

光集積回路による流速計測の高機能化

加藤 覚,長谷川和男

Novel Techniques of Laser Doppler Velocimetry using Optical Integrated Circuit

Satoru Kato, Kazuo Hasegawa

要旨

車載可能な流速分布測定システムの開発を目指し、可動部がないため振動に強く、かつ低消費電力で動作するという光集積回路の特長を生かしたFLDV (Fiber Laser Dopper Velocimetry)システムとして、3つの開発事例を紹介する。まず、小型の差動型プローブを開発し、これを用いて集積型光周波数シフタにより速度成分を周波数領域で分離検出する新規な2次元計測法を提案する。次に、多点の速度情報を集積型光スイッチにより時分割にて測定するシステムを作製し、4点測定器にて

オイル流速測定を実施して実用性評価した結果を示す。最後にバルクの光学部品を用いない全光ファイバ構成で実現可能な方式として、半導体レーザの周波数変調特性を利用して周波数領域でプローブを弁別する手法を提案し、2点測定にて気流速測定を実施した結果を示す。各方式とも、光源であるLDの出力光量あるいはスペクトル安定性等によりシステム仕様に制限があるもののシステムとしての機能性、実用性を確認できた

Abstract

This paper describes three novel techniques of multipoint measurement in optical fiber laser Doppler velocimetry, which make it possible to construct a system with an optical integrated circuit and optical fiber. Since such systems employ a unit light source and a unit optical detector, we will be able to measure the flow distribution using the systems. First, we demonstrate a new 2-dimensional measurement system using the optical integrated frequency shifter that we have originally designed on LiNbO₃. Next, we construct a multipoint measurement system with on

integrated optical switch and the distribution of oil flow is then measured using a four-point system. This method is based on time division multiplexing and each point is measured sequentially. Finally, the multipoint simultaneous measurement is demonstrated using a new type of system that employs laser diode modulation by injection current and many probes with an unbalanced optical fiber interferometer. Each system proved to be practical for air or oil flow measurement.

キーワード

LDV, 光集積回路, 集積型光周波数シフタ, 集積型光スイッチ, 2次元計測, 多点計測

1.はじめに

流れ場を乱すことなく,非接触で速度測定が可能な LDV (Laser Doppler Velocimetry: レーザドップラ流速計)は,YehとCumminsがその原理を発表¹⁾して以来,すでに34年が経ち,流速計測への

応用も数多く行われ,流れ診断の道具として定着している。しかし,従来の固定型 LDV は大型であり,使用に際して柔軟性に乏しく,測定点の移動も容易ではない。それを克服するため,近年FLDV も市販されているが,光源および測定プローブサイズはまだ大きく,どこでも容易に使用で

豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 34 No. 2 (1999. 6)

きるものではない。

自動車まわりにおいても,LDVはエンジンや車体開発において,有用な道具となっている。例えば,実車走行状態での最適燃焼,最適冷却のための検討が行われているが,現状では測定器のサイズに制限されて車載できないため,実車状態での検証ができない。そこで車載可能で,かつ速度分布測定をも含め,多点の速度情報を測定可能なシステムに対するニーズが高まっている。

筆者らは,これまでに光源に半導体レーザ(Laser Diode,以後LDと略す)を用いかつ小型プローブを有する1点測定のFLDV装置の開発を進めてきた。その結果,固定型LDVと同程度の測定能力を持ち,小型で可搬な測定器を開発した。

本報告では上記のFLDV装置を車載可能なまでに小型化し、さらに多点の流速を同時に測定可能な新規な測定手法について述べる。

2.流れの計測手法

この章では流れを乱すことなく測定可能な非接触による計測手法について示し,光集積回路を用いた多点および車載可能な流速測定器についてまとめる。

2.1 方式

流れを非接触で計測する手法としては,可視化技術を基にしたPIV(Particle Image Velocimetry)と,光のドップラ効果を利用したLDVがある。PIVは面内の流速分布および変動を測定するのに適した方法であるが,装置も比較的大きく,実時間計測は不可能な構成である。それに対してLDVは流速を高精度にかつ実時間で計測可能であり,光源部と測定プローブを光ファイバで分離させたFLDV構成とすることにより小型で測定対象に対して柔軟なシステムとなる。しかし市販装置は1点あるいは2次元測定で,分布を測定するには装置構成が大きくなり,困難であった。

