

福山大学工学部紀要
第2号 1980年3月

半透明体の放射温度測定法について

松井松長*・玉重繁良*・高木亨*

New Methods of Radiation Thermometry
of Translucent Bodies

Matsunaga MATSUI,* Shigeyoshi TAMASHIGE*
and Tohru TAKAGI*

* Faculty of Engineering, Fukuyama University

ABSTRACT

As the transmittance for thermal radiation of translucent bodies are high, it is difficult to use temperature measurement using infrared techniques.

So, in this paper two new methods of non contact temperature measurement for translucent bodies are discussed. One is to measure by radiation thermometer through the translucent body from the source which is set behind the sample, and its temperature is varied twice. The other is conducted by reading the thermal infrared image (thermogram) of temperature targets suspended in the translucent gas.

* 電子電気工学科

1. ま え が き

放射温度測定法は、対象物の温度を非接触（遠隔）で、迅速に測定できるという長所をもっている反面、対象物の放射率、中間介在物の吸収・放射、および周辺物体の放射などに対する補正が必要であるという短所がある。不透明で低放射率の対象物については、これらの欠点はすべて解消されて、極めて有用な測定法になるのに対して、半透明体の場合は最も不適当な方法であると考えられてきた。これは半透明体であることが、低放射率で放射エネルギーが小さいのに加えて、高透過率で背後物体からの放射（背景放射）の影響が極めて大きいことに起因している。

本報告では、半透明体を対象とした二種類の非接触温度測定法の考察および実験結果についてのべる。第一の方法（背後放射変化法）^{1,2)}は中位透過率の固体、液体、および煙などの測温に適しており、第二の方法（温度指標挿入法）³⁾は比較的高透過率の空気、その他の気体の温度分布の測定に最適である。

2. 背後放射変化法

半透明体の非接触温度測定には、これまで測定対象物（試料）の吸収波長帯における放射を測定する方式が採用されてきた^{4,5)}この方法は帯域幅が狭くて放射エネルギーが小さいことが多く、それ故に高感度の放射温度計が必要である。また試料の種類に応じて、それぞれの吸収波長帯に合致した分光感度を有する専用の放射温度計を備えねばならない。本測定法は、透過波長帯を利用し、試料背後に二種の既知温度の物体を交互に置いて行う新測定法である。

放射温度計、半透明体材料、および背後物体（可変温度放射体）をそれぞれ図1のように配置する。従来の方法では、試料からの温度放射のみを測定しようとしても、背後物体からの放射が半透明の材料を通過して放射温度計に加わるために、これを避ける方法として試料の吸収の強い波長域を利用している。本測定法では、この背後物体からの放射を積極的に利用しているのが特徴である。

ここでは、中間介在物の吸収の大小、および

試料表面と背後物体表面の放射率の高低により、三つの場合において検討する。

2.1 近距離の場合

放射温度計と試料との間の距離が10 m程度までの場合は、大気の透過率は $\tau_{a1} \approx \tau_{a2} \approx 1$ とみなしても支障がない。従って、図1の放射温度計の位置における放射輝度 N_1 は次式で与えられる。

$$N_1 = \tau_s \epsilon_1 N_b(T_1) + (1 - \tau_s) N_b(T_s) \quad (1)$$

ここで、 τ_s は試料の透過率、 ϵ_1 は背後物体の放射率（表面を黒化して使用するため $\epsilon_1 \approx 1$ になる）、 T_s は試料の温度、 $N_b(T_s)$ は温度 T_s の黒体の放射輝度、 T_1 は背後物体の温度、 $N_b(T_1)$ は温度 T_1 の黒体の放射輝度である。なお、温度を除く他の量は、すべて波長 λ の関数であるが、これを省略して表わす（以下同じ）。

