



液体噴流の微粒化過程におよぼす噴孔内流れの影響 (第2報, ノズルの幾何学形状および雰囲気気圧の影響)

Effects of the Internal Flow in a Nozzle Hole on the Breakup Processes of a Liquid Jet (2nd Report: Effects of Geometric Shapes of Nozzle and Ambient Pressures)

玉木 伸茂, 西田 恵哉, 清水 正則, 廣安 博之
(Nobushige TAMAKI) (Keiya NISHIDA) (Masanori SHIMIZU) (Hiroyuki HIROYASU)
広島大 広島大 近畿大 広島大
(Hiroshima Univ.) (Hiroshima Univ.) (Kinki Univ.) (Hiroshima Univ.)

The purpose of this investigation is to clarify the breakup process of a high speed liquid jet. In early researches concerning the breakup mechanisms of liquid jets, it has been asserted that the disintegration of the liquid jet was induced by the interfacial force between the issuing jet and the ambient gas. Researchers including the authors, have reviewed the relationship between the internal flow and the issuing jet characteristics, having views upon the internal flow in the nozzle hole. And it has been clarified that the disturbance in the nozzle hole, for instance, the cavitation phenomena, hardly contributed to the disintegration of the liquid jet as a new concept.

In order to survey these mutual relationships, experiments were performed under conditions ranging from decompression (0.008MPa) to high (3.1MPa) ambient pressures using transparent nozzles with various ratios of hole length to diameter L/D , inlet shapes of nozzle holes and a wire netting over the inlet of the nozzle hole on purpose to give some disturbance to the liquid flow.

As a consequence of this study, it has been established that the atomization of the liquid jet was induced by the disturbance of the liquid flow resulting from the cavitation phenomena.

Key Words: Fuel Injection, Atomization, Breakup Process, Liquid Jet, Internal Flow, Nozzle Hole

1. まえがき

ディーゼル機関に用いられている単孔ホールノズルから噴出した液体噴流の微粒化は、噴流周囲の気体との摩擦による分裂が支配的であると考えられてきた。

ところが、ノズル噴孔内の流れに着目し、噴孔内の流動状態と噴流の分裂挙動との関係について調べた結果^{(1)~(4)}および前報⁽⁵⁾で報告したように、ノズルの噴孔管長や雰囲気気圧および噴射差圧を最大200MPaまで変化させて噴流の分裂挙動を観察した結果、噴孔内にキャビテーションの発生に伴う液流の攪乱が生じなければ、噴流の微粒化はほとんど促進されないということから、噴流の微粒化は噴流周囲の気体との摩擦

よりも、噴孔内の液流の攪乱に大きく影響していることが明らかになった。

本報では、キャビテーションによる液流の攪乱の発生に大きく影響する、噴孔管長や噴孔入口形状といったノズルの幾何学形状や雰囲気気圧を種々に変化させて、ノズル噴孔内の流れとノズル噴孔出口から100mm程度の噴流の分裂挙動の観察を写真撮影により行なった。また、噴孔内の液流の攪乱による振動を加速度センサを用いて測定し、噴流の分裂挙動との関係について調べた。

2. 実験装置および方法

実験装置、方法については前報と同様であるので、その概要を簡単に述べる。高圧ポンプで加圧した常温の水を圧力容器内に定常噴射した。噴孔内の流れはマ

イクロフラッシュで透過光撮影し、噴流はルビーレーザで散乱光撮影した。図1に供試ノズルの概略を示し、表1にその諸元を記す。供試ノズルは、噴孔入口付近で縮流が生じ易いシャープエッジタイプのノズル（以下、Nozzle-Sと称す）と、縮流が生じ難いように噴孔入口部を半径 r の曲面としたラウンドエッジタイプのノズル（以下、Nozzle-Rと称す）および液流に攪乱を与えるためにNozzle-Sの噴孔入口直上に金網（線径0.1mm, 100メッシュ）を設けたノズルを用いた。噴孔径 D は0.5mm, 噴孔管長と噴孔径との比 L/D は4, 10, 20, 噴孔上流部の直径 D_u は、噴孔内の流れが噴孔上流部の流れの影響を受けないように、噴孔径の10倍のもの⁽⁶⁾を用いた。

また、液流の攪乱による振動を加速度センサで測定し、振動加速度レベル（以下、VAL(dB)と称す）は、次式(1)⁽⁷⁾により求めた。

$$VAL = 20 \log \frac{A_{rms}}{A_0} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 A_{rms} は振動加速度の実効値 (m/s^2) , A_0 は振動加速度レベルの基準値 ($10^{-5} m/s^2$) である。

