多噴孔 VCO ノズルの燃料噴出特性*

大西 浩 之^{*1}, 吉田 哲 哉^{*1}
有 福 孝 智^{*2}, 角 田 敏 一^{*3}

Characteristics of Fuel Discharge in Multihole VCO Nozzle

Hiroyuki OHNISHI, Tetsuya YOSHIDA,
Takatomo ARIFUKU and Toshikazu KADOTA

An experimental study was conducted on the behavior of the fuel spray and the nozzle needle in a multihole valve cut orifice (VCO) nozzle for diesel engines. The measurements of time lag for fuel discharge among individual holes and the photographic observation of fuel sprays at an arbitrary instant after the start of fuel discharge were carried out using a video camera and a microflash. The magnified image of the top portion of the nozzle needle illuminated by an argon laser and two He-Ne lasers was observed using a high-speed video camera through a window of diameter 0.6 mm installed at the nozzle tip. The results showed that the fuel spray was classified into solid cone, hollow cone and mixed types, and that the radial displacement of the nozzle needle was straight and toward the opposite side of the hole from which the earliest fuel spray appeared among the five holes.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Fuel Injectin, Multihole Nozzle, VCO Nozzle, Nozzle Needle

1. 緒 言

直接噴射式ディーゼル機関から排出する窒素酸化物の低減対策として、燃料噴射時期を遅らせることが有効であるが、これを実施すると、すすおよび未燃炭化水素が増加することが知られている。このほか、低圧縮比・高過給・高出力ディーゼル機関においても、多量の未燃炭化水素が排出する傾向にある。このように、ディーゼル機関から排出するすすおよび未燃炭化水素が重要な問題で、その低減技術の確立が早急な技術的課題となっている。この対策として、後だれ容積の低減を図ったバルブカットオリフィス(以下 VCO と略称)ノズル⁽¹⁾の使用が有効であるといわれている。しかしながら、少数の報告例⁽²⁾を除いて、VCO ノズルの燃料噴出特性に関する研究結果は報告されておらず、不明な点が多く残されている。

そこで、著者らは、実機に使用される多噴孔 VCO ノズルの燃料噴出特性を明らかにすることを目的とし

て、系統的研究を行った。本論文では、多噴孔 VCO ノズルの燃料噴出時における噴孔間不均一性の実態ならびにノズル針弁の挙動に関する実験結果について述べる。多噴孔 VCO ノズルの噴孔間燃料噴出遅れおよび噴出順序を測定するとともに、噴霧形状の経時変化を明らかにした。また、ノズル先端に設けた窓を通して、レーザおよび高速度 VTR カメラにより、燃料噴出時におけるノズル針弁の挙動を観察した。これらの結果に基づき、針弁の半径方向最大偏心量と噴孔間の最大燃料噴出遅れとの関係、針弁の偏心方向と最初の燃料噴出が生じる噴孔位置との関係など、多噴孔 VCO ノズルの燃料噴出特性に関する考察を行った。

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略を示す。燃料(軽油)はタンクからボッシュ形燃料噴射ポンプを経て、試験台に固定された供試ノズルを含む 4 本の燃料噴射ノズルに供給される。燃料タンクとポンプ間に設けたピュレットにより、燃料流量を計測した。2 個の電磁式回転検出器を利用した時間遅れ装置を調整することにより、任意時刻においてストロボスコープを発光させ、ビデオカメラを用いて噴孔間燃料噴出遅れの測定および噴霧映像の撮影を行った。遅れ時間は、ユニバーサルカウンタ

* 平成 5 年 7 月 14 日 第 11 回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成 6 年 8 月 10 日。

*1 正員, 広島商船高等専門学校 (〒725-02 広島県豊田郡東野町 4272-1)。

*2 正員, いすゞ自動車(株) 藤沢工場 (〒252 藤沢市土棚 8)。

*3 正員, 大阪府立大学工学部 (〒593 堺市学園町 1-1)。

図 1 実験装置

Nozzle	Hole length l mm	Maximum difference in hole length Δl mm	Injection angle α
1	1.014	0	70°
2	1.001-1.049	0.048	$63^\circ 11' - 77^\circ 55'$
3	1.014-1.112	0.098	$69^\circ 59' - 86^\circ 16'$
4	1.034-1.184	0.150	$75^\circ 10' - 92^\circ 35'$

