



Title	ヤチダモ造林木の凍裂に関する研究：凍裂の発生状況とその組織学的研究
Author(s)	今川, 一志; 笹, 賀一郎; 大谷, 諄
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 45(2), 599-636
Issue Date	1988-02
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21270
Type	bulletin (article)
File Information	45(2)_P599-636.pdf



[Instructions for use](#)

ヤチダモ造林木の凍裂に関する研究

— 凍裂の発生状況とその組織学的研究 —

今川一志* 笹賀一郎** 大谷 諄*

Study on the Frost Cracks of Plantation-grown Yachidamo,
Fraxinus mandshurica var. japonica
—Occurrence and Anatomy—

By

Hitoshi IMAGAWA*, Kaichiro SASA**
and Jun OHTANI*

要 旨

ヤチダモ造林木に発生していた凍裂の実態を調査した結果、約23%の樹幹の表面に凍裂が発生しており、それは根元付近から5m上方までの間に出現していた。また、樹幹表面上には出現していなくても、その樹幹内部には内部凍裂が発生している場合のあることも明らかになった。以上の観察結果から、凍裂の発達過程を考えた場合、内部凍裂は樹幹表面上に出現した、いわゆる凍裂の先駆けと看されたので、後者を前者と対照させて外部凍裂と呼び、これら両者の総称を凍裂とすることが適当と考えられた。また、冬期に採取した円板中に内部凍裂が発生していた場合、その割れ目は透明な氷で満たされていた。その結果、その割れ目の幅は夏期に採取したものに比べ、はるかに拡大していた。その氷の中央部には多数の気泡が列をなして封じ込められていた。また、引き裂れた材小片もしばしば認められた。割れ目を光顕やSEMで組織学的に観察した結果、割れの多くは材を構成する各種の細胞の細胞間層付近に沿ったものであった。それ以外にも、細胞自体が接線方向に引き裂れた結果の割れも時々認められ、割れの発生経過の解明の上からも注目に値する現象ではないかと推定された。

キーワード： ヤチダモ、凍裂、氷、光顕、SEM。

1987年8月31日受理 Received August 31, 1987.

* 北海道大学農学部木材理学講座

Laboratory of Wood Physics, Dept. of Forest Products, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University.

** 北海道大学農学部附属演習林

College Experiment Forest, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

目 次

はじめに	600
調査林地の概要	601
研究方法	601
1. 凍裂の実態	601
2. 樹幹内部の状態	602
3. 内部凍裂の観察	602
結果および考察	602
1. 凍裂の実態	602
2. 樹幹内部の状態	606
3. 内部凍裂の観察	609
3.1 割れ目中の氷	609
3.2 割れ目部の光顕観察	611
3.3 割れ目部のSEM観察	613
おわりに	616
謝 辞	617
文 献	617
Summary	618
Explanation of photographs	620

はじめに

北海道のトドマツに凍裂がかなりの頻度で発生することはよく知られている。その実態や発生の機構については、石田による一連の研究によって相当に明らかになっている¹³⁻¹⁸⁾。また、本州においても、スギに凍裂が発生することが報告されており^{1,8,10)}、最近の調査では、東北地方のスギの凍裂はかなり高頻度であることが示されている^{22,25,26)}。

他方、北海道の広葉樹にも凍裂が発生することはしばしば報告されている。石田(1952)によれば、調査した19樹種のうちの11樹種に低頻度ではあるが凍裂の発生が認められている。また、千葉(1965)も改良ポプラとヤマハンノキに、井上(1984)も調査した26樹種中の23樹種に凍裂の発生を確認している。さらには、FERGUS(1956)は *Quercus* の、BOYCE(1961)は Oak, hybrid black poplar の、JOVIĆ(1974)は *Populus* の、HARTとDENNIS(1978)は Norway maple の凍裂を報告している。また、いわゆる林業樹種ではないが、SIMONS(1970)はリング樹(スターキングとゴールドデリシャス)にも凍裂の発生を見ている。

このように見てくると、凍裂は針・広葉樹を問わず、樹木一般に生じる可能性のある現象とも考えられるが^{4,13,27,29)}、上述した石田の一連の研究以外には系統的なものはほとんどなく、特に最近の研究例は非常に少ない。凍裂の発生した樹幹には、利用上に深刻な問題があることは明白であり、何らかの対策が望まれよう。そのためには、まず凍裂の実態の解明、あるいは発生機構の研究などが急がねばならず、それらの成果を踏えた上でなんらかの解決策が見い出されるものと期待される。

以上のような観点から、ここでは、従来報告されていた例¹⁴⁾よりも、かなり高頻度で凍裂が発生していたヤチダモ造林木について、その凍裂の実態や樹幹内部の状態について調査、研究を進めたのでその結果を報告する。なお、既に、この成果の一部は予報的に示してある¹¹⁾。

調査林地の概要

調査したのは、北海道大学中川地方演習林の有賀の沢に、1923年から1926年にかけて植栽されたヤチダモ造林地である (Fig. 1)。植栽されたものは山引苗で、いったん苗畑で養成したもので、18.51 haの面積に50,700本(ヘクタール当り2,740本)植え込まれた。下刈りや除・間伐などの保育作業はあまり行なわれずに、放置された状態が長く続いたため、林齢が60年に達した現在では立木密度の高い造林地になっている。そのため、樹齢に比して樹幹径は細く、形質不良木と見なされるものも多い³⁴⁾。

有賀の沢は、流域面積約500 ha、幹線流路長約4 kmの小溪流である。ヤチダモ造林木は、この溪流の中流部から下流にかけての溪床堆積地³¹⁾に植栽されている。この堆積地は50 m~80 mの幅であり、溪床勾配は0.8%ほどである。このような緩勾配の堆積地であるため、流路は蛇行し、過去の流路変動による旧流路の痕跡も数多く存在している。洪水時はもちろん、春の融雪時にも現流路や旧流路の低地部を中心に冠水し、しばしば堆積地の全体が冠水することもある。以上のようなことから、この造林地は土中水分のかなり高い区域であると推定される。

研究方法

1. 凍裂の実態

上述した有賀の沢ヤチダモ造林地のなかには、0.15 haから0.5 haまでの面積で、計6ヶ所の長期観察林が設定されている。この造林地は1980年と、1983年から1985年とにかけて、2回の間伐が行なわれ、同時にこれらの施業の効果や林分の推移を比較検討するための対象区(無間伐区)も設定されている。したがって、長期観察林の一部はこのような対象区とも重複し、ここでは植栽以降そのままの森林状態の観察が可能である。

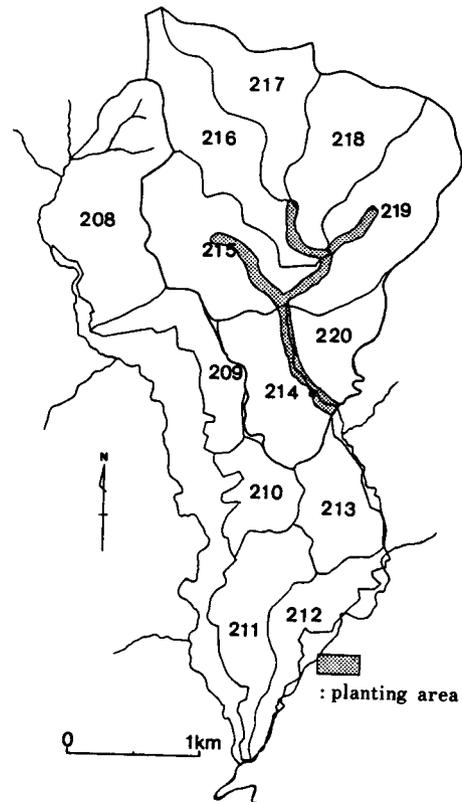


Fig. 1. Yachidamo planting forest of Ariganosawa in Nakagawa Experiment Forest, Hokkaido University, Hokkaido, Japan.

