

熱電対による気温測定について

小林 定教*

Air Temperature Measurement Using Thermocouple

Sadanori KOBAYASHI

ABSTRACT

This research, through experiments on influences of the solar radiation and radiation from surrounding objects, which can cause errors during air temperature measurement using a thermocouple, has made clear the effects of the solar-radiation shield length in the vicinity of the temperature sensing element of the thermocouple as well as the effects of the increase in heat transfer rate for the purpose of promotion of heat exchange between the thermocouple and the air. On the basis of the results, the decreasing method of the measurement error, and the measurement accuracy and problems of a ventilated thermocouple type thermometer were examined. Furthermore, because air temperature may change cyclically at a rate of about 1°C per several seconds, for the purpose of measurement of a value close to the average value, a ventilated thermometer (which is made of copper and cylindrical in shape) whose sensing element has been increased in heat capacity has been manufactured and the accuracy of the thermometer was examined through experiments.

Keywords: thermocouple, air temperature, radiation, temperature measurement.

1. はじめに

熱電対による気温測定は、建築環境工学分野で広く用いられ、その測定方法について種々の研究が発表されている。¹⁾⁻⁵⁾ 気温測定の難しさは、熱電対測温接点とその付近の素線部分（以下測温接点部とする）が日射および周囲物体からの放射を受け、空気と等温にならないことにある。そのため、気温測定に当たっては、周囲からの放射を小さくするために遮蔽板を設け、さらに遮蔽板による放射、熱のこもりの影響があるものと想定し、通風を計る方法をとっている。気温は数秒間に1°C程度の周期的変化をすることがあるので、屋内外気温の測定においては、目的に応じた測定方法をとる必要がある。気温の時間的変化を測定する際には、細い熱電対を用いその測温接点部の容積を小さくすればよいが、一般の測定においては、1分、10分、30分、1時間毎の測定値をその時刻の代表気温とすることが多い。そのため、測定値は、ある時は変動の谷、あるいは山の値となり、振幅の小さい表面温度と比べて安定性を欠く場合がある。本論文では、まず、上述した放射の影響について検討し、次に気温の時間的変化の影響を極力小さくすることを目的として、熱電対測温接点部の熱容量を大きくした通風型の温度計を作製して実験を行い、その精度、問題点について考察した。

*建築学科

2. 熱電対による従来の気温測定方法と問題点

日射および長波長放射（以下放射とする）の影響を小さくするためには、1) 熱電対測温接点部の放射率を小さくし、2) 放射遮蔽板を設け、3) 通風による熱伝達率の増加を図る。²¹⁾ 一般にはそれらを組合せ下記の方法などを行っている。

- a) 熱電対測温接点部を細くして対流熱伝達率を増大させ、かつ放射率を小さくする。
- b) 放射を遮るため、遮蔽板（または筒）を用いる。
- c) 放射遮蔽筒を設け、測温接点部の熱伝達率を増大させるため、空気を吸引しつつ測定する。²⁾
- d) 放射遮蔽板を設け、測温接点部の熱伝達率を増大させるため、測温接点部を回転させながら気温を測定する。³⁾
 - a) の方法によると熱電対の放射率は、時間の経過とともに酸化、および埃等の付着により大となる。
 - b) の方法は、最も一般的に用いられる方法である。直達日射を除去するには有効な方法であるが、周囲からの放射を除くことは困難であり、測温接点部を囲みすぎると熱のこもる原因となる。
 - c) の方法は、吸引することにより周囲空気の流れを乱し、気温を変化させる恐れがある。
 - d) の方法は、屋外測定用のためには装置が大きく、モータの発熱が温度場を乱すことが問題となる。

次に、熱電対で気温測定をする場合の測定誤差の要因を経験的に整理すると下記のごとくなる。

- 1) 外的要素による誤差要因
 - (1) 日射、周囲物体からの長波放射
- 2) 熱電対の特性による誤差要因
 - (1) 測温接点部の放射率
 - (2) 測温接点部の熱伝導率
 - (3) 測温接点部の形状・寸法
- 3) 放射遮蔽、通風による誤差要因
 - (1) 放射による遮蔽板の温度上昇
 - (2) 遮蔽筒の寸法
 - (3) 遮蔽板による熱のこもり
 - (4) 通風による周囲空気の流れの乱れ
 - (5) 測温接点部に当たる気流速度の相違

3. 放射と測定誤差の関係について

放射による測定誤差としては、1) 熱電対測温接点部が日射を受けることによって生ずるもの、2) 測温接点近くの熱電対素線が放射を受ける場合、伝導熱流の測温接点への影響によって生ずるものがある。

3. 1 熱電対測温接点部が日射を受けた場合

3. 1. 1 実験装置

図1の装置は、二本の直達日射束が得られ、その一方の低部に日射計、他方には気温測定用熱電対、直達日射束外に基準気温測定用熱電対が設置され、その部分の気流速度を変化させることが出来る。気温測定には銅・コンスタンタン熱電対（タイプT:0.74, 0.67mm φ油煙仕上げ）を用い、その起電力は直流可動コイル型反射検流計（ $0.8 \times 10^{-6} \text{V/m}$ ）、直達日射量はGorezynski型日射計で読み取った。

3. 1. 2 実験方法

実験は、日射が安定しているとき、装置を太陽に向け、装置前面のシャッターを開き、直達日射量 J 、日射を受けた測温接点の温度 θ_t 、および日射を受けない基準気温 θ_T を5秒毎30回同時測定した。日射を受ける熱電対の長さ（以下受熱長さとする） l 、日射量 J 、気流速度 V は種々変化させた。

