

# 特集 噴流活用ガソリン直噴エンジンとインジェクタの開発\*

## Development of a DISI Gasoline Engine Using a Fan-shaped Spray Injector

吉丸清考 後藤守康 橋本 晋 野村 啓  
 Kiyotaka YOSHIMARU Moriyasu GOTO Susumu HASHIMOTO Hiroshi NOMURA

This paper describes a new nozzle developed for a novel gasoline direct injection engine of TOYOTA. The novel engine has an advanced concept to improve combustion gas homogeneity and combustion velocity which takes full advantage of the enhanced flow in the cylinder and the jet flow of the injector. This combustion concept requires extremely fine fuel atomization and a low penetration distance of sprayed fuel in the cylinder. Our newly developed nozzle has demonstrated superior performance through a drastic reduction of both oil dilution and the quantity of atmospheric particulate matter by effectively utilizing the fuel pressure energy including the use of the cavitation occurring at the inlet of the nozzle hole and the suppression of the vortex flow in the sac.

Key words : Heat Engine, Spark Ignition Engine, Mixture Formation/Gas Flow, DISI, Spray Jet, Fuel Injector

### 1. まえがき

近年、自動車用ガソリンエンジンに対する低燃費、動力性能向上、低エミッションの要求はますます厳しくなっており、これらの要求に応えるため筒内直噴の採用が進んでいる。市場への導入当初、ガソリン筒内直噴エンジンでは省燃費効果の大きい成層リーン運転が行われていたが、排気規制の強化に伴い大部分は均質ストイキ運転へと変更されてきた。ただし、エンジン始動直後の触媒暖機時は成層リーン運転が行われ、低エミッション化に貢献している。

一方で、ガソリンエンジンの省燃費化のため、筒内流動の強化により大量EGR燃焼を実現する動きが広まっている。また、欧州における粒子数規制導入など、筒内直噴の課題である粒子状物質（以下PM）の排出規制が強化されている。そこで、本報ではまず、このような動向に対応すべくトヨタ自動車にて開発した新たな筒内直噴のコンセプトと、このコンセプトに適応すべくデンソーにて開発した燃料噴射弁のノズル諸元と噴霧特性の関係について紹介する。本コンセプトでは、噴霧の噴流を筒内流動強化に積極的に活用することで燃焼速度と混合気均質性を向上させ、噴孔の入口で発生するキャビテーションの活用や、サック内の渦流れの抑制などにより、燃料の持つ圧力エネルギーを有効活用し、微粒化、低ペネトレーション化を実現した噴射弁によりPM粒子数とオイル希釈を大幅に低減した。

### 2. コンセプト概要

Fig. 1, Table 1に新コンセプトの概要を示す。吸気ポートは、高比出力を狙った<sup>1)</sup>大流量低タンブルポートから、筒内流動強化を狙い高タンブルポートへと変更した。また、噴霧は、広い空間分散を狙った縦ダブルスリット噴霧<sup>1)</sup>(Fig. 2上)から、気流との同調性に優れPM粒子数低減にも有利なファンスリット噴霧<sup>2)</sup>(Fig. 2下)へと変更した。これまでも下向き噴射角 $V$ (Fig. 3)を小さくすると混合気均質性が向上するという知見があったが、成層触媒暖機運転時に高い燃焼安定性が得られる<sup>3)</sup>ことから $V=50^\circ$ 程度としてきた。これに対し、新コンセプトでは、吸気タンブル流と同調する方向を狙い(Fig. 3)、下向き噴射角を $V=29^\circ$ と小さくした。同時に、高噴射圧化と噴孔改良を行い、微粒化向上とペネトレーション適正化により、筒内燃料付着を低減し、触媒暖機運転時の燃焼安定性も確保した。以下、コンセプトの成り立ちを解説する。

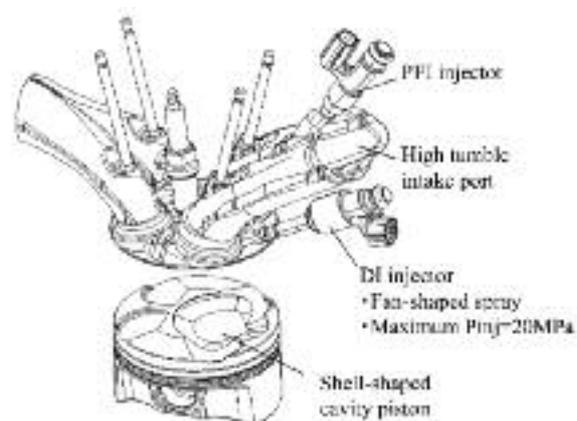


Fig. 1 Overview of the new concept

\* (社)自動車技術会の了解を得て、2013年12月18日自動車技術会シンポジウムNo.9-13より一部加筆して転載

Table 1 New concept engine specification

	Current product	New Concept
Cylinder bore	94mm	←
Stroke	83mm	←
Design	V6	←
Intake port	High flow	High tumble
Tumble ratio	0.47	1.01
Injection system	DI+PTI	←
DI maximum P <sub>inj</sub>	12MPa	20MPa
DI spray type	Dual-fan	Single-fan
Piston	Shell-shaped cavity	←