凍裂の状況については、このような対象区内の長期観察林0.5 ha (50 m × 100 m) を中心にして、1985年12月に次のような調査を行なった。ヤチダモ造林地ではあるが、上記のように保育作業が不十分であったために、ヤチダモ以外の樹種も混入していた。そのため、一応の樹種構成を調べた。また、樹幹の外観から判断した凍裂発生本数、樹幹あたりの凍裂の数、凍裂発生の部位などについても調査した。さらに、対象区以外の林地において、1984年12月に間伐を行なった際に、間伐木だけについてはあるが、その元口断面を観察し、その断面上に放射状の割れ、すなわち内部凍裂が発生しているかどうかについても調査した。

2. 樹幹内部の状態

間伐対象木とされたもののうちから、比較的生育良好と見られるものを18本選定し、1985年12月から1986年12月にかけて、計9回、毎回2本ずつ伐採した。これは樹幹内の含水率分布の季節的変化を調べる目的で行なったものである。その際、樹幹材部中に放射状の割れが発生していたものについては、地際部より、割れが認められなくなるまでの間にわたって、5～10 cm厚の円板を連続的に採取した。各円板の上側表面を電動カンナで仕上げ、その上に透明なプラスチックシート（オーバーヘッドプロジェクター用フィルム）を当て、放射状の割れを写し取った。そのようにして得たトレース図を比較することによって、樹幹内での放射状の割れの分布状態を明らかにしようとした。

なお、季節的な含水率分布については、別の機会に報告したい。

3. 内部凍裂の観察

1985年3月に伐採した供試木には、樹幹外観には凍裂を認めることができなかったにもかかわらず、その元口断面には放射状の割れが発生しており、その割れ目中には氷が認められた。その樹幹の地際部から約10 cm厚の円板を採取し、割れ目中の氷の存在状態を観察した。なお、詳細な観察には、大型マクロ写真装置（ニコンマルチフォト）を用いた。

氷の観察後、割れを含む小ブロックを採取し、直ちにFAA液で固定した。固定試料の一部からは光学顕微鏡観察のために切片（木口、板目面）を作成し、常法通りサフラニンで染色し、永久プレパラートとした。また、残りの試料については、走査型電子顕微鏡（SEM）によって、割れ目の表面を詳細に観察した。これらの観察によって、割れの状態を組織学的に明らかにしようとした。

結果および考察

1. 凍裂の実態

ヤチダモ植栽木が生育していた林地の状態を示すために、標準地内での樹種構成を調べた（Table 1）。ヤチダモ植栽木は63%を占め、それ以外のものは、ヤチダモ天然木が7%、ハルニレが15%、キハダが12%であり、その他は単木的に混在している。このように、造林地であるにもかかわらず、他樹種が混在していることは、前述したように保育作業が不十分であっ

Table 1. Tree species at the sample plot (100 m × 50 m) in Ariganosawa

Species		Number	%
Yachidamo	planted	144	63.4
<i>Fraxinus mandshurica</i> <i>var. japonica</i>	natural	15	6.6
Nire	natural	33	14.5
<i>Ulmus spp.</i>			
Kihada	natural	28	12.3
<i>Phellodendron amurense</i>			
Others	natural	7	3.1
Total		227	

たことを示すものであろう。ヤチダモ植栽木の樹高は平均 23.5 m で、最大は 30 m、最小は 7 m であり、胸高直径は平均 25 cm で、最大は 46 cm、最小は 8 cm であった。一方、天然木の樹高は平均で 28.5 m、最大は 32 m、最小は 24 m であり、胸高直径は平均で 36 cm、最大は 54 cm、最小は 36 cm で、植栽木よりもかなり高く、太い。したがって、ヤチダモ天然木は山引苗が植栽された時にすでに生育していたものをそのまま残したものであると考えられる。この点から見て、この沢地がヤチダモの生育に特に支障はなく、むしろ適地であるとも考えられる。

このように、ヤチダモにとってはむしろ適地と考えられるにもかかわらず、ヤチダモ樹幹に凍裂が発生していた。その発生頻度を示したのが Table 2 である。144 本の植栽木のうちの 23% にあたる 33 本の樹幹に凍裂が発生していた。また、天然木では、15 本中の 6 本に認められた。これらの凍裂木のなかには、その樹皮上に軸方向に走った割れ目が認められるもの (Photo 1)、あるいはすでに癒合組織が形成され、割れは生じておらずに、樹皮上には凍裂の痕跡だけが認められるものがあった。しかし、両者を区別することなく、凍裂木として数えた。なお、他の樹種の場合には、調査地区への侵入本数が少な過ぎること、本研究の目的ではないことから、ここでは取り扱わないこととした。

石田(1952)も、ヤチダモ天然木の凍裂を報告しているが、37 本中に 1 本あったに過ぎなく、それに比べると、この林地での凍裂発生率は相当に高いと言える。また、ヤチダモと同時にトドマツを調査し、15% の発生率であったと述べている。したがって、トドマツに比べても、かなりの高頻度で発生している。しかしながら、三上ら(1986)によれば、東北地方のスギには 30% 近くの高率で凍裂が発生している林地がある。そのスギ林地に比べれば、この林地のヤチダ

Table 2. Number (%) of trees injured by frost cracks (FC) in the sample plot

Species		No. surveyed	No. with FC	%
Yachidamo	planted	144	33	22.9
	natural	15	6	40.0
Others	natural	68	3*	4.4

* Each one of *Betula*, *Acer* and *Ulmus*, respectively

モは異常に高い発生率とは言えないが、決して見過すことのできない頻度と言えよう。

笹と今川(1986)によれば、凍裂木の存在位置と、その地形とは興味深い関係があるらしい。すなわち、調査地を10個の小プロットに区分し、各プロット内での凍裂発生率を求めてみた。それによると、発生率の高いプロットは現在の小川の流路の近くや、以前の小川の流路跡などの土中水分が高いと考えられる地点に対応することが予報的ではあるが示唆された。この関係は凍裂の発生原因を考える上からも、非常に注目されるが、調査はまだ予備的段階であり、今後のより精密な調査が期待されるところである。その結果、溪床地形と凍裂の発生とに関係のあることが確認されれば、ヤチダモを植栽する際に不適地を避けることが可能になり、林業上非常に有益な指針を与えることになる。

凍裂は樹幹に1ヶ所しか発生しないと言うことはなく、複数の発生を見ることはしばしばある。ヤチダモの樹幹当りの凍裂発生数を調査した結果をTable 3に示す。植栽木の場合には、1ヶ所だけしか発生していないものが27本、2ヶ所のものが5本、3ヶ所のものが1本であった。天然木のほとんどは1ヶ所の発生であった。この結果だけから見ると、ヤチダモの凍裂は樹幹当り3ヶ所までと言えるが、後述するように標準地以外では4ヶ所に発生しているものもあった(Photo 3)。したがって、場合によってはもっと数多く発生することがあると考えられる。

ヤチダモの場合、多くの樹幹では1ヶ所の発生であった。また、石田(1952)によれば、トドマツでは、367本中で、1ヶ所だけで発生しているものはその74%にあたる270本であり、平均すると樹幹当り1.4ヶ所の発生であった。さらに、スギの場合でも²⁵⁾ 1ヶ所以上で発生しているものは少なかった。これらの調査結果を考え合わせると、凍裂の直接的な原因を樹幹内部での氷の形成に伴う内圧¹⁷⁾であるとするなら、樹幹の1ヶ所に裂目が生ずると、その内圧のほとんどは緩和されてしまうと推定することができよう。

凍裂が発生している樹幹上の方位には多くの関心が持たれているが¹²⁾、予備調査によれば、この造林地では特別な方向性が認められなかったため、ここではそのための調査は行なわなかった。トドマツでは、方位の影響は無いと考えられており¹⁴⁾、スギでは、方位よりはむしろ林地の傾斜方向に関係すると報告されている^{22, 25)}。したがって、このヤチダモ造林地は比較的平坦であったので、その発生方向には一定の傾向は見出されなかったものと推定される。ただし、

Table 3. Number of frost cracks occurred on each stem

No. of frost cracks in one stem	Number of trees	
	planted	natural
1	27	5
2	5	1
3	1	—
Total	33	6

千葉(1965)によると、改良ポプラとヤマハンノキの凍裂発生頻度は非常に高く、それぞれ約50%、37%であり、そのほとんどが樹幹の南西面に発生していた。これはおそらく日射が大きく影響していると思われる。しかしながらこれらの樹種の樹皮の外樹皮は比較的薄く、一方ヤチダモのそれはかなり厚いので、ヤチダモの場合は日射による影響は大きくないものと考えられる。

ヤチダモの凍裂の多くは1ヶ所の発生であることが示されたが、次に、その凍裂の発生部位や長さについて調査した結果をTable 4に示す。植栽木では、地際部から上方へ1 mまで達しているものが58%、それよりも長く、上方へ5 mまでの間に達しているものが42%であり、

Table 4. Length of frost cracks on the stems

	Length*	Number	%
Planted	1 m and less	23	57.5
	5 m and less	17	42.0
Natural	1 m and less	1	—
	5 m and less	6	—

* Frost cracks usually began at the base of the stems.

