鏡面反射光を利用した固体表面速度および
角度のレーザー・ドップラ計測[†]

岡田 英史*・南谷 晴之*

Laser Doppler Measurement of Solid Surface Velocity and
the Moving Angle by Use of Specular Reflection

Eiji OKADA* and Haruyuki MINAMITANI*

On the measurement of velocity of moving solid surface by using a laser Doppler velocimeter (LDV), diffuse and specular reflection can be observed in the back scattering region. Since the specular reflection (SR) is followed by the law of geometrical optics, direction of the reflected beam changes with the moving angle of solid surface. However, the utilization of SR has never been considered on the LDV measurement.

In this study, we proposed a new differential method of LDV, in which the SR beam was again reflected by means of a mirror (specular re-reflection, SRR) and arranged to enter into the sampling volume as an incident light. As consequence by crossing three laser beams (SR and two inherent incident beams) in the focal point, three different interference were constructed in the sampling volume. When scatters pass through the sampling volume, scattered light emits and involves three different Doppler frequency shifts which give an information regarding the velocity of the solid surface and the moving angle.

In the present paper, theoretical investigation was carried out about the effect of SRR on the Doppler signals correlated with the moving angle of the solid surface. Fundamental experiment was also carried out by using a rotating disk and the results were compared with the theoretical aspects. Application of the Doppler effect caused by SRR

was additionally discussed.

Key Words: laser Doppler velocimeter, specular reflection, moving solid surface

1. 緒 言

レーザー・ドップラ速度計 (Laser Doppler Velocimeter, 略して LDV) は 2 本のレーザー光を交差させることによって測定体積に干渉縞を形成し, そこを通過する散乱体からの散乱光のドップラ周波数シフトから速度を求める測定法である. そのため非接触測定が可能である, 測定速度とドップラ周波数の関係が線形である, 応答が速く速度の瞬時値を連続的に測定できる, 空間分解能がよい, などの利点がある. 反面, 測定対象に光を散乱させる要因が必要であるという測定条件をもつ.

気体, 液体流の測定のときは散乱体として微粒子を測定対象に混入することによってドップラ周波数シフトをうけた散乱光を得る. この混入する微粒子の粒子径や形状と出力されるドップラ信号の特性のあいだに密接な関係があると考えられ, さまざまな検討¹⁾がなされている.

測定対象が固体表面の場合, 固体表面にレーザー光を入射するとその表面の粗さに応じて拡散反射と鏡面反射が一定の比率で生じる²⁾. このうち拡散反射による散乱光は流体速度計測における散乱粒子からの散乱光と同様に固体表面の速度に応じたドップラ周波数シフトをうけており, 測定対象の速度に関する情報をもっている. また鏡面反射によるビーム状の反射光は幾何光学的に反射の法則にしたがっているので固体表面の移動方向に関する情報をもっている. しかし, 従来のレーザー・ドップラ速度計測においてこの鏡面反射光の利用についてはほとんど検討がなされていない.

[†] 流れの計測と可視化 大阪ジョイント講演会で一部発表 (昭 60・10)

* 慶応義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

(Received January 13, 1986)

(Revised May 7, 1986)

著者らはこの固体表面からの鏡面反射光の幾何光学的性質に着目し、鏡面反射光の一方を反射鏡を用いて再反射させ固体表面上の測定体積に入射させることにより測定体積に多重干渉縞を形成し、そのとき得られる複数のドップラ周波数から固体表面の移動方向を求めて、固体表面の速度を2次元速度成分表示する手法を考案した。

本論文では2本の入射光、および固体表面から生じる鏡面反射光の再反射光の計3本のレーザー光で形成される測定体積から生じる散乱光のドップラ周波数シフトに関する理論的検討を行う。ついで、回転円盤を用いた基礎的実験の結果を示し、理論との比較検討を行い、再反射光に依存するドップラ周波数の特性とその利用法について述べる。

2. 記号一覧

- $\mathbf{V}$: 固体表面速度
- f_d : ドップラ周波数
- I : レーザーからの入射光
- R : 固体表面からの反射光
- ϕ : 固体表面移動方向、光学系の中心軸（入射光の2等分線）と固体表面の法線がなす角
- θ : (入射2ビームの交差角)/2
- λ : レーザー光波長
- n : 媒質の屈折率
- P : 散乱光強度
- f : レンズの焦点距離
- E : 散乱光の電場
- $\mathbf{K}$: レーザー光の波数ベクトル
- $\mathbf{r}$: 任意の点を原点とする位置ベクトル
- ϕ : 電場の位相差
- Δd : 干渉縞間隔

