



Title	生物の凍結過程の分析 . . : 木の枝の凍結曲線上に現れる棘状突起
Author(s)	青木, 廉
Citation	低温科学. 生物篇, 15, 1-15
Issue Date	1957-11-05
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/17593">http://hdl.handle.net/2115/17593</a>
Type	bulletin (article)
File Information	15_p1-15.pdf



[Instructions for use](#)

## 生物の凍結過程の分析 XIII.

木の枝の凍結曲線上に現われる棘状突起\*

青 木 廉

(低温科学研究所 生物学部門)

(昭和32年6月受理)

### I

クワの1年生の枝からとつた小片の凍結曲線の型は秋から冬にかけて明瞭に変化する。その変化のうち著しい点は過冷却の破れた直後、一時温度は急激に上昇し直ちに下降するため棘状の突起が現われることである(第1図A)。しかし1月頃からはこの凍結の初めに現われる棘状突起は認められなくなり、その代り短かい棘状突起が不規則に凍結曲線上に現われるようになる。この場合には過冷却の破れた後の温度上昇は凍結の初めに棘の現われるばあいに比べてかなり緩かとなつている(第1図B, C)ことは前報で述べた<sup>1)</sup>。なおこの初めの大きな棘状突起は材部の急激な凍結に由来するもので、皮層部が材部に比べ凍結しにくいために生ずることが明らかにされたが、短かい不規則の棘の本態は不明のままであつた。その後この短かい棘は耐凍性の低下し始めた時期、すなわち4月から5月上旬になつても同様に現われるばかりでなく、更にポプラ、バイカウツギ、エルム等の1年生枝の小片の凍結曲線にも同様に認められることが判つた。したがつてこの短かい棘の現われることはクワに限られたものではなく、一般的のものであると思われる。それ故この短かい棘の本態を明らかにすることは凍結曲線から木の枝の凍結過程を知る上に必要なことと考え以下報告するような実験を行なつた。

### II

実験は主としてポプラを用いて行なつたが、バイカウツギ及びクワ(品種名タキノガワ)も一部の実験に使用した。これらの木の1年生の枝の直径6~7mmの部分から長さ15mmの小片を切りとり、この小片の凍結に伴う温度変化を測定した。小片の両端は傷口であり、この部分から凍結が始まり易いので、それを防ぐため一応濾紙で切口を軽く拭つた上、厚くワセリンで蔽うた。多くの場合には熱電対(径0.15mmの銅・コンスタンタン綿)の先端を枝小片の髓のちょうど中央に来るように挿入し、温度を電子管式自記ポルトメーター(横川製3mV)に記録した。この他に必要に応じて熱電対の一端を小片の表面に捲き表面の温度を測定したり、ま

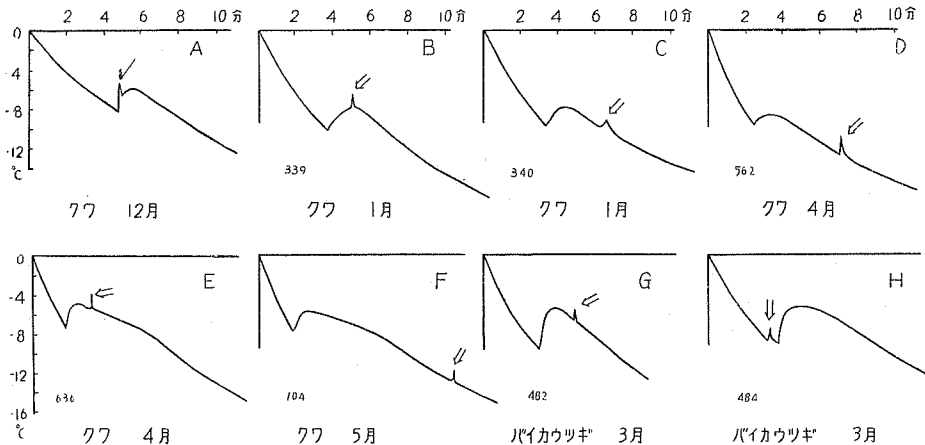
\* 北海道大学低温科学研究所業績 第363号

た小片の中央部すなわち髓の中に熱電対の一端を挿入し、環状にした他の一端を小片の表面に接触させ中心部と表面との温度差を示差的に測つたばあいもある。小片の表面の温度を測る時、熱電対と表面との接触は非常に不完全なため、間にシリコン油をつけて小片表面の温度が熱電対に伝わるのを助けた。

冷却温度はすべての実験で $-20^{\circ}\text{C}$ である。熱電対に小片をつけたまま内径28mmのガラス保護管に挿入してから $-20^{\circ}\text{C}$ のブライン中に浸す。冷却速度を変える必要のあるときは二重の保護管を用いた。いずれの場合にも人工的に過冷却を破るような処置は行なわず、自然に過冷却の破れるのをまつた。

### III

この短い棘状突起(以下二次棘と呼ぶ)は一般に見られるものらしく、この春に実験したクワ、ポプラ、バイカウツギ、ネコヤナギ、サクラボン、エルム等の凍結曲線上に現われているが、その高さ、発現の位置、型は全く不規則である。ポプラ、クワでは二次棘の現われるばあい過冷却の破れた直後の温度上昇はゆるやかである。第2図に示す例のように温度が急激に上昇するとき、すなわちこの部分がほとんど垂直になつているときには、二次棘は現われな

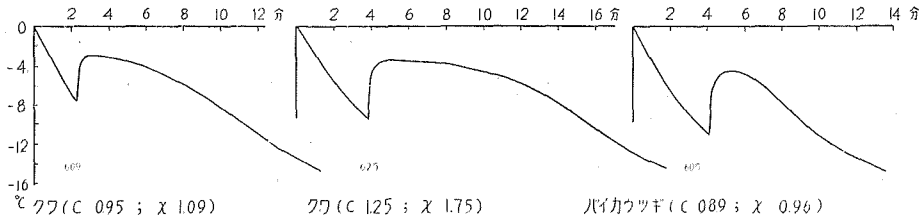


第1図 クワ(タキノガワ)及びバイカウツギの1年生枝よりとつた小片の凍結曲線

← は一次棘 ⇌ は二次棘を示す

い。過冷却の破れた直後、明瞭な棘状突起(以下一次棘と呼ぶ)が現われるか否かには無関係である。これに対し過冷却の破れた後、急激に凍結が進行しない、即ち割合徐々に温度が上昇するばあいに限つて二次棘が現われるのであるが、しかし温度の上昇の緩かなときには必ずこの棘が現われるとは限らない。

