

霜害の機構とその防止法について

田 沢 博*

(1) 霜害の機構は気象学、植物生理学、植物細胞学等各方面の総合研究にまたなければ判明しない。気象学は大気中の結霜およびこれをもたらした低温に精細も密な研究ができて、この研究結果のみからももちろん植物霜害の機構を云々することはできない。凍結した魚肉、野菜等が融解の仕方によって品質にいちじるしい差異を生ずるとやや似通った現象が霜害にもある。すなわち結霜の翌朝、日射を急激に受けた箇所は被害が顕著で日蔭の箇所は被害が極めて軽微であったり、あるいは霜を水で洗い流し、また特にいねいに拭い取ると被害がほとんど見られない事実などがある。したがって地面際の冷却を緩和するとか、結霜の誘因を除く研究は気象学に負わなければならないが、気象学の立場からだけで植物の霜害を論ずることは危険であって、これこそ農業気象学に委ねるべきものである。植物の幼芽葉上に結んだ霜が融解の際、植物のその部位にいかなる変化を与えるかは植物生理学者や細胞学者が比較的容易につかみ得るはずであるが、これにも1~2の代表的な外国研究を除いては注目に値するものがない。

(2) 文化が進み、学術研究はいちじるしい進歩をしている今日、いまだ霜害の機構が判然としておらず、したがって適切な霜害防止法が立てられていないのは一体なぜであろう。燻煙法は Columbus がアメリカ発見の当時南緯15°附近の土人が行っているのを見たのに始まると云われている。真偽の程は判らないが、気温の逆転層を利用した一応は理論に叶った方法だが、当時と情勢の異なる今日、いまだにこれが最善の方法であるのみか、ほとんど唯一無二の防止対策で、ほかに適当な防止法が見出されていないのはなぜだろう。毎年春だけでも100億円前後、時にはこれを遥かに凌ぐ損害が喧伝され、農家は不安におののいておりながら対策が徹底しないのは不思議である。わたくしは樺太、北海道など寒地の霜害が予想外に大きく豊凶をも強く支配する事実を知って、20年来この問題に没頭して、かって美瑛産業気象研究所で

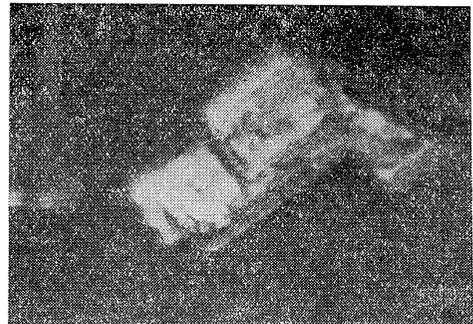
は所員と協力して相当に研究を進めたが、惜しいところで中断の止むなきに至った。研究成果の一斑は藤原暎平先生の御校閲と望外なお褒めのお言葉を頂いて雑誌「寒地農学」創刊号および2号に発表して一応研究は打切った。しかしわたくしは居を大阪に移して5年、今更ながらに暖地の霜害が予想外に大きいのに驚いて、再び老骨に鞭打って研究を続行せざるを得なくなった。結局霜害の研究は農業気象学者に課せられた責務と感じたからである。現在京都では京大教授滑川博士を中心とした大規模な霜害研究が始められている。わたくしも植物部門の担当を委嘱せられているのでこれの協力かたがた研究を進めるつもりである。

