



# ディーゼル噴霧の運動量計測による壁面衝突噴霧の挙動解析

## Using the Diesel Spray Momentum Measurement to Analyze the Wall Impinging Spray Behavior

友松 健一\*, 戸田 直樹, 池本 雅里  
 (Kenichi TOMOMATSU) (Naoki TODA) (Masato IKEMOTO)  
 (株) SOKEN (株) SOKEN トヨタ自動車 (株)  
 (SOKEN, INC.) (SOKEN, INC.) (TOYOTA MOTOR CORPORATION)

In diesel engine, it has become more important to analyze the spray characteristics after impinging on the combustion chamber wall for reducing the soot emission and the fuel consumption. It is known that the spray momentum is a significant characteristic of the air entrainment and the mixture formation process at the combustion chamber. It is required two measurements to clarify a relationship between the spray momentum and the wall impinging spray behavior. One is the spray momentum which is measured by a force sensor, and the other is the spray visualization at the 2D combustion chamber. The spray momentum is changed by the nozzle-hole shape and the rail pressure.

Keywords: Diesel Spray, Spray Momentum, Spray Distribution, Spray Impingement, Combustion Chamber Wall

### 1. はじめに

排気・燃費規制の強化に対応するため、内燃機関にはクリーンかつ高効率な燃焼が求められる。ディーゼルエンジンにおいては、コモンレールシステムによる噴射圧の高圧化やインジェクタの高応答化により噴霧の混合気形成を改善し、スモーク抑制や燃費向上に取り組んでいる。噴霧は周囲の空気を噴霧内部へ取り込む際、噴霧と空気が運動量交換を行い噴霧自身の運動量が減衰する<sup>(1)</sup>。趙らは噴霧運動量が噴射率や噴孔間・噴射間のばらつき、噴霧内部構造の解析に活用できることを報告している<sup>(2)~(6)</sup>。また一方で、燃費向上を目的としたダウンサイジングにより燃焼室が小型化され、噴霧は燃焼室壁面に衝突しやすくなり、衝突後の噴霧挙動が燃焼に与える影響は大きくなっている。江原らは噴霧と壁面間の距離や角度が壁面衝突後の噴霧到達距離に与える影響<sup>(7)</sup>を、志茂らは壁面衝突後の噴霧流動の強化により Soot が低減する効果<sup>(8)</sup>を報告しており、燃焼室壁面衝突後の噴霧挙動に噴霧運動量が関与していると考えられるが、そこに言及している文献は少ない。

本報では、燃焼室壁面に衝突する噴霧挙動を噴霧運動量によって明らかにするため、噴霧運動量を計測可能な装置と、燃焼室縦断面形状を模した 2 次元燃焼室の噴霧形状を可視化可能な装置を準備した。本装置を用いてノズル形状と噴射圧によって噴霧運動量を変化させ、燃焼室壁面衝突後の噴霧形状に与える影響を調査した。

### 2. 実験装置と条件

#### 2.1 噴霧運動量計測

噴霧運動量計測装置を図 1 に示す。噴霧の運動量（衝突力）は力センサ（Kistler 9215A）によって計測する。実機に近い密度環境場で計測するため、力センサ及び力センサ受圧部を Ar ガスが充填できる定容容器内に配置した。多噴孔ノズルのうち、

任意の 1 噴孔から噴射された噴霧を力センサ受圧部にて受け止め、力センサにより衝突力  $F$  として出力する。式 (1), (2) に示す運動の第 2 法則より衝突力  $F$  は噴霧の単位時間当たりの運動量変化となり、衝突力  $F$  の時間積分  $\int F dt$  により噴霧質量  $m$  と噴霧速度  $v$  の積である噴霧運動量  $P$  を算出できる。

噴霧と力センサの構成を図 2 に示す。噴霧運動量計測には噴霧中核の運動量計測と噴霧内部の運動量分布計測を行う<sup>(5)</sup>。噴霧中核の運動量計測ではノズルから力センサ受圧部までの距離  $X_f$  を変えながら噴霧運動量の変化を計測し、噴霧内部の運動量分布計測では力センサ受圧部の外周をセパレータで囲み、力センサ受圧部範囲外の噴霧が力センサ本体に衝突しないようにし、噴霧軸中心から力センサを上下方向へオフセットし多点で計測を行う。噴霧中核の運動量計測では、 $X_f=5\sim 20\text{mm}$  において噴霧に対し力センサ受圧部径  $D_f$  が過大になると力センサの受圧部の面上に噴流による渦が発生し、渦による負圧の影響を受け衝突力波形が正確に計測できないことが分かっている<sup>(4)</sup>。そこで本報では渦の発生による影響が小さい  $D_f=5\text{mm}$  を設定し、噴霧中核の運動量計測を実施する。また、分布計測の  $D_f=1\text{mm}$  とする。

