



# ディーゼル燃料の高圧化における噴霧特性に関する研究

## The Characteristic of Diesel Spray with High Pressure Injection

黒仁田 徳士\*, 松村 透弥, 田島 知弥, 多田 清貴, 西島 義明  
 (Tokuji KURONITA) (Toya MATSUMURA) (Tomoya TAJIMA) (Kiyotaka TADA) (Yoshiaki NISHIJIMA)  
 愛知工業大学大学院 愛知工業大学大学院 愛知工業大学大学院 愛知工業大学大学院 愛知工業大学  
 (Aichi Institute of Tech.) (Aichi Institute of Tech.) (Aichi Institute of Tech.) (Aichi Institute of Tech.) (Aichi Institute of Tech.)

In recent years, higher thermal efficiency and better environmental performance of diesel engines are still critically required. The purpose of this study is to grasp the effect of extremely high injection pressure up to 400 MPa on spray characteristics and its combustion behavior. Introducing a new high pressure devices with fuel injector makes possible to analyze the penetration and characteristics of diesel fuel spray at extremely high injection pressure conditions. As a result, it was confirmed that penetration of diesel fuel spray at 400 MPa was extended as same tendency in regards to increasing injection pressure, however there was also observed the difference of penetration between experimental results against calculated value. The analysis determined that experimental formula in consideration with the injection rate shape behavior of common rail system during the fuel injection event. Hence, it is confirmed that the calculated value of spray penetration from the experimental formula matches that of the actual measurement result.

Keywords: High-Pressure Injection, Characteristic of Diesel Spray, Experimental Value

### 1. 緒言

現在自動車業界では 2050 年のカーボンニュートラル目標を達成するために、排ガス低減や燃費改善に向けた様々な対策が講じられている。そのひとつとして車両の電動化が促進されており、小型車だけでなく大型車にも適用される機会が増えている。しかし、電動化車両の中でも 2050 年時点においてはエンジンとモータを搭載する HEV (Hybrid Electric Vehicle) や PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) が 70% を占めると予想されている。また、カーボンニュートラル燃料も提唱されており、電動化が進む中においてもエネルギー変換機関としてのエンジンに対する需要は根強く CO<sub>2</sub> 削減や排ガス規制対応に向けた継続的開発が必要である。

排ガス排出量低減とエンジン熱効率向上の方法の一つとして未燃成分の低減が挙げられる<sup>(1), (2)</sup>。その低減手段として燃料噴射の高圧化が有効であり、竹村<sup>(3)</sup>らの研究にて燃料噴射圧力 350MPa での噴霧および噴霧火炎の発達特性の調査結果が報告されている。希薄な噴霧形成および火炎の輝度むらの平滑化が認められ、燃料の高圧化が未燃成分の低減の手段として有効であることが報告されている。

本研究では、現行以上の高圧噴射下においても排ガス排出量低減と熱効率向上のポテンシャルが得られるかを明らかにすることを目的に、噴射圧力 400 [MPa]での噴霧挙動の解析を試みている。高圧燃料噴射のための高圧発生装置としてコモンレールシステムが実用化されており、噴射圧力 270[MPa]が市販車に適用されている。これに対して、本研究ではさらなる高圧化として噴射圧力 400[MPa]を可能とするための高圧発生装置を導入し、噴霧の挙動解析を可能とした。超高圧噴射での噴霧の挙動解析として希薄な噴霧形成に影響する噴霧到達距離に着目した。噴霧到達距離について、これまでに提唱されている実験式に関し広安ら<sup>(4)</sup>は噴霧内に液相が存在している期間では時間の一乗に比例し、液相が分裂した後は時間の 1/2 乗に比例することを考慮した実験式を提唱している。

原稿受付：2022 年 8 月 1 日

\* 責任著者：学生員，愛知工業大学大学院

(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

E-mail: tokuji.kuronita@na.denso.com

超高圧噴射下での噴霧到達距離に関する本解析において、提唱されている実験式からの計算値と実測値の相関について調査を行い、燃料噴射方式の変更に伴う実験式と噴射率との相関について解析を行った。

### 2. 実験装置および実験条件

#### 2.1 実験装置および実験方法

##### 2.1.1 コモンレールシステム

超高圧噴射での噴霧の挙動解析を行うため、噴霧観察システムを構築する。本実験における実験装置は定容容器、燃料噴射装置および制御装置、可視化用ストロボ、ハイスピードカメラにより構成される。

図 1 にコモンレールシステムの概略図を示す。高圧ポンプ、コモンレール、インジェクタとこれらを制御する ECU (Engine Control Unit, 以下 ECU), EDU (Engine Drive Unit, 以下 EDU) から構成されている。高圧ポンプにて高圧化した燃料をコモンレールに蓄え、インジェクタの電子制御により燃料を噴射する。インジェクタ内の電磁弁の ON/OFF によってインジェクタ内の作動油圧を制御し、ノズルニードルを作動させることで噴射の開始と終了を決定する。これによりエンジン回転数に依存しない噴射圧力での噴射が可能である。

