



Title	寒さのために樹木が割れる現象について
Author(s)	石田, 茂雄; ISIDA, Sigeo
Citation	低温科学, 5, 61-73
Issue Date	1950-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17472
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_p61-73.pdf



寒さのために樹木が割れる現象について*

石 田 茂 雄

(北海道大學農學部 森林利用學研究室)
(低溫科學研究所 應用物理學部門)

(昭和23年5月受理)

嚴寒の頃に、樹木が大きな音を發して割れることがある。此の現象は、林業者間に“凍裂、(霜割れ, Frostriss, Frost Crack) と呼ばれ、はやくから世界の各地に知られていた。わが國でも、北海道を始め、本州の東北地方、北陸地方並びに中南部の山岳地帯にわたつて廣く發生する。樹木の凍裂は、木材利用の立場からは、一つの自然的な欠點となるが、従來は主として歐米殊にドイツの林學者、實地林業家の間に於て、此の現象に對する論議が行われてきた。筆者が此の研究をはじめたのは、主として、木材利用並びに森林撫育の觀點からであるが、又一方、此の現象の機構自體に對する關心からである。それで、北海道の森林について、實際の凍裂を調査すると共に、北海道大學低溫科學研究所の低溫實驗室で試料による實驗的研究を行つた。こゝに、昭和22年1月中旬から2月末にかけて行つた實地調査の結果と、低溫實驗室で行つた實驗の結果の一部とを報告する。

この研究は、北海道大學農學部森林利用學研究室、大澤正之教授の御懇篤な御指導によつて進められた。こゝに厚く感謝の意を表わす。また低溫科學研究所の吉田順五教授には、低溫實驗室に於ける實驗について、また物理學的立場からの批判について、いろいろお世話になつた。記して感謝の意を表わす。

なお、現地調査の際にいろいろ御便宜を與えられた當麻木材會社の方々には厚くお禮を申上げる。

I. 實地調査現場の状況

調査現場は、北海道上川郡當麻村、旭川林務署當麻事業區第12林班の一部で、南北に走る小澤を挟んで、東及び西に傾斜する林地である。林相は、針葉樹、廣葉樹が略々同量の群團的混交状態をなしていたが、筆者の調査期間中に、昭和21年度の伐採が行われた。この地域は冬は、低溫、多雪であるが、風は少く、比較的平穩である。筆者は滞在中に氣溫及び風速の測定を行つた。場所は、澤沿いにある宿舎の近くであるが、その結果によれば、1月26日

* 北海道大學低溫科學所業績 第98號

から2月28日迄の平均気温は -10°C 、最高は2月26日14時の 0.5°C 、最低は2月12日6時の -26°C であつた。風速は、アネモメーターによつて測定したが、アネモメーターの羽根がほとんど廻らないことが多く、非常に平穩であつた。

凍裂木出現の頻度は、筆者の調査によれば第1表の如くである。勿論、これは伐採以前の林についてである。

第1表 凍裂發生の頻度

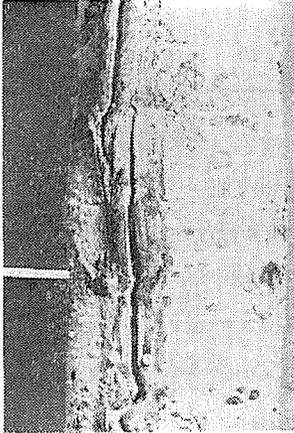
(當麻事業區第12林班)

標準地	樹種	總數 (N)	凍裂木 (n)	n/N $\times 100$	備考
No. 1	トビマツ	133	15	11	澤沿いの平地 100m \times 100m
	エゾマツ	31	0		
	タケカバ	18	2		
	ミズナラ	65	1		
	シナノキ	11	1		
	ホノノキ	10	1		
	その他潤葉樹	32	0		
合計	300	20	7		
No. 2	トビマツ	65	11	17	中腹の斜面 50m \times 100m
	イチキ	4			
	エゾマツ	17			
	ミズナラ	12	1		
	シナノキ	23	1		
	イタヤ	14	1		
	アサダ	6	1		
その他の潤葉樹	19	0			
合計	160	15	9		
No. 3	トビマツ	87	29	33	峯通りの平地 50m \times 100m
	エゾマツ	2			
	シナノキ	16	1		
	その他の潤葉樹	86			
合計	191	30	30		

II. 凍裂木の形態

凍裂は嚴寒時に發生し、冬の時は割目が開いている。然し、春になつて気温が上昇してくると次第に閉鎖し、夏の生育期間中に新しい組織によつて被われる。然し、次の冬の寒さがやつて來ると、外部の新しい組織が容易に裂開し、凍裂は再び開く。このような経過を毎年くりかえすことによつて、凍裂は、外部的並びに内部的に特異な形態を呈するようになる。

