

# ディーゼル燃料噴射装置の現状と将来\*

## Current and Future Technology of Diesel Injection System

足立 尚史  
Naofumi ADACHI

芹澤 一史  
Kazufumi SERIZAWA

Diesel injection equipment is required to be more accurate and higher in pressure to meet the increasingly strict emission, fuel consumption regulations and higher engine performance. One of the key component to meet these demands is injector. It has been developed according to the following approaches, high fuel robustness, high combustion speed by high rectangle injection rate, stabilized firing by small quantity high speed multiple injection, wider area combustion by wide diffusion spray. This paper reports the latest technology of diesel injection system and the excellent injection performance.

Key words :

*heat engine, compression ignition engine, fuel injection, fuel spray, multiple injection, diffusion spray*

### 1. まえがき

近年の急激な地球環境悪化に対して、種々の地球温暖化対策が進められている。このような中、ディーゼルエンジンは燃費性能が良く、さらにCO<sub>2</sub>の排出量が少ない為、地球温暖化防止に貢献する内燃機関として注目されている。ディーゼルエンジンの燃焼は、燃料の噴射制御による自己着火により得られる為、燃料噴射装置の性能がディーゼルエンジンの性能を大きく左右する。燃料噴射装置としては、かつては機械制御式のジャークシステムが主流であったが、現在は電子制御式のコモンレールシステムが主流となっている。コモンレールシステムに採用されるインジェクタは、年々厳格化される排出ガス規制、燃費規制に対応する為、噴射期間の短縮と燃料噴霧の微粒化による燃焼効率向上を目的とした燃料噴射圧の高圧化が求められる。更に、化石燃料枯渇の危惧から燃料の多様化への対応が重要である。そこで、2013年より燃料噴射圧250MPa、燃料ロバスト性を向上した第4世代ソレノ

イドインジェクタ (G4S インジェクタ) を量産化した。

一方、今後のエンジン開発の動向としては、欧州・アジアを中心に、エンジンのダウンサイジング化がさらに進むことが予測される。これらの小排気量エンジンに適応した次期噴射装置のニーズとしては、更に燃焼効率を向上させる為、燃焼室壁面への冷却損失を抑制しつつ燃焼速度を向上する必要がある。その為、時間的・空間的に最適な燃焼を達成する噴射装置の開発を進めている。

今回は、現在量産しているG4Sインジェクタと開発中の次期燃料噴射装置について述べる。

### 2. 噴射装置の現状 (G4S インジェクタ)

#### 2.1 G4S インジェクタ開発方針

開発方針を考えるにあたり、まず排出ガス規制対応として重要な噴射圧力の目標値を200MPa～300MPa<sup>1) 2)</sup>と定めた。この高圧化により、噴射燃料は微粒化され、年々厳格化の進む排出ガス規制に長期間対応可

\* (公社)自動車技術会の了解を得て、「SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016」より一部加筆して転載

能となる。この高圧噴射可能なインジェクタを将来に渡り世界中の市場に展開する上での最大の課題は燃料ロバスト性の向上と考えた。多様化する燃料においては、燃料性状が悪いものが存在し、この燃料が使用されるとインジェクタ内部に以下の4つの悪影響が出る事が懸念される。

- ①デポジット生成による摺動部の固着
- ②錆の生成による摺動部の固着
- ③摺動部位の摩耗
- ④摺動部の焼き付き

これらはインジェクタの機能不良に繋がる。性状の悪い燃料に対してインジェクタのロバスト性を上げる設計手段として、燃料の高温劣化による変質を防ぐ静リークレス、スイッチングリーク最小化によるインジェクタ内の燃料温度の低減が有効であると考えた。ここで静リークとは、高圧燃料部と低圧燃料部を隔離する微小隙間の摺動部を通じて、高圧部から低圧部に流出する燃料量、スイッチングリークとは、制御弁を通過する燃料量を示す。

**2.2 G4S インジェクタリーク最小化の実現**

Fig. 1 に示すように、第3世代ソレノイドインジェクタ (G3S インジェクタ) では、コマンドピストンの存在によって微小隙間の摺動部を通じて静リークが発生する。コマンドピストンの機能としては、Fig. 1 右図に示すように、噴射終了時にノズルニードルに閉弁力を発生させ、ノズルニードルの高速閉弁を実現している。静リークレスを実現するためには、コマンドピストンの無い構造が必要であるが、閉弁力を失いノズルニードルの高速閉弁が得られない。コマンドピストンの無い構造で高速閉弁を得るためには、流入 (IN) オリフィスの拡大が有効である。しかし、Fig. 1 左図に示すように、G3S インジェクタの制御弁<sup>3)-5)</sup>は2Way Valve(2WV)：シート部1箇所構造であり、ノズルニードル開弁中においても IN オリフィスから制御室への流入があるため、IN オリフィスからの流入量はノズルニードル開弁速度に影響する。

