



Title	植物の霜害に関する研究 Ⅰ : 霜害におよぼす融解速度の影響
Author(s)	酒井, 昭; SAKAI, Akira; 吉田, 静夫 他
Citation	低温科学. 生物篇, 25, 59-70
Issue Date	1967-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17720
Type	departmental bulletin paper
File Information	25_p59-70.pdf



植物の霜害に関する研究 I*

霜害におよぼす融解速度の影響

酒井 昭・吉田 静夫

(低温科学研究所 植物凍害科学部門)

(昭和 42 年 9 月受理)

I. 緒 言

耐凍性の小さい植物や耐凍性の大きい植物でも、耐凍性の低下している時期には、急速にとかすと植物が害を受けやすいということは古くから知られている¹⁾。従来、霜害におよぼす朝日のわるい影響が農林作物で強く主張されてきている。たとえば、今田・武藤²⁾は霜害に対する朝日の影響を調べるために、トドマツの苗木を凍結後すぐ直射日光にさらして急速に温度を上昇させたばあいと、凍結後、日陰におき除々に常温にもどしたばあいの芽の凍害と不定芽の発生状態を調べて、凍結後 0°C においてから常温に戻すと凍害が著しく少ないことを明らかにした。そして彼等は朝日の直射を受ける芽は凍結した組織が急速にとかされるために、朝日をさえぎられた日陰の芽よりも害が著しいと結論している。しかし、彼等の実験では、5月中旬から6月初旬に -4°C で凍結後、日中の直射日光にさらしたのであって、早朝の朝日にあてたのではない。したがって、この実験からただちに被害程度の差を朝日の影響に帰することはできないように思われる。

本論文は霜害におよぼす融解速度の影響を明らかにするために、トドマツを用いて昭和 41 年 4 月から昭和 42 年 5 月までの期間に行なった実験結果の報告である。

演習林での測定に種々ご援助をいただいた北大苫小牧演習林谷口林長および前田技官に謝意を表します。

II. 材料と方法

材料はトドマツ (*Abies sachalinensis* Mast.) の 5 年生苗木の発芽前後のものを使用した。凍結実験は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度で調節された低温室内の恒温箱中で行なった。特別にことわらない場合には、次の操作に基づいてトドマツを凍結させた。苗はあらかじめ水でぬらして 8~10 本ずつポリエチレン袋で包み、 -3°C の恒温箱中に入れて、60 分後なお凍結していない苗は霜をふりかけて凍結させた。その後、 -4°C まで冷却し 2~4 時間その温度にたもったのち、いろいろな方法でとкаした。なお、根を凍結させないために根部は鉢型のブリキで作られた恒温箱

* 北海道大学低温科研究所業績 第 840 号

中に入れて 0°C にたもった。融解は 0°C 、またはいろいろな温度にたもたれた恒温器や室内でゆっくり融解させるか、午後 2 時ごろの直射日光に直接さらすか、または 5°C の水中に入れて急速にとかした。同一系統の実験には、同一発芽状態にある苗 8~10 本ずつを使用した。

苗の冷却および融解速度は 0.2 mm 銅—コンスタンタン熱電対を頂芽の中に挿入して打点式、またはペン書レコーダーで自記させた。野外での一部の実験では、注射針型サーミスターの感温部を芽の中に挿入して温度変化を測った。

被害程度は凍結、融解した苗木をビニールハウス中に植込み、2 カ月後、頂芽、側芽および 1 年生側芽の開舒率を調べてきめた。また幹の各組織の褐変度も調べた。

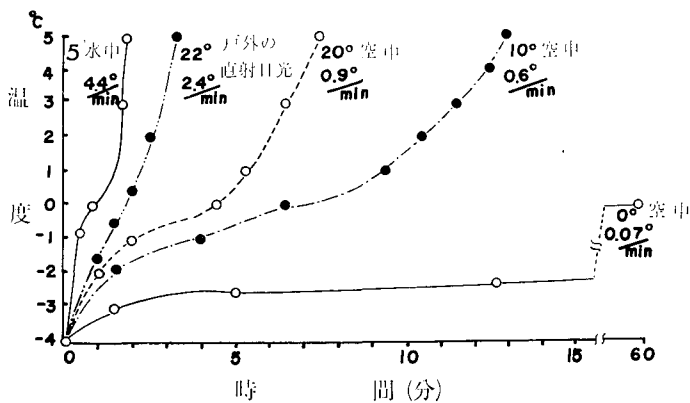
室内実験と併行して北大苫小牧演習林、山の神事業区の 13 および 18 林斑にまたがった北東斜面と南西斜面での霜害時におけるトドマツの芽の凍結開始温度、最低温度および斜面の方位や部位による朝日を受けたあとの融解速度の差を調べた。

