

# 特集 コモンレール噴射システムを用いた直噴ディーゼルエンジンの噴射ノズル形状に関する研究\*

## Research Concerning Injection Nozzle Shape for Direct-Injection Diesel Engine Using Common Rail Injection System

田中武裕

Takehiro TANAKA

佐藤康夫

Yasuo SATO

堀越修

Osamu HORIKOSHI

依田稔之

Toshiyuki YODA

柴田仁

Hitoshi SHIBATA

The influence of the nozzle hole characteristics on exhaust emission and power were analyzed from investigation of spray characteristics and flame behavior for a DI diesel engine with a common rail injection system. As a result of this experiment, the effect of the nozzle hole characteristics were clear, and we established the optimum nozzle characteristics that realize low emission and high power.

**Key words** : Diesel engine, Fuel injection, Engine performance, Common-rail, Nozzle hole, Visualization

### 1. 序論

直接噴射式ディーゼルエンジンは高効率な内燃機関として、幅広い分野で使用されている。特に乗用車用ディーゼルエンジンには、ガソリンエンジン同様、広範囲なエンジン回転数及び負荷における運転に加えて、比出力の向上、排気的大幅低減並びに従来以上の燃費向上が求められる。これら高次元な要求に対して、高圧噴射や制御自由度の高いコモンレール噴射システムが注目されている。

直接噴射式ディーゼルエンジンでは、いうまでもなく燃料噴霧特性が燃焼の良否を左右する。燃料噴霧特性は燃料噴射ノズルの噴孔形状に密接に関係し、ノズル径<sup>1)</sup>やノズル内部流動<sup>2)3)</sup>などが燃料噴霧特性に与える影響やその噴霧構造<sup>4)5)</sup>に関する研究が報告されているが、コモンレール噴射システムにおける噴霧特性に関して論じたものは少ない。

本研究ではコモンレール噴射システムを用いた直噴ディーゼルエンジンにおいて、噴孔径や流量係数など噴射ノズルの形状を決定する基本的要件が噴射ノズルから噴射される噴霧特性とどのように関係し、エンジン性能がどう変化するかを、燃焼室内の観察結果も含めて解析した。その結果からエンジンの出力向上と排気低減の両立が可能な噴射ノズル形状について定性的な考察を行った。

### 2. 実験装置

#### 2.1 実験エンジン及び燃料噴射装置

実験にはTable 1に示す排気量3Lの直接噴射式ディーゼルエンジンを用いた。使用したコモンレール噴射システムは、インナーカム式のサブライポンプと一定

高圧の燃料を保持するコモンレール及び電磁駆動式インジェクタから構成される。噴射圧の調整は吸入調量方式により行い、最大135MPaまで昇圧した。また、噴射時期と噴射量の調整は、電磁駆動式インジェクタへの通電タイミングと通電時間によって行った。

実験に使用したエンジンの1気筒当たりの排気量は0.75Lとなる。そこで、噴射ノズルは、この排気量のディーゼルエンジンで用いられる一般的な噴孔形状を基準とし、排気低減に有利と考えられるVCO (Valve Covered Orifice) 形状を選択した。Table 2に噴射ノズル諸元を示す。また、流量係数の変更は、噴孔入口のR形状を変化させて行った。

Table 1 Engine specification

Displacement	3L
Number of cylinders	in line 4
Compression ratio	18.5

Table 2 Nozzle hole specifications

Nozzle type	VCO (Valve Covered Orifice)				
Hole number	6				
Nozzle cone angle (deg)	155				
Hole diameter(mm)	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190
Discharge coefficient	0.69	0.73	0.77	0.80	
Hole length(mm)	0.5	0.8	1.1	1.3	1.49

\* Translated and reprinted from FISITA 2002 Proceedings with permission from FISITA Conference Office

Table 3 Experimental condition of engine performance evaluation

	Low speed torque condition	High speed output condition	Exhaust emission evaluation condition
Engine rev. / load	1200rpm / 100%	3600rpm / 100%	1750rpm / 25%
Injection pressure	70MPa	135MPa	73MPa

2.2 実験条件

Table 3に実験条件を示す。出力評価点として1200rpm全負荷, 3600rpm全負荷を選択し, 排気性能評価点として1750rpm25%負荷を選択し, 幅広い領域で性能調査を行った。また, 排気性能調査はスモーク濃度が一定となるようにEGR率を調整し, NOx排出重量一定とした場合のパーティキュレート排出重量を求めて行った。

2.3 噴霧特性実験装置

エンジンシリンダ内の圧縮上死点付近における空気密度と等価な, アルゴンガス0.88MPaに加圧した高圧容器内で噴霧特性を調査した。調査項目をTable 4に示す。ペネトレーションと噴霧角はFig. 1に示すように, 噴射開始後0.6ms後の噴霧写真より計測した。また, 燃料粒径は約1000個の燃料粒子を計測してザウタ平均粒径 (SMD) として求めた。Table 5に示すように, 高速出力運転時の噴射条件として135MPaを, 低速トルク及び排気性能運転時の噴射条件として70MPaの噴射圧と各々の噴射量を選択して燃料を噴射した。

Table 4 Spray characteristics evaluation method

Penetration (mm)	Direct measurement on photograph
Spray cone angle (deg)	↑
SMD(μm)	PDPA

Table 5 Experimental condition of spray evaluation

	High speed output condition	Low speed torque condition Emission performance condition
Injection pressure	135MPa	70MPa
Injection quantity	90mm <sup>3</sup> /st	25mm <sup>3</sup> /st

