

特集 環境保護と経済性を両立させる 先進ディーゼルコモンレールシステム*

An Advanced Diesel Common Rail System for Achieving a better Balance between Ecology and Economy

依田 稔之
Toshiyuki YODA

In recent years, the world's industries are striving to preserve the environment. The automotive industry is also making great efforts to comply with new emission regulations including NOx and PM, and the requirement of reducing CO2 emissions from the perspective of global warming and energy saving. In light of this, diesel engines that have a significant potential to reduce CO2 emissions are attracting a lot of attention. In order to enhance the potential of diesel engines to reduce CO2 while continuing to solve its problems, which is slow, dirty and noisy, a common rail fuel injection system is vital. DENSO developed an advanced, 3rd generation common rail system that integrates a fuel injector capable of delivering up to nine time injection events during one combustion cycle at an injection pressure of 200 MPa. This paper describes the injection performance and effects of this 200 MPa common rail system.

Key words: Diesel engine, Fuel injection system / 3rd generation common rail system

1. 緒言

昨今、地球環境保護が世界規模の問題として大きく取り上げられている。我々自動車産業にとっては大気汚染の防止およびCO2削減の観点から、内燃機関の排出ガス低減および燃料消費を抑えることが重要である。

近年は、特に燃費が重視され、ハイブリッドや電気自動車の開発が急速に加速されているものの、世界規模での普及にはまだ時間を要すると考えられ、高い燃焼効率により、ガソリン車に比べ燃費に大きな優位性がある従来からのディーゼル車は、今後も重要な役割を担っていくと考える。1995年にコモンレールシステムが商用車で初めて採用されて以来、それまで遅い、汚い、うるさいと称されてきたディーゼルエンジンは大きく進化を遂げた。排出ガス低減が大幅に進み、今や50%のディーゼルシェアがある欧州をはじめとしてBRICs等の新興国や世界各地で、今後もディーゼル車が普及していくことが予測される。

本論文は、当社が2008年に生産を開始した第3世代のコモンレールシステム（以下、CRSと記す）についてその概要を述べるものである。第3世代CRSは、2002年に生産開始した第2世代CRS⁽¹⁻⁴⁾を更に進化させ、“200MPa”の超高压を実現し、9回のマルチ噴射を高精度で微小な噴射量まで可能とした。これにより、エンジンの高出力化、低燃費、欧州のEURO5排出ガス規制適合を実現した。この第3世代CRSは今後のEURO6規制にも対応できるポテンシャルを有するシステムである。

2. 燃料噴射システムの技術動向

2.1 燃料噴射システムへの要求

Fig. 1に日本、ヨーロッパ、アメリカのディーゼル排出ガス規制の変遷を示す。PM（Particulate Matter: 排気微粒子）、NOx（窒素酸化物）、HC（ヒドロカーボン）を主な対象とする排出ガス規制の強化は、ディーゼル車に対し極めて厳しい開発環境を作り出している。その中で、走行性能、燃費、静粛性を兼ね備えた商品力のあるエンジンを供給するため、燃料噴射システムの果たす役割は大きい。

ディーゼルエンジンの排出ガスを低減するために、①燃焼改良、②EGR等のエンジン制御、③後処理の技術開発が進められている。燃料噴射システムが、燃焼改良を担う最も重要な技術の一つであることは、現在も

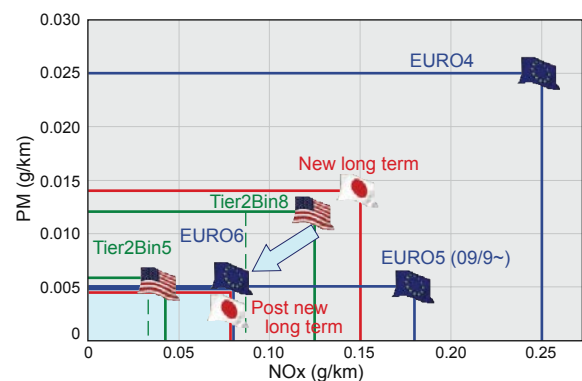


Fig. 1 Emission regulations (Japan, EU, U.S.A)

