

高効率微粒化促進ノズルの微粒化特性と 直接噴射式ディーゼル機関用噴射ノズルへの適用性

玉木伸茂*, 清水正則*, 廣安博之**

Atomization Characteristics of High-Efficiency Atomization Enhancement Nozzle and Application to Injection Nozzle for Direct Injection Diesel Engine

Nobushige TAMAKI, Masanori SHIMIZU, Hiroyuki HIROYASU

Abstract

It has been clarified that the strong disturbance in the nozzle hole, due to cavitation phenomena, greatly affected to atomization of a liquid jet. Since a nozzle for a direct injection Diesel engines is a pressure atomized type, it is difficult to obtain the excellent spray characteristics under low injection pressure. If the same excellent spray characteristics as ones of the high injection pressure was obtained at relatively low injection pressure, it is possible to miniaturize the injection system. When cavitation occurs in the nozzle hole, atomization of the liquid jet is enhanced considerably. Based on this concept, a new method for 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 effects of geometric shapes and measurements of the atomization enhancement nozzle on atomization of the spray, the spray characteristics and application to an injector with a needle were studied. The results show that the excellent spray, which the spread of the spray is large and the breakup length is short, was obtained at relatively low injection pressure. Moreover, when this nozzle was applied to the injector with the needle, the same and the fine atomization characteristics were obtained at low injection pressure.

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

1. 緒言

従来の直接噴射式ディーゼル機関に使用されている噴射ノズルは、噴射圧が 100 MPa を超えるような高圧で燃料を噴射しなければ、燃焼に適した良好な噴霧を得ることができない^{1) 2)}。このように、燃料噴射圧の高圧化に伴い、燃料噴射装置が大型になり、燃焼室の耐圧、材質といった設計上の問題も生じて

くる。さらに、機関の小型化、燃費の改善、二酸化炭素の排出量の低減といった、昨今の社会的な問題に対処するために、従来よりも小さなエネルギー、すなわち低い噴射圧で効率良く燃料を微粒化することができる噴射ノズルの開発が望まれている。

そこで、液体噴流の微粒化の要因がノズル噴孔内

*近畿大学工学部機械工学科

*Department of Mechanical Engineering,
School of Engineering, Kinki University

** (有) ヒロ技術研究所

**Hiro Technology Brains, Inc.

に発生するキャピテーションであるという知見^{3)~9)}に基づき、噴射ノズルの噴孔部のみを改良することにより、低い噴射圧で微粒化促進が可能なノズルを開発した^{10)~13)}。この微粒化促進ノズルの低圧噴射時($\Delta P_i=10$ MPa)における噴霧特性は、実機の超高圧噴射時($\Delta P_i=200$ MPa)における単孔ホールノズルの噴霧特性よりも改善された。

本研究では、さらに噴霧の微粒化促進を目指し、ノズルの幾何学寸法が噴霧の微粒化に及ぼす影響を調べ、最も良好な噴霧特性が得られるノズルの幾何学寸法を決定した。また、これまでに開発した微粒化促進ノズルを実機に適用することを目的として、微粒化促進ノズルに針弁を設けたノズルを用いて実機噴射ノズルへの適用性を調べた。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。供試液体は、カスケード式高粘度高圧噴射ポンプを用いて大気圧霧団気中に定常噴射した。ノズル噴孔内の流れと噴霧の分裂挙動は、ストロボを用いて背景散乱光撮影した。流量係数 C_d は、次式(1)から算出した。ここで、 Q は単位時間あたりの体積流量、 D (D_2) は噴孔径、 ρ は噴射液体の密度、 ΔP_i は噴射差圧である。分裂長さは、従来から用いている電気抵抗法¹⁴⁾により測

$$C_d = \frac{4Q}{\pi D^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_i}} \dots\dots\dots (1)$$

