

レーザーを用いた光電子計数法による流体中微粒子の移動速度の測定

平野 文昭
(技術研究所)
三宅 紀治
(技術研究所)

§ 1. はじめに

近年、地下水による環境汚染が社会的問題になっている。地下水汚染の進行を把握するためには、地下水の流動を直接捉えることが要求される。一般に、地下水の流速は非度に遅いことが知られている。したがって、それを測定するには測定可能流速範囲が 10^{-2} cm/sのオーダー以下の微流速測定用の装置の開発が必要である。

レーザードップラー速度計(LDV)は、物体の速度や流体の流速を測定するのに用いられている。利点として、(1)非接触で測定できるので測定対象の境界条件を乱さない、(2)測定体積が小さいので空間的分解能が高い、(3)応答が速く測定時間が短い、(4)速度方向の正負を識別できる、などが知られている。従来、LDVの利用は実験室に限られていたが、最近ではレーザーの小型化や光ファイバーの発達により現場でも使用可能なシステムが開発されつつある^{1)~6)}。

したがって、LDVを用いて地下水の流速を測定するには、LDVの特性を活かした計測器の開発が期待されている。ところで、これまでに開発されたLDVは主としてその必要性から測定可能流速範囲が 10^{-1} cm/s以上のものが大部で、微流速用のものはほとんど見られない。微流速用のLDVが開発されなかったのは、必要性もさることながら従来の技術ではレーザー光の周波数のシフト量を小さくすることができず、流体の流動方向を識別することができなかつたからと思われる。

従来のLDVでは流体の流動方向を求めるために、測定体積をつくるレーザー光の周波数をシフトさせて、そのシフト量と流体が流動している場合に得られる信号の周波数とを比較して、その量の大小で識別している。したがって、これらの周波数の値は同じくらいのオーダーであることが必要であった。特に、微流速の場合には得られる信号の周波数が低いので、それと比較するレーザー光の周波数シフト量も小さくする必要がある。

例えば、測定体積にある干渉縞の間隔を $1\mu\text{m}$ とし、

この干渉縞を粒子が速度 10^{-4} cm/sで通過するとすれば、このとき得られる信号の周波数は1Hzとなる。したがって、信号の周波数と比較するには、レーザー光の周波数シフト量を数Hz程度にする必要がある。

一般に、回折現象を利用してレーザー光の周波数をシフトさせる方法には、音響光学素子を用いる方法と円盤にスリットが放射状に刻まれた回折格子を用いる方法とがある⁶⁾⁷⁾。

音響光学素子を用いる方法では、超音波によって移動回折格子ができてセルにレーザー光を入射させることにより、元のレーザー光の周波数に周波数シフト量を加えた回折光が得られる。この方法では、回折角を大きくし任意の回折角を他の回折角と分離するために超音波を駆動させることが必要であり、必然的に得られる回折光の周波数シフト量も大きくなる。

一方、円盤状回折格子を用いる方法では、回転している円盤状回折格子にレーザー光を照射させることにより回折光が得られる。この方法では、回折角を大きくするためには回折格子のスリット間隔を小さくすればよく、また回折光の周波数シフト量を小さくするためには円盤状回折格子の回転速度を非常に遅くすればよい。

したがって、音響光学素子を用いる方法は周波数シフト量が小さくしなければならない微流速の測定には適していないが、円盤状回折格子を用いる方法は上記の要求を満足することにより微流速への適用が可能である。

以上の観点から、本研究の目標は上記のように周波数シフト量を小さくすることができる円盤状回折格子(Grating Disk)を用いた流体の流動方向の正負を識別できる微流速用のLDVを開発することである。その第一段階として、本論文ではまず微流速を測定するための測定原理を述べ、次に回折格子のスリット間隔が $2.8\mu\text{m}$ で、 $0.0003\text{rpm}\sim 0.15\text{rpm}$ の回転数で回転させることができる円盤状回折格子を用いた後方散乱型と前方散乱型の試作装置の概要を示す。さらに、後方散乱型装置を用いて本装置での補正曲線の検討を行ない、最後に前方散

乱型装置を用いて水槽内散乱粒子の移動速度を測定する。

§ 2. 測定原理

2.1 実フリンジ法による流速の測定^{9)~11)}

本装置では、図-1に示すようにレーザー光を円盤状回折格子に当てて得られる回折光のうち、+1次と-1次の回折光をレンズ等で収束させ交差させるようにしている。一般に、2本のレーザー光を交差させれば、交差部に図-2に示すような間隔 d_F の干涉縞が得られる。この部分が測定体積（長軸 ϕ_l 、短軸 ϕ_s の回転楕円体）である。レーザー光の波長を λ 、2本のレーザー光の交差角を $2\theta_1$ とすれば、干涉縞の間隔は次式で表わされる。

$$d_F = \lambda / (2 \sin \theta_1) \quad \dots\dots(1)$$

この干涉縞中を流体中にある散乱粒子（直径数 μm ）が通過すれば、粒子が干涉縞の明部にあるときは強く、暗部にあるときは弱い散乱光を生じることになる。この散乱光は集光レンズ等で受光され、光ファイバーでフォトマル等の光電変換器へ送られ電気信号に変換される。高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform: FFT）により得られる信号（ドップラー信号）の卓越周波数 f_d 、散乱粒子の移動速度 V および干涉縞の間隔 d_F との間には次式が成り立つ⁹⁾。