この実験の時期は3月から5月にかけてであつて含水量はさほど未だ増加していない。単位乾燥重量に対する水分量は4月におけるポプラでは皮層部で1.00~1.25位、材髓部で0.50~0.80であり、皮層部に比べ材部の水分は少ない。ポプラの枝を室温(10~18°C)で数日間水挿し

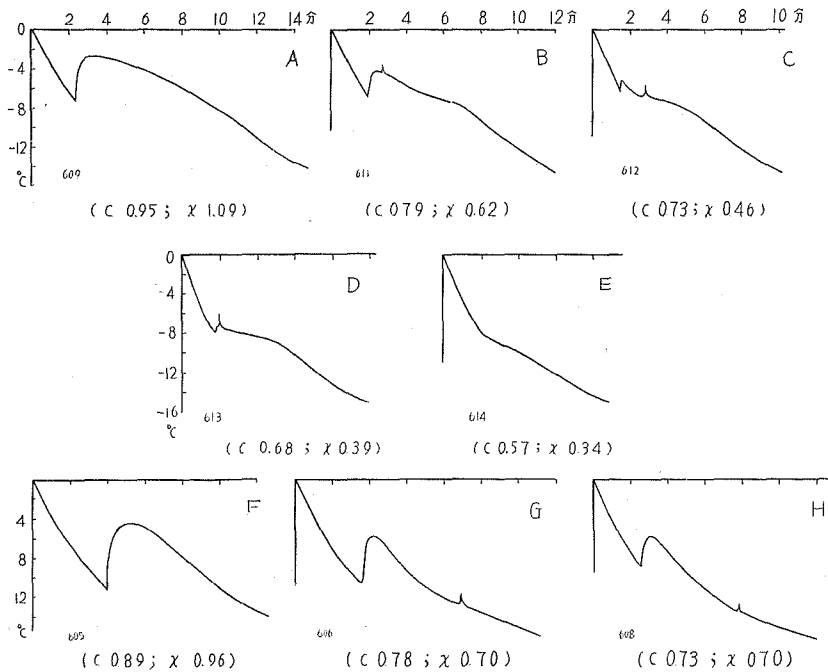


第2図 含水量の多い枝小片の凍結曲線

( ) 内の数字は単位乾燥重量に対する水分を,  $c$  は皮層部,  $x$  は材髓部を示す。以下各附図についても同じ。

しておくとな部の水分は急に増加するが皮層部では増加がほとんど見られない。このように材部の水分が増大している枝の小片の凍結曲線は、第2図に示されているように過冷却の破れた後、温度は急激に上昇しその後は非常に緩かに下るが、どこにも棘は全く認められない。このことから二次棘の出現するか否かは材部における水分量と密接な関係があるように思われる。

二次棘の出現には小片の材部における含水量の低いという条件が必要ならば、人工的に含水量を低下させれば、二次棘を生ぜしめることも可能な筈である。この点を簡単に確かめるために同一枝から切りとつた 15 mm の小片を糸で室内 (18~21°C) につるし 3.5 時間から 6 時間に

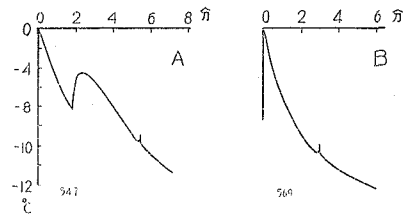


第3図 乾燥の凍結曲線に及ぼす影響

A-E ポプラ, A 対照, B-E 乾燥したもの。F-H バイカツツギ, F 対照, G-H 乾燥したもの。

わたつて乾燥した後に凍結曲線をとつてみた。その結果は第3図に示した1系列の例のようにポプラでもバイカウツギでも乾燥の結果水分が少なくなると二次棘が現われてくる。この実験に用いた枝は予め3日間水挿ししてあるために材部の含水量は高くなつてゐる。ポプラで皮層部0.95, 材部で1.09のものが3時間半の乾燥後にはそれぞれ0.79及び0.62に減少, この小片では明らかに二次棘が現われている(第3図B)。しかし乾燥度が高くなり含水量が皮層部0.57, 材部0.34となつたものでは二次棘はもはや認められなくなる(第3図E)。バイカウツギの場合も同じ傾向がはつきり認められる(第3図F-H)。この乾燥実験では材部ばかりでなく, 皮層部の含水量も共に低下しているので氷の生成過程ばかりでなく, 生ずる氷の量も異なつてくるため曲線全体の型も変つてきている。とにかく以上の実験結果から枝小片の含水量が低いときに二次棘の現われることは明らかではあるが, どの部分の含水量の低下が二次棘の出現に直接関係しているものかは明らかでない。

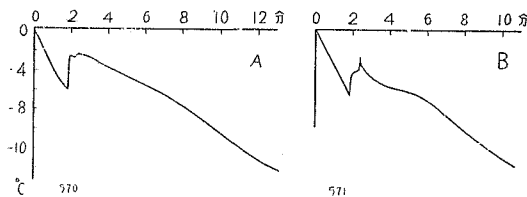
一方, 皮層部を完全に除去した材髓部のみの凍結曲線にも二次棘が明瞭に現われるばあいがある(第4図)。この事実から二次棘は材部の凍結に由来しているものであらうと想像される。この関係を明らかにするためには皮層部の含水量を変えないで材部のみの含水量を変化させることが必要であるが, その場合処理時間の短いことが望ましい。そこでまず遠心力を利用してみた。枝の小片(長さ15mm)の両端に濾紙を当てがい全体を綿で包んで遠心した。こうすると材部の導水管系の水は遠心端の切口の方に集まり一部は濾紙に吸取られる筈である。第5図に示した例では約 $12 \times 10^3 G$ で20分間遠心したもので, この間に重量は400mgから380mgに減少した。二次棘の全く認められない枝の小片



第4図 髓材部の凍結曲線  
A バイカウツギ B クロ

(第5図A)でも, 遠心された後では明瞭に二次棘を現わすようになる(第5図B)。遠心されたものでは二次棘の現われる他に曲線全体の型が変つてきていることからみると, 凍結の進行のしかたは遠心されないものとはかなり異なつてゐると考えられる。

