

国産放射温度計の特性と天空長波放射の補正法

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者名	王,秀峰 堀口,郁夫 町村,尚
発行元	養賢堂
巻/号	49巻3号
掲載ページ	p. 149-158
発行年月	1993年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



国産放射温度計の特性と天空長波放射の補正法

王 秀峰・堀口郁夫・町村 尚

(北海道大学農学部)

Characteristics of Infrared Thermometers Manufactured in Japan
and Calibration Methods for Sky Radiant Emittance

Xiufeng WANG, Ikuo HORIGUCHI and Takashi MACHIMURA

(Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

Infrared thermometers to measure surface temperature have been increasingly adopted in recent years. The characteristics of the IR thermometer, however, are not well known.

IR thermometers manufactured in Japan systematically adjust for ambient radiation based on the internal temperature of the thermometer. If, therefore, there is a large difference between the internal temperature of the IR thermometer and the apparent temperature associated with the surrounding radiation, a large error will be induced into the measured surface temperature.

The purpose of our research was to determine the characteristics and measurement errors of IR thermometers. Experiments were performed with regard to the following items: ① Measurement errors related to the internal temperature of the IR thermometer. ② Linearity of the output signal of the IR thermometer. ③ Response of the output signal to changes in the emissivity setting. ④ Effect of sky radiant emittance on the measured surface temperature. ⑤ Calibration method for the terrestrial surface.

The following is a summary of the results: Measurement error is affected by the internal temperature of the IR thermometer. Measurement accuracy is improved with a controlled internal temperature of 20–30°C. The measurement error becomes larger at emissivity settings under 0.7.

The measurement error outdoors was not proportional to the downward longwave radiation, but to the sky radiant temperature measured by the IR thermometer. Calibration for sky radiant emittance was improved by using the difference between sky radiant temperature and air temperature.

When the surface temperature measured by the infrared thermometer is plotted against the surface temperature measured by thermocouple, the sky radiant emittance error is obtained from the Y intercept. Additionally, the difference between true temperature and output of the IR thermometer for a reference plate was compared to that obtained for vegetation, and the RMS obtained was about 1.0°C.

Key words: Calibration method, Infrared thermometer, Measurement error, Sky radiant emittance.

キーワード: 測定誤差, 天空長波放射, 放射温度計, 補正法

1. はじめに

最近, 常温付近を測定する非接触性の携帯型の放射温

度計が市販されるようになり, 植物個体や群落などの表面温度の測定が容易になった。しかし, この放射温度計は接触型の温度計と異なり, 測定物体からの長波放射を測定して温度変換しているため, 周囲からの長波放射や測定物体の放射率などが測定値に影響する。したがって,

1992年7月5日 全国大会にて口頭発表

1992年12月24日 受付, 1993年9月13日 受理

放射温度計の指示値が測定物体の真の温度ではない。そのためアメリカでは1960～1970年代に盛んに、放射温度計の特性や補正方法の研究が行われた（たとえば、Lorenz, 1966; Conaway *et al.*, 1967 b; Fuchs *et al.*, 1968; Jackson *et al.*, 1969; Hatfield, 1979)。その後、1980年代に入って日本においても放射温度計が製造されるようになり、安価に入手出来るようになった。

国産の放射温度計は、室内で測定する測定器として設計されており、周囲からの放射量や測定物体の放射率の補正機構が付いている。周囲からの放射量の補正は放射温度計内部の温度を使用しているため、屋外で測定する場合、放射温度計内部の温度と周囲からの放射の相当温度は異なり、その差が誤差として導入される。

また、放射率の補正機構が付いているが、測定時に測定物体の放射率の設定が正しく行われぬ場合が多い。これは放射温度計の波長感度である窓領域の放射率の測定が困難であることと、測定例が少ないためである。したがって、放射率の設定の特性や放射率の設定が正しく行われぬ場合の誤差を知る必要がある。

国産の放射温度計のこれらの特性や誤差について研究した論文はほとんど無い。放射温度計を正しく使用するためにも、これらの放射温度計の特性を明らかにし、測定値の正しい補正方法を検討する必要がある。

本論文は国産の放射温度計の特性と、この特性に基づく誤差を調べて、補正法を検討したものである。

2. 放射温度計の測定理論

放射温度計の特性や誤差を調べるためには、放射温度計の測定理論を知らなければならない。各社の放射温度計の測定機構は異なるが、測定理論はほぼ同じである。

放射温度計の放射センサがとらえる放射量には、測定表面からの放射量と、測定表面で反射した周囲からの放射量が含まれる。したがって、放射温度計の出力は(1)式で表わされる。

$$W_0 = \alpha [\varepsilon_0 \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_0) \cdot R(T_a)] \quad (1)$$

ただし、 W_0 ：放射温度計の出力、 α ：変換係数、 $R(T)$ ：温度 T K の測定物体の黒体放射エネルギー（ただし、放射温度計に感じる波長範囲）、 $R(T_a)$ ：周囲からの放射エネルギー（ただし、放射温度計に感じる波長範囲）、 T_a ：周囲からの放射エネルギーに対する相当温度(K)、 ε_0 ：測定物体の放射率（ただし、放射温度計に感じる波長範囲）。

国産の多くの放射温度計は、チョッパやセンサにサーモパイルを使用している。したがって、放射温度計の放射センサには、チョッパからの放射やサーモパイルの基

準温度（これらの温度を T_c K）と測定物体からの放射量との差が入る。そのため放射温度計の出力は(2)式のようにになる。

$$W_0 = \alpha [\varepsilon_0 \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_0) \cdot R(T_a) - R(T_c)] \quad (2)$$

ただし、 $R(T_c)$ ：チョッパからの放射量やサーモパイルの基準温度による放射量。

(2)式の出力では、 $R(T_c)$ が誤差になるため、別に温度センサで測定したチョッパ温度や放射センサの温度（以下、本体温度 T_c ）による $R(T_c)$ を加えている。この本体温度による補正を、Ma社とO社の放射温度計では放射率補正の後に行っているため、(2)式は(3)式になる。

$$W = \alpha \{ [\varepsilon_0 \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_0) \cdot R(T_a) - R(T_c)] / \varepsilon' + R(T_c) \} \quad (3)$$

