

# 位相ドップラ法による粒径と速度の同時測定

岡本達幸\*

## Simultaneous measurements of size and velocity of a droplet by phase-Doppler technique

**Key Words** : Phase-Doppler technique, Particle sizing, Spray flows

### 1. はじめに

噴霧流や噴霧燃焼の研究においては、液滴数密度、粒径分布、流速分布などに加えて、滴径と速度の相関に関する情報も重要であり、滴径と速度の同時測定が望まれる。レーザ・ドップラ流速計(LDV)光学系で、粒子の速度と粒径を同時に測定するには、従来、ビジビリティ法や散乱強度法が利用されていたが、液滴を対象とする場合には、位相ドップラ法が主流になりつつあるように思われる。我々もこの測定法の理論的検討を行い、光学系および信号処理器を自作して、噴霧流中の液滴の粒径と速度の同時測定を行い、数値解析と併用して噴霧の挙動の解明を進めている。

### 2. 位相ドップラ法の測定原理

位相ドップラ法のアイデアは、1975年のF. Durstらの発表<sup>1)</sup>に端を発する。彼らは、LDV測定部を鋼球が通過するとき、空間の2点でドップラ信号を観測すると、信号の位相のずれが球径に比例することを見出した。

その原理は、幾何光学の考え方をを用いれば以下のように説明できる。図1は、Z軸に並行な光線の透明球形粒子による散乱の様子を示し

ているが、鋼球の場合、図中(1)で示される外面反射光のみとなる。その散乱角 $\theta_1$ と入射角 $\theta_i$ の間には、

$$\theta_1 = \pi - 2\theta_i$$

の関係が成り立ち、粒子直径をDとすると、外面反射光は

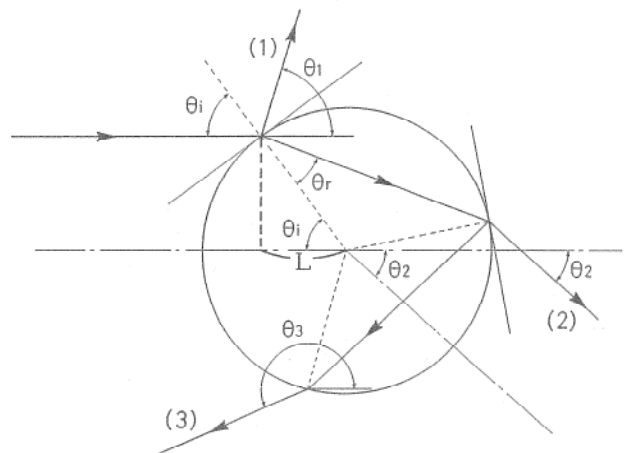


図1 透明真球粒子による光散乱の様子

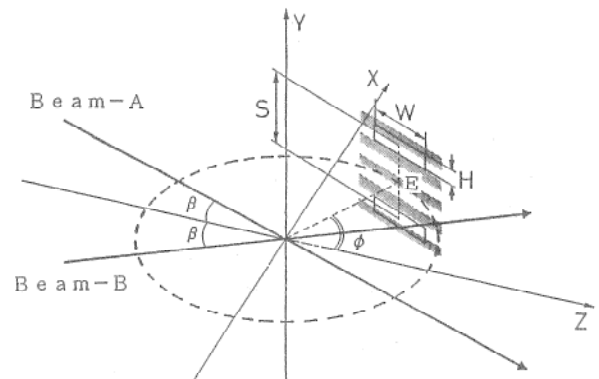


図2 座標系および受光窓位置の定義

\*Tatsuyuki OKAMOTO  
1954年10月24日生  
昭和54年大阪大学大学院工学研究科前期課程修了  
現在、大阪大学工学部産業機械工学科 輸送現象学研究室、助教授、工学博士、燃焼工学  
TEL 06-877-5111 (内線 5109)



$$2L = D \cdot \cos \theta_i = D \cdot \cos(\pi/2 - \theta_1/2) \\ = D \cdot \sin(\theta_1/2)$$