(3) 結霜の成因および霜については気象学者が完璧の調査をすでに了している。だがわたくしは次の諸点の補足と研究の進捗を痛感する。

(i) 結霜の直前には地面際に過冷却の水滴または微細な氷晶の浮泛する事実がある。

(ii) 結霜を誘致する地面際の冷却の主体はもとより輻射冷却に基因するが、これに伴う冷気塊の移流および冷気の沈降を特に強く考える必要がある。

(iii) 地物に結霜する際と植物葉上の場合とは霜の形態が異なる。原則として地物にはこれに直接して霜が附着しているが、植物の場合は必ず薄い氷層があってその上に



霜が附着している (写真参照)。この氷層は結霜の過程において当初温度の下降とともに葉上に結露し、この露

* 大阪府立大教授、農博、元美瑛産業研究所々長

が凍結して凍露の過程を経て氷層を作るものである。わたくしはこの結露はもちろん空気中の水蒸気が主体をなすことは当然と思うが、植物の細胞液の水が加わっていることを想像する。それは植物生理上では細胞液の水を放出して細胞液の濃度を高めることは植物自身の耐凍性を増す自衛手段であるからである。しかも葉上に結氷結霜することは同時に暗黒体である植物体がじ後の輻射冷却を緩和するとともに凍結に伴う潜熱を自衛手段の1つとして利用することも考えられる。植物が環境に対して採る自衛手段はわれわれが想像する以上に強力なもので、さすがに生物であるという感を深くする、平地のタンポポを寒冷風の吹き荒む山頂に移植すると、間もなくその細胞液の濃度をいちじるしく高くすることの実験結果もこの間の消息をよく物語るものである。鈴木清太郎博士は(鈴木, 荒井一霜害の可能性, 農業気象7, 1952)わたくしと同様な見解を述べておられるが、わたくしは朝比奈氏が(朝比奈英三—植物霜害の一機構, 低温科学B第11昭和29年)論ぜられているように降霜が凍害を防ぐものとは考えていない。わたくしは植物が生物として外圍の悪条件に無関心ではないということを強調するとともにこの点を霜害防止に採入れようとしているからである。凍害を判然と起すようないちじるしい低温では、結霜はも早や別箇の現象として考える段階を超えている。霜を拭い去れば霜害を緩和でき、また結霜の翌朝日蔭の部分に霜害が少い等の事業から、霜害緩和を考える余地が多分にあることをわたくしは農業上で知っており、また実際に霜害の被害の対策と目されるものがここにあることも忘れてはならないと思っている。

(二) 霜害に弱い植物を鉢植にして百葉箱内に置いて、これと畑のままのものとを比較してみると、畑のものが霜害でやられても霜を伴わない箱内のものは被害を受けない。この場合露地の地面温よりも箱内の気温がやや低い場合でもおよそ同様である。ことに箱内鉢植のものは水色に凍結しても回復する場合がかなり多く、その場合鉢内土の水分が多いと一層耐凍力が強く、鉢内の土が乾燥していると弱い植物体内水分の移行に微妙な何物かがき知されるようである。なお植物の中には、非常に霜に強い莖葉をしているが、これを根から切離して了うとその莖葉は霜害に極端に弱くなる例もある。霜に弱い植物が蔓になって高く捲き上がり地面際の不利な環境を逃れようとしていることもわれわれは関心を大にする必要がある。纏繞性の植物が総じて霜に弱い事実は、逆にその性質と努力のために生き抜いているものと考えられない

こともない。

(四) 植物が冷却に遭った際零下相当な温度に対しても過冷却の状態を保ち、凍結に耐えることが知られている。朝比奈氏(前掲)は結霜が積氷の役をして細胞組織の過冷却を破り凍害を起すものと考えているが、もしこの考えが妥当なりとすれば結霜前の露の凍結の際に遡って考えてよいわけで、結霜の有無による被害の差と思ひ合わせると肯けないものがあるようである。

(一) 霜には次の3種類がある。

(i) みずしも(水霜) 気象学上凍露の一種と考えてよい場合が多い

(ii) しろしも(白霜)無定形の霜

(iii) ざらめしも(晶霜) 結晶形の霜

この分類および命名は藤原先生のご指教によったものである。気象観測上霜の強度に疑を持つ。いわんや3種の霜を区分せずに強度を示すことは一層無意味である。白霜のみでみて、霜色によって現象を記載するのはよからうが、霜害とはほとんど無関係なことは承知すべきである。

(二) 霜害と凍害が同時にいわゆる霜害の被害を大にしている事実をわたくしは否定はしない。しかし晩霜時に見る低温と凍結は極めて軽微であって、植物がむしろ過冷却の状態で耐えうる温度である点からも、霜害は凍害と区分して研究の対象とならねばならないと思う。