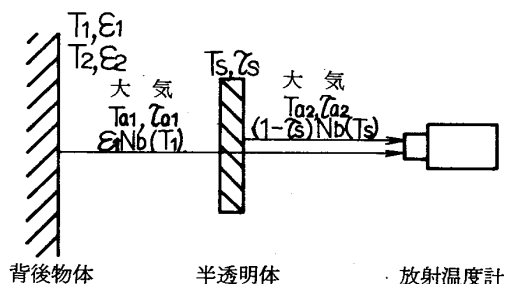


図1 半透明体の非接触温度測定

次に温度 T_2 、放射率 ϵ_2 の第2の背後物体（温度だけを T_2 に変化させてもよい）についても式(1)と同様に

$$N_2 = \tau_s \epsilon_2 N_b(T_2) + (1 - \tau_s) N_b(T_s) \quad (2)$$

で与えられる。通常、 T_2 は未知であるから、これら二式の差をとり、変形すれば

$$\tau_s = (N_1 - N_2) / \{ \epsilon_1 N_b(T_1) - \epsilon_2 N_b(T_2) \} \quad (3)$$

となる。これを式(1)に代入し、整理すれば、

$$N_b(T_s) = \{ N_1 - \tau_s \epsilon_1 N_b(T_1) \} / (1 - \tau_s) \quad (4)$$

となり、温度 T_s を知ることができる。ただし

$$N_b(T_s) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_\lambda d\lambda \quad (5)$$

であり, N_λ は Planck の放射則

$$N_\lambda = (2\pi hc^2/\lambda^5) \{ \exp(ch/\lambda k T_s) - 1 \}^{-1} \pi^{-1} \quad (6)$$

であるから, $N_b(T_s)$ は上式により予め求めておくものとする。

2.2 反射を考慮した場合

2.1の方法は試料表面および背後物体表面における反射が無視できる場合に限り適用できる。しかし, 試料面が高反射率であるとか, 周辺に高温物体があるときには, 背後物体および試料の表面で反射されて放射温度計に入射する周辺物体からの放射を考慮しなければならない。また試料が薄片で透過率が高い場合には, 試料両面での多重反射も考えねばならない(図2)。

いま, 試料の温度を T_s , 透過率を τ_s , 反射率を ρ_s , 背後物体の温度および放射率をそれぞれ T_1, ϵ_1 とすれば, 放射温度計の位置における放射輝度は次式で表わされる⁶⁾

$$N_1 = \tau_s^* \{ \epsilon_1 N_b(T_1) + (1 - \epsilon_1) N_r \} + \epsilon_s^* N_b(T_s) + \rho_s^* N_r \quad (7)$$

ここで,

$$\tau_s^* = \{ \tau_s (1 - \rho_s)^2 \} / (1 - \tau_s^2 \rho_s^2) \quad (\text{試料の実効透過率})$$

$$\rho_s^* = \rho_s + \{ \tau_s^2 \rho_s (1 - \rho_s)^2 \} / (1 - \tau_s^2 \rho_s^2) \quad (\text{試料の実効反射率})$$

$$\epsilon_s^* = \{ (1 - \rho_s)(1 - \tau_s)(1 + \tau_s \rho_s) \} / (1 - \tau_s^2 \rho_s^2) \quad (\text{試料の実効放射率})$$

N_r = 周辺物体の放射輝度

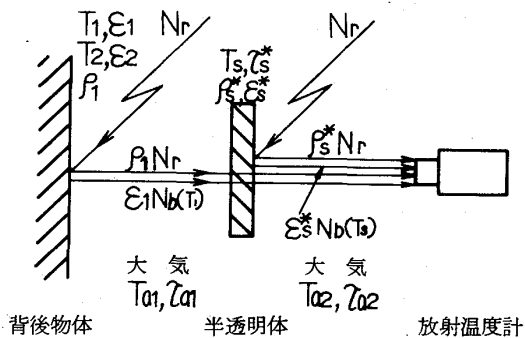


図2 半透明体の非接触温度測定 (反射を考慮した場合)

背後物体の温度を T_2 , 放射率を ϵ_2 とすれば, 式(7)と同様に

$$N_2 = \tau_s^* \{ \epsilon_2 N_b(T_2) + (1 - \epsilon_2) N_r \} + \epsilon_s^* N_b(T_s) + \rho_s^* N_r \quad (8)$$