3. 1. 3 測定結果とその検討

図2は、受熱長さ $l = 25 \text{mm}$ における日射量と測定誤差の関係を示したものである。この測定誤差（ $\theta_e = \theta_t - \theta_T$ ）

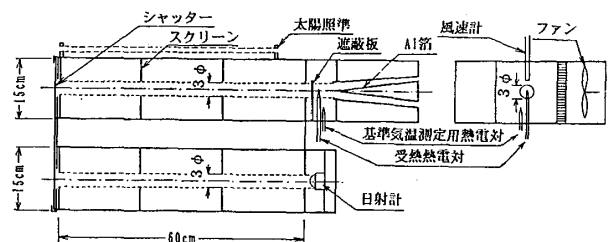


図1 熱電対測温接点部への直達日射照射装置

は、日射を受けない測温接点の温度 (θ_r) を基準気温とし、日射を受けた測温接点の温度 (θ_t) との差で表したものである。測定誤差は日射量に比例して大となり、その値は $V = 0 \text{ m/s}$ の場合、 $\ell = 25 \text{ mm}$ 、 $J = 600 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の日射量を受けたとき 4°C にも達する。受熱長さが長くなると、受熱量は当然大きくなり誤差も増大するが、誤差の増加率は図3に示すごとく、受熱長さが増加するに伴いむしろ漸減する。

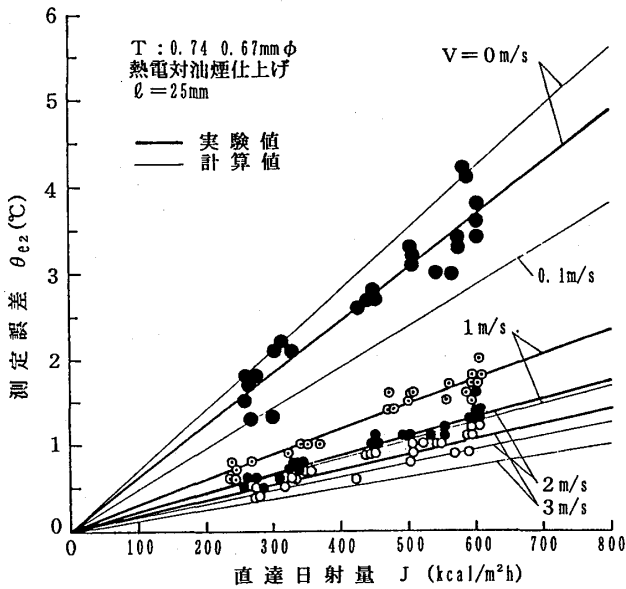


図2 熱電対測温接点部が直達日射を受けた場合の測定誤差

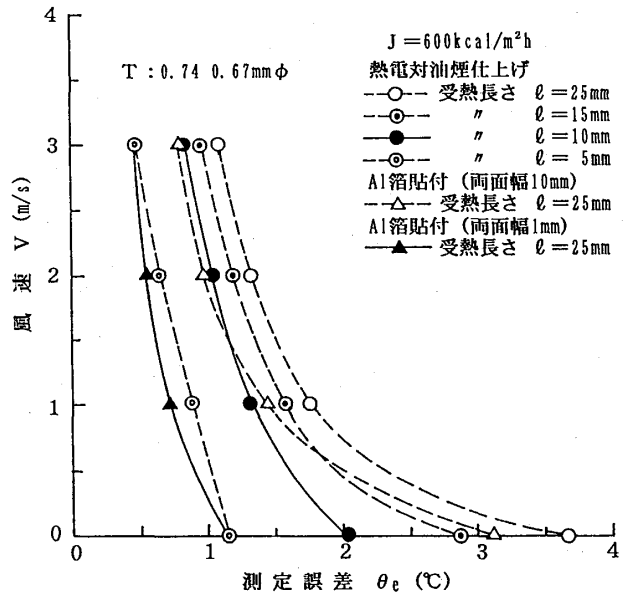


図3 測温接点部が直達日射を受けた場合の測定誤差と風速の関係

つぎに、熱電対が放射を受けた場合、熱電対の直径、放射率、熱伝達率による影響について熱電対の熱収支を図4のようにモデル化して検討すると、測温接点部が日射を受けた場合の温度上昇（測定誤差 $\theta_e = \theta_t - \theta_a$ ）は（1）式のごとくなる。

$$\theta_e = \frac{\alpha_r (\theta_R - \theta_a) n_r}{\alpha_c + \alpha_r} + a J n \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda}}\right) - \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda}} e^{-Az} - e^{-Bz}}{(\alpha_c + \alpha_r n_r) \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda}}\right)} \quad (1)$$

ただし、

$$A = \sqrt{\frac{4(\alpha_c + \alpha_r n_r)}{\lambda d}} \quad B = \sqrt{\frac{4(\alpha_c + \alpha_r n_r)}{\lambda' d}}$$

ここに、

- d : 熱電対の直径(mm)
- a : 熱電対の日射吸収率
- J : 直達日射量(kcal/m²h)
- θ_t : 熱電対温度(°C)
- θ_R : 熱電対に対する平均放射温度(°C)
- θ_a : 空気温度(°C)
- λ, λ' : 熱電対の熱伝導率(kcal/mh°C)
- α_c : 熱電対の対流熱伝達率(kcal/m²h°C) ^{註1)}
- α_r : 熱電対の放射熱伝達率(kcal/m²h°C)
- $\alpha_r = \epsilon \sigma (T_r^3 + T_r^2 T_t + T_r T_t^2 + T_t^3)$
- σ : ステファンボルツマン定数
- ϵ : 熱電対の放射率
- ℓ : 受熱長さ(mm)

