

自動車エンジン開発から学んだこと

秋田県産業技術センター 斎藤 昭則

1. はじめに

日本工業教育経営研究会東北支部秋田大会での講演を依頼され、研究発表ではないし何を話せば良いのか悩んだ末、前職で経験した自動車エンジンの開発にまつわる話をすることにした。果たして、工業教育に携わる方々の参考になるのかどうか不安ではあったが、何とか講演を終え、それなりに参考になったとの感想をいただいた時はほっとした。

その後、この講演の内容をもとに本誌の執筆を依頼され、紙面を無駄にするのではないかとまたまた不安ではあったが、何かのお役にたてばとお引き受けすることにした。

今でこそ世界に引けをとらない日本の自動車エンジン技術も、その開発の過程では多くの技術者が苦悩した。そして、成し遂げた達成感にひたる間もなく次の課題に挑戦してきた。このような開発の流れの一端を感じていただき、次世代を担う若い技術者の奮起を促すことができれば幸いである。

2. 自動車排気規制

私は1973年に大学院修士課程を修了し、トヨタグループの研究機関である（株）豊田中央研究所に就職した。当時の自動車各社は米国のマスキー法に端を発した自動車排気規制法への対応に追われていた。いつの時代もそうであるように、日本は常に外からの力に振り回される

立場になる。

すでにモータリゼーション真っ盛りの米国では、自動車の排気成分である窒素酸化物と炭化水素が太陽光に含まれる紫外線で反応して光化学スモッグとなり、目がチカチカし呼吸が困難になるということで大きな問題になっていた。これに対して当時の上院議員エドムンド・マスキー氏の提案による、自動車の有害排出ガス濃度を1/10に規制するための法案制定に揺れていた。当時勢いのあった米国の自動車会社ビッグ3は議会に強い圧力をかけ、この法案は骨抜きになってしまった。

しかし、これを見習った日本の排気規制法は昭和50年（1975年）から施行されることになった。この規制値をクリアしていない自動車は販売できないことになるので、自動車各社は必死であった。特に、車種も生産台数も多かったトヨタ自動車工業（当時）は極めて困難な対応を迫られ、技術面で支援する立場の豊田中央研究所にも多くの技術開発課題が寄せられていた。新入社員の私にはトヨタ自動車内での実習が課せられていたため、入社早々にトヨタ自動車の社員寮に移りほぼ1年間の実習に臨んだ。最初の1ヶ月はエンジン部品製造工場での現場実習があった。現場実習を終えた後、技術部での実習になった。技術部では何が何でも排気規制をクリアする技術開発を期限内にやり遂げなければ

ばならないとの熱気であふれ、「猫の手」も借りたい忙しさであった。実習生などと悠長に構えてはいられない。エンジン開発部署の末席に机とドラフターを与えられ、開発エンジンの部品図を書いた。もちろん図面は手書きであった。1973年はオイルショックに伴う電力規制で、震災のあった2011年と同様に冷房は制限されていた。困ったのは腕の汗であった。腕を製図用紙にあてて書くと汗で紙が伸びてしまうので、腕を浮かせて書かざるを得なかった。細かな寸法を入れる時など、手元が定まらず苦勞した。

まもなく、開発会議にも出るように言われ、会議室の隅でやりとりを聞いた。ほとんど毎日、開発エンジンの排出ガス濃度の最新結果が報告された。炭化水素、一酸化炭素、窒素酸化物の順で数字のみ報告され、出席者はその値のメモをとった。数字の読み上げが終わると、「まだ、そんな値か。そんな値でクリアできると思っているのか。」と、責任者の怒号が飛んだ。自分が叱られた訳ではないが、その迫力で体が硬直した。そんな会議と部品製図に明け暮れ、ほぼ1年を過ごして研究所に戻った。

研究所ではエンジン開発を支援するための計測や解析に従事したが、開発現場ではその後も数多くの排気規制対策技術が考案され、それを応用したエンジンが試作された。多くの排気規制対策技術の中で何とか世に出せるものは次々に実用化されていったが、将来はさらに厳しい規制が行われるだろうとの見方が大方で、根本的な対策は何かが問われていた。

そのような中で、従来とは全く違う考えが提案されていた。それは触媒を使い、酸化と還元を同時に行う方法であった。排気成分のうち、規制される有害成分は一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)、窒素酸化物(NO_x)である。CO、HCは酸化することによって二酸化炭素と水になり無害になるが、NO_xは還元して窒素と水にしなければならない。この酸化と還元を同時に