図 2 VCO ノズルの構造

により、 $5 \mu\text{s}$ 以内の精度で計測される。また、ストロボスコープのせん光時間は、 $2.1 \mu\text{s}$ とした。ノズルに内蔵された針弁揚程検出器の信号およびノズル入口に取付けた圧力変換器の信号は、各増幅器を経て記録計に記録される。燃料噴射ポンプのラック位置を固定し、回転数 $500 \sim 1000 \text{ rpm}$ において、大気圧下で測定を行った。燃料流量は、ポンプ回転数が 500 rpm のとき 6.30 l/h 、 1000 rpm のとき 8.60 l/h であった。

図 2 に、5 噴孔 VCO ノズルの構造を示す。ノズルは、

図 3 針弁観察装置

サック容積をもたず、針弁の降下により、噴孔入口がふさがれる構造になっている。ノズル先端部の正面拡大図に示す 5 個の○印は、噴孔を表し、各噴孔間の角度は同一である。噴孔 3 は、噴射ノズル内燃料通路 A の反対側に位置している。下部の表は、使用したノズル仕様を示す。また、測定対象外の 3 本の噴射管にも、同種のノズルを取付けた。噴孔長さ l は、ノズル中心線と噴孔軸のなす角として定義される噴射角 α によって決まり、各ノズルとも噴孔 3 が最も長く、以下噴孔 4, 2, 5, 1 の順に短くなる。最大噴孔長さ Δl は、各ノズルの最長噴孔と最短噴孔の差を示す。ノズル開弁圧は 20.6 MPa 、最大針弁リフトは 0.31 mm である。

図 3 に、針弁観察装置を示す。ノズル先端に設けた観察窓の内径は 0.6 mm である。観察窓を通して、異なる 3 方向から Ar レーザおよび 2 本の He-Ne レーザにより照射された針弁先端を、高速度 VTR カメラにより 2066 こま/s の速度で撮影した。また、シャッタースピードは $1/5000 \text{ s}$ とした。

3. 実験結果および考察

図 4 に、噴霧の時間経過写真の一例を示す。図 4 のように、噴孔ごとにより異なった形状の噴霧が現れる。噴出初期において、到達距離の大きい噴霧は中実で、サック容積を有するホールノズルからの噴霧と同様の特性を示す。これを中実円すい形噴霧(以下中実形噴霧と略称)と呼ぶ。噴霧角の大きい噴霧は中空で、噴霧周辺部に燃料が偏在する構造を示す。これを中空円すい形噴霧(以下中空形噴霧と略称)と呼ぶ。中空形噴霧の到達距離は、中実形噴霧に比べて小さい。また、両者の特性を併せもつ噴霧も存在し、これを混合形噴霧と呼ぶ。

VCO ノズルにおいては、噴孔ごとに燃料噴出時期が異なる。最初と最後の燃料噴出開始時間差を最大燃料噴出遅れと呼び、これを図 5 に示す。これらの結果

は、48 個の測定結果から求めた最大燃料噴出遅れの平均値 Δt_d と最大噴孔長差 Δl の関係を示したものである。 Δl の値は、使用した 4 種類のノズルに対応している。図 5 より、最大燃料噴出遅れは、最大噴孔長差には依存しないことが明らかになった。このことから、噴孔間の燃料噴出遅れは、噴孔長さに無関係であるといえる。また、最大燃料噴出遅れは、燃料噴射ポンプ回転数 n によって変化し、 $n=1000$ rpm では $n=500$ rpm の約 75% 程度の値を示す。

図 6 は、48 個の計測結果から求めた噴孔間の燃料噴出経路の類別と、それらの出現する割合を示したものである。類別を示す図 6 の上部において、○印は各噴孔を表し、矢印は噴出経路を示す。タイプ 1 とタイプ 2 の噴出経路は、3 番め以降が異なる。タイプ 1 とタイプ 3 の噴出経路は、2 番め以降が異なる。それぞれのタイプの生じる割合を図 6 の下部に示す。ここで、2 番めの噴出が、最初に噴出する噴孔の左になる場合を白抜き、右になる場合を斜線で表す。2 番めの噴出が最初の噴孔の右あるいは左になる割合は、ほぼ同程度である。また、タイプ 1 が全体の 60% 程度を占めることがわかる。さらに、タイプ 1, 2 およびタイプ 3 を合せた割合は、90% 以上を占めている。このことは、大部分の噴出において、最初の燃料噴出が生じる噴孔から、噴出位置が徐々に遠ざかることを意味する。