即ち、發生の初期には、樹幹の表面では縦に長い割目として、又横断面では外から内方に向う楔状の割目として認められるが、年敷を重ねるにつれて、裂開部分の形成層細胞の異常分裂のため、次第に凍裂部分が膨起してくる。従つて、外部的には、或る幅に膨起した線所、謂、霜腫 (Frostleiste) として、横断面では、割目を挟む嘴状の突起として認められるようになる。(第1圖, 第2圖)



第1圖 凍裂の形態
樹種：トマツ
低温實驗室にて撮影

尤も、時には霜腫を形成せず、却つて陥没した線をなすこともある。一旦、凍裂が發生しても、その樹體の生育條件によつては、新しい組織によつて完全に癒着されてしまうこともあるが、又數十年、或は百年以上も、年々癒着、裂開の経過を繰返すこともある。凍裂は多くの場合、地上50cm位から2~3m位の間に發生するが、又樹幹の遙か上部に發生することも少くない。

III. 凍裂木の内部観察

凍裂の發生する頻度は、樹種、立地條件等によつて異なるが、多くて30%位のものである。之等特定の個體を決定する條件としては、個體の内部的特異性が考へられなければならない。そこで、伐採の行われている森林中で

いろいろの觀察を行うと共に、凍裂木、健全木を伐採し、内部の狀況について各種の觀察測定を行つた。

1. 凍裂木内部の特徴

a) 針葉樹

北海道産の主要針葉樹である、トマツ、エゾマツの中、凍裂の發生するのはほとんど前者である。そこで、凍裂木の内部の特徴を調べるに當り、先づ兩樹種の比較を行つた。その結果、トマツとエゾマツとでは、水喰材* (ミズクイザイ、或はミズクイ・Nassholz, Wet wood) の量に大差あることが判明した。伐採進行中の、区域内に選定したトマツ41本、エゾマツ30本の伐採面(地上約50cm~100cm、凍裂は、多くの場合此の断面によつて切斷される)について測定した水喰材の面積と凍裂の有無とを第2表に掲げる。水喰材の面積は、1cm目盛りのセルロイド方眼紙で測定した。

エゾマツには水喰材が非常に少く且凍裂木がなかつたので表にはのせなかつた。トマツは水喰材が著しく多く、凍裂木も41本中10本に及んでいる。又、トマツの水喰材が増加するにつれて凍裂の發生頻度も増加している。これらのことから、水喰材と凍裂との間に密接

* 針葉樹の健全な心材は比較的乾燥しているものである。NassholzはまたNasskemともいわれ、異常に水分の多い心材部のことをいう。凍結によつて暗褐色となり、健全部とはつきり區別されるようになる。

な関係のあることが推定される。

第 2 表 水喰材と凍裂の有無 (樹種: トマツ)

水喰材面積 斷面積 $\times 100$ (%)	- 5	5~10	10~20	20~30	30~
全 本 數 (N)	18	10	7	3	2
凍 裂 木 (n)	1	3	2	2	2
n/N (%)	5	30	29	70	100

なお、第 2 表の水喰材 30% 以上の二例は、樹冠部の幹にのみ凍裂のある場合で、此の部分には極めて著しい水喰材があつたにもかかわらず、伐採面や、その他の断面には僅少であつた。水喰材に、地上數 m の間に出る“根水喰材、”と、之れとは関係なく樹幹の高いところに出る“枝水喰材、”との二つのタイプのあることは、Torsten Lagerberg 氏によつて報告されている。又同様な事實を、北海道のトマツについて北村博士が報告してをられる。水喰材に上、下二つのタイプがあると同様、凍裂にもそのような二つのタイプがあることは兩者の間に何等かの関係のあることを暗示するものであらう。

水喰材には、年輪方向並びに放射方向の多數の割目があり、冬は之等の割目の中に、透明な氷、或いは白濁した氷が一ぱいつまつている。これ等の割目中の水分の全量が、凍結以前から割目の中にあつたものかどうかは判然しない。時には、自由水の凍結によつて暗褐色を呈する組織中に、氷のつまつた厚いレンズ状の割目があり、近接の細胞組織が壓縮されて、著しく歪み、その歪んだ部分が線状をなして、健全な心材の如き明るい色を呈することがある。斯かる現象は、近接部分からの脱水によつて起るものと考えられる。水喰材の割目以外の部分の、凍結時の含水率は $60 \sim 70\%$ 位から 200% 位であるが、 $100 \sim 150\%$ 位のことが多い。

b) 廣 葉 樹

廣葉樹についても、針葉樹と同様に伐根を主とした調査を行つた。廣葉樹では、ヤチダモ、ハンノキ、ニレ類、ナラ類、イタヤ類、カバ類その他北海道産廣葉樹一般にわたつて凍裂が発生する。廣葉樹には、針葉樹のような水喰材はなく、邊材から中心部まで多量の自由水が含まれている。

廣葉樹の凍裂部分の内部的特徴は、年輪方向、放射方向に多數の割目があつて、その中に氷ががつまつていることである。この内部割れの大きさ、形、數、分布状態等は、樹種、個體によつて異なるが、概して針葉樹の水喰材中の割目に比べて幅が大きく、且つ幾何學的に整齊

