

直噴式ディーゼル機関用燃料噴射ノズルの微粒化特性の改善

Improvement of Atomization Characteristics of Fuel Injection Nozzle for Direct Injection Diesel Engine

研究代表者 工学部 機械工学科 准教授 玉木 伸茂

The purpose of this study is to improve of atomization characteristics of a direct injection Diesel nozzle, which the spray with large spray angle, short liquid core length and small droplet diameter are obtained. In the previous study, the single hole atomization enhancement nozzle, which excellent spray characteristics are obtained at relatively low injection pressure, was developed. In this study, it was investigated about atomization of the spray of the multi-hole atomization enhancement nozzle, and aimed to improve atomization characteristics and to obtain excellent spray characteristics. The effects of dimensions of the atomization enhancement nozzle such as hole diameter and geometric shapes of nozzle hole on atomization of the spray and spray angle were investigated. As a result, it was cleared that in case of the multi-hole nozzle with hole number of $N = 4$, breakup length becomes short and spray angle becomes large about two times, compared with the single hole nozzle. Atomization characteristics of continuous injection and intermittent injection were improved considerably by using the multi-hole nozzle with round inlet shape of nozzle hole and the multi-hole nozzle of hole number of $N = 4$ at high-ambient pressure conditions for actual Diesel engine.

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、燃料噴射装置が大型になるほか、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噴霧の広がりが大きく、噴霧の到達距離が長くなる、すなわち噴霧の高分散・高貫徹力を実現でき、効率よく微粒化できるノズルを開発することである。

従来の研究より、ノズルから噴射された液体噴流は、噴射液体と雰囲気との空気力学的な相互作用⁽²⁾、⁽³⁾、噴流表面の小さな波の共振による圧力変動⁽⁴⁾、噴射液体と雰囲気との界面に存在するせん断波が噴流の微粒化を引き起こすという境界層の不安定性理論⁽⁵⁾といった、噴射液体と雰囲気との相互作用により微粒化するものと考えられてきた。

しかし、液体がノズルから噴出する以前、すなわちノズル噴孔内の流れが噴霧の微粒化に影響しているという新しい見解が打ち出されており、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ピテ

ーションによる液流のかく乱であるという知見が得られている^{(6)~(12)}。そこで、この知見に基づき、ノズルの構造が単純で二次的な装置が不要であり、低い噴射圧において噴霧特性を大幅に改善することができる微粒化促進ノズルを考案した^{(13)~(17)}。

これまでの研究は、考案された微粒化促進ノズルを実機へ適用するために、実機ノズルと同等の噴孔径を有する単噴孔微粒化促進ノズルを使用し、ノズルの幾何学寸法および雰囲気圧を変化させ、微粒化特性を調べてきた^{(18)~(27)}。本研究では、多噴孔微粒化促進ノズルを用いて、ノズルの幾何学寸法、噴孔入口形状を変化させ、大気圧雰囲気下に定常噴射したときの噴霧の微粒化と微粒化特性に及ぼす影響を調べた。また、実機の燃焼室内と同じ雰囲気密度である、高圧雰囲気下に間欠噴射したときの噴霧の微粒化促進に及ぼす影響を調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 定常噴射と間欠噴射の実験装置

図1に定常噴射実験装置の概略を示す。実験装置は、最高噴射圧 15 MPa まで連続噴射が可能な空気駆動式高圧噴射ポンプ(パワーユニット:フジキン(株), 500W)、アキュムレータ、噴射ノズル、オシロスコープ、一眼レフデジタルカメラ (Nikon, D1H)、ストロ

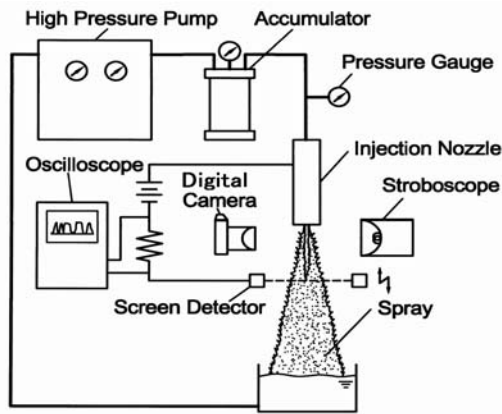
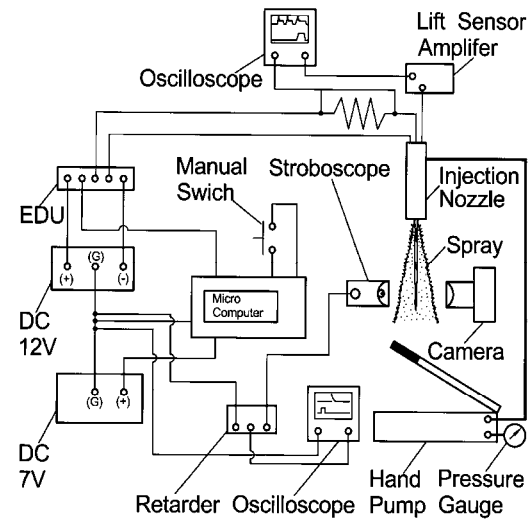


