

赤外線熱映像による緑化用植物の低温被害診断技術について

An Analysis Method on Injury Symptoms Utilizing Infrared Thermal Imaging under the Freezing Stress

成 富根* 近藤 三雄**

Bugeun SEONG* Mitsuo KONDO**

1. 科学的な低温被害診断技術の確立の必要性

緑化用植物の生育診断の良否や生理障害・気象害の有無、程度などの生育診断については、生育量や光合成速度の測定をはじめ、その目的、対象植物に応じて、様々な手法で測定されているが、絶対的な手法というものはありません。とりわけ緑化用植物については収穫が栽培の目的ではないため、生育量の良否を定量的に判定することが難しい。また、生理障害や気象害の発現機構やその被害度を可視障害からだけで定量化することも難しい。いかに先端的な科学技術を駆使して緑化用植物の生育診断手法を確立するかも造園学、造園技術の重要な課題の一つと言える。

近年、赤外線熱映像による状態診断がさまざまな学問、技術の領域において試みられ、成果をあげている。造園の分野においては、都市のヒートアイランド現象の解明、緑地の存在効果あるいは屋上緑化の熱的改善効果の実証などにも威力を発揮している。

本報では、低温による緑化用植物の被害症状の診断、その発現のメカニズムの解明のための赤外線熱映像の有効性や可能性について言及した結果を述べる。

2. 植物の低温被害と既往の診断手法

植物の低温障害の診断にあたっては、これまで関係諸分野において、生理機能の定量化云々ではなく、植物体に現れる可視障害の程度や生育量あるいはそれらも含めた経験的な知見によって判定してきた。

イネをはじめとする作物や果樹などの農作物では低温被害が生産量の減量につながるため長い間、様々な研究がなされてきた。しかし、造園植物の場合、それとは異なってその研究が等閑視されてきたのが現状である。地球温暖化や環境問題などが大きく取りあげられている中で重要な機能が課せられる造園植物の生育についての確な診断とその結果に基づく処方による健全生育の保持が強く求められるようになってきた。

筆者らは、この造園植物の低温域での被害の機構解明とその予防のための一連の研究を行ってきた^{1), 2)}

これらの一連の実験は長い時間をかけて、供試植物の養生、さらには、低温設定が可能な大がかりな人工環境気象室などの

実験設備がなければ実行し難いことである。

特に植栽の現場で活用できる実用的な技術が望ましい造園分野の特性上、より簡便で有効な低温被害の診断技術が求められることから赤外線熱映像による低温被害の診断を試みた。

3. 赤外線熱映像の有効性の実証

(1) 植物体表面温度による最低致死温度等の表示の必要性

これまで植物の最低致死温度等は空気温度によって表示されることが一般的であったが、近年の赤外線熱映像技術の向上に伴ない、Wisniewski や Pearace らの最新の研究成果^{3), 4), 5), 6), 7)}によって植物体表面温度で表示することの妥当性が指摘されるようになった。筆者らも、本来、低温被害を受けない空気温度でも風要因が加わることによって植物体表面温度が空気温度よりも明らかに低下し、低温被害が発生したという実験結果から今後は植物の最低致死温度等は空気温度だけではなく、植物体表面温度で表示することの妥当性を報告²⁾している。

(2) 植物体表面温度の定量化

ただし、植物体表面温度を正確に把握することは簡単ではない。筆者らの測定結果から言えば、同じように設定した人工環境気象室の中でも植物体表面温度は一様ではなく様々な分布をしていること、また植物体は部位によっても温度分布が異なること、風などの環境要素が加わると植物体表面温度の変化がある温度域では激しい変化を示していることなどが認められた。

植物の体表面温度は、1枚の葉の中でも複雑多岐な様相を示す。この状態を正確に把握できるのも赤外線サーモグラフィ装置の性能によるものである。ただし、このような植物の部位、あるいは1枚の葉における温度分布の違いは何を意味するのか定かではない。

植物組織体の微妙な構造や形態の違いによるものだけではなく、植物体部位による低温抵抗性が異なり、低温による被害の受け方の違い、目に見えない凍結被害の進行状態の違いや度合等が温度分布の違いとなって現れるものと推察される。

(3) 熱電対、赤外線放射温度計の限界

これまで葉温等の植物体表面温度の測定の定量的な計器であった熱電対による手法は、あくまでも植物体(葉)のある1点のみの測定結果であり、また、赤外線放射温度計も単位面積当り

