作物の霜害と環境条件

第1報 ダイズ苗の霜害と凍結温度との関係

山中捷一郎*・羽生寿郎**・西山 司*** 中山敬一**

(* 九州大学農学部
** , *** 千葉大学園芸学部)

Relation of the Environmental Conditions to the Frost Injury.
Part 1. Relationship between the Freezing Temperature and
the Frost Injury of Soybean Seedling

Syoichiro YAMANAKA*, Juro HANYU **, Tsukasa NISHIYAMA***
and Keiichi NAKAYAMA **

(* Faculty of Agriculture, Kyushu University, Hakozaki
6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka 092, Japan
** , *** College of Horticulture, Chiba University, Matsudo 648,
Matsudo 271, Japan)

1. ま え が き

作物の霜害調査は数多く行われているが、野外で作物の冷却、結霜、作物体の凍結・融解の状態を正確に把握することは、霜害の発生が時間的、空間的に不確定であるため困難であり、情報の不足を補うために多くの実験が行われてきた。

植物体の細胞内外の水は種々の物質を溶解しているので、その融点は純水のそれ(0℃)より低く、さらに融点で凍結しないで過冷却する。植物の凍死の原因について、安藤(1919)は原形質破壊によるとし、Levitt(1956)は細胞外凍結だけでも死ぬことがあると述べ、朝比奈(1958)は細胞外凍結の場合にも細胞内凍結と同様の原形質凝固状態が見られ、細胞内凍結による死を認識するには組織の凍結状態の観察の必要性を説いている。

植物の冷却、融解の速さと被害との関係についても若干の報告がある。凍結葉の昇温速度と被害との関係について、酒井・吉田(1967)はトドマツの芽について0.8℃/minの融解速度では害はほとんどみられないが、2℃/min以上では被害が大きくなること、汁液融点近くの温度に10分間置いたものはその後の急昇温によっても被害がないこと、現地観測と実験から融解速度が1℃/minを越えないときは、朝日が有害な作用を及ぼすこと

は少ないと報告している。また、吉田・酒井(1967)はツゲとイヌツゲの葉の実験から汁液融点付近の温度範囲の通過速度が大きいほど被害が大きいが、汁液融点までの昇温速度は有害でないことを認めている。北浦(1967)はクワの葉の場合、融解の前後とも昇温速度と被害との間に関係がなく、凍結中の葉が被害発生の臨界温度下で経過したとき、直射日光が多少被害を大きくすると述べている。また、小中原(1975)はカンキツの枝葉の場合、急速融解したものは被害が大きくなり、融解後に直射日光や高温条件(22℃)に置いたものは、野外の日陰に置いたものより被害が助長されると述べている。一方、冷却速度と被害との関係について、Finkle *et al.*(1974)はアカブの根を用いて実験した結果、-4℃までの条件では急速冷却の方が被害が大きいと報告している。

これらの実験の多くは空気を冷して植物を凍結させる方法で行われているが、晴夜の野外の植物は放射冷却により周りの空気より低温である。本研究においては、筆者らが先に考案した放射型霜実験装置(羽生ら, 1978)を用いて放射冷却環境下で植物に結露、結霜を起こさせ、霜害を与える方法をとった。

本実験では、実験装置の規模と取り扱い易さを考慮してダイズ幼苗を選び、これを材料として霜害に最も影響の大きいと思われる気象条件の解明を試みた。実験に当り、種々御教示を賜った千葉大学大泉久一教授に厚く御礼申し上げる。なお、本実験は文部省科学研究費補助金(昭和53年度)によるものである。

昭和55年4月7日 全国大会にて発表

昭和57年1月14日 受理

*** 現在 サトダ事務機株式会社

2. 材料と方法

2.1 実験材料と育苗方法

実験装置が小さいため、実験に供するダイズの生育時期を初生葉展開期とし、自然光の人工気象箱で一定の温度条件(6:00~18:00 25℃, 18:00~6:00 20℃)で生育させた。品種は白鳥枝豆、培地は膨潤に保ったピートモスポット(ジーフィー 7, 直径約 5 cm, 高さ約 4 cm)を使用, 1 粒ずつ播種した。なお, 冬季は日射不足のため補光した。