図1. 定常噴射実験装置の概略

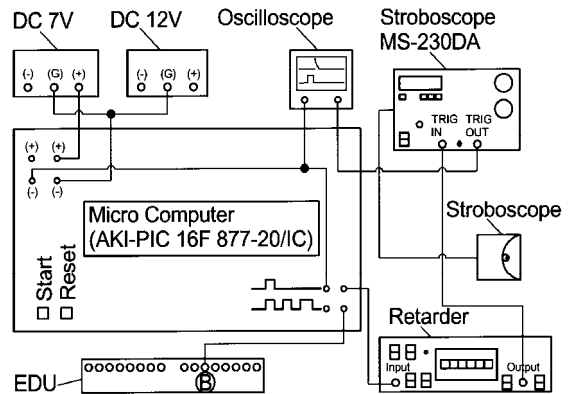
ボスコープ(菅原研究所, MS-230DA)および自作の分裂長さ(噴霧中に存在する未分裂の液柱の長さ)の測定装置から構成されている。供試液体は水道水を用い、大気圧雰囲気下に定常噴射した。

噴霧の分裂挙動は、ストロボスコープと一眼レフデジタルカメラを用いて散乱光撮影を行った。分裂長さは、スクリーン電極を用いた電気抵抗法⁽⁶⁾により測定した。電気抵抗法による分裂長さの測定装置は、ノズル側を正極、スクリーン電極側を負極にとり、その間に約1 MΩの抵抗を設け、直流電源を用いて150~300 Vの電圧を印加した。直列抵抗の両端をオシロスコープに接続し、スクリーン電極を上下移動させ、液柱先端がスクリーン電極へ接触、非接触を繰り返した時に現れる断続信号波形(オシロスコープの on, off 信号)を読み、分裂長さを測定した。噴霧角は、ストロボスコープの連続光を噴霧に照射し、一眼レフデジタルカメラで散乱光撮影した画像を処理したものから直接測定した。

図2に間欠噴射実験装置の概略を示す。図2(a)は間欠噴射実験装置全体の概略を示し、(b)は燃料噴射時期、燃料噴射期間およびストロボスコープ発光時期の制御装置の概略を示す。実験装置は、手動ポンプ(理研機器(株), UP-21)とマイコン(AKI-PIC, 16F877-20/IC スタンプ)、間欠噴霧を撮影する一眼レフデジタルカメラ(Nikon, D1H)とストロボスコープ(菅原研究所, MS-230DA)から構成されている。供試液体は、JIS 2号軽油(動粘度 $\nu = 2.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_a = 293 \text{ K}$)を用い、噴射差圧 $\Delta P_i = 100 \text{ MPa}$ 一定で実機ディーゼル機関の高温、高圧雰囲気下とほぼ同じ雰囲気密度である常温、高圧雰囲気下($P_a = 1.6 \text{ MPa}$, $T_a = 300$



(a) 間欠噴射実験装置全体の概略



(b) 燃料噴射時期、燃料噴射期間およびストロボスコープ発光時期の制御装置の概略

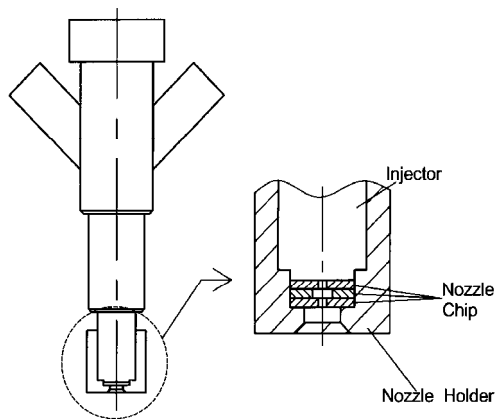
図2. 間欠噴射実験装置の概略

K)に間欠噴射した。

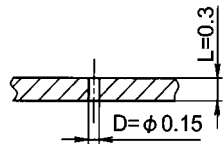
噴霧の撮影は、噴射開始からの時間 t が 0.05 ms から 0.3 ms まで、遅延装置とストロボスコープを用いて、噴射開始後の任意の時間における噴霧の散乱光撮影を行った。

2.2 供試ノズル

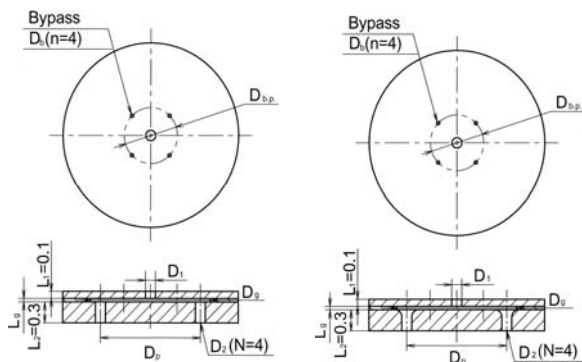
図3に供試ノズルの概略を示す。図3(a)は直接噴射式ディーゼル機関用噴射弁[(株)デンソー, トヨタ自動車(株), ランドクルーザ用燃料噴射弁], (b)は実機ディーゼル機関に使用されている単孔ホールノズル, (c)は噴孔数 $N=4$ 本の多噴孔微粒化促進ノズルで噴孔入口部が直角切断型ノズル(Nozzle-S),



