気体用熱電温度計

芝 亀 吉・川 村 幹 也

東洋大学工学部 川越市鯨井字中野台 2100

(昭和 46 年 12 月 6 日 受付)

Thermoelectric Thermometer for Gases

Kamekichi SHIBA and Mikiya KAWAMURA

(Faculty of Engineering, Toyo University, Kawagoe)

(Received December 6, 1971)

One important and difficult problem in the thermometry of gaseous substances is how to eliminate the error due to radiation.

The purpose of the paper here reported is to construct a thermoelectric thermometer with which the correct temperature of a gas can be obtained by a single measurement regardless of radiation. Two copper-constantan thermopiles are covered with materials of different emissivities. The ratio of the number of couples of the two piles is inversely proportional to the emissivities of the materials.

The error due to radiation is canceled, and the correct temperature of a gas can be obtained by a single measurement. The ratio of emissivities may be estimated experimentally.

Improvements are made for simplification of the equipment and stabilization of the output voltage. The number of couples and reference junctions is considerably reduced.

An improved thermometer of type I is composed of a reflective thermocouple, a reference junction and a set of differential couples.

An improved thermometer of type II is composed of some reflective couples and absorptive couples connected in parallel and a set of compensating differential couples.

The experimental results show that good stability of output voltage and simplification of the setup are obtained fairly well. The error due to radiation is within $\pm 3 \mu\text{V}$ (0.06°C) over the temperature range from 35°C to 45°C . It is recognized that improved thermometers are available for gas temperature measurement.

1. ま え が き

気体の温度測定は一般にかなり困難である^{1),2)}. その原因は, つぎのとおりであると考えられている³⁾.

- (1) 気体の単位体積当たりの熱容量が小さいこと
- (2) 気体の熱伝導率が一般にかなり小さいこと
- (3) 温度計の感温部が周囲の物体から放射を受けること^{4)~6)}

この中 (1) と (2) とによる困難は温度計の感温部の単位表面積当たりの熱容量を小さくすることによって, かなりの程度に軽減される. 原因 (3) による

困難は, 周囲の物体の温度が被測定気体の温度と同じでないときに生じる. この放射による影響は, 感温部を遮蔽したり^{7),8)}, また気体を常に流してやることで少なくできるが完全ではなく, 装置も複雑になる^{9),10)}.

放射の影響を受ける度合の異なる 2 個の感温部を利用することで放射による影響を消去することができるが, これには 2 温度を測定して, グラフなどを利用して計算することを必要とする.

ここに報告する気体用熱電温度計は上記の方法と同様の考え方で放射の影響を消去する方式のものであるが, 単一量の測定で直接気体の温度が知られるように

考案されたものである。

2. 測定原理

放射率がそれぞれ σ_r, σ_a の2枚の薄板を考える。その放射率はいずれも既知で、 $\sigma_r < \sigma_a$ であり、 σ_r はなるべく小さく、 σ_a はなるべく大きいことが望ましい。放射率 σ_r の薄板を反射薄板、 σ_a のものを吸収薄板と呼ぶことにする。薄板を考えることにしたのは、前掲の(1)、(2)による困難を避けるためである。気体の温度、反射薄板の温度、吸収薄板の温度をそれぞれ $t^\circ\text{C}, t_r^\circ\text{C}, t_a^\circ\text{C}$ とする。 $t_a^\circ\text{C}$ と $t_r^\circ\text{C}$ との差があまり大きくないとするので、 σ と温度 θ との関係は直線で表わされる。Fig. 1 はその例を示す。 $\sigma=0$ の

Fig. 1 Emissivity of thermosensitive element vs temperature

ときの温度が、放射の影響を受けない場合の温度、つまり気体の温度 $t^\circ\text{C}$ である。(a) は周囲の物体の温度が、被測定気体の温度より高い場合であり、(b) は低い場合である。一般に t_a と t との差は十分に小さいとはいえないが、両薄板を遮蔽して周囲物体からの放射が直接到達しないようにすると、この差は小さくなるので、 t と t_a との間で σ と θ が直線関係にあるとすることができる。ゆえに

$$\sigma_a(t_r - t) = \sigma_r(t_a - t) \quad (1)$$

の関係が得られ、これによって t_r, t_a の測定で気体自体の温度 t が知られることになる。

両薄板の温度を熱電温度計で測定することにする。両熱電温度計の素線は同じ材質のものでよいが異なってもよい。反射薄板および吸収薄板の温度を測定する温度計をそれぞれ反射温度計および吸収温度計ということにする。基準接点の温度が 0°C のとき、両温度計の1対の熱電対の起電力をそれぞれ e, e' とし

$$\text{温度 } t^\circ\text{C}, t_r^\circ\text{C} \text{ で } e = e_t, e = e_r$$

$$\text{温度 } t^\circ\text{C}, t_a^\circ\text{C} \text{ で } e' = e_t', e' = e_a'$$

