



Title	トドマツ生材の凍結温度
Author(s)	石田, 茂雄; ISHIDA, Shigeo
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 19(1), 123-144
Issue Date	1958-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20757
Type	departmental bulletin paper
File Information	19(1)_P123-144.pdf



トドマツ生材の凍結温度

石田茂雄

FREEZING POINT OF GREEN TODOMATSU-WOOD

By

Shigeo ISHIDA

目次

I. 序	123
II. 実験方法	124
III. 実験結果とその考察	127
IV. 要約	141
参考文献	142
Summary	143

I. 序

木材中の水分が凍ると、その物理性が変化し、実用上にいろいろの問題を起す。たとえば、北海道の冬季間の凍結材の製材作業は、その能率、動力消費、製品の品質などの点で、かなり不利な条件の下におかれている¹⁾。また、凍った組織を内包する丸太や樹幹などでは、その内部に複雑なストレスがはたらき、このため、たとえば凍裂^{2),3)}のような好ましくない現象が誘発されるものと考えられる。これらの問題を解決するためには、木材凍結の実相をあきらかにしなければならない。すなわち、水分を含む木材組織の凍結する温度、そのための諸条件などについて十分検討する必要がある。

この報告は、上に述べたような意味からおこなった研究の一部の成果であつて、おもに、生材組織の凍結温度に関するものである。

生物体の凍結現象については、北大低温科学研究所で、細密にして系統的な研究がおこなわれており、一連の貴重な成果が発表されている⁴⁾。筆者の実験は全くこれらの成果の導きによつて進められたものである。ここに記して関係者の方々に厚く謝意を表する次第である。

II. 実験方法

問題の意味と測定の基礎 はじめに、この報告の標題の意味について述べる。“生材”と云う言葉を、ここでは簡単に、伐採後あまり長い日時を経ていなくて、水分その他の条件が立木当時の状態と変わらない材と考えておく。もちろん、生きた材と云う意味ではなく、むしろ反対に完全に死んだ組織と考うべきであろう。形成層の部分や新梢の組織などはこの実験の対象から除外してある。生材の凍結温度とは、生材から取った搾汁の温度の意味ではなく、生材組織の中において、その水分が凍結する温度であつて、生材組織の凍結温度（凍結点あるいは氷点）と云つて差支えない。

生材組織の凍結点は、実験的に得られた資料組織の凍結曲線から求められる。生材組織の凍結曲線は冷却曲線の一種で、 0°C 以上の温度の資料を低温に曝露し冷却する場合に、冷却時間と組織の温度測定点の温度との関係から得られる曲線である⁵⁾。Fig. 1に生材組織の凍結曲線の一例を示し、二、三の説明を加えよう。

Fig. 1では、横軸に冷却時間、縦軸にテストピースの測定点の温度をしめす。曲線 *abcdef* が凍結曲線、*a* は温度および冷却時間の起点である。室温 *a* に保持してあつたテ

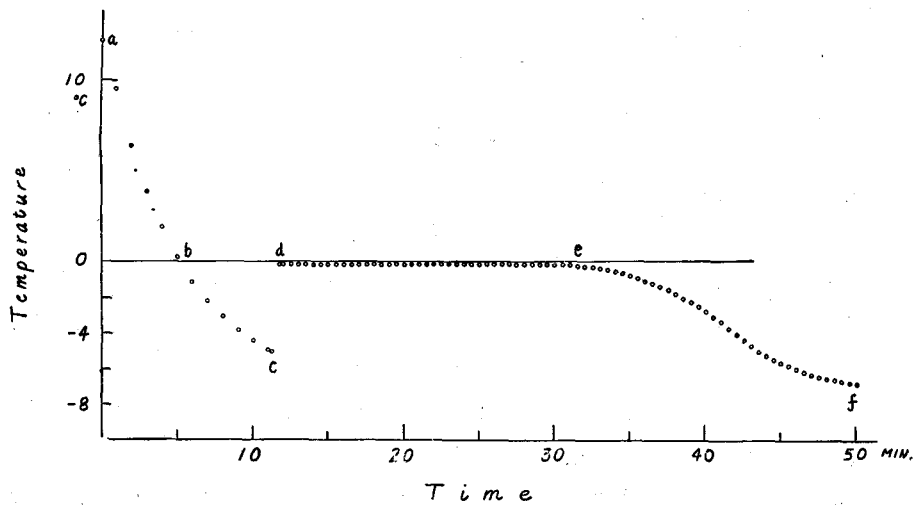


Fig. 1. A freezing curve (time-temperature curve) of sapwood. (specimen No. is A-8.3-5). The temperatures at each point of *a*, *b*, *c*, *d* and *f* of this curve mean;

- a*: initial temperature (room temperature)
- b*: 0°C
- c*: temperature at which super cooling state was broken, i.e., the freezing of specimen began from this temperature
- d*: freezing point of specimen
- f*: terminal temperature.

ストピースを硝子管で保護し、温度 -7.5°C の冷却媒体の中へ急に入れる。^{※1} 時間が経つにつれ、テストピースの温度は、はじめは急速に、後にはややゆるく下り、*b* 点 (起点から約5分後) において 0°C の線を通り、さらに降下を続けて *c* 点 (約12分後、温度約 -5°C) にきた時、とつぜん上昇して *d* に達する。*d* から *e* まで約20分間、テストピースの温度は一定値を保持するが、*e* 点付近から、はじめは徐々に、次第に急激に、やがて再び緩徐に降下してゆき、ついに冷媒温度 *f* に一致する。*b-c* は (厳密には *b* よりすこし後) 生材組織が過冷却されている区間、*c* はこの過冷却が破れた点、*d* に続く水平部分は凍結が進行し、潜熱を出している区間、*e* 付近からは単純な冷却がおこなわれている区間である。*d* ならびにそれに続く水平部分の示す温度が、この生材組織の凍結温度である。

実験材料 この実験の材料木として、北大の雨龍演習林内で、冬季に、トドマツの健全木 (凍裂なし) と凍裂木をそれぞれ一本ずつ伐採した。この時すでに樹幹内部の自由水は凍結し^{※2} 凍裂は開孔していた。伐採した樹幹のうち健全木 (胸高直径 26 cm, 樹高約 20 m, 樹令約 100 年) からは、地上高 0.3 m, 2.3 m, 4.3 m, 8.3 m 付近から、それぞれ厚さ 10 cm の円板を切りとつた。凍裂木 (胸高直径 25 cm, 樹高 23 m, 樹令約 100 年。凍裂は 1 本あり、地上約 7 m から 10 m にわたっていた) からは、地上高 8 m の位置から厚さ 10 cm の円板をとり、また、凍裂のない地上 4 m の部分からも同様の円板を切り取り、実験材にした。これらの実験材は、木取り後すぐに北大林学教室の実験室へ輸送し、測定にかかるまで (2~4 週間)、構内の雪の中に埋めておいた。これらの円板を、それぞれ実験開始の数日前に雪の中から掘り出し、大体 5°C の室温で徐々に凍結を解かした。その後、これらから、凍結温度測定用テストピースを作り、測定に供した。テストピースの取り方その形、寸法などを fig. 2 に示す。

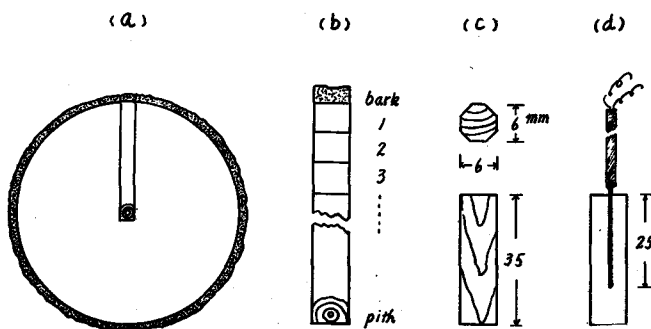


Fig. 2. Sketch showing method of cutting up specimens and showing their form and sizes.

