

G0700506

少量噴射時におけるディーゼル噴霧特性に関する研究

住野 友則^{*1}, 包 智超^{*2}, 堀部 直人^{*3}, 石山 拓二^{*3}

Study on Characteristics of a Diesel Spray under Small-Quantity Injection Condition

Tomonori SUMINO^{*1}, Zhichao BAO, Naoto HORIBE and Takuji ISHIYAMA

^{*1} Graduate School of Energy Science, Kyoto University
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

This study aims to investigate the spray development process of diesel spray under small-quantity injection condition. The effects of injection pressure and injection quantity on spray tip penetrations were analyzed using a rapid compression and expansion machine, and the effects of injection-rate pattern on spray development process were simulated using a one-dimensional spray model. The results show that the spray tip penetration is dependent on time with exponent more than one just after injection start, and the exponent turns to one and one half as time elapses. With small-quantity spray the exponent is one forth after the end of injection. The simulation results show that the penetration dependence on time to the power of more than one during beginning of injection is caused by increasing momentum flux by rising injection rate, and the penetration rapidly decelerates as reducing momentum flux at the spray tip by decline of injection rate.

Key Words : Diesel, Spray, Injection, Penetration, Pilot injection, Post injection

1. 緒 言

ディーゼル機関の騒音低減や排ガス低減のためにパイロット噴射やアフター噴射などの多段噴射が活用されている。多段噴射の条件を適切に選ぶには混合気形成と熱発生、環境影響物質の生成との関連を明らかにする必要がある。混合気形成に関連する噴霧発達に関する研究⁽¹⁾⁽²⁾は古くから数多く行われてきたが、パイロット噴射やアフター噴射に用いられる少量噴射時の噴霧発達過程についての基礎的知見は十分とは言えない。そこで本研究では、少量噴射時の混合気形成過程を明らかにするために、急速圧縮膨張装置を用いて噴霧の可視化実験を行い、噴射圧力および噴射量が噴霧先端到達距離に及ぼす影響を調べた。さらに、Musculusらのモデル⁽³⁾に準じた数値計算を行い、各噴射条件に対する噴霧発達過程について考察した。

2. 実験装置および方法

実験には、急速圧縮膨張装置⁽⁴⁾（ボア×ストローク：102 mm×105 mm，圧縮比 12.9）を用いた。本装置は、シリンダヘッド内に高さ 40 mm，幅 30 mm，深さ 43 mm の概ね直方体の燃焼室を持つ。コモンレール式噴射装置を用いてピエゾ駆動式単噴孔噴射弁（噴孔径 0.12 mm）により JIS2 号軽油（密度 832.7 kg/m³@15℃，総発熱量 45.8 MJ/kg）を燃焼室内に噴射し、左右の観察窓（高さ 40 mm，幅 30 mm）を通して透過型シャドウグラフ法により燃焼室全体を撮影した。撮影は高速度デジタルイメージングカメラ（Photron FASTCAM SA1.1）を使用し、撮影速度 90,000 fps，露光時間 3.5 μs で行った。撮影画像をもとに噴霧先端到達距離を求めた。なお、本実験では吸気に窒素を用いる非燃焼条件において実験を行った。エンジン回転速度は 1,200 rpm とし、TDC における筒内圧力が 4.2 MPa となるよう吸気圧力を調整した。それにより、TDC における筒内温度は 600 K，雰囲気密度は 23.6 kg/m³ となっ

^{*1} 学生員，京都大学大学院 エネルギー科学研究科（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