定した。噴霧角は、デジタルカメラで散乱光撮影した画像から直接測定した。

図2に供試ノズルの概略を示す。供試ノズルは、

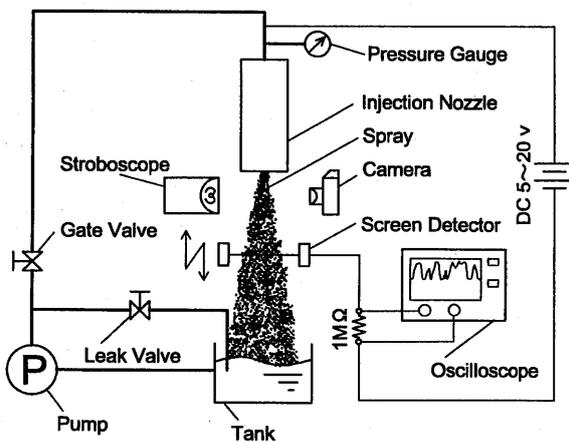
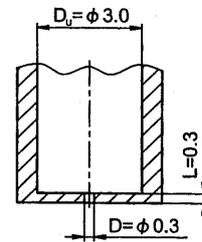
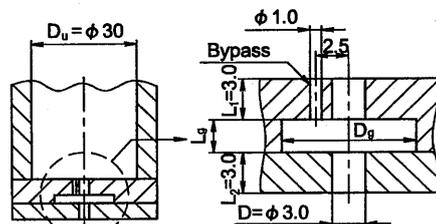


図1 実験装置の概略

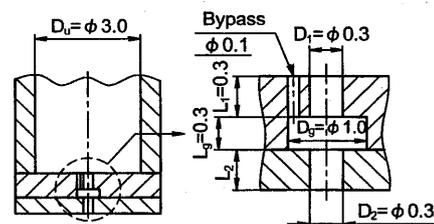
従来の直接噴射式ディーゼルノズルに用いられている単孔ホールノズル[図2(a)]、単孔ホールノズルの噴孔の途中にすき間を設け、さらに噴孔上流部とすき間を結ぶ連絡孔(バイパス)を設けた微粒化促進ノズル[図2(b)、(c)]を用いた。また、開発した微粒化促進ノズルの実機噴射ノズルへの適用性を調べるために、微粒化促進ノズルに針弁を設けたノズル[図



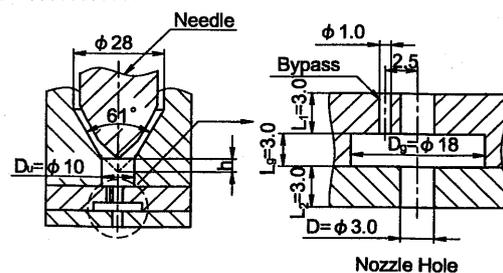
(a) 単孔ホールノズル



(b) 微粒化促進ノズル(拡大ノズル)



(c) 微粒化促進ノズル(実機寸法ノズル)



(d) 針弁を設けた微粒化促進ノズル

図2 供試ノズルの概略

2(d)]を用いた。すき間下部の噴孔径、すなわち噴孔径は、拡大ノズルが $D = \phi 3.0 \text{ mm}$ 、実機に近い噴孔径のノズルが $D_2 = \phi 0.3 \text{ mm}$ とした。

3. 実験結果および考察

3.1 すき間直径の影響

図3にすき間直径 D_g が流量係数に及ぼす影響を示す。図3より、噴射差圧 ΔP_i の変化に対する流量係数の変化は、 D_g に依らずほぼ同じ傾向を示している。また、任意の ΔP_i における流量係数は、 D_g に依らずほとんど同じであり、ほぼ同じ流量が得られている。

図4に噴射差圧 $\Delta P_i = 0.7, 1.5 \text{ MPa}$ において、すき間直径 D_g が分裂長さおよび噴霧角に及ぼす影響を示す。図4より $\Delta P_i = 0.7 \text{ MPa}$ の場合、 D_g が大きくなるのに伴い、分裂長さは短くなり、噴霧角は大きくなる。 D_g が $\phi 18 \text{ mm}$ よりも大きくなると、分裂長さはほぼ一定になり、噴霧角はやや小さくなる。これに対し、 $\Delta P_i = 1.5 \text{ MPa}$ の場合、 $D_g = \phi 18 \text{ mm}$ までは $\Delta P_i = 0.7 \text{ MPa}$ の時と同じ傾向を示しているが、 D_g が $\phi 18 \text{ mm}$ よりも大きくなると、分裂長さは長くなり、噴霧角はやや小さくなる。 $D_g = \phi 18 \text{ mm}$ の時、

