

レーザー流速計の最近の動向



技術解説

中谷 登*, 山田朝治**

1. はじめに

現在、各種のレーザーが市販され、非常に使い易くなり、レーザーを用いた各種の流速測定法(表1に示す)が開発されている。そのうち、一部は実用化し、特にレーザー・ドップラ流速計(LDV)は非接触測定が可能、流速とドップラ周波数との直線関係、高速応答、高い空間分解能などの特色をもつため、流れに関係した非常に広い分野で使用されている。本解説では、この2、3年の間に開催されたレーザーを用いた流速測定法に関する国際会議等¹⁻⁵⁾の資料をもとに、最近の発展をのべる。従来の1点の測定から、空間パター的な測定、2相流での粒子の速度と径の同時測定に大きな進展が見られた。これ等に限定して、その意義を含めて以下の章に記す。その他、光エレクトロニクスの進歩に支えられて、光ファイバ、半導体レーザーを用い、バッテリー駆動の可搬型コンパクトLDV⁶⁾が開発された。また、LDV信号の処理としては、パースト信号をデジタル・メモリに取り込み、高速フーリエ変換により処理するパースト・スペクトルアナライザ⁷⁾が開発された。特色

としては、カウンタ型の信号処理器に較べて、S/Nの悪い信号でも処理でき、データレイト多くとれることなどがある。

2. 流速の空間パターン計測

2.1. 多点同時測定LDV

LDVは、これまで、流速の空間パターンよりも1点での時系列的測定に重点をおいた測定法として、発展してきた。したがって流速の空間分布を測定する場合、速度計全体、または測

表1 レーザーを用いた各種の流速測定法

method	laser	characteristics	velocity range	spatial range
holography	ruby, YAG (record) Ar ⁺ , He-Ne (reconstruction)	three dimensional measurement	low-middle	plane
whole field speckle	ruby, YAG (record) Ar ⁺ , He-Ne (reconstruction)	easy adjustment	low-high	plane
particle imaging	ruby, YAG	easy adjustment	low-high	plane
laser Doppler	Ar ⁺ , He-Ne	linearity	low-high	point, line plane
laser multi-focus	Ar ⁺ , He-Ne	high SNR	low-high	point
luminescence fluorescence	Ar ⁺ , dye	high fidelity	high	point, line plane
phosphorescence	N ₂ , XeCl	long life time	low-middle	point, line
photochromic	N ₂ , XeCl	easy visualization	low-middle	point, line plane
photothermal	CO ₂ , dye	without seed particle	low-high	point, line

定対象自体を走査して、1点1点測定しなければならなかった。しかし、乱流解析をする場合空間的、時間的に変化する流速を測定する必要があり、多点同時計測の開発が望まれていた。

乱流解析での流速の多点同時計測の意義を次

*中谷 登(Noboru NAKATANI), 大阪大学工学部 精密工学科, 講師, 工学博士, 光計測

**山田朝治(Tomoharu YAMADA), 大阪大学工学部, 精密工学科, 教授, 工学博士, 科学機器

に述べる。図1に積分スケールの定義がしめされている。乱れのコヒーレント運動、渦の大きさを示し、流体の混合距離、乱流拡散係数などに関係する流れの重要な特性量である。従来は自己相関関数を一点での流速の時系列データから求め、テイラーの一様性の仮定のもとに、積分スケールを求めていた。しかし、このような仮定は、乱流では非常に限られた場合にしか適用出来ない。たとえば、図2のような、乱流火炎の反応過程を実験的に解析したい場合、渦の大きさは空間的、時間的に変化し、そのコヒーレント性を知りたい場合、当然そのような一様性の過程が成立しない。

空間分布を測定する方法としては、LDVの入射ビームをポリゴンミラーを用いて空間的に走査する方法が試みられているが、測定体積が連続的に動くため、信号処理上の問題があり、数100Hz程度が限界であり気体乱流を対象とする場合、流速の時系列変化をとらえるには不十分である。著者らは、時間の同一性を保つため、図3に示す多点同時測定LDV^{8),9)}を構成した。従来の1点測定LDVの光学系の集光レンズの前側焦平面にビーム分割用の位相回折格子を置くだけでよい。光源としては、ビーム分割による劣化を除くため、高出力Ar⁺レーザー(514.5nm, 最高出力1800mW)を使用している。流速の正負方向を判別するため、ブラッグセルAOM1,2で周波数偏移を行い、周波数が若干異なる2本のビームに分ける。走査性をよくするため、各々のビームは偏波面保存シングルモード光ファイバに入射されLDV入射光学系に導かれる。2本のビームは位相回折格子を通過し、数本の回折光に分かれた後、集光レンズを通過、直線状に等間隔で交点を結び数対のビームを構成する。各交点で散乱された信号光はレンズで集光して(前方散乱, 後方散乱モード), 光ファイバを使って受光する。この光学系の最大の特徴は、回折格子のピッチを変えたり回転するだけで、数本のビームが作り出す測定点の間隔や方向をひとまとめにして変更できる点にある(図4)。その各点の測定間隔は $d = \lambda F / d_g$ (λ : 光波長, d_g : 格子のピッチ, F : 集光レンズの焦点距離) である。また入射光学系で高い位置精度が出せ

