

# 東北地方におけるスギ凍裂の発生実態

今川一志<sup>(1)</sup>, 及川伸夫<sup>(2)</sup>, 糸屋吉彦<sup>(3)</sup>, 太田敬之<sup>(4)</sup>, 下田直義<sup>(5)</sup>

IMAGAWA, Hitoshi<sup>(1)</sup>, OIKAWA, Nobuo<sup>(2)</sup>, ITOYA, Yoshihiko<sup>(3)</sup>, OTA, Takayuki<sup>(4)</sup>  
and SHIMODA, Naoyoshi<sup>(5)</sup> : Frost Cracks of Sugi (*Cryptomeria japonica*)  
in the Tohoku District

**要 旨** : 東北地方の115か所のスギ造林地における凍裂の発生実態を調査した。凍裂は胸高部を中心とした地上2~3m部位に発生した。ほとんどは樹幹に1か所だけの発生であったが、複数発生しているものもあった。樹幹における発生は両側に、急傾斜地の場合は谷側に発生しているものが多かった。樹幹径と凍裂発生の間には密接な関係は見られなかった。凍裂木の樹幹内部には凍裂による割れ以外にも多様な割れが出現しており、その心材含水率は異常に高かった。また、樹幹中への気温の伝わり方はかなり緩慢なものであり、急激な気温低下が凍裂発生に直結するとは考えられなかった。スギ凍裂は40年生半ば頃から発生し始め、その後は少数ではあるが新たな凍裂木が出現し続けた。凍裂は目回りのような既存の割れの存在が発生の引き金になるものと推定されたが、心材中への水分集積が根本原因と考えられた。東北地方の発生状況は奥羽山脈沿いに多く、海岸側に少ない傾向にあり、秋田県北部に高い出現率の林分が多かった。林分ごとの凍裂木出現率は0~30%まで幅広くみられた。凍裂発生と生育環境との間に特別な関係は見られなかったが、溪床沖積地に多く出現した事例は見られた。表系スギに多く発生する傾向が明らかになった。発生機構について若干の考察を試みたが、根本原因である心材水分の由来については明らかにできなかった。

## 目 次

1	はじめに .....	2
2	調査方法 .....	4
2.1	実態調査 .....	4
2.2	凍裂木の樹幹内部 .....	4
2.3	凍裂発生開始の林齢 .....	4
2.4	発生の継続経過 .....	4
2.5	新たに発生した凍裂 .....	5
2.6	種子産地試験地の発生状況 .....	5
3	結果及び考察 .....	6
3.1	樹幹外部の特徴 .....	6
3.1.1	凍裂木の識別 .....	6
3.1.2	発生部位 .....	6
3.1.3	発生数 .....	7
3.1.4	発生方位 .....	8

3.1.5 樹幹径との関係	10
3.2 樹幹内部の状態	11
3.2.1 割れの状態	11
3.2.2 年輪構造の特徴	12
3.2.3 割れの発達経過	13
3.2.4 凍裂部の組織	15
3.2.5 含水率分布	16
3.2.6 樹幹温度の変化	17
3.3 凍裂発生開始の林齢	18
3.4 発生の継続経過	19
3.5 新たに発生した凍裂	21
3.5.1 新凍裂木の確認	22
3.5.2 割れの出現状況	22
3.5.3 含水率分布	24
3.5.4 新凍裂の発生	24
3.6 東北地方における発生状況	24
3.7 種子産地試験地の発生状況	30
3.8 発生機構の考察	31
4 おわりに	33
引用文献	33
Summary	37

## 1 はじめに

厳寒期、樹木の幹が激しい音を発しながら縦に割裂することがある。このような現象は「モメキ」または「幹割れ木」（後藤・中村，1977）、「寒割れ」（元村，1986）、「いてわれ」あるいは「ゆりわれ」（中田・上田，1985）などと称されることもあるが、霜割れあるいは凍裂と呼ぶことになっている（日本材料学会，1982）。また、このような現象は多くの樹種で発生することも知られている（BOYCE, 1961; 千葉，1965; FERGUS, 1956; 今川ほか，1988a, 1989d; 井上，1984; 石田，1950, 1952, 1963, 1986; PEACE, 1962; 佐藤，1981）。ただし、厳寒期に発生するこの現象を霜割れと呼ぶのは古くからの慣例（本多，1902）に過ぎず、その実態を的確に示しているとは思われない。そのため、以下では、その実態により近い用語、すなわち凍裂と呼ぶことにするが、霜割れという用語は速やかに廃止すべきであろう。ちなみに、我が国において凍裂という現象が知られるようになったのは、外国からの情報によるもののようで、教科書的には烈寒割裂、氷裂、凍裂（望月，1894）、霜割（本多，1902）、風裂、霜裂（新島，1912）、寒裂（白沢・後藤，1914）などいくつかの苦心の訳語がある。なお、酒井（1982）によれば、農林作物の冬季における気象害は寒害と雪害とに大別することができ、凍裂は凍害、乾燥害、寒風害などとともに寒害の一つに

位置付けられている。

従来、石田（1950, 1952, 1963, 1986）によるトドマツの凍裂についての一連の研究報告により、凍裂とは北海道のトドマツに特有な現象であるかのように見なされがちであった。石田や佐野ほか（1989）によれば、トドマツの凍裂木の樹幹中には凍裂による割れ以外にも多数の割れがあったり、水喰い材と呼ばれる局所的な高含水率域があったりしてその材質は著しく低下する。また、この凍裂は胸高部付近を中心とした、いわゆる1番丸太で発生し、その上、30~40年生のいわゆる壮齢木になった頃から発生する。すなわち、長年月にわたって除・間伐などを行い、壮齢木となった頃から凍裂が発生し始め、その上最も経済的に価値の高い胸高部付近を中心とした部位に凍裂が発生する。このような点を考えると、長長期化の趨勢にある林業にとって、凍裂は非常に深刻な、見過ごすことのできない問題である。

スギにも凍裂が発生するという事は、今世紀初めに、大西（1907）が「越後地方のスギには凍裂（霜割れ）の被害が甚だしい」とすでに指摘していた。トドマツやヤチダモ（今川ほか, 1988a, 1989d）の例からも明らかのように、林業的には深刻な問題であるにもかかわらず、我が国の重要な造林樹種であるスギの凍裂については大西の指摘にもかかわらず、近年までほとんど注目されず、その調査・研究は着手されないままであった。

スギの凍裂が一般的に広く知られるようになったのは高山ほか（1973）の報告以来である。それ以降には、その問題性の故からスギの凍裂についてはかなりの調査報告がある（赤坂ほか, 1986；安藤, 1992；後藤ほか, 1977, 1978；堀内, 1977；松田ほか, 1985；元村, 1986；中田・上田, 1984, 1985；高木・西山, 1987；富田ほか, 1988；富田・滝尻, 1988；上田・中田, 1986；和口, 1988；和口ほか, 1991）。しかし、それらの多くは限定された地域、例えばある県のある林分に限られた局所的な一事例の報告であることが多く、調査本数がそれほど多くないなど、スギ凍裂の発生実態を十分に明らかにするには至っていないと考えられる。

このような点から、筆者らは東北地域全域にわたる多くの林分を対象とし、スギ造林木における凍裂の発生事例を可能な限り調査して、その発生実態を詳細に明らかにしようとした。調査・研究は1986~1993年にわたって進められ、その間に得られた個々の成果は随時報告してきた（今川ほか, 1988b, 1988c, 1989a, 1989b, 1989c, 1990a, 1990b, 1990c, 1990d, 1992a, 1992b；三上ほか, 1986；及川ほか, 1986a, 1986b, 1987, 1988a, 1988b, 1991, 1993）。しかし、その間に得られた個々の成果を総合的に考察する機会はなかったので、それらの成果を取りまとめ、東北地方におけるスギ凍裂の発生実態を総括的に示す。

なお、この調査・研究に最初に着手したのは、元森林総合研究所東北支所長の三上 進博士であり、筆者らはそれを途中から引き継いだことを明記するとともに、本調査を進めるにあたり、元森林総合研究所東北支所育林部長の河原輝彦博士には種々援助をいただいた。また、青森・秋田両営林局、各地の営林署、各県の林業試験場、民有林の方々には調査林分の選定、調査の協力など多大のご援助をいただいた。ここに記して、深甚なる謝意を表す。

調査の一部は国有林野事業特別会計技術開発試験（平成3~5年度）経費を使用した。

## 2 調査方法

### 2.1 実態調査

1986年から1993年にかけて、東北6県全域にわたるように調査林分を選定して、凍裂の発生実態を調査した。すなわち、青森県28林分、岩手県26林分、秋田県24林分、宮城県14林分、山形県8林分、福島県15林分の計115林分で調査を実施した。調査対象林分の林齢は原則として50年生以上とした。しかし、該当するような林分がなく、それよりも若い林分について調査せざるを得ない場合もあり、調査した林分の林齢は42～180年生までの広い範囲であった。なお、調査林分には、国・公有林及び民有林が含まれているが、国有林が最も多かった。

各調査林分における調査本数は原則として200本を目途とし、胸高直径を測定しながら、各樹幹での凍裂発生の有無を確認しながら調査を進めた。一般的に行われているような標準地を設定するような方法はとらなかった。凍裂の発生が確認された場合には、発生部位（へびさがり）の地上高及び長さ、樹幹当たりの発生数、樹幹における発生方位（8方位別）などを調べた。各調査林分での調査木総数に対する凍裂木（凍裂が発生しているもの）数の割合（％）をその林分における凍裂木の出現率とした。なお、調査林分の林齢、標高、地形（傾斜の有無、緩急）などについても調査した。

### 2.2 凍裂木の樹幹内部

各地における凍裂木の出現率を求めるとともに、凍裂木を適宜伐採し、樹幹内部についても調査した。凍裂部を中心として、上下方向に円板を連続的に採取し、その表面を電動カンナなどで仕上げ、写真撮影をするるとともに、円板上に見られる割れを透明なシートに写し取り、樹幹内部の割れの出現状況を調査した。

また、割れ部から小材片を採取し、常法に従い光学顕微鏡切片を作成し、割れの状態を組織学的にも調べた。

円板から直径方向のストリップを割り取り、1～2cm厚に細分し、乾燥法により含水率を測定し、樹幹内部の含水率分布を調査した。

へびさがりの発達が顕著な典型的な凍裂木について、冬期間における樹幹温度の変化及び凍裂部の開閉経過を調査し、両者の関係を検討した。

### 2.3 凍裂発生開始の林齢

スギの凍裂発生開始樹齢（林齢）は明らかではないので、同じような生育環境にあった林齢の異なる5林分（20～60年生）に試験地を設定し、凍裂木の有無を調査し、凍裂が発生し始める林齢を推定した。

### 2.4 発生の継続経過

凍裂木がすでに出現している林分において、さらに新たな凍裂が発生するのかどうか、あるとしたらどのぐらいの割合で発生し、それはいつまで継続するのかを明らかにしようとした。固定試験地を3か所設定し、試験地内のスギ樹幹にはすべて番号をつけ、凍裂木か健全木かを示す基本台帳を作成した。1月下旬から2月上旬の厳寒期に、その基本台帳に基づき新たな凍裂の発生の有無を現地踏査した。調査は5年間継続した。

固定試験地の概況は以下のとおりである。

① 試験地-1

所在地：秋田県小坂地区（十和田営林署砂子沢国有林25林班よ小班）

林 齢：70年生（1986年時）

試験地：40m×50m

平坦地と傾斜地に2か所設定

本 数：平坦地；119本，傾斜地；108本

② 試験地-2

所在地：岩手県雫石町（民有林）

林 齢：60年生（1988年時）

試験地：50m×50m

平坦地に2か所設定

本 数：161本，200本

③ 試験地-3

所在地：岩手県雫石町（民有林）

林 齢：48年生（1989年時）

試験地：平坦地

本 数：161本

なお、試験地-1については、1989年11月～1990年2月にかけて、林内気温をデータロガーを用いて測定し、気温と凍裂発生との関係を検討した。それ以外の年の気温は近くの気象観測所のデータを参考にした。

## 2.5 新たに発生した凍裂

厳寒期に固定試験地（試験地-1及び3）で新たに凍裂が発生したものを伐採し、凍結したままの状態を持ち帰り、その樹幹内部の割れの状態や含水率分布などを前述したような方法で調査し、凍裂発生のメカニズムを解明しようとした。

## 2.6 種子産地試験地の発生状況

全国の47産地から種子を集め、青森営林局大鰐営林署東碓ヶ関国有林239林班ほ・へ小班にスギ種子産地試験地が1935年に設定された。57年経過したので、産地別の発生率を調査し、発生要因として産地（表・裏系の別）の影響を検討した。ただし、各産地林とも除・間伐が入っているため、現在の成立本数は少ない。そのため、明確な結論を出すには至らないと予測されるが、凍裂発生原因を解明するための貴重な示唆が得られると期待される。

### 3 結果及び考察

#### 3.1 樹幹外部の特徴

##### 3.1.1 凍裂木の識別

凍裂は厳寒期に発生する。その結果、樹幹表面では縦に走り、樹幹内部では樹皮から中心部へ向かう割れ（開口部）が出現する。春に向かうにつれ開口幅は狭まり、ついには閉じる。成長期には傷ついた形成層が癒合組織を作り、通常とは異なる材部（年輪）や樹皮が形成され、割れは癒合することが多い。しかし、癒合部はわずか1年間の肥大成長量しかないので、次の冬期には再度割れることが多い。このような開口と閉鎖の繰り返しの結果、材部は局部的に肥大し、樹幹表面には割れに沿った山脈状の盛り上がりが見られるようになり、異常樹皮も発達する。これが凍裂樹皮（石田, 1986）で、いわゆる「へびさがり」と呼ばれるものであり、凍裂が発生したことの証拠になる。なお、このような開閉の繰り返しによって「へびさがり」はしだいに幅広くなり、より顕在化する。

Photo 1は典型的なスギ凍裂木樹幹の外観を示す。樹幹中央部を縦に走っている帯状部が発達したへびさがりであり、冬期に撮影したため開口している。さらに詳細に見ると、前年に形成された材部（年輪）が引き裂かれ、割れ目には白い材部が見られる（Photo 2）。なお、このへびさがりはまっすぐに走っているが、左右いずれかに傾斜していたり、不連続なものだったりすることもある。このような相違は材部の繊維走向（木理）を反映している（KUBLER, 1991）。

ただし、凍裂の発生から年月の経過していない場合にはへびさがりはそれほど発達していないので、凍裂木を見つけ出すことは容易ではない。特に、発生したばかりの場合には、へびさがりは全く発達していないので、凍裂の確認は割れ目の有無だけである。しかも成長期にはその割れ目も閉じてしまい、その痕跡もスギ樹皮にある深い亀裂中に埋もれ、それを見つけ出すことは非常に難しい。ときには、凍裂部からの樹液の流出によって見つけることができることもあるが、新しい凍裂の場合は厳寒期の開口を確認することが最も確実である。

通常、凍裂部は開閉を繰り返すが、中には冬期の開口がなく、樹幹表面の盛り上がりはあるが、割れ跡が全く認められなくなってしまうこともある。このような表面的な閉鎖に至る経過は明らかではないが、表面的には癒合したとしても、材中の割れは決して治癒することはない。

なお、スギ樹幹表面には凍裂以外にも様々な傷跡があり、凍裂跡と見誤りやすいので、凍裂木の識別には慎重な観察が必要である。Photo 3に示されているように、へびさがりの樹皮部には細かな縦縞（石田, 1986）があるので、その有無が重要な判断材料になる。しかし、それでも不確実のときには、厳寒期の開口の有無を検証することが必要である。

##### 3.1.2 発生部位

Photo 1に見られるように、へびさがりは樹幹の下方部に出現する。実際の出現部位（地上高）を示すのがTable 1である。調査した林分の中から、凍裂木が多かった5林分を選び、各林分におけるへびさがりの出現部位（平均地上高）を求めた。対象林分は岩手、秋田、福島県の52～180年生である。表から明らかのように、へびさがりは胸高部を中心とした、地際部から2～3mまでの長さである。他の調査結

Table 1. へびさがりの出現部位  
Location of frost ribs on the surface of stems

調査地 Area	林齢 Stand Age	平均地上高(cm) Height	凍裂木数 Number
岩手県雫石 Shizukuishi, Iwate Pref.	52	21~184	22
福島県原町 Haramachi, Fukushima Pref.	60	32~220	24
岩手県沢内 Sawauchi, Iwate Pref.	70	40~221	78
滝沢 Takizawa, Iwate Pref.	89	34~233	21
秋田県田沢 Tazawa, Akita Pref.	180	28~300	50
総平均 Average	67	42~222	958