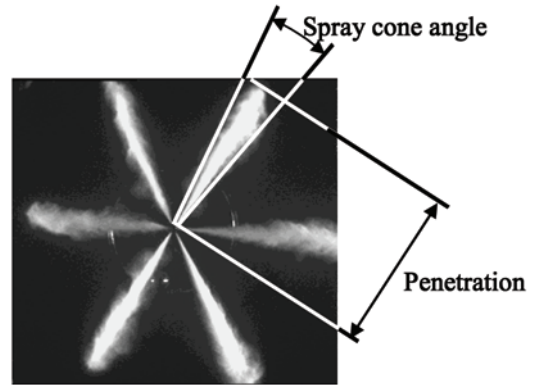


Fig. 1 Photograph of spray (inside of high pressure vessel with 0.88MPa of argon gas)

2.4 燃焼観察装置

噴霧特性が燃焼に与える影響を明らかにするため, Fig. 2に示すファイバースコープによりシリンダヘッド直上からシリンダ内燃焼観察を行った。ファイバースコープは撮影用ファイバーの外周に照明用ファイバーを配した一体構造のものを用いた。一体構造を実現するため解像度3万画素, 直径1mmの高解像度かつ細径な撮影用ファイバーを用いた。シリンダヘッドは, 圧縮比及び燃焼室内の気流への悪影響を最小限にとどめる改造内容とした。観察は燃焼室内における6噴霧中の2噴霧を観察範囲に入れ, スワールと噴霧の関係が明らかになるような工夫をした。本装置によって, 3600rpmの全負荷までの連続運転を行い, より実際に近い燃焼現象の撮影を試みた。

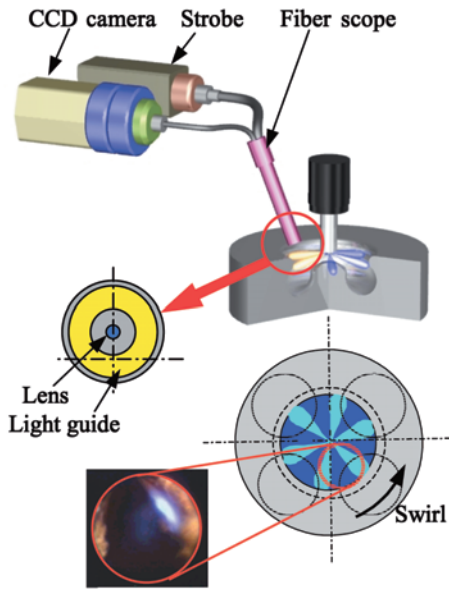


Fig. 2 Visualization system

### 3. 結果

#### 3.1 噴孔形状とエンジン性能の関係

噴孔形状が噴霧のペネトレーション，噴霧角，微粒化等に大きな影響を与えることは周知のところ，実験式<sup>4)5)</sup>も提唱されている．本研究においてもTable 2

の限定した諸元の中で，噴孔形状と噴霧特性の関係を解析した．噴孔径，流量係数，噴孔長がペネトレーション，噴霧角，燃料粒径に与える影響は，これまでの多くの報告と同様の結果を示し，コモンレール噴射システム特有の傾向はなかった．

この噴射ノズルを用い，噴霧特性とエンジン性能の関係を調査した．結果をFig. 3に示す．

Fig. 3左に示すように噴孔径を拡大すると低速トルク，高速出力，パティキュレート排出重量は増加した．Fig. 3中央に示すように流量係数を増加すると低速トルクは減少したが，高速出力は増加した．また，パティキュレートは減少した．Fig. 3右に示すように噴孔長を延長すると低速トルクは減少したが，高速出力は増加した．パティキュレートは減少した．

噴孔形状の変化に対し，低速トルク，高速出力及びパティキュレート排出重量はほぼ比例的な変化を示すが，図左の噴孔径に対する高速出力や図右の噴孔長に対するパティキュレート排出重量はこれと異なる変化を示す．すなわち，噴孔形状が直接的にエンジン性能に影響しないことがわかる．そこで，噴霧ペネトレーションや噴霧角などの噴霧特性とエンジン性能との関係を解析した．