* 木材の生の状態の重量を G 、 100°C に乾燥した重量を G_0 とすれば

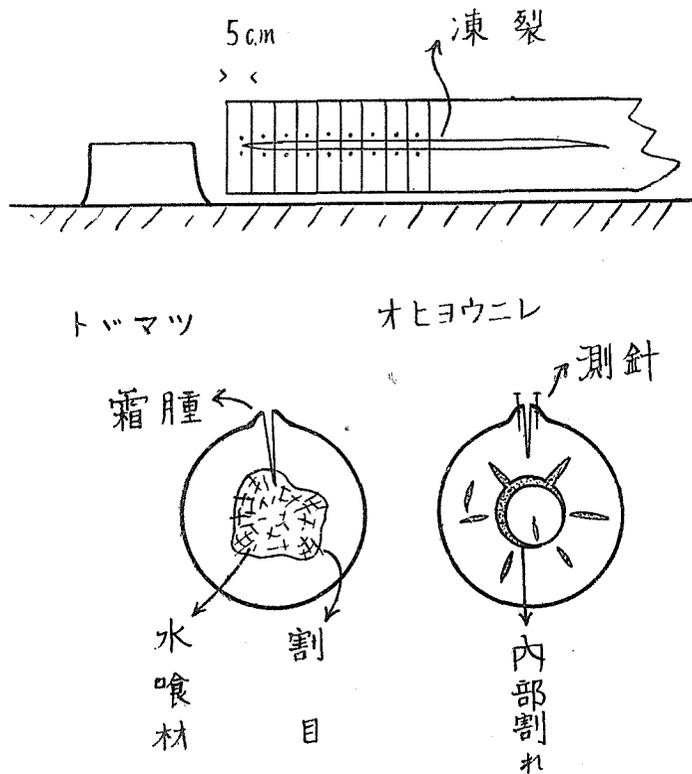
$$\text{含水率}(\%) = \frac{G - G_0}{G_0} \times 100。$$

トマツの健全な心材の含水率は大概 40% 内外である。

な形をなす場合が多い。割目の最も大きい樹種はヤチダモであるが、その幅が 2cm に達することも少ない。凍裂のない部分にも内部割れのあることは珍しくないが、その量が少いか、多くても氷のある割目は僅少である。

2. 凍裂と、水喰材及び内部割れとの関係

a) 針葉樹の水喰材並びに廣葉樹の内部割れと凍裂の大きさとの関係をなお詳しく調べるため次のような測定を行つた。前年の夏、癒着し、本年の冬に再び裂開した適当なトマツ、オヒヨウニレを伐りたおし、第2圖の如く、凍裂のある部分から、厚さ 5 cm の圓板を順次に切取り、圓板の横断面に現れる水喰材及び氷のつまつた内部割れの總面積を測ると共に

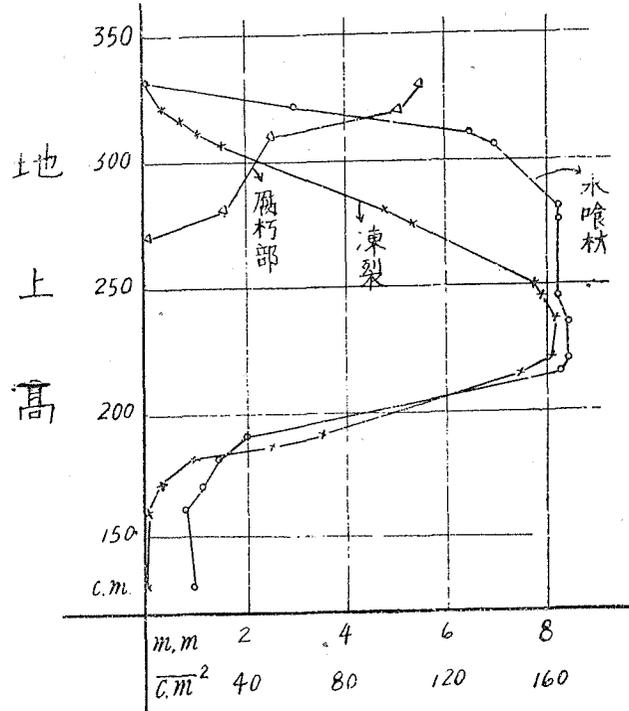


第2圖 圓板の木取り及びその圓板

外表面の凍裂の幅を測定した。凍裂の幅はキヤリパーで測り、水喰材の面積は、セルロイドの方眼紙で判つた。内部割れの面積は、氷のあるものだけについて測定した。個々の割目を三角形、矩形等に分割し、それらの邊の長さをキヤリパーで測り、計算によつて面積を求めた。長さ 0.5mm. 以下の邊のある分割圖形の面積は省いたが、このために起る誤差は小さい。なお、凍裂の幅の測定は、圓板切取り後30分たつてから行つた。圓板の凍裂の幅は、切取る前と異なる。切取る前は、圓板はその上下につながる部分からストレスを受けて歪んでいるので、凍裂の幅も當然その影響を受ける。そして、切りとると、このストレスは直ちになくな