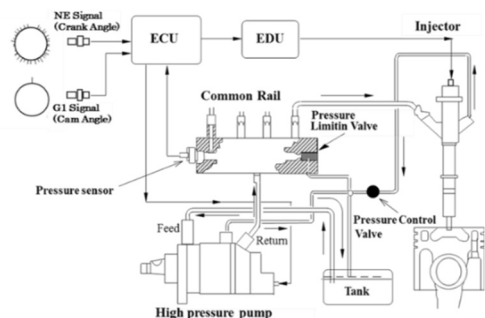
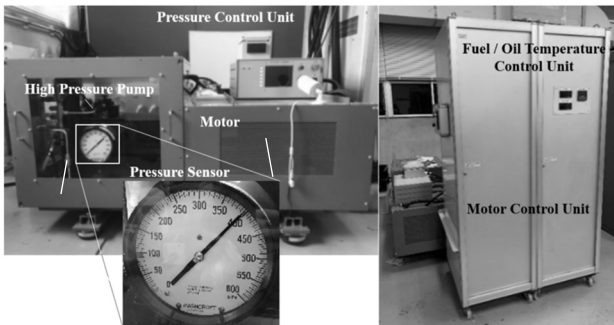


Fig.1 Common Rail System

##### 2.1.2 高圧発生装置

噴射圧力 400 [MPa]を可能とするためにコモンレールシス

テムを用いた高圧発生装置（株式会社杉江精機：0211A）を導入した。図 2(a)に高圧発生装置の外観を、図 2(b)にモータ、燃料および潤滑油の制御装置を示す。



(a)High Pressure Generator (b) Motor Control Unit  
Fig.2 High Pressure Pump System

図 2(a)の躯体にコモンレールシステムを搭載している。高圧ポンプの駆動は交流モータにて行っている。一般的に用いられている燃料潤滑方式に対し、オイル潤滑式を採用した高圧ポンプによるシステム構築により圧送時のカムへのストレスを低減させることで超高圧の燃料圧送を実現している。高圧ポンプはプレストローク調量式で、調量弁の開弁および閉弁タイミングを EDU にて調整することで燃料噴射圧力は 400 [MPa]までの設定が可能である。また、燃料噴射圧力を 400[MPa]に設定し評価を実施した際の圧力表示（Ashcroft：631379WWSL09L）の様子を参考に示す。燃料圧力はコモンレールの蓄圧部に装着したピエゾ圧電式の圧力センサに加えて、ブルドン管での圧力計測を二重系にすることにより実噴射圧力とシステム安全性の相互確認を実施している。

2.1.3 定容器

図 3 に本実験で使用した定容器のシステム構成図を示す。

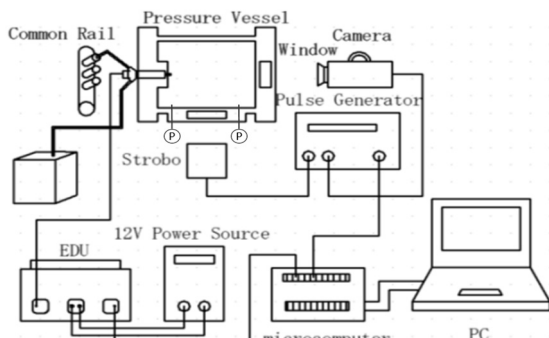
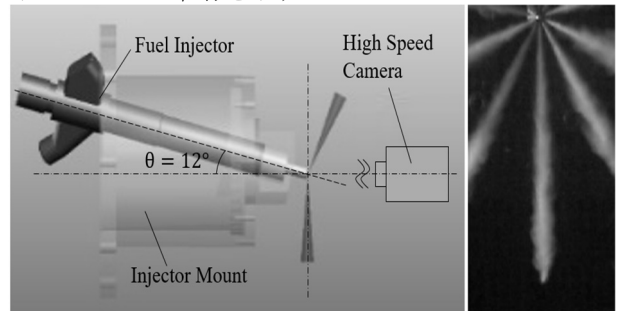


Fig.3 Experimental Set-up of Spray Analysis

本噴霧実験において使用した定容器は内部に  $\phi 300 \times 220$  の円筒形空間を有し容積は 0.016 [m<sup>3</sup>]であり、側面の観察窓は直径  $\phi 210$  [mm]である。電磁弁を用いて定容器内の高圧空気の吸排気を行い、内部圧力を常温下でゲージ圧 0~0.99 [MPa]まで設定が可能である。内部の圧力はデジタル圧力計とブルドン管を用いて測定することで正確性の向上を図っている。観察窓に対面する側面に取り付けられたインジェクタホルダに固定されたインジェクタ (DENSO:4<sup>th</sup> Gen. Solenoid Injector)先端部から燃料を噴射させる。燃料噴射には 2.1.2 項の高圧発生装置から導入した燃料を噴射するインジェクタを使用する。インジェクタの駆動制御はパルス発生器により行い、噴射期間を任意に設定できる。

図 4(a)に治具に固定されたインジェクタおよびインジェクタホルダの模式図と、図 4(b)にハイスピードカメラで撮影した噴霧のテスト撮影画像を示す。また表 1 に本研究で使用し

たインジェクタの仕様を示す。



(a) Injector and Injector Mount (b) Sample of Spray Image from shooting direction  
Fig.4 Injector mount and Spray