^{*2} 京都大学大学院

^{*3} 正員，京都大学

E-mail: sumino.tomonori.76c@st.kyoto-u.ac.jp

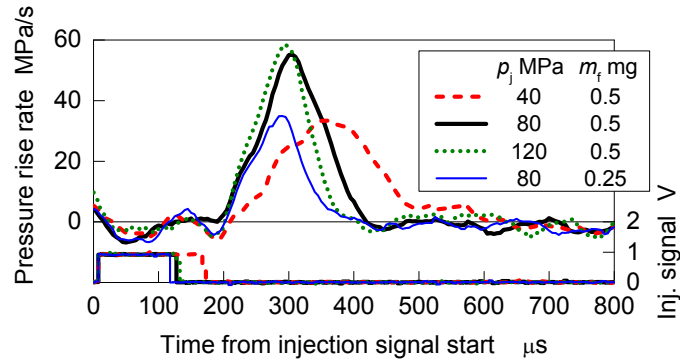


Fig. 1 Injection rates under various injection conditions

た．噴射時期は TDC とした．噴霧先端到達距離は，連続する 2 フレームの撮影画像の差分画像においてグレー値が最大となる画素を噴霧先端とみなして求めた．

実験に先立ち，Zeuch の方法⁶⁾を用いて各噴射条件における噴射率を計測した．計測では，噴射前の容器内圧力を 2.0 MPa とした．図 1 に計測容器内の圧力上昇率（噴射率に比例）および噴射信号の履歴を示す．いずれの噴射条件でも圧力上昇率は直線的に増加した後，直ちに減少する三角形状をしており，定常状態は見られない．同一噴射量では噴射圧力を高めるほど噴射期間が短くなり，また，同一噴射圧力では噴射量を小さくすると噴射期間が短くなる傾向が得られた．

3. 実験結果および考察

3・1 噴射圧力の影響

噴射圧力の影響を調査するため，噴射量 $m_i = 0.5$ mg において噴射圧力 p_j を 40, 80, 120 MPa と変化させた．噴射開始からの経過時間 t に対する噴霧先端到達距離 S を図 2 に示す．いずれの噴射圧力でも，先端到達距離は始め急激に増加し，やがて上昇率が緩やかになる．噴射圧力を高めると，先端到達距離は大きくなる．先端到達距離の推移をより詳細に調べるため，図 2 の結果の両対数表示を図 3 に示す．いずれの噴射圧力でも，噴射の初期は傾き 1 よりも大きな傾きで先端到達距離は増加し，やがて傾き 1 の直線に沿って増加した後，噴射率ピークを超えたあたりから傾き 0.5 で増加した．初期の傾き 1 以上の領域は噴射率が增加していく影響を受けたと考えられ，それ以降の傾き 1 および 0.5 の領域は廣安らの結果²⁾と同じ傾向となった．

3・2 噴射量の影響

つぎに噴射量の影響を調査するため，噴射圧力 80 MPa において，噴射量 m_i を 0.25 mg に減少させて実験を行った．図 4 に噴射量 0.5 mg および 0.25 mg の噴霧先端到達距離の時間経過を示す．噴射量を減らしても噴射開始

