

神戸大学 正員 篠 源亮
 “ 学生員 西田 寿夫
 “ “ 前田 強

レーザーを応用した流速計には、リંગレーザーを応用したもの、スペckルパターンを応用したもの、ドップラー効果を応用したもの、3種類が見受けられる。一般にレーザー流速計としては、ドップラー効果を応用した、L.D.V.と略称されるものが多く、すでに市販されている。本文はこのL.D.V.の考察ならびに試作を行った結果について述べる。

L.D.V.は、光源、光路、トランスデューサー、処理装置の4系統から成り立っており、流体中の測定点、光センサー内を通過する微小粒子による散乱光のドップラーシフトされたものを検出することにより流速を求めるものである。

光路系として後述するDifferential-Scatter-Modeを用いれば、トランスデューサーとして一般に用いられる光電増倍管(P.M.)に入射する光波 E_i ベクトルは

$$E_i = E_1 + E_2 \quad (1)$$

となり、2方向からの散乱光が入射することになる。光電増倍管は2乗検出特性であるので、その出力電流 I の平均値は、

$$I = \mu |E_i|^2 = \mu \{(|E_1|^2 + |E_2|^2) + (E_1 E_2^* + E_2 E_1^*)\} \quad (2)$$

となり、(2)式の右边第1項は直流成分、第2項は、交流成分を示す。ここで、 μ はP.M.のプレート感度、サファクス*は共役複素数を示す。P.M.の周波数特性は 10^9 Hz程度であるため、光そのものの波は感知せず、ドップラー信号のみを抽出し、

$$I_{AC} = \mu (E_1 E_2^* + E_2 E_1^*) \quad (3)$$

をドップラー信号として検出する。光波ベクトル E_i が波動であるから(3)式を書き直すと、

$$I_{AC} = E_0 \cos(f_0 t - \phi) \quad (4)$$

となり、ドップラーシフトされた光を電流に変換出来る。ここで、 E_0 はレーザー出力、光路、光センサー等によって定まる量である。散乱光によるドップラー周波数 f_0 は図-1を参照して、

$$f_0 = -(K_0 - K_s) \cdot V \quad (5)$$

を与えられ、流速が入射・散乱で変化したから、

$$f_0 = \frac{2\pi n V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (6)$$

となり、流速 V と f_0 が比例関係にある。ここで、 λ はレーザー光の波長、 n は、流体の屈折率である。

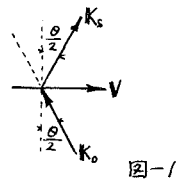


図-1

上記は単一の粒子からの散乱の場合の理想的な状態における関係であるが、実際には存在粒子はある測定体積 V をもつ光センサー($V = \frac{\pi D_a^2}{4} \Delta z$; D_a はAiry Disk径)に不規則、不連続に流入・流出するのであるから、各々の粒子による散乱光は、センサーに流入した時定まる位相が異なるため、散乱光全体としての位相は不規則に変化し、これが、ドップラー周波数の見かけ上のゆらぎとなって測定される。すなわち(4)式は、

$$I_{AC} = \sum_m E_{0m} \exp\left\{j \frac{\Delta f_0}{f_0} (t - t_m)\right\} \cos\{f_0 (t - t_m) + \phi_m\} \quad (7)$$

となる。(7)式は時間 t_m に m 番目の粒子が E_{0m} のパワーで散乱することを示す。ただし Δf_0 は上に述べたことによる不確定な周波数の振れのバレット中である。一般に $f_0 = f_0(\lambda, V, \theta)$ であることから、

$$\Delta f_0 = \frac{\partial f_0}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial f_0}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial f_0}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (8)$$

のドップラー周波数の広がりがある。第一項はレーザー自身のバート中で数Hz,あるいは 10^3 Hzの値をもつ。流体の流速が低い場合は、この周波数変動は問題であるが、高流速では問題とならない。第二項は、流速変動によるバート中であり、流速勾配と非定常性に関係する。第三項はレンズの収束角による影響であり、また光路交叉角とも関係する。乱流を測定する場合、乱流による Δf_D と、この不確定性による Δf_D との区別は難しい。さらに、乱流微細構造を問題とする場合光センサーの大きさを乱流のマイクロスケールより小さくしなければならぬが、この場合不確定性が増す。その他の雑音に対しては、処理装置に適当な通過波器を組み込んで計測系の雑音を除去する方法が取られている。