Table.1 Specification of Injector

Specification of Injector	Solenoid Drive Type
Nozzle Hole Diameter [mm]	$\phi 0.114$
Nozzle Hole Number [-]	10
Corn Angle [°]	156

本装置では定容器側面に取り付けられたインジェクタの多孔ノズルから噴射される噴霧のうち噴霧画像の鉛直下方に向いた一本の噴霧を測定対象とし、観察窓からの撮影方向に直交するようにインジェクタを取り付けている。このためにインジェクタの固定治具はインジェクタのコーン角 156 度に合わせて撮影カメラの撮影方向に対し  $\theta = 12$  度の傾斜角度を付けた設定とした。この設定により噴霧軸方向に対して垂直な断面の可視化を可能とした。雰囲気条件は、雰囲気圧力を 0.4 [MPa]、雰囲気温度  $T$  を 293 [K]とした。燃料噴射量は 20 [mm<sup>3</sup>/st]とし、定めた量になるよう噴射期間を設定した。

2.1.4 定容器内部の雰囲気密度調整装置

2.1.3 項に示す超高圧噴射での噴霧観察システムはその定容器内の雰囲気密度の変更を可能にしている。図 5 に雰囲気密度変更のためのガス供給システムの模式図を示す。

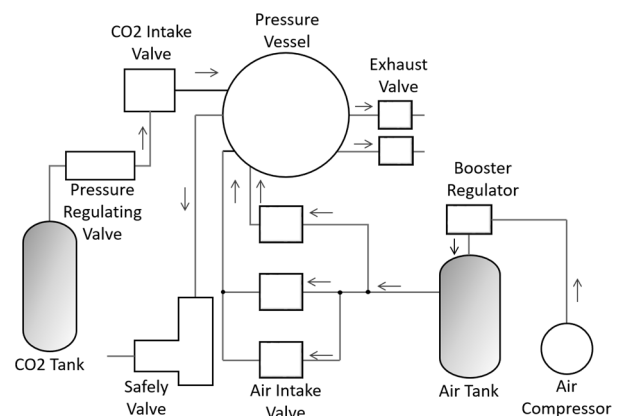


Fig.5 Equipment of Ambient Density Adjusting

電磁バルブを操作し圧力容器に封入されている二酸化炭素と空気を定容器内へ導入し、その圧力を調整することで定容器内部の雰囲気密度を変更することが可能である。

本実験で雰囲気密度は雰囲気全体の全圧に対する二酸化炭素ガスの分圧の割合を基に調節した。図 6 に雰囲気全体のゲージ圧が 0.4 [MPa]の時に混合された二酸化炭素ガスの割合と雰囲気密度との関係を示す。二酸化炭素ガスの圧力割合を  $\alpha$  [%]とすると  $\rho$  は式 (1) で表すことができる。なお、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]：雰囲気全体の密度、 $\rho_{air}$  [kg/m<sup>3</sup>]：空気の密度、 $\rho_{CO2}$  [kg/m<sup>3</sup>]：二酸化炭素ガスの密度、である。

$$\rho = \frac{100-a}{100} \rho_{air} + \frac{a}{100} \rho_{CO2} \quad (1)$$

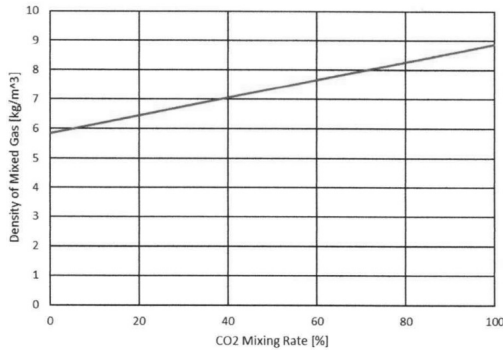


Fig.6 CO<sub>2</sub> Mixing Rate and Gas Density

## 2.2 実験条件

### 2.2.1 噴霧噴射条件

表 2 に本実験を行った際の噴射条件を示す。高压容器内には空気を充填し、一回の噴霧を形成した。今回用いたインジェクタは燃料噴射圧力 400 [MPa]での噴射が可能な試作ソレノイドインジェクタで、ノズル噴孔数は 10 噴孔、噴孔径はφ 0.114 [mm]である。本装置ではインジェクタをコーン角にあわせて角度をつけた治具に固定し、多孔ノズルによる噴霧の内一本を撮影方向に直交するように高速度カメラを設置する。燃料は JIS 二号軽油を用いた。

Table2 Test Conditions

Ambient Pressure [MPa]	0.4
Ambient Temperature [K]	293
Injection Pressure [MPa]	100, 250, 400
Injection Volume [mm³/st]	20

### 2.2.2 噴霧撮影条件

本実験の撮影は高速度カメラ(株式会社ナックイメージングテクノロジー: MEMRECAM HX-3)で行い、レンズは AI Nikkon50mm f/1.2S を用いた。2.1.2 項で記載した高压発生装置を用いて容器内に燃料を噴射し噴霧撮影を行う噴霧観察手法について説明する。表 3 に撮影条件を示す。ストロボ照射とハイスピードカメラを 2.1.1 項に示すコモンレールシステムの駆動パルスによるインジェクタ駆動のトリガ信号に同期させ、一噴射に対し一回の撮影で観察した。