2.2 光集積回路を用いた計測手法の特長

多点の流速を同時に測定するシステムとしては,複数波長を利用する方法²⁾,照射光の偏光状態を利用する方法³⁾等が提案されている。これらの方式は光源として高出力気体レーザを用い,かつバルク光学部品を使用した構成であるためにシ

ステムとしては大きく,振動に対して不安定であり車載可能な測定器にはなり得ない。また,プローブの小型,安定化を目的として,光集積回路技術を用いてプローブを構成したシステムの報告⁴⁾もあるが,構成上大きな受光開口径が得られず実用的ではなかった。このように従来法では,小型,安定化のために光集積回路を用いたシステム構成とし,高感度検出のためにバルク光学部品を用いた構成となっている。

そこで,安定に流速分布計測できかつ車載可能 なシステムとするため,以下の構成とした。

- (1) 光源にLDを用い,かつ光源と光検出器は各 1個で実現可能な構成とする
- (2) 測定プローブは微小光学部品で構成とする
- (3) 2次元および多点計測のためのキーデバイスを光集積回路で実現する

ここで,光集積回路をキーデバイスとする理由は,可動部がなく振動に強く,かつ低消費電力で動作するという特長を有しているためで,これを用いることにより車載可能な実用計測器を実現し得ると判断するからである。

そこで本報告では、3章にて集積型光数は数シフタを用いた新規の2次元計測法50を示す。また4章では、集積型光スイッチを利用して複数点の速度情報を時系列的に順次計測するシステムと、耐振動性を考慮したバルク光学部品を用いない全光ファイバ構成の計測法6070を示す。

3.2次元計測法

2次元計測としては,2波長を用い測定プローブにて照射用2光束を直交した配置として,プローブ光軸に対して垂直面内の流速を測定するものが市販されている。それに対して我々は,照射2光束からの後方散乱光と光源からの分岐光をヘテロダイン検波することにより,照射2光束面内の2次元流速を測定する新規な方式を提案する。

3.1 原理・構成

我々の提案する2次元流速計測システムの構成 図をFig. 1に示す。このシステムには,3種類の 周波数が得られる導波形の光周波数シフタが用い られている。これは我々が設計した独自の導波路 パターンであり,3種類の光周波数出力を等光量

(7)

に分配でき,かつ原理的に高いアイソレーションの得られる構造である。波長 1.3μ mのLD出力光を光周波数シフタに入射して,非回折光 f_{opt} と \pm 1次回折光 f_{opt} + f_{saw} および f_{opt} - f_{saw} を得る。各回折光を照射光として偏波保持ファイバPMFa,PMFbに導き,集光レンズにより1点に交差集光する。このとき,この集光部を通過する散乱体からの後方散乱光のうち,PMFaおよびPMFbからの信号成分は次式で与えられる。

$$\begin{split} f_{opt} + f_{saw} + f_{da} &= f_{opt} + f_{saw} + \\ & \{ - (1 + \cos \alpha)^{\bullet} v_x + \sin \alpha^{\bullet} v_y \} / \lambda \end{split} \tag{1} \\ f_{opt} - f_{saw} + f_{db} &= f_{opt} - f_{saw} + \end{split}$$

$$\{-(1+\cos\alpha)^{\bullet} v_{x} - \sin\alpha^{\bullet} v_{y}\}/\lambda \tag{2}$$