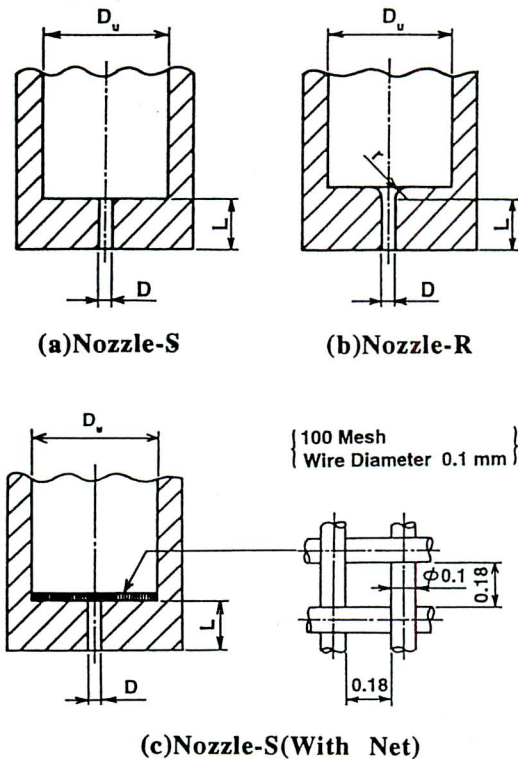


Fig.1 Schematic of test nozzles

3. 実験結果および考察

3.1 噴孔管長の影響

前報で述べたように、噴孔管長の長短はキャビテーションによる液流の攪乱の発生に大きく関わっており、噴流の分裂挙動に大きな影響を与える。ここでは、雰囲気圧力を減圧から高圧雰囲気まで変化させた時の、噴孔管長が噴流の分裂挙動に及ぼす影響について述べる。

図2に $D=0.5mm$, $L/D=4$, 20のノズルの減圧、大気圧および高圧雰囲気下における噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動を示す。図中、 $Q(cm^3/s)$ は、大気圧雰囲気下で噴射差圧 $\Delta P_i=10MPa$ における単位時間当たりの体積流量である。また、図3に噴孔管長がVALに及ぼす影響を示す。

図2の(a)より $L/D=4$ の場合、減圧雰囲気下において、噴孔内にキャビテーションは発生しておらず、噴流はほとんど微粒化していない。また、図2の(b)より大気圧雰囲気下においても噴孔内にキャビテーションの発生は見られず、液流が噴孔内壁面に所々附着しながら噴孔外へ噴出し、その結果、噴流の周囲に液滴が形成されているものの、噴流の主流部はほとんど微粒化していない。また、図3の(a), (b)より、減圧および大気圧雰囲気下において $L/D=4$ のVALの値は噴射差圧が大きくなってほとんど増加しない。

一方、図2の(a), (b)より $L/D=20$ の場合、減圧および大気圧雰囲気下においても噴孔内にキャビテーションが発生しており、噴流の微粒化が促進されている。また、図3の(a), (b)より、VALの値は $L/D=4$ に比べて大きくなっている。

