低圧噴射による液体噴流の微粒化促進*

玉木 伸 茂^{*1}, 清 水 正 則^{*1}, 廣 安 博 之^{*1}Enhancement of Atomization of a Liquid Jet
at Low Injection PressureNobushige TAMAKI^{*2}, Masanori SHIMIZU and Hiroyuki HIROYASU^{*2} Department of Mechanical Engineering, Kinki University,
1 Takayamunobe, Higashihiroshima-shi, Hiroshima, 739 2116 Japan

This paper describes a method for obtaining an excellent spray under low injection pressure. Since the diesel nozzle, which is used in direct injection diesel engines, is a pressure atomized type nozzle, excellent spray characteristics can not be obtained under low injection pressure. When cavitation occurs in the nozzle hole, atomization of the liquid jet enhanced considerably. Based on the results of a previous study, a new method of enhancing atomization of the liquid jet at low injection pressure, which involves the use of a simple nozzle in which a gap made at the nozzle hole, is proposed. The spray characteristics of the nozzle invented in this study were compared with those at super high injection pressure ($\Delta P_i=200$ MPa). The results of the present study indicated that enhancement of atomization of the liquid jet at low injection pressure ($\Delta P_i=10$ MPa) is possible by simply making the gap and installing the bypass at a single hole nozzle.

Key Words: Atomization, Fuel Injection, Cavitation, Nozzle, Diesel Spray, Low Injection Pressure, Liquid Jet, Spray Characteristics, Enhancement of Atomization

1. 緒 言

直接噴射式ディーゼル機関に用いられているホールノズルは、燃料を高圧噴射しなければ良好な噴霧を得ることができない⁽¹⁾。近年、エンジン性能の向上と排出ガス低減のため、燃料噴射圧の高圧化が進んでいるが、高圧噴射に伴い、燃料噴射装置が大掛かりになるほか、燃焼室の材質の制約、耐久性の問題も生じるため、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、より小さなエネルギーで効率よく微粒化できるノズルを開発することである。そこで、液体噴流の微粒化の要因がノズル噴孔内に発生するキャビテーションであるという知見^{(2)~(5)}に基づき、ノズルの構造が単純で、二次的な装置が不要であり、低圧で微粒化促進が可能なノズルを考案した。

本報では、考案した微粒化促進ノズルの低圧噴射時($\Delta P_i=10$ MPa)における噴霧特性と、超高圧噴射時($\Delta P_i=200$ MPa)における単孔ホールノズルの噴霧特性を比較した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。低圧噴射時における供試液体の加圧は窒素ボンベで行い、超高圧噴射時における加圧は、最高噴射圧380 MPaまで連続噴射が可能な高圧噴射ポンプ(スギノマシン)を用いた。低圧噴射時における噴孔内の流れと噴霧の写真は、マイクロフラッシュを用いて透過光撮影した。高圧噴射時における噴霧の写真は、ルビーレーザー(発光期間30 ns)を用いて散乱光撮影した。液柱の分裂長さは、電気抵

Fig. 1 Experimental apparatus

* 原稿受付 2000年11月22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

抗法⁽⁶⁾により測定した。噴霧角 θ は、噴孔出口から噴孔径 D の60倍下方における噴霧の外縁と噴孔出口とのなす角と定義した。平均粒径は、フランホーファ回折法による粒径測定装置 LDSA-1400 A [東日本コンピュータアプリケーションズ(株)製]を用いて測定した。本研究で対象としている噴霧は数密度が大きいため多重散乱を起こし、従来のフランホーファ回折法による粒径の算出方法では誤差が大きくなる。高橋⁽⁷⁾は、高濃度の粒子群を対象とした粒度分布測定において、多重散乱の影響を補正することにより測定が可能であることを示している。本研究では、抜山・柵沢の分布関数を仮定して計算を行い、多重散乱による測定誤差を小さくするために、測定器がもつ機能であるレーザの透過率と測定散乱光強度分布から多重散乱による散乱光強度分布の補正を行い、粒径を算出した。粒径の測定位置は、噴射軸方向に測定位置を変化させて測定した結果をもとに、噴孔出口から150 mm 下方で行った。本研究は、大気圧雰囲気下における実験であり、ディーゼル機関の雰囲気圧力と異なるが、ディーゼル機関を対象とした研究であるため、結果の整理に噴射圧と雰囲気圧力との差である噴射差圧を用いた。

