

2 ビーム照射による自己混合型半導体レーザー速度計

今村 峰宏*・瀬間 久稔*・井藤 嘉泰*・三上 修*,**

*東海大学電子情報学部 〒259-1292 平塚市北金目 1117 番地

**東海大学未来科学技術共同研究センター 〒259-1292 平塚市北金目 1117 番地

Two-Beam Type Self-Mixing Semiconductor Laser Doppler Velocimeter

Minehiro IMAMURA*, Hisatoshi SEMA*, Yoshiyasu ITOH* and Osamu MIKAMI*,**

*School of Information Technology and Electronics, Tokai University, 1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

**Future Science and Technology Joint Research Center, Tokai University, 1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

Velocity can be easily measured by using Doppler-shifted frequency with the self-mixing effect of a laser diode (LD). Application of the LD self-mixing effect has several advantages, such as the high sensitivity and simple optical system. However, for the conventional LD self-mixing velocimeters, the information of the laser beam incidence angle to the moving target is indispensable to calculate the velocity from the Doppler-shifted frequency. We have proposed a new two-beam arrangement for the LD self-mixing Doppler velocimeter. It is confirmed that the velocity in the plane of the two beams can be obtained only by the information of the two-beam offset angle which is given precisely.

Key words: semiconductor laser, velocimeter, self-mixing effect, Doppler-shifted frequency

1. はじめに

レーザードップラー速度計 (LDV: laser Doppler velocimeter) はその開発以来数十年経ち、すでに多くの分野で実用化されている。たとえば、回転・往復運動している物体や、ガスや液体の流れの速度計測に応用されている。

しかし、従来の LDV の基本構成としては、光源となる半導体レーザーと測定対象物からの散乱光を受光する PD (photo diode) とを別の位置に設置する必要があった。また、音響光学素子を必要とするなど、センサーとしての光学系が複雑になる欠点があった。さらにレーザー光の波長と光学系の幾何学的条件をあらかじめ決定して、ドップラーシフト周波数から速度を求めるといった測定原理のため、物体の移動方向と測定系の光軸がなす角度情報があらかじめ必要であった。よって、その相対角度が時間的に変化するといった場合には、速度計測が困難になる。

これらの問題に対して、半導体レーザーの自己混合効果を利用する方法が、静岡大学の篠原らのグループによって

提案されている^{1,2)}。この方法は、センサーヘッドが小型化でき、複雑な光学系を使用せずに安価にできるなどの利点がある。しかし、この場合も、物体の移動方向と測定系の相対的な角度情報はあらかじめわかっていることが前提であった。

今回、筆者らは、自己混合型 LDV において半導体レーザーからのビームを2分割し、オフセット角度が既知である2ビームを物体に照射することによって、測定物体との相対角度を必要とせずに、2ビームのなす平面内の速度が求められることを見いだした。この中で2つのビームを1スポットで照射した場合、2つのドップラーシフト周波数のほかに、第3の周波数が認められた。本報告では、2ビームの自己混合型 LDV の原理、実験結果について報告する。

2. 従来の自己混合型 LDV

まず、LDV の原理を簡単に述べる。LD (laser diode) から出射されたレーザー光を、移動している測定対象物に照射することによって、散乱光が発生する。その散乱光を

** E-mail: mikami@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

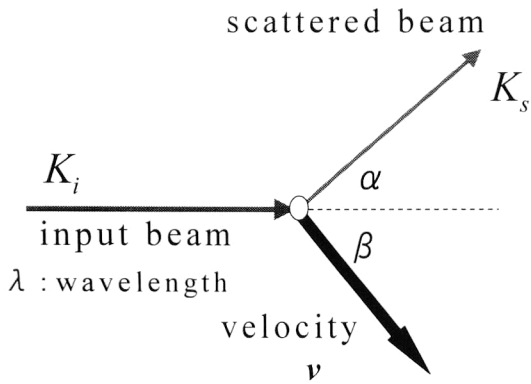


Fig. 1 Relation between laser beams and velocity v .

