穴あきレンズを用いた小型光ファイバ LDV[†]

池田 裕二*・中島 健**・細川 茂雄**・松本 隆一**

A Compact Fiber LDV with a Perforated Beam Expander

Yuji IKEDA*, Tsuyoshi NAKAJIMA**, Shigeo HOSOKAWA** and Ryuichi MATSUMOTO**

Although fiber LDVs have been developed for their flexibility and easy handling, the performance of the fiber LDVs developed and commercialized so far is inferior to that of conventional fixed-type LDVs. The smaller the diameter of the LDV probe is, the worse the quality of its measurement volume becomes. This is because that the diameter of the output beam from the fiber is so small that it requires a beam expander to improve the quality of the measurement volume; however, the use of a beam expander makes the adjustment complex and the probe diameter undesirably large. We have developed a small fiber LDV probe including a beam expander with a perforated lens, successfully improving the measurement volume quality. The SN ratio of the developed FLDV was ten times as much as that of the conventional fiber LDV. In order to achieve a high launching efficiency of the laser beam into a fiber, a single lens having a desirable focal length was adopted. The positioning of the beam spot into the fiber core was done by means of a tilting mechanism of high resolution of 0.3 μ m. The transmitting efficiency of 80% was performed. The performance of the LDV probe was examined by measuring both the tangential velocity of the rotating disk and the longitudinal velocity profiles of water in a pipe. The results show an excellent performance of the fiber LDV. The use of the perforated lens as a space filter enables us to measure the velocity close to the wall (0.5 mm), even in the condition that the half of the measurement volume is formed in the wall.

Key Words: fiber, LDV, velocity measurement, perforated lens

1. はじめに

流れ場を乱すことなく、非接触、高精度で速度測定を行う手段として、レーザードップラ流速計 (LDV) は、流体力学、熱工学のみならず広い分野で用いられており、ほぼ完成したシステムであるといえる。しかし、従来型 LDV は大型であるため、測定点の移動が困難であり、応用範囲に制限を受けている。応用性、融通性の高い LDV としての光ファイバ LDV (FLDV) はいくつか報告されているが^{1), 2)}、これらは従来型の LDV に比べると、性能が劣り、かつ調整が複雑であり、十分にその有用性を発揮しているとはいえない。本報においては、FLDV の性能向上のために、高分解能マニピュレータを考案し、レーザビームの入射効率の向上を図った。また、穴あきレンズを用いた FLDV プロブにより、光学系の簡素化、小型化、そして測定体積を小さくすることにより散乱光強度の向上を図った。試作された FLDV の性能評価をスリガラスの回転速度測定と円管内乱流の速度分布測定により行った。

2. 光学系

まず、FLDV の一般的構造と問題点について述べる。

FLDV は 2 本のレーザビームをおのおのの偏波面保存ファイバで伝送し、プローブ内でおのおのの光ファイバからの 2 本の光をコリメートし、レンズにより 2 本のレーザビームを交差させ、測定体積を形成するものである。交点からの散乱光はプローブ内に内蔵された受光光学系により受光ファイバに集められる。しかし、この FLDV は従来の固定式の LDV に比べると性能が劣っている。その原因として、①レーザビームが光ファイバへ入射する際の効率の低さがある。使用する光ファイバのコア径が 3~4 μ m であるため、入射効率を向上させるためには高分解能の調整

[†] 第 4 回 SICE 光応用計測部会講演会で発表 (1988・11)

* 神戸大学自然科学研究科 神戸市灘区六甲台町 1-1

** 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町 1-1

* The Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Kobe

** Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe
(Received April 20, 1989)

(Revised January 29, 1990)

機構 (マニピュレータ) が必要である。また光ファイバの NA が小さいため、集光用レンズの適性も問題となる。②測定体積 (スポット) が大きい。光ファイバから出射するビームをコリメートする際に使用するセルフロックレンズ (SML) が限定されており、出射平行ビーム径が細いため、スポットを小さくできない。また、焦点距離を長くするとスポットがさらに大きくなり、散乱光強度の低下を招く。対策としてはフロントレンズに入るレーザービームの径を太くするために、ビームエクspandaを内蔵すればよいが、光学素子の数が増加し、調整が複雑になるとともにプロブの小型化が困難となる。