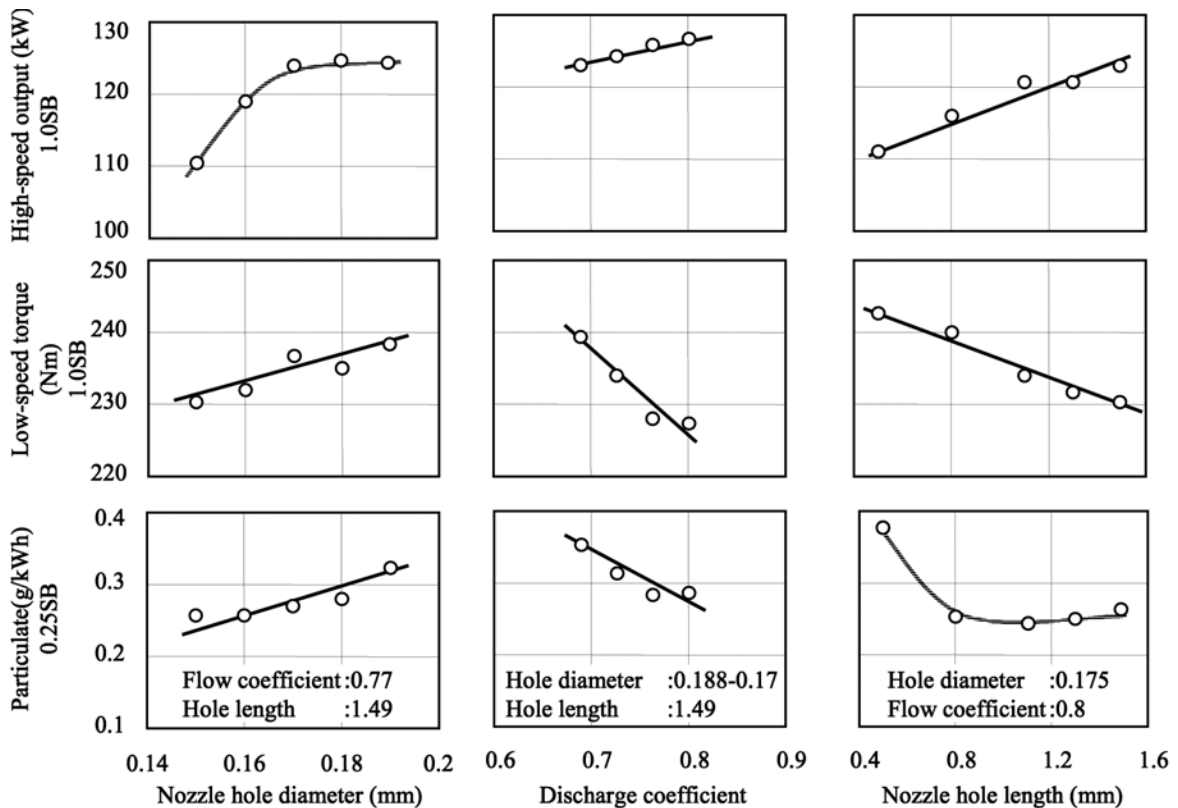


Fig. 3 Influence on engine performance by nozzle specifications

3.2 噴霧特性がエンジン性能に与える影響

噴霧特性とエンジン性能の関係をFig. 4に示す．図中Rで示すのはそれぞれの相関係数であり，各噴霧特性中最も相関が強いものを枠線で囲って示す．結果は次のようになった．

- 低速トルク：噴霧角（相関係数0.79）
- 高速出力：ペネトレーション（相関係数0.68）
- 排気性能：噴霧粒径（相関係数0.78）

これらから，それぞれのエンジン性能は，ある特定の噴霧特性に強く影響を受けることが分かる．

3.3 噴霧特性と燃焼挙動

シリンダ内の燃焼状況を直接観察した．同時計測したシリンダ内圧力から指圧線図解析も行った．

燃焼観察はエンジン性能への影響が最も強く表れた噴霧特性となる噴射ノズルを選択して行った．低速トルク点においては噴霧角のみが異なり，ペネトレーション，微粒化は同等となる噴孔諸元を選択した．同様に高速出力点においてはペネトレーションのみが異なる噴孔諸元を，排気性能点においては微粒化のみが異なる噴孔諸元を選択した．

(1) 低速トルク点

低速トルクに対し強い相関を示した噴霧角を変更した場合の燃焼状況をFig. 5中段に，その時の熱発生率をFig. 6に示す．クランク角度5° ATDCにおいて，噴霧角が狭い場合は，広い場合に比べて火炎輝度が弱く，スモークの発生が多いと推察される．熱発生率の比較においても，噴霧角が狭い場合の燃焼が緩慢であることが分かる．

(2) 高速出力点

高速出力に強い相関があったペネトレーションを変更した場合の燃焼状況をFig. 5中段に，その時の熱発生率をFig. 6中央に示す．クランク角度15° ATDCにおいて，ペネトレーションが強い場合，火炎は燃焼室壁面に衝突後，縦に旋回して燃焼室中央部にまで伸長している様子が伺える．熱発生率の比較においても，ペネトレーションが強い場合は噴射時期10° ATDC付近の燃焼が最も活発であることが分かる．

