

# 特集 群噴孔ノズルを用いた排出ガス低減へのアプローチ\*

## A Successful Approach to Reduce Emissions Using a Group Holes Nozzle

西島 義明

Yoshiaki NISHIJIMA

増田 誠

Makoto MASHIDA

佐々木 覚

Satoru SASAKI

大島 健司

Kenji OSHIMA

The Common Rail System, (CRS), has revolutionized diesel engines. DENSO has been working on CRS technologies since they were first developed. This report describes the technology to simultaneously reduce NOx and PM through an innovative Group Holes Nozzle concept. We can obtain a more homogeneous, lean air-fuel mixture through Group Holes Nozzles, and by the addition of a cooled EGR, achieve pre-mixed combustion. This has underscored the potential in clearing future emission standards.

**Key words :** Diesel engine, Fuel injection, Nozzle, Spray, Common Rail System, Pre-mixed combustion

### 1. はじめに

デンソーは1995年に世界で始めてCRS (Common Rail System)<sup>12)</sup>の生産を開始し、その後も着実な技術開発を進めてきた。2002年には180MPaという高噴射圧を可能にしたCRSの生産を開始した。本システムを搭載した乗用車(4cyl, 2L)は比出力50kW/Lを持ち、DPF無しでEURO4規制をクリアしている。しかし、より一層厳しくなる排出ガス規制に対し、エンジンアウトでの排出ガス有害成分をどれだけ低減できるかが重要なポイントである。これは後処理の負担を軽くし、ディーゼルエンジンの更なるクリーン化を導くからである。

本研究では、新しいノズルコンセプト「群噴孔ノズル」を提案し、次期排出ガス規制への対応の可能性を調べた。群噴孔ノズルによる良好な貫徹力、高拡散均一噴霧を用いてNOxとPMが同時に低減できることを示した。

### 2. 排出ガス規制に対するシナリオ

Fig. 1に、排出ガス規制に対する二つのステップからなるシナリオを示す。

#### 第1ステップ:

予混合燃焼にてPMを増加させることなく、NOxの発生量を大幅に抑制する。

#### 第2ステップ:

Catalyzed DPF (Diesel Particulate Filter)にてPMを大幅に低減する。

エンジンコストの増加を抑えるために、NOx低減には触媒を適用せず、予混合燃焼によりNOx排出量を抑制する。

### Diesel technologies

#### 1st step

- Pre-mixed combustion
  - Common rail technologies
  - EGR cooler, Intercooler (Reducing compression ratio)

#### 2nd step

- Catalyzed DPF

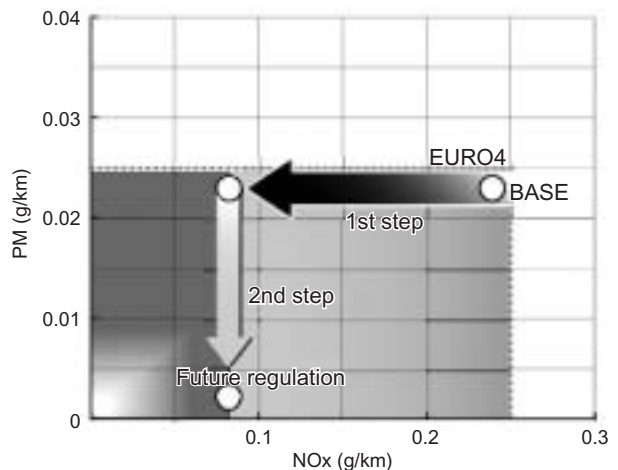


Fig. 1 Scenario for emission regulation

\* (社)自動車技術会の了解を得て、「2005年春季大会学術講演会前刷集」No. 46-05, 233より転載

Fig. 2に上記のシナリオに関するEMS (Engine Management System) を示す。システムは次の三つのグループから構成されている。

- ① Pre-mixed combustion:
  - ・ Common rail components  
(Injector, High-pressure pump, Rail, ECU, Sensors)
  - ・ EGR cooler
  - ・ Intercooler
- ② Air management:
  - ・ Air flow meter
  - ・ Throttle body (DC motor)
  - ・ Manifold pressure sensor
  - ・ EGR valve (DC motor)
  - ・ UHEGO sensor

- ③ Aftertreatment:
  - ・ Catalyzed DPF
  - ・ Exhaust gas temperature sensor
  - ・ Exhaust differential pressure sensor

