

特集 コモンレールによるディーゼル排気ガスの浄化*

Reduction of Diesel Exhaust Gas Emission with Common Rail System

伊藤昇平 Shohei ITOH
 中村兼仁 Kanehito NAKAMURA

Fuel injection system is one of the key technologies in order to reduce diesel emission. This paper describes an advanced common rail system from some fuel injection systems. We present some test data of automotive engines with multiple injection using common rail system : Pilot-, Pre-, After-, and Post-injection.

Key words : Diesel engine, Fuel injection, Emission, Common rail, Multiple injection

1. はじめに

ディーゼル機関の排気ガス浄化について、燃料噴射系の視点から解説する。特に、ディーゼル乗用車の噴射系として主力になりつつあるコモンレールシステムを用いた高圧噴射と多段噴射に関して解説する。さらに、多段噴射の各噴射(パイロット、プレ、アフター、ポスト噴射)による排気ガス低減効果の実験例を示す。

筒外噴射のガソリンエンジンでは、もともと沸点の低いガソリン(33~170)を使用するため、筒外に低い圧力(約0.3MPa)で噴射しても、シリンダ内では圧縮行程中に十分均一化された予混合ガスが形成される。

一方、軽油を燃料とするディーゼルエンジンでは、軽油の沸点が高い(180~360)ため、圧縮行程~着火までに均一化された予混合ガスは得られにくい。そのため、燃料過濃領域(高負荷域)では、酸素不足領域の増加、高燃焼温度により、いわゆるスモークを発生させてしまい、これがディーゼルバッシングの源とされてきた。

直噴ガソリンエンジンの出現により、確かに低負荷領域では、ポンプ損失低減効果により熱効率は副室ディーゼルを上回り、直噴ディーゼルに近づいている。しかし、高負荷域では、従来の理論空燃比の燃焼に戻るため、熱効率が30%のディーゼルエンジンの方が優れているのも現実である。

本稿では、この熱効率を大きく損なうことなく、デ

ィーゼル排気ガスの浄化の手法を燃料噴射系の視点から述べる。

2. 燃料噴射系の役割

一般に、ディーゼル排気ガスを浄化する手法として、Fig.1に示すアプローチが考えられる。すなわち、エンジン燃焼改良、後処理、燃料の改良である。このうち、エンジン燃焼改良の中で最も重要視されているのが燃料噴射系である。

Approach		Emission		
		NOx	PM	HC・CO
Improvement of combustion	Engine	・ Compression ratio	Better combustion ・ Swirl ratio	・ Combustion chamber shape
	F.I.S.	Low oil consumption		
		・ T.I.	・ 4 Valve	・ Intake port shape
EMS	・ Higher injection pressure	・ Multipule injection		
After treatment	Fuel	・ Injection rate control	・ Wider control range of quantity and timing ・ Fine control	
		・ EGR	・ VNT	・ Low nozzle sac
		・ NOx catalyst	・ Oxidation catalyst	
				・ D. P. F
				・ Low sulfua ・ Low aroma
		・ Alcohol injection		

Fig.1 Approach of emission reduction

従来から言われているように、ディーゼル燃焼のキーポイントの一つは、いかに燃料を微粒化してシリンダ内の空気流動により、均一噴霧混合状態を形成するかである。吸気系の改良により、より高いエネルギーを持った空気流動をシリンダ内に与えたとしても、燃料を微粒化し続けながら燃焼させることがさらに重要となり、おのずと燃料噴射系に求められる圧力も非常に高くなる。

* (社)自動車技術会の了解を得て、「自動車技術 vol.55, No.9(2001.9)」より一部加筆して転載

ところが、従来の噴射装置では、エンジン回転速度の依存性もち、特に低回転速度・高負荷域では高い圧力を得ることは難しい。これが発進、加速時の黒煙につながるのである。高回転速度・高負荷域で200～240MPaの噴射圧力を有するユニットインジェクタでも例外ではない。

しかし、単なる高圧噴射で得られた微粒化噴霧を一気に燃焼させると多量のNO_xが発生してしまう。この課題に対して、パイロット噴射によりNO_xを低減でき、さらに、最近の研究により、1回の噴射燃料をTDC（上死点）前後で4～5回に分割噴射する噴射率制御により、PMとNO_xを同時に低減する手法が報告されている。これを実現できる噴射系がコモンレール¹⁾である。

