

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

JSAE エンジンレビュー

## 特集：エンジンの燃料噴射

・「エンジンの燃料噴射」特集号について

・ディーゼル噴霧燃焼

・私のコモンレール開発物語(1994年-2003年)

・ディーゼル燃料噴射装置の現状と将来

・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第1回)ガソリン噴射の黎明と航空機エンジン用の時代

・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第2回)自動車エンジン用ガソリン筒内噴射の世界初の実用化



公益社団法人 **自動車技術会**

コラム : ● 車の年輪	1
Growth ring	
菊池 勉 (編集委員, 日産自動車)	
Tsutomu KIKUCHI (NISSAN Motor Co., Ltd.)	
特集: エンジンの燃料噴射	
・「エンジンの燃料噴射」特集号について	2
小酒 英範 (東京工業大学)	
Hidenori KOSAKA (Tokyo Institute of Technology)	
・ディーゼル噴霧燃焼	3
Diesel Spray Combustion	
新井 雅隆 (東京電機大学)	
Masataka ARAI (Tokyo Denki University)	
・私のコモンレール開発物語(1994年-2003年)	19
伊藤 昇平 (くわな科学技研)	
Shohei ITOH (Kuwana Institute of Science and Technology)	
・ディーゼル燃料噴射装置の現状と将来	31
足立 尚史, 芹澤 一史 (株式会社デンソー)	
Naofumi ADACHI, Kazufumi SERIZAWA (DENSO CORPORATION)	
<連載企画>	
・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第1回)	
ガソリン噴射の黎明と航空機エンジン用の時代	35
The Technical History of Gasoline Direct Injection	
The Dawn of Gasoline Direct Injection and The Age of Military Aircraft Engines it's Equipped -The 1st serial article-	
調 尚孝 (株式会社日本自動車部品総合研究所)	
Naotaka SHIRABE (NIPPON SOKEN, INC.)	
・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第2回)	
自動車エンジン用ガソリン筒内噴射の世界初の実用化	45
The Technical History of Gasoline Direct Injection	
The World First Practical Realization of Gasoline Direct Injection for Vehicle Engines -The 2nd serial article-	
調 尚孝 (株式会社日本自動車部品総合研究所)	
Naotaka SHIRABE (NIPPON SOKEN, INC.)	

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)  
副委員長: 村中 重夫 (元日産自動車)  
幹事: 飯島 晃良 (日本大学)  
委員: 遠藤 浩之 (三菱重工業エンジン&ターボチャージャ)  
大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)  
金子 タカシ (JX エネルギー)  
菊池 勉 (日産自動車)  
小池 誠 (豊田中央研究所)  
小酒 英範 (東京工業大学)  
清水 健一 (元産業技術総合研究所)  
下田 正敏 (日野自動車)  
西川 雅浩 (堀場製作所)  
野口 勝三 (本田技術研究所)  
平井 洋 (日本自動車研究所)  
山口 恭平 (自動車技術総合機構)  
山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会  
発行日: 2016 年 11 月 26 日  
発行人: 石山 拓二 (京都大学)  
〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2  
電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW  
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN  
Vol. 6 No. 4 2016

## ●コラム

### 車の年輪

Growth ring



菊池 勉

Tsutomu KIKUCHI

編集委員，日産自動車

NISSAN Motor Co., Ltd.

父の影響を受け、車に乗るたびに走行距離、行った場所、給油量等を欠かさず記録している。愛車は 1000cc の AT 車で通勤の足として使い続け、走行距離は原稿を書いている時点で 22.5 万 km に達しており、この間大きな故障もなく元気に活躍している。

少し計算してみると、今までにガソリンを 435 回 14663ℓ 給油し CO<sub>2</sub> 換算で約 32t 排出したことになる。ガソリンの値段は車購入当時 110 円位だったが一時 180 円まで上がり、最近はまだ安くなっている。ちなみに今まで燃料に払ったお金は車両価格をはるかに超えている。

新車からの満タン法での燃費推移をまとめてみたのが図 1 である。平均燃費は約 16km/ℓ で諸元値の 16.6km/ℓ に近い値を示す。大きな傾向では、1 万 km 位まで急激に燃費が良くなっていて、車の慣らし効果と運転の慣れと思われる。10 万 km 以降は通勤場所が変わり高速走行距離が増えて渋滞頻度が減り燃費がステップ的に良くなっている。

細かくみると、1 年を通して、季節変動により周期的に変化している。さらにいくつか瞬間的に燃費が悪い時があるが、①は震災当日渋滞 ②は大雪の影響で 15 時間の渋滞の影響である。眺めてみると、この車と遭遇した数々の出来事をしみじみと思い出す。

近くの公園の桜の大木が倒木のおそれがあり切り倒された。小口は 60cm 位あり、数えてみると 40 位の年輪が読み取れた。間隔の狭い所広い所、色もさまざまでこの木が曝されてきた周辺の環境変化の情報が刻み込まれたものである。

燃費の線図を見ていたら、まるでこの車の年輪を表しているようだ。

子供のころよく読んだ本に“機関車 1414”がある。1414 という名前の蒸気機関車が 50 年間同じ駅の間を走り続けられてしまう。運転手に石炭を一杯にくべてもらい一晩中一人（一両）で走り、冒険をする。リフレッシュして次の日からまた元気に走るという話。我が愛車も通勤の行き来に飽きていてリフレッシュでもしたいのかなと、ふと思ったりする。

無機質な機械に感情を感じられる技術を作ってゆきたい。

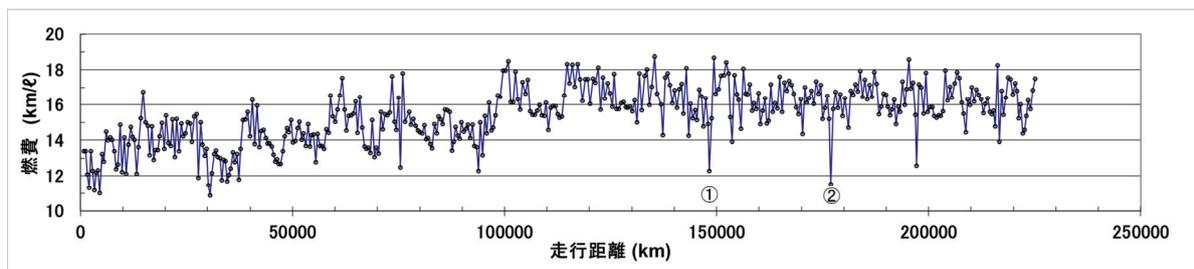


図 1 満タン法による燃費の経緯

## 「エンジンの燃料噴射」特集号について

小酒 英範

Hidenori KOSAKA

東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

エンジンにおける燃料噴射は、燃焼排気性能の改善、排気後処理装置の性能向上、燃料多様化への対応などの技術課題に関連して、その重要性が増している。燃料噴射装置は単なる燃料供給装置ではなく、電子制御式燃料噴射装置の高い制御性を生かした燃焼室内の燃料分布のきめ細かい制御による燃焼改善に加えて、エンジンと排気後処理装置の協調駆動なども担っており、エンジンシステム全体の性能を支配するキーデバイスとなっている。20 数年前のディーゼル燃料噴射装置開発における主な目標は燃料噴射圧力の高圧化であった。特にディーゼルエンジンの排気改善のため燃料噴射圧力の高圧化が進められた。これによるディーゼル微粒子の排出低減効果は大きく、年々厳しくなる排ガス規制への対応技術として重要な役割を担ってきた。しかしながら、近年になり求められている過渡運転時の排ガス浄化や、燃費向上のためには、燃料噴射圧の高圧化だけでは不十分であり、燃料噴射と燃焼室形状の最適化、燃料噴射と排気後処理における触媒反応との最適化などの課題を解決しなければならない。また、噴口径の微細化と燃料噴射圧力の高圧化を組み合わせる必要がある。ガソリンエンジンの燃料噴射についても、燃料噴射制御の重要性は同様であり、特に筒内燃料噴射による成層リーンバーンの成否は燃料噴射に依存するところが大きい。このように、エンジンにおける燃料噴射(と装置)の重要性は増しているが、その求められる機能は複雑化しており、わかりにくくなっている。そこで、今号と次号の2号にわたりエンジンの燃料噴射に関する特集を組み、燃料噴射に関連する分野の専門家に、エンジンの燃料噴射に求められること、燃料噴射装置の歴史、最新の燃料噴射技術についてわかりやすく解説していただく。今号ではディーゼルエンジンにおける燃料噴射を、次号ではガソリンエンジンにおける燃料噴射をとりあげる。

ディーゼル燃料噴射については、4名の専門家に解説記事を執筆いただいた。東京電機大学の新井雅隆氏には、ディーゼルエンジンの燃料噴霧に対し、燃焼排気改善のために求められる噴霧特性、各種燃料噴霧特性に関する半実験とそれらの物理的な意味について初心者にも理解できるように解説いただいた。同氏がこれまでに得た燃料噴霧に関する膨大なデータに基づく燃料噴霧と燃焼の関係についての洞察が示され、さらに、エンジン設計にも役立つ諸量の実験式を引用元情報とともに記載いただいた。エンジン技術者が燃料噴霧に関する基本設計をする際に有用な手引書となっている。くわな科学技研の伊藤昇平氏には、現在ほとんどのディーゼル車で用いられているコモンレール式燃料噴射装置の開発について、基本設計の段階から生産に至るまでの経緯を執筆いただいた。同氏は、コモンレール式燃料噴射装置の開発を統括した技術者であり、開発者自身が語った開発物語は他にない説得力を持っている。記載された技術的な内容もさることながら、同氏の技術者としての誇りと意地が直に伝わるような内容に、技術者ならだれでも感銘を受けることと思う。技術者を目指す工学分野の学生、若手の技術者に是非読んでいただきたい記事である。株式会社デンソーの足立尚史氏と芹澤一史氏には、ディーゼル燃料噴射装置の最新技術について解説いただいた。伊藤氏らにより開発されたコモンレール式燃料噴射装置の進化系がいかなるものであるのかをご理解いただけたと思う。燃料多様化に伴う性能劣化抑制技術、微量噴射の精度向上と応答性向上技術、高分散噴霧を実現する特殊形状ノズル孔など、最新の燃料噴射装置に求められる機能と性能をいかにして実現しているのかが解説されている。

また以上の記事とは別に、今号より、株式会社日本自動車部品総合研究所の調尚孝氏による連載記事「ガソリン筒内噴射の開発史」を開始する。同氏が収集された膨大な資料を基に執筆される連載記事は、ガソリン噴射装置の開発史として貴重な資料となるであろう。今号では、1870年代のドイツで起きたガソリン噴射の黎明期から歴史が紐解かれる。

以上の記事を通して、エンジンにおける燃料噴射の役割と今後のあり方についてあらためて考える契機としていただければ幸いです。

# ディーゼル噴霧燃焼

## Diesel Spray Combustion

新井 雅隆

Masataka ARAI

東京電機大学

Tokyo Denki University

### 1 緒言

ディーゼル機関の機関特性はディーゼル噴霧に強く依存しているため、ディーゼル噴霧燃焼という燃焼の概念が存在している。これは燃焼炉やガソリン機関には存在しない概念であり、燃焼炉での炉内流動やガソリン機関での火炎伝播に対応し、ディーゼル燃焼を端的に表す概念として使われている。本文ではまずディーゼル噴霧の役割と挙動を述べる。次に可燃混合気の形成のための噴霧への空気導入を運動量保存則の観点から述べ、その結果をもとにディーゼル燃焼について解説する。

### 2 ディーゼル噴霧の役割

圧縮された高温の空気中に燃料を直接噴射して着火を行わせる機関は、1894年2月17日に Rudolf Diesel によって初めて自立運転に成功した。彼は噴霧の形成と制御に腐心しているため、ディーゼル噴霧研究の先駆者は Rudolf Diesel 自身であり、圧縮終了後に燃料を噴射する遅延噴射による等圧燃焼を試みたことが成功の端緒であったようである<sup>1)</sup>。彼の最初の機関では、高圧空気と燃料の内部混合型燃料供給装置、すなわち気流噴射弁が採用され、カム駆動のポペットバルブで燃料供給の On-Off を行っていた。しかし現在のディーゼル機関では、補助空気によって燃料を燃焼室に送り込むこの初期の方式は姿を消し、燃料自身を高圧に加圧して、細孔から高速噴射して微粒化しながら供給する方式が一般的になっている。ディーゼル噴霧の特徴は高圧高温の雰囲気中に高速かつ断続的に噴射された燃料噴霧ということができる。図1は直接噴射式ディーゼル機関における燃焼に及ぼす噴霧挙動の良否の概要である<sup>2)</sup>。ディーゼル噴霧形成の最初の過程は燃料噴射と微粒化であるが、微粒化が速やかに行われ中心部に微粒化が不完全な液体の芯が残らずかつ横方向への広がり大きいこと、すなわち分裂長さが短いことと噴霧角の大きいことが、良好な燃焼のために必要となる。第2の過程は周囲空気との混合であるが、高速噴流の状態であるディーゼル噴霧への空気の巻き込みだけでなく、燃焼室壁面への衝突、スワール流やスキッシュ流による混合促進などが、この混合過程を支配している。さらに、噴霧内部での混合も重要である。第3の過程である燃料の自己着火は噴霧の蒸発過程の途中で発生する。したがって、噴霧の蒸発過程と着火過程を時間経過に従って明確に分離することはできず、このことが、ディーゼル噴霧燃焼の現象解明を著しく困難にしている。さらに、最後の過程である燃焼は噴霧と空気の両者の流動が複雑に絡み合った乱流拡散燃焼となっている。

現在のディーゼル機関では燃焼を制御するため種々のタイミングで燃料を噴射している。図2はその概要である。PMの生成を抑制するための予混合圧縮着火(Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI)燃焼では、燃料の噴射と自己着火の間に十分な時間的余裕を与えて着火以前に均質な予混合気を形成させることが必要である。早期噴射はこの均質な予混合気の形成を目的とした噴射である。遅延早期噴射は、予混合気中に若干の不均一性を残してHCCI燃焼の場合の急激な初期燃焼を抑制する噴射方式である。パイロット噴射、分割噴射、後期噴射は、噴射により燃焼(熱発生率)を直接制御することを目的とした噴射方式である。ポスト噴射は、後処理装置の活性化のための排ガスの温度上昇を目的とした噴射である。

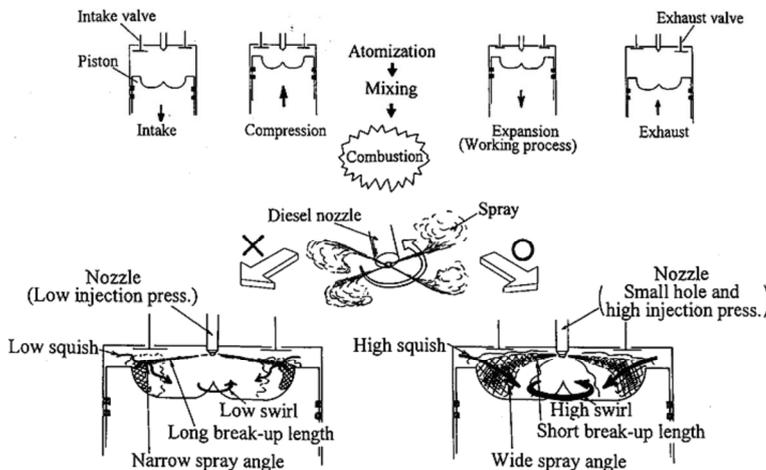


Fig.1 Prospective view of diesel spray behavior (Ref.2)

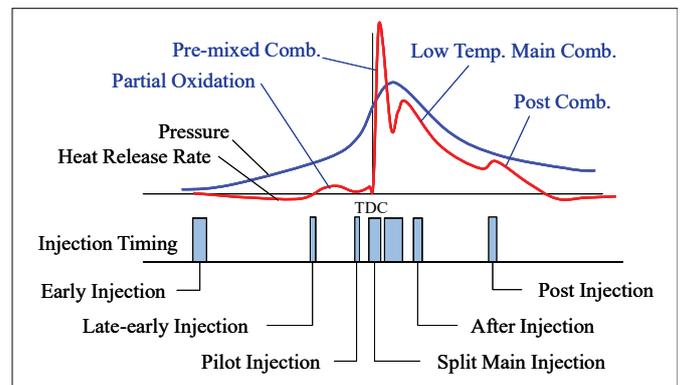


Fig.2 Injection timing of diesel spray for various purposes

ディーゼル機関の燃料噴射装置は、シリンダ内で圧縮され高温となった雰囲気中に燃料を供給する装置であり、その役割は、以下の3点に集約できる。

- (1) 供給燃料量と供給タイミング制御
- (2) 均質または不均質な混合気の形成
- (3) 燃焼室の適切な空間への燃料供給

すなわち、ディーゼル噴霧の役割は、図3に示すように燃焼室の意図した空間に意図した状態の燃料を適切なタイミングで供給すること尽きる。したがって、意図したタイミングで燃焼室の意図した空間に燃料を供給する別の手段があれば、ディーゼル噴射弁を用いないディーゼル機関も可能になると考えられる<sup>3)</sup>。

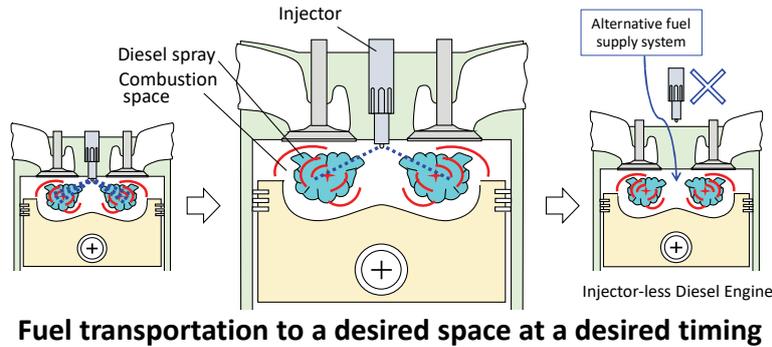


Fig.3 Diesel injector and fuel supply (Ref.3)

### 3 ディーゼル噴霧の挙動

#### 3.1 ディーゼルノズル内のキャビテーションと微粒化

液体噴流の微粒化ではノズル内で発生するキャビテーションが重要な働きをしていることが明らかになっている。図4では実スケールのディーゼルノズル内における2種類のキャビテーションの存在を明らかにしている<sup>4)</sup>。ここではノズル入口から発生する膜状キャビテーション(film cavitation)とノズル内の流れの旋回に依存する紐状キャビテーション(string cavitation)の両者が示されている。また図5はキャビテーション数 $K_c$ により現象を整理する手法の提案であり、 $K_c < 1$ がキャビテーション発生条件である<sup>5)</sup>。キャビテーションが起きると噴霧角が増大しノズル近傍での空気導入が盛んになる。一方キャビテーションが発生するとノズルの流量係数が式(1)のように低下する<sup>6)</sup>。ここで $C_d$ は流量係数、 $C_v$ は速度係数、 $C_c$ は縮流係数である。また最近の研究ではキャビテーションとディーゼル噴霧燃焼の因果関係も明らかにされつつある<sup>7)</sup>。

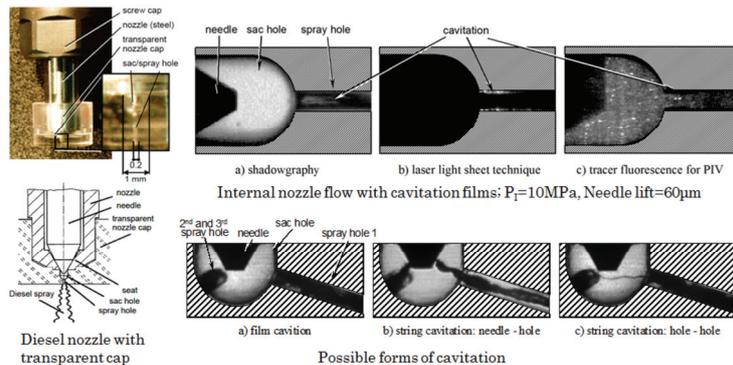


Fig.4 Cavitation in diesel nozzle (Ref.4)

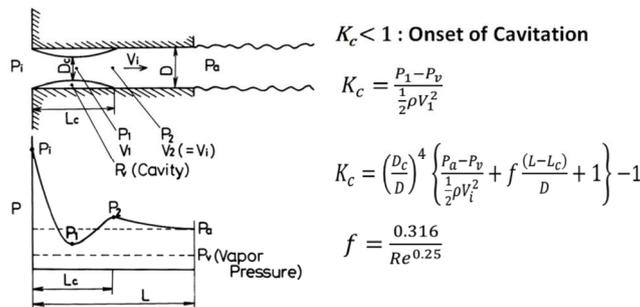


Fig.5 Cavitation number (Ref.5)

$$C_d = C_v C_c \sqrt{K_c}, \quad (K_c \leq 1) \tag{1}$$

ディーゼル噴霧の形成が0.1 mm程度の微細噴孔から噴出する高速液体噴流の微粒化であるので、その直接写真からキャビテーション気泡の崩壊と液体噴流表面の微粒化の進行の関係を捉えることは難しい。図6はピコ秒のレーザ光源を使って、高速液体噴流の大気圧下での微粒化の様子を捉えた結果である<sup>8)</sup>。噴孔から噴出した直後の液体噴流の表面に皺状の変形が見られる。また、噴流表面の変形の進行とともに瘤状の液体塊が噴流表面に誘起され、それが枝状に成長し離脱しながら紐状となり微粒化していく様子が見られる。この写真の条件より3倍以上高速でかつ高圧の雰囲気中に噴射されて形成される現実のディーゼル噴霧については、図6と同様な微粒化の機構が想定されているだけである。数値計算によるシミュレーションも行われているが、微粒化シミュレーションの信憑性は観察結果がないので不明である。

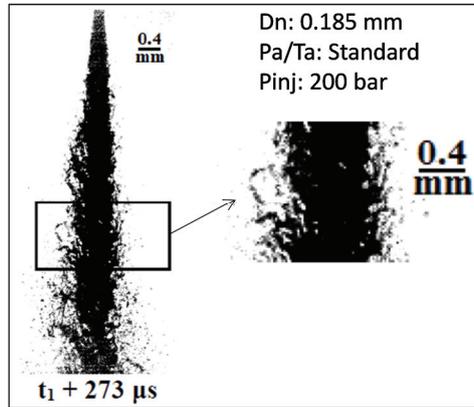


Fig.6 Atomization process of high speed liquid jet (Ref.8)

### 3.2 ディーゼル噴霧の特性パラメータ

ディーゼル噴霧の特性を表すパラメータは図7のように、巨視的なパラメータと微視的なパラメータに分けてリストアップすることができる。

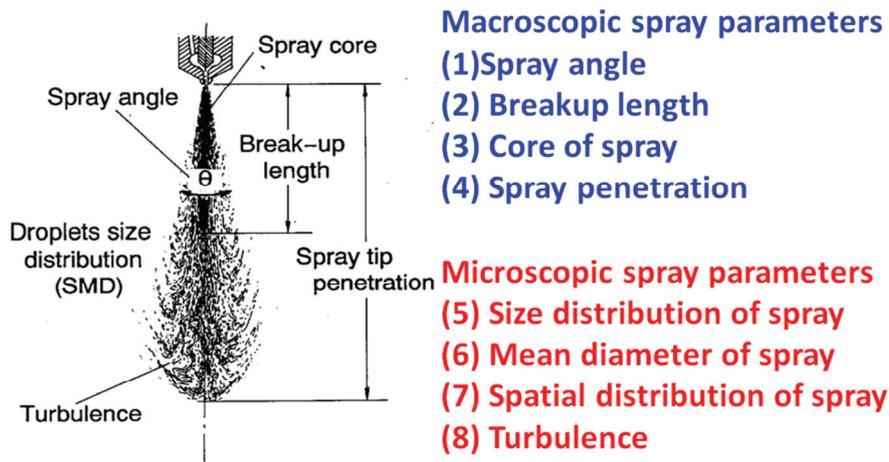


Fig.7 Characteristic parameters of diesel spray

ディーゼル噴霧の巨視的なパラメータである噴霧角 $\theta$ と分裂長さ $L_b$ については

$$\theta[\text{deg}] = 0.0143 \left( \frac{\rho_f}{\rho_a} \right)^{-0.25} \left( \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_f}} \frac{D_n \rho_f}{\mu_a} \right)^{0.5} = 0.017 \left( \frac{D_n^2 \cdot \rho_a \cdot \Delta P}{\mu_a^2} \right)^{0.25} \quad (2)$$

$$L_b = \alpha \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_a}} \cdot D_n = 13.3 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_a}} \cdot D_n \quad (3)$$

という関係式が知られている<sup>9)</sup>。ここで $\rho_a$ は雰囲気密度、 $\rho_l$ は燃料液体の密度、 $\mu_a$ は燃料液体の粘性係数、 $\Delta P$ は噴射差圧、 $D_n$ はノズルの噴孔径である。噴霧角については単純な計測値ではなく後述する噴霧の到達距離および運動量の保存則から影響因子を求めて、実験値と比較して係数を定めた結果である。分裂長さは図8のモデルにて初期噴霧が等速で成長する部分の長さであるが、噴霧の写真観察から得られる液体噴流のコア(未分裂)部分と、本質的には同じ物理的意味を持っている。この分裂長さ以上に成長した噴霧については発達した乱流噴流とほぼ同じ扱いができることが知られている。

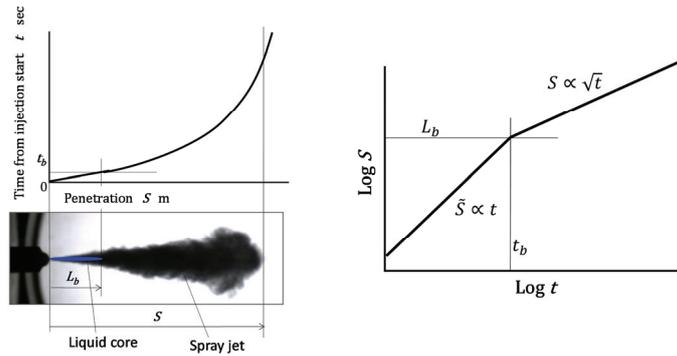


Fig.8 Diesel spray penetration model (Ref.9)

図8に示してある $L_b$ を分裂長さ、 $t_b$ を分裂時間とすれば、一定速度で成長する分裂の終了前と速度減衰の起こる分裂終了後に分けて、到達距離は次のように示される。

$$0 < t \leq t_b$$

$$S = U_{inj} t = K_v \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} \cdot t \quad (4)$$

$$t_b < t$$

$$S = \beta \sqrt{t} = K_p (D_n)^{0.5} \left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.25} \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

ただし

$$t_b = K_{bt} \frac{\rho_l D_n}{\sqrt{\rho_a \Delta P}} \quad (6)$$

式内の定数については噴射系が従来のジャクポンプ式であるか現在のコモンレール式であるかにより、また噴射弁のノズル噴口の縮流係数によっても変化するので、表1のような数値が現在提案されている。表中の従来の値はジャクポンプ式、修正したものはコモンレール式に対応しているが、その相違の主要因は有効噴射圧の評価基準が異なることに依存している。

Table 1 Penetration parameters (Ref.9)

	Original equation	Modified equation	
$K_v = C_v$	0.39	0.60	0.80
$K_{bl} = \alpha$	15.8	13.3	10.0
$K_{bt} = \frac{K_{bl}}{\sqrt{2}K_v}$	28.7	15.7	8.84
$K_p = (2)^{0.25} (K_{bl} K_v)^{0.5}$	2.95	3.36	3.36

表中の $K_v (=C_v)$ はノズルの速度係数であり、流量係数 $C_d$ は、縮流係数 $C_c$ と速度係数 $C_v$ とにより

$$C_d = C_c \cdot C_v \quad (7)$$

と表される。ノズルの速度係数 $C_v$ を直接計測することは困難であるため、縮流係数 $C_c$ を1.0として、速度係数の代替値として流量係数の値を用いることも行われている。表1の値はキャビテーションが発生している状態のディーゼル噴霧の実験結果から求めた値である。キャビテーションが強まれば式(1)において流量係数の減少とともに見かけの縮流係数は減少するが速度係数は若干増加し、その結果として分裂長さ(表3中の $\alpha$ の値)は一般に短くなり噴霧角は増大する。

以上の到達距離の式は中心軸上を移動する噴霧先端の挙動についての記述である。ここで、ディーゼル噴射の噴射率の変化が少なく、噴霧内での追い越しが発生しないとすれば、後続の噴霧についても時間軸をずらした同じ式が適用できる。また噴霧の周辺部の速度は軸上の速度に比べて遅いので、速度は半径方向にガウス分布しているとすれば、式(8)にて、噴霧軸から離れた位置(角度)の噴霧の動きを表現できる。

$$S_\varphi = C_\varphi S = C_\varphi \beta \sqrt{t} \quad (8)$$

$$C_\varphi = \exp \left[ \ln \delta_s \left( \frac{\varphi}{\varphi_{\text{spray}}} \right)^2 \right] \quad (\delta_s \leq 1.0) \quad (9)$$

式(8)と式(9)中の変数については図9の通りであり、 $\varphi_{\text{spray}}$ は噴霧の縁の角度、 $\delta_s$ は噴霧の縁と中心部の到達距離の比である。

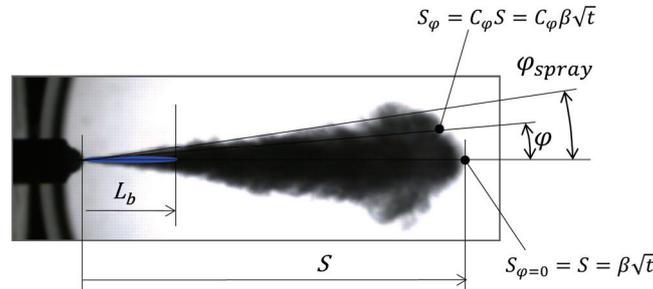


Fig.9 Penetration of side spray (Ref.9)

図10は最近の高過給機関を意識して噴霧の到達距離を調べた結果である。雰囲気圧力の増加に伴い噴霧先端の到達距離は減少するが、高圧雰囲気下では噴霧の側方の動きが先端よりも強く抑えられ、ノズルから20mm程度離れたところでほとんど停止した状態(式(9)にて $\delta_s \approx 0.2$ )になる。一方スプリット噴射の場合には噴霧の追い越しが問題となる。図11はこの状態を調べた結果であり<sup>10)</sup>、ノズルから40mm以上離れると個々のスプリット噴霧を識別することが困難になり、噴霧先端にてスプリット噴霧間の混合が盛んに行われていることを示している。

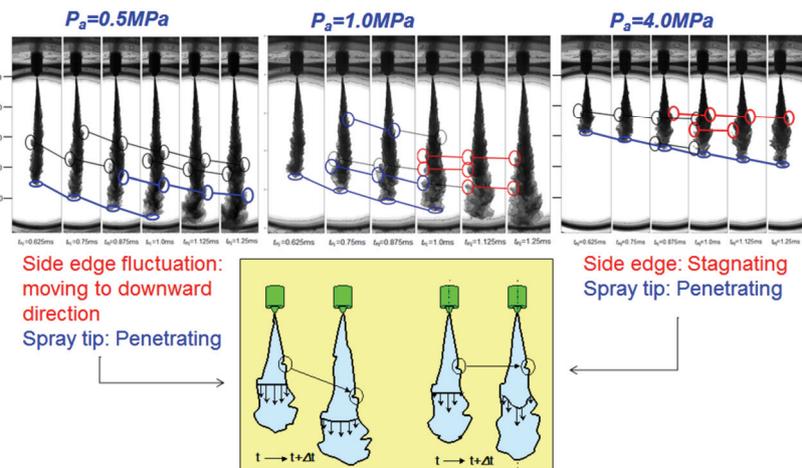


Fig.10 Tip and side penetrations of diesel spray

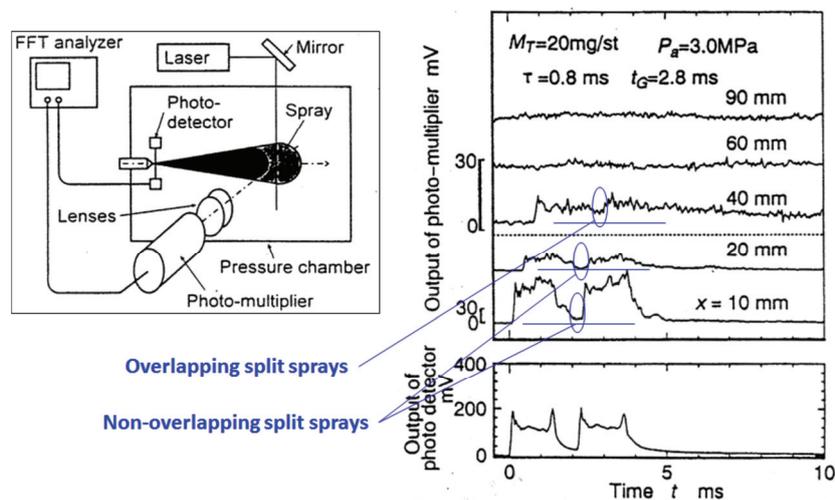


Fig.11 Optical analysis of spray density fluctuation (Ref.10)

ディーゼル噴霧の微視的パラメータの代表的なものは平均粒径である。噴霧の平均粒径にはさまざまな定義の方法があり、粒子径 $D_i$ の粒子の個数を $n_i$ 、その $n_i$ 個の粒子の総質量を $m_i$ とすれば、平均粒径 $D_{mn}$ は式(10)で表すことができる。

$$D_{mn} = \left( \frac{\sum_i n_i D_i^m}{\sum_i n_i D_i^n} \right)^{1/(m-n)} = \left( \frac{\sum_i m_i D_i^{m-3}}{\sum_i m_i D_i^{n-3}} \right)^{1/(m-n)} \quad (10)$$

また、式(10)の範疇にない平均粒径や、平均としての意味はないが、粒径分布の特徴を示すピーク粒径やモード粒径などが、噴霧の特性を示す粒径として用いられる場合もある。そのような粒径をまとめて表2に示す。また図12は粒径分布をもつ噴霧についての種々の代表粒径を比較した例である。

