高分散形ディーゼル噴射ノズルの開発研究*

(第 2 報, ノズルの幾何学寸法と雰囲気圧が
噴霧の微粒化に及ぼす影響)玉 木 伸 茂^{*1}, 清 水 正 則^{*1}Developmental Study on High-Dispersion Diesel Injection Nozzle
(2nd Report, Effects of Geometric Measurement of Nozzle and
Ambient Pressures on Atomization of Spray)Nobushige TAMAKI^{*2} and Masanori SHIMIZU^{*2} Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Kinki University,
1 Takaya Umenobe, Higashihiroshima-shi, Hiroshima, 739-2116 Japan

The purpose of this study is to clarify the application of the atomization enhancement nozzle developed in this study to the high-ambient pressure and the intermittent spray. In this paper, the effects of the ambient pressures on atomization of the spray of the atomization enhancement nozzle, and its application to the actual Diesel injector were investigated. Moreover, the correlation of the atomization characteristics between the enlarged nozzle and the actual size nozzle were investigated. The results show that the atomization enhancement nozzle developed in this study was obtained the excellent spray and the spray characteristics which the breakup length is short, the spray angle is large and the droplet diameter is small. Moreover, approximate correlations between the enlarged nozzle and the actual size nozzle were obtained. Furthermore, it was clarified that the spread of the spray of this atomization enhancement nozzle becomes large compared with the single hole nozzle at the high-ambient pressure of $P_a=1.6$ MPa at the room temperature.

Key Words: Atomization, Fuel Injection, Diesel Engine, Spray Characteristics, High-Ambient Pressure

1. 結 論

ディーゼル機関は、省エネルギーと低燃費の観点から、機関の小形・軽量化を達成するために、できる限り低い噴射圧で高圧噴射時と同程度の良好な噴霧特性を得る必要がある。本研究の目的は、低い噴射圧で高圧噴射時に匹敵する噴射量が得られ、噴霧の広がりが大きい高分散噴霧が得られる噴射ノズルを開発することである。

これまでに考案した微粒化促進ノズル⁽¹⁾⁽²⁾に基づき、実機ノズルの寸法を拡大した拡大ノズルを用いて、噴霧の微粒化促進に最適なノズル噴孔部の寸法を決定した⁽³⁾。また、ノズルのサック室の容積を小さくする目的から、サック室に相当する噴孔上流部の直径、針弁の有無および針弁リフト量の影響を調べた。その結果、噴孔上流部の直径によらず、噴霧の広がりが大きく、良好な微粒化特性が得られた。また、拡大ノズル

であるが、考案した微粒化促進ノズルに針弁を設けた場合においても、噴霧は微粒化することがわかった⁽³⁾。

そこで、この微粒化促進ノズルを実機ノズルに適用するために、実機寸法ノズルを用い、常温高圧雰囲気下における噴霧の分裂挙動を調べ、大気圧雰囲気下における噴霧特性と比較することにより、高圧雰囲気下における微粒化促進ノズルの適用性を調べた。

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略を示す。供試液体の水は、プランジャ式高圧噴射ポンプを用いてノズルへ供給し、常温大気圧雰囲気中(雰囲気圧 $P_a=0.1$ MPa, 雰囲気温度 $T_a=300$ K)、常温高圧雰囲気中($P_a=1.6$ MPa, $T_a=300$ K)に定常噴射した。噴霧の分裂挙動は、ストロボスコープを用いて散乱光撮影した。分裂長さは電気抵抗法⁽⁴⁾により測定し、噴霧角は散乱光撮影した画像から測定した。平均粒径はフランホーファ回折法による粒度分布解析装置を用いて測定し、ザウタ平均粒径で結果を整理した。

また、拡大ノズルと実機寸法ノズルの相関を調べる

* 原稿受付 2006 年 10 月 18 日。

^{*1} 正員, 近畿大学工学部 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1)。

E-mail: tamaki@hiro.kindai.ac.jp

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

(a) Single hole nozzle

(b) Atomization enhancement nozzle

Fig. 2 Test nozzles

場合、次式(1)に示すレイノルズ数 Re を用いて結果を整理した。ここで、 ν_t は 293 K における噴射液体の動粘度、 D_2 はすきま下部の噴孔径、 v はノズル噴孔出口で測定した実測流量と、すきま下部の噴孔径から求めた噴射速度である。

$$Re = \frac{v \cdot D_2}{\nu_t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

