

実機等倍ディーゼルノズルの内部流動計測

間弓 功一*1, 田端 道彦*2

Measurement of internal flow in real size nozzle of diesel injector

Koichi MAYUMI*1, Michihiko TABATA*2

A transparent nozzle of the same size was created and measured to clarify the internal flow of the nozzle that is believed to be affecting diesel spray. By using quartz glass with a refractive index close to that of diesel fuel for the material of the transparent nozzle, only cavitation generated inside the nozzle can be taken as a shadow. Therefore, the injection pressure increases, the cavitation generation area differs, and the spray angle fluctuates as the cavitation amount fluctuates. Furthermore, with two-hole injectors, string cavitation is likely to be connected in the nozzle sac and occurs for a long time.

Key words: diesel injector, cavitation, transparent nozzle, spray atomization

1. はじめに

ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べ高効率であるが、排ガスに含まれる有害物質が問題視されている。燃焼の改善には燃料噴霧の微粒化が重要な因子である。また、噴霧の微粒化には、ノズル噴孔内部に生じるキャビテーションが深く関わっていることが報告されており⁽¹⁾⁽²⁾、ノズル内部流動と噴霧特性の関係性を明らかにする必要がある。しかし、実際のディーゼルノズル内の現象は複雑かつ高速であるため、拡大ノズルを用いた評価が行われてきた。しかし、拡大モデルによる定性的評価だけでは、十分な情報が得られないため、実機と等倍のノズルを用いた内部流動の計測が必要である。

本研究は、実機と等倍の透明ノズルを用いて、ノズル内部のキャビテーションと噴霧角を計測し、ノズル内部流動が及ぼす燃料噴霧への影響を明らかにした。

2. 実験装置及び方法

図1に今回使用した透明ノズルの外観と寸法を示す。噴孔径 $\phi 0.125$, $\phi 0.170$ [mm], 噴孔長さ 0.80 [mm]で、内部の観測を容易にするため、2噴孔とした。材質には軽油と屈折率の近い石英ガラスを使用した。この透明ノズルを、先端に研削加工を施した実機噴射ノズルに取り付けるこ

とで噴射ノズル先端部を可視化した。

図2に実験装置の概略図を示す。燃料噴射にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置を用い、噴射パルス期間を 0.4 [ms]とし、微少噴射量におけるノズル内部流動を計測した。

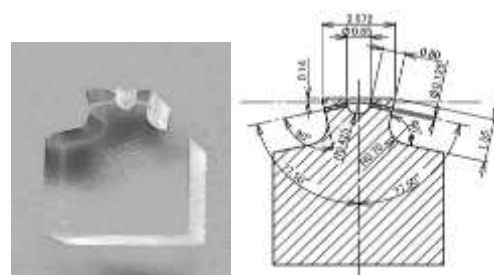


図1. 透明ノズル外観及び寸法

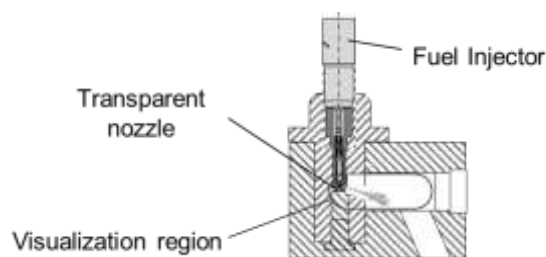


図2. 実験装置概略図

原稿受付 2020年4月9日

*1 近畿大学大学院 システム工学研究科 システム工学専攻 博士前期課程 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

*2 近畿大学工学部 機械工学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

E-mail tabata@hiro.kindai.ac.jp

連絡先: 田端道彦 (研究代表)

図3に実験時の光学系配置を示す。光源に連続発振の固体レーザーを用い、凹レンズで拡散させ、透明ノズルに照射する。対面に設置した拡大光学装置を装着した高速度カメラ（撮影速度 37,000[fps]）により背景散乱光撮影を行った。