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \tag{1}$$

$$\int F dt = mv = P \tag{2}$$

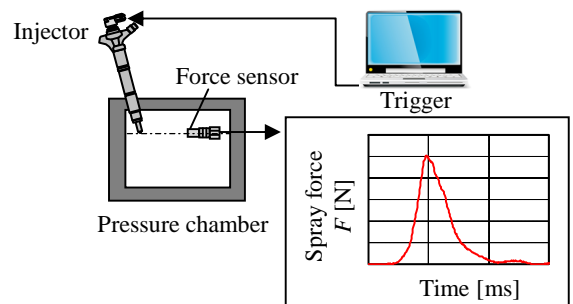


Fig.1 Experimental apparatus (spray force)

原稿受付：2017 年 5 月 29 日

\* 責任著者：正会員、(株) SOKEN

(〒445-0012 愛知県西尾市下羽角町岩谷 14 番地)

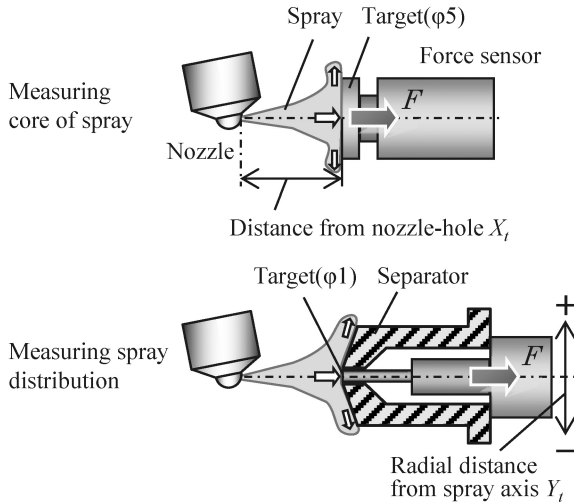


Fig.2 Measurement of spray momentum

2.2 噴霧形状可視化

全噴孔の自由噴霧形状を可視化する装置を図3に示す。実機に近い密度環境場で計測するため、Ar ガスが充填できる定容容器内にインジェクタから噴射された噴霧を高速カメラ (Photron 製 FASTCAM SA1.1, 撮影速度 20000fps, 最大解像度 512×512pixel) と反射式シャドウグラフ法により撮影し可視化する。本計測ではキセノン光源からの連続光を小径アchromaticレンズで拡大した後、大径アchromaticレンズで平行光にし、容器下面の可視化窓から容器へ導く。噴霧で減衰され容器内のミラーで反射し再度噴霧で減衰した光を、ハーフミラーを介し高速カメラで撮影する。

燃焼室内における噴霧形状を可視化する装置を図4に示す。図3で示した装置の定容容器内に燃焼室縦断面形状を模した2次元燃焼室を配置し撮影する。ノズル外周に1噴孔分のみスリットが開いているセパレータを装着し、任意の1噴孔以外の噴霧の飛散方向を可視化範囲外(図4のA-A断面左側)へ転換させ、任意の1噴孔の噴霧形状のみを可視化する。隣接する噴霧が無く噴孔間での周辺空気を取り合いが無くなるため、多噴孔での噴霧形状とは異なることが考えられるが、本報では1噴孔の噴霧形状での相対比較で検討する。

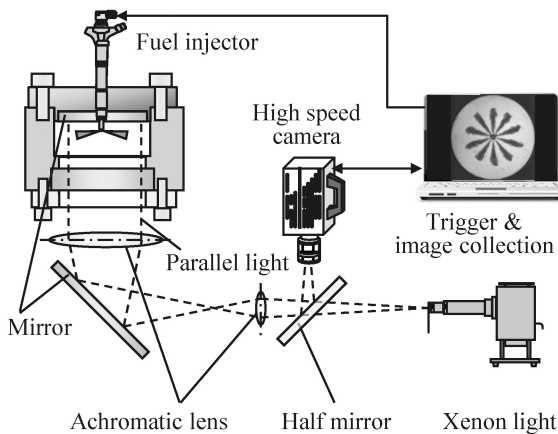


Fig.3 Experimental apparatus (spray visualization)

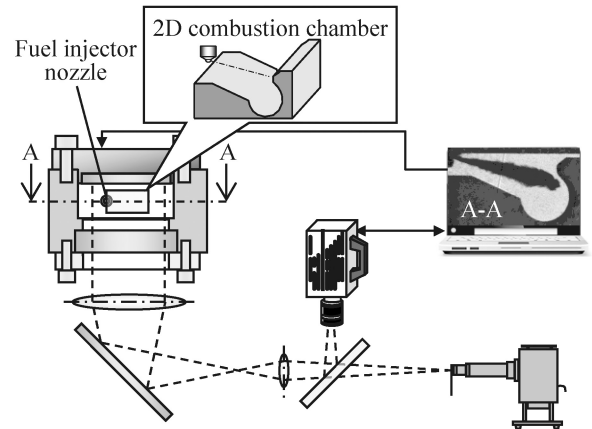


Fig.4 Experimental apparatus (spray visualization at the 2D combustion chamber)

