14 高速ビーム走査型LDVによる瞬時流速分布の測定

大阪大学工学部

中谷 登, 上原 淳則, 前川 暁夫, 山田 朝治

Measurement of Instantaneous Flow Velocity Distribution by the Rapidly Beam Scanning LDV

Noboru NAKATANI*, Atsunori UEHARA*, Akio MAEKAWA and Tomoharu YAMADA*

The beam scanning LDV is developed for measurement of instantaneous flow velocity distribution. A polygon mirror is used for scanning laser beam and a frequency counter is used for processing LDV signals. The relation between the beam scanning speed and the measurable velocity range is described.

Using air free jet, it is demonstrated that this LDV system is a powerful tool for measurement of large scale structure in turbulent flow.

1. まえがき

レーザ・ドップラ流速計(LDV)の測定領域を拡大して、流れを空間的に測定する方法として、多点同時測定法やビームを走査する方法が試みられている。多点同時測定法では、測定点の数や光量などの点で、測定領域が数mm~数十mmに限られてしまうが、ビームを走査する方法では、それ以上の領域の流速を瞬時に測定することができる。したがってビーム走査形LDVは、瞬間の流速分布を測定できるほか、大きなスケールの乱れの構造を視覚的にとらえたり、瞬間的な現象を定範囲にわたって測定することができる。このようなビーム走査形LDVを構成する場合には、ビーム走査が高精度かつ高速で行えること、走査中に光学系の条件が変化しないこと、瞬間の流速を処理することができる信号処理器を用いることなどの必要条件を満たさなければならない。

そこで本研究では、ポリゴンミラーを用いたビーム走査形LDVを構成して、このLDV信号を周波数カウンタで処理する方法について検討した。さらにこれを自由噴流の流速分布測定に応用した結果について示す。

2. ビーム走査形LDVの構成

本研究で構成したビーム走査形LDVをFig. 1に示す。この光学系の光源には、 Ar^+ レーザ($\lambda=514.5nm$)を用いて、光変調器により80MHz、 $80MHz+f_s$ だけ周波数偏移した光でLDVを構成した。散乱光の結像面にはレンズ L_7 を置き、さらにその前に散乱光のみを通すマスクを置くことによって散乱光の像を集光し、これを直接フォトマル1で受光した。この方法により、ビーム走査形LDV信号の

Fig.1. Schematic diagram of the beam scanning LDV.

*Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University;
2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan

SN比を向上させることができる。

ビーム走査は、レンズ4の側焦点平面に配したポリゴンミラーをモータで回転することによって行う。このときビームの走査方向は流れに対して垂直である。ポリゴンミラーでビームを走査する場合、走査速度はミラーの回転数とレンズ4の焦点距離で決まり、観測周波数はミラーの枚数で決まる。乱流のように速い流速変動を測定する場合には、観測周波数を高める必要があるが、ミラーの枚数を多くすると逆に走査範囲が狭くなる。いま、Fig. 2のようにポリゴンミラーのある一つの面にビームが角度 γ で入射しているとき、ビームの走査範囲 θ_{scan} はポリゴンミラーの内角 2α で決まり、幾何学的に次のようになる。

$$\theta_{scan} = 2(180^\circ - 2\alpha) \quad (\text{degree}) \quad (1)$$

ただし、 $\gamma > 180^\circ - 2\alpha$ である。したがって六面ポリゴンミラーでは $\theta_{scan} = 120^\circ$ 、十二面では $\theta_{scan} = 60^\circ$ となる。また測定領域が40mmの場合には、80面まで、20mmの場合には156面まで取り付け可能である。

このほか、この光学系ではミラー2、レンズ6により後方散乱光を受光することも可能である。このときポリゴンミラーが回転しているために、任意の時刻で散乱される光は常に一点に絞られる。したがって、通常のLDVと同じように受光できる。さらに、観測を容易にするために、走査されるビームをレンズ5の位置で光ファイバを通して受光し、それを外部トリガ信号とした。

フォトマルチまたは2で受光されたドップラ信号を処理すれば、瞬間の流速分布が得られる。このとき信号処理には、応答速度が速いこと、ダイナミックレンジが広いこと、などの条件が必要となるが、ここではそのような信号処理器として周波数カウンタを用いた。しかし、周波数カウンタは測定体積を固定している通常のLDVの信号処理器として研究開発されてきた装置であり、ビーム走査形LDVの信号処理器として応用するためには、測定条件を検討しておく必要がある。そこで次に、信号処理法について検討してみる。

3. 周波数カウンタを用いた信号処理法

本研究で用いた周波数カウンタは、D.T社カウンタであるが、この装置が1つの流速データを出力するためには、散乱粒子は少なくとも8個のフリッジと交差しなければならぬ。ビーム走査形LDVの場合、一つの散乱粒子からのドップラ信号を区別して正確に処理したときに、流速分布測定の空間分解能が高くなる。したがって、そのためには測定体積が走査される間に、各散乱粒子が何個のフリッジと交差するかということが、測定条件を決める上で非常に重要となる。

これを厳密に計算することは困難であるが、次のような仮定を設けて簡単に考えていくことにする。

1) ある時刻に測定体積内に存在する粒子の数は1個とする。

2) 測定体積の断面を長方形とする。

計算に際して測定体積の形状および動きをFig. 3のように考え、各記号を次のように定義しておく。

- u: 散乱粒子の流速
- f_s : 光学系の周波数偏移量
- Δx : 測定体積の流れ方向の大きさ
- Δy : 測定体積の走査方向の大きさ ($\Delta x \neq 0, y$)

Fig. 2. Beam scanning by the use of a polygon mirror.

θ : ビーム交差角の半角
 λ : 光源の波長
 f_0 : ドップラ周波数偏移量

Fig.3. Sampling volume at scanning speed v_{scan} .

