

三孔ピトー管を用いた速度分布の自動計測

石 綿 良 三

Automatic Measuring of Velocity Distributions
by a Cobra Pitot Probe

Ryozo ISHIWATA

Abstract

Cobra Pitot probes are generally used to measure velocities of two-dimensional flow in many fields, since they are convenient to deal and inexpensive. However, it is known that a measurement of velocity distributions requires a lot of time. An automatic measuring system which had an automatic traverse function was developed in this work.

The system is able to carry out positioning of the Pitot probe and sampling of pressure data from it with a micro-computer. This contains two stepping motors to adjust position and angle of the probe. The probe is connected with one stepping motor to adjust its angle. This stepping motor is set up above a nut of ball screw and is slid with it. The ball screw is connected with another one to adjust position of the probe. Therefore the probe is successively traversed over the measuring span. On the other hand, pressure data from pressure transducers are taken into the micro-computer by A/D conversion.

Therefore the measuring time is sharply shorten.

1. 諸 言

ピトー管は数多くの流速測定装置の中で、取扱いが容易であり、比較的安価であるなどの理由から非常に広い範囲で用いられている。そのうち、三孔ピトー管は二次元的な流れの速度（流速の大きさと流れ角）の測定に適しており、簡単な手作業で製作できるという利点がある¹⁾。しかしながら、製作された三孔ピトー管を実際の流速測定に供するようにするまでには、検定に多大な時間を要することが多い。

そこで著者はマイクロコンピュータを用いた自動検定システムの開発を試み、検定時間の短縮を行った^{2),3)}。そのシステムはマイクロコンピュータから出力される制御信号によってステッピングモータの回転角を制御し、それに直結された三孔ピトー管の角度を順次変化させ、同時に設定された各流れ角において、そのときの三孔の圧力を圧力変換器および動ひずみ測定器を介して A/D 変換によってマイクロコンピュータ内に取込むものである。その結果、流れ角が $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$

の範囲で 1.8° ごとに51点で検定を行った所、要する時間が5分以下と極めて短時間となった³⁾。

一方、このような三孔ピトー管を用いて二次元的な流れ場の速度分布を測定するときについて考える。通常は人間がピトー管を手動でトラバースしていき、各測定位置における三孔の圧力をマノメータなどで読取るわけであるが、(1)トラバース後、圧力が定常値に達するまでに時間がかかる、(2)圧力が定常になったかどうかの判断が難しい、(3)手動でトラバース位置を設定するため、無駄な動きが出やすく、かつ時間がかかる、(4)特に微小圧の場合に圧力値の読取り精度が悪くなるなどの問題がある。以上の原因から、測定者は速度分布を得るまでに長時間拘束されることが多く、また得られる測定結果の精度にも限界がある。

そこで本研究では、このような三孔ピトー管を用いた速度分布の計測に対して、マイクロコンピュータを用いた自動計測システムの開発を試みた。前述の自動検定システム^{2),3)}ではピトー管の角度設定にステッピングモータを1台だけ使用したが、本自動計測システムではさらにピトー管トラバース用にもう1台のステッピングモータを追加し、ピトー管の角度とトラ

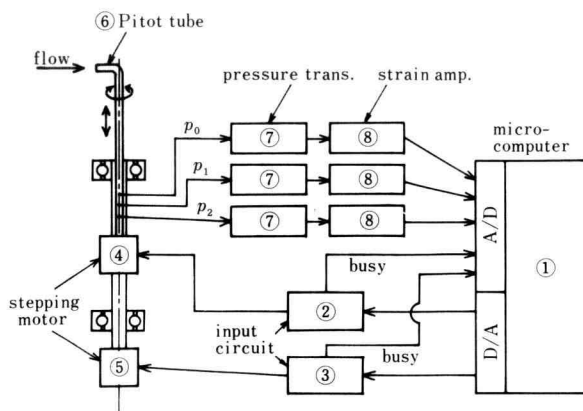


Fig. 1. 自動計測システムの概要

ベース位置をそれぞれ独立して設定できるようにした。これにより短時間で、かつ無人で速度分布の測定ができるようになった。

2. システムの構成

本自動計測システムの特徴はステッピングモータを2台使用していることであり、それとともなマイクロコンピュータからの制御信号はトラバース用と流れ角用の2組を必要とする。一方、ピトー管からの圧力データは自動検定システム^{2),3)}と同様に、圧力変換器と動ひずみ測定器を介してA/D変換によりマイクロコンピュータ内に取込まれる。

