

# 特集 デーゼル噴射系の進化\*

— 超高圧噴射が拓く世界 —

Evolution for Diesel Fuel Injection System

- The New World by Ultra High Pressure Injection -

小島 昭和  
Akikazu KOJIMA

内山 賢  
Ken UCHIYAMA

増田 誠  
Makoto MASHIDA

伊達 健治  
Kenji DATE

堀内 康弘  
Yasuhiro HORIUCHI

Dr. Olaf E. HERRMANN

Dr. Hermann J. LAUMEN

Diesel engine management systems are increasingly becoming more and more complex, large-sized and expensive to meet stringent emissions regulations. The purpose of this development is to explore the way to build a simple and low-cost engine management system while maximizing the benefits of diesel engines.

In order to achieve the purpose, we blended "Power" and "Smart". "Power" is the injection system which offers extremely high pressure 250 - 300 MPa. "Smart" is the world's first closed-loop control system which automatically corrects injection characteristics using pressure signals obtained from the injector built-in pressure sensor (i-ART: intelligent Accuracy Refinement Technology). It enabled us to create all-time high added value.

Key words : heat engine, Compression Ignition Engine, Fuel injection, Common Rail System (A1)

## 1. まえがき

近年、自動車のエミッション規制が世界的規模で、かつ急速に強化されている。また、地球環境保護の観点からCO<sub>2</sub>排出に関しても同様に厳しい規制強化が進められている。

欧州ではディーゼル車に対するエミッション規制はここわずか10年ほどの間にNO<sub>x</sub>70%、PM80%もの大幅な低減が、またCO<sub>2</sub>に関してもおよそ30%の削減が強いられている。このように燃費を改善しつつ厳しいエミッション規制をクリアするためには車両トータルでの対応が必須であるが、その中でもエンジンマネジメントシステム (EMS) がエミッションおよびCO<sub>2</sub>排出低減に及ぼす役割は大きい。

エミッション低減のためにはEGRやターボ等のエアパスシステムに代表されるエンジン側での改良と、DPFやNO<sub>x</sub>触媒のような後処理システムとを併用する必要がある。特に大型車では後処理システムにDPFとNO<sub>x</sub>触媒であるSCRを併用したシステムが広く用いられている<sup>1)</sup>。しかしながら複雑・大規模で高価なEMSでは、イニシャルコストの増加や搭載性の悪化などカ

ーメーカーにとって競争力低下に繋がる場合がある。

このため我々は、EMSの複雑化、高コスト化を抑えつつディーゼル車が有する燃費メリットを活かしディーゼル車の市場でのステータス向上に貢献する、いわゆる「ディーゼルレボリューション」の実現を目指して開発を進めてきた。

具体的には、超高圧噴射を実現する噴射系、即ち、製品の「力」と、インジェクタ内部に圧力センサを搭載し得られた圧力信号を用いて噴射特性の自動修正を行う、世界初のクローズドループ制御システム (i-ART: Intelligent Accuracy Refinement Technology)<sup>2)-6)</sup>の「知恵」とを融合することで各々のパフォーマンスを高め合い、これまでにない高付加価値を創造することを開発方針とした。

今回この詳細を紹介する。

## 2. 開発コンセプト

エミッション低減のためにエンジン、後処理のいずれに重点を置くかという選択肢がある。燃費や搭載性、ドラビリ等の面でそれぞれ一長一短があるが、特に大

\*自動車技術会の了解を得て、「自動車技術会論文集」Vol.43 No6 20124742より一部加筆して転載

型車では走行距離が長く、また搭載性に余裕があるためエンジン改良よりもSCR等の後処理に重点を置き、その課題に対する様々な改良が行われている<sup>7)</sup>。しかしながら我々はディーゼル車が生き残るためには、EMSトータルとして簡素化、低コスト化を図り車両価格を抑えることが必要であると考え、このためにエンジンで極力エミッションを低減して高価な後処理システムをできるだけ簡素にすることを開発のコンセプトとした。

