HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トドマツ樹幹の凍裂の発生機構，とくにその水喰材との関係について
Author(s)	石田，茂雄; ISHIDA, Shigeo
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告，22(2)，273-373
Issue Date	1963-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20824
Type	departmental bulletin paper
File Information	22(2)_P273-373.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

トドマツ樹幹の凍裂の発生機構，とくにその水喰材との関係について

石田茂雄

On the Development of Frost Cracks on "Todomatsu" Trunks, *Abies sachalinensis*, especially in Relation to their Wetwood

By

Shigeo ISHIDA

目　　次

第1章　序　　論 …… 274
第2章　研　究　史 …… 276
第3章　北海道における凍裂の発生状況概観 …… 286
第4章　トドマツ樹幹の凍裂の発生に関与する条件 …… 290
　第1節　内　部　条　件 …… 290
　　1. トドマツ樹幹の水喰材概説 …… 291
　　2. 伐根調査における水喰材と凍裂との関係 …… 292
　　3. 水喰材の原因としての樹幹の外部形態的特徴と凍裂 …… 293
　　4. 凍裂と，凍裂幹材内部の水喰材との関係 …… 294
　　5. 水喰材の凍結，融解と凍裂幅との関係 …… 300
　第2節　外　部　条　件 …… 305
　　1. 樹幹温度と凍裂幅との関係 …… 307
　　2. 円板の温度と復張との関係 …… 310
第5章　トドマツ樹幹の凍裂の発生機構 …… 316
　第1節　トドマツ樹幹の水喰材 …… 316
　　1. 水喰材の分布とその含水率 …… 316
　　2. 水喰材の中の割れ目 …… 321
　第2節　水喰材の凍結と樹幹内圧 …… 325
　第3節　凍裂の発生に対する樹幹の内部割れの意義 …… 328
　第4節　正常樹幹に対する熱応力の近似計算 …… 331
　第5節　凍裂の発生機構についての考察 …… 334
第6章　結　　論 …… 337

石田茂雄：北海道大学農学部林産学科　助教授　林学博士
S. ISHIDA: Assistant Professor, Doctor of Forestry, Institute of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

参考並びに引用文献 …… 339
Summary …… 343
附 表 …… 352
写 真 …… 366

第1章 序 論

凍裂（とうれつ，霜割れ，霜裂，寒裂），Frostrisse (Frostspalten, Kälterisse, Frostklüfte, Eisklüfte, Eisborsten; Frost cracks, Frost splits; gélivure; Frostsprikor) の定義とも云うべきものは，多くの学者によって，いろいろの形で与えられている。たとえば，CASPARY (1855)[12] は，

> . . . . , durch den Frost der Länge nach oft bis aufs Mark gespalten werden, ...

と，凍裂は樹幹上に寒さによって生ずる縦長い放射方向の割れであることを述べている。しかるに HESS-BECK (1935)[28] によれば，

> Frostrisse sind durch Winterfrost meist unter Mitwirkung von Wind verursachte Längrisse an Stämmen. Sie gehen von der Rinde aus und setzen sich in radialer Richtung mehr oder weniger tief in den Holzkörper hinein fort.

と，その主なる発生原因として，寒さの外に風の機械的作用の共存を挙げ，さらに GAYER-FABRICIUS (1935)[19] によれば，

> Frostrisse, Eisklüfte sind Strahlenrisse, welche am stehenden Baum bei sehr grosser Winterkälte unter Mitwirkung des Windes stets zwischen zwei Wurzelansätzen auftreten.

と，凍裂の最も多く発生する位置をつけ加えている。また，Forestry terminology (1950)[18] は，Frost crack について

> A longitudinal radial split in the wood of a tree, generally near the base of the bole, from internal stresses set up by low temperatures.

と述べている。

これらを二，三の実例とする多くの文献における凍裂の定義の共通点を求めると，

1) 凍裂は樹幹の外周部から内方に向う縦長い割れ目であること，

2) これが寒さによって発生するものであること，

の2点である。著者によって定義ないし定義的な記述がちがっているのは，この基本の形に発生機構に対する見解その他の説明的要素が附加されているからである。

凍裂の発生機構をテーマとする筆者の研究においては，その対象となる凍裂の定義を明確にしておかなければならない。上に見たように，凍裂の定義的記述の中には，すでに

その発生機構に対する解釈を含むものが多いが，ここではそのような解釈そのものが問題になるのであるから，斯かる要素はできるだけ排除しなければならない。したがって，ここでは“凍裂”を，樹幹外周部から内方に向う，冬の低温時に発生する縦長い割れ目と定義しておく。なお，便宜的に，爾後の記述において，“凍裂”なる語を上に定義したような割れ目を発生する現象すなわち凍裂現象の意味に用いることがあり，また，時に“凍裂する”の如く，動詞的に用いる場合もある。

凍裂の現象は，かなり古くから，世界の寒冷各地の林業者の間に知られており，これに関する林業上の調査研究が多く行なわれている。すなわち，凍裂の発生と樹種，立地，作業法などとの関係，利用上の欠点としての観点からの凍裂樹幹の形態的特性に関する調査などがこれである。

一方，凍裂の発生機構についても古来，多くの人達によって研究，考察がおこなわれた結果，多くの説が提出されている。しかし，今日なお，統一的な定説というものがなく，部分的には明らかな不合理を含み，また互に矛盾する幾つかの説が，それぞれ，多くの研究者によって支持され，引用されている状態である。思うに，これは，凍裂現象の原因，機構が，林学上の多くの問題と同様に決して単純なものではなく，それに関与する要因が甚だしく多いことに基因するものと云うべきであろう。したがって，この問題の一般的な真の解明は，林学領域における多くの学問，とくに森林環境学，林木生理学，低温における樹幹の物理学などの協力によってはじめて達成され，林木撫育上の適切な手段を以てこれが防止を図ることが可能になるものと考えられる。

北海道のトドマツにはしばしば凍裂が発生してその利用価値を低下しており[32),33),35)]，また，北海道産の有用広葉樹種も，多かれすくなかれ，そのほとんどが凍裂の害を受けている。林木を凍裂の害から保護すべき林業上の手段については，経験的に多くのことが教えられているが[28)]，それらの保護手段は現象の本質の理解の上に立っておこなわるべきものであることは論を俟たない。このためにこそ，従来も多くの西欧の研究者によって発生機構についての論議が行なわれて来たのである。しかし，本邦においては，かなり凍裂の発生がみられるにもかかわらず，その発生機構についての系統的な研究は全くおこなわれていない。その完全な解明の困難なことは上述のとおりであるが，関係部門の研究者の，それぞれの立場からの研究成果を積み上げて行くことによって，その解明に一歩一歩近づくことができるのである。その意味では，筆者の，北海道産トドマツの凍裂に関する研究は，主として樹幹の形態学，木材理学の立場からの一つの努力に過ぎないものであって，さらに他の部門からの積極的な研究の行なわれることが望まれる。

しかしながら，北海道のトドマツについての筆者の研究によれば，従来，凍裂の原因としてはほとんど考慮されていなかった，その樹幹内部の水喰材の存在が，その凍裂の主

因をなすものと判断される。この条件の考慮なしには，トドマツの凍裂の発生機構は明らかにされないであろう。従来の諸説によれば，凍裂がなぜ一部の個体にしか発生せず，或はなぜ樹幹の限られた一部にしか発生しないかを，多くの努力がなされたにもかかわらず明確にすることができなかった。トドマツの水喰材は，凍裂とは無関係に，全く個体的な原因によって発生するものであるから水喰材が凍裂の主因であるとするならば，上述の疑問点はトドマツに関する限りは，ほとんど解明されるものと信じて差支えない。

この論文は，北海道産トドマツの凍裂の発生機構を，主としてその内部的特性，すなわち水喰材との関連において考究したものである。この論文のはじめに，西欧諸国，とくにドイツの文献によって，今日までの凍裂の発生機構に対する研究の歴史について述べ，ついで北海道における凍裂，とくにトドマツの凍裂の発生状況を概観する。次に論文の本論において，まず，トドマツの凍裂の発生に関与する主なる因子として，その樹幹の内部的特性すなわち水喰材の存在を挙げなければならないこと，しかも，これが凍裂個体を決定する個体的条件であることについて述べ，次にトドマツの樹幹に外部から作用して，その凍裂の発生に関与すると考えられる主なる条件，すなわち低気温，とくに急激な気温降下の意義について述べる。最後に，これらの内部的，外部的条件が如何に関連して凍裂が発生するものであるかについて考察をおこなう。

この研究におけるいろいろの調査，観察・測定，一部の実験は何れも厳冬期の野外でおこなわれたもので，実施上の多くの障害にもとづく不備の点がすくなくなかったように思われる。この意味では今後さらに完備した条件の下での精しい観察実験をおこなうことが望ましい。

本研究は，終始現北大名誉教授大沢正之博士の御指導の下に進められた。ここに厚く御礼を申述べる。また多くの現地調査，現場における観察・測定などに便宜を与えられた北海道道有林，道内国有林関係の方々，またいろいろと御協力をいただいた北大演習林，なかんづく雨竜派出所，天一派出所の方々に深甚の謝意を表したい。

第2章　研　究　史

凍裂の発生機構に対する最も素朴な一つの解釈は，古くから西欧に伝えられていると云われる Märchen の中にみることができる。1885年，Forstwissenschaftliches Centralblatt 紙上に H. MAYR[53] は，凍裂の発生機構についての ALERS の説[1] に反対して一文をのせているが，その中で，

Der Stammfrost giebt dem Verfasser Gelegenheit, das alte Märchen von der Sprengung der Bäume in Folge Ausdehnung derselben durch das Erstarren des Pflanzensaftes dem jungen Forstmanne neu aufzutischen; . . . .

と述べている。MAYR のいう Märchen は具体的に何を指すものかははっきりしないけれども，北欧神話の中にもこの趣旨のものがみえているといわれる。何れにしても，凍裂は古くから，厳しい寒さの時に樹液が凍り膨張して幹が破裂するものである，と漠然と考えられていたようである。われわれは，ここに最も素朴な形での凍裂の発生に対する一つの解釈をみることができる。

DÖBEL (1746)* は，彼の著書 Jäger=Practica (1746) の中で，多くの樹種，とくに Eiche, Rotbuche, Esche などの広葉樹には，厳しい寒さのために凍裂が発生するが，その主なる原因は，その樹幹がよく成長し，多孔質なことであると述べている。

1860 年，H. NÖRDLINGER[58] は Kritische Blätter für Forst- u. Jagdwissenschaft 紙上に "Bedeutung des Winterfrosts für die Waldbäume" なる論文をのせ，この中で当時までの，凍裂発生の機構に対する諸説を紹介している。これらの諸説の発表された文献には筆者が入手できなかったものが多いので，ここには主としてこの NÖRDLINGER の論文を参照して，当時までの模様を調べてみよう。

NÖRDLINGER は，はじめに，従来おこなわれて来た凍裂機構に対する樹液の凍結膨張説は正しいものでないことを示差し，さらに，これに関する GÖPPERT の研究，HUNDESHAGEN の見解などを紹介している。

HUNDESHAGEN の所論は，この頃の樹液膨張説に対する反論の一つの代表的なものと考えられ (文献 58 の 136 頁)，

> . . . . , wenn die Frostrisse von Ausdehnung des Holzes durch gefrornen (salzehaltigen) Saft herrührten, das Platzen hauptsächlich zur Zeit des Gefrieren d.h. der grössten Eisausdehnung zwischen dem Nullpunkt und einigen graden darunter stattfinden. Diess ist aber nicht der Fall, vielmehr knallen die Bäume in der Regel erst bei weit tieferer Temperatur und um so häufiger, je strenger die Kälte.

と主張する。そして彼自身は風の乾燥作用を凍裂の原因として強くみている。

つまり，樹液の凍結膨張によって凍裂が起るものとすれば，0°C あるいはそれより幾分低い温度において凍裂が起らなければならないが，事実は然らず，もっと低い温度で樹幹は割裂するものである，と云うのである。このような議論は，後年 (1880 年代)，ALERS と T. NÖRDLINGER その他によっても繰返されている。

NÖRDLINGER は次に SCHÜPLER の見解を紹介している。これは凍結による膨張説の範疇に属するものであるが，それが樹幹の中心部附近にある異常水分の凍結を主として考慮しているところに特徴がある。NÖRDLINGER はそのようなことは考えられないこと，もしそうならば頭木作業のとられている林に凍裂は多く見出される筈であるが事実はそうでな

---

* 文献 8) 参照。

いと述べている。

HUNDESHAGEN は上に述べたように，従来考えられて来た樹液膨張説の矛盾を指摘し，風による一種の樹幹の乾燥収縮説をとるが，NÖRDLINGER はこれについて，樹幹の材部は樹皮によって乾燥に対し保護されていること，樹幹の破裂音は風のない静かな時にしばしば起るものであること，冬の空気は比較的湿っていること，樹幹は冬には比較的に含水率が高いものであることなどを挙げ，HUNDESHAGEN に反論している。次に NÖRDLINGER の紹介している GÖPPERT の見解もその原著がないので詳細がわからないが，凍結して脆弱になっている材部が風の機械的作用によって凍裂する。とくに枝において然りというものである。しかし，NÖRDLINGER も CASPARY[17] も批判的で，CASPARY は理論的には異論はないが，枝の軸のところに凍裂のあるのをみたことがないと述べている。

最後に H. NÖRDLINGER 自身は，DUHAMEL* の実験（寒さによって樹幹の円周が減小することの測定），TH. HARTIG** の実験（略々 DUHAMEL に同じ），H. NÖRDLINGER*** の実験（円板について，のその放射方向および円周方向の収縮を測定），また，略々彼と同じ方法の CASPARY[15)~17)] の実験などについて記述したあと，寒さによって樹幹の周囲が縮小すること，また円板については円周方向が放射方向より多く収縮することを確認し，結局，次のように結論している。“すなわち，凍裂の発生は，寒さによる樹幹の収縮に基づくものではあるが，単に見掛上，樹幹の円囲が縮小したとしても，若しそれが樹幹の内部全体にわたって均一に収縮したものであるならば樹幹は割裂する筈がない。これが不均一な収縮をした場合には内部の層が抵抗し，樹幹の外層が割裂することも考えられるが，しかし，これは必ずしも事実に符合するものではない。結局，最も確からしいのは，割れ目が放射方向に発生することから考えて，木材本来の性質である，円周方向において放射方向よりも多く収縮すると云うこと（あたかも木材の乾燥における如く）に基づくものである”と。これは，NÖRDLINGER の引用によれば，DUHAMEL などもすでに指摘していたところである。

ROBERT CASPARY は Botanische Zeitung 誌上に 1855[12)~14)] および 1857[15)~17)] 年にそれぞれ3回づつ，凍裂に関する論文を載せている。今から100年前に出された，前後6回にわたる CASPARY のこれらの論文は，今日までに発表された論文の中では最も大きいものの一つであり，しかも，その大部分は，凍裂は如何にして発生するものであるかと云う問題の解明に充てられている。CASPARY の結論の要点は，先に述べた NÖRDLINGER のものと同種のものである。すなわち，円周方向の熱膨張係数が放射方向のそれよりも大きい事実を実験的に確かめ，その事実からみれば，樹幹が割裂することは数学的にも疑いのない

---

* Exploitation I. p. 323 (文献58による)。

** Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung. 1849 (文献58による)。

*** 同　上　1850 (　〃　)。

ところであるとしている。但し数学的証明そのものはこの論文では扱われていない。

木材の理学的な問題に造詣の深かった DUHAMEL，H. NÖRDLINGER の研究，また CASPARY の詳細な研究の結果などから到達した，凍裂発生に対する樹幹の異方性収縮説は当時，すなわち，1850～1870 年頃に，すでに一つの定説となっていたものと考えられる。この説は後年，すなわち今日に至るまで最も確からしいものとして，多くの文献にしばしば引用されているところのものである。

1880 年代には，G. ALERS の凍裂発生機構に対する見解発表をめぐって一時論争がおこなわれた。

1884 年，G. ALERS[1] は，北部温帯地域の林木に対する寒さの影響に関する一文を発表した。この中で ALERS は樹幹の凍裂，とくにその発生機構について見解を述べている。ALERS はその中で，“寒さのきびしい時には樹幹の中の樹液が外から中の方へだんだん凍ってゆく。凍結が深く進入するにつれて樹幹には，樹液の凍結膨張による内圧が発生し，その力が大きくなると樹幹はついに割裂するに至る。CASPARY，H. NÖRDLINGER などの説くように，凍裂は突然の低温の来襲によって発生するものではなくて，強い寒さが続くような夜など，夜通し凍裂することがあるものだ”，と主張して，CASPARY などの説に反対した。

1885 年，T. NÖRDLINGER は，Allgemeine forst- und Jagdzeitung 誌上[59] に，一小冊子として出版された ALERS の上掲論文の紹介と批判の筆をとり，樹液の凍結による内圧が凍裂の原因であるならば，樹液の凍結温度，すなわち 0°C，あるいはそれよりすこし低い温度において凍裂が起る筈だが，事実は……ALERS も述べているように……もっと強い寒さが続く時に凍裂は起るものであり，ALERS の説は事実と矛盾する*。凍裂の原因はただ一つ，木材の乾燥に際してみられると同じように，寒さによる円周方向の収縮が半径方向のそれに比べて大きいと云うことである，と主張いている。

翌 1886 年，T. NÖRDLINGER の批判に応えて ALERS[2] は，NÖRDLINGER の説には賛成し兼ねるとし，実際の凍裂がかなり低い温度において起ると云う批判については，0°C あるいはそれより僅かに低い温度と云うことではなしに，かなり強い寒さが必要であって，これによって，樹液は外周部だけではなく内部まで凍結し，ここではじめて樹幹が割裂するものなることを力説している。この反論の中で ALERS は，強い寒さの時にも，あらゆる樹幹が割裂するものではないことについての推論を述べている。NÖRDLINGER は再度批判の筆を取り[60]，凍裂が 0°C 付近ではなく，かなり低い温度において起るものであると云う事実と ALERS の説とは矛盾すると強調した。

ALERS の上記の小冊子は，また，1885 年，H. MAYR によって Forstwissenschaftliches

---

* 277 頁 HUNDESHAGEN の説を参照のこと。

Centralblatt 誌上に紹介されたが[53]，この中で MAYR は ALERS の説を一笑に付し，これはあたかも古い Märchen の中味を事新しく持ち出して来たようなものだときめつけた*。ところで，その H. MAYR はどのように考えていたのであろうか。

MAYR はその造林学[52]の中で，まず古くからの凍結膨張説及び R. HARTIG の凍結に際しての細胞膜の乾燥説を否定し，樹液の多い辺材部分が低温で凍結すれば，その部分は，いわば，一つの氷の筒とみなされる状態になる，凍裂が，樹幹外周部から発生するのは，この部分が寒さのために収縮割裂するからである．と述べている。HERBERT STONE[27]も類似の考えを述べているが，これらの説はその後あまり引用されていない。

1888年，BELING[8]は当時までの凍裂発生機構に対する諸説の分類を試みた後，次のように彼の凍裂発生現場を目撃した経験について述べている。このような記述は非常に珍しいので関係部分を掲載する (文献8の29頁)。

> Im Winter 1837/1838 herrschte zu Anfang eine aussergewöhnlich milde Temperatur, die in den ersten Tagen des Januar an einem klaren sonnigen Tage bei plötzlich nach Ost drehendem Winde in sehr strenge Kälte umschlug. Als ich am nächsten Nachmittage nach dem Eintritt der Kälte gleich nach Tisch mit einem Studiengenossen den die Stadt Göttingen umgebenden, mit starken Linden bestandenen Wall beging, hörten wir mehrfällig die Linden pistolenschussähnlich knallen und überzeugten uns durch Einnahme des Augenscheins, dass die Stämme ganz frische Eisborsten bekommen hatten resp. bekamen. . . . .

すなわち，BELING は，暖かい冬の日が続いたあとに急にやって来た低温によって，多くの Linde に凍裂が音をたてて発生するのを目撃したことを述べ，凍裂は急激な気温低下の際の，樹幹内の温度分布の不均一による応力のために起るものであるとの説に同調したものと考えられる。

ROBERT HARTIG 氏は1894年[23]，1896年[24]に，凍裂についての研究結果を論文として発表し，その発生機構に言及しているが，1900年[25]にその著 Handbuch der Pflanzenkrankheiten の中で，それらを次のように要約記載している (213頁)。

> Wenn das Wasser im Holzkörper gefriert, so tritt bei tieferen Temperaturen auch das Imbibitionswasser aus den Wandungen der Holzelemente in das mit Luft und Wasser gefüllte Lumen der Organe und erstarrt dort zu Eis. Der verminderte Wassergehalt der Holzwandungen muss naturgemäss auch eine Volumenverminderung des Holzes zur Folge haben, da das in das Zellinnere ausgetretene Wasser resp. Eis keinen Einfluss auf das Gesammtvolumen des Holzes auszuüben vermag, sondern nur die Holzluft etwas verdichtet. Es treten infolgedessen ähnliche Schwindungserscheinungen zum Vorschein, wie beim

* 276頁参照。

Trocknen des Holzes. In der Regel entstehen Frostspalten nur dann, wenn plötzlich sehr starke Kälte eintritt zu einer Zeit, wo das Innere des Baumstammes noch nicht oder nur wenig geschwunden ist, so dass der von aussen schnell kälter und kleiner werdende Holzkörper aufreissen muss. . . . .

HARTIG は，木材中の水分が厳しい寒さのために凍結する時，細胞膜の中の水分が細胞内腔に析出する．そのため，木材組織は，ちようど木材の乾燥の際にみられるような収縮を起す，そして，一般に，樹幹の外側がすでに完全に凍結しているにかかわらず内方部分がなお凍結せず，したがって収縮していないか，或は僅かしか収縮していないような時，急に強い寒さがやってくると凍裂が起ることを述べようとしている。すでに述べたように[52]，この説は H. MAYR によってその非なることが指摘されてはいるが，その後も，HARTIG の流れを汲む多くの学者によってしばしば引用されている。

BUSSE[11] は 1910 年，立木の凍裂について観察した結果を発表し，凍裂の発生機構について特異な所論を展開した。すなわち，彼は先づ，当時凍裂の発生機構として，それぞれ比較的多くの人達によって支持されていた 2 つの説，すなわち，R. HARTIG の凍結による乾燥収縮説と H. NÖRDLINGER 以来の，樹幹内の温度差にもとづく不均当収縮説を紹介し，その何れが是なりや否なりやは別として，冬の低気温を凍裂の唯一絶対の原因として考えることに疑問を持ち出して次のように述べている。

Hierdurch hat es den Anschein, als käme der Frost als alleiniger und absoluter Faktor bei der Entstehung der Frostrisse in Betracht. Ist dies möglich? Die oben angeführten Theorien lassen die Frage offen. Meiner Ansicht nach muss sie bedingungslos verneint werden, da ihre Bejahung zu unhaltbaren Konsequenzen führt. Es müssten dann bei genügend niedriger Temperatur und sonst gleichen Bedingungen sämtliche Stämme eines Bestandes oder doch wenigstens sämtliche stämme einer besonders empfindlichen Holzart frostrissig werden! Die Frostwirkung kann nicht absolut von dem Temperatur- minimum abhängig gemacht werden.

しかして，若し，寒さが凍裂の唯一の原因であるとすれば，それは或る一地域に対して略々同一の作用をするから，その林分の全林木，或いは寒さに対する感受性の同一の樹種のすべてが凍裂しなければならないと主張する。しかし，これは事実に反するところから，彼はさらに寒さ以外の要因が考えられなければならないとし，その第一に風を挙げている。風は，勿論寒さの担い手としての作用をも果すが，彼はむしろ，樹幹に対する風の機械的作用に注意を向けている。彼は多くの凍裂について観察した結果，その凍裂が樹幹の上に占る位置は二つの根張りの間 (Wurzelhals) であることを見出し，この事実と風の機械的作用とを結びつけたが，この説も今日まで多くの文献に引用されているので，次にその原文の一部を掲げる。

Der Sitz der Frostrisse zwischen zwei Wurzeln erklärt sich durch die Wirkung des Windes.

Die Wurzeln sind die Zugkräfte des Baumes. Ihm seinen Halt gebend, wirken sie ständig auf ihn ein. Sobald der Baum vom Winde hin und her bewegt wird, kommt ihre Einwirkung vor allem zur Geltung. Es entsteht dann gleichsam ein Kampf zwischen den Wurzeln des Baumes und dem Schaft mit seiner Krone zwischen Zug und Druck. In diesem Kampfe werden die Holzfasern sowohl der ober- wie unterirdischen Baummasse gedehnt und gepresst und in ihrer gegenseitigen Lage verschoben. Dort nun, wo die Wurzeln ansitzen, d.h. wo die Zugkräfte des Baumes am stärksten wirken, ist die Wirkung des Druckes eine beschränkte. Eine Spannung, welche aus dem Entgegenwirken von Zug und Druck resultiert, kann zur Trennung der Holzfasern daher nur dort führen, wo die Druckkraft der Zugkraft überlegen ist, d. i. zwischen zwei Wurzeln, und zwar wird dieser Fall meines Erachtens um so eher eintreten, je stärker der Druck in der Tangente der Zugkrat wirt.

Wenn nun k der Frost eine Spannung rings im Schaftmantel erzeugt und der Wind eine Spannung an bestimmter Stelle desselben, so wird hierdurch die Frostspannung einerseits erhöht, andererseits lokalisiert; sie wird durch die Windspannung gezwungen, zwischen zwei Wurzeln sich auszulösen. Eine logische Folgerung läßt sich hier anknüpfen: Je stärker Zug und Druck sind, um so grösser werden die Spannungen sein, und um so häufiger wird es zur Auslösung der Spannungen kommen. Die meisten Frostrisse müssten demnach an alten, starkwurzligen und breitkronigen Bäumen gefunden werden. . . . .

すなわち，"樹幹が風によって揺り動かされることによって，樹幹の支持体である根には，対向的かつ交番的な引張力と圧縮力が発生する。したがって，引張と圧縮を受ける2本の根の間の部分には，繊維の結合を幹軸方向に剪断しようとする力が働らくことになる。一方，寒さによって，樹幹の円周方向に引張力が働らくと，結局，Wurzelhalse において繊維の分離が起り，寒さによる応力が消滅する。根に働らく力が大きければ大きい程それによる応力が大きくなり，繊維の分離による応力の消滅すなわち凍裂が，よりしばしば起ることになる" と云うのが，BUSSE の風と凍裂に関する所論の主旨である。

寒さ以外の要素に関連して，彼は，凍裂は風のない静かな夜に多く発生するものだと云われている事実と彼の説との矛盾に対し，彼の考えを述べている。すなわち静かな夜にきこえる音は，おそらく，古い凍裂が再び裂開する時に発生する音なのであろうとし，始めて樹幹が凍裂するのはやはり風の機械的作用があってこそ可能なのだと述べている。

BUSSE が次に考えた凍裂発生のための要因は，立木生育のための立地条件の影響である。氏は次のように考えている。すなわち，"その樹木の属する科，属によって凍裂に対する感受性 (Empfindlichkeit) が異なるのは，それらの間の材部構造の違いにもとづくものであり，また，同一樹種であり乍ら或るものは或るものより frostriss-empfindlich であると

云うのは，やはり，その材部構造の違いによるものである。しかして，この違いは立地によって影響されるものである。一般に土壌が湿潤である場合に，よりしばしば凍裂が発生するようであるが，これは，湿った立地に育った樹木は，一般に，営養過多になる傾向があり，そのため或る程度不健全になっているからであろう。また，樹皮の中にある貯蔵物質が凍裂に対する保護作用をしているようであり，これらの物質が樹冠に向って上昇する頃が，その樹木の凍裂し易い時期であるようだ。"

凍裂の原因として，寒さ以外に風による応力，立地の影響などの個体的，局所的要素を持出した BUSSE は，結局，

> Der Standort bezeichnet das Baumindividuum für den Frostriss, der Wind weist an diesem dem Frostriss seinen Platz an und der Frost—last, not least—lässt dann an diesem Platze den Frostriss entstehen.

すなわち，立地によって凍裂個体がきまり，風によって樹幹上の凍裂の位置がきまり，そして寒さによってその位置に凍裂が発生する，と結論している。

BUSSE の説も，CASPARY, NÖRDLINGER の説，R. HARTIG の説などと共にその後しばしば多くの人達によって引用されている。

SORAUER (1909)[69], GRAEBNER (1920)[22] は，それぞれの著書の中で凍裂の発生機構に触れているが，その内容は H. NÖRDLINGER, CASPARY の説と同じ系列のものである。

NEGER (1924) はその著書[57] の中で，凍裂の発生に関し，R. HARTIG の乾燥収縮説にしたがって樹幹内にストレスが生ずることを説いているが，NEGER の説の特徴は，樹幹が割裂することの Anlage として，木部や樹皮部にはじめから存在する裂目や傷を考慮した点にある。

GAYER-FABRICIUS (1935)[19] の Forstbenutzung は，その版によって記述の内容が幾分ことなっているが，おおむね一貫して樹幹内外部の温度差，樹幹材部の熱収縮の異方性にもとづく応力説をとっている。

HESS-BECK の Forstschutz (1930)[28] では，その中の数頁が凍裂に関する記事のために充てられているが，凍裂の発生機構そのものについては著者の特別の見解は述べられていない。すなわち，R. HARTIG, H. MAYR 両氏の説を紹介し，寒さによる樹幹内部の応力の差によって凍裂が発生することは間違いないところであるがいまだ定説なしとし，さらに寒さ以外の要因を考慮した BUSSE の説について述べるとともに，凍裂と立地，樹種，樹幹生長状態，作業法などとの関係に言及している。

KOLLMANN (1951)[42] はその著 Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe の中で凍裂に関し (33頁)，

> Die Ursache sind wahrscheinlich Spannungen, die auftreten, wenn sich die

äusseren Schichten des Stammes bei starkem Frost tiefer abkühlen und mehr zusammenziehen als die inneren. . . . .

と述べている。すなわち，H. NÖRDLINGER 以来の樹幹内部温度差による不均一収縮説の中に含められるものであるが，材の異方性収縮については，ここでは触れていない。KOLLMANN はこのような観点から1942年[43]に木材丸太を割裂させるところの，木材内部の温度勾配について計算をおこない，極めて近接した距離に対して考えられた温度勾配が40°Cに及ぶ時は木材は破壊しなければならないと述べている（後述）。

MAYER-WEGELIN (1955) はその著[75] Das Holz als Rohstoff. 2. Aufl. (本書の初版は TRENDELENBURG[76] であるが，これには凍裂についての記述なし) の中で凍裂を扱い，新しい見地から従来の諸説の展望をおこなっているが，上述の KOLLMANN と同様に，樹幹内の温度差によるストレスが凍裂の原因であるとの説が，今日最も確からしいものであることを述べている。

KNUCHEL (1947)[40] は Holzfehler の中で，R. HARTIG の組織の凍結による乾燥収縮説に併せて，風の機械的作用説を紹介し，また，従来，一つの定説になった感のある気温低下による樹幹外周部の熱収縮説に対しては疑問をいだいている。

大沢・石田 (1947)[63] は，北海道産のトドマツの凍裂樹幹の内部形態的な性状を調査した結果，凍裂と水喰材の間に相関々係のあることを認め，また，石田 (1950)[31] は，水喰材の凍結が樹幹の再凍裂を越させる主なる原因であることを確認した。

SCHULZ (1957)[66] は，1956年の晩冬に，野外において，Eiche, Pappel, Buche, Rosskastanie などの凍裂について，いろいろの観察測定をおこない，凍裂の機構については，温度差による外周収縮説を批判する方向に筆を進め，氏が測定した凍裂幅の変化は，木材の熱膨張率* から計算した値より遙かに大きいことを述べ，結局，

Insgesamt muss also angenommen werden, dass Frostrisse durch eine stärkere Zusammenziehung des Holzes verursacht sind als aus den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten erklärbar wird. Damit wächst die Wahrscheinlichkeit, dass im Holze des lebenden Baumes der Wassergehalt und Wasserverlagerungen das Verhalten der Frostrisse mit beeinflussen. Die schnelle Reaktion auf Temperaturveränderungen lässt vermuten, dass stark gegensätzliche Kräfte und Spannungszustände wirksam werden.

として，普通の方法で求められる線熱膨張率から考えられるものより強い収縮によってはじめて凍裂は解明されるとし，生立木における含水率，水分々布が問題であろうと述べている。

米国，英国などの文献にも，凍裂 (Frost cracks, frost splits) に関する記載はしばし

* KOLLMANN[42] より引用。

ば見られるが，発生機構については，特別の Originality を持ったものがないようである。BROWN/PANSHIN/FORSAITH (1949)[10] の Textbook of wood technology には（1巻303頁），

> Several theories have been advanced to explain the reasons for the development of frost cracks. One claims that the splits form as a result of the low heat conductivity of the wood. According to this hypotheses, the outer annual increments of wood contract as the temperature falls, before the inner layers are affected by this change. ……. Busse, on the other hand, considers the mechanical action of the wind to be the most important factor in the development of cracks in the first place. According to this investigator, once they are established, tension stresses resulting from frost would prove sufficient to reopen them.

と述べられ，すでに筆者が紹介した幾つかの説を引用している。RECORD (1914)[64]，WANGAARD (1950)[83] も略々同趣旨のことを述べている。

LAMPRECHT (1949/50)[50] によれば，主としてスイスにおけるこの問題についての研究はとくに活発なものではなく，とくに変った説は提出されていない。

日本，とくに北海道においては，この現象はかなりはやくから知られていたものの如くであるが（例えば (72)），その発生機構についての系統的研究或は独自の見解の発表はなされていない。今，新島氏[62] によれば，“霜裂の生ずる原因は，樹幹が急激な温度の低減のために内外部に収縮の差を生じ，外部の強き収縮に内部のものが伴う能わずして遂に割裂するによるものである”と。この記述は，たとえば，HESS-BECK[28] などと略々同じものであり，氏はさらに，凍裂発生の頻度と樹種，樹幹部分，樹齢，作業法，立地などとの関係について述べている。

上村氏 (1924)[79] は R. HARTIG の乾燥収縮説，平井氏 (1953)[29] は樹木の外面の凍結にもとずく引張応力によって発生するものとしている。

以上において，1850年頃からの幾つかの文献（主としてドイツのもの）によって，今日までの凍裂発生機構に対する諸説の概観を試みた。これらの諸説は主として Eiche, Buche, Esche, Ulme, Ahorn, Linde, Roßkastanie などの広葉樹および一部の針葉樹すなわち Tanne の凍裂に関する観察，研究の結果提唱されたものである。これらの諸説は，次のように大きく分類することができる。

[1]. 樹幹の凍結によってその内部に圧力を生じ，そのために凍裂が起る。これに属するものは，ALERS[1]（樹液が凍結に際し外部から内方へ押し込められてゆき，やがてそのため外方に向う内圧を発生する），SCHÜPLER[58]（樹幹中央部の異常水分の凍結）および，古くからの漠然とした一つの解釈（たとえば古くからの Märchen に表われた考え）など。

[2]. 低温において樹幹の外部と内部に大きな温度差を生じ，そのために樹幹外周部に引

張応力を生じ，凍裂する。この説は今から約100年前にH. NÖRDLINGERその他によって確立されたもので，温度差のほかに木材の固有の性質(収縮の異方性)が考慮され，乾燥の際の収縮による木材割裂の現象に類似するものとされている。これに属するものは，CASPARY[12)~17)]，DUHAMEL，H. NÖRDLIMGER[58)]，T. NÖRDLINGER[59)]など。また，その説の同調者ないしは引用者は非常に多く，GAYER-FABRICIUS[19)]，BELING[8)]，SORAUER[69)]，HESS-BECK[28)]，MAYER-WEGELIN[79)]，KOLLMANN[42)]……，河合[47)]，新島[62)]など。

[3]. 樹幹内の水分は凍結に際し，組織の細胞膜から細膜内腔へ析出する，すなわち，細胞膜が乾燥し，それに樹幹内部の温度差が加わって，結局，凍裂を起す。これに属するものは，R. HARTIG[25)]，NEGER[57)]，KLEIN[51)]など。ならびにその後の引用者，HUNDESHAGENも乾燥を考えているが，その原因として風の作用を考えている。

[4]. [2]或は[3]の説に風の機械的作用を加味し，さらに立地条件にもとづく個体の特異性を考慮したもの。

BUSSE[11)]およびその引用者，すなわちBROWN/PANSHIN/FORSAITH[10)]，RECORD[64)]，WANGAARD[83)]，HESS-BECK[28)]，GAYER-FABRICIUS[19)]，MAYER-WEGELIN[75)]。なおGÖPPERT[58)]は風の機械的作用のみを考えている。

これらをもう一度，その発展の経過を追って概観すると，まず，極く素朴な考えとして存在した，いわば科学以前の1)樹液の凍結膨張説は木材理学の発達によって否定され，科学的根拠を持つものとして，2)樹幹内外の温度差ならびに木材の異方性にもとずくストレスによって凍裂が発生するものなることが主張され，一つの定説となって今日に至った。この間に，3) R. HARTIGによって提起された，木材組織の凍結に際しての乾燥収縮説および，2)の説の矛盾をついた，4) BUSSEの新説が提出され，それぞれ，一部の研究者の支持を受けながな2)の説とともに今日に至った。これらの中，今日最も確からしいものされている*2)の説に対しても，近年，新しく異論が提出され，大沢・石田(1947)[63)]，石田(1950)[31)]は，北海道産トドマツについては，明らかに水喰材がその凍裂の原因であることを述べ，SCHULZ (1957)[66)]は凍裂樹幹内部の水分分布が問題になるのではないかと述べている。

第3章 北海道における凍裂の発生状況概観

北海道における凍裂の発生状況については，北大演習林研究報告(1952)[32)]にその調査成績の詳細を報告した。ここでは，主として天然林産トドマツの凍裂の発生状況について簡単に述べておく。上記の調査において明らかにされた樹種別凍裂木**の出現率を地区

---

* 例えばTRENDELENBURG/MAYER-WEGELIN: Das Holz als Rohstoff. (1954)[75)].