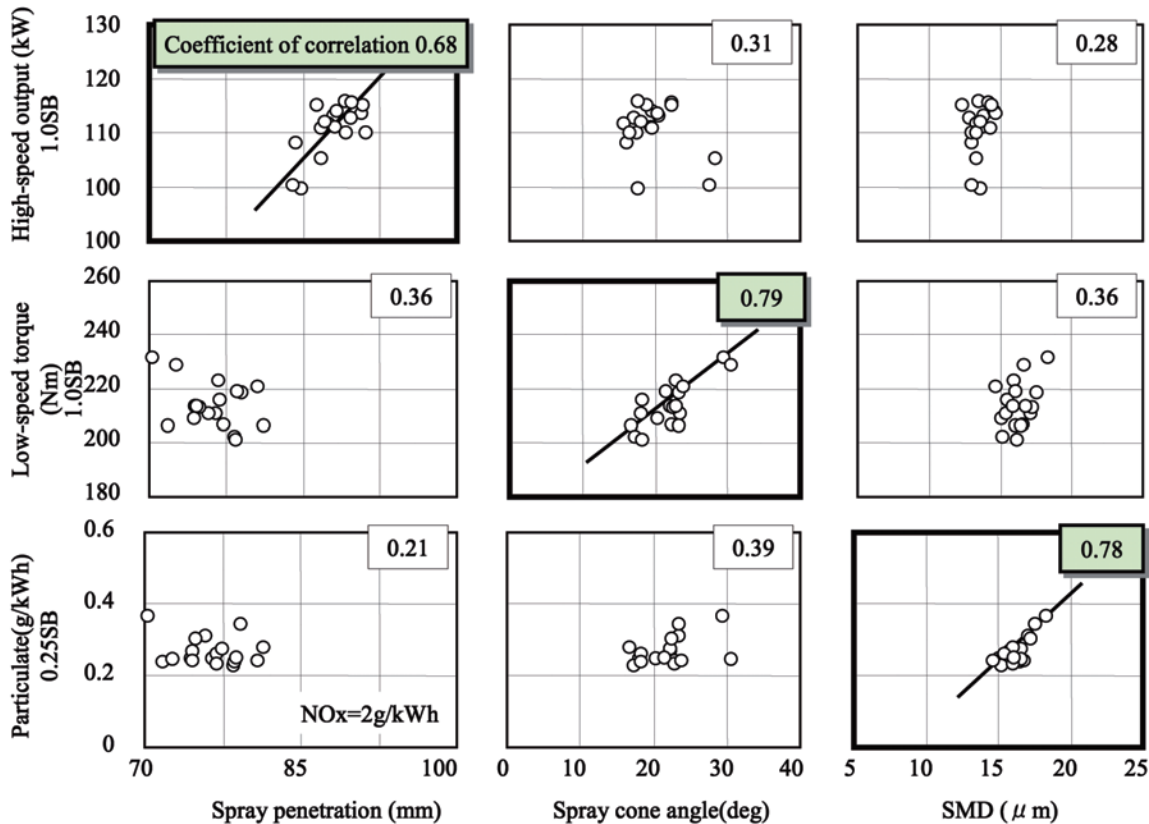


Fig. 4 Correlation between spray characteristic and engine performance

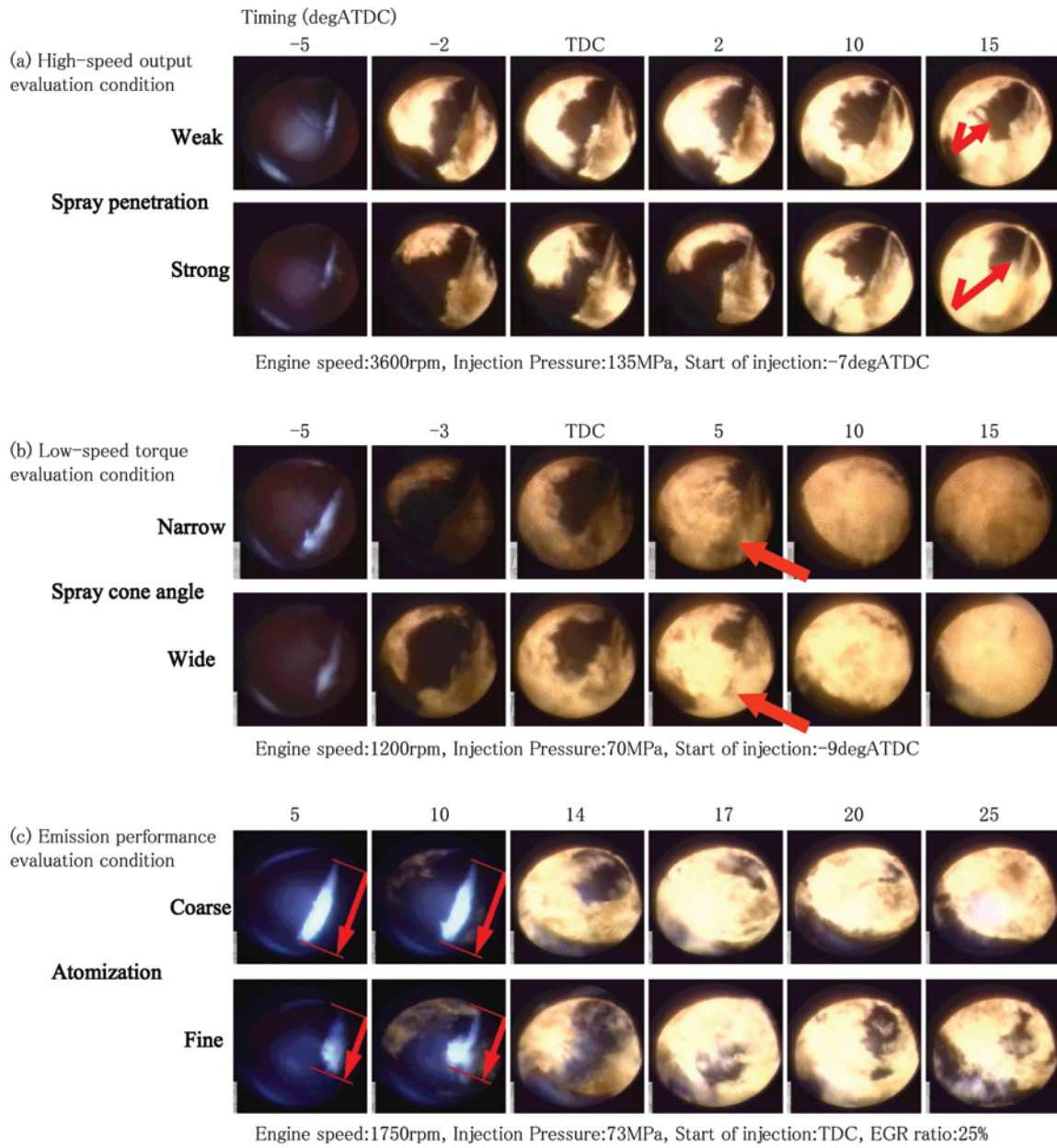


Fig. 5 Influence on spray and combustion behavior in combustion chamber by characteristic