遠心実験のばあいも二次棘を十分現わすためには少なくとも15分間位の遠心を必要とするが, この処理時間が短かければ短かいほど皮層部の水分の損失は少なくてすむ筈である。この条件を満足させるために枝の小片を一方の切口から陰圧で吸引してみた。まず小片の一端を厚肉ゴム管に挿入し, ロータリーポンプで(Hg 12mm位の陰圧)で吸引し含水量の変化を調べた。その結果は第1表にあるとおり吸引時間8分以内のばあいは皮層部の含水量はほとんど変わらないのに対し, 材部の含水量は明



第5図 遠心の凍結曲線に及ぼす影響

材料 ポプラ, AとBに用いた小片は同一枝より切りとつたもの。

A 遠心しない場合, B 遠心したもの。

かいほど皮層部の水分の損失は少なくてすむ筈である。この条件を満足させるために枝の小片を一方の切口から陰圧で吸引してみた。まず小片の一端を厚肉ゴム管に挿入し, ロータリーポンプで(Hg 12mm位の陰圧)で吸引し含水量の変化を調べた。その結果は第1表にあるとおり吸引時間8分以内のばあいは皮層部の含水量はほとんど変わらないのに対し, 材部の含水量は明

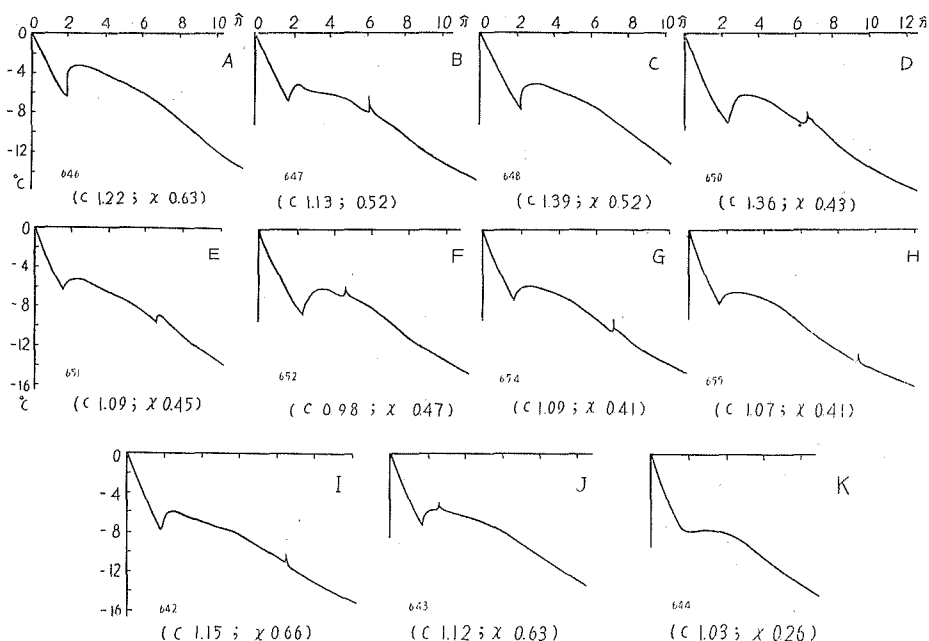
第1表 陰圧吸引による含水量の変化

部 位		吸 引 時 間 (分)						
		0	1.5	3	5	6	8	9
第一枝	c	1.04	1.03	—	1.02	—	1.04	—
	x	0.79	0.60	—	0.70	—	0.43	—
第二枝	c	1.02	—	1.05	—	1.06	—	1.00
	x	0.92	—	0.44	—	0.31	—	0.30

c 皮層部; x 材髓部。含水量は単位乾燥重量に対する水分量。

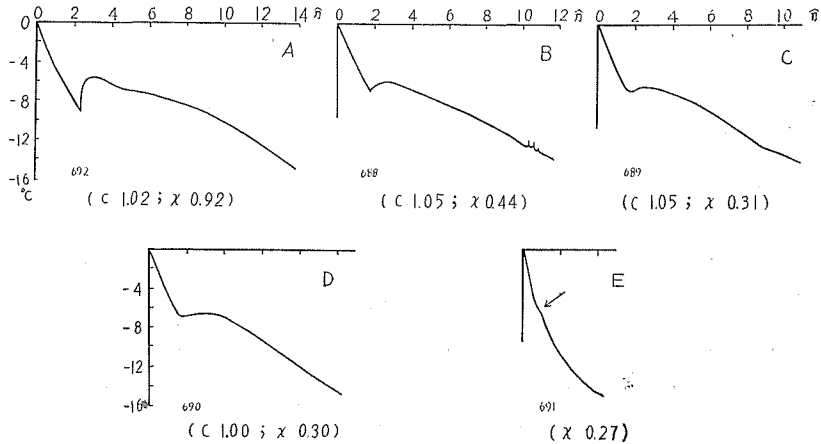
らかに減少するが、それが或値(約 0.3)になるとそれ以下には減少しにくくなる傾向がある。しかし吸引時間が長くなると程度は少ないが皮層部の含水量もやはり低下するが、時間さえ短かければ、だいたい材部のみ含水量を減少せしめることができる。

この吸引方法で材部の水分を変化させたばあいの凍結曲線の変化は、第6図に示してあるが、この例の吸引時間は割合短く1~1.5分であり、小片はすべて異なる枝からとつたものである。したがって二次棘の現われ方はかなり異なり、材部における含水量は等しいにもかかわらず一方では二次棘が現われているのに対し他方では全く認められないばあいもある。棘の型も針状(B)から小さいピーク状(E)のもの、その中間型(D, G)のものもあるというようにな



第6図 枝全体を吸引したばあいの凍結曲線

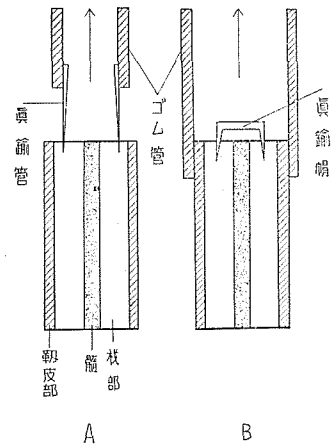
材料 ポプラ, A 未処理, B-E 75秒吸引, F 60秒吸引, G 90秒吸引, H 120秒 K 5分, それぞれ異なる枝からとられた小片を用いた。I-J 同一枝から切りとつた約12cmの部分をも20分間吸引した後それから15mmの小片を切りとつた。Iの方が吸引端に近い部分。



第7図 枝全体を吸引したばあいの凍結曲線

材料 ポプラ、同一枝よりとつた小片を用いた。A 未処理のもの、B 3分吸引、C 6分吸引、D 9分吸引、E 9分吸引後、皮層を除去したものの、即ち髓材部の凍結曲線、✓印のところに僅かな凍結が認められる。