果でも、地際部から2~3m (赤坂ほか, 1986; 堀内, 1977; 高木ほか, 1987; 和口ほか, 1991) あるいは4~5m (高山ほか, 1973; 富田・滝尻, 1988) までであった。なお、調査したすべてのへびさがりが出現部位の平均値は地上42cmから222cmまで、平均長は180cmであったが、なかには全長が5mにも達するものもあった。

また、対象林分はほぼ10年間隔の林齢であり、林齢が増すにつれ、へびさがりは長くなる傾向にあることが分かる。樹幹内部のところで詳述するが、へびさがりは開閉を繰り返すことにより、次第に上下に進展してゆくことがわかる。

いずれにしても、へびさがりの出現する部位はいわゆる一番丸太であり、しかもそれは次第に進展してゆく。凍裂発生の最も深刻な点である。

### 3.1.3 発生数

ほとんどの場合、凍裂は樹幹に1か所だけの発生であった。しかし、中には複数の凍裂が発生しているものもあった。調査した958本の凍裂木について、発生数別の頻度を示すのがTable 2である。樹幹あたり1か所発生していたものは全体の約88%にあたる847本、2か所が約10%にあたる94本、3か所が約1%にあたる15本であり、4か所に発生していたものが最高であったが、わずかに2本に過ぎなかった。ただし、複数の凍裂の中には、少数ではあるが、調査時点では癒合しており、開口していないと考えられるものも含まれている。他の調査でも1~3か所のものが多いが(赤坂ほか, 1986; 和口ほか, 1991)、5か所(赤坂ほか, 1986)、あるいは6か所(後藤・中村, 1978)に発生した事例も報告されている。

凍裂が複数発生している場合、それらが互いにどのような位置関係にあるのかを調べてみたのがFig.1である。3か所以上のもは数が少ないので、2か所に発生していた94本だけについて、互いの位置関係を求めてみた。すなわち、一方の発生部位を基準として、もう一方が樹幹のどの位置(反対側, 左右45°, 90°, 135°)に発生しているかを示している。図から明らかなように、反対側に発生しているもの

Table 2. 樹幹あたりの発生数  
The number of frost cracks in each stem

凍裂数 Number	本数 No. FC stems	%
1 か所	847	88.4
2 〃	94	9.8
3 〃	15	1.6
4 〃	2	0.2
計 Total	958	100.0

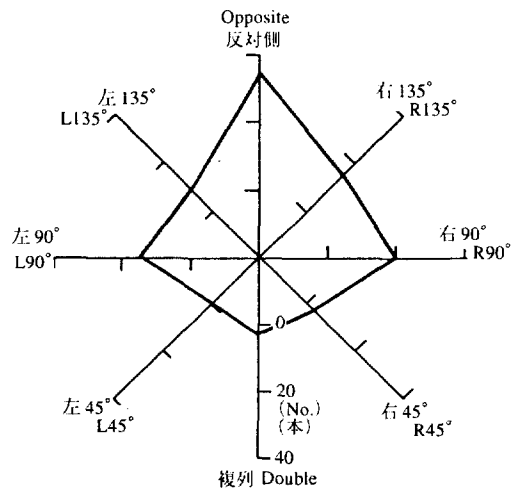


Fig. 1 2か所発生の場合の位置関係  
Relative location of two frost cracks on FC stem  
FC stem : Stem with frost crack, R : right, L : left

が最も多い。しかし、なぜ反対側に多いのか、その理由は不明である。それ以外では左右に関係なくほぼ同じような頻度で発生している。なお、複列とは互いに極めて接近して発生している場合である。

樹幹内部に生じたであろう凍裂を引き起こすような力（それが収縮力であろうと膨張圧であろうと）は凍裂が1か所発生し、樹幹が割れればそれは消失するはずである。しかし、それだけでは済まず、さらに2か所目の凍裂が発生することがあるということの明確な説明はまだない。複数の凍裂発生という現象は凍裂の発生機構を検討する際の貴重な情報と考えられる。

#### 3.1.4 発生方位

樹幹における凍裂の発生方位についてはいくつかの報告があるが、それらは必ずしも一致していない。千葉（1965）、堀内（1977）、松田ほか（1985）、中田・上田（1984）、佐藤（1981）、高山ほか（1973）らによれば、日射が当たる南側に多く発生する。高木・西山（1987）は西から北側に多いと報告している。一方、赤坂ほか（1986）、井上（1984）、富田・滝尻（1988）、和口ほか（1991）らによれば、発生方位には特別な傾向はない。

筆者らもこれまでは発生方位には特別な傾向はないものと考えてきた。しかし、全調査林分115か所において、1か所だけ発生していた847本（Table 2）を総合してみたところ、Fig.2に示されているように、これまでの結論と異なる結果になった。すなわち、南を中心とした方位に多く発生しており、その反対側には少ない。すなわち、日射を受ける側に多く発生する傾向にあると考えるべきであろう。

これまでの調査結果によれば（及川ほか、1986；今川・及川、1990c）、傾斜地にある林分では方位との関係は少ない。そのため、平坦地にある林分だけについて発生方位を調べてみた。それがFig.3であり、この場合もFig.2と同様に、南を中心にして日射を受ける側に多発する傾向にあることが分かる。ちなみに、日射をよく受ける南東から南西までの方位だけに限ってみても、南東側で71本、南で88本、



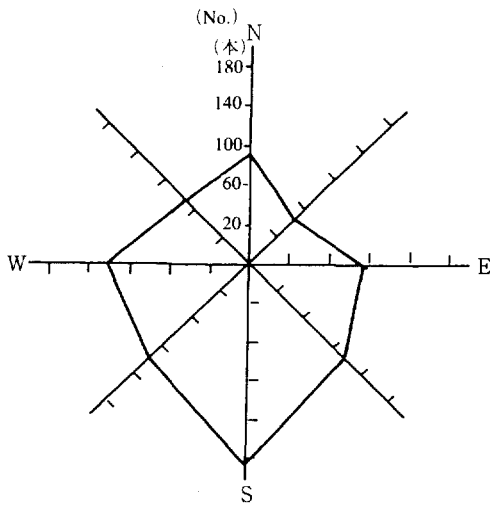


Fig. 2 全凍裂木の発生方位  
Compass direction of the frost cracks on all  
FC stem surveyed

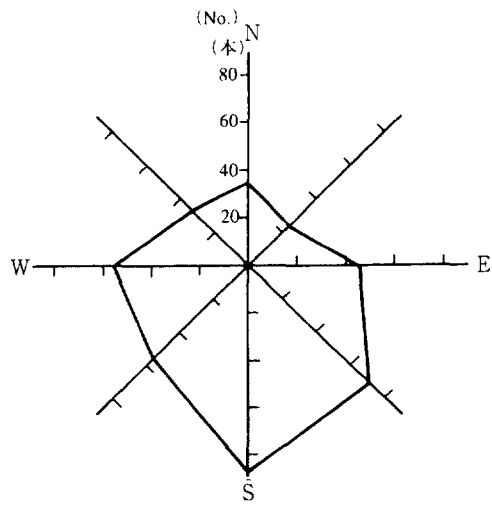


Fig. 3 平坦地における発生方位  
Compass direction of the frost cracks on the FC  
stems in flat forest stands

南西で56本の計215本であり、全体の約53%であった。

以上の結果から、スギの凍裂は樹幹の日射を受ける側に多く発生する傾向にあることが明らかになった。なお、筆者ら（今川・及川，1990a，1990b，1990c）あるいは前述の他のいくつかの報告におけるような発生方位についての混乱は調査木数が十分でなかったためと考えられる。

前述したように、傾斜地にある林分での発生傾向は平坦地とは異なり、傾斜下側すなわち谷側に多く発生すると報告されている（高山ほか，1973；三上ほか，1986；及川ほか，1986；後藤・中村，1978；和口ほか，1991）。そのため、全調査林分から平坦地や緩傾斜地にある林分を除き、急傾斜地（森林調査簿で傾斜が中以上）にある林分だけについて発生方向をまとめてみた。それがFig.4であり、方位ではなく、林地の傾斜方向を基準にして示してある。それによれば、明らかに谷側に多く発生しており、他の調査結果と一致している。

ただし、スギは南側の斜面に植栽されることが多い。事実、これらの急傾斜地はFig.5に示されるように、南向きの斜面が多い。そのため、林地の谷側と日射が一致してしまう場合が多いので、傾斜だけの影響とは確定できない。そこで、日射を受けない北西、北、北東向きの急傾斜地にある林分だけについて、発生方向を調べてみた。それがFig.6であり、凍裂は明らかに傾斜方向である谷側（北側）に多く発生している。すなわち、日射の影響を除去してもやはり傾斜地では谷側に多く発生する傾向にあることが明らかになった。

以上の結果から、凍裂は日射を受ける側に多く発生する傾向にあるものの、急傾斜地では傾斜の下側に多発する傾向にあることも明らかになった。日射を受ける側に多いということは、凍裂発生にとって日射による樹幹温度の変化が一つの要因である可能性を示唆しているとも考えられる。一方、日射を受けない急傾斜地の場合には別の要因を考える必要がある。通常、傾斜地に生育する針葉樹樹幹の谷側に

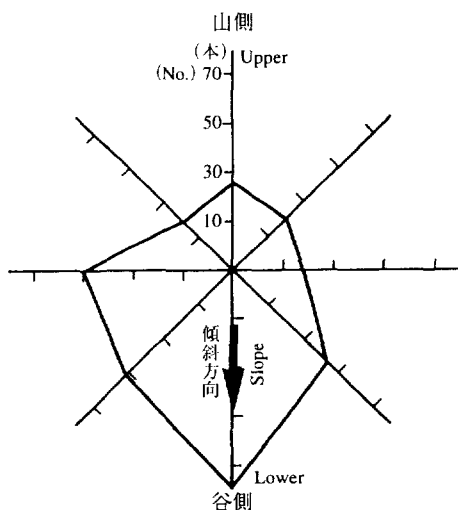


Fig. 4 急傾斜地における発生方位  
Direction of the frost cracks on the FC stems  
on steep slopes

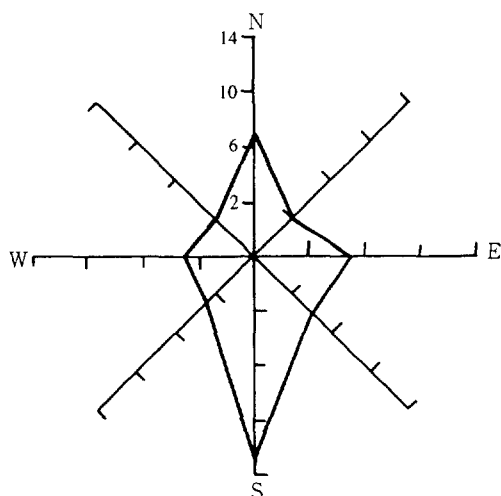


Fig. 5 林地の傾斜方位  
Compass direction of sloped stands surveyed

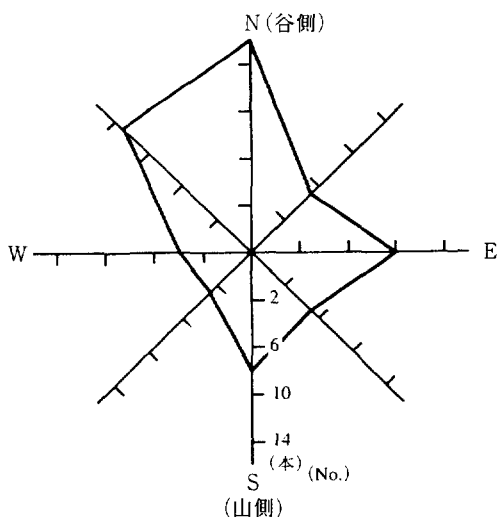


Fig. 6 日陰斜面における発生方位  
Compass direction of the frost crack in shady  
forest stands

はあて材が形成されやすい。ここでは、そのような点からは調査していないので、今後はあて材についての検討も必要であろう。

### 3.1.5 樹幹径との関係

凍裂の発生と樹幹の太さとの関係についてはかなりの関心が払われているようである。凍裂は樹幹径の大きなもの（佐藤，1981）あるいは中径木（井上，1984）に多いとか，低胸高直径階のものには発生しない（松田ほか，1985）とか種々の報告がされている。一方，樹幹径とは関係ないとの指摘もある（三上ほか，1986；中田・上田，1985；及川ほか，1986b）。

そこで，凍裂木数が多かった調査林分の中から秋田県十和田地区の75年生林分について，直径と凍裂発生との関連性を調査した。なお，調

査木本数は227本であり，凍裂木は52本（23%）である。それがFig.7であり，胸高直径階別の本数頻度が健全・凍裂別に示されている。図に見られるように，全体の直径階別頻度はほぼ正規分布を示している。凍裂木についても2・3の例外はあるものの，同様な分布傾向であり，特定の直径階に集中して発生するというような傾向は見られない。また，他の林分を調査した結果でも同じ傾向であった。以上の結果から，樹幹径，すなわち肥大成長の良否と凍裂発生との間に特別な関係があるとは考えられなかった。

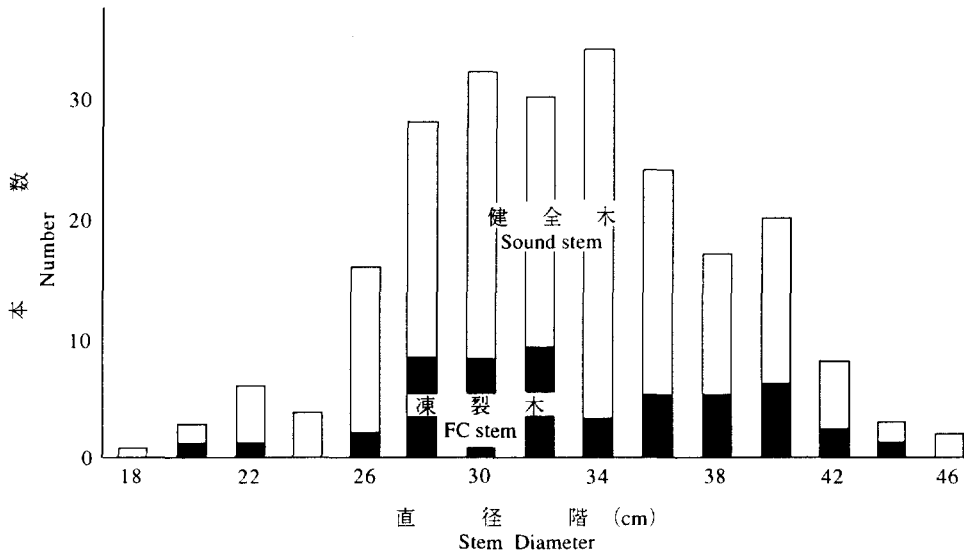


Fig. 7 直径階別本数頻度  
Number of sound stems and FC stems by stem diameter

### 3.2 樹幹内部の状態

#### 3.2.1 割れの状態

凍裂木の樹幹内部の状態を調査するために、秋田県仁別地区から75年生の凍裂木1本 (DBH:36cm, H:23cm) を伐採し、地上20及び40cm, それ以上は50cm間隔で連続的に円板を採取した。なお、この樹幹表面には2か所にへびさがりがあった。各円板の表面を仕上げた後、肉眼で識別できる割れをすべて写し取った。それがFig.8であり、樹皮、辺心界も示されている。

地上20~190cmまでの円板上には、凍裂による割れが二つ見られ、それらはどちらも心材内側にある目回りから樹皮部へ到達している。円板上方に見られる割れは地上40cmと90cmの円板においてだけ樹幹表面まで達しているが、それ以外では材中にとどまっている。部分的とはいえ、割れが樹幹表面まで達していることからみて、この凍裂は開閉を繰り返していることがわかる。一方、左下に見られる割れはすべての地上高において、樹幹表面まで達していないので、すでに癒合してしまったものであることが分かる。

また、凍裂の割れ以外にも、年輪に沿った割れ (目回り) や、放射方向の短い割れなど多数の割れが見られる。これらの割れは地際部から上方へ向かうにつれ、次第に増大し、胸高部付近で最も発達し、さらに上方へいくにつれ減少している。地上240cm以上では、半径方向の割れは見られなくなり、目回りだけが出現している。

このような割れの出現状態、すなわち胸高部付近で最も顕著に発達し、その上下では次第に減退するという傾向はいずれの凍裂木でも共通していた。樹幹内部の割れのこのような出現傾向からみると、凍裂は胸高部付近で発生し、その後の開閉の繰り返しにより、材中の割れはさらに発達するものと推定さ