Fig. 3に燃焼温度と当量比の関係におけるNO<sub>x</sub>とPMの発生領域を示す。従来燃焼では、その燃焼領域がNO<sub>x</sub>とPMの発生領域に大きく入り込んでいる。これに対して、NO<sub>x</sub>とPMの同時低減が可能である予混合燃焼を成立させるために、局所当量比の低減(均一希薄混合気形成)と低温燃焼を実現しなければならない。

局所当量比の低減には、高圧噴射、ノズルニードルの高応答性、小噴孔径といった技術が有効である。ただし、小噴孔径については微粒化とペネトレーションとのトレードオフがある。これを打破すべく「群噴孔ノズル」を均一希薄混合気形成に対する新しい噴射系要素技術として提案する。

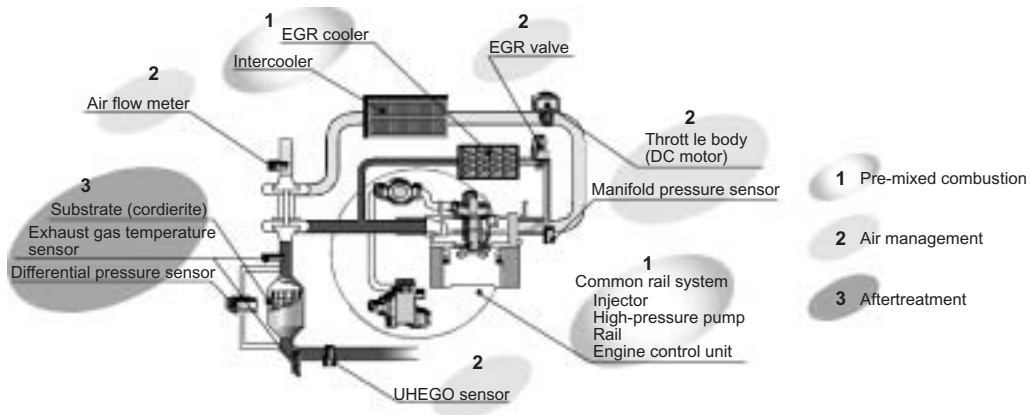


Fig. 2 Engine management system

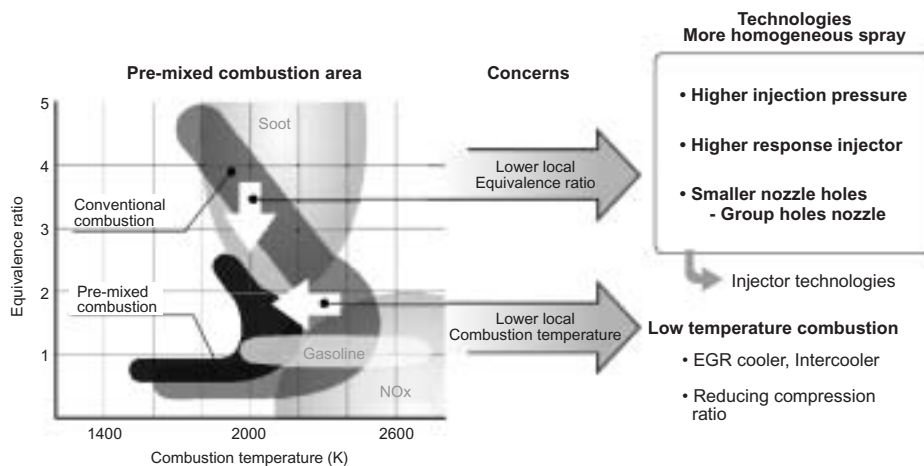


Fig. 3 Region of NO<sub>x</sub> and PM

### 3. 群噴孔ノズルによる噴霧形成技術

#### 3.1 群噴孔ノズル

Fig. 4に群噴孔ノズルのコンセプトを示す。従来のノズルと基本構造に変更はない。各々の噴孔の噴孔面積が各々の小径噴孔群の噴孔面積の総和と同じになるように置き換えて構成する。小噴孔径化は微粒化を促進する。しかし、単なる小径多噴孔ノズルではペネトレーションが抑制される。これを克服するために、小径噴孔をグループ化して良好なペネトレーションを回復しようとしたのが、このノズルのコンセプトである。