計測システムの概要をFig. 1に示す。システムはピトー管の角度設定、位置設定および圧力データの取込みといった一連の操作を1台のマイクロコンピュータで行うようになっており、これを中心としてピトー管制御側とデータ取込み側とに分けられる。

制御側はマイクロコンピュータからの出力信号によって、ピトー管の角度設定、位置設定を行う部分である。Fig. 1において、ステッピングモータは角度設定用④とトラバース位置設定用⑤の2台があり、それぞれに対してスタート信号(決められたステップ数だけモータを回転させる)と回転方向信号(ステッピングモータ軸の回転方向を指定する)の2種類ずつの信号がマイクロコンピュータ①からD/A出力され、入力回路②, ③を介して送られている。これらによってピトー管⑥の設定を行うようになっている。なお、自動的にトラバースを行うため移動に要する時間が短い、

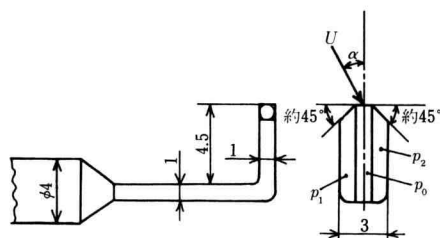


Fig. 2. 供試ピトー管 (単位: mm)

無駄な動きがない、位置設定の精度が良いなどの利点がある。

データ取込み側はピトー管⑥からの圧力データをマイクロコンピュータ①に取込む部分である。ピトー管の三孔の圧力はそれぞれ圧力変換器⑦によって電気信号に変換され、動ひずみ測定器⑧を経た後、A/D変換されてマイクロコンピュータ①内に取込まれる。圧力変換器を用いているため、圧力が定常値に達するまでの時間が短く、さらに微小な圧力の場合にもそれに応じた圧力変換器を用いれば測定精度の向上が期待できるなどの利点がある。また、圧力データを連続してサンプリングし、圧力の変化を捕えているため、圧力が定常状態になったかどうかの判断が容易に行われる。

供試ピトー管の標準寸法をFig. 2に示す。外径 $\phi 1$ mmのステンレス管3本をはんだ付けし、先端を図の形状に加工した。3本の導圧管はビニール管によって圧力変換器と接続されている。

三孔ピトー管のトラバース装置をFig. 3に示す。角

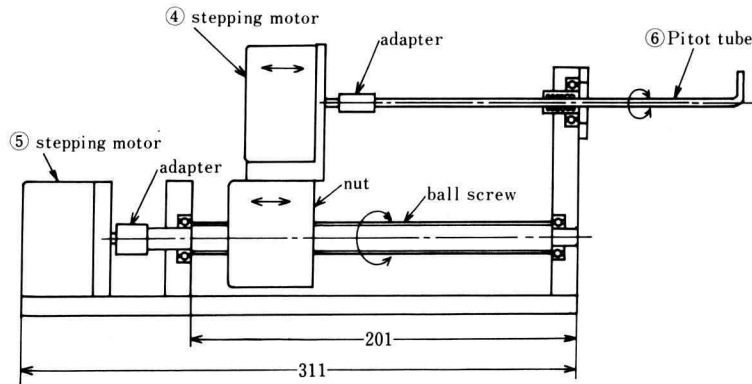


Fig. 3. 三孔ピトー管トラバース装置 (単位: mm)

度設定用ステッピングモータ④はピトー管取付け用のアダプタと直結されており、ピトー管を 0.9° 単位(1パルス当り 0.9°)で設定することができる。なお、角度設定誤差は $\pm 0.05^\circ$ 以下である。トラバース位置設定用ステッピングモータ⑤はボールねじ(ピッチ5 mm)に直結されており、これを回転させるとナットが軸方向にスライドする。ナットには角度設定用ステッピングモータが取付けられているので、ピトー管はナットおよび角度設定用ステッピングモータと一体となってトラバースされることになる。トラバースは $12.5 \mu\text{m}$ 単位で設定でき、設定累積誤差はおよそ $\pm 20 \mu\text{m}$ 以下である。また最大ストロークは120 mmである。

