

特集 ディーゼルエンジン用1800barコモンレールシステムの開発*

1800bar Common Rail System for Diesel Engines

田中 泰

Yasushi TANAKA

長田 耕治

Koji NAGATA

Recently, a common-rail fuel injection system for automotive diesel engines has been developed and commercialized. The common-rail system has greatly contributed to improving diesel engine performance through higher injection pressure and increased flexibility of injection control. This report describes the DENSO 2nd-generation common-rail system, which achieved ultra-high pressure injection of 1800bar and multiple injections per combustion cycle by using precise small-quantity injection control. This product has been used commercially in one model of passenger car (2-liter engine) on the European market. It meets the requirements of the very strict EURO4 regulations for PM and NOx without using DPF (Diesel Particulate Filter). In addition, due to the multiple injection system, the noise of combustion while idling is drastically reduced, to a level equal to gasoline engines.

Key words : Diesel engine, Fuel system, Engine component, Fuel system, Spray, Combustion, Common rail, Fuel injection

1. はじめに

自動車用内燃機関では、燃費とパワーに優れるディーゼル車が特にヨーロッパで高く評価されており、車両の約40%を占めるまでに増加してきている。一方で、ディーゼルエンジンの課題は、粒子状物質（PM：Particulate Matter）とNOxに代表される排出ガス中の有害成分をいかに抑制するかであり、PMとNOxの排出ガス規制は、近年一段と厳しさを増して施行されている。この課題に対応するために、エンジン燃焼系、吸気系、燃料噴射系、排気後処理にて多く研究開発がなされている。この中でも燃料噴射システムの持つ役割は大きく、当社では従来の燃料噴射装置に対してより高圧噴射が可能で噴射の制御自由度が高いコモンレールシステムを世界に先駆けて開発・製品化し、ディーゼルエンジンの性能向上・排出ガス低減に寄与してきた。

本稿では、燃料（軽油）を最大1800barまで高圧に加圧・制御を行なう、ディーゼルエンジン用の燃料噴射装置であるコモンレールシステムについて技術的な紹介を行う。

2. コモンレールシステムの構成、作動、特徴

Fig. 1にコモンレールシステム構成図を示す。主要な構成製品はサプライポンプ（高圧燃料の生成）、レール（高圧燃料を蓄圧）、インジェクタ（燃料を噴射）とこれらを制御するECU及び、エンジン作動状態を検

出するセンサ類から構成されている。コモンレールシステムは、サプライポンプにて生成した高圧燃料を、パイプを經由してレール（蓄圧室）に蓄え、インジェクタ内の電磁弁によるノズル背圧の制御により、噴射の開始と終了をきめるという電子制御燃料噴射システムである。

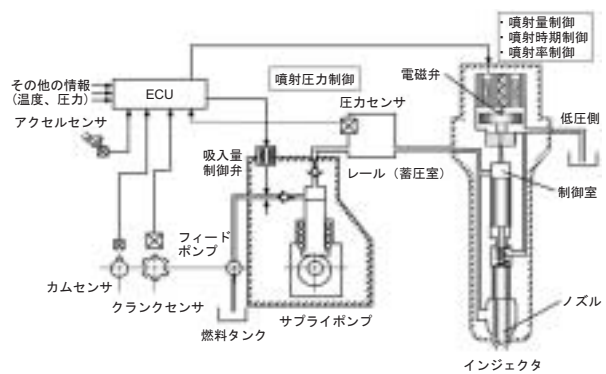


Fig. 1 コモンレールシステム構成

コモンレールシステムの特徴をTable 1に示す。コモンレールシステムは、燃料噴射の重要な特性である噴射圧力、噴射量、噴射タイミング、噴射率をそれぞれ独立に制御できる制御自由度において高いポテンシャルを有している。これらの特徴は、前述の排出ガス低減に関していうと、二つの特徴に集約できる。

* (社)自動車技術会の了解を得て、「自動車技術」Vol. 58, No.4, 2004より転載

(1) エンジン低回転域からの高圧噴射化 (Fig. 2)