III. 結 果

1. 芽の害におよぼす融解速度の影響

5 月 20 日、頂芽は表面のヤニがとけ、芽がふくらみ、側芽は開舒直前にあった。この状態にある苗はまだ -4°C での 2 時間の凍結に耐えた。凍結状態にある苗を低温室中の恒温箱から取出してつぎの 5 つの異なった方法でとかした。1. 0°C の空中 ($0.07^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、2. 10°C の空中 ($0.6^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、3. 20°C の空中 ($0.9^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、4. 直射日光 (気温 22°C) ($2.4^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、5. 5°C の水中 ($4.4^{\circ}\text{C}/\text{分}$)。これらのばあいの融解曲線を第 1 図に示す。なお、融解速度は -4°C から 0°C に達するまでに要した時間を測定してきめた。

いろいろな融解速度でとかしたばあいの芽の開舒率を第 1 表に示す。この表からわかるよ



第 1 図 トドマツの芽を異なった条件でとかした時の融解曲線 (昭和 41 年 4 月 20 日)

トドマツの芽を -4°C で 2 時間凍結させてからいろいろの条件でとかした

融解速度は芽の温度が -4°C から 0°C になるまでに要した時間 (分) を測定してきめた

第1表 トマトの芽の凍害におよぼす融解速度の影響 (1)

融解条件	頂芽			側芽			葉の害*
	供試数	開舒数	開舒率 (%)	供試数	開舒数	開舒率 (%)	
10°Cの空中 (0.6°C/分)	10	6	60	50	26	52	±
気温 20°Cの直射日光 (2.4°C/分)	10	3	30	47	20	43	卄
5°Cの水中 (4°C/分)	10	2	20	42	8	19	卄
0°Cの空中に45分間おいてから5°Cの水中** (4.4°C/分)	10	9	90	49	32	65	±

実験期日：5月20日，被害調査日：6月16日

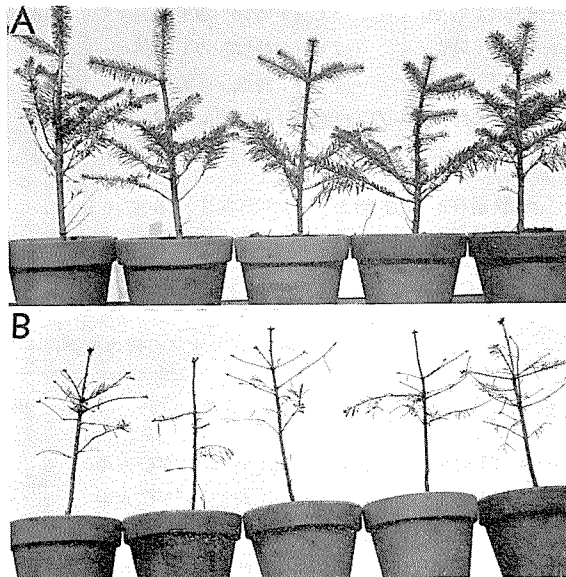
* 葉の被害程度は+の数で示し，±は少し葉が褐変しているけど，卄は大部分の葉が，卄は全部の葉が褐変していることを示している

** 0°Cの部屋に移して45分間で芽の温度は0°Cに達した

凍結条件：いずれも-4°Cで2時間

うに，頂芽，側芽および側枝のいずれについても融解速度の大きいものほど開舒率が低いことがわかる。しかし，凍結した苗を0°Cの空中において芽の温度が0°Cに達してから，すなわち融解したものを5°Cの水中に入れたばあいには，発芽中の側芽を除いてほとんど被害を受けなかった。葉の被害についても同様な傾向が認められた。第2図に-4°Cで2時間凍結後，10°Cの空中に出してゆっくりとかしたものと，直射日光にあてた苗の状態を示す。

以上の結果から，凍結した芽を0°Cにおいて融解後，5°Cの水中に入れても害を受けないことがわかったので-4°Cで凍結後，-3，-2，-1および0°Cの各温度に1時間おいてからの5°C水中に入れる実験を行なった。実験に使用した芽の状態は頂芽のヤニがとけてふくらみ，側芽は開舒直前にあった。なお，この時期の苗は-4°Cでの1時間の凍結にも多少の被害を受けた。第2表と図版Iに示すように，第1表の結果と同様，-4°Cで1時間凍結後，0°Cの部屋に1時間おいてゆっくり融解した苗を5°Cの水中に入れたばあいには，大部分の頂芽，側芽は開舒した。しかし，-4°Cで凍結後，直接5°Cの水中に入れたもの，