2.3 ノズル諸元

表1にノズル諸元を、図5にノズル噴孔の断面形状を示す。本試験はデンソー製ピエゾインジェクタを使用する。噴射率形状を合わせた条件で噴霧形状を変えて燃焼室壁面に到達する噴霧運動量を変化させるため、噴孔流量  $q_f$  (at  $P_c=9.81\text{MPa}$ ) を合わせ噴孔長  $l$  の短縮による広角低貫徹化や、式(3)により表されるテーパ率  $\beta$  の増加による狭角高貫徹化を狙った4諸元のノズルにて試験を行う。噴孔長が短くテーパ率の小さいノズルAは広角低貫徹噴霧、噴孔長が長くテーパ率の大きいノズルDは狭角高貫徹噴霧を狙いとす。また、ノズルB及びCはノズルAとノズルDの中間の噴霧を狙った諸元とした。

$$\beta = \frac{d_i - d_o}{l} \times 100 \quad (3)$$

Table 1 Properties of experimental nozzle

| Nozzle             |                              | A     | B   | C   | D   |
|--------------------|------------------------------|-------|-----|-----|-----|
| Hole number        | $n$ [-]                      | 10    |     |     |     |
| Hole diameter      | $d_o$ [mm]                   | 0.120 |     |     |     |
| Flow rate of holes | $q_f$ [cm <sup>3</sup> /min] | 900   |     |     |     |
| Hole length        | $l$ [mm]                     | 0.5   | 0.8 | 0.5 | 0.8 |
| Cone angle         | $\alpha$ [°]                 | 155°  |     |     |     |
| Taper rate         | $\beta$ [%]                  | 1.5   | 3   | 2.5 |     |

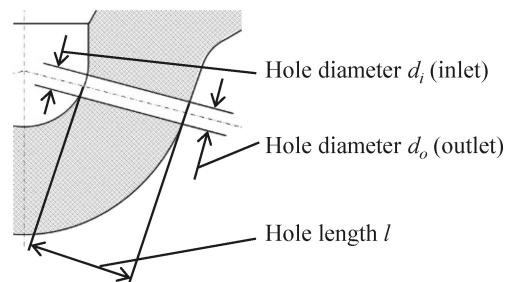


Fig.5 Detail drawing of nozzle-hole

2.4 試験条件

表2に試験条件を示す。軽・中負荷に相当の高密度場とし、噴霧運動量を変化させるために噴射圧  $P_c$  は2水準、燃焼室はリエントラント形状とする。

Table 2 Properties of experimental condition

|                     |                               |            |
|---------------------|-------------------------------|------------|
| Injection pressure  | $P_c$ [MPa]                   | 80, 120    |
| Injection quantity  | $Q$ [mm <sup>3</sup> ]        | 18         |
| Ambient density     | $\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 15         |
| Ambient temperature | $T_a$ [K]                     | 293        |
| Ambient gas         |                               | Ar         |
| Target diameter     | $D_t$ [mm]                    | 1, 5       |
| Cavity shape        |                               | Re-entrant |

3. 結果および考察

3.1 噴霧運動量計測による噴射率計測

任意の1噴孔の噴射率  $q_a$  は式(4)に示すように噴霧衝突力  $F$ 、縮流係数  $c$ 、1噴孔断面積  $A_a$ 、燃料密度  $\rho_f$  で構成され、噴霧運動量計測によって求められる噴霧衝突力  $F$  の0.5乗に比例する(3),(5)。

$$q_a = \frac{dQ_a}{dt} = \sqrt{\frac{F \cdot c \cdot A_a}{\rho_f}} \quad (4)$$

噴霧中核の運動量計測 ( $X=4\text{mm}$ ) により求めた噴射開始後 (ASOI, After Start Of Injection) の噴孔噴射率の波形を図6に示す。なお、本計測のみ霧囲気密度は  $1.6\text{kg/m}^3$  として計測した。また、任意の1噴孔の噴射量  $Q_a$  と、噴射率  $q_a$  の積分値が等しくなることから、各噴射条件における縮流係数  $c$  を設定している。同じ噴射圧では狙い通りノズル間での噴孔噴射率形状に差がないことを確認した。以後、噴霧形状を大きく変えたノズル A (広角低貫徹狙い)、ノズル D (狭角高貫徹狙い) を中心に解析する。

