

論文 レーザホログラフィ法による噴霧計測*

3D Spray Measurement System for High Density Fields Using Laser Holography

姉崎 幸信 調 尚孝 金原 賢治 佐藤 孝明

Yukinobu ANEZAKI Naotaka SHIRABE Kenji KANEHARA Takaaki SATO

A measuring technology to accurately analyze the process of disintegration into droplets is required in order to develop injection nozzles. The abilities required of a measuring device for spray droplets are: “the ability to measure the diameter of spray droplets in high-density fields”, “the ability to measure the structure of spray droplets in 3D”.

As a promising method to satisfy these requirements, the laser holography method has already been suggested. However, it has some drawbacks, such as the difficulty in measuring spray droplets in high-density fields. The authors have made some improvements to the optical system of recording. With these improvements, we have achieved a resolution of 5.3 μm or higher in a space corresponding to the engine cylinder (high temperature and high pressure) and a measuring accuracy of 0.16 μm in high-density fields.

In this paper, we report the analysis of droplet size of port fuel injectors and gasoline direct injectors, using the developed method.

Key words : Holography, Laser, Fan spray, Direct injection, Droplet size

1. はじめに

噴霧特性は、燃費・排気エミッションに影響を与える主要因である。特に直噴ガソリンエンジンでは筒内に直接燃料を噴射するため、噴霧特性が混合気形成およびエンジン性能に及ぼす影響は大きい。エンジンの燃焼コンセプトや運転条件に最適な状態で燃料を噴射するノズルの開発・噴霧の数値シミュレーション技術向上には、噴霧の分裂過程を正確に解析する計測技術が必要不可欠である。

噴霧特性を代表するものとして、噴霧形状・微粒化・燃料濃度がある。特に微粒化は噴霧の分裂状態を示す重要な因子であるため、Table 1に示すように光の干渉を利用したホログラフィ法、カメラによる直接撮影、噴霧粒子のドップラ信号を利用したPDPA法、

粒子の回折光分布から粒径分布を求めるレーザ光回折法など、幾つもの計測装置が開発されてきた。

これらの手法を比較してみると、ホログラフィ法以外は計測範囲が2mm以下と狭く、1回だけの噴射では噴霧全域の計測が不可能なことが分かる。また、噴霧粒子から発する信号(ドップラ信号、回折パターン)から粒径を計測するPDPA(Phase Doppler Particle Analyzer:位相ドップラ粒径測定装置)やレーザ光回折法は非球形粒子をノイズとして扱うため、非球形粒子の計測が困難である。これに対しホログラフィ法は1回の撮影で、噴霧全域における噴霧粒子1個1個の形状と空間分布が計測可能である。このため、瞬時の噴霧粒子の3次元空間分布や内部構造の解析が可能であり、噴霧粒子そのものが計測できるため噴霧粒径計測の原器として位置づけられている。しかし、ホログラフィ法をガソリン直噴インジェクタの噴霧計測に適用するには、“高密度領域の噴霧計測が困難”、“撮影は瞬時に終わるが、解析には多大な時間を要する”などの点が課題となっていた。

この問題を解決するため本論分では、撮影光学系の改良、自動解析装置の開発を試みた。撮影光学系には噴霧以外のノイズを除去するため、噴霧と噴霧を撮影する記録媒体の乾板との間にリレーレンズを設置し、レンズの焦点位置にピンホールを設けることで、噴霧中心部における噴霧の輪郭を鮮明に撮影することを可能とした。また、CCDカメラで撮影した噴霧粒子画

Table 1 Measuring methods of spray droplet

	Laser holography	Direct recording	PDPA	Fraunhofer diffraction method
Minimum measurable droplet	3.5μm (Theoretical value)	30 μm	1μm or less	5μm
Measuring area	whole spray	2x2mm	1droplet	φ2mm
3-D structure analysis of spray	good (Same spray)	poor	mediocre (Average value)	poor
measuring non-spherical droplets	good	good	poor	poor
Measuring time	mediocre	mediocre	mediocre	good

* SAEの了解を得て、SAE2002-01-0739を和訳、一部加筆して転載

Translated and reprinted with permission from SAE 2002-01-0739 (2002.3)(© 2002 Society of Automotive Engineers, Inc.)

像から輝度情報を利用し、CCDカメラの焦点面内にある粒子のみを抽出する自動解析装置を開発した。これにより噴霧粒子の識別確率が向上し、短時間で噴霧全域の解析が可能となった。

本論分では上記の改善項目に加え、精度検証結果およびポート噴射用インジェクタ、直噴ガソリン用インジェクタの解析事例についても報告する。

2. ホログラフィ法の原理

ホログラフィ法は、被写体の3次元情報が記録可能な写真撮影法の一つである。ホログラフィ法の撮影には、被写体に入射する光（物体光）と入射しない光（参照光）が必要であり、物体光と参照光の入射方法の違いからインライン法とオフアキス法に分類される。物体光と参照光が同一光路であり、物体光が参照光の役割も兼ねたものをインライン法と呼び、参照光と物体光が別光路であるものをオフアキス法と呼ぶ。一般に噴霧粒子計測には光学系の簡単なインライン法が用いられてきた¹⁾²⁾³⁾しかし、インライン法では噴霧粒子を透過しない光が参照光となるため、雰囲気密度や粒子密度が高い領域では鮮明な像が得にくい。そのため西田ら⁴⁾は、粒子密度が高い直噴スワール噴霧の解析をオフアキス法で実施している。本論分でも、光学系は複雑になるが“エンジン筒内環境下での計測”、“高密度領域の噴霧粒径計測”を可能にするため、オフアキス法を選定した。