コモンレールは、1960年後半において、その原型といえるものがスイスのMr.Hiberによって開発されていた²⁾。その後、スイス工科大学のGanserを中心にコモンレールの研究が進められてきた。実用化においては、当社が1995年末にトラック用として生産を開始し、1997年末にはBoschが乗用車用として世に送り出している。

高圧噴射によるスモークの低減もさることながら、前述したパイロット噴射により、NO_x、振動、音を下げることができ、ディーゼルトラックを一新したとして注目をあびた³⁾。その後、1998年の日本のディーゼル

排気ガス長期規制において、中型以上のトラックではコモンレールが主流となった。さらに、欧州市場では、パイロット噴射に加えて、高圧ながら低いポンプ駆動トルクという特徴から、コモンレールがディーゼル乗用車に次々と搭載されていった。

3. コモンレールとは

コモンレール方式は、サプライポンプにて生成した高圧燃料をパイプを経てコモンレール（蓄圧室）に蓄え、インジェクタ内の電磁弁によってノズル背圧を制御し、噴射の開始と終了を決めるという電子制御燃料噴射システムである。すなわち、回転速度に依存しない最高135MPaまでの噴射圧力制御、ノズルリフトを直接制御することにより、通常噴射のみならず、パイロット噴射および多段噴射が可能となり、噴射圧・噴射量・噴射時期の完全独立電子制御を実現している。

本システムをFig.2に示す。サプライポンプ、コモンレール、インジェクタとこれらを制御するためのECU（Electronic Control Unit）、EDU（Electronic Driving Unit）およびセンサ群から構成される。本システムは、トヨタ自動車（株）殿と共同開発し、1999年から量産中である。

本システムの主要製品であるサプライポンプおよびインジェクタの構造と作動について述べる。

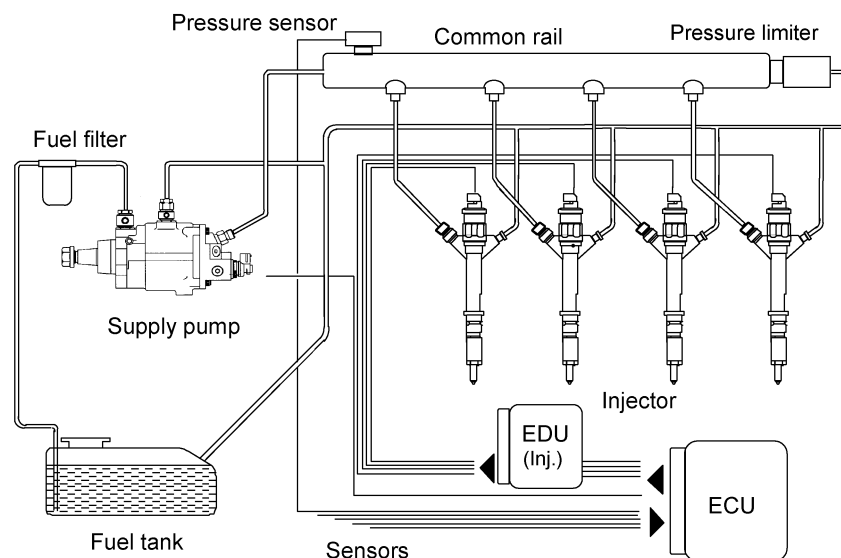


Fig.2 Common rail system

3.1 サプライポンプの構造と作動

サプライポンプの機能は、レール内の燃料圧力を生成し制御することである。このため、インナカム式の圧送系と電磁弁による吸入量の調量方式を採用しているのがFig.3に示すサプライポンプである。このポンプは、カム軸と一体となったインナカム面（2山、楕円に類似）、それに2対のプランジャが対向して設置され、2対が90度回転方向に位相をずらしてプランジャの摺動面に設置されている。そのため、Fig.4に示すように、どちらかの対が必ず90度間隔で圧送（もう1対は吸入）を繰り返す。従って、吐出量は各対の手前に設けた吸入調量電磁弁の開口期間にて制御される。

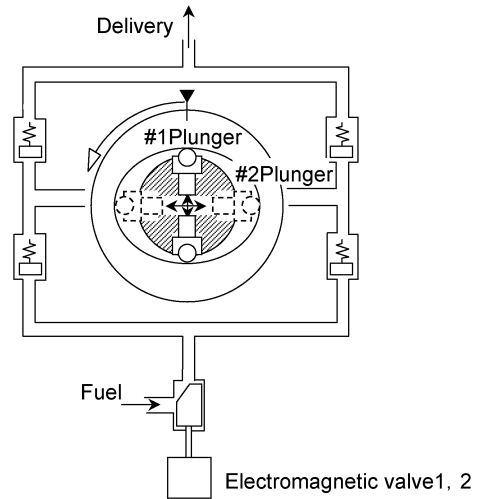


Fig.3 Supply pump structure

コモンレール内の燃料圧力は圧力センサにより検出され、エンジンの回転速度と負荷に応じた最適値にフィードバック制御される。これにより、低回転速度域での昇圧性が大幅に改善され、低速域から高圧噴射が可能となる。

