

# ホログラフィによる燃料噴霧粒子測定法の現状

佐藤 誠四郎\*

## Review of Holographic Techniques for the Study of Fuel Spray and Particles

By  
Seishiro SATO

### Abstract

Fuel spray characteristics such as particle size and velocity distributions have a significant effect on the maximization of efficiency and minimization of pollutant productions in the internal combustion engine.

Many interesting techniques have been developed for the measurement of such characteristics. A holographic technique is one of the desirable methods, on account of its possibility of noncontacting, noninterfering and instantaneous measurements.

The purpose of this paper is to review the recent studies for measuring method of the size and velocity distributions of fuel spray and particles by a holographic technique. This technique provides a method of storing the information of dynamic three-dimensional particle fields in a hologram so that a stationary image can be produced for detailed study. The hologram exhibits the many interesting informations including the determination of the size, relative position and velocity of particles suspended in the air.

The basic principles of this method and several applications for spray combustion are described and the advantages and practical limitations are discussed.

### 1. ま え が き

内燃機関からの有害排出ガス抑制と燃料経済性を両立させるため、噴霧燃焼における燃料の微粒化状態とガス流れとの相互関係などを、実機条件下でより明確にとらえることが要求されている。

燃料噴霧の挙動および粒度分布などの噴霧特性の測定には従来から多くの方法が試みられているが、近年レーザを応用した方法がいくつか提案され、これらは非接触で実時間測定が可能であることから有望視されその実用化研究が行われている<sup>1)</sup>。

ホログラフィを利用した方法もその1つであり、ホログラフィ法では飛翔中の粒子を映像として三次元的

にとらえることができるので、条件によっては粒径ばかりでなく粒子の空間分布や飛翔速度などの噴霧の挙動を知ることができ、噴霧粒子の測定に有力な手段になると思われる。

本報告は、ホログラフィ法による噴霧粒子研究の現状を調べたもので、測定法の概要、適用例および今後の課題などについてのべる。

### 2. ホログラフィ法の特徴および原理

ホログラフィによる微粒子の測定は、ホログラフィ技術応用の最初のもので、早くから粒子濃度の比較的薄い霧やエアロゾル粒子の測定には多くの適用例がみられるが<sup>2),3)</sup>、燃料噴霧への応用は、粒子濃度が高い場合の測定が難しいこと、得られる写真の解像力が低いことなど基礎的な問題が多く、主として噴霧流のバ

\* 機関開発部

原稿受付：昭和55年2月12日

ターンなどの巨視的な粒子群の測定がなされている<sup>4)</sup>。

ホログラフ法の特長として、1) 通常の写真法では焦点深度の制約のため狭い領域の粒子しか撮影できないが、ホログラフによれば視野の深度は、通常の写真の約3桁増のものが得られ、空間に分布している粒子の濃度変化や粒径を一度にとらえることができる<sup>5)</sup> こと、2) 各粒子毎に焦点を合わせられるので、焦点はずれの誤差をさけることができる、3) 直接測定であるので粒子径、速度とも検定が不要である<sup>6)</sup>、4) レーザの単色性と高輝度から燃焼中の測定も可能なこと、である。

一方欠点として、前述のように1) 粒子濃度が高い場合の測定が難しいこと<sup>6)</sup>、2) 個々の粒子の計数などのデータ解析がめんどうで、このため粒子画像解析装置などが用いられるが、得られる写真は粒子のコントラストがそれぞれ異なりまた背景が一様でないので自動化が困難である<sup>6)</sup> こと、3) 粒度分布や分散量を求めるには、粒子の空間分布のほか各粒子の速度が必要であること、4) 一般に運動粒子を対象とするのでパルスレーザが必要であり、画像解析装置とともに各機器が高価なこと、などである。

2.1 Fraunhofer 回折

物体に光を当て、その後方にできる物体による回折光(物体光)と回折されない光(参照光)との干渉模様をホログラムといい、撮影されたホログラムに参照光を当てると元の物体の波面が再現される<sup>7)</sup>。

ホログラフによる粒子測定では、光学系配置の簡単なことなどから参照光と物体光をとくに分けなくて光束を一つとし、粒子の大きさに比べ粒子とホログラムの距離を大きくしたインライン(in-line) Fraunhofer ホログラム<sup>8)</sup>を用いるものが大部分であるのでこれについてのべる。

簡単のため、一つの粒子が図-1に示すようコヒー

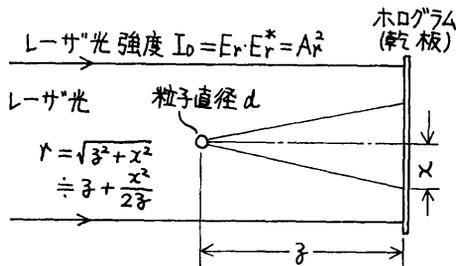


図-1 インライン Fraunhofer ホログラム

(314)

レントな平行光で照射される場合を考え、粒子からホログラム面までの距離  $z$  は、つぎの far field の条件(または Fraunhofer の条件ともいう)を満足しているとす<sup>9)</sup>。

$$z \geq \frac{d^2}{\lambda} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $d$ : 粒子直径、 $\lambda$ : 光の波長である。

式(1)の条件を満たすとき、物体による回折光の振幅分布  $E_0(x)$  (複素振幅ともいう)は、Fraunhofer 回折<sup>10)</sup> となり照明光の振幅分布を  $E_r(x)$  とすると次式のように表わされる<sup>9)</sup>。

$$E_r(x) = A_r \cdot e^{ikz}$$

$$E_0(x) = \frac{ik}{2\pi} A_r \int \frac{e^{ikz}}{r} D(x) \cdot dx \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $A_r$ : 振幅、 $r$ : ホログラム面における物体からの距離、 $k=2\pi/\lambda$ 、 $D(x)$ : 物体断面形状。

したがってホログラム面における光の強さ  $I(x)$  は、照明光の強さを  $I_0$  とするとつぎようになる。

$$I(x) = |E_r(x) + E_0(x)|^2$$

$$= I_0 \left[ 1 - \frac{k}{\pi z} \sin\left(\frac{kx^2}{2z}\right) \bar{D}(x) + \left\{ \frac{k}{2\pi z} \bar{D}(x) \right\}^2 \right] \quad \dots\dots(3)$$