ただし、 W ：補正後の放射温度計の出力、 ε' ：設定放射率。

(3)式の{ }内は放射センサの出力で、右辺最終項の $R(T_c)$ は本体温度のための温度センサの出力である。したがって、設定放射率 $\varepsilon' = 1$ のときは本体温度に影響されない出力になる。今、測定物体の放射率と設定放射率が等しいとき、(3)式は(4)式になる（久保井ら、1977）。

$$W = \alpha [\varepsilon_0 \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_0) \cdot \{ R(T_a) - R(T_c) \}] / \varepsilon_0 \quad (4)$$

(3)式や(4)式で明らかのように、放射温度計の出力は、放射温度計の本体温度の影響を受けることになる。室内測定の場合で、壁や天井の温度 (T_a) と本体温度 (T_c) が近似なら、(4)式は(5)式となる。

$$W = \alpha \cdot R(T) \quad (5)$$

したがって、室内のように周囲の放射物体（壁や天井）の温度と放射温度計の本体温度が近似の場合で、放射率設定を正しく行えば正確に表面温度が測定できる。

しかし、屋外で測定する場合は、周囲からの放射の主なものは天空からの長波放射（以下、単に天空からの放射）である。そのため、天空からの長波放射量 ($R(T_a)$)（以下、単に放射量）と放射温度計の内部補正量 ($R(T_c)$) は大きく異なり、それが誤差となって現れる。

このように、屋外で使用する場合、放射温度計の本体温度と天空からの放射量が、測定表面温度に関係する。さらに、最近の放射温度計は測定物体の放射率を補正する機構も付いている。

そのため放射温度計の本体温度の影響、放射率補正の特性、天空からの放射量の影響と補正法などについて研究を行った。

Table 1 Specifications of the IR thermometers used for these experiments.

Therm. named	Spectral response (m μ)	Temperature range (°C)	Accuracy (°C)	View angle (°)	Sensor element	Response time (sec)	Note
A. 1	8.5~12.5	-50~150	±0.5	2	PbTiO ₃	0.7 (95%)	Ma. Co. (Japan)
A. 2	8.5~12.5	-30~150	±1.5	1	PbTiO ₃	0.7 (95%)	"
B	7~20	-50~500	±1.0	2	Thermopile	0.5 (90%)	O. Co. (Japan)
C. 1	8~14	-50~1000	±0.3	1	(Pyroelec. element)	0.5~1.0	Mi. Co. (Japan)
C. 2	7~30	-50~1000	±1.0	1.3		0.5~1.0	"
D	8~14	-30~100	±0.3	2	?	~0.5	E. Co. (USA)

3. 実験方法

実験は市販の放射温度計を使用して、室内と屋外で行った。使用した放射温度計は、室内実験については Table 1 に示す外国製の 1 社を含む 6 種類の放射温度計を、屋外実験は A.1 放射温度計と B 放射温度計を使用した。

これらの実験は主として一定の放射率になるように塗料を塗布した金属製の板(以下、測定板)を使用した。使用した塗料は放射率 0.96 の黒色塗料(3M Velvet Coating 2010 - 住友スリーエム社製)と放射率 0.03 の銀色塗料(サンデーペイント KK)で、これらの塗料は波長による放射率の変動が少ないものとして市販されている。なお、黒色塗料の全長波域(2~35 μ m)と近赤外域(1.4~2.5 μ m)の放射率の差は、住友スリーエム社の資料によるとほとんど無い。また、銀色塗料はアルミ粉が入ったもので、アルミニウムは 5 μ m 以上で均一な分光放射率をもつ。

測定板の放射率は D and S AERD 放射率計(昭和電工 KK 製)を使用して決定した。しかし、この放射率計は全長波域の放射率を測定するもので、放射温度計は窓領域の放射を測定している。したがって、全長波域の放射率と窓領域の放射率が異なる場合は、放射率を変更する必要がある。しかし、波長による放射率の変動が少ない塗料を使用しているため、全長波域の放射率と窓領域の放射率に大きな差がないと仮定した。測定板は裏面にヒータを貼付け温度制御出来るようにした(Fig.1)。

なお、実験項目は、室内実験では①放射温度計の本体温度の影響、②測定物体の表面温度と放射温度計の出力の関係、③放射温度計の放射率補正の特性について、屋外実験では④天空からの放射の影響、⑤天空からの放射の補正法である。

3.1 放射温度計の特性に関する室内実験の方法

室内実験で使用した測定板(10×10 cm)は、放射率 0.96 の黒色塗料を塗布し、熱電対を表面に貼付けた。また、測定中は周囲からの放射の影響が無いように、内部に放射率 0.03 のアルミ箔を貼ったコーンを使用した(Fig.

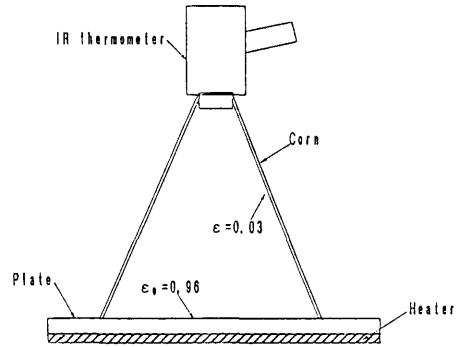


Fig. 1. Schematic diagram of the IR thermometer with cone used for measurements in the laboratory.