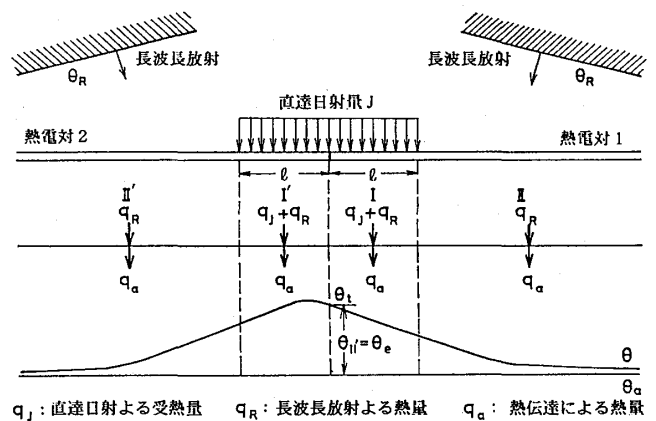


図4 熱電対測温接点部が直達日射・長波長放射を受ける場合の温度分布

n : 熱電対が受ける直達日射の受熱面積割合、円柱の場合 $1/\pi$

n_r : 熱電対が受ける熱放射の受熱面積割合

上式において、第1項は周囲物体などからの長波長放射による誤差 (θ_{e1}) を示し、第2項は日射量 J による誤差 (θ_{e2}) を表している。

いま、 $n=1/\pi$ 、 $n_r=1$ として、熱電対全体が放射を受けた場合、即ち、受熱長さ l が無限大の時、長波長放射および直達日射による測定誤差を気流速度、および直径を種々変化させて求めると、強制対流時には図5、自然対流時には図6のごとくなる。測定誤差を小さくするためには、前述したごとく、放射の遮蔽、熱伝達率の増大を計る必要がある。

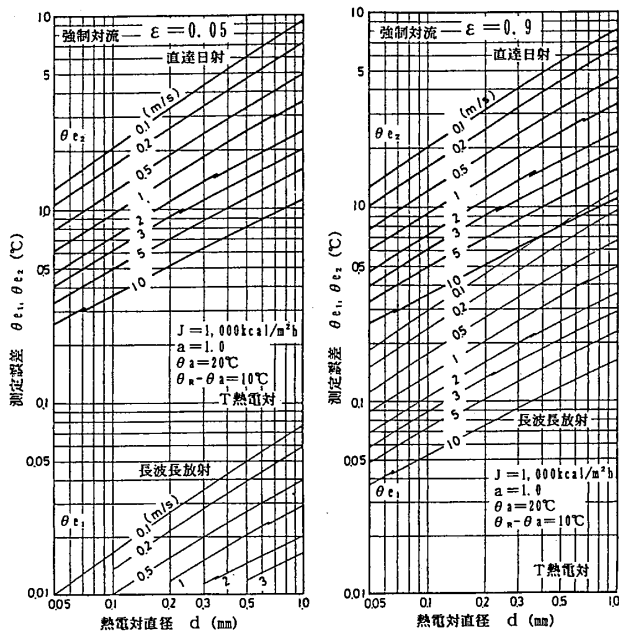


図5 熱電対測温接点部が直達日射・長波長放射を受けた場合の測定誤差(強制対流時)

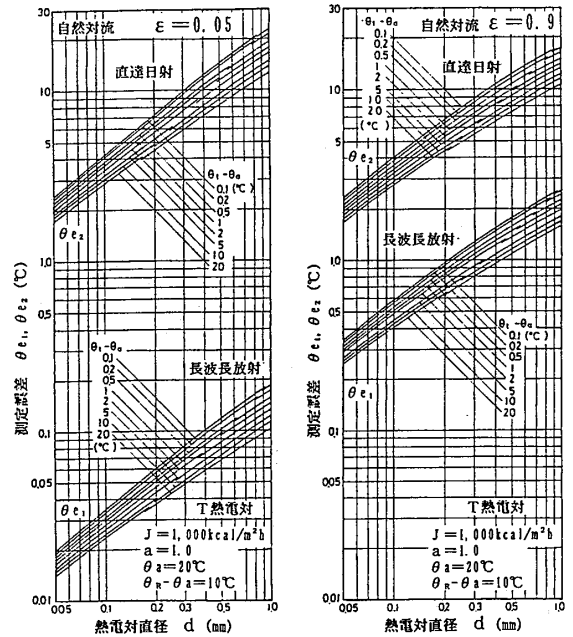


図6 熱電対測温接点部が直達日射・長波長放射を受けた場合の測定誤差(自然対流時)

3. 2 測温接点近くの熱電対素線が放射を受ける場合の伝導熱流による測温接点への影響について

3. 2. 1 実験装置 (図7)

装置は三枚のスクリーンよりなり、その一方の端には放射源のハロゲンランプを設置し、スクリーンを通して放射束が得られるようになっている。他方には気温測定用熱電対と、その放射束外に基準気温測定用熱電対が取り付けられている。気温測定には銅・コンスタンタン熱電対 $T(0.32, 0.32\text{mm } \phi)$ と $0.74, 0.67\text{mm } \phi$ を用い、その両線とも裸状にし、

