レーザドップラ流速計の出力信号に与える 諸因子の影響

中山 泰 喜*・青 木 克 巳*・太 田 紘 昭*

Effect of Several Factors Given to Output Signal of Laser Doppler Velocimeter

Yasuki NAKAYAMA*, Katsumi AOKI* and Hiroaki OHTA*

As to laser Doppler velocimeter, the relation between the visibility and the diameter of a seeding particle was calculated by the simple method assuming that the intensity of scattered light from the particle is proportional to the integrated intensity of interference fringes on particle.

The analytical results using this method accurately agreed with the experimental results that were obtained by using newly developed wire disc and water channel disc respectively, which can correctly determine particle diameter, and it was clarified that fine wire diameter or particle diameter can be measured from the visibility.

Next, systematic measurements were carried out on the beam intersecting angle, the intensity ratio of two beams, the density of particles, the dimensionless aperture radius, the backward and forward scattering and the presence of plural particles in the measuring volume, and the relation between seeding particle size and the output characteristics of a laser Doppler velocimeter was clarified.

Key Words: flow measurement, laser Doppler velocimeter, interference fringe, particle, visibility

1. 緒 言

レーザドップラ流速計は二本のレーザ光により測定部に干渉縞をつくり、そこを通過する微粒子からの散乱光のドップラシフトを測定することにより流速を得るため、干渉縞と出力信号の質がきわめて重要な要素となっている。

出力信号の質のうち重要と思われる粒子径とビジビリティの関係については、Farmer¹⁾、Robinson と Chu²⁾、Adrian と Orloff³⁾などの研究が報告されている。Farmer は粒子径とフリンジ幅の比に対するビジビリティの関係を Mie の光散乱理論によって導き、粒子径測定への応用の可能性について述べている。Robinson と Chu はこの関係とともに無次元開口半径との関係を Scalar diffraction theory を基礎として理論的に求め、球形粒子による実験値と比較している。Adrian と Orloff らは後方散乱の場合をとりあげ、ビジビリティの特性は前方散乱の場合とやや異なることを述べている。しかし、出力特性に影響するその他の諸因子を含めて総合的かつ系統的に調べられた報告はない。また、今まで出力特性の測定には粒度分布をもった球形粒子を用いているので条件設定がむずかしく、希望する条件下での出力信号に関する検討は十分行なわれていない。

本報では、まず、干渉縞の中にある粒子からの散乱光の強度はその粒子上にのる干渉縞の光の強さの積分値に比例するとする直観的かつ簡便な計算法により粒子径とビジビリティの関係を明らかにした。

ついで、レーザドップラ流速計の 2 本の光線の光線交差角ならびに光線の強度比による干渉縞の変化を撮影し比較を行った つぎに、この測定部を新しく工夫したワイヤ円板ならびに水路円板により、円柱形粒子と球形粒子の粒子径、通過位置、通過速度を正しく規定して通過させ、その出力信号より、粒子径の変化によるビジビリティの正確な値を求めた、そして、その値が理論値ときわめてよく一致することを確認し、細線径あるいは粒子径測定への応用の可能性を明らかにした。

同じ実験装置を用いて、粒子濃度、光線の強度比、無次元開口半径を変えた場合の出力信号を撮影し、それよりビジビリティがどのように変化するかを明らかに

* 東海大学工学部 平塚市北金目 1117

* Faculty of Engineering, Tokai University, Hiratsuka

(Received July 10, 1984)

(Revised November 20, 1984)

にした。また、前方散乱と後方散乱の比較を行い、最後に複数粒子が同時に測定部に入ったときの出力信号より、出力特性の評価を行った。

以上のように、出力信号に関係するいろいろの因子を変化させた場合の干渉縞ならびに出力信号を系統だてて求めることにより、出力信号に対する上記諸因子の影響を明らかにすることができた。