式(7), (8)より

$$\tau_s^* = (N_1 - N_2) / \{ \epsilon_1 N_b(T_1) - \epsilon_2 N_b(T_2) \} \quad (9)$$

N_1 および N_2 を測定して τ_s^* を求め, 式(7)に代入して変形すれば

$$N_b(T_s) = (N_1 - \tau_s^* \{ \epsilon_1 N_b(T_1) + (1 - \epsilon_1) N_r \} - \rho_s^* N_r) / \epsilon_s^* \quad (10)$$

となり, 試料の温度 T_s を知ることができる。

2.3 遠距離の場合

遠距離にある物体の温度測定においては, 光路中の大気の放射と吸収を考慮しなければならない。図1において, 光路中に介在する大気の温度 T_{a1}, T_{a2} , および透過率 τ_{a1}, τ_{a2} が測定可能であれば, 放射温度計から見た場合の放射輝度は

$$N_1 = \tau_{a2} \{ \tau_s [\tau_{a1} \{ \epsilon_1 N_b(T_1) \} + (1 - \tau_{a1}) N_b(T_{a1})] + (1 - \tau_s) N_b(T_s) \} + (1 - \tau_{a2}) N_b(T_{a2}) \quad (11)$$

同様に

$$N_2 = \tau_{a2} \{ \tau_s [\tau_{a1} \{ \epsilon_2 N_b(T_2) \} + (1 - \tau_{a1}) N_b(T_{a1})] + (1 - \tau_s) N_b(T_s) \} + (1 - \tau_{a2}) N_b(T_{a2}) \quad (12)$$

式(11), (12)より

$$\tau_s = \{ (N_1 - N_2) / \tau_{a2} \} / \{ \tau_{a1} \{ \epsilon_1 N_b(T_1) - \epsilon_2 N_b(T_2) \} \} \quad (13)$$

式(4)と同様にして, 式(11), (13)より

$$N_b(T_s) = \frac{(1/\tau_{a2}) \{ N_1 - (1 - \tau_{a2}) N_b(T_{a2}) \}}{1 - \tau_s} \frac{\tau_s [\tau_{a1} \{ \epsilon_1 N_b(T_1) \} + (1 - \tau_{a1}) N_b(T_{a1}) \}]}{1 - \tau_s} \quad (14)$$

2.4 噴煙の温度測定

地上高数十mから数千mの煙，またはその他の大気中に局部的に存在する吸収性ガスの温度のパッシブ遠隔測定法について検討する。

【不透明な煙の場合】観測点として図3に示すような同一高度の3地点を選定して，煙の放射輝度 N_{s1} ， N_{s2} および N_{s3} を測定するものとする。この場合煙の放射率は $\epsilon_s \approx 1$ と考えられるから， N_{s1} は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} N_{s1} &= \tau_{a1} \cdot N_b(T_s) + N_{a1} \\ &= \exp(-\alpha_a l_1) \{N_b(T_s) - N_b(T_a)\} \\ &\quad + N_b(T_a) \end{aligned} \quad (15)$$

N_{s2} ， N_{s3} についても同様である。ただし， l_1 ， l_2 ，および l_3 は各観測点から煙までの距離， τ_{a1} は距離 l_1 の大気の透過率， α_a は大気の減衰係数（吸収係数+散乱係数）， $N_b(T_s)$ は煙の温度と同温度の黒体放射輝度， N_{a1} は光路 l_1 中の大気の放射輝度， T_a は気温（ただし，傾斜光路中の大気放射に対応した等価温度）とする。式(15)より次式が導かれる。

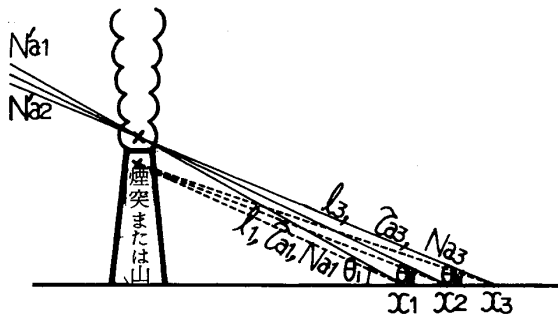


図3 煙の遠隔温度測定

$$\begin{aligned} N_{s1} - N_{s2} &= \{N_b(T_s) - N_b(T_a)\} \{ \exp(-\alpha_a l_1) \\ &\quad - \exp(-\alpha_a l_2) \} \end{aligned} \quad (16)$$