図 7 は、ポンプ回転数 $n=500$ rpm の場合において、噴出開始から終了までの、噴霧形状の時間的变化を示

したものである。なお、噴出期間は、1.48 ms である。図 7 の横軸は、最初の噴出からの時間経過であり、縦軸は噴出順序を示す。噴出初期の $t \leq 0.4$ ms では 3 種類の噴霧すべてが現れ、噴出順序が早い場合には中実形噴霧、遅い場合には中空形噴霧が見られる。また、早期に中実形として噴出した噴霧は、噴出後もその形状を保ちながら発達する。一方、遅れて中空形として噴出した噴霧は、時間経過とともに、つねに混合形を経て中実形へ変化する。 $t=0.7$ ms になると、すべての噴霧が中実形に移行する。噴出後期の $t \geq 1.3$ ms の結果に見られるように、噴出初期において中空形であった噴霧は、噴出後期においても中空形に遷移する確率が高い。

このように、VCO ノズルにおいては、噴孔間で燃料

図 5 噴孔間最大燃料噴出遅れ

図 4 噴霧写真

図 6 噴出経路

図 7 噴霧形状の時間的变化 ($n=500$ rpm)

(a) 燃料噴出前 (b) 最大変位時
図 8 針弁写真 ($n=500$ rpm)

図 10 針弁の半径方向最大偏心量

図 9 針弁中心位置の軌跡 ($n=500$ rpm)

噴出時期に差があり、その後の噴霧形状に大きく影響する。この原因の一つとして考えられるノズル針弁の動きを調べた。図 8 の写真は、異なる時刻における針弁先端の写真である。図 8 (a) は燃料噴出前、図 8 (b)

は燃料噴出中最大変位時における例である。写真の黒い円形部分は、直径 0.6 mm の観察窓に相当する。窓内の白い部分は、針弁先端の円すいにおけるレーザの反射光を示し、これらの交わる所に針弁の中心がある。

図 9 は、ポンプ回転数 $n=500$ rpm における、ノズル針弁中心の半径方向の軌跡の一例を示したものである。破線は各噴孔の方向を示す。図から明らかなように、針弁の半径方向の動きは直線状であった。本実験の範囲内においては、回転数にかかわらずこのような傾向が得られた。このことは、最初の燃料噴出が生じる噴孔から、噴出位置が徐々に遠ざかることを示した図 6 の結果と対応している。針弁の変位が生じる理由は、明らかでない。燃料通路の圧力差によって生じることも考えられるが、この点も含めて今後検討する必要がある。

図 11 針弁最大偏心量と最大燃料噴出遅れの関係

図 12 針弁偏心方向

図 10 に、ノズル針弁の最大偏心量を示す。最大偏心量 d は、ポンプ回転数 n の上昇とともに減少することがわかる。図 11 に、最大偏心量 d と最大燃料噴出遅れ Δt_d との関係を示す。最大燃料噴出遅れと最大偏心量の間には強い相関が見られ、最大偏心量の増加とともに、最大燃料噴出遅れは増加する傾向にある。図 10 および図 11 の結果は、ポンプ回転数の上昇とともに最大燃料噴出遅れが小さくなることを示し、最大燃料噴出遅れがポンプ回転数の上昇により小さくなることを示した図 5 の結果と一致する。

図 12 は、ノズル針弁の偏心方向と最初の燃料噴出が生じる方向との関係を示したものである。図 12 の上部において、 o はノズル中心、 r は半径方向、下向き矢印は最初の燃料噴出方向を示す。 θ は針弁の移動する方向を示す。A の範囲を示す 72° は、隣り合う噴孔間

図 13 針弁位置の時間変化 ($n=500$ rpm)

