

## 裸熱電対による温度測定 of 誤差

宮野秋彦・小林定教

建築学科  
(1969年9月11日受理)Error of the temperature measurement with  
the thermocouple

Akihiko MIYANO and Sadanori KOBAYASHI

Department of Architecture  
(Received September 11, 1969)

We usually use thermocouples for measuring the surface temperature of outside surface of a building. In the measuring the outside surface temperature of building received solar radiation and wind and the air temperature around it experimental data on the error of measurement are not sufficient.

We report experimental study on the following heads.

1. On the error by the length of thermocouple attached on the plate.
2. On the error by the material to attach the thermocouple on the plate.
3. On the effect that diameter of the thermocouple give to the measurement value.
4. On the effect that thermal characteristic of the test plate give to the measurement value.
5. On the effect that the thermal difference between the test plate and the surrounding air give to the measurement value.
6. On the effect that air velocity give to the measurement value.
7. On the effect that radiation give to the measurement value.

## 1. 緒言

建築方面での温度測定においては、裸熱電対を使用することが多いが、その際に生ずる測定誤差については従来殆ど論ぜられていない。

たとえば、日射と風を受ける建築物外壁の表面温度、および気温を測定する際、熱電対の貼付け方法および設置方法によつて、その測定結果に甚しい差異を生ずることがある。

本論文では、a) 表面温度測定 b) 気温測定の二つに分け、それぞれ種々の条件下において実験検討したところを報告する。

## 2-1 表面温度測定

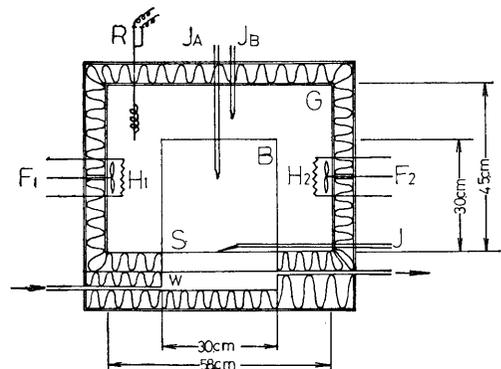
## (1) 実験装置ならびに実験方法

実験は Fig. 1 の如き装置によつて行った。

温度測定には直流可動コイル型反射検流計  $7.1 \times 10^{-10}$  A/mm ( $0.82 \times 10^{-6}$  v/mm) を用いた。

恒温室内気温を始め、恒温箱および恒温水槽の温度を調節し実験条件がそれぞれ  $\pm 0.02^\circ\text{C}$  以下にとどまるよう留意した。

使用熱電対は CC (0.74, 0.67mm $\phi$ ), CA (0.33,



B, G: 恒温ボックス S: 測定試料 H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>: 加熱器 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>: 攪拌機  
R: レギュレーター W: 恒温水槽 J<sub>A</sub>, J<sub>B</sub>: 熱電対

Fig. 1 実験装置

0.33mm $\phi$ ) の二種類である。

## (2) 実験結果とその検討

## a) 貼付け材料による影響

熱電対を用いて表面温度を測定する際の測定誤差は、熱電対先端の貼付け材料、測定表面材料および貼付け方法によつて甚しく異なった値を示す。

実験はCC熱電対を用い下記の五種類の貼付け方法について、表面温度が周囲気温より低い場合で、貼付け長さおよび巾を同一とした時について比較実験を行なった。

- 1) T.C.+セロテープ (厚 0.07mm)
- 2) T.C.+ブラックテープ (厚 0.4mm)
- 3) T.C.+アルミ箔 (厚 0.02mm)
- 4) アルミ箔+T.C.+アルミ箔
- 5) アルミ箔+T.C.+ブラックテープ+アルミ箔

上記において、熱電対の上または下に貼付けたアルミ箔は放射絶縁効果または集熱効果を考慮したものである。

実験結果は表一1の通りであって、いずれを真の表面温度とも決め難い状態である。しかし、いずれの材料についても1)~5)の順序で低温となり、5)が最も水槽温度に近い値を示している。