$N_{s2} - N_{s3}$ についても同様である。従って

$$\begin{aligned} \frac{N_{s1} - N_{s2}}{N_{s2} - N_{s3}} &= \frac{\exp(-\alpha_a l_1) - \exp(-\alpha_a l_2)}{\exp(-\alpha_a l_2) - \exp(-\alpha_a l_3)} \\ &= \beta \end{aligned} \quad (17)$$

ここで $l_3 > l_2 > l_1$ ， $l_3 - l_2 = l_2 - l_1$ となるように観測点 x_1 ， x_2 ，および x_3 を選定すれば，

$$\beta = \{ \exp(-\alpha_a l_1) \} / \{ \exp(-\alpha_a l_2) \} \quad (18)$$

上式の両辺の対数をとれば

$$\alpha_a = \ln \beta / (l_2 - l_1) \quad (19)$$

この α_a を式(16)に代入して $\{N_b(T_s) - N_b(T_a)\}$ を求め，これを式(15)に代入して $N_b(T_a)$ を，さらに $N_b(T_s)$ を求めることができる。

【半透明な煙の場合】半透明な測定対象物が上空にあるときは，人為的に背後放射を変化させることは不可能である。そこで，天空放射が天頂角に依存すること^{7,8)}を利用する。

前述の方法で煙突または山の頂部の放射輝度を測定して α_a を求めた後，2点 x_1 ， x_2 より頂上付近の煙の放射輝度 N_{s1} ， N_{s2} を測定したとすれば，次のように表わされる。

$$N_{s1} = \tau_{a1} \{ (1 - \tau_s) \cdot N_b(N_s) + \tau_s N'_{a1} \} + N_{a1} \quad (20)$$

N_{s2} も同様である。ただし， τ_s は煙の透過率， N'_{a1} は煙の位置における θ_1 方向の天空放射輝度を表わす。

式(20)の N'_{a1} については次のように求める。すなわち x_1 点における仰角 θ_1 の方向の天空放射輝度 N_{i1} は

$$N_{i1} = \tau_{a1} N'_{a1} + N_{a1} \quad (21)$$

であるから，同じ放射温度計を使用し，仰角 θ_1 で異った方位角の天空放射を測定すればよい。

式(20)，(21)より，煙の透過率は

$$\tau_s = \frac{(N_{s1} - N_{a1}) / \tau_{a1} - (N_{s2} - N_{a2}) / \tau_{a2}}{(N_{i1} - N_{a1}) / \tau_{a1} - (N_{is} - N_{a2}) / \tau_{a2}} \quad (22)$$

式(22)を(20)に代入すれば $N_b(T_s)$ を求めることができる。

2.5 実験結果

この方法の正当性を確認するために，厚さ1mmのポリエチレン板を試料として実験を行った。放射温度計は，千野製作所製IR-LCH形（動作波長域：2~22 μ m，測定可能温度範囲：-50~100 $^{\circ}$ C，視野：0.2rad）を使用した。背後物体としては，表面に黒化塗料を塗布した

罐に水を満たして用いた。2.1および2.2の方法による測定結果を表1に示す。

表1の結果より、水銀温度計の指示値を真温度と見なせば、試料温度と背後物体の温度との差が大きい場合に誤差が大きくなる傾向があるが、これについては、温度差が大きくなるにつ

表1 背後放射変化法によるポリエチレン板の温度測定の結果

背後物体の温度		接触法(°C) 水銀温度計の 指示値 T_{Hg}	非 接 触 法			
T_1 (°C)	T_2 (°C)		反射を無視		反射を考慮	
			T_s (°C)	T_{Hg} の差(°C)	T_s (°C)	T_{Hg} の差(°C)
70.5	60.6	18.0	16.7	- 1.3	17.4	- 0.6
49.6	34.7	18.0	18.0	0.0	18.5	+ 0.5
82.0	26.2	16.8	16.2	- 0.6	16.6	- 0.2
24.7	15.8	19.2	18.7	- 0.5	19.2	0.0
18.7	2.8	20.4	21.4	+ 1.0	21.7	+ 1.8