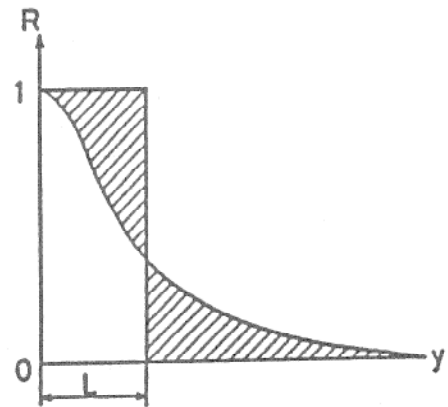


図1 積分スケールLの定義。 $L = \int_0^{\infty} R(O, y) dy$, $R(O, y)$: 空間相関係数

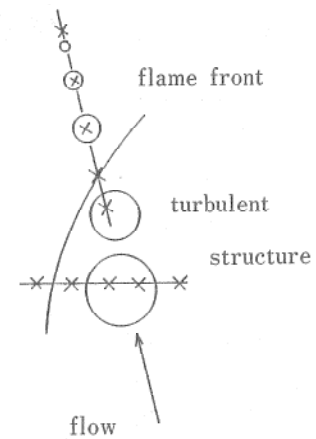


図2 乱流構造の火炎面での変化

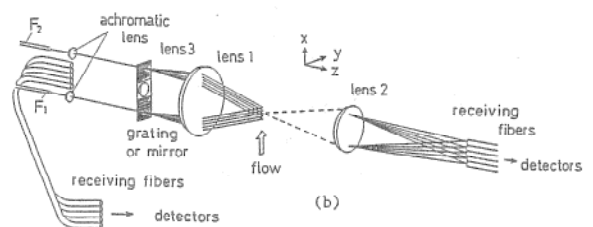
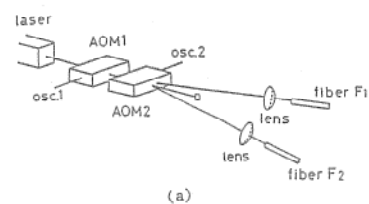


図3 位相回折格子を用いた多点同時測定LDV。(a): ファイバ入射側, (b): ファイバ出射側

るので、受光用光ファイバは比較的低い精度で対応できる。従来の1点測定LDVで、2ビームの交差的をレンズの焦点位置で一致させるた

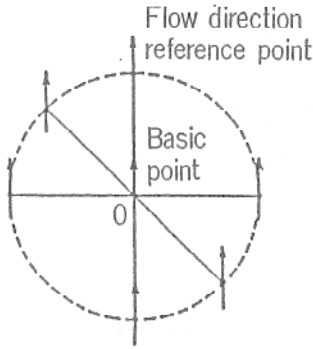


図4 回折格子をx, y平面上で、z軸まわりに回転した時の測定点の移動

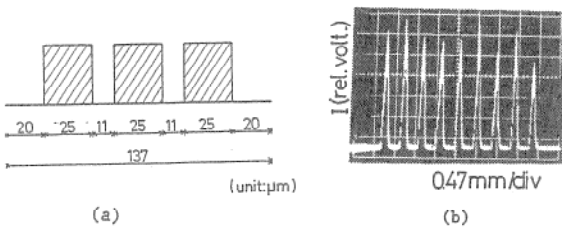


図5 パルス位置変調法による位相回折格子。
(a): 格子の構造, (b): 9ビームの均一な強度

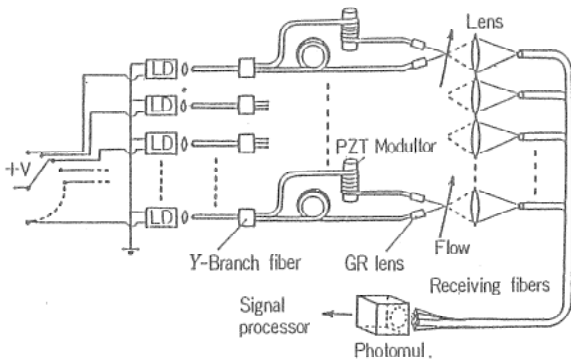


図6 半導体レーザーの切り換えによる多点同時測定光ファイバLDV

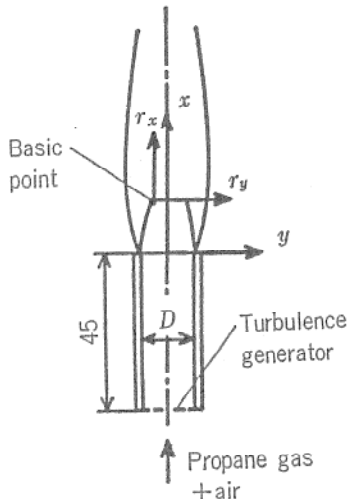


図7 乱流予混合火炎での空間相関測定位置。D=15mm

め、光軸調整が難しいことを考えると、後の数々の交差点をセルフアライニングで作れることは、実験を容易にする上で重要である。また各点に対応するビーム交差角が等しく、ドップラ周波数の感度が同じであるので信号処理が簡単に行える。