小さな噴霧粒径を保ちつつ、噴霧の拡がり、ペネトレーションの維持により空気利用率が向上する。予混合燃焼に必要なとされる理想の均一希薄混合気形成を実現する可能性を向上させるものである。

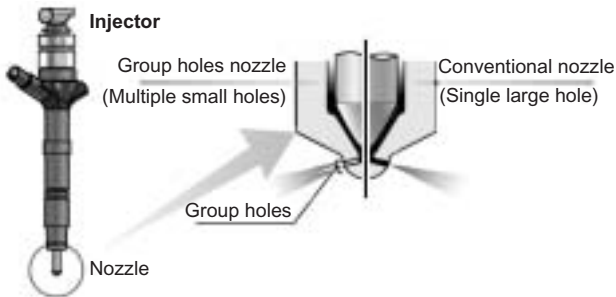


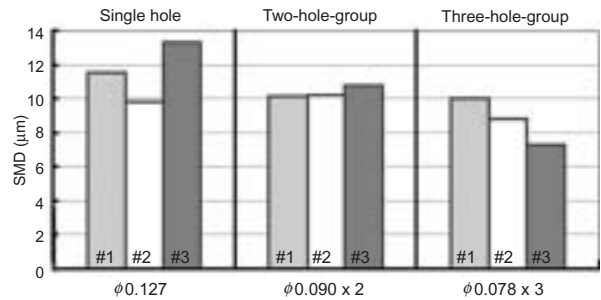
Fig. 4 Group holes nozzle concept

#### 3.2 群噴孔ノズルの特性

噴霧粒径SMD (Sauter Mean Diameter) 測定と高温高圧場での噴霧観察を行った。Fig. 5に評価対象としたノズル仕様と噴霧粒径測定結果 (SMD) を示す。従来ノズル ( $d = \phi 0.127$ ; 単孔 $\times 8$ ) と、ノズル流量を同じにした2種類の群噴孔ノズル ( $d = \phi 0.09$ ; 2孔 $\times 8$ 群,  $d = \phi 0.078$ ; 3孔 $\times 8$ 群) を選んだ。噴霧粒径測定結果 (SMD) の測定方法はLDSA (Laser Diffraction Sizing Analyzer) である。測定箇所はFig. 5に示した3点 (噴霧中間点2箇所、噴霧先端) である。SMDはノズル形態によらず噴孔径に依存し、従来ノズルと同様に噴孔径を小さくするほど小さくなっている。群噴孔により噴霧の密度が高くなっているが、合体などにより微粒化が阻害される現象は認められない。

しかし、一般的には小噴孔径化による微粒化の促進はペネトレーションの抑制を招く。そこで群噴孔ノズルの高温高圧場におけるペネトレーション解析を行った。

	Single hole	Two-hole-group	Three-hole-group
Hole configuration			
Hole dia. x Number	$\phi 0.127$	$\phi 0.090 \times 2$	$\phi 0.078 \times 3$
Hole layout		Parallel	
Hydraulic flow (cm <sup>3</sup> / min)	810		



More group holes = better atomization (smaller dia.)

Measurement condition  
 Fuel pressure: 80MPa  
 Ambient temperature: 293K  
 0.5ms after injection start

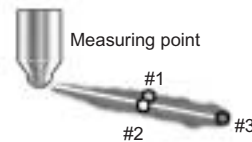
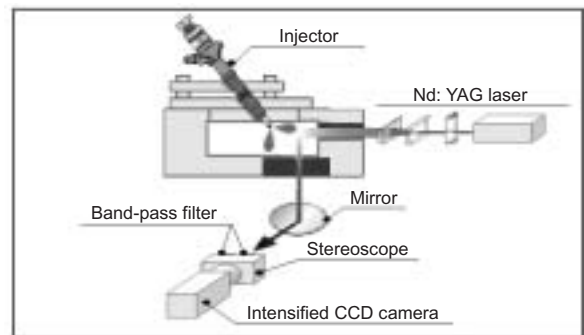


Fig. 5 Nozzle specifications and SMD

Fig. 6にLIEF (Laser Induced Exciplex Fluorescence)<sup>3)</sup>による噴霧観察に用いた実験装置を示す。ステレオスコープをCCDカメラに装着し、噴霧の液相と気相の同時撮影を可能にした。



Ambient pressure	5MPa
Ambient temperature	873K
Injection pressure	80MPa
Photographic time	0.7ms after injection start