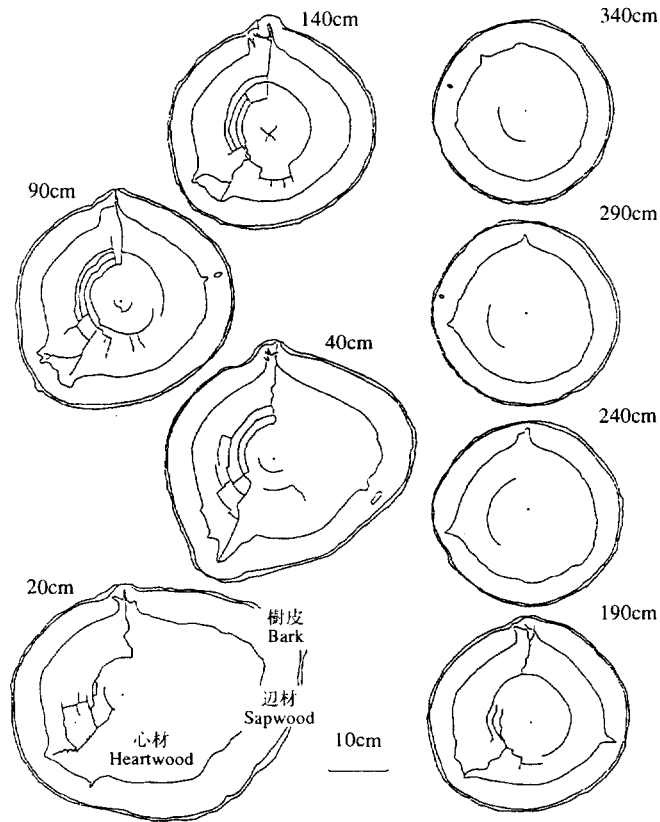


Fig. 8 樹幹内部の割れ  
Various splits in the successive disks from a typical FC stem

れる。なお、割れが発達していく経過及び新たに発生した凍裂木（新凍裂木）の内部状態については後述する。

辺材部において、凍裂の割れに沿って心材と同じように着色している部分がある。ただし、正常な心材色よりは濃色であり、正常な心材化とは同一視することはできないようである。後述するように、このような着色の一部は凍裂部の開口により侵入した腐朽菌などによるものと考えられる。

### 3.2.2 年輪構造の特徴

Photo 4はFig.8に模式的に示された地上40cm部の円板表面である。辺・心材，その間にある白色の移行材が明瞭に見られる。ただし，その心材は健全材の心材色とはほど遠く，黒っぽく，いわゆる黒心に近い色調である。円板上方と左下の2か所に凍裂が発生していることが認められる。また，Fig.8と対応させると，目回りや放射方向の割れ，さらには円板左下の癒合されてしまった凍裂などの存在がよく分かる。

その円板の上方面に見られる凍裂部を拡大したのがPhoto 5であり，この凍裂の割れは樹皮表面まで達しているので，まだ閉閉を繰り返していることが分かる。各年輪は明瞭に読み取ることができるので，樹

皮側から割れに沿ってたどっていくと、10番目の年輪までは局所的な肥大部があるが、11番目から内側（髓側）の年輪は同心円状で正常な年輪であることが分かる。従って、10年前の年輪が形成される前の冬期に初めて凍裂が発生し、形成層が傷つき、年輪が局所的に肥大した結果であることが分かる。しかも、それ以降も開閉は繰り返されているため、同様に肥大した年輪が連続し、樹幹表面は盛り上がってしまっている。

Photo 6はFig.8の地上140cm部の円板表面であり、Photo 4の円板とほぼ同じような状態である。ただし、円板上部の凍裂部は異なる形状を示している。Photo 5と同じ凍裂の上端部が見られるが、この部位では割れは樹皮部まで達していません、樹幹表面では単に盛り上がっているだけである。同じへびさがりであっても、その中央部とその上端では癒合の仕方に相違があることが分かる。なお、へびさがりの中央部では割れを繰り返しているが、その上下端では癒合しているというような相違は凍裂木に一般的な現象であった。

この凍裂部を拡大したのがPhoto 7であり、Photo 5との違いがよく分かる。同様にして年輪をたどっていけば、この地上高で凍裂が発生したのは9年前であることが分かる。地上90cm部よりも1年後に凍裂が発生し、その後開閉を繰り返していたが、4年前に癒合した。また、この凍裂の割れは、一直線状ではなく、途中から左方向へ枝分かれています。この枝分かれました割れは、3年前に樹皮まで達し、形成層を傷つけ、肥大部も認められる。このような枝分かれましたはしばしば観察される現象であり、Fig.1中の複列にあたるものである。

以上のように、凍裂木の材部を仕上げ、注意深く観察すれば、肉眼でも凍裂の発生年を正確に知ることが出来る。そのような観察を行えば、次に示すように、凍裂による割れの樹幹中における発達経過を詳細に追求することも可能である。

### 3.2.3 割れの発達経過

凍裂部の開閉の繰り返しによって、その割れはさらに発達すると推定されるので、その経過を調査した。岩手県内の90年生林分から、凍裂が4か所発生している凍裂木1本（DBH:53cm、H:29m）を1991年に伐採した。地際部から50cm間隔で計11枚の円板を連続的に採取し、各円板における割れの状態を写し取った。また、各円板上（各地上高）における各凍裂の発生年を年輪の局所的な肥大に基づいて調査した。

凍裂によるへびさがりは樹幹の北西側（地上0～330cm）、南西側（地上60～190cm）、東側（地上30～220cm）、北北西側（地上0～110cm）に出現していた。各円板における割れの出現状態をFig.9に示す。この図では、北西のものを凍裂A、南西を凍裂B、東を凍裂C、北北西を凍裂Dとした。

凍裂Aについてみれば、地上1.0、1.5及び2.0mの円板では27年前の年輪に初めて局所的な肥大部が認められた。ついで、26年前には地上2.5mで、25年前には地上3.0mで、23年前には地上0.5mで、18年前には地上3.5mで最初の肥大部が出現した。すなわち、27年前の冬に胸高部付近の地上1.0～2.0m部で凍裂が初めて発生し、その後割れは次第に上方へ、ついで下方へと伸展していったことが分かる。しかし、地上3.5mでは肥大部は見られず、材中に割れがあるだけであり、それ以上の部位では割れはなかった。このような発達経過を具体的に示すのがFig.10であり、横軸が年数、縦軸が割れの長さである。凍裂が発生して材中に最初の割れが出現するが、その後の開閉の繰り返しにより、その割れは上下にさら

に伸展していくことがよく分かる。凍裂が発生した場合、材中の割れは治癒することはなく、さらに発達することが示された。この調査結果から明らかなように、凍裂が発生したときには、早急に伐採し、何らかの有効利用を考えることが凍裂による被害を最も小さくすることになろう。

また、図中に見られるように、樹幹表面に出現していたへびさがりよりも、材中の割れの方がさらに上方へ延びていた。このように、スギ凍裂では材中の割れの方がへびさがりよりも長い場合がしばしば観察されたので留意することが必要である。

他の凍裂も同様であり、凍裂Bでは18年前には地上0.5及び1.0mで、16年前には地上1.5mで肥大が認められたが、地上0.0及び2.0mでは単なる材中の割れだけで、肥大部は見られなかった。凍裂Cでは、11年前には地上0.5～1.5mで、9年前には地上2.0及び2.5mで肥大部が見られたが、それよりも上方には見られなかった。凍裂Dでは、28年前には地上0.5mで肥大部が見られたが、地上0.0及び1.0mでは内部割れの状態にとどまっていた。

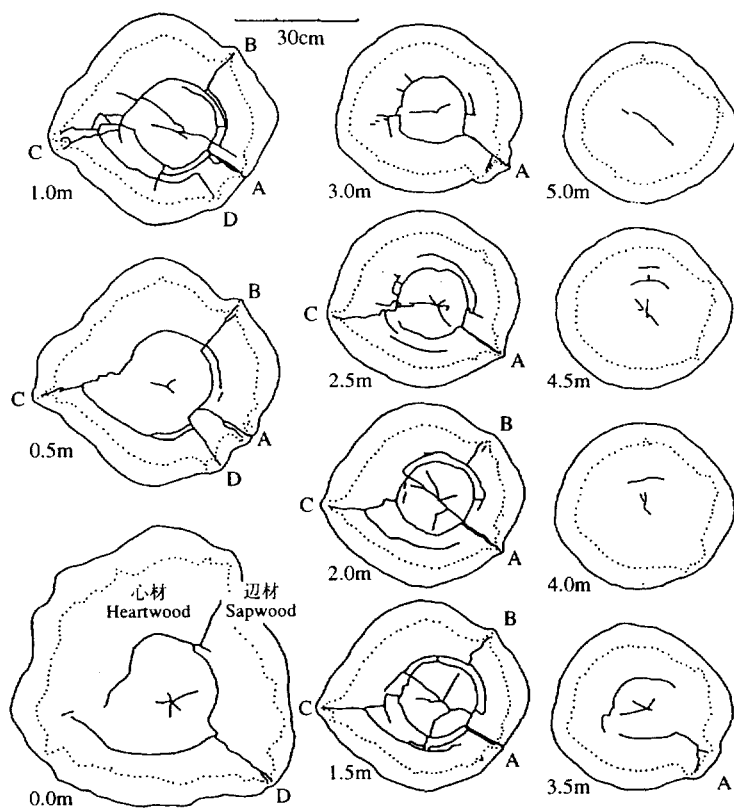


Fig. 9 4か所の凍裂を有する樹幹内部  
Various splits in the successive disks from a stem with severe frost cracks

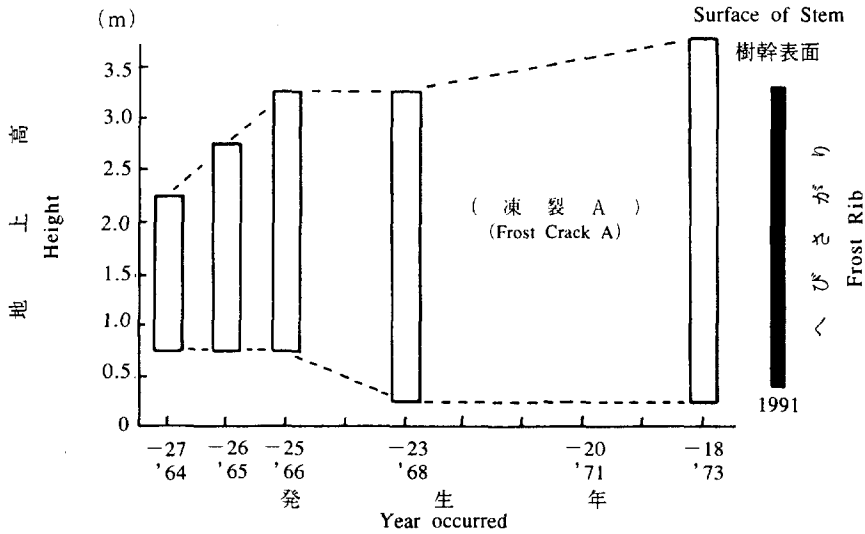


Fig.10 割れの発達経過  
Developmental process of frost crack A in Fig.9

### 3.2.4 凍裂部の組織

凍裂により割れた部分を顕微鏡で観察した。Photo 8は樹皮付近の凍裂部の顕微鏡写真（木口面）である。写真中には6年輪が認められるが、下方の3年輪は同心円状の正常年輪である。一方、上方の3年輪にはそれぞれ肥大部があることから、これらの年輪は凍裂発生以降に形成されたものであることが分かる。従って、この凍裂が発生したのは、下から3番目の年輪が最外年輪であった冬期間中である。その結果、形成層が傷つき、翌年の成長期には癒合組織である異常細胞が形成された。それとともに、その付近の木部形成は異常に促進され、局部的に肥大した。翌年以降も同様な経過をたどり、異常な木部形成が進み、局所的な肥大が益々顕著になっている。

Photo 8の一部をさらに拡大したのがPhoto 9で、割れ目付近の細胞（仮道管）中には着色物質の存在が認められる。また、この凍裂は発生後、開閉を繰り返していたので、その間に侵入した腐朽菌により仮道管壁は穿孔されている。穿孔の形状から侵入したのはいわゆる軟腐朽菌であり、それらの菌糸も見られる。この着色物質は軟腐朽菌の侵入が原因で生産され、そのために辺材部の割れ目付近は着色したと考えられる。

Photo 10は凍裂が発生し、その割れが材内部まで延びている状況を示す。この付近の年輪は凍裂が発生する前に形成されたため、凍裂発生後に形成された年輪とは異なり、異常細胞や局所的な肥大部は存在せず、単に割れているだけである。割れは半径方向に走る直線的なものだけではなく、写真に見られるように年輪界に沿って割れている場合もあった。

割れに面している細胞は破壊しておらず、本来の形状を保っていることから、割れは細胞（仮道管）が破壊した結果によるものではなく、Photo 11に見られるように、仮道管相互間にある細胞間層部にお

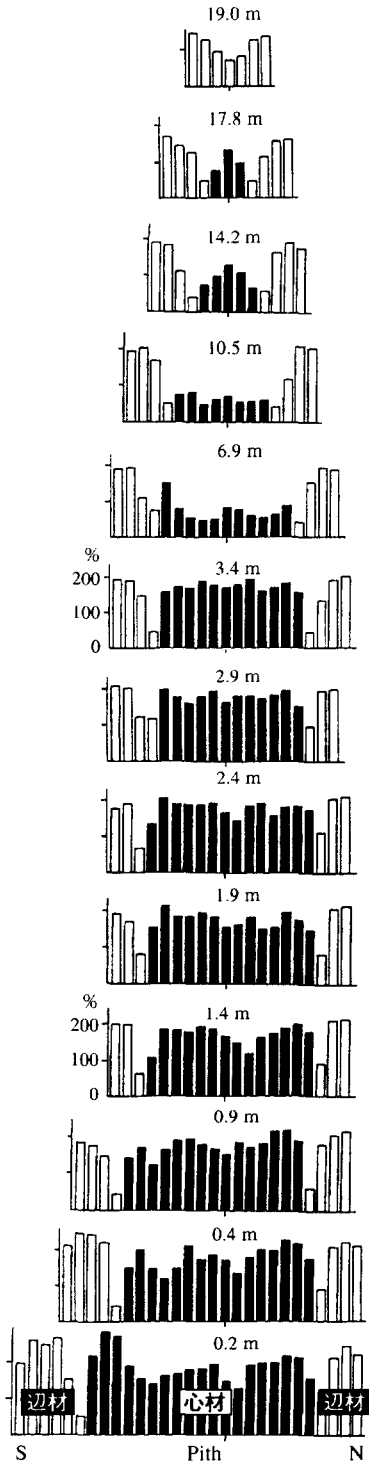


Fig.11 凍裂木の含水率分布  
Distribution of moisture content in a typical FC stem

る剥離の結果であることが分かる（今川ほか，1988a；佐野ほか，1989）。このような細胞間層部における剥離による割れのため，凍裂は仮道管の樹軸方向の走向（木理）に沿って割れることになる。従って，樹幹表面に現れる割れ目の方向は木理を反映して，まっすぐになったり，左右に傾斜したりすると考えられる（KUBLER，1991）。

Photo 12に示されているように，放射組織に沿って割れる場合も，放射組織と仮道管との間の細胞間層部における剥離の結果であり，細胞の破壊によるものではない（今川ほか，1988a；佐野ほか，1989）。

### 3.2.5 含水率分布

Fig.8に示した凍裂木から，割れ観察用円板と同時に採取したもう一枚の円板を用いて含水率を測定した。各円板において，凍裂の割れを含まない直径上で3cm幅のストリップを割り取り，約1~2cm厚に細分し，乾燥法で含水率を測定した。その結果がFig.11である。

よく知られているように，スギの健全木の心材含水率は辺材よりもかなり低い（矢沢・深沢，1956）。しかし，Fig.11に見られるように，凍裂木の心材含水率分布は健全木とは著しく異なっている。すなわち，地上0.2~3.4mまでの心材は辺材と同じ程度あるいはそれ以上に高い含水率であり，ときには200%にも達している。このように，心材の含水率が異常に高いことがスギ凍裂木樹幹内部の最も顕著な特徴である。後藤・中村（1977,1978），及川ほか（1986b），富田・滝尻（1988）なども同様に高含水率であることを報告している。このような高い含水率を直接的に示す事例として，夏期に凍裂木を伐採したときにその切り口から多量の水が噴出したとの報告もあり（元村，1986；富田ほか，1988），筆者らもしばしば経験している。

しかし，それより上方の地上6.9mからは心材含水率は低くなり，健全木に近い含水率分布である。

なお，辺・心材の境界部の含水率は低い。これが移



行材と呼ばれる部分であり、健全木の場合でも同様に低い。心材と辺材はいずれも高含水率であるにもかかわらず、その間に挟まれて低含水率領域が存在することは興味深い。心材の高含水率は辺材中の水分が半径方向に移動した結果であるとするならば、心材を鞘状に取りまいて低含水率領域の存在をどのように解釈すべきなのか、判然とはしない。心材の高含水率化には別の機構が働いているものと考えられるべきなのかも知れない。