2. 主要記号

- A : 正弦波の振幅
- d : 粒子の直径
- D : 光線交差部のビームの最小径
- f : レンズの焦点距離
- f_0 : ドップラ周波数
- h : 波の高さ、光の強さ
- I : 粒子から反射する光のエネルギー
- k : 比例定数
- l : 粒子中心間距離
- N : 干渉縞の数
- r : 粒子の半径
- R : 無次元開口半径
- u : 流速
- V_i : 鮮鋭度 (Visibility)
- V : 有効測定体積
- w : 開口半径
- δ : 干渉縞の間隔

Fig.1 Beam intersection point of light beams

2θ : 光線交差角

λ : 光線の波長

3. 干渉縞とビジビリティ

レーザ光線を交差角 2θ で交差させると、その交差部には Fig. 1 に示すような干渉縞を生ずる。焦点付近のビームの強度はガウス分布をしているので、測定部の内部で等強度面で囲まれる最も大きな立体、すなわち有効測定体積 V は、これに内接する楕円体と考えられるので、 D を交差部のビームの最小径とすると、有効測定体積 V およびこの楕円体の三つの軸の長さ Δx , Δy , Δz はそれぞれ次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{\pi D^3}{6\sqrt{2} \sin 2\theta} \\ \Delta x &= \frac{D}{\sqrt{2} \cos \theta} \\ \Delta y &= \frac{D}{\sqrt{2}} \\ \Delta z &= \frac{D}{\sqrt{2} \sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また、光線交差部にできる干渉縞の間隔 δ とその数 N は、

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \\ N &= \frac{\Delta x}{\delta} = \frac{\sqrt{2} D \tan \theta}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この測定体積中を粒子が通過するとき表われる信号の強さの最大値 $I_{\max}$ と、最小値 $I_{\min}$ とからビジビリティ V_i は次式のように定義される。

$$V_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

干渉縞の強さは、Fig. 2 に示すように正弦波状に変化するものとし、ここを通る粒子から散乱される光のエネルギー I は、その粒子の $x-z$ 面への投影面積上における干渉縞の光の強さの積分値に等しいとし、円柱形粒子と球形粒子についてビジビリティを求めた。実際

Fig. 2 Energy scattered from particle

の光の強度はガウス分布をしているが、 V_i に関しては最大値と最小値のみを用いるので、一様な正弦波状分布と仮定しても実際の場合と同じとなる。

3.1 円柱形粒子の場合

Fig. 2において、干渉縞の波長に相当する正弦波の波長を δ 、振幅を A とすると、任意の x の位置における波の高さすなわち光の強さ h は次式で表わされる。

$$h = A \left(1 + \sin \frac{2\pi x}{\delta} \right) \quad (4)$$

測定体積中にて、 x - z 面上に横たわり、中心を x において半径 r の円柱形粒子よりの散乱光の強度 I は、この粒子の上に乗った正弦波状山形の体積に比例するとし、比例定数を k_1 とすると、

$$\begin{aligned} I &= k_1 \int_{x-r}^{x+r} h dx = k_1 A \int_{x-r}^{x+r} \left(1 + \sin \frac{2\pi x}{\delta} \right) dx \\ &= k_1 A \left[x - \frac{\delta}{2\pi} \cos \frac{2\pi x}{\delta} \right]_{x-r}^{x+r} \\ &= k_1 A \left(2r + \frac{\delta}{\pi} \sin \frac{2\pi x}{\delta} \sin \frac{2\pi r}{\delta} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

