

多孔プレート型ノズルの微粒化機構に関する一考察

A Study on Atomization Mechanism of Liquid Jet Injected from Plate-type Multi-hole Nozzle

鈴木 孝司
(Takashi SUZUKI)豊橋技術科学大学
(Toyohashi Univ. of Tech.)谷 泰臣
(Yasuhide TANI)(株)デンソー
(DENSO CORPORATION)徳富 寛
(Hiroshi TOKUTOMI)豊橋技術科学大学大学院
(Toyohashi Univ. of Tech.)

This paper dealt with atomization mechanism of liquid jet injected from plate-type multi-hole nozzle, which was capable of suitable fuel atomization at relatively low liquid pressure. Experimental investigations were performed using real-scale model nozzle that was composed of nozzle plate with four small holes and cylindrical flat-head needle located just upstream of the plate. Behavior of the liquid jets was observed in detail by flash photography. Breakup-length of liquid jet and mean-drop-size of spray were measured from the photographic images. It was found that the nozzle discharged fine spray droplets when pitch-circle-diameter of nozzle holes was relatively small and clearance between nozzle plate and needle tip was relatively small. Liquid flow pattern near nozzle hole was investigated. It was found that liquid was injected as a shape of flat liquid jet from each nozzle hole, and the liquid jet was accompanied with thin liquid films when both of the pitch-circle-diameter and the clearance were relatively small. Turbulent intensity of jet flow was measured by injecting air from 20-times enlarged single-hole model. The smaller the clearance became, the larger the turbulence intensity was. Based on these experimental facts the mechanism of atomization was discussed.

Key words: Atomization, Liquid Jet, Breakup Mechanism, Multi-hole Plate-type Nozzle, Fuel Injector, SI Engine

1. はじめに

近年、地球環境保護の観点から、自動車用エンジンのさらなる低エミッション化と熱効率の向上が急務となっており、吸気管噴射方式のガソリンエンジンでも燃料噴霧のより一層の微細化が望まれている⁽¹⁾。同時に燃料噴射系の信頼性や生産性の向上も必要であり、当該工業分野における大きな課題の一つとなっている。このような流れを受けて、図1に示すような多孔プレート型インジェクタが開発された⁽²⁾。このノズルは平らなプレートに複数の噴孔を開けたのみの単純な構造でありながら、比較的低い噴射圧力でも微細な噴霧が得られることなどから、その普及が期待されている。このように単純噴孔ノズル⁽³⁾に類する構造でありながら低圧でも利用し得る微粒化ノズルは珍しく、その微粒化機構を調べることは微粒化学上、大変興味深い。また、微粒化機構の解明によって、この種のノズルのさらなる性能向上や適用範囲の拡大も期待されよう。

そこで本研究では、まず、4孔プレート型インジェクタを模した実寸大ノズルを対象に、プレート上の噴孔配置やプレート上流の流路形状を変えて、液体噴流の挙動を詳細に瞬間写真観察するとともに形成される噴霧の平均粒径を測定して、分裂挙動や微粒化特性はこれらに強く依存していることを確認した。つぎに、実寸大ノズルならびに単孔の20倍拡大モデルを用いて噴孔近傍での液体の流動状態を詳細に観察し、これらの結果をもとに微粒化機構を考察した。その結果、このノズルでは各噴孔から液体が扁平化しながら噴出

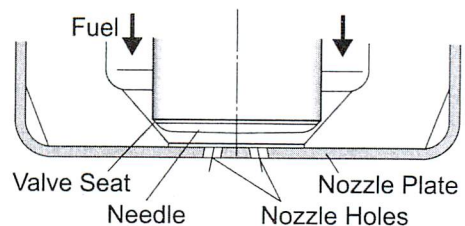


Fig.1 Plate-type multi-hole nozzle injector.

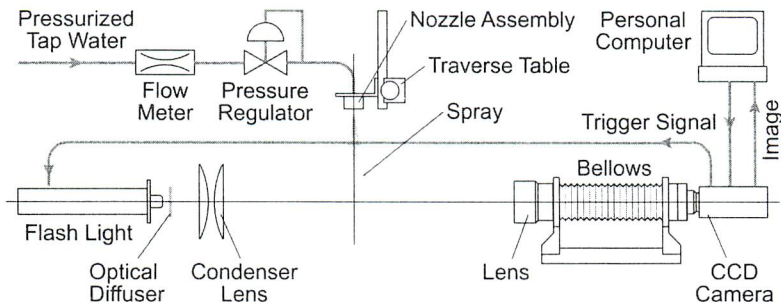


Fig.2 Experimental setup.

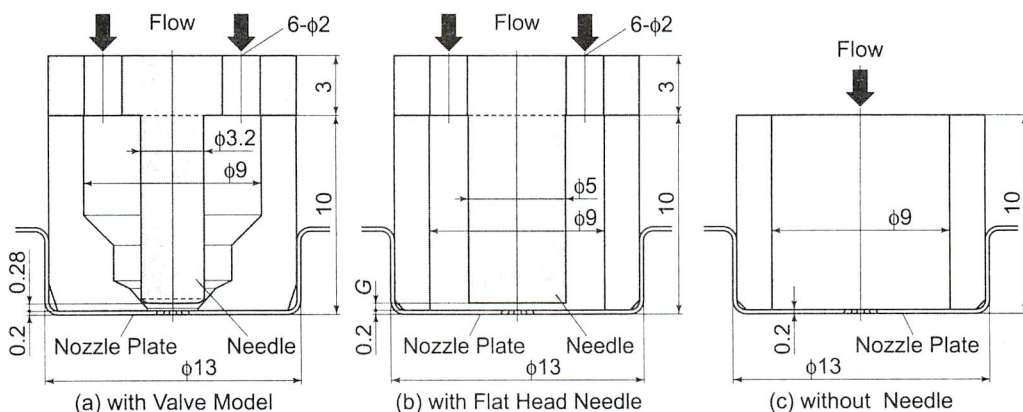


Fig.3 Bodies of real scale nozzles .

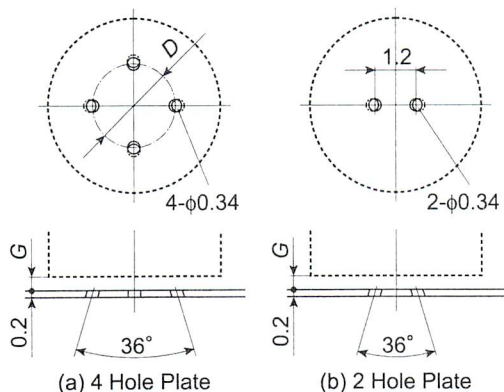


Fig.4 Test plates for real scale nozzles.

