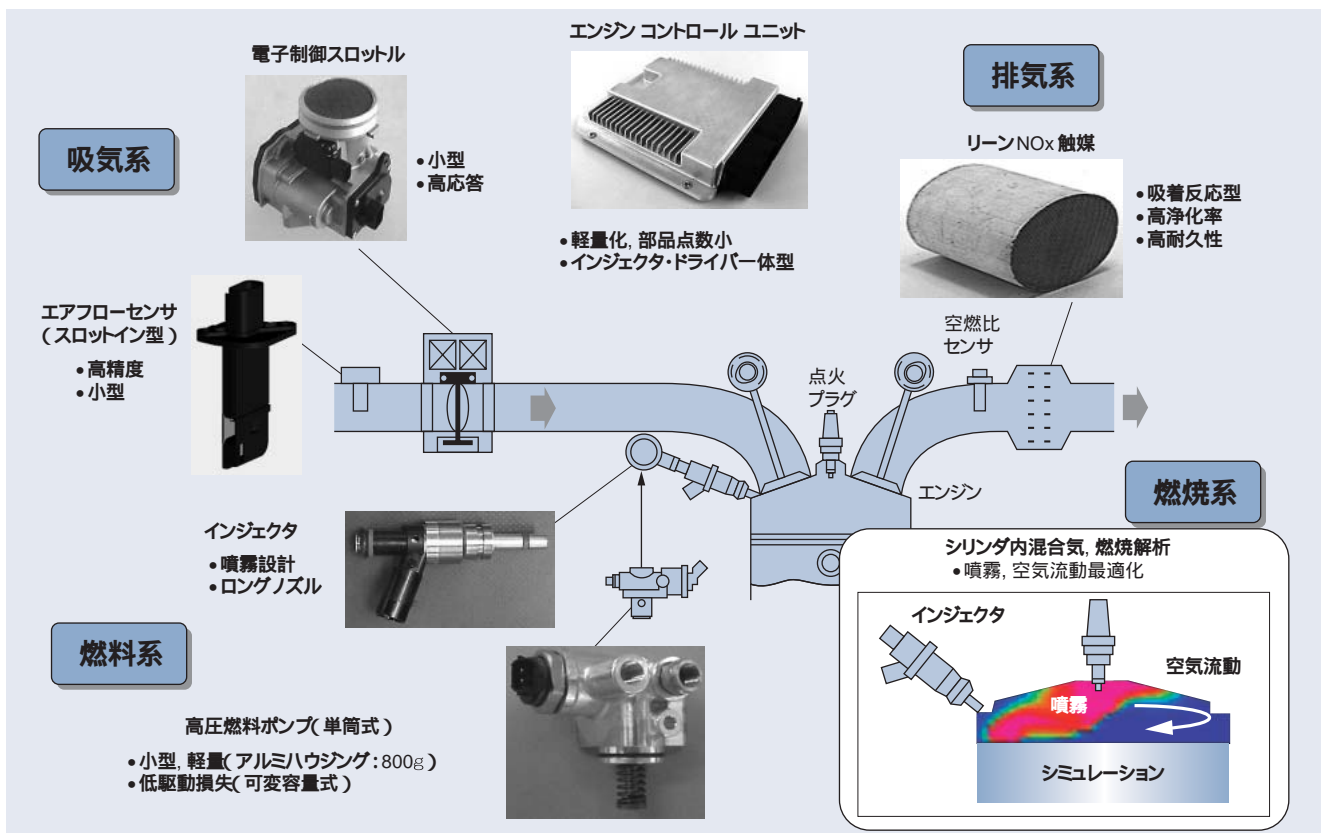


# 低燃費・低排気の筒内噴射エンジン制御システム

## New Direct-Injection Engine Control Systems for Meeting Future Fuel Economy Requirements and Emission Standards

大須賀 稔 Minoru Ōsuga 五十嵐信弥 Shin'ya Igarashi 白石拓也 Takuya Shiraishi  
 田辺好之 Yoshiyuki Tanabe 財津政弘 Masahiro Zaitso 安部元幸 Motoyuki Abe



### 筒内噴射エンジンシステムの概略構造と主要コンポーネント

日立グループは、筒内噴射エンジン用の主要コンポーネントの製造に加え、さまざまなシステム制御技術を開発している。コンポーネントでは、吸気、燃料、および排気系にわたるシステム全体をカバーしており、独自のシミュレーションや解析技術により、噴霧、空気流動などの燃焼系の最適化を図っている。

