



## 液体噴流の微粒化過程におよぼす噴孔内流れの影響 (第1報, 加速度センサによるノズル噴孔内の攪乱特性の測定)

### Effects of the Internal Flow in a Nozzle Hole on the Breakup Process of a Liquid Jet (1st Report: Measurement of the Disturbance of the Internal Flow in the Nozzle Hole by Acceleration Transducer)

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 atomization mechanism of a high speed liquid jet, inquiring into the mutual relationship between the internal flow and the disintegration behavior of the liquid jet. To make clear the effect of the internal flow in the nozzle hole on the spray characteristics, the vibration accelerations associated with the disturbance in the nozzle hole were measured by using a piezoelectric acceleration transducer. Experiments were performed under ranging from decompression (0.008MPa) to high (3.1MPa) ambient pressures by using transparent nozzles with various the ratios of hole length to diameter  $L/D$ . It was shown that the vibration acceleration level VAL was proportional to the magnitude of the disturbance in the nozzle hole. As a consequence of this study, it has been clarified that one of the important factors in the disintegration process of the liquid jet was 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

これまで、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射された液体噴流の微粒化は、噴流周囲の気体との摩擦によって引き起こされると考えられてきた。ところが、ノズル噴孔内部の流れに着目して噴流の微粒化との関係について調べた結果<sup>(1)~(3)</sup>、液体噴流の微粒化は噴流周囲の気体との摩擦よりも、ノズル噴孔内で引き起こされる液流の攪乱に大きく依存していると考えられるようになった。

本研究では、噴孔内の流れが噴流の微粒化に及ぼす影響について詳しく調べ、液体噴流が微粒化する要因を追及し、微粒化機構を解明することを目的としている。

本報では、実機に近い噴孔径を有するノズルを用い、ノズル噴孔内の流動状態を大きく変化させるために噴

孔管長や雰囲気圧力を種々に変化させ、噴孔内の流れとノズル噴孔出口から100mm程度の噴流主流部の分裂挙動の観察を行った。また、噴孔内で引き起こされる液流の攪乱の大きさを把握するため、加速度センサを用いて液流の攪乱による振動加速度を測定した。そして、噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動および液流の攪乱による振動加速度との関係について調べた結果について述べる。

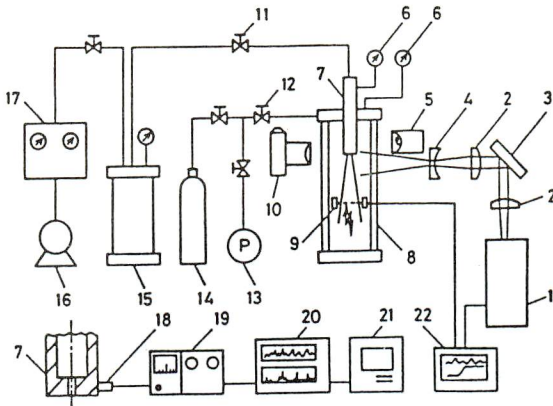
#### 2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。図1(a)は全体図であり、空気圧駆動式高圧ポンプ⑦で加圧したアキュムレータ⑤内の水を、アクリル製の噴射ノズル⑦から減圧、大気圧および高圧雰囲気中の圧力容器内⑧に定常噴射した。噴孔内の液流の挙動は、マイクロフラッシュ⑤を用いて透過光撮影し、噴流は発光時間40nsのパルスレーザー①を用いて撮影した。液柱の分裂長さは、

スクリーン電極⑨を用いた電気抵抗法<sup>(4)</sup>によって測定した。

後述するように、本論文はノズル噴孔内の流動状態と微粒化度を観察したものであるが、写真撮影による噴孔内の流動状態は定量化が困難であり、何らかの定量化が必要と考えられた。そこで、種々調査した結果、