3. 測定方法

ここで、本自動計測システムによる速度分布の測定方法について説明する。自動計測用プログラムの流れ図をFig. 4に示す。まず速度分布を測定する際のトラバース範囲およびトラバース間隔、さらにレイノルズ数を算出するために必要な代表長さ(供試ピトー管ではステンレス管の外径, 1 mmをとった)および動粘度等を入力する。初期設定位置にトラバース後、測定を開始する。ピトー管を移動または回転させた後はまわりの流れが非定常状態になること、または圧力測定系の応答性などにより圧力データが定常値となるまでに時間がかかる。そこで、本システムでは圧力データを連続してサンプリングし、圧力が定常値と判断されるまでそれを続けるようになっている。圧力が定常値に達したかどうかの判断は、昨年度開発した自動検定シ

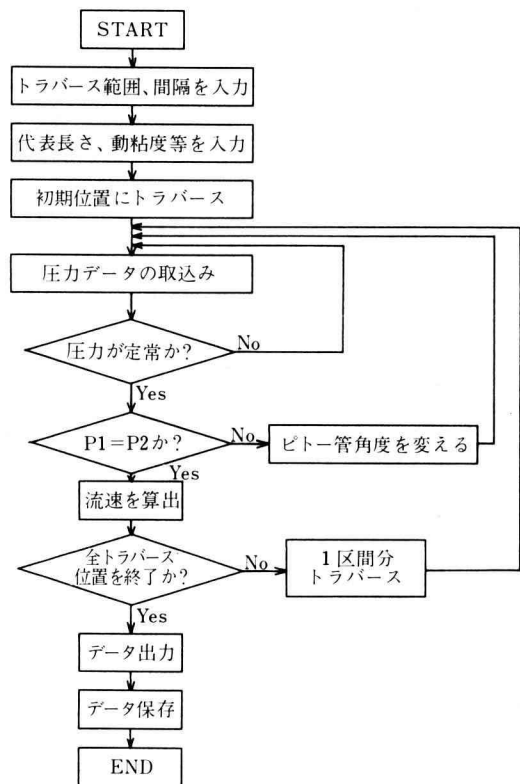


Fig. 4. 自動計測流れ図

ステム³⁾と同様に、三孔の各圧力値をそれぞれ前にサンプリングした値と比較し、それらの差がある基準値(圧力の判断基準値)より小さくなったときに定常状態に達したと判断する方法をとった。圧力の定常値が得

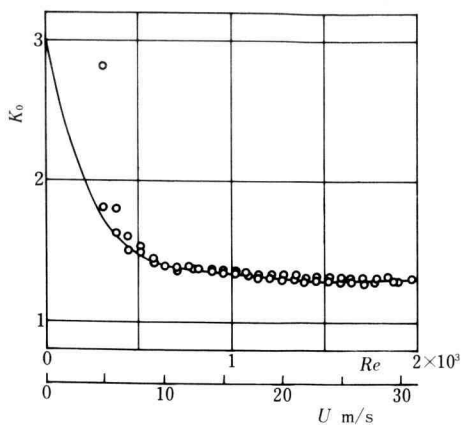


Fig. 5. ピトー管検定曲線

られると、次に二つの側管の圧力 p_1 と p_2 を比較し、これらが一致する方向にピトー管を回転させる。これはピトー管を流れ方向に向けさせるためのものであり、 p_1 と p_2 の差が最小になったとき流れ方向とピトー管の角度は 0.45° 以下になり（1 ステップ 0.9° であるため）、ピトー管と流れ方向が一致したと判断する。 p_1 と p_2 が最小になった段階で流速を算出する。以下順々にトラバースを行い、同様に各点の流速を求めていき、速度分布を計測する。

次に各点における流速の求め方を説明する。あらかじめ予備実験を行い、使用するピトー管のピトー管係数 K_0 をレイノルズ数 Re に対して検定しておく必要がある。検定では、三孔ピトー管の側管の圧力 p_1 と p_2 が一致する方向のときをピトー管が流れの方向を向いていると定義し、この状態でのピトー管係数を K_0 とし、次式で算出する。

$$K_0 = U \sqrt{\frac{\rho}{2(p_0 - p_1)}} = U \sqrt{\frac{\rho}{2(p_0 - p_2)}} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 U は流速、 ρ は流体の密度、 p_0 は全圧管の圧力である。Fig. 5 に検定結果の一例を示す。検定で得られたピトー管係数 K_0 を次式のようにレイノルズ数 Re のべき級数で表しておく。

$$K_0 = \sum_{i=0}^m A_i Re^i \quad \dots\dots(2)$$

A_i は検定で求めるべき係数であり、最小二乗法によって算出する。 i は次数であり、 m は多項式の最高次数である。求められた係数 A_i を自動計測プログラムに組