その考え方をFig. 1に模式的に示した、通常のアプローチでは噴射系の改良で、ある程度エミッションを改善し後処理のDPF, SCRによってNOx, PMを目標値まで低減する。これに対して我々は250MPaの超高圧を実現する噴射系コンポーネントにより燃料噴霧の微粒化や空気利用率を向上することでエミッションの絶対値を大幅に改善し、これに噴射特性のフィードバックが可能で可能なi-ARTシステムを組み合わせることによってエミッションのバラツキを改善するものである。これにより簡素な後処理で目標を達成し得る、シンプルで低コストなトータルシステムの実現を目指した。

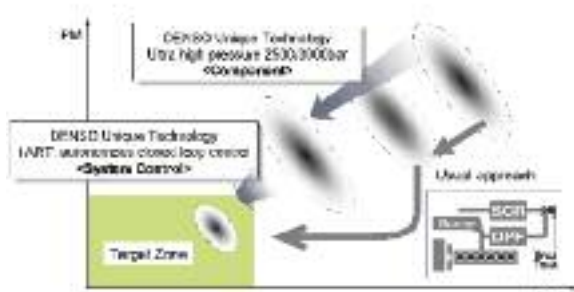


Fig. 1 Approach to Improved Emissions

Fig. 2は排気規制に対応するために必要な大型ディーゼルエンジンのEMSのインシャルコストを比較した例である<sup>4)</sup>。

EURO5対応エンジン (①) の噴射系, EGR系でEURO6をクリアするには, DPFとSCRを組み合わせた複雑な後処理システムが必要となり, トータルコストが20%程度増加する (②)。

これに対して超高圧噴射系とそれに対応したEGR系を用いると (③~⑤), 噴射系およびEGR系自体のコストは若干増加するがエンジンからの排出エミッションが改善されるために後処理システムの負荷が低減されてDPFのみ, あるいはSCRのみの簡素な後処理システムとすることができるために, EMSトータルでのコスト低減が可能となる。

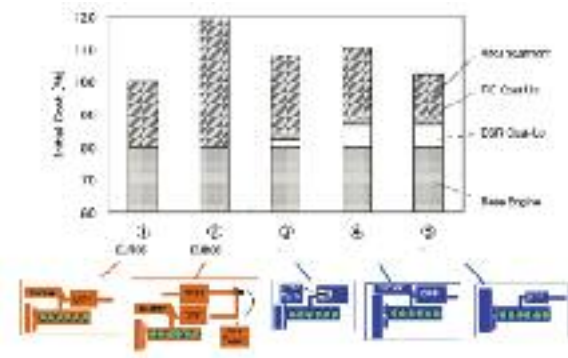


Fig. 2 Complex System to meet EURO6

Fig. 3<sup>5) 6)</sup>に著者らのメーカーの噴射系ロードマップを示す。

1995年にトラック用コモンレールシステムとして世界初の量産化を果たした第1世代噴射系以来, 各国において実施された規制強化に合わせて, 当時の世界最高となる噴射圧力を実現する第2世代,第3世代と, 常に他社に先んじて噴射圧力の高圧化にチャレンジし続けてきた。

そして現在は, 250MPaという実に第1世代の2倍以上となる超高圧噴射が可能な第4世代噴射系の量産を開始した。

今回, 高圧化のための施策を中心に第4世代噴射系システムの詳細を以下に説明する。

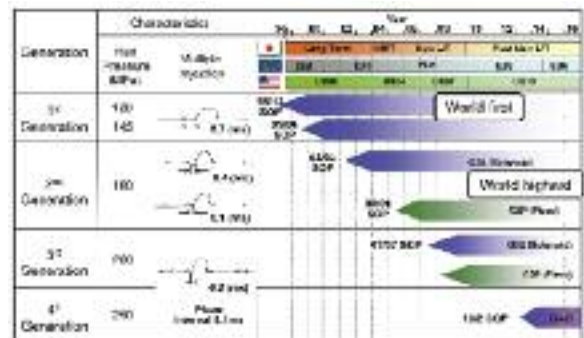


Fig. 3 FIE Roadmap

### 3. 第4世代噴射系システム

Fig. 4は第4世代噴射系システムの構成例で, 250MPaが実現できるコンポーネントを準備している。図は各インジェクタに圧力センサを内蔵し, 検出した圧力信号に基づいて噴射特性をフィードバック制御するi-ARTシステムを組み合わせた場合の構成である。