るが、歪が消えるのにはかなり長い時間がかかる。水喰材の面積、内部割れの面積と凍裂の幅との関係は、この種の歪から開放された状態で求めるべきものであるから、切り後30分待つてから測定したのである。

以下に測定結果の二、三の例を掲げる。



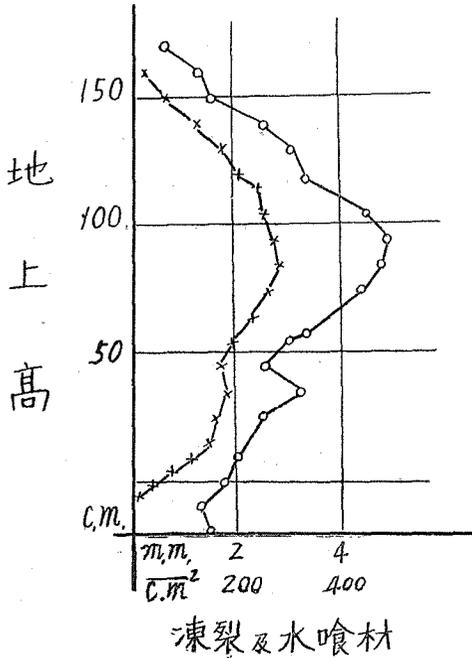
凍裂及水喰材

第3圖 トマツの凍裂と水喰材との関係

第3圖、第4圖はトマツについての測定結果である。第3圖の場合は、水喰材のほかに腐朽部もあるが、腐朽のない部分についてみれば水喰材の面積のグラフと凍裂の幅のグラフとはほとんど完全に一致している。第4圖では腐朽部がなく、二つのグラフの一致は全體にわたっている。第5圖のオヒヨウニレ（廣葉樹）の場合についても、内部割れの面積と凍裂の幅とのグラフの一致はほとんど完全である。

上の結果は、勿論、夫々一本の木についてのものであるから個體差の影響が除かれている。従つて、凍裂の幅は、針葉樹では水喰材の面積に比例し、廣葉樹では内部割れの面積の總和に比例するといふことがはつきり確められたわけである。

第3圖で、水喰材と腐朽部と共存している部分では、水喰材の凍裂を起させようとする作用を腐朽部がある程度妨げているように見える。この場合の腐朽部は乾燥していたが、一般に乾燥した腐朽部だけがある場合には、勿論、凍裂は起らない。従つて、乾燥した腐朽部は凍裂を防ぐ作用を持っているといえる。然し、腐朽部が粗糙で多くの自由水を含んでいると