表一1 貼付け材料による測定誤差

貼付け材料	1	2	3	4	5
銅	20.1	19.3	18.6	19.1	19.2°C
	1.5	0.7	0	0.5	0.6deg
モルタル	26.0	25.8	25.1	24.5	24.1°C
	1.9	1.7	1.0	0.4	0 deg
気泡コンクリート	28.7	28.4	28.0	27.6	26.9°C
	1.8	1.5	1.1	0.7	0 deg
ハードボード	26.8	26.3	25.5	25.4	25.2°C
	1.6	1.1	0.3	0.2	0 deg
スチロフォーム	35.5	35.2	35.0	34.5	33.9°C
	1.6	1.3	1.1	0.6	0 deg

使用熱電対 CC (0.74, 0.67mmφ)  
但し、恒温箱内温度 40.0°C

b) 熱電対の貼付け長さについて (無風時)

本論文では下記の方法によって真の表面温度を仮定し、これとの差を暫定的に測定誤差 ( $\theta_e$ ) とみなした。

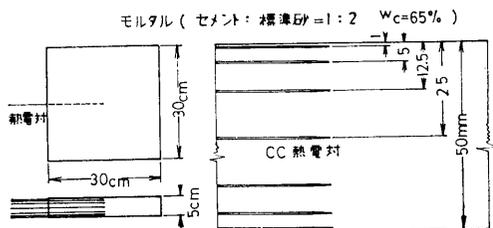


Fig. 2 内部温度分布測定試料

すなわち、モルタル試料板にあらかじめ Fig. 2 の如く七本の熱電対を埋込み、内部温度分布より表面温度を求めこれを一応の真の表面温度とした。

表面温度測定の際の誤差の原因の一つとして、熱電対自体を伝導する熱流が熱電対先端感温部に影響を及ぼすことが考えられる。その影響を少なくするためには、熱電対を測定表面に沿って適当な長さだけ貼付けることが考えられる。

前述の熱電対 CC および CA を用いモルタル試料面にアルミ箔 (巾 15mm, 先端より熱電対間隔約 7~8mm に保つ) で貼付長さ  $L=0, 1, 2, 3, 5$  および 10cm の六段階に分け貼付し同時測定を行った。Fig. 3 に結果の一例を示す。

すなわち、測定誤差は熱電対の径が大きい方が大となり、周囲気温との温度差が増加するにつれて大きくなる。いずれの場合も無風時においては貼付け長さ 10cm 程度になるとほぼ一定値を示すようになる。

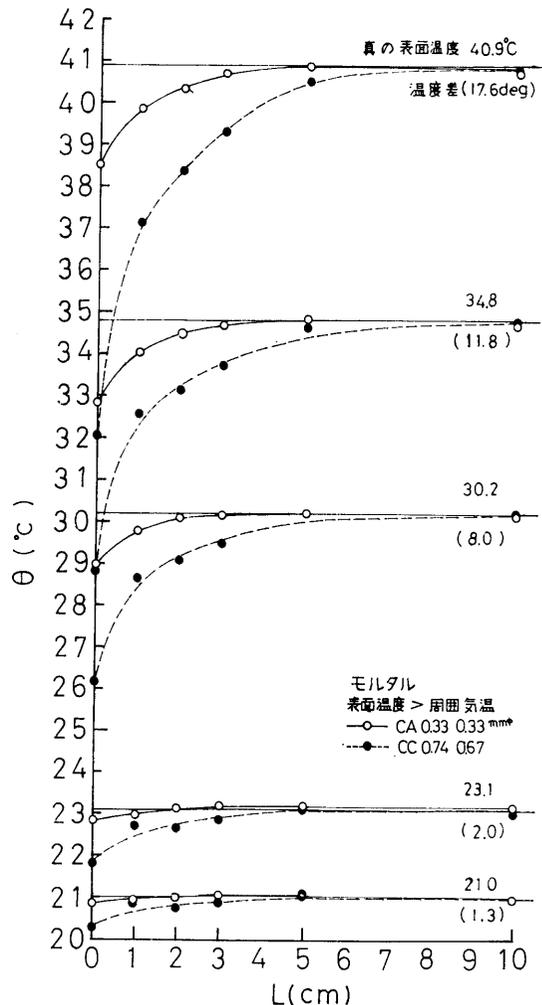


Fig. 3 貼付け長さ と測定誤差

Fig. 4 は、横軸に貼付け長さ  $L$ 、縦軸に  $A = \frac{\theta_L - \theta_a}{\theta_s - \theta_a}$  をとり測定結果をまとめたものである。ここで  $\theta_a$  は周囲気温、 $\theta_L$  は貼付け長さ  $L$  のときの測定値、 $\theta_s$  は真の表面温度である。

