

三孔ピトー管を用いた速度分布自動計測 システムの高速化

石綿良三・川口隆史

Reduction in the Time of Measuring Velocity Distributions
by a Cobra Pitot Probe

Ryozo ISHIWATA and Takashi KAWAGUCHI

Abstract

Already one of authors developed the flow measurement system which consisted of a cobra Pitot probe unit with a traverse function and a microcomputer that controlled the system. The aim of this system was an automatic measurement of velocity distributions of two-dimensional flow. And it was clear that the system could do the measurement by itself and the measurement time by the system was shorter than that by a manual operation.

In the system a Pitot probe coefficient was determined only by the Reynolds number. So the Pitot probe was directed towards the upper stream and the pressure was measured. It may be supposed that a Pitot probe coefficient depends on the Reynolds number and a Pitot probe angle for the flow direction. Therefore the Pitot probe didn't need to be directed to its upper stream during the measurement, if its coefficient was decided by the Reynolds number and the Pitot probe angle.

Actually we improved the system, that is, we expressed the Pitot probe coefficient by a polynomial for the Reynolds number and the Pitot probe angle, and made the system measure the velocity distributions of two-dimensional flow automatically without directing the Pitot probe just towards the upper stream. According to some examples we found that the measurement time by the present system was about 30% shorter than that by the previous system.

1. 緒 言

比較的製作の容易な三孔ピトー管は、二次元的な流れの速度測定に多く使われている¹⁻³⁾。

既に、著者の一人によって、三孔ピトー管とマイクロコンピュータを組み合わせて、二次元的な流れの速度分布を自動計測するシステムが開発された^{4,5)}。このシステムにより、速度分布の測定が無人で短時間のうちに行えるようになった。

ピトー管係数は、レイノルズ数と流れ方向に対するピトー管の傾き角に依存すると考えられる。先の自動計測システムでは、あらかじめ傾き角が 0° のときのレイノルズ数に対してピトー管係数を求めた。したがって、自動計測ではピトー管を流れ方向に向けてから各

孔の圧力を測定した。ところでこの方法を変えて、傾き角の変化に対してもピトー管係数を求めることにすれば、自動計測中にピトー管を流れの方向に向けず流速の測定が行えると考えられる。

実際に、ピトー管係数をレイノルズ数と傾き角の多項式を用いて表現し、ピトー管の流れ方向の角度を変えずに二次元の流れ場の自動計測を行った。この結果、測定時間がより短縮されたが、先の自動計測システムと同様の速度分布が得られた。

2. システムの構成

システムの概要を Fig. 1 に示す。ハード的には、これまでのシステムと同じである⁵⁾。

供試ピトー管⑥の寸法を Fig. 2 に示す。材質は、ステンレスである。

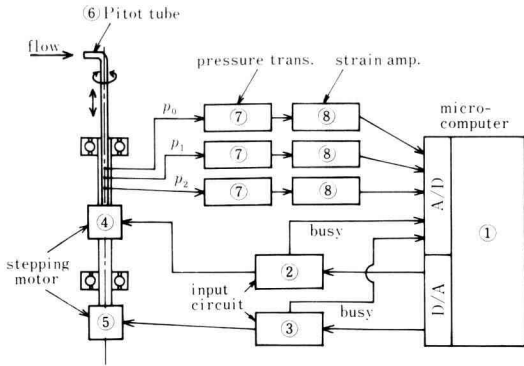


Fig. 1. Automatic flow measurement system

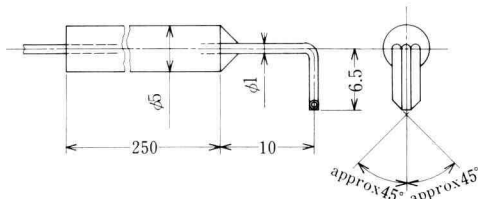


Fig. 2. Cobra Pitot probe (unit : mm)