図2に供試ノズルの概略を示す。供試ノズルは、単孔ホールノズル [図2(a)], 単孔ホールノズルの噴孔の途中にすきまを設けたノズル (Nozzle-S, With gap) で、導管とすきまを結ぶ連絡孔 (以下、バイパスと称す) がないノズル (Without bypass) とバイパスがあるノズル (With bypass) [図2(b)], すきまとバイパスを設けたノズルの噴孔入口部に噴孔径と同じ3 mm のR面取りを施したノズル (Nozzle-R, With bypass) [図2(c)] を用いた。なお、単孔ホールノズルは、微粒化状態が最も良好なノズルを用いた⁽⁸⁾。

Fig. 3 Effect of existence of bypass on atomization of liquid jet

3. 実験結果および考察

3.1 バイパスの影響 図3にバイパスの有無が噴流の微粒化に及ぼす影響を示す。図3の噴流、噴霧写真は、噴孔径 D が $\phi 3.0$ mm、噴射差圧 ΔP_i が1.5 MPaの結果である。ノズル噴孔内は透過光撮影しているため、キャビテーションが発生している領域と噴孔内壁面は黒く写っている。

図3よりバイパスがない場合、液流が噴孔内壁面から離れた状態で噴孔入口部から噴出しており、噴孔内にキャビテーションは発生していない。噴流は、観察範囲内においてまったく微粒化していない。

一方、バイパスがある場合、すきま上部と下部の噴孔内にキャビテーションが発生しており、噴霧の広が

りが大きく、微粒化している。

このように、バイパスがある場合、噴流が微粒化する理由として、以下のことが考えられる。図4にすきまとすきま下部の噴孔内の圧力を測定した結果を示す。図4中の黒いシンボルは、バイパスなしを示し、白いシンボルはバイパスありを示す。図4よりバイパスがない場合、 ΔP_i を増加させてもすきま内の圧力はほぼ大気圧と同じであり、バイパスがある場合のすきま内の圧力と比較して小さくなっている。一方、バイパスがある場合、 ΔP_i の増加に伴い、導管部の圧力の影響を受けてすきま内の圧力は高くなっている。この結果から、バイパスの存在がすきま内の圧力上昇に影響していることがわかる。一般に、急縮小部で縮流が生じると管内の圧力が低下し、その結果、液体中に含

有している気体がキャビテーション気泡となって発生し、高圧の領域で崩壊する。本研究においても、すきま上部の噴孔内で生成されたキャビテーション気泡は圧力が高くなっているすきま内に流入すると瞬時に崩壊し、すきま内にキャビテーション気泡核が多数存在しているものと思われる。したがって、すきま下部の噴孔入口部で縮流が生じると、キャビテーションが容易に発生し、噴流が微粒化するものと思われる。

次に、バイパスから流入してくる液流によるかく乱と、噴孔内で発生するキャビテーションによるかく乱の影響を分離するため、噴孔内にキャビテーションが発生しないように噴孔入口部に3mmのR面取りを施したノズル(Nozzle-R)を用いて噴流の微粒化に及ぼす影響を調べた。図5に噴孔内の流れと噴流の分裂挙動を示す。

図5より、Nozzle-Rの場合、噴孔内にキャビテーションは発生しておらず、先述したNozzle-Sと比較して噴流はほとんど微粒化していない。この結果から、バイパスから流入する液流は、噴流の微粒化に寄与しておらず、噴孔内で発生するキャビテーションが噴流の微粒化促進に大きく影響していることがわかる。

3・2 微粒化促進ノズルの噴霧特性

3・2・1 噴射差圧の影響 図6に本研究で考案した微粒化促進ノズルの噴孔内の流れと噴霧の写真を示す。噴孔径 D は $\phi 3.0$ mm、すきま上部と下部の噴孔管長 L_1, L_2 は3.0 mmである。また、図7に噴射差圧

Fig. 4 Variations of pressure in nozzle hole and gap as a function of differential pressure of injection

Fig. 5 Photographs of internal flow in nozzle hole and sprays

Fig. 6 Disintegration behaviors of sprays of atomization enhancement nozzle

Fig. 7 Variations of breakup length and spray angle as a function of differential pressure of injection

ΔP_i を変化させたときの分裂長さと噴霧角の変化を示す。図6, 7の番号は, おのおの対応している。

図6より, ΔP_i を増加させていくと, すきま上部と下部の噴孔内にキャビテーションが発生し, 噴霧の広がりが大きくなり, 噴流は微粒化ようになる(図6の③)。また, 図7に示す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7の③)。さらに ΔP_i を増加させても, 噴霧の微粒化の様相, 分裂長さおよび噴霧角は, ほとんど同じであり, ΔP_i が小さくても良好な噴霧と噴霧特性が得られていることがわかる(図6, 7の④~⑥)。

