温度ゆらぎを利用した気体の流速測定†

鳥羽 栄治*・豊田 弘道**・阿刀田 央一**

Velocity Measurement of Air Flow Using Temperature Fluctuation

Eiji TOBA*, Hiromichi TOYOTA** and Ōichi ATODA**

A special CA thermo-pile with high sensitivity and fine frequency characteristics, of which the gain is flat to 10 Hz, is developed as a sensor for measurement of temperature fluctuations.

The irregular temperature fluctuations produced around a heater are convected by air flow and detected by the two sensors provided along the flow. Using the distance between two sensors and a cross-correlation function of the two signals, the flow velocity is calculated.

The main features of this method for the measurement of the air flow velocity are as follows:

- (1) The method using temperature fluctuations is more advantageous than tracer injection methods, because it does not contaminate an object.
- (2) In the region of 0.5 m/s~10 m/s, measurement of the flow velocity is possible if the velocity is calibrated with a standard flow meter.
- (3) This method requires some time interval for averaging times, since the correlation method is used to obtain the flow velocity.
- (4) The relative error of this measurement is as small as $\pm 5\%$ when the product (vl) of the distance between two sensors (l) and the flow velocity (v) is greater than 0.12 for $l=10$ cm, and 1.40 for $l=30$ cm.

Moreover, when vl is smaller than the above-mentioned values, the errors are systematic. Thus this method is still useful with compensation.

The velocity measurement by this method is applicable in various fields of flow.

1. はし が き

流体になんらかの目印をつけて、その移動速度から平均流速を求める方法はよく知られている。筆者らの考案した温度差の目印を利用する方法^{1),2),3)}は、流体を汚染しない点で試薬添加法より有利である。液体の場合の温度差添加法に関しては、柏木らによって研究⁴⁾がまとめられた。

一方、気体の場合の温度ゆらぎを利用した研究⁵⁾は少なく、流速測定法としての精度に問題が残されていた。温度ゆらぎを利用した気体の流速測定法を開発するにあたって、気体の流速測定に関する研究^{3),6)}について、考察を加える。

1) 気体輸送管の中途に加熱器を挿入すると、加熱電流が一定の場合でも、輸送管を通過する気体は、不規則な温度ゆらぎが印加されて、流れに乗って下流に運ばれるので、これを目印として利用できる。

2) 加熱器の下流側に設置した2個の温度ゆらぎ検出器は、周囲の管路内壁から剝離して混入する2次の温度ゆらぎを雑音としてひろう。この場合の温度ゆらぎのパワースペクトルは、水冷管のほうが保温管よりパワーレベルが高くなり、流速が遅いほど混合が進行しないので、パワーが増加する。また、気体平均温度と管壁温度との温度差が大きくなるほど、2次のゆらぎの強さが増加する。

3) 流速測定法としての精度を向上させるには、2次の温度ゆらぎの混入を防止することが必要であると

† 第11回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭47・8)

* 信州大学繊維学部 上田市常田 3-15-1

** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* The Faculty of Textile Science and Technology, University of Shinshū, Ueda

** Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received February 2, 1973)

考えられる。このためには、加熱器による気体平均温度上昇をできるだけ小さくし、これに伴う温度ゆらぎ信号の微弱化に対しては検出器の感度を上げてやればよい。また、流速測定法としては、加熱器の構造はなるべく高周波の温度ゆらぎが印加されるようにする。そして、加熱器と検出器との中間は簡単な形状に統一し、2検出点間距離もあまり大きくしないほうがよい。

上記に示した考察に基づいて本研究を進めた結果、従来の実験からは得られなかったよい結果が得られたので、これを報告する。

2. 温度ゆらぎ測定用検出器

2.1 構造

微小温度変動測定用検出器として、Fig. 1 に示すような構造の特殊サーモパイルを製作した。基板（ベーク）の上に、線径 0.02 mm の CA 熱電対 30 対を直列に接続している。基板内径は、測定用配管とほぼ等しいものを使用した。測温接点部分は、熱容量をできるだけ少なくするように特殊な溶接をした。冷接点部分は、ある程度の時定数をもたせて、測定配管の外側に出し、測定管内温度と大気温度（周囲温度）との差を検出する。30 対の熱電対を Fig. 1 に示すような円周上にほぼ一様に分布する構造としたので、管路内