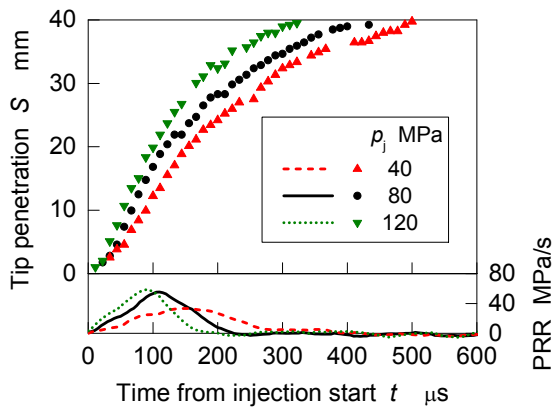


Fig. 2 Effect of injection pressure on tip penetration

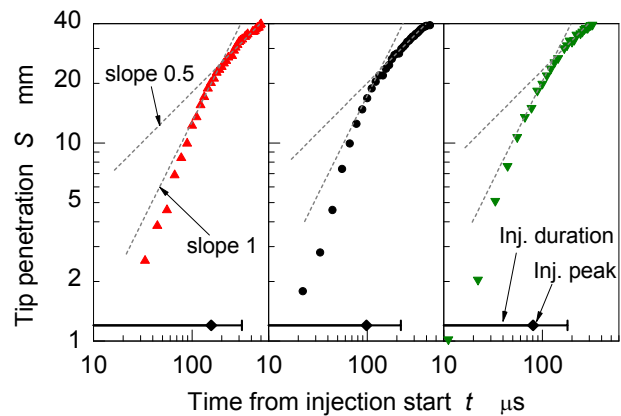


Fig. 3 Effect of injection pressure on tip penetration on logarithmic scale

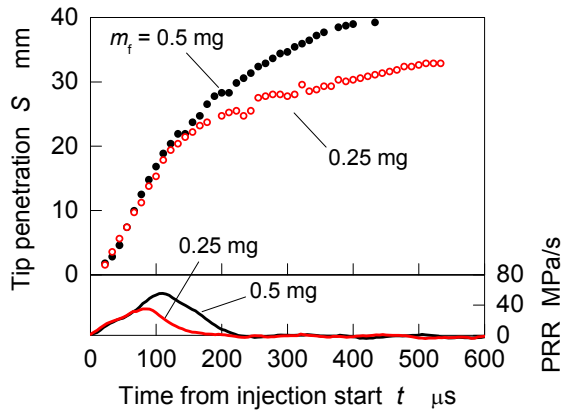


Fig. 4 Effect of injection quantity on tip penetration

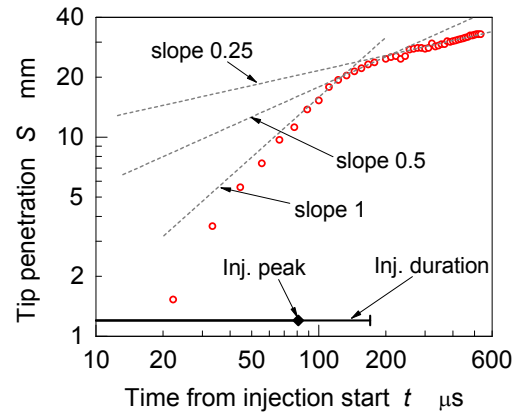


Fig. 5 Effect of injection quantity on tip penetration on logarithmic scale

直後は先端到達距離に違いは現れないが、噴射率を小さくすると噴射が終了する $t = 150 \mu\text{s}$ あたりから噴霧先端の速度が急激に低下し、 $m_f = 0.5 \text{ mg}$ の場合よりも先端到達距離は短くなった。噴射量 $m_f = 0.25 \text{ mg}$ の結果を両対数表示した図5によると、先端到達距離は噴射終了時期あたりから t の0.25乗比例に近づく。

3・3 数値計算を用いた解析

上記のような先端到達距離の時間依存性の変化について考察するために、Musculus らの一次元噴霧モデル⁽⁴⁾を用いて数値解析を行った。このモデルは、半径方向の速度・濃度分布形状を与え、噴霧拡がり角を一定として扱う簡易モデルである。雰気密度 23.6 kg/m^3 、燃料密度 832.7 kg/m^3 、噴孔径 0.12 mm 、流量係数 0.8 、噴霧拡がり角 12.5° 一定とし、噴射量 $m_f = 0.5 \text{ mg}$ および 0.25 mg について計算した。噴射率経過は噴射率が一定となる矩形および実測に近い三角形とした。噴射圧力 80 MPa 、噴射量 $m_f = 0.5 \text{ mg}$ における実測の噴射期間 $220 \mu\text{s}$ をベースとして、 $m_f = 0.25 \text{ mg}$ の場合、矩形噴射では噴射期間を半分とし、三角形の噴射では最大噴射率および噴射期間をそれぞれ $1/\sqrt{2}$ 倍した。