(a) 直接噴射式ディーゼル機関用噴射弁



(b) 単孔ホールノズル



多噴孔微粒化促進ノズル

(c) Nozzle-S

(d) Nozzle-Ra

図3. 供試ノズルの概略

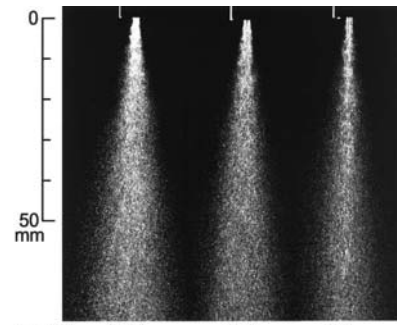
(d)はすき間下部の噴孔入口部に R 面取りを施したノズル(Nozzle-R_d)である。

3. 実験結果および考察

3.1 すき間長さが定常噴霧の微粒化特性に及ぼす影響

(1) Nozzle-S, $D_1 = \phi 0.15 \text{ mm}$, $D_2 = \phi 0.15 \text{ mm}$ (N=4) の場合

図4にすき間下部の噴孔入口形状が直角切断型ノズルの場合, 最高噴射差圧 $\Delta P_1 = 10 \text{ MPa}$ において, すき間長さ L_g が噴霧の微粒化に及ぼす影響を示す。



$L_g \text{ mm}$ 0.05 0.1 0.3
Atomization Enhancement Nozzle, Nozzle-S
N=4, n=4, $D_b = \phi 0.05 \text{ mm}$, $D_{bp} = \phi 0.8 \text{ mm}$
 $L_1 = 0.1 \text{ mm}$, $D_1 = \phi 0.15 \text{ mm}$, $D_g = \phi 1.8 \text{ mm}$
 $L_2 = 0.3 \text{ mm}$, $D_2 = \phi 0.15 \text{ mm}$ (N=4), $D_p = \phi 1.5 \text{ mm}$
 $\Delta P_1 = 10 \text{ MPa}$, $P_a = 0.1 \text{ MPa}$

図4. すき間長さが噴霧の微粒化に及ぼす影響 (Nozzle-S)

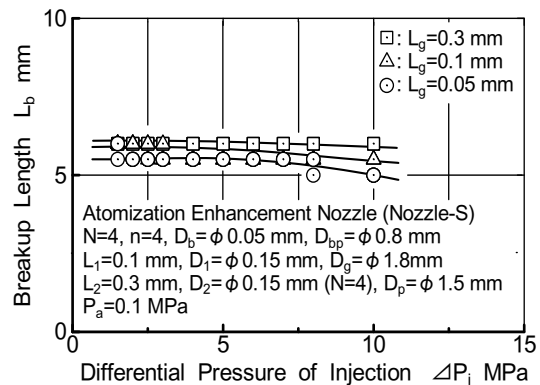


図5. すき間長さが分裂長さに及ぼす影響 (Nozzle-S)

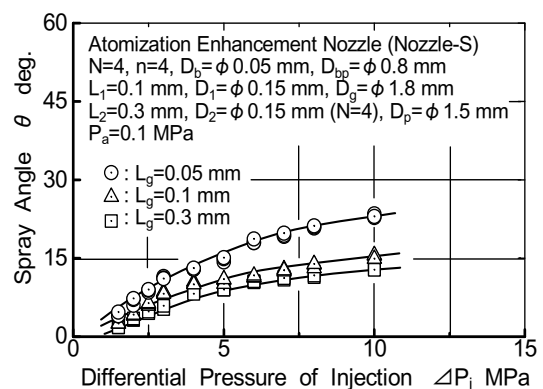


図6. すき間長さが噴霧角に及ぼす影響 (Nozzle-S)

すき間下部の噴孔の総断面積が, すき間上部の噴孔の総断面積よりも大きい場合 ($D_1 < D_2$) の結果である。

また、図5にすき間長さ L_g が分裂長さに及ぼす影響を示し、図6に噴霧角に及ぼす影響を示す。

図4より、 $L_g=0.05$ mm の場合、噴霧の広がり最も大きくなっており、噴霧外縁部に微細な液滴が多数存在していることがわかる。また、噴霧の広がり、 $L_g=0.3$ mm の場合、最も小さく、 L_g が長くなるにつれて小さくなっている。

図5より、噴射差圧 ΔP_i の変化に対する分裂長さの変化は、すき間長さ L_g によらず、ほとんど同じである。また、全噴射差圧領域において $L_g=0.3$ mm の分裂長さが最も長く、 $L_g=0.05$ mm の分裂長さが最も短くなっている。

図6より、噴霧角は、 $L_g=0.1$ mm、 0.3 mm の場合、噴射差圧 ΔP_i が約 6 MPa を超えると、 ΔP_i の増加に対する噴霧角の変化はほとんど見られず、 $L_g=0.05$ mm の場合、 ΔP_i が大きくなるにつれて大きくなっていく。また、全噴射差圧領域において、 $L_g=0.05$ mm の噴霧角が最も大きく、 $\Delta P_i > 8.0$ MPa において噴霧角が最も小さい $L_g=0.3$ mm のノズルよりも約 2 倍大きくなっている。

このように、すき間下部の噴孔径 $D_2 = \phi 0.15$ mm (噴孔数 $N=4$ 本; $N=1$ 本のノズルで噴孔径 $\phi 0.3$ mm 相当) の場合、すき間長さが最も短い $L_g=0.05$ mm の噴霧の微粒化と微粒化特性が最も改善されている。

これは、 L_g が短い場合、すき間直径 D_g が同じ大きさであるため、すき間容積が最も小さい。したがって、キャビテーションの発生による液流のかく乱に加えて、バイパスからすき間内に流入する液流によるかく乱(旋回流と思われる)がほとんど減衰しないため、噴霧の半径方向へ広げる力が大きくなったためであると考えられる。