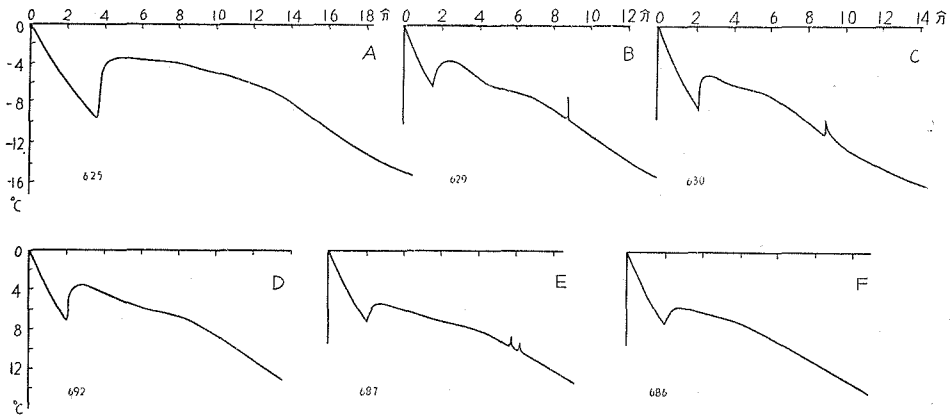
りの変化がみられ、又その曲線上に現われる位置にも一定の関係は認められない。次に同一枝から切りとつた小片について吸引の程度を変えてみた1例が第7図である。吸引時間が長くなり材部の含水量が少なくなると二次棘は小さくなり遂には全く現われなくなる。このような場合には過冷却の破れた後の温度上昇は非常に緩かになるばかりでなく、その上昇度も小さい。吸引後の材部みの凍結曲線(第7図E、第11図E)から見て材部には凍結は僅かしか起らないか、あるいはほとんど起らないのであるから、このような場合には凍結はだいたい皮層部に限られているといつてよいであろう。皮層部における凍結の進行速度の遅いことから考えると以上の緩かな凍結曲線の型はよく説明できる。以上の吸引実験から二次棘の現われるか否かは材部の含水量に左右されることは確かであるが、凍結が二次棘として現われる水は材部のどこに存在しているものかは不明である。そこで材部の水を一様に除去する代りに大ざっぱではあるが主として材部の中心部の水を、あるいは材周辺部の水を吸引で取ることを試みた。枝小片の一端の材部に、髓がちょうど中心に来るように直径4.5 mmの薄肉真鍮管を約2 mm挿し込む(第8図A)。この管はロータリーポンプに接続してある。この真鍮管の外側には約1 mmの材部及び皮層部が露出しているので、蒸発を防ぐため厚くワセリンを塗っておく。こうして吸引すると挿し込まれた管の直径に等しい材部の円柱部分の水が主として奪われることは、吸引後小片の縦断面を見ると中心柱の部分は白く乾いているが皮



第8図

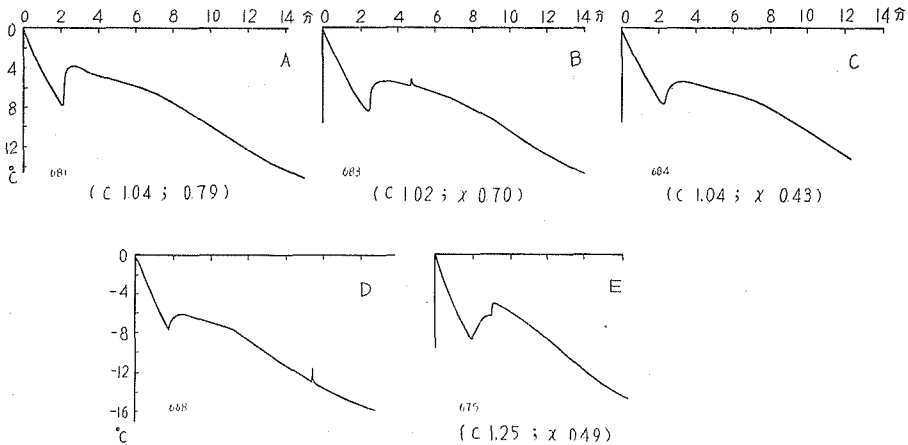
A 材中心部より吸引、B 材周辺部より吸引、矢印は吸引の方向を示す。

層部に近いところは半透明に湿つていること、及び吸引される反対側の切口に色素液をつけて弱く吸引すると挿し込んだ管に相当する中心柱のみが染まることから明らかである\*。このばあい色素液は髄の中には全く入らない。このように吸引されたものではよく二次棘が現われるようになるが、やはり枝によつて型、位置はかなり違つている。予め水挿しておいて材部の



第9図 小枝の中心部を吸引したばあいの凍結曲線

材料 ポプラ、A-C、D-Fにはおのおの同一枝からの小片を用いた。  
A 未処理のもの、予め水挿しておいた枝であるため含水量は多く、したがつて凍結の山は大きくなつている ( $c 1.25, x 1.75$ ), B 5分吸引 ( $c 1.24, x 0.93$ ) C 5分吸引 ( $c 1.26, x 0.74$ ) D 未処理のもの、採取直後の枝 ( $c 1.02, x 0.92$ ), E 4分吸引 ( $c 1.11, x 0.63$ ), F 5分吸引 ( $c 1.13, x 0.52$ )。



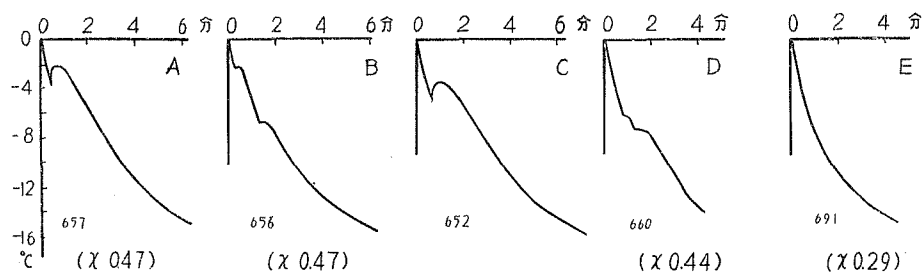
第10図 枝の周辺部を吸引したばあいの凍結曲線

材料 ポプラ、A-Cは同一枝よりの小片について、D及びEはそれぞれ異なる枝について得られたもの。A 未処理のもの、B 5分吸引、C 8分吸引、D 4分吸引、E 3.2分吸引。

