



Title	植物霜害の一機構
Author(s)	朝比奈, 英三; ASAHINA, Eizo
Citation	低温科学. 生物篇, 11, 13-21
Issue Date	1954-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17562
Type	departmental bulletin paper
File Information	11_p13-21.pdf



植 物 霜 害 の 一 機 構*

朝 比 奈 英 三

(低溫科學研究所 生物學部門)

(昭和28年2月受理)

農作物の霜害については従来少なからぬ報告があるが、多くは被害の原因を降霜によるものと想定して作物の損傷の程度を述べたものに過ぎず、當然行われるべき降霜時の作物についての直接観察さえ記載されたものはきわめて少ない。我國では既に1919年に安藤の優れた實驗的研究¹⁾が發表されていたにもかかわらず、樺太における田澤の研究²⁾を除けば、現在に至るまで霜害の機構にふれたものは殆んどない。田澤の多年の勞作は微氣象學的觀測に加えて、葉上に結露して結霜に至る過程を考察し、又霜害は單なる凍害ではないことを指摘した點においてきわめて注目すべきものであるが、惜しむらくは生物學的の實證が未發表である。最近鈴木らは實驗室及び戶外において植物体の冷却と、葉上の結霜とを觀測し、結霜は作物の凍害を防ぐことに役立つと結論した¹⁴⁾。この説は安藤の主張と矛盾せず、更にこれに物理學的の根據を與えたかの如く見える點において非常に興味深いものであるが、その結論に重要な關係をもつ被害植物に關する記述の甚だ簡單であるのがおしまれる。

我々は今迄植物細胞の凍結過程の研究において、致命的な細胞内凍結をおこしやすい、即ち凍害に弱い植物の細胞でさえも、過冷却されること自身は少なくとも短時間では殆んど無害であり、且つ植氷しない限りこのような過冷却を破ることはきわめて困難なことを知つた⁶⁾。従つてたとえ結霜が一時的には植物組織の冷却速度を低めたとしても、植物表面に附着した霜によつて組織が植氷され、その内部へ凍結が進行することになれば、降霜は必ずしも凍害を防ぐとは限らない。一旦組織の凍結が始まつた後は一般の凍害と同様にその機構を説明することが出来るであろう。

たまたま1953年5月18、19、20日に札幌附近に顯著な晩霜があり、發芽していた各種の作物には大きな被害があつた。當日圃場に出て馬鈴薯を觀察したところ、葉の大部分が曲げると折れる程度に固く凍結し半透明になつているものが多かつた。そこで馬鈴薯の芽を材料として降霜の際に起りそうな條件で、その凍結過程を低溫室内で觀察し、同時に結霜による組織の凍結開始の可能性をしらべてみた。

* 北海道大學低溫科學研究所業績 第239號
研究費の一部は文部省科學研究助成補助金による。

I. 組織切片の凍結過程

1953年5月下旬乃至6月上旬の間に草丈2寸位のびた馬鈴薯(品種名 男爵)の苗を圃場よりとり、その葉及び莖をかみそりで小切片(厚さ0.5~0.3 mm)とし、カバーガラス上でSilicone oil(液状珪素樹脂)をかけて懸滴とする。これを低温室内の温度調節装置を施した顕微鏡で観察した。組織片の温度はこの懸滴中に小熱電對をさし入れて測つた。尙装置及び方法の詳細は前報⁴⁾を参照され度い。

組織片を冷却していくと(0°Cにおける冷却速度1°C/15~60秒) -10°C以低にまで過冷却してしまう場合が多いので、マイクロピペットの先につけた小氷片を任意の温度で切片にふれて即ち植氷して凍結を開始させた。