3.2 インジェクタの構造と作動

インジェクタの機能は、高圧化されたコモンレール内燃料をシリンダ内に、最適化された噴射時期、噴射量、噴射率にて噴射することである。このため、噴射ノズル、ノズルニードル閉閉を制御するコマンドピストン、入口、出口オリフィスを有する制御室、この制御室内への燃料流出・流入をON-OFF制御する電磁弁から構成される。

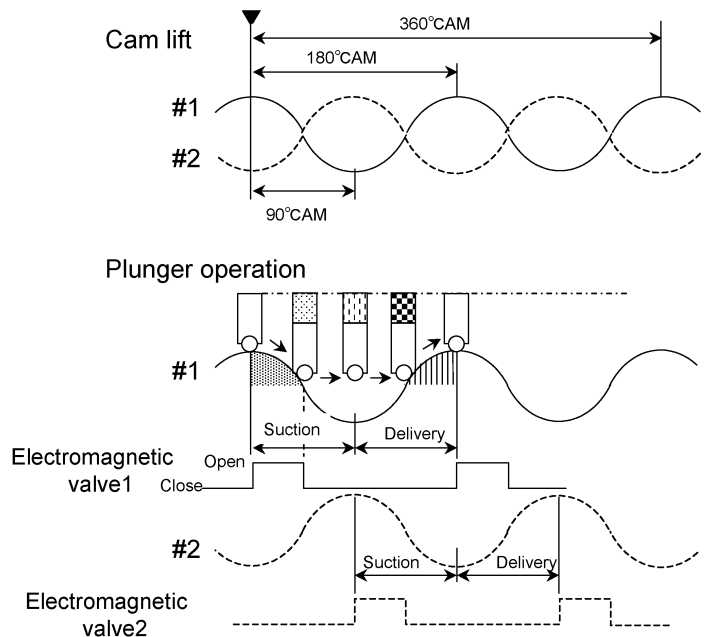


Fig.4 Supply pump operation

次にFig.5に従って、インジェクタの作動を説明する。電磁弁は、通電が行われない状態（左）では、バルブは下方へ押し付けられ、出口オリフィス部が閉じ、制御室には入口オリフィスを通じてコモンレールからの高圧燃料が印加されるので、コマンドピストン～ノズルは閉じられ噴射は行われない。電磁弁に通電が開始されると（中）、電磁力によりバルブは引き上げられ、その結果出口オリフィスを介してノズル背後室（制御室）の燃料は次第に低压側へ流出し、ノズル側の高圧によるノズル開弁力の方が勝るとノズルニードルは上昇し始め、噴射が開始される。さらに通電を続