PDで受光し、電気スペクトラムアナライザにて検出すると、ドップラーシフト周波数が観測される。このドップラーシフト周波数と照射角度の情報から速度を求める。いま、Fig. 1に示すように、測定対象物の移動速度を v 、照射レーザー光の角波数ベクトルを K_i 、散乱光の角波数ベクトルを K_s とすると、そのドップラーシフト周波数 f_b は次式で表される。

$$f_b = (K_i - K_s) \cdot \frac{v}{2\pi} \quad |K| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

$|K|$ は各角波数ベクトルの大きさである。スカラー表示すれば、

$$f_b = \frac{2v}{\lambda} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2)$$

ここで、 λ は真空中での光波長である。式 (2) より、速度 v が含まれているので、レーザービーム、物体の移動方向、観測方向の相対的角度情報 α と β がわかれば、速度が求められることになる。

次に、1ビームによる自己混合型LDVを説明する。これは、レーザー光の自己混合効果によって観測されるドップラーシフト周波数から速度を求めるというものである。LDから出射されたレーザー光を測定対象に照射する。物体に対する照射角度を θ とする。物体からの散乱光は同じ光路を逆に進み、再びもとのLDに戻ることによって、もとのレーザー光と散乱光とが自己混合し、ビート周波数が発生する。LD後方に設置されたPDで出力光を受光し、その後プリアンプによる増幅や電気スペクトラムアナライザという電氣的処理によって、ドップラーシフト周波数を観測し速度を求める。

自己混合型の採用によって、受光器としてのPDと光源としてのLDを一体化することができ、光学系が簡単になる。しかも、LDの端子電圧を測定するようにすれば、PDは不必要になる。さらに、LDの自己混合効果を用いることによって、散乱光の受光感度が向上する。しかし、

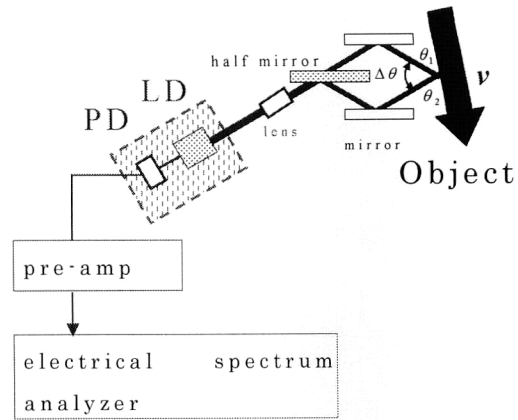


Fig. 2 Block diagram of the proposed two-beam self-mixing type LDV.

速度を得るには、常に照射角度情報が必要である。従来の自己混合法は、この点で簡易性が失われ、応用分野も限定されるという問題があった。さらに、正確な照射角度を入力しないと、精密な速度計測を行うことができず、常に一定角度を保つ測定対象物に限定するか、精密な角度計測を行う角度計測装置を新たに付加しなければならないという不都合があった。

3. 2ビームによる自己混合型LDV

3.1 測定原理

この問題を解決するために今回提案したものが、以下に述べる2ビームを用いた自己混合型LDVである。この方法を用いることで、2ビームを含む平面の速度成分を測定することができる。Fig. 2を用いて原理を説明する。

LDからのレーザー光をハーフミラーで2分割し、それぞれのビームを再びミラーで反射し測定対象物の1点に照射する。つまり、オフセット角度 $\Delta\theta$ をあらかじめ設定した2ビームを用いることで、照射角度情報なしで2つのドップラーシフト周波数とオフセット角度との関係から速度計測を行う。測定対象物の速度を v 、レーザー光の波長を λ 、2つのビームの照射角度を θ_1 、 θ_2 とすると、それぞれのビームによるドップラーシフト周波数 f_1 、 f_2 は

$$f_1 = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_2 \quad (4)$$

となる。ここでオフセット角度は、

$$\Delta\theta = \pi - (\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

式 (3)、(4) より、その差を求めると、

$$\Delta f = f_1 - f_2$$

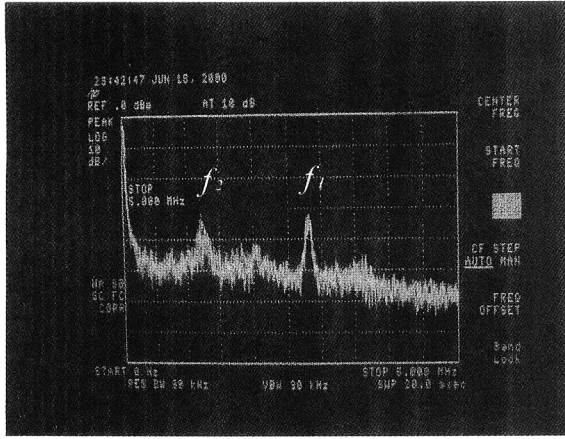


Fig. 3 Observed spectrum for two-spot irradiation case of the two-beam self-mixing LDV.