高圧雰囲気下になると図2の(c)に示すように、噴孔

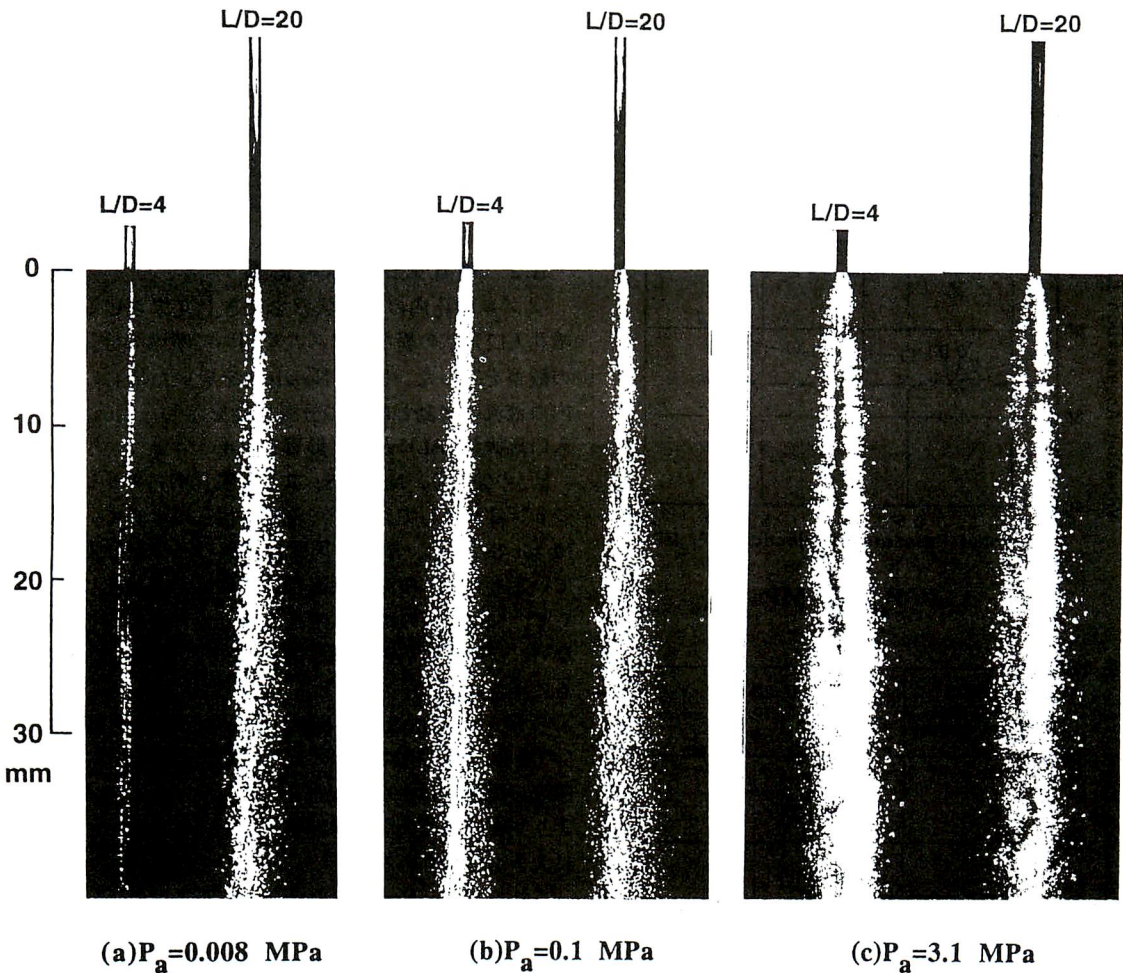
Table 1 Specification of test nozzles

Nozzle Types	D mm	L / D	D_u / D	r/D
Nozzle - S (Sharp Edge)	0.5	4	10	/
		10		
		20		
Nozzle - R (Round Edge)	0.5	4	10	5
Nozzle - S (With Net)	0.5	4	10	/

管長に依らず噴孔内にキャビテーションが発生し、噴流の微粒化がかなり促進され、噴流の分裂挙動も類似したものとなっている。また、図3(c)よりVALの値は減圧、大気圧雰囲気下に比べて大きく、また、噴射差圧による変化は噴孔管長に依らずほとんど同じである。

このような結果の説明として次のようなことが考えられる。図4に前報で示したL/D=4と20の場合のノズル噴孔内の液流の挙動を示す。図4の(a)より、噴孔管

長が短いL/D=4の場合、大気圧雰囲気下において ΔP_i が小さい時に噴孔入口付近で生成されたキャビティが、噴孔内の圧力が回復する噴孔出口付近で崩壊する(図4(a)の②, ③)。しかし、キャビティの崩壊が生じる所の圧力が雰囲気圧力と同程度、もしくは高いと考えられ、キャビティの崩壊によって生じた多数の小さな気泡(以下、気泡群と称す)は噴孔外へ流出してしまい(図4(a)の④)、液流が噴孔内壁面から離れたまま



Nozzle-S, D=0.5mm, $\Delta P_i = 10 \text{ MPa}$ $\left\{ \begin{array}{l} L/D=4 : Q=16.1 \text{ cm}^3/\text{s} \\ L/D=20 : Q=16.0 \text{ cm}^3/\text{s} \end{array} \right.$

Fig.2 Internal flow in a nozzle hole and disintegration behavior of jets (Effects of the hole length)