$$V = d_F \cdot f_d \quad \dots\dots(2)$$

干涉縞の間隔は予め分かっているため、式(2)から散乱粒子の移動速度を求めることができる。

以上の測定は、流体中の散乱粒子の移動速度を測定しているもので、流体の移動速度を測定しているのではな

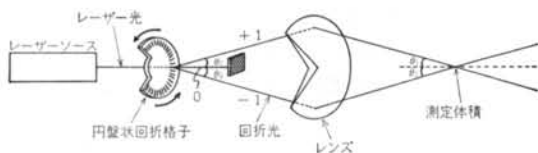


図-1 円盤状回折格子と回折光

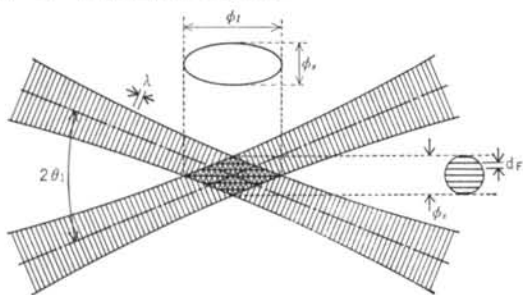


図-2 測定体積の概念図

いが、粒子の径が十分小さければ粒子は流体に追従して移動すると考えて良いので、粒子の移動速度 V をそのまま流体の移動速度としても差し支えないと考えられる。

図-3に周波数と流速の関係を示す。

また、信号の処理には散乱光が微弱な場合に有効な光電子計数法を用いた。光電子計数法は、図-4に示すような光電子の放出に伴って信号出力される光電子パルス数を数える方法で、光量のわずかな変化をとらえることができる利点がある¹²⁾¹³⁾。

2.2 流動方向の測定

円盤状回折格子を一方方向に所定の速度で回転させれば流速のみならず、その流動方向をも測定することができる。いま、円盤状回折格子が一方方向に所定の速度で回転している場合を考えよう。

元のレーザー光の周波数を f_0 とすれば、+1次回折光の周波数は元の周波数 f_0 より f_1 （円盤状回折格子のスリット間隔とその回転数によって一義的に定まる）だけシフトし、

$$f_{+1} = f_0 + f_1$$

となる。また、-1次回折光の周波数は元の周波数 f_0 より $-f_1$ だけシフトし、

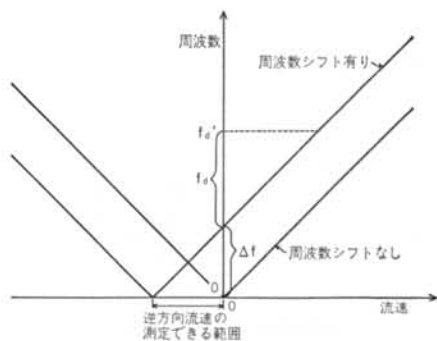


図-3 周波数と流速の関係

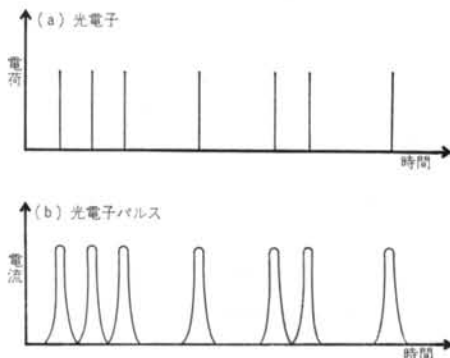


図-4 信号出力の概念図

$$f_{-1} = f_0 - f_1$$

となる。したがって、 ± 1 次回折光を収束させて得られる干渉縞は、それぞれの周波数の差、すなわち

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_{+1} - f_{-1} \\ &= 2f_1 \end{aligned}$$

の周波数シフト量に伴って、一定方向にその明暗部が移動していることになる。

上記のようにして周波数をシフトさせた場合の周波数と流速の関係は、図-3 に示す周波数シフト無しの場合の直線を Δf だけ平行移動させたものとなる。すなわち、周波数をシフトさせたときに、流体中の粒子が干渉縞中を通過した場合に得られる周波数 f_a' は、ドップラー信号の周波数 f_a に周波数シフト量 Δf を付加した量となる。

ここで、この周波数シフト量 Δf および干渉縞の移動方向は、回折格子の回転数と回転方向により予め知ることができるので、 f_a' を検出すれば f_a' と f_a の値の大小関係から流動方向を識別することができる。