※1 測定方法については後述。

※2 自由水の凍結は内眼的³⁾ その他の方法で判断される。

まづ、樹幹の所定の地上高の位置から木取つた円板の最小径に直交する一半径方向 (fig. 2-a) から, fig. 2-b に示す皮付きの小材片 (厚さ 7 mm, 高さ 35 mm, 半径長) を帯鋸で鋸断し, さらにこの小材片から fig. 2-c に示すようなテストピースを, 主として hand work で作製した^{*}。テストピースの横断面はおおむね正八角形である。テストピースの番号は, 辺材から心材に向つて数えた当該 (Junction が挿入されている) 年輪番号であらわした。最後のテストピースは, その中心に髓を含んでいる。Thermo-junction はなるべく一年輪の中央附近に挿入されるようにした。ただし, 年輪幅のせまいところでは挿入位置が 2~3 年輪にわたつた場合もある。

実験装置と冷却過程の測定 テストピースの温度の測定には銅—コンスタンタン熱電対をもちいた。熱電対は, 尖端部の直径が 0.7 mm の注射針型のもので, これを fig. 2-d に示したように, テストピースの片側から 25 mm の深さに挿入した。熱電位差の測定には島津製作所製の標準反照検流計 (感度 1.9×10^{-10} A) をもちい, 適宜, 付属の shunt を使用した。ここに報告する測定では, スケール上の読みが温度 1°C に対し約 13 目盛であつた。冷却には食塩と細氷の寒剤を用い, これを魔法ビンの中に入れてその温度を保持した。冷却装置の縦断面を fig. 3 に示す。なお, この装置は, 青木氏⁶⁾ の冷却装置をやや簡単にしたものである。

fig. 3 に示すように, 寒剤を, 口径約 10 cm の魔法ビン (a) の中に入れ, 攪拌棒 (d) を以て適時に攪拌し, 要すれば液の交換をおこなつて所要の温度を保つた。冷却速度は, 組織の凍結点, 過冷却などに影響を与えるから⁷⁾, これを適当な値にしなければならない。この実験では, 予備実験の結果, 0°C 付近における冷却速度を毎分 2°C を越えないことを原則とした。寒剤の中に挿入してある 2 本の保護管 (f, g. 内径は 35 mm と 20 mm) は, この実験の寒剤温度の下において所要の冷却速度をあたえるためのものである。テストピースは小さい方の保護管の中へ, Thermo-junction を挿入したまま静かに図の位置まで入れられる。この小さい保護管の底には, 図に示すように, 必要に応じて組織片の過冷却を破るための氷片を凍りつかせてある⁸⁾。冷却温度 (冷媒温度) は -8°C 前後にした。

テストピースが, 冷却装置の外から fig. 3 に示す位置に入れられると, その温度はだんだん下つて行き, やがて凍結がはじまり, 温度は上昇する。このような, 温度変化の時間的経過は, 原則として 15 秒おきに, ガルバのスケール上に読みとられた。この値を図示したのが, すでに述べた凍結曲線である。一部の測定では, 過冷却が自然に破れるのを待つたが, 他の測定では過冷却を人為的に破つた。すなわち, テストピースを 1~1.5

^{*} テストピースの形, 大きさは, 作製技術の面で必ずしも規定どおりに行かなかつた。とくに, 材部に, 凍裂部のような⁹⁾ 割目がある場合にはいろいろと問題がでてきた。このために, Fig. 2-a に示した位置より幾分はづれた位置から木取つたテストピースが若干ある。

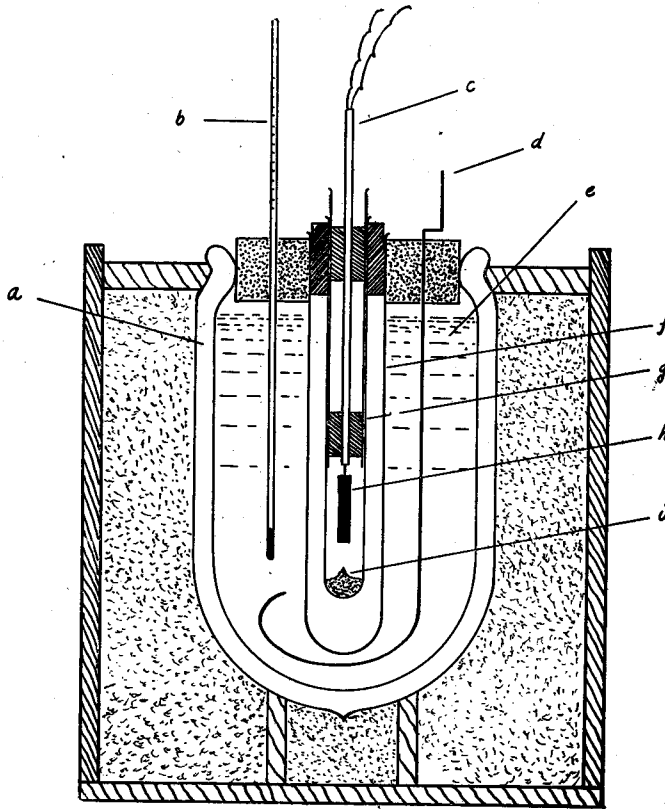


Fig. 3. Diagram of apparatus used for cooling specimen.

- | | |
|--|-------------------|
| a: Vacuum bottle | b: Thermo-meter |
| c: Thermo-junction | d: Aditator |
| e: Freezing mixture (NaCl+ice) | f, g: Glass tubes |
| h: Test specimen | |
| i: Ice needle used for breaking super cooling of specimen. | |

cmほど下に押し下げて保護管の底の氷片に、暫時接触させた。人為的に過冷却を破つた温度は大体 -3°C 付近であつた。

III. 実験結果とその考察

はじめに、測定成績を掲げる。table I には、A-樹幹(健全木)の樹高のことなる3カ所から取つた材部のテストピース、および1カ所から取つた樹皮部のテストピースについての測定成績と、B-樹幹(凍裂木)の凍裂のある部位および無い部位から取つたテストピースについての測定結果を示す。table II には table I の要約を示す。

Table I. Freezing point of wood tissue cut
from green Todomatsu trunk.

Tab. I-1. Trunk A: Without frost crack.