最近、わが国や欧州では、CO<sub>2</sub>削減のニーズから、自動車の燃費向上が急務となっている。エンジンシステムでは、高効率のディーゼルエンジンが増加すると予測されており、すすなどの排気対策が大きな課題である。一方、ガソリンエンジンは、排気面での対環境性が高く、燃費の点でもディーゼルエンジンに近づきつつある。

日立グループは、1997年に筒内噴射エンジン制御システムを製品化して以来、システムの制御や主要コンポーネントを開発、製造し続けており、現在では欧州へも展開している。また、自動車の燃費、排気、出力などへのニーズに対応するため、さまざまな先進的システムソリューションを提案している。

## 1 はじめに

1997年に本格的に市場投入されて以来、筒内噴射エンジ

ンは、主に国内で普及してきた。さらに最近、その燃料経済性、高出力特性などにより、CO<sub>2</sub>問題が深刻化している欧州で急速に普及する機運にある。

日立グループは、長年培ってきたエンジンの制御システム技

術をこの筒内噴射システムに投入し、製品化してきた。現在、排気やCO<sub>2</sub>削減など2005年以降の環境規制強化の流れに対応するため、新しいシステムを提案している。

吸気系では、エンジンの吸気量やトルクを正確に制御するエアフローセンサや電子制御スロットルを、燃料系では、アルミハウジングを採用した世界最軽量の高压燃料ポンプなど、さまざまな燃焼室形状や燃焼方式に対応する噴霧形成が可能なインジェクタを提供している。また、排気系では、リーンバーン(希薄燃焼)時のNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)を高効率で浄化するリーンNO<sub>x</sub>触媒を製品化している。さらに、独自のシミュレーションにより、燃焼を左右するインジェクタ噴霧仕様やピストン、燃焼室形状などを提案している。

ここでは、最新のエンジン燃焼技術と、それを実現する制御技術、およびコンポーネントについて述べる。

## 2 筒内噴射エンジン制御システム

### 2.1 筒内噴射エンジンの特性と適用展開

従来のポート噴射エンジンと筒内噴射エンジンの構造比較を図1に示す。筒内噴射エンジンでは、エンジンのシリンダ(筒)内に直接燃料を噴射することから、噴射のタイミングやシリンダ内での混合分布が自由に制御でき、高压縮比化や燃費向上、高出力化が可能である。また、制御自由度の高い筒内噴射エンジンでは、エンジン本来の耐ノック性や応答性、リーンバーン、EGR(Exhaust Gas Recirculation)性などの基本特性が、ポート噴射に比べて大幅に向上する。日立グループは、これらの優れた基本特性を利用して、可変バルブやハイブリッドシステム、過給システムのダウンサイジング、規制対応などで新しいシステムを展開している(図2参照)。

### 2.2 制御システムの構成

筒内噴射エンジンの優れた性能を引き出すためには、コン

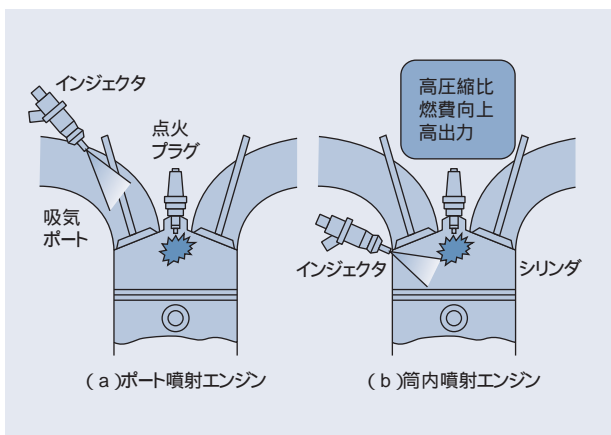
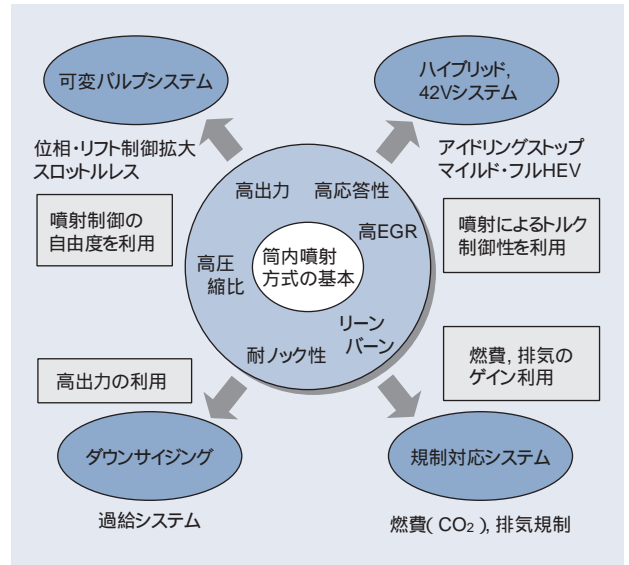