切片の表面には切斷された細胞から出た細胞液が一面に附いているが、徐々に冷却しながら* -1.2°C又はこれより低い温度で植氷すると凍結がはじまる。氷晶は切片表面の液を傳わつてゆつくり生長していくが、生きている細胞の内部にはなかなか侵入しない。しかし細胞外凍結²⁾はどんどん進行し組織片の表面にはるいと氷塊が析出する(第1圖)。葉の海綿組織の間隙等にははつきり氷塊が認められ、細胞は水をとられて収縮する(第4圖)。短時間の細胞外凍結ならば** 組織細胞の多くは殆んど皆凍結に耐え、融解後まわりの水を吸収して再び原形に戻り(第5圖)、生体染色による呈色や原形質分離能力にも異常がない。しかし細胞外凍結をおこした組織片をあまり時間のたないうちに-3°Cより低温に冷却すると數分間に表皮組織にも柔組織にも細胞内凍結がはじまる*** このときの凍結過程は所謂フラッシング⁴⁾であつて、切片の各部分の細胞が一つ一つバラバラに突然凍結暗化するのである。凍結する前はかなり透明であつた細胞内部は、フラッシングによつて瞬間的にこまかく密集した顆粒に充され一面に暗く乳濁する(第2圖)。これは我々の呼ぶ〔液滴式の細胞凍結〕⁵⁾をおこしたのであつて、細胞の内部には無数の微細な氷晶が充滿しその間に濃縮細胞液及び破壊された原形質が挟まれている。このような凍結状態はきわめて不安定なもので、-3°C内外の温度では30秒位の間に、隣接する微氷晶は互に融合してどんどん大形になり、従つてはじめは細かく分離したように見えていた濃縮細胞液其他よりなる挟雜物は互に連なつて網目状になつてくる。莖の透明な柔細胞で観察すると、-3°C内外ではフラッシング後30秒位の間にはつきりした網目構造が現われる。小切片**** を-3°C以下の温度で植氷すると、このようなフラッシングは細胞外凍結に引續いて始めはひんぱんに次第に散發的におこり、10分間以内に切片のどの部分にも、もはやおこらなくなる。しかしこのことは切片内のすべての細胞がフラッシングしたことを意味するとは限らない。即ちこうなつた切片を融かしてみるとフラッシした細胞の内部構造は完全にこ

* 冷却速度は1°C/150秒内外。

** -2°C内外で凍結時間少なくとも30分。

*** ごく一部の細胞では、細胞内凍結の直前に氷による原形質分離⁵⁾をおこしかけるものもあつた。

**** 面積5 mm × 5 mm 内外。

わされて、凝固した原形質の残骸がまだ原形を保っている細胞膜でかこまれた小室の底に沈んでいる。ところが一部の細胞では——特に表皮細胞の一部でしばしば見られたが——融解後も核の形がこわれず、そのまわりに一見原形質分離の様な形に収縮した細胞質が變性凝固して死んでいるのが見出された。このような細胞は恐らく細胞外凍結若しくは凍結による原形質分離によつて殺されたものと考えてよいであろう。

上述のような組織の凍結過程は葉でも莖でも殆んど同様に認められたが、莖の組織ではフラッシングの進行が葉の場合に比べておくれ、凍結の終了するまでに時間のかかるのが常であつた。

II. 切斷しない植物体の凍結

前述の切片の凍結過程は甚だ特殊な條件で觀察されたものであるから、次にまるのままの植物を凍らせてみた。前と同様な材料を一部は塊莖をつけたまま、他は塊莖のつけ根から切斷し、土等の附着物をおとし、表面がぬれていないように常温でしばらく乾かす。これを根の方を先にして適當な太さのガラスの管ビンに収める。このとき莖の切斷した部分には流動パラフィンをしめした脱脂綿をまいて切口が直接空氣にふれないようにしておく。管ビンの上端にコルク栓をし、これを貫いて棒状温度計をガラス管壁にさわらぬ様にさし入れておく。この管ビンを低温室内においた適當な温度の恒温箱に入れて冷却し、任意の時間に管ビンの外から觀察し、又必要に応じて植物を取り出し、まるのままでもしくは組織切片としてその生死を觀察した。

-3°C の恒温箱内で植物を冷却した場合、温度(管ビン内の棒状温度計のよみ)が -1.5°C 乃至 -2°C に達してから30分内外で葉のガラス壁に接した部分から凍結がはじまることが多い。このときガラス管の内壁には、はじめ結露がみられ、これが植物の凍結に先立つて凍っていた場合がしばしばであつた。凍結した葉は外見も半透明にうす黒くなるので、凍っていない部分と區別出来るし、又上記温度計の先端でふれてみると固くなっている。

葉の一部分から始まつた組織の凍結は次第に擴がつていくが、たまたま葉柄が折れまがつていた場合にはここで停止する場合も少なくない。そこで組織内の凍結の傳わり方をみるために、切片觀察の場合と同じ方法で、先端及び葉柄を切斷した葉片を顯微鏡下で透過光線を當てながら -5°C で凍らせてみた。すると切り口に植氷されると同時に凍結による暗化が先ず管束部にそつて脈状にひろがり、それを中心として更に暗化が二次的に擴がつていくのが見られた。即ちこのような組織内では細胞間隙よりも先きに、恐らく導管を傳わつて先ず氷がのびていくものであろう。