Fig. 1にオフアキスホログラフィの原理を示す。ホログラフィ法は、撮影系と再生系の二つの光学系から構成される。撮影は、噴霧に照射した光と噴霧を通らない光を記録媒体である乾板上で交差させることで行う。このとき、物体光と参照光の光路差をレーザの可干渉距離内になるように調整すると乾板上に干渉縞が生じる。この干渉縞には噴霧粒子から伝播する光情報（輝度、光の方向）が含まれており、これを乾板に露光することで記録する。撮影した乾板は、通常の写真撮影と同じく現像処理を行う。

再生は、乾板の背面から光（再生光）を入射して行う。このとき再生光の入射角度を再生光と同一角度にすると、再生光は乾板に記録された干渉縞によって回折する。この回折により、再生光は撮影時の物体光と同一位相の光波面に変換され、噴霧像が空間に結像する。この再生像をCCDで拡大撮影し、粒子一粒ずつの粒径を測定する。粒子の3次元構造は、粒子の位置

情報をCCDの焦点位置から算出して求める。

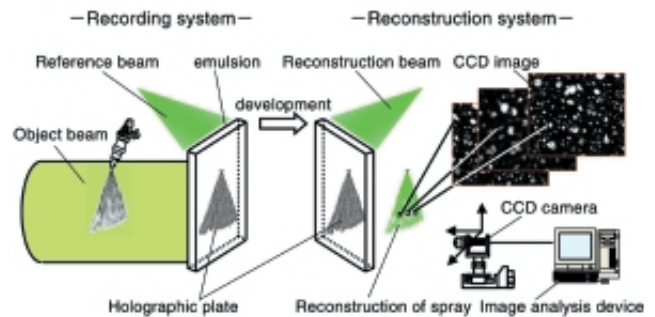


Fig. 1 Principle of holography

3. 実験装置

3.1 撮影光学系

Fig. 2に、本研究で用いたオフアキスホログラフィの撮影光学系を示す。光源にはパルスYAGレーザ（スペクトラフィジックス製 PIV200、波長532nm、出力200mJ）を用いた。レーザの発光期間は7nsと極めて短時間であり、噴霧の静止画像の撮影が可能である。レーザにはインジェクションシーダが設けられており、可干渉距離を0.01mから2mまで拡大することで、物体光と参照光の光路差が大きくなっても良好なホログラムの作成を可能とした。上記レーザから発振された光は、ビームスプリッタで物体光と参照光に分割される。物体光と参照光はそれぞれスペシャルフィルタでビームの強度分布を均一にされたのち、凸レンズで拡大平行光に変換される。光量は光路上に設けたNDフィルタで調整する。拡大平行光に変換された物体光は高温・高压容器内に噴射された噴霧を通過後、リレーレンズ系（凸レンズ×2枚 $f=150$ ）とピンホールで構成されるノイズフィルタでノイズを除去される。その後、噴霧を迂回した参照光と乾板（コニカ製 P5600B、分解能7000本/mm）上で交差し、干渉縞が乾板に記録される。乾板への物体光と参照光の入射角度は回折効率が最大となる 90° と 45° とした。

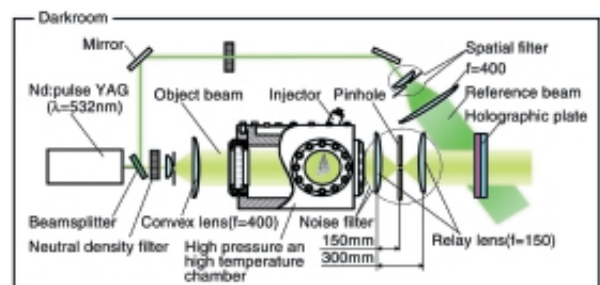


Fig. 2 Recording optical system

高温・高圧容器は2.1kWのヒータと断熱材が内蔵し
てあり、250 までの昇温が可能である。容器内には
ファンを設置し、雰囲気を攪拌することで温度むら
を±5 以内に維持している。容器の観察窓径は 90、
内部の寸法は110mm(H)×380mm(W)×200mm(D)で
ある。容器内圧は窒素ガスを充てんすることで、
0.9MPaまでの加圧が可能である。また、本研究では
容器内にピストンを模擬した平板を設置することで、
壁面衝突噴霧の計測も実施した。

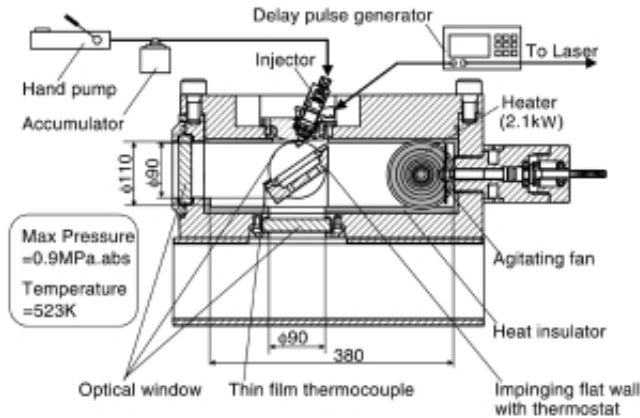


Fig. 3 High pressure and high temperature chamber

燃料の加圧は手押しポンプとアキュムレータで行った。供試燃料はn-ヘプタンを使用し、噴射期間と撮影タイミングはディレイパルスジェネレータ (Stanford Research System製 DG535, 横河製) により任意に設定が可能である。

