



ディーゼル機関における燃料噴霧特性に関する研究(第1報)

(燃料噴射圧力およびノズル噴孔径, 雰囲気密度が非蒸発ディーゼル噴霧のマクロ特性に及ぼす影響)

A Study on fuel spray characteristics in diesel engine (First report)
(Effects of fuel injection pressure and nozzle hole diameter and ambient density on macro features of non-evaporative diesel spray)

西浦 宏亮,
(Kohsuke NISHIURA)
同志社大学大学院
(Doshisha Univ.)

井上 優,
(Yu INOUE)
同志社大学大学院
(Doshisha Univ.)

松村 恵理子,
(Eriko MATSUMURA)
同志社大学
(Doshisha Univ.)

千田 二郎*
(Jiro SENDA)
同志社大学
(Doshisha Univ.)

The combustion process in diesel engines is greatly affected by spray characteristics and depends on air-fuel mixture characteristics. Therefore, it is necessary to grasp the detailed spray characteristics in mixture formation process. The purpose of this report is to grasp macro characteristics and internal structures in diesel sprays. Here, shooting and analysis of free spray with changing nozzle hole diameter in noncombustible field was carried out by using a constant volume vessel.

Keywords: Heat engine, Compression ignition engine, Fuel spray, Atomization

1. 緒言

近年, 化石燃料の枯渇が懸念されており⁽¹⁾, 発展途上国における自動車の需要が今後増加することで, さらなる化石資源の大量消費が示唆されている⁽²⁾と同時に, 排出される有害物質の増加が予想される⁽³⁾. したがって, 多くの研究者が内燃機関において熱効率の向上および低エミッションに向けた研究を行なっている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾.

内燃機関では, 噴霧の微粒化が蒸発過程および混合気形成過程に深く影響すると言われており, 熱発生率や排気物質を左右する一つの要因となっている⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾. さらに近年の動向としては, 過給ダウンサイジングの普及により, エンジン筒内はさらに高雰囲気密度場となり, それに伴い噴射圧力の高圧化や小噴孔径化により微粒化を促進させる動きが進んでいる. よって, 巨視的並びに微視的観点から噴霧の微粒化を評価し, 体系的にまとめることが熱効率の向上および低エミッション化の実現に繋がる.

本研究では上記で述べた通り, ディーゼル噴霧燃焼場の状況変化を踏まえて主要な実験パラメータとして噴射圧力, 噴孔径, 雰囲気密度を用いて詳細な噴霧特性を調査し, 噴霧のモデリングを行なうことを目的としている. 同時に, 過去に提案されている種々の噴霧特性に関する実験式との整合性を確認する. そこで本報では, 3つのパラメータを変化させた際において時系列の噴霧形状を把握するためにシャドウグラフ撮影を行ない, 燃料噴射圧力およびノズル噴孔径, 雰囲気密度がディーゼル噴霧のマクロ特性に及ぼす影響について調査を行なった.

2. 噴霧特性の指数相関

1章で述べたように, ディーゼル噴霧の噴霧角の実験式などが近年の噴射圧力の高圧化に対応できているか検証する必要がある. そこで, これまで提案された噴霧角に関する実験式を式(1)~(3)に示す.

廣安らの式は和栗らの噴霧角に対する式⁽⁸⁾を基準に高速ディーゼル機関における噴霧の噴霧角を求める実験式を導出したものである. 噴霧角はノズル噴孔から 30mm 離れた位置で

測定し, 噴射圧力は 7~15MPa の範囲で変化させ測定している⁽⁹⁾.

$$\theta = 0.05 \left(\frac{\rho_a \cdot \Delta P \cdot d_n^2}{\mu_a^2} \right)^{0.25} \quad (1)$$

稲垣らの式は高压容器内に噴射された燃料を高速ビデオカメラで撮影することにより噴霧角を測定し導出した式である. 噴霧角は噴霧長の半分の位置で測定し, 噴射圧力は 40~180MPa の範囲で変化させ測定している⁽¹⁰⁾.

$$\theta = c \left(\frac{\rho_a}{\mu_a^2} \right)^{0.25} P_{cr}^{0.18} \left(\frac{l_n}{d_n} \right)^{-0.14} \quad (2)$$

北口らの式は噴霧角が噴射圧力, 雰囲気密度および噴孔径に影響を受けていると仮定し, 噴射差圧力, 雰囲気密度および噴孔径に対する指数相関を基に段および西田らの実験結果⁽¹¹⁾~⁽¹⁴⁾から定量的にフィッティングを行ない導出した式である. 噴霧角はノズル噴孔から 25mm 離れた位置で測定し, 噴霧角は 100~300MPa の範囲で変化させ測定している⁽¹⁵⁾.

$$\theta = 26 \cdot \Delta P^{-0.02} \cdot \rho_a^{0.385} \cdot d_n^{0.15} \quad (3)$$