Height above ground	Specimen No.: No. of annual rings sap to pith	Cooling rate	Super cooling ^{※1}	Freezing point	Moisture content ^{※1}
m		°C/M	-°C	-°C	%
0.3	Bark	1.3	3.2*	1.1	
	2	0.9	2.7*	0.2	186
	4	1.0	2.7*	0.2	195
	6	1.1	3.0*	0.2	184
	8	1.1	3.0*	0.3	156
	10	1.2	2.9*	0.2	158
	13	2.1	3.6*	0.5	82
	22	2.1	4.4*	0.5	45
	24	1.7	2.5*	0.4	54
	27	2.0	4.4*	0.4	67
	36	1.4	3.1*	0.5	94
	42	1.7	0.8	0.5	62
	69	1.0	1.0	0.3	143
	80	1.4	3.3*	0.5	95
	85	1.1	2.8*	0.3	155
	Pith (95)	1.2	3.3*	0.3	116
4.3	Bark	0.8	7.1	1.2	
	2	1.0	2.8*	0.3	220
	4	2.1	1.6*	0.3	193
	6	1.0	2.1*	0.3	150
	8	1.7	1.5*	0.3	166
	10	1.3	2.6*	0.3	49
	12	1.6	2.4*	0.3	90
	13	1.2	2.3*	0.5	91
	14	1.5	5.0	0.4	90
	19	1.3	5.8	0.3	113
	22	0.8	1.8*	0.3	147
	26	1.3	7.0	0.6	153
	35	1.0	2.2*	0.8	137
	52	2.0	2.5*	0.5	76
	63	1.0	2.9*	0.4	75
69	0.5	0.6*	0.5	105	
	Pith (78)	0.5	2.1*	0.6	123

Height above ground	Specimen No. : No. of annual rings sap to pith	Cooling rate	Super cooling ※1	Freezing point	Moisture content ※2
m		°C/M	-°C	-°C	%
8.3	Bark	1.8	6.3	0.9	
	2	1.4	6.5	0.1	192
	4	1.6	4.5	0.1	191
	6	1.4	5.5	0.1	191
	8	1.6	6.2	0.2	171
	10	2.5	6.2	0.3	112
	12	2.0	4.8	0.2	90
	14	2.2	6.5	0.5	103
	16	2.0	4.6	0.4	82
	18	2.5	5.3	0.6	64
	19	1.3	5.9	0.3	71
	20	2.0	7.4	0.7	69
	24	2.1	7.2	0.7	71
	Pith	1.1	6.6	0.7	153
2.3 Bark only	Bark 1	0.8	2.8*	1.2	
	" 2	1.0	3.2*	1.6	
	" 3	1.0	3.0*	1.4	
	" 4	1.2	5.0*	1.3	
	" 5	1.0	3.3*	1.5	
	" 6	1.2	3.2*	1.3	
	" 7	1.1	3.3*	1.5	
	" 8	1.2	2.7*	1.0	
	" 9	1.0	2.3*	1.2	
	" 10	1.3	2.6*	1.2	

Tab. 1-2. *Trunk B: With a frost crack from 7 to 9 m height above ground.*

Height above ground	Cardinal direction	Specimen No.: No. of annual rings sap to pith	Cooling rate	Super cooling	Freezing point	Moisture content
m			°C/M	-°C	-°C	%
4.0 Normal part	North side	2	0.8	2.9*	0.2	210
		4	1.0	3.1*	0.2	215
		5	1.1	3.0*	0.4	200
		7	0.9	2.8*	0.4	140
		9	0.8	3.2*	0.4	101
		10	1.2	3.1*	0.3	94
		11	1.4	3.0*	0.2	88
		14	1.1	2.9*	0.4	95
		16	1.5	3.3*	0.4	69
		18	1.5	4.2*	0.5	60
		21	1.4	3.0*	0.5	56
		24	1.8	2.5*	0.5	70
		26	1.3	2.6*	0.4	75
		29	1.6	2.8*	0.5	55
		31	1.8	3.1*	0.6	49
		34	1.1	2.4*	0.4	100
		38	1.3	2.3*	0.3	70
		41	1.0	3.2*	0.3	95
		45	1.1	3.0*	0.4	74
		48	0.8	2.5*	0.5	65
		55	0.6	2.6*	0.5	105
		60	0.6	2.9*	0.4	115
71	0.8	3.1*	0.4	208		
		Pith	1.0	3.0*	0.5	203
	South side	2	1.0	2.8*	0.2	180
		5	1.0	2.1*	0.2	175
		7	0.8	3.0*	0.2	200
		9	1.2	2.5*	0.3	150
		12	0.8	2.2*	0.2	151
		14	1.2	2.4*	0.3	110
		16	1.7	3.1*	0.4	95
		18	1.4	3.2*	0.4	85
		21	1.1	2.9*	0.4	78
		23	1.3	2.8*	0.5	65
		26	1.5	3.2*	0.4	59

Height above ground	Cardinal direction	Specimen No.: No. of annual rings sap to pith	Cooling rate	Super cooling	Freezing point	Moisture content
m			°C/M	-°C	-°C	%
	South side	30	1.8	3.0*	0.5	70
		32	2.0	2.8*	0.3	75
		34	1.6	2.9*	0.5	76
		38	1.3	3.0*	0.3	80
		43	1.1	2.2*	0.4	50
		46	1.5	2.1*	0.3	65
		49	1.4	3.0*	0.4	63
		53	0.9	3.1*	0.3	76
		58	1.1	2.5*	0.5	95
		65	1.0	2.9*	0.6	185
		73	1.1	3.1*	0.4	135
8.0 Cracked part	North side	1	1.2	6.4	0.2	150
		3	1.3	6.7	0.4	190
		5	1.1	5.7	0.3	200
		7	1.2	5.7	0.2	210
		9	1.4	6.2	0.1	110
		12	1.8	5.4	0.3	89
		14	1.7	4.8	0.5	75
		16	1.5	6.5	0.7	54
		19	1.4	4.6	0.5	65
		21	1.3	3.5	0.3	48
		24	1.6	5.3	0.4	43
		27	1.1	4.9	0.4	85
		29	1.0	7.0	0.3	131
		30	0.9	7.1	0.4	175
		34	1.0	6.5	0.4	140
		38	1.1	6.5	0.3	170
		41	1.2	5.1	0.4	151
	54	1.1	7.1	0.6	146	
	Pith	1.0	6.8	0.5	215	
	south side	2	1.0	3.1*	0.3	130
		5	1.0	2.8*	0.4	181
		8	1.2	3.2*	0.2	169
		10	1.4	2.9*	0.2	150
		13	1.7	2.1*	0.2	126

Height above ground	Cardinal direction	Specimen No.: No. of annual rings sap to pith	Cooling rate	Super cooling	Freezing point	Moisture content
m			°C/M	-°C	-°C	%
8.0 Cracked part	South side	16	1.6	3.0*	0.5	89
		19	1.5	2.5*	0.6	95
		22	1.8	3.0*	0.5	78
		24	1.5	3.1*	0.3	68
		26	1.3	2.8*	0.4	71
		29	1.6	2.6*	0.3	70
		33	1.0	3.2*	0.4	120
		38	1.0	3.1*	0.3	150
		43	1.1	3.2*	0.3	170
		45	1.2	2.9*	0.4	140
		49	0.8	2.5*	0.4	195
		53	0.9	2.8*	0.3	201
		58	0.5	3.5*	0.3	190

Note: ※1 Specimens inoculated artificially are marked with an asterisk (*).

$$\text{※2 Moisture content (\%)} = \frac{W_g - W_0}{W_0} \times 100$$

here, W_g : Weight in green.