実験苗は実験の前日夕方約 +5℃の低温実験室に移し, 予冷した。調査項目は草高, 茎長, 葉長, 全重, 被害率である。被害率は, 実験 2 週間後の初生葉の褐変割合(葉面積に対する褐変合計面積比)とした。

2.2 実験期間と処理方法

予備実験は 1978 年春より実施し, 本実験は Table 1 に示す期間に 4 種の実験処理を行った。1 回の実験に 2 個体を使用し, 1 個体は葉温測定に, 他の 1 個体は被害の調査用とした。播種, 育苗は実験計画に基づき次々に実施し, 1 処理に 40 回の実験(80 個体使用)を行った。したがって, 全実験に使用した個体数は 320 個, 準備した苗はその数倍である。実験苗はポットごとにアルミ箔を貼ったプラスチックケースに収め, 懸架に 2 個逆さに吊し, 3~4 本平行に張った細いナイロン糸によって葉を水平に維持した。

実験は Table 1 の実験番号の順に逐次実施した。第 1 実験は予備実験を兼ね, 第 2, 第 3 実験では冷却速度並に融解過程の昇温速度を変え, また朝日の影響をみるためのライト照射を行い, 第 4 実験では凍結温度を高める

ため植水を行った。植水は内径 3 mm のアクリルチューブに細水粒を詰め, 放射板で冷却しておき, 葉温が -3℃程度に下がったとき葉面に接触させることによって行った。また, 葉の凍結に先立って葉面に霜を形成するように, 内部水槽の水温を調節しようと試みた。

2.3 冷却・融解曲線

植物が有効放射により冷却, 凍結し, やがて昇温する経過を Fig. 1 に模式的に示す。実験開始時に 0℃以上であった葉は有効放射により次第に冷却し, 細胞外液の融点 T_e (あるいはさらに細胞内液融点 T_i) より低下(過冷却)し, ある温度で突然細胞外液が凍結する。その時放出される凍結の潜熱により葉温は急上昇し, 潜熱が十分にあれば細胞外液の融点で上昇は停止する。凍結液が少量の場合には, 潜熱不足により上昇は T_e に達しないで停止する。したがって, 図の T_2 の温度は必ずしも細胞外液の融点を示すとは限らない。 T_2 から T_3 への過程は, 体内溶液の凍結の潜熱と有効放射との差によって大体決まる。 T_3 が T_i より低いと, その程度により若干の細胞が順次凍結する。以上は既往の多くの実験によって得られた凍結過程の知見である。本実験において, T_3 温度の設定は冷却速度, T_2 後の冷却時間, 放射板ヒーターの加熱の調節によってほぼ達成された。

昇温過程($T_3 - T_e$)は放射板の加熱量や 300 W スポットライトの放射熱を調節することによって設定された。放射板の温度は第 1 実験の前半を除き, 最終的に 20℃一定に設定し, その温度に至る時間は加熱量によって調節した。スポットライトの電圧は 40 V と 80 V の 2 種とした。

Table 1. Treatment conditions.

Experiment No.	Experimental period	Cooling rate of radiation plate	Heating condition			Water temperature	Ice inoculation
			Radiation plate		E		
			Temperature	Heater output			
1	2 Dec. 78' 6 Feb. 79'	−0.33°C/min	0.4°C/min	5	—	15°C	—
	20°C const.		5	—			
2	25 May 79' 21 June 79'	−0.14°C/min	20°C const.	3	40 V	15°C	—
	"		7	80 V			
3	23 June 79' 19 July 79'	−0.50°C/min	"	10	—	15°C	—
	"		3	80 V			
4	4 Sep. 79' 2 Nov. 79'	−0.33°C/min	"	3	80 V	15°C	On

Note: Numerals in heater output column denote the relative electric power of the heater in the radiation plate. E denotes the voltage of 300 watt tungsten lamp.

Fig. 1. Schematic diagram of leaf temperature change on the cooling and warming processes.

- T_1 : Freezing temperature of extracellular solution.
 T_2 : Temperature that is equal or close to the melting point (T_e) of extracellular solution.
 T_3 : Minimum temperature after T_2 ($T_3 \geq T_i$ or $T_3 < T_i$)
 T_4 : 0°C.
 T_5 : Temperature at which rising rate changes discontinuously.
 T_i : Melting point of intercellular solution.
 r_c : Lowering rate of temperature.
 r_1, r_2, r_3 : Rising rates of temperature during T_3-T_4 , T_4-T_5 and T_5-T_6 , respectively.