1)。放射温度計の設定放射率は 1 とした。

測定板に高い反射率のコーンをかぶせると、周囲からの放射 $R(T_a)$ は(6)式で表される。

$$R(T_a) = r \cdot \rho \cdot \epsilon_0 \cdot R(T) \quad (6)$$

ただし、 r : コーンの反射率、 ρ : コーンの底面積と上部面積の比。

実験には、 $\rho = 0.14$ と 0.28 の 2 種類のコーンを使用した。放射温度計の焦点距離の関係で、 $\rho = 0.14$ のコーンは B と D 放射温度計に、 $\rho = 0.28$ のコーンは A と C 放射温度計に使用した。

また、この時の実効放射率(ϵ_0)は、(7)式で表される(Fuchs *et al.*, 1966)。

$$\epsilon_0 = \epsilon_0 / \{ \epsilon_0 + r \cdot \rho \cdot \epsilon_0 \cdot (1 - \epsilon_0) \} \quad (7)$$

この式で計算すると、0.96 の測定板の実効放射率は、0.9998 ($\rho = 0.14$) と 0.9996 ($\rho = 0.28$) であり、コーンを使用すると黒体に近い物体からの放射を受けたことになる。

3.1.1 放射温度計の本体温度の影響

放射温度計の本体温度と測定板の表面温度を種々変化させて実験を行った。本体温度は放射温度計本体にヒータを巻つけて、温度制御器で一定の温度(約 20, 30, 40, 45°C)にした。また、測定板の表面温度は 20~50°C の範囲で約 5°C ずつ変化させて測定を行った。室温の制御

は特に行わなかったが約 20℃であった。

3.1.2 測定物体の表面温度と放射温度計の出力の関係

測定物体の真の表面温度と、放射温度計の出力が一致するかどうかを確かめる必要がある。熱電対による測定値を真の表面温度として、これと放射温度計の出力と比較した。この解析は 3.1.1 節の実験結果を使用した。

3.1.3 放射温度計の放射率補正の特性

放射温度計の設定放射率を種々変化させたときの「熱電対で測定した表面温度と放射温度計の出力の差」(以下、測定偏差)を調べた。この実験は次の 3 種類について行った。①放射温度計の本体温度を約 30℃に保ち、放射率 0.96 の測定板の表面温度を約 20, 30, 40℃に保ったとき、②放射温度計の本体温度を約 20℃に保ち、放射率 0.96 の測定板の表面温度を約 25, 30, 35, 40, 45, 50℃に保ったとき、③放射温度計の本体温度を約 20℃に保ち、放射率 0.96, 0.85, 0.73, 0.56 の測定板の表面温度を約 30℃に保ったときである。

②の実験で①の実験より本体温度を低くした理由は、本体温度と測定板の表面温度の差が大きい時の測定偏差を調べるためである。また、③の実験は放射率の設定が正しく行われないうちの測定偏差を調べるためである。

なお、③の実験に使用した種々の放射率の測定板は、黒体塗料と銀色塗料を混合して作製した。

3.2 天空からの放射に関する屋外実験の方法

周囲に建物などの物体が無い場合、放射温度計に影響する周囲からの放射は、天空からの下向き長波放射である。天空からの下向き長波放射が、測定物体で反射して放射温度計に入り測定誤差となる。そのため屋外実験で、①天空からの放射の影響、②天空からの放射の補正法、の検討を行った。

3.2.1 天空からの放射の影響

種々の長波放射の反射率を持つ測定板の表面温度を測定して、天空からの長波放射の影響を調べた。測定板は 20×17 cm でアルミ板上に、黒体塗料と銀色塗料を混合して作製した。長波の反射率は 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 の 10 種類である。なお、反射率は D and S AERD 放射率計 (昭和電工 KK 製) によって放射率 (ϵ_0) を測定し、 $1-\epsilon_0$ から求めた。

測定は建物の屋上で行い、なるべく周囲物体からの放射の影響が無いようにした。作製した測定板を屋上に並べ、手早く 10 枚の測定板の表面温度を放射温度計で測定し、測定板に貼付けた熱電対による表面温度と比較した。また、天空からの下向き長波放射量の測定は放射収支計の地面側センサにアダプタをかぶせて測定し、別に

測定した日射量とアダプタの温度から計算によって求めた。また、放射温度計を天空に向けて、天空の温度 (以下、天空放射温度) も測定した。

なお、使用した放射温度計は、本体温度の変化による測定偏差が小さく、-70℃まで測定できた A.1 放射温度計を使用し、本体温度の制御は行わなかった。また、放射率の設定は 1 とした。

3.2.2 天空からの放射の補正法

屋外で測定する場合、天空からの放射による影響を補正しなければならない。そのため、3 種類の補正法を検討した。すなわち、①天空放射温度による補正、②グラフによる補正、③参照板による補正である。

1) 天空放射温度による補正

天空放射温度と測定偏差の関係をあらかじめ調べておき、天空放射温度から測定偏差を推定する方法である。この実験は 3.2.1 節の測定データを使用した。

2) グラフによる補正

放射温度計の設定放射率 $\epsilon' = 1$ の場合、真の表面温度と放射温度計の出力をグラフに表すと ((3) 式参照)、このグラフの勾配が測定物体の放射率になり、定数項が天空からの放射による補正值になる (Fuchs *et al.*, 1966; Conaway *et al.*, 1967 b)。

放射率が 0.96 の測定板 (以下、参照板-大きさ 35×35 cm) を使用して、熱電対で測定した参照板の真の表面温度と、放射温度計の出力をグラフに書いて補正值を調べた。解析は天空放射温度の変動が少ない晴れの日について行った。また、特定の日について前節で使用した放射温度計 (A.1) で天空放射温度を測定して天空からの放射の変動を調べた。

3) 参照板による補正

表面温度の測定が比較的容易な参照板の測定偏差と、測定が比較的困難な測定物体の測定偏差の関係をあらかじめ求めておき、参照板の測定偏差から測定物体の測定偏差を知る方法である。

参照板 (放射率 0.96 の測定板) と植物の葉 (エゾノギンギン) について、熱電対と放射温度計で表面温度を測定し、両者の測定偏差の関係を求めた。

2) と 3) の研究に使用した放射温度計は受感部にサーモパイルを使用し、長期間自記が可能な B 放射温度計を使用した。

4. 実験結果および考察

4.1 放射温度計の特性に関する室内実験の結果と考察

4.1.1 放射温度計の本体温度の影響

放射温度計の本体温度を変化させて出力を調べ、結果

を本体温度と測定偏差の関係で表した。その結果の代表的な例をFig. 2に示した。

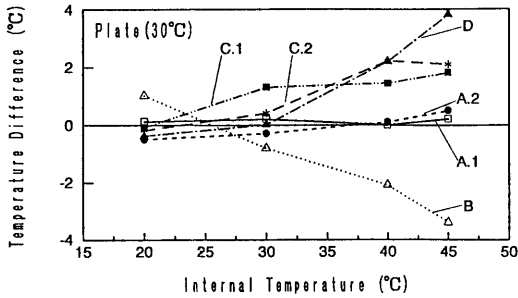


Fig. 2. Differences between the surface temperatures of a 30°C plate as determined by thermocouple and by IR thermometer caused by changing internal temperature of the IR thermometers.