すること、この液噴流に薄い液膜が付随すること、ならびに液流が強く乱れていることなどがあまって、液噴流が激しく変動して速やかに微細な液滴へ分裂していると考えられることを示した。

2. 分裂挙動と微粒化特性

実際のエンジンでは燃料を噴射する雰囲気圧力は運転状態により変化する。汎用の渦巻き噴射弁などは

少なからず雰囲気の影響を受けるといわれているが、既報⁽²⁾のように実際の多孔プレート型インジェクタでは雰囲気圧力を変えても燃料噴霧の平均粒径はほとんど変化しない。また、実寸大の単一噴孔ノズルから燃料を噴射しても噴霧は形成されない（平滑な棒状噴流となる）ことから、この種のノズルによる微粒化現象は気液の相対速度にもとづく噴流界面の不安定性では十分説明できない。ノズルの幾何形状に由来する他の何らかの要因が強く関与しているものと推察して、本研究では噴孔配置や流路形状を系統的に変えて観察が容易な大気雰囲気中で実験的に調べることにした。

2.1 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図2に示す。微動台に取付けた実寸大ノズルに圧力レギュレータを介して加圧した液体を供給して、大気中に定常噴射した。図3に示す3種類のノズルを用いた。いずれもノズルプレートが交換できる構造となっている。図3(a)はプレート上流にシート径3.2mmのニードル弁を有する実際のインジェクタの先端部内部構造を忠実に模したもので、以降、バルブモデル付きと呼ぶ。液体は上部の6個の穴から流

入し、弁部を経てプレート上面とニードル先端に挟まれた薄いすき間に流入してプレートに開けられた噴孔から噴出する。図 3(b)は(a)から弁シート部を取り除き、ニードル部を直径 5mm の先端の平らな円筒状ニードルで置き換えたもので、プレートとニードル先端のすき間 G を任意に設定できる。実験では、 G を 0.1mm、0.2mm、0.4mm の 3 通りに変えた。本研究では主にこの円筒状ニードル付きノズルを用いた。以降、特に断りのない限り、 G の値が示されたデータは図 3(b)のノズルを用いた結果である。図 3(c)は(b)よりニードルを取り除いたもので、以降、ニードルなしと呼ぶ。

使用したノズルプレートを図 4 に示す。いずれも厚さ 0.2mm のステンレス板に直径 $d=0.34\text{mm}$ の噴孔が複数個開けられている。各噴孔の軸はノズル中心軸に対して外側に 18° づつ傾いている。図 4(a)のプレートには、4 噴孔が直径 D のピッチ円上に均等に開けられている。 D が 1.2mm、1.7mm、2.4mm の 3 通りのプレートを用意した。以降、これらを 4 孔プレートと呼ぶ。図 4(b)は $D=1.2\text{mm}$ の円周上に 2 噴孔を開けたもので、以降、2 孔プレートと呼ぶ。実験では、これらのプレートをノズル本体にねじ込み式の治具で締付けて使用した。

ここで用いたノズルプレートは実際のインジェクタのそれと同じ材質、厚さであり、噴孔の数や直径、配置も実機の代表的な仕様に準じたものである ($D=1.2\text{mm}$ の 4 孔プレート；但し実機では吸気管形状に合わせて 2 方向の噴霧となるよう噴孔軸の向きが設計されている)。また、噴孔部も実際のインジェクタ製造過程と同じ精密放電加工法 (小数ロット生産の場合；多数ロットでは他の方法も用いられている) によって、入口角部の丸みを極力小さく抑え、かつ傷やバリなどが無いように加工されている。実験にあたっては噴孔部を顕微鏡で観察して、これらのことを確認している。なお、 $D=1.2\text{mm}$ の 4 孔プレートを計 4 枚製作して液噴流の分裂挙動などを相互に比較してみたが、特に差異は認められなかった。

噴射された液体噴流の挙動は、ストロボ光源 (菅原研究所製 NP-1A、閃光時間 180ns) を用いて背照法により、35mm カメラならびに CCD カメラで瞬間写真撮影した。液体噴流の平均分裂長さ L_B (プレート下面から平均分裂位置までの距離) は、このような瞬間写真より測定した。各条件で撮影した約 40 枚の写真より平均の分裂長さを求めた。

噴霧の液滴径分布ならびに体表面積平均粒径 D_{32} 、体積メディアン径 D_{V50} は、同様の光学系によって噴霧を CCD カメラ (画素数 1360×1024) で拡大瞬間写真撮影して、その画像を粒径解析ソフト (Oxford Laser 社製

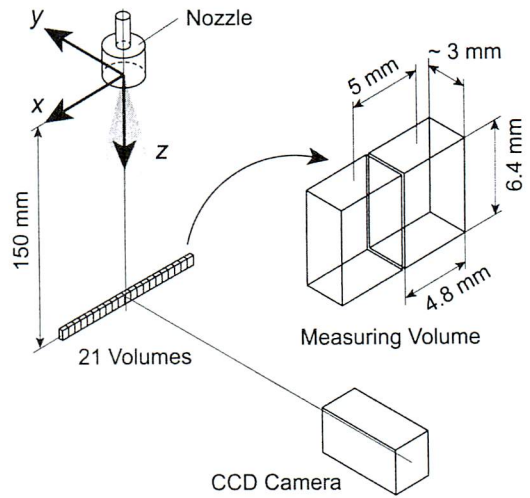


Fig.5 Measuring volume for drop sizing.

VisiSize Solo) で解析することにより測定した。視野が $6.4\text{mm} \times 4.8\text{mm}$ 、被写界深度が約 3mm と狭いため、図 5 に示すように測定体積を x 方向に 5mm ピッチで移動 (実際には光学系を固定したままノズルを移動) しながら計 21 点で各 100 枚ずつの画像を取得し、一括して解析した。なお、測定位置は対面する 2 つの噴孔の軸を含む面内でノズル下流 $z=150\text{mm}$ の位置とした。

流出係数 C_d は、タービン流量計による流量 Q の測定値と噴孔の総断面積 A をもとに、次式より算定した。ここで ρ_l は液体の密度、 Δp は噴射差圧である。

$$Q = C_d A \sqrt{2\Delta p / \rho_l} \quad (1)$$

供試液体には、実験の簡便さを考慮して常温の水道水を用い、実際の吸気管燃料噴射の条件に近い $\Delta p=0.3\text{MPa}$ で大気中に定常噴射した。水と石油系燃料とは表面張力などの物性値が異なることから、予備実験として実際の多孔プレート型インジェクタから工業ガソリン (JIS-5 号) ならびに水を噴射して両者を比較してみた結果、噴霧の平均粒径には相応の差が見られたものの、ノズル近傍での液噴流の流動状態にはほとんど差異はなく、水を噴射した場合でも液体噴流の分裂過程は石油系燃料を噴射した場合と基本的に類似しているものと考えられた。一方、実際のインジェクタから燃料を間欠噴射して噴霧粒径の時間変化を調べてみたところ、吹き始めより 1.5ms 程度以降は噴射終了まで現象がほぼ定常的とみられた。これらのことから本研究では、定常噴射状態における微粒化機構について水を用いた実験結果をもとに考察した。

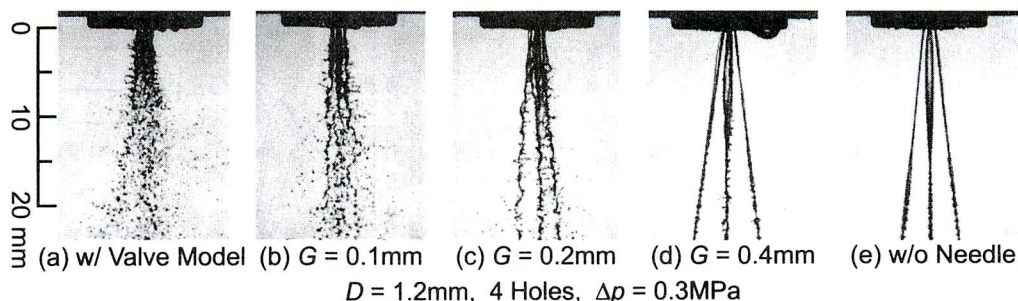


Fig.6 Flash photographs of liquid jets; showing effects of nozzle-body configuration upon breakup pattern.