それ以上のものはなかった。また、天然木でも、5 m以内に納まっている。いずれの場合にも、凍裂は樹幹の根元付近に発生していることがわかる。トドマツでは¹⁴⁾、凍裂は地表面直上から樹冠部までの間に発生するが、地上数mに集中する傾向にあり、1 m前後の長さのものが最も多い。また、スギでは、それよりも幾分長く、2 m前後のものが最も多く²²⁾、同様に根元付近に集中して発生していた²⁵⁾。Norway mapleの場合も、凍裂は樹幹の基部に集中し、1~数m上方へ達しているものが多かった⁹⁾。凍裂が発生する外的条件の最大のもは低温であることは改めて言うまでもない。しかしながら、樹幹の下方部だけが集中的に低温にさらされ、上方部はあまり温度低下がないとは考えにくい。温度差よりはむしろ樹幹内部の生理的あるいは物理的状態の相違により凍裂が根元付近に集中するのも知れない。ASHWORTHら(1985)が行なったように、ヤチダモ樹幹の地上高別温度変化を長期的に測定してみることも必要であろう。また、樹幹内での生長応力の分布の点からの検討も不可欠であるかもしれない³⁵⁾。

凍裂の発生している樹幹には、冬期の割裂と夏期の癒合の繰返しによって、いわゆる霜ばれの顕著なものが多かった。著しい場合には、樹幹表面から10 cm前後も盛り上った霜ばれも見られた。Photo 2はその一例で、地際部の円板であり、左上方と右下方に2つの霜ばれの断面が認められる。なお、これらの凍裂はすでに癒合を完了し、樹幹表面には裂目は見られず、樹皮上にその痕跡が認められるだけである。このような場合には、樹幹の肥大が進むにつれ、霜ばれ部の突出はしだいに目立たなくなり、ついには盛り上りは認められなくなるであろう。また、写真上で明らかなように、材中には、霜ばれ部あるいは凍裂の痕跡に対応した割れや、それ以外にも多数の放射状の割れが認められる。このような材中の割れは、いつまでたっても閉そくすることはなく、割れたままである。したがって、外部的に凍裂が見出されない場合で

も、その樹幹内部にはこのような割れが発生していることは十分に予想される。

このように、樹幹表面に表われず、内部に限定された割れが低温に由来する場合には、それは内部凍裂と呼ばれる^{4,13,17)}。この内部凍裂の発生頻度を調査した結果が Table 5 である。内部凍裂の調査には供試木を伐採しなければならず、そのような機会は非常に限られてしまい、そのため、内部凍裂の発生頻度を調査した報告はこれまで報告されていないと思われる。したがって、間伐木と言う制限があるにしても、本研究での調査結果は非常に貴重なものと言える。

Table 5. Number of frost cracks (FC) and internal frost cracks (IFC) of thinning-trees

	No. surveyed	No. with FC (A)	No. with IFC (B)	A+B
Number	184	16	7	23
%		8.7	3.8	12.5

A : Number of trees in which frost cracks can be recognized on the surface of the stems.

B : Number of trees in which frost cracks can not be recognized on the surface of the stems, but only internal frost cracks occur in the basal disks of the felling trees.

調査は 1984 年 12 月に伐採されたヤチダモ間伐木 184 本について行なった。この間伐は同一地域での 3 回目にあっており、過去の間伐では不良木の整理が主体となっていたので、樹幹表面に凍裂が認められたものは或る程度は取り除かれた後の状況ということになる。

その元口断面に放射状に割れている内部凍裂が認められたものは、間伐木の約 13% にあたる 23 本であった。この 23 本のうちの 16 本の樹幹表面には凍裂が認められた。したがって、内部凍裂だけが認められたものは 7 本であり、約 4% の割合であった。この調査だけでは十分とは言えないが、樹幹表面には凍裂が認められなくても、樹幹内部には内部凍裂が発生している場合のあることが明らかとなった。内部凍裂だけが認められたものは、樹幹表面に凍裂が認められたものの本数の約 40% にあたり、決して無視できない割合である。このように、樹幹表面に見られる凍裂、さらには表面からはその存在を認めることのできなかった内部凍裂の発生などを考えると、このヤチダモ造林地での凍裂による被害は相当に深刻な状況にあると言える。今後は、このような高い頻度で凍裂が発生していると言う点を十分考慮しながら、このヤチダモ造林木を育生していくことが必要であると考えられる。

2. 樹幹内部の状態

前述したように、含水率分布を調べるために、ヤチダモを定期的に伐採した。その際、その元口断面に放射状の割れが認められるものが幾つかあった。これは内部凍裂と考えられるので、その形態学的特徴は後述することとし、ここではその樹幹内分布を示す。この割れの程度、すなわち割れの数や放射方向の長さは樹幹によって著しく変化した。しかしながら、樹幹下方に顕著に出現し、上方に行くにつれ次第に減退して行くという共通的な傾向にあった。ただし、冬期に伐採したものではなかったため、その割れ目幅は狭く、幾分見出しにくい点があったが、円板の表面を仕上げることでその識別は十分に可能であった。以下では、放射状の

割れが認められたものの中から、その樹幹表面に凍裂が発生していた痕跡の認められたものと、まったく認められなかったものと、2つの場合を示すことにする。なお、凍裂が閉閉を繰り返しているような例は入手できなかった。

Fig. 2はその樹皮上に、凍裂の痕跡が4ヶ所認められた樹幹からの連続円板のトレース図である。最も長い痕跡は約3mも上方へ達していた。なお、樹高は24.5m、胸高直径は30cmであった。各トレース図の右上の数字は地際部から数えた円板の順番を、クサビは樹幹の北側を示す。連続的に採取した円板ではあるが、円板1~4は30cm間隔に、それ以上は10cm間隔に採取したもので、各円板の上面をトレースしたものである。各図において、最外線は樹幹の輪郭(樹皮)を、次は樹皮部と材部との境界を、最内線は辺心境界を示している。ただし、樹皮の形状は一部省略している。また、円板1, 3, 10, 16についてはそれぞれ表面をPhoto 2, 3, 4, 5に示した。

トレース図から明らかかなように、放射状の割れは樹幹の根元付近に数多く出現し、長いものが多い。一方、上方に行くにつれ、割れの程度は減退している。髓付近には目まわりも認められ、内部凍裂を貫通したり、それを出発点としている割れも認められる。各円板を比較して

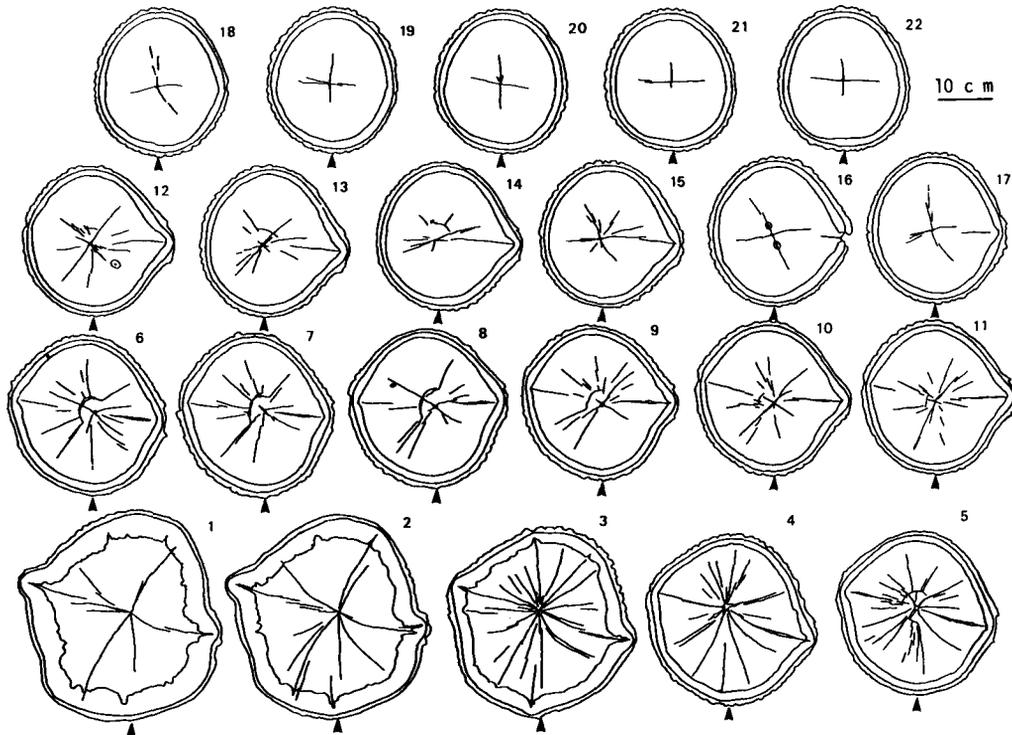


Fig. 2. Internal frost cracks in serial disks from the stem with the traces of frost cracks on the bark. Each outline represents respectively the bark, xylem and heartwood inwardly. Number indicates the order from the base of the stem. Wedge shows the north side of the stem.