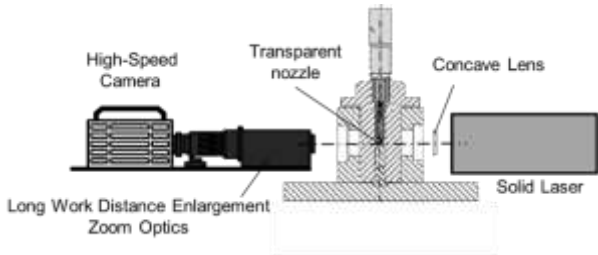


図 3. 光学系配置

表 1 に実験条件を示す。実験は室温、大気圧下で行った。針弁の上がりきらない微少噴射量における、噴射圧力を上げた場合、噴孔径が異なる場合のノズル内部流動を計測した。

表 1. 実験条件

Common rail type injector	G3S
Injection pressure [MPa]	10, 30, 50
Injection time [ms]	0.4
Number of nozzle holes	2
Nozzle hole diameter D [mm]	0.125, 0.170
Nozzle hole length L [mm]	0.8

3. 実験結果及び考察

図 4 にノズル内部の撮影結果を示す。噴射パルス幅

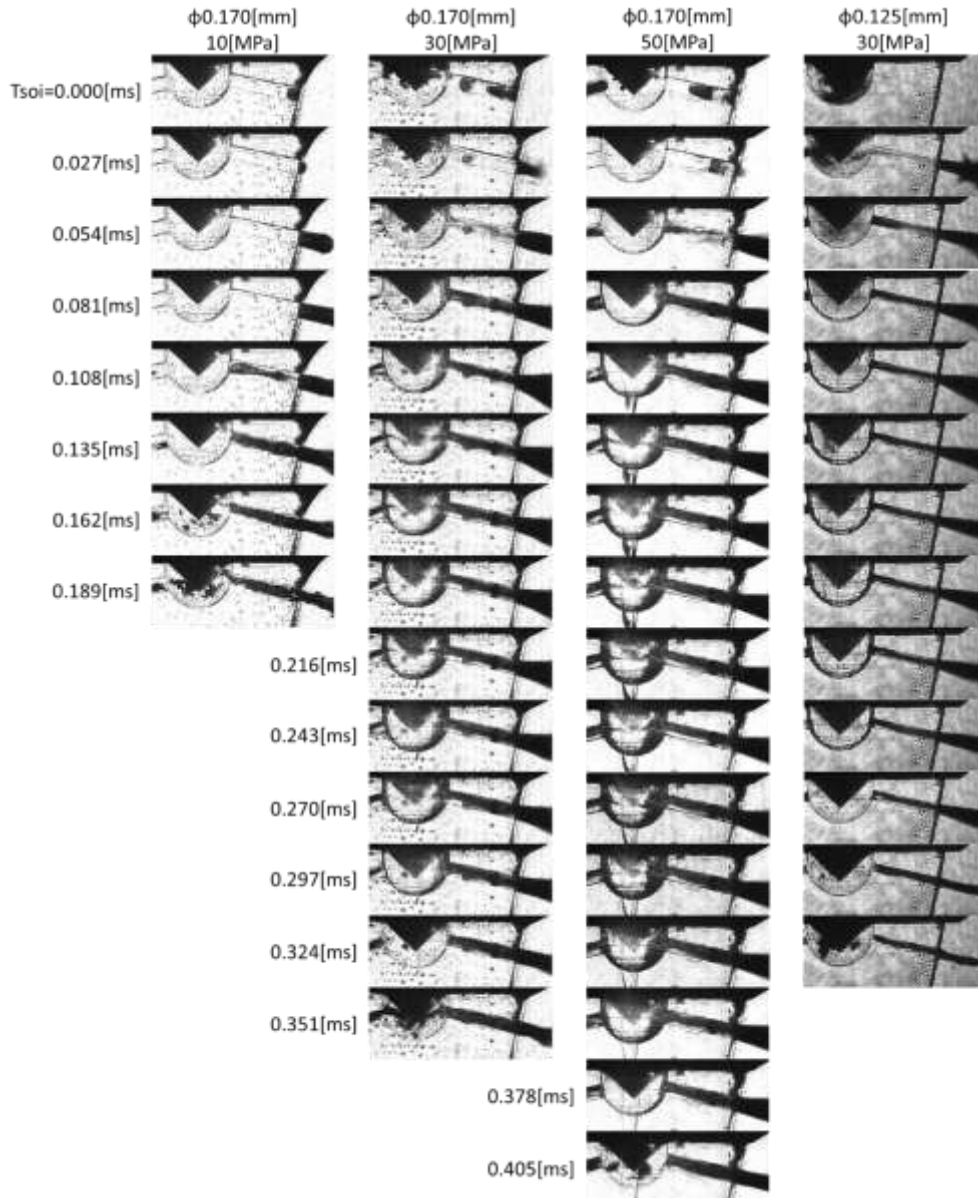


図 4. ノズル内部撮影画像

は 0.4[ms]一定とし、噴孔径 0.170[mm]における噴射圧力 $P_{inj}=10, 30, 50$ [MPa]、噴孔径 0.125[mm]における噴射圧力 $P_{inj}=30$ [MPa]の時系列変化を示している。噴射開始時期は画像より噴孔出口から燃料が現れた画像の直前の画像を $T_{soi}=0$ [ms]とした。

各条件においても噴射パルス一定としているため、噴孔径 $\phi 0.170$ [mm]、噴射圧力 10[MPa]では針弁の上昇が微小で噴射期間が短く、極少量の噴射しか行われない。噴射開始から 0.108[ms]で噴孔入口下側のエッジからキャビテーションが発生している。その後針弁は 0.162[ms]で閉まる。

噴孔径 $\phi 0.170$ [mm]での噴射圧力 30, 50[MPa]では針弁の上がり始めはサック内の流速が遅く、キャビテーションは見られないが、0.054[ms]から噴孔入口上側のエッジにおいてキャビテーションが発生していることがわかる。また、30[MPa]では 0.135[ms]、50[MPa]では 0.108[ms]でサック内にストリングキャビテーションが発生しており、その後成長し、2つの噴孔でつながっていることがわかる。ストリングキャビテーションは旋回流による中心負圧発生と関係して発生することから³⁾、2孔ノズルでは2つの噴孔の旋回流が影響しあい、ストリングキャビテーションがつながりやすいことが考えられる。