$\bar{D}(x)$  は粒子の Fourier 変換を表わし、断面が円形の物体(半径  $a$  とする)ではつぎようになる。

$$\bar{D}(x) = 2\pi a^2 \left[ J_1\left(\frac{kax}{z}\right) / \left(\frac{kax}{z}\right) \right] \quad \dots\dots(4)$$

ここに  $J_1$  は、第1種のベッセル関数で式(3)はつぎのように表わされる。

$$I(x) = I_0 \left[ 1 - \frac{2ka^2}{z} \sin\left(\frac{kx^2}{2z}\right) J_1\left(\frac{kax}{z}\right) / \left(\frac{kax}{z}\right) + \frac{k^2 a^4}{z^2} \left\{ J_1\left(\frac{kax}{z}\right) / \left(\frac{kax}{z}\right) \right\}^2 \right] \quad \dots\dots(5)$$

式(5)は、粒子におけるインライン Fraunhofer ホログラムと呼ばれ<sup>9)</sup>、記録時と同じ光線で照射すると、直接像と共役像が再生される。

2.2 視野の深度

式(1)の far field の条件の下限は、粒子再生の際に直接像(虚像)と共役像(実像)の重なりにより、像の解像力やコントラストが低下するのを避けるためであり、上限は乾板上における物体からの回折光の強さの減少量によって決まり、これ以上の距離でははっきりした再生像が得られない限界を示す。

通常、測定できる粒子の距離は、ホログラムから1ないし100 far field の範囲といわれ<sup>12)</sup>、上限は使用光学系などにより決まる。ただし1 far field とは

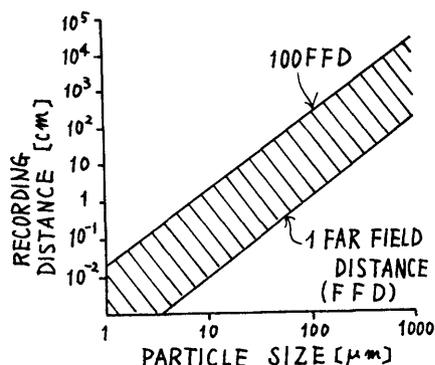


図-2 粒子再生範囲<sup>12)</sup>

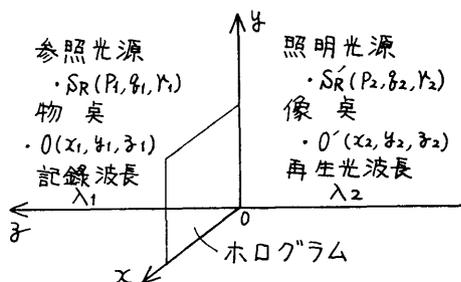


図-3 ホログラムの結像<sup>16)</sup>

$d^2/\lambda$  である。赤松ら<sup>13)</sup>によるとこの上限は、視野の広さと物体の面積比が大きいほど広がるとしている。また正確な粒径測定には、1ないし10 far fieldの範囲が良いともいわれる<sup>14)</sup>。

図-2は、インラインホログラムから粒子を再生できる範囲を示し、記録距離の最大と最小の比は100であるから距離が一定では解像の良い像が得られる粒径比は10以上にはならない。しかし、Trolingerら<sup>15)</sup>によると大粒では1 far field以下の距離でも良い再生像が得られるとしており、距離の近い方の制約は厳しくないと思われる。

### 2.3 結像関係式

前述の Fraunhofer 回折では、簡単のため平行光線をえらんだが、実際の撮影には任意の位置においた点光源からの光線を用いることができる。

図-3で  $O(x_1, y_1, z_1)$ ,  $S_R(p_1, q_1, r_1)$  をそれぞれ撮影のときの物点および参照光源の位置、 $O'(x_2, y_2, z_2)$ ,  $S_R'(p_2, q_2, r_2)$  を再生のときの像点および光源の位置、 $\lambda_1, \lambda_2$  をそれぞれ撮影および再生の場合の波長とすれば、近軸光線の結像式として次式が成立

つ<sup>16)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\lambda_1} \left( \frac{1}{z_1} - \frac{1}{r_1} \right) &= \pm \frac{1}{\lambda_2} \left( \frac{1}{z_2} - \frac{1}{r_2} \right) \\ \frac{1}{\lambda_1} \left( \frac{x_1}{z_1} - \frac{p_1}{r_1} \right) &= \pm \frac{1}{\lambda_2} \left( \frac{x_2}{z_2} - \frac{p_2}{r_2} \right) \\ \frac{1}{\lambda_1} \left( \frac{y_1}{z_1} - \frac{q_1}{r_1} \right) &= \pm \frac{1}{\lambda_2} \left( \frac{y_2}{z_2} - \frac{q_2}{r_2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

ここで、二重符号+は直接像、符号-は共役像である。またこのときの像の倍率は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{横倍率 } M_{lat} &= \pm \frac{\lambda_2 z_2}{\lambda_1 z_1} \\ \text{縦倍率 } M_{long} &= \pm \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

撮影、再生とも平行光を用いると式(6),(7)で  $r_1 = r_2 = \infty$  とおいて、

$$\begin{aligned} z_2 &= \pm \frac{\lambda_1}{\lambda_2} z_1, \quad x_2 = \pm x_1, \quad y_2 = \pm y_1, \\ M_{lat} &= 1, \quad M_{long} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \end{aligned}$$

すなわち、z方向(光軸方向)のみ波長比の係数が掛るほか、x,y面では、物体があった位置に像が再生され倍率は粒子の位置に関係なく一定となるので、データ処理などが簡単である。