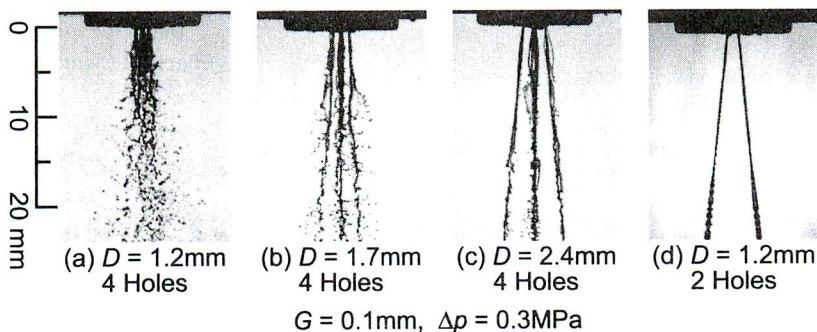


Fig.7 Flash photographs of liquid jets showing effects of nozzle-hole arrangement upon breakup pattern.

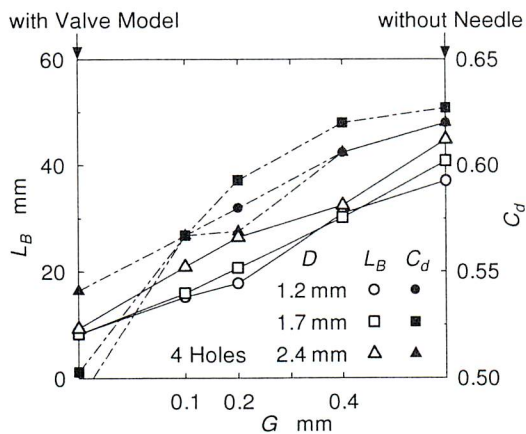


Fig.8 Breakup length and discharge coefficient.

2.2 液噴流の分裂挙動

実寸大ノズルから噴射された液体噴流の分裂挙動を瞬間写真観察した結果の一例を図6, 図7に示す。図6は $D=1.2\text{mm}$ の4孔プレートを用い、ノズル本体すなわちプレート上流の流路形状を変えて観察してみた結果である。バルブモデル付きでは、図6(a)に示すように各噴孔から噴射された液噴流は噴出直後から激しく変動し、ノズル下流10mm程度の位置で細かな液滴へと分裂しており、実際の多孔プレート型インジェクタが良好な微粒化特性を示すことが窺われる。図

6(b)~(d)は円筒状ニードルを用い、プレート-ニードル間のすき間 G を変えて観察したものである。 $G=0.1\text{mm}$ の場合には、(b)に示すように液噴流の変動がやや穏やかなものの流動パターンは(a)と類似している。 G を大きくすると、液噴流の激しい変動は次第にみられなくなり、噴流が分裂する位置も下流となっている。また、 G が小さい場合には各噴流はノズル中心軸に沿うように流下しているのに対して、 G が大きい場合には、各噴流はやや外向きである。ニードルなしの場合には、図6(e)に示すように、もはや噴流の激しい変動は観察されず、ノズルより遙かに下流で通常の低速棒状噴流のような分裂挙動を呈している。

図7は円筒状ニードルを用い、プレート上の噴孔配置を変えて分裂過程を観察してみた結果である。いずれも $G=0.1\text{mm}$ とした。図7(a)は、図6(b)と同じ条件、4孔プレート $D=1.2\text{mm}$ である。 $D=1.7\text{mm}$ にすると図7(b)に示すように噴流の変動が(a)よりいくぶん穏やかになり、噴流が分裂する位置もより下流になる。また、噴流の向きがやや外向きとなる。 $D=2.4\text{mm}$ では図7(c)に示すように、このような傾向はさらに顕著となる。一方、 D が同じでも噴孔同士の間隔が(a)の4孔プレートよりも大きい2孔プレートでは、図7(d)に示すように、各噴孔から噴射された液噴流はまっすぐな棒状で、前述の図6(e)と同様、通常の低速棒状噴流のような分裂挙動を呈している。

このように同じ噴孔径、噴射圧でも噴孔配置や噴孔上流の流路形状によって液噴流の挙動は大きく異なり、まっすぐな棒状となったり激しく変動しながら速やかに分裂したりする。このことから、この種のノズルによる微粒化には液噴流と周囲気体との相互干渉よりむしろノズルの幾何形状に由来する他の何らかの要因が強く関与しているものと考えられる。

次に、4孔プレートで円筒状ニードル付きの場合に着目して、 G ならびに D を変えて液体噴流の平均分裂長さ L_B と流出係数 C_d を測定してみた。結果を図8に示す。図の両縦軸上にはバルブモデル付きならびにニードルなしの場合の結果を参考までに記入してある。図より L_B は G を大きくするほど長くなり、ニードルなしの場合には $G=0.4\text{mm}$ の場合よりさらに長くなっている。また、 L_B は D を大きくすると長くなる傾向が見られる。これらの結果は瞬間写真観察の結果と良く対応している。

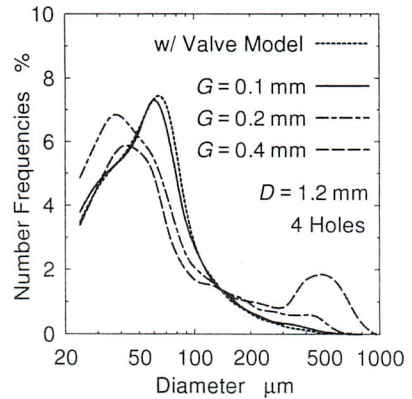
一方、 C_d は G を小さくするとしだいに小さくなる傾向が見られる。バルブモデル付きの場合には $G=0.1\text{mm}$ の場合よりさらに C_d が小さい。これは弁の部分で圧力損失を生じているためと考えられる。しかしながら、測定値のばらつきなどもあって、 D が C_d に及ぼす影響については必ずしも明確にできなかった。