$$= f_1 \cdot (1 - \cos \Delta\theta) + \frac{2v}{\lambda} \cdot \sin \Delta\theta \sqrt{1 - \left(f_1 \cdot \frac{\lambda}{2v} \right)^2} \quad (6)$$

式 (6) において、未知数は速度 v だけであるので、これを求めると、

$$v = \frac{\lambda}{2 \sin \Delta\theta} \sqrt{f_1^2 + f_2^2 - 2f_1 f_2 \cos \Delta\theta} \quad (7)$$

周波数 f_1 と f_2 および、オフセット角度 $\Delta\theta$ のみが含まれている。すなわち、それぞれのビームの照射角度 θ_1 , θ_2 の情報は不要になる。ただし、 f_1 と f_2 はスペクトラムアナライザー上では常に正として出力されるので、あらかじめ θ_1 と θ_2 の大まかな照射角度情報は必要となってくる。以下に、3通り示す。

- i) $0 < \theta_1 < \pi/2$ $\pi/2 < \theta_2 < \pi$
- ii) $0 < \theta_1 < \pi/2$ $0 < \theta_2 < \pi/2$
- iii) $\pi/2 < \theta_1 < \pi$ $0 < \theta_2 < \pi/2$

i) および iii) の場合には式 (7) をそのまま使い、ii) の場合は式 (7) において $-2f_1 f_2 \cos \Delta\theta$ を $+2f_1 f_2 \cos \Delta\theta$ と置き換えて計算する必要がある。また、どの場合においても f_1 と f_2 の識別を行わなくてよい。

3.2 2ビーム2スポット照射の場合

式 (7) には、2つの周波数 f_1 , f_2 が含まれている。これらの2つの周波数が同一 LD 内で自己混合を生じるわけであり、お互いに相互干渉せずに独立に存在することを確認するため、以下に示す予備実験を行った。

測定対象物である回転ファンの同一半径上約 15 mm の近接した2点にレーザー光を照射した。すなわち、1つの速度 v を2つの照射角度 θ_1 と θ_2 で測定し、異なるドップラースhift周波数 f_1 と f_2 を発生させた。オフセット角度 $\Delta\theta$ は 12° と設定した。Fig. 3 に、観測した電気スペクトラムアナライザーの結果を示す。

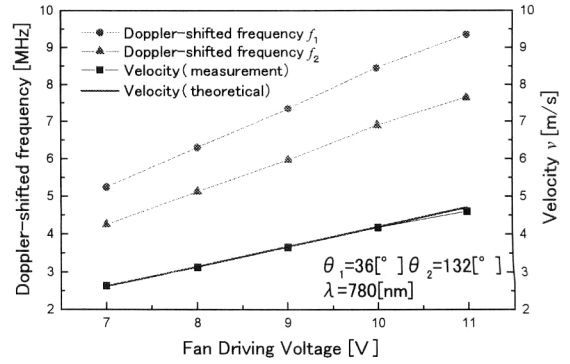


Fig. 4 Observed Doppler-shifted frequencies f_1 and f_2 , and measured fan velocity v as a function of fan driving voltage in the case of two-spot irradiation.

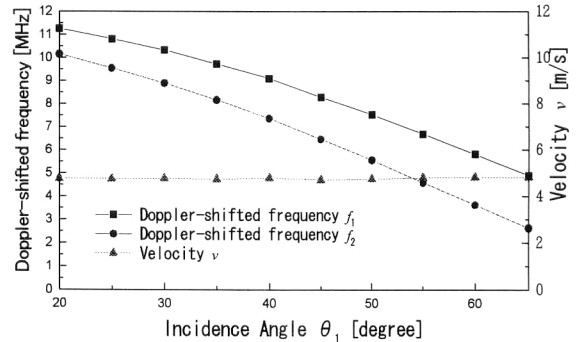


Fig. 5 Observed Doppler-shifted frequencies f_1 and f_2 , and measured fan velocity v as a function of incidence angle θ_1 .