ホログラムによる結像では、撮影時の参照光源と再生時の照明光源の位置を適当に選べば、倍率を変えることができるので、後述の粒子像の拡大に利用できる。

## 3. 計測方法

### 3.1 光学系配置

参照光と物体光の配置方法からインライン(in-line)型とオフアキス(off-axis)型に分けられ、前述のようにインライン型が多く用いられている。

インライン型(図-1)は、1本の光線が参照光と物体光を兼ねるもので、両光線の光路差が短いことから、比較的高コヒーレンスの良くないレーザを用いてもよく、使用する感光材料も高い分解能が要求されない<sup>2)</sup>。しかし粒子濃度が高いと良い再生像が得られないので、比較的濃度の薄い霧やエアロゾル粒子の測定に適している。エンジンの燃焼室内では、混合気や燃焼による乱れにより参照光の位相が変化してホログラフィよりむしろシャドウグラフの性格が強くなり燃料噴霧の到達距離や拡がりなどの噴霧流のパターンや蒸発領域が観測され、巨視的な粒子群の測定法となる<sup>4)</sup>。

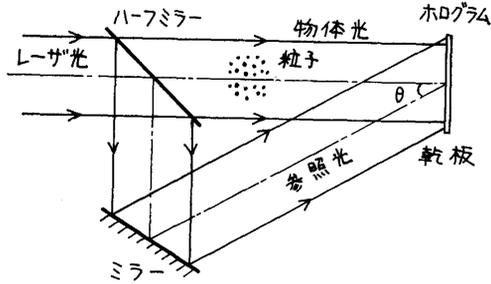


図-4 オフアキス型光学系

一方オフアキス型は、図-4のように参照光と物体光がある角度をもってホログラム乾板上で干渉する形をいう。この型では、インライン型に比べ比較的濃度の高い粒子群の測定や燃焼場の測定でも乱れの影響を少なくでき、再生に伴う2つの像は完全に分離できる。また多くの配置が可能であるが光学系が複雑になり、再生時の正確な配置が面倒である<sup>19)</sup>。

### 3.2 像の拡大

ホログラフィにおける像の拡大は、つぎののべる方法やこれらの組み合わせなどより行われている。

#### a) ホログラムの記録前に物体を拡大<sup>17),20)</sup>

レンズなどで物体を拡大して記録する方法で、乾板などの所要解像力の制限を補うことができ、レンズを用いない場合よりも一般に解像力は良いといわれる<sup>21)</sup>。しかし、高精度のレンズが必要であり視野がレンズの開口で制限されること、レンズによる収差を伴うことなどの欠点がある。レンズはまた、測定系に近づけない場合とか far field の条件を満たすためにも用いられる。

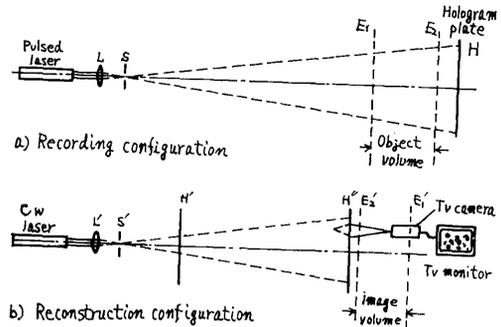
#### b) ホログラムと光源などの配置により拡大像を得る

ホログラフィによる倍率の式(7)からわかるように、物体と像の光軸方向の距離の比を大きくすることにより高倍率が得られる。これには図-5のように、記録、再生ともに発散光を用い、記録の際は物体をホログラムにできるだけ近づけ、再生時にはホログラムを光源に近づけることにより得られる。Bexon ら<sup>20)</sup>は、これにより200倍の拡大像を得ている。この方法では、レンズを用いる方法よりも大きな視野が得られる<sup>22)</sup>が配置によっては収差が大きくなるので注意が必要である。

#### c) ホログラムからの再生像を拡大

ホログラムからの再生像を顕微鏡などで拡大する方

(316)

図-5 発散光による像の拡大<sup>20)</sup>

法で、ホログラムとして倍率1で記録した場合、再生像は収差のない像が得られる<sup>23)</sup>。記録、再生とも平行光を用いると、前述のように粒子の位置に関係なく倍率は一定となりデータ処理が簡単になる。

このほか、記録時と再生時の波長を変える方法、ホログラム自体の拡大による方法などがあるが、これらは使用光源や解像力などの点で実用には難点がある。

以上のように像の拡大には、いずれの方法も長短があり解像力、視野の広さ、収差の大小などの点から使用目的に適した方法を選ぶべきと思われる。

### 3.3 解像力

ホログラフィでは、記録、再生という二段階を経て物体の像を得るため、この間に収差やスペクルノイズを伴いやすく解像力が低下する。このため解像力の向上とノイズ低減は、燃焼中での測定や粒子画像の自動解析を行うためにも検討する必要がある。

再生される像の解像力を左右するものは、1)乾板の解像力、2)ホログラムの大きさ、3)ホログラムなどによる収差、4)参照光源と照明光源のコヒーレンスなどである<sup>19)</sup>。ここでは、ホログラムの大きさと収差改善などについてのべる。

物体による光線の回折角は微小物体ほど大きく<sup>10)</sup>、したがって物体からの回折光を全て記録するため、ホログラムは寸法が大きいほど解像力を増すことができる。しかし実際はホログラムを大きくすることは困難なので、物体とホログラムは far field の条件を満たしながらできるだけ近づけた方がよい。

ホログラム記録時の使用レンズによる収差を改善するには、図-6のように再生、記録とも同じ配置の光学系を用いホログラムの裏面から共役な参照光で照射すると、物体のあった位置で得られる像は、使用レンズの収差が差引かれ無収差となる<sup>19),21)</sup>。しかし、記