Fig. 1 Construction of thermopile

Fig. 2 Calibration apparatus

Fig. 3 Frequency response characteristics

断面についての平均温度ゆらぎを検出できる。

2.2 静特性および過渡的な応答

本実験で使用した 30 対 CA サーモパイルの熱電能は、約 1.2 mV/°C である。沸点にある熱湯の中に、空気中からできるだけ急激にサーモパイルを入れる。サーモパイルの測温接点に比し冷接点の時定数ははるかに大きいので、湯に入れた瞬間、急速に熱起電力が発生する。この場合の過渡応答から求めた時定数は、約 0.1 秒であった。時間が経つと、次第に冷接点部分も暖まり、熱起電力は徐々に下がり零に近づく。この場合の過渡応答から求めた冷接点側の時定数は約 0.9 秒ぐらいであった。つぎにインパルス応答法（できるだけ迅速にサーモパイルを湯の中に漬け引出す）により、前記の過渡応答法より出力が低下しないことを確認した。過渡応答法より出力が低下するようでは、測温接点の時定数が大きすぎて、温度ゆらぎ検出用としては不適當である。

2.3 周波数応答

熱湯を利用して求めた動特性が気体温度変化に対する動特性と違っていないことを確かめるため、気体の断熱圧縮、膨張による温度変化を利用した動特性測定を行なった。動特性測定のための可変周波数発生装置の概略図を Fig. 2 に示す。サーモパイルを密封容器の中に挿入して、これを薄いゴム膜でふたをし、その中心部分を偏心回転板で上下に振動させて、容器の内部に正弦波状断熱圧力変化を発生させるようになって

Fig. 4 Schematic Arrangement.

Fig. 5 Typical records of temperature fluctuation

いる。この周波数は、変速モータにより連続的に変更できる。位相標点は、回転円板状の細孔の通過光を光電式回転計で受け、出力パルスを取り出すことにより得られる。Fig. 3に、2個の検出器の周波数特性を示す。これによると、 -3 dB 周波数は約 20 Hz であるから、温度ゆらぎ信号に十分追従できることがわかる。また、2個の検出器の利得および周波数特性は、測定された全周波数領域にわたって非常によく一致しているので、高精度の相関法用検出器として使用可能である。

サーモパイルの動特性を向上させるためには、熱電対の線径を細くし、温接点部分の熱容量をできるだけ小さくすることが必要である。しかし、あまり線径を細くしすぎると、接合部分の溶接が技術的に困難となり、流速が速くなると（約 10 m/s 以上）、断線する恐れがある。したがって熱電対線径を決定する際には十分配慮を要する。

3. 測定方法および装置

一般に相関を利用した流速測定法は、主につぎの2

つに分類される。その1つは、流れの中に自然に存在する速度成分などのむらの相関をとる。他の1つは、人為的に流れの中に温度のむらなどを作って相関をとる方法である。これらの両者は、いずれも流れの中に存在する不規則なむら（ゆらぎ現象）を利用して、相互相関関数から流体の移動速度を求める方法である。

本文では後者の方法を用いて、気体の流速測定を試みた。Fig. 4に実験装置の概略図を示す。変速ブロワで空気を管路系に送り出す。送り出された空気は電熱式加熱器を通して加熱され、不規則な温度ゆらぎが印加される。温度ゆらぎは、一定距離 (l) 離れた2個のサーモパイルで検出される。上流側検出器 TP_1 および下流側検出器 TP_2 で検出された不規則な温度ゆらぎ信号を $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ とし、この2つの信号の相互相関関数 $\phi_{1-2}(\tau) = \overline{\theta_1(t) \theta_2(t+\tau)}$ を計算する。

