

レーザ流速計による固液2相流の流体及び粒子速度の同時測定について
Simultaneous Measurements of Fluid and Particle Velocities
in Solid-Fluid Phase Flow by Laser Velocimeter

九州大学工学部 正員 神野 健 二
九州大学工学部 正員 初井 和 朗
九州大学工学部 正員 上田 年比古

1. はじめに

レーザ流速計による流体速度の測定は、従来の流速計と異なり流体場を乱すことなく測定できることからその有用性が注目され、既に数多くの研究、応用が報告されている¹⁾。これにともない従来の測定機器との優劣の比較や、測定精度向上についての詳細な検討、あるいは簡単な流れの場については出力信号の単なる信号処理のみならず、流量計としての実用化のため、コンピュータによるソフト処理方法についての研究²⁾なども増えつつある。

一方、固液2相流あるいは固気2相流へのレーザ流速計の応用については、既にLee, S. L.³⁾、Tsuji, Y.⁴⁾の研究などにも見られ、粒子および流体速度の同時測定が可能になりつつある。

流体中で微細粒子が浮遊したり、比較的大きな粒子が重力沈降する固液2相流の問題は工学の各分野で重要な課題として多くの研究がなされているが⁵⁾、これらの複雑な現象を解明するためには、粒子および流体の相互運動を検討してゆくことが必要であろう。

Einav, S. and Lee, S. L.⁶⁾は固液2相流の基本的特性を検討するために、層流境界層に進入する中立浮遊粒子(粒径 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$)の速度および流体速度を、境界層の各断面でレーザ流速計により測定し、流下方向に変化する流れの場と粒子速度との相互関係について述べている。また最近、辻ら⁷⁾は比較的大きな粒子(粒径 3.4mm 、比重 0.97 のポリエチレン球)を用い、前方散乱方式で得られるドップラ-信号を周波数トラッカーに入れ、この出力信号の特性から粒子速度を求める方法を検討している。本報では、粒径 $2.25\sim 2.34\text{mm}$ のガラス球、粒径 4.75mm の鋼球、粒径 1.00mm のポリスチレン球を用い、レーザ流速計による粒子および流体速度の同時測定に関する検討を行った。

2. 信号処理システム

固液2相流で粒子および流体速度の同時測定を行う場合、以下に述べるような二つの方法〔(A), (B)〕が考えられている。その一つは、(A)図-1に示すような信号を処理するもので、手順を概説すると、

- ①前方に設置した一つのフォトマルにより、流体と粒子からの信号が混合している原信号を検知する。
- ②流体に追従している微粒子からの信号に比べて固体粒子の場合は図の信号(a)に示すように、その直流成分(これをペダスタル信号という)の大きな信号が得られる。したがって、流体と粒子からの信号の振幅の違いを利用して両者を分離する。信号(b)は予め設定したトリガーレベルより高い粒子からの信号であり、信号(c)はそれより低い流体からの信号である。
- ③分離した二つの信号(b)、(c)を最適なバンドパスフィルタに通して、低周波数のペダスタル部分と高周波数の雑

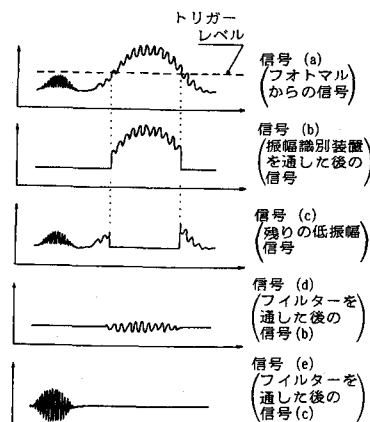


図-1 前方散乱方式で得られる固液2相流の信号例³⁾

音成分を取りのぞき最終的に周波数解析に有効な粒子からの信号(d)、流体からの信号(e)を得る。

辻らは上述の処理方式においては有限の大きさを持つレーザビームのどの部分を粒子が通過するかによっても、ペDESTALは大きく変化するためペDESTALのみによる信号の分離は不十分であることを指摘している。したがって、辻らは信号(d)、(e)にも閾値を設定しあいまいな信号は除外して有効な信号のみを取り出して周波数の解析を行っている。

