



起されたときの蛍光強度  $I_f$  は、 $I_f = \alpha C \cdot I_e \cdot \epsilon \phi_q(T)$ .  $\alpha$ : 集光率.  $C$ : 蛍光体の濃度.  $I_e$ : 強度.  $\epsilon$ : 吸収係数.  $\phi_q$ : 量子収率(温度の関数)  $I_e$  と  $C$  が一定の場合は、蛍光強度は温度のみの関数になります。更に蛍光強度  $I_f$  を基準温度  $T_{ref}$  のときの蛍光強度  $I_{ref}$  で標準化すれば、温度は基準強度との関数となります。シュリーレン法は、気体や液体（もしくは透明体）の密度差を目に見える形に表す可視化法、気体や液体の密度差から温度を求める測定法です。レーザースペックル法は、気体や液体の密度差からレーザ光の屈折率が異なることから偏光率から温度分布を求める測定法であります。赤外線ふく射2色CT法（岐阜大学工学部 若井和憲教授）は、測定炎からのふく射のみを測定する方法で、光源がなくとも測定できる有利さを持っています。燃焼後のガス中の水蒸気は、その赤外域の1.4ミクロン・1.9ミクロン・2.7ミクロンで光を吸収し、その水蒸気自体の温度が高いとその波長でふく射します。また、炭酸ガスは4.3ミクロンで水蒸気より相当強く、吸収やふく射を行います。それを使って温度測定をする方法でそれらのガスからのふく射の強さは、ガスの種類・波長・ガスの濃度・ガス温度の影響を受けます。ガスからのふく射強度、あるいは光源を用いてその光源からの光がガスを通過してくるときの吸収の影響を調べることで、ガスの種類・波長・ガスの濃度等が既知であるとガス温度を求めることができる測定法です。音を使った温度測定法について、音速は温度の関数ですから、音が伝播する時間を測定すれば、その時間から温度が計算できます。音が伝播する道筋の平均温度が得られます。そのデータにCT法を用いると二次元温度分布が測定できます。しかし、音は温度分布のある場を通ると、大幅に屈折してしまう問題があります。音速は媒質の速度にも影響を受けます。だから、音の伝播時間を測定すると、媒質の流速も測定することができるのです。ただし、温度の影響も受けるわけですから、温度も流速も変わっているとすると、音の伝播時間がどちらの影響を受けたのか分からなくなります。一様温度の場であれば速度が測定できますし、温度場が既知であれば、補正を加えて速度分布も測定できます。

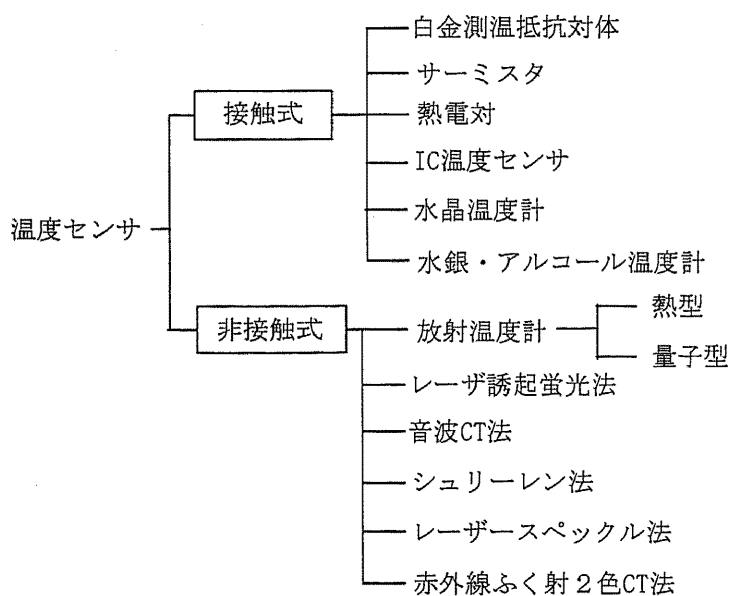


図1. 温度センサの種類

## 2. 実験装置及び測定方法

### 2.1 実験装置

図2. に実験装置の概略図を示す。測定部は鉄製の円筒管を使用した。それは、加工しやすさと比較的熱伝導率が良い・触媒反応が少ないこと等の理由による。測定部は、空気で満たされた状態で大気圧と同じ圧力下である。その両端に発信用スピーカと受信用のマイクロフォンを設置した。スピーカは、比較的高周波を発生できるホーンツイータスピーカを使用した。マイクロフォンは、比較的高周波