Fig. 2によると、本体温度を変化させると測定偏差が変化し、しかも放射温度計によって測定偏差の状態が異なる。すなわち、本体温度が高くなると測定偏差が正值で大きくなる製品と、逆に負値で大きくなる製品がある。測定偏差が負値で大きくなるB放射温度計は放射センサにサーモパイルを使用したものである。

2章で示したように、設定放射率を1とすると、放射温度計の出力は本体温度の影響を受けないことが考えられた。しかし、Fig. 2に示されているように測定偏差は本体温度の影響を受けている。この原因については放射温度計の内部で(3)式のように処理されない場合や、放射センサによるチョップ温度やサーモパイルの基準温度と、温度センサで測定した本体温度の違いなどが考えられる。

そのため「測定板の表面温度-本体温度」と測定偏差の関係調べた。その結果、AとB放射温度計は「測定板の表面温度-本体温度」が0に近いとき測定偏差の絶対値が小さく、「測定板の表面温度-本体温度」が大きくなると測定偏差の絶対値が大きくなる結果を示した(Fig. 3(a))。しかし、C放射温度計とD放射温度計は必ずしもそのような関係を示さなかった(Fig. 3(b))。

D放射温度計のカタログには内部補正のことについての記述が無いが、Fig. 4に示したごとく、本体温度が30℃以上になると、急に測定偏差が大きくなる。また、C放射温度計の技術資料によると、本体温度で内部補正を行っていることが記述されているが、実験結果からは本体温度が20℃以上になると、徐々に測定偏差が大きくなる傾向を示した。

以上の測定結果から次のことが明らかになった。①本体温度の変化が測定偏差に影響する。②その特性は各社

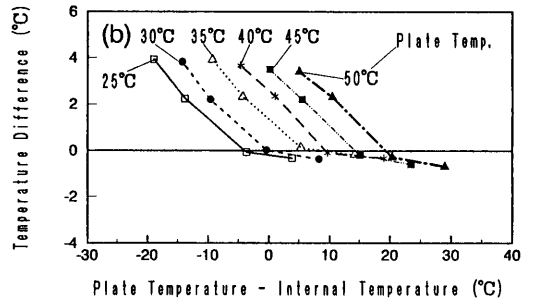
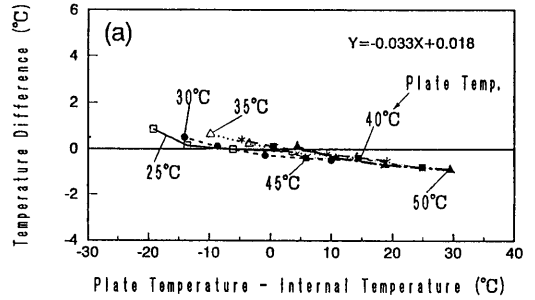


Fig. 3. Relationships between temperature difference and plate temperature minus internal temperature.

(a) A.2 IR thermometer, (b) D IR thermometer.

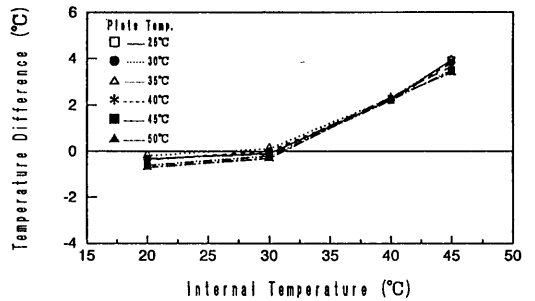


Fig. 4. Temperature differences caused by changing internal temperature of D IR thermometer.

によって異なり、外国製のD放射温度計は国産のAやB放射温度計とは明らかに異なる。③一般的に、本体温度を20~30℃にすると、測定偏差が小さくなる。

4.1.2 測定物体の表面温度と放射温度計の出力の関係

本体温度を30℃で一定に保ったときの、熱電対による表面温度と放射温度計の出力とを比較した。その結果、熱電対による表面温度と放射温度計の出力は1:1に対応していた。したがって、(4)式と(5)式は(8)式と(9)式で表される(久保井ら, 1977)。

$$t_w = [\epsilon_0 \cdot t + (1 - \epsilon_0) \cdot (t_a - t_c)] / \epsilon_0 \quad (8)$$

$$t_w = t \quad (9)$$

ただし、 t_w ：放射温度計の指示温度(℃)、 t 、 t_a 、 t_c ： T 、 T_a 、 T_c (K)のセルシウス度(℃)。

熱電対で測定した表面温度と、放射温度計の出力との回帰式を計算すると、B放射温度計を除いて、回帰係数が0.98~1.07の範囲であり、定数項は-0.53~0.29の範囲であった。B放射温度計は回帰係数は0.85~0.94で、定数項は1.07~5.27であった。

以上の結果は本体温度を30℃に保ったときの結果である。しかし、4.1.1節で明らかになったごとく、本体温度の変化による測定偏差は各社で特徴があった。D放射温度計は本体温度を30℃に保ったとき、最も測定偏差が小さかった。したがって、30℃以外の本体温度のときの精度を調べた。

本体温度を一定(20, 30, 40, 45℃)に保って、種々の表面温度に測定板を変化させたときの、熱電対による表面温度と放射温度計の出力の差(測定偏差に相当)について、標準偏差を計算した。その結果をTable 2に示した。Table 2には本体温度を変化させて、測定板の表面温度を一定に保ったときの標準偏差も示してある。

Table 2によると、本体温度を一定にして測定板温度を変化させた場合、A.1, A.2, C.1, D放射温度計の標準偏差が小さく、1:1の直線との対応が良いことを示している。また、本体温度を変化させて測定板温度を一定にした場合、C.1とD放射温度計は標準偏差が大きい。これは4.1.1節で示したごとく、これらの放射温度計では本体温度が20℃または30℃以上になると測定偏差が大きくなるからである。

実際に放射温度計を使用する場合、測定板による検定を行い、熱電対で測定した表面温度と放射温度計の出力との回帰式を計算する。したがって、この回帰式からの偏差が問題になる。この回帰式からの偏差(RMS)をTable 3に示した。Table 3における20~45℃のRMS

Table 2 Standard deviations of measurement errors for changing plate temperature under a constant internal temperature, and changing internal temperature under a constant plate temperature.