入れておけば、 K_0 と Re の関係が明確になる。一方、自動計測時に測定された圧力 p_0 , p_1 , p_2 から流速 U を求めるには次のようにする。側圧管の圧力 p_1 と p_2 の差は最小になるようにピトー管を流れ方向に向けるのであるが、必ずしも一致するわけではないので、側管の圧力は両者の平均値を用い、次式によって流速 U を求める。

$$U = K_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(p_0 - \frac{p_1 + p_2}{2} \right)} \quad \dots\dots(3)$$

式 (2) および式 (3) において、流速 U とピトー管係数 K_0 はともに未知数であるので、繰返し計算法で式 (2), (3) を満足する U と K_0 を求める。

なお、Fig. 5 の検定例では 5 次まで ($m=5$) の項でピトー管係数 K_0 を近似し、曲線で示してある。レイノルズ数がおおよそ 600 以上では実験点と近似曲線がほぼ一致していることがわかる。ただし、それ以下の範囲では実験点のばらつきが大きくなり、また実験点と曲線の差が大きいのでさらに精度の良い検定が必要となる。したがって、Fig. 5 の検定結果の適用範囲はレイノルズ数が 600 以上のときとなる。

4. 応用例

自動計測システムを用いて速度分布を測定した例を次に示す。

4.1 風洞出口部の流れ

Fig. 6 に示すような風洞出口部の速度分布を測った。風洞出口の寸法は縦 146 mm、横 108 mm である。

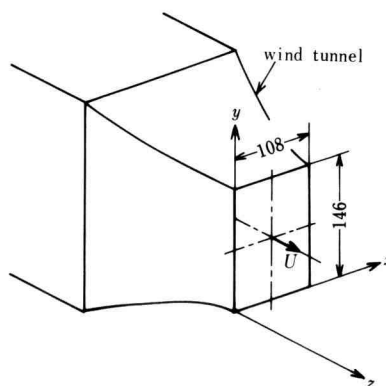


Fig. 6. 風洞出口部 (単位: mm)

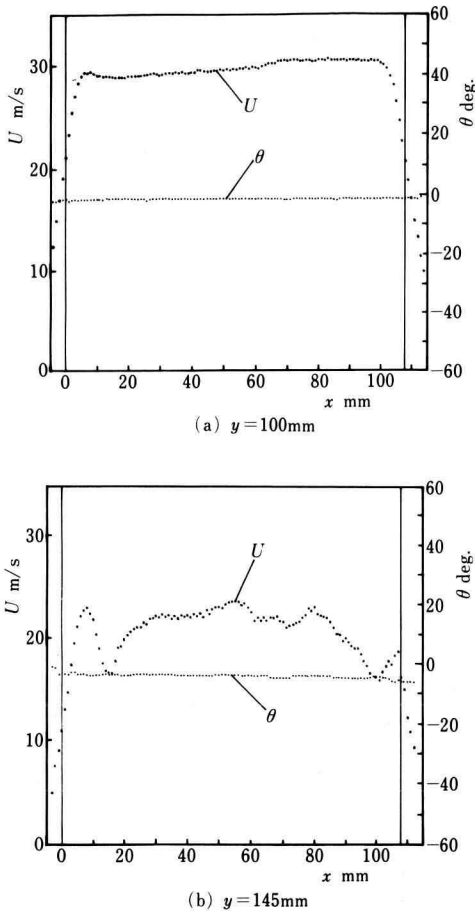


Fig. 7. 風洞出口の速度分布 ($U \approx 30$ m/s, $z = 10$ mm)

水平方向 (x 方向) にオート・トラバースを行った。トラバース間隔は 1 mm, 範囲は 110 mm, したがって 1 回の計測につき 111 点の流速を測定した。鉛直方向 (y 方向) には 5 mm おきに 30 ケ所でトラバース装置の高さを設定し, それぞれの位置の水平面内で自動計測を行った。なお測定時, 風洞出口流速は 30 m/s ($Re = 1920$) に設定した。

Fig. 7 に測定結果の例を示す。Fig. 7 (a) は高さ $y = 100$ mm, 風洞出口からの距離 $z = 10$ mm の速度分布であり, 横軸はトラバース距離, 縦軸は流速 U および流れ角 θ を示す。分布はやや非対称であるが, ほぼ一様に近い分布となっている。Fig. 7 (b) は $y = 145$ mm, $z = 10$ mm の速度分布を示し, 風洞上壁まで 1 mm であるので境界層の影響で流速は 20 m/s 前後と小さく