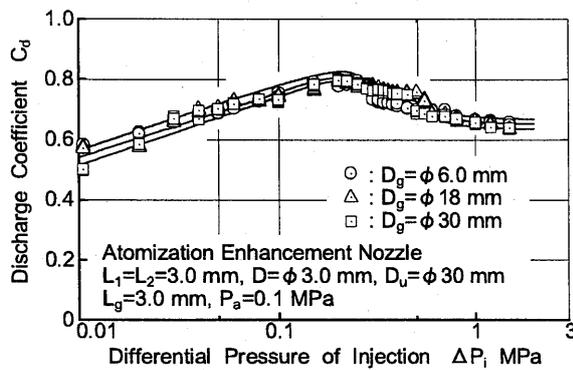


図3 すき間直径が流量係数に及ぼす影響

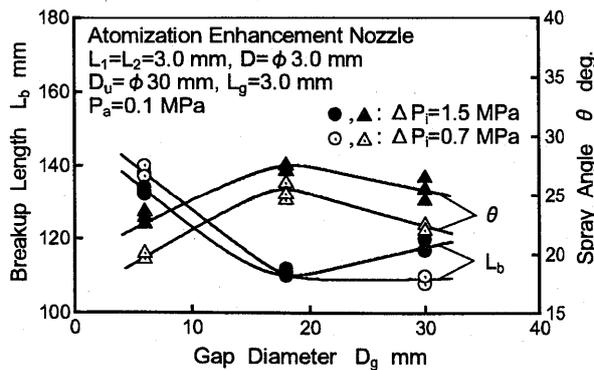


図4 すき間直径が分裂長さおよび噴霧角に及ぼす影響

ΔP_i に依らず分裂長さが最も短く、噴霧角は最も大きくなっており、噴孔径 $D = \phi 3.0 \text{ mm}$ に対し、 D_g を最適な大きさ ($D_g = \phi 18 \text{ mm}$) にすると、良好な微粒化特性が得られることがわかる。

3.2 すき間長さの影響

図5にすき間長さ L_g が分裂長さおよび噴霧角に及ぼす影響を示す。図5より L_g が比較的短い場合 ($L_g = 1.0, 3.0 \text{ mm}$)、分裂長さは短く、噴霧角は大きくなっていく。 L_g が最も短い場合 ($L_g = 1.0 \text{ mm}$)、 $\Delta P_i = 1.5 \text{ MPa}$ の時の分裂長さは最も短くなり、噴霧角は最も大きくなっていく。しかし、 $\Delta P_i = 0.7 \text{ MPa}$ の時、 $\Delta P_i = 1.5 \text{ MPa}$ と比較して分裂長さは長くなり、噴霧角は小さくなっていく。 $L_g = 3.0 \text{ mm}$ の場合、 ΔP_i に依らず、分裂長さは短く、ほぼ同じ長さであり、噴霧角は大きく、ほぼ同じ大きさであり、良好な噴霧が得られていることがわかる。これに対して、 L_g が長い場合 ($L_g = 9.0 \text{ mm}$)、 L_g が短い場合と比較して、分裂長さは長く、噴霧角は小さくなっており、微粒化状態が悪くなっていることがわかる。この結果から、 L_g が比較的短い場合 ($D = \phi 3.0 \text{ mm}$ に対し、 $L_g = 3.0 \text{ mm}$)、 ΔP_i に依らず、良好な微粒化特性が得られることがわかる。