みると、地際部（円板1）に割れが最も激しく出現している訳ではなく、60 cm上方の円板3に最も多数の割れが出現している。円板3には、凍裂の痕跡（Photo 3の※印）の断面が4ヶ所認められ、凍裂による影響が最も集中して表われた部位であることがわかる。これらの痕跡には、それぞれに対応した放射状の割れが認められるが、それらはいずれも、すでに閉そくしてしまっている。また、痕跡に対応しない割れも多数認められるが、それらはいずれも対応しているものよりも短い。なお、心材部に見られる同心円状の着色帯は腐朽に関係したものと考えられる。

他の円板でも、凍裂に対応した割れや、しないものが認められるが、それらは髓まで到達しているもの、そうでないもの、あるいは1本の割れとして延びているもの、途中から複数本になっているものなどがあり、割れの出現状態は多様である。そのため、特定の割れについて、地際から上方の消失まで各円板を通して確実に追跡することは困難であった。したがって、割れの樹幹内分布を実際に示すことはできなかったが、トレース図からみて、割れは根元部で長く、上方に行くにつれ徐々に短くなる。すそ開き状の分布を示しているものと考えられる。なお、円板16の凍裂の痕跡部は腐朽し、樹皮には穴があいてしまっている。

Fig. 3は樹幹表面に凍裂の発生を見出すことのできなかったものの連続円板のトレース図である。1986年5月初めの伐採で、樹高20.4 m、胸高直径20 cmであった。円板は地際部から1 m上方まで、5 cm厚に連続して採取した。

Fig. 2の場合に比べ、放射状の割れの数はかなり少ない。数は少ないものの、同様に樹幹

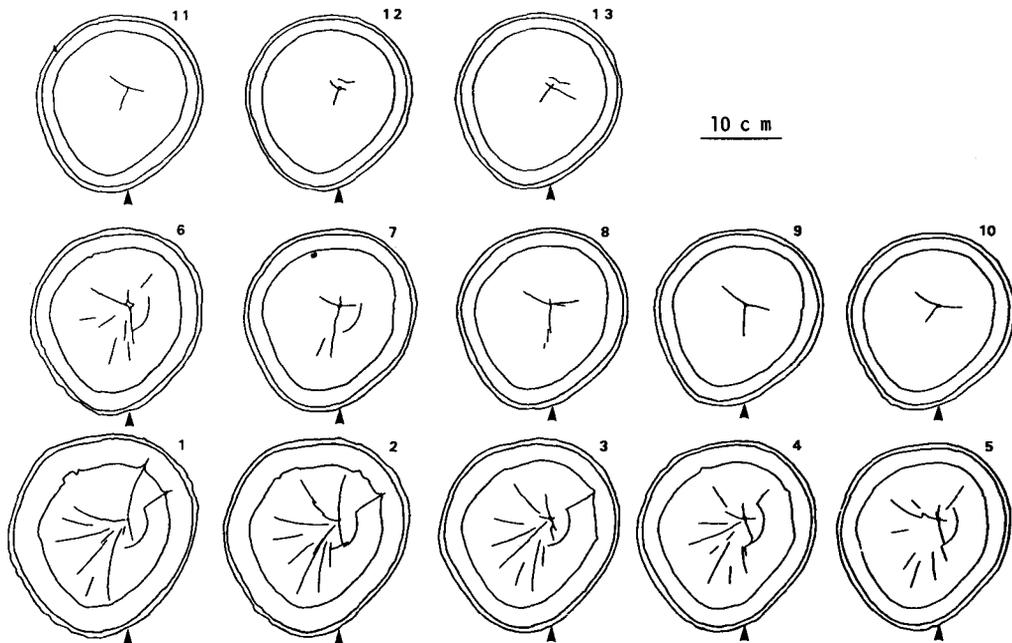


Fig. 3. Internal frost cracks in serial disks from the stem without any frost cracks on the bark. Outlines, number and wedges are the same of Fig. 2.

の根元付近に集中し、上方に行くにつれ減退する傾向は明らかである。また、割れには、髓まで到達しているもの、していないもの、さらには途中から複数になっているものなどが認められ、割れ方も Fig. 2 と基本的には同じである。

以上の結果を整理してみると、次の2点が重要な点であることがわかる。第1に、樹幹表面に凍裂が認められなくても、材中には割れが発生していることがある。第2に、凍裂に対応した割れ以外にも多数の割れが存在する。凍裂に対応したもの以外の割れは内部凍裂と考えられるので、以上の2点から、凍裂が発達して行く経過を次のように考えることが可能であるかも知れない。すなわち、冬期の低温により、樹幹内部にあった放射状の割れ目中に氷が形成され、割れ目幅が大きくなる。しかし、この段階(内部凍裂)では、割れは樹幹表面までは到達しておらず、材中に限定されている。したがって、樹幹表面からは凍裂の発生を知ることはできない。この段階がさらに進行し、或る限界、たとえば氷の形成による膨圧とそれに対する材部の抵抗力との釣合いの臨界点を越えると、材中に限定されていた内部凍裂のあるものは樹幹表面に到達する。この段階で、凍裂を初めて樹幹表面に認めることができる。なお、石田(1963)もトドマツの凍裂の発達する経過について、同様の見方を示している。

このように考えると、凍裂が樹幹表面上に現われて来るまでの経過はかなり明らかになったと言えるかもしれない。しかしながら、その出発点と看した放射状の割れ(内部凍裂)が発生する機作は不明なままである。いわゆる凍裂の発生原因については種々論じられ、紹介もされているが^{9, 17, 28)}、まだ確定されてはいないように思われる。したがって、今まであまり研究されていない内部凍裂の発生原因についての究明も必要であろう。また、その際には、樹幹内部に存在する生長応力の面からの論議も必要となろう³⁵⁾。

また、樹幹表面に現われるまでの凍裂の発達経過を上述のように考えると、内部凍裂は樹幹表面に表われた凍裂の先駆けと看すことも可能である。そのように考えると、従来の凍裂とは樹幹表面に現われたものを言い^{4, 9, 17)}、材中のものは内部凍裂^{4, 13, 17)}として扱われて来たことだけでは十分とは言えないと思われる。本研究によれば、両者は連続した現象と考えられ、樹幹表面上に現われたかどうかの差異しかないように思われる。したがって、表面に現われたものを外部凍裂、材中のものを内部凍裂と呼び、両者の総称を凍裂とするのが適当と考えられる。さらには、外部凍裂が完全に癒合してしまい、樹皮上にはその痕跡しか認められないものを凍裂痕と呼べば、開閉を繰り返している外部凍裂周辺の凍裂樹皮¹⁸⁾と区別することができ都合が良いと考えられる。

3. 内部凍裂の観察

3.1 割れ目中の氷

Photo 6は、冬期(1986年3月初め)に伐採した供試木の地際部から採取した円板の表面写真であり、Photo 7はそれを接写したものである。供試木の樹幹表面には外部凍裂は認められなかったものであり、樹高は24 m、胸高直径は34 cmであった。林地は北海道北部にあるた

め、この時期でもまだ厳寒期（3月上旬の平均気温は -10°C 前後）であり、林地には2m前後の積雪があり、樹幹は完全に凍結状態であった。写真は円板採取直後のものであり、凍結したままである。なお、円板上の物差しは20cm長のものである。

円板はチェーンソーで鋸断されたままで、その表面は仕上げられていないので、表面の状態はあまり鮮明ではないが、3本の太い放射状の割れはよく見える。それらはいずれも髄を通り、緩やかな曲りを示しながら、円板周辺部へ延びている。しかしながら、それらの割れは樹皮部には到達してはず、したがって外部凍裂は発生してはず、この樹幹は内部凍裂の段階にとどまっている。

これらの太い割れ目には氷がつまっております、その氷は光を反射して細い、白線状に見える。また、その幅はPhoto2~5のものに比べてはるかに広い。氷の形成による内圧によって、割れ目が拡大したためであり、その幅は1~2mmである。なお、石田(1950)は、広葉樹の凍裂の幅は針葉樹よりも大きく、特にヤチダモが最も大きく、時にはその幅が2cmにも達することがあると述べている。この太い割れの他にも、細い割れが幾本かあったが、写真上には見られない。