§ 3. 試作装置

3.1 装置の概要

後方散乱型試作装置の概要を図-5 に、前方散乱型試作装置の概要を図-6 に示す。両試作装置は、センサ部と解析処理部に大別される。

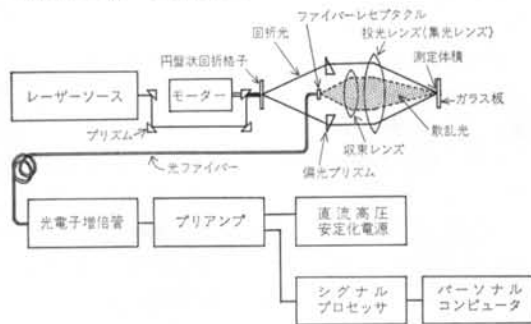


図-5 後方散乱型試作装置の概要

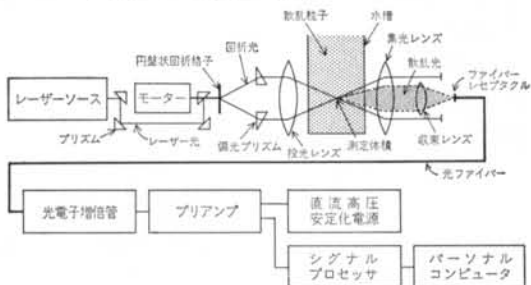


図-6 前方散乱型試作装置の概要

センサ部は、光源部、モーター部および光学系から構成されている。光源部はヒューズ社製の出力 5 mW の直線偏光 He-Ne レーザーソースと電源部から、モーター部はハーモニックドライブシステムズ社製のモーター本体 (HT-11-SP) と円盤状の透過型回折格子から成っている。円盤状回折格子はモーター本体の軸に取り付けられていて、幅 1.4 μm のスリットが放射状に刻まれている。さらに、光学系は偏光プリズム、投光レンズ (集光レンズ)、収束レンズ、ファイバーレセプタクルおよび光ファイバーからなっている。

後方散乱型と前方散乱型の違いは、センサ部の光学系の配置で区別されており、前者は集光レンズ (投光レンズと同じもの)、収束レンズ、ファイバーレセプタクルが光の進行の逆方向にあり、後者は集光レンズ、収束レンズ、ファイバーレセプタクルが光の進行方向にある。

解析処理部は、受光部、シグナルプロセッサおよびパーソナルコンピュータで構成されている。受光部にはいづれも浜松ホトニクス社製のものを用い、光電子増倍管 (フォトマル) は光電子計数法に適している R2757 を、プリアンプは C2760 を、直流高圧安定化電源は C752-01 を用いている。シグナルプロセッサは浜松ホトニクス社製の C2550 を、パーソナルコンピュータは NEC 製の PC 9801-VX を用いている。

両装置では、まずレーザーソースから発射されたレーザー光をプリズム (ミラー) 等で調節し、円盤状回折格子の任意の面に垂直に照射させる。円盤状回折格子を通過したレーザー光は、0 次、 ± 1 次、 ± 2 次、... というような高次になるほど大きな回折角を持つ多数の回折光に分かれるが、ここでは ± 1 次の回折光を偏光プリズムで平行光に直し、投光レンズ等で収束させる。この収束部 (2 本の回折光の交差部) に図-2 に示すような干渉縞が形成され、ここを通過する散乱粒子が干渉縞の明暗に伴う散乱光を生じさせるようになっている^{9)~11)}。さらに、この散乱光を集光レンズ (後方散乱型は投光レンズと同じもの) で平行光に直し、収束レンズで光ファイバーへ入射させて、解析処理部へ光信号の状態 で伝送させる。

3.2 試作装置の詳細

3.2.1 円盤状回折格子による周波数シフト量

円盤状回折格子を回転させることにより得られる周波数シフト量 Δf は、円盤状回折格子のスリット間隔を P_0 、回転速度を v とすれば、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta f &= 2v/P_0 \\ &= 2\pi D_0 R / (P_0 \times 60) \end{aligned} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 D_0 は円盤状回折格子の直径、 R は円盤状回折格

子の回転数である。したがって、ここでは $D_0=19 \times 10^3 \mu\text{m}$, $P_0=2.8 \mu\text{m}$ であるので、 $\Delta f(\text{Hz})$ と $R(\text{rpm})$ との関係は式(3)より、

$$\Delta f=710R \quad \dots\dots(4)$$

となる。

さらに、図-1 に示す円盤状回折格子のスリット間隔 P_0 と ± 1 次回折光のなす角 $2\theta_0$ との関係は、レーザー光の波長を λ とすれば、次式で表わされる¹⁴⁾。

$$\begin{aligned} \sin \theta_0 &= \lambda / P_0 \\ \theta_0 &= \sin^{-1}(\lambda / P_0) \end{aligned} \quad \dots\dots(5)$$

ここでは $P_0=2.8 \mu\text{m}$, $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ であるので、式(5)より $\theta_0=13.06^\circ$ となる。

3.2.2 スポットサイズ

一般に、レーザー光は図-7 に示すように進行するにつれて広がって行く。レーザー光の放射照度が最大放射照度の $1/e^2$ となる円の直径をビーム径と定義すれば、距離 x の位置でのビーム径 $W(x)$ は、出射口でのビーム径 $W(0)$ と全角のビーム広がり角 θ を用いて、次式で表わされる¹⁵⁾。

$$W(x) = W(0) + 2x \tan(\theta/2) \quad \dots\dots(6)$$

ここで用いるレーザーは、ビーム径 $W(0)$ が 0.83mm 、ビームの開き角度が 1.0mrad 、レーザーソースから投光レンズまでの距離が約 500mm であるので、投光レンズ位置でのビーム径 D は式(6)より、

$$D = 0.83 + 2 \times 0.5 = 1.83(\text{mm})$$

となる。

次に、投光レンズで収束されるレーザー光のスポットサイズ(測定体積の短軸の長さ)に等しい ϕ_s は、焦点距離を F_1 とすれば次式で表わされる。

$$\phi_s = 4 \lambda F_1 / (\pi D) \quad \dots\dots(7)$$

ここで用いる投光レンズの焦点距離は、空気中で $F_1=60\text{mm}$ 、水中で $F_1=80\text{mm}$ であるので、本装置の場合、式(7)の値は空気中で、

$$\begin{aligned} \phi_s &= 4 \times 6328 \times 10^{-7} \times 60 / (\pi \times 1.83) \\ &= 0.0264(\text{mm}) \end{aligned}$$