図1 ポート噴射エンジンと筒内噴射エンジンの概略構造

筒内噴射エンジンでは燃料をインジェクタからシリンダ(筒)内に直接噴射し、燃焼するので、ポート噴射エンジンより高圧縮比と高出力が得られる。



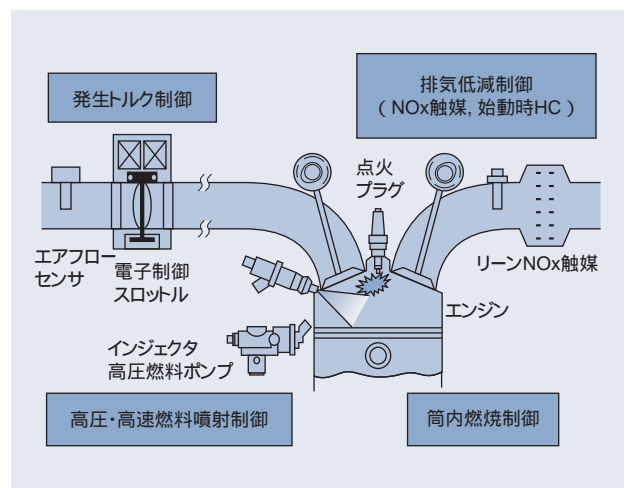
注：略語説明 HEV( Hybrid Electric Vehicle )

図2 筒内噴射エンジンシステムの特徴

高出力、噴射の自在性、低排気性などの特性を持つ筒内噴射エンジンは、将来のニーズに対応するパワートレインへ適用されている。

ポーネットの革新と制御という新しい高度なシステム技術が必要となる。すなわち、基本となるエンジンの燃焼を高精度にコントロールするためには、高い圧力(5~12 MPa)で燃料をシリンダ内に噴射する高压燃料ポンプとインジェクタがキーコンポーネントとなる。高压で高速の燃料噴射制御を実現するため、さまざまな運転状態での完全燃焼化を図ったこれらのキーコンポーネントを開発している。

また、エンジンへの吸入空気量を正確に検出するエアフローセンサと、高応答の電子制御スロットルを用いることにより、運転者の時々刻々と変化する要求に応じて、エンジンの発生トルクを制御している。筒内噴射エンジンでは、リーンバーンによる高効率運転を利用するものもあるため、リーン



注：略語説明 HC( Hydrocarbon )

図3 筒内噴射エンジン制御システムの概略構造と主な機能

アイドリングから高速まで、さまざまな運転状態で発生するトルクの制御、燃料の最適噴射、燃焼制御、排気低減制御の機能を持っている。

(酸素過多)状態でNOxを還元するリーンNOx触媒が必要となる。

日立グループは、そのための高浄化率制御も併せて提供している(図3参照)。

### 3 筒内噴射の燃焼技術

#### 3.1 筒内噴射エンジンの燃焼解析技術

シリンダ内燃焼制御のキーとなるインジェクタの開発にあたって、シミュレーションを駆使した解析技術を適用している(図4参照)。日立グループのエンジン燃焼シミュレーション技術は、原子力プラントの配管内の、気液二層流を解析する非定常・圧縮性流体解析プログラムを基にしている。現在では、これにさまざまな改良を加え、実用性を向上させている。改良の主眼点は、開発のターンアラウンド時間をできるだけ短縮することと、筒内現象を正確に再現することである。前者に関しては、三次元CAD図から直接メッシュを作成できる「ボクセル法」を開発した。この手法では、約200万セルのメッシュを5分で自動生成できる。これにより、従来は数週間かけていたメッシュ作成の工数が低減でき、短時間でピストン形状などの燃焼室に関するパラメータサーベイを可能とした。後者に関しては、シリンダ内の空気流動再現の精度向上を図った。乱流を直接シミュレーションする技法の開発により、噴霧形成や、燃焼に大きく影響する空気流動を高い精度で再現する。

