

## 2点相関測定用アダプタ付き光ファイバ LDA プローブ\*

小保方 富夫\*<sup>1</sup>, Stefan BOPP\*<sup>2</sup>, Cam TROPEA\*<sup>2</sup>LDA Fiber-Optic Probe with Adapter  
for Two-Point Spatial Velocity Correlations

Tomio OBOKATA, Stefan BOPP, and Cam TROPEA

A simple adapter for a two-dimensional, backscatter, fiber-optic laser Doppler anemometer probe consisting of two glass plates has been developed to measure the spatial correlation of velocity fluctuations. A conventional two-color, four-beam LDA probe has been modified by reversing the placement of two of the fibers so that both the green and the blue control volumes measure the same velocity component. An adapter for beam separation is then mounted behind the front lens to separate the two control volumes. In the present work, the measuring point separation was varied up to 3 mm in the lateral and vertical directions. By using only one glass plate 10 mm thick, it was also possible to achieve in-line (axial) displacements of the control volumes of up to 3.5 mm. Spatial correlations were performed in an intermittent jet flow in which the convective flow velocity could be deduced from the offset of the cross-correlation function.

**Key Words:** LDV, LDA, Laser, Flow Measurements, Optical Fiber, Two Point Measurements, Jet, Pulsation, Turbulence, Spatial Correlation

## 1. ま え が き

レーザドップラー流速計 (LDA) の入射光および散乱光の伝送に光ファイバを用いると、測定点、測定方向の選択と移動が容易となり、複数光学系を用いて流速の多次元的な収集も可能で、さらにレーザや光学系の保守も容易となるなどの長所があり<sup>(1)</sup>、多くの開発研究<sup>(2)~(5)</sup>が続けられ、すでに二次元流速測定用プローブも市販されている。今後の課題は波長 488 nm の青色光で 60%程度である単一モード光ファイバへの入射効率のいっそうの改善、1 W 級の高出力光の安定した伝送、光ファイバに対する外乱の低減<sup>(1)</sup>、光ファイバの特徴を生かした応用研究である。

本研究では、入射光の伝送に GI 形マルチモード光ファイバを用いた後方散乱形の 2 色 4 光束二次元 LDA プローブ<sup>(6)(7)</sup>を改良し、同一流れ方向の 2 点の測定間隔を任意に変えられる平板ガラス 2 枚で構成された 2 点測定アダプタを試作した。また、本アダプタを併用して脈動噴流の 2 点の速度を同時測定し、さらに

空間相関を得るなど、実用性の高いことも証明され、二次元光ファイバプローブの応用範囲を広められたので以下に報告する。

## 2. 供試 LDA の光学系

**2.1 光ファイバ LDA** 使用した LDA は図 1 に示す火花点火機関のシリンダ内流速測定用に製作された二次元の後方散乱形光ファイバプローブである<sup>(6)</sup>。本プローブの特徴はコア径 50  $\mu\text{m}$  の GI 形マルチモード光ファイバを使用し、80%程度の高い入射効率で総合 1.5 W 以上の高出力光を小さな測定体積に集光していることで、図 1 に Lens と示した小径の散乱光集光レンズでも十分な信号強度が得られる。測定に先立ち、光ファイバからの出射光がシングルモードに近くなるようにファイバ入射部を微調整するが、ファイバに振動などの動的なひずみ加わると振動周期に同期してモードが変化し、乱れ強さに換算して 1%程度のドップラー周波数変化が現れるので注意が必要となるが、静的な使用では問題がない。

**2.2 2点分離用アダプタ** 図 1 のプローブでは測定点における二次元速度  $U$ ,  $V$  が測定される。この入射光ファイバの 2 色のうち 1 本ずつを入れ替えると、同一点における同一方向速度が測定できる。さら

\* 原稿受付 昭和 63 年 10 月 3 日。

\*<sup>1</sup> 正員 群馬大学工業短期大学部 (〒376 桐生市天神町 1-5-1)。\*<sup>2</sup> Lehrstuhl für Strömungsmechanik, University of Erlangen (Egerlandstrasse 13, 8520 Erlangen, F. R. Germany)。