加速度センサによる振動加速度レベルによる値を用いることにした。噴射ノズル先端における振動加速度は図1(b)に示すように、ノズル噴孔部外壁面に取り付けられた圧電型加速度センサ（測定周波数範囲：2Hz～50kHz）を用いて測定した。振動加速度の周波数分析は、FFTアナライザにより行った。また、予備実験としてノズル噴孔内に発生するキャビテーションによる振動加速度を、広い周波数領域で測定した結果から、振動加速度が顕著に現れる周波数範囲は約50kHzまでであり、これ以上の周波数領域で検出されたものは小さなレベルのものであるので、測定周波数範囲を50kHzまでとした。また、ノズル側壁面上の加速度センサの取り付け位置の選定にあたって、噴孔入口側、噴孔出口側およびそれらの中間の位置に取り付けて周波数分析を行った。その結果、各々の周波数スペクトラムの間にほとんど違いはみられなかった。よって、加速度センサの取り付け位置を噴孔管長の中に固定した。振動加速度レベル（以下、VAL(dB)と称す）は、次式(1)<sup>(5)</sup>により求めた。



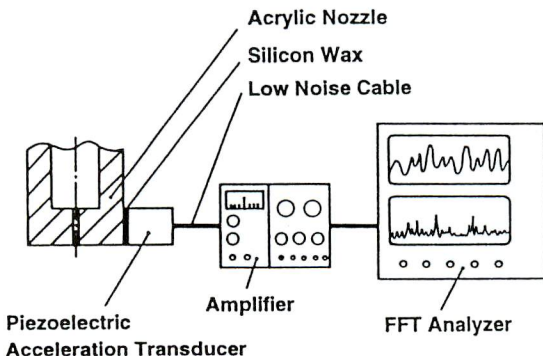
- 1. Ruby Laser
- 2. Lenses
- 3. Mirror
- 4. Cylindrical Lens
- 5. Micro Flash
- 6. Pressure Gauges
- 7. Injection Nozzle
- 8. Pressure Vessel
- 9. Screen Detector
- 10. Camera
- 11. Needle Valve
- 12. Needle Valve
- 13. Vacuum Pump
- 14. Air Bomb
- 15. Accumulator
- 16. Air Compressor
- 17. High Pressure Pump
- 18. Piezoelectric Acceleration Transducer
- 19. Amplifier
- 20. FFT Analyzer
- 21. Personal Computer
- 22. Oscilloscope

(a) Experimental apparatus

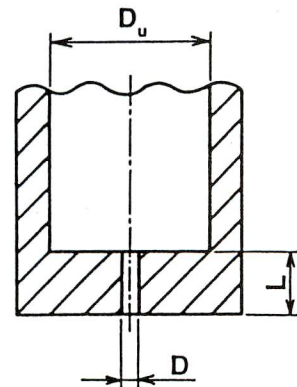
$$VAL = 20 \log \frac{A_{rms}}{A_0} \dots \dots \dots (1)$$

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。

図2に供試ノズルの概略を示す。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であり、噴孔径Dは0.3mmと0.5mm、噴孔管長と噴孔径との比L/Dは2.5, 4, 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<sup>(6)</sup>を用いた。