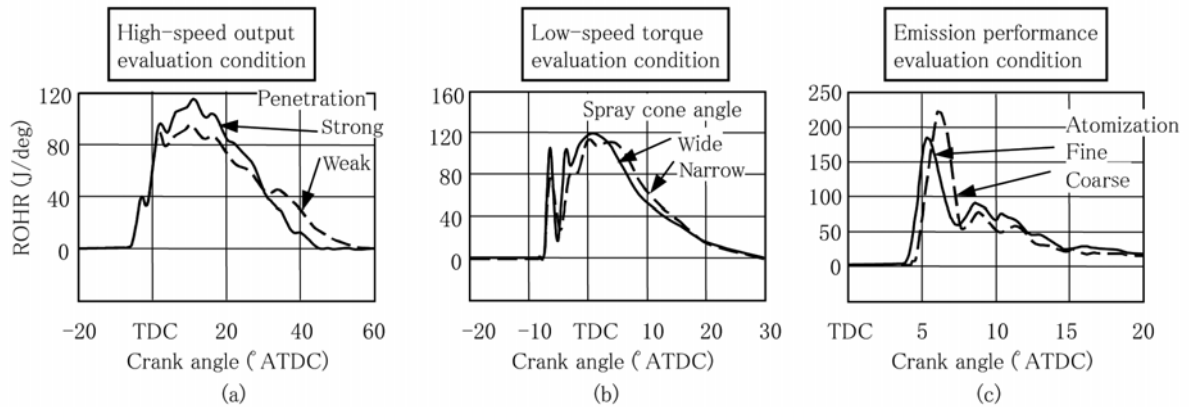


Fig. 6 Heat release rate when changing spray characteristic

(3) 排気性能点

排気性能に強い相関を示したザウタ平均粒径 (SMD) を変更した場合の燃焼状況をFig. 5中段に、熱発生率をFig. 6に示す。クランク角度5及び10° ATDCにおいて、ザウタ平均粒径が小さい場合、噴霧の長さはザウタ平均粒径が大きい場合に比べて、短い。高压容器内での噴霧特性調査における両者のペネトレーションに差はなく、この噴霧長の違いはシリンダ内における蒸発の違いと推測できる。すなわち、照明光で散乱する燃料液敵量が異なることによって、見かけ上の噴霧の長さが短く撮影されたものと推測する。熱発生率の比較において、ザウタ平均粒径が小さい場合は、大きい場合に比べて着火開始が早く、蒸発が進んでいる様子が伺える。

4. 考察

4.1 低速トルクと高速出力に影響する噴霧特性の違い

ディーゼルエンジンでは、スモークによる出力制限を受ける。従って出力を向上させるには、空気と燃料の積極的混合を行いスモークの発生を抑制する必要がある。燃焼室内での混合には、スワールやスキッシュといった気流を利用するものと、噴霧自身のエネルギーによる混合が考えられる。

低速ではスワール回転速度が相対的に遅くなることから、スワール流に随伴して燃焼室内に広がる燃料噴霧量が減少する。このため、燃焼室内に局所的な過濃混合気が形成される。また、噴霧着火後においても、継続して燃料が噴射され、火災中に燃料噴霧が突入する。このことは、燃料の蒸発による酸化潜熱の影響を強く受けることとなり、火災温度の低下を招く。これらのことが相まって、低速ではスモーク発生の多い燃焼形態を辿るものと考えられる。従って、噴霧角の拡大は噴霧飛翔エネルギーをスワール回転と同方向に振り向けることができ、燃焼室内に広がる燃料噴霧量を増加させることになる。このことが、スモークの生成を抑制し、トルクの向上に至った主たる理由であり、噴霧角の大小が低速トルクに強い相関を示したのも、このような現象からと推察する。

一方、高速では低速と異なり、スワール回転速度が早く、燃料噴霧はスワール流に随伴して燃焼室内に十分に広がる。従って、噴霧角によるスワール回転方向への噴霧の振り向けは、燃焼に大きな影響を示さない。

しかし、噴霧の直進性であるペネトレーションが弱いと、スワール流に随伴された燃料が燃焼室壁面近傍に停滞し過濃混合気を形成する。これに対し、ペネトレーションが強い場合は、スワール流に影響されずに噴霧が十分に伸長して燃焼室壁面まで到達し、Fig. 7示すように燃焼室断面形状に沿った方向へ広がり、局所的な過濃混合気の形成が抑制される。このことがスモーク生成量を減少させ、出力の向上に至った主たる理由であり、ペネトレーションの強弱が高速出力に強い相関を示すものと考えられる。

このように、燃焼室内の気流及び噴霧の飛翔エネルギー状態によって、エンジン性能に影響する噴霧特性が大きく異なる。

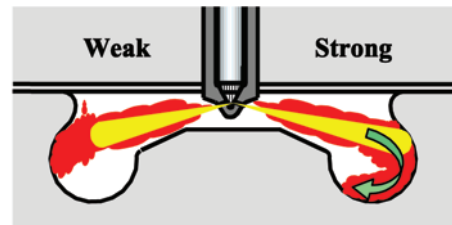


Fig. 7 Image of fuel dispersion by penetration

4.2 燃料粒径と排気性能の関係

排気性能を検討した低負荷では噴射する燃料量が少なく、前述した低速及び高速の全負荷のような噴霧飛翔エネルギーの影響や気流に関連した影響は少ないと考えられる。

ザウタ平均粒径が小さい場合、燃焼観察で見たように、燃料噴霧の蒸発は早く、大きい場合に比べて、蒸発部分での空気との混合が進む。また、未蒸発燃料噴霧部分が燃焼室壁面に衝突する割合も減少する。これらから、スモークの抑制と未燃燃料分の排出が減少し、これが、排気性能に対し燃料粒径が強い相関を示した主要因と考える。

4.3 高出力と低排気及び低速トルク向上を同時に実現するための噴射ノズル形状のあり方

高速出力の向上にはペネトレーションの強化、排気低減には燃料微粒化の向上が有効である。ペネトレーションを強化するには、噴孔径の拡大や流量係数の向上が必要である。また、燃料の微粒化を向上するには、噴孔径の縮小と流量係数の向上が必要である。

Fig. 8は噴孔形状を変更した場合の高速出力及び低速トルクとパティキュレート排出重量の関係と、その時の噴霧特性を示すものである。流量係数を0.77一定のまま噴孔径を縮小した条件と、流量係数を0.69から0.84に向上させ前者と同様に噴孔径を縮小した条件である。流量係数を一定のままノズル噴孔径を縮小していくと、パティキュレート排出重量の低減が飽和し高速出力は大幅に減少する。これは、噴孔径縮小によって噴霧のペネトレーションが低下するためである。これに対して、噴孔流量を一定に保ったまま流量係数を向上させて噴孔径を縮小すると、前者に比べて、より低パティキュレート排出重量のまま高速出力を維持できる。これは噴孔径縮小による燃料微粒化の効果を維持しつつ、噴霧ペネトレーションも十分に確保できるためであり、高出力と低排気を両立する手段といえる。しかし、低速トルクは両者ともに低下してしまう。これは、噴孔径の縮小及び流量係数の向上が噴霧角を減少する背反の関係にあたるためである。