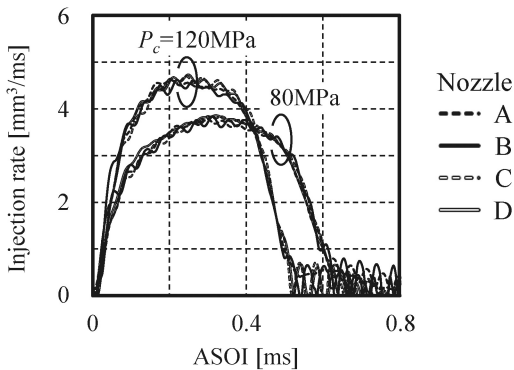


Fig.6 Injection rate with spray momentum method

3.2 自由噴霧の噴霧形状

$P_c=120\text{MPa}$ における自由噴霧での噴霧到達距離の計測を行った結果 (全噴孔平均と上下限值) を図7, 噴射開始後 1.0ms における全噴孔の噴霧形状と噴霧角 (全噴孔平均) を図8に示す。噴孔長が長くテーパ率が大きいノズル D の方が、噴孔長が短くテーパ率が小さいノズル A よりも噴霧到達距離は長い。一方、ノズル A の方がノズル D よりも噴霧角は大きくなっており、狙い通りノズル A は広角低貫徹、ノズル D は狭角高貫徹な噴霧となることを確認できた。

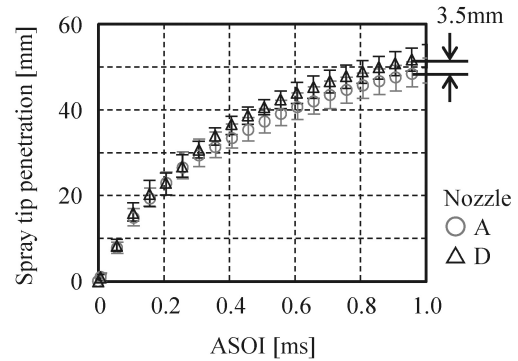


Fig.7 Spray tip penetration

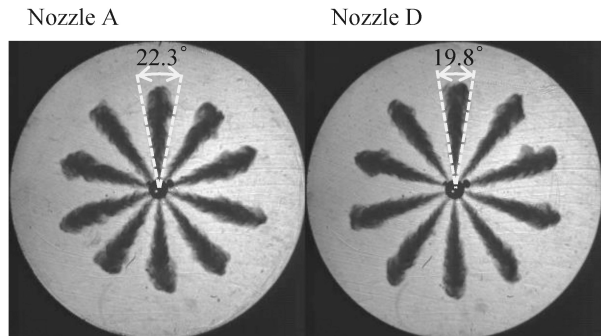


Fig.8 Spray images at 1.0ms ASOI

3.3 噴霧運動量の減衰

噴射開始後 0.4ms における噴霧形状と噴霧中核の衝突力波形の計測位置 ( $X=4\text{mm}, 16\text{mm}, 28\text{mm}$ ) を図9に、噴霧中核の衝突力波形を図10に示す。ノズル近傍 ( $X=4\text{mm}$ ) では衝突力波形の差は小さいが、 $X=16\text{mm}, 28\text{mm}$  とノズルから離れるほど衝突力のピークが小さくなる。また、広角低貫徹のノズル A の方が衝突力のピークは大きく減少している。

噴霧衝突力の時間積分により算出した噴霧中核の運動量を図11に示す。衝突力波形と同様にノズル近傍 ( $X=4\sim 12\text{mm}$ ) では噴霧中核の運動量の差は小さいが、ノズルから離れるほど噴霧中核の運動量は減衰し、燃焼室壁面位置 ( $X=28\text{mm}$ ) においては広角低貫徹のノズル A や噴射圧の高い噴霧の方が噴霧中核の運動量の減衰は大きい。噴射圧の高い  $P_c=120\text{MPa}$  ではノズル近傍の噴霧中核の運動量は大きいですが、周辺空気を噴霧内に取り込む時の運動量交換が盛んに行われ燃焼室壁面までに噴霧中核の運動量の減衰も大きくなったと考える。