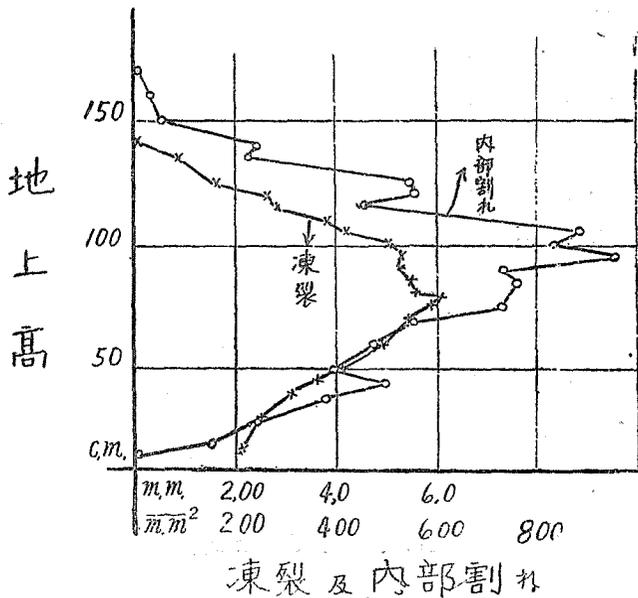
第4圖 トドマツの凍裂と水喰材との関係

ものが多かつた。この氷を取除いた時、もし凍裂が閉ぢるとすれば、内部割れの中の氷が、凍裂の直接の原因であるということになる。

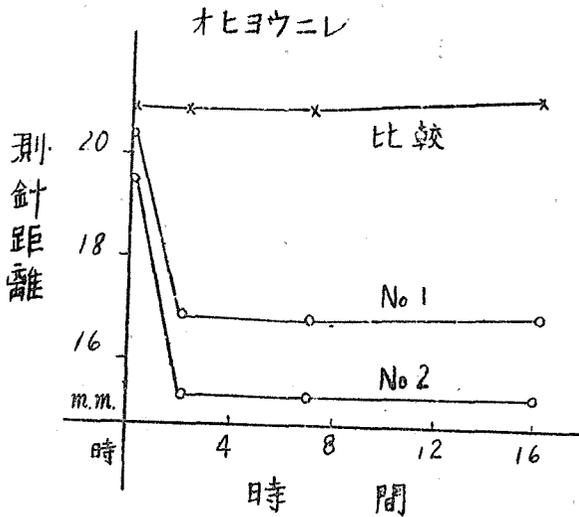
きは逆で、凍裂に対する関係は水喰材との同様に考えてよい。

オヒヨウニレの内部割れには、氷のつまっているものと、然らざるものがある。第5図の内部割れの面積とは、氷のあるものゝ面積であつた。図にみるように、凍裂は地上約1.5mのところまで終つてゐるが、内部割れは地上数mに及んでゐた。然し、それらの割目には氷が非常に少かつたのである。従つて、内部割れがあつても、その中に氷がなければ凍裂は起らないことが判る。第5図のような関係は、オヒヨウニレ以外の多くの廣葉樹にも認められた。

b) 第5図に揚げたオヒヨウニレの内部割れは、かなり大きく、その中につまつてゐる氷を、ピンセットや針などで取除ける



第5圖 オヒヨウニレの凍裂と内部割れとの関係



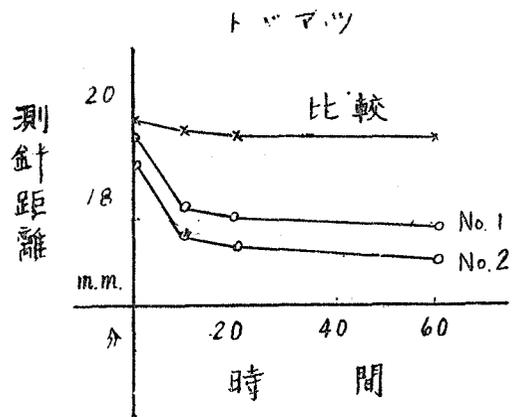
第 6 圖

著しい變化がなければ、温度の變動の影響はないと考えてよい。第6図に“比較、とあるのはこの切目の幅である。

トマツでは、水喰材の面積と凍裂の幅が比例するという結果を得たのであるが、上述のように、水喰材の中には、氷のつまつた割目がある。この氷を取除いた時の凍裂の幅の變化をみればよいのであるが、水喰材中の割目は細かくて、取除くことが簡単でない。それでトマツでは、水喰材の部分を全部くりぬいて取去つた。

第7図は水喰材を取除いたあとの凍裂の幅の變化の2例である。測定時の條件、測定方法は第6図の場合と同様である。

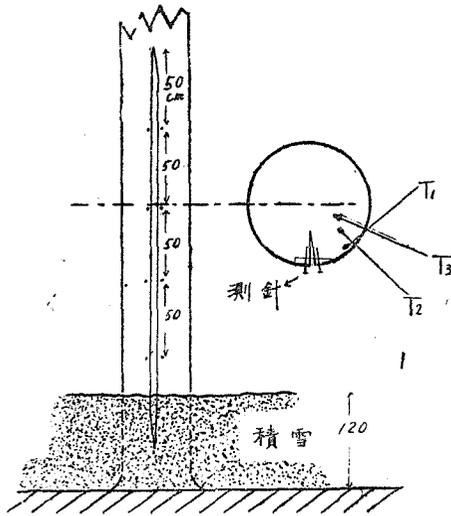
以上に述べたような、森林中で行つたいろいろな観察測定の結果、凍裂木の内部には水喰材内部割れが著しく多く、そしてその中の自由水の凍結が、凍裂を起させるストレスの原因であることが明らかになつた。



第 7 圖

IV. 樹温と凍裂の大きさとの關係

次に、凍結状態にある凍裂木内部の温度及びその變化が凍裂の大きさにどのような影響をあたえるかについて行つた測定の結果を述べる。測定を行つた木はトマツで、地上高 2.5m