(ただし、 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.94$, $t_1 = t_2 = 4.0$ cm)

れて背後物体の表面の温度むらが大きくなるため、および動作波長域内にある試料の狭い吸収帯によるものであると考えられる。

3. 温度指標挿入法

室内の気温の垂直分布または水平分布の測定には、これまで多数の水銀温度計または熱電対温度計を配列して、その指示値を逐次読みとる方法が用いられてきた。これらの接触温度測定法では、各点の温度の同時測定が困難なばかりでなく、読みとりのために水銀温度計の場合は空気の攪乱が避け難く、また熱電対を使用した場合は、検出部と表示部との間の配線が煩雑になる。本測定法は、走査式赤外線映像装置(走査式赤外線カメラ)を使用する新測定法であって、温度指標板の熱放射を利用して、非接触で同時測定が可能であり、上記の諸問題はすべて解決される。

3.1 測定の原理

一般に空気のような赤外線透過率の高い物質は、放射温度測定には不向きである。そこでこの方法では、室内の測定しようとする平面内に等間隔に多数の温度指標(金属板または金属箔)を吊るして、各金属板からの熱放射を走査式赤外線映像装置で同時に測定する(図4参照)。温度の読みとりは、映像装置のブラウン管面の熱映像(サーモグラム)とグレイ・スケールとの比較、または同時に表示される部分温度分布

曲線により行う。

温度指標(測温用金属板)としては、被測定面が高放射率、裏面が高反射率のもので、かつ高熱伝導率、小熱容量のもの(気温に即応するもの)がよく、銅板、アルミニウム板、アルミニウム箔などの片面に黒化塗料を塗布したものが適当である。このような空気中に吊り下げら

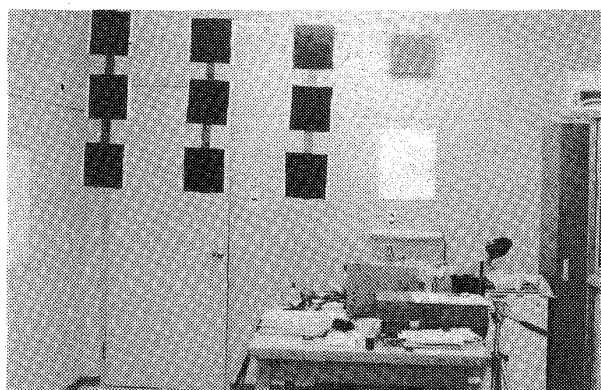


図4 温度指標板

れた金属板と周囲の壁面との間の熱の授受は、放射と対流により行われる。そこでこれらについて検討してみる。

(1) 壁面からの放射の影響

壁面の温度を T_2 、温度指標板の温度を T_1 とすると、指標板の受ける放射エネルギーは

$$W = \sigma(T_2^4 - T_1^4) \left[\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} \right] \quad (23)$$

で与えられる。⁹⁾ ここで σ は Stefan-Boltzmann 定数、 ϵ_1 および ϵ_2 はそれぞれ壁面と指標板の放射率である。

(2) 対流による熱の流出

温度指標板から空気中に流出する単位時間当りの熱流 I は、

$$I = \alpha s \theta \quad (24)$$

で表わされる。ここで、 α (W/cm²・°C)は熱伝達率、 s (cm²)は表面積、 θ (°C)は空気との温度差である。⁹⁾

いま、指標板の片側表面積が300 cm²以下であって、壁面温度および気温との差がいずれも2°Cの場合について計算すると、壁からの放射および空気の対流による熱の流出を合せても、指標板の温度変化は0.1°C以下になる。

3.2 実験結果

本測定法の適不適を確かめるために各指標の裏面に水銀温度計を貼付けて比較測定を行った。図5は温度指標の熱映像の一例である。

測定は、本学3号館の3階の研究室において空調装置を30分以上運転した後、攪拌せずに冷気は下に、暖気は上方に偏った状態で行った。赤外線映像装置には、富士通(株)インフラアイ・