3.2 再生光学系

撮影した乾板は通常の写真と同様に現像・定着・漂白処理を実施し、Fig. 4に示す光学系で再生する。再生は連続発振のYAGレーザー (スペクトラフィジックス製 Millenniums, 波長532nm, 出力500mW) を使用した。レーザーから発振した光は撮影時と同様にスペシヤルフィルタと凸レンズで拡大平行光に変換後、撮影時の参照光と正反対の方向から乾板に入射される。これにより噴霧の再生像 (実像) は、撮影時と同じ位置に再生される (この手法を位相共役再生と呼ぶ)。

次に、再生像を10倍の顕微鏡用対物レンズを取りつけたCCDカメラ (東芝製, IK-SM43H) で拡大撮影し、噴霧粒子画像をパソコンに取り込む。乾板とCCDカメラは、それぞれ自動パルスステージ (シグマ光器製, CTS-100) に設置することで、乾板はX-Z平面上(上下

左右)、CCDカメラはY方向 (奥行き) の任意の位置に移動可能である。これにより噴霧再生像とCCDの相対位置を変更することで、再生像全域の噴霧粒子をスキャンした。CCDカメラの視野範囲は1×1.5mm、被写界深度は0.3mmであるため、1ヶ所あたりの測定体積は1×1.5×0.3mmとなる。噴霧粒径は、噴霧粒子画像から画像解析装置 (Media Cybernetic製, Image Pro) で粒子の等価円直径を求めることで行った。また、粒子の位置はCCDと乾板の相対距離から求めた。この装置により1回の噴射だけで、噴霧全域における噴霧粒径の空間分布計測が可能である。

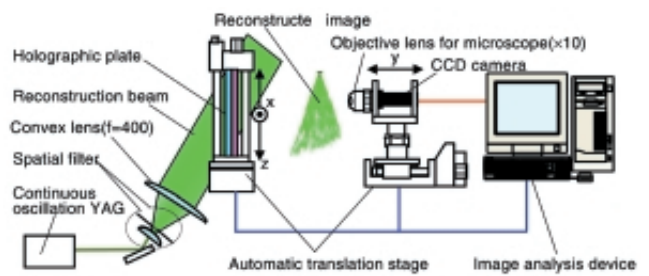


Fig. 4 Reconstruction optical system

4 . ホログラフィシステムの改善

4.1 撮影光学系

撮影光学系では、噴霧全粒子に対して粒子一粒ずつ干渉縞を記録する。そのため、粒子密度が高い領域では乾板の分解能への負担は大きい。乾板の分解能の負担低減には、粒子の干渉縞の間隔を広くする方法と粒子以外から発する光を記録しない方法がある。

粒子の干渉縞の間隔を広くするには、西田ら⁴⁾のようにリレーレンズを撮影時に用いないことで噴霧と乾板の距離を大きくし、粒子からの散乱光を拡大させて乾板に記録する方法がある。但し、粒子の散乱光強度は距離の2乗に比例して減衰するため、この方法では散乱光強度の減衰が大きくコントラストが低下する懸念がある。また、散乱光の拡散により干渉縞の直径も大きくなるため、粒子の高密度領域では干渉縞同士が重なり合うことで精度が低下する可能性がある (Fig. 5)。

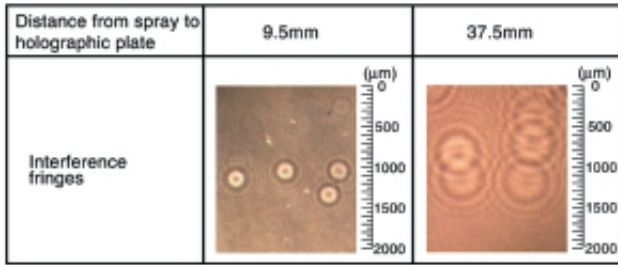


Fig. 5 Influence of distance from spray to holographic plate

これに対し、Katzら⁵⁾はピンスポットで粒子以外から発する光を記録しない方法を提案している。Katzらは凸レンズ2枚で構成されているリレーレンズ系のうち、噴霧側の凸レンズの焦点にピンスポットを設置し、粒子を通過しない物体光を除去することで乾板の分解能への負担を低減している。この方法はリレーレンズにより噴霧像を乾板の近傍に結像するため、散乱光強度の距離減衰が生じない。しかし、ピンスポットは物体光のうちの平行光成分のみしか除去できないため、この手法では高温・高压容器内でのハレーション、光学部品に付着した埃・傷による回折光、レンズ、NDフィルタの反射光などの外乱光は除去できない。

そこで本研究では、光の距離減衰の防止と上記外乱光の除去の両立を図るため、リレーレンズとピンホールで構成されるノイズフィルタを考案した。Fig. 6にその原理を示す。一般に凸レンズで平行光を集光すると焦点に集光するが、点光源（散乱光）は焦点に集光しない。この原理を利用し、リレーレンズ系の噴霧側凸レンズの焦点位置にピンホールを設置することで、平行光ではない外乱光の除去を行った。但し粒子の散乱光も平行光ではないため、ピンホール径を粒子の散乱光のみが通過できるように設定する必要がある。そのためピンホールを円形開口と見なし、ピンホール径を円形開口におけるフラウンホーファの回折の式 (Eq. 1) から求めた。