そのため IN オリフィスの拡大には制限があり、2WV の制御弁では静リークレスの構造が困難であった。したがって、静リークレスを実現するためには、

Fig. 2 左図に示すような、ノズルニードル開弁中に、IN オリフィスから制御室へ流入しない制御弁、つまり3Way Valve(3WV)：シート部2か所が必要である。一般的に高圧の燃料の流れを3WVを用いて制御する為には、インジェクタに搭載可能な体格においても大駆動力が得られるピエゾアクチュエータが用いられてきた。G4S インジェクタに採用するソレノイドアクチュエータは、長寿命でグローバル生産が容易という利点はあるものの、駆動力が小さく、3WVにて高圧燃料流を制御するのは困難であった。そこで実構造は2WVでありながら、3WVの機能を有する新制御弁の開発に取り組んだ。小さなソレノイドアクチュエータの駆動力においても、200～300MPaの高圧燃料の流れを制御可能とするには、制御弁を通過する流量、つまりスイッチングリークを低減することが有効と考え、スイッチングリークを最小化する手法を検討した。以下この詳細について述べる。

**3<sup>rd</sup> Generation Injector (2-Way-Valve)**

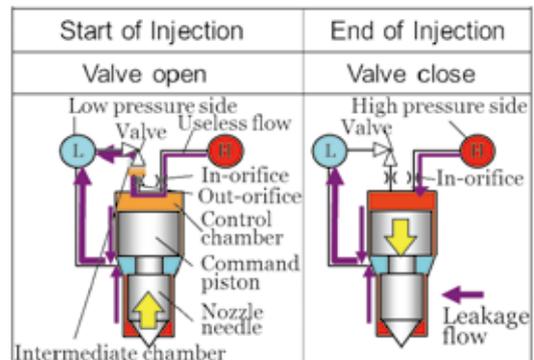


Fig. 1 Concept of Control valve and Nozzle movement 3<sup>rd</sup>. Generation Injector (2Way Valve)

**4<sup>th</sup> Generation Injector (3-Way-Valve)**

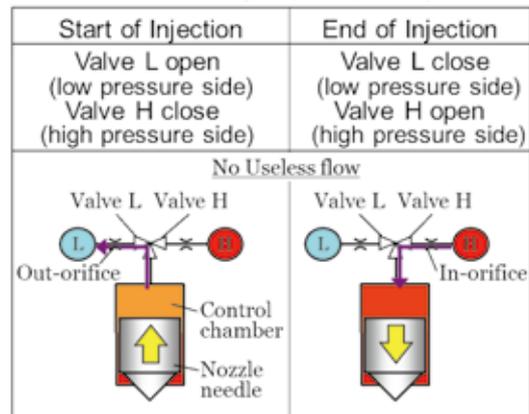


Fig. 2 Concept of Control valve and Nozzle movement 4<sup>th</sup>. Generation Injector (3Way Valve)

