

### 3 ビーム照射を用いたレーザドップラ速度測定法の検討

宇賀神 惇\*<sup>1</sup> アナス・ルクマン・ビン・ムハマド\*<sup>1</sup> 三上 修\*<sup>2</sup>

#### Laser Doppler Velocimeter Using a Three Beam Irradiation Scheme by

Atsushi UGAJIN\*<sup>1</sup> Anas Luqman BIN MUHAMAD\*<sup>1</sup> and Osamu MIKAMI\*<sup>2</sup>

(Received on Sep.29, 2012 and accepted on Jan.17, 2013)

#### Abstract

Conventional one and two beam Laser-Doppler-Velocimeter (LDV) has one limitation that the direction of velocity vector of the moving target must be known before measurement. It is because the irradiation laser beam and the velocity vector must be on the same plane, and the angle between the laser beam and velocity vector is necessary in order to calculate the magnitude from the observed Doppler shift frequencies. These limitations may reduce the application field of LDV. We propose a new LDV system whose sensor head consists of 3 fibers aligned perpendicularly to each other. The proposed LDV enables measurement of the magnitude and direction of the velocity vector of a moving object regardless of its position relative to the 3-beam sensor head. The measurement principle of the 3-beam LDV and experimental results are reported.

**Keywords:** Velocimeter, Doppler Shift, Interference, Optical Fiber, Spectrum

#### 1. はじめに

LDV(Laser Doppler Velocimeter)はレーザ光のドップラー効果を利用した速度測定装置であり、1964年に Yeh と Cummins によって初めて流体計測に応用されて以来、回転物体の速度や水流の流速の測定などに用いられている<sup>1,2)</sup>。

今回、我々が提案する3ビームLDVでは、2次元の平面的な速度しか求めることができなかつた従来型1ビーム<sup>3)</sup>、ないしは2ビームLDV<sup>4,5)</sup>を改良することにより、3次元の速度の大きさおよび方向を求めることが出来る。ここで3次元速度測定とは、照射条件が制限されていた従来型LDVに対し、センサヘッドを測定対象物に対して、任意の位置に置いてレーザビームを照射することによって、速度の大きさと方向を求めることが出来る、という意味である。

例えば、障害物によって流れ方向が不確かになった水流の速度を測る場合、従来型LDVでは、流れの方向が既知の情報として与えられていないと、正確な速度を測定することは難しかった。しかし今回提案する3ビームLDVを用いることによって、流れの速度に加えて、流れの方向までを測定することが可能になる。

本稿では、その新たな測定系の提案および検証実験について報告する。

#### 2. LDVの動作原理

1ビームのレーザ光をファイバで照射するLDVの動作原理をFig.1に示す。速度を持つ対象物にレーザ光を照射すると、散乱光が発生し、その散乱光は光のドップラー効果により速度に比例した分だけ周波数がシフトする(ドップラーシフト周波数)。散乱光は照射光と同じ経路でファイバ内へ戻る。その際光学系内のファイバ端面等からの反射による参照光と散乱光とが干渉し、ビート波が発生する。そのビート波を光/電気(O/E)コンバータで電気信号に変換し、電気スペクトラムアナライザでドップラーシフト周波数を観測する。観測されたドップラーシフト周波数を用いて対象物の速度を求めることが出来る。レーザの波長を $\lambda$ 、照射光と対象物の速度方向とがなす照射角を $\theta$ 、ドップラーシフト周波数を $f$ とすると、対象物の速度 $V$ は下式(1)で求められる。

$$V = \frac{f\lambda}{2\cos\theta} \quad (1)$$

この1ビーム照射方式を展開して、2本のファイバ照射を用いた2ビームLDVが開発された<sup>4,5)</sup>。2ビームLDVの特徴としては、ビーム1、ビーム2の間のオフセット角度 $\Delta\theta$ の値のみで速度計測が可能となる点にある。これにより、速度測定の際のセンサヘッドに対する自由度が向上する。

\*1 工学研究科情報通信制御システム工学専攻修士課程

\*2 工学部光・画像工学科特任教授 工博

しかし、この 2 ビーム LDV の欠点として、測定対象物の速度方向と、2 つのビームの照射方向がいずれも同一平面上になければ正確な速度を求められないという点あげられる。2 つのビームがなす平面に対して測定対象物の速度が 3 次元的方向を持ってしまった場合、正確な測定が不可能となってしまう。

