマツ凍裂木の水食い材部に出現する放射状の内部割れに接する材組織は，凍結時には内部割れの空隙で氷晶が析出することにより圧縮されていること，及びその内部割れよりも離れた領域に位置する明らかに含水率の高い材と比較して明色を呈することから，含水率が低くなっていると判断している。そして，これらの結果を根拠として，氷晶の詰まった放射状の内部割れは凍結による水食い材部の膨張の原因として寄与することは考え難く，放射状の割れのうち比較的樹皮に近い領域に発生しているものが凍裂の原因となる接線方向の引張り応力に対する材の強度を低下させることにより凍裂の発生に寄与している，という見解を述べている。KUBLER[13]もこれと同様に，放射状の内部割れの空隙で起こる氷晶の析出が，凍裂を引き起こすような大きな内部膨圧を引き起こすことは考え難いという見解を述べている。また，今川ら[23]は，ヤチダモの凍裂の場合，多湿心材部に発生する放射状の内部割れの空隙で氷晶が発達することにより，それらの内部割れがそのまま樹幹表面まで進展し，凍裂が発生するという見解を述べている。

一方，凍裂樹幹の水食い材部にみられる目回りが凍裂の発生にどのように寄与しているのかという点については，凍裂の原因となる樹幹外層部での接線方向の引張り応力を引き起こし得る内部膨張の直接の原因となるという考え方が石田[10,17]により指摘されている。石田[10,17]は，著しく発達した目回りをもつオヒョウとトドマツの凍裂円板の目回りの空隙の内部に詰まっている氷晶をピンセットで取り除くことにより，円板の凍裂が閉じたことを根拠として，そのような見解を述べている。一方，今川ら[69]は，スギの新凍裂木では凍裂の割れが氷晶の詰まった目回りと連続していたことから，目回りが凍裂の発生に強く寄与しているという見解を述べている。

本研究では，放射状の内部割れと目回りのいずれの場合も，破断面に接する限られた領域の材組織で集中的に細胞が潰れているなどの，表面圧密を起こしている状態は観察されなかった。それらの破断面から離れた領域でも，本来の細胞列の走行が内部割れの空隙の拡大に対応して変化している状態が認められた。従って，放射状の内部割れと目回りは，い

ずれも凍結の際に氷晶の析出により水食い材部の体積増加を引き起こすものと判断される。

b. 内部割れでの氷晶析出機構

凍裂木の高含水率心材部で観察されたような細胞間隙で起こる氷晶析出は，草本植物でも観察されている。照本[100]は，アカビート（*Beta vulgaris* L. var. *rapa* Dumort）の根をゆっくりと凍結させることにより，その横断面において同心円状に配列している複数の維管束間の貯蔵柔細胞層で，目回り状に著しい氷晶析出が起こることを報告している。中山・原田[101]は，冬季にチャノキ（*Thea sinensis* Linn.）の樹皮が裂ける"主幹裂"という寒害の原因解明を目的として，針植のチャノキを様々な温度・処理条件で凍結させる実験を行った。その結果，保温のために鉢土にワラを被せた試料で主幹裂害が多発したこと，主幹裂は含水率の高い地際の樹幹部に発生しやすいことを明らかにしている。そして，その原因が師部での氷晶析出であるという見方を述べている。

また，温帯北部に生育するいくつかの樹種の放射柔細胞などの越冬細胞では，原形質の水分が細胞外のアポプラストの空隙に析出して（細胞外凍結）脱水されることにより，原形質の凍結による細胞死を回避していると考えられている[67]。この場合，氷晶の析出する場所が細胞間隙とは限らず，隣接する道管内腔などに析出する場合もあるが，同様な現象であると考えられる。一方，氷晶析出は，微粒などの特定の構造的特徴をもつ土壌などの粉体中でも発生し，霜柱や凍上の原因となる[102]。これらの氷晶析出しくみについては，次のように説明されている。

越冬細胞の場合には原形質膜，あるいは細胞壁が，液体の水を通し得る一方で氷晶の侵入に対しては障壁となるような構造になっている。微粒な粉体の場合には，粉体を構成する粒子間の空隙が微小なため，液体の水を通し得る一方で氷晶の侵入に対しては障壁となる。このような構造物を隔てて両方に水が存在し，氷点下まで温度が低下したとき，一方の水が過冷却したままなのに対してもう一方が凍結した場合，氷点下の等温下では過冷却した水の表面蒸気圧の方が凍結した水（氷）のそれよりも高いため，その化学ポテンシャル差を駆動力として，過冷却した水分は障壁を通って氷晶の表面に析出する。

Cryo-SEM観察では，目回りに隣接する髄側の組織で集中的に細胞内腔が空洞化している領域が認められた。この結果から，目回り部での氷晶析出の機構について，上述と同様に次のように説明できるかも知れない。樹液の凍結は，まず樹幹の外層部で始まり，その凍結面は徐々に樹幹の中心部へ進行していく。凍結面が目回りまで達したとき，仮に目回りに隣接する材組織が液体の水を通しやすい一方で氷晶の侵入に対して障壁となるような構造になっているとすれば，氷点下の等温下での過冷却した水と氷との表面蒸気圧の差を駆動力として，目回りに隣接する髄側の材組織の過冷却した水分は，目回りの空隙で凍結した氷晶の表面に析出する。

Cryo-SEM観察により，目回りに隣接する髄側の材組織で空洞化した仮道管が集中的に発生している領域では，空洞化した仮道管が発生していない領域と比較して沈着物が多量に堆積しているという傾向が認められた。これらの沈着物が，液体の水を通しやすい一方で氷晶の侵入に対して障壁となるような構造をもっているのかも知れない。そのために，沈着物が多い領域で空洞化が発生した可能性が考えられる。今後，これらの沈着物の空隙構造や化学組成について究明する必要がある。

しかし，目回りに隣接する髄側の材組織で，集中的に仮道管の内腔で空洞化が発生している場合，目回りの髄側の材組織の空洞量よりも目回りの氷晶量の方がはるかに多いようであった。また，氷晶の詰まった目回りに隣接する髄側の組織では空洞化が必ず発生しているわけではなかった。さらに，放射状の内部割れ近辺の材組織ではそのような空洞化の集中的な発生は全く観察されなかった。従って，隣接する組織から水分が水平方向に移動する析出機構だけでは氷晶析出により目回りの空隙が拡大するしくみについて説明をつけることはできない。目回りや放射状の内部割れの空隙での氷晶析出機構を明らかにするためには，樹軸方向の水の移動による析出の機構も検討する必要があるかも知れない。

VI. 凍裂及び内部割れの破壊形態

A. 概　説

木材の破壊形態を微細構造レベルで明らかにすることは，組織構造学的，並びに材料科学的に興味深い問題である。また，木材の破壊機構を解明するうえでも重要な問題である。そのため，木材の破壊形態についての組織学的研究は多くの研究者により試みられ，報告されてきた。そのうち，破壊時の温度

と破壊形態の関連を検討している研究例として，次のような報告がみられる。

KORÁN[103]は，−190℃から250℃までの範囲の様々な温度下でマリアナトウヒ［*Picea mariana* (Miller) B. S. P.］材を接線方向に引張り破壊させ，その放射破断面の仮道管間の破壊形態について電子顕微鏡的に詳しく調べている。その結果，(1)100℃以上の高温下での引張り破壊では破断面が全体に平滑であること，(2)常温（約25℃）以下の温度領域での引張り破壊では，壁切断破壊や壁層レベルでの破断面の移行が増加することにより破断面が全体に粗くなること，(3)さらに低い温度下での引張り破壊では有縁壁孔対の壁孔縁の破壊が頻発することなどを明らかにしている。WOODWARD[104]は，20，40，60，77℃の4通りの温度下で，針葉樹材を放射方向，及び接線方向に引張り破壊させ，それぞれの温度下での破断面の仮道管間の破壊形態の特徴について調べている。その結果，いずれの温度下でも二次壁S1層で破断を起こすという点では一致すること，20℃での破壊の場合には，壁層・ラメラレベルでの破断面の移行が多かったのに対して，77℃での破壊の場合には破断面ではそのような微細構造レベルでの破断面の移行がほとんど認められないという明らかな違いがあったことを報告している。

このように，木材を引張り破壊させた場合，その破断面は破壊時の温度に応じて特徴的な破壊形態を呈する。従って，破壊形態の特徴を解明することにより，逆に破壊時の温度を推定することができると考えられる。

これまで述べてきた本研究の結果から，凍裂木の水食い材部に出現する氷の詰まった目回りや放射状の内部割れは，凍裂の発生要因として寄与している可能性が強い。しかし，これらの氷の詰まった内部割れについては，水食い材部の凍結の際に氷晶の折出によって発生したのか，それとも常温下で別の原因で発生した内部割れの空隙に氷晶が折出したのか，その成因は明らかではない。しかし，これらの内部割れの破断面の破壊形態的特徴を明らかにすることにより，少なくとも内部割れの発生時の温度条件を推定できる可能性がある。そこで，トドマツ凍裂木を使用し，凍裂，放射状の内部割れ，目回りの破断面の破壊形態の観察を行い，それぞれの特徴を整理・比較した。

B. 研究方法

a. 材　料

光学顕微鏡観察とSEM観察には，凍裂樹幹の傷害組織の光顕微鏡（III章B-e）に使用したFAA固定試料(トドマツ1，2；表4)を観察材料とした。本章のCryo-SEM観察は，V章の観察の副産物であり，材料（トドマツ4；表4）はV章Bに記載した通りである。

b. 光学顕微鏡観察

凍裂や内部割れの破断面をふくむ小材片を，その破断面に触れないように注意しながら採取し，約1×1×1 cmのブロックに整形した。このブロックより，スライディング式ミクロトームにより厚さ15〜25 μmの木口面切片を薄切した。染色〜検鏡の手順は，III章B-eに記載したとおりである。

c. SEM観察

凍裂の破断面を含む小材片を，破断面に刃先や指が触れないように注意しながら採取し，直径1 cmの円筒形のSEM試料台に載せることができる寸法に整形した。一部の試料については，とくに対応破断面を対照させて同一の試料台上で観察するために，凍裂あるいは内部割れ付近の材部より，相対応する破断面を含む小材片を組にして採取・整形した。アセトンによる溶媒置換乾燥，または臨界点乾燥の後，導電性接着剤（ドータイト；藤倉化成）で試料台に固定した。これに炭素と金を二重蒸着し，SEM（JSM35CF-2；日本電子）により加速電圧15 kVで検境及び写真撮影を行った。

d. Cryo-SEM観察

観察試料の作製法，検鏡法はV章B-bに記載したとおりである。

C. 結　果

a. 破断の走行

以下に，1）凍裂，2）放射状の内部割れ，3）目回りに分けて，結果を詳述する。

1）凍　裂

凍裂の破断面は，ひとつの仮道管放射列の放射壁から別の仮道管放射列のそれへと頻繁に移行しており(破断面の移行)，そのため木口面で観察すると階段状に走行していた（写真56〜58)。破断面の移行の程度は様々であり，かなり多数の仮道管放射列単位で破断面の移行が起こっている場合もあれば（写真56，矢印；57，大矢印；58，矢印)，ごく少数の仮道管放射列単位で破断面の移行が起こっている場合もあった（写真57，小矢印)。一年輪内では，年

輪境界部で破断面の移行が起こる（写真58，矢印）ことは比較的少なく，年輪内で起こっている場合（写真56～58）が多いという傾向があった。

2）放射状の内部割れ

放射状の内部割れの破断の走行にも，凍裂の場合と同様な特徴が認められた。写真59～61は，いずれも放射状の内部割れ付近の光顕写真である。放射状の内部割れのサイズは様々であり，破断面の移行の程度も異なるが，いずれも(1)破断面の移行が随所で発生し，階段状に走行する，(2)年輪境界部では破断面の移行が少ない，という凍裂と同様な特徴が認められる。

放射状の内部割れのうちサイズの小さいものは，光顕で観察した限りすべて写真59，60のように，年輪境界を横切って発生していた。非常にサイズの小さいものでも，その外端はわずかながら年輪境界を越え，樹皮側に隣接する年輪のイニシャル部まで達している状態が観察された（写真59）。

3）目回り

年輪境界部付近で発生する目回りの破断は，年輪境界，または髄側の年輪のターミナル部に位置する晩材仮道管間で起こっており，年輪イニシャル部に位置する放射径の大きい仮道管間で起こってる場合は観察されなかった。写真52，53には，いずれも目回りの樹皮側の破断面付近の材組織が示されている。破断面に沿って，放射径が小さく厚壁の晩材仮道管が随所に認められる。一方，写真54，55には，目回りの髄側の破断面付近が示されている。破断面付近は，放射径が小さく厚壁の晩材仮道管だけから構成され，放射径が大きく薄壁の早材部の仮道管は全く認められない。目回りの髄側破断面，樹皮側破断面に，それぞれ以上のような特徴が認められたことから，年輪境界部付近で発生する目回りの破断は年輪境界～年輪のターミナル部に位置する晩材仮道管間で起こっているといえる。

b．破断面のSEM観察

SEM観察により破壊形態をさらに微細構造レベルで観察した結果を，放射破断面と接線破断面に分けて以下に述べる。放射破断面の観察では，凍裂と放射状の内部割れの破断面での仮道管放射壁間，仮道管・放射柔細胞間の破壊形態的特徴について検討した。接線破断面の観察では，凍裂や放射状の内部割れの破断面の移行部と目回りの破断面での，仮道管接線壁間，放射柔細胞間の破壊形態的特徴について検討した。木材の破壊形態に関する分類と用語は佐伯[105]に従い，細胞間層とそれに近い細胞壁内での破断を壁界破壊，細胞壁の分断を伴う破断を壁切断破壊に大別して記載した。以下に，1)放射破断面の破壊形態，2)接線破断面の破壊形態に分けて詳述する。

1）放射破断面の破壊形態

凍裂の破断面と放射状の内部割れの破断面との間には，微細構造的にも破壊形態に相違は認められず，同様な破壊形態的特徴が認められた。写真62，63に，放射状の内部割れの対応破断面を対照させた組写真(以下，マッチング写真と記す)を示す。仮道管の末端部が単独，あるいは束になって部分的にはく離している（写真63）。仮道管の壁切断破壊も認められる（写真62，大矢印；写真63，大矢印）。仮道管・放射柔細胞間の破断では，放射柔細胞の壁切断破壊が頻発している（写真62，小矢印；写真63，小矢印）。

写真64は，仮道管間の壁界破壊の破断面のうち，壁孔の少ない領域の拡大である。樹軸方向に長く帯状を呈する，対応破断面側の仮道管壁の壁層断片が仮道管の接線壁間の窪みを覆っている(矢印)。そのため，仮道管接線壁間の窪みが認められない。

写真65，66は，仮道管間の壁孔のない領域の壁界破壊の破断面のマッチング写真である。一方の破断面に傾角が70～90℃の縞状の構造が認められ（写真65），対応破断面には鏡像のように一致する縞状のテクスチャーが認められる（写真76）。これらの縞状のテクスチャーはミクロフィブリル配向を示している。針葉樹材の仮道管壁内でこのようなフラットヘリックスのミクロフィブリル配向をもつ壁層にはS1層とS3層があるが[53,54]，傾斜方向が右上がりから左上がりへと画然と変化している部位のギャップの程度から，破断がS3層のような二次壁の内層で起こっていることは考え難い。二次壁の外層部に位置しているS1層内での壁界破壊であると判断される。

壁孔の少ない領域の仮道管間の破断を図16に模式的に示した。凍裂ならびに放射状の内部割れの仮道管間の破断は，一方の破断面側の仮道管壁のS1層から他方の破断面側の仮道管壁のS1層への破断面の移行を，この図のようにかなり規則的に繰り返す，壁界破壊であると判断される。

写真67，68は，有縁壁孔対が数多く集中的に存

在する領域の破断面のマッチング写真である。有縁壁孔対の壁孔縁の破壊が比較的多く認められる（矢印）。また，対応破断面側の壁層の断片が仮道管接線壁間の凹部を規則的に覆っているため，そのギャップが認められない（図16）という，壁孔の少ない領域で見られたのと同様な特徴も観察される。

写真69，70は，仮道管・放射柔細胞間の破断面のマッチング写真である。分野壁孔付近では，とくに壁層レベルでの破断面の移行が部分的に起こり，そのため仮道管側の破断面に分野壁孔の孔口が露出している部位がある（写真69，矢印）。これ以外の領域では，ミクロフィブリル配向を示す縞状の構造が放射柔細胞軸と平行に走行しているのが部分的に認められる。放射柔細胞壁内でその細胞軸と平行なミクロフィブリル配向をもつのは一次壁最外層（P1）層であり[106]，このことから仮道管・放射柔細胞間の破断は，放射柔細胞壁のP1層内を破断面とする壁界破壊であると判断される。

2）接線破断面の破壊形態

接線破断面には，目回り及び凍裂や放射状の内部割れの破断面の移行部（木口面でみて階段状の部分；写真56～58，矢印）の2種類がある。仮道管間の破断面では，両種の破断面ともにほぼ同様な特徴が認められ，壁界破壊と壁切断破壊が認められた。

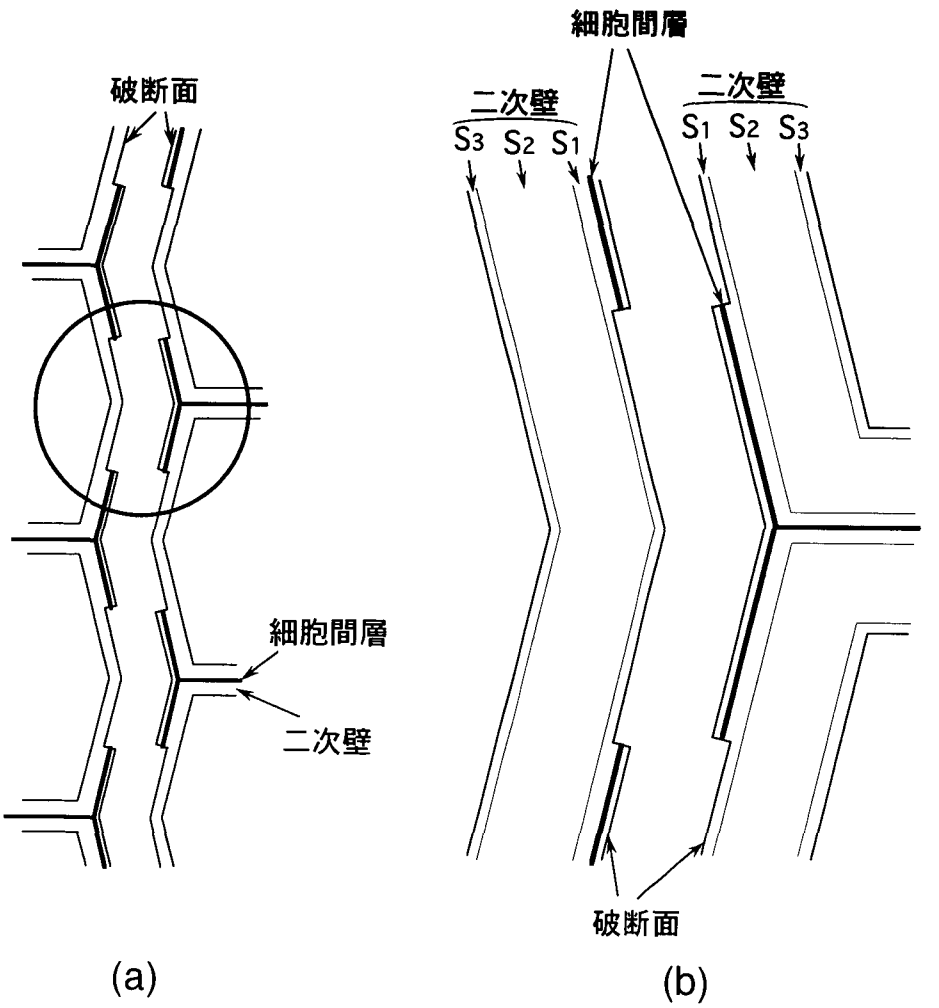


図16　凍裂および放射状の内部割れの仮道管間の破断の模式図
(b)は(a)の円内の拡大

このうち，壁壊破壊はS1層での破断であった。一方，放射柔細胞間の破壊形態にははっきりと異なる特徴が認められた。以下に，放射柔細胞間の破壊形態について詳述する。

写真71，72は，凍裂の破断面の移行部である。壁切断破壊が多く，加えて壁層の断片が表面上にササクレている。放射柔細胞はほとんどすべて壁切断破壊を起こしている。（写真71，小矢印；72）。

写真73に目回りの破断面を示す。凍裂や放射状の内部割れの破断面の移行部と同様に，壁切断破壊（大矢印）や仮道管の末端部の部分的なはく離が認められる。一方，放射柔細胞の破壊形態には，凍裂や放射状の内部割れの破断面の移行部とははっきりと異なる特徴が認められた（小矢印）。ほとんどすべての放射柔細胞が壁界破壊により分離しており，壁切断破壊は認められない。

写真74は，放射組織の破断面の拡大写真である。仮道管間の破断面よりも放射柔細胞が突出しており，細胞の切断を起こしていない。凍裂や放射状の内部割れの破断面の移行部の放射組織の破壊形態（写真72）とははっきりと異なる。

D. 考　案

a. 放射状の内部割れの成因

放射状の内部割れの破断面には，凍裂の破断面と同様な破壊形態的特徴が認められた。そのうえ，KORÁN[103]が指摘している，常温以下の温度領域で針葉樹材を引張り破壊させた際の破断面の破壊形態的特徴との一致点が認められた。KORÁN[103]は，常温以下の温度領域では，破壊時の温度が低くなるにつれて壁切断破壊，有縁壁孔対の壁孔縁の破壊，壁層レベルでの破断面の移行が増加し，そのため破断面が全体的に粗くなることを報告している。本観察では，壁層レベルでの破断面の移行が多くみられた点，及び有縁壁孔の壁孔縁の破壊が比較的よく認められた点で，KORÁN[103]が指摘した低温下での破壊形態的特徴と一致する。

石田[10]は，これらの放射状の内部割れが，その空隙での氷晶の析出と融解の繰り返しにより発達するという考えを述べている。さらに，充分に含水させたカラマツ材やトドマツ材を凍結させると氷の詰まった放射状の割れが発生することがあることを実験的に確かめている。本観察でも放射状の内部割れの破断面には，低温下で発生したことを示唆する破壊形態的特徴が認められたことから，少なくともその発達には氷晶の折出が大きく寄与しているものと筆者も考える。発生後間もないときには写真59に示したように年輪境界付近で発生し，凍結と融解を繰り返すうちにその空隙が拡大し，さらに個々の小さな割れが連結していくことにより，数年輪にわたり直線的に発達していくのに違いない。

しかし，放射状の内部割れの最も初期段階の発生のしくみは不明である。氷晶の析出によりそのような放射状の内部割れが発生したのか，それとも最も初期段階では別の成因によって微小な割れが発生し，そこに氷晶が析出することにより肉眼的にも認め得るようなサイズにまで発達したのかについては，本結果から判断することが困難である。