だけ光路長が短くなるとみなせる。

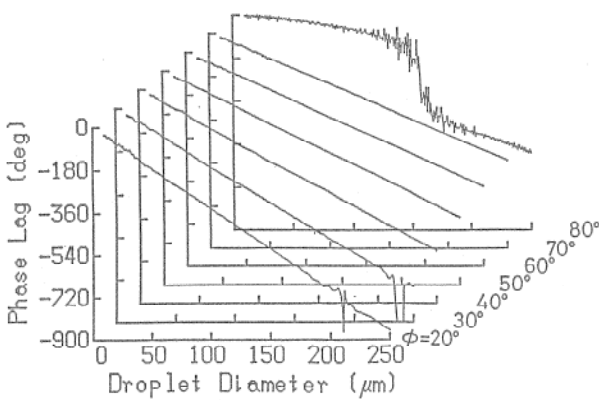
図2のように、2本の平面波レーザービームが、 $X=0$ の平面上にあり、原点でZ軸を角2等分線として交差し、原点では双方のビームの光波は同位相であるとする。受光窓の中心点間を結ぶ破線が $Y=0$ の平面と交差する点をE点とし、E点と原点を結ぶ直線がZ軸正方向となす角度 $\phi$ を睨み角と呼ぶ。仮にE点に受光点があると、対称性により、Aビームからの散乱角 $\theta_{1A}$ と、Bビームからの散乱角 $\theta_{1B}$ は等しく、光路長の短縮量 $L_A$ と $L_B$ も等しいから、両ビームからの散乱光は同位相となり、E点は明るくなる。受光点をE点からY軸正方向へ移動してゆくと $\theta_{1A}$ と $L_A$ は大きく、 $\theta_{1B}$ と $L_B$ は小さくなる。この光路長の相対変化の結果、Aビームからの散乱光の位相が先行する形で、光波の位相がずれ始め、受光点の明るさはE点よりも暗くなっ

てゆくが、位相ずれが $2\pi$ に達すれば再び明るくなる。かくして、図2のように受光窓面上に干渉縞が生じる。粒子直径Dが2倍になれば、位相ずれも2倍になるから、縞模様の空間周期は粒子径に反比例する。

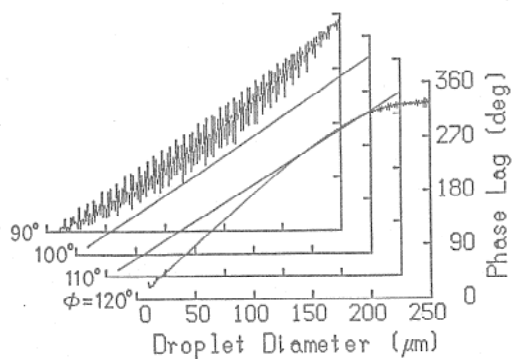
粒子が原点からY軸正方向へ移動すると、粒子に照射される光波の位相関係は、Aビームが先行する形でずれ始め、E点にはそのまま反映されるが、E点よりY座標値が大きい受光窓では、上述のように更に先行して光波の位相ずれが進んでいる。従って干渉縞もY軸正方向へ動く。干渉縞が動く受光窓では明暗信号(ドップラ信号)が検出されるが、ドップラ信号の位相差は干渉縞の空間周期に反比例するから、結局粒子直径に比例することになる。

### 3. 位相ドップラ法の利点・留意点

散乱強度法では、ビーム強度分布が不均一であったり、部分照射の状態になると粒径測定に誤差が入る。また、光路に沿って奥行き深く、

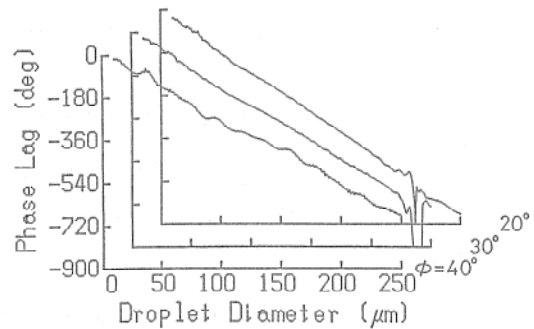


(1)

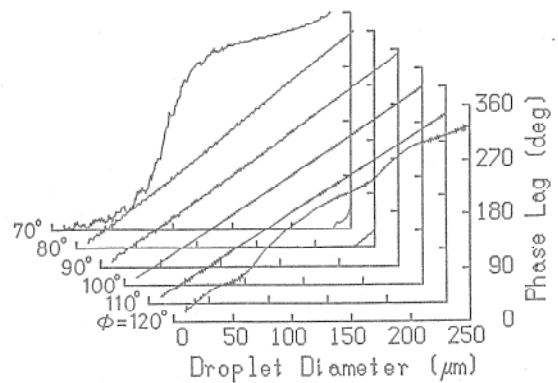


(2)

図3 睨み角が校正曲線に及ぼす影響 (入射光偏光面: Y-Z面に垂直)



(1)



(2)

図4 睨み角が校正曲線に及ぼす影響 (入射光偏光面: Y-Z面に平行)

かつ高濃度に粒子群が存在すると、光強度の減衰による粒径誤差が生じる<sup>2)</sup>。これに対して、位相ドップラ法は信号の位相情報から粒径を求める方法であるから、振幅の影響をほとんど受けないと考えられ、濃度の高い粒子群の流れに対して、散乱強度法より有利な方法となる。また、位相差の粒径に対する感度は、光学系の仕様と測定対象の屈折率が変わらない限り不変であり、散乱強度法のように頻繁に感度校正を行う必要がないのも利点の一つである。