\* 導水管系の配置からみると、この境界はかなりほけていた管であり、吸引がすすむにつれて、材周辺部の水も次第に中心柱の方への移動が起る。



含水量を増加させておいた枝の方が二次棘ははつきりした針状となる傾向が強い(第9図A-C)。第9図D-Fは採取直後の枝についての結果である。全体として見ると切口全体から一様に吸引したばあいとほとんど差は認められない。次に材部の周辺部を吸引したばあい、すなわち材部の皮層部に近い部分から水を奪つたばあい如何な影響が現われるかを調べた。そのために直接4mmの真鍮の帽子を第8図Bのように一方の切口の材部の中央部に打ち込み、帽子を打込んだ切口側を吸引用の厚肉ゴム管に挿入した。このばあいもかなりはつきりと水の奪われた部分と残っている部分は区別できる。吸引がすすむと切口面では材部は収縮するため皮層部との間に溝が生じたように見えるが、この溝は切口附近に限られている。このように材周辺部から水をとつても二次棘の現われること、そしてその位置、型の不定の点、また脱水度が高いときは全く二次棘が認められなくなることも前述の二つの吸引実験とほぼ同様で、特異の変化は見られなかつた。部分的吸引のばあいもお互に皮層部材部における含水量が等しいのに一方の小片では二次棘が現われるのに他の小片では全く認められないことが良くある。この部分的脱水実験は非常に粗雑で、真鍮管又真鍮帽子の挿し込み方の僅かの差異が水の奪われる範囲やその割合にかなりの影響を及ぼすにちがいない。しかしこの実験で行なつた含水量測定法では各部における平均の含水量が判るのみで、その分布状態は全く判らない。したがつて材部の含水量は等しくとも水の分布状態にはかなりの違もあり得るわけで、二次棘の出現の有無と含水量との間の関係が乱れることも十分考えられる。例えば第11図のA, Bでは材部の含水量は等しいにもかかわらず凍結の進行はかなり異なっているという事実は、吸引によつて材部内における水の分布状態が変つたことを示すものである。ポプラの例では、予め吸引した後皮層部を除去した材部の凍結曲線には凍結は階段状に現われてくるか、あるいは単なる折曲りとして認められるにすぎない(第11図)。更に脱水がすすめば——材部含水量0.29——凍結は曲線上に認められなくなるので、この程度まで吸引脱水されたばあいの小片の凍結曲線は専ら皮層部の凍結を示すといふことができる。



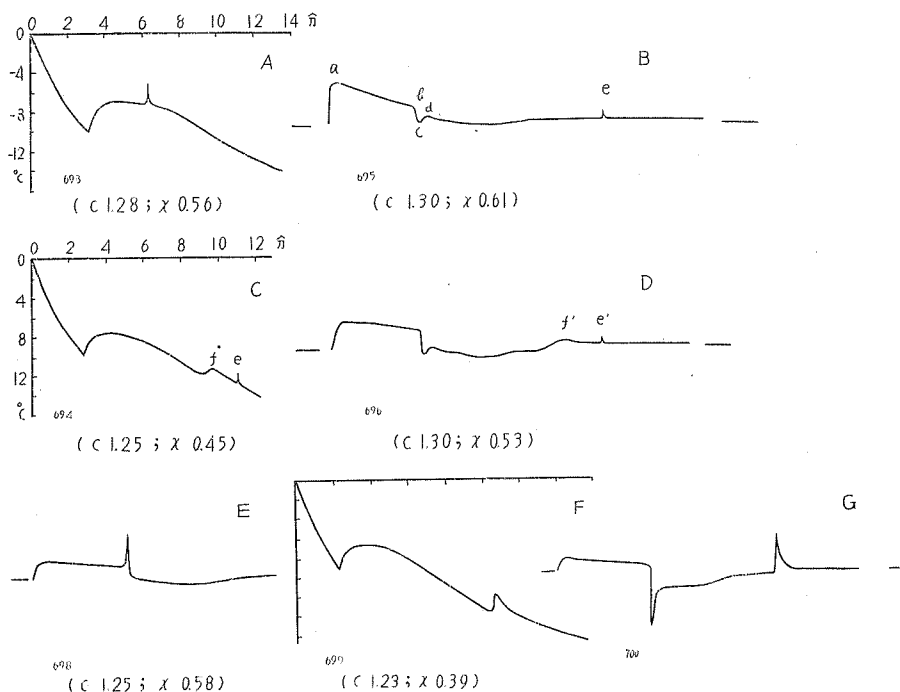
第11図 吸引の髓材部の凍結曲線に及ぼす影響

A-B, C-Eにはおのおの同一枝よりの小片を用いた。A 対照, B 45秒吸引, C 対照, D 1分吸引, E 9分吸引, ほとんど凍結は認められない。

#### IV

11月から12月にかけて行なわれたクワの枝小片の凍結曲線の分析実験から次のことが明

らかになった。熱電対を小片の髓部に挿入して冷すばあいには凍結はいつも材部の方から始まる。そして材部の凍結は凍結曲線上には一次棘として現われ、それに続く山型の部分は主に皮層部の凍結によるものである<sup>り</sup>。以上の実験の行なわれた時期の水分は皮層部で1.2~1.0, 材部で約0.6以上である。ところが二次棘の現われ始める1月には材部の水分は0.5位まで低下している。このように材部の水分が少ない場合にも小片では凍結はやはり材部から始まるものか否か、更に二次棘が果して材部の凍結に由来しているか否かを更にはつきりさせるために、枝小片の中心部と表面との温度差の変化から凍結の進行過程を調べてみた。このばあい熱電対の一脚は髓の中心に挿入し、他脚は小片の表面に捲きつける。このようにして得られた凍結曲線が第12図のB, D, E, Gである。まず普通の方法(熱電対を髓の中心に挿す)で凍結曲線\*