Thermometer named	Treatment	Standard deviation of error	
		Changing plate temperature	Changing internal temperature
A.1		0.4℃	0.2℃
A.2		0.5	1.0
B		2.9	1.9
C.1		0.5	2.9
C.2		1.0	1.9
D		0.3	4.8

Table 3 Root mean squares (RMS) for regression lines between true surface temperature and IR thermometer output under a constant internal temperature.

Internal Temp.	20℃	30℃	40℃	45℃	20~45℃
	℃	℃	℃	℃	℃
A.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
A.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.4
B	0.2	0.2	0.3	0.3	1.7
C.1	0.1	0.3	0.2	0.9	1.1
C.2	0.1	0.3	0.3	0.4	0.8
D	0.1	0.1	0.1	0.1	1.7

は、本体温度20, 30, 40, 45℃の全データについて回帰式を計算して求めたものである。C.1放射温度計は本体温度が高くなると、RMSが大きくなり回帰式からの変動が大きくなる。また、外国製のD放射温度計は本体温度を一定にするとRMSは小さいが、本体温度が変化(20~45℃)するとRMSは大きくなる。A.1, A.2放射温度計は本体温度に関係なくRMSは小さい。

以上の実験結果から、次のことが明らかになった。①本体温度を一定にしないと精度よく測定できない放射温度計と、本体温度を一定にしなくても精度よく測定できる放射温度計がある。②各放射温度計とも本体温度を一定にして、真の表面温度と放射温度計の出力との回帰式を計算して補正するとRMSがより小さくなる。この場合、本体温度が40℃以下ではRMSは最大±0.3℃であることが、Table 3から推定できる。

4.1.3 放射温度計の放射率補正の特性

本体温度を約30℃で一定にし、設定放射率を変化させた結果の例をFig.5(a)に示した。なお、測定板(放射率0.96)の表面温度は約20, 30, 40℃の場合である。

Fig.5(a)で明らかのように、本体温度と測定板の表面温度がほぼ同一のとき、設定放射率を変化させても測定偏差の変動はほとんど無い。実験の結果、使用した4社の放射温度計はFig.5(a)とほぼ同じような傾向を示した。

これは、(8)式を(3)式の形式に変形すると(10)式になり、したがって、 $t = t_a = t_c$ なら(10)式の右辺の分子は0で、放射温度計内部の放射率補正が作動しないためと思われる。

$$t_w = [\epsilon_0 \cdot t + (1 - \epsilon_0) \cdot t_a - t_c] / \epsilon' + t_c \quad (10)$$

Fig.5(a)によると、設定放射率を種々変化させると、本体温度(t_c)が測定板の表面温度(t)より高い場合、正の測定偏差が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じた。本実験はコーンを使用しているのだから $t = t_a$ であり、また、(10)式から「本体温度と測定板の表面温度がほぼ同一のとき」は、「本体温度と周囲からの放射の相当温度

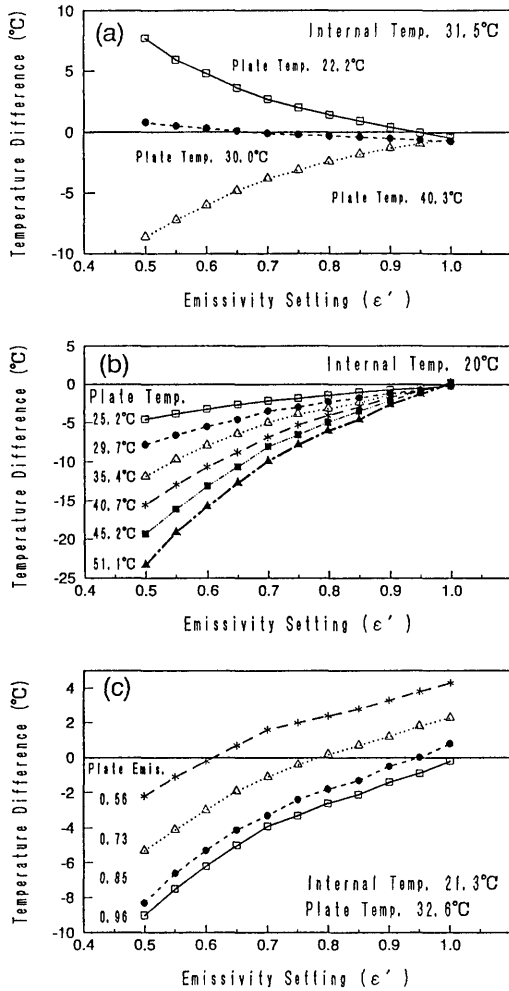


Fig. 5. Temperature differences due to emissivity settings for A.2 IR thermometer.