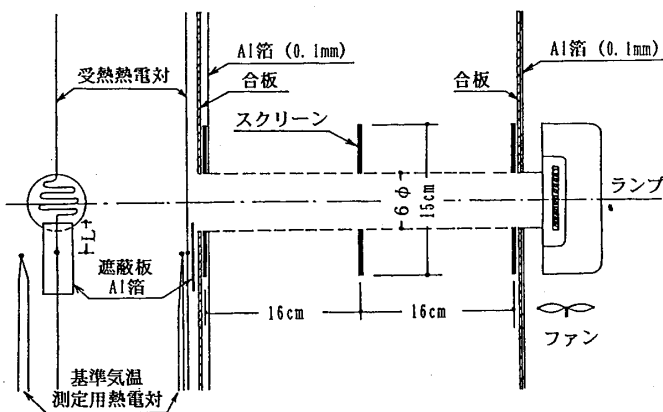


図7 熱電対測温接点部以外の素線への放射照射装置

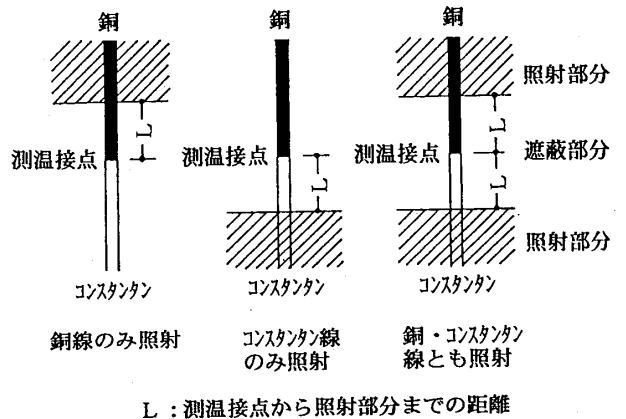


図8 熱電対測温接点部以外の素線の遮蔽状態

艶消し黒色塗装仕上げとした。気温測定用熱電対の位置における放射量はネオ日射計で測定した。

なお、熱電対の起電力は、デジタルマルチメータ TR-6855 (最高分解能 $1 \mu v$) で読み取った。装置は恒温実験室 ($6 m \times 12 m \times 3 m$ 、壁、天井、床は2インチの内断熱) 内中央に設置し、熱電対設置位置における空気はほぼ静止状態になるよう、ビニールシートによって室内を区切った。

3. 2. 2 実験方法

実験は、図7のように熱電対素線に放射をあて、測温接点とその付近の素線の遮蔽状態を、図8のごとく、次の三通りに変化させて行なった。これは梅干野氏等の方法³⁾を参考とした。

- a) 測温接点より L (cm) 以上離れたコンスタンタン線のみを照射した場合
- b) 測温接点より L (cm) 以上離れた銅線のみを照射した場合
- c) 測温接点より L (cm) 以上離れた銅とコンスタンタン両線を照射した場合

3. 2. 3 実験結果とその検討

実験結果を図9に示す。測温接点より L (cm) 以上離れた素線を照射した場合、その素線部分から測温接点への熱伝導による上昇温度 θ_E は、測温接点付近の素線を照射した場合の測温接点温度 θ_t と、照射しない基準気温測定用測温接点温度 θ_T との差で示した。

θ_E は、コンスタンタン線(熱伝導率 $\lambda = 20 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$) のみを照射した場合、測温接点から照射部分までの距離が熱電対の直径 d の60倍以上になると認められない。一方、熱伝導率が大きい銅線(熱伝導率 $\lambda = 320 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$) のみを照射した場合は、直径 d の250~300倍程度で、 θ_E は 0.1°C 以下となる。また、銅・コンスタンタン両線を照射した場合の温度上昇値 θ_E は、銅線のみを照射した場合とほぼ同様な傾向を示す。以上の結果より、無風時に素線から測温接点への熱伝導による影響を除くには、銅線については直径の300倍以上、コンスタンタン線については60倍以上遮蔽する必要がある。

次に、種々の熱電対の直径、放射量、熱伝達率の影響について、図10のようにモデルを考え検討を加えた。その結果放射が熱電対素線を伝導して測温接点温度を上昇させる値 θ_E は、下式で表される。

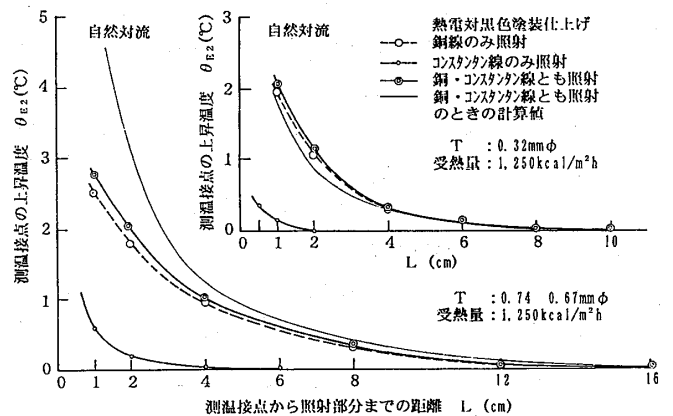


図9 熱電対測温接点部以外の素線が放射を受ける際の熱伝導による測温接点の温度上昇

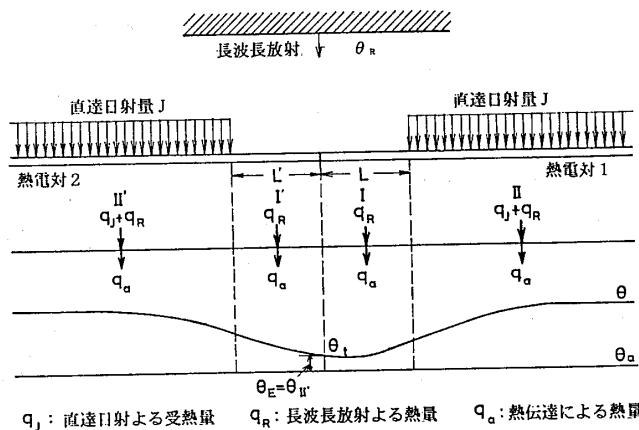


図10 熱電対測温接点部以外の素線が直達日射・長波長放射を受ける場合の温度分布

$$\theta_E = \frac{\alpha_r (\theta_R - \theta_a) n_r}{\alpha_c + \alpha_r n_r} + a J n \cdot \frac{\sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda}} e^{-AL} - e^{-BL}}{(\alpha_c + \alpha_r n_r) \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda}}\right)} \quad (2)$$