W_0 : Weight in oven dry.

Table II. Summarized values from Tab. I.

Height above ground	Cooling rate	Super cooling	Freezing point	Moisture content	
m	°C/M	-°C	-°C	%	
[Wood]					
Normal trunk	0.3	0.9~1.4~2.1	2.5~3.2~3.6*	0.2~0.4~0.5	45~119~195
	4.3	0.5~1.3~2.1	1.8~2.2~2.9*	0.3~0.4~0.8	49~124~220
	8.3	1.1~1.8~2.5	4.5~5.6~7.4	0.1~0.4~0.7	64~120~192
Cracked trunk	4.0 (N)	0.6~1.2~1.8	2.4~2.9~4.2*	0.2~0.4~0.6	49~109~215
	4.0 (S)	0.8~1.2~2.0	2.1~2.8~3.2*	0.2~0.4~0.6	50~106~200
	8.0 (N)	0.9~1.3~1.8	3.5~5.9~7.1	0.1~0.4~0.7	43~129~215
	8.0 (S)	0.5~1.2~1.8	2.1~2.9~3.5*	0.2~0.3~0.6	70~133~201
Total	0.5~1.3~2.5	3.5~5.8~7.4	0.1~0.4~0.8	43~119~220	
		2.1~2.8~4.2*			
[Bark]					
2.3	0.8~1.1~1.8	2.3~3.1~5.0*	0.9~1.3~1.6		

*: Artificially inoculated.

Moisture content A-樹幹には凍裂がなかつたが、散在的に水喰材³⁾があらわれた。地上高 0.3, 4.3 および 8.3 m の各断面の、この測定におけるテストピースの平均含水率は、何れも約 120%、また、B-樹幹の凍裂部の含水率は、南北ともに平均約 130%、非凍裂部のそれは前者より約 20% 低い値を示している。この実験全般を通じて、心材からとられたテストピースの含水率は、ほとんどが 60% 以上であり、トドマツの正常心材³⁾のそれに比べ、かなり高い値を示した。A, B 両樹幹とも測定部に腐朽はみられなかつたが、B の水喰材部、A の髓心付近には、やや著しい暗褐色の着色がみられた。B 樹幹の凍裂部には小さな肉眼的な割目が多数あらわれ、樹幹の凍結時には氷がつかつていた²⁾。しかし、この実験のテストピースには、このような割目は含まれていないから、テストピースの凍結温度の測定に關与した水分は、組織の中に含まれていたものに限られ、肉眼的に認められるような割目の中の水分は關与していないものと考えられる。

Cooling rate 冷却速度は、テストピースの熱容量、熱伝導度、冷却温度その他に關係し、したがつて、ピースの大きさ、含水率、空気層の厚さ、寒剤温度その他に關係する。冷却速度の大小は、生組織の凍結曲線のタイプに複雑な影響を及ぼすものとされているが^{6), 9)}、ここで問題にしている木材の凍結温度に対しても影響を与える。予備実験の結果によれば、一般に、資料の平均含水率が約 50% 以上あれば、0°C における冷却速度が 2.0°C/min 以下において、その値が変化しても略々同じ凍結温度が得られるが、しかし、これにはさらにテストピース内部の含水率分布の關係を考えに入れなければならないようである。冷却速度がこの値を越して大きくなつてくると、凍結曲線の平坦部の長さが短くなり、かつ、その示す温度すなわち組織の凍結点が低くなつて来る。冷却速度がさらに大きくなると平坦部はあらわれず、線の単なる折れ曲りのような形となる⁶⁾。一方、含水率がトドマツの生材としての非常に低い値すなわち 30% 付近まで下ると、冷却速度が、上掲の値より低い場合でも普通には平坦部があらわれない。しかし、平均含水率 30% 付近でも、あきらかに平坦部を示すこともある。これは、ピース内部の含水率分布の不均一に基因する現象ではないかと考えられる。上に掲げた測定値では、冷却速度の全平均が 1.3 °C/M であつた。冷却速度のムラは、含水率のムラに主として基因し、またテストピースの大きさ、形のムラにも影響されているものと考えられる。全体を通じて 2.0 °C/M を越えるものが数例あるが、何れも平坦部があきらかにあらわれ、かつ、ほとんど同じ温度がすくなくとも 2 分以上経過したものである。

Super cooling A-樹幹と B-樹幹の、それぞれ一部の測定では、自然に過冷却が破れるのを待つた。A の地上高 4.3 m、B の凍裂部分の北側についての測定がそれである。この場合、冷却をはじめから 10~20 分で過冷却が破れた。この実験では、A, B 両者の間に、過冷却が破れる温度についてはつきりした違いはみられなかつた。そこで両者を

併せた数値についてみると*, 平均 -5.8°C で, -3.5 から -7.4°C の間にあつた。なお, この外に非常に高い温度で過冷却の破れた例が二つ (A の 0.3 m 断面の No. 42 と 69) あつた。過冷却が自然に破れるのを待つとかなり長い時間を要するので, 凍結温度の測定を主な目的とするこの実験の大部分の測定では, すでに述べたような方法で人為的に過冷却を破つた。材部の場合, テストピースを氷に接触させ, 植氷してから $1\sim 2$ 秒で破れた。しかし, 樹皮ではなかなか破れないことがあり, 氷に接触してから 30 秒位で破れたもの (fig. 12), 3 分位でようやく破れたもの (fig. 13) があつた。数表に示した, 人為的に過冷却を破つた場合の数値はこの実験の実験条件を示す意味で掲げたものであるが, また, これによつて, すくなくとも, この程度の温度までは過冷却すると云うことは云えるわけである。

Freezing point 冷却速度や, 過冷却の破れ方が上に述べたような条件下で測定された凍結温度は, この実験全体についてみると, 材部が $-0.1\sim -0.8^{\circ}\text{C}$, 平均 -0.4°C , 樹皮は $-0.9\sim -1.6^{\circ}\text{C}$, 平均 -1.3°C であつた。材部の凍結温度を全部合併して, その出現状況を fig. 4 に示す。凍裂のある B-樹幹とそれのない A-樹幹の間にはあきらかな差は認められず, また, B の凍裂部と健全部との間にも差は認められなかつた。含水率と凍結温度の間には相関的な傾向がみられる。fig. 5 に両者の関係を示す。図の大体をみれば含水率が増すにつれて凍結温度が高くなる傾向がわかる。この理由の確かなことはわからないが, 予備実験の結果から判断すれば, 冷却速度の影響ではないと云えるので, 材組織の中における含水率分布の microscopic な違い, および, 溶液の濃度の相違にもとづくものと考えられる。このように考えると, 木材組織の凍結の様相は必ずしも単純なものではない筈で, 後に述べる一部の凍結曲線の複雑さも, 一応了解される。図の右下半部に散在する数個の測定値は, いづれも髄, あるいはそれに近い部分のものである。これらのテストピースは含水率がかかなり高く, 冷却速度は $1.5^{\circ}\text{C}/\text{M}$ 以下である。今, 髄の付近と辺材部の凍結温度を比較するために, 前者については, 髄を含むテストピースとそれに隣接するピースとの凍結温度を全円板について平均した値, 後者については, 材部の一番外側から三つ目までのテストピースの凍結温度を全円板について平均した値をとつてみると, 髄の付近は -0.48°C , 辺材は -0.24°C である。含水率は, 髄の付近が約 150% , 辺材が 180% である。幹の最外周と中心付近とにおける凍結温度のこのような違いは, 含水率や材組織構造の相違によるものと云うよりは, 原因は別のところにあるものと考えられ, おそらくは溶液の濃度の相違にもとづくものではなからうか。樹皮は, 測定数がややすくなく, またテストピースを取つた位置も限られているが, その凍結温度は材部よりかなり低く, その差が約 1°C に達した。