であるとする。 $t^\circ\text{C} \sim t_a^\circ\text{C}$ の温度範囲はあまり広くないので、この範囲内では温度 $\theta^\circ\text{C}$ と e, e' とが直線関係にあるとみられ、

$$e_r - e_t = \varepsilon(t_r - t) \quad (2)$$

$$e_a' - e_t' = \varepsilon'(t_a - t)$$

の関係がある。ここに $\varepsilon, \varepsilon'$ は一般には温度によるが、

この範囲内では定数とみられる。

(2) 式を (1) 式に代入して整理すると、

$$\varepsilon' \sigma_a e_r - \varepsilon \sigma_r e_a' = \varepsilon' \sigma_a e_t - \varepsilon \sigma_r e_t' = E(t) \quad (3)$$

となる。そこで $E(\theta)$ と温度 $\theta^\circ\text{C}$ との関係を示すグラフが作られていれば、 e_a', e_r を別々に測定し、(3) 式の左辺に代入して計算し、その値からグラフによって t を求めることができるが、これを単一の測定で求めることを考えて見る。

2.1 基本形

反射温度計および吸収温度計の熱電対列がそれぞれ n_r 対および n_a 対の熱電対からできているとし、 n_r, n_a が近似的に

$$n_r \cdot \varepsilon \cdot \sigma_r = n_a \cdot \varepsilon' \cdot \sigma_a \quad (4)$$

の関係にあるように選定されているとする。このときには (3) 式は (4) 式により

$$n_r \cdot e_r - n_a \cdot e_a' = n_r \cdot e_t - n_a \cdot e_t' = E(t) \quad (5)$$

(5) 式の左辺は両熱電対列の熱起電力の差であるから、両熱電対列を逆直列に連結して全体の熱起電力を測定すれば $E(t)$ が得られる。このように単一測定によって気体自体の温度が知られる。

ここで両熱電対列素線について ε と ε' との比が温度によらないならば、広い温度範囲にわたって (5) 式が充される。しかし一般にはそうではない。そこで、両熱電対列に同一材質の素線を用いると、常に $\varepsilon = \varepsilon'$ であり、(4) 式は

$$n_r \cdot \sigma_r = n_a \cdot \sigma_a \quad (6)$$

となる。さらに、 $e_t = e_t'$ であるから、(5) 式は

$$E(t) = (n_r - n_a) e_t \quad (7)$$

となる。これは $(n_r - n_a)$ 対の熱電対の温度 $t^\circ\text{C}$ における熱起電力に等しいことを示している。なお実際には、反射温度計の熱電対列の中の $(n_r - n_a)$ 対にだけ基準接点を用い、基準接点の数を節約することができる。すなわち Fig. 2 において全起電力 E は

Fig. 2 Connection of thermopiles (basic type)

$$E = \varepsilon n_a(t_r - t_a) + \varepsilon(n_r - n_a)t_r \\ = \varepsilon(n_r t_r - n_a t_a) = \varepsilon(n_r - n_a)t \quad (8)$$

となる。

2.2 改良形 I

基本形の熱電対の数および基準接点数を少なくするように、また、出力が安定になるように改良する。

(1) 式を

$$t = t_r - \frac{\sigma_r}{\sigma_a - \sigma_r} (t_a - t_r) \quad (9)$$

と書き変えることができる。これは 1 個の熱電対 t_r と差動熱電対 $(t_a - t_r)$ の起電力を $\sigma_r/(\sigma_a - \sigma_r)$ 倍したものを逆直列に連結すればよいことを示している。このときの結線図は Fig. 3 に示されているようになる。

Fig. 3 Improved thermometer of type I (schematic)

十分大きい抵抗 R で差動熱電対を分路し、その一部 r から t_r のほうに連結されている。このとき r は

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_a - \sigma_r} = \frac{r}{R} \quad (10)$$