第12図 示差的にとつた凍結曲線

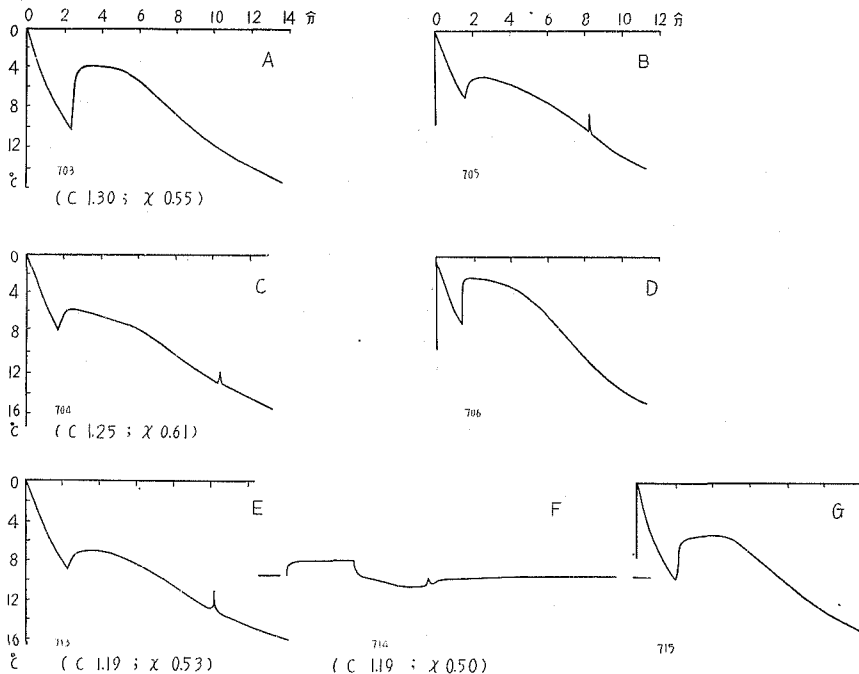
材料 ポプラ。A-D, E-Fはおのおの同一枝よりの小片について得られたもの。A 対照 枝は多少乾燥気味であつた, B 凍結に伴う小片の中心部と表面の温度差の変化, 基線より上方になるにつれ相対的に中心部の温度が表面より高くなる, C 吸引30秒, D 吸引30秒, 示差的にとつたもの, E 示差的にとつた対照, F 吸引1分30秒, G 示差的にとつた Fの再凍結曲線。

\* 二次棘の出現は同一木でも枝によつて違う。ある枝では非常によく出るが、他の枝では全く出ない場合もよくある。A, B, C, Dの曲線をとつた枝は室温で約1週間水挿しておいたもので、先端部の芽はかなり開いており、材部はや乾燥気味であつた。E, F, Gは実験直前に採取した枝について得られたものである。

をとつて二次棘の現われる枝を選び、それに続く各節からとつた小片について示差的に温度記録をとつたもの、すなわち同一枝からの材料についての凍結曲線が第12図A-Dであり、同様に二次棘の現われない枝について得られた曲線がE-Fである。示差的の凍結曲線では基線が温度差のないとき、つまり表面と中心が等しい温度のときで、それより上方に行くにつれて中心部の温度が相対的に表面より高くなるようになっている。冷し始めは表面に接している熱電対の脚の方が先に冷されるので、中心部は相対的に表面より温度が高いことになるので急に曲線は上向きになる(第12図、Bのa)。その後中心部も次第に温度が下るので表面との温度差は徐々に少なくなる結果、曲線はゆつくり下降するが、bのところでは急に下向きに変化する。いいかえると表面の温度が上昇した訳で(c)、表層部の方に凍結が起つたことを示す。つづいて一時中心部の温度がやや上るが、再び徐々に下るので小さな山型を呈し(d)やがて一定になる。そのうち突然中心部の温度が瞬間的に一時高くなり、棘状突起として現われてくる(e)。この曲線の型、すなわち中心部と表面との温度差の変化から判断すると凍結はまず皮層部に始まり、やがて材部に波及し、両者の中に拡がつていくが、凍結がだいたい終つた頃に、突然中心部に近いところに急激な、しかも単時間しか持続しない凍結が起ると説明される。このように考えるとAの凍結曲線(Bとは同一枝からとられた小片ではあるが節が異なるため二次棘の現われる位置は互に異なっている)の過冷却の破れた直後の凍結は皮層部のものであり、それに引きつづき材部の凍結が加わり、その途中で材部のある部分の水が急激に凍り二次棘として現われると解釈される。30秒間吸引した枝小片について得られた通常の凍結曲線(C)と示差的に得られた凍結曲線(D)の温度変化の間にもはつきりと対応が見られる。吸引脱水されたこの例では(C)二次棘の他に小さな山型の突起が(f)が現われているが、Dではそれぞれに対応してe'及びf'がはつきりと認められる。これからみるとfなる山は材部の一部の凍結によるものと考えられる。Eは二次棘の現われない枝の小片の示差的凍結曲線であるが、このばあいには凍結は材部から始まっている。何となれば中心部の温度がまづ上昇しているからである。この枝の小片を吸引脱水し、材部の水分を減じたもの(含水量0.39/乾燥重量)について得られた凍結曲線(F)では割合徐々に凍結は開始し、温度が $-13^{\circ}\text{C}$ 位になつて棘というより突起状の温度上昇が現われている。この小片を室温で完全に融解した後、表面を十分乾かしてから示差的な再凍結曲をとると(G)、Eの場合とは逆に凍結は急に表層部に始まつて材部の方に進行していくことがよく判る。そして突起状の温度上昇に相当した部分が材部の凍結として現われているが、棘状ではなくやはり突起状に、つまりある程度持続的の凍結が起つていることを示している。皮層部での凍結の進み方はGとB、Dとではかなりちがつている。曲線の型からはGでは単に凍結の進行が速いばかりでなく、一時に多量の氷が生成されると考えられるが、一度凍結し、融かした直後では水の分布状態は凍結しないばあとはやはり差異があるので、氷生成の様子がちがつてくるためと思われる。この実験ではFとGは同一小片について得られたものであるが、Fは初凍結、すなわち第1回目の凍結であり、Gは2回目の凍結、つまり再凍結であるが、敢てこの2回目の凍結を利用した理由は後で述べる。以上の実験から二次棘の現われるばあいに

は凍結は皮層部から始まる。したがって凍結の進行は割合遅い、その上普通のばあいには中心部の温度変化のみを測っているため、凍結部位と测温部位との間に距離があるために過冷却の破れた後の温度上昇が、二次棘の現われるばあいには、緩かになることが了解される。