3. 原 理

レーザー・ドップラ速度計による固体表面速度測定 の原理を Fig. 1 に示す。これは干渉縞法という手法で2本のレーザー光 I_1, I_2 (波数ベクトル $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$) を固体表面上で交差させ測定体積を形成する。このとき、固体表面の凹凸による拡散反射によって生じた2本のレーザー光からの散乱光は観測方向 ($\mathbf{K}_s$) では固体表面の速度 $\mathbf{V}$ に応じた量だけドップラ周波数シフトを受けており、この二つの散乱光をレンズで重ね合わせてビートをフォトマルで観測する。2本のレーザー光 I_1, I_2 による観測方向 $\mathbf{K}_s$ に対する散乱光の電場 E_1, E_2 は次式のように表わされる³⁾。

$$E_1 = A_1 \exp[-i\{\omega t + (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_1) \cdot \mathbf{V}t - \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{r} + \phi_1\}]$$

Fig. 1 Principle of measuring the velocity of solid surface by means of laser Doppler velocimeter

(1. a)

$$E_2 = A_2 \exp[-i\{\omega t + (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_2) \cdot \mathbf{V}t - \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{r} + \phi_1\}]$$

(1. b)

よって、フォトマルで観測される強度 P は

$$\begin{aligned} P &\propto (E_1 + E_2)(E_1^* + E_2^*) \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\{(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \cdot \mathbf{V}t + \phi_1\} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで $A_1^2 + A_2^2$ は直流成分で、最後の項からドップラ周波数 f_d が測定できる。すなわち、

$$f_d = \frac{(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \cdot \mathbf{V}}{2\pi} = \frac{2n|\mathbf{V}| \cos \phi \sin \theta}{\lambda} \quad (3)$$

また、2本のレーザー光の波面の位相差によって交差部に生じる干渉縞の間隔は $\lambda/2n \sin \theta$ であるので、(3)式のドップラ周波数は干渉縞の明暗の変化による散乱光の強度変化の周波数であるという解釈もできる。

このとき、測定されたドップラ周波数 f_d から求められるのは光学系の中心軸に垂直な速度成分 $|\mathbf{V}| \cos \phi$ のみで、固体表面速度 $|\mathbf{V}|$ ならびにその移動方向 ϕ を独立に求めるためには2次元、3次元測定が可能な光学系の構成が必要となる。

固体表面での鏡面反射によって生ずる反射光 R_1, R_2 は幾何光学的な反射の法則にしたがうので、これらが I_1, I_2 となす角は、Fig. 2 に示すように固体表面の移動方向 ϕ に依存している。この鏡面反射光から固体表面の移動方向に関する情報を得るため、ここでは2本の鏡面反射光のうち R_1 のみ反射鏡を用いて測定体積に再入射させるものとする。

このとき、測定体積は等価的に3本の入射光によって形成されたと考えることができる。ここで、鏡面反射光を利用した3本目の入射光 R_1 (波数ベクトル $\mathbf{K}_3$) による観測方向 $\mathbf{K}_s$ に対する電場 E_3 は

$$E_3 = A_3 \exp[-i\{\omega t + (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_3) \cdot \mathbf{V}t - \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{r} + \phi_2\}] \quad (4)$$

Fig. 2 Optical geometry of incident beams and the specular reflection beams of which direction changes with the measuring angle of solid surface

となる。よって I_1 , I_2 , R_1 の 3 本のレーザー光からの散乱光をフォトマルで観測したときの強度 P' は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} P' &= (E_1 + E_2 + E_3)(E_1^* + E_2^* + E_3^*) \\ &= A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + 2A_1A_2\cos\{(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \cdot \mathbf{V}t - \phi_1\} \\ &\quad + 2A_2A_3\cos\{(\mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_2) \cdot \mathbf{V}t - (\phi_2 - \phi_1)\} \\ &\quad + 2A_3A_1\cos\{(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_3) \cdot \mathbf{V}t - \phi_2\} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $A_1^2 + A_2^2 + A_3^2$ は直流成分、残りの 3 項がドップラ周波数変化を表わしているの観測されるドップラ周波数は

$$f_{d1} = \frac{(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \cdot \mathbf{V}}{2\pi} = \frac{2n|\mathbf{V}|\cos\psi\sin\theta}{\lambda} \quad (6. a)$$

$$f_{d2} = \frac{(\mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_2) \cdot \mathbf{V}}{2\pi} = \frac{2n|\mathbf{V}|\sin(\theta + \psi)}{\lambda} \quad (6. b)$$

$$f_{d3} = \frac{(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_3) \cdot \mathbf{V}}{2\pi} = \frac{2n|\mathbf{V}|\cos\theta\sin\psi}{\lambda} \quad (6. c)$$