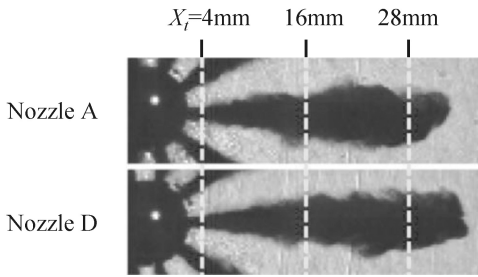


Fig.9 Spray images at 0.4ms ASOI,  $P_c=120\text{MPa}$

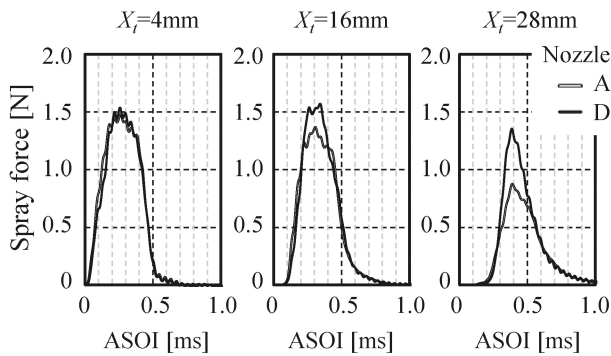


Fig.10 Spray force characteristics at  $P_c=120\text{MPa}$

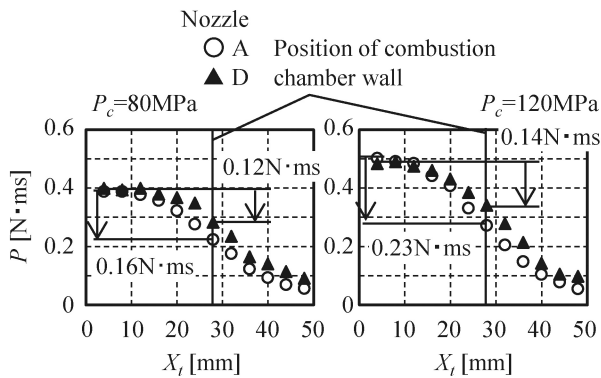


Fig.11 Core of spray characteristics

### 3.4 噴霧運動量分布

$X_f=28\text{mm}$  における噴霧運動量分布と自由噴霧の噴霧幅を図12に示す。噴霧運動量の分布は正規分布となる<sup>9)</sup>ことが分かっており、本計測でも同様に正規分布形状となることを確認した。 $P_c=80, 120\text{MPa}$  共に噴霧を狭角高貫徹化したノズルDの方が広角低貫徹化したノズルAよりも噴霧軸中心の噴霧運動量が大きい。一方、噴霧軸中心から $\pm 2.5\text{mm}$  の範囲を外れた噴霧外縁部においてはノズルA, D共に噴霧運動量はほぼ0となる。自由噴霧の噴霧幅( $\geq 10\text{mm}$ )に対し噴霧運動量を持つ範囲が $\pm 2.5\text{mm}$  と狭くなるのは、噴霧内へ周囲の空気を取り込むエントレインは噴霧外縁部で行われており、エントレインによる運動量交換によって噴霧外縁部の運動量が失われたためと考える。

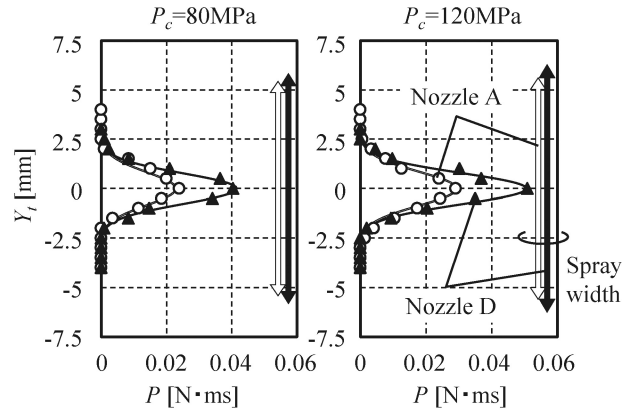


Fig.12 Spray distribution characteristics

### 3.5 2次元燃焼室における噴霧形状

図4の装置を用い2次元燃焼室内の噴霧可視化を行い、図13に示すように燃焼室壁面衝突前の噴霧先端位置  $L_1$  と燃焼室壁面上の噴霧先端位置  $L_2$  を計測する。

噴霧形状の可視化結果を図14に示す。高貫徹化したノズルDや、 $P_c=120\text{MPa}$  に高圧化したときの方が早く燃焼室壁面に衝突し、キャビティボウル部の接線方向に沿って回転し、燃焼室内径側へ戻ってくる。

燃焼室壁面衝突前後の噴霧先端位置  $L (=L_1+L_2)$  を図15に示す。 $P_c=80, 120\text{MPa}$  共に高貫徹化したノズルDの方が低貫徹化したノズルAよりも  $L$  が長い。

燃焼室壁面に衝突した後の燃焼室壁面上の噴霧先端位置  $L_2$  を図16に示す。燃焼室壁面衝突後 (ASOSI, After Start Of Spray Impingement) 0.4ms 以内では、 $P_c=80, 120\text{MPa}$  共にノズル間による  $L_2$  の差は小さく、貫徹力により表されたノズルD>Aの関係が崩れている。燃焼室壁面衝突後 0.5ms 以降でノズルDの高貫徹化の効果が表れノズルAよりも  $L_2$  の増加が大きくなる。