ピトー管トラバース装置を Fig. 3 に示す。ステッピングモータは、ピトー管の傾き角設定用④とトラバース位置設定用⑤の二台がある。いずれも、マイクロコンピュータ①からD/A出力され、入力回路②を経た電圧信号によって制御される。この信号には、モータ軸の回転方向を指示する信号とモータ軸を指定された角度だけ回転させる信号の二種類がある。ピトー管の傾き角度の設定は、 0.9° 単位で行える。角度の設定誤差は、 $\pm 0.05^\circ$ 以内である。トラバースは $12.5 \mu\text{m}$ 単位

で設定でき、設定累積誤差はおおよそ $\pm 20 \mu\text{m}$ 以下であり、最大ストロークは 120 mm である。

ピトー管係数の検定、すなわち、ピトー管係数をレイノルズ数と傾き角の多項式を用いて表現すること及び速度分布の測定は、BASIC 言語 (一部機械語) で記述されたプログラムにより自動的に実行される。

3. 検 定 方 法

レイノルズ数を算出するために必要な代表長さは、供試ピトー管の外径 (この検定では 1 mm) をとった。

ピトー管係数 K を

$$K = \frac{U}{\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p_2)}} \quad (\alpha \geq 0), \quad (1)$$

$$K = \frac{U}{\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p_1)}} \quad (\alpha < 0) \quad (2)$$

で定めた。ただし、 U は流速、 ρ は流体の密度で、 p_0 、 p_1 、 p_2 は、ピトー管内の圧力であり Fig. 4 による。

K は、レイノルズ数 Re とピトー管角度 α に依存すると考えられる。そこで、 K を Re に対して 4 次の、 α に対して 6 次の多項式で近似した：

$$K = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^6 a_{ij} Re^i \alpha^j. \quad (3)$$

無次元化圧力 P を

$$P = \frac{p_0 - p_1}{p_0 - p_2} \quad (\alpha \geq 0), \quad (4)$$

$$P = \frac{p_0 - p_2}{p_0 - p_1} \quad (\alpha < 0) \quad (5)$$

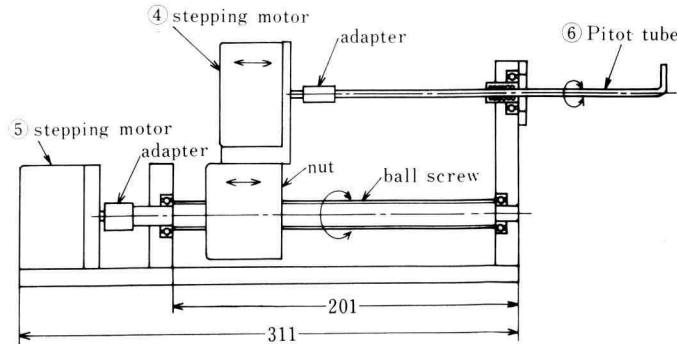


Fig. 3. Traverse device (unit : mm)

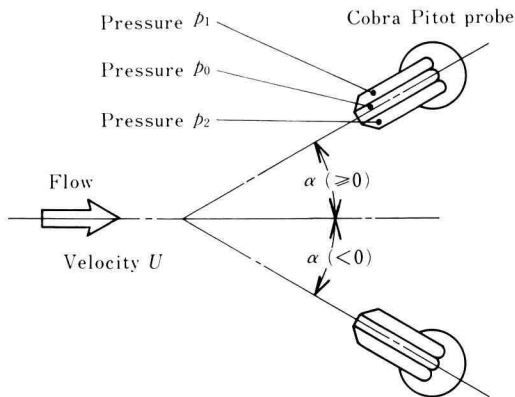


Fig. 4. Pitot probe angle α and pressures in pipes p_0, p_1, p_2

で定義した。 P もレイノルズ数 Re とピトー管角度 α に依存すると考えられる。そこで、やはり、 α を Re に対して 4 次の、 P に対して 6 次の多項式で近似した：

$$\alpha = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^6 b_{ij} Re^i P^j. \quad (6)$$