またこのとき、3 本の入射光のうちの 2 本の入射光の組合せで生じる干渉縞の間隔は

$$\Delta d_1 = \lambda / (2n\sin\theta) \quad (7. a)$$

$$\Delta d_2 = \lambda / \{2n\sin(\theta + \psi)\} \quad (7. b)$$

$$\Delta d_3 = \lambda / (2n\sin\psi) \quad (7. c)$$

となっており、複数の入射光によって同一点に複数の干渉縞が存在するとき観測されるドップラ周波数はそれぞれの干渉縞によって生じるドップラ周波数の線形結合となっていることがわかる。ここでは I_1 と I_2 , I_1 と R_1 , I_2 と R_1 によって生じる干渉縞からのドップラ周波数がそれぞれ f_{d1} , f_{d2} , f_{d3} となっている。

これらのことから、固体表面からの鏡面反射光を測定体積に再入射させることにより、従来のレーザー・ドップラ速度計測において観測されるドップラ周波数 f_{d1} を表わすスペクトラムのほかに、あらたに二つの固体表面速度 $|\mathbf{V}|$ および固体表面の移動方向 ψ をパ

ラメータとするドップラ周波数 f_{d2} , f_{d3} を表わすスペクトラムが観測されることがわかる。ゆえに f_{d1} のほかに f_{d2} , f_{d3} のうちのどちらかの周波数を得ることにより、固体表面速度 $|\mathbf{V}|$ および固体表面の移動方向 ψ の値を独立して求めることができる。たとえばドップラ周波数 f_{d1} , f_{d2} が得られる場合には (6. a), (6. b) 式を、また f_{d1} , f_{d3} が得られる場合には (6. a), (6. c) 式を連立して解くことにより固体表面の移動方向 ψ は次式のように求めることができる。
 f_{d1} , f_{d2} が得られる場合

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{f_{d2}}{f_{d1}} - 1 \right) \tan\theta \right\} \quad (8. a)$$

f_{d1} , f_{d3} が得られる場合

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{f_{d3}}{f_{d1}} \tan\theta \right) \quad (8. b)$$

さらに、 f_{d1} から光学系の中心軸に垂直な速度成分 $|\mathbf{V}|\cos\psi$ が、また f_{d3} から光学系の中心軸方向速度成分 $|\mathbf{V}|\sin\psi$ が次式のように求まるので

$$|\mathbf{V}|\cos\psi = \frac{\lambda f_{d1}}{2n\sin\theta} \quad (9. a)$$

$$|\mathbf{V}|\sin\psi = \frac{\lambda f_{d3}}{2n\cos\theta} \quad (9. b)$$

固体表面速度を 2 次元速度成分表示することが可能となる。また、この式に ψ の値を代入することにより固体表面速度 $|\mathbf{V}|$ が求まる。

4. 実 験

4.1 実験装置

Fig. 3 に本研究で使用したレーザー・ドップラ速度計の光学系を示す。レーザー光源 (He-Ne, 632.8nm, 15mW) からのレーザー光はビームスプリッターで間隔 50mm の平行で等強度の 2 ビームに分割した後、レンズ ($f=106\text{mm}$) を用いて交差角 $2\theta=26.53^\circ$ で交差させ測定体積を形成する。測定対象となる固体表面にはアクリル製回転円盤を用いた。この回転円盤表面に光を入射したときの反射率は 20% で、反射光の鏡面

Fig. 3 Optical system of laser Doppler velocimeter

反射成分 S と拡散反射成分 D の比は $S/D=3.0$ である。回転円盤は D.C. モータで駆動され、任意の回転速度が選択できる。回転円盤表面からの鏡面反射光の一方は回転円盤からレーザー光源側 10mm に設置した平面鏡 (反射率 85%) によって再反射される。平面鏡はこの再反射光が測定体積に入射するように角度の調整を行う。レーザー光源からの 2 本の入射光と反射鏡からの再反射光が回転円盤で拡散反射することによって生じるドップラ周波数シフトを受けた散乱光は、レンズで集光されフォトマルチプライヤで光電変換される。得られた信号はオシロスコープで表示し、スペクトラムアナライザで周波数解析した。