(2) Nozzle-R_d, $D_1 = \phi 0.15$ mm, $D_2 = \phi 0.15$ mm (N=4 本) の場合

図7にすき間下部の噴孔入口部にR面取りを施したノズルの場合、最高噴射差圧 $\Delta P_i = 10$ MPa において、すき間長さ L_g が噴霧の微粒化に及ぼす影響を示し、図8に噴霧角に及ぼす影響を示す。図4の結果と同様に、すき間下部の噴孔の総断面積が、すき間上部の噴孔の総断面積よりも大きい場合 ($D_1 < D_2$) である。

図7より、図4で示した Nozzle-S のノズルと同様に、すき間長さ $L_g=0.05$ mm の場合、噴霧の広がり最も大きくなっており、 L_g が長くなるにつれて、噴

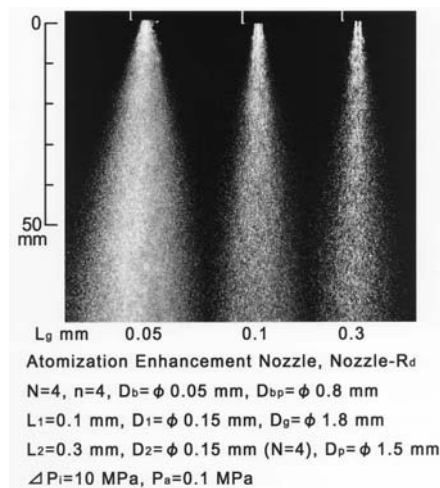


図7. すき間長さが噴霧の微粒化に及ぼす影響 (Nozzle-R_d)

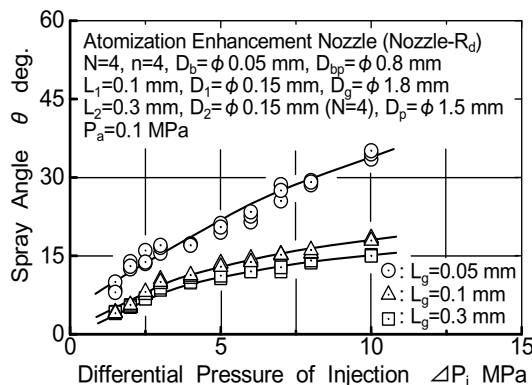


図8. すき間長さが噴霧角に及ぼす影響 (Nozzle-R_a)

霧の広がり最も小さくなっている。また、図8より、全噴射差圧領域において、すき間長さ $L_g=0.05$ mm の噴霧角が最も大きくなっており、 $\Delta P_i > 8.0$ MPa において、噴霧角が最も小さい $L_g=0.3$ mm のノズルよりも約 2 倍以上大きくなっている。

一般的に、同一噴射差圧において体積流量が多くなると、噴霧の微粒化状態は悪くなり、逆に、体積流量が少なくなると、噴霧の微粒化状態は良くなる傾向がある。図9にすき間長さ L_g が体積流量に及ぼす影響を示す。図9より、任意の噴射差圧 ΔP_i で比較して、体積流量は L_g によらず、ほとんど同じである。したがって、図7、図8より、ほとんど同じ体積流量であるにもかかわらず、噴霧の広がり、噴霧角が他のすき間長さ L_g のノズルに比べて約 2 倍以上

大きくなっている。したがって、体積流量の違いが影響しているのではなく、すき間長さの長短により、すき間内における液流のかく乱状態が噴霧の微粒化に大きく影響していることが考えられる。

3.2 すき間下部の噴孔径が定常噴霧の微粒化に及ぼす影響

図 10 に最高噴射差圧 $\Delta P_i = 10$ MPa において、すき間下部の噴孔径 D_2 が噴霧の微粒化に及ぼす影響を示し、図 11 に噴霧角に及ぼす影響を示す。

図 10 より、噴霧の広がり、 $D_2 = \phi 0.15$ mm ($D_1 < D_2$, 噴孔数 $N=4$ 本; $N=1$ 本のノズルで噴孔径 $\phi 0.3$ mm 相当) の方が、 $D_2 = \phi 0.08$ mm ($D_1 = D_2$, $N=4$ 本; $N=1$ 本のノズルで噴孔径 $\phi 0.15$ mm 相当) よりも大きくなっている。図 11 より、 $D_2 = \phi 0.08$ mm ($N=4$ 本) の噴霧角は、噴射差圧 ΔP_i が約 7 MPa を超えると、 ΔP_i の増加に対する噴霧角の変化はほとんど見られないが、 $D_2 = \phi 0.15$ mm ($N=4$ 本) の噴霧角は、 ΔP_i が増加するにつれて大きくなっている。また、全噴射差圧領域において $D_2 = \phi 0.15$ mm の噴霧角の方が大きくなっており、最高噴射差圧 $\Delta P_i = 10$ MPa において比較すると、 $D_2 = \phi 0.15$ mm ($N=4$ 本) の噴霧角は、 $D_2 = \phi 0.08$ mm ($N=4$ 本) より、約 2 倍以上大きくなっている。

この理由として、噴孔内はキャビテーションによる液流のかく乱と、バイパスから流入する液流による旋回流が発生するため、すき間下部の噴孔径 D_2 が大きい場合、流路損失が小さく、液流のかく乱と旋回流による半径方向の運動量が増すため、噴霧角が大きくなるものと考えられる。

