放射温度計による葉温測定と植物生体情報との関連†

滝内基弘*・橋本 康**

Measurement of Leaf Temperature by Means of Infrared Thermometer in Connection with Plant Physiological Information

Motohiro TAKIUCHI* and Yasushi HASHIMOTO**

The leaf temperature was measured by means of an infrared thermometer, which utilized PbTiO_3 pyroelectric infrared detector, in connection with plant physiological information.

The infrared thermometer was operated with a band pass filter of $9\mu\text{m}$ to $12\mu\text{m}$, in which region the spectral reflectance of leaf is relatively low (less than 1% for tobacco leaf) and the averaged emissivity of leaf estimated by using Weber's method is nearly 1.0. The stability of the infrared thermometer proved to be better than 0.3 K in terms of zero drift in a series of continuous operation and its best resolution of temperature was 0.1 K. A high sensitive impedance meter was used simultaneously as for the measurement of water content in plants.

The leaf temperature response of tobacco plant to light inputs and humidity inputs in various condition was measured in a controlled growth cabinet. The water content in stem, the transpiration and the gas concentration were measured simultaneously. As the result;

- (1) When the leaf was irradiated, oscillating changes in the leaf temperature in connection with changes in the water content of stem and in the transpiration were clearly observed.
- (2) The leaf temperature changed more rapidly at a higher air temperature.
- (3) The amplitude of leaf temperature change was greater at a lower air humidity.
- (4) A comparison between the results of temperature measurement obtained by

thermocouple and those by infrared thermometer showed that the effect of the adhesive that was used for thermal contact of thermocouple on the leaf was not negligible.

The results as a whole shows that the information obtained through the measurement of leaf temperature by means of infrared thermometer can present a key to make clear the phenomena in plant growth.

1. ま え が き

植物における生産活動は光合成であり、太陽エネルギーと CO_2 ガスと水の供給のもとに葉面で炭素同化作用が行われる。それゆえ葉面は、工業生産におけるプラントに相当し、茎を通しての葉面への水の供給、気孔を通しての葉面への CO_2 のとり込みならびに同時に行われる蒸散などにより葉面の温度はかなり変動している。

この意味での温度変化は光合成活動にとって重要な情報であり、その測定法の確立は急を要する問題である。もちろん、熱電対やサーミスタに依る接触測定は従来から広く行われていたが、接触に伴う測定対象物へのじょう乱や検出素子の汚染などに加えて、葉面への素子の固定作業の困難、長時間固定の際の接着剤の生体に及ぼす影響など問題が多く、非破壊、非接触で長時間安定に測定してはじめて有用な生体情報が得られるものであるにもかかわらず、その面での考慮がほとんどなされていなかったといっても過言ではない。

それゆえ、筆者らはこれらの問題が避けられる非接触法を取上げ、熱放射を赤外領域で測定する方法に着目した。赤外線による温度測定を高田¹⁾は平衡、能動のおよび受動的の3方法に分類しているが、放射環境を変えることなく植物生体情報としての葉温を測定するには受動的な方法が適している。そこで受動的な熱

† 第15回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭51・8)

* 松下電器産業(株)中央研究所 守口市八雲中町 3-15

** 愛媛大学農学部 松山市樽味 3-5-7

* Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Moriguchi

** Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama

(Received November 13, 1976)

放射の測定による放射温度計を葉温測定に適用することを試み、その際の問題点について若干の実験的検討を加えたうえで葉温を測定し、当初の期待に沿う結果を得たので報告する。

2. 葉温測定の原理と装置の特性

2.1 原理

基本原理は Planck の放射則である。葉面より放射温度計に入射する放射束は葉面の熱放射によるものと、周囲物体からの放射を葉面にて反射したものとの和となる。すなわち放射温度計よりみた葉面のみかけの分光放射輝度 $L_{\theta\beta}(\lambda, T)$ は葉面が不透明であると仮定するとつぎのごとく表わすことができる。

$$L_{\theta\beta}(\lambda, T) = \varepsilon_{\theta\beta}(\lambda, T) L_b(\lambda, T) + \rho_{\theta\beta}(\lambda, T) \frac{E(\lambda, T_s)}{\cos \beta} \quad (1)$$

ここに

$\varepsilon_{\theta\beta}(\lambda, T)$ 温度 T なる葉面の分光放射率

$L_b(\lambda, T)$ 温度 T なる黒体の分光放射輝度 (Planck の放射則に従う)