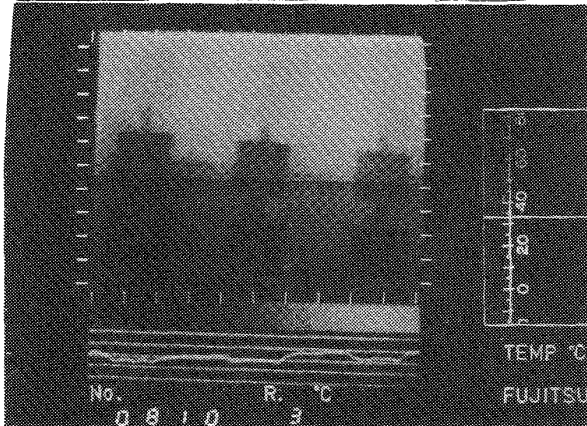


図5 温度指標の熱映像

501Aを用いた(視野: $20^\circ(H) \times 15^\circ(V)$, 瞬時視野: $2 \text{ mrad} \times 2 \text{ mrad}$, 測温範囲: $0^\circ\text{C} \sim 1,500^\circ\text{C}$)。

図5の熱映像より、一見して上部が高温、下部が低温であることがわかる。これをグレースケールを用いて読みとり、水銀温度計の指示値と比較したのが図6である。同図より両者の指示値には若干の差はあるが、全般的な分布状態はほぼ一致している。

	(左)		(右)	
	1A	1B	1C	上段 熱映像
(上)	31.4℃ 31.1℃	31.7 31.4	31.9 31.7	
	2A	2B	2C	下段 水銀温度計
	30.7 30.1	31.1 30.5	31.2 29.6	
	3A	3B	3C	1978.8.10 11:50 空調作動
(下)	29.9 30.0	29.9 30.4	29.8 30.2	

図6 熱映像の表示温度と水銀温度計の指示温度との比較(例)

この種の温度測定において、特に留意すべきことは、温度指標の熱特性である。被測定面は、壁面からの放射の反射を避けるために高放射率

でなければならない。温度指標の温度変動を避けるには高放射率でなければならないという相反する特性が要求される。これらを完全に両立させることは不可能であるが、被測定面を黒化して裏面を高反射面とし、さらに黒化面を凹面にすれば、空洞放射の効果と相まって指標としては一層高性能のものが得られる。

4. むすび

放射温度測定の対象として最も不適当とされてきた半透明体について、二種の測定法を提案した。第一の背後放射変化法は、中位透過率の固体や液体、火山などの噴煙、および透明管内の流体の温度測定に応用できるであろう。この方法において背後放射体の温度は、任意の二点の温度をとればよく、これが大きな利点である。この原理によれば光源としてレーザーの利用も可能である。第二の温度指標挿入法は、室内気温分布の測定には最適の方法であると考えられる。

終わりに本研究において試料の入手にご配慮頂いた本学白井万次郎教授、および実験に協力された中村英明君に深謝する次第であります。

《参考文献》

- 1) 松井, 堤: 電気四学会中国支部連合大会講演論文集(昭51)30718.
- 2) 松井, 玉重, 中村, 高木: 電気四学会中国支部連合大会講演論文集(昭53)80179.
- 3) 高木, 松井, 玉重: 電気四学会中国支部連合大会講演論文集(昭53)80720.
- 4) Barnes社: 放射温度計説明書, Bulletin 10-72(1972).
- 5) 宮内克之: 赤外線放射計測技術とその応用(千野製作所), 第18回計測工業展新製品技術説明会資料(昭54).
- 6) 高木, 松井, 宮武: 日本産業科学研究所研究報告, 1(1975)1.
- 7) 高木, 松井: 分光研究, 16(1967)112.
- 8) M. Matsui et al: Proc. of the Tenth International Symp. on Remote Sensing of Environment, 1(1975)223.
- 9) 電気学会編: 電熱工学, 電気学会(昭30)28;46.