

# 固液二相流におけるレーザー流速計の信号の処理と 粒子濃度の測定について

## ON THE LDV SIGNAL PROCESSING SCHEME AND THE MEASUREMENT OF PARTICLE CONCENTRATION IN SOLID-LIQUID TWO-PHASE FLOW

梶井和朗\*・神野健二\*\*・上田年比古\*\*\*

By Kazuro MOMII, Kenji JINNO and Toshihiko UEDA

This paper presents a measurement technique for the analysis of solid-liquid two-phase flow with a laser-Doppler velocimeter. Setting up an optimum threshold value between amplitudes of Doppler signals from fluid and those from particle makes it possible to discriminate the particle from the fluid signals. The present two-photomultiplier system, which is composed of an optical arrangement with two reference beam modes, is effective for reducing the ambiguity noise in the spectrum of the fluctuating fluid velocities. It is also shown that the particle concentration can be calculated from the measured particle velocity, particle arrival rate, and the cross-section, where the amplitude of Doppler signal is greater than the threshold value, within the measurement volume.

*Keywords: LVD measurement, solid-liquid two-phase flow, signal processing scheme*

### 1. はじめに

水工学の分野で問題となる固液二相流は、河川や沈殿池における細砂粒子の運動特性、貯水池における濁水の清澄化過程<sup>1)</sup>等、多数の固体粒子を含む分散系である。このような固体粒子を含む流れの乱れについて実験的研究を行う場合、従来のプローブ挿入型の熱膜流速計では、混入粒子が流速計に衝突し、流速計からの出力電圧に異常が生じる<sup>2)</sup>といった計測上の問題がある。本研究では熱膜流速計では困難であった固液二相流の乱れ解析に、非接触測定が可能なレーザードップラー流速計(Laser-Doppler Velocimeter, 略してLDV)を適用し、固体粒子と流体のドップラー信号の識別方法、流体の変動速度のスペクトルに影響を及ぼすアンビギュエティ雑音<sup>3)</sup>の除去方法、および固体粒子の平均体積濃度の測定について、従来の研究成果<sup>3)~9)</sup>を参考に検討を行うものである。

### 2. 固体粒子と流体の信号識別

実験は Fig. 1 のように、内径 8 cm × 8 cm の四角形管

\* 正会員 農博 九州大学助手 工学部水工土木学科

(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

(同上)

\*\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科(同上)

の鉛直下降流で行い、測定点(2本のビームの交差点)は流入口より下流 220 cm の管断面中央部である。流体用トレーサーには 10 μm のフィルターを通過した水道水中の自然混入微粒子を利用し、固体粒子には比重 2.5 で平均粒径 95 μm, 180 μm の二種の透明ガラス粒子を用いている。なお、本研究で用いたレーザー流速計のレーザー光のビーム径は 1.3 mm, ビームの交差角は 4.77°, 干渉縞の間隔は 7.6 μm である。

Fig. 2 に測定点で得られる固液二相流のドップラー信号(以下信号と記す)を例示する。ここでは、このような自然混入微粒子と固体粒子の信号の混在する信号系列から、たとえば図示のように [L] 部が自然混入微粒子, [P] 部が固体粒子の信号というように識別する方法について述べる。

測定点における 2 本のビームの交差により生ずる Fig. 3 に示す測定体積内を自然混入微粒子または固体粒子が通過するとき、信号振幅は、たとえば Fig. 2 の L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, P 部のように増減し、1 つの山型を呈する。いま図のようにこれら山型のそれぞれの最大振幅を A<sub>m</sub> とする。

まず静止流体中に、ある粒径の固体粒子を沈降させて得られる信号(Fig. 2 が固体粒子のみの信号となる)から Fig. 2 に示すような A<sub>m</sub> を 500 個抽出し、これを標本