これより、

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= k_1 A \left(2r + \frac{\delta}{\pi} \sin \frac{2\pi r}{\delta} \right) \\ I_{\min} &= k_1 A \left(2r - \frac{\delta}{\pi} \sin \frac{2\pi r}{\delta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ゆえに、

$$V_i = \frac{\sin(2\pi r/\delta)}{2\pi r/\delta} \quad (7)$$

3.2 球形粒子の場合

測定体積中にて、中心 x において半径 r の球形粒子よりの散乱光の強度 I は、比例定数を k_2 とすると、前と同様にして、

$$\begin{aligned} I &= 2k_2 \int_0^r \int_{x-\sqrt{r^2-z^2}}^{x+\sqrt{r^2-z^2}} h dx dz \\ &= 2k_2 A \int_0^r \int_{x-\sqrt{r^2-z^2}}^{x+\sqrt{r^2-z^2}} \left(1 + \sin \frac{2\pi x}{\delta} \right) dx dz \\ \phi &= \frac{2r}{\delta}, \quad \xi = \frac{x}{\delta}, \quad \eta = \frac{2z}{\delta} \quad \text{とおくと,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= k_2 A \delta^2 \int_0^\phi \int_{\xi-\frac{\sqrt{\phi^2-\eta^2}}{2}}^{\xi+\frac{\sqrt{\phi^2-\eta^2}}{2}} \left(1 + \sin 2\pi \xi \right) d\xi d\eta \\ &= k_2 A \delta^2 \int_0^\phi X d\eta = k_2 A \delta^2 Y \\ X &= \left[\xi - \frac{\cos 2\pi \xi}{2\pi} \right]_{\xi-\frac{\sqrt{\phi^2-\eta^2}}{2}}^{\xi+\frac{\sqrt{\phi^2-\eta^2}}{2}} \\ &= \sqrt{\phi^2-\eta^2} + \frac{1}{\pi} \sin 2\pi \xi \cdot \sin \pi \sqrt{\phi^2-\eta^2} \end{aligned}$$

$$Y = \int_0^\phi X d\eta = \frac{\pi}{4} \phi^2 + \frac{1}{\pi} \int_0^\phi \sin 2\pi \xi \cdot \sin \pi \sqrt{\phi^2-\eta^2} d\eta$$

ゆえに、

$$I = k_2 A \delta^2 \left(\frac{\pi}{4} \phi^2 + \frac{1}{\pi} \sin 2\pi \xi \int_0^\phi \sin \pi \sqrt{\phi^2-\eta^2} d\eta \right) \quad (8)$$

$\eta = \phi \sin \alpha$ とおくと、

$\sqrt{\phi^2-\eta^2} = \phi \cos \alpha$, $d\eta = \phi \cos \alpha d\alpha$ であるから

$\eta=0$ で $\alpha=0$, $\eta=\phi$ で $\alpha=\pi/2$ となる。

ゆえに、

$$\begin{aligned} \int_0^\phi \sin(\pi \sqrt{\phi^2-\eta^2}) d\eta &= \int_0^{\pi/2} \sin(\pi \phi \cos \alpha) \cdot \phi \cos \alpha d\alpha \\ &= \frac{\pi \phi}{2} J_1(\pi \phi) \end{aligned}$$

これを(8)式に代入すると、

$$I = k_2 A \delta^2 \left\{ \frac{\pi}{4} \phi^2 + \frac{\phi}{2} \sin 2\pi \xi J_1(\pi \phi) \right\} \quad (9)$$

これより、

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= k_2 A \delta^2 \left\{ \frac{\pi}{4} \phi^2 + \frac{\phi}{2} J_1(\pi \phi) \right\} \\ I_{\min} &= k_2 A \delta^2 \left\{ \frac{\pi}{4} \phi^2 - \frac{\phi}{2} J_1(\pi \phi) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ゆえに、

$$V_i = \frac{2J_1(\pi \phi)}{\pi \phi} = \frac{2J_1(2\pi r/\delta)}{2\pi r/\delta} \quad (11)$$