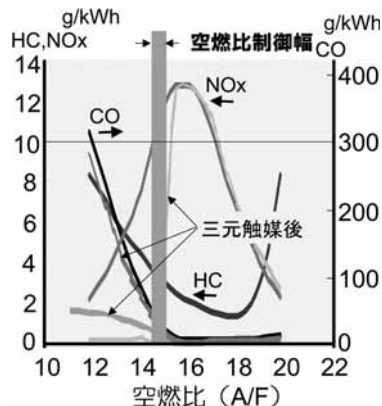


図1 空燃比に対する有害排出ガス濃度

行えば、有害3成分が一気に減少することが分かっていった。ただし、そのためにはエンジンシリンダ内での燃焼を理論空燃比で行う必要がある。理論空燃比とは燃料(ガソリン)に対して過不足なく酸素(空気)が供給されることで、空気と燃料の重量比、いわゆる空燃比が14.7に正確に制御されなければならない(図1)。当時の燃料供給は気化器で行われており、空気流量に対してガソリンがほぼ比例して供給されるしくみにはなっていた。ただし、理論空燃比に正確に定めることは至難の技であった。気化器をベースにして空燃比を制御する方法もいくつか試みられたが、エンジンの全運転範囲で実現するのはとても不可能だった。

これを実現したのが電子制御式燃料噴射装置による閉ループ空燃比制御技術であった。電子制御式燃料噴射装置は、それ以前から開発が進められていたが、コストが極めて高く、この装置を装着したエンジンは「エンジン付き燃料噴射装置」と揶揄されていた。しかし、これを用いた触媒システムが本命だということは誰の目にも明らかになり、実用化に向けた強力な体制が敷かれた。こうして、電子制御式燃料噴射装置を用いた三元触媒システムが実用化され、現在のガソリンエンジン車の基本技術になった。

この間、私は燃料噴射弁の噴霧特性の計測や噴射弁の改良に携わった。触媒システムの欠点

は、エンジン始動時の触媒温度が低い時には触媒が作用しないことである。また、エンジン始動時は始動性を良くするために燃料の量を増量する。増量された燃料は吸気管の壁面に付着し、エンジンが暖機されるまで燃料過剰の状態が続いた。そのため、燃え残りのHCが大量に排出された。これを改善するには、燃料噴霧を微細にして吸気管への付着を極力避け、必要最小限の燃料を供給する必要があった。噴射弁の微粒化改良のために種々のノズル形状を検討し提案した。そうした中で、空気流で燃料を微粒化する噴射弁が最も有効と判断され、米国向けのエンジンに採用された。

現在では直径の極めて小さな多数の噴口で構成される多噴口噴射弁が使われている。また、触媒も多くの改良がなされガソリンエンジンの排気浄化システムは完成の域に達している。

図2に日本の排気規制値の変遷を示した。横軸は年代を示しているが、排気規制が言われ始めた1965年頃（図2左端）に比較すると、現在（図2では右端の2005年）の有害排出ガス濃度は1/100以下になっている。そして、電子制御式燃料噴射装置を用いた触媒システムは、世界標準として現在生産されているほぼ全てのガソリンエンジンに搭載されている。

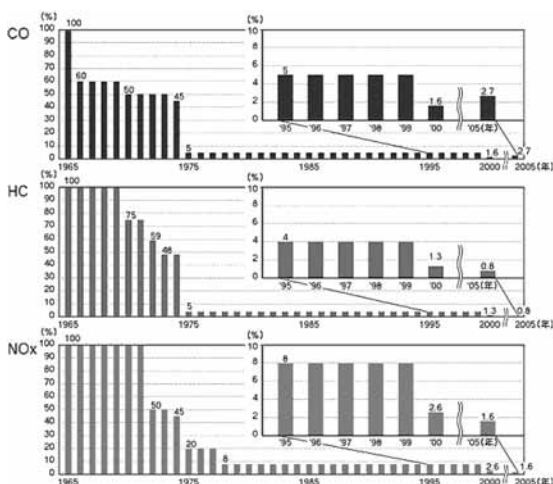


図2 日本の自動車排気規制値の変遷

3. 直噴ガソリンエンジン

自動車各社が排気対策で追われていた一方で、世の中はオイルショックで揺れていた。前項で1973年のオイルショックで電力規制が行われたことにふれたが、その後も原油価格は上がり続けガソリン価格も上昇した。自動車は燃費の良さがセールスポイントになり、燃費向上への取組が急務になった。