(b) Apparatus for measuring of vibration acceleration



Nozzle - S

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

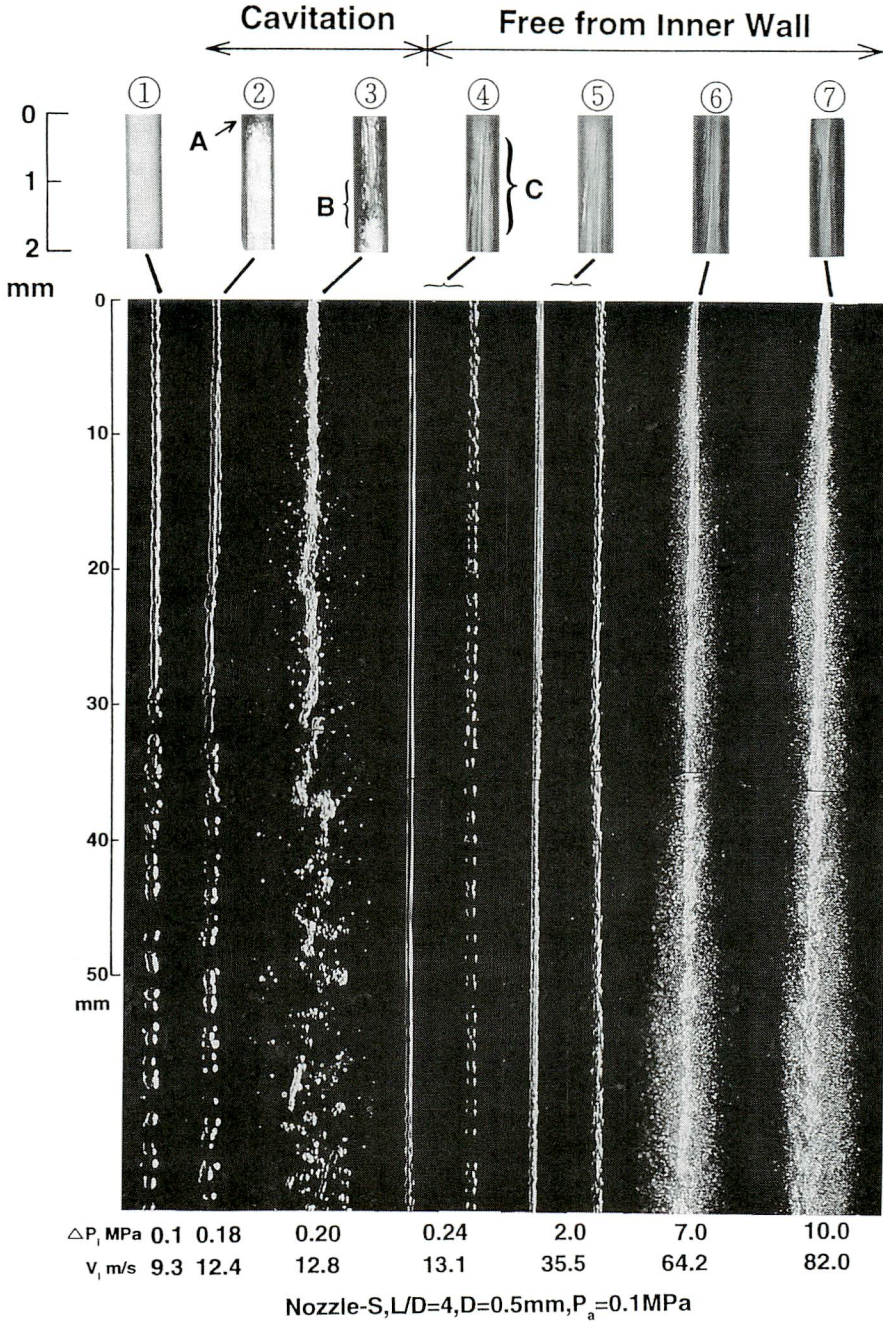
Fig.2 Schematic of test nozzle

3. 実験結果および考察

3.1 噴孔管長が噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動におよぼす影響

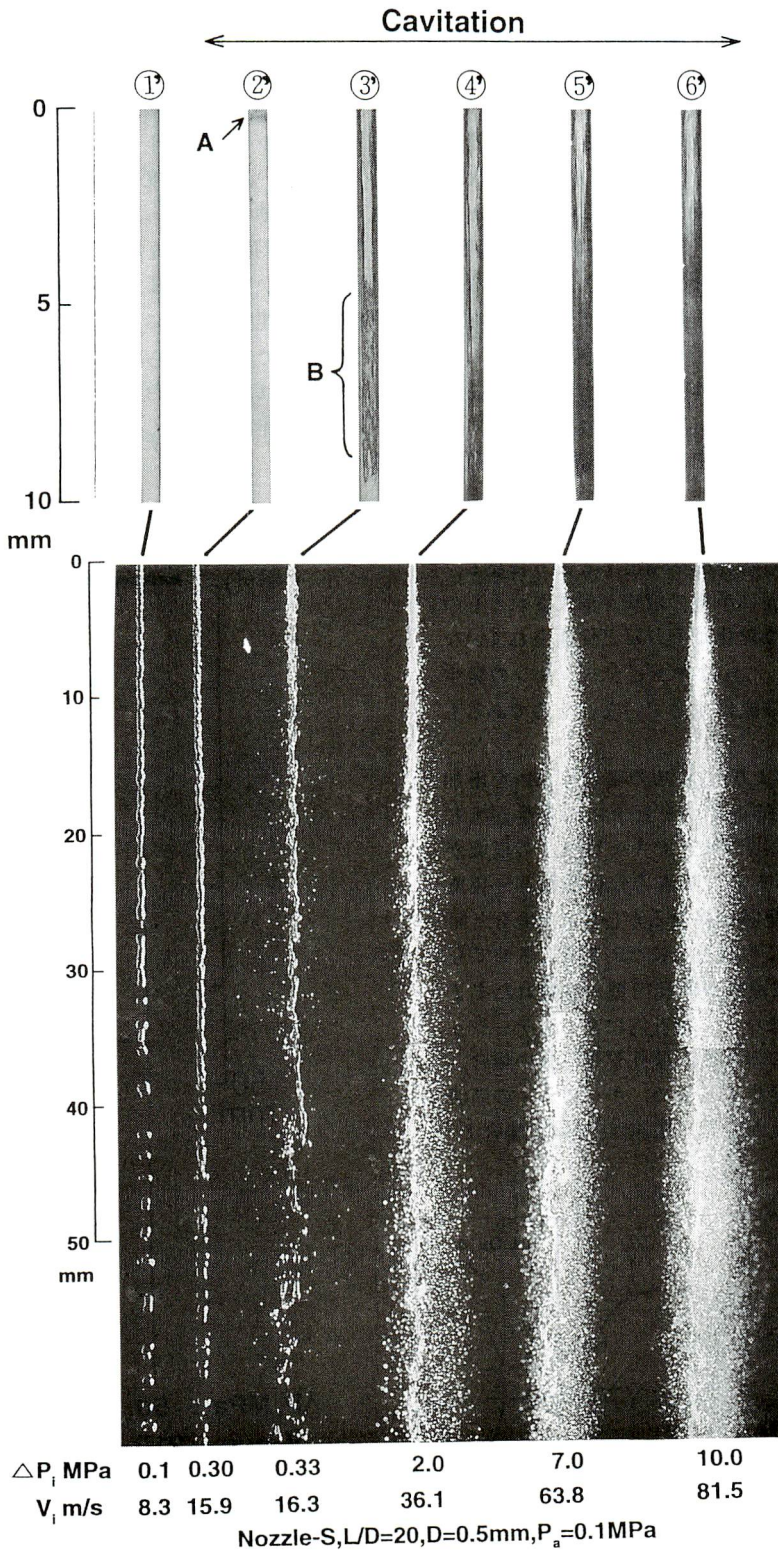
噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動が大きく異なる

る  $L/D=4$ , 20 の場合の, 噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動を図3に示し, 噴孔管長が分裂長さに及ばず影響を図4に示す. 図3において, 噴孔内は透過光による撮影のため, 噴孔内壁, キャビティと液体との界面および噴孔内壁から離れた液流表面が部分的に噴孔内



(a)  $L/D=4$

Fig.3 Internal flow in a nozzle hole and disintegration behavior of jets (Effects of the hole length)



(b) L/D=20

Fig.3 (Continued) Internal flow in a nozzle hole and disintegration behavior of jets (Effects of the hole length)