Table 2. Summary of results. T_A is air temperature at the same height as the leaf. I is the ratio of browning parts to the leaf area. $S.D.$ is the standard deviation. r is the correlation coefficient of each factor to I . *, ** and *** denote that the significance levels are less than 5%, 1% and 0.1%, respectively. Other symbols are indicated in Fig. 1 or Table 1.

	Experiment 1				Experiment 4			
	Average	S. D.	r	E	Average	S. D.	r	E
T_1 °C	−5.0	0.5	−0.28	Off	−3.9	0.8	−0.60***	Off
T_2 "	−1.6	0.4	0.03		−2.0	0.7	−0.69***	
T_3 "	−3.4	0.8	−0.71***		−2.3	0.7	−0.53***	
T_A "	−2.5	0.5	−0.68***		−0.8	0.4	—	
r_c °C/min	0.067	—	—		0.077	—	—	
r_1 { "	C 0.122	—	} 0.35*		0.250	0.063	−0.10	
"	D 0.057							
"	E 0.800							
"	F 0.478							
I %	73	30		29	22			

	Experiment 2				Experiment 3			
T_1 °C	−5.0	0.5	0.074	40 V	−5.3	0.6	0.004	Off
T_2 "	−2.0	0.5	−0.44**		−2.4	0.6	−0.20	
T_3 "	−2.7	0.9	−0.72***		−2.9	0.6	−0.40**	
T_A "	−2.6	0.4	—		−2.7	0.6	—	
r_c °C/min	0.045	—	—		0.094	—	—	
r_1 °C/min	0.10	0.03	0.30		0.38	0.07	0.27	
r_2 "	0.55	0.16	0.16		1.07	0.20	0.26	
r_3 "	0.12	0.02	−0.14		0.08	0.01	−0.28	
I %	54	32		77	16			
r_1 °C/min	0.14	0.05		80 V	0.12	0.03	80 V	
r_2 "	0.41	0.08			0.41	0.10		
r_3 "	0.15	0.02			0.16	0.02		
I %	47	32			70	17		

3. 実験結果

3.1 第1実験

この実験の目的はダイズ初生葉の凍結温度、冷却開始から凍結に至る時間、被害査定、昇温調節等、その後の実験に必要な基礎データを得ることであった。

放射板を 0.33°C/min の割合で冷却したときの本実験の葉温、気温の平均的变化を Fig. 2 (Exp. 1), データを Table 2 に示す。葉温と気温の平均降下速度はそれぞれ 0.067, 0.050°C/min で、葉の平均凍結温度 T_1 は -5.0°C, T_2 は -1.6°C であった。この気温降下速度は霜害発生時の夜間のその 2 倍程度のものである。葉温の降下速度は気温よりやや大きく、凍結時における両者の平均差は 2.5°C であり、実験装置が放射冷却条件を充していることを示している。

昇温については、実験の前半が放射板を 0.4°C/min の割合で加熱し、後半は放射板を 20°C 一定に調節した。Fig. 2 の D-F 線は前者、C-E 線は後者の場合の葉温変化を示す。この上昇速度は小中原 (1975) の温州ミカン葉、酒井・吉田 (1967) のトマツ芽の日陰及び日向の観測例とはほぼ一致している。葉温が 0°C に達した後 (T_4-T_5 過程) の急上昇は、体内の氷の消失、葉面水滴の乾燥

Fig. 2. The average temperature changes of soybean seedling at each experiment.

の結果と考えられる。

40 回の実験における T_1 と T_2 の変動は小さく、 T_1 の最高値と最低値の較差は 2.1°C に止まった。 T_3 は人為的に変えることができ、本実験では -3.5°C を中心として $-2 \sim -5^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化させた。したがって、被害率 I と各要素との間の相関は T_1 、 T_2 で極めて小さく、 T_3 との相関が認められた。 T_1 の相関係数が小さいにもかかわらず、凍結時の気温 T_A が被害率と相関を持つ理由は明らかでない。また、融解速度 r (r_1 、 r_2 の平均) はわずかに相関がみられた。これは r に T_3 が関与しているためで、 I と r 、 T_3 との偏相関係数が小さい (0.023) ことから、 r は直接 I に関係していないように思われる。