* 2009年9月28日 原稿受理

変わらない。噴霧の微粒化を促進しPM排出量を低減する「高圧噴射」、予混合燃焼比率の拡大と燃焼騒音を低減するパイロット噴射、主にエンジントルクを引き出すプリ/メイン噴射、不完全燃焼分の再燃焼を促進するアフター噴射、触媒活性の役割を担うポスト噴射を1回の燃焼行程にて行う「マルチ噴射」、排出ガスを安定して低減する噴射圧力・噴射量・噴射タイミングの高精度制御、といった高性能・高機能が要求される。

以上のような要求を満足するべく、当社では第1世代、第2世代に続き、世界で初めて200 MPaの超高压、9回までのマルチ噴射が可能な第3世代CRSを2008年に生産開始した。

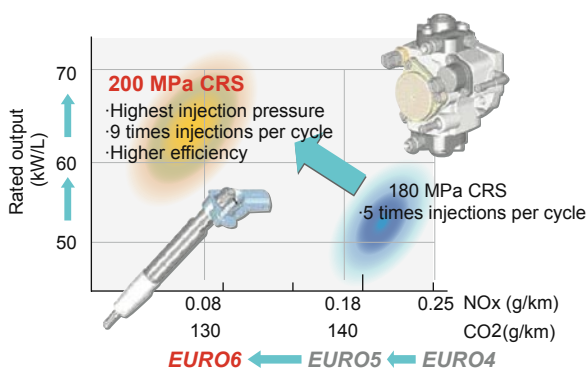


Fig. 2 3rd generation 200 MPa CRS

3. 第3世代コモンレールシステム

3.1 開発コンセプトおよびシステム構成と特徴

Fig. 2に第3世代CRSの開発コンセプトを示す。

第3世代CRSは2009年10月に導入されたEURO5排出ガス規制はもちろん、2014年から導入が予定されているEURO6規制をも視野に入れ、多様な制御自由度向上を目指し、四つのコンセプトに注力し開発した、

- ・高噴射圧化（200 MPa）による噴霧の微粒化向上
- ・高速ソレノイド採用による応答性向上
- ・可動部最適化による燃料リーク量低減
- ・低エネルギー駆動によるマルチ噴射の多段数化

システム構成をFig. 3に示す。200 MPaの超高压噴射を実現するサプライポンプ、高精度と高応答を低エネルギー消費で実現したインジェクタ、圧力制御用の圧力センサ、燃料圧力の減圧側を制御する減圧弁を装備したレール、前記インジェクタ駆動用のドライバおよび燃料噴射制御機能を備えたエンジン制御ECUで構成されている。基本構成は第2世代CRSと同じであり、置換えを可能にした。