2.3 微粒化特性

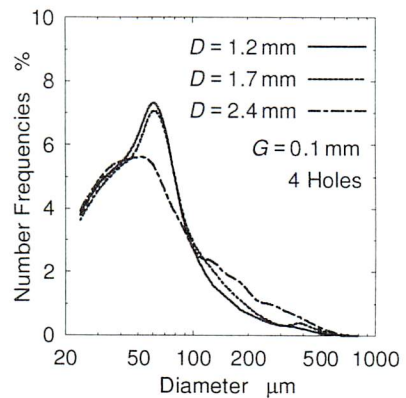
実寸大ノズルを対象に G ならびに D を変えて生成された噴霧の粒径を測定してみた。粒径分布の測定結果を図9に示す。図9(a)は $D=1.2\text{mm}$ の4孔プレートで円筒状ニードル付きの場合について、 G を変えて粒径分布を測定した結果である。参考までにバルブモデル付きの場合の結果も記入してある。図より、 $G=0.1\text{mm}$ の場合には直径 $100\mu\text{m}$ 以下の液滴が多数生成されており、 $500\mu\text{m}$ 以上の液滴はほとんど存在しない。 G を大きくすると粗大な液滴の頻度が高くなり、 $G=0.4\text{mm}$ の場合には直径 $500\mu\text{m}$ 前後に粒径分布のピークがみられるようになる。前述の C_d の測定結果より各噴孔から噴射される液噴流の等価直径は噴孔径の約 0.8 倍すなわち 0.27mm 程度と推定されることを考慮すれば、 G が大きい場合には液噴流が Rayleigh の理論に準じた分裂機構⁽⁴⁾で分裂しているものと推察される。

図9(b)は同じく4孔プレートで D を変えて粒径分布を測定した結果である。図より D を大きくすると直径 $100\mu\text{m}$ 以下の液滴の生成頻度が低下し、より大きな液滴の生成頻度が増加している。

図9の粒径分布をもとに体表面積平均粒径 D_{32} 、体積メディアン径 D_{V50} を算出した結果を図10に示す。 D_{32} 、 D_{V50} ともに G を大きくすると著しく増大する。また、



(a) Effects of Clearance



(b) Effects of P.C.D.

Fig.9 Drop size distributions.

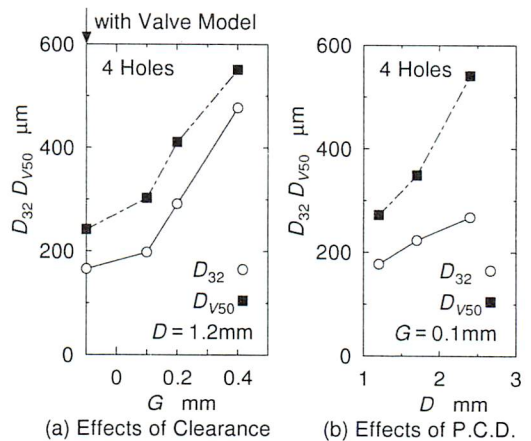


Fig.10 Mean drop size.

D を大きくするほど D_{32} 、 D_{V50} は大きくなる。

以上の結果は前節の瞬間写真観察の結果と良く対応している。すなわち、円筒状ニードル付き4孔プレートでは、 D と G がともに比較的小さい場合には噴出された液噴流は激しく変動して速やかに分裂するために

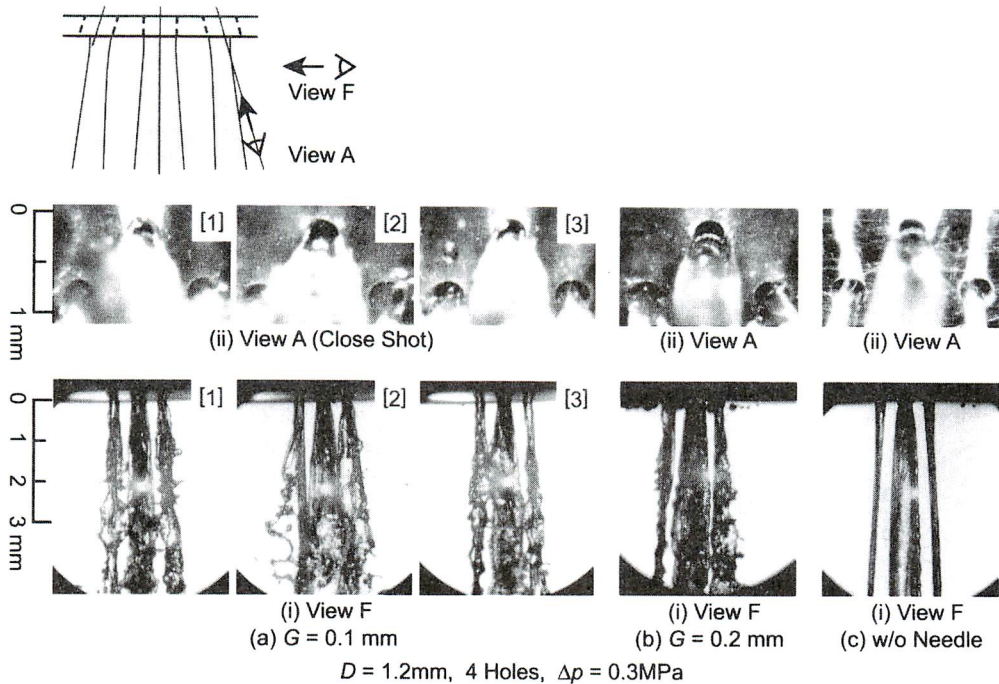


Fig.11 Close-up shots of liquid jet injected from real scale nozzle.

噴霧の平均粒径が比較的小さいが、 D あるいは G を大きくすると、液噴流の変動が穏やかになるために平均粒径が大きくなるものと理解される。

3. 噴孔出口近傍での流動状態

上述のように多孔プレート型ノズルでは、噴孔同士の間隔ならびにプレート上のすき間が共にある程度小さい場合に限って、噴射された液噴流は激しく変動して速やかに微細な液滴へと分裂する。単純噴孔ノズルに類する構造でありながら、なぜこのような分裂挙動を呈するのであろうか。

実寸大ノズルから噴射される液噴流をあらためて詳細に観察してみたところ、図 6(c)や図 7(b)でも見られるように、各噴孔の出口直後の液噴流に薄い液膜が付随することがあった。液噴流は、まずこの液薄膜の部分から分裂しはじめ、やがて噴流全体が変動・分裂していた。対照的に粗大な液滴が多数形成される条件下では、図 6(e)や図 7(d)に示したように、扁平な液柱が噴出されるのみで、液薄膜は付随していなかった。

このように液噴流に付随する薄い液膜が噴流全体の分裂に寄与していると考えられることから、噴孔近傍での流動状態について詳しく調べてみた。

3.1 実寸大ノズル噴孔近傍の流動状態

実寸大ノズルの噴孔出口での液体の流動状態をより

詳細に観察してみた結果の一例を図 11 に示す。図は 4 孔プレートで円筒状ニードル付きならびにニードルなしの場合について、長距離顕微鏡を用いて噴孔出口での液噴流を拡大瞬間写真撮影したもので、図の下端(i)は側方から背照法で、中段(ii)は 1 つの噴孔の軸上から前照法で撮影した(視点は図 11 上段の模式図参照)。

図 11 中段の写真より、いずれの場合も液体は各噴孔のノズル中心軸側の壁面に沿うように流出しており、外側は空洞となっている。しかし、 $G=0.1\text{mm}$ の場合には、この空洞領域の噴孔壁面に沿うように液体が膜状にせり上がるようすが観察される。ニードルなしの場合には、このような現象は観察されない。一方、下段の写真より、いずれの G でも液体は扁平化しながら流出しているが、 $G=0.1\text{mm}$ の場合には液流に薄い液膜が付随している。この液薄膜は上述の噴孔内壁に沿う液体のせり上がりに起因していると考えられる。この液薄膜はノズルから離れるにしたがって大きくなる傾向が見られる。また、この液薄膜の形状は、図の[1]~[3]のように写真ごとくに大きく異なり、不規則に激しく変動していることがわかる。この液薄膜の変動とともに液噴流自身も不規則に変動している。対照的に、ニードルなしの場合には、このような液薄膜は観察されなかった。また、微細な変動は観察されるものの、噴流界面は総じて滑らかであった。