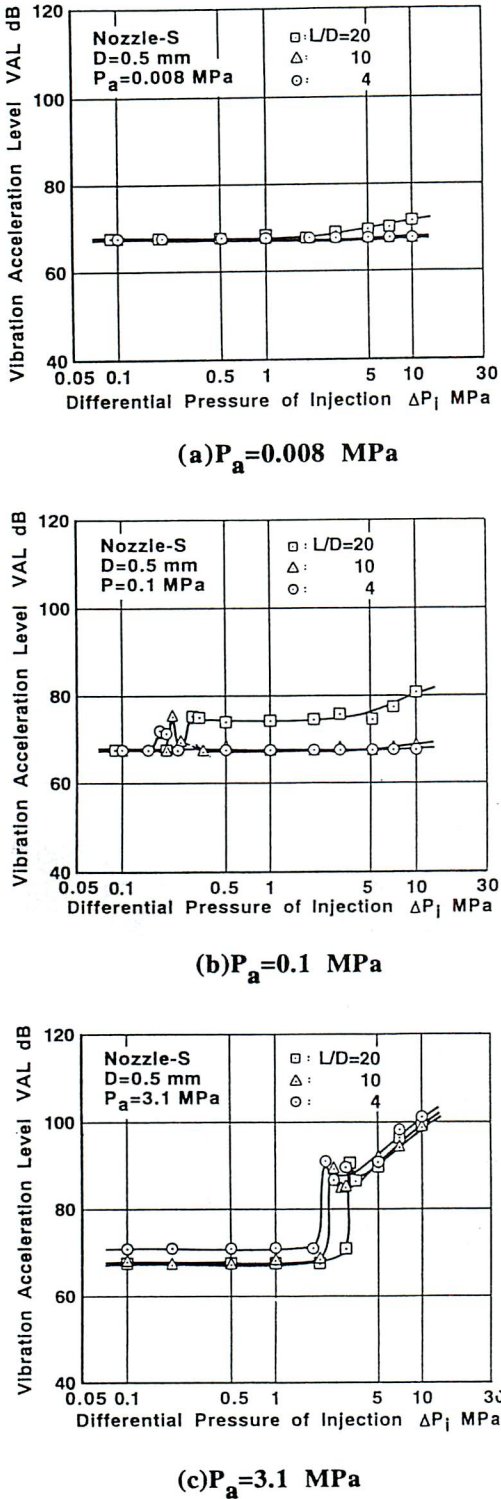


Fig.3 Effects of the hole length on the vibration acceleration level VAL

噴出してしまふ。このため、図2の(a), (b)に示すように ΔP_i が大きくなって噴孔内にキャビテーションの発生は見られず、液流に攪乱が生じないため噴流の微粒化はほとんど促進されないものと思われる。

これに対して、図4の(b)に示すように噴孔管長が長くなると噴孔内壁面への液流の再付着が生じるため、L/D=4のように、気泡群が完全に噴孔外へ流出してしまうようなことはない(図4(b)の③~⑥)。その結果、図2の(a), (b)に示すように、液流に大きな攪乱が生じ噴流の微粒化が促進されるものと思われる。

一方、雰囲気圧力が高くなると雰囲気圧力の方がキャビティの崩壊が生じる所の圧力よりも高いため、噴孔管長が短いノズルで減圧、大気圧雰囲気下のように気泡群が噴孔外に流出してしまうことはない。その結果、噴孔管長が短い場合でもキャビテーションの発生により、液流に大きな攪乱が生じるため、噴孔管長に依らず噴流の微粒化が促進されるものと思われる。

3.2 噴孔入口形状の影響

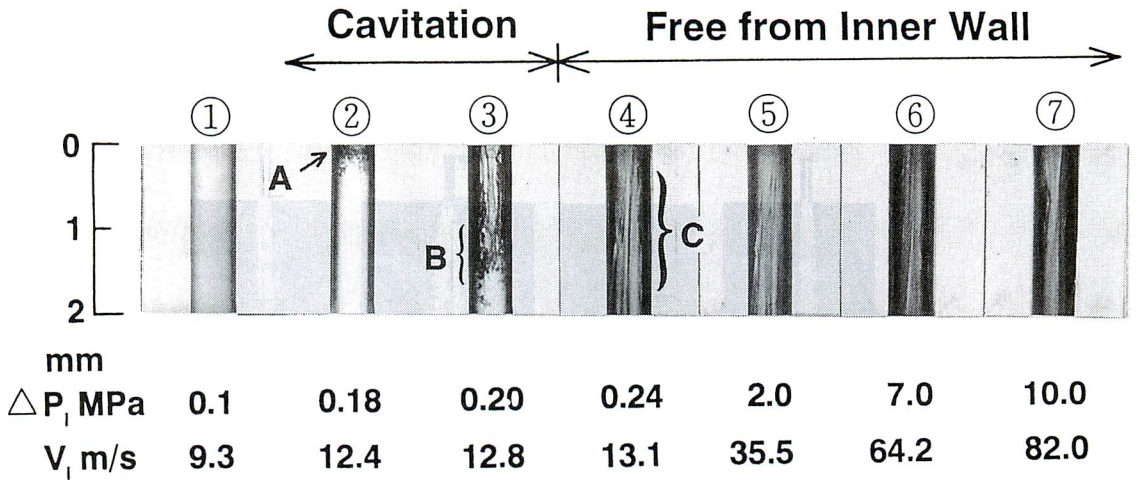
ノズル噴孔内の流動状態を大きく変化させるため、噴孔入口形状の異なるノズルを用いて噴流の分裂挙動の観察を行った。図5にNozzle-Rを用いた場合の噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動を示し、図6に噴孔入口形状がVALに及ぼす影響を示す。

