

II-145 ドップラー強度と粒子通過位置を考慮した固液2相流の粒子濃度測定

九州大学大学院 学生員 末松 健 二
 九州大学工学部 正会員 粉井 和 朗
 九州大学工学部 正会員 神野 健 二
 九州大学工学部 正会員 上田 年比古

1.はじめに

レーザドップラー流速計(LDV)を固液2相流に応用する場合には、流体と粒子の信号識別などの不明確な問題がある。本報は、粒子と流体のレーザ信号を識別し、粒子の体積濃度を測定する方法について検討したものである。

2.粒子と流体の信号識別法

図-1にドップラー信号例を示す。Id_{max}は一つのドップラーバーストの最大振幅の2倍である。ドップラー信号の強度Idを用い流体と粒子の信号の識別ができる¹⁾ので、本報ではペDESTAL信号の強度による識別は考慮しない。まず、固体粒子を加えてない流れから流体のId_{max}を500個抽出する。これを標本(A)とし、Id_{max}のヒストグラムを図-2に示す。標本(A)は0.0v-0.9vの範囲に分布する。次に、固体粒子を加えた流れからId_{max} ≥ 0.9vの信号を500個抽出する。これを標本(B)とし、Id_{max}のヒストグラムを図-2に示す。流れに粒子を付加すると、標本(A)に存在しないId_{max} ≥ 0.9vの信号を抽出できる。従って、トリガーレベルをId = 0.9vに設定すると、流体と粒子の混合したレーザ信号から粒子信号を識別できる。

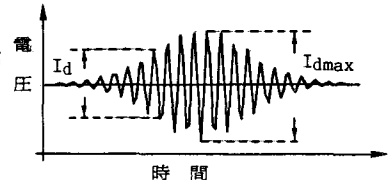


図-1 ドップラー信号例

3.LDVによる粒子濃度の計測法

粒子平均速度V_p、単位時間当たり測定体積を通過する粒子の個数すなわち粒子到達率n、粒子が測定体積を通過する断面積A_mが既知の場合には単位体積当たりの粒子の個数Nは次の関係²⁾から求められる。

$$n = N \times V_p \times A_m \quad (1)$$

上式においてnは、解析時間内のドップラー信号に対し振幅識別値以上の個数をカウントすることによって得られ、V_pは粒子と判定されたドップラー信号の周波数f₀をゼロクロス法で求め、次式より計算する。

$$V_p = 7.603 \times 10^{-9} \times f_0 \quad (2)$$

次に、粒子の通過断面積A_mをいかに与えるかが問題となってくる。従来A_mにはレーザ測定体積のZY平面への投影面積で与えられている²⁾。しかし、振幅識別値以上のドップラー信号の個数を粒子到達率として用いるために、識別値に対応した通過断面積を定めることが必要である。本報では、以下のようにしてA_mを与える。図-3に示す測定体積中の光強度分布は、X、Y、Z方向にそれぞれガウス分布の強度をしており、単一粒子が測定体積を通過する時のドップラー信号Idは次のように表わされる。

$$Id(x, y, z) = A \cos(kx) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3)$$

ここに、散乱波数k = 4π sin(θ/2)/λ、θはレーザビームの交差角、λはレーザ波長、係数Aは粒径dによる関数で実験で得るId_{max}の最大値を使い、X、Y、Z方向の分散σ_x、σ_y、σ_zは、Idが測定体積の端でAの1/e²となるように定める。式(3)によると、粒子の通過位置によりドップラー信号の強度が変化することになる。粒子はX方向だけに移動すると仮定すれば、x=0でIdは最大のId_{max}となる：

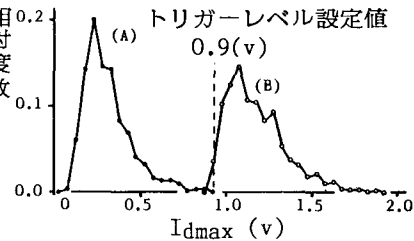


図-2 ドップラー信号の強度のヒストグラム

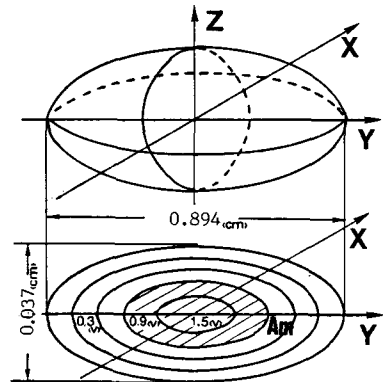


図-3 測定体積とドップラー信号の強度の等高線

$$I_{d_{max}}(y, z) = A \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (4)$$

図-3は係数 $A=1.5v$ の場合の式(4)による測定体積内の $I_{d_{max}}$ の等高線である。たとえば、 $I_{d_{max}} \geq 0.9v$ のドップラー信号の場合には図中の斜線部を粒子の中心が通過したことになる。さて、ある値 $I_{d_{max}}$ の等高線内の楕円面積 A_m' は式(4)より

$$A_m' = \pi \times y_x \times z_x \quad \text{となる。}$$

ここに、 $y_x = -2\sigma_y^2 \ln(I_{d_{max}}/A)$ 、 $z_x = -2\sigma_z^2 \ln(I_{d_{max}}/A)$ である。従って、粒子が測定体積内を通過する断面積 A_m は、振幅識別値を $I_{d_{max}}$ とすると次のようになる。

$$A_m = \pi \times (y_x + d/2) \times (z_x + d/2) \quad (5)$$

4. 実験

前方散乱式レーザドップラー測定法の実験装置を図-1の概略図に示す。33 μm の金網を通して自然混入物を除

去した水を8cm \times 8cmの正方形管路に入れる。これ以下の自然混入物を流体用トレーサとする。実験に使用した固体粒子は比重2.48、平均粒径79.6 μm 、179.5 μm と380.9 μm の3種類の透明ガラス粒子である。

