

論文 ECD-U2 システムによる噴射率制御の研究*

Injection Rate Shaping Technology with Common Rail Fuel System (ECD-U2)

伊藤昇平 岩永貴史
Shohei ITO Takashi IWANAGA

In the diesel field, innovative technology development has been desired for fuel injection system from the points of severe emission reduction to meet increasingly stringent emission regulation year by year respecting environmental protection and product improvement for various customer requirements including fuel consumption improvement.

We have been pursuing the ideal fuel injection system which is called "ECD-U2" to meet above expectations.

"ECD-U2" is the direct injection system of highly pressurized fuel with optimum injection timing by using of the injector controlled by high speed response magnetic valve. This system also has the fuel injection pattern controllability in one injection (injection rate) as one of the greatest asset.

This report focuses on the new injector structure development to achieve desirable injection rate control for diesel engine combustion.

Key Words : Fuel Injection, Unit Injector, Common Rail, Injection Rate Control.

1. はじめに

ディーゼルエンジンにおいて、環境保護の観点から年々強化される排出ガス規制に対応する有害排気成分低減と、燃費改善を始めとする数々のユーザーニーズに対応する商品性向上の両面より、燃料噴射システムに対する技術革新が強く望まれている。

我々は、この期待に応えるべく新燃料噴射システム "ECD-U2" の開発を行っている^{1),2)}。

ECD-U2 は高速応答性電磁弁を用いて制御されるインジェクターによって蓄圧器内の高圧燃料を最適のタイミングでエンジン燃焼室内へ直接噴射するシステムであるが、一回の燃料噴射中の噴射パターン（噴射率）をも制御可能であることが大きな特長の1つである³⁾。

今回、燃焼にとって望ましい噴射率を実現するためのインジェクター構造を開発した。

2. 噴射システムへの要求

近年、ディーゼルエンジンへの排出ガス規制が年々その厳しさを増している一方で、燃費改善や騒音低減といったユーザーニーズも強まりつつある。

これらの命題に応えるべく、有害排気成分低減と商品性向上を両立させる画期的な燃料噴射システムの構築が我々の最も重要な課題であり、そのためには図1に示される要求を満足せねばならない。

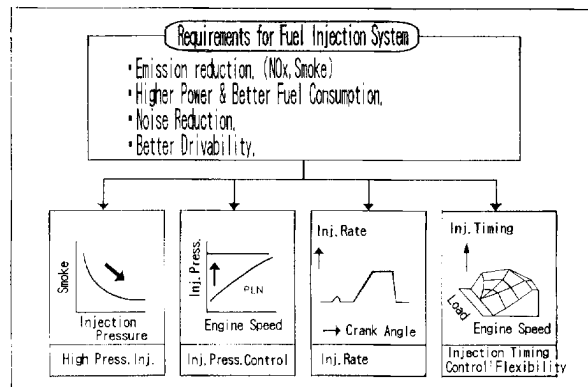


図1 次世代ディーゼル噴射系への要求

*日本機械学会第13回内燃機関シンポジウム講演論文集(96.6.17)より転載

1) 高圧噴射

噴射圧力の増加により、ノズルからの噴霧の微粒化が促進されると共に、噴霧の運動エネルギーが増大するため、噴霧中への空気を取り込みが促進され、燃焼が改善されることによって、排出ガス中のスモークは低減する。

図2に噴射圧力を変化させた場合の噴霧粒径（ザウタ平均粒径）およびスモーク濃度を測定した一例を示すが、噴射圧力の上昇によって微粒化が促進されていることが分かる。これに伴いパーティキュレート排出の一要因である排気中のスモーク濃度が低減されており、本測定例では100~120 MPa程度の噴射圧力にてゼロとなっている。上記特性に加え、長期排気ガス規制を狙った場合には、さらなるパーティキュレートの低減を達成すべく噴射期間短縮の観点から噴射圧力の最高値として120~150 MPaが要求されている。また、ポスト長期規制対応を目標とする場合にはさらに高い圧力である200 MPaが必要とされるとの要求も出されている。