$$D = \frac{\lambda \cdot f}{\pi \cdot d} \dots \text{Eq.1}$$

λ : Wave length
 f : focal length
 d : droplets size

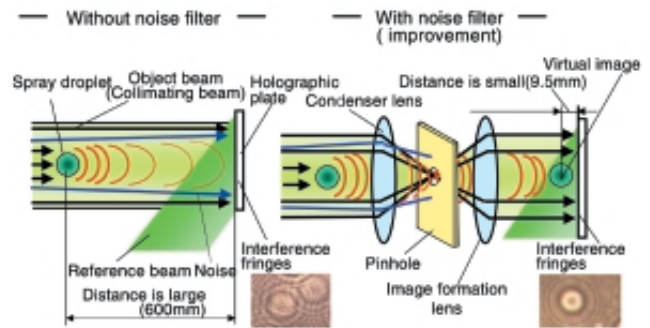


Fig. 6 Principle of noise filter

4.2 自動解析システム

本研究では計測時間の短縮を図るため、CCDカメラの移動から、画像の取り込み、粒径解析までを自動で行う自動解析システムを構築した。自動解析を実現するために、CCDカメラの焦点面内にある粒子と焦点外の粒子の識別、およびCCDカメラの位置によって生じる粒子輝度の減衰補正、バックグラウンドノイズ除去のアルゴリズムを開発した。Fig. 7に噴霧粒子の再生像を示す。CCDカメラの焦点深度内にある粒子は輪郭がシャープに映っているが、焦点から外れた粒子は輪郭がぼけて映っている。

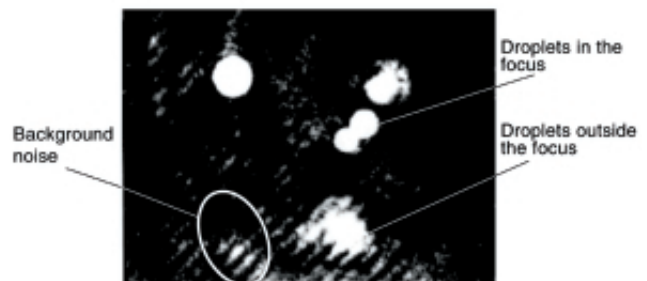


Fig. 7 Reconstructed image of spray droplets

Fig. 8に、CCDカメラをY（奥行き）方向に移動させて同一粒子を撮影したときの粒子の輝度率（輝度/最大輝度）と、CCDカメラの移動距離の関係を示す。粒子の輝度率は、CCDカメラの焦点内で極大値を取り、焦点外ではある一定値（しきい値）以下となっている。またバックグラウンドノイズの輝度は、CCDカメラの位置に関係なく、しきい値以下であった。よって、あるしきい値以上の粒子を抽出することで、焦点面内の粒子のみの識別が可能である。しかし、このしきい値はFig. 8で示すように、粒子の最大輝度により変化する。このため、粒子の最大輝度としきい値の関係を実験で求めた。その結果、しきい値は最大輝度と

1次関数の関係であった (Fig. 9) . 本研究では、これらの現象から粒子の識別アルゴリズムを構築し、自動解析システムを完成させた .

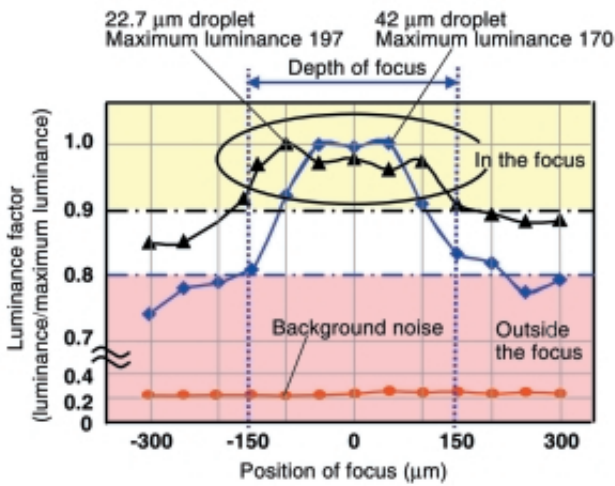


Fig. 8 Relationship between the luminance factor and position of focus

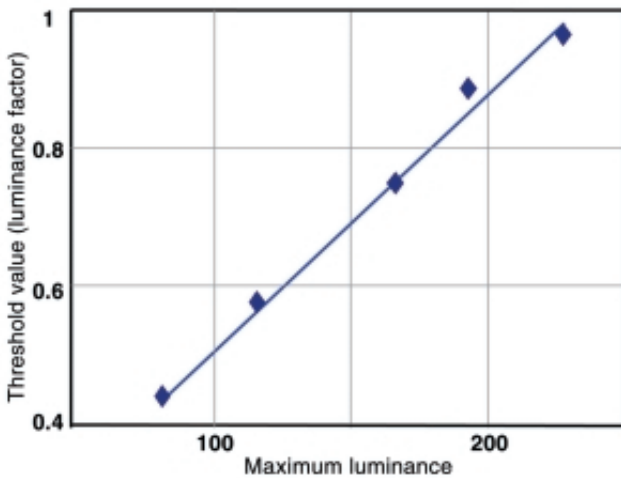


Fig. 9 Relationship between the maximum luminance and the threshold value

5 . 精度検証

5.1 供試物体による検証

最小分解能の検証として、直径が $5.3\ \mu\text{m}$ のワイヤをホログラフィ法で計測した . その結果をFig. 10に示す . ホログラフィ法で計測したワイヤの平均径は $6.0\ \mu\text{m}$ であり、誤差は $0.7\ \mu\text{m}$ であった .