$\rho_{\theta\beta}(\lambda, T)$ 葉面の分光反射率

$E(\lambda, T_s)$ 温度 T_s なる周囲物体による葉面の分光放射照度

β 葉面の法線と観測方向とのなす角

ただし、添字 $\theta\beta$ を付した値は葉面上の測温部分から放射温度計に向かう方向についての値を示すものとする。

有効波長領域 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ なる放射温度計を使用した場合、放射温度計の出力 V はつぎのごとく表わされる。

$$V = A\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) s(\lambda) L_{\theta\beta}(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

ここに

A 内蔵増幅器の総合増幅率

ω 入射光学系に係る幾何学的係数

$f(\lambda)$ 入射経路の気体やレンズ、フィルタなどの総合透過率

$s(\lambda)$ 検出器の放射—電気変換効率

次いで関数 $\bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T)$ および $F(T)$ をつぎのごとく定義する。

$$\bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\theta\beta}(\lambda, T) f(\lambda) s(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) s(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (3)$$

$$F(T) = A\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) s(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda \quad (4)$$

L : Lens F : Bandpass filter
D : Detector A : Narrow band amp.
PSD : Phase sensitive detecting circuit
M : Motor MIX : Mixing circuit
A : Amp. C : Compensation circuit
CH : Chopper T : Temperature sensor

Fig. 1 Block diagram of the infrared thermometer

$\bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T)$ は波長領域 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ において放射温度計の特性および黒体の分光放射輝度によって波長に関し加重平均した葉面の放射率で以下本報告では平均放射率と称する。

(1)~(4)の各式より

$$V = \bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T) F(T) + A\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\theta\beta}(\lambda, T) f(\lambda) s(\lambda) \frac{E(\lambda, T_s)}{\cos \beta} d\lambda \quad (5)$$

完全黒体を試料とし、この測定器の較正曲線を求めた場合には、 $\bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T) = 1$ 、 $\rho_{\theta\beta}(\lambda, T) = 0$ であるから (5) 式はつぎのごとくなる。

$$V = F(T) \quad (6)$$

$F(T)$ の値はこの較正曲線より求めることができる。一般に $E(\lambda, T_s)$ の関数形は未知であるが $\bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T)$ が既知で (5) 式の右辺第 2 項の値が第 1 項の値に比して小さく無視しうる場合には、 $V \approx \bar{\varepsilon}_{\theta\beta}(T) F(T)$ により葉温を決定することができる。

有効波長領域の選択は重要な問題であるが、空気中の水分や CO_2 ガスの影響が小さい、300 K 前後の常温付近で熱放射エネルギーが大、太陽光の分光強度が弱いなどの条件を勘案して、今回は $9 \sim 12 \mu\text{m}$ を選んだ。この領域における葉の分光透過率については溝数 120 本/mm の回折格子と KRS-5 を窓材とする熱電

Fig. 2 Calibration curve of infrared thermometer

Fig. 3 (a) Resolution of temperature
(b) Stability of infrared thermometer

対放射計（検出部面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ）とを使用して測定した結果、約 0.15 mm 厚の葉で葉面に垂直な方向の分光透過率は 0.2% 以下であった。

2.2 測定装置の特性

使用した放射温度計のブロックダイアグラムを

Fig. 1 に示す。主な仕様はつぎのごとくである。

赤外線検出素子	焦電形 PbTiO_3 （常温使用）
検出波長領域	$9 \sim 12 \mu\text{m}$
感度	0.1 K
応答速度	1 s
視野角	2°

この形式の放射温度計の放射エネルギー電圧変換原理は文献 7), 8) に詳しいから省略する。

Fig. 2 に次節で述べる標準黒体炉を用いた本装置の校正曲線を、Fig. 3(a) および Fig. 3(b) に測温出力の記録例をそれぞれ示す。短時間では 0.1 K 、長時間動作では 0.3 K 以内の温度変化の測定精度が得られている。

Fig. 4 Schematic experimental set up for determination of the mean emissivity

Table 1 Averaged emissivity of leaf in the region $9 \mu\text{m}$ to $12 \mu\text{m}$