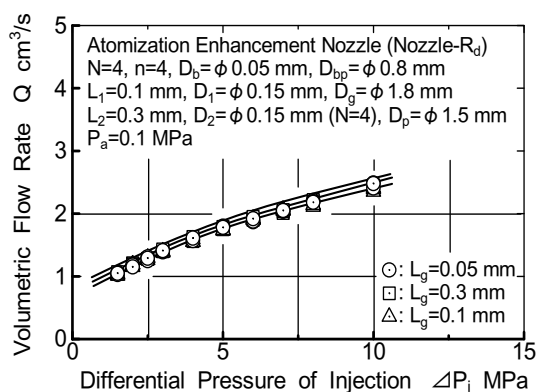


図 9. すき間長さが噴霧の微粒化に及ぼす影響 (Nozzle-Ra)

これらの結果から、すき間上部の噴孔径 D_1 に対し、すき間下部の噴孔径 D_2 を大きくすると ($D_1 < D_2$), 噴霧の微粒化促進に効果的であることがわかる。

3.3 すき間下部の噴孔径が常温、高圧雰囲気下における間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響

図 12 にすき間下部の噴孔径 D_2 が間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響を示す。図 12(a) は、すき間下部の噴孔入口形状が直角切断型ノズルの場合、(b) はすき間下部の噴孔入口部に R 面取りを施したノズルの場合であり、噴霧画像は噴射開始からの時間 $t = 3.0$ ms の結果である。図 12(a) より Nozzle-S の場合、噴霧の広がり、 $D_2 = \phi 0.15$ mm ($N=4$ 本, $D_1 < D_2$) のノ

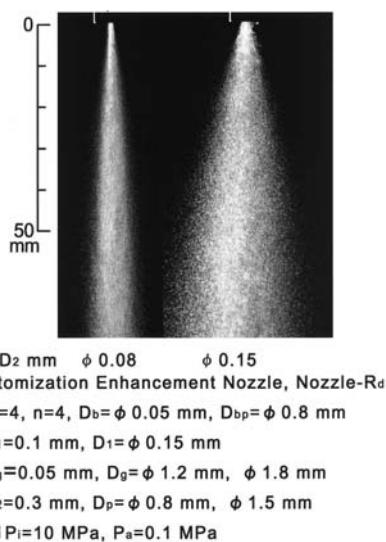


図 10. すき間下部の噴孔径が噴霧の微粒化に及ぼす影響 (Nozzle-Ra)

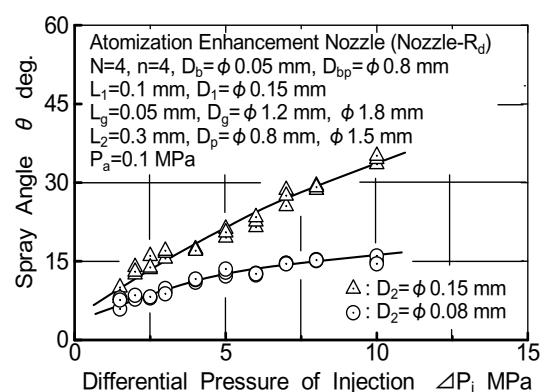
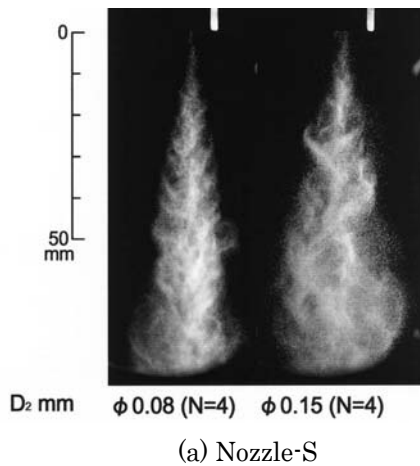
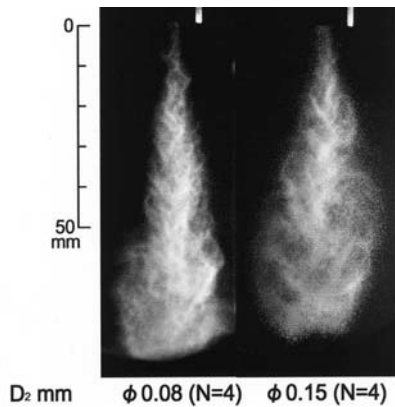


図 11. すき間下部の噴孔径が噴霧角に及ぼす影響 (Nozzle-Ra)



(a) Nozzle-S



(b) Nozzle-Rd

Atomization Enhancement Nozzle, N=4, n=4,
 $D_b = \phi 0.05 \text{ mm}$, $D_{bp} = \phi 0.8 \text{ mm}$, $L_1 = 0.3 \text{ mm}$, $D_1 = \phi 0.15 \text{ mm}$,
 $L_2 = 0.05 \text{ mm}$, $D_2 = \phi 1.2 \text{ mm}$, $\phi 1.8 \text{ mm}$, $L_2 = 0.3 \text{ mm}$,
 $D_p = \phi 0.8 \text{ mm}$, $\phi 1.5 \text{ mm}$, $\angle P_1 = 100 \text{ MPa}$, $P_a = 1.6 \text{ MPa}$,
 $T_a = 300 \text{ K}$, $T_{inj} = 900 \text{ } \mu\text{s}$, $t = 3.0 \text{ ms}$