(t_a)がほぼ同一のとき」である。したがって、本体温度(t_c)が周囲からの放射の相当温度(t_a)より高い場合は正の測定偏差が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じることになる。

実際、屋外の測定の場合、一般的に周囲からの放射の相当温度は天空放射温度であるため、本体温度の方が高く、正の測定偏差が発生する(Fig. 6, 7 参照)。

さらに、本体温度を約 20°C で一定にし、測定板(放射率 0.96)の表面温度を約 25~50°C に変化させて、設定放射率の違いによる測定偏差を調べた。その結果の例を Fig. 5 (b) に示す。測定板の表面温度が高くなるにしたがって測定偏差の絶対値が大きくなる。

また、本体温度を約 20°C に保ち、放射率 0.96, 0.85, 0.73, 0.56 の測定板の表面温度を約 30°C に保ったときの、設定放射率の違いによる測定偏差の例を Fig. 5 (c) に示

す。この Fig. 5 (b), (c) の傾向も各社の放射温度計で同じであった。Fig. 5 (b), (c) から、設定放射率 0.70 付近から測定偏差が大きくなり、設定放射率の精度が悪くなる。

以上の実験結果から、次のことが明らかになった。①各社の放射温度計の設定放射率に対する特性はほぼ同じである。②本体温度、測定物体の表面温度および周囲からの放射の相当温度が同一のとき、放射温度計の放射率を設定しても放射率補正は出来ない。③設定放射率を間違えると、本体温度が周囲からの放射の相当温度より高い場合、正の測定偏差が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じる。④設定放射率が 0.70 より小さくなると測定偏差は大きくなる。

4.2 天空からの放射に関する屋外実験の結果と考察

4.2.1 天空からの放射の影響

熱電対で測定した表面温度と放射温度計の出力の差(測定偏差)と、測定板の反射率との関係を調べた。その例を Fig. 6 に示した。反射率が大きくなるにしたがって測定偏差は大きくなり、その関係はほぼ直線式で表される。したがって、下向き長波放射量が測定板で反射して、測定偏差に影響していることが推定できる。

そのため測定偏差と放射収支計で測定した下向き長波放射量(以下、下向き全長波放射量)および放射温度計で測定した天空放射温度との関係を調べた。その結果の例を Fig. 7 (a), (b) に示した。いずれの反射率の測定板も Fig. 7 と同じように下向き全長波放射量との相関は悪いが、天空放射温度との相関はよい。

これは、①測定偏差に影響する長波放射量は放射温度計で測定した 8~12 μ m の窓領域の長波放射量であるが、放射収支計で測定した波長域(約 3~60 μ m)の長波放射量でない。また、②放射温度計で測定した天空放射温度は大気上層の温度であるが、放射収支計で測定した下向

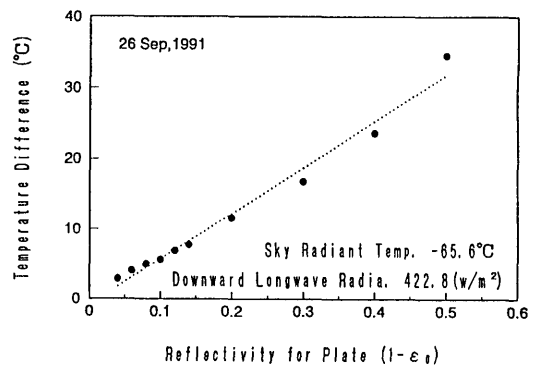


Fig. 6. Temperature differences caused by sky radiant emittance.

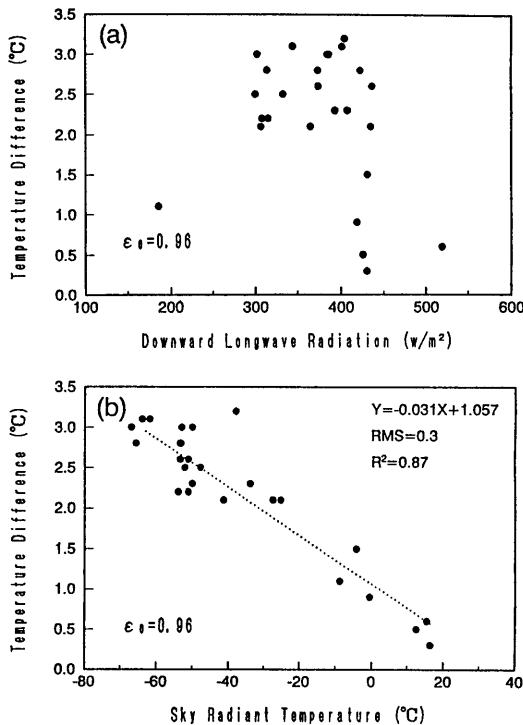


Fig. 7. Relationships between temperature difference and (a) downward longwave radiation, and (b) sky radiant temperature.

き全長波放射量は比較的大気下層からの長波放射量であり両者は関係がない、ことが考えられる。

そのため、札幌管区気象台による高層の気温と湿度を調べ、天空放射温度と比較した。その結果、晴れた日の天空放射温度は300~100 hPa (高度約8~15 km) 付近の温度と近似の値であった。また、曇りの日は大気中の湿度の高い層(雲)の温度に近似の値であった。

Lorenz (1966) は天空からの放射による誤差は最大1.0℃であるとしている。また、Svendsen *et al.* (1989) は天空からの放射量 10 W/m² で放射率 0.9~1.0 の物体を測定するとき、測定誤差は0.5℃であると報告している。これらの天空からの放射による測定誤差は、Fig. 7の測定偏差より小さい。これは国産の放射温度計が周囲からの放射を本体温度で補正しているため、周囲からの放射の相当温度と本体温度の差が測定誤差に加わるためと思われる。

また、放射温度計の出力を本体温度で補正していない場合、(1)式からわかるように天空からの放射量が小さくなるほど(天空放射温度が低くなるほど)測定偏差が小さくなる(Fuchs *et al.*, 1966)。しかし、本体温度で補正している場合は、Fig. 7 (b)に示されているように、

逆に天空からの放射量が小さくなるほど測定偏差が大きくなる。今回の研究では、A.1放射温度計で測定した測定偏差の最大は約3.0℃にも達した。

以上の結果から、次のことが明らかになった。①屋外で測定した場合、測定偏差と天空放射温度は比例するが、下向き全長波放射とは比例しない。②天空放射温度の低下とともに測定偏差は大きくなる。