また、Fig. 4 にファン駆動電圧を変数として、周波数 f_1 と f_2 , さらに測定結果から求めたファン速度 v を示す。ファン駆動電圧の上昇により速度が変化し、ドップラースhift周波数 f_1 および f_2 は、先に示した式 (3), (4) に従って変化する。これらより求めたファン速度を、実際のファン速度と比較し、その誤差は 1~2% 以内であった。この結果、2つのドップラースhift周波数は、同一 LD 内で互いに干渉せず独立に自己混合することが確認できた。すなわち、それぞれの速度成分に応じた2つのドップラースhift周波数を良好に得ることができた。ドップラースhift周波数が2つ得られると、照射角度を用いずに、オフセット角度だけの情報で速度を算出できることになる。

3.3 2ビーム1スポット照射の場合

次に、照射スポットを回転ファン上の同一点にして測定を実施した。オフセット角度 $\Delta\theta$ は 11° と一定に保ち、照射角度 θ_1 を変化させて測定した。Fig. 5 に、実験結果を示す。

先と同様に、回転ファンの速度は誤差 1~2% 以内で求めることができた。この誤差の原因は、オフセット角度の設定誤差に起因すると考えられる。ファイバー型や導波路

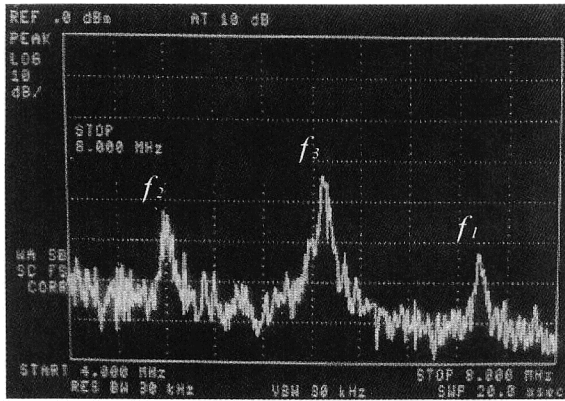


Fig. 6 Observed spectrum in the case of one-spot irradiation.

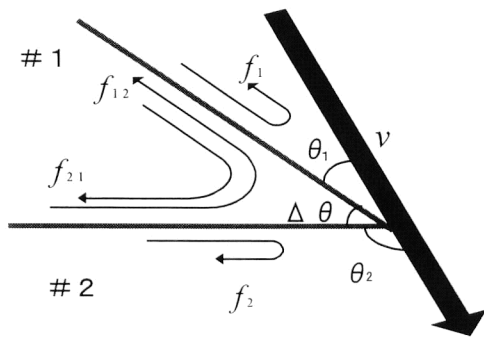


Fig. 7 Schematic illustration of input beams and scattered beams.

型の光分岐デバイスを用いれば、今回のようなフリースペースの場合よりも精密にオフセット角度を設定できると考えられる。

1スポット照射の場合、特異な現象が観測された。Fig. 6に、電気スペクトラムアナライザの結果を示す。ドップラーシフト周波数は、先に述べた f_1 , f_2 以外に、第3の周波数 f_3 が f_1 と f_2 の中間に発生することが見いだされた。これは、実際の速度計測には影響を及ぼさないが、その原因を検討した。1スポット照射の場合、Fig. 7に示すようにいくつかの散乱光の戻り方がある。ひとつは、ビーム1, 2の散乱光がそれぞれもとの光路を逆に戻り、LD内で自己混合を起こす。この場合のドップラーシフト周波数 f_1 および f_2 は、先の式(3), (4)で与えられる。

次に、ビーム1の散乱光がビーム2の光路を逆に戻ることが考えられる。また、ビーム2の散乱光も同じである。この場合のドップラーシフト周波数を計算すると、

$$f_3 = f_{12} = f_{21} = -\frac{2v}{\lambda} \cdot \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (8)$$

となる。したがって、LD内では3種類の周波数が自己混合することになる。

この結果、スペクトラムアナライザ上には、Fig. 7に

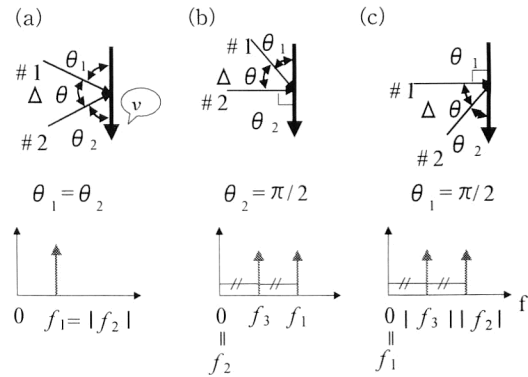


Fig. 8 Special cases of two-beam irradiation.

