29 LDVによる管内流れの計測と解析

広島自動車工業短期大学 三坂 善晴

Measurements and Analyses of Pipe Flow by the Use of a Laser Doppler Velocimeter

* Yoshiharu MISAKA

Measurements by a laser doppler velocimeter have become essential to the examination of the behavior of gas in the cylinders of an internal-combustion engine. As the measurements demand a considerable level of technique, however, I have made as the first step the velocity distribution measurements outside the inlet length of water flow in a round pipe by using a laser doppler velocimeter. Through the measurements I have obtained pretty excellent results: errors came within approximately 3 percent in either case of laminar flow, transition flow or turbulent flow, and the turbulence levels within 3.5 percent in the turbulent zone of Re no. 11200.

1. 緒言

レーザードップラ流速計(LDV)は、流体中に存在する光散乱粒子にレーザー光を入射し、そのドップラ周波数の変化を測定して流速をえんとするもので、Yeh¹⁾らに開発されて約20年、そのすぐれた画期的な特長により各方面から注目され活発な研究が進められつつある。自動車も省燃費、低公害、高出力というきびしい社会的要求に対応して、エンジン気筒内のガス流のLDVによる計測も極めて重要な意味をもってきた。しかしこれには相当の技術を要するので、今回はその基礎的実験として先づ円管内水流の計測と解析をLDVにより行った。筆者は過去に水素気泡法^{2,3)}を利用して、ケヤンオル内、円管(直管、曲管)内り流れの特性を報告したが、今回はさらに良好な結果がえられたので以下概要を報告する。

2. LDVの特色と原理

LDVの特色については多くの文献⁴⁾に紹介されているが、長所としては、①無接触測定のため流れの場を乱さない。②直線性がよく応答が早い。③超低速から超音速まで計測可能。④局所流速、流速、変動速度の計測可能。⑤温度に影響しない等があるが反面短所としては、①光学系の調整が非常に面倒で技術を要する。②追従性のよい均一散乱粒子を一樣に供給する必要がある。③比較的高価である等があげられる。ともあれレーザー光でしかえられない特性(可干渉性、単色性、単一指向性)を活用して、現在最も多い干渉縞方式を採用したので、原理も干渉縞理論による。図1は干渉縞によるLDVの形成図であり、図2は干渉縞(ビーム交叉部)の原理図の詳細である。ここに

f_d : ドップラ周波数, λ : レーザー光波長,

θ : 入射光の交叉角, Δf : 干渉縞の間隔,

U_n : 干渉縞に垂直な速度成分(流速) として, Fig.1 Fringe by LDV

* Hiroshima Junior College of Automotive Engineering; Nakano, Aki-ku, Hiroshima

$$fd = \frac{U_m}{D_f} \text{ -----(2.1) } \quad D_f = \frac{\pi}{2 \sin \theta/2} \text{ -----(2.2)}$$

$$\therefore U_m = D_f \cdot fd = \frac{\pi}{2 \sin \theta/2} \cdot fd \text{ -----(2.3)}$$

よって π と θ を決定し、光電変換素子の出力から fd を読みとれば、(2.3) 式から流速 U_m を求めうる。

3. 本実験での流体力学的関係理論式

(1) 層流

$$\text{Hagen-Poiseuille の関連法則 } U = U_{\max} (1 - \frac{r^2}{a^2}) \text{ -----(3.1)}$$

(2) 乱流

$$(a) \text{ Kármán-Prandtl の指数法則 } U = U_{\max} (1 - \frac{r}{a})^{1/4} \text{ -----(3.2)}$$

$$\text{壁面摩擦応力 } \tau_0 = 0.0225 \rho U_{\max}^2 (\frac{\nu}{U_{\max} a})^{1/4} \text{ -----(3.3)}$$

(b) Kármán-Nikuradse の対数法則

$$\text{乱流域: } \frac{U}{U_*} = 2.5 \log_e \frac{U_* (a-r)}{\nu} + 5.5 \text{ -----(3.4)}$$

$$\text{遷移層: } \frac{U}{U_*} = 5 + 5 \log_e \frac{U_* (a-r)}{5\nu} \text{ -----(3.5)}$$

$$\text{層流底層: } \frac{U}{U_*} = \frac{U_* (a-r)}{\nu} \text{ -----(3.6)}$$

U : 測定点の理論流速, $U_{\max}$: 最大流速, U_* : 摩擦速度, $\bar{u}$: 平均流速,

r : 測定点の半径, a : 円管の半径, ν : 水の動粘度, ρ : 水の密度,

ΔU : 変動速度, $\sqrt{\Delta U^2}$: ΔU の RMS, ϵ : 乱れ強度,

なお、上式中 $U_{\max}$ は計測値を使用した。

4. 実験装置および実験方法

4.1 光学系装置 図3はLDVの実験装置の概要で、その中(a)は光学系を示す。

発光部は日本科学製 27-2121 型を用い、中央から左側の一対鏡線で包まれた部分で構成されている。レーザ光源から出たビームはクスタープリズムにより2本のビームに分れ、集束レンズにより測定点で交差させる。