図2に供試ノズルの概略を示す。供試ノズルは、ディーゼル機関に用いられている単孔ホールノズルと、微粒化促進ノズル⁽¹⁾⁽²⁾を用いた。単孔ホールノズルは、噴孔径 $D = 0.3$ mm、噴孔管長 $L = 0.3$ mm である。表1に微粒化促進ノズルの諸元を記す。ここで、 n は噴孔の途中に設けたすきまと実機ノズルのサック室に相当する噴孔上流部を結ぶ連絡孔(バイパス)の本数、 D_u は噴孔上流部の直径、 D_1 はすきま上部の噴孔

Table 1 Configuration of test nozzle (mm)

Nozzle Type	n	D_u	L_1	D_1
Atomization Enhancement Nozzle	1	$\phi 3.0$	0.3	$\phi 0.15$, $\phi 0.3$
		$\phi 30$	3.0	$\phi 3.0$
	L_g	D_g	L_2	D_2
	0.3	$\phi 0.6$, $\phi 0.8$, $\phi 1.0$	0.3, 0.9	$\phi 0.3$
		$\phi 18$	3.0	$\phi 3.0$

径、 L_1 はすきま上部の噴孔管長、 D_g はすきま直径、 L_g はすきま長さ、 D_2 はすきま下部の噴孔径、 L_2 はすきま下部の噴孔管長である。 D_b はバイパスの直径であり、 $D_1 = D_2 = \phi 0.3$ mm に対し、 $D_b = \phi 0.1$ mm、 $D_1 = D_2 = \phi 3.0$ mm に対し、 $D_b = \phi 1.0$ mm とした。

3. 実験結果および考察

3.1 バイパス数の影響、拡大ノズルと実機寸法ノズルの微粒化特性の相互関係

図3～図5にバイパス数 n が分裂長さ、噴霧角およびザウタ平均粒径に及ぼす影響をそれぞれ示す。図3、4より $n=1$ 本の場合、全噴射差圧域において $n=4$ 本のノズルよりも分裂長さは短くなっており、噴霧角は大きくなっている。図5より、ザウタ平均粒径は $n=4$ 本の場合、噴射差圧 ΔP_i が約 5 MPa より小さい領域において、 $n=1$ 本より小さくなっているが、 ΔP_i が約 5 MPa を超える領域において、バイパス数によらず、ザウタ平均粒径はほぼ同じ大きさである。また、 ΔP_i が約 10 MPa を超える領域において、約 10～20 μ m の小さなザウタ平均粒径が得られている。

図6に噴射差圧 $\Delta P_i = 20$ MPa において、バイパス数 n が噴霧の微粒化に及ぼす影響を示す。図6(a)は雰囲気圧 $P_a = 0.1$ MPa の場合、(b)は $P_a = 1.6$ MPa の場合である。図6より、 P_a によらず、 $n=1$ 本のほうが $n=4$ 本よりも噴霧の広がりが大きくなっており、バイパス数が噴霧の微粒化に大きく影響する。

図7にバイパス数 n が体積流量に及ぼす影響を示す。図7より、任意の噴射差圧で比較してバイパス数 n によらず、体積流量はほぼ同じであり、バイパス数 n の増加による体積流量の増加は見られない。実機寸法ノズルに対し、バイパス数の増加が噴射量の増加に効果的でないため、低圧噴射時における噴射量の増加方法について引き続き検討する。

次に、拡大ノズルと実機ノズルの噴霧特性の相関が明らかになると、拡大ノズルの特性を実機ノズルの特

Fig. 3 Effects of bypass number on breakup length

Fig. 4 Effects of bypass number on spray angle

Fig. 5 Effects of bypass number on Sauter mean diameter

性に適用することが可能であり、ノズルの設計が容易になるものと思われる。そこで、ノズルの幾何学形状、寸法比が同じであり、実機ノズルの噴孔径を約10倍に拡大したノズルと、実機寸法ノズルを用い、微粒化特性の相関を調べた。

初めに、本研究で対象としている噴霧の領域を示すため、図8に噴射速度を変化させたときの分裂長さの変化と噴霧の領域⁽⁵⁾を示す。図8より、噴射速度の増加に伴い、噴流は滴下、平滑噴流域、波状噴流域、噴霧域へと変化していく。本研究では、拡大ノズル、実機

Fig. 6 Effects of bypass number and ambient pressures on atomization of spray

Fig. 7 Effects of bypass number on volumetric flow rate

Fig. 8 Variations of breakup length as a function of injection velocity and breakup form of liquid jet⁽⁵⁾

寸法ノズルにおいて、図8中のDからFで示された領域(波状噴流域から噴霧域)の噴霧を対象とした。

図9にバイパス数 n が分裂長さに及ぼす影響を示し、図10に噴霧角に及ぼす影響を示す。分裂長さは、

Fig. 9 Effects of bypass number on breakup length

Fig. 10 Effects of bypass number on spray angle

すきま下部の噴孔径 D_2 で除した値で表した。また、本研究で用いた拡大ノズルと実機寸法ノズルにおいて、図8で示した噴霧域(EからF)に該当するレイノルズ数領域を図9, 10に明記した。