このように、すき間長さ L_g の違いにより、噴霧の微粒化状態が異なる原因として以下のことが考えられる。図6に噴射差圧 $\Delta P_i = 1.5 \text{ MPa}$ において、すき間長さ L_g を変化させた時のノズル噴孔内の流れと噴霧の分裂挙動を示す。噴孔内は背景散乱光により撮影しているため、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6より、 L_g に依らず、すき間下部の噴孔内にキャビテーションが発生している。 L_g が比較的短い場合 ($L_g = 1.0, 3.0 \text{ mm}$)、すき間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、 L_g が長い場合

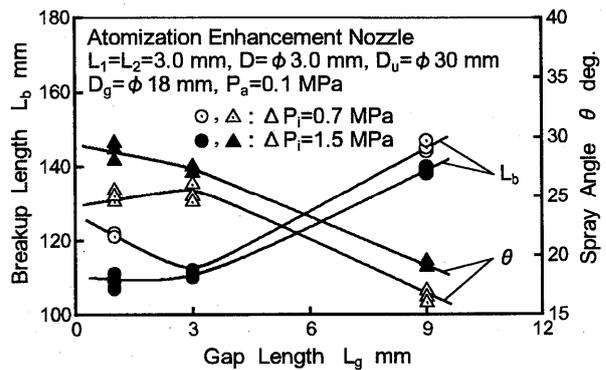


図5 すき間長さが分裂長さおよび噴霧角に及ぼす影響

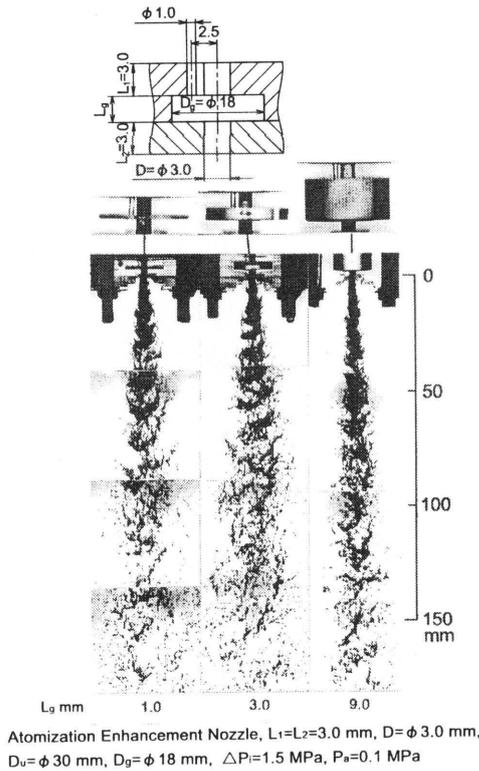


図6 ノズル噴孔内の流れと噴霧の分裂挙動

($L_g=9.0$ mm)と比較して噴霧の広がりが大きく、微粒化している。一方、 L_g が長い場合、すき間下部の噴孔内にキャビテーションが発生しているが、すき間上部の噴孔内にキャビテーションは発生しておらず、噴霧の広がりは小さくなっている。

さらに、すき間上部の噴孔内で発生したキャビテーションにより乱された液流が、すき間に流入することも考えられ、 L_g が短い場合、 L_g が長い場合と比較してこの影響が大きくなり、噴霧の微粒化促進に影響することが考えられる。これに対して、 L_g が長い場合、すき間入口付近では、 L_g が短いノズルと同様にこの液流の影響が大きいものと思われるが、すき間出口付近では、かく乱が減衰し、この液流の影響がほとんどないものと考えられる。

以上のことから、 L_g が短い場合、すき間下部の噴孔内で発生するキャビテーションによる液流のかく乱と、すき間上部の噴孔からすき間に流入する液流のかく乱により微粒化が促進されるものと考えられる。これに対し、 L_g が長い場合、すき間下部の噴孔内で発生するキャビテーションによる液流のかく乱のみであるため、 L_g の長短による影響が顕著に表れたものと考えられる。