本システムによる、三孔ピトー管の検定は、以下のように行われた。

- [1] JIS 標準ピトー管とゲッチングマンノメータを用いて、風速を 30 m/s から 5 m/s まで、1 m/s 毎に設定した。三孔ピトー管の流れに対する傾き：ピトー管角度は、 $+45^\circ$ から -45° まで、 1.8° 毎に変化させた。
- [2] ピトー管の角度を変えた直後、ピトー管の近傍で流れが乱れる。流れが定常状態に達するまで待つて、測定を行わなければならない。三孔ピトー管のすべての孔の圧力が、連続してサンプリングされ、各孔の一回前に測定された圧力との差が 2Pa 以下になったならば、ピトー管まわりの流れが定常状態になったと判断し、圧力の測定を開始した。圧力を 5 回測定し、その平均を測定値とした。
- [3] これらの測定値をもとに、最小二乗法により、 a_{ij}, b_{ij} ($i=0, 1, \dots, 4; j=0, 1, \dots, 6$) を定めた。

4. 検定結果

ピトー管係数 K -レイノルズ数 Re -ピトー管の傾き

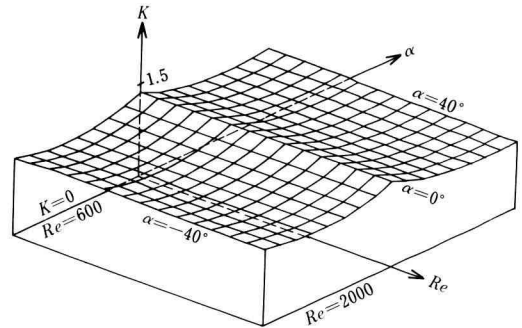


Fig. 5. K - Re - α surface

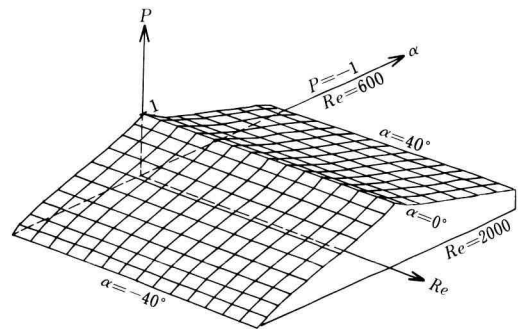


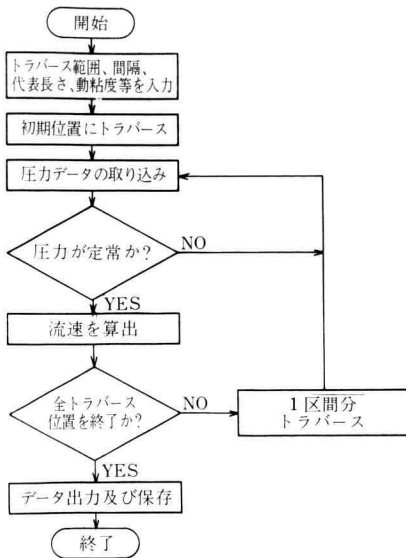
Fig. 6. P - Re - α surface

角 α の近似曲面を Fig. 5 に、無次元化圧力 P -レイノルズ数 Re -ピトー管の傾き角 α の近似曲面を Fig. 6 に示す。尚、これらをディスプレイ上に表示するプログラムも開発した。