位相格子として、レーザ描画装置を用いて、銀塩乾板に、パルス幅変調格子やパルス位置変調格子を描き、これをホログラムでおこなわれるのと同じやり方で漂白して用いると、前者では5~7ビーム、後者では9ビームに分割が可能である。後者の例を図5に示す。

受光には測定点数と同数の光電子増倍管が必要である。これらから、得られたLDV信号を処理するには、同一個数の信号処理器を用いると時間の同一性が保たれる。このような経済的制約を除くため、電子スキャナを用いてアナログLDV信号をきりかえ、1台のLDV周波数カウンタを用いて処理できる。この場合、5点測定で、最大周波数7kHzが達成されている。

最近半導体レーザーが安価に入手できるようになってきたので、光ファイバと組み合わせて多点LDVが構成できるようになった。その1例を図6に示す。半導体レーザーからの光はシングルモードファイバに入射して後、カップラを通してビーム分割され、片一方のビームをPZTで位相変調し、測定体へ入射させる。半導体レーザーは、高速で切り換えることができるので、光源側で走査させることにより光検器が一つですみ、信号は1台の周波数カウンタで処理できる利点がある。

最後に多点同時測定LDVによる乱流火炎構造測定例を示す。回折格子をもちいる多点同時測定LDVを用いて、図7に示すバーナ(2mm径、周期3.5mmの乱流発生格子使用)の位置で乱流予混合火炎(空気とプロパン濃度比14)と非燃焼時の平均空間相関係数を測定した例を図8に示す。これから渦の大きさや動きの相違を知ることができ、燃焼によって流れが乱され相関係数が下がること、渦の動く方向が曲げられることを示す。同じバーナで5点同時測定を行った結果を図9, 10に示す。測定速度の方向は火炎面に平行な方向である。測定点列の方向は平

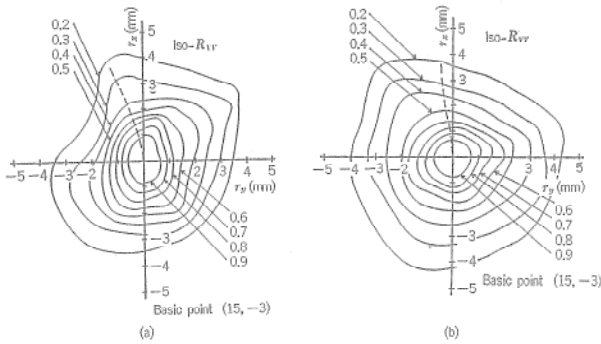


図8 等相関図(——), 渦の移動方向(-----)。 (a): 予混合火炎, (b): 空気噴流

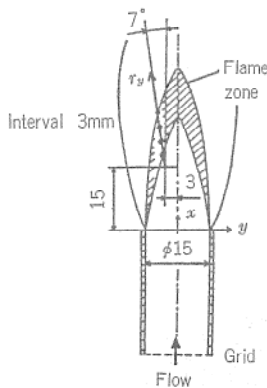


図9 乱流予混合火炎の多点同時測定位置

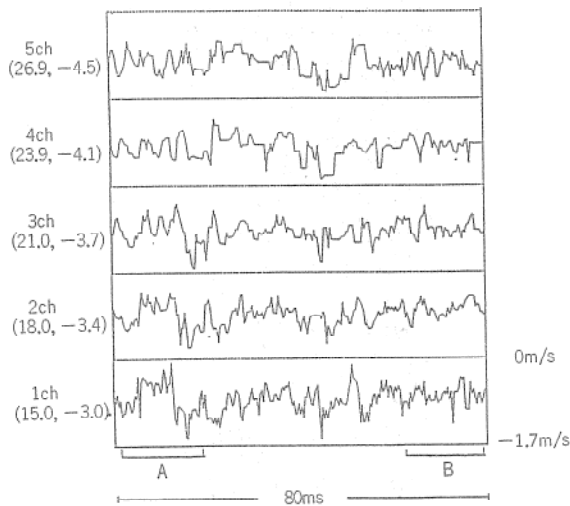


図10 乱流予混合火炎の速度変動の5点同時測定。速度方向は火炎面に垂直方向, 図9の測定位置

均速度ベクトルの方向に合わせてある。A部では、未燃焼部の大きなスケールが存在し、火炎帯で反応によって小さなスケールに変化すると共に、変動幅が小さくなっていることを示している。B部では未燃焼部でのスケールが小さく、火炎帯でA部ほど大きな変化は見られない。このように多点同時測定を行うと渦構造変化を直視できる利点がある。短期積分空間スケール(マクロスケール)をA, Bで求めた結果を図11に示す。上記の結果を定量的に裏付けている。

