

# 連携記事

## ディーゼル燃料噴射装置の進化 Evolution of Diesel Fuel Injection Equipment

依田稔之  
Toshiyuki Yoda

(株)デンソー ディーゼル噴射技術部  
室長

### 1 緒言

地球環境保護の観点から、内燃機関の排出ガス浄化、燃費向上が進められている。ディーゼル機関ではここ15年で、PM (Particulate Matter：排気微粒子)、NO<sub>x</sub> (窒素酸化物)などの排出ガスは90%低減、燃費は40%向上した。これは、機関本体や過給機、排出ガス浄化装置 (de-NO<sub>x</sub>触媒、酸化触媒、ディーゼルパーティキュレートフィルタ)などの進化によることはもちろんであるが、コモンレール式燃料噴射装置の登場、進化も一役買っている<sup>1,2)</sup>。

コモンレール式燃料噴射装置は、低速から高压で燃料噴射ができ、燃料噴射タイミングの設定範囲が広く、また1燃焼サイクルあたりに複数回 (マルチ) 噴射ができるなどの多機能かつ高機能を有し、燃焼改善による排出ガス浄化および燃費向上に貢献している。マルチ噴射は、燃焼改善に加えて排出ガス浄化装置の昇温を促進し浄化効率の向上にも貢献するとともに、ディーゼルノック音と呼ばれる燃焼音をも低減する<sup>3)</sup>。元来パイロット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の増加、マルチ噴射が可能な運転領域の拡大をもたらし、燃焼音のさらなる低減や、低減範囲の拡大を可能とし、ディーゼル車をさらに静かにしている。

本論では、コモンレール式燃料噴射装置とその進化について概説する。

### 2 ディーゼル燃料噴射装置

本章では、コモンレール式燃料噴射装置の特徴を、ジャーク式燃料噴射装置と比較して述べる。

#### 2.1 ジャーク式燃料噴射装置

列型燃料噴射装置や、分配型燃料噴射装置に代表される

ジャーク式燃料噴射装置 (図1) は、コモンレール式燃料噴射装置が登場する以前にはほとんどのディーゼル機関で使われていた。エンジン回転速度に同期したカム軸でプランジャを駆動する燃料噴射ポンプと、スプリング付勢力で閉弁し燃料圧力で開弁するノズル&ノズルホルダが、燃料鋼管で連結された構成となっている。燃料噴射ポンプのプランジャ上昇により燃料が圧送され、ノズルの開弁圧以上に圧力が上昇すると燃料噴射を開始する。燃料噴射圧力は燃料噴射ポンプの送油率 (プランジャ上昇速度×プランジャ断面積) により決まる。燃料噴射タイミングは、ポンプに併設されたタイマー (遠心式、油圧式および電子制御式がある) で制御される。燃料