ただし、

$$A = \sqrt{\frac{4(\alpha_c + \alpha_r n_r)}{\lambda d}} \quad B = \sqrt{\frac{4(\alpha_c + \alpha_r n_r)}{\lambda' d}}$$

ここに、

L : 熱電対測温接点からの遮蔽長さ(mm)

上式の第1項は周囲物体などからの長波放射に関する誤差(θ_{B1})を示し、第2項は日射量 J に関する誤差(θ_{B2})を表している。なお、図9に示した実験結果は上記の第2項の日射の誤差(θ_{B2})に相当する。参考のため、 $n = 1/\pi$ 、 $n_r = 1$ として、上式第2項で求めた自然対流時の誤差を図9に併記した。

4. 熱電対通風温度計

4.1 装置の概要

熱電対通風温度計は、アスマン電動式通風乾湿計の上部のファン部分を取り外し、その下方の通風筒取り付け部(内径 22mm ϕ)に熱電対を内蔵したAl箔製の二重の通風筒を設けたものである。(図11)

4.1.1 通風筒の寸法

通風筒は内筒と外筒よりなり、それぞれの通風部分の面積が同一になるよう内筒 16mm ϕ 、外筒 22mm ϕ とした。外筒のみの通風速度は約 5.5m/s 、内筒では 7m/s 前後となった。その二重の通風筒の周りには、日射の影響を小さくするため断熱材(ポリスチレン 3mm 厚)を巻き、更にその周りをAl箔(0.1mm 厚)仕上げとした。

4.1.2 通風筒の長さ

通風筒の長さの決定に際しては、通風筒の中心に熱電対測温接点(小球)を支持した場合を仮定した。円筒の直径を $2R$ 、筒の長さを L 、球面から円筒端をみる形態係数を F_{12} とすると、筒の長さ形態係数の関係式は下式のごとくなる。(図12)

$$L = \sqrt{\frac{(1 - F_{12})^2}{1 - (1 - F_{12})^2}} \cdot R^2 \quad (3)$$

ここに $F_{12} = 0.01$ および $R = 8\text{mm}$ ϕ とすると筒の長さ L は 56mm となり、通風筒の全長 $2L$ は 112mm となる。今回作製した温度計の通風筒長さ $2L$ は、上部ファン部分とのバランスから 200mm ($F_{12} = 0.003$)とした。

4.1.3 筒内に設ける熱電対の長さ

測温接点付近の素線が日射を受けた場合、測温接点への熱伝導による影響を取り除くため、上述の結果より通風速度を 1m/s と仮定し、熱電対(タイプT)の場合、直径の 300 倍の長さの銅線を内筒中央部に螺旋状に設置した。

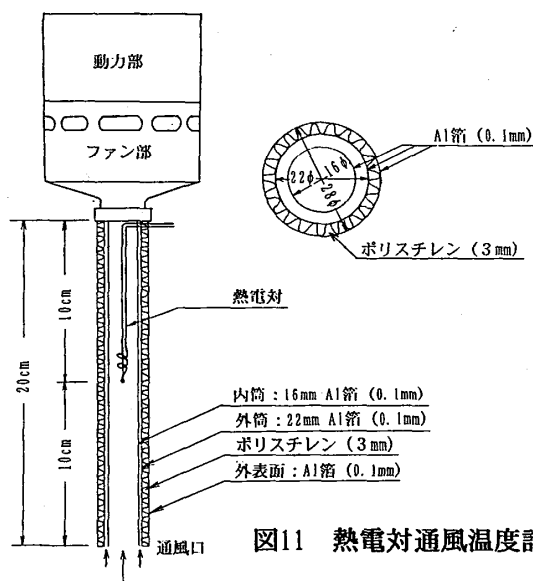


図11 熱電対通風温度計

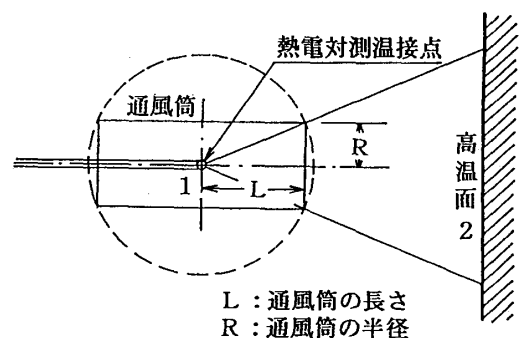


図12 通風筒の長さ形態係数

4. 1. 4 熱電対通風温度計測温接点部

測温接点部は下記の二つの形状とした。

1) 測温接点部の熱容量が小さい通風温度計 (図11)

測温接点部A : 以前から使用している銅・コンスタンタン熱電対 (T : 0.32mm φ) 素線を溶接したもの。

2) 測温接点部の熱容量が大きい通風温度計 (図13)

測温接点部B : 直径2、3、4および5mm φの銅棒 (長さ12mm) に0.5mm φの穴をあけ、図13のように熱電対 (T : 0.32mm φ) 測温接点部を溶接したもの。測温接点部先端の形状は水銀温度計球部とほぼ同形とした。測温接点部の熱容量は表1の如くである。