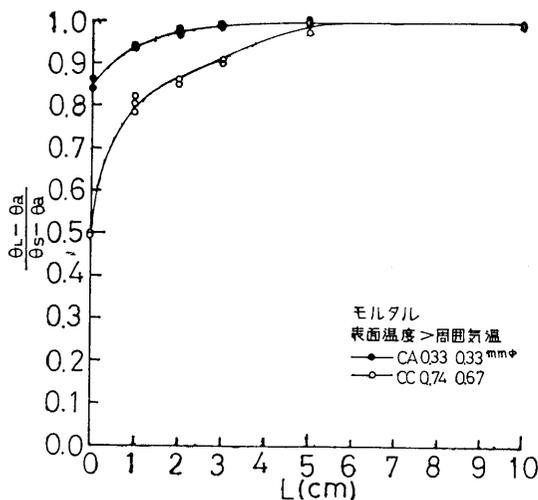
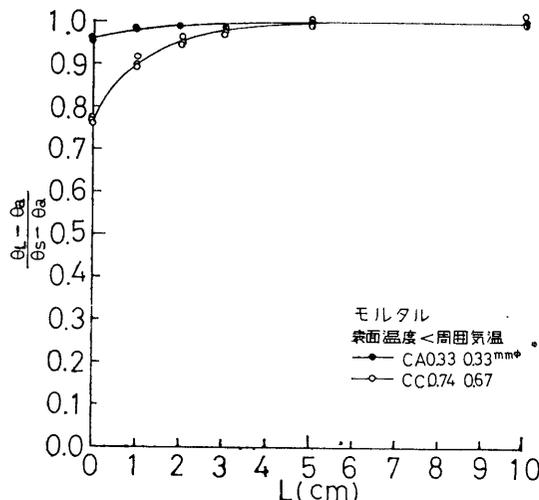


Fig. 4

図に見られる如く、いずれの場合も、 $L-A$  曲線は貼付け長さの増加に伴って指数曲線的に1に収斂する。

この結果より貼付け長さ  $L$  cm の場合の表面温度  $\theta_s$  は

$$\theta_s = \frac{\theta_L - \theta_a(1-A)}{A}$$

と推定出来る。しかし、後述する如く測定表面材料によって  $L-A$  の関係が異なるため更に検討を要する。

c) 試料板表面附近の温度分布の影響について

本実験においては、試料板は水平に置かれ温度条件は下記の 1) 表面温度 > 周囲気温 2) 表面温度 < 周囲気温の二通りである。

測定誤差は銅板、モルタル板、ハードボードのいずれの場合も 2) に比べ 1) の方が大きい。

これは Fig. 5 の如く表面附近の温度分布の関係で 1) の方が 2) に比べて熱電対立上り部分の熱交換が大きく、これが熱電対感温部に影響を与えるためと考えられる。

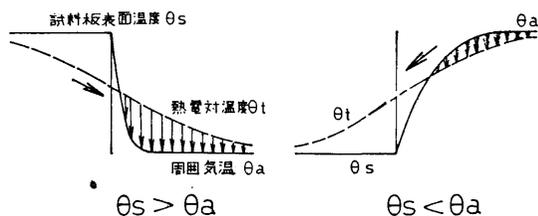


Fig. 5

d) 測定表面の材質による影響

同一熱電対を使用しても測定材料の熱特性によって誤差が異なる。

本論文では、銅板、ハードボードにおいては内部温度分布より真の表面温度を推定出来ないため、 $L=10$ cm の時の測定値を一応真の温度と仮定し、それとの差を測定誤差とした。Fig. 6 はそのようにして画いた  $A-L$  曲線である。

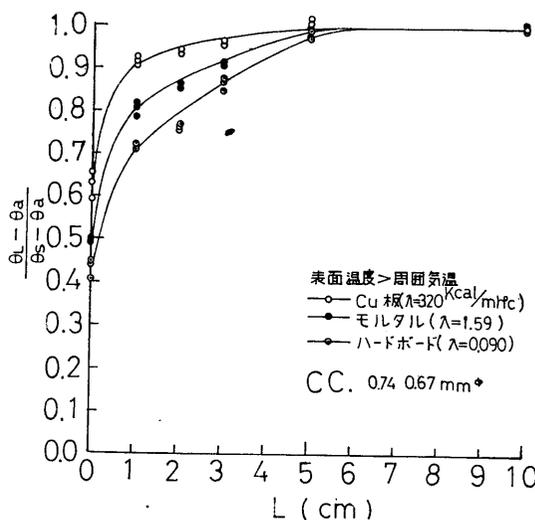


Fig. 6 材質による測定誤差

試料板の厚さの影響はあると考えられるが、熱伝導率の小さいもの程、測定誤差は大きくなっている。

同種、同線径の熱電対を用い、同一方法で貼付した場合に、試料板の熱伝導率が小であればある程、熱電対を通して流出入する熱量に対しては、試料板表面が一種の断熱効果を発揮する結果となり、そのため熱伝導率の大

