

特集 燃料噴射制御によるディーゼルエンジンの燃焼音低減*

Reduction of Diesel Combustion Noise by Controlling Fuel Injection

依田 稔之

Toshiyuki YODA

The Common Rail Fuel Injection system, which enables the proper adjustment of the injection pressure, timing, and frequency during one combustion-cycle of a diesel engine, contributes to the reduction of emissions, NOx, and particulate matters. Now, through a combination of this system and the development of after-treatment technology, such as de-NOx, oxidant catalysts, and diesel particulate filters, the emission reduction performance of diesel engines has almost reached the emission target; the same level of performance as gasoline engines. In addition, this system has been shown to be able to reduce combustion noise known as “Diesel knock”. It is well known that combustion noise can be reduced by using two injections in each combustion-cycle. Concerning the injection frequency, this system can inject fuel more than two times per combustion-cycle. Thus, this system is able to increase the flexibility of the engine setup conditions to reduce noise more than ever, thereby realizing more comfortable diesel vehicles through enlarging the optimum engine operation region with low noise.

Key words: Diesel engine, Common rail fuel injection system/Noise reduction

1. 緒言

コモンレール式燃料噴射装置は、噴射圧力、噴射タイミングの設定、1燃焼サイクルあたりの複数回（マルチ）噴射など、その高機能を利用して、NOx、PMを代表とする自動車排出ガス浄化に貢献している¹⁾²⁾³⁾。いまやde-NOx触媒、酸化触媒、DPF（ディーゼルパーティキュレートフィルタ）など後処理装置の発達とあいまってディーゼルエンジンの排出ガス性能はガソリンエンジンのそれと同じレベルを目標とするまでに達している。

マルチ噴射の採用はまた、ディーゼルノック音と呼ばれる燃焼音も低減する。元来、パイロット（2回）噴射による燃焼音の低減は知られていたが、コモンレール式燃料噴射装置は噴射回数を増やすこと、その範囲の拡大を可能とし、燃焼騒音のさらなる低減、低減範囲の拡大により、ディーゼルエンジン搭載車を快適なものとしている。

本論文では、コモンレール式燃料噴射システムを用いた燃焼音低減効果について紹介する。

2. コモンレール式燃料噴射装置の特徴

Fig. 1に燃料噴射装置のコンセプトを示す。列型ポンプを代表とする従来方式は注射器のように燃料を押し出す仕組みである。エンジン回転軸に同期したカム軸でプランジャを駆動する噴射ポンプと、ばね付勢力で閉弁、燃料圧力で開弁するノズルが、高压燃料配管で連結された構成となっている。噴射ポンプのプランジャにより燃料が圧送され、ノズルの開弁圧以上に燃料圧力が上昇すると燃料噴射を開始

する。燃料噴射圧力は、エンジン回転速度に比例するプランジャ速度とプランジャ断面積の積（ポンプ送油率）およびノズルの噴孔流量により決まる。コモンレール方式は風船に燃料を蓄えておいて、燃料を噴射させる仕組みである。燃料を高压化するための圧送ポンプと、高压燃料溜めとなるレール、なんらかのアクチュエータで駆動されノズルを開、閉弁させるインジェクタが高压燃料配管で連結されている。噴射圧力はエンジン回転速度に依存することなく任意に設定でき、低速域から高压化できる特徴がある（Fig. 2）。

3. コモンレール式燃料噴射装置

3.1 システム構成

システム図をFig. 3に示す。システムは乗用車から大型商用車まで対応できるようにシリーズ化されている。サブライポンプは必要噴射量に応じて三つのバリエーションを持