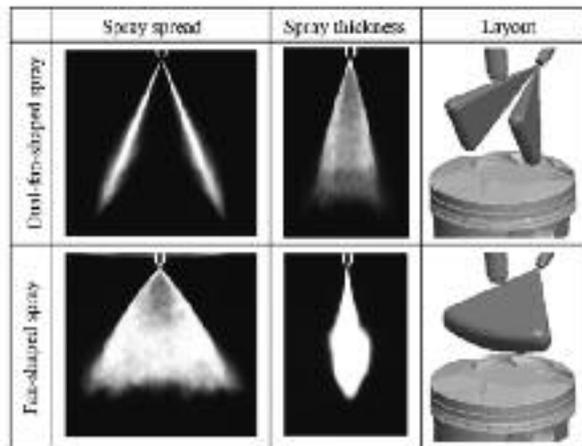


Fig. 2 Configuration of DI spray

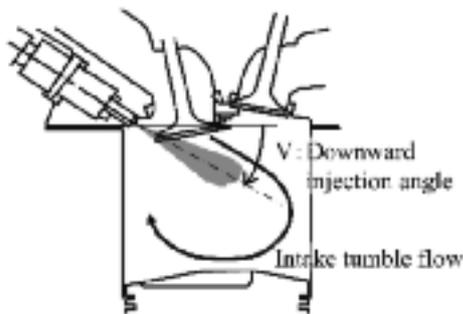


Fig. 3 DI injection direction

### 3. 噴流活用による燃焼改善

#### 3.1 噴射方向の適正化

筒内流動の強化に筒内直噴の噴流を活用するため、噴射方向の適正化を行った。これまでV=50°程度に設定してきたファンスリット噴霧の下向き噴射角を、吸入空気流に同調できる方向を狙ってV=29°とした。この効果をCFDにより評価した。下向き噴射角をV=29°とすることで、吸気ポートから流入する気流に噴流を同調させることができ (Fig. 4上)、タンブル比を増加させる効果が得られた (Fig. 5)。これにより、ピストン上昇に伴いタンブル流が潰され、局所渦に変換され

ることで生じる圧縮行程後期の乱れ強度が増加し (Fig. 4下, Fig. 6), 混合気の均質度も向上する結果となった (Fig. 7)。なお, Fig. 7中の混合気均質度は、筒内混合気濃度の空間標準偏差を空間平均の濃度で除して1から減じた値であり、完全均質で1となる指標である。

次に、実機で噴射方向適正化の効果を確認した。下向き噴射角をV=29°とすることで、熱発生速度が増加し (Fig. 8), 燃焼期間が短縮した (Fig. 9上)。これは、圧縮行程後期の筒内の乱れ増加により、乱流燃焼速度が増加したためと考えられる。また、排気中CO濃度の減少から (Fig. 9下), 混合気均質性も向上したことが分かる。これらの効果により、下向き噴射角をV=49°から気流と同調できるV=29°とすることによって、出力空燃比での全負荷性能は約2%向上した (Fig. 9上)。