3・2・2 噴孔部に設けたすきまの位置の影響 すきま上部と下部の噴孔管長を大きく変化させて, 噴孔部に設けたすきまの位置が噴流の微粒化に及ぼす影響を調べた。図8に噴孔部に設けたすきまの位置が噴流の微粒化に及ぼす影響を示す。また, 図9, 10に噴射差圧 ΔP_i を変化させたときの分裂長さと噴霧角の変化を示す。

初めに, すきま上部の噴孔管長 L_1 を 3.0 mm に固定し, すきま下部の噴孔管長 L_2 が 3.0 mm と 30 mm のノズルを用いた。図8の①より, すきま下部の噴孔管長 L_2 が短い場合($L_2=3.0$ mm), 噴霧の広がりが大きくなっており, 微粒化している。一方, 図8の③より, すきま下部の噴孔管長 L_2 が長い場合($L_2=30$ mm), 噴霧の広がり小さく, ほとんど微粒化していない。また, 図9, 10の①, ③に示す分裂長さ, 噴霧角もすきま下部の噴孔管長 L_2 により大きな違いが見られ, L_2 が長い場合, 分裂長さは長くなっており, 噴霧角は小さくなっている。

次に, すきま下部の噴孔管長 L_2 を 3.0 mm に固定し, すきま上部の噴孔管長 L_1 が 3.0 mm と 30 mm のノズルを用いた。図8の①, ②より, すきま下部の噴孔管長が短い場合, すきま上部の噴孔管長 L_1 によらず, 微粒化しており, 噴霧の広がりほとんど違いが

Fig. 8 Effects of position of the gap on disintegration behavior of liquid jet

Fig. 9 Effects of position of the gap on breakup length

Fig. 10 Effects of position of the gap on spray angle

見られない。また、図9、10より、噴射差圧 ΔP_i が小さいときに、分裂長さや噴霧角に違いが見られるものの、 ΔP_i が大きくなると、すきま上部の噴孔管長 L_1 によらず、同じ傾向を示している。

以上の結果から、すきま上部の噴孔管長 L_1 によらず、すきま下部の噴孔管長 L_2 を短くする、すなわち、噴孔出口に近い位置にすきまを設けると、良好な噴霧を得ることができる。また、ノズルの大きさや燃料の後だれの問題を考えた場合、できる限りサック室や噴孔容積を小さくする必要があるため、図8の①で示したノズルの幾何学寸法が好ましいことがわかる。

3・3 単孔ホールノズルと微粒化促進ノズルの噴霧特性の比較 単孔ホールノズルの噴孔出口近傍にすきまを設け、さらにバイパスを設けたノズルを用いると、良好な噴霧と噴霧特性が得られることがわかった。次に、このノズルの噴孔径 D を実機のノズルに近い噴孔径にして、噴霧の観察と噴霧特性の測定を行い、超高圧噴射時 ($\Delta P_i = 200$ MPa) の単孔ホールノズルの噴霧特性との比較を行った。

図11に噴孔径 D が $\phi 0.3$ mm の単孔ホールノズルと、微粒化促進ノズルの噴霧写真を示す。単孔ホールノズルを用いたときの噴射差圧 ΔP_i は、10~200 MPa まで変化させた。また、図12~14に ΔP_i を変化させたときの分裂長さ、噴霧角およびザウタ平均粒径の変化を示す。図11~14の番号はおのの対応している。なお、微粒化促進ノズルは、 ΔP_i が10 MPaを超えると、噴霧と噴霧特性に顕著な違いが見られなくなり、本研究の目的がより低い噴射圧で実機の噴霧に匹敵す

Fig. 11 Photographs of sprays of single hole nozzle and atomization enhancement nozzle

る良務な噴霧を得ることであるため、単孔ホールノズルの噴霧特性と比較する場合の噴射差圧 ΔP_i は10 MPaとした。

図11より、 $\Delta P_i = 10$ MPaにおける噴霧を比較すると、微粒化促進ノズルの噴霧は、単孔ホールノズルよりも噴霧の広がりが大きく、良好な噴霧が得られている。また、図12より、同じ噴射差圧 ($\Delta P_i = 10$ MPa) で比較すると、微粒化促進ノズルの分裂長さは、かな