噴射を超高圧化することにより、燃料噴霧粒子がより微粒化され、燃料と空気の混合が促進される。このためより完全な燃焼となり排出ガス中のPM低減が可能になる。コモンレールシステムは、レール (蓄圧室) にいったん高圧燃料を蓄圧して、各気筒の噴射はインジェクタの電磁弁が調量する方式のため、高圧にした燃料を逃がすことなく有効に生かす技術となっている。

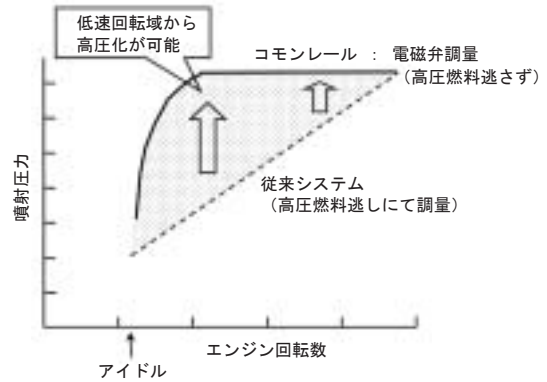


Fig. 2 エンジン回転数と噴射圧力

(2) 複数回噴射/1 燃焼サイクル (噴射率制御)

コモンレールシステムは、インジェクタの電磁弁を複数回開閉することにより、従来の噴射系ではできなかった1 燃焼サイクルあたり複数回噴射が可能であり、燃焼制御技術の向上を図ることができる。

第1世代の商用車 (トラック用) システム (最大1200bar, 2回噴射) は1995年に世界に先駆けて生産、1998年から日本で本格的に量産され、日本の商用車メーカー4社に採用されている。更に乗用車用システム (最高1450bar, 2回噴射) はトヨタ自動車 (株) との協同開発により1999年6月から生産を開始し、ヨーロッパ市場向けの車に採用されてきた。

Table 1 コモンレールシステムの特徴

ディーゼル燃料噴射装置のニーズ	コモンレール方式の特徴とポテンシャル
高圧噴射化 噴射圧力制御	・電磁弁調量により高圧化が可能 ・レールの圧力制御により噴射圧力を任意に制御可能
噴射タイミング制御 噴射量制御	・インジェクタ電磁弁の通電時間により任意に制御可能
噴射率制御	・1 燃焼サイクルあたり複数回噴射が可能
高精度, 高機能	・電子制御利用による制御精度向上や機能向上が可能
製品標準化 (搭載性, コスト)	・サプライポンプ, レール, インジェクタの標準化が可能

これらの第1世代システムの開発と生産経験より、コモンレールの持つ特徴を更に生かした第2世代システム (最高1800bar, 5回噴射) を開発して2002年6月に実用化した。以下、この第2世代の1800barコモンレールシステムについて解説する。

3. コモンレールシステムの開発経過

Fig. 3に当社のコモンレールシステムの開発経過を示す。

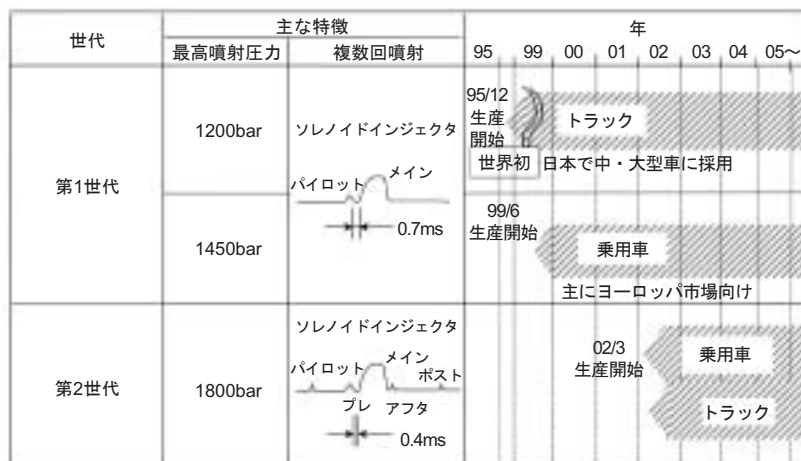


Fig. 3 コモンレールシステム開発経過 (デンソー)