ここで, ρ_a は雰囲気密度, P_{cr} はコモンレール圧力, c は実験定数, μ_a は, ΔP は噴射差圧力, l_n はノズル噴孔長, d_n はノズル噴孔径を示す. 式(1)(2)に示すように, 従来式の多くでは噴霧角は噴射圧力の増加によって増加するが, 近年の高圧状況下では式(3)より, 高圧噴射条件下では噴霧角の指数値は噴射圧に対して-0.02となり, 概ね一定値を示している. また, その噴霧角が一定となる遷移点の噴射圧力は噴孔径に依存するという知見がある. そこで, 本報では燃料噴射圧力を 40MPa から 120MPa の高圧へ変化させた際にどのような相関が得られるかを検証した.

3. 実験装置および実験条件

3.1 シャドウグラフ撮影における実験装置

非蒸発場において噴霧の可視化を行なうため, 噴霧の撮影手法としてシャドウグラフ撮影法を用いた. 図 1 に実験

原稿受付: 2019年6月19日

* 責任著者: 正会員, 同志社大学

(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3)

E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

装置の概略図を示す。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、可視化用レーザ照明、高速ビデオカメラにより構成され、定容容器内に窒素を充填し、燃料を噴射した。また、燃料噴射装置には手動ポンプ（理研機器株式会社：UP-31）を用いて、単噴孔ホールノズル(DENSO：G3P インジェクタ）により燃料を噴射した。光源には、可視化用レーザ照明（Cavitar Ltd.：CAVILUX Smart、波長 $\lambda_L=640\text{ nm}$ ）を用い、露光時間は $50\mu\text{s}$ に設定した。レーザ光は片凸レンズ（ $f=1,200\text{ mm}$ ）によって並行光となり噴霧に照射され、再び片凸レンズ（ $f=1,200\text{ mm}$ ）を通過し集光され、カメラのレンズ上に像を結像する。撮影には高速ビデオカメラ（Vision Research Inc.：Phantom v2011）を使用し、撮影速度は $20,000\text{ fps}$ とし、露光時間は $50\mu\text{s}$ とした。本実験における試行回数は5回とした。

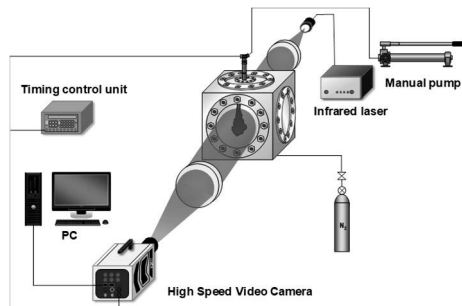


Fig.1 Schematic diagram of shadowgraph photography

3.2 シャドウグラフ撮影における実験条件

3.2.1 燃料噴射圧力変化条件

表1に、実験パラメータとして燃料噴射圧力を変更した際の実験条件を示す。供試燃料にはトリデカンを用いた。雰囲気条件は、雰囲気圧力 P_a を 1.5 MPa 、雰囲気密度 ρ_a を 18.75 kg/m^3 、雰囲気温度 T_a を 293 K とした。燃料噴射量 m_f は 5.7 mg となるよう噴射期間 t_{inj} を設定し、燃料温度 T_f は 293 K とした。本実験では燃料噴射圧力 P_{inj} を変更した際の噴霧形状の変化を把握するために、 P_{inj} を $40, 80, 120\text{ MPa}$ と変化させた。燃料噴射ノズルには単噴孔ホールノズル($d_n=\phi 0.121\text{ mm}$)を用いた。

Table 1 Experimental condition of changing P_{inj}

Test fuel	nC13H28	
Ambient pressure	P_a [MPa]	1.5
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	18.75
Ambient temperature	T_a [K]	293
Injection fuel amount	m_f [mg]	5.7
Injection pressure	P_{inj} [MPa]	40, 80, 120
Fuel temperature	T_f [K]	293
Nozzle hole diameter	d_n [mm]	$\phi 0.121$
Nozzle length	l_n [mm]	0.8
Injector	3 rd generation Piezo Injector with Single hole nozzle	

3.2.2 ノズル噴孔径変化条件

表2に、実験パラメータとしてノズル噴孔径を変更した際の実験条件を示す。供試燃料にはトリデカンを用いた。雰囲気条件は、雰囲気圧力 P_a を 1.5 MPa 、雰囲気密度 ρ_a を 18.75 kg/m^3 、雰囲気温度 T_a を 293 K とした。燃料噴射量 m_f は 5.7 mg となるよう噴射期間 t_{inj} を設定し、燃料温度 T_f は 293 K 、燃料噴射圧力 P_{inj} は 120 MPa とした。本実験ではノズル噴孔径 d_n を変更した際の噴霧形状の変化を把握するために、 d_n を $\phi 0.115, \phi 0.121, \phi 0.133\text{ mm}$ と変化させた。燃料噴射ノズルには単噴孔ホールノ