これまでに，このような樹芯部での放射方向の内部割れの発生要因については，1)強風により樹幹が曲げやねじれを起こすことにより一時的に発生する内部応力，2)成長応力や樹幹が傾斜することにより引き起こされる内部応力などの，長い期間にわたり樹幹に残留する内部応力，3)樹幹の損傷やバクテリアなどの生物的因子，などが指摘されている[107]。しかし，これらの因子は，“heart shake（心裂け）”という髄から放射状に発生するサイズの大きい放射状の内部割れの成因として指摘されているものであり，凍裂樹幹の高含水率心材部に認められたような微小な放射状の内部割れについてのものではない。凍裂樹幹の高含水率心材部に認められたような氷の詰まった放射状の内部割れの成因や発達のしくみについての研究例や記載は限られており，今後さらに検討を加えてみるべき課題のひとつである。

b. 目回りの成因

目回りの成因については，材の損傷や傷害組織と目回りの発生との関連性を指摘する報告例がみられる[108-112]。その一方で，傷害組織と目回りの関連性を否定する報告もある[113]。MEYER・LENEY[111]は，針葉樹材の目回り付近の材組織を光顕観察し，傷害樹脂道付近で発生する場合が多いことを報告している。KANDEEL・MCGINNES[108]は，ベルチナラ（*Quercus velutina* Lamarck）の目回りの発生部位や破壊形態を光学顕微鏡的，及び電子顕微鏡的に観察した結果，傷害組織付近で発生することが多いことを報告している。SHIGO[112]は，広葉樹数樹種について樹幹内部での目回り出現部位を調べた結果，目回りはすべて傷痕付近で発生していたことなどを根拠として，傷痕付近での微生物の働き，エイジン

グの過程で樹幹内部に生じる樹幹内部の応力，風による応力などが加わって，目回りは発生・発達していくという見解を述べている。McGinnes・Wu[114]は，目回りの発生部位やその付近の化学成分を調べた結果，目回りが発生している材部の化学組成が正常材部のそれとは異なっていたことを明らかにしている。そして，この結果から，樹幹の損傷部付近では細胞壁成分が劣化し，そのため目回りの発生が起こりやすくなっているという見解を述べている。これに対して，Owen・Wilcox[113]は，針葉樹材の目回りの樹幹内分布や破壊形態を光学顕微鏡的に調べ，目回りは必ずしも傷害樹脂道の発生している年輪に発生するわけではないことを明らかにしている。Owen・Wilcox[113]は，さらに傷害樹脂道を含む針葉樹材の木片について引張り破壊試験を行っている。その結果，傷害樹脂道で破断がおこる場合が比較的少ないことから，傷害が目回りの原因であるという見方に対して疑問を表明している。

本研究では，観察した限り，目回り近辺の材組織には傷害樹脂道は全く観察されなかった。従って，少なくともトドマツの水食い材部に発生する目回りの場合，その発生と傷害樹脂道との間に密接な関連があるとは考え難い。いずれにせよ，目回り発生の最も初期段階のしくみ及びその発達過程についても，放射状の内部割れ発生のそれと同様に不明の点が多く残されており，今後さらに検討を加える必要がある。

VII. 人工凍裂の誘発実験による発生要因の検討

A. 概　説

生立木の樹幹内部には，その伸長成長と肥大成長の過程で本来的に生じる成長応力といわれる複雑な内部応力が作用している。凍裂の発生と深く関連がある樹幹の接線方向の成長応力は，樹幹表面付近では圧縮応力になっている[16,115]。そのため，生立木の樹幹には凍裂のように樹幹表面まで達する放射縦断面の割れは発生し難いと考えられている[115]。この接線方向の圧縮応力の大きさは，樹幹表面から樹幹の内部に進むにつれて減少し，ある部位でゼロになる。そして，それよりも内側では逆に引張り応力に転じ，その大きさは内部に進むにつれて増大する。

樹幹内部には一般には以上のような接線方向の成長応力が本来的に作用しているが，その分布や大きさは，節，木理の走行，樹幹内部での含水率の変動により局所的には個体内でもかなりの変動があるに違いない。さらに，それが凍結した場合には，低温乾縮の影響が加わり，常温下の場合とは異なった状態になるものと推察される。従って，凍裂の発生機構を検討するには，無欠点の理想的な木材片を使用した試験から得られた木材の熱的性質や膨潤・乾縮に関する一般的知識だけではなく，円板や丸太の状態で冷却した場合にその内部に起こる様々な現象を捉えることが不可欠であると考える。

これまで，凍裂の発生機構を明らかにすることを目的として，円板状態の木材について冷却過程での物性学的挙動を調べた研究は少なくない。ふるくにはCaspary[56]が，円板に人為的に凍裂状の鋸目を入れ，冷却過程での鋸目の幅の変化を観測する実験を行っている。その結果，温度の低下に従い凍裂を発生させるような内部応力が確かに円板内に発生することを示唆する結果を得ている。石田[10,17]はトドマツについて同様な実験を行い，水食い材などの異常材部をもたない正常な円板の外層部では，接線方向の圧縮応力が約−8℃以下になると引張りに転じることを示唆する結果を得ている。石田[10,17]は，上述の実験とは別に，凍裂をもつ丸太を凍結・融解させた際の凍裂の開閉の挙動と樹幹の温度変化との関連について調べ，凍裂の開閉が樹芯に位置する水食い材部の凍結・融解に応じて起こることも明らかにしている。近年では，今川ら[74]がスギの凍裂木について同様な実験を行い，ほぼ同様な結果を得ている。これらの研究は，木材の熱的性質や膨潤・乾縮に関する一般的知識だけでは推定することの困難な知見を提供している。

元々凍裂をもたない円板や丸太に実験室的に凍裂を誘発させることが仮にできれば，凍裂発生の原因やしくみを検討するうえでさらに有益な知見を得ることが期待できるだろう。たとえ偶発的にしか誘発させることができなかったとしても，凍裂が発生した試料と発生しなかった試料の構造的な違いを明らかにすることより，凍裂の発生機構を解明するための有力な手掛かりを得ることができるに違いない。また，それを手法的に確立し，実験系として利用して，冷却過程での円板の変形の仕方や応力分布の変化を解析するなど，さらに物性学的・材料力学的な検討を加えることにより，凍裂の発生機構を細部にまでわたり解明できる可能性がある。

生材の円板を実験室的に冷却した際に，円板に割裂が発生するかどうかを調べた報告例は，SCHIRP ら[66]，富田・滝尻[87]のほかには見あたらない。SCHIRP ら[66]は，凍裂の発生機構を検討することをひとつの目的として，数種の広葉樹の生材状態の円板を室温下から－40℃の冷凍庫に移した際に，円板がどのように温度低下を起こし，基本3方向にそれぞれどのように収縮するのかについて解析している。そして，冷却によりいくつかの円板に割裂が発生したことを報告している。しかし，いずれも割裂の発生は心材部にとどまり，樹幹表面にまで達する凍裂状の割れを誘発させるには至っていない。富田・滝尻[87]は，(1)スギの凍裂木のなかの凍裂が発生している部位より採取した丸太，(2)同じ樹幹のなかの凍裂が発生していない部分から採取した丸太，及び(3)健全木から採取した丸太を，－30℃に冷却させた場合の割裂の発生状況を調べている。その結果，(1)では凍裂部が大きく開いたのに加えて新たに小さな割裂が発生したこと，(2)では小さな割裂が発生したこと，(3)では全く変化が起こらなかったこと，を報告している。しかし，"小さな割裂"というのが，樹幹表面まで達する凍裂状の割れのことなのか，それとも内部割れのことなのかについては，明記されていない。

本章では，本研究でこれまでに得られた結果より推定された凍裂の発生要因についての考えをさらに検討するために，円板に人為的に凍裂を誘発させる実験を行った。その結果，一部の試験体に凍裂状の割れが誘発された。そのため，凍裂が誘発された円板と誘発されなかった円板との間での，内部構造上の違いについても検討を加えた。

B. 実験方法

a. 放射方向の温度勾配の付与による誘発試験

供試木として，ハルニレ天然木1本（胸高直径，約13 cm；北大天塩地方演習林産），ヤマナラシ（*Populus sieboldii* Miquel）植栽木2本（胸高直径はいずれも約20 cm；北大演習林実験苗畑産）を使用した。伐採後，直ちに長さ1～2 mに玉切りし，木口面にワセリンを塗布してからアルミホイルとポリ袋を被せ，防水した。この状態で－5℃のプレハブ低温恒温室に冷凍保存した。

実験方法の概要は図17に示したとおりであり，手順は次のとおりである。保存丸太より厚さ約15 cmの円筒形の樹皮付き樹幹試料を採取し，髄付近

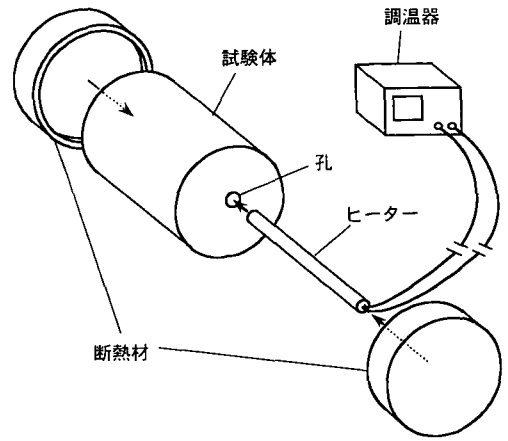


図17　円筒形の樹皮付き樹幹試料内に放射方向の温度勾配を与えるための方法

を直径1.4 cmのドリルで穿孔した。この孔に，直径8 mmのアルミパイプに水道管の凍結防止用のヒーティングケーブル（直径2 mm）をコイル状に隙間なく巻き付け，これをビニールカバーで被覆するという手順で棒状に加工したヒーターを挿入した。木口面にはワセリンを塗布し，その上にアルミホイルを被せて防水し，さらに試料内部における熱流方向をできるだけ放射方向とするために断熱材を被せた。この状態で試料を約－20℃～－80℃の一定温度に選択・設定した冷凍庫に入れて冷却し，一方で円板の中心部に挿入したヒーター温度を－5～＋30℃の一定の温度に選択・設定して加温することにより，試料内に放射方向の温度勾配を与えた。こうして一定の温度勾配を与えたまま2～5日間静置した後，ヒーターによる円板中央部の加温を停止し，さらに1日そのまま経過させて試料を完全に凍結させた。続いて，これを－15℃の低温室に運び，凍結状態のまま試料の中央付近を手鋸で切断し，その内部状態を肉眼及び実体顕微鏡により観察した。

b. 含水処理した円板の冷却による誘発試験

供試木は，ヤチダモ天然木1本（胸高直径，約18 cm；北大中川地方演習林産），ヤマナラシ植栽木2本（前項の実験と同一の供試木）である。これらの樹種を使用したのは，両樹種ともに液体浸透性が高く，含水処理を施しやすいからである。伐採後直ちに前項に記載したとおりに玉切り，木口面の防水を行い，冷凍保存した。

冷凍保存しておいた丸太より厚さ5～10 cmの円板状の樹皮付き樹幹試料を採取した。これを水を満たした金属容器に入れ，円板を完全に水没させた状態で煮沸と冷却を繰り返した。こうして充分に含水させた円板の木口面にワセリンを塗布し，その上にアルミホイルを被覆して防水した。さらに，試料が冷却される際にその内部の熱流方向をできるだけ放射方向とするために，試料の木口面に段ボールや発砲ウレタン，スポンジなどを被せ（厚さ約5 cm），断熱した。これをそのまま単に－80℃の冷凍庫に入れ，2日間静置した。その後，－15℃の低温室に運び，温度平衡させてから，凍結状態のまま試料の中央付近を手鋸で切断し，試料の内部状態を肉眼及び実体顕微鏡により観察した。

c. 木口面上での内部割れ面積占有率の測定

凍裂の誘発実験により，円板に内部割れが著しく発達する場合にだけ，凍裂が誘発されるという結果が得られた(後述)。そこで，内部割れの発達と凍裂の発生との関連をさらに詳しく調べるために，前項（b）の実験に使用したすべての試料について，画像解析により木口面上での内部割れの面積占有率を求めた。

－15℃の低温室で，試料の木口面に透明のプラスチックシートをかけ，極細の油性マジックペンにより，木部，内部割れの輪郭，凍裂の輪郭を写し取った。この断面トレース図をイメージスキャナ(GT-6500；EPSON）を介してパソコン（Quadra700；Machintosh）上に72 pixel/inchの条件で入力し，画像解析ソフト・NIHイメージにより，木部，内部割れの空隙の面積を計測した。これらの測定値から円板木口面上での内部割れの面積占有率（内部割れの空隙面積／木部面積）を算出した。

C. 結　果

a. 放射方向の温度勾配の付与による試験

ハルニレについては計3枚，ヤチダモについては計5枚，ヤマナラシについては計8枚の円板試料を作製し，実験を行った。冷凍庫内と試料中心部に挿入したヒーターとの温度差に拘わらず，いずれの試料にも樹皮表面まで達する凍裂状の割れ（以下，人工凍裂と記す）は誘発されなかった。なかには，冷凍庫内温度を約－80℃，試料中心部に挿入したヒーター温度を＋20℃に設定した試料もある。しかし，結果は同様であり，髄付近に軽微な放射状の内部割れが認められることはあったが，人工凍裂は誘発されなかった。

一方，試料中心部に挿入したヒーターの温度によって，試料の内・外部に割裂の発生以外の変化が引き起こされることがあった。ヒーターを0℃以上の一定温度に設定した試料では，ヒーター付近の材部が脱水され，試料木口面に霜が析出するという変化が認められた。これに対して，ヒーターを0℃以下の温度に設定した試料では，試料の内・外部に肉眼的及び実体顕微鏡的に認め得る変化は観察されなかった。

b. 含水処理した円板の冷却による試験

以下に，まず1）ヤマナラシと2）ヤチダモに分けて結果を述べ，続いて3）内部割れの面積占有率と凍裂の発生との関連を検討した結果について述べる。

1）ヤマナラシ

写真75～77に，人工凍裂が誘発された試料の横断面を示す。樹幹表面まで割れていることが明らかである。人工凍裂の割れの内端は辺・心材の境界部付近にとどまっている（写真76)。樹芯部には，人工凍裂の割れとは別に，髄を通る放射状の内部割れが発生しており，その内部には氷晶が詰まっている（写真75，小矢印；写真77，小矢印)。比較的サイズの小さい放射状の内部割れも認められる（写真77，小矢印)。

写真78，79は，凍裂が誘発されなかったヤマナラシの円板の横断面である。人工凍裂は認められない。髄付近に放射状の内部割れが認められるが，そのサイズは凍裂が誘発された円板の場合と比較して，はるかに小さい（写真79，矢印)。

2）ヤチダモ

写真80～82は，人工凍裂が誘発された試料の横断面である。試料の内部状態には，人工凍裂が誘発されたヤマナラシの場合と類似点が多い。凍裂の内端は樹芯部深くまでは達していず，心材外縁部の比較的浅い部位にとどまっている（写真80，81)。樹芯部には，人工凍裂とは別に，サイズの大きな放射状の内部割れが発生している（写真80，82)。しかし，この内部割れの空隙には氷晶が充満していず，ほぼ空洞になっている（写真82)。この点でヤマナラシの場合とは異なる。

なかには，2本の人工凍裂が誘発された試料や3本の人工凍裂が誘発された試料もあった。いずれの場合も，人工凍裂とは別に心材部にサイズの大きな

内部割れが認められるという点で一致していた。また，人工凍裂の割れは樹芯部深くまでは進展せず，樹幹の比較的浅い部位にとどまっている点でも一致していた。

写真83，84は，凍裂が誘発されなかったヤチダモの円板の横断面である。人工凍裂は認められない。人工凍裂が誘発されなかったヤマナラシの円板と同様に，髄付近に放射状の内部割れが認められるが，凍裂が誘発された円板のそれと比較して非常に軽微である（写真84）。

3）内部割れの面積占有率と凍裂の発生

画像解析により試料木口面上での内部割れの面積占有率（内部割れの空隙面積/木部面積）を調べた結果，その面積占有率がある一定の値以上に達する試料だけに人工凍裂が誘発されていた。図18にこの測定結果を示す。ヤチダモ，ヤマナラシ両樹種ともに，試料木口面上での内部割れの面積占有率が約0.8%以上のものにだけ人工凍裂が誘発され，その値が0.8%未満の試料には人工凍裂は誘発されていない。

D. 考　察

放射方向の温度勾配を付与する実験では，いずれの試料にも人工凍裂は誘発されなかった。冷凍庫内の温度を−80℃，試料中心部の温度を+20℃という，天然下では起こり得ないような温度条件を設定しても，試料に人工凍裂は誘発されなかった。この結果から，凍裂の発生要因が樹幹内部での放射方向の温度勾配であることは考え難い。たとえ樹幹内部での放射方向の温度勾配が凍裂の発生に寄与することはあっても，その寄与の程度は小さく，不可欠の因子ではないものと判断される。

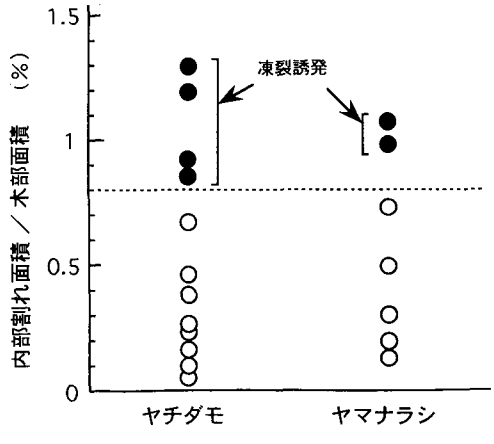


図18　円板試料の横断面における木部面積に対する内部割れ面積の比
●　；人工凍裂が誘発された試料
○　；人工凍裂が誘発されなかった試料

但し，この実験では試料の中心部を加温するのにヒーターを挿入するために，円板の髄付近に直径1.4 cmの穿孔を施している。このような樹芯部での孔の存在により，低温乾縮や熱収縮の異方性に起因する樹幹接線方向の引張り応力が緩和された可能性がある。凍裂の発生に対する樹幹内部の放射方向の温度勾配がどの程度凍裂の発生に寄与するのかという点について，さらに厳密に検討する必要があるかも知れない。

一方，含水処理した円板状の樹皮付き樹幹試料を単に凍結させる実験では，いくつかの試料に人工凍裂を誘発させることができた。人工凍裂が誘発された円板には，人工凍裂とは別に，内部割れが著しく発達しているという，構造的特徴が共通して認められた。この点では，天然下で発生した凍裂樹幹の構造的特徴と一致する。

人工凍裂が誘発された円板には，いずれも放射状の内部割れが著しく発達していた。これまでに，凍裂樹幹の内部に放射状の内部割れが著しく発達している場合があることは，既往の研究報告にも記載され，その内部割れと凍裂の発生との関連については，議論されてきた[10,13,14,17,23,63]。それらの報告では，このような放射状の内部割れが，材の接線方向の引張り強度を低下させる[10,23]，樹幹に接線方向の引張り応力が引き起こされたときにこれらの放射状の内部割れ末端部で応力集中が起こる[13,14,63]，あるいはこのような放射状の内部割れの空隙に析出する氷晶の膨圧により，その放射状の内部割れがそのまま樹幹表面まで達する[23]ことにより，凍裂の発生に寄与するという見解が述べられている。しかし，仮に放射状の内部割れの末端部で応力集中が起こる，あるいは放射状の内部割れの空隙に析出する氷晶の膨圧により，その放射状の内部割れが樹幹表面まで達し，凍裂として発生するのならば，凍裂の内端部は放射状の内部割れと接続して同方向へ進展するという一定の位置的関係が認められるはずである。しかし，本実験で人工凍裂が誘発された試料では，人工凍裂の内端は内部割れと連続していず，ある程度の距離を隔て，異なる方向へ発生している（写真75，80）。凍裂と放射状の内部割れにはこの

ような位置関係が認められることから，放射状の内部割れが強度的な弱点として凍裂の発生に寄与したこと，あるいは放射状の内部割れがそのまま樹幹表面まで進展して凍裂となることは考え難い。

天然下で発生した凍裂樹幹にみられる放射状の内部割れの場合，(1)凍結状態のときにはその割れの空隙に氷晶が詰まっている，(2)その内部割れから距離を隔てた領域の材組織でも，氷晶析出による割れの空隙の拡大に応じて材組織が変形を起こしている，などの形態的特徴が認められた。これらの観察結果から，氷晶析出による割れの空隙の拡大により凍結時の凍裂樹幹では材組織全体の体積増加を伴う内部変形が引き起こされ，こうして引き起こされた内部変形に応じて樹幹の外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が生じ，凍裂の要因となっていることが示唆された（V章）。本章の実験で人工凍裂が誘発されたヤマナラシの試料の場合，放射状の内部割れの空隙には氷晶が詰まっていたという点で天然下で発生した凍裂樹幹の場合と一致する。従って，ヤマナラシの円板に誘発された人工凍裂の場合にも，その発生要因について同様に考えることができるだろう。氷晶析出により放射状の内部割れの空隙が拡大し，こうして引き起こされた試料の内部変形に応じて円板の外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が発生し，凍裂が発生するに至ったものと考える。

一方，ヤチダモの場合，放射状の内部割れが著しく発達した円板にだけ人工凍裂が誘発され，その内部割れと人工凍裂が距離を隔てて異なる方向へ発生していたという点ではヤマナラシの場合と同様であった。しかし，その内部割れの空隙には，破断面にザラメ状の氷晶が析出しているにとどまり，ほぼ空洞になっていたという相違がある。従って，凍裂が誘発されたヤチダモの試料に発生した放射状の内部割れの拡大機構についてはさらに検討する必要がある。

まとめると，内部割れが著しく発達した円板にだけ人工凍裂が誘発された。この結果から，内部割れの発達が凍裂の発生に大きく寄与していることは確かだろう。内部割れの空隙が拡大することにより引き起こされた円板の内部変形に応じて，円板の外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が発生することが，凍裂の発生に不可欠な因子になっていると推定される。

VIII. 総合考察と結論

凍裂は寒冷時に樹幹の放射縦断面に沿って割裂することから，温度低下の際に限って樹幹内に引き起こされる接線方向の引張り応力が原因となって発生する[63]。従って，凍裂の発生要因を解明することとは，温度低下の際に樹幹外層部で引き起こされる接線方向の引張り応力の発生要因を明らかにすることである，と言い換えることができる。(1)凍裂発生の温度条件，(2)凍裂樹幹の構造的持性，(3)凍裂樹幹の物性的特性，(4)人工凍裂の誘発，について検討を行った本研究の結果から，樹幹外層部で凍裂を起こし得るほどの高い接線方向の引張り応力を引き起こす因子は，高含水率心材部に存在する内部割れの空隙が凍結の際に氷晶析出により拡大することであると結論される。ここでは，凍裂の発生に対する内部割れの空隙の拡大の寄与の仕方，つまり氷晶析出による内部割れの空隙の拡大がどのようにして樹幹外層部に高い接線方向の引張り応力を引き起こすのか，そのしくみについてさらに考察を進める。それに加えて，本研究により得られた凍裂の発生機構についての見解と従来の仮説との比較，今後の課題について付信する。

1)凍裂の発生に対する内部割れの空隙の拡大の寄与

樹幹内の高含水率心材部の中～外層部に著しく発達した目回りが出現するという特徴をもつ凍裂木が，凍裂樹幹の内部構造の観察において認められた（III章）。このように樹芯部に位置する高含水率心材部の外層部に著しく発達した目回りをもつタイプのトドマツの凍裂樹幹について，凍結・融解過程での凍裂の開閉の挙動やよく発達した目回りを含む水食い材部の膨張・収縮の挙動を実際に調べた結果，(1)凍結・融解過程での凍裂の開閉は，それぞれ凍結・融解過程での目回りを含む水食い材部の膨張・収縮に対応して起こること，(2)目回りを含む水食い材部の凍結・融解に伴う膨張・収縮が，直接には目回りの拡大・縮小によって引き起こされていることが示唆された（IV章）。これらの結果から，高含水率心材部の中～外層部に著しく発達した目回りが出現するタイプの凍裂木における，樹幹外層部での接線方向の引張り応力発生のしくみについて，図19のように樹幹を完全に一周する目回りが発生した場合を仮定し，単純化して説明することができるかも