ここで, f_{da} および f_{db} は各々 PMF_a , PMF_b での照射光がドップラーシフトを受けた後の光周波数シフト量, v_x , v_y は各々Fig.1中での速度のx,y成分であり, α は照射2光速の交差角である。これらの後方散乱光は,再度集光レンズと受光レンズにより受光用ファイバSMFで光検出器まで導かれ,光検出器上で非回折光と合波干渉させる。このとき次式で示すビート信号が同時に得られる。

$$2f_{saw} + f_{da} - f_{db} = 2f_{saw} + 2\sin\alpha \cdot v_y / \lambda$$

$$f_{saw} + f_{da} = f_{saw} + \{ -(1 + \cos\alpha) \cdot v_x + \sin\alpha \cdot v_y \} / \lambda$$

(4)

(5)

$$f_{saw}$$
 - $f_{db} \! = \! f_{saw}$ - { - (1+cos α) - $v_x \! - \! \sin \alpha$ - v_y }/ λ

式(3)は式(1)と式(2)による干渉信号,式(4)は式(1)と非回折光によるの干渉信号,式(5)は式(2)と非回折光によるの干渉信号であり,この周波数成分をスペクトル分析器にて測定する。式(3) - (5)から面内の速度成分は次式のように算出できる。

$$v_{x} = \{ |f_{saw} + f_{da}| - |f_{saw} - f_{db}| \} / \{ -2 (1 + \cos \alpha) / \lambda \}$$
(6)

$$v_y$$
 = { $\mid f_{saw} + f_{da} \mid + \mid f_{saw} - f_{db} \mid - 2 \; f_{saw} \; \} / (\; 2 \; sin \; \alpha / \lambda)$

3.2 検証結果

光周波数シフタはz-cut $LiNbO_3$ (以後LNと略す)基板上に作製した。LNによる光回路デバイスの作製は,半導体デバイス作製と同様にフォトマスクを用いて,レジストにパターンを転写する方法により実施した。光導波路をパターニングした後,金属Tiを500nm堆積させてパターン部以外をリフトオフにて取り除き,1025°C wet O_2 雰囲気下で8時間熱拡散させて光導波路部を作製する。その後,光導波路と同様の工程で 0.2μ mの SiO_2 バッファ層と 1μ mの $A\ell$ 電極を作製してデバイスとする。

作製した導波型光周波数シフタは, $A\ell$ による櫛形電極で弾性表面波を励振して3つの出射光ポートから,非回折光および \pm 1次回折光を得る構造であり,素子の特性としては,過剰損失4.58dB,クロストーク19.6dBであった。

使用した測定プローブの外観をFig. 2に,また光学パラメータをTable 1に示す。構成は,照射用2光束を交差集光する差動型構成である。寸法は外径17mm ϕ ,長さ60mm,焦点距離45mm であり,比較的小型のものを作製した。

2次元流速計測の実験は,回転円板の側面の線速度をプローブを移動させて実施した。円板端の線速度をv=1.0 m/s一定として,傾き角 θ を0から45°まで変化させて測定した。周波数測定後 v_x および v_y 成分を算出した結果をFig. 3, 4に示す。 v_x はFig. 3のように予測値とよく一致しているが, v_y は

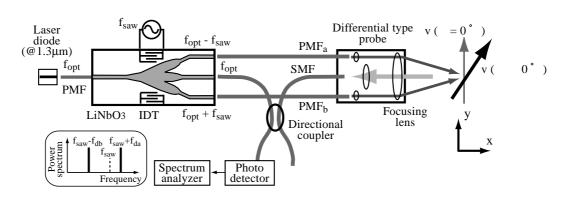


Fig. 1 Schematic illustration of 2D-FLDV system.

Fig. 4に示すように 傾き角の小さな領域において 誤差が大きくなっている。この要因としては , 光 周波数シフタにおける周波数シフト量f_{saw}が小さいため光導波路の分岐角が小さくなり , それが原 因でクロストークが増大し , スペクトル解析器で の周波数測定誤差が大きくなったためと思われる。

以上のように,現状ではやや測定誤差が大きいが,本方式において原理的に2次元流速が測定可能であることを確認した。

4. 多点計測法

4 . 1 光スイッチ方式

本方式は、小型の測定プローブを複数個配置し、 照射光を集積型光スイッチにより各プローブに順 次短時間で切り換え、対象の流速分布を測定する ものである。測定プローブの弁別を時間領域で行 うため、ドップラ信号は市販解析器を用いること のできるシステム構成であり、リアルタイム処理 が可能である。

4.1.1 原理・構成

Fig. 5に測定システムの基本構成を示す。光源には波長1.3μmのLDを用いた。レーザ出力光はレンズで平行光として,光アイソレータを通過後ビ



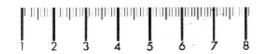


Fig. 2 Photograph of the small probe.