次に、図 11 下段のような拡大瞬間写真をもとに、液

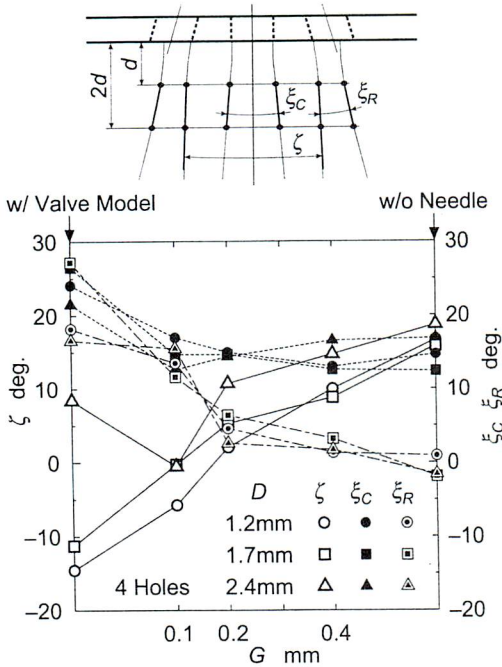


Fig.12 Extension angles of each liquid jets and jet flow.

噴流のノズル周方向への広がり角 ζ_C 、ノズル半径方向への広がり角 ζ_R 、ならびに対面する2噴流の内側界面の成す角 ζ を測定してみた。これらの値は、プレート下面から $1d$ ならびに $2d$ 下流での液噴流界面の位置より算定した(d は噴孔直径)。液噴流は激しく変動していることから、約20枚の写真から平均値を求めた。

4孔プレートの結果を図12に示す。図には円筒状ニードルで G を変えた場合の結果に加えて、バルブモデル付きの場合とニードルなしの場合の結果を両縦軸上に記入してある。図より、 ζ_C はいずれも正の値で、液体がわずかではあるが扇状に広がりながら流出していることがわかる。また、バルブモデル付きの場合を除き、 ζ_C は 15° 程度でほぼ一定あり、本実験の範囲では ζ_C は噴孔配置や上流の流路形状の影響をあまり受けないと考えられる。

一方、 ζ_R はニードルなしの場合にはほぼ零であるが、円筒状ニードル付きでは G を小さくするほど大きくなっている。これは、 G を小さくすると液噴流に液膜が付随するようになるためである。バルブモデル付きの場合には、 $G=0.1\text{mm}$ の場合よりもさらに ζ_R が大きく、液薄膜がより大きいことを示している。

他方、 ζ は $G=0.1\text{mm}$ の場合には零前後の小さな値であるが、 G を大きくするほど ζ は大きくなっている。また、 ζ は D を大きくするほど大きくなる傾向がある

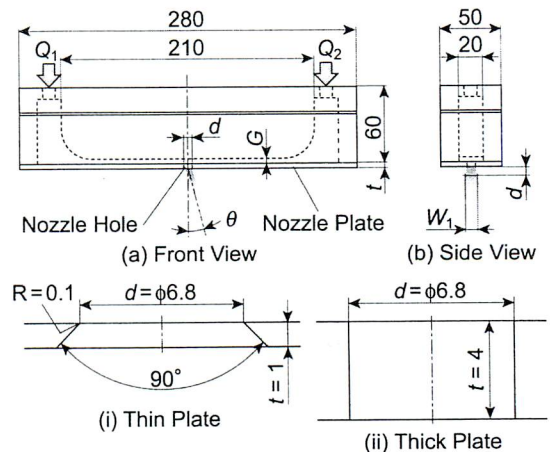
が、ニードルなしの場合には D による ζ の差はほとんど見られない。なお、本実験の範囲では ζ の測定値は、最も大きな値をとるニードルなしの場合ですら、対面する2噴孔の軸の成す角(36°)の半分程度であった。

3.2 単孔拡大モデルを用いた実験

前節までの結果から、多孔プレート型ノズルでは、扁平化しながら(僅かに扇状に広がりながら)流出する液噴流に薄い液膜が付随する点が、単純噴孔ノズルなどから噴出される低速の棒状液噴流とは大きく異なる。このような特徴的な液噴流の形成には、液流と噴孔壁面との干渉が重要な役割を演じているものと推察されるが、実寸大ノズルを用いた実験ではこのことについてさらに踏込んで検討することは困難である。そこで、単孔の拡大モデルを用いて噴孔出口近傍の流動状態についてさらに詳しく調べてみた。

3.2.1 実験装置

実験に用いた単孔拡大モデルを図13に示す。1噴孔を寸法比20倍で模擬したもので、一部を除き透明アクリル樹脂製である。実際のノズルではプレートのすぐ上にニードルがあり、ほとんどの流体がプレートの外周側から噴孔に流入していると考えられることから(例えば、円筒状ニードル付きの4孔プレートで $G=0.1\text{mm}$ 、 $D=1.2\text{mm}$ の場合、ピッチ円上の流路断面積 πDG は噴孔の総断面積 A とほぼ等しい)、これを模擬するためにプレート上面の流路を幅20mmの矩形流路とし、左右からの流体の供給流量を任意に設定できる構造とした。実験では矩形流路の厚さ G は2mm、4mm、6mmの3通りとした(それぞれ実寸大ノズルの $G=0.1\text{mm}$ 、 0.2mm 、 0.3mm に対応)。図(c)に示す2種



(c) Closeup of Nozzle Holes

Fig.13 20-times enlarged model.