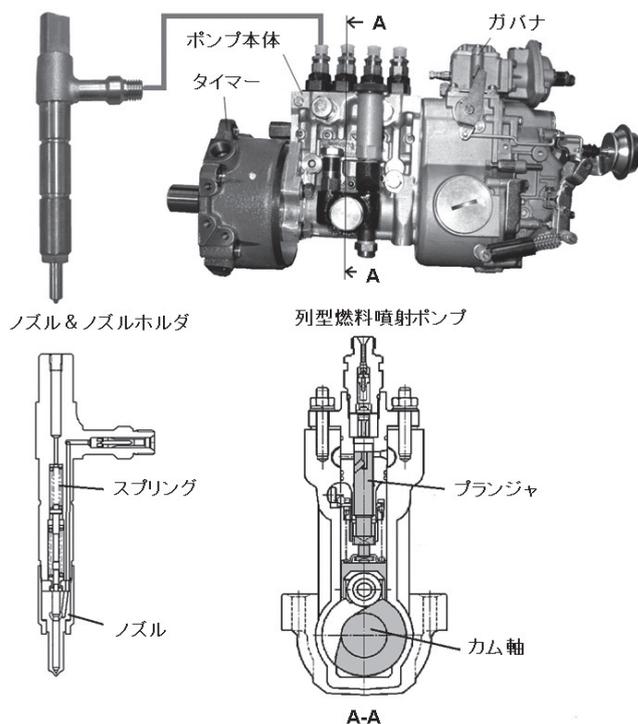


図1 ジャーク式燃料噴射装置

噴射量は、同じくポンプに併設されたガバナー（遠心式、電子制御式がある）で制御される。

送油率がプランジャ上昇速度すなわちエンジン回転速度に比例するため、低～中速域の燃料噴射圧力は低くなる。また、1回噴射するたびに昇圧、降圧を繰り返すため、1燃焼サイクル内で可能な噴射は2回程度が実用限界となっている。

## 2.2 コモンレール式燃料噴射装置

コモンレール式燃料噴射装置の基本構成を図2に示す。燃料を圧送するサプライポンプ、高圧燃料を蓄えるレール、ソレノイドまたはピエゾ素子<sup>4,5)</sup>をアクチュエータとして燃料を噴射するインジェクタ、サプライポンプとレールおよびレールとインジェクタを連結する燃料鋼管およびECU (Engine Control Unit) で構成される。

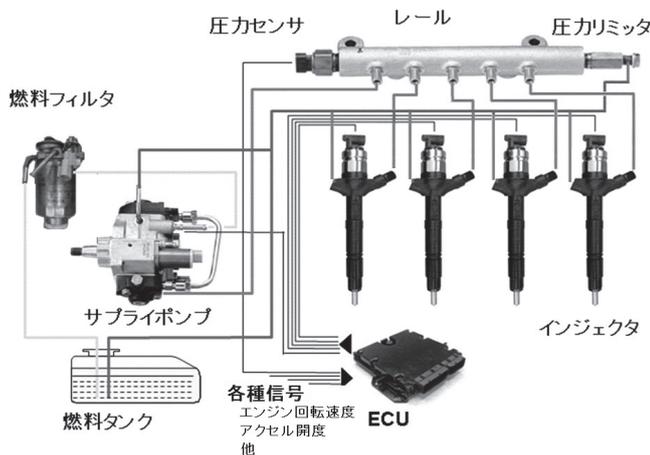


図2 コモンレール式燃料噴射装置

サプライポンプの吐出量は、レールに取り付けられた燃料圧力センサーの信号をもとに、所望の圧力となるようにECUによってフィードバック制御される。

インジェクタの噴射タイミング、噴射量は、エンジン回転速度、アクセル開度およびそのときの燃料圧力などに応じてECUで演算され、アクチュエータへの通電タイミングで燃料噴射タイミングが、通電時間で噴射量が制御される。

ここでは、ソレノイドインジェクタを例に、燃料噴射過程を図3に沿って説明する。ソレノイドインジェクタは主に、ノズル内に設置されたノズルニードルを閉弁方向に付勢するノズルスプリング、ノズルニードルに接続されたコントロールピストン、コントロールピストン上部の制御室、制御室に燃料を流入させる入口オリフィスおよび、流出させる出口オリフィス、出口オリフィスを開閉するソレノイドバルブとバルブスプリングで構成されている。燃料噴射前、バルブはバルブスプリング付勢力により閉弁しており、制御室とノズル室の燃料圧力は同じとなっている。コントロールピストンの制御室側受圧面積はノズルニードルのノズル室側受圧面積より広くかつ、ノズルスプリング付勢力により、ノズルニードルが閉弁する方向に荷重がかかり、インジェクタは無噴射状態となっている。通電によってソレノイドバルブが作動（バルブが開弁）すると、制御室の燃料圧力が低下してコントロールピストンが制御室側から受ける荷重が低下する。この荷重とノズルスプリング付勢力をあわせた荷重が、ノズルニードルがノズル室側から受ける荷重より小さくなるとノズルニードルが開弁し燃料が噴射される。通電を止めるとバルブが閉じ、入口オリフィスからの燃料流入により制御室の燃料圧力が回復、荷重バランスが再びノズルニードルを閉弁す