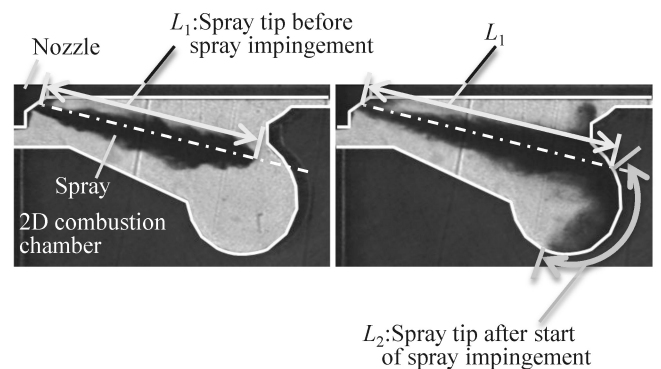


Fig.13 Spray tip analysis



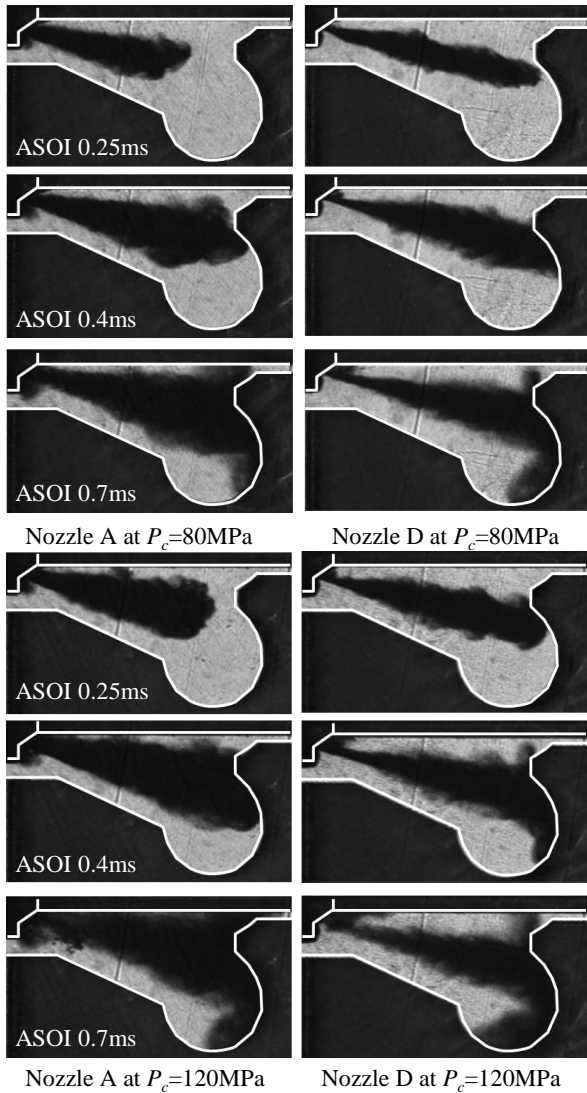


Fig.14 Spray images at 2D combustion chamber

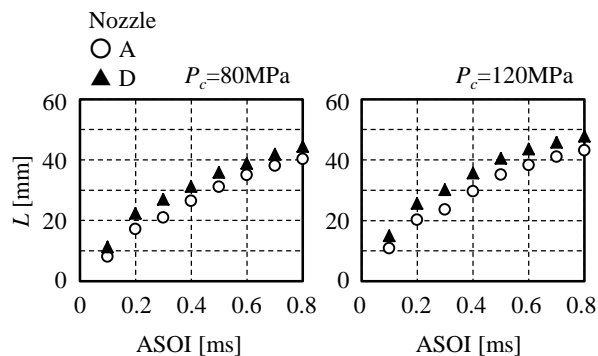


Fig.15 Spray tip at 2D combustion chamber

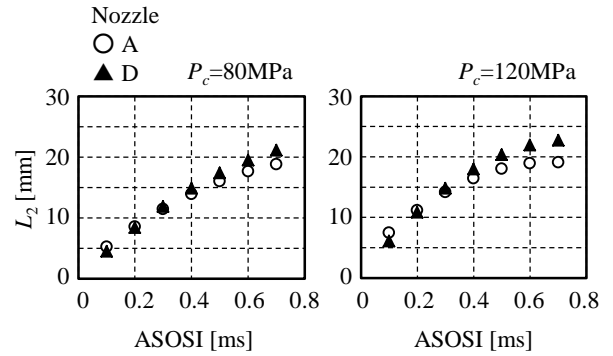


Fig.16 Spray tip after impingement

### 3.6 噴霧運動量と壁面衝突後の噴霧形状の関係

3.5 節にて壁面衝突後 0.4ms 以内の噴霧は噴霧貫徹力だけで整理できないことが分かった。そこで壁面衝突後の噴霧流動の促進に必要な噴霧特性を明らかにするため、燃焼室壁面位置における噴霧運動量の大きさと広がりに着目する。図 17 に示すように正規分布の 68% の範囲を示す標準偏差  $\sigma$  によって噴霧運動量の広がりを表す。ここでノズル B, C も加えたノズル 4 諸元の燃焼室壁面位置の噴霧中核の運動量  $P$  と噴霧運動量分布の標準偏差  $\sigma$ 、燃焼室壁面に衝突した後の燃焼室壁面上の噴霧先端位置  $L_2$  の結果を図 18 に示す。 $\sigma$  と燃焼室壁面衝突から 0.2ms 後の  $L_2$  に正の相関があり、 $P$  と 0.6ms 後の  $L_2$  に正の相関がある。