4. 実験装置

Fig. 3 は干渉縞を撮影した光学系で、レーザー光源 (He-Ne, $\lambda=6328\text{\AA}$, 出力 5 mW), 光線分割装置 (ケスタプリズム), 集光レンズ (径 55 mm, $f=141.48$ mm) よりなり、Fig. 4 はこの光学系に集光器と光電子増倍管 (EM 19658 B, 印加電圧 750 V) をつけたレーザードップラ流速計の構成⁴⁾を示す。これらの光学系は筆者らの開発したもので、この装置の特長は、(1) ケスタプリズムを交軸に沿って移動させることにより、光線交差角 θ を任意に選ぶことができ、 θ を変化

Fig. 3 Measuring device of interference fringe

Fig. 4 Measuring device

しても焦点の位置は動かない。そのため、低流速にいたる広範囲な流速の連続的な測定ができる。(2)分割した2本の光線の光路差がないので、信号レベルの低下が極めて少ない。(3)光線分割装置を回転させても測定部の焦点位置は移動しない、そのため、任意の方向の分速度の測定が容易にできる。などである。

これらの光学系は共通ベースの上に設置されており、光軸方向に沿って、全体が微小移動するため任意の位置に正しく設置できる。

測定部に粒子を通過させるのには、新しく工夫した回転円板装置を使用した。供試粒子としては細線による円柱形粒子と顕微鏡標準粒子による球形粒子とを用いた。Fig. 5(a)に細線を用いた場合のワイヤ円板装置の詳細を示す。細線は回転円板装置の粒子設置板の窓に取付け、この細線が測定点を横切ることによりドップラ信号が得られるようにした。この回転円板装置は光軸に対して直角に微動できるようになっており、オシロスコープの信号波形を観察しながら回転円板をゆっくり回転させ、フリンジの中心を横切るように調整した。

細線を粒子設置板にどのように設置したら粒子からのみの明確な信号が得られるか種々試みた結果、単一粒子の場合はFig. 5(a)(1)のように取付ければ希望する位置を通過させることができることがわかった。複数粒子の場合もいろいろ試みた結果Fig. 5(a)(2)のように微小角で交差させて張ることを思いついた。この方法によれば回転円板の軸と光軸との距離を微小変化させることにより、2粒子中心間距離 l を容易にかつ正確に変えることができる。その上、距離 l の極めて小さい値まで正確にドップラ信号を測定できることがわかった。細線としては径5, 10, 20, 30 μm のタングステン線を用い、張り付けには最小目盛1 μm のコンパレータを使用し、細線のたるみ、折れ曲がり、交差角などに注意して設置した。

Fig. 5(b)に球形粒子として顕微鏡標準粒子を注

Fig. 5
Rotating disc

入した水路円板の詳細を示す。この方法も新しく工夫したもので、あらかじめ規定の蒸留水中に顕微鏡標準粒子を規定の容積だけ注入して混合し、それを水路中に注入することにより、きめられた容積の中にきめられた大きさの粒子をきめられた数だけ混入させることができ、精度の高い実験値をうることができるとともに、粒子濃度についても正確な測定を行うことができた。

Fig. 6は前方散乱と後方散乱の比較を行うため用いた装置で、焦点距離の異なった集光レンズを3種類($f_1=66$, $f_2=242$, $f_3=103$ mm)用いることにより光線交差角を変えた。

5. 実験結果および考察

5.1 干渉縞

5.1.1 光線交差角と干渉縞

Fig. 3に示す装置により光線交差角を変えて測定部に生ずる干渉縞を撮影した。その一例を示すとFig. 7のようである。この図より、光線交差角が大きくなるにつれ、干渉縞の間隔は小さくなり、その数が増加していることがよくわかる。

Fig. 6 Measuring device

Fig. 7 Interference fringe

この関係を図示すると Fig. 8(a), (b) のようになる. この図の実線は(1), (2)式より求めた値を示す. 光線交差部の大きさ Δx , Δy ならびに干渉縞の間隔 δ とその数 N を表わす線は実測値とよく一致している.

