

# 基調論文 エンジン分野における計測技術\*

## Measurement Technologies in the Field of the Internal Combustion Engine

調 尚 孝

Naotaka SHIRABE

The phenomena which occur in the engine are so complicated that the measurement technologies concerned extend to a variety of technological fields. These technologies have become indispensable as an art form in seeking a guide-post with the aim of obtaining a further improved performance of the engine, as they confirm whether the phenomena occur as intended by the engine developer or not. This paper summarizes the measurement technologies concerning the engine combustion which will become more and more important to the suppliers, and also considers the direction of future technologies.

**Key words** : Measurement technologies, Engine combustion, Direction of future technologies, Visualization

### 1. はじめに

エンジンで起こっている現象は複雑であり、それにかかわる計測技術も多岐にわたっている。例えばエンジンの燃焼に関連する現象だけを例に挙げても、吸入される空気流動、動弁系の機械的挙動、乱れの生成と消滅、噴射弁可動部の運動により噴射される燃料噴霧挙動、空気との混合による動的挙動や蒸発現象、それに引き続く燃焼室内での混合気形成、更に着火を起点とする燃焼という化学反応、同時に起きる燃焼室壁面での熱伝達という具合に短時間に物理的そして化学的な現象が複合して進行している。そのために開発者が意図したようにこれらの現象が起きているかを確認し、更により良い性能を得るにはどうすべきかの指針を得る術(すべ)として計測技術が進化してきた。上記の場合、計測対象となるのは空気流量、流速分布、動弁系の動的リフト挙動、噴射弁ニードル挙動、噴霧形状・粒径、噴霧の燃焼室内運動、混合気濃度、燃焼室内圧力、火炎の温度、燃焼生成物の濃度等である。

歴史的にみてエンジン分野でいち早く取り組まれた計測技術は、燃焼室内の圧力測定と言われている<sup>1)</sup>。すでに1920年代から取り組みが始まり、1970年代になっても更に改良が続けられており、この計測技術によりエンジン燃焼の熱力学的理解が可能になった。もう一つの計測技術の進歩は「可視化技術」である。特に燃焼室内を直接見るという努力が古くからなされ続けてきた。「見えない」ものを「見える」化することは物事の理解を大きく深める。現在ではこの燃焼室内の「可視化技術」は多様な位置と角度、大きな視野範囲で鮮明な撮像が可能なまでに進歩している。更に近年レーザを使った計測技術が盛んにエンジン分野に適用

されるに至り速度、温度、噴霧粒径、混合気濃度など燃焼現象にかかわるあらゆる物理状態量が高速で精度よく計測できるようになってきている。

本論文では主にデンソーとしてサプライヤの立場から理解すべきエンジン分野の計測技術を紹介する。なお、一方では変形、応力、歪み、振動、音、潤滑現象を対象としたエンジン分野の計測技術もエンジンメーカーが中心となって強力に行われているが、本論文では割愛する。

### 2. 計測技術の概説

Fig. 1にエンジンにおける燃焼という現象面にかかわる計測技術の一例を示す。上流からイベントの順に以下、吸入空気、燃料噴霧、混合気形成、燃焼、排気に関する計測技術を概説する。

#### 2.1 吸入空気の計測

エンジンの吸入空気量は、ガソリンエンジンの性能に直接影響し、ディーゼルエンジンでは空気過剰率やEGR率に影響するため非常に重要な計測項目である<sup>2)3)</sup>。現状のエンジン実験現場では、量産エンジンに搭載されているエアフローメータを空気量計測に用いることもあるが、エアフローメータと同じ計測原理である熱線式流速計<sup>4)</sup>やラミナーフローセンサを用いて、エンジン定常状態の全気筒分の時間平均的な吸入空気量を計測することも可能である。しかし、回転数やエンジン負荷等の過渡状態において、吸入空気量を直接計測することは現在では困難である。過渡状態における各気筒 - 1 サイクル毎の吸入空気量の正確な計測は、今後のSULEV等の厳しいエミッション規制に対応する