小によって測定誤差に相異を生ずるものと考えられる。

#### e) 風の影響について

風がある場合の測定誤差を検討するため、風速 1.6, 2.2 および 3.9 m/sec の三段階に分けて実験した。

Fig. 7 に A-L 曲線を示す。いずれも無風状態に比べて風速が大きくなる程誤差が増加しており、その傾向は線径が太くなる程顕著である。

#### 2-2 輻射の影響について

表面温度測定の際に輻射の影響によって生ずる誤差を求めため、輻射量、貼付け材料(吸収率, 熱伝導率), 測定材料(吸収率, 熱伝導率)等について実験検討を行った。

##### (1) 実験装置ならびに実験方法

輻射熱は赤外線電球 (100V—500W) を用い、散光ガラスで拡散し、輻射を出来る限り均一とした。また、輻射の増減は電圧を一定に保ち、試料と電球の距離を変化させることによって波長を一定とした。

測定試料は前述のモルタル、ハードボードの二種類で熱電対は CA を使用した。貼付け方法は長さ 10cm, 巾 5, 10, 20 および 30mm のアルミ箔を試料面に貼り、その上に熱電対の各線を先端から約 1.5mm の間隔に離して置き、その上に同寸法のアルミ箔で押えた。温度測定の方法は前述と同様である。

##### (2) 実験結果とその検討

###### a) 貼付け巾による測定誤差(輻射のない場合)

Fig. 8 の如く測定誤差は、いずれの場合も周囲気温と材料表面温度との温度差が増加するに伴って大きくなるが、貼付け材料の輻射能が試料のそれに比べて小さいため、測定値は表面温度より高い値を示し、そのためアルミ箔の巾の小さいもの程、測定誤差の増加割合が小なるものと考えられる。

また、モルタルとハードボードを比較すると図に見られるように熱伝導率の小さいハードボードの方がモルタルに比べ測定誤差は数倍となる。

なお、測定誤差はモルタル、ハードボード共、貼付け巾 5mm の時の値を基準としてそれとの差をもって一応表示している。

###### b) 表面に輻射を受けた場合の測定誤差

輻射については、約 160, 260, 350 kcal/m<sup>2</sup>h の三段階に分けて実験を行った。

Fig. 9 の如く、貼付け材料の吸収率が試料のそれに比べて小さいため、a) の場合とは逆に測定値は低く表われる。

測定誤差  $\theta$  は輻射量の増加に伴って、モルタル、ハードボード共にほぼ直線的に増大するが、同一輻射量に対してはハードボードの方がモルタルに比べてやや大きい値を示している。