ズルを用いた。

Table2 Experimental conditions of changing d_n

Test fuel	nC13H28	
Ambient pressure	P_a [MPa]	1.5
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	18.75
Ambient temperature	T_a [K]	293
Injection fuel amount	m_f [mg]	5.7
Injection pressure	P_{inj} [MPa]	120
Fuel temperature	T_f [K]	293
Nozzle hole diameter	d_n [mm]	$\phi 0.115, \phi 0.121, \phi 0.133$
Nozzle length	l_n [mm]	0.8
Injector	3 rd generation Piezo Injector with Single hole nozzle	

3.2.3 雰囲気密度変化条件

表3に、実験パラメータとして雰囲気密度を変更した際の実験条件を示す。供試燃料にはトリデカンを用いた。本実験では雰囲気密度 ρ_a を変更した際の噴霧形状の変化を把握するために、雰囲気圧力 P_a を $0.5, 1.5, 2.5\text{ MPa}$ と変更し、その際の雰囲気密度 ρ_a は $6.25, 18.75, 31.25\text{ kg/m}^3$ である。雰囲気温度 T_a は 293 K とした。燃料噴射量 m_f は 5.7 mg となるよう噴射期間 t_{inj} を設定し、燃料温度 T_f は 293 K 、燃料噴射圧力 P_{inj} は 120 MPa とした。燃料噴射ノズルには単噴孔ホールノズル($d_n=\phi 0.121\text{ mm}$)を用いた。

Table3 Experimental conditions of changing ρ_a

Test fuel	nC13H28	
Ambient pressure	P_a [MPa]	0.5, 1.5, 2.5
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	6.25, 18.75, 31.25
Ambient temperature	T_a [K]	293
Injection fuel amount	m_f [mg]	5.7
Injection pressure	P_{inj} [MPa]	120
Fuel temperature	T_f [K]	293
Nozzle hole diameter	d_n [mm]	$\phi 0.121$
Nozzle length	l_n [mm]	0.8
Injector	3 rd generation Piezo Injector with Single hole nozzle	

4. 実験結果および考察

本実験では、燃料噴射圧力 P_{inj} 、ノズル噴孔径 d_n 、雰囲気密度 ρ_a の3つのパラメータを設定し、自由噴霧の評価を行なった。したがって、まず各パラメータごとに噴霧特性をまとめた後に、指数相関で整理した。さらに、従来の実験式との比較を行なった。

4.1 各パラメータ変化における噴霧特性

4.1.1 燃料噴射圧力変化

図2に、燃料噴射圧力 P_{inj} を変化させた際にシャドウグラフ撮影法を用いて撮影した自由噴霧の撮影画像を示す。図2より、噴射初期段階から燃料噴射圧力の上昇に伴い、噴霧先端到達距離が増加し、噴霧体積が大きく異なることから、噴射量が差が生じていることが確認できた。

図3, 4, 5に燃料噴射圧力 P_{inj} を変化させた場合における噴霧先端到達距離、最大噴霧角および噴霧体積の実験結果を示す。ここで、最大噴霧角はそれぞれの画像で噴霧の最外縁を計測して算出した角度と定義した。また噴霧体積は、噴霧を噴霧

軸方向に $dx = 1\text{mm}$ 間隔で分割し、噴霧幅を直径とする円盤の体積を積算することにより求めている。

図3, 4より、燃料噴射圧力の上昇に伴い、噴霧先端到達距離が増加し、最大噴霧角が増加していることが確認できる。これは、燃料噴射圧力の上昇に伴いインジェクタ先端からの燃料噴出速度が増加し、噴霧の貫徹力が増加することによって噴霧先端到達距離が増加したためであると考えられる。同時

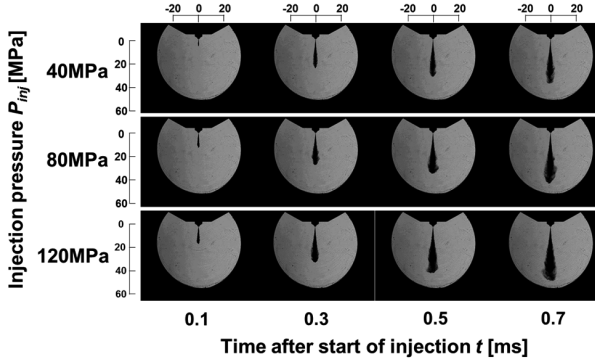


Fig.2 Shadowgraph images of diesel spray for various $P_{inj}(d_n=\phi 0.121\text{mm}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3)$