そこで、噴霧ペネトレーション、燃料微粒化を悪化させずに噴霧角の拡大が可能な噴射ノズル形状が求められる。しかし、噴孔径の拡大や低流量係数化による噴霧角の拡大はペネトレーション、微粒化の悪化を招く。また、噴孔長短縮による噴霧角拡大もペネトレーション、微粒化向上を阻害することから、従来の噴孔形状では解が存在しない。これを解決する一つの手段として、流量係数をさらに向上した上での噴孔長短縮

が考えられる。流量係数を従来以上に高めることで燃料噴霧の持つ運動エネルギーが増大し、噴霧の噴射方向と半径方向すなわちペネトレーションと噴霧角の増加を狙えると考えられる。従来以上に噴射ノズルの流量係数を高める手段として、ノズル噴孔の出口側より入口側の径を拡大させたテーパ噴孔が有効であると考えられる。テーパ噴孔の効果について事項にて詳細に述べる。

#### 4.4 流量係数向上手段としてのテーパ噴孔

ノズル噴孔の流量係数を向上させるため、従来はFig. 9(a)に示すように噴孔入口に丸みを持たせた形状が採用されている。これに対し、Fig. 9(b)に示すテーパ噴孔はノズル噴孔の出口側より入口側の径を拡大させ、噴孔内での損失を抑制し流量係数の向上を狙う手法である。本論文ではテーパ度を次式で定義する。

$$\text{テーパ度} = \frac{\text{入口径} - \text{出口径}}{\text{噴孔長}}$$

噴孔の流量係数向上メカニズムを解析するため、噴孔内流れの数値計算を行った。Fig. 10にその結果を示す。ストレートノズルでは噴孔入口部において流れの剥離による圧力低下が発生している。流量係数は0.69と低い値となった。入口部に半径0.06mmの丸みを持たせることで入口部での圧力低下が緩和され流量係数は0.80に向上した。一方、テーパ噴孔においても、

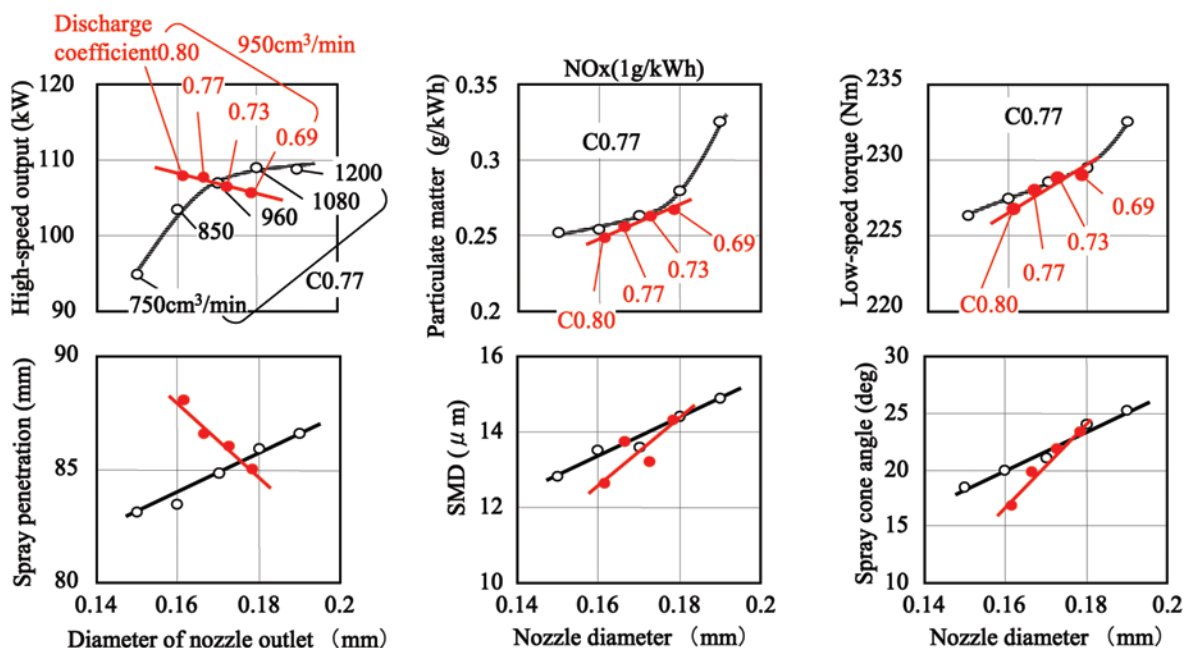


Fig. 8 Nozzle hole specification required to realize high speed output, low speed torque and low particulate

入口R付噴孔と同様に入口部での圧力低下が緩和されており流量係数は0.74に向上した。このことは入口R付噴孔とテーパ噴孔は、噴孔の形状は異なるが流量係数向上のメカニズムは同じであることを示している。