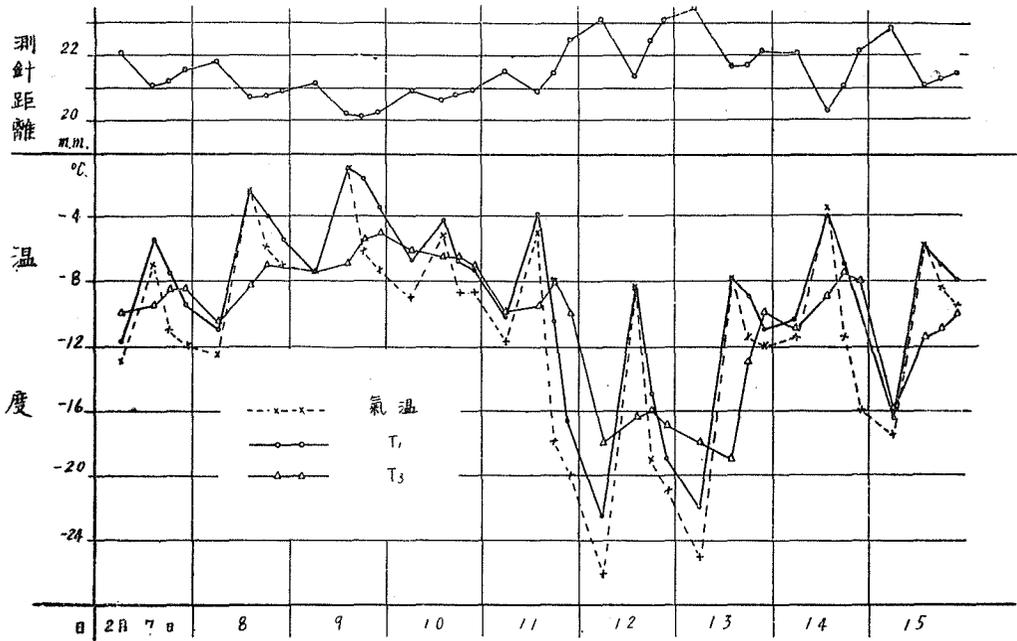


第8圖 樹温と凍裂の大きさとの関係についての測定樹種：トドマツ

の直径が約 30cm, 樹高 17m, 地上 1.2m 迄雪で被われていた。凍裂は地上 50cm, から 3.5m. に及び, 幹の南東側にあるが, 日光の直射はほとんどない。(第8図)

凍裂の幅は, 凍裂の上端から 50cm, 100cm, 150cm, 200cm の4ヶ所で測つた。キヤリパーを凍裂の内側に当てれば, 実際の大きさ D が測定されるが誤差が起りやすい。そこで第8図にみられるように裂目の両側に打ち込んだ測針の距離 d をマイクロメーターで測定した。一度, D と d とを同時に測定しておけば, D は d を測定することによつて間接に求められる。

幹の内部の温度は, 凍裂の上端から約 100cm 下のところで, 第8図のように, 寒暖計を挿しこんで測つた。寒暖計の球部の深さは表面から 2cm, 6cm, 9cm でその温度を夫々 T_1, T_2, T_3 で表わす。気温の測定には, アルコール寒暖計と自記寒暖計とを使つた。観測は毎日 6, 10, 14, 18, 22 時の5回行い, 1ヶ月以上つづけた。第9図に, この観測結果の一部を示す。



第9圖 樹温と凍裂の大きさとの関係

気温 T_1 の變動につれて、幹の温度が、外から内方に順次に變動している。そして、凍裂の幅の變動も温度の變動に忠實に従っている。温度が下るほど、凍裂の幅 D は増すが、此の多くの観測値から、 D と T_1 との關係を求めたら

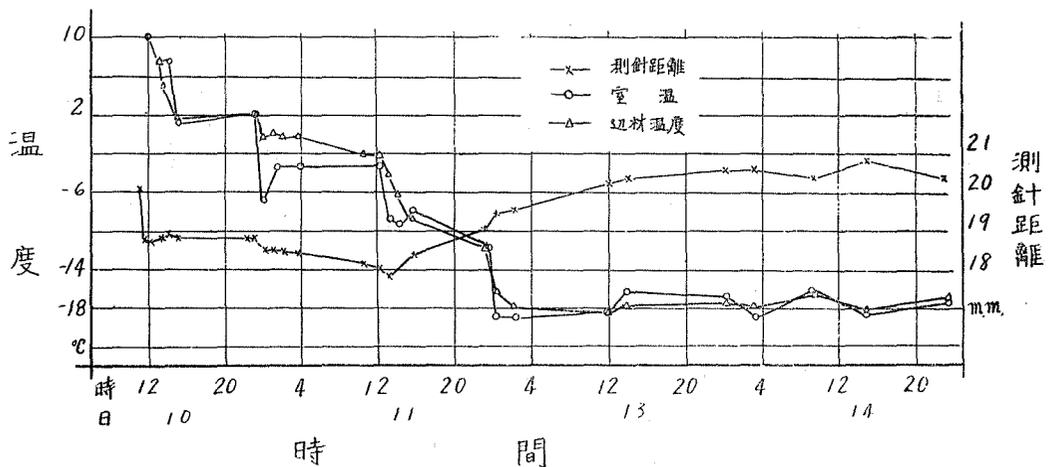
$$D(\text{mm}) = 3.72 - 0.13T_1(^{\circ}\text{C})$$

が得られた。この關係式に對する相關係數は 0.959 で相關係は非常によい。 d と T_2, T_3 との相關係數は、それぞれ 0.931, 0.754 であり、 d と T_1 との相關係數は、0.868 である。即ち幹の表面から 6cm ほどの間の温度と凍裂の幅との間に最も密接な關係がみられ、中心近いところの温度と凍裂の幅との關係はそれに比べて少し浅い。気温 T_1 との間には相當密接な關係があることになる。