第2図 10°Cの空中でとかしたトマトと直射日光にあてたものとの比較

実験期日：4月20日，被害調査日：6月16日
凍結温度：-4°Cで2時間

A：10°Cの空中でとかしたもの，B：午後2時の直射日光にあてたもの

-4°Cで凍結後、-3°Cまたは-2°Cにさらに1時間おいてから凍結状態のまま5°Cの水の中に入れたものでは、頂芽はほとんど開舒しなかった。しかし、-4°Cで凍結後-1°Cに1時間おいてから5°Cの水の中に入れたものでは頂芽の約20%が開舒した。側芽はすでに開舒直前の状態で、頂芽よりも耐凍性が低下して-4°Cでの凍結にもあるていど被害を受けた。そのため0°Cで融解後5°Cの水の中に入れたばあいでも25%の開舒率しか示さなかった(図版-1)。

融解速度の有害な影響は芽だけでなく皮層部、材部でも認められる。ことに開舒頃は皮層部や材部の耐凍性が低下しているため、それらの部位での融解速度の影響は大きい。第2表に示した実験のばあいにおける幹の被害を第3表に示す。処理4ヵ月後の9月17日に調査したので、融解速度が大きいばあいには、大部分の苗はすでに枯死していた。この枯死は皮層部、形成層、材部の著しい被害によるものと考えられる。幹における被害は第2表に示した芽の開舒に対する影響とほぼ同様な傾向が認められた。なお、このことはほかの期日に行なった実験でも認められた。

以上の結果から、凍結状態から水中に入れて急速にとかすと害が著しいことがわかったの

第2表 トドマツの芽の凍害におよぼす融解速度の影響(2)

凍結条件	融 解 条 件	頂 芽			側 芽			葉の害*
		供試数	開舒数	開舒率(%)	供験数	開舒数	開舒率(%)	
-4°C(1時間)	5°C水中	10	0	0	37	7	19	+
-4°C(1時間)	-3°C(1時間)→5°C水中**	10	0	0	43	2	5	+
-4°C(1時間)	-2°C(1時間)→5°C水中	10	0	0	38	6	16	+
-4°C(1時間)	-1°C(1時間)→5°C水中	10	2	20	38	11	29	+
-4°C(1時間)	0°Cの空中(1時間)→5°C水中	10	8	80	39	25	64	±
-4°C(1時間)	0°Cの空中(1時間)→12°C空中	10	10	100	43	26	66	-

実験期日：5月28日、被害調査日：6月16日

実験材料：定山溪産、5年生苗で頂芽のやにはとけてふくらみ、側芽は開舒直前の状態にあった

* 葉の害は褐変度であらわし、+の数の増加は被害の増加を示す

** 5°Cの水中に1分間浸す。1分間で0°Cに達した。その後水中から取出して10°Cの空中におく

第3表 トドマツの幹の凍害におよぼす融解速度の影響

凍結条件	融 解 条 件	供 試 数	枯 死 数 (%)	皮層部の被害*
-4°C(1時間)	-4°C空中(1時間)→5°C水中	10	10(100)	-
-4°C(1時間)	-3°C空中(1時間)→5°C水中	10	9(90)	+(1/1)
-4°C(1時間)	-2°C空中(1時間)→5°C水中	10	9(90)	##(1/1)
-4°C(1時間)	-1°C空中(1時間)→5°C水中	10	4(40)	##(3/6) ##(3/6)
-4°C(1時間)	0°C空中(1時間)→5°C水中	10	1(10)	+(6/9) ##(3/9)
-4°C(1時間)	0°C空中(1時間)→12°C空中	10	0(0)	-(10/10)

実験期日：5月28日(定山溪産、5年生苗)、被害調査日：9月17日

* 皮層部は枯死していない個体について調べた。その程度は褐変の度合とその範囲から、-、+、##、##の相対値であらわした。+の数の増加は害の程度の増加を示す

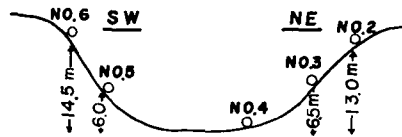
第4表 トドマツの頂芽の凍害におよぼす融解条件の影響
(昭和41年5月10日)

凍結条件	融解条件	葉の被害	開舒した頂芽	開舒した側芽
-4°Cで3時間	2°Cの水中	≡	0/5	0/17
-4°Cで3時間	0°Cの水中(30分)→20°Cの水中	≡	1/5	0/21
-4°Cで3時間	-0.9°CのC.H.* (1分)→20°Cの水中	+	1/5	2/18
-4°Cで3時間	-0.9°CのC.H. (10分)→20°Cの水中	-	3/5	8/22
-4°Cで3時間	0°C空中	-	5/5	17/22

実験材料：定山溪産5年生トドマツで側芽は開舒直前で、頂芽はやにがとけてふくらんだ状態

* C.H.：-0.9°Cの氷点を有する食塩溶液

で、芽の組織の氷点(-0.9°C)と同じ濃度の食塩溶液中に凍結しているトドマツを入れて、その温度で徐々に細胞内に再吸水させてから5°Cの水中に入れてみた。その結果を第4表に示した。-4°Cで凍結しているトドマツを0°Cの水中に入れたときは、入れた瞬間に被害を受けるものと考えられる。しかし、組織の氷点である-0.9°Cの塩溶液中に10分おいたものでは、その後5°Cの水中に入れても頂芽の60%は生存していた。