** "凍裂木"とは，その樹幹のどこかに凍裂のある立木。凍裂の数，大きさ，位置，新しさ，現在割裂しているか癒着を完了しているかなどの別は問わない。

別に簡約すれば Table 1 の如くになる。

これによれば，北海道においては非常に多くの種類の林木に凍裂が発生するが，針葉樹では，トドマツにおいてその比率がとくに大きく，反面，エゾマツでは非常に小さい*。広葉樹も毎木調査に表われた樹種の約7割に凍裂の被害がみられたが，さらに，筆者の行

Table 1. Number (percent) of trees injured by frost cracks[32].

District	Asahigawa			Teshio			Kushiro			Nopporo			Grand total		
Frequency / Species	Tree number surveyed	Tree number with frost crack	Percentage of frost crcked tree (%)	Tree number surveyed	Tree number with frost crack	Percentage of frost crcked tree (%)	Tree number surveyed	Tree number with frost crack	Percentage of frost crcked tree (%)	Tree number surveyde	Tree number with frost crack	Percentage of frost crcked tree (%)	Tree number surveyed	Tree number with frost crack	Percentage of frost crcked tree (%)
Abies sp.	733	158	22	698	80	11	927	97	10	469	32	7	2827	367	13
Picea	64			1			37						102		
Taxus	6			20			47			1			74		
Total	803	158	20	719	80	11	1011	97	10	470	32	7	3003	367	12
Acer	118	2	2	191	4	2	97	3	3	17			423	9	2
Alnus	3			12			35	1	3	4			54	1	2
Betula	131	3	2	76	2	3	57	1	2	20			284	6	2
Cercidiphyllum	8						6			9			23		
Cornus	2			2						30			34		
Castanea										4			4		
Fraxinus	11			3			10			13	1	8	37	1	3
Juglans							1						1		
Kalopanax	13			22			8	1	13	13			56	1	2
Magnolia	38	1	3	38	1	3	7			22			105	2	2
Ostrya	8	1	13							13			21	1	5
Phellodendron	6			5			10						21		
Prunus	13			38	1	3	31	2	6	10			92	3	3
Quercus	235	4	2	52	1	2	18	3	17	13			318	8	3
Salix							2			2			4		
Sorbus				7			1			16			24		
Tilia	110	3	3	158			15			20			303	3	1
Ulmus	12			12			1	1		29	1		54	2	4
Total	708	14	2	616	9	1	299	12	4	235	2	1	1858	37	2
Grand total	1511	172	11	1335	89	7	1310	109	8	705	34	5	4861	404	8
Total area of sample plots surveyed (ha)	4.3			2.4			2.8			1.8			11.3		

* この調査ではエゾマツの凍裂木が1本もなかった。しかし，エゾマツに凍裂が全くないわけではない。

なった他の観察によれば，この調査で凍裂のみられなかったシラカンバ，カツラ，オニグルミ，ヤナギ類などにも凍裂は発生する。

トドマツの凍裂木を地域別にみれば，旭川地区の発生比率が最も大きく，釧路，天塩地区がこれにつぎ，野幌地区が最も小さかった。

トドマツ凍裂木の径級関係については Table 2 に示すように，胸高直径が増すにつれ

Table 2. Relationship between the number of trees with frost cracks and the diameter of the trees (*Abies sachalinensis*)[32].

Diameter class D.B.H. (cm)	Number of trees surveyed (tree)		Number of frost cracked trees		Number of frost cracked trees	
			Number (tree)		Percentage (%)	
10—14	340		39		11	
16—20	435	1149	43	120	10	10
22—26	374		38		10	
28—32	446		55		12	
34—38	289	917	60	158	21	17
40—44	182		43		24	
46—50	75		22		29	
52—56	42		17		40	
58—62	29	151	9	51	31	34
64—68	3		2		67	
82—86	2		1		50	
Total	2217		329		15	

凍裂木の出現比率が増加する。この調査結果では，各地区ともその傾向が顕著で，今これを全地域合併についてみれば，小径木 (10～26 cm) : 10%，中径木 (28～44 cm) : 17%，大径木 (46 cm 以上) : 34% であった。

凍裂が樹幹のどの方位の側に多く発生するかについては，すでに，多くの文献[11),28),その他]に，凍裂の発生機構とも関連して述べられているが，筆者の調査では Table 3 に示すように，樹幹上における凍裂の方位に関し，特定方位に出現すると云う傾向は認められなかった。しかしこれを，調査した個々の標準地についてみれば，比較的に南側に多い場合，逆に北側に多い場合などがあり，事象はかなり複雑であった。したがって，従来一部の人達によって唱えられたような[1),11)]，地理学的な意味での方位に関連すると云うよりは，立地的にはより局所的諸条件，或いは樹幹の個体的諸条件に関連するものと考うべきであろう。

トドマツの凍裂の長さについては，一般に長い凍裂は大径長大木の多かった旭川，釧路両地区に多く，反対に短い凍裂は，小径木の多かった天塩地区に多く出現した (Table 4 参照)。凍裂は小は 30 cm 位から大は 10 m の長きに達するものまであったが，全般的には 1 m 前後のものが多く，0.5～3.0 m の間に大部分の凍裂 (85%) が含まれた。

Table 3. Relationship between the directions of facing of frost cracks on tree trunks and the compass directions (*A. sachalinensis*)[32]. (%)

District	Plot	North	South	East	West	Total
Asahigawa	A	20	20	28	32	100
	B	20	30	10	40	100
	C	16	28	24	31	100
	D	20	27	35	19	100
Teshio	A	25	27	25	23	100
	B	25	32	22	22	100
Kushiro	A	35	29	29	6	100
	B	34	18	18	29	100
	C	10	29	38	24	100
	D	28	28	31	14	100
Nopporo	A	38	13	25	25	100
	B	13	43	26	17	100
Grand total		23	27	28	22	100

Table 4. Frequency distribution of length of frost cracks (*A. sachalinensis*).

District / Class (m)	Asahigawa	Teshio	Kushiro	Nopporo	Grand total	
					Frequency	Percentage (%)
0.0—0.5*	2	2	2		6	1
0.5—1.0	31	24	23	8	86	17
1.0—1.5	57	34	34	12	137	27
1.5—2.0	42	19	14	6	81	16
2.0—2.5	46	18	13	7	84	17
2.5—3.0	24	10	5	1	40	8
3.0—3.5	15	3	4	3	25	5
3.5—4.0	5	2	7	1	15	3
4.0—4.5	2	1	3		6	1
4.5—5.0	3		4		7	1
5.0—5.5			1		1	
5.5—6.0	3		4	1	8	2
6.0—6.5	3		1		4	1
6.5—7.0	2		2		4	1
7.0—7.5	1				1	
7.5—8.0						
8.0—8.5			2		2	
8.5—9.0	1				1	
Total	237	113	119	39	508	100

* Less than 0.5 m

トドマツの凍裂は，地表面直上から樹冠内部に達する間の樹幹に発生するが，地上数m以下，とくに地上高0.5～3.0mの間の樹幹部に多く発生する傾向がみられた（Table 5 参照）。

この事実は，西欧の多くの文献[28],その他にみられるところに一致する。詳細は文献[32]を参照のこと。

Table 5. Height of the places on trunks where the frost cracks were distributed (*A. sachalinensis*)[32]

Height above the ground (m)	Percentage (%)	Height above the ground (m)	Percentage (%)
0.5	26	6.5	8
1.0	52	7.0	8
1.5	52	7.5	7
2.0	45	8.0	7
2.5	37	8.5	6
3.0	30	9.0	5
3.5	22	9.5	3
4.0	16	10.0	2
4.5	14	10.5	3
5.0	13	11.0	3
5.5	11	11.5	1
6.0	9	12.0	0

第4章 トドマツ樹幹の凍裂の発生に関与する条件

第1節 内部条件

凍裂は，冬季に，寒冷の地に発生するものである。しかし，その場合決して一地方の，あるいは一林分の，あるいは特定の樹種のすべての立木が凍裂するわけではない。たとえば，これをトドマツについてみれば，凍裂は，北海道のトドマツ生育地のほぼ全域において発生しているものと考えなければならない。しかも，その出現頻度は，すでに述べたように，地方によって，林分によって相違はあるが，その違いはそんなに大きいものではない（地域毎の平均についてみれば7～22%，Table 1 参照)。また，一つの林分内における凍裂木の分布をみても，凍裂が特定の地点に強く集中発生するという事実は一般的な傾向としては認めがたい。むしろ反対に，はなはだしい凍裂木と，これと径級，樹高などのほぼ等しい全く健全な立木とが相接して並び立つ状況が極く普通に観察されるのである。

このように簡単にいえば，凍裂には広い地域にわたって散在的に発生する傾向がみられる。若し，急激な気温低下によって，しかしてほとんどそれのみによって凍裂が発生するものとすれば，凍裂の発生には或る程度の地域的な集中性がみられるわけではないか。もっとも，この考えは，その地域内の立木樹幹に，急激な気温低下の影響が略々均当に作用することを前提にしているが，事実ははなはだ複雑であって，これは，もっと局所気候的に考察しなければならない問題であろう。とくに，凍裂は基幹部に発生する傾向が大きいから，地表面附近の特殊な地形などを考えた局所気候的考察を加えなければならないことは十分に認められる。しかし乍ら，一方，すでに述べたように，相隣接するトドマツ立木群中の1本が甚だしく凍裂におかされているにもかかわらず，他のすべては凍裂のない健全木であるというような事実が非常に多い。また基幹部の凍裂についてみても，筆者の調査した範囲では，旭川地区（層雲峡，当麻)，雨竜地区（北大演習林)，天塩地区（北大演習林）などの多雪地帯においては，凍裂の下方部位が初冬の頃から，その温度変化に対し

て一種の保護作用を持つとみられる積雪の中に埋っている場合が多く，積雪の深さを増すにつれて，凍裂全体がその中に没している場合もすくなくない。どうしてこのようなことが起るのであろうか？　凍裂が，いわば特定の個体にしか発生しないことについての疑問が，すでに述べた凍裂の発生に対する有力な説すなわち，急激な気温低下にもとづく樹幹外周部の収縮説に対する疑問点として，古くは BUSSE[11] によって強く指摘され，また，その他の多くの研究者によって考慮された点である[28],その他。

筆者もまた，この一部の個体にしか凍裂が発生せず，さらにその樹幹上の一部分にしか凍裂が発生しないという事実をはやくから重視していた。凍裂は，冬の低気温を，すくなくともその一つの因子として発生するものであることは間違いないであろう。しかし，低温の作用を局所気候的に考えたとしても，それだけからは凍裂を説明できない矛盾点が多いように思われる。この問題解明のために取られなければならない方途はすくなくないであろうが，先ずなされなければならない，そして最も重要なことは，その凍裂木個体にあるいは一つの樹幹の凍裂部分に，全く個体的な，或いは全く局部的な特殊な条件として内在する何物かがあるのではないか？　そして存在するとすれば，それと凍裂との関係はどうかということを調査することである。

このような観点から，筆者は，過去約10年にわたってトドマツの凍裂木の樹幹内部の状態を仔細に調査し，その成果を一部すでに発表した[33]。この調査の結果，凍裂木の内部形態的特徴は，その樹幹の内部に水喰材を必ず含むことであることが明らかになった[33]。以下，本節において，トドマツの凍裂と水喰材の関係について記載的に述べる。

1. トドマツ樹幹の水喰材概説

トドマツの樹幹にはしばしば水喰材が存在する[46),48),33]。水喰材 (Naßholz, Naßkern, wetwood, Vatved)[49),48] は，トドマツ(必ずしもトドマツとは限らない。稀れにエゾマツにも出現する)の正常心材[33),45] に比べて遙かに高い含水率を示し，かつ，その内部に多くの割れ目を含んでいる。水喰材については，T. LAGERBERG[49] が，欧州アカマツ (*Pinus silvestris*)，欧州トウヒ (*Picea abies*) などについて詳細な研究をおこなった結果，それには大きく分けて二つの型があることが明らかになった。すなわち心材内部の異常水分が根から入ってくるものと枝から入ってくるものとの二つで，LAGERBERG は前者を根水喰材 (Root wetwood)，後者を枝水喰材 (Branch-born wetwood) と称した。この分類は，北海道産トドマツに対してもおおむね妥当するものと考えられる。根にある孔状部 (たとえば Photo 13) その他の欠点部から浸入した水分は樹幹の心材部へ滲透し，その高さが地上数 m に達する場合がある。枝水喰の型の水喰材は，トドマツでは極めて多く観察される。枯れた枝から樹幹の内部へ水が浸入するもの，幹が折損し，その癒着不完全な個所から水が浸入するもの，その他二又部分，樹幹上に出来た孔状部から水が浸入するものなどがある。とくに樹

幹折損，二又，孔状部などの場合には，比較的に集合した，顕著な水喰材を形成する場合が多い(巻末写真参照，とくに17～22, 24など)。

2. 伐根調査における水喰材と凍裂との関係

冬季の伐採進行中の森林で，トドマツ，エゾマツの伐根(伐採断面)について，水喰材の存否，その量と凍裂の存否との関係を調査した。調査森林は，北海道大学天塩第一演習林誉平事業区第34林班，および，道有林旭川林務署当麻事業区第12林班である*。伐根の地上高は，おおむね，50～100 cmで，この高さには，トドマツでは根水喰材の出現することが多い[33]。根水喰材は幹の横断面においては，比較的に髄を囲んで集中する傾向があり，とくに50～100 cm附近ではその傾向が強い。したがって，水喰材中の水分が凍結した場合には，断面の中央附近から外方に広がる暗褐色部[33]が比較的あきらかに識別される。この調査では，この暗褐色部の面積を，方眼目盛りを施した透明な板をとおして，1 cm^2 単位で読みとり，それをその伐根にあらわれた水喰材の面積とした。しかし，文献[33]中にも

Table 6. Relationship between amount of the wetwood and the occurrence frequency of frost cracks, appeared on the sections of trunks at about 1 meter height above the ground. (*Abies* and *Picea*).[32]

			Percentage of wetwood area (%)					Total
			0	1～10	11～20	21～30	31～	
Ponpira dist.	*Abies*	*N*	10	28	7	3	2	50
		n	0	4	2	2	2	10
		n/*N* (%)	0	14	29	67	100	20
	Picea	*N*	17	3	0	0	0	20
		n	0	0	0	0	0	0
		n/*N* (%)	0	0	0	0	0	0
Tōma	*Abies*	*N*	19	50	20	8	7	104
		n	0	7	7	6	6	26
		n/*N* (%)	0	14	35	75	86	25
	Picea	*N*	34	1	0	0	0	35
		n	0	0	0	0	0	0
		n/*N* (%)	0	0	0	0	0	0
Grand total	*Abies*	*N*	29	78	27	11	9	154
		n	0	11	9	8	8	36
		n/*N* (%)	0	14	33	73	89	23
	Picea	*N*	51	4	0	0	0	55
		n	0	0	0	0	0	0
		n/*N* (%)	0	0	0	0	0	0

N: Number of trees surveyed, *n*: Number of frost cracked trees.

* 前出第1表参照。水喰材調査は，おおむね，第1表に示した調査の標準地付近でおこなわれた。標準地については文献32参照のこと。

記したように，水喰材中の水分が完全に凍結したとしても，水喰材と正常心材との境界は必ずしも判然としたものではないから，この測定の精度は高いものではない。また，上述のように，調査した伐根の地上高付近では，水喰材が比較的中央付近に集中する傾向があるが，時にはいちじるしく散在し，かつ，水喰材と健全心材との境界のはっきりしない場合もある。このような伐根は測定の対象外とした。凍裂は，伐採面に在存する，現に割裂中のものだけを考慮した。すなわち，もし，或る断面に凍裂が存在したとしても，それがすでに癒着を完了*してしまったものであれば，その断面に凍裂がないものとして扱った。測定結果を Table 6 に要約して掲げる。

調査木の伐根直径は，最小 42 cm，最大約 100 cm であった。この表から明らかなように，トドマツには非常にしばしば水喰材が出現し，また，凍裂も多い。これに反し，エゾマツには水喰材は稀にしか出現せず，また，凍裂ははなはだすくない（本表では 0）。また，さらにトドマツについてみれば，両地とも，樹幹横断面積に対する水喰材面積の比が増せば増すほど凍裂の発生する頻度が高くなる傾向がみられる。この事実から，まず，凍裂と水喰材の間に密接な相関的関連のあることを識ることができる。

3. 水喰材の原因としての樹幹の外部形態的特徴と凍裂

すでに述べたように，トドマツの樹幹には水喰材が極めて多く出現するが，それは成因によって，根水喰材と枝水喰材，もしくは枝水喰材に準ずるものとに区別される。本節の 2 に述べた水喰材は，トドマツの根水喰材で，それがその立木の伐採断面で切断されたものである。根水喰は根の欠点に基づくものであるが，その存否を立木の外部形態的特徴から見出すことは，多くの場合不可能といって差支えないであろう。これに対し，樹幹の比較的高いところにある枝水喰材その他については，トドマツの場合その存否を或る程度探知することが可能であり，とくに幹にある孔状部，分叉部，折損部，大きな枯枝の集合する部分などの内部には，一応，水喰材が存在するものと考えて差支えない[33]。筆者の調査によれば，トドマツの凍裂は，これら水喰材形成の原因となる樹幹材部露出カ所と位置的に対応することがしばしば観察された（たとえば Photo 1, 6～9 など）。すなわち，凍裂木総数約 350 本の中，明らかにそれらの関係の認められたものは，

幹の分叉に関連する凍裂のある凍裂木	30 本
幹の折損部に関連する凍裂のある凍裂木	15 本
幹の側面の孔状部に関連する凍裂のある凍裂木	10 本
太い枝とくに枯枝に関連する凍裂のある凍裂木	20 本

であり，これを凍裂の数についてみれば，凍裂木の数よりも，かなり多い数の凍裂が，こ

* 成長期間中に凍裂の割れ目の外側が完全に癒着され，かつ次の冬になってもその凍裂が開かなくなることがある。

れら樹幹上の，材露出部に関連を持つものと考えられる。何となれば，このような樹幹上の欠点部と位置的に関連する凍裂は，一立木に2つ以上集まって発生することがしばしばみられるからである。

4. 凍裂と，凍裂幹材内部の水喰材との関係

樹幹上に存在する個々の凍裂と，その凍裂のある樹幹の内部の水喰材との関係について調べた結果について述べる。冬季，凍裂している* トドマツの樹幹を伐採し，その凍裂を含む幹材部を丸太として切取る。これをさらに，凍裂の上端と下端で横断すると，その断面には多かれすくなかれ，必ず水喰材が存在する。また，この両断面の中間には，もちろん，水喰材が必ず存在する。筆者の林内での調査では，調査時，裂開中の凍裂については，それがはじめて割裂してからの年数の多少を問わず，この事実には全く例外がなかった。しかして，凍裂の割れ目の幅** は，個々の凍裂についてみれば，上端および下端で最も小さく，一般的にはそれより遠ざかるにつれて大きくなる傾向がある。しかし，必ずしも長さの中央付近で最大になるわけではなく，とくに長い凍裂（たとえば5 mとか10 mなどのような）は極大値が幾つも出る場合がある。さて，今，上に述べたようにして樹幹から切取られた凍裂のある丸太を，両端から順次に，たとえば5 cmの厚さの円板として細かく切断してゆき，これらの個々の円板の凍裂の幅とその円板の断面に表われる水喰材の面積とを測定すれば，両者の間にどのような関係がみられるであろうか。このために行なった測定実験の結果をFig. 1～3に掲げる。

これらの測定は，何れも，旭川林務署当麻事業区12林班でおこなわれたものである。円板の凍裂の割れ目の幅は，原則として，円板切断30分後に測定した。これは一般に円板の凍裂幅は，それを丸太から切断する前と後で違った値を示し，しかも切断後凍裂幅は徐々に変化し，約30分後に，略々，その温度におけるその円板としての定まった値を示すようになったからである。なお，円板の凍裂幅は，その温度が変化するとそれに応じて変化するから（後述），一連の測定中は，なるべく日光の直射のない北側斜面を選び，切断した円板は，平にして雪の上に並べるようにした。

Fig. 1は胸高直径27 cm，樹高16 m，樹齢約120年の上長成長の悪いトドマツ樹幹についての測定例である。この凍裂は明らかに根水喰と位置的に関連するものであり，水喰材は比較的中央部に集中しており，かつ，この凍裂の下半部の材自体の着色はほとんどみられず，水喰材面積の測定は比較的確実におこなわれた。凍裂の長さの中央部付近から褐色腐朽があらわれて来るとともに水喰材部の着色（暗褐色）が目立ってきた。同時に，水喰

---

* 凍裂の割れ目が開いている状態を指す。ここでは，すくなくとも1年輪分の新しい組織がその冬に新しく裂開した状態を考える。Photo 14, 15 参照。

** 凍裂の割れ目の，円周方向における距離。ここでは材部の最も外側における距離と解しておく。Photo 14, 15, 16 参照。

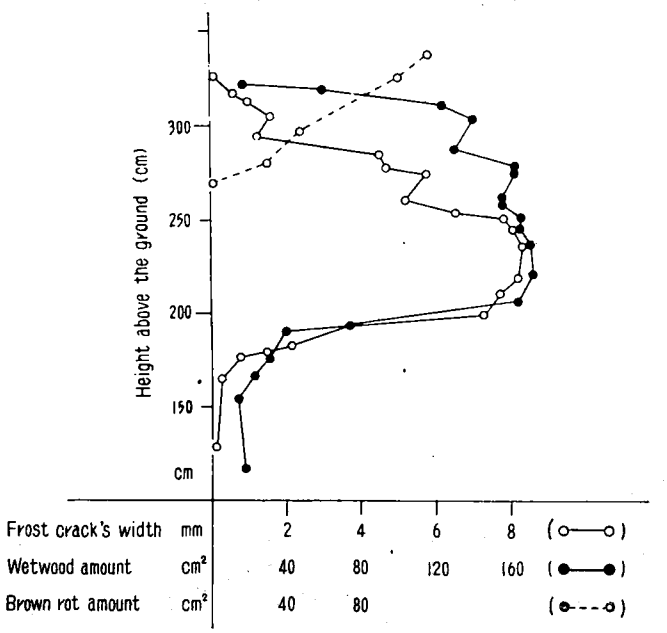


Fig. 1. The relationship between amount of wetwood and widths of a frost crack in a trunk at various heights above the ground (*A. sachalinensis*).

の，樹幹横断面における分布が分散的となり，その面積の測定も，凍裂の下半部に比べて不確実になった。図から判るように，この凍裂は地上 1.25 m に始まり，3.3 m に終っている。1.15 m では水喰材が約 20 cm^2 存在するが，この水喰材は，この断面以下では全く髄を中心として円形状に集中し，地上高 0.3 m では約 10 cm^2 の広さをもっていた。凍裂は，1.7 m 付近から地上高を増すにつれて急激にその割れ目の幅を増し，これに伴って水喰材の面積も増加する。約 2.5 m 付近から凍裂の幅は減小しはじめるが，水喰材面積は変化せず，3 m 付近から急激に減小をはじめる。凍裂は 3.25 m で消滅し，水喰材の存在も，ほぼ同じ高さで認めにくくなっていた。この凍裂木の場合には，2.7 m 付近から，粗慥な，含水率の低い* 腐朽部が現われはじめ，これより地上高を増すにつれてこの面積が増加し，5 m 付近では断面における心材のほとんどがこれに侵されていた。凍裂の下端から，ほぼその中央部までは，凍裂の幅と水喰材面積との間にかなりはっきりした相関がみられるが，上半部では，見掛上この相関が失われ，逆に腐朽部の出現と水喰材減小の凍裂幅減少からのおくれが一時的に対応している。結局，Fig. 1 の測定例からは，水喰材と凍裂幅との間に量的相関のあることが認められるけれども，また，この相関を乱す要素の存在しうることをも認めなければならない。

---

* 自由水がすくなく，低温においても軟かく，かつ粗慥である。

Fig. 2 は，胸高直径 24 cm，樹高 21 cm，樹齢約 110 年，外見的な形質の比較的よい樹幹についての測定結果である。樹幹には凍裂が1本あり，これは Fig. 1 と同じく，位置的には根水喰に関連するものである。水喰材は，凍裂の下端からその長さの 2/3 位までは，樹幹の中央付近に集まった，ほぼ円形に近い分布をなし，凍結したその面積の測定は比較的よい精度でおこなわれた。それより上部にゆくにつれ，水喰材の集中性はだんだんおとろえて行き，凍裂の上端付近では，肉眼的に認められる水喰材は，かなり散在的な分布をなしていた。これに続いて，凍裂の上方約 5 m にわたって枝から進入した水喰材が分散的に存在していた。凍裂の幅と水喰材面積との対応は，全体にわたってかなり完全であり，両者の相関の密なることが認められる。

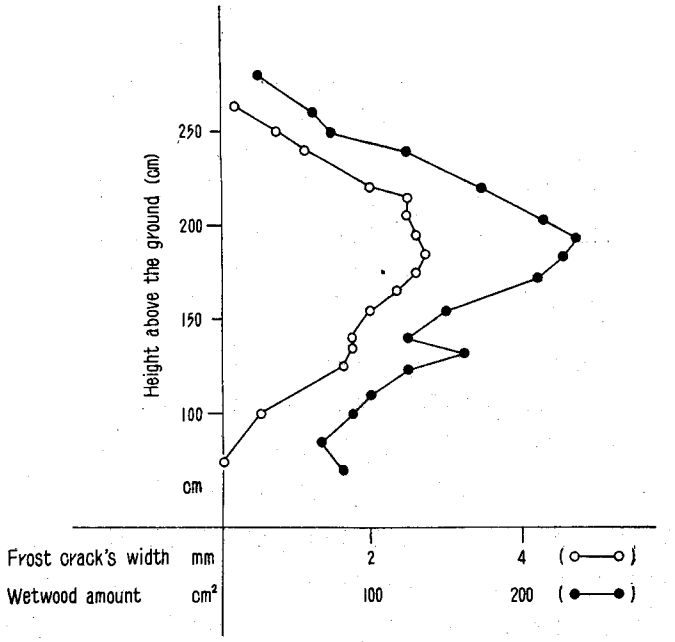


Fig. 2. The relationship between amount of wetwood and widths of a frost crack in a trunk at various heights above the ground (*A. sachalinensis*).

Fig. 3 は胸高直径 36 cm，樹高 22 m，樹齢約 150 年の枯枝の多い樹幹についての測定結果である。凍裂は樹幹の東側に，地上約 4 m から 7 m に達するものが1本，西側に地上 6.5 m から 7.8 m に達するもの1本，同じく西側に 8.5 m から 9.6 m に達するものが1本あった。

以上の3例によれば，凍裂の程度（割れ目の幅）と水喰材量（その面積）との間には密接な相関のあることが明らかである。Fig. 1 および Fig. 3 にみられるような，凍裂幅と水喰材量との部分的な非対応は，両者の基本的な相関関係を見掛上乱すところの，別の要素，

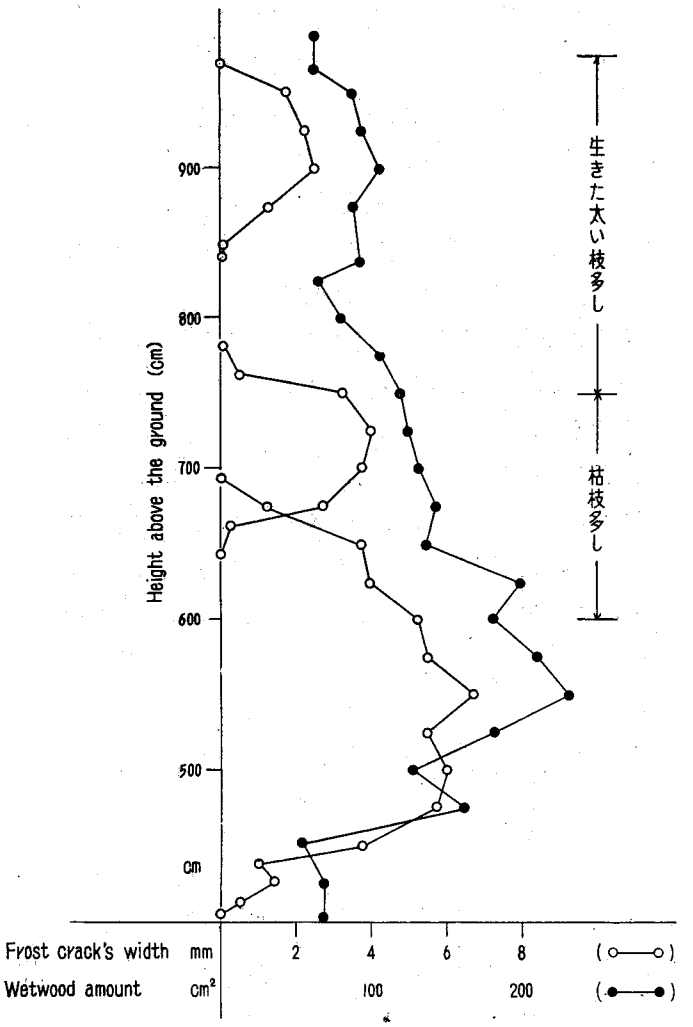


Fig. 3. The relationship between amount of wetwood and widths of a frost crack in a trunk at various heights above ground (*A. sachalinensis*).

ここでは乾いた，粗慥な腐朽部分とか，太い健全な枝節の存在にもとづくものと考えられる。このような，凍裂量（換言すれば，凍裂を生ぜしめている樹幹内のストレス）と水喰材量の関係をみだす要素は，樹幹内部に存在する，アテ材，繊維の錯綜，入皮，巻込み，腐朽，枝節などの欠点部分であって，北海道の天然林産トドマツには，水喰材とともに，これらの欠点が非常に多く出現し，凍裂があった場合でも，それと水喰材との定量的相関のはっきりしない場合がしばしば認められる。とくに，樹幹の，比較的高い位置にある枝水喰に関連する凍裂では，その内部にある水喰材が，比較的に分散し，かつ，低含水率部との境界が不明瞭な状態で出現することが多いので[33]，水喰材量の表示法そのものの問題

とも関連し，両者の量的関係の乱れることが比較的に多い。しかし，如何なる場合にも，全く水喰材の存在しないところに凍裂が存在することはなかった。

トドマツの水喰材の中には，冬には氷のつまった多くの割れ目が含まれている。一般的には，樹幹横断面における水喰材の分布と，この割れ目の分布とはおおむね一致するから，割れ目の分布の広さと凍裂量との間には密接な関係があることになる。しかし，この割れ目そのものの大きさにはかなりな変異があり[33]，かつその分布面積（これはおおむね水喰材面積に比例する）内の割れ目の密度にも変異があるから，割れ目そのものの総面積とその分布面積，したがって水喰材面積，結局は凍裂量との間にはどの程度の相関があるかはわからない。そこで，根水喰いに関連すると考えられる一つの凍裂について，Fig. 1～3などの場合と同じような調査をおこない，さらに水喰材内部の割れ目の面積を幾何学的な方法を以て，近似的に測定した。その結果を Fig. 4 に示す。

この凍裂木は胸高直径 24 cm，樹高 19 m，樹齢 76 年（但し地上高 0.7 m の断面における値），外見上の形質はかなり良好なものであった。凍裂は，樹幹の北西側にあり，地上 0.8 m から 2.65 m に達していた。はじめて凍裂の起った年は，凍裂の中央付近で 24 年前

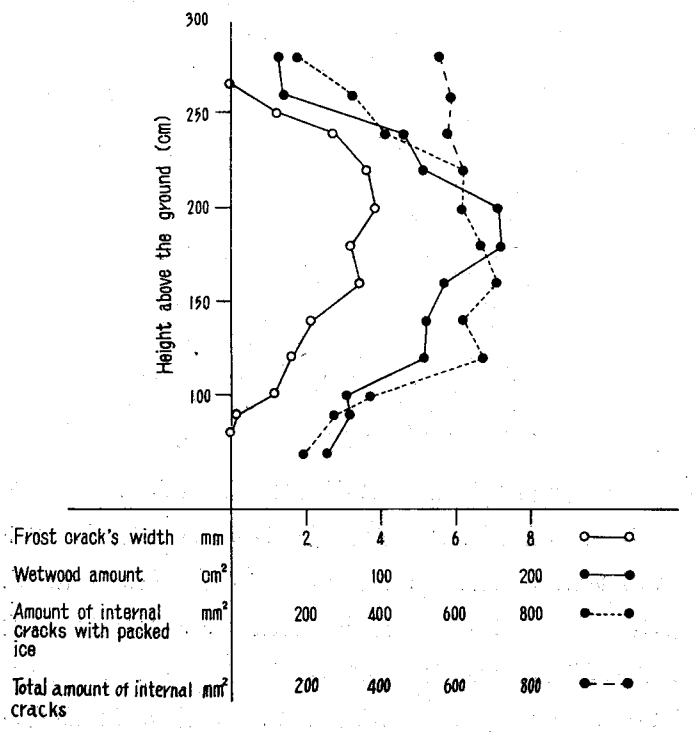


Fig. 4. The relationship between amount of wetwood, widths of a frost crack, and amount of internal cracks with packed ice (*A. sachalinensis*).

（この調査は1947年1月に行なったものであるから1922/23の冬）であった。凍裂幹材部には，腐朽その他の顕著な欠点は全く認められなかった。割れ目の面積は，割目（Photo 46～50参照）の形に応じて矩形，三角形などに区分し，測定，計算をおこなった。割れ目の長さの測定精度はおおむね0.5 mm，幅については0.2～0.3 mmの精度で測定し，最大幅0.4 mmに満たない割れ目は除外した。したがって，ここにいう一つの円板における割れ目の総面積とは，最大幅0.4 mm以上の割れ目の面積の総計の意味であり，真の割れ目の総面積はここに掲げる値より大きいことになる。

この凍裂では，その中央付近から，あまり氷のつまっていない割れ目がところどころに現われはじめ，さらに上部にゆくにつれ，この種の割目が多くなる傾向がみられた。図で割れ目の面積を点線（·····）で表わした値は，すくなくとも割目の中の氷が面積の半分以上つまっていると判断された割目についてのものであり，破線（－－－）で示した値は，氷の量に関係なく0.4 mm以上の割目全部についてのものである。図では，破線部が，地上高2.2 m以上にしか無いが，このことは，この凍裂木では，その高さ以上でしか，氷のつま2.2 m以下に或いは氷のすくない割目が観測されなかったことを意味する。換言すれば，っていない，おいては観測された割れ目は，すべて氷を相当量含んでいたことになる。図において，凍裂幅と水喰材面積との対応はかなりよく，Fig. 3などの例とほぼ同様の傾向を示している。これに対し，凍裂幅と割れ目の面積（点線）との関係はやや乱れ，前者の相関係数（凍裂幅と水喰材量）0.880に対し，後者（凍裂幅と実線（――）で示した割れ目の面積）は0.775である。

樹種的には，この論文のテーマであるトドマツとは全く違ったものであるが，しばしば凍裂が発生し，しかもその内部に著しい割れ目を含んでいることのあるオヒョウ（*Ulmus laciniata* MAYR）についての測定結果を参考としてFig. 5に掲げる。凍裂幅，割れ目の面積の測定方法などはFig. 1～4の場合に同じ。

このオヒョウは，胸高直径16 cm，樹高15 m，凍裂は地際近くから，1.5 mの高さに達していた。オヒョウの凍裂幹材部の割れ目は，トドマツの場合と同じく，その多くは完全に氷でみたされているが，中には氷の全くないもの，非常にすくないもの，或いはその割目の全体にわたって氷があるけれども，その氷の中に空気を含んで白濁しているものなどがある。図の実線で示した割れ目の面積は，割目が完全に氷でみたされているもの，および，気泡を含んでいても，氷が割目の略々半分以上をみたしているものの合計面積である。破線は，それ以外の割れ目，すなわち，氷がないか，あっても非常にすくないものをも含んだ合計面積を示している。図からわかるように，このオヒョウの場合は，氷のすくない割れ目（破線）は凍裂の下端付近と上端部に多く，とくに上部では凍裂の上端を越えてさらに地上高約3 mまで達していた。実線部分だけについてみれば，凍裂幅との対応がか

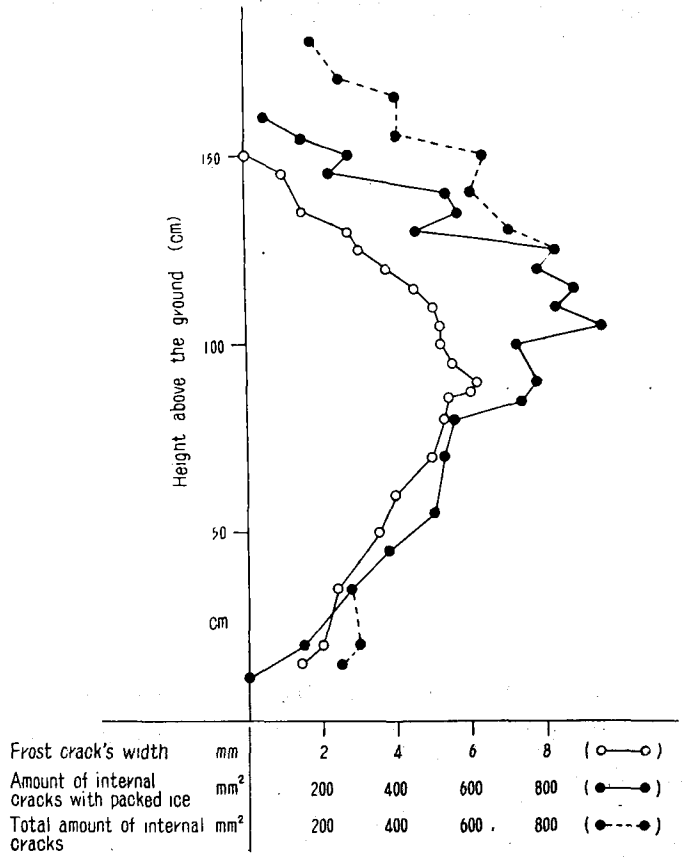


Fig. 5. The relationship between amount of widths of a frost crack and amount of internal cracks (*Ulmus laciniata*).