* 東京農業大学大学院農学研究科農学専攻

** 東京農業大学地域環境科学部造園科学科

* Department of Agricultural Science, Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture

** Department of Landscape Architecture Science, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

の平均温度の測定結果であるから、いずれも植物体表面温度の分布特性を含めた正確な温度状態を計測する測器としては不十分と判断される。

(4) 赤外線サーモグラフィ装置の有効性

改めて植物体表面温度の測定機器としての赤外線サーモグラフィ装置の有効性を整理すると

- ①非破壊で測定が可能であること
- ②遠隔操作で測定が可能であること
- ③単一点ではなく対象物全体に体表面に関する温度情報を数値でかつ総合的に得られること
- ④温度情報はリアルタイムで得られること
- ⑤測定された画像はデジタル化されたもので、全ての温度情報が数値化されている。それ故、解析ソフトで多様な形で解析が可能であることなどが挙げられる。

4. 赤外線サーモグラフィ装置による測定・解析法

(1) 機械操作上の留意点

(i) 測定上の留意点

赤外線サーモグラフィ装置の測定に臨むとき最も留意すべき点は測定対象物に伝導、対流など熱力学的な原理を常に考えて測定環境を整えることである。

赤外線サーモグラフィ装置は測定対象物の熱を映像として撮る測定機器であり、従って、熱力学や赤外線のメカニズムに背くような場合は正確な熱映像を撮ることが難しくなる。従って、周辺の物体からの熱が伝導されると、測定対象物の温度の状況が大きく歪んでしまったり、物体の輪郭が霞んでしまったりする。これで、後に解析に臨むとき測定の努力を無駄にする可能性が高くなる。厳に留意すべきことである。

(ii) 機種を選定

赤外線サーモグラフィ装置にはそれぞれ測定対象や測定環境に適した機種があり、主に検出素子の素材によって異なるが低温環境で低温と推定される物体の測定は HgCdTe(水銀カドミウムテレレ)検出素子に液体窒素冷却方式を備えた機種が適していると言われる。筆者らは、本報で冷却式と非冷却式の2種類の機種での測定を試みたが、非冷却式のものでは測定対象物の輪郭がかすんでしまったり、焦点が合わなくなったりすることが起き、正確な温度の解析・把握に膨大な労力と習熟度を要し、迅速に低温状態の植物体表面温度を測定するためには不向きな機種と言える。

一方、冷却式のものはこの点の問題点がなく、0℃以下の低温領域の測定に好適な機種とみなせる。

(2) データの解析、とりまとめ方

- ①低温での測定環境を整える。例えば、伝導や反射などが起こらないようにする。その詳細については事例1と2で説明する。
- ②測定は機器取扱書の操作マニュアルに従って、測定し、メモリーで測定結果を収める。
- ③メモリーで収められた画像データは付属の解析ソフトに取り込み、解析を行う。
- ④解析の結果はメモリーで保存する。

これで一サイクルの解析が完了することになる。

5. 低温被害と赤外線熱映像による植物体表面温度のメカニズムの分析事例

これまでに筆者らが行った「栽培育成条件の違いと耐寒性との関係究明」、「風要因が加わることによる寒風害の機構解明」についての実験結果を事例²⁾として低温による可視障害と赤外線熱映像による植物体表面温度との関係分析を試みる。

(1) 事例1：栽培育成条件の違いと耐寒性との関係究明実験

本実験はヘデラの露地栽培品と温室栽培品との低温抵抗性ならびに同一個体の先端部と基部の葉の低温による被害の発現の違いを植物体表面温度との関係から明らかにするために人工環境気象室で行ったものである。

(i) 測定方法

赤外線熱映像の撮影にあたっては葉の表面温度の実温を正確に撮るために表面を黒塗りした厚さ1cmのガラス板(縦40cm×横30cm)1枚を人工環境気象室の壁面に取付け、4個体からそれぞれ一枚ずつ切取った葉を遅滞なくガラス板に貼り付けるようにし、非冷却式のTVS-600で葉面温度の測定を行った(写真-1と写真-2)



写真-1(左) 赤外線熱映像測定対象物

注) *H. helix* L. の葉面温度を測定するため切葉の葉身を黒塗りのガラス板に貼りつけた模様。上段(露地栽培品の先端部葉身)、下段(温室栽培品の先端部葉身)