まず測定体積が固定されているとき、1個の散乱粒子がフリンジと交差する回数を N とすると、

$$N = \frac{\Delta x}{u} \left(f_s + \frac{2 \sin \theta}{\lambda} u \right) \quad (2)$$

が得られる。次に測定体積を速度 v_{scan} で走査するとき、1個の散乱粒子がフリンジと交差する回数を N' とすると、 N' は次のようになる。 $u \geq v_{scan}$ の場合には、測定体積が Δy だけ動く間に散乱粒子は Δx 以上動くことができるので、 $N' = N$ となる。 $u < v_{scan}$ の場合には、測定体積が Δy だけ動く間に散乱粒子は $(\Delta y / v_{scan}) \cdot u$ だけ動くことができるので、

$$N' = \frac{1}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{v_{scan}} \cdot u \cdot N = \frac{W_0}{v_{scan}} \left(f_s + \frac{2 \sin \theta}{\lambda} u \right) \quad (3)$$

となる。ただし、 W_0 はビームウエスト径である。以上のことをまとめて、現光学系について計算すると、Fig. 4(a) のようになる。前にも述べたように信号処理には8個のフリンジと交差しなければならないので、Fig. 4(b) のように $N' = 8$ を境にして各粒子を区別して信号処理できる流速の最小値 u_{min} が決まる。また f_s を小さくしていくと、ある条件

での粒子も8個のフリンジと交差できなくなる。これを $f_{s, min}$ とする。また信号処理できる最大流速値 u_{max} は使用する周波数カウンタの最大測定周波数で決まる。ただし $f_{s, min}$ が存在する場合には、 $u \geq v_{scan}$ の領域で $N' = 8$ と交わる点が存在し、その点で u_{max} が決まる。以上のことを D, T 社カウンタについて計算すると次式のようになる。

$$u_{min} = \frac{8 v_{scan} / W_0 - f_s}{2 \sin \theta} \lambda \quad (4)$$

Fig.4. The number of fringes from one scattering particle.

$$f_{smin} = \left(\frac{\delta}{W_0} - \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \right) u_{scan} \quad (5)$$

$$u_{max} = \frac{f_{max} - f_s}{2 \sin \theta} \lambda \quad (6)$$

(f_{smin} が存在しないとき)

$$= \frac{\lambda \Delta f_s}{8\lambda - 2\Delta x \sin \theta} \quad (7)$$

(f_{smin} が存在するとき)

これらの式に現光学系の各値を代入して流速測定範囲を示すと Fig. 5 のようになる。計算より、0 以上の流速を測定するには約 680 kHz 以上の周波数偏移 (f_s) が必要である。

さて、瞬間の流速を次々と処理するためには、次に測定体積内に入ってくる粒子の流速との差が、周波数カウンタの比較精度の範囲内に入っていないなければならない。そこで、周波数カウンタが 8 カウントする間に、どの程度の流速変化があれば流速データが "reject" されるかということを計算してみる。いま、フリンジをカウントしている間に、Fig. 6 のように周波数が Δf だけ変化したとする。比較精度の設定を $C\%$ にすると、 $C\%$ の誤差に相当する周波数変化は、

$$\Delta f = \frac{\delta f C}{300 - \delta C} \quad (8)$$

となり、流速の変化は、

$$\Delta u = \frac{\delta C}{300 - \delta C} \left(u + \frac{\lambda}{2 \sin \theta} f_s \right) \quad (9)$$

となる。(9) 式に、光学系、周波数カウンタの各値を代入して計算すると Fig. 7 のようになる。この図から、平均流速値が小さくて、流速勾配の大きい領域、たとえば壁面付近や噴流と周囲流との境界層では、信号が処理しにくいことがわかる。このような検討結果は、F. Durst¹⁾ が行った検討結果とよく一致している。

Fig. 5. Measurable velocity range.

Fig. 6. Frequency fluctuation in 8 fringes.

Fig. 7. Measurable velocity fluctuation range.

4. 流速分布測定への応用

信号処理系のモデル的な検討、およびその結果をもとにして、自由噴流の流速分布測定を行った。用いたセルは、内径 10 mm のガラス管で、Fig. 8 のように座標系を決め、 $Re = 3400$ で測定した。測定点は、ガラス管出口 ($x = 0 \text{ mm}$) と、出口から 40 mm 下流 ($x = 40 \text{ mm}$)、

Fig.10. Influence of the fringe inclination on measured velocity; (a) inclined fringes, (b) measurement error of velocity.

(10) 式、(11) 式から、わずかのフリッジの傾きでも、走査速度の大きい場合には測定誤差が大きくなることがわかる。しかしこのようなフリッジの傾きは、(11) 式で走査速度に対する誤差の変化の割合 $d(\Delta u/u)/dV_{scan}$ が一定になることから求めることができる。 θ_f が求まると、(10) 式より流速値の修正もできるようになる。今回の実験では、 $\theta_f \approx 2.5^\circ$ であった。

Fig. 11 Instantaneous velocity distribution patterns. $Re = 3400$, $f_s = 4.1$ MHz, $v_{scan} = 7$ m/s, observation interval 0.5 s. (a): $x = 0$ mm, (b): $x = 40$ mm.

最後に走査方向の傾きを補正して求めた流速分布の測定結果例を Fig. 11 に示す。

参考文献

- 1) F. Durst, B. Lehman and C. Tropea: Rev. Sci. Instrum. **52** (1981) 1676.
- 2) 中谷 他: 第21回燃焼シンポジウム講演論文集 (1983) p 4.
- 3) 中谷 他: レーザ学会研究会報告 No. RTM-84-7 (1984) p 39.