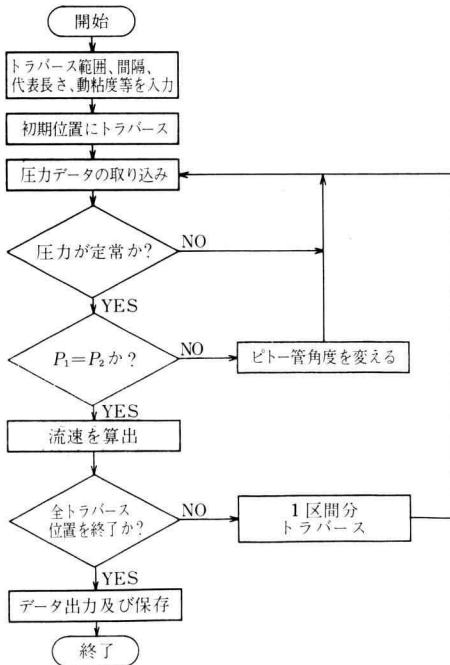
5. 測定方法

本システムによる二次元流れ場の速度分布の測定方法（以下、Ver. 1.2 と呼ぶ）について述べる。既に、開発された自動計測システム（以下、Ver. 0.0 と呼ぶ⁵⁾との違いは、ピトー管の傾き角を変えずに測定を行うことである。自動計測用プログラムの流れ図を Fig. 7 に示す。

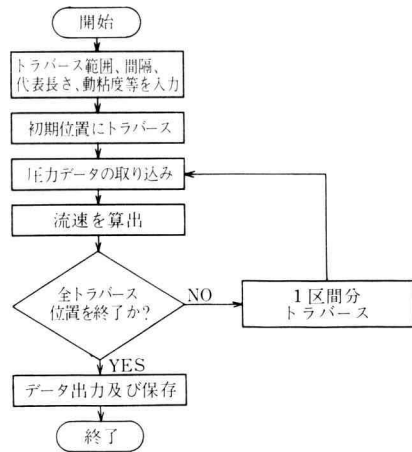
- [1] 現在のピトー管位置、測定のためのトラバース範囲とトラバース間隔、現在のピトー管角度、レイノルズ数算出に必要な代表長さ（供試ピトー管の外径）、流体の動粘度、流体の密度を入力する。
- [2] ピトー管を初期設定位置までトラバースし、測定を開始する。



(a) Ver. 1.2



(b) Ver. 0.0



(c) Ver. 2.0

Fig. 7. Flow chart of measurement

[3] ピトー管が移動、または、角度を変えた直後、ピトー管の近傍で流れが乱れる。流れが定常状態に達するまで待って、測定を行わなければならない。三孔ピトー管のすべての孔の圧力が連続してサンプリングされ、各孔の一回前に測定された圧力との差が2Pa以下になったならば、ピトー管まわりの流れが定常状態になったと判断し、圧力の測定を開始する。

また、定常状態に達したか、判断せずに、圧力の測定を開始するプログラム（以下、Ver. 2.0と呼ぶ）も用意し、判断する場合と比較した。

[4] 測定された三孔の圧力より、無次元化圧力を計算する。

[5] 検定範囲内のあるレイノルズ数を仮定し、これと無次元化圧力から、式(6)で、ピトー管の傾き角を求める。

[6] ピトー管の傾き角とレイノルズ数を用いて、式(3)よりピトー管係数を算出し、流速を求める。

[7] [6]で求めた流速に対するレイノルズ数と仮定したレイノルズ数の相対誤差が、0.005以下であれば、[6]で求めた流速を現在のピトー管位置の流速とし、次の位置へピトー管をトラバースする。そうでない場合、[6]で求めた流速のレイノルズ数を新たな仮定値として式(6)よりピトー管の傾き角を求め、[6]、[7]を

繰り返す。

- [8] すべての測定を終了すると、データをディスクに書き込む。
- [9] 流速分布、ピトー管の傾き角の測定結果を必要に応じて、ディスプレイ上に表示する。複数の実験結果を同時に表示させることも可能である。

6. 測定例

Ver. 1.2, Ver. 0.0, Ver. 2.0 を用いて、速度分布を測定した例を以下に示す。

Fig. 8 に示す曲がりダクト出口部の速度分布を測定した。水平方向(x 軸方向)にオート・トラバースを行った。トラバースの位置は曲がりダクト出口中心線上($y = 73 \text{ mm}$)、トラバース間隔は 1 mm 、範囲は 110 mm で、 111 点の速度を測定した。また、速度を三通りに変えた。結果を Fig. 9, ..., Fig. 14 に示す。測定に要した時間を Table 1 に示す。