写真-2(右) 赤外線熱映像測定風景

注) 栽培育成条件の違いによる供試植物の測定風景(TVS-600)

(ii) 解析方法

TVS-600 付属の解析ソフト(TVR-KS2000)を用い、葉面温度について解析を行い表-1と図-1のような結果が得られた。

表-1 葉面温度解析結果

計測の領域	重心X	重心Y	面積	最小	平均	最大	偏差
A多角形の解析	51.3	57.4	1444	-6.5	-4.3	-2.0	0.8
B多角形の解析	134.6	55.4	1115	-6.8	-4.7	-2.8	0.7
C多角形の解析	192.6	60.4	869	-5.8	-3.5	-2.3	0.6
D多角形の解析	257.4	71.8	1959	-6.8	-4.3	-2.3	0.8

注) 人工環境気象室設定温度-6℃、48時間前後経過した時点で写真-1のようにガラス板に葉身を貼りつけ、TVS-600(日本アピオニクス社製、非冷却2次元FPA(マイクロボロメータ)、long wave 8-14μm)による測定ならびに解析結果。図-1上段の *H. helix* L. 露地栽培品先端部葉面温度解析の結果

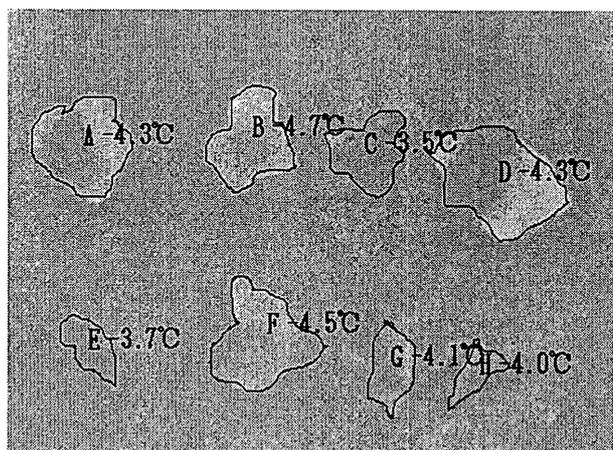


図-1 赤外線熱映像による葉面温度解析図

注) ネガティブの写真と模様が違うのは熱として対象物を取るためである。また、サーマルノイズが加え葉身の輪郭が一部に止まっているところも見られる(E, GとH)

露地栽培品先端部の葉面温度解析結果は表-1の通りである。その元になる温度データをX, Y座標通りに再構成すれば測定した葉面の形で温度の分布を知ることが出来る。再構成された葉面温度分布図は本報では紙面上の都合で載せられないが、データの視覚的要約方法としての幹葉図表示手法と形態的に極めて類似している。これを見れば従来、熱電対またはアクティブ型放射温度計で一点、一点測るようには不可能な温度情報と画像が得られる。また、これは低温顕微鏡で観察した時の細胞構造とは違って葉面温度分布を実物の葉形での葉面温度が分かり、これによって低温被害の可能性のあるところとそうでないところの判定がある程度可能になると考えられる。また、このような分析を温度区毎に行ったものをオーバーラップすると、被害の部位とその拡散の模様やスピード、被害の割合などが、デジタルデータ故に精度の高い分析が可能になると考えられる。

この点、従来型の温度測定法ではなかなか実現出来なかった測定、解析の新しい手立てとも言える。

(iii) 測定結果に基づく考証

人工環境気象室の温度を -6°C と -12°C に設定した時の基部と先端部の葉面の温度分布を 1°C 刻みで、その面積と温度の出現割合を計算し、表-2に示した。

この一連の計算結果によると、露地栽培品先端部と基部の葉身の実験設定温度 -6°C 区と -12°C 区における温度分布をそれぞれ比べて見ると先端部の葉面温度が -6°C 区で $-2\sim-7^{\circ}\text{C}$ 、 -12°C 区で $-2\sim-15^{\circ}\text{C}$ までの範囲で分布している。一方、基部の葉面温度は -6°C 区で $-2\sim-11^{\circ}\text{C}$ と -12°C 区で $-1\sim-12^{\circ}\text{C}$ までの分布を示しており、 -6°C 区では基部の方が、 -12°C 区では先端部の方がより広い範囲の分布を示した。これは露地栽培品の場合、基部より先端部の葉身が低温感受性が高いことを意味する。このような傾向はおおむね温室栽培品にも見られることから、先端部の低温感受性が高いと一般的に認識されてきたことを裏付けることになる。