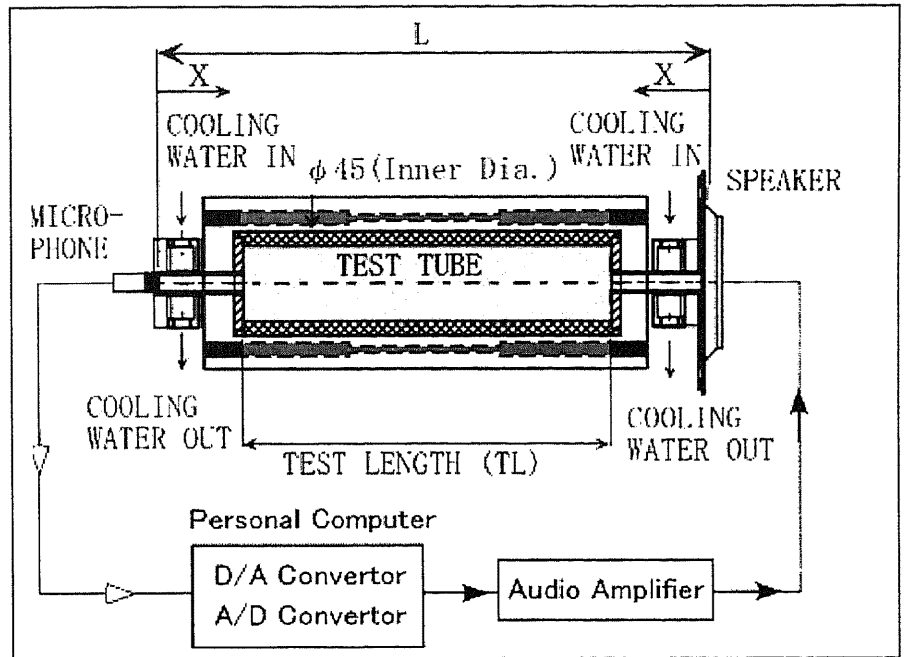


図2. 実験装置

領域まで精度の良いコンデンサマイクを使用している。スピーカ・マイクロフォンの耐熱温度は、約 50°C 程度である。本実験では、円筒部分は 1000[K] 以上の高温に保持する必要があり、円筒壁の周囲から電気炉などで使用される発熱体（シリコニット）で高温に加熱した。円筒部を一定の温度に保つために温度コントローラで制御しながら加熱した。その温度制御用のセンサは、K 型の熱電対を使用し、これを円筒管中心に挿入した。実験中は常にこの温度コントローラにより、温度を一定に保つことができる。円筒部から両端の発信部・受信部までは、鉄製円筒管の両端にステンレス製のパイプ（外形 12mm、内径 8mm）を取り付けそこに冷却部（熱交換器）を設置した。それにより円筒部分で 1000[K] 以上に加熱してもスピーカとマイクロフォンは、加熱による破壊と劣化を防ぐことができる。冷却部（熱交換器）は、円筒部からの熱伝導・熱伝達による温度上昇を 50°C 以下に抑えるように水道水量を考慮の上、伝熱計算でステンレス管の長さや肉厚等を求めた。このとき、冷却水と金属管の熱伝達率の見積もりを誤ると許容温度以下に抑えることができないので正確さが問われる。