* この両者の外に自然に過冷却の破れた数例の値をも含む。

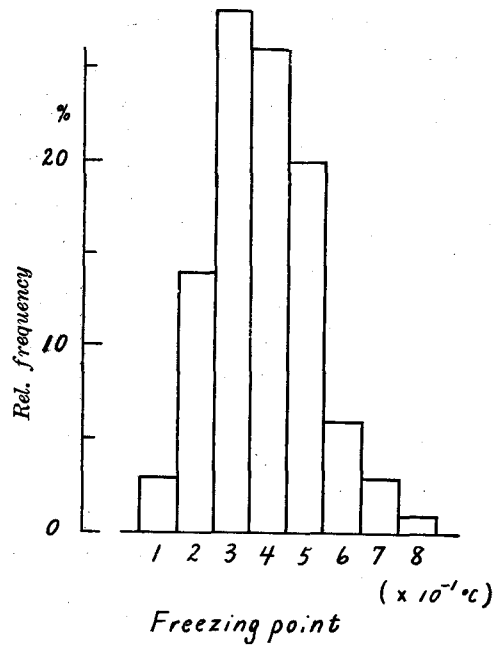


Fig. 4. A histogram showing variation of freezing point.

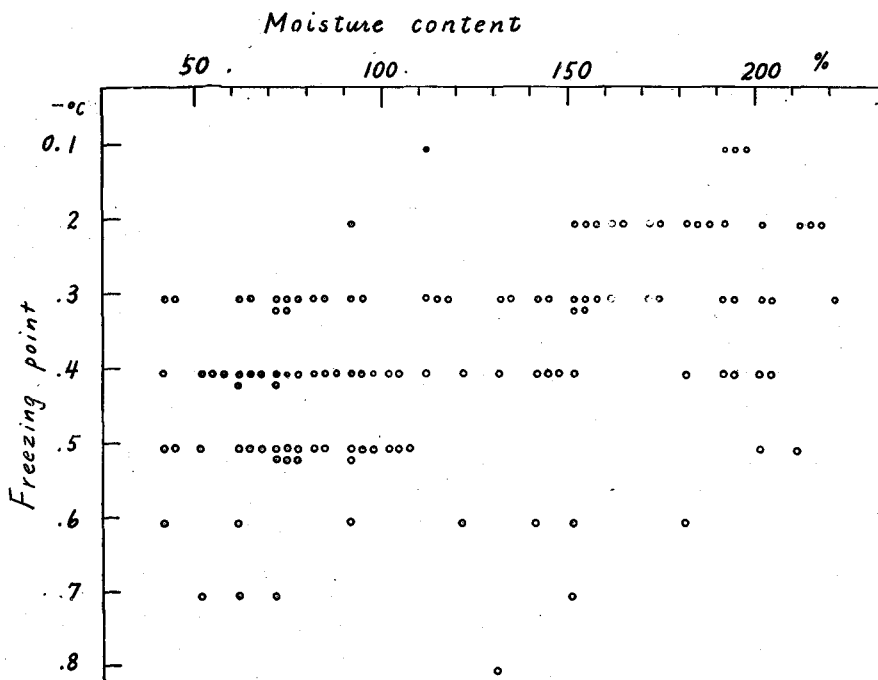


Fig. 5. Relation between the moisture content and the freezing point of specimens.

凍結曲線の形について 凍結曲線の、凍結をあらわす部分の形は、組織の凍結の進行状況を反映するもので、生物体組織の顕微鏡で観察された凍結過程と、それから得られた凍結曲線との対応については深く研究されている^{9),10)}。生材に関する筆者の実験から得られた凍結曲線は、当然のことながら死んだ組織の凍結曲線のタイプ、或いは完全な初凍結の行われた組織の再凍結曲線のタイプに属するものであつて¹¹⁾全体的な形から云えば同じ方法で測定した蒸溜水の凍結曲線の形と同じ種類のものである。fig. 1は樹幹の含水率の高い辺材部の凍結曲線で、曲線のどの部分も非常になめらかで、とくに凍結が進行中の平坦部では、かなり長い間、スケール上の spot が完全に静止していた。このような場合には凍結温度の読み取りは容易かつ確実で、凍結温度としての意味にもあいまいさがないものと考えられる。この場合ほどの平滑な曲線は、しかし、必ずしも一般的なものとは云えない。fig. 6~9などは、なめらかでないものの代表的な幾つかの例であるが、組織片の凍結に対応する曲線部分にこのような凹凸が生ずるのは、組織片の中で、断続的なあるいは不規則な凍結が進行していることを示すものであろう。その機作については、とくべつには調べなかつたので、死んだ組織で、かつ何回も、あるいは何十回も凍結を繰返している木材の凍結に際してもこのような事実が観察されることを以下の数例を参考にして述べておく。fig. 6は、fig. 1と同じ辺材組織であつて含水率191%、fig. 1のテストピースは外側から六番目の年輪、fig. 6は二番目の年輪である。しかし、このテストピース

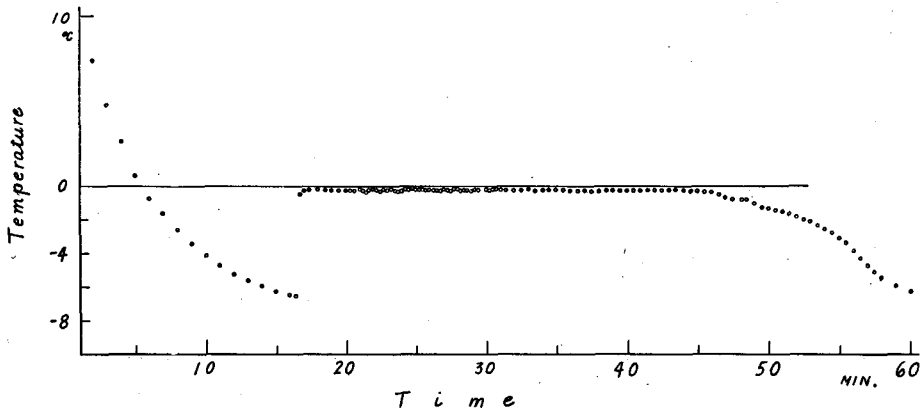


Fig. 6. A freezing curve of sapwood specimen (No. A-8.3-2).
Small vibrations and some of relatively large waves
appear on the plateau of the curve.