そこで、その解決策として新たに 3 ビーム LDV を提案する。

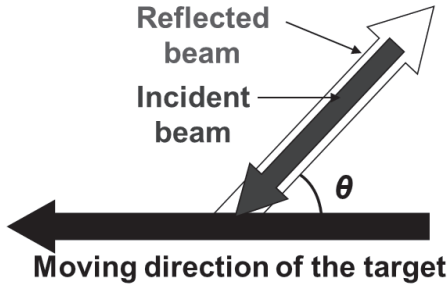


Fig.1 Configuration of 1-beam LDV.

### 3. 3 ビーム LDV の動作原理

#### 3.1 速度の導出方法

3 ビーム LDV の動作原理を示す。測定方法の模式図を Fig. 2 に示す。今回は計算を容易にするため、それぞれのビームを直交させたセンサヘッドを用いる。直交させることにより、3 本のビーム軸を直交座標系 X,Y,Z とみなすことが出来る。まず、センサヘッドの直交性を崩さず、任意の方向から対象物にレーザを照射する。そして得られたそれぞれのビームによるドップラシフト周波数を用いて、測定対象物の速度  $V$  を各ビーム軸に沿った速度成分に分解した速度  $v_i$  を求める。ビーム軸上の速度成分  $v_i$  は式(3)で表わされる。

$$v_i = \frac{f_i \lambda}{2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

この 3 個の速度成分を合成することにより、測定対象物の速度  $V$  が求められる。合成方法は、3 個の速度成分がそれぞれ直交しているため、式(4)で求められる。

$$V = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2} \quad (4)$$

#### 3.2 速度ベクトル方向の導出方法

前出の式(4)で求めた  $V$  を逆算することによって、センサヘッドに対する速度ベクトルの方向を求めることができる。以下に計算方法を示す。また Fig. 3 に模式図を示す。すなわち、各ビーム軸の速度成分  $v_i$  と、対象物の速度  $V$  との間には、次の関係が成立する。ここで  $\theta_i$  は、物体の速度ベクトルと各ビーム軸とのなす角度である。

$$v_i = V \cos \theta_i \quad (5)$$

これを変形すると、

$$\theta_i = \cos^{-1} \frac{v_i}{V} \quad (6)$$

すでに測定によって既知である  $v_i$  と、式(4)で求めた  $V$  を式(6)に代入することによって、物体の速度ベクトルと各ビーム軸とのなす角度、すなわち各ビーム軸からの速度ベクトルの傾きが得られる。それらを合成することで、速度ベクトルのセンサヘッドに対する方向を求めることができる。

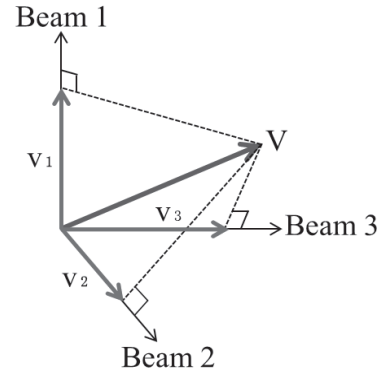


Fig.2 Configuration of proposed 3-beam LDV.  $V$  is velocity of moving target, and  $v_i$  is velocity component for beam axis  $i$ .

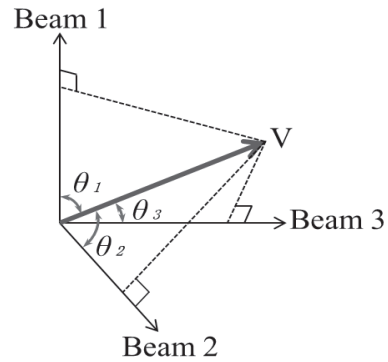


Fig.3 Schematic of angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  and  $\theta_3$ .  $\theta_i$  is angle between the target velocity and beam axis  $i$ .