(4) 従来霜害防止法としては燻煙法, 加熱法, 撒水法, 灌水法, 灌水法, 覆蓋法, 送風法などが挙げられており、また最近鈴木博士は(人工降雨氷結法による凍霜害防止法再論—農業及園芸32—3) 間接法として気候改良, 直接法として被覆法, 煙霧法, 加熱法, 降雨法を挙げ、「食塩水とか砂糖溶液とかを散布する方法は結氷点を降下することをねらったものであるがまだ成功していない」と述べられ、「結局防凍霜法として実用しうるのは空気のこん(潤)濁, 暖房, 降水のこの3個の方法しかない」と結論せられている。だが以上幾多の方法とまったく趣を異にした植物生理に結んだ防霜害法が考えられることをわたくしは附け加えたい。わたくしは10年前水滴微粒子の噴霧法を提案していたのであるが、これが今日関心を深めてきているようだ。実行になお一工夫が必要だがフォグ・マシンの利用など企図されている。アメリカで Gasoline derivatives を噴霧する研究がその2~3年後で学術雑誌に発表されたが、その後の反響がない所を見るとやはり実行困難なのだろうかと思う。

(5) わたくしが植物生理学に結ぶ研究を企図している理由を簡単に述べよう。これは成功すれば実用価値が最も高いので、農家に歓迎されると思う。

(i) 水または溶液が空気と接する時、空気と液との間に水分子の移行があり、そしてそれは両者の蒸気圧の差による。この場合2相の間には水だけの移行があって溶質の移行はないから、あたかも溶液と水あるいは濃度の異なる2つの溶液間の浸透現象に類似する関係が成立つ。すなわち水分子の移行の原理は2つの溶液間の場合でも空気と水との間の場合でも同様である。

(ii) 組織内の細胞間隙の空気の蒸気圧は、大部分これを取囲む細胞のもつ平衡蒸気圧によって決定せられる。

(iii) 大気と水分平衡状態にある細胞においては、理論的にこの時の空気相の蒸気圧を浸透圧に換算した値がこの細胞の吸水力の値に等しい。なお細胞膜および細胞質の毛細管的構造もまた蒸気圧をわずかながら減ずるから、細胞膜の毛細管が空気に接する端の浸潤水の濃度は理論上細胞液の濃度よりもやや低くなって平衡状態にある。

(iv) 蒸気圧は空気中の水分子の密度に比例し、温度とともに高まる。また水中に不揮発性の物質が溶解されると蒸気圧は減じ、かつその低減の度は濃度に比例し物質の種類に関係しない。大体蒸気圧は浸透圧に反比例するとみてよい。

(v) 外気の蒸気圧あるいは相対湿度が低ければ、初めはまず細胞膜が水を失い、ついで原形質および液胞が水分を失って膨圧は減じ、ついに葉は萎凋する。もし萎凋が過度に起る時は再び細胞に水を与えても膨圧を回復することがなく死にいたる。しかし過度でなければ細胞は緊張状態を回復して再び健全な生育を継続することができる。

(vi) 普通の空気中では大抵細胞の蒸気圧が空気よりも高いから細胞は水を出して失う方が多い。

(vii) 湿度小なることは蒸気圧が小なることで、細胞による水の吸収は困難となるが、細胞の浸透値、したがってその吸水力は高まる。これは今まであった細胞液が水を失って濃縮されるためでなく、むしろこのような外部条件において細胞に浸透的に作用する溶解性物質の量の増加をきたすからである。もっとも普通に見られるこの種の変化としては澱粉が加水分解して溶解性の糖となることである。そしてその逆反応によって浸透値が低下することもある。

(viii) 浸透調節機能は温度の影響によって起る。一般植物細胞は低温に遭えばいわゆる増張作用を起し、化学変化によって細胞内の浸透値を高める。そしてこの増張作用は0°C附近あるいはそれ以下の温度に遭う時にいちじるしい。実験的に低温に遭わせると細胞内に還元糖がいちじるしく増加して浸透値が高まることが認められている。この浸透調節は耐乾あるいは耐凍性に関係する。