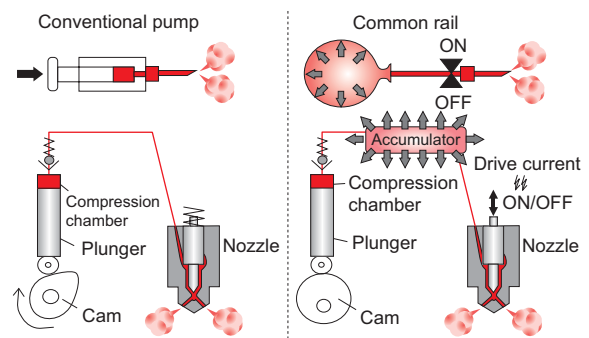


Fig. 1 Common rail concept

* 2010年7月30日 原稿受理

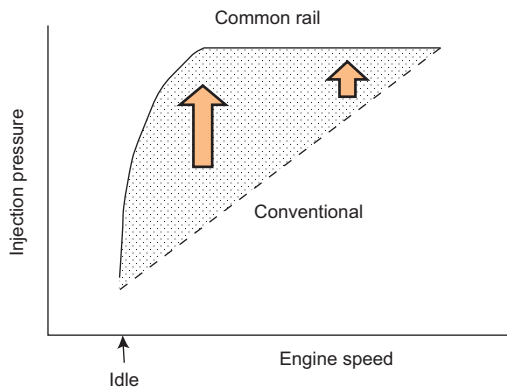


Fig. 2 Maximum injection pressure profile

つ。特に HP3 (乗用車～小型商用車用), HP4 ポンプ (中型商用車用) は最高 200 MPa の高圧噴射が可能である。

インジェクタは、噴射を制御するアクチュエータがソレノイド式とピエゾ式の2バリエーション用意されている。

3.2 サプライポンプ

HP3 の構造を Fig. 4 に示す。乗用から中型商用車は従来、分配型ポンプが使われていた領域であり、カムなど駆動部の潤滑に燃料を使用している。HP3, HP4 ポンプもこれを踏襲し燃料潤滑を採用する。この環境で 200 MPa という高圧燃料を吐出させるため、ローラレス、偏芯アウトカムを採用し摺動部の面圧を低減している。

また、高圧燃料通路は鉄製のシリンダに、低圧燃料通

路はアルミダイキャスト製ポンプハウジングに配し、複数気筒の燃料吸入量をリニアソレノイド式調量弁ひとつで制御し、HP3 ポンプはプランジャ、シリンダを2筒 180° 対向配置、HP4 ポンプは3筒 120° 毎配置とするなど、小型軽量化を図っている。

3.3 インジェクタ

3.3.1 ソレノイドインジェクタ

ソレノイドインジェクタの構造を Fig. 5 に示す。マルチ噴射や高精度な微量噴射量制御のために複合軟磁性材料を用いた高応答ソレノイドを採用するとともに油圧駆動部の最適化によりノズルの動作速度を高めている。その結果、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 msec まで短縮し且つ、高精度な微量の燃料噴射を実現した。また、電磁弁に印加する電力を低減し、電気回路の発熱課題に対応し、1 燃焼サイクルで 5～9 回のマルチ噴射を可能とした。Fig. 6 に、マルチ噴射 5 回の噴射波形例を示す。

3.3.2 ピエゾインジェクタ⁷⁾

ピエゾインジェクタの構造を Fig. 7 に示す。ピエゾインジェクタは、ピエゾスタックを内蔵したアクチュエータ、アクチュエータの変位を拡大して制御バルブへ伝達する変位拡大ユニット、制御バルブ、ノズルが主要構成部品となっている。