示すような周波数成分が観測されることになる。つまり、 f_1 , f_2 は、測定対象物に当たるまでのレーザー光がたどった光路をそのまま同じ光路でLDに戻った結果生じるドップラーシフト周波数であり、その真中に生じた第3周波数 f_3 は、散乱光が互いに他のビームの光路を通過してLDに戻った結果生じていることが確かめられた。

3.4 2ビーム照射の特殊な場合

2ビーム照射の特殊な場合を、Fig. 8に示す。Fig. 8(a)は、2つのビームの照射角度が同じである場合である。2つのドップラーシフト周波数は一致し、電気スペクトラムアナライザ上には、ただ1本のスペクトルが観測される。速度 v は、次式で求められる。

$$v = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \frac{\Delta\theta}{2}} \cdot f_i \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

(b) および (c) は、一方のビームが測定対象物の運動方向に対して 90° で照射される場合である。(b)を例にとるとドップラーシフト周波数 f_2 はゼロとなるが、第3周波数 f_3 は存在する。このとき速度 v は次式で求められる。

$$v = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \Delta\theta} \cdot f_1 \quad (10)$$

これより、このような条件においても、相対角度情報なしでの測定は可能である。

3.5 オフセット角

これまで、オフセット角度の設定は、ハーフミラーの構成上、任意の角度に設定することはできなかった。しかし、理想的なオフセット角度があるとすれば、さらに測定誤差を少なくすることができる。このようなことから理想的なオフセット角度を検討した。

$$\frac{\partial v}{\partial \Delta\theta} = \frac{\lambda \{ f_1 f_2 \sin^2 \Delta\theta - \cos \Delta\theta (f_1^2 - 2f_1 f_2 \cos \Delta\theta + f_2^2) \}}{2\sqrt{f_1^2 - 2f_1 f_2 \cos \Delta\theta + f_2^2} \cdot \sin^2 \Delta\theta} \quad (11)$$

したがって、式(11)を用いてファン速度を4 m/s、波長を780 nm、照射角度 θ_1 を 10° と設定することでドップ

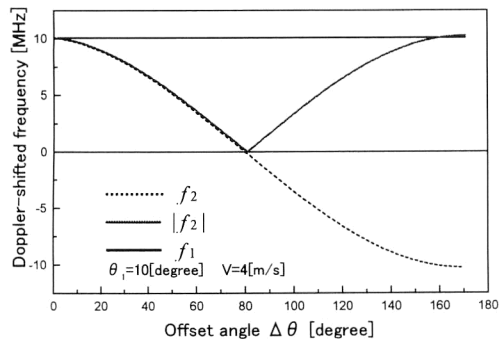


Fig. 9 Ideal offset angle.

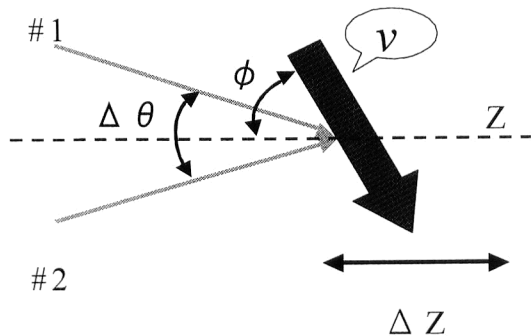


Fig. 10 Block diagram of the object displacement.

ラーシフト周波数 f_1 を固定値にし、それに対するドップラーシフト周波数 f_2 の関係から理想的なオフセット角度を検討した。その結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 からわかるように、オフセット角度が 20° 以下までの部分と 150° 以上の部分では、オフセット角度に対するドップラーシフト周波数 f_2 の変化の勾配がなだらかである。つまり、ドップラーシフト周波数に対するオフセット角度の許容誤差範囲が大きいといえる。

したがって、 20° 以下までの部分と 150° 以上の部分が理想的なオフセット角度であるといえる。しかし、実際には 150° 以上のオフセット角度を設定しようとするとき、焦点距離が近くなり、構成上大きくなってしまふ。また、ほんの少し焦点がずれた場合でも速度計測ができなくなるといふことが考えられる。

このことを考慮すると、 20° 以下でオフセット角度を設定することが望ましいといえる。

4. 第3周波数の応用

第3周波数は、速度計測には必要がないが、その応用を検討した。その結果、第3周波数の電気スペクトラムアナライザー上での強度を用いることにより、レーザー照射の位置情報を得る可能性がわかった。