以上のように葉位ごとの詳細の温度分布は把握できだが、それが果して被害の部位や程度とどの関連性を持つのかについて

は今後の研究課題として残される。

表-2 *H. helix* L. 露地栽培品の基部と先端部の葉面温度域別温度の出現割合(%)

区 分	葉面温度の出現割合(%)			
	基部	先端部	基部	先端部
葉面温度域 ($^{\circ}\text{C}$)	-12°C 区	-12°C 区	-6°C 区	-6°C 区
$-1\sim-2$	6.1	0.0	0.0	0.0
$-2\sim-3$	5.6	0.1	0.1	5.5
$-3\sim-4$	10.0	0.6	4.9	29.0
$-4\sim-5$	17.2	3.2	20.8	35.8
$-5\sim-6$	21.6	3.8	15.0	27.6
$-6\sim-7$	20.2	5.2	17.1	2.1
$-7\sim-8$	10.7	10.3	18.2	0.0
$-8\sim-9$	6.9	29.5	16.3	0.0
$-9\sim-10$	1.0	23.9	6.9	0.0
$-10\sim-11$	0.5	14.7	0.7	0.0
$-11\sim-12$	0.1	5.8	0.0	0.0
$-12\sim-13$	0.0	2.4	0.0	0.0
$-13\sim-14$	0.0	0.4	0.0	0.0
$-14\sim-15$	0.0	0.1	0.0	0.0
合計	100	100	100	100

注) 葉面温度の分布を 1°C 刻みで計算した。

(2) 事例2: 風要因が加わることによる低温被害の機構解明実験

本実験は、低温時における風要因の影響の有無による露地栽培品と温室栽培品との低温抵抗性ならびに同一個体の葉面と腋芽結節点との低温による被害の発現の違いを植物体表面温度との関係から明らかにするために人工環境気象室内で行ったものである。植物体表面温度の測定には冷却式のTH-5202を用いた。

(i) 測定方法

人工環境気象室の壁面につや消し NT ラシャ(黒)を施した厚さ 0.7cm のスチロポリ板、横 50cm ×縦 91cm の大きさのものを3枚取付けた。また、伝導現象も極力抑えるため壁面両面に長さ 173cm のポール2台を壁面で架け、このポールの間には黒糸を使い、一定の間隔で縛りつけた。この黒糸に供試植物の枝条を絡ませるようにし、風による揺れも最小限抑えるようにした(写真-3)



写真-3 送風による低温被害の測定風景

注) TH-5202: 冷却式赤外線サーモグラフィ装置 NEC-SANEI 社製、スターリングクーラ式 HgCdTe, long wave $8\sim 12\mu\text{m}$

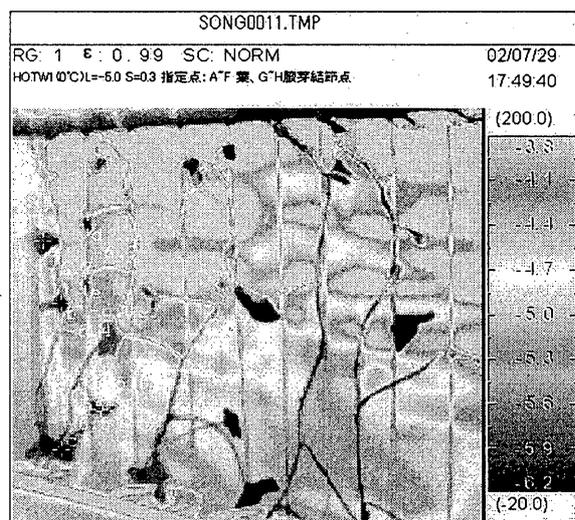


図-2 送風区の赤外線熱映像解析図

注)人工環境気象室設定温度 0°C 平均風速 3.4ms^{-1} 、寒風温度 -3.3°C 、平均葉面温度 -6.2°C

(ii)解析方法

TH-5202 付属の解析ソフト TH71-703 を用い、葉面温度について解析を行い、図-2 と表-3 の結果が得られた。

表-3 部位別温度解析結果

部 位	葉 面	腋芽結節点
栽培条件	露地	温室
実験温度($^{\circ}\text{C}$)	栽培品	栽培品
0	-6.2	-6.5
-2	-6.8	-6.9
-4	-7.5	-7.8