次にシステムを構成する各コンポーネントについて

説明する。このような超高压を実現するためには各コンポーネントにおいてリークとして無駄に捨てられる高压燃料をいかにして低減するかがキー技術であると考え、リーク抑制を最重要課題として各コンポーネントの設計を行うこととした。

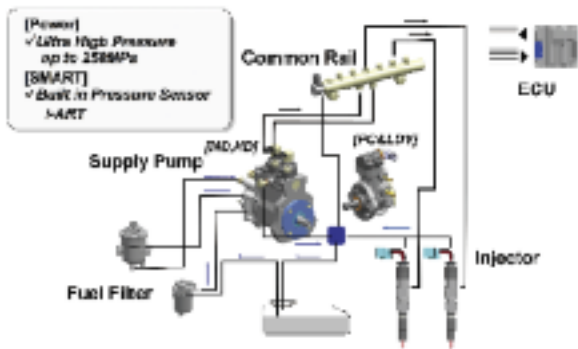


Fig. 4 4<sup>th</sup> Generation Common Rail System

Fig. 5はインジェクタおよびポンプにおける燃料圧力とリーク量との関係を示す模式図で、燃料のリーク量は圧力の上昇に伴って急激に増加する。高压の燃料がリークすると圧力エネルギーが熱エネルギーに変換されるためにポンプやインジェクタの構成部材が受熱して高温になる。それにより燃料温度が上がるために燃料の動粘度が低下してさらにリーク量が増える、という悪循環が生じてしまう。

この結果、高温による燃料の劣化や動粘度低下による潤滑不良、リーク量増加による燃費悪化という問題を引き起こすことになる。つまりリークを極力抑制してこれら不具合の発生を防止することが高压化のための重要な課題である。

以下、各コンポーネントのリーク低減対策を中心にその詳細を説明する。

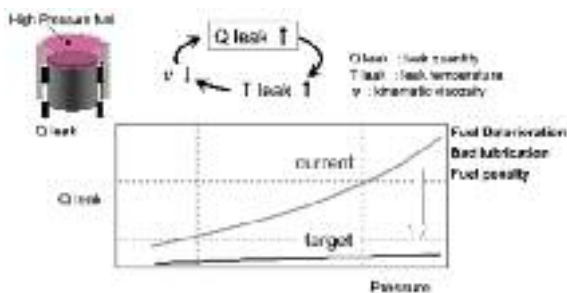


Fig. 5 Components Development Policies

まずインジェクタの作動とリークのメカニズムおよびその低減方法について述べる。

Fig. 6は従来インジェクタの模式図で、油圧力をノ

ズルニードルに伝えるコマンドピストンの上部には、その部屋の圧力を制御することによって噴射を司る制御室がある。

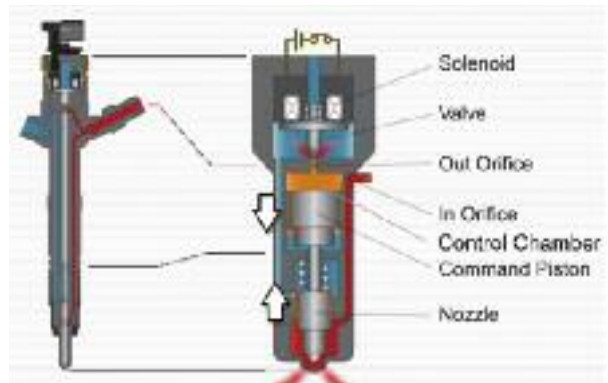


Fig. 6 Current Injector Structure

非噴射時はバルブによりアウトオリフィスが閉鎖されているために、制御室は高压に維持されている。噴射時にはECUからの指令によってソレノイドに通電されバルブが引き上げられると、制御室の燃料はアウトオリフィスを介して低压経路に流出する。これにより制御室の圧力が低下してノズルニードルが上昇し燃料が噴射される。

噴射終了時はソレノイドへの通電を停止することでバルブが閉弁し、インオリフィスから流入する高压燃料によって制御室の圧力が上昇するために、コマンドピストンを介してノズルを押し下げて噴射が終了する。

インジェクタボディとコマンドピストンおよびノズルニードルの間には摺動のためのクリアランスが必要である。この寸法は数 $\mu\text{m}$ という微小な値に加工されているが高压の燃料を完全にシールすることはできず、このクリアランスから高压燃料が常時リークすることになる（静リーク）。