20mW He-Neガスレーザのレーザ光はビームスプリッターにより二つに分割され、光束が交

差する位置に測定点を作る。ドップラー効果を受けたレーザ光を、前方のフォトマルで検出する。入力したレーザ信号からペDESTAL成分をバンドパスフィルターにより除去しドップラー成分を得る。ドップラー信号を適当なサンプリング周波数でA/D変換し、マイクロコンピュータでドップラー信号の強度と周波数計算を行う。

5. 実験結果および考察

表-1に解析時間 10.62秒間のドップラー信号を識別して求めた各粒径別の濃度測定値を示す。実験装置の下部より循環中の水を抽出し、計測した体積濃度 c を参考値として示す。粒径が小さい場合あるいは濃度が大きくなると測定体積中に1つ以上の粒子が同時に存在する確率が高いこと、および信号状態が悪化するために測定できる濃度に上限(約 $N=100$ 個/cm 3)があるようだ。その他の粒径、濃度の場合(表中のアンダーラインの濃度)では、測定値と参考値を比較するとほぼ妥当である。一方、従来の測定体積の断面積を用いた場合の結果を表中の②に示している。濃度①あるいは参考値と比較して約1/4の値になる傾向にある。以上のことから、振幅識別値に対応した粒子の通過断面積を設定することで、LDVによる粒子濃度計測が可能であると言えよう。

6. おわりに

本報では、固液2相流にレーザ流速計を応用し粒子体積濃度の計測法について検討を行った。その結果、LDVによる濃度計測の上限はあるが、流体と粒子のレーザ信号をドップラー信号の強度で識別し、識別値に対応した粒子の通過断面積、粒子到達率及び粒子速度を用いて固液2相流における粒子の平均濃度が測定できる。

参考文献

- 1) 末松・柁井・神野・上田：LDV計測における固体粒子と流体の信号識別について、第40回土木学会年次講演会概要集，pp.381~382，1985。
- 2) Durst, F., A. Melling and J.H. Whitelaw: Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, Academic Press Inc., p.334, 1976.

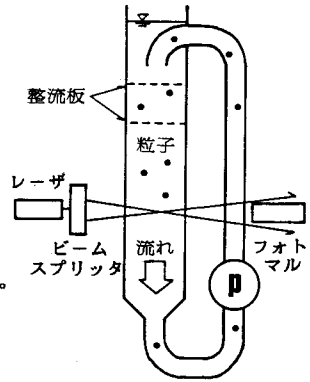


図-4 実験装置

表-1 粒子濃度

| 平均粒径 (μm) | Idの最大値 A(v) | 粒子到達率 n(個/s) | 粒子平均速度 Vp(cm/s) | 通過面積 $A_m(\text{cm}^2)$ | 粒子個数 N(個/cm 3) | 体積濃度 C(%) | | 参考値 c(%) |
|---------------------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|--------|-------------|
| | | | | | | ① | ② | |
| 79.6 (a) | 1.30 | 7.5 | 14.6 | 0.00715 | 71.9 | 0.002 | 0.0004 | 0.014 |
| | " | 16.2 | 14.7 | " | 154.2 | 0.004 | 0.0009 | 0.017 |
| | " | 4.0 | 14.9 | " | 37.5 | 0.001 | 0.0002 | 0.027 |
| 179.5 (a) | 1.87 | 6.2 | 15.4 | 0.00976 | 41.2 | 0.012 | 0.003 | 0.012 |
| | " | 5.8 | 15.9 | " | 37.3 | 0.011 | 0.003 | 0.017 |
| | " | 14.2 | 16.3 | " | 89.4 | 0.027 | 0.007 | 0.028 |
| 179.5 (b) | " | 8.4 | 16.4 | " | 52.4 | 0.016 | 0.004 | 0.046 |
| | 1.87 | 6.9 | 14.6 | 0.00976 | 48.6 | 0.015 | 0.004 | 0.012 |
| | " | 3.8 | 15.3 | " | 25.5 | 0.008 | 0.002 | 0.017 |
| 380.9 (a) | " | 12.4 | 15.6 | " | 81.3 | 0.025 | 0.006 | 0.028 |
| | " | 11.7 | 15.6 | " | 77.1 | 0.023 | 0.006 | 0.046 |
| | 1.80 | 0.5 | 14.6 | 0.01610 | 2.1 | 0.006 | 0.002 | 0.010 |
| 380.9 (a) | " | 1.6 | 15.9 | " | 6.3 | 0.018 | 0.005 | 0.019 |
| | " | 7.5 | 16.4 | " | 28.5 | 0.082 | 0.024 | 0.038 |

測定点(a):管路の中央部,(b):壁面と中央部の中間

濃度①:係数Aに対応する通過面積 A_m を使う,②:測定体積の断面積を通過面積 A_m として使う