凍裂と関係した異常な水分については、トドマツの水食い材がよく知られている（石田，1950，1952，1963，1986；佐野ほか，1989）。しかし、トドマツの水食い材は心・辺材を問わず、材中に局部的に出現する高含水率領域であり、スギ凍裂木の心材におけるようなほぼ均一な高含水率分布とは異なっている。一方、ヤチダモの凍裂木はスギの心材含水率と同様な分布を示した（今川ほか，1988a，1989d）。

スギの心材には赤心と黒心のあることが知られている（矢沢・深沢，1956）。このうちの黒心は凍裂木の心材と同様に含水率が高い（藤原・岩神，1989；松山，1981；坂口，1983）。凍裂木の心材色も赤心にはほど遠く、黒心に類似した色調を示す。これらの点から、両者間には密接な関係があるものと推察される。黒心については森林総合研究所を中心とした研究プロジェクト（農林水産技術会議，1994）が進行中であり、黒心の形成機構が明らかになるものと期待される。その成果は凍裂木心材の高含水率化の機構を解明するために大きく貢献するものと考えられる。

いずれにしても、凍裂木における異常な水分分布は注目に値する点であり、さらに研究を進めなければならぬ最も重要な問題点である。

### 3.2.6 樹幹温度の変化経過

供試した凍裂木（86年生，DBH:43cm，H:26m）には樹幹の東側に地際付近から約2m長のへびさがりが出現していた。その樹幹北側の1.2m部において、心材（15cm深）及び辺材（2cm深）にまでサーミスタを挿入し、樹幹温度の変化を記録した。また、凍裂中央部において、凍裂部の開閉幅についても定期的に測定した（及川ほか，1988b；今川ほか，1989b）。

Fig.12は1988年10月～1989年4月までの気温、心・辺材の温度変化の経過及び凍裂部の開閉経過を示す。各温度は10月半ば頃から徐々に下がり始め、1月から2月にかけて最低値になり、その後次第に上昇している。各温度とも、全体的にはほぼ同様な経過をとっていると言える。しかし、詳細にみると、気温は細かく変動しており、それに比べて辺材はかなり緩やかな動きであり、心材ではさらに緩慢な変動経過であることが分かる。変動幅の相違があるものの、辺材の温度は気温の動きに対してかなり速やかに同調していることも認められる。一方、心材は気温の変化にかなり遅れて動いており、ときには10時間以上も遅れて対応することがしばしばあり、さらには測定値に影響を認めることができない場合もある。

このような対応の仕方からみると、樹幹表面に近い部分は気温の影響を強く受けるが、内部へいくにつれて気温の影響は弱くなっていることが分かる。すなわち、樹幹中への気温の伝わり方は相当にゆっくりしたものであることが示されている。そのため、気温が急激に低下したとしても、樹幹内部の温度がそれに応じて直ちに影響されることは少ないと考えられる。急激な気温低下が凍裂発生の原因であるといわれることがしばしばあるが（Boyce,1961；Peace,1962），樹幹中への温度の伝わり方からみて、一

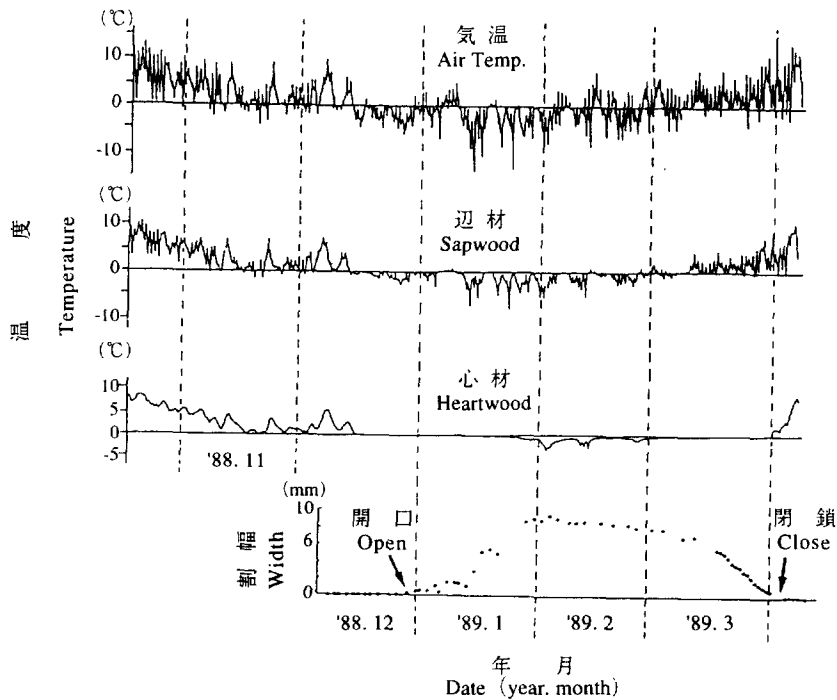


Fig.12 気温、樹幹温度、開口幅の変化経過  
Changes in opening width of frost crack following change in air and stem temperature

時的な気温低下が凍裂発生に大きく影響するとは考えにくい。

なお、心材の温度変化は非常に特徴的な経過を示している。12月中旬までは、気温の動きに遅れてはいるものの、大きくは同じような経過を示しながら低下している。しかし、それ以降は長い間0°C付近（マイナス域）にとどまり、1月下旬頃になって初めてさらに温度は低下している。この停滞期が心材中の異常水分の凍結に要する時間と考えられ、再び低下し始める頃には心材中の水分の凍結は完了したものと推定される。2月末頃から再び0°C付近に停滞しているが、この時期は心材部が融解しているためと考えられる。前年の測定でも同様な経過であった（及川ほか, 1988b）。

このような心材温度の変化は凍裂部の開閉経過とよく対応している。凍裂部の開口が初めて測定されたのは12月30日であった。この頃は心材水分の凍結が進行中と考えられた時期に対応している。それ以降は開口幅は次第に増加し、1月下旬頃には約10mm幅に達し、最大幅を示した。ちょうどこの頃に心材の凍結は完了したと推定されるので、最大幅と凍結完了はよく一致している。凍裂部の再開鎖は4月初めであったが、心材温度がプラス側に転じた時期とよく同調していた。

前述したように、既存の凍裂部の開閉と温度との関係は比較的単純な関係であることが分かった。しかし、新凍裂の発生と温度との関係には不明な点が多く、今後の研究を待たねばならない。

### 3.3 凍裂発生開始の林齢

スギの凍裂発生が始まる林齢あるいは樹齢についてはいくつかの調査結果がある。元村（1986）や富

田ほか(1988)は40年生以上から、及川ほか(1986a)は50年代後半から、中田・上田(1984)は60年生以上からのいわゆる壮齢木で凍裂の発生が始まると報告している。一方、和口ほか(1991)はIV齢級のものに凍裂発生を観察しており、富田ほか(1988)はさらに若い15年生前後に発生している数例を確認している。このように、様々な開始齢が報告されており、スギに固有の開始齢があるのか、ないのかを含めて、さらに多くの事例を集積する必要があると思われる。

このような点から、岩手県雫石町の民有林内の林齢の異なる5林分(20, 32, 44, 47及び60年生)を選び、凍裂発生の開始齢を明らかにしようとした。なお、この民有林は平坦地にあり、各林分は互いに比較的近くに位置しているので、生育条件はほぼ同じと考えられる。

Table 3から明らかなように、20年生と32年生の林分には凍裂木は全く認められず、44年生の林分に初めて凍裂木が出現した。それよりも林齢の高い林分では林齢が増すにつれ凍裂木数も増加している。なお、20年生林分では除・間伐は全く実施されず、植栽時の状態のままであった。また、32年生の林分では過去に除・間伐が実施されたが、残された伐根には凍裂が発生した痕跡は認められなかった。従って、この両林分では凍裂の発生はまだ始まっていないと考えられる。このような点から、岩手県雫石地区では、40年生半ば頃から凍裂の発生が始まると推測される。ただし、前述したいくつかの調査結果とは異なっており、調査したのはこの一例だけなので、この結果を直ちに東北地方のスギ全般に当てはめることには問題が残る。今後は、さらに多くの林分について同様な調査を進め、スギ凍裂の開始齢を明らかにする必要がある。

また、ここで実施したような調査法以外にも、凍裂木を伐採し、前述したような凍裂発生に伴う年輪の局所的な肥大部から開始齢を求める方法、あるいは植栽時から同一林分を継続して調査する方法などが考えられる。しかし、前者は多数の試料木を伐採しなければならず、後者は非常な長年月を必要とする。一方、ここで用いた方法は比較的調査しやすいものの、同一の生育環境下に異齢の林があるような例はそれほど多くはない。このように調査を進める上の障害は少なくはないが、開始齢を明らかにすることは凍裂木を早期に除去するためにも林業上重要である。

### 3.4 発生の継続経過

岩手県雫石地区での凍裂発生開始齢を不十分ではあるが示すことはできた。しかし、凍裂の発生が始まった林分におけるその後の発生経過についてはこれまで全く調査されておらず、その経過は不明である。すなわち、そのような林分において、凍裂の発生はいつまで継続するのか、継続するとしたらどのような割合で新凍裂木は増え続けるのか、あるいは発生が終了することがあるのかなど不明な点が多い。そのような点から3か所に固定試験地を設定し、5冬季にわたって新凍裂の発生の有無を継続調査した。

試験地-1での結果をFig.13に示す。1987~1991年における既存の凍裂木、健全木、新凍裂木の年別本

Table 3. 林齢別の凍裂木数  
The number of FC stems in each stand age

林 齢 Stand Age	凍裂木数 Number	調 査 本 数 No. stems surveyed
20	0	140
32	0	216
44	2	151
47	15	161
60	43	361

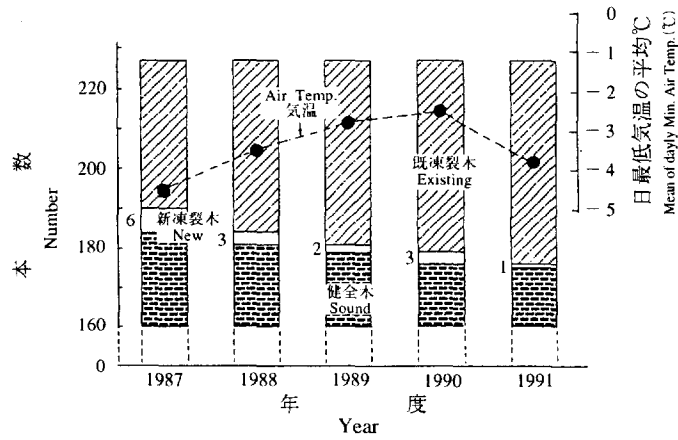


Fig.13 凍裂発生の経年経過 (試験地-1)  
Yearly occurrence of new frost cracks in Plot 1.  
Figures indicate the number of NFC stems. NFC : Stem with new frost crack

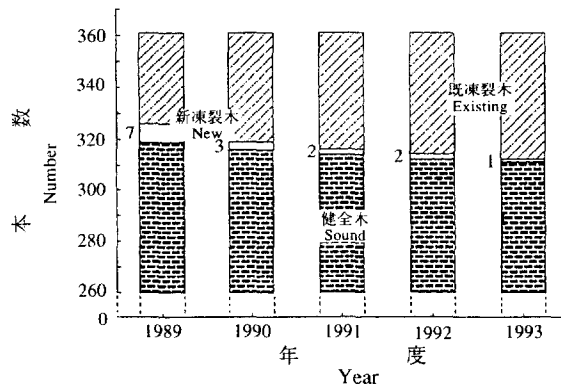


Fig.14 凍裂発生の経年経過 (試験地-2)  
Yearly occurrence of new frost cracks in Plot 2. Figures indicate the number of NFC stems

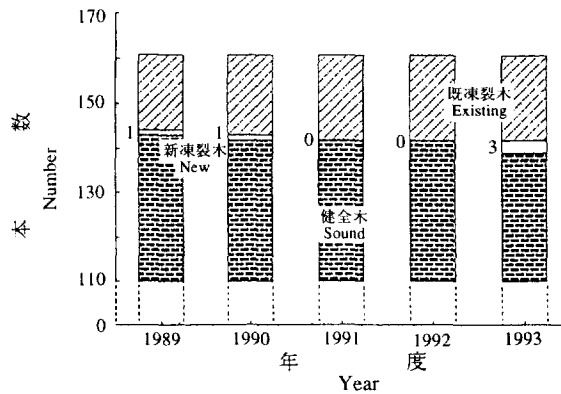


Fig.15 凍裂発生の経年経過 (試験地-3)  
Yearly occurrence of new frost cracks in Plot 3. Figures indicate the number of NFC stems

数が示されている。なお、図中の数字はその年の新凍裂木の本数である。図から明らかなように、新凍裂木は毎冬、少数ではあるが出現し続けている。ただし、1987年の設定時に新凍裂木が6本と多いのは、その冬に発生したものだけではなく、それ以前に発生した比較的新しい凍裂も含まれているためと推定される。すなわち、発生して年数がたっていない場合には、へびさがりの発達が不十分であり、発生直後のものと区別することは非常に難しい。そのため、新凍裂と数えたものの中には比較的新しい凍裂も含まれていたためではないかと考えられる。1987年についての新凍裂は例外だとしても、凍裂木数は1987年には43本で18.9%であったものが、4冬季にわたって新凍裂の発生が継続した結果、1991年には52本になり、出現率は22.9%に増加している。

他の2試験地の結果をFig.14及び15に示す。経過の詳細は省くが、両試験地とも試験地-1と同様な経過であり、毎冬少数の新凍裂木が（ときには発生の見られない年もあるが）出現し続けている。

3試験地での調査結果によれば、凍裂の発生はまだ継続すると推定される。また、調査した最高林齢の林分は180年生であったが、その中にはへびさがりの状態から判断して比較的新しい凍裂とみなされるものも観察された。そのため、スギの凍裂は相当長い期間にわたって新たに発生し続けると推定される。しかし、それがいつまで継続するのか、あるいは終了することがあるのかまだ明らかではない。もっと長期にわたる同様な調査、あるいは凍裂発生機構の解明を待たなければこの点は判然としないであろう。

このような増加傾向が継続するとしたら、長い年数を必要とするにしても、いずれはすべてが凍裂木という事態になるはずである。しかし、後述するように、そのような林分は見られず、30%の出現率が最高であった。他の調査報告によっても、30%以上の出現率はほとんど報告されていない（後藤・中村, 1977; 堀内, 1977; 松田ほか, 1985; 中田・上田, 1984; 高木・西山, 1987; 高山ほか, 1973; 富田・滝尻, 1988）。例外的に、上田・中田(1986)は調査本数は非常に少ないが(14本中6本)、43%の、元村(1986)は聞き取り調査によって50%の出現率を報告している。

いずれにしても、すべてが凍裂木という林分はないようであり、この点は重要な示唆を与える。すなわち、凍裂の発生は急激な気温低下により樹幹内部に発生した不均一な膨張と収縮が原因であると説明されることが多いが(BOYCE, 1961; PEACE, 1962)、凍裂は限られた数の樹幹でだけ発生するという事実を考えれば、このような単純な物理的現象だけにその原因を求めることには問題があろう。他の発生要因をも考慮する必要があると思われる、それらの点については後述する。

### 3.5 新たに発生した凍裂

前述したように、スギの凍裂の発生開始齢についての報告はいくつかあるが、開始したばかりの樹幹を調査したものは全くない。開始直後の樹幹には凍裂発生に至った経過を推測できるような手掛りが残っており、それを解析すれば凍裂の発生機構を解明するための示唆が得られる。このような点から、新凍裂木の樹幹内部を以下のように調査した。

前述の固定試験地-1を1989年1月下旬に調査した際に見い出された新凍裂木(DBH:30cm, H:22m)を伐採し、その樹幹内部の状況を調査した。Photo 13に見られるように、発生直後の樹幹表面には細い割れ目(矢印)が認められるだけであり、へびさがりは形作られてはいない。そのため、新凍裂の発生を

示すのはその細い割れ目だけである。なお、この割れ目は樹幹の西側の地上60~220cmに出現していた。

伐採した樹幹の地上35, 45 (割れ目下端部), 90, 135 (割れ目中央部), 180, 230 (割れ目上端部) 及び255cm部から円板(5cm厚)を2枚ずつ連続的に採取し、一方は円板上に見られる割れの巨視的及び微視的観察に用いた。もう一方からは凍裂部に直角の直径上で3cm幅のストリップを割り取り、辺材(1cm厚), 移行材, 心材(2cm厚)ごとに細分して含水率分布を測定した。