このシミュレーションの筒内噴射エンジンへの適用例を図4に示す。シリンダ内に噴射された混合気とその燃焼火炎の計算では、混合気の分布を着火性確保の観点から最適化することが重要であり、そのためには、インジェクタの噴霧仕様が

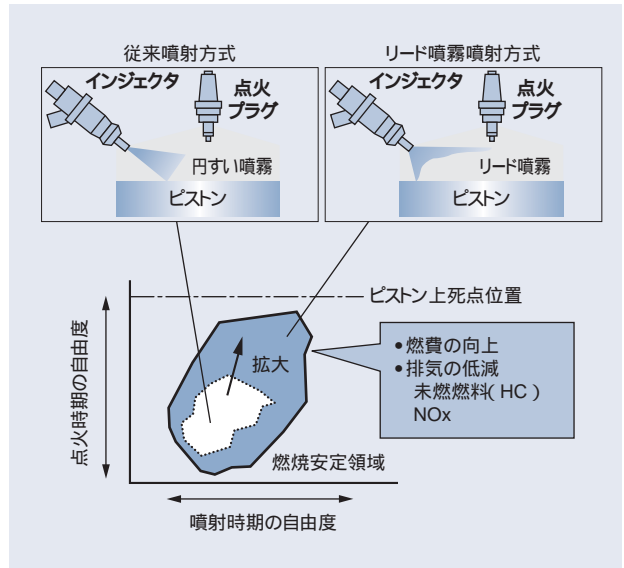


図5 従来方式と次世代の筒内噴射方式の比較

次世代の噴射方式として、リード噴霧噴射方式を提供する。これにより、日立グループの従来噴射方式比で燃費向上と排気低減が図れる。

かぎとなる。この解析技術を用いてインジェクタの噴霧仕様を決定し、燃焼室や吸気管形状についてカーメーカーへ提案している。

#### 3.2 新噴射方式の開発

筒内噴射エンジンの性能は、燃費と排気のニーズに応じて進展している。現在、市販されているものの大半は、円すい噴霧を用いた噴射方式を採用している(図5参照)。この従来方式では、インジェクタから噴射された噴霧はピストン面に衝突したあと、火花プラグ部で燃焼する。これに対し、次世代のエンジンに対応するため、リード噴霧噴射方式を開発した。