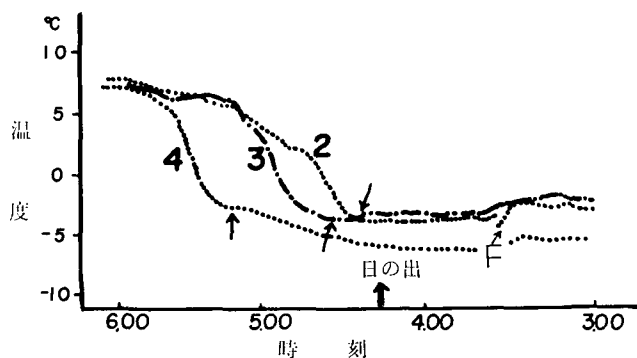


第3図 観測地での各測点の位置

実験場所：北大苦小牧演習林、山の神事業区
斜面上の白丸は測点を示す。各測点にあるトドマツの頂芽の温度が測定された

2. 霜日における日出頃のトドマツの頂芽の融解速度

北大苦小牧演習林、山の神事業区の13および18林班の道路をはさむU字型の北東斜面と南西斜面の5地点で4年生トドマツの苗木の頂芽の中にサーミスターを挿入し芽の温度変化を自



第4図 現地での霜日におけるトドマツの頂芽の温度上昇曲線(昭和41年5月11日)

2, 3, 4は測点(第3図)を示し、それぞれ北東斜面の肩の部分、中腹および底部にあるトドマツの頂芽の融解曲線を示す。Fは測点2のトドマツの凍結開始点(約-3°C)を示す。その他の測点にあるトドマツの芽は3時以前に凍結した。矢印は各測点にあるトドマツに朝日があたった時刻を示す。なお、頂芽の氷点は約-0.5°Cであった

記させて調べた。実験の状況は第3図に示す。5月11日の霜日のときに4つの頂芽において-3, -3, -1.5 および -1°C の各温度で凍結が開始したことが温度変化の上から明らかであったが、ほかのひとつの頂芽はほかの曲線と重複して不明確であった。5月11日における現地での日出は約4時15分である。自記された温度記録から判断すると、現地では4時20分ごろに最初に北東斜面の肩の部分にあるNo.2(第4図)に朝日があたり、ついで南西斜面の肩の部分にあるNo.6, 北東斜面中央部No.3, 南西斜面No.5, 最後に底部のNo.4に朝日があたる。いずれの部位にあるトドマツの芽も $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ の温度で朝日にあたっている。底部にあるトドマツの頂芽は斜面上にあるものよりも約 2°C , 最低温度が低かったが、朝日にさらされる時間がおそいので、日の出後約 $0.07^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の速度で温度が上昇し、約 -1°C の時に朝日を受けた(第4図)。凍結状態で朝日があたってから 4°C に上昇するまでの温度上昇速度は北東斜面では $0.35\sim 0.4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ で、南西斜面のNo.6では、 $0.22^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった(第5表)。5月11日の霜日には底部においてもわずかしが霜害は認められなかった。なお、日の出時の凍結温度から 0°C までの温度範囲で融解速度をはかると第5表のように、いずれも約 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ で非常におそい。

第5表 斜面の各地点における最低温度および日射後の融解速度(昭和41年5月11日)

測点および場所*	朝日のあたる順序	温度上昇速度** ($^{\circ}\text{C}/\text{分}$)		日の出後、 0°C までに達する時間 (分)	日の出前最低温度 ($^{\circ}\text{C}$)
		A	B		
No. 2 (北東斜面の上部)	1	0.35	0.13	20	-2
No. 3 (北東斜面の中部)	3	0.35	0.12	30	-2
No. 4 (北東斜面の底部)	4	0.42	0.13	60	-4
No. 6 (南西斜面の上部)	2	0.22	0.09	30	-2

* 第3図参照

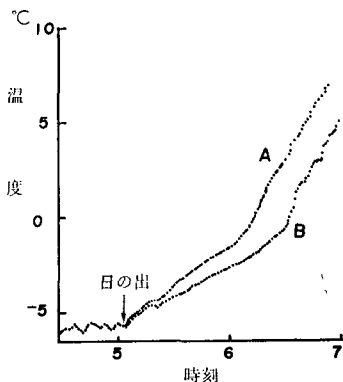
** 温度上昇速度Aは凍結している芽が朝日を受けてから 4°C に達するまでの時間を、Bは同じく 0°C に達するまでの時間を測定してきめた