壁に附着している領域が黒く写っている。

図3(a), 図4より  $L/D=4$  の場合, 噴射差圧  $\Delta P_i$  を増加させていくと  $\Delta P_i=0.18\text{MPa}$  で噴孔入口付近にキャビティの初生が起きる (図3(a)中A). さらに  $\Delta P_i$  を増加させ  $\Delta P_i=0.20\text{MPa}$  になると噴孔出口付近でキャビティの崩壊が生じる (図3(a)中B). この時, キャビティの崩壊に伴う攪乱が噴孔内の液流に生じ, 噴流の微粒化が促進される. この後,  $\Delta P_i=0.24\text{MPa}$  になると突然, 液流が噴孔内壁から離れたまま噴孔外へ噴出するようになる (図3(a)中C). この時, 噴流はほとんど微粒化しなくなり, 図4に示すように分裂長さは不連続に長くなる. この時, 噴孔出口付近でキャビティが崩壊する現象 (図3(a)中B) は噴孔内部で観察されておらず, 液流に攪乱は生じていないものと思われる. さらに  $\Delta P_i$  を増加させると液流の表面が噴孔内壁面に所々附着しながら噴孔外へ噴出するようになる. その結果, 噴流の周囲に多数の液滴が形成されるものの, 噴流の主流部の微粒化はそれほど促進されていない (図3(a)⑥, ⑦). これはキャビテーションの発生による大きな攪乱が液流に生じていないためであるものと思われる.

一方, 図3(b), 図4より  $L/D=20$  の場合,  $\Delta P_i$  を増加させた時に噴孔入口付近でキャビティの初生が生じ (図3(b)中A), 噴孔出口付近でキャビティの崩壊が生じる (図3(b)中B) までの噴流の分裂挙動と分裂長さの変化は,  $\Delta P_i$  の範囲は異なるが  $L/D=4$  の場合と同様である. しかし, この後さらに  $\Delta P_i$  を増加させても,  $L/D=4$  の場合のように液流が噴孔内壁から離れたまま噴出するようなことはなく, 噴孔内にキャビテーションが発生している. このように噴孔管長が長い場合, キャビテーションが発生するため, キャビティの崩壊時に液流に大きな攪乱が生じ, 噴流は  $L/D=4$  の場合よ

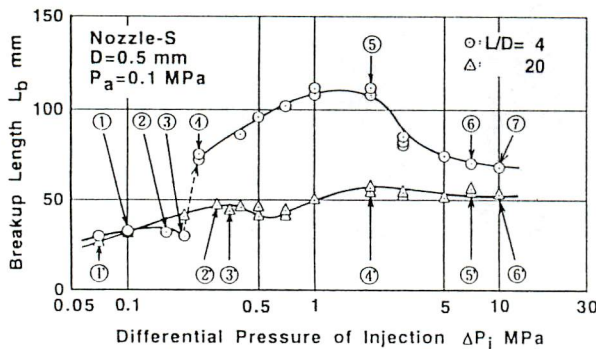


Fig.4 Effects of the hole length on the breakup length

りも微粒化しており, 図4に示す分裂長さも短くなっている。

図5に噴孔入口形状がシャープエッジで, 噴孔内にキャビテーションが発生しないような噴孔管長の短いノズルを用い, 噴射速度を非常に大きくした場合の噴流の分裂挙動を示す。

図5より噴孔管長が短い場合, 前述したように液流が噴孔内壁から離れたまま噴出するため, 噴出直後の噴流は噴射速度が非常に大きくなってガラス細工のように透明で非常に滑らかである. また, 噴孔出口からかなり離れた位置においても噴霧角は大きくなり, 噴射速度が非常に大きくなって噴流の微粒化は促進されない。