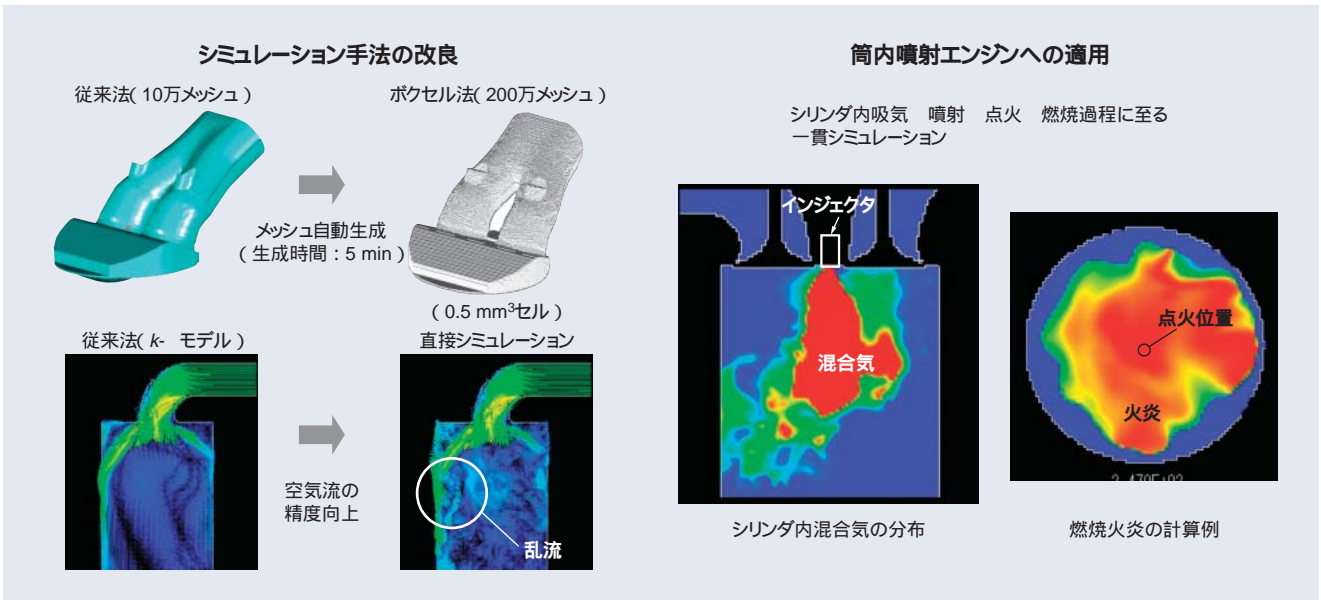


図4 エンジン内流動、燃焼解析シミュレーション手法と筒内噴射エンジンへの適用例

メッシュ作成の迅速化と精度向上を図り、シリンダ内吸気から噴射、点火、燃焼に至る過程の一貫したシミュレーションを行っている。この結果を、インジェクタ噴霧仕様の決定や燃焼室形状の提案など、筒内噴射エンジンの燃焼技術開発に活用している。

この方式では、噴射された噴霧はピストン面に衝突することなく、シリンダ内に分散し燃焼する。したがって、噴霧はピストン面に付着しないので、未燃の燃料が低減できる。また、リード噴霧の効果により、点火時期や噴射時期の自由度が拡大でき、運転状態に応じて燃焼を開始し、燃焼期間を制御することができる。その結果、従来噴射方式に比べて燃費向上と未燃燃料(HC)やNO<sub>x</sub>の低減を実現できる。

## 4 コンポーネント技術

### 4.1 インジェクタ

筒内噴射エンジンのキーコンポーネントであるインジェクタの外観と構造、および噴霧形状例を図6に示す。筒内噴射エンジンでは、ポート噴射の40倍以上という高い圧力の燃料を短時間に噴射する必要がある。そのため、動磁場解析などの解析技術を駆使し、ソレノイド駆動力を増大させて弁動作の高速化を図るとともに、日立グループ製従来機種比の50%という小型・軽量化を実現した。

また、燃料の噴霧形成や微粒化のために、独自の「スワール(渦流)方式」を採用したほか、噴霧先端のノズル部形状の設計技術により、エンジンや、燃焼方式に合った噴霧を形成することを可能とした。図6に示した噴霧形状には、対称な円すい噴霧や、エンジンレイアウトに対応するための偏向噴霧、前述したリード噴霧噴射方式に対応する最新の馬蹄状

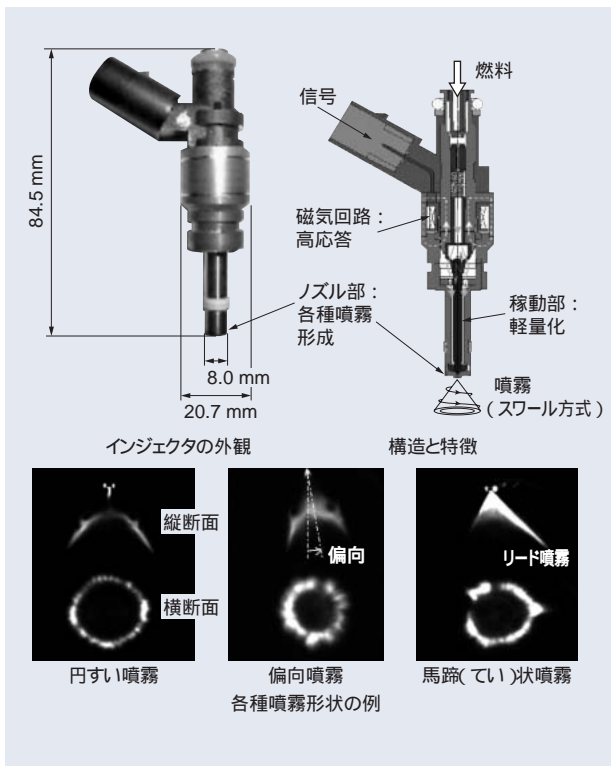


図6 インジェクタの外観と構造、各種噴霧形状例

磁気回路の高応答化と稼働部の軽量化によって弁の高速応答化を図ったほか、ノズル部の形状により、エンジンとその燃焼方式に適した形状の噴霧を提供する。

噴霧などがある。リード噴霧噴射方式では、馬蹄状噴霧のリード噴霧部の仕様を燃焼室形状に合わせて最適化することにより、さまざまな運転状態で良好な着火性を確保する。

### 4.2 高圧燃料ポンプと配管系

高い燃料圧力(5~12 MPa)を実現する高圧燃料ポンプと配管系の最適化例を図7に示す。高圧燃料ポンプでは単筒の往復動式プランジャポンプを採用したほか、ハウジングにアルミニウム材を使用し、表面のめっき技術により、アルコール含有燃料(E10)にも対応できる800 gの世界最軽量ポンプを実現した。