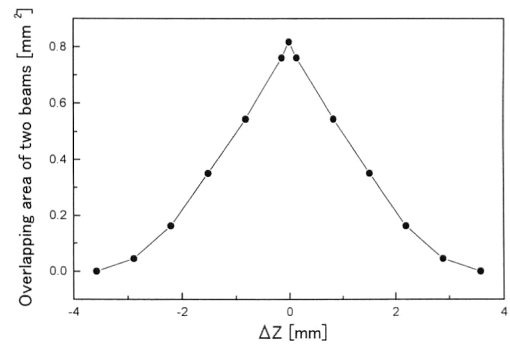


Fig. 11 The relation between the object displacement and the overlapping area of the two beams.

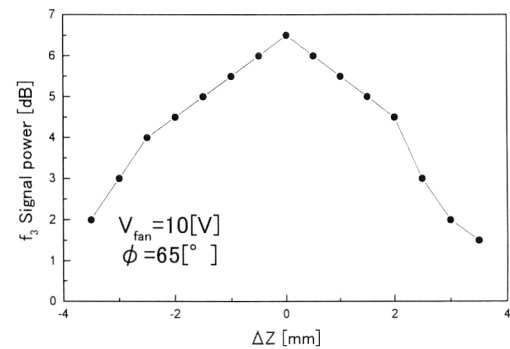


Fig. 12 Signal intensity of the frequency f_3 , vs. object displacement.

4.1 理 論

第3周波数の発生原因をもう一度整理すると、2つのレーザーが測定対象物に1スポットで照射された場合、散乱光が異なる光路を戻る結果生じるものである。逆にいえば、1スポットで照射されなければ発生しない周波数である。ここでの1スポットとは、測定対象物上で2つのレーザー光が少しでも重なる部分があれば、散乱光が違う光路を戻ることができるので、1スポットと定義する。また、2つのレーザー光がまったく同一点に重なる場合とほんの少しだけ重なる場合とでは、電気スペクトラムアナライザー上での信号強度が異なることが考えられる。測定対象物上でのレーザー光束の重なり面積と信号強度との関係を求めた。

Fig. 10 に示すように、測定対象物を前後に移動した場合の距離 ΔZ と、2ビームの重なり面積との関係を求めた。ここで、便宜上2ビームは測定対象物に対称 ($\phi = 90^\circ$) に照射され、かつ重なり度が100%のときを移動距離 $\Delta Z = 0$ mm とした。また、レーザー光の直径は1 mm、オフセット角度 $\Delta\theta = 12^\circ$ で計算した。計算結果を Fig. 11 に示す。測定対象物が1.5 mm程度移動すると、重なる面積は半減する。

4.2 測定結果

測定対象物を前後方向 ΔZ に変位させた場合の、電気スペクトラムアナライザ上での第3周波数の強度を測定した。その結果を Fig. 12 に示す。

信号強度は移動距離 ΔZ が大になるに従って減少し、2 mm 程度変位した場合に半減した。これは、計算値とは若干差があるが、信号強度と移動距離との関係はほぼ同様であり、信号強度は2つのレーザー光が重なる面積に依存するといえる。オフセット角度を大きくすれば、変位に対してより敏感になると予測される。

5. ま と め

新たに提案した2ビーム法を用いた自己混合型LDVは、ハーフミラーを用いてレーザービームを2分割するとともに、あらかじめ設定したオフセット角度で交差させて測定対象物に照射する。受光部から出力されたビート波を周波数分析すると、各ビームのそれぞれの照射角度に応じたドップラーシフト周波数が得られ、この2つのドップラーシフト周波数を用いると、レーザー光の照射角度にかか

わず測定対象物の2ビーム平面内の速度算出をすることができた。したがって、正確な照射角度の計測を必要とせず、速度計測を行うことができるようになる。このため、自己混合型LDVの構成の簡易さを失わずに、高精度な速度計測を行うことが可能になるという特長をもつ、測定器を構成することができる。

本研究を進めるにあたりご助言をいただいた、静岡大学工学部篠原茂信教授、千葉工業大学工学部角正雄教授、小寺博教授、ならびにスズキ株式会社技術研究所に感謝いたします。

文 献

- 1) S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida and M. Sumi: "Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1417-1419.
- 2) S. Shinohara, H. Yoshida, H. Ikeda, K. Nishide and M. Sumi: "Compact and high-precision precision range finder with wide dynamic range and its application," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **41** (1992) 40-44.