には、一番外側の年輪の材部が幾らかついている。過冷却が破れ、温度が上昇してから3分間ほど spot は静止していたが、その後、小さく揺れ*はじめ、その状態が約20分間つ

* 略々スケールの1目盛り内の振れ。この小さな振れは、曲線上の形としては青木氏¹²⁾の報告に似ている。

づいた。それから5分間ほど静止した後、前より長い週期で再び揺れ出したが、間もなく温度降下がはじまつた。温度が約 1°C 位下つた頃から spot の動揺はなくなり、温度降下の速さを増していった。この場合のように、長い平坦部の初期から中頃にかけての、小刻みの不規則な振れは、この実験では、一般に辺材部に多くみられた。また、平坦部の終り頃にあらわれたような、週期の比較的長い揺れ動きは辺材部に限らず、しばしば観察された。一方、凍結のはじめから、非常にゆつくりした波があらわれることがあつた。fig. 7 はそのもつとも甚だしいものの一例であつて、このような場合は、本来、凍結温度を一つの値で示すべきものでないかも知れないが、図の場合には高いところをとつた。曲線に凹凸ができた場合、その山の形が単なるトンガリの場合は別として、その他の場合は fig. 7 の例に準じて凍結点を決定した。fig. 8 と fig. 9 は過冷却が破れて温度が上昇し、一部の凍結が進んだ後、主な凍結に移つたと考えられる場合である。fig. 10 は、比較的含水率の低い場合の普通の曲線である。fig. 11 は樹皮の凍結曲線である。曲線はなめらかでなく、かつ、だらだらと下つて行く傾向がみられた。fig. 12 も樹皮の場合で、テストピースに氷を押しつけたが過冷却は急激には破れず、温度はしばらく同じ値を示した後、急に上昇し、曲線上に小さなトンガリ山を作つた。トンガリの一番高いところから一番低いところ(平坦部の始まりの位置)までの時間は約30秒であつた(ガルバの週期は7秒)。このようなトンガリは外に2例あつた。fig. 13 も樹皮で、テストピースに氷を接触して

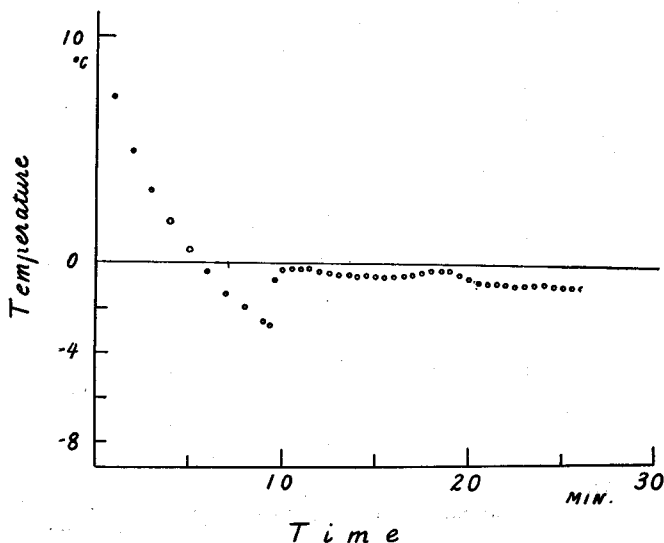


Fig. 7. A freezing curve with relatively large waves of the plateau of it. (specimen No. A-0.3-4).

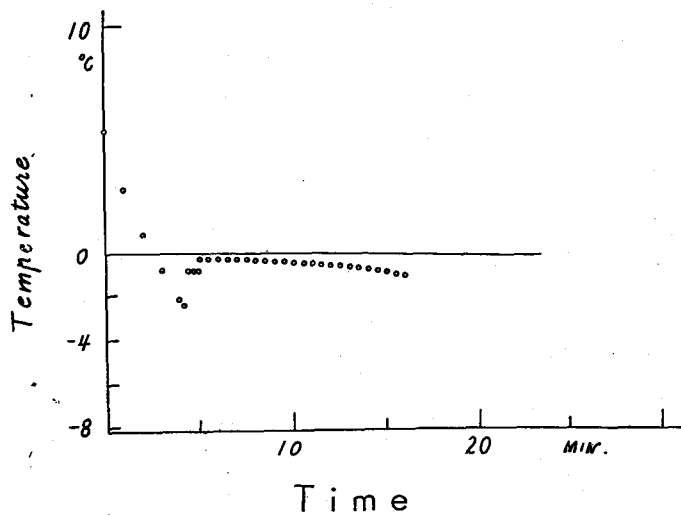


Fig. 8. A freezing curve showing abnormal form at beginning of plateau of it.

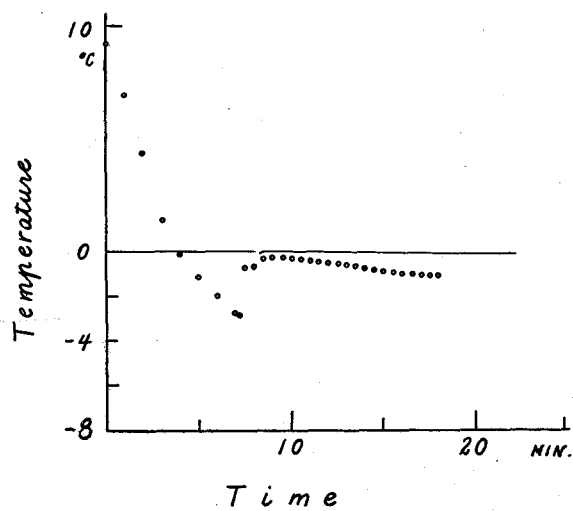


Fig. 9. A freezing curve showing abnormal form at beginning of plateau of it.

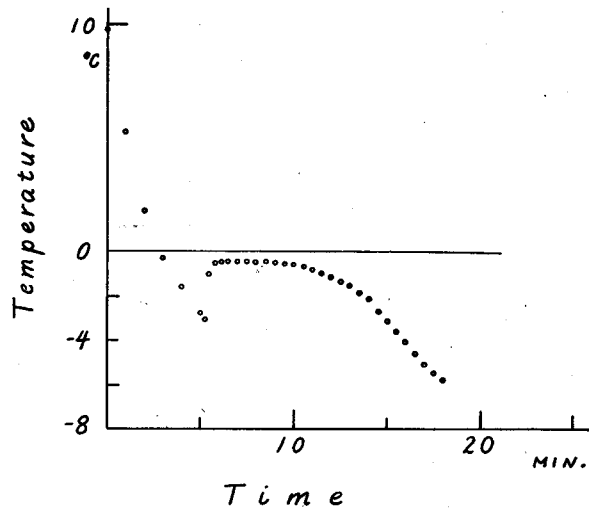


Fig. 10. Usual form of the freezing curve appearing in specimen with relatively low humidity. (specimen No. A-0.3-24)

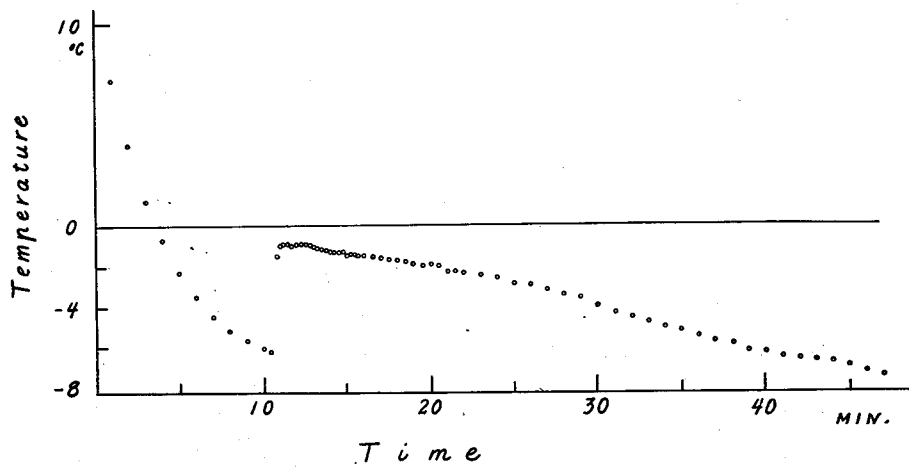


Fig. 11. A freezing curve of test specimen cut from bark tissue. (Specimen No. A-8.3-bark)