水中で、

$$\begin{aligned} \phi_s &= 4 \times 6328 \times 10^{-7} \times 80 / (\pi \times 1.83) \\ &= 0.0352(\text{mm}) \end{aligned}$$

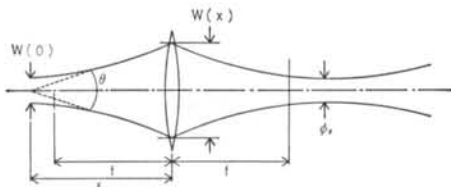


図-7 ビームの広がりとスポットサイズ

となる。

3.2.3 干渉縞

図-2 に示すように測定体積には干渉縞が形成されており、2本のレーザー光の交差角を $2\theta_1$ とすれば、干渉縞の間隔は次式で表わされる⁹⁾。

$$d_F = \lambda / (2 \sin \theta_1) \quad \dots\dots(8)$$

本装置の場合、空気中で $\theta_1=15^\circ$ 、水中で $\theta_1=11.3^\circ$ であるので、式(8)の値は空気中で、

$$\begin{aligned} d_F &= 6328 \times 10^{-7} / (2 \sin 15^\circ) \\ &= 0.0012(\text{mm}) \end{aligned}$$

水中で、

$$\begin{aligned} d_F &= 6328 \times 10^{-7} / (2 \sin 11.3^\circ) \\ &= 0.0016(\text{mm}) \end{aligned}$$

となる。

また、測定体積にはいる干渉縞の本数は次式で表わされる。

$$N = \phi_s / d_F \quad \dots\dots(9)$$

本装置の場合、式(9)の値は空気中で、

$$\begin{aligned} N &= 0.0264 / 0.0012 \\ &\approx 22 \text{ (本)} \end{aligned}$$

水中で、

$$\begin{aligned} N &= 0.0352 / 0.0016 \\ &\approx 22 \text{ (本)} \end{aligned}$$

となる。

3.2.4 光ファイバーの必要コア径と開口数

(1) 光ファイバーの必要コア径

測定体積から得られるすべての信号をファイバーに取り込むために必要な、ファイバーのコア径について検討する。

まず、レンズの仕様だけを考慮すれば、測定体積中のスポットサイズ ϕ_s に等しい長さをもつ物体は、集光レンズ(焦点距離 $F_1=60\text{mm}$ (空気中)、 $F_1=80\text{mm}$ (水中))と収束レンズ(焦点距離 $F_2=50\text{mm}$)の二つのレンズにより、ファイバーレセプタクルの位置では次式で表わされる大きさの像に結像する。

$$\phi_s' = \phi_s F_2 / F_1 \quad \dots\dots(10)$$

本装置の場合、式(10)の値は空気中で、

$$\begin{aligned} \phi_s' &= 0.0264 \times 50 / 60 \\ &= 0.022(\text{mm}) \end{aligned}$$

水中で、

$$\begin{aligned} \phi_s' &= 0.0352 \times 50 / 80 \\ &= 0.022(\text{mm}) \end{aligned}$$

となる。すなわち、本装置ではレンズの仕様から、空気中では測定体積中にある $26.4 \mu\text{m}$ の長さの物体はレセプタクルの位置で $22 \mu\text{m}$ になり、水中では測定体積中にある

る35.2 μm の長さの物体はレセプタクルの位置で22 μm になる。

次に、式(10)で得られる ϕ_s' の大きさの像が回折の影響により、レセプタクルの位置でどれくらいの大きさになるのか検討する。回折の影響を考慮すれば、測定体積中にある無限小の点はレセプタクルの位置ではレンズの有効口径 ϕ を用いて次式で表わされる大きさの像になる¹⁶⁾。

$$\phi_s'' = 2.44 \lambda F_2 / \phi \quad \dots\dots(11)$$

本装置の場合 $\phi = 16\text{mm}$ であるので、式(11)の値は、

$$\begin{aligned} \phi_s'' &= 2.44 \times 6328 \times 10^{-7} \times 50 / 16 \\ &= 0.0048(\text{mm}) \end{aligned}$$

となる。

したがって、本装置ではレンズの仕様と式(11)で表わされる回折の影響から、空気中では測定体積中にある26.4 μm の長さの物体はレセプタクルの位置で22+4.8=26.8(μm)になっており、水中では測定体積中にある35.2 μm の長さの物体はレセプタクルの位置で22+4.8=26.8(μm)になっていることになる。したがって、コア径としては26.8 μm 以上が必要である。

(2)光ファイバーの開口数

すべての散乱光を光ファイバー内で減衰させないで伝搬するには、どれくらいの開口数 (N.A.) の光ファイバーが必要か検討する。

収束レンズの N.A. は、図-8 に示す θ_c と媒質の屈折率 n を用いて、次式で表わされる¹⁷⁾。

$$\text{N.A.} = n \sin \theta_c \quad \dots\dots(12)$$

θ_c が非常に小さい場合、焦点比 $F_R (= F_2 / \phi)$ と N.A. との間には、次の近似式が成り立つ¹⁷⁾。

$$F_R = 1 / (2 \text{N.A.})$$

したがって、

$$\text{N.A.} = \phi / (2F_2) \quad \dots\dots(13)$$

である。本装置の場合、式(13)の値は、

$$\begin{aligned} \text{N.A.} &= 16 / (2 \times 50) \\ &= 0.16 \end{aligned}$$

となる。したがって、本装置では収束レンズの N.A. が 0.16 であるので、N.A. が 0.16 以上の光ファイバーを用いれば、収束レンズで取り込んだすべての散乱光を減衰させないで伝搬することができる。