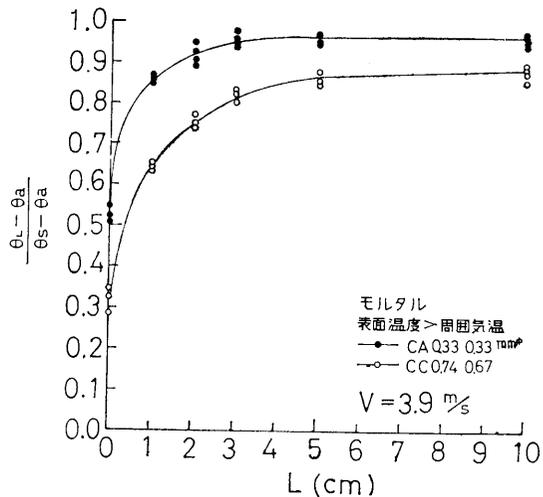
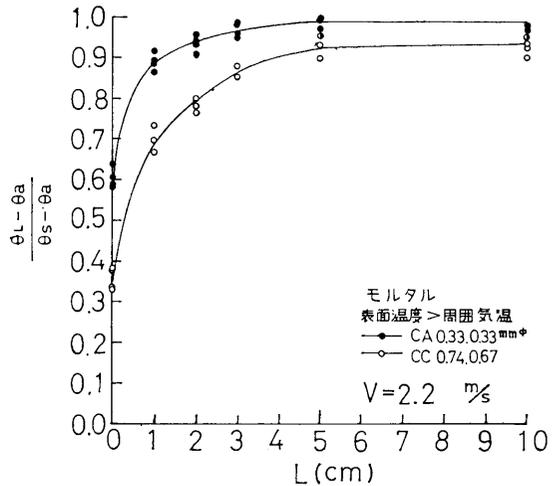
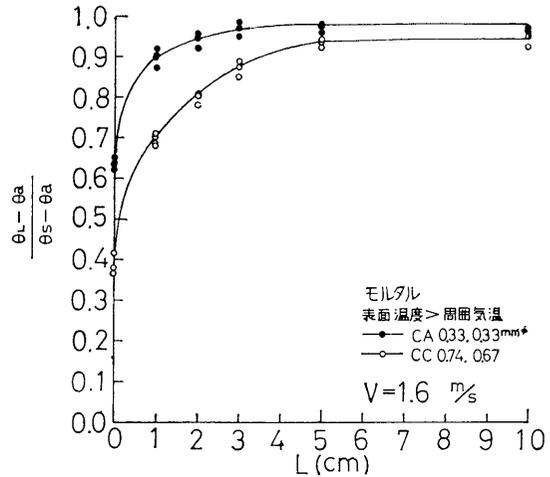


Fig. 7 風速と測定誤差

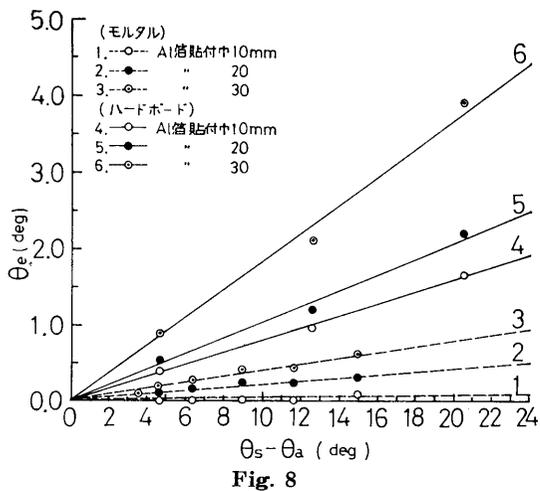


Fig. 8

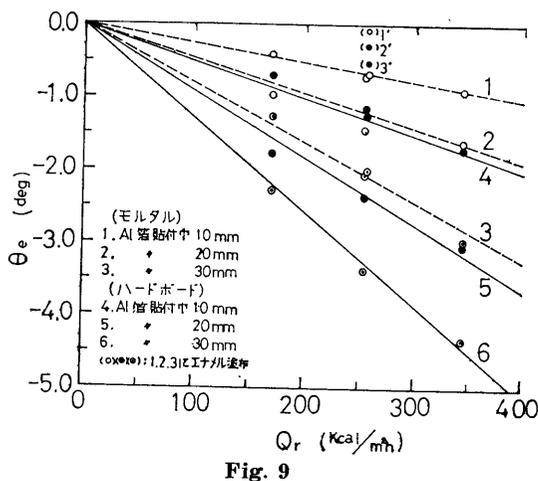


Fig. 9

なお、上図は定常状態における結果であるが、Fig. 10 に過渡状態での表面温度の時間的変化を示す。

すなわち、時間の経過と共に内部温度が上昇するため、貼付け巾による測定値の開きは漸次大となり、やがて定常値に達する。この場合、表面測定温度がほぼ定常値に達する時間は、モルタルの場合約150min であるのに対してハードボードではほぼ50min であって時定数も小さい。

以上の結果より、比較的短時間の放射照射または、照射開始から短時間内の表面温度測定の影響については更に、試料の熱特性および試料の厚さなどについて詳細な検討が必要である。

c) アルミ箔にエナメルを塗った場合の効果

上述した如き、アルミ箔と試料表面の放射吸収能の相異による測定誤差への影響を検討するため、モルタル試料面とほぼ同程度の明度を有するエナメルをアルミ箔に塗布した場合について測定した。