3.2 第2実験

本実験では第1実験より緩慢な冷却条件を与え、同時に、融解過程で朝日が当ることを想定して、スポットライトで光を照射した。光の強さは電圧を 80V と 40V の2処理とし、 40V 照射の場合は放射板のヒーターの出力を大きくして、昇温速度を等しくしようとしたが、Table 2 に示すように多少の差異を生じた。

冷却過程では、葉温と気温の平均降下速度は 0.045 、 $0.036^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で、第1実験の約 70% であり、平均凍結温度は第1実験に等しかった。融解過程では、Fig. 2 (Exp. 2) に示すように葉温は T_4 (0°C) とその直後の T_5 を境としてそれぞれ異なる昇温速度を持つ不連続的経過をたどる。 T_3-T_4 、 T_4-T_5 、 T_5-T_6 の平均昇温速度を r_1 、 r_2 、 r_3 として Table 2 に示した。 r_1 と r_3 の値はほぼ等しく、 r_2 の値は大きい。 r_2 の値が大きい理由は第1実験で述べたが、 r_3 の値が再び低下するのは蒸散によるもの

かもしれない。

被害率と各要素との相関は Table 2 に示すように T_3 で認められ、 T_2 も相関が認められた。 T_3 の有意な相関は第1実験と同様の理由であろう。 T_2 、 T_3 の平均値は第1実験に比べて T_2 は 0.4°C 低く、 T_3 は 0.7°C 高かった。平均被害率は 47% と 54% で、第1実験 (73%) の7割前後であった。第1実験との被害の相違は冷却速度、 T_3 、昇温速度の何れかが関係しているものとみられ、次の実験を用意した。

3.3 第3実験

本実験では T_1 、 T_3 を前の実験とほぼ等しくし、冷却速度と昇温速度を変化させて、被害率との関係を明らかにしようとした。

葉の平均冷却速度は $0.094^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で、第1実験、第2実験の約 1.5 倍と 2 倍とした。一方、葉の平均昇温速度は Table 2 に示すように、 r_1 、 r_2 の過程では第2実験の $2 \sim 3$ 倍の値とした。また、光照射の被害への影響を見るため、照射の有無にかかわらず昇温速度が一定になるよう、放射板ヒーター出力を調節したが、Table 2, Fig. 2 (Exp. 3) に示すように、結果的には失敗し、光照射をしない方が $2 \sim 3$ 倍の昇温速度となってしまった。

本実験の平均被害率は 70% で、第1実験とほぼ等しく、第2実験に比べて大きい値となった。被害率と各要素との相関は T_3 を除いて認められなかった。第1実験との条件の違いは、 T_2 、 T_3 のわずかな差と、大きい冷却速度差並に昇温方法の違いであったが、これらの要素と被害率との各相関が何れも小さいことから、これらの処理の差は被害に大きな影響を及ぼさないことを示唆している。

3.4 第4実験

これまでの実験の結果、この装置での苗の凍結温度は -3.7°C から -6.6°C までの範囲であり、自発凍結ではより高い凍結条件が得られないことがわかった。そこで、本実験では植氷により凍結温度を高め、凍結温度 T_1 と被害率との関係をみようとした。

植氷は葉温が $-2 \sim -3^{\circ}\text{C}$ のとき行った。植氷に用いる小氷片は植氷間隙まで冷却板上に置いたため、植氷時に葉温が約 1°C 急降下した後凍結した。このため、本実験の平均凍結温度は -3.9°C (最高 -2.7°C) に止まった。

葉温、気温の降下速度は 0.077 、 $0.058^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で、第1実験よりやや大きい値であった。主な結果を Table 2 に示す。 T_3 は約 -2°C とし、他の実験より高くした。その結果、平均被害率は 29% となり、前の諸実験よりかなり小さい値を得ることができた。昇温速度は T_3 から $+5^{\circ}\text{C}$ になるまでの平均値で示した。被害率と相関の認められた要素は T_1 、 T_2 、 T_3 であるが、 T_2 は T_1 、 T_3 と有意な相関 (0.855^{**} と 0.639^{**}) をもつことによるもので、被害率

との単独の関係でないと思われる。

3.5 苗の生育と被害率

実験に使用した苗の実験直後の調査結果を Table 3 に示す。各実験とも気温条件はほぼ等しく調節されたが、日射、日長条件は天候と季節で変化した。また、育苗装置がハウス内に置かれたため全般に日射量が少なく、やや徒長気味であった。

被害率は各実験とも環境条件のわずかな差や個体差によって、大きく変化した。そのヒストグラムを Fig.3 に示す。第1実験では80~100%に集中し、第3~4実験ではそれぞれ60~100%, 0~39%の範囲に全体の83%と73%が出現している。

Table 3. Observation data of plants on the experimental date.