ポンプはエンジンのカム軸で駆動し、プランジャの往復運動で燃料を吸入、吐出する。ポンプ吸入弁の開口タイミングを可変にする流量制御弁で必要なだけの吐出流量を供給することで、駆動損失を最小化している。この駆動損失の低減は、燃費低減にも寄与している。

流量制御仕様と高圧配管の構成を含めたポンプの開発には、独自の挙動液系解析ソフトウェアを用いた。これによってカムや弁など各構成要素の挙動を把握し、設計にフィードバックすることで、ポンプの高効率化を図った。配管系の配列による圧力脈動の低減例を図7に示す。高圧配管の圧力脈動の予測による、最適な高圧配管の構成を提案している。

### 4.3 高精度エアフローセンサ

筒内噴射システムでは、リーンバーンや高EGR化によって

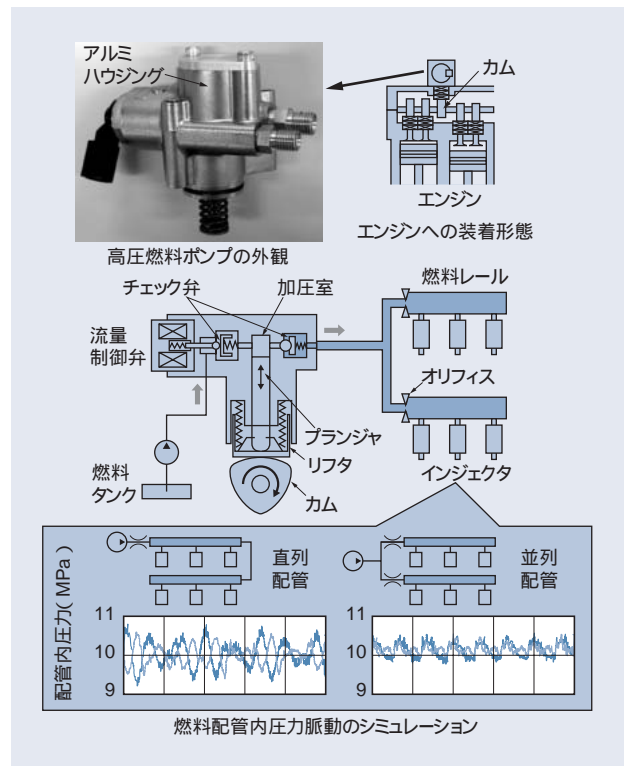
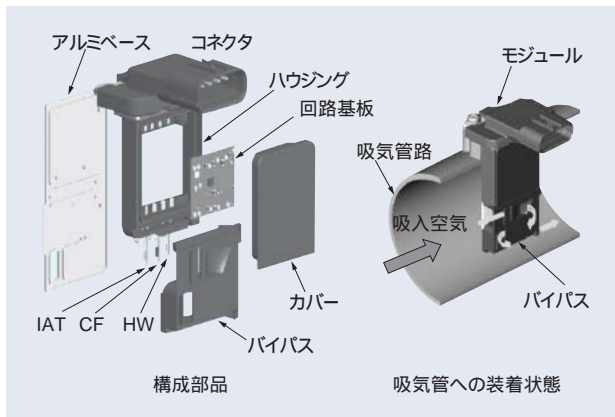


図7 高圧燃料ポンプの構造と高圧配管系の最適化例

アルミボディの採用によって世界最軽量(800 g)を実現したほか、独自のシミュレーションにより、圧力脈動の少ない高圧配管系を開発した。



注：略語説明 IAT( Intake Air Temperature Sensor ; 吸気温度検出素子 )  
CF( Cold Film ; 発熱温度制御用感温抵抗体 )  
HW( Hot Wire ; 流量検出用発熱抵抗体 )

図8 スロットインエアフローセンサの構成

アルミベースにその他の構成部品を積層していく1方向組立方式により、生産性を向上させた。コネクタ部以外の各構造部品は上下2分割による成形が可能で、多数個取りなどによるコスト低減を図ることができる。

吸気脈動が増大する環境でも空気流量を正確に検出する必要がある。長年実績のあるエアフローセンサを改良することでこれに対応している。スロットインエアフローセンサの構成を図8に示す。スロットイン式では、回路基板面積を積層構造などのくふうによって半減し、回路ケース部と検出素子固定部を一体化している。また、小型高性能化が可能な迂(う)回パイパスをアルミベース上に並設したモジュール構造とすることで、部品費の低減と、生産性向上によるコストダウンを達成した。このモジュールをエアクリーナなどの吸気管に装着すれば、空気流量を検出することができる。