さて凍結した植物は -3°C より低温では30分乃至1時間で殆んど致命的な害を受ける。融解後の組織細胞の觀察からみて、これは少なからぬ細胞内凍結と不可逆的な細胞外凍結の双方によるものらしい。しかし -1.5°C では3.5時間以内に葉面の凍結さえ完了することは少なく、このとき冷却を止め融かしてみると、凍っていた組織の各部分において生きていた細胞がきわ

めて多い。これは大部分の細胞が可逆的な細胞外凍結をしていたことを意味するものである。この程度に凍つた植物を植えておくと、凍つた葉の先端から縁部にかけて黒變がはじまり少なくとも凍結した組織の一部は枯死する。 -2°C 内外の温度では夫々凍結時間の長短に従い融解後の葉面の黒變面積が増えるが、この黒變部は葉脈を中心として擴がっている場合が多い。融解直後の植物は組織片でみると生きている細胞はやはり相當に多いが、これを植えておくと凍結した葉は殆んど皆枯死する。しかし莖部の大部分は生長を続ける能力がある。

植物体の温度を更に一定に保つてみるために、上記の様に植物を収めた管ビンに流動パラフィンを充して冷却した。但しこの場合は後述するように植物体の返冷却が甚だ破れにくいので、一部を油上に出しておいてここに植木した。この方法で3時間 -1.5°C においた植物は莖も葉も共に凍結していたが、融かしてみるとやはり大部分の細胞が生きていた。しかし何れの組織でも管束部とそのまわりの細胞には、死んだものが他の部分に比べて遙かに多かつた。これらの結果から考えると、組織の凍死は必ずしも大部分の細胞が先ず凍死することを意味するわけではなく、生活に必要な或る一部の組織が致命的な凍害を受けた結果として招來される場合も少なくないであろう。

III. 植物上の結霜による組織の凍結開始の可能性について

一般に生物には過冷却しやすいものが多いが、馬鈴薯の葉では安藤が實驗室で -2.28°C 、圃場で -3.4°C 乃至 -4.2°C 迄過冷却したことを報じている。筆者も前章の實驗の際植物体が相當大きな過冷却をおこす例を見たのであるが、更に次の様な實驗を行つた。

流動パラフィンを充したガラス管ビン中に塊莖を除いた植物体を入れ、管ビン内壁に接して濾紙をめぐらし直接植物体がガラス壁にふれないようにする。内部の温度は管ビンのコルク栓を貫いた温度計でよむ。これを低温室内の適當な温度の恒温箱に入れて夫々別個に冷却した。まず冷却速度の影響をみるために $+6^{\circ}\text{C} \rightarrow -2^{\circ}\text{C}/30$ 分、 $-2^{\circ}\text{C} \rightarrow -4^{\circ}\text{C}/30$ 分、 $-4^{\circ}\text{C} \rightarrow -7.5^{\circ}\text{C}/60$ 分の3回の觀察を行つたが、何れの場合も凍り出さなかつた*。次に冷却時間の長さの影響をみるために、 -2.5°C 及び -5.5°C で夫々18時間、 -7.5°C で4時間放置してみたがやはり過冷却は破れなかつた。流動パラフィンのついていない表面の乾いた葉でも -1.5°C で3時間内外の過冷却を続けるものは稀ではなく、 -3°C でも凍り出さずに2時間経過したものがあつた。この場合も前章で述べたように氷のついたガラス壁に接した葉から先ず植物体の凍結がはじまる例が多かつたので、無傷の植物組織が凍り出すためにも植氷が有効であろうと豫想し次の様な實驗を行つた。

葉片を鋏で $7\text{mm} \times 7\text{mm}$ 位に四角く切り、この切口を濾紙でかるくふき葉の上下両面がぬれていない様にする。これを切片の凍結過程をみたのと同じ方法で、本来の葉の裏面がカバー

* 更に急速に冷却すれば過冷却の破れる可能性もあるが、自然の氣象状態では気温が $4^{\circ}\text{C}/\text{時}$ より大きな冷却速度を示すことはめつたにない。