以下、主要コンポーネントであるサプライポンプ、インジェクタ、および制御システムについて述べる。

3.2 HP3 サプライポンプ

ロータリ方式/アウトカム圧送方式、軽量化のため

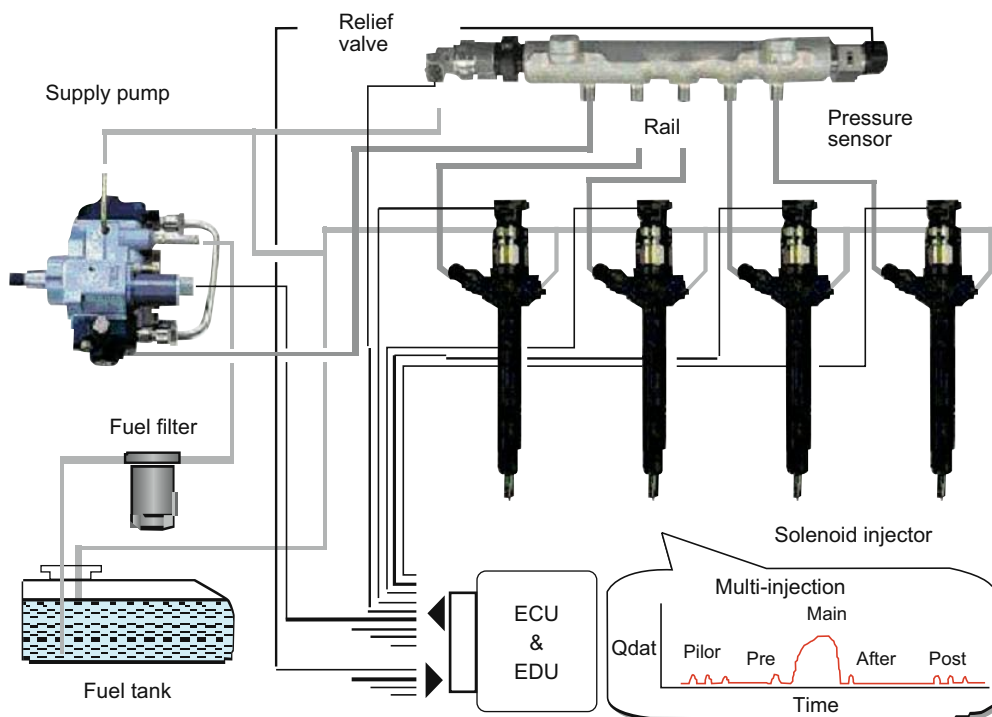


Fig. 3 3rd generation 200 MPa solenoid CRS

のアルミハウジング、低コスト化を狙ったリニアソレノイドタイプの吸入面積制御弁を用いた吐出量制御方式を採用し、吸入面積制御弁により必要な燃料量をポンプの圧送室に導入、対向プランジャーで燃料を昇圧圧送する、またトロコイド方式のフィードポンプを内蔵し、機械式、モーター式を問わず別ポンプを必要としない等、第2世代 CRS で採用した 180 MPa 対応の HP3 サプライポンプと同じ機能を持たせ、アウトカム、カムリング、吐出弁など耐圧強度が必要な部品の材料、加工、設計を見直し 200 MPa 化した。このため、ポンプの体格は変わらず搭載互換性を有している (Fig. 4)。

3.3 G3S インジェクタ

サプライポンプ同様に、第2世代 CRS で採用した2方弁方式、ソレノイドの通電時間、通電タイミングにより燃料噴射量および噴射タイミングを制御する G2S インジェクタをベースに、エンジンでの搭載互換ができるように基本構造・作動原理は変えず 200 MPa 耐圧と、更なる高応答化・高精度化を実現する設計とした (Fig. 5)。

高圧化に際し、燃料リーク量低減のため、リーク部の見直しを行い、200 MPa の燃料圧力下において、G2S インジェクタを 180 MPa で使用する時以下の燃料リーク量に抑えた。燃料リーク量の低減は、ポンプ仕事を低減しエンジンの燃費向上に寄与するのはもちろん、インジェクタからのリターン燃料の温度上昇抑制という点で車両燃料系の信頼性向上にも寄与している。

高応答化は、磁気回路の改良により電磁弁の反応速度を高め、油圧駆動部の最適化によりノズルの動作速

度を高めて実現した。このため、G2S では 0.4 ms であった噴射インターバル (マルチ噴射時の前段噴射の終了から後段噴射の開始までの噴射間隔) を 0.2 ms まで短縮した。

高精度化は、部品加工精度および組付け精度向上といった改良を施し実現した。

更に電磁弁に印加する電力の低減を行う事で電気回路の発熱課題に対応し、G2S と同等の電磁弁駆動電力で噴射回数を 5 回までから 9 回まで可能とした。

3.4 制御システム

高精度な噴射の実現にあたっては、噴射系コンポーネントの改良だけでなく、制御による精度向上技術の開発も行っている。

マルチ噴射の回数が増加すると、インジェクタ噴射量の気筒間バラツキが噴射した回数だけ積み上がる。車両使用過程では経時変化も積み上がる。これは排気性能、燃費、騒音の劣化に大きな影響を及ぼすため、経時変化も含めて噴射量を高精度に制御することが重要となる。第3世代 CRS では以下に示す制御手法を導入した。

- ・ SQL (Small Quantity Learning):
エンジン回転速度変化量から微小噴射量を検出し補正する
- ・ RQL (Relative Quantity Learning):
エンジン回転速度の積分値から各気筒の仕事量を検出し気筒間噴射量ばらつきを補正する
- ・ MQL (Mean Quantity Learning):
排気 O₂ 濃度を検出し平均噴射量を補正する