注) *H. helix* L. 送風区の部位別平均体表面温度

(iii)測定結果に基づく考証

送風区における露地栽培品の平均葉面温度は 0°C 区で -6.2°C 、 -2°C 区で -6.8°C 、 -4°C 区 -7.5°C となり、それぞれの設定温度(空気温)よりも $3.5\sim 6.2^{\circ}\text{C}$ 低温となった(表-3)

また、人工環境気象室の設定温度が低温になるにつれ、葉面温度との差は小さくなるものの送風区において寒風がもたらす体表面温度の低下が明らかに証明された。また、無風区においては腋芽結節点の体表面温度が葉面温度よりは露地栽培品区で $0.1\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 、温室栽培品区で $0.2\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 高いことが認められた。

これは低温に晒された供試植物の体表面温度の分布が部位別に異なることを意味する。つまり、部位によっては低温感受性が異なっていることが明らかとなった。

6. 結論と課題

筆者らは、上記にその一端を述べてきたが、これまでさまざまな条件設定で低温による植物の被害と赤外線熱映像による体表面温度との因果関係の分析を試みてきた。総じて言えることとして、他より低い体表面温度を示す部位は低温感受性が高い(温度がより低温の状態になること)と言え、低温による被害の度合も若干小さい。このことは赤外線サーモグラフィ装置によ

る植物体表面温度の測定によって植物個体の部位、あるいは1枚の葉の部位の違いによる低温被害の進行度合の予察もある程度可能であることを意味するものと言える。

以上のように、赤外線サーモグラフィ装置による植物体表面温度の測定は、隔測可能な非破壊的な低温被害の解析手法として今後の活用が期待できると判断される。

そのためにも植物の生理現象や低温による可視障害(黒斑、油浸状斑、凍結斑)と赤外線熱映像による温度分布との関係究明に係る基礎研究の一層の深化が望まれる。

7. 今後の展開と応用

今回の検討で明らかとなった赤外線サーモグラフィ装置の性能を利用した緑化用植物の低温被害の解析に関連して今後、その展開が可能な事象として次のようなことが考えられる。①緑化用植物の凍害被害の度合やメカニズムを迅速に解明するため、最近のWisniewski やPearace らの研究成果を基に氷核活性細菌(INA Active Bacteria)を活用し、被害の発生を速め、その状態を熱映像で解析していく「迅速測定法」の開発、②積雪寒冷地のゴルフ場で問題となっている積雪の有無や多少による芝生の凍害発生メカニズムの予察、③緑化用植物の耐寒性の品種間差異の検証、④寒風害防止資材の効果の検証、さらには⑤最近の大きな話題である緑化(芝生)屋根の冬季の保温効果の検証なども赤外線熱映像の解析が極めて有効であると考えられる。

なお、本報を作成するにあたり、測定機器等についてご指導頂いた東京農業大学造園科学科金子忠一助教授ならびに(株)サーモグラフィア山田浩文氏に対し、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1)成富根、近藤三雄(2001):ヘデラ属植物の耐寒性の究明に関する実験的研究:東京農業大学農学集報第46巻第3号、208-212
- 2)成富根、近藤三雄(2002):植物体表面温度と栽培育成条件からみたヘデラ属植物の耐寒性について:東京農業大学農学集報第47巻4号
- 3)Pearace, R. S., Fuller, M. P. (2001): Freezing of Barley Studied by Infrared Video Thermography: *Plant Physiology*, 125, 227-240
- 4)Wisniewski, M. (1997): The Use of Infrared Video Thermography to Study Freezing in Plants: *Plant Cold Hardiness* Paul H. Li et al, Plenum Press, New York, 311-316
- 5)Wisniewski, M., Lindow, S. E., and Ashworth, E. N. (1997): Observation of Ice Nucleation and Propagation in Plant Using Infrared Video Thermography: *Plant Physiology*, 113, 327-334
- 6)Pearace, R. S. (2002): Plant Freezing and Damage: *Annals of Botany*, 87, 417-424
- 7)Ann, B., Workmaster, A., Palta, J. P., Wisniewski, M. (1999): Ice Nucleation and Propagation in Cranberry Upright and Fruit Using Infrared Video Thermography: *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124, 619-625