もう一つの方法は、(B)流体からのドップラー信号は前方散乱方式で受光するが、比較的大きい粒子については粒子からのドップラー信号を後方散乱方式、すなわち反射光を粒子専用のフォトマルで受光し、それぞれの速度を独立に解析する方法である^{8),9)}。この方法で筆者らが検討した粒径の範囲(0.8 μ m~4.75 μ m)の球形粒子では反射光も十分に容易に計測できる。本報では(B)の方法についての検討を行った。

まず本報の計測方法でどのような測定値が得られるかをできるだけ詳細に調べるために、

Case(1) : 静水中に垂直に挿入した内径3mmのガラス管の中を自然落下する粒子速度をLDVとVTRとで測定し両者の比較を行った。

Case(2) : 静水中を一定速度で上昇する粒子の速度とこれに伴う流体速度をLDVで測定し、これをNavier-Stokesの方程式による流体速度の数値計算結果と比較した。

Case(3) : 開水路中にノズルから水とともにポリスチレン球を水平に放出させ、粒子および流体速度の変動を測定した。

図-2はCase(1),(2)で用いた信号処理システムである。投光部は出力5mWのHe-Neガスレーザをビームスプリッタで交差角4.77°の2本のビームに分けたものである。また粒子および流体からのドップラー信号を直接マイコン処理するために2台のトランジェントメモリ(粒子用は2048個、流体用は4096個の容量)に記憶させた。すなわち、

①ビーム交差点を粒子が通過するときの粒子表面からの反射光をフォトマル(PM2)で受光する。

②フィルタを通した信号をトランジェントメモリ(TM2)に入れる。このとき予め、次の(i)~(iii)の項目の設定を行う：

(i) TM2のサンプリング時間

(ii) トリガーレベル(粒子からの反射光が十分に強く良好な信号のみを処理するために設定する)

(iii) データの記憶をする時間帯(トリガーがかかった時点を原点に過去あるいは未来何%から記憶を開始するか)

③ TM2のトリガーを流体用のTM1の外部トリガーに接続する。

④ TM1についても前述の(i)~(iii)の項目を設定しておく。

⑤ TM1、TM2に記憶させたデータをGP-IBインターフェイスを通してマイコンに転送する。

⑥ マイコンではそれぞれ離散化されたドップラー信号のうち、予め設定されたレベル以上の強度をもつ波だけを対象にし、まずこの波が時間軸を最初に横切った時点から、最後に横切るまでの時間を計算する。

⑦ 次にこの時間内に含まれる波の個数を求め、ドップラー-周波数を計算する。

次に、図-3はCase(3)で用いた信号処理システムで、原理的には図-2とは同じであるが、ここではなるべく長時間の変動特性を調べるためスペクトルアナライザによりドップラー信号のピーク周波数を求め、マイコンによ

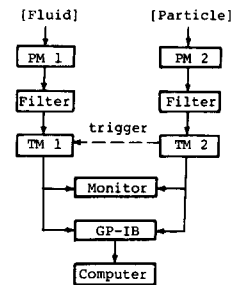


図-2 Case(1),(2)用の信号処理システム

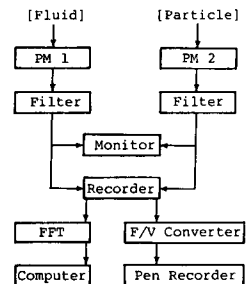


図-3 Case(3)用の信号処理システム

り速度に換算している。この場合もスペクトルアナライザ-の内部トリガ-を粒子の信号により駆動させ、粒子の通過前後の流体速度の時系列および粒子速度を求めるようにしている。また、図のF/Vコンバータにより粒子のドップラ-信号をパルス信号列に変換し、単位時間に測定点を通過する粒子個数を解析している。

3. 測定結果

Case(1)

図-4に示す容器に内径3.00mmの透明ガラス管を挿入し、白ペンキで着色した粒径2.25~2.34mmのガラス球をこの中で自然落下させた。この場合は粒子速度のみを測定した。またVTRでも同時に測定し、表-1に示すような結果を得た。両者の差は1~5%とかなり小さく本方式による粒子速度測定にかなり高い精度が期待できる。

Case(2)