Photo8と9はPhoto6と7に示した円板の表面を電動カンナで仕上げ、それに発生していた太い割れをさらに接写、拡大したものである。撮影のための照明によって、円板表面の凍結は幾分融け、濡れた状態になっている。材中に見られる幾つかの穴は早材道管の横断面である。割れ目中は氷によって完全に埋めつくされているが、その氷は透明なため、写真上にその存在自体を示すことは非常に難しい。しかし、氷中には大小の気泡が割れ目の中央部に列をなして閉じ込められていることから、氷が充填されていることが間接的にわかる。凍裂の割れ目にある氷が示された例はあまりないが、石田(1963)はトドマツの割れ目中に同様の透明な氷を観察している。また、PARKER(1963)は氷中に気泡が存在することを記している。なお、Photo8の早材道管中にも気泡(矢印)が認められる。なお、照本(1960)はアカビートの根中で氷が形成される経過を実験的に示し、最初に細胞間隙で氷晶の形成が始まり、次いで細胞内凍結が起ると述べている。また、ANDREWSとPROEBSTINGとGROSE(1986)は*Prunus*の0.5cmの太さの幹中に氷が形成される際には、バクテリアの一種がそのための核となることもあると記している。しかしながら、これらの結果が直ちにヤチダモの場合に適用できるのかどうか判然とはしない。ヤチダモ材中での氷の形成経過を明らかにすることも、その凍裂現象の解明には重要であろう。

Photo8に示されている割れの場合、その材部は画然と割れており、割れ目の中に見られるのはほとんど氷だけである。一方、Photo9の場合は、材部は引裂れたような状態を示している。割れた材表面からはその一部がけば立ち、いわゆる“ササクレ”状になり、氷中に埋込まれてしまっている。このように、同じ内部凍裂でも、材部の割れ方はかなり異なっている。このような違いは割れの組織学的相違に由来すると考えられるので、その点については後述する。

Photo 10, 11, 12は、同じ円板の一部を切断し、その板目面を拡大、接写したものである。

割れ目中には透明な氷が満ちており、その中には同様に気泡が認められる。Photo 10は Photo 8と同様な画然とした割れであり、Photo 11は Photo 9と同じで、引裂れたような状態の割れである。Photo 12は2本の割れ目が接しているかのように見える。しかしながら、この割れは同一のものであり、その途中に材組織の一部の引裂れが不完全のまま残ったと見るべきかもしれない。

3. 2. 割れ目部の顕微鏡観察

Photo 6～12は示された内部凍裂の一部から光学顕微鏡切片を作り、その割れ部を組織学的に観察した。それが Photo 13～18(木口面)と Photo 19～23(板目面)で、組織の破壊の状態が示されている。

材中に割れが発生している場合、その割れ方には2つのタイプがあった。1つは、材を構成している細胞の細胞間層付近に沿って、割れている場合である(Photo 13, 14)。もう一つは構成細胞自体が破壊して割れている場合である(Photo 15, 16)。観察例はあまり多いとは言えないが、細胞間層付近に沿って割れている場合の方がしばしば観察された。また、直線的に走っている割れが比較的多かったが(Photo 13～16)、時には直線的に走っていた割れが途中で折れ曲っているものも見られた(Photo 17, 18)。

Photo 13は直線的な割れであり、放射組織を境として割れている例である。写真中央を水平方向に走っている、長方形の細胞が2段に重なっているものが放射組織である。この放射組織の上にある木繊維は、割れる前には放射組織に接していたものである。これらの放射組織と木繊維はそれ本来の形状をほぼ保持し、その細胞壁の破壊はほとんどないので、それらの細胞間層付近で分離したものと考えられる。但し、顕微鏡のため、細胞間層だけの破壊であるのかどうかは不明であり、それには電顕(TEM)による観察が必要であると考えられる。なお、写真の両側には細胞自体の破壊に由来する割れが見える。このように、細胞間層に沿った割れの場合には、放射組織の存在が大きく貢献していることが多かった。

Photo 14は割れの先端部を示す。写真上に見られる径の大きな、壁の厚い細胞は晩材道管である。この割れは、写真左側から進行して来たものであり、その晩材のわずか手前で終わっている。Photo 13と同様に、木繊維の細胞間層付近に沿って割れが走っている。そのため、各木繊維を縁取るように割れており、詳細に見ると、幾分曲折した状態の割れ目になっている。分離した細胞が割れ目中に孤立し、写真上下のどちらの組織からも分離してしまっているものが認められる(矢印)。これは、この細胞がいわゆる“ササクレ”状になって、その一部が組織から分離し、残りの部分がまだ結合した状態のもので、その分離した部分の断面が表われたためであると考えられる。なお、この試料は、この割れ目の本来の状態を保持するための特別な処理、たとえば包埋などは行っていない。したがって、ここに見られる割れの先端部が樹幹中でのそれをそのまま示しているとは断定できないが、それに近いものと考えられる。なお、この点についてはSEMでも観察した。

Photo 15は細胞自体の破壊によって生じた割れ目を示す。木繊維の細胞壁が主に接線方向に引きちぎられて破壊している。木繊維は針葉樹仮道管のように整然とした半径列をなしていないので、木繊維の破壊による割れもかなり曲折しているのがわかる。引き裂かれた木繊維の中には、それが存在していたことを示す鑄型だけが残り、引き裂れた細胞壁が認められないものがある(矢印)。これは、単に切片作成中に欠落したものか、あるいは割れた際にその細胞だけが細胞間層付近で分離し、ササクレだち、割れ目中に孤立していて、同様に切片作成中に欠落したものかのどちらかであろう。

Photo 16は早材道管が破壊されて、割れが進行したものである。写真中央に見られる、2つの道管(複合管孔)が接線方向に引き裂かれている。しかし、2つの道管が接している細胞壁部は2重壁のため強いので、その細胞壁自体は引き裂かれてはおらず、それに接続している右側の道管の細胞間層付近で分離している。また、左側の道管の場合も同様に破壊したものと考えられる。なお、この破壊の状態についてはSEMでも観察したので、詳細については後述する。このような道管自体の破壊と共に、その左右に延びている割れの多くは道管と同様に木繊維自体の破壊によっているようである。

これまでに示して来たものは、幾分かの曲折はあるものの、巨視的に見るとほぼ直線的に割れているものについてである。そのような直線的な割れとは異なり、割れの途中でその方向を激しく変えてしまったものもあった。それがPhoto 17で、その拡大がPhoto 18である。写真右側には径の大きな早材道管が見られ、その近くに年輪界があり、左側には径の小さな晩材道管がある。また、この割れ部の片側は欠け落ちてしまい、写真上には見られない。

写真左側に発生した割れは、年輪界付近で、幾分斜めではあるが接線方向に向きを変えて、その進行は止まっている。一方、写真右側の割れは年輪界部を直線的に進んだ後、その向きを突然に変え、左側の割れに出会い、その進行は終了している。このような状態になるには、接線方向にあまり離れていない部位で、2つの割れが発生し、延びて行く途中で出会うことが必要と考えられる。一つの割れが延びて行く途中で、このような状態になるとは考えにくい。

左側からの割れは主として放射組織に沿って進行しており、細胞間層付近での分離による。そのため、その割れは画然とした状態である。折れ曲った後でも同様に、細胞自体の破壊はほとんど認められない。また、右側の割れの場合、早材道管は破壊されてはいるが、その付近の細胞はほとんど破壊されていず、細胞間層付近での分離の結果である。なお、左側の割れの終点付近では、割れは3つに分岐している(矢印)。このような分岐は、上述したような2つの割れが出会ったために生じたのか、あるいは試料作成時のものかどうかは判然とはしない。

Photo 19~23は割れ部の板目面であるが、いずれの場合も、割れたもう一方の材部は欠け落ちている。ここに示されている割れのほとんどは細胞間層付近に沿って分離した結果のものである。Photo 19に典型的に見られるように、割れの軸方向への進み方はいわゆる繊維方向に沿っていることが多かった。その際、放射組織の割れに対する挙動は注目される。割れの進

行が放射組織をう回したり(Photo 19), 放射組織とそれに隣接していた木繊維との間の細胞間層付近を進んだり(Photo 20), 放射組織を構成する放射柔細胞間の細胞間層付近に曲折しながら進んだり(Photo 21), さらには放射柔細胞を2分するように進んだり(Photo 22)している。また, 木繊維が分離しかかっているものもしばしば見られた(Photo 19, 20の矢印)。