Table 2 Characteristic diameters of spray

Classification	Name and notation	Number base equation	Mass base equation	Comments	
Mean diameter	Arithmetic mean $D_{10}$	$\frac{\sum_i n_i D_i}{\sum_i n_i}$	$\frac{\sum_i m_i / D_i^2}{\sum_i m_i / D_i^3}$	Average diameter	
	Surface mean $D_{20}$	$\left( \frac{\sum_i n_i D_i^2}{\sum_i n_i} \right)^{1/2}$	$\left( \frac{\sum_i m_i / D_i}{\sum_i m_i / D_i^2} \right)^{1/2}$	Area average diameter	
	Volume mean $D_{30}$	$\left( \frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i} \right)^{1/3}$	$\left( \frac{\sum_i m_i}{\sum_i m_i / D_i} \right)^{1/3}$	Mass average diameter	
	Surface-diameter mean $D_{21}$	$\frac{\sum_i n_i D_i^2}{\sum_i n_i D_i}$	$\frac{\sum_i m_i / D_i}{\sum_i m_i / D_i^2}$	Area-length average diameter	
	Volume-diameter mean $D_{31}$	$\left( \frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i D_i} \right)^{1/2}$	$\left( \frac{\sum_i m_i}{\sum_i m_i / D_i^2} \right)^{1/2}$	Volume-length average diameter	
	Volume-surface mean $D_{32}$	$\frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i D_i^2}$	$\frac{\sum_i m_i}{\sum_i m_i / D_i}$	Sauter mean diameter Volume-area average diameter	
	Mass mean $D_{43}$	$\frac{\sum_i n_i D_i^4}{\sum_i n_i D_i^3}$	$\frac{\sum_i m_i D_i}{\sum_i m_i}$		
	Others	Harmonic mean $D_h$	$\frac{\sum_i n_i}{\sum_i n_i / D_i}$	$\frac{\sum_i m_i / D_i^3}{\sum_i m_i / D_i^4}$	
		Geometric mean $D_g$	$(D_1^{n_1} \cdot D_2^{n_2} \cdot D_3^{n_3} \dots D_i^{n_i} \dots)^{1/N}$ , $N = \sum_i n_i$		
	Characteristic diameter of size distribution	Mode/peak diameter $D_{mode}$			Number mode/peak diameter Mass mode/peak diameter
Median diameter $D_{median}$				$D_{50 \text{ number}\%}$ $D_{50 \text{ mass}\%}$	
Maximum diameter $D_{max}$				$D_{90 \text{ number}\%}$ , $D_{95 \text{ number}\%}$ $D_{90 \text{ mass}\%}$ , $D_{95 \text{ mass}\%}$	
Characteristic diameter $D_R$		$f_N(D) = \frac{\beta}{D_R \Gamma(1-3/\beta)} \left( \frac{D}{D_R} \right)^{\beta-4} \exp \left\{ - \left( \frac{D}{D_R} \right)^\beta \right\}$		Rosin-Rammler size distribution	

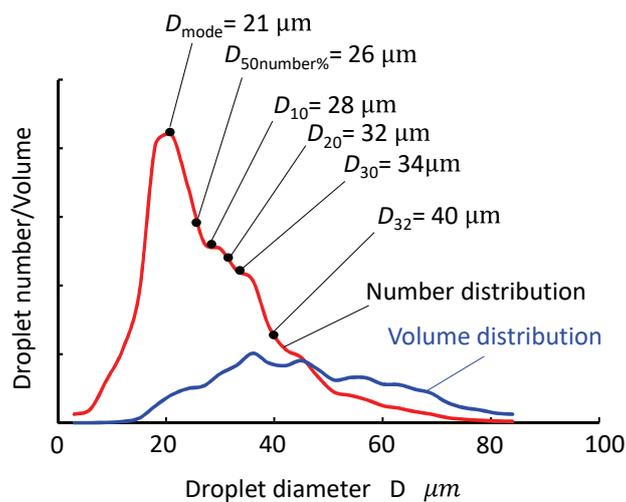


Fig.12 Size distribution of spray and its characteristic size parameters

噴霧の平均粒径には、式(11)で示される体積-面積平均の平均粒径が用いられている。この平均粒径はザウタ平均粒径 $D_{32}$ とよばれ、対象とする噴霧に対し体積と表面積の比が同じになる単分散粒子群の粒径である。液滴の蒸発速度は液滴の表面積に比例するので噴霧の質量蒸発速度はこのザウタ平均粒径に比例する。

$$D_{32} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (11)$$

ディーゼル噴霧のザウタ平均粒径については、以下のような実験式が提案されている<sup>11)</sup>。

$$\frac{D_{32}}{D_n} = \text{MAX} \left[ \frac{D_{32}^{LS}}{D_n}, \frac{D_{32}^{HS}}{D_n} \right], \text{ ただし } \text{MAX}[A, B] \text{ は } A \text{ と } B \text{ の うち の 大 き い 方 の 値} \quad (12)$$

$$\frac{D_{32}^{LS}}{D_n} = 4.12 \cdot Re_{jet}^{0.12} \cdot We_{jet}^{-0.75} \cdot \left( \frac{\mu_l}{\mu_a} \right)^{0.54} \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_a} \right)^{0.18} \quad (13)$$

$$\frac{D_{32}^{HS}}{D_n} = 0.38 \cdot Re_{jet}^{0.25} \cdot We_{jet}^{-0.32} \cdot \left( \frac{\mu_l}{\mu_a} \right)^{0.37} \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_a} \right)^{-0.47} \quad (14)$$

$$Re_{jet} = \frac{U_{inj} D_n}{\nu} = \frac{\rho_l U_{inj} D_n}{\mu_l} \quad (15)$$

$$We_{jet} = \frac{U_{inj}^2 D_n \rho_l}{\sigma_l} \quad (16)$$

ここで、 $U_{inj}$  は燃料液体の噴出速度、 $\sigma_l$  は燃料液体の表面張力である。また $Re_{jet}$  と $We_{jet}$  は噴孔径と噴出速度を代表値としたレイノルズ数とウェーバ数である。 $D_{32}^{LS}$  は低速で噴射されるディーゼル噴霧に対応した実験式である。一方 $D_{32}^{HS}$  は高速噴射されるディーゼル噴霧に対応した場合の実験式である。ただし、式(13)と式(14)の区分は不明確であるため、式(12)で示したように両式を比較して大粒径となる方の値を採用することが適用上必要である。両式をそれぞれの影響因子ごとのべき乗で表すことで、式(17)と式(18)が得られる。

$$D_{32}^{LS} = 4.12 \cdot (C_v \sqrt{2\Delta P})^{-1.38} \cdot \rho_l^{0.24} \cdot \mu_l^{0.33} \cdot \sigma_l^{0.75} \cdot \rho_a^{-0.18} \cdot \mu_a^{-0.54} \cdot D_n^{0.37} \quad (17)$$

$$D_{32}^{HS} = 0.38 \cdot (C_v \sqrt{2\Delta P})^{-0.39} \cdot \rho_l^{0.405} \cdot \mu_l^{0.12} \cdot \sigma_l^{0.32} \cdot \rho_a^{0.47} \cdot \mu_a^{0.47} \cdot D_n^{0.93} \quad (18)$$

ザウタ平均粒径と噴射差圧の関係は $D_{32}^{LS} \propto \Delta P^{-0.69}$  および  $D_{32}^{HS} \propto \Delta P^{-0.195}$  となるので、低速での噴射では噴射圧の増加とともにザウタ平均粒径は小さくなるが高速では噴射差圧をさらに高めてもザウタ平均粒径はさほど小さくならない。また雰囲気気の影響は $D_{32}^{LS}$  では粒径を小さくする方向に作用するが、 $D_{32}^{HS}$  では粒径を大きくするように作用する。

### 3.3 壁面に衝突するディーゼル噴霧

壁面に衝突するディーゼル噴霧についての観察結果が図 13 である<sup>12)</sup>。衝突壁面はディーゼル噴霧の分裂長さ以上に離れた位置に置かれている。壁面に浅い角度で衝突する場合では、噴霧は自由噴霧(壁面に衝突せずに空間を自由に進む噴霧)とほぼ同様な挙動になるが、運動量の一部は衝突により失われ、到達距離は減少する。一方壁面に垂直に衝突する噴霧では、衝突点から放射状の噴霧が新たに発生するような状況になる。また到達距離は明らかに減少する。この場合には燃料の数割が壁面に付着するので、噴霧液滴の質量も減少する。図 14 はガラス面に衝突させた噴霧を裏側から撮影した結果であり、噴霧中心の液膜形成領域と衝突後の噴霧がスリップしている領域を明瞭に区別することができる<sup>13)</sup>。

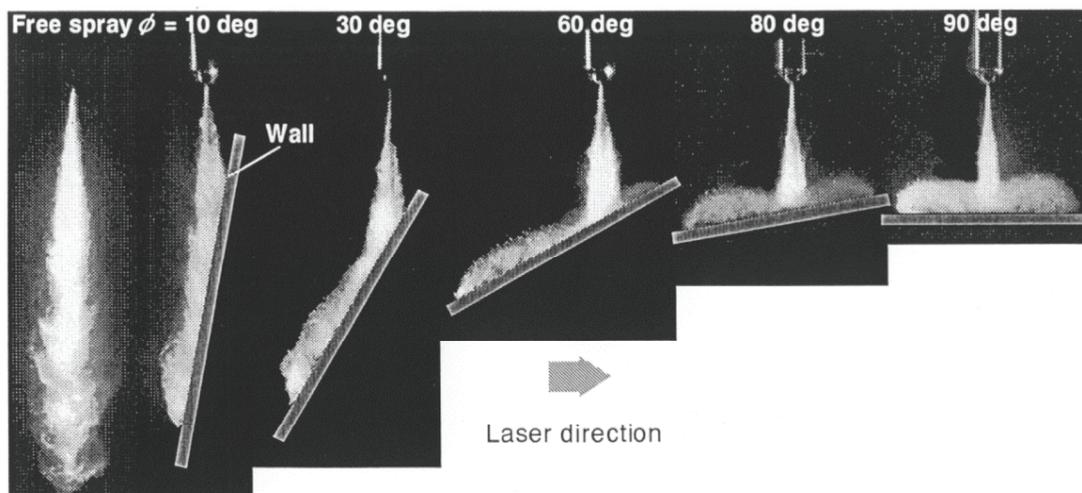


Fig.13 Wall impingement diesel spray (Ref.12)

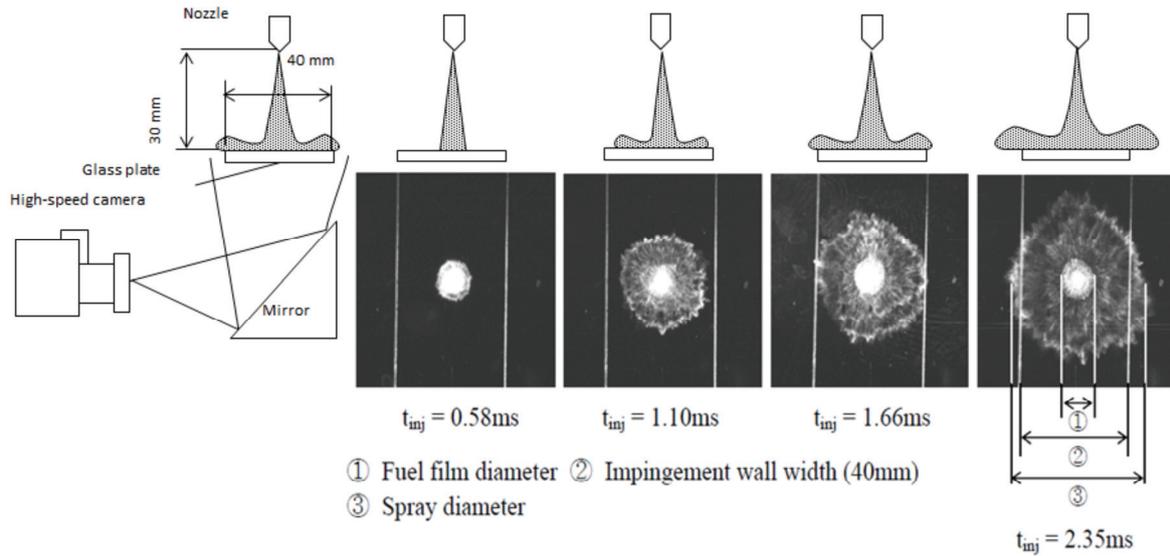


Fig.14 Radial spread of impingement diesel spray and fuel film (Ref.13)

#### 4 空気導入と噴霧の蒸発

噴霧を巨視的に取り扱うならば、噴霧の運動量は噴霧中の液体燃料と噴霧内に取り込まれた空気の質量の和とその速度で定まる。この場合の導入空気量(噴霧に巻き込まれた空気)は、図 15 のモデルと運動量保存式である式(19)から求めることができる<sup>9)</sup>。ここで、 $M_f$  は噴射された燃料質量、 $M_a$  は噴霧へ導入される空気質量、 $U_{inj}$  は燃料の噴射速度、 $U_a$  は噴霧へ導入される空気の速度、 $U_{spray\ average}$  は空気が導入された後の噴霧の平均速度である。

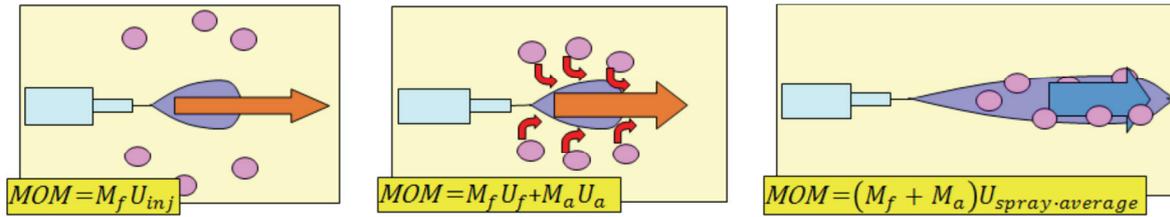


Fig.15 Spray mass conservation and air entrainment (Ref.9)

$$M_f U_{inj} = (M_f + M_a) U_{spray\ average} \quad (19)$$

したがって噴霧の平均速度が明らかであれば、その変化から、噴霧への空気導入量は式(20)となる。

$$M_a = M_f \left( \frac{U_{inj}}{U_{spray\ average}} - 1 \right) = M_f \left( \frac{U_{inj}}{\left( \frac{dS(t)}{dt} \right)} - 1 \right) \quad (20)$$

噴霧が式(5)に従って進行する場合は平均速度について式(21)が成り立つので、噴霧先端の到達距離の変化から噴霧への巨視的な空気導入量を求めることができる。

$$\overline{\left( \frac{dS(t)}{dt} \right)} = \frac{3\beta}{4\sqrt{t}} = \frac{3}{2} \frac{dS(t)}{dt} \quad (21)$$

なお、この場合の平均速度は噴霧の運動量中心の速度であり、噴射率が一定であれば先端から 1/3 の位置の速度に対応している。

式(21)は噴霧全体に対する空気導入であるが、運動量保存則は噴霧の一部の要素についても成立するので、ディーゼル燃焼の現象論的シミュレーションで用いられている噴霧パッケージ<sup>14)15)</sup>についても式(22)が成立している。

$$(dM_f U_{inj})_{package} = (dM_f + dM_a)_{package} \left( \frac{S(t)}{dt} \right)_{package} \quad (22)$$

噴霧の微小要素が噴霧先端と同じく式(5)に従って進行しているとすれば、噴霧全体へ流入する空気量は式(22)の積分により式(23)のように求めることもできる。ただし、ここでは燃料の噴射率  $dM_f/dt$  は時間によらず一定としている。

$$M_a = \int_0^S \frac{dM_a}{dS} dS = \int_0^t \frac{dM_a}{dt} dt = \frac{dM_f}{dt} \int_0^t \left( \frac{2U_{inj}\sqrt{t}}{\beta} - 1 \right) dt = \frac{dM_f}{dt} \left( \frac{4U_{inj}t^{1.5}}{3\beta} - t \right) \quad (23)$$

図16と図17は、噴霧内のPIV解析による得られた速度分布をもとに、式(22)を用いて噴霧内部の当量比の分布およびその時間変化を求めた結果である<sup>16)</sup>。噴射圧90MPaで1MPaの雰囲気中に噴射されたディーゼル噴霧では、高濃度のコア部分が中心部に存在するため、その部分の局所当量比は噴射終了まで過濃状態のままである。一方噴射圧150MPaで4MPaの雰囲気中に噴射された噴霧では、ノズル近傍においてすでに十分な空気の導入が行われ、希薄混合気が形成されている。

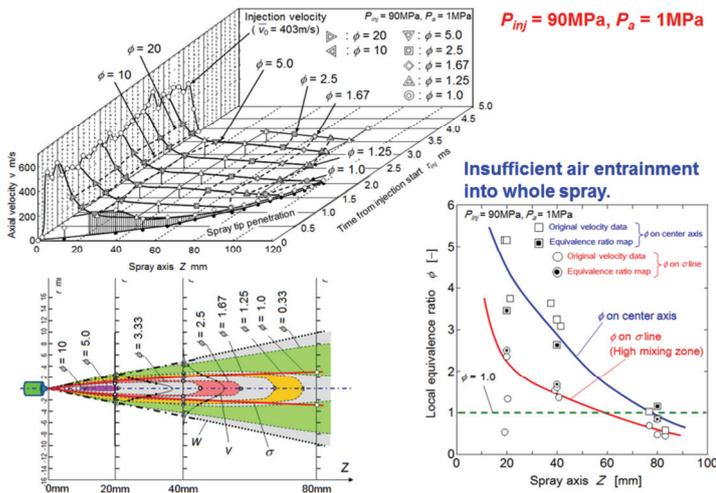


Fig.16 Spray velocity and local equivalence ratio (Pinj = 90MPa, Pa = 1MPa) (Ref.16)

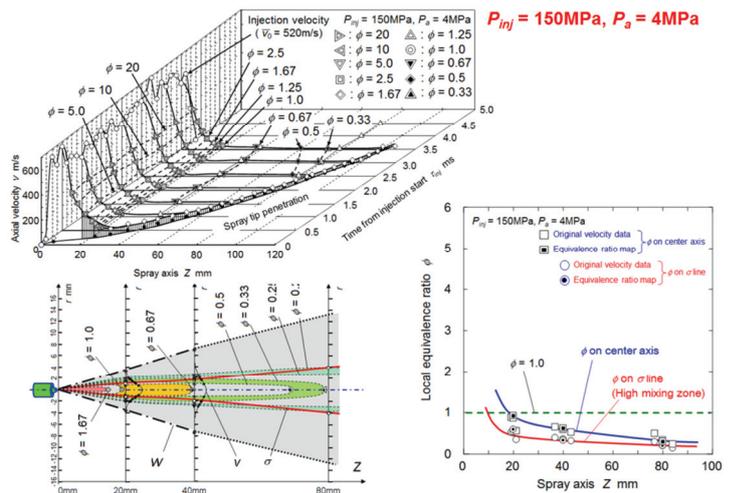


Fig.17 Spray velocity and local equivalence ratio (Pinj = 150MPa, Pa = 4MPa) (Ref.16)

周囲空気の温度が高ければ、空気導入の結果として噴霧の蒸発が始まり可燃混合気が準備される。高温雰囲気中での液滴は式(24)に示す液滴径  $D$  に関する2乗則によって蒸発することが知られている。ここで  $D_{i0}$  は液滴の初期径、 $D_i$  は蒸発途中の液滴径である。 $k$  は液滴の蒸発速度係数であり、液体(燃料)の性質と雰囲気密度や温度などによって定まる。

$$D_i^2 = D_{i0}^2 - kt \quad (24)$$

図18は上式に従って蒸発する噴霧の粒径分布パターンの変化を示したものである。計算の対象としたヘプタンのザウタ平均粒径は  $60 \mu\text{m}$  でモード粒径は  $9.5 \mu\text{m}$  である。蒸発開始から1msec経過するとモード粒径の粒子の蒸発は終了し、粒径分布のパターンが初期の状態と著しく異なってくる。図19はザウタ平均粒径が  $60 \mu\text{m}$  のヘプタン噴霧とドデカン噴霧の蒸発過程におけるザウタ平均粒径の推移を示した結果である。小さな粒子ほど蒸発の終了が早いので、蒸発の途中で平均粒径が一度増大しその後減少すること、またその変化は蒸発速度係数の大きいヘプタンの方が激しいことが示されている。

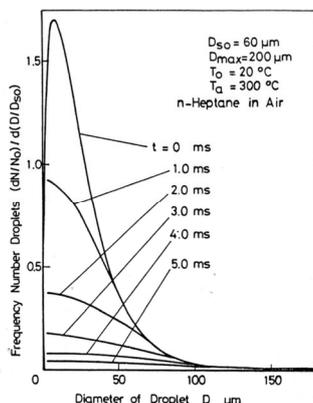


Fig.18 Change of spray size distribution during evaporation process (Ref.17)

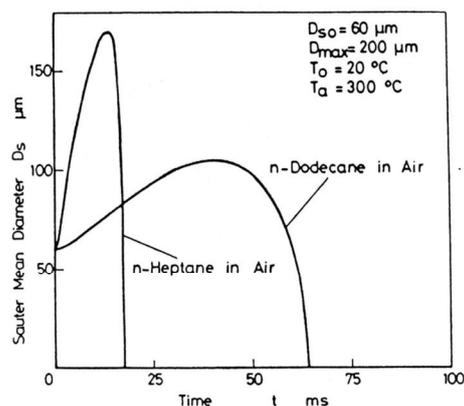


Fig.19 Change of Sauter mean diameter during evaporation process (Ref.17)

ディーゼル噴霧燃焼の場合では、雰囲気温度や圧力が時々刻々変化するので、液滴の温度 $T_l$ 、液滴径 $D_l$ 、液滴の質量 $m_l$ についての以下の連立微分方程式を解いて蒸発を解析することが行われている<sup>14)</sup>。

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{1}{m_l c_{pl}} \left\{ \pi D_l^2 h^* (T_\infty - T_l) + \lambda \frac{dm_l}{dt} \right\} \quad (25)$$

$$\frac{dD_l}{dt} = \frac{2}{\pi D_l^2 \rho_l} \left( \frac{dm_l}{dt} - \frac{\pi D_l^3}{6} \frac{d\rho_l}{dt} \right) \quad (26)$$

$$\frac{dm_l}{dt} = -\pi D_l^3 k^* \frac{Y_{F0} - Y_{F\infty}}{(1 + \xi) Y_{F0}} \quad (27)$$

ここで $c_{pl}$ は液体の定圧比熱、 $h^*$ は液滴表面の熱伝達率、 $T_\infty$ は雰囲気温度、 $\lambda$ は蒸発潜熱、 $k^*$ は物質伝達率、 $Y_{F0}$ と $Y_{F\infty}$ は液滴表面と雰囲気燃料蒸気濃度、 $\xi$ は燃料蒸気と空気の液滴表面における質量流量比である。コモンレール式の高圧噴射装置から噴射されるディーゼル噴霧のザウタ平均粒径は20 $\mu\text{m}$ 前後であり、上式を用いて実際の蒸発を計算してみると噴射後1ms前後で蒸発は終了してしまうことが明らかになっている。したがって、ディーゼル噴霧が液滴のまま燃焼室壁面に衝突することはあっても、液滴としての蒸発自体が燃焼を直接左右することではなく、軽油を燃料とする小型高速ディーゼル機関では、冷間始動時を除き蒸発速度の見積もり精度についてはさほど問題にされていない。

ディーゼル噴霧の蒸発については、蒸発した燃料と空気の混合で生じた可燃混合気の空間分布の把握が重要になる。図20は二波長のレーザー光を用いて液体噴霧と燃料蒸気を分離して計測した結果をもとに作成した蒸発過程にあるディーゼル噴霧の液相および気相の当量比の空間分布である<sup>18)</sup>。図の結果によれば噴射開始後0.6ms経過した時点ですでに可燃範囲にある混合気が形成されている。対象としているディーゼル噴霧の噴射期間は0.85msであるので1.5ms経過した時点では噴射は終了して、高濃度の燃料蒸気が生成されている。またこの燃料蒸気の巨視的な流動状態は常温の非蒸発ディーゼル噴霧の挙動に酷似している。このことはディーゼル噴霧の流動が最終的にはガス噴流の流動となり、前述した運動量理論に基づく乱流ガス噴流の扱いが可能であることを示している。

壁面に衝突するディーゼル噴霧は壁面に沿って放射状に広がる。壁面に衝突するディーゼル噴霧の蒸発についてレーザー解析を行った結果が図21である<sup>19)</sup>。ここでは雰囲気温度と壁面の温度を変えた条件設定を行い、高温雰囲気および高温壁面の両者が及ぼす、壁面に衝突する噴霧の蒸発の促進効果の相違を調べている。結果とすれば、壁面を高温にすることより、雰囲気を高温にした場合(図の下段)の方が高い蒸発促進効果が得られることが示されている。言い換えれば、壁面から熱伝達でディーゼル噴霧に供給される熱量より噴霧に巻き込まれる高温の空気が持ち込む熱量の方が重要であることを示している。

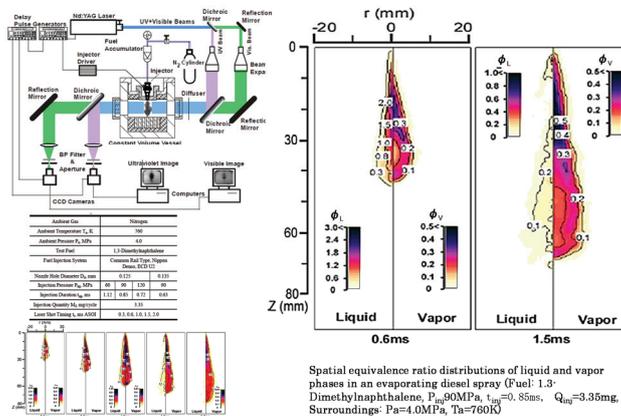


Fig.20 Diesel spray evaporation (Ref.18)

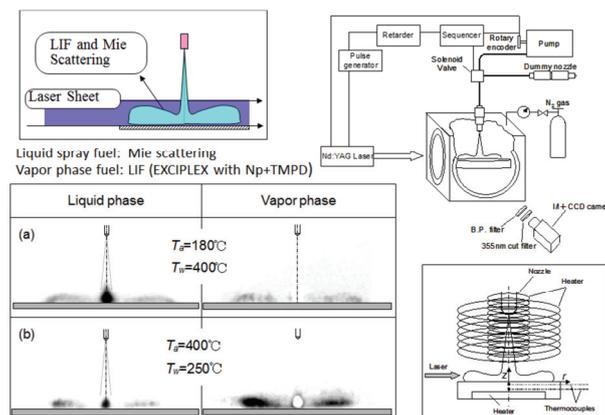


Fig.21 Evaporation of wall impingement diesel spray (Ref.19)

## 5 ディーゼル噴霧の着火と燃焼

### 5.1 ディーゼル噴霧の着火

高温高圧雰囲気下のディーゼル噴霧の自己着火は、噴霧の蒸発、着火前駆物質の生成と蓄積、前駆物質相互の化学反応を含む物理化学的過程である。図 22 は着火の一般的化学反応モデルであり、着火の前駆物質としてのラジカルの生成と蓄積が着火の基礎メカニズムである。

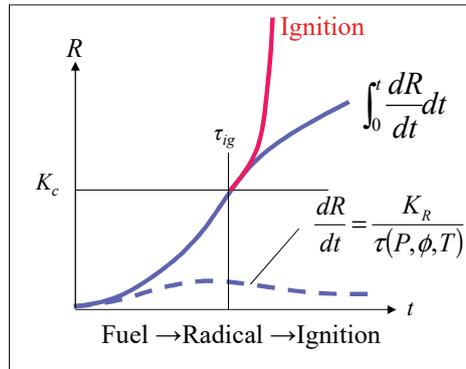


Fig.22 Ignition process

このラジカルの生成速度は式(30)のような圧力Pと等量比φとラジカルRの生成のための活性化エネルギー $E_{act}$ によるアレニウス型の速度式で表現される。着火はこの式にしたがって生成されるラジカルが蓄積され、それが閾値 $K_c$ を超えると発生する。ラジカルの蓄積量と着火時刻 $t_{ig}$ の関係は式(31)のように表すことができる。

$$\frac{dR}{dt} = \text{Function}(P, \phi) \cdot \exp\left(\frac{-E_{act} \text{ of Radical Formation}}{R^*T}\right) \quad (30)$$

$$\int_0^{t_{ig}} \frac{dR}{dt} dt = K_c \quad (31)$$

図 23 は均一予混合気について、上記の化学的着火遅れを示した結果である。ここでは n-heptane ( $C_7H_{16}$ )と iso-octane ( $C_8H_{18}$ )を用い、KUCRS (knowledge-basing utilities for complex reaction systems)と命名されている着火反応の計算コード<sup>20)</sup>での推定結果と衝撃波管での実験から得られる着火遅れを比較している<sup>21)</sup>。n-heptane の場合では373の化学種を対象に1071の素反応を組みわせ、iso-octaneの場合では537の化学種に対して1469の素反応が用いられている。結果として iso-octane の低温の場合を除き、実験結果とよい一致が得られている。

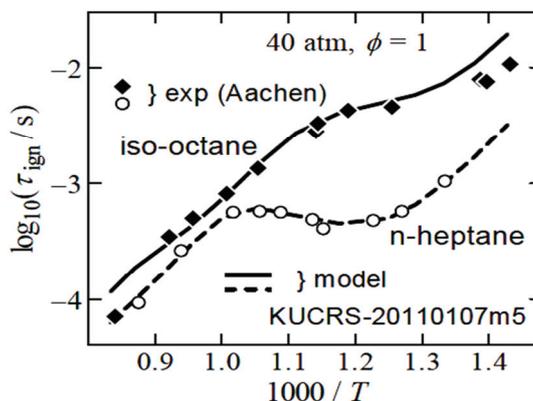


Fig.23 Chemical ignition delay (Ref.21)

低温の場合(アレニウスプロットしてある図の右側)は高温側と比べ着火遅れが非常に長く(例: $\log(0.01)=-2$ ,  $\tau_{ig}=10\text{msec}$ )かつ温度依存性が低い温度域があることが判る。これはいわゆる冷炎としての着火遅れを示したものである。これらの計算は均質混合気が対象であり、ディーゼル噴霧の着火のような微粒化、高温空気との混合、蒸発、拡散等の物理過程は考慮していないが、計算された着火遅れはディーゼル噴霧の着火遅れとほぼ同程度となる。このことは、ディーゼル噴霧の着火過程では、物理的な混合気形成過程と着火にいたる化学反応過程が同時進行していることを示している。一般に低温の場合には化学反応過程が、高温の場合には物理的な混合気形成過程が、主として着火遅れを支配しているといわれている。

ディーゼル噴霧の着火遅れには微粒化や噴霧の蒸発などの物理過程も関与しているが、その関与も含めて、実験結果を式(32)のようなアレニウス型の実験式で整理することが行われている<sup>22)</sup>。

$$\tau_{ig} = AP^B \phi^C \exp\left(\frac{D}{T}\right) \quad (32)$$

$$\phi = \frac{P_{O_2}}{0.21P} \quad (33)$$

ここで、 $\tau_{ig}$  (ms) は着火遅れである。また  $P$  (atm) は雰囲気圧力であり、 $T$  (K) は雰囲気温度である。式(33)で定める  $\phi$  は空気中の酸素濃度をベースに規格化した雰囲気酸素濃度である。式中の  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , および  $D$  は実験定数であり、表3の値が使われている。なお、式(32)および表2における  $D$  の値は正であり、式(30)中の活性化エネルギーと符合が逆になっている。これは着火遅れ時間が基本的に反応速度の逆数になっていることを示している。

Table 3 Empirical parameters of ignition delay (Ref.22)

Fuel	A	B	C	D
Kerosene	$2.76 \times 10^{-2}$	-1.23	-1.06	7280
n-Heptane	$7.48 \times 10^{-1}$	-1.44	-1.39	5270
n-Dodecane	$8.45 \times 10^{-1}$	-1.31	-2.02	4350
n-Hexadecane	$8.72 \times 10^{-1}$	-1.24	-2.10	4050

着火遅れに対応した反応の特性時間を圧力、当量比、温度の関数として  $\tau_R(P, \phi, T)$  とすると、式(31)に示したラジカルの生成速度は特性時間の逆数に比例するので、式(34)を満たすように特性時間を定めることができる。さらに着火遅れ時間中にこの特性時間が不変(ラジカルの生成速度が一定)であれば、着火遅れ時間と特性時間の関係は式(35)のようになる。

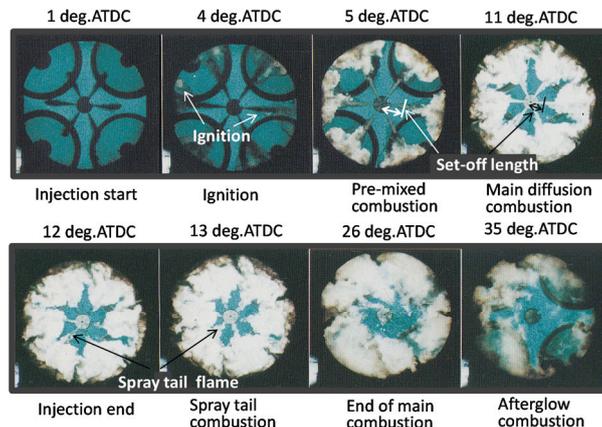
$$\frac{dR}{dt} = \frac{K_c}{\tau_R(P, \phi, T)} \quad (34)$$

$$\frac{1}{K_c} \int_0^{\tau_{ig}} \frac{dR}{dt} dt = \int_0^{\tau_{ig}} \frac{1}{\tau_R(P, \phi, T)} dt = \frac{1}{\tau_R(P, \phi, T)} \int_0^{\tau_{ig}} dt = \frac{\tau_{ig}}{\tau_R(P, \phi, T)} = 1 \quad (35)$$

したがって式(34)で定まる特性時間は着火遅れ時間に他ならない。着火遅れの簡易モデル計算では  $\tau_R(P, \phi, T)$  を便宜的に式(32)で置き換えることが行われている。

## 5.2 ディーゼル噴霧の燃焼

実機関におけるディーゼル噴霧燃焼の代表的な状態を図24に示す<sup>23)</sup>。着火はディーゼル噴霧の側方や燃焼室壁面近くの衝突噴霧で発生する。図中に記入したセットオフ長さ(Set-off Length)は著者が提案しているノズルから火炎までの距離であり、この距離の間で微粒化、周囲雰囲気との混合、可燃混合気の形成、ラジカルの蓄積などの燃焼のための準備が行われている。この距離については可燃混合気の流れと火炎伝播の速度バランスをもとにしたリフトオフ長さ(Lift-off length)<sup>24)</sup>として扱う考え方<sup>25)26)</sup>もあるが、速度バランスで火炎の位置が定まっているわけではないので、速度バランスに基づくリフトオフ長さとは区別する必要がある。噴霧の挙動をみると、衝突噴霧の壁面からの巻き上がりや噴霧間の相互干渉が見られる。また火炎の広がりや熱発生との関係を調べると、着火後火炎が燃焼室に広がるまでの間で熱発生がほとんど終了している。噴射の終了時では、噴霧後端の移動速度は噴霧先端の速度に比べて低く、噴霧後端は噴射弁近傍に滞留する。したがって図24のクランク角12度および13度の写真では噴霧後端の火炎が噴射弁近傍に存在し、セットオフ長さも短くなる。



$P_{inj} = 150 \text{ MPa}$ ,  $Q_{inj} = 110 \text{ mg/st}$ , Shadow dish C.C,  $D_n = 6 \times 0.17 \text{ mm}$ ,  $R_{swirl} = 0.9$ ,  $N_e = 1000 \text{ rpm}$

Fig.24 Diesel spray combustion in engine (Ref.24)

直噴ディーゼル機関での噴霧燃焼は基本的にピストン頂部のキャビティと呼ばれる燃焼室内に維持されるが、火炎がキャビティ全体に広がることはほとんどなく、キャビティ内の燃焼用空気には未利用の部分が残る。一般にセットオフ長さが長くなるとキャビティ中央部に未利用の空気が多く残る。また噴射終了後の噴霧の緩慢な動きに伴う空気の巻き込みの低下も未利用の空気を増加させる原因となっている。図 16 に示した自由噴霧への空気導入から推定すれば、噴射終了後においては噴霧の中心部でも当量比以下の希薄混合気が形成される状態になるはずであるが、壁面衝突する実際にディーゼル噴霧では混合が抑制され、後燃え(After glow)の状態が長く続き Soot の生成の要因になっている。したがって図 13 に関連して述べた衝突により運動量の一部が失われることがここで起きていと推定することができる。