以上より、ここではコア径が26.8 μm 以上で、N.A. が

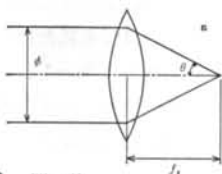


図-8 開口数

0.16以上の光ファイバーを用いれば、測定体積で得られる散乱光をすべて伝搬することができる。本装置では、コア径50 μm 、N.A.=0.2のものを用いる。

§ 4. 円盤状回折格子による補正曲線の検討

4.1 検討方法

本装置の測定体積中を散乱粒子が移動するときを得られる信号の補正について検討する。

図-5 に示す円盤状回折格子を回転させると、 ± 1 次回折光の周波数がシフトし、そのシフト量に応じた速度で干渉縞がガラス板上を移動する。これは、静止している干渉縞上を散乱粒子が移動するのと同じ状態であるといえる。

したがって、ここでは散乱粒子が移動するときを得られる信号の補正曲線を、円盤状回折格子を回転させたときに理論上得られる周波数(式(4))と実際に散乱光を信号処理して得られる周波数とから検討した。

実験は、図-5 に示す後方散乱型装置を用い、測定体積(図-2 に示す干渉縞を形成している部分)を光軸に垂直なガラス板の表面に設置して行なった。

4.2 検討結果

図-9 に、円盤状回折格子を回転させることにより得られる周波数シフト量 Δf と円盤状回折格子の回転数 R の関係を示す。この関係は式(4)、すなわち $\Delta f = 710R$ で与えられている。式(4)によると、円盤状回折格子を例えば $R = 7.5 \times 10^{-3} \text{rpm}$ で回転させると、表-1 に示すように $\Delta f = 5.325 \text{Hz}$ (真値) が得られる。

図-10 に、円盤状回折格子を $R = 7.5 \times 10^{-3} \text{rpm}$ で回転させたときに得られる出力信号を示す。これは、5ms 毎

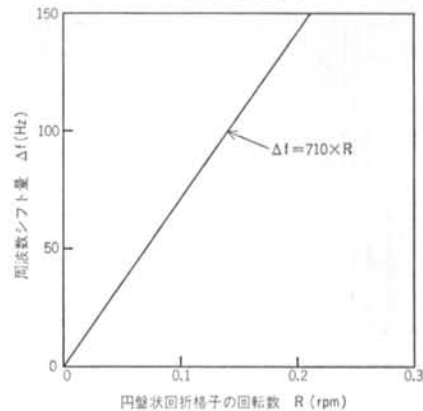
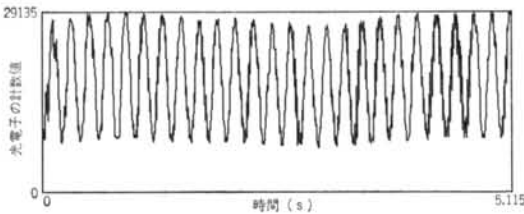


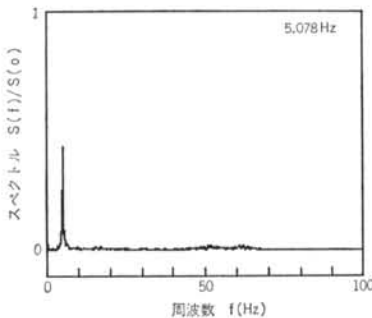
図-9 円盤状回折格子の回転数に対応する周波数シフト量

R (rpm)	Δf (Hz)	Δf_a (Hz)	$\log(\Delta f)$	$\log(\Delta f_a)$	$\hat{\Delta f}$ (Hz)	$\frac{\Delta f - \Delta f_a}{\Delta f}$	$\frac{\Delta f - \hat{\Delta f}}{\Delta f}$
3.0×10^{-4}	0.213	0.195	-0.672	-0.710	0.209	0.085	0.019
6.0×10^{-4}	0.426	0.391	-0.371	-0.408	0.419	0.082	0.017
1.5×10^{-3}	1.065	0.977	0.027	-0.010	1.047	0.083	0.017
3.0×10^{-3}	2.130	2.051	0.328	0.312	2.198	0.037	-0.031
7.5×10^{-3}	5.325	5.078	0.726	0.706	5.443	0.047	-0.022
1.5×10^{-2}	10.650	10.254	1.027	1.011	10.990	0.037	-0.031
3.0×10^{-2}	21.300	19.531	1.328	1.291	20.934	0.083	0.018
7.5×10^{-2}	53.250	53.711	1.726	1.730	57.568	-0.009	-0.075
1.5×10^{-1}	106.500	97.656	2.027	1.990	104.669	0.083	0.017

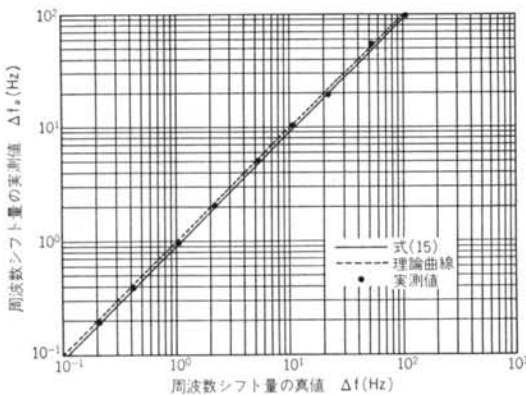
表一 円盤状回折格子の各回転数に対応する周波数



図一〇 出力信号図 (円盤状回折格子の回転数; 7.5×10^{-3} rpm)