Fig. 6 Experimental apparatus

Fig. 7に噴霧観測結果を示す。下段に示した群噴孔ノズルは、直径  $d = \phi 0.09\text{mm}$  の噴孔を平行に並べたもの、噴霧中心部の黒色部分が液相、液相周辺の気相を当量比に応じて色別に表示してある。

上段の従来ノズルの噴孔径も  $d = \phi 0.09\text{mm}$  であるが、噴孔は一つで流量は群噴孔ノズルの約半分である。この観測結果において、同じ噴孔径でありながら群噴孔ノズルの噴霧液相が長くなっている。また群噴孔ノズルの方が噴霧の拡がりも大きく、ペネトレーションも強いことが分かる。

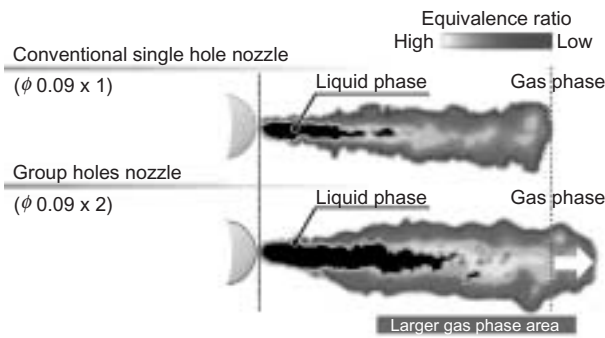


Fig. 7 Spray observation

このメカニズムを明らかにすべく、噴霧シミュレーションによる解析を行った。Fig. 8に噴霧シミュレーションにより液相および気相を計算した結果を示す。特に噴霧内部の温度分布に着目した比較を行った。

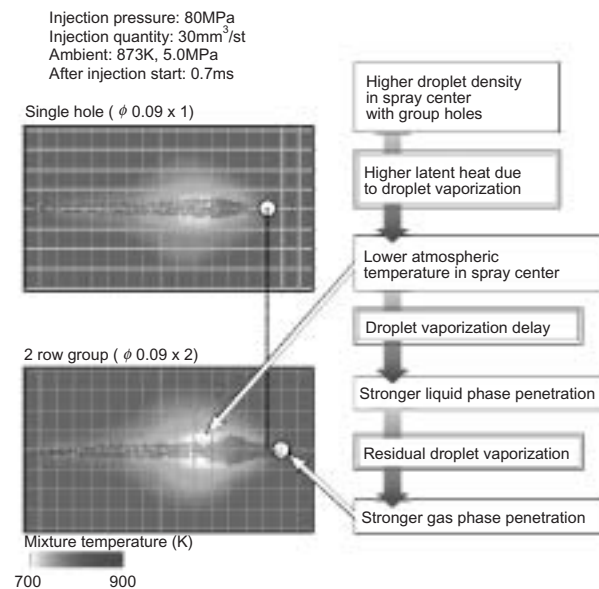


Fig. 8 Spray simulation

上段の図が単噴孔ノズル ( $d = \phi 0.09\text{mm}$ )、下段の図が群噴孔ノズル(2孔/群、 $d = \phi 0.09\text{mm}$ )である。計算codeにはAVLのFIRE (Version 8.3)を使用した。群噴孔ノズルの場合は、二つの噴孔からの噴霧が軸心上で重なるために噴霧液滴の密度が高い。このため、周囲高温空気 (873K) に与える蒸発潜熱による冷却効果が大きく、噴霧内部はより低い温度分布となる。この雰囲気温度の低下によって噴霧の蒸発過程に時間遅れが生じ、軸心部の液相が長くなる。その結果として生じる気相はノズルからより遠くに到達することになる。

以上から群噴孔ノズルの方がより強いペネトレーションが得られると推定する。

噴霧の微粒化とペネトレーション増大の総合的な効果を検証するために、ノズル流量をそろえた場合の噴霧ペネトレーションの実測を行った。Fig. 9の上段に噴霧観測結果を示す。観察には前述と同じLIEFを用いた。比較のためにFig. 9の下段に噴霧シミュレーション結果を併記した。比較に用いたノズル仕様はFig. 5に示した3種類である。結果は従来ノズルと群噴孔ノズルの液相ペネトレーションがほぼ同じ長さになっている。また、気相ペネトレーションについてもほぼ同じ長さであることが分かる。なお、Fig. 9に併記したシミュレーションにおいても同様の結果となった。