なり良く，その相関係数は0.895であるが，氷のすくない割れ目を加えた，割れ目の合計量との対応は大分みだれ，相関係数は0.770となる。実線部分についての相関が，破線部分を含めた場合の相関よりよいことはFig. 4のトドマツの場合も同様であり，氷のない，あるいは，すくない割れ目の凍裂に対して持つ意味を示唆するものと考えられる。

5. 水喰材の凍結，融解と凍裂幅との関係

2～4に述べた，冬季間の，凍裂と水喰材に関する諸調査の結果，凍結している水喰材と凍裂の間に量的相関のあることがわかった。しからば，この水喰中の水分が融解すれば，凍裂の幅がどうなるであろうか。また，逆にその凍結過程において凍裂はどのように変化するのであろうか。この問題解明のために次に示す一連の実験をおこなった[31]。

冬になって，樹幹が完全に凍結し，凍裂が完全に裂開している状態のトドマツ凍裂木2本を伐採し，その凍裂部分から丸太を切り取り，凍結状態のまま，北大の低温科学研究所に輸送した。この丸太を常温の実験室内に約1週間定置しておいたところ，樹幹内水分

の凍結は解け，また凍裂の割れ目は全く閉じてしまった。ここで丸太の辺材，および中心部に棒温度計をさし込んでこの部分の温度を読み，また凍裂の長さの中央部付近1カ所を選び，割目の両側に測針を打ちこんで，その距離を1/100 mmの精度で測定した*。辺材温度をT_2，中心部温度をT_3とし，測針距離をDとする。常温における測定が終ってから直ちに丸太を低温室（室温 …T_1… −16°〜−20°C）に入れ，爾後1時間ないし2時間毎にT_1，T_2，T_3およびDを測定した。約50時間で凍結過程ならびにそれに続く状態の測定を了えた後，供試丸太を低温室から出して常温の実験室に移し，引き続き融解過程におけるT_1，T_2，T_3，Dを測定した。供試凍裂丸太は2本（丸太AおよびBと呼ぶ）で，何れも，凍裂の中央付近の直径が約15 cmであった。凍裂は典型的な霜腫れをなし，水喰材には稍々濃い褐色の着色があった。供試丸太の凍裂は，常温では，割れ目が完全に閉じていたが，云うまでもなく，これは割目の単なる閉鎖であって，癒着組織は全く形成されていない。

測定結果をFig. 6〜9に示す。

凍結過程も融解過程も，A，B両者の間にはとくべつの違いが認められない。今，Aの凍結過程についてみれば（Fig. 6参照），測定の基点となった，低温室に入れる直前のT_2，T_3，Dは，それぞれ7°C，9°C，23.94 mmであった。これが，室温 −16°C（T_1）の低温室に入れられると，まず，辺材温度T_2が急に下りはじめ，0°C付近で水分凍結（Fig. 10参照）のためしばらく停滞するが，やがてまた急速に降下してゆく。辺材の凍結が終了して温度降下の速さが増しはじめる頃は中央部温度T_3はなお0°C以上にあり，また測針幅には全く変化が起らない。時間の進行につれてT_2が−8°C付近に達した頃にT_3は0°Cの

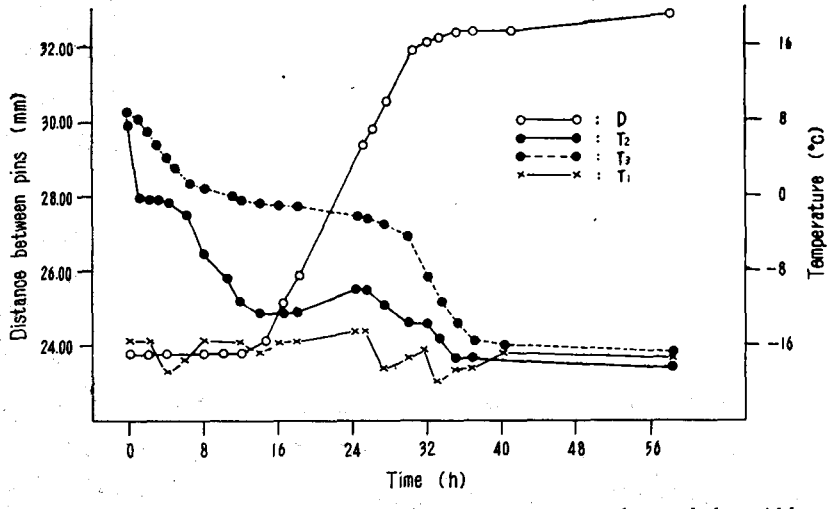


Fig. 6. The relationship between the temperature in a log and the width of its frost crack during the cooling process (*A. sachalinensis*).

* この測針間の距離の変化は凍裂の割れ目幅の変化を示すことになる。

線を越え，かつ，その降下勾配が緩くなり始めるが，この附近（測定開始後12時間付近）から D は増加しはじめる。その後 T_3 の停滞，ないしは極めて緩徐な降下が約15時間継続するが，ほぼ，この時間に対応して D の増加がおこなわれ，30時間附近で T_2 が急に下りはじめると D の増加はほとんど止ってしまう。この実験結果で重要なことは，T_3 の停滞部分すなわち水喰材の凍結区間[36]と D の増加区間（すなわち凍裂幅増大区間）がよく一致していることである。また，図から明らかなように，T_2 の停滞区間すなわち辺材の凍結区間では D には何らの変化がみられない。B (Fig. 7) の場合も一般的傾向としては全く A

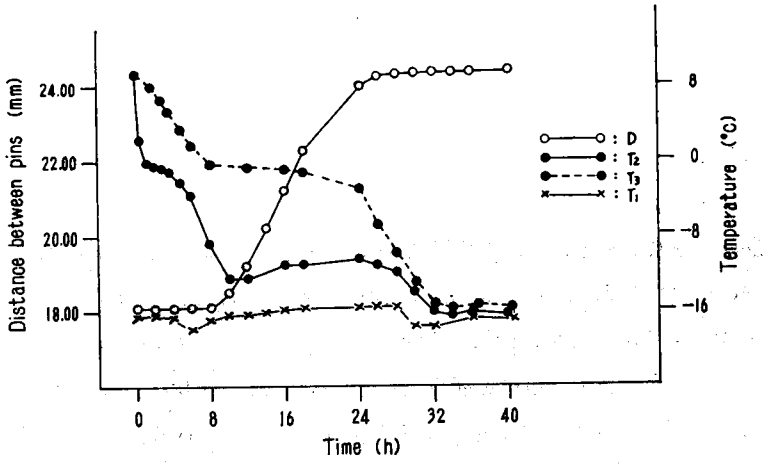


Fig. 7.　The relationship between the temperature in a log and the width of its frost crack during the cooling process (*A. sachalinensis*).

と同様であるが，T_2，T_3 の停滞区間が A に比べて何れも短かく，D の全増加量，すなわち，凍裂幅も前者に比べてかなり狭いことである。このことは，現象的には，両丸太の心材部の含水率の相違に関連する。すなわち，両丸太の凍裂幅の測定点付近から取った円板の心材部* 含水率は次のとおりで，A 丸太の方が B 丸太よりかなり高い値を示している。

		円板の含水率			
		平均	最小	最大	
丸太	A	145%	87%	196%	テストピース 24個
〃	B	115	89	161	〃 19

次に融解の場合についてみよう (Fig. 8, 9参照)。A の場合 (Fig. 8) の起点の T_2 は約 −18°C，T_3 も −18°C，D は 34.25 mm であった。これが突然 20°C の常温実験室へ移されると，まず，辺材温度が急激に上昇をはじめ，−4°～0°C 付近で暫時停滞の後再び急速に上昇した。この温度の停滞区間は，辺材水分の融解区間である。T_2 が 0°C の線を通過してから約4時間後に T_3 が 0°C の線に達し，爾後 0°C より幾分高い温度で十数時間停滞

* 何れも直径約7 cm の小円板。

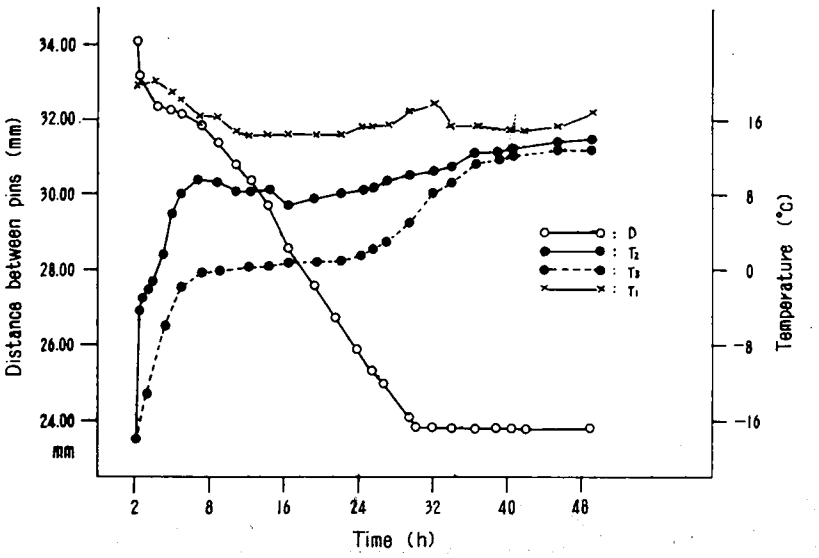


Fig. 8. The relationship between the temperature in a log and the width of its frost crack during thawing process (*A. sachalinensis*).

し，以後急速に上昇して室温に平衡する温度に落ちついた。Dは，凍結過程とは違って，低温室外に出された瞬間から減小し始め（すなわち，凍裂幅がせまくなり始め），その後しばらくその速度が落ちるが，爾後，かなり長い時間ほぼ直線的に減小を続け，ついに凍結開始前の値にほぼ一致した。しかして，この長い直線部分は，ほぼT_3の停滞部分に対応し，T_3の値が急に増加を始める頃にDの減小は止み，凍裂の割れ目は完全に閉じた。Fig. 9 の場合も前者と略々同様の経過をとる。

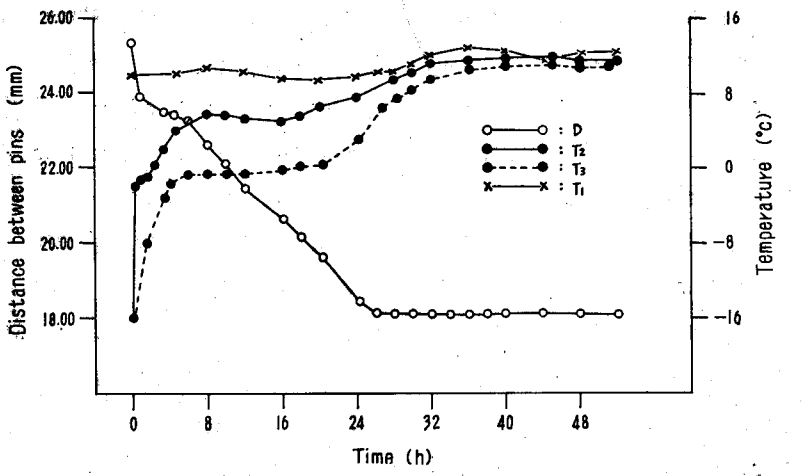


Fig. 9. The relationship between the temperature in a log and the width of its frost crack during thawing process (*A. sachalinensis*).

以上の2本の凍裂丸太の冷却において，丸太の辺材部温度 T_2，中央部温度 T_3 が，それぞれ0°C附近で一時的に停滞する現象が観察された。この現象は，丸太を低温室から常温の実験室へ移した場合にもみられた。このような，0°C附近での温度の一時的な停滞区間を，筆者はすでに，温度測定点附近の水分の凍結する区間であると，説明しておいた。これは木材中の自由水の凍結に関する，筆者の，次の実験結果から明らかなところである[36]。

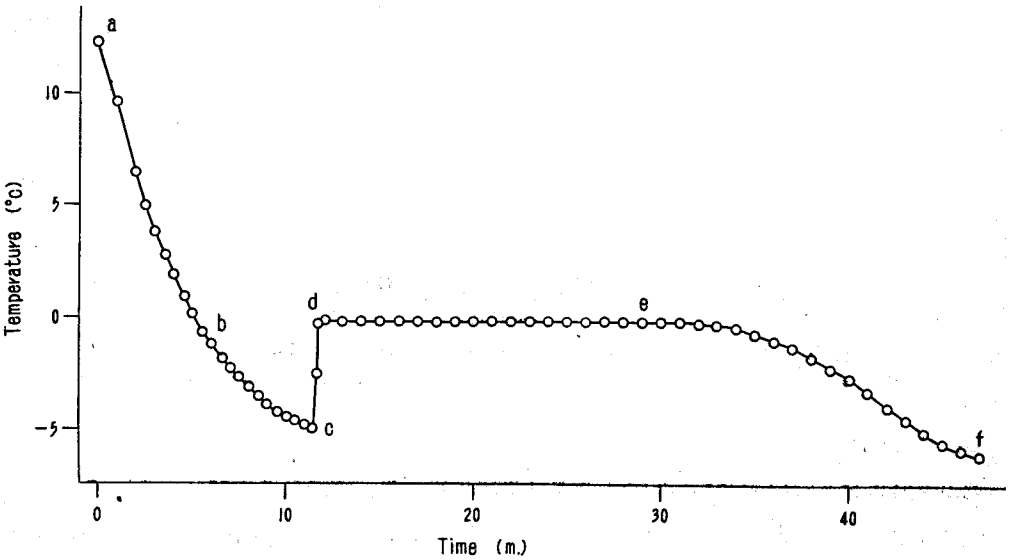


Fig. 10. A typical freezing curve of green wood (*A. sachalinensis*)[36].

トドマツの生材から切取ったテストピースを常温から低温中（たとえば −10°C 位）に移し，その冷却過程の温度を記録すれば，たとえば Fig. 10 に示すような曲線（温度—時間曲線）がえられる。この曲線には水分の凍結過程が含まれており（文献[85]など参照），したがってこの曲線は供試木材組織の凍結曲線ということができる。図の横軸は時間を，縦軸はテストピースの温度を示す。室温(a)に保持してあったテストピースを硝子管で保護し，温度約 −8°C の冷媒体の中へ急に入れる。時間が経つにつれてテストピースの温度は，はじめは急激に，後にはややゆるく降下し，b点において0°C線を通過，さらに降下を続けてc点（温度約 −5°C）に達した時，とつぜん上昇してdに達する。dからeまで約20分間，テストピースの温度は一定値を保持するが，e点附近から，はじめは徐々に，次第に急激に，やがて再び緩徐に降下してゆきついに冷媒温度(f)に一致する。b—c（厳密にはbよりすこし後れた点からcまで）は生材組織が過冷却[6),78),7)]などされている区間，cはこの過冷却が破れた点，dに続く水平部分は凍結が進行し，潜熱を出している区間，eから後はテストピースの凍結が完了近くなり，さらに，完了して単純な冷却の行なわれる区間である。dならびにこれに続く水平部分の示す温度が，この生材組織の示す凍結温度である。

このようにして実験的にえられた多くの凍結曲線から求められた供試木材の凍結温度（Freezing point），過冷却温度（過冷却の破れた温度の意，Super cooling temperature），冷却速度（Cooling rate）などを巻末附表Ⅰに示し，それらの総括を Table 7 に示す。ここに，凍結温度について簡単に触れるならば，その値は Table 7 に示すように −0.1°〜−0.8°C，平均 −0.4°C であった。測定された凍結温度の値はテストピースの含水率に関係することが示された。一般的には含水率が高くなればその値が高く，低ければ低い傾向がある。詳細については文献[36]を参照のこと。なお，これら生物体あるいは無生物体の凍結に関しては低温科学[77]に多くの関連論文がある。

Table 7. Summarized values on freezing point etc.* of green wood (*A. sachalinensis*).

	Height above the ground	Cooling rate	Super cooling temperature	Freezing point	Moisture content
	m	°C/M	−°C	−°C	%
[Wood]					
Normal trunk	0.3	0.9〜1.4〜2.1	2.5〜3.2〜3.6*	0.2〜0.4〜0.5	45〜119〜195
	4.3	0.5〜1.3〜2.1	1.8〜2.2〜2.9*	0.3〜0.4〜0.8	49〜124〜220
	8.3	1.1〜1.8〜2.5	4.5〜5.6〜7.4	0.1〜0.4〜0.7	64〜120〜192
Frost-cracked trunk	4.0 (N)	0.6〜1.2〜1.8	2.4〜2.9〜4.2*	0.2〜0.4〜0.6	49〜109〜215
	4.0 (S)	0.8〜1.2〜2.0	2.1〜2.8〜3.2*	0.2〜0.4〜0.6	50〜106〜200
	8.0 (N)	0.9〜1.3〜1.8	3.5〜5.9〜7.1	0.1〜0.4〜0.7	43〜129〜215
	8.0 (S)	0.5〜1.2〜1.8	2.1〜2.9〜3.5*	0.2〜0.3〜0.6	70〜133〜201
Total		0.5〜1.3〜2.5	3.5〜5.8〜7.4	0.1〜0.4〜0.8	43〜119〜220
			2.1〜2.8〜4.2*		
[Bark]					
	2.3	0.8〜1.1〜1.8	2.3〜3.1〜5.0*	0.9〜1.3〜1.6	

*: Artificially inoculated.
*: see ref. 36.

第2節　外部条件

前節においては，凍裂の発生に対しその樹幹の内部から作用する条件について述べた。本節においては，樹幹一般（個々の凍裂樹幹を含む）に対して外部から作用する条件について述べる。

凍裂は，冬の，急に低温が来襲する時[8),58)]など，或いは1日のうち最も気温が低下する日出前[11)]；あるいは，強い寒さが長時間つづくような夜など[1)]に多く発生するものであると言われている。とに角，凍裂の発生に冬季の低気温が，主役[58),42),その他]あるいは，その一役[11)]を演じていることは間違いないものと古くから信じられている。筆者も略々同じ意見であり，とくに樹幹水分の凍結が一要件であるから（前節），この意味での低気温の存在

は決定的に必要である。しかして，樹幹の凍裂の発生に対する低気温の問題は，いうまでもなく低気温そのものの問題ではなく，樹幹温度を規定する一つの条件としての問題である。樹幹を囲繞する空気の低温は樹幹外部から作用してその温度を変化させる一つの条件であるが，この意味で水喰材のような凍裂に対する内部的な条件に対し，外部条件と呼ぶことができる。また，この条件は，その作用のし方は別として，或る地域内の，あらゆる林木に必ず作用する条件であるから，水喰材が凍裂に対する個体的条件であるのに対し，これを一般的条件と呼ぶことができる。

樹幹の温度分布に大きな影響を及ぼす他の因子は，樹幹に対する日射である。日射について，上記の諸論文の中で一般にいわれていることは，日射時に，その側の樹幹温度が他の側の温度に比べて上昇し，夜は他の側と等しく低気温の影響を受けるから，結局，樹幹の日射側の温度変化が大きくなり，したがって，発生する応力も大きいということである。そして，事実，凍裂は南面あるいは南西面に多いという報告[70]もある。しかし，凍裂の方位は，すでに述べたように，トドマツに関しては，このようなことは一般的事実とはいい難い。筆者の，初冬の頃の立木樹幹の辺材凍結前後の樹温測定成績*から判断するに，日射のための樹温変化は，これのない場合に比べて，たしかに大きい。冬の低温時，すなわち，樹幹水分の凍結状態においては，常温におけるそれよりもかなり小さいものと考えられる。日射によって樹幹温度が上昇しても，辺材の凍結の融解を全く起さない温度，すなわち −1°C 付近以下[36]であれば，日射がなくなった後，低気温によって急激な樹温低下を来すことはありうる。もし，辺材の凍結を融かすようなことがあれば，融解の続く時間中，辺材温度は 0°～−1°C の範囲を出ることがない。このような場合には日射の去った後も，急激に樹温が下ることはなく，水分凍結のための時間を必要とし，その間，やはり辺材温度は 0°～−1°C の範囲内に止まることとなる。この 0°C 付近に止っている時間は，吸収された日射のエネルギーその他に関係し，極めて複雑なものとなるであろう。何れにしても，辺材の，一種の温度調節作用を考えるならば，常温におけるほど大きな温度変化はないものと考えられる。しかも，現実に，トドマツの凍裂は日光直射のない斜面に立つ樹幹，あるいは鬱閉のためほとんど日射を受けない立木樹幹にも発生し，また，一樹幹についてみても，凍裂が日射側に多いということは確認できなかった。

風，樹冠上の積雪圧などは，樹幹に対する荷重として作用し，その内部に応力を発生させる。凍裂の発生機構に対する風の作用については古く[11),58)]から考慮されており，理論的には，これを否定する根拠はない。BUSSE の，基幹部の剪断応力説は，一応その可能性が考えられるが，しかし，凍裂は必ずしも樹幹基部の根と根の間の部分 (Wurzelhals) に

* 304頁に述べた，生材凍結温度に関する実験を，立木樹幹に拡大測定したものであり，この測定によれば，立木の辺材部の凍結融解のために辺材温度は長時間 0°C 付近に停滞することがある。未刊。

出現するというものではない。むしろ，風によって樹幹が曲げられる場合，樹幹の圧縮側に，引張応力が，円周方向に発生することを考えなければなるまい。しかし，この風の作用も，低気温の作用と同じく，これのみを以て凍裂を説明することはできず，とくにトドマツの場合には，その内部条件が凍裂に対し必要な条件であるから，風が凍裂発生の主役をなすものとはいえない。

1. 樹幹温度と凍裂幅との関係

凍裂の割れ目の幅が，気温の変化に関連して変化する事実は，古くは CASPARY[15)~17)] によって報告され，また，最近，SCHULZ (1957)[66)] によっても報告されている。CASPARY の測定は何れも広葉樹についてのものであり，SCHULZ の測定も Eiche, Pappel, Buche, Roßkastanie など，すべて広葉樹についてのものである。筆者は北海道産トドマツ立木について，その凍裂の割れ目の幅が，気温，その樹幹の温度に関してどのように変化するかについて観測した。

1947 年 1～3 月にかけて，旭川林務署管内当麻事業区 12 林班内で，すでに凍裂が裂開している凍裂木を選び，付近の気温，樹幹の内部温度，凍裂の割れ目幅について測定した。供試木は，胸高直径約 30 cm，樹高 17 m のトドマツで，凍裂は樹幹の南東東側に 1 本あり，地上 0.5 m から 3.5 m にわたっていた。付近の積雪の深さは，測定期間のはじめと終りでは，かなり大きな変化がみられたが，この供試木については，観測期間中，ほぼ同

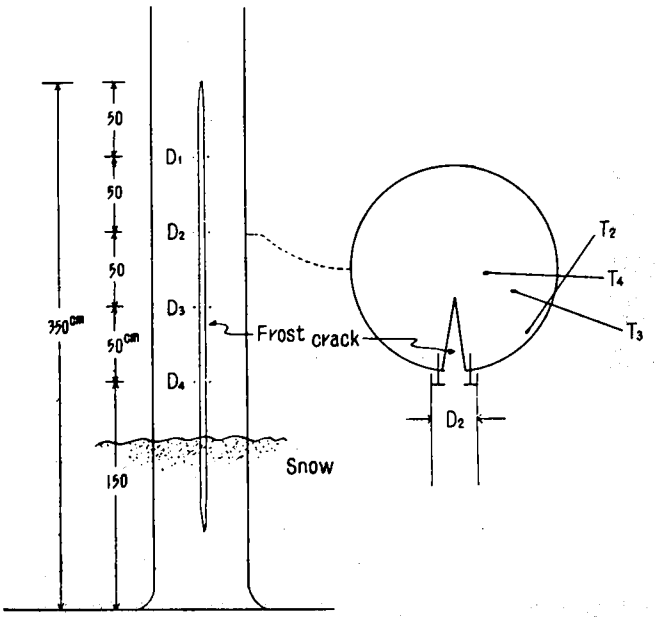


Fig. 11. Schematic sketch showing places where temperatures of a trunk and widths of a frost crack on it were measured.

じ深さ，すなわち約1.2 mの積雪で被われているように配慮した。

温度および凍裂幅の測定は次のようにしておこなった (Fig. 11)。

すなわち，凍裂の幅は，凍裂の上端(地上高3.5 m)から50 cm下の位置(測定点1)，100 cm (同2)，150 cm (同3) 及び 200 cm (同4) の位置の4カ所で測り，樹幹温度は，凍裂の上端から100 cm (すなわち凍裂幅の第2測定点) の位置で測定した。測定開始の1月下旬には，すでに凍裂の割れ目は開いており，第2測点位置で約4.30 mm (気温 −3°C) の幅があった*。この割れ目の幅が，気温や樹温の変化によってどのように変化するかを知るのがこの測定の目的であるから，割目幅そのものを，常に測定する必要はない。そこで，実際には，割れ目の両側に2本の測針を図のように打ちこみ，その距離(D)をマイクロメーター (1/100 mmの精度) によって測定した。したがって，これによって割れ目の幅の変化は，間接的に1/100 mmの精度を以て読みとることができた。樹幹温度は樹皮表面から2 cm, 6 cm, 及び10 cmの箇所に図のように棒温度計を挿しこんで測定した。気温は，この樹幹から約1 m離れ，大体樹幹温度の測定点と同じ高さの位置で測定した。測定にはアルコール棒温度計と1週間巻自記温度計を用いた。なお，風速をも併わせて測定した。この測定の対象になった樹幹部分への日射の影響はほとんどなかったものとみて差支えない。観測は原則として毎日 6, 10, 14, 18, 22 時の5回おこなった。測定成績を Appendix II として巻末に掲げる。

測定成績を通覧してわかるように，気温 T_1 の変動につれて，樹幹温度は T_2, T_3, T_4 と，順次に内方へ変動しており，一方凍裂の割れ目の幅は樹幹温度の変動につれて変化している。割れ目幅の変化と，気温および樹温変化の対応状況を示すために，一例として T_1, T_2, D_2** の観測値から，それぞれの標準測定値*** (t-value) を求め，これを図示したのが Fig. 12 である。

図からわかるように，D_2 は T_2 に密接に関連しながら温度が下がればその幅を増している。この相関係数は −0.959 で，非常に緊密な相関を示す。一方，T_1 と D_2 の相関係数は −0.868 で，T_2 と D_2 の場合より低いがかなり密接な相関のあることを示している。D_2 と T_3, T_4 との相関係数はそれぞれ −0.931, −0.754 である。すなわちこの観測では幹の表面から数 cm のところの温度と凍裂幅との間には最も密接な相関関係がみられ，樹幹の

---

* 1月25日午後の値。第1測点1.90 mm，第3測点4.40 mm，第4測点4.55 mmであった。

** 第2測定点の測針距離。

*** たとえば，小倉金之助： 統計的研究法 (1943) 参照。ここでは，T_1, T_2, D_2 などの観測値の，それぞれの算術平均値を基準点とし，変量の標準測定単位として各変量の標準偏差を用いた。標準測定値 t は，$t=\frac{\xi}{\sigma}$，ここに，σ: 標準偏差，$\xi = X_i$(観測値) $- M$(算術平均)。割目については，$t=\frac{M-X_i}{\sigma}$ とする。

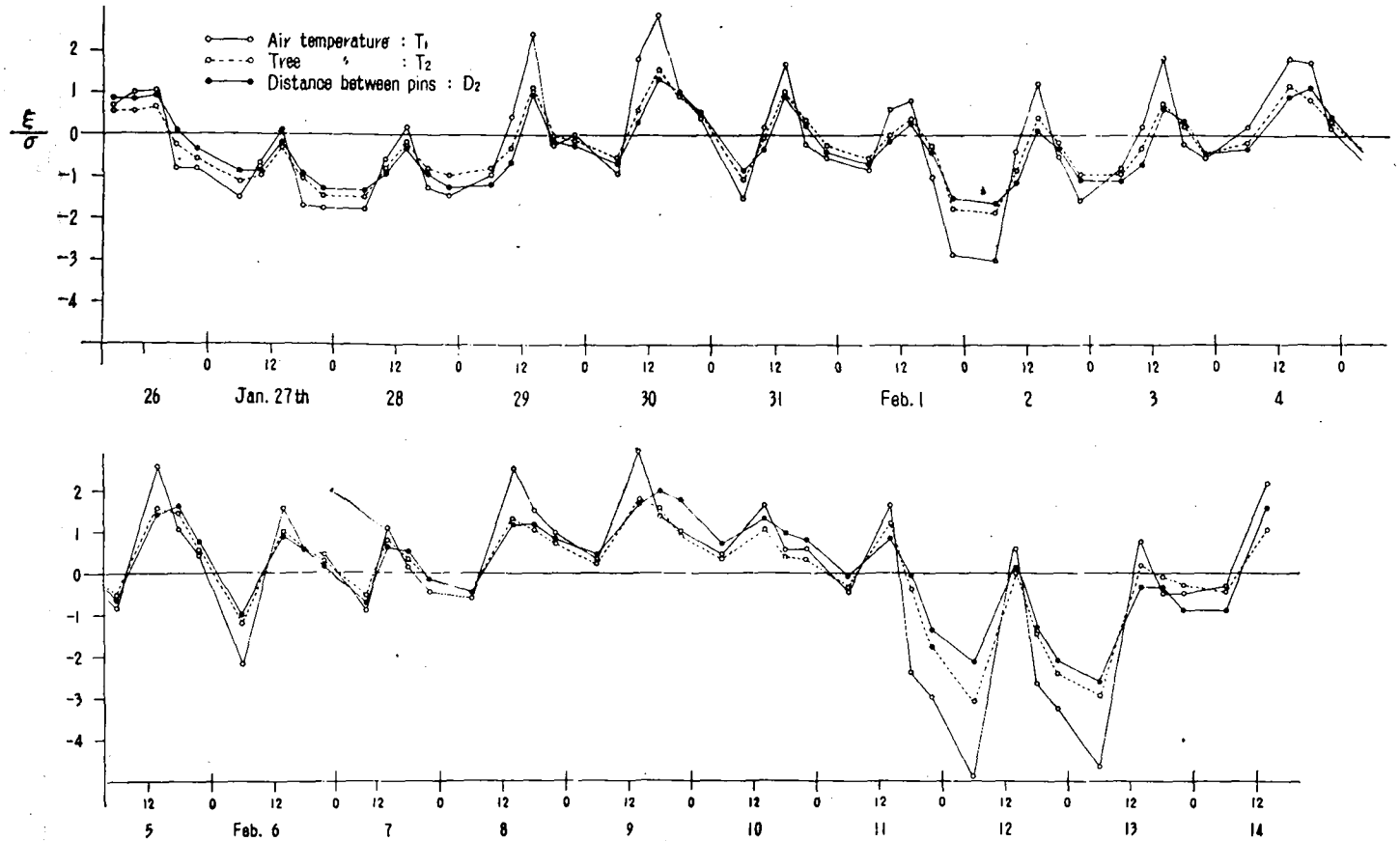


Fig. 12. The relationship between air temperature, sapwood temperature in a standing tree trunk, and the width of a frost crack on it (*A. sachalinensis*). (Ref. to fig. 11).
σ: standard deviation of the temperature and the width of the frost crack.
ξ: X_t (observational value) $- M$ (the arithmetic mean) for the temperature, while $M - X_t$ for width of the frost crack.

中央近くでは相関が浅くなった。また，樹幹の近くの気温との相関はかなりよかった。

この凍裂の割れ目は，樹幹表面から約10 cmの深さまではぼ，直線状に樹心方向に向っていたが*，その内方では，水喰材の割れ目に接続していた。樹幹内の水喰材の存在状態，とくに割れ目の分布状態などは，この立木自体の特有のものであり，したがってこの樹幹内部の応力状態も特有のものであって，ここに観測された値を以て他を律することはできないと考えられるが，今，D_2とT_2の関係式を求めてみると次の如くである。

$$D_2(\text{mm}) = 3.72 - 0.13\,T_2$$

但し，T_2は-1℃以下。

2. 円板の温度と復張との関係

常温で，生の樹幹から円板を切り取り，その樹皮から中心に向って鋸目を入れると，円板の鋸目の幅がせまくなり，鋸身は側方から圧せられるようになる。この現象は，復張[79]，Klemmen[61),41)]と呼ばれ，かなり古くから林業者の間に知られていた。

常温における復張量は，円板の含水率に関係し[41)]，生材時に最大で，含水率の減小，すなわち，円板の乾燥に伴なって小さくなり，ある程度乾燥が進行すると，復張はみられず，それ以上の乾燥度では鋸目の幅が却って広くなり，負の復張を示すに至る。樹幹から切取った円板に復張の現象がみられるということは，その内部に一種の元応力[74)]が存在していることを示すもので，円板に切目を入れることによってそれが解放**されるものと看做すべきである。復張量が円板の乾燥に伴って変化することは，円板内の応力が，その乾燥に伴なって変化することを意味するものである[39),41)]。

円板の含水率を生材状態に保持し，それを凍結せしめ，しかる後，いろいろの温度において円板の復張量を測定すると，その値は円板の温度に関して変化する。このことは当然，切目のない円板内部に，一種の元応力としての熱応力[74)]の存在することを示すものである。低温における円板内のストレスを測定計算することは木材の低温における諸定数に不明なものが多いので，なかなか困難であるが，円板の復張量と温度との関係は実験的に測定することができる。以下，主として，正常円板についておこなった復張と温度に関する実験の結果，すなわち，円板の復張率，復張の消滅温度について述べる。

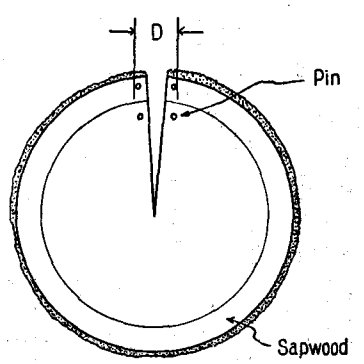


Fig. 13. Schematic sketch showing method of measuring the squeezing of a disk.

冬に，すでに凍結しているトドマツ立木を伐採し，

---

* 第2測点附近の状況

** 完全に解放されるとは勿論云い難い。

その樹幹から円板を切取り，その温度を一定（0℃以下，この温度を t_1 とする）に保持しながら，Fig. 13 のように鋸目を入れると，鋸断の前後で測針距離（D）が変わる。すなわち，上述の復張現象がみられる。ただし，ここでは一般的に復張量（−）の場合をも考えるものとする。今，鋸目を入れる前の測針距離を d_0，鋸目を入れた後の距離を d_{t_1} とすれば，

$$S_{t_1} = d_0 - d_{t_1}$$

が，その温度 t_1 におけるその円板の半径 r の点の復張量である[41),61)]。この円板を，爾後，いろいろの温度 t_t の下に，含水状態を変化させないようにしながら一定時間づつ保持し，それぞれの温度*における測針距離 d_{t_t} を測定し，

$$S_{t_t} = d_0 - d_{t_t}$$

を算出した。しかして，ここでは，この値 S_{t_t} をも，その円板の，その温度における復張量と呼ぶことにする**。

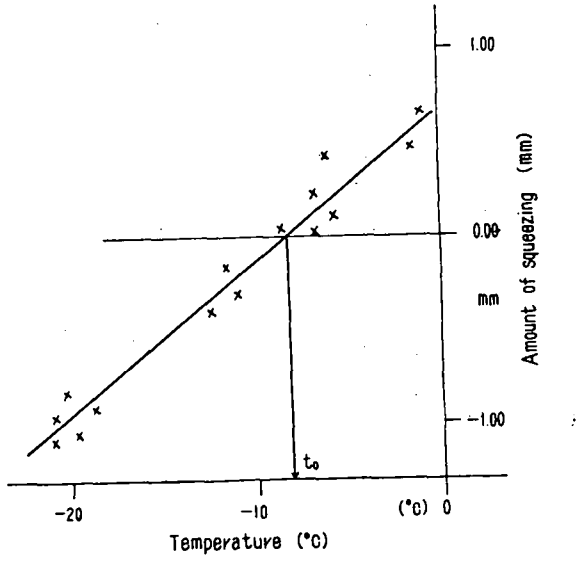


Fig. 14. A curve showing the temperature-squeezing relationship of a normal (free from defects) disk in low temperatures. Each × shows a value obtained respectively (*A. sachalinensis*).