知れない。

融解時では，目回りは閉じているため，目回りの髄側破断面の周囲長と樹皮側の破断面の周囲長は等しい（図19 a)。ところが，凍結の際に氷晶析出によって目回り幅が拡大した場合（図19 b)，目回り髄側の破断面から髄までの寸法はごく僅かに縮小するか，あるいはほとんど変化を起こさないのに対して，目回りの樹皮側破断面から髄までの寸法はほぼ目回りが拡大した分だけ増加する。そのため，目回りの髄側の破断面の周囲長は融解時のそれとほぼ等しいのに対して，目回りの樹皮側の破断面の周囲長は目回り幅の拡大に応じて$2\pi x$だけ増加する。（図19 b)。従って，目回りの樹皮側の材組織では接線方向の引張り応力が発生する。このことは，形成層での細胞分裂によって新たな二次木部の層が形成されることより，形成層よりも外側に位置する二次師部が外方へと押し出されてゆくことにたとえることができる。著しく発達した目回りをもつ凍裂木では，こうして樹幹の外層部に生じた接線方向の引張り応力が要因となって，凍裂が発生するものと推定する。

高含水率心材部の中～外層部に著しく発達した目回りが出現するという特徴をもつタイプの凍裂樹幹では，凍裂の内端がその目回り部にとどまり，それよりも内部深くには達していないという特徴が認められた（III章；写真16，23)。このモデルのように目回りの空隙が拡大すれば，目回りを境としてその髄側の領域と樹皮側の領域では接線方向の応力が著しく異なるはずである。樹皮側の材組織では前述のように接線方向の引張り応力が発生するのに対して，髄側の材組織は目回りの拡大により放射方向に圧迫されるため，少なくとも樹皮側の材組織のように放射方向に大きく膨張することはない。そのため，円周が大きく拡大し，接線方向に大きな引張り応力が発生することは考え難い。従って，凍裂の内端がその目回り部に位置し，それよりも内部深くには達しないという状態についてもうまく説明をつけることができる。

また，IV章の実験では，よく発達した目回りをもつトドマツ水食い材部が凍結により半径方向に膨張を起こすことが確認されたが，その膨張率は0.65～1%であった（表5)。この値は，凍結した生材の限界ひずみ・約1%[63]にかなり近い。図19に示したように，円周の膨張率は半径のそれと等しい。そのため，少なくともIV章の実験に使用したトドマツ凍裂樹幹の水食い材部の目回りの樹皮側破断面の円周は，目回りの空隙の拡大により限界ひずみに近い程度に接線方向に膨張を起こしていると判断される。従って，放射縦断面の破断である凍裂を充分に起こし得ると考えられる。

しかし，凍裂樹幹の高含水率心材部での内部割れの発達形状は一様ではなかった。凍裂樹幹の観察（III章）では，比較的サイズの小さい目回りや放射状の内部割れが高含水率心材部の全域に数多く出現

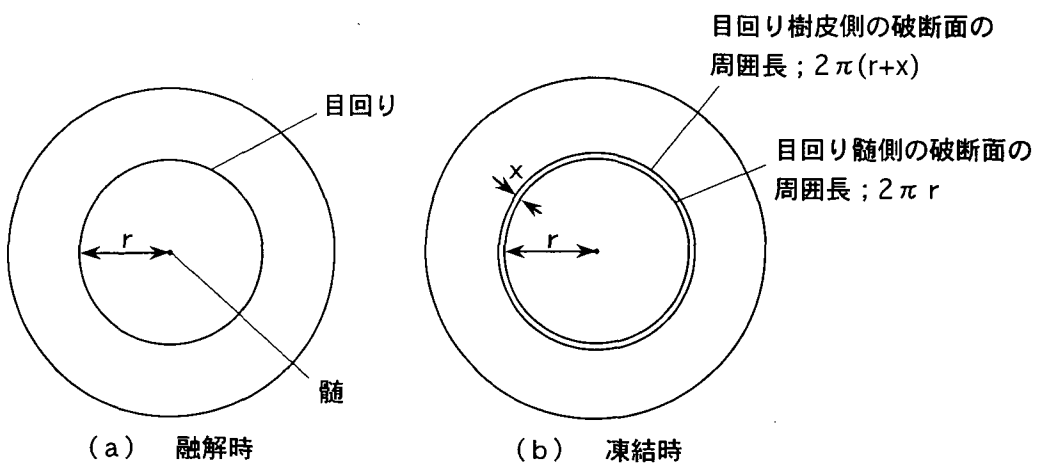


図19　凍結の際に氷晶析出により目回り幅が拡大した場合の樹幹横断面でみた材の変形

するもの，比較的サイズの小さな放射状の内部割れだけが数多く発生するもの，比較的サイズの大きい放射状の内部割れが少数発生しているもの，などが認められた。また，人工凍裂の誘発実験（VII章）で凍裂が誘発された試料には，内部割れが著しく発達しているという共通点があった。しかし，いずれの試料でも，放射方向の長さが数cm，割裂幅が数mmに達する比較的サイズの大きい少数の放射状の内部割れは発生していたが，目回りは全く認められないか，認められた場合でもその接線方向の長さや割裂幅は非常に小さかった。

天然の凍裂木樹幹内の水食い材部で認められた放射状の内部割れとその近辺の材組織を凍結状態で実体顕微鏡的，及び電子顕微鏡的に調べた結果，その破断面付近の材組織で細胞が集中的に潰れている状態（表面圧密）は観察されず，内部割れの破断面から離れた領域でも材組織の構成要素の本来の配列がその破断面の走行に対応して変化している状態が観察された（V章）。この観察結果から，氷の詰まった放射状の内部割れだけが発生している高含水率材部でも，著しく発達した目回りが発生している高含水率心材部の場合と同様に，凍結の際にその内部割れの空隙で起こる氷晶析出により高含水率心材部の体積増加が引き起こされているものと判断された（V章；図14，図15）。しかし，放射状の内部割れの空隙の拡大によって樹幹外層部に生じる内部応力は，目回りが高含水率心材部の外～中層部で著しく発達する場合とは異なっているものと考えられる。とくに，サイズの小さい放射状の内部割れだけが数多く出現する場合，サイズの小さい目回りや放射状の内部割れが数多く出現する場合，それらの内部割れの空隙の拡大による高含水率心材部の変形の仕方は複雑化し，その高含水率心材を取り囲むように位置する樹幹外層部での内部応力の種類や大きさは局所的に著しく変動していることが推察される。そのため，高含水率心材部にサイズの小さい放射状の内部割れだけ，あるいはサイズの小さい目回りや放射状の内部割れが数多く出現するという特徴をもつ凍裂木の場合，樹幹外層部での接線方向の引張り応力発生のしくみについては，高含水率心材部の中～外層部に著しく発達した目回りが出現するという特徴をもつタイプの凍裂木の場合（図19）のように，単純化して説明することは困難である。

樹芯部の高含水率心材部の水の凍結による体積膨張ではなく，直接には高含水率心材部に存在する内部割れの空隙の拡大により引き起こされるという点では，いずれの凍裂木でも同一の現象であるといえる。しかし，内部割れの形状や寸法，数は一様ではなく，凍裂木個体間で大きく異なっている。樹幹外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が発生するしくみは，それら内部割れの発達形状に応じて異なっているものと推察される。従って，凍裂の内的な要因を一律に"内部膨張"ということは妥当ではないかもしれない。厳密には，目回りや放射状の内部割れの空隙の拡大という，その発達形状に応じて細部では個体間でかなり違いのある複雑な内部変形に応じて，樹幹の外層部で局所的に発生する高い接線方向の引張り応力が凍裂の要因であると説明すべきだろう。

以上のように，樹芯部に位置する水食い材部や多湿心材部などの高含水率心材部が凍結する際に起こる，内部割れの空隙の拡大という内部変形に応じて樹幹外層部で局所的に生じる高い接線方向の引張り応力が凍裂の要因であり，凍裂の発生には不可欠の条件であると考える。しかし，こうして引き起こされる樹幹外層部での接線方向の引張り応力だけですべての凍裂が発生するのか否か，という点についてはさらに検討を加える必要がある。凍裂の発生時期と気温条件を解明するために行った野外調査（II章）では，古い凍裂の再割裂は，一時的な著しい低温ではなく，初冬に氷点を数℃～十数℃下回る程度の比較的温和な低温が継続するときに集中的に引き起こされることが示唆された。しかし，なかには厳寒期に再割裂を起こしたと判断される古い凍裂も認められた。新凍裂の発生の場合にも，古い凍裂が集中的に再割裂するのと同時期に，同程度の気温条件で発生したと判断される事例も観察されたが，氷点下30℃近くまで達する著しく冷え込みの厳しい日や気温の日較差が30℃近くまで達する日が続く，厳寒期に発生したものと判断される事例も観察された。

初冬に起こる古い凍裂の集中的な再割裂，及びそれと同時期に発生した新凍裂の場合には，高含水率心材部が凍結する際に氷晶析出により内部割れの空隙が拡大するのに応じて樹幹外層部で生じる局所的に高い接線方向の引張り応力により最終的に引き起こされたものと考えられる。これに対して，厳寒期に起こったと判断される一部の古い凍裂の再割裂及び新凍裂の発生の場合には，高含水率心材部が凍結

する際に上述のように樹幹外層部で引き起こされる局所的に高い接線方向の引張り応力に加えて，低温乾縮異方性などの，他のしくみによって生じる樹幹外層部の接線方向の引張り応力もその発生に寄与している可能性が強い。凍裂を引き起こす直接の外部因子は一様ではなく，これまでに凍裂の原因として指摘されてきた樹幹の接線方向の乾縮や熱収縮などが，その最終的な引き金として寄与している場合もあるのかもしれない。

以上に述べてきた考察に基き，凍裂が発生するに至る過程を説明すると，次のとおりである。氷点下の気温が継続する初冬の寒波の最中に樹幹の凍結が樹芯部まで進んだとき，高含水率心材部の目回りや放射状の内部割れの空隙に氷晶が析出することにより，あるいは氷晶の析出により新たに内部割れが発生することにより，それらの内部割れの空隙が拡大する。そして，内部割れの空隙の拡大という内部変形に応じて，樹幹の外層部では局所的に高い接線方向の引張り応力が発生する。こうして樹幹外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が引き起こされた樹幹のうち，あるものではこの時点で凍裂が発生するが，あるものでは凍裂が発生するには至らない。しかし，この時点には凍裂が発生するには至らなかった樹幹でも，さらに気温が氷点を大きく下回る程度にまで冷え込んだとき，あるいは厳寒期の夜間や早朝に放射冷却により気温が著しく急激に低下したときに，樹幹外層部での接線方向の低温乾縮や熱収縮が加わって，凍裂を起こすに至る。

2）従来の仮説との比較

以上に述べてきた凍裂の発生要因についての考え方は，急激な温度低下によって樹幹の内・外層で大きな温度勾配が生じた際に，熱収縮が樹幹外層部で局所的に大きく作用することを凍裂の原因として指摘している熱収縮説[61]，接線方向の低温乾縮量の方が放射方向のそれよりも大きいために樹幹内に引き起こされる接線方向の引張り応力を凍裂の主因として指摘している低温乾縮異方性説[14,62,63]とは異なっている。樹幹外層部で局所的に熱収縮が強く作用することや低温乾縮の異方性により引き起こされる樹幹接線方向の引張り応力が凍裂を起こす最終的な外部因子として寄与する場合もあり得るとは見做したが，それが凍裂の発生に不可欠の条件ではないことを本論文では結論としている。

一方，樹幹が凍結するときに樹芯部に位置する水食い材部の凍結に基く内部膨張により樹幹の外層部で接線方向の引張り応力が生じ，これに厳冬期の著しい低温に基く樹幹外層部の局所的な収縮が加わることによって凍裂が発生するという内部膨張説[10]とは一致点が多い。しかし本結論には，(1)高含水率心材部にみられる氷の詰まった放射状の内部割れの凍裂の発生に対する寄与の仕方，(2)凍裂を引き起こす外部因子，の2点の解釈をめぐって内部膨張説[10]とは相違があり，内部膨張説[10]を全面的に支持するものではない。内部膨張説[10]をさらに発展させた説として位置付けられる。

内部膨張説[10]では，それぞれ(1)放射状の内部割れのうち，とくに樹幹内の比較的外層部に位置するものが，材の接線方向の引張り応力に対する強度的な弱点として作用する，(2)著しく気温が低下したとき，あるいは急激に気温が低下したときに樹幹の外層部で生じる接線方向の大きな熱収縮が加わることにより，最終的に凍裂が発生する，と結論している。これに対して，本論文では(1)放射状の内部割れは，樹幹接線方向の乾縮や熱収縮によって生じる樹幹内での接線方向の引張り応力に対する強度的な弱点としてではなく，樹芯部の材組織の内部変形を引き起こし，その内部変形が凍裂の原因となる樹幹外層部での高い接線方向の引張り応力を引き起こすことにより，凍裂の発生に寄与する，(2)氷点下を数℃下回る程度の比較的温和な低温下でも凍裂は発生し得る，と結論している。さらに，本論文では，高含水率心材部にみられる放射状の内部割れの場合にも，樹芯部の材組織の内部変形を引き起こすことにより凍裂の発生に寄与すると判断したため，凍裂の要因を一律に"内部膨張"というよりも，内部変形と置き換えるべきことを述べた。

3）今後の課題

本論文では，樹芯部に位置する水食い材部や多湿心材部に存在する内部割れの空隙が氷晶の析出により拡大することが，凍裂の発生に不可欠の因子であることを結論した。しかし，凍裂の要因となるそれらの内部割れの発達形状は，個体間で異なっていた。従って，これらの内部割れの空隙の拡大により引き起こされる樹幹外層部での局所的に高い接線方向の引張り応力の発生のしくみは一様ではなく，高含水率心材部での内部割れの発達形状に応じて異なっており，いく通りものケースがあるものと推定される。今後，凍裂樹幹内での内部割れの発達形状

をいくつかの典型的なパターンに分類し，それぞれのパターン毎に個別的に，内部割れの空隙の拡大に応じて，樹幹内での応力の種類や分布，大きさがどのような状態になるのか，という問題について材料力学的に検討を加えていく必要がある。これにより，凍裂の原因となる樹幹の外層部での接線方向の引張り応力の発生のしくみは解明されると考える。

さらに，目回りや放射状の内部割れの発生機構，並びにこれらの内部割れの空隙での氷晶析出機構を明らかにする必要がある。とくに，これらの内部割れが発生する最も初期段階のしくみについては，現在のところ全く不明である。そのしくみを明らかにすることにより，凍裂の発生機構を細部にまでわたり解明できるものと考える。

謝　辞

本研究の遂行と論文の取りまとめにあたり，北海道大学農学部教授・深沢和三博士のご指導を仰ぎ，終始適切なご教示と助言を頂いた。同助教授・大谷諄博士には，研究全般にわたり教示と助言を賜ったうえ，論文の取りまとめにあたり懇切な助言を頂いた。同教授・平井卓郎博士，並びに北海道大学演習林教授・滝川貞夫博士には，本論文の校閲の労をとられ，その内容と取りまとめについて適切な教示と助言を頂いた。

本研究は，森林総合研究所北海道支所主任研究員（当時北海道大学農学部助手）・今川一志博士に導かれ，開始したものである。研究の開始当初には実験の進め方や手法上の教示を今川博士に仰ぎ，懇切なご指導を受けた。研究材料の採取や運搬，野外調査を実施の際には，北海道大学天塩地方演習林，同中川地方演習林，森林総合研究所北海道支所，及び旭川林務署当麻事業所より便宜をはかって頂いたうえ，その職員諸氏より協力を頂いた。北大低温科学研究所助教授・藤川清三博士には，研究の進め方や研究手法上の指導を仰ぎ，適切な教示と助言を頂いた。京都大学農学部助手・高部圭司博士，北海道大学農学部助手・船田良博士には，本研究に対する貴重な助言や批判，激励を頂いた。

以上の各位に対して，謹んで深甚な謝意を表する。

引用文献

1) BAUCH, J., SHIGO, A. L. and STARK, K.: Wound effects in the xylem of *Acer* and *Betula* species. *Holzforschung* **34**: 153-160. 1980
2) SHIGO, A. L. and SHARON, E. M.: Mapping columns of discolored and decayed tissues in sugar maple, *Acer saccharum*. *Phytopathology* **60**: 232-237. 1970
3) SHORTLE, W. C.: Compartmentalization of decay in red maple and hibrid poplar trees. *Phytopathology* **69**: 410-413. 1979
4) SHIGO, A. L.: A new tree biology. Shigo and Tree Associates, Durham, 1986
5) 赤井龍男：森林保護学一改定版一(四手井綱英編). 朝倉書店, 29-30, 1987
6) 石田茂雄：トドマツの凍裂. 北方林業会, 1986
7) KOZLOWSKI, T. T., KRAMER, P. J. and PALLARDY, S. G.: The physiological ecology of woody plants. Academic Press, San Diego, 1991
8) SCHIRP, M.: Frostrisse an Baumstmen. *Forstarchiv*. **39**: 149-154. 1968
9) 石田茂雄：トドマツ樹幹の凍裂の形態について. 北海道大学農学部演習林研究報告 **17**: 473-512. 1955
10) 石田茂雄：トドマツ樹幹の凍裂の発生機構，とくにその水食い材との関係について. 北海道大学農学部演習林研究報告 **22**: 273-373. 1963
11) FERGUS, C. L.: Frost cracks on oak. *Phytopathology* **46**: 297. 1956
12) 松田正宏，沢田貞夫，梅田正治：福井地方におけるスギ老齢林の凍裂被害. 33回日林中支講：119-122. 1985
13) KUBLER, H.: Origin of frost cracks in stems of trees. *J. Arboriculture* **13**: 93-97. 1987
14) KUBLER, H.: Frost cracks in stems of trees. *Arboricultural J.* **12**: 163-175. 1988
15) 石田茂雄：木材の構造（原田浩ほか編著）. 文永堂出版, 201-203, 1985
16) 渡辺治人：木材理学総論. 農林出版, 1978
17) 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（生物編）**5**: 61-73. 1950
18) 石田茂雄：北海道に於ける凍裂の発生状況. 北海道大学農学部演習林研究報告 **15**: 303-341. 1952
19) 栗林盛三，稲垣敬一：トドマツ人工林の凍裂の実態. 昭和58年帯広営林支局業務研究発表集：89-95. 1984
20) 新岡義宣：トドマツの凍裂と樹皮裂. 北方林業 **42**: 69-73. 1990
21) 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年帯広営林支局業務研究発表集：

64-70. 1985
22) 佐野雄三，今川一志，大谷諄，深沢和三：トドマツ造林木における凍裂発達の観察．北海道大学農学部演習林研究報告 **46**：315-341. 1989
23) 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，凍裂の発生状況とその組織学的研究．北海道大学農学部演習林研究報告 **45**：599-636. 1988
24) 今川一志，及川伸夫，糸屋吉彦：ヤチダモの凍裂．日本林学会東北支部会誌 **41**：73-75. 1989
25) 佐野雄三，深沢和三：ヤチダモ凍裂の発生と形態．日本木材学会北海道支部講演集 **21**：57-60. 1989
26) 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
27) 後藤康次，中村基：今須地方にみられるスギの凍裂害．岐阜県林業センター研究報告 **6**：11-26. 1978
28) 堀内孝雄：林木の耐凍性：スギ樹幹の凍裂の発生について．茨城県林業試験場業務報告 **No. 14**：8-9. 1977
29) 今川一志，及川伸夫：スギ造林木の凍裂（I）—東北地方におけるその発生実態—．北方林業 **42**：19-23. 1990
30) 今川一志，及川伸夫：スギ造林木の凍裂（II）—東北地方における発生経過—．北方林業 **42**：74-76. 1990
31) 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）—岩手県安代地区スギ造林地における凍裂の発生状況—．日本林学会東北支部会誌 **38**：142-144. 1986
32) 元村桂助：スギ林内の凍裂被害について—福岡県矢部村・星野村での被害—．日林九支研論集 **No. 39**：211-212. 1986
33) 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．奈良林試研報：20-21. 1984
34) 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）—秋田県小坂地区スギ造林地における凍裂の発生状況—．日本林学会東北支部会誌 **38**：145-147. 1986
35) 高木哲夫，西山嘉彦：九州におけるスギ凍裂害—大分県上津江村での調査—．98回日林論：421-423. 1987
36) 富田ひろし，川北要始補，滝尻富士雄：スギ大径木の凍裂害（I）—三重県における実態—．36回日林中支論：53-55. 1988
37) DENISOV, A. K.: Incidence of frost-crack damage in relation to forest type. *Forestry Abstracts* **30**: 84, No. 716. 1968
38) LACHAUSSÉE, E.: Note on cup-shake and frost crack of oak (*Quercus robur*). *Forestry Abstracts* **15**: 324, No. 2598. 1953
39) LAMPRECHT, H.: The influence of environmental factors on frost-crack of Pedunculate and Sessile Oak in the north-east of the Swiss plateau. *Forestry Abstracts* **12**: 519, No. 3340. 1950
40) BUTIN, H. and SHIGO, A. L.: Radial shakes and "frost cracks" in living oak trees. *USDA Forest Serv. Res. Pap.* **NE-478**: 1-21. 1981
41) BUTIN, H. and VOLGER, C.: Untersuchungen über die Entstehung von Stammrissen ("Frostrissen") an Eiche. *Forstwiss. Cbl.* **101**: 295-303. 1982
42) BUSSE, J.: Frost-, Ring- und Kernrisse. (Beobachtungen aus meiner "Försterzeit"). *Forstwiss. Cbl.* **32**: 74-84. 1910
43) KNIGGE, W., SCHULZ, H.: Grundriss der Forstbenutzung. Verlag Paul Parey, 1966
44) SCHULZ, H.: Untersuchungen an Frostrissen im Fruhjahr 1956. *Forstwiss. Cbl.* **76**: 14-24. 1957
45) SVIDENKO, A. I.: Frost-crack damage to *Juglans regia* in Bukorina region (Ukraine). *Forestry Abstracts* **31**: 549, No. 4649. 1970
46) 千葉茂：ポプラの品種及びヤマハンノキの凍裂について．北海道の林木育種 **8**：9-11. 1965
47) CRANDALL, B. S.: Bacterial infection and decay of the inner wood of winter-injured young London plane trees. *Phytopathology* **33**: 963-964. 1943
48) 畑野健一：忘れられない木と森の話3—樹木の被害—．林業技術 **No. 620**：27-28. 1993
49) 北原曜：凍裂を教えてくれた蝶．森林保護 **No. 214**：47. 1989
50) 井上晋：イヌエンジュ二次林の群落生態について（I）—凍裂の実態—．日本林学会北海道支部論文集：172-175. 1984
51) 中田銀佐久，右田一雄：ヒノキの凍裂について．93回日林論：255-256. 1982
52) LOWELL, E. C. and FAHEY, T. D.: The effect of frost cracks in sugar pine trees on lumber grade. *Forest Products J.* **44(10)**: 57-60. 1994
53) PANSHIN, A. J. and de ZEEUW, C.: Textbook of Wood Technology. McGraw-Hill, 1980
54) TSOUMIS, G.: Science and Technology of

Wood. Van Nostrand Reinhold, 1991

55) CASPARY, R.: Über Frostspalten. *Botanische Zeitung* **13**: 449-464, 473-482, 489-500. 1855
石田[10], BUTIN・SHIGO[4,9], SCHIRP[8] より引用.