4. 2 通風温度計の特性

4. 2. 1 測温接点部の時定数

測温接点部の時定数は、恒温室内に図14の鉛直ダクト装置 (アクリル製) を設置し、その通風部の中央部に測温接点部をセットして一定温度 (約100 °C) に加熱した後、その温度下降経過をサーボ式ペンレコーダ (最大ペン速度 : 1,000mm/s) で測定した。

図15は測温接点部Bの時定数と気流速の関係を示したものである。

時定数は測温接点部の熱容量が大きくなるに従い大となる。気象庁型二重管温度計の時定数は無通風で約185sec、3.5m/sの通風で約40秒^{6), 7)}といわれている。

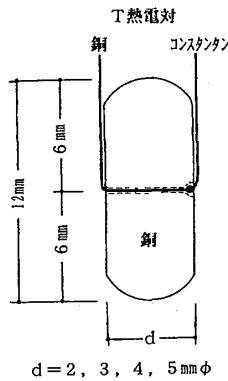


図13 熱電対測温接点部B

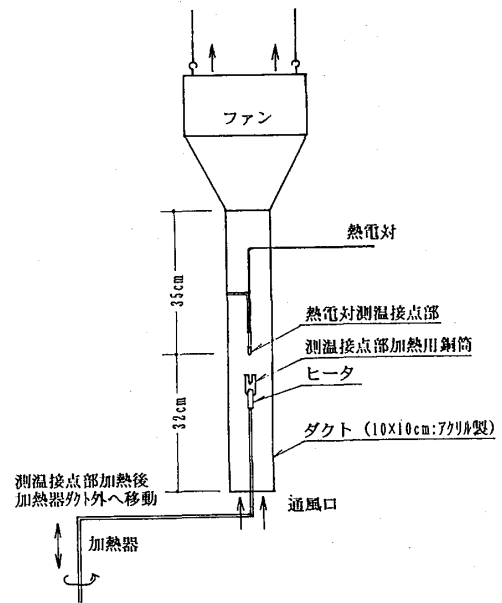


図14 熱電対測温接点部の時定数測定装置

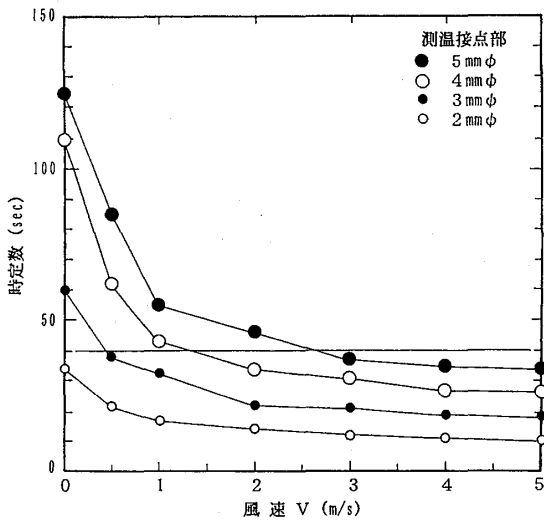


図15 熱電対測温接点部の時定数と風速の関係

表1 熱電対測温接点部の熱容量

温度計 感温部	直径 (mm)	長さ (mm)	熱容量C _γ V (kcal/°C)
水銀温度計 (水銀+ガラス)	5.5	16	180.56×10 ⁻⁶
熱電対 (t. c.)	0.32	—	0.169 "
銅棒+ (t. c.)	2.0	12	33.552 "
銅棒+ (t. c.)	3.0	12	75.492 "
銅棒+ (t. c.)	4.0	12	132.209 "
銅棒+ (t. c.)	5.0	12	209.701 "

アスマン通風乾湿計の感温部の水銀重量
2.14g (筆者測定)

4. 2. 2 熱電対通風温度計とアスマン通風乾湿計の同時測定

熱電対通風温度計とアスマン通風乾湿計の同時測定は、屋外の日射を受けたアスファルト面上1.5m（通風口）において5秒毎に行なった。なお、アスマン通風乾湿計はトランシットにより読取った。

図16はその測定結果の一部を示したものである。

測温接点部A (0.32mmφ) による測定値は、図のように、気温の変化に応じて大きくしかも細かく変化している様子が伺われる。それに比べ、銅棒の測温接点部Bの振幅は小さくなり、熱容量が大きくなるに従いその傾向は顕著である。アスマン通風乾湿計の振幅は小さい。今回作製した熱電対通風温度計Bの測定値は、0.32mmφの通風温度計Aとアスマン通風乾湿計の中間にあり、その使用に当たっては測定の目的に応じて適切な選択が必要である。