相互相関関数の最大となる遅延時間を τ_m とすると、 τ_m が2検出点間距離 (l) を流体が移動する実効時間を示している。すなわち、流速 $v_c = l/\tau_m$ から求めることができる。

流速校正用として、四分円ノズルを使用した。実験

中に流速が変動しないことは、熱線風速計により確認した。主要管路は 25 ϕ アクリル管および 30 ϕ の硬質塩化ビニル管を使用した。ヒーターと検出器(TP_1)との距離(L)は 5 cm $\sim$ 100 cm 可変, ($\text{Red.} \approx 1.5 \times 10^3 \sim 10^4$), 管内平均温度 20 $^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲で実験を行った。またヒーターはフィリップ製サーモコックスヒーター (直径 1.0 mm, 60 W および 20 W) を使用した。

4. 実験結果および検討

Fig. 5 は検出器 TP_1 (上流側), TP_2 (下流側) で得られた代表的な温度ゆらぎ波形の実時間パターンを示す。**Fig. 6** は上下流の温度ゆらぎ波形から求めた相互相関関数を示し, **Fig. 7** にこの自己相関関数を示す。すなわち温度ゆらぎはみかけ上の平均流速によって変わり, 平均流速が大きくなると, 温度ゆらぎの周波数は高くなり振幅は小さくなる。2 検出点間距離をある値に固定して, 流速を変化させた場合, 上流側および下流側のおおのの温度ゆらぎ波形パターンを比較すると, 下流側のほうがやや高周波成分が減衰する程度で, 両者の有意な差はみられない。**Fig. 8** はヒーターと検出器(TP_1)間の距離(L)を固定して, l を変化させた場合の流速 $v_c = l/c_m$ と四分円ノズルから求めた流速 v との関係を示す。**Fig. 9** は, 測定用配管の材質と管径を変えた場合の v と v_c の関係を示す。これらは, いずれの場合にも l が約 15 cm ぐらいまでは, v と v_c との比例関係は直線的である。 l を 15 cm 以上としたときには, $v_c > v$ の傾向が現

Fig. 6 Crosscorrelation function of signal $\theta_1(t)$ and $\theta_2(t)$

Heater A $v = 2.29 (\text{m/s})$, $l = 11.2 \text{ cm}$, $L = 4.5 \text{ cm}$.

Fig. 7 Autocorrelation functions of signal $\theta_1(t)$ and $\theta_2(t)$

われる。 l をさらに長くして 100 cm 以上にする, 相互相関係数の値が低下し(0.1 以下となる), 流速測定が困難となる。管材料のアクリルと塩ビの熱的性質は, 大きな差がないので, **Fig. 8** と **Fig. 9** は管内径の影響を示すものと考えられる。

したがって, v_c と v との直線的比例関係は管内径が変化しても, 一定であるとみなしてよい。ただし, $v_c = v$ の直線からの偏よりは, **Fig. 8** と **Fig. 9** とで多少の差があるが, これは 25 ϕ 管の場合には検出器前後の管接続用の段がついているためと考えられる。

2 検出点間にメッシュ (2 mm $\times$ 2 mm 方眼の金網) や曲り管などを挿入した場合でも, 直管の場合とほぼ等しい結果が得られた。これは本実験で使用したサーモパイルが円管断面の平均温度ゆらぎを検出しているため, 測定対象としての温気塊の空間的尺度 (管軸方向長で数 cm 以上) が大きくなり, メッシュや曲がり管などによって生起する局所的微小攪乱 (空間的尺度が微小) の影響をほとんど受けないことを示している。したがって, 管路内にセンサー保護用の金網などを挿入することが可能であるから, 実用上は非常に便利である。

〔検討 1〕 ヒーターの形状

本文では相関法により流速を求めているので, ヒーターではできるだけ高周波成分の温度ゆらぎを印加したほうが分解能が向上する。そこで, **Fig. 10** に示すような主に 2 種類の形状のヒーター A および B について考察する。**Fig. 11** は流速や L などの条件を等しくしてヒーター A および B を用いた場合の θ の自己相関関数の相違を示す。すなわち **Fig. 10** からわかるように, ヒーター A (流体の流れ方向に対して加熱部分