しかし、位相ドップラ法にも制限や留意しなければならない点がある。まず、位相ドップラ法が適用できるのは、理論通りの干涉縞が形成される粒子、即ち、真球とみなすことができ、かつ表面の滑らかな粒子に限られる。従って、表面が不規則な形状を示す粉体粒子には適用できない。

また、位相ドップラ法では、受光窓を設置できる位置が限定される。図3および図4は、真球の水滴(相対屈折率=1.333)の均一照射を想定して、粒径と位相差の関係(校正線)を理論計算したものである<sup>3)</sup>。図3は入射ビームの偏光面(電場の振動面)がY-Z平面に垂直な場合、図4は平行な場合を示している。正面と後方では校正線のうねりや振動が激しく、測定には適さないので省略している。偏光面の向きによって、有効な睨み角の範囲が大きく異なることに注意が必要である。また、睨み角の範囲によって、校正線の傾きの正負が逆転する。睨み角の大きい側では外面反射光が主となっているが、睨み角の小さい側では、図1中で(2)と記された屈折透過光が主となっている。屈折透過光においては、外面反射光の場合とは逆に、散乱角が大きいほど光路長が延びるので、干涉縞の動く向きが反対になる。中間領域では移動方向が逆で、空間周期も異なる干涉縞が混じりあうため測定が不可能になる。

位相ドップラ法は、信号振幅の影響を受けないとの推測から、当初、レーザビームの強度の不均一はあまり問題にされずに、LDVに使われているガウシアンビーム(強度分布がガウス分布になっている)が、そのまま利用されてきた。

図2において、 $1/e^2$ 径が $100\mu\text{m}$ のガウシ

ンビームが使用され、 $X=0$ において強度が最大であるとする。睨み角は $30^\circ$ で、受光系はXの正の側にあるとする。睨み角 $30^\circ$ にとった場合、滴全体が均一強度のビームで照射されていれば、屈折透過光の振幅は外面反射光の約6倍に達する。水滴が $Z=0$ 面内をY軸に平行に飛行するとし、滴中心の軌跡のX座標が異なる場合について、ドップラ信号を理論予測し、屈折透過光が強いことを前提にした信号処理アルゴリズムを適用して求めた観測粒径 $D'$ を示したのが図5<sup>4)</sup>である。滴径が $20\mu\text{m}$ 迄は粒径の誤認は生じないが、滴径がビーム径の半分である $50\mu\text{m}$ になると誤認が生じるようになり、滴径が大きくなるほど誤認をおこす範囲が広がる。

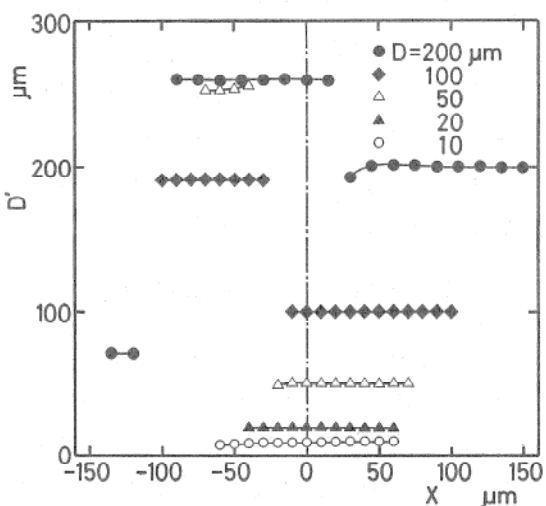


図5 ガウシアンビームを用いた場合の粒径誤認(粒径および粒子軌跡の影響)

ガウシアンビームを用いた場合でも、滴径がビーム径に比べて十分小さければ、ほぼ均一強度の光を照射されている状態になり、つねに屈折透過光が強い。ところが、外面反射光の入射点のX座標値は、滴中心より約 $0.48D$ 正側に、屈折透過光のそれは約 $0.38D$ 負側へ偏っている。そのため、滴が大きく、滴中心がXの負の側(受光窓から遠い側)へ偏った場合、外面反射光の入射点はほぼビーム中心にあるが、屈折透過光の入射点は光強度が極度に弱いビーム周辺部へ遠ざかり、外面反射光のほうが強くなってしまふことが起こりうる。その場合、干涉縞の移動方向が逆になるため粒径誤認を引き起こす。