の関係が成り立つように定められる。

つぎに反射熱電対を 1 個でなく m 個を直列に連結する場合を考える。このときには、(9) 式を m 倍した式

$$mt = mt_r - \frac{m\sigma_r}{\sigma_a - \sigma_r} (t_a - t_r) \quad (11)$$

によって、反射温度計の熱起電力から、1 組の差動熱電対の出力の $m\sigma_r/(\sigma_a - \sigma_r)$ 倍を引いた残りが、 m 個の熱電対の真温度 $t^\circ\text{C}$ における熱起電力に等しいことが知られる。このときに、 $m\sigma_r/(\sigma_a - \sigma_r)$ が 1 に等しいような整数 m があれば、その m については抵抗分圧器が不用となる。このような整数 m が存在しないときには、この比がなるべく 1 に近くて 1 より小さいという条件が充されている整数 m を選定し、差動熱電対の起電力を少し減少して補正すればよいので、抵抗分圧器の代わりに、適当な 1 個の抵抗で分路すればたりる。また、直読のために用いる出力減衰器も、減衰比が簡単な整数でよいので、正確なものが得やすい。

2.3 改良形 II

基本形にしても改良形 I にしても多くの基準接点が必要としたり、分圧器、減衰器などを用いたりしなければならない。改良形 II は、熱電対の並列接続を利用する方式で、上記のようなものを必要としない。

一般に起電力が E_m の電源を m 個、 E_n の電源を n 個を並列に接続したときの合成起電力 E は、

$$E = \frac{mE_m + nE_n}{m+n} \quad (12)$$

で与えられる。ただし各電源の内部抵抗は等しいとする。これを n_r 個の反射熱電対と n_a 個の吸収熱電対とを並列に接続する場合に適用すると、(12) 式は

$$E = \frac{n_r e_r + n_a e_a}{n_r + n_a} \quad (13)$$

となる。いっぽう、(1) 式を書きなおして

$$t = \frac{\sigma_a t_r - \sigma_r t_a}{\sigma_a - \sigma_r} = \frac{x t_r + y t_a}{c(\sigma_a - \sigma_r)} - (t_a - t_r) \quad (14)$$

とおくと、 x, y は

$$x = c\sigma_r, \quad y = c(\sigma_a - 2\sigma_r) \quad (15)$$

で与えられる。ここで、比 x/y に近似的に等しい簡単な整数比を n_r/n_a とする。 n_r, n_a は、あまり大きくない整数である。

上記の考え方に基づいて、Fig. 4 に示されている

Fig. 4 Improved thermometer of type II (schematic)

ように、 n_r 個の反射熱電対接点と n_a 個の吸収熱電対接点を並列に接続したものと、1 組の差動熱電対とを逆直列に連結する。このときの並列熱電対起電力は

$$\frac{n_r e_r + n_a e_a}{n_r + n_a} = \frac{x e_r + y e_a}{x + y} = \frac{x e_r + y e_a}{c(\sigma_a - \sigma_r)} \quad (16)$$

で与えられるので、近似的に真温度 $t^\circ\text{C}$ が測られる。

3. 実験方法

上述の考え方に従って試作された気体用熱電温度計によって、空気温度が測定されることは理論的に証明されている。この温度計によって空気温度が実際に測定されることを実験的に実証することは、他の方法で空気自体の温度を測定することが、ほとんど不可能であるためにはなほだ困難である。

そこで、直接ではないが、空気温度が測られることを推定するために

- (1) 差動熱電対による放射の影響の測定
- (2) 恒温槽内壁の放射影響の測定
- (3) 放射率の比 σ_a/σ_r の評価
- (4) 試作気体用温度計による実験

を行なうこととした。

4. 実験装置

実験に使用した装置は Fig. 5 の測定系統図および、Fig. 6 の写真に示されているように、試作気体用熱電温度計、恒温槽、基準接点、測定部からできている。

Fig. 5 Schematic figure of measuring system

Fig. 6 Photograph of measuring system

4.1 試作気体用熱電温度計

熱電対は Philips 社製銅-コンスタンタン箔状熱電対を用い、吸収温度計には黒インキを塗布し、反射温度計には市販のアルミ箔を両面接着テープで貼りつけた。熱起電力感度は $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 間では $42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ である。

4.2 恒温槽

容積が 40 cm^3 立方で $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の精度で一定温度が保たれる (Fig. 7)。小さい二重ガラス窓がつけられて

Fig. 7 Performance of constant temperature box

いて、その外から 100 W の白熱電球で照射されるようになっている。恒温槽内の空気は扇風機でよく攪拌され、槽内壁と空気との平均温度差は 0.4°C と小さく

なっている。また内壁の温度分布も $\pm 0.8^\circ\text{C}$ の精度に保たれる。なお恒温槽外の照射用電球のそばにも扇風機をおき、電球からの熱伝導を防ぐために、中間の空気を常に流動するようにしてある。

4.3 測定部

熱電対出力リード線は恒温槽の上部の小孔から引き出され、槽の上におかれている基準接点用魔法びんと、 E_a, E_r 切換 SW 箱に接続され、その出力は卓上の直流増幅器、減衰器を経て、4 けたのデジタル電圧計につながれている。