ディーゼル噴霧の着火直後の火炎の挙動を解説した結果が図 25 である。ディーゼル噴霧燃焼においてノズル近傍には火炎の侵入しない部分があることは以前から知られていて<sup>27)</sup>、そこでの空気導入がその後の燃焼状態を支配することが明らかにされている<sup>28)</sup>。ノズル近傍での空気導入と初期燃焼の関係、壁面衝突後の噴霧の流動(乱流混合)と Soot の関係など、噴霧の流動と燃焼排出物には密接な関係があり、多くの研究が行われている<sup>25)26)</sup>。

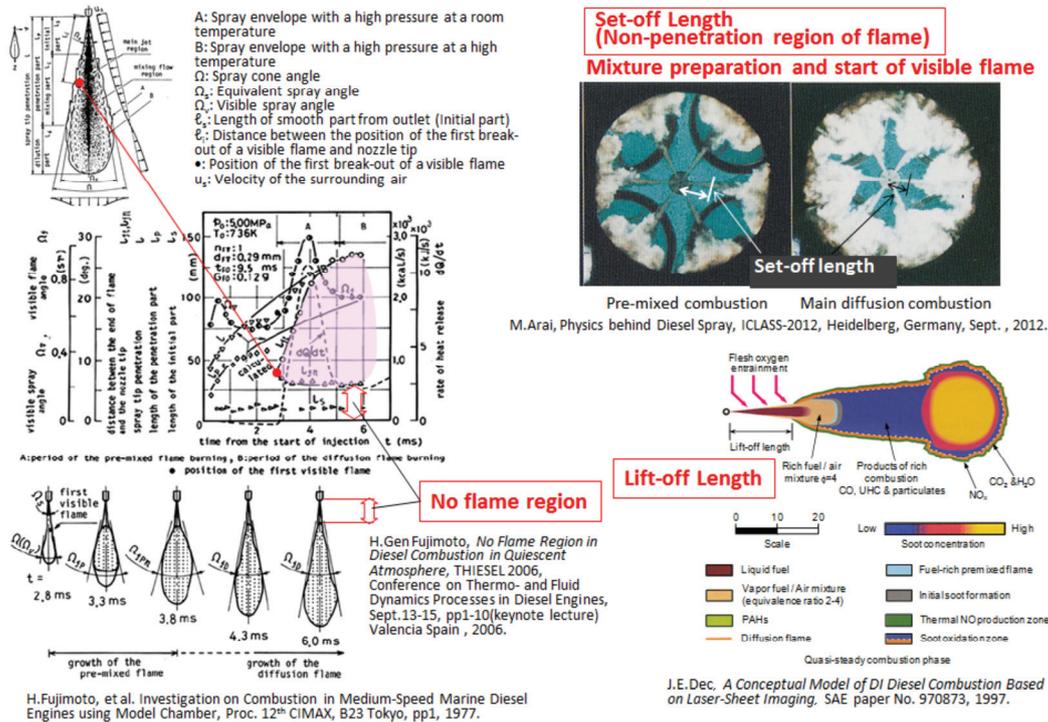


Fig.25 Ignition and combustion of diesel spray (Ref.24, 27 and 28)

ディーゼル噴霧燃焼のモデルには図 25 中に示した J.E.Dec のモデル<sup>28)</sup>がある。ディーゼル燃焼では、NO と Soot の生成が問題とされ、このモデルにより種々の検討が行われている。図 26 は Kosaka ら<sup>29)</sup>による詳細なモデルである。このモデルはコモンレール式高圧噴射によるディーゼル噴霧の燃焼観察に基づいて構築されている。二つのモデルの相違点は噴霧へ導入される空気の流入位置と噴霧内部の乱れである。前者では噴霧の根元での空気の導入や噴霧外縁部での混合と燃焼が強調されているが、後者のモデルでは、内部の乱流構造とそれに基づく空気の巻き込みが強調されている。言い換えると、周囲空気の巻き込みは噴霧の速度減衰に対応してディーゼル噴霧火炎でも起きていることをモデル化している。

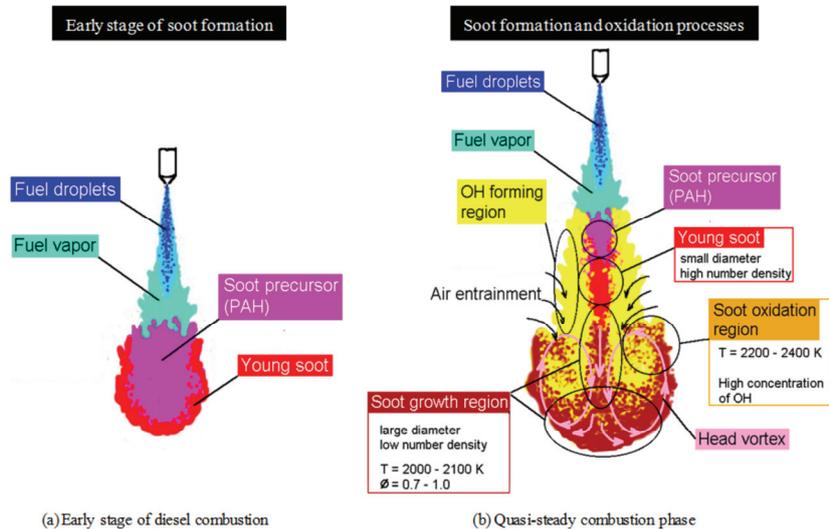


Fig.26 Diesel spray combustion and soot formation model (Ref.29)

コモンレール式高圧噴射装置では、噴射のタイミングや噴射期間などを電子制御しているので、噴射を制御して最適な熱発生率を得ようとする試みが行われている。図 27 はその一例である<sup>30)</sup>。プレ噴射により主燃焼としての初期燃焼を抑えることで、燃焼騒音また初期燃焼時の温度上昇を抑えて NOx の低減に寄与させている。高圧噴射では噴射期間が短くまた噴射された噴霧の運動量が大きいので、拡散燃焼を活性化させてスートと CO を低減させることが可能となる。また燃焼期間が短くなることで、ディーゼル燃焼全体が等容燃焼に近づき、熱効率の向上に寄与することになる。

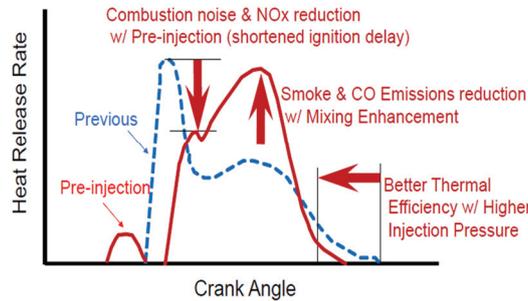


Fig.27 Heat release rate pattern improvement for better combustion (Ref.30)

熱発生率はディーゼル機関の解析で用いられる基本的な特性量である。Q を熱量、W を仕事、U を内部エネルギーとすれば熱力学の第一法則は式(36)で表される。

$$Q - W = \Delta U \quad (36)$$

この式を機関のクランク角で微分すれば式(37)が得られる。ここでV はシリンダ容積、M はシリンダ内に充てんされている気体の総質量、 $c_v$  は定容比熱である。さらに気体のガス定数 $R^*$  と状態方程式を用いれば、機関に加えられた熱量の推移を圧力と容積の変化で式(38)のように表すことができ、これが熱発生率である。

$$\frac{dQ}{d\theta} - P \frac{dV}{d\theta} = M \frac{dU}{d\theta} = M c_v \frac{dT}{d\theta} \quad (37)$$

$$\frac{dQ}{d\theta} = \left(1 + \frac{c_v}{R^*}\right) P \frac{dV}{d\theta} + \frac{c_v}{R^*} V \frac{dP}{d\theta} \quad (38)$$

ディーゼル機関の特徴は、機関の膨張行程において継続して燃料を噴射して等圧燃焼を行わせることである。等圧燃焼期間では、

$$\frac{dP}{d\theta} = 0 \quad (39)$$

となるから、等圧燃焼期間中では熱発生率の式を

$$\frac{dQ}{d\theta} = \left(1 + \frac{c_v}{R^*}\right) P \frac{dV}{d\theta} \quad (40)$$

と書き改めることができる。ここでP は等圧燃焼中のシリンダ圧力である。この結果は等圧燃焼を実現させるためには、シリンダ容積の変化に対応した熱発生を行わせるように燃焼を制御すればよいことを示している。ボア 110 mm の機関を例として、現状の熱発生率パターン、燃焼室容積の変化、等圧燃焼に要求される熱発生率パターンの関係を調べた結果が図 28 である。容積変化に比例するように初期燃焼を抑え、さらに燃焼をすばやく終了させることが等圧燃焼のために必要である。これを噴霧への空気導入の立場からみれば、噴霧の速度減衰に伴う空気の巻き込みは噴射初期に盛んであるため、運動量理論に基づく空気の巻き込みで図 28 のような熱発生パターンを実現することは難しい。したがって等圧燃焼を実現するためには、噴射率そのものを制御することが必要となる。

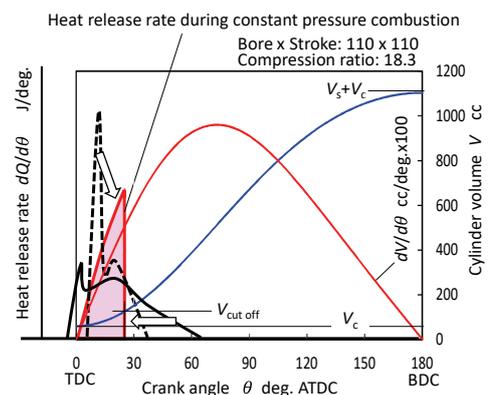


Fig.28 Constant pressure combustion and heat release

ディーゼル燃焼における燃焼室容積と等圧燃焼の終了時のシリンダ容積の比は縮切り比(等圧膨張比)とよばれ、ディーゼル機関の理論熱効率を左右する重要な因子となる。縮切り比 $\sigma$ 、圧縮比 $\varepsilon$ 、熱効率 $\eta_{th}$ 、行程容積 $V_s$ 、燃焼室容積 $V_c$ 、等圧燃焼の終了時のシリンダ容積 $V_{cut\ off}$ の関係を次に示す。

$$\varepsilon = \frac{V_s + V_c}{V_c} \quad (41)$$

$$\sigma = \frac{V_{cut\ off}}{V_c} \quad (42)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\sigma^{\kappa} - 1}{\kappa(\sigma - 1)} \quad (43)$$

式(40)より等圧燃焼の出力を増加させるためには等圧燃焼時のシリンダ圧力を増加させること、すなわち圧縮比を高めることや過給が重要になる。燃焼期間を長くして出力を増加させることも可能であるが、式(43)より縮切り比の増大は熱効率の低下を招くことになる。

図27の燃焼改善の方針はこの等圧燃焼に近い燃焼パターンを意図したものと見える。ディーゼル燃焼を速やかに終了させて、燃焼状態を全体として等容燃焼に近づける図27の方針は、縮切り比を1に近づけることと同じである。燃料噴霧と空気の混合や燃焼が瞬時に行われるならば、熱発生率は噴射パターンで制御可能になるが、現実的には噴射パターンと熱発生率の関係は複雑で、多くの遅れ時間が存在する。燃料の噴射から燃焼までの種々の時間遅れが短くなれば、噴射パターンで熱発生率を直接制御することが容易になる。そこで高圧噴射は噴霧に大きな運動量を与えて空気との混合遅れ時間を短縮することに本質があると筆者は考えている。

## 6 まとめ

ガソリン機関のキャブレターやジャーク式ディーゼル噴射システムのように技術革新とともに姿を消しつつある装置もあるが、ディーゼル噴射弁そのものは現在でも使われている。しかし今後の技術革新により燃料供給の新機構が開発されれば、ディーゼル噴射弁が姿を消すことも将来的にはあると考えられる。一方、現在のディーゼル噴射弁に改良が加えられ、引き続き燃料供給装置として不動の位置を占めるとするならば、燃料噴射パターンによる熱発生率の直接制御を行うための研究技術開発が重要と思われる。

## 【参考文献】

- 1) C. Lyle Cummins, Diesel's engine, Volume One from Conception to 1918, Carnot Press/Graphic Arts Center, 79-109, 1993.
- 2) Masataka Arai, Physics behind Diesel Sprays, International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-2012, CD/Contribution 1419, pp.1-18, 2012.
- 3) Masataka Arai, Study of Diesel Spray, Journal of SAE-Japan, Vol.68, No.3, 2014, pp.1-3.
- 4) J.Walther, J.K.Schaller, R.Wirth, C.Tropea, Characterization of Cavitating Flow Fields in Transparent Diesel Injection Nozzles using Fluorescent Particle Image Velocimetry (FPIV), ILASS-Europe 2000 Darmstadt 11-13 September 2000.
- 5) H.Hiroyasu, M.Arai and M.Shimizu, Break-up length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, Fifth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-91, Gaithersburg, MD, USA), 1991, pp.275-282.
- 6) Nian LI, Qiang Wang, Zhixia HE, Wenjun ZHONG, and Yanan FU. Numerical Investigation of Two-phase Flow inside the Double-layer Multi-hole Injector Nozzle under High-pressure Common Rail, ILASS-Asia 2014, Shanghai China, 2014.
- 7) Tomohiro Hayashi, Masayuki Suzuki, and Masato Ikemoto, Effects of internal flow in a diesel nozzle on spray combustion, Internal Journal of Engine Research, Vol.14 (6), 646-654, 2013.
- 8) H.Purwar, H.Wang, M.Tang, S.Idlahcen, A.Hideur, C.Toze, J.B.Blaisot, T.Dodin, Development of Picosecond Fiber Laser for High Repetition Diesel Spray Imaging, ICLASS2015, B2-3-131, 2015.
- 9) Masataka Arai, Diesel Spray Penetration and Air Entrainment, 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Tainan Taiwan, August 23-27, B2-1-002, 2015.
- 10) M.Arai and K.Amagai, Dynamic Behaviour of Multi-Stage Injection Diesel Spray, SAE paper No.970044, 1997.
- 11) H.Hiroyasu, M.Arai and M.Tabata, Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray, SAE paper No.890464, 97-106, 1989.
- 12) T.Ebara, K.Amagai and M.Arai, Image Analysis of a Diesel Spray impinging on a Wall, Proceedings of ICLASS-1997, 527-544, Seoul Korea, 1997.
- 13) K.Ko and M.Arai, Diesel Spray and Adhering Fuel on an Impingement Wall, SAE paper No.2002-01-1628, 2002.
- 14) Hiroyuki Hiroyasu, Toshikazu Kadota and Masataka Arai, Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel engine Efficiency and Pollutant Emissions (Part 1, Combustion Modeling), Bulletin of the JSME, Vol.26, No.214, (April), 569-575, 1983.
- 15) A.Minato and N.Shimazaki, Development of the Total Engine Simulation System (TESS) and Its Application for System Investigation of Future Diesel Engine, SAE paper No.2011-01-1298, 2011.
- 16) Y.Zama, W.Ochiai, K.Sugawara, T.Furuhata and M.Arai, Study of Mixing Process of Diesel Spray under High Ambient Gas Density Condition, Atomization and Sprays, Vol.23, No.5, pp.443-461, 2013.
- 17) Tharwat M.Farag, Masataka Arai and Hiroyuki Hiroyasu, Effects of temperature and Fuel Volatility on Spray Evaporation Characteristics, Mem. Fac.

- Eng. Hiroshima Univ. Vol.8, No.1 (Ser. No.24), 31–39, 1982.
- 18) J.Gao, Y.Matsumoto and K.Nishida, Effect of Injection Pressure and Nozzle Hole Diameter on Mixture Properties of D.I. Diesel Spray, 2006 JSAE Annual Spring Congress, JSAE–20065442, 2006.
  - 19) K.Amagai and M.Arai, Evaporation and Fuel Vapor Distribution in a Diesel Spray Impinging on a Hot Wall, COMODIA–2004, C7–2, 561–566, 2004.
  - 20) <http://www.frad.t.u-tokyo.ac.jp/~miyoshi/KUCRS/index.htm.en>, cited at Dec.2012.
  - 21) A. Miyoshi, Detailed Kinetic Mechanism Generator for Versatile Fuel Components and Mixtures, COMODIA–2012, OS3–1, 116–121, 2012.
  - 22) S.Ikura, T.Kadota and H. Hiroyasu, Ignition Delay of Fuel Spray in a Constant Volume Bomb, Trans. of JSME (Japanese), 41–345, 1559–1568, 1975.
  - 23) Advanced Combustion Engineering Inst. Co., Ltd., ACE's Spray and Combustion Photo Review, 19–29, Sept. 1992.
  - 24) Bernard Lewis and Guenther von Elbe, Combustion Flames and Explosions of Gases, 2nd Ed. 228–261, Academic Press Inc. 1961.
  - 25) D.L.Siebers and B.S.Higgins, Flame Lift-off on Direct-Injection Diesel Sprays under Quiescent Conditions, SAE paper No.2001–01–0531, 2001.
  - 26) H.Juneja, Y.Ra and R.D.Reitz, Optimization of Injection Rate Shape using Active Control of Fuel Injection, SAE paper No.2004–01–0530, 2004.
  - 27) H.Gen Fujimoto, No Flame Region in Diesel Combustion in Quiescent Atmosphere, THIESEL 2006, Conference on Thermo- and Fluid Dynamics Processes in Diesel Engines, Sept.13–15, pp1–10(keynote lecture) Valencia Spain, 2006.
  - 28) J.E.Dec, A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging, SAE paper No. 970873, 1997.
  - 29) H.Kosaka, T.Aizawa, and T.Kamimoto, Two-Dimensional Imaging of Ignition and Soot Formation Processes in a Diesel Flame, Int. J. of Engine Research, Vol.6, No.1, pp.21–42, 2005.
  - 30) Noboru Uchida (New ACE Institute Co. Ltd. Japan), How Far Extreme-high Pressure Fuel Injection have an Effect on Diesel Combustion Improvement, Mechanical Engineering Congress, 2014 Japan (MECJ–14), W071003, 2014.

# 私のコモンレール開発物語(1994年-2003年)

伊藤 昇平

Shohei ITOH

くわな科学技研

Kuwana Institute of Science and Technology

## 1 クリーンディーゼルとコモンレール

最近、TVのCMで走りがいい「クリーンディーゼル車」という言葉をよく耳にする。私はこの言葉に何故か馴染めない。何かディーゼルは「汚い」というイメージを、払拭する言葉に思えて仕方がないのだ。そう思っていると、昨年9月18日「EPA」がVW社に対し大気汚染防止法の違反通知を発行、VW社も「Defeat Device」の組み込みを認める、という関係者には暗いニュースが流れたことは未だ記憶に新しい。ところが、「クリーンディーゼル(図1)」と「VW社排ガス不正問題」の両者に大きく関係しているのが、「コモンレール」という「ディーゼル燃料噴射装置」である事は、一般にはあまり知られていない。私はその「コモンレール」開発の統括リーダーを(株)デンソーで「約10年間(1994年-2003年)」担当させて頂いた経験がある。その時の苦労話が、若い技術者、研究者の方々の今後の活動の参考になるように「JSAEエンジンレビュー誌」に投稿してほしいと、自動車技術会エンジンレビュー編集委員会からご依頼を受け、今回の執筆に至った。「老人の遠い昔話」と思っ読んで頂きたい。また文章の書き方で、いきなり技術的な話の連続よりも、どのように開発が進んでいったのか、「経緯」も書いた方が今後の開発研究活動の参考になると思い、編集委員会の御推奨通り、20年以上前の記憶を辿って「開発物語風」に執筆してみた。多少の「記憶違い」、「誇張した表現」、「失言」の類などはご容赦願いたい。

出典:InterNet 情報 より加筆

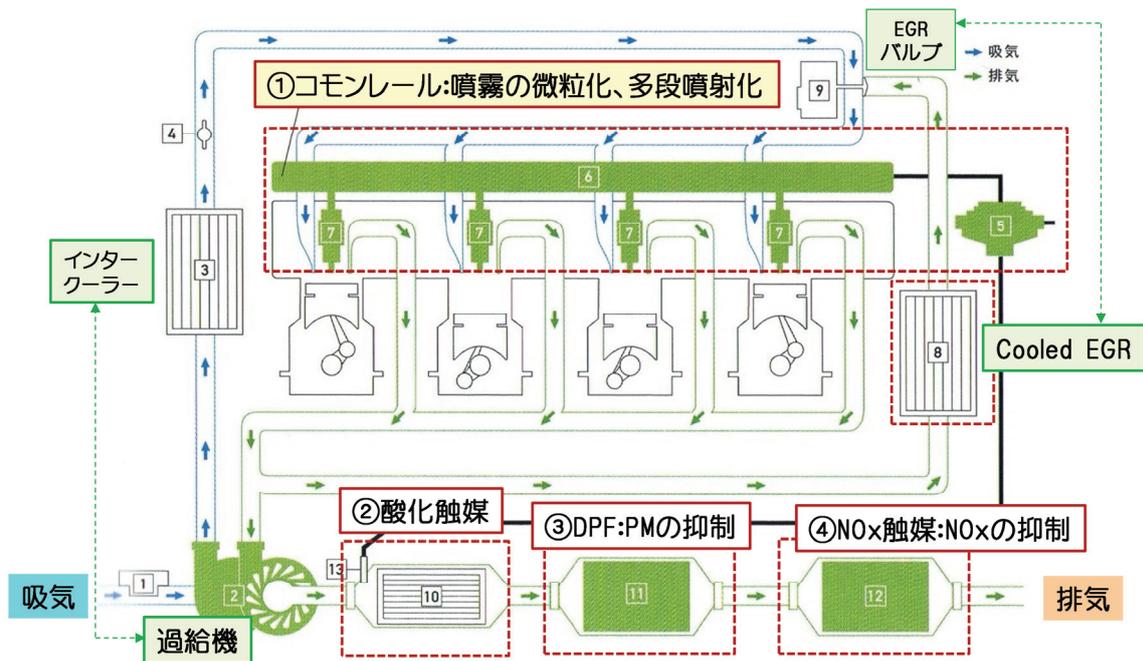


図1 最近の「クリーンディーゼル」

## 2 トラック用燃料噴射装置の設計(1977年-1993年)

私が日本電装(株)に入社(1977年)した頃、ディーゼルトラックと言えば、「汚い」「臭い」「うるさい」の代表であったような気がする。地元桑名市に近いという理由だけで入社を希望し、クルマが特に好きでもない私が配属されたのは、全社でも「離れ小島」の部署と見られていた「ディーゼル燃料噴射装置の技術部」であった。そこは、BOSCH社とライセンス契約をした製品を、主に国内トラックメーカー向けにアプリケーション設計している部署である。1年程経ったある日、部長から席に呼ばれ「おい、今度のBOSCH来社時に、向こうから恒例の技術プレゼンがあるので君も聞きなさい。」と言われた。

当時、年一回ライセンス契約のため、BOSCH社ディーゼル事業部のマネージメントが来社していた。その際、彼らから「最新の技術動向のプレゼン」があるので、聞いて勉強しろということであった。狭い応接室に20人程壁に張り付いた状態で、マネージメントのプレゼンを随行者の通訳者が、「上から目線」の「尊大」な説明の仕方をしていた。「見下された」説明を次長職以下は立ったままで、メモを取りながら聞いていた光景は今でも忘れない。所謂「ダンスパーティーの壁の染み」状態であった。「いつか「あいつら」を見返してみせる！(現在では不適切な表現ではあるが、その時の思いを正確に伝えるために用いたことをご容赦願いたい)」と「負け犬の遠吠え」に似た「何故か悔しい思い」だけが強く残った。しかし、会議室を出て席に戻ると、全社から

不採算事業として見放されていた従来式(列型)噴射ポンプ<sup>1)</sup>(図2)のアプリ設計, 原価低減活動, という”全く面白くない仕事”が待っていた。あの時の「悔しい, 憤りに似た感情」とはかけ離れた日常の仕事をこなす中で, ”17年”という長い歳月があつという間に過ぎ去った。そして気がつくと, 1994年「41才の中堅課長」としての「正月」を迎えていた。

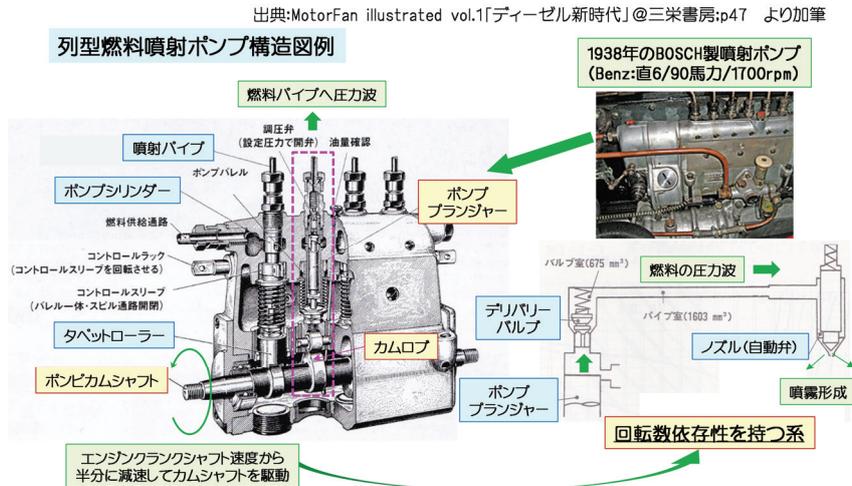


図2 列型燃料噴射ポンプ@BOSCH

年始から数週間たったある日, 昨年からの事業部長として海外赴任先から本社に戻られた取締役の秘書から「お呼びです」と電話が入った。何の品質問題だろうと思いつらしながら出向くと, 開口一番「伊藤君, ”コモンレール開発”のリーダーをやってくれ」。予想とはまるで違った話であった。要約すると, 八王子のトラックメーカーから, 「共同研究開発」してきた中型トラック用6気筒エンジン(コモンレール搭載)を, 1995年末から100台程の「限定少量生産」したいと申し入れがあったという。工場で生産すれば, 少量といえども「世界初のコモンレール生産」となる。そこで, 「生産の経験が少ないリーダー」の下で行っていた開発を, この段階からは生産設計業務の経験が長い「私」にリーダーを任せたいということであった。「会社TOPの指示で部長格を他部署から君の上司として一人置すが, 課長格の君が実質”コモンレールのリーダー」となる。まずは, 来年末の少量生産開始に向かって, 組織も含めて全て見直してくれ。3月からの再スタートとする。」大体その様な事を言われたのを覚えている。平凡に過ぎてきた設計課長にとって, まさに「晴天の霹靂」である。私にあるのは, 17年間従事してきた従来噴射ポンプの生産設計の経験だけである。一瞬「不安」が頭の中をかすめたが, 回答は「はい, 分かりました!」であった。ここから, 10年に及ぶ「私のコモンレール人生」が始まった。

### 3 コモンレールと従来式(列型)噴射系

従来式(列型)噴射系は, 「ジャーク式」とも呼ばれ, BOSCH社が1930年代に開発したディーゼル燃料噴射装置の一つで, 日本では主にトラック用, 船用として使われていた。作動原理<sup>2)</sup>(図3)は以下のようである。

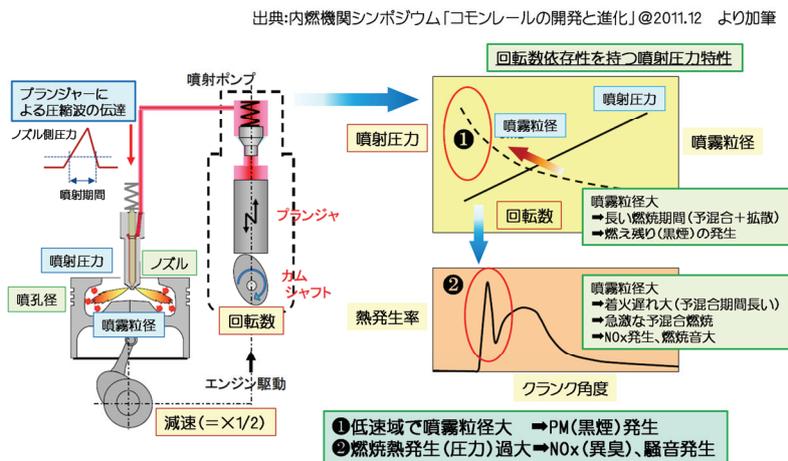


図3 従来式燃料噴射系の限界

エンジンクランク速度を半分に減速して噴射ポンプのカムシャフトを駆動させる。カムロブでプランジャーを上下に往復動させて, 瞬時に「圧縮伝達波」を「噴射パイプ内」に発生させる。噴射ポンプは, 「燃料圧送ポンプ」ではなく(最近の講演録で「注射器」とあるが, 誤解される), 「圧縮波発生装置」である。その圧縮波が「噴射パイプ」内を約1500m/秒の速度<sup>3)</sup>でノズル端に伝達される。設定開弁圧より伝達波の圧力が高くなると, ノズルニードルがシート部から上昇(最大0.2mm程)して, 燃料は噴孔部(噴孔径は約0.2mm, 噴孔数6~8)からエンジン筒内に噴射される。噴射圧力特性は, ポンプ端で発生した圧縮波に対してノズルの噴孔径, 噴孔数, 開弁圧の影響を受けて, ポンプ端の圧縮波に「似た圧力特性」となる。さらに図3に模式的に示すよう

に、「回転速度依存性」を持つ。つまり、低回転速度域では噴射圧力は低く、「噴霧粒径」が大きくなってしまふ。そのため、着火するには時間を要し(着火遅れ時間)、その後の燃焼(予混合燃焼+拡散燃焼)もさらに時間を要して、完全に燃え切ることができず、「黒煙」として排出される場合が多い。また長くなった「着火遅れ」期間中に噴射された噴霧が「一気に燃焼する予混合燃焼」のため、燃焼温度が高くなり、「サーマル NO(注 1)」が大量に発生する。また、その時の燃焼音も大きくなり、これが所謂ディーゼルトラック固有の「ガラガラ音」である。この低速回転域の「従来ポンプの噴射特性」が、ディーゼルトラック車の「汚い」「臭い」「うるさい」の大きな原因の一つになっていたのである。

「コモンレール」は、これを一掃するために開発された。そして会社 TOP の願いは、技術提携を長きに渡って結んできた「BOSCH 式からの決別」であった。この願いは、入社間もない頃に味わった、「BOSCH 社によるプレゼン時に抱いた私の”悔しい思い”」と同じであった。元祖「コモンレール」の原型<sup>4)</sup>は 1960 年代後半、スイスの Robert Huber が開発し、スイス工科大学で然程高くないレール圧で研究が進んだとされている。その後、1990 年よりマニエッティ・マレリがフィアット中央研究所、エラスと共同研究開発(後の BOSCH コモンレールの原型)をしてきた。

「コモンレールの原理」を、従来式と比較して説明する(図 4)。従来式噴射ポンプは、あくまで「圧縮波発生装置」である。ノズル端の噴射圧力特性は、ポンプ回転速度、幾何学的なポンプ仕様、噴射パイプ仕様、ノズル仕様が相互的に影響し合うという、恐ろしく複雑な特性を持つ。これが長きに渡り、多くのディーゼルエンジンの開発者、研究者の頭を悩ませてきた。

一方「コモンレール」では、高圧ポンプは「共通パイプ(蓄圧室)」である「コモンレール」に燃料を「圧送する」役目だけを担っている。レール圧力を圧力センサーにて検知し、予め設定した目標圧力になるように、「燃料圧送量」にてフィードバック(F/B)制御される。したがって、「噴射圧力特性」は「高圧ポンプ」と「レール」との間だけで決まる。一方インジェクターは、高圧ポンプの圧送量とは無関係に、必要とされる噴霧特性を満足する噴射開始時期、噴射量、噴射回数を「独立して電磁弁で制御」できるのである。やっとな、ディーゼルエンジンの開発者が「噴射系の呪縛」から解放されて、自由になる「時」がやって来たのである。

出典:内燃機関シンポジウム「コモンレールの開発と進化」@2011.12 より加筆

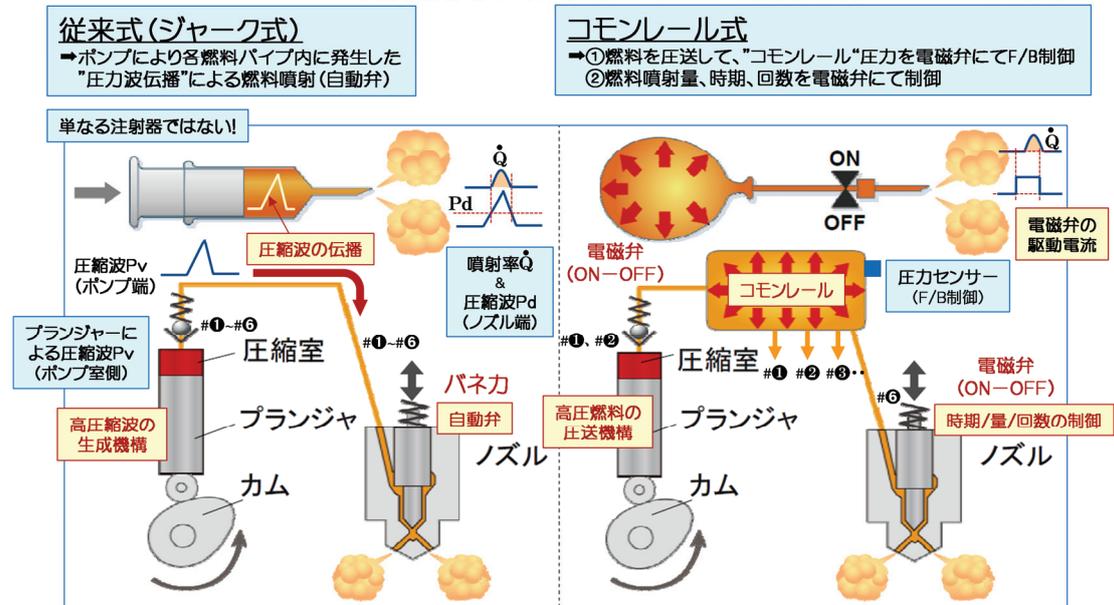


図 4 従来式とコモンレール式

#### 4 トラック用コモンレールの開発(1994年-1999年)

トラック用コモンレールの開発は、1995年末の限定生産に向けて1994年3月に再開した。既に1年ほど前から従来式ポンプの技術員が20名ほど移籍されていた開発組織の中に、部長格一人と私(旧リーダー格の二人と入れ替え)だけが投入された。そのため、何を聞いても何を相談しても「コモンレールの知識量が少ない」二人に対して、「いらだち」とも思える態度が、技術員にも技能員にも見られた。これは初めから分かっていたことであったが、当面彼らのやっていることを、ただ話を聞いて理解していくことから始めるしかなかった。