(I)とする。次に、同様に水単相流による信号から  $A_m$  を 500 個抽出し、これを標本 (II) とする。

Fig. 4 は、95  $\mu\text{m}$  と 180  $\mu\text{m}$  の固体粒子についての標本 (I) と自然混入微粒子についての標本 (II) のヒストグラムである。光の散乱面積の大きい固体粒子の  $A_m$  が、自然混入微粒子のそれに比べて大きくなるのがわかる。Fig. 4 から確実に自然混入微粒子からとみなせる信号は、 $A_m \leq 0.3$  Volt の信号といえる。したがって、この範囲の信号を用いて、固液二相流での流体の平均速度、乱れ強度、レイノルズ応力などを算定することができる。次に、確実に固体粒子とみなせる信号は、固体粒子と自然混入微粒子のヒストグラムの重なり部分を除いた  $0.5 \text{ Volt} (= A_{m*}) \leq A_m$  の信号といえる。したがってこの範囲の信号を用いて固体粒子の平均速度などを算定する。ここでは信号の振幅のみを利用する最も簡単な識別方法について述べたが、さらに識別の精度が要求される場合には、Tsuji and Morikawa<sup>4)</sup> および Modaress ら<sup>5)</sup> が採用しているドップラー信号とペダスタル信号の両者により識別する方法、あるいは Durst<sup>6)</sup> による粒子専用の光検出器を使用する方法が参考となろう。

### 3. アンビギュイティ雑音の処理

LDV による流体の変動速度のスペクトルを求める場合、LDV に固有の高周波部分に生ずるアンビギュイティ雑音<sup>3)</sup> (雑音と記す) の除去が問題となる。この雑音は、測定体積内を通過する複数の微粒子からの散乱光のうちフォトマルに向かう散乱光が重なり合っ、その合成散乱光の位相が、時間的に不規則に変化し、その結果生ずるきわめて短い時間間隔の不規則な周波数変動等が原因とされている。この雑音の除去について、ここでは、van Maanen ら<sup>7), 8)</sup> が単相流を対象に提案している相互相関法による LDV 計測システムを固液二相流の流体の変動速度のスペクトル算定に適用し、この方法の有効性を確認してみよう。

Fig. 5 に本研究で用いた LDV 計測システムを示している。実験では、まず 180  $\mu\text{m}$  固体粒子の固液二相流において、管内壁から 2 cm の位置でレーザー投光部からの交差する 2 本のビーム Beam 1, Beam 2 (本実験では強度比 1 : 1) に、測定体積内の自然混入微粒子から発生する散乱光をのせ、2 つのフォトマル PM 1, PM 2 に受光させ、それぞれの信号から流体の速度時系列  $v_1$ ,  $v_2$  を求める。この場合前述のように、 $A_m \leq 0.3$  Volt の信号のみを用いることから、 $A_m > 0.3$  Volt の信号部分は欠落部となる。ここではスペクトル計算に必要な十分長く連続した速度時系列を得るために、欠落部の速度補間を、従来の欠落部直前の速度を与えるホールド補間で行った<sup>4)</sup>。

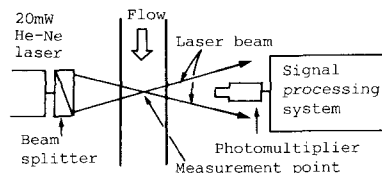


Fig. 1 Experimental equipment.

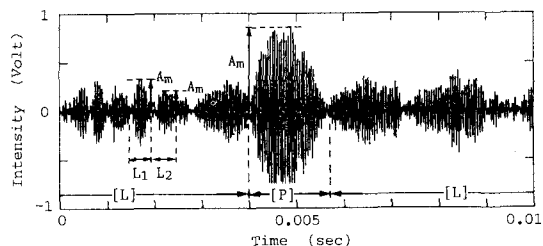


Fig. 2 Typical Doppler signals in solid-liquid two-phase flow.

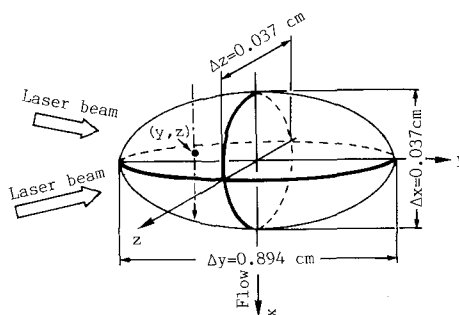


Fig. 3 LDV measurement volume in measurement point.