	Exp.2	Exp.3	Exp.4
Leaf area (cm ²)	18.1±3.4	18.8±3.0	—
Stem lenght (cm)	6.6±1.5	8.3±2.1	—
Total weight (g)	44.8±4.2	45.1±4.4	45.6±7.0
Number of days ₁	18±2	17±2	19±2
Number of days ₂	12±1	11±2	13±2

Notes: Total weight = Pot weight + Plant weight

Number of days { 1: From the sowing day to the experiment day.
2: From the emergence day to the experiment day.

Fig. 3. Frequency distribution of injury grade at each experiment. Each injury grade denotes the following range of I : 1; 0–20%, 2; 21–40%, 3; 41–60%, 4; 61–80%, 5; 81–100%.

4. 考 察

4.1 凍結温度

本実験における自然凍結時(人工的植水をしない)の凍結温度は Table 2 の第1~3実験の値から知られるように、平均して約 -5°C であり、その変動幅は小さかった。この原因は Table 3 に示すように、育苗温度がほぼ等しく、実験苗の生育に大きな差がなかったことと、実験中

の葉の周りの気流の状態が似ていたことによるかもしれない。北浦(1967)によれば、凍結温度は冷却速度の増大とともに低下するとしているが、本実験の冷却速度の範囲ではその傾向は定かでなく、冷却速度の最も大きい第3実験でわずかに凍結温度の低下がみられた。これらの関係については今後の研究にまたなければならない。

北浦(前出)は桑葉の過冷却は -4°C より高い温度で安定していたと述べているが、本実験のダイズの初生葉についても全く同様の結果が得られ、自然凍結の最高温度は -3.7°C であり、120回の実験中 -3°C 台の凍結は2回に過ぎなかった。北浦は過冷却を破る方法として、植水、その他の物質の接触、葉の動揺等を試み、植水だけが安定して過冷却を破るのに有効であったと述べている。本実験では植水により凍結温度を約 1°C 高め、平均 -1.9°C に引き上げることができた。本実験では植水にさいして小氷片を放射板上に載せておき、植水時に引き上げて使用したので、葉は氷片の接触により約 1°C 急激に低下した後凍結した。植水方法の工夫により、さらに高い温度での凍結が可能かどうか、検討が残されている。

4.2 昇温過程と被害率

個々の実験における葉の昇温過程は複雑であるが、葉温変化の節目を区切って(Fig.1の r_1 , r_2 , r_3)直線化したものの平均値を Table 2 に示した。各昇温過程の昇温速度と被害率との関係は本実験の範囲では相関が小さく、有意な関係は得られなかった。この結果は酒井・吉田(1967)の実験と一致している。しかし、葉内の氷の融解と被害との関係はおそらく微妙なものであり、なお綿密な実験によって検証さるべきものと考えられる。

4.3 凍結温度と被害率との関係

4種の各実験内の被害率と T_1 , T_3 との関係は前述のように T_3 で相関が認められたが、 T_1 については明瞭でなかった。しかし、全実験データについて被害率と T_1 , T_3 との単相関を求めると、Table 4 に示すように有意な相関を示した。同表の標準偏差をみると、 T_1 と T_3 はほぼ等しくなっており、Table 2 で T_1 の相関が低かったのは各実験内の T_1 の値の範囲が小さかったことに原因していたことになる。

次に被害率 I と T_1 , T_3 との重相関係数を求めると、0.748を示し、次の重回帰式が得られた。

Table 4. Correlation coefficient (r) of T_1 or T_3 to the ratio (I) of browning parts to the leaf area.