V. 凍裂木の凍結、融解の過程

今まで述べて來たことは、すべて森林内の既に凍結している樹木についての觀察であつた。凍結していない凍裂木が凍結する過程、又は凍結している凍裂木が融解する過程を現地で完全に觀察することは困難なことである。それで、凍裂木の凍結、融解の過程は、低温實驗室で研究することにした。なほ健全な樹木の凍結、融解の過程についても實驗を行つた。以下にその二、三の例を掲げる。

a) 水喰材のないトマツの幹から圓板を切り、樹皮に直角に 2 本の釘を打ちこみ、その間に鋸目を入れた。釘の間の距離 d は鋸目を入れると小さくなる（これを復張という）。これを低温實驗室に入れ、温度をいろいろに調節しながら d の變化を測定した結果が第 10 図である。復張のため、 d は最初非常に減るが、温度が下がると共にだんだん増してくる。邊材の凍結がはじまると再び減少し出すが、凍裂が完了してその温度が下り始めると d は増



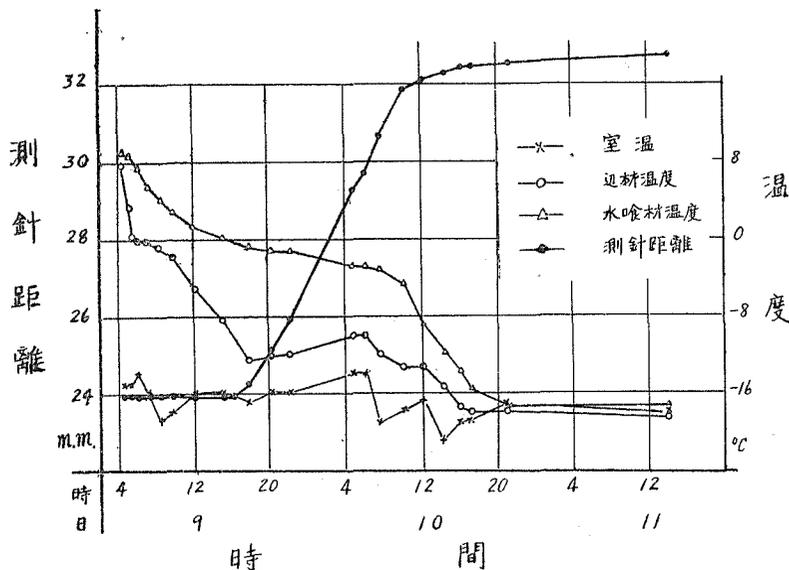
第 10 圖

してくる。その後は温度の變化に應じて變化し、温度が上れば減り下れば増す。

この實驗に使つた材料には水喰材がないから、凍結しても凍裂は起さない筈である。それにもかゝらず、人工的に作つた圓板の切目の幅は、自然的に起る凍裂の幅と大體同じように温度の變動に應じて變化する。従つて、前節にみたような、温度による凍裂の幅の變化は水喰材とは直接の關係をもつていないとみられる。凍裂の幅が變化するのは、幹の中のストレスが變るためである。このストレスの變化は水喰材の有無にかゝらず幹の温度變化によつて起るのであつて、たまたま凍裂を持つた木では、その影響が凍裂の幅の變化となつて現われたに過ぎない。

b) トマツの凍裂が、水喰材のために起るものとするれば、水喰材が凍結しなければ凍裂が起こらない筈である。次の實驗は、健全な邊材の部分だけが凍結しても凍裂はおこらず、水喰材の凍結することが、凍裂の起るのに必要な條件であることをはつきり示している。

冬に凍裂を起し、一度すつかり融解した丸太を低温實驗室に入れ、凍裂の幅と温度との變化を測定した。冬、凍裂が開孔している状態のまま伐りたおした木から取つた丸太であるから、凍裂は閉ぢてはいるが、勿論癒着することなく残つていた。第11図は、邊材部と、中心の水喰材の部分に寒暖計をさし込んで測定した温度と、凍裂の兩側の測針距離 d とのグラフである。低温實驗室に入れると、先づ邊材部の温度が下りだし、 0°C 附近でしばらく停滯す

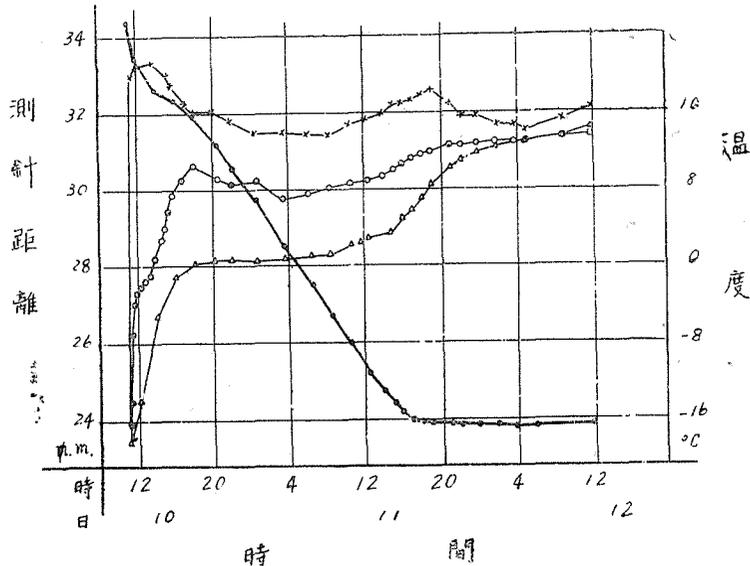


第 11 圖 凍結過程に於ける凍裂と温度との關係

る。これは凍結が起つてゐることを示すが、この時なほ、凍裂の幅には殆ど變化が起らない。凍結が終つて更に温度が下り、 -10° になつてもやはり d はもとのまゝである。水喰材の温度の降下は、邊材の温度降下より遅れるが水喰材の凍結が始まると(図のグラフ T_2 の水平部分)、 d は急に増しはじめる。そして凍結が完了すると共に d は大體一定の値となり、その