### 2.2 音波による測定方法

気体中での音速は、次式(1)で表される。

$$c = \sqrt{\kappa RT(x, y)} \quad \cdot \cdot (1)$$

c: 音速  $\kappa$ : 気体の比熱比  
R: ガス定数 T: 絶対温度  
x, y: 空間の位置

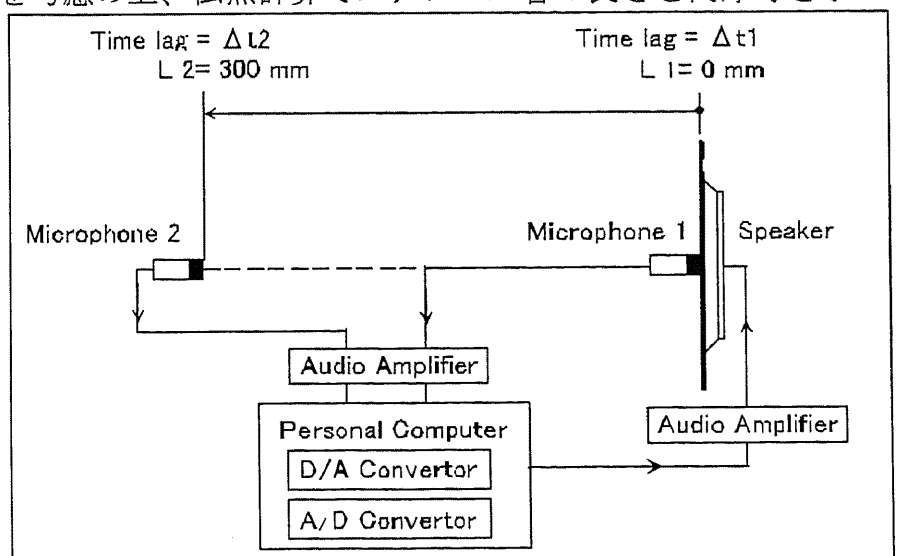


図3. 音波伝播時間測定回路

本研究においてもこの音速の温度依存性を生かした。したがって、音波の伝播時間を計測することで、の一次元投影データが得られる。実験は、室温での確認と熱電対と同様中心温度 400, 700, 1000[K]の温度場を対象にして行った。スピーカから音波を発生させ、マイクロフォンの受信信号を記録させる方法をとっている。このタイミングチャートを図4に示す。スピーカからの音波には、D/A変換による

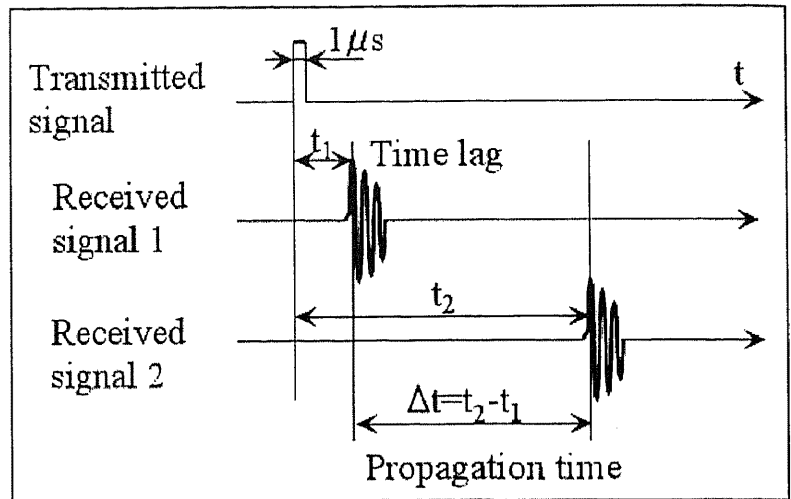


図4. タイミングチャート

パルス幅 1[us]の矩形波を利用し、受信信号の記録には、A/D変換を利用した。単発の矩形波によって、音波をスピーカから発生させているので、マイクロフォンでの受信信号の立ち上がりが重要である。しかし、スピーカ・マイクロフォン・増幅器などの遅れにより、当然受け取る信号(図4 Received signal 1,2)にはダレが生じてくる。よって、矩形波による送信信号の立ち上がりから受信信号の各波形における最初のピーク値までの時間をその距離に対する伝搬時間とすることにした。ここで、この信号には、前述のあらゆる遅れ時間も加わっているため、距離がない場合の時間を予め測っておき、それを全体の遅れと見なすことにした。それが図4の  $t_1$  にあたる。そして、 $t_2$  は距離  $L$  (マイクロフォン・スピーカ間の距離)での実際の伝播時間である。よって、マイクロフォン・スピーカ間の距離  $L$  での伝播時間は  $\Delta t = t_1 - t_2$  と表せる。ここで、 $t_1$  は 0.1[ms]程度、 $t_2$  は室温で 1 [ms]程度のオーダーであった。そして、先の音速の(1)式を利用して管内音波伝播経路の断面平均温度を求めた。

### 2.3 熱電対による測定方法

電対を用いた温度測定は、直径 3.2 mm の K 型シース熱電対を使用した。熱電対による計測では、音波で計測したときと同じ状態で測定部の中心軸上をトラバースさせる方法をとった。なお、400, 700K の場合はトラバースの間隔を 10mm, 1000K では温度勾配が大きかったため間隔 5mm とした。また、熱伝導による誤差をおさえるために熱電対のトラバースは挿入側から中心付近までを測定する方法をとった。また、熱放射の影響を補正する際に測定部の管壁の温度が必要となるが、

