高感度小形圧力センサの多点走査方式
による三次元流れの計測*

井上 雅弘**, 山本 芳久**, 富岡 英俊***

Three-Dimensional Flow Measurement by Means of
Multi-sampling Scan with a Small Pressure Sensor

Masahiro INOUE, Yoshihisa YAMAMOTO, and Hidetoshi TOMIOKA

A technique for three-dimensional flow measurement has been developed by use of a single pressure sensor buried in a cone-type head. The probe actuator involves a stepping motor to rotate it about its axis as instructed by a microcomputer. A great number of output data are obtained with random sampling pulses at each rotating angle, and the average and the variance of these outputs are calculated by the on-line computer. The three-dimensional velocity components and pressure can be obtained by solving the calibration equations. The turbulent intensity is also estimated from the variance. The accuracy of the measurement has been investigated in a potential core and fully developed turbulent region of a circular jet.

Key Words: Flow Measurement, Pressure Sensor, Probe, Mean Velocity Vector, Pressure Measurement, Multi-sampling

1. ま え が き

流れが時間的に変動する三次元流れ場において、流体の変動現象や乱流現象を計測したいという要求は、流体工学の分野のみならず工業界全般に極めて多い。特に三次元変動流の計測は、流体を扱うあらゆる機械および装置の損失のメカニズムや内部流動状態を解明するうえで重要である。これまで速度の計測に対しては、複数の熱線を用いる多線式プローブや、レーザ流速計があるが、圧力分布やその変動量の測定ができないのみならず、前者には汚れによる出力低下や検定作業の複雑さ、また後者にはシーディング技術など実用上面倒な問題がある。

先に著者らは多線式熱線の欠点を考慮して、単一傾斜熱線をパルスモータに直結し、熱線出力の抽出と、パルスモータの回転をマイクロコンピュータで制御させ、多数のデータを取り込む多点走査方式を採用し、データを統計的に処理することによって三次元流れの計測を検定作業を含めてシステム化した⁽¹⁾、更に本研究では高感度小形圧力センサを用い、上記の方法を

応用して、三次元流れ場の圧力の平均値とその変動量および平均速度ベクトルなどを求める方法を検討した。

2. 座 標 系 と 記 号

本研究では、図1に示すように、プローブ軸を z 軸とし、プローブ軸に垂直な面を xy 平面とした流れ場固定座標系 (x, y, z) を使用する。主な記号を以下に示す。

V : 速度ベクトル,

V : 流速,

ϕ : 流れのピッチ角,

ϕ : ヨー角,

図1 座標系とピッチ角, 回転角の符号

* 昭和61年10月7日 第64期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年3月27日.

** 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1).

*** 准員, 旭化成(株) (〒882 延岡市中原町5-4960).

β : プロープ回転角,
 β_0 : 校正時の最高出力点を示す回転角,
 $\beta^* = \beta - \beta_0$,
 F : センサ出力,
 P_t : 全圧,
 P_s : 静圧,
 q : 動圧,
 C_t : 全圧係数,
 C_s : 静圧係数
 なお, $\phi, \beta(\phi)$ の符号は図 1 のように定めた.

3. 実験装置

3.1 プロープの構造 図 2 に本実験で使用したプロープの構造を示す. 圧力センサは直径 1.6 mm, 定格圧力 34.3 kPa, 固有振動数 150 kHz で, 真ちゅう製の滑らかに仕上げられた頂角 60° の円すい形の取圧部に封入され, 取圧部の中央に, 母線に垂直に直径 0.3 mm の圧力孔があけられている. この取圧部は気密を保ってプロープサポートにねじ止めされている. また Reference 管は大気開放されている. なお, 増幅器 (増幅率 5 000/3 倍) を介したセンサ出力と差圧の関係はリニアである.

3.2 計測システム 図 3 に本測定システムの概要を示す. 圧力センサのプロープ軸にパルスモータ (一パルスで 0.9° 動く) を直結し, マイクロコンピュータからパルスモータのドライバ (図の PM driver) に信号を送ってプロープを回転させ, センサの方向を設定する. センサの方向が設定されると, 96~1 638 μ s の間隔でランダムに出力抽出パルス (SP) が発生し, A-D 変換後, あらかじめ設定した個数 (N 個: 本実験では

$N=1\,000$) のデータがマイクロコンピュータに読み込まれ, 積算および二乗積算されて, 平均値 ($\bar{F}=1/N \cdot \sum F_i$) と分散値 ($\bar{F}^2=1/N \cdot \sum F_i^2 - \bar{F}^2$) がオンラインで計算される. なお, プロープはほぼ最小出力から最大出力を経て再び最小出力が得られるように約 240° 回転させ, 設定角 1.8° ごとに上記のデータの収集を行った.