移籍して数ヶ月経った頃、工場は試行生産準備に入っていた。毎日「どうするんだ?」と、次々に製造部からもメーカーからも、私に集中して判断を求めてきた。その時々に応じて、担当者と話し合って結論を伝え終えると、大抵夜の8時過ぎであった。それからは自分の時間として、開発品の図面、実験データを見直した。特に実施したのは、過去17年間の従来噴射ポンプの「知識と経験(これが大きな落とし穴になった)」から自分で部品図面を1点1点見直すことであった。図5はシステム構成図、図6はしばらく問題が集中する高圧ポンプの断面図である。高圧ポンプ(図6)は、従来式(列型)ポンプにかなり類似した形状であることが分かる。ただし、レール室への燃料圧送は、1本のプランジャーがエンジン3筒分担うため、カムシャフトのカムロブが「3山カム」となっている。カムロブ面をローラー、ピン、ボディで構成された「タペットローラー部」が上下動する。従来プランジャーにあった噴射量制御用の「切り欠き」の代わりに、「吐出調量電磁弁」がポンプシリンダー上部に取付けられ、吐出量を制御する。従って、2つの3山カム、2本のプランジャーにより、中型6気筒エンジンが必要とする燃料噴射量、リーク量(インジェクターの電磁弁、高圧摺動部から低圧燃料通路への燃料もれ量)を賅う。図面の見直し作業は、従来式ポンプのベテラン技術員にもかなり手伝ってもらった。また並行して、これまでの耐久テスト部品(単体、エンジン、実車)を観察して「問題点」を見落していないか、再確認した。さらに不明確な点については、単体耐久テストも追加実施した。この頃から、午前0時を回るのは、ほぼ毎

日、土曜日でも出社するという狂人的な生活が始まった。それを支えたのは「BOSCH 社からの脱却であり、BOSCH 社に勝ちたい」という「強い思い」であったような気がする。これが私には「コモンレール開発の原動力」となった。だが結果としては、大きな問題点は何も抽出することができず、いわゆる「空振り」に終わった。

出典:内燃機関シンポジウム「コモンレールの開発と進化」@2011.12 より加筆

## 120MPaコモンレールのシステム構成(1994年世界初CR生産)@デンソー

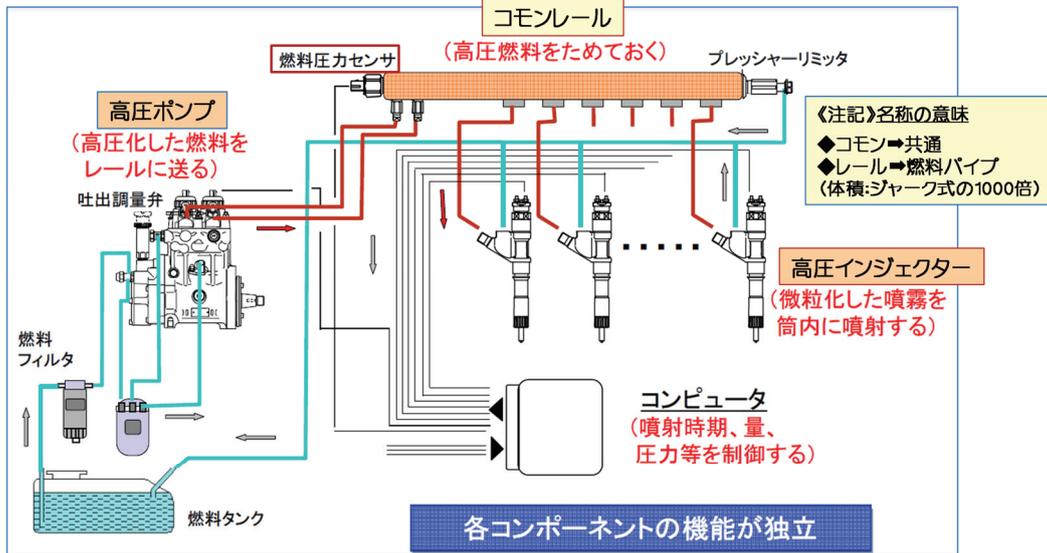


図5 120MPa コモンレール

出典:内燃機関シンポジウム「コモンレールの開発と進化」@2011.12 より加筆

## 120MPaコモンレールの高圧ポンプ断面図@デンソー

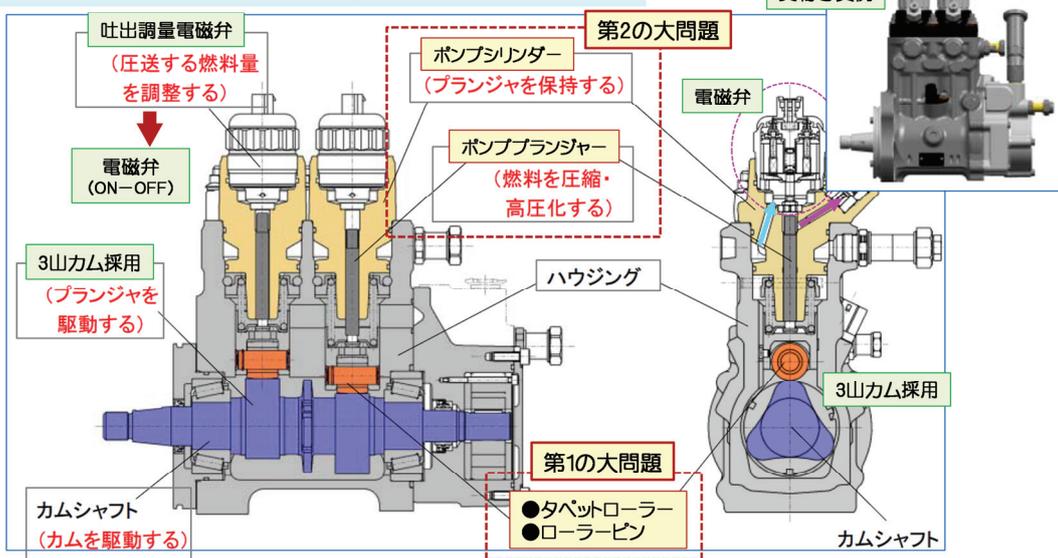


図6 高圧ポンプ@120MPa コモンレール

1995年が明けて、いよいよ製造部での試行生産が始まった。そして、間もなく「問題」は起きた。製造部で高圧ポンプの調整・チェック作業中に、タペットローラー一部で「異音」が生じる問題が頻発し始めた。私の席に担当役員が血相を変えて現れた。「すぐ製造部に行って、何が起きているのか、調べてくれ。」当時は技術部が刈谷市、製造部が西尾市にありクルマで約1時間程の距離であった。生産ラインに向かうと、作業者が「異音」で気づいた「不具合高圧ポンプ」が選別されて、「不具合品置き場」に置かれていた。分解調査すると、異音の原因はタペット部の「ピン」と「ボディ」間の焼き付きであることが分かった。ここで状況を整理すると、一般に調整工程では「従来ポンプ」のカム室は「軽油潤滑」でポンプを駆動していた。理由は「軽油」と「潤滑油」を同じ調整ベンチ上で「同時に使用したくない」からである。従来ポンプでは何十年も実施しており、何の問題もなかった。製造部は「従来と同じ条件」で「高圧ポンプの調整」を行っただけで、当然我々も「それでいい」と考えていた。残念ながら、試作時の「高圧ポンプ調整」ではカム室は「オイル潤滑」(これも従来通り)であったため、問題は抽出されなかった。早速、金属屋と精査・議論した結果、「軽油潤滑」としても、タペットピン部の耐焼き性は高圧ポンプとしては「限界に近い」と判断された。そこで加工性は悪くなる方向であるが、「ピン」を耐焼き性が高い材質へと変更した。この時、「原因」を掘り下げる時間的余裕もなく、社内外にも「耐焼き性に対して悪い方向の対策ではない」という判断で、「材質変更案」は採用されてしまった。

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

調整時の焼付きの問題が解決すると、少量生産は順調に進んだ。やはり、前任者の進め方に大きな問題はなかったかのように見えた。インジェクター調整時間など多少問題は生じたが、生産数量が増加するまでに検討することにして、1995年12月の少量生産開始を最優先した。最終単体耐久テストは問題なく終了し、八王子でのエンジン耐久テストも終盤を迎えていた。そして12月の初め、「第1の大問題」が発生した。エンジンメーカーが実施した「最終エンジン耐久テスト」3台全てにおいて、今度はタベットの「ローラーが破損」と連絡が入った。すぐに、現地に向かった。新幹線の中では調整時の焼付き問題処理が甘かったことを反省しつつ、対策案も考えながらメーカーの正門をくぐった。八王子の会議室に到着したのは、午後10時を回っていた。机の上に彼らの手で分解された部品が「破損したタベットのローラー」を中心に既に並べられていた。バラバラになったローラーを見た時は、さすがに顔色を失い、声も出なかった。恐る恐るメーカーの部長をはじめとする幹部の方々の顔を見上げた。その時、責任者のエンジン部長は開口一番(正直怒鳴られると思った)「伊藤さん、お互い眉間に皺を寄せても部品は良くなりません。ここは、冷静に話し合いながら、お互いの知恵を出し合しましょう」。この言葉で本当に救われた気持ちになったのを今でも忘れない。「3山カム」で従来より約3倍の負荷を「従来設計のタベットの部品」に掛けたため、その時発生した熱で短時間の疲労破壊に達したのでは?と考え、「材料の耐熱性」を上げることで意見は一致した。結局、「ローラー」の材質も、先に変更した「ピン」と同じ材質に変更して、「熱負荷に強くなった」確認耐久テストを行う事で合意したのである。八王子に向かう新幹線の中で思い巡らした「もう少し、掘り下げていれば…」という反省が頭に残ったが、材質変更品での数量を増した耐久確認テストの状況が良好であるという結果に掻き消されてしまった。結果的には、「生産移行が可」という判断をメーカーから頂くことができた。

1995年12月末から「世界初のコモンレール生産(限定100台)」が始まった。八王子のメーカーは歴史に残る「世界初のコモンレール搭載車の生産会社」ということになった。これまで悪評された「汚い」「臭い」「うるさい」というディーゼルトラック車のイメージを一掃することになったのである。我々も「世界初のコモンレール生産会社」として、日本の自動車技術240選「コモンレール」設計者:伊藤昇平」の一つに「多くの方のお蔭」で選ばれた。

年が明けた1996年、次なる開発は川崎のトラックメーカーの大型8気筒エンジン用の「コモンレール」であった。少量だが今度は継続生産であり、用途も大型エンジン用ということで、「コモンレール」には非常に厳しい条件であった。ただ、一方では「これからの試金石」となるアプリケーション開発であるとも言えた。慎重に試作品での性能、信頼性確認、量産行程品での品質確認を終えた。両者の関係者は、正直安堵の念を抱いた。その時、「第2の大問題」が生じた。またもや「エンジン最終耐久テスト」で、今度は「高圧ポンプが圧送しない」と不具合表示され、エンジントルクダウンに至ったとの連絡が入った。川崎への途中の刈谷駅のホームで、偶々担当役員に出会った。簡単に問題状況を報告し、今から現地に向かう旨を伝えた。「おい、倒れるなよ。俺の責任で何でもするから、言われた事は何でも受けてこい。」これで気持ちが軽くなった。現地で高圧ポンプを分解したところ、燃料を圧送するプランジャーがポンプシリンダー内部で固着していた。そこで、お互い不具合ポンプを持ち帰って、専門家を含めた徹底精査が行われた。問題を起こした最終耐久テストは、エンジンの負荷(トルク)も上げ、潤滑油の温度も上げるというエンジンメーカーのこれまでのノウハウで培われた内容のテストであり、当然他の部品の品質確認も兼ねていたが、この「コモンレールの不具合」が全体の耐久確認テストを中断させてしまった。高圧ポンプの「問題なし」部品と「問題あり」部品との形状精度等の比較精査を、西尾製造部の検査課で徹底的に実施した。しかし、結果は「両者の有意差」を見つけることができずに終わり、時間だけが経過していった。八王子のタベットの問題では、「3山に因る熱疲労」でローラーが破損した。今回、川崎の開発エンジンは8気筒であるため、高圧ポンプは「4山カム」を採用している。「まさか」という思いが走った。「タベットのローラー部は」先回の材質変更で何とか耐えた。一方、プランジャーがポンプシリンダー内を摺動する時、その熱発生も内部で約4倍に増えているはず。製造上のバラツキの中で焼付いたり、焼付かなかったりしているだけではないのか?プランジャー部は「焼付き限界」に来ている?とすれば、耐焼付き性を桁違いに向上しなければ、この問題の解決にはならないと思った。プランジャーとシリンダーのスキマは、「10μm以下」というレベルである。したがって、そのプランジャー摺動面の僅かなスキマに何らかの「数μmレベルで均一な表面処理(コーティング)」が必要になる。その時、部長格の一人が「研究テーマ」で生産技術研究部に依頼をしていた「ある表面処理方法」を思い出した。「今となっては、これを使ってみよう。」私を含めた全員が賛同した。メーカー側には研究テーマであると「注釈」を入れて、提案した結果「よし、やってみよう」ということになった。早速、表面処理を生産技術研究の「実験室」で行い、耐久テスト用高圧ポンプを製作し、エンジンメーカーに持ち込んだ。3台エンジン耐久テストを実施して全く問題なし、耐久後の部品精査結果でも問題は見つからなかった。これもバラツキ範囲ではという懸念の声もあったが、さらなる耐久テストで確認されていった。元々計画されていた「エンジン最終耐久テスト」も再開され、エンジンの他の部品を含めて「問題ない」ことがやっと確認されたのである。これにより、大型エンジン用コモンレールの生産が開始でき、川崎のメーカーは高出力エンジン搭載のトラクターヘッドを世に送り出すことができた。1996年の初秋を迎えていた。

その頃「世界初」を世に送り出した八王子のメーカーは、どのトラックメーカーよりも早く、国内長期規制(1998年)に対応したエンジン搭載車を生産しようとしていた。その先行機種は大型6気筒エンジンで、先の「世界初の中型エンジン」と比べると、エンジントルクは2倍程大きかった。しかし、我々の気持ちの中では、2度の「高圧ポンプ」の大きな不具合を経験したことにより、多少なりとも「120MPaコモンレール」に自信(過信?)を持てるようになっていたのである。第1、第2の「大問題」は、「高圧ポンプ部品」であり、原因は、使われ方がまるで異なっているのに、従来式ポンプの設計を安易に流用したことにあつた。ただ、その中であつて新規設計であるのに、インジェクターだけは不具合を起こさず、ここまで「耐えて」くれていた。インジェクターの初期設計の質が高いという他ない。「大きな試金石」を乗り越えた後の今回のアプリ開発は、大きな問題なく進むであろうと多少高を括っていた。実際、エンジン開発は、コモンレールを搭載して順調に進んでいた。1997年の暮れになると西尾工場が生産試作され、そのコモンレールを搭載したエンジンが最終評価段階に入っていた。「世界初」の時は、「最終耐久テスト」で問題を起こしていたが、今回は「大丈夫らしい」という情報が八王子のメーカーから入ってきた。しかし、何故か私の中では「落ち着かない何か」が潜んでいた。

そしてまたもや、「最終確認耐久テスト」で「第3の大問題」が起きた。1998年が明けた大雪の1月初め、長野冬季オリンピックの女子モーグルで初の金メダルを取ったと日本中が騒いでいるときであった。経過時間が100時間を過ぎた時点で、エンジントルクが「限界値」を超えるというのである。噴射量の指令値は一定であるため、これは明らかに「機械部品の経時劣化」による「噴射量増加」を意味する。八王子から大雪の中、何とか列車を乗り継いで耐久品を西尾工場に持ち帰った。インジェクター単体噴射量を調査すると、「噴射量増加」が確認できた。分解精査すると、何とこれまで見られなかったノズルシート部に「異常摩耗」らしきものが観察できた。恐らくこの「異常摩耗」によって、シート部のシート径が小さくなり、「噴射量が増加した」と推定され

た。シート径が小さくなると、開弁する力が大きくなり、同じ噴射量の指令値でも噴射始めが早くなって、噴射期間が伸び、噴射量が増加する。ここに来て、大丈夫と思っていたインジェクターの「基本的な問題」に遭遇してしまったのだ。すぐエンジンメーカーでも調査チームが編成された。私は西尾工場に開発技術員を引き連れて常駐し、この問題に当たることにした。摩耗に関しては、専門家である全社の品質管理部が精査した。何とか「面圧を下げる」案をいくつか考えて、その仕様を現場で図面化した。その図面をもとに、生産上の問題点を議論して耐久品を製作してもらった。もはや西尾製造部は、「耐久サンプル試作工場」と化した(大変申し訳ない事をしたが、エンジンメーカーの方々に「羨ましい関係」だと言われ、ある意味製造部を「誇り」に思った)。エンジンメーカー側は、実験部長が自ら西尾工場に常駐して、我々の対策内容の概要を八王子のチームに報告・承認取得をして頂いた。早速、対策品を生産ラインで製作。検査後、特配便で八王子に送り、短時間耐久テストに入るという手順であった。10~15時間で増加傾向は判断でき、その結果を基に議論し、更なる耐久品の仕様を決めるという日が続いた。月曜日から土曜日まで「対策品製作⇒エンジン耐久テスト」を繰り返し実施。日曜日には、メーカーから役員をトップとする調査チームを迎えて、西尾工場内で進捗状況報告会が開かれた。このパターンが1月中旬から始まり、いつ終わるとも知れない非常にタフな日々が続いた。その過労のためか、会議が始める前に「吐く」時も幾度かあった。「この仕事が終わったら、仕事を変えてもらう。もう体力的にも精神的にも限界だ。」と家族に気弱なことをこぼした記憶がある。

1998年3月梅の花が咲く頃、「60種類を超える耐久仕様」の中から、メーカーと議論の末、やっと「最終仕様」を選出した。そして数量を増して「確認最終耐久テスト」を行った。その設計仕様とは、ノズルシート部の「ヘルツ面圧を下げる」という極めて「Orthodox」な対策案であった。当初から改良案の中に「この仕様」は入っていたのだが、初期の耐久テストでは効果が表れなかった。経時劣化の要因の中に多くの外乱要因が絡み合っていて、正しい結果が得られなかったと推定した。その阻害要因を一つずつ取り除く(改良する)ことにより、「対策仕様品」が製造できるようになったのである。どちらかといえば、「この小改良」の積み重ねが効果的であった。いずれにしても、多くの方々の努力と貴重な開発費をかけて、「共通レールの標準仕様」がやっとここに出来上がり、八王子のエンジン・トラックは生産開始できたのである。その後は、この「120MPa 共通レール」をトラック向け長期規制対応用として、ディーゼル大型国内4社に展開したのであった。

その展開の中、「何故次々と生産間近かまで問題を抽出できなかつたのか」全社的に議論された。「高圧ポンプ」、「インジェクター」の「大問題」は、従来仕様のまま、使われ方が異なる「共通レール」に、そのまま適用したことが原因であることは明らかであった。ところが、全社の品質保証会議ではその点が全く議論されてなかった。会社としては「一事業部の問題」ではなく、「全社の」品質保証の考え方として捉えて頂いた。従来式噴射ポンプと「共通レール」では「変化点」は何か、それに対してどう手が打たれたのかを、今回の「120MPa 共通レール」を「好例」として総見直しすることになった。この全社活動によって「共通レール固有の知的財産」を残すと共に、「変化点」を議論するという「全社共通の開発手法」が生み出され、定着するようになった。「知的財産」「開発手法」は、次の「耐久棟」と共に「第2世代の乗用車用共通レール」の開発に大きく寄与することになる。もう一つは、エンジン耐久テストでなければ抽出できなかつた「大問題」を、単体耐久テストで抽出できるような、エンジン耐久テストをシミュレートした「耐久テストベンチ」を開発することである。これは全社予算により、品質管理部の責任で進められ、「耐久棟」建設も決まった。今後は、「単体限界耐久テスト」をこの「耐久棟の設備」で実施することが「生産移行決定の必要条件」となった。この耐久棟でのテスト結果は、当事者でない品質管理部で精査される。技術課題が抽出(指摘)された時は事業部が対策し、品質管理部が確認するという「流れ」が、共通レール開発の耐久確認の標準形になった。「共通レール」という製品は、事業部内は勿論のこと、全社組織の品質管理部、生産技術研究、そして言うまでもないが、メーカーの方々のご尽力があって開発されたもので、決して個人がなし得ることができない「エンジン部品」である。今回の開発でも、その事を示してくれた。1998年度日本機械学会賞(技術)、2001年度(第36回)機械新興協会賞<sup>9)</sup>を多くの方々の代表の一人として授与されたが、当然ながらこの開発に尽力された方々のお蔭であることも述べておきたい。

## 5 乗用車用共通レールの開発(1999年-2003年)

我々が「トラック用共通レールの開発」で苦勞していた頃、欧州ではBOSCH社が「第1世代乗用車用共通レール 135MPa」を1997年に生産開始して、徐々にディーゼル市場を拡大していた。その頃、我々の社内ではこれ以上事業部だけに開発負担をかけては技術員が潰れてしまうという判断で、1996年頃から全社組織の研究開発部にて「第1世代の乗用車用共通レールの開発(135MPa)」を開始していた。そして、ある程度「形」になった1998年頃に開発研究部から担当した全研究員が事業部に移籍して、これまでの「技術蓄積」、「開発手法」を取り入れて総見直しを行ない、1999年乗用車メーカー向けの生産に漕ぎ着けた。BOSCH社に遅れること、「2年」であった。そして、「第2世代乗用車用共通レール」も私の担当(リーダー)に加えられた。

出典:MotorFan illustrated NO.25「ディーゼル真の力量(2005年@BOSCH)」@三栄書房;p21 より加筆

20世紀末、欧州の乗用車業界では「風雲急を告げる」状況になっていた。トラック用で「世界初」を獲得したが、「乗用車用共通レール」ではBOSCH社に遅れを取った形になっていた。しかし、正直「その事は、我々の意識の中には全くなかった」と言ってもいいであろう。日本市場だけ見れば、ディーゼル乗用車の排気ガス規制は当時世界で日本が最も厳しく、そのディーゼルシェアは「0%」に近い状態が続いていた。これを見ていた営業側が「欧州市場は「BOSCH共通レール」でディーゼル乗用車のシェアが急上昇<sup>6)</sup>(図7)。

今この時が、欧州拡販の大きなチャンス。競合先よりも、「何か技術的に卓越した特徴」を持つ「第2世代」を開発してくれないか」とかなり積極的な要請をしてきた。確かに「BOSCH共通レールの登場」で欧州ディーゼル乗用車のシェアは「20→30%台」

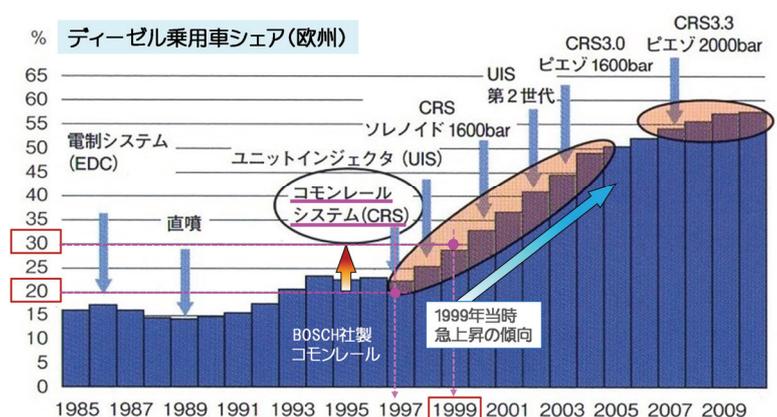


図7 欧州乗用車ディーゼルシェア

へと上昇し、さらに伸びる「勢い」が予測された。この急速なディーゼル化に対して、新たに競合他社が「2社」も出現していた。BOSCH社を含めた競合3社を相手に、「4社目」の手を上げるべき、というのが営業の総意であった。各競合他社の動向を現地で調査すると、2000年の初めに「更なる高圧コモンレール」を投入して、欧州メーカーの「新モデル」に搭載してもらうべく、拡販活動のコンペが既に始まっているという。その情報から、BOSCH「160MPa(2001年)」、Continental(当時Siemens)「150MPa(2003年)」、Delphi「150MPa(2003年)」ということが分かってきた。したがって、「理論的根拠は別」にして、コモンレールの最も重要な基本性能である「レール圧」を、最大である「BOSCH社の160MPa」を超えることが、絶対必要条件であると営業側は訴えた。事業部側もこれに同調、必然的に「第2世代乗用車用コモンレールの目標レール圧は”180MPa”」になったのである。

まず事業部側のすべきことは、「180MPa化」に対する「従来からの変化点は何か」という観点で、部品、制御法、製造方法などを全て洗い出すことになった。一方、欧州拡販活動に対して、営業側から「事業部へ更なる提案」があった。「競合3社」の最近のアプローチの中で、当時の我々に「欠けている点」が、次の2項目であるというのであった：

- ① 標準制御仕様書(コモンレール・エンジン制御など)の提示
  - ➡この「仕様書」にてほぼ「7割程」の完成度のクルマができる。さらに「仕様書」の中にある「エンジン適合手順書」でクルマの味付けを変えることができる。この「秘伝書」のような「仕様書」が各社に存在するというのである。部品納入後のエンジン、クルマの適合は、「メーカーにお任せ」という、これまでの「日本の慣習」とは明らかに異なっていた。
- ② 欧州本土での「エンジンラボ、テストコース」、「コモンレール生産工場」の建設、見学

「欧州拡販」を軽く考えていたわけではないが、「180MPa化」という基本的な技術課題の他に、前述の「2つの課題がある」と知らされた時は、さすがに「頭を抱えた」。まずは、各項目に対して個別に議論を進め、下記の進め方で営業側と合意した。

- ① 第2世代(180MPa)コモンレールシステムの開発：
  - ➡2001年初めに試作サンプルをメーカーに納入できるよう開発。ある間隔で営業側にも開発の進捗状況を報告。開発途中からでも拡販活動(主に技術プレゼン)は開始。
- ② 「標準制御仕様書(英語版)」の開発：
  - ➡従来の仕様書を基に、開発(改良)に着手。「試作サンプル納入時」に間に合わせる。
- ③ エンジンラボ、テストコース、コモンレール工場の欧州本土建設およびその見学：
  - ➡UKにて「稼働中の欧州ラボ、テストコース」、欧州本土にて「稼働中の従来電子制御ポンプ工場」をそれぞれ見学して頂く。商談成立後、共に欧州本土の建設に着手する。

「第2世代の開発」の要点である「180MPaへの高圧化」には、当然ながら非常に多くの技術的課題があった。その中でも大幅に変更する必要があったのは、「高圧ポンプ」であった。第1世代(135MPa)では、圧送方式に「インナーカム」を採用していた。ただ、このまま延長した「高圧化」では、ポンプの駆動トルクが相当増加し、これによる音、振動、信頼性面で致命的な問題になることが予想された。一方で、当時開発評価中の「次期型トラック用コモンレールの高圧ポンプ」には「偏心カム方式」を採用していた。理由は、レール圧の高圧化には「圧縮波」が必要なのではなく、「高圧燃料の圧送」が必要だからであった。そこで、「第2世代」にも同じ容積型の「偏心カム方式(図8)」に変更することを決めた。

出典:内燃機関シンポジウム「コモンレールの開発と進化」@2011.12 より加筆

## 180MPaコモンレールの高圧ポンプ断面図@デンソー

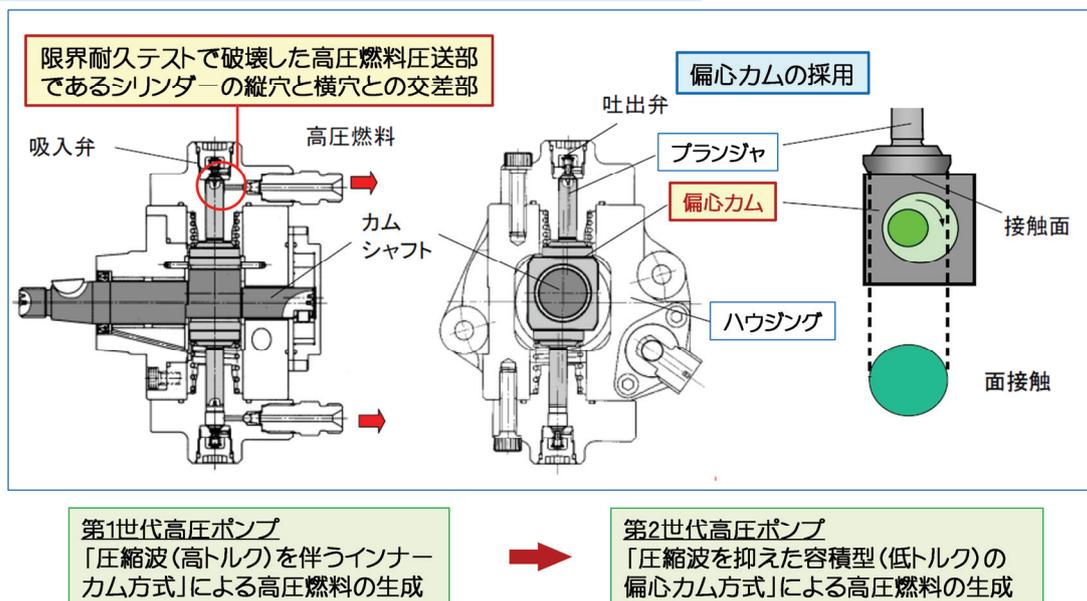


図8 高圧ポンプ@180MPa コモンレール

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

試作品の噴射性能は順調に目標値を達成した。また耐久テスト評価は、例の「耐久棟」で実施された。第1段階では「変化点」に多くの「改良・工夫」が功を奏して、順調に「レール圧 180MPa」をクリアした。ところが第2段階の「限界耐久テスト」で、「200MPa」を超えた辺りからポンプ、インジェクターが次々に疲労破壊していったのである。「180MPaの耐圧余裕度が全くない!」。その疲労破壊個所は、共に最も応力集中する「高圧燃料通路の縦穴と横穴の交差部」。亀裂開始点近傍を電子顕微鏡にて精査すると、そこに大きな(≒300μm)介在物が必ず存在した。鉄鋼会社と議論の末、介在物の「大きさ」を、できる限り最小化する「材料開発」を依頼した。しばらくすると、大きさを何とか「1/3以下」にすることができるようになったと報告を受けた。早速この「新材料」で試作し、限界耐久テストで確認をした。その結果「何と230MPaまで破損しない(当時の設備上の限界)」ことが確認できたのだ。鉄鋼会社の方々の「成果」だった。また、「メーカーの最終耐久テスト」での不具合を繰り返していたこれまでの「開発」とは全く異なり、「社内の限界耐久テスト」にて問題を抽出できたことも、「大きな成果」の一つであった。

「標準制御仕様書」も完成し、いよいよ欧州拡販の準備は整いつつあった。そんな状況下、「欧州も主戦場」とする広島乗用車メーカーが2002年モデルのディーゼル車に「第2世代」の搭載を強く要望してきた。我々にとっても「渡りに船」の申し入れであり、いきなり欧州メーカーで「第2世代のアプリ開発」をするよりも、国内メーカー(特に、日本語が通じる利点はやはり大きい)で開発をしたいと考えていたところであった。「ワンステップ踏むことができる」と思い、すぐこの「申し入れ」を受けた。このアプリ開発が成功裏に終われば、欧州拡販活動の中で「実績の一つ」として強く主張できる。さらに有り難かったのは、「第2世代の開発」が「途上」であることを十分考慮して頂いた。つまり、「第2世代」を開発状況に応じて、エンジン・クルマでカバーするか、「第2世代」の開発に参画して、アイデアも出すというのであった。加えて生産開始後の他社拡販に対して、何の制限も要求されなかったのである。ただし、その反面「疑問」は残った。何故そこまで、「我々」に一歩譲るのか? 欧州市場ならば、何故「BOSCH コモンレール」でエンジン開発を行わないのか? 当時欧州メーカーは、2002年モデル(EURO3規制対応)でも「インセンティブ(税の軽減措置)」を得るために、「2005年 EURO4規制(注2)」達成を目指していた。この厳しい「EURO4規制」に対応するため、高価な後処理「DPF(注3)」を装着して「PM」を低減することが「標準」と考えられていた。一方、広島のメーカーでは「こう」考えたのでは思う。「コモンレールの高圧噴射特性を適用拡大して、「DPF無しでEURO4規制を達成」すれば、欧州メーカーとの差別化ができるが、「BOSCH コモンレール」では欧州側に知られてしまうし、「160MPa」の研究結果では、レール圧がまだ不足。パイロット噴射量(図9)精度も良くない。」そんな時に我々の「第2世代」の情報を知り、「第2世代の180MPa」に惹かれて、「日本の我々」に声を掛けたのではと推定している。

出典:MotorFan illustrated vol.25「ディーゼル真の力量」@三栄書房;p25 より加筆

## コモンレールによる多段噴射

### ①Pilot噴射

→ 予め燃焼室内に混合気を形成して「着火遅れ」を小さくし、着火性を高めるための噴射。  
燃焼音、振動の低減の他、始動性向上や燃費向上にも貢献

### ②Pre噴射

→ メイン噴射前に燃焼室内に種火がつくられ、主燃焼が滑らかになる。NOx発生の抑制になり、噴射時期を進角できるため燃費も向上(パイロット噴射に類似しているが、メインとの噴射間隔は非常に小さい)

### ③After噴射

→ 燃え残った噴霧を完全燃焼させる。また排気温度上昇により、触媒活性化も狙う。

### ④Post噴射

→ 1) 酸化触媒による酸化で排気温度を上昇させ、「DPFの強制再生」を実施  
2) 未燃分によるCO/H<sub>2</sub>の発生でNOx触媒(LNT)でトラップしたNO<sub>2</sub>をN<sub>2</sub>に還元

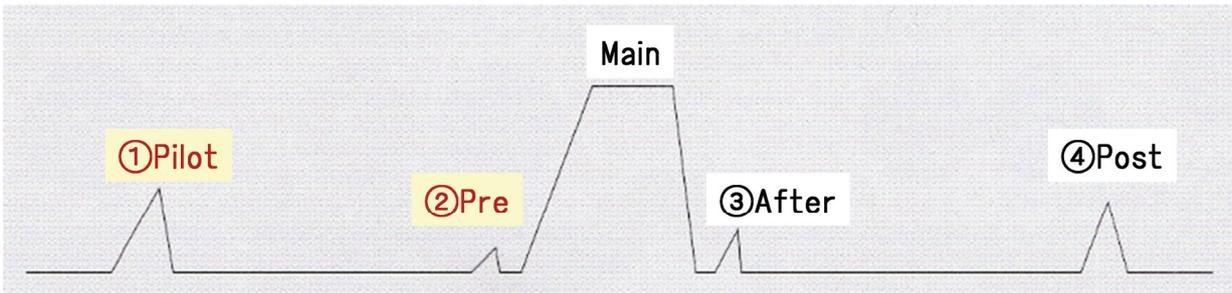


図9 コモンレールの多段噴射

まず、メーカーの技術者は「アイドル音をもっと静かにしたい。」とだけ言ってきた。一般には、アイドル時に「パイロット噴射」を適用して燃焼音を低減するが、彼らは多段噴射(5回分割噴射、ただし生産時には3段パイロット噴射、つまり4回噴射に変更された; 図10)を導入したいという申し入れだった。何故それほどまでに「アイドル音」に拘るのか、その時は理解できなかった。ただ、試験車のアイドル音を聞かされた時はさすがに驚いた。「伊藤さん、このエンジン音を聞いて下さい。このディーゼルアイドル音は、世界中どこにもない音色ですよ。これを生産したい」。確かに、これまで聞いてきた「ディーゼルアイドル音」とはまるで次元が違っていた。だが、「問題」はここからである。彼らの微小噴射量の精度要求値を聞いて驚いた。「噴射量精度を”1 ± 0.5mm<sup>3</sup>/st”にできませんか」。その時の私の答えは、即座に「NO!」であった。噴射量のイメージがない方々には、いつもこの例で説明する。2Lのディーゼルエンジンの最高出力点での噴射量は「約 50mm<sup>3</sup>/st 程度」で、これは「耳かき1杯に相当」する。今回の精度要求値は、その「100分の1」というとんでもない「微量」なのである。インジェクター部品の加工精度、選択嵌合組み付けを駆使しても、当時我々の噴射量精度の実力は、レール圧 = 25MPa(アイドル時)で、「2 ± 1mm<sup>3</sup>/st」程度であった。レール圧が上がれば、さらに拡がる。広島のエンジン実験棟の会議室で、その当時でも珍しい”黒