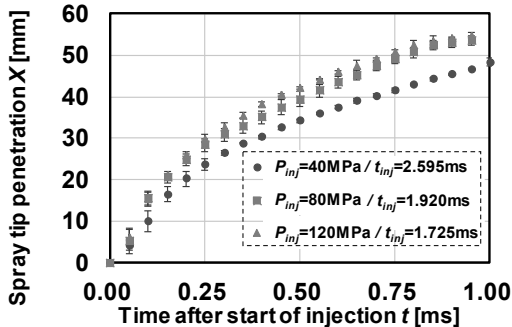


Fig.3 Spray tip penetration for various $P_{inj}(d_n=\phi 0.121\text{mm}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3)$

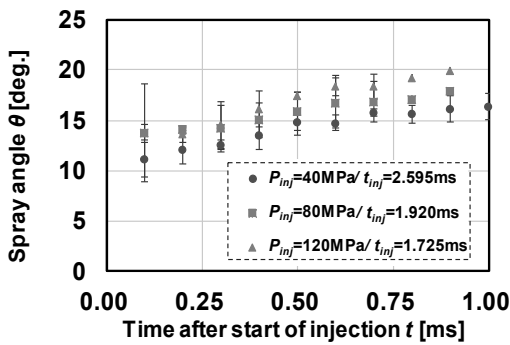


Fig.4 Spray angle for various $P_{inj}(d_n=\phi 0.121\text{mm}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3)$

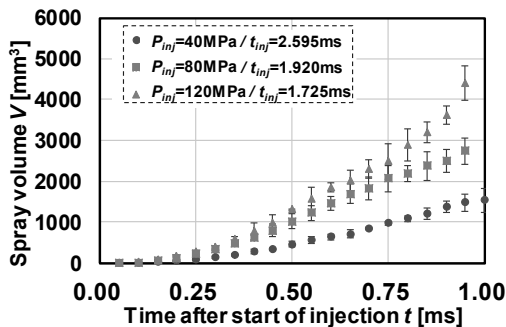


Fig.5 Spray volume for various $P_{inj}(d_n=\phi 0.121\text{mm}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3)$

に、燃料噴出速度の増加によって霧団気場とのせん断力が増加し噴霧が微粒化され、噴霧軸半径方向への分散が大きくなったと考えられる。それに従い図5より、燃料噴射圧力の上昇に伴い同一時刻における噴霧体積が増大したと考えられる。

4.1.2 ノズル噴孔径変化

図6に、ノズル噴孔径 d_n を変化させた際にシャドウグラフ撮影法を用いて撮影した自由噴霧の撮影画像を示す。図6より、噴射開始直後はノズル噴孔径 d_n によらず概ね同一形状の噴霧が確認できるが、0.7ms 後ではノズル噴孔径 d_n の増大に伴い、噴霧先端到達距離がわずかに増加していることが確認できる。

図7, 8, 9にノズル噴孔径 d_n を変化させた場合における噴霧先端到達距離、最大噴霧角および噴霧体積の実験結果を示す。図7, 8より、噴射初期では、噴霧先端到達距離はノズル噴孔径によらず概ね同等の傾向を示すが、最大噴霧角はノズル噴孔径の増大に伴い増加していることが確認できる。噴射初期においては、ノズル内部ではサックのシート部とニードルに起因する燃料流の乱れが生じており、噴孔径がより大きいほど乱れを維持しながら霧団気場に放出される⁹⁾。したがって、ニードルリフトが小さい噴射初期段階では、噴霧半径方向へ拡散されるため、最大噴霧角は増加し、噴霧軸方向への貫徹力は抑制されるため、噴霧先端到達距離は概ね同等の傾向になったと考えられる。

一方、噴射開始から時間経過するに伴い、噴孔径 $d_n=0.115\text{mm}$ と 0.133mm を比較すると1噴孔あたりの流量は噴孔径の2乗に比例することから約1.33倍となるため、噴孔径の増大に伴い噴射率が増加する。それにより噴孔出口における運動量が増加したことで、噴霧の貫徹力が増加するため、噴霧先端到達距離は増加すると考えられる。同時に、噴孔径が増大すると噴射率が増加することから、各ノズル噴孔径条件下では同一時刻において周囲気体にさらされる噴射量が増加する。そのため、周囲気体の影響を受けやすくなることから微粒化が促進

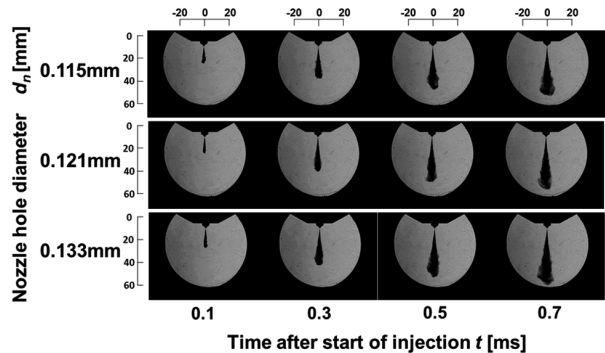


Fig.6 Shadowgraph images of diesel spray for various $d_n(P_{inj}=120\text{MPa}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3)$