一方, 細胞自体が破壊した例はあまり多く見られなかったが, 木繊維の細胞壁が引き裂れた残り(Photo 20, 21の二重矢印)も認められた。時には, 構成細胞が切断されてしまっている場合もあった(Photo 23)。これは, Photo 17の場合(木口面)のそれと同様で, 上下2ヶ所で発生した割れが出会った所であると考えられる。

これまで見て来たように, ヤチダモ内部凍裂の結果発生した割れは, その多くは構成細胞間層付近に沿ったものであった。また, 構成細胞自体が接線方向あるいは軸方向に引き裂れて破壊した結果のものもあった。前述したように, 凍裂による割れの発生については不明な点が多く, その発生機構が十分に解明されているとは言い難い。この点を考えると, 注目に値する現象を2つ挙げるができる。1つは, 割れが早材道管を貫通している場合には, 早材道管自体が接線方向に引き裂れ, それに隣接する木繊維も同様に破壊しており, 道管から離れるにつれ細胞間層付近で分離する傾向にあった(Photo 16)。もう1つは, 割れの大部分は構成細胞が細胞間層付近に沿って分離した結果であり(Photo 13), また, その先端部も同様であった(Photo 14)。

以上の点だけを考え合せると, 凍裂によって材部が割れて行く経過を次のように推定することが可能かもしれない。ただし, 材中の割れ目部の組織の破壊状態を観察した結果だけに基づいており, 言わば静的な面からの見方であり, 生長応力³⁵⁾などを考慮した動的な観点はまったく省いてある。したがって, 内部凍裂の真の意味での起源を明らかにするには不十分と考えられるが, そのための一つの示唆を与えるものになるかもしれない。すなわち, 最初の氷の形成は早材道管の内腔に集中し, その形成に伴う膨圧が早材道管壁の抵抗力を越えた時, 早材道管は急激に破壊し, それと同時に隣接細胞も同様に破壊する。この破壊により, その膨圧は一時的には緩和されるものの, さらに引き続く氷の形成により, その割れはさらに発達して行く。しかし, それは緩やかな膨圧の増加であり, その圧力に対しては細胞間層付近での分離で十分対処して行ける。この時, 細胞間層付近の化学的変質によるぜい弱化がなされておれば, この分離はさらに容易なものとなろう。その役目をバクテリア^{18, 21)}などが果しているのかもしれない。今後はその面からの追求, さらには氷の形成経過についてのモデル実験^{6, 12, 14, 20, 28, 33)}も必要と考えられる。

3.3 割れ目部のSEM観察

光顕によって割れ目部の材組織の状態を示して来たが, 詳細な観察には十分ではなく, 例えば細胞間層での分離かどうか判然とせず, その付近と考えて来た。そのような点の解決と, 割れ目部の状態を三次元的に把握するためにSEM観察を行なった。なお, Photo 24~29は

木口面についての、Photo 30~37は主としてまさ目面についての割れの状態を示している。観察した試料のほとんどは光学顕微鏡切片を作成したものと同一ものである。

Photo 24は木口面で見た場合の割れ(内部凍裂)の一例である。写真中央部には、径の大きな早材道管が多数存在し、いわゆる孔圏を形作っている。写真左側の早材道管の存在しない部分が晩材部であり、この部分と孔圏との境が年輪界である。ここに示されている割れはほぼ直線的であるが、詳細に見ると、年輪界付近と、孔圏内との2ヶ所に割れの曲折部がある(クサビ)。また、早材道管が接線方向に引き裂れた結果の割れ部もある。なお、写真右上の隅に見られるへコミ部は、試料作成中に生じた傷であり、本来の割れとの関係はまったくない。この割れの右側の一部をさらに拡大したのがPhoto 25である。ここに見られる割れのほとんどは放射組織と木繊維とが分離した結果であるが、その中央部の一部(クサビ)だけは木繊維相互の間で割れている。割れ目の表面には木繊維の側面が見られるが、その細胞壁は破壊されていず、それ本来の形状をほぼ維持している。そのため、この割れは細胞間層付近に沿った分離の結果であると考えられる。Photo 24に見られた早材道管の破壊状態をさらに詳細に示すのがPhoto 26である。なお、Photo 16に示されたものは、この試料から切削したものであり、そこに見られた早材道管と同じものであり、両者の破壊状態はよく対応する。放射組織に接していた部分の道管壁は完全に剝離しており、そこには多くの有縁壁孔が認められ、同様に放射柔細胞壁にもそれらと対をなしていた単壁孔が見られる。その単壁孔を詳細に見ると、壁孔壁が残っているもの、それが剝離されてしまい単なる穴としての形状を示すものなどがある。このように種々の剝離状態にあると言うことは、細胞壁の剝離の仕方は局部的にかなり異なると考えるべきで、常に一定の壁層部で剝離あるいは分離が生じて割れるとは言えないようである。この点についてはTEM観察を試みる必要はあるものの、これまで述べて来たように、細胞の剝離または分離は細胞間層付近に沿って発生すると考えておくことにする。Photo 27はPhoto 24の孔圏内に見られた、割れの曲折部を拡大したものである。上方の割れは、放射組織と木繊維との分離の結果であるが、曲折部では放射組織は切断されている。放射柔細胞のなかには、その末端壁部(矢印)で分離しているものもあるが、多くは切断されている。また、曲折部の木繊維の多くは細胞間層付近で分離しているが、なかには引き裂かれているものも見られる。

Photo 28は割れ目の先端部を示す。写真左側からの割れは、写真中央のやや右側で止まっている(クサビ)。なお、ここに見られる割れは木繊維相互の分離の結果である。この先端部をさらに拡大したのがPhoto 29である。細胞間層付近に沿って分離していることがよくわかる。一見したところでは、放射組織と細胞Aとの間で割れが止まっているかのように思われる。しかしながら、細胞C, D, Fの細胞壁側面上には棒状のバクテリアが多数存在し、一方細胞A, Bのそれには見られない。試料は採取後、直ちにFAA液で固定してあり、採取後にバクテリアが発生したとは考えられず、試料採取以前から存在していたと考えられる。樹幹内部の割れ目にバクテリアがしばしば存在することはよく知られており、したがって、バクテリアの存在する

所が樹幹中で割れていた所であると推定される。それ故、細胞A、B部の分離は試料処理中に発生したものであり、本来の割れは細胞C、E、F部まで到達していたと考えられる。なお、放射柔細胞上にもバクテリアが認められるが、その由来については不明であり、また木繊維の細胞壁断面上にも存在するがその由来についても同様に判然としない。

Photo 30 は割れ表面の一例である。写真上方には木口面が、その下方にはまさ目面が見られ、SEMの最大の特徴(焦点深度が大)がよく示されている。木口面上の左側には大径の早材道管が多数あり、孔圏部を形作り、その右側は年輪界を挟んで晩材部がある。まさ目面である割れの表面には、早材道管や木繊維などの側面が見られる。また、そのような軸方向の細胞に対して水平に走っているのが放射組織である。割れの表面が比較的平滑な部分はそれらの細胞の細胞間層付近に沿って剝離した結果であり、それ以外のけば立った状態の部分は細胞が引き裂かれたり、切断されてしまった部分である。早材道管は、道管要素がそっくり剝離したものや、残存したりして、その破壊状態は様々である。この割れ目には曲折部がある(クサビ)。それを拡大したものがPhoto 31である。接線方向に割れた曲折部の表面には、引き抜かれた状態の木繊維や切断された放射組織が見られる。なお、割れ表面に放射柔細胞の一部だけが残存しているが(クサビ)、これはPhoto 22の場合に見られた破壊と同様なものである。

Photo 32~35は割れの表面の一部を拡大したものである。Photo 32は割れた際に、構成細胞が板状に引き裂かれたものであり、その先端部の細胞は切断されたり、引き抜かれたりしているが、それ以外の板状の側面部は細胞間層付近での分離の結果であり、その表面は平滑である。なお、この板状部は、その大きさからみてPhoto 9や11に見られた氷中に埋まっていた“ササクレ”に相当するものと考えられる。Photo 33は木繊維が細胞間層付近から分離し、引き抜かれてしまった痕跡が鑄型のように見える例である。また、その一部だけが材中から引き抜かれたものも認められる。このような状態はPhoto 14の矢印で示したものと同様なものであると考えられる。なお、引き抜かれた木繊維がねじれているのは試料処理中の乾燥の結果である。写真中央付近には、放射柔細胞が1個だけ残存しているが(クサビ)、その細胞壁は特別な破壊は受けていないようである。木繊維が破壊される場合には、軸方向に細胞壁が引き裂れ、その先端が鋭角をなしているもの(Photo 34)、細胞軸にほぼ直角に切断されているもの(Photo 35)などの状態のものもしばしば認められた。しかしながら、そのような破壊形態の相違をもたらす原因は不明である。KORÁN (1967) は -190°C から 250°C までの間の8種類の温度下で、*Picea mariana*の小ブロックを引張り破壊させ、その破壊面をSEMとTEMで観察した。その結果によると、 -190 、 -60 、 0°C の低温では、その破壊面は高温のものに比べ一般的に粗く、それは1次壁あるいは2次壁S₁層で破壊しているためであると記している。また、低温下では仮道管の切断もしばしば発生したと述べている。本研究ではいわば天然の低温下での破壊状態を同様にSEM観察した訳であるが、広葉樹のため構成細胞の種類が多く、複雑に構成されていること、さらにはTEMを用いなかったことなどで、彼のような詳細な知