また、針弁が上がるにつれ、サック内を覆うように影が発生していることがわかる。これは、噴射圧力が高くなるほど、影の占める割合が大きくなっている。噴射圧力が高くなるほどサック内の流れが乱れ、密度差が生じることで、影が生じていると考えられる。

噴孔径 $\phi 0.170$ [mm]、 $\phi 0.125$ [mm]の噴射圧力 30[MPa]を比較すると、 $\phi 0.170$ [mm]ではストリングキャビテーションが長期間つながっているが、 $\phi 0.125$ [mm]ではストリングキャビテーションの影が薄いことから、噴孔径が大きいほどストリングキャビテーションが発生しやすいことがわかる。

各条件においても針弁が閉じると、噴孔出口からサック内に空気が入り込み、サック内に滞留する。これは次回の噴射に影響を与えていると考えられる。

噴射圧力違い、噴孔径違いによって針弁のリフト量に差異があるのか調べるため、各条件における針弁のリフト量を計測した。また、噴孔内のキャビテーション量を定量的に示すために、噴孔の上部領域と下部領域に分けて測定した。噴霧角も上部 $\theta 1$ と下部 $\theta 2$ の測定を行った。その計測領域の概略を図 5 に示す。噴孔内のキャビテーションの占める割合は、各領域内の輝度が 20~100 のピクセル数をカウントとし、輝度が低いピクセルの占める割合を示したものである。また、

噴孔出口の噴霧角も上部 $\theta 1$ と下部 $\theta 2$ は、噴孔の輪郭と噴霧外側がなす角度を取った。

図 6 に各噴射圧力の針弁リフト量を示す。噴射圧力が高くなるほど針弁の最大リフト量が大きくなっており、噴射圧力が高くなると、多量の燃料がノズル内に流れ込んでいることがわかる。

図 7 に噴孔内部のキャビテーション割合と噴霧角に及ぼす噴射圧力の影響を示す。 $T_{soi}=0.0$ [ms]でキャビテーション割合が存在するのは、前回の噴射で気泡が噴孔内に残留しているためである。