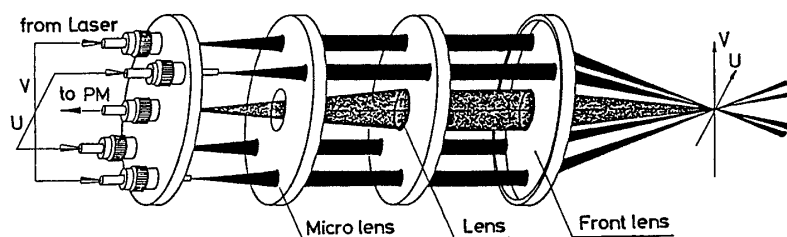


図 1 二次元後方散乱形 LDA プロープ

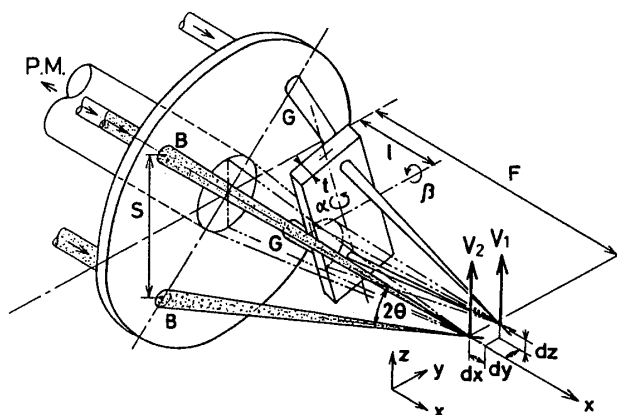


図 2 2点分離用アダプタの概念図 (平板ガラス1枚の例)

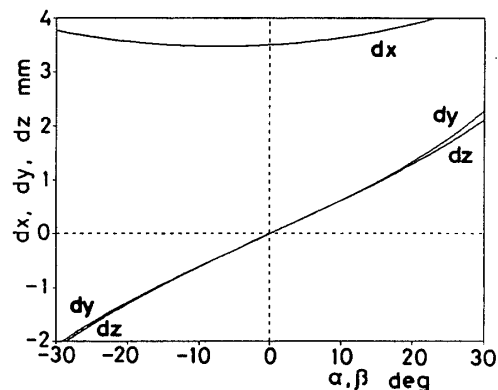


図 3 測定点の移動量

に収束レンズ前方に平板ガラスを用いて測定点を分離して二つの速度  $V_1, V_2$  を測定するものが図 2 に示す 2点分離用アダプタである。ここで青色光 G のみ厚さ 10 mm の平板ガラスを挿入したとき、青色光 B との測定点のずれを求めたものが図 3 である。3 方向の移動量 ( $dx, dy, dz$ ) は線状の光が傾いた平板ガラスを通過するときの平行移動量から新しい交差部の空間位置を求める単純な幾何学計算で得られたものであり、図 2 の各定数には表 1 の値を代入した。

図 3 において、角度  $\alpha, \beta$  は図 2 の平板ガラス取付角であり、入射 2 光線の中心軸に直角に置かれた位置を零とし、反時計方向回転 (UCW) を正とした。ガラス板の横回転  $\alpha$  により測定点は横方向に  $dy$  ずれ、またガラス板の存在により軸方向にも  $dx$  変化する。次に縦回転  $\beta$  により測定点は縦方向に  $dz$  変化し、同時に  $dx$  も変化するが、この  $dx$  は省略した。 $dy$  と  $dz$  の変化量は  $\alpha$  と  $\beta$  に対してほぼ同様であり、角度変化  $\pm 30^\circ$  で  $\pm 2$  mm 程度移動し、青色光にも逆方向に回転させた同じ平板ガラスを挿入すると、さらに 2 倍の変位が得られる。 $dx$  は 3.5 mm 程度で、 $\alpha$  によって少し変化するが、緑と青の両方にガラス板を使用すると  $dx$  は零となり、ガラス板取付位置  $l$  を変えると相対位置は少し動くが、大きく移動させるには板厚  $t$  を変えなければならない。

表 1 アダプタ付き LDA プロープの諸元

Material	BK7
Refractive index, n	1.52
Thickness, t	10 mm
Separation, S	24.75 mm
Focal length, F	200 mm
Total intersection angle, $2\theta$	$7.08^\circ$
Laser power :Blue	76 mW
:Green	108 mW
Mean diameter of waist :Blue	76 $\mu\text{m}$
:Green	72 $\mu\text{m}$
Measuring volume length	$\approx 800 \mu\text{m}$
Vertical rotation angle, UCW $\rightarrow +$	$-30^\circ < \alpha < 30^\circ$
Lateral rotation angle, UCW $\rightarrow +$	$-30^\circ < \beta < 30^\circ$
Glass position, l	30 mm