いちおうの目安として空気の温度を知るために、サーミスタ温度計を恒温槽内に設置した。放射を避けるように感温部は遮蔽されているので、正しい空気温度に近い値が得られる。

5. 実験とその結果

5.1 差動熱電対による放射影響の測定

恒温槽内に反射熱電対接点と吸収熱電対接点とからなる差動熱電対を置き 50°C より 40°C まで恒温槽内を攪拌しながら冷却した場合の差動熱電対出力の変化を外部から照射を与えたときと、与えないときについて測定したところ、Fig. 8 の結果を得た。

Fig. 8 Effect of irradiation on differential couples

照射を与えないときのグラフ B が完全に 0 でないのは、恒温槽内壁と空気とのわずかの温度差によるものである。ゆえに照射による影響は $A-B$ で示される。

5.2 槽内壁の放射影響の測定

差動熱電対によって槽内壁の放射の影響が現われることがわかったが、 θ_a, θ_r そのものがどのような影響を受けるかをしらべた。Fig. 9 はその結果であり外部から照射しないで攪拌加熱しながら測った場合と自然冷却の状態で測った場合とを示す。

5.3 放射率比 σ_a/σ_r の評価

Fig. 9 Comparison of outputs of both couples in a constant temperature box

本実験に使用している表面材料の放射率比の実測法を考える。ここで σ_a, σ_r の絶対値の測定は困難であり、また必ずしも必要ではなく、比 σ_a/σ_r がわかればよいことは (1) 式によって明らかである。(1) 式より

$$\sigma_a/\sigma_r = (t_a - t)/(t_r - t) \quad (17)$$

であるが、照射しないときの熱電対起電力が $E_a = E_r$ ならば、これは真温度 t を示していることになるので照射を与えたときの起電力 E_a', E_r' より

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_r} = \frac{E_a' - E_a}{E_r' - E_r} = \frac{\Delta E_a}{\Delta E_r} \quad (18)$$

となり、 σ_a/σ_r が知られる。

結果は Fig. 10 に示されており、 $\Delta E_a/\Delta E_r$ が 2.5

Fig. 10 $\Delta E_a/\Delta E_r$ vs temperature

~3 で平均 2.8 となった。

5.4 試作熱電対による実験

(1) 基本型 $\sigma_a/\sigma_r = 3$ と想定して 4 個の熱電対を、Fig. 11 および Fig. 12 の写真に示されているように、基板にマウントしたものをを用いた。この場合の出力は、その温度における熱起電力の 2 倍であるから、出力増幅器の後の減衰器で 1/2 にして、その温

Fig. 11 Construction of trial thermometer (basic type)

Fig. 12 Photograph of trial thermometer
Fig. 11

$\Delta\theta_r$: Error of reflective thermometer
 $\Delta\theta$: Error of trial thermometer
(I) basic type
(II) type adjusted by parallel resistor
Fig. 13 Error $\Delta\theta$ of trial thermometer

度における起電力を直読できるようにした。

Fig. 13 はその結果で、照射しないときの指示に対し、照射したときどれだけの誤差を生じるかを示している。 $\Delta\theta$ の (I) が実験の場合で、放射誤差は -0.2°C までに減少している。 $\Delta\theta_r$ は Fig. 11 の A~B 間を短絡して補正起電力を除いた場合で、 0.8°C の誤差を生じており、明らかにこの形の効果が現われている。さらに AB 間を抵抗で分路して調整した場合について、 $\Delta\theta$ の (II) のグラフに示されるように、 -0.06°C 以下になった。

(2) 改良形 I 2 個の反射熱電対と 1 個の吸収熱電対とを、Fig. 14 に示されているように基板にと

Fig. 14 Improved thermometer of type I (actual)

りつけ、補正起電力を R_a, R_r で分割したものを、1 個の反射熱電対起電力 e_r に加えるようになっている。

$\sigma_a/\sigma_r=3$ ならば $R_a=R_r$ である。実際に $R_a=R_r=1.5\text{ k}\Omega$ としたところ、 $\Delta\theta=+0.25^\circ\text{C}$ となり、補償不足とみられたので、 $R_a=820\text{ }\Omega$ 、 $R_r=1.5\text{ k}\Omega$ としたところ、Fig. 15 に示されるように、 $\Delta\theta$ は -0.07°C 以内となった。この場合 $\sigma_a/\sigma_r=2.5$ に相当した。