Table3 Photographing Conditions

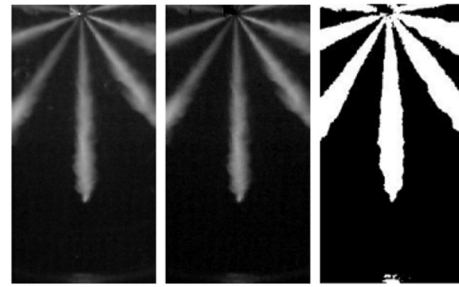
Frame Rate [fps]	100000
Shutter Speed [μ sec]	0.997
F-number	f5.6

### 2.2.3 画像解析条件

撮影した画像から噴霧到達距離を測定するうえで、噴霧形状を正確に捉えるため以下の画像処理を行った。化学・医療・軍事産業などの幅広い分野における画像処理に用いられている画像処理および噴霧形状測定ソフト(アメリカ国立衛生研究所 (NIH) : ImageJ)を用い、撮影した画像は背景除去とグレースケール化を施した。図 7(a)に背景除去する前の噴霧撮影画像を、図 7(b)にグレースケール化後の噴霧撮影画像を、図 7(c)に二値化処理した噴霧撮影画像をそれぞれ示す。この一連の処理により噴霧以外の背景部分が取り除かれ噴霧の輪郭が明確になる。またノズル先端の画像も取り除かれ、噴霧の噴射開始位置を判別することが容易となる。

噴霧は中心部が濃く、外延部は微細化が進み薄くなってゆく。このような濃淡のある画像は二値化処理を行う<sup>(6)</sup>ことで

噴霧形状の測定を容易に行うことができる。撮影した噴霧画像から噴霧の最大輝度を求め閾値を検定し、各画像の最大輝度の 20%を閾値と設定して二値化処理を行った。



(a) Before (b) Gray Scale (c) Threshold  
Fig.7 Comparison of Background Removal Image

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 噴霧観察結果および考察

図 8 に燃料噴射圧力 100, 250, 400 [MPa]における噴射開始からの噴霧の成長の撮影画像を示す。また図 9 には 2.2.3 項で説明した方法で算出した噴霧到達距離の算出結果を示す。

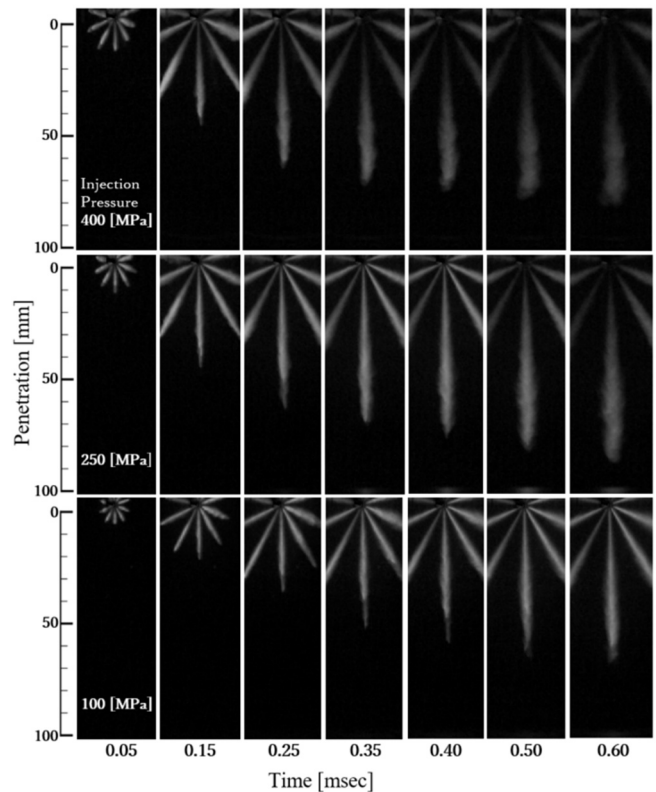


Fig.8 Spray Image

燃料噴射圧力の上昇に伴い噴霧到達距離の増大が確認できる。これは噴霧に与えられる運動エネルギーの増加によると考えられる。しかしながら 250 [MPa]から 400 [MPa]への圧力上昇では、100 [MPa]から 250 [MPa]への圧力上昇に対して噴霧到達距離の増加が小さくなっている。これは、噴霧の幅が広く噴霧根元部が薄くなっていることから、周辺の空気によるせん断力で空気との混合が促進され噴霧が拡散し、希薄な噴霧が形成されたためと考えられる。さらに、希薄な噴霧に対し空気の粘性により噴霧の広がり方向に運動量が変化することで噴霧の軸方向の運動量成分が減少したことが噴霧到達距離の増加が小さくなる理由だと考えられる。