さて，このようにして，多くの円板の，いろいろの温度における復張量を測定したが，今，一つの円板についての測定結果を一例として Fig. 14 に示す。

図は横軸に円板の温度（t），縦軸に復張量 S をとったもので，円板温度と復張量との関

* 円板の内部には温度勾配が全く存在しないものとする。実験的には近似的に可能。

** NÖRDLINGER[61)] などの "Klemmen" は，鋸目を入れる前後の測点間距離の変化量を意味する。ここでは，本文中記載のようにその意味を拡げる。

係は，観測温度範囲では一般に，この図のように直線を以って表わすことができた。この図では，直線の方向係数が約 0.08 (mm/℃)，−8.5℃ で復張は 0 となり，それより高い温度では (+)，低い温度では (−) となる。すなわち，この円板の復張の測定点では，温度 −8.5℃ では復張が起らず (或は消滅し*)，それより高い温度では，円板につけた切目の幅がせまくなり，これより低い温度では切目の幅が広くなる。従来測定された生材の復張は，常温あるいはあまり低くない低温におけるものであるから，生材については，復張は常に鋸が側圧を受ける方向のものとして理解され，この場合の値を (+) として表示したものと考えられる。

一度，切れ目をつけられた円板の温度がその内部に温度勾配のない状態で変化すると，その切れ目の幅は，図に示す S—t 曲線のような関係で変化する。若し，円板に半径方向の温度勾配が生じた場合には，それに相当する切れ目幅の変位量が温度勾配のない場合に加重される。このことは円筒，すなわち樹幹の場合にもこれを拡張して考えることが可能で，前項に述べた，凍裂木についての野外観測の成績と，実験室内でおこなった円板についての成績とは，その現象の基本的な面では相対応するものである。すなわち，円板の場合と樹幹の場合では，弾性的抱束の状態が異るから，定量的には問題があるとしても，割

Table 8. Summarized values on squeezing of disks in green (*A. sachalinensis*).

Disks tested	Diameter of disk (cm)	Bark	Squeezing (k) at −6℃*1 ($\times10^{-4}$)			No squeezing temperature (t_0) (−℃)			Squeezing rate*2 ($\times10^{-4}$/℃) (r_k)		
			mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max
Normal disk (free from defects)	8～10	With	6.3	2.2	9.4	12.9	15.4	8.7	1.5	1.3	1.8
		Without	8.6	5.3	12.3	11.5	13.5	9.3	2.2	1.8	2.5
	20	With	3.4	1.9	5.2	8.8	9.9	6.8	1.9	1.7	2.2
		Without	7.8	6.4	8.9	8.0	9.0	7.6	2.6	2.4	2.8
	25	Without									
		S*3	14	12	16	9.9	11.3	9.0	1.5	1.3	1.6
		H	14	12	17	9.4	10.6	8.2	1.6	1.4	1.8
	25	Without									
		S	19	17	22	10.7	11.5	10.0	2.0	1.7	2.1
		H	19	17	21	10.7	11.5	9.8	2.0	1.8	2.2
	25	Heart only	22	20	24	10.3	11.5	9.2	2.3	2.1	2.6
Disk with wetwood	25	With	−1.7	−2.5	1.4		− 8		0.8	0.4	3.4
	15	With	−2.1	−4.3	2.7		−10		1.1	0.2	2.9
Disk with frost crack	21	With							0.9	0.3	1.1

*1 Aactual squeezing value per unit length of corresponding circumference with the radius of the point where the value was measured : k.
*2 Squeezing (k) per unit temperature (℃) : r_k.
*3 S and H show both the outest part of sapwood and heart of a disk, resp., whear the amount of squeezing was measured.

* この温度を復張の消滅点 t_0 と呼ぶ。

れ目の幅が温度に関連して変化する事実は，すでに述べた，樹幹の凍裂幅の温度変化による変化に対応するものである。

次に円板の温度と復張に関する実験結果を要約して Table 8 に掲げる。なお実験結果の詳細は巻末 Appendix III を参照のこと。

Table 8 は全測定成績の総括表である。復張量 (squeezing : k) とは，この実験の最初に，円板に鋸目を入れた際の復張量，すなわち本来の意味での復張量である。但し，その数値は，測定点の半径 r_i に対する円周長 $2\pi r_i$ でその復張量を割った値で示してある。ここにいう復張率 (squeezing rate : r_k) とは，換言すれば，単位の温度変化に対する，上記復張量の比で，Fig. 14 の直線の方向係数を測定点の半径に対する円周長で割った値である。

まず，本表の復張率を検するに，その大きさは，$1\sim3\times10^{-4}$ の範囲にあり，樹皮のない円板は皮つき円板より，心材だけの円板は辺材つき円板より，それぞれ幾分づつ大きい傾向を認めることができる。復張の消滅点は，樹皮の有無，辺材の有無にはほとんど関係なく，−10℃ 付近にあるが，直径 8 cm の円板（地上高 18～20 m からとられた）では稍低温の側に移る傾向がみられた。切断時の復張量は，その円板の復張率，円板切断時の温度から計算的に求めることができるが，その値は必ずしも測定値（表に示した値）とは一致しない。その不一致の程度は，この測定では小さい円板の方が大きかった。これは明らかに凍結材部すなわち辺材部などの影響による弾性余効的効果に基づくものと考えられる。

水喰材を含んだ円板については，その存在形態が複雑なだけに，あまり系統的な測定ができなかった。測定値のバラツキも大きく，一般的なことはいえないが，この測定では大部分の円板は −1℃ 以下で正の復張を示さず，したがって，その消滅点を観測することが出来なかった。この点は，凍裂円板の場合と同様であった。復張率は，全体的には，正常円板より小さく，とくにそのバラツキが大きかった。凍裂円板の場合も，測定値のバラツキの大きいことが目立った。

水喰材円板，凍裂円板において，測定値がかなり大きな変異を示すのは，それら内部の含水率分布や，割れ目の分布の複雑さに基因するものであろう。しかし，この測定から一般的に推論しうることは，水喰材のある円板では，その凍結状態において，t_0 すなわち復張の消滅温度が高い値を示すことである。すなわち，これを一般的に表わせば，

正常円板の t_0 ＜凍結した水喰円板の t_0 ≦水喰材の凍結温度

水喰円板の t_0 の上昇は，その水分の凍結に基因するものと考えられるから，その値が水喰材の凍結温度を越えて高くなることは現実にはありえない。

さきに述べた凍裂樹幹についての測定では，樹幹内部に多くの場合，温度勾配があり，また力学的にみても，割れ目の二次元的，三次元的な抱束状態が複雑であるから，ここに述べた円板の場合と同列に論ずることはできない。しかし，温度勾配については，多数の

観測値の中から，温度勾配の小さい時点における D_2 について考えれば円板の場合との比較の可能性がでてくる。そこで，Appendix II の全測定値の中から，T_2, T_3, T_4 の値が，互に 1°C の差（本観測の精度）を越えない幾つかの時点の D_2 を探し出し，それらの時点の平均温度と D_2 との関係から復張率を計算すると大体の値として $r_k: 2\times10^{-4}$/°C が得られる。この値は，Table 8 に示した正常円板の復張率におおむね等しい。またこの r_k から，温度勾配のない場合の，−1°C における第2測定点の割れ目の幅を計算すると，3.3 mm になる。(因みに，310 頁の T_2 と D_2 の関係式から −1°C における D_2 の値を求めると約 4 mm になる)。上述の如く，現実には，樹幹温度が 0°C になれば水喰材は融解し，この 3.3 mm の割れ目は全くなくなるが，今，かりに，この樹幹の復張率 2×10^{-4}/°C を以つて，3.3 mm の割れ目のなくなる温度を，常温に延長してみると，計算上，約 20°C となる。すなわち，この凍裂樹幹に内在する水喰材は，それが凍結したために，正常樹幹における，温度勾配のない場合の復張の消滅点を計算上約 30°C 上昇させたと同じ作用をすることになる。

以上に述べた実験的事実を，円板につけた切れ目の変位と温度の問題として考察してみよう。今，或る温度で，円板に Fig. 13 のような切れ目をつけることによって，円板内のストレスがすべて解放されるものとしよう。このような元応力の全くない円板に温度変化を与えれば，その切れ目の幅はどのように変化するであろうか。完全に等質等方性の物質から成る円板では，その内部に温度勾配がなければ，切れ目の幅には何等の変化も起らない[74]。木材の場合，すなわち樹幹から切取った円板の場合は，上述の測定における如く，温度勾配がなくても切れ目幅が変化する。これは，正常樹幹の場合には，半径方向の線熱膨張率 (α) と，円周方向の膨張率 (β) の相違にもとづくものである。今，このような異方性の円板が，温度変化を受けた時，自由に変形できるものとすれば，半径 r なる点の切れ目幅 B の変異は

$$\Delta B = 2\pi r\cdot\theta(\beta-\alpha),$$

また，これを単位円周長，単位温度に対する値 b で表わせば，

$$b = (\beta-\alpha)$$

となる。ここに．

$$\theta = t_1 - t_2$$

t_1: 初めの温度

t_2: 終りの温度

この b はまた，上述の円板の復張率 k に相当する量であるから，円板が現実に自由に，或は近似的自由に変形しているものとすれば，実測された k と，α, β にもとづいて計算された b は，近い値になければならない。木材の半径方向，円周方向の線膨張率，すなわち，α, β については若干の研究報告[21),80),84)]があるが，これらは何れも常温付近の全乾材を対

象としたものである。生材については，McLEAN[54]* の報告があるが，これは高温時のものである。今，KOLLMANN[42]，WEATHERWAX[64] などによって与えられている値を参照して，

α：　2×10^{-5}

β：　3×10^{-5}

とすれば，

$$b = 1\times10^{-5}$$

しかるに上述の如く，k は約 2×10^{-4} であるから桁数が一つ違うことになる。

筆者が，トドマツの生材について行なった実験によれば，低温（−2°〜−20°C）における凍結生材の熱膨張率は，上述の諸論文に発表された値に比べて遙かに大きい値であった（Appendix IV 参照）。すなわち

α：　$0.56\sim1.97\times10^{-4}$

β：　$1.25\sim3.64\times10^{-4}$

今，

$$\alpha = 1.3\times10^{-4} \qquad \beta = 2.6\times10^{-4}$$

とすれば

$$b = 1.3\times10^{-4}$$

となり，実測された復張率 k にかなり近い値になる。

本節においては，凍裂の発生に関与すると考えられる外部条件としての樹幹（或は円板）温度の変化によって，その放射方向の割れ目幅の変化する事実について述べた。もし，樹幹に，このような割れ目がなければ，樹幹の各部にその温度分布に応じた応力成分が発生しなければならない。われわれの観察する凍裂樹幹は，低温において，その外周部に放射方向の割れ目を持つ樹幹であるから，若し，かような樹幹に割れ目がなかったとすれば，その外周部に引張応力が働いている筈である（これは，一般に水喰材樹幹の t_0 が著しく上昇する事実によっても証明される）。本節1の観測結果によれば，凍裂幅の変化は，気温変化との間にかなり高い相関をもっているから，樹幹外周部の引張応力は，気温の低下，とくに急激な低温の来襲によって大きくなるものと考えなければならない。この事実は，円板についておこなった分析的な復張と低温との関係からも当然演繹できるところであるが，樹幹内の応力を考える場合には，復張の消滅する温度の存在することにとくに注意しなければならない。上に述べた円板の復張の消滅温度 t_0 においては，円板を外方から内方に序々に鋸断する際，その如何なる段階においてもいわゆる復張が全く現われないとは云えない。この点についての系統的な実験を行なうことはできなかったが，一般に，辺材を

* 生材丸太が高温におかれると，円周方向に膨張し，半径方向に収縮するらしいと述べている。

完全に切り込むまでは t_0 においては復張があまり現われず，切り込みの途中で多少(+)或は(−)の復張が円板の外周部で現われ，完全に髄心に達した直後には略々はじめの頃の復張量すなわち略々(0)に合致する傾向がみられた。

第5章 トドマツ樹幹の凍裂の発生機構

第1節 トドマツ樹幹の水喰材

この論文の，今までの記述においては，水喰材を，単に水喰材という一つの概念で一括し，その量的表示にも肉眼的に識別される面積を以ておこなってきた。また，あるいは，第4章第1節におけるように，水喰材部を，その温度変化という見掛上の現象をとおして，樹幹の外部からの観測によって認識してきたのである。そこで，以下においては，水喰材そのものの質的な面を凍裂の発生ということに結びつけて考察してみよう。

トドマツの正常な心材は30〜50%の含水率を示し，含水率100〜200%の辺材部と明らかな対比をなすものである。しかるに，しばしば，正常値に比べて異常に高い含水率の心材部が出現することがあり，これがいわゆる水喰材である。水喰材の内部には，大小様々な割れ目が含まれている。この異常に高い含水率と，多くの割れ目の存在が，一般的には水喰材の特質をなすものであり，すでに，前章において述べたトドマツの凍裂と水喰材の関係を，この水喰材の特質にさかのぼって追求するのがこれからの考察の目的である。

1. 水喰材の分布とその含水率

トドマツの水喰材の分布，その含水率の一般的なことについては，すでに文献33に詳述した。ここでは，凍裂の発生機構との関連の下に水喰材について記述を進めることにする。

トドマツ，エゾマツなどの辺材や水喰材部のような含水率の高い材部は，低温で凍結するといちじるしく色相が変って，淡い，ないしは暗い褐色になる。これに対し，含水率の低い材部すなわち正常心材の色相は低温においても変らない。したがって低温においては，材の高含水率部と低含水率部の色相の違いが著しくなり，肉眼的に両者を区別できるようになる。もちろん両者の区別は，普通の写真によっても明らかに認められる[33]。もっとも，この区別は，必らずしも精密なものではなく，材の中の含水率差の大小，材の固有の色相，水喰材部の着色などによって，その量的表示の正確度が影響を受ける。とに角，われわれは，低温において，辺材や水喰材が，このような色相を呈することによって，それら自体の存在していること，および，それらの水分が凍結していること[33]を確認することができる。極く一般的にいって，凍結した際，肉眼を以てその存在を認識しうる，水喰材の限界的な含水率は，おおむね100%前後 (80〜120%) であった。

樹幹内部の水喰材の分布は甚だしく複雑なものであり，その含水率分布を完全に把握するには，測定的方法としては，水喰材全部を立体的に小材片に細分し，これら個々の含水率を測定整理しなければならない。また，肉眼的に観察する方法としては，たとえば，1本の丸太ならば，これから“ダビキ”の方法で多数の挽板を製材し，それらの板の表面に表われる水喰材の状態から，丸太内部の水喰材の分布を立体的に考察することができる。Photo 17～20は，このような目的で凍裂丸太および非凍裂丸太から板を製材し，その板の一部を製材した順序に展開した状態を示す。Photo 17の原木は，小さな死節の多い丸太で，凍裂はなかったが，元口断面には著しい水喰材があらわれていた。しかし，末口には，ほとんど全くあらわれていなかった。製材の結果，この丸太の内部には，死節に連なる多くの水喰材の存在することが明らかになった。黒線で囲まれた（これは，便宜上，チョークで水喰材部を縁取りしたものである）多くの不規則な形の図形が水喰材である。この丸太の中には，あまり大きな拡がりを持たない，それぞれに独立した多くの水喰材が含まれていた。この水喰は典型的な枝水喰の一例である。Photo 19は，凍裂木樹幹の基幹部丸太を製材し，展開したものであって，この場合，水喰材は丸太の中軸部に著しく集中しており，大形の割れ目が比較的に多く存在し，氷を充していた。この丸太の凍裂は非常に古いものであり（1875年にはじめて凍裂），伐採した時にもなお裂開しており，その水分分布は水喰材の肉眼的観察および，凍裂の位置などから推論するに，文献33の，凍裂木No. 2*のそれと同類のものと考えられる。Photo 19に示す板の原木には，その元口から約1.5 mの深さまで凍裂が入っており，それより上部，すなわち末口方向には，あまり欠点のない丸太であった。すなわち，1本の原木丸太の，凍裂のある部分とない部分の，水喰材分布の状態がよく写真にあらわれている。

次に測定的方法によって調べた，凍裂樹幹内の含水率分布について簡単に述べる。測定供験木は，北大両竜演習林産のトドマツで，胸高直径35 cm，樹高25 m，樹齢約170年であった。第1の凍裂は，地上高約50 cmに始まって，310 cmに終り，第2の凍裂は670 cmに始まって，750 cmに終り，第3の凍裂は800 cmに始まり，約12 mに終る。地上高13 m附近で樹幹は2本に分れるが，この分岐点直下の12～13 mの間の樹幹部は，癒傷部，腐朽部，孔状部などを含み，複雑極まる形態を示す（Photo 31～35）。この樹幹から多くの円板を切取って，それぞれの円板の含水率分布を，1.5×1.5×2 cm³（繊維方向に2 cm）のテストピースによって測定した。次に，それらの円板の写真（Photo 25など）および含水率分布測定成績の一部を示す。詳細は文献33参照のこと。

写真は，円板の凍結状態で撮影したものであり，心材中の暗色部が，肉眼的に認めら

---

* 文献33の477～480頁，第1表参照。

れる水喰材である*。

この水喰材の肉眼的分布と，測定表における含水率分布との対応はかなりよく，おおむね，含水率80% 以上の水喰材は肉眼的に確認することができた。

この凍裂木は，凍裂のある部分は勿論，ない部分にもかなり著しい水喰材を含んでおり，それぞれの円板の平均含水率および測定値の比較度数分布は Table 9 の如くである。

Table 9. An example of the distribution of moisture content in a tree trunk with frost cracks at various heights above the ground (*A. sachalinensis*).

Height above the ground (m)	Frost crack	Average moisture content of disk	Relative frequency of moisture content (%)										
			26～50	51～75	76～100	101～125	126～150	151～175	176～200	201～225	226～250	251～275	276—
1.0	With	114	19	16	8	11	9	18	15	4			
1.6	〃	128	8	23	14	11	10	7	15	9	4		
2.2	〃	153	1	8	13	15	11	11	14	20	7		
2.8	〃	152	2	8	12	14	13	11	18	18	4		
3.4	Without	139	1	14	14	16	13	10	16	13	4		
4.3	〃	138	7	12	12	16	13	11	5	12	8	1	1
5.5	〃	151		6	13	18	16	13	11	14	8	1	
6.7	With	158	2	10	7	12	14	12	15	17	12	1	
7.3	〃	153	3	7	12	16	12	11	11	15	12		
7.9	Without	143	2	7	18	14	13	13	16	12	5		

各円板の含水率度数分布は，何れも二頭的分布をなし，No. 1, No. 2 の円板では 50% 付近と，ほぼ 170% 付近に分布の極大点を持っており，かつ，この高含水率部と低含水率部との差が大きい。爾余の円板では，全般的に高い含水率を示し，100～125% 付近と 200% 付近に極大点を持つ分布を示している。No. 3 と No. 4 付近の材部は，全般的に高い含水率の材部の中に，さらに高い 200% 以上の強い水喰材部分が出現した。凍裂のない，No. 5～7 などの円板でも，依然として全般的に高含水率であるが，No. 6 の付近の材部には，含水率からみた正常心材に近い材部が幾分存在する。No. 8 には 175% 以上の高含水率の材部が多く，とくに 200% 以上の材部が凍裂のある側に集中している。No. 9 も 200% 以上の材部が割合に多い。No. 10 には，かなり著しい凍裂があって，高含水率部分が円板の中央付近に集中しているが (髄心付近は割合に低い)，その周辺には 100% 未満の材部が分布している。これより地上高を増すにつれて，水喰材部の割れ目が大きくなり，上述の如き含水率測定片でも 250% 以上の値を示す部分も出現したが，一般的にみて，高含水率

* 0°～2°C の室温中で撮影。円板表面が幾分とけはじめており，完全な凍結状態に比べて水喰材がやや判然しない。

部分が分散状，もしくは周囲状分布をなす傾向を示した。

この測定に供した凍裂樹幹では，樹幹の低い位置から，すでに，水喰材は分散的分布をなしていた。このような樹幹では，第4章1節に示したような測定はかなり困難であり，また，凍裂と水喰材との量的関係はかなり複雑なものとなろう。

水喰材の中には多くの割目があり，とくに凍裂木の場合には氷のつまっているものが多い。したがって，氷のつまった割れ目の大きさ，その分布密度と含水率測定片の大きさとの相対関係から，上述の含水率の値が変ってくるのは当然である。すなわち，氷のつまった割れ目の分布密度が大きく，或は割れ目の幅が広くて，含水率測定片の中に占める氷の容積が大きければ大きい程大きな含水率を与えることになる。現実に，$1\times1\times1\,cm^3$の試験片でも500%位の含水率を示す場合がしばしば観測される。このような値は，含水率測定片の，正常部分（割れ目を含まぬ部分）の最大含水率をはるかに越えた値である。とく

Table 10. Moisture content of disks cut from two "Todomatsu" trunks injured by frost cracks respectively (*A. sachalinensis*).

Trunk number	Height above the ground (cm)	Average moisture content of wetwood part of disk (%)	Average maximum moisture content of the wetwood part* (%)	Average sapwood moisture content (%)
No. 1	66	161	192	186
	72	172	199	137
	80	176	179	174
	90	181	213	189
	96	195	199	136
	102	143	206	159
	108	167	186	164
	115	177	162	175
	122	141	221	211
	130	139	213	171
No. 2	45	87	186	189
	55	85	192	179
	64	125	208	200
	74	146	168	146
	79	99	174	175
	85	100	186	184
	90	92	179	165
	98	95	168	175
	107	89	185	181
	115	85	191	167

* Maximum moisture content was calculated from the formula $M_{max}=\frac{1}{G_f}-0.64$

G_f: Specific gravity based upon green volume and oven dry weight of specimen.

に，枝水喰の場合には，大きな割れ目が出現することが多いから，たとえば，1 cm 立方ぐらいの大きさの氷片を取出すことも可能なわけであり，すなわち，この場合には含水率が無限大と云うことになる。しかし，一般的には，或る程度以上の大きさの水喰材全体についてみれば，その平均含水率が，その材部組織の平均最大含水率を越すことはすくない。 Table 10 に，小径凍裂木の中央部水喰材について測定した成績を掲げる。

両凍裂木における，それぞれの円板の平均含水率は，その内部に多くの割れ目を含み，その中に氷があるにもかかわらず，最大 120% および 116% で，辺材部含水率よりもかなり低い値である。また，もちろん，この材部の最大含水率より低い値であった。

すでに述べたように，割れ目の中には氷がつまっているから，このような割れ目を含む含水率測定片の示す含水率は，理論的には正常組織と氷との，容積の相対関係によって，含水率無限大を最大とする広い範囲に変化することが可能である。テストピースの正常材部の含水率がその最大含水率 (M_{max}) にあり，さらにテストピースが，氷のつまった割目を含んでいる場合には，試験片全体の含水率は，この氷の分だけ正常材部の M_{max} を超える。もし，正常材部の含水率が，M_{max} 以下であっても，テストピースに氷が含まれておれば，両者の相対関係から，ピース全体の含水率は正常材部の M_{max} を超えることもありうる。常温において，割れ目の中に自由水が存在することは，しばしば観察されるところであるが，このような場合は，割目付近の材部の含水率も高いから，そのような水喰材部が凍結した場合には，その部分の含水率はかなり高い値になり，容易に M_{max} を超えることになろう。もし，割れ目の中の水分が，凍結に際してその位置へ移動してきたものとすれば，その水分の根源が何処であるかによって，その割れ目付近の含水率が，とくにそれがその組織の M_{max} を超過するかどうかの可能性が大きく左右されることになる。その割れ目の中の水分が凍結に際し，たとえば，霜柱の生成機構における如く，他の部分から移動してきたものとすれば，その割目付近の含水率は，その移動の程度によっては大きく増大しなければならない。この水分移動の可能性は考えられるけども，それを実証することは極めて困難である。若し，割れ目の中の水が，その割れ目付近の正常材部から，凍結に際して移動したものであれば，割れ目を含むその付近の材部全体の含水率は，正常組織の M_{max} を超えることはないであろう。これに関連る事実は，極めて稀にトドマツの水喰材について観察される。すなわち，凍結した水喰材中に存在することのある，普通 1～2 年輪内の，厚い凸レンズ状の割れ目である (Fig. 15a)。

筆者の観察した幾つかの実例によれば，レンズ状の割れ目の中は透明な氷でみたされ，かつ，氷に接する材部はあきらかに年輪方向に圧縮されていた。また，圧縮された材部の色相は，周囲の水喰材部に比べて明るく，いちじるしく含水率の低い状態を呈していた。この割れ目は，水分の凍結が融解した後は，肉眼的にはほとんど認め難い細い放射方向の

線になってしまった。この場合は，割目の中の水分は，おそらく，それに接する正常組織の中から凍結に際して析出されたものと考えられる。若しそうだとすれば，この割れ目を含むテストピースの含水率は，その付近の正常組織の M_{max} を超えることはないものと考えられる。Fig. 15b は，秋材部を中心に放射方向にのびる割れ目で，トドマツの高含水率の材部が凍結する際に先ず現われる普通の割れ目で，内部は氷でみたされている。この割れ目は放射方向に発達して数年輪にわたる長い割目となる傾向がある。この場合も割目の中の水分は恐らくその周辺から凍結に際して集って来たものであろう。

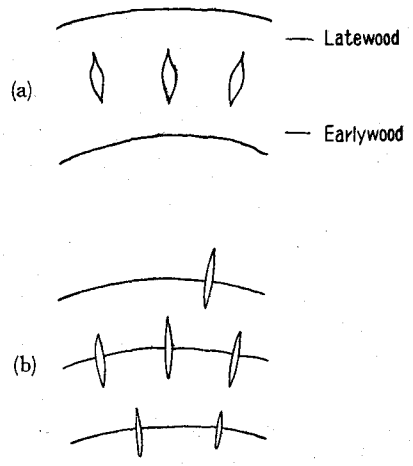


Fig. 15. Schematic drawing of small internal radial cracks packed with ice. (a) shows some paticular cracks appeared only within an annual increment of "Todomatsu" wood and (b) shows usual small cracks appeared in parts from latewood to next earlywood.

2. 水喰材の中の割れ目

トドマツの凍裂幹材部にある水喰材の内部には，普通，いろいろの形の，かつ非常に多くの割れ目が含まれている。これらの割れ目の中には，普通，冬には氷がつまっている。以下，主として1において述べた含水率分布の供試木と同じ樹幹について調べた割れ目の出現状況について述べる（Photo 25～38, 47～50 参照）。

この樹幹の地上高 0.5～3.1 m に第1の凍裂がある。この部分の樹幹の内部には，樹幹表面から内方に向う最大の割れ目，すなわち凍裂があり，さらに，多くの放射状の割れ目と周囲状の割れ目とがある。凍裂は，これらの放射状あるいは，周囲状割れの或るものと接続し，曲折して髄心方向に向う。胸高直径 10～15 cm 位の，小径被圧の凍裂木* においては，凍裂が，樹幹の中心付近まで真すぐにのびていることもあるが（Photo 23），一般的には，凍裂が真すぐに髄心にまで達することはなく，多くはこの供試木のような状態を示す（Photo 26 など）。

基幹部の放射状割れの大部分は，一般的には，その長さ** も短かく，又，幅も比較的にせまい。しかし，時には，これらの割れ目の幾つかが，著しく長くのびて辺材部に達し，さらに形成層にまで達して，傷痍組織を造成する場合がある（後述）。Photo 25 の左下部，その他の円板にみられる割れ目などがそれである。第2凍裂の附近までは，割れ目の形や大きさは，基幹部のそれとあまり変らないが，その数が非常にすくない。

---

* このような凍裂木は，北海道の天然林中のトドマツにはかなり多い。文献 32 参照。

** 樹幹横断面における放射方向の長さ。幹軸方向については後述。

樹幹の地上高を増した，第2の凍裂付近では，割れ目の数もすくなかったが，やや大きな放射状割れ，周囲状割れが目についた。第3の凍裂 (Photo 29～33) 付近では割れ目の数も多く，また，その形も大きかった。Photo 33 からもわかるように，その付近では，樹幹の内部が，凍裂，放射状割れ，周囲状割れなどが相接続して網目のように割れていた。Photo 33 は円板の凍結状態で撮影したものであるが，この付近から取った円板は，後に常温にもどしたところ，もはや円板としては，凍裂の割れ目を完全に閉じることができず，とくに中央部はバラバラにくずれてしまった。一般に，樹幹の上の方の凍裂，とくに幹の折損部，二又，孔状部などの直下にある凍裂には，このような内部形態をもつのが多い。そして著しい内部割れのために，凍結が融けた後も，凍裂の割れ目を完全に閉じることができないままに，形成層によって造成される新しい組織が，凍裂の割れ目の上に橋をかけるように毎年押し出される傾向がある。このため，凍裂の内方には，幅広い，放射方向の割れ目が残り (Photo 29, 文献 33 の Fig. 30) 或は，周囲状の巨大な割れを残すようになる。新しい，1年輪の組織によって，凍裂の割れ目の一番外側が，完全に癒着された場合，これらの巨大な割れ目，周囲状内部割れなどの中に，夏の間は，水がみたされ，冬には，巨大な氷の塊がみられることがある。

凍裂部樹幹に内在する多くの割れ目の中には氷がつまっているのが普通である。Photo 41～50 にその状態を示す。

次に割れ目の形について述べる。周囲状割れは，普通，年輪に沿って起り，Fig. 50 のように，年輪界から画然と分離する場合が多い。この場合，あきらかに傷痍樹脂溝列に沿って材部の分離が起ることがしばしば観察される。周囲状割れが，年輪の境界部以外において起ることも，もちろん観察され，また，幾つかの年輪にわたって，稍斜めにのびている場合もある。放射状割れは，それぞれ単独に，髄線方向に，ある程長くのびているのが普通である。しかし，1年輪，2年輪ないしは数年輪にわたる程度の短い割れ目が，順次，右に，あるいは左にずれて接続し，階段的に外方にのびる割れ目も，しばしば出現する (Photo 47)。また，既述のように，極めて稀に，1～2年輪内の凸レンズ状の割れ目が出現することがある。

放射状割れの大きさや，その分布密度は，樹幹個体により，また，その部分によって大いに異なる。一般に，樹幹の低い部分には，その長さ，幅ともに，比較的小さいものが多い (Photo 25, 26 など)。Table 11 の A, B は，地上高約 2 m から切取った，凍裂のある円板 (Photo 45 に略同じ) の放射状割れの大きさについての測定結果を示すものである。測定対象面積は 100 cm^2 (10×10) で，この面積の中に，それぞれ，割れ目の形の全体が完全に含まれていた 269 個の放射状割れについての測定成績である。

表の A には，これらの割れ目の放射方向の長さ，表 B には，これらの幅の最大値について

Table 11. Size of internal cracks appeared in wetwood of trunks. (*A. sachalinensis*).

A) Length of radial cracks at a butt end (cross sectional surface) of a tree trunk. (cf. photo 45).

Length (mm)	Frequency
2	19
4	28
6	30
8	38
10	40
12	33
14	25
16	18
18	10
20	10
22	5
24	3
26	4
28	3
30	1
32	0
34	1
36	1
38	0
40	1

B) Maximum values of width of the same cracks as those in A.

Width (mm)	Frequency
0.1	17
0.2	28
0.3	44
0.4	59
0.5	50
0.6	33
0.7	17
0.8	11
0.9	0
1.0	6
1.1	0
1.2	2
1.3	0
1.4	0
1.5	3

C) Length of internal cracks on a sawn board surface, in longitudinal direction of fiber; a case of a board from a log having wetwood but not frost crack.

Length (cm)	Frequency
1	10
2	31
3	40
4	59
5	65
6	45
7	50
8	38
9	34
10	32
11	28
12	14
13	13
14	11
15	6
16	5
17	5
18	5

D) Length of internal cracks on a sawn board surface, in londitudinal direction of fiber; a case of a board from a log having a frost crack.

Length (mm)	Frequency
1～5	60
6～10	100
11～15	71
16～20	35
21～25	20
26～30	8
31～35	7
36～40	3
41～45	5
46～50	1
51～100	21
101～150	9
151—	2

の測定結果を示す。幅の最大値が0.5 mmに満たない割れ目は，この測定の対象から除いてある。

放射状割れの，樹幹の軸方向の長さも，非常に広い範囲の値を示す。この場合，一般的に云えることは，その割れ目が含まれている水喰材の，幹軸方向の長さと，割れ目の長さの間に関係のあることで，たとえば，Photo 18 写真のような水喰材中の割れは一般に短かく，Photo 19 のような場合（凍裂木ではこの状態のもの多し）は，全体的に長いが，とくに前者に比べて，甚だしく長いものが，少数ながら出現する。次に放射方向の割れの，幹軸方向の長さの測定結果を Table 11-C, Table 11-D に掲げる。

Table 11-C は，ほぼ，Photo 17 と同様な，凍裂のない板の，長さ1 mの間に出現した数個の水喰材部について，その放射状割れの長さを測定した値を示し，Table 11-D は，Photo 21 とほぼ同様な板（凍裂あり）について測定した値を示す。

冬が去って，樹幹の温度が上ると，水喰材の凍結は融解し，一般に凍裂の割れ目は閉じる。この状態，すなわち，常温においては，凍裂樹幹内部の割れ目はどのような状態を呈するものであろうか。常温において，凍裂木樹幹の凍裂部（内部に水喰材の存在することが当然推論される）から円板を切取ると，その横断面には，通常，比較的少数の，幅の広い，放射状割れや周囲状割れがみられるが，一般に凍結状態の凍裂木内部にみられるような，おびただしい数の，小さな放射状割れはあまり見えず，全体としては割れ目の非常にすくない様相を示す。これは，常温における凍裂木内部の割れ目の大部分は，冬にその中に含まれていた氷が融け，肉眼的には，その存在を認め難い位の幅になっていることを示すものと考えられる*。事実，冬に，凍結し，凍裂の割れ目が開いている樹幹から切取った円板には，多くの割れ目が含まれているが，この円板をあたためて常温にもどすと凍結状態で認められた割れ目，とくに，その幅のせまいものは，ほとんどそれを肉眼を以ては認めることができなくなる。このことは，製材した板についてもいえることである。凍結状態で，凍裂丸太から製材した板の板目面には多くの割れ目が認められるが，常温で，凍裂部分から製材した板では，割れ目を肉眼的に識別することはかなり困難で，著しい水喰材に限り，その色調から，存在が判定できる程度である。しかし，このような水喰材部に繊維に直角方向の曲げの力を働かせると，いちじるしく弱く，かつ，曲げることによって，小さな割れ目が多く見えるようになる。また，著しい水喰材のある原木から製材した板を乾燥すると，水喰材部分に集中的に割れ目が現われてくる。この割れ目は，板の表面に分布する表面割れ (check) とは明らかに異るものであり，このことは，水喰材中の割れ目が，常温では著しくその幅がせまくなり，見えにくい状態になっていることを示すものである。（文献33 の Photo 35 は，凍裂木から木取った水喰材部の，常温，未乾燥の状態を

---

* 長い，幅広の放射状割れ，周囲状割れについては別である。

示し，Photo 36 は，乾燥状態を示すものである）。

第2節　水喰材の凍結と樹幹内圧

すでに述べたように，凍裂が発生するためには，その樹幹部分の内部に著しい水喰材が存在し，その水分が凍っていなければならない。水喰材の分布，その含水率，おそらくは，氷を含んだ割目の量とその分布などによって，樹幹を凍裂させる原因の程度に相違があるものと考えられる。さきに述べた低温室での実験に示されるように，樹幹内の水喰材の凍結がはじまる頃から凍裂の割れ目が開きはじめ，辺材温度が低温室温まで下り丸太の中の温度分布としては，その勾配の最大の状態を通過してしまってからもなお，凍裂幅の著しい増大が続き，水喰材の凍結終了によって，凍裂幅の増大が止った事実は，水喰材部の凍結が，この丸太材の内圧として働らくものであることを示している。この圧は，水喰材部の単なる凍結膨脹によって起る内圧と考えられ，換言すれば，水喰材部が凍結しさえすれば，その丸太内部に発生する力であると考えられる。トドマツ生材樹幹の水喰材の凍結温度は，筆者の実験によれば −1℃ より高い値を持っており，凍結に先行する過冷却が破れれば凍結がはじまり，そして約 −1℃ 以下の温度が続きさえすれば，凍結が進行するから，丸太の内部には内圧が発生することになろう。したがって，もし，すでに凍裂があるような場合には，それは再び割裂する筈である。次の実験はこの事実を証明している。さきに述べた凍裂丸太とほぼ同じような凍裂丸太（長さ約 1 m）2 本を冬に伐採し（凍裂は開いており，割れ目の幅は凍裂の長さの中央付近で，それぞれ 4 mm，6 mm。丸太温度約 −5℃ における値），それを常温の室内に保存して凍結を解かし，割目が完全に閉じた後，屋外の雪中に約 4 日間埋めておいた。丸太の付近の雪の温度は −2°～−5℃ の間で変化した。その結果，凍裂は丸太の中心付近の温度約 −3℃ において約 3 mm 及び 5 mm の幅に裂開していた。水喰材のある円板の復張現象は正常円板のそれとはかなり違って複雑なものであるが，今これを正常円板としての性質と，水喰材凍結のための性質とに一応分離して考えてみる。すると，水喰材円板が一般的に示すところの，正常円板の t_0（復張消滅温度）における負の復張は，水喰材凍結のための内圧にもとづくものと看做すことができる。正常円板の t_0 における，水喰材円板の示す負の復張量の大きさは，実験では円板によるバラツキが大きく，はっきりした傾向が出なかったが，おおむね，水喰材量の大きさに関連する傾向がみられた。これを凍裂のある円板についてみれば，正常円板の t_0 では，いずれも負の復張置を示した。

さきに述べた，Fig. 1～3 などの，凍裂幅と水喰材量の関係の調査は，おおむね円板温度 −5°～−7℃ の範囲でおこなったものであるが，もしこれを，たとえば −10℃ でおこなったとしても，定性的には Fig. 1～3 に掲げたものと同じ傾向があらわれるものと考えら

れる。とに角，$-1°\sim t_0$ (正常円板に対する値) において，温度分布の均当な樹幹の凍裂が或る幅をもつ割れ目として存在することは，水喰材の凍結による内圧のあることを示すものであり，また，任意の温度 t_i (但し$-1\sim t_0$℃) におけるその割れ目の広さは，主として，水喰材量に関連するものと考えるべきである。すなわち，この関係を模式的に図示すれば，Fig. 16 の如くになる (下の斜線は正常円板，上は水喰円板の場合)。

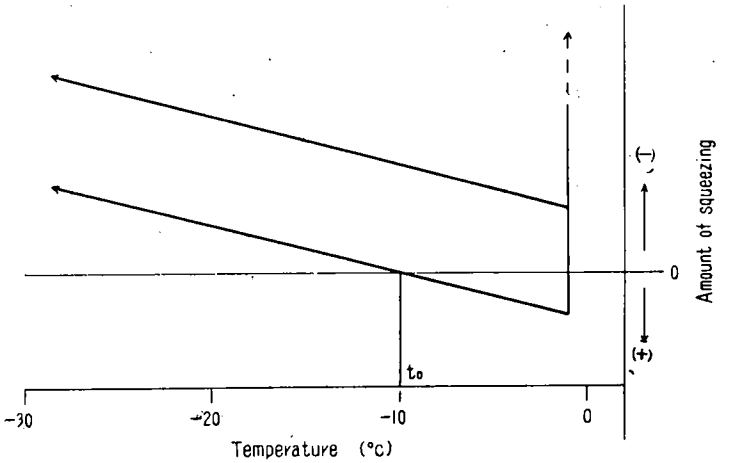


Fig. 16. Effect of freezing of wetwood in a disk upon the amount of its squeezing (*A. sachalinensis*).