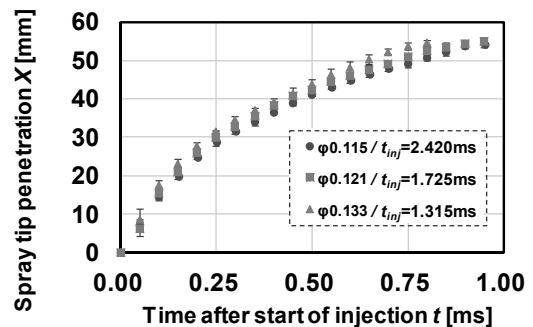


Fig.7 Spray tip penetration for various $d_n(P_{inj}=120\text{MPa}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3)$

され、噴霧角が増加したと考えられる。それに従い図9より、噴孔径の増大に伴い同一時刻における噴霧体積が増大したと考えられる。

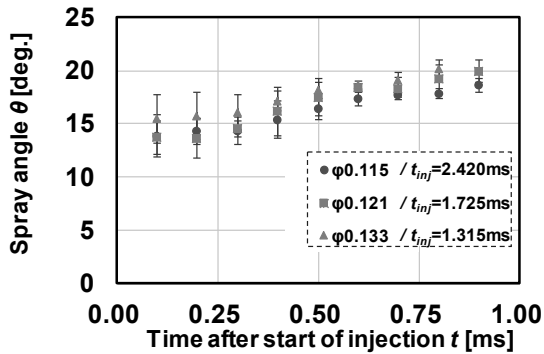


Fig.8 Spray angle for various d_n ($P_{inj}=120\text{MPa}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3$)

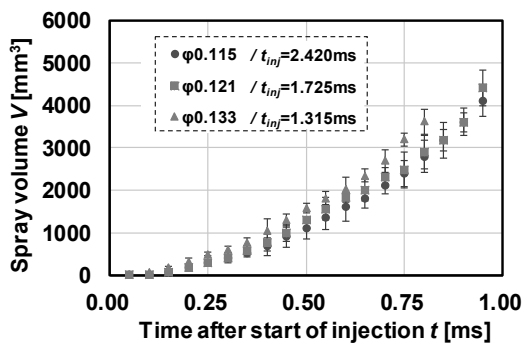


Fig.9 Spray volume for various d_n ($P_{inj}=120\text{MPa}, \rho_a=18.75\text{kg/m}^3$)

4.1.3 雰囲気密度変化

図10に、雰囲気密度 ρ_a を変化させた際にシャドウグラフ撮影法を用いて撮影した自由噴霧の撮影画像を示す。図10より、雰囲気密度 ρ_a の増加に伴い、噴霧のコンパクト化が確認できる。

図11, 12, 13に雰囲気密度 ρ_a を変化させた場合における噴霧先端到達距離、最大噴霧角および噴霧体積の実験結果を示す。図11, 12より、雰囲気密度 ρ_a の増加に伴い、噴霧先端到達距離が減少していることが確認できる。これは、雰囲気密度の増加に伴い雰囲気場の抗力が増大したこと、またせん断力が増大したことで微粒化が促進され、周囲気体による気流の影響を受けやすくなり半径方向への分散が大きくなったためであると考えられる。それに従い図13より、雰囲気密度の上昇に伴い同一時刻における噴霧体積が減少していることが分かる。

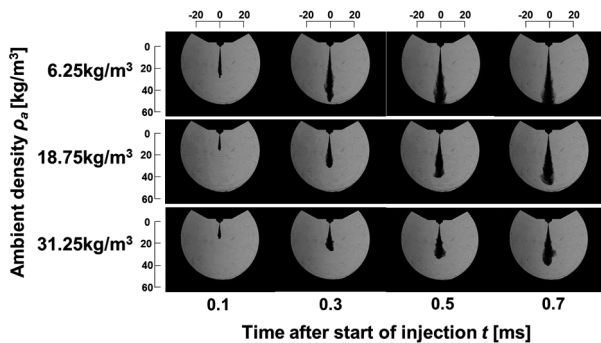


Fig.10 Shadowgraph images of diesel spray for various ρ_a ($P_{inj}=120\text{MPa}, d_n=\phi 0.121\text{mm}, t_{inj}=1.725\text{ms}$)

4.2 実験式との整合性

4.1節にて噴射圧力、雰囲気密度およびノズル噴孔径を変化させた実験データを調査した。4.2節では、この実験データを用いて各因子の噴霧角および噴霧体積に対する指数相関を求め、過去の実験式との整合性を検証した。