板”に白のチョークで書いて説明した覚えがある。「アイドル時の噴射量精度向上ができれば、実はその結果を”排ガスモード領域の高圧領域まで展開”したいと考えている。」(ちょっと待てよ, ”高圧領域への展開”・・・?)「第2世代」を欲しがり, 「微小噴射量精度の向上」を要求してきた理由が, ここに来てやっと理解できた。「DPF無しでEURO4規制をクリア」することを彼らは「研究」ではなく, 「開発」のレベルで実証していたのであった。それには「160MPaより高圧な”第2世代180MPa”と”微小噴射量の精度向上」がどうしても必要だった。「高圧噴射特性」の適用を拡大して, 「DPF無しでEURO4規制をクリア」できたとしても, 最後に残る大きな問題は, 「高圧噴射特性によるエンジン燃焼音の増大」である。その「燃焼音」を和らげるには, 微小噴射精度が高い「パイロット(プレ)噴射(図9)」が必要となる。広島エンジンの開発者は, 「その事」を既に「BOSCH160MPa」「第2世代」の両方を駆使して「データ」として掴んでいたのだ。彼らは従来の「噴射系の呪縛」から解放され, 「コモンレール」を面白いように駆使し始めていたのであった。

出典:第3回クリーンディーゼル普及・将来見通しに関する検討会資料@2008年4月 より加筆

### 広島エンジンの(EURO4対応)に適用された多段噴射マップ

注) NVH⇒ Noise Vibration Harshness (音振動による乗員の不快感に意味)

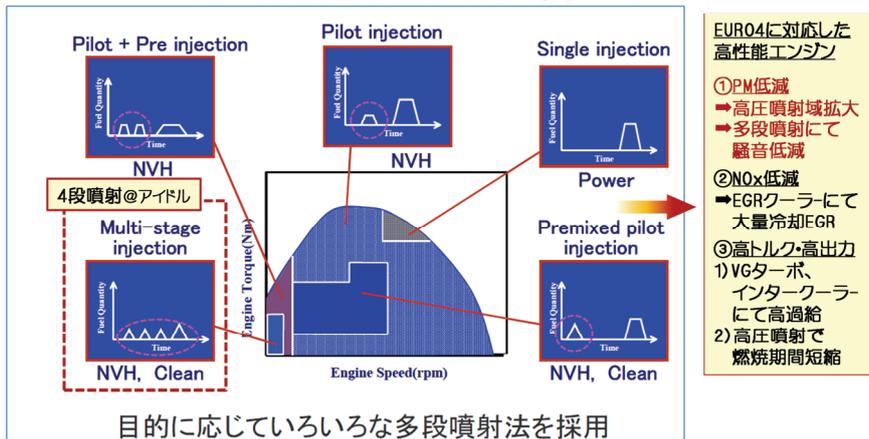


図10 「第2世代」の多段噴射マップ

「実験データは, お見せできないが既に手元にある。EURO4規制は”DPF無し”でクリア。アイドル音もモード領域の燃焼音も非常に静かです。”180MPa”に”微小噴射量精度向上”が「第2世代」に加われば, ”世界初, DPF無しでEURO4規制をクリア”でき, ”世界一静かなディーゼルアイドル音”が得られる。」彼らの「想い」を聞くことで, ここに来て我々の「心」も動いた。そして, 「世界初」「世界一」の響きが”こよなく心地良かった”。ここまでの「機械的な不具合対策」の「世界初」とは全く違った。彼らにとって, 「新エンジン」に「第2世代」を搭載することは「ジョーカーを切ること」を意味していた。そして我々もこの「第2世代」で, 念願の「BOSCH社に対する”勝利”」を得ることができるかもしれない」と思い始めた。

しかし, 微小噴射量の要求精度は「 $1 \pm 0.5 \text{ mm}^3/\text{st}$ 」なのである。それも高圧噴射域まで拡大したいという要求である。議論の末, 次の内容で進め方の合意をした。インジェクターの噴射精度向上は, 1)加工精度向上, 選択嵌合組付けの実施, 2)固体間バラツキを抑制するため, 「2次元バーコードによる噴射量補正」も実施。さらに微小噴射量精度向上のため, 3)アイドル時のパイロット噴射量を補正する制御ロジックを開発(エンジン台上), 4)この制御ロジックを「高圧噴射領域までの拡大化」, することであった。こうして, 「微小噴射量精度向上の開発」も大きく動き始めた。3), 4)に対して, 「エンジンが大好きな」技術者を一人だけ(機密厳守の意味)広島エンジンの実験室に常駐させて頂き, 制御開発に必要なエンジンデータを採取した。その結果を基にメーカーの技術者と知恵を出し合って, その補正制御ロジックの開発を行ってもらった。

しばらくすると, 要求値に近い「エンジンデータ」が得られ始めた。数ヶ月経つと, 数量を増した試作エンジン・車両にて, 「”DPF無し”で高圧噴射によるEURO4規制クリア, 「多段階噴射による静粛なアイドル音」という「世界初」「世界一」の結果が確認されていった。2001年も暮れようとする時の出来事であった”(図10.11)。

出典:第3回クリーンディーゼル普及・将来見通しに関する検討会資料@2008年4月 より加筆

### 広島エンジンの(EURO4対応)システム図

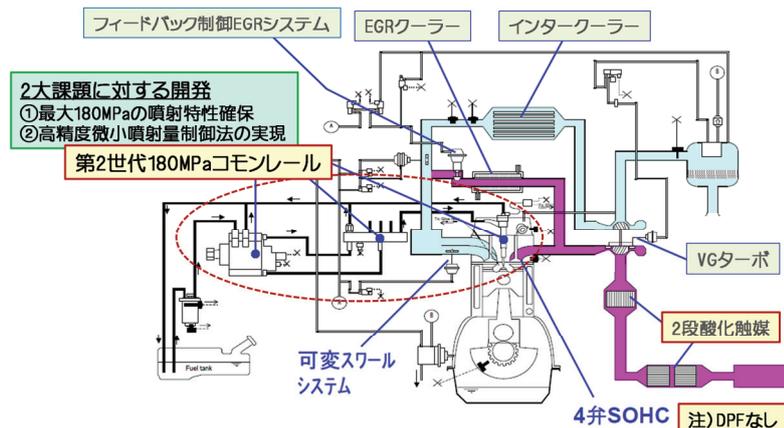


図11 「第2世代」のエンジン搭載図

生産計画に対して半年程遅れたが、2002年3月広島で生産開始され、5-6月に欧州で販売開始された。このクルマは欧州のエンジンメーカー、一般顧客にも高い評判を呼んだ。特に、「DPF無しでEURO4規制クリア(この精神は今でもこのメーカーには残っている)」は専門家を驚かせた。最大180MPaとする高噴射圧特性を適用しているのもかわらず、高精度のパイロット噴射により最近の欧州エンジンよりも静かであること、とりわけアイドル音の静けさは、欧州の一般ユーザーを喜ばせた。広島のエンジンメーカーは30を超える”賞”を「エンジン」「クルマ」で頂いたと聞いている。我々も「2002年度日刊工業新聞十大新製品」の一つに選出された。翌年には「トヨタプリウス」が選ばれるという、非常に名誉ある賞であった。

その頃、私にとってはさらに「嬉しい知らせ」が、当時の担当常務へ「BOSCH社」から届いていた。部屋に呼ばれて入っていくと「伊藤君、BOSCHから電話が入ったぞ」。話の趣旨はこうであった。「180MPa コモンレール生産おめでとう！心からお祝いを言わせてもらおう。お蔭でBOSCH社内は大騒ぎになっている。」入社して間もない頃、BOSCH社による「尊大に聞こえたプレゼン」を「壁の染み状態」で聞いた時の「あの悔しい思い」が頭の中をよぎった。「やっと、BOSCH社に一瞬でも”勝つ”ことができた！」1977年に入社して、既に26年の歳月が流れていた。

この”事件”を機に欧州拡販活動に「拍車がかかった」のは言うまでもない。欧州メーカーからの「第2世代」の受注のお蔭で、100万台/年を超える生産工場、欧州ラボも欧州本土に建設された。さらに、コモンレール開発はアクチュエーターを「ソレノイド」から「ピエゾ」に変えたインジェクターを有する「第3世代の開発段階」に移っていた。第1回全社の品質保証会議で私自身が2時間以上も掛けて説明し、会社承認も得た。私のコモンレール人生は「ぱつ」と勢い良く拡がって行くはずであった。しかし・・・がしかし、1年後に突然「その終わり」がやってきた。

「まさか」の終わりであった。2000年に会社の産業医から「心臓弁膜症」を患っていることを知らされていた。半年に1回エコー検査を受けるという「経過観察中」だったので「軽度」であると思っていた。2003年5月のある日、専門医のカテーテル検査を受診したところ、半年後には「心不全」になる可能性があることが聞かされた時は「目の前が真っ暗」になった。家族、上司に相談して、2003年7月末に「人工弁置換手術」を受けることに決めた。手術後の経過も良く、担当医からは「元の職場」に戻っても差支えないという「お墨付き」を頂いた。だが「会社側」は、厳しい環境の事業部で、このまま続けさせることは「命にかかわる」と考え、私にとって「厳しい判断」をした。「コモンレール人生」を次のリーダーに渡すように辞令が出され、他の「研究開発の道」を準備してくれた。2003年12月末、次の新しいリーダーにバトンを渡した。部内全員の前で花束を頂いた時は、さすがに目頭が熱くなった。ディーゼル噴射装置に係る仕事、特に思い出に強く残る「コモンレール開発」をさせて頂き、27年間多くの方々にお世話になりっぱなしであること、ご迷惑もお掛けしたこと、この場を借りて御礼とお詫びを申し上げる次第である。

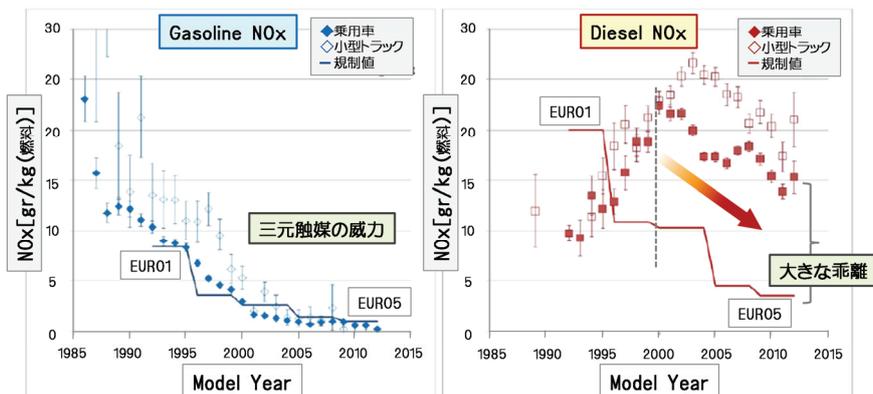
以上が約10年に渡る「私のコモンレール人生」の嘘偽りのない「話」である。その後は、「新しい仕事」に全く馴染めず(50歳を過ぎても子供のように仕事の好き嫌いがはっきりしており、特に管理職業務は最も不得意であった為、大変ご迷惑をかけた)、何の成果も語る事ができない不毛の「7年間」を過ごした。そして10年に及ぶ「コモンレールの開発」で「燃え尽き症候群状態」が続いたため、2011年1月に「抜け殻状態」で自己都合退職をした。その後「心と体のリハビリ」と「次なる準備期間」を経て、2012年9月に人生の再起を賭け「くわな科学技研」という「技術コンサルタント事務所」を起業。「活動」を始めた2年後の2014年7月4日に、次は「大動脈解離」を発症。緊急手術直後は「生死の境」を彷徨ったが、奇跡的に九死に一生を得て2014年11月末に何の後遺症も無く、無事退院。現在は自宅で療養しながら、PCに向かって原稿、資料を作成したり、時折関東方面で「講演会」、「自動車セミナー」などを行うという「やっと身も心も落ち着いた穏やかな日々」を生まれ故郷である桑名市の田舎町で過ごしている。

## 6 今思うこと

「コモンレール開発」という仕事から離れた2003年末から12年半経ったが、後輩の方々の努力により、最大レール圧は「280MPa」に迫り、インジェクター単体で補正制御をする”頭脳”を内蔵しているという画期的な最新状況を聞くと大変うれしく思う。ただし、一方ではコモンレールの役割が、単にエンジントルクを発生させる「燃料噴射装置」というだけでなく「ポスト噴射」による「DPFの再生制御」、「LNT(注4)のN2還元」にまで「標準機能」として拡大している。それを製造する側にも、使うメーカー側にも、その「使用責任と市場への影響」の重大さは、従来に比較にならない程、大変重くなった様な気がする。VWの不正ソフトの問題、またそれに関連してICCT(注5)の報告<sup>8)</sup>により、「モードNOx排出量」と「実路NOx排出量」との差が、「ガソリン車」に比べて「ディーゼル車」は非常に大きいこと(図12)がクローズアップされてきた。

出典:Real driving emissions「Challenges to regenerating diesel engines in Europe(2015.03.11)」@ICCT より加筆

欧州NOx規制値(EURO1~EURO5)と実路(チュールッヒ)での測定結果@ICCT(2014年10月)



「シャーシダイナモによるテストモード値」と「実路での測定値」の差が、ディーゼル車は大きい！

図12 欧州 NOx 規制値と実路値

それによると、実路では欧州車のNOxの排出量は、「EURO5」で規制値の「4.4倍」、「EURO6」で「7.5倍」の量を排出しているようだ<sup>9)</sup>。広島メーカーは、相変わらず”自慢のエンジン改良(低圧縮比)”で「DPF付NOx触媒無し」でも「EURO6規制をクリア」しているが、実路で規制値の「3.6倍」のNOx量を排出しているらしい<sup>10)</sup>。明らかに、ストイキ燃焼で「三元触媒」が使える「ガソリン車」に比べて、「ディーゼル車」は今後の「排ガス規制」「新排ガスモード”WLTC,RDE”」を考えると、「後処理付エンジン」だけでは限界にきていると言わざるを得ない。また「ディーゼル車」の最大の利点である「燃費面」でも、CO2の排出量において「2020年欧州規制(95g/km)」が限界であり、「2025年規制(68~78g/km)」ではクリアできないと、「ICCT」では予測している<sup>11)</sup>。「ガソリン車」は当然のことながら、「ディーゼル車」も「燃費面」でも非常に厳しい状況に追い込まれてきた気がする。ただし、欧州路を走るならまだしも、この狭い国内でCMの「走り」に踊らされ、「国内余剰軽油の消費」という目的で、「実路」で有害なNOxを規制値の何倍も撒き散らす「ディーゼル乗用車」は、本当に「美しい日本」に必要であろうか？と思うことがある。

此の所、自動車講義、自動車講演会でお話させて頂くようになってから思うのは、専門知識に疎い機関投資家の方々の方が、「自分」のクルマに”酔いしれる”、”執着している”メーカーの管理職の方々よりも、”冷静に”世界の「時代の波」を感じ取っておられる気がする。恐らく彼らは「株(お金)」の動きが生命線であるため、世界中の”時代の流れ”を的確に読む必要があるからだ。彼らによれば、電気社会、水素社会のインフラが遅々として進まない中、「排気ガス規制」「燃費規制」の両面だけでなく、「ADAS(注6)」を含めた「自動運転への進化過程」からも、必ず「クルマの(大きな)電動化」は必要になると考えている。したがって「世界のクルマの主演」は、「2050年頃」まで「ハイブリッド車(HV)」、「プラグイン・ハイブリッド車(PHV)」であると予想しているのである。残念ながら、百年の長きに渡って活躍してきたガソリン乗用車(”ベンツモートルパーゲン@1885年”~)、ディーゼル乗用車(”ベンツ260D@1935年”~)の時代は、確実に終焉に向かっていていると思われる。何よりも日本市場では、クルマを購入する一般の方々も、「2015年新車販売台数」BEST10<sup>12)</sup>によると「HV」と「軽自動車」を選んでいる<sup>13)</sup>(図13)。ディーゼル乗用車に逆風が吹き荒れる中、「最新の共通レール技術」で「全域PCI(注7)燃焼」を達成した”ディーゼルHV(PHV)”が、「排ガス規制」「燃費規制」など軽くクリアして、ガソリンHV(PHV)と同程度の価格帯で、どこかの市場に現れるのを今から楽しみに待っている。

出典:「2015年(1-12月)の車名別新車販売台数」日本自動車販売協会連合会 より加筆

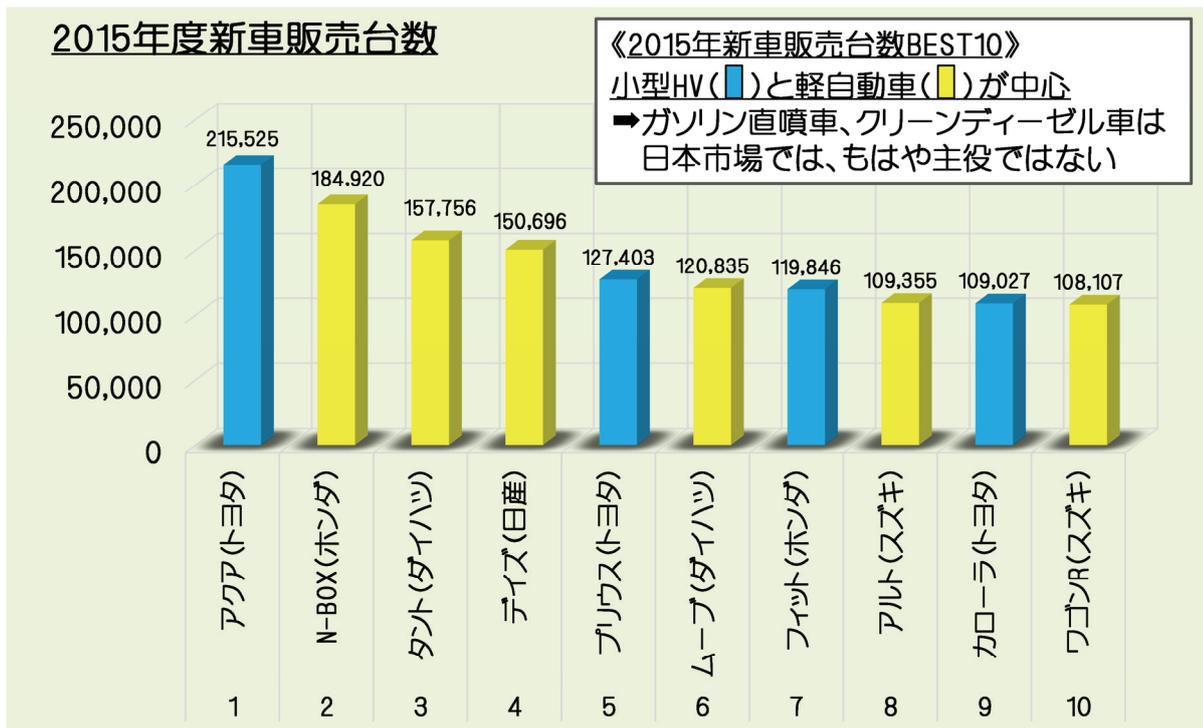


図13 日本の顧客が選んだクルマ

《追記》

重ね重ね今回の執筆の貴重な機会を与えて下さった東工大小酒先生、自技会事務局の方々に感謝致します。また、還暦を過ぎても短気で気まぐれな私を終始応援し続けてくださっている愛妻伊藤仁恵さんに心から感謝する次第です。研究者、技術開発者の皆さん、私が言えることではありませんが、心と体の健康にだけは十分留意して、研究、技術開発を「存分に楽しみ」ながら、多くの方が納得する素晴らしい「Made in JAPAN」を創出して下さい。

注1) サーマルNO=1500°C以上の雰囲気下で、雰囲気中の窒素が酸化して生成される一酸化窒素(NO)のこと。  
 注2) EURO4規制=2005年欧州排気ガス規制。NOx, PMの排出量がEURO3(2000年)規制値に対して半減となる、当時としては厳しい排気ガス規制。  
 注3) DPF=Diesel Particulate Filter(PMを捕獲するセラミックスフィルター)  
 注4) LNT=Lean NOx Trap(リッチ時にNOxを吸蔵して、リッチ時にN2に還元する触媒)

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

注 5) ICCT=International Council on Clean Transportation(国際クリーン交通委員会)

注 6) ADAS=Advanced Driving Assistant System(読み方は「エーダス」) ➡

自動車の先進運転支援システムのことで、加減速、制御のいずれかを自動車が行う状態(レベル1。ちなみにレベル4は完全自動運転)。緊急ブレーキなどで実用化されている。

注 7) PCI=Premixed Compression Ignition(ディーゼル燃焼の予混合圧縮自着火方式; 現在では限られた領域しか成立しないため、三元触媒が使えない)

## 【参考文献】

- 1) 「ディーゼル新時代」MotorFan illustrated vol.1(2006年11月)@三栄書房;p47(本文図2)
- 2) 「コモンレールの開発と進化」(2011年11月)@内燃機関シンポジウム(本文図3,4,5,6,8)
- 3) 「内燃機関講義上巻」長尾不二夫@養賢堂;p260
- 4) 「噴射ポンプ」(コモンレール式)@Wikipedia
- 5) 「機械振興」2001年12月@機械振興協会;p4
- 6) 「ディーゼルエンジン真の力量」MotorFan illustrated vol.25(2008年11月)@三栄書房;p21,25(本文図7,9)
- 7) 「第3回クリーンディーゼル普及・将来見通しに関する検討会資料」@2008年4月(本文図10,11)
- 8) 「Real driving emissions”Challenges to regurating diesel engines in Europe”(2015年3月11日)@ICCT, p4(本文図12)
- 9) 「Laboratory versus real world(2012年11月7日)@ICCT;p2
- 10) 「どのディーゼル車がクリーンか」日経 Automotive(2016年3月)@日経 BP 社;p64
- 11) 「EU CO2 Emission Standards For Passenger Cars and Light-Commercial Vehicles(2014年1月)@ICCT;p6
- 12) 「2015年(1-12月)の車名別新車販売台数」@日本自動車販売協会連合会(本文図13)

# ディーゼル燃料噴射装置の現状と将来

足立 尚史, 芹澤一史

Naofumi ADACHI, Kazufumi SERIZAWA

株式会社デンソー

DENSO CORPORATION

## 1 緒言

近年の急激な地球環境悪化に対して、種々の地球温暖化対策が進められている。このような中、ディーゼルエンジンは燃費性能が良く、さらにCO<sub>2</sub>の排出量が少ない為、地球温暖化防止に貢献する内燃機関として注目されている。ディーゼルエンジンの燃焼は、燃料の噴射制御による自己着火により得られる為、燃料噴射装置の性能がディーゼルエンジンの性能を大きく左右する。燃料噴射装置としては、かつては機械制御式のジャークシステムが主流であったが、現在は電子制御式のコモンレールシステムが主流となっている。コモンレールシステムに採用されるインジェクタは、年々厳格化される排出ガス規制、燃費規制に対応する為、噴射期間の短縮と燃料噴霧の微粒化による燃焼効率向上を目的とした燃料噴射圧の高圧化が求められる。更に、化石燃料枯渇の危惧から燃料の多様化への対応が重要である。そこで、2013年より燃料噴射圧250MPa、燃料ロバスト性を向上した第4世代ソレノイドインジェクタ(G4S インジェクタ)を量産化した。

一方、今後のエンジン開発の動向としては、欧州・アジアを中心に、エンジンのダウンサイジング化がさらに進むことが予測される。これらの小排気量エンジンに適応した次期噴射装置のニーズとしては、更に燃焼効率を向上させる為、燃焼室壁面への冷却損失を抑制しつつ燃焼速度を向上する必要がある。その為、時間的・空間的に最適な燃焼を達成する噴射装置の開発を進めている。

本解説では、現在量産している G4S インジェクタと開発中の次期燃料噴射装置について紹介する。

## 2 噴射装置の現状(G4S インジェクタ)

### 2.1 G4S インジェクタ開発方針

開発方針を考えるにあたり、まず排出ガス規制対応として重要な噴射圧力の目標値を200MPa~300MPa<sup>1), 2)</sup>と定めた。この高圧化により、噴射燃料は微粒化され、年々厳格化の進む排出ガス規制に長期間対応可能となる。この高圧噴射可能なインジェクタを将来に渡り世界中の市場に展開する上での最大の課題は燃料ロバスト性の向上と考えた。多様化する燃料においては、燃料性状が悪いものが存在し、この燃料が使用されるとインジェクタ内部に以下の4つの悪影響が出ることが懸念される。

- ①デポジット生成による摺動部の固着
- ②錆の生成による摺動部の固着
- ③摺動部位の摩耗
- ④摺動部の焼き付き

これらはインジェクタの機能不良に繋がる。性状の悪い燃料に対してインジェクタのロバスト性を上げる設計手段として、燃料の高温劣化による変質を防ぐ静リークレス、スイッチングリーク最小化によるインジェクタ内の燃料温度の低減が有効であると考えた。ここで静リークとは、高圧燃料部と低圧燃料部を隔離する微小隙間の摺動部を通じて、高圧部から低圧部に流出する燃料量、スイッチングリークとは、制御弁を通過する燃料量を示す。

### 2.2 G4S インジェクタリーク最小化の実現

図1に示すように、第3世代ソレノイドインジェクタ(G3S インジェクタ)では、コマンドピストンの存在によって微小隙間の摺動部を通じて静リークが発生する。コマンドピストンの機能としては、図1右図に示すように、噴射終了時にノズルニードルに閉弁力を発生させ、ノズルニードルの高速閉弁を実現している。静リークレスを実現するためには、コマンドピストンの無い構造が必要であるが、閉弁力を失いノズルニードルの高速閉弁が得られない。コマンドピストンの無い構造で高速閉弁を得るためには、流入(IN)オリフィスの拡大が有効である。しかし、図1左図に示すように、G3S インジェクタの制御弁<sup>3), 4), 5)</sup>は2 Way Valve(2WV):シート部1箇所の構造であり、ノズルニードル開弁中においてもINオリフィスから制御室への流入があるため、INオリフィスからの流入量はノズルニードル開弁速度に影響する。

そのためINオリフィスの拡大には制限があり、2WVの制御弁では静リークレスの構造が困難であった。したがって、静リークレスを実現する

## 3<sup>rd</sup> Generation Injector (2-Way-Valve)

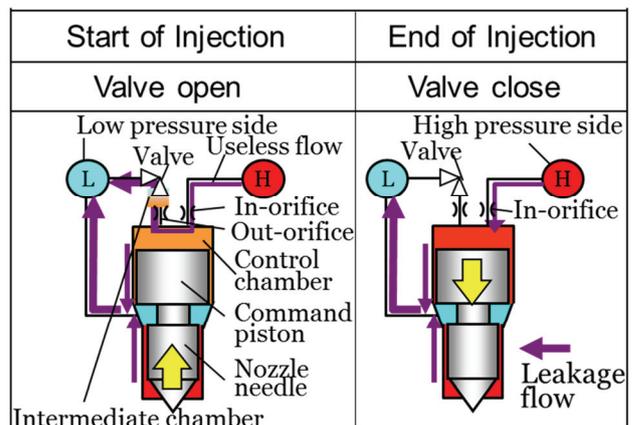


Fig.1 Concept of Control valve and Nozzle movement 3<sup>rd</sup>. Generation Injector (2Way Valve)

ためには、図2左図に示すような、ノズルニードル開弁中に、IN オリフィスから制御室へ流入しない制御弁、つまり 3 Way Valve(3WV) :シート部 2 か所が必要である。一般的に高圧の燃料の流れを 3WV を用いて制御する為には、インジェクタに搭載可能な体格においても大駆動力が得られるピエゾアクチュエータが用いられてきた。G4S インジェクタに採用するソレノイドアクチュエータは、長寿命でグローバル生産が容易という利点はあるものの、駆動力が小さく、3WV にて高圧燃料流を制御するのは困難であった。そこで実構造は 2WV でありながら、3WV の機能を有する新制御弁の開発に取り組んだ。小さなソレノイドアクチュエータの駆動力においても、200~300MPa の高圧燃料の流れを制御可能とするには、制御弁を通過する流量、つまりスイッチングリークを低減することが有効と考え、スイッチングリークを最小化する手法を検討した。以下この詳細について述べる。

G3S インジェクタの 2WV 構造は、図1に示すように、開弁→閉弁の 2WV 作動により、2WV とアウトオリフィス間の圧力が瞬時に低圧から中圧に変化する中間室がある。この圧力変化を利用して自動開閉する弁を設計することに着目し、図3に示す構造を見出した。本構造の最大の特徴は、制御室内に配置された制御プレートである。制御プレートは、常時高圧である高圧溝、作動条件により圧力変化する制御室、中間室の3つの圧力バランスで作動する。制御弁が作動しない無噴射中は、スプリングにより上側に押し付けられている。制御弁が開弁すると、中間室の圧力が降下するため、制御プレートの位置が保持されたままで、制御室圧が降下するため、噴射が開始する。制御弁が閉弁すると中間室圧が制御室圧と同程度まで上昇するため、高圧溝の作用力により制御プレートが下降し、高圧溝と制御室とが連通し、インオリフィスを通して高圧燃料が制御室に流入し、ノズルが下降し噴射が終了する。

本構造により、ノズルニードル開弁作動中は、制御室は低圧部のみと連通しスイッチングリークを最小化できる。またノズルニードル閉弁作動中は、制御室は高圧部のみと連通できる構造である。

作動圧全域で正常作動させるためには、制御プレートに作用する圧力による力が重要となる。高圧溝圧、制御室圧、中間室圧の作用する面積を最適に設計することで、インジェクタに搭載可能なソレノイドアクチュエータの駆動力においても、設計成立することを確認した。

### 4<sup>th</sup> Generation Injector (3-Way-Valve)

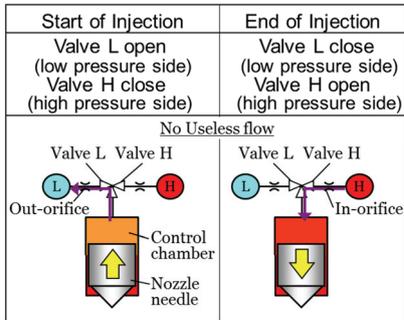


Fig.2 Concept of Control valve and Nozzle movement  
4<sup>th</sup>. Generation Injector (3Way Valve)

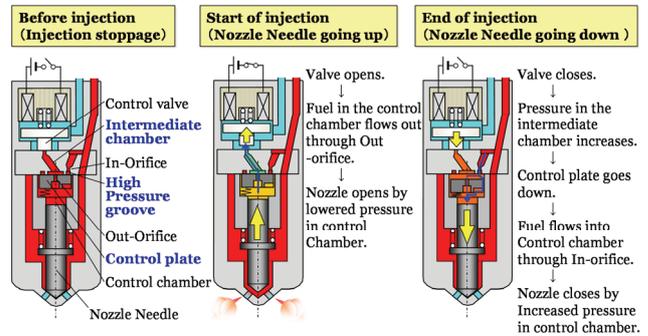


Fig.3 Structure and Operation of 4th Generation solenoid Injector

### 2. 3 G4S インジェクタリーク性能

今回開発した G4S インジェクタと G3S インジェクタとの噴射性能比較を実施した。

図4は、静リークとスイッチングリークを足し合わせた全リークの比較を示す。G4S インジェクタは、G3S インジェクタの全リークの半分を占める静リークを実現した。スイッチングリークは、G3S インジェクタ比 1/3 まで削減できた。また時間比例で増加する静リークがゼロであるため、エンジン低速トルク点に代表される高圧低回転時のリーク量を低減できた。

図5に作動耐久中の全リーク変化を示す。G4S インジェクタは、静リークが発生する微小隙間の摺動部を持たないことから、摺動部摩擦によるリーク流路の増大が発生せず、経時的に安定したリーク特性が得られる。

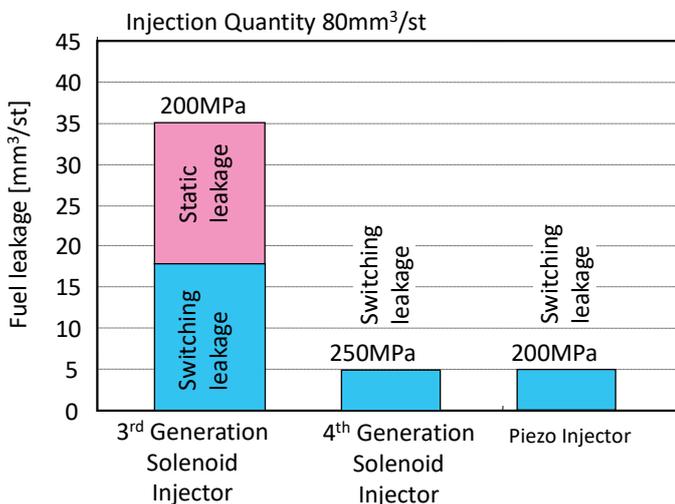


Fig.4 Fuel leakage

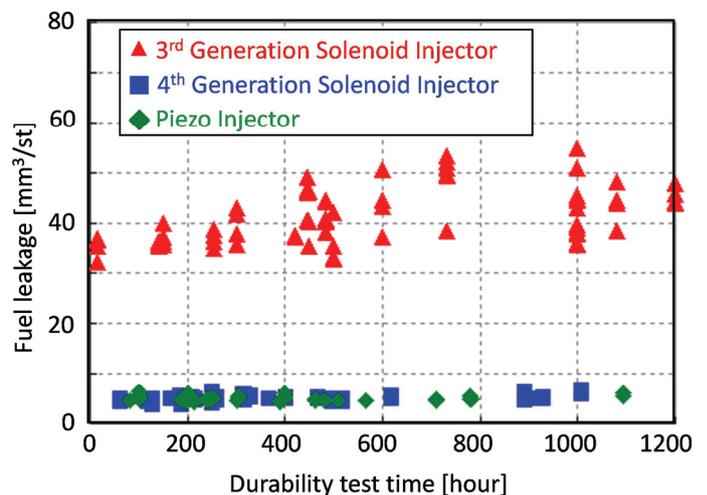


Fig.5 Injector Fuel leakage deterioration

### 3 燃料噴射装置の将来

#### 3.1 次期噴射装置へのアプローチ

前述のように次期噴射装置には、燃焼効率を向上させる為、燃焼室壁面への冷却損失を抑制しつつ燃焼速度を向上する技術が必要となる。その実現の為、以下アプローチで開発を進めた。