56) CASPARY, R.: Neue Untersuchungen uber Frostspalten. *Botanische Zeitung* **15**: 329-335, 345-350, 361-371. 1857
石田[10], SCHIRP[8] より引用.

57) WEATHERWAX, R. C. and STAMM, A. J.: The coefficients of thermal expansion of wood and wood products. *USDA Forest Products Laboratory Report* **No. R1487**: 1-43. 1946

58) MÜLLER-THURGAU, H.: Über das Gefreiren und Erfrieren der Pflanzen. *Ladwirtsch. Jahrb.* **15**: 453-610. 1886
MAYER-WEGELIN ら[62], SCHIRP ら[66], KUBLER[14] より引用.

59) KÜBLER, H.: Schwinden und Quellen des Holzes durch Kalte. *Holz als Roh- und Werkstoff* **20**: 364-368. 1962

60) KUBLER, H., LIANG, L. and CHANG, L. S.: Thermal expansion of moist wood. *Wood and Fiber* **5**: 257-267. 1973

61) KOLLMANN, F. P.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Aufl., Bd. 1., Berlin-Heidelberg-Munchen, 1951
KUBLER[14], 石田[10] より引用.

62) MAYER-WEGELIN, H., KÜBLER, H., TRABER, H.: Über die Ursache der Frostrisse. *Forstwiss. Cbl.* **81**: 129-137. 1962

63) KUBLER, H.: Mechanism of frost crack formation in trees-A review and synthesis. *Forest Science* **29**: 559-568. 1983

64) NEELY, D. and HIMELICK, E. B.: Freeze-crack-related measurement on *Platanus*×*acerifolia trees*. *Forest Science* **33**: 239-244. 1987

65) METTHECK, C.: Trees "The mechanical design". Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991

66) SCHIRP, M., KÜBLER, H., LIESE, W.: Untersuchungen an Baumscheiben uber das Entstehen von Frostrissen. *Forstwiss. Cbl.* **93**: 127-136. 1974

67) SAKAI, A. and LARCHER, W.: Frost Survival of Plants. Springer-Verlag, Berlin, 51-54, 1987

68) 今川一志, 及川伸夫, 三上進, 伊勢良：スギ造林地における凍裂の発生実態 (IV) —凍裂木の樹幹内部の割れの状態—. 99回日林論：303-304. 1988

69) 今川一志, 及川伸夫, 三上進, 工藤広治：スギ造林地における凍裂の発生実態 (V) —新しい凍裂木の樹幹内部—. 日本木材学会北海道支部講演集 **21**: 53-56. 1989

70) 今川一志, 及州伸夫, 三上進：スギ造林地における凍裂の発生実態 (XI) —比較的新しい凍裂木の樹幹内部—. 日本林学会東北支部会誌 **42**: 132-133. 1990

71) 及川伸夫, 三上進：スギ造林地における凍裂の発生実態 (III) —凍裂木と健全木のおける成育期間中の材の含水率—. 日本林学会東北支部会誌 **38**: 148-150. 1986

72) 及川伸夫, 今川一志, 三上進, 竹内美次, 伊勢良：スギ造林地における凍裂の発生実態 (VII) —凍裂木の経時的温度変化—. 99回日林論：305-306. 1988

73) 今川一志, 及川伸夫, 三上進：スギ造林地における凍裂の発生実態 (IX) —凍裂木の樹幹温度—. 日本林学会東北支部会誌 **41**: 76-78. 1989

74) 今川一志, 及川伸夫, 三上進：スギの凍裂の発生経過. 日本木材学会北道支部講演集 **20**: 65-68. 1988

75) 佐野雄三, 藤川清三, 深沢和三：樹木の凍裂発生機構の研究. 凍結及び乾燥研究会会誌 **39**: 9-16. 1993

76) 日本材料学会木質材料部門委員会：木材工学辞典. 泰流社, 1982

77) 北方林業会：北海道の樹種とその学名. 北方林業会, 1981

78) 大井次三郎著・北川政夫改訂：新日本植物誌顕花篇. 至文堂, 1983

79) 日本木材学会：材質に関する組織用語集. 木材学会誌 **18**: 147-152. 1972

80) 平川泰彦, 藤原健, 太田貞明：精英樹スギクローンによる材質評価(2)—心材水分と心材色—. 日本木材学会大会 (名古屋) 研究発表要旨集：67. 1992

81) WARD, J. C. and PONG, W. Y.: Wetwood in trees: a timber resource problem. *USDA Forest Service General Technical Report* **PNW-112**: 1-56. 1980

82) 蕪木自輔：木材材質の森林生物学的研究(第12報) 北海道野幌地方における造林木の生材含水量について. 林業試験場研究報告 **90**: 77-108. 1956

83) YAZAWA, K., ISHIDA, S. and MIYAJIMA, H.: On the wet-heartwood of some broad-leaved trees grown in Japan. I. *Mokuzai Gakkaishi* **11**: 71-76. 1965

84) 今川一志：スギ凍裂の発生実態. 昭和62年度林業試験場東北支場研究発表会記録 (支場年報 **No. 29**): 72-76. 1988

85) SEEHOLZER, M.: Frostriß und Frostleiste. *Mitt. Dt. Dendrol. Ges.* **48**: 255-258. 1936

SCHIRP[8] より引用.

86) MASELLI, V.: Note on the reaction of woody plants in Liguria to the exceptional cold in winter of 1955-56. *Montie. Boschi.* **9**: 403-410. 1956
KUBLER[14] より引用.

87) 富田ひろし, 滝尻富士雄：スギ大径木の凍裂害(II)—被害木の特性—. 36回日林中支論：57-58. 1988

88) SANO, Y. and FUKAZAWA, K.: Timing of the occurrence of frost cracks in winter. *Trees* (in press)

89) 札幌管区気象台：北海道気象月報（平成5年12月号～平成6年4月号). 札幌管区気象台, 1993, 1994

90) 加納孟, 蕪木自輔：木材材質の森林生物学的研究（第7報)トドマツに於ける樹皮の形態的特徴による材質診断の可能性. 林業試験場研究報告 **61**: 57-72. 1953

91) 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) —スギ凍裂木樹幹内部の状態—. 日本林学会東北支部会誌 **39**: 95-96. 1987

92) COUTTS, M. P. and RISHBETH, J.: The formation of wetwood in grand fir. *Eur. J. For. Path.* **7**(1): 12-22. 1977

93) PHELPS, J. E., MCGINNES, E. A. Jr. and LIEU, P. J-Y.: Anatomy of xylem tissue formation associated with radial seams and cracks in black oak. *Wood Sci.* **8**: 397-405. 1975

94) RADMACHER, P., BAUCH, J. and SHIGO, A. L.: Characteristics of xylem formed after wounding in *Acer, Betula,* and *Fagus. IAWA BULL. n. s.* **5**: 141-151. 1984

95) BAILEY, I. W. and FAULL, A. F.: The cambium and its derivative tissues, No. IX. Structural variability in the redwood, *Sequoia sempervirens,* and its significance in the identification of fossil woods. *Journal of Arnold Arboretum* **15**: 233-254. 1934

96) 石田茂雄：トドマツ生材の凍結温度. 北海道大学農学部演習林研究報告 **19**: 123-144. 1958

97) WINGET, C. H. and KOZLOWSKI, T. T.: Winter shrinkage in stems of forest trees. *J. Forestry* **62**: 335-337. 1964

98) SANO, Y., FUJIKAWA, S. and FUKAZAWA, K.: Detection and features of wetwood in *Quercus mongolica* var. *grosseserrata. Trees* **9**: 261-268. 1995

99) 佐野雄三, 藤川清三：cryo-SEMによる樹木細胞の水の観察法について. 日本木材学会北海道支部講演集 **27**: 47-50. 1995

100) 照本勲：植物組織内にできる氷塊について. 低温科学（生物編）**18**: 39-44. 1960

101) 中山仰, 原田重雄：人為低温処理により発現した幼茶樹の主幹裂傷害. 茶業研究報告 **38**: 11-14. 1973

102) 小沢久：微細多孔質膜上での氷晶分離. 北海道大学学位論文, 1987

103) KORÁN, Z.: Electron microscopy of radial tracheid surfaces of black spruce separated by tensile failure at various temperatures. *Tappi* **50**: 60-67. 1967

104) WOODWARD, C.: Fractured surfaces as indicators of cell wall behavior at elevated temperatures. *Wood Sci.* **13**(2): 83-86. 1980

105) 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. 1983

106) FUJIKAWA, S. and ISHIDA, S.: Ultrastructure of ray parenchyma cell wall of softwood. *Mokuzai Gakkaishi* **21**: 445-456. 1975

107) DARROW, W. K.: Heart shake in South Africa-grown *Pinus elliottii. Wood and Fiber Sci.* **24**(3): 241-251. 1992

108) KANDEEL, S. A. and MCGINNES, E. A. Jr.: Ultrastructure of ring shake in scarlet oak (*Quercus coccinea,* Muench). *Wood Sci.* **2**: 171-178. 1970

109) MCGINNES, E. A. Jr.: Extent of shake in black walnut. *Forest Products J.* **18**(5): 80-82. 1968

110) MCGINNES, E. A. Jr. and PHELPS, J. E.: Ultrastructure observation of tangential shake formation in hardwoods. *Wood Sci.* **6**: 206-211. 1974

111) MEYER, R. W. and LENY, L.: Shake in coniferous wood—An anatomical study. *Forest Products J.* **18**(2): 51-56. 1968

112) SHIGO, A. L.: Ring and ray shakes associated with wounds in trees. *Holzforschung* **26**: 60-62. 1972

113) OWEN, D. O. and WILCOX, W. W.: The association between ring shake, wetwood, and fir engraver beetle attack in white fir. *Wood and Fiber* **14**: 267-280. 1982

114) MCGINNES, E. A. Jr. and WU, K. Y.: Intra-incremental chemical studies of ring shake in scarlet oak. *Wood Sci.* **5**: 287-294. 1973

115) ARCHER, R. R.: Growth stress and strain in trees. Springer-Verlag, 147-151, 1986

Summary

Although there have been several proposed explanations concerning the cause of frost crack occurrence in living trees, many aspects need to be examined experimentally to confirm these proposed explanations. Thus, this study was undertaken to elucidate the primary factors of frost crack occurrence. The results of the present study are summarized as follows.

1. In order to determine the timing of the occurrence of frost cracks, as well as to evaluate the associated climatic conditions, study plots were established in late autumn and early winter. Serial observations were conducted until mid-winter or early spring to identify both the occurrence of new frost cracks and the re-opening of old frost cracks in trees in the study plots. Observations were conducted for three winter seasons in different study plots. Most of the old frost cracks re-opened in early winter. Observations showed that these re-openings did not occur simultaneously in a short period of time such as one day or night, when there was a sudden or large drop in air temperature, but rather tended to occur steadily over the course of several days of sustained sub-zero temperatures. It has been suggested that freezing of the trunk contributes considerably to the re-opening of old frost cracks. Four frost cracks in a total of 1,002 trees were newly formed during the course of this study. The new frost cracks developed both in early winter and in mid-winter. It has been suggested that new frost cracks can occur when most of the old frost cracks have re-opened and the air temperature does not fall far below 0℃.

2. In order to elucidate the structual features of trunks with frost cracks, 22 trees belonging to 6 species were examined. The trees were dissected for examination of their morphological features and determination of moisture content. In all the trees examined, wetwood was found in the heartwood. Many internal shakes such as ring and radial shakes were observed in the wetwood. Observation of frozen trunk samples showed that the spaces of the internal shakes were filled with ice crystals. The size and location of these internal shakes seemed to affect the pattern of frost crack development. In the samples where large ring shakes were present in the outer layer of the wetwood, the inner end of the frost cracks was connected to the ring shakes and did not extend inwardly beyond the ring shakes. On the other hand, in trunk samples with only radial shakes, the depth of the frost cracks varied; some extended from the bark to the peripheral layer of the wetwood while others extended from the bark to the pith of trunk. These results suggest that the occurrence of frost cracks is closely associated with the presence of wetwood and internal shakes in the wetwood region.

3. In order to investigate the role of the freezing of wetwood in the occurrence of frost cracks, changes in the width of a frost crack and dimensional changes in the radius of wetwood taken from trees with frost cracks during freezing were observed. Firstly, changes in the width of an old frost crack on a small section of *Abies sachalinensis* during freezing and thawing were measured. The frost crack was closed in a thawed state at room temperature (+20℃). However, during the freezing process, the frost crack began to re-open as the wetwood, located in the heartwood, began to freeze at about −1℃. A marked increase in the width of the crack was seen during the freezing period. However, further cooling of both the wetwood and the peripheral layer of the sample trunks from −1 to −20℃ resulted in little increase in the width of the crack. Secondly, disc-shaped samples of wetwood were taken from the trunks of *A. sachalinensis* with frost cracks, and dimensional changes in the radius of these samples during freezing and thawing were measured. Similar measurements were also conducted on disc-shaped samples taken from the trunks of *A. sachalinensis* and *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* in which frost cracks had not occurred, and the behavior of dimensional changes during freezing and thawing was compared with that of the wetwood samples taken from frost cracked trunks. The samples of wetwood taken from trunks in which frost cracks had been formed swelled radially during freezing at about −1℃ and recovered to the initial dimensions during the following thawing process. However, the samples of wetwood taken from trunks in which frost cracks had not been formed did not increase in radial dimension during freezing at about −1℃, even in cases where the samples contained the same level of moisture as the wetwood samples taken from trunks with frost

cracks. In the disc-shaped samples taken from trunks in which frost cracks had occurred, many internal shakes such as ring and radial shakes were present. The intercellular spaces of the internal shakes were found to enlarge in a frozen state due to ice segregation, while such spaces were closed in a thawed state. On the other hand, in the disc-shaped samples taken from trunks without frost cracks, the internal shakes were smaller both in number and size than the samples taken from frost cracked trunks, or in some cases, no internal shakes were present. These results suggest that the opening of frost cracks is closely associated with the swelling of wetwood during freezing, and that swelling is associated with ice segregation occurring in the intercellular spaces of internal shakes.

4. In order to further explore the role of ice segregation occurring in the intercellular spaces of internal shakes in the occurrence of frost cracks, a frost cracked trunk of *A. sachalinensis* was selected for examination. The location of moisture and the state of deformation of wood tissues at and around the internal shakes were examined under frozen conditions by cryo-scanning electron microscopy. In the wetwood, almost all the lumina of cells were filled with ice crystals, although lumina of tracheids, which were located near the pith side fractured plane of ring shakes, were often cavitated. The intercellular spaces of the internal shakes were also filled with ice crystals. No collapse of cells was found around the internal shakes irrespective of the types of shake. The role of internal shakes in the occurrence of frost cracks was considered on the basis of available anatomical evidence. It is unlikely that enlargement of the intercellular spaces of internal shakes due to ice segregation is counterbalanced in other spaces of wood since no collapse of cells was found. It is possible that the enlargement of intercellular spaces of internal shakes contributes to the increase in the volume of wetwood during freezing.

5. In order to characterize the topography of the fractured surfaces of frost cracks and internal shakes, as well as to evaluate temperatures when internal shakes were formed, fractured planes of both the frost cracks and the internal shakes of *A. sachalinensis* were examined by light microscopy and scanning electron microscopy. Similar features were found in the fractured planes of the frost cracks and the internal shakes. The separation between tracheid walls occurred in the S1 layer of the secondary walls. The separation between tracheids and ray parenchyma seemed to occur in the primary walls of ray parenchyma. In both types of separations, however, transwall failure was often found in both the tracheids and ray parenchyma. On the fractured planes of the separation between tracheids, it was found that the pit border was frequently broken. These findings were compared with those of previous studies which examined the effects of temperature on the topography of fractured surfaces separated by tensile failure. According to the results of previous studies, frequent transwall failure and destruction of the pit border are features indicating that separation occurs under lower than normal temperature. Therefore, it is concluded that the developmental process of the internal shakes is associated with a level of low temperature similar to the occurrence of frost cracks.

6. The above findings suggest that ice segregation occurring in the internal shakes strongly contributes to the occurrence of frost cracks. In order to evaluate the suggested causes of frost crack occurrence based on analyses using trees with naturally formed frost cracks, experimental induction of frost cracks was attempted on a small section of trunk. The first experiment was designed to provide a radial temperature gradient in a trunk sample of *Populus sieboldii* and *Ulmus japonica*. In the second experiment, water-penetrated discs taken from trunks of *P. sieboldii* and *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* were simply transferred from a room at about +20℃ to a refrigerator at −80℃. As a result, frost crack-like splits extending from the wood to the bark (artificial frost cracks) were induced in some of the sample discs in the second experiment while such cracks were not induced in any sample in the first experiment. In the sample discs in which the artificial frost cracks were induced, large-sized internal shakes were formed. However, in the sample discs in which no artificial frost cracks were induced, the internal shakes were smaller both in size and in number than those in the sample discs with artificial frost cracks. Artificial frost cracks seemed to occur when the spatial occupancy of the internal shakes (expressed as "area of the intercellular spaces of the internal

shakes / area of the wood" on the transverse section) exceeded a certain limit, approximately 0.8%. The experimental rusults also suggest that there is a close relationship between the occurrence of frost cracks and the presence of internal shakes.

The findings obtained in the present study strongly suggest that ice segregation, occurring in the intercelular spaces of internal shakes located in wetwood at a continuous sub-zero temperature, is one of the primary factors causing frost cracks to occur. It is likely that ice segregation during freezing induces an increase in the volume of wood, as well as an abnormal deformation of trunks. This deformation of the trunk would lead to large tangential tension stress in the peripheral layer of the trunk, which would result in the occurrence of frost cracks. Other factors, such as anisotropy of frost-induced shrinkage of wood, extremely low temperatures and trunk wounds, only occasionally contribute to the occurrence of frost cracks, and are thus not considered to be primary causative factors.

写真 1 月寒標準地で認められたシラカンバの凍裂木。

写真 2 **写真 1** の凍裂木の凍裂部の接写写真。1992年12月20日に撮影。矢印は，凍裂の再割裂により露出した材組織を示している。

写真 3 **写真 1** と同一部位。1993年4月3日に撮影。

写真 4 月寒標準地で認められたハルニレの凍裂木。

写真 5 **写真 4** の凍裂木の凍裂部の接写写真。1992年12月20日に撮影。

写真 6 **写真 5** と同一部位。1993年4月3日に撮影。

写真 7～10 野幌標準地で認められたハルニレの凍裂。同一部位を，1993年12月12日(**写真 7**)，同年12月19日(**写真 8**)，1994年1月8日（**写真 9**)，同年3月13日（**写真 10**）に撮影した。

写真 11 野幌標準地で認められたナナカマドの凍裂木。

写真 12 **写真 11** の凍裂木の凍裂部の接写写真。1993年12月12日に撮影。

写真 13 **写真 12** と同一部位。1993年12月19日に撮影。

写真 14 タンタシャモナイ標準地での調査で，12月13日に発生していることが確認されたヤチダモの新凍裂。1988年12月13日に撮影。矢印は凍裂を示している。

写真 15 **写真 14** のヤチダモ新凍裂の割裂部の接写写真。割裂部沿いに凍裂樹皮部が認められない。

写真 16 トドマツ凍裂樹幹（トドマツ4；表4参照）の凍裂割裂部付近の生材軟X線写真。大矢印，小矢印は，それぞれ目回り，放射状の内部割れを示す。

写真 17 ヤチダモ新凍裂木（ヤチダモ1；表4参照）の凍裂割裂部付近の軟X線写真（**a**）と接写写真（**b**)。矢印は放射状の内部割れを示す。(**a**）と（**b**）のアステリスクは，同一部位を示す。

写真 18 ヤチダモの古い凍裂木（ヤチダモ3；表4参照）の凍裂割裂部付近の生材軟X線写真（**a**）と接写写真（**b**)。矢印は放射状の内部割れを示す。(**a**）と（**b**）のアステリスクは，同一部位を示す。

写真 19 新凍裂をもつトドマツ樹幹（トドマツ1；表4参照）の横断面。生材・凍結状態で撮影。

写真 20 **写真 19** のトドマツ樹幹の凍裂の内端部付近の拡大。

写真 21 古い凍裂をもつトドマツ樹幹（トドマツ2；表4参照）の横断面。生材・凍結状態で撮影。

写真 22 **写真 23** のトドマツの水食い材部の拡大。

写真 23 **写真 21** と同一のトドマツ凍裂樹幹の別の地上高部位の横断面。大矢印，小矢印は，それぞれ目回り，凍裂の内端を示す。アステリスクは傷痕を示す。

写真 24, 25 エゾニワトコ凍裂樹幹（エゾニワトコ1；表4参照）の樹幹横断面。生材・凍結状態で撮影。**写真 24, 25** は，それぞれ凍裂の中央部，上端部付近の樹幹横断面である。矢印は凍裂の内端を示す。

写真 26 トドマツ1（表4参照）の凍裂の上端部付近の樹幹横断面。凍裂の割れが認められるが（矢印），樹幹表面までには達していず，その外端が形成層付近にとどまっている。生材・凍結状態で撮影。

写真 27～32 トドマツ2（表4参照）の凍裂割裂部付近の材組織の木口面の光顕写真。**写真 27**：霜腫れ部と正常材部の境界部付近。矢印はその境界部を示す。**写真 28**：霜腫れの中央部付近である。矢印は複列の放射組織を示

す。**写真 29**：**写真 27** とは別の地上高部位の霜腫れ部と正常材部の境界部付近である。矢印は傷害柔組織を示す。**写真 30**：**写真 29** において矢印で示された傷害柔組織の拡大。**写真 31**：**写真 27** の霜腫れ部に近い正常材部付近の割裂部。矢印は傷害樹脂道を示す。**写真 32**：**写真 31** の対応破断面側の割裂部。矢印は傷害樹脂道を示す。

写真 33　凍裂樹皮が形成されていないことから新凍裂木であると判断されたトドマツ1（表4参照）の凍裂割裂部付近の木口面光顕写真。矢印は傷害樹脂道を示す。

写真 34～36　ヤチダモ3（表4参照）の霜腫れ部の木口面光顕写真。**写真 34**：霜腫れ部と正常材部の境界部。矢印は傷害柔組織を示す。**写真 35**：霜腫れの中央部付近。矢印は傷害柔組織を示す。**写真 36**：**写真 35** の一部の拡大。

写真 37～40　凍裂樹皮が形成されていないことから新凍裂木であると判断されたヤチダモ1，2（表4参照）の凍裂割裂部付近の木口面光顕写真。**写真 37**：ヤチダモ1（**写真 17** 参照）の凍裂の割裂部付近の材組織。**写真 38**：**写真 37** の一部の拡大。**写真 39**：ヤチダモ2の凍裂の割裂部付近の材組織。大矢印，小矢印は，それぞれ傷害柔組織，形成中の孔圏道管を示す。この供試木は5月中旬に伐採されたため，孔圏道管がすでに形成中である（小矢印）。**写真 40**：**写真 39** の一部の拡大。矢印は傷害柔組織を示す。

写真 41　凍結状態のトドマツ凍裂樹幹（トドマツ1；表4参照）の水食い材部。アステリスクで示した明色の領域は正常心材部である。

写真 42～45　トドマツ凍裂樹幹の水食い材部にみられた放射状の内部割れの接写写真。凍結状態で撮影。**写真 42**：サイズの小さな二つの放射状の内部割れが近接している部位。アステリスクは，二つの放射状の内部割れを隔てている材組織を示す。**写真 43**：比較的サイズの大きい二つの放射状の内部割れが近接している部位。矢印は破断の走行が階段状に変化している部位を示す。アステリスクは，二つの放射状の内部割れを隔てている材組織を示す。**写真 44**：放射状の内部割れの破断の走行が階段状に変化している部位。材組織の分離を伴わない例である。**写真 45**：放射状の内部割れの破断の走行が階段状に変化している部位。材組織の分離を伴う例である。

