上流旋回式インジェクタの噴霧特性に関する研究*

(第3報, 噴霧の2方向化とエンジン性能)

岡本良雄^{*1}, 中川幸二^{*1}, 寺西隆夫^{*2}
小菅徳男^{*2}, 黒羽恒光^{*3}

Atomization Characteristics of Upstream-Swirl-Type Injector

(3rd Report, Effect of Two-Stream Spray on Engine Performance)

Yoshio OKAMOTO, Koji NAKAGAWA, Takao TERANISHI,
Tokuo KOSUGE and Tunemitsu KUROHA

Recently, the four-valve engine has become an increase of common type of gasoline engine. However, in such engines, the fuel supply is delayed because of the central wall of the intake port. Thus, the characteristics of a spray through an injector must be improved. This report presents the analysis on the fuel flow and experimental results on the characteristics of the spray injected through an upstream-swirl-type injector which was previously developed by authors. Installation of an adapter for splitting, the fuel spray below the metering orifice produces a two-stream spray. This adapter is a single-port type that has parallel walls with expansion chambers on the left and right (spectacle shape). Spray separation can be monitored by adjusting the position of these two parts. The two-stream injector atomizes and distributes fuel very well. It also improves starting and acceleration, as well as overall engine performance.

Key Words: Four-Valve Engine, Upstream-Swirl-Type Injector, Atomization Characteristics, Two-Stream Spray, Spectacle-Shaped Adapter

1. 緒 言

近年, ガソリンエンジンは, 燃料噴射の電子制御化の増加に加えて出力, 燃費の両立を図るため多バルブエンジン, 特に4バルブエンジンが増加の傾向にある。4バルブエンジンでは, 吸気弁中央隔壁への燃料付着による燃料の供給遅れの問題があり, 燃料噴射装置を構成するインジェクタにおいては, 噴霧特性の適正化を図る必要がある。これに関する研究は, 燃料通路を吸気弁座の特定位置に指向させる2ホール形インジェクタを用いてエンジン性能を検討した岩田らの研究, 等いくつか報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかしながら, 微粒化度の高い噴霧が扱われておらず, まだ不明な点が多い。

本研究では, 微粒化特性のよい上流旋回式インジェクタの検討を行っており, これまでに, その微粒化機構や噴射量特性について述べた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本報では, 燃料微粒化をさほど損なわず, 噴霧の2方向化を図ることを

目的としており, 新たに考案した燃料分配機構を有する2ストリームインジェクタの検討結果とともに, エンジン性能への効果についても検討を行ったのでその結果を述べる。

2. 2ストリームインジェクタの構造および動作

4バルブエンジンでは, 吸気弁中央隔壁への燃料付着をさけ, かつおのおの吸気弁に均等に燃料を供給するのが好ましい。また, 均質な混合気の形成のためには, 短期間で十分霧化可能な微粒化度を備えていなければならない。微粒化特性とエンジン性能の関係については, 1ストリームインジェクタを用いた検討によって明らかにしている⁽⁴⁾。したがって, 2ストリームインジェクタにおいては, 吸気弁中央隔壁への燃料付着のない, しかも微粒化特性のよい2方向噴霧とする必要がある。

図1に, 本研究の2ストリームインジェクタの構造を, 図2に, アダプタ取付部の構造を示す。オリフィス下部に仕切りのない偏平空間, すなわち, 1ポート形のアダプタ(めがね形と称している)を機械的に固定したもので, そのアダプタを取り除くと, 1ストリームインジェクタとなる。このインジェクタは, 軽量化構

* 1991年7月18日 第9回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 1994年4月7日。

*¹ 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町502)。

*² (株)日立製作所自動車機器事業部 (〒312 勝田市大字高場2520)。

*³ 自動車機器技術研究組合 (〒312 勝田市大字高場2520)。

造のボール弁と、計量オリフィスの上流側で、燃料に旋回を与える燃料旋回部材(スワラ)とを組合せた上流旋回式である。

本研究では、種々の条件下での燃料分配性、噴霧の方向性を確保するために、アダプタの主要形状パラメータおよびアダプタとオリフィスの位置関係等、実験と解析の両面から検討を加えている。

以下にインジェクタの動作の概要について記述する。駆動回路によりコイルに電流を流すと磁性材料製のプランジャが、ばね力に打ち勝って吸引されシートを開放する。燃料は、スワラの旋回溝を通過することによって、旋回を与えられ旋回室下流のオリフィスよりアダプタに導かれる。アダプタに導かれた燃料は平行壁で拘束され、弁軸心より等間隔に配置される拡大室に均等に誘導分離され、旋回エネルギーを著しく損なうことなく二つの吸気弁に向けて噴射される。燃料の噴射量はボールバルブのストローク、オリフィス