3.3 ノズルの幾何学形状の影響

図7に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。すき間下部の噴孔径 D_2 は、実機ディーゼルノズルの噴孔径に相当する $D_2=\phi 0.3$ mmである。図7より、微粒化促進ノズルの噴霧の広がり、従来の単孔ホールノズルよりも大きく、微粒化しており、良好な噴霧が得られている。

図8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9に噴霧角に及ぼす影響を示す。図8、図9より、ノズルの幾何学形状に依らず、噴射差圧 ΔP_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、分裂長さは比較的小さな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はほぼ同じである。また、全噴射差圧域において、微粒化促進ノズルの分裂長さは単孔ホールノズルよりも短くなっており、噴霧角は大きくなっていく。

以上の結果から、この微粒化促進ノズルは従来の単孔ホールノズルと比較して、噴霧の微粒化と微粒化特性が大幅に改善されることが明らかになった。

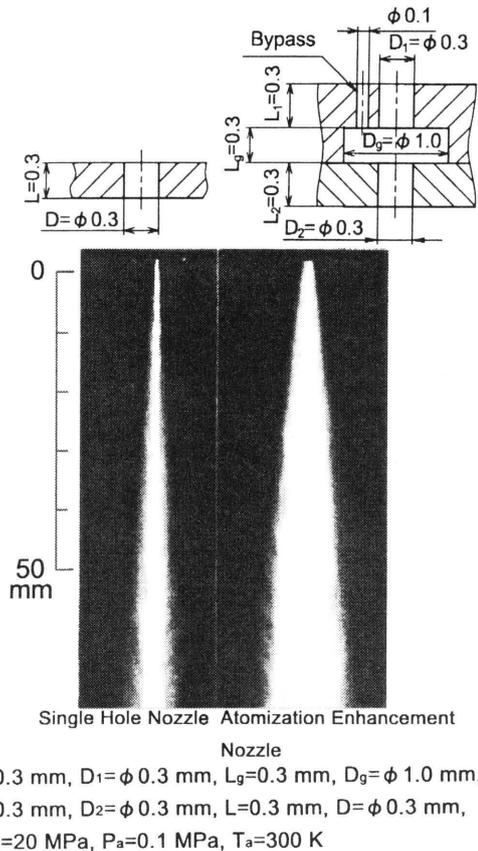


図7 ノズルの幾何学形状が噴霧の微粒化に及ぼす影響

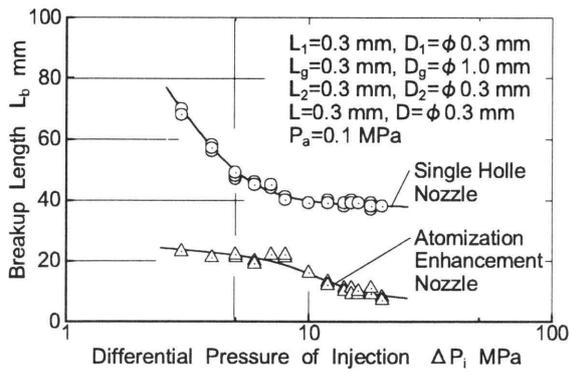


図 8 ノズルの幾何学形状が分裂長さに及ぼす影響

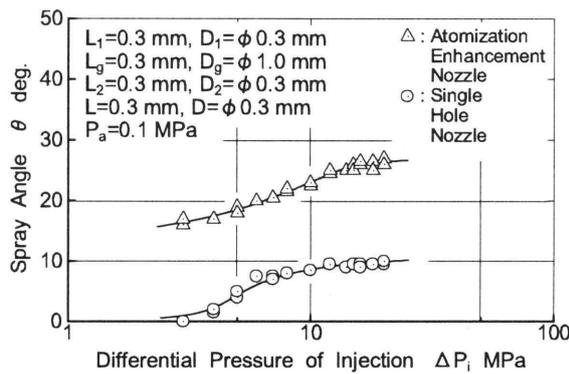


図 9 ノズルの幾何学形状が噴霧角に及ぼす影響

3.4 針弁を設けたノズルの微粒化特性

図 10 に針弁の有無がノズル噴孔内の流れと噴霧の微粒化に及ぼす影響を示す。針弁リフト量 $h=5$ mm、噴射差圧 $\Delta P_i=1.5$ MPa の場合である。図 10 より、針弁の有無に依らず、すき間上部とすき間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、噴霧は微粒化している。また、ノズル噴孔内の流れ、噴霧の広がりおよび噴霧の分裂挙動は、針弁の有無による大きな違いは見られない。