Ver. 1.2 と Ver. 0.0 の間には若干の差があるが、ほぼ等しい結果が得られた。この差は測定方法の違いにより生じたのではなく、検定の精度に影響されていると思われる。

Ver. 2.0 と Ver. 1.2 の結果の差は、流速が大きいとときに大きくなる。また、Ver. 1.2, Ver. 0.0 では、流速が大きいほど測定時間を要している。流速が大きいとときには、ピトー管が動くと、流れが定常状態に達するまで時間がかかるためである。特に、Ver. 2.0 では定常状態になる前に圧力の測定を開始していると考えられ

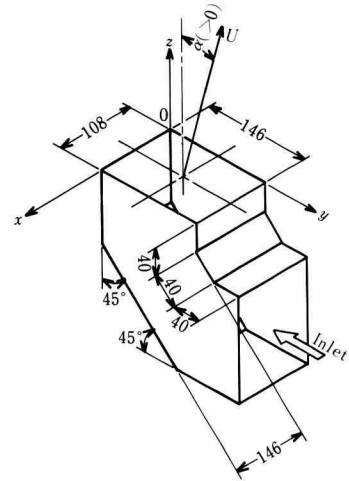
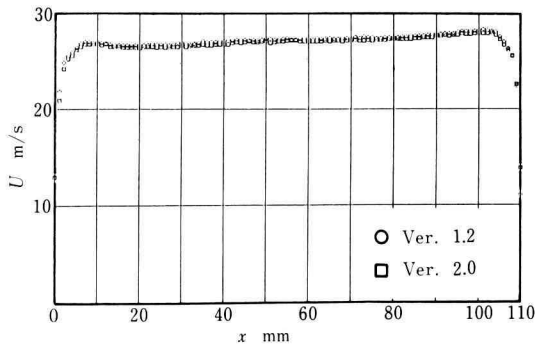


Fig. 8. Bent duct (unit : mm)

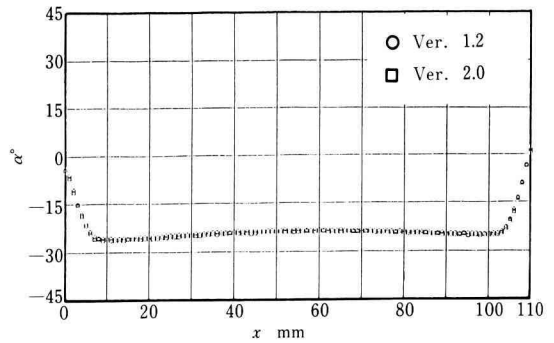
Table 1. Measurement time (unit : s)

system \ velocity [m/s]	Ver. 1.2	Ver. 2.0	Ver. 0.0
12.52	347	257	939
19.96	359	253	1022
27.44	375	255	1224