図 12. すき間下部の噴孔径が間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響

ズルの方が $D_2 = \phi 0.08 \text{ mm}$ ($N=4$ 本, $D_1 = D_2$) のノズルより大きくなっている。噴霧の長さは、観察窓と噴霧先端の撮影画像の状況から、 $D_2 = \phi 0.08 \text{ mm}$ ($N=4$ 本, $D_1 = D_2$) のノズルの方が $D_2 = \phi 0.15 \text{ mm}$ ($N=4$ 本, $D_1 < D_2$) のノズルより長くなっている。

これは、 D_2 を小さくすると、ノズル噴孔内における噴霧の流速が増し、噴射軸方向の運動量が大きくなり、噴霧の貫徹力が大きくなるためであると考えられる。

図 12(b) より Nozzle-Rd の場合、噴霧の広がり、

$D_2 = \phi 0.15 \text{ mm}$ ($N=4$ 本, $D_1 < D_2$) のノズルの方が $D_2 = \phi 0.08 \text{ mm}$ ($N=4$ 本, $D_1 = D_2$) のノズルより大きくなっている。また、噴霧の長さは観察窓と噴霧先端の撮影画像の状況から、 $D_2 = \phi 0.08 \text{ mm}$ のノズルの方が $D_2 = \phi 0.15 \text{ mm}$ のノズルより長くなっている。

この理由として、噴孔内はキャビテーションによる液流のかく乱と、バイパスから流入する液流による旋回流が発生することが過去の可視化実験から明らかになっている。 D_2 が大きい場合、流路損失が小さく、液流のかく乱と旋回流による半径方向の運動量が増すため、噴霧の広がりが大きくなるものと考えられる。また、定常噴射実験においてノズル噴孔入口部に R 面取りを施すと、噴霧角が大きくなることが確認されており、間欠噴射実験においてもその影響を確認することができた。

これらの結果より、すき間下部の噴孔入口部に R 面取りを施したノズルの場合、定常噴霧においても、間欠噴霧においても、すき間下部の噴孔径 D_2 は噴霧の微粒化に影響を及ぼすことがわかった。すなわち、すき間上部の噴孔径 D_1 より、すき間下部の噴孔径 D_2 を大きくした場合、噴霧の微粒化状態が改善されることがわかった。

3.4 すき間下部の噴孔入口形状が常温、高圧雰囲気下における間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響

図 13 にすき間下部の噴孔入口形状が間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響を示す。噴霧画像は、噴射開始からの時間 $t = 3.0 \text{ ms}$ の結果である。図 13 より、噴霧の広がり、Nozzle-Rd の方が Nozzle-S より大きくなっている。また、噴霧の長さは、観察窓と噴霧先端の撮影画像の状況から、Nozzle-S の方が Nozzle-Rd より長くなっている。

3.5 実機ディーゼル機関用単孔ホールノズルと多噴孔微粒化促進ノズルの比較

図 14 に実機ディーゼル機関用単孔ホールノズルと多噴孔微粒化促進ノズルの間欠噴霧の微粒化と噴霧の成長過程を示す。図 14(a) は単孔ホールノズル、(b) は多噴孔微粒化促進ノズルの場合である。

図 14 より、噴霧の広がり、噴射開始からの任意の時間で比較して、多噴孔微粒化促進ノズルの方が単孔ホールノズルより大きくなっている。単孔ホールノズルは噴射開始からの時間 $t = 0.5 \text{ ms}$ を超えると、噴霧先端が観察窓下部から出ているのに対し、多噴

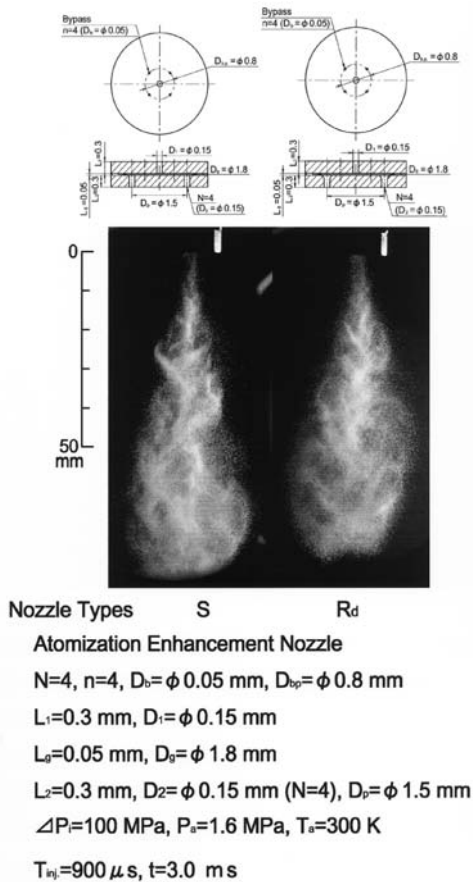
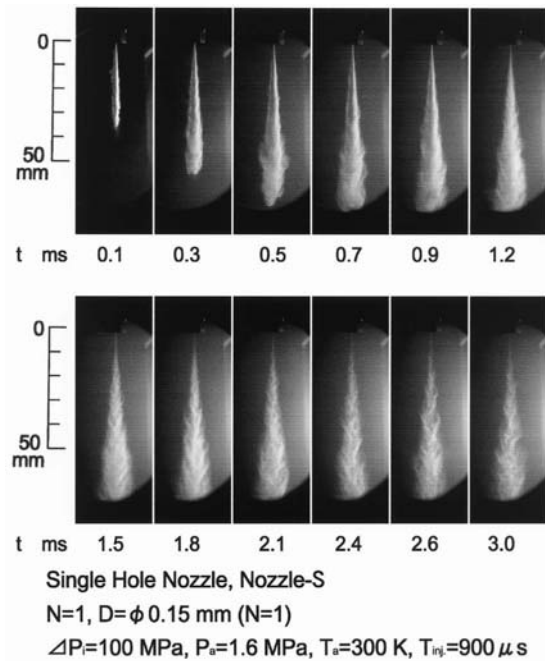