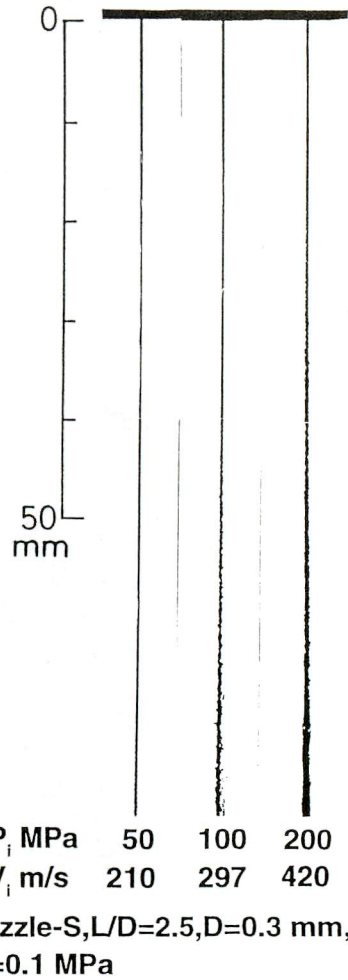


Fig.5 Disintegration behavior of super high speed liquid jets

これらの結果より、噴孔内部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が促進されず、噴流の微粒化は噴孔内の液流の攪乱に大きく依存していることがわかる。

次に、液流の攪乱の大きさを定量化する一手法として、加速度センサを用いて液流の攪乱による振動を測定した。図6に $\Delta P_i$ に対する振動加速度の周波数スペクトラムを示し、図7に噴孔管長が振動加速度レベルVALに及ぼす影響を示す。

図6, 図7より $L/D=4$ の場合、図3(a)で示したように噴孔入口付近でキャビティの初生が起こる $\Delta P_i=0.18\text{MPa}$ で振動加速度が検出され始める。噴孔出口付近でキャビティの崩壊が生じる $\Delta P_i=0.20\text{MPa}$ で、振動加速度は若干小さくなるものの検出されている。しかし、 $\Delta P_i=0.24\text{MPa}$ の時、液流が噴孔内壁から離れたまま噴出するようになると、振動加速度はほとんど検出されなくなる。さらに $\Delta P_i$ が大きくなっても、液流の表面が噴孔内壁に所々付着する程度で、キャビテーションの発生による大きな攪乱が生じていないため振動加速度はほとんど検出されない。

一方、 $L/D=20$ の場合、図3(b)で示したように $\Delta P_i$ の増加に伴い、キャビテーションの発生に伴う液流の攪乱が生じるため、 $L/D=4$ に比べて振動加速度は大きくなっている。

これらの結果より、VALの変化は噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動に良く符合しており、逆にVALの変化から噴孔内の液流の流動状態と噴流の微粒化の状態の見当がつくことが予想される。

### 3.2 霧囲気圧力の影響

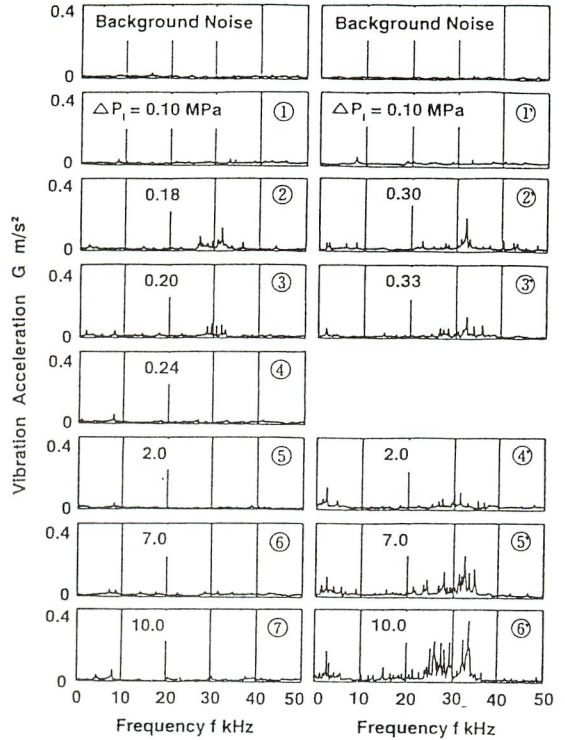
次に、霧囲気圧力を減圧霧囲気から高压霧囲気まで変化させて噴流の分裂挙動と振動加速度との関係について調べた。