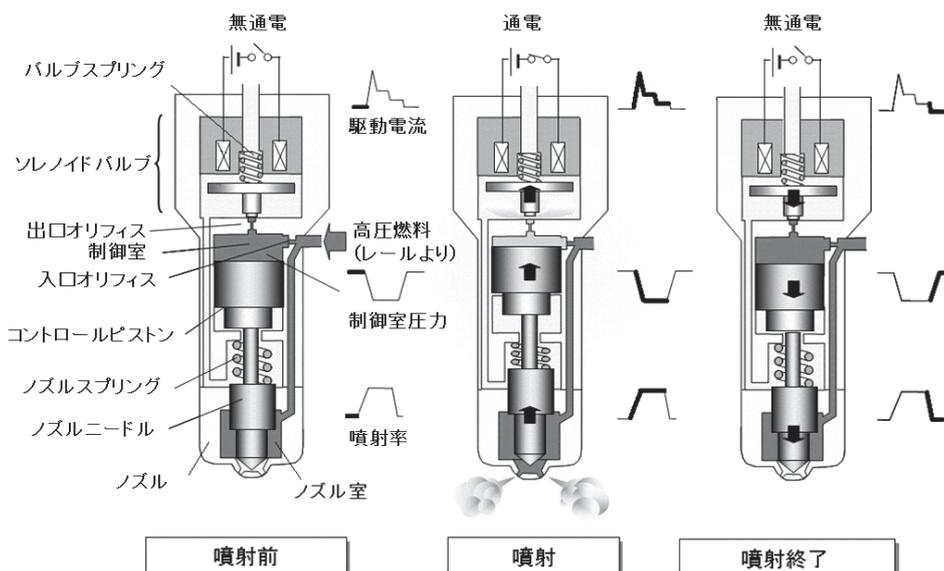


図3 インジェクタの作動

る方向に転じてノズルが降下、閉弁し噴射が終了する。

コモンレール式燃料噴射装置では、常に高压の燃料をレールに蓄えているため、燃料圧力はエンジンの回転速度に依存しない。すなわち、低速から高压燃料噴射が可能である。また、インジェクタのソレノイドをオン・オフ駆動することで燃料噴射を行うため、燃料圧力の昇圧、降圧を繰り返す必要がなくマルチ噴射が可能である。

### 3 コモンレール式燃料噴射装置の進化

ディーゼル機関を年々厳しくなる排出ガス規制に適応させ、かつ低燃費、高出力とするため、燃料噴射装置にはより高い燃料噴射圧力と、マルチ噴射回数の増加が求められてきた。マルチ噴射には、燃焼騒音を低減する「パイロット噴射」、主にエンジントルクを向上する「プリ噴射」と「メイン噴射」、不完全燃焼分の再燃焼を促進しPMを低減する「アフター噴射」、触媒活性の役割を担う「ポスト噴射」が求められている。このような要求に応えるための改良を重ね、コモンレール式燃料噴射装置が登場した1995年当時、1200気圧程度であった燃料噴射圧力は、2008年には2000気圧に達した。また、マルチ噴射は1995年当時、「メイン噴射」に燃焼騒音を低減する「パイロット噴射」を追加した2回噴射であったが、2002年には上記5回噴射を達成、さらに2008年には「パイロット噴射」、「ポスト噴射」の分割要求に応え、9回噴射(図4)までに達している。

本章では、これら高压燃料噴射とマルチ噴射の進化を支える技術について紹介する。

#### 3.1 高压燃料噴射を支える技術

高压化により、部品に発生する応力が高くなる。図5のインジェクタ断面図において、色を塗った部分は高压燃料通路を示す。オリフィスプレートやノズルボデーの○部のように高压燃料通路が交差する場所には応力集中が起こり、より高い応力が発生する。応力が材料強度を超えると破損するため、材料強度を向上させる、または発生する応力を低減させ