の角度に相当する。図 12 の下部は、ポンプ回転数 $n=500, 750$ rpm および 1000 rpm における 12 個の測定結果から求めた針弁偏心方向を示したものである。図 12 より、A が 67%、B が 33% であり、針弁はすべて $\theta=\pm 90^\circ$ の方向に偏心することがわかる。このように、針弁の偏心方向と最初の燃料噴出が生じる噴孔位置との間には、高い相関があることがわかる。

図 13 は、針弁の半径方向の動きと針弁揚程の測定結果から描いたノズル針弁位置の時間変化である。図 13(a) は、各時刻 t におけるノズル針弁の縦断面内の位置を示したものである。図 13(b) は、図 13(a) の $c-c$ 断面を示す。これより、 $t=0.025$ ms において、針弁とシート面は接触しており、左側の三つの噴孔は針弁によってほとんどふさがれた状態にある。 $t=0.05$ ms になると、 s は $5\mu\text{m}$ 程度で、針弁に最も近い噴孔のみがほとんどふさがれた状態にある。針弁は、その後次第にシート面を離れ、 $t=0.1$ ms において $s=20\mu\text{m}$ 、さらに、 $t=0.48$ ms の最大変位点においては、 $s=100\mu\text{m}$ に達する。このような針弁の動きから、 $t=0.05$ ms 程度までは、針弁はシート面の一部にほぼ接触し、噴孔をふさぎながら上昇する。このことは、図 5 に示したポンプ回転数 $n=500$ rpm における最大燃料噴出遅

れが、45 μ s 程度であることと対応している。

以上のことから、VCO ノズルにおいては、針弁とシート面の間にすきまがあって、針弁の変位により噴孔をふさぐことが、噴孔間の燃料噴出に遅れの生じるおもな原因ではないかと推察される。針弁によってふさがれてない噴孔からの燃料噴出は早く、中実形噴霧が形成される。一方、ふさがれている噴孔からの燃料噴出は遅れ、噴出初期においては流路断面積が小さいため燃料流量が絞られることにより中空形噴霧が形成されるものと考えられる。時間の経過とともに流路断面積が増大すると、燃料流量も増大し、中実形噴霧が噴出し始め、混合形噴霧へと移行するものと推察される。また、針弁は上昇時と同じ方向からシート面に沿って下降してくるため、噴出初期に中空形噴霧の現れた噴孔には、噴出後期にも中空形噴霧が現れるものと推察される。このように針弁の動きから推察される噴霧挙動は、図7で述べた噴霧形状の時間的変化とよく対応している。

4. 結 言

多噴孔 VCO ノズルの燃料噴出時における噴孔間不均一性の実態およびノズル針弁の挙動に関する実験を行った。5 噴孔 VCO ノズルについて、ストロボスコープを用いて噴霧の噴孔間噴出遅れおよび噴出順序を測定した。また、5 噴孔 VCO ノズルの先端に観察窓を設

け、高速度 VTR カメラを用いて燃料噴出時のノズル針弁先端の半径方向偏心量および偏心方向を測定した。その結果、次の結論を得ることができた。

(1) 早期に噴出する噴霧には中実円すい形、遅れて噴出する噴霧には中空円すい形が多い。中空円すい形噴霧は、時間経過とともに混合形噴霧を経て中実円すい形噴霧に移行する。また、噴出初期において中空形であった噴霧は、後期においても中空形に遷移する確率が高い。

(2) 噴孔間最大燃料噴出遅れは、ノズル針弁の最大偏心量の増加とともに増大する。

(3) ノズル針弁の半径方向の動きは直線状である。また、ノズル針弁の最大偏心量は、燃料噴射ポンプ回転数の上昇とともに減少する。

(4) ノズル針弁の偏心方向と最初の燃料噴出が生じる噴孔位置との間には高い相関があり、ノズル針弁は最初の燃料噴出が生じる噴孔の反対方向に偏心する。

終わりに実験の協力者である元広島商船高等専門学校技官 底押金吾氏に深謝する。

文 献

- (1) 小川・ほか 1 名, 自動車技術, 41-10(1987), 1141.
- (2) 飯山・ほか 3 名, 第 9 回内燃機関合同シンポジウム講演集, (1991), 409.