図-4に示す実験である。白ペンキで着色した粒径4.75mmの鋼球を釣糸でつるし、モ-ターで定速上昇させた。LDVによる粒子速度Uの測定値は3.13, 3.23, 3.39 cm/secであり、粒子速度Uを用いたReynolds数($Re=2aU/\nu$)はそれぞれ139, 143, 149である。なお、粒子速度については前述のケース(1)と同様にVTR測定値と比較し、その差が数%以内であることを確認した。

図-5には測定された鉛直方向(粒子の移動方向)の流体速度を○、+、および△印で示している。トランジェントメモリ-の記憶容量に限度があるため、粒子の通過前と通過後の流体速度Vを別々に測定せざるを得なかったが、粒子の接近とともに流体速度が増し、遠ざかるとともに減少してゆく様子が測定されている。

一方、同図の実線および破線は、Navier-Stokes方程式を球座標表示の渦度輸送方程式に変換し、さらに $z=\ln r$ と変数変換した次式¹⁰⁾

$$\begin{aligned} & \partial \omega / \partial t + \text{Exp}(-z) \{ (\partial (\omega v_r) / \partial z + \partial (\omega v_\theta) / \partial \theta + \omega v_r) \} \\ & = \{ (2 \text{Exp}(-2z)) / \text{Re} \} \\ & \times (\partial^2 \omega / \partial z^2 + \partial^2 \omega / \partial \theta^2 + \partial \omega / \partial z \cot \theta + \partial \omega / \partial \theta - \omega / \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\omega = (\text{Exp}(3z) \sin \theta)^{-1} (\partial^2 \phi / \partial z^2 + \partial^2 \phi / \partial \theta^2 - \partial \phi / \partial z \cot \theta + \partial \phi / \partial \theta) \quad (2)$$

を、一様流(無限遠の流速U)中の球のまわりの流れについて数値計算した値にもとづいて得られたものである。上式(1),(2)において v_r :半径方向流速, v_θ :接線方向流速, $Re=2aU/\nu$ (粒子Reynolds数), a :粒子半径, ω :渦度, ϕ :流れ関数である。式(1)は前進差分計算を、また式(2)はSOR法による計算を行った。

図-5の実線および破線のうち、“軸上”と記入したものは粒子の中心軸上の半径方向の流速、また“表面上”と記入したものは粒子表面における粒子の進行方向(一点鎖線の方向)の流速を示したものである。

表-1 Case(1)の測定結果

実験 番号	粒子速度 (cm/s)		
	ビデオ	レーザ 流速計	誤差 (%)
1	9.65	9.43	2.3
2	9.00	8.85	1.7
3	9.11	9.04	0.7
4	7.50	7.87	4.7
5	9.60	9.24	3.8
6	9.82	9.41	4.3
7	9.75	9.34	4.3
8	9.15	8.91	2.7
9	9.75	9.49	2.7
10	9.72	9.47	2.6

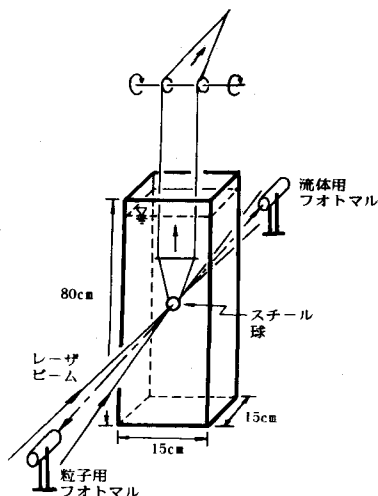


図-4 Case(1),(2)用の実験装置

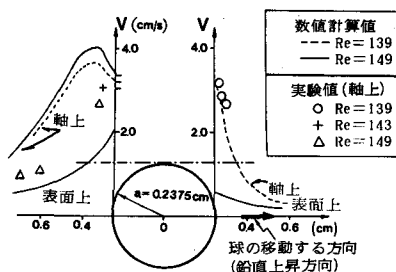


図-5 鉛直方向の流体速度Vの実測値および数値計算値

図-5の流速の測定値を見ると球の通過前では”軸上”の流速に近い値(Re 数=139)となっているが、球の通過後では”軸上”および”表面上”の曲線の間中間的な値(Re 数=143, 149)となっている。これは必ずしも球の軸上にビーム交差点が一致していなかったためと考えられる。