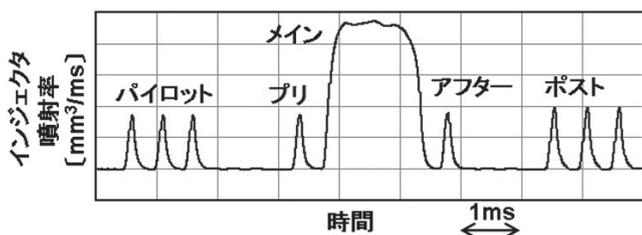


図4 マルチ噴射の例

る設計が求められる。

#### 3.1.1 材料強度向上例

金属材料には、図6に示す材料Aのように介在物(炭火物)が製錬時に析出し、構造部材として使用する場合に内部欠陥として作用する。これが多いほど応力集中部に存在する確率が高くなり、また大きい程応力集中度が高くなって、部品が破損し易くなる。このため、図6の材料Bのように介在物を少なく、かつ小さくした材料を使用することで応力集中部における存在確率や応力集中度を低め、材料強度を向上させている。

#### 3.1.2 応力低減例

図7は、ノズルの高压燃料通路交差部に2000気圧の燃料圧力を加えたときの応力発生状況をFEMで解析した結果である。高压燃料通路の交差部には高い応力が発生する。そこで、交差部周りの形状を変更し、交差角度を大きく(図7のAからBへ)して応力を低減した例である。

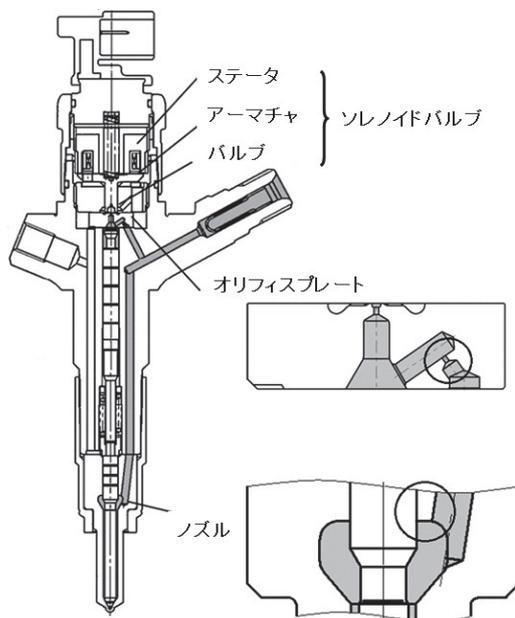


図5 ソレノイドバルブ式インジェクタ断面図

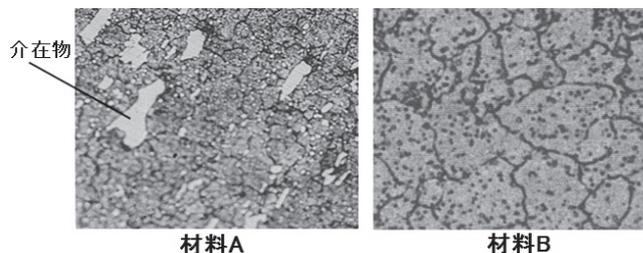


図6 金属材料組織の電子顕微鏡写真

### 3.2 マルチ噴射を支える技術 —ソレノイドバルブの進化—

マルチ噴射を実現するためには、1燃焼サイクル内という短時間に燃料噴射を終わらせる必要がある。特にプリ、メイン、アフター噴射はその間隔を短くするほどエンジントルク向上と、PM低減効果があるため、近接噴射が求められている。

ソレノイドバルブは、電流通電および切断時にステータとアーマチャに渦電流が発生し、磁力の発生・消滅を遅らせ、アーマチャに連結されたバルブの開閉を緩慢にする特性を持っているため、渦電流を抑制することが近接噴射を実現する鍵となる。

渦電流を抑制するには、ステータ、アーマチャの内部抵抗(比抵抗)を高めることが有効である。初期のインジェクタには絶縁皮膜で覆われた板材を重ねた積層ステータ(図8のA)が使われた。その後、材料技術の進化により、ステータには樹脂をバインダとして鉄粒子を押し固めた軟磁性複合(圧粉