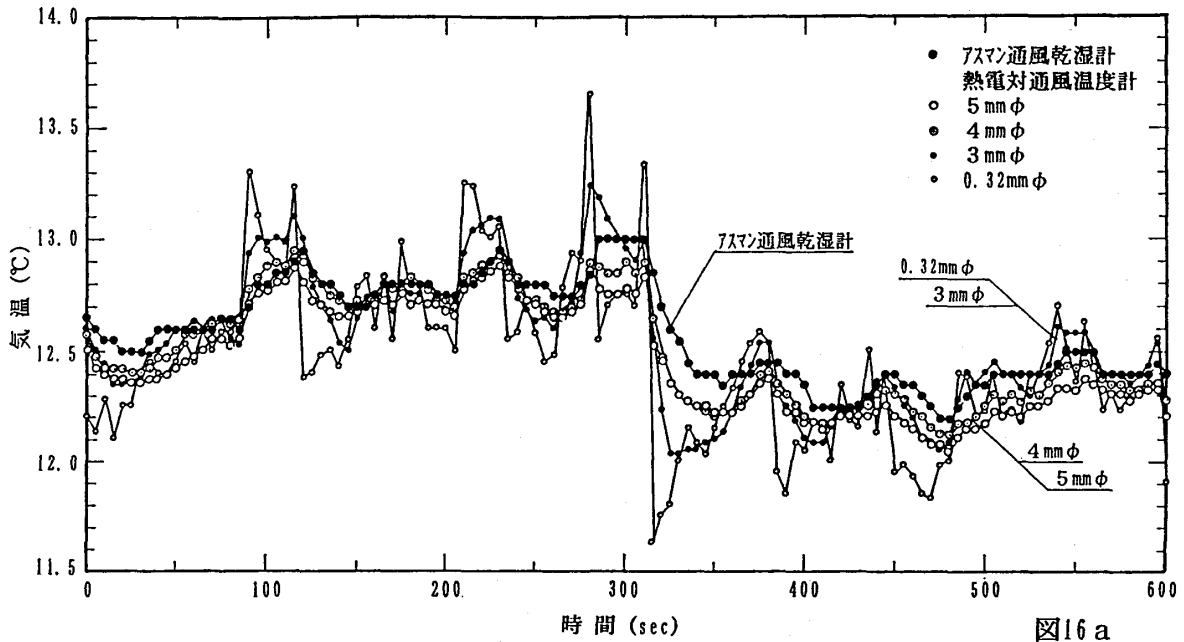


図16 a

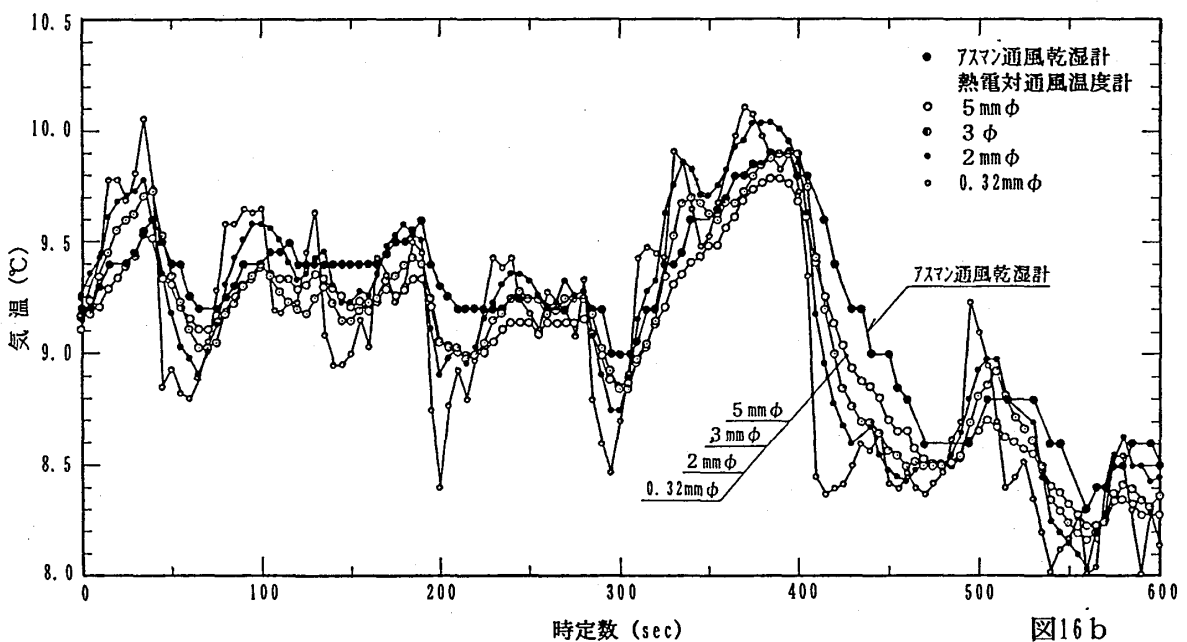


図16 b

図16 アスマン通風乾湿計、熱容量の異なる熱電対通風温度計による同時気温測定結果

5. まとめ

気温測定の際には、観測場所の気温の代表性を考え、測定器を設置する点と、測定器の特性を十分把握しておくことが重要である。

本報では、熱電対による気温測定の際の問題点について考察し、その結果に基づいて作製した熱電対通風温度計と測定精度について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 気温測定の際の誤差要因は、周囲からの長波長放射（日射は無論）で、その精度はこの影響をいかに小さくするかに掛かっている。
- 2) 放射の影響を減少させる方法としては、放射を遮蔽すると共に遮蔽板からの放射を小さくし、通風により熱伝達率の増大を計ることが最も効果があると考えられる。
- 3) 熱電対測温接点への放射による伝導熱流の影響を除くためには、タイプTの熱電対の場合は、直径の300倍の長さを遮蔽し同一環境下におく必要がある。
- 4) 屋外気温のように数秒間に1℃程度の周期的変化をする気温を測定する場合には、熱電対の測温接点部の熱容量を大きくした方が測定時間の代表気温が得られる。測定の目的に適応した測定方法を選択する必要がある。
- 5) 屋外における長期間測定においては、熱電対が酸化し初期の放射率は期待出来ないので、通風が不可欠である。

注

1) 熱電対の熱伝達率については、測温接点の形状は球、円柱、あるいは両者の合体した形になっている。気温測定の場合、素線部分の熱交換の影響が大きく測温接点部を細い円柱とみなした。