(ix) 植物の組織内に氷ができる経過は、温度の低下とともにまず細胞に氷ができるが、この氷は初め細胞間隙にある水蒸気から生じ、その結果細胞間隙の蒸気圧が減じて、液胞からも水蒸気が出て氷となる。もちろん細胞液内には物質が溶解しているから、温度0°Cあるいはそれよりもやや以下となっても結氷をきたさない。細胞液から水分が水蒸気として奪われ細胞間隙に結氷が進むとともに細胞液の濃度が高まるから、液中の結氷は漸次困難となるはもちろんである。しかしさらに甚だしく温度が下ると液胞内にもついに結氷が起ることになるが、その温度は種々な条件によって多少の相違がある。これに反して急激な温度低下では氷は初めから細胞間隙のみならず細胞内にもただちに生じ、また甚しい場合には原形質内にも氷を生ずる。この場合には液胞から次第に水蒸気が奪われて行くことはないから、細胞液の濃度が高まって行く時間の余裕がない。以上は厳寒期の凍害と一般の霜害はもとより、霜の有無による低温害の考究に重要な観点の1つとなるものであろう。そして細胞内の結氷はその微細構造により、また液内に含まれる親水膠質によっていずれも氷点降下に役立っていることが見られるが、細胞の構造、原形質の組成からも同様に見受けられる。

(x) 急激に凍結が起ると原形質はその結合水までも奪われ、それが不可逆の奪水、すなわち原形質膠質の凝固となって死をきたす。安藤博士はすでに古く細胞汁液の凍結する温度すなわちその氷点と原形質の氷点が異なることを、そして後者は前者より高からざることを実験により証明せられ、またその凍結の原形質がゾルよりゲルに変化することを顕微鏡下で検せられて、かくて植物の凍死点は原形質の凍結する温度と同一と見なしている。しかしこれら凍害の研究はとかく途中の霜害を飛んでこの点のみ集中せられた傾向が多い。

(xi) 植物ことに高等植物では細胞内に氷ができる程の低温でなくとも、低温のため根の吸水が不活潑になり萎凋して害を受け、生育を害せられて、ときには枯死するものがある。すなわち植物細胞原形質凍結までの過程に、

植物が主として低温に災いせられて死にいたる幾多の段階のあることを知るべきであり、霜害もその1つと考えてよいであろう。とくに農作物は人間の望むままに一方的に形質を変えられ、随所に栽培が拡張せられていることも忘れてはならない。

(ア) 細胞が水の吸失によって伸縮するに当り、細胞膜と細胞質との間に起る器械的破壊作用は乾燥または凍害に重要視されなければならない。耐乾性、耐凍性の特徴として挙げられるものは多くはこの点に関係をもつ。この両抵抗性共通の特徴として知られていることは、これらの性質が強い細胞の細胞液の浸透係は高いということである。しかも外圍の状態に適応して増張現象によって植物は浸透係を高め、寒冷に対してもよくみずから処することが知られている。凍害の場合浸透係を高めて氷点を降下させ、結氷の害を緩和する。しかしかりに葡萄糖が1モル増加したとしても、そのために起る氷点降下はわずかに1.86°Cに過ぎず、しかもかような濃度の増加は細胞内では容易ではない。結氷による細胞体積の変化を成るべく少なくし、細胞質と膜との間の不利な器械的作用を軽減するにあるのだらうという説のでも当然である。