本報においては、これらの問題点を解決するため各光学系について検討を行い、FLDV の高性能化を図った。

2.1 マニピュレータ

マニピュレータ部においては、レーザー光源からのビームの偏光軸と使用する偏波面保存光ファイバの偏光軸を一致させ、レーザービーム (約 1.1 mm: He-Ne) を光ファイバ (コア径: 4 μm) に入射させる。入射方法は、ビーム径をコンプレッションしてセルフロックマイクロレンズ (SML) を用いる方法と、ビームを 1 枚のレンズにより直接ファイバに入射する方法がある。本実験では、コンプレッションレンズを用いずビームを絞り込む方式を用いた。

レーザービームをファイバへ入射するには以下の項目を考慮する必要がある。①レーザービームの偏光軸と光ファイバの偏光軸を一致させる。②ビームのスポット径 (d_i) はファイバのコア径 (d_f) より小さくする ($d_i < d_f$)。③入射ビームの $NA_i(\theta_i)$ はファイバの $NA_f(\theta_f)$ より小さくする ($\theta_i < \theta_f$)。ここで、レンズにより集光されたビームの直径と、集光角は次式で表わされることから、

$$d_i = \frac{4f\lambda}{\pi d_{in}} \quad (1)$$

$$NA_i = \frac{d_{in}}{2f} \quad (2)$$

f : レンズの焦点距離

λ : レーザービームの波長

d_{in} : レンズ面でのビーム径

つぎの関係式が求まる。

$$NA_i = \frac{2\lambda}{\pi d_i}$$

この関係を用いて、上記の条件②、③を書き直すと、次式のようになる。

$$\frac{2\lambda}{\pi NA_i} = d_i < d_f \quad (3)$$

$$\frac{2\lambda}{\pi d_f} = \sin \theta_f < NA_f \quad (4)$$

これらの条件を満足させるためには、高分解能の調整と集光用レンズの適性化が必要となる。He-Ne レーザー ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 用の偏波面保存光ファイバには、楕円ジャケットのものと、PANDA 方式のものがある。本実験では、伝送損失の少ない楕円ジャケット型光ファイバを用いた。この光ファイバはコア径が 4 μm 、 NA が 0.1324 であるため、集光スポット径と集光角は (3)、(4) 式より次式を満足しなくてはならない。

$$3.04 \mu\text{m} < d_i < 4 \mu\text{m} \quad (5)$$

$$0.10 < \sin \theta_i < 0.1324 \quad (6)$$

4 μm 弱のビームスポットを 4 μm のコアの中へ高効率で入射させるには高分解能の調整機構が必要となる。ビームを絞り込み、ファイバに入射させるには Fig. 1 に示すような x, y, z, θ, ϕ の調整が必要である。使用するファイバのコアは 4 μm であるので x - y 方向にはミクロン以下の分解能が要求される。そこで、本研究では高分解能を得ることができる三点支持機構を用いたビーム集光機構を考案した。

まず、調整を大きく二つの部分に分けて考える (x - y 方向と θ - ϕ 方向)。 x - y 方向の調整には Fig. 2 に示すように、集光用レンズに入射するレーザービームの入射角 (θ_{in}) を変化させることにより、焦点面での距離 t を変化させる。これは、 $t = f \cdot \tan \theta_{in}$ が近軸光学の範囲で成り立つからである。実際には Fig. 3 に

Fig. 1 Coupling adjustment of laser beam into fiber

Fig. 2 Spot positioning mechanism at focal plane

θ and ϕ direction adjustment section resolution: 5×10^{-3} in NA
 x and y direction adjustment section resolution: $0.3 \mu\text{m}$