4. 測定方程式と解法

4.1 測定方程式 プロープの回転角と流れの圧力, 速度, 方向によりセンサの出力は異なるので, その関係を整理し, 測定方程式をつくるために, 出口直径 50 mm の円形ノズルから流出する空気の流れのポテンシャルコア中で 40~90 m/s の流速に対し, ピッチ角 ϕ を変化させて校正を行った. なお, ノズル差圧とポテンシャルコア内の流速の関係はあらかじめ標準ピトー管で校正されている. 図 4 は $V=70$ m/s の場合の ϕ によるセンサ出力 F とプロープ回転角 β^* の関係である. 図 4 中, 圧力一定の領域は死水域を, 圧力極小点は流れのはく離点を示す. また実線は F と β^* の関係を

$$F = \alpha_4 \beta^{*4} + \alpha_3 \beta^{*3} + \dots + \alpha_0 \quad (1)$$

と置きはく離点から死水域までを除いた校正データによって各係数を最小二乗法で計算させた近似曲線である. β^* は曲線の最高出力点を $\beta=0$ としたものでその点の回転角を β_0 とすると $\beta^* = \beta - \beta_0$ である.

ところで, 式 (1) を静圧 (Reference 圧力との差) $P_s \approx 0$ の一般の流れ場に適用するためには, ある基準の圧力幅で式 (1) を無次元化する必要がある. この値としてはまず最大出力値と最小出力値 (極小点の出力値)

図 2 プロープの構造

図 3 計測システム

図 4 校正曲線の例

の差 $F_{\max} - F_{\min}$ が考えられるが、乱れが大きい場合、特に $F_{\min}$ が決定しにくいこと、および異常値をひろう恐れがあることなどを考慮して、本研究では $F_{\max} - F_{-50}$ で無次元化した。 F_{-50} は $\beta^* = -50^\circ$ の出力値である。 $\phi = 0^\circ$ を ϕ_0 とすると、式(1)は、

$$\begin{aligned} [F - \alpha_0]_{\phi, V, \beta^*} &= [F - \alpha_0]_{\phi, V, \beta^*} / [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi, V} \\ &\times [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi, V} / [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi_0, V} \times [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi_0, V} = f_1 \times f_2 \times f_3 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 f_1, f_2, f_3 は校正データを整理すると、

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= [F - \alpha_0]_{\phi, V, \beta^*} / [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi, V} = f_1(\phi, \beta^*) \\ f_2 &= [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi, V} / [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi_0, V} = f_2(\phi) \\ f_3 &= [F_{\max} - F_{-50}]_{\phi_0, V} = f_3(V) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で表されるので、 f_1, f_2, f_3 のそれぞれの変数に対する関数形を定めて測定方程式とする。

4.2 平均速度ベクトルの求め方 ヨー角、ピッチ角、流速の順に以下のごとく求める。

(1) ヨー角 ϕ 校正においては、最小二乗近似曲線の極大値を示す回転角 β_0 が、 V および ϕ によらない。したがって未知の流れでは、抽出したデータを式(1)で近似し、最大値を示す回転角、 β_m を求めれば、 $\phi = \beta_m - \beta_0$ である。

(ii) ピッチ角 ψ 校正結果から

$$f_1 = A_1(\psi)\beta^{*4} + A_2(\psi)\beta^{*2} \quad (4)$$

$$A_i = A_i(\psi) \quad (i=2, 4) \quad (5)$$

とおくことができる。したがって ψ は式(5)を逆に解けば求まるが、 A_2 のほうが A_4 に比べて、 V の影響が小さいために、 A_2 によった。

(iii) 速度 V 式(2)に $\beta^* = \beta_{-50}^*$ を代入すると、式(3)の関係から、

$$f_3(V) = \frac{[\alpha_0 - F_{-50}]_{\phi, V}}{f_2(\psi)} \quad (6)$$

ψ がわかれば、式(6)を解いて V が求まる。

4.3 圧力の算出 全圧係数として次式を定めた。

$$C_t(\psi) = \frac{F(P_t) - \alpha_0(\psi)}{F(q)} \quad (7)$$

ここに、 P_t ：全圧、 q ：動圧、 $\alpha_0(\psi)$ ：各ピッチ角にお

ける α_0 の値、 $F(P_t), F(q)$ ：全圧、動圧をセンサ出力値 [volt] に換算した値

校正においては、 $P_s \approx 0$ だから式(7)で $P_t = q$ と置き、 $C_t(\psi)$ の ψ に対する関数形を定めれば、

$$F(P_t) = C_t(\psi) \cdot F(q) + \alpha_0(\psi) \quad (8)$$

より P_t を求めることができる。また静圧は死水域における圧力を基準に静圧係数 $C_s(\psi)$ を

$$C_s(\psi) = \frac{P_d(q) - F(P_s)}{F(q)} \quad (9)$$

〔ただし、 $P_d(q)$ ：死水圧に対応する出力値 [volt]、 $F(P_s)$ ：静圧に対応する出力値〕と定義して直接算出を試みたが、 $\psi \leq -15^\circ$ では、流れのパターンが変化して、死水域を確定できなかった。したがって静圧は $P_t - q$ より計算する。