4.2 実験結果ならびに考察

Photo. 1~4 は、Fig. 3 の光学系を用いて回転円盤の速度測定を行ったときのスペクトラムアナライザで観測されるドップラ周波数を示すスペクトラムである。左側の高いピークの中心が零周波数を示しており、横軸 (周波数目盛) は 2 MHz/Div., 縦軸 (ゲイン目盛) は 10 dB/Div., 走査フィルタの帯域幅は 100

kHz, 掃引時間は 20 ms/Div. である。Photo. 1~3 は、回転円盤の測定点の速度 $|V|=12$ m/s, 移動方向 $\phi=4^\circ$ の同一条件下で観測したスペクトラムである。Photo. 1 は Fig. 3 の光学系を用いたとき観測されるスペクトラムを示している。観測されるスペクトラムは $\phi < \theta$ の条件下では (6. a) ~ (6. c) 式から $f_{d3} < f_{d1} < f_{d2}$ の関係が成立するので、このスペクトラム図は左側から零周波数, f_{d3} , f_{d1} , f_{d2} を表わしている。レーザー光源からの 2 本の入射光によって生じるスペクトラム (f_{d1}) に比べて、レーザー光源からの 1 本の入射光と鏡面反射の再反射光によって生じるスペクトラム (f_{d2} , f_{d3}) は、鏡面反射の再反射光の強度が低くなっているため 10 dB 程度ゲインが低下していることがわかる。Photo. 2 は反射鏡を用いずに測定した場合でレーザー光源からの 2 本の入射光 I_1 , I_2 によって生じるスペクトラム (f_{d1}) のみが観測されている。これは、通常の 1 次元レーザー・ドップラ速度計測を行ったとき得られるスペクトラムである。Photo. 3 は、レーザー光源からの入射光のうち I_2 を遮断したとき

Photo. 1 Doppler frequency spectra obtained by three beams I_1 , I_2 and R_1 where $\phi=4^\circ$ and $V=12$ m/s

Photo. 3 Doppler frequency spectrum obtained by two beams I_1 and R_1 where $\phi=4^\circ$ and $V=12$ m/s

Photo. 2 Doppler frequency spectrum obtained by two beams I_1 and I_2 where $\phi=4^\circ$ and $V=12$ m/s

Photo. 4 Doppler frequency spectra obtained by three beams I_1 , I_2 and R_1 where $\phi=8^\circ$ and $V=12$ m/s

得られるスペクトラムで I_1 , R_1 によって生じるスペクトラム (f_{d1}) のみが観測されている。Photo. 1~3 から、本研究で用いた光学系で観測されるドップラ周波数は、3本の入射光のうちの2本の入射光の組合せて生じる干渉縞からのドップラ周波数の線形結合となっていることが確認された。Photo. 4 は、測定点の速度を変えずに回転円盤の移動方向 ψ を $\psi=8^\circ$ に変化させたとき観測されるスペクトラムの状態を示している。Photo. 1 と Photo. 4 を比較すると、 f_{d1} のスペクトラムはほとんど移動していないのに対して f_{d2} , f_{d3} を表わすスペクトラムが移動していることがわかる。Fig. 4~Fig. 6 は、回転円盤の速度一定で移動方向を $1^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ の範囲で変化させたときに得

られるスペクトラムの周波数と回転円盤の移動方向の関係について示したものである。これらの図の実線は理論値を、プロットは実験値を表わしている。Fig. 4 は、回転円盤の移動方向 ψ とスペクトラムの周波数 f_{d1} の関係を示している。(6. a)式から $f_{d1} \propto \cos\psi$ の関係があることがわかるが、実験では $1^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ なので $\cos\psi \approx 1$ でありスペクトラムの周波数 f_{d1} の値に対する ψ の依存度は小さく、 f_{d1} はほぼ一定値をとる。Fig. 5, Fig. 6 は、それぞれ回転円盤の移動方向 ψ とスペクトラムの周波数 f_{d2} , f_{d3} の関係を示している。(6. b)式から $f_{d2} \propto \sin(\theta + \psi)$, (6. c)式から $f_{d3} \propto \sin\psi$ の関係があることがわかっており、 $1^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ では f_{d2} , f_{d3} は ψ の増加にしたがって単調増加する。各図とも理論値と実験値はきわめてよく一致している。