さらに噴射動作中はバルブが開弁した状態のため高压燃料がイン、アウトオリフィスを介して低压経路に流出し続ける（動リーク）。リーク低減のためには静リークと動リークの両方を考慮する必要がある。

これに対して第4世代インジェクタ（G4S）では内部に低压部を持たないセンターフィード構造を採用することでコマンドピストンを廃止した<sup>4) 5) 6)</sup>。これによりコマンドピストンおよびノズルニードルの摺動部クリアランスから生じる静リークをゼロにすることが可能となる。

また動リーク低減のためにバルブ構造として3方弁（3WV）機能を採用した。従来の2方弁（2WV）と3方弁の作動を比較すると、2方弁では前述のように噴射

排  
ク  
リ  
ー  
ン  
気  
ん

期間中は高圧と低圧経路が導通した状態となるためリーク燃料が流れ続ける。これに対して3方弁では噴射中は高圧側のバルブが閉じられるために高圧燃料が流入することなく、したがって動リークの低減が可能となる。

Fig. 7にG4Sのリーク量を従来品と比較した結果を示す。

従来品では圧力の増加とともに静リークと動リークを合わせたトータルリーク量が急激に増加する。

これに対して今回開発したG4Sインジェクタでは静リークをゼロに抑え、なおかつ動リークも抑制されるために全負荷運転時に相当する300MPaの条件でも従来品でアイドル時の圧力（数10MPa）相当程度の低いリーク量に抑えられることが確認できた<sup>4) 5) 6)</sup>。

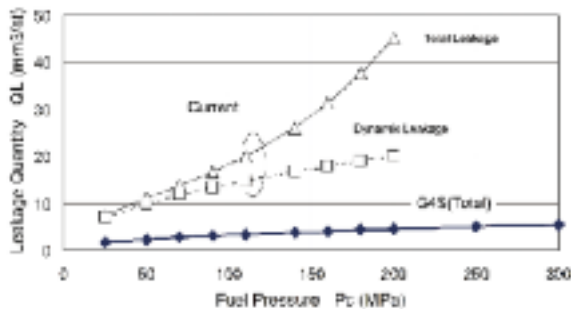


Fig. 7 Comparison of Leakage Quantity

次に第4世代ポンプ（HP7）について述べる。ポンプ駆動は超高圧に耐えられるように、商用車用で既実績のあるカムとローラによる方式を採用した。またコモンレールに圧送する高圧燃料の調量はプレストローク制御方式とした。これはプランジャ室に低圧燃料全量を吸入して、バルブを閉弁する時期、即ち圧送開始タイミングを調整することで所望の高圧燃料を送り出すもので、吸入時に燃料の流れが絞られないためポンプの駆動損失を減らせられるばかりでなく、プランジャ室内の真空化を防ぎキャビテーションの発生を抑制、ひいては燃料の劣化を防止できるものである。

次に従来品の構造を用いてポンプのリーク低減施策を説明する（Fig. 8）。プランジャにより燃料を圧縮するとハウジングとプランジャの摺動部クリアランスを介して、高圧燃料がプランジャ室からリーク回収溝を通して低圧経路にリークする。この時、圧力エネルギーが熱エネルギーに変換されるためにハウジングやプランジャが高温となる。これにより燃料が受熱して昇温するために動粘度が低下し益々リークが増加することになる。

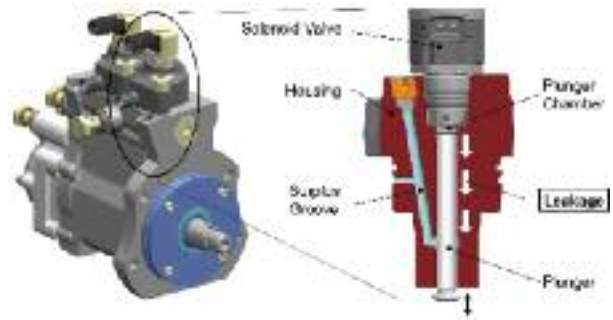


Fig. 8 Current Pump Structure

この対策のためにフィード燃料（低圧）をプランジャ近辺に誘導する冷却通路を新たに設置する構造とした<sup>4) 6)</sup>。これにより低圧かつ低温の燃料がハウジング等の部材を冷却し、その結果燃料の温度を下げた動粘度の低下を抑制するとともにハウジングの熱膨張によるクリアランスの拡大を抑えることでクリアランスからのリークを低減することができる。