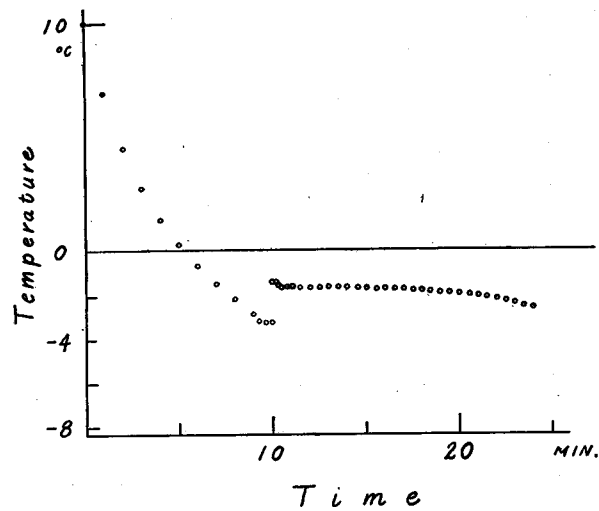


Fig. 12. A freezing curve of bark (No. A-2.3-bark-2). No change of temperature appears for about one minute after ice inoculated on bark tissue and then a small peak appears at beginning of plateau of this curve.

いるにもかかわらず、なお3分間ほど温度降下を続けた場合で、このようなことは外に一例しかなかつたが、一般に樹皮は材部に比べて過冷却を破ることがむづかしかつた。

以上、要するに、この実験の結果、トドマツの生材の凍結温度は 0°C から -1°C の間の値であることがあきらかになつた。別の実験によれば、繊維飽和点あるいはそれ以下の材では、ここに報告したような方法では凍結点は観察されなかつたから、この報告における生材の凍結点は、生材組織中の自由水の凍結点と

みなして差支えないであろう。この実験において、略々 $0\sim-1^{\circ}\text{C}$ の範囲に分散した凍結点があるが、テストピースの含水率の大小、すなわち自由水の多少と相関的關係を示すことは、この水分が、毛管構造をもつ組織要素としての細胞(仮導管)、すなわちいろいろな太さの

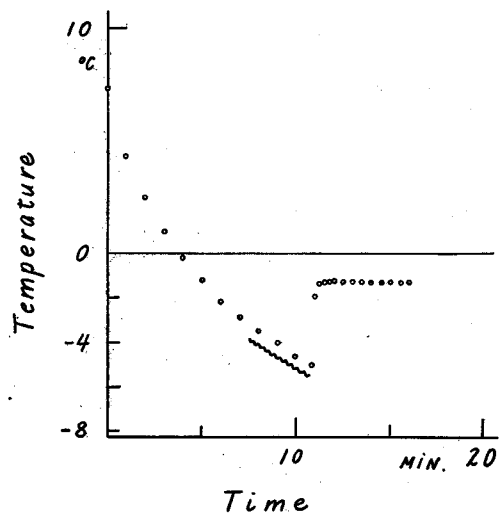


Fig. 13. A freezing curve of bark (No. A-2.3-bark-4). Super cooling was not easily broken.

細胞の、何れに含まれているかと云うことに一つの関連をもつものと考えられ、また、自由水の中に含まれている溶質の濃度にも一つの関連をもつものと考えられる。後者の意味では、搾汁の氷点降下を調べてみる必要がある。また、実験条件、とくに冷却速度の影響について、今一度厳密な検討を行う必要があるかも知れない。この実験において、間接的な一つのねらいとして考慮していた凍裂材の中の水喰材部分と辺材部の凍結点の関係については、両者は全く同一なものと考えてよいことがわかった。

凍結曲線の形として、fig. 1 のようななめらかで単純な形を示さないものが数多く観察されたことは、一応、われわれが、死んだ組織と考えている木材組織の凍結様式も、必ずしも単純なものでないことを示している。もちろん、生きた組織の凍結様式¹⁰⁾とは全く違ったものではあろうけれども、あるいは、一部になお生きた組織が存在するための現象であるかも知れないし、また、主として、水分分布の microscopic な違いによつて起る現象であるかも知れない。これらの点についてはなお検討してみる必要がある。

森林内の立木はもちろん、伐採された丸太材においても、その材部の温度が、上に述べた凍結温度に達したとしても必ずしも凍結しないことは云うまでもない。凍結に先行する過冷却がどこまで進行するかが問題である。とくに、樹皮に包まれた立木の幹では、樹皮の過冷却が破れにくい傾向がみられるだけに、現実にとどの位の温度の下で、また、どんな条件の下で、樹皮の、おそらくは従つて、材部の過冷却が破れ、それらの凍結が始まるかは、はなはだわかりにくく、実際に測定してみる外に方法がない。この意味で、立木の幹の各部位の凍結開始の時期、気温、樹温などに関し、目下測定を進めている。

IV. 要 約

1. 立木の幹や丸太の中の水分が凍ると、その材質が変わり、実用上にいろいろの問題を起している。したがつて、このような木材の凍結の実相をあきらかにすることは木材利用の上から必要なことである。本研究はこのような観点からおこなわれたもので、ここにはトドマツの生材の凍結、とくに凍結温度に関する実験の結果を報告した。

2. 冬季に、すでに凍結しているトドマツの凍裂木および健全木を伐採し、その樹幹から切り取つた生材組織の凍結温度を測定した。fig. 2 にテストピースの木取法、形、寸法などを示す。

3. 凍結温度は、資料の凍結曲線から求められた。資料の冷却には寒剤を用い、また温度の測定には銅—コンスタンタン熱電対を用いた。fig. 3 にテストピースの冷却装置を、また、得られた凍結曲線の一例を fig. 1 に示す。曲線上の *b* 点附近から冷却速度を、*c* 点から過冷却の破れた温度を、*d* 点の温度から凍結温度 (凍結点) を決定した。

4. 測定結果を tab. I, tab. II に掲げ、また、その一部を fig. 4, fig. 5 に掲げる。

ここに掲げた諸数値については、凍裂木と健全木、凍裂木の凍裂部分と健全部との間に差が認められないので、実験の全測定値を合併してみると、材部では、冷却速度 $0.5\sim 2.5$ $^{\circ}\text{C}/\text{M}$ 、過冷却が自然に破れた温度 $-3.5\sim -7.4^{\circ}\text{C}$ 、また、実験上の操作として人為的に過冷却を破つた温度は $-2.1\sim -4.2^{\circ}\text{C}$ 、含水率は $43\sim 220\%$ で平均 119% であつた。凍結温度の値は fig. 4 のような分散を示し、 $-0.1\sim -0.8^{\circ}\text{C}$ 、平均 -0.4°C であつた。凍結温度の値はテストピースの含水率に関係することが示された。一般的には、含水率が大きくなれば凍結点が高く、小さければ低くなる傾向がみられた (fig. 5)。この原因については、はつきりしたことはわからないが、水分の、組織内での存在形態、液の濃度の違いなどに関連するものと考えられる。なお、この実験では、髓の付近は含水率が高いにもかかわらず比較的低い凍結点を示した。