Fig. 15 Error of improved thermometer of type I

(3) 改良形 II (14) 式は

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_r}=3 \text{ のとき } t = \frac{t_r + t_a}{2} - (t_a - t_r) \quad (19)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_r}=2.5 \text{ のとき } t = \frac{2t_r + t_a}{3} - (t_a - t_r) \quad (20)$$

となり、結線図はそれぞれ Fig. 16, Fig. 17 となる。

Fig. 16 Connection of improved thermometer of type II A

Fig. 17 Connection of improved thermometer of type II B

Fig. 18 Error of improved thermometer of type II A, B

また実験結果は Fig. 18 に示されるように、照射誤差は、それぞれ $+0.05^\circ\text{C}$ 、 -0.17°C となった。なお、用いた熱電対は、すべて 4・1 に述べた同一規格、寸法のものであるので、その内部抵抗は、ほぼ等しいとみなされる。

6. 考 察

基本形、改良形いずれも照射誤差を 0.1°C 以下におさえることができて、十分実用的精度を示したが、基本形では多くの熱電対および基準接点が必要であり、測定のために引き出すリード線が長くなって、種々の雑音を拾いやすく、安定度が十分でない。

改良形 I では放射率に無関係に熱電対 1 個に相当する出力を取り出すので、基準接点 1 個で足り、装置が簡単になる。また補償用の抵抗を調整することによって、精度を平均 0.03°C まで上げることができる。しかし、抵抗は雑音の少ない良質のものを使用しなければならない。この実験中に抵抗雑音によると考えられる出力の不安定が多少認められた。

改良形 II では、 σ_a/σ_r の値によっては多数の熱電対を要する点は基本形と同様であるが、基本形よりは、

$$(n_a + n_r) - (n_r - n_a + 2) = 2(n_a - 1)$$

だけ少なくすむ。そのうえ基準接点は 1 個でたり。分圧抵抗器は不要である。

σ_a/σ_r の正しい値は容易に知られないことが多い。しかしだいたいの値の推定は容易である。その推定値が真の値と 20% ちがっているときでも、誤差は 0.2°C の程度となるにすぎない。

7. 結 論

熱電対温度計で気体温度を測定するさいに、外部物体からの放射の影響に対する補償を行ない、真温度を知るために、放射率の異なる材料で蔽った 2 種の熱電対接点と組み合わせる方法を考究した。

まず基本形として、感温接点放射率の異なる材質で被覆された 2 種の熱電対を、それぞれの放射率に反比例した数だけ使用して、それを逆直列に連結したものを試みた。その結果として放射による平均誤差を

35~45°C の範囲で 0.1°C 以下におさめることができた。

つぎに基本形を改良して、熱電対の数および基準接点の数を減らして、装置の簡易化と出力の安定化とを企図した方式のものを研究した。

改良形 I は、反射熱電対 1 個、基準接点 1 個、差動熱電対 1 組とを使用し、差動熱電対で得られる起電力を分圧抵抗器で調整して補償起電力を得る方式のものである。

改良形 II は、並列熱電対を用いて、その平均熱起電力を 1 組の差動熱電対の出力で補償する方式のものである。

改良形 I および II を試作し実験した結果、装置の簡易化と出力の安定化が、かなりの程度に実現されることが認められた。また、35~45°C の温度範囲での実験によって、照射による誤差がいずれのものにも、 $\pm 0.06^\circ\text{C}$ 以内になっており、気体の温度測定に使用できることが確認された。なお照射条件等が実験以外の一般的な場合にも、十分に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) Measuring Air Temperature, Electrical Times 145 [1], p. 23 (1964)
- 2) L. C. Lynnworth : Sound Ways to Measure Temperature, Instrumentation Technology, 16[4], 47/52 (1969)
- 3) 宮内・林・渡辺・杉山共著：温度測定並自動制御, p. 32 (コロナ社)
- 4) M. Mikheyev : Fundamentals of Heat transfer, Chap. 12, Peace Publishers Moscow
- 5) W. H. Giedt : Principles of Engineering Heat Transfer, Chap. 12, Nostrand (1957)
- 6) M. Jakob : Heat Transfer, VI p. 23, Wiley (1965)
- 7) E. F. Snyder et al. : Thermal Radiation Shields, Instruments & Control Systems, Vol. 39, 101/106 (1966)
- 8) R. J. Moffat : Gas Temperature Measurement, Direct Design of Radiation Shielding, ISA Trans., 8 [2] 91/97 (1969)
- 9) 3) p. 100
- 10) P. Euser : Compensation Pyrometer for the Measurement of Surface Temperature of Moving Parts Independent of the Surface Emissivity, Instrument Practice, 17 [5], 487/489 (1963)