図5の(a)より、Nozzle-S, Rとも噴孔内にキャビテーションは発生しておらず、液流に攪乱は生じていない。Nozzle-Sの場合、噴流の周囲に多数の液滴が形成されているものの、噴流の主流部はそれほど微粒化しておらず、Nozzle-Rの場合、噴流はほとんど微粒化していない。この時のVALの値は図6(a)より、Nozzle-S, Rともに小さい。

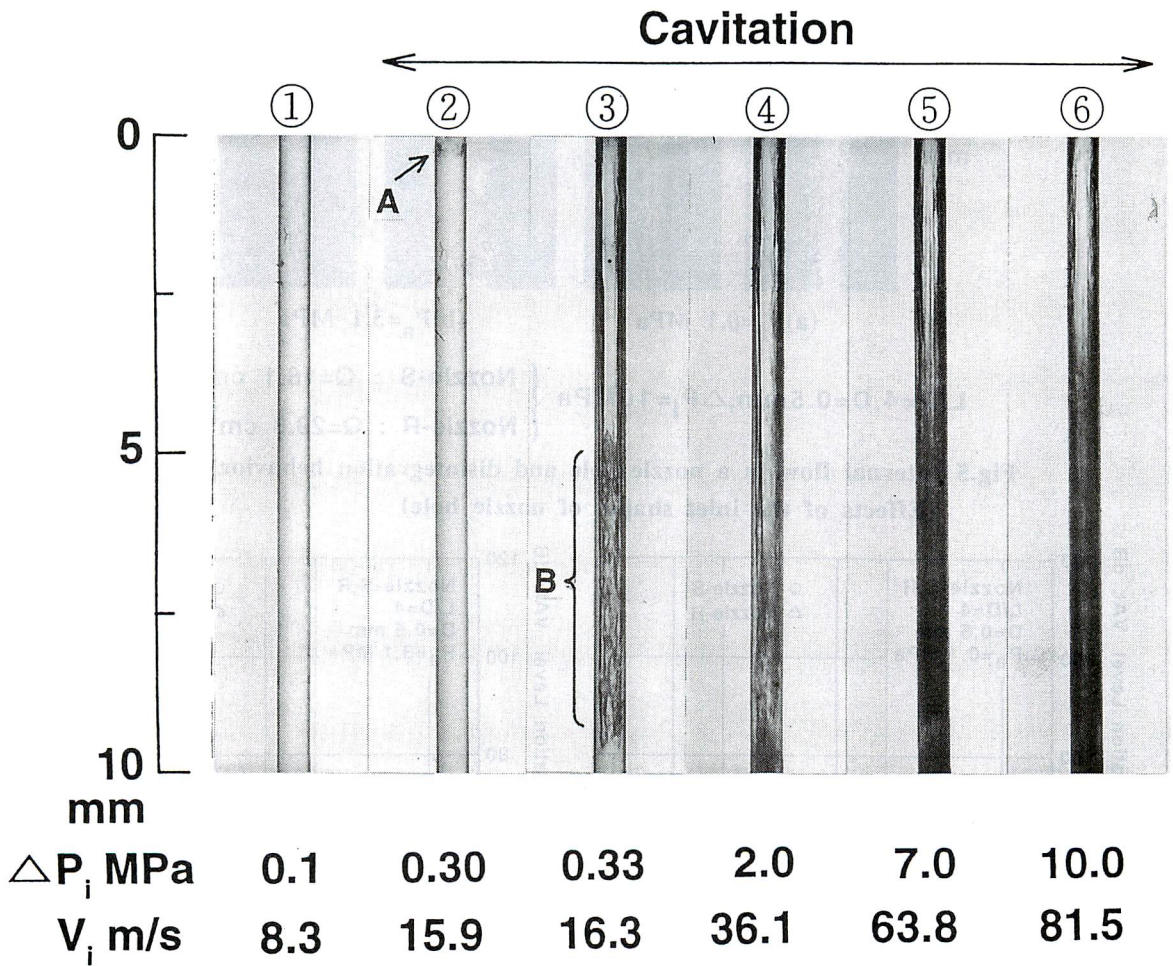
一方、図5の(b)より雰囲気圧力が高くなるとNozzle-Sの場合、噴孔内にキャビテーションが発生しており、噴流の微粒化はかなり促進されている。また、図6の(b)よりVALの値は大気圧雰囲気下のものと比較して非常に大きくなっている。

これに対し、Nozzle-Rの場合、高圧雰囲気下においても噴孔内にキャビテーションは発生しておらず、噴流と周囲気体との相互作用による影響が大きくなる高圧雰囲気下にもかかわらず、Nozzle-Sと比較して噴流はほとんど微粒化していない。また、VALの値もNozzle-Sと比較してかなり小さい。