図-6は粒子の上昇速度 U による Re 数を式(1)に与えて、定常解に対する抵抗係数 C_D を計算したものである。これを図のようにLibster, Allen¹⁰⁾の実験値と比較すればほぼよい一致を示し、数値解の精度が十分であると考えられる。

Case(3)

図-7は、全長8m、幅30cm、高さ34cm、勾配1/100の開水路での粒子および流体速度の測定状況を示したものである。粒子は粒径1.0mm、比重1.04のポリスチレン球であるが、白色ペンキで着色したために実際の比重は1.08となった。この場合レーザ光源として出力20mWのHe-Neガスレーザを用いた。ここでは水平方向の粒子および流体速度の測定例を示す。

図-8にそれぞれのフォトマルから得られた信号の一部の20msec間の信号例を示している。図上部の流体の信号が遮断された区間は、図下部に示すように粒子が通過している区間に対応している。本報ではドップラ-信号に $\Delta t=8\text{msec}$ のデ-タウィンドウをかけ、周波数のスペクトル解析を行った。したがって、実際には流体信号が遮断されている区間でも流体速度が算定されることがあるが、ここでは時間的に長いスケールの現象を解析することを目的にしている。この点は問題にらなかった。なお、粒子通過直前、直後の流体および粒子の正確な速度が必要な場合には、Case(1), (2)で示したようにA/D変換したドップラ-信号のうち必要な部分だけを直接マイコンで周波数解析すればよい。また、ここでは流体信号が粒子によって十分に遮断された例を示しているが、粒子が必ずしもビ-ム交差点の中心を通過しない場合には、粒子のドップラ-信号が弱く、流体信号も完全に遮断されずに検出される。この場合にはドップラ-信号のスペクトルのレベルが小さくなることを利用して除外した。

図-9にドップラ-信号の周波数を速度に換算した流体および粒子速度の250msec間の時系列の例を示している。サンプリング時間間隔は $\Delta t=4\text{msec}$ である。ま

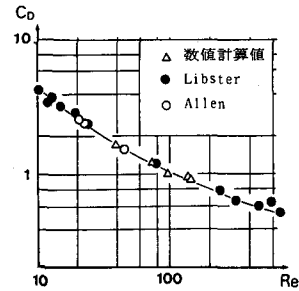


図-6 抵抗係数 C_D の数値計算値

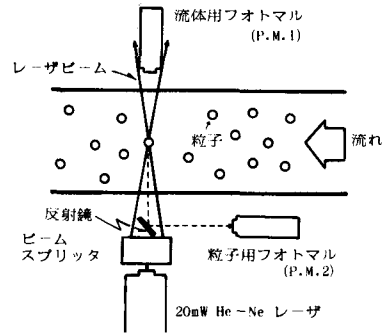


図-7 Case(3)用の実験装置

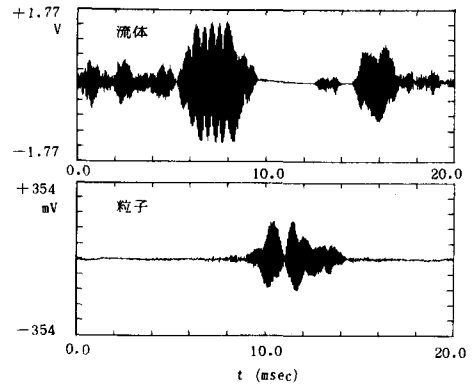


図-8 流体および粒子からのドップラ-信号

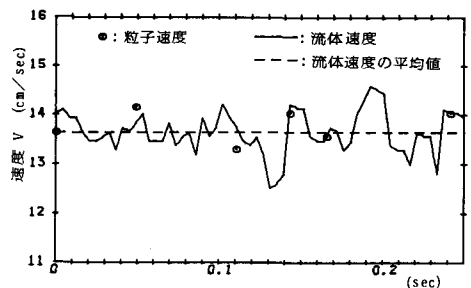


図-9 粒子および流体速度の変動時系列

た、この測定例ではドップラ-信号をスペクトル解析する際の周波数の最小分解能が125Hzで、したがって速度にして0.95mm/secが最小分解能となっている。この図における流体速度の変動は、ノズルから水が放出されるために発生する乱れと、固体粒子との相互作用による乱れによって生じたものと考えられる。測定点を通過する粒子の速度は流体速度に応じて変動しているが、粒子と流体の間に相対速度が存在することが認められ、粒子と流体の間で加速、減速が行われている可能性がある。