まず、図6に矩形噴射を用いた場合の先端到達距離を示す。実測と異なる履歴を示すが、噴射量を減らすと先端到達距離の増加率が $m_f = 0.5 \text{ mg}$ の場合と比べて途中から小さくなる傾向を再現する。図7に示す両対数グラフによると、先端到達距離ははじめ直線的に増加し、噴射終了後しばらく経ってから実測同様に t の0.25乗に比例するように推移する。

定常噴射の場合、噴射期間中は噴霧軸上のいずれの断面でも運動量流束が一定となることが知られている。そこで、噴霧先端到達距離の時間依存性が大きく変化する $m_f = 0.25 \text{ mg}$ について、噴射中および噴射終了後の噴霧

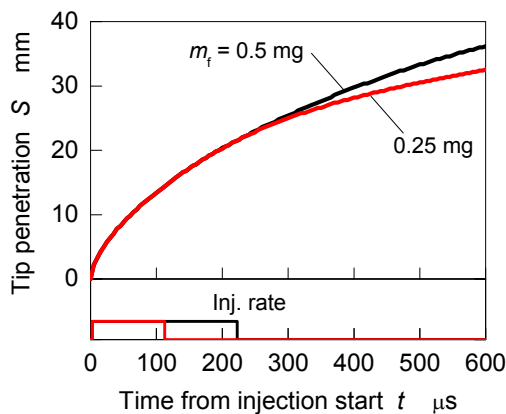


Fig. 6 Effect of injection quantity on tip penetration by simulation with constant injection rate

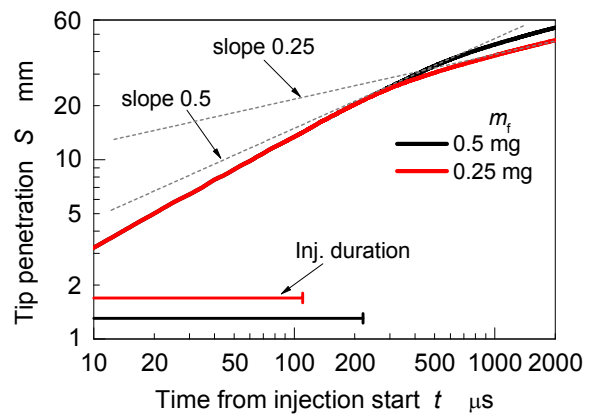


Fig. 7 Effect of injection quantity on tip penetration by simulation with constant injection rate on logarithmic scale

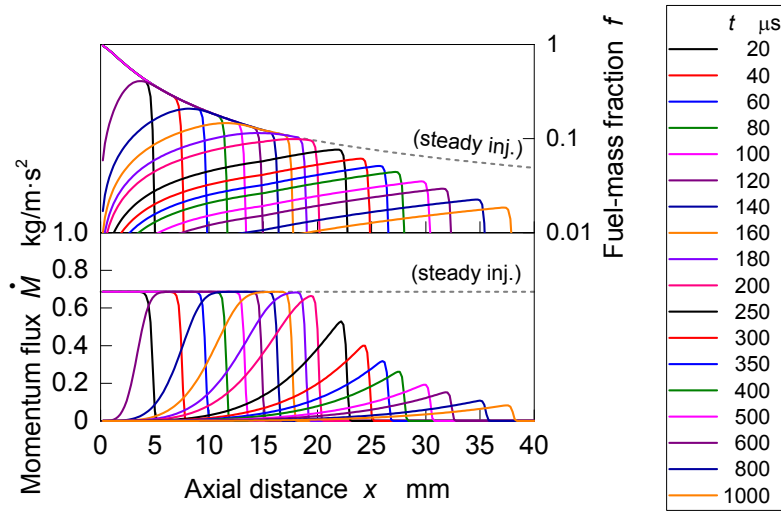


Fig. 8 Cross-sectionally averaged momentum flux and fuel-mass fraction with constant injection rate