見を得るには至らなかった。今後はまず、トドマツの凍裂材について、SEM、TEMを併用した研究を進め、彼の結果と比較、対照してみることが重要であると思われる。

Photo 2や3の円板表面に見られるように、ヤチダモの内部凍裂材中には、腐朽に関係していると考えられる同心円状の着色部がしばしば認められた。光顕、SEM観察した円板についても同様の変色部が認められ、腐朽などの進行が推定された。それを示すのがPhoto 36と37である。前者には木繊維中に認められた菌糸が(矢印)、後者には道管壁に見出された棒状のバクテリアが示されている。この種のバクテリアはPhoto 29にも示された。トドマツの水食い材の原因が種々考えられているが、その中の一つにバクテリア説があり¹⁸⁾、材中に存在するバクテリアがしばしば報告されてはいる。しかしながら、それが水食い材の主原因であるのかどうかは判明していないようである。予備的調査によると、供試したヤチダモは心材含水率が辺材のそれよりも高い、多湿心材を有していた。この現象はトドマツの水食い材に対応するとも考えられ、ヤチダモ材中にもバクテリアが見出された。したがって、バクテリアが多湿心材の原因で、その多湿心材が凍裂をひき起すと考えることも可能ではある。しかし、本研究結果だけで、そのような結論を出すことは非常に危険であると考えられ、その点については今後の研究に期待したい。

おわりに

先に述べたように、ヤチダモ(天然木)にも凍裂は発生するが、その割合はかなり低いものであると言われて来た。しかしながら、本研究によれば、その発生率は相当に高いものであった。その上、調査された林分は植栽されたものであり、近年の広葉樹造林へのすう勢を見る時、このような高頻度の発生は非常に深刻な問題としてとらえねばならない。したがって、その発生の原因の究明、それに基づく防止法の開発が急がねばならない。本研究はまだ緒についたばかりであり、その原因を明らかにするにも至らなかったが、そのための第一歩として、これまでは単に“凍裂”として取り扱われがちであった現象を、内部凍裂と外部凍裂とに分けて考えるべきであることを示した。すなわち、従来はここで言う外部凍裂に強い関心が寄せられる傾向にあったが、本研究によれば、むしろ内部凍裂の方に注目すべきであると言えよう。

また、この内部凍裂の結果生じた材中の割れを光顕、さらにはSEMで観察し、割れ目の状態を組織学的に明らかにした。その結果によれば、割れの多くは材を構成する各種の細胞の細胞間層付近に沿ったものであり、時には細胞自体が引き裂かれているものもあった。特に、後者の場合が、割れの発生経過を考える際には注目しなければならないと推察されたが、十分な結論を出すには至らなかった。したがって、今後も組織学的な究明をさらに幅広く、詳細に進める必要があると考えられる。

なお、本研究では、外部凍裂の試料を得ることができなかつたため、それについての組織学的な研究は行なわれなかつた。この点は本研究にとって最も不満の残るところであるが、今後の研究に期待したい。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、北海道大学農学部林産学科木材理学講座教授、深沢和三博士には貴重な御教示を多数戴いた。ここに記して深甚なる謝意を表わす次第である。

なお、この研究の一部は北海道大学中川地方演習林(林長 小鹿勝利助教授)の経営試験のなかで行なわれた成果の一部である。

文 献

- 1) 赤坂 宿, 他: スギの凍裂について(I), 立木にあらわれた凍裂こんについて, 岩大演業資, 8号:36-42 (1986).
- 2) ANDREWS, P. K., PROESTING, E. L. and GROSE, D. C.: Ice nucleation and supercooling in freeze-sensitive peach and sweet cherry tissues, J. Amer. Soc. Hort. Sci., 111: 232-236 (1986).
- 3) ASHWORTH, E. N., et al.: Ice formaion in *Prunus persica* under field conditions, J. Amer. Soc. Hort. Sci., 110: 322-324 (1985).
- 4) BOYCE, J. S.: Forest Pathology, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co. Inc. (1961).
- 5) 千葉 茂: ポプラの品種別及びヤマハンノキの凍裂について, 北海道の林木育種, 8: 9-15 (1965).
- 6) FERGUS, C. L.: Frost cracks on oak, Phytopathology, 46: 296 (1956).
- 7) GLERUM, C. and FARRAR, J. L.: A note on internal frost damage in white spruce needles, Can. J. Bot., 43: 1590-1591 (1965).
- 8) 後藤康次, 中村 基: 今須地方にみられるスギの幹割れの被害について, 日林中支講, 25: 60-67 (1977).
- 9) HART, J. H. and DENNIS, G. L.: Effect of tree wrap on the incidence of frost crack in Norway maple, J. Arboriculture, 4: 226-227 (1978).
- 10) 堀内孝雄: スギ樹幹の凍裂の発生について, 茨城林試業報, No. 14: 8-9 (1977).
- 11) 今川一志, 大谷 諄, 笹賀一郎: ヤチダモの凍裂について(予報), 日本北支講, 18号: 5-8 (1986).
- 12) 井上 晋: イヌエンジュ二次林の群落生態について(Ⅲ)-凍裂の実態, 日林北支講, 33号: 172-175 (1984).
- 13) 石田茂雄: 寒さのために樹木が割れる現象について, 低温科学, 5: 61-73 (1950).
- 14) 石田茂雄: 北海道における凍裂の発生状況, 北大演報, 15: 303-341 (1952).
- 15) 石田茂雄: トドマツ生材の凍結温度, 北大演報, 19: 123-144 (1958).
- 16) 石田茂雄: 直立丸太材内部の冬期における温度分布に関する一実験, 日林北支講, 10号: 95-98 (1961).
- 17) 石田茂雄: 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, 北大演報, 22: 273-373 (1963).
- 18) 石田茂雄: トドマツの凍裂, 北方林業会, (1986).
- 19) Jović, D.: Appearance of bark frost cracks and process of having over the cracks caused under the influence of low temperatures of *P. × euramericana* CL. "I-214", Topola, 18/19: 60-67 (1967). P.
- 20) KORÁN, Z.: Electron microscopy of radial tracheid surfaces of black spruce separated by tensile failure at various temperatures, TAPPI, 50: 60-67 (1967).
- 21) 李 起泳, 深沢和三, 石田茂雄: ドロノキ材の結晶と細胞組織及び有機物との関連, 日本北支講, 18号: 1-4 (1986).
- 22) 三上 進, 及川伸夫, 伊藤喜悦: スギ造林地における凍裂の発生実態(I)-岩手県安代地区スギ造林地における凍裂の発生状況一, 日林東北支誌, No. 38: 142-144 (1986).
- 23) 中田清二, 上田富茂: 吉野材の生産技術体系改革に関する研究, 凍裂の実態調査, 奈良林試業報, : 20-21 (1984).

- 24) 中山 仰, 原田重雄: 人為処理により発現した幼茶樹の主幹裂傷害, 茶業研報, 38: 11-14 (1973).
- 25) 及川伸夫, 他: スギ造林地における凍裂の発生実態(Ⅱ)—秋田県小坂地区スギ造林地における凍裂の発生状況一, 日林東北支誌, No. 38: 145-147 (1976).
- 26) 及川伸夫, 三上 進: スギ造林地における凍裂の発生実態(Ⅲ)—凍裂木と健全木における成育期間中の材の含水率一, 日林東北支誌, No. 38: 148-150 (1986).
- 27) 大沢正之, 石田茂雄: トドマツの凍裂, 北方林業, 3: 22-26 (1951).
- 28) PARKER, J.: Cold resistance in woody plants, Bot. Rev., 29: 123-201 (1963).
- 29) PEACE, T. R.: Pathology of Trees and Shrubs, Oxford Univ. Press, (1962).
- 30) 酒井 昭, 斉藤 満: 林木の寒風害の研究(Ⅱ), 水分の上昇をおさえる幹の凍結温度, 日林誌, 49: 198-204 (1967).
- 31) 笹賀一郎, 今川一志: ヤチダモ造林地における凍裂の発生状況, 北大演試報, 4号: 12-13 (1986).
- 32) SIMONS, R. K.: Phloem tissue development response to freeze injury to trunks of apple trees, J. Amer. Soc. Hort. Sci., 95: 182-190 (1970).
- 33) 照本 勲: 植物組織内のできる氷塊について, 低温科学, 18: 39-42 (1960).
- 34) 塚本光弘: ヤチダモ造林地の現況と間伐について, 北大演試報, 3号: 50-56 (1985).
- 35) 渡辺治人: 木材理学総論, : 33-38 農林出版, (1978).