\*2003年9月9日 原稿受理

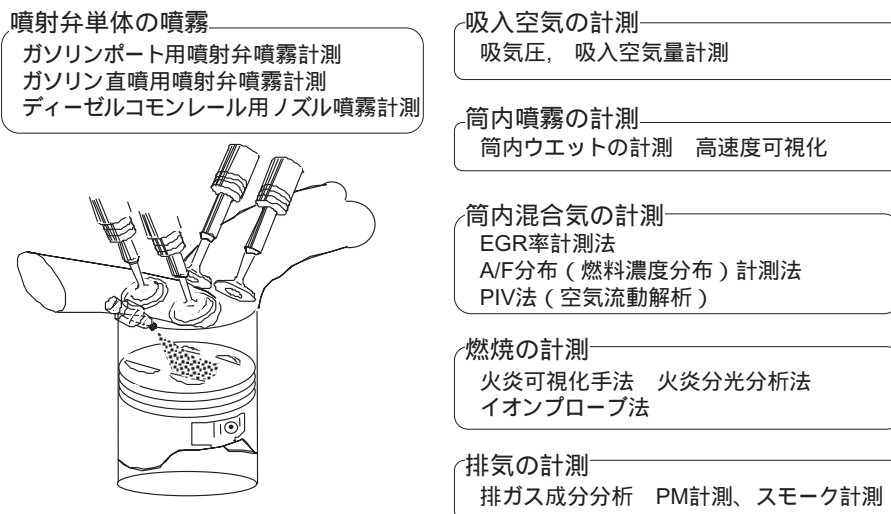


Fig. 1 The measurement technologies concerning engine combustion

ために、その計測要求が高くなってきている。現状では、過渡状態での吸気圧力脈動、筒内圧、吸気温度を計測し、状態方程式を用いて、各気筒の1サイクル毎の吸入空気量に換算することで、間接的に計測されている。過渡状態における各気筒1サイクルの吸入空気量の計測結果は、吸入空気量の気筒分配改善や、負荷応答性（レスポンス）の改善を狙った吸気系の形状改良や、空気量に合わせた燃料噴射の精密制御の開発に活用されている。

吸入空気の流速の計測は、熱線式流速計のほかには、火花放電法、レーザドップラー流速計（Laser Doppler Velocimetry, or Anemometer, LDV, or LDA）が使用される<sup>5)</sup>。これらの計測は局所的な流速や乱れを計測するのに適している。流れ場全体の流速分布や流れ方向を計測する手法として近年PIV法（Particle Image Velocimetry）がエンジン計測に適用されるようになってきた。この手法は、空気にトレーサ（微粒子、マイクロバルーンやオイルミスト等）を混入し、計測場所である吸気ポートや筒内にレーザシート光を照射し、微小時間間隔で撮影した2枚の画像から、トレーサの移動距離と移動方向を求めることで、流れ場の流速や流れ方向の分布、乱れによる渦の発生や渦の大きさ等を計測する手法である<sup>5), 6)</sup> Fig. 2にPIV法による流速分布の計測手法を示す。

2.2 噴射弁単体の噴霧計測

噴射弁（インジェクタ）から噴射された燃料噴霧の粒子径（液滴の大きさ）、ペネトレーション等の特性は、エンジン出力、燃費、エミッション等の特性に影響

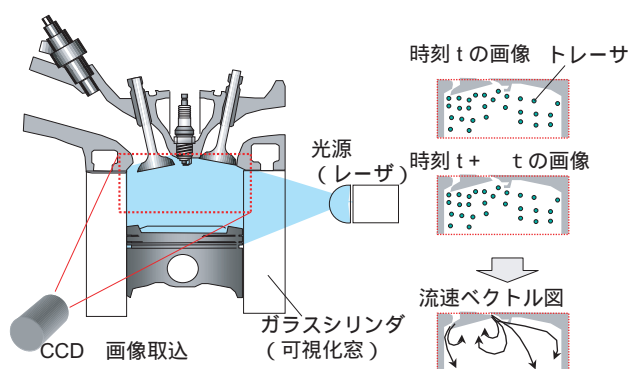


Fig. 2 The measurement method of the flow velocity distribution using PIV

響するため、噴霧特性を定量的に把握しておくことは重要である。噴霧の解析は、噴射弁をエンジンから取外した噴射弁単体状態で評価することが容易である。ガソリンエンジンでは、低圧の吸気ポート噴射用と中圧の筒内直噴用の噴射弁があり、ディーゼルエンジンでは高圧の直噴用噴射弁がある。その他CNG用等のガス噴射弁がある。それぞれの燃料の種類、燃料圧力や、噴射する場のガス圧力・温度に違いがあるので、専用の計測装置が個別に開発されている。以下、ガソリン吸気ポート用噴射弁、ガソリン直噴用噴射弁、ディーゼルコモンレール用噴射弁の噴霧特性を計測する手法について説明する。