Fig. 12 Variations of breakup length as a function of differential pressure of injection

Fig. 13 Variations of spray angle as a function of differential pressure of injection

Fig. 14 Variations of Sauter mean diameter as a function of differential pressure of injection

り短くなっており、図13に示す噴霧角は大きくなっている。さらに、図14に示すザウタ平均粒径も、非常に小さくなっている。

次に、 $\Delta P_i=200$ MPaにおける単孔ホールノズルの噴霧特性と、 $\Delta P_i=10$ MPaにおける微粒化促進ノズルの噴霧特性を比較する。図11より、微粒化促進ノズルの噴霧は、単孔ホールノズルよりも噴霧の広がりが大きくなっている。また、図12, 13より、微粒化促進ノズルは、単孔ホールノズルよりも、分裂長さは短くなっており、噴霧角は大きくなっている。さらに、図14に示すザウタ平均粒径は、微粒化促進ノズル、単孔ホールノズルとも非常に小さくなっている。微視的に見ると、単孔ホールノズルのザウタ平均粒径は、微粒化促進ノズルよりも小さくなっているが、両者の違いが数 μm 程度である。また、微粒化促進ノズルは、 $\Delta P_i=10$ MPaにおいてザウタ平均粒径が20~30 μm と非常に小さくなっており、微細な液滴が得られていることがわかる。

したがって、本研究で考案した微粒化促進ノズルの噴霧と噴霧特性を総合的に評価すると、実機ディーゼル機関の噴射圧よりもはるかに低い噴射圧で、同等もしくはそれ以上の良好な噴霧特性が得られており、小さなエネルギーで効率よく微粒化させることが可能である。また、本研究で考案した微粒化促進ノズルは、ディーゼル機関用ホールノズルの噴孔部のみを改良しているため、実機のノズルへの適用も可能である。

4. 結 言

小さなエネルギーで効率よく微粒化できるノズルを開発することを目的とし、ノズル噴孔内に発生するキャビテーションを利用して、低い噴射圧で噴霧の微粒化促進が可能なノズルを考案した。以下に、得られた結果を示す。

(1) 噴孔の途中にすきまを設け、導管とすきまを結ぶ連絡孔(バイパス)を設けると、低い噴射圧で噴霧の広がりが大きく、分裂長さが短くなり、良好な噴霧

を得ることができる。

(2) 噴孔出口に近い位置にすきまを設けると、微粒化促進に効果的である。

(3) 本研究で考案した微粒化促進ノズルは、10 MPa程度の噴射差圧で超高压噴射時($\Delta P_i=200$ MPa)の噴霧に匹敵する噴霧を得ることができ、噴霧特性を大幅に改善することができた。

本研究は、旧文部省科学研究費補助金奨励研究(A)(課題番号11750174)の補助を受けて行った。また、実験装置の一部は、旧文部省私大助成金によった。ここに記して謝意を表す。さらに、本研究に協力された香川健仁君[(株)熊平製作所]、玉重貴法君[三菱重工業(株)]、加藤貴久君(近畿大学大学院生)に謝意を表す。最後に、論文集編集・校閲委員各位から多大の示唆を賜ったことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) 藤沢英也・川合静男、ディーゼル燃料噴射、(1988)、48、山海堂。
- (2) Soteriou C., Andrews R. and Smith M., Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization, *Spray Technology, SAE Spec. Publ.*, 1065, No. 950080(1995), 27-52.
- (3) Chaves, H., Knapp, M. and Kubitzek, A., Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzles, *SAE Paper*, No. 950290(1995), 645-657.
- (4) 玉木伸茂・西田恵哉・清水正則・廣安博之、ノズル噴孔内のキャビテーションが液体噴流の微粒化に及ぼす影響、*機論*, **63** 614, B(1997), 3447-3454.
- (5) Tamaki, N., Shimizu, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet, *Atomiz. Sprays*, **8**(1998), 179-197.
- (6) 清水正則・新井雅隆・廣安博之、高速噴流の分裂長さの測定、*機論*, **49** 448, B(1983), 2886-2892.
- (7) 高橋位、高濃度噴霧のレーザ粒度分布測定における多重散乱補正方法、第6回微粒化シンポジウム講演論文集、(1997)、243-248.
- (8) 玉重貴法・玉木伸茂・清水正則・廣安博之・多賀正夫、高速液体噴流の分裂長さや噴霧角におよぼす噴孔管長と噴孔入口形状の影響、第6回微粒化シンポジウム講演論文集、(1997)、162-167.