図 13. すき間下部の噴孔入口形状が間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響

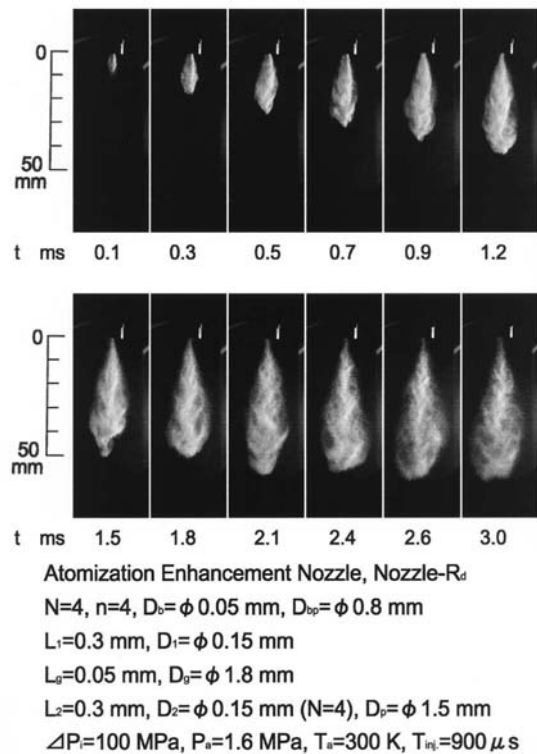
孔微粒化促進ノズルは $t = 3.0$ ms においても噴霧先端が観察窓下部に到達していないことから、噴霧の長さは、単孔ホールノズルの方が多噴孔微粒化促進ノズルより長くなっていることがわかる。

これは、多噴孔微粒化促進ノズルは、バイパスとすき間部を設けることにより、すき間内におけるキャビテーション気泡の崩壊による液流のかく乱、バイパスから流入する液流の旋回流により、噴霧の微粒化状態が大きく改善されるものと考えられる。

以上の結果より、定常噴射実験において微粒化特性が最も改善された多噴孔微粒化促進ノズルを用いると、噴霧液滴群が半径方向に広く分散し、噴霧の広がりがかかなり大きくなり、高分散噴霧が得られ、高圧雰囲気下においても噴霧の微粒化がかかなり改善されることがわかった。また、常温、高圧雰囲気下においても、噴霧の微粒化状態が定常噴射時とほぼ同じ傾向が得られ、良好な噴霧と微粒化特性が得られることがわかった。したがって、ノズルを設計、



(a) 単孔ホールノズル



(b) 多噴孔微粒化促進ノズル

図 14. 実機ディーゼル機関用単孔ホールノズルと多噴孔微粒化促進ノズルの間欠噴霧の微粒化と噴霧の成長過程

開発する場合、定常噴射時において、噴霧の微粒化状態を把握すればよいことがわかる。

6. 結言

これまでに開発した多噴孔微粒化促進ノズルを用いて、ノズルの幾何学寸法、噴孔入口形状を変化させ、大気圧雰囲気下に定常噴射したときの噴霧の微粒化と微粒化特性に及ぼす影響を調べた。また、実機の燃焼室内と同じ雰囲気密度である、高圧雰囲気下に間欠噴射したときの噴霧の微粒化に及ぼす影響を調べた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) すき間下部の噴孔入口形状によらず、すき間長さ L_g が短いノズル ($L_g=0.05$ mm) を用いると、噴霧の微粒化促進に効果的であり、噴霧角は、 L_g が長いノズル ($L_g=0.3$ mm) の約 2 倍以上大きくなる。
- (2) すき間上部の噴孔径 D_1 に対し、すき間下部の噴孔径 D_2 を大きくすると ($D_1 < D_2$)、噴霧の微粒化促進に効果的であり、噴霧角は、 $D_1 = D_2$ のノズルの約 2 倍以上大きくなる。
- (3) すき間下部の噴孔入口部に R 面取りを施したノズルの場合 (Nozzle-R_d)、噴孔入口部が直角切断型のノズル (Nozzle-S) より、噴霧の広がりが大きくなる。
- (4) 常温、高圧雰囲気下 ($P_a=1.6$ MPa, $T_a=300$ K) において、実機ディーゼルインジェクタへの適用性を調べた結果、定常噴射実験において、噴霧の微粒化状態が最も改善された多噴孔微粒化促進ノズルを用いると、噴霧液滴群が半径方向に広く分散し、噴霧の広がりがかなり大きくなり、高分散噴霧が得られ、高圧雰囲気下においても噴霧の微粒化状態がかなり改善された。