磁心)材(図8のB)、さらにアーマチャには磁気回路部のみ軟磁性複合(焼結)材(図8のC)を開発し採用、高比抵抗化を図り、渦電流を抑制し、バルブの高速作動を実現した。

## 4 おわりに

コモンレール式燃料噴射装置は、高压燃料噴射とマルチ噴射において画期的な進化を遂げてきたが、この進化は上述のような材料の進化なしには成し得なかったことである。

地球環境保護や温暖化抑制の観点から、さらなる排出ガス浄化および燃費低減が求められており、これには燃料噴射装置の更なる高压化が必要と言われている。われわれ燃料噴射装置メーカーは、材料メーカーとの協業も図りながらその実現を目指していく。

### 参考文献

- 1) 田中, 長田: 自動車技術, 58 (2004) 4, 19-24.
- 2) 柴田, 桑原, 江崎: 自動車技術会春季学術講演会, 117-20095288, (2009)
- 3) 依田: デンソーテクニカルレビュー, 15 (2010), 110-114.
- 4) Mamoru Oki, Shunichi Matsumoto, Yoshio Toyoshima, Kazuyoshi Ishisaka and Naoyuki Tsuzuki: SAE paper, 2006-01-0274, (2006)
- 5) 近藤, 豊島, 高山, 山口: 自動車技術会2009秋季学術講演会, 188-20095709, (2009)

(2012年12月19日受付)

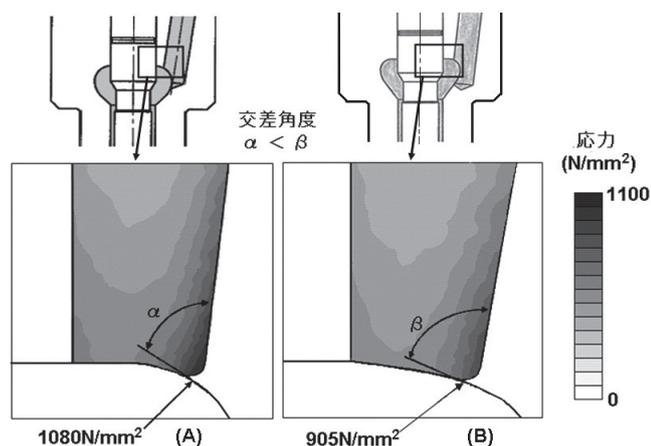


図7 形状を変更した場合の応力計算 (FEM) 結果

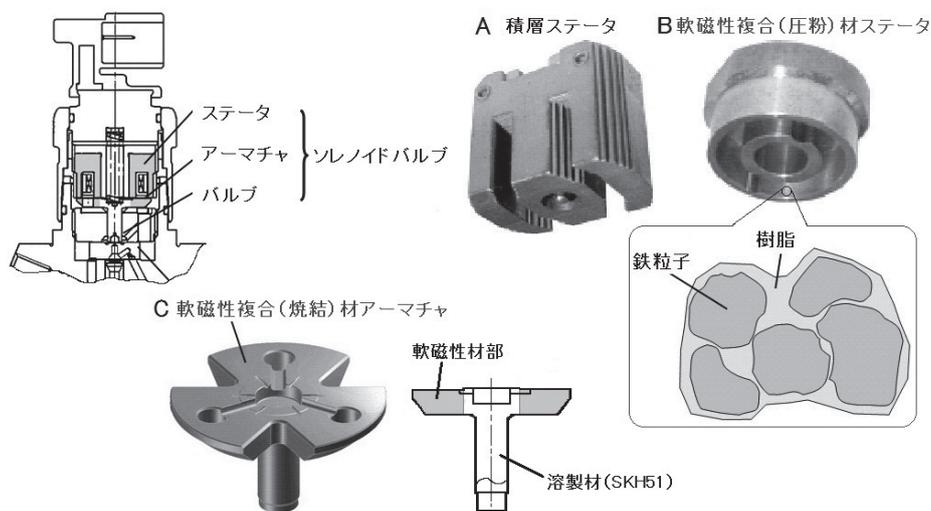


図8 ソレノイドバルブのステータおよびアーマチャ