図一一 FFTによる解析結果 (図一〇に対応)



図一二 円盤状回折格子による周波数シフト量の真値と実測値

に取り込まれた光電子 (フォトン) の計数値を1024点の時系列表示にしたもので、粒子に相当するものが干渉縞の明部にあるときは計数値が大きく、暗部にあるときは計数値が小さくなっている。

図一〇は、図一〇の出力信号をFFTによりスペクトル解析した結果で、縦軸は0 Hzでのスペクトル値 $S(0)$ で正規化した値 $S(f)/S(0)$ を示している。表一に示すように、円盤状回折格子の回転数に対応する卓越周波数 5.078 Hz (実測値; Δf_a) が得られている。

図一二は、ある回転数で円盤状回折格子を回転させたときに、図一〇の関係で得られた回転数に対応する周波数シフト量の真値 (Δf) と、図一〇、図一〇のようにして求められた周波数シフト量の実測値 (Δf_a) との関係を示したものである。これらの値は、理論上は図中破線に示すように1対1に対応するが、得られた実測値は若干破線の下方にずれている。この場合の残差を求めれば、表一に示すように3.7~8.5%の範囲にある。

さらに、残差を小さくするために本装置での補正曲線を求めてみる。補正曲線を、図一二の Δf と Δf_a の対数値について線形回帰式と仮定し、最小二乗法を適用すれば、

$$\log(\Delta f_a) = 1.00 \log(\Delta f) - 0.03$$

を得る (図一二中の実線)。これを整理すれば、

$$\Delta f_a = 0.933 \Delta f \quad \dots\dots(14)$$

または、

$$\hat{\Delta f} = (1/0.933) \Delta f_a \quad \dots\dots(15)$$

を得る。したがって、実測値 (Δf_a) が得られれば、式(15)に代入することにより理論上の速度に対応する周波数を推定することができる。表一での Δf_a を新たに得られた実測値として推定すれば、その残差は表一に示すように大部が1.7~3.1%となる。これと補正曲線を用いない場合の残差とを比較すれば、ほとんどの場合に精度が向上しているといえる。

§ 5. 流体中散乱粒子の移動速度の測定

5.1 測定方法

図-6 に示す前方散乱型装置を用い、水槽内散乱粒子の移動速度を測定した。水槽は厚さ 3 mm、縦 5 cm、横 5 cm、高さ 30 cm のアクリル製の直方体で、本装置の投光レンズと集光レンズの間に設置し、2 本のレーザー光の交差点（測定体積）が底面から約 7 cm の位置の水槽のほぼ中央になるように調節した。散乱粒子には、沈降速度が遅く、ブラウン運動しにくい比重 1.05、粒径 49.4 μm のポリスチレンビーズを用いた。

測定は、まず蒸留水で満たされた水槽にその上方から多数の粒子をゆっくり投入し、粒子が測定体積付近を通過するようにした。さらに、この場合に得られた散乱光を信号処理して卓越周波数を算定し、これを流速に換算した。一方、散乱粒子の実際の移動速度は沈降状況をビデオカメラで連続撮影し、測定体積付近を通過した粒子の移動距離と経過時間から算定した。以上のようにして得られた本装置での流速値と実際の流速値とを比較し、本装置の性能を確認した。

次に、流体中の散乱粒子が沈降している場合に、円盤状回折格子をそれが取り付けられているモーターの軸の方からみて時計方向や反時計方向に回転させ、それぞれの状態での周波数を算定した。さらに、理論どおりの周波数が得られているか検討し、円盤状回折格子の周波数シフターとしての性能を確認した。

5.2 測定結果

5.2.1 流体中散乱粒子の移動速度の測定

図-13 は、流体中の散乱粒子が沈降している場合に得られる出力信号である。これは 100 μs 毎に取り込まれた光電子の計数値を 1024 点の時系列表示したものである。

図-14 は、図-13 の出力信号を FFT により解析した結果で、縦軸は図-11 と同様に正規化したスペクトル値を示している。卓越周波数 195.313 Hz (実測値; Δf_a) が得られている。式(2)を用いて真の流速に対応する周波数の推定値を求めれば、209.339 Hz (推定値; $\hat{\Delta f}$) が得られる。この値を式(2)により流速に換算すれば、水中での干渉縞の間隔は $d_F = 1.6 \mu\text{m}$ であるので、 $V = 3.35 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ となる。

図-15 は、測定体積付近を通過する数個の散乱粒子について、5 秒毎の移動位置をプロットしたものである。これから、測定体積付近を通過する散乱粒子の実際の移動速度は、 $V = 2.27 \times 10^{-2} \sim 2.76 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ となる。

本装置で得られた流速の推定値は、図-15 から得られ

た実際の流速値とほぼ一致しており、一応本装置で流体の移動速度が測定できると考えられる。若干値が異なるのは、前者が測定体積を通る流体の流速であるのに対し後者が測定体積付近の流速であるからと思われる。