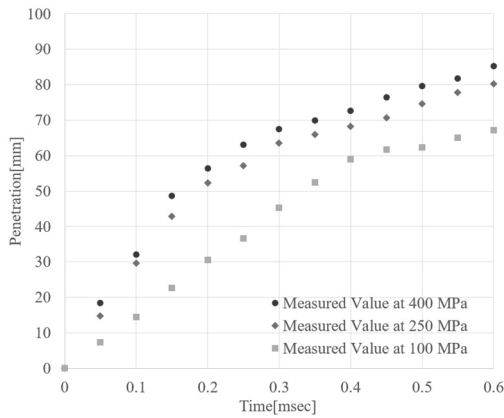


Fig.9 Fuel Spray Penetration Comparison

3.2 実験式による計算値と実測値の比較評価

噴射された燃料噴霧を撮影画像から測定した噴霧到達距離に関し、これまでに提唱されている実験式を参照して解析した結果を示す。

噴霧到達距離の算出に関し実験式がいくつか提唱されている。中でも広安ら<sup>(4)</sup>は噴霧内に液相が存在している期間では時間の一乗に比例し、液相が分裂した後は時間の 1/2 乗に比例することを考慮した実験式を提唱している。式 (2) に広安らが導き出した液相分裂前の噴霧到達距離の実験式を示す。式 (3) に導出された液相分裂後の噴霧到達距離の実験式を示す。式 (4) に導出された液相分裂時間を示す。

$$0 \leq t \leq t_b \quad S = 0.39 \left( \frac{\Delta P}{\rho_f} \right)^{0.5} t \quad (2)$$

$$t_b \leq t \quad S = 2.95 \left( \frac{\Delta P}{\rho_a} \right)^{0.25} (d_0 \cdot t)^{0.5} \quad (3)$$

$$t_b = 28.65 \frac{\rho_f d_0}{\sqrt{\rho_a \Delta P}} \quad (4)$$

ここで、 $S$  : 噴霧到達距離[m],  $d_0$  : 噴孔直径[m],  $t$  : 時刻[s],  $t_b$  : 液滴分裂時間[s],  $\Delta P$  : ノズルサック圧と雰囲気圧の差[Pa],  $\rho_a$  : 雰囲気気密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_f$  : 燃料密度[kg/m<sup>3</sup>], である。

図 10 に燃料噴射圧力 400 [MPa]における噴霧到達距離の実測値と、広安らが提唱した実験式からの計算値の比較を示す。

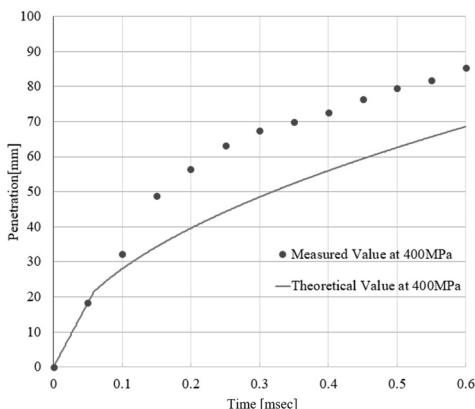


Fig.10 Comparison of Spray Tip Penetration between Experiment Results and Hiroyasu-Arai Formula

プロット点が燃料噴射圧力 400 [MPa]における噴霧到達距離の実測値を示す。広安らが提唱した実験式からの計算値を実線で示す。噴霧到達距離に関する本解析において、提唱されている実験式からの計算値と実測値の間に乖離が認められた。噴霧到達距離の実測値と計算値を比較すると、実測値が計算

値を上回っていることが分かる。

3.3 噴霧到達距離に対する燃料噴射装置の影響

この乖離の要因を解析し、燃料噴射装置の変更に伴い実験式に噴射率を加味することの必要性について検討する。

図 10 より燃料噴射圧力 400 [MPa]における噴霧到達距離の実測値と提唱された実験式からの計算値に差が認められた。この要因として燃料の供給装置の違いが挙げられる。広安らは分配型噴射ポンプを用いていたが、本研究ではコモンレールを用いている。そのため燃料の供給装置の違いを加味して計算値を算出する必要があると考えられる。図 11 に分配型噴射ポンプを用いた場合とコモンレールを用いた場合の単位時間当たりの噴射量である燃料噴射率の比較を示す。なお噴射率の比較は 40 [mm<sup>3</sup>/st]で行った。

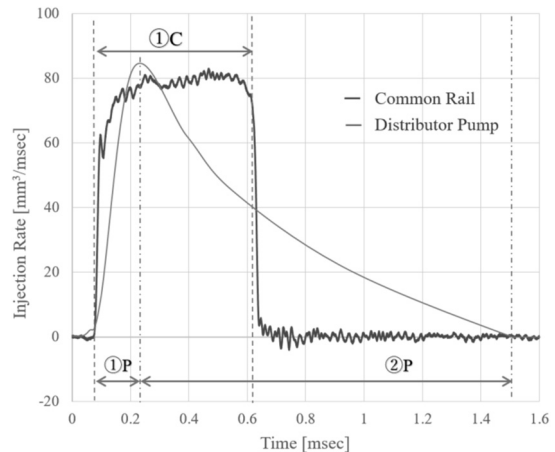


Fig.11 Pressure Behavior of Common Rail and Distributor Injection Pump

分配型ポンプを用いた場合の燃料噴射率は①P に示すように出始めが最も高く、続く②P に示すように噴射中は下がっていく傾向にある。分配型ポンプはポンプ圧縮室で圧縮された燃料が直接ノズルから噴射される機構になっているため燃料噴射開始時が最も噴射率が高くなる。これはポンプのプランジャによる燃料圧送過程で発生する圧力波において噴射ノズルに伝わる際の圧力伝播速度が速くなり、集積された圧力波によって噴射開始直後にノズル近傍の噴射圧力が最大値を迎えるためである。一方、コモンレールを用いた場合は①C に示すように出始めから噴射終わりまでの燃料噴射率の降下が少なくなっている。コモンレールシステムは圧縮された燃料を蓄圧室に充填しインジェクタ電磁弁の開閉によって燃料を噴射している。ゆえに、蓄圧された燃料が燃料噴射開始後も噴射ノズルへ供給され続けるため噴射期間中の圧力降下が小さい。