Fig. 3 Principle of adjustment

示すように、集光用レンズとファイバを一体化し、その後部を三点支持機構により傾け、レーザービームの入射角の調整を行う。 θ - ϕ 方向の調整は Fig. 3 に示すようにロッドガラスを用いてフロントレンズに入射するレーザービームの位置を変化させることにより行う。レーザービームのファイバへの入射には GI 型のセルフロックマイクロレンズ ($\phi=3$, $f=4.437 \text{ mm}$) を用いてレーザービームを直接ファイバに絞りこんだ。(5), (6) 式を焦点距離に換算すると、つぎのようになる。

$$4.14 \text{ mm} < f < 5.46 \text{ mm} \quad (7)$$

焦点距離を短くすると、スポット径を小さくできる ((1) 式) が NA が大きくなる ((2) 式)。試作したマニピュレータは、 x , y 方向の分解能は約 $0.3 \mu\text{m}$ 、角度の分解能はファイバの NA の約 $1/250$ であるため、 f はできるだけ小さくすることが望ましい。今回用いたセルフロックマイクロレンズの焦点距離は 4.437 mm であり、これにより形成されるスポット径は $3.25 \mu\text{m}$ である。ただし、He-Ne レーザーのビーム径は $1/e^2$ で 1.1 mm として計算した。このセルフロックマイクロレンズでは、両端面に多層膜による減反射コーティングが施されている。

集光用レンズとファイバは一体化されており、その後部を2次元的に調整し、レーザービームの入射角 (θ_{in}) を調整することにより、スポットを光ファイバのコア内に調整する (Fig. 3)。調整は、レンズとファイバを一体化したものの一端を支点として、他端をネジで押すことにより、本体を傾けて行う。実際にネジを回すと、約 4° 程度で調整可能である。ネジのピッチが 0.5 mm であるため、ネジは $4/360 \times 0.5 = 5.5 \times$

10^{-3} mm 押される。本体の長さが 75 mm であるため、本体は $\tan \theta_{in} = 5.5 \times 10^{-3}$ 傾くことになる。これを $t = f \cdot \tan \theta_{in}$ に代入すると、 $t \approx 0.325 \mu\text{m}$ となる。つまり x - y 方向の分解能は約 $0.3 \mu\text{m}$ となる。

つぎに集光レンズへの入射ビームの位置調整は、長さ 80 mm のロッドガラスの後部を三点支持機構により調整し、入射ビームの集光角をファイバの受光角 (NA) のなかに入るようにした。使用したロッドガラスは両端面が平行になっており、減反射コーティングが施してある。 x - y 方向と同様に M3 (ピッチ 0.5 mm) のネジを用いて調整を行った。 θ_{rod} の調整範囲は $\pm 12^\circ$ であり、上記と同様に調整の分解能を計算すると 3.05×10^{-20} となる。これを NA に換算すると 5×10^{-4} になり、ファイバの NA に対して約 $1/250$ 程度となっているので、高精度の調整が可能である。

Fig. 3 中の z 方向の調整は、集光用レンズ (SML) とファイバ端面を M25 ピッチ 1 のネジによるスライド機構を用いた。これも同様に約 3° の調整とすると、スライド量は $3/360 \times 1 = 8.3 \times 10^{-3} \text{ mm}$ となる。この $8.3 \mu\text{m}$ の分解能は他の x - y , θ - ϕ 方向のそれに比べて大きい。スポットから軸方向に $8.3 \mu\text{m}$ 離れた位置でのスポット径 d_{spot} は、次式より約 $3.3 \mu\text{m}$ であり、 $0.05 \mu\text{m}$ 太くなるだけである。この z 方向の分解能は十分である。

$$\left(\frac{d_{spot}}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_t}{2}\right)^2 \times \left(1 + \left(\frac{\lambda \cdot L_w}{\pi \cdot \left(\frac{d_t}{2}\right)^2}\right)^2\right) \quad (8)$$

$$\therefore d_{spot} = 3.3 \mu\text{m}$$

ここで、

$$d_t: \text{焦点でのビーム径} (= 3.25 \mu\text{m})$$

Fig. 4 Schematic layout of manipulator

L_W : 焦点からのズレ ($=8.3\mu\text{m}$)