円柱面の平均熱伝達率については、五十嵐・平田⁸⁾、Hilpert⁹⁾、King¹⁰⁾、らにより多くの研究があるが、本研究では、自然対流については、CollisとWillams¹¹⁾、およびHegge Zijnen¹²⁾、強制熱伝達率についてはCollisとWillamsおよびMcAdams¹³⁾の式を検討し、これらよりNu数を求め

式5)より熱伝達率 α_c を求めた。

円柱の自然対流時

1) $10^{-10} < Gr < 10^{-2}$ の範囲では
$$Nu^{-1} = 0.88 - 0.43 \log_{10} Gr \quad 1)$$

2) $10^{-2} < Gr$ の範囲では
$$Nu^{-1} = 0.35 + 0.24 Gr^{1/8} + 0.41 Gr^{1/4} \quad 2)$$

円柱の強制対流時

1) $Re < 44$ の範囲では
$$Nu = 0.24 + 0.56 Re^{0.45} \quad 3)$$

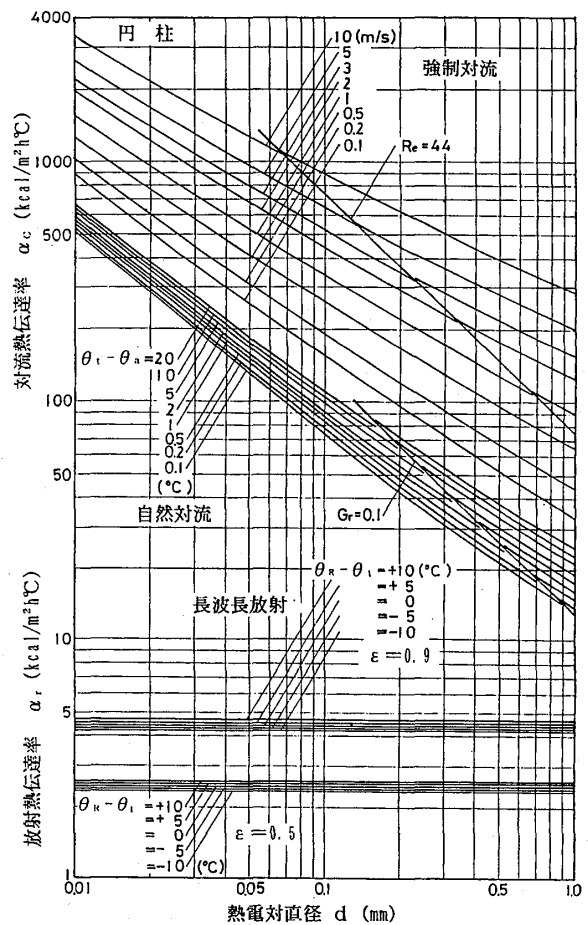
2) $44 < Re$ の範囲では
$$Nu = 0.32 + 0.43 Re^{0.52} \quad 4)$$

$$\alpha_c = Nu \cdot \lambda_a / d \quad 5)$$

ここに

- Re: レイノルズ数 Gr: グラスホフ数
- Nu: ヌセルト数 λ_a : 空気熱伝導率
- d: 熱電対の直径

熱伝達率 α_c は、自然対流時では、測温接点温度 θ_s と空気温度 θ_a の差を0.1℃から20℃まで、強制対流時では、風速Vが0.1m/sから10m/sまで計算し、その結果を付図1に示す。



付図1 細線の熱伝達率 (円柱状)

【参考文献】

- 1) 宮野秋彦、小林定教：熱電対による温度測定の誤差 第3報（気温測定の場合）、日本建築学会東海支部研究報告集、pp.184~186、1968.6
- 2) 小林定教：気温測定、日本建築学会環境工学委員会熱分科会第8回熱シンポジウム、pp.49~54、1978.8
- 3) 龍谷光三、清家 清、梅干野 晃：ふく射環境下における気温測定装置の試作とその検討（照り返しに関する基礎的研究・その1）日本建築学会論文報告集、245,pp.91~99、1976.7
- 4) 前田敏男、寺井俊夫、渥美勝利：日射のある場合の外気温測定装置について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.209~210、1968.10
- 5) 中村泰人：建築環境計測における気温測定のための双対感温素子の検討、日本建築学会近畿支部研究報告集、p.57~60、1977.5
- 6) 気象庁：地上気象観測指針、pp.43~47、1993
- 7) 気象ハンドブック編集委員会編：気象ハンドブック、朝倉書店、pp.160、1992.10
- 8) 五十嵐保、平田 賢：はくり流の熱伝達に関する研究、日本機械学会論文集（第2部）39-322 昭和48年6月
- 9) Hilpert,R : Wärmeabgabe von geheizten Drähten und Rohren im Luftstrom.ForschArb. IngWes.4,pp.215~224.1933
- 10) King,L.V.: On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid. Determination of convection constants of small platinum wires with application to hot-wire anemometry.Phil.Trans.A,214,pp.373~432. 1914
- 11) D.C.Collis,and M.J.Williams. : Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. J.Fluid Mech.,6. pp.357~384. 1959.1
- 12) van der Hegge Zijnen,B.G., : Modified correlation formulae for the heat transfers by natural and by forced convection from horizontal cylinders. Appl.Sci.Res A,6,pp.129~140.1957
- 13) McAdams,W.H. : Heat transmission.Chap.X . New York.McGraw-Hill Book Co.Inc. 1954
- 14) 中村泰人、平岡久司、西村浩一：市街地空間における気温分布性状に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集 第364号、pp.48~56 昭和61年6月
- 15) 片山忠久、塩月義隆、増田正一：放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集 第381号、pp.20~26 昭和62年11月