5.1.2 光線の強度比と干渉縞

Fig. 4 の装置を用いて, 二つの分割された強度の等しい光線の一方に校正済の減光フィルタを入れることにより, 入射光の強度比 I_2/I_1 を 1, 0.884, 0.472, 0.230, 0.084, 0.012, 0.003 と 7 種類に変えて, 干渉縞の変化を撮影した. その結果の一例を Fig. 9 に示す. 強度比 I_2/I_1 が小さくなるに従い, 干渉縞の明暗が

少なくなっている.

5.2 粒子径による影響

円柱形粒子については Fig. 5(a) に示すワイヤ円板のタングステン線の径を 5, 10, 20, 30 μm とし, この円板を回転し, ワイヤが測定部を 35 cm/s の一定速度で直角に横切った場合の出力信号をオシロスコープにより観察した.

球形粒子については, 1 μm の顕微鏡標準粒子を水路に数をきめて入れた水路円板を前と同じ速度

で回転させ, 粒子が測定部を横切った場合の出力信号を同様にオシロスコープで観察した. この場合の回転数は遠心力により粒子が外壁によらない程度の約 60 rpm とした. これらの結果をまとめ粒子径とビジビリティの関係をプロットすると Fig. 10 となる. この図の実線と点線はそれぞれ(7)式および(11)式より求めた理論値を示したものであるが, 理論値と実験値はきわめてよく一致している.

粒子径 $2r$ と干渉縞の間隔 δ との比 $2r/\delta$ が大となるに従って, ビジビリティ V_i は低下し, 円柱形粒子では $2r/\delta=1$ で, 球形粒子では 1.22 で V_i は零となり, 最初の最小値をもつ. この結果より, V_i の値より細線ならびに粒子径の精密な測定が可能である.

5.3 粒子濃度による影響

一般に測定体積内に常に 1 個の粒子があればほぼ連続的な信号が得られることから, 測定体積を直径 0.1 mm, 長さ 1.1 mm の円筒と仮定すると粒子の必要密度は, 116 個/ mm^3 以上となる.

粒子径 1 μm の顕微鏡標準粒子が測定体積中に 1, 3, 5, 30, 100, 500, 1000 個の割合で含まれるように濃度をきめて蒸留水に混入し, その混入液を水路円板の水路に注入し, 水路中心線上の測定部が一定速度 35 cm/s で通過するようにし, 光線交差角 $2\theta=10^\circ$ として信号状態を観測した.

信号の一例を示すと Fig. 11 のようである. これらの信号を確率密度計を用いて統計的に V_i を算出した.

測定体積中に 1~5 個程度では V_i の低下は明瞭には認められなかったが 30 個以上すなわち 3×10^3 個/ mm^3 程度より多くなると V_i の低下が認められた.

Fig. 8 Relation of beam intersecting angle to interference fringe

Fig. 9 Interference fringe for the light intensity ratio of two beams

Fig. 10 Signal visibility for a columnar and a spherical scatters vs $2r/\delta$

(a) Number of particles: $3.48 \times 10^3 / \text{mm}^3$

(b) Number of particles: $1.16 \times 10^4 / \text{mm}^3$

(c) Number of particles: $5.80 \times 10^4 / \text{mm}^3$

Fig. 11 Wave form of output signal occurred by the particle concentration

Fig. 12 Relations of particle concentration in unit volume to output signal of visibility and voltage

Fig. 12 はこの領域の出力信号のビジビリティ V_i ならびに出力信号電圧 E と単位体積中に含まれる粒子数との関係を示したものである。この図より、粒子数 3×10^3 個/ mm^3 程度以上になると V_i は低下し、それからの粒子数の増加に対してはあまり大きく変化しない。これは、 3×10^3 個/ mm^3 程度に多くなると、粒子の凝集も多くなり、SN 比も悪くなるため、粒子密度は $200 \sim 500$ 個/ mm^3 程度にとどめておいた方がよい。