写真 46，47　トドマツ凍裂樹幹の水食い材部にみられた目回りの接写写真。凍結状態で撮影。**写真 46**：年輪境界部で発生している目回り。矢印は明色の材部を示す。**写真 47**：明らかに早材部で発生している目回り。

写真 48～55　トドマツ凍裂樹幹（トドマツ4；表4参照）の水食い材部の Cryo-SEM 写真。**写真 48**：内部割れから離れた領域の年輪境界部の木口面。矢印は空洞化した放射柔細胞を示す。**写真 49**：内部割れから離れた領域の早材部の板目面。この試料の観察面は凍結割断法により露出させた。矢印，アステリクスは，それぞれ空洞化した放射柔細胞，仮道管の内腔に詰まっている氷晶を示す。**写真 50**：木口面で見た放射状の内部割れ。矢印，アステリクスは，それぞれ空洞化した放射柔細胞，細胞壁切断を起こした仮道管を示す。**写真 51**：**写真 50** の同一の放射状の内部割れの樹皮側の末端部付近。矢印は，放射状の内部割れの空隙の拡大に応じて本来の走行が変化した放射組織を示す。**写真 52**：目回りの樹皮側の破断面付近の木口面。**写真 53**：目回りの樹皮側の破断面付近の木口面。**写真 54**：目回りの髄側の破断面付近の木口面。目回りに沿って仮道管が集中的に空洞化している例である。矢印は沈着物または析出物を示す。**写真 55**：目回りの髄側の破断面付近の木口面。目回りの破断面に近接する材組織で集中的な空洞化が発生していない例である。

写真 56～58　トドマツの凍裂破断面付近の木口面の光顕写真。**写真 56**：凍裂の内端部付近。矢印は破断面の移行部を示す。**写真 57**：破断面の移行部の拡大。大矢印，小矢印は，それぞれ数多くの仮道管放射列単位，少数の仮道管放射列単位で破断面の移行を起こしている部位を示す。**写真 58**：年輪境界部付近での破断面の移行（矢印）。

写真 59～61　トドマツ凍裂樹幹の水食い材にみられる放射状の内部割れの木口面光顕写真。**写真 59**：サイズの小さな放射状の内部割れ。矢印は破断面の移行部を示す。**写真 60**：複数の放射状の内部割れが近接している部位。矢印は破断面の移行部を示す。**写真 61**：比較的サイズの大きい放射状の内部割れ。

写真 62～70　トドマツ凍裂樹幹の水食い材部にみられる放射状の内部割れの放射破断面の SEM 写真。**写真 62**：年輪境界部付近。大矢印，小矢印は，それぞれ仮道管の壁切断破壊，放射柔細胞の壁切断破壊を示す。アステリスクは，対応破断側（**写真 63**）との対応部位を示している。**写真 63**：**写真 62** の対応破断面。大矢印，小矢印は，それぞれ仮道管の壁切断破壊，放射柔細胞の壁切断破壊を示す。アステリスクは，対応破断面側（**写真 62**）との対応部位を示している。**写真 64**：仮道管間の破断面の拡大。矢印は，この写真の破断面の対応破断面側の仮道管壁の壁層の断片を示す。**写真 65**：仮道管間の破断面の拡大。アステリスクは，対応破断面側（**写真 66**）との対応部位を示している。**写真 66**：**写真 65** の対応破断面。アステリスクは，対応破断面（**写真 65**）

との対応部位を示している。**写真 67**：仮道管間の破断面のうち，有縁壁孔が密集する領域。矢印は，有縁壁孔の壁孔縁の一部が完全にはく離した断片，あるいは部分的にはく離した部分を示している。アステリクスは，対応破断面側（**写真 68**）との対応部位を示している。**写真 68**：**写真 67** の対応破断面。矢印は，有縁壁孔の壁孔縁の一部が完全にはく離した断片，あるいは部分的にはく離した部分を示している。アステリスクは，対応破断面側（**写真 67**）との対応部位を示している。**写真 69**：仮道管・放射柔細胞間破壊の仮道管側の破断面。アステリスクは，放射柔細胞の細胞長軸方向に走行する縞状の構造が認められる領域を示している。矢印は，分野壁孔の仮道管側の孔口を示す。**写真 70**：**写真 69** の対応破断面側（放射柔細胞側の破断面）。アステリスクは，放射柔細胞の細胞長軸方向に走行する縞状の構造が認められる領域を示している。

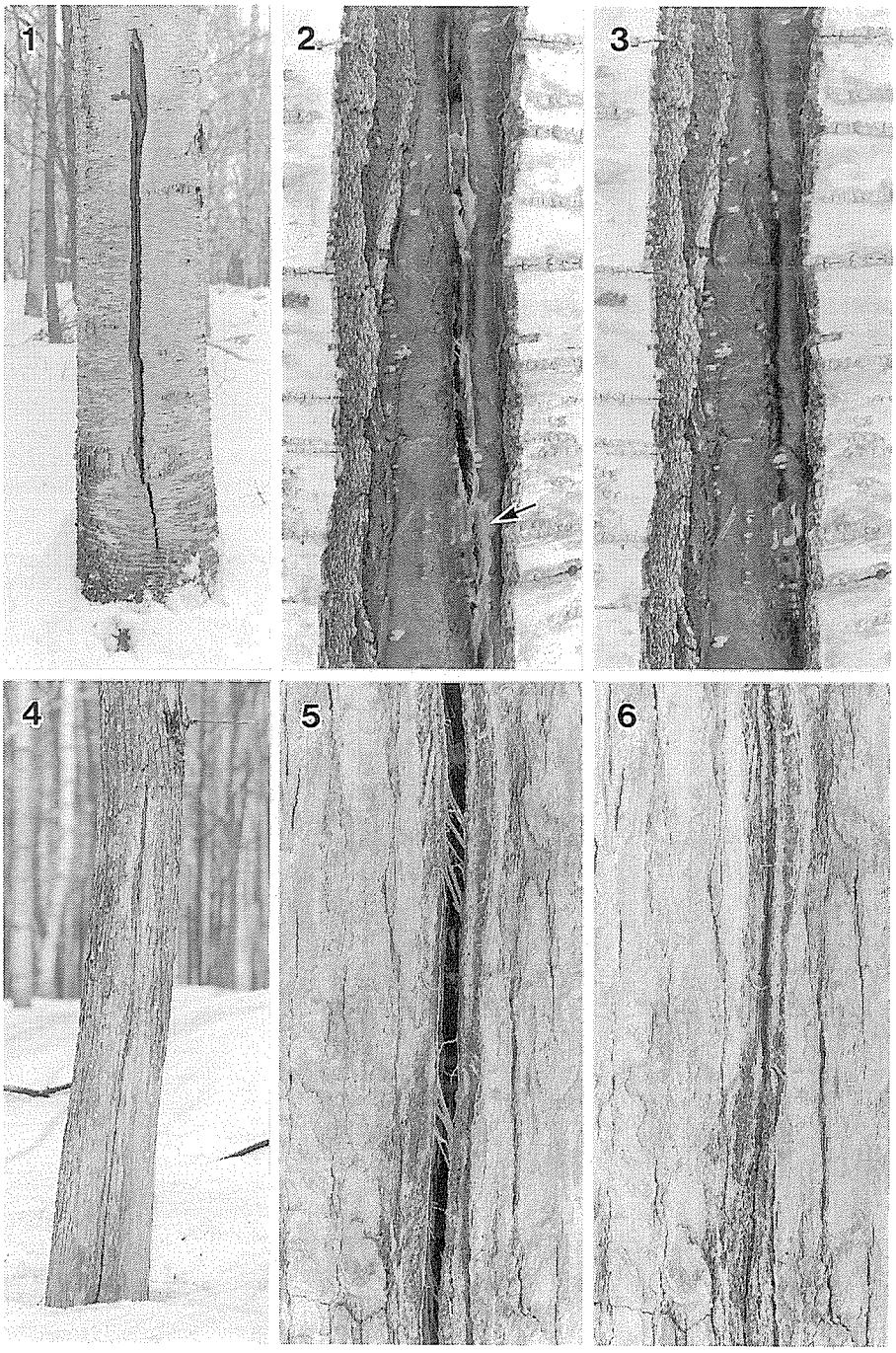
写真 71～74 トドマツ凍裂木の接線破断面（凍裂の破断面の移行部と目回り）の SEM 写真。**写真 71**：凍裂の破断面の移行部。大矢印，小矢印は，それぞれ壁切断破壊を起こしている仮道管，壁切断破壊を起こしている放射柔細胞を示す。**写真 72**：凍裂の破断面の移行部。壁切断破壊を起こしている放射柔細胞の拡大である。**写真 73**：目回りの破断面。大矢印，小矢印は，それぞれ壁切断破壊を起こしている仮道管，壁界破壊により破断している放射柔細胞を示す。**写真 74**：目回りの破断面。壁界破壊により破断し，仮道管間の破断面より突出している放射柔細胞。

写真 75～77 含水させ，単に凍結させる方法により人工凍裂が誘発されたヤマナラシの円板の横断面。**写真 75**：円板の全体像。大矢印，小矢印は，それぞれ凍裂，氷の詰まった放射状の内部割れを示している。**写真 76**：凍裂部の拡大。**写真 77**：円板中心部の拡大。大矢印，小矢印は，それぞれ凍裂の内端，氷の詰まった放射状の内部割れを示す。

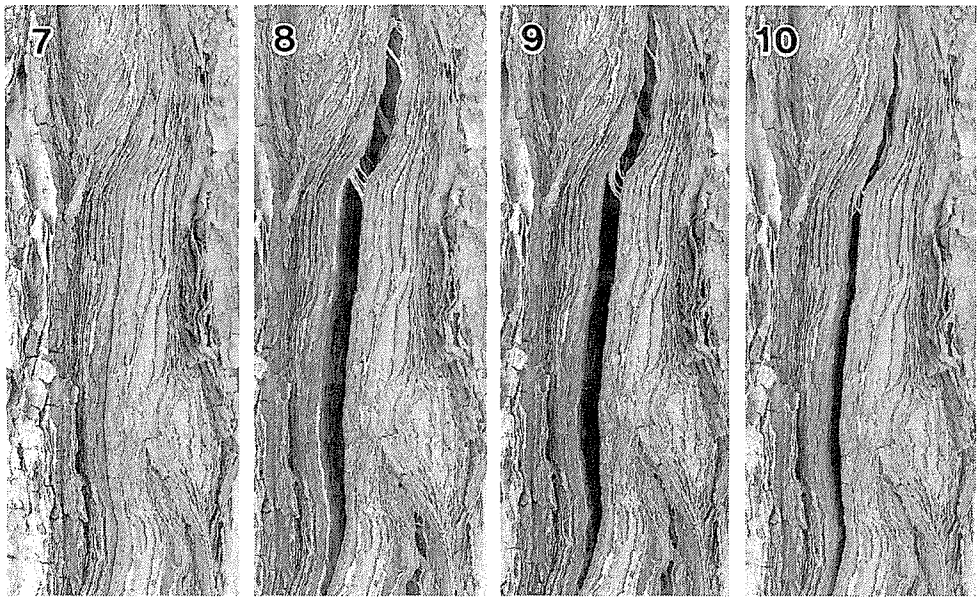
写真 78, 79 含水させ，単に凍結させる方法による凍裂の誘発実験で，凍裂が誘発されなかったヤマナラシの円板の横断面。**写真 78**：円板の全体像。**写真 79**：円板中心部の拡大。矢印は，軽微な放射状の内部割れを示している。

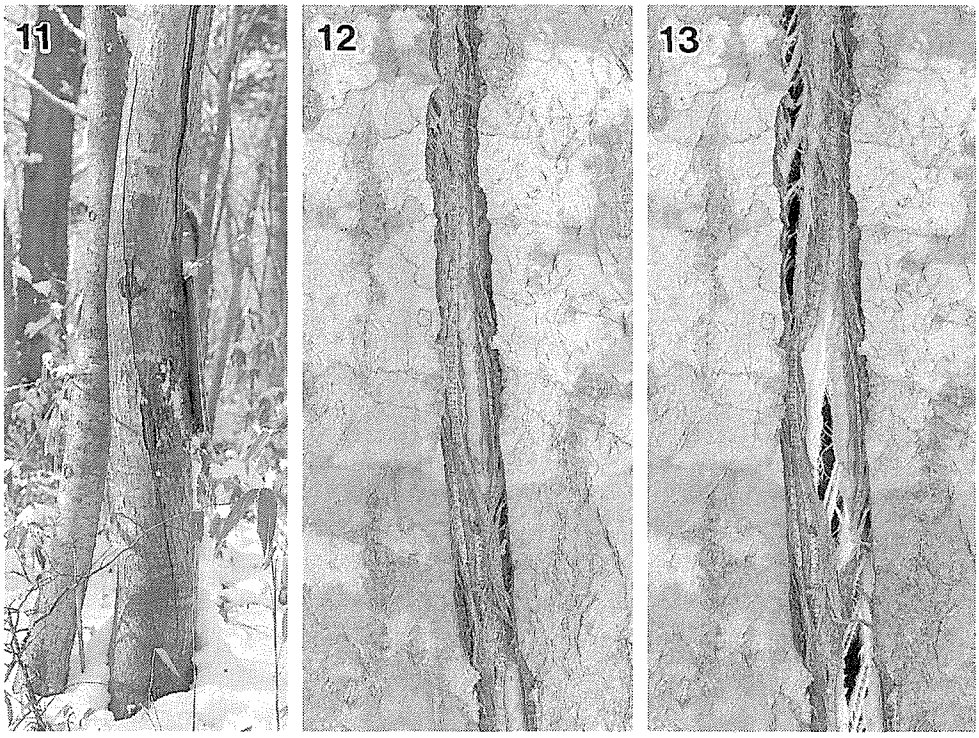
写真 80～82 含水させ，単に凍結させる方法により凍裂が誘発されたヤチダモの円板の横断面。**写真 80**：円板の全体像。大矢印，小矢印は，それぞれ凍裂，放射状の内部割れを示している。**写真 81**：凍裂部の拡大。**写真 82**：円板中心部の拡大。

写真 83, 84 含水させ，単に凍結させる方法による凍裂の誘発実験で，凍裂が発されなかったヤチダモの円板の横断面。**写真 83**：円板の全体像。**写真 84**：円板中心部の拡大。