図 7 上図に示すように、噴孔上部領域では、針弁の開弁によりキャビテーション割合が急激に増加する。噴射圧力 50[MPa]では、開弁直後から増加し、0.08[ms]でほぼキャビテーション領域となる。噴射圧力が低下するとキャビテーション割合の増加する時期が遅れ、一連のキャビテーション割合も低くなる。噴孔下部領域では上部領域よりもキャビテーション割合が低く、不安定であり、常に 3-4 割の気泡部が存在することがわかる。また、図 7 下図は、噴霧角変化を示している。いずれの噴射圧力でも、キャビテーション領域が急激に増加すると同時に噴霧角が拡大していることがわかる。噴射圧力が高い 50 [MPa]では、噴孔上部が常にキャビテーション領域となっているため噴霧角は安定しているが、30 [MPa]では、キャビテーション割合の変動とともに噴霧角も変動する。

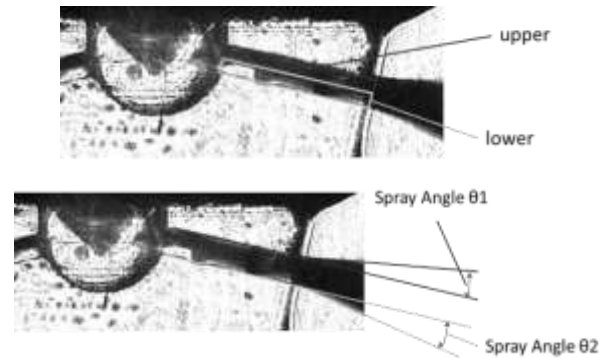


図 5. キャビテーション量と噴霧角の測定方法

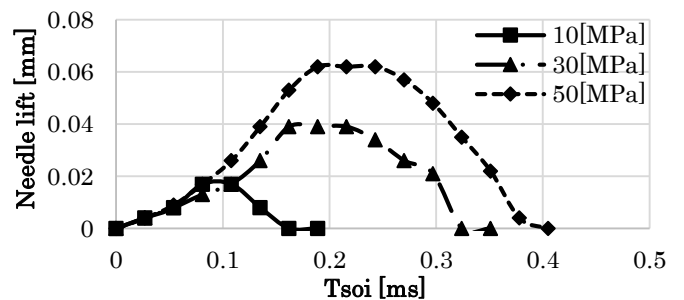


図 6. 各噴射圧力における針弁リフト量

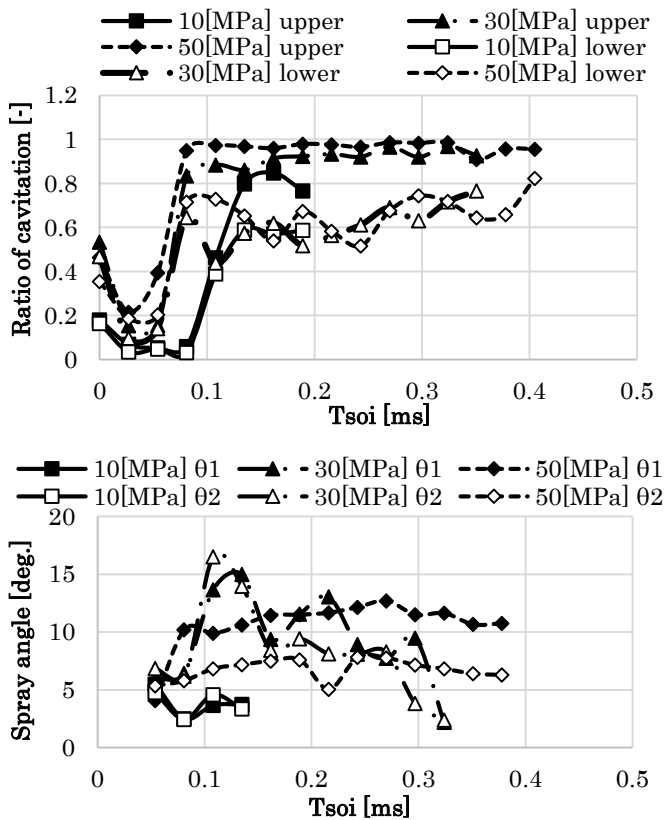


図 7. 各噴射圧力における噴孔内キャビテーション割合と噴霧角(噴孔径 $\phi 0.170[\text{mm}]$)