2.2.1 ガソリン吸気ポート噴射用噴射弁の噴霧計測

吸気ポート用噴射弁は、約300kPaの燃料圧力でポート内に燃料を噴射する。ポート内のガス温度は、極

低温始動時の -30 ~ 暖機後の約70~80 であり、雰囲気圧力はスロットル閉時の -70kPa~スロットル全開の大気圧、ターボ等の過給がある場合は約 +120kPa程度である。吸気ポート用噴射弁の基本的な噴霧特性としては、流量（静的流量）、噴霧角度、ペネトレーション、粒子径 = SMD (Sauter Mean Diameter) がある。噴霧角度やペネトレーションの計測には、受け止め法や可視化技術を応用したシャドウグラフ（影写真）法が一般的である。

粒子径の計測には、レーザドップラー法（PDPA Phase Doppler Particle Analyzer<sup>7)</sup>）やレーザ回折法（LDSA Laser Diffraction Spray Analyzer<sup>7)</sup>）やシャドウグラフ（影写真）法<sup>8)</sup>がある。シャドウグラフ法は、噴霧にストロボ光を照射し噴霧中の液滴の影を撮影し、画像解析から粒子径を計測する手法である。現在のガソリン吸気ポート用噴射弁は、一昔前に比べると相当微粒化した噴霧となっているが、更なる微粒化向上に向けて、噴射された燃料が液滴に分裂する時の分裂形態を明確にするニーズが高くなっている。

これに対し日本自動車部品総合研究所（以下 総研）では、分裂形態を計測できる噴霧解析装置を開発しており、この装置を用いて、新形状の噴孔における噴霧の分裂過程が液膜分裂であることを見出し製品開発の指針を得ることができた。詳細は本号の論文に記載されている。このように高度な計測技術を持っていることは、新たな噴射弁開発において強力な武器になると思われる。

### 2.2.2 ガソリン直噴用噴射弁の噴霧計測

ガソリン直噴用噴射弁は、10MPa以上の燃料圧力で、筒内に燃料を噴射する。エンジンの運転状態により噴射タイミングは制御されており、大きく分けて吸気行程噴射と圧縮行程噴射がある。前者は比較的均一な混合気が形成でき、後者は燃料濃度が濃い部分と薄い部分を形成して成層燃焼を実現できる。圧縮行程噴射を行う場合、噴射タイミングでの筒内の状態は、ガス温度が250 程度、ガス圧力は約1MPa程度である。噴射弁単体の計測時において、エンジン実機の筒内ガス状態を再現するために、圧力容器を用いるのが一般的である。

粒子径計測には、前項（吸気ポート用噴射弁の噴霧解析）で示した各種手法があるが、総研ではホログラフィ法を直噴噴射弁の噴霧解析に用いている<sup>9)</sup>。ホログラフィ法は、レーザを用いた撮影方法の1種で、物体

の3次元情報を干渉縞として乾板（ホログラム）に記録する技術である。噴霧解析では、まず実際の噴霧をホログラフィ法で撮影し、次にホログラム再生により空間上に噴霧全体の3次元虚像を浮かび上げさせ、この噴霧の虚像（再生像）をCCDカメラで局所的に撮影し、画像処理により粒子径を計測するという手順をとる。つまりホログラフィ法では、単一噴霧の一瞬間の状態を干渉縞という形で乾板に保存し、一瞬間静止状態の噴霧全体像を作り上げることができる。これにより、噴霧全体の粒子径やSMD、更には粒子径の空間分布を計測することができる。詳細は、本号の論文に記載されている。

### 2.2.3 ディーゼルコモンレール用噴射弁の噴霧計測

最近のディーゼルエンジンではコモンレール方式が主流となりつつあり、この噴射システムでは燃料圧力が130MPa~180MPaという高压になっている<sup>10)</sup>。噴射時における筒内のガス状態をここで簡単に計算してみる。圧縮前の筒内圧を大気圧（0.1MPa）、圧縮前の空気温度40、圧縮比18.5、比熱比1.35とすると、噴射時のガス温度は596、筒内圧は5.14MPaになっており、非常に高温高压状態であることが分かる。噴霧単体計測用の圧力容器内で高温高压状態を再現する手法として、プレ燃焼方式<sup>11)</sup>が通常使われる。プレ燃焼方式とは、圧力容器内に可燃ガス（例ペンタン）を注入して混合気を作成し点火プラグで燃焼させ、燃焼後期の高温高压状態のタイミングで、計測対象である噴霧を噴射させて解析を行う手法である。噴射時は高温高压状態であるが、プレ燃焼で酸素が消費されているため燃焼は起こらない。ディーゼル用噴射弁の基本特性はガソリンの場合と同じで、流量特性、ペネトレーション、噴霧角、粒子径 = SMDである。