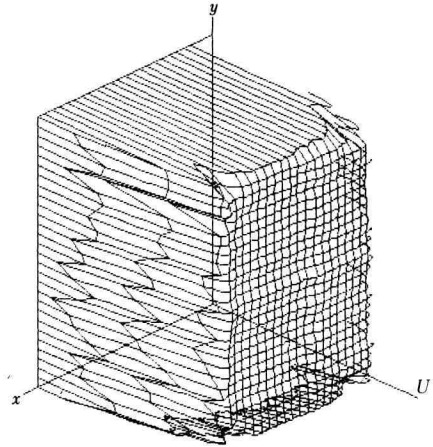


Fig. 8. 速度分布の三次元表示 ($U = 30$ m/s, $z = 10$ mm)

なっている。また, 速度分布の両端付近で流速が大きくなり, ピークをもっていることがわかる。

各高さで測定された速度分布から得られた結果を三次元的に表したものが, Fig. 8 である。全般的に見てはほぼ一様流であることがわかるが, 長方形の 4 ケ所のコーナ付近は流速分布に局部的なピークをもっている。これは, く形断面流路の二次流れによるものと思われる。

なお, Fig. 7 および Fig. 8 の測定の際, 一つ velocity 分布 (111 点の流速) を測定するのに要した時間は 20~30 分であり, 1 ケ所当りの所要時間は 15 秒前後であった。

4.2 風洞出口後方の流れ

Fig. 6 の風洞出口から下流側の速度分布を測定した。出口からの距離は $z = 10, 100, 300, 500, 650$ mm で, 高さは風洞の中心位置 $y = 73$ mm とし, x 方向に自動計測を行った。トラバース間隔は 1 mm, 範囲は 110 mm (111 点) で測定した。結果を Fig. 9 に示す。横軸の x' は風洞の中心軸から流れと直角に x 方向に測った距離である。風洞出口直後ではほぼ一様であった速度分布が下流にいくにしたがって Schlichting の分布に近づいていくのがわかる。本測定例においても, 1 点当りの所要時間は 14~15 秒であった。測定精度に関しては, 中心軸から離れて流速が 5 m/s 程度以下の所では圧力測定誤差が大きくなり, またピトー管係数 K_0 の信頼性が悪く, 正しい流速は測られていないと思われる。低速域を精度よく測定するためには圧力測度を高

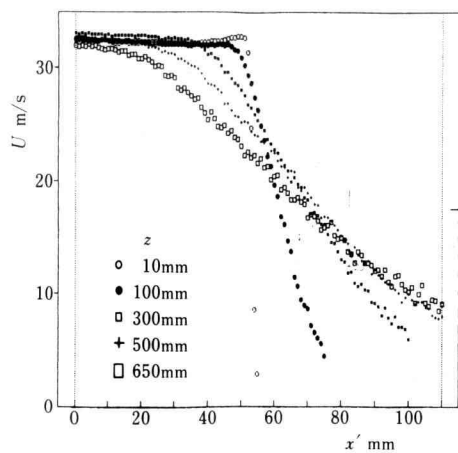


Fig. 9 風洞出口後方の流れ ($U=32.8$ m/s, $y=73$ mm)

めること、低レイノルズ数域におけるピトー管係数の検定を精度よく行っておくことなどが必要である。

5. 結 言

マイクロコンピュータを用いた三孔ピトー管による自動計測システムを開発した。そのおもな特徴は次の

通りである。

- (1) 速度分布の測定時間が短縮され、1点につき15秒前後で測定が可能である。また、現在流れ方向検出の方法を改良中であり、これにより計測時間を1/2以下に短縮できるものと考えている。
- (2) 測定が無人で行われる。
- (3) トラバース位置が精度よく設定でき、累積誤差は $20\mu\text{m}$ 以下である。

最後に、本研究を進めるに当って本学赤池志郎教授、根本光正助手、ならびに当時本学学生の會田武彦、秋山正、水野眞吾、山田和秀の諸氏の協力を受けたので、ここに厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 豊倉, 亀本: 流体力学, 実教出版, p. 57.
- 2) 石綿: 日本機械学会, 講論, 第63期全国大会, (1985).
- 3) 石綿: 幾徳工大研究報告, B理工学編, 10号 (1986), p. 13.