樹皮の凍結点は材部のどの部分よりも低い値を示し、また、人為的に過冷却を破る場合、材部に比べていちじるしく破れにくい傾向があつた。

5. 凍結曲線の形は、タイプとしては死んだ組織のそれに属するものであるが、組織の凍結進行に対応する曲線部分の形は必ずしも単純なものではなく、組織の内部に不規則な断続的な凍結がおこなわれていることが推論された (fig. 6~9 参照。なお、樹皮については fig. 11~13 などを参照のこと)。

参考文献

References

- 1) 石田・宮島・寺江・高見・中西：凍結材製材用の帯鋸の歯型 (予報)。北海道林業指導所研究報告，第5号，昭和29年，80-100頁。
- 2) 石田茂雄：寒さのために樹幹の割れる現象について。低温科学，第5輯，昭和25年，61-73頁。
Shigeo ISHIDA: A study on the cracking of trees due to frost. Low Temperature Science, 5, 1950.
- 3) ———：トドマツ樹幹の凍裂の形態について。北大演習林研究報告，第17巻，第2号，昭和30年，473-512頁，外に写真52枚。
Shigeo ISHIDA: Morphological study on frost crack of Todo-fir trunk. Research Bulletins of the College Experiment Forests, College of Agriculture, Hokkaido University. Vol. XVII, II, 1955.
- 4) 低温科学：北海道大学低温科学研究所編。
Low Temperature Science. Edited by Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.
- 5) 吉田順五：熱伝導論の立場からみた馬鈴薯の凍結曲線 (I)。低温科学，第10輯，昭和28年，52-68頁。
Zyungo YOSHIDA: Application of heat conduction theory on the freezing curve of potato tuber. Low Temperature Science, 10, 1953.
- 6) 青木 廉：馬鈴薯塊茎の再凍結曲線の型について。低温科学，第3輯，昭和25年，207-217頁。

- Kiyoshi AOKI: On the shape of the refreezing curve of potato tuber. *Low Temperature Science*, 3, 1950.
- 7) 燕木自輔: 野幌産トドマツ材の生材含水率, 容積密度数および収縮変形に関する春秋材部別観察. 林業試験場研究報告, 第46号, 昭和25年, 37-70頁.
- Zisuke KABURAGI: On the moisture content, the bulk density of early- and late-wood of green Todo-fir grown at Nopporo district in Hokkaido and their shrinkage. Report of the Government Forest Experiment Station, No. 46, 1950.
- 8) 青木・篠崎: イラガ前蛹の過冷却に及ぼす冷却速度の影響. *低温科学*, 第10輯, 昭和28年, 108-116頁.
- K. AOKI and J. SHINOZAKI: Effect of cooling rate on the undercooling points of the Prepupa of Slug Moth. *Low Temperature Science*, 10, 1953.
- 9) 照本 勳: 植物組織の第1氷点と過冷却. *科学*, 21巻, 昭和26年, 596頁.
- 10) Eizo ASAHINA: The freezing process of plant cell. Contribution No. 308 from the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University. 1956.
- 11) 青木 廉: 馬鈴薯塊茎の凍結曲線. *低温科学*, 第2輯, 昭和24年, 183-193頁.
- 12) ———: 凍結曲線の不規則な振れ. *科学*, 16巻, 昭和21年, 129頁.

Summary

Freezing behavior of green wood tissue is of interest, since it influences the physical properties of lumbers, logs and trunks of standing timbers.

Measurements of freezing point of successive growth rings from pith outward were made of green wood tissue cut from varying heights in frost-cracked and normal Todomatsu trunks, *Abies Mayriana*, felled in the winter of 1957 in Coll. Exp. Forest of Hokkaido University. Fig. 2 shows the method of cutting specimens and their form and sizes. The individual specimens were numbered with their No. of annual rings into which a thermo-junction had been inserted, counted from sap to pith. The numbers were abbreviated to simple form such as ex. No. A-8.3-5. Here, A: Normal trunk; 8.3: Height in the tree from which specimen was cut; 5: Annual ring number.

The freezing point of each test specimen was determined from time-temperature curve (freezing curve) obtained in cooling specimen from room temperature to definite low temperature. An example of freezing curve obtained is shown in fig. 1. The writer has taken the temperature d of plateau of the curve as freezing point and that of point c as super cooling temp. The apparatus used for cooling test specimen is shown in fig. 3. The test specimen into which thermo-junction had been inserted was removed into cooling bottle from room condition as shown in fig. 3 and then was subjected to freezing under definite rate of cooling (below 2.5°C per minute). In majority of measurements super cooling was broken artificially by inoculating ice on specimen. The temperature change of specimen was taken by use of a copper-constantan thermo-junction every 15 seconds or 30.

Cooling rate, super cooling and freezing point, as determined from the freezing curve obtained experimentally, and moisture content for each specimen are shown

in table I. They are summarized in table II. Values of cooling rate varied from 0.5 to 2.5°C per minute at 0°C and average 1.3°C/M (only wood specimen). Temperatures at which super cooling was broken naturally varied between -3.5 and -7.4°C and temperatures which was broken artificially varied between -2.1 and -4.2°C for wood tissue. In the case of bark tissue it was harder to break super cooling state than in wood tissue. The moisture content of specimen cut from heart wood of Todomatsu trunk was fairly high because of being of wet heart wood in both kinds of trunks. In total experiment values including sapwood of both trunks, moisture contents ranged from 43 to 220 per cent and averaged 119 per cent. On the freezing point, there were no significant distinctions between normal and frost-cracked trunks. In total for wood tissue these values ranged from -0.1 to -0.8°C (fig. 4), decreasing with decreasing moisture content of the test specimen as a general tendency (fig. 5) and averaged -0.4°C. The freezing point of bark was given lower about 1°C than wood tissue.

The freezing curve of tissue specimen can be understood as the expression of temperature changes accompanied by freezing in tissue. Accordingly, the shape of curve must be changed correspondingly to the mode of freezing of tissue. The freezing curve obtained from present experiment has showed almost all the shape of typical refreezing curve of living tissue. Some examples of the shape of freezing curves are exhibited in figs. 1, 6, 7, 8 and 9 for wood and in figs. 11, 12 and 13 for bark tissue. Fig. 1 presents the usual form appearing in highly moistened sapwood or wet heart wood which frequently occurs in Todomatsu trunk. It has very smooth line throughout the entire part, especially on the plateau, of the curve. Each of figs. 6, 7, 8 and 9 has more or less vibratory or corrugate line at certain parts of the freezing curve. These irregularities of the plateau which correspond to freezing of tissue seem to show that irregular freezing is going on. Fig. 11 is one of the curves appearing usually in freezing of bark tissue and also the shape shown in figs. 12 and 13 appears when bark tissue is frozen.