また、ディーゼルは燃料を噴射した直後に噴霧自身が発火するため、噴霧中の混合気形成が重要となる。このため、噴霧中の液滴部の密度と、燃料蒸気の濃度の同時計測が重要であり、その計測手法としてLIEF法（Laser Induced Exciplex Fluorescence<sup>11)</sup>）がある。この手法は燃料に蛍光剤（TMPD Tetramethylphenyldiamineとナフタレン）を混入し、レーザ照射により液体成分が蛍光する波長と、燃料蒸気が蛍光する波長が違うことを利用し、蛍光量を個別に計測することにより液相と気相の分離を行い、液滴部の密度と、気相においてはその蛍光量をもとに燃料蒸気の濃度を計測する手法である。

また、噴射弁の開弁においては、ノズル内部の燃料流れを把握したいという要求が高い。これらの要求に対しては、10~20倍の拡大モデルを用いて内部流れを解析した例が報告されている<sup>12)</sup>とともに、シミュレーション活用事例も多い<sup>13)</sup>。

### 2.3 エンジン筒内噴霧の計測

ガソリンエンジンの噴射弁から噴射された燃料がエンジン実機でどのような噴霧となるか、また吸気ポートや筒内に付着した燃料ウエットの量や付着位置の計測を、一般に燃料挙動解析と呼んでいる。燃料ウエットの付着位置を特定する方法として、燃料に着色料を混入しておき付着痕を調べる方法が知られている<sup>14)</sup>。また筒内ウエット量の計測については、吸・排気弁を自由に制御できるカムレスエンジンを用い、吸・排気弁を閉じた状態でエンジンを停止して、筒内の燃料ウエットを全量気化させてガスサンプルしHC量からウエット量を計測する方法を総研が開発している<sup>15)</sup>。

実機エンジンでの噴霧挙動の解析には、一般に可視化手法を適用することが多い。総研でも、ポート内に噴射された燃料の観察や、直噴エンジンで筒内に噴射された燃料がプラグ近傍に到達する様子を撮影している<sup>16)</sup>。Fig. 3に筒内噴霧の可視化例を示す。数年前までは、1サイクルに1枚の画像を撮影し、撮影タイミングをずらしながら数枚の画像を撮影し、擬似的に1サイクルと見立てて連続的な噴霧挙動を観察をしていたが、最近では高速度カメラを用いることで、1サイクル中に1000~4500枚の画像を撮影できるようになり、実際の1サイクルでの燃料挙動を観察できるようになってきている。

ディーゼルエンジンでは噴射直後から燃焼が始まるため、エンジン実機での噴霧挙動の計測は、燃焼計測の範疇に入れることにする。

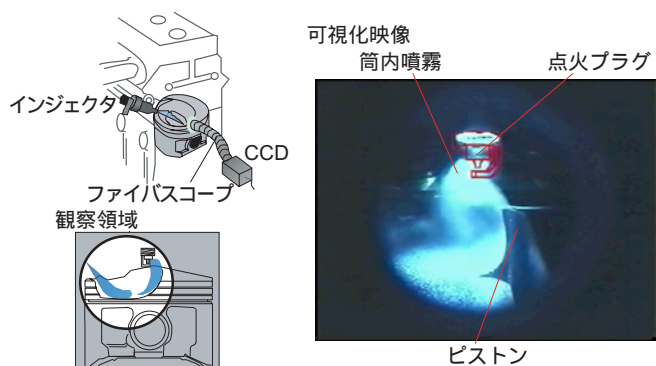


Fig. 3 Visualization of the in-cylinder spray behavior of a direct injection engine