図8に霧囲気圧力を変化させた時の噴孔内の液流の挙動と噴流の分裂挙動を示し、図9に霧囲気圧力がVALに及ぼす影響を示す。

減圧霧囲気下の場合、噴流はほとんど微粒化しておらず、大気圧霧囲気下においても噴流の周囲に多数の液滴が形成されているものの、噴流の主流部はほとんど微粒化していない。また、この時の振動加速度はほとんど検出されておらず、VALの値は小さい。

一方、高压霧囲気下の場合、噴流の微粒化はかなり促進されており、この時のVALの値は減圧、大気圧霧囲気下と比較して非常に大きくなっている。

これは、噴孔管長が短いノズルの場合、減圧、大気圧霧囲気下において、図3(a)の②、③で示したように



Nozzle-S,  $D=0.5\text{mm}$ ,  $P_a=0.1\text{MPa}$

(a)  $L/D=4$  (b)  $L/D=20$

Fig.6 Frequency spectrums

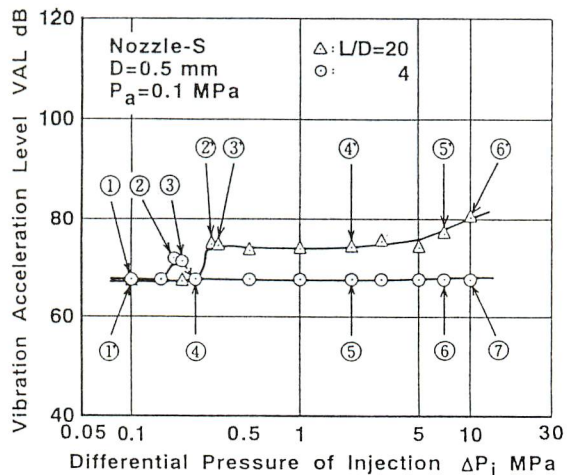
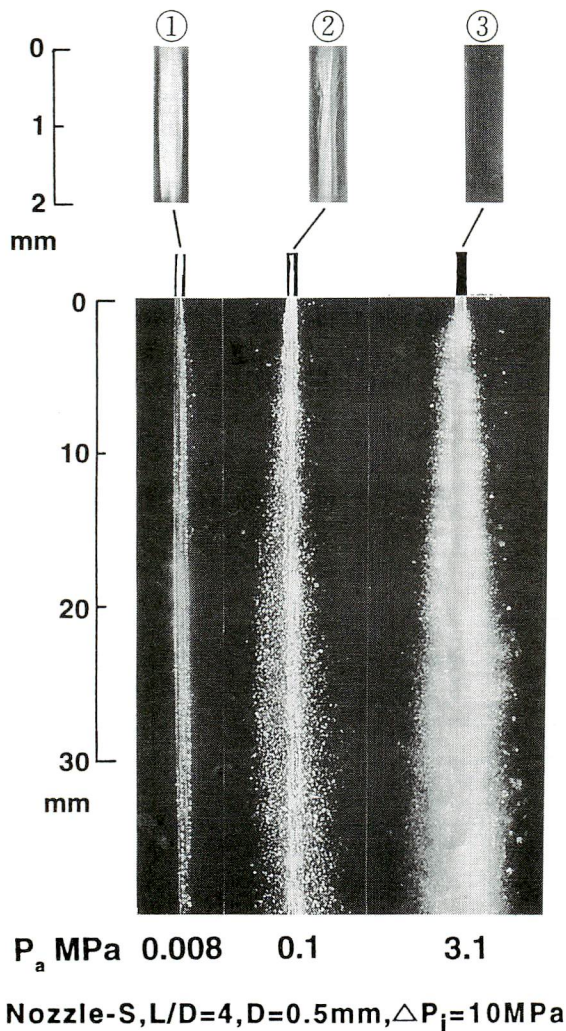
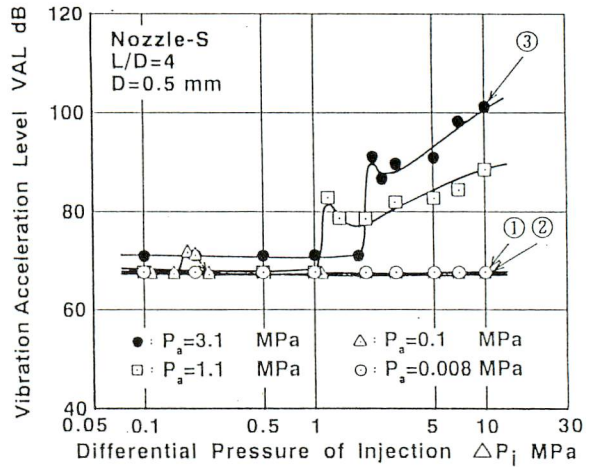