4.2.2 天空からの放射の補正

1) 天空放射温度による補正

4.2.1節で判明したごとく測定偏差と天空放射温度は直線関係にあった。しかし、測定偏差は周囲からの放射の相当温度(T_a)と本体温度(T_c)に関係する。そのため、測定偏差と「天空放射温度-本体温度」の方が、測定偏差と「天空放射温度」のみより相関が良いことが推定できる。しかし、今回本体温度を測定していないため、本体温度が気温と等しいと仮定して、測定偏差と「天空放射温度-気温」の関係を調べた。その結果、測定偏差と「天空放射温度-気温」の寄与率は0.89で、RMSは0.30であった。Fig. 7に示した測定偏差と「天空放射温度」の寄与率(0.87)やRMS(0.31)よりやや改良された。

すなわち、測定誤差と「天空放射温度-気温」の回帰式を計算しておく、精度よく天空からの放射による測定偏差を推定できる。

2) グラフによる補正

Fig. 7に示したように、測定期間中の天空放射温度は約-67~16℃の範囲であった。市販の放射温度計の測定範囲は、Table 1に示したように、-50℃以下は測定できないものが多い。また、カタログに-50℃まで測定できるように示されている、実際には測定できない測定器もある。したがって、このような機種を使用する場合は、別な方法で天空からの放射の影響を補正しなければならない。

熱電対による測定板の表面温度と放射温度計による測定板の表面温度について回帰式を計算し、回帰式の勾配および定数項を検討した。勾配は測定板の放射率に相当し、定数項は天空からの放射による測定偏差に相当する。その結果をTable 4に示す。

Table 4によると、勾配は0.931~0.980、定数項による測定偏差は約2.9~5.3℃である。これらのデータには天空からの放射が測定時間内で変動しているデータも含まれていると思われる。したがって、別に測定した天空放射温度の変動の比較的小さい2日間(09/18, 09/22)のデータを検討した。この2日間の勾配は0.948と0.954で、定数項による測定偏差は約3.4℃と4.4℃であった。また、平均の測定偏差は、5.5℃と6.1℃である。測定偏差と定数項の差が誤差であり、この中に設定放射率によ

Table 4 Regression equations between true surface temperature by thermocouple and surface temperature by IR thermometer, and measurement errors between the surface temperature of thermocouple and of IR thermometer.

Month/day/time	Regression equation	Sky radiant temperature (°C)	Measurement error (°C)
08/01/08-16	$Y=0.944X-2.938$	-0.6, -7.3	5.7 ± 1.0
08/04/07-19	$Y=0.980X-3.774$	-35.8, -43.7, -48.1	4.6 ± 0.7
08/11/07-18	$Y=0.931X-3.741$	—	7.1 ± 1.0
08/18/00-24	$Y=0.954X-3.158$	3.8, -9.4, -7.7	4.7 ± 0.9
08/29/00-24	$Y=0.950X-3.650$	—	4.9 ± 1.0
09/06/00-24	$Y=0.970X-5.309$	—	6.0 ± 0.9
09/13/00-24	$Y=0.966X-4.554$	—	5.3 ± 0.8
09/18/11-17	$Y=0.948X-3.394$	-40.5~-48.4	5.5 ± 0.6
09/22/09-17	$Y=0.954X-4.445$	-44.6~-55.6	6.1 ± 0.9

る誤差が含まれる。放射率設定を1として測定しているので、設定放射率による誤差は測定板の表面温度から0.3~0.5°C(平均0.4)と推定できるため、測定偏差の推定誤差は約1.7と1.3°Cである。

Table 4から勾配は0.95付近が多く、使用した測定板の窓領域の放射率は0.95付近である可能性がある。測定板の窓領域の放射率を0.95と仮定して、Table 4の定数項を計算し直すと、測定偏差との差は0.9と2.5°Cになる。放射率設定による誤差0.4°Cを差し引くと、測定偏差の推定誤差は0.5と2.1°Cである。

測定物体の放射率(勾配)をあらかじめ測定し、熱電対で測定した真の表面温度と放射温度計で測定した表面温度をグラフにプロットすると、Y軸の切片が天空からの放射による測定偏差である。この方法は比較的精度は良くないが、1回の熱電対と放射温度計の測定値から簡単に測定偏差を求めることが出来る。

植物の葉温などを測定する場合、葉の放射率(ϵ_0)をあらかじめ測定しておいて、熱電対による葉温(t)と放射温度計による葉温(t_w)を、 $t_w = \epsilon_0 \cdot t + b$ の式に代入すると、定数項(b)が天空からの放射による測定偏差である。この値は天空状態が変化しない時間帯内で利用できる。

3) 参照板による補正

前節の2)の方法は天空からの放射量が変化したかどうかを知ることが困難である。また、表面温度を自記計で連続測定している時は不便である。そのため簡単な方法として参照板を作製し、参照板の測定偏差と測定物体の測定偏差の関係をあらかじめ求めておく方法が考えられる。参照板の測定偏差を連続測定して、後に測定物体の測定偏差を計算で求めることができる。

Fig. 8は参照板(放射率=0.96)の測定偏差と植物葉(エゾノギシギシ)の測定偏差との関係である。RMSは1.0°Cでやや大きいですが、これは熱電対の接触などのため葉

の測定偏差の変動が大きいのである。参照板を使用した補正法はConaway *et al.*(1967a)が実用的に使用しているが、その補正精度については記述がない。

以上3種類の方法は一長一短がある。①天空放射温度による方法は比較的精度がよいが、低温まで測定できる放射温度計が必要であり、あらかじめ天空放射温度と測定偏差の関係を求めておく必要がある。②グラフによる方法は簡単であるが、①の方法と比較して精度が悪く、あらかじめ測定物体の放射

率を求めておく必要がある。③参照板による方法は自記計で連続測定の場合に有効であるが、あらかじめ参照板と測定物体の測定偏差の関係を求めておく必要がある。

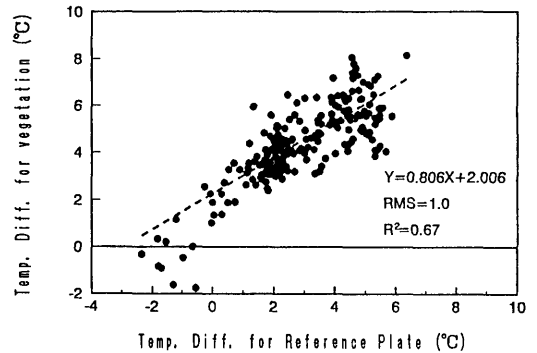


Fig. 8. Relationship between temperature difference for reference plate and that for vegetation.