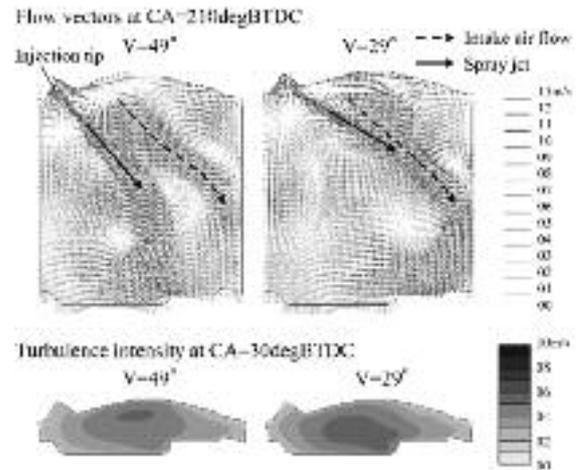


Fig. 4 Intake flow and turbulence intensity

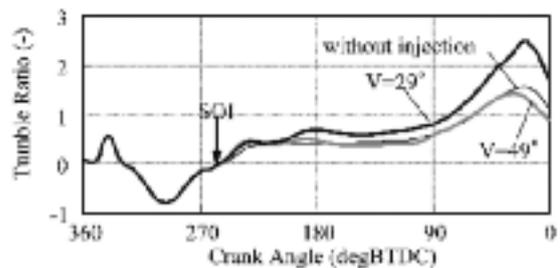


Fig. 5 Comparison of tumble ratio

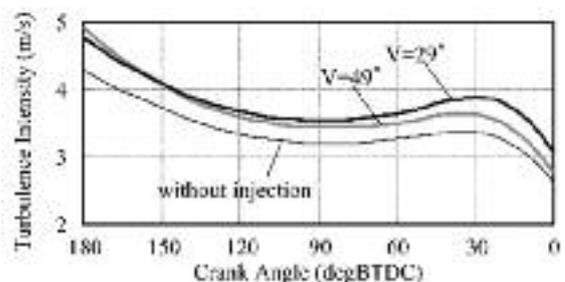


Fig. 6 Comparison of turbulence intensity

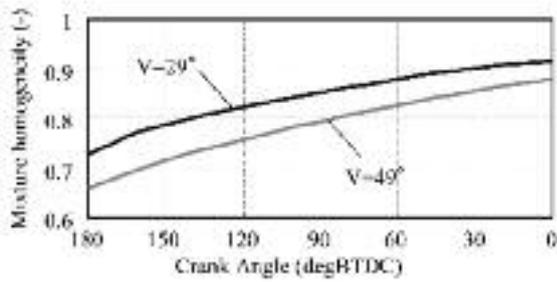


Fig. 7 Comparison of mixture homogeneity

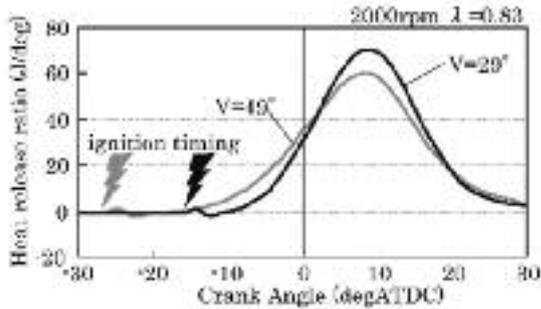


Fig. 8 Comparison of heat release ratio

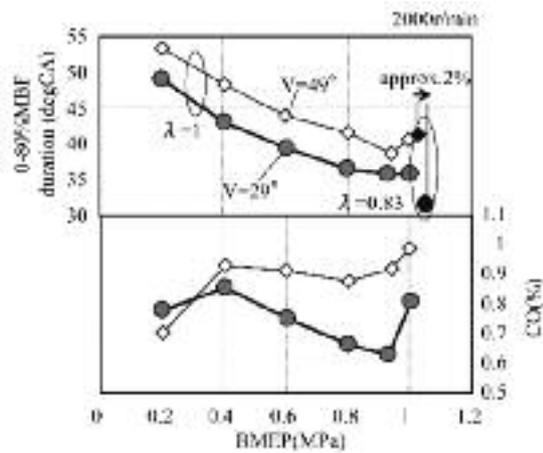


Fig. 9 Combustion duration and CO emission

### 3.2 噴霧形状の適正化

気流との同調を狙う噴射に対して、噴霧形状の適正化を行った。Fig. 10に示すように、下向き噴射角Vが小さいほど排気中COが減少し空気利用率が高い傾向にある。その中で、噴霧厚み方向 (Fig. 2参照) に広がり小さいファンスリット噴霧は、広がり大きい縦ダブルスリット噴霧に対して、より空気利用率が高いことがわかった。これは、縦ダブルスリット噴霧の下向き噴射角の大きい成分が、気流と同調しにくいと考えられる。マルチホールノズルにより形成される噴霧についても、縦ダブルスリット噴霧と同様の傾向にあった。このことから、気流との同調を狙うにはファンスリット噴霧が適していると判断した。