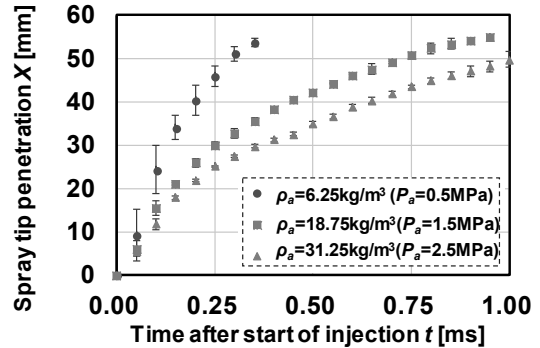


Fig.11 Spray tip penetration for various ρ_a ($P_{inj}=120\text{MPa}, d_n=\phi 0.121\text{mm}, t_{inj}=1.725\text{ms}$)

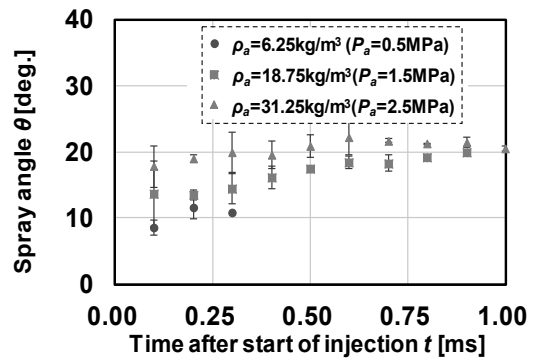


Fig.12 Spray angle for various ρ_a ($P_{inj}=120\text{MPa}, d_n=\phi 0.121\text{mm}, t_{inj}=1.725\text{ms}$)

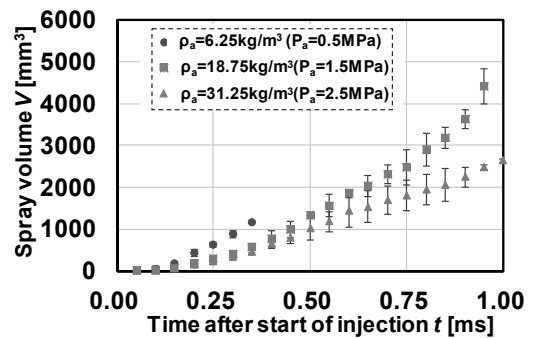


Fig.13 Spray volume for various ρ_a ($P_{inj}=120\text{MPa}, d_n=\phi 0.121\text{mm}, t_{inj}=1.725\text{ms}$)

4.2.1 噴霧角の実験式の選定

過去の噴霧角に関する指数相関式として2章で述べたように、廣垣ら⁽⁹⁾、稲垣ら⁽¹⁰⁾、北口ら⁽¹⁵⁾の式の3つを挙げたが、本実験結果と検証する上で実験式を選定する必要がある。ここで、図14に示すように、ディーゼル噴霧の構造は模式的に4つの領域に分類できる⁽¹⁷⁾。本実験では噴霧の最外縁を計測して算出した最大噴霧角を計測しているため、領域IIIで測定された角度である。一方で、稲垣ら、北口らの式の噴霧角における噴射圧力の検証範囲はそれぞれ43~180MPa、100~300MPaであり、その測定位置はそれぞれ噴霧長の半分の位置、ノズル噴孔から25mm地点である。したがって、2式における噴霧角の測定領域は図14における領域IIもしくはその上流であると

推測される。また、廣安らの式の噴霧角における測定位置はノズル噴孔から 30mm 地点であるが、噴射圧力の検証範囲が 10~15MPa といった低噴射圧力であることから、噴霧が成長しないと考えられる。したがって、廣安らの式における噴霧角の測定領域は図 14 における領域 III であると推測される。以上より、本報での比較検証は、測定領域が同じであると考えられる廣安らの式を用いた。

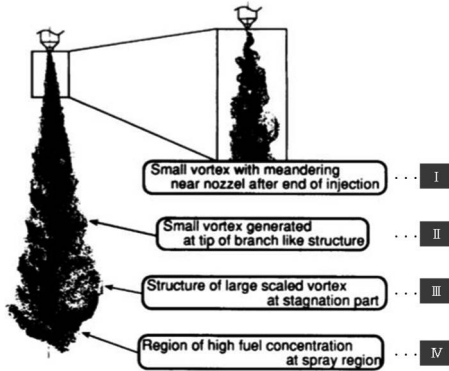


Fig.14 Qualitative model of diesel spray structure [Reproduced from Ref. (17)]