### 3.5.1 新凍裂の確認

まず、この凍裂が新たに発生したものであることの確認が必要である。それには割れ目部の年輪を調査しなければならない。すなわち、1989年以前に割れ、成長期を経過したものであれば、割れに沿った年輪中には異常組織や局所的な肥大が認められるはずである。一方、その冬に発生した新凍裂であれば、単に割れているだけで、そのような異常は認められないはずである。それを確認するために、割れの中央部(地上135cm部)から採取した円板の割れ目部を観察した。その木口面を接写、拡大したのがPhoto 14である。写真には樹皮部(2次師部)、形成層、前年に形成された最外部の年輪さらには2年前の年輪まで見られる。いずれの年輪にも異常組織や局所的な肥大は全く認められず、正常な年輪が半径方向に割れているだけである。従って、この凍裂はこの冬に発生したばかりの新凍裂であることが確認された。

### 3.5.2 割れの出現状態

供試木は新たに発生したばかりの凍裂木であることが確認されたので、樹幹中における割れの出現状態を調査した。なお、供試木は厳寒期に伐採したので、その樹幹は凍結していた。そのため、すべての割れ目は今川ほか(1988a)や佐野ほか(1989)が示したように透明な氷で埋めつくされていた。Photo 15は目回り中の氷に斜めから照明をあてて撮影したもので、白く反射しているのが氷である(矢印)。

樹幹全体における割れの出現状態をFig.16に示す。図には、樹皮、辺材、心材(点線)の境界も描かれている。円板上には種々の割れが見られるが、それらの中で樹幹表面から内側へ向かう半径方向の割れが新たに発生した凍裂によって出現した割れである。

それ以外にも、髓近くの目回り、心材外側の目回り、それらの目回りから延びている放射方向の割れ、目回りとは連続していない短い放射方向の割れなどさまざまな割れが多数見られる。ただし、これ

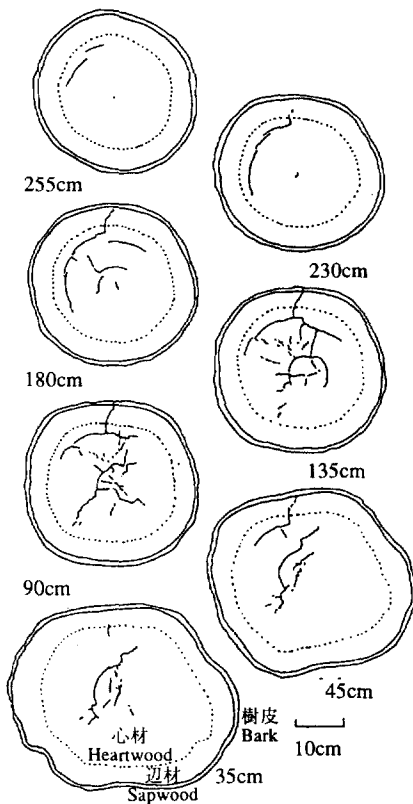


Fig.16 新凍裂木の樹幹内部  
Various splits in the successive disks from  
NFC stem in Plot 1

らの半径方向の割れはすべて材中に限定されており、凍裂による割れのように樹幹表面にまでは達していない。そのため、樹幹表面からそれらの存在を知ることはできない。これらの多様な割れは新凍裂の中央部付近（地上90及び135cm部）で最も顕著に出現しており、そこから上下方向にいくにつれて減少している。

新凍裂による割れも同様で、地上90、135及び180cm部では樹幹表面まで達しているが、45cm部では樹皮付近まで延びているものの、樹皮を引き裂くには至っていない。また、地上35及び230cm部では、凍裂の割れは心材と辺材との境界付近に出現しているだけである。地上255cm部では心材外側に目回りが認められるだけであり、新凍裂の影響は認められない。しかし、いずれの地上高においても、新凍裂の割れは心材外側にある目回りまでであり、それよりも内側へは延びていない。

このような樹幹内部における割れの出現状態から見ると、この新凍裂が発生した結果として材中に多様な割れが出現したとは考えにくい。それとは逆に、材中には多様な割れが先に出現しており、その結果として樹幹表面に達する割れ、すなわち新凍裂が発生したと考えられる。特に、新凍裂の割れが心材外側の目回りに連結していることは注目に値する。

そこで、その目回り付近に注目し、さらに詳細な観察を進めた。Photo 16及び17は凍裂のほぼ中央部にあたる地上90cm部と下端部である地上45cm部から採取した円板であり、Photo 18及び19はそれぞれの割れ目部を接写、拡大したものである。いずれも辺材、移行材、心材は明瞭に識別できる。地上90cmの円板上には、樹幹表面にまで達している凍裂による割れや、心材外側にある目回り（矢印）などが認められる。

Photo 18に示されている凍裂による割れ目は樹幹表面から心材外側にある目回りまで延びている。その割れ目には引き裂かれ毛羽だった材片がいくつか観察される。ただし、その割れは目回りより内側へは延びてはいない。

Photo 19の地上45cm部における割れの全体的な出現状態は90cm部に類似している。しかし、詳細に見ると、放射方向の短い割れが斜め方向に不連続に出現しており、Photo 12に見られるような一つの割れ目ではない。

なお、Photo 5及び7に示したように、発生後時間が経過した辺材中の凍裂の割れ付近は着色している。しかし、この供試木の場合にはそのような着色は全く認められない。この点からも、この凍裂は発生直後のものであることが確認される。

それに反し、Photo 19に見られるように、心材中の割れ目の周辺は濃く着色している（二重矢印）。すなわち、この着色域の割れはかなり前に、少なくともこの新凍裂が発生する前には出現していたものと考えられる。しかも、新凍裂の割れはこの古い割れと連続しており、あたかもそこから外側へさらに延びた結果であるように見える。その上、この古い放射方向の割れは心材外側の目回り（小矢印）と連結しており、この目回りが元々の出発点であったと推測できる。Photo 15に示したように、この目回り中で水分が凍結して膨圧が発生し、まず古い放射方向の割れが出現し、この古い割れがさらに発達して新凍裂が発生したのであろう。この目回りが生じた原因については不明であるが、冠雪による幹曲がりや雪起こしによりその材中にモメや年輪に沿った割れなどの傷が入ることが多いといわれることもある（石川、1983）。冠雪あるいは強風などによる樹幹の曲がり目回り及び凍裂との関係を明らかにするこ

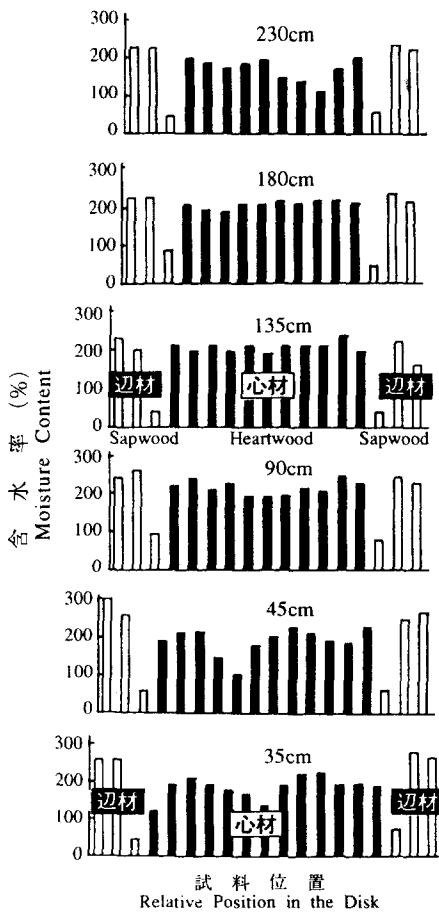


Fig.17 新凍裂木の含水率分布  
Distribution of the moisture content in NFC stem

とは重要であろう。

### 3.5.3 含水率分布

Fig.11に示したように、へびさがりが出現しているような典型的な凍裂木の心材含水率は常に異常に高い。心材水分の異常は凍裂木の顕著な特徴の一つである。そのため、この新凍裂についても含水率分布を測定した。その結果がFig.17である。ただし、各試料の半径方向の幅は異なるので、横軸は正確な意味での直径(距離)ではない。

図から明らかなように、いずれの地上高においても、心材の含水率はほぼ200%前後と高く、辺材と同程度、あるいはそれ以上もの値も示している。このような傾向はこれまでに調査した典型的な凍裂木と同じである。

この供試木は凍裂が発生したばかりのものであり、しかも伐採時には樹幹内部は凍結していた。従って、凍裂発生直後に心材中へ水分が移動したとは考えられず、新凍裂の発生以前から心材はすでにこのように高含水率であったと推定される。

### 3.5.4 新凍裂の発生

新凍裂木の樹幹内部を調査した結果は以下のように総括することができる。すなわち、新たに凍裂が発生する前に、その心材中には異常な水分集中があり、材中には多数の割れがすでに出現していた。このような状況下で、冬期の低温にさらされると、心材中の異常水分は目回りのような既存の割れの中で凍結し、膨圧が発生す

る。樹幹がこの膨圧に抗しきれなくなると、樹幹表面に達するような割れが出現して、膨圧は解放され、結果として凍裂の発生が認められるのであろう。ただし、この異常な水分や多様な割れがどのような機構によってもたらされるのかはいまだ明らかではない。

## 3.6 東北地方における発生状況

これまでの、スギ凍裂木の樹幹外部、樹幹内部、発生開始齢、発生の経過、新凍裂木など凍裂現象そのものについて明らかにしてきた。以下では、そのようなスギ凍裂木が東北6県においては実際にどのように出現しているのかを示す。

東北6県における115林分での調査結果をTable 4に示す。調査した総本数は25 093本で、その内の958本が凍裂木であり、全体の出現率は3.8%であった。各県ごとの調査林分数はかなり異なるので、県別の出現率を単純には比較できないが、参考までに各県ごとの出現率を求めてみた。それによると、秋田県7.2%、岩手県5.7%、福島県4.2%、山形県1.8%、青森県1.7%であり、宮城県は1.5%で最も低かった。な



Table 4. 東北地方における凍裂木の出現率  
Results obtained in this survey

営林署名	国有林名	林班	小班	林 齢 (年)	出現 率 (%)	F (本)	T (本)	D cm	H m	標 高 (m)	地 形
青森県	Aomori Pref.										
大鰐	東碓ヶ関山	39	ほ	55	4.3	106	2 473	40	21	280	平
蟹田	東小国山	111	い1	83	0	0	219	31	24	130	〃
〃	〃	162	い1	81	0	0	208	42	25	75	〃
増川	西大川平山	126	は2	58	0	0	220	50	30	70	緩
〃	三厩山	35	ほ1	83	0.5	1	219	26	23	100	平
市浦	磯松山	72	ろ	56	0	0	211	34	26	80	〃
中里	薄市山	110	ほ6	70	0.5	1	217	30	25	75	傾
〃	今泉山	150	は2	76	0	0	211	38	27	40	平
金木	前田野目山	145	ろ	80	0.4	1	235	36	25	370	傾
鱒ヶ沢	矢倉山	45	に3	54	0	0	264	29	22	270	〃
〃	赤石山	52	は1	52	0.9	2	225	36	27	110	〃
〃	大童子山	23	い1	53	0	0	225	32	23	170	〃
横浜	入込山	77	は6	66	0	0	158	34	22	50	〃
〃	川台山	91	は1	55	0.5	1	210	35	22	200	平
〃	〃	127	〃	72	0.9	2	225	29	22	220	傾
むつ	猿ヶ森	90	い	50	0.9	2	228	32	24	40	平
〃	南関根	152	い1	51	2.1	5	241	27	20	100	傾
〃	矢立山	36	ぬ	69	1.9	4	210	41	30	250	〃
大畑	佐藤ヶ平	185	ろ	53	0	0	226	22	24	30	〃
〃	葉色山	172	は	79	1.7	4	240	41	25	40	〃
〃	赤滝山	75	に	57	0.4	1	224	35	26	110	平
大間	八森山	47	ち	58	0	0	219	32	24	150	傾
〃	二股山	28	ほ1	60	0	0	210	32	23	70	〃
脇野沢	源藤城	261	り	55	0.5	1	201	29	23	90	緩
〃	二又	248	へ1	54	0	0	210	36	27	70	傾
〃	金八山	201	ほ	51	0	0	240	36	27	100	平
大鰐町				63	2.2	6	267	46	34	200	傾
野辺地駅				90	4.3	9	210	34	18	20	平
岩手県	Iwate Pref.										
安代	鍋越山	460	ろ	73	28.0	21	75	28	19	550	傾
盛岡	姫神岳	63	ち	72	5.0	13	260	39	33	500	緩
湯田	長橋	116	は	53	3.4	7	208	39	27	650	傾
二戸市	模範林			73	0	0	151	45	28	230	〃
岩手大学	滝沢演習林			89	7.7	21	272	41	27	200	〃
遠野市	青笹町			70	9.0	22	245	38	25	470	〃
〃	土淵町			60	0.8	1	125	29	23	400	〃
山形村	戸呂			75	7.1	16	224	31	25	300	〃
久慈市	山根町			90	3.8	2	53	41	30	350	〃
宮古市	花輪町			72	1.9	2	108	34	28	110	〃
田老町	撰待			75	2.3	5	221	38	30	80	平
陸前高田市	気仙町			60	1.2	3	256	39	25	150	緩
〃	〃			80	4.5	7	156	39	28	150	傾
〃	〃			150	1.6	1	62	59	40	150	緩
沢内村	前郷			70	26.6	78	293	32	25	270	平
〃	南川舟			60	6.7	14	208	29	24	350	〃
二戸市	石切所			80	0.8	2	250	35	29	100	〃
一関市	巖美町新田			65	5.3	23	433	26	20	230	〃

Table 4. (つづき) (Continued)

営林署名	国有林名	林班	小班	林 齡 (年)	出 現 率 (%)	F (本)	T (本)	D cm	H m	標 高 (m)	地 形
一関市	巖美町四度花山 横森			90	2.4	4	166	36	24	230	平
				52	1.2	3	252	30	20	250	緩
				45	1.3	2	150	38	23	250	々
				42	1.2	1	84	32	25	250	々
				48	0	0	116	36	20	200	傾
				65	14.4	52	361	27	21	350	平
				52	13.7	22	161	25	20	350	々
45	2.6	4	151	18	19	350	々				
秋田県	Akita Pref.										
十和田	砂子沢	25	よ	75	22.6	21	108	33	23	550	傾
				75	26.1	31	119	30	22	500	平
合川	羽根山	22	り	94	18.1	13	72	48	35	160	々
				94	30.0	21	70	49	36	160	々
秋田	務沢	々	り1	76	17.1	55	322	37	21	250	々
				82	3.1	6	192	35	28	150	々
本荘	男鹿山	89	ほ	82	1.0	2	201	33	28	150	々
				68	0.9	2	214	31	25	100	々
大曲	水林外6	40	は	81	0.9	2	216	34	25	150	傾
				49	0	0	238	31	20	500	平
鹿角	川口沢	173	わ	63	0	0	233	36	20	400	緩
				77	7.8	20	258	36	23	500	傾
扇田	扇形	150	に	85	4.5	9	200	36	26	200	々
				189	よ	85	4.5	9	200	36	26
早口	善知鳥	17	ほ3	56	5.5	11	200	32	21	600	々
				102	い	82	0.5	1	200	40	27
鷹巣	柴内山外9	102	い	65	8.1	16	197	34	25	300	々
				20	ろ	78	9.9	20	202	42	28
上小阿仁	綴子沢	156	い	60	4.9	10	205	34	25	200	々
				72	り	68	7.5	15	200	42	32
合川	今泉沢	72	り	82	2.7	5	185	52	31	200	々
				62	ろ	83	5.9	12	203	50	32
能代	添畑沢	62	い	64	9.5	19	200	46	26	400	々
				145	い	64	9.5	19	200	46	26
田沢湖町	田沢			180	29.4	50	170	69	46	555	々
藤里町				85	26.0	13	50	55	-	100	々
宮城県	Miyagi Pref.										
白石	倉石岳	13	い1	77	1.4	3	215	29	25	620	傾
				33	よ	59	1.4	3	211	27	20
々	不忘岳	118	い2	53	0	0	213	26	18	650	々
				202	ろ2	51	0	0	174	39	25
々	東山	206	ろ	55	0.6	1	170	32	24	500	々
				77	は3	48	2.8	4	145	22	23
気仙沼	切曾木山	77	は3	51	0	0	223	34	27	100	傾
				31	ち1	51	0	0	223	34	27
中新田	大岩井山	31	ち1	50	2.6	6	227	31	27	300	緩
				81	り3	50	2.6	6	227	31	27
古川	烏山	53	の	51	0	0	211	37	30	270	傾
				5	ろ1	48	0	0	222	34	17
石巻	花山村山伏	5	ろ1	79	0	0	148	38	32	350	傾
				37	ろ	79	0	0	148	38	32
鳴子町	鬼首字根松			70	8.7	11	127	51	30	750	々
				69	2.4	3	125	53	30	700	々
々	字上ノ台			63	5.2	7	135	44	25	600	平
々	字中野			63	5.2	7	135	44	25	600	平