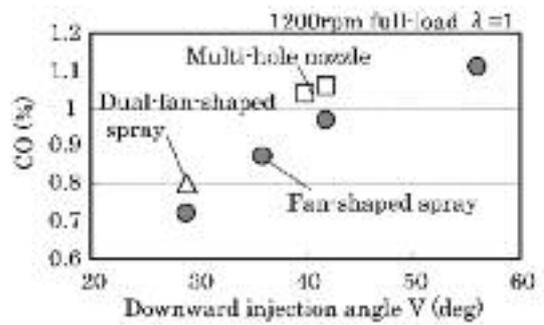


Fig. 10 Influence of spray shape

### 4. 新概念実現のための要求噴霧特性

気流との同調を狙って、ファンスリット噴霧で下向き噴射角を小さくすると、燃料のシリンダボア壁面への付着が増加し、燃料によるオイル希釈の増加が問題となる。Fig. 11, Fig. 12に筒内燃料付着をCFDで評価した結果を示す。V=29°のファンスリット噴霧では、従来の縦ダブルスリット、V=49°のファンスリット噴霧に対して、ボア壁面への燃料付着が増加する結果となった。燃料付着箇所は、エキゾースト側ボア壁が主であり、噴霧ペネトレーションの低減が付着抑制に有効とわかる。一方で、ピストン頂面への燃料付着は減少しており、PM排出低減には有利と考えられる。

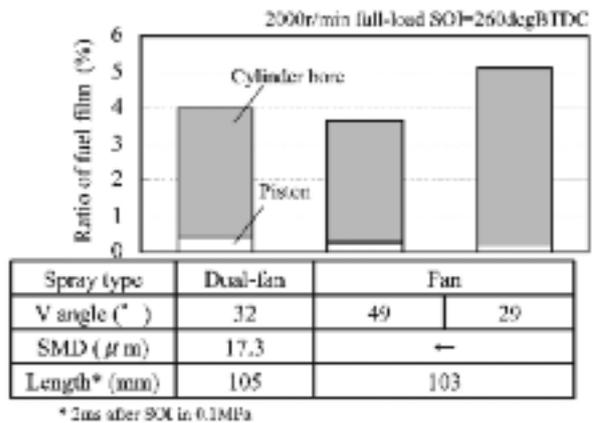


Fig. 11 CFD analysis result of wetting fuel

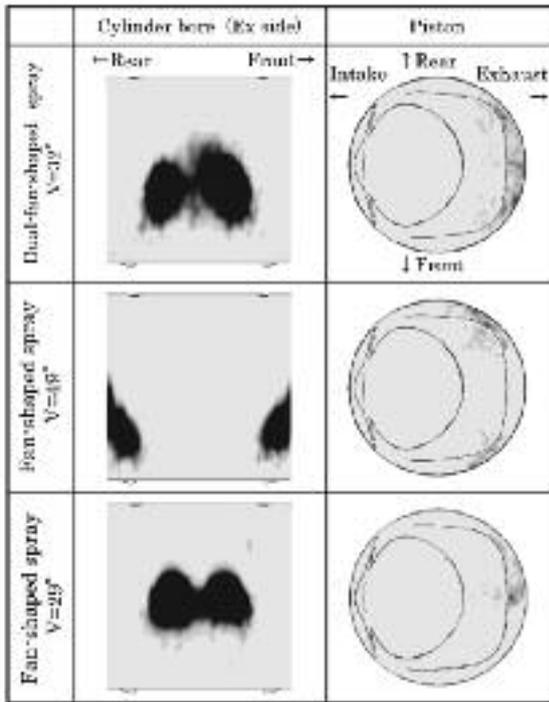


Fig. 12 CFD analysis result of wetting position

燃料ボア付着の低減には、微粒化向上と噴霧ペネトレーション低減が有効である。しかしながら、両者は出力にも影響を及ぼす。Fig. 13に噴霧粒径とペネトレーションがオイル希釈と出力に及ぼす影響を示す。噴霧微粒化の向上はオイル希釈を低減させると同時に、充填効率を増加させ出力の向上につながる。一方で、噴霧ペネトレーションの低減は、オイル希釈低減効果はあるものの、噴流効果が減少することで出力低下につながる。そこで、本コンセプトでは、筒内燃料付着低減と高比出力を両立する噴霧特性を目標として設定した。その達成のため、噴孔改良による高微粒化、低ペネトレーション化と、高噴射圧化を行った。