また、吸気脈動や温度変化による計測誤差を低減した。吸気脈動に関しては、脈動流自体を低減するパイパス内に検出部を設け、パイパスの細部にわたる最適化により、初期精度、出力ノイズなどの性能を改善しながら、脈動による計測誤差を従来の半分にした。また、樹脂モールドによる断熱と、アルミベースからの放熱のバランスの最適化を図ることにより、温度変化による従来の計測誤差も半減した。

エンジンルーム内は排気熱などによって高温化するが、外気を吸入する吸気管路内は温度変化が少ない。スロットインエアフローセンサでは、アルミベースから吸気への放熱により、回路や検出素子部の温度変化を低減させたほか、熱ストレスによる接合部の寿命を延長するなど、信頼性を向上させた。そのほか、流量検出素子には実績のあるボビン巻線式のホットワイヤを採用し、回路ケースの気密性を高めるなど、高信頼化を図った。

#### 4.4 インジェクタ・ドライバー型エンジンコントロールユニット

筒内噴射では、高燃圧を噴射するインジェクタを高速駆動するドライバーが新たに必要となる。これまで別体であったインジェクタドライバーをエンジンコントロールユニットに一体化し、

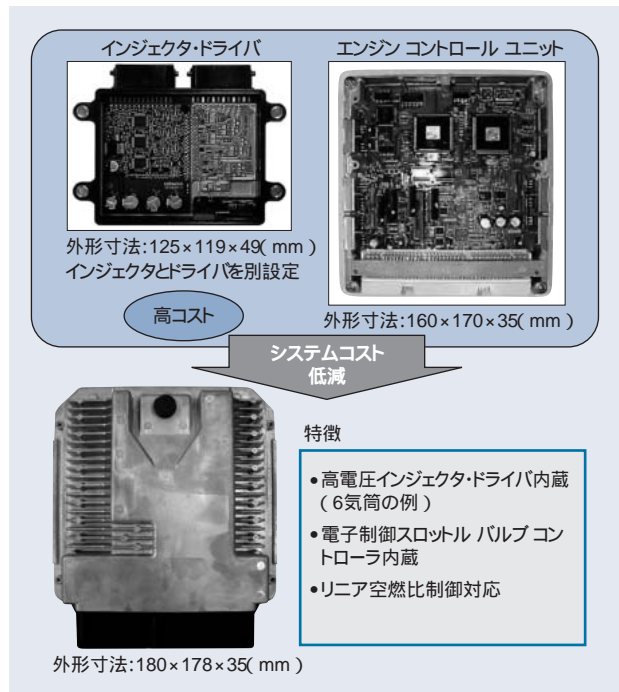


図9 インジェクタ・ドライバー型エンジンコントロールユニットの外観と特徴

従来、個別に設けられていたインジェクタとドライバーをエンジンコントロールユニットに一体化させ、小型、軽量化、コスト低減を図った。

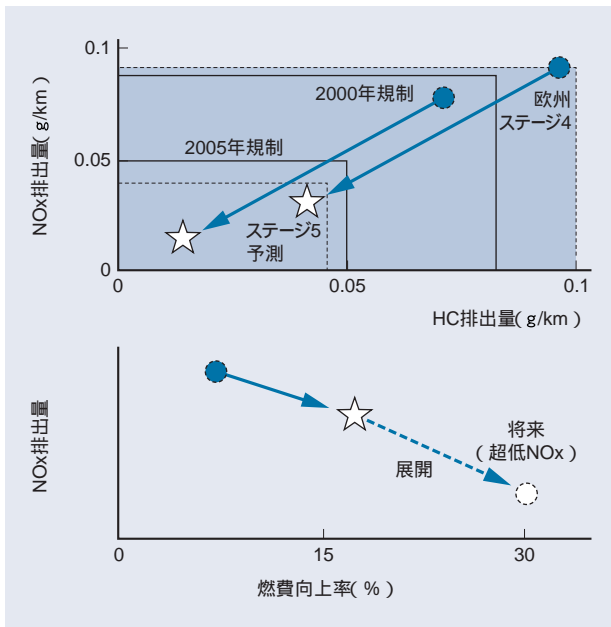
小型・軽量・低コストを実現した(図9参照)。さらに、防水構造の採用によってエンジンルーム内実装対応とし、車両への搭載性向上を図り、ワイヤハーネスの削減を可能とした。