Plant	ε
Tobacco	0.99
Taro	0.98
Strawberry	0.98
Sweet potato	0.95
Gum tree	0.95

3. 測定上の諸問題の実験的検討

3.1 葉面の放射率

$T_1 \sim T_2$ なる温度領域において $\varepsilon_{\theta\beta}(T)$, $\rho_{\theta\beta}(\lambda, T)$, $E(\lambda, T_s)$, 放射温度計の諸特性などが温度 T に依存しないと仮定し、温度 T_1 と温度 T_2 とにおける試料および標準黒体炉に対する放射温度計の出力をそれぞれ $V(T_1)$, $V(T_2)$ および $V_B(T_1)$, $V_B(T_2)$ とすれば試料の平均放射率 $\bar{\varepsilon}_{\theta\beta}$ は (5) 式より

$$\bar{\varepsilon}_{\theta\beta} = \frac{V(T_2) - V(T_1)}{V_B(T_2) - V_B(T_1)} \quad (7)$$

となり、これによって周囲物体からの放射の影響を除去して求めることができる³⁾。この原理に基づいて Fig. 4 のごとき装置で葉面の平均放射率を測定した。なお測定中は $E(\lambda, T_s)$ を一定とするため周囲を一定温度の黒色塗装金属板で囲んだ。また放射温度計は葉面に垂直な方向に設置した。同一種類の植物であっても葉面の放射率の値はバラツキを示すが、測定値の一例を Table 1 に示す。この測定のために試作した標準黒体炉は空洞の全長 25 cm 、最大半径 5 cm 、開口の半径 2.5 cm の銅製円錐空洞型で、内面を 3 M ベルベットコーティング黒色塗料にて塗装したものである。塗料の $9 \sim 12 \mu\text{m}$ 領域における平均放射率を 0.94 ⁴⁾ として岡山⁵⁾ に従ってこの黒体炉の実効放射率を計算すると 0.9995 となる。

Table 1 から明らかなごとく、植物の種類によって若干変動するが、 $9 \sim 12 \mu\text{m}$ における葉面の平均放射率 ε は $0.95 \sim 0.99$ で 1 に近い。なお測定は $T_1 = 24^\circ\text{C}$, $T_2 = 34^\circ\text{C}$ にて行った。さらに 20°C より 34°C

Fig. 5 Spectral reflectance of leaf

Table 2 Change of measured values of leaf temperature from various direction

β (degree)	$\parallel$	$\perp$
60	22.8°C	22.6°C
50	22.8	22.6
40	22.7	22.6
30	22.7	22.6
20	22.7	22.7
10	22.7	22.7
0	22.6	22.7
-10	22.7	22.8
-20	22.7	22.7
-30	22.8	22.7
-40	22.8	22.7
-50	22.8	22.7
-60	22.8	22.7

Tobacco leaf

の間で種々の T_1 および T_2 にて測定した結果、後述の葉温測定に使用したタバコの葉の ε は 0.99 ± 0.01 ($T=20 \sim 34^\circ\text{C}$) なる値が得られている。

3.2 葉面の分光反射率

従来から報告されているごとく⁹⁾、葉面の分光反射率は植物の種類や育成段階、健全であるか否かなどによっても異なるが、一般に近赤外領域では大きく、 $5 \mu\text{m}$ 以上の波長領域では 5% 以下である。Fig. 5 に葉面の分光反射率の実測結果の一例を示す。測定装置は可視域 $\sim 2.5 \mu\text{m}$ が H 社製自記分光光度計で付属の積分球を使用し、ビーム入射角 8° で測定した、 $2.5 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$ 領域では N 社製赤外分光光度計を使用しビーム入射角は 13° であった。Fig. 5 はこれらの測定結果を便宜上同一グラフ上に示したものである。

3.3 周囲物体の影響

(5)式の $E(\lambda, T_s)$ の値を厳密に評価することは困難であるが、测温値に及ぼす影響について以下のごとく実験的に検討した。

内面を前述の黒色塗料で塗装したキャビネット内に試料葉を配置して $0.1 \text{ mm}\phi$ の CA 熱電対と放射温度計とで葉温を同時に測定した。キャビネットの内面温度を上昇せしめると、その放射エネルギーを吸収して葉温も上昇するが、葉面付近に一定温度の風を吹きつけることにより葉温を任意の値に保たしめた。後述のごとく熱電対での指示値は放射温度計の指示値に比べて時間的遅れを生ずるが、平衡に達した値を比較すると、キャビネット内面温度が $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 、葉温が $20 \sim 35^\circ\text{C}$ の範囲内では熱電対による接触測定値と放射温度計による測定値との差異は $\pm 0.1 \text{ K}$ 以内であった。