5.2.2 周波数シフターの性能確認

まず、散乱粒子が沈降しているときに、円盤状回折格子を時計方向に 0.15 rpm で回転させて得られる周波数について検討する。

本装置の光学系は、円盤状回折格子を時計方向に回転させれば、測定体積の干渉縞が上向きに移動するように設置されている。したがって、散乱粒子が沈降しているときに円盤状回折格子を時計方向に回転させれば、干渉縞は散乱粒子とは逆方向に移動するので、得られる周波数は回転数に相当する周波数（周波数シフト量）だけ高

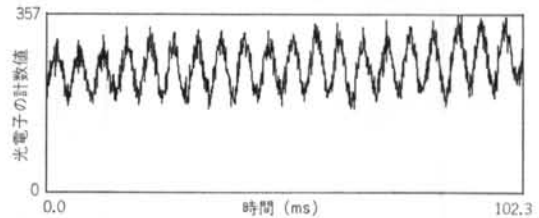


図-13 出力信号図 (円盤状回折格子の回転数: 0 rpm)

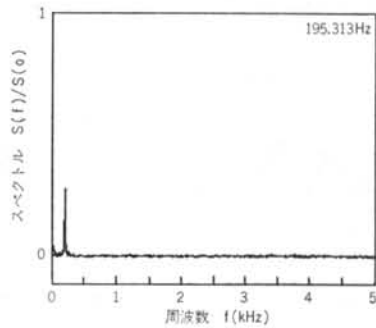


図-14 FFT による解析結果 (図-13 に対応)

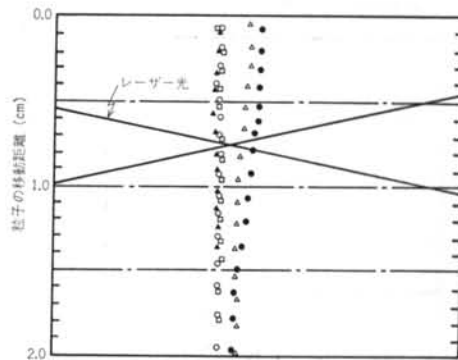


図-15 水槽内散乱粒子の移動状況 (5 秒毎の移動位置)

くなることになる。

円盤状回折格子を0.15rpmで回転させれば、表-1から97.656 Hzの周波数シフト量が得られる。この場合には、円盤状回折格子を時計方向に回転させているので、円盤状回折格子を回転させないときの値195.313Hzに周

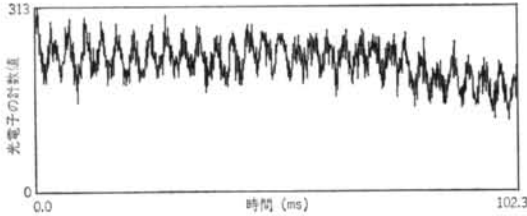


図-16 出力信号図(円盤状回折格子の回転数;時計方向に0.15 rpm)

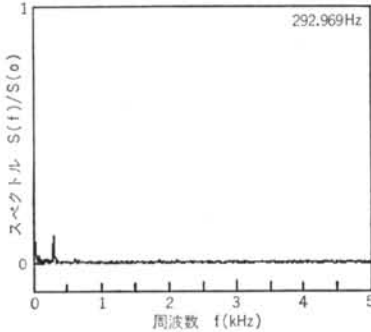


図-17 FFTによる解析結果(図-16に対応)

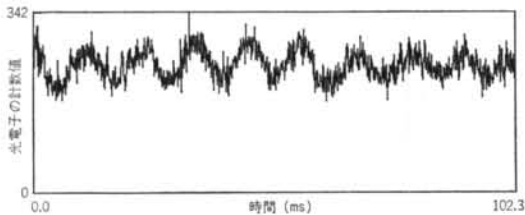


図-18 出力信号図(円盤状回折格子の回転数;反時計方向に0.15 rpm)

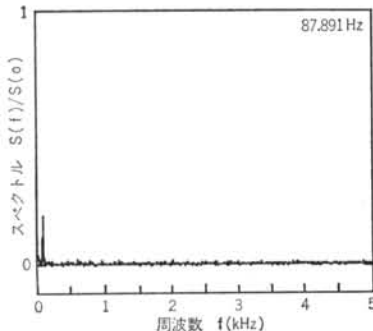


図-19 FFTによる解析結果(図-18に対応)

波数シフト量を加えた $195.313+97.656=292.969(\text{Hz})$ の周波数が理論上得られることになる。

図-16に、散乱粒子が沈降しているときに円盤状回折格子を時計方向に0.15rpmで回転させて得られる出力信号を示す。これは、図-13と同じ取り込み条件で表示したものである。

図-17は、図-16の出力信号をFFTにより解析した結果で、縦軸は図-11と同様に正規化したスペクトル値を示している。卓越周波数292.969Hzが得られている。この値は上述の理論上の値292.969Hzと一致しており、回転数に対応した周波数シフト量が得られている。

次に、散乱粒子が沈降しているときに、円盤状回折格子を反時計方向に0.15rpmで回転させて得られる周波数について検討する。

本装置では、円盤状回折格子を反時計方向に回転させれば、測定体積の干渉縞が下向きに移動するようになっている。したがって、散乱粒子が沈降しているときに、円盤状回折格子を反時計方向に回転させれば、干渉縞は散乱粒子と同じ方向に移動するので、得られる周波数は周波数シフト量だけ低くなることになる。

円盤状回折格子を0.15rpmで回転させれば、上述のように97.656 Hzの周波数シフト量が得られる。この場合には、円盤状回折格子を反時計方向に回転させているので、円盤状回折格子を回転させないときの値195.313Hzから周波数シフト量を差し引いた $195.313-97.656=97.657(\text{Hz})$ の周波数が理論上得られることになる。