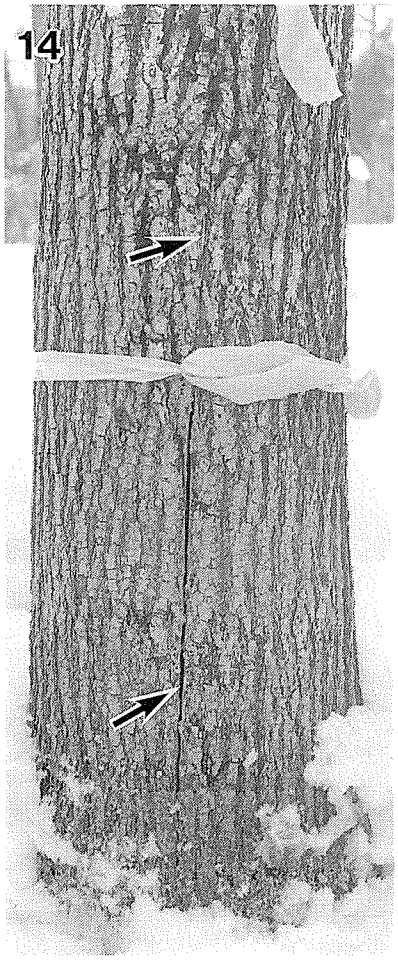


プレート　1

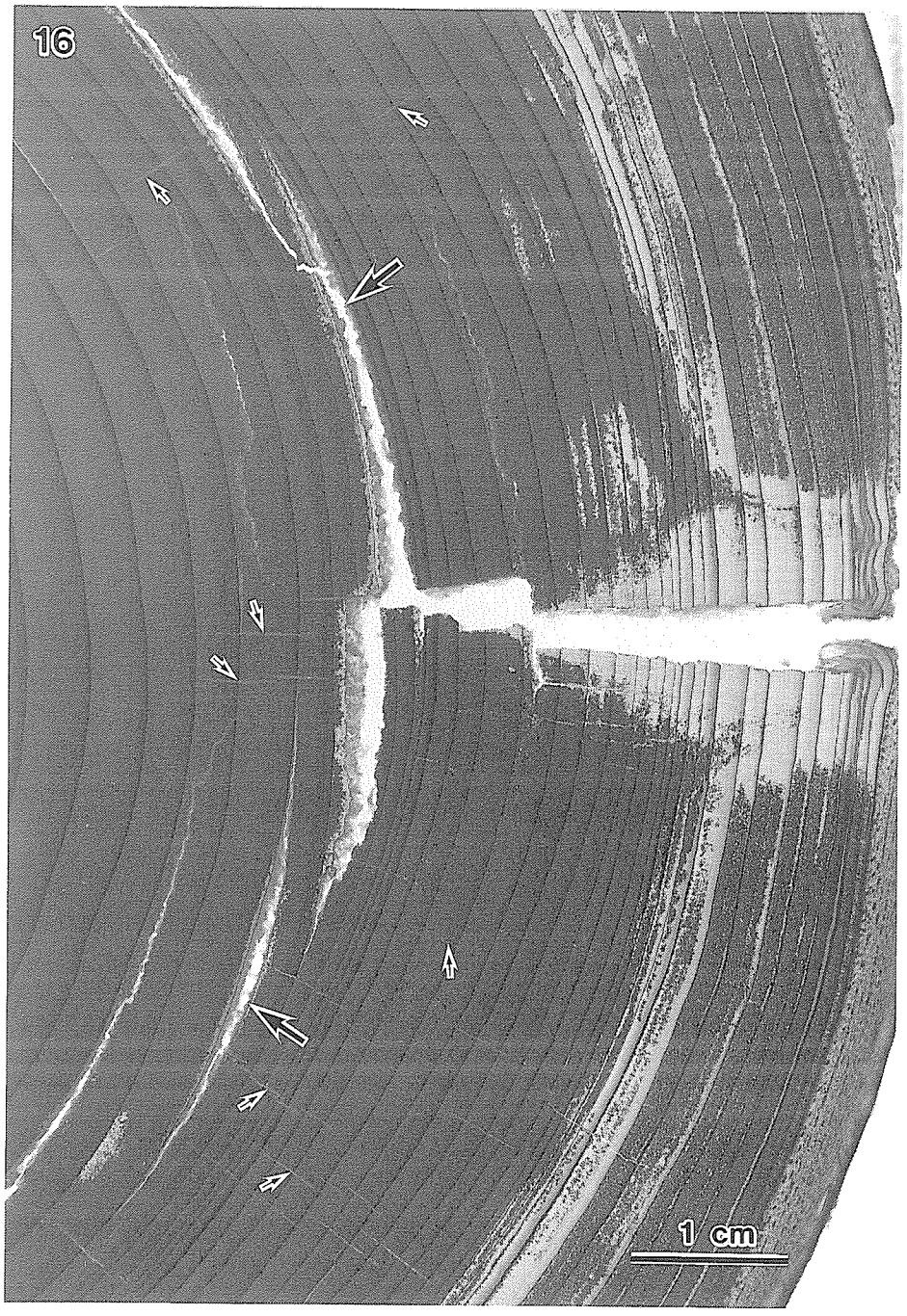




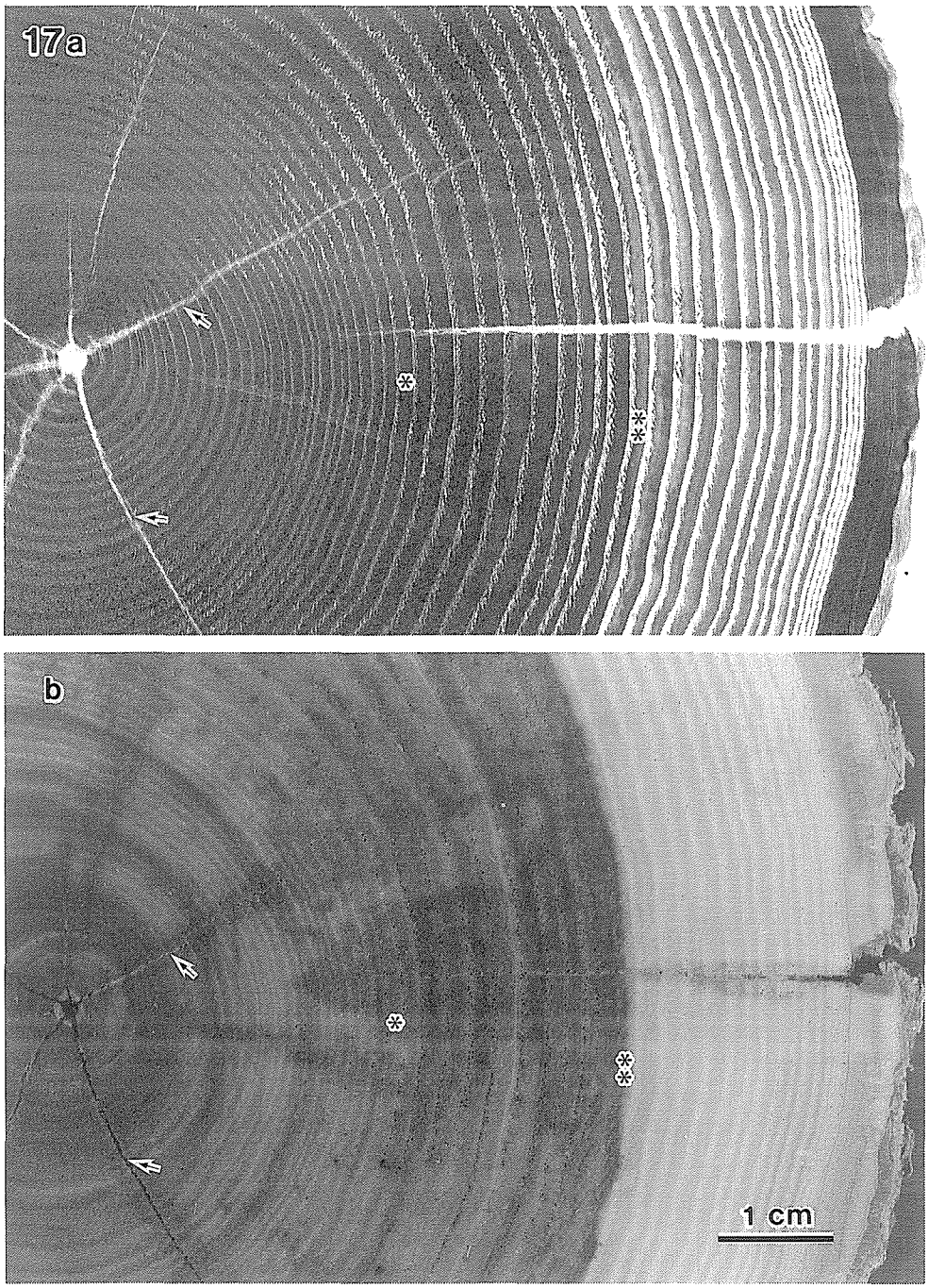
プレート 2



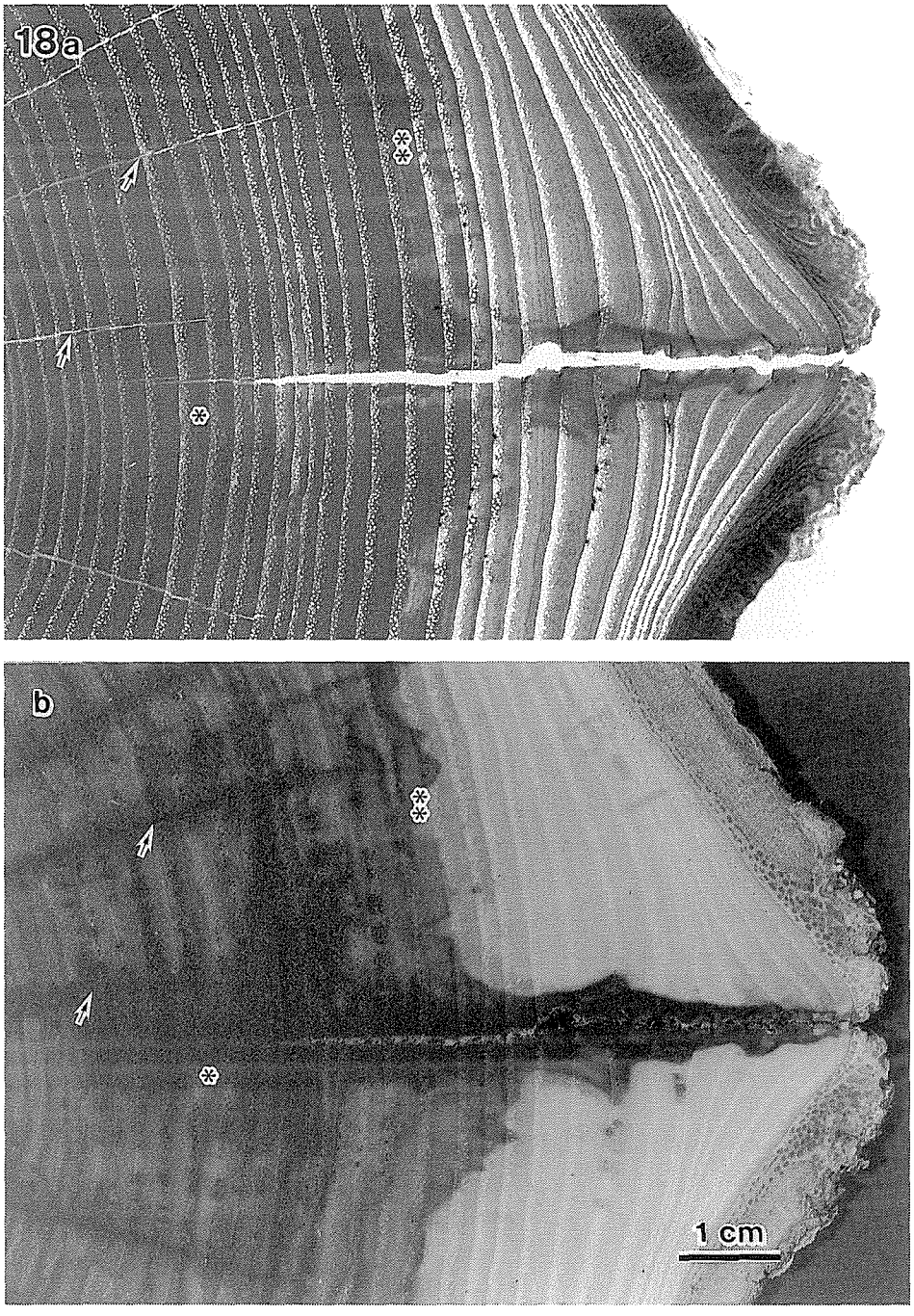
プレート 3



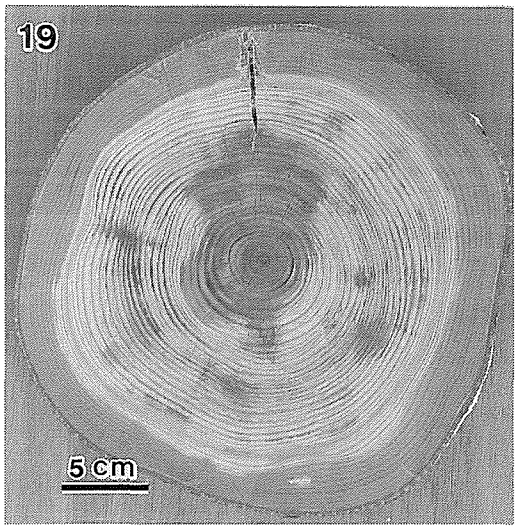
プレート 4

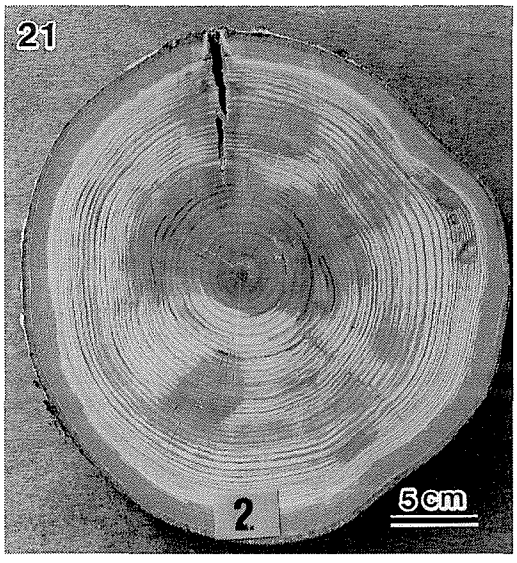


プレート 5

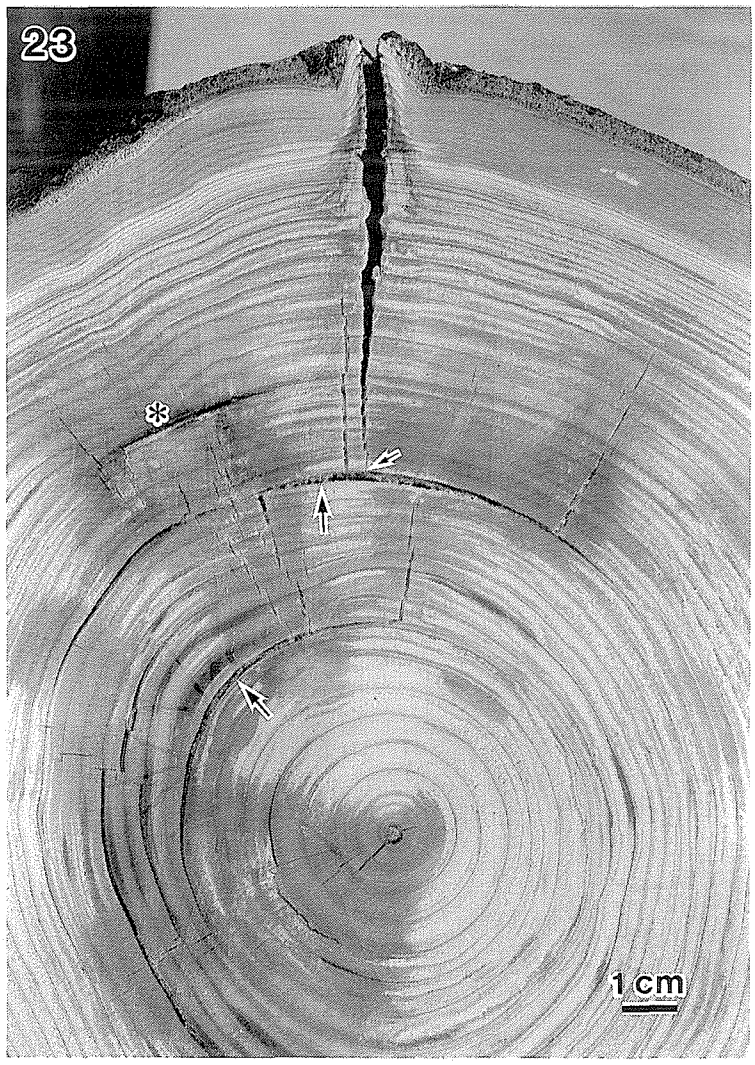


プレート 6

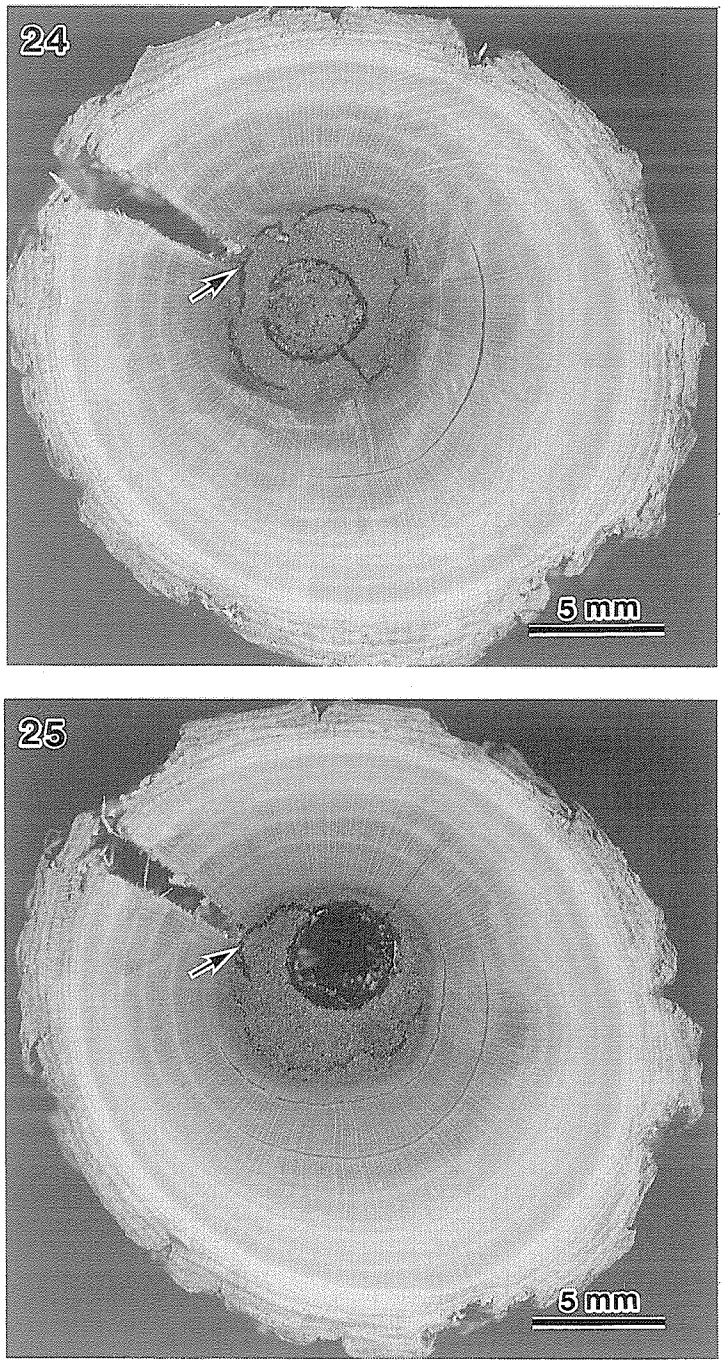




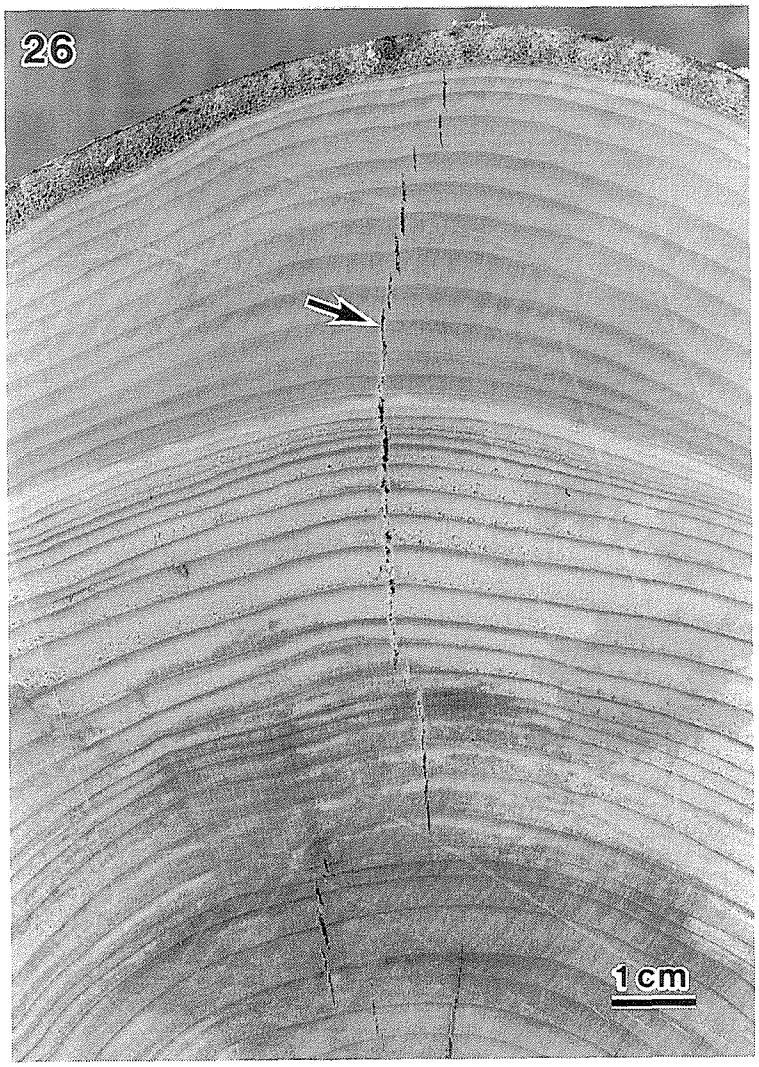
プレート 7



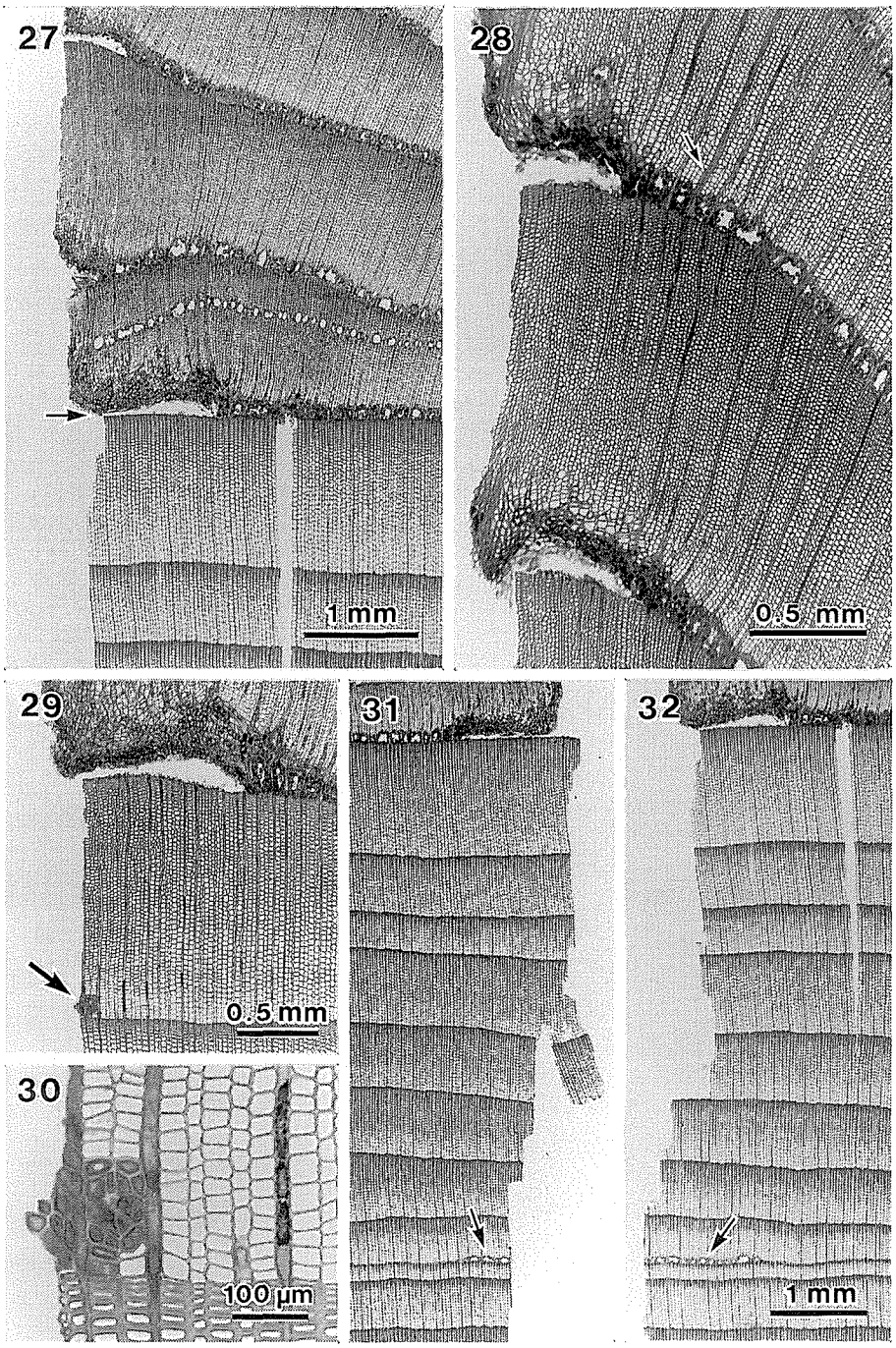
プレート8



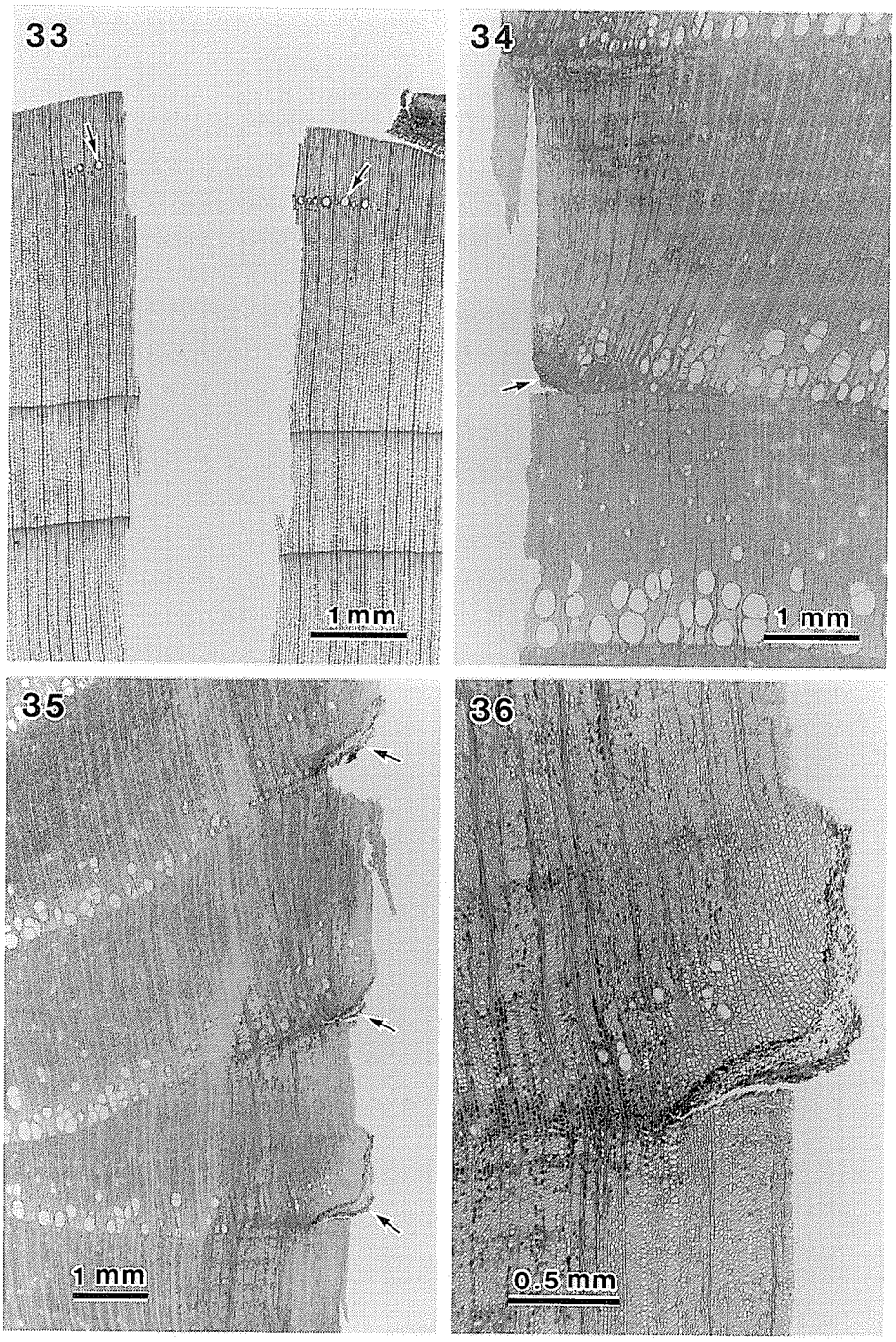