### 2.4 筒内混合気の計測

燃焼前の筒内にある燃料蒸気の濃度は、筒内ガスを少量サンプルしHC濃度を計測することでA/Fに換算することができる<sup>17)</sup>。ガスサンプルする位置を燃焼室上面の数ヶ所に配置することで、混合気濃度の筒内分布を計測することもできる<sup>17)</sup>。ガスサンプルは少量であるとはいえ筒内ガス量が低減してしまうため、最近ではガスサンプルを行うことなく筒内に直接レーザー光を照射し、筒内の燃料濃度を計測する手法も開発されてきている<sup>18)</sup>。

レーザーを用いて燃料濃度を計測する手法には、レーザー誘起蛍光法と赤外吸収法がある。レーザー誘起蛍光(LIF, Laser induced Fluorescence)法の計測原理は、蛍光剤入り燃料がレーザー照射により蛍光する光量と燃料濃度が比例することを利用して、蛍光の強さから燃料濃度を計測するものである。これはディーゼル噴霧解析で用いられるLIEF法と同様な手法である。蛍光剤からの蛍光波長と励起用レーザー光の波長が異なるため、条件により最適な組合せを選択する必要がある。

一方、赤外吸収法(NDIR)<sup>19)</sup>は、燃料混合気を透過させた赤外レーザー光の強さがHC濃度に比例して減衰することを利用して、HC濃度を計測するものである。最近、点火プラグに入射用ファイバーと受光用ファイバーを取り付け、点火プラグ位置での局所的な燃料濃度を計測した例も報告されている<sup>18)</sup>。いずれの手法もレーザー光入射のための光学系をエンジンに組み込んで計測を実現するには相当な困難を伴う<sup>20)</sup>。

エンジン筒内に流入し封入されるガスは、燃料蒸気を含む新規空気と、EGR(Exhaust Gas Return)が混合したものである。EGRには、EGRラインを通り吸気に戻される外部EGRと、内部EGRがある。内部EGRとは、前サイクルの燃焼後のガスが排気ポートに排気されずに筒内に残留したガスと、一度排気ポートに排出されるがバルブオーバーラップ時に筒内に戻される排気ガスをいう。これらのEGR(燃焼後のガス)が筒内全ガス量に対して占める割合はEGR率と呼ばれ、燃焼に大きく影響する。VVTは、バルブタイミングの位相変化で内部EGR率を変化させることで、筒内ガス温度と燃焼をコントロールしエミッションを改善しており、内部EGRを積極的に活用するための機構もある。外部EGR率の計測手法は、吸気ポートのCO<sub>2</sub>濃度を計測してEGR率に換算する手法がある<sup>21)</sup>。

また、筒内の空気流動いわゆるスワール流やタンブル流は、空気と燃料蒸気を混合する作用があり、この

過程はその後の燃焼に大きく影響する<sup>22)</sup>。燃料噴射から発火までの時間が非常に短いディーゼルエンジンでは、筒内流れが少ないと燃焼場所の酸素濃度が薄くなり噴射後半の燃焼が弱くなるため、筒内の流れを用いて燃焼場所の噴霧を流し、未燃焼噴霧に酸素濃度の高い新鮮な空気を当てるようにして燃焼に使える酸素を増やし(=空気利用率の向上)、噴射後半の燃焼を活発にさせている<sup>22)</sup>。

ガソリンエンジンは燃料噴射から点火までの時間がディーゼルエンジンに比べて長いので、混合気形成に吸気から圧縮行程までの時間をかけることができる。とは言っても、ガソリン直噴エンジンでは成層燃焼を実現するために不均一な混合気状態を特定のタイミングで作り上げなければならず、これは高度な技術が必要となる<sup>17)</sup>。

ガソリンでもディーゼルでも吸気から燃焼までの空気流動を制御する要求が高いが、筒内に空気が封入されてから新たに流れを発生させる細工をエンジンに施すのは難しく(スキッシュ等がある)、基本的には吸気弁が閉じるまでに、筒内流入時の流れの勢いが燃焼時まで持続するような流入の仕方を仕込んでおく必要がある。この仕込みを行う方法として、スワールコントロールバルブ等の気流制御アイテムや、ポート形状に手が加えられている。これら筒内の空気流動を計測する手法としては前述のPIV法やLDV法が有効である。