- ①高矩形噴射による燃焼速度向上
- ②高速微量マルチ噴射による着火性能向上
- ③高拡散噴霧による空気利用率の向上

以降、これら各々の開発について述べる。

#### 3.2 高矩形度噴射の実現

ディーゼル用インジェクタは、ニードル上部に配置された制御室の圧力を、流入(IN)・流出(OUT)のオリフィスで制御することにより、ニードル速度を決めるのが一般的である。このニードル速度により噴射の矩形度が決まる為、噴射自由度を与えるには、IN・OUTオリフィスの流量を独立して制御する機能、すなわち、3WVを活用することが望まれる。前述のように、制御プレートを用いた新制御弁の開発により小駆動力でも3WV制御可能なG4Sインジェクタを開発してきた。但し、より高矩形度の噴射を達成するには、従来以上のオリフィス流量が必要となり、それを制御する為の駆動力も必要となる。高駆動力を得られるものとして、ピエゾを使用したインジェクタが量産化されており、このピエゾインジェクタで得られる噴射矩形度をより安価なソレノイドで達成すべく、OUTオリフィス流量を従来比1.5倍以上を目標とし開発を進め、磁性材料、磁気回路の最適化により高矩形度噴射を実現した第4世代ソレノイドインジェクタ改良(G4.5Sインジェクタ)を開発している。また同時に、高圧化に優れたG4Sインジェクタの制御弁にピエゾアクチュエータを用いた更なる高矩形度が得られる第4世代ピエゾインジェクタ(G4Pインジェクタ)の開発も進めている。その噴射率比較を図6に示す。従来のG4Sインジェクタと比較し、噴射率矩形度が向上しており、これを圧力換算すると、G4.5Sインジェクタで20MPa以上、G4Pインジェクタで50MPa以上の利得がある。

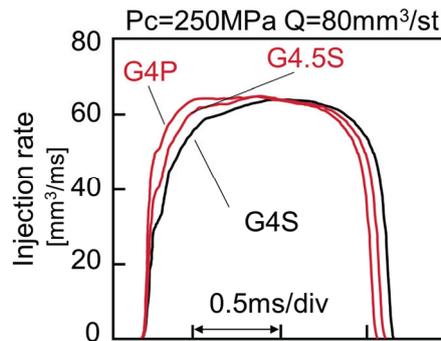


Fig.6 Injection rate

#### 3.3 高速微量マルチ噴射の実現

G4Sインジェクタ制御弁の3WV機能は、図3で示す通り、2WVと制御プレートを組合せることで実現している。この構造は、図7の上段に示すように、小駆動力で3WV機能を達成する反面、制御プレートが開弁し閉弁するまでの間は噴射することが出来ず(無機能期間)、この動きが次の噴射への遅れとなり噴射インターバルに限界があった。そこで図7の下段に示すように、制御プレートの開弁中において制御室圧力を2WVで制御できるように、第2のアウトオリフィス(以下サブアウトオリフィスと記載)を中間室内に設定し、制御プレート開弁中に制御室圧力を決定するインオリフィスとサブアウトオリフィスの関係を最適化することで、制御プレートの無機能状態においても2WVだけで制御室圧力を制御できるようにした。つまり、通常噴射時は3WV機能で使用しつつ、高速微量マルチ噴射時には、2WV構造を活用することで制御プレートの動きを制御し、無機能期間を極限まで短縮することとした。高速微量マルチ噴射結果を図8に示す。これにより、従来最小噴射インターバル0.2msに対し、G4.5Sインジェクタでは0.1ms、G4Pインジェクタでは限りなくゼロに近い噴射インターバルを達成した。

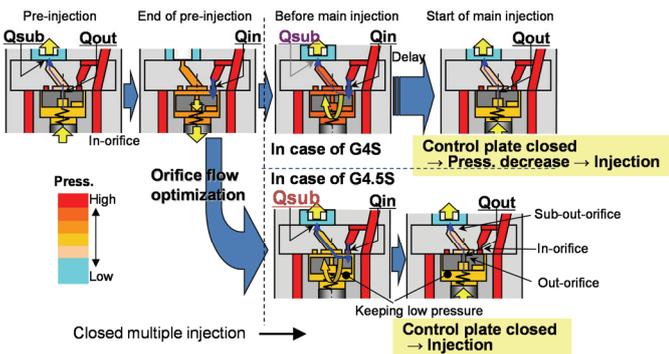


Fig.7 Injector operation at multiple injection

	G4P (Piezo)	G4.5S (Solenoid)	G4S (Solenoid)
Injection rate			
Interval	Nearly 0ms	0.1ms	0.2ms

Fig.8 Characteristics of multiple injection

### 3. 4 高拡散噴霧の実現

従来高圧化による噴霧微粒化, 及び強ペネトレーションによる空気の活用が主流であり, 噴流が直進方向となるストレート噴孔で対応してきた。近年エンジンの小型化が進んで来ると, 低噴射圧時は噴霧拡散による壁面冷損抑制が望ましく, 高噴射圧時は従来通りの強ペネトレーションが求められる。その為, 図9に示すように, わずか噴孔径 $\phi 0.1\text{mm}$ 程度 $\times$ 噴孔長 $L 0.8\text{mm}$ 以下の噴孔に対し短噴孔長, あるいは異形状となるよう加工を行い, 所望の噴霧拡散特性が得られる Controlled Diffusive Spray Nozzle (CDS Nozzle)を開発した。

これにより, 噴孔内を流れる燃料の乱流を制御することや, 噴孔出口部の燃料流の速度ベクトルを制御することにより, 噴霧の空間的配置の自由度の向上が可能となった。

噴霧確認した結果を図10に示す。これによると, 低噴射圧にて高拡散噴霧が得られ, 高噴射圧では従来のストレート噴孔と同等のペネトレーションが得られていることが分かる。このように, CDS Nozzle を採用することにより, エンジンの負荷毎の噴霧配置について自由度が向上することを確認した。

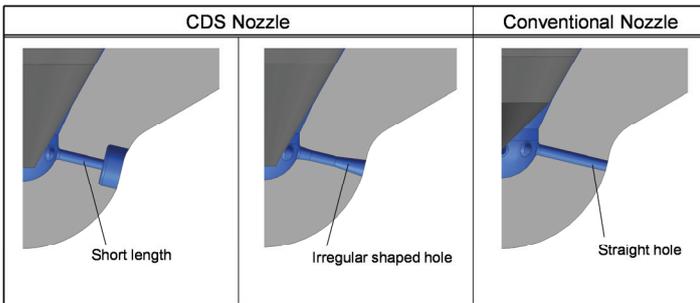


Fig.9 Example of CDS nozzle

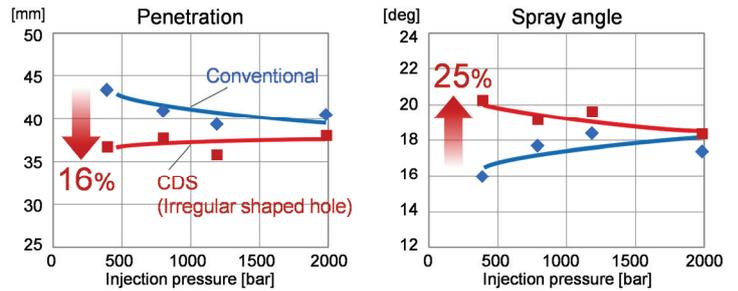


Fig.10 Spray characteristics with CDS nozzle

### 4 まとめ

ディーゼル噴射系部品については, コモンレールシステムの採用により革新的な成長を遂げてきている。その中でもコモンレール用インジェクタは, エンジン性能に直結する部品であることから, 高圧化, 燃料ロバスト性向上, 高応答化へ技術開発を進めてきており, 新制御弁の開発により, 高ロバストなインジェクタを量産開始した。さらにはその制御弁の進化による噴射の時間的自由度の向上及び, ノズル噴孔形状の最適化による噴霧の空間的配置の自由度を向上させ, 時・空間燃焼制御に取り組んだ最先端技術を紹介した。今後もこの時空間燃焼を発展させるべく, 更なる噴射率, 噴霧の自由度向上に向け開発を推進する。

### 【参考文献】

- 1) Yukihiro Shinohara, Katsuhiko Takeuchi, Olaf Erik Herrmann and Hermann Josef Laumen: 3000bar common rail system, MTZ worldwide Edition, 2011-01, Vol72, 4-8
- 2) Mrs. Xiumei Wang, Mr. Takashi Kikutani, Mr. Noriaki Nakane and Mr. Katsuhiko Takeuchi: Development toward "Diesel Revolution" using Ultra High pressure CRS with closed-loop control system for Heavy Duty Engine, FISITA world automotive congress 2010 May, Technical Programme F2010A164
- 3) V. Caika, T. Kammerdiener and N. Dorr: Operation of Piezoelectric Common Rail Injector with Diesel and FT-Kerosene, SAE Technical Paper 2007-24-0070
- 4) Rolf Leonhard, Johann Wurga, Thomas Pauer, Markus Ruckle and Matthias Schnell: Solenoid Common-rail Injector for 1800 bar, MTZ worldwide Edition, 2010-02 10-15
- 5) C S Hardy, C M Hudson, M S Harper and D M Ainsworth, Pressure is nothing without control: Evolution of control valve design, Institution of Mechanical Engineers (IMEchE) Fuel Systems for IC Engines, 14-15 March 2012, 115-128
- 6) Kenji Date, Shuichi Matsumoto, Masayoshi Ito, Koichi Yamada and Kazuhiro Omae: New Concepts of Injector for Common Rail System, JSAE Technical Paper 243-20125633

# ガソリン筒内噴射の開発史

(連載第1回) ガソリン噴射の黎明と航空機エンジン用の時代

## *The Technical History of Gasoline Direct Injection*

*The Dawn of Gasoline Direct Injection and The Age of Military Aircraft Engines it's Equipped -The 1st serial article-*

調 尚孝

Naotaka SHIRABE

株式会社 日本自動車部品総合研究所

NIPPON SOKEN, INC.

### 1 はじめに

現在、先進の自動車用ガソリンエンジンには筒内噴射装置が採用されている。本稿ではこの筒内噴射装置のその発生から今日見られる電子制御式の自動車用ガソリン筒内噴射装置までの歴史の変遷を辿る。単に羅列でなく出来るだけその出現意義に私見を加える。

ガソリンエンジンに燃料を供給する方法として歴史的には永らく気化器が採用され、その後1980年代以降エンジンの吸気管やポートに燃料を供給する電子制御式燃料噴射装置(EFI)が主に使われてきた。そして、1990年代後半に日本で自動車用エンジン用として世界に先駆けて初の筒内噴射が実用化されたと誤解されがちであるがそうではない。技術の発達には必然性と連続性が必要で、ガソリン筒内噴射はガソリンエンジンの黎明期から連続と開発努力が継続されてきた。既に1950年代前半にドイツで自動車用として初めて実用化された燃料噴射は機械式ではあったが吸気管噴射方式ではなく筒内噴射であったというのは紛れもない歴史的事実である。

ガソリン筒内噴射の歴史は大別して

- (1) 前史(黎明期)
- (2) 航空機エンジン用の時代(1930年～1940年代中期)
- (3) 自動車用ガソリン筒内噴射の出現と商品化、その後の消滅(1950年代)
- (4) 直噴層状給気(DISC)への数多くの試み(1960年～1970年代)
- (5) 開発中断(吸気管方式・ポート噴射方式がこの時期進化し全盛)(1970年～1980年代)
- (6) 2ストロークエンジン用筒内噴射の活発な研究開発(1980年代後半～1990年代半ば)
- (7) 層状吸気自動車エンジン用筒内噴射の実用化(1990年代半ば)
- (8) 自動車エンジン用筒内噴射の量産(2000年代から今日)

となるが、本稿では(7)の1996年に市販された三菱GDI、トヨタD-4のガソリン筒内噴射装置の出現までを記述する。

内容的にボリュームがあるので数回の連載という形をとる。

なお、本稿の内容の性格上、色々な書籍・文献資料を参考にし、図表も引用させていただいた。出来る限り出典出所を明記したが、中には出典不詳のものや図が不鮮明なものも混在している。あらかじめお詫びするとともに、参考にさせていただいた先人技術者のたゆまぬ努力に感謝と敬意を表したい。

### 2 ガソリン噴射(\*)の方法

Fig.1にガソリン噴射の11の方法<sup>1)</sup>を示した。この図は技術分類的に11種の方法があるという誤解を与えるので、1964年当時で開発されてきた、あるいは実用化されたガソリン噴射の方法が11種存在したと理解したほうが良い。1964年当時では、いろんなガソリン噴射の方式が検討されていたということである。

大きく連続噴射方式と間欠噴射方式に大別され、

連続噴射方式には

- (1) 燃料調量装置を上流に持ち、燃料を各気筒にノズルで分配し連続噴射する方法
- (2) ノズルの解放端にオリフィスを有し、オリフィス直後で部材平面に衝突させ燃料を分散させる方法
- (3) ノズルの解放端にオリフィスを有し、その下流の気筒共通の空気通路で空気を混ぜ、さらに下流に設けたオリフィスから燃料と空気の混合したものを噴射する方法
- (4) 上記方法に近いが、気筒別に設けた空気通路により、吸い込み効果を利用してオリフィスから燃料と空気の混合したものを噴射する方法
- (5) ノズルの噴孔上流に設けたスワール機構で燃料を旋回させて、接線方向に燃料を噴射する方法、ニードル弁のあるバルブ室はダイヤフラムで仕切られている

間欠噴射方式には

- (6) 燃料調量装置を上流に持ち、各気筒にノズルで間欠的に分配、噴射する方法
- (7) いわゆる外開弁、上流圧がバネ(Compression Spring)でセットされた開弁圧を超えると噴射し、開弁圧をよりも下がった時に閉弁し間欠的に燃料を噴射する方法

(8) 上記と機能的にはほとんど同一だが、バネとして Tension Spring を採用している方法

(9) 開弁圧に到達すると燃料圧力によりバルブ部材を押圧、噴孔を開口し、ノズル軸に垂直な方向に噴射する方法

(10) エルボ部材を使って真横に噴射する方法、ノズルは(7)の構成

(11) いわゆる電磁弁構成で、バルブを電磁的に吸引し開弁させ燃料を噴射し、電磁的印加が終了するとバネでバルブを押し戻し、弁閉止させる方法の 11 の方法が紹介されている。(1) から(10)まで機械式の噴射方法で、(11)の方法

ガソリン筒内噴射は、噴射孔が常に筒内に開口している関係上、噴射時期を選ぶので間欠噴射方式しかあり得ず、1940 年代に航空機エンジンで主に実用化された方法と 1950 年代前半に自動車用で実用化された方法は(6)、いわゆる列型噴射ポンプ方式であった。しかるに、進化した現代の電子制御ガソリン筒内噴射方式の構成を鑑みるに、この時期概念として決定的に欠落していた方法はコモンレール方式(日本語では共同配管方式と訳される)であった。この方式は気筒間を横断して一つの燃料管(コモンレール)が設置され、そこから各気筒に設けた燃料噴射弁に配管される。燃料管は蓄圧の機能を有し、各噴射弁で燃料が調量される。

このコモンレール方式と(11)に示した電磁弁を組み合わせて、1970 年代以降電子制御式の吸気管噴射あるいはポート噴射方式のガソリン噴射が進化し全盛を迎えた。現代の電子制御ガソリン筒内噴射方式も分類的にはこの延長線上にある。またこのコモンレール方式の概念は現在主流となっているディーゼルの燃料噴射の方式にも引き継がれる。

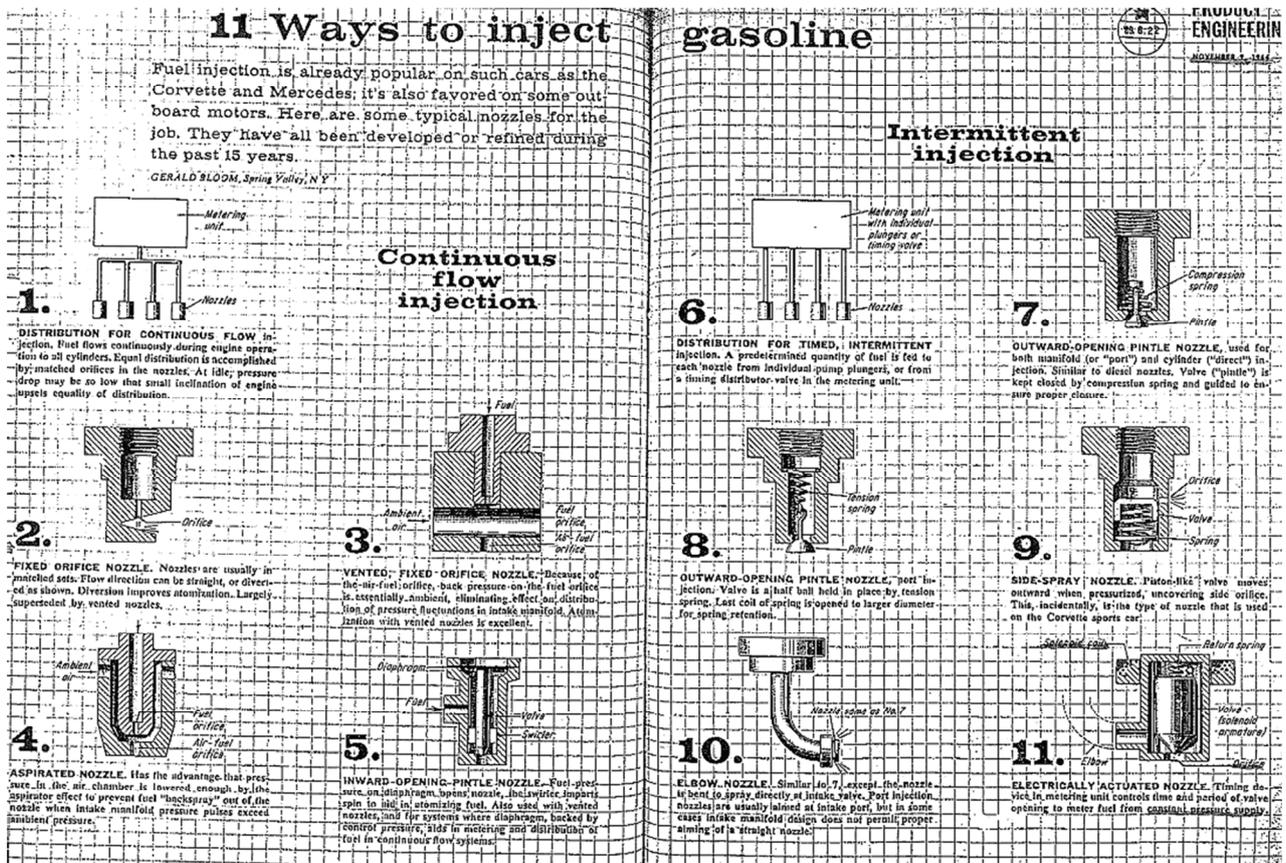


Fig.1 11 ways to inject gasoline

### 3 前史:ガソリン噴射の黎明(1870年代後半から1930年代にかけて)

#### 3.1 ガソリン筒内噴射の初期の試み

ガソリン噴射の歴史は、気化器と同じくらい古く、その黎明はドイツで起きた<sup>2)</sup>。1877年という早い段階で、4サイクルエンジンの発明者として知られる Nicholas August Otto は燃焼室に直接燃料を噴射する特許を出願している。1884年には、Hallesche Maschinenfabrik の Johannes Spiel が史上初の吸気管ガソリン噴射の定置エンジンを製作している。吸気管ガソリン噴射のエンジンはその後 Deutz 社によって航空機用 2 サイクルエンジンとして改良され、1903 年米国でのライト兄弟の初飛行へと継承されていく。初めて空を飛んだ飛行機のエンジンにはガソリン噴射が採用されていた。

一方で、ガソリン筒内噴射の最初の試験は 1898 年 Haselwander によって、定置用エンジン(Fig.2)で行われた<sup>3)</sup>。燃料は上死点直前で短時間に供給されリッチな混合気が点火プラグへ導かれる構成となっていた。しかし技術的に未成熟なため、この試験は成功しなかった。

ガソリン筒内噴射の開発が初めて本格的に行なわれるのは 1916 年、航空機メーカーとして著名な Junkers によってである。当時のディーゼル噴射の問題や、ガソリンを航空機エンジンに使いたいという軍部の要求があり第 1 次世界大戦終了の 1918 年まで、ガソリン筒内噴射の開発が行われた。この開発は

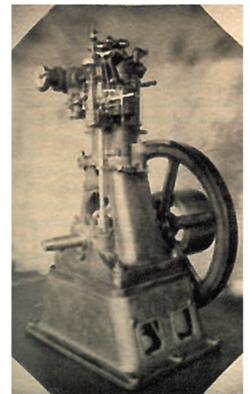


Fig.2 Haselwander engine (1898)

Junkers のエンジン製作部門である Otto Marder で行われた。この間に Junkers はクランクケース内のバックファイヤによる(2 サイクル)エンジン損傷を防ぐためには、混合気掃気では望ましくなく、ガソリンを直接燃焼室に噴射する方法が良いことを知った。

なお、“Gasoline direct injection - Wikipedia (英文)”によれば Junkers より少し早い 1902 年にフランス人 Leon Levavasseur により V8 エンジン用にガソリン筒内噴射が発明され Antoinette という単葉航空機に搭載されたとの記述がある。

### 3. 2 Hesselman エンジンの登場

スウェーデンの Hesselman は、2 サイクルディーゼルの掃気方法を研究してきた人で、1930 年頃から技術誌上に筒内噴射式の火花点火機関 (Fig.3) の紹介しており、1935 年頃には実用の軌道に乗った<sup>4)5)</sup>。これはクランク軸と連動したカム軸で燃料ポンプ棒を上下動させ、その下流の噴射弁から筒内に噴射するという、まさしく機械式のユニットインジェクタの構成である。1930 年代にこのような完成の域に近い構成のものがあったとは驚く。本エンジンは車両用火花点火式筒内噴射機関としては、最古に位置する。このエンジンは富塚清先生の著書<sup>4)</sup>によればアメリカでトラクターなどに使用されたとのことだが、当時はガソリンが生産量も少なく非常に貴重で、省燃費のために層状給気(吸気弁にディフレクタが付いている)を狙っており、燃料として魚油、大豆油、松根油まで試みられたとある。まさに 1960 年代に各研究機関で行われた Texco TCCS を始めとする多燃料対応の DISC (Direct Injection Stratified Charge) エンジンの先駆けに位置する。その後、ガソリンの生産が活発となり潤沢に入手できるようになってからはこのエンジンは急速に衰退し、1950 年以降には消滅した。

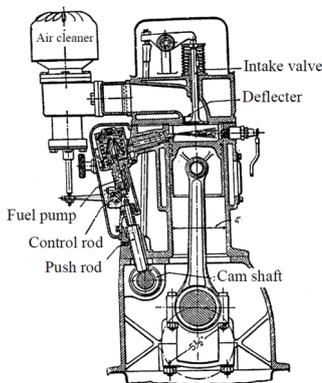


Fig.3a Cross sectional view of Hesselman Engine

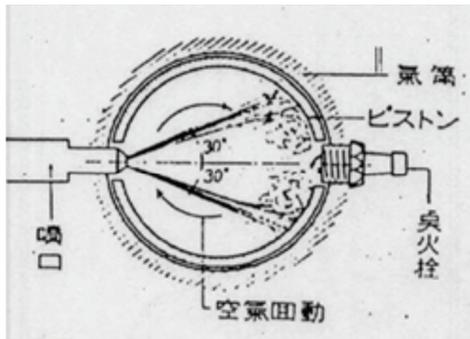


Fig.3b Illustration of Fuel spray angle, air motion and spark plug location for Hesselman Engine

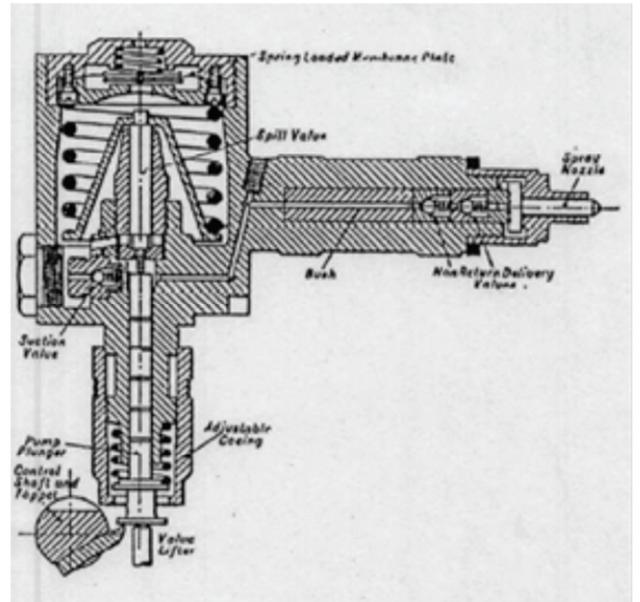


Fig.3c Details of Fuel Injector and its fuel pressurized mechanism for Hesselman Engine

## 4. 航空機エンジン用の時代 (1930 年代から 1940 年代半ばまで)

### 4. 1 ドイツの航空機エンジンに使われたガソリン筒内噴射

ドイツで第 1 次世界大戦敗戦を経て、ガソリン筒内噴射の開発が再び本格化するのは 1930 年代で、やはりその長所を理解していたのは Junkers であった。

ガソリンエンジンの燃料供給装置として当時主流であった気化器に対して、ガソリン筒内噴射は特に航空機エンジンにおいて、次のような長所があると考えられていた。

- (1) 吸気系においてベンチュリなどの抵抗部分が存在しないため、出力向上が図れる。
- (2) 吸気ライザ加熱によるホットスポットがないために吸入効率向上が図れる。
- (3) 吸排気弁のオーバラップの大きいエンジンでは燃料損失低減が図れる。
- (4) エンジン高温時に燃料蒸発の問題が起きない。
- (5) 燃料の輸送遅れが無く、機関の応答性が良い。
- (6) 燃料供給系が外力の影響を受けない。

特に(6)は重大で、戦闘機において急旋回や背面飛行時に、気化器のようなフロートを有するものは、燃料調量に甚大な悪影響を及ぼした。以降 Junkers の歴史に戻る。

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

August Lichte 博士<sup>6)</sup>は1934年春、DessauのJunkers Motorenwerkeに入社し、Junkers教授の研究施設でまずJunkers航空機エンジンL10(後のJumo 210G)のガソリン筒内噴射を開発するという課題を与えられた。その後、1910年代の技術的知見もあり、航空機エンジンJumo 210GにはLichte氏により開発された高い信頼性と制御性を有するガソリン筒内噴射が採用されるに至った(Fig.4)<sup>7)</sup>。Jumo 201Gは各気筒の脇にクランク軸で駆動される小型ポンプを設置し、噴射弁には燃料ラインに筒内圧が逆流しないようにポペットバルブが採用された。それは負圧により開閉するチェックバルブから燃料を滴下する初歩的なもので吸気行程の適正なタイミングでポンプより燃料供給された。これは高圧燃料ラインから噴射弁により霧化噴射するのちの標準的形式ではなかったが、キャブレターを排したことで戦闘機の運動性が画期的に向上したため、他のドイツ製エンジンに波及した。このJumo 210Gは、Messerschmitt Bf 109とBf 110の初期型にのみ搭載された<sup>8)9)</sup>。

Junkersによって証明されたガソリン筒内噴射の利点により、1930年代のドイツの航空機エンジンでガソリン筒内噴射開発に集中するという動きが生まれた。Boschがディーゼル列型噴射ポンプを実用化したのは1927年のことで、その頃既にBoschやI'Orangeはディーゼル噴射の分野で正確な燃料調量精度と少量の燃料供給に関して、豊富な開発経験と生産技術を保有していた<sup>10)</sup>。Boschは現在周知の会社であり、I'Orangeとは1909年にRudolf I'Orangeにより設立されたディーゼル噴射ポンプの製造会社である<sup>11)</sup>。

1934年3月、Daimler-BenzでDB600エンジンベースの単気筒エンジンを使ってガソリン筒内噴射の開発がスタートした。これはディーゼル噴射ポンプをベースとしており、最初は噴霧貫徹力の比較的弱いピントルノズルが使われた。吸気行程の強い気流中に燃料を噴射することが望ましいことが分かり、初めはI'Orangeが後にBoschが多噴孔ノズルのほうが燃費とノック限界の改善という観点から良好な結果となることを証明した。Fig.5<sup>12)</sup>にI'Orangeが開発したホールノズルを示す。ノズル先端の噴孔部分の図が鮮明でないが、ニードル弁を有しないことからおそらく当時ディーゼル用で用いられた有名なJunkersの衝突弁の構成とは異なり複数噴孔を有するホールノズルだったと思われる。一連の実験で分かったことは、燃料(ガソリン)が十分満たされている状況下では、ポンプエレメントの摩耗の問題がないということである。ポンプエレメントにおける燃料リークにより阻害されるポンプエレメントとカム間の潤滑と一方でポンプエレメントの潤滑を確保するためにBoschはFig.6<sup>13)</sup>に示すオイルブロックのポンプエレメントを開発した。Bosch噴射ポンプの全体断面をFig.7<sup>14)</sup>に示す。このポンプはDB603とDB605に採用され、この設計は非常にディーゼル噴射ポンプに似ている。燃料噴射量は歯車付ラック(制御ロッド)によるポンププランジャの微小な回転によって変えられた。

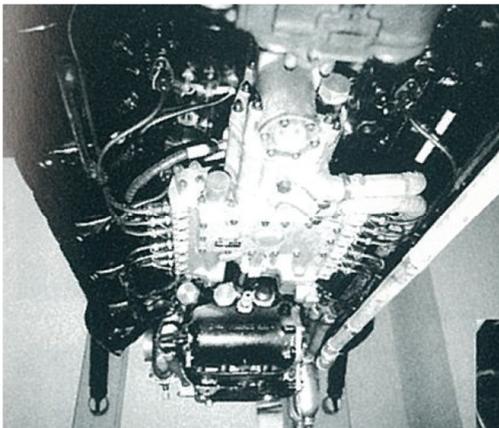


Fig.4 Gasoline Direct Injection Pump used in Jumo 210G

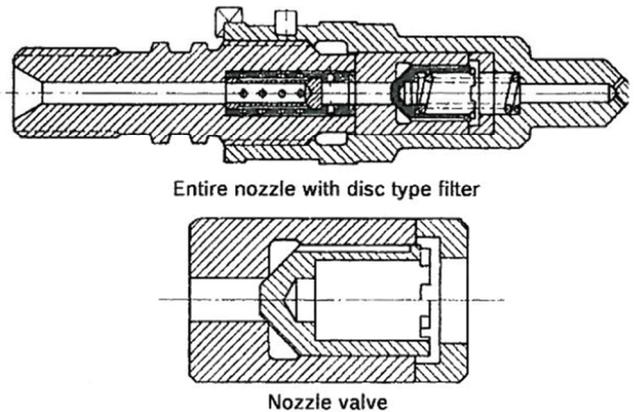


Fig.5 Cross-section of I'Orange Injection Nozzle used in Daimler-Benz aircraft engine

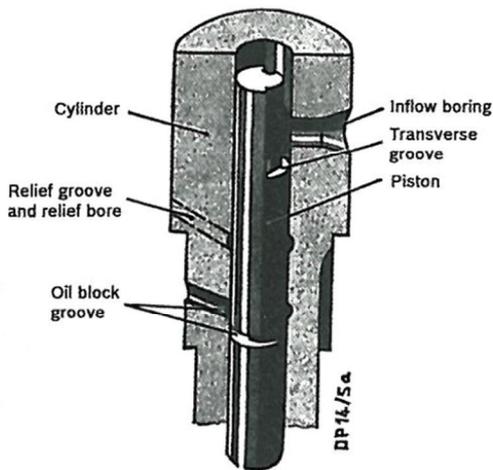


Fig.6 Cross-section of Bosch Pump Element with oil blocking

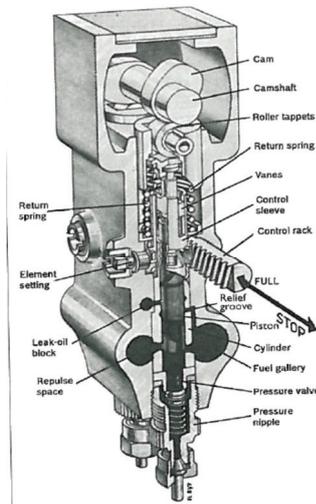


Fig.7 Cross-section of Bosch Injection Pump for DB603 and DB605 engines

1935年、Hans ScherebergはDaimler-Benz社でBoschと緊密な共同開発の下、Fritz Nallingerの指導によりガソリン筒内噴射装置付き航空機エンジンの量産開発をスタートした。この開発は、ガス交換サイクル、圧縮比、過給圧およびバルブタイミングの精密なチューニングに集中された。Fritz Nallingerは1950年代に登場する世界初の乗用車用ガソリン筒内噴射エンジン車であるBenz 300SLの開発をDaimler-Benz社で指揮した人である。Fig.8<sup>15)</sup>にDaimler-Benzの航空機エンジンDB601エンジンの断面図で、噴射ポンプ、噴射ノズルおよび点火プラグの位置を示す。一目瞭然だが、このエンジンは倒立エンジンでクランクケースとエンジンヘッドの天地が真逆である。倒立した理由は、プロペラが地面に干渉するので、クランク軸の位置をより上方にしたかったからである。V型エンジンでVバンクの間に噴射ポンプが収納されている。このエンジンについては、鈴木孝氏が著書<sup>16)</sup>にて詳述されているので参考にされたい。Fig.9<sup>7)</sup>に、DB601エンジンのVバンクに搭載された噴射ポンプを示す。Fig.10<sup>15),17)</sup>に、DB601エンジン筒内の燃料と空気の挙動と気化器との出力比較を示す。噴射弁と点火プラグはシリンダ横にそれぞれ対向の位置に配置された。結果としてこのエンジンは、同種の気化器エンジン(DB600)よりかなりの高出力を実現できた。

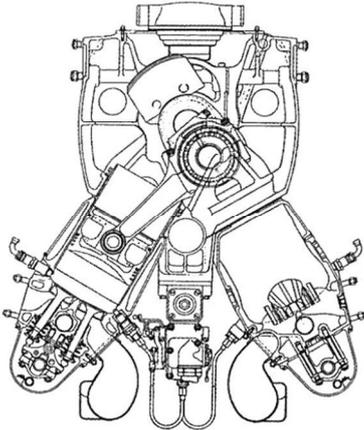


Fig.8a Cross-section of DB601 E 12-cylinder aircraft engine (V=33.8L)

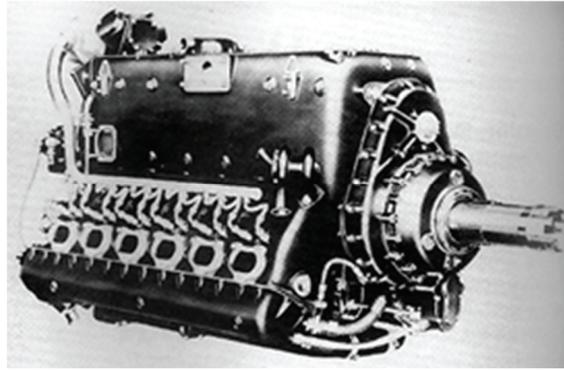


Fig.8b Outside view of DB601 A aircraft engine

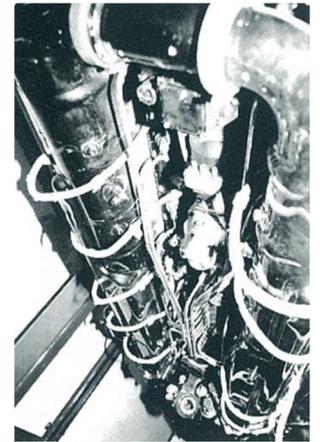


Fig.9 Direct Gasoline Injection Pump installed in the V-bank of DB601 aircraft engine