4. 1800barコモンレールシステムの開発

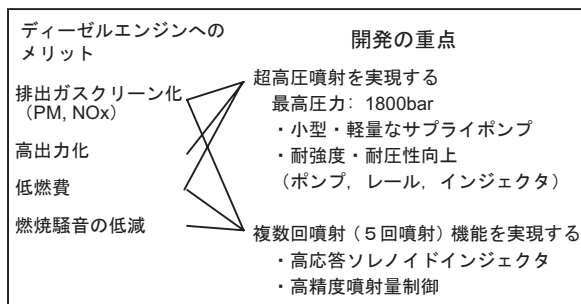
欧州のディーゼル乗用車の排出ガス規制を例にとり、排出ガス低減技術のまとめをFig. 4に示す。2005年には、PM、NO_xともに現行規制値を50%低減した、厳しいEERO4規制が施行される。

燃料噴射装置では、噴射圧力の高圧化（最高1800bar）と複数回噴射および高精度な噴射量制御が重要な技術であり、第2世代コモンレールの開発の重点を以下の2点におき、製品の開発とシステム制御系の開発を行なった。

- (1) 最高1800barの高圧噴射
- (2) 高精度な複数回噴射（最大5回噴射/1燃焼サイクル、最小噴射インターバル：0.4ms）

Table 2に、ディーゼルエンジンへのメリットとこれらの開発重点項目との関係を示す。

Table 2 第2世代コモンレールシステムの開発



高圧噴射化は、エンジン出力の点からは噴射期間の短縮やノズル噴孔の小径化が可能になるためエンジンの高出力化ができる。一方で、ノズル噴孔の小径化は、エンジンの部分負荷域でも燃料の霧化を良くするため排出ガス低減のためにも重要な仕様である。

排出ガスのPM低減については、日本、欧州、米国では更に厳しい排出ガス規制が検討されており、パティキュレートフィルタなどの排気後処理装置が開発・生産されている。コモンレール噴射系では、高圧噴射を利用して、できる限りPMを低減することによって、排気後処理装置の負荷を低減することができると考えられる。更に高圧噴射化によるメリットは、高出力化や低燃費化が可能であり、ディーゼルエンジンの持つ良さを更に向上させることができる。次に、高精度な複数回噴射については、排出ガス低減やディーゼル燃焼騒音低減のために、複数回噴射による燃焼について多くの研究がなされており、高精度な複数回噴射機能の開発に取り組んだ。Table 3にシステムの特徴とエンジン・車両での期待効果をまとめる。

5. 1800barコモンレールシステム

5.1 システム構成

Fig. 5に第2世代のコモンレールシステムを示す。サプライポンプは1800barまで高圧化することができる小型・軽量タイプを新たに開発した（HP-3、HP-4ポンプ）。また、インジェクタは高応答なソレノイドの開発により、最大5回の複数回噴射が可能な高応答ソレノイド式インジェクタを開発した。Fig. 4に示すとおり乗用車から大型商用車まで対応できるようにサプライポンプは3種類をシリーズ化しており、レール、インジェクタは、エンジンへの搭載上外観形状は異なるが、内部構成は部品の共通化をしている。ECU（エンジンコントロールユニット）は、32bit高速ECM（エンジンコントロールモジュール）とEDU（エレクトロニックドラバーユニット）を一体小型化した他、複数回噴射や高精度な噴射制御等の制御機能を大幅に向上させた。Fig. 6にシステム構成製品の写真を示す。

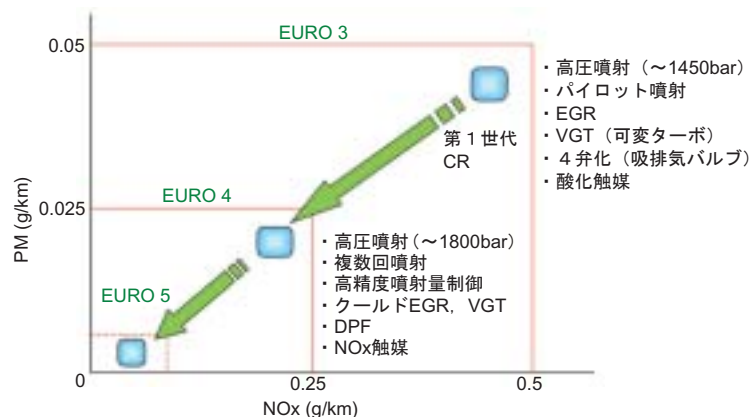
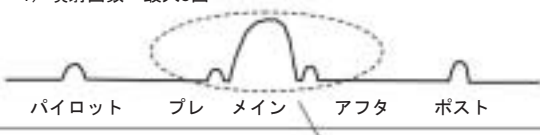
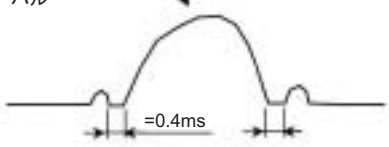