Table 1 Optical parameter of probe.

focal length	: 60mm
fringe space	: 7.89µm
fringe number	: 6.5
measurement volume	$: 50 \times 50 \times 610 \ \mu\text{m}^3$
SNR parameter	: 5.6 × 10 ⁻⁵
probe size	: $17\text{mm}\phi \times 60\text{mmL}$

ームスプリッタで2分割される。それぞれの光は 照射用光ファイバに結合され,集積型光スイッチ に伝搬されて各プローブに順次切り換えられる。 得られた後方散乱光は,受光用ファイバを通して 光検出器で光電変換される。ドップラ信号はFFT (Fast Fourier Transform) 解析器 (KANOMAX製, Model8007) にて,信号が得られた時間とその時 の速度が解析され,それぞれのデータはパソコン に取り込まれる。データの取込みは測定開始信号 によりプローブ1から順に切り換えて,信号の時 間情報からプローブを弁別してプローブごとに流 速平均と分散を算出する構成である。

作製した小型光源部の外観をFig. 6に示す。寸法としては80×80×35mm³と小型化を実現した。各ファイバ端からは3mWの出力が得られている。

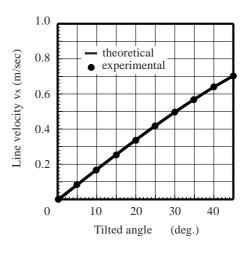


Fig. 3 X axis component v_x of line velocity v.

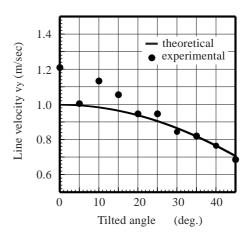


Fig. 4 Y axis component v_v of line velocity v.

使用した測定プローブは,前章で使用したもの と同じものである。

本測定法における測定誤差の主要因は,光ファイバの振動および照射用の2本のファイバの温度変化が考えられる⁸⁾。振動による効果としてはこのシステムにおいては1%以下と見積もられる。また,温度変化に関しては,数mm/sec以下の低速測定において問題になる程度である。

4.1.2 光スイッチ特性

現状の半導体レーザ、光検出器を基にしてのシステム作製において、光スイッチに要求される仕様をTable 2にまとめた。試算において、挿入損を6dB以下にできれば測定点での光量を3mW以上にできるため、水流および気流速測定においても実用的なシステムになると判断した。

上記の試算を基にして,集積型光スイッチとしては低挿入損失,高消光比および作製の容易性を考慮して,Fig. 7に示す導波路構成の反転 $\Delta\beta$ 形 $^{9.7}$ を採用した。今回は,上記構成の光スイッチを2段直列に配置した2入力4出力素子をLNにて作製して評価を行った。

今回作製したデバイスでは完全結合長が4.7mmとなったため,スイッチング電圧として32V程度を必要とした。作製した光スイッチの諸特性をTable 3にまとめる。

4.1.3 検証結果

まず,4点流速測定システムの機能評価を行った。評価実験系は,回転円板上に金属線 $(200\mu\text{m}\phi)$ を1列にならべ,回転半径を変化させ,金属線の線速度が各々で異なるように設定したものである。プローブ1から順に異なる金属線の線速度を測定可能なようにプローブを配置させ速度測定を行った。測定時のプローブの集光部光量は,各プローブとも2光束合計で0.4mW程度である。