Fig. 7 は、設定した回転円盤の移動方向とその状

Fig. 4 Relation between angle of rotating disk and the Doppler frequency f_{d1} , where the velocity of rotating disk is considered as a parameter

Fig. 5 Relation between angle of rotating disk and the Doppler frequency f_{d2} , where the velocity of rotating disk is considered as a parameter

Fig. 6 Relation between angle of rotating disk and the Doppler frequency f_{d3} , where the velocity of rotating disk is considered as a parameter

Fig. 7 Linear relation between the object and the calculated angle of rotating disk

態で回転円盤の測定点の速度 $|\mathbf{V}|=12\text{ m/s}$ で測定を行ったときに観測されたスペクトラムの周波数から算出した回転円盤の移動方向 ϕ の関係を示している。ここで白丸は f_{a1} , f_{a2} を用いて(8. a)式から求めた値を、黒丸は f_{a1} , f_{a2} を用いて(8. b)式から求めた値をそれぞれ示している。両者の間にはよい一致がみられる。

以上の結果から、固体表面速度計測の際生じる鏡面反射光を測定体積に再入射することによって観測されるスペクトラムの周波数から固体表面の移動方向が求まることが確認された。また、このとき得られるスペクトラムの周波数から(8. a), (8. b)式を用いて固体表面速度を2次元速度成分表示することが可能となる。その際得られるのは、入射する2本のレーザー光によって生じる干涉縞に対して垂直な速度成分(光学軸に対して垂直な速度成分)と光学系の中心軸方向速度成分の2次元方向の速度成分である。

ここで注目すべきことは、本研究の手法を用いることにより光学系の中心軸方向速度成分が測定できるということである。なぜなら、従来の光学系による多次元速度測定は測定体積に設定方向の異なった干涉縞を形成することによって行われるので、固体表面速度計測の場合、光学軸方向に対して垂直な2次元方向の速度成分の測定は通常の光学系で測定することは可能であった。しかし、光学系の中心軸方向速度成分を測定するためには干涉縞を光学軸に対して直角に作らなければならないため、レーザー光を光学軸に対して測定対象の前後から入射しなければならない、不透明な固体表面の場合は測定できなかった。そのため、光学軸方向速度成分を測定するためには特殊な構成の光学系が必要とされ、マイケルソン干渉計を変形して光学系を形成する方法が報告されているが、この方法には光学系構成が複雑であるという難があった。その点、本研

究で用いた手法は鏡面反射光が得られる固体表面の速度計測に応用した場合、きわめて有効であると考えられる。ただし、今回行った実験は固体表面の移動方向と観測されるスペクトラムの周波数の関係を調べるための基礎的なものであるため、使用した光学系では固体表面の移動方向に応じて平面鏡を設定して鏡面反射光が測定体積に入射するように調整しなければならない。その点に関しては、反射鏡に凹面鏡を用いることによって、固体表面の移動方向が不明であっても常に鏡面反射光が測定体積に戻る光学系が構成できる。現在、凹面鏡を用いた、さらに実用的な光学系について検討を行っており、その結果についての議論は別紙に譲りたい。

5. ま と め

本論文ではレーザー・ドップラ速度計を用いた固体表面速度測定の際生じる鏡面反射光の幾何光学的性質を利用して固体表面の移動方向を測定し、固体表面速度を2次元方向成分で表示する方法を示した。さらに、基礎的実験からその妥当性を確認した。

最後に、本研究を進めるにあたって終始協力いただいた矢野秀幸君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中山, 青木, 太田: レーザドップラ速度計の出力信号に与える諸因子の影響, 計測自動制御学会論文集, 21-3, 284/291 (1985)
- 2) 奈良治郎: 表面あらさ, 光学的測定ハンドブック(田幸, 辻内, 南編), 601, 朝倉書店(1981)
- 3) 中谷, 山田: レーザを用いた流速測定, システムと制御, 18-8, 453/460 (1974)
- 4) F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw: Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, Academic Press (1976)
- 5) 中谷, ほか: LDVの基礎と応用, 日刊工業新聞社(1980)