る。これは、流速によらず測定時間がほぼ一定であった事からもわかる。

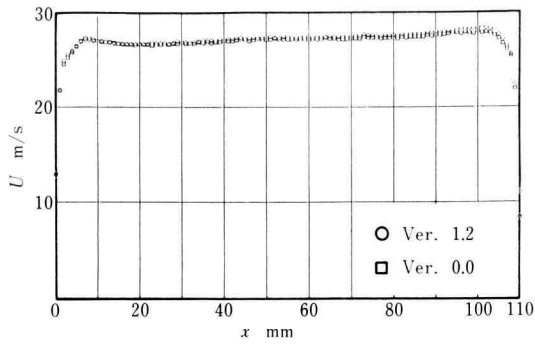


(a) Velocity distribution

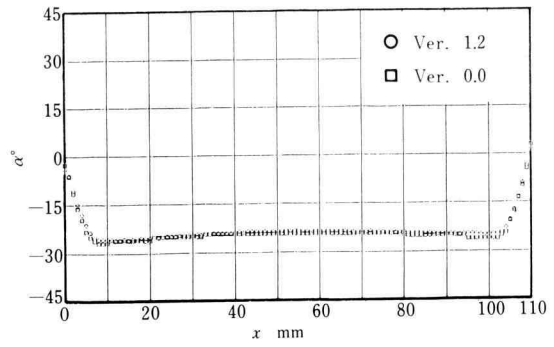


(b) Flow angle

Fig. 9. Velocity distribution and flow angle (Ver. 1.2-Ver. 2.0)

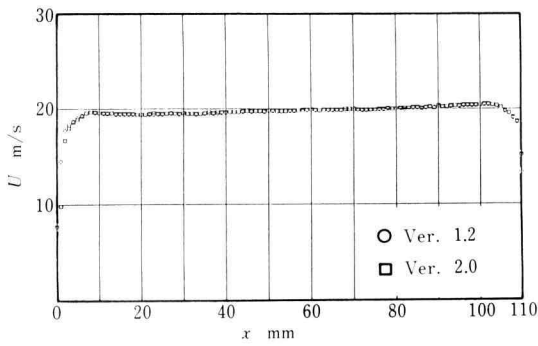


(a) Velocity distribution

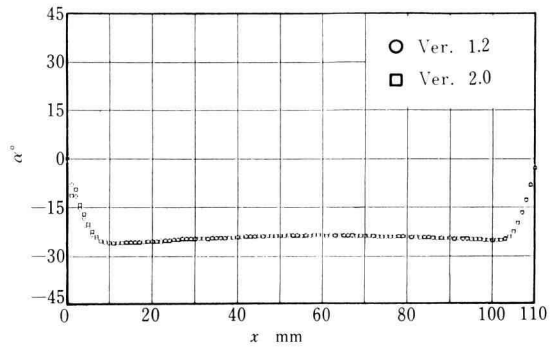


(b) Flow angle

Fig. 10. Velocity distribution and flow angle (Ver. 1.2-Ver. 0.0)

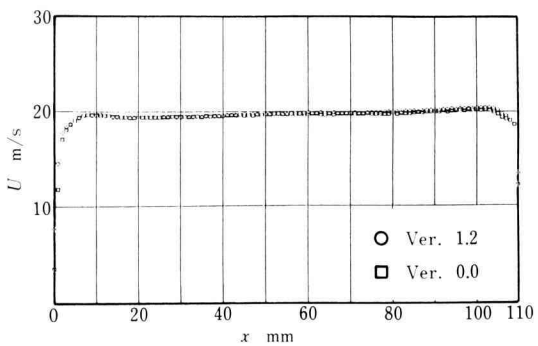


(a) Velocity distribution

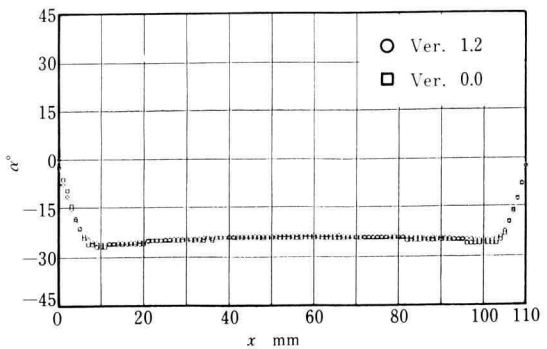


(b) Flow angle

Fig. 11. Velocity distribution and flow angle (Ver. 1.2-Ver. 2.0)



(a) Velocity distribution



(b) Flow angle

Fig. 12. Velocity distribution and flow angle (Ver. 1.2-Ver. 0.0)