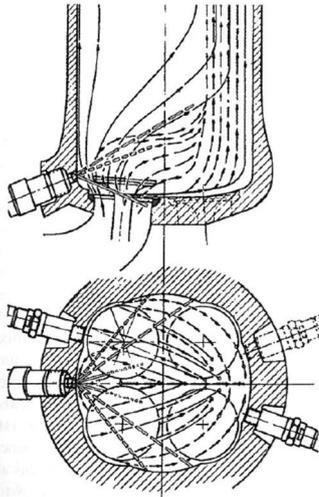


Fig.10a Sectional view of DB601 E 12-cylinder aircraft engine illustrating the air movement and fuel spray

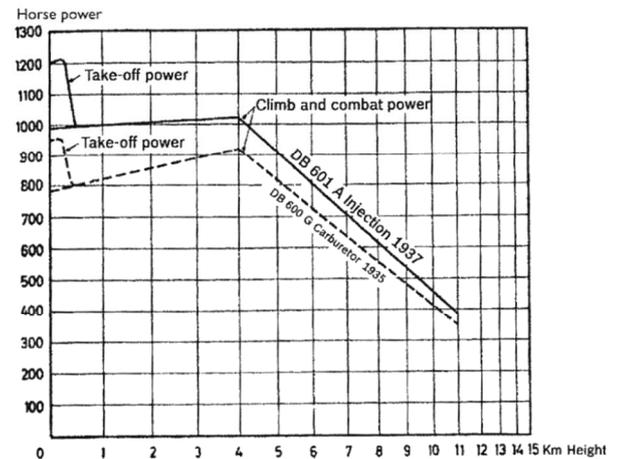
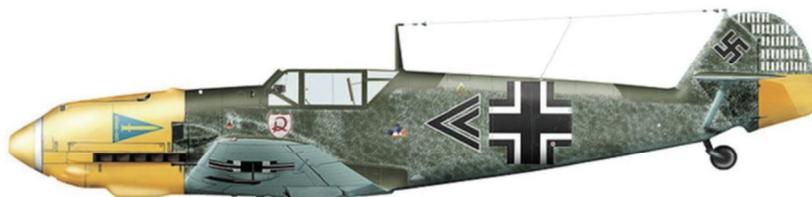


Fig.10b Power Comparison between Daimler-Benz DB601(injection) and DB600(carburetor)



Messerschmitt Bf 109 E-4, W.Nr. 5344 - Hauptmann Helmut Wick, Kommandeur I/JG 2, Beaumont le Roger, Oktober 1940

Fig.11 Messerschmitt Bf-109 E4

1937年は記念すべき年で、世界初のガソリン筒内噴射航空機エンジン DB601A が Daimler-Benz の手により量産が開始された。そしてこのエンジンは戦闘機 Messerschmitt Bf109 (Fig.11<sup>18)</sup>) に搭載された。ほぼそれと時を同じくして、Junkers からは Jumo210G エンジンが、BMW からは 132F エンジンが量産開始された。これらは全てガソリン筒内噴射を装備していた。前述したように Jumo210G エンジンは Messerschmitt Bf109 と Bf110 のごく初期に採用された。BMW の 132F エンジンは空冷星形 9 気筒で、爆撃機 Ju86E-2 に搭載された。Messerschmitt は第 2 次世界大戦において欧州の空、とりわけイギリスの制空権を争った 1940 年代初頭のいわゆる The Battle of Britain に投入された<sup>19)</sup>。対するイギリス空軍の戦闘機 Spitfire は、気化器付きマーリンエンジンで、気化器を装備してマイナス G がかかるとガソリン供給が一瞬途切れるのに対して、そのような欠点がないガソリン筒内噴射ポンプは効果絶大で、大戦前半は空中戦において優位を保ったと言われる。

Messerschmitt は 1939 年には最高時速 755.1km/h を記録し、その後スーパーチャージャーを付け、スーパーチャージャーの上流でメタノール噴射することにより 1544kw(2100hp)まで出力向上が図れた。そして 1937 年の生産開始以来 1945 年の終戦まで、筒内噴射航空機エンジンは機体の離陸から様々な姿勢において劇的な性能向上が図られていった。ドイツのミュンヘンにある Deutsches Museum (ドイツ博物館) には、エンジンも含めて多くの Messerschmitt が展示されている。

その他、Junkers や BMW の航空機エンジンもまた筒内噴射を装備してうまくいった。12 気筒 Jumo210G エンジンに搭載された噴射ポンプは Junkers 内製だったが、その基本設計は Daimler-Benz 航空機エンジンに採用された Bosch 噴射ポンプに類似していた。一方、2 列 14 気筒の星形 BMW エンジンの噴射ポンプは Deckel 社 (1903 年設立のミュンヘンの機械メーカー、レンズシャッターのような精密機器製造を得意とする) によって供給され、列型噴射ポンプとは異なり、ドラムの形をした 14 個の別体ポンプハウジングの中にポンプエレメントが収納され、そのポンプが各気筒近傍に設置された形式であった。

開ループ制御あるいは閉ループ制御の要求、および過給圧、空燃比、スロットル開度、点火時期、プロペラ羽位置等の飛行状態に関するエンジン操作条件の要求、加えてパイロットからの極端に高度な要求から、動作時のエラーの対処も含めて、ドイツの航空機エンジンは極めて複雑な機械式の混合気コントローラーを装備していた。Fig.12a<sup>2)</sup> に Bosch 噴射ポンプと統合された DB603 エンジンおよび 605 エンジンの混合気コントローラーを示す。このコントローラーでは、燃料噴射量は、外気圧力、吸入空気圧および吸入空気温に依存していた (おそらく空燃比制御はスピードデンシティ方式だったと思われる)。同じく Fig.12b に 棚沢泰先生が書かれた筒内噴射システムの概要図<sup>20)</sup>を示す。

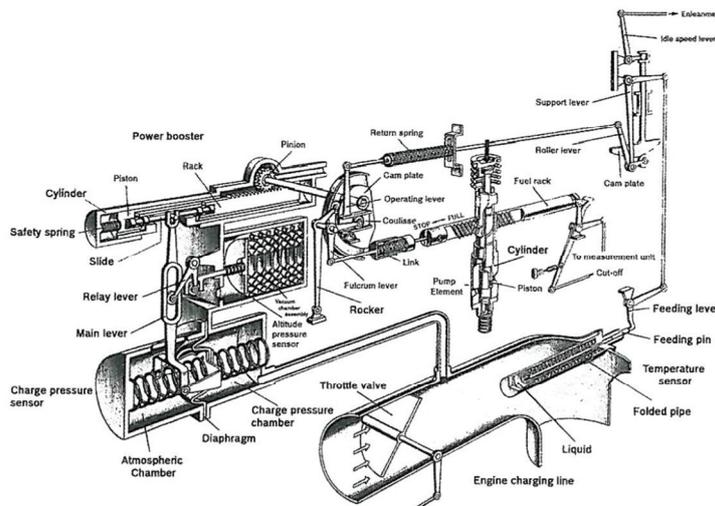


Fig.12a The function of mixture controller integrated BOSCH Injection Pump for Daimler Benz DB603 and 605 aircraft engines

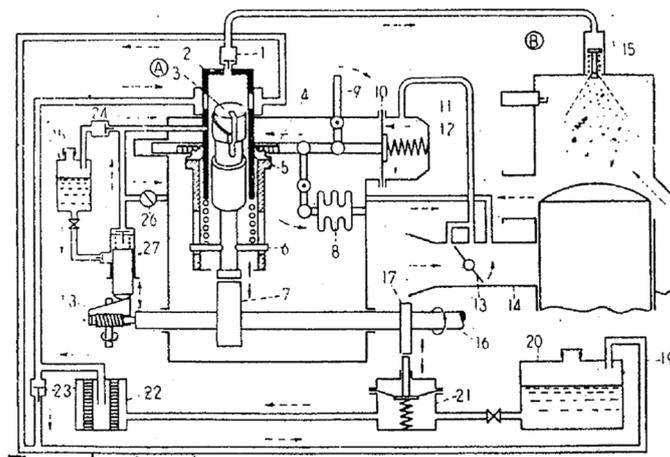


Fig.12b Bosch Direct Injection System for Daimler-Benz Aircraft Engine

#### 4.2 アメリカの航空機エンジンに使われたガソリン筒内噴射

アメリカの航空機エンジンにおいても、燃料供給装置の主流は永らく気化器であった。

ドイツはディーゼル噴射ポンプからガソリン噴射に派生していったのに対し、アメリカでは、非気化器と何か？から出発し噴射に移行した。1930年代当時気化器の有力製造メーカーであったBendix社は、3.1で述べた航空機エンジンに気化器を使用する際の問題点(6)、すなわち気化器がフロート室を持つがゆえに航空機用の戦闘態勢時に重力や遠心力の影響で燃料調量に支障をきたす問題解決と、もう一つ高度飛行時ベンチュリ部で発生する減圧吸出による温度低下、いわゆるアイシングの問題解決について研究していた。この問題の解決策は加圧された燃料系の中で作動する気化器であった。我々は噴射というとドイツ流の噴射ポンプをイメージしがちだが、ドイツとアメリカという世界大戦の敵国同士で当時技術交流が隔絶された時代において、アメリカではまったく異なる形態の噴射方式が発達したという意味で非常に興味深い。1936年、Bendix Aviation Corporation(Bendix社系の航空機用燃料系メーカー)が開発した、解決に向けての初の気化器がBendix-Stromberg Pressure Carburetor(Injection Carburetorとも言う)<sup>21)</sup>であった。1938年には改良されフロート室無しとなっている。Bendix-Stromberg Pressure CarburetorのカットサンプルをFig.13<sup>22)</sup>に示す。これを「気化器」に分類するか「噴射」に分類するかは議論が分かれるが、それは「噴射」というイメージが先行しているからにほかならず、内燃機関からみればノズルを介して加圧された燃料を供給する方式ということで、本稿では「噴射」の範疇と考える。ドイツと違って歴史的に見てディーゼル噴射ポンプの開発経験を持たないアメリカならではの気化器を改良した噴射装置であり、気化器特有の燃料量調整機構を活かした工夫のあとがうかがえる(Fig.14)<sup>23)</sup>。構造的に気化器ベースの燃料噴射で、ベンチュリ部分がノズルとなっており、気化器部分もフロート室は無く、ダイヤフラム室で与圧された燃料がノズルに連続的に供給される構成となっており吸気管噴射方式であった。当時アメリカの航空機エンジンは気化器も含めて吸気管に燃料を供給する方式が主流であったが、より高性能を追求しようとする筒内噴射方式が期待された。当時、筒内噴射は吸気管噴射に比較して次の長所があったと考えられていた。これは現在の自動車用でも同じことが言える。

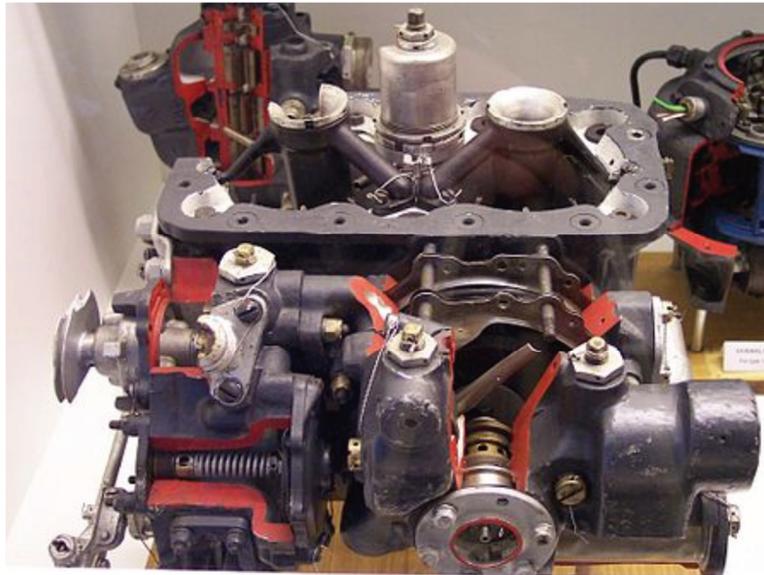


Fig.13 Bendix-Stromberg Pressure Carburetor (PD12-F13)  
for a Pratt & Whitney R-2000 radial engine

- (1) 吸入空気に燃料蒸気が存在しないため、充填効率向上が図れる。
- (2) 筒内が燃料潜熱で冷却されるのでノック限界が広がり圧縮比を上げることが出来る。
- (3) 燃料の輸送遅れが無く、機関応答性が良い。

1944年に量産開始された超空の要塞と言われた戦略爆撃機 B-29 後期型は太平洋戦争に投入され日本の継戦能力を著しく弱めたことで知られるが、B-29のWrightR-3350エンジンには改良型Bendix-Stromberg Pressure Carburetorが使われ、筒内噴射方式であった(Fig.15)。筒内直噴のために燃料の圧力を増大させる機構としてエンジン各気筒(9気筒)に2個の斜板ポンプを用いて筒内噴射ノズルに燃料を圧送し、気筒あたり2個の噴射ノズルが使用されている。ノズルの開弁圧は3.5MPaで、噴射時期を制御されて間欠的に筒内に燃料を噴射した。WrightR-3350エンジン<sup>24)</sup>をFig.16、B-29の機体をFig.17に示す<sup>25)</sup>。このWrightR-3350エンジンは東京都市大学世田谷キャンパスに保管展示されている<sup>26)</sup>。撃墜されたものを古浜庄一先生が当時分解調査されたとのことである。以前筆者が訪れて見学した時は、燃料供給装置部分は失われていた。アメリカのオハイオ州DatonにあるAir Force Museumに完全なエンジン部分が展示されている。このエンジンは太平洋戦争後、旅客機DC-7に使用された。

なお、前述したBendix Aviation Corporation社だが、この会社は1957年に後の電子制御式燃料噴射装置の先駆けとなる“Electrojector”をSAE Paper<sup>27)</sup>上で発表し、当時センセーショナルな話題となった。これについては、後の章で述べることにする。

このほか大戦後期には連合国側では、その他の航空機エンジン用燃料噴射装置として、Hobson-R.A.E.Injector, S.U.Injection Pump, Rolls-Royce Governor Injectorなどが開発されたが、いずれも吸気管噴射であり、特に前二者はその名からして気化器ベースの噴射装置だったと思われる。日本でも中島式低圧燃料噴射装置(吸気管噴射)が試みられたが、十分な性能を発揮しないうちに終戦を迎えた。



# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

とが伝えられる。整備上のトラブルは、当時の日本の航空用エンジンはほとんどが星形空冷で、水冷列型の整備ノウハウに乏しく、たびたび水漏れ、オイル漏れが発生したことが伝えられる。当時の噴射ポンプに関する問題点はポンプブランジヤの焼き付き等が伝わっている<sup>30)</sup>。戦闘機「飛燕」は復元修復したものが岐阜県のかかみがはら航空宇宙科学博物館にて2018年3月より恒久展示されることになっている。なお、かかみがはら航空宇宙科学博物館には土井武夫氏の当時の書斎(仕事場)も復元展示されている。

一方、海軍でもドイツから水冷列型エンジンが技術導入され、そのエンジンを採用した代表は艦上爆撃機「彗星」(Fig.19<sup>31)</sup>)である。これは1942年より愛知航空機熱田工場で製造され、エンジンは地名から「アツタ 21」,のちに圧縮比増や過給高回転化の改良がされて「アツタ 31」と命名された<sup>32)</sup>。Fig.20<sup>33)</sup>に「アツタ 31」のエンジン図を示す。噴射ポンプは「日立航空機」製 12LA10/10 型と伝えられる。エンジンは前述の「ハ-40」エンジンと同じく DB601 エンジンと同一設計であるが、「ハ-40」と同様、製造に苦労したようである。ローラー軸受の破損、クランクシャフトの焼き入れ性の悪化で歩留り低下、水漏れ等のトラブルを記述した資料がある<sup>33)</sup>。「アツタ 31」は、伊号潜水艦艦載機「晴嵐」(Fig.21), 練習機「南山」(Fig.22)や魚雷艇にも搭載され<sup>34)</sup>、「アツタ 21」と合わせて1734台製造された。「彗星」は靖国神社の遊就館(大展示室)に復元展示されている<sup>35)</sup>。

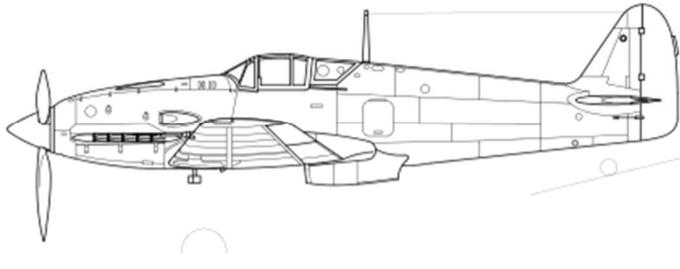


Fig.18 Japanese Army Fighter “HIEN (TONY)”



Fig.19 Japanese Navy Carrier Dive-Bomber “SUISEI (JUDY)”

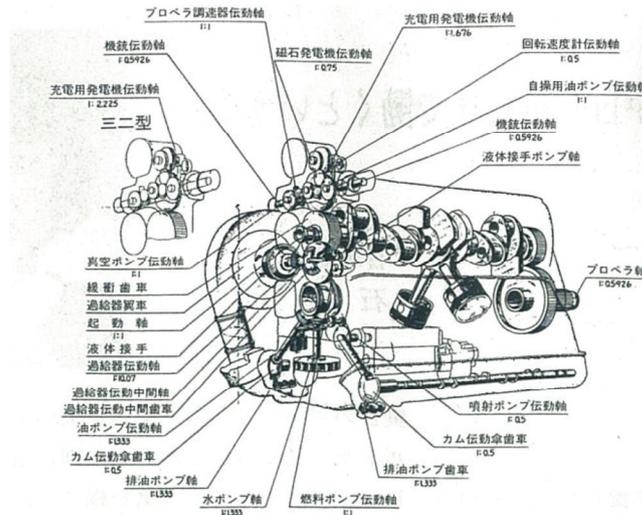


Fig.20 Structure of “ATSUTA-31” Engine

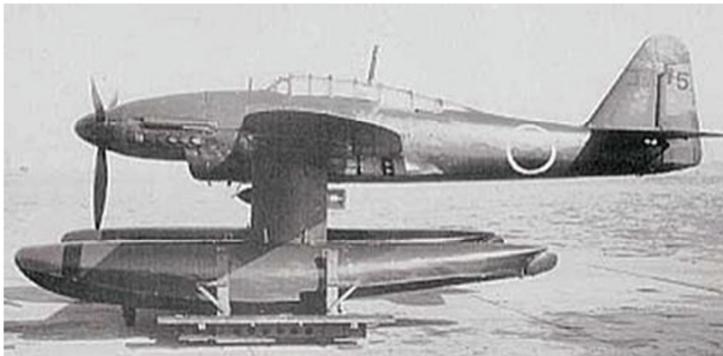


Fig.21 Japanese Navy Fighter “SEIRAN” for “I-400” Submarine



Fig.22 Japanese Navy Prototype Fighter “NANZAN” for Training

航空機用ガソリン噴射についてさらに深い情報については、大阪市立大学経済学部教授坂上茂樹先生の著された技術文献<sup>35)</sup>をお勧めする。ここでは独、米、日の航空機用ガソリン噴射について100頁を超える詳細な解説がなされている。

(次回連載:「自動車用ガソリン筒内噴射の出現・商品化」に続く)

## 【脚注】

\* 本稿ではガソリン噴射という用語は、ガソリン筒内噴射とは使い分けた。ガソリン噴射は筒内直噴だけでなく、吸気管や吸気ポートよりガソリンを噴射して機関に供給する方法の総称として本稿では使用している。

## 【引用文献】

- 1) Gerald Bloom, PRODUCT ENGINEERING ,November 9 ,1964
- 2) Richard van Basshuysen, Gasoline Engine with Direct Injection,Chapter2, VIEWEG-TEUBNER, 2009
- 3) ibid 2),p5
- 4) 富塚清, 内燃機関の歴史, p305, 三栄書房(1969)
- 5) 齊藤昭則,直噴ガソリンの開発経過,R&D Review of Toyota CRDL,1-5,Vol.36,No.4(2011)
- 6) <http://www.deutsche-biographie.de/sfz53536.html>
- 7) 鈴木孝, 20 世紀のエンジン史, p328, 三栄書房 (2001)
- 8) ユンカーズ ユモ 210 -Wikipedia
- 9) The Hugo Junkers Homepage <http://www.junkers.de.vu/>
- 10) ibid 2) ,p6
- 11) l' Orange 社ホームページ <http://www.lorange.com/lorange/history/>
- 12) ibid 2),p9
- 13) ibid 2),p9
- 14) ibid 2),p10
- 15) ibid 2),p11
- 16) 鈴木孝,エンジンのロマン,361-407, プレジデント社,(1988)
- 17) ibid2),p12
- 18) メッサージュミット Bf109 -Wikipedia
- 19) バトル オブ プリテン- Wikipedia
- 20) ibid 2),p14, 及び棚沢泰, 気化器とガソリン噴射装置, 社団法人自動車技術会技術シリーズ No.1, p13 , (1975)
- 21) [https://en.wikipedia.org/wiki/Bendix-Stromberg\\_pressure\\_carburetor](https://en.wikipedia.org/wiki/Bendix-Stromberg_pressure_carburetor)
- 22) ibid 21)
- 23) 長尾不二夫, 内燃機関講義(上巻), p492 ,養賢堂(1957)
- 24) ライト R-3350 - Wikipedia
- 25) Graham White, Allied Aircraft Piston Engines of World War II ,366-368,1994, Published by SAE
- 26) 東京都市大学 HP <http://www.tcu.ac.jp/topics/201508/20150827000001863.html>
- 27) Winkler, A. and Sutton, R., "ELECTROJECTOR-BENDIX ELECTRONIC FUEL INJECTION SYSTEM," SAE Technical Paper 570060, 1957
- 28) 三式戦闘機 - Wikipedia
- 29) 小口富夫, ダイムラー・ベンツ DB601 の国産化, 世界の傑作機 No.17 陸軍 3 式戦闘機「飛燕」, 44-46, 文林堂, 1989
- 30) 渡辺哲国, アツタ・エンジンの葉, 世界の傑作機 No.69 海軍艦上爆撃機「彗星」, 68-73, 文林堂, 1998
- 31) 彗星(航空機)- Wikipedia
- 32) アツタ(エンジン)- Wikipedia
- 33) 渡辺哲国, 熱田今昔物語「アツタ」航空発動機との出会い, 自動車技術会中部支部報
- 34) 晴嵐 - Wikipedia
- 35) 坂上茂樹, 三菱航空発動機技術史ガソリン噴射,水メタノール噴射技術の進化と三菱重工業 2013 年 6 月- 大阪市立大学学術機関リポジトリ [http://dlisv03.media.osaka-cu.ac.jp/infolib/user\\_contents/kiyo/111C0000001-78.pdf](http://dlisv03.media.osaka-cu.ac.jp/infolib/user_contents/kiyo/111C0000001-78.pdf)

# ガソリン筒内噴射の開発史

(連載第2回) 自動車エンジン用ガソリン筒内噴射の世界初の実用化

## The Technical History of Gasoline Direct Injection

The World First Practical Realization of Gasoline Direct Injection for Vehicle Engines -The 2nd serial article-

調 尚孝

株式会社 日本自動車部品総合研究所

Naotaka SHIRABE

NIPPON SOKEN, INC.

### 5. 航空機技術の自動車への応用

第2次世界大戦が終了し、軍用だった航空機技術の一部を平和利用の象徴である自動車へ応用しようとする動きは自然な流れであった。航空機技術であったナビゲーションやABS(Anti-Lock Braking System)\*が自動車に応用された例は今日よく知られているが、この「ガソリン筒内噴射」は其中でも先駆けではなかったかと思われる。地上で自動車に使われていた気化器が空中の航空機に使われ、その欠点を解決する目的で開発された燃料噴射が再び地上へ舞い降りてきたという言い方もできる。戦前から自動車用に使用されてきた「気化器」に対する「ガソリン筒内噴射」の長所は4章でも示したように第2次世界大戦に使用された航空機エンジンで実証済であった。動きはガソリン筒内噴射の黎明の歴史と同じくまたしてもドイツで始まった。ただしすんなり自動車への適用が進んだかという必ずしもそうではなく、依然として当時では下記のような障壁や技術課題があった。

- (1) 自動車で用いられる環境は航空機ほど苛酷ではない。従って気化器を用いる決定的不都合がない。
- (2) 自動車エンジンの排気容積は航空機のそれと比較して小さく、それに対応して燃料噴射量も少なくなる。  
例えばDB603Aエンジンが $300\sim 600\text{mm}^3/\text{str.cyl.}$  だったのが自動車用では排気量や用途にもよるが $5\sim 80\text{mm}^3/\text{str.cyl.}$  程度と劇的に少なくなる。この微少噴射量の制御が大きな課題となる。
- (3) 自動車の使用負荷範囲(負荷変動)は広く、(2)の数値でも分かるように噴射量(のダイナミックレンジ)の広い範囲の燃料量制御を行う必要がある。
- (4) 気化器からさらに機械的に複雑な燃料噴射への切り替えは相当なコスト上昇を伴う。

これについては、後述する Benz 社はまずレース活動での実績を積んだ上、名声を獲得し、高級車にガソリン筒内噴射を採用し市販するというシナリオを歩んだようである。

### 6. 自動車用ガソリン筒内噴射エンジン開発と実用化

#### 6.1 Benz 社の動向

ドイツが壊滅的打撃を受けた第2次大戦終了後僅か1年後の1946年に、Daimler-Benz社は自動車生産を開始した。1947年同社のHeinz HoffmannがMercedes170V 1.7L直4エンジンをを使ってガソリン筒内噴射の研究を着手し、気化器の38PSに対し47PSまで出力を向上させた。しかし航空機DB601Aエンジンの噴射ポンプをそのまま使用したため燃費の優位性を立証できず(おそらく噴射量が多過ぎたか?)、1949年に噴射ポンプが故障するや研究が中断している。前述したが、単に航空機エンジンサイズのポンプ流用では、噴射量が自動車用には多過ぎる。より微少噴射量を制御できることも必要であった。

一方で220系、300系という超高級サルーンで再び名声を博した同社は戦前から持っていたもう一つの顔すなわち「最強のグランプリレースの会社とスポーツカーを生産する会社」を目指した。この第一歩は第4章に登場したMesserschmittのDB601エンジンシリーズの開発を指揮したFritz Nallingerによって記された(Fig.23)<sup>36)</sup>。Nallingerは、車両開発責任者にRudolf Uhlenhaut、エンジン開発に同じく4章でも登場したHans Scherenberg、レースのマネージャーにAlfred Neubauerという良き部下たちを得て、レース車両Mercedes-Benz 300SL\*\*プロトタイプ(Fig.24)を製作し、当時の多くのレースに参戦した。このエンジン(M194, Benzではエンジン型式の初めにMotorenのMを付ける)には燃料供給装置としてSolex3連気化器が使用された。レースの結果は大戦果であり、1952年に行われたスイスGPで優勝、ルマン24時間で1-2フィニッシュ、ニュルンベルグ25周年開設レースで1-4位独占、メキシコのカレラ・パンアメリカナで1-2フィニッシュとこの年の5つの大会で4つの優勝を勝ち取るという大躍進であった。このレーシングマシンはそのボデーの色から1930年代のBenzの「Silver Arrow(独 Silberpfeil): 銀の矢」の再来とされた。今でもBenzの市販車両は銀が基調色となっている。



Fig.23 Dr. Fritz Nallinger, Technical Board Member of Daimler Benz

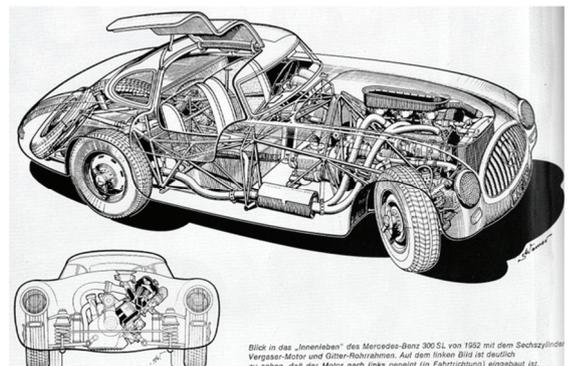


Fig.24 Mercedes-Benz 300SL Prototype

Blick in das „Jensenleben“ des Mercedes-Benz 300 SL von 1952 mit dem Sechszylinder Vergaser-Motor und Gitter-Rohrrahmen. Auf dem linken Bild ist deutlich zu sehen, daß der Motor noch links geneigt (in Fahrtrichtung) eingebaut ist.

## 6. 1. 1 Benz 社による世界初ガソリン筒内噴射装置付エンジンの実用化

予想以上の戦果をあげた Benz 社は市販化を目標にその後さらなるエンジン出力向上を目指す。ここで Nallinger は 1952 年に 1949 年以降中止されていたガソリン筒内噴射の開発を開始する。元来ディーゼルエンジンの分野で世界をリードしていた Benz 社で燃料噴射に関するノウハウは豊富であったが、何より戦闘機 Messerschmitt でのガソリン筒内噴射によるエンジン高出力化の経験は大きかった。この開発には同社のエンジン技術者 Hans Scherenberg とその部下 Karl Heinz Geschael が活躍する。この二人は Messerschmitt の DB601 エンジンでガソリン筒内噴射開発を担当したまさしくその技術者たちである。さらに噴射ポンプ開発には Bosch 社の Willi Voit と Hermann Stol が参画した。そして自動車にこのシステムを採用するにはかなりの試行錯誤が繰り返されたが、最終的には気化器が搭載されていたプロトタイプの前部である圧縮比 8.0 から 8.55 まで上げ、出力を 25%アップの 215PS までに向上させ、ガソリン筒内噴射を搭載した自動車エンジン用の開発に成功した。

1954 年 2 月に開催されたニューヨーク・オートショーで一般公開された Mercedes-Benz 300SL Coupe (Fig.25) はレースに参戦したプロトタイプと同じくガルウイング開閉のドアでたちまち好評を博し、上流階級の人气的になった<sup>37)</sup>。この 300SL のエンジンこそ Nallinger 率いる Benz チームの開発した後述するガソリン筒内噴射が搭載されていた。気化器との性能差を Fig.26 に示す。300SL は市販価格 \$7500 で次第にオプションも充実し市販車のままレースに出走する者も現れた。ガルウイング式のドアは乗降が不便でスカートをはいた女性が乗れないという上流社会では致命的欠陥があった。そこでフレーム構造を見直し、通常の開閉ドアを持つオープンカーが Roadster (Fig.27)<sup>38)</sup>として 1957 年 3 月、ジュネーブオートショーに出展され、市販開始された(市販価格 DM32500)。さらに圧縮比を 8.55 から 9.5 まで上げ、エンジン出力は高められたが Coupe の持つようなスポーツ性は低まった。

さて、型式 M198 である 300SL エンジン (Fig.28)<sup>39)</sup> のガソリン筒内噴射装置について解説する。M198 エンジンには SOHC 直列 6 気筒 2996cc エンジンで、倒立こそしていないがエンジン軸が天地より 50° ほど傾いており、その下方脇にガソリン噴射ポンプが搭載され、ポンプ軸はクランク軸と同期して回転を与えられる。ポンプから気筒数分の鋼管で各気筒の噴射ノズルと連結される。興味深いのは、噴射ノズルと点火プラグのレイアウトである。300SL のベースエンジンは 1951 年に発表された 300 リムジエの M186 であるが、元々点火プラグが真横に付いていたそのプラグ穴を噴射ノズル穴とし、燃料噴霧が吸気バルブに当たるようにする設計が最終的に採用された。



Fig.25 Mercedes-Benz 300SL Coupe

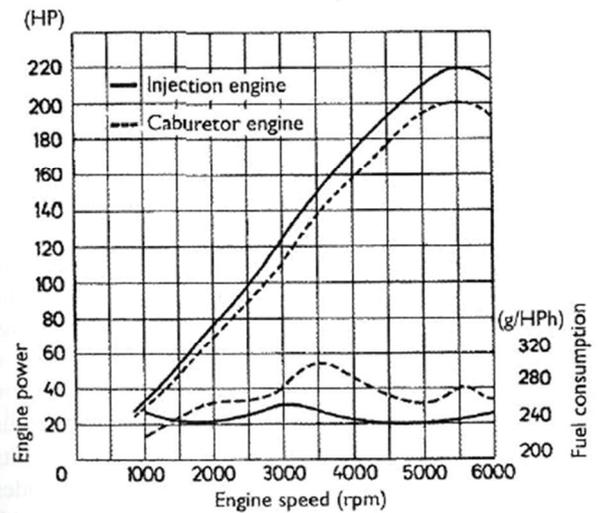


Fig.26 Comparison of Power and Fuel Consumption between Direct Injection and Carburetor of MB-300SL Engine



Fig.27 Mercedes-Benz 300SL Roadster

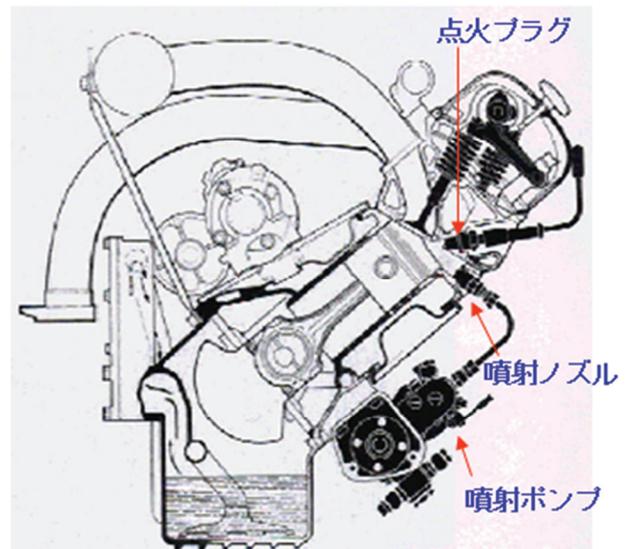


Fig.28 M198 Engine of Mercedes-Benz 300SL

噴射ポンプとその混合気制御系を Fig.29 に示す<sup>40)</sup>。噴射ポンプはエンジン 6 気筒に対応した 6 プランジヤで、いわゆる Jerk Pump 式ディーゼル噴射ポンプと同様な形式である。噴射期間は吸気 ATDC60° で終了するよう調整された。すなわちいわゆる早期噴射 (Early Injection) で予混合を狙った筒内噴射と考えられる。(プランジヤのメタリング溝のディーゼルとの唯一の違いは、ディーゼルが送油開始時期を調整するのに対し、このポンプは送油の終了時期が調整された。) 高温時のベーパー対策のため、ポンプには過剰な燃料がフィードされ、余分な燃料は溢流バルブとリターン管を通じてタンクに戻された。ノズルは外開式の自動弁であり、第 2 章の Fig.1 の形式 (7) に相当する構造である。このノズルの特徴はリークレスで戻し配管が不要なことである。ディーゼルの内開式の自動弁をガソリン機関にそのまま適用するとガソリンは粘性が低いので特に高温になるとリーク量が増え送油量も多くなり効率が悪く、噴射量精度も悪化する。従って外開弁を使ってポンププランジヤで押し込んだ分だけ噴射するという方式が採用された。ノズル開弁圧は 15 気圧であった。なお、BOSCH の Injection Pump 品番は PES6KL70/320R2 ,R3(1956 の改良版)である。