2.2. ドップライメージング法

この方法は、流速の瞬時空間パターンを測定し、全体的な様子を定量的に知ろうとするものである。

マイケルソン干渉計を用いる方法¹⁰⁾を図12に示す。各場所の散乱粒子からのドップラ周波数偏移したレーザ散乱光をマイケルソン干渉計に入射して、各場所での偏移量を直接分光して測定する。ミラーS₂側の光路にnの屈折率を持つガラスブロックを挿入してl₁, l₂に光路差をつけ、ドップラ偏移量が異なる光、すなわち波長が異なる光が通過すると位相に差ができること

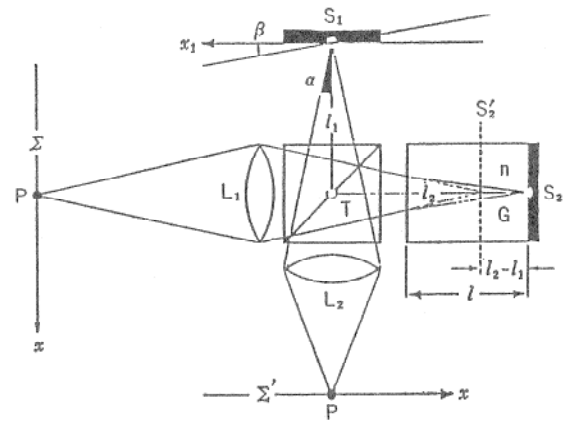


図12 マイケルソン干渉計を用いたドップライメージング測定原理

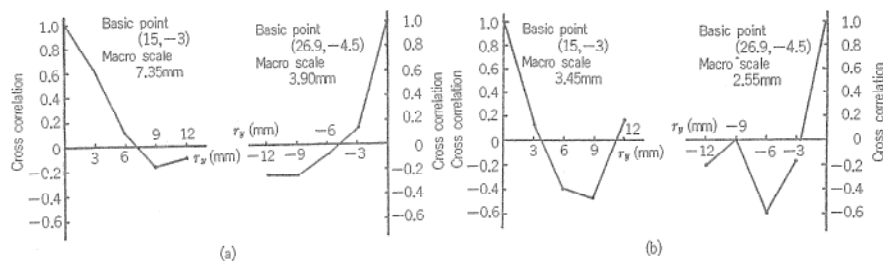


図11 図10から求めた短期相関係数。(a): 図10中のA部, (b): B部

を利用する。等傾角のフリンジの移動量、 ΔX はドップラ周波数偏移量に比例する。

$\Delta X/s \propto (f - f_0)/f_0$ (s : フリンジ間隔)。
 ただしミラー S_1 からとミラー S_2 からの像は同一平面 Σ' に結像する必要がある、 $l_2 - l_1 = \{(n - 1)/n\}l$ を満足すること、ミラー入射角 α が小さいことが必要である。

図13に実際の実験を示す。光源にNd:YAGパルスレーザーを用いて、撮影した画像を図14に示す。明瞭にフリンジの移動が観測されている。渦の部分は散乱粒子がシードされていないので、フリンジが観測されず黒くなっている。濃度分布を同時に観測していることにもなる。この方法は流速が約100m以上の高速流の測定に適用できる。

2.3. Whole field velocimetry

流れ場全体の瞬時の速度パターンを求めることを目的とし、2重露光中の粒子の移動パターンを計測するもので、記録後のパターンは、コンピュータにより画像処理されることが多くなっている。この方法としては、粒子濃度が高い場合には、スペckル法¹¹⁾が、低い場合には、particle imaging法¹²⁾がある。

スペckル法は、多粒子からの散乱光の干渉によってできる斑点状のパターンであるスペckルの2重露光中の移動距離を測定する。ホログラフィ法に較べて、この方法の測定領域はある断面状の2次元流速パターンに限定されるが光の振幅情報を記録すればよく、像ブレの影響が緩和され、容易な方法である。図15、16に測定法を示す。微粒子を混入した流れに平行に膜状のレーザー光を入射させ、その光膜に垂直な方向から、一定時間間隔おいて光膜からのスペckル像をフィルム状に2重露光する。得られたネガの小領域ごとのスペckル像の移動を図16のようにヤング縞の傾きと間隔からもとめる。このため、ビデオカメラで観測した縞の自己相関関数をコンピュータ処理し求める(図17)。等速度線を求めるには、図18のように再回折光学系の焦平面に空間フィルターを用いて求める。図19から求めたベナール対流の等速度線を図20に示す。