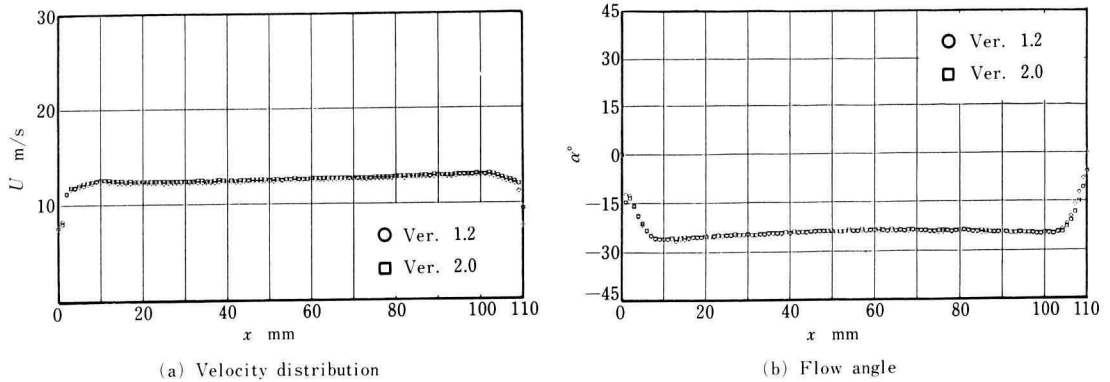


Fig. 13. Velocity distribution and flow angle (Ver. 1.2-Ver. 2.0)

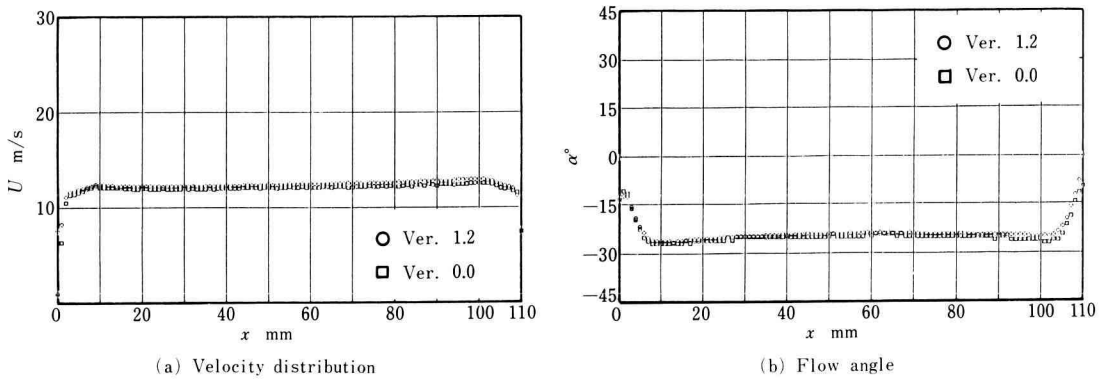


Fig. 14. Velocity distribution and flow angle (Ver. 1.2-Ver 0.0)

7. 結 言

既に開発された三孔ピトー管とマイクロコンピュータを組み合わせた二次元の流れ場の速度分布を自動計測するシステムを改良した。即ち、ピトー管係数をレイノルズ数とピトー管の傾き角の関数として表すことにより、ピトー管を流れの方向に向けずに圧力の測定を行い、測定時間を約三分の一に短縮した。得られた速度分布は従来のシステムと同様のものである。

本システムの開発は、当時本学学生の矢崎雅孝氏に協力を受けた。ここに、記して、謝意を表す。

文 献

- 1) 豊倉, 亀本: 流体力学, (1979), 57, 実教出版.
- 2) 富田, 山崎: 水力学, (1985), 203, 産業図書.
- 3) 日本機械学会: 技術資料 流体計測法, (1985), 76.
- 4) 石綿: 幾徳工業大学研究報告 B理工学編, 10, (1986), 13.
- 5) 石綿: 幾徳工業大学研究報告 B理工学編, 11, (1987), 41.