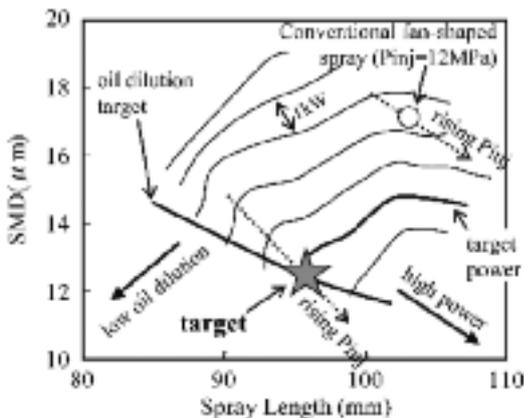


Fig. 13 Influence of spray length and SMD

### 5. 要求噴霧特性を実現するノズル開発

要求噴霧特性を実現するノズル開発の方針立案のために、ノズル内流れを調査した<sup>4) 5)</sup>。Fig. 14に流れの可視化結果を示す。サック内流れからはサックの外縁側に渦が生成していることが分かる。渦は、サック内の流れの損失を招き、噴孔出口の流速を低下させるとともに、成長と崩壊を繰り返すため、サック内の流れが不安定となり、噴霧のばらつきにつながる。この可視化結果から、噴射燃料が元々持っている圧力エネルギーを有効に利用するには、渦の抑制が必要と考えた。また噴孔内流れでは、噴孔入口で発生したキャビテーションが噴孔下流では消散しており、噴孔壁により整流された状態で燃料が噴射されていることが分かる。この結果から、噴孔入口で生成されたキャビテーションが、噴霧の微粒化に有効に利用されていないと考えた。以上の結果を踏まえ、

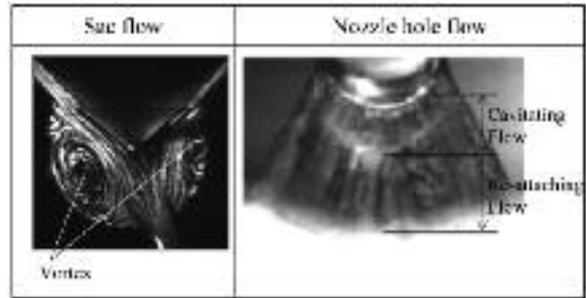


Fig. 14 Flow visualization result

噴霧の微粒化、低ペネトレーション化、噴孔詰まりに対する耐性向上についての具体策を検討した。

低ペネトレーション化については、基本的には微粒化が運動量の低減につながるため有効な策であるが、流速の向上はペネトレーションの増加に繋がるため、扇状の噴霧の広がり角を広げ、運動量を横方向に分散することで低ペネトレーション化を図ることとした。

微粒化についてはエネルギーの有効利用の観点から、サック内の渦を縮小するために、ニードルの先端に整流用突起を設置することにした。噴孔入口で生成した乱流エネルギーについては、噴孔の長さを低減することで液滴の分裂に利用することを考えた。

噴孔詰まりに対する耐性向上については、Fig. 14の噴孔内の流れ解析結果とFig. 15に示す燃焼生成物の付着状態との比較により、キャビテーションが生成されている部位の付着が少ないことから、前記の噴孔長の短縮が有効な策となると考えた。

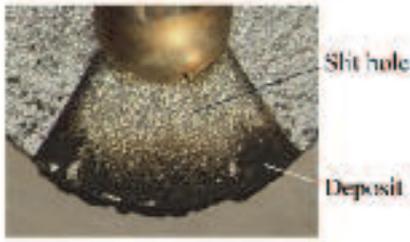


Fig. 15 Adherent state of deposit

噴霧の微粒化，低ペネトレーション化，噴孔詰まりに対する耐性向上について，改良アイテムをまとめるとFig. 16の3点となる．以降，3つのアイテムについての検討結果を順に説明する．

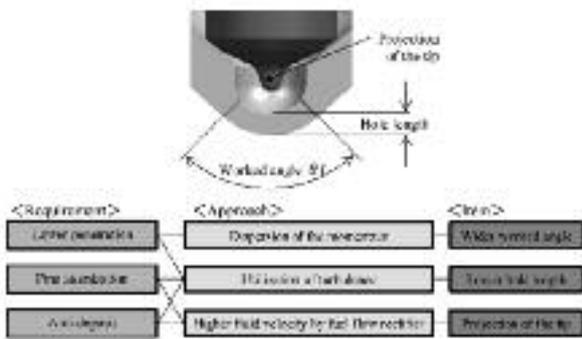


Fig. 16 Item of the nozzle improvement

### 5.1 噴孔加工角

Fig. 17に噴孔加工角と噴霧長，噴霧の収縮率を示す．収縮率とは噴孔の加工角 $\theta_f$ に対する噴霧角 $\theta_a$ の比である．加工角を拡大していくことで狙い通り，噴霧の運動量が横方向に分散されるため，噴霧長を短くできる．しかしその効果は，徐々に頭打ちとなり，加工角を拡大しても噴霧長は横ばいとなる．噴霧長短縮の効果が頭打ちになる付近では噴霧の収縮も急速に進行する．