内燃機関

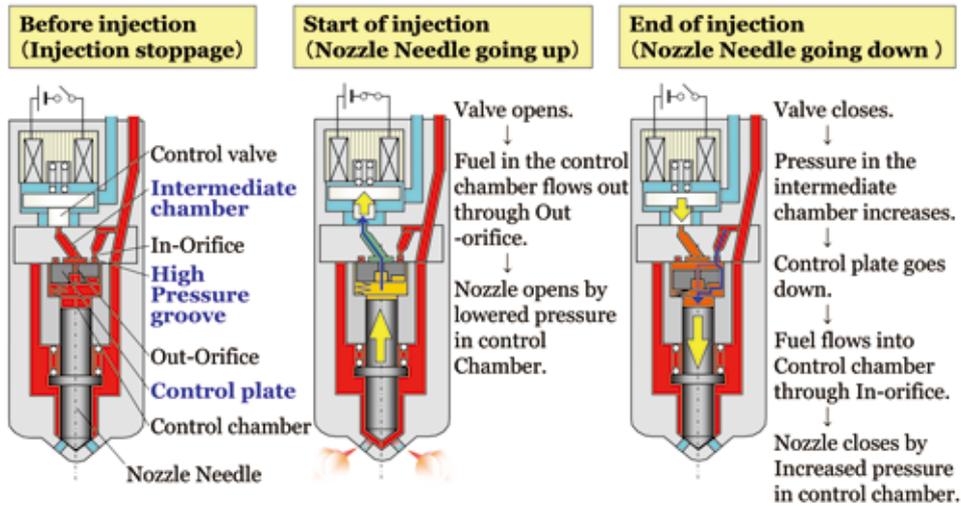


Fig. 3 Structure and Operation of 4th Generation solenoid Injector

G3S インジェクタの2WV構造は、Fig. 1に示すように、開弁→閉弁の2WV作動により、2WVとアウトオリフィス間の圧力が瞬時に低圧から中圧に変化する中間室がある。この圧力変化を利用して自動開閉する弁を設計することに着目し、Fig. 3に示す構造を見出した。本構造の最大の特徴は、制御室内に配置された制御プレートである。制御プレートは、常時高圧である高圧溝、作動条件により圧力変化する制御室、中間室の3つの圧力バランスで作動する。制御弁が作動しない無噴射中は、スプリングにより上側に押し付けられている。制御弁が開弁すると、中間室の圧力が低下するため、制御プレートの位置が保持されたままで、制御室圧が低下するため、噴射が開始する。制御弁が閉弁すると中間室圧が制御室圧と同程度まで上昇するため、高圧溝の作用力により制御プレートが下降し、高圧溝と制御室とが連通し、インオリフィスを通して高圧燃料が制御室に流入し、ノズルが下降し噴射が終了する。

本構造により、ノズルニードル開弁作動中は、制御室は低圧部のみと連通しスイッチングリークを最小化できる。またノズルニードル閉弁作動中は、制御室は高圧部のみと連通できる構造である。作動圧全域で正常作動させるためには、制御プレートに作用する圧力による力が重要となる。高圧溝圧、制御室圧、中間室圧の作用する面積を最適に設計することで、インジェクタに搭載可能なソレノイドアクチュエータの駆動力においても、設計成立することを確認した。

### 2.3 G4S インジェクタリーク性能

今回開発したG4S インジェクタとG3S インジェクタとの噴射性能比較を実施した。

Fig. 4は、静リークとスイッチングリークを足し合わせた全リークの比較を示す。G4S インジェクタは、G3S インジェクタの全リークの半分を占める静リークレスを実現した。スイッチングリークは、G3S インジェクタ比1/3まで削減できた。また時間比例で増加する静リークがゼロであるため、エンジン低速トルク点に代表される高圧低回転時のリーク量を低減できた。

Fig. 5に作動耐久中の全リーク変化を示す。G4S インジェクタは、静リークが発生をする微小隙間の摺動部を持たないことから、摺動部摩擦によるリーク流路の増大が発生せず、経時的に安定したリーク特性が得られる。