Fig.7 Effects of the hole length on the vibration acceleration level VAL

$\Delta P_i$ 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。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、もしくは高いものと考えられ、キャビティの崩壊によって生じた微細な気泡（以下、気泡群と称す）は噴孔外へ流出してしまい、図3(a)の④で示したように液流が噴孔内壁から離れたまま噴出するようになる。このため、図8の①、②に示すように $\Delta P_i$ が大きくなっても噴孔内にキャビテーションが発生しておらず、噴孔内に攪乱が生じないため噴流の微粒化は促進されないものと思われる。



**Fig.8 Internal flow in a nozzle hole and disintegration behavior of jets (Effects of the ambient pressures)**



**Fig.9 Effects of the ambient pressures on the vibration acceleration level VAL**

これに対して、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ものと考えられ、減圧、大気圧雰囲気下のように気泡群が噴孔外へ流出することはない。また、ノズル噴孔入口付近で縮流が生じるため圧力低下が起こりキャビティが生成されるが、その直後の噴孔内の圧力は雰囲気圧力の影響を受けて高くなっており、そこでキャビティの崩壊が生じる。その結果、液流の攪乱が非常に大きくなり、噴流の微粒化が促進されるものと考えられる。

#### 4. まとめ

ノズルの噴孔管長、噴射差圧および雰囲気圧力を種々に変化させて、噴孔内の液流の流動状態と噴流の分裂挙動の観察を行い、噴孔内の液流の攪乱によって引き起こされる振動を加速度センサで検出した。そして、この振動と噴孔内の液流の挙動および噴流の分裂挙動との関係について調べた結果、次のことが明らかになった。

(1) 噴流主流部が微粒化する重要な要因の一つは噴孔内部の流動様式であり、キャビテーション発生の有無が影響する。

(2) 噴射差圧 $\Delta P_i$ が大きい領域において、噴孔管長が短い場合、噴孔内の液流に攪乱は生じず、噴流の微粒化は促進されない。これに対し噴孔管長が長い場合、噴孔内にキャビテーションの発生による液流の攪乱が

生じ、噴流の微粒化が促進される。

(3) 霧団気圧力が高くなると、噴孔管長が短い場合でも噴孔内にキャビテーションの発生による液流の攪乱が生じ、噴流の微粒化が促進される。

(4) ノズル噴孔側面に取り付けた加速度センサにより測定した振動加速度は、噴孔内の液流の攪乱の状態に応じて検出される。

(5) 噴孔内の液流に攪乱が生じない場合、噴流の分裂長さは長く微粒化は促進されず、振動加速度はほとんど検出されない。一方、攪乱が生じる場合、噴流の分裂長さが短くなり微粒化が促進され、攪乱の大きさに応じた振動加速度が測定される。

### 謝辞

本研究に協力された佐々木隆司君（現在、広島大学大学院生）、上田晋君（当時、広島大学学部生）に謝意を表す。

### 参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 清水・新井・廣安：高速噴流の分裂長さの測定, 機論B, 49-448(1983-12), 2886-2892.
- (5) 北村：騒音と振動のシステム計測, コロナ社, (1975), 235.
- (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.



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。



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。



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。