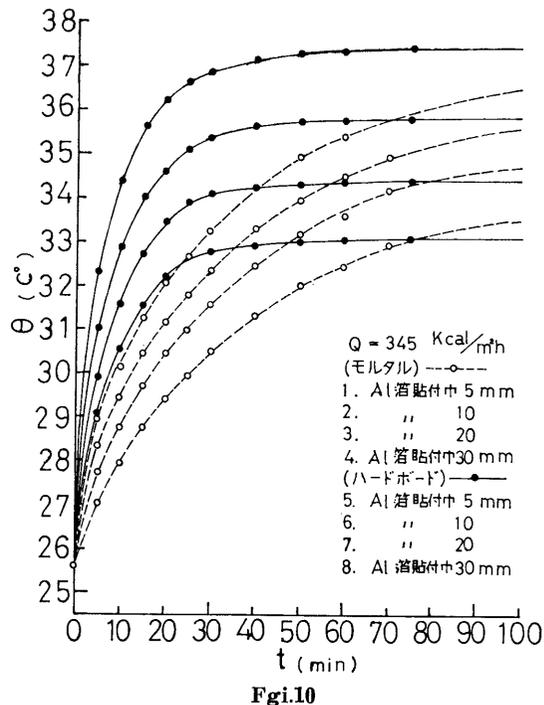


Fig. 10

測定結果は Fig. 9 に併記した如くであって、エナメル塗布により測定誤差の減少が認められる。

試料面に加えた放射量は  $Q_r = 266 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  である。

以上 a)~c) の実験結果より、測定対象となる表面が放射を受ける場合でも、反対にその面が高温であって、放射を放散する場合でも共に熱電対先端にアルミ箔を貼付することは誤差を増大せしめる結果となることが明らかとなった。

3. 気温測定

(1) 実験装置ならびに実験方法

実験は二つの放射束を得るため Fig. 11 の如き装置を作成し実験を行った。

気温測定には電流感度  $1 \times 10^{-10} \text{ A/mm}$  の反射型検流計を、放射測定にはゴルチンスキー日射計を用いた。

また、使用熱電対は CC (0.74, 0.67mmφ) で感温部は油煙が塗布してある。

実験は日射が安定している時、装置を太陽に向け、気温、日射量を同時測定した。

(2) 実験結果とその検討

実験は受熱長さ、放射量、風速、遮蔽板の形状なども種々変化させて行った。

a) 放射量について

放射量については  $200 \sim 600 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  の範囲を対象として、各ケースにつき約30点宛測定し、その傾向を求めた。