5. 実験結果と考察

5.1 測定精度 本実験での全圧設定範囲は 1.27～5.10 kPa で、最大圧力の場合でも、センサの定格圧力の 1/7 程度である。このため増幅器（増幅率 5000/3 倍）を用いたが、零点ドリフトや温度ドリフトの影響等を考えると、風速 25 m/s 以下では使用しないほうがよい。

次に、校正時の生のデータを用いて 4.2 および 4.3 の方法で平均流速、方向、全圧を求め、それぞれ校正時の設定値と比較して測定精度の検討を行った。図 5 にピッチ角の設定値 ψ_s からの誤差 $\Delta\psi$ を ψ_s に対して、プロットした。図より $\Delta\psi$ はほぼ $\pm 3^\circ$ 以内で、 $\psi \leq$

図 6 流速の測定精度

図 5 ピッチ角の誤差

図 7 全圧の測定精度

図8 噴流の速度分布の測定例

0のほうが、ばらつきがやや大きい。これは式(5)において、 ψ の変化に対する A_2 の変化が $\psi > 0$ のときに比べてかなり小さいためである(図省略)。またヨー角の測定精度は $\pm 1.8^\circ$ 以内にある。

図6と図7にはそれぞれ設定速度および全圧との相対誤差 $\Delta V/V$, $\Delta P_t/P_t$ を ψ_s に対して示した。図6, 7より、速度の誤差はほぼ $\pm 2\%$ 、全圧の誤差は $\pm 4\%$ 以内で、速度誤差の2倍程度であることがわかる。

図8は圧力センサの校正に用いたノズルの出口面から下流300 mmにおける速度分布の測定例で、縦軸は軸方向の流速 U を中心線上の流速 U_m で、横軸は流れの方向に垂直な座標 r を半値幅 $b_{1/2}$ で無次元化してある。(図8では $\eta = r/b_{1/2}$) 実線は円形噴流の理論値(Görter), ●印は標準ピトー管による測定結果である。図8から本プローブの測定値はピトー管による値および理論値に近く、したがって本測定法は平均流速に対しては実用上問題ないと思われる。なお $\eta = 1.2$ 以下で理論値から離れてくるのは、この領域が検定外の低い流速になるためであろう。

5.2 圧力変動 図9に円すいプローブおよびプローブ直後においた熱線風速計の出力波形のスペクトル分布を示している。1 kHz付近に見られるピークは円形噴流固有のもので、円すい形プローブを取り除いた状態でも観察される。熱線出力に対する3 kHzのピーク値はストローハル数を求めることにより、円すいプローブのカルマン渦によるものと推定されるが、円すいプローブの出力波形解析には現れていない。したがって、圧力孔がはく離近傍にないかぎりカルマン渦の影響はない。

図10は熱線により測定した噴流の乱れ度と圧力変動の分散値との関係である。図10中の V は実験時のポテンシャルコア中の流速を示す。分散値は最大出力付近の九つのプローブの設定角に対する値の平均値をとった。両者の相関関係は非常によく、この関係を用いて、圧力変動の分散値から乱れ度を測定することも

図9 出力波形のスペクトル分布

図10 圧力変動の分散値と乱れ度の関係

可能であるが、これらについては、現在なお検討中である。

6. むすび

本研究では、高感度の小形圧力センサを内蔵した円すい形のプローブを試作し、パルスモータで軸のまわりに回転させることによって得られる多数の出力信号を統計的に処理する多点走査方式を用いて、三次元流れの平均速度ベクトルや圧力の平均値などの計測を行った。測定精度はピッチ角で $\pm 3^\circ$ 、ヨー角は $\pm 1.8^\circ$ 以内、流速、全圧でそれぞれ $\pm 2, 4\%$ 程度である。方向や流速の精度は熱線風速計に劣るが、熱線のように汚れによる出力変化や検定作業のわずらわしさがなく、圧力についての情報が得られる利点がある。センサの感度の制約から、25 m/s以下の流速には適用できなかったが、高感度の圧力センサの開発⁽²⁾に伴い、低速への適用と測定精度の向上も期待される。終わりに本実験に協力された当時学生の中野直広、玉利孝徳両君に謝意を表する。

文 献

- (1) 井上・山本, 流れの計測, 13-4 (1985), 11.
- (2) Das, D. K., and Jiang, H. K., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, 106-7 (1984), 542.

討 論

〔質問〕 西 道 弘〔九州工業大学〕

(1) 乱流計測が強調されていることからして、応答周波数が低下しないように単孔プローブの導圧管に制動油を封入することを、将来、計画されているのか。

(2) 使い勝手のよい形状と考えるが、円筒形プローブと同様にステムに沿う二次流れの影響が避け難いと思われる。どのようにお考えか。

〔回答〕 (1) 本実験で使用した圧力センサ（キュライト社製，XCS-062）はシリコン系のオイルを導圧管に封入しても受感部に影響はないので、この方向で検討している。

(2) ご指摘のように、本質的には、ステムに沿う二次流れの影響は避けられないと考えている。したがってこのことを考慮したプローブも現在試作中である。付図1にその一例を示す。

付図 1