Fig. 4 欧州排出ガス規制へのアプローチ手法 (乗用車)

Table 3 1800bar共通レールの特徴と予想効果

項目	予想効果
1 高噴射圧化 最高レール圧力: 最大1800bar	<ul style="list-style-type: none"> ・噴射期間短縮→高出力化 ・ノズル噴孔小径化, 噴霧微粒化→PM低減
2 複数回噴射 1) 噴射回数: 最大5回  2) 噴射インターバル 0.4ms  3) 高精度なパイロット噴射量制御 $Q_p=1.0 \pm 0.5 \text{ mm}^3/\text{st}$ 	複数回噴射の使用効果 (例) <ul style="list-style-type: none"> ・パイロット: 予混合燃焼による PM, 燃焼騒音低減 ・プレ: メイン噴射の着火遅れ短縮による NOx, 燃焼騒音低減 ・アフター: 拡散燃焼の活性化による PM低減 ・ポスト: 後処理装置の触媒活性化
3) 高精度なパイロット噴射量制御 $Q_p=1.0 \pm 0.5 \text{ mm}^3/\text{st}$	<ul style="list-style-type: none"> ・ PM, NOxの低減, 燃焼音低減

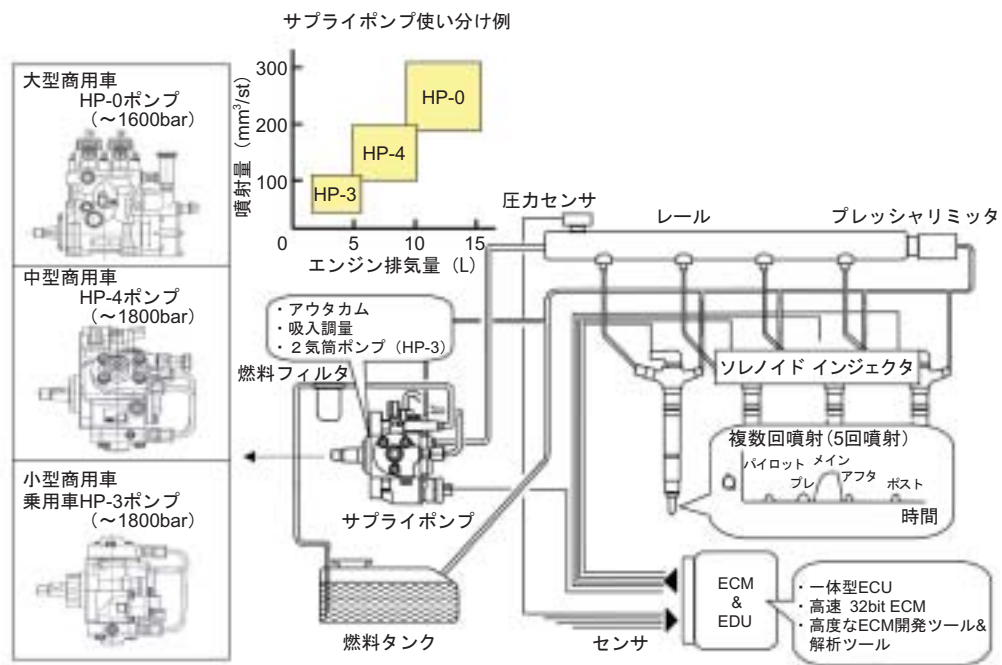


Fig. 5 第2世代1800bar共通レールシステム



Fig. 6 システム構成製品

5.2 サブライポンプ (HP-3, HP-4)