上記評価実験にて,9m/sec までの測定範囲において $\pm 2\%$ 以下の誤差で測定可能なことを確認した。またプローブ切り換え時間に関しても,15msec-500 msecまで変化してもシステムとして安定動作を確認した。ゲート時間の下限15msecは,DCモータの特性と,回転による金属線の安定性による検定実験時の制限であり,光スイッチとしては駆動回路の特性を考慮しても,数十 μsec 以下

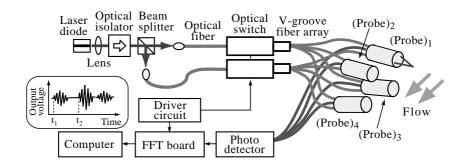


Fig. 5 Schematic illustration of multipoint measurement system in time domain multiplexing.

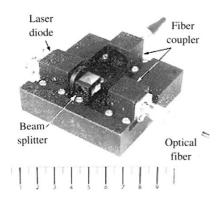


Fig. 6 Photograph of FLDV light source.

Table 2 Target specification of optical integrated switch.

output power	: > 1.5 mW/port
insertion loss	: < 6 dB
crosstalk	: < 20 dB
switching voltage	: < 15 V

でも十分に可能である。

次に, 当所で作製した2次元バルブモデル実験 装置を用いて、オイル流速の分布測定を行った。 測定対象は,スプール形の油圧バルブを2次元に モデル化し,その内部流れを評価するための装置 である。測定窓部にプローブを4点配置し,油中 に気泡を加えシードとして測定を実施した。測定 点は,流入ポート部(プローブ1), 絞り部(プ ローブ2),流出ポート部(プローブ3,4)とした。 各測定点の平均流速,分散値およびデータレート をTable 4に示す。流速測定結果は,他の固定型 LDVにて測定された結果とほぼ一致している。デ ータレートに関しては,他の測定対象において40 Hz以上が得られることを確認しているが,今回 の測定対象ではシードが少なく,かつ光源の光量 不足が原因で低かったと思われる。しかし光源の 光量増加とシーディングの改善により向上できる と判断している。

以上のようにプローブの移動なしに対象の速度 分布状態が測定可能であり、システムの実用性を 確認できた。

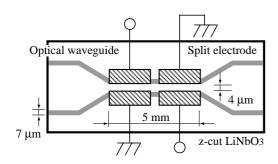


Fig. 7 Configuration for switched coupler with stepped $\Delta\beta$ reversal.

Table 3 Measured characteristics of optical integrated switch with one input and four outputs.

insertion loss	: 6.7 dB (± 0.8 dB)		
crosstalk	: 18 dB (± 1.5 dB)		
switching voltag	switching voltage;		
cross state	: 32 V (± 1.5 V)		
bar state	: 3 V (± 1 V)		

4.2 全光ファイバ方式

本方式は,前節と同様に小型の測定プローブを 複数個配置し,流速分布を測定するシステム構成 であるが,測定プローブの弁別を周波数領域で行 うため完全な同時計測を実現する。得られるドッ プラ信号には,複数の周波数成分が同時に存在す ることもあるため,従来市販のドップラ信号解析 器では安定に解析不可能なため,デジタルオシロ スコープとパソコンによる周波数解析器を使用し た。このため,現状では実時間測定ではない。

4 . 2 . 1 原理・構成

従来のLDVでは,流速方向を検出するため,一方の照射光をAOM (Acousto-Optics Light Modulator)にて周波数変化させてキャリア周波数を発生させている。このキャリア周波数をLDのFM特性と照射用光ファイバの光路差にて実現し,流速方向の検出とプローブの弁別に利用するのが本方式である。

Fig. 8に測定システムの基本構成を示す。LDは注入電流を変化させることにより、出力光強度を変調できるだけでなく、発振周波数をも変調することができる。そこでLDの駆動電流を鋸歯状に変調して、発振周波数を直線的に変化させる。出力光は戻り光による発振の不安定を避けるために光アイソレータを通した後、2分割され照射用光ファイバに導かれる。このとき2本の照射用光ファイバに光路差を設けると、プローブの集光部ではこの2光束の光周波数がLDの発振周波数の時間変化率と光路差に比例した分だけ異なり、ビートとなって現れる。このビート周波数fbは次式で表すことができる。

$$f_{b} = (dv/dt) \cdot \tau$$

$$= f_{m} \cdot \delta v \cdot \tau$$
(8)

Table 4 Results of multipoint measurement of oil flow distribution.