このような内圧は如何にして発生するのであろうか。第1節でみたように，凍裂材内部の水喰材中には，氷のつまった割れ目があり，それを含む含水率測定片の含水率が，計算的に求められるところのその正常組織の最大含水率を超える場合がしばしば観測される。また時には，このような値がテストピースの数個あるいはそれ以上連続して出現する場合もある。すくなくとも，このような材部については，単純に考えて，その水分が樹幹内において凍結する際，部分的な，一種の膨張圧が作用するものと看做される。一般に材片の大きさを，より大きくとり (例えば，第1節で述べたテストピースの10個分とか数十個分，或いはそれ以上など)，その平均含水率を測定すると，その値は，その部分の正常材に対する M_{max} を超過することは現実にはあまりない。たとえば，Appendix V (詳しくは文献33) に示した実測値がそのことを示している。さて，Table 10 に示した凍裂丸太の場合には，その内部の水喰材部の平均含水率は，その M_{max} に比べてかなり低いにかかわらず，現実に凍裂は存在しており，その形態が Fig. 6, 7 などの場合の凍裂丸太に酷似しているから，その水喰材部の凍結によって，その丸太の内部に膨脹圧を生じ，それが凍裂幅に影響しているものと考えられる。このような場合の膨張圧の根源は何であろうか。

ここで注意すべきは，正常材部の含水率とは無関係に，割れ目の中の氷がもつ，内圧発生に対する作用である。これを調べる一つの方法は，凍裂円板について，水喰材部の割

れ目の中の氷を除去し，それが凍裂幅に及ぼす影響を観測することである。

割れ目の中の氷と，凍裂幅の間に最も直接的な関係がみられたのは，Photo 28 の円板の凍裂と，この内方にある周囲状割れの場合であった。写真に示した円板付近の樹幹部から切取った厚さ 1 cm の円板 5 枚についての測定では次のような結果が得られた。

	平均	最小	最大
氷を除去したための凍裂幅の減少 (mm)	2.13	1.74	2.35

すなわち，目廻りの中の氷を除去しただけで，何れも約 2 mm 位ずつ割れ目幅が減小し，完全に割れ目を閉じてしまった。さらに極端なのは Photo 46 に示す如き円板の場合で，凍裂の割れ目の内方の大きな氷塊を取除いただけで，割れ目の幅は 4～5 mm の縮小をみた。Table 12 は，さらに，Photo 30 に示す円板付近の樹幹について，その内部の氷 (凍裂の割れ目そのものの内方にある氷，およびその他の内部割れの氷) を除いた場合の凍裂幅の変化を測定した結果である。

Table 12. Effect of eliminating of the ice packed in the internal cracks of disks upon the widths of the frost cracks located on the disks (*A. sachalinensis*).

Log number	Disk number	Width of frost cracks (mm)	Decrease of the frost crack's width (mm)	
			After eliminating ice located closely in inside of the frost crack	Do. from some other internal cracks
I	1	7.1	2.46	0.34
	2	8.5	1.98	0.51
	3	8.1	2.50	0.63
	4	6.9	3.45	0.24
	5	8.0	2.03	0.31
II	1	5.2	1.01	0.59
	2	8.1	0.98	0.78
	3	6.0	1.51	0.98
	4	5.5	1.23	0.35
	5	6.5	0.81	1.25

これに対し，たとえば Photo 26 その他のような，水喰材が比較的中央部に集合し，かつ割れ目が小さい場合には，割れ目の中の氷の除去そのものが完全には行なわれ難く，測定操作中の温度変化，人為的に加えられる外力の作用などで確実な両者の関係を把握することが困難であった。つぎに，比較的簡単に氷を除くことができたオヒョウについての測定の一例を参考に Fig. 17 に掲げる。測定開始の 1 時間後から氷を除く操作をはじめ約 30 分で終了，2 時間後には平均約 2.5 mm の減小をみた。

SCHÜPLER[58]* は，腐朽しかけた樹幹の髄心付近によくみられる水分の凍結によって

* 277 頁参照。

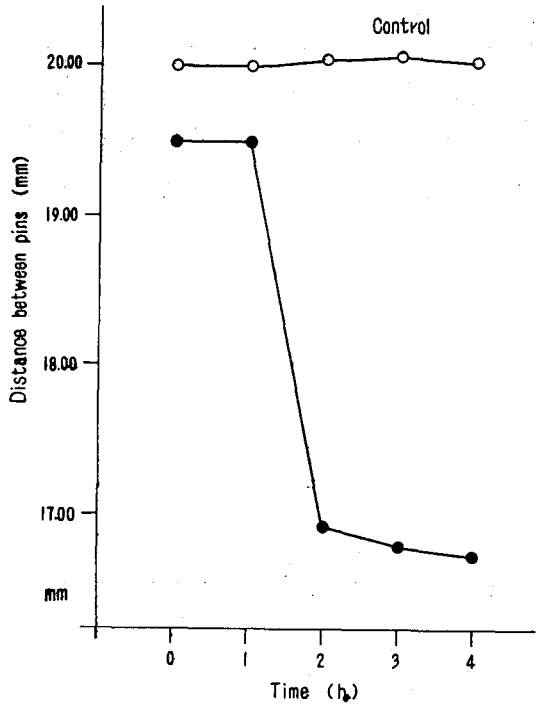


Fig. 17. Effect of eliminating of packed-ice from internal cracks in disk on the width of frost crack of the disk. Ice was begun to remove after one hour from the beginning of the test (*Ulmus laciniata*).

凍裂が発生すると述べている。また，ALERS[1]* は，樹幹の凍結に際して，樹液はだんだん中の方へ押し込められてゆき，結局，そのために内圧が発生し，凍裂が起ると述べ，これをめぐって1880年代に論議がおこなわれた。筆者の，上に述べた考察とここに述べた人達の所説とは，その内容において異なるところが多いが，樹幹内部で水分が凍結し，そのために内圧を発生するという点については共通する。

第3節 凍裂の発生に対する樹幹の内部割れの意義

凍裂樹幹についての観察測定の結果，水喰材の凍結が樹幹内圧として働らきうること，また，この内圧，すくなくともその一部は水喰材に含まれている割れ目の中の氷に基因するものであることが明らかになった。このことが，すなわち，氷を含んだ割れ目が凍裂に対してもつ一つの重要な意味を示すものである。

樹幹の内部割れが，凍裂に対してもつ，他の重要な意義は，材料力学的にみた，一つの物体としての樹幹の性質を変化させることである。いうまでもなく，樹幹の内部割れは，

* 279頁参照。

その樹幹内部の，繊維方向に生じた完全な破壊箇所である。したがって，常温においては，樹幹内の水喰材部は，極端な場合には，繊維に直角方向の結合が完全に絶たれて，バラバラになった小材片の集合*したものであり，また，軽度の場合でも，正常木材に比べて，繊維に直角方向の引張力に対する弾性，強度を，かなり低下した材部であるということができる。しかし，凍裂樹幹についての観察によれば，水喰材中のこれらの割れ目は，その多くが氷でみたされている。したがって，冬季は，分離された材部が氷によって凝結され，その水喰材部全体が，一つの固まった物体となることが多く，常温に比べては，かなり大きな弾性，強度を持っている。しかし，その強度や弾性の増大する程度は，分離した材部が氷によって凝結される程度に関するものであり，従って強さの増大の，いろいろの段階が存在しうることになる。水喰材中の割れ目の，このような性質が，全体としての樹幹に如何なる影響を及ぼすかは，割れ目の形，大きさ，集合状態，分布，含水率ならびに凍結状態などによって異なり，したがって，それが凍裂に対してもつ意義も複雑に変化するものと考えられる。一般的にいえることは，冬季間においても，樹幹の強さや弾性を弱めるということであろう。

凍裂は，樹幹に生じた放射方向の縦長い割れ目であるから，樹幹の，このような破壊に対して，とくに大きな意義を持つ樹幹内の割れ目は，いうまでもなく放射状割れで，とくに樹幹の外周部に存在しているものであろう。たとえば，Photo 36～38 その他にみられる如きものである。このような割れ目のある樹幹の外周部に，円周方向の引張力が働いた場合，樹幹の他の部分に割れ目がなければ，この割れ目の外方の，残された材部に大きなストレスが発生し，すなわち，はじめに定義したような凍裂の発生する可能性が大となる**。これらの割れ目が短かくなり，また，その位置が樹幹の内方へ移るにしたがって，割れ目がもつ，凍裂に対する材の弱点としての意味が小さくなってゆく。さてこのような割れ目は，上述のように，現実の凍裂樹幹や水喰樹幹にはしばしば出現する。Photo 36～38 は，いずれも既述*** の凍裂樹幹に出現したもので，円板の一部に大きな凍裂があった。これらより短いが同類の割れ目は，Photo 25, 30, 31, 32 などに多くみることができる。しかして，これらの割れ目の形，大きさ，一円板内における分布，数などは複雑なものであるからそれらが，凍裂に対してもつ実際の意味もまた極めて複雑なものと云うべきであろう。

一体，立木当時すでに内在する樹幹の各種の内部割れは如何にして発生するものなの

---

* 322 頁参照。

** これは，割れ目の存在による有効断面の減小，および割れ目の尖端付近における応力集中という二重の理由による。応力集中の理論は材料力学においてよく研究されており，切欠部の形が単純な場合について，集中係数を求めることができる（例えば74)。水喰材中の放射状割れの尖端は非常に尖鋭であるから，その理論の適用はむずかしいが，もしその理論を拡大して考えれば，その応力集中係数は極めて大きいものとなる。

*** 317 頁下から 10 行目

であろうか。多くの文献[61),75),11),その他]がこの問題を扱っているが，その成因は単純なものではなく，幾多の内部条件，外部条件の連合，相互作用によって発生するものと考えられる。水喰材中の多くの割れ目についても，その成因の明らかなことはわからないが，LAGERBERG[49]は，細胞組織の中の水が凍る時に，たとえば，細胞と細胞の間に小さな割れ目がまず生じ，これが大きな割れ目の根基になるのではないか，また，このような割れ目が組織の中にできることによって，さらに水の滲透が容易におこなわれるようになり，水分量が増し，割れ目が発達するのではないかと述べている。また，MÜLLER-THURGAU[55]は，凍結の最初の氷の結晶は細胞膜の表面，あるいは細胞間隙における膜表面において発生する。しかる後，氷は細胞膜，細胞液，原形質などから水を抽出して発達すると述べているが，これをLAGERBERGの説と併せ考えれば，組織中の割れ目の発達は一応説明できる。また，筆者もすでに述べたように，割れ目の中の氷は，その付近の材部に対して側圧として働らく場合が多いから，このような凍結・融解の繰返しが，水喰材中の割れ目の発達に寄与していることは当然と考えられる。飽水状態のカラマツ，トドマツ材などを凍結させると放射方向の割れ目が発生し，内部に氷をみたしている。この割れ目は凍結融解の繰返しによって発達することが実験的にたしかめられた*。

トドマツの辺材には，普通，水喰材部にみられるような割れ目は全くないが，Photo 36～38などに示したように，見掛上は，水喰材中の割れ目の一部が，長く外周方向にのびたような形で辺材部に達しているものがある。その中には形成層にまで達し（しかし樹皮表面には現われない），明らかな傷痍組織を形成しているものもある。この後者をR. HARTIG[24]は内部凍裂 Innere Frostspalten と呼び，その成因についてはすでに述べたR. HARTIG[25]の凍裂発生に対する見解**を適用し，この割れ目が樹幹表面に現われないのは，樹皮と辺材部の材質的相異に主として基因するものとしている。樹幹材部の外周部にまで達する割れ目は，上述の如く，円周方向のストレスに対する樹幹の弱点となるものであるが，その生成の過程において，すでに，樹幹の円周方向のストレスの影響を受けているものと考えなければならない。しかし，辺材の途中で止っている割れ目がしばしばみられるから，これらすべてが，単なる温度差（外周部を低温側とする）にもとづく応力によってできたものとはいえず，割れ目内部の水分凍結による内生的な発達過程をも考うべきものであろう。何れにしても，これらの割れ目については，冬季の低温と，水喰材中の割れ目水分の凍結その他の相加的な作用が考えられなければならない。もし，冬の低温の来襲によって起る樹幹円周方向のストレスの全部あるいは大部分が，このような放射方向の，一つあるいは少数の割れ目に集中したとすれば，その割れ目は樹幹の外周部にまで達し，われわれが

---

*　未刊。

**　280頁参照。

“凍裂”として外部から認識している形のものが発生する可能性が生ずるであろう。

一樹幹の，ほぼ同じ高さの材部に，二つ以上数個の凍裂が同時に存在することがある（Photo 31, 41, 42 など）。また，材部最外周に達しながら，樹皮の表面にまでは現われない小さな凍裂のよう割れ目，すなわち，HARTIG のいう Innere Frostspalten が数多く，ときには一つの円板に数十個も出現することがある。しかも，Photo 41, 42, 44 にその一部がみられるように，大きな凍裂のある位置に近接して，このような小さな，樹皮直下の，形成層に達する或いは一時達したことのある割れ目が多数出現することもある。これらの，相接近して出現する数多くの凍裂，あるいは凍裂類似の割れ目の生成機構は，これを急激な温度降下にもとづく樹幹外周部のストレスだけから説明することは無理で，これらの多くの割れ目，とくに樹皮下の小さな割れ目については，樹幹の内部的条件による内生的な面を重視すべきであろう。この際，その辺材部の含水率が大きな意味を持つものと考えられる。

第4節　正常樹幹に対する熱応力の近似計算

すでに述べたように，KOLLMANN[43] は，凍裂の原因は，急激な気温低下によって樹幹外周部に発生する引張応力であるとの考えから，低温において樹幹の外周部を放射方向に割裂せしめる条件，すなわち温度勾配を近似的に計算した。すなわち，温度 t(℃) の樹幹が急激に，温度 t' の空気によって冷却されるものとすれば，樹幹の外周部は $t-t'$ の温度変化を受ける。従って，この温度変化に相当する，外周部円周方向の収縮量 $-\Delta U$ は

$$-\Delta U = \beta \cdot U(t-t') = 2\beta \cdot \pi \cdot r(t-t') \qquad (1)$$

ここに β は木材の年輪方向の線熱膨脹率である。極めて急激な温度変化を受けたため，樹幹内部の温度変化，したがって内部の材の収縮が全く起らないものとすれば，樹幹の外周部に $-\Delta U$ に対応する応力 (Kältespannungen) が生じなければならない。この考えを弾性論的に扱えば，

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \varepsilon E \qquad (2)$$

ここに，ε は歪で，E はヤング率，(1) と (2) から

$$\sigma = \beta \cdot E(t-t') \qquad (3)$$

ここで KOLLMANN は，β: 0.00005，$\sigma_{z\perp}$: 30 kg/cm²，$E_{\perp}$: 15000 kg/cm² とし，この仮定のもとで，$t-t'=40$℃ と計算し，樹幹が，常温から急激に −30℃ 附近の低温に曝露された場合，その外周部が放射方向に割裂する危険があると述べている。

すでに述べたように，このような計算は，本来，木材の異方性に立脚しておこなわれ

なければならない筈であるが，そのような解を求め，数値を計算することはなお困難であって，等方性理論からの概算に終ることは止むをえない。しかし，KOLLMANNの計算は極めて大ざっぱな仮定の上に立っている。すなわち，急激な低温の来襲により，外周の或る厚さのみが気温tと同温度になるが，内層の温度降下は考えられていない。また，樹幹の外層部が収縮する場合，それに伴って起る半径方向の収縮が考慮されず，$-\Delta U$の全量がEを通じて歪応力に換算されているが，実際はそうではないであろう。

さて，現実に凍裂の発生する樹幹は，トドマツではその内部に水喰材を包蔵し，材料力学的には極めて複雑な性質を持っている。多くの割れ目，すなわち一種の破壊部分がその内部に不規則に分布しているが，そのため正確な弾性論的取扱いをすることは不可能であり，或いは無意味であろう。しかし，冬には，多くの場合，割れ目の中に氷がつまっており，そのため，氷によって凝結された水喰材部は，一応一つの連続体をなしているものと考えることができるから，このような凍結樹幹に対しては，熱応力の概算を試みることは可能であろう。

樹幹を無限長の円筒と考えれば，その熱応力は円板の熱応力の問題から考察することができる。そこで，近似的に等方弾性体の考え方に従い，次の式によって[74]，急激な温度降下の際に発生する円周方向のストレス(σ_θ)を計算してみる。

$$\sigma_\theta = \frac{(1-\mu)\alpha E}{1-2\mu}\left(-T+\frac{1}{R^2}\int_0^R Trdr+\frac{1}{r^2}\int_0^r Trdr\right) \qquad (1)$$

これは，温度が半径方向rのみの函数なる場合の等質等方円板の，任意のrの位置における円周方向のストレスを与える式である。式中，

μ：ポアソン比

E：ヤング率

T：元温度から測った半径rの位置の温度

R：円板の半径

r：円板内の任意点の半径

α：線熱膨脹率

式の括孤内は，円板全体の平均温度と半径rの内方部分円板の平均温度との和の1/2と，半径rなる点の，元温度から測った温度Tとの差を示している。すでに定義したような凍裂の発生については$r=R$におけるσ_θの値が問題であるから，$r=R$，また，常数項

$$\frac{(1-\mu)\alpha E}{1-2\mu} = K \qquad (2)$$

とすれば，

$$\sigma_\theta = K\left(-T+\frac{2}{R^2}\int_0^R Trdr\right) \qquad (3)$$

この積分項は，円板の平均温度である。常数 K を求めるために一応，

μ：　−0.35（KOLLMANN[42] による）

α：　0.0002（ここでは一応円周方向の膨張係数をとる。石田（Appendix IV）による）。なお KOLLMANN は上述の計算においては β: 0.00005 を用いた。

E：　5000 kg/cm² (E_t とする。トドマツの低温における E_t の実験値なきも，文献 43, 44, 71, 56, 20 などを参照）

とすれば，

$$K \fallingdotseq 0.8 \qquad (4)$$

$T=f(r)$ は，平均温度（温度勾配ほとんどなし）−1°C の，辺材の凍結した，直径 30 cm の長さ約 90 cm のトドマツ丸太を冷却の末端効果に注意し乍ら −25°C の低温室へ急に入れた際の温度分布資料* にもとづき，これより稍々強い勾配を持つ，極めて簡単な形 $T=-\left(\frac{r}{5}\right)^3$ を与えることにする。K, T を (3) に代入して計算すれば $\sigma_\theta \fallingdotseq 13$ kg/cm²（引張り）となる。円筒に対しては常数項の形がすこし異なるが，この場合その値はほとんど変らない。

トドマツの正常生材の，円周方向の引張強さは概算において平均 23 kg/cm²（文献 42), 71), 34) などを参照）位と考えられるから，上の計算値よりは大きい。事実，前頁に述べたトドマツ丸太は割裂せず，なお −45°C の低温室へ −1°C から急激に入れた場合も材部には何らの変化も起らなかった。一般的にみて，正常材の多くのものは，このような条件では割裂しないものと判断される。しかし，一方，(1) 式常数項の中の μ, E, α などは現実の立木樹幹材では，かなり大きな変異を示すものであり，その幅を考えれば，上述の如き条件の下においても σ_θ の値がかなり大きくなる場合もありうる。反面，上の計算には，$\beta=2\times10^{-4}$ を用いたが，KOLLMANN の如く 5×10^{-5} を用いると σ_θ はそれだけ減ずる。しかも，ここに導入した T は現実の北海道の森林ではまずありえないものである。もちろん，ストレスの作用を受ける樹幹材部の性質の面からも考えなければならない。とくに，その材部に欠点，なかんづく放射状割れのある場合には，限られた正常材部に著しく高いストレスが発生することもありうるから，そのような場合には容易に割裂することもありうるであろう。

云うまでもなく，(1) 式は，等方弾性体の弾性限界内におけるものであり，凍裂のような破壊の問題は，この限界を越えた別の領域における問題であるから，本式からの数値を

---

* 低温室へ入れてから 5 分毎に温度を測定。樹皮表面付近温度が略室温になり，かつ材部外周部との差が最大であった入室後 45 分の温度差による。すなわち，

r:	0	9	13	樹皮表面（約 15 cm）
T:	−1	−7	−17	−25°C

以て，凍裂発生の可能なりや否やを速断することはできず，また，その予測もなかなかむずかしい。この問題は今後の研究にまたなければならない。

第5節　凍裂の発生機構についての考察

以上，本章に述べたところを総括すれば，トドマツの凍裂の発生機構は次の如きものとなろう。すなわち，トドマツの凍裂の発生する樹幹は，その内部に水喰材を含んでおり，したがって，ここでまず，正常樹幹と一線を画することができる。このような樹幹に，その外周部から内方に向う割れ目，すなわち凍裂を発生せしめるストレスの主因は，外部的には，強い低温による樹幹の温度降下，とくに低温における急激な温度降下による樹幹外周部の収縮であり，内部的には水喰材水分の凍結にもとづく膨張（水喰材という材部の集合体の膨張，あるいは個々の割れ目の中の水の凍結にもとづく細微な部分の膨張）である。一方，水喰材のある樹幹は正常樹幹に比べて著しくその材料力学的特性が変化し，とくにその内部に含まれている割れ目の性状分布によっては，外周部の円周方向の引張応力に対する抵抗を減ずる。さらに，以上を簡約すれば，外部条件（低温，急激な温度降下，その他）および内部条件（水喰材の凍結）によって樹幹内部にストレスを発生し，一方，そのストレスの作用を受ける材部強度の正常材に比べての低下が相重って，外周部における放射状割れ，すなわち凍裂を発生するに至るのであろう。トドマツの凍裂の原因が，主としてその内部の異常形態すなわち水喰材の存在（これは凍裂とは全く無関係に，凍裂の発生よりはるかに広く，高い頻度で発生する）によるものであることが明らかになったために，その発生機構に対する定性的な説明はかなり容易になったが，逆に内部条件の複雑さのために定量的な扱いをほとんど不可能にした。上来，ほとんど定性的な考察に終始したのは，主としてこのことに基因する。

トドマツの凍裂の発生機構についての以上の考察を模式的に示せば Fig. 18 の如くになる。この関係は，樹幹の水分が凍結している状態についてのみ適用できる。図では横軸に温度（円板中央部），縦軸に樹幹外周部の円周方向のストレス（$\sum_{t_t}$）をとる。このストレスは，一般的には幾つかの要素の複合からなり，

$$\sum_{t_t} = \sigma_{t_t} + \sigma_w + \sigma_g \tag{1}$$

ここに

$$\begin{cases} 0 \leqq \sigma_{t_t} \leqq \sum_{t_t} \\ 0 \leqq \sigma_w \leqq \sum_{t_t} \\ 0 \leqq \sigma_g \leqq \sum_{t_t} \end{cases} \tag{2}$$

また，$\sum_{t_t}$ は，$\sigma_{D\perp}$ から $\sigma_{Z\perp}$ の間に変化しうる。ここに

σ_{t_t}：正常円板の Klemmen にもとづくストレス。すなわち正常円板の任意温度におけ

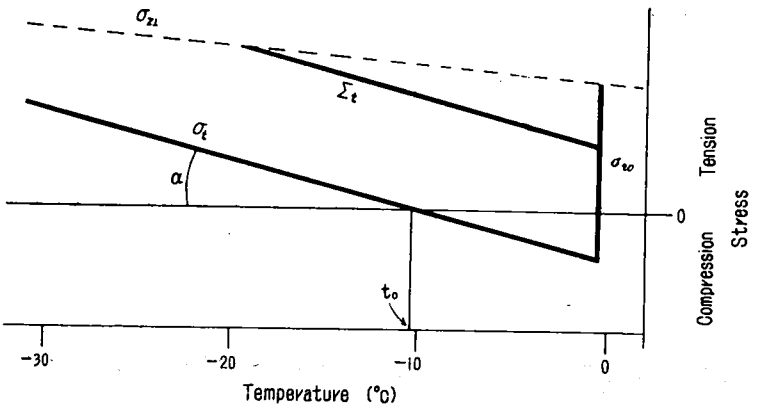


Fig. 18. A comprehensive illustration of the tangential stresses in the outer part of a tree trunk caused by low temperature (*A. sachalinensis*).
Σ_t: total tangential stress.
σ_t: tangential stress corresponding with squeezing.
$\sigma_{z\perp}$: tensile strength perpendicular to grain of green wood of a trunk.
σ_g: stress from the temperature gradient, should be considered if it occurs.

る，温度勾配のない時のストレス。水喰材円板にも近似的にこれと同様な関係があるものと考える。

σ_w：水喰材凍結にもとづくストレス

σ_g：温度勾配（r に関する）にもとづくストレス（図には示されていない）

α：σ_{t_t} の温度勾配

(1) 式の各要素は，温度，樹幹材の性状などに応じて (2) のように変動しうるから，現実の樹幹内ストレス $\sum_{t_t}$ は極めて複雑な変化を示す量となる。すなわち

正常樹幹では

$\sum_{t_t}=0$　　復張消滅点 (t_0) において温度勾配なし

$\sum_{t_t}=\sigma_{t_t}$　　任意温度，温度勾配なし

$\sum_{t_t}=\sigma_g$　　t_0 において温度勾配あり

$\sum_{t_t}=\sigma_{t_t}+\sigma_g$　　任意温度，任意温度勾配 …… (3)

水喰樹幹では

$\sum_{t_t}=\sigma_w$　　t_0 (正常材に対する) における温度勾配なき状態

$\sum_{t_t}=\sigma_w+\sigma_{t_t}$　　任意温度，温度勾配なし

$\sum_{t_t}=\sigma_w+\sigma_g$　　t_0 において温度勾配あり

$\sum_{t_t}=\sigma_w+\sigma_{t_t}+\sigma_g$　　任意温度，任意温度勾配 …… (4)

すなわち，水喰材のない正常樹幹の場合には，その外周部円周方向のストレス σ_{t_t} は，円板

の復張に関する実験から明らかなように，傾斜角αを以て温度降下に伴って圧縮(−)から引張(+)の方向に上昇，途中t_0を通過する。正常樹幹に，rに関する温度勾配が生じた場合には，それの大きさにもとづくストレスが生ずるからt_0以外の温度では

$$\sum_{t_t} = \sigma_{t_t} + \sigma_g \qquad \text{(上記式3)}$$

となる。水喰材のある樹幹の場合には，その程度によって水喰材部凍結後σ_wを生じ，温度勾配がなければ，任意温度において

$$\sum_{t_t} = \sigma_w + \sigma_{t_t}$$

となる。ここにσ_{t_t}は正常円板のものであるが，水喰円板に対して適用できるものとする。さらに，このような樹幹に温度勾配が生ずれば，σ_gが加重され，結局

$$\sum_{t_t} = \sigma_w + \sigma_{t_t} + \sigma_g \qquad \text{(上記式4)}$$

となる。さらに風の影響などを考えると付加項の増すことは当然である。

一方，樹幹材部の強さ$\sigma_{z\perp}$*（繊維に直角方向の引張強さ）は，材の健全部については，正常樹幹と水喰樹幹の間に根本的な差があるわけではない。しかし，樹幹材部全体についてみれば，その内部における割れ目の存否による有効断面の違いが両者によっていちじるしい。さらに割れ目のある場合の，応力集中の影響を考えるならば，水喰樹幹における円周方向の全応力$\sum_{t_t}$は，有効断面の減小，切欠部への集中のために局部的に大きな応力度を生ずるものと考えられる。このことを逆に云えば，水喰材の割れ目は樹幹材部の強さを著しく減小させるから，Fig. 18における$\sigma_{z\perp}$のレベルを，水喰材に対しては下げて考えなければならないことになる。したがって$\sigma_{z\perp}$もまた，水喰材に対しては，かなり広く変化する量と考えなければならない。図では$\sum_{t_t}=\sigma_{z\perp}$でその樹幹外周部が破壊すなわち凍裂が発生することになる。

現実の樹幹には，定性的にみて，このような種類の応力が，各様の大きさで存在しているものと考えなければならない。上述の外に風などの外力によるもの，温度以外の元応力によるものなどを考えなければならない。

さて，実際の凍裂は，トドマツでは水喰材のないものには発生しないから式(3)だけでは，すくなくとも北海道程度の寒さでは凍裂は発生しないといえる。水喰材樹幹にのみ凍裂が発生するということは，ストレスの面からみれば，σ_wの存在が必要だということである。しかし水喰材の場合はσ_wと，$\sigma_{z\perp}$の低下とは同時に存在するのであるから，その何れの重みがより大きいかはわからない。何れにしても水喰樹幹ではσ_wと$\sigma_{z\perp}$低下とが共存することによって樹幹外周部の割裂の可能性が相加的に高められているものと云えよう。

---

* 正常材では一般に温度低下とともにその値を増す。

第6章　結　　論

林木の凍裂の発生機構に関する研究や考察はかなり古くからおこなわれ，長い間に，これに対する多くの説が提出された。これらの或るものは，提案者の，林木の凍裂についての長い観察によって結論されたものであり，また或るものは，木材についての本来の性質についての深い知識に基づいて演繹された所論である。しかし，反面凍裂そのものについての深い観察や十分な検討がおこなわれず，単なる憶側にすぎないようなものもないではない。概して，凍裂の問題については古くから広く関心が持たれていた割合には，十分計画された研究，たとえばCASPARY[12)~17)]の研究の如きものは比較的にすくない。それぞれの時代における林学関係の権威者の発言には，広い視野からみた啓発的なものがあるけれども，地道な研究データの積み重ねを欠くために結果的には，全般的な，或いは部分的な混乱を来した場合もないとは云えない。しかし，何れにしても，かなり長い間に多くの人達の研究や検討を経た結果，第2章に述べたように，今日，次の三つの系統の説が，それぞれ多くの人達によって支持され，引用されている。すなわち，1) 主として低温における急激な温度低下に伴なう樹幹外周部の収縮説ならびにその同類，2) R.HARTIGによって唱えられた凍結による乾燥収縮説，3) 寒さの作用の外に，とくに風の機械的作用その他を考慮したBUSSEの説がこれである。尤も，多くの人達は，この中の何れか一つを支持しながらも，なお，それと協同的に，或いは促進的に作用する要因の存在を否定してはいなく，積極的に，凍裂のAnlageとしての樹幹内部の欠点の如きものを挙げている者（たとえばNEGER[57)]）もある。BUSSEの説は，寒さの外に風の機械的作用や，樹幹個体の特性をも考慮しているが，その考え方は，寒さのみで凍裂が発生するものではなく，むしろ複合的な要因を考慮すべきであるという批判から出発したものであり，史的にはこの点が重要である。

今日，最も確からしいものとされている1)の説は，木材の乾燥に際してみられる割裂現象に対する解釈を凍裂に適用したものであり，乾燥による収縮を温度低下による収縮におきかえたものである。したがって，問題は現実にやって来る低気温の程度と，低温における線膨張率の大きさに関係するが，KOLLMANNの計算，筆者の計算からもその可能性はないとは云えない。しかし，この温度応力のみから凍裂が発生するものとすれば，現実に，凍裂は正常な樹幹にも発生しなければならないが，北海道のトドマツではそのようなことが全くみられなかった。また，たとえこのようにして凍裂が発生したとしても，気温の変化によって樹幹内の温度勾配は常に変動し，凍裂を起すような引張応力を樹幹外周部に発生するといわれるような温度勾配とは逆に，外部温度が内部に対して高くなりうることはAppendix IIからも明らかなように，昼間，常にみられるところである*。また，筆者の測

---

*　また，トドマツ樹幹，ドイツトウヒ丸太などについての筆者の観測結果（未刊）より明らかである。

定によれば，トドマツの復張の消滅する温度は，正常樹幹では −10℃ 付近にあるから，若し急激な低温の来襲によって凍裂が起り，割裂したとしても，樹幹内に温度勾配がなくなればそれは冬季においても，容易に閉じなければならない筈であるが，われわれが形態的に凍裂と判断するものは，−10℃ 以上においても明らかに割れ目として認知できる場合が多い。したがって，この点からも，上述の説は事実に反する。しかし乍ら，冬の低気温はたしかに樹幹の内部に凍裂を発生させる方向のストレスを生ぜしめうることはたしかであるから，凍裂生起の一つの要素として考えなければならないことは当然である。HARTIG の凍結に際しての乾燥収縮説は，一般的に考えれば，之れを否定できる根拠はない。植物組織の凍結の問題としてこれを考察するとき，先ず自由な状態の水が凍結し，これが凍結の核となって付近の水を吸引し凍結せしめることは当然考えられるから[7),55)]，これを拡大して考えれば，細胞内腔，或いは間隙にできた凍結の核に向って膜の中の結合水が或る程度析出凍結する可能性がないとは云えない。しかし，木化組織の中の水分凍結，とくに凍結に際しての細胞膜吸着水の行動については，その詳しいことがわかっていないから，ここでは，この点についての批判をおこなうことはできない。しかし，筆者の復張に関する測定によれば，正常円板ではその辺材部の凍結に際して切れ目の幅が増大せず，むしろ幾分減小する傾向がみられ，また生材ないしは飽水材の小試片についての測定では凍結に際して膨張する傾向がみられるので，凍結に際しての辺材部の収縮の起る事実は認められなかった。また，水喰材部の凍結に際しては，その材部全体としては膨張する場合が多いので，この点からも凍結乾燥説は事実に反する。凍裂の発生するような寒冷地では冬季に樹幹の自由水が凍結するのが普通であるから特別の個体的，局所的事由がない限りこの説に従えばもっと多く，もっと広い範囲にわたって凍裂が発生する筈であろう。これを樹種間の関係の一例についてみても，エゾマツには凍裂がほとんどない。凍裂がトドマツには多くて，エゾマツにはほとんど発生しない程に，両樹種の凍結機構に著しい違いがあろうとは考えられない。BUSSE の考えについては，樹冠を通じて，樹幹に風圧力が作用する場合は，樹幹は曲げの作用を受けるから，その圧縮側の円周方向には引張の成分が発生する。この意味では，風は凍裂に対する一つの要因となりうるであろう。BUSSE のいうような Wurzelhals における風圧力による剪断力の作用も当然考えられるけれども，現実の凍裂は必ずしも Wurzelhals に存在するものではない。また，若し風と寒さによって樹幹が割裂したとしても，それが冬季間，常に割目として存在するためには，何か別の要因が存在しなければならないであろう。BUSSE は寒さをその要因として考えているのであるが，寒さによる考え方の現実との矛盾については上述したとおりである。

北海道のトドマツの場合には，凍裂は水喰材の存在する樹幹においてのみ発生する。その発生機構については第5章において考察したが，結局，水喰材の存在，その凍結にも

とづく内圧によって円周方向の引張応力が発生するが，これに，低気温その他によるストレスが加重し，一方，水喰材内部の割れ目のために，その樹幹材部の強度低下が起ることによって，結局，樹幹の割裂，すなわち凍裂が発生する。したがって，ここでは，水喰材の存在，その凍結ということが決定的に重要な意味を持つ。水喰材の凍結は，水喰材が存在し，冬になれば必ず起る現象であるが，水喰材の存在自体は凍裂とは無関係な，個体的な，或いは局所的な理由によって発生するものである。従って，トドマツにおける凍裂個体の決定，その樹幹部分の決定も明白に説明できる。また，エゾマツに凍裂が発生しないのも，それに水喰材がほとんど発生しないことと結びつければ当然といえる。

今後の問題としては，樹幹の元応力の一つとしての正常樹幹の低温における熱応力を明らかにし，これが水喰樹幹への定量的適用の可能性を見出すことが必要である。また，凍裂発生の重要な契機となる水喰材の本体を見出すことが必要であろう。すなわち，その異常水分の集積や割れ目の生成機構を明らかにするとともに，とくに割れ目が離心的に成長して，凍裂の有力な Anlage となる傾向がみられるから，上に模式的に述べた幾つかの条件の定量的検討を行なうとともにこの点に関する詳細な研究をおこなうことによって，トドマツの凍裂の機構はさらに明白になるものと考えられる。

上述したトドマツの凍裂の発生機構からみて，その主な原因である水喰材の生成を防止することができれば，結果的には凍裂を防止できるであろう。また，木材の素材利用の観点からは，いわゆる，トドマツの凍裂の割れ目そのものよりも，その幹材部に内在する無数の割れ目の方が，より大きく問題になるから，凍裂の原因になる水喰材の生成を防除する手段を見出すことは，実用上，極めて有意義なことといわなければならない。

参考並びに引用文献

References

1) ALERS, G.: Der Frost in seiner Einwirkung auf die Waldbäume der nördlichen gemässigten Zone. Centralblatt für das gesammte Forstwesen, 1884.
2) ————: Die Bildung der Frostrisse. Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung, 1886.
3) 青木　廉：馬鈴薯塊茎の凍結曲線．低温科学，第2輯，1949.
4) ————：凍結曲線の不規則な振れ．科学，1946.
5) ————：馬鈴薯塊茎の再凍結曲線の型について．低温科学，第3輯，1950.
6) ————・篠崎寿太郎：イラガ前蛹の過冷却に及ぼす冷却速度の影響．低温科学，第10輯，1953.
7) ASAHINA, E.: The freezing process of plant cell. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No. 10, Hokkaido Univ., 1956.
8) BELING: Über Rindenrisse an Bäumen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 1888.
9) ————: Über das Erfrieren der Pflanzen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 1893.
10) BROWN/PANSHIN/FORSAITH: Textbook of wood technology. Vol. I. 1949.
11) BUSSE: Frost-, Ring-, Kernrisse. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 1910.
12) CASPARY, R.: Über Frostspalten. Botanische Zeitung, 1855, S. 449.