の開口面積、噴射場所の圧力と燃料圧力との差圧に依存するが、これらがいったん決定されると、コイルへの通電時間によって決定される。

3. 燃料流れの数値解析

噴霧の2方向分離は、アダプタ壁面の誘導作用によって行われる。オリフィスから流出する噴霧の旋回速度は、インジェクタの機種ごとに異なるため、アダプタ壁面の誘導作用は、旋回速度の違いに対して変化の少ないことが望ましい。また、部品の組立誤差による影響も少なくする必要がある。

図3および図4は、二次元解析⁽⁶⁾により、アダプタ内に生ずる誘起渦中心の位置、誘導作用の変化を検討したものである。オリフィス部の流れについては、その外周の周速のみを境界条件としている。

図3に、形状の影響を示す。面内の速度が非常に小さいが、平行部が長いタイプ1では旋回速度によって渦中心や誘導室側へ移動するのにに対して、平行部の短いタイプ2では渦中心の移動は見られない。

図1 2ストリームインジェクタの構造

図2 アダプタ取付部の構造

図3 アダプタ形状と流動状況の関係(渦中心位置と誘導作用の変化)

図4 アダプタのオフセットと流動状況の関係(アダプタ中心とオリフィス中心のずれの影響)

図5 噴流の分離の様子を示す三次元解析の結果

図4に、組立により生ずるオフセットの影響を示す。旋回速度が2 m/sではオフセットの影響はなく、旋回速度が4 m/sになると、渦中心が誘導室壁側に向かって旋回方向に移動しており、タイプ2を基本とする形状がよいことがわかる。

図5に、オリフィスから流出する旋回成分をもつ噴流の高速成分が、アダプタの誘導作用によって2方向の分離する模様を示す。旋回速度が2 m/sで軸方向速度が18 m/s時の三次元解析の結果である。この解析では分離の様子を簡便に知るために、ガソリン中にガソリンジェットが噴出する場合を計算している。したがって、速度の高い部分が、オリフィスから噴出した

図6 噴霧の内部構造解析装置

ジェット部にあたる。噴流の分離は、平行壁部分の拘束抵抗作用によって起こっているものと考えられ、アダプタ下方15 mmの位置で分離が完結している様子が見られる。

4. 噴霧特性

噴霧の粒径測定には、フラウンホーファ回折法を応用した英国マルバーン社の粒径測定装置(ST-2200)を用いている。測定位置は、インジェクタと吸気弁間の平均的な距離に相当するオリフィス先端100 mm下方である。粒径の表示は、ローギンラム平均粒径を用いている。また、噴霧角は、フラッシュ光源を用いた瞬間撮影で噴霧写真を撮影し、これをもとに求めている。供試燃料は、シェルロースと市販の無鉛ガソリンである。噴霧の計測には、シェルロースを用いており、供給圧力は294 kPaである。供給圧力は、エンジン試験に用いた市販の無鉛ガソリン(供給圧力は250 kPa)との燃料物性の差を考慮したものである。また、燃料噴射は、大気中への連続噴射であり、本研究では、このときの流量を静的流量としている。

図6に、噴霧の内部構造解析装置を示す。本装置は、噴霧に微小角度刻みで平行光を照射し、その透過光による像をTVカメラで撮影し、それから得られる投影

データを基に、CT (Computer Tomography) の手法に基づいて減衰係数の空間分布を再構成することにより、噴霧の内部構造を測定するものである。光学系は、点光源とその前方に置かれた2対の凹面鏡と、手前に置かれた2対の平面鏡、および CCD カメラよりなる。解析装置は、画像処理装置、デスク、ビデオプリンタ、モニタよりなる。インジェクタを取付ける噴霧の容器は、平面鏡の間に置かれている。光は、中心波長 660 nm の高輝度な LED から、タイミングコントローラによって、およそ 5 μ s の間発せられる。なお、この点光源は、LED の前に置かれたコリメートレンズ、コンデンサレンズ、ピンホールより構成されており、ピンホールを通過した光は凹面鏡により直径およそ 250 mm に拡大され、平行光となって測定部に照射される。測定部内の噴霧を通過した透過光は、凹面鏡によりアパーチャに集光された後、CCD カメラにより撮影される。

4.1 スワール数の影響 図 7 に、燃料の旋回強さ(スワール数 S)⁽⁷⁾と粒径および噴霧角(分離角 θ_1 、厚み角 θ_2)の関係を示す。スワール数は、次式により算出した。