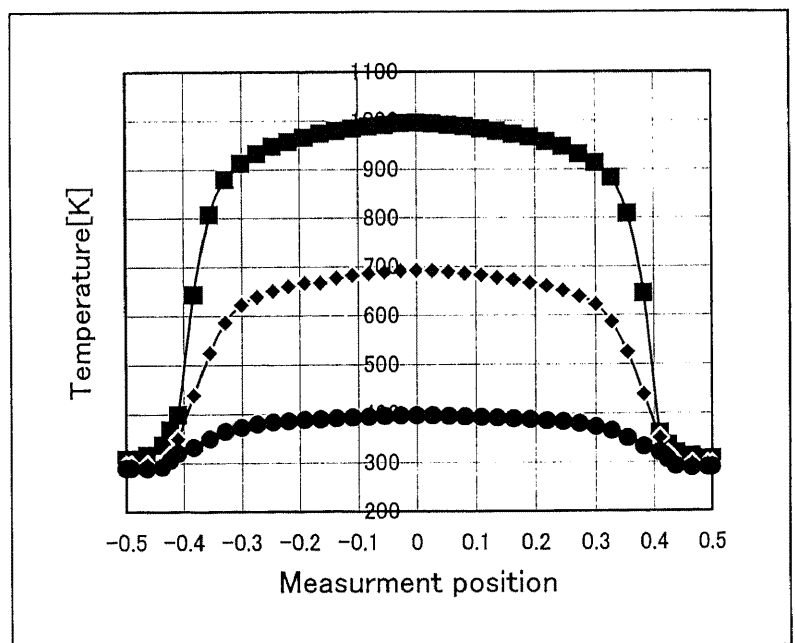


図5. 熱電対で測定された温度分布

これは K 型シース熱電対を用いて 10mm 間隔で管壁上をトラバースさせて測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 熱電対による測定結果

熱電対により計測した温度分布を図 5 に示す。横軸は測定部中心からの距離を 145mm で割った無次元数で縦軸は温度である。両端の冷却部においては、どの温度の場合もほとんど変化はなかった。また、0.4~0.4 の範囲において温度ほぼ一定であって、測定部中央位置に対してほぼ左右対称の温度分布であった。

#### 3.2 熱電対の測定誤差とその補正

図 6 に熱電対を用いて計測した測定部中心軸上の平均温度の計測結果と音波で測定した結果との対応図を示す。図の横軸は音波による計測結果を示し、縦軸は熱電対によって計測したデータである。ただし、いずれも断面平均温度である。図に示すように、計測温度が高温になるほど、熱電対での計測値が音波による計測値よりも高い値を示しており、より誤差が大きくなることが伺える。これは、熱電対への熱伝達と熱放射による誤差ものと考えられる。そこで、ここでは熱放射の温度の補正を行った。熱放射の影響を補正するには、次式を用いた<sup>(3)</sup>。