(イ) 凍害に対する Iljin の説は、結氷が細胞間隙だけに生じた場合に限るもので、細胞内に結氷が生ずる場合の考究に適しないとされているが、霜害機構の考究上はかえて面白いと思う。すなわち凍害は空気中で凍結した細胞あるいは組織においては乾燥の場合と同様で細胞質と細胞膜とが附着したまま變をなして収縮する。温度が高まるとまず細胞間隙の氷が融解して液状の水となり、あたかも乾燥した細胞を急激に水中に入れたと同じ条件となり、同様の害作用が起る。すなわち急激に細胞膜が細胞質の抵抗に逆って離れようとするため細胞質に破壊的の害を起しついに死をきたす。もし温度を高める前にあらかじめ濃度の高い蔗糖溶液に浸して氷を融解する時は、細胞内に急激に水が入るのが阻止せられる。かくして後に徐々に蔗糖液の濃度を低めて行く時は、細胞は害を蒙ることなく正常の状態に復帰することができる。

(ロ) 霜害は凍害機構を無視しては考えられないが、すべてを凍害で解釈しようとするのも誤である。植物の凍害死には低温とその継続時間が要因であり、これに植物の耐凍性が条件として加わる。氷点下に降って植物体が凍結をきたし、見掛上は同様に認められてもその実質的凍害の内容は極めて複雑である。春の霜害と秋の霜害の

根本的差異もその1つのいちじるしい相違を示す適例である。秋季徐々に熟期に入っている作物の組織は次第に冷温に遭うとともに耐寒性がいちじるしく増進するが、春季わか（嫩）葉が開展し新条が伸長するものでは、寒気に対する保護組織をすでに失い、貯蔵養分は減少し、原形質は休眠より覚めて活動期に移ろうとし、耐寒性はいちじるしく減少するにいたっている。したがって作物としては予期しない急激な低温、その低温が比較的軽度の場合が多いにかかわらず、被害を大にし、新組織を枯死にいたらしめ易いのは当然である。わたくしは暖地の霜害には寒地の霜害とやや異った特徴を認めるとともに、暖地のみで可能な霜害防止法にも想到する。

(ハ) ある細胞学者は凍死の原因は原形質に対する低温そのものの害であるから、作物の表面に結霜するにいたったならば、すみやかに温度を加え、低温より救えば凍害を免れ霜害を遁れうするという説をなしている。作物の汁液は通常過冷却の過程を経て結氷を始めるが、これと同時に、またはこれよりも遅れて原形質は凍結するから、結霜があっても原形質が凍結するまでは死にいたらない故、長時間の放冷を防いで凍害を免れうするというのである。この説は専門家の意見として一応尊重はするが、解せない点もある。前述のようにわずかに軽度の冷却で止まって本当の霜（白霜）にならず、水霜で終わった際にも相当の霜害の伴う場合があり、霜量は低温の持続および進行とともに増加するが、霜害は必ずしも霜量に関係がなく、かつ霜の融解の仕方により、また霜を拭去り洗去ることによって霜害を異にする等反証の事例が少くない。

(ニ) 従来霜害に対する学説は多少あるが、その機構を特に採上げたものはほとんどなく、前述朝比奈氏が「植物霜害の一機構」の中でもわたくしの「霜と霜害」の報文以外には見当たらないと認めている。すなわち既往の学説や研究はいずれもほとんど霜害直接の問題に触れておらず結局凍害をもって説明しているに過ぎない。実際の霜害には凍害の外に霜生成に基く諸因、霜と植物体およびその生理との関係、さらに霜融解の影響等が十分に検討されなければ全きを期せられないはずである。安田博士はその著栽培学汎論の中で「同じ温度で、霜を結んだときと結ばぬときを比較すれば、霜を結んだ方が植物の受ける害は少い。すなわち水の凍結によって潜熱を出し、植物の葉の冷却を防ぎ、霜を結んだために凍害を免れることさえある」また「植物の凍害は温度の下降が原因であって、空中の水蒸気が多ければ霜は多いが、植物の被害はかえて少い。すなわち霜と凍害とは別であ