	r	Number	Mean value	Standard deviation
T_1	-0.481***	160	-4.79°C	0.83 $^{\circ}\text{C}$
T_3	-0.703***	160	-2.82°C	0.87 $^{\circ}\text{C}$

$$I = -10.23 T_1 - 22.04 T_3 - 54.60$$

ただし、上式での T_1 , T_3 の値は本実験の範囲 (-2°C 以下) で適用されることはいうまでもない。

以上の結果、霜害(葉の褐変)に対して凍結温度 T_1 と T_3 の値が大きく関与していることが明らかとなった。

5. 摘 要

霜害実験の多くは植物を空気で冷却し、植物を凍結させる方法をとってきた。我々は霜害実験をするため、羽生ら(1978)が設計した放射冷却装置を用いた。この装置の中で、植物は長波放射により冷却され、その表面に霜が昇華し、植物が凍ることによって死に至った。

4 種の実験が各 40 回繰返された (Table 1)。4 種の実験の気温、葉温の平均的経過が Fig. 2 に示された。更に、その平均値と変動が Table 2 に示された。そして各実験の被害のヒストグラムが Fig. 3 に示された。

自然凍結の場合、大豆の凍結温度は約 -5°C で、その変動幅は Table 2 (実験 1~3) に示すように、小さかった。それ故、凍結温度幅を広げるため、植氷が行われた。その結果、平均凍結温度は -3.9°C まで上昇した。霜害に及ぼす冷却、融解割合の影響は我々の実験では明らかでなかった。霜の被害率は葉面積に対する褐変面積の比として示された。

細胞外液の凍結温度 T_1 と T_1 後の最低温度 T_3 が Table

4 に示すように被害率 I と良く相関することが認められた。さらに、これらの要因の重相関分析は次の式を与えた。

$$I = -10.23 T_1 - 22.04 T_3 - 54.60$$

そして、重相関係数 0.748 は有意であった。

引用 文 献

- 安藤広太郎, 1919: 植物の凍死及其耐寒性に関する研究, 農試報, **44**, 1-99.
- 朝比奈英三, 1958: 生細胞の凍結, 細胞化学シンポジウム, **8**, 1-28.
- Finkle, B. J., Pereira, E. Sa B. and Brown, M. S., 1974: Freezing of nonwoody plant tissues I. *Plant Physiol.*, **53**, 705-708.
- 羽生寿郎・山中捷一郎・西山 司・中山敬一, 1978: 霜害研究用の放射型霜実験装置について, 農業気象, **34**, 7-12.
- 北浦 澄, 1967: 晩霜による桑の凍結および被害に関する研究, 蚕糸試報, **22** (2), 207-328.
- 小中原 実, 1975: カンキツの寒害発生機構と防除法に関する実験的研究, 静岡柑試特報, **3**, 1-164.
- Levitt, J., 1956: *The hardiness of plants*. Academic Press, New York, 1-278.
- 酒井 昭・吉田静夫, 1967: 植物の霜害に関する研究 I, 低温科学生物篇, **25**, 59-70.
- 吉田静夫・酒井 昭, 1967: 植物の凍害に及ぼす融解速度の影響 I, 低温科学生物篇, **25**, 71-79.

Summary

Most experiments on the frost injury have adopted the method of cooling air and freezing plants in their experimental chambers. In order to conduct the study on the frost injury, we used the radiative cooling apparatus designed by Hanyu *et al.* (1978). In this apparatus plants were cooled by long wave radiation and were lead to death, because the plants froze resulting in sublimating on their surfaces.

Four kinds of experiments were conducted 40 times, respectively (Table 1). The mean courses of air- and leaf-temperatures in four experiments were shown in Fig. 2. Further, their mean values and their variations were shown in Table 2 and the histogram of the injury in each experiment was shown in Fig. 3.

In the case of natural freezing, the freezing temperature in soybean seedlings was about -5°C and the range of their variations was narrow as shown in Table 2 (Exps. 1-3). Therefore, ice inoculation was carried out in order to extend the width of freezing temperature and as a result, the mean freezing temperature rose up to -3.9°C . The effects of the cooling and melting rates of plant to the frost injury were not clear in our experiments. The ratio of frost injury was denoted as the ratio of browning parts area to the leaf area.

It was recognized that the freezing temperature, T_1 , of extracellular solution and the minimum temperature, T_3 , after T_1 were correlated well with the ratio of frost injury, I , as shown in Table 4. Further, the multiple correlation analysis with these factors gave the following equation:

$$I = -10.23 T_1 - 22.04 T_3 - 54.60$$

and the multiple correlation coefficient of 0.748 was significant.