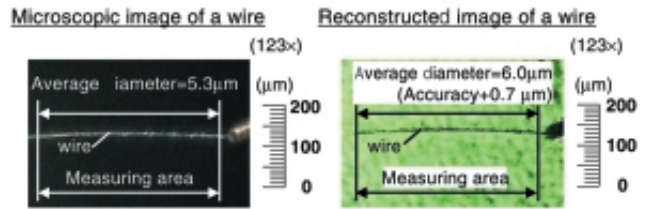


Fig. 10 Accuracy verification of minimum resolution

次に高密度領域での精度検証として、噴霧内に設置したワイヤを計測した . インジェクタはファン噴霧直噴ガソリンインジェクタを用いた . Table 2に実験条件を示す . ワイヤは噴孔から 30mm 下方に設置した . PDPA法で計測した結果、この位置での燃料濃度は $0.002\text{cm}^3/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ である . Fig. 11に結果を示す . ワイヤ平均径 $58.25\ \mu\text{m}$ であるのに対し、噴霧内のワイヤをホログラフィで計測した結果は $58.09\ \mu\text{m}$ (誤差： $0.16\ \mu\text{m}$)であった . 以上より、ガソリン直噴インジェクタ噴霧のように粒子密度が高い領域でも、高精度で計測可能であることが確認できた .

Table 2 Test condition for accuracy verification in high density fields

Injector type	Fan spray injector (prototype)
Fuel	N-heptane
Fuel pressure	13MPa
Injector quantity	15.9mm ³ /str
Ambient pressure	0.1MPa.abs
Ambient temperature	Room temperature
Laser firing time	1.0ms from start of injection

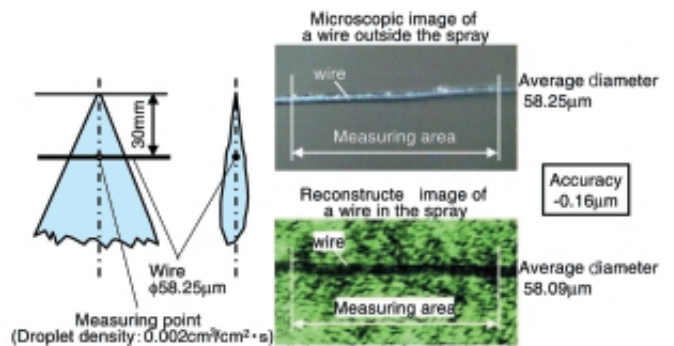


Fig. 11 Accuracy verification in high density fields

噴霧のように多数の液滴群の計測への適用性を調べるために、レチクルによる精度検証を実施した。レチクルとはガラス基板の両面に、円形のクロム薄膜を噴霧とほぼ同じ粒子密度となるように蒸着したものである。Fig. 12にホログラフィ法と顕微鏡で計測したレチクルの粒度数分布を示す。両計測手法の粒径分布は傾向がほぼ一致しており、ザウター平均粒径 (Sauter Mean Diameter, 以下SMD) もホログラフィ法: 48.6 μm, 顕微鏡計測: 48.8 μmと精度0.4%と高い精度で計測できることを確認した。

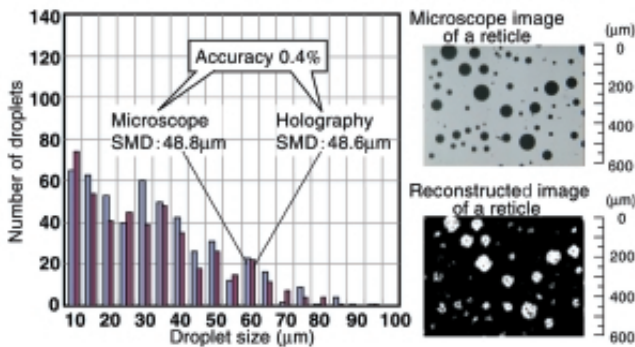


Fig. 12 Accuracy verification using a reticle

5.2 他の計測手法との比較

5.2.1 カメラによる直接撮影との比較

実噴霧計測への適応性を調べるため、噴霧計測に一般に使用されている手法であるカメラでの直接撮影法とPDP法との比較を実施した。

カメラによる直接撮影法との比較として、ポート噴射インジェクタの噴霧計測を行った。直接撮影法では粒子密度の高い直噴インジェクタ噴霧の解析が困難なため、ポート噴射インジェクタを選定した。実験条件をTable 3に示す。インジェクタは多孔(12孔)インジェクタを用いた。燃料の噴射圧力は500kPa, 雰囲気圧力は0.1MPa.absである。撮影時期は噴射開始後7ms, 測定位置は噴孔から50mm下方である。ホログラフィ法の計測領域は高さ1.0mm, 幅50mm, 奥行き方向に40mmでCCDカメラ(視野範囲1mm × 1.5mm)を2mm間隔で移動させてスキャンした (Fig. 13)。カメラによる直接撮影の視野範囲は高さ3mm, 幅4mmである。

Fig. 14に粒度分布を示す。両計測とも40と60 μmにピークがあり、粒度分布は同様の傾向を示す。SMDは直接撮影法が71.7 μm, ホログラフィ法は70.3 μmとほぼ同じ値を示した。以上より、本装置は噴霧解析

に対しても十分な精度で計測可能であると判断できる。Fig. 15に同一噴霧におけるポート噴射インジェクタの水平方向断面でのSMD分布を示す。Fig. 15より、噴霧外縁に比べ中心部に大きな粒子が存在していることがわかる。ホログラフィ法は3次元計測が可能であるため、粒子の空間分布の特徴を容易に把握できる。

Table 3 Test condition for port fuel injector

Injector type	Multi-holes Injector
Fuel	N-heptane
Fuel pressure	500kPa
Injector quantity	4.9mm ³ /str
Ambient pressure	0.1MPa.abs
Ambient temperature	Room temperature
Laser firing time	7.0ms from start of injection