受光部は日本科学製 27-2221 型を用い、右側の一対鏡線で包まれた部分で構成されており、測定点の散乱光を集束レンズで平行ビームにし、集束レンズでピンホール ($\phi 100 \mu$, $\phi 500 \mu$) を通してファームルに集め、散乱光の変化を光電変換し、信号処理は周波数トラッカー (2.5 KHz ~ 15 MHz) 方式により、トップラ周波数として指示盤に表示させた。なお出力された周波数はシンクロ (岩崎 55-4511) によっても測定したが、トラッカーはそれより精度がよかつた。なお信号指示ユニット (日本科学製

Fig.2 Principle of Fringe

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \text{ -----(3.7)}$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\Delta U^2}{\bar{u}^2}} \text{ -----(3.8)}$$

(a) 光学系装置

(b) 流量-流速装置

Fig.3 Apparatus for Experiment by LDV

21-1211 型) にある V_{meter} , R.M.S. は乱流計測のさいの指示計として用いた。

4. 2 流量一定装置等

図3(b)は流量一定装置を示す。水は透明なアクリル管(内径14mm, 厚さ1mm)内を流し, 測定点はオーバーフロータンク出口から1600mmの助走区間外の点とした。測定点の移動はトラスバー装置(自数報)によって直径方向に0.5mmずつ移動させ, その移動量はダイヤルゲージ(1/100mm)により読みとり, その点のドップラ周波数を計測した。流量の調整は下流の歪形弁によって行ない, ポンプはイワキLP-15(最大流量17L/min, 最大揚程3.6m)を用いた。交叉部は“測定係数”をもっているので, 壁面付近で測定は不明確となる可能性がある。そこで測定点が壁面から何mmの位置にあるかを知るため, 交叉部が管の真の中心にあるときの状態を写像判定し, そのときのダイヤルゲージの目盛を基準として手送りした。この方法は精度よく測定位置を明示できた。次に使用した散乱粒子は約15μmのアルミナであつたが, ポーラス性のためには比較的よく水に追随した。そして層流の場合 $Re=270\sim1110$, 乱流の場合 $Re=6700\sim12700$ について速度分布と乱れ強度を計測した。なお層流の場合, LDVの他に同一実験条件の下で, 水素気泡法でも同時計測して比較して見た。図4は同時計測のさいの実験装置外観写真である。

Fig.4 Apparatus for the Experiment of Visualization by Using together LDV and Hydrogen Bubble method.

5. 実験結果と考察

Fig.5 Velocity Distribution in Laminar Flow (LDV)

Fig.6 Velocity Distribution in Laminar Flow (Hydrogen Bubble Method)

図5は $Re=970$, $U_{max}=15.83\text{ cm/s}$ のLDVによる層流速度分布の例である。壁面付近(測定係数域)を除けば, 誤差は理論値の3%以内に入っており, 壁面付近の計測は困難であるが, それでも $U/U_{max}=0.90$ まで計測可能であつた。図6は $Re=970$ の同じ水流を水素気泡法で同時測定した速度分布図である。これも誤差は3%以内に納まりつつはいるが, LDVによるものが精度は少し良好であつた。

乱流指数法則による速度分布の一例が図7で, $Re=11540$ である。この場合も,

壁面付近を除けば、誤差は約3%以内にとどまった。図中実線は理論値、○はLDVで計測した測定値である。実験条件としては、水温、 Re 、最大流速、および変角をとりあげ、それぞれ図の枠内に明示した。図8は乱流対数法則による速度分布図で、測定値は4種類の Re 数($Re=6000, 6700, 11500, 12200$)についてプロットした。

図8から明らかなように乱流域では理論値と極めてよく一致しており、その誤差は約2%以内である。壁面に極めて近い層流底層から遷移層の途中までは、誤差はやや大きいがこのレーザー特有の測定体積限界領域の存在のため止むをえないものと考えられる。

図9は乱流における各断面の乱れ強度の一例で、 $Re=11200$ のとき乱れ強さは、壁面近くで6~7%、乱流部ではほぼ3.5%以内にあり、満足すべき結果がえられた。

6. 結び

以上総合して次のような結論をえた。

(1) LDVは精度がよく、層流・乱流とも速度分布の誤差は3%以内にとどまった。

(2) 壁面付近での速度分布の誤差は比較的大きいが、レーザーを使用する以上仕方がない。

(3) 乱れ強度は $Re=11200$ のとき、壁面付近で約7%、乱流部で3.5%以内にあり、良好な結果がえられた。

(4) 散乱粒子は高価な球状高分子粒子でなくとも、アルミナでも使用上十分である。

最後に、本実験に当り国立米子商専には一方ならぬご援助を戴いた。ここに厚甚な謝意を表します。

文献

- 1) Yeh, Y. and Cummins, H. Z., Applied physics Letters, 4-10, 1964.
- 2) 三坂, 流れの可視化シンポジウム(第1回) p135, 1973. 3) 三坂, 流れの可視化シンポジウム(第2回) p139, 1974.
- 4) たとえば浅沼, 小俣, 流体工学, Vol. 13, No. 6, p329, 1977.

Fig. 7 Seventh power Law for Turbulent Flow

Fig. 8 Logarithmic Law for Turbulent Flow

Fig. 9 Turbulence in Turbulent Flow