の幅をできるだけ小とする)のほうがヒーターB(流体の流れ方向に対してある程度の幅を有する)よりも高周波の温度ゆらぎが印加される。したがって、温度ゆらぎを発生させるヒーターの形状としては、ヒーターAのようにしたほうが相互相関関数のピークは鋭く、相互相関関数の半値幅($\tau_{1/2}$)を小さくすることができ、測定精度がよくなる。前章の実験に使用したのは、すべてヒーターAである。

また、ヒーターで加熱されることによる気体の平均温度上昇は約5~10°Cぐらいいであり、これをあまり大きくすると2次の温度ゆらぎがヒーター以外の管壁から混入して、測定誤差を増大させる。

〔検討 2〕 加熱器と検出点との距離(L)および2検

出点間距離 (L)

加熱器で不規則に印加された温度ゆらぎは混合拡散し、次第に均一な温度の塊となって下流に流れてゆく。 L があまりにも小さすぎると温度の均一化が十分でなく、検出信号は雑音の多い信号となり、測定値のパラツキが大きくなる。また、 L が大きすぎると検出信号の振幅、とくに高周波成分が著しく小さくなる。したがって、最適な L の値を実験的に求めてみると、 $L=1.5D\sim 10D$ 位である。ただし、 D は管径を示す。一方 l については、(a)測定分解能、(b)拡散による測定精度低下の両面を考慮して決定されねばならない。後者は次章で論ずるので、この章では(a)のみについて考察する。

測定の分解能を高めるには $\tau_{1/2}/\tau_m$ を小さくする必要がある。ただし $\tau_{1/2}$ は半値幅である。 τ_m は当然 l に比例して増大するが、一方 $\tau_{1/2}$ も l を増大するとともに高周波のコヒーレンスの低下により増大する。しかし、実験的には $\tau_{1/2}$ の増加は徐々であり、したがって l を大きくしたほうが $\tau_{1/2}/\tau_m$ は小さくなり、分解能は上昇する。ところが、 l をあまり大きくしすぎると、相互相関係数の値が極度に低下し、($l=40D$ のとき、0.1程度)実際上非常に測定しにくく

なる。したがって、 $l=2D\sim 20D$ ぐらいが適当な値である。

〔検討 3〕 拡散の影響

2検出点間で気体の拡散が存在すると、測定値に誤差を生ずる可能性がある。ここで、管路内の気体温度ゆらぎの拡散を1次元拡散モデルで近似すると、次式が成立する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - v \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

ただし、 θ : 温度変動、 ε_x : 気体のみかけ上の温度拡散係数、 v : 平均流速。

式(1)を条件 $t=0$ のとき、 $\theta=\delta(t)$ で解くと、

Fig. 10 Heater Configuration

Fig. 11 Autocorrelation function ($V=1.22$ m/s, $l=9.5$ cm, $\Delta t=4$ ms)

$$\theta(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \varepsilon_x t}} \exp\left\{-\frac{(x-vt)^2}{4\varepsilon_x x}\right\} \quad (2)$$

ここで、 $x=l$ の点に検出器を置いたと仮定し、この検出器の入力インパルスに対する出力が最大となる時刻 $\tau_{\max}$ を求めると、

$$\tau_{\max} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_x}{vl} + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_x^2}{v^2 l^2}}} \cdot \tau_0 \quad (3)$$

ただし、 $\tau_0 = l/v$

式 (3) から常に $\tau_{\max} < \tau_0$ であることがわかる。すなわち、出力のピーク位置から計算した流速が常に平均流速より大きくなることを表わしている。この状況を図式的に説明したものが Fig. 12 である。Fig. 12 により、時間軸上 (t) の応答と空間軸上 (x) の応答との区別がはっきりするであろう。