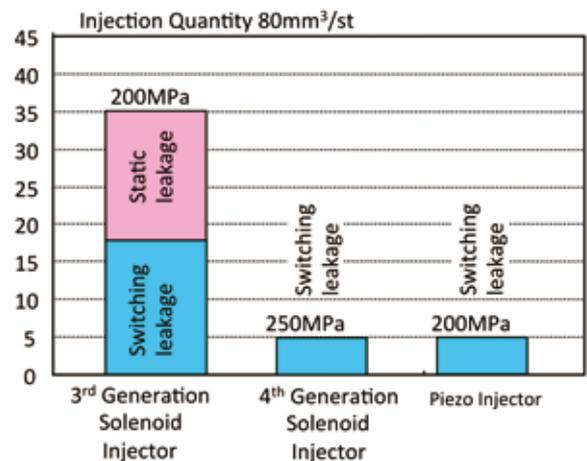


Fig. 4 Fuel leakage

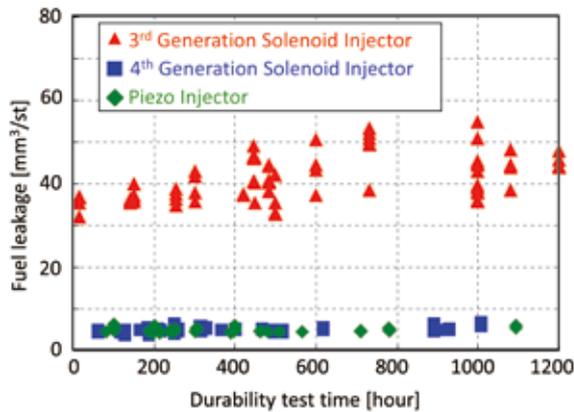


Fig. 5 Injector Fuel leakage deterioration

### 3. 燃料噴射装置の将来

#### 3.1 次期噴射装置へのアプローチ

前述のように次期噴射装置には、燃焼効率を向上させる為、燃焼室壁面への冷却損失を抑制しつつ燃焼速度を向上する技術が必要となる。その実現の為、以下アプローチで開発を進めた。

- ①高矩形噴射による燃焼速度向上
- ②高速微量マルチ噴射による着火性能向上
- ③高拡散噴霧による空気利用率の向上

以降、これら各々の開発について述べる。

#### 3.2 高矩形度噴射の実現

ディーゼル用インジェクタは、ニードル上部に配置された制御室の圧力を、流入 (IN)・流出 (OUT) のオリフィスで制御することにより、ニードル速度を決めるのが一般的である。このニードル速度により噴射の矩形度が決まる為、噴射自由度を与えるには、IN・OUTオリフィスの流量を独立して制御する機能、すなわち、3WVを活用することが望まれる。前述のように、制御プレートを用いた新制御弁の開発により小駆動力でも3WV制御可能なG4Sインジェクタを開発してきた。但し、より高矩形度の噴射を達成するには、G4Sインジェクタ以上のオリフィス流量が必要となり、それを制御する為の駆動力も必要となる。高駆動力を得られるものとして、ピエゾを使用したインジェクタが量産化されており、このピエゾインジェクタで得られる噴射矩形度をより安価なソレノイドで達成

すべく、OUTオリフィス流量をG4Sインジェクタ比1.5倍以上を目標とし開発を進め、磁性材料、磁気回路を改良したソレノイドにより高矩形度噴射を実現した第4世代ソレノイドインジェクタ改良 (G4.5Sインジェクタ)を開発している。Fig. 6はG4.5Sインジェクタに搭載する新開発ソレノイドの吸引力特性計算値を示しており、G4Sインジェクタのソレノイドに対し高応答、高吸引力が得られている。その噴射率比較をFig. 7に示す。G4Sインジェクタと比較し、噴射率矩形度が向上し、ピエゾインジェクタ並みの噴射率特性が得られており、これを圧力換算すると、G4.5Sインジェクタで20MPa以上の利得がある。