内運動量流束分布および燃料質量分率分布を調べた。図8に噴射ノズルから噴射軸方向距離 x における噴霧断面の平均運動量流束 $\dot{M}$ および燃料質量分率 f を示す。噴射期間中 ($t < 110 \mu\text{s}$)、運動量流束はいずれの x においても一定となる。この期間中、図7より噴霧先端到達距離の時間依存性は一定である。噴射が終了すると、噴霧後端から $\dot{M}$ および f が低下し、 $t = 200 \mu\text{s}$ あたりに噴霧先端の $\dot{M}$ および f が定常噴射を続けた場合 (steady injection) と比べて低下し始め (図8)、先端到達距離の増加率が減少し始める (図7)。さらに時間が経ち、 $\dot{M}$ および f が十分低くなると、先端到達距離は t の 0.25 乗に近づく。このように噴射終了によって運動量の供給が止まり、運動量流束の低下が噴霧先端に到達することにより、噴霧先端到達距離が急激に減速し、時間依存性が変化すると考えられる。

つぎに、実験条件に近い三角形の噴射率を用いて数値計算を行った。図9および図10に噴射開始からの時間 t に対する先端到達距離 S の線形グラフおよび両対数グラフを示す。図9より先端到達距離の絶対値は実測 (図4) と比較して小さく計算されているが、噴射量を減少させると $t = 150 \mu\text{s}$ あたりから先端到達距離の増加が抑えられる傾向を再現していることが分かる。図10に示す通り、実測 (図5) と同様に噴射率ピークからしばらく経った後に先端到達距離の傾きは1より小さくなり、噴射終了後に傾きは0.5より小さくなる。

図11に $m_f = 0.25 \text{ mg}$ における噴霧断面の平均運動量流束 $\dot{M}$ および燃料質量分率 f を示す。矩形噴射の場合 (図8) と異なり、噴射率上昇中 ($t < 78 \mu\text{s}$) は噴霧全域において $\dot{M}$ が増加する。そのため、図10の初期における噴霧先端到達距離 S の傾きは1より大きくなる。 $t = 100 \mu\text{s}$ 付近で噴霧先端付近の $\dot{M}$ が最大となり、その後は運動量の供給減少・停止に伴って噴霧先端の $\dot{M}$ が減少し、図10における S の傾きが小さくなる。矩形噴射の場合、噴射終

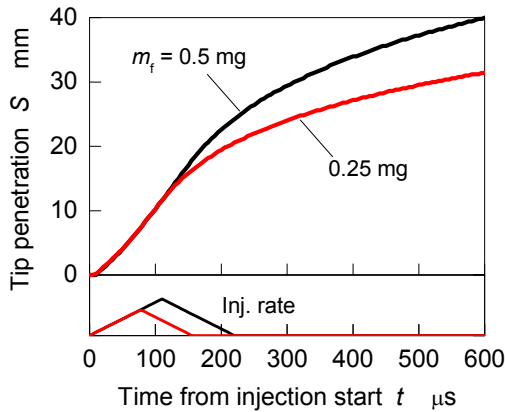


Fig. 9 Effect of injection quantity on tip penetration by simulation with triangle injection rate pattern

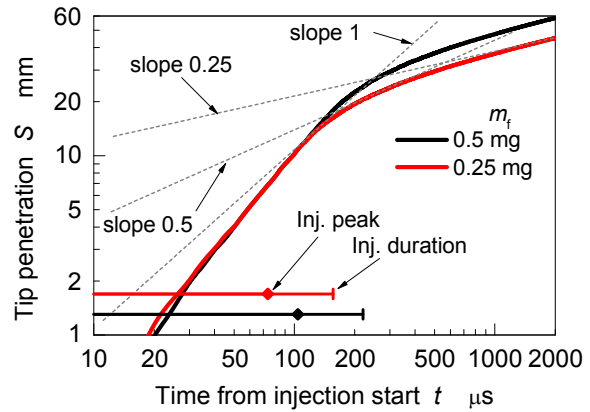


Fig. 10 Effect of injection quantity on tip penetration by simulation with triangle injection rate pattern on logarithmic scale