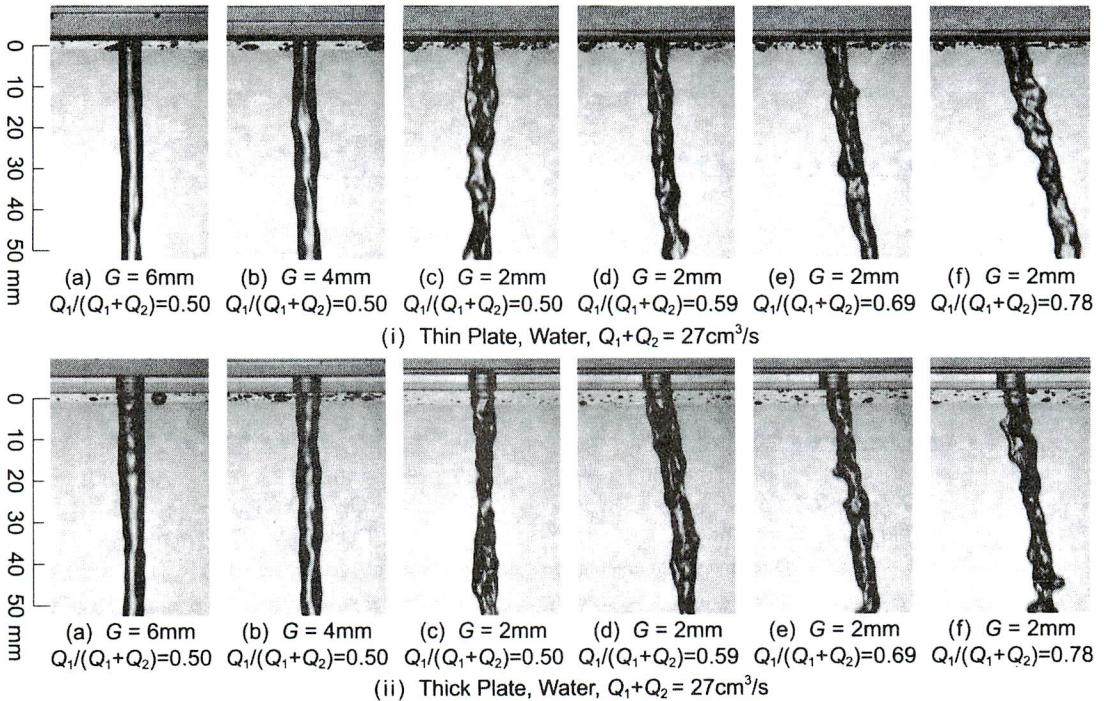


Fig.14 Typical photographs of liquid jet injected from 20-times enlarged model.

類のプレートを用いた。(i)の薄いプレートはステンレス製で噴孔壁面と噴流との干渉を抑えるため、薄刃オリフィスとなっている。(ii)の厚いプレートは噴孔の軸が傾いていない点を除いて実寸大ノズルの噴孔と相似であり、噴孔径は(i)と等しい。透明アクリル樹脂製で透過して噴孔内部を観察できる。

供試流体には常温の水道水を用いた。噴孔径 d を代表長とするレイノルズ数 $Re (=4Q/(\pi d \nu))$ 、ここで ν は流体の粘度) が実寸大ノズルと同程度の 5.5×10^3 となるよう、左右からの流体の流入量の和 Q_1+Q_2 を $27\text{cm}^3/\text{s}$ に保ちながら $Q_1/(Q_1+Q_2)$ を 20% から 80% の範囲で変えた。

3.2.2 流動状態の観察

まず、 $Q_1/(Q_1+Q_2)$ を 50% からしだいに大きくしながら噴孔近傍での液体の流動状態を観察してみた。結果を図 14 に示す。図はハロゲンライトの背照法により撮影した写真である。薄いプレートを用いた場合、図 14(i) の(c)~(f) に示すように、 $Q_1/(Q_1+Q_2)$ を大きくすると、噴射方向が供給流量の少ない側へ徐々に変化した。しかし、噴流界面の状態には特に変化は見られなかった。一方、厚いプレートを用いた場合、図 14(ii) の(c)~(f) に示すように、 $Q_1/(Q_1+Q_2)$ を大きくすると、噴射方向は供給流量の少ない側へ変化した。ある程度以上大きな $Q_1/(Q_1+Q_2)$ では噴射方向に変化は見られなくなり、噴流界面にしばしば大きな変動が観察されるようにな

った。噴孔内部を拡大観察してみたところ、このような状況下では、液体は供給流量の少ない側の噴孔壁面に沿って流出しており、反対側は空洞となっていた。残念ながら単孔拡大モデルでは液噴流に付随する液薄膜が安定して観察されることはなかったが、厚いプレートで供給流量が大きすぎた場合には、しばしば小規模の液薄膜が観察されたほか、時折、液噴流全体が膜状に広がる様子も観察された。なお、いずれのプレートでも G を大きくすると噴流界面の変動が穏やかになる傾向が見られるが、これについては後で考察する。

各条件で 10 枚の写真を解析して、液噴流の平均の射出方向 θ (図 13(a)参照) を測定してみた。結果を図 15 に示す。図には参考までに標準偏差 $S.D.(\theta)$ も記入した。図の(a), (c)より、薄いプレートを用いた場合、 θ は供給流量のずれ ($Q_1/(Q_1+Q_2)$ の 50% からのずれ) に比例して変化している。また、 G が小さい場合の方が流量のずれに対する θ の変化が大きい。一方、厚いプレートを用いた場合、 $Q_1/(Q_1+Q_2)$ が 40% から 60% 程度の範囲では、図の(b), (d) に示すように θ は流量のずれに概ね比例して変化するが、さらにずれの大きな範囲では θ は頭打ちとなって一定値に漸近する傾向が見られる。

次に、液噴流を側方から写真撮影して、プレート下面から $1d$ 下流における液噴流の幅 W_1 (図 13(b)参照) を測定してみた。結果を図 16 に示す。図には標準偏差

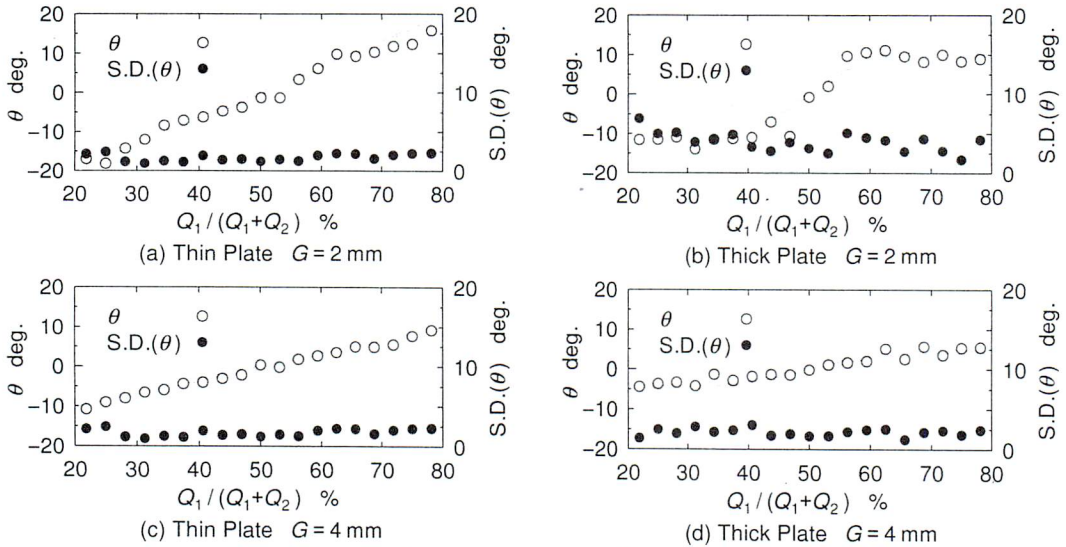


Fig.15 Direction of liquid jet injected from 20-times enlarged model.

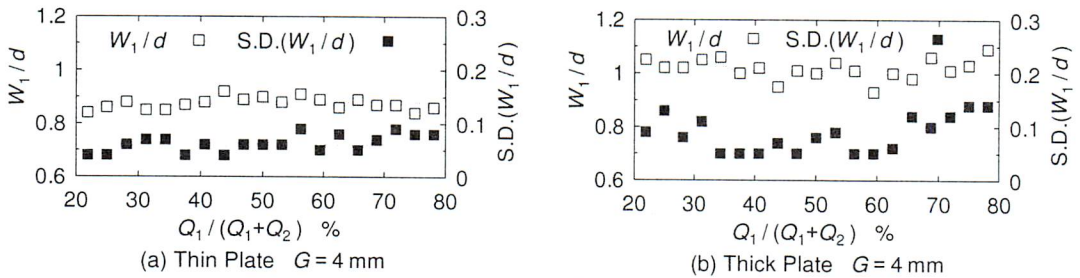


Fig. 16 Width of liquid jet injected from 20-times enlarged model.