### 4. 3 ビーム LDV 速度測定実験

今回使用した測定系を Fig.4 に示す。測定対象物として、側面に反射板を張り付けた回転する円筒 (直径 38mm) を用いた。その側面に互いに直交させた 3 つのビームを 1 スポットになるように照射する。光源にはファイバ・ブラッグ・グレーティング共振構造の単一縦モード半導体レーザ (波長 976nm) を用いた。レーザ光を 3dB-SMF (単一モードファイバ) カップラに入射し、2 ビームに分岐する。2 ビームに分岐された片方のファイバの先に、コネクタでさらに 3dB-SMF カップラをつなぎ 2 ビームに分岐させることで、最終的に 3 本のビームになるように光学系を構成した。3 本のファイバ先端にはコリメータレンズをつけ、Fig. 5 に示すような治具を用い、直交性を持たせたセンサヘッドを構成した。

測定物に照射し得られた周波数スペクトルの一例を Fig. 6 に示す。これらの周波数スペクトルを用い、式(3)より各速度成分を求め、式(4)で合成することにより対象物の速度を求める。求められた速度を市販の速度計(キーエンス社製 RX-22:測定誤差±1%程度)で測定した数値と照らし合わせたところ、誤差は 5%程度であった。測定誤差の原因は、照射ビームの直交性を手動にて調整していることによる角度誤差が発生している可能性、さらに使用したレーザの波長が

近赤外域のために、対象物の側面で照射ポイントの確認が難しかったことが考えられる。また、考える電気スペクトラムアナライザでの読み取り誤差範囲を±100kHzとし、各ビームの周波数がすべて100kHzずつずれた場合を想定して計算したところ、最終的な速度への誤差影響は最大でも±1%程度となった。今後、これらの点を改良して、測定精度の向上をはかることが必要である。

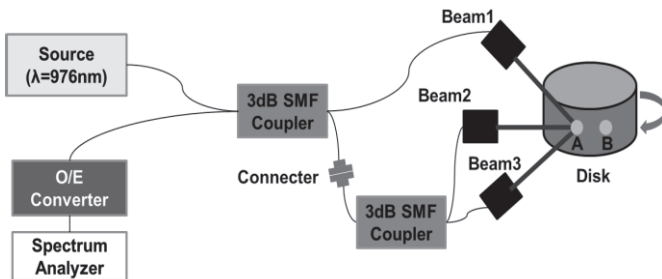


Fig.4 Experimental setup of 3-beam LDV.

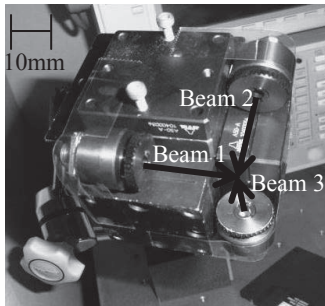


Fig.5 Photograph of 3-beam sensor head.

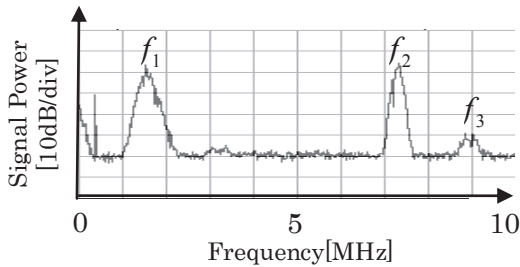


Fig.6 Example of observed Doppler shift frequencies.

次にセンサヘッドを平行にシフトさせることによって、測定対象物上でのビームの照射位置をずらし、それぞれの点をポイント A, B としたとき (Fig.7 参照) 場合の速度測定を行った。

観測された周波数スペクトルを Fig.8 に示す。またこれらの周波数スペクトルの値を使用して、対象物の速度を求めた結果を Table 1 に示す。Fig. 8 より、照射位置をずらした場合、それぞれのビームによるドップラーシフト周波数の値が変わる。これは測定点での速度ベクトルの方向が異なるからである。しかし、これらの周波数から測定対象物の速度を求めると、ほぼ一致することがわかる。これは測定対象物の回転速度は一定に保たれており、ポイント A と B で測定した速度は一定であることから、当然の結果である。このほかにも、数回照射位置をずらして測定を行ったが、いずれも誤差 0.1m/s 以内 (1.5%程度) という結果を得ることができた。比較的高い再現性が得られた要因として、センサヘッドを動かさず測定対象物を動かして測定を行ったため、角度設定が常に一定であり、本実験内においては、角

度ずれの影響がなかったことが考えられる。しかしながら、未だ現れる誤差原因として、前述したように、不可視光の使用、スペアナでの読み取り誤差が考えられる。

ビーム軸  $i$  に対する速度ベクトルのなす角  $\theta_i$  を求めた結果を Table 2 に示す。この結果から、測定点が異なるため、速度ベクトルの方向が変化していることが示されている。