Position	mean velocity (m/sec)	deviation (m/sec)	data rate (Hz)
1	0.225	0.017	0.67
2	0.846	0.021	0.88
3	0.774	0.297	0.59
4	0.391	0.028	0.68

$$\tau = \mathbf{n} \cdot \Delta \mathbf{L} / \mathbf{c}$$

ここで, f_m および δv はLDへの鋸歯状変調周波数と発振周波数の総偏移量,nおよび ΔL は投光用ファイバのコア部屈折率とファイバ長の差,cは真空中での光速である。そのため光検出器から得られる周波数 f_s は次式となる。

(9)

$$f_s = f_b + f_d$$
 (10)
ここで, f_d は散乱粒子によるドップラ周波数である。

ドップラ信号の解析は、ドップラ信号をデジタルオシロスコープ(Lecroy製, Model 9310L)で8bitに量子化し、その後GP-IBにてパソコンに転送してFFT処理後,流速値を算出する構成である。ドップラ信号の判定は、FFT後のパワースペクトルレベルにて判断した。

本測定法に測定誤差としては,前節で示した光ファイバの振動および温度変化による要因以外に,式(8)からビート周波数fbの安定性が要因となる。光源の周波数変調によりこのビート周波数を発生させているため,光源に求められる条件として次の2点がある。

- (1) 光路差に対して安定に干渉縞が得られるように狭帯域発振スペクトル線幅である
- (2) 発振スペクトルの時間変化率 (dv / dt) が一定 である

光源には、発振スペクトルの縦モード安定性と発振周波数の大きな総偏移量を得るため、波長0.8μm帯のLDを用いた。このLDの諸特性をTable 5に示す。スペクトル線幅は6.5MHz程度のため、光ファイバの光路差としては30m程度まで安定し

た干渉縞は形成される。しかし本方式ではLDに電流変調を行うためにLDに温度変動が生じる。使用した1/50°C程度の温度制御回路においては,LDの発振周波数に発振スペクトル線幅以上(300MHz程度)の変動が生じるために,測定誤差1%以下とするには現状では光路差を最長でも2m程度しか実現できない。この光路差のため現状では流速測定範囲として±3m/sec程度に制限されている。そこで今回,プローブ1および2のビート周波数をそれぞれ259.3kHz,891.6kHzに設定した。

4.2.2 気流速測定結果

システム評価のための実験系としては,前述の 回転円板上に回転半径の異なる位置に列べられた 金属線を用い,この線速度測定を行った。結果より,2プローブとも測定範囲±3m/secに対して, 3.5%以下の誤差で測定可能なことを確認した。測 定誤差は,現状ではFFT処理における周波数分解 能に制限されている。

次に,2点の同時計測として内径 30mmφのアクリル円筒管内部の気流速分布を上流部および下流部において実施した。対象は円筒管下流側に吸い込みファンを配置し,上流部に整流チャンバを設けた構成である。このときシードとして加湿器のミストを用いた。整流チャンバから下流0.03mおよび2.7m位置における流速分布の測定結果をFig.9に示す。2.7mの下流位置では層流において流れが十分に発達しており,円筒管の中心位置に対して流速分布がほぼ対称形になっている状況が測定できた。分散値は中心付近で小さく,壁面に近づくにつれ大きくなっており,予測値と一致する。

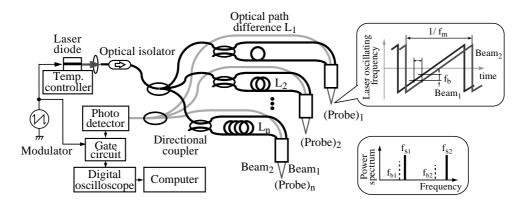


Fig. 8 Schematic illustration of the multipoint measurement in frequency domain multiplexing.