後は室温の變動に應ずるようになる。

融解の場合は第12図のようになる。この場合は、先づ d の急激な減少が起るが、之は邊材の溫度上昇によるものである。邊材が室温近くになつてからも水喰材の融解している間は d の減少が続き、水喰材の溫度が上昇しだす頃割目は完全に閉ぢる。



第 12 圖 融解過程に於ける凍裂と溫度との關係實驗：昭和23年5月

VI. 觀察結果，實驗結果の考察

以上に説明したいろいろなことを取りまとめると次のようになる。

(1) トマツ、エゾマツの二種の針葉樹では、凍裂はほとんどトマツだけにみられる。エゾマツには、水喰材が非常に少ないが、トマツには水喰材が多く、水喰材の多いものほど凍裂が起りやすい。水喰材には、細かい割目があり、凍裂した樹木では、この割目に氷がまつている。

(2) 北海道産廣葉樹では、ひろく凍裂が発生する。凍裂を起した幹には内部割れがあり、その割目に氷がまつている。内部割れがあつても氷がまつていないときには凍裂がおこらない。

(3) 凍裂の幅は、一本の木についても場所によつてちがう。一本の木にたくさんの切斷面を作り、各切斷面につき、針葉樹では水喰材の部分の面積 A 、廣葉樹では氷のまつた内部割れの面積の總和 A を測つた。各切斷面の凍裂の幅を D とすると、 D は A に比例する。

(4) 凍裂のある廣葉樹の幹から、うすい圓板を切取り、内部割れの中につまつている氷を取去ると、氷の裂け目は閉ぢる。トマツについても、同様な圓板をとり、水喰材の部分

くりぬいてしまつたら、やはり凍裂の裂目はとぢた。

(5) 一度、凍裂をおこしたトマツの丸太を常温から次第に冷却してゆくと、内部にある水喰材が凍つたとき、はじめて凍裂は開孔する。健全な組織である邊材部が先に凍るが、このときには凍裂が開孔しない。これを再び常温にもどすときは水喰材の融けている間、凍裂の幅は減少し、とけをわる頃に完全にとぢる。

(6) トマツの立木の凍裂の幅 D は、気温 t の變動と共に變動する。 t が下がると D は大きくなり、 D と t とのあいだには直線的な關係が成立つ。

(7) 水喰材のない健全なトマツの厚い圓板に、凍裂の裂目と同じような切目を鋸で入れた。温度が變ると切目の幅は、凍裂の幅と同じように變化する。

凍裂の機構については、既にたくさんの説が出ているが、その大部分は、樹體の温度降下又は温度の不均一のために起る應力をもととして考えている。然るに、上の(6)と(7)の結果からみると、この種の應力は凍裂を起した樹木に對しても、起さない樹木に對しても同様に現われると判断しなければならない。一方、(1)から(5)までの事實は、凍裂の起る樹木と起らない樹木との間に差異があることを示している。その上、凍裂のある樹にみられる水喰材や氷のつまつた内部割れが、凍裂の直接の原因であることを明かにしている。即ち凍裂は、單なる温度降下または温度分布の不均一によつて起る應力のために發生するものではない。水喰材が凍結し、また内部割れの中に氷がまつて、周邊部に強い應力を及ぼすよなつてはじめて凍裂が發生するに至るのであらう。

R é s u m é

A long crack called "frost crack" often appears along the trunk of a tree when it is very cold in winter. Frost cracks were examined on a number of trees of a forest in the Hokkaido Island. It was found that the conifers were liable to be cracked when they had wet wood in the internal part of their trunks. The broad leaf trees which had frost cracks were found to have a large number of ice packed internal cracks distributed within their trunks. A cracked trunk was cut in many circular disks and the area A of the wet wood part in case of conifer or total area A of the ice packed internal cracks in case of broad leaf tree was measured on each disk. The width D of the crack was determined at the edge of each disk and it was found that D varied in proportion to A .

A log was cut out of a trunk of TODOMATSU (*Abies Mayriana* M. et K.) which had been cracked in winter and, when the crack on it was shut in the next summer, it was put in a cold chamber of temperature about -20°C . The sap wood in the outer part of the log froze first and then the wet wood in the internal part froze. The crack remained shut as long as the sap wood part was freezing and was opened when the wet wood part began to freeze.