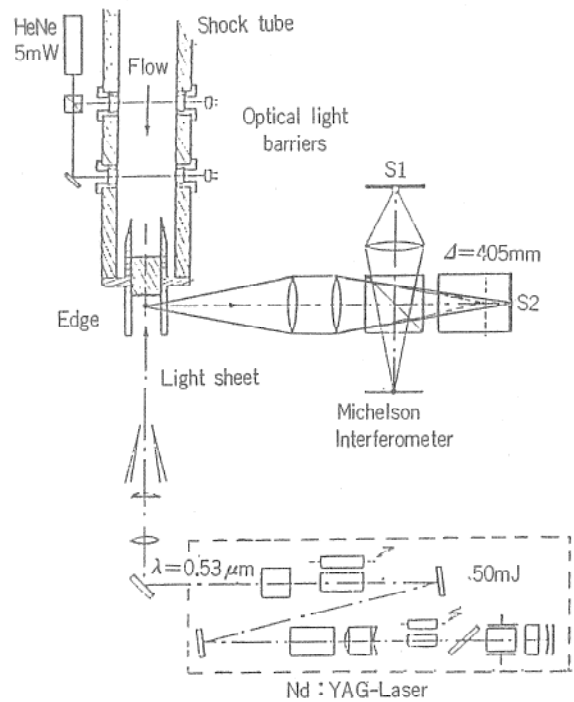


図13 ドップライメージング法の実験システム

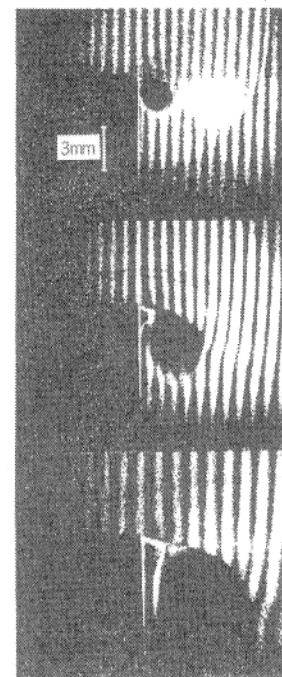


図14 噴流のドップライメージング

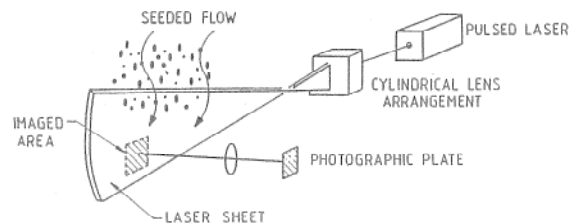


図15 スペckル法における2重露光パターンの作製

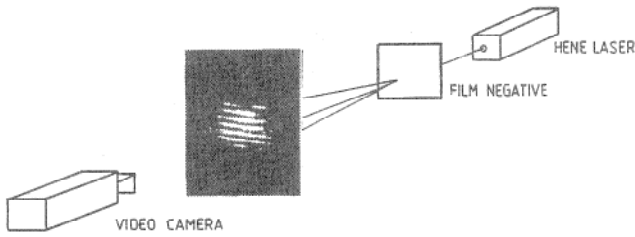


図16 スペックル法における粒子の移動距離の測定

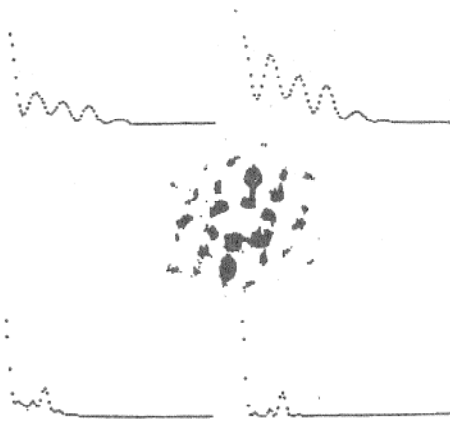


図17 TVシステムとコンピュータによる相関処理例

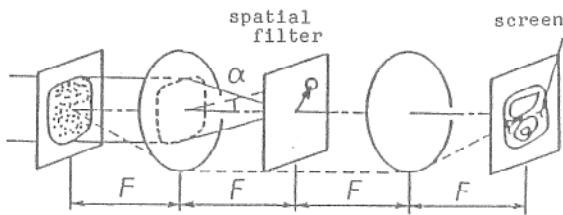


図18 スペックル写真から等流速分布を求める光学系

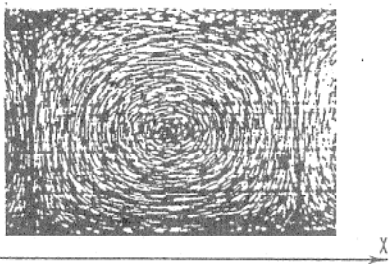


図19 ベナール対流のスペックル写真

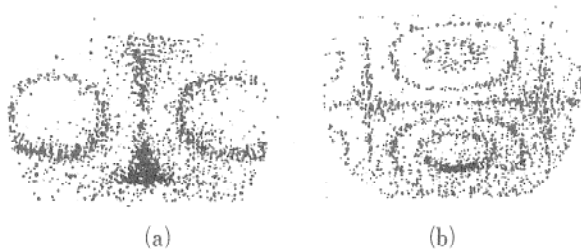


図20 図19から求めたベナール対流の等速度線。

(a): $v_x = 0$, $v_y = 32 \mu\text{m/s}$,

(b): $v_x = 19.5 \mu\text{m/s}$, $v_y = 0$

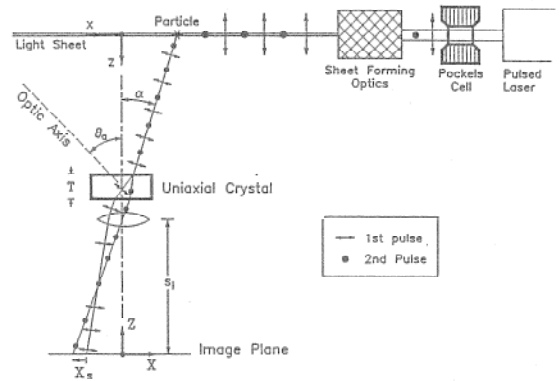