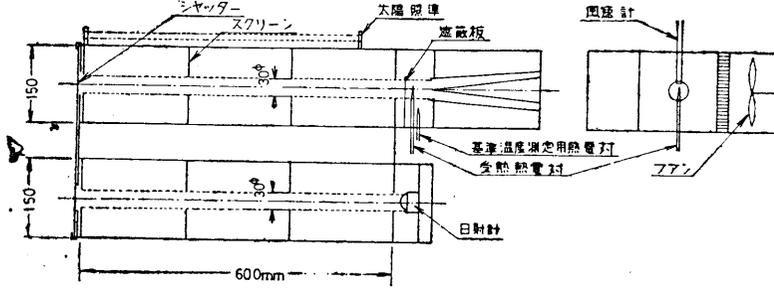


Fig.11 実験装置

Fig.12 に見られる如く風速一定の場合、測定誤差は輻射量に比例して増大しており、無風時には特にその傾向が強い。

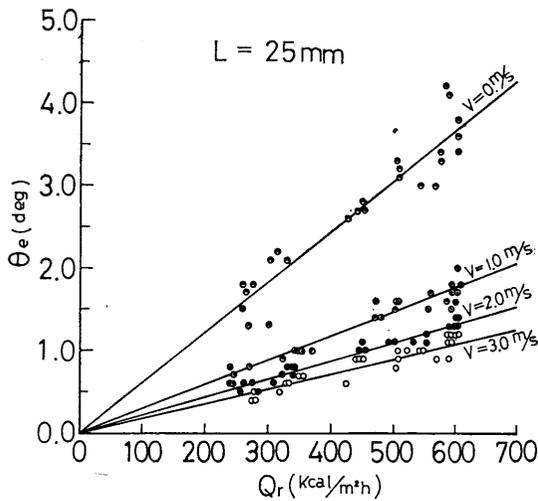


Fig.12 日射量と測定誤差

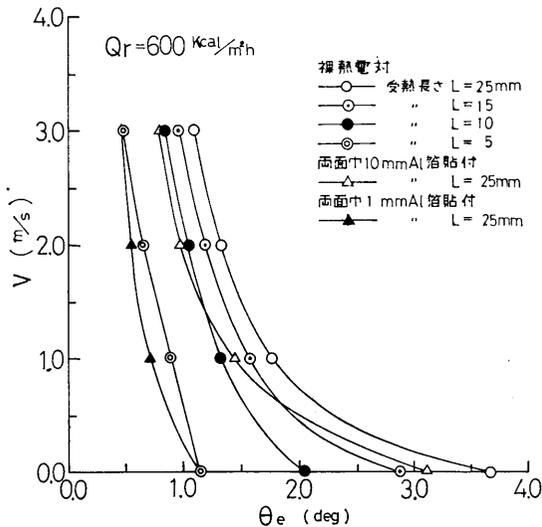


Fig.13 風速と測定誤差

b) 受熱長さについて  
受熱長さについては  $L=5, 10, 15, 25\text{mm}$  の四段階に分けて実験を行った。

受熱長さが大きくなると、受熱量は当然大きくなり、誤差も増加するが、Fig.13 に示す如く誤差の増加率は受熱長さの増加に伴ってむしろ漸減する。

(3) 表面熱伝達率について

a) 風速の影響

風速については、 $0, 1, 2, 3\text{ m/s}$  の四段階に分けて、それぞれの受熱長さについて実験した。

Fig.13 の如く風を感温部に与えると受熱長さ  $L=5, 10, 15, 25\text{mm}$  いずれの場合も測定誤差は双曲線的に減少する。

誤差は無風時が最も大きく、風速の増大に伴う誤差の減少率は受熱長さの大なるもの程大となる。

b) 熱電対の大小の影響

この実験では直径の大小についての検討は行っていないが、一般に直径が小さくなるに従って熱伝達率は大きくなるので当然誤差は小さくなるものと考えられる。

(4) 遮蔽板の寸法について

巾  $10\text{mm}$  のアルミ板 (一重) 厚さ  $0.15\text{mm}$  で熱電対感温部を遮蔽して測定した結果、誤差は認められなかった。また、Fig.13 に示す如く、 $L=25\text{mm}$  について、遮蔽板を用いず、アルミ箔 ( $10\text{mm}$  巾) を直接熱電対面に貼付けて測定した場合は、遮蔽しない場合に比べて、約  $0.3\sim 0.4\text{ deg}$  の減少にとどまる。しかし、アルミ箔の巾を  $1\text{mm}$  程度にすると  $L=25\text{mm}$  の場合で、遮蔽をしない時の  $L=5\text{mm}$  に相当する効果を示す。

なお、上述のように本実験では、熱電対の太さは一種類に限っているので、簡単な数学的解析を行って、その傾向を検討し、併せて実験結果の総合的吟味を行った。

いま、Fig.14 のように熱電対の受熱長さ  $L$  の部分が均一な輻射量  $Q_r$  を受けたとした場合、その各部の熱収支を考慮して下記の条件下で熱電対の先端における測定誤差  $\theta_e$  を求めると下式の如くなる。

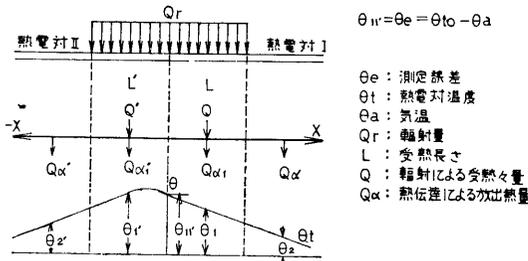


Fig.14

$\theta_{1r} = \theta_e = \theta_{to} - \theta_a$   
 $\theta_e$ : 測定誤差  
 $\theta_1$ : 熱電対温度  
 $\theta_a$ : 気温  
 $Q_r$ : 輻射量  
 $L$ : 受熱長さ  
 $Q$ : 輻射による受熱熱量  
 $Q_{\alpha}$ : 熱伝達による加熱量

境界条件

$$\begin{aligned} x=0 : \theta_1 &= \theta_1', \quad \frac{d\theta_1}{dx} = \frac{d\theta_1'}{dx} \\ x=L : \theta_1 &= \theta_2, \quad \frac{d\theta_1}{dx} = \frac{d\theta_2}{dx} \\ x=-L : \theta_1' &= \theta_2', \quad \frac{d\theta_1'}{dx} = \frac{d\theta_2'}{dx} \\ x=\infty : \theta_2 &= 0 \\ x=-\infty : \theta_2' &= 0 \end{aligned}$$