図9, 10より、 D_2 によらず、 $n=1$ 本の場合、 $n=4$ 本よりも分裂長さは短く、噴霧角は大きくなっている。また、噴霧域において、 $D_2 = \phi 0.3$ mmの場合、レイノルズ数 Re が約 3×10^4 を超える領域では、 Re 数の増加に伴い、分裂長さは短くなっていき、 $D_2 = \phi 0.3$ mmの場合と比較して傾向が若干異なる。しかし、これ以外は D_2 によらず、分裂長さや噴霧角は、ほぼ同じ傾向と値を示している。これらの結果から、拡大ノズルと実機寸法ノズルの噴霧域に該当する Re 数領域は異なるが、拡大ノズルで得られた分裂長さや噴霧角の傾向と値は、実機寸法ノズルにおいても類似した結果が得られ、両者に相関があることがわかった。

3.2 すきま下部の噴孔管長の影響 図11にすきま下部の噴孔管長 L_2 が分裂長さや噴霧角に及ぼす影響を示す。図11より L_2 が短い場合、任意の噴射差圧で比較して L_2 が長いノズルよりも分裂長さは短く、噴霧角は大きくなっている。

図12に噴射差圧 $\Delta P_i = 20$ MPaにおいて、すきま下部の噴孔管長 L_2 が噴霧の微粒化に及ぼす影響を示

Fig. 11 Effects of hole length downstream from gap on breakup length and spray angle

Atomization Enhancement Nozzle, $n=1$, $L_1=0.3$ mm, $D_1=\phi 0.3$ mm, $L_g=0.3$ mm, $D_g=\phi 1.0$ mm, $D_2=\phi 0.3$ mm, $\Delta P_i=20$ MPa, $T_a=300$ K

(a) $P_a=0.1$ MPa (b) $P_a=1.6$ MPa

Fig. 12 Effects of hole length downstream from gap on atomization of spray

す。図12(a)は雰囲気圧 $P_a=0.1$ MPaの場合、(b)は $P_a=1.6$ MPaの場合である。図12(a)より $P_a=0.1$ MPaの場合、 $L_2=0.3$ mmのほうが $L_2=0.9$ mmよりも噴霧の広がりが大きくなっている。図12(b)より、 $P_a=1.6$ MPaにおける噴霧の微粒化状態は、 $P_a=0.1$ MPaの場合と同じ傾向であり、 L_2 が短いノズルは、 L_2 が長いノズルよりも噴霧の広がりが大きく、雰囲気圧によらず、すきま下部の噴孔管長 L_2 が噴霧の微粒化に大きく影響することがわかる。

3.3 すきま上部の噴孔径の影響 図13にすきま上部の噴孔径 D_1 が分裂長さや噴霧角に及ぼす影響を示し、図14にザウタ平均粒径に及ぼす影響を示す。図13より、本実験の噴射差圧 ΔP_i の範囲で ΔP_i が大きい領域 ($\Delta P_i > 15$ MPa)において、 D_1 によらず、分裂長さは短く、噴霧角は大きく、ほぼ同じ値になって

Fig. 13 Effects of hole diameter upstream from gap on breakup length and spray angle

Fig. 14 Effects of hole diameter upstream from gap on Sauter mean diameter

いる。\$D_1=\phi 0.15\$ mm の場合、\$\Delta P_i\$ が小さい領域において、分裂長さは \$D_1=\phi 0.3\$ mm よりも短く、噴霧角は大きくなっている。また、分裂長さは、噴射差圧 \$\Delta P_i\$ によらず短くなっており、\$\Delta P_i\$ が小さい領域において、最高噴射差圧 \$\Delta P_{i, \max}=20\$ MPa と同程度の分裂長さが得られている。

図 14 より、噴射差圧 \$\Delta P_i\$ が約 10 MPa を超えると、すきま上部の噴孔径 \$D_1\$ の違いによる影響はほとんど見られず、ほぼ同じザウタ平均粒径が得られている。しかし、\$\Delta P_i\$ が約 8 MPa よりも小さい領域において、ザウタ平均粒径は \$D_1=\phi 0.15\$ mm のほうが \$D_1=\phi 0.3\$ mm よりもかなり小さくなっており、低圧噴射時ににおいて良好な噴霧が得られることがわかる。