4.2.2 噴霧角の整合性

図 4, 8, 12 の実験データを元に噴霧角の各因子に対する時系列での指数値を整理したものを図 15 に示す。図 15(a)は噴射圧力に対する指数値、図 15(b)は雰囲気密度に対する指数値、図 15(c)はノズル噴孔径に対する指数値を示す。ここで、噴霧角の各パラメータに対する指数相関式を式(4)に示す。

$$\theta = A \cdot P_{inj}^a \cdot \rho_a^b \cdot d_n^c \quad (4)$$

ここで、 A は実験定数、 a, b, c は指数値を示す。図 15 より、廣安らの式の指数値と比較して実験より算出した指数値 a はいずれの時間においても概ね一致し、指数値 b, c はわずかに大きい値となるのが確認できる。これは、本実験では混合気形成時における噴霧形成領域で噴霧角を測定しているため、噴霧主流域の流動が噴霧の半径方向の広がり大きく寄与することから実験式に対して大きい指数値を示す実験結果になったと考えられる。

4.2.3 噴霧体積の整合性

噴霧体積の変化は運動論理論より式(5)(6)で示される⁽¹⁸⁾。

$$V = \frac{\pi}{3} (S \tan \varphi)^2 S = \frac{\pi C_c K_p^3}{3 K_{bl}^2} (d_n)^{1.5} \left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.75} t^{1.5} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{\beta}{d_n^{0.5} \left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.25}}, \quad \beta = \frac{S}{\sqrt{t}}, \quad K_{bl} = \frac{K_p^2}{\sqrt{2} K_v} \quad (6)$$

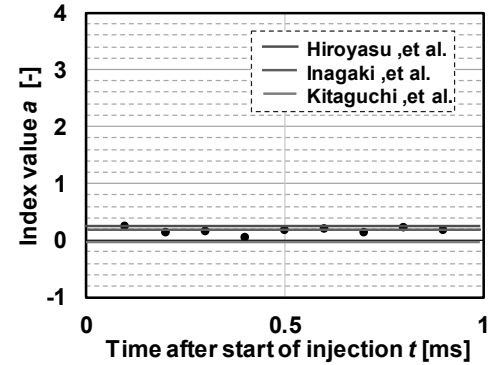
ここで、 S は噴霧先端到達距離を示す。よって、噴霧体積における各パラメータに対する指数相関式を式(7)に示すことができる。

$$V = B \cdot P_{inj}^\alpha \cdot \rho_a^\beta \cdot d_n^\gamma \quad (7)$$

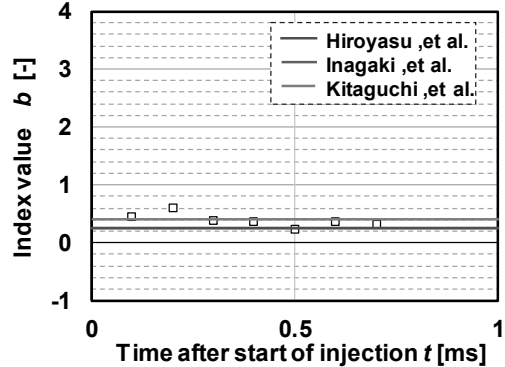
ここで、 A は実験定数、 α, β, γ は指数値を示す。各パラメータに対する指数値は、理論式では式(5)より $\alpha=0.75, \beta=-0.75, \gamma=1.5$ となる。

図 5, 9, 13 の実験データを元に各因子の噴霧体積に対する時系列での指数値を整理したものを図 16 に示す。図 16 より、

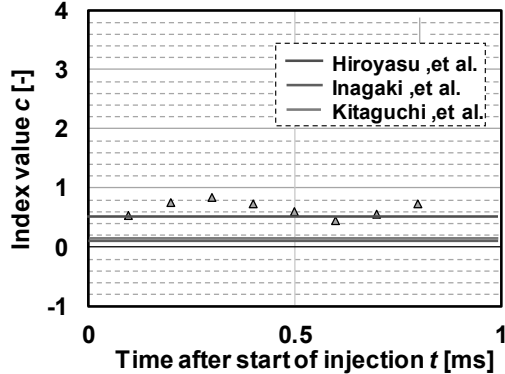
噴射開始直後は全てのパラメータに対する実験より算出した指数値は理論式での指数値より上回り、時間の経過に伴い理論上の指数値に収束することがわかる。ここで、ニードルリフトが微量時に燃料を噴射する状態を非定常状態、十分に上昇して一定の流量を維持しながら燃料を噴射する状態を定常状態と考えると、図 16 より指数値が一定に収束する $t=0.4\text{ms}$



(a) Index value of injection pressure P_{inj}



(b) Index value of ambient density ρ_a



(c) Index value of nozzle hole diameter d_n

Fig.15 Index value of various parameter after injection

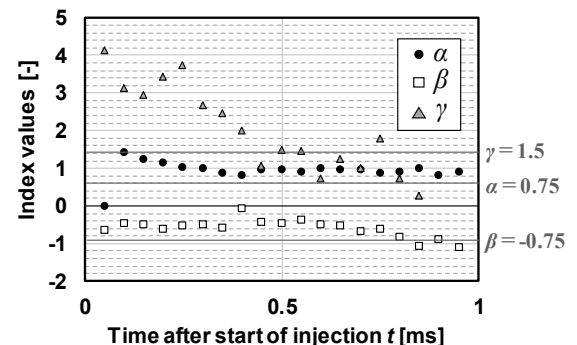


Fig.16 Index value of various parameter after injection

以降の噴霧は定常状態であると考えられる。このことから、各パラメータに対して噴射開始直後の噴霧が非定常状態では理論上の指数相関式は成立しないことが確認できた。一方で、噴霧が定常状態の場合、各パラメータに対する指数相関は成立することが確認できた。