更に噴孔の入口Rとテーパを組み合わせると、流量係数向上の効果はさらに向上し、従来の入口Rでは不可能である流量係数0.84を達成することが可能となる。

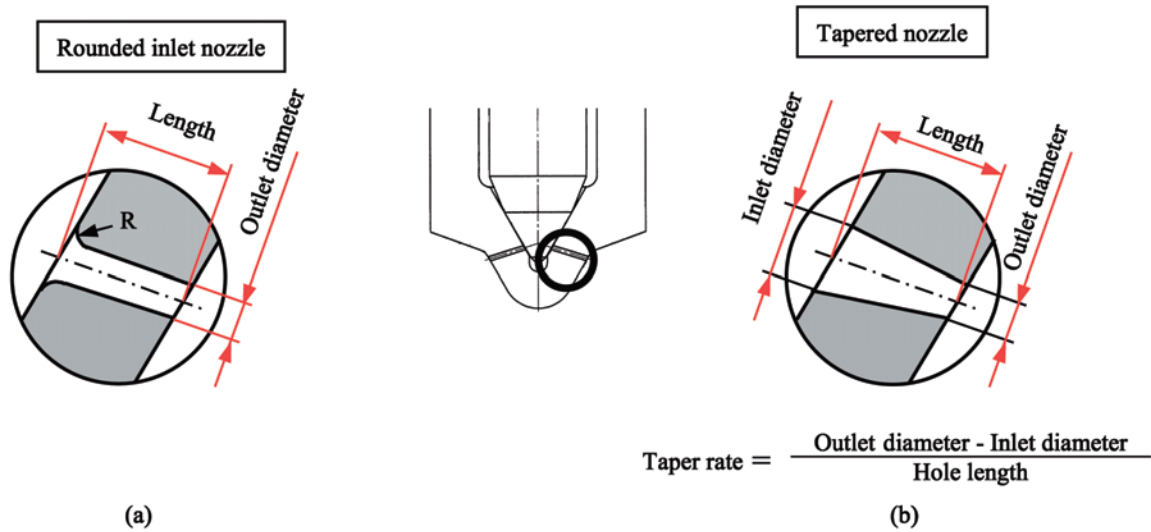


Fig. 9 Measures to improve nozzle discharge coefficient

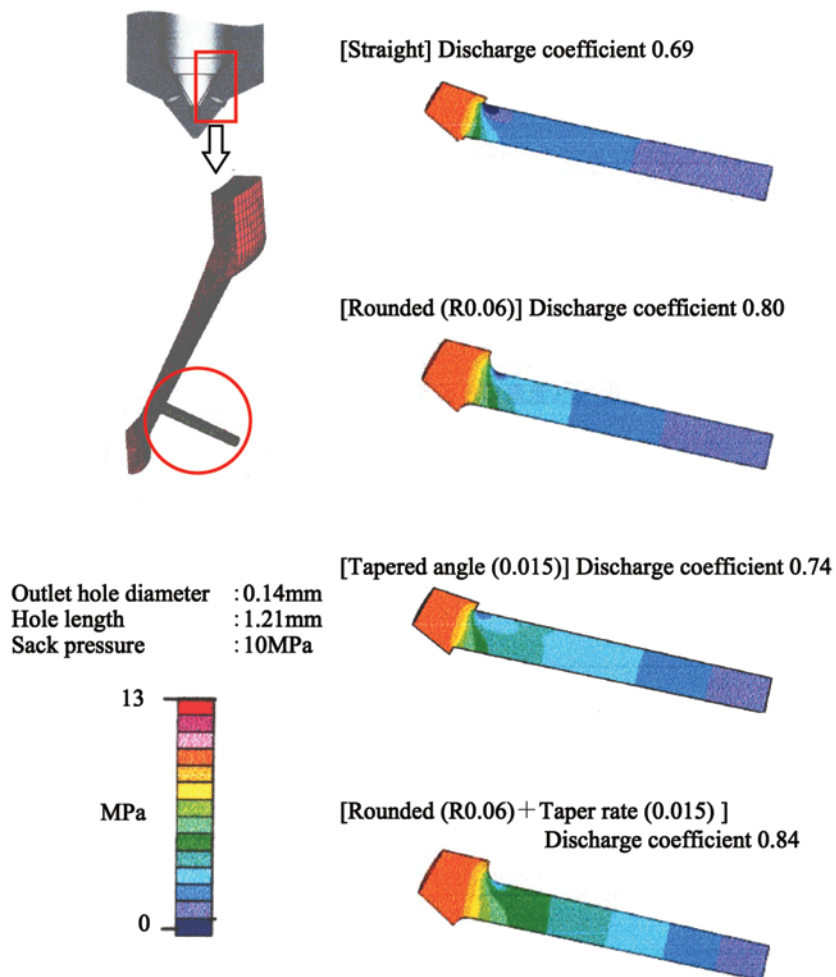


Fig. 10 Pressure distribution in nozzle hole



4.5 テーパー噴孔ノズルの噴霧特性とエンジン性能

噴孔のテーパ化と従来の噴孔入口R付による流量係数向上のメカニズムが同じであることは、噴霧特性に与える影響も同等と考えられる。噴霧特性を高圧容器で調査した結果をFig. 11に示す。供試ノズルの噴孔諸元はTable 5に示す。Type Aは入口R付のみとテーパのみによって、流量係数を0.726にそろえた諸元である。Type Bはテーパ度を変化させ、噴孔入口Rの半径を調整することで、流量係数を0.809にそろえた諸元である。さらにType Cはテーパ加工、入口R付を加工限界まで行い、流量係数を0.841まで高めた諸元である。

Type Aの入口R付噴孔とテーパ噴孔の噴霧特性に差異はなかった。また、Type Bの入り口R付とテーパを組み合わせ、流量係数をそろえた噴孔は、Type Aに比べ流量係数が向上したため、噴霧のペネトレーションは増加、微粒化は向上、噴霧角は縮小した。しかしType Aと同様に、テーパ度変更時においても流量係数をそろえてしまうと噴霧特性に変化は現れなかった。さらに、流量係数を0.841にまで高めたType CではType A, Bに比べ噴孔径が縮小しているにもかかわらず、噴霧ペネトレーションは増加し微粒化は向上した。

以上の噴霧特性を持つノズルを使用し、エンジン性能を調査した結果をFig. 12に示す。テーパ噴孔を使用した場合においても、3.2項で述べたように、各エンジン性能は特定の噴霧特性と相関が強く、ペネトレーションが強くなると高速出力が増加し、微粒化向上によりパーティキュレート排出量は減少した。一方、低速トルクは噴孔諸元変更の影響が少なかった。これはFig. 4に示す噴霧角の変化(Table 1のノズル)に比べ、Table 5のノズルでは噴霧角の変化量が少なかったことが原因である。