Fig. 9に従来品とHP7のポンプ特性を比較した結果を示す。従来品では300MPaでリーク温度が200℃近くになるのに対し、冷却通路を設置した効果により燃料リーク量が大幅に抑制され70℃程度のリーク温度低減が可能となった。

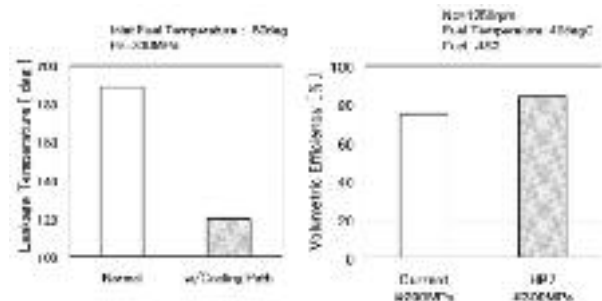


Fig. 9 HP7 Characteristics

また、駆動トルク、燃費に影響を及ぼすポンプの容積効率についてもリークとして無駄に捨てられる燃料が大幅に低減されることによって、従来品の200MPa時の容積効率と比べて300MPaと高圧でありながら効率は逆に9%程度改善できることがわかった（同図右）。

#### 4. 高圧噴射の効果

一般に、高圧で噴射するほど強いペネトレーションが得られ、また噴霧とエアの混合が促進されるために燃焼の改善が期待されることから、他の噴射系メーカーにおいても噴射圧力の高圧化に関する開発が盛んに行われている<sup>8)</sup>。

排 ク  
リ ー  
ン 気 ン

そこで噴射圧力が噴霧およびエンジン性能に及ぼす影響を第4世代噴射系を用いて定量的に調査した。

まず、燃焼に大きく影響する燃料噴霧の噴霧特性を比較した結果をFig. 10<sup>4)</sup>に示す。

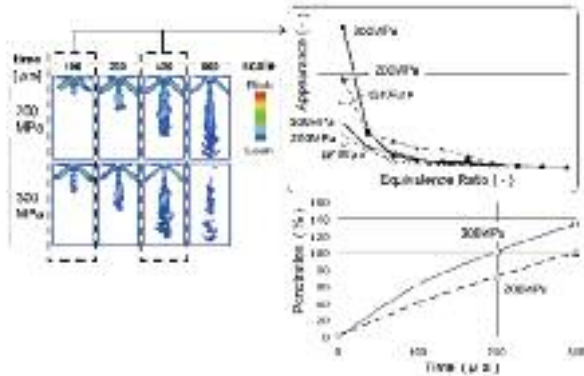


Fig. 10 Spray Comparison between 200MPa and 300MPa

図左は噴霧の相状態および当量比をLIEF (Laser Induced Exciplex Fluorescence) 法<sup>9)</sup>で観察した画像で、これを定量的に示したグラフを図右に示す。

300MPaでは200MPaに比べて噴射直後からペネトレーションが強く、また図左の画像および図右上の当量比の分布を示すグラフより、比較的初期からリーンな噴霧が形成されていることがわかる。このように高压の噴射条件ほど微粒化と空気のエントレインメントが促進されるために、燃焼に適した質の良い噴霧が供給できるものと期待される。

Fig. 11<sup>4) 6)</sup>は噴射圧力に対するエンジン性能を単気筒エンジンを用いて調査した結果である。高負荷(EU大型車テストモードC100)条件において、ベースである噴射圧力220MPaのままEGR率および過給圧を増加させると燃焼温度が低下してNO<sub>x</sub>は大幅に低減されるが、燃焼状態が悪くなって燃費、スートの悪化をもたらす。