試作器

試作したL.D.V.の概要は次の通りである。

光源: He-Ne レーザー, $\lambda = 6328 \mu$ T.E.M.₀₀モード (ガラス分布, 従って(4)(7)式の E_0 はガウス分布と見る必要がある), 出力 2.5mW. 安定化電源使用

光路: Differential-Reference 複合型

トランスデューサー: 光電増倍管 (1850~8200Å) (ダイナート, プレート型電源使用)

処理装置: 3波器-前置増中器-広帯域増中器-振巾制限器-微分回路-周波数計
 ↳可変狭帯域 ↳周波数分判器-電圧計

L.D.V.は一般に用いられる光路系は図-2に示す。これには、(1) Reference-Scatter-Mode, (2) Differential-Scatter-Mode, (3) Dual-Scatter-Mode, (4) Back-Scatter-Mode の4方式がある。Reference-型は初期のL.D.V.によく用いられており、3次元速度成分の測定がよいと出来るが、測定値を可視するとは出まらず、この点、Differential型は可視出来るが、同時に2成分の流速測定は出来ないの下、乱流剪断力等の測定には向かない。Back-Scatter型は大きな光源を必要とするため一般的でない。以下は簡単に他のModeの光路に変えることが出来るという利点と、それ以上に、光路系の設定・調整が最も容易であるという理由で、ReferenceとDifferential型を複合したものを光路系に用いた。レーザーからの光束を2分するのにはハーフミラーを用いているが、その他プリズム等を用いることによっても得られ、又スベリヤルズミラーによりレーザービームを拡げてレンズ前面の2つのビームホールにより2光束を得ることも出来る。後者の方法は光量は落ちるが、良い方法である。

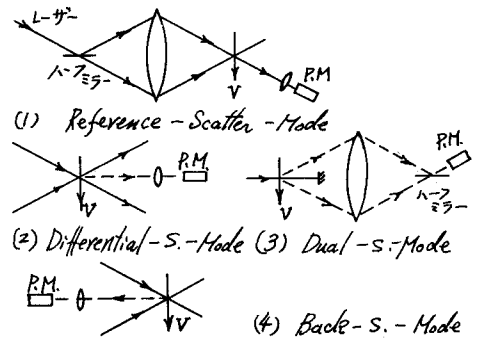


図-2

レーザーからの光束を2分するのにはハーフミラーを用いているが、その他プリズム等を用いることによっても得られ、又スベリヤルズミラーによりレーザービームを拡げてレンズ前面の2つのビームホールにより2光束を得ることも出来る。後者の方法は光量は落ちるが、良い方法である。

処理装置は、(6)式より $\theta = 20^\circ$ とすると $f_D(\text{kHz}) = 736 V(\%)$ となり、今流速が0~1%まで変化すれば f_D は0~736kHzまで変化することになり、これをカバーするものではない。単一の広帯域増中器下ではこの範囲の周波数をカバーすることは困難である。通常用いられているのは、ヘテロダイン混合を行って狭帯域フィルターを通し、復調器からの出力電圧を電圧制御発振回路(V.C.O.)にフィードバックさせて、ヘテロダインの発振周波数を変化させ、常に混合された信号が狭帯域フィルターを中心周波数からずれないように自動制御も行っている。

しかしながらこの回路ではドローアップアウトの現象を生じ、センサーを覆ふような粒子が通過すると出力は零周波数になりV.C.O.ははずれてしまう。もっともこれを補償出来るようなつたものも存在する。試作を行ったのは、周波数領域を0~200kHz, 200~600kHzに分離し前者を広帯域増中器、後者可変狭帯域増中器とした。指示方法は周波数計で平均流速を、復調器出力電圧で乱流を得られるようにしたが、乱流測定は慎重に行う必要があり得られた結果と直にそのまゝ乱流とするには問題がある。L.D.V.は速度-周波数変換であり、周波数に負値はないため流向は判別出来ない。流向の判別を行うためニミ試みながらこれについては発表時に述べる。