図21 ポッケルセルと複屈折結晶を用いたイメージング変移システム

Particle imaging 法は、粒子密度が低い場合に適用され、スペックル写真法と異なり、粒子1つ1つを区別する。2重露光記録した粒子像を1点1点コンピュータ画像処理して移動距離を求める。またスペックル写真法のヤング縞解析のやり方と同じ手法が使用できる。

以上述べた方法では、2回露光中の粒子の移動の方向を判別できない。このような速度方向のアンビギュイティをなくすため、図21に示すように、電気光学素子のポッケルセルと複屈折結晶を組み合わせた方法¹³⁾が開発されている。パルスレーザーの電気ベクトルの方向を垂直、水平方向に切り換えると、複屈折結晶を通してみると、第1パルスと第2パルスに対する粒子の像は、粒子の移動に加えて一定間隔変移して、露光されるので、これから速度方向を求めることができる。

3. 2相流計測

噴霧粒子、固体粒子、気泡或いはエアロゾル分布に関連しプロセス、具体的には、燃料噴霧、塗装、ポリマー形成、粒子製造などではその解析に、粒子の速度と径の同時測定が必要とされている。このような目的に、これまで、LDVを用いて、その信号のvisibilityの粒子径依存性を用いる方法が試みられてきた。この方法では線形関係が成立しないこと、LDVの2光束ビームの強度の同一性が変わると異なったvisibilityを示し一々較正が必要であり、あまり使用されていなかった。最近、このようなレーザービームの強度の影響を受けず、粒子径と線