但し、この誤認は受光窓を3個にし、信号処

理アルゴリズムを工夫することで排除できる<sup>4)</sup>。また、入射角をブリュスタ角とした場合の外表面反射光の散乱角(水滴の場合では $73.75^\circ$ )に睨み角をとり、入射レーザービームの偏光面をY-Z面に垂直にすれば、外表面反射光が極く弱くなる現象を利用することも考えられる。但し、図3, 4から判るように、この睨み角は測定不可能になる中間領域(その範囲は屈折率によって変わる)に極めて近いうえ、偏光面が異なると校正線の傾き(すなわち干渉縞の移動方向)が逆になってしまうので、偏光面、滴の屈折率ならびに受光窓の設置位置を厳密にコントロールしなければならない。

ところで、滴径がビーム径の2倍に達すると、図5には2種類の誤認粒径が現われるが、これには、複数回の内面反射を伴う屈折透過光も関係して誤認が生じている。複数回の内面反射を伴う散乱光の挙動は複雑になるので、粒径誤認対策も難しい。従って測定可能な粒径はビーム径程度までと考えるべきである。

#### 4. ホローコーン噴霧の測定

ディーゼル噴霧のように液柱が分裂して噴霧が形成される場合、下流での液滴の挙動は液滴の初期条件に比較的鈍感であるが、渦巻噴射弁からの中空円錐液膜が分裂して形成されるホローコーン噴霧では、液膜が分裂してできる液滴の初期条件を変えて数値シミュレーションを行うと、下流部での液滴の挙動が著しく変化してしまう。しかし、液滴の初期条件を明確に与えられるだけの実験データは得られていないのが現状である。著者らはこの噴霧を対象として、位相ドップラ法による滴径と速度の同時測定を行っている。図6は測定結果の一例である。図から判るように滴径と速度の間には明確な相間関係がある。言い換えれば、滴径が違えばその挙動もまったく違ってくることを意味している。従って、数値シミュレーションの妥当性を検討するに際しても、滴径の違いによる挙動の変化も予測できているか検討しなければならないし、実験からはその検討に必要なデータを提供しなければならない。先に測定データからは、平均速度や粒径分布はもちろんのこと、滴径範囲別の

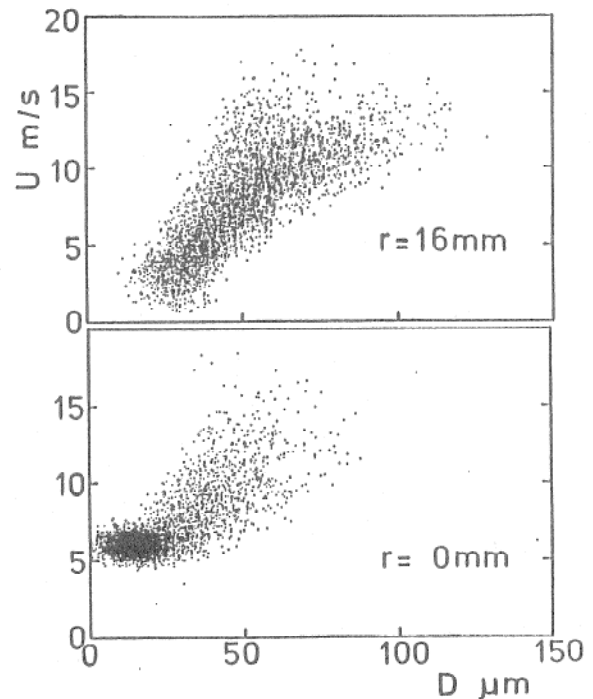


図6 ホローコーン噴霧における測定例

平均速度やそのばらつきを知ることができる。さらに通過頻度の同時測定も行い、滴径範囲別の質量流束も調べようとしている。それらの結果を数値シミュレーション結果と比較検討することにより、数値モデルの妥当性について非常に詳しい検討が可能になる。

#### 5. 結 び

位相ドップラ法には本文中に述べた制限のほかにも、測定対象に応じて、受光窓の設置間隔や窓の大きさ、レーザービームの交差角などを最適化しなければならない、測定対象を変える場合にはかなりの範囲にわたって装置の改造を行わなければならないという不便さもある。しかし、それらのことを認識した上で利用すれば、粒径に関する分解能は散乱強度法などに比べてかなり高く、粒径一速度同時測定法として現在のところもっとも優れた方法であり、噴霧流および噴霧燃焼の研究において同時測定データの必要性は高いので、今後さらに普及が進むと思われる。

#### 参 考 文 献

- 1) F. Durst : Proc. LDA-Symp. Copen-

- hagen, (1975), 403.
- 2) Y. Kaliafas, A. M. K. P. Talor and J. H. Whilelaw : Experiments in Fluids, 5, (1987), 159.
  - 3) 岡本達幸, 高城敏美, 梶 俊和, 寺内方志: 機械学会論文集B, 55, 519, (1989), 3593.
  - 4) 岡本達幸, 高城敏美: 機械学会論文集B, 59, 558, (1993), 639.