上に記した霜日の日射後の融解速度は 1.2ϕ の太さのサーミスターを芽の中に挿入して測定したもので、測定感度があまりよくない。そのため、 0.2mm 銅—コンスタンタン熱電対をトドマツの芽に挿入し、6打点記録計で自記させた。実験は苫小牧演習林の平坦地で行なった。その測定記録を第5図に示す。第5図には、朝日を受けるトドマツの芽、同じ場所で障立で朝日をさえぎられた芽について、日の出後の温度上昇速度を比較して示す。この図に示したように、朝日をうけたトドマツの頂芽の融解速度(A)は $0.08^{\circ}\text{C}/\text{分}$ (-5°C から -0.5°C まで)、スチロポールの障立で日射をさえぎったトドマツの頂芽の融解速度(B)は $0.06^{\circ}\text{C}/\text{分}$ (-5°C から -0.5°C まで)であった。なお、 -5°C から 4°C までの間の温度範囲における温度上昇速度をとってみても朝日を受けたもの $0.15^{\circ}\text{C}/\text{分}$, 日蔭のもの $0.09^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった。この霜日は4月27日であったので芽の最低温度は -6°C を記録したが被害を受けなかった。

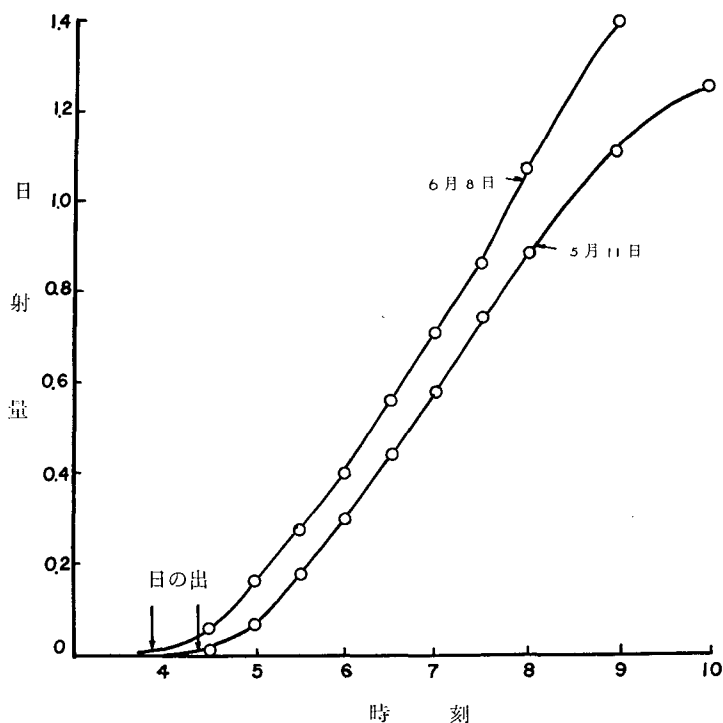
5月3日の霜日には頂芽は -2°C までさがったが、この時の日射のあたっている頂芽の融

解速度は $0.05^{\circ}\text{C}/\text{分}$ (-2°C から -0.5°C まで) であったし、日射をさえぎられた頂芽のそれは、 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった。

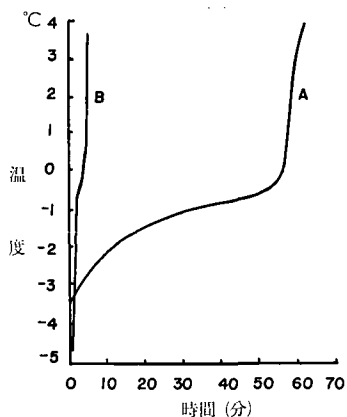
霜日における朝日による温度上昇の程度をさらに詳細に調べた。1967年5月11日の札幌气象台において観測された朝日の日射量は5時において $0.17\text{ cal}/\text{cm}^2/\text{分}$ であった。トドマツを -3.5°C で1時間凍結してから低温室の電源をきって冷却をとめた状態で、200 W フラットランプで40 V で50 cm の距離から凍結しているトドマツの芽に照射するときの輻射量は $0.27\text{ cal}/\text{cm}^2/\text{分}$ であった。この輻射量は5月11日の6時頃(日の出1時間半後)の日射量に、あるいは6月8日の5時30分頃(日の出1時間半後)の日射量に相当する(第6図)。このばあい、 -3.5°C から芽の氷点(-0.8°C)までの融解速度は $0.05^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった(第7図)。もちろん、このていどの融解速度では芽は害されなかった。50 V で30 cm の距離から -4.5°C の温度で凍結したトドマツの頂芽に照射($1.1\text{ cal}/\text{cm}^2/\text{分}$)したときの融解速度は $1.8^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった(第7図)。このばあいの輻射量は5月11日



第5図 霜日におけるトドマツの頂芽の温度上昇曲線 昭和42年4月27日(苫小牧演習林)
A: 直射日光をうけた芽,
B: スチロポールで日射をさえぎった芽



第6図 札幌における5月11日と6月8日の日の出後の日射量 $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{分}$ であらわす