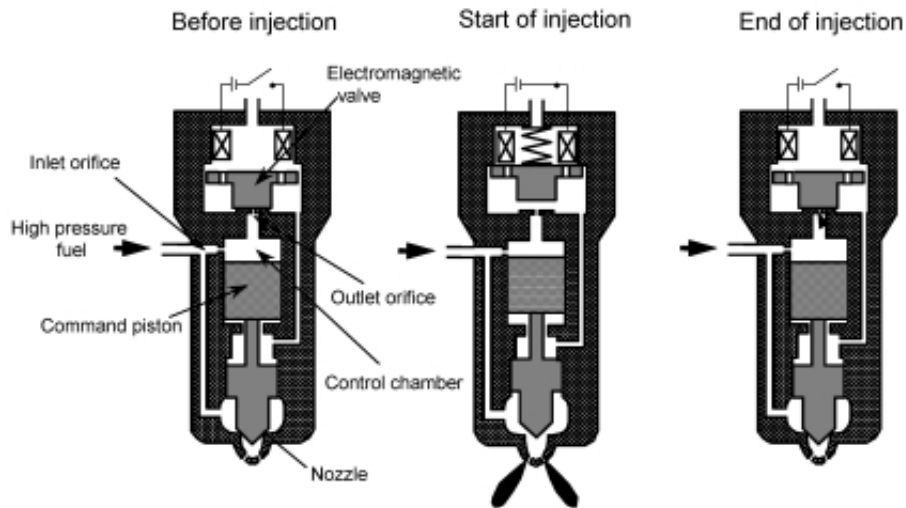


Fig.5 Injector operation

ければノズルはフルリフトし最大噴射率の状態となる。電磁弁への通電を止めると（右）、バルブは再び下降し、出口オリフィス部を閉じる。このとき、高圧燃料が入口オリフィスを通じて制御室に流入し、コマンドピストンを経てノズルは急激に閉じられる。従って、電磁弁への通電時期により噴射時期が、電磁弁への通電時間により噴射期間が電子制御できる。

さらに、Fig.6に示すように、メイン噴射に先立って、微小な通電パルスを追加することにより、ノズル背後の制御油圧を2度上昇させ、微量のノズル開弁に伴うパイロット噴射特性が得られる。これにより、着火遅れが短くなり予混合燃焼が抑制されて、ディーゼルエンジンのもう一つの課題であるNOxの抑制、燃焼音、振動の低減ができる。さらに、必要とあれば多段噴射特性も得られる。

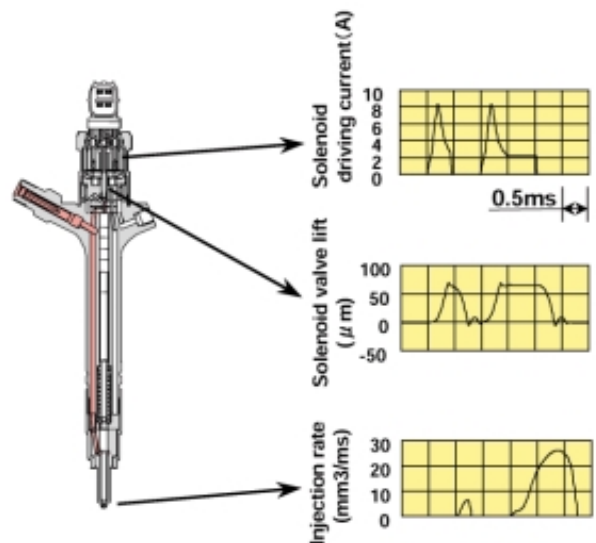


Fig.6 Pilot-injection

4. コモンレールの技術課題

コモンレールに対して、次なる要求がディーゼル燃焼改良の観念から投げかけられている。さらなる高圧噴射、パイロット噴射から多段（4～5）噴射という要求である。

4.1 高圧噴射

高圧噴射に対しては、ノズル噴射圧力120～140MPaにて平均噴霧粒径という点では、ほぼサチュレートしている。ではなぜ、さらなる高圧噴射が必要か、理由として、2点挙げられる。

一つは、エンジンの低速～中速度域にて、噴霧を微粒化するためノズル噴孔径を減少させている。そのため、出力点においては噴射期間が長くなり、高出力化

のためには高噴射圧力が必要となる。

高圧噴射を必要とするもう一つの理由は、高圧噴射にすればするほど、噴霧内の局所当量比が低くなるという観測結果によるものである⁴⁾高圧噴射により、そのエネルギーの高いことで雰囲気中の空気導入が活性化され、過濃な混合気が少なくなるので、大幅にスモークを低減できる。

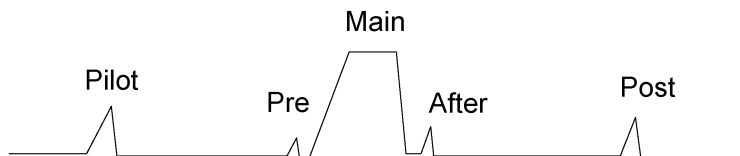
では、コモンレールに対して、現状135MPaという圧力から、さらに高圧化するとどうい課題があるのか、Table 1にインジェクタ、ポンプ、レール、パイプといったコンポーネントごとにまとめた。やはり、最も懸念されるのが、シール性と機械強度である。材料強度という観点からすれば、最大レール圧力は、160~180MPaといったところに落ち着くものと推定される。

4.2 多段噴射

コモンレールによる多段噴射の研究は、1994年ウィスコンシン大のReizによって報告されている⁵⁾いわゆる分割噴射によって燃焼率制御を行い、PMとNOxを同時低減させるものである。同時に、日本でも予混合燃焼の研究が活発化⁶⁾し、今後のディーゼル燃焼は、いくつかの分割噴射により燃焼率を制御することが重要なKeyの一つとされている。