謝辞

本研究の一部は、平成 18 年度 (独) 科学技術振興機構 (JST) シーズ発掘試験研究助成金、平成 21 年度 (独) 日本学術振興会 科学研究費補助金、基盤研究 C (課題番号: 19560217) によった。また、実験装置の一部と実機インジェクタは、(株) デンソーより試供され、制御装置は、近畿大学 工学部 知能機械工学科、宮田 繁春 准教授のご指導によった。さらに、新たなノズルの設計に際し、平成 22 年度文部科学省 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業、地域連携による次世代自動車技術に関する研究、「省エ

ネ型内燃機関用噴射ノズルの実用化研究」によった。ここに記して、謝意を表す。

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, (1988), 48.
- (2) 棚沢泰, ディーゼル機関 I, 山海堂, (1960), 81.
- (3) Reitz, R. D. and Bracco, F. V., Mechanism of Atomization of a Liquid Jet, *Phys. Fluids*, Vol. 25, No. 10, (1982), 1730-1742.
- (4) Lin, S. P. and Kang, D. J., Atomization of a Liquid Jet, *Phys. Fluids*, Vol. 30, No. 7, (1987), 2000-2007.
- (5) Lin, S. P. and Lian, Z. W., Mechanisms of the Breakup of Liquid Jets, *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 1, (1990), 120-126.
- (6) Hiroyasu, H., Arai, M. and Shimizu, M., Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, *Proc. 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-91*, (1991-7), 275-282.
- (7) 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, (1995), 27-52.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 玉木伸茂, 噴孔内の流れと液体噴流の微粒化機構, 広島大学博士学位請求論文, (1997), 40-82.
- (11) Tamaki, N., Shimizu, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet, *Atomization and Sprays*, Vol. 8, (1998), 179-197.
- (12) 玉木伸茂, ノズル内の流れと液体噴流の微粒化,

- 会誌微粒化, 11-34, (2002), 29-40.
- (13) Tamaki, N., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., Enhanced Atomization of a Liquid Jet by Cavitation in a Nozzle Hole, *Proc. 8th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-2000*, (2000-7), CD-R, 6 Pages.
- (14) 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, **67**-664, B(2001), 3147-3152.
- (15) 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, (2001), 125-137.
- (16) Tamaki, N. and Shimizu, M., Enhancement of Atomization of High-Viscous Liquid Jet by Pressure Atomized Nozzle, *Proc. 18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe 2002*, (2002-9), 357-362.
- (17) Tamaki, N., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., Effects of Geometric Shapes of High-Efficiency Atomization Enhancement Nozzle on Atomization Characteristics, *Proc. 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe 2005*, (2005-9), 317-322.
- (18) Tamaki, N., Ishida, Y. and Higashi, A., Practical Study on High-Dispersion Atomization Enhancement Nozzle, Effects of Ambient Pressures on Atomization of Spray and Application to Actual Diesel Nozzle, *Proc. 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-2006*, (2006-8-9), CD-R, 7 Pages.
- (19) 玉木伸茂・清水正則, 高分散形ディーゼル噴射ノズルの開発研究 (第一報: 微粒化促進ノズルの幾何学形状が噴霧の微粒化特性に及ぼす影響), 機論, **73**-730, B(2007), 1410-1417.
- (20) 玉木伸茂・清水正則, 高分散形ディーゼル噴射ノズルの開発研究 (第二報: 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), 機論, **73**-730, B(2007), 1418-1423.
- (21) Tamaki, N., Nishida, Y. and Hosokawa, T., Practical Study on High-Dispersion and High-Penetration Diesel Injection Nozzle, First Report: Effects of Geometric Shape of High-Dispersion Atomization Enhancement Nozzle on Atomization of Intermittent Spray, *Proc. 21st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe 2007*, (2007-9), CD-R, 7 Pages.
- (22) 玉木伸茂・西田義巨・細川剛志, 高分散形ディーゼル噴射ノズルの開発研究 (第三報: 微粒化促進ノズルの幾何学寸法が間欠噴霧の微粒化に及ぼす影響), 機論, **74**-744, B(2008), 203-209.
- (23) Tamaki, N., Morimoto, K. and Chiba, M., Practical Study on High-Dispersion and High-Penetration Diesel Injection Nozzle, Second Report: Atomization of Intermittent Spray of High-dispersion Atomization Enhancement Nozzle at High-Ambient Pressure, *Proc. 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe 2008*, (2008-9), CD-R, 7 Pages.
- (24) 玉木伸茂・森本健介・千葉実季人・尾野純市, 直噴式ディーゼルノズルの微粒化特性の改善, 機論, **75**-757, B(2009), 155-162.
- (25) Tamaki, N., Effects of Cavitation in a Nozzle Hole on Atomization of Spray and Development of High-Efficiency Atomization Enhancement Nozzle, *Proc. Eleventh International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-2009*, (2009-7), CD-R, 6 pages.
- (26) 玉木伸茂・加藤孝輔・加藤篤志・今野敬太, 多噴孔ノズルによる噴霧の微粒化特性の改善, 機論, **76**-771, B(2010), 1973-1981.
- (27) Tamaki, N., Kato, A., Imano, K. and Kato, K., Improvement of Atomization Characteristics of Spray by Multi-Hole Nozzle for Pressure Atomized Type Injector, *Proc. 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe 2010*, (2010-9), CD-R, 7 Pages.