噴霧到達距離は噴霧先頭の燃料位置によって決められる。分配型ポンプを用いた場合噴射開始時に燃料圧力が最も高く、後から出る燃料は圧力が下がった状態で噴射される。そのため先に噴射された燃料に対し、後から噴射された燃料による噴霧先頭での突き抜けが起こりにくい。一方、コモンレールを用いた場合、噴射中の圧力降下が少ないため先に噴射された燃料が失速した後に追い越すすなわち噴霧先頭での突き抜けが発生する。

よって、特にコモンレールを用いた高圧噴射の場合には噴射期間中の噴射率を加味する必要があるのではないかと推測する。そこで、本研究では噴霧到達距離の解析において二つの項目に着目した。

一つ目は実験式定数の決め方である。座間ら<sup>(6)</sup>は広安らが導き出した実験式において定数が過小評価されていると提唱しており、定数の再検討を行っている。そのため本研究でも

定数の再検討を行う必要があると考えられる。

二つ目は噴射率を用いた算出方法である。燃料の供給機関の違いは燃料圧力の挙動に影響を及ぼし、噴射率の波形に表れる。そのため噴射率を加味して実験式からの計算値を算出する必要があると考えられる。

#### 4. 実験式の定数再検討

##### 4.1 実験定数 $\alpha$ の算出

この要因解析をもとに燃料噴射期間中の噴射率を加味した実験式について検討する。式(5)に液相分裂前の噴霧到達距離を表す式を示す。Levichの理論では微粒化してできた液滴の径は噴射された液相表面の変動の波長に等しく均一粒径と仮定している。

$$L_b = \alpha \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.5} d_0 \quad (5)$$

実際の液滴径は粒度分布を持った粒径であるため、補正するために広安らは実験定数 $\alpha$ を導入した。実験定数 $\alpha$ は実験から求める定数であり、実験定数 $\alpha$ を15.8に設定している。しかし座間ら<sup>(6)</sup>は実験定数 $\alpha$ の値が過小評価されていると提唱しており、再検討を行っている。そこで本研究においても実験定数 $\alpha$ の再検討を行う。表4に実験定数 $\alpha$ を算出するための条件を示す。燃料噴射中の噴射率を考慮することで実験定数 $\alpha$ が大きくなると想定される。これは噴射圧力の上昇により噴霧噴射速度も大きくなり噴霧の運動量が増加することから、噴霧微粒化の促進されることで実験定数 $\alpha$ が大きくなることが妥当だと考えられる。液相長さ $L_b$ は噴霧到達距離より算出した。なおその時刻は、液相分裂前後の噴霧到達距離が一致する時刻である。

表4の条件を式(5)に代入することで実験定数 $\alpha$ を算出した。また各条件で算出した実験定数 $\alpha$ を平均した値を本実験での実験定数 $\alpha$ とする。本実験では実験定数 $\alpha$ を34.3とする。

Table4 Experimental Conditions of  $\alpha$

Injection Pressure [MPa]	100			250			400		
Fuel Density $\rho_f$ [m <sup>3</sup> /kg]	830								
Air Density $\rho_a$ [m <sup>3</sup> /kg]	5.84	7.06	8.27	5.84	7.06	8.27	5.84	7.06	8.27
Penetration [mm]	52.47	42.98	36.36	47.00	42.19	30.00	45.35	48.57	40.00
Experimental Constants $\alpha$ [-]	38.597	34.768	31.834	34.583	34.129	26.268	33.369	39.296	35.024
Average of $\alpha_p$ [-]	35.067			31.660			35.896		

##### 4.2 速度係数算出用係数 $C_v'$ の算出

式(6)に液相分裂完了前の期間における噴霧先端速度を表す。式(7)に速度係数 $C_v$ を導く式を示す。

$$V_s = C_v \left(\frac{2\Delta P}{\rho_f}\right)^{0.5} \quad (6)$$

$$C_v = C_v' \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.25} \quad (7)$$

速度係数 $C_v$ はベルヌーイの式から得られる噴口出口速度と液相分裂完了前の時間における噴霧先端速度の比で表される。広安らの式では速度係数 $C_v$ を0.39で一定としている。しかし座間らは速度係数 $C_v$ について、雰囲気密度 $\rho_a$ の依存性を考慮する必要があると提唱している。そのため本実験でも速度係数 $C_v$ の再検討を行う。

燃料噴射中の噴射率を考慮することで速度係数定数 $C_v$ は大きくなると想定される。これは4.1節で示す実験定数 $\alpha$ と同様に、噴射圧力の上昇により噴射速度も大きくなる効果が同