5. ま と め

放射温度計は非接触型の表面温度計で、植物体などの表面温度が容易に測定できるようになった。しかし、放射温度計の特性はあまり良く知られていない。

放射温度計は測定物体からの長波放射を測定して温度変換している。そのため周囲からの長波放射の反射が出力に含まれる。その影響を除くため、国産の放射温度計は本体温度で補償している。したがって、本体温度と著しく異なる温度からの長波放射が測定物体で反射する場合、大きな測定誤差が生じる。そのため放射温度計の特性と補正法を検討した。

測定項目は①放射温度計の本体温度の影響、②放射温度計の出力の直線性、③放射温度計の放射率補正の特性、④天空からの放射の影響、⑤天空からの放射の補正法、である。

その結果、①放射温度計の本体温度の影響についてみると、本体温度の変化が測定偏差に影響する。その特性は各社によって異なり、外国製のD放射温度計は国産のAやB放射温度計の反応とは明らかに異なる。しかし、一般的に、本体温度を20～30℃以下にして測定することが望ましく、その場合に測定偏差が小さくなる。

②放射温度計の出力の直線性については、本体温度を一定にしないと精度よく測定できない放射温度計と、本体温度を一定にしなくても精度よく測定できる放射温度計がある。しかし、各放射温度計とも本体温度を一定にして、真の表面温度と放射温度計の出力との回帰式を計算して補正するとRMSが小さくなる。この場合、本体温度が40℃以下ではRMSは最大±0.3℃程度である。

③放射温度計の放射率の補正についてみると、各社の放射温度計の設定放射率に対する特性はほぼ同じである。本体温度、測定物体の温度および周囲からの放射の相当温度が同一のとき、放射温度計の設定放射率は作動しない。設定放射率を間違えると、本体温度が周囲からの放射の相当温度より高い場合、正の測定偏差（放射温度計の指示温度の方が真の温度より低い）が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じる。また、設定放射率が0.70より小さくなると測定偏差は大きくなる。

④天空からの放射の影響については、屋外で放射温度計を使用する場合、測定偏差と天空放射温度は比例するが、下向き全長波放射量とは比例しない。天空放射温度の低下とともに測定偏差は大きくなる。

⑤天空からの放射の補正法の検討については、3種類の方法で行った。

(a) 天空放射温度による補正については、測定物体の反射率が小さい場合、「天空放射温度－気温」によって測定偏差を精度よく推定できる。

(b) グラフによる補正については、測定物体の放射率をあらかじめ求めておくと、1回の熱電対で測定した真の温度と放射温度計の出力から測定偏差をグラフで求めることができる。測定偏差の推定精度はやや悪いが簡単な方法である。

(c) 参照板による補正については、参照板の測定偏差と測定物体の測定偏差の関係をあらかじめ求めておく方法である。植物葉を使用した実験では、推定精度はRMS=1.0℃であった。これは長期間表面温度を自記する場合には有用な方法である。

放射温度計は非接触性のため利用範囲が広い。たとえば、今まで測定できなかった群落の表面温度などが、放射温度計を使用して容易に測定できるようになった。この群落の表面温度を使用した熱収支の研究や水収支の研究も盛んに行われている。しかし、放射温度計を使用す

る場合、その特性を良く理解して使用する必要がある。わが国では比較的この分野の研究が少なく、より多くの研究が行われることが望まれる。

本研究を行うにあたり、北海道大学農学部青木助教授、および山口大学農学部谷助教授の指導を得ました。また、札幌管区気象台調査課長松田一氏には資料の提供など大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- Conaway, J. and van Bavel, C. H. M., 1967a: Evaporation from wet soil surface calculated from radiometrically determined surface temperature. *J. Appl. Meteor.*, **6**, 650–655.
- Conaway, J. and van Bavel, C. H. M., 1967b: Radiometric surface temperature measurements and fluctuations in sky radiant emittance in the 600 to 1300 cm^{-1} waveband. *Agron. J.*, **59**, 389–390.
- Fuchs, M. and Tanner, C. B., 1966: Infrared thermometry of vegetation. *Agron. J.*, **58**, 597–601.
- Hatfield, J. L., 1979: Canopy temperature – the usefulness and reliability of remote measurements. *Agron. J.*, **71**, 889–891.
- Idso, S. B. and Jackson, R. D., 1968a: A note on the role of sky radiance in infrared thermometry. *J. Appl. Meteor.*, **7**, 521–522.
- Idso, S. B. and Jackson, R. D., 1968b: Significance of fluctuations in sky radiant emittance for infrared thermometry. *Agron. J.*, **60**, 388–392.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Ehrlert, W. L. and Mitchell, S. T., 1969: A method for determination of infrared emittance of leaves. *Ecology*, **50**, 899–902.
- 井村健二, 1986:放射温度計シリーズ. *Minolta Techno Report*, **3**, 12–22.
- Jackson, R. D. and Idso, S. B., 1969: Ambient temperature effects in infrared thermometry. *Agron. J.*, **61**, 324–325.
- 久保井常雄, 伊勢 敏, 貝和良一, 猪股陽二, 榎本 裕, 1977: 赤外線放射温度計 ER-2007. *National Technical Report*, **23**, 905–910.
- Lorenz, D., 1966: The effect of longwave reflectivity of natural surfaces on surface temperature measurements using radiometers. *J. Appl. Meteor.*, **5**, 421–430.
- オプテックス株式会社: 非接触温度計, 技術資料.
- Sevendesen, H., Jensen, H. E., Jensen, S. E. and Mogonsen, V. O., 1990: The effect of clear sky radiation on crop surface temperature determined by thermal thermometry. *Agri., Forst. Meteor.*, **50**, 239–243.