第1表 植氷温度と時間経過

植氷時間 (分後)	0	0.5	2	3	4	5	6	7	8	10
温度 (°C)	-2.0	-3.0	-3.0	-3.4	-3.7	-4.2	-5.0	5.6	-6.0	-6.4

ガラスに向う様に懸滴中に封じ、この葉片を冷却しつつ、下側から植氷のとき使用したものよりやや大きな*氷片で無傷の表皮組織の表面(つまり葉の表側)に約1分おきにふれて、いつ凍り出すかをしらべた。第1表にその一例を示す。

その結果多くは -5°C 乃至 -9°C の範囲で、上表の場合は10分後 -6.4°C で始めて表皮組織の過冷却が破れ、細胞のフラッシングがバラバラに、しかし急速に次々とおこり、このため組織の温度はやや上り約1分で凍結は終了する。尙この場合は単に氷片でふれるのみでなく、軽くたたく程度の振動も加え、又植氷の場所も表皮の上でいろいろ變えてみたがこのように凍りにくかつたのである。

我々は過冷却された昆虫の体壁に氷をふれた場合、相当密接に氷がさわらないと虫の体が凍り出さないことをすでにみていた³⁾ので、今度は次の方法を試みた。即ち豫じめ植物の葉上の色々な面積に**水をぬつておき、管ビン内には流動パラフィンを入れずその内壁に沿つてよく乾燥した濾紙をめぐらし、葉が直接ガラス壁にふれないようにして冷却した。この場合は比較的わずかの過冷却度で葉上の水が凍り出すのが常であつて、多くは管内の気温 -2°C 乃至 -4°C 位で葉面上の水の凍結に引続き常に組織の凍結が始まつた。しかし過冷却の破れる温度と葉につけた水の量との間にははつきりした相互関係が見出されなかつた。

田澤は南瓜の葉に始め露がつきこれが凍つて後その上に霜が出来ることを観察した¹⁵⁾。又鈴木等によれば戸外でヒメジョオン、オホバコ等に結霜するときは、葉上に出来た露の玉が一旦連なつて水膜となつてから凍結する、又實驗的にカブの葉に結氷させた場合葉上の水膜が凍ると殆んどこれに續いて組織の凍結がはじまるという¹²⁾。

これらの事實からみると降霜の際出来た氷晶は植物の表皮組織と密接にふれ合い、これが組織に植氷する役をつとめることはほとんど疑う餘地がないように思われる。

IV. 豫想される霜害の過程

安藤は晩霜のおりる所に桑、茶等の葉が凍結するのは、植物体が夜間の輻射によつて冷却しただけで組織の過冷却が破れたもので、たまたま降霜と凍害とが同じ氣象条件のもとでおこるために混同されやすいのであると主張しているが¹⁾、今迄述べたことから想像してみると、植物上の結霜と植物組織の凍結との間にはきわめて直接的な連關がありそうに見える。作物の過

* 先端の太さ 0.2 mm 乃至 0.4 mm 位。

** 直径 1 mm 乃至は 1 cm 位の圓形の面積に水をぬる。

冷却は、安藤が指摘したように低温に対する保護作用の最重要要素の一つであり、結霜さえなければ凍害をまぬかれることが少なくないのは、過冷却状態を破るための要因として植物上の結霜が植氷の役を果たしているからであると考えられる。勿論植氷されなくても生物体が凍り出す場合は多いが、我々の現在迄の知見では植氷されたときに比べて遙かに大きな冷却をするまではその過冷却状態は意外な程安定であり、かなりの振動を與えてもこれをやぶることは困難である。

さて今、霜に植氷されて植物組織の凍結が始まったとしても、このことが直ちに植物の凍害をもたらすかどうかについては異論のあるところであろう。田澤は葉上に露や霜の出来ることは作物自体の冷却を妨害する結果となるから植物にとつては返つて望ましいと考えている¹⁰⁾。

鈴木等も実験室内で行つたナクネ*の葉の凍害の観察¹³⁾と戸外で得た植物葉の冷却曲線の形から同様の効果を主張し従つて結霜は凍害を防ぐのに役立つことが多いと結論した¹⁴⁾。しかし植物の凍害が單に致死温度という様な限界に達しさえすれば、決定的となるものでないことは既に幾多の研究がこれを證明している⁸⁾。我々も今迄細胞の凍結によつておこる死の過程については、度々記載しているから^{2,4,5)}ここにくり返すことはさけるが、要するに細胞内凍結は致命的であり、細胞外凍結はその細胞の耐凍性の高低に従がい耐えうる温度と凍結時間にある程度の限界を認めることが出来るのである。馬鈴薯の芽のように耐凍性の低いものでは組織切片が凍結する場合は、 -3°C 附近に或程度の限界を考へることが出来るが、前述のように植物体全体としての凍害は必ずしも -3°C 以下に冷えずとも大害を來す可能性がある。