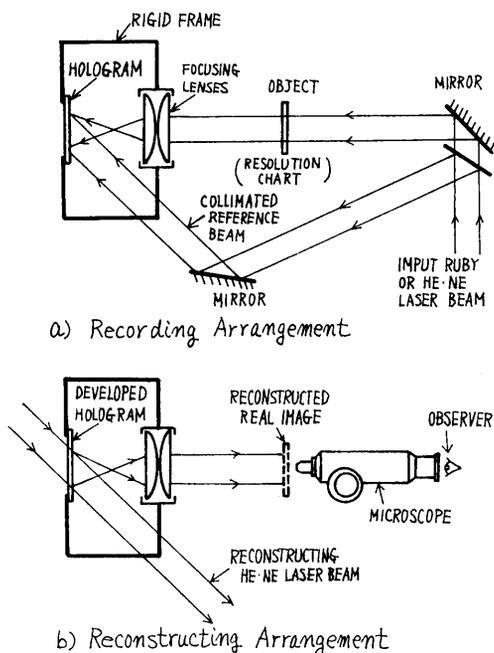


図-6 使用レンズの収差補正<sup>21)</sup>

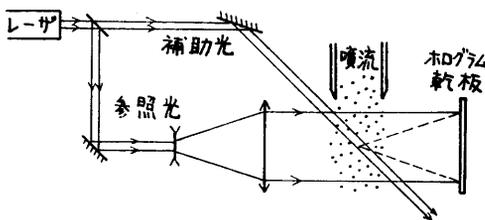


図-7 補助光を用いるインライン型<sup>25)</sup>

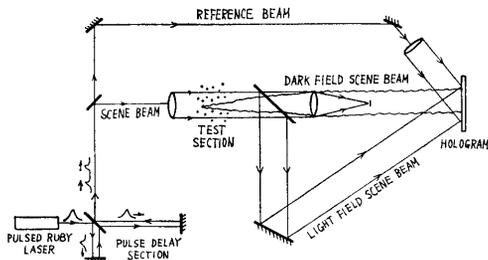


図-8 明視野, 暗視野観測<sup>45)</sup>

録, 再生とも同じ波長のレーザー光を用いないと波長の違いによる誤差を生ずる。

前節のホログラムと光源の配置により像を拡大する場合, 一般に等倍の再生像以外は収差を生ずるといわれるが<sup>16)</sup>, 再生時に物体のあった位置に照明光源を配

置してホログラムを照明すると, 収差の少ない再生像を得ることができる<sup>24)</sup>。

得られる像のコントラストを増すことも粒子の自動解析には都合がよい。これには図-7のようれ物体光を強めるためインライン型に補助光を用いる方法<sup>25), 26)</sup>, 図-8のように背景光をレンズの焦点でさえぎり, 粒子からの散乱光のみを観測できるよう暗視野にすると, 粒子の周辺部が強調されて見ることができる<sup>45)</sup>。図-8はまた通常の明視野も同時に観測できるようにしてあり, 微小粒は暗視野の方が見やすいといわれる。

解像力を損うものにスペックルノイズがある。ホログラフィでは, コヒーレント光を用いるため物体などによる散乱光が斑点状のスペックルパターンとなり雑音となる。

噴霧では, 粒子自体がこのようなノイズ発生の原因となる<sup>26)</sup>ので, 対象粒子以外で生ずるスペックルノイズ低減が必要である。この点で拡散光照明<sup>27)</sup>では, それ自体でスペックルが発生するのでさけるべきと思われる。しかし拡散光を用いる場合, 解像力を減らさない程度に光源のコヒーレンスを悪くしてスペックルを少なくするよう, 拡散板を動かして照明する方法が試みられている<sup>28)</sup>。

スペックルノイズは, このほかホログラムや写真レンズの開口が小さい場合に顕著になるので<sup>29)</sup>, 例えば図-9のような虚像再生ではレンズの絞りや位置の関係上ホログラム全面を有効に利用できない。したがってノイズ低減には, カメラレンズなどを用いないホログラム全面を利用した実像再生<sup>30)</sup>が有効と思われる。

また複数の参照光を用いるとスペックルノイズが効果的に減少できる<sup>31), 32)</sup>といわれ, これは再生の際スペックルパターンの平均化などによると思われる。

このほかホログラフィを利用した情報処理の分野で, Fourier 変換型ホログラム<sup>16)</sup>の配置の場合に, ランダムな位相板とサンプリング板を用いて, ホログラムの冗長性や再生像の質をまったく悪化させることな

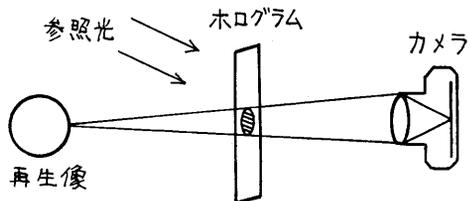


図-9 ホログラムの大きさの有限性<sup>30)</sup>

く、スペックルノイズを低減している例がある<sup>33)</sup>。これは光線が位相板とサンプリング板を通ることによって、各光束間の相互作用がなくなることを利用したものである。しかしこの方法による粒子測定への有効性はまだ確かめられていない。

使用光源自体によるノイズは、一般に行われているようレーザからの平行ビームを絞った位置にピンホールを置き、平行光以外の光を除くことにより背景の干渉模様を減らすことができる<sup>20)</sup>。しかしこの方法ではレーザ出力が大きい場合、集光点で高エネルギー密度となるので、周囲のガスがイオン化してレーザ光が吸収される難点がある。

以上のようにスペックルノイズを含めた一般のノイズ低減については、ホログラフィ利用による粒子測定の今後の課題であると思われる。

#### 4. 適用例

##### 4.1 粒子径測定

ホログラフィでは、解像力の点から粒径が $10\mu\text{m}$ 以上で粒子濃度が $10^3$ 個/cm<sup>3</sup>以下の噴霧粒子群が測定の対象となっている<sup>4)</sup>。適用例では粒子濃度の低いエアロゾル、霧などの例が多く<sup>21), 217), 221)</sup>、燃料ノズルからの噴霧では、粒径測定よりも主として噴霧流のパターン