第7図 凍っているトドマツの頂芽に人工光線を照射したばあいの融解曲線

A: -3.5°C で凍っているトドマツの頂芽に人工光線で $0.27\text{ cal/cm}^2/\text{分}$ の照射量(6月8日の日の出1時間半後の照射量)をあたえたときの融解曲線(融解速度: $0.05^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、B: -4.5°C で凍っているトドマツの頂芽に $1.1\text{ cal/cm}^2/\text{分}$ の照射量(6月8日の日の出4時間後の照射量)をあたえたときの融解曲線(融解速度: $1.1^{\circ}\text{C}/\text{分}$)

Aのばあいは無害であったが、Bのばあいには5本のトドマツ中1本がかかるく害されたが他の4本は正常であった

の9時頃(日の出後4時間半),あるいは6月8日の8時頃(日の出後4時間)の日射量に相当する(第7図)。このばあいは5本のトドマツ中1本がかかるく害されたが、他の4本はまったく正常であった。

3. 斜面の部位による被害の差

6月11日と12日に百葉箱中で約 -4°C の最低温度が記録され、ひどい霜害があらわれたが、測定装置の故障のためこの時の温度記録をうることができなかった。この試験地にはトドマツが5月19日に植栽されていたが、斜面の方位による被害の差は認められなかった。トドマツの芽の被害は両斜面とも中腹にあるNo. 2, No. 5(第3図)の高さ以下においてのみ認められた。なお、斜面の下部ほど被害は著しかった。

4. 斜面の方位による芽の開舒状況の差

南西斜面は土壤融解が北東面より早いので、5月末頃には芽の開舒の状態は北東面よりあるていど早かったが(第6表)、霜害時の6月11日ごろには両斜面における差はほとんど認められなくなった。

第6表 斜面の方位による頂芽の開舒状況の差(昭和41年5月31日)

	頂芽の芽鱗が破れていないもの数	頂芽の芽鱗が破れているもの数	開舒して約2cmに達しているもの数	合計
南西斜面	13 (18.3%)	13 (18.3%)	45 (63.9%)	71
北東斜面	24 (32.0%)	33 (44.0%)	18 (24.0%)	75

調査場所: 北大苫小牧演習林, 山の神事業区

IV. 考 察

1. 霜害におよぼす朝日の影響

霜害は耐凍性が低下している春や秋におこる凍害で、霜そのものが害をあたえるのではなく、霜はたんに植物体内に凍結をひきおこす引金の役目をはたしているにすぎない。実験条件下で急速に冷却されるばあいとちがひ、生物が自然条件下で冷却されるばあいには、体内に自然発生的に凍結がおきることはまれである。植物体の表面の露が凍っていわゆる結霜すると、これが体内に凍結を誘引する。たとえ凍っても植物が凍結に耐えられれば死なないことから考え、霜害は凍れば害を受けるような耐凍性の低い状態にある植物が霜によって有害な凍結を強制されておるものと考えられる。

植物が凍結状態で耐えられる限度をこえて冷却されたときには、融解速度のいかにかわらず害を受ける。耐えられる限度をこえ冷却されていないときでも、急速に融解されると害を受ける。一般に耐凍性が高いものほど急速融解に耐えられる。耐凍性が高まった冬の木の皮層組織の切片を水に浸して -30°C や -70°C の温度まで凍結状態で冷却してから、または -30°C から液体窒素中に入れたのち、 30°C の温水中に入れて急速に融解させても害を受けない³⁾。組織切片でなくヤナギ、ポプラ、シラカバなどの冬の枝では、 -15°C 以上の温度で凍結させてから温水中に入れて急速にとかしても害を受けないが、 -20°C 以低で凍結したものを温水中で急速にとかすと死ぬ^{4,5)}。しかし、 -20°C 以低に冷やされたものでも -5°C まで一度あたためてから温水中に入れたばあいには害を受けない。

しかし、本実験のように、 -4°C での短時間の凍結にしか耐えられない耐凍性の低い開舒期のトドマツの芽では、融解速度が大きいつきには著しい害を受ける。しかし、トドマツの芽に対する融解速度の影響は開舒前後の耐凍性の変化と関連してかなり異なる。