Fig. 7に新しく開発したサブライポンプ (HP-3 : 乗用車用) を示す。第1世代システムの乗用車用サブライポンプの最高圧力は1450barであったが、これ以上の圧力を生成するには従来のインナカム方式では機構的に限界があった。1800barの実現のため、構造をローラレスの偏心アウタカム方式として、しゅう動部

- ① 高圧化(1800bar)
 - ・ 耐圧性向上
 - ➡ 不純物の少ない材料開発
 - ・ 摺動部耐焼付性向上
 - ➡ CrNコーティング(ブランジャ)
- ② 小型軽量化(3.8kg)
 - ・ 低圧部をアルミニウムハウジング
 - ・ FEM解析による最適設計
- ③ 低コスト化
 - ・ 部品点数削減
 - ➡ ブランジャ、タベットの一体化
 - ・ 部品の標準化

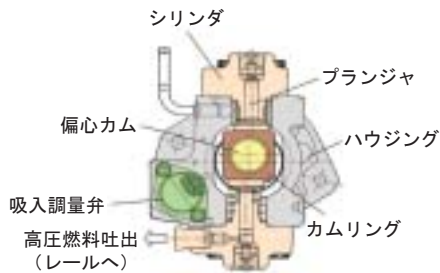


Fig. 7 サプライポンプ (HP-3) の設計重要点

分の面圧を低減している。HP-3ポンプでは、ブランジャとシリンダを2筒として水平対抗に配置することにより、小型エンジンでも搭載できるような小型化を図った。また、高圧部を鉄製のエレメントに集結することにより、ポンプハウジングにアルミダイキャストを利用して軽量化を図った。1800barという超高压下での疲労強度を確保するため、不純物の少ない新しい材料の開発や、生産技術的にはブランジャのしゅう動部分へのセラミックスコーティング製造技術や、0.5 μ mレベルの精密加工技術を利用している。レール

(蓄圧室)の燃料圧力を目標圧力に制御するために、サプライポンプは必要な量だけをレールに燃料を吐出する方式により効率を高めている。このために1個のリニアソレノイド式吸入調量弁により、ブランジャ室への燃焼吸入量を制御している。また、トロコイド式のフィードポンプを内蔵している。

中型商用車用には、筒数を3筒化したHP-4ポンプをシリーズ化して設定した。Fig. 8にHP-3ポンプとHP-4ポンプの仕様を示す。

5.3 ソレノイドインジェクタ (G2)

Fig. 9に、第2世代1800barの新ソレノイドインジェクタ (G2インジェクタ) の設計重要点を示す。耐圧強度確保のため、サプライポンプと同様に不純物の少ない材料開発とともに、ノズルシート部分の磨耗低減のためコマンドピストン径を小型化してノズル閉弁時の油圧を低減している。第2世代のインジェクタでは、噴射インターバル(噴射の終了から次の噴射開始までの時間)の短縮化を図り、かつ複数回噴射を実現するために、第1世代インジェクタの約2倍の応答速度が必要であった。そのため、エネルギー損失の小さい複合軟磁性材料を利用した高応答ソレノイドを開発するとともに、バルブの可動部質量低減と制御室の容積の最適化により噴射の開閉速度に関連する油圧応答速度を向上させた。