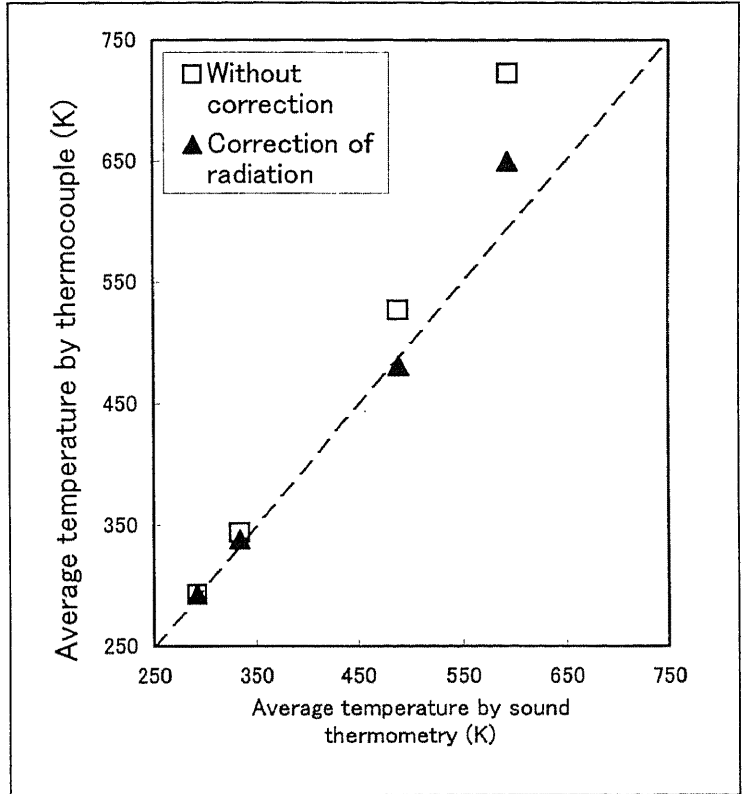


図 6. 音波平均温度と熱電対平均温度

$$\dots\dots(2)$$

$h$  : 媒体から感温部への熱伝達係数,  $T_g$  : 非測温媒体の静温度,  $T_k$  : 素線の温度,  $T_w$  : 周囲の温度,  $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ ),  $\varepsilon$  : 素線表面の放射率,  $f$  : 形態係数

式 (2) により補正した結果、熱電対を用いて計測した平均温度の計測結果と音波により計測した結果の差が小さくなったことが図 6 で確認できる。測定部内の鉄製円筒管の壁面温度はほぼ一定であった。測定部空気は温度勾配中心付近と外側とで温度差がある。したがって、測定部の中心付近よりも外側で熱放射による影響が大きかったと考えられる。周囲の温度が、シース熱電対より高いことから以下のように考察できる。

#### 3.3 考察

本実験の場合、温度条件  $T_w$  : 周囲の温度  $>$   $T_g$  : 非測温媒体の静温度  $>$   $T_k$  : 素線の温度条件であることから、熱放射で受ける熱は  $\sigma \varepsilon (T_k^4 - T_w^4)$  であり、熱放射で補正しても完全に補正できない温度上昇値は、円筒管内で自然対流が起こっていると推察されることから、高温空気から対流により受ける熱は  $2 \pi d h (T_g - T_k)$  である。

実際に火炎の温度を測定する場合、温度条件  $T_k$  : 素線の温度条件  $>$   $T_g$  : 非測温媒体

の静温度  $T_w$  : 周囲の温度であることから、対流により高温燃焼ガスから受ける熱は、 $2 \pi dh(T_g - T_k)$  であり、これに対して、放射で放出する熱は、 $\sigma \epsilon (T_k^4 - T_w^4)$  である。ここで、左辺が放射によるの誤差温度である。

$$\Delta T \equiv T_g - T_k = Re^{-\alpha_{Re}} (\epsilon \sigma T^4 d) / (C_{Re} h) \quad Nu = C_{Re} Re^{-\alpha_{Re}}$$

この式で不明なのが、ふく射率、熱伝達率としての Nu 数と Re との関係など。これらがわかれば、放射補正式が確定する。また、気流の熱伝達率などの物性値も何らかの関数化がなされれば、火炎などの燃焼温度が正確に測定できることになる。

しかし、熱電対で火炎内の温度を測定する時には、熱電対と火炎との化学反応について十分に注意する必要がある。また、触媒反応を避けるあまり酸化アルミナのパイプカバーを使うことがあります。温度勾配の激しい火炎での温度測定では、熱伝導による温度誤差が、 $\phi 3\text{mm}$  の酸化アルミナパイプカバーで  $100^\circ\text{C}$  程度の熱伝導誤差を生じることもあります。熱電対を使った火炎の温度測定でどのような測定方法が最良かと考えたとき、このような測定法が最良であると断言できる測定法は残念ながら現在のところありません。熱放射・触媒反応・熱伝導・熱伝達などを推察することができて、絶対的な温度でなく目安となる温度を測定する手段として使うならば、熱電対ほど簡便で使い勝手のよい温度測定手段はないと考えるところでもあります。

#### 4. まとめ

熱伝導・熱放射・触媒反応・熱伝達などの影響を受けない音波による温度計測結果と熱電対を用いた結果を比較検討し、熱電対の誤差検定に音波を使った温度測定が有効であることを確認できた。

- (1) 熱電対の誤差検定用の実験装置を提案した。
- (2) 熱電対の問題点である、熱放射・触媒反応・熱伝導・熱伝達による影響を受けない音波による温度測定と熱電対による温度測定との比較を行った。

#### (参考文献)

- (1) 陸剣, 他 4 名, ガスの二次元温度分布測定のための屈折を考慮した音波 CT のアルゴリズム, 機械学会論文集, 65-638, B(1999), 3468.
- (2) 伊藤文夫, 坂井, ボイラ燃焼の音波計測とそのイメージ処理技術に関する基礎研究, 機械学会論文集, 53-489, B(1987), 1610.
- (3) 大竹一友, 機械の研究, 37, (1985), 599-605.