また霜害の機構の一つの解釋として、田澤は霜が融ける際にはつきりと植物の上に害が認められるから、これは Iljin の唱えた凝原形質分離とそれにつづく凝原形質復歸のための害⁷⁾であろうと想像した。しかしこのような害は Stuckey 等¹¹⁾の追試其他で明らかにされたように特殊な實驗条件を與えない限りむしろおこり難いもので、いまでは凍つた細胞が融ける際にみられる原形質破裂は、細胞外凍結が或程度進んだときすでにおこる原形質表層部の變化の結果であると考えられている¹⁰⁾。筆者の觀察でも凍結細胞を急激に融かすことによつて、ゆつくり融かす場合より大きな害を與へることは出来なかつた。まして表皮の外側でおこる霜の融解によつて葉の組織細胞が害されることは少なくとも自然状態ではおこり難い現象であろう。

次に 1953 年 5 月の札幌で晩霜のあつた日の氣象条件** を舉げこれと馬鈴薯の芽の凍害との關係を考へてみよう (第 2 表)。

即ち 3 日間どの日も降霜に植氷されて植物の組織が凍りだす程度の温度状態であり、且つ少なくとも 18 日はかなりの量の細胞内凍結をおこし得たであろう。又 19, 20 日の兩日には或いは組織内に細胞外凍結しかおこらなかつたかも知れないが、耐凍性の低い細胞ではこれのみ

* この類の植物は細胞外凍結に耐える能力が比較的高いが、葉面に植氷されずに充分過冷却してから凍り出すと、フラッシングを起し易く、従つて高い温度で既に細胞外凍結を始めた組織よりも害が大きくなる場合が多い。

** 札幌管區氣象臺の觀測値。参照に當つて御配慮下さつた山崎道夫技官に深謝する。

第2表 降霜時の温度(°C) 1953年5月,札幌

時	18日	19日	20日	
1	0.4	2.2	4.9	気温 地上1m
2	0.2	1.2	4.7	
3	0.0	-0.1	4.3	
4	-0.3	0.3	3.7	
5	0.1	1.2	4.2	
6	3.9	5.0	9.5	
7	6.8	9.7	13.1	
6	3.9	6.5	7.1	地表面温度
	-5.2	-3.2	-2.2	接地最低温度*

* 地上約3cmに上向きにおいた最低温度計の読み。

でも程度によつては致命的となる可能性は充分考えられる。又前述のように導管附近の一部の組織が害されたために残部の細胞はたとえ融解直後は生きていても、葉全体としては結局死んでしまう場合も想像出来よう。しかし莖部では、垂直に向つている上に表面積が小さいから葉に比べて冷却の程度は遙に少なくなり、被害はずつと軽減されるであろう。事實筆者の観察した圃場では太い莖で枯死したものは殆んどなく、後日側芽は勿論頂芽さえ生長して来たものが少なくなかつた。

又最近、霜害を受ける時には最低温度そのものよりも低温にさらされる時間の長さの方が植物にとつて重要であるとの説⁹⁾もあるが、その植物組織の中で細胞内凍結がおこる場合は時間的要因は殆んど問題にならないから、これは植物組織が細胞外凍結の過程にある間に限つて考えられる要因であろう。

ともあれ今迄述べたことは、植物体の過冷却が結霜によつて破れるであろうとの前提に従つて霜害の過程を考察したものであつて、霜害研究の最も重要な問題である自然の結霜によつて組織の凍結がはじまる過程については、鈴木及び荒井の観察¹⁰⁾に負うところが多いが、尙今後の研究に待たねばならない。この他降霜が二、三日連続におこることは少なくないから、凍結融解が反復する場合の害も弱い春の作物にとつては勿論考慮する必要がある。又細胞内凍結をおこさない過程での凍結は、それぞれ作物によつて相當に異なるものと考えられ¹¹⁾、同一作物であつても異なる組織は異なる耐凍性を持つであろうし、又組織の死を招來するために必ずしも大部分の細胞の凍死を必要としないことは既に述べた通りである。これらの意味において、降霜時の圃場で種々の作物に對する直接の観察が微氣象學的觀測と同時に行われることは、霜害の機構を知り、且つその根本的な防除を考究するために必須の仕事であるといつても過言ではないであろう。