その主な特徴は、インジェクタドライバーの一体化と新カスタムICの採用により、部品数を50%削減して従来の50%まで軽量化し、同時に、低コスト化を実現したことである。さらに、インジェクタドライバーをエンジンコントロールユニットに一体化するため、周辺機能を集約化した新たなカスタムICを、電源回路部や出力部、インジェクタドライバー用にそれぞれ開発した。これらのカスタムICの採用により、部品数を大幅に削減することができ、インジェクタドライバーの一体化を可能にした。

## 5 システムの性能と今後の展開

日立グループは、前述した、噴霧形成を基本とした燃焼制御技術とコンポーネントのほか、制御技術を融合させた筒内噴射のシステムソリューションを提案している。

システムの性能と今後の展開を図10に示す。今回開発したリード噴霧噴射方式は、低NOxと低HC化により、2005年に実施される新長期規制の低排出ガス車に対応する。また、欧州で2008年以降に実施されると予測されているステージ5(ステージ4の $\frac{1}{2}$ )にも対応する。低NOx化を実現すると同時に、ポート噴射に比べて燃費を約16%向上できる。さらに、2010年を目標に、超低NOxを実現しつつ、燃費を30%向上させるシステムの開発に着手している。



注：（従来噴射方式），（リード噴霧噴射方式）

図10 噴射方式の性能比較と今後の展開

リード噴霧噴射方式は、2005年から強化される新しい環境規制に対応する。2010年以降の将来システムでは、いっそうの性能の向上を目指す。

## 6 おわりに

ここでは、日立グループが開発した筒内噴射エンジン制御

システムソリューションについて述べた。

長年培った技術により、1997年に筒内噴射エンジンが開発された当初から、そのための制御システムの製品化を続けている。

さらに、環境規制などのニーズに合わせ、燃焼解析技術を基にした各種噴霧やコンポーネント技術を開発している。

2010年以降もエンジンシステムは変ぼうしていくものと予測される。日立グループは、これに対応する新たなソリューションを提案していく考えである。

### 参考文献

- 1) 白石, 外: 筒内噴射エンジンの混合気形成, 自動車技術会論文集, Vol. 33, No. 4 (2002.10)
- 2) 安部, 外: L-Stepインジェクタによる噴霧形状制御, 日本機械学会全国大会予稿集(2003.8)
- 3) Yoshihiro Sukegawa, et al: Numerical Simulation for Mixture Formation and Combustion in Direct Fuel Injection Gasoline Engines, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress F2000A139(2000)
- 4) Shinji Nakagawa, et al: A New Feedback Control of a Lean NOx Trap, SAE International Engine Electronic Controls 2004, SP-1822, No. 2004-01-0527(2004/3)
- 5) 平工賢二, 外: 高圧燃料ポンプ用流体圧シミュレータ, 機械学会2003年次大会講演論文集 Vol. (2003.8.5)

### 執筆者紹介



#### 大須賀 稔

1979年日立製作所入社、オートモティブシステムグループ制御システム設計部 所属  
現在、筒内噴射などのエンジンシステム開発に従事  
日本機械学会会員、自動車技術会会員  
E-mail: moosuga @ cm. jiji. hitachi. co. jp



#### 財津 政弘

1983年株式会社日立カーエンジニアリング入社、設計本部電子第一グループ 所属  
現在、エンジン コントロール ユニットの開発に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: m-zaitsu @ cm. jiji. hitachi. co. jp



#### 田辺 好之

1980年日立製作所入社、オートモティブシステムグループエンジン機器開発センタ 所属  
現在、エンジン制御機器の開発に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: y-tanabe @ cm. jiji. hitachi. co. jp



#### 白石 拓也

1993年日立製作所入社、日立研究所 第三研究部 所属  
現在、エンジンの燃焼解析、制御開発に従事  
日本機械学会会員、自動車技術会会員  
E-mail: tshirai @ gm. hrl. hitachi. co. jp



#### 五十嵐 信弥

1981年株式会社日立カーエンジニアリング入社、設計本部電子第二グループ 所属  
現在、エアフロー センサの設計・開発に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: s-igashi @ cm. jiji. hitachi. co. jp



#### 安部 元幸

1999年日立製作所入社、機械研究所 自動車システムプロジェクト 所属  
現在、筒内噴射用インジェクタの開発に従事  
日本機械学会会員  
E-mail: abemo @ gm. merl. hitachi. co. jp