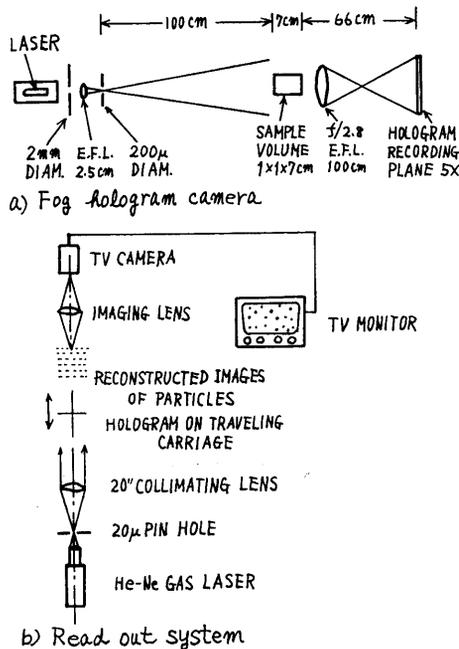


図-10 霧の測定光学系<sup>3)</sup>

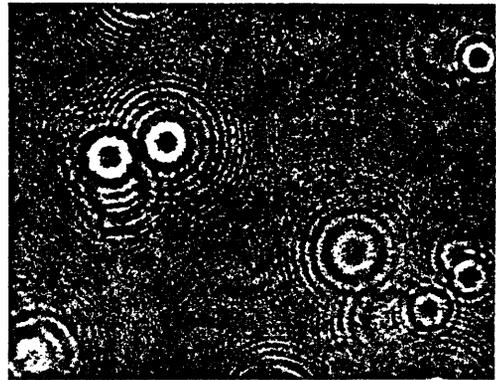


図-11 粒子の回折パターン<sup>8)</sup>

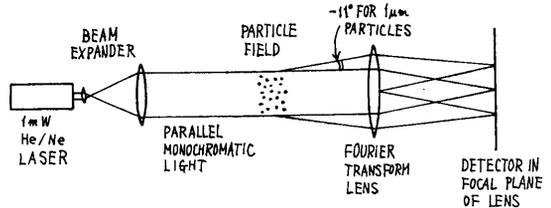


図-12 回折による粒度分布測定<sup>11)</sup>

の観測が行なわれている<sup>19), 34)</sup>。

図-10は、霧の測定に用いた光学系を示した記録にはQスイッチルビレーザ、再生にはHe-Neレーザを使用し、テレビカメラと組み合わせ倍率300倍で解像力は $10\mu\text{m}$ より良い結果を得ている<sup>3)</sup>。

Thompsonら<sup>8)</sup>は、ホログラムを再生して粒子径と空間の位置を求める代り、図-11のホログラムの回折模様から直接求めている。この方法では式(5)で表わされる回折パターンの最初の径(Airyパターン<sup>10)</sup>)から、もとの粒子径を求め、パターン強度の濃淡の周期から粒子の位置を求めている。しかし粒子1個ずつの回折パターンを測るよりも、粒子を再生する方が処理が簡単のため、この方法は実用性は少ないと思われる。

Fraunhofer回折を応用して、粒子群の粒度分布を求める方法が提案されている<sup>11)</sup>。この方法では映像を用いていないのでホログラフィ法とはいえないが、同じ回折現象を利用しているのでここで述べることにする。図-12に示すようにレンズの集光の性質をうまく利用して、粒子からの回折像のできる位置を粒子位置に関係なく、レンズ光軸を中心とした一定の円環上に集るように配置してある。したがって粒子が運動していても回折像のできる位置には影響を与えない。回折

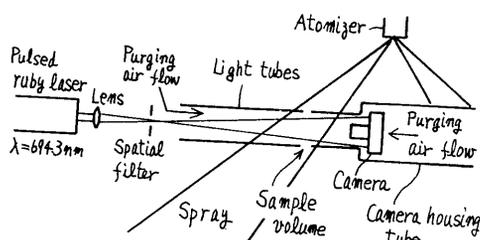


図-13 高濃度噴霧の撮影<sup>6)</sup>

によりできる円環の径は、粒子の大きさにより決まっているので、円環上の光の強度分布を光電管で測り計算処理によって、光束内での粒子群の粒度分布を求めることができる。この方法では、短時間で粒度分布が求められるが、光軸方向の分布の変化が求められないこと、粒子濃度が高い場合に多重回折となり正確な測定ができないことなどが欠点である<sup>35)</sup>。

粒子濃度が高い場合は、粒子自体によるスペックルノイズとともに、個々の粒子からの回折光が乱されたりさえぎられるので測定が困難になる。Trolinger<sup>18)</sup>らによるとインライン型では80%の光が粒子による回折を受けずに透過することが必要があり、Kleitzら<sup>36)</sup>によるとホログラムへ記録できる粒子数は、粒径一定ではホログラムからの距離が大になるほど減少し、ほぼ粒径の自乗に反比例して少なくなるとしている。

理想的には各粒子の回折光が重ならない程度の濃度がよく、またノイズの少ない像を得るため粒子数は少ない方がよい。このため図-13に示すように粒子濃度の高いところで光線を覆い、スリットで噴霧の一部だけを視野内に通過させて撮影している例がある<sup>6), 37)</sup>。したがってこの場合は、非接触測定および視野深度が大きいというホログラフィ法の長所を損うことになるが止むを得ないと思われる。

#### 4.2 粒子速度

ホログラフィ法により噴霧の粒度分布、分散量などを求めるには、粒子の空間分布のほか各粒子の速度を同時に測らなければならない<sup>38)</sup>。

粒子速度の測定には、ホログラムに適当な間隔をおいて二重露光すると、再生により一對の粒子の空間位置が求まり、露光の時間間隔から三次元的な速度ベクトルの測定ができた粒径も同時に求められる<sup>40)</sup>。

植村らは<sup>39)</sup>、ダブルパルスルビーレーザーを用い高圧ノズルから噴射したメタノール粒子群の速度を測定している。使用光学系を図-14に、粒子再生像を図-15に示す。また植村ら<sup>40)</sup>によると二重露光撮影では、単