すなわち、従来ノズルに対して群噴孔ノズルでは、同じノズル噴孔流量で噴霧粒径が小さく、同等のペネトレーションとなり、均一希薄混合気形成が得られた。

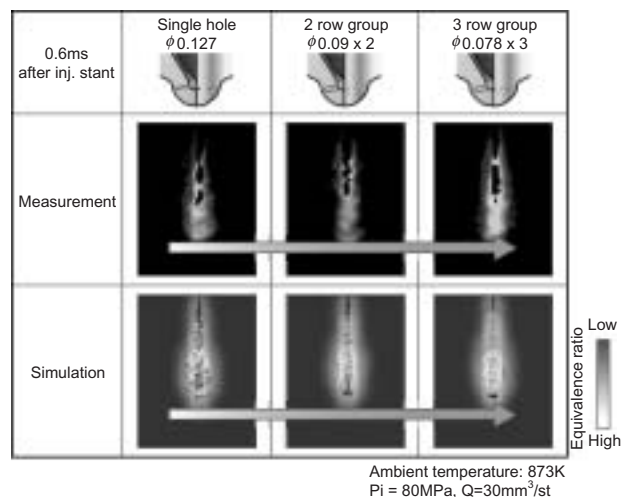


Fig. 9 Spray measurement and spray simulation

#### 4. 群噴孔ノズルによるエンジン性能

ここまでの、群噴孔ノズルによってペネトレーションを損なうことなく微粒化の改善が可能であることが明らかになった。そこで、3 L (4cyl) エンジンにて群噴孔ノズルを使用した低負荷領域での性能比較試験を行った。

Fig. 10に噴射タイミングをパラメータとして、熱発生率、筒内圧、NOx、PM、燃費、騒音を測定した結果を示す。

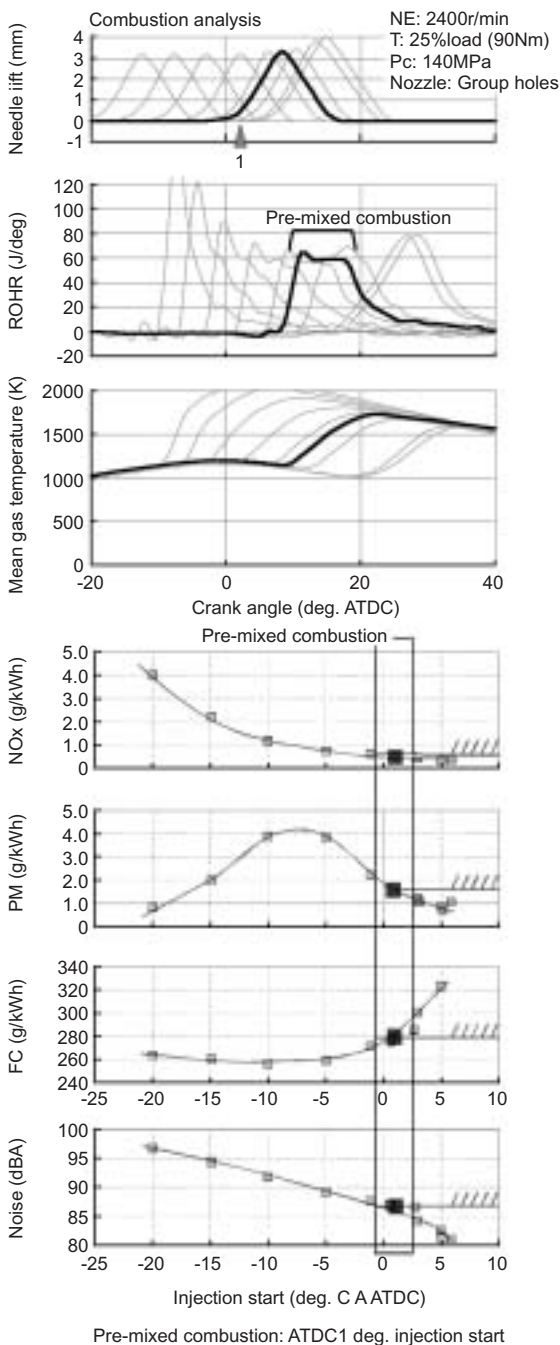


Fig. 10 Engine test result

一般に従来ノズルを用いた場合には、ディーゼルの典型的な拡散燃焼しか得られず、PMとNOxのトレードオフ関係が発生する。これに対して、Fig. 10の群噴孔ノズルではATDC 1° 噴射においてNOx、PMが同時に低減している。明らかに従来ノズルの拡散燃焼とは異なった燃焼形態が得られている。ニードルリフトと熱発生率の比較から、噴射が半分終了したときに着火している。更に着火後の熱発生率においても拡散燃焼形態は見られず、噴射による混合気形成と燃焼が同時進行する形態になっていると推定する。