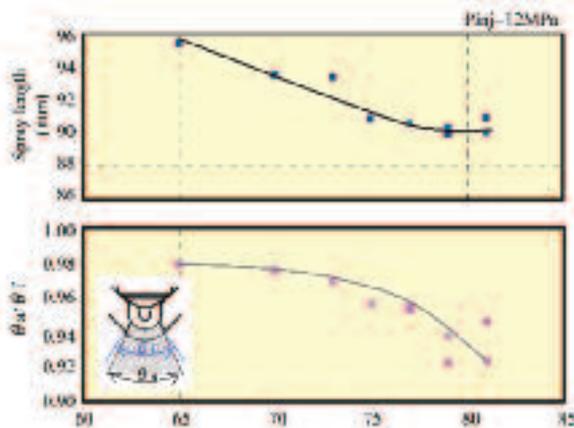


Fig. 17 Effect of nozzle work angle

Fig. 18に加工角を変えた際の流れ解析結果を示す．加工角が小さいうちは，端部まで高い流速を維持しているのに対し，加工角を拡大していくと，テーパの端部の燃料流速が低下する範囲が内側に拡大している．この流速の低下は，噴孔への付着物の洗い流しの効果の低下につながるため，噴孔詰まりに対する耐性を低下させる．以上の結果より，噴孔の加工角は，噴霧の収縮が起こらない範囲に設定する必要がある．

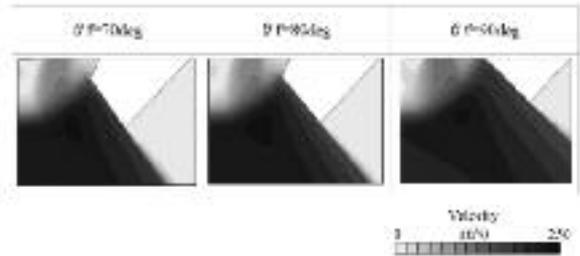


Fig. 18 Effect of nozzle work angle on flow

### 5.2 噴孔長

Fig. 19に噴孔長を変えた際のノズル内流れの可視化結果と流れ解析結果を示す．可視化画像では噴孔長の短縮により，噴孔入口で発生したキャビテーションを維持したまま噴射されている様子が確認でき，流れ解析では噴孔出口で噴流が持つ乱流エネルギーが高い状態を維持し，燃料が噴射されることが確認できた．

噴孔長の短縮に伴い，流れの指向性が低下するため，噴射方向のばらつき増加が懸念される．Fig. 20は，噴孔長 $L$ とスリット噴孔の厚さ $t$ の比 ( $L/t$ ) に対する噴霧特性を示したものである．噴孔長 $L$ の短縮により $L/t$ を小さくすることで，噴孔入口で生成したキャビテーションの活用ができるため，噴霧長短縮，微粒化が可能であるが，過剰に短縮すると噴射角のばらつきが急激に悪化する．以上より噴孔長の短縮による噴霧長短縮の効果は，噴射方向の安定性で制約されることが分かる．