Table 1 Problem for high pressure injection

Component	Problem	
	Reliability	Performance
Injector	<ul style="list-style-type: none"> •High pressure part seal •Mechanical strength •High temperature durability of resin and rubber parts (Leak fuel amount increase →Leak fuel temperature rise) 	<ul style="list-style-type: none"> •Electromagnetic valve seat seal •Nozzle seat abrasion resistance
Supply pump	<ul style="list-style-type: none"> •High pressure part seal •Mechanical strength •High-pressure sliding area lubricity 	<ul style="list-style-type: none"> •Pump delivery amount (Injector Leak amount increase)
Rail	<ul style="list-style-type: none"> •High pressure part seal •Mechanical strength 	<ul style="list-style-type: none"> •Pressure stability
High-pressure piping	<ul style="list-style-type: none"> •High pressure part seal •Mechanical strength 	



Injection	Effect
Pilot	PM reduction by pre-mixed combustion
Pre	NOx & combustion noise reduction by decrease of ignition delay
After	PM reduction by activated diffusive combustion
Post	Supply of reducing agent to NOx catalyst Temperature rise of catalyst and DPF

Fig.7 Effect of multiple injection

これまで、一般的に言われている多段噴射の効用をFig.7に示す。この多段噴射という要求に対してコモンレールの技術課題をまとめたのがTable 2である。多段噴射には、多数回の電磁弁の作動を必要とし、駆動エネルギーと消費エネルギーという課題がある。一方、Main噴射前後でのPre、After噴射では、噴射インターバルを近づけると、後の噴射量に影響を与えるという課題が生じる。対策として噴射圧力やインターバルで後の噴射量指令値を補正する工夫が必要になる。さらに、Pilot噴射とPost噴射はピストンが下降した位置で噴射されるため、シリンダ内壁

Table 2 Problem for multiple injection

Factor	Problem
Plural number injections	Heat of EDU and driving energy charge speed of injector ・Driving energy decrease of injector ・Collection energy increase at injector drive (Consumption energy= Driving energy - Collection energy)
Closed injection	Injection amount change (Pre-, Main-, After-injection) ・Injector high response (High response of electromagnetic valve and hydraulic) ・Decrease of pressure pulse and correction
Injection timing	Fuel adhesion to cylinder wall by injection at piston descent position (Pilot-, Post-injection) ・Penetration decrease of atomization Torque change at exhaust gas temperature rise control (Post-injection) ・Correction of main-injection amount

への燃料付着が発生する課題がある。対策として少量を多段で噴射する工夫が必要になる。また、後処理の再生のために要求されているPost噴射では、発生トルクに影響を与えることになり、Main噴射量の指令値を補正する工夫が必要になる。

以下、各噴射の効果をエンジンデータで示す。

(1) Pilot噴射

Pilot噴射はMain噴射に対して大きく進角した時期に噴射され、予混合燃焼によりPM (スモーク)、燃焼騒音を低減できる。Fig.8は低速高負荷域への適用例

であり、Pilot噴射時期に対するスモークと燃焼騒音を示す。Pilot噴射時期を進角するに従い、スモークと燃焼騒音は低下していく。

Pilot噴射有無での熱発生率をFig.9に示す。BTDC 70°CAで噴射されたPilot噴射は、BTDC30°CAで冷炎反応、続いてBTDC20°CAで熱炎反応を開始するが、十分に予混合しているため、スモークの発生はない。また、筒内ガス温度の上昇によりMain噴射の着火遅れの短縮、予混合燃焼の低減が図られ、低騒音が達成できる。