燃費の向上にはエンジンの高効率化が不可欠である。そして、エンジンの高効率化には高圧縮比化が大きく寄与する。エンジンの圧縮比を上げると爆発圧力が上昇するため出力が向上する。従って、同じ出力ならば燃料量を低減できることになる。ただし、ガソリンエンジンで圧縮比を高めると、ガソリンの特性上ノッキングが発生し出力が頭打ちになる。これを避けるために、これまで多くの技術開発が行われてきた。燃料の耐ノッキング特性を向上させることと、燃料の供給方法を変えることが主な開発ポイントである。

前項で述べたように、これまでのガソリンエンジンでは気化器や燃料噴射弁によって吸気管内に燃料が供給されていた。これを直接エンジンシリンダ内に供給すると、ガソリンの気化熱でシリンダ内の温度が低下しノッキングが起こりにくくなることが知られている。直噴ガソリンエンジンの特徴である。ただし、シリンダ内に燃料を供給するためには高圧ガソリン噴射装置が必要である。前項で述べた電子制御式燃料噴射装置の燃料圧力は高々3気圧であるが、シリンダ内に噴射するためには100気圧以上の燃料圧力が必要である。さらに、燃焼状態を制御するために噴射時期の制御も不可欠であり、制御性の良い燃料噴射装置が必要であった。これまでも世界中で直噴ガソリンエンジンの開発が試みられてきたが実現できなかった。適切な燃料噴射装置がなかったことが最大の理由である。これに対して、吸気管噴射方式ではあったが、

電子制御式燃料噴射装置が排気浄化システムとともに進展していったことは大きな寄与をもたらした。

100気圧を超える圧力までガソリンを加圧する燃料ポンプと、その燃料を噴射する噴射弁の開発が始まった。高圧燃料ポンプはプランジャ方式にする必要があったが、ガソリンは粘度が低いためプランジャの磨耗が激しく、その対策にはかなりの時間を要した。噴射弁も高出力で高速なアクチュエータから考える必要があった。さらに、直噴ガソリンエンジンでは噴射から点火までの時間が極めて短くなるため、噴霧の蒸発を促進する必要があり、燃料の微粒化を実現するノズル部分の開発も課題になった。「100気圧ものガソリンを噴射するなんてばかげている。」との声もあがっていた。

そうした困難を克服して開発された噴射弁を図3に示す。この時期、直噴ガソリンエンジンの開発は三菱自動車工業でも行われていたが、両社の噴射弁はほぼ同様の考え方によるものであった。駆動は電磁石方式で、ノズルはスワールノズルが使われた。

これらの燃料噴射装置を用いた直噴ガソリンエンジンは三菱自動車では「GDI」、トヨタ自動車では「D-4」という名称で市販車に搭載された。その後、トヨタ自動車では直噴ガソリンエンジン搭載車種を増やす方針が打ち出されたが、スワールノズルの噴霧は圧縮行程の空気密

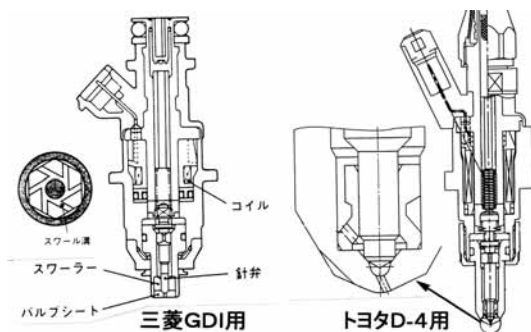


図3 直噴ガソリンエンジン用燃料噴射弁

度が高い状態では分散状態が悪化するため、シリンダ内に空気の渦を発生させて燃料を分散させる必要があった。このため、吸気管にスワールコントロール・バルブが設置されたが、空気通路の抵抗になることが欠点としてあげられていた。この課題が研究所に寄せられた。研究所では以前スリットノズルを試作し、その噴霧形状は扇状（ファンスプレー）になって分散性に優れていることを確認していた（図4）。この噴射弁と簡素な形状の燃焼室とを組合わせた新たな燃焼系を構成し、単気筒エンジンで性能を調査した。その結果は想像以上に良い性能であった。さっそく、トヨタ自動車に報告したところ、これをベースに開発することが決定された。

しかし、それからが困難を極めた。最初の実験では良い性能を出したスリットノズルだったが、同じように作ったはずなのにエンジン性能がばらついた。噴霧形状を測定する方法を考えてスリット寸法と噴霧形状との関係をつかみ、何とかばらつきを抑えた。エンジンの耐久試験では潤滑油の粘度が低下するという不具合が発生した。噴射時期が早期に設定された場合、シリンダ内面に燃料が付着し潤滑油に混じってしまうことが原因だった。噴射弁の位置や噴射時期の適正化が図られ、この課題も何とか解決された。ほぼ課題がクリアされたということで、量産時期が決定された。