プレート 9



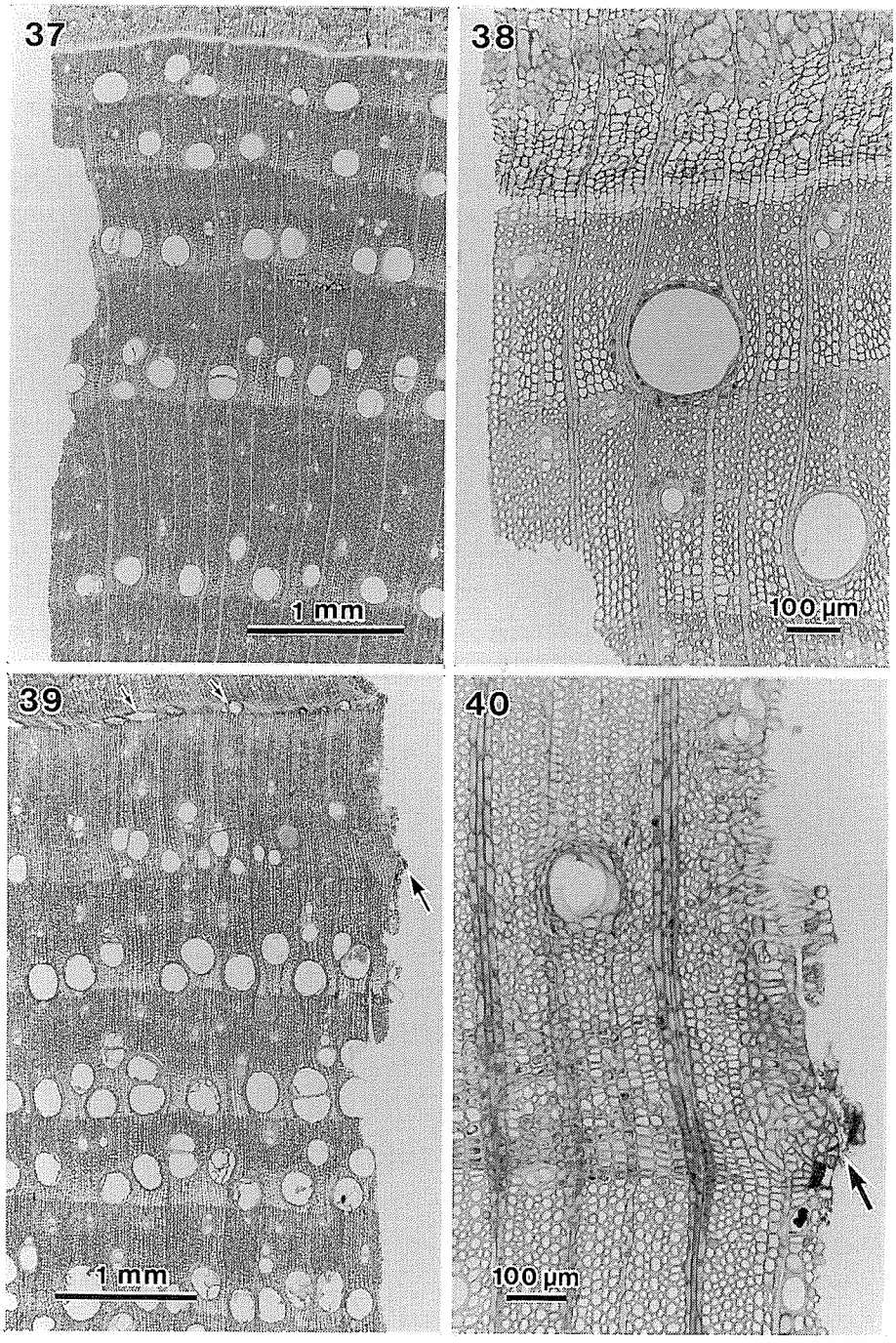
プレート 10



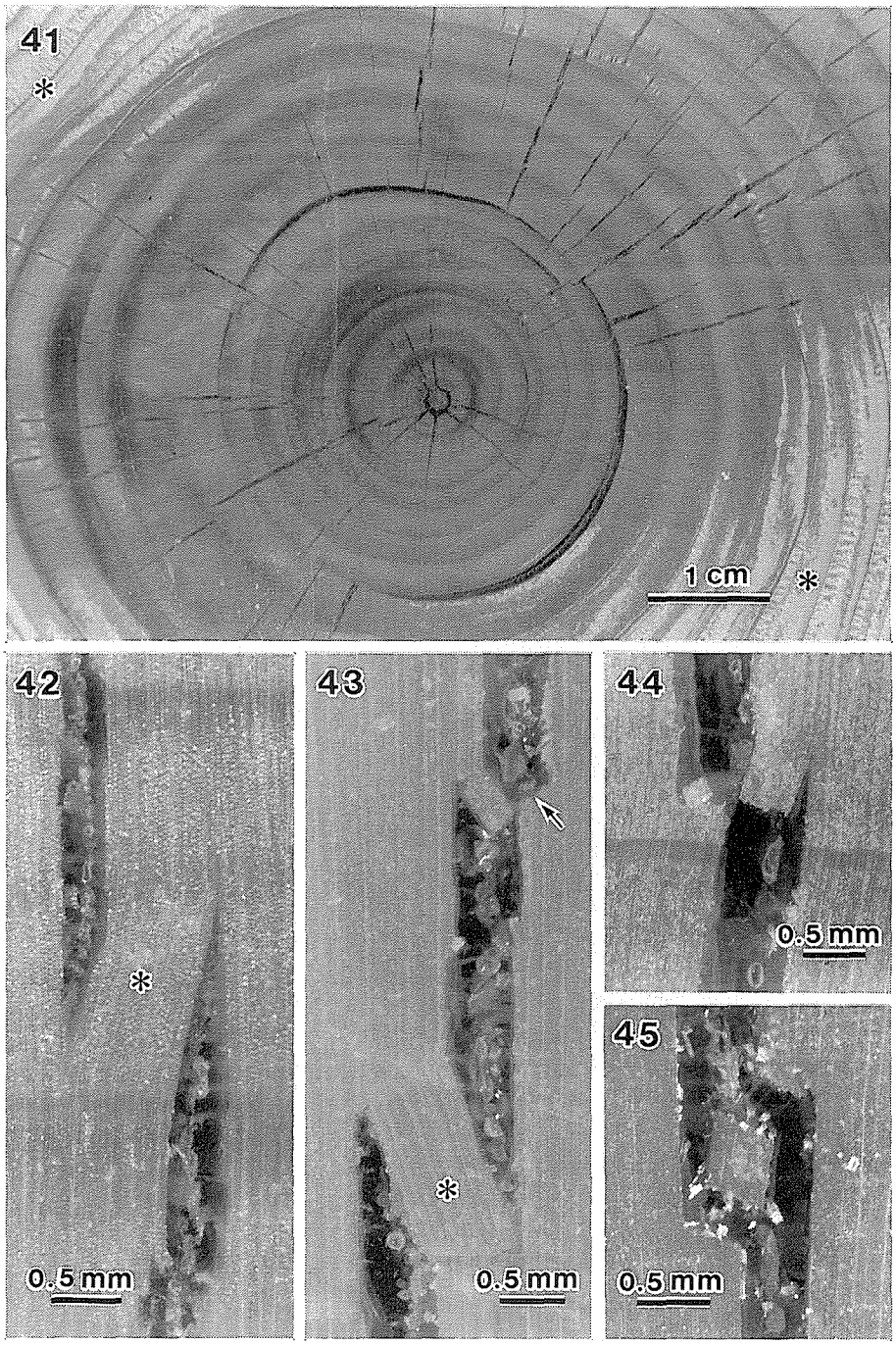
プレート 11



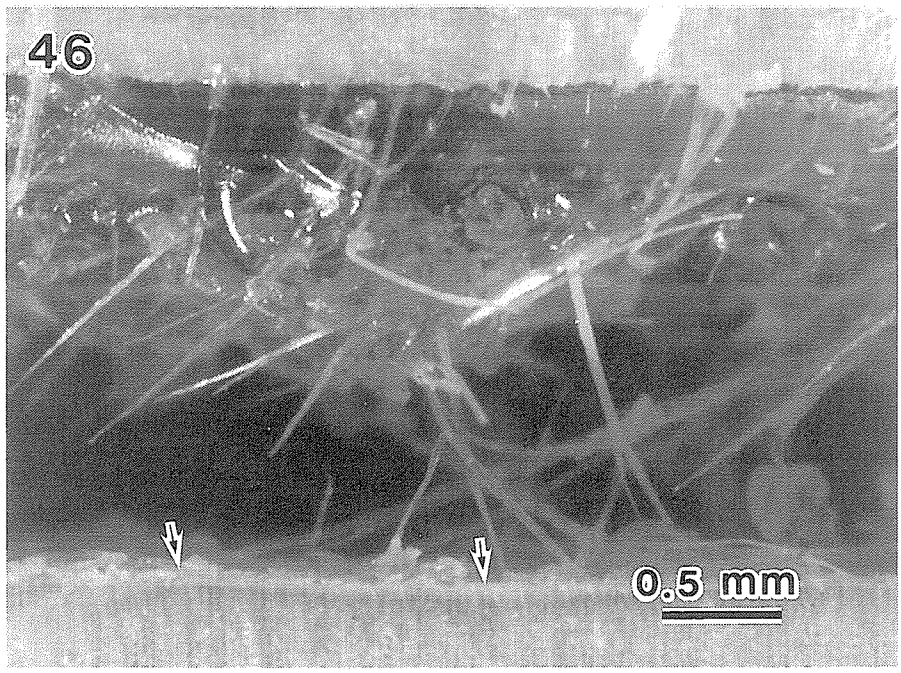
プレート 12

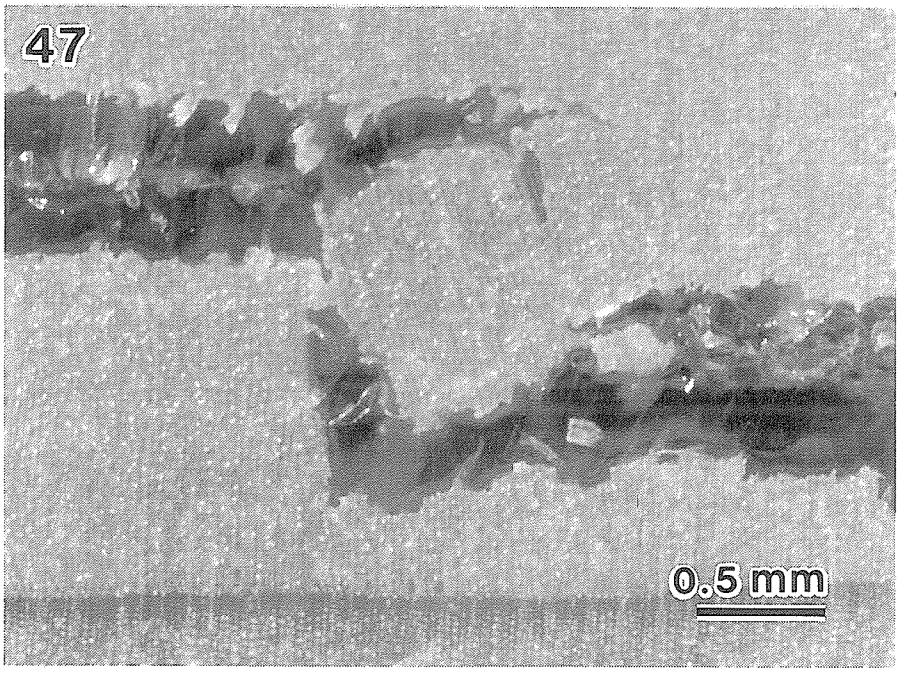


プレート　13

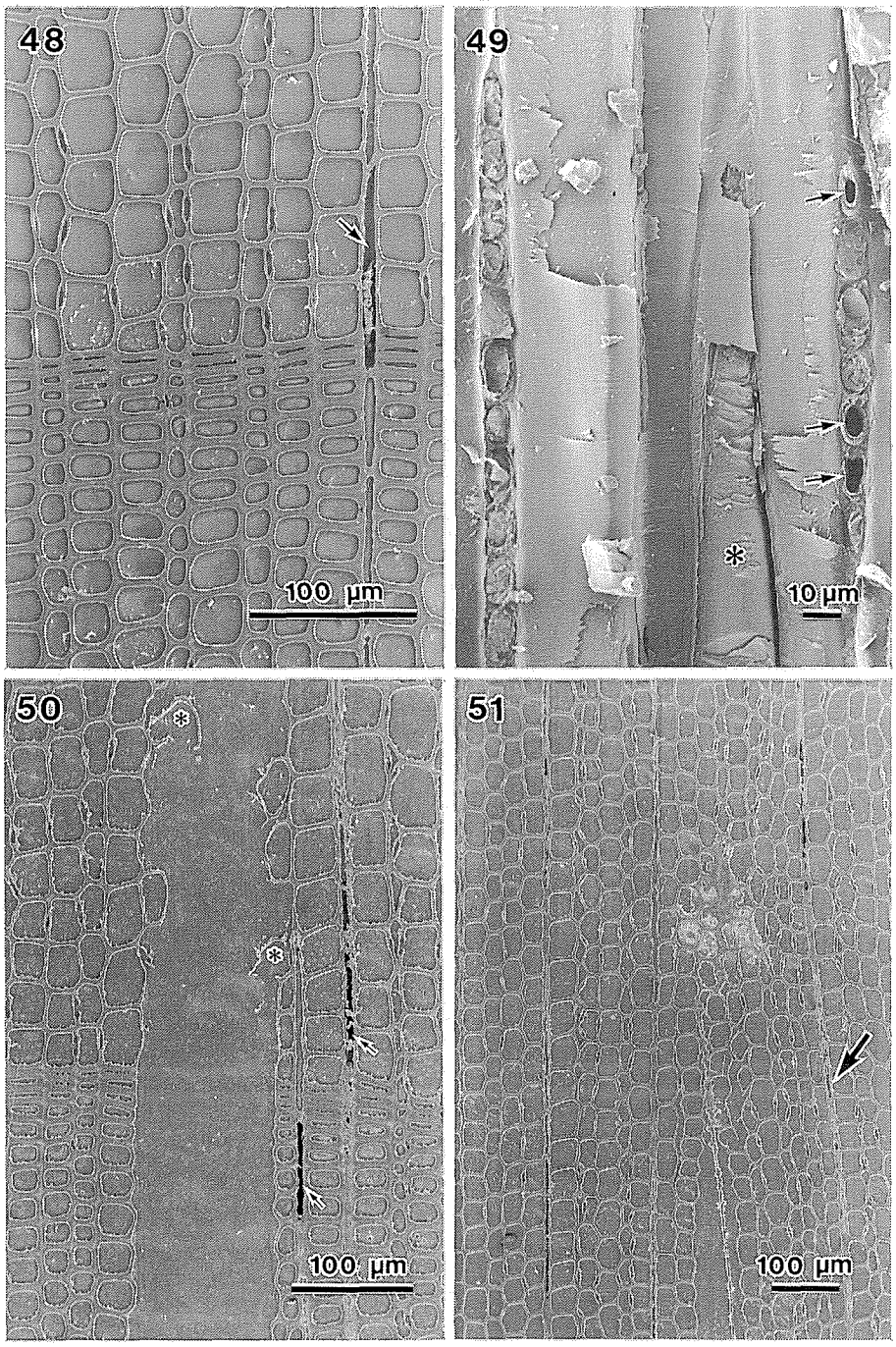


プレート 14

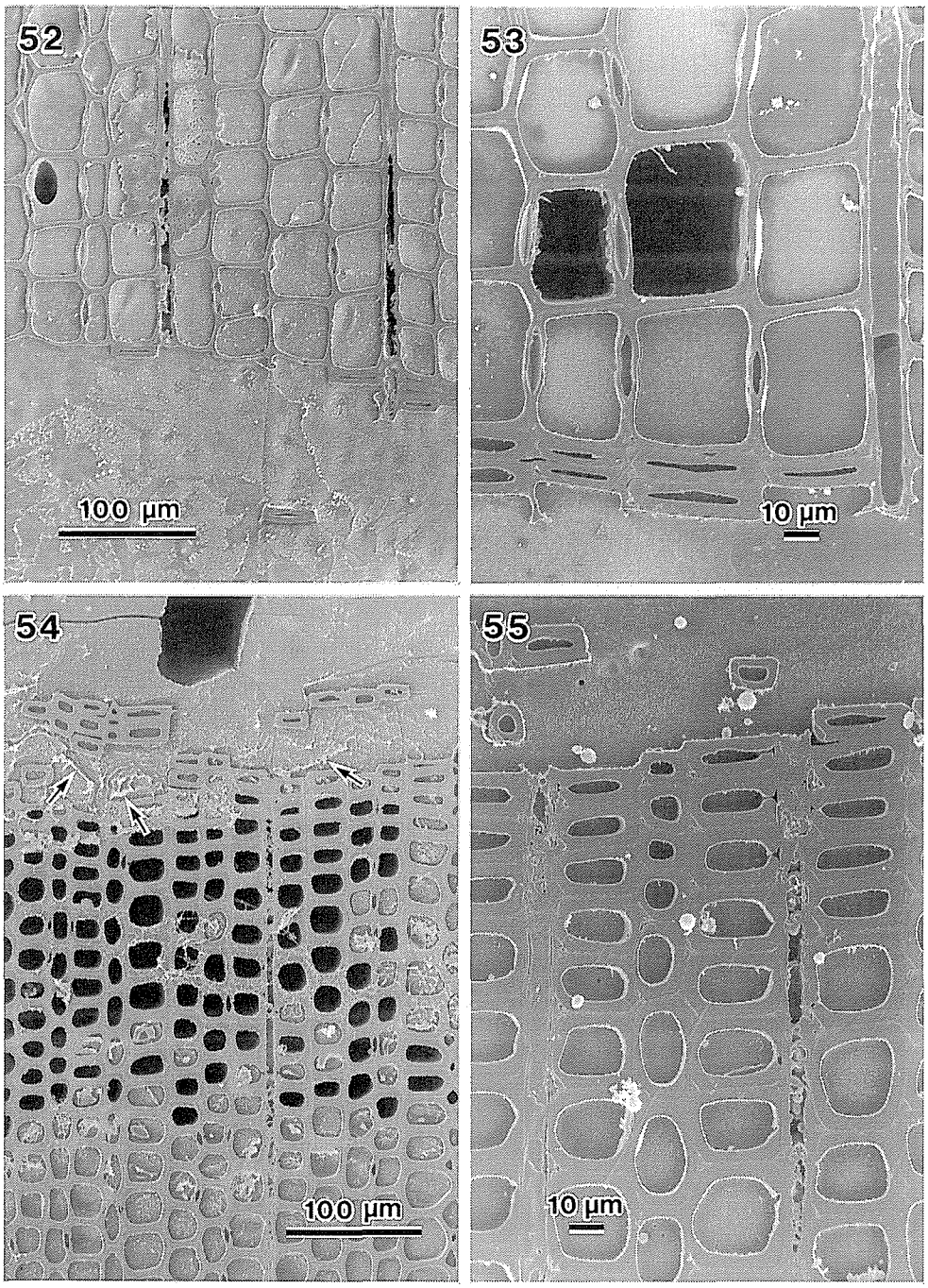




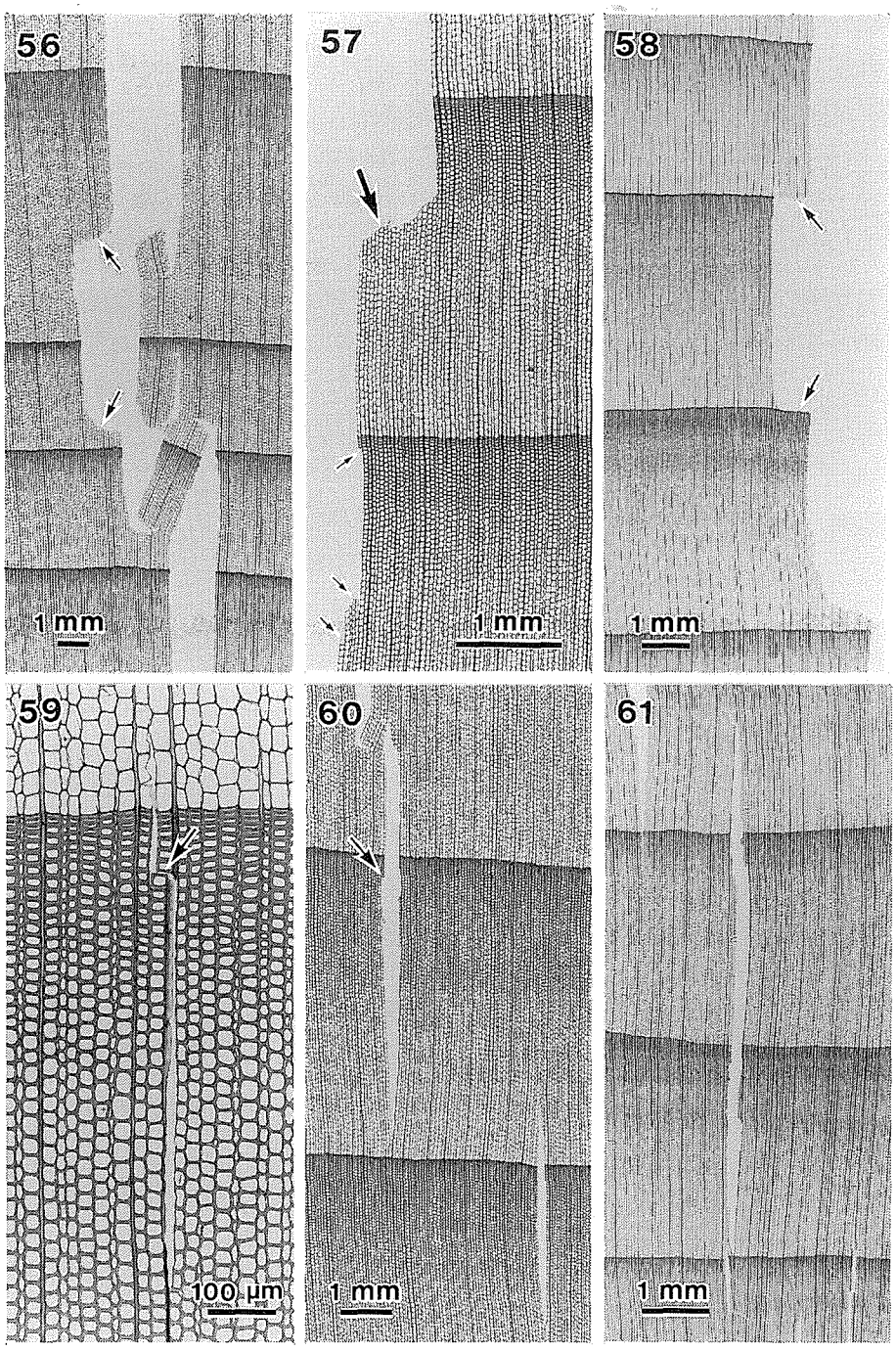
プレート 15



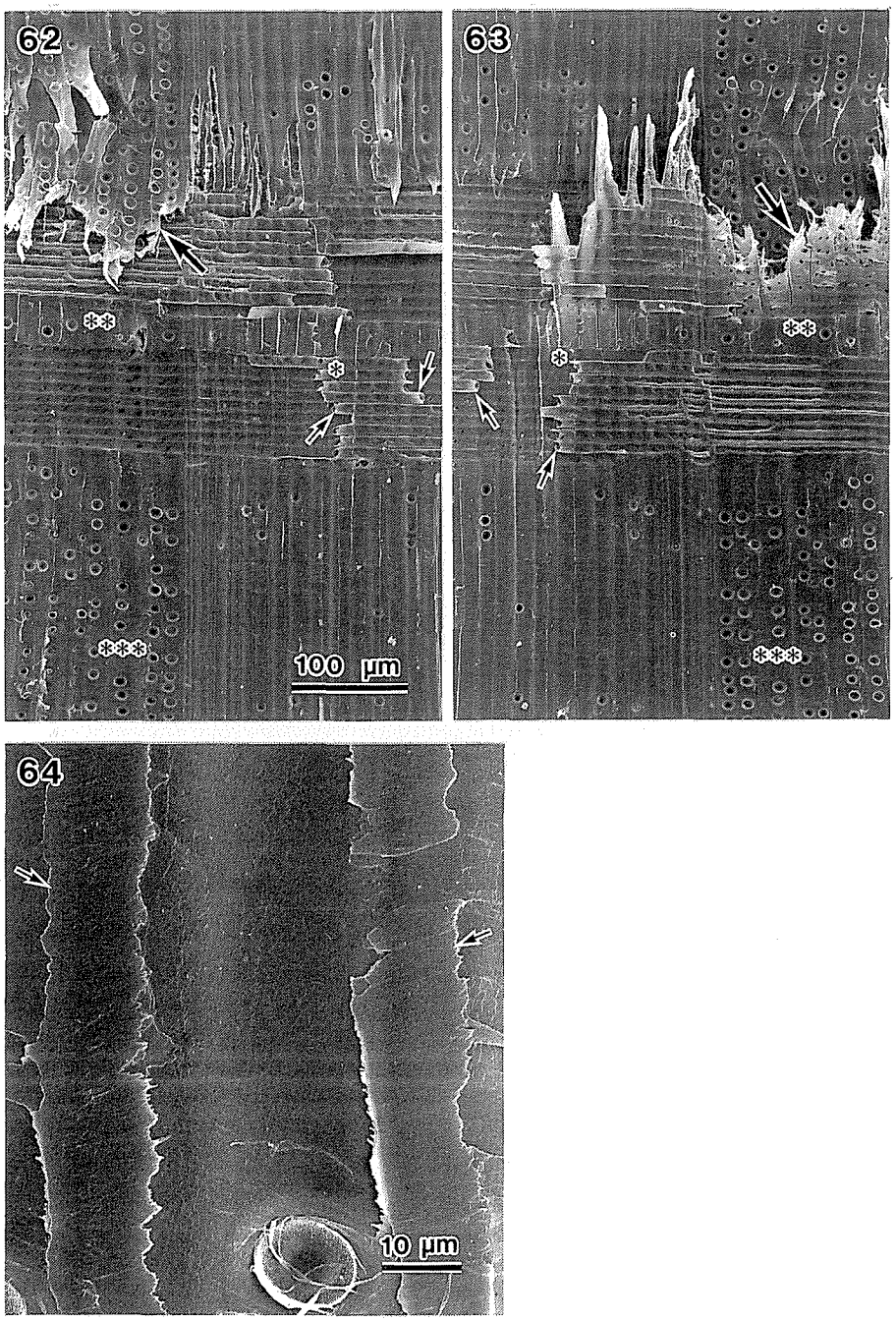
プレート 16



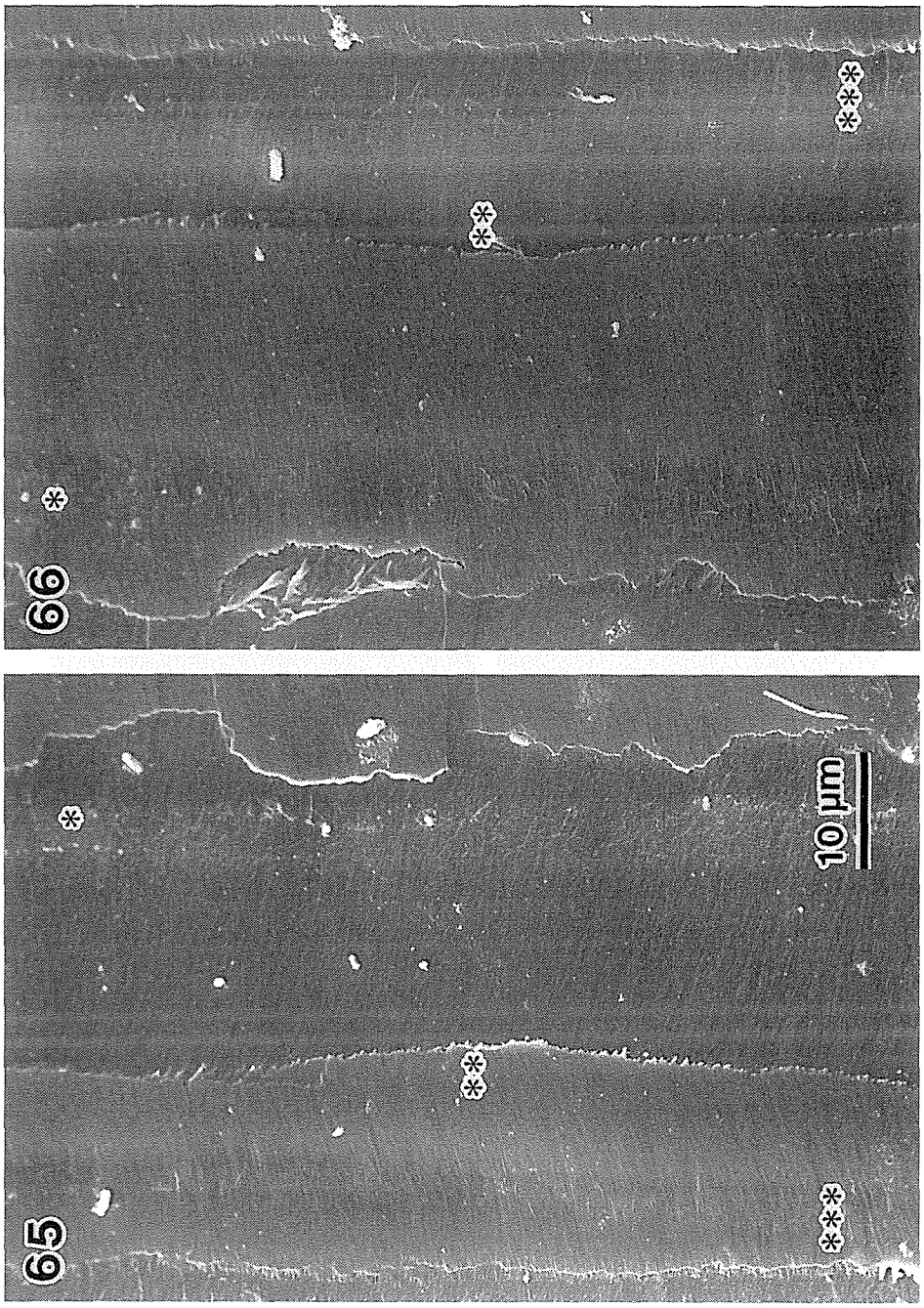
プレート 17



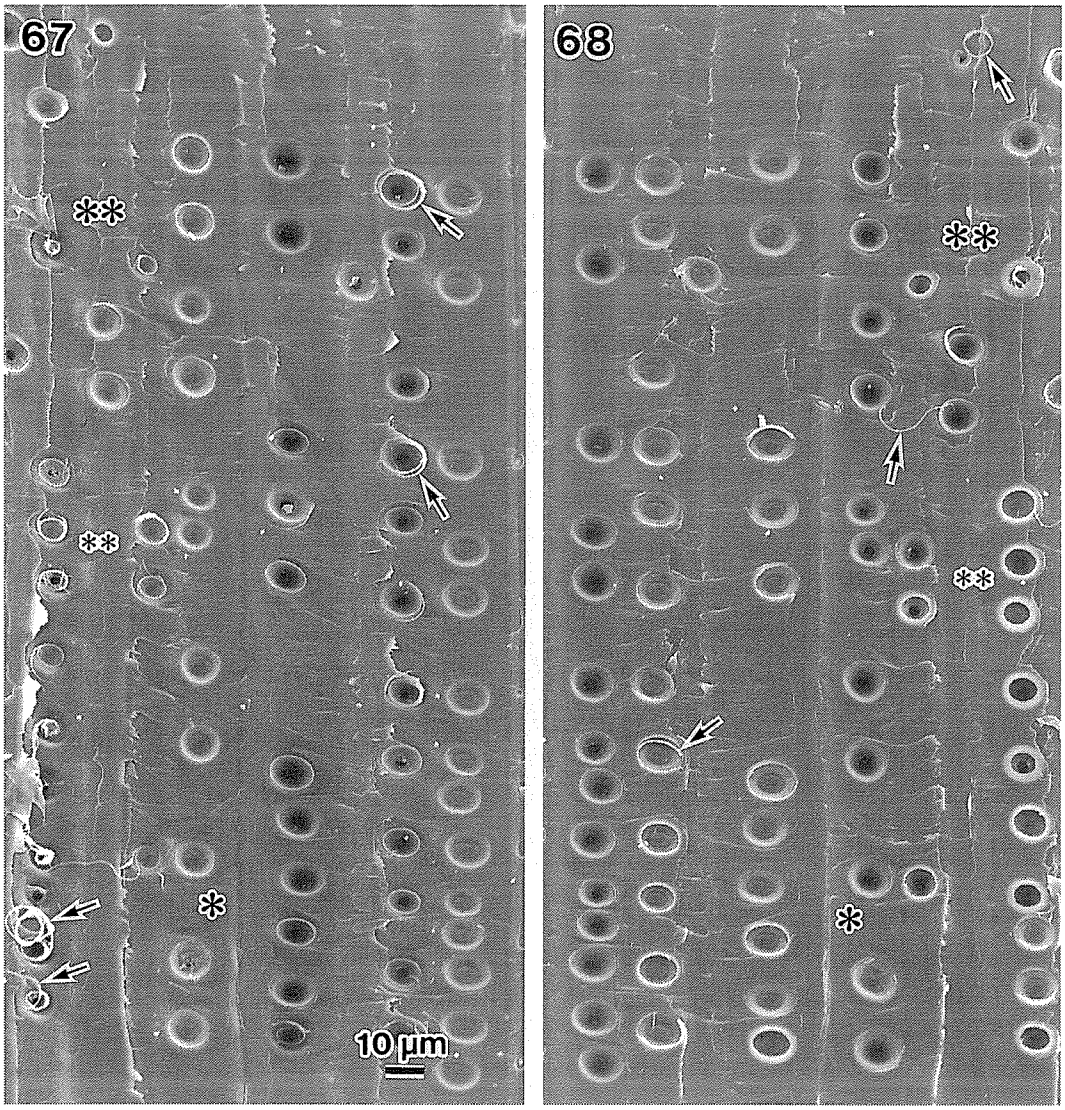