通常生物の環境調節に使用されているグロースキャ

ビネットでは内部の気温は高精度で制御されているがキャビネット内面の放射率や表面温度に関しては特に考慮されていない場合が多い。しかし光照射用ランプ室内温度が 29°C のとき最大照度が得られているとの報告¹²⁾もあり気温 25°C 前後の実験ではキャビネット内面温度は 40°C 以下であるからグロースキャビネット内面の状態如何に関係なく葉温変動の測定は 0.1 K 以内の精度でなしうと考えられる。

3.4 角度依存性

葉面の法線方向より β なる角度に放射温度計を傾けて設置して葉温測定を行った結果の一例を Table 2 に示す。葉の長軸方向を含む面内で傾けた場合を $\parallel$ 欄に、これと直角方向の面内の場合を $\perp$ 欄にそれぞれ示す。この結果より 60° 以内ならば $\pm 0.1 \text{ K}$ 以内の精度で葉温測定を行うことが可能であると考えられる。

4. 葉温の測定結果

4.1 植物生体情報と葉温との関係

葉温については、葉面熱伝達に関するものの報告は多い⁹⁾が、生体系の一つとして葉面への水の輸送(茎内水分)、排出(蒸散)などとの関連での測定例、すなわちいわゆる生体情報としての例は従来見当たらない。Fig. 6 に生体情報としての葉温と、茎内水分および蒸散との関係を示す。葉温は放射温度計 ($^\circ\text{C}$) で測定し、茎内水分は高周波による静電容量法 (pF)¹⁰⁾、蒸散は重量法 ($\text{g}/100 \text{ cm}^2 \text{ hr}$) によって測定したものである。まず暗条件下で温度 25°C 、湿度 60% RH に環境条件を定常制御し、次いで人工光 ($30,000 \text{ lx}$) を点灯し、明条件下にした場合の光入力に対するタバコ

Fig. 6 Leaf temperature response of tobacco plant to light input

(エムシー種, 生育中期, 以後特別にことわらぬ限り同様とす)の葉の応答特性を測定したものである。上段が葉温, 中段が茎内水分の静電容量, 下段が蒸散量の同時測定結果である。図に示されるごとく光入力で輻射熱のため葉温はいったん上昇するが他方光入力で葉面の気孔が開き, 蒸散が促進され, ある時間以後は蒸散に伴う気化熱により葉温は下降する。蒸散がある程度増大すると茎内水分が減少し, 根からの吸水能力も制限されているため蒸散が抑制され, 葉温はふたた

び上昇しはじめる。このように気孔開閉や生体内水分移動に対応して変動する葉温のダイナミックな特性は植物生産に関する重要な情報を包含していると考えられるが, 従来この種の対応関係は測定されていない。

4.2 熱電対との比較

Fig. 7 に放射温度計と熱電対 (クロメル-アルメル 0.1 mm ϕ) との比較測定の結果を示す。この場合は輻

Fig. 7 Comparison of leaf temperature measured by thermocouple with that measured by infrared thermometer

Fig. 8(a) Leaf temperature response of tobacco plant to humidity input in the dark

Fig. 8(b) Leaf temperature response of tobacco plant to humidity input in the light

Fig. 9(a) Effect of air temperature on the response of tobacco plant to light input

Fig. 9(b) Effect of humidity on the response of tobacco plant to light input

射の影響を少なくするよう熱電対の接触点をカバーしたが、接着剤の影響で放射温度計に比較しかなりの遅れが現われている。この遅れは接着剤の使用量の増大によりさらに増える傾向にあり、熱電対を葉面に接触させるための接着剤の使用が気孔ならびに孔辺細胞を麻痺、あるいは死に至らしめていると考えられる。このように熱電対による従来の接触測定は気孔開閉に伴う生体情報というよりは接接近傍の生体細胞と接触点との熱伝導による変化を測定していることとなる。さらに熱電対の線材の直径や熔接点の熱容量に関係する遅れ、輻射熱による外乱などをうけ長時間の安定な測定も困難であることを考えれば、非接触、非破壊方式の本放射温度計はきわめて葉温測定に適しているといえることができる。