拡散は空間軸方向に対しては、その中心のまわりに対称に起こる

Fig. 12

が、 $x=l$ での温度の時間的な変化は対称とはならず、拡散の中心、すなわち空間軸上でのピークが $x=l$ の点を通過する以前に最大値をとる。図中の“Sensor Output”と記された曲線が、この様子を示したものである。

本論文の場合は、式 (2) の空間軸方向に温度ゆらぎ波形をコンボリューションしたものとなり、状況は非常に複雑になる。ここでは、式 (2) は時間的インパルス応答を与えるものでないことに注意しなければならない。しかし、この場合にも常に $\tau_{\max} < \tau_0$ の傾向があり、 $\tau_{\max}/\tau_0$ は ε_x/vl の単調減少関数であり、 $\varepsilon_x/vl=0$ のとき 1 となる。

Fig. 8 のデータを横軸に vl 、縦軸に相対誤差 $\{(\tau - \tau_m/\tau) \times 100\} \%$ をとりプロットすると、Fig. 13 となる。Fig. 13 から上記の考察をほぼ裏づける結果が得られているが、 l の値により多少曲線が全体的に上下に変動する。このことは上記の考察から予想されな

Fig. 13

かったことで、この原因はみかけ上の拡散係数（たとえば 3 次元方向の混合拡散などにより）が l により変化するためであると思われる。

Fig. 13 から流速測定用計器としての本流量計の使用範囲を求めると、つぎのようになる。

(a) 誤差が $\pm 5\%$ としたとき、

$l \doteq 10 \text{ cm}$ のとき、 $vl > 0.12$

$l \doteq 30 \text{ cm}$ のとき、 $vl > 1.40$

(b) 誤差が $\pm 10\%$ としたとき、

$l \doteq 10 \text{ cm}$ のとき、 $vl > 0.10$

$l \doteq 30 \text{ cm}$ のとき、 $vl > 0.70$

しかし、これらの範囲外でも Fig. 8 および Fig. 9 を見ればわかるように、適当な補正をすることにより流速測定が可能である。

4. ま と め

温度ゆらぎを利用した流速測定を行なった結果をまとめると、つぎのようになる。

1) 高感度でかつ動特性の優れた CA 特殊サーモパイルを使用し、微小温度ゆらぎを目印として検出することにより、気体流速測定が可能となった。

2) 温度ゆらぎを利用した気体流速計としての使用範囲を明確にした。すなわち、相対誤差が $\pm 5\%$ 以内に収まる vl の値は、 $l \doteq 10 \text{ cm}$ のとき、 $vl > 0.12$ であり、 $l \doteq 30 \text{ cm}$ のとき、 $vl > 1.40$ である。しかし、

これらの範囲外でも補正をすると、十分流速計として使用可能である。

3) 2 検出点間に曲がり管とか、メッシュを挿入した場合にも、直管とほぼ同じ結果が得られた。すなわち、利用している温度ゆらぎは、局所的微小攪乱の影響をほとんど受けない。

4) 加熱器は、できるだけ高周波成分の温度ゆらぎを印加できる構造としたほうが、測定精度が向上する。このためには、流れ方向に関してできるだけ薄い構造にしたほうがよい。

最後に、実験に協力して下さった水田千益君と岡林定幸君に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 豊田, 鳥羽ほか: 温度ゆらぎを利用した気体の流速測定, 第 11 回 SICE 学術講演会予稿集, 215/216, (1972)
- 2) 豊田, 柏木: 温度差のある流体添加による流速測定法, 第 5 回 SICE 予稿集, 145/146, (1966)
- 3) 豊田ほか: 特殊な温度測定, 計測と制御, 10-1, 25/35, (1971)
- 4) 柏木: 相関技術を用いた流速測定, 計測と制御, 10-2, 87/101, (1971)
- 5) P. G. Bently et al Fluid Flow Measurement by Transit Time Analysis of Temperature Fluctuations, Trans. Soc. Instr. Tech., 18, Sept., 183/193, (1966)
- 6) 豊田ほか: 気体流体の温度ゆらぎ, 第 6 回 SICE 学術講演会予稿集, 375/376, (1967)