これらの結果より、高圧雰囲気下においてもキャビテーションの発生に伴う攪乱が液流に生じていなければ噴流の微粒化は促進されない。すなわち、噴流の微粒化は、雰囲気との相互作用よりも噴孔内の液流の攪



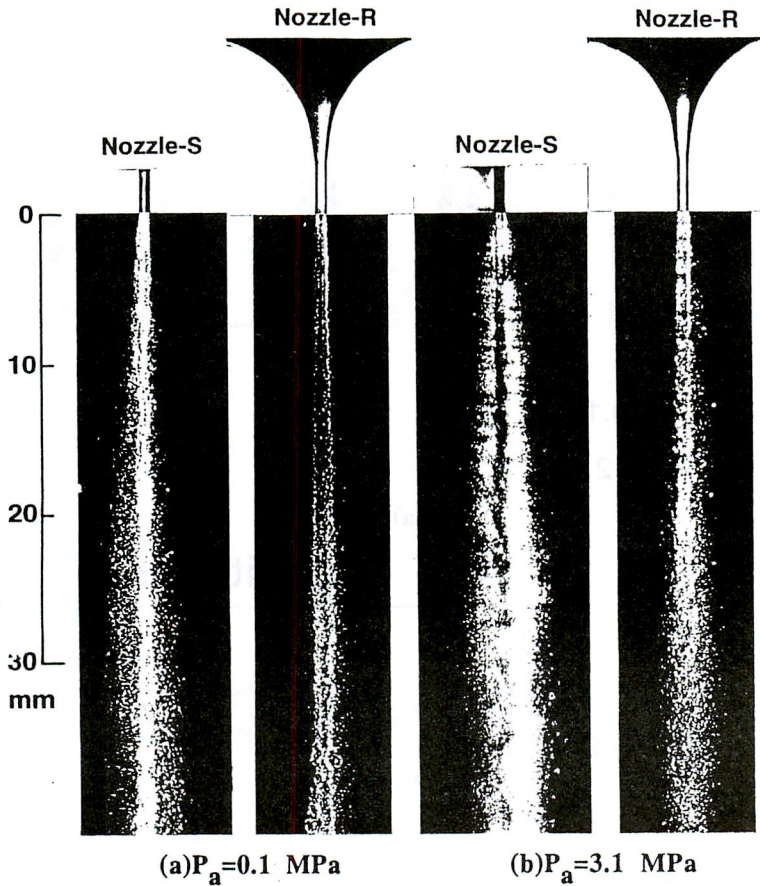
(a) L/D=4



(b) L/D=20

Nozzle-S, D=0.5mm, $P_a=0.1$ MPa

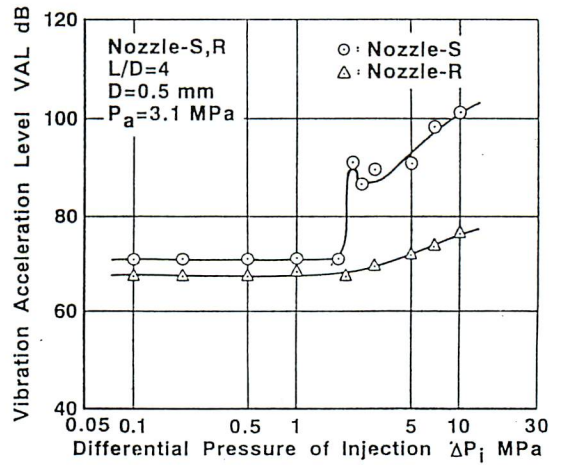
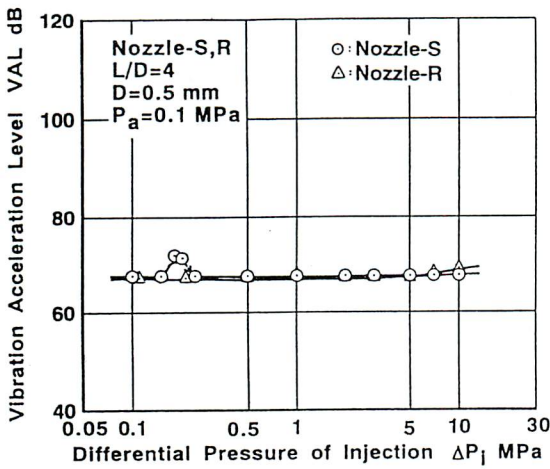
Fig.4 Internal flow in a nozzle hole
(Effects of the hole length)



$L/D=4, D=0.5\text{mm}, \Delta P_i=10\text{MPa}$
}

 Nozzle-S : $Q=16.1\text{ cm}^3/\text{s}$
 Nozzle-R : $Q=29.8\text{ cm}^3/\text{s}$

**Fig.5 Internal flow in a nozzle hole and disintegration behavior of jets
(Effects of the inlet shapes of nozzle hole)**