13) ————————: Über Frostspalten. Botanische Zeitung, 1855, S. 473.
14) ————————: Über Frostspalten. Botanische Zeitung, 1855, S. 489.
15) ————————: Neue Untersuchungen über Frostspalten. Botanische Zeitung, 1857, S. 329.
16) ————————: Neue Untersuchungen über Frostspalten. Botanische Zeitung, 1857, S. 345.
17) CASPARY, R.: Neue Untersuchungen über Frostspalten. Botanische Zeitung, 1857, S. 361. [Eneroth, O.: Handbook i skogsteknologi は 26)]
18) Forestry terminology. Society of American Foresters. 1950.
19) GAYER-FABRICIUS: Forstbenutzung. 13. Aufl. 1935.
20) GEORGE, H. O.: The effect of low temperature on the strength of wood. Bulletin of New York State College of Forestry, Technical Publication, No. 43, 1933.
21) GLATZEL, P.: Neue Versuche über die Ausdehnung von Körpern durch die Wärme. Annalen der Physik und Chemie, 1877.
22) GRAEBNER, P.: Lehrbuch der nichtparasitären Pflanzenkrankheiten. 1920.
23) HARTIG, R.: Sonnenrisse und Frostrisse an der Eiche. Forstlich-naturwissenschaftliche Zeitschrift, 1894.
24) ————————: Innere Frostspalten. Forstlich-naturwissenschaftliche Zeitschrift, 1896.
25) ————————: Lehrbuch der Pflanzenkrankheiten. 1900.
26) Handbok i skogsteknologi. Eneroth, O. 外. 1922.
27) H. STONE: A textbook of wood. 1921.
28) HESS-BECK: Forstschutz. Zweiter Band, 1930. [北大低温科学研究所: 低温科学は 77]
29) 平井信二・北原覚一: 木材理学. 1953.
30) 井口常雄: 木材試験法. 1935.
31) 石田茂雄: 寒さのために樹木の幹が割れる現象について. 低温科学, 第5輯, 1950.
32) ————————: 北海道に於ける凍裂の発生状況. 北大演習林研究報告, 第15巻, 第2号, 1952.
33) ————————: トドマツ樹幹の凍裂の形態について. 北大演習林研究報告, 第17巻, 第2号, 1955.
34) ————————: 木材の機械的性質に及ぼす温度の影響. 北大演習林研究報告, 第17巻, 第1号, 1954.
35) ————————: 凍裂木の製材原木としての価値. 日本林学会講演集 (第63回大会), 1954.
36) ————————: トドマツ生材の凍結温度. 北大演習林研究報告, 第19巻, 第1号, 1958.
37) 石田・宮島・寺江・高見・中西: 凍結材製材用の帯鋸の歯型 (予報). 北海道立林業指導所研究報告, 第5号, 1954.
38) KIENHOLZ, R. and BIDWELL, C. B.: A survey of diseases and defects in Connecticut forests. Connecticut Agricultural Experiment Station, Bulletin No. 412, 1938.
39) KITAO, D.: Über Schwinden und Quellen der Hölzer. Bulletin of the College of Agriculture, Tokyo Imp. Univ. 1898.
40) KNUCHEL, H.: Holzfehler. 1947.
41) KOIDE, F.: Untersuchungen über das Klemmen der technisch wichtigsten Japanischen Holzarten. The Bulletin of the College of Agriculture, Tokyo Imperial University, 1894.
42) KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 1. Bd. 2. Aufl., 1951.
43) ————————: Über das Gefrieren und den Einfluss tiefer Wintertemperatur auf der Hölzer. Mitteilungen der Hermann-Göring-Akademie der deutschen Forstwissenschaft, 1942.
44) ————————: Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. Dritte Mitteilung: Die Bedeutung der Temperatur für die Elastizität und Festigkeit des Holzes. Holz als Roh- u. Werkstoff, 1952.
45) 蕪木自輔: 木材材質の森林生物学的研究 (第1報). 野幌産トドマツ材の生材含水率・容積密度数及び収縮変形に関する春秋材部別観察. 林業試験場研究報告, 第46号, 1950.

46) 加納　孟・無木自輔：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，第61号，1953.
47) 河合鈰太郎・大西　鼎：実用森林利用学．上巻，1906.
48) 北村義重：水喰材の性質について．北海道林業試験場時報，27号，1941.
49) LAGERBERG, T.: Barrträdens vattved. Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift, 1935.
50) LAMPRECHT, H.: Über den Einfluss von Umweltsfaktoren auf die Frostrissbildung bei Stiel- u. Traubeneiche im nordostschweizerischen Mittelland. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, XXVI. Bd., 1949/50.
51) LOREY, T. (編): Handbuch der Forstwissenschaft. 2. Aufl., 1926.
52) MAYR, H.: Waldbau auf naturgesetzlicher Grundlage. 1925.
53) ————: "Der Frost in seiner Einwirkung auf die Waldbäume der nördlich gemässigten Zone". Von G. ALERS. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 1885.
54) MCLEAN, J. D.: Effect of temperature on the dimensions of green wood. Proceedings of 48th annual meeting of A.W.P.A., 1952.
55) MÜLLER-THURGAU: Untersuchungen und Beobachtungen über die Entstehung von Frostschäden. Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz, 1947.
56) 宮井健吉・大沢正之：凍結材の抗折強について．北大演習林研究報告，1923.
57) NEGER, F. W.: Die Krankheiten unserer Waldbäume. 1924.
58) NÖRDLINGER, H.: Bedeutung des Winterfrosts für die Waldbäume. Kritische Blätter für Forst- u. Jagdwissenschaft, 1860.
59) NÖRDLINGER, T.: "Der Frost in seiner Einwirkung auf die Waldbäume der nördlichen gemässigten Zone". Von G. ALERS. Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung, 1885.
60) ————————: Die Bildung der Frostrisse. Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung, 1886.
61) NÖRDLINGER, H.: Die technische Eigenschaften der Hölzer. 1860.
62) 新島善直：森林保護学．下巻，1925.
63) 大沢正之・石田茂雄：林木の凍裂に関する一考察．木材工業，1947.
64) RECORD, S. J.: The mechanical properties of wood. 1914.
65) SCHULZ: Frostrisse bei Tauwetter. Der Deutscher Forstwirt, 1937.
66) SCHULZ, H.: Untersuchungen an Frostrissen im Frühjahre 1956. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 1957.
67) SCHÄDELIN, W.: Die Auslesedurchforstung als Erziehungsbetrieb höchster Wertleistung, Dritte Auflage, 1942. (Lamprecht (50) による).
68) SEEHOLZER, M.: Frostriss und Frostleiste. Mitteilungen der deutschen dendrologischen Geselschaft, 1936.
[Society of American Foresters: Forestry terminology. 1950 は 18)]
69) SORAUER, P.: Handbuch der Pflanzenkrankheiten. Dritte Auflage, 1909.
70) STONE, G. E.: Shade tree. Massacchusetts Agricultural Experimental Station, Bull. 170, 1916. (Kienholz (38) による).
[Stone, H は 27)]
71) SULZBURGER, P. H.: The effect of temperature on the strength properties of wood, plywood and glued joints at various moisture contents. Jour. Counc. Sci. Ind. Res., Div. For. Prod. Australia, 1948. (文献 44 による).
72) 更科源蔵：コタン生物記．1942.
73) 関谷文彦：木材工芸学．1933.
74) TIMOSHENKO, S.: Theory of elasticity. 1934.
75) TRENDELENBURG/MAYER-WEGELIN: Das Holz als Rohstoff. Zweite völlig überarbeitete Auflage, 1955.

76) TRENDELENBURG, R.: Das Holz als Rohstoff. 1939.
77) 低温科学 (生物編, 物理編): 北大低温科学研究所編.
78) 照本 勳: 植物組織の第1氷点と過冷却. 低温科学, 1951.
79) 上村勝爾: 森林利用学. 上, 1924.
80) VILARI, F. E.: Experimental-Untersuchungen über einige Eigenschaften des mit seiner Fasern parallel od. transversal durchgeschnittenen Holzes. Annalen der Physik und Chemie, 1868.
81) VONHAUSEN, W.: Die Volumenveränderungen des Holzes lebender Bäume bei niedrigen Temperaturgraden als Ursache der Frostrisse. Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung, 1861.
82) VONHAUSEN, W.: Nachtrag zu dem Aufsatze: Die Volumenveränderungen des Holzes lebender Bäume bei niedrigen Temperaturgraden als Ursache der Frostrisse. Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung, 1861.
83) WANGAARD, F. F.: The mechanical properties of wood. 1950.
84) WEATHERWAX, R. C. and STAMM, A. J.: The coefficient of thermal expansion of wood and wood products. Forest Products Laboratory, U.S.A. Rept. No. R 1487, 1946.
85) 吉田順五: 熱伝導論の立場からみた馬鈴薯の凍結曲線 (I). 低温科学, 第10輯, 1953.

Summary

I.

It has been well known that frost cracks develop as radial splits from the bark inward along the grain of a tree trunk during extremely cold weather. They are found in several species of conifers as well as hardwoods in cold climes.

There are many published papers about the frost cracks from the point of view of forest protection and wood technology, especially in Germany. Also there are many studies made of "development" of frost cracks, partly from the stand point of practical prevention of frost cracks, partly in regard to the mechanism of the phenomenon of frost cracking itself. Although several theories have been advanced to explain the reason for the development of frost cracks, no fully acceptable theory has been established.

The present author began about ten years ago to gather a survey record about occurrence of frost cracks in Hokkaido, and to examine the morphological characteristics of the trunks injured by frost cracks. The results have been reported (ref. 32, 33 in this paper). After the works the writer also began a study in order to explain the reason for the development of frost cracks on tree trunks of "Todomatsu", *Abies sachalinensis* Masters, from physical and morphological stand points.

This paper is the result of the study and deals with: 1) historical review on studies made of development of frost cracks, 2) physical and morphological characteristics of wetwood as a cause of frost cracks of "Todomatsu", 3) some other factors affecting development of frost cracks and 4) discussion and conclusion about the mechanism of frost cracking.

Several theories have been advanced on the occurrence of frost cracks. It seems that in old time, people who lived familiarly with the forest had simply accepted frost cracks as splittings of tree trunks due to expansion of water in them caused by its freezing. During the 19th century, especially the latter half, several theories for the clarification of frost cracking were advanced, based on the scientific knowledge at that time. Some of them have yet found acceptance with many investigators. 1) One of these theories which was established by T. NÖRDLINGER, CASPARY and others (12, 13, 14, 59, 60, ···), already in about the middle of the 19th century, claims that the splits form as a result of low heat conductivity of the wood. According to this hypothesis, the outer part of the trunk contracts as the temperature falls, before the inner part of it is affected by this change. The tensile stress thus resulting from this uneven contraction of the trunk produces failures across the grain in a radial direction; these are the so-called frost cracks. 2) Another theory (R. Hartig and others) considers the segregation of imbibision water of cell walls as the wood freezes, in addition to the uneven contraction caused by the uneven temperature distribution in the trunk. According to this theory, the severe stresses resulting from the contraction of the outer layers due to the rapid temperature fall and to the drying of cell wall produce failures, i.e., frost cracks. 3) Busse's theory, on the other hand, considers the cause

of frost cracks as beeing associated with some factors such as wind, individual character of trunk, site and, the mechanical action of the wind to be the most important factor in development of the cracks in the first place. According to this consideration when once they are established at the place, the tension stress resulting from frost would prove sufficient to reopen the cracks in the following winter again.

According to the results of the present author's survey there never occur frost cracks of "Todomatsu" trunk nor of several hardwoods in a group of a large percentage of their trunks (see ref. 32 or table 1 in the paper), in a certain locality or, in a certain forest stand where there seems to exist a rather even temperature distribuiton. On the other hand, there are considerable differences of occurrence of frost cracks among some individual "Todomatsu" trunks which were located in very similar site conditions concerning air temperature, exposure to sunshine or wind and so on. It is a rather common fact in forests in Hokkaido that one or more (not many) belonging to a group of trees which are very closely adjacent to each other in place and in some growing conditions are severely injured by frost cracks while the others are not at all.

II.

Occurrence of frost oracks of forest trees in Hokkaido were surveyed at 12 sample stands in four different districts located in north, east, central parts of Hokkaido and near Sapporo respectively. The survey was carried out on occurrence of tree trunks with frost cracks in regard with their species, tree height, diameter, outer morphological aspects and some site conditions such as direction and gradient of slope, height above sea level and so forth. Also the survey was made of frost cracks themselves in regard with their location—height above the ground, direction of facing of them on the trunks—, width of frost ribs and of openings of frost cracks in frozen state of water in the trunks and some other morphological characters.

The results obtained in the survey are briefly presented in tables 1 to 5 and summarized as follows: 1) During the course of the survey about 500 trees were found to have one or more frost cracks or 8 percent of all trees examined in grand total of the four districts as shown in table 1. *Abies sachalinensis* called "Todomatsu" in Japan in conifers is most frequently frost-cracked with a percentage of 15% on an average in grand total obtained for whole 12 sample stands, ranging from 7 percent in Nopporo to 20 percent in Asahigawa districts. In broad-leaved trees, *Acer*, *Betula*, *Quercus* spp. are most frequently damaged by frost cracks followed by *Ostrya*, *Fraxi nus*, *Ulmus* spp. etc. 2) Some investigators have stated that frost cracks were almost always found on the south side of the tree, while some have stated the exact reverse. Also some others have reported that frost cracks faced toward the cold wind direction. The directions of facing of 508 individual frost cracks of "Todomatsu" were noted here in table 3. There was fund no general, simple tendency to agree with any report about the direction above mentioned concerning sunshine, wind or slope of the site. Moreover many individual trunks had two or more frost cracks located on different sides of the trunk or there were some extremely long frost cracks listed "all directions" which were eliminated from this direction count. Though the irregular character of the

forest stands with various site conditions concerning slope directions and the gradients, exposure to the sunshine and wind and so on, must be more minutely discussed for determining of direction of facing of the cracks, the problem must first be considered in regard to the internal morphological aspect of a tree trunk. 3) As shown in table 2 in which only the data for grand total are set down, the percent of the trees injured by frost cracks increases with increase in the diameter of the trunks. In Asahigawa district, trunks of lowest diameter class of 10 to 14 centimeters, however, had a highest percentage of trees injured by frost cracks. 4) Though the frost cracks appear from the ground level to nearly top of the trunks as high as 20 or 25 meters, a large number of frost cracks of "Todomatsu" noted in this survey were located within the first about three meters in height above the ground. Table 5 shows the height of the places where the frost cracks were distributed over the trunk part in the case of "Todomatsu". These figures were obtained by tabulating all of the frost cracks in every cross section of trunks. For example, a frost crack on a tree trunk ranging from 3.4 to 5.2 meters in height above the ground was recorded in the four cross sections of 3.5, 4.0, 4.5 and 5.0 meter height above the ground, or one ranging from 0.5 to 7.6 meters was recorded in each of 15 sections ; 0.5, 1.0, ……7.5 meters high. Thus, e. g., the number of 133 in the section at height above the ground of 0.5 m in the table means the total number of 133 of the frost cracks which appeared in the section of 0.5 m height above the ground. The frost cracks reaching above 12 meter height above the ground were eliminated from this count because the data were not sufficiently accurate to discuss here. 5) Frost cracks of "Todomatsu" trunks ranged from less than 0.5 meter to as much as 10 meters or more in length in general observations made by the present author. However, about 80 present of all frost cracks of "Todomatsu" in this survey had the lengths ranging from 0.5 to 3.0 meters as shown in table 4 and the largest percentage of them fell into the 1.0 to 1.5 m class of length. The value of length in weighted average in grand total was about 2 meters.

III—1

The present writer made a series of investigations about the internal morphology of trunks with frost cracks from a general point of view and in regard to the cracked parts of trunks injured by frost cracks. By the author's extensive field observations it was found that there often appeared wetwood in "Todomatsu" trunks either with or without frost cracks. In the case of frost-cracked "Todomatsu" trunks, however, there always existed the wetwood in them. From the further investigations the writer reached some conclusions.

1) Wetwood occurs very often in trunk of "Todomatsu" but seldom in that of "Ezomatsu", *Picea jezoensis* Carr. in which frost cracks seldom occur. In a observation on the sections at which standing trees were cut down, the writer found a tendency that occurrence of frost cracks increases with the increase of wetwood in the case of "Todomatsu" as shown in table. 6.

2) The part of the trunk where frost cracks were located was connected frequently with part of the trunk where the woody tissue, esp., heartwood was exposed to the

air and wtewood often developed.

3) Some tree trunks of "Todomatsu" with frost cracks were felled and many disks were cut from the trunk part with frost cracks; measurements were made on the relationship between the width of frost crack on the each disk and the amount (measured by area of the surface) of wetwood on it. As the result, it was found that there was close relationship between the two as shown in figs. 1, 2 and 3, and also a close relationship was established between width of frost crack and amount of ice-packed internal cracks in each disk as shown in figs. 4 and 5. However, the relationship was disturbed when relatively dry wood part, decayed part, knots, compression wood existed in the wetwood of the trunk, and also there was a tendency for the relationship above mentioned to be disturbed in the case of scattered wetwood, mainly because of some difficulties to measure the amount of the wetwood part accurately.

4) Small logs having frost cracks, respectively, cut out from standing timbers in winter when there was frozen water in them were moved to a room temperature of about 10~15°C to thaw the state. With thawing of the water in the logs the frost cracks closed entirely. When the logs of which frost cracks had entirely closed the openings were put into a cold chamber of temperature about −15°C and then water in the trunks congealed into ice, the frost cracks opened again. The temperature of the logs (T_2, T_3) and of the surrounding air (T_1) and the widths (D) of the openings of the frost cracks were measured. These are illustrated in figures 6 and 7. From shortly after the logs were moved in to the cold chamber, the temperature (T_2) of the outer parts of the logs fell rapidly to about 0°C and then the water began to freeze. After staying at the 0°C temperature and finishing of freezing, the temperature of the sapwood part began to fall again. Meanwhile the temperature (T_3) of the inner parts of the logs followed after the outer parts in the same process as the outer and then began to freeze at about 0°C. After staying in that state and finishing of freezing, the temperature of the inner parts began to fall like that of the outer parts of the logs and finally reached to the temperature of the outer parts. On the other hand, the frost cracks began to increase in width almost only with the freezing of the inner parts, not with that in the outer parts of the logs, and the increasing width ended in correspondence with the finishing of freezing of the inner parts of the logs (see table 7, figure 10, appendix I concerning freezing point of green wood).

For the next observation, these logs were moved out from the cold chamber to a room of normal temperature of about 15°C. Figures 8 and 9 show changes of the temperatures and the width of the cracks during this thawing process. At first the temperatures of the outer parts began to rise and then reached finally to the air temperature about 40 min. later, through a short period of staying at about 0°C for thawing. The inner parts followed after the outer in like manner. Though the width of the frost cracks began to decrease from just after the logs were put out of the cold chamber in a little disagreement with the case of the cooling processes, the decreases in width continued nearly until about the finishing of the thawing of the inner parts of the logs.

It is briefly noted here from items 1) to 4) above that the frost cracks of "Todomatsu" develop only at the places where wetwood existed inside, but not at places

without wetwood. In general there is a tendency for the frequency of occurrence of frost cracks to increase with increase of amount of wetwood. Also the grade (measured by the width of their openings) of frost cracks depends approximately on the amount of wetwood in the trunks on which the frost cracks are located. Change of the width of frost cracks corresponds with the freezing or thawing of wetwood in the inner part of trunks not with those occurrences in sapwood, in process of both cooling and thawing of logs (see table 12, figure 17 concerning the effect of eliminating packed ice).

It is clear that the principal cause of frost cracks of "Todomatsu" trunks should be both existence and freezing of wetwood in them. Since frost cracks never appear on tree trunks which are perfectly free from wetwood in any part of them according to the writer's observation, the existence of wetwood in the trunk and its freezing are necessary prerequisite for frost cracks. It can be also noted here that existence of wetwood in a trunk is an individual condition for occurrence of frost cracks because the existence gives a possibility of frost-cracking to the individual tree trunk. Furthermore, to be exact, it can be expressed that the existence of wetwood at a certain place of a trunk is a topographical condition for occurrence of frost cracks because the existence determines the place on the trunk where there is a possibility of frost-cracking.

III—2

One of the other causes for development of frost cracks is winter frost, that is, low winter temperature, especially rapidly coming low temperature. This is an external condition which acts externally on a tree trunk while wetwood is an internal condition, or this is a general condition which acts generally on many trunks while wetwood is an individual condition. The temperature in a "Todomatsu" trunk which had a frost crack at 0.5 to 3.5 meter height above the ground was measured in the forest, together with the surrounding air temperature and the width of the frost crack (refer to figure 11 and appendix II). As shown in figure 12, the width of opening of the frost crack decreases with the rising of the air temperature and the trunk temperature. The width of the frost crack is most closely correlated with the temperature in the outer part of the trunk (T_2) (r: 0.959) followed by that of the atmosphere (T_1) (r: 0.868). It is clear from the measurement that there appears an internal stress caused by temperature change in the trunk of a standing tree without any such as this frost crack.

An experiment was performed on "squeezing" (Klemmen), the occurrence of which is well known (see ref. 41, 61), of disks cut from several trunks with or without wetwood of "Todomatsu", in regard to temperature change of them in low temperature. The amount of squeezing was measured at several temperatures below 0°C, and also the amount of changing of the kerf of disks made by a saw blade at a definite temperature of the disks themselves of about −6°C (partly −2°C) (fig. 13). It was found that there existed a special low temperature ("t_0" in the text) at which squeezing did not appear in green disk free from wetwood and any other defects, while the amount of squeezing had positive values above the no-squeezing temperature t_0, and had negative values below it (fig 14).. Further, there was a proportional relationship between amount of

squeezing and low temperature from about −1° to −20°C for each disk, that is, each disk had a definite squeezing rate. resp., as shown in table 8 and app. III. It should be noted here that there occurs compressive stress in the tangential direction at the outer part of the disk, without any such as the kerf, above the temperature of no-squeezing, occuring tension stress in the direction at the part below the no-squeezing temperature.

IV

As stated above, the existence and the freezing of wetwood in a trunk are necessary conditions for development of frost crack according to the writer's field surveys and to the laboratory works about frost-cracked trunks. The characteristics of wetwood of "Todomatsu" from the point of view of the conditions for frost-cracking are described as follows.

1. Though wetwood of "Todomatsu" trunk tends, in general, to distribute in relation to the externally abnormal parts of the trunk where the woody tissue is exposed to open air, its distribution in the inner part of the trunk is very complicated. Root wetwood is located at the basal portion of the trunk and, in general, gathers round the pith part. Branch-born wetwood, on the contrary, tends to be scattered associated with each branch, especially dead branches, but it is often extended towards the trunk axis in association with each other when the trunk part has frost crack. The moisture content of wetwood part in a trunk having frost crack varies widely and also the distribution in such trunk is very complicated as shown in appendix V and photos 26 etc: the value varies from the percentage of that for normal heartwood of "Todomatsu" to the theoretically maximum value given by calculation. The value of the moisture content of wetwood having packed ice, however, is possible to be a higher percentage than the maximum content for normal wood part when the piece used for the determining of the content is in small size; there were such cases actually in these experiments. However, the moisture content determined from the test piece of size above that of about $1.5 \times 1.5 \times 2.0$ cm^3 never showed values above the maximum moisture content for the wood part, as shown in tables 9 and 10 or appendix V. It is not clear from where and how the water came there which is packed as ice in many internal cracks. Though it is found experimentally that water may be segregated into small cracks from the surrounding woody tissue by the freezing of wood, further investigations on these points are being carried out (fig. 15–a).

2. There are many internal cracks extending radially or tangentially and they are very often packed with ice in winter as shown in photos 25 to 33, 47 to 50. In general, there is a tendency for relatively shorter, narrower cracks especially such radial cracks to appear, in the wetwood existing at the trunk as shown in photos 29 to 34. At the same time there is a tendency for appearance of larger cracks than the former in wetwood in connection with some defects of main stem such as forked part, broken or large dead branches and so on. These large cracks tend to show a special pattern like a net associated with each other (photo 29 or others). There also often appear extremely large radial cracks which are connected to ring shakes located inside them.

The present author often observed that such large cracks in the summer season were saturated with water (photo 29, figs. 30, 37 in ref. 33). One or more of the radial cracks often extend toward the periphery of the trunk, and often reach to the cambium of the tree; they form cullus tissue while there is no notable change in the morphology of the bark corresponding to the radial crack in the wood tissue (photos 36 to 38). Some results of measurements on the length and width of radial cracks are shown in table 11 (also see photo 45). There is a tendency for their length of radial cracks located in wetwood to vary in direction of grain in relation to the length of the wetwood in that direction, for instance, they are longer in such a case as that of photo 18 and shorter in photo 21. There often appear remarkably long radial cracks in direction of grain as well as tangential cracks, in such a case of that of photo 21 (see figs. 27 to 30 of ref. 33).

V.

As stated above, it is clear that the freezing of wetwood causes a kind of internal pressure in the trunk. In general, the no-squeezing temperature "t_0" in any disk with wetwood is higher than that in any normal disk in low temperature due to existence of internal pressure caused by the freezing of the wetwood (table 8). There often appeared negative squeezing at as high temperature as shortly below 0°C in disk with wetwood while such never is the case of a normal disk. Moreover, since the amount of saw kerf of any disk which has wetwood varies corresponding with the temperature change in like manner as the case of any normal disk, apart from the numerical value of the squeezing, i. e., squzeeing rate, it is noted here that such a disk has both characters to rise the no-squeezing temperature and to vary amount of squzeeing due to its temperature change. The relation is illustrated schematically in figure 16. One of 2 oblique lines (below) shows the process of decreasing of squeezing (increasing of width of kerf) with the temperature fall for a normal disk and the other one shows an example of that for a disk having wetwood and extremely high no-squeezing temperature t_0 which it is impossible to determine in this case numerically (see also figs. 17 and 18).

VI.

It is clear that frost, especially rapid coming of low temperature causes stresses in trunks. KOLLMANN[44] has given the value of $t_0-t_1=40$°C as the temperature difference between that at the outer part (t_1) of a trunk and in the surrounding air (t_0), to split the trunk at the outer part radially; he assumed for the discussion that linear thermal expansion coefficient of wood α: 0.00005, E (in tangential direction): 15,000 kg/cm², $\sigma_{z\perp}$ (tensile strength in tangential direction of wood): 30 kg/cm². The present author also tried to calculate approximate value of thermal stress at the outer part of a small log from following formula,[74]

$$\sigma_\theta = \frac{(1-\mu)\,\alpha E}{1-2\mu}\left(-T+\frac{1}{R^2}\int_0^R Trdr+\frac{1}{r^2}\int_0^r Trdr\right)$$

on some assumptions that μ: -0.35, α: 0.0002*, E: 5,000 kg/cm², $T=-\left(\frac{r}{5}\right)^3$ **, and obtained $\sigma_{Z\perp}=13$ kg/cm² for the log of $R=15$ cm.

The small normal log of 30 cm diameter, 90 cm in length (above mentioned) was subjected experimentally to sudden cooling from $-1°$ to -25°C, or $-1°$ to -40°C with attention to the prevent of end effect of the cooling of the log. There, however, occurred no failures at all in the logs in both cases of the treatment. The further investigations on the possibility of cracking of normal trunk only as a result of low temperature must be an important subject of future research.

VII.

Some main factors which act to develop frost crack in the outer part of a trunk may be expressed comprehensively as shown in figure 18, or as follows:

$$\Sigma_{t_t}=\sigma_{t_t}+\sigma_w+\sigma_q$$

here $0\leqq\sigma_{t_t}\leqq\Sigma_{t_t}$
$0\leqq\sigma_w\leqq\Sigma_{t_t}$
$0\leqq\sigma_q\leqq\Sigma_{t_t}$

σ_{t_t}: Tangential stress in the outer part of normal disks corresponding with squeezing of them, as well as wetwood disks, on the assumption that the principle above mentioned (V) can apply to wetwood disks.

σ_w: Tangential stress in the outer part derived from internal pressure caused by freezing of water in wetwood.

σ_q: Tangential stress in the outer part caused by temperature gradient in the radial direction of the trunk.

Σ_{t_t}: Total tangential stress in the outer part of the trunk.

The value of Σ_{t_t} is possible to vary from $\sigma_{D\perp}$ to the $\sigma_{Z\perp}$; it varies widely and complicatedly in wetwood trunks corresponding with such items as number, size and distribution etc. of the internal cracks. Consequently, though the phenomenon of frost cracking which should be considered from both Σ_{t_t} and $\sigma_{Z\perp}$ is very complicated, since actual frost cracks occur only on the trunks having wetwood, actual value of σ_w must occure for frost cracking, and at the same time the value of $\sigma_{Z\perp}$ for such trunks may be low because of existence of internal cracks in the wetwood. It is very possible that the simultanous existence of both σ_w and decreased value of $\sigma_{Z\perp}$ accelerate development of frost cracks.

VIII.

Since frost cracks have been well known from many years ago by many people who lived familiarly with forests, several theories have been advanced to explain the development of them; some of those theories often appear in references cited on wood

*: See appendix IV.

**: The value is approximate for a special case obtained in a cooling experiment from $-1°$ to -25°C of the log.

or forestry nowadays, as stated above. If one of them (1) which claims that the splits form as a result of low heat conductivity of wood is correct, it is considered that there should occur more frost cracks in a definite area, or they should occur more collectively in certain special areas where nearly the same temperature appears, as described by BUSSE and others. But such is not the case; frost cracks tend actually to appear rather scatteringly. Furthermore, if the frost cracks occur as a result of rapid falling of temperature causing a large gradient in a trunk, the cracks must be closed when the air temperature rises, meaning disappearance of the tangential tension stress in the outer part of the trunk. Actually, in winter, however, there are a large number of frost cracks which have actual openings even in the case of that temperature of air is higher than that of trunk and the temperature gradient in a trunk is reversed; examples are given from appendix II. The theory advanced by R. HARTIG and others also has the same irrationality as the former, especially disagreement with actual facts. As to BUSSE's theory, though it is possible that shearing force develops in the collar part of two primary roots due to mechanical action of wind, frost cracks not only appear at the collar part of the primary roots, but also they often appear just above the primary roots (photo 4), or in a higher part of trunk far from the root parts (photo 9). Even though frost cracks develop as a result of low temperature in cooperation with mechanical action of wind, there should be necessary some other factors to cause the openings of the frost cracks during the whole winter. The theory does not give any reason for the continuing existence of the openings.

On the frost crack of "Todomatsu" trunks there does not exist such disagreement of theory with actual facts in regard to wetwood which develops actually by some other cause than that of frost crack, and is the individual and the internal conditions for development of a frost crack. Why frost cracks of "Todomatsu" occur at a definite tree trunk or a definite part of trunk may be understood if one takes into consideration the wetwood as an individual or topographical condition for development of the frost cracks. As described above (III), the factors relating to development of frost cracks can be expressed qualitatively. It is very hard to treat them quantitatively in the view of the fact that so-called frost cracks develop only at wetwood part of trunk not at a normal part. However, further investigation must be carried out about the thermal stresses in normal trunks in relation to growing stresses, and about the possibility of the applicability of the results to wetwood trunks. On the other hand, investigations are needful about wetwood formation in tree trunk, that is, the process of accumulation of the water in wetwood and, especially, the mechanism of development of the internal cracks because it seems to occur often that some radial cracks extend outward from the center of tree trunk and become just origins for development of so-called frost cracks.

APPENDIX

Appendix I. Freezing point of wood tissue in green (*Abies sachalinensis*).

Appendix II. Results of measurements on the temperature in a standing tree trunk and on the width of a frost crack located on it (*A. sachalinensis*).

Appendix III. Some numerical values on squeezing of disks in green (*A. sachalinensis*).

Appendix IV. Coefficient of linear thermal expansion of wood in green, in range of temperature from −2°C to −25C° (*A. sachalinensis*).

Appendix V. Cross sectional distribution of moisture content in a disk (see photo 26) taken at 100 centimeters height above the ground of a trunk having two frost cracks at the place (*A. sachalinensis*)[33].

Appendix I. Freezing point of wood tissue in green (*Abies sachalinensis*).

I-1. *Trunk A: without frost crack.*

Height above the ground	Specimen No.: No. of the annual ring counted from sap to pith	Cooling rate	※1 Super cooling temperature	Freezing point	※2 Moisture content
m		°C/M	−°C	−°C	%
0.3	Bark	1.3	3.2*	1.1	
	2	0.9	2.7*	0.2	186
	4	1.0	2.7*	0.2	195
	6	1.1	3.0*	0.2	184
	8	1.1	3.0*	0.3	156
	10	1.2	2.9*	0.2	158
	13	2.1	3.6*	0.5	82
	22	2.1	4.4*	0.5	45
	24	1.7	2.5*	0.4	54
	27	2.0	4.4*	0.4	67
	36	1.4	3.1*	0.5	94
	42	1.7	0.8	0.5	62
	69	1.0	1.0	0.3	143
	80	1.4	3.3*	0.5	95
	85	1.1	2.8*	0.3	155
	Pith (95)	1.2	3.3*	0.3	116
4.3	Bark	0.8	7.1	1.2	
	2	1.0	2.8*	0.3	220
	4	2.1	1.6*	0.3	193
	6	1.0	2.1*	0.3	150
	8	1.7	1.5*	0.3	166
	10	1.3	2.6*	0.3	49
	12	1.6	2.4*	0.3	90
	13	1.2	2.3*	0.5	91
	14	1.5	5.0	0.4	90
	19	1.3	5.8	0.3	113
	22	0.8	1.8*	0.3	147
	26	1.3	7.0	0.6	153
	35	1.0	2.2*	0.8	137
	52	2.0	2.5*	0.5	76
	63	1.0	2.9*	0.4	75
	69	0.5	0.6*	0.5	105
	Pith (78)	0.5	2.1*	0.6	123

Height above the ground	Specimen No: No. of the annual ring counted from sap to pith	Cooling rate	※1 Super cooling temperature	Freezing point	※2 Moisture content
m		°C/M	−°C	−°C	%
8.3	Bark	1.8	6.3	0.9	
	2	1.4	6.5	0.1	192
	4	1.6	4.5	0.1	191
	6	1.4	5.5	0.1	191
	8	1.6	6.2	0.2	171
	10	2.5	6.2	0.3	112
	12	2.0	4.8	0.2	90
	14	2.2	6.5	0.5	103
	16	2.0	4.6	0.4	82
	18	2.5	5.3	0.6	64
	19	1.3	5.9	0.3	71
	20	2.0	7.4	0.7	69
	24	2.1	7.2	0.7	71
	Pith	1.1	6.6	0.7	153
2.3 Bark only	Bark 1	0.8	2.8*	1.2	
	" 2	1.0	3.2*	1.6	
	" 3	1.0	3.0*	1.4	
	" 4	1.2	5.0*	1.3	
	" 5	1.0	3.3*	1.5	
	" 6	1.2	3.2*	1.3	
	" 7	1.1	3.3*	1.5	
	" 8	1.2	2.7*	1.0	
	" 9	1.0	2.3*	1.2	
	" 10	1.3	2.6*	1.2	

Note: ※1 Specimen inoculated ice artificially is marked with an asterisk (*), resp.

※2 Moisture content $(\%) = \frac{W_g - W_0}{W_0} \times 100$

W_g: weight in green.
W_0: weight in oven dry.