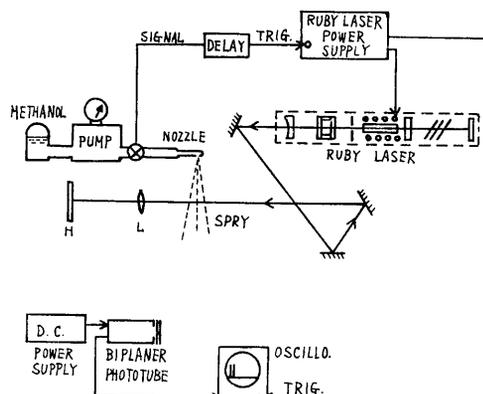


図-14 ダブルパルスインライン型光学系<sup>39)</sup>

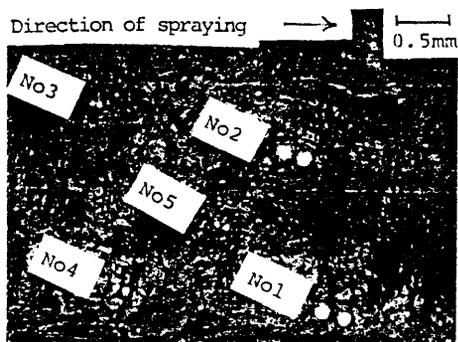


図-15 メタノール粒子再生像<sup>39)</sup>

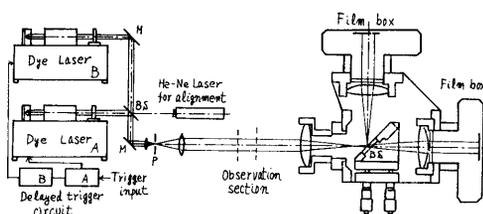
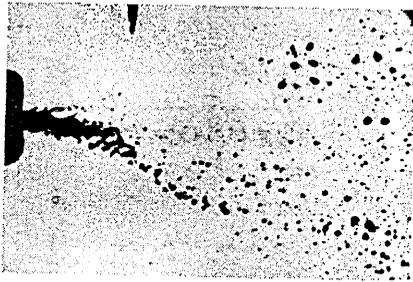


図-16 二波長パルス法光学系<sup>41)</sup>

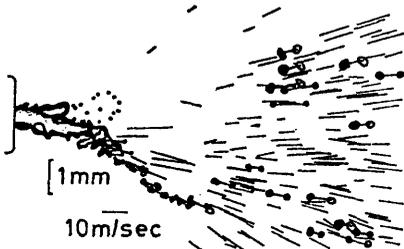
一露光のものより画質が悪くなるとしている。

Royesら<sup>26)</sup>も得られる像のコントラストは重ね撮りの露光数に比例して減少するとして、図-7に示す光学系を用い再生像のコントラストを高め、また一つの乾板にストロボ的に粒子を記録し、同一粒子の局所的な速度変化測定の可能性を示している。

粒子濃度が高い場合、どの粒子がどこへ移動したかその同定が困難になる。村上ら<sup>41)</sup>は、この点を改善するため図-16に示すような波長の異なる2台の色素パルスレーザーを用い、粒子のインラインホログラムを別



(a). Dynamic observation of disintegrated liquids and particles.



(b). Velocity distribution of (a).

図一七 噴霧の速度分布<sup>44)</sup>

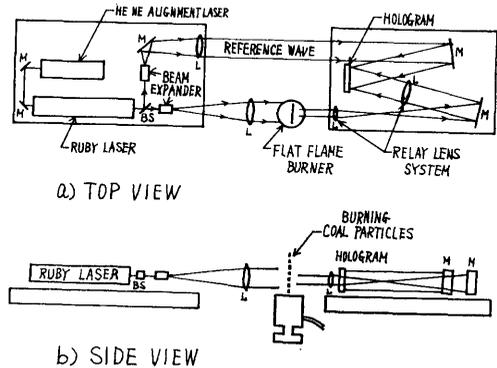
々のフィルムに記録しそれらを重ね合わせて観測する方法を開発している。この方法を用い各種ノズルからの噴霧粒子の速度、噴霧流のパターンなどの測定を行い液体の微粒化機構の解析などに貴重なデータを提供している<sup>42)</sup>。図一七は、ノズルからの噴霧粒子速度の測定例で、ホログラム乾板に平行な速度成分を示し、粒の同定、速度方向などが色別により容易に判定できる<sup>44)</sup>。使用レーザーのコヒーレンス性などから三次元像の再生はまだ試みられていないようであるが、通常の高速度写真よりも解像力が優れており今後の有力な手法になると思われる。

毎秒数km以上の超高速測定として、パルス幅3~5nsのシングルパルスレーザーからの光を図一八に示すようビームスプリッターを用いて2つの光線に分け、一方の光線に光路差を与えこれによる時間遅れを利用して二重露光を得る方法が試みられている。光露差3m程度で4~6km/sの粒子速度の測定が可能である<sup>45)</sup>。

#### 4.3 燃焼中の測定

燃焼中での粒子測定の基本的な問題は、火炎光による乾板の露光を防ぐことと、燃焼に伴う密度の乱れなどにより解像力が失なわれることである<sup>43)</sup>。

Websterら<sup>47)</sup>は、火炎光をせまいバンド幅のフィ



図一八 オフアキスイメージ型光学系<sup>49)</sup>

ルタを用いて防ぎ、超音波ノズルからの残渣油燃焼中の噴霧を測定し20 $\mu$ mの解像力を得ている。しかしフィルタ使用によりノイズが増加するとしている<sup>48)</sup>。

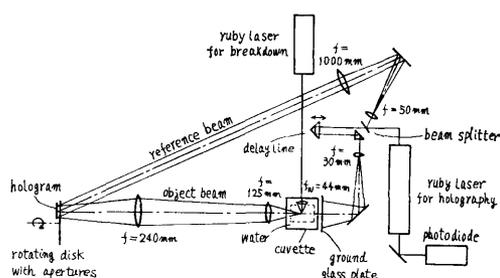
村上ら<sup>50)</sup>は、前述の二波長ダブルパルス法でエタノール火炎中の噴霧燃焼状況を観測し、火炎中の噴霧粒子の分布、粒子速度などを明らかにしている。この方法では、2つの波長の像を分離するため干渉フィルタを用いているので、火炎光は効果的に防ぐことができる。

Trolingerら<sup>49)</sup>は、燃焼による解像力低下を補うため、とくに高解像が得られる光学系を用いている。図一八のように記録にはレンズで拡大した像を乾板面に結像するようイメージ型<sup>28)</sup>とし、オフアキス型である。再生には記録時の光学系と正確に同じ配置になるようホログラムの再設置などに注意して行った。これにより火炎中の石炭粒子を撮影し、3 $\mu$ mの解像と2.5cmの視野を得ている。

#### 4.4 駒撮りホログラフィ

非定常現象を連続的に観測するには、位相物体の場合は実時間干渉法があるが、噴霧粒子の場合には、ダブルパルス法によるほか、駒撮りホログラフィ<sup>50), 51)</sup>, <sup>52)</sup>の手法が適用される。ホログラフィでは1枚のホログラムの中に多数の像を重ねて記録することができる上に、再生の際にはこれらの像を一つ一つ分離して取り出すことが可能でありこれを利用して駒撮りが行われる<sup>53)</sup>。