スワール数

$$= \frac{\text{角運動量}}{\text{噴射軸方向の運動量} \times \text{オリフィス半径}}$$

$$= \frac{2 \cdot d_0 \cdot L_s}{n \cdot d_s^2 \cdot \cos \theta_s}$$

ここに、

d_0 : オリフィス径

図 7 スワール数と平均粒径、噴射角の関係

L_s : 旋回溝のオフセット

n : 旋回溝の数

θ_s : シート角 (45°)

d_s : 溝の等価直径

$$= \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H} \left[\begin{array}{l} W: \text{溝の幅} \\ H: \text{溝の高さ} \end{array} \right]$$

アダプタの拡大室の径 D と最狭部の距離 d との比 D/d と、拡大室の中心間距離 W と最狭部の壁の長さ(以下平行壁の長さと呼ぶ) F との比 W/F は一定の場合である。アダプタを設けることによって、旋回エネルギーが多少なりとも損なわれること、また、噴霧をほぼ2本に誘導収束する作用が働くため、粒径はアダプタのない場合に比べて大きくなる。この場合、スワール数 S が大きい範囲では、粒径が大きくなる度合いは 5 μ m から 10 μ m 程度であるが、スワール数 S が小さい領域では、その度合いはさらに大きくなる。全般的には、スワール数 S を大きくすると粒径は小さくなる傾向が顕著にでている。一方、分離角 θ_1 は、スワール数 S を大きくすると、これに伴って大きくなり、厚み角 θ_2 はやや小さくなる。いわゆる、噴霧は次第に扁平となる。噴霧の分離性から見ると、スワール数 S は、大きいほうが有利であるといえる。

4.2 アダプタ D/d の影響 図 8 に、アダプタ D/d と粒径および噴霧角(分離角 θ_1 、厚み角 θ_2)の関係を示す。スワール数 S と W/F は一定の場合である。 D/d が 1 の場合、噴霧は厚み角 θ_2 が 5° 程度で角度の広い扁平状となる。この場合、2本に収束するというより、比較的中心部にも噴霧が存在するだ円形噴霧となる。 D/d を次第に大きくすると噴霧の分離が進行し、

図 8 アダプタ D/d と平均粒径、噴射角の関係

分離角 θ_1 は小さくなる。また、これに伴って、厚み角 θ_2 は次第に大きくなる。本実験の範囲では、 D/d は、2 程度が良好な 2 方向噴霧となる。これは、平行部に連続する拡大室への噴霧の拡散作用が効果的に働くものと考えられる。

4.3 アダプタ W/F の影響 図 9 に、アダプタ W/F と粒径の関係を示す。スワール数 S と D/d は一定の場合である。また、この結果は、拡大室の中心間距離 W を一定として、平行壁の長さ F を変化した場合である。 W/F を小さくすると、アダプタ断面は次第に偏平形となるため、噴霧はこれに伴ってだ円状となり粒径も大きくなる。逆に、 W/F を次第に大きくすると、噴霧の分離が進行し粒径は小さくなる。一方、 $W=0$ なる場合を考えれば、直径 D (拡大室径) なる筒状通路が形成されることになるので、この通路への噴霧の衝突がなければ粒径は一定値に落ち着く。その値は 1 方向噴霧の粒径と同一となる。

4.4 噴霧パターンおよび粒径分布 図 10 に、2 ストリームインジェクタの噴霧写真と粒径分布を示す。平均粒径は、1 ストリームインジェクタと比較すると多少大きくなるが、旋回エネルギーが著しく損なわれることなく微粒化されている。すなわち、アダプタは、燃料分配の機能を十分果たしているといえる。

図 11 に、このインジェクタの噴射量分布を示す。測定は、インジェクタの下方 100 mm の位置に 10 mm 角の格子状受液皿を設けて行ったものである。燃料噴射は、間欠噴射であり、駆動周波数が 100 Hz で、パルス幅が 3 ms である。図 11 から明らかなように、比較的分配性能の良好な噴霧が得られている。

4.5 噴霧の内部構造 図 12 に、噴霧の内部構造解析結果を示す。図 12(a) は縦断面の解析結果を、

(b) は横断面の解析結果をそれぞれ示す。使用した燃料はシェルロースで、供給圧力は 294 kPa である。また、インジェクタの駆動パルス幅は、6 ms で 1 ショット噴霧の解析結果である。図 12 中のスケールは、噴霧の濃度を 64 色に分けて表示したもので、上側が密度が濃いことを示している。また、図 12(a) の丸数字は、

図 10 噴射の状況と粒径分布

図 9 アダプタ W/F と平均粒径の関係

図 11 受止め法により測定した噴射量分布

(a) 噴霧の縦断面構造

(b) 噴霧の横断面構造

図 12 噴霧の断面構造

横断面の解析位置を示している。図 12(a) から明らかなように、オリフィスから流出する噴流の高速成分がアダプタの下方、すなわち、図 12(a) に示す③の位置で分離している様子が示される。3 章で述べた三次元解析の結果は、この分離の様子を比較的表している。