I-2. *Trunk B: with a frost crack from 7 to 9 m height above the ground.*

Height above the ground	Cardinal direction	Specimen No.: No. of the annual ring counted from sap to pith	Cooling rate	Super cooling temperature ※1	Freezing point	Moisture content ※2
m			°C/M	−°C	−°C	%
4.0 Normal part (free from the frost crack)	North side	2	0.8	2.9*	0.2	210
		4	1.0	3.1*	0.2	215
		5	1.1	3.0*	0.4	200
		7	0.9	2.8*	0.4	140
		9	0.8	3.2*	0.4	101
		10	1.2	3.1*	0.3	94
		11	1.4	3.0*	0.2	83
		14	1.1	2.9*	0.4	95
		16	1.5	3.3*	0.4	69
		18	1.5	4.2*	0.5	60
		21	1.4	3.0*	0.5	56
		24	1.8	2.5*	0.5	70
		26	1.3	2.6*	0.4	75
		29	1.6	2.8*	0.5	55
		31	1.8	3.1*	0.6	49
		34	1.1	2.4*	0.4	100
		38	1.3	2.3*	0.3	70
		41	1.0	3.2*	0.3	95
		45	1.1	3.0*	0.4	74
		48	0.8	2.5*	0.5	65
		55	0.6	2.6*	0.5	105
		60	0.6	2.9*	0.4	115
		71	0.8	3.1*	0.4	208
		Pith	1.0	3.0*	0.5	203
	South side	2	1.0	2.8*	0.2	180
		5	1.0	2.1*	0.2	175
		7	0.8	3.0*	0.2	200
		9	1.2	2.5*	0.3	150
		12	0.8	2.2*	0.2	151
		14	1.2	2.4*	0.3	110
		16	1.7	3.1*	0.4	95
		18	1.4	3.2*	0.4	85
		21	1.1	2.9*	0.4	78
		23	1.3	2.8*	0.5	65
		26	1.5	3.2*	0.4	59

Height above the ground	Cardinal direction	Specimen No.: No. of the annual ring counted from sap to pith	Cooling rate	Super cooling temperature ※1	Freezing point	Moisture content ※2
m			°C/M	−°C	−°C	%
	South side	30	1.8	3.0*	0.5	70
		32	2.0	2.8*	0.3	75
		34	1.6	2.9*	0.5	76
		38	1.3	3.0*	0.3	80
		43	1.1	2.2*	0.4	50
		46	1.5	2.1*	0.3	65
		49	1.4	3.0*	0.4	68
		53	0.9	3.1*	0.3	76
		58	1.1	2.5*	0.5	95
		65	1.0	2.9*	0.6	185
		73	1.1	3.1*	0.4	135
8.0 Cracked part (with frost crack)	North side	1	1.2	6.4	0.2	150
		3	1.3	6.7	0.4	190
		5	1.1	5.7	0.3	200
		7	1.2	5.7	0.2	210
		9	1.4	6.2	0.1	110
		12	1.8	5.4	0.3	89
		14	1.7	4.8	0.5	75
		16	1.5	6.5	0.7	54
		19	1.4	4.6	0.5	65
		21	1.3	3.5	0.3	48
		24	1.6	5.3	0.4	43
		27	1.1	4.9	0.4	85
		29	1.0	7.0	0.3	131
		30	0.9	7.1	0.4	175
		34	1.0	6.5	0.4	140
		38	1.1	6.5	0.3	170
		41	1.2	5.1	0.4	151
		54	1.1	7.1	0.6	146
		Pith	1.0	6.8	0.5	215
	South side	2	1.0	3.1*	0.3	130
		5	1.0	2.8*	0.4	181
		8	1.2	3.2*	0.2	169
		10	1.4	2.9*	0.2	150
		13	1.7	2.1*	0.2	126

Height above the ground	Cardinal direction	Specimen No.: No. of the annual ring counted from sap to pith	Cooling rate	Super cooling temperature ※1	Freezing point	Moisture content ※2
m			℃/M	−℃	−℃	%
8.0 Cracked part	South side	16	1.6	3.0*	0.5	89
		19	1.5	2.5*	0.6	95
		22	1.8	3.0*	0.5	78
		24	1.5	3.1*	0.3	68
		26	1.3	2.8*	0.4	71
		29	1.6	2.6*	0.3	70
		33	1.0	3.2*	0.4	120
		38	1.0	3.1*	0.3	150
		43	1.1	3.2*	0.3	170
		45	1.2	2.9*	0.4	140
		49	0.8	2.5*	0.4	195
		53	0.9	2.8*	0.3	201
		58	0.5	3.5*	0.3	190

Note: ※1 Specimen inoculated ice artificially is marked with an asterisk (*), resp.

※2 Moisture content $(\%) = \frac{W_g - W_0}{W_0} \times 100$

here, W_g: weight in green.
W_0: weight in oven dry.

Appendix II. Results of measurements on the temperature in a standing trunk and on the width of a frost crack located on it (*A. sachalinensis*). (Figs. 11 and 12)

Date	Time	Air temperature (−°C) T_1	Temperatures in trunk (−°C) T_2	T_3	T_4	Distances between the pins (mm) D_1	D_2	D_3	D_4
Jan. 23	16	10	3	6	7	21.51	20.75	19.34	
	22	17	12	7	7	22.84	22.19	21.09	
24	6	22	18	13	14	23.64	23.00	21.84	
	10	15	16	15	16	23.64	22.90	21.81	
	14	6	7	10	15	22.35	21.84	20.65	
	18	11	9	10	13	18.49	21.63	21.28	19.83
	22	10	9	9	12	18.60	21.70	21.38	19.91
25	6	10	8	9	9	18.60	21.70	21.37	19.88
	10	5	6	8	9	18.21	21.25	20.92	19.56
	14	3	2	4	7	17.51	20.38	20.12	19.03
	18	4	3	3	5	17.41	20.36	20.09	19.02
	22	4	3	3	5	17.44	20.34	20.08	19.03
26	6	8	6	4	5	17.89	20.84	20.56	19.32
	10	9	6	5	6	17.92	20.91	20.56	19.33
	14	10	6	5	6	17.84	20.81	20.51	19.25
	18	13	10	7	7	18.35	21.43	21.11	19.70
	22	14	12	9	9	18.63	21.75	20.40	19.92
27	6	16	14	12	12	19.99	22.13	21.69	20.22
	10	14	13	13	13	19.95	22.15	21.75	20.20
	14	13	10	11	13	18.56	21.63	21.30	19.85
	18	16	13	11	12	18.98	22.19	21.78	20.23
	22	16	15	13	13	19.16	22.42	22.03	20.43
28	6	15	15	14	15	19.23	22.51	22.00	20.55
	10	14	13	13	15	18.98	22.23	21.85	20.30
	14	11	10	11	13	18.64	21.76	21.37	19.99
	18	15	12	11	12	18.98	22.23	21.81	20.31
	22	16	13	12	13	19.09	22.39	21.99	20.43
29	6	14	12	12	13	19.09	22.32	21.95	20.41
	10	9	10	11	13	18.79	22.00	21.62	20.18
	14	3	4	7	11	17.76	20.73	20.44	19.29
	18	12	9	8	10	18.35	21.56	21.30	19.98
	22	11	9	8	10	18.45	21.62	21.31	19.93
30	6	13	12	10	11	18.74	21.97	21.60	20.19
	10	5	6	9	10	18.21	21.28	20.97	19.67
	14	3	2	5	8	17.46	20.48	20.11	19.03
	18	8	5	5	6	17.60	20.71	20.38	19.26
	22	10	7	6	6	17.97	21.09	20.79	19.55

Date	Time	Air temperature (−°C) T_1	Temperatures in trunk (−°C) T_2	T_3	T_4	Distances between the pins (mm) D_1	D_2	D_3	D_4
Jan. 31	6	16	14	10	10	18.91	22.15	21.75	20.26
	10	10	9	10	11	18.56	21.75	21.39	19.95
	14	8	4	7	9	17.72	20.75	20.43	19.28
	18	11	7	7	8	18.15	21.30	20.90	19.60
	22	12	10	8	8	18.54	21.74	21.35	19.98
Feb. 1	6	14	11	10	10	18.75	21.94	21.54	20.11
	10	10	9	10	10	18.45	21.60	21.23	19.83
	14	10	7	7	10	18.15	21.16	20.85	19.66
	18	15	10	8	9	18.56	21.72	21.35	19.93
	22	20	17	12	11	19.30	22.60	22.19	20.57
2	6	20	17	14	15	19.35	22.70	22.29	20.63
	10	12	13	14	16	19.06	22.31	21.95	20.35
	14	6	7	10	13	18.33	21.39	21.07	19.72
	18	13	10	9	12	18.66	21.68	21.35	19.96
	22	16	13	11	12	18.98	22.28	21.90	20.38
3	6	14	13	13	13	19.02	22.34	21.95	20.38
	10	11	10	11	13	18.76	21.96	21.56	20.08
	14	6	6	8	11	18.00	20.99	20.73	19.48
	18	12	8	7	9	18.18	21.26	20.97	19.71
	22	13	11	9	9	18.61	21.83	21.46	20.05
4	6	10	10	9	10	18.65	21.67	21.33	19.94
	14	5	4	5	7	17.70	20.69	20.38	19.25
	18	6	5	4	6	17.61	20.60	20.30	19.23
	22	12	7	5	6	18.06	21.16	20.86	19.57
5	6	14	12	9	9	18.72	21.91	21.52	20.02
	14	2	2	5	8	17.43	20.38	20.15	19.02
	18	8	3	4	6	17.30	20.29	20.02	19.03
	22	9	7	5	6	17.83	20.92	20.64	19.44
6	6	18	14	11	10	18.89	22.21	21.80	20.24
	14	6	5	7	10	17.82	20.82	20.53	19.35
	18	9	6	5	8	18.05	21.05	20.77	19.55
	22	10	8	6	7	18.21	21.36	21.01	19.70
7	6	13	12		10	18.81	22.05	21.65	20.09
	14	8	6		10	17.96	20.98	20.67	19.41
	18	12	8		9	18.03	21.13	20.85	19.50
	22	13	10		9	18.50	21.60	21.24	19.81
8	6	13	11		11	18.67	21.85	21.48	20.00
	14	4	3		8	17.63	20.63	20.28	19.17
	18	7	4		7	17.61	20.63	20.39	19.25
	22	7	6		7	17.85	20.89	20.58	19.38

Date	Time	Air temperature (−°C) T_1	Temperatures in trunk (−°C) T_2	T_3	T_4	Distances between the pins (mm) D_1	D_2	D_3	D_4
Feb. 9	6	10	8		8	18.12	21.17	20.90	19.60
	14	3	1		7	17.30	20.25	20.01	18.79
	18	7	2		5	17.17	20.02	20.91	18.82
	22	7	4		5	17.28	20.18	21.06	18.97
10	6	10	7		6	17.86	20.92	20.65	19.38
	14	7	4		7	17.57	20.53	20.31	19.08
	18	9	7		7	17.76	20.78	20.51	19.27
	22	10	7		7	17.92	20.95	20.70	19.35
11	6	13	10		10	18.34	21.55	21.33	19.70
	14	7	4		10	17.71	20.85	20.41	19.12
	18	19	11		8	18.43	21.54	21.23	19.77
	22	20	17		8	19.08	22.47	22.11	20.36
12	6	27	23		18	19.71	23.11	22.77	20.88
	14	10	9		17	18.33	21.39	21.12	19.76
	18	21	15		16	19.16	22.44	22.10	20.46
	22	22	19		17	19.65	23.06	22.69	20.89
13	6	25	22		18	19.94	23.42	23.00	21.16
	14	10	8		19	18.54	21.71	21.42	19.48
	18	12	9		13	18.49	21.73	21.39	20.04
	22	12	11		10	18.88	22.13	21.73	20.24
14	6	12	11		11	18.91	22.13	21.74	20.22
	14	5	4		9	17.84	20.31	20.53	19.39
	18	13	7		8	18.03	21.11	20.83	19.65
	22	16	13		8	18.80	22.12	21.78	20.26
15	6	18	17		16	19.45	22.85	22.46	20.76
	14	7	6		12	18.08	21.12	20.80	19.54
	18	9	7		11	18.12	21.35	21.01	19.73
	22	10	8		10	18.39	21.54	21.23	19.85

Appendix III. Some numerical values on squeezing of disks in green (*A.sachalinensis*).
Disk diameter: 8~10 cm. Height above the ground at which disks were cut: 18~20 m.

Bark	Disk number	Squeezing at ※ −6°C (×10⁻⁴)	No squeezing temperature (−°C)	Squeezing rate (×10⁻⁴/°C)
With	1	7.3	14.2	1.5
	2	9.4	14.6	1.5
	3	8.3	14.0	1.6
	4	6.8	13.0	1.6
	5	8.8	12.5	1.4
	6	7.3	13.6	1.3
	7	3.1	8.7	1.4
	8	2.2	9.7	1.3
	9	5.7	14.0	1.3
	10	5.4	15.4	1.6
	11	4.3	11.9	1.5
	12	4.8	11.3	1.4
	13	6.4	14.5	1.4
	14	6.5	13.2	1.6
	15	3.9	10.8	1.5
	16	3.1	11.5	1.5
	17	7.9	13.4	1.6
	18	7.7	13.7	1.6
	19	8.0	13.6	1.5
	20	8.2	14.9	1.6
	21	5.9	11.6	1.8
	22	8.2	12.9	1.6
Without	1	12.3	12.8	2.1
	2	12.3	13.5	1.8
	3	10.4	11.9	2.2
	4	6.5	11.5	1.9
	5		12.0	2.1
	6	8.4	12.0	2.1
	7	7.7	10.6	2.3
	8	6.3	11.1	2.1
	9	5.3	11.2	2.3
	10	10.0	11.1	2.3
	11	6.5	9.3	2.5

Disk diameter: rd. 20 cm. Height above the ground: 8 m.

Bark	Disk number	Squeezing at −6°C (×10⁻⁴)	No squeezing temperature (−°C)	Squeezing rate (×10⁻⁴/°C)
With	1	5.2	9.2	1.9
	2	4.0	8.4	1.9

※ The figure of this column is given in the ratio of amount of so-called "squeezing" to the length of the outest circumference of each disk.

(Continued from the previous page)

Bark	Disk number	Squeezing at −6°C ($\times 10^{-4}$)	No squeezing temperature (−°C)	Squeezing rate ($\times 10^{-4}$/°C)
With	3	3.1	8.2	1.9
	4	2.5	8.0	1.9
	5	1.9	6.8	1.9
	6	2.4	8.0	1.9
	7	2.2	8.2	1.9
	8	2.9	7.8	2.0
	9	4.0	9.8	1.9
	10	3.8	9.7	1.7
	11	3.4	8.5	1.9
	12	3.0	8.8	2.7
	13	3.5	8.8	1.8
	14	3.1	8.7	2.0
	15	3.2	8.4	2.0
	16	3.2	8.0	1.9
	17	4.0	8.8	2.1
	18	2.0	8.0	2.1
	19	3.9	9.6	1.9
	20	4.0	9.8	1.8
	21	3.3	8.4	1.8
	22	3.0	8.7	1.9
	23	5.1	9.9	1.8
	24	4.2	9.4	2.0
Without	1	7.7	9.0	2.5
	2	7.8	8.2	2.8
	3	8.9	9.0	2.4
	4	6.4	7.6	2.6
	5	8.1	8.0	2.7

Disk diameter: rd. 25 cm. Height above the ground: 4 m.

Bark	Disk number and measuring place		Squeezing at −2°C ($\times 10^{-4}$)	No squeezing temperature (−°C)	Squeezing rate ($\times 10^{-4}$/°C)
With	1	S ※	13	9.7	1.5
		H	14	9.3	1.6
	2	S	13	10.1	1.4
		H	14	9.6	1.5
	3	S	14	9.8	1.6
		H	15	9.7	1.7
	4	S	12	9.7	1.3
		H	12	8.9	1.5
	5	S	14	10.1	1.5
		H	14	9.6	1.6

Bark	Disk number and measuring place		Squeezing at −2°C (×10⁻⁴)	No. Squeezing temperature (−°C)	Squeezing rate (×10⁻⁴/°C)
With	6	S	13	9.8	1.4
		H	12	9.0	1.6
	7	S	14	9.8	1.5
		H	15	9.4	1.7
	8	S	14	9.7	1.5
		H	15	9.4	1.6
	9	S	16	11.3	1.5
		H	17	10.6	1.7
	10	S	13	9.0	1.6
		H	15	8.2	1.8
Without	1	S	22	10.0	1.9
		H	18	10.0	2.0
	2	S	19	10.4	2.0
		H	19	9.8	2.1
	3	S	18	10.1	1.7
		H	18	9.8	1.8
	4	S	17	11.3	2.0
		H	18	12.8	1.9
	5	S	18	10.5	2.0
		H	17	10.1	2.0
	6	S	19	10.8	1.9
		H	19	11.0	2.0
	7	S	18	10.0	2.1
		H	19	10.2	2.1
	8	S	21	11.5	2.0
		H	20	10.6	2.0
	9	S	20	11.4	2.1
		H	21	11.0	2.1
	10	S	21	11.2	2.0
		H	21	11.5	2.2
Without sap (heartwood only)	1		22	10.6	2.2
	2		22	9.8	2.4
	3		21	9.5	2.6
	4		20	9.2	2.5
	5		21	9.8	2.3
	6		22	10.8	2.3
	7		21	9.8	2.3
	8		24	11.5	2.2
	9		22	10.7	2.1
	10		22	10.8	2.2

※ S and H show both the outest part of the sapwood and the heart wood of a disk, respectively, at which squeezing was measured.

Appendix IV. Coefficient of linear thermal expansion of wood in green in range of temperature from −2° to −25°C (*A. sachalinensis*).*

Direction of grain	Coefficient ($\times 10^{-4}$)			Moisture content (%)			Specific gravity in oven dry		
	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.
Radial (α)									
Sapwood**	1.21	0.73	1.81	71	48	95	0.40	0.34	0.47
Heartwood	1.31	0.56	1.97	47	36	98	0.40	0.33	0.47
Tangential (β)									
Sapwood	2.67	1.49	3.64	101	68	150	0.39	0.32	0.47
Heartwood	2.50	1.25	3.13	48	38	63	0.43	0.37	0.49

* The measurement was carried out mainly by using of optical lever method with a magnification of about 2,000×.

** Specimens include a part of heartwood.

Appendix V. A sample of cross sectional distribution of moisture content in a disk (see photo 26), taken at 100 centimeter height above the ground of a trunk having frost cracks (*A. sachalinensis*).

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*	*l*	*m*	*n*	*o*	*p*	*q*	*r*	*s*	*t*	*u*	*v*	*w*	*x*
1										57	66	144	150	165	166									
2								160	99	59	34	71	70	74	117	165								
3						178	163	172	32	147	116	173	59	73	112	72	160	159	157					
4				192	193	83	31	64	104	166	186	177	134	61	73	107	114	87	141	168				
5			203	91	79	31	55	52	182	200	201	198	185	100	74	76	66	58	54	148	168			
6		184	155	30	32	54	104	128	190	179	185	173	183	187	138	141	120	58	37	72	102	163		
7	146	130	74	40	55	161	197	193	182	82	135	139	180	183	182	193	105	58	67	29	61	94	153	
8	126	115	201	128	103	206	198	170	167	89	165	186	182	186	172	172	155	64	63	28	28	31	110	
9	167	66	154	167	169	195	185	161	118	105	128	155	162	164	175	109	223	62	79	31	29	32	89	
10	179	36	41	123	189	177	182	161	146	129	84	52	133	97	95	33	151	74	79	39	25	35	117	146
11	188	48	40	119	149	167	134	126	123	86	65	47	39	38	35	34	66	54	69	41	28	40	123	152
12	191	73	42	160	140	131	142	140	123	157	61	64	36	38	34	37	38	47	47	51	27	94	133	151
13	202	91	63	109	165	136	180	166	139	178	111	58	87	94	32	107	42	41	49	23	32	172	174	155
14	207	137	69	79	197	179	172	175	141	189	74	47	66	110	50	113	55	36	54	54	36	158	164	
15	201	187	97	113	172	160	147	203	56	175	113	125	58	148	155	105	56	53	45	29	113	172		
16		213	77	91	172	112	45	83	196	100	174	156	110	156	163	41	76	47	35	44	163			
17			208	107	72	138	30	47	96	176	116	104	91	51	44	30	35	30	42	155	173			
18			176	206	75	87	134	34	88	157	56	44	46	32	29	33	29	32	138	177				
19				180	179	71	140	124	71	194	182	72	30	27	29	162	94	122	164					
20						190	180	199	151	90	180	192	77	92	117	151	174	174						
21								170	160	110	165	197	194	201										

写　真　説　明

写真 1　トドマツ凍裂木。1956年，雨竜演習林にて。積雪約2m。地上高約1mから8mにわたる長い凍裂で，地上高3mの位置における凍裂の割目の幅は気温約 −5℃ において8mm。地上高8〜9mの位置に幹の折損部，孔状部などあり。

写真 2　トドマツ凍裂木。1953年，天塩第一演習林にて。形質良好なトドマツ基幹部の凍裂。典型的な霜腫れを形成す。凍裂の下方部に樹皮裂あり。

写真 3　トドマツ凍裂木。1953年，天塩第一演習林にて。比較的若い凍裂で霜腫れ著るしからず，二つの根張りの間の上方に位置す。BUSSE の論文参照。

写真 4　トドマツ凍裂木。1953年，天塩第一演習林にて。典型的な基幹部の凍裂，但しほとんど霜腫れをなさず，むしろ溝状をなす。写真3と違って根張りの直上に凍裂あり。

写真 5　トドマツ凍裂木。1956年，雨竜演習林にて。地上高1〜5mの凍裂。細い枯枝と多くの節(樹幹表面からは死節と認められるもの多し)。写真下端附近の凍裂割目幅は −5℃ で4mm。

写真 6　トドマツ凍裂木。1956年雨竜演習林にて。二又部の直下にあり，太い枯枝多し。写真のような枯枝が多くても，若し上方に二又部がなければ凍裂の出現することはすくない。

写真 7　トドマツ凍裂木。1956年，雨竜演習林にて。典型的な二又部(樹幹分岐部)直下の凍裂。二又部下方1〜2mが最も著るしく凍裂。トドマツにはこのような凍裂が非常に多い。

写真 8　トドマツ凍裂木。1956年，雨竜演習林にて。太い枯枝その他の材部露出部に関連す。正面の凍裂は癒着してしまっているが，左側面にみえるものは，気温 −7℃ で約15mm(最大幅のところで)裂開。

写真 9　トドマツ凍裂木。雨竜演習林にて。凍裂は主幹の損傷部に関連す。正面にみえる凍裂の外になお小凍裂が損傷部附近にあり。その横断面の模様は写真30附近の材部に類似するものと判断される。

写真 10　トドマツ凍裂木。1956年，雨竜演習林にて。典型的な基幹部の凍裂で，ほとんど地際から凍裂。凍裂の割目は通直でなく蛇行し，異常な霜腫れを形成す。

写真 11　トドマツ凍裂木。1955年，十勝川上流附近にて。凍裂はなお若く，霜腫れが著しくないが，通直にして，外見的には形質良好な樹幹の典型的な基幹部凍裂。ほぼ根張りの直上にあり。

写真 12　典型的なトドマツ凍裂霜腫部表面の樹皮。この凍裂は完全に癒着せるもので，その材部の状況は写真39に類似(文献33の Fig. 40 をも参照。)

写真 13　トドマツ凍裂木の根にみられた孔状部。野幌国有林にて。凍裂は基幹部にあり，その内部の水喰材は目廻りなどを通じてこの孔状部に接続。LAGERBERG[49] 参照。

写真 14　凍裂幹材部外観。直径約15cm。写真13の凍裂木の凍裂部外観に酷似。凍裂の割目幅は気温 −5℃ で約7mm(写真の丸太の中央附近で)あり，また割目の2，3箇所に裂かれた新しい組織あり。次の写真参照。なお写真23はこの丸太の横断面を示す。

写真 15　凍裂の割目にみられる新組織。この写真は冬季凍裂が裂開している際のもので，前年の生長期に凍裂部を被って形成された新しい組織が，冬季凍裂の裂開によって引き裂かれた状況を示す。

写真 16　凍裂の割目。常温では完全に閉鎖せる割目なるも写真15のような新組織はみられず。樹勢の衰えた立木にしばしばこのような凍裂がみられ，時には夏の生長期間中にも割目の閉じない場合あり。なお，本文中にしばしば凍裂の割目幅と記したのはこの写真にみられるような割目で，多くの場合特定の位置についてキャリパーを以て測定。

写真 17　トドマツの水喰材。水喰材のある丸太の片側から連続して板を製材しその順序に並べた状況を示す。不規則な模様が水喰材で，その概略の形を示すため黒く縁取りす。凍裂なし。

写真 18　写真17に類似の水喰材部。水喰材は節（多くは死節と認められる）を中心にして分布。何れも枯枝或いは樹幹表面に露出した死節に接続するもので枝水喰[33),49)]に属す。凍裂なし。

写真 19　凍裂のある丸太を写真17と同法で製材し，並べたもの。凍裂は板の下方約1/3の部分にあるが（板3, 4, 5に現わる），水喰材も丸太のおおむね下半部に分布。

写真 20　凍裂丸太の水喰材。丸太の中央附近に集まり幹軸方向に長く分布す。凍裂はこの写真に示す全長にわたり，半径方向は板の番号11，10,…1の方向。

写真 21　凍裂木の水喰材。写真19と略々同類。完全な柾目板で多くの目廻りが板の縦方向の細線として走る。その割目の中には氷がつまっている。これに関しては写真46，47など参照のこと。凍裂はこの写真に直角に，向う側から入っている。

写真 22　凍裂のある板の水喰材部。水喰材として総括的に扱っている材部も，この写真から明らかなようにその含水率分布は極めて複雑。縦に走る細い黒線は目廻りの縦断面。一般に暗色部は明色部に比べて含水率が高い。写真26，附表（巻末）V参照のこと。

写真 23　凍裂幹材部横断面。写真12参照。約 −15℃ の低温室でうつす。この凍裂は約30年前に割裂したものであるが，その後，毎年，割裂，癒着を繰返し，典型的な霜膨れを形成した。凍裂の割目は，ほとんど直線的に円形断面の半径ほどの長さで内方の目廻りに接続する。

写真 24　トドマツ丸太木口面に分散的に現われた枝水喰材。凍裂はなく，北海道の天然林の冬の伐採現場では極く普通にみられる。反対側（上方）約1mの断面には水喰材なきも更に上方の断面には存在す。

写真 25　地上高約13mの位置に二又部を持つトドマツ凍裂木の，地上高65cm附近の断面。凍裂の割目（左上方）は3本に分れ，複雑な形状を示す。その内方に幅2～3mmの目廻りあり，氷をみたす。水喰はやや分散的。写真左下方，右上方部に辺材に達する長い割れあり。以下写真38まではこの凍裂木の幹材部の模様を示す。

写真 26　地上高100cmの横断面。凍裂は樹皮表面より約10cm真直ぐに髄心方向に入り，目廻り，放射方向の割れに接続して，結局，髄心に達す。凍裂の最外側はなお若干開孔せるも，やや内方での割目幅に比べてかなりせまい。従って，本円板の水喰材が完全に融け，凍裂の最外側が接触すなわち凍裂が完全に閉鎖した状態でも，その内部には比較的幅の広い割目が残っているものと判断される（文献33のFig. 30など参照のこと）。なお本円板の含水率分布を附表Vに示す。円板の暗色部は一般に含水率が高い（文献33参照のこと）。

写真 27　地上高6.5m附近の断面。髄心のやや上方にある目廻りの中央部から外方にのびる放射状割れあり，これが曲折して樹幹外周部の二つの割れ目に接続す。左の割目は樹皮表面に達し，いわゆる凍裂として外部から認知することができる。右側の割目は樹皮表面に達していないので外部から認知できないが，その尖端は樹皮直下の形成層に達し，毎年，わずかながら傷

瘢組織を形成。これは R. HARTIG のいわゆる Innere Frostspalten に該当するものと判断される。なお，この割目は，稍下方部において樹皮表面に現われ，明らかな凍裂として認知された（文献33の491頁，Fig. 4, 45～47など参照のこと）。

写真 28　地上高730 cmの断面。右上の凍裂は外部から明らかに認知でき，上方のものは認知できず。本文中にも記したように，右上部の凍裂の幅とその内方にある目廻りとの間に量的関係あり，目廻り中の氷を除去することにより凍裂は割目を閉じた。この写真のように，大きな目廻りの外側に，それに直接あるいは間接して外方にのびる放射状割れの出現すること多し。

写真 29　地上高940 cmの断面。主なる凍裂の外に数個の凍裂様の割目があり，明らかに異常成長をしている。円板中央部の割目の数も多く，形も大きい。かつほとんど氷をみたしている。写真47～50を参照のこと。融解後凍裂は閉鎖せるも，その内方には大きな割れ目を残す。

写真 30　前者より稍上方の円板。凍裂の割れ目の内方の目廻中の氷を除いた状況。氷除去のため凍裂の割目幅は，最外側で約3 mm減少した（約 −5°C の低温室にて）。しかし割目は完全には閉じなかった。このような円板では，いわゆる充実円板 (Solid disk) の考え方は全く適用できず，定量的扱いは不可能。

写真 31　地上高1030 cmの断面。この部分では，外見上主なる凍裂はaであるが，bも樹皮に達しており，またcはかって樹皮表面にまで達していたことが樹皮の外部形態から明らか。またdは樹皮に割裂の痕跡を残していないが，過去約10年間にわたり，形成層の活動による異常肥大組織を形成している。髄の周辺に褐色の腐朽が出現。

写真 32　腐朽は分散的に拡大し，また著しい内部割れのため氷の融解後は円板としての原形は保持し得ず。外方部の割目の中には氷を充している。樹幹の，この附近で目につくことは，目廻りの発達がいちじるしく，その外側に放射状割れが数多く発生し，その比較的多数のものが凍裂に接続し，あるいは凍裂様の割目となっていることである。伐採当時割裂していた割目はaのみ。

写真 33　写真32の下方部。

写真 34　写真32の円板の左下方部。下方および左下方にのびた割目 (b, c, d) はすべて癒着を完了しているが，樹皮には明らかに割裂当時の痕跡を残す。

写真 35　地上高13.5 m附近。樹幹はこの附近から2本に分岐し，それぞれのここから上方約2 mにわたり全面的な水喰状態を示すが内部割れは全くみられず，凍裂もない。さらに上方へ行くにつれ樹幹は正常な含水率分布をとり戻す。

写真 36　写真29附近の円板の一部。円板の中央部には放射方向，円周方向の，比較的大形の割目あり，氷をみたす。外方にのびる一つの放射状割れ及びジグザグに接続し乍らのびる一つの割目あり，両者とも尖端附近の2～3年輪が異常成長している。この種の割目はかなり屢々現われるが，写真のように外方に尖った笠形の特殊な着色を示すのが，その尖端部分の特徴である。

写真 37　写真26附近の材部の一部。約8年前から5年間，辺材部割目の尖端に異常肥大成長が起り，また傷痍樹脂溝を形成（写真40参照）。しかし樹皮には割裂の痕跡認められず。

写真 38　写真36の同類。笠形の着色部が三つあるが，その一つには割目がこの断面では認められず。しかし，樹幹のこの断面よりやや下方から，この変色部に対応する割目が現われはじめ，下

方へ行くにつれ大きくなった。

写真 39　完全に癒着した凍裂幹材部の横断面。この凍裂は伐採した年から51年前にはじめて割裂し，約15年間，割裂癒着の経過を繰返し，割裂後約20年にして癒着を完了。内部に大きな放射方向の割れを包蔵する。この樹幹の場合は癒着完了後の数年目から急激に肥大成長を増す。

写真 40　凍裂の癒着組織（材部のみ）。写真39参照。本格的な凍裂発生の年（矢印）の2年前からこの附近の組織に異常あり，傷痍樹脂溝を形成，凍裂発生後9年間毎冬割裂。10年目以後は割裂せず，癒着完了。写真左上方の割目は凍裂に非ず。

写真 41　癒着の完了した凍裂と，なお裂開中の凍裂を含む樹幹の一断面で，多数の，小さいが肉眼を以って認知可能な放射方向の割れを含む円板。明らかに樹皮に痕跡を残す凍裂が8個あり，また内部にある凍裂様割れは十数個あり。円板の含水率分布は文献33)，484頁に掲載。

写真 42　凍裂a，bは明らかに樹皮に痕跡を残す。c，d，eなどは異常組織を形成するも外部に痕跡なし。ほかに，なおcなどと類似の小さい割目が数個あるも写真には現われず。

写真 43　写真41の一部で癒着の完了せる凍裂の附近。この凍裂は約60年前に割裂，30年前にほぼ癒着を完了。凍裂の内方には多数の放射状割れあり。但し含水率は比較的低し。

写真 44　写真41の一部で，冬季にはなお裂開する凍裂。約50年前に割裂。凍裂の内方には放射状割れが多いが，また辺材部に達する凍裂様の小さな割れが，大きな凍裂に接近して存在。内方部の含水率比較的高し。

写真 45　写真41の一部で放射状割れの集合する状態を示す。割れ目の長さ，幅などについては第11表参照。これらの割れは氷の融解後は肉眼による認知やや困難となる。

写真 46　大きな周囲状割れとその内部の氷を示す。

写真 47　水喰材内部の割れ目。凍裂の内方に分布する。このような割れ目はほとんど氷でみたされている。

写真 48　写真47に類似。上方に凍裂の一部あり。目廻り中の氷を除くと凍裂幅が減少した。

写真 49　1年輪或いは2年輪にわたる短い放射状割れが右に，左にずれ乍ら伸びる状態を示す。中央左側に示されるように，1年輪の長さの割れ目の場合は秋材部を中心とする凸レンズ状のことが多い。

写真 50　割れ目の中の氷。氷は黒く写っているが，その中に点在する白い部分は気泡。目廻りはしばしば樹脂溝列の位置に発生。

写真 51　復張実験に用いた円板の一部。円板は写真の架台に保持し，雪洞，室内などで温度を調節。

Explanation on the photos 1-51.

Photo 1. Distant view of a frost cracked tree of "Todomatsu", *Abies sachalinensis*, having a long frost crack extending about one to 8 meters above the ground. The main trunk forks at about the height of 8 meters above the ground.

Photo 2. A "Todomatsu" trunk having a typical frost rib at its basal part.

Photo 3. "Todomatsu" trunk having a relatively young frost crack, the outer view of which is rather flat. The crack is located at a part of the collar of two primary roots.

Photo 4. A "Todomatsu" trunk having a typical frost crack at the base. It is not located at the collar part as is the case of Photo 3 but just above a primary root.

Photo 5. A "Todomatsu" trunk having a frost crack from 1 to 5 meters in height above the ground where it has also many dead branches.

Photo 6. A "Todomatsu" trunk having a frost crack located from 5 to 7 meters above the ground where there are many thick living branches.

Photo 7. A typical frost crack which often appears under the forked part of "Todomatsu" trunk. The place under the forked part of trunk is often severely injured by frost cracks.

Photo 8. A "Todomatsu" trunk having some frost cracks in conjunction with thick dead branches and some kinds of scar of the trunk. The photo shows a perfectly healed frost crack on the front side and not yet healed cracks on the left side of the tree.

Photo 9. A "Todomatsu" trunk having an approximately 3 meter long frost crack located on the front side together with some 20 to 30 centimeters long cracks, which are connected with a broken wound part of the trunk as shown in the photo.

Photo 10. A "Todomatsu" trunk having an abnormal frost crack in a exterior view, viz., it runs upwards in a zigzag line, ranging from near the ground level to about 6 meters in height.

Photo 11. A typical form of frost crack which often appears in the basal part of a tree trunk. The trunk shown here was free from any defects in the outer view except the frost crack over 10 meters in height from the ground level. But it must have wetwood in the internal part.

Photo 12. Close-up of the outer surface of a perfectly healed frost crack. The inner part of the trunk resembled very closely that shown in photo 39.

Photo 13. The main root of a frost cracked trunk which was injured at the basal portion. The root has a hole through which the water penetrated to the heartwood of the trunk to form wetwood at the trunk part where the frost crack was located.

Photo 14. Outer view of a small frost cracked log of rd. 15 centimeters in diameter. The frost crack opened about 7 milimeters in width in the middle portion after 2 days from that it was put into a cold chamber of temperature of −5°C.

Photo 15. Teared tissues which were bridged over the crack in the preceding growing season and which were broken when the frost crack reopend during the following winter.

Photo 16. Opening of a frost crack without teared bridged-tissue. This often occurs in such cases of over matured trunks.

Photo 17. Picture showing distribution of wetwood in a log and in a number of boards which were sawn from that log. Wetwood parts are outlined with black chalk in order to show the wetwood clearly.

Photo 18. Sawn boards from a log without any frost cracks, showing wetwood distribution and how it penetrates to the inner wood part through dead knots.

Photo 19. Sawn boards from a log with a frost crack, showing wetwood districution in relation to the frost crack which is located in boards No. 3, 4 and 5.

Photo 20. Sawn boards from a log with frost crack extending over the entire length of it, showing wetwood which distributes collectively around the pith part.

Photo 21. A magnified view of a portion of one of the boards shown in photo 19. Many ring shakes which are packed with ice run parallel to grain of the board.

Photo 22. A magnified view of a portion of a edge grain board. It shows complicated distribution of moisture and many cracks packed with ice in wetwood. See photographs 46 or 47 etc., concerning these cracks and also see photo 26 and Appendix V concerning moisture distribution in a disk numerically.

Photo 23. Cross sectional view of the frost cracked log shown in photo 14, at temperature of −15°C. During the repetition of healing and reopening for about 30 years, the frost crack formed a typical frost rib as shown in this photograph.

Photo 24. A view of branch-born wetwood of "Todomatsu" which usually appears scatteringly at end surfaces of logs in the case of free from frost cracks.

Photo 25. A magnified cross sectional view having frost cracks inside which there is a ring shake packed with large ice of about 3 milimeters in width. There also are long radial cracks reaching to sapwood at the left lower and right upper parts.

Photo 26. A cross sectional view at 100 centimeters height above the ground of the same tree trunk as that shown in photo 25. It has a frost crack which spreads inward in length of about 10 centimeters, connecting with some ring shakes or internal radial splits in inner part of the trunk. The moisture content of this disk is illustrated in Appendix V, of which two lines, a vertical and a horizontal, are respectively corresponded with the dotted lines in this photograph.

Photo 27. A cross sectional view at 6.5 meters above the ground of the same trunk as that of photo 25, showing 2 frost cracks (upper part), some radial and ring cracks and wetwood. The left one of the frost cracks reaches to outest part of the trunk, viz., surface of bark, but the other one dosn't in the picture.

Photo 28. A cross sectional view at 7.3 meters height above the ground, having 2 frost cracks, many internal cracks and wetwood. Opening of one (right) of the frost cracks closed entirely by eliminating packed ice from a ring shake which was located just

inside the frost crack as shown this picture. This is the case which often occurs in "Todomatsu". The other one (upper) which apparently formed wound wood tissue as shown in this picture. However, this did not reach to the surface of the bark.