Table 4. (つづき) (Continued)

営林署名	国有林名	林班	小班	林 齢 (年)	出現 率 (%)	F (本)	T (本)	D cm	H m	標 高 (m)	地 形
山形県	Yamagata Pref.										
酒田	大畑外5	49	ほ	46	0.4	1	250	26	20	200	傾
鶴岡	中小屋	56	わ	54	0.5	1	206	34	15	570	緩
小国	道六神山	91	は2	52	0.5	1	211	39	22	250	傾
米沢	桧沢	72	は	57	3.8	8	209	39	25	450	平
山形	末沢外42	245	り	55	0.9	2	230	30	23	650	傾
村山	岩行沢	67	ほ	56	0.9	2	219	37	20	430	平
向町	大森山	52	ろ	71	4.2	9	213	48	31	420	緩
真室川町	大字釜淵			77	3.4	7	203	32	22	170	平
福島県	Fukushima Pref.										
若松	姫山	62	へま	48	2.5	5	198	37	21	660	傾
〃	東沢	70	ま4	52	1.7	4	229	33	24	820	緩
山口	帝釈山	25	あ	50	1.8	4	226	26	22	840	傾
〃	〃	25	ぬ	50	2.3	5	221	30	23	850	緩
〃	東松山	1	し	61	3.1	7	226	28	17	600	〃
〃	〃	3	あ	56	0.9	2	228	34	18	570	〃
〃	駒止山	6	ち	51	1.8	4	228	30	19	1000	傾
坂下	惣山	48	ろ	63	0.4	1	240	26	15	600	平
郡山	安子ヶ島	27	ら	74	6.8	14	207	44	27	530	傾
平	鍛冶淵	108	む	52	4.4	10	228	24	22	520	平
勿来	仏具山	1	ち	93	3.4	8	238	58	42	400	緩
原町	湯船	231	ほ	60	11.6	24	207	35	24	400	傾
浪江	野行	253	は	45	7.4	16	215	22	21	650	緩
会津高田町				65	6.7	8	120	43	27	310	〃
塙町台宿				55	16.0	19	119	27	24	220	平

営林署 : District Forest Office

国有林 : National Forest

林班 : Compartment

小班 : Subcompartment

林齢 : Stand Age (years)

出現率 :  $F/T \times 100\%$

F : 凍裂木数, No. FC stems

T : 調査木数, No. stems surveyed

D : 胸高直径, DBH

H : 樹高, Tree Height

標高 : Elevation

地形 : Topography of stand

傾 ; 急傾斜, Steep slope

緩 ; 緩傾斜, Gentle slope

平 ; 平坦地, Flat stand

\* 網掛文字 (meshed letter) : 民有林 (private forest)

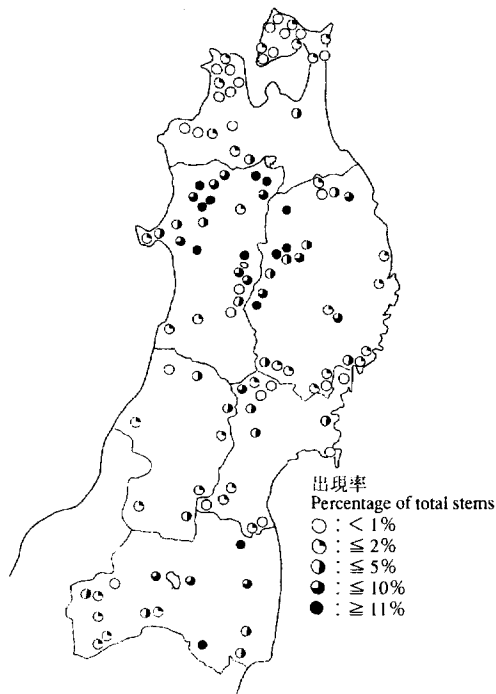


Fig.18 東北地方における凍裂の発生状況  
Distribution of FC stems in the Tohoku district  
%: No. of FC stems ÷ No. of stems surveyed × 100

お、調査林分中で最高の出現率だったのは秋田県の合川営林署管内の30.0%であったが、凍裂木が1本も認められなかった林分もかなりあり、青森県では13林分、宮城県では6林分、秋田県と岩手県では2林分に凍裂木は全く認められなかった。山形県と福島県では調査したすべての林分に凍裂木が出現していた。

なお、出現率と林齢、あるいは出現率と標高との間には特別な関係を見出すことはできなかった。

Table 4に基づき、東北6県における凍裂木の出現状況をFig.18に示す。出現率を5段階に分け、率が高いほど丸内の黒色部は大きくなるようにしてある。

東北地方全体では、出現率はその脊梁をなす奥羽山脈側が高く、両海岸に近づくにつれ低い傾向にある。また、秋田、岩手、宮城及び山形の4県に限れば、北に行くほど高く、南に行くほど低い傾向にあることも分かる。ただし、東北では最も北に位置するにもかかわらず、青森県は全体的に低く、逆に福島県では比較的高い。また、秋田県の北部は出現率の高い林分が特に集中しており、岩手県もそれに似たような傾向が示されている。

なお、スギの凍裂は他の県においても発生している。これまでに発生が確認されているのは、栃木県（藤森、1993）、茨城県（堀内、1977）、岐阜県（後藤・中村、1977、1978；高山ほか、1973）、福井県（松田ほか、1985）、三重県（富田ほか、1988；富田・滝尻、1988）、奈良県（中田・上田、1984、1985；上田・中田、1986；和口、1988；和口ほか、1991）、愛媛県（安藤、1988）、福岡県（元村、1986）、大分県（高木・西山、1987）の9県である。

しかし、東北6県での調査結果から推測すれば、これらの県が特別に発生し易いという訳ではなく、報告のない県では調査されていないというだけではないかと考えられる。調査されればほとんどの県でスギの凍裂は見い出されるであろう。従って、スギの凍裂は決して地域的に特殊なものではなく、むしろ日本全域に広く発生する現象と考えるべきであろう。

以上のように、各調査林分においては凍裂木の出現率はかなりの変動があった。しかし、そのような変動があったとしても、1林分内で見た場合には、凍裂木が林分内で局部的に集中して出現しているような例はほとんど見られなかった。その一例として、岩手県沢内村での調査結果をFig.19に示す。70年生の平坦地にある民有林で、293本中の78本に凍裂が発生しており、調査した林分中ではかなり高い出現率（26.6%）であった。図には林分中のすべての健全木（白丸）と凍裂木（黒丸）の位置が示されている。なお、立木密度が疎の部分は過去に除・間伐が行われていた所である。図から明らかなように、

凍裂木は林分全体にほぼ均等に分布しており、一部分に集中して出現してはいない。

ほとんどの林分は特別な出現傾向を示さなかったが、Fig.20で模式的に示す福島県原町営林署管内の林分は特異的であった。その林分は急傾斜地とそれに続く溪床沖積地の部分とからなっていたが、開設された林道が両者の境界となり、林地が顕著に二分された林分(60年生、平均DBH:35cm、平均H:24m)である。調査した総本数は207本で、凍裂木は24本、全体の出現率は11.6%であった。しかし、溪

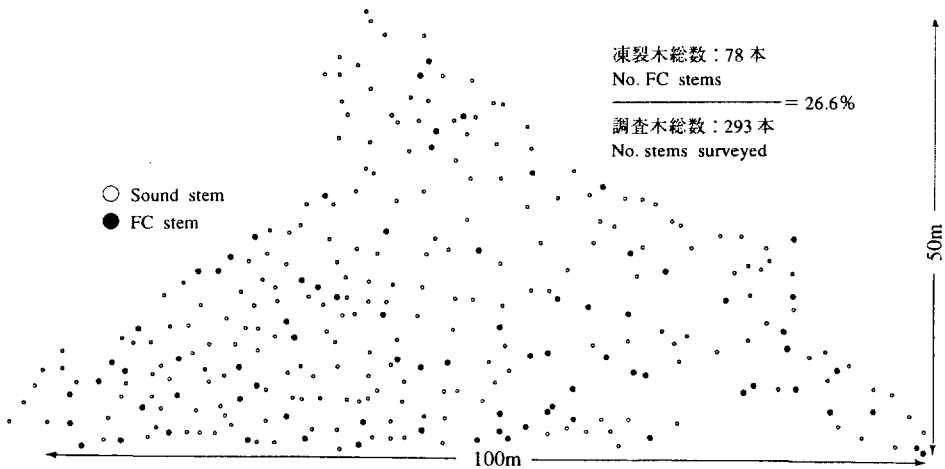


Fig.19 凍裂木の出現位置 (岩手県沢内村)  
Positions of the FC stems in a forest stand at Sawauchi in Iwate Prefecture

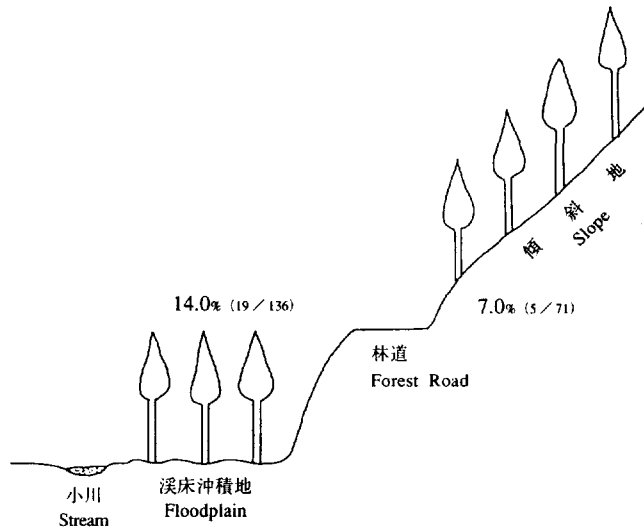


Fig.20 凍裂木の出現位置 (福島県原町営林署管内)  
Position of FC stems in a forest stand located in a floodplain (Haramachi in Fukushima Prefecture)

床沖積地では136本中の19本、すなわち14.0%が凍裂木であり、一方、急傾斜地では71本中のわずか5本、7.0%でしかなかった。すなわち、溪床沖積地では急傾斜地に比べ2倍もの出現率であった。他の同様な調査地においても、溪床沖積地に凍裂木が多く出現する傾向はしばしば認められた。赤坂ほか、(1986)、後藤・中村(1978)及び高山ほか(1973)らも凍裂木は林地の低地あるいは谷筋に多く出現すると指摘している。一方、高木・西山(1987)によれば、斜面下部より上方に多く、さらに元村(1986)によれば、南西・北東斜面に多く発生する。このように、生育環境との関係はまだ判然としていないので、今後さらに多くの調査が必要であろう。また、土壌条件の面から凍裂発生を追求したものもあるが(及川ほか、1988a; 真田ほか、1987)、凍裂木に隣接して健全木が生育している事実もあり、明確な結論を出すには至っていないようである(及川ほか、1991)。

筆者らの調査は、まず東北地方全体におけるスギ凍裂の発生状況の概要を把握することを目的として進められた。その結果、できるだけ多くの林分を調査することに主眼をおいたために、個々の林分の生育環境についての調査は十分とは言えなかった。今後は、出現率の調査とともに、その林分の生育環境についてもより詳細な調査を進めることが必要である。多くの林分で生育環境が明らかになれば、凍裂の発生機構を明らかにするための貴重な情報が得られるものと期待される。

### 3.7 種子産地試験地の発生状況

当試験地には全国の47産地から種子が集められ、育苗された苗木が植栽された。除・間伐を経た結果、調査時には2474本が成立していた。その内の106本に凍裂が発生し、総出現率は2.3%であった。なお、複数の凍裂が発生していた樹幹は見られなかった。

試験地内の各産地は気象条件からスギの適合地域を区分したいわゆる河田線(貴田ほか、1982)に基づき、表系(太平洋側:27産地)と裏系(日本海側:20産地)に分けることができる(及川ほか、1993)。凍裂発生に対する遺伝的な要因を追求するには、いわゆるクローンを対象とした精細な研究が必要なことは明らかである。しかし、その対象として最も適切な次代検定林はまだ若く、凍裂が発生し始める林齢には達していない。そのため、種子産地試験地ということから不十分な点もあるが、とりあえず表・裏系別という面から凍裂の発生を検討してみた。

凍裂は表、裏両系ともに発生していた。各産地とも過去の除・間伐によって、調査時点での成立本数は12~111本(平均53本)であり、これまでの調査本数よりはかなり少ない。そのため、出現率をこれまでと同じように取り扱うことには問題があると思われるので、出現率階ごとの産地数頻度を表、裏系別に比較した。それがFig.21であり、表系では21産地(74%)に、裏系では11産地(55%)に凍裂が発生していた。表系では高い出現率の産地が多かったが、裏系のものには出現率の低い産地の方が多く、出現率の高い産地は少ない傾向にあった。なお、凍裂が全く発生していないものも15産地あったが、各産地の出現率は0~17.0%の変動を示した。表、裏系別に総合して見ると、表系では1166本中の68本が凍裂木であり、出現率は5.8%、裏系では1308本中の38本に凍裂が発生しており、出現率は2.9%であった。すなわち、表系産地の方が2倍も高い出現率であった。この結果によれば、表系のスギを当試験地のような厳しい裏日本型の気候条件下に生育させると、凍裂発生の可能性は大きくなると言えそうである。

ただし、10%以上の高い出現率は表、裏両系ともに見られた。表系では福島、千葉、三重、福岡県内

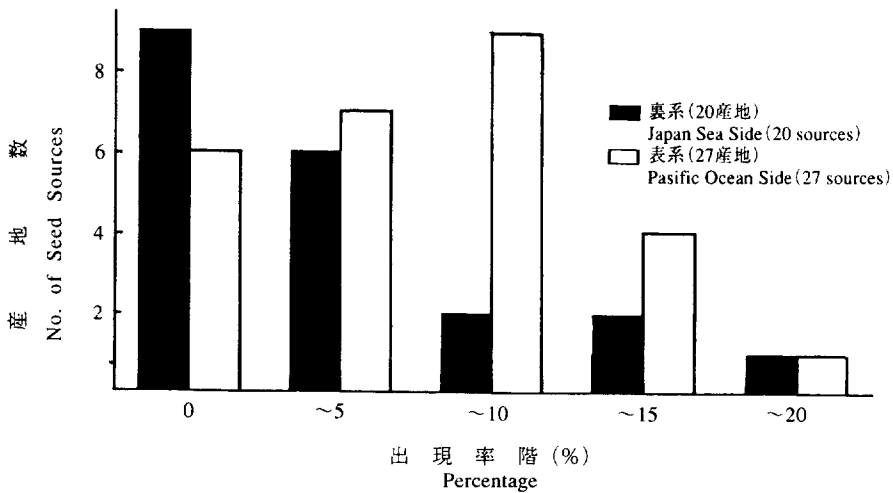


Fig.21 凍裂木の出現率別産地数  
Number of seed sources by rate of occurrence of FC stems

の、裏系では新潟、兵庫県内の一部の産地が高い出現率を示した。しかし、同じ千葉県内であっても、5産地の出現率は0~14.3%と大きく変動していた。また、表系であるにもかかわらず、高知県の5産地中の4産地には凍裂は全く発生していなかった。このような問題点があるため、表、裏系という単純な分け方だけでは十分とは言えないが、凍裂発生に対する遺伝的な面からの検討の必要性を示唆する貴重な結果が得られたものと考えられる。

なお、スギの凍裂発生について、品種的な面から検討を加えているものもいくつか報告されている。元村 (1986) によれば、40年生以上のウラセバル系スギには凍裂が発生し易い。また、高木・西山 (1987) によれば、スギ樹皮が網肌のものに少なく、荒く下端反転剥離している樹皮を持つものに多いことから、抵抗性品種の存在の可能性を示唆している。富田・滝尻 (1988) も樹皮に着目し、樹皮が薄いものに多く発生すると報告している。

### 3.8 発生機構の考察

これまで、スギ凍裂木の樹幹内外の特徴あるいは東北6県における実際の発生状況などについて述べてきた。以下では、以上の調査結果を踏まえて、スギの凍裂発生機構について若干の考察を試みる。Fig.22にその概略を模式的に示す。