以上の設計により試作したマニピュレータを Fig. 4 に示す。

2.2 プローブ

FLDV のプローブは、2本の光ファイバから出射した2本のレーザービームをコリメートし、かつ2本を平行にしてフロントレンズに入射させ、2本のビームを交差させて測定体積を形成させるものである。FLDV は光ファイバを用いることにより、従来型の固定式 LDV にはない高い融通性とプローブの調整が不要という特徴を有している。また、後方散乱用の受光光学系をプローブ内に内蔵することにより、LDV の光学系を小型化することができる。すなわち、プローブ部の形状および性能が FLDV で最も重要な部分を占めるといっても過言ではない。

FLDV の利点を最大限に発揮させるには、プローブ径を細く、プローブ長さを短く、かつ焦点距離を長くすることが要求される。しかし、これらの条件を十分に満たした FLDV はいまだ報告されていない。なぜなら、後述するように形成される測定体積の径を小さくするには、フロントレンズに入るビーム径を拡大する ((1)式) ためのビームエクパンダが必要であるが、これを用いると、光学素子の数が増え、プローブ径を大きくし、かつ光学系の調整を複雑にするからである。

現在までに報告されている1次元用 (He-Ne) のプローブは³⁾⁻⁵⁾、光ファイバから出射したビームを SML でコリメートして、フロントレンズにより2本のビームを交わらせ、測定体積を形成させている。交点からの散乱光はプローブ内の受光レンズ (小口径) により受光するものである。しかし、SML からの出

射ビーム径が細いため、形成される測定体積が大きくなり、従来型の LDV の有する性能より SN 比⁶⁾⁻⁸⁾にしてかなり劣っている (後述)。改善策としては、ビーム拡大機構をつけるか、もしくはより NA の大きな SML を使用するかであるが、ビーム拡大機構はプローブ径を大きくし、また、大きい NA の SML は現在まだ製造されておらず、今後の開発が望まれる。

本研究では、プローブの小型化と高性能化のため、穴あき凹レンズを用いたビーム拡大機構を応用して FLDV の開発を行った。

Fig. 5 に概略図と写真を示す。従来、ビーム径を拡大するためにレンズを用いると各ビームにつき2枚以上必要となるため、1次元用プローブでは6枚、2次元用では10枚のレンズが必要であり、かつプローブの小型化は困難であった。この穴あき凹レンズを用いると、1次元用でも2次元用でもレンズは3枚構成で済み、調整は簡単になり、かつプローブを小型化することが可能となる。ここでは、凹レン

(a) Schematic layout of probe

(b) Photograph of probe

Fig. 5

Table 1 Dimension of the measurement volume

	Developed FLDV	Conventional LDV (DANTEC)	Conventional LDV (DANTEC)	FLDV (DANTEC)	FLDV (TSI)	FLDV (KANOMAX)
Wavelength (nm)	632.8	632.8	488.0	632.8	632.8	632.8
Focal length (mm)	50	310	310	50	60	60
Probe diameter (mm)	φ18	φ120	φ120	φ14	φ14.22	φ12
Spot diameter (μm)	71.2	227	79.5	149	140	130
Spot length (mm)	0.62	2.36	0.83	1.87	2.4	2.89
Fringe spacing (μm)	2.77	3.28	2.53	3.97	3.87	7.1
Fringe number	25	69	31	37	30	18
SNR parameter ($\times 10^{-4}$)	6.32	0.47	2.29	0.72	0.61	0.29

SNR parameter is $\left(\frac{D_a \cdot d_{in}}{r_a \cdot f}\right)^2$

ズ ($f=-12$ mm), 凸レンズ ($f=25$ mm) を用い, 約 2.08 倍のエキスパンドを行った. そのため, ビーム径を拡大することができ, 測定体積を小さくすることが可能になった.