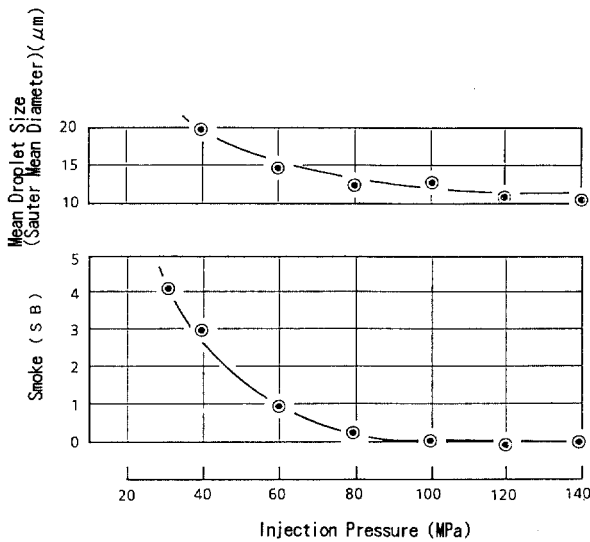


図2 平均粒径と黒煙への圧力の影響

2) 噴射圧力制御

既存の噴射システムにおける噴射圧力は、エンジンの回転と連動する噴射ポンプ内の圧送プランジャーの上昇速度により、ほぼ一義的に決定される。ところがディーゼルエンジンは、発進時や登板時にはスモーク低減のための高圧噴射として前述の図2に示すごとく100 MPa程度の圧力を必要とする反面、アイドル時には騒音低減のための低圧噴射を必要とするという具合にエンジン回転数や負荷に応じた噴射圧力を必要とし

ており、その制御自由度を高めることが噴射システムに強く求められている。

3) 噴射率制御

噴射率とはノズルの噴孔から時々刻々噴射される燃料の量的推移 (dQ/dt) を指し、ディーゼルエンジンの燃焼にはたいへん重要なパラメーターである。この噴射率に関してはNOx低減のためにパイロット噴射により着火遅れ期間中の噴射燃料を極端に低減すると共に、着火後もその初期段階においては噴射率を低く抑えることが、またスモーク低減のために中期・後期の噴射率を高く保ち、かつ一気に噴射を終了することが要求されている。

4) 噴射時期自由度

NOxとスモークを同時抑制するためには、噴射時期の最適化も極めて重要であり、従来の回転数に応動するだけの自動進角タイマーではとうてい追従できないような複雑な最適噴射時期の要求を満足するフレキシブルな噴射時期制御が必要なばかりではなく、触媒へのHC供給、ターボによる加速感向上というニーズから膨張行程噴射といった今までにない要求も出てきている。

以上のように、排出ガス規制とユーザーニーズへの対応の両面から噴射システムに対して非常に高いポテンシャルが求められており、ポスト長期規制を狙った場合の要求を含めてまとめたものを図3に示す。

Requirements	System Function
① Wide Controllability	Q, Q̇, Timing, Pressure
② Excessive Little Particulate	Excessive Higher Injection Pressure
③ Lean NOx Catalyst Deoxidization	Expansion Stroke Injection
④ Oxidation Catalyst Temp. Control	Timing, HC Temp Feed Back
⑤ Drivability Improvement	Expansion Stroke Injection (with Turbo)

図3 21世紀版燃料噴射系への要求

3. ECD-U2 概要

3.1 開発の狙い

第1章で述べてきた燃料噴射システムへの要求に応えるための1つの理想と考えられるのが「高圧コモンレール+電磁弁による噴射制御」の方式である。我々は、本概念を具体化する新噴射システムをECD-U2と名付けて開発中であり、図4に本システムの有利点をまとめる。