Summary

Frost cracks of Yachidamo, *Fraxinus mandshurica* var. *japonica*, were investigated macroscopically and microscopically. In Yachidamo planting forest (about 60-year old) at Ariganosawa in Nakagawa Experiment Forest of Hokkaido University, Hokkaido, frost cracks occurred on about 23 % of 144 stems surveyed. Among 33 stems with frost cracks, 27 stems were injured by only one frost crack, 5 stems by two, only one by three. Most of the frost cracks were extended 5 m and less from the base of the stems. The occurring directions of the frost cracks on the stems varied considerably.

Observing the bottom ends of the felled stems or the serial disks from them, it was realized that internal frost cracks occurred often within the stems, even though there were not at all so-called frost cracks which can be recognized only on the outer surface (bark) of the stems. And naturally, there also found many frost cracks within the stems on which so-called frost cracks occurred. Internal frost cracks were extended radially as well as so-called frost cracks, but the former occurred more abundantly than the latter. In one stem, usually, both cracks occurred more severely near the base of the stems, and reduced gradually toward the upper portion.

Judging from the occurring states of both cracks as mentioned above, internal frost cracks seemed to be qualitatively similar to so-called frost cracks, however, in the stage of their development the former appeared to be different from the latter. That is, it is considered that the latter is one which some of the formers develop more radially to reach the outer surface of the stems. Therefore, it was proposed that so-called frost cracks should be called "external" frost cracks corresponding to "internal" frost cracks. And it was also concluded that frost cracks should be used to include either internal and external frost cracks. Considering the developmental process of the frost cracks, consequently, external ones may be preceded by internal ones. Firstly, internal frost cracks occur within the stem by low temperatures in winter, and then are extended furthermore outwardly by increasing ice-formation, and finally bark is suddenly split and longitudinal crack occurs ranging some distance on the stem. At this time,

firstly, external frost crack becomes to be enable recognized with naked eye.

In winter, internal frost cracks were fully embedded with transparent ice. In the ice, numerous air bubbles were located in row and fine pieces of xylem which were partially teared were often found. By the formation of the ice, the widths to the cracks were more enlarged tangentially than ones in summer. Their widths ranged 2-3 mm.

The states of the xylem at the internal frost cracks were observed by usual light and scanning electron microscopy. Specimens were fixed in FAA and prepared usually for their microscopes. Most of the internal frost cracks occurred along near the intercellular layers of various cells. And infrequently, cells themselves were tangentially or longitudinally teared apart to form the cracks. Especially, it is interested that earlywood vessels and the adjacent cells are tangentially teared apart. Consequently, it may be possible to suppose as follows. That is, at first the formation of the ice in the earlywood vessels is advanced rapidly, because the large lumina of the earlywood vessels are suitable to form the ice. And then, when the increasing pressures derived from the formation of the ice in the lumina exceed the resistance of the vessel walls, such vessels are suddenly teared apart to occur the crack. After the occurrence of such initial crack, perhaps, it develops gradually along near the intercellular layers of the cells depending on the speed of the expansion of the ice formed.

Although the internal frost cracks ran in a more or less curved line macroscopically, they bent often during their course microscopically. It is assumed that such turnings correspond to the portions at which to cracks were encountered to connect each another.

Many hyphae or bacteria were located in the lumina or the cell walls. However, it is not clear why they were observed in the xylem, though it is said that they may be important to form the wetwood.

Unfortunately, the xylem of the external frost cracks could not observed microscopically, because the stems with them could not obtained. Therefore, further studies on the external frost cracks seem to be necessary to clarify fully the microscopical features of the frost cracks in sense of the definition of this study.

Explanation of Photographs

- Photo 1.** Frost crack on the stem of Yachidamo. Opening of the cracks is seen in winter.
- Photo 2.** Internal frost cracks in the disks at each height of the stems with four frost cracks. Photo 2 corresponds to disk 1, Photo 3 to disk 3, Photo 4 to disk 10 and Photo 5 to disk 16 in Fig. 7, respectively.
- Photo 5.**
- Photo 6.** Internal frost cracks with ice in the disk of the stem without frost crack.
- Photo 7.** Enlargement of Photo 6. Ice in the frost cracks appears white narrow bands because of reflection of light.
- Photo 8.** Ice in the frost crack. Numerous air bubbles in a row are seen at the center part of the ice.
- Photo 9.** Ice in the frost crack. Air bubbles and fine pieces of xylem teared apart are embedded in the ice.
- Photo 10.** Internal frost cracks in tangential view. Ice with air bubbles and fine pieces of xylem are shown.
- Photo 12.**
- Photo 13.** Transverse section of internal frost crack. Split occurs along the ray.
- Photo 14.** Transverse section of internal frost crack. Split occurs along near the intercellular layers of fibers. Arrows show the cells separated from the adjacent cells.
- Photo 15.** Transverse section of internal frost crack. Most of fibers are teared apart to form the crack. Arrows show the casts of the fibers pulled out.
- Photo 16.** Transverse section of internal frost crack. Earlywood vessels and the adjacent fibers are teared apart. Fibers far from the vessels are separated each other along near the intercellular layers.
- Photo 17.** Transverse section of the portion in which two internal frost cracks are nearly located. Another one of the separated xylems is lost.
- Photo 18.** Enlargement of Photo 17. Split occurs along near the intercellular layers of various cells. Branched ends of the split are seen.
- Photo 19.** Tangential section of internal frost crack. Another one of the separated xylems is lost. Since split occurs along near the intercellular layers, the surface of this split is relatively smooth.
- Photo 20.** Tangential section of internal frost crack. Arrow shows the partially separated fiber. Double arrow shows the piece of the cell wall which was teared apart.
- Photo 21.** Tangential section of internal frost crack. Some of the ray parenchyma cells are separated.
- Photo 22.** Tangential section of internal frost crack. About a half of the ray parenchyma cells are separated from the ray.
- Photo 23.** Tangential section of the portion in which two internal frost cracks are nearly located. At a part of the split, fibers are teared apart.
- Photo 24.** SEM observation of internal frost crack. Wedges show the two turnings of this split.
- Photo 25.** Enlargement of Photo 24. Split occurs along the part except for the central (wedge).
- Photo 26.** Enlargement of Photo 24. Earlywood vessels are severely teared apart. These vessels correspond to the ones in Photo 16.
- Photo 27.** Enlargement of Photo 24. At the turning of the split, most of the ray parenchyma cells are teared apart and one is separated along the end wall (arrow).

- Photo 28.** SEM observation near the end of internal frost crack. Wedge shows the end of the split.
- Photo 29.** Enlargement of the crack in Photo 28. Since bacteria are seen on the side cell walls of cell B, C, D and F, the split between cell A and ray seems to occur during the treatments of this specimen.
- Photo 30.** SEM observation of the radial surface of internal frost crack. Wedge shows the turning of the split.
- Photo 31.** Enlargement of the turning in Photo 30. In tangential surface of the turning, teared ray parenchyma cells are seen. In radial surface, leaved ray parenchyma cells are located (wedge).
- Photo 32.** SEM observation of the surface of internal frost crack. A piece of plate-like cells is partially separated.
- Photo 33.** SEM observation of the radial surface of internal frost crack. Many casts of fibers pulled off are seen. Wedge shows the leaved ray parenchyma cell.
- Photo 34.** SEM observation of the radial surface of internal frost crack. Most of the fibers are longitudinally teared apart.
- Photo 35.** SEM observation of the radial surface of internal frost crack. Most of the fibers are transversely cut.
- Photo 36.** SEM observation of the radial surface of internal frost crack. Hyphae are abundantly seen in the lumina of fibers (arrows).
- Photo 37.** SEM observation of the radial surface of internal frost crack. Many bacteria are located on the pits and the wall of the vessel.