**Fig.6 Effects of the inlet shapes of nozzle hole
on the vibration acceleration level VAL**

乱が支配的であることがわかる。

3.3 金網による噴孔内の液流への攪乱の付与の影響

これまで述べてきた結果から、噴孔内の液流の攪乱が噴流の微粒化に対して支配的な因子であることが考えられる。次に、このことを確かめるために、噴孔入口直上に金網を設け、噴孔内の液流に故意に攪乱を与え、Nozzle-Sで噴流がほとんど微粒化しない減圧雰囲気下における噴流の分裂挙動を調べた。

図7に金網による液流への攪乱の付与が、噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動に及ぼす影響を示し、図8にVALに及ぼす影響を示す。

図7より金網を設けない場合、噴流はほとんど微粒化しておらず、図8のVALの値は小さい。これに対し、金網を設けると金網の素線の直後で圧力降下が生じ、そこでキャピテーションが発生する。その結果、液流に攪乱が生じ、噴流が微粒化しない減圧雰囲気下においても微粒化が促進されるようになる。また、図8より、VALの値は ΔP_i の増加に伴い大きくなっている。

この結果より、噴流の微粒化は噴孔内の液流の攪乱によって促進されるということが明白である。

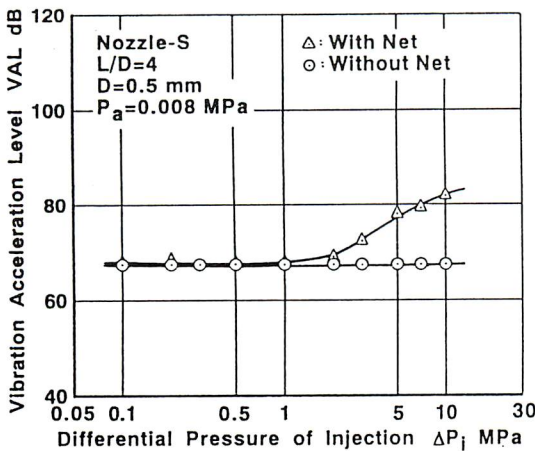
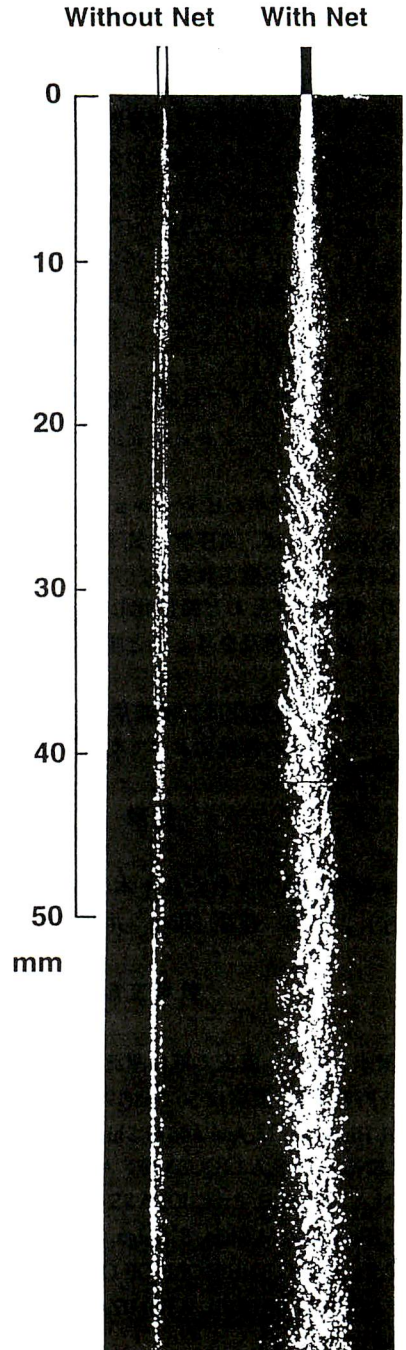


Fig.8 Effect of the disturbance given by wire netting on the vibration acceleration level VAL



Nozzle-S, L/D=4, D=0.5mm, $\Delta P_i=10\text{MPa}$, $P_a=0.008\text{MPa}$

Without Net : $Q=16.1\text{ cm}^3/\text{s}$
 With Net : $Q=15.3\text{ cm}^3/\text{s}$

Fig.7 Internal flow in a nozzle hole and disintegration behavior of jets (Effect of the disturbance given by wire netting)

4. まとめ

ノズル噴孔内の流動状態を変化させるために、噴孔管長、噴孔入口形状および雰囲気圧力を種々に変化させて、噴孔内の流れと噴流の分裂挙動について調べた結果、以下のことが明らかになった。