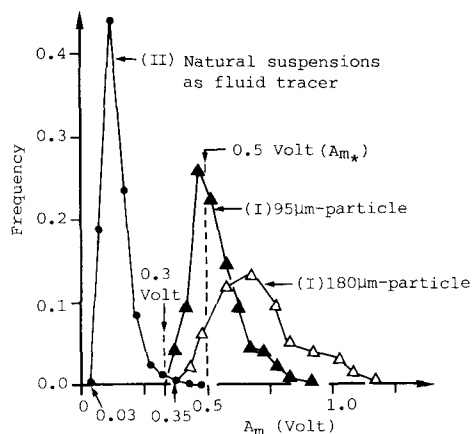


Fig. 4 Histograms of amplitudes of Doppler signals from fluid and solid particle.

次にこうして得られる 2 つの時系列  $v_1$  と  $v_2$  に含まれる雑音  $n_1$  と  $n_2$  を考える。測定体積を通過する複数の微粒子からの散乱光の位相は、PM 1 と PM 2 の 2 方向で異なっていると考えられる。ここで、微粒子はランダ

ムな配置で測定体積を次々と通過するため、2方向の上  
述した合成散乱光の位相は、互いにほぼ無相関となり、  
したがって、これに基づく雑音  $n_1$  と  $n_2$  とはほぼ無相  
関となる。したがって、 $v_1$  と  $v_2$  のクロススペクトルを  
とれば、雑音のスペクトルがほぼ除去された乱れのスペ  
クトルが得られると考えられる。

Fig. 6 には、前方散乱フリンジ方式で、従来の1つの  
フォトマルにより求めたスペクトル  $F_{11}$  を記号●で示  
し、2つのフォトマルによる Fig. 5 の計測システムで求  
めたクロススペクトル  $F_{12}$  を記号△で示している。 $F_{11}$   
では、ほぼ5 Hz 付近の周波数帯でアンビギュエティ雑  
音の影響が現われ始め、10 Hz 以上ではスペクトルレ  
ベルは平坦化している。 $F_{12}$  では、15 Hz 程度まで、ス  
ペクトルレベルが減衰し、雑音の影響がほぼ除去され  
ているものと考えられよう。次に  $F_{11}$  と  $F_{12}$  の15 Hz 以上  
のスペクトルレベルを比較すると、 $F_{12}$  のほうが1 オ  
ーダー程度低下して、これは中谷らがアンビギュエ  
ティ雑音除去のためフォトマルを改造して得た結果<sup>9)</sup>  
とほぼ同じ結果が得られている。以上により、投光部  
からの2本のビームの線上に配置した2つのフォト  
マルから得られる時系列のクロススペクトルから、  
アンビギュエティ雑音のほぼ除去された固液二相流  
の流体の乱れのスペクトルを求めることができるとい  
える。

#### 4. LDV による固体粒子の濃度測定

##### (1) 測定方法

直径  $d$  の固体粒子の平均速度を  $V_p$ 、流れに直角な断  
面積  $S$  を単位時間に通過する粒子の個数 (粒子到達率)  
を  $n$  とすれば、固体粒子の平均体積濃度  $C$  は、一般に  
次式で表わされる。

$$C = (\pi d^3 / 6) n / (V_p S) \dots \dots \dots (1)$$

いま LDV による Fig. 3 の測定体積中での計測値を式  
(1) に用いて、測定点での  $C$  を求めてみる。ここで  
は確実に粒子とみなせる信号すなわち、前述のように、  
 $A_{m*} = 0.5 \text{ Volt} \leq A_m$  の信号のみをとり、その信号の周波  
数の速度変換値の個数平均を  $V_p$  とし、その信号の単位  
時間当たりの個数を  $n$  とする。

次に通過断面積  $S$  について考える。これには、固体  
粒子がその断面を通過するとき、 $A_{m*}$  以上の  $A_m$  を発生  
する断面をとる必要がある。