このようにして開発したソレノイドインジェクタは1800barの耐圧性と、1万分の4秒(0.4ms)という高速な噴射間隔での微量な燃料噴射を実現し、気筒あた

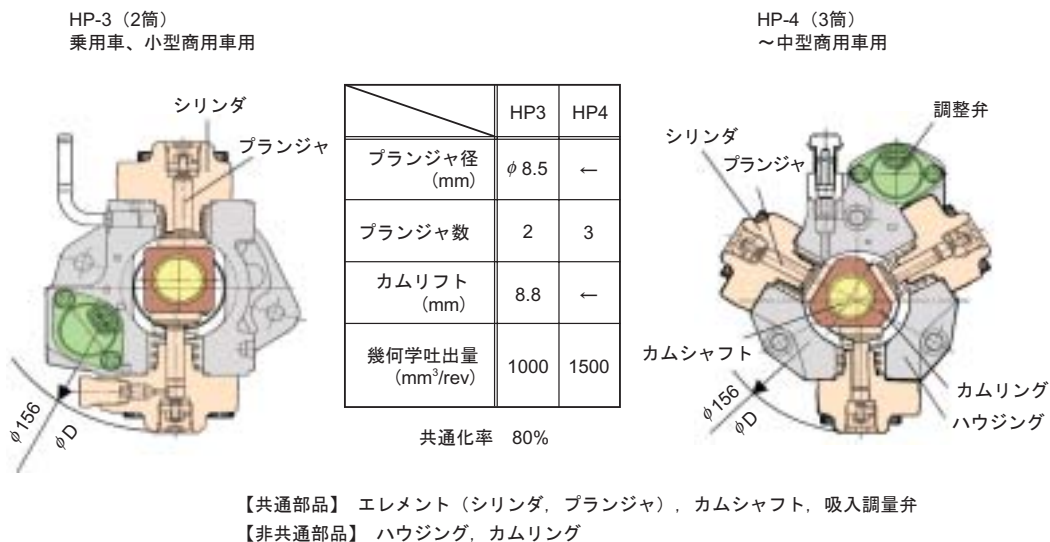


Fig. 8 HP-3/HP-4サプライポンプ

りの燃焼行程で最大5回の複数回噴射が可能になった。Fig. 10に5回噴射のデータ例を示す。

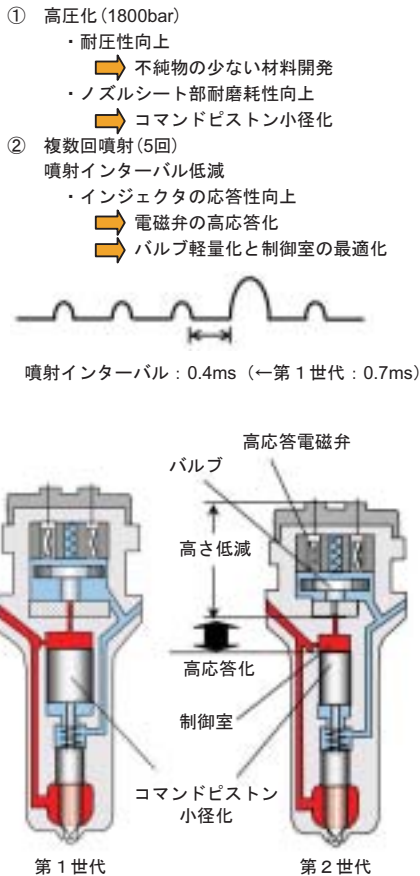


Fig. 9 インジェクタ (G2) の設計重要点

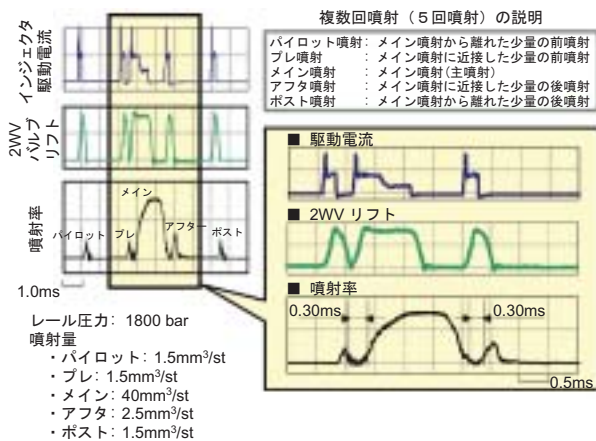


Fig. 10 インジェクタ (G2) の5回噴射性能

5.4 制御システム

インジェクタの噴射量制御精度の向上は、燃費、排出ガス低減のために重要であり、また最近の研究ではパイロット噴射におけるパイロット噴射量が小さいほど、排出ガスであるPMとNO_xのトレードオフが少なくなることが分かってきている。微少噴射量の制御精度を向上するために、加工精度の向上によりインジェクタの噴射量調量精度を上げるとともに、インジェクタの電磁弁の通電時間により噴射量を制御するコモンレールシステムではインジェクタの個体間バラツキやエンジンの運転状況による経時変化に対しても各インジェクタの補正制御が可能である。この補正制御により、パイロット噴射量を 1 mm³/st ± 0.5 mm³/st の精度で制御することが可能になった。