今田、武藤²⁾の結果と同様に、本実験でも凍結したトドマツを5月中旬～下旬の日中の直射日光にさらすと芽は大きな害を受けた。これは凍結した芽を日中の直射日光にさらしたばあいであつて、この実験結果から、ただちに朝日の直射を受ける芽が朝日をさえぎられた日蔭の芽よりも害が著しいと結論することはできないように思う。これを結論するまえに、自然状態で実際にトドマツの芽が朝日をうけてどのていどの速さでとけ、どのていどの害を受けるかを知ることが必要である。実験結果によれば -4°C で凍結したトドマツを5月下旬の午後2時頃、外気温が $20\sim 22^{\circ}\text{C}$ の直射日光にさらしたばあひの融解速度が約 $2.4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ で芽は著しい害を受けたし、 5°C の水中に入れたときは $4.4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の融解速度で大部分の芽や幹は枯死した。しかし、 0°C の空中でゆっくりとかすか ($0.07^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、 20°C 以低の温度の空中でとかすとき (約 $0.9^{\circ}\text{C}/\text{分}$) は芽も幹もわずかししか被害を受けなかった。被害をあたえる限界融解速度は開舒時期によってあるていど異なるが、すくなくとも $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ より大きい融解速度のばあひに限られるようである。自然状態で霜害の多い5月中～下旬頃の日の出は4時～4時15分頃で、凍結したトドマツが朝日を受けて温度が上昇するときの融解速度は朝日を受ける時間の早晚によって多少ことなるが、北東斜面では約 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ である。朝日がおくれてあたる斜面の底部では

日の出後朝日があたるまでの温度上昇速度は約 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{分}$ である。朝日がおそくあたるほど朝日を受けてからの融解速度は多少大きくなる傾向が認められるが、朝日があたるときの芽の温度は 0°C に近づくか、 0°C 以上になるので朝日の有害な影響は受けにくくなる。

凍っているトドマツに霜害時期の日の出1時間後の日射量に相当する熱量を人工的に照射してとかしても被害を受けなかった。このばあいの融解速度は約 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった。さらに日の出4時間後の日射量に相当する熱量を人工的にあたえたときには、4本のトドマツ中、1本のみがわずかな被害を受けた。なお、このばあいの融解速度は約 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であった。以上の実験事実から考えて、すくなくともトドマツの芽では、霜日に朝日があたって被害がますということとは考えられない。

凍結している植物に対する加温速度の影響として、凍結温度からその組織氷点まで温度をあげるときの速さ、組織氷点付近における融解速度、融解後の加温速度のすくなくとも3つの要因が関係していると考えられる。 -4°C で凍っているトドマツの芽を芽の組織氷点に相当する濃度の食塩水中に直接入れて約5~10分間そこにおいて、細胞内にあるていど吸水させてから、 5°C の水中に入れたときには、約60%のトドマツの頂芽は生存していた。しかし、食塩水中に1分間入れておいてから、 5°C の水中に入れたときには全ての芽が死んだ。これらの事実から、 -4°C から -1°C の食塩水中に入れて急速にあたためても、また -1°C から 5°C の水中に入れても、かならずしも死なないことがわかる。急速融解の害は凍っている植物が組織氷点の温度で急速に吸水するときにおこるものと考えられる。

2. 斜面の方位と被害程度

著者は日射のよくあたる南斜面は雪融や土壌融解が速いので北斜面よりも地温もたかく、開封も早いので霜害を受けやすいと考えていた。実際に、これらのことを両斜面について測定してみると、たしかに南斜面は北斜面より融解も早く、地温も高く、5月初旬ごろには芽の動きも北斜面より早い、その後これらの差は谷が浅い丘陵のばあいにはかなりすくなくなる。しかし、谷が深い山岳地形の造林地では、雪融や土壌融解が1週以上もおくれる。実際植付は植栽可能な南や南西斜面から始められ、約7~10日おくれて北や北西斜面が植付けられる。

昭和41年6月11日、12日に北海道の十勝地方ではトドマツがひどい霜害を受けた。いろいろな植栽地で被害を調べたところ、ある高さから下の方は斜面の方位にあまり関係なく被害を受けているばあいが多かった。傾斜角が約 20° で道路と川をはさんで南・北斜面が相対している地形では、両斜面とも約50m(比高)までトドマツの芽は被害を受けていたし、斜面を約50m(比高)あがった所に樹高約5mのトドマツがあったが、その先端近くの芽も害を受けていた。さらに斜面のより上部では、トドマツの芽は被害を受けていなかったが、ワラビ、ゼンマイ、エンレイソウ、ノブドウなどは斜面の最上部(比高約90m)でも枯死していた。このことから、すくなくとも斜面の底部から70~90mの高さまで氷点下の気温になっていたことが想像される。山岳地形では冷やされた空気は停滞しやすいので、霜害のとき、すり鉢形地形のある高さ以下はどの斜面も害されると考えた方が妥当のように思われる。約 40° の急斜面でもかなりの高さまで被害を受けていた。もちろん斜面の下部、中だるみ地形および台地は斜面

の上部や急斜面のところよりも被害が著しかった。

一般に、北や北東斜面では、側芽が害されているが、頂芽の正常なものが多く、南や南西斜面では、頂芽や幹の先端部の害が多く、地際の幹の凍害は斜面の中腹まで認められるばあいが多かった。これらの事実は北や北東斜面では南や南西斜面より発芽がおくれるので、被害を受けてもそのていどがかかることを示しているように思われる。