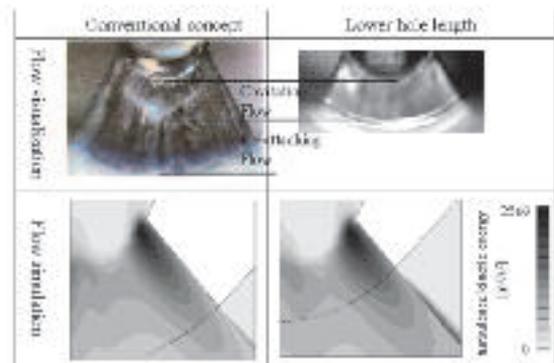


Fig. 19 Effect of  $L/t$  on flow

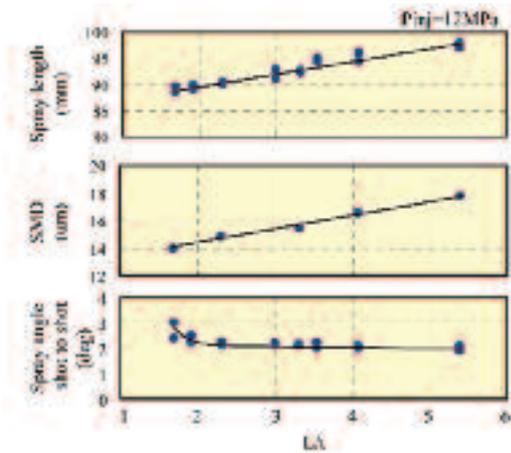


Fig. 20 Effect of L/t on spray performance

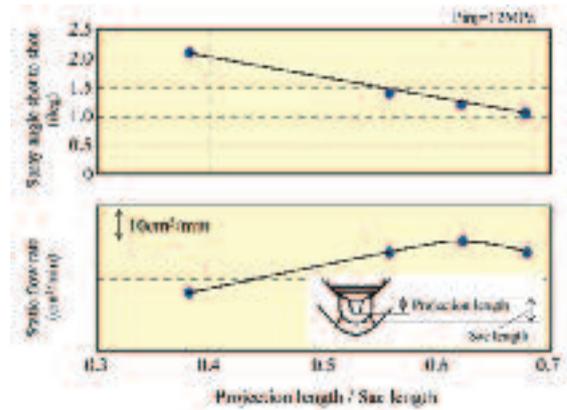


Fig. 22 Effect of projection of the tip

### 5.3 先端突起

Fig. 21にニードルの先端に整流用の突起を設けた際の可視化結果と流れ解析結果を示す。可視化画像ではサック壁面近傍の渦スケールの減少、流れ解析では同部位での流速がほとんど無い淀み領域の減少が確認でき、両者とも突起追加により狙い通りに整流効果が得られ、噴孔内の流速が向上することが確認できた。

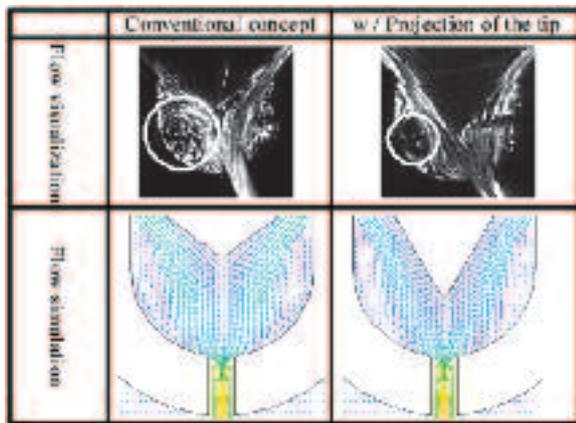


Fig. 21 Effect of projection of the tip on flow (Side view)

Fig. 22に突起長と噴射方向のばらつき、インジェクタの静的流量の関係を示す。突起を長くするほど整流効果が高まり、流れが安定するため噴霧のばらつきを低減できる。また噴孔出口の流速は高まるため静的流量も増加する。しかし突起を長くしすぎると燃料通路面積が絞られるため、静的流量が低下する。以上より、ニードル先端の突起長は燃料通路が絞りにならない範囲に設定する必要がある。

### 5.4 開発ノズルの噴霧特性

以上の検討結果を反映し、新燃焼コンセプトに対応するノズル仕様を決定した。Fig. 23に噴霧の写真を示す。正面視では従来の噴霧に対し広角に広がり、かつ側面視では噴霧の巻き上がりが大きくなっていることが分かる。

Fig. 24に噴霧長の時系列挙動を示す。噴射圧12MPa同士では時間の経過とともに噴霧長の差が拡大しており低ペネトレーション化を実現できた。噴射圧を20MPaまで高圧化しても開発品は目標の噴霧長を達成しており、必要な特性を得ることができた。