本システムは高圧サプライポンプにて生成した高圧燃料をコモンレール（蓄圧室）に蓄え、電磁弁によっ

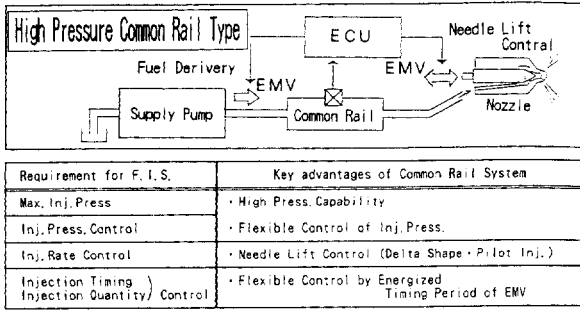


図4 ECD-U2システムの有利点

てノズルニードルの開閉を行うことで噴射の開始と終了を制御し、さらにコモンレール内の燃料圧力は、圧力センサーとポンプの吐出量制御機構により常にエンジンの求める最適値に制御する。

まず噴射システムの機能面から見ると、2次噴射等の制約のない高压化と、回転数に依存しない圧力最適制御、エンジンに最も近いインジェクタ内でのニードルリフト直接制御による細やかな噴射率制御および機械的メカニズムに制約されない噴射量・噴射時期の完全な電子制御が原理的に可能である。

また噴射システム構築、適合の上でも、噴霧の時間的・空間的成形＝ノズル、圧力の発生を制御＝高压サプライポンプ、噴射量・噴射時期の制御＝電子制御系といった具合に機能が分化できているため、エンジン

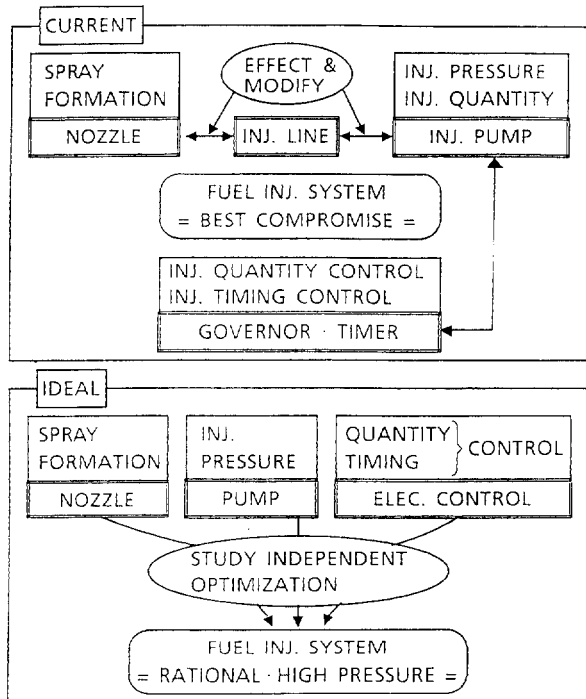


図5 噴射システムの構成と適合手法

バリエーションへの適応という点から、例えばノズルの噴孔仕様変更の結果ポンプのハード仕様を変更せざるを得ないといった問題は本質的に発生しない。従って各機能単位別にエンジン要求に対し最適を選定をした上で最終的にすべてを合体する図5の理想の姿を実現できる。すなわち、システムの大部分において躍進的な標準化が可能なものとなっている。

以上より、本システムは機能面における精度とシステム適合面における柔軟性において従来システムに比べ卓越した可能性を持っているものといえる。ゆえに、前述のポスト長期規制への対応という観点から最適解を与える理想的なシステムの1つであるといえる。

3・2 システム構成と基本作動

ECD-U2システムは図6に示すように、高压サプライポンプ、コモンレール、インジェクターとこれらを制御するためのECU(電子制御ユニット)、およびセンサー群から構成される。コモンレールに設置された圧力センサー・ECU・燃料吐出量制御バルブ(ポンプコントロールバルブ=PCV)というクローズドループにより所望の圧力にフィードバック制御されたコモンレール内の高压燃料は、インジェクターのノズル側と油圧ピストンを介したノズルの背後側(制御室)の双方に導入されている。この状態から三方電磁弁(スリーウェイバルブ=TWV)に通電することにより制御室内の高压燃料がリークへ流出され、ノズル側の高压によるノズル開弁力によってニードルが上昇して噴射が開始され、TWVへの通電を止めると再び制御室内へ高压燃料が導入されてノズルは閉弁＝すなわち、噴射が終了する。したがって、TWVへの通電時期により噴射時期が、TWVへの通電時間により噴射期間が制御できる。