熱電対の先端における測定誤差  $\theta_e$  は

$$\theta_e = \frac{Q_r n a}{\alpha} \left( \frac{1 - e^{-ML} + \frac{N}{M} \frac{q}{p} (1 - e^{-NL'})}{1 + \frac{N}{M}} \right) \text{ (deg)}$$

ここに、 $p = Q_r n a / \alpha$  (°C),  $q = Q_r n' a' / \alpha$  (°C),  
 $M = \sqrt{2\alpha / r \lambda}$  (1/m),  $N = \sqrt{2\alpha' / r' \lambda'}$  (1/m).

なお、 $p = q$  の場合には

$$\theta_e = \frac{Q_r n a}{\alpha} \left( 1 - \frac{e^{-ML} + \frac{N}{M} e^{-NL'}}{1 + \frac{N}{M}} \right) \text{ (deg)}$$

ただし、 $Q_r$ : 輻射量 (kcal/m<sup>2</sup>h),  $\alpha$ : 熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>hdeg),  $r$ : 熱電対の半径 (m),  $\lambda$ : 熱電対の熱伝導率 (kcal/mdhdeg),  $L$ : 熱電対の受熱長さ (m),

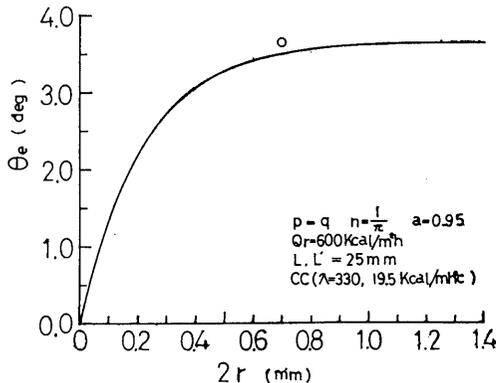


Fig.15 熱電対の直径と測定誤差

$n$ : 熱電対の受熱面積に関する係数,  $a$ : 輻射吸収率。

上式より、熱電対の直径  $2r$  と測定誤差  $\theta_e$  の関係を画くと Fig.15 の如くなる。図中○印は実験結果である。

なお、ここで使用した線状固体表面に関する対流熱伝達率  $\alpha_{co}$  の値は下式によった。

$$\text{自然対流: } \alpha_{co} = 17.5 + \frac{0.011}{D} \quad (D: \text{直径m})$$

(A. Schack)

$$\text{強制対流: } \alpha_{co} = 0.32 + 0.43 R_e^{0.52} \quad (R_e = 0.1 \sim 1000)$$

(M. Adams)

以上の実験結果より測定誤差の減少を計るには、先ず輻射の影響を小さくすることが必要となるが、実際にはこれを遮断することは仲々困難な場合が多い。従って、一般には吸収率 ( $a$ ), 受熱長さ ( $L$ ) の小さい熱電対を使用し、周囲空気との熱交換の増大を計る工夫が必要となる。

#### 4. 結 言

裸熱電対で表面温度ならびに気温を測定する際の誤差について、昭和40年以降、今日までに実験、検討したところを取纏めて報告した。

実験に用いた試料板表面は平滑面であったため、表面温度の決定が比較的容易であったが、実際の建築物の壁面はかなりの粗面であるから、今後表面温度を論ずる場合、どの面を表面と定義するかが一つの問題である。

#### 文 献

宮野秋彦, 小林定教: 熱電対による温度測定 of 誤差 (第1報) 日本建築学会東海支部研究報告第4号 昭40.12.  
 宮野秋彦, 小林定教: 熱電対による温度測定 of 誤差 (第2報) 日本建築学会論文報告集, 号外 昭41.10.  
 宮野秋彦, 小林定教: 熱電対による温度測定 of 誤差 (第3報) 日本建築学会東海支部研究報告第6号 昭43.6.  
 宮野秋彦, 小林定教: 熱電対による温度測定 of 誤差 (第4報) 日本建築学会学術講演梗概集, 昭43.10.  
 宮野秋彦, 小林定教: 熱電対による温度測定 of 誤差 (第5報) 日本建築学会学術講演梗概集, 昭43.10.