Photo 29. A cross sectional view showing frost cracks, and many internal cracks extending radially or tangentially. Some of the frost cracks are perfectly healed but one of them (upper) not, as shown in this picture.

Photo 30. A cross sectional view of a disk with a frost crack (upper) after eliminating ice from ring shakes which were located inside the frost crack. Width of the frost crack at the outest part decreased by the eliminating of the ice, but not closed entirely.

Photo 31. A cross sectional view at about 10 meter height above the ground of the same trunk as that of photo 25 etc. It has 4 main frost cracks two (a, b) of which reached to the surface of the bark, one (d) reached only to the cambium and has formed wound tissue for these 10 years. There appear some brown rots in the center portion of the disk in the picture.

Photo 32. A magnified cross sectional view at about 11 meter height above the ground, showing frost cracks, many internal cracks with packed ice, and scattered rotten wood parts.

Photo 33. View of lower part of the same disk as that of photo 32.

Photo 34. View of lower left part of the same disk as that of photo 32. Frost cracks b, c, d have been perfectly healed up in this cross section.

Photo 35. A cross sectional view at 13.5 meter height, of the same trunk as that of photos from 25 to 34. The trunk has been forked at about 13 meter height above the ground level and had no frost cracks above this height. The part above this height of the trunk, however, has wetwood without any ice packed cracks as shown in this picture.

Photo 36. Radial cracks extending from central portion outward straightly or zigzag. Such cracks appear very often in "Todomatsu" trunk in Hokkaido. They have usually special discoloration at the top as shown in this picture.

Photo 37. A similar radial crack to that of photo 36.

Photo 38. The similar radial cracks which have typical discoloration in the form as shown in the picture. These cracks (including those of photos 36, 37) did not reach to outer surfaces of the barks.

Photo 39. A cross sectional view with a frost crack healed up perfectly. This frost crack was originated 51 years ago (from the year when the tree felled) and perfectly healed up by cullus tissue about 20 years ago after repetition of bridging and reopening for about 15 years. There is a large radial crack, a frost crack, and is a large number of radial, tangential cracks which are invisible with naked eyes.

Photo 40. A magnified (about 4 times) cross sectional view of cullus tissue of a frost crack like that of photo 39. An arrow shows the year in which this crack splited for the first time as a so-called frost crack. After repetition of bridging and reopening for 9 years it was healed perfectly by the cullus tissue.

Photo 41. A cross sectional view of a disk cut from a mature "Todomatsu" trunk of 70 centimeters in diameter at breast height, showing a perfectly healed frost crack and a not healed crack, and many other small cracks.

Photo 42. A magnified view of a portion of the same disk as that of photo 41. Cracks **a** to **e** respectively have cullus at only the wood part or both at the wood and the bark.

Photo 43. View of a perfectly healed frost crack and a large number of small radial cracks which appear inside the frost crack.

Photo 44. View of a main frost crack and some small cracks which apparently formed cullus tissue.

Photo 45. A magnified view of a portion of that of photo 41, showing a large number of small radial cracks appearing collectively in inner part of the disk. It is hard to see them with naked eye after thawing.

Photo 46. A disk having a frost crack and some remarkably big ring shakes inside the frost crack. These internal cracks with packed ice had the width of about 1 to 1.5 centimeters in maximum value. The frost crack closed entirely after eliminating the ice in these ring shakes.

Photo 47. A magnified view of a disk with a frost crack, showing many ring shakes, radial cracks with packed ice distributed in inner part of the disk.

Photo 48. Similar view to that of the photo 47.

Photo 49. Similar view to that of the photos 47 and 48.

Photo 50. A magnified view of ice packed in ring shakes and radial shakes. There are many small white spots which show bubbles of air being included in the ice.

Photo 51. Disks used for measuring squeezing in low temperature.



Photo 1



Photo 2



Photo 3



Photo 4



Photo 5



Photo 6



Photo 7



Photo 8



Photo 9



Photo 10



Photo 11

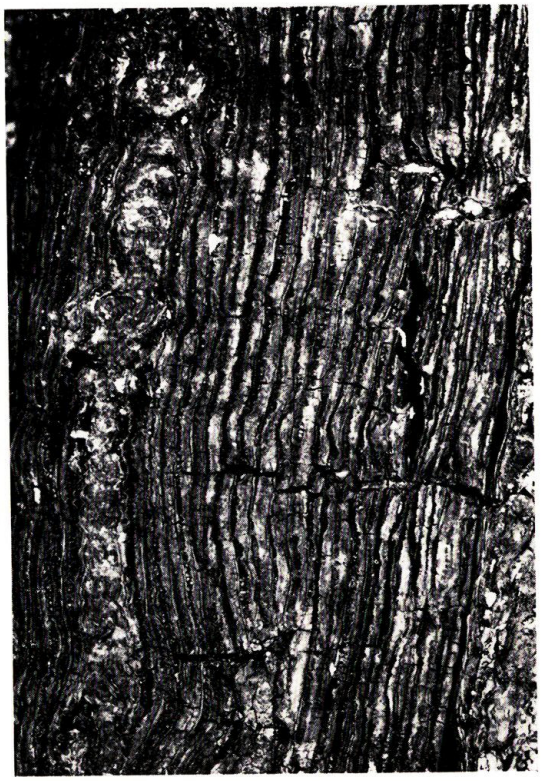


Photo 12



Photo 13

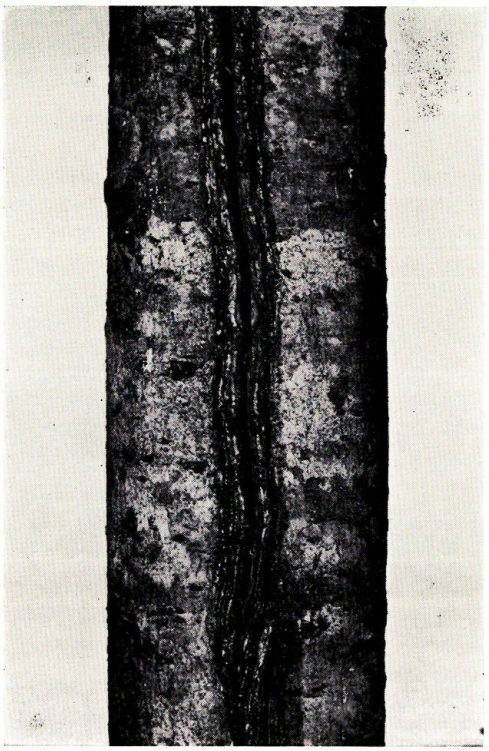


Photo 14



Photo 15

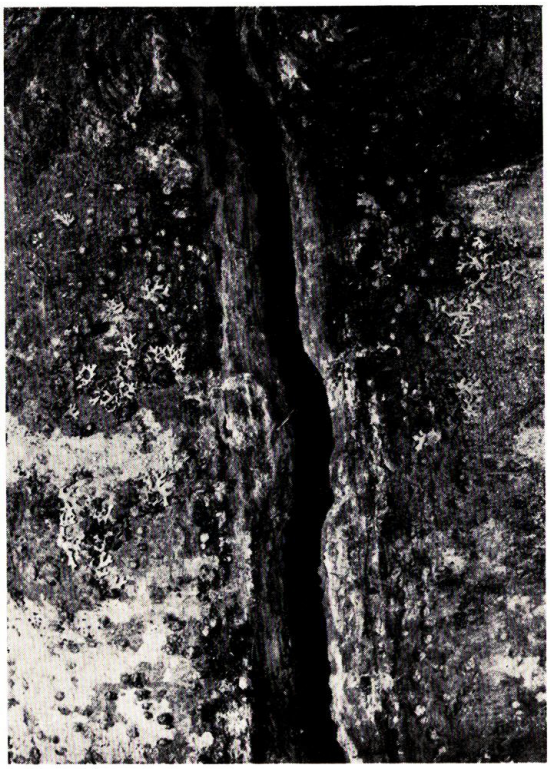


Photo 16

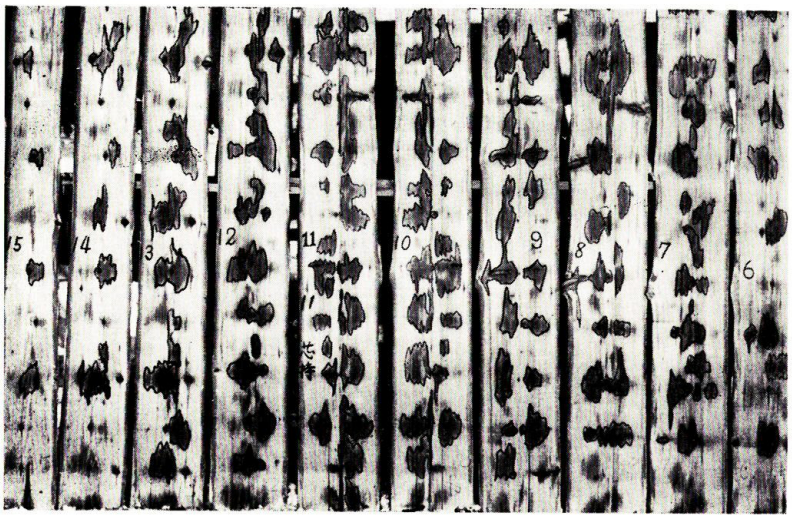


Photo 17

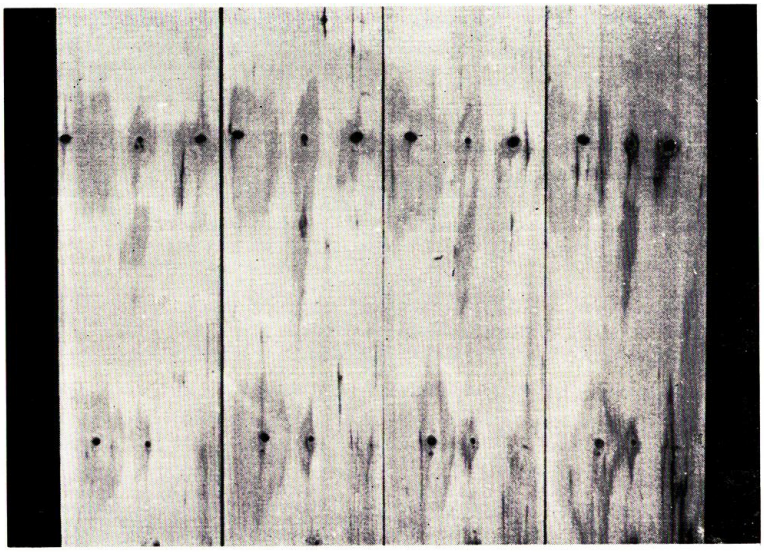


Photo 18



Photo 19

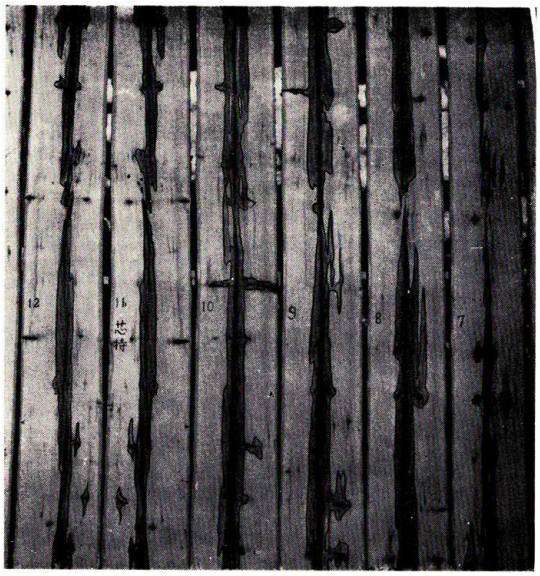


Photo 20

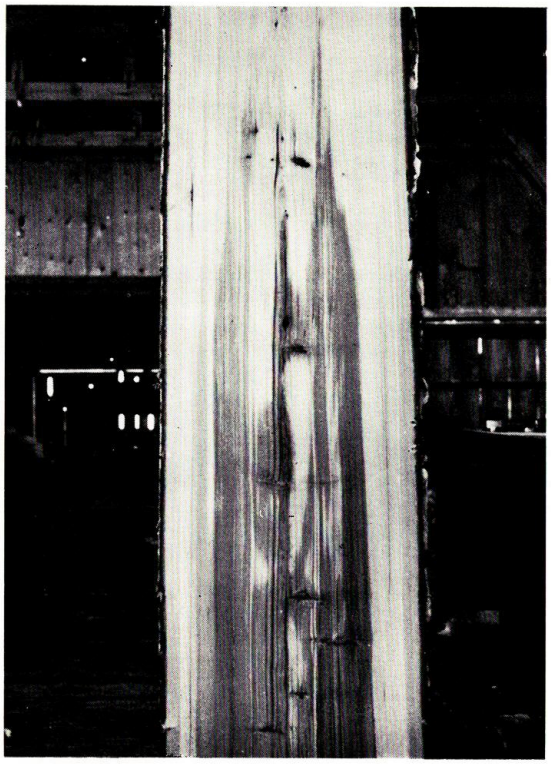


Photo 21

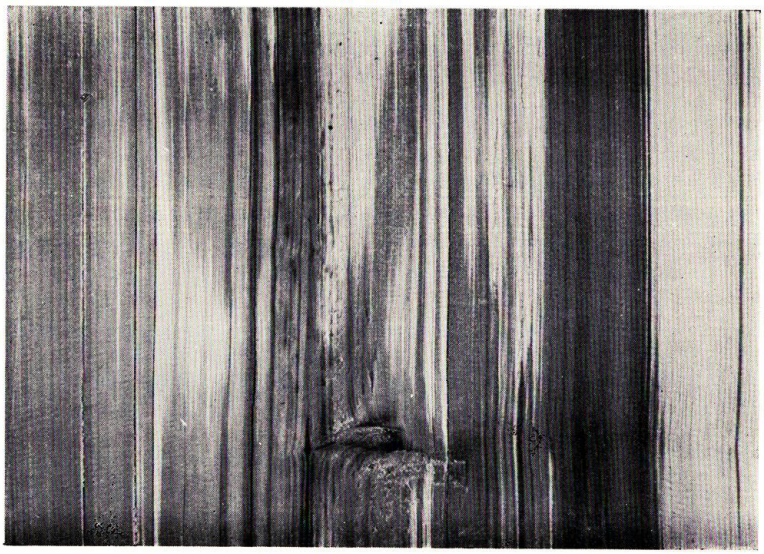


Photo 22

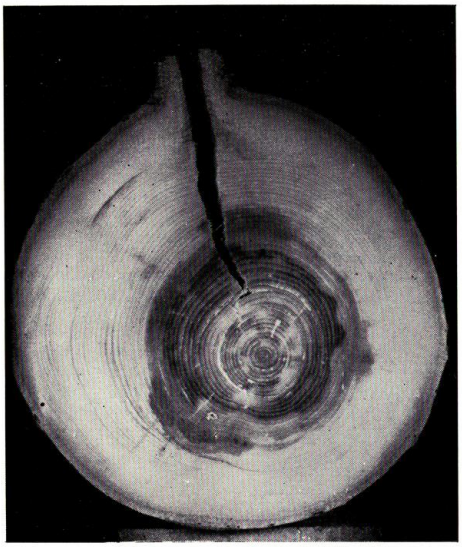


Photo 23

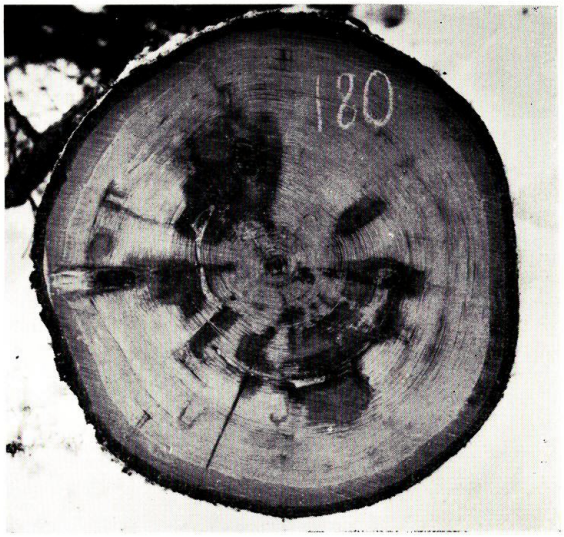


Photo 24



Photo 25

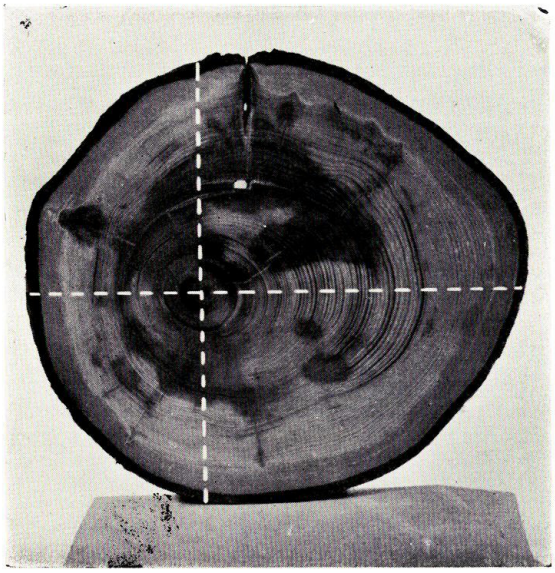


Photo 26

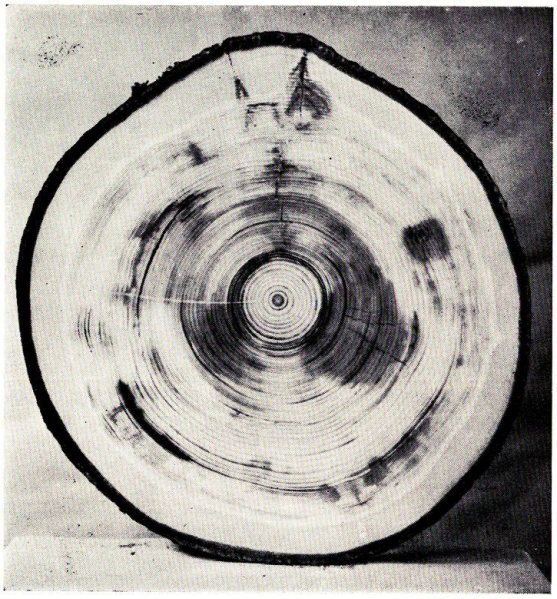


Photo 27



Photo 28

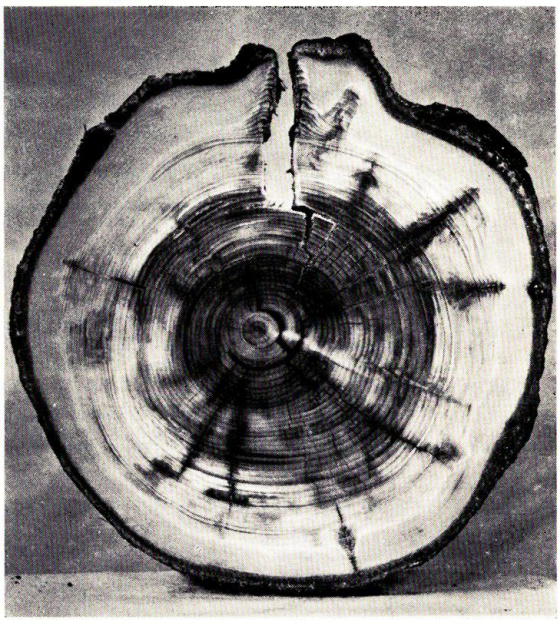


Photo 29



Photo　30

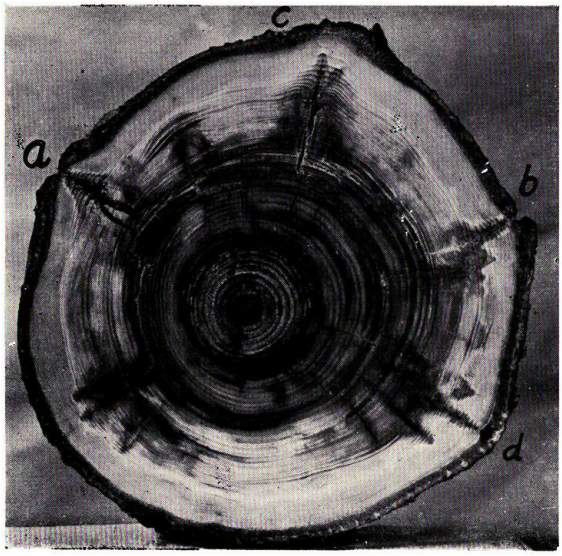


Photo　31

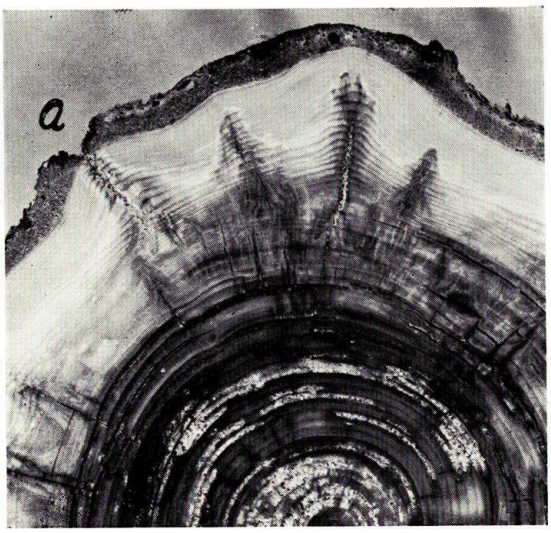


Photo　32

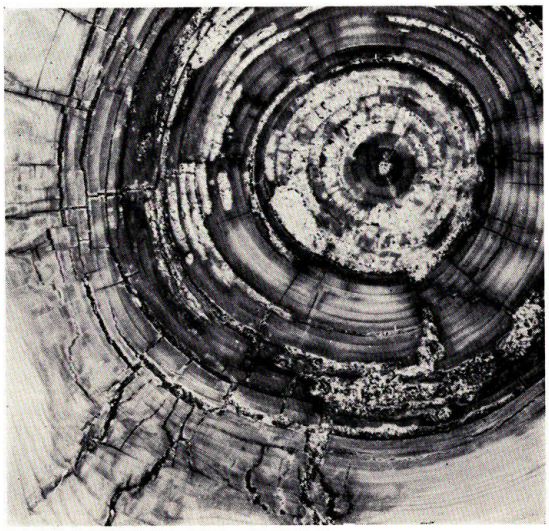


Photo　33



Photo 34



Photo 35



Photo 36

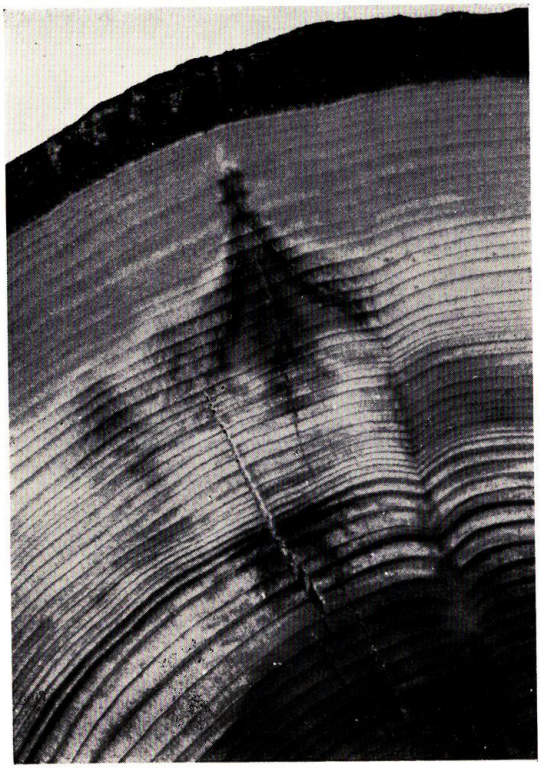


Photo 37

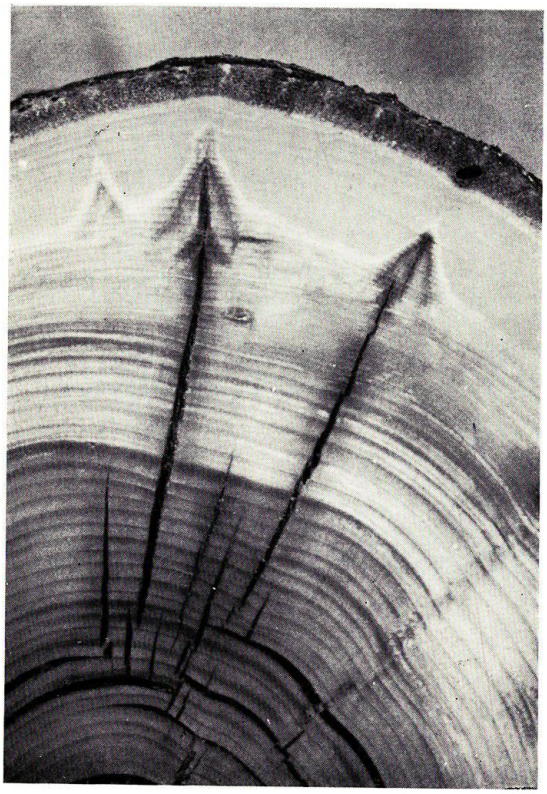


Photo 38



Photo 39

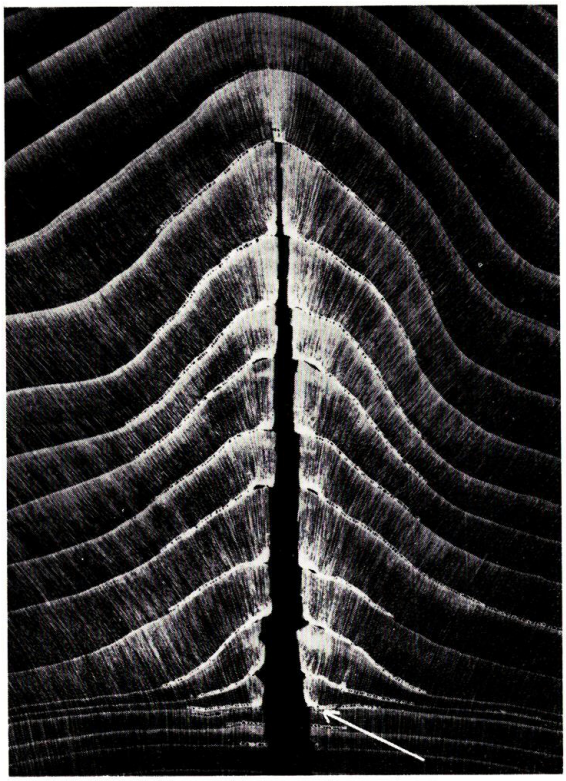


Photo 40

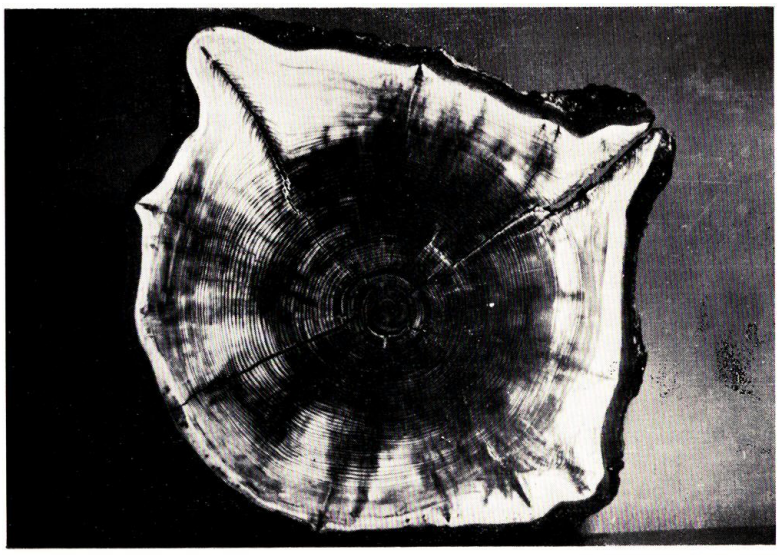


Photo 41

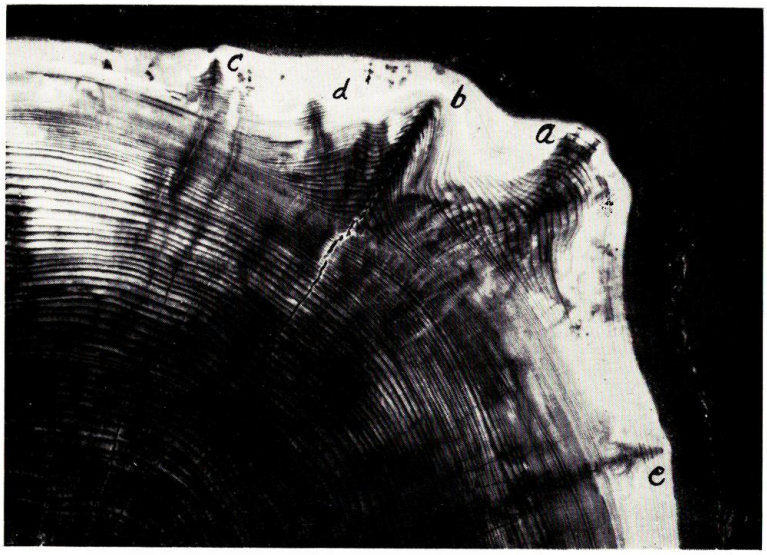


Photo 42

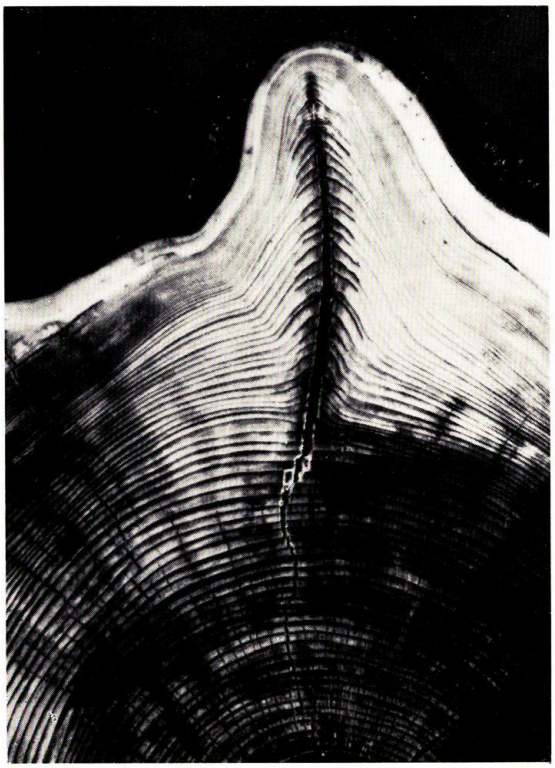


Photo 43

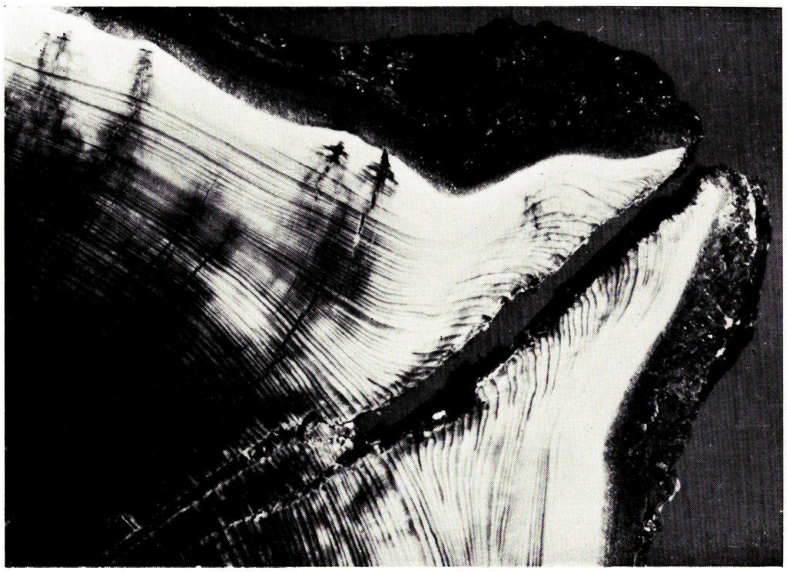


Photo 44

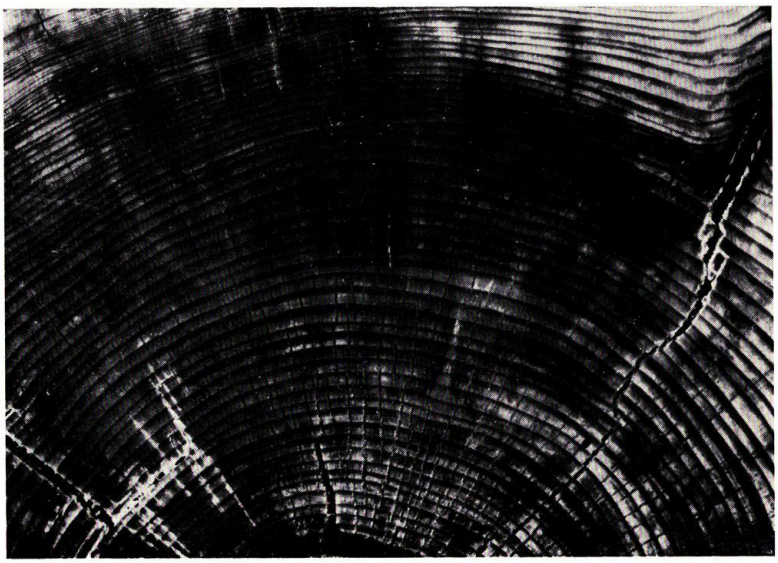


Photo 45



Photo 46

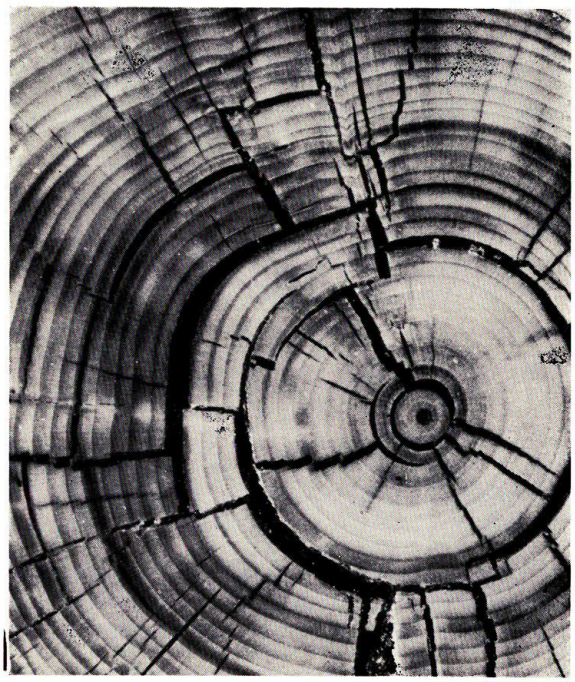


Photo 47



Photo 48

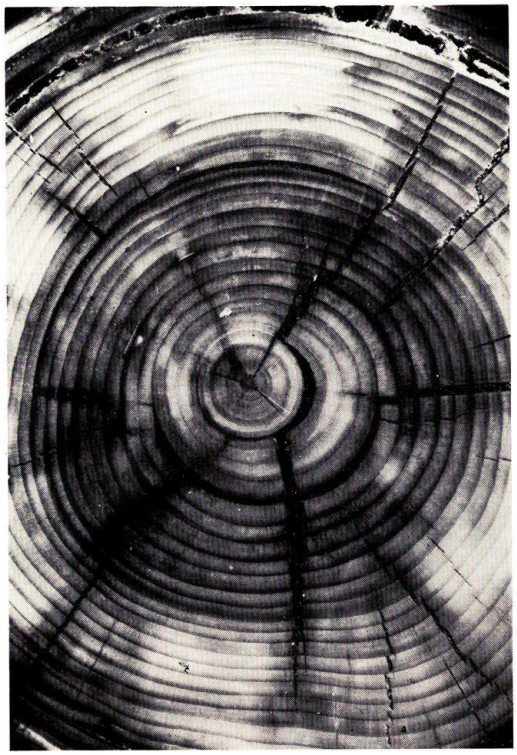


Photo 49



Photo 50

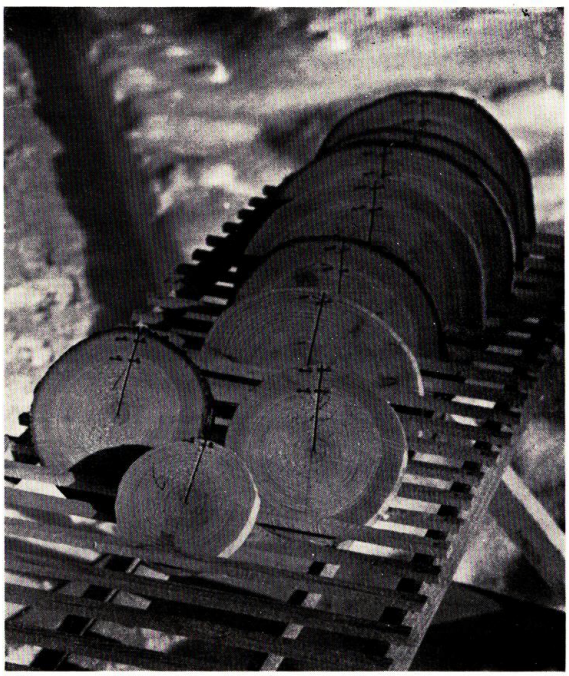


Photo 51