噴射開始時には、インジェクタボデー内部に收容されたピエゾスタックに電荷を充電し、ピエゾの「逆圧電効果」を

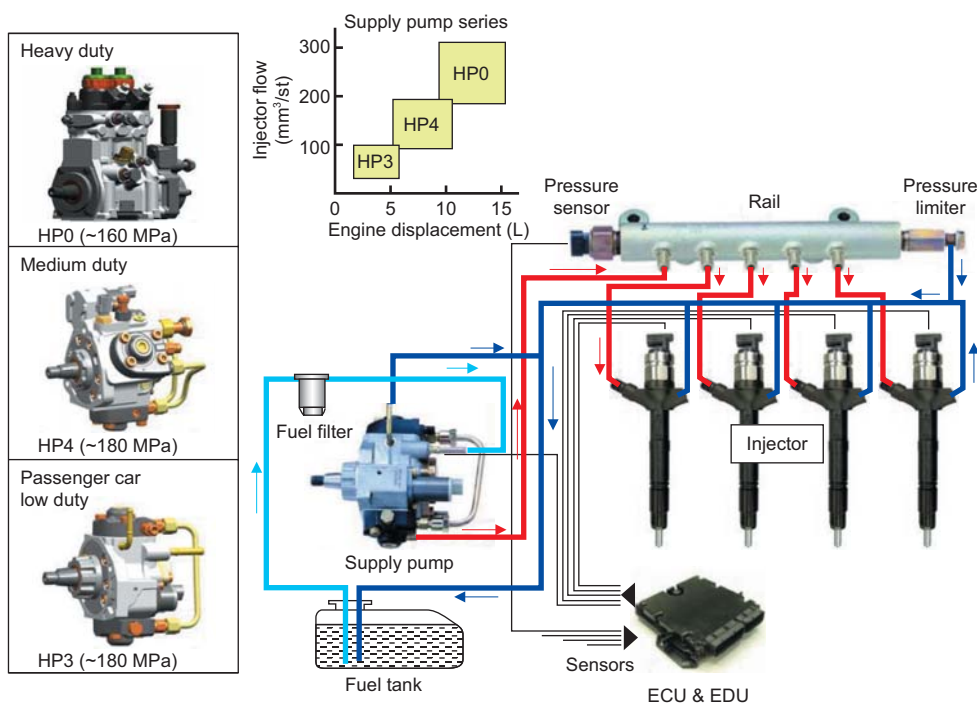


Fig. 3 Common rail system

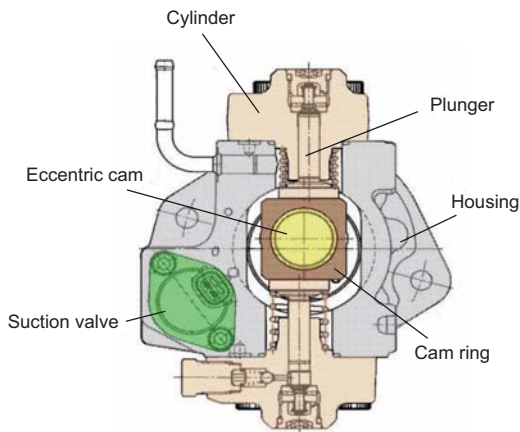


Fig. 4 Supply pump (HP3)

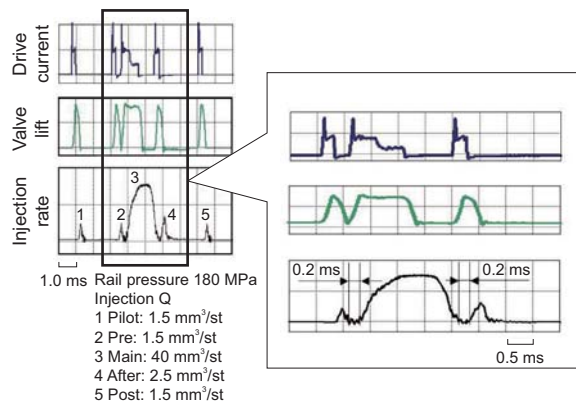


Fig. 6 Injection performance

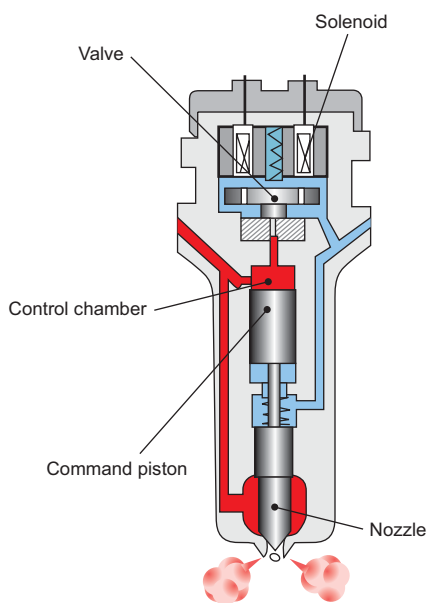


Fig. 5 Solenoid injector

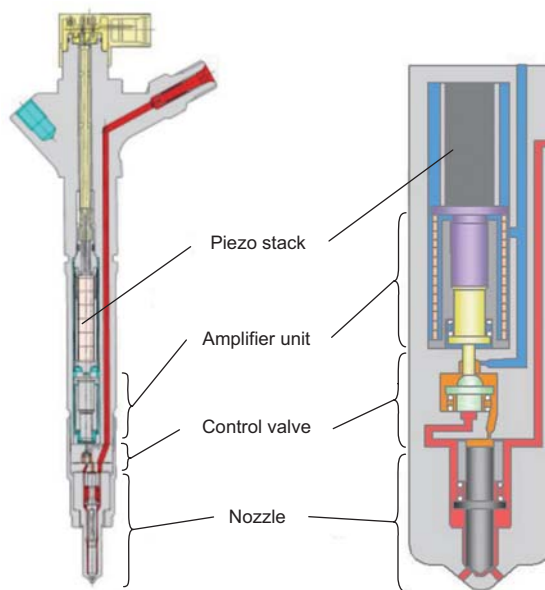


Fig. 7 Piezo injector

利用して伸びを生じさせる。直径の異なる二つのピストンと、その間に挟まれた油密室から構成される変位拡大ユニットにて、ピエゾスタックの伸び量が拡大され、制御バルブが駆動される。制御バルブが下方に移動すると、バルブ上シートが開弁、下シートが閉弁し、ノズル背圧室の圧力が低下することにより、ノズルニードルが上方に移動し噴射が開始する。