以上の結果、二つの測定点間隔が容易に変えられることがわかったが、二つの散乱光もそれぞれの平板を通して後方に集光されるので、青、緑それぞれの散乱光強度は最大でも 1/2 となり、両板ガラス間のすきまもあることからさらに減少し、実用的な測定点間隔は制限される。

プローブ調整用ジグに取付けて実験中のアダプタを図 4 に示してあるが、アダプタ外径をプローブ外径と同様に 66 mm としたため、ガラス板回転角も制約され、 $dy, dz$  ともそれぞれ 3 mm 程度までが実用上十分な散乱光強度の得られる範囲である。

なお、Nakatani らの方法<sup>(4)</sup>のように、複数の光ファイバプローブを用いれば、測定方向、間隔とも任意

に変えられるので応用範囲はより広い。本アダプタは既存の二次元プローブに容易に適用できること、さらに小形であるのでエンジン内など測定用窓の設置が空間的に制約される場所での使用などに長所がある。

3. 脈動噴流への適用例

3.1 脈動噴流 2点分離用アダプタの実用性を確認するため、散乱用粒子供給器(医療用ネブライザ)の出口に図5に示す円管を取付け、その一部分を突起付きの回転円板で開閉して脈動噴流を得た。噴流の脈動周波数は約89 Hz、噴流の平均速度(約3 m/s)と出口管径(6 mm)から得られる噴流のレイノルズ数は約1000である。

3.2 測定方法 二つの流速  $V_1$  および  $V_2$  の測定

表 2 カウンタ形信号処理器の設定条件

Channel	LDA 1	LDA 2
Counter TSI Model	1990	1980B
High pass filter	300 kHz	300 kHz
Low pass filter	5 MHz	10 MHz
Shift frequency	2 MHz	2 MHz
Cycles/Burst	8	8
Comparison	1 %	1 %
Gain setting	0.4	0.4
Monitor level	0.4 Vp-p	0.5 Vp-p

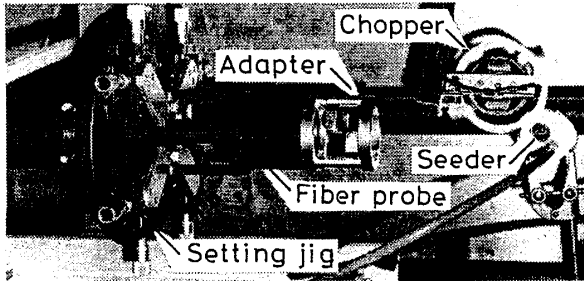


図 4 脈動噴流測定中のアダプタ付きプローブ

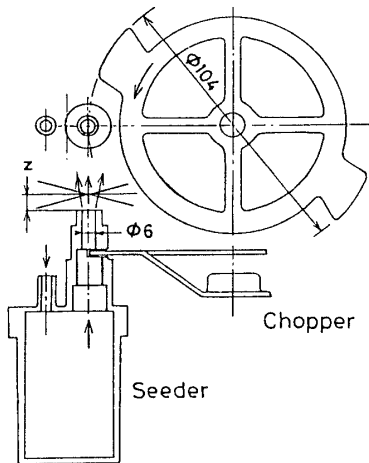


図 5 脈動噴流発生用粒子供給器とチョッパー

には、表2に LDA 1 (緑)および LDA 2 (青)と示したカウンタ形信号処理器を使用した。それぞれのカウンタの設定値は表2に、また各測定体積の大きさやレーザー光の強さは表1に示してある。これらはデータ処理用マイクロコンピュータ(HP社 Vectra)のモニター画面に示された図6のような、両 LDA の信号量(DR と表記)がほぼ等しくなるよう光学系とカウンタを調整した結果の値である。

なお、二つのカウンタからの流速、到着時刻などの信号は2チャンネル用に拡張された LDA データ取得用インタフェース(Zech社, モデル1400)を介して前記マイクロコンピュータに入力される<sup>(8)</sup>。