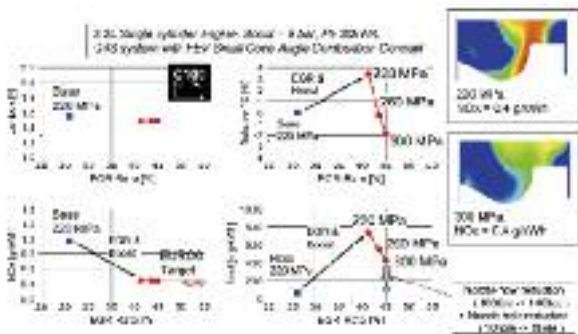


Fig. 11 Merit of Extremely High Pressure

そこで噴射圧力を260MPa、さらに300MPaと高める

と先述の噴霧観察の結果にも示されるように、噴霧の微粒化が促進されるとともに空気利用率が向上して燃焼が改善されるため燃費、スートの低減が図れる。

しかしながら噴射圧力の高压化だけではスートレベルがベースまで改善しきれなかったため、噴孔数、噴孔流量などノズル諸元の最適化を行うことにした。この結果、ノズルの噴孔流量を1600ccから1400cc、孔数を10孔から8孔とすることで、1孔当たりの流量が増加してペネトレーションが増すために噴霧の到達距離が延びて燃焼室周辺部の空気利用率が増すことや噴霧の干渉が抑制されること等によってスートをほぼベースレベルまで抑えられることが確認できた。

### 5. 噴射特性のクローズドループ制御システム

Fig. 12<sup>5) 6)</sup>に開発中のi-ART (Intelligent Accuracy Refinement Technology) の構成を示す。

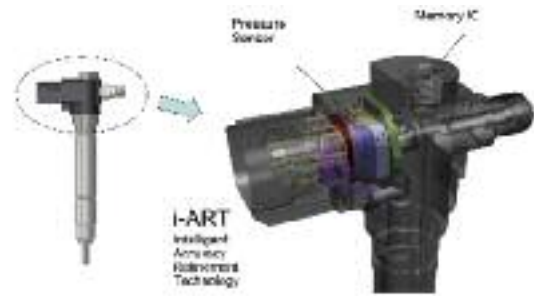


Fig. 12 i-ART Structure

インジェクタのヘッド部にはインジェクタ内部の圧力を検出するための圧力センサと、ECUとの通信のための電子回路および走行時に得られた学習値等を保管する機能を持ったメモリICが搭載されている。

燃料が噴射されるとインジェクタ内部の圧力が低下・変動するが、その圧力挙動は実際の噴射率と相関がある。つまり圧力の変曲点噴射率の変曲点となる。したがって圧力を検出することによってその圧力挙動から逆に噴射率が推定できるため、その情報から時々刻々の噴射時期や噴射量を推定することが可能となる。

一方ECUは目標とする噴射率モデルを内部に持っている。インジェクタの噴射率特性は原理的に圧力、噴射量、温度に依存するため、事前に専用ベンチで目標のモデルを設定しておく。このモデル値と実際に圧力センサで検出した値から推定される噴射率とを比較して、エンジン運転条件ごとに狙いとする噴射時期、噴射量となるよう噴射指令値をフィードバック制御す

る。これによりインジェクタ個体の噴射特性ばらつきや経時的な噴射量変動を自動修正でき、したがって生涯に亘るエミッションバラツキの抑制が可能となる (Fig. 13)<sup>5) 6)</sup>。

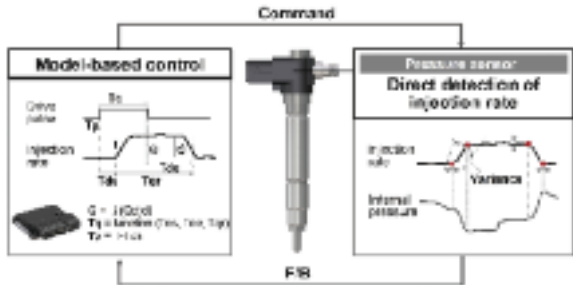


Fig. 13 Closed-loop Control Strategy

Fig. 14<sup>3) 6)</sup>にi-ARTシステムの制御の効果例を示す。1回の噴射作動中に複数回の噴射を行うマルチ噴射はエミッションや騒音の低減，燃費改善に効果のあることがよく知られているが，環境条件の変化等に対して複数回の噴射を精度良く安定して制御するには，多大な適合工数が必要である。