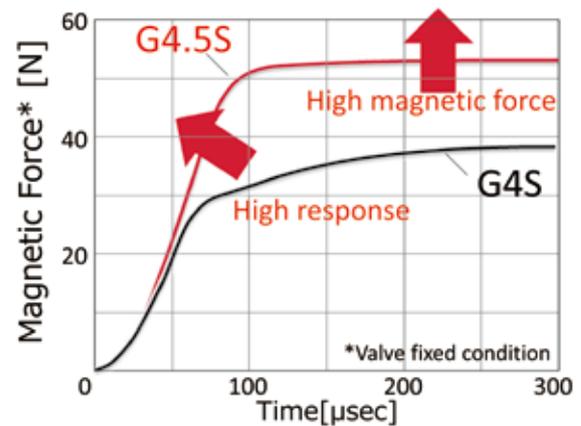


Fig. 6 Magnetic Performance of New Solenoid

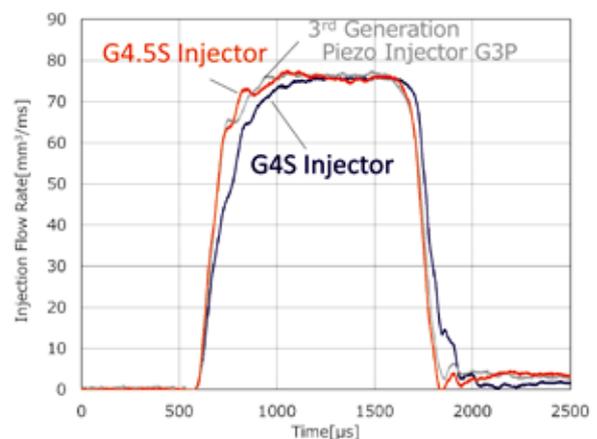


Fig. 7 Injection Flow Rate

#### 3.3 高速微量マルチ噴射の実現

G4Sインジェクタ制御弁の3WV機能は、Fig. 3で示す通り、2WVと制御プレートを組合せることで実

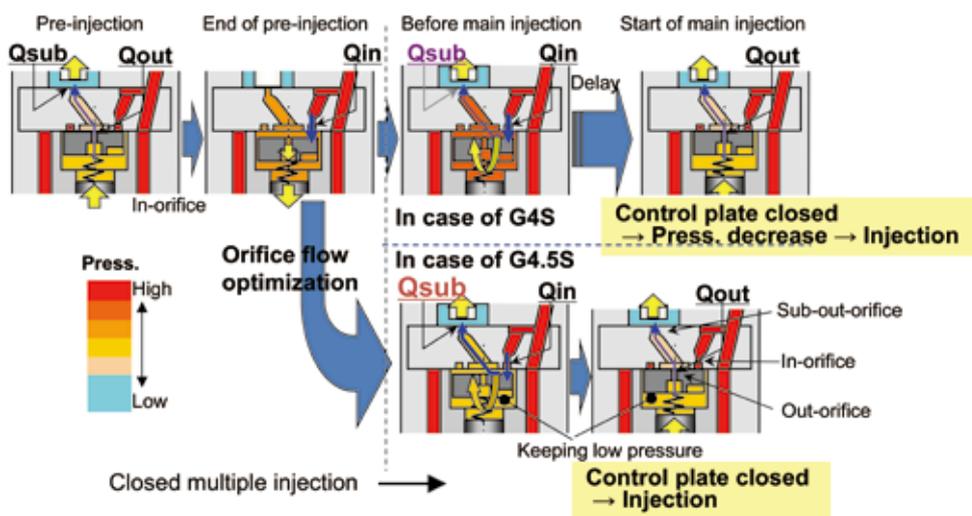


Fig. 8 Injector operation at multiple injection

現している。この構造は、Fig. 8の上段に示すように、小駆動力で3WV機能を達成する反面、制御プレートが開弁し閉弁するまでの間は噴射することが出来ず（無機能期間）、この動きが次の噴射への遅れとなり噴射インターバルに限界があった。そこでFig. 8の下段に示すように、制御プレートの開弁中において制御室圧力を2WVで制御できるように、第2のアウトオリフィス（以下サブアウトオリフィスと記載）を中間室内に設定し、制御プレート開弁中に制御室圧力を決定するインオリフィスとサブアウトオリフィスの関係を最適化することで、制御プレートの無機能状態においても2WVだけで制御室圧力を制御できるようにした。つまり、通常噴射時は3WV機能で使いつつ、高速微量マルチ噴射時には、2WV構造を活用することで制御室圧力を制御し、無機能期間を極限まで短縮することとした。高速微量マルチ噴射結果をFig. 9に示す。これにより、G4Sインジェクタの最小噴射インターバル0.2msに対し、G4.5Sインジェクタでは0.1msの噴射インターバルを達成できる。

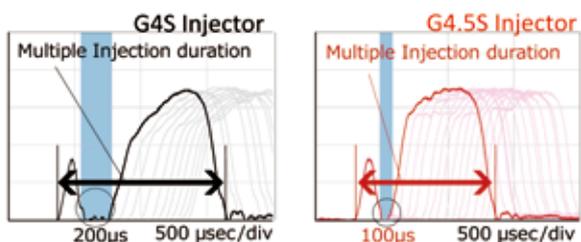


Fig. 9 Characteristics of Multiple Injection

### 3.4 高拡散噴霧の実現

従来高圧化による噴霧微粒化、及び強ペネトレーションによる空気の活用が主流であり、噴流が直進方向となるストレート噴孔で対応してきた。近年エンジンの小型化が進んで来ると、低噴射圧時は噴霧拡散による壁面冷損抑制が望ましく、高噴射圧時は従来通りの強ペネトレーションが求められる。

その為、Fig. 10に示すように、わずかな噴孔径φ0.1mm程度×噴孔長L0.8mm以下の噴孔に対し短噴孔長、あるいはテーパ形状となるよう加工を行い、所望の噴霧拡散特性が得られるControlled Diffusive Spray Nozzle (CDS Nozzle)を開発した。