摘 要

晩霜のある頃の馬鈴薯の芽を材料として、組織の凍結過程と植物体の過冷却の破れ方をしらべ霜害の機構を考察した。

植物体の過冷却状態は相當に安定したもので、作物は凍り出さない限りかなりの低温に耐えられるであろう。しかし一旦降霜のあつた場合、植物表面の結霜は比較的わずかの低温にあつても植物の過冷却をやぶり組織の凍結をひき起すのに充分役立つものと考えられる。晩春の作物のように耐凍性の低い細胞から出来ている組織では、一旦凍り出した場合致命的な細胞内凍結をきわめておこしやすい。又細胞外凍結のみしかおこさなくても、比較的短時間にこれが致命的となる場合がある。又この時大部分の細胞は細胞外凍結に耐えられても、例えば管束組織のように生活に重要な或一部の組織細胞が害されたためにその植物の或部分、若しくは全体としては結局死を招くことも考えられる。

文 献

- 1) 安藤廣太郎 1919 植物の凍死及其耐寒性に關する研究. 農事試験場報告, 44, 1.
- 2) 青木藤・朝比奈英三・照本勳 1953 生物の凍結過程の分析 IX. 植物の耐凍性と凍結曲線の型. 低温科學, 10, 69.
- 3) 青木藤・篠崎壽太郎 1953 イラガ前蛹の過冷却に及ぼす冷却速度の影響. 同誌 10, 109.
- 4) 朝比奈英三 1950 生物の凍結過程の分析 II. 植物組織の凍結過程の顯微鏡的觀察. 同誌 3, 229.
- 5) ———— 1948 生物の凍結過程の分析 V. 植物細胞のフラッシュ型凍結の様式に就いて. 同誌 4, 85.
- 6) ———— 1951 生物の凍結過程の分析 VIII. 植物細胞の氷粒式凍結. 同誌 8, 89.
- 7) Iljin, W. S. 1934 The point of death of plants at low temperatures. Bull. Assoc. russe Rech. Sci., Prague, 1, No. 4, 1.
- 8) Levitt, J. 1941 Frost Killing and Hardiness of Plants. A Critical Review. Minneapolis.
- 9) Shanks, R. E. and F. H. Norris. 1950 Microclimatic variation in a small valley in eastern Tennessee. Ecology, 31, 532.
- 10) Siminovitch, D. and J. Levitt 1941 The relation between frost resistance and the physical state of protoplasm. II. The protoplasmic surface. Canad. Jour. Res, C 19, 9.
- 11) Stuckey, I. and O. F. Curtis 1938 Ice formation and death of plant cells by freezing. Plant Physiol., 13, 815.
- 12) 杉山直儀 1944 蔬菜類の凍害. 産業氣象の研究, 2, 79.
- 13) Suzuki, S., Yoshida, Y. and T. Arai 1951 Does frost really bring injury to plants? (Preliminary report) 農業氣象 7, 17.
- 14) 鈴木清太郎 荒井哲男 1952 霜害の可能性 (豫報第2) 農業氣象, 7, 127~131
- 15) 田澤 博 1947 霜と霜害. 寒地農學, 1, 213, 325.

Résumé

According to the microscopic observations on the freezing process of the plant tissue and to the results obtained from the experiments on the initiation of tissue freezing of frosted, intact plant, the most probable process of injury caused by the formation of hoar frost on potato sprout can be explained as follows:

The sprout tissue is easily freed from supercooled state by the frost formation on

the leaf surface. When the tissue freezing has once begun, the cells of the sprout usually suffer fatal injury from a temperature fall of a few degrees below zero. At about -3°C these cells are easily frozen intracellularly. Even the extracellular freezing for relatively short length of time is sometimes dangerous for the sprout cells. Beside this, the cells of certain tissues such as vascular bundle are particularly susceptible to the freezing, consequently the frost damage of only one important part of tissue often results in fatal injury to the whole plant.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