S.D.(W_1/d)も記入した。なお、図 12 と評価方法が異なるのは、重力の影響が顕在化するのを抑えるためである。図 16(a)より、薄いプレートを用いた場合、 W_1/d の値は $Q_1/(Q_1+Q_2)$ によらずほぼ一定で 0.9 程度である。S.D.(W_1/d)も 0.1 以下でほぼ一定である。一方、厚いプレートを用いた場合、図 16(b)に示すように、 θ が流量のずれに比例して変化する $40\% \leq Q_1/(Q_1+Q_2) \leq 60\%$ 程度の範囲では、 W_1/d は 1 よりやや小さな一定値をとり、S.D.(W_1/d)も薄いプレートの場合と同程度だが、供給流量がより大きくずれると、 W_1/d は 1 より大な値をとるようになっていく。これは、片側からの流入流速が大きくなった結果として、噴孔内部で液流が反対側の壁面に強く押し付けられ扁平化しながら流出した結果と理解される。なお、これにともなって、S.D.(W_1/d)も若干増大している。

4. 微粒化機構の考察

以上の結果をもとに、多孔プレート型ノズルの微粒化機構（比較的低い噴射圧力でも微細な噴霧が得られ

る理由）を考察してみる。

円筒状ニードル付き 4 孔プレートからの液噴流の観察結果によれば、各噴孔から液体が扁平化しながら流出しており、微細な噴霧が得られる条件下ではこれに薄い液膜が付随していた。そこで、この液噴流の扁平化と液薄膜の付随の原因について考えてみる。

実験で用いた 4 孔プレートでは噴孔の軸がノズル中心軸に対して外側に傾いているため、噴孔入口部での剥離の状態が非対称となる。このため、ニードルがなく各噴孔に液体が上流から一様に流入する場合ですら、図 17(a)に模式的に示したように、液体は各噴孔のノズル中心軸よりの壁面に沿うように流出すると考えられる。このことは、図 11(c)からも裏付けられる。

実際にはプレートのすぐ上にニードルがあり、噴孔の上流は狭いすき間流路となっている。もしも噴孔同士の間隔が十分に大きければ、液体が各噴孔にその全周から概ね一様に流入することになるだろうが、ここで用いたプレートでは噴孔同士が比較的隣接している。このため、4 つの噴孔で囲まれた領域に液体が十分に流

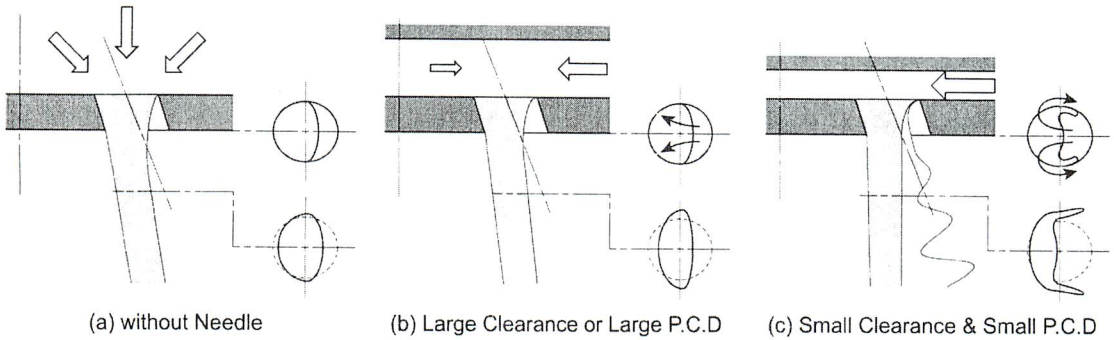


Fig.17 Models of liquid flow passing through nozzle hole.

入することができず、各噴孔への液体の流入は主にノズルの外周側からとなると考えられる。このように各噴孔に流体が片側のみから流入する場合、噴孔長が十分短ければ噴流の向きが傾くのみであろうが、ここで対象とした噴孔では噴孔長と噴孔径の比が 0.6 程度あるから、傾いた液流が噴孔壁面に干渉する。すなわち、液流が噴孔の片側壁面に押し付けられて、図 17(b)のように、その方向と断面形状が変化する。このことは図 15(d)と図 16(b)において噴孔への流入流量のずれがある程度以上大きくなると、噴流の方向の変化が頭打ちとなるとともに噴流が扁平化 ($W_1/d > 1$) したことから裏付けられる。

プレートーニードル間のすき間 G や噴孔のピッチ円径 D が必ずしも小さくない場合は、これにより噴流が扁平化するのみであろうが、両者ともに小さい場合には、噴孔への近寄り流れの速度が大きく流入の偏りも大きいから、流れがより強く噴孔の壁面にぶつかり、図 17(c)のように液体の一部が跳ね返るように噴孔壁に沿って膜状に突き出すと考えられる。これにより、 G 、 D ともに小さい場合には扁平な液噴流に付随して液薄膜が各噴孔から噴出したものと考えられる。

このような液薄膜は流体力学的に不安定であるから、不規則に変動して収縮あるいは分裂する。また、この変動に伴って噴流全体も変動する。扁平な液噴流は円筒状噴流よりも分裂しやすいため、これによって液噴流全体が速やかに分裂に至ることができよう。

しかし、残念ながら上記の扁平な液噴流と付随する液薄膜の考察のみでは、多孔プレート型ノズルの微粒化機構を必ずしも十分説明できない。図 6, 7 に示したように、噴孔のピッチ円径 D やプレートーニードル間のすき間 G がある程度大きい場合でも小規模ながらも液薄膜が付随するが、その変動は D 、 G ともに小さい場合に較べて明らかに穏やかである。液噴流全体が激しく変動して速やかに分裂するためには、他の何らかの因子も関与していると考えざるを得ない。

Table 1 Stream-wise velocity and turbulent intensity of gas jet injected from 20-times enlarged model.

Plate	G mm	$Q_1/(Q_1+Q_2)$	U m/s	U'/U
Thin	2	50 %	15.6	12 %
		50 %	15.4	4 %
	4	63 %	15.4	6 %
		75 %	15.4	6 %
	6	50 %	15.6	3 %
	Thick	2	50 %	15.6
50 %			15.5	5 %
4		63 %	15.5	6 %
		75 %	15.5	5 %
6		50 %	15.6	3 %

At center of gas jet, 0.25d below nozzle plate.