このように流量係数をそろえることで、噴孔入口R付とテーパ化の差異は無い。従って、テーパ噴孔は従来の入口R付以上に流量係数を向上させる場合の手段として有効である。2手段を組み合わせることで、従来以上の高流量係数化が可能となる。4.3項で述べたように、高流量係数化は噴霧の飛翔エネルギーを高めることが可能であるため、噴孔長短縮と組み合わせることにより、強噴霧ペネトレーション、広噴霧角及び燃料微粒化向上が高次元で両立可能と考える。

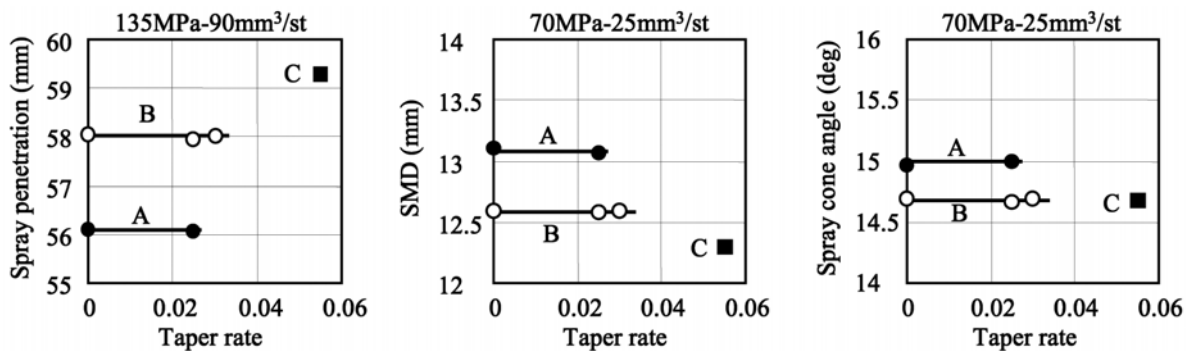


Fig. 11 Spray characteristics of tapered nozzle

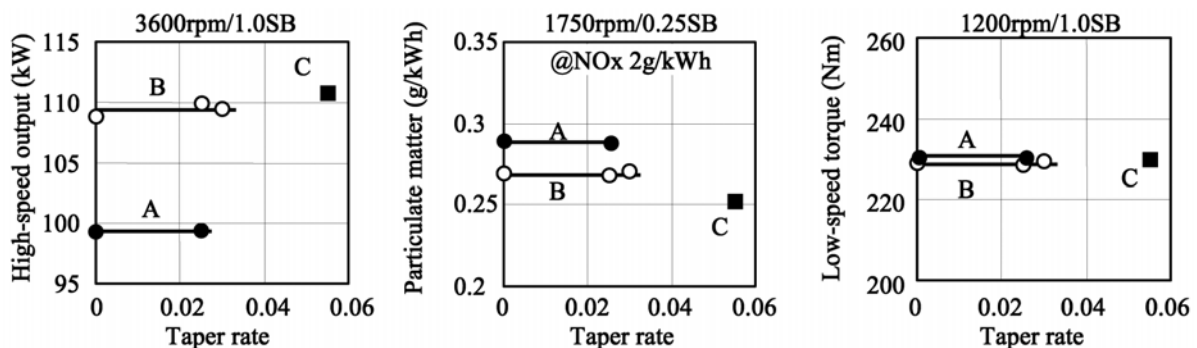


Fig. 12 Engine performance of tapered nozzle

## 5. 結論

コモンレール噴射式システムを用いた直噴ディーゼルのノズル噴孔諸元が、噴霧特性、エンジン性能に与える影響を明らかにした。

- (1) 低速トルクの向上には噴霧角の拡大、高速出力の向上にはペネトレーションの強化、排気性能の向上には微粒化向上が有効である。
- (2) シリンダ内の燃焼観察、指圧線図解析を行い、低速全負荷時の噴霧角拡大は燃焼室のスワール流方向への噴霧拡散を促進し、高速全負荷時のペネトレーション強化は強スワール下においても噴射方向への噴霧飛翔を確保でき、燃焼室内の空気と燃料との混合がより進むことによってスモークを抑制できる。中速低負荷時における微粒化向上は燃料の蒸発を促進し、燃料の壁面付着と燃料の拡散向上によりパテイクキュレートを減少できる。

- (3) 高出力と低排気の両立には、小噴孔径化と流量係数向上の組み合わせが有効であるが、低速トルク低下の問題がある。これを解決する方法として、高流量係数噴孔形状のテーパ噴孔を基本とした短噴孔長化による噴霧角拡大が有用なことを示唆した。

### <参考文献>

- 1) 池上 他, 機論B, 59-568 (1993), pp.346-351.
- 2) 金 他, 自技会論文集, Vol.29 No.4 (1998), pp.29-34.
- 3) 山本 他, 自技会論文集, Vol.31 No.1 (2000), pp.11-16.
- 4) H. Hiroyasu, et al., SAE Paper 900475
- 5) 今西 他, 14回内燃シンポジウム講演論文集(1997), pp.43-48.

### <著者>



田中 武裕  
(たなか たけひろ)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第4研究室  
エンジン部品の製品開発に従事



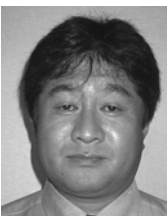
佐藤 康夫  
(さとう やすお)  
トヨタ自動車(株)  
パワートレーン本部 第2パワート  
レーン開発部  
ディーゼルエンジンの燃焼技術研究  
に従事



堀越 修  
(ほりこし おさむ)  
トヨタ自動車(株) 第2エンジン  
技術部  
ディーゼルエンジン適合(先行, 量  
産開発)に従事



依田 稔之  
(よだ としゆき)  
ディーゼル噴射技術2部  
ディーゼル噴射系部品の開発に従事



柴田 仁  
(しばた ひとし)  
ガソリン噴射技術部  
ガソリン直噴インジェクタの開発・  
設計に従事