今までの凍結曲線は熱電対を髓の中心に挿入して得られたものであるため、材部に起つた急激な局部的凍結が二次棘として現われたと考えられる。つまり熱電対に近い部分に凍結が起つたために捕えられたことになる。示差的に得られた凍結曲線は、二次棘の現われるばあいには凍結は皮層部から始まることを示している。したがってこのような枝小片の表面に熱電対を接触させてとつた凍結曲線上にもやはり二次棘は認められるだろうか？ もし二次棘が表層部のどこかの局部的凍結に由来しているものならば、何等かの変化が認められる場合もあつてよい筈である。この予想で行なつた実験の1例が第13図である。Aは熱電対を小片の表面に捲いたばあいの凍結曲線であり、その小片を十分融解し表面を乾かしてから熱電対を髓部に挿入して測定したばあいがBである。Bに比べAでは凍結の山は非常に大きく二次棘は根跡さえ認められないが、Bでは凍結の山は小さく明瞭な二次棘が現われている。CとDとでは丁度逆に初凍結では熱電対を髓部に挿し込み(C)、再凍結のときには表面に捲きつけた(D)。このば

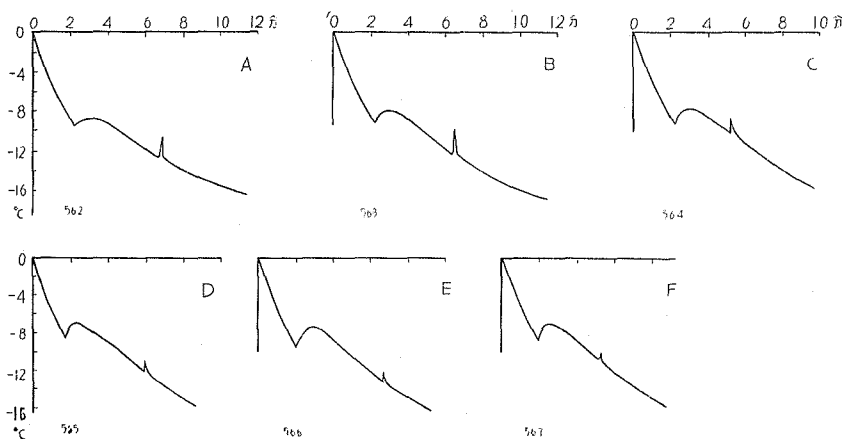


第13図 熱電対の位置と凍結曲線

材料 ポプラ。A 熱電対を小片の表面に(初凍結), B 熱電対を髓の中心に(小片Aの再凍結), C 熱電対を髓の中心に(初凍結), D 熱電対を小片の表面に(Cの再凍結), E 熱電対を髓の中心に(初凍結), F 小片表面と髓の中心とを示差的に測つたもの(初凍結), G 熱電対を小片の表面に(初凍結)。A-D, E-Gはおのおの同一枝よりとつた小片について測られた。

あいも関係は A, B のばあいと同様に髓部に熱電対を挿入した時のみ二次棘が認められる。この実験に用いた枝の材部含水量は割合少なく、凍結は皮層部より始まっている。この結果も二次棘は皮層部の凍結に由来しているものではないことを示す 1 つの証拠である。皮層部及びそれにつづく材周辺部の凍結による遊離潜熱は直接表面に接触している熱電対に伝わる結果、凍結の山は大きくなり、熱電対より遠方の材部内に起る局部的の凍結、すなわち二次棘として現われる凍結はかくされて曲線上に現われないと考えられる。この関係は同一枝からとつた 3 つの小片についての実験で更に確められている (E, F, G)。髓に熱電対を挿入したばあいは明瞭に二次棘が現われており (E)、示差的にとつた記録では凍結は皮層部から始まり、材部に急激な一時的の凍結、つまり二次棘に対応する凍結の存在することがはつきり認められる (F)。ところが熱電対を表面に捲きつけたものの記録には、二次棘は全く認められず単一な大きな山状の曲線を示すにすぎない。

秋頃まではクワでは初めて凍結させたときの曲線(初凍結曲線)と、それを十分融した後再び凍結させたときの曲線(再凍結曲線)との型はかなりちがうのが普通である<sup>1)</sup>。ところが 3 月から 4 月にかけて調べた多くの種類の木の 1 年生枝では、初凍結曲線及び再凍結曲線の型の間には著しい差の認められないばあいが多い。特に著しいのはクワ(タキノガワ)における例である(第 14 図)。二次棘は再凍結のばあいはいうまでもなく 6 回目の凍結曲線にさえだいたい近い温度あたりで現われている。少なくとも二次棘だけについていえば 2 回目の凍結でも 1 回目の凍結のばあいとほぼ同じとみてよい。前の実験で再凍結を利用した理由はここにある。しかし枝小片全体の凍結過程は厳密には等しくはない。第 14 図の例でも過冷却の破れた直後の温度上昇は凍結を繰返えすごとに次第に急になり、二次棘も小さくなっている。この関係は第 12 図の示差的凍結曲線 B と G を比較すればよりはつきりする。第 12 図の G、すなわち再凍結のばあいも凍結は皮層部より始まっではいるが、凍結速度と凍結の山の高さは初凍結のばあいよ



第 14 図 繰返しの凍結と凍結曲線

材料 クワ(タキノガワ)4月, 熱電対は髓の中心に挿す。A 第 1 回目, B 第 2 回目, C 第 3 回目, D 第 4 回目, E 第 5 回目, F 第 6 回目の凍結。

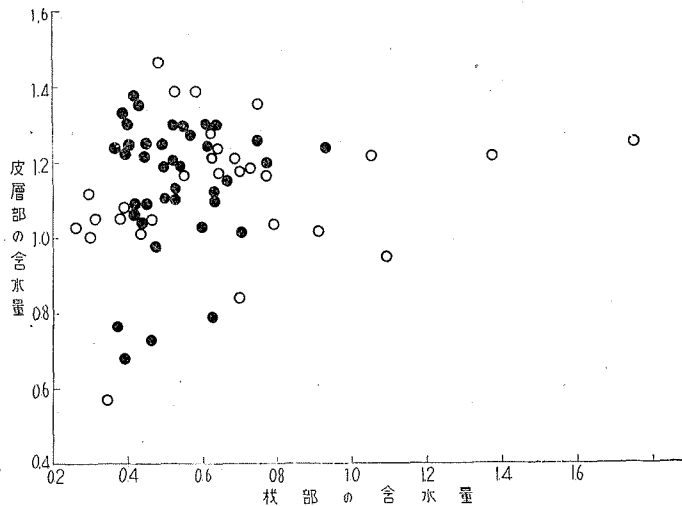
り大きい。このために、熱電対を髓に挿入する方法でとつた凍結曲線でも再凍結のばあい過冷却の破れた直後の温度上昇速度が大きくなつて現われるのである。