このように、小さな噴射差圧域において、すきま下部の噴孔径 \$D_2=\phi 0.3\$ mm に対し、\$D_1=\phi 0.15\$ mm のほうが \$D_1=\phi 0.3\$ mm よりも良好な噴霧特性が得られる理由として以下のことが考えられる。同一噴射差圧の場合、\$D_1\$ が小さくなると、\$D_1\$ が大きいノズルに比べてすきま上部の噴孔入口付近の流速が大きくなり、圧力が大きく低下するものと思われる。そのため、\$D_1\$ が小さいノズルは、比較的小さな噴射差圧において噴

Fig. 15 Effects of geometric shape of nozzle on atomization of spray

(a) \$P_a=0.1\$ MPa (b) \$P_a=1.6\$ MPa

孔入口付近の圧力低下が顕著になり、キャビテーションが発生しやすくなるものと考えられる。その結果、\$D_1=\phi 0.15\$ mm のほうが \$D_1=\phi 0.3\$ mm よりも小さな噴射差圧において噴孔内にキャビテーションが発生し、噴霧の微粒化が促進されるものと考えられる。

以上の結果から、すきま下部の噴孔径 \$D_2=\phi 0.3\$ mm に対し、すきま上部の噴孔径 \$D_1=\phi 0.15\$ mm (\$D_1=D_2/2\$) にすると、小さな噴射差圧で良好な噴霧特性が得られることがわかる。

3.4 ノズルの幾何学形状の影響 図 15 に噴射差圧 \$\Delta P_i=20\$ MPa において、ノズルの幾何学形状が噴霧の微粒化に及ぼす影響を示す。図 15(a) は雰囲気圧 \$P_a=0.1\$ MPa の場合、(b) は \$P_a=1.6\$ MPa の場合である。図 15 より、\$P_a\$ によらず、微粒化促進ノズルの噴霧の広がり、単孔ホールノズルよりも大きくなっている。

図 16 にノズルの幾何学形状が分裂長さに及ぼす影響を示し、図 17 に噴霧角に及ぼす影響を示す。図 16, 17 より、噴射差圧 \$\Delta P_i\$ の増加に伴い、分裂長さは短くなっていき、噴霧角は大きくなっていく。微粒化促進ノズルの場合、分裂長さは全噴射差圧域において短くなっており、最高噴射差圧 \$\Delta P_{i, \max}=20\$ MPa における分裂長さとほぼ同じである。この結果から、本研究で開発した微粒化促進ノズルは、小さな噴射差圧、すなわち、小さなエネルギーで分裂長さが短く、噴霧角が大きく、ザウタ平均粒径が小さい良好な噴霧特性が得られることがわかる。また、全噴射差圧領域において、微粒化促進ノズルの分裂長さは単孔ホールノズル

Fig. 16 Effects of geometric shape of nozzle on breakup length

Fig. 17 Effects of geometric shape of nozzle on spray angle

よりも短く、噴霧角は大きくなっており、微粒化特性が大幅に改善されることが明らかになった。

4. 結 論

- (1) 微粒化促進ノズルのバイパス数 n が1本、す

きま下部の噴孔管長 L_2 が短く ($L_2=0.3$ mm), すきま上部の噴孔径 D_1 がすきま下部の噴孔径 D_2 より小さなノズル ($D_2=\phi 0.3$ mm に対し, $D_1=\phi 0.15$ mm) を用いると, 分裂長さが短く, 噴霧角が大きく, ザウタ平均粒径が小さい良好な噴霧特性が得られた。

(2) この傾向は, 噴孔径(すきま下部の噴孔径 D_2) が変化してもほとんど同じであり, 拡大ノズルと実機寸法ノズルの間に相関が得られた。

(3) この微粒化促進ノズルは雰囲気気圧によらず, 噴霧の広がりが大きくなる。また, 単孔ホールノズルと比較して, 噴霧の微粒化特性が大幅に改善された。

文 献

- (1) Tamaki, N. et al., Enhancement of Atomization of a Liquid Jet at Low Injection Pressure, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 664 (2001), pp. 3147-3152.
- (2) Tamaki, N. et al., Atomization of High-Viscous Liquid Jet by Cavitation in the Nozzle Hole, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71, No. 702 (2005), pp. 632-640.
- (3) Tamaki, N. et al., Developmental Study on High-Dispersion Diesel Injection Nozzle, 1st Report, Effects of Geometric Shape of Atomization Enhancement Nozzle on Atomization Characteristics of Spray, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 73, No. 730 (2007), (Under contribution).
- (4) Shimizu, M. et al., Measurement of Breakup Length at High-Speed Liquid Jet (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 49, No. 448 (1983), pp. 2886-2892.
- (5) Shimizu, M. et al., Disintegrating Process of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 56, No. 528 (1990), pp. 2519-2525.