噴射終了時には、ピエゾスタックから電荷を放電しピエゾスタックを収縮させることで制御バルブが元の位置に復帰する。その結果、バルブ下シートが開弁、上シートが閉弁し、ノズル背圧室の圧力が上昇することにより、ノズルニードルが下方に移動し、ノズルシートが着座して噴射が終了する。

以上の作動で1回の噴射が完結し、この動作の繰り返しにより、マルチ噴射が実行される。

4. 騒音低減効果

4.1 燃焼騒音低減

ディーゼルエンジンは、直接燃料をシリンダ内に噴射するため、燃焼室内に噴射した燃料噴霧の状態が燃焼騒音に大きな影響を及ぼす。ここでディーゼルでの混合気形成から燃焼過程までの変化を Fig. 8 に、熱発生率と燃焼過程の例を Fig. 9 に示す。ディーゼル燃焼は大別すると、着火遅れ期間（物理的遅れ、化学的遅れ）と燃焼期間（予混合燃焼期間、拡散燃焼期間）で構成される⁴⁾⁻⁶⁾。物理的遅れとは噴射燃料の液滴形成、加熱・蒸発および空気との混合による可燃混合気形成までを指し、化学的遅れとは燃料の軽質化（炭化水素の分断）および軽質化された炭化水素と酸素の前炎反応までの期間を指す⁶⁾。化学的遅れ期間は化学反応律則のため筒内温度に依存し、制御することは

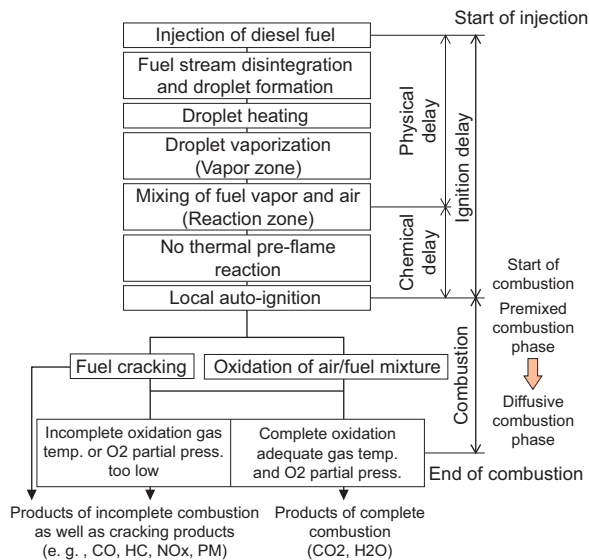


Fig. 8 Details from the injection process to the combustion process⁴⁾⁵⁾

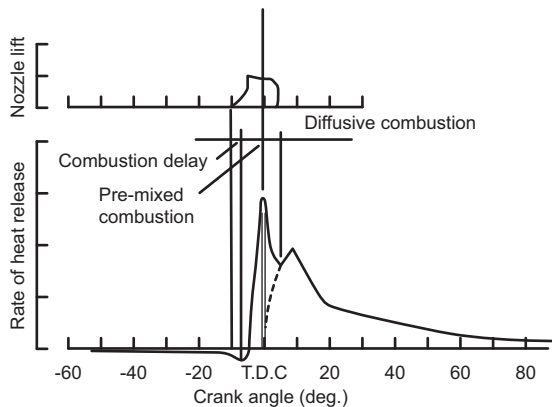


Fig. 9 Combustion process⁶⁾

非常に難しい。着火遅れ期間中に予混合気が生じ、燃焼開始とともに予混合気が一気に燃焼し、熱発生率がスパイク状に増加、減少する。着火遅れ期間中に生成する予混合気量が多いとこのスパイクが高く、クランク角あたりのエンジン筒内圧力増加率 ($dP/d\theta$) が高くなり燃焼騒音が大きくなる。予混合気量を低減するためにマルチ噴射を使って着火遅れ期間中の燃料噴射量を少なくする。着火遅れ期間を短くするために高圧噴射による微粒化を促進し物理的遅れ期間をできるだけ短くすることで $dP/d\theta$ が低下し燃焼騒音を低減することができる。