Fig. 25には、各燃圧での噴霧粒径を示す。開発ノズルは低圧から高圧まで従来ノズルに対し良好な微粒化を実現できた。

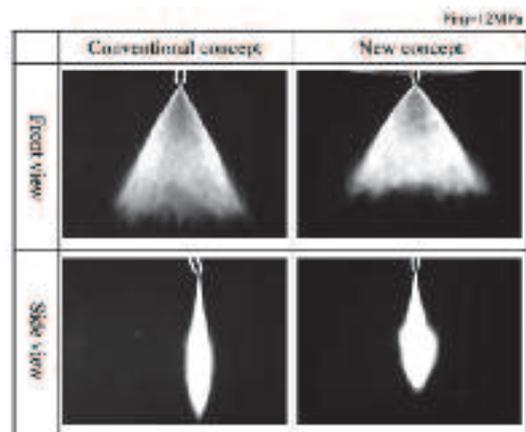


Fig. 23 Spray Shape

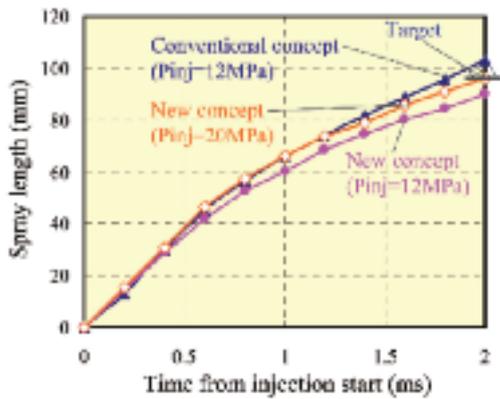


Fig. 24 Spray length

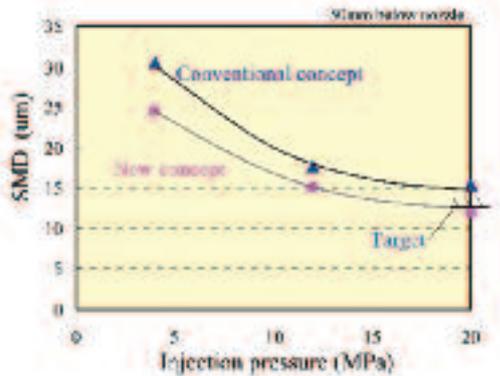


Fig. 25 Droplet size

## 6. エンジンへの適用結果

Fig. 26に改良したファンスリット噴霧の台上定点での筒内付着低減の効果を示す。図中では、縦ダブルスリット噴霧でのPM粒子数、オイル希釈レベルを100%として低減効果を示している。

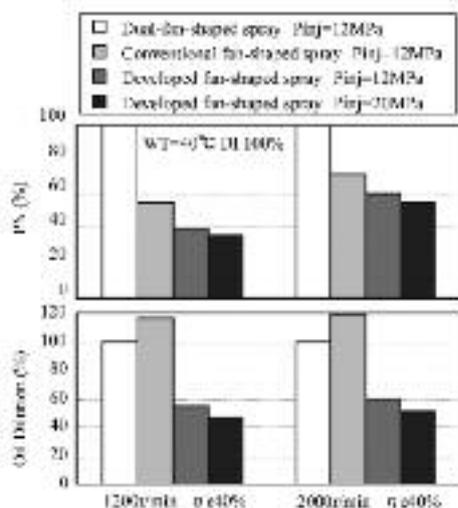


Fig. 26 Effect of improved spray on cylinder wet

従来の縦ダブルスリット噴霧に対してPM粒子数とオイル希釈を同時に約50%低減した。また、Fig. 27に示すように、今後要求される大量EGRなどの希薄燃焼に対する耐性も大幅に向上した。

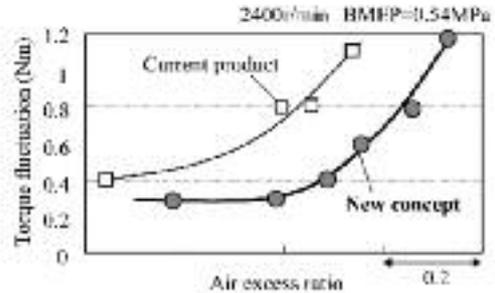


Fig. 27 Resistance on lean combustion

## 7. まとめ

将来要求される大量EGRなどの希薄燃焼に高い耐性を有し、高比出力、筒内少燃料付着、低エミッションを実現し得るガソリン筒内直噴の新たな燃焼コンセプトと新コンセプトにて要求される噴霧特性を実現するノズルを開発した。

### <参考文献>

- 1) 生駒卓也ほか：新筒内直噴システム搭載のV6 3.5Lエンジンの開発（第2報），自動車技術論文集，Vol.38 No.5（2007）
- 2) 杉本知士郎ほか：新コンセプト直噴ガソリンエンジン-第5報：スリットノズルインジェクタの開発-，自動車技術会学術講演会前刷集，No.21-00，P9-12，（2000）
- 3) 定金伸治ほか：新型V6ガソリンエンジンの開発（第2報），自動車技術論文集，Vol.36 No.2（2005）
- 4) E. Matsumura et al：Analysis of Visualized Fuel Flow inside the Slit Nozzle of Direct Injection SI Gasoline Engine, SAE Paper, Vol.112 No2003-01-0060
- 5) E. Matsumura et al：Analysis of Visualized Fuel Flow and Spray Atomization in Slit Nozzle for Direct Injection SI Gasoline Engine, SAE Paper, No2006-01-1000

<著者>



吉丸 清考  
(よしまる きよたか)  
ガソリン噴射技術2部  
第1技術室  
ガソリン直噴インジェクタ設計  
に従事



後藤 守康  
(ごとう もりやす)  
㈱日本自動車部品総合研究所  
研究1部 14研究室  
ガソリン噴射系部品の開発に  
従事



橋本 晋  
(はしもと すすむ)  
トヨタ自動車㈱エンジン先行  
制御システム開発部  
ガソリン直噴エンジンの燃焼  
開発に従事



野村 啓  
(のむら ひろし)  
トヨタ自動車㈱エンジン先行  
制御システム開発部  
ガソリン直噴エンジンの燃焼・  
噴霧開発に従事