6. エンジン, 車両性能

以上に述べた1800barコモンレールシステムのエンジン, 車両性能結果例についてまとめる。対象エンジンは排気量: 2L, 4気筒直噴ディーゼルエンジンであり車両は乗用車である。

1800barと複数回噴射による効果を以下の項目について述べる。

- (1) エンジン出力の向上
- (2) 排出ガス (PM, NO_x) の低減
- (3) アイドル燃焼騒音の低減

エンジン出力の向上について高圧噴射化による効果をFig. 11に示す。高圧化により噴射期間の短縮が可能になり、等スモークレベルでのエンジン出力が向上する。この例では、1600barから1800barの高圧化により、約6%の出力向上が可能である。

次に排出ガスの低減について、前述のとおり出力点での高圧噴射化によりノズル噴孔径が小さくできるため、部分負荷域でも噴霧の微粒化が促進され排出ガスが低減できる。また、Fig. 12に示すとおり、パイロット噴射量を $Q_p = 1 \pm 0.5 \text{ mm}^3/\text{st}$ という高精度で制御することにより、排出ガスが低減でき、パイロット噴射量が小さいほど、またインジェクタ間の噴射量ばらつきが小さいほど、排出ガスを低減できるという結果が得られた。

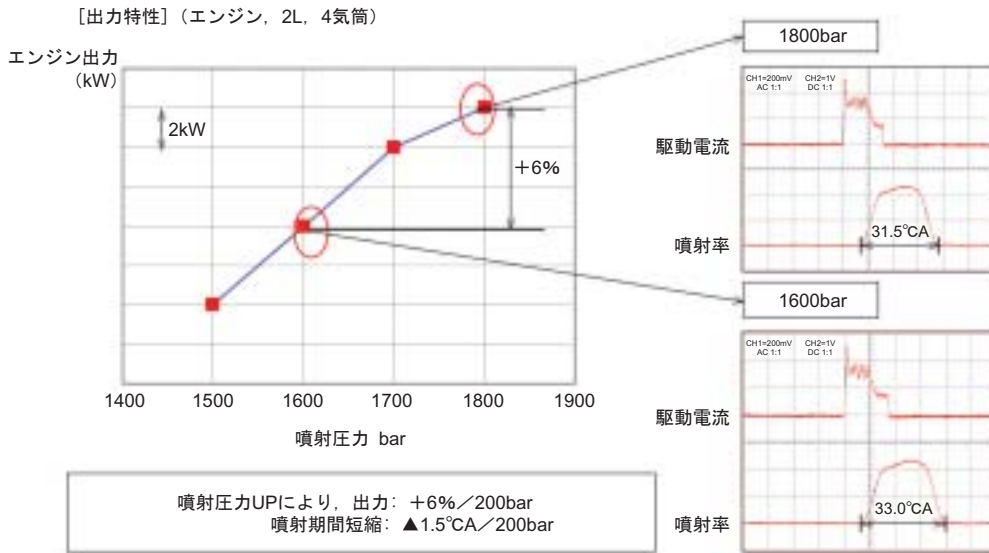


Fig. 11 高圧噴射によるエンジン出力向上

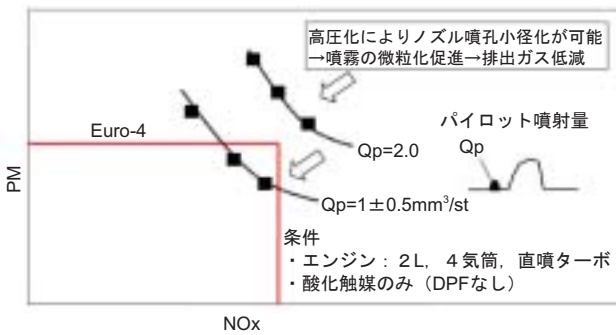


Fig. 12 高精度パイロット噴射による排出ガス低減効果

アイドル燃焼音の低減について、複数回噴射の評価例をFig. 13に示す。アイドリング状態での噴射を5回に分割して制御した場合、従来のパイロット噴射（2回噴射）のレベルよりも更に5 dB(A)の低減効果が得られた。これは、アイドル噴射量を精度良く5回の噴射で分割することにより、熱発生が少ない予混合燃焼による効果であると考えられる。