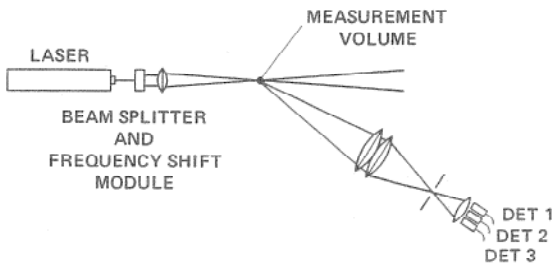


図22 位相LDVの光学系

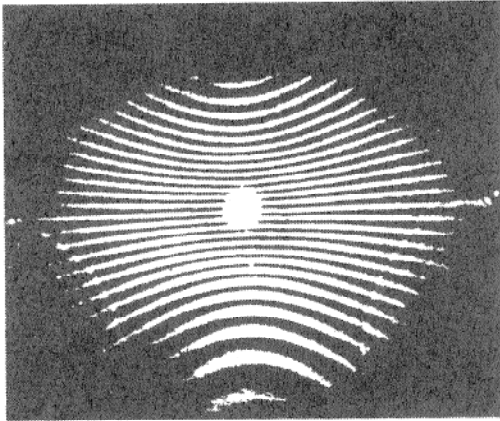


図23 透明粒子により得られた散乱干渉縞

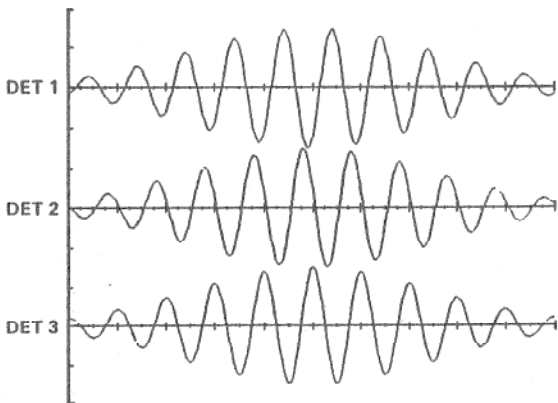


図24 位相ドップラ信号(ハイパス・フィルター後)の位相差

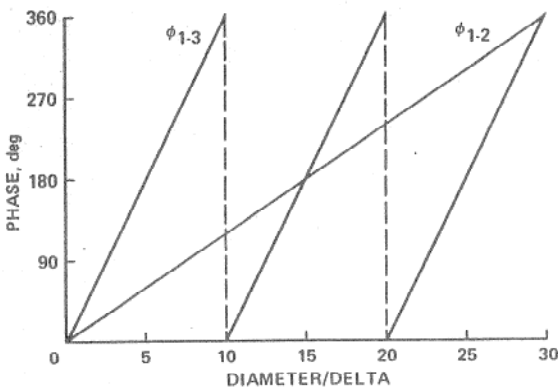


図25 粒子の径と位相差との関係

形関係をもつ位相ドップラ法が注目され、この2, 3年間に実用化のきざしが見られるようになった。

位相ドップラ流速計¹⁴⁻¹⁷⁾、図22に示すように入射側ではLDVと同じ光学系を使用でき受光側に複数の光検出器を必要とする点で異なる。

原理としては、2本のレーザ・ビームの交差領域を粒子が通過する時、散乱光によって図23のような干渉縞が形成される。粒子は動いているので、散乱干渉縞は、光検出器のアパーチャをドップラ偏移周波数で通過し、この周波数が速度と比例する。また、干渉縞の間隔は粒子の直径に反比例する。干渉縞の間隔の測定は、受光面に一定の間隔で設置された2個の検出器で行う。図23ではダイナミックレンジを大きくするため、3個の検出器を用いて、検出器1, 3, および検出器1, 2と組み合わせて使用する。各々の検出器で検出されたドップラ信号は同一の周波数を持つが、一定間隔はなして設置されているので、図24に示すように、位相差をもちこの位相差は粒子の径と線形関係をもつ(図25)。モデル的には図26に示すフリンジモデルによって説明できる。LDVで形成された2光束干渉縞が、透明球形粒子の屈折によるレンズ作用によって拡大され、縞の間隔 s が粒子の径 D に反比例するので、間隔 s' 離れた光検出器で検出されたドップラ信号の位相差が粒子の径に比例する。

位相と粒子の径の関係は、粒径パラメータ $\alpha = \pi D / \lambda > 15$ では、上記のように、幾何光学的近似を用いることができ、入射光軸に対して、 10° 以上の受光角では、回折の影響は無視できる。 $\alpha < 15$ では、Mie 散乱理論を用いて厳密に計

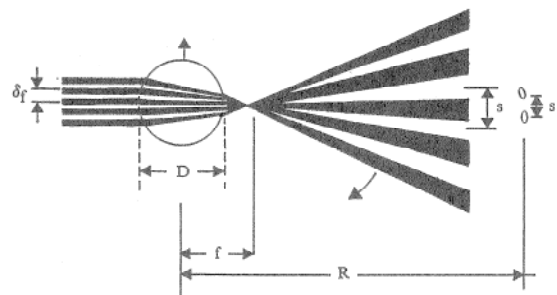


図26 位相LDVのフリンジモデル

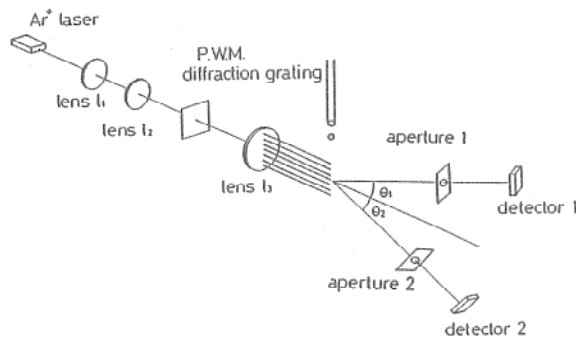


図27 レーザ多焦点法の光学系

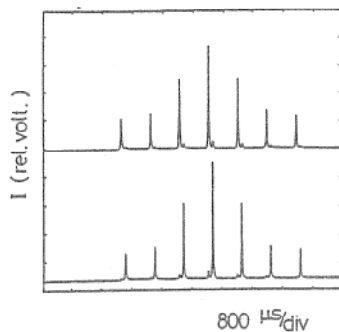


図28 レーザ多焦点法による粒子の速度と径の測定信号例

算する必要があり、特に受光開口が小さいと粒子の径と位相差の線形関係が崩れ、振動する。最近この現象について多くの研究がなされ、受光開口を大きくすることで、この問題を解決できることがわかり、 $\alpha=5$ までの測定が可能になった。現在各方面での適用が活発に試みられている。