る。ただこの二つの現象がよく相伴って起るに過ぎない」と述べ、農学者特に植物生理学者としての観察と1つの見方を説明している。

(4) わたくしは植物細胞の滲透調節機能を初め植物生理機構を重要視する。外圍の温度低下ことに氷点下の温度およびこれに伴う凍結に対し極力被害を免れようとする植物の必死の努力を見通すわけにはいかない。そしてその機能がいちじるしい低温に堪え得られないのは、普通一般の場合ほとんどその必要がないからであると解したい。すなわち植物活動期の初終あるいは時期の間、換言すれば寒暖候期の移り際の春秋のある期間不時の低温から自体を保護しさえすればよいからである。ことに秋は成熟の目的を達して子孫の存続可能の見通しの立つ程度の低温から自衛し得れば、じ(爾)後は冬眠に入るなり莖葉枯凋に任せて差支えないわけである。農作物が相当霜害によりまた凍害により被害を受けて枯死する現況は、前述したように一面人為的にその原産地のそれを距る気象環境下に移し、あるいは需要目的に副うよう個性を変革したことにも大きい理由があるものである。早朝一面に結霜を見た際にほとんど霜を認めない植物があったり、他の植物が凍害霜害でいちじるしい被害を蒙っている最中であって、しかも地表面に平然と莖葉を伸ばしてまったく無被害の植物さえある。植物も生物であって環境に即応する能力のあることは明確な事実である。植物の細胞液が濃縮されるに伴って失われる水分はいかなる形態またはいかなる経路をたどるにせよ、結霜および結露に一役買っていることは想像に難くない。温室育ちが外気の下で弱いことは人間の常識になっている位、急な温度差は凍害でなくても被害を伴う。逆に低温に相当時間曝露せるものを急激に相当高温に遭わせても悪影響の大きいことは明白である。霜の急激な融解に伴ってこれに接する薄い氷層も融解し、植物細胞は劣張度の甚だしい水中ににわかに移された結果の有害作用も考えられる。この有害作用にはただ単に滲透的に過剰の吸水がありまた過大の膨脹を生ずることのみならず、細胞質を構成する化学物質の溶出が起ることに注目指摘している学者(坂村博士—植物生理学)もある位である。わたくし

はこの辺に霜害機構の謎があり、身近な霜害が永く解決を見なかった理由があると思うし、適切な霜害防止法もこの謎を解くことによって生まれることを信ずるものである。気候改良は霜害のみに限ったことではないが、農耕地内またはその附近の施設あるいは地形を変えること等によって、地域的な実行は可能性に富み有意義であるが、広範囲にわたっては利害相反する場合もあり、経費その他いろいろな問題が伴って実行困難な場合が多い。将来は別として従来農業防災はいずれも個々あるいは利害をともにする数戸の農家が行っている現状である。ここに農村の封建性や利己的観念の是正が強く反省を促されているが、霜害防止のように特に作物栽培に直接関係を持つ防災では共同実施が一層困難と思う。燻煙法の実施がうまくいかない理由の1つもここにあると思う。しかし燻煙法はわれわれが考える以上に実施上に労力を多く要し、燃料も案外農村では不足気味であることなどから、農家に歓迎されていない。さらにもう1つ考えられることは農家は自己の耕地内全作付に対して霜害防止の必要を感じずる場合が割合少ないということである。茶、桑、柿など特産的に大規模にやっている所は全国的に見ても極く少く、大半の農家は自己の広い畑の一部に霜害に弱い作物を作付しているに過ぎない。と云って覆蓋法をやるには面積は広過ぎるし、これに相当多額の経費をかけるに足らず生産物の売価が伴わない。結局運を天に任せて見殺しにする気持になるのであろう。京大滑川博士は燻煙効果の研究も企図して計画中と聞いているが、従来農家の実施程度では効果あまりよく出ないということも燻煙法が進んで実行されない1つの理由と思う。ともあれ、気象台の不断の努力によって霜害警報が出され、報道機関が完備してきた今日、直ちに速報されて府県市町村の関係者が周章手配を行っても、肝心の防止法に適當なものが無いから、現実の面では行詰っている。毎年の巨額の損害は気象台の霜害警報が鳴りひびいている真中で起っていることは如実にこの間の消息を物語っていることである。早急の霜害防止の適法が真に望ましいことである。