次に、図-10に単位時間当たりに測定点を通過する粒子の個数の時系列を示している。粒子からのドップラ-信号は図-8の下図にも示しているように、必ずしも連続した波形でない場合がある。したがって、本報ではF/Vコンバータによるパルス信号列と、図-8のようなドップラ-信号とを見比べながら粒子個数を数えた。

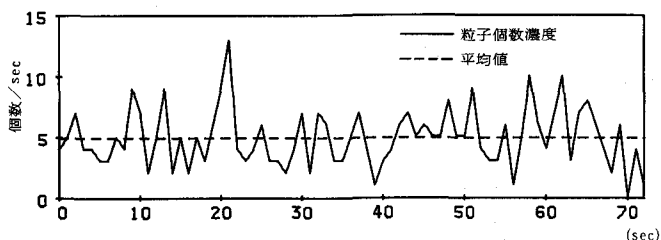


図-10 測定点を通過する粒子個数濃度(個数/sec)の変動時系列

4. おわりに

本報では粒子速度を後方散乱方式で、流体速度を前方散乱方式で同時測定する方法および得られる信号特性、測定精度について検討した。その結果、

- (1) 粒径2.25~2.34mmの白着色ガラス球の粒子速度のLDV測定値とVTR測定値との差は5%以下であった。
- (2) 粒径4.75mmの粒子速度および粒子通過前後の流体速度もほぼ精確に同時測定できる。
- (3) 粒径1.0mmの粒子および流体速度の時間的変動、測定点を通過する粒子個数の時間的変動が同時測定できることなどが確かめられた。

今後さらに、レーザ流速計によって得られる情報量をどのようにして固液2相流の運動メカニズムの解明に役立てて行くか、あるいは実用性の高い固液2相流の測定装置としてこれらの結果をいかに応用して行くか、など検討する必要がある。

謝辞: 本報をまとめるにあたり、本学大石秀人技官、学生の川本敏道、牛嶋純、両君に御助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 流れの計測大阪シンポジウム—応用LDV計測—講演概要集: 流れの計測懇談会編、昭和58年7月
- 2) 内山勝、箱守京次郎: 円管内流速分布推定フィルタ、計測自動制御学会論文集、第18巻、第7号、pp. 653-660、1982年
- 3) Lee, S.L. and Durst, F.: On the Motion of Particles in Turbulent Duct Flows, Int. Jour. of Multi-phase Flow, Vol. 8, No. 2, pp. 125-146, 1982
- 4) Tsuji, Y. and Morikawa, Y.: LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe, Jour. of Fluid Mech., Vol. 120, pp. 385-409, 1982
- 5) 混相流の基礎理論と応用技術: 混相流シンポジウム実行委員会編、1982年12月

- 6)Einav,S. and Lee,S.L.:Particle Migration in Laminar Boundary Layer Flow,Int. Jour. of Multi-phase Flow,Vol.1,pp.73-88,1973
- 7)辻 裕、他:レーザ流速計による水平管内気二相流の測定,機械学会論文集(B)、第47巻、第417号、pp. 801-811、1981
- 8)Durst,F.:Studies on Particle Motion by Laser Doppler Techniques,Proceedings of the Dynamic Flow Conference 1978,pp.345-372,1978
- 9)神野 健二、初井 和朗、他:Laser流速計による球形粒子速度およびその前後の流体速度測定について、第1回流体計測シンポジウム、pp.41-44、1983年6月
- 10)Rimon,Y. and Cheng,S.I.:Numerical Solutions of a Uniform Flow over a Sphere at Intermediate Reynolds Numbers,The Physics of Fluids,Vol.2,No.5,pp.949-959,1969
- 11)生井 武文、井上 雅弘:粘性流体の力学、理工学社、p117、1981