また, 従来の FLDV プローブでは, 送光用ビームがフロントレンズに入る際にわずかに散乱や反射を起こす. それらが受光ファイバに入り SN 比の低下や光電子増倍管で電流値が上がり測定不可能になるという問題がある. この穴あきレンズは, 凹レンズの穴 ($\phi 4$ mm) により, このフロントレンズ面での散乱光が受光ファイバに入らないように遮断している. つまり, この穴が空間フィルタの役割をはたしている. Table 1 に本研究で開発されたプローブによる測定体積を他の報告と比較した.

測定点での散乱光強度は, 測定体積の大きさ (直径) の 2 乗に比例している. 本報で考案した方式により形成した測定体積は, 他の研究のそれと比較すると直径が約半分程度小さくなっている. つまり, 散乱光強度が大幅に増加しており, このことにより FLDV の性能が向上していることになる.

つぎに, FLDV の性能を SN 比で比較した. SN 比⁸⁾は次式で表わされる.

$$SNR = A_s \cdot \frac{\eta_q \cdot P_0}{\Delta f} \cdot \left(\frac{D_a \cdot d_{in}}{r_a \cdot f}\right)^2 \quad (9)$$

ここで,

A_s : 散乱粒子によって決まる定数

D_a : 受光開口の直径

Δf : バンド幅

P_0 : 2 本のレーザービームの強度

r_a : 測定体積と受光部との距離

η_q : フォトディテクタの量子効率

この式において A_s は散乱粒子によって決まり, $\eta_q \cdot P_0 / \Delta f$ はフォトディテクタ, レーザー光源および信号処理器によって決まるため, FLDV の光学系の

SN 比は $(D_a \cdot d_{in} / r_a \cdot f)^2$ によって決まる. ここで, $(D_a \cdot d_{in} / r_a \cdot f)^2$ を SNR パラメータとして Table 1 に併記した. 本研究で開発した FLDV は, 他の研究者の FLDV と比べて約 10 倍の SN 比を有していることがわかる.

以上より, 穴あきレンズを用いたビームエキスパンド機構は FLDV の性能向上にとって有効な手段といえる.

3. 性能評価, 検討

本実験で用いた集光用レンズによる伝送効率 (カップリング効率) を求める.

集光用レンズに入射する前のビーム強度は 5.5 mW, プローブからの出射地点で 3.7 mW であった. ここで, 各光学部品に入射する際の損失は, 減反射コーティング付きは 1.5%, コーティングなしは 4% としてレーザービームの光ファイバへのカップリング効率を計算すると 80% 以上になる (Fig. 6).

レーザービームを集光して, ファイバ内に入れる際に生じるけられを考慮した理論上のカップリング効率

1. He-Ne laser
2. Beam splitter
3. Prism assembly
4. Dual Bragg cell
5. Focusing lens
6. Optical fiber
7. SELFOC microlens
8. Probe section

$$P_{out} = (1 - 0.015)^2 \times (1 - 0.04)^3 \times P_{in} = 0.7722 \cdot P_{in}$$

Fig. 6 Coupling efficiency

Fig. 7 Performance test (comparison of the measured velocity with the calculation)

は 82.7% である。また、この値はいままで報告されている 24% (小保方)⁹⁾と比較してみるとかなりの高効率である。

開発された FLDV の性能をスリガラス (表面粗さ: 約 1 μm) を回転させ、その接線方向速度を測定し、計算値との比較により行った (Fig. 7)。測定にはカウンタ (Dantec) を用いた。スリガラスは厚さ 2 mm、直径 30 cm であり、測定点は中心より 117 mm の地点である。この半径の位置決め誤差は約 0.5 mm であり、これは 0.4% の速度誤差に相当する。また接線方向と測定方向の一致の精度は約 1° であり、これは 0.02% の測定誤差に相当する。回転数設定の精度は約 10 rpm であり、これは 0.6% の測定誤差に相当する。また、使用したモータの回転誤差は 3% 以内である。以上のことを考慮すると、この FLDV による測定結果はよく計算値と一致していることがわかる。