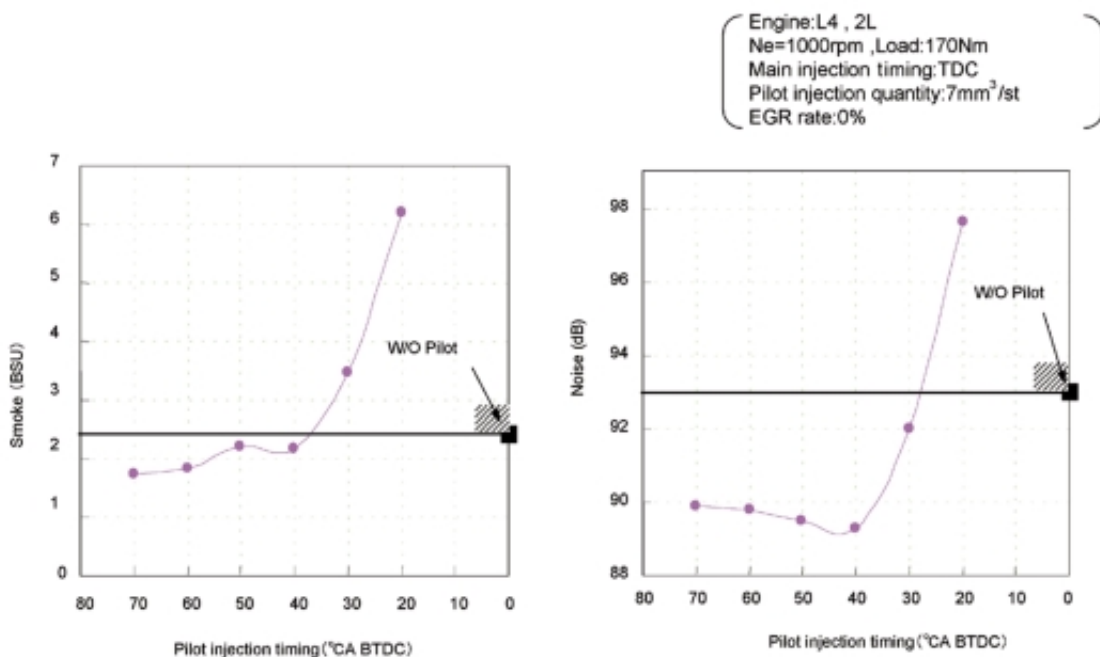


Fig.8 Effect of pilot-injection

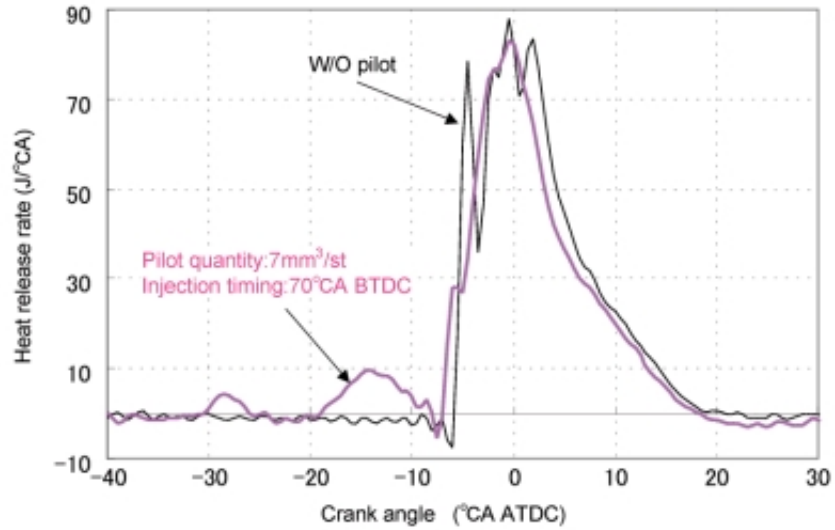


Fig.9 Heat release rate with pilot-injection

(2) Pre噴射

Main噴射に先立ちPre噴射を行うこと(インターバル: 約 1 ms)で, NOx, 燃焼騒音を低減させる噴射パターンが既に実用化されているが, PM (スモーク)が増加する課題がある. この課題に対して, Pre噴射をMain噴射に近接させてPM (スモーク)を低減できる.

Fig.10は中速中負荷域への適用例であり, インターバルに対するスモークと燃焼騒音を示す. Pre噴射をMain噴射に近づけるに従い(インターバル 0.4ms), スモークを低減できる. ただし, その分燃焼騒音低減効果が低下する.