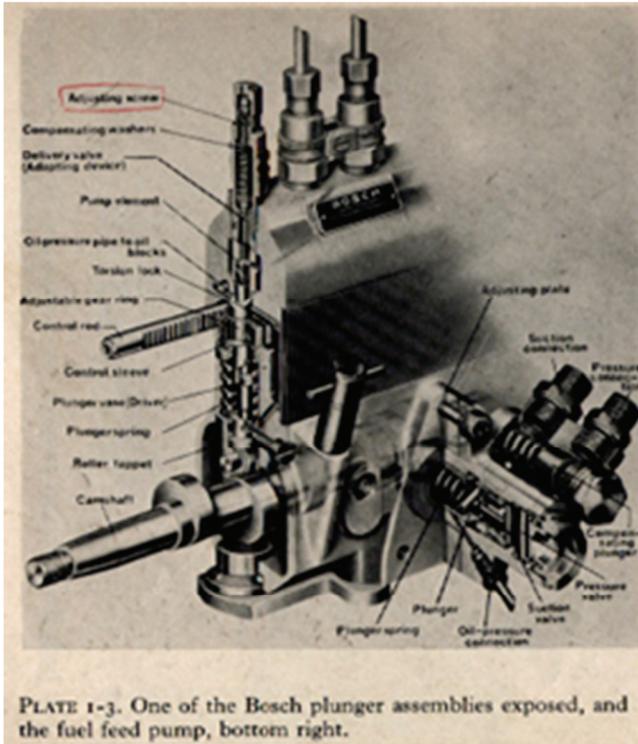


Fig.29a Cut-away Drawing of Gasoline Injection Pump for M198

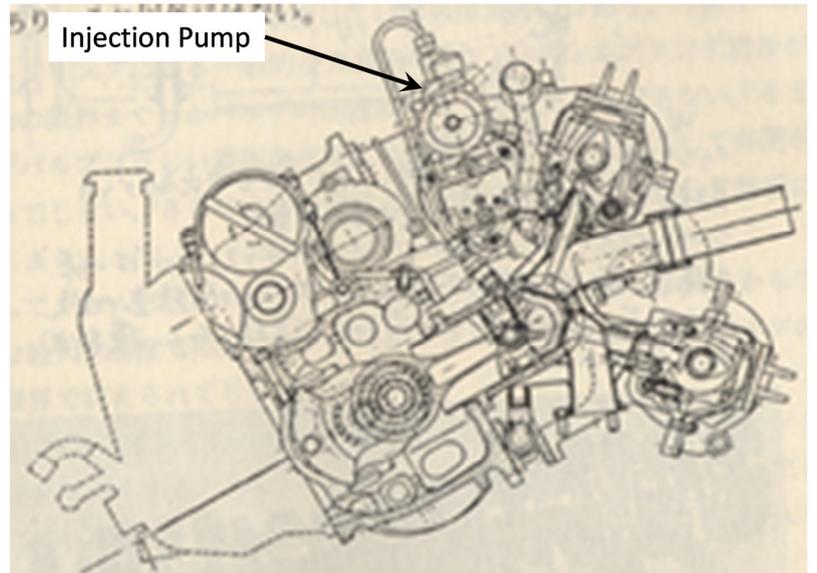


Fig.30b M196 Engine for W196

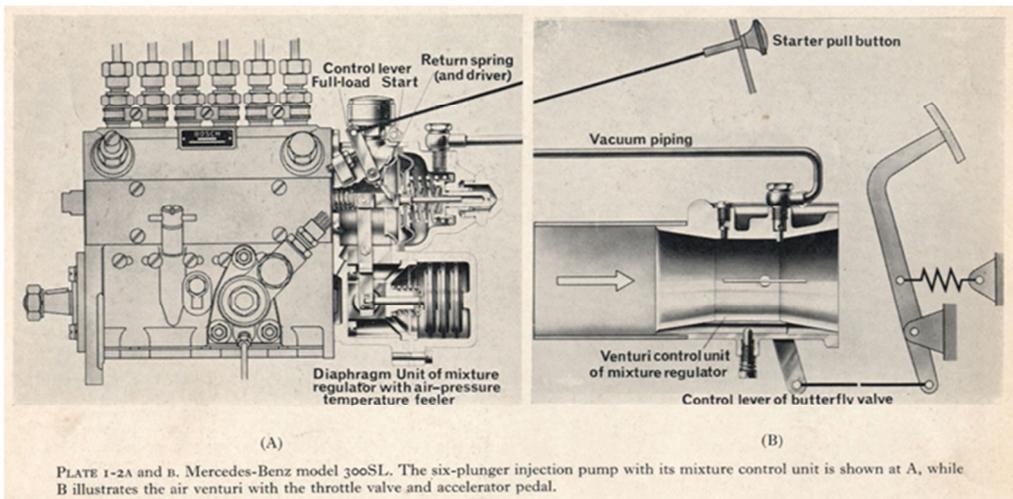


Fig.29b Gasoline Injection Pump and its Mixture Control Unit for M198



Fig.29c Outwardly Opening Injection Nozzle for M198

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

## 6. 1. 2 Benz 社はガソリン筒内噴射搭載エンジンでレースに参戦し大戦果

噴射装置から少し離れた話題になるが 300SL の市販化と並行して、Benz 社はレース活動をさらに強化した<sup>36)</sup>。新たに 2.5L のガソリン筒内噴射エンジン M196 が開発され、W196 のマシンに搭載された。W196 は 300SL の思想を継承して 3 種類が開発され、それぞれ W196 Monoposto, W196R Streamliner, W196S(300SLR: 3L の筒内噴射エンジン搭載、R は Rennwagen を意味)と呼ばれ、前二者はグランプリレース、後者はスポーツカーレースと各々レースの規格に合わせて投入された。筒内噴射装置の基本は 300SL と同じだが細部でレース仕様に変更されたものと推定する。M196 エンジン (Fig.30) は直列 8 気筒 (φ76 × 68.8(2496cc)) のガソリン筒内燃料噴射エンジン、強制閉閉バルブ機構の DOHC「デスモロミック」方式が採用されて 257PS@8250rpm を絞り出す。90° 交叉角をなす大型の 2 バルブは、各々二つのカムとフォロアによって駆動される。排気バルブはナトリウム冷却ステムが採用されている。エンジン中央上部に Bosch 社の噴射ポンプが配置され、シリンダの側方に噴射弁が取り付けられている。クランク軸系はすべて転がり軸受けを採用しており、Hirsch 継ぎ手方式による複雑精巧な組み立て式クランクを採り、転がり軸受けによる 10 点支持でコンロッド大端も一体式転がり軸受けである。実に当時では先進技術満載のエンジンであった。1954 年は W196R のデビュー戦、フランス GP でまず優勝を収め、次いでドイツ GP、スイス GP、イタリア GP を制した。さらに 1955 年まで 15 レースに参戦してそのうち 12 レースで勝利を挙げ、文字通り史上最強、無敵を誇る活躍をしたのであった。

一方、300SLR(W196S)も大活躍した。Benz 社の技術陣は当時のスポーツカーレースが 3.5L 以上のエンジンを搭載していたジャガーD タイプやフェラーリに比べ決して自社の 300SL ベースの 3L エンジンが劣らないことを確信し、M196 エンジンを改良、ボアを 2mm 広げて 2982cc とし、302PS@7500rpm を絞り出すことに成功した。これのデビュー戦は 1955 年イタリア公道レースのミッレ・ミリアであり、300SLR は 1593km におよぶこの伝統のイタリアン・クラシックを平均車速 157km/h、10 時間で走り抜け優勝を飾った。さらにこのレースのほかにも 1955 年にツーリストトロフィー、タルガ・フローリオなどの 4 レースで勝利を収めている。しかし、この比類なき戦闘力を持つ 300SLR は悲劇の主役でもあった。1955 年、ルマン 24 時間に参戦した 300SLR は誰もが優勝を確信していた。事実、Juan manuel Fangio の運転する 300SLR の 19 番車はレースを終盤まで引っ張り、トップに立っていた。このレースの最中、ピットをオーバーランしてコースを塞いだ Hawthorn のジャガーD タイプを、周回遅れの同僚 300SLR20 番車の Levegh がすり抜けようとしたが果たせず、ジャガーを避けるため進路を変えてきたオースチン・ヒーレーに追突し宙に舞い、観客席に飛び込んだ。こうしてルマン史上最悪の大惨事が起こった。それでもレースは続行された。事故の全貌が明らかになるにつれ社会的影響を危惧したベンツ社は緊急役員会で責任と哀悼の声明を出し、レースから全車撤退を指示した。あと数周を残してトップを走っていた Fangio はレースを取りやめ、代わってトップに立って優勝したのはなんと Hawthorn のジャガーであった。ルマンでの事故後、Benz 社は 1955 年をもって一切のレース活動から撤退することを声明した。以降 1987 年まで一切のオフィシャルなレース活動は行っていない。

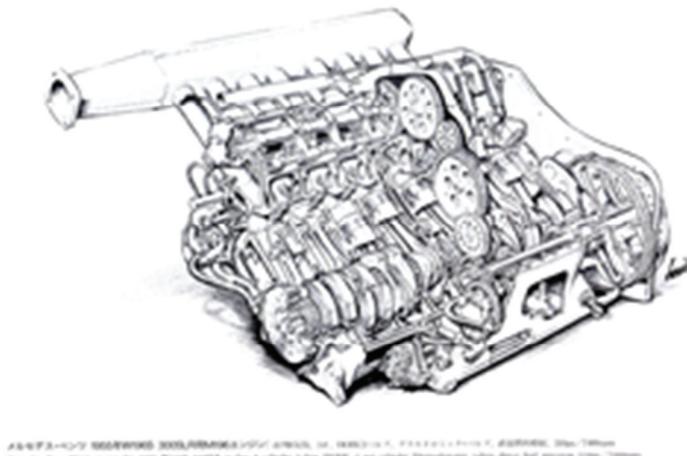


Fig.30 M196 Engine for W196

## 6. 1. 3 市販化された Mercedes-Benz 300SL のその後

Coupe は 1957 年 5 月まで約 1700 台 (一部資料では約 1400 台) が生産された。Roadster は 1963 年 2 月まで生産が続けられ Coupe より多い総生産台数 1858 台であった。やはり欧米の富裕層をターゲットにした高級車路線では行き詰まり感があり、加えて燃料噴射装置にはコストがかかるのでよりグレードの低い車への転換は難しかったのではないと思われる。当時 Benz 社内で行われた 300SL ベースでの筒内噴射と吸気管噴射の比較実験 (圧縮比は変えていない) では、筒内噴射が均一混合気を狙っている以上その性能差はわずか<sup>41)</sup>で、より構造が簡素になることが期待できる機械式の吸気管噴射の開発にその後の重点を置いたように思われる。その論拠として 300SL の生産を終了した 1957 年には同社で初の吸気管噴射の Mercedes-Benz 300D を販売しており 1958 年に販売した Mercedes-Benz 220SE, 220SEB はともに吸気管噴射であった。これら吸気管噴射装置についての解説は本稿の主旨から外れるので割愛する。

それから先、21 世紀を迎えるまで Benz 社からは量産車用のガソリン筒内噴射エンジンは出現していない。現在、Mercedes-Benz 社の広報やモーターショーなどのパンフレットでは、世界初の筒内噴射エンジン乗用車を実用化した会社として、この車を誇りにしている。名車中の名車でもある。

なお、Mercedes-Benz 300SL は今でも欧州の公道を走っており、時たま映画にも登場する。ドイツではオーナーズクラブも存在すると聞く。また現在日本では、北海道小樽市の石原裕次郎記念館、軽井沢の松田コレクション博物館およびトヨタ博物館<sup>42)</sup>に Mercedes-Benz 300SL Coupe が所蔵されている。筆者は一度、ご厚意でトヨタ博物館所蔵車に乗せていただいたが、ガルウイング車の運転席に座るまでの身の動きが一苦労で、ギヤチェンジがもの凄く硬かったことを記憶している。

## 6. 2 Bosch 社の動向

第3章のガソリン筒内噴射の前史では触れなかったが、燃料噴射の概念が考えられた19世紀末から、内燃機関に燃料噴射を用いる可能性をいち早く追求したのは、会社創立からまもないBosch社であった。航空機エンジンでのDaimler-Benz社との共同開発が初めてではない。1912年に2ストローク船外機エンジンに噴射ポンプを装着してガソリン筒内噴射に改造、同年ディーゼル噴射の研究にも着手し、ディーゼル噴射ポンプについては1927年(昭和2年)に実用化に成功している。

### 6. 2. 1 Bosch 社による2ストロークエンジン用ガソリン筒内噴射の実用化

Bosch社には、2ストロークエンジンこそ筒内噴射は好適というこだわりがあったようで、気化器や吸気管噴射では2ストロークは混合気掃気となり、一部の未燃燃料がそのまま排出され、HCエミッションとなり、また燃費悪化を招く。これを筒内噴射では掃気が終了した後に圧縮行程で噴射すれば、この燃料の吹き抜けは回避できる。

1951年に開催されたFrankfurtの自動車国際見本市(モーターショー)でBosch社は2ストロークエンジン用ガソリン筒内噴射装置を初めて発表した。Goliath社とGutbrod社の乗用車エンジンにオプションで、この装置を取り付けた。それぞれGoliath GP700, Gutbrod Superior という車名でともに排気量は600ccである。掃気はシュニーレ方式であった。それぞれの車両をFig.31<sup>43)</sup>, Fig.32<sup>44)</sup>に示す。カラー写真が現存しているので今だ公道を走っているものと思われる。Goliath社とはCarl Borgwardが設立したBorgward系の会社で、Gutbrod社とは元々2輪メーカーで前出のBenz社のHans Scherenbergが一時期役員を務めていたという会社である。

噴射装置付きGoliath GP700エンジンをFig.33<sup>45)</sup>に、筒内噴射システム図をFig.34<sup>46)</sup>に、筒内噴射装置の各コンポーネントをFig.35<sup>47),48)</sup>にそれぞれ示す。噴射ポンプはエンジンクランクシャフトの延長線上に取り付けてあり、ポンプのカムシャフトを直接駆動する。タンクから出てガソリン噴射ポンプに至る低圧配管の途中に燃料フィルターが設置されている。このフィルターの目的はポンプや噴射ノズルの精密加工部分の異物による詰まりや摩耗を防ぐためである。ポンプエレメント(2列)の頭上のチェック弁から高圧配管が出ており終端はエンジンヘッド上の噴射ノズルに繋がっている<sup>49)</sup>。噴射ノズルはBenzの場合と同様に外開弁である。燃料噴射量はラックによるポンププランジャーの回転位置で制御され、スロットルバルブ下流の吸気管負圧をポンプ横に設けたダイヤフラム室に導入し、ダイヤフラムの変位でラック位置を制御した。いわゆるスピードデンシティ方式である。なお、燃料吹き抜け回避が目的なので、噴射時期はBenzと異なり圧縮行程における遅期噴射(Late Injection)であった。

1994年頃、筆者がRobert Bosch社のSchwieberdingenにあるガソリン噴射事業部を訪問した際、玄関にこの噴射装置のカットサンプルが展示しており世界初の筒内噴射装置と書いてあったのを記憶している。置いてあったのがMercedes-Benz 300SLの筒内噴射でなかったのは、今思えば「独自に開発した」というBosch社のこだわりだったかもしれない。ミュンヘンのDeutsches Museumにもこの噴射装置が展示されている。



Fig.31 Goliath GP700



Fig.32 Gutbrod Superior 1951

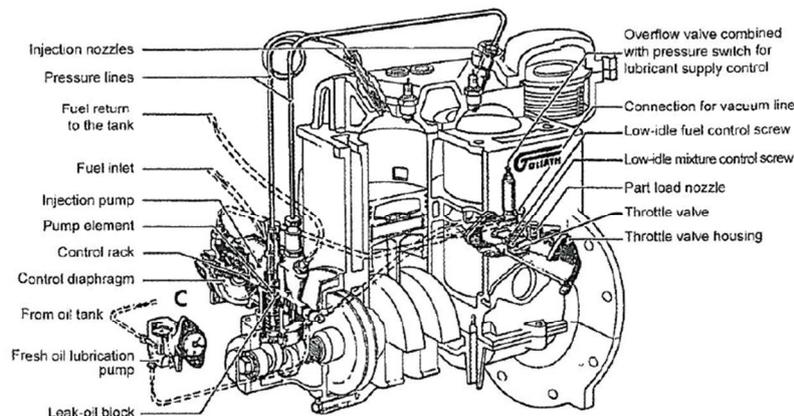


Fig.33 Structure of the Goliath GP700 Engine with Bosch Gasoline Direct Injection

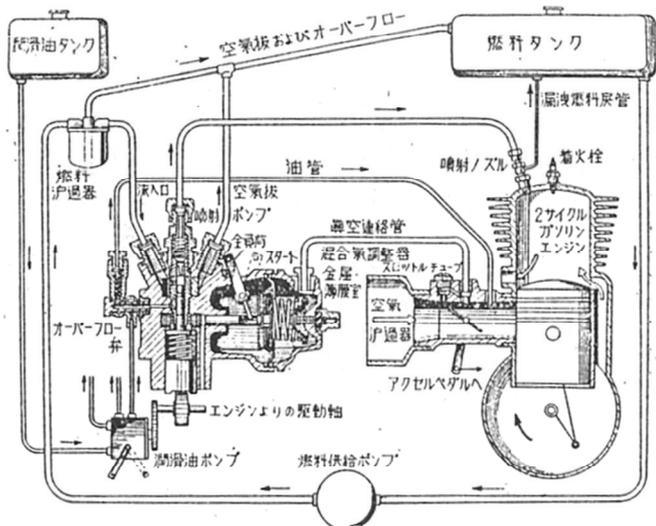


Fig.34 Bosch Gasoline Direct Injection System for Two Stroke Engine (1951)

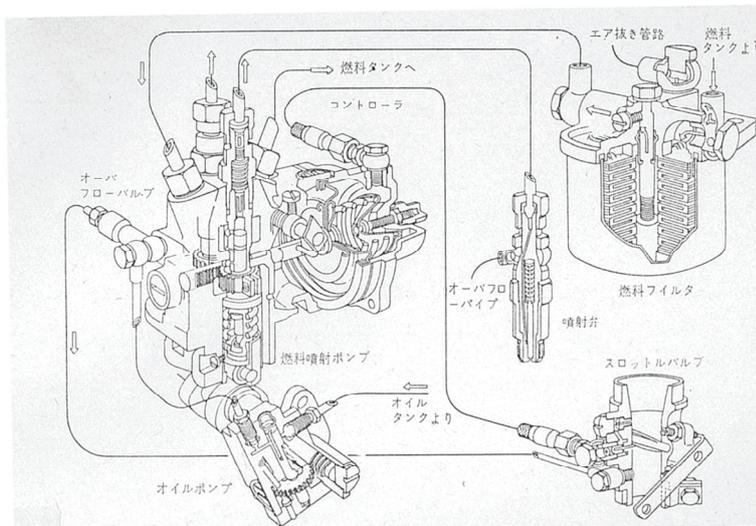


Fig.35 Structure of Bosch Gasoline Direct Injection Components; Pump, Nozzle, Throttle Valve and Fuel Filter for Two Stroke Engine (1951)

6. 2. 2 2ストローク筒内噴射エンジン車のその後

どうい経緯だったかは定かでないが、その後 Benz 社とは異なり小規模会社だったこともあり、Goliath も Gutbrod も会社が売却や企業統合に会い残っていない。大衆車クラスの筒内噴射ということで Benz とは別の進化が期待されたが、これらの車はその後消滅した。Bosch 社は消滅した理由を詳細に知っているのかもしれない。一つの参考として2ストロークエンジン研究の権威である富塚清先生の著書<sup>50)</sup>には「——日本にも輸入され、好調と伝えられたが、どうしたわけか続かず忘却された。理由は不明、恐らく、常例の欠陥のそれか、——例えば、煙が出る、馬力が出ない、少し変えてみるが、良い結果が現れない、それ以上どうしたよいか見当が付かない。この辺まで来るとすぐ四サイクルとの比較や、金儲けのことが絡んできて、自信が失われる。——」と解説してある。大衆車とはいえ、当時大衆が容易に買える車両価格だったとも思えず、オプション設定の筒内噴射はさらに高価格で、割高感があつたのかもしれない。

Goliath GP700 の生産台数は 10,000 台以上だったというが全て噴射付きのオプションだったかどうかは判然としない。Gutbrod Superior については生産台数を記録した資料は見つからなかった。当時の車両価格は一体どのくらいだったのかという記録も見つからなかった。が、大衆車設定でもあり高級車 Mercedes-Benz 300SL よりは圧倒的に販売台数は多かったのではないと思われる。

なお、正史では Mercedes-Benz 300SL が 1954 年の世界初のガソリン直噴エンジン車ということになっているが、筆者の分析では、それより 3 年早い 1951 年の Goliath GP700, Gutbrod Superior のオプション車こそ世界初のガソリン直噴エンジン車とすべきと考える。両社が今日残っていればきっとそう主張したはずである。いずれにしても、Bosch 社は世界初の自動車用ガソリン筒内噴射装置を実用化した会社である。

ところで、日本には軽四輪自動車という市場がある。以前は 360 cc で 2 ストロークエンジンだったが、1960 代後半に日本電装(現社名デンソー)はこの軽四輪自動車用エンジンの性能向上、とりわけ掃気中の燃料吹き抜け損失回避と排気対策を目的に独自にノズルは外開弁で手のひらサイズの 2 筒列型ポンプ(独自の立体カム機構を持つ)を使った機械式筒内噴射装置を軽四輪自動車メーカーと共同で開発した。コスト等諸事情があり実用化こそされなかったが、この開発では自らエンジンを回し、得た技術知見は後の同社の主力商品となった電子制御式燃料噴射装置(EFI)に活かされた。この経緯については資料<sup>51)</sup>に詳しく解説してある。

このように、一度消えてしまった 2 ストローク筒内噴射エンジンだが、「歴史は繰り返す」の妙で、1990 年代に再び開発ブームが到来する。これについては後の連載で解説する。なお、1955 年当時、NSU 社(2 輪メーカー)の Froede 博士が空気噴射式の 2 ストローク 2 輪機関用筒内噴射装置を開発した報告<sup>52)</sup>があるが、これについても後の連載で触れる。

7. 機械式ガソリン吸気管噴射の登場 (1950 年代後半以降)

筒内噴射装置が自動車から消えたものの、自動車の燃料供給装置としてはやはり依然として化器が主流で、筒内噴射の代わるものとしての機械式の吸気管噴射もやはり化器よりも高価格で、相変わらず化器よりはるかに構造が複雑であった。機械式吸気管噴射の開発の歴史は混沌としている。このことは、ディーゼル噴射は列型噴射装置が 1927 年に登場して以降、気筒内の着火拡散燃焼との相性が良く途中副室噴射の分配型が加えて開発されたくらいで 1990 年代にコモンレール方式が登場するまで(当然改良等の努力はあったが)永らくこの基本形が標準の決定版でディーゼル機関に使われてきたという歴史を持つのにに対し、機械式のガソリン吸気管噴射装置は雑多の方式が試行錯誤の上開発され、その全てが消滅している。この要因として、

- (1) 基本を予混合火炎伝播燃焼とする火花点火式ガソリン機関が、化器以上に複雑な機械式の吸気管噴射装置を持ってしても化器を大きく超えた性能の取り分がなかなか期待できないということ。(但しこれは後に 1960 年代の直噴層状給気機関の開発熱に繋がっていく。)

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

- (2) 1908年に販売されたT型フォードは大成功を収め、ガソリン乗用車は大量生産という時代に入り、部品価格とその信頼性が非常に重要視されるようになってきており、気化器に代わる噴射装置は価格上昇分が大きな障壁になったこと。既に標準形のあった気化器に比較して標準形の見えない標準形を試行錯誤して模索するガソリン噴射装置は益々価格上昇の問題にさらされた。

があげられる。特に(2)の要因は重大だったと思われる。つまり1885年にWilhelmMybachが基本形を発明したと言われ改良されてきた気化器を当時の自動車採用して何も決定的な不都合はなかったのである。

当時の数多くの機械式吸気管噴射(一部に創世記の電子制御式も含め)については北海道大学の村山正先生が欧州と米国に分けてかなり詳細にまとめられる<sup>53)</sup>。これら一つひとつを再掲して解説するのは本稿の主旨に反するので、ここではその名前のリストを以下に紹介する。別の書籍<sup>54)</sup>や資料<sup>55)</sup>にも一部紹介されている。一時的な開発だったゆえか会社名や開発者の名前と呼ばれているのが多い。加えて言えば、当時自動車用ガソリン噴射装置に想いを馳せる開発技術者は非常に数多く存在したということである。そして、それは自動車用ガソリン噴射装置開発の本格的幕開けでもあったのである。また、6章で述べたドイツだけでなく、その他の国々とりわけアメリカもこの開発競争に参戦していたのである。

## (欧州)

- ・Kugelfischerの燃料噴射装置(ドイツ) Peugeot 404で実用化 1961年
- ・NSUによるガソリン噴射 Metabo型, Schindele型, Coproni型 (ドイツ)
- ・Boschの噴射装置(ドイツ) Mercedes 300D,220SEで実用化(既述)1957年
- ・Borgward-Isabellaの噴射装置(ドイツ)1963年
- ・SIMMS式ガソリン噴射装置(ドイツ?)1960年
- ・Joseph Lucasの噴射装置(イギリス)マセラティ 5000GT,3500GTで実用化 1959年
- ・Injex(M.Rollet)の噴射系(イギリス)1955年
- ・Bondのガソリン噴射装置(イギリス)1954年?
- ・Carbonaroの空気噴射装置(フランス)
- ・Scintillaの装置(フランス)1961年

## (アメリカ)

- ・GM Rochesterの燃料噴射装置 1957年 Chevrolet Stingrayで実用化(1963年)
- ・American Boschの燃料噴射系
- ・Marvel-Scheblerの燃料噴射系統 1957年
- ・Fuel Chargerの燃料噴射系 3種(M-1,M-2,M-3)
- ・Hollery R-83のガソリン噴射装置
- ・Tecalemit-Jacksonの燃料噴射装置 1963年
- ・Bendix Electrojector 1957年

開発年は分かる範囲で記載した。

Charles H.Fischer<sup>40)</sup>が、当時実用化された機械式吸気管噴射と気化器の価格差について言及している。すなわち気化器に対する価格上昇は、

- ・Peugeot 404に搭載したKugelfischerの燃料噴射装置で95ポンド
- ・Mercedes 300D,220SEに搭載したBoschの燃料噴射装置で200ポンド
- ・Chevrolet Stingrayに搭載したGM Rochesterの燃料噴射装置で142ポンド

だったと述べている。当時の1ポンド=約3ドルで、4バレルの気化器2個で大体12~18ポンド程度だったので、実に燃料噴射は気化器の10倍以上の価格だったのである。これでは普及しない。

ところで、上に挙げたリストの中で一番最後に掲げたBendix Electrojectorとは、Bendix Aviation社(文字通り航空機用燃料供給装置のメーカー)が1957年にSAE(アメリカの自動車技術会)に提出した“Electronic Brain Controls-Bendix Fuel Injection System”なる論文<sup>56)</sup>で、燃料噴射弁を“Electrojector”と称しているのである。Electronic Injectorの短縮語である。この論文はガソリン噴射を開発していた当時の技術者から大いなる反響を受けた。

このElectrojectorをFig.36<sup>57)</sup>に示す。Bendix社の燃料噴射システムは唯一、後の吸気管噴射の標準形である電子制御式燃料噴射装置(EFI)に繋がるものであった。既にその基本骨格を備えていた。が、それを手本としたBosch社がVWの車で実用化するまでにさらに10年という長い時間を要した。

Bendix社は4章第2節(4.2)で述べたように、「ガソリンエンジンにおいて好適な非気化器と何か?」から出発し、ディーゼル流の列型噴射ポンプを使用しない噴射気化器:「高圧燃料系統の中で作動する気化器(噴射)」を開発し、戦略爆撃機B-29用の筒内噴射を開発した会社である。いわゆる重厚な列型ポンプから脱却した、今風に言えば「軽い」簡素な噴射を目指した会社である。「エンジンの設計変更が最少で気化器から噴射に置き換え可能」

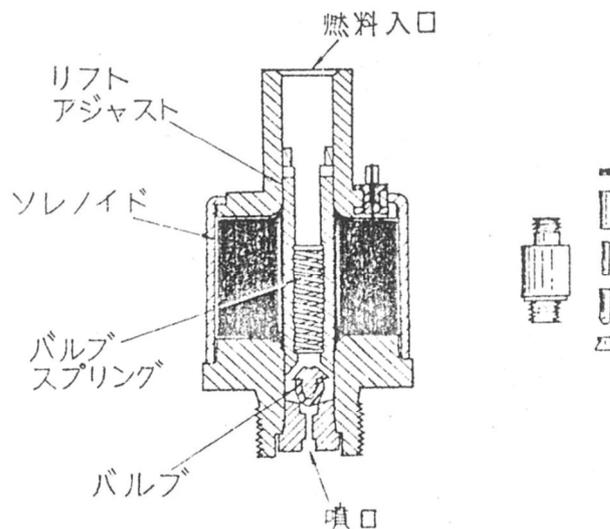


Fig.36 Bendix Electrojector (a Part of INJECTOR)

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

ということを開発目標として標榜したのである。

但し、Bendix 社による燃料噴射の開発努力だけで標準形になったのではなく、同時進行していた他の歴史事象すなわち、「電子技術の発展」と「カリフォルニアの空(大気汚染)」がその標準化を後押しした。この2つはその後の開発者にとって天佑であったと言える。

繰り返しになるが Electrojector は吸気管噴射であったが、後の標準形である電子制御式燃料噴射装置(EFI)の原点とも言え、この進化の過程は、1990年代半ばに日本で実用化された電子制御式ガソリン筒内噴射装置にも大きく影響を与えた。

よって、次回連載はこの原点なる Electrojector についての詳細な解説から始める。

なお、これまで、

ドイツ:航空機用筒内噴射(噴射ポンプ)→自動車用筒内噴射→衰退→機械式吸気管噴射→衰退

アメリカ:航空機用筒内噴射(噴射化器)→自動車用吸気管噴射(創生期の電子制御)

という歴史を辿っている。これから先は、アメリカの自動車用吸気管噴射もひと頃衰退しかかったが、このアメリカタイプの吸気管噴射の「ある機能」の素晴らしさに着目して実用化(標準化)したのは再びドイツという興味深い歴史を辿ることになる。

(次回連載:吸気管噴射 "Electrojector" の登場とその進化)

## 【脚注】

\* ABS は正確に言えば、鉄道→航空機→自動車の順に技術移転している。

\*\* Mercedes は自動車販売社名、300SL の 300 は排気量 3L SL とは Sport Leicht(スポーツ軽量)を意味する。

## 【引用文献】

36) 調 尚孝, 1950 年代 Mercedes-Benz 社レース活動の歴史, エンジンテクノロジー, Vol.4, No.2, 67-71, 2002, 山海堂

37) いのうえ・こーいち, ヨーロッパの名車 Mercedes-Benz, 保育社(1992)

38) 三栄書房編, 名車の世界(6) メルセデスベンツ TEST and PICTURE (1963)

39) Richard van Basshuysen, Gasoline Engine with Direct Injection, Chapter 2, p16 VIEWEG-TEUBNER, 2009

40) CHARLES H. FISCHER; CARBURATION 3: Spark-Ignition Engines; Fuel Injection System, CHAPMAN & HALL LTD(1966)

41) 村山 正(北海道大学工学部), ガソリン噴射について(未公表), p49, 1967

42) 伝説の名車 メルセデス ベンツ 300SL クーペ, トヨタ博物館だより, 5, No.88, 2012

43) Goliath GP700 - Wikipedia

44) Gutbrod - Wikipedia

45) ibid(39), p17

46) 近藤康治, ガソリン噴射式エンジンの現況, 機械技術, vol.3, No.5, 44-48, 1955, 日刊工業新聞社

47) 須田壽, ガソリン噴射式 2 サイクル機関, 内燃機関, vol.10, No.116, 1971, 山海堂

48) Zweitakt-Benzineinspritzung bei Gutbrod und Goliath, MTZ, Nr.10, 1952

49) 近藤康治, ポッシュ社のガソリン噴射装置, モーターファン, 189-193, 昭和 31 年 5 月号

50) 富塚清, 内燃機関の歴史, 三栄書房(1969)

51) 伊藤誠悟, 株式会社デンソー 電子制御式ガソリン噴射装置(EFI)の開発・事業化, CASE#11-04 一橋大学イノベーション研究センター (2011/09/26) <http://pubs.iir.hit-u.ac.jp/admin/ja/pdfs/show/1252>

52) W.Froede, Benzineinspritzung fuer Kleine Zylinder von Otto-Motoren, MTZ, Nr.8, 1955

53) ibid(41) 村山 正(北海道大学工学部), ガソリン噴射について(未公表), 1967

54) 小林久徳 小林善子, 私の学んだ 40 年と次世代への提言(未完), 新理工評論出版, 2010

55) 須田壽, ガソリン噴射装置(その 2), 内燃機関, vol.6, No.11, 85-91, 山海堂, 1967

56) Winkler, A. and Sutton, R., "ELECTROJECTOR-BENDIX ELECTRONIC FUEL INJECTION SYSTEM," SAE Technical Paper 570060, 1957

57) ibid 55)

## 【参考文献】

Mercedes-Benz 300SL については、下記の書籍も参考にした。

・エリック・エッカーマン著(松本廉平訳); 自動車の世界史; グランプリ出版(1996)

・中村良夫; レーシングエンジンの過去現在未来 ; 山海堂(1981)

・中村良夫; F1 グランプリ ホンダ F1 と共に ; グランプリ出版(1990)

・樋口健治; 自動車技術史の事典 ; 朝倉書店(1997)

・笹本健次; ワールドカーガイド 18メルセデスベンツ ; (株)ネコ・パブリッシング(1994)

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 4 2016

- ・長谷川模型;メルセデスベンツ300SL1/30 模型製作要領書
- ・高島鎮雄 ;GULL WING STORY ;二玄社(1971) ※高島氏は日本での Mercedes Benz 研究の第一人者である。
- ・野村誠一写真集 ;Mercedes-Benz 300SL 1954-1957 カーグラフィック編(二玄社)
- ・Dennis Adler ;MERCEDES-BENZ 300SL ;Motorbooks International Publishers & Wholesalers (1994)
- ・Motor Klassik und Mercedes-Benz Museum;300SL 1952-1963 (1992)
- ・Auto Passion ; AUTO COLLECTION No.13 ,MERCEDES 300SL (1994)
- ・三栄書房編;名車の世界(6) メルセデスベンツ TEST and PICTURE (1963)
- ・マーク・カーン著(相原俊樹訳);死のレース/1955年ルマン;二玄社(1993)
- ・アルフレート・ノイバウア著(橋本茂春訳);MERCEDES-BENZ ;三樹書房(1991)
- ・菅原留意;MERCEDES-BENZ GRAND PRIX CARS 1934-1955;二玄社(1997)
- ・ATZ ;Mercedes-Benz Roadster,91 (1989)
- ・隈部一雄他;メルセデスベンツ 300SL ROAD TEST;モーターファン 1962.4月(三栄書房刊)
- ・Mythos Silberpfeil Chronik der legendären Rennwagen ; Mercedes-Benz Classic Video (1997)
- ・Jan P.Norbye ; Automotive Fuel Injection Systems - A Technical Guide ; ;Motorbooks International Publishers & Wholesalers (1981)