図-18に、散乱粒子が沈降しているときに、円盤状回折格子を反時計方向に0.15rpmで回転させた場合に得られる出力信号を示す。これは、図-13と同じ取り込み条件で表示したものである。

図-19は、図-18の出力信号をFFTにより解析した結果で、縦軸は図-11と同様に正規化したスペクトル値を示している。卓越周波数87.891 Hzが得られている。この値は上述の理論上の値87.891 Hzと一致しており、回転数に対応した周波数シフト量が得られている。

以上より、本装置では円盤状回折格子を回転させることにより理論どおりの周波数シフト量を得ており、円盤状回折格子が周波数シフターとして正常に機能していることが確認された。したがって、上記性能を利用し円盤状回折格子を回転させ、予め周波数シフト量を与えた状態で得られる信号の解析値と、周波数シフト量を与えない状態で得られる信号の解析値とを比較すれば、2.2で示した方法により流体の流動方向を識別することができると思われる。

§ 6. おわりに

本論文では、従来までの LDV を低速域まで測定できるように微流速測定用の装置を試作し、その特性について種々検討を行なったものである。すなわち、円盤状回折格子を回転させ、これにより得られる信号の周波数が設計どおりの周波数を示すかどうか、水槽内の散乱粒子の移動速度が測定できるかどうか、また円盤状回折格子を回転させることにより得られる周波数シフト量が設計どおりの値を示すかどうか検討したものである。その結果、以下のような知見が得られた。

(1)スリット間隔の小さい円盤状回折格子を用い、回転を遅くすれば微流速の測定ができ、本装置で 10^{-2} cm/s のオーダーの流速が測定できた。

(2)周波数の真値(f)と実測値(f_a)の対数値に対して

線形回帰式の補正曲線を仮定し、 $\hat{f}=(1/0.933)f_a$ を得た。この補正曲線を用いることにより、実測値(f_a)から周波数の真値の推定値 \hat{f} を求めることができる。

(3)本装置での真値と実測値との残差は3.7~8.5%で、補正曲線を用いれば1.7~3.1%に改善される。

(4)円盤状回折格子を回転させる場合に得られる実測値とそれを回転させない場合に得られる実測値を比較することにより、流体の流動方向を識別することができる。

謝辞 本研究を実施するに当たり、終始懇切なご指導を頂きました。九州工学部神野健二助教授、梶井和朗助手ならびに筑波大学水理実験センター嶋田純講師に深く感謝の意を表します。また、轉応用光電研究室笠原一郎氏、住友セメント轉高城一氏ならびに東京光学機械轉増山正幸氏には光学系の基本設計と装置の製作に協力して頂きました。ここに、記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 大場謙吉：“光ファイバを用いたレーザ流速計”ターボ機械 Vol.12, No.11 (1984年) pp.38~45
- 2) 沢本正樹・日野幹雄・山下俊彦・広永勝治・村本龍夫：“光ファイバを用いたレーザドブラ流速計の開発”東工大土木工学研究報告 No.33 (1984年) pp.25~35
- 3) 中谷 登：“最近のレーザ・ドブラ流速計”高温学会誌 Vol.10, No.5 (1984年) pp.184~193
- 4) 新田 淳・世古淳也：“レーザ・ドブラ流速計”病態生理 Vol.3, No.8 (1984年) pp.634~639
- 5) 前田昌信：“差動型レーザ・ドブラ流速計の活用”ターボ機械 Vol.12, No.11 (1984年) pp.30~37
- 6) B. Ruck: “Laser Doppler Anemometry—a Non-Intrusive Optical Measuring Technique for Fluid Velocity” Part. Charact. 4 (1987) pp.26~37
- 7) 小林 彬, 他：“光応用計測の基礎”計測自動制御学会 (1983年)
- 8) T.S. Durrani & C.A. Greated: “Laser Systems in Flow Measurement” Plenum Press (1977)
- 9) 池上 詢・塩路昌宏・石山拓二：“光電子相関レーザ・ドブラ法による輝炎内の流れの測定”日本機械学会論文集 (B編) Vol.49, No.438 (1983年) pp.517~525
- 10) 前田昌信・菱田公一・中村公泰・猪飼 茂：“混相流中の微粒子の粒径、速度および濃度の非接触測定 (はん用フリンジモード LDV 光学系を用いた粒径測定)”日本機械学会論文集 (B編) Vol.48, No.425 (1982年) pp.69~77
- 11) M. Ikegami & M. Shioji: “Flow Measurement by a Photoelectron Correlation Method” The Application of Laser Doppler Velocimetry (1984) pp.127~141
- 12) 稲場文男：“超微弱光計測およびスペクトル情報分析技術の最近の進歩とその医学・生命科学への応用”O plus E No.12 (1980年) pp.78~92
- 13) 久米英浩：“極端領域における光計測センサ”センサ技術 Vol.7, No.6 (1987年) pp.16~29
- 14) 平井紀光：“ホログラフィの基礎と実験”共立出版 (1979年)
- 15) 大竹祐吉：“市販レーザ装置活用のためのレーザの使い方と留意点”オプトロニクス社 (1986年)
- 16) 竹中俊夫編：“技術資料流体計測法”日本機械学会 (1985年)
- 17) 末田哲夫：“オプトロニクス活用のための光学部品の使い方と留意点”オプトロニクス社 (1986年)