撮影できるホログラムの駒数は8~20個程度であるが、噴霧のような微小物体が広い範囲に分布している場合の撮影には、視野深度の大きいホログラフィ法が適する。記録には二つの方法があり、一つは各駒を乾板の異なる場所に撮影する方法と、他の一つは乾板全



図—19 駒撮ホログラフィ光学系<sup>51)</sup>

体に各駒毎に参照光の角度を変えて記録する方法である。前者の方法では、通常ホログラフィの光学系がそのまま用いられ、ノイズ、像のコントラストなどは通常のものと同様な写真が得られる。後者では光音響効果を利用したセルなどを用いて、各駒毎に参照光の角度を変えて多重露光するのでコントラストなどは前者より低下する。

Lauterborn<sup>51)</sup>らは、図—19に示す光学系を用いて超音波で生じたキャビテーション気泡、液中の衝撃波などを撮影した。光源はルビーレーザーから1回のポンピングにより20kHz間隔で8パルスの発振が得られるよう多重トリガーを用い、同図に示される開口つき回転ディスクと同期させ各駒を乾板の異なる位置に記録できるようにしてある。10~20 $\mu\text{m}$ 程度の解像力が得られたが、光源の発振などに問題があるようである。

## 5. ま と め

ホログラフィ法による噴霧粒子の測定法、適用例などについて、今後の応用の可能性のあるものを含めて概説した。

内燃機関への応用については、現在のところ噴霧流のパターンや拡がりなどの巨視的な測定には有力な手段となっているが、平均粒径、粒度分布などの定量的な測定ではまだ満足すべき結果が得られていない。しかし、火災中における噴霧粒子の分布状況や各粒子の速度測定などの限られた目的には十分役立つ方法となっている。

粒度分布などのような微視的な測定を実機条件下などで応用するには、今後研究すべき問題が多い。これらの問題点を列記するとつぎのようになる。

燃焼中でも5~10 $\mu\text{m}$ 程度の粒子が測定できるように高解像力を持ち、かつ大きな視野が得られるようにすること。このためには例えばレンズなどで粒子を拡大

しイメージ型として乾板に記録し、再生時には波長可変レーザーなどで記録時と同波長のレーザー光を使用することにより用いるレンズの収差を完全に補正するようにする。またノイズの原因となる干渉フィルタを用いないで、シャッタなどにより火炎光を防ぐようにすることなどにより、かなりの高解像力が期待できると思われる。

粒子濃度が高い場合でも測定できること。これには物体への照明方法などを考慮すればある程度の濃度まで解像力が得られる可能性がある。

粒子速度の測定については現在二重露光間の粒子の移動を一对の映像として判別しているが、この粒子の判別の手間を無くするため粒子の移動を干渉縞として検出する手法<sup>52)</sup>を確立すること。

ホログラムから各粒子に焦点合わせをし、粒子1個ずつ計数するのは手間が大変なので、完全な自動解析処理ができるようノイズの少ない。コントラストの良い再生像を得ること。

粒子画像解析装置への要求として、ホログラムから再生された粒子への焦点合わせ、再生像におけるノイズと粒子の判別やノイズ低減、粒子径測定、粒子の計数、計算処理などが自動化できることである。

本文は、日本機械学会内燃機関におけるレーザー計測に関する研究分科会（主査、東海大学、浅沼強教授）の成果報告書<sup>51)</sup>の一部として筆者が調査したものである。まとめに当り、同分科会委員の皆様から貴重なご意見を、ご援助を載きました。紙上にて御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 機械学会、内燃機関におけるレーザー計測に関する調査研究分科会成果報告書、分科会報告 No. 283、昭和54年12月。
- 2) B. J. Thompson, Holographic Particle Sizing Techniques, Jour. of Physics E: Scientific Instrum., 7—10, (1974), 781.
- 3) B. J. Thompson *et al*, Application of Hologram Techniques for Particle Size Analysis, Appl. Optics, 6—3, (1967) 519.
- 4) 清水、レーザーによる粒子の測定、機械学会第468回講習会教材、(昭53—6)、69.
- 5) F. B. Peterson *et al*, Comparative Measurements of Bubbles and Particulate Spectra by Three Optical Methods, 14th Intern. Towing Tank Conference, (1975), 27.
- 6) R. A. Jones *et al*, Application of in-line holography to drop size measurement in dense