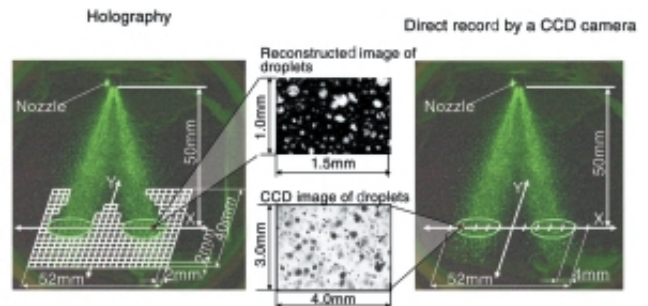


Fig. 13 Measuring point for a port fuel injector

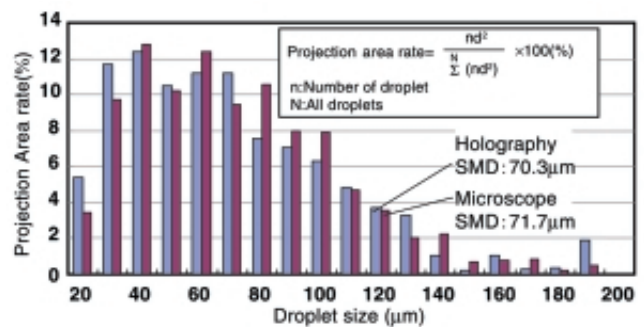


Fig. 14 Comparison of droplet size distributions among holography and direct recording

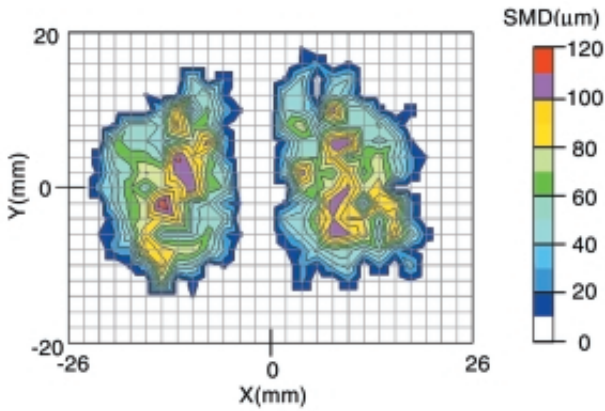


Fig. 15 SMD distribution of a port fuel injector

5.2.2 PDPAとの比較

次に高密度噴霧での精度検証として、直噴インジェクタ噴霧を計測しPDPAと比較した。計測条件は燃圧13MPa、霧田気圧0.21MPa.abs、インジェクタはファン噴霧インジェクタとした (Table 2)。ホログラフィ法の撮影は噴射開始1ms後に行った。測定位置は、X座標を噴霧中心と外縁の2ヶ所とし、Y座標を噴霧厚み方向の中心軸上、Z座標を噴孔から30mm下方とした (Fig. 16)。PDPAは単発噴射ではサンプリング粒子数が少ないため、10Hz間隔で200回噴射して計測した。ホログラフィ法のサンプリング粒子数は噴霧中心で45、外縁部で59なのに対し、PDPAは232と104である。

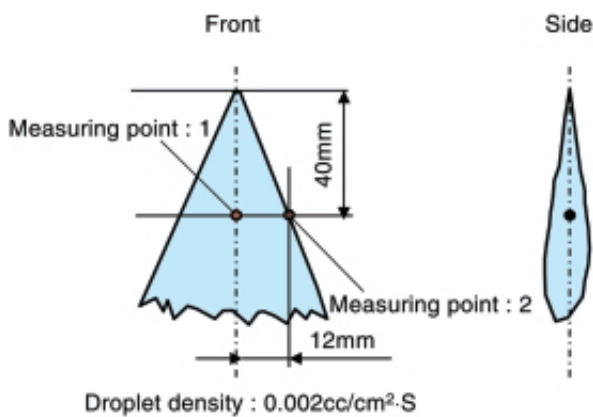


Fig. 16 Measuring point for a fan spray

粒度分布をFig. 17に示す。両計測とも、噴霧中心・外縁ともに粒径が20 μm付近にピークがあり、分布も似たような形状を示す。しかしホログラフィ法の結果には、PDPAでは検出されない140 ~ 65 μm以上の粒子が存在している。これは、PDPAで計測する際に

ノイズとして除去する非球形粒子だと考えられる。

Fig. 18に、粒度分布から求めたRosin-Rammler線図を示す。ホログラフィ法のRosin-Rammler線図は直線となり、粒度分布は良好な正規分布を示す。これに対し、PDPAは40 μm以下ではホログラフィ法と同様の特性を示すが、40 μmに変極点が存在する。PDPAの粒度分布には40 μm以上の粒子は検出されていないが、100 μm以上の粒子が存在する。PDPAではサンプリング数を補うため、燃料を数回噴射して計測する。これにより噴孔端部に燃料が付着し、噴射に伴い噴霧によって引き切られた燃料を検出したと考えられる。