この現象に対し図 14 の噴霧挙動を元に考察した結果を図 19 に示す。噴霧が壁面へ衝突した直後においては、噴霧が壁面に押し潰され、外縁部の噴霧が壁面接線方向の先端となる。壁面衝突後しばらくすると外縁部の噴霧を中核部の噴霧が追い越していると考えられる。そのため、壁面衝突後 0.4ms 以内である 0.2ms では噴霧外縁部の幅を表す  $\sigma$  と  $L_2$ 、燃焼室壁面衝突後 0.5ms 以降である 0.6ms では噴霧中核の貫徹力の強さを表す  $P$  が壁面衝突後の噴霧先端位置と強い相関を持ったと考える。燃焼室壁面に到達する噴霧中核の運動量の強化により、燃焼後半（ここでは燃焼室壁面へ噴霧衝突後 0.6ms 以降とする）の噴霧を酸素が残存している燃焼室内径側まで戻ることができるため、Soot の再酸化が促進され Soot 排出量を低減できると考える。渡辺らはノズルサック内の渦生成抑制による噴霧の狭角高貫徹化の効果<sup>9)</sup>を報告しており、これは噴霧中核の運動量の強化に有効と考える。

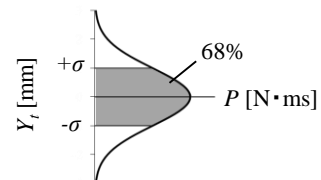


Fig.17 Standard deviation of spray momentum distribution

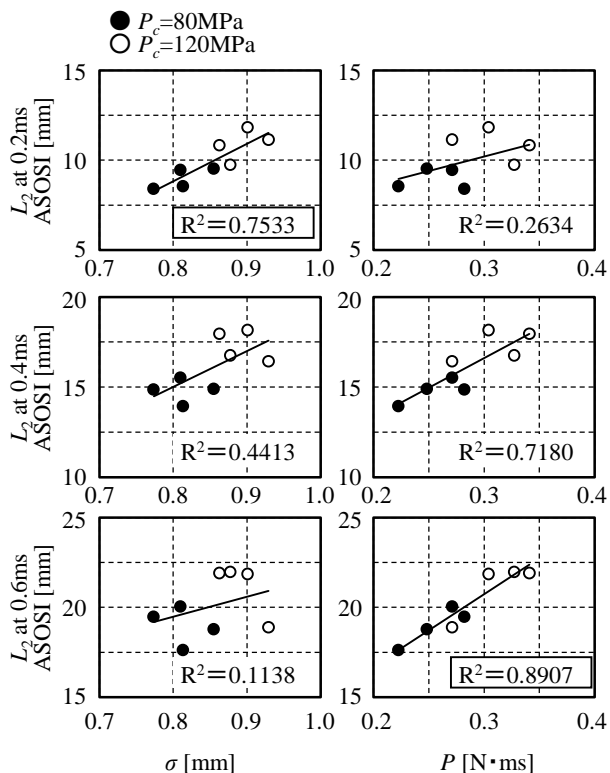


Fig.18 Spray characteristics and spray tip after impingement

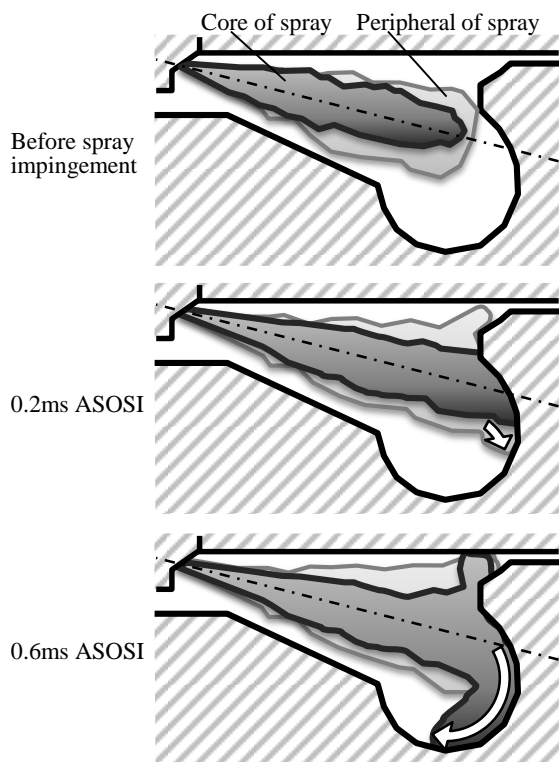


Fig.19 Images of spray impingement at 2D combustion chamber

#### 4. 結論

噴霧運動量計測手法と2次元燃焼室内の噴霧形状可視化手法により、燃焼室壁面に衝突する噴霧の運動量と燃焼室壁面衝突後の噴霧形状との関係を明らかにした。以下に得られた知見を示す。