図 11 に針弁の有無が分裂長さと噴霧角に及ぼす影響を示す。図 11 より、 ΔP_i に対する分裂長さと噴霧角の変化は、針弁の有無に依らず、ほとんど同じ傾向を示している。 ΔP_i が 0.5 MPa を超えると、分裂長さは短い状態で推移し、噴霧角は大きい状態で推移し、最高噴射差圧 $\Delta P_i=1.5$ MPa の時の分裂長さ、噴霧角とほぼ同じ値になっている。

図 12 に針弁リフト量 h が分裂長さと噴霧角に及ぼす影響を示す。図 12 より h が小さい場合 ($h=1$ mm、 $h=2$ mm)、 h が大きい場合 ($h=10$ mm) と比較して分裂長さは長く、噴霧角は小さくなっており、微粒化状態は悪くなっている。しかし、 h が増加していくと、分裂長さは短くなり、噴霧角は大きくなる。

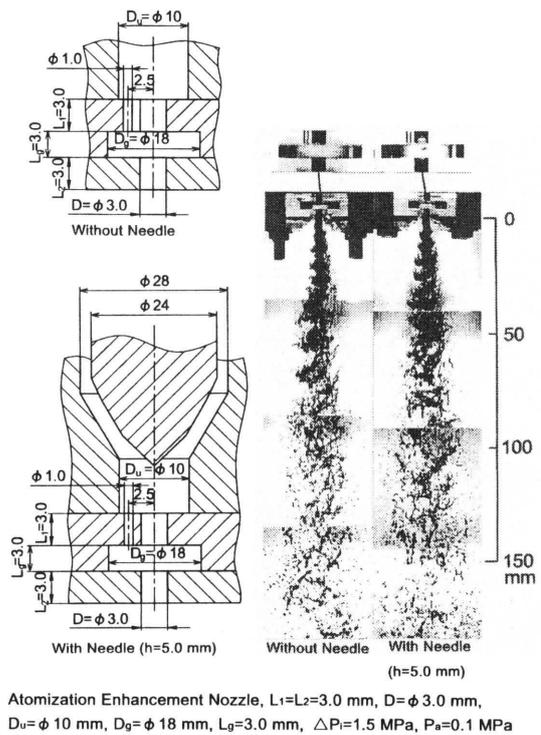


図 10 針弁の有無がノズル噴孔内の流れと噴霧の微粒化に及ぼす影響

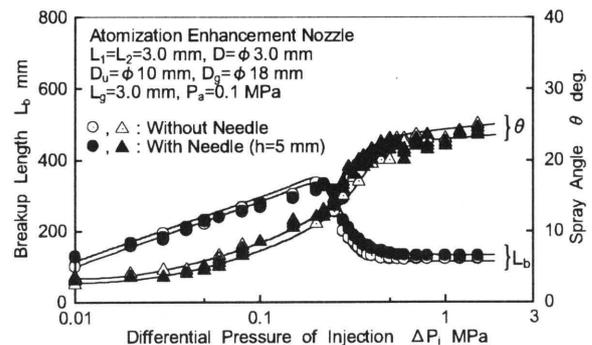


図 11 針弁の有無が分裂長さと噴霧角に及ぼす影響

$h=5$ mm を越えると、分裂長さと噴霧角はほとんど変化しなくなり、 ΔP_i に依らず、同じ傾向を示している。

以上の結果より、針弁の有無による噴霧の微粒化状態の違いは、ほとんど見られず、針弁を設けても比較的小さな噴射差圧において良好な微粒化特性が得られることがわかった。

4. 結言

- (1) 微粒化促進ノズルの噴孔部に設けたすき間直径 D_g とすき間長さ L_g を最適な寸法にすると ($D=$

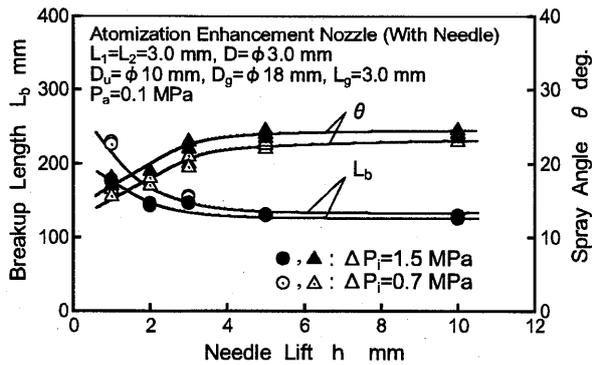


図 12 針弁リフト量が分裂長さおよび噴霧角に及ぼす影響

$\phi 3.0$ mm に対して、 $D_g = \phi 18$ mm、 $L_g = 3.0$ mm)、噴射差圧 ΔP_1 に依らず、最も分裂長さが短く、噴霧角が大きな噴霧が得られる。

- (2) 開発した微粒化促進ノズルは、従来の単孔ホールノズルと比較して、噴霧の微粒化と微粒化特性が大幅に改善される。
- (3) 微粒化促進ノズルに針弁を設けた場合でも噴霧の微粒化促進が可能であり、実機への適用が可能である。

参考文献

- (1) 藤沢英也・川合静男, ディーゼル燃料噴射, 株式会社山海堂, p. 48, 1988.
- (2) 日本液体微粒化学会編, アトマイゼーション・テクノロジー, 微粒化の基礎と基本用語辞典, 森北出版株式会社, p. 34, 2001.
- (3) Hiroyasu, H., Arai, M. and Shimizu, M., Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, *Proc. Fifth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-91*, pp. 275-282, 1991.
- (4) Soteriou, C., Andrews, R. and Smith, M., Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization, *SAE Technical Paper*, No. 950080, pp. 27-52, 1995.