以上のように加湿器のミストをシードとして安 定に流速測定が可能なことを確認した。

5.まとめ

実車走行状態で自動車まわりの流速分布を測定可能な計測器の開発を目指し,可動部がないため振動に強く,かつ低消費電力で動作するという光集積回路の特長を生かしたLDVの方式を提案し,機能および実用性評価を行った。

まず,差動型LDVを基本構成とした新規な2次元計測法として,集積型光周波数シフタを用いて速度成分を周波数領域で分離検出する方式を提案した。また,多点測定法として集積型光スイッチにより時分割にて測定するシステムを作製し,オイル流速測定において4点測定の実用性評価を行った。さらにバルクの光学部品を用いず,全光ファイバ構成により実現可能な方式を提案し,2点測定にて気流速測定を実施した。

各方式とも、光源であるLDの出力光量あるいはスペクトル安定性等により測定システムの仕様に制限があるがシステムとしての機能性、実用性は確認することができた。そのため、今後LDのさらなる特性改善に期待している。

Table 5 Laser diode specification.

Spectral width $v_{\rm sp}$: 6.5MHz (@Po=30 mW)
Modulation rate dv/dt	: 1.4×10^{14} Hz/sec
Output power Po	: 30 mW (@Im=85mA)

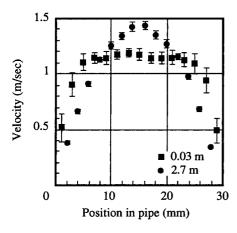


Fig. 9 Results of air flow measurement.

最後に,本研究における実用性評価実験を行う にあたり,機械2部の方々に協力していただいた。

参考文献

- Cummins, H. Z., Knable, N. and Yeh, Y.: "Observation of Diffusion Broadening of Rayleigh Scattered Light", Phys. Rev. Lett., 12(1964), 150
- 2) 例えば、DANTEC, The new FiberFlow system catalog
- Pannell, C. N., Tatam, R. P., Jones, J. D. C., and Jackson, D. A.,: "Two-dimensional fibre-optic laser velocimetry using polarisation atate control", J. Phys. E., 21-1(1988), 103
- 4) 春名正光, 笠澄研一, 西原浩: "光集積差動形レーザドップラー速度計", 電子情報通信学会論文誌C-II, J71-C-II, 5(1991), 346
- 5) 長谷川和男, 市川正, 加藤覚, 伊藤博: "ファイバ・レーザ・ドップラー流速計による流速の二次元計測", 第20回光波センシング技術研究会論文集, LST 20-21 (1997)
- 6) 加藤覚, 各務学, 市川正, 長谷川和男, 伊藤博: "半導体レーザのFM特性を利用した光ファイバレーザ流速計の検討", 第14回光波センシング技術研究会論文集, LST14-10 (1994)
- Kato, S., Ichikawa, T., Ito, H., Matsuda, M. and Takahashi,
 N.: "Multipoint Sensing Laser Doppler Velocimetry Based on Laser Diode Frequency Modulation", Intern. Conf. Optical fiber Sensors (Sapporo, May 1996), 606
- 8) Kaufman, S. L. and Fingerson, L. M.: "Fiber optics in LDV applications", Intern. Conf. Laser Anemometry-Advances and Application (1985), 53
- 9) Kogelnik, H. and Schmidt, R. V. : "Switched Directional Couplers with Alternating $\Delta\beta$ ", IEEE J. Quantum Electron., QE-12-7 (1976), 396

著者紹介



加藤 覚 Satoru Kato

生年:1960年。 所属:光応用研究室。

分野:光集積回路を用いた応用技術の開

発。

学会等:応用物理学会会員。



長谷川和男 Kazuo Hasegawa

生年:1965年。 所属:光応用研究室。 分野:光集積回路。

学会等:応用物理学会,電子情報通信学

会会員。 工学博士。