図6の Coinc. は信号取得時間の一致(コインシデンス)を調べたもので、設定時間(ここでは 20 μs)以内に両カウンタで信号が得られた割合を示し、この値が大きいほうがよい精度で相互相関関係が得られる<sup>(9)</sup>が、本実験のように離れた2点間では低く、各 LDA の信号量の1/5程度である。図7は図6と同様に、横方向の2点間隔  $dy=2$  mm における定常噴流(平均流速約3 m/s)において、 $\tau[\mu s]$  の対数で表記したコインシデンス時間を変えながら DR と相関係数  $c$  を求めたものである。ここで瞬間の流速  $V$  を平均流速  $\bar{v}$  と変動分  $v'$  で示すと、二つの流速  $V_1$  と  $V_2$  において

$$c = \frac{\overline{v_1 v_2}}{\bar{v}_1 \bar{v}_2} \dots\dots\dots (1)$$

より  $c$  が得られる。なお上式の分子はコインシデンス

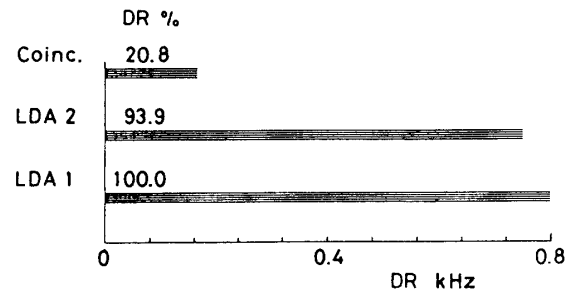


図 6 定常噴流中の  $dy=2$  mm における信号量

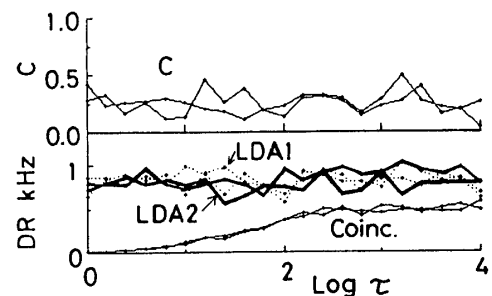
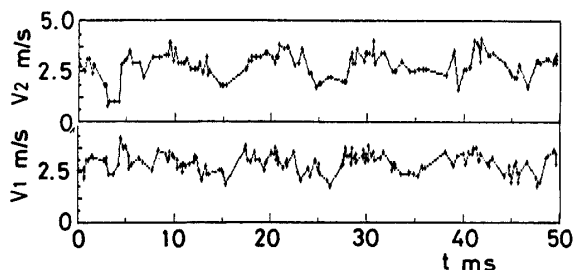
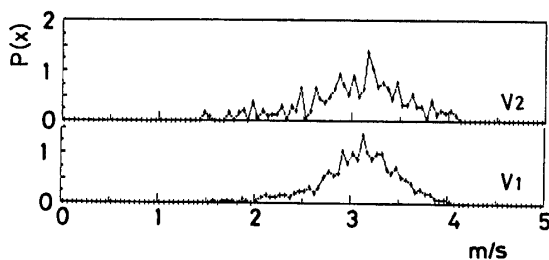


図 7 コインシデンス時間  $\tau[\mu s]$  を変えたときの相関係数  $c$  と信号量 DR[kHz]

図8 脈動噴流内の  $dz=2$  mm における流速図9 両流速  $V_1, V_2$  の確率密度関数

時間内に得られた両変動流速の積のアンサンブル平均

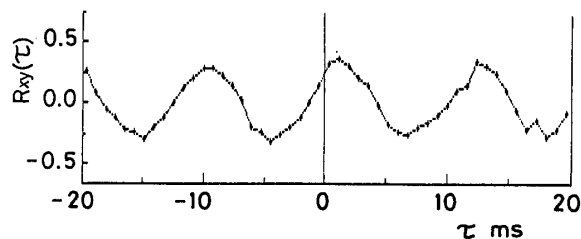
$$\overline{v_1 v_2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_1 v_2) \dots \dots \dots (2)$$

であり、 $v_1', v_2'$  は乱れ強さ、すなわち  $V_1 - \bar{v}_1$  および  $V_2 - \bar{v}_2$  の実効値 (rms) である<sup>(10)</sup>。