図 8 に噴孔径違いによる針弁リフト量への影響を、図 9 にキャビテーション割合と噴霧角への影響を示す。

図 8 より、噴孔径が小さくなると、針弁の立ち上がり早いことがわかる。噴孔径が小さいことで、サック内圧力が上昇しやすいためと考えられる。

図 9 上図より、噴射圧力違いと同様に噴孔上部領域でのキャビテーション割合が多いことがわかる。また、キャビテーションが急増する時期に関しては、噴孔径が小さいものほど早いことがわかる。噴孔下部領域でのキャビテーション割合は、噴孔径が大きくなると変動が大きくなる。図 9 下図の噴霧角に着目すると、噴孔径が大きくなると噴霧角の変動が大きくなっており、キャビテーションの変動が影響していると考えられる。

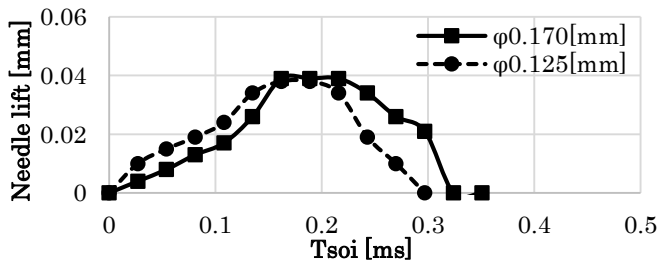


図 8. 各噴孔径における針弁リフト量

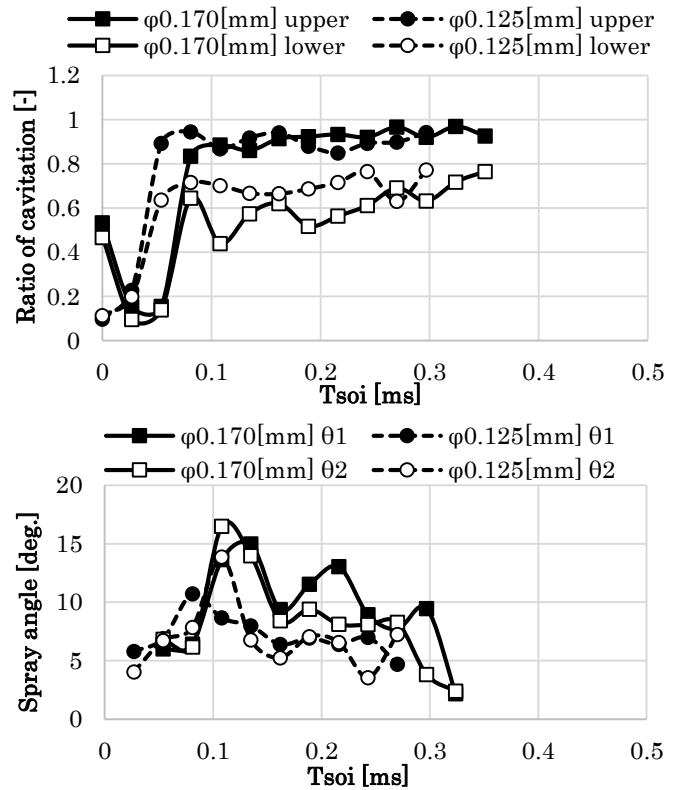


図 9. 各噴孔径における噴孔内キャビテーション割合と噴霧角(噴射圧力 $P_{inj}=30[\text{MPa}]$)

4. まとめ

実機噴射弁と等倍の透明ノズルを用いた噴孔内部流動を観測し、キャビテーションと噴霧角の関係を調べた結果、以下のことが分かった。

- 1) 2孔インジェクタにおいて、ストリングキャビテーションが付きやすくなり、長期間発生する。
- 2) ストリングキャビテーションの発生直後に噴霧角は大きくなる傾向にある。
- 3) 噴射圧力の違いによって、エッジキャビテーションの発生箇所が異なる。
- 4) 噴射圧力が高くなると、噴孔上部領域はキャビテーションで満たされるが、噴孔下部領域では、気泡部が存在し、その割合が変動する。この変動が噴霧角の変動に連動している。
- 5) 噴孔径が小さくなるとキャビテーション割合の変動が少なくなり、噴霧角も安定する。

参考文献

- (1) 清水ほか, 機論 B 56(528), p.2519, (1990).
- (2) Chaves, H. ほか, SAE Paper NO.950290 p.645 (1995).
- (3) 林ほか, 自技論 43(6), p.1251, (2012).