じように適用されるためと考えられる。速度係数 $C_v$ の算出に当たり式(7)の速度係数算出用係数 $C_v'$ を算出する必要がある。表5に式(7)の速度係数算出用係数 $C_v'$ を算出するための条件を示す。

Table5 Experimental Conditions of  $C_v'$

Injection Pressure [MPa]	100			250			400		
Fuel Density $\rho_f$ [m <sup>3</sup> /kg]	830								
Atmospheric Pressure [MPa]	0.4								
Penetration [m]	0.0525	0.0430	0.0364	0.0470	0.0422	0.0300	0.0454	0.0486	0.0400
Split Time [s]	0.00035	0.00030	0.00025	0.00016	0.00015	0.00012	0.00015	0.00015	0.00013
Experimental Constants $C_v'$ [-]	0.0886	0.0888	0.0938	0.1097	0.1101	0.1018	0.0892	0.1002	0.1030
Average of $C_{v,p}'$ [-]	0.0903			0.1073			0.0975		

ここで、 $\Delta P = P - P_a$ である。噴霧先端速度 $V_s$ は液相分裂前の噴霧到達距離と液相分裂時間を実測値より算出した。表2の条件を式(6)および式(7)に代入することで速度係数算出用係数 $C_v'$ を算出した。また各圧力で算出した速度係数算出用係数 $C_v'$ の平均した値を本実験での速度係数算出用係数 $C_v'$ とする。本実験での速度係数算出用係数 $C_v'$ を0.10とする。式(8)に液相分裂前の噴霧到達距離を示す。式(9)に液相分裂後の噴霧到達距離を示す。式(10)に液相分裂時間を示す。

$$0 \leq t \leq t_b \quad S = C_v' \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.25} \left(\frac{2\Delta P}{\rho_f}\right)^{0.5} t \quad (8)$$

$$t_b \leq t \quad S = 2^{0.25} \sqrt{\alpha C'} \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.125} \left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.25} (d_0 \cdot t)^{0.5} \quad (9)$$

$$t_b = \frac{\alpha}{\sqrt{2C'}} \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{-0.25} \frac{\rho_f \rho_f}{\sqrt{\rho_a \Delta P}} \quad (10)$$

式(11)に再検討を行った液相分裂前までの到達距離の実験式を示す。式(12)に再検討を行った液相分裂後の到達距離の実験式を示す。式(13)に液相分裂時間を示す。

$$0 \leq t \leq t_b \quad S = 0.1 \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.25} \left(\frac{2\Delta P}{\rho_f}\right)^{0.5} t \quad (11)$$

$$t_b \leq t \quad S = 2.2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.125} \left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.25} (d_0 \cdot t)^{0.5} \quad (12)$$

$$t_b = 243 \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{-0.25} \frac{\rho_f \rho_f}{\sqrt{\rho_a \Delta P}} \quad (13)$$

##### 4.3 噴射率を用いた実験値算出方法

算出した実験式(8)(9)(10)からこれまでの実験で行われていない400[MPa]までの噴霧到達距離の計算値と本実験での実測値を比較し、算出した実験式(11)(12)(13)の確からしさを検証する。噴射率を噴射期間で等分にして十箇所の噴射期間の噴射率を算出する。噴射時期全域の中で噴射率が最大値になった時刻を設定圧力になった最大噴射率と仮定する。仮定した最大噴射率点の噴射率と各時刻における噴射率の比から十箇所の圧力を算出する。図12に等分にした噴射率を示す。各期間における最終時刻の噴射率点を代表値とし、時刻が早い代表値よりAからJの順で十点指定する。算出した十箇所の圧力を式(11)と式(12)に代入し噴霧到達距離を算出する。噴霧到達距離は噴霧先頭の燃料によって決められる。最初に噴射された燃料が失速した後追い越しすなわち噴霧先頭での突き抜けが発生する。実験式からの計算値において噴霧到達距離が交差するポイントが噴霧先頭での突き抜けが発生したポイントである。そのため算出した噴霧到達距離が交差する

交点を結ぶことで噴霧先頭の突き抜けを加味した実験式からの計算値を算出することができる。

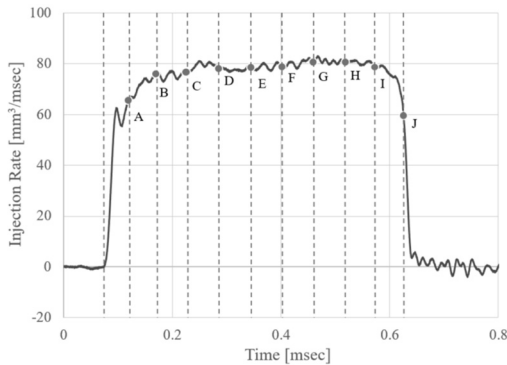


Fig.12 Injection Rate of Injection pressure at 250 MPa

図 13 に噴射期間における十箇所の圧力から算出した実験式からの計算値と実測値を示す。実線は圧力挙動による噴霧先頭の突き抜けを加味した噴霧到達距離の実験式からの計算値である。各プロット点が噴霧到達距離の実測値である。ここで、噴射期間における各燃料噴射圧力から算出した噴霧到達距離の計算式と実測値が交差する点を三角プロット点で示す。実線で示す圧力挙動による噴霧先頭の突き抜けを加味した噴霧到達距離の実験式からの計算値と噴霧到達距離の実測値はよく一致していることが分かる。よって実験式の定数再検討と圧力挙動による噴霧先頭の突き抜けを加味することで噴霧到達距離の計算が可能であることが示された。