4.3 相対湿度が変化する場合の葉温

相対湿度が変化すると、葉面の気孔からの蒸散が制御されるので葉温の変化も茎内水分の変化と対応して観測されるはずである。Fig. 8(a)は暗条件下で気温25°Cに制御している定常状態で相対湿度のみ種々変化させた場合、葉温変化とそれに対応する茎内水分変化の模様が如何に変化するかを示した図である。葉温は急激に変動し茎内水分の変動はゆるやかであるが、両者は対応しながら環境湿度の変動に応じて変化するのが認められる。Fig. 8(b)には同じく明条件下で相対湿度を変化させた場合の葉温の変化を示してある。なお図中の破線はアブシジン酸(ABA)を投与し、葉面の気孔を閉じさせた場合の応答である。正常の場合に比較し葉温の変化は少ない。

4.4 温湿度の設定条件をパラメータとした場合の葉温測定

明条件での葉温変化のパターンは環境条件によっても異なる。Fig. 9(a)に温度設定値をパラメータとした葉温、茎内水分、蒸散、CO₂ガス濃度(光合成活動の目安となる)などの変化の測定結果を、Fig. 9(b)に湿度設定値をパラメータとした葉温、茎内水分、CO₂ガス濃度などの変化の測定結果を示す。Fig. 9(a)より高温度ほど応答が速く、光合成も活発であり、Fig. 9(b)より低湿度ほど葉温の振幅が大きいたことが判明する。これらの結果も植物生体系を考えるうえで重要な情報であるが、前同様、従来は測定されていない。

4.5 植物体の生育ステージが異なる場合の葉温測定

植物体の生育ステージによって気孔の応答の速さも異なるので当然葉温の応答も異なるはずである。

Fig. 10に明条件での葉温の応答を移植後の経過日数

Fig. 10 Effect of vegetation stage on the leaf temperature response to light input

Fig. 11(a) Dynamic characteristics of leaf temperature and stem-water in tobacco and cucumber by step input of light-on

Fig. 11(b) Dynamic characteristics of leaf temperature and stem-water in tobacco and cucumber by step input of light-off

をパラメータとして記録した結果を示す。生育の経過に伴い気孔の開閉の応答が鈍くなり、葉温の振幅は大きくなることが判明する。

4.6 供試植物が異なる場合の葉温

前項までタバコを用いた測定結果を示したが、Fig. 11 にタバコとキュウリ（近成山東種、生育中期）との比較を示す。Fig. 11(a)が明条件下における葉温と茎内水分の応答の記録結果である。Fig. 11(b)が暗条件下における同様の結果である。タバコに比べキュウリの葉温は振動しにくい。

5. む す び

以上の実験的検討より本方式の放射温度計による葉温測定は植物を非破壊、非接触で測定できるので、植物生体に対する経時的な影響がほとんどなく、測定の再現性も良く、使用も容易で、従来の熱電対やサーミスタと比較してきわめて有効なことが確認された。さらに植物生体の葉温変化は 2~3K とかなり大きいので 0.3K 以内の温度変化の測定精度が得られている本測定法は、茎内水分や蒸散量などの測定を同時に行えば葉面で起っている現象を定量的に解明する重要な手がかりを提供しうることとなる。したがって、本方式は単なる葉温の測定方法として有用であるばかりでなく、葉温を介しての植物生体情報の測定手段として今

後多方面に応用されることが予想される。

参 考 文 献

- 1) 高田誠二：赤外放射を利用する温度測定，応用物理，**38** 537/545 (1969)
- 2) M. Fuchs et al: Infrared Thermometry of Vegetation, *Agronomy Journal*, **58**, 597/601 (1966)
- 3) D. Weber: Spectral Emissivity of Solids in the Infrared at Low Temperatures, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 815/820 (1959)
- 4) 高木他：日本産業科学研究所昭和 49 年度研究報告(I)
- 5) 岡山誠司：円錐型黒体炉の底の黒さの近似計算，応用物理，**33**, 875/882 (1964)
- 6) E.E. Bell et al: Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 2 Microns. II. Sky Measurements, *J. Opt. Soc. Am.*, **50**, 1313/1320 (1960)
- 7) 山香他：焦電形赤外線検出器，National Technical Report, **18**, 141/152 (1972)
- 8) 嶋山他：焦電形検出器を用いた赤外線放射温度計，National Technical Report, **18**, 153/164 (1972)
- 9) 武智修：物質の交換と輸送（植物生理学講座 5，朝倉書店）
- 10) 橋本康他：植物生体情報の電子的測定—高感度インピーダンス計による植物生体内水分の測定，計測自動制御学会論文集，**12-4**, 440/446 (1976)
- 11) Siegel and Howell: Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company
- 12) Matsui et al: Control of Artificial Light for Plant 生物環境調節，**12**, 53/68 (1974)