5. エンジンテスト結果

本研究の 2 ストリームインジェクタと従来のピントル形インジェクタを 2 本用いた実験結果の中から、過渡性能と始動性能について述べる。表 1 に、実験に用いたおのおののインジェクタの仕様を示す。

図 13 に、過渡性能を示す。過渡性能は加速応答性で代表し、 N/L レーシングで評価した。評価内容は、絞り弁全開の後、エンジン回転数が 4000 min^{-1} に到達するまでの所要時間 T [ms] とした。また、絞り弁を開く前の条件は、エンジン回転数が 1200 min^{-1} 、点火時期は 15° BTDC 、空燃比は A/F が 14.7 で一定とし

表 1 供試インジェクタの仕様

Injector	Mean Droplet Diameter (μm)	Spray Angle (deg.)	Details of Injector tip
Pintle	170	12	
Two-Stream	101	$\theta_1=19$ $\theta_2=10$	$S=0.46$ $W/F=8.8$ $D/d=2$ $t=1.5\text{mm}$

図 13 各回転数までの到達時間 (加速応答性)

図 14 完爆時間 (-30°C での始動時間) の比較

図 15 完爆時間(30°Cでの始動時間)の比較

ている。また、絞り弁を開く速さは、全開まで 150 ms となるように調整した。なお、加速時の燃料補正は割込み噴射のみとした。

加速応答性は、吸気弁中央隔壁へ燃料の付着状態により、その良否が左右されるものと考えられるが、ピントル弁を 2 個用いた本実験結果では、隔壁への燃料の付着量が多いと推定される 2 ストリームのほうが応答性がよくなっている。これは粒径の依存度が比較的高いことを示しており、図 13 に示されるように、粒径を小さくすることによって到達時間が短くなっている。加速時の図示平均有効圧力 P_i の挙動の観察結果によれば、 P_i の立上りは速く、また、立上り後も変動が小さく安定した燃焼が得られている。到達時間は約 17% 短くなっている。

図 14 に、低温 -30°C 時における始動パルス幅と完爆時間の関係を示す。従来形のピントルインジェクタは完爆しなかったが、本研究の 2 ストリームインジェクタは 8 s で完爆している。また、目標とする完爆時間 20 s は、始動パルス幅が約 75 ms で満足できている。低温 -30°C の雰囲気下で噴霧観察によれば、ピントル

インジェクタの噴霧は棒状になるが、2 ストリームインジェクタは十分な広がりを見せており、表面張力や粘度の変化に比較的強いインジェクタといえる。

図 15 に、水温 30°C 時における始動燃料噴射量と完爆時間の関係を示す。2 ストリームインジェクタは、ピントルインジェクタに比べて、さらに噴射量の少ない領域で、しかも短い時間で完爆している。

以上のように、微粒化ならびに燃料分配性のよい 2 方向噴霧の形成によって、吸気弁中央隔壁への燃料付着が低減されるとともに、微粒化の向上によって、燃焼室内に効果的な混合気が供給されエンジン性能が向上できる。

6. 結 言

自動車用インジェクタに適用した上流旋回式インジェクタの噴霧の 2 方向化の検討と、エンジン性能への改善効果について検討を行い、本研究の範囲で以下の結論を得た。

(1) 旋回燃料を計量・噴射するオリフィス下部に、噴霧分割用のアダプタを装着することにより、微粒化ならびに燃料分配性のよい 2 方向噴霧を実現した。

(2) このアダプタは、平行壁とこれに連通する左右の拡大室を有する 1 ポート形(めがね形と称す)であり、噴流の分離は両者の位置関係を適宜選ぶことにより調整できる。

(3) 本研究の 2 ストリームインジェクタは、微粒化ならびに燃料分配性に優れ、始動性能や加速性能の向上等、エンジンの性能の向上に貢献できる。

文 献

- (1) Greiner, M., ほか 2 名, *SAE Paper*, No. 870124 (1987).
- (2) Nogi, T., ほか 3 名, *SAE Paper*, No. 880558 (1988).
- (3) 岩田・ほか 2 名, *自動車技術*, **41-4**(1987), 524.
- (4) 岡本・ほか 5 名, *機論*, **61-589**, B(1995), 3369.
- (5) 渡辺・ほか 3 名, *機論*, **61-589**, B(1995), 3377.
- (6) Ikegawa, M., ほか 2 名, *Proc. ASME*, FED-66 (1988), 161.
- (7) 辻, *燃焼機器工学*, (1975), 126, 日刊工業新聞社.