さて、測定体積内でのドップラー信号の強度  $I$  は次  
式で表わされる<sup>3)</sup>。

$$I(x, y, z) = A_{m0} [\exp \{- (x^2 / 2 \sigma_x^2 + y^2 / 2 \sigma_y^2 + z^2 / 2 \sigma_z^2) \}] \cos(kx) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、Fig. 3 のように  $x$  は流下方向、 $y, z$  はこれに  
直角な直交座標軸である。また  $\sigma_x = \sigma / \sqrt{2} \cos(\theta/2)$ 、  
 $\sigma_y = \sigma / \sqrt{2} \sin(\theta/2)$ 、 $\sigma_z = \sigma / \sqrt{2}$ 、 $k = 4\pi \sin(\theta/2) / \lambda$  で

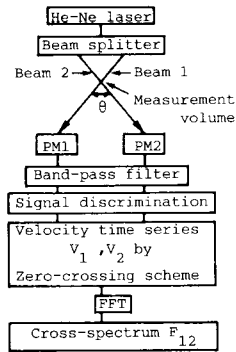


Fig. 5 Two-photon multiplier system for reducing the effect of ambiguity noise on spectrum in solid-liquid two-phase flow.

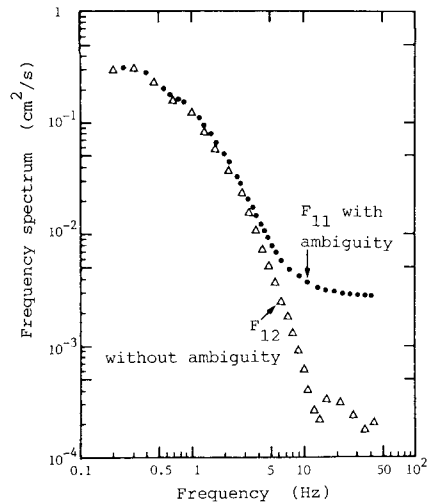


Fig. 6 Frequency spectra of fluctuating fluid velocities in solid-liquid two-phase flow.

あり、 $\sigma$  はビーム交差部でのビームの最小径で、 $\sigma = \sqrt{2} L \lambda / (\pi D)$ 、 $\theta$  はビーム交差角、 $\lambda$  はレーザーの波長、 $D$  は集光レンズ前の平行レーザー光の直径、 $L$  は焦点距離である。また  $A_{m0}$  は粒径  $d$  の粒子により発生する信号強度  $I$  の最大値で、ここでは各粒径ごとに、実験で得られる  $A_m$  の最大値を用いている。

さて式 (2) より Fig. 3 の測定体積内のある点 ( $y, z$ ) を流れる粒子は  $x=0$  で最大振幅を発生し、これが  $A_m$  となる。したがって  $A_{m*}$  以上の  $A_m$  を発生する  $x=0$  面内の領域は、式 (2) より次式に示す楕円内部の領域となる。

$$y^2 / y_*^2 + z^2 / z_*^2 \leq 1 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

$$y_* = \sigma_y \sqrt{2 \ln(A_{m0} / A_{m*})}, \quad z_* = \sigma_z \sqrt{2 \ln(A_{m0} / A_{m*})}$$

これより式 (1) に用いる粒子の通過断面積  $S$  としては、粒径  $d$  を考慮して次式で与えられる。

$$S = \pi (y_* + d/2)(z_* + d/2) \dots \dots \dots (4)$$

すなわち、固体粒子の中心が、式(4)の面積以内を通過すればその粒子の一部分または全部は式(3)の面積を通過することになり、その場合の $A_m$ は $A_{m*}$ 以上となる。

以上得られた $V_p$ ,  $n$ ,  $S$ を用いて、式(1)より粒子の平均体積濃度 $C$ が求められる。

## (2) 実験による検討

Table 1に、LDV計測により得られた管断面中央部における粒子の平均体積濃度を示している。比較のため、レーザーによる測定位置より20cm下流の管断面中央部に内径3mmの銅パイプを挿入し、二相流中の固液水を採水して求めた固体粒子の体積濃度の概略値を参照値として表右端に示している。RUN 1-2を除いて、本測定法による濃度の実測値は、ほぼ参照値に近い値を示している。