5. 結言

本実験では、ディーゼル噴霧において燃料噴射圧力およびノズル噴孔径、雰囲気密度を変化させた際の噴霧マクロ特性に関する計測を行なった。得られた知見を以下に示す。

- (1) 燃料噴射圧力の上昇に伴い、噴霧の貫徹力増大および微粒化促進により、噴霧先端到達距離および最大噴霧角が増大し、噴霧体積が増加する。
- (2) ノズル噴孔径の増大に伴い、噴射率が増大することにより運動量および周囲気体の影響を受けやすくなることから、噴霧先端到達距離および最大噴霧角が増大し、噴霧体積が増加する。
- (3) 雰囲気密度の増加に伴い、抗力の増大およびせん断力の増大による微粒化促進により、噴霧先端到達距離が減少し、最大噴霧角が増大するため噴霧体積が減少する。
- (4) 噴霧角の指数相関式を各パラメータにおいて算出し、廣安らの式と比較すると、噴射圧力に対する指数値は概ね一致したが、雰囲気密度、ノズル噴孔径に対する指数値は大きくなった。
- (5) 噴霧体積の指数相関式を各パラメータにおいて算出し、運動論理論によって算出された式と比較すると、噴霧の定常状態においては指数値が一致する。

文 献

- (1) 水田美能, 埴雅一: 化石燃料供給の我が国への影響, 日本エネルギー学会誌, 94-11(2015), 1234-1242.
- (2) 松本泰郎: 世界のエネルギー資源の現状と展望, 自動車技術, 58-11(2004), 4-10.
- (3) 山口恭平, 鈴木央一: 世界統一試験サイクルにおける燃費および排出ガス性能について-車両試験結果からわかるJC08モードとの違い-, 独立行政法人交通安全環境研究所, (2014).
- (4) 青山市三: 21世紀の自動車に求めるもの, 自動車技術会, 62-11(2008), 2.
- (5) 石野勲雄: エンジンの技術革新(<メカライフ特集>機械の進歩 激動の四半世紀), 日本機械学会誌, 115-1120(2012), 134-135.
- (6) 新井雅隆: ディーゼル噴霧とその燃焼, 微粒化, 22-77(2013), 189-202.
- (7) 谷泰臣, 森幸雄, 望月孝一, 鈴木敦志: 多孔ノズルインジェクタの微粒化, デンソーテクニカルレビュー, 5-2(2000), 27-35.
- (8) 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 (B編), 25-156(1959), 820-826.
- (9) 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, 21(1980).
- (10) 稲垣和久, 水田準一, 橋詰剛, 友田晃利: 小ボア径ディーゼルエンジンの噴霧設計に関する理論的研究(第2報: 噴霧特性相似を用いた噴霧設計法の提案), 自動車技術会論文集, 47-1(2016), 31-37.
- (11) Dan, T., Yamamoto, T., Senda, J., Fujimoto, H.: Effect of Nozzle Configurations for Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray, SAE Technical paper, 970355(1997).
- (12) Dan, T., Yamamoto, T., Senda, J., Fujimoto, H.: Effect

- of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray, SAE Technical paper, 97032(1997).
- (13) Dan, T., Senda, J., Fujimoto, H.: Organized Structure and Motion in Diesel Spray, SAE Technical paper, 970355(1997).
 - (14) Zhang, W., K., Nishida: Mixture Formation and Combustion of Diesel Sprays from Micro Hole Nozzle under Ultra-High Injection Pressure, THIESEL2010(2010).
 - (15) 北口浩二, 松本雅至, 南埜良太, 河辺隆夫, 表洪志, 岡田周輔, 千田二郎: 実験式および数値計算による超高压噴射・高密度場ディーゼル噴霧特性の予測(第一報: 噴霧特性に対する実験式の有効性), 第21回微粒化シンポジウム講演論文集(2012), 15-22.
 - (16) 段智久: ディーゼル燃料噴霧の乱流構造とその形成機構, 同志社大学博士課程後期論文, (1996), 55-87.
 - (17) 段智久, 高岸佐代, 大石直己, 千田二郎, 藤本元: 高压燃料噴射時のディーゼル噴霧構造に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 62-597(1996), 2079-3085.
 - (18) Masataka Arai: Physics behind Diesel Spray and Its Combustion, LAP LAMBERT Academic Publishing(2016), 209.