- fuel sprays, *Appl. Optics*, **17**—3, (1978), 328.
- 7) 山本, ホログラフィ利用による測定, 機械学会第468回講習会教材, (昭53—6), 27.
- 8) B. J. Thompson, A New Method of Measuring Particle Size by Diffraction Techniques, *Jap. Jour. Appl. Physics*, Vol. 4, Suppl 1, (1965), 302.
- 9) K. Murata *et al*, On the Processing of Bubble Chamber Tracks by Means of In-Line Filtered Holography, *Memoires of the Faculty of Engineer, Hokkaido Univ.* Vol VII—3, No. 56, (1969).
- 10) M. Born *et al*, *Principles of Optics*, Pergamon Press, (1975), 草川ほか訳, 光学の原理 I, II, III., 東海大学出版, (1974).
- 11) J. Swithenbank *et al*, A Laser Diagnostic Techniques for the Measurement of Droplet and Particle Size Distribution, *A. I. A. A.*, Pap. No. 76—69, (1976).
- 12) R. T. Pitlak *et al*, Limitations of transmission holography in particle analysis, *holosphere*, 5—8, (1976), Appolo Laser 社資料.
- 13) 赤松ほか, In-Line Fraunhofer Holography によるキャビテーション気泡の観測. 第2回, 流れの可視化シンポジウム, 東大宇航研, (昭49), 143.
- 14) P. F. Macloughlin *et al*, A Holographic Study of Interacting Liquid Sprays, *Proc. 1st Intern. Confer. Liquid Atomization and Spray Systems*, Tokyo, (1978), 325.
- 15) J. D. Trolinger *et al*, Holographic Techniques for the Study of Dynamic Particle Fields, *Appl. Optics*, 8—5, (1969), 957.
- 16) 辻内, ホログラフィ, 機械学会誌, 70—586, (昭42—11), 1658.
- 17) R. Bexon, Magnification in aerosol sizing by holography, *Jour. of Physic E: Scientific Instrum.*, **6**, (1973), 245.
- 18) J. D. Trolinger *et al*, Application of Electro-Optical Techniques in Diesel Engine Research, *SAE pap.*, 740125.
- 19) J. D. Trolinger, Particle Field Holography, *Optical Engineering*, **14**—5, (1975), 383.
- 20) R. Bexon *et al*, In line holography and the assessment of aerosols, *Optics and Laser Technology*, (1976), 161.
- 21) R. A. Brions *et al*, Holographic Microscopy, *Appl. Optics*, **17**—6, (1978), 944.
- 22) K. W. Pavitt, Holography of fast-moving cloud droplets, *Jour. of Physics E: Scientific Instrum.*, **3**, (1970), 971.
- 23) 諸隈, ホログラフィと顕微鏡, *応用物理*, **37**—6, (1968), 869.
- 24) 永井ほか, Maréchal 収差許容量による顕微鏡ホログラム系の解析, *応用物理*, **37**—6, (1968), 518., 同, **37**—11, (1968), 1009.
- 25) H. Royer, Holographic Velocimetry of Sub-micron Particles, *Optics Communications*, **20**—1, (1977), 73.
- 26) H. Royer, Particle Velocity Measurements Via High-Speed Holography, *Proc. 11th Intern. Congress on High Speed Photography*, London, (1974), 259.
- 27) 小野島ほか, 流動微粒子のホログラフィ測定技術の研究, 三菱重工技報, **12**—6, (1975), 26.
- 28) M. E. Cox *et al*, Image plane holograms for holographic microscopy, *Appl. Optics*, **17**—9, (1978), 1455.
- 29) 村田, ホログラフィ入門, (昭51), 朝倉書店.
- 30) 松下編, ホログラフィの基礎と実験, (昭54), 共立出版(株).
- 31) H. J. Gerritsen, Elimination of Speckle Noise in Holograms with Redundancy, *Appl. Optics*, **7**—11, (1968), 2301.
- 32) J. D. Trolinger, Application of generalized phase control during reconstruction to flow visualization holography, *Appl. Optics*, **18**—6, (1979), 776.
- 33) Y. Tsunoda *et al*, High-density image storage holograms by sampling and random phase shifter method, *Jour. Appl. Physics*, **44**—5, (1973), 2422.
- 34) J. D. Trolinger, Holographic Interferometry as a Diagnostic Tool for Reactive Flows, *Combustion Science and Technology*, **13**, (1976), 229.
- 35) 小沼, 噴霧火炎の計測, 機械学会関西支部, 第32回特別講義会テキスト, (昭53—5), 33.
- 36) A. Kleitz, Application de l'holographie ultrarapide à la détermination de la taille et de la vitesse des particules dans un écoulement diphasé, *La Houille Blanche*, **8**, (1973), 677.
- 37) C. E. Polymeropoulos *et al*, Measurement of Droplet Size and Fuel-Air Ratio in Spray, *Combustion and Flame*, **29**, (1977), 123.
- 38) 倉林, 内燃機関技術者のための液体の微粒化(5), *内燃機関*, **15**—13, (1976), 57.
- 39) T. Uyemura *et al*, Application of Pulse Laser Holography, *Proc. 13th Intern. Congress on High Speed Photography and Photonics*, Tokyo, (1978), 346.
- 40) 植村ほか, 高速微粒子の測定, 第25回応物講演会予稿集, (1978), 156.
- 41) T. Murakami *et al*, Laser Holographic Study on Atomization Processes, *Proc. 1st Intern. Confer. on Liquid Atomization and Spray Systems*, Tokyo, (1978), 317.
- 42) 村上ほか, ディーゼル機関用噴射ノズルによる燃料噴霧の写真観測, 機械学会内燃機関合同シンポジ

- ウム講演論文集, (昭54—8), 241.
- 43) R. A. Belz *et al*, In-Line Holography of Reacting Liquid Sprays, Proc. Engineer. Application of Holography, Los Angeles, (1972), 209.
- 44) 村上ほか, 波長が異なる二つのレーザーパルスによる微粒子のホログラフィ観測, 材料, 27—298, (昭53—7), 681.
- 45) T. J. Marcisz *et al*, The Holographic Investigation of a Hypersonic Target Material Subject to Impact with a Water Droplet, SPIE, Vol. 97, High Speed Photography, Toronto, (1976), 113.
- 46) M. E. Fourny *et al*, Aerosol Size and Velocity Determination via Holography, Review of Scientific Instrum. 40—2, (1969), 205.
- 47) J. M. Webster *et al*, Holographic Size Analysis of Burning Sprays, Combustion and Flame, 27, (1976), 395.
- 48) J. M. Webster *et al*, High-Speed Photographic and Holographic Studies of Burning Oil Droplets in Atomized Spray, 11th Intern. Congress on High Speed Photography, London, (1974), 501.
- 49) J. D. Trolinger *et al*, Coal particle Combustion studied by holography, Appl. Optics, 18—11, (1979), 1757.
- 50) 村上ほか, 噴霧燃焼のレーザインラインホログラフィ観測, 第16回燃焼シンポジウム前刷集, (昭53—12), 226.
- 51) W. Lauterborn *et al*, High Speed Holographic Photography of Cavitation Bubbles, SPIE, Vol. 97, High Speed Photography, Toronto, (1976), 96.
- 52) R. G. N. Hall *et al*, Recording rapid sequences of holograms, Jour of Physics E: Scientific Instrum., Vol. 3, (1970), 789.
- 53) J. W. C. Gates *et al*, High Speed Holographic Recording of Transilluminated Events, Proc. 9th Intern. Congress on High Speed Photography, Denver, (1970), 4.
- 54) 植村編, 画像計測入門, (昭54—5), 昭晃堂.
- 55) K. Iwata *et al*, Measurement of flow velocity distribution by means of double-exposure holographic interferometry, Jour. Optical Soc. America, 67—8, (1977), 1117.