このことに関連して、図 14 に示した単孔拡大モデルから噴射された液噴流の観察結果では、どちらのプレートを用いた場合も、 G が小さいほど噴流界面の変動が激しくなっている。そこで、単孔拡大モデルから空気を大気中に噴射して、熱線流速計を用いて流速ならびに乱れ強さを測定してみた (I 型プローブを使用)。なお、前章と同様に Re が実寸大ノズルと等しくなるよう供給流量の和 Q_1+Q_2 を $400\text{cm}^3/\text{s}$ とした。

ノズルプレートから $0.25d$ 下流における噴流中心での流れ方向速度 U と乱れ強さ U'/U を表 1 に示す。表より、 U'/U は $Q_1/(Q_1+Q_2)$ を変えてもあまり変化しない。しかしながら、 G を小さくすると U'/U は著しく大きくなっている。この傾向はどちらのプレートでも同様である。ここでは計測上の都合により気体を噴射したが、液体を噴射した場合にも、これと同様の乱れによって液噴流が激しく変動していたものと考えられる。

ここで、このように G を小さくするほど噴流内部の乱れが強くなる原因についても考察しておこう。 G が小さい場合には噴孔入口で流れが急激に向きを変える

ことになるから、これにより何らかの乱れが誘起された可能性もあるが、次のように考えることもできよう。

本実験の範囲では噴孔上流の矩形流路内の流れは乱流遷移の初期段階 ($Q_1/(Q_1+Q_2)=50\%$ の場合、レイノルズ数は1200程度)であるから、すでに流れにある程度の乱れが重畳していると考えられる。一般に絞りをよぎる流れでは流体が大きく加速されると乱れは減衰する⁽⁵⁾。噴孔近傍の流れにもこの考えが当てはまるとすれば、 G が比較的大きい場合には噴孔への近寄り流れの流速が小さいために噴孔近傍で流体が大きく加速され、上流の流れがある程度乱れていても減衰してしまうであろう。しかし、 G が比較的小さい場合には噴孔への近寄り流れの流速が大きく噴孔近傍で流れはほとんど加速されないため、上流の流れに重畳した乱れがほとんど減衰せずに流出することとなる。このために、上流の矩形流路内流れのレイノルズ数ならびに噴孔内流れのレイノルズ数が同じでも、 G が小さい場合ほど噴出直後の噴流内部の乱れが大きかったと考えることもできよう。さらに、バルブモデル付きのノズルではニードル先端とプレートの間隔が0.28mmとやや広いにもかかわらず、 $G=0.1\text{mm}$ の場合と同様に噴射された液噴流が激しく変動していたことは、弁部で一旦絞られた流体がプレート上面に流れ込む際に強い乱れが発生したと考えれば、この考察から説明できよう。ちなみに、図3(a)のノズルを20倍に拡大した4孔拡大モデルから同様に気体を噴射して乱れ強さを測定してみたところ、噴流中心における乱れ強さは、単孔の拡大モデルで $G=2\text{mm}$ の場合と同程度であった。

これらに加えて、ここで対象としたノズルでは噴流同士が接近しているために、噴流界面の変動が相互に干渉して変動がさらに増強されている可能性もあろう。しかしながら、この効果の有無を確認するためには本研究とは異なる観点からの研究が必要である。

いずれにしても、多孔プレート型ノズルでは、その幾何形状に起因して各噴孔から液体が扁平化しながら噴出し、これに液薄膜が付随する。加えて液流が強く乱れているために、液噴流が激しく変動して速やかに微細な液滴へと分裂しているものと理解される。また、このような微粒化機構のために、実際の多孔プレート型インジェクタでは雰囲気圧力を変えても噴霧の平均粒径がほとんど変化しなかったものと考えられよう。

5. まとめ

平らなプレートに複数の噴孔を開けたのみの単純な構造でありながら比較的低い噴射圧力でも微細な噴霧が得られる多孔プレート型ノズルの微粒化機構の解明を目的とした実験研究を行った。

まず、図3(b)の実寸大ノズルを対象に噴孔配置やプレート上流の流路形状を変えて液体噴流の流動状態を詳細に観察するとともに微粒化特性を測定した結果、

- (1) 噴孔同士の間隔とプレート-ニードル間のすき間がともに比較的小さい場合には、各噴孔から噴出された液噴流が激しく変動しながら速やかに分裂する。しかし、噴孔同士の間隔が広い場合やプレート-ニードル間のすき間が大きい場合には、通常の低速棒状噴流に類した分裂挙動を呈する。
- (2) 噴孔同士の間隔が小さいほど、プレート-ニードル間のすき間が狭いほど、液噴流の分裂長さは短くなり、噴霧の平均液滴径も小さくなる。
- (3) 液体は各噴孔のノズル中心軸よりの壁面に沿って扁平化しながら流出しており、反対側は空洞となっている。また、噴孔同士の間隔およびプレート-ニードル間のすき間がともに比較的小さい場合には、この液噴流に薄い液膜が付随する。

次に、20倍の単孔拡大モデルを用いて噴孔近傍での流動状態を詳細に調べた結果、

- (4) 薄刃オリフィスでは、噴孔への流入流れに偏りがあっても射出方向が変化するのみで、液噴流の形状は変化しない。しかし、噴孔長が有限の場合、流入流れがある程度以上偏ると、液流が扁平化しながら噴出されるようになる。
- (5) 噴出された噴流の中心部の乱れ強さは、噴孔への流入流れに偏りがあっても変化しないが、プレート上の流路すき間を小さくするほど乱れ強さは大きくなる。

これらをもとに微粒化機構を考察した結果、この種のノズルでは、その幾何形状に起因して変動・分裂しやすい形状の液噴流が噴出され、かつ、液流が強く乱れているために、噴出された液噴流は激しく変動して速やかに微細な液滴へと分裂するものと理解される。

文 献

- (1) 例えば、Lai, M. et al., The Structure of Port Injector Spray in Gasoline Engines, Proceedings of The International Symposium on Advanced Spray Combustion, (1994), pp.79-89.
- (2) Tani, Y. et al., Fuel Atomization of Multi-hole nozzle Injector, SAE Paper 2000-01-1428(2000), pp.155-162.
- (3) Lefebvre, A.H., Atomization and Sprays, (1989), pp.37-59, Taylor & Francis.
- (4) 天谷, 液柱状液体噴流の不安定性理論, 微粒化, 9-25(2000), pp.261-269.
- (5) 例えば、Batchelor, G., The Theory of Homogeneous Turbulence, (1956), p.74, Cambridge.



鈴木 孝司
豊橋技術科学大学
機械システム工学系
助教授
〒441-8580
愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
TEL : 0532-44-6667
FAX : 0532-44-6661

略歴：1991年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了（機械工学専攻）、同年 豊橋技術科学大学助手、1996年 同講師、2000年より現職
主に気液界面流動ならびに対流伝熱の研究に従事



谷 泰臣
㈱デンソー パワートレイン機器
事業グループ特定開発室
主任部員
〒448-8661
愛知県刈谷市昭和町 1-1
TEL : 0566-61-4151
FAX : 0566-25-4676

略歴：1982年 東北大学大学院工学研究科博士課程前期修了、同年 ㈱豊田中央研究所入社、
1988年 ㈱デンソーへ転籍入社
主に燃料噴射システムの研究開発に従事



徳富 寛
豊橋技術科学大学大学院
工学研究科修士課程
機械システム工学専攻
〒441-8580
愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
TEL : 0532-47-0111
FAX : 0532-44-6661

略歴：2002年 豊橋技術科学大学卒業、同年 同大大学院工学研究科入学（機械システム工学専攻）
現在、本論文に関するテーマで修士論文を執筆中