なお、TWVと制御室間には、ノズル背後側圧力が抜

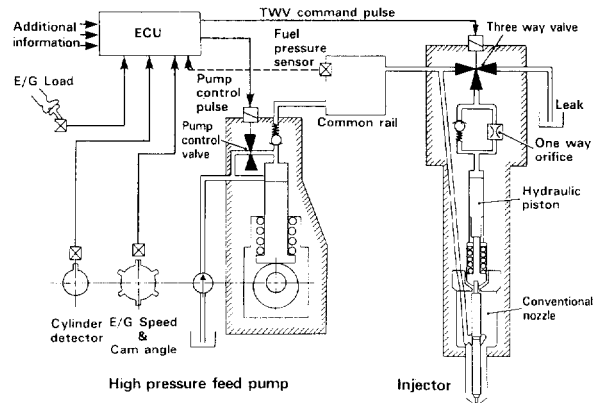


図6 ECD-U2システム構成

け出る方向のみに絞り作用を持つワンウェイオリフィス(OWO)が配置されており、噴射の始まりを抑制し、かつ噴射を一気に終了させるデルタ型の噴射率パターンを実現させている。また、TWVへの通電を2回繰り返すことによりパイロット噴射も実現可能である。

3.3 技術課題と開発方針

本システムは、全電子制御といった新規点からいくつかの技術的課題がある。例えば、第1章で述べた噴射率制御もその1つである。本システムを適用することによりNOx、白煙といった排出ガス低減だけでなく騒音、振動の低減といった商品性を著しく向上させることができる。その技法の1つがパイロット噴射である。一般的に、パイロット噴射の火種としての効果を楽しむためには、パイロット噴射は主噴射に近接させなければならない場合が生じる。ところが、前節で述べたワンウェイオリフィスは図7に示すように、パイロット噴射終了時高圧燃料により押し下げられており、主噴射の初期噴射率を抑えるためにはワンウェイオリフィスの初期位置への復帰を待たねばならず、その間にパイロット噴射の火炎が消滅してしまうことになる。また、ワンウェイオリフィスの初期位置への復帰を待たずして主噴射を開始した場合初期噴射率の抑制効果が損なわれ、パイロット噴射の効果が半減してしまう。

一方、主噴射に近接させたパイロット噴射を実現すべくワンウェイオリフィスを固定したとすると、噴射開始時における制御室からの高圧燃料の流出のみならず、噴射終了時の制御室への高圧燃料の流入をも制限してしまうため、噴射終了が緩慢となり、スモークの悪化を招くことになる。

そこで、我々は固定したオリフィスでありながら、そこを通過する燃料流量が流れ方向により大きく異なるデュアルフローレートオリフィス(DFRO)を開発することで、この技術課題を打破し、理想の噴射率制御

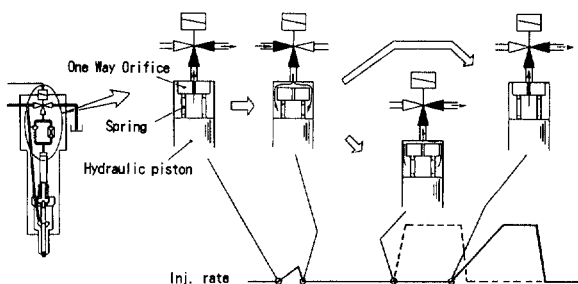


図7 パイロットの噴射時のオリフィス挙動

が実現するものと考え、シミュレーション・数値解析等の技術を駆使した開発を行った。

4. DFROの効果

開発の第1ステップとして、オリフィスを固定したインジェクターを含むECD-U2のモデルを構築し、DFROの効果をオリフィスを介した制御室からの流出流量に対する流入流量の比(K)をパラメーターとしてシミュレーションによる検討を行った。その結果を図8に示す。