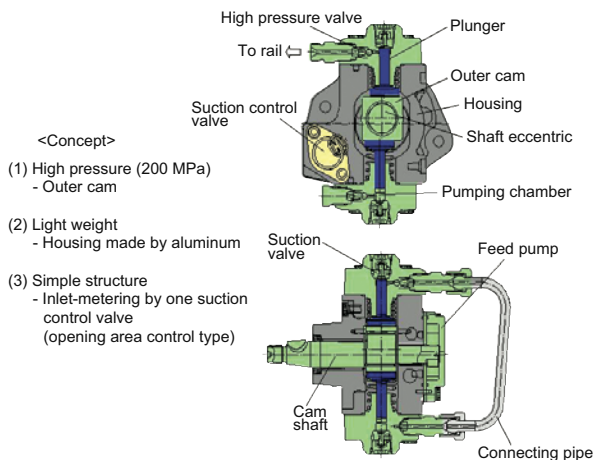


Fig. 4 Supply pump

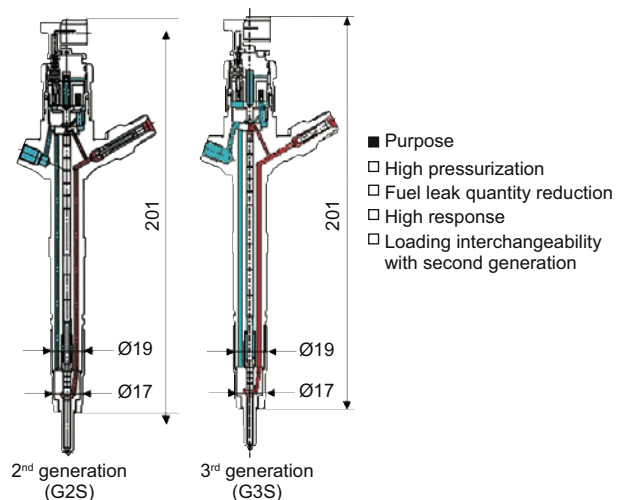


Fig. 5 3rd generation injector (G3S)

このうち, SQL について以下に詳述する。

SQL は, 第 2 世代 CRS で既にそのコンセプトの一部を採用していた。無負荷のアイドル安定時に 4 ~ 5 回均一に分割噴射し, エンジン回転速度の釣り合いから 1 回の微小噴射量 1 ~ 2 mm³/st. を基準噴射量と比較して, その噴射量指令値を補正する学習制御であり, 新車から廃車まで低噴射圧域の微小噴射量精度を確保した。

排出ガス低減, 燃費向上のため, マルチ噴射の使用域が高圧域にまで拡大し, 第 3 世代 CRS では高圧域での微小噴射量学習制御を取り入れている。Fig. 6 に制御の概要を示す。エンジン減速時など, 無噴射時に所定の圧力条件の下, 1 ~ 3 mm³/st. の燃料を微量噴射し, エンジン回転の低下速度の変化量により実噴射量を推定し補正する。この学習制御により, 200 MPa の超高圧まで噴射量補正が可能となった。

4. 性能

4.1 噴射性能

G3S インジェクタの性能について記す。

Fig. 7 に噴射率波形の比較を示す。高応答化した G3S は, G2S に比べ初期噴射率が向上し, 噴射期間が約 7 %

短縮している。

噴霧構造として, Fig. 8 に噴射期間中のペネトレーション, Fig. 9 に噴霧平均粒径の比較を示す。常温, 常圧場で G3S は G2S に比べ, ペネトレーションで 20% 増加, 平均粒径で 6 % の微粒化が確認された。

以上の噴射性能向上は, ソレノイド改良による燃料制御弁の開閉弁速度の高速化, 更には 200 MPa 高圧噴射によるものである。

4.2 エンジン, 車両性能

4 気筒, 2 リッターエンジンに第 2 世代 CRS と第 3 世代 CRS を搭載し, 性能比較を行った。

Fig. 10 にスモーク排出量, 噴射時期, ノズル流量, 吸入圧を同じとしたときの燃費と出力性能の比較を示す。180 MPa 第 2 世代 CRS に対し, 200 MPa 第 3 世代 CRS は燃費 6 g/kWh 低減, 出力は 3 kW/L 向上することが確認された。

Fig. 11 に, エミッション評価の一代表点で, 等スモーク排出量としたときの NO_x 低減効果を確認した結果を示す。等ノズル噴孔流量下で, 約 30% 低減が確認された。