4.2 マルチ噴射の騒音低減効果

アイドル運転時の燃焼音低減効果を Fig. 10 に示す。シングル噴射、2回噴射（パイロット噴射+メイン噴射）、5回噴射とマルチ噴射の回数を増加させるに従ってスパイク状の熱発生率が低下し燃焼音が低下する。これはアイドル

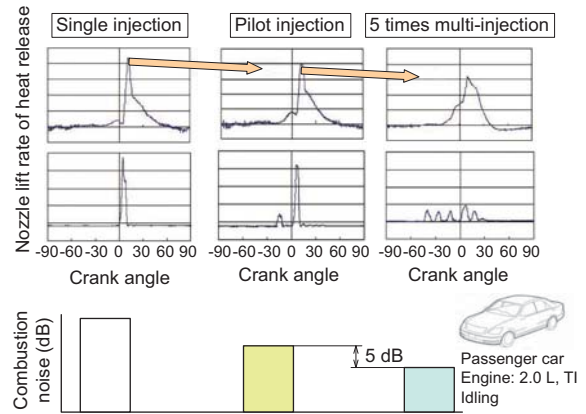


Fig. 10 Combustion noise reduction

ングに必要な燃料量を分割、間隔を空けたことで着火遅れ期間中の燃料噴射量が減少し予混合燃焼量が減少、 $dP/d\theta$ が低下したことによる。なお、後発の噴射時には、前段噴射燃料の燃焼により筒内温度が上昇していることで化学的遅れも減少していると推定する。

また、部分負荷時におけるパイロット噴射有無でのエンジン筒内圧力の比較を Fig. 11 に示す。シングル噴射では着火遅れ期間中に噴射し続ける燃料が順次予混合気を形成し、着火すると急激にシリンダ内圧が上昇する。これに対してパイロット噴射を行った場合、着火遅れ期間が短くなるため急激な圧力上昇が抑えられ、燃焼音が低下する。

5. まとめ

コモンレール燃料噴射装置を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, 排出ガス浄化はもちろん, ディーゼル燃焼音の低減に大きく貢献した。

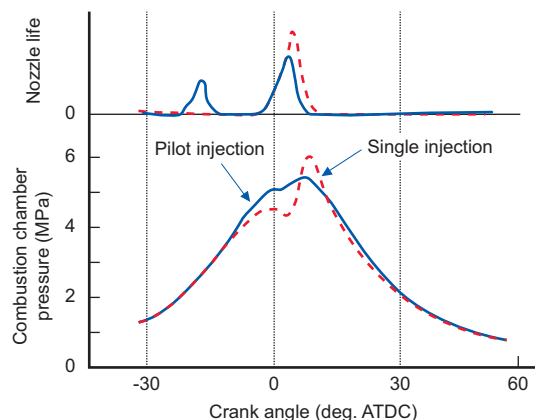


Fig. 11 Combustion chamber behavior

<参考文献>

- 1) 田中, 長田: “ディーゼルエンジン用 1800 bar コモンレールシステム”, 自動車技術, Vol. 58, No.4, pp. 19-24 (2004).
- 2) K. Nagata, Y. Tanaka, K. Yano: “Technologies of DENSO Common Rail for Diesel Engine and Consumer Values”, 2004 Convergence, paper 2004-21-0075 (2004).
- 3) 長田, 佐々木, 鳥谷尾, 田中: “コモンレールシステム”, エンジンテクノロジー, Vol. 8, No.1, pp. 31-35 (2006).
- 4) Hans-Hermann Braess, Ulrich Seiffert: Handbook of Automotive Engineering (SAE International, 2005), pp. 180-182.
- 5) John B. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals (McGraw-Hill, 1988), pp. 503-506.
- 6) 自動車工学全書編集委員会: 自動車工学全書 5巻 ディーゼルエンジン (山海堂, 1980), pp. 108-112.
- 7) 近藤, 豊島, 高山, 山口: “200 Mpa ピエゾコモンレールシステム”, 自動車技術会 2009 秋季学術講演会 188-20095709.



<著者>



依田 稔之
(よだ としゆき)
ディーゼル噴射技術2部 技術総括室
ディーゼル燃料噴射技術開発に従事