以上の事実から考えて、霜害のばあいには、冷え込みのていど、その持続時間および発芽の状態がもっとも重要な要因であって、従来いわれていた朝日による融解の促進そのものの影響はほとんど問題にならないように思う。

霜害時における造林地での斜面の方位や斜面の各部位における最低、最高温度は測定されているが、こうした場所にあるトドマツの芽や幹の温度を連続的に記録した資料はまったくない。霜害の問題を解明するには、いろいろな植栽地での植物体各部位の温度と、植物体各組織の耐凍性の大きさや開舒時期の差を測ることが必要である。

V. 摘 要

霜害におよぼす朝日の影響を調べるために、5年生トドマツを用いて実験室で融解速度と被害の関係を、現地で霜日に朝日があつたばあいの融解速度を調べた。

凍害におよぼす融解速度の有害な作用は芽の開舒が進むにつれて著しくなる。芽が開舒する直前のトドマツでは、 -4°C で1~2時間凍結後、 15°C 以下の空中でゆっくりととこしたとき(融解速度: $0.8^{\circ}\text{C}/\text{分}$)には害がほとんど認められなかったが、約 20°C の外気温のときに直射日光にさらすか(融解速度約 $2^{\circ}\text{C}/\text{分}$)、または 5°C の水中に直接浸したとき(融解速度約 $4^{\circ}\text{C}/\text{分}$)には、トドマツの芽は著しい害を受けた。しかし、 -4°C で凍結したトドマツを組織氷点に近い温度に約10分間おいてから 5°C の水中に入れても害を受けなかった。さらに -4°C で凍結後、 -3 、 -2 、 -1°C および 0°C まで温度をあげ、1時間各温度においてから 5°C の水中に入れた。その結果、 -2°C 以下の温度から 5°C の水中に直接入れたときには著しい害が現われることがわかった。

現地で霜日に凍っている芽に朝日があつたとける速さは約 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ である。融解速度が $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ をこえないときには、開舒期のトドマツは有害な影響をほとんど受けないという実験事実、および霜害は朝日のよくあたる北東斜面より南西斜面の方が被害が多いという事実から考えて、霜日に朝日が有害な作用をおよぼすことは非常にすくないものと考えられる。

文 献

- 1) Iljin, W. S. 1933 Über den Kältetod der Pflanzen und seine Ursachen, *Protoplasma*, **20**, 105-124.
- 2) 今田敬一・武藤憲由 1958 北海道主要造林樹種の凍害に関する研究 (II). 凍害と朝日の影響, 北大演習林研究報告, **19**, 61-78.
- 3) 酒井 昭 1966 超低温における植物組織の生存 IV. 急速冷却, 急速加温した細胞の生存の機構, 低温科学, 生物篇, **24**, 1-13.
- 4) Туманов, И. И. и Красавцев, О. А. 1962 Изучение механизма отмирания растений при быстром их оттаивании. Физиология Растений, **9**, 718-729.

- 5) Туманов, И. И. и Красавцев, О. А. 1962 Влияние быстроты оттаивания на выживание витрифицированных клеток и закаленных растений. Физиология Растений, 9, 595-606.

Summary

To clarify the effect of sunshine in the early morning upon the spring frost damage, the critical thawing rate causing damage and the thawing rates of buds exposed to sun beams immediately after sunrise in the field were investigated using 5-year-old Marie's fir.

In Marie's fir immediately before unfolding, no damage was observed both in buds and stems, when thawed slowly in the air at 10 to 15°C (thawing rate: 0.6°C/min. to 0.8°C/min.) after freezing at -4°C for 1 to 2 hours, while the buds and stems were seriously damaged when thawed rapidly by immersion into the water at 5°C (thawing rate: 4.4°C/min.) or exposure to sun beams at 14:00 hours in the middle of May (2.4°C/min.). It was noted however that when the frozen buds at -4°C were kept in the air at 0°C for 45 minutes before being rapidly rewarmed, they suffered hardly any damage.

In the field, the thawing rates of the buds exposed to sun beams immediately after sunrise were within 0.2°C/min., which was not great enough to cause damage.

From these facts, it may reasonably be considered that sun beams in the early morning have hardly any harmful influence on the frozen buds and stems of Marie's fir in frosty mornings in spring.

図 版 説 明

トドマツの凍害におよぼす融解速度の影響

実験期日：5月28日，撮影期日：9月20日

A：-4°Cで1時間凍結後，0°Cの空中に1時間おいてから10°Cの空中に出したもの

B：-4°Cで1時間凍結後，-2°Cの空中に1時間おいてから5°Cの水の中に入れたもの

C：-4°Cで1時間凍結後，-1°Cの空中に1時間おいてから5°Cの水の中に入れたもの

D：-4°Cで1時間凍結後，0°Cの空中に1時間おいてから5°Cの水の中に入れたもの