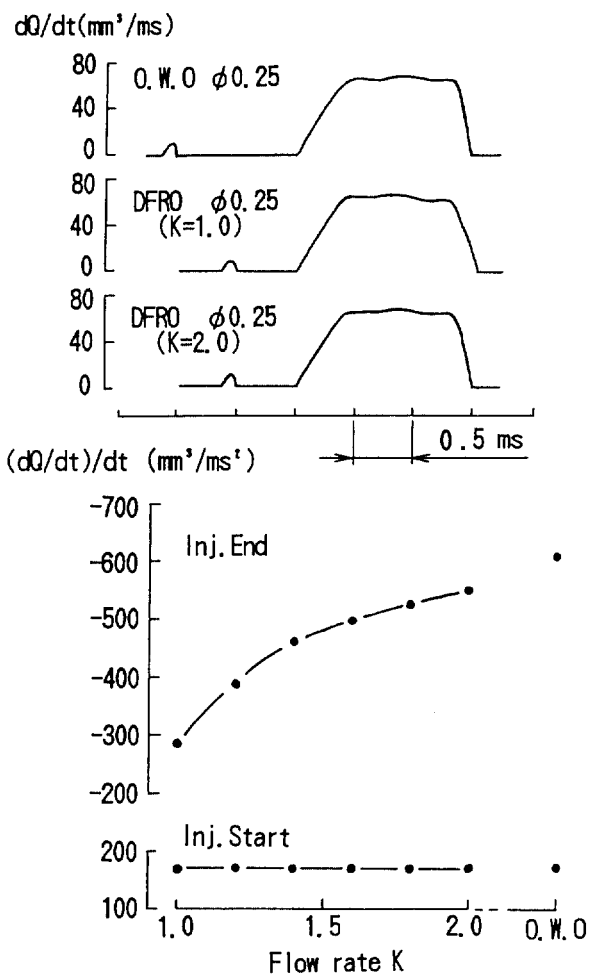


図8 DFROの効果

噴射開始時の噴射率変化率 $\{(dQ/dt)/dt\}$ に関してはOWOおよびDFROの流出流入比(K)にかかわらず同じ値を示している。一方、噴射終了時の噴射率変化率 $\{(dQ/dt)/dt\}$ に関してはDFROの流出流入比(K)の増加に伴い、その絶対値の増加が見られている。すなわち、DFROを導入することにより初期噴射率は維持されたまま、噴射切れを急しゅんにすることが可能

であることが確認された。同時に DFRO であるがゆえに OWO の場合に比べメイン噴射に近接したパイロット噴射（シミュレーション結果ではパイロット間隔約半減）が可能となっていることはいうまでもないことである。

そこで我々は次ステップとして実際のオリフィス形状の改善により上述の流出流入量比 (K) をどこまで増加させることが可能なものであるかを検討することとした。

5. DFRO の流量解析

次ステップとして流れ解析モデルによるオリフィス形状の最適化を行った。

一般にオリフィス流れの流量は次式によって示されることが知られている。

$$\text{流量 } Q = \frac{C_c C_v}{1 - C_c^2 m^2} a \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}$$

C_c : 収縮係数 (<1)

C_v : 速度係数 (<1)

m : 開口比

a : オリフィス面積

ρ : 流体の密度

P_1, P_2 : オリフィス上流圧力、下流圧力

上式よりオリフィス入口部の流れの収縮 ($C_c < 1$) が流量の低下を招くことが分かる。ゆえに、流量格差を与えるべく噴射終了にかかわる流入側の流量を増加させるためにオリフィスにテーパ形状を用いることで