これにより、噴孔内を流れる燃料の乱流を制御することや、噴孔出口部の燃料流の速度ベクトルを制御することにより、噴霧の空間的配置の自由度の向上が可能となった。

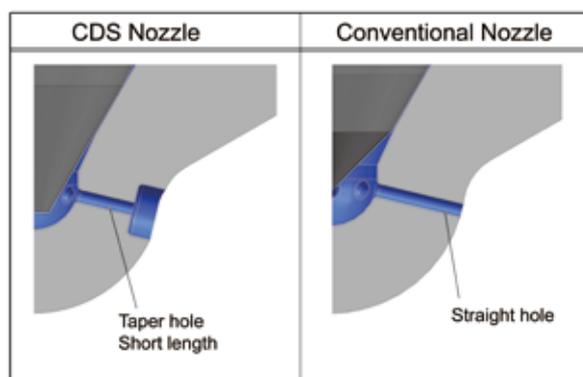


Fig. 10 Example of CDS nozzle

噴霧確認した結果を Fig. 11 に示す。これによると、低噴射圧にて高拡散噴霧が得られ、高噴射圧では従来のストレート噴孔と同等のペネトレーションが得られていることが分かる。このように、CDS Nozzle を採用することにより、エンジンの負荷毎の噴霧配置について自由度が向上することを確認した。

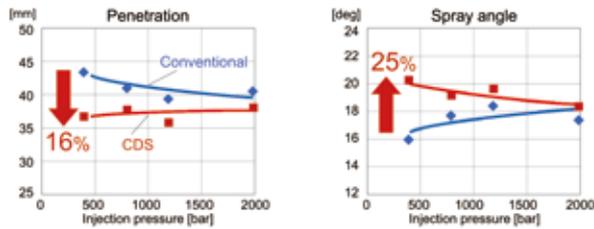


Fig. 11 Spray characteristics with CDS nozzle

## 4. むすび

ディーゼル噴射系部品については、コモンレールシステムの採用により革新的な成長を遂げてきている。その中でもコモンレール用インジェクタは、エンジン性能に直結する部品であることから、高圧化、燃料ロバスト性向上、高応答化へ技術開発を進めてきており、新制御弁の開発により、高ロバストなインジェクタを量産開始した。さらにはその制御弁の進化による噴射の時間的自由度の向上及び、ノズル噴孔形状の最適化

による噴霧の空間的配置の自由度を向上させ、時・空間燃焼制御に取り組んだ最先端技術を紹介した。今後この時空間燃焼を発展させるべく、更なる噴射率、噴霧の自由度向上に向け開発を推進する。

## 参考文献

- 1) Yukihiro Shinohara, Katsuhiko Takeuchi, Olaf Erik Herrmann and Hermann Josef Laumen: 3000bar common rail system, MTZ worldwide Edition, 2011-01, Vol72, 4-8
- 2) Mrs. Xiumei Wang, Mr. Takashi Kikutani, Mr. Noriaki Nakane and Mr. Katsuhiko Takeuchi: Development toward "Diesel Revolution" using Ultra High pressure CRS with closed-loop control system for Heavy Duty Engine, FISITA world automotive congress 2010 May, Technical Programme F2010A164
- 3) V. Caika, T. Kammerdiener and N. Dorr: Operation of Piezoelectric Common Rail Injector with Diesel and FT-Kerosene, SAE Technical Paper 2007-24-0070
- 4) Rolf Leonhard, Johann Wurga, Thomas Pauer, Markus Ruckle and Matthias Schnell: Solenoid Common-rail Injector for 1800 bar, MTZ worldwide Edition, 2010-02 10-15
- 5) C S Hardy, C M Hudson, M S Harper and D M Ainsworth, Pressure is nothing without control: Evolution of control valve design, Institution of Mechanical Engineers (IMEchE) Fuel Systems for IC Engines, 14-15 March 2012, 115-128
- 6) Kenji Date, Shuichi Matsumoto, Masayoshi Ito, Koichi Yamada and Kazuhiro Omae: New Concepts of Injector for Common Rail System, JSAE Technical Paper 243-20125633

## 著者



### 足立 尚史

あだち なおふみ

ディーゼル噴射技術部  
コモンレールシステム インジェクタの  
開発に従事



### 芹澤 一史

せりざわ かずふみ

ディーゼル噴射技術部  
コモンレールシステム インジェクタの  
開発に従事