- (1) ノズルから4mmのノズル近傍では広角低貫徹噴霧と狭角高貫徹噴霧の噴霧中核の運動量の差は小さい。ノズルから28mmの燃焼室壁面位置まで離れると狭角高貫徹化した噴霧の方が運動量の減衰は小さく、広角低貫徹化した噴霧ほど運動量の減衰が大きい。また、噴射圧を  $P_c=80 \rightarrow 120$ MPa と高くするとノズルから28mmの燃焼室壁面位置における噴霧中核の運動量の減衰量は大きくなる。
- (2) ノズルから28mmの位置の噴霧運動量分布は狭角高貫徹化した噴霧の方が噴霧軸中心の噴霧運動量が大きくなる。噴霧軸中心から $\pm 2.5$ mmの範囲を外れた噴霧外縁部の噴霧運動量はほぼ0となる。自由噴霧の噴霧幅( $\geq 10$ mm)に対し噴霧運動量を持つ範囲が狭いことから、噴霧内へ周囲の空気を取り込むエントレインによる運動量交換によって噴霧外縁部の運動量が失われたと考える。
- (3) 2次元燃焼室内の噴霧可視化から解析した燃焼室壁面衝突前後の噴霧先端位置  $L$  は、狭角高貫徹化した噴霧ほど長くなり、広角低貫徹化した噴霧ほど短くなる。また、燃焼室壁面衝突後の燃焼室壁面上の噴霧先端位置  $L_2$  は、壁面衝突後0.4msまでは貫徹力による差は小さく、壁面衝突後0.5ms以降において高貫徹化により  $L_2$  が長くなる。
- (4) 燃焼室壁面位置における噴霧運動量分布の標準偏差  $\sigma$  と燃焼室壁面衝突から0.2ms後の燃焼室壁面上の噴霧先端位置  $L_2$  に正の相関があり、噴霧中核の運動量  $P$  と0.6ms後の  $L_2$  に正の相関がある。燃焼室壁面に到達する噴霧中核の運動量の強化により、燃焼後半(燃焼室壁面へ噴霧衝突後0.6ms以降)の噴霧を酸素が残存している燃焼室内径側まで戻ることができるため、Sootの再酸化が促進されSoot排出量を低減できると考える。

#### 文献

- (1) 和栗雄太郎, 藤井勝, 網谷竜夫, 恒屋礼二郎: ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, 日本機械学会論文集, 25B-156 (1959), 820-826.
- (2) 趙日永, 箕浦彰, 中村陽介, 齋藤昌弘, 千田二郎, 藤本元: ディーゼル噴霧内の液滴密度, 運動量流速, 流速の分布, 混相流, 4-4 (1990), 307-322.
- (3) 河村清美, 勝見則和, 植田玲子, 齋藤昭則: ディーゼルノズルの個別噴孔噴射率の測定, 第7回微粒化シンポジウム講演論文集(1998), 271-276.
- (4) Lucio Postrioti, Michele Battistoni: Evaluation of Diesel Spray Momentum Flux in Transient Flow Conditions, SAE Technical Paper, 2010-01-2244 (2010).
- (5) Lucio Postrioti, Michele Battistoni, Carmine Ungaro, Alessandro Mariani: Analysis of Diesel Spray Momentum Flux Spatial Distribution, SAE International Journal of Engines 4, 2011-01-0682 (2011), 720-736.

- (6) G. Dober, N. Guerrassi, K. Karimi: Mixture Preparation and Combustion Analysis, a Key Activity for Future Trends in Diesel Fuel Injection Equipment, SIA Diesel Powertrain International Conference (2012).
- (7) 江原拓未, 天谷賢児, 新井雅隆: 壁面に沿うディーゼル噴霧の挙動, 微粒化, 5-3-11(1996), 116-124.
- (8) 志茂大輔, 加藤雄大, 金尚奎, 宮崎正浩, 神崎淳, 西田 恵哉: 燃焼室壁に衝突するディーゼル噴霧による縦渦形成と燃焼過程, 第22回内燃機関シンポジウム講演論文集(2011), 67-72.
- (9) H. Watanabe, M. Nishikori, T. Hayashi, M. Suzuki, N. Kakehashi, M. Ikemoto: Visualization Analysis of Relationship between Vortex Flow and Cavitation Behavior in Diesel Nozzle, THIESEL 2014 Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines (2014).