なお、0.4[msec]以後において噴霧到達距離の実測値と実験値に差が生じている。本研究にて試作したインジェクタは、大型車両への搭載を想定したものである。そのため、実際に車両で使われているエンジンのボア半径 75 [mm]に噴霧が到達する時間を考慮し 0.35 [msec]までの範囲で検討を行った。

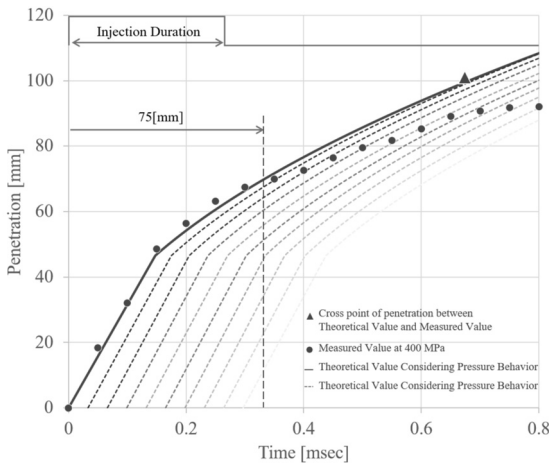


Fig.13 Theoretical Value Considering Pressure Behavior

#### 4.4 実験結果

図 14 に各燃料噴射圧力における到達距離の比較結果を示す。実線は各燃料噴射圧力での式 (11), 式 (12) および式 (13) を用いて実験式から算出した噴霧到達距離の計算値である。プロット点が各噴射圧力での噴霧到達距離の実測値である。各燃料噴射圧力の実験式から算出した噴霧到達距離の計算値と実測値を比較すると、よく一致していることが確認できる。また燃料噴射圧力上昇に伴い噴霧到達距離の増大も確認できる。このことから燃料噴射圧力上昇によって噴霧の初速度が増加しており、噴霧が持つ運動エネルギーも増加していると考えられる。運動エネルギーが増加すると噴霧が空気を巻き込む効果も増加するため、混合が促進され燃料圧力上昇にお

ける燃料と空気の混合促進が考えられる。

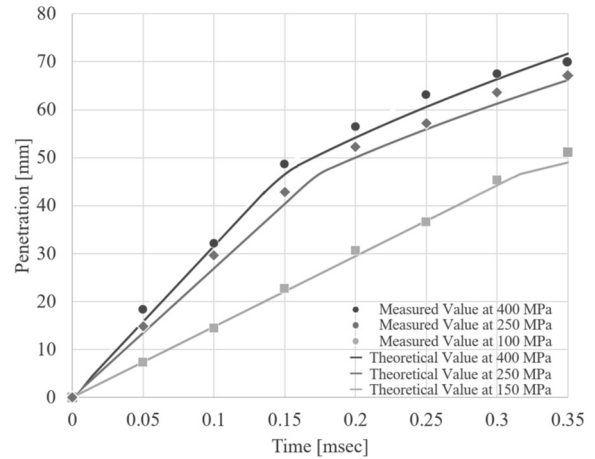


Fig.14 Fuel Spray Penetration Comparison between Theoretical value and Measured Value

### 5. 結言

本研究では燃料噴射の更なる高压化に向けて高压噴射での噴霧挙動の解析を試み、以下の結果を得た。

- (1) 新たに高压装置とインジェクタを導入することで噴射圧力 400 [MPa]での噴射を可能にし、噴霧到達距離の測定と解析を行った。
- (2) 噴射期間中の噴射率を加味したこれまでの実験で行われていない 400 [MPa]まで適用可能な噴霧到達距離の実験式を算出し、実験式からの計算値と実測値が一致することを確認した。

### 文 献

- (1) 佐々木 正和, 大型トラックの xEV 化の可能性検討(第 1 報), 自動車技術会論文集, Vol52, No.4, pp.756-762, (2021)
- (2) 佐々木 正和, 大型トラックの xEV 化の可能性検討(第 2 報) 自動車技術会論文集, Vol52, No.4, pp.750-755, (2021)
- (3) 竹村知浩, 河崎澄, 山根浩二, 超高压噴射を適用したディーゼル噴霧および噴霧火炎の発達特性, 自動車技術会論文集, Vol51, No.4, pp.589-597, (2020)
- (4) 廣安博之, 新井雅隆, ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角, 自動車技術会論文集, Vol21, pp.5-11, (1980)
- (5) Jeffrey D. Naber, Dennis L. Siebers, Effects of Gas Density Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays, SAE, 960034, pp.59-88, (1996)
- (6) 座間淑夫, 菅野俊宏, 掛橋展久, 荒木幹也, 石間経章, 尾形陽一, 異なる噴口径ノズルから噴射されるディーゼル噴霧の到達距離に関する検討, 微粒化, Vol25, No.84, pp.2-8, (2016)

### 謝辞

本研究は株式会社デンソーとの共同研究によって実施されたものである。