V

以上の実験から明らかになつたことは次のことである。1) 凍結曲線上に現われる二次棘というものは材部の水分が減少しているときのみ現われる。2) 既に凍結が進行しているのに、材部の一部になお過冷却状態で取残されていた水の急激な凍結が二次棘として現われたものである。

枝小片の含水量と二次棘の出現との関係をポプラについてみると(第15図)、材部の含水量の低いときに二次棘が現われる傾向ははっきりしているが、点の分布状態からみるとその出現の有無は材部含水量のみによつて決まるものではなさそうである。ここに示す含水量は平均であつて、水の分布状態は全く不明であることを考えれば当然であろう。吸引によつて容易に除去される水分はまず導管中の水である。それにしても導管の太さに大小があり、且つその分布、また放射状に走っている導水管系、その上このような導水管系に如何なる程度に水が入つているか等、つまり水の分布状態が具体的には明らかになつていない現在、凍結によつて二次棘として現われる水のことを具体的に論ずることはできない。今後に残された問題である。

なお小片を枝から切りとるときに機械的に水分が移動することを考えなければならない。したがつて材部の性質、導管の配置及び導管内の水分量等によつて切断時に受ける影響は等しくはない筈で、したがつて材部の水分状態の受ける変化も等しくないのは当然である。二次棘のよく現われる枝というのは、切断時に過冷却されるのに好都合の状態に一部の水が隔離され易い状態にあるとすると一応の説明は可能であらう。もし切断時に受ける水分の機械的移動が二次棘の原因とすれば、切断の際導管に空気の入らぬよう水中で切断すれば二次棘は現われない筈である。事実二次棘の現われる枝から水中で小片を切り取つた場合には二次棘は現われなかつた。しかしこの簡単な事実のみから二次棘は単に切断時の人為的のものとは断言できない



第15図 含水量と二次棘の出現との関係

含水量は単位乾燥量に対する比で表わす。黒丸は二次棘の現われた場合、白丸は二次棘の表われぬ場合。

が、切断という機械的操作がやはり一つの原因となつている可能性は考えなければならない。

前報<sup>1)</sup>でクワ(タキノガワ)の1年生枝では1月頃に二次棘の現われること、及びそのような場合には凍結は初め皮層部に始まり、おくれて材部に進行するという予想を述べた。今回の示差的凍結曲線の実験は明らかにこの予想の正しいことを実証している。皮層部に始まつた凍結は割合徐々に進行する。その結果熱電対を髓に挿入したときの曲線上には凍結はドーム型を呈する山型となつて現われ、二次棘がたいてい認められるのであるが、材部の水分が非常に少くなると二次棘も全く現われない。このような場合この実験条件の下では材部には容易に凍り得る水は非常に少ないか或いはほとんどないと考えてよいであろう。材部に含まれる水の主要部は恐らく導管中に連続した水系として存在すると思われるが、その一部に凍結が始まると相当速に伝搬して行くにちがいない。これに反して皮層部の大部分を占める生細胞は秋から春先にかけては細胞外凍結をするので<sup>2)</sup>凍結の進行は遅い。したがつて材部の凍結のばあいには単位時間に遊離される潜熱量は皮層部に比べて遙に多い。このため材部の凍結するときは温度は急に上昇するが皮層部の凍結では温度の上昇は緩かである。したがつて以上の実験条件の下では凍結曲線で温度上昇の急激のところは材部の凍結とみてさしつかえない。

### 摘 要

真冬から春先にかけて、クワ、ポプラ、バイカウツギ等の1年生枝から切りとられた小片の凍結曲線上には不規則な棘状突起(二次棘)が現われる。この一過性の温度上昇はどの部分の凍結によるものかを明らかにするため主としてポプラを材料として2, 3の実験を行なつた。その結果、次のことが明らかになつた。

1. 二次棘は材部含水量の低下しているときのみ現われる。しかし材部の含水量が非常に低くなると二次棘は現われない。
2. 二次棘の現われるばあいには、凍結は皮層部に始まり部材に進行していく。
3. 枝の小片にすでに凍結が進行しているにもかかわらず、なお材部のどこかに過冷却状態を保っている水があり、その急激な凍結が二次棘として現われる。しかしこの水の具体的ことについては現在不明である。
4. 枝から小片が切りとられるとき受ける機械的障害も、二次棘の出現に何等かの関係があると思われる。

### 文 献

- 1) 青木 廉 1955 生物の凍結過程の分析 XII. リワの枝の凍結曲線, 低温科学, 生物篇, **13**, 1.
- 2) Asahina, E. 1956 The freezing process of plant cells. Contrib. Inst. Low Temp. Sci. No. 10.

### Résumé

From winter to early spring, on the freezing curve taken from a small piece of a preceding year twig of mulberry and poplar tree, there appear frequently one, occasionally two or more, irregular short spikes (secondary spike Fig. 1, B-H), in this case, however, no abrupt rise of temperature appearing as a clear spike (initial spike) is observed immediately after setting free from supercooling, not as in twig piece in December (Fig. 1, 4). To solve the nature of the secondary spike may give a key for surmising the freezing process in twig piece from the shape of the freezing curve. For this reason some experiments were made mainly on pieces of preceding year twig (6-7 mm in diameter, 15 mm in length) of poplar.

The results of the experiments indicate that the occurrence of the secondary spike merely depends upon low water content of xylem part of the twig piece. That is to say, on the freezing curve obtained from a twig piece cut off from the twig which has shown no secondary spike owing to high water content, a secondary spike becomes obviously observable, when water is properly taken out of xylem part by drying in the room or by suction with negative pressure. Thus, lower content of water in the xylem part is a necessary condition for the appearing of the secondary spike, however, as to the amount of water indispensable for producing the secondary spike there seems to exist a limiting value beyond which it does not make its appearance. In the twig piece of which xylem part has low water content sufficient to produce the secondary spike, freezing always begins, when cooled, in the cortical layer and then propagates into the xylem part. From these facts the secondary spike may be explained as follows. In xylem part there may exist a part of water being in supercooled state. This small amount of supercooled water in the xylem suddenly freezes, as temperature drops further, and the abrupt rise of temperature resultant from this sudden, not lasting, freezing in the xylem part appears as the secondary spike on the freezing curve.

Further a probability was briefly discussed whether the secondary spike is an artefact derived from the disturbance of water distribution in xylem part produced mechanically in cutting off a piece from twig.