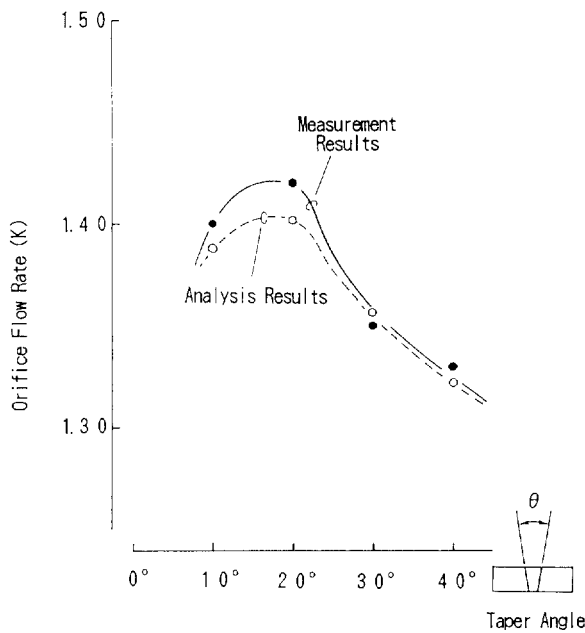


図9 DFRO の流量比

流れの収縮を抑制することが有効であると予測できる。そこでテーパ形状を導入した DFRO およびその周辺の流れ現象把握のために数値解析を実施した。

図9にオリフィステーパ角度に対する流量比（流入/流出）の計算結果とこれを検証する実験結果を示

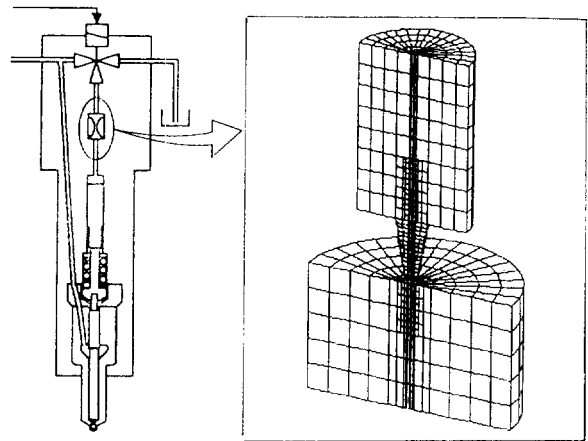


図10 DFRO の流れ解析モデル

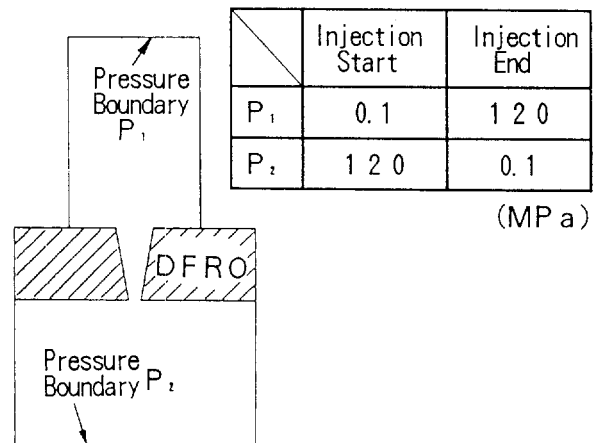


図11 解析領域と境界条件

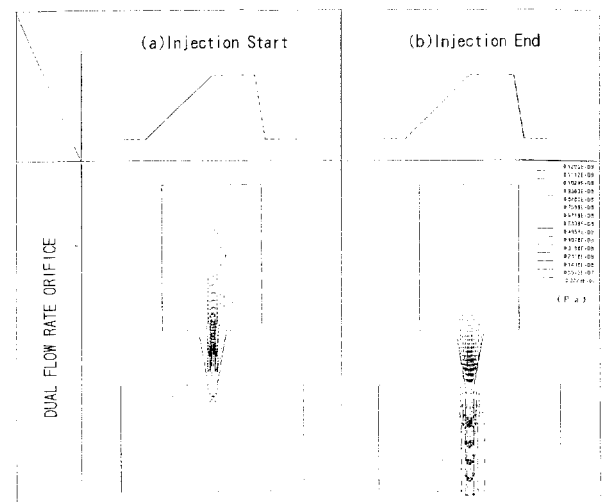


図12 DFRO での計算結果

す。両者はテーパー角度 20°程度にてピークを迎え非常に良く一致している。なお、ここで用いた解析モデルを図 10 に、境界条件を図 11 に、テーパー角度 20°での計算結果を図 12 に示す。ここで、図 12(a)のオリフィス入口付近中心部において急激な流れの集中が発生していることから、テーパー先端を入口とする流出において収縮による流量低下が発生している。すなわち、噴射率においては DFRO での噴射開始が緩やかになっていることを意味する。これに対して図 12(b)に示すごとく流入においてはオリフィス内における急激な流れの集中が見られないことより流入がスムーズに進行しているものと考えられる。すなわち、DFRO での噴射終了は開始に比べ急しゅんになっていることを意味する。また、図 12(a)の流出において見られる特徴としてオリフィス入口後方部における逆流現象がある。これはオリフィス入口部での絞り現象による反射波の発生に起因するものと思われる。一方、図 12(b)の流入においては前記逆流現象が見られず、オリフィスへの燃料流入がスムーズに行われているものと思われる。

以上の流れ解析および実験結果よりテーパー形状の導入により DFRO の流出流入量比 (K) を加工の容易性を考慮した上で 1.4 程度まで増加させることが実現できることが判明した。