図7にはコインシデンス時間  $\tau$  を逐次変えながら行った2回の実験における  $c$  と  $DR$  を重ねて示してある。ここで  $c$  の値は  $\tau=200 \mu\text{s}$  程度まで減少する傾向にあるが、値は小さい。これは  $Re=21000$  で行われた本実験と同様の噴流において<sup>(10)</sup>、 $dy=2$  mm では  $c$  が小さい値を示したと同様である。また  $DR$  においては、LDA 1 (点線) と LDA 2 (太線) は  $\tau$  によって変化しない。コインシデンス (細線) の信号量は  $c$  とは逆に  $\tau=200 \mu\text{s}$  まで増加するが、その後は一定値となり、両カウンタの信号量の半分程度の値となる。よい相関を得よう  $\tau$  を小さくすると信号量が下り、測定に長い時間が必要となることがわかる。

**3.3 測定例** 図5においてパイプの出口より、 $z=5$  mm を中心として2点間隔  $dz=2$  mm における脈動噴流の流速  $V_1$  (上流側) と  $V_2$  (下流側) の実時間測定例を図8に示す。両流速には対応関係があり、 $V_2$  に少し位相遅れが認められる。このときの流速の確率密度関数  $P(x)$  を図9に示すが、 $V_1$  と  $V_2$  において平均流速は 3.1, 3.0 m/s とほぼ等しく、乱れ強さは 0.53, 0.61 m/s (rms) と  $V_2$  において乱れが増加している。

さらに、流速とその出現時間をもとに、不等間隔データによる相互相関係数  $R_{xy}(\tau)$  を求め<sup>(11)</sup>、図10に示

図10 流速  $V_1$  に対する  $V_2$  の相互 (空間) 相関係数 (データ数 1000)

す。なお、ここでの  $\tau$  は遅れ時間 (ms) であり、得られた曲線の周期から脈動周波数が約 89 Hz であること、また曲線の横方向のずれが  $\tau=0$  にて 0.7 ms ほどあり、これと平均流速値約 3.0 m/s との積から両流速の測定点間隔が 2.1 mm 程度と推定され、実測間隔の 2.0 mm とよい一致を示している。

#### 4. ま と め

2色4光束方式の後方散乱形二次元光ファイバプローブ用に、2枚の平板ガラスを用いて、同一速度成分を測定する二つの測定体積を作り、測定点間隔も自由に換えられる2点分離用アダプタを試作した。

本アダプタにより、測定点間隔は横および縦方向に 3 mm 以上、また1枚のガラス板により光軸方向にも 3.5 mm 程度変えることができた。

また、本アダプタを用いて、脈動噴流の中心軸上における2点の流速を実測し、両速度の空間相関係数から乱れの伝達速度が得られ、乱流の解析に本アダプタが有用であることが確認された。

本研究はドイツ連邦共和国、エアランゲン大学で実施されたものであり、種々の便宜をいただいた F. Durst 教授に感謝する。

#### 文 献

- (1) 小保方, 自動車技術会論文集, 30 (1985), 23.
- (2) 前田・ほか2名, 機論, 50-458, B (1984), 2545.
- (3) Knuhtsen, J., ほか2名, *J. Phys.*, E, 15 (1982), 1188.
- (4) Nakatani, N., ほか3名, *Rev. Sci. Instrum.*, 56 (1985), 2025.
- (5) Hironaga, K., ほか3名, *Int. Conf. Laser Anemomet.*, Manchester, (1985), Paper No. 25.
- (6) Durst, F., ほか2名, *Automob. Ind.*, 3 (1985), 327.
- (7) Bopp, S., ほか3名, *Proc. 4th. Int. Symp. Appl. L. A. to F. M.*, Lisbon, (1988), No. 6. 2.
- (8) Tropea, C., ほか1名, *ISL*, R 105 (1987), No. 29.
- (9) Fraser, R. A., ほか1名, *SAE Paper*, 880381 (1988).
- (10) Johns, R. J. R., ほか2名, *Proc. 3rd. Int. Symp. Appl. L. A. to F. M.*, Lisbon, (1986), No. 10. 2.
- (11) Buchhave, P., *Tech. Note*, State Univ. of New York at Buffalo, No. TRL-106 (1979).