通常、健全木の心材含水率は辺材に比べかなり低い。一方、凍裂木の心材はいずれも辺材と同程度あるいはそれ以上に高い含水率分布を示した。また、凍裂が発生したばかりの樹幹においても、その心材含水率は異常に高かった。そのため、凍裂発生以前から心材はすでに高含水率状態であったと推定される。そのような水分状態において、冬期の低気温にさらされた場合、その異常水分も凍結する。ただし、樹幹中への気温の伝わり方は緩やかであり、心材中の水分が凍結するまでには時間を要する (今川ほか, 1989b; 及川ほか, 1988b)。和口 (1988) が指摘しているように、凍裂が発生するには0℃以下

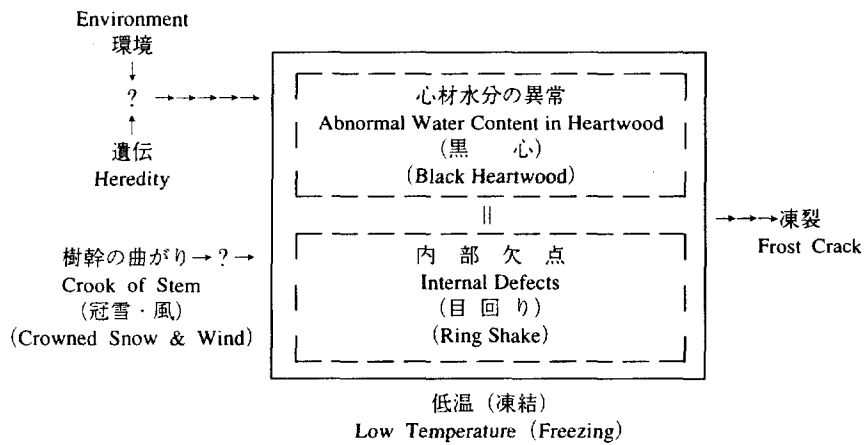


Fig.22 凍裂発生機構の模式図  
Model for the mechanism of frost crack formation

となるような低温が長く続くことが必要であると考えられる。BOYCE (1961) やPEACE (1962) のように、急激な気温低下が凍裂を発生させるとは考えにくい。

このようにして心材まで低温が到達した場合に、材中に例えば目回りのような内部欠点があれば、その中で水分が凍結し、膨圧が生じる。樹幹がその圧力に抗しきれなくなったときに、凍裂が発生すると推測することができる。同様な考え方はすでに報告されており、目回りや枝抜けなどの樹幹内外の傷と凍裂発生との関連性の論議 (BUTIN・SHIGO,1981; 後藤・中村, 1977, 1978; 高山ほか, 1973) があり、それらの欠点が凍裂発生の引き金 (KUBLER,1983) になると考えられている。

また、樹幹の南側に多く発生している点から日射の影響、あるいは林地傾斜の下側に多い点からあて材との関係についても無視することはできない。しかし、特に日射による寒暖差を考えた場合、日射方向は林分中の立木すべてに共通しており、すべての樹幹に凍裂が発生しても不思議ではないと思われる。しかし、そのような調査結果は得られなかったし、そのような報告もいまのところ見られない。以上のような点から、凍裂発生は樹幹内部に生じた収縮あるいは引張り力の結果であるとする物理的な現象 (BOYCE,1961) だけによるとは考えにくい。凍裂発生にとっては樹幹内部の目回りのような欠点の存在がその引き金として重要な役割を果たすものと考えられる。

以上の点から考えると、スギに凍裂が発生する場合に最も基本的な条件となるのは心材中に水分が異常に集積することであろう。そのような基本的な条件があり、目回りのような引き金になるような内部欠点があれば、凍裂が発生するものと推定される。従って、健全木では低いはずの心材中にどのようにして水分が集積するのかという点が重要になる。

多くの林分において凍裂木が局部的に集中して出現することはなく、土壌条件との関係もあまり密接な関係は見い出されなかった。しかし、溪床沖積地に多く発生していたことから、環境要因を無視することもできない。また、表系スギに凍裂木が多く見られたことから、遺伝的要因についても考慮しなければならない。



よく知られているスギの黒心はその材色及び高含水率という特徴を有している。これらの点では、スギ凍裂木の心材は黒心と非常に類似している。スギ黒心の場合、その心材含水率は品種（河澄ほか，1991）あるいはクローン（藤沢ほか，1989；川村・三上，1987）特性であり、さらに材色もクローン（近藤・山本，1992）に依存していると報告されている。凍裂と黒心とに関連性があるならば、スギ凍裂の最も重要な基本的条件である心材の高含水率化は遺伝的な影響下にあることになる。黒心の生成経過が明らかになれば（技術会議報告書，1994），凍裂木の異常水分集積機構も解明され、凍裂発生の回避あるいは防除策が確立されることが期待できよう。

#### 4 お わ り に

スギ造林木の凍裂について調査・研究した結果、その樹幹外部の特徴や内部の特異な点を明らかにすることができた。また、凍裂が発生し始める林齢、その後の発生経過についても示すことができた。さらには、東北全域における発生状況の概要を明らかにするとともに、凍裂木が出現しやすい立地条件や遺伝的な要因についても貴重な示唆を得ることができた。

以上の結果や新凍裂木の調査結果から、凍裂発生には低温下のもと、心材中への水分集積があり、それとともに発生の引き金になる目回りのような材中の欠点の存在が不可欠であることを指摘することができた。

しかしながら、凍裂発生の根本的な原因である心材水分が集積する機構を明らかにすることはできなかった。黒心との関係についても論議を進めたが、黒心の発現機構も不明であり、それ以上の進展はなかった。

従って、現時点では凍裂を回避・防除するための有効な方策は見当たらない。凍裂が発生した場合、その後の開閉の繰り返しにより、材中の割れはさらに発達し、腐朽菌の侵入も避けることはできない。すなわち、発生時点よりもその材質が良くなることはなく、悪化するだけである。現時点では、早期の伐採・利用が凍裂の被害を最小限に抑える唯一の方策であろう。

#### 引 用 文 献

- 赤坂 宿ほか12名：スギの凍裂について（I）立木にあらわれた凍裂こん，岩大演業務資料，8, 36～42（1986）
- 安藤 貴：私信(1988)
- ：岩手大学滝沢演習林のスギの凍裂，岩大演習林報，23, 1～8(1992)
- BOYCE, J. S. : Forest Pathology, 3rd ed. McGraw-Hill Book Co. Inc., 48p (1961)
- BUTIN, H. and SHIGO, A. L. : Radial shakes and "frost cracks" in living oak trees, USDA Forest Ser. Res. Pap., NE-478, 21pp (1981)
- 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(2), 9～15(1965)
- FERGUS, C. L.: Frost cracks on oak, Phytopath., 46, 297(1956)
- 藤森隆郎：私信(1993)

- 藤沢義武, 圓谷浩之, 田島正啓: スギにおける心材形成の個体変異とクローン間差—心材の水分分布の変異—, 日林学会発論集, **100**, 307~308(1989)
- 藤原新二, 岩神正朗: スギ及びヒノキ材の生材含水率と心材色の関係について, 高知大演習林報, **16**, 19~23(1989)
- 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, 日林学会中部講集, **25**, 60~67(1977)
- , ———: 今須地方にみられるスギの凍裂害, 岐阜林業七報, **6**, 11~26(1978)
- 本多静六: 実用森林学(上巻), 池田商店, (1902)
- 堀内孝雄: スギ樹幹の凍裂の発生について, 茨城林試業務報, **14**, 8~9(1977)
- 今川一志, 笹 賀一郎, 大谷 諄: ヤチダモ造林木の凍裂に関する研究—凍裂の発生状況とその組織学的研究, 北大演習林報, **45**(2), 559~636(1988a)
- , 及川伸夫, 三上 進, 伊勢 良: スギ造林地における凍裂の発生実態(VI) 凍裂木の樹幹内部の割れの状態, 日林学会発論集, **99**, 303~304(1988b)
- , ———, ———: スギの凍裂の発生経過, 木材学会北海道講集, **20**, 65~68(1988c)
- , ———, ———: 同上(VIII) 発生開始とその後の経過, 日林学会発論集, **100**, 263~264(1989a)
- , ———, ———: 同上(IX) 凍裂木の樹幹温度, 日林学会東北誌, **41**, 76~78(1989b)
- , ———, ———, 工藤宏治: 同上(X) 新しい凍裂木の樹幹内部, 木材学会北海道講集, **21**, 53~56(1989c)
- , ———, 糸屋吉彦: ヤチダモの凍裂, 日林学会東北誌, **41**, 73~75(1989d)
- , ———: スギ造林木の凍裂(I) 東北地方におけるその発生実態, 北方林業, **42**(1), 19~23(1990a)
- , ———: 同上(II) 東北地方における発生経過, 同誌, **42**(3), 74~76(1990b)
- , ———: 同上(III) 凍裂木の樹幹, 同誌, **42**(5), 136~140(1990c)
- , ———, 三上 進: スギ造林地における凍裂の発生実態(XI) 比較的新しい凍裂木の樹幹内部, 日林学会東北誌, **42**, 132~133(1990d)
- , ———: スギの凍裂について, 森林総研成果選集, 26~27(1992a)
- : 寒夜に響く木の悲鳴, 続・森林の100不思議, 日林技協, 146~147(1992b)
- 井上 晋: イヌエンジュ二次林の群落生体について(III) 凍裂の実態, 日林学会北海道講集, **33**, 172~175(1984)
- 石川政幸: 新版スギのすべて, 坂口勝美監修, 全国林業改良普及協会, p.384(1983)
- 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)
- : 北海道に於ける凍裂の発生状況, 北大演習林報, **15**(2), 303~341(1952)
- : 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, 北大演習林報, **22**(2), 273~373(1963)

- : トドマツの凍裂, 北方林業会, 110pp.(1986)
- 加納 孟: 新版スギのすべて, 坂口勝美監修, 全国林業改良普及協会, p.408(1983)
- 川村忠士, 三上 進: スギにおける心材含水率のクローン間変異, 日林学会東北誌, **39**, 72~73(1987)
- 河澄恭輔, 小田一幸, 堤 寿一: 同一林分で生育したスギ品種の心材含水率, 九大農学芸誌, **46**(1・2), 79~84(1991)
- 貴田 忍, 及川伸夫, 森 麻須夫: 碓ヶ関スギ種子産地試験地の成績, 日林学会発論集, **93**, 205~208(1982)
- 近藤 晃, 山本茂弘: 静岡県内で選抜されたスギ精英樹クローンの心材色—目視と色差計との関係—, 日林学会発論集, **103**, 303~304(1992)
- KUBLER, H.: Mechanism of frost crack formation in trees—A review and synthesis—, For.Sci., **29**(3), 559~568(1983)
- : Function of spiral grain in trees, Trees, **5**(1), 125~135(1991)
- 松田正宏, 沢田貞夫, 梅田正治: 福井地方におけるスギ老齢林の凍裂被害, 日林学会中部講集, **33**, 119~122(1985)
- 松山将壮: スギ心材の変色と調色, 木材工業, **36**(1), 8~13(1981)
- 三上 進, 及川伸夫, 伊藤喜悦: スギ造林地における凍裂の発生実態 (I) 岩手県安代地区スギ造林地における凍裂の発生状況, 日林学会東北誌, **38**, 142~144(1986)
- 望月 常: 木材工芸的性質論, 東京有鱗堂, (1894)
- 元村桂助: スギ林内の凍裂被害について—福岡県矢部村・星野村での被害—, 日林学会九州論集, **39**, 211~212(1986)
- 中田清二, 上田富茂: 吉野材の生産技術体系改革に関する研究—凍裂実態調査—, 奈良林試業務報, 20~24(1984)
- , ———: 吉野材の生産技術体系改革に関する研究, 凍裂実態調査, 同誌, 24(1985)
- 日本材料学会木質材料部門委員会編: 木材工学辞典, 工業出版, 975pp.(1982)
- 新島善直: 日本森林保護学 (下巻), 裳華房, (1912)
- 農林水産技術会議: 「品質管理型林業のためのスギ黒心対策技術の開発」研究推進会議報告書, 32pp.(1994)
- 及川伸夫, 三上 進, 田沢光次, 工藤宏治: スギ造林地における凍裂の発生実態 (II) 秋田県小坂地区スギ造林地における凍裂の発生状況, 日林学会東北誌, **38**, 145~147(1986a)
- , ———: 同上 (III) 凍裂木と健全木における生育期間中の材の含水率, 同誌, **38**, 148~150(1986b)
- , ———, 田沢光次, 工藤宏治: 同上 (IV) スギ凍裂木樹幹の内部形態, 同誌, **39**, 95~96(1987)
- , 今川一志, 三上 進, 伊勢 良: 同上 (V) 凍裂木の発生と土壌状態, 日林学会発論集, **99**, 301~302(1988a)

- , ——, ——, 竹内美次, 伊勢 良: 同上 (VII) 凍裂木の経時的温度変化, 同誌, **99**, 305~306(1988b)
- , ——, 太田敬之: 同上 (X II) 凍裂木の発生と土壤状態, 日林学会東北誌, **43**, 105~107(1991)
- , ——, ——: 同上 (X III) 津刈沢スギ種子産地試験地の実態, 日林学会発論集, **104**, 433~434(1993)
- 大西 鼎: 霜割れ, 実用森林利用学 (上巻), p.157(1907)
- PEACE, T. R.: Pathology of trees and shrubs, Oxford Univ. Press, (1962)
- 酒井 昭: 寒害, 植物の耐凍性と寒冷適応, 学会出版センター, p.217(1982)
- 真田 勝, 高橋邦秀, 片寄 藤: トドマツ水食い材発生環境の解明 (1) 採種園におけるトドマツの心材含水率と土壤, 日林学会発論集, **98**, 187~188(1987)
- 佐野雄三, 今川一志, 大谷 諄, 深沢和三: トドマツ造林木における凍裂発達の観察, 北大演習林報, **46**(2), 315~341(1989)
- 佐藤邦彦: 林木の凍裂 (霜割れ) 被害, 野ねずみ, **162**, 16~18(1981)
- 白澤保美, 後藤房治: 最新林学提要, 成美堂, (1914)
- 高木哲夫, 西山嘉彦: 九州におけるスギ凍裂害—大分県上津江村での調査, 日林学会発論集, **98**, 421~423(1987)
- 高山雄治, 戸田清佐, 中村 基: スギの凍裂防止に関する研究 (I) 凍裂木の分布とマクロな発生環境について, 日林学会中部講集, **21**, 231~235(1973)
- 富田ひろし, 川北要始補, 滝尻富士雄: スギ大径木の凍裂害 (I) 三重県における実態, 日林学会中部講集, **36**, 53~55(1988)
- , 滝尻富士雄: 同上 (II) 被害木の特性, 同誌, **36**, 57~58(1988)
- 上田富茂, 中田清二: 凍裂実態調査, 奈良林試業務報, 17(1986)
- 和口美明: 凍裂実態調査—被害発生時の気温について—, 日林学会関西講集, **39**, 1~4(1988)
- , 柴田叡弼, 米田吉宏: 奈良県におけるスギ凍裂害の実態 (第1報) 被害の特徴, 奈良林試研報, **21**, 8~12(1991)
- 矢沢亀吉, 深沢和三: 中部地方における人工植栽スギ材の生長状況と理学的性質との関係 (第1報) 生材含水率の分布, 木材誌, **2**(5), 204~209(1956)

## Frost Cracks of Sugi (*Cryptomeria japonica*) in the Tohoku District

IMAGAWA, Hitoshi<sup>(1)</sup>, OIKAWA, Nobuo<sup>(2)</sup>, ITOYA, Yoshihiko<sup>(3)</sup>

OTA, Takayuki<sup>(4)</sup> and SHIMODA, Naoyoshi<sup>(5)</sup>

### Summary

Frost cracks of Sugi were investigated in 115 forest stands in Aomori, Iwate, Miyagi, Akita, Yamagata and Fukushima Prefectures. Frost cracks, as separations in the radial-longitudinal plane of the stems, were usually found 2 to 3m off the base. Generally, one frost crack occurred in each cracked stem surveyed, 2 to 4 frost cracks were occasionally found on a stem. Frost cracks were more frequently found at the south sides of the stems. However, in the stands on the steep slopes, the majority of frost cracks occurred on the lower sides of the stems. No close relationships were found between the stem diameters and the occurrence of frost cracks. Inside the stems with frost cracks (hereafter called FC stems), not only the splits of the frost cracks, but also various internal defects, such as radial splits or ring shakes, were found. It was notable that the moisture content of the heartwood in the FC stems was always abnormally high.

Because the temperature is slowly conducted into the inside of a stem, it was not presumed that frost cracks occur as the result of a sudden drop in temperature in winter. The occurrence of frost cracks began in stands aged in the mid-40s, with a few new frost cracks developing almost every winter thereafter. It was assumed that freezing of the water existing in the internal defects triggers the development of frost cracks, which therefore might be caused by the abnormal accumulation of water into the heartwood.