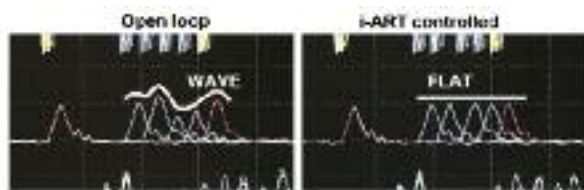


Fig. 14 Multiple Injection Accuracy

図左に従来のオープン制御でマルチ噴射を行った場合の噴射率の測定結果を示す。

2回目の噴射の噴射時期を変える，即ち噴射のインターバルを変えると，1回目の噴射によって発生したインジェクタ内部の圧力変動が2回目の噴射の噴射開始や噴射終了時期あるいは噴射率に影響するため，同じ指令値でありながら2回目の噴射は噴射時期や噴射量が変動してしまう。

これに対してi-ART制御を加えた場合（図右）には実際の噴射率を検出して目標値にフィードバックすることができるために，1回目の噴射の圧力波の影響を受けることがなく複雑な適合も必要とせず噴射時期，噴射量ともに安定したマルチ噴射が可能となる。

Fig. 15はi-ARTシステムの燃費低減効果を車両で確認した結果で，EUモード走行時のCO<sub>2</sub>の排出量をi-ART制御有り無しで比較した。

i-ARTシステムでは噴射時期，噴射量のばらつき精

度が向上するため，ベースの適合条件よりも燃費が改善される方向に噴射時期等の適合値をシフトすることができる。この結果，モード走行時トータルのCO<sub>2</sub>排出量は従来よりも2%程度低減可能であることが確認できた<sup>3) 6)</sup>。

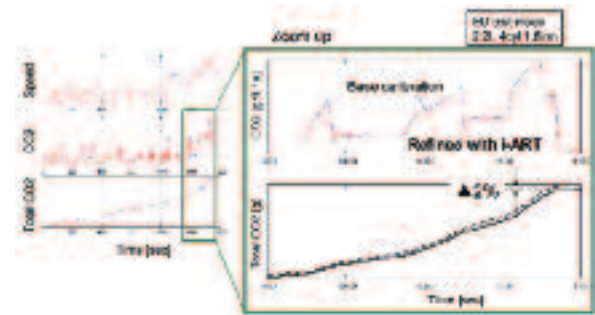


Fig. 15 i-ART Effect on Fuel Consumption

## 6. 高圧化とi-ART制御の効果

最後に第4世代噴射系システムとi-ARTシステムの組み合わせによるエミッション，燃費の低減効果の例を示す。

Fig. 16<sup>4) 6)</sup>は単気筒エンジン（2.2ℓ）を用いて調査した結果で，ベースである200MPa噴射時のエミッションに対して250MPaへの増圧とノズル諸元の最適化およびEGR，過給圧の増加とによってNO<sub>x</sub>とスートの大幅な改善が図れる。300MPaへのさらなる増圧やポスト噴射の付加等によりスートは更に低減可能である。

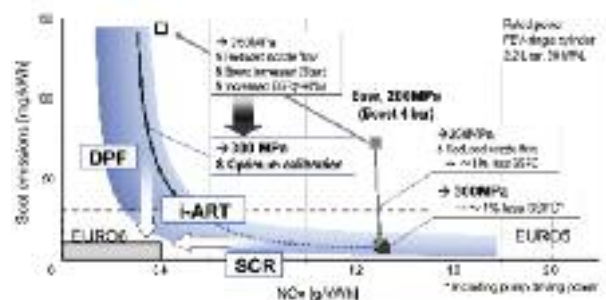


Fig. 16 Advanced Development Direction with 300MPa FIE

これによりDPFのみ，あるいはSCRのみという簡素な後処理システムでエミッションを目標値にまで低減できる目処を得ることができた。

さらにi-ART制御を加えることによってエミッションの個体間ばらつき，および経時変化を抑制できるために，生涯に亘って初期のエミッション値を維持する

排 ク  
リ ー  
ン 気 ン

ことが可能である。

このように、今後のディーゼルエンジンにとって超  
 高压噴射による燃焼改良と制御システムによる噴射特  
 性の精度向上がディーゼルエンジン生き残りのキー技  
 術となることを確信している。