従来ノズルと群噴孔ノズルを用いた場合の燃焼観察を行った。Fig. 11に熱発生率との比較で観察結果を示す。上段の従来ノズルの場合には、熱発生がピークに達する辺りで輝炎が観察され、高温の拡散燃焼が発生しているものと推定される。一方、下段の群噴孔ノズルの場合には、燃焼期間の全域において輝炎の発生が少なく、低温で燃焼室キャビティ外周近傍での燃焼が観察される。

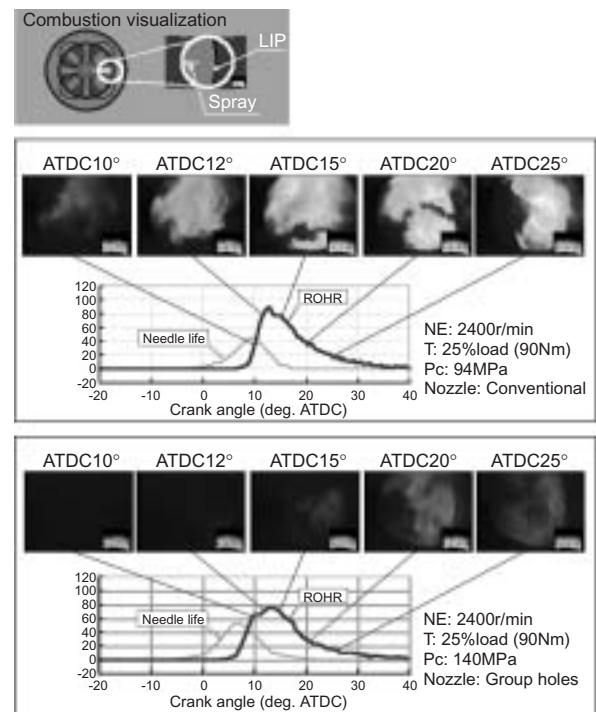


Fig. 11 Combustion observation

## 5. まとめ

CRSを用いたディーゼルエンジンに関する排出ガス有害成分低減の観点から、噴霧の微粒化とペネトレーションを両立させる「群噴孔ノズル」を提案した。噴霧、燃焼の観察およびシミュレーションによる解析から以下のことを明らかにした。

- (1) 「群噴孔ノズル」により、均一希薄混合気が得られることを噴霧観察および噴霧シミュレーションにより示した。
- (2) エンジン試験での性能評価において、群噴孔ノズルを用いた場合にPMとNO<sub>x</sub>が同時に低減できる噴射時期が存在する。

## <参考文献>

- 1) Miyaki, M., Fujisawa, H., Masuda, A., Yamamoto, Y.: "Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines", SAE paper 910252 (1991-3).
- 2) 中村兼仁, 伊藤昇平: "ディーゼル用コモンレールシステム-2", エンジンテクノロジー, Vol.5, No.1 (2003), pp.94-99.
- 3) 千田二郎, 神田知幸, 小林正明, 田邊弥彦, 藤本元: "エキサイプレックス蛍光法によるディーゼル噴霧濃度場の定量化(第1報)", 日本機械学会論文集(B), Vol.63, No.607, 607 (1997-3), pp.322-327.



## <著者>



西島 義明  
(にしじま よしあき)  
パワトレイン機器事業グループ  
特定開発室  
工学博士  
ディーゼル噴射系先行開発及びパワトレイン機器新商品探索に従事



増田 誠  
(ましだ まこと)  
パワトレイン機器事業グループ  
特定開発室  
ディーゼル噴霧燃焼シミュレーションに従事



佐々木 覚  
(ささき さとる)  
パワトレイン制御開発部  
低エミッション技術の開発に従事



大島 健司  
(おおしま けんじ)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
ディーゼル噴霧燃焼解析に従事