以上のLDVを用いる方法では、2光束干渉を用いているため、形成される干渉縞は正弦波状で、得られる信号のS/Nが悪く、位相測定のための信号ピーク位置の決定が難しく、また光学系の調整が難しかった。したがって、位相法によって、粒子の径を求める場合、精度が悪くなる。また、干渉縞の間隔を大きくできないため、高速度での測定が難しかった。著者等はこのようなLDVの欠点を克服するため、図27に示すような、レーザ多焦点流速計¹⁸⁾を構成した。回折格子を集光レンズの前側焦平面に置くだけでよく、光学系の調整が簡単である。回折格子としては、均一な強度を得るため、第2.1.節で述べた変調位相格子を用いた。粒子の速度と径の測定については、位相LDVと同じ

である。この方法では、回折格子による多重干渉縞を用いているので、形成される干渉縞は、鮮鋭で、図28のようにS/Nの高い信号が得られる。したがって、粒子径の測定を高精度で行うことができる。この方法では、多焦点の間隔を大きくでき、信号処理の周波数応答を緩和でき、高速流での測定が可能になると考えられ光学系の特性の検討、適用例を示すことが、今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) Proc. of the 3rd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1986).
- 2) Laser Anemometry in Fluid Mechanics-3 (Selected Papers from the 3rd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics), LADOAN (1988).
- 3) Proc. of the 4th Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1988).
- 4) Proc. of the 2nd Int. Conference on Laser Anemometry-Advances and Applications, Strathclyde, Springer-Verlag (1987).
- 5) Proc. of the 3rd Int. Symp. on Laser Anemometry, Boston, ASME FED 55(1987).
- 6) D. Dopheide, M. Faber, G. Taux and G. Reim "A Portable Frequency Stabilized Laser Diodes Backscattered LDA for High Velocity Applications," Proc. of the 4th Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1988) 4-4-1~6.
- 7) P. Buchhave: "A New Burst Spectrum Analyzer for LDA Signal Processing," Proc. of the 3rd Int. Symp. on Laser Anemometry, Boston, ASME FED 55 (1987) 31~35.
- 8) N. Nakatani, T. Yamada and T. Sakabe: "Measurements of Turbulent Structures in Premixed Flame with Multipoint LDVs," Laser Diagnostic and Modelling, Springer-Verlag (1987) 11~20.
- 9) N. Nakatani, A. Maegawa, T. Izumi, T. Yamada and T. Sakabe: "Advancing Multipoint Optical Fiber LDV's Vorticity Measurement and Some New Optical Systems," Laser Anemometry in

- Fluid Mechanics-3, LADOAN, Lisbon (1988) 3~18.
- 10) F. Seiler and J. Strulijes: "Doppler-pictures of Velocity Fields - an Applications to Fluid Mechanics," Proc. of the 3rd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1986) 19-2-1~6.
 - 11) L. M. M. Lourenco and M. C. Whiffen: "Laser Speckle Method in Fluid Dynamics Applications," Laser Anemometry in Fluid Mechanics-2, LADOAN (1986) 51~68.
 - 12) C. J. D. Pickering and N. A. Halliwell: "Particle Image Velocimetry: Data Reduction by Fringe Analysis," Laser Anemometry in Fluid Mechanics-3, LADOAN, Lisbon (1988) 131~146.
 - 13) C. C. Landreth and R. J. Adrian: "Electrooptical Image Shifting for Particle Image Velocimetry," Appl. Opt. 27, 20 (1988) 4216~4220.
 - 14) W. D. Bacharo and M. J. Houser: "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions," Optical Engineering 23, 5 (1984) 583~587.
 - 15) N. E. Tayali, C. J. Bates, W. D. Dalzell and M. L. Yeoman: "Two Experimental Techniques for the Simultaneous Measurement of the Size and Velocity of Large Particles," Proc. of the 2nd Int. Conference on Laser Anemometry - Advances and Applications, Strathclyde, Springer-Verlag (1987) 313~324.
 - 16) M. Saffman: "The Use of Polarized Light for Optical Particle Sizing," Laser Anemometry in Fluid Mechanics-3, LADOAN (1988) 387~398.
 - 17) M. Saffman, G. K. Fraidl and G. Wigley: "Applications of Phase and Laser Doppler Anemometry to the Measurement of Droplet Size and Velocity in Gasoline and Diesel Fuel Injection Systems," Proc. of the 4th Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1988) 5-15-1~6.
 - 18) N. Nakatani, S. Kohri, T. Yamada and T. Sakabe: "A Laser Multifocus System for Measurement of Particle Size, Velocity and Refractive Index," Proc. of the 4th Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon (1988) 4-10-1~8.