次にRUN 1-2の場合は、かなり高い粒子の個数濃度が観察されたが、この場合レーザー入射光および散乱光が遮断され、レーザー出力信号の途切れや出力信号レベルの低下が生じた。このため実際より低い $n$ (=74)が算出されて、参照値との差が大きくなったものと考えられる。この場合の参照値から $n$ を逆算すると約100個/秒となり、これ以上の $n$ に対して本光学系を適用することは困難といえるが、光学系を光ファイバーレーザー流速計に改造し、散乱光の検出能力を向上させることによって、本測定法の適用範囲を増大することができよう。

以上のように、本測定法では、RUN 1-2程度の濃度より低い濃度に対しては、二相流からの直接採水による濃度測定値と比較して、妥当な値が得られているといえる。なお、ここでは既存のレーザー流速計を利用した比較的簡便で安価な方法による場合の基礎的検討を行ったが、粒子径が異なり、Table 1の濃度より高い固液二相流を対象とする場合には、高価ではあるが、最近提案されているDANTECのシステム<sup>10)</sup>が有効であると考えられる。

## 5. おわりに

本研究の内容を要約すると次のようである。

(1) 固体粒子と自然混入微粒子のドップラー信号の振幅の相違を利用して両信号の識別を行うことができる。

(2) 投光部からの2本のレーザービームの線上にそれぞれフォトマルを配置し、両者から得られる速度時系列のクロススペクトルを求めれば、アンビギュイティ雑音のほぼ除去された固液二相流の流体のスペクトルが得

Table 1 Particle concentration by LDV measurement.

	d ( $\mu\text{m}$ )	n ( $\text{s}^{-1}$ )	S ( $\text{cm}^2$ )	Vp ( $\text{cm/s}$ )	Concentration C ( $\times 10^{-2}\%$ )	
					Present method	Reference value
RUN1-1	95	67	0.016	14.1	1.3	1.5
RUN1-2	95	74	0.016	14.1	1.5	2.2
RUN2-1	180	15	0.020	15.9	1.4	1.2
RUN2-2	180	33	0.020	16.1	3.1	2.8

られる。

(3) 確実に固体粒子と認められるドップラー信号から、固体粒子の速度とその通過個数を求め、次いでその通過断面を適切に選ぶことにより、粒子径が既知の場合の固液二相流中の固体粒子の体積濃度をほぼ算定できる。

## 参考文献

- 1) 上田年比古・神野健二・梶井和朗・前浜光爾：数値計算による一様等方性乱流中の沈降性粒子の拡散係数の検討，土木学会論文報告集，第337号，pp.93~100，1983。
- 2) 林 泰造・佐藤邦明・青野利夫：中立浮遊粒子を含む水流の乱流構造に関する実験的研究，第30回水理講演会論文集，pp.625~630，1986。
- 3) George, W. K. and Lumley, J. L. : The Laser-Doppler Velocimeter and its Application to the Measurement of Turbulence, J. Fluid Mech., Vol. 60, pp.321~362, 1973.
- 4) Tsuji, Y. and Morikawa, Y. : LDV Measurements of an Air-Solid Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe, J. Fluid Mech., Vol. 120, pp.385~409, 1982.
- 5) Modarres, D., Tan, H. and Elghobashi, S. : Two-Component LDA Measurement in a Two-Phase Turbulent Jet, AIAA Journal, Vol. 22, No. 5, pp.624~630, 1984.
- 6) Durst, F. : Studies of Particle Motion by Laser Doppler Techniques, Proceedings of the Dynamic Flow Conference, pp.345~372, 1978.
- 7) Van Maanen, H. R. E., van der Molen, K. and Blom, J. : Reduction of Ambiguity Noise in Laser-Doppler Velocimetry by Crosscorrelation Technique, Proceedings of the LDA-Symposium Copenhagen, pp.81~88, 1975.
- 8) Durrani, T. S. and Greated, C. A. : Laser Systems in Flow Measurement, Plenum Press, New York, pp.272~273, 1977.
- 9) 中谷 登：レーザー・ドップラー流速計におけるアンビギュイティ雑音の除去，応用物理，第49巻，第11号，p.1117，1980。
- 10) Saffman, M. : Optical Particle Sizing Using the Phase of LDA Signals, Dantec Information, No. 5, pp.8~13, 1987.

(1987.7.27・受付)