5.4 光線の強度比による影響

Fig. 13 に光線の強度比を 5.2 で述べたように変化し、その測定部にワイヤ円板を通した場合の出力信号

$I_2/I_1 = 1$

$I_2/I_1 = 0.472$

$I_2/I_1 = 0.048$

$I_2/I_1 = 0.012$

Fig. 13 Wave form of output signal for the light intensity ratio of two beams

Fig. 14 Relation of light intensity ratio to visibility of burst signal for a columnar particle

Fig. 15 Distance of focus and radius of aperture

を示す。強度比 I_2/I_1 が小さくなるに従い、バースト信号の振幅ならびにビジビリティは低下している。この実験結果より、入射光の強度比に対する出力信号のビジビリティ V_i の値を図示すると **Fig. 14** のようになり、強度比の減少にともなってビジビリティの低下する傾向がよくわかる。

5.5 無次元開口半径による影響

ビジビリティは次式に示す無次元開口半径 R によっても変化する。

$$R = \frac{2wr}{\lambda z} \quad (12)$$

ここに、 w は開口半径、 z は焦点位置から開口面までの距離とする。これらの関係を **Fig. 15** に示す。

実験は $2r/\delta = 0.18, 0.45, 0.55, 0.725, 1.8, 3.6$ で、開口半径 $w = 1.15 \sim 11.55$ mm と変化した場合に

(a) $2r/\delta=3.6$, $w=1.15$ mm (b) $2r/\delta=3.6$, $w=5.75$ mm**Fig. 16** Wave form of output signal due to the difference of dimensionless aperture **Fig. 17** Relation of dimensionless aperture radius to visibility **Fig. 18** Comparison of the signal intensity between forward and backward scattering (a) $l=110 \mu\text{m}$ (b) $l=12 \mu\text{m}$ (c) $l=6 \mu\text{m}$
 $d=10 \mu\text{m}$, $\delta=12 \mu\text{m}$ **Fig. 19** Wave form of output signal when plural equal diameter particles pass through the interference fringe (a) $l=110 \mu\text{m}$ (b) $l=12 \mu\text{m}$ (c) $l=6 \mu\text{m}$
 $d=5.30 \mu\text{m}$, $\delta=12 \mu\text{m}$ **Fig. 20** Wave form of output signal when plural different diameter particles pass through the interference fringe

ついて行った。その一例として $2r/\delta=3.6$ で $w=1.15, 5.75 \text{ mm}$, したがって $R=0.1$ と 0.5 の場合の光電子増倍管の出力波形を示すと **Fig. 16** のようになる。これらすべての実験結果をまとめると **Fig. 17** のようになる。この図から、 $2r/\delta$ の値に関係なく、 R が 0 に近づくとき V_i も 1.0 に近づく。そこから R が増加すると、 $2r/\delta$ の値が大きいくほど V_i が急に低下し、 $R=1.5$ 以上では $2r/\delta$ の値に関係なく V_i は一定値となる。

5.6 前方散乱と後方散乱の比較

Fig. 6 に示す装置を用い、ワイヤ円板を回転し、細線が測定部を一定速度 35 cm/s で直角に横切った場合の出力信号を前方散乱と後方散乱により観察し、比較した。タングステン線は径 $5, 10, 15, 20 \mu\text{m}$ の4種類を用い、光線交差角 2θ は 11.8° とした。

この出力信号より、ワイヤ径 d と出力信号電圧 E との関係を示すと **Fig. 18** のようになる。この結果から、粒子径の大小に関係なく、後方散乱光の出力信号は前方散乱光の出力信号の約 $1/100$ であることがわかった。

5.7 複数粒子による変化

Fig. 5(a)(2) に示したように細線を取り付け、測定体積中を2粒子が一定の中心間距離 l で通過した場合の出力信号波形を観測した。**Fig. 19(a)**, **(b)**, **(c)** は $\delta=12 \mu\text{m}$ の測定体積を径 $10 \mu\text{m}$ の円柱粒子が2個一定の粒子中心間距離 l で横切った場合の l の変化に対する出力信号波形を示したものである。