- (5) Chaves, H., Knapp, M., Kubitzek, A., Obermeier, F. and Schneider, T., Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzles, *SAE Technical Paper*, No. 950290, pp. 645-657, 1995.

- (6) 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による液体噴流の微粒化の促進, *機論 B*, 63-613, pp. 3144-3149, 1997.
- (7) N. Tamaki, M. Shimizu, K. Nishida and H. Hiroyasu, Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet, *Atomization and Sprays*, vol. 8, pp. 179-197, 1998.
- (8) Badock, C., Wirth, R., Fath, A. and Leipertz, A., Investigation of Cavitation in Real Size Diesel Injection Nozzles, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 538-544, 1999.
- (9) Bunnell, R. A., Heister, S. D., Yen, C. and Collicott, H., Cavitating Injector Flows: Validation of Numerical Models and Simulations of Pressure Atomizers, *Atomization and Sprays*, Vol. 9, No. 5, pp. 445-465, 1999.
- (10) 玉木伸茂・清水正則・廣安博之, 低圧噴射による液体噴流の微粒化促進, 第 8 回微粒化シンポジウム講演論文集, 247-252, 1999.
- (11) Tamaki, N., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., Enhancement of Atomization of a Liquid Jet by Cavitation in a Nozzle Hole, *Eighth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2000, U. S. A.*, CD-R, 2000.
- (12) 玉木伸茂・清水正則・廣安博之, 低圧噴射による液体噴流の微粒化促進, *機論 B*, 67-664, pp. 3147-3152, 2001.
- (13) Tamaki, N., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., Enhancement of the Atomization of a Liquid Jet by Cavitation in a Nozzle Hole, *Atomization and Sprays*, Vol. 11, No.2, pp. 125-137, 2001.
- (14) 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 B*, 49-448, pp. 2886-2892, 1983.

謝辞

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。ここに記して謝意を表す。