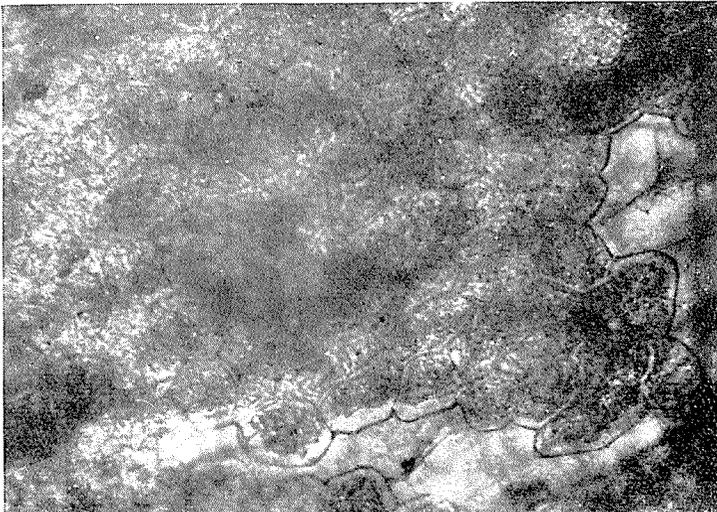
The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

The first part of the paper is devoted to a discussion of the
 general theory of the subject. In the second part, we shall
 apply the theory to the case of the n -body problem.

第 1 圖 版

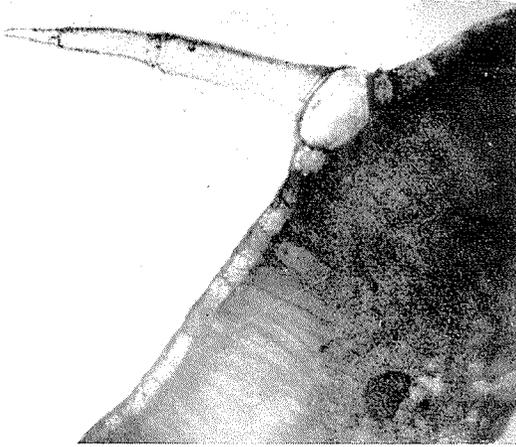


第 1 圖 莖の柔組織の凍結。細胞外凍結で多量の水が表面に出来た後、細胞内凍結もおこっている。 -1.5°C で植水後 24 分、 -3.5°C 。

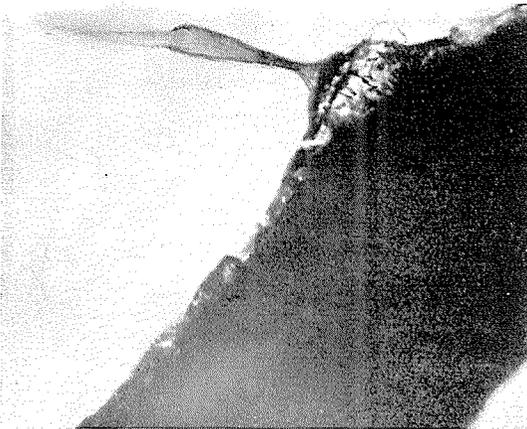


第 2 圖 莖の表皮細胞の細胞内凍結。 -8.8°C でフラッシングをおこしてから 4 分後、 -9°C 。

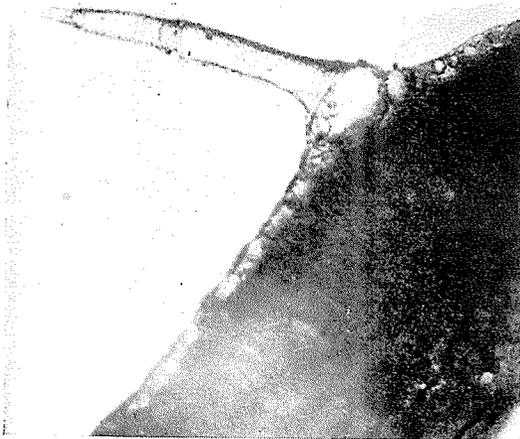
第 2 圖 版



第 3 圖 葉の断面， -5.6°C に過冷却したところ。



第 4 圖 同上。細胞外凍結をしている。 -1.8°C で植氷後 16 分， -1.7°C 葉上の毛の細胞は根もとに出来た氷に脱水されてしなび、先端は曲つて寫眞の焦點から外れている。



第 5 圖 同上。20 分間の細胞外凍結の後融かしたところ。細胞は何れも生きていて吸水し原形に戻る。融解後 2.5 分 -0.4°C (各圖とも $\times 140$)