しかし、量産への最終調整をしている中で、突発失火という現象が起きることが分かった。エンジン出力のごく低い状態で数十分運転していると、突然、ゴトゴトと音がするというこ

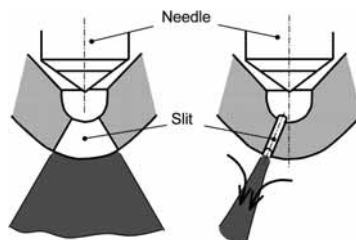


図4 スリットノズルとファンスプレー

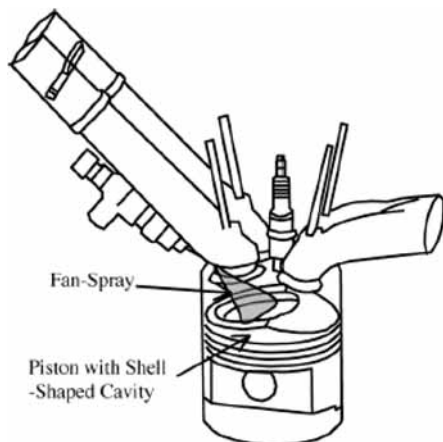


図5 スリットノズルを用いた第2世代D-4

であり、これは一瞬着火が途絶えるのが原因であるとのことであった。この現象は文字通り突発的に起きるので再現が非常に難しかった。そのため、対策もなかなか進まなかった。すでに量産時期が決定されているのに、この対策ができなければ量産延期にならざるを得ない。この時点での量産延期は、ほとんど量産中止という可能性もあった。ここまでくると研究所では手も足も出ない。何とか良い知らせがくることを祈るしかなかった。とうとうトヨタ自動車の開発会議で量産延期が決まったようだとの知らせが入り、もはやこれまでか、と思った次の日、噴射弁の位置を少し変えたら突発失火が収まった、との連絡が届いた。

スリットノズルを用いた直噴ガソリンエンジンは、「第2世代D-4エンジン」(図5)としてようやく世に出た。

4. 噴霧計測技術

研究所では燃料噴射系開発やエンジン開発を支援する一方で、噴霧特性や燃焼状態の評価のための新たな計測・解析方法を開発することも重要な任務である。

私が就職して間もなく、電子技術や光学技術の中でいくつかの大きな進展があった。一つ目は集積回路の進展で、これはマイクロコンピュータにつながっていった。二つ目はレーザの進

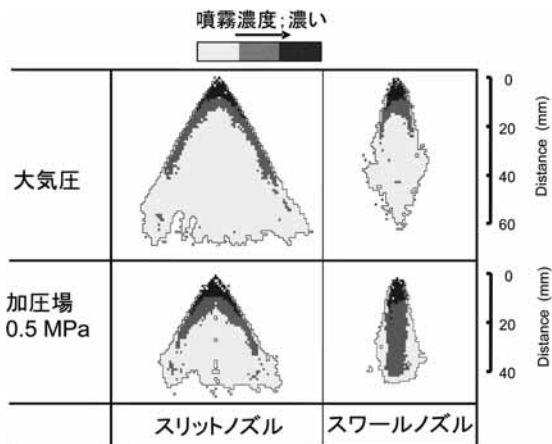


図6 噴霧濃度分布測定

展であった。私は機械系の出身であるが、いわゆる「ラジオ少年」を経験した世代なので、電気関係のことにも大いに興味があった。

研究仲間と一緒にマイクロコンピュータを使った画像処理とレーザを組み合わせ、「レーザ光減衰噴霧濃度分布測定法」を開発した。これによって前項で述べたスリットノズルから噴射されるファンスプレーの噴霧濃度分布を測定し、その特徴を明確にした。結果を図6に示す。この図からファンスプレーは直噴ガソリンエンジンでの実際の噴射雰囲気(0.5MPaの加圧状態)でも、噴霧の分散が良好であることが分かる。

この方法を学会で発表した際、それまで辛口の評価ばかりもらっていた先生から「面白い方法を開発したね。先を越された。」との感想をいただき大変うれしかったことが忘れられない。

5. おわりに

新たな技術が開発され、それを用いた製品が世に出るまでの道のりは極めて厳しい。しかし、乗り切った時の達成感は何にも代え難い。

若き技術者達に自らの好奇心をいつまでも持ち続ける「科学少年」の心を忘れさせないでいただきたい。そして、信頼できる人々との輪を築きつつ、周囲に流されず新しいことに挑戦する「和して同ぜず」の心も涵養していただきたい。