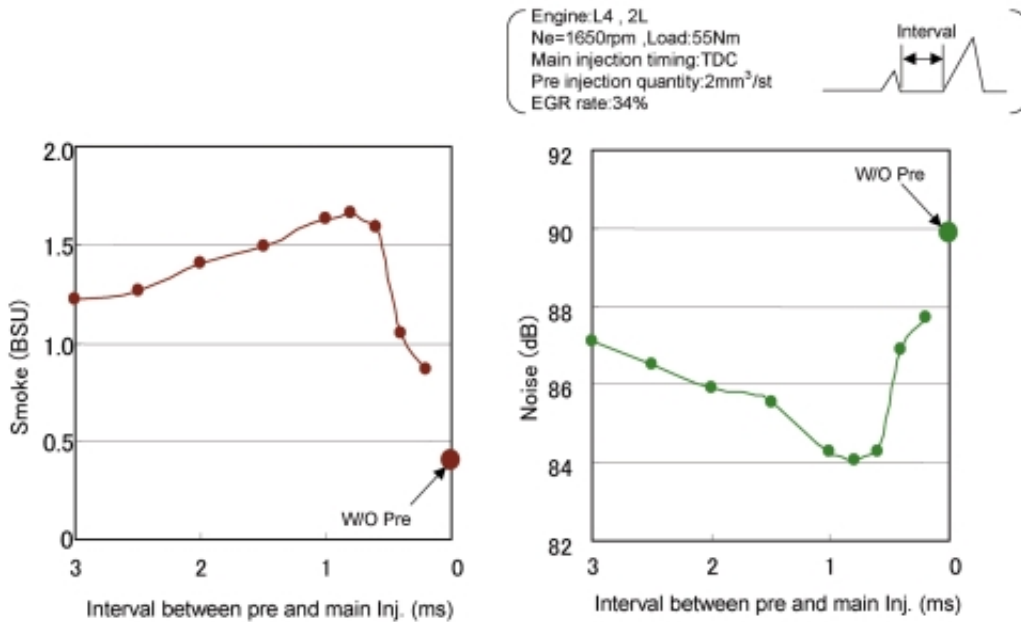


Fig.10 Effect of pre-injection

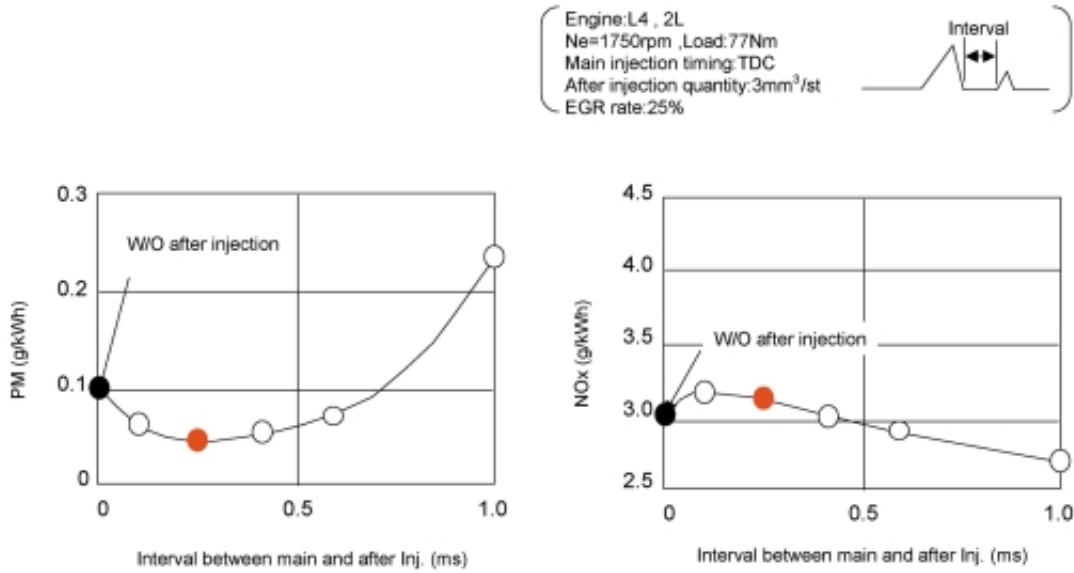


Fig.11 Effect of after-injection

(3) After噴射

After噴射はMain噴射に対して近接した時期に噴射され、拡散燃焼を活性化させることでMain噴射により発生したPMを低減できる。

Fig.11は中速中負荷域への適用例であり、インターバルに対するPMとNOxを示す。After噴射をMain噴射に近づけるに従い(インターバル 0.7ms), PMを低減できる。ただし、若干NOxが悪化する。