上記のワイヤ計測、他の計測手法との比較結果から、本装置はガソリン直噴噴霧計測を十分な精度で解析が可能であると言える。

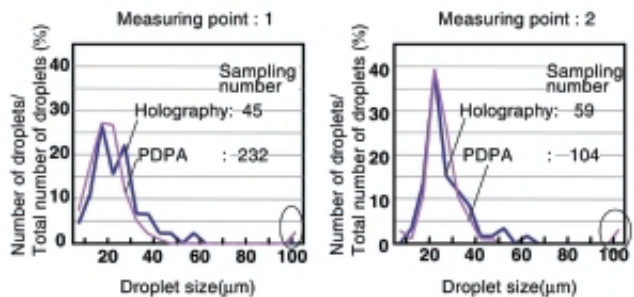


Fig. 17 Comparison of droplet size distributions among holography and PDPA

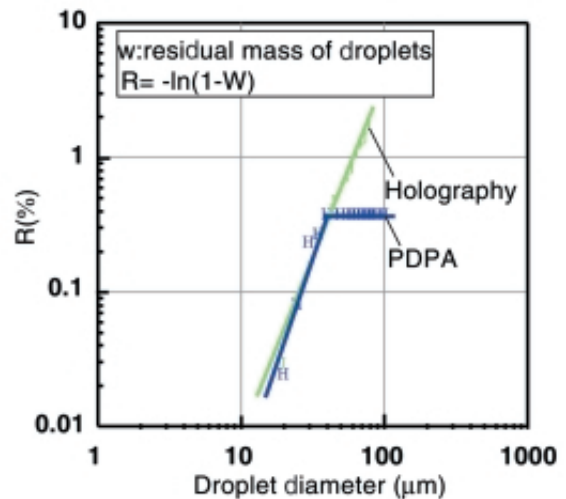


Fig. 18 Rosin-rammler diagram

6 . 直噴インジェクタ解析

6.1 ファン噴霧の粒径分布

本計測システムを直噴噴霧計測に適用した例を以下に示す．供試インジェクタはファン噴霧インジェクタのプロトタイプを使用した．噴孔諸元をFig. 19に示す．サック径および噴孔幅は1.0mm, 0.185mmである．噴孔中心軸はインジェクタ中心軸に対して横方向にオフセットがある．実験は燃圧13MPa, 雰囲気気圧0.21MPa. abs, 撮影時期は噴射開始後1.0msの条件で行った．実験条件をTable 4に示す．測定位置は噴孔から30と40mm下方とした．噴霧厚み方向の中心軸上を2mm間隔で幅32mmの範囲についてCCDでスキャンを行った (Fig. 20)．1画像内 (1mm × 1.5mm) の粒子数は, およそ50 ~ 200個である．測定の結果, 噴孔から30mm下方, 40mm下方ともに, 噴霧中心にくらべ外縁部のSMDが大きいことが分かる (Fig. 21)．

Table 4 Test condition for direct injector

Injector type	Fan spray injector (prototype)
Fuel	N-heptane
Fuel pressure	13MPa
Injector quantity	24mm ³ /str
Ambient pressure	0.21MPa.abs
Ambient temperature	Room temperature
Laser firing time	1.0ms from start of injection

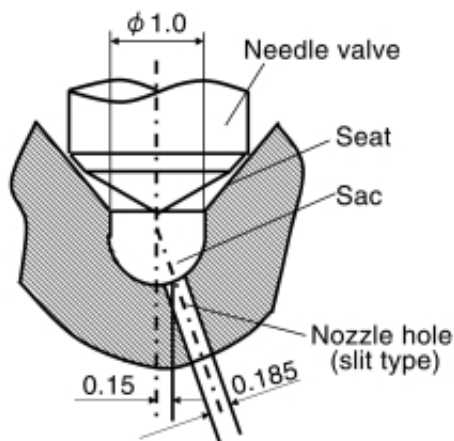


Fig. 19 Nozzle geometries

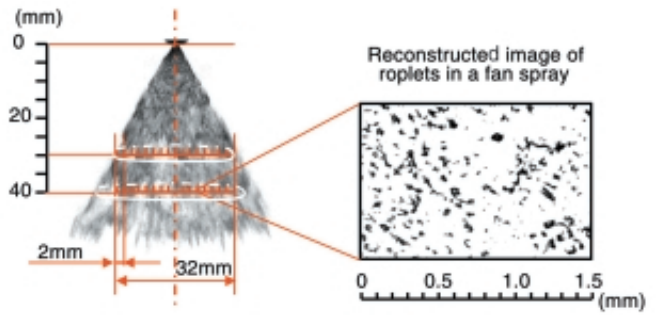


Fig. 20 Measuring point

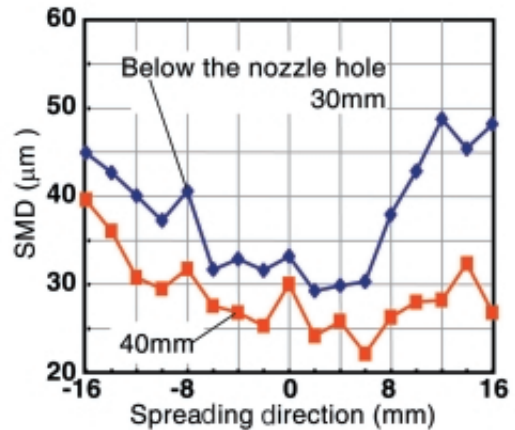


Fig. 21 SMD distribution of fan spray

6.2 平板衝突噴霧解析

最後に筒内環境における噴霧解析として, ピストンを模擬した平板に衝突する噴霧の計測例を示す．実験条件は, 雰囲気気圧0.3MPa, 雰囲気気温度206 , 平板温度130 である (Table 5)．上記条件は, エンジン実機における1200r/min, 37Nmのアイドル条件相当の値である．インジェクタと平板の位置関係と測定位置をFig. 22に示す．なお, インジェクタは5.1.の自由噴霧計測で使用したものとした．(Fig. 19)

Table 5 Test condition for impinging spray

Injector type	Fan spray injector (prototype)
Fuel	N-heptane
Fuel pressure	11MPa
Injector quantity	13.6mm ³ /str
Ambient pressure	0.3MPa.abs
Ambient temperature	479K
Wall temperature	403K