In the Tohoku district, FC stems were frequently observed in forest stands near the Oou Mountains, but less frequently near the seacoast. A great number of frost cracks occurred in the northern part of Akita Prefecture. As a whole, the number of FC stems, compared to the total stems surveyed in each forest stand, widely ranged from 0 to 30 %. It was not assumed that the environmental conditions of forest stands were directly related to the occurrence of frost cracks, although the stems grown from seeds which were collected in areas along the Pacific side of Japan tended to crack more frequently than those from areas along the Sea of Japan. Although the mechanism of frost crack formation is discussed in this paper, the reason why abnormal amounts of water accumulate into the heartwood is still clear.

---

Received February 23, 1995

(1) Hokkaido Research Center

(2)(3)(4)(5) Tohoku Research Center



Photo 1. 凍裂木の樹幹表面  
Typical surface of a stem with frost crack  
(hereafter, FC stem)



Photo 2. 凍裂部の開口  
Opening of the frost crack in winter



Photo 3. 凍裂部樹皮の縦縞  
Vertical stripes on the bark of frost rib

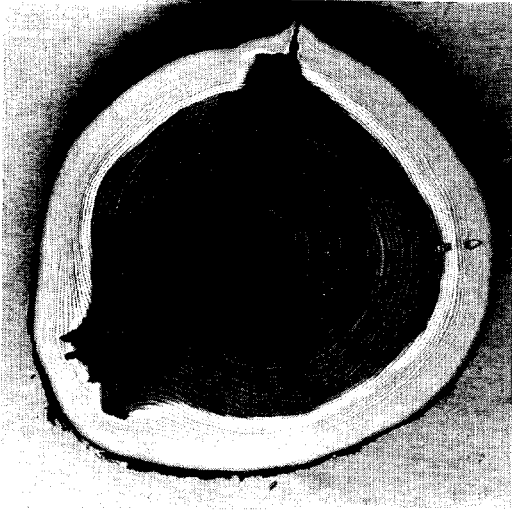


Photo 4. 凍裂木の樹幹内部 (地上90cm)  
Disk from typical FC stem (90cm above the ground)

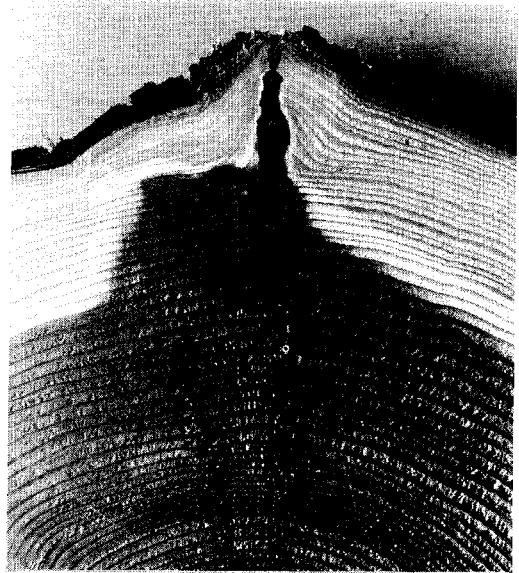


Photo 5. Photo 4の拡大  
Enlargement of Photo 4

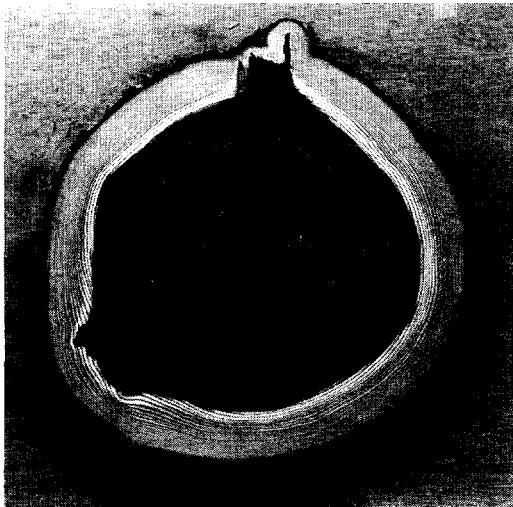


Photo 6. 凍裂木の樹幹内部 (地上140cm)  
Disk from typical FC stem (140cm above the ground)

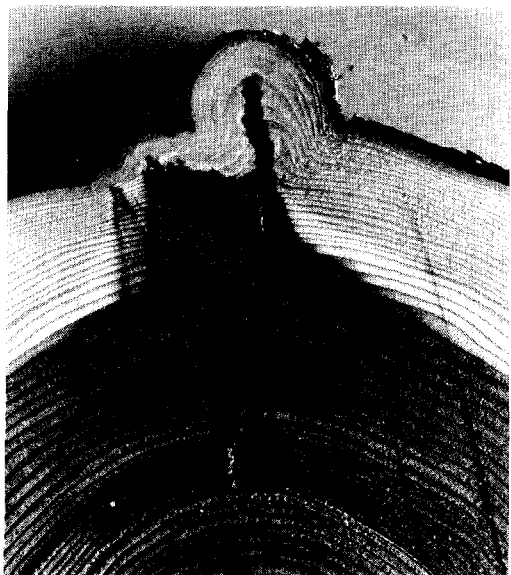


Photo 7. Photo 6の拡大  
Enlargement of Photo 6



Photo 8. 凍裂部の顕微鏡写真(木口面,  $\times 40$ )  
Microscopic cross section showing a frost crack ( $\times 40$ )

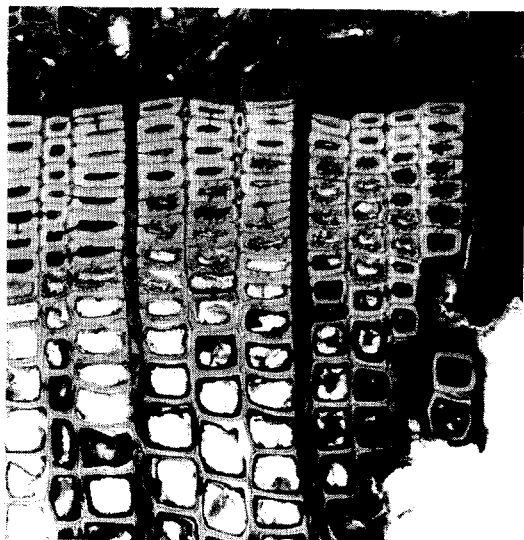


Photo 9. Photo 8の枠内の拡大 ( $\times 260$ )  
Enlargement of Photo 8 ( $\times 260$ )

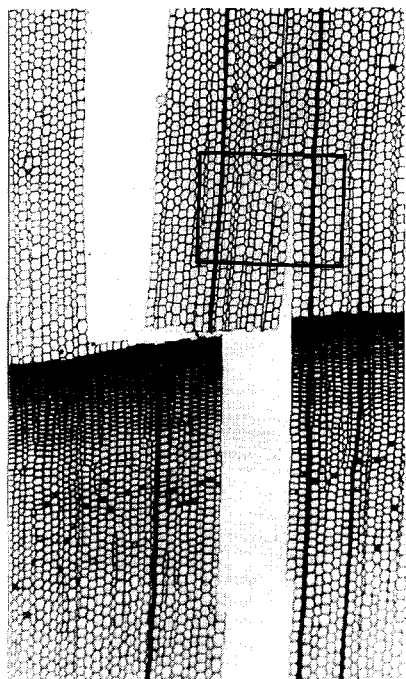


Photo 10. 材中の割れ部の顕微鏡写真(木口面,  $\times 50$ )  
Microscopic cross section showing the separation  
of tracheids ( $\times 50$ )

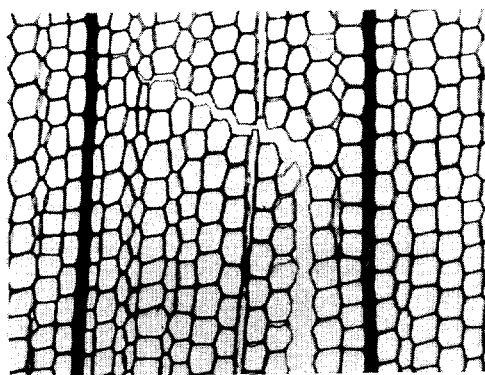


Photo 11. Photo 10の枠内の拡大 ( $\times 130$ )  
Enlargement of Photo 10 ( $\times 130$ )



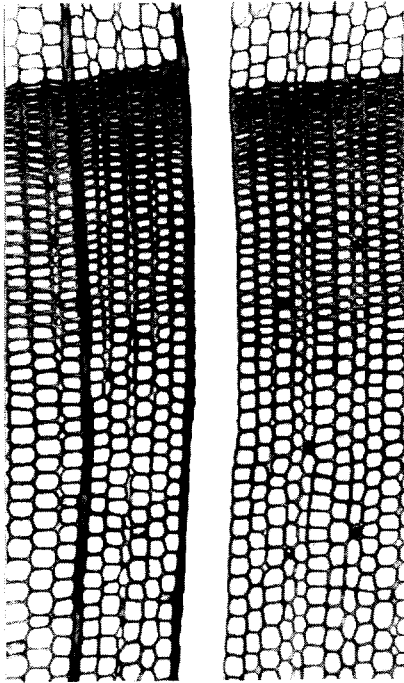


Photo 12. 材中の割れ部の顕微鏡写真(木口面, ×130)  
Microscopic cross section showing the separation of tracheids and ray (×130)

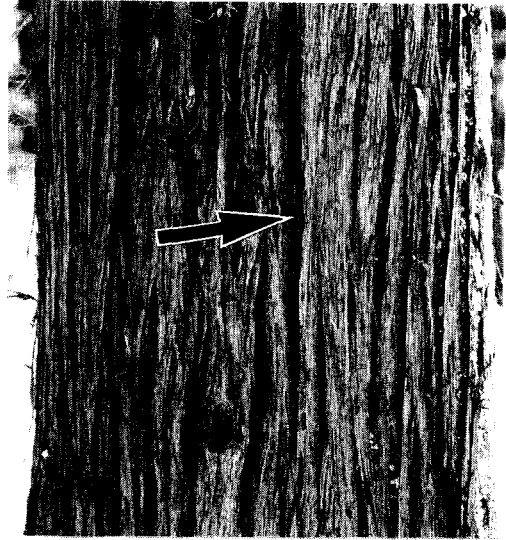


Photo 13. 新凍裂木の樹幹表面の割れ (矢印)  
Surface of a newly-cracked FC stem (hereafter called NFC stem)

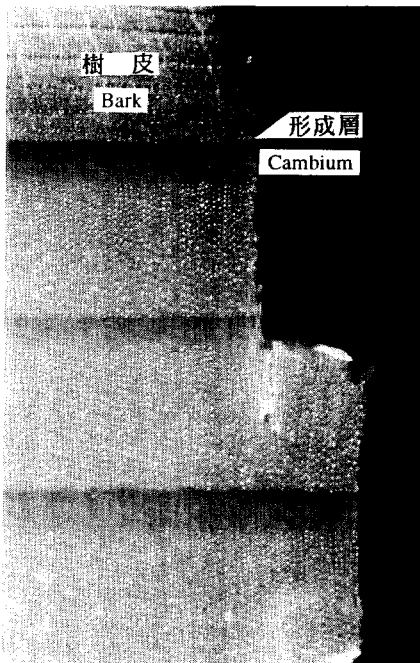


Photo 14. 新凍裂の形成層付近 (木口面)  
Submicroscopic surface near the cambium in a disk from a NFC stem

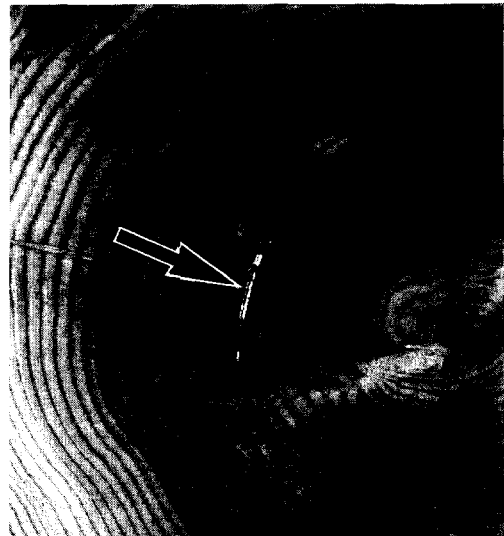


Photo 15. 目回り中の氷 (矢印)  
Ice in the ring shake in the NFC stem

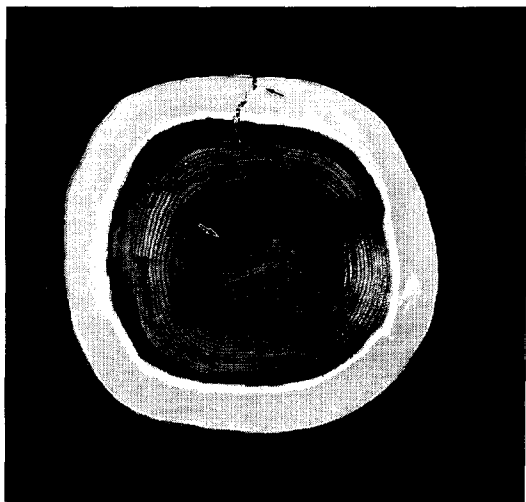


Photo 16. 新凍裂木の樹幹内部（地上90cm）  
Disk from the NFC stem (90cm above the ground)  
外側の矢印：新凍裂の割れ  
Outer arrow : Split resulting from NFC  
内側の矢印：目回り  
Inner arrow : Ring shake

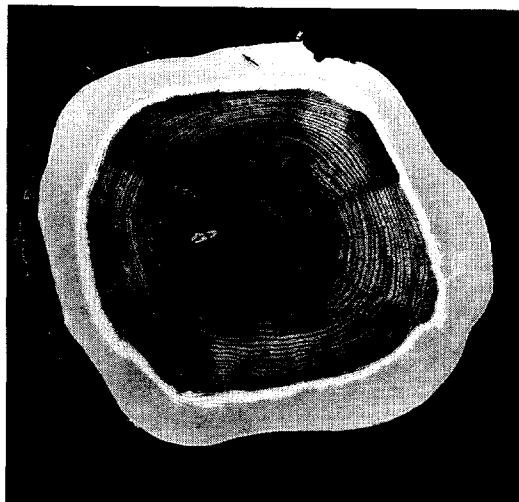


Photo 17. 新凍裂木の樹幹内部（地上45cm）  
Disk from the NFC stem (45cm above the ground)  
外側の矢印：新凍裂の割れ  
Outer arrow : Split resulting from NFC  
内側の矢印：目回り  
Inner arrow : Ring shake

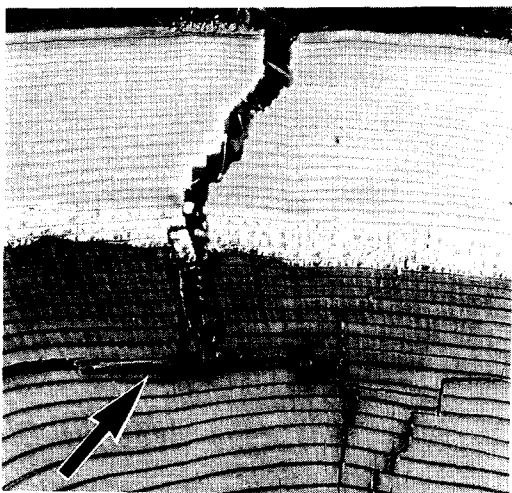


Photo 18. Photo 16の拡大  
Enlargement of Photo 16  
矢印：目回り  
Arrow : Ring shake

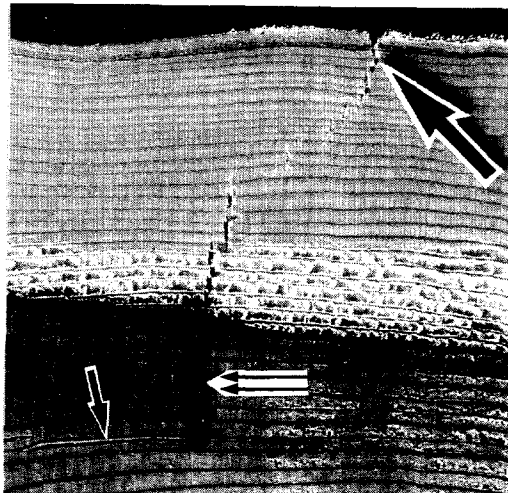


Photo 19. Photo 17の拡大  
Enlargement of Photo 17  
二重矢印：着色した割れ  
Double arrow : Colored split  
大矢印：凍裂表面  
Large arrow : Split resulting from NFC  
小矢印：目回り  
Small arrow : Ring shake