6. エンジン実験結果

今回開発した DFRO の効果を検証すべく、ワンウェイオリフィスを用いた場合との比較にてエンジン試験をした結果を図 13 に示す。本試験では第 1 章で述べた

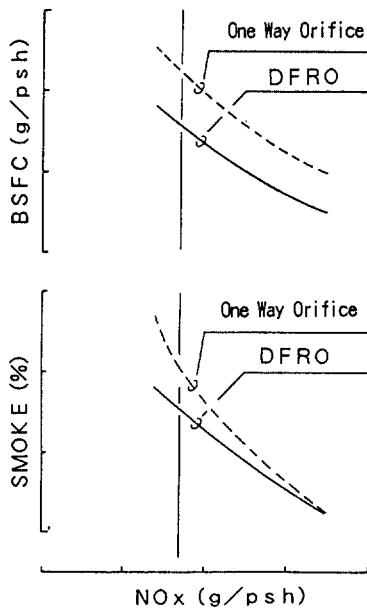


図 13 DFRO を用いたエンジン評価結果

ごとく噴射時期を変化させることで NOx 量を変化させ、これと同時にスモーク量と燃費 (BSFC) を測定した。これより初期噴射率を低減しつつ同時に良好な噴射切れを達成する DFRO を用いることで、特定の NOx 値に対する SMOKE 値で 7% の抑制が可能となっている。

また、近接したパイロット噴射の実現により NOx 値を抑制しつつ噴射時期を進角させることが可能となったことにより、燃費 (BSFC) においても約 4% 改善が得られており、この点からもその優位性のあることが分かった。

7. 終わりに

ディーゼルエンジンの有害排気成分低減と商品性向上を両立させるための鍵である「噴射率制御」を簡単な構成によって成立させることができた。

特に今回の開発においてはシステムのキーコンポーネントであるインジェクターの特性を決定づける噴射率制御を流出・流入の速度差をつけたオリフィス「DFRO」を適用することにより、排出ガスを低減し、燃費を向上させることができた。

今後さらに、パイロット噴射を含めた「スプリット噴射」の技術を構築することにより、さらなる ECD-U2 の開発を推進していく。

＜参 考 文 献＞

- 1) 宮木 正彦：SAE Paper 910252
- 2) 藤沢 英也：内燃料機関 92 年 7 月号技術解説
- 3) 大須賀勲夫：SAE Paper 940586

＜筆 者＞



伊藤 昇平(いとう しょうへい)
ディーゼル噴射技術部
ECD-U2 システムの開発に従事。
工学博士



岩永 貴史(いわなが たかし)
ディーゼル噴射技術部
ECD-U2 システムの開発に従事。