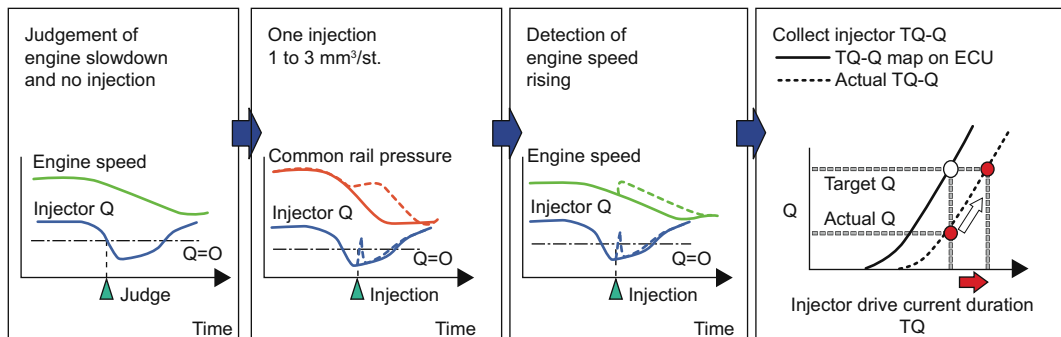


Fig. 6 SQL control

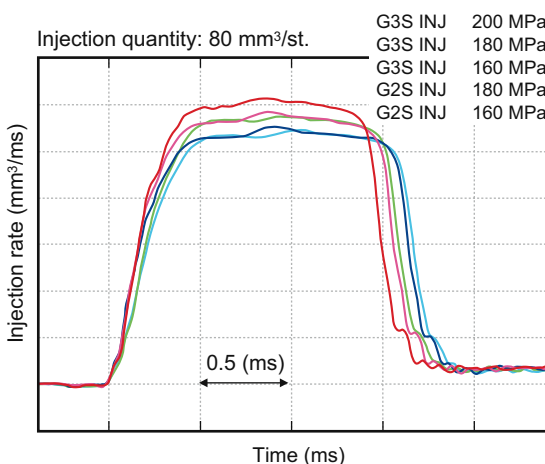


Fig. 7 Injection rate

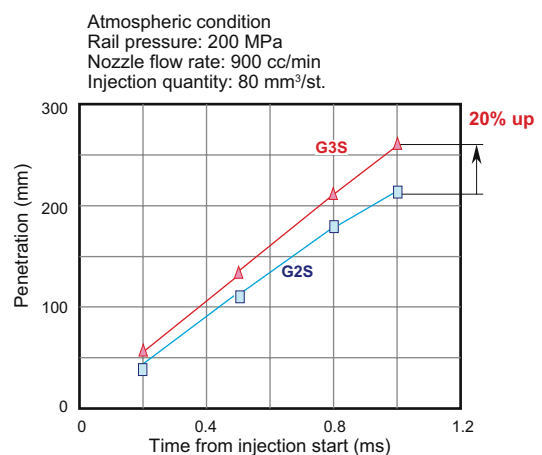


Fig. 8 Penetration performance

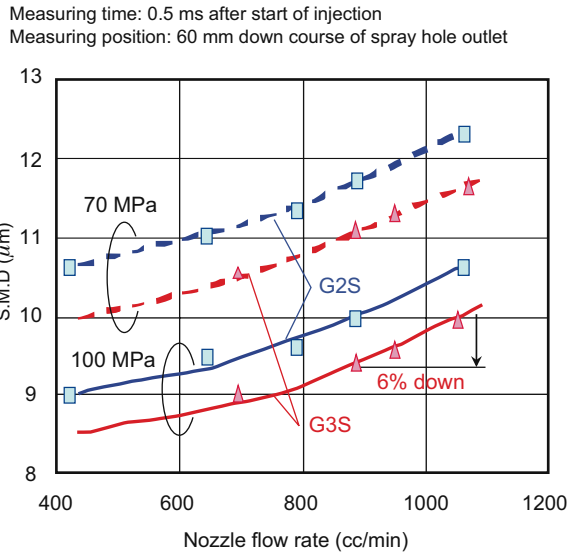


Fig. 9 Sauter mean diameter characteristics

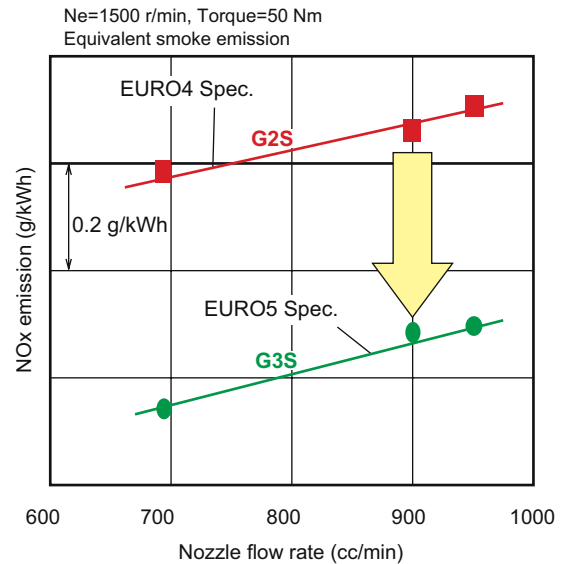


Fig. 11 Engine emission performance

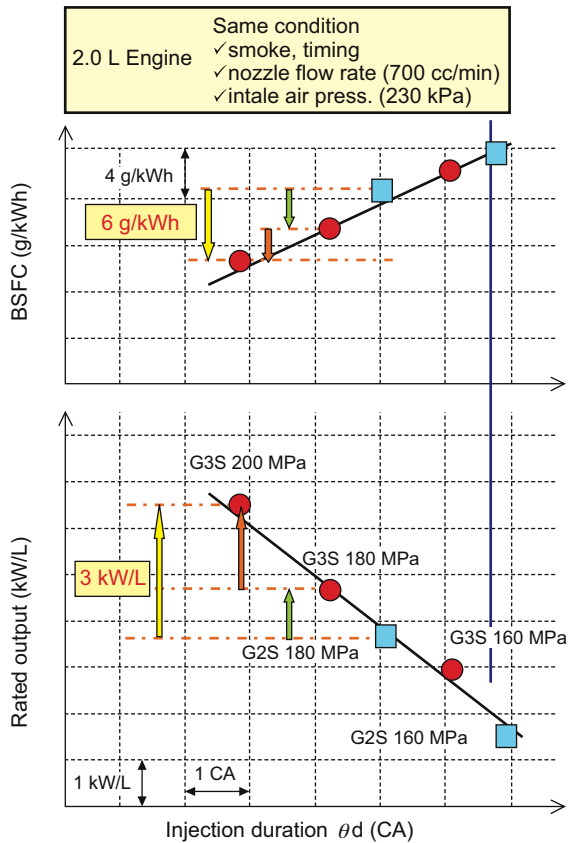


Fig. 10 Engine output performance

5. まとめ

第3世代 CRS の持つポテンシャルとその効果について、以下まとめる。

- (1) 噴射圧力 200 MPa, 最大噴射回数 9 回のマルチ噴射, 高噴射量精度を実現し, 出力向上, 燃費低減, 排出ガス浄化に大きく貢献した。
- (2) 従来技術の延長で主要コンポーネントを開発し, エンジンへの搭載互換も可能とした。

6. 結言

当社は、1995 年に世界最初のコモンレールシステムを生産開始して以来、コモンレール噴射系のサプライヤとしてたゆまぬ技術開発を進めて来た。今や更なる進化を遂げた第3世代コモンレールシステムを供給し、新たな技術革新を成し遂げ、時流に先駆けた多様、かつ高難度な顧客の要求を実現し、ディーゼル車の排出ガス、走行性能、燃費、静粛性の向上、果ては地球環境保護と経済性の両立に大きく貢献している。

今後更なる進化を遂げるべく次なる開発に取り組んで行く。

7. あとがき

本論文に記載したコモンレールシステム開発に関し、深い理解と共感を持って開発をサポートして頂いたエンジン、車両メーカー各社に深く感謝する。

<参考文献>

- 1) Katsuhiko Takeuchi, Tetsuya Toyao,
“Development of 2nd Generation Common Rail
System”, I-Mech EC610/013/2003.
- 2) Yasushi Tanaka, Koji Nagata: Journal of Society of
Automotive Engineers of Japan, Vol. 58, No. 4, pp.
19-24, 2004. Type references over these paragraphs.
- 3) Mamoru Oki, Shunichi Matsumoto, Yoshio
Toyoshima, Kazuyoshi Ishisaka, Naoyuki Tsuzuki,
“180 MPa Piezo Common Rail System,” SAE paper
2006-01-0274, 2006.
- 4) Hitoshi Tomishima, Takeo Matsumoto, Mamoru
Oki, Koji Nagata, “The advanced Diesel Common
Rail System for Achieving a Good Balance Between
Ecology and Economy” SIIMC-2008, 2008.



<著 者>



依田 稔之

(よだ としゆき)

ディーゼル噴射技術2部

ディーゼル燃料噴射技術開発に従事