プレート 18



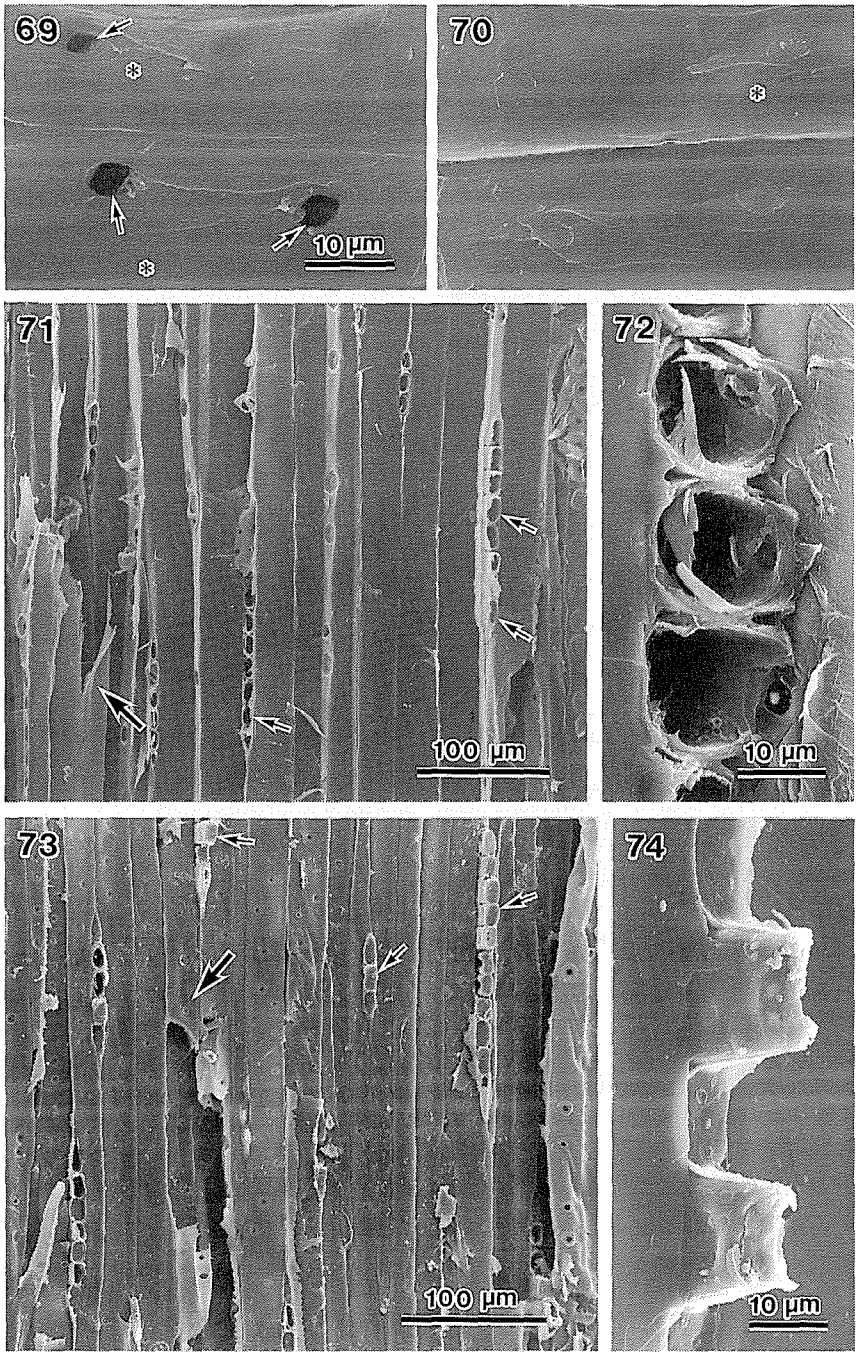
プレート 19



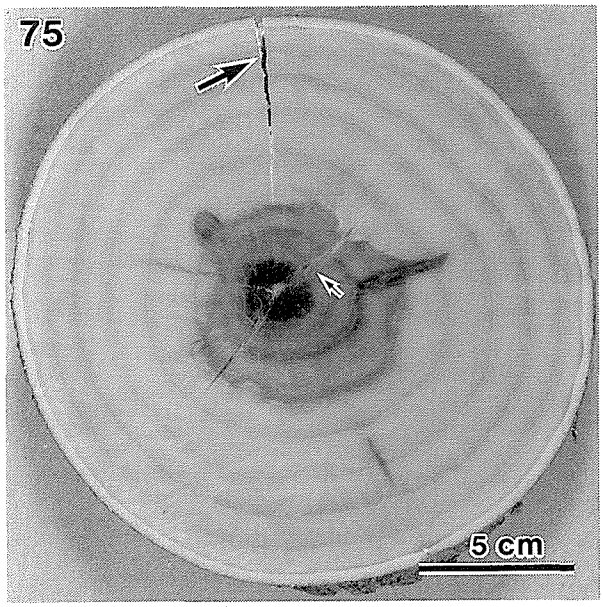
プレート 20

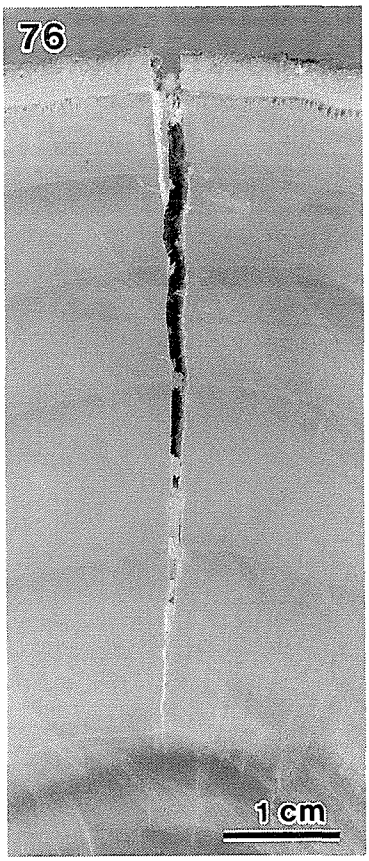


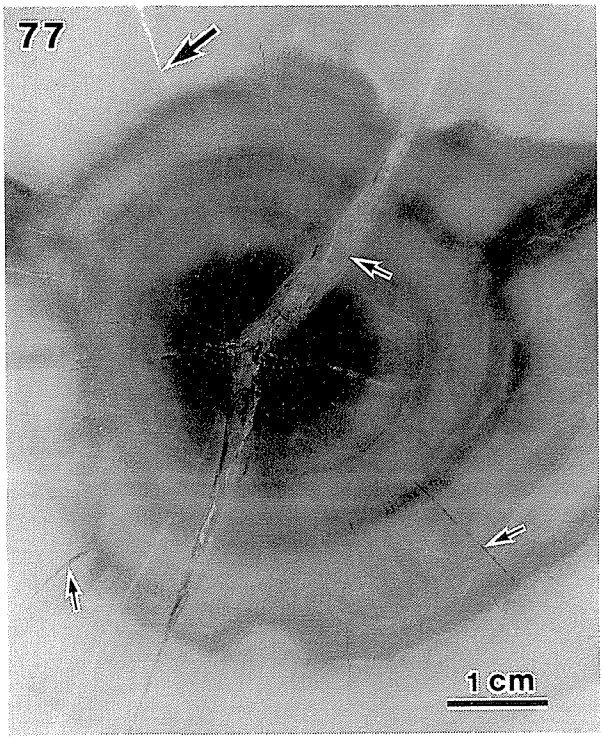
プレート 21



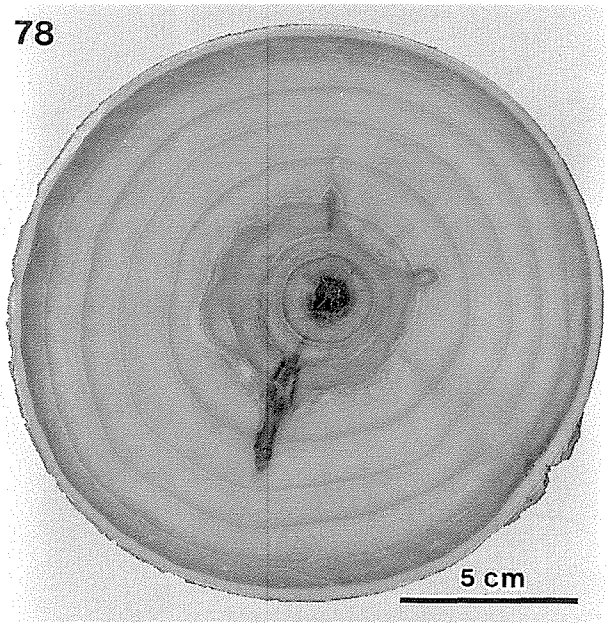
プレート 22

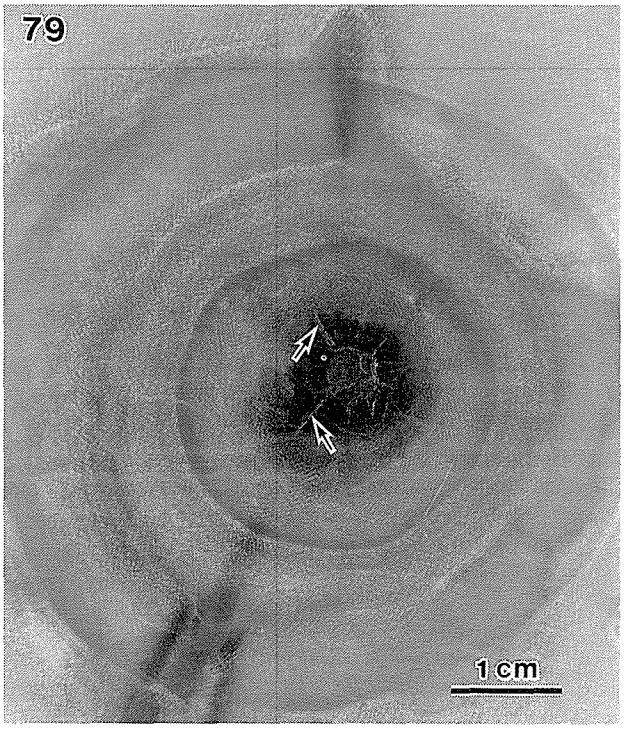




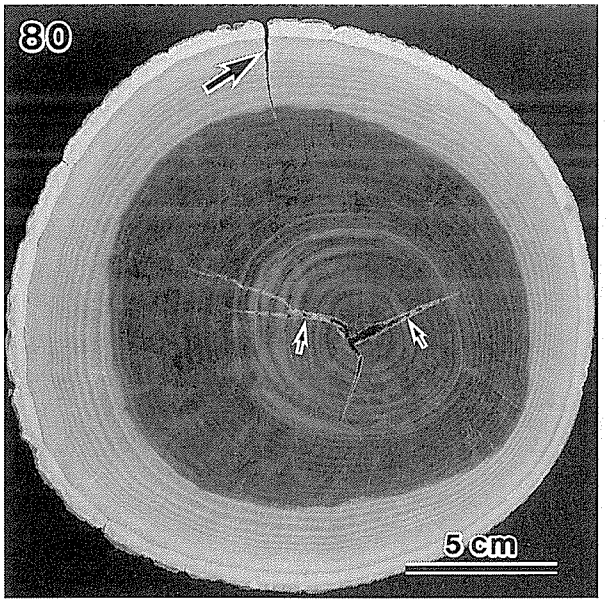


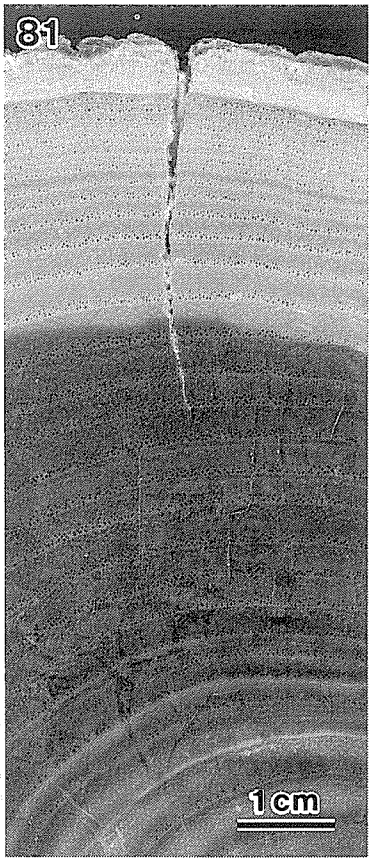
プレート 23



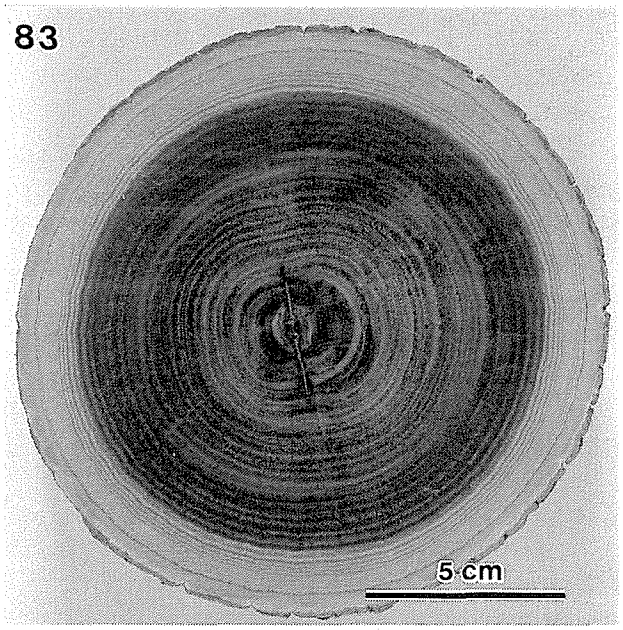


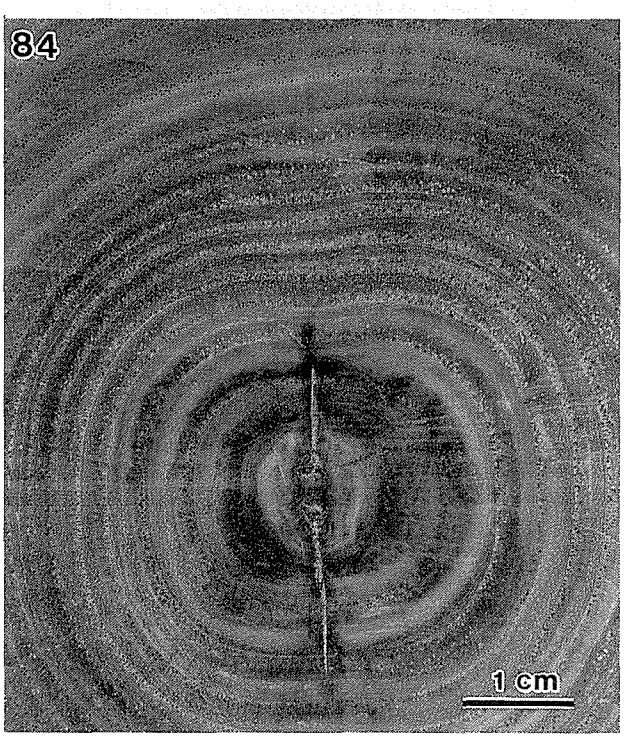
プレート 24





プレート　25





プレート 26