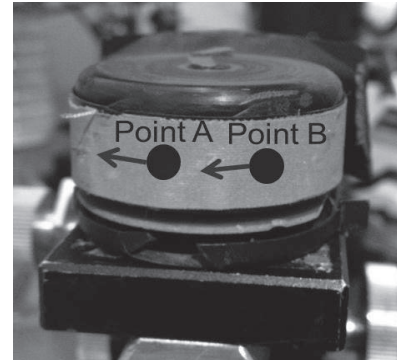


Fig.7 Irradiation point A and B on the target.

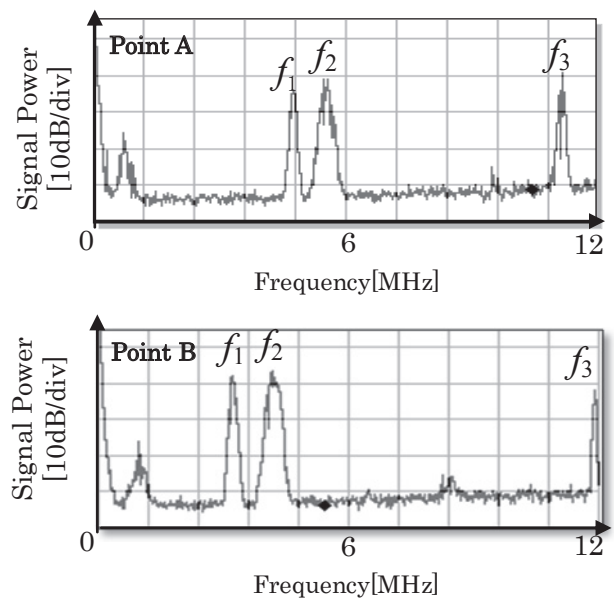


Fig.8 Experimental results observed at different irradiation points.

Table 1 Experimental results.

Point A	Frequency $f$ [MHz]	Each Velocity $v$ [m/s]	Composition Velocity $V$ [m/s]
Beam 1	4.75	2.32	6.43
Beam 2	5.45	2.66	
Beam 3	11.02	5.38	

Point B	Frequency $f$ [MHz]	Each Velocity $v$ [m/s]	Composition Velocity $V$ [m/s]
Beam 1	3.19	1.56	6.34
Beam 2	4.18	2.04	
Beam 3	11.9	5.80	

Table 2 Calculated angles  $\theta_i$  for beam axis  $i$  at point A and B.

	$\theta_1$ [deg]	$\theta_2$ [deg]	$\theta_3$ [deg]
Point A	68.9	65.6	33.2
Point B	75.8	71.2	23.8

## 5. まとめ

以上、測定誤差の解消という課題は残るが、3 ビーム照射方式を採用することによって、センサヘッドの照射方向に関係なく、速度の大きさと方向を測定できることが確かめられ、本提案の3 ビーム LDV の有効性を確認できた。

今後は、センサヘッドの高精度の組み立てと可視レーザー光の利用によって、測定精度の向上と、速度の大きさと方向を即座に表示できる計測システムの開発に取り組む予定である。

## 参考文献

- 1) Y. Yeh, and H.Z. Cummins : Localized Fluid Flow Measurements with a He-Ne Laser Spectrometer, Appl. Phys.Lett, 4, 176(1964)
- 2) 猪狩直志：光ファイバを用いた半導体レーザドップラ速度計に関する研究, 東海大学大学院工学研究科 2009 年度修士論文.
- 3) S. Shinohara, et al : Laser Doppler Velocimeter using the self-mixing effect of semiconductor laser diode, Appl. Opt. Vol. 25, pp.1417-1419(1986).
- 4) 今村峰宏, 瀬間久稔, 井藤嘉泰, 三上修 : 2 ビーム照射による自己混合型半導体レーザ速度計, 光学, Vol. 30, No.11, pp.748-753(2001).
- 5) 猪狩直志, アナス ルクマン ビン ムハマド, 三上修 : 2 ビームファイバ照射を用いた半導体レーザ速度計, 東海大学紀要工学部, Vol.49, No.2, pp.25-28(2009).