Fig. 19(a) は $l=110 \mu\text{m}$ の場合で粒子同志の干渉作用はない。**Fig. 19(b)** は $l=\delta$ の場合で、出力信号は加え合せられ、出力信号の最大値は **Fig. 19(a)** の2倍となっている。これに対し、**Fig. 19(c)** は $l=\delta/2$ の場合であり、交流信号成分が相殺されて変調深さ零に近い信号となっている。

Fig. 20(a), **(b)**, **(c)** は径 $5 \mu\text{m}$ と $30 \mu\text{m}$ の径の異なる粒子を距離 l を変えて、フリンジを通過させたときの出力波形である。**Fig. 20(a)** は $l=110 \mu\text{m}$ の場合で、二つの粒子からの出力信号がたがいに影響を受けておらず、径 $5 \mu\text{m}$ の小さい粒子からの信号のビジビリティが大きく質がよいのに対し、径 $30 \mu\text{m}$ の大きい粒子では小さく質が悪いことがわかる。**Fig. 20(b)** は $l=\delta$ であり、二つの粒子からの出力信号がたがいに影響を受け、中間的なビジビリティを有する信号となる。すなわち単一粒子からの出力信号が質の悪い信号であっても、他の粒子からの質のよい信号を

受けることにより良質な信号となることもあり、またその逆となることもある。しかし、**Fig. 20(c)** のような $l=\delta/2$ の場合は片方の粒子がフリンジの明るい(暗い)部分にあると、他方の粒子は暗い(明るい)部分にあるため、交流信号成分の相殺が起り常に質の悪い信号となる。

6. おわりに

本論文では最初に、散乱光の強度は粒子の上にある干渉縞の光の強さの積分値に比例するとする直観的かつ簡便な計算により粒子形状とビジビリティの関係を求めた。

ついで、光線交差角と光線の強度比を変化した場合の干渉縞の状態を明らかにし、その干渉縞を新しく開発したワイヤ円板と水路円板を用いて、大きさと通過位置ならびに通過速度を規制した粒子を通過させることにより、粒子形状に対する正しい出力信号を求めた、その結果は理論値ときわめてよく一致した。

また、同じ円板装置を用いて実験を行った結果、二つの光線の強度比が小さくなるとビジビリティが悪くなること、散乱粒子の数はおよそ $200\sim500 \text{ 個/mm}^3$ 含まれる程度が測定に適当であること、後方散乱は前方散乱の $1/100$ くらいに出力信号が低下すること、などが明らかとなった。

つぎに、複数粒子が同時に測定体積に入ったとき、2粒子の中心間距離が干渉縞の間隔またはその整数倍に等しいときは信号の出力およびビジビリティは増加するが2粒子間距離が干渉縞の間隔の半分のときはビジビリティが極端に低下することが出力信号から明確にされた。これらの諸因子の影響が明らかとなったことにより、レーザドップラ流速計の出力信号改善に寄与するとともに工業的応用面として、細線径あるいは粒子径の正確な測定へも十分利用できることが分った。

参考文献

- 1) W.M. Farmer: Measurement of Particle Size, Number Density, and Velocity Using a Laser Interferometer, Appl. Opt., **11**-11, 2603/2612 (1972)
- 2) D.M. Robinson and W.P. Chu: Diffraction Analysis of Doppler Signal Characteristics for a Cross-Beam Laser Doppler Velocimeter, Appl. Opt., **14**-19, 2177/2183 (1975)
- 3) R.J. Adrian and K.L. Orloff: Laser Anemometer Signals; Visibility Characteristics and Application to Particle Sizing, Appl. Opt., **16**-30, 677/684 (1977)
- 4) LDV研究グループ: 中山ほか7名, レーザドップラ流速計, 東海大学紀要・工学部, No. 2, 93/104 (1975)