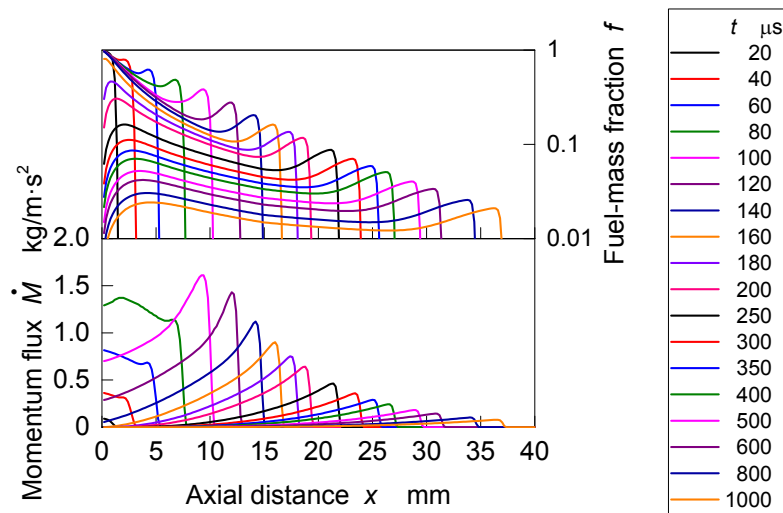


Fig. 11 Cross-sectionally averaged momentum flux and fuel-mass fraction with triangle injection rate pattern

了後にノズル近傍の f が急激に低下し、燃料が噴霧先端付近に集中して存在するのに対し、三角形の噴射率ではノズル付近に f のピークがあり、噴霧先端とノズル近傍の両端に比較的 f が高い領域が残る。

4. ま と め

急速圧縮膨張装置を用いて少量噴射時の噴霧の可視化を行い、噴射圧力および噴射量が噴霧先端到達距離に及ぼす影響を調べた。さらに、簡易な一次元噴霧モデルを用いて噴射率形状が噴霧発達過程に及ぼす影響を考察した。

- ・ 噴霧先端到達距離の時間依存は、噴射初期では時間の 1 乗より大きく、その後、1 乗から 0.5 乗へと推移する。
- ・ 噴射量を小さくすると、先端到達距離は噴射終了時期あたりから時間の 0.25 乗比例に近づく。
- ・ 矩形噴射の噴射期間中では噴霧内の運動量流束は一定となり、先端到達距離の時間依存性は一定となる。一方、三角形の噴射率では噴射率上昇中は噴霧全域で運動量流束が増加し、先端到達距離は時間の 1 乗より大きくなる。
- ・ 噴射率の減少により運動量供給が減少して噴霧先端の運動量流束が低下すると、先端到達距離は急速に減速する。

本研究は JSPS 科研費 26820063 の助成を受けたものです。

文 献

- (1) 和栗雄太郎ほか，“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（第 2 部），Vol. 25, No. 156 (1959), pp. 820-826.
- (2) 廣安博之ほか，“ディーゼル噴霧の到達距離に関する研究”，日本機械学会論文集（第 2 部），Vol. 44, No. 385 (1978), pp. 3208-3219.
- (3) Musculus, M.P.B., Kattke, K., “Entrainment Waves in Diesel Jets”, *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2, No. 1 (2009), pp. 1170-1193.
- (4) 植村拓海ほか，“少量噴射におけるディーゼル噴霧特性の解析”，日本機械学会関西支部第 90 期定時総会講演会講演論文集 (2015), M217.
- (5) Zeuch, W., “Neue Verfahren zur Messung de Einspritzgesetzes und de Einspritz-Regelmäßigkeit von Diesel-Einspritzpumpen”, *MTZ*, nr. 9 (1961).