つぎに、FLDV を用いて完全発達した円管内乱流の軸方向速度分布を種々の流量について測定し、その測定結果と滑面管路の対数流速分布の式¹⁰⁾とを比較し、FLDV の実際の流れ場への適応を検討した。

円管はアクリル製 (内径 25 mm、外径 32 mm) であり、作動流体は水を用いた。散乱粒子は平均粒径 3 μm のシリコン・カーバイトを用いた。この円管は垂直に置かれており、測定地点は下から 1 m (完全発達領域) である。流量は、ポンプにより 18.6, 27.9, 37.2 l/min ($Re=15600, 23400, 31200$) と変化させて、軸方向速度測定を行った。

Fig. 8 に測定結果の速度分布を示す。図中の横軸は無次元化された中心からの距離を表わしている。この結果で注目すべき点は、壁面から 0.5 mm の測定が可能となったことである。従来型の LDV では壁面での散乱光がノイズの原因となるため、ほとんど測定不

Fig. 8 Velocity profile and turbulent intensity of turbulent water flow in a pipe

可能であった。しかし、本実験で用いた空間フィルタにより壁面近傍の測定が可能となった。

つぎに、次式で示す普遍速度分布式より求めた値¹⁰⁾と実験結果の比較を Fig. 9 に示す。

$$\frac{u(y)}{U^*} = 5.75 \cdot \log \frac{U^* y}{\nu} + 5.5$$

ここで、

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} : \text{摩擦速度}$$

$$\tau_w = \frac{\rho u^2 \lambda_B}{8} : \text{せん断応力}$$

ν : 動粘性係数

u : 断面平均速度

ρ : 密度

$\lambda_B = \frac{0.3164}{Re^{1/4}}$: Re が 10^5 以下の滑管乱流の抵抗に関するブラジウスの実験公式

Fig. 9 Comparison of the measured data with the universal velocity-distribution law

この図からも明らかなように、開発された He-Ne FLDVにより測定された速度結果は理論値とよく一致している。このことにより、この FLDV は実際の流れの測定に应用可能であることがわかった。

4. ま と め

従来型の大型 LDV と同程度の性能を有する小型 FLDV の開発を行った。

入射効率向上のため、高分解能 (約 $0.3\mu\text{m}$) の調整が可能なマニピュレータを試作し、80%のカップリング効率を得た。また、プローブ部においては、穴あきレンズを用いて測定体積の性能向上と光学系の簡素化、小型化を図った。測定体積で比較すると、開発された FLDV は従来型 FLDV より約 10 倍程度 SN 比が向上している。このことより、穴あきレンズは FLDV の性能向上に有効な手段であることがわかった。

開発された FLDV の性能と実際の流れへの適応をスリガラスの速度測定と円管内乱流の軸方向速度測定

により行った。測定結果は理論値とよく一致しており、FLDV は実際の流れの測定に十分応用可能であることがわかった。さらに、壁面から 0.5mm の地点での測定が可能であり、従来型 LDV においても測定困難な条件の測定も可能となった。

参 考 文 献

- 1) 前田, ほか: ファイバ LDV の開発と平板境界層における乱流測定, 日本機械学会論文集 (B 編), **50**-458, 2545/2548 (1984)
- 2) 日野, ほか: 光ファイバを用いた 2 次元 LDV の試作, 第 2 回流れの計測シンポジウム資料, 71/75 (1985)
- 3) LDV カタログ, DANTEC (1986)
- 4) TSI カタログ, TSI (1986)
- 5) FLV プローブ取扱説明書, 日本科学工業 (株) (1986)
- 6) 流れの計測懇談会編: LDV の基礎と応用, 日刊工業社 (1980)
- 7) F. Durst, et al.: Principles and Practices of Laser-Doppler Anemometry, Academic Press (1976)
- 8) TSI Technical Data, TSI (1988)
- 9) 小保方富夫: 光ファイバレーザ流速計の内燃機関への応用, 自動車技術会論文集, **30**, 23/29 (1985)
- 10) 日野幹夫: 流体力学, 朝倉書店 (1986)