## 7. むすび

ディーゼルエンジンのメリットを活かしつつ、将来  
 ますます厳しくなるエミッション、CO<sub>2</sub>規制をクリア  
 するために、我々は「ディーゼルレボリューション」  
 の考えの下、トータルとしてできるだけ簡素で安価な  
 エンジンマネージメントシステムの構築を目指してい  
 る。

第4世代噴射系システム製品の持つ「力」とシステ  
 ム制御の「知恵」の融合によって各々のパフォーマ  
 ンスをより高め合いこれまでに無い付加価値を実現す  
 ることをコンセプトとして開発を進めてきた。

具体的な開発として、高压化のためのキー技術であ  
 るリーク量の低減に拘ってコンポーネント設計を行う  
 ことで250~300MPaという超高压を実現、エミッシ  
 ョンの絶対値を大幅に改善できる目処を得た。また世界  
 初のi-ARTシステムによる噴射特性の自動修正が可能  
 なクローズドループ制御によってインジェクタ個体の  
 ばらつきや噴射量変動を抑制することでエミッション  
 のばらつきを低減できることを確認した。

我々はさらに「ディーゼルレボリューション」を推  
 し進めることで、今後もクリーンでエコかつ簡素なデ  
 ーゼルパワートレインシステムを追求し続けて顧客  
 および社会に貢献する所存である。

quantity by i-ART & ultra high injection pres-  
 sure, Aachen Colloquium, P317-338 (2010)

- 4) Miyaki et al.: Fulfilling Euro6 Emission Regulations  
 for Heavy Duty Engines without SCR-System—A  
 Challenge to the FIE System—, 32<sup>th</sup> International  
 Vienna Motor Symposium, P196-213 (2011)
- 5) 宮木正彦：コモンレールシステムの開発と進化、  
 第22回内燃機関シンポジウム、K-25-K-43 (2011)
- 6) 小島昭和ほか：ディーゼルレボリューションへの  
 挑戦、自動車技術会シンポジウムテキスト、  
 NO.11-11, P19-24 (2012)
- 7) 鈴木央一ほか：ポスト新長期尿素SCR車における  
 N<sub>2</sub>O排出特性、自動車技術会学術講演会前刷集、  
 NO.115-11, P7-10 (2011)
- 8) Andrew Knight et al.: Development of High  
 Pressure Common Rail Systems incorporating  
 Advanced Electronic Control Strategies for future  
 Heavy Duty Vehicles, 33<sup>th</sup> International Vienna  
 Motor Symposium, P300-317 (2012)
- 9) Yamashita et al. : Research of the DI Diesel spray  
 characteristics at high temperature and high  
 pressure ambient, SAE 2007-01-0665

## <参考文献>

- 1) 小林弘晃ほか：JP09規制対応6R10エンジンの紹介、  
 自動車技術会シンポジウムテキスト、NO.12-10、  
 P29-34 (2012)
- 2) Miyaki et al.: The Breakthrough of Common Rail  
 System: Closed-loop Control Strategy Using  
 Injector with Built-in Pressure Sensor, 30<sup>th</sup>  
 International Vienna Motor Symposium, P300-317  
 (2009)
- 3) Ishizuka et al.: Further innovations for Diesel  
 Fuel Injection System : Closed-loop control of fuel

<著 者>



小島 昭和  
(こじま あきかず)  
ディーゼル噴射事業部  
ディーゼル事業の技術企画  
に従事



内山 賢  
(うちやま けん)  
ディーゼルシステム技術部  
ディーゼルエンジンマネー  
ジメントシステムの開発に  
従事



増田 誠  
(ました まこと)  
ディーゼル噴射事業部  
ディーゼル次期型システム  
開発に従事



伊達 健治  
(だて けんじ)  
ディーゼル噴射技術部  
ディーゼル用インジェクタ  
の設計・開発に従事



堀内 康弘  
(ほりうち やすひろ)  
日本自動車部品総合研究所  
次期型製品の研究開発に従  
事



Dr. Olaf E. HERRMANN  
DENSO AUTOMOTIVE  
Deutschland GmbH  
Advanced D-EMS



Dr. Hermann J. LAUMEN  
FEV Motorentechnik  
GmbH Diesel Injection  
Systems