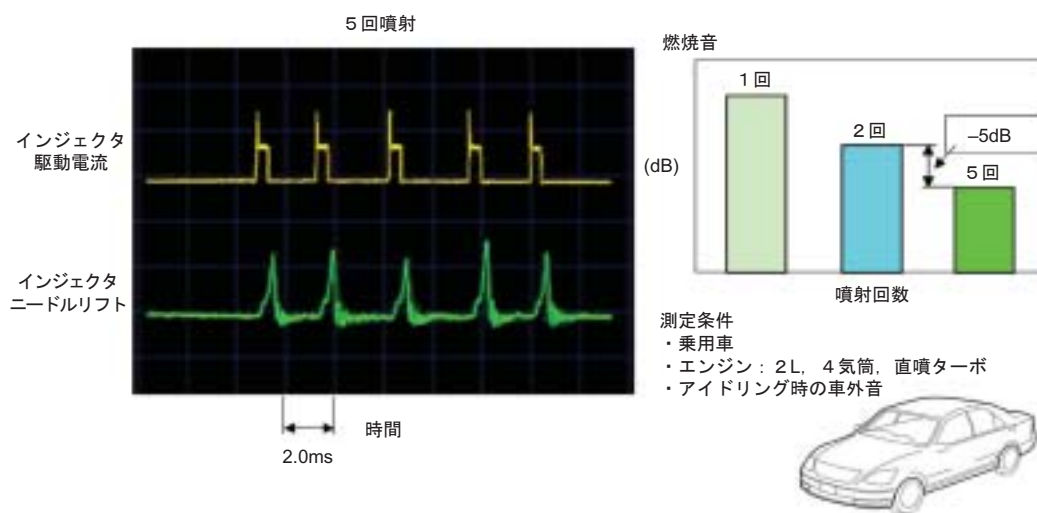


Fig. 13 5回噴射によるアイドル燃焼音の低減例

7. まとめ

クリーンで高出力・低燃費のディーゼルエンジンの実現に貢献できる燃料噴射装置として、第2世代1800barコモンレールシステムの開発・実用化を行った。本システムは、車両重量1600kgクラスの乗用車にて、DPF（パーティキュレートフィルタ）なしで、厳しい規制である欧州EURO4規制をクリアした。また、高精度な複数回噴射技術を開発して、燃焼適合の自由度を向上すると共に、アイドル音についてもガソリン車に匹敵する静粛性を実現した。今後も、コモンレール噴射装置の持つ利点を更に進化させて、排気後処理技術と組み合わせて更なる排出ガス低減に取り組んでいく。

8. 謝辞

第2世代コモンレールシステムの開発にあたり、共同開発を頂いたトヨタ自動車（株）の関係者の皆様並びに適合開発に多くのご指導を頂いたマツダ（株）の関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) M. Miyaki et al.: "Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines" SAE paper 910252
- 2) 伊藤昇平: "コモンレールシステム", エンジンテクノロジー, Vol.1, No.4 (2001), pp.46-48.
- 3) K. Takeuchi et al.: "Development of second generation common rail system" I-MechEC610/013/2003
- 4) Y. Terazawa et al.: "Mazda's New Common Rail DI Diesel Engine" Auto Technology, Vol. No.3, Jun (2003)
- 5) 中川雅人, 他: ディーゼル用コモンレールシステム (1), エンジンテクノロジー, Vol.4, No.6 (2002), pp.107-111.
- 6) 中村兼人, 他: 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.
- 7) 西村輝一, 他: 直噴ディーゼルエンジン, エンジンテクノロジー, Vol.4, No.4 (2002), pp.9-11.

<著者>



田中 泰
(たなか やすし)
ディーゼル噴射技術1部
コモンレールシステムの開発に
従事



長田 耕治
(ながた こうじ)
ディーゼル噴射技術1部
ディーゼル噴射技術開発マネジメ
ントに従事