(1) 減圧、大気圧雰囲気下で噴孔管長が短い場合、噴孔内にキャビテーションが発生せず、噴流の主流部はほとんど微粒化しない。これに対して噴孔管長が長い場合、噴孔内にキャビテーションが発生し、噴流の微粒化が促進される。

(2) 高圧雰囲気下では噴孔管長の長短に依らず、噴孔内にキャビテーションが発生し、噴流の微粒化が促進される。

(3) 噴孔内にキャビテーションの発生による液流の攪乱が無ければ、高圧雰囲気下においても噴流の微粒化はほとんど促進されない。

(4) 噴流がほとんど微粒化しない減圧雰囲気下において、液流に攪乱を与えると噴流の微粒化は促進される。

(5) 噴流の微粒化は、噴流周囲気体との摩擦よりも、噴孔内の液流の攪乱によって支配される。

謝辞

本研究に協力された佐々木 隆司君（現在、香川県庁）、上田 晋君（現在、井関農機）に謝意を表す。

参考文献

- (1)清水・新井・廣安：液体噴流の微粒化過程とノズル内の流れ，機論B, 56-528(1990-8), 375-381.
- (2)H. Hiroyasu, M. Arai and M. Shimizu: BREAK-UP LENGTH OF A LIQUID JET AND INTERNAL FLOW IN A NOZZLE, Proc. ICLASS-91(1991), 275-282.
- (3)Z. Huang, Y. M. Shao, S. Shiga, H. Nakamura and T. Karasawa: THE ROLE OF ORIFICE FLOW PATTERN IN FUEL ATOMIZATION, ICLASS-94(1994), 86-93.

(4)C. Soteriou, R. Andrews and M. Smith: Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization, SAE SP-1065, 950080(1995), 27-52.

(5)玉木・西田・清水・廣安：液体噴流の微粒化過程におよぼす噴孔内流れの影響（第一報，加速度センサによるノズル噴孔内の攪乱特性の測定），微粒化，VOL.5-2, NO.10(1996), 4-11.

(6)玉木・西田・清水・廣安：液体噴流の微粒化過程におよぼす噴孔内流れの影響，機講論，Vol. III, 940-30(1994), 70-72.

(7)北村：騒音と振動のシステム計測，コロナ社，(1975), 235.

討論

質問（会誌委員会）

結論（5）について、摩擦とキャビテーションの競合関係を明らかにするためには、噴流速度の変化に対する微粒化の変化と、キャビテーションの変化に対する微粒化の変化との比較がなされなければならない。本研究において、後者については結果が示されているが前者の情報は殆どなく、唯一雰囲気圧力の変化による微粒化状況の変化から、雰囲気との相互作用の感度を類推しているのみである。したがって、本研究の範囲内では周囲気体との摩擦よりも、キャビテーションが支配的とするには無理があるのではないか。

回答

噴射差圧 ΔP_i を最大200MPaまで変化させても、ノズル噴孔内にキャビテーションの発生に伴う液流の攪乱が生じなければ、噴流はほとんど微粒化しないという結果（第一報，文献（5）），および本論文の図5の(b)に示すように、噴流と周囲気体との相互作用が大きくなる高圧雰囲気下においても、ノズル噴孔内にキャビテーションが発生しないノズル（Nozzle-R）の場合、噴流の微粒化はほとんど促進されないという結果から、本論文の結論(5)が得られます。



玉木 伸茂
広島大学・大学院・工学研究科
移動現象工学専攻
燃焼工学研究室
〒739
広島県東広島市鏡山1-4-1
Tel.(0824)24-7566
Fax.(0824)22-7193
略歴：現在、広島大学大学院工学研究科博士後期課程に在学。
液体噴流の微粒化機構に関する研究に従事。



清水 正則
近畿大学・工学部・教授
〒737-01
広島県呉市広古新開5-1-3
Tel.(0823)71-9171
Fax.(0823)74-5133
略歴：1965年 近畿大学工学部機械工学科卒業。
高速液体噴流の微粒化機構、ディーゼル噴霧に関する研究に従事。



西田 恵哉
広島大学・工学部・助教授
〒739
広島県東広島市鏡山1-4-1
Tel.(0824)24-7562
Fax.(0824)22-7193
略歴：1980年 広島大学大学院工学研究科博士前期課程修了。
噴霧のレーザ応用・画像計測、微粒化機構、ディーゼル噴霧、エンジン内混合気形成に関する研究に従事。



廣安 博之
広島大学・工学部・教授
〒739
広島県東広島市鏡山1-4-1
Tel.(0824)24-7563
Fax.(0824)22-7193
略歴：1962年 東北大学大学院博士課程修了後、(株)豊田中央研究所を経て、1969年より広島大学教授。
燃焼工学担当。