After噴射有無での熱発生率をFig.12に示す。After噴射により、拡散燃焼後期が活性化していることがわかる。

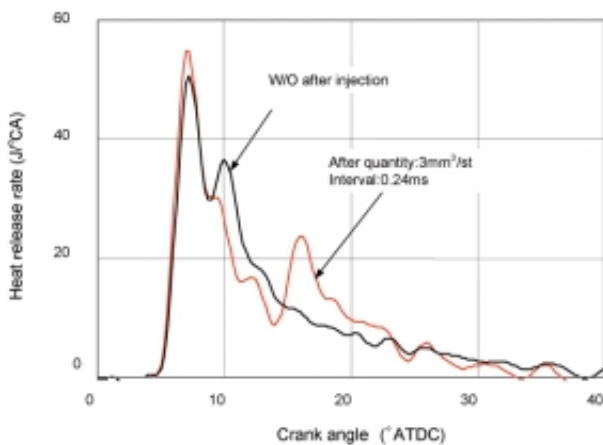


Fig.12 Heat release rate with after-injection

(4) Post噴射

Post噴射はMain噴射に対して大きく遅角した時期に噴射され、排気ガスの昇温や還元成分の供給により触媒を活性化させる。

Fig.13は中速高負荷域への適用例であり、Post噴射時期に対する排気ガス中のHC濃度を示す。Post噴射を早めると(ATDC130° CA) シリンダ内で燃焼し、排気ガス温度を上昇できる。Post噴射を遅らしていくと触媒に供給される還元成分が増加できるが、過剰に遅らすと(ATDC180° CA) シリンダ内壁への燃料付着が発生する。従って、各運転条件ごとに最適なPost噴射時期を適合する必要がある。

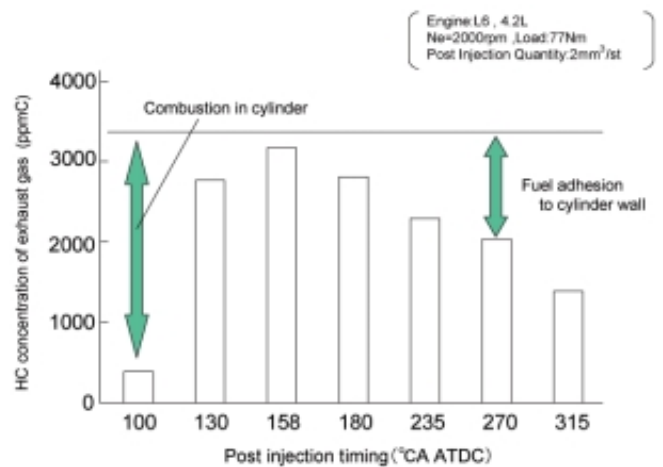


Fig.13 Effect of post-injection

5.おわりに

最近、所用で欧州に出掛ける機会がある度に、必ず欧州のディーゼル乗用車に乗ることにしている。その度に思うことは、ディーゼル乗用車が一昨年よりも昨年、昨年よりも今年、必ず進化し続けていることである。

ディーゼル乗用車に乗り慣れていない日本人の方が、初めて欧州のディーゼル乗用車に乗ると、ガソリン車と大差なく、時にはガソリン車を凌ぐ性能に驚かれるのも珍しくない。車外のエンジン音は、パイロット噴射で静か。車室内では、ほとんどエンジン音が聞こえない。走り始めると、アクセルと加速とに一体感がある。アウトバーンに出て150km/hで走行しても、車室内は静寂そのもの。そこから、一気に加速すると、アクセル操作に対して遅れなく加速感がある。

本稿は、現在、当然なさねばならない排気ガス浄化という視点からディーゼル燃料噴射技術を述べたが、今後は、これも各エンジンメーカーの方々と力をそそいでいる「ガソリン車を凌ぐディーゼル車のFun to drive」という視点から燃料噴射技術を語ってみたいと考える次第である。

<参考文献>

- 1) 伊藤昇平：コモンレール，自動車技術Vol.53，No.10(1999)，p.85.
- 2) 西村輝一：大型ディーゼル噴射装置の現状と今後の動向，微粒化，Vol.8，No.22(1999)，p.102.
- 3) 足立裕輔ほか：低公害ディーゼルエンジンの開発，自動車技術会春季大会学術講演会前刷集(1996)
- 4) 赤川久：燃焼と燃料噴霧の可視化による解析 ENGINE TECHNOLOGY，Vol.1，No.4(1999)，p.94.
- 5) R.D.Reitz，et al.
Reducing Particulate and NOx Emission by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine, SAE940897
- 6) 横田治之他：予混合多段噴射方式によるディーゼル機関のNOx低減，第14回内燃機関シンポジウム論文集(1997)

<著者>



伊藤 昇平
(いとう しょうへい)
ディーゼル噴射技術部 工学博士
ディーゼル噴射装置、システムの開発に従事



中村 兼仁
(なかむら かねひと)
ディーゼル噴射技術部
コモンレールのシステム開発に従事