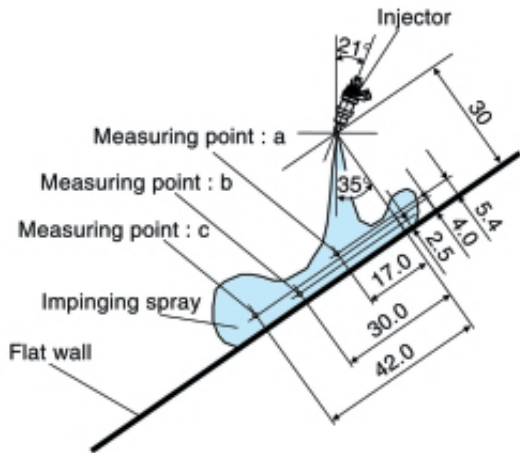


Fig. 22 Impinging condition and measuring point

Fig. 23に平板衝突噴霧の散乱光写真とSMD, 噴霧粒径の度数分布を示す. 同一測定位置でのSMDを比較すると, 時間の経過と共にSMDは大きくなる. 度数分布については, 時間の経過と共に $20\mu\text{m}$ 程度の粒径は減少するが, $40\mu\text{m}$ 以上の粒子数には変化があまりないことが分かる. 以上から, 噴霧が壁面に衝突すると壁面から熱を授与し小粒子は蒸発するが, 大粒子は蒸発しきれずに残留するため, SMDは見かけじょう大きな値を示すと考えられる. また噴霧先端部におけるSMDの時間変化に着目してみると, 同様に大粒子が残留していることが分かる.

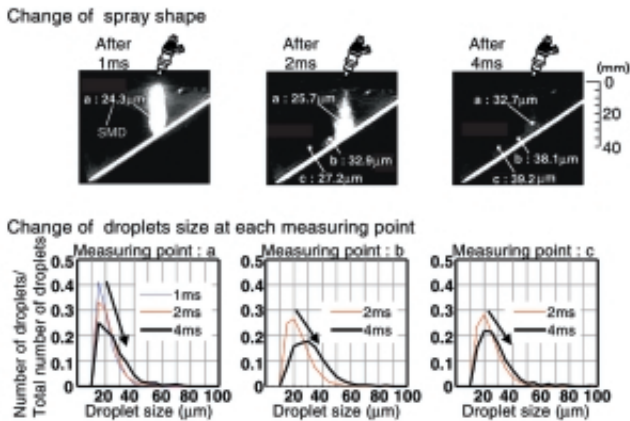


Fig. 23 Droplet size distribution of impinging spray

7. おわりに

本研究では, 噴霧解析手法としてホログラフィ法による噴霧粒径計測装置を開発した. この装置は従来の撮影光学系に, リレーレンズとその中心位置にピンホールを設置したノイズ除去機構を組み込むことで, 噴霧粒子以外のノイズを除去し良好なホログラムの撮影を可能とした. また, 再生系にはCCDカメラの焦点面内にある粒子と焦点面外の粒子を輝度変化により自動識別するアルゴリズムを構築することで, 解析時間の短縮を図った.

以上の改良を実施することで, 計測範囲: $5.3\mu\text{m}$ 以上, 高密度領域での精度: $0.16\mu\text{m}$ (ワイヤ計測時), 噴霧と同等の分布を持ったクロム円盤(レチクル)のSMDを0.4%の精度で計測可能となった.

上記計測装置をファン噴霧直噴インジェクタの自由噴霧解析に適用した結果, 噴霧中心部にくらべ外縁部に大きな粒子が分布していることがわかった. また, ピストンを模擬した平板に噴霧を衝突させ, 衝突前後の粒径を計測した結果, 噴霧が壁面に衝突すると小粒子は蒸発し, 大粒子は蒸発しきれずに残留するため, SMDは見掛け上, 大きくなることが分かった.

8. 謝辞

多大なご協力を頂いたトヨタ自動車殿に厚く感謝の意を表します.

<参考文献>

- 1) M. Masuda, H. Yano, T. Aoki, K. Matsuo: " Particle Sizing with Inline Laser Holography using an Ultraviolet Laser "; Journal of the visualization society of Japan, Vol18 (1998) pp71-72 .
- 2) H. Meng, J. Estevadeordal, S. Gogineni, L. Goss, W. M. Roquemore: " Holographic Flow Visualization as a tool for studying 3D Coherent Structures and Instabilities "; Proceedings of The Second International Workshop on PIV ' 97-Fukui (1997) pp.27-34 .
- 3) H. Meng, F. Hussain: " In-Line recording and Off-axis viewing technique for holographic particle velocimetry "; Applied Optics Vol.34, No.11 (1995) pp.1827-1840 .

4) M. Yamakawa, K. Nishida, M. Kamikawa, T. Yoshizaki, H. Hiroyasu: " Development of Three Dimensional Measurement System for Droplet Size Distribution via Pulsed Laser Holography Method ", Journal of the ILASS-Japan, Vol.8, No.23 (1999), pp.130-137 .

5) J. Zhang, J. Katz, " Off-axis HPIV with Forward Light Scattering from Particles ", ASME 1994, FED-Vol.191 (1994), pp.173-177 .



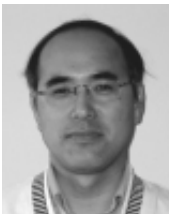
< 著 者 >



姉崎 幸信
(あねざき ゆきのぶ)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の受託研究に従事



調 尚孝
(しらべ なおたか)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の受託研究に従事



金原 賢治
(かねはら けんじ)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の受託研究に従事



佐藤 孝明
(さとう たかあき)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の受託研究に従事