## 2.5 燃焼の計測

エンジン分野で燃焼解析と言えば、筒内圧を計測して熱発生率や図示平均有効圧を計算する解析が一般的であり、これに関しては実績も多く実験室レベルで実用化されている<sup>23)</sup>。ガソリンエンジンでの燃焼は、点火プラグで火花をスパークさせることで始まる。プラグ点火で発生した初期の燃焼火炎は火炎核と呼ばれており、火炎核は初期燃焼の強さと相関が高く、初期燃焼のばらつきはトルク変動にまで影響することがあるので、火炎核の成長過程は燃焼改善やプラグ開発において重要な計測項目である<sup>24)</sup>。火炎核成長過程の計測には可視化手法を用いることが多い<sup>24)</sup>。

また点火により発生した火炎核が火炎となり筒内に広がる様子を計測することは、燃焼そのものを解析するという意味で貴重である。いわゆるノックと呼ばれる現象は、火炎が中心から広がっていく過程で、別の場所で高温の未燃混合気が自着火するものである。火炎の計測には、ガラスシリンダを用いた火炎観察

(Fig. 4)と分光分析<sup>16)</sup>が用いられる。火炎の分光分析とは、燃焼中の燃焼生成物が熱発光する光の波長が異なることを利用し、波長毎に燃焼光の強度を計測することで、燃焼領域の特定や空燃比解析、火炎温度、すす発生状態を計測することができる。詳細は本号の論文に記載されている。

また、火炎の広がりやを計測する手法として古くからイオンプローブ法<sup>17)</sup>がある。イオンプローブ法は、プローブ位置に火炎が来ると電流が発生することを利用して、プローブを燃焼室に配置して火炎の広がりを計測する手法である。この手法は火炎の広がりをクランク角タイミングで把握できるので、燃焼室形状やエンジン条件による火炎の広がりの違いやノック発生箇所等を明確にできる。

また、ディーゼルエンジンでは、燃料噴射した直後に燃焼が始まるため、噴霧挙動と燃焼が密接に関連している。ディーゼルでの燃焼の解析としては可視化手法があるが、ディーゼルは圧縮比が高いのでディーゼルのガラスシリンダエンジンは製作が難しい。そこで総研では量産エンジンでの燃焼可視化を実現するため、ファイバースコープを燃焼室上面から埋め込む方式を開発した<sup>25)</sup>。本号の論文に詳細な記述がある。

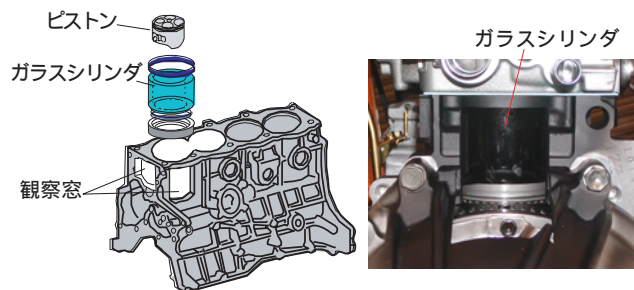


Fig. 4 Glass cylinder engine

## 2.6 排気の計測

排気中に含まれるCO, CO<sub>2</sub>, NOX, HC, PMの量(g/走行距離)は、エミッション規制対象であり正確な計測が要求される。通常のエンジン実験での計測では、排ガス分析器を用いて成分濃度(vol%)を計測しているが、排ガス中の成分濃度は非常に重要で、空燃比(空気過剰率)や燃焼の状態、エンジン制御の正常性が分かる。熟練のエンジン技術者になると、過渡時の排気特性からエンジンの素性或適合マップの完成度まで分かると言われている。このため、エンジン実験には排ガス分析は欠かせない計測の一つであり、総研においてもすべてのエンジン実験室に排ガス分析器

を用意している。

排ガスを浄化する三元触媒は、昭和53年規制に対応するため開発された画期的な技術であり、今では排ガス浄化に当たり前に使われるアイテムである<sup>26)</sup>。機械の代表のようなエンジンの排ガス浄化に、化学分野から触媒という解答が得られている事実は興味深い。触媒の浄化特性を決定する大きな要因として触媒温度があり、始動時の温度上昇過程や、暖機後の触媒の温度分布を計測し、排気管レイアウトと合わせて最適な触媒配置を決定している。また、貴金属を担持していないダミー触媒との温度差から、触媒中の還元反応の大きさを推定することができる。触媒の浄化性能の評価は、触媒前後での排ガス成分の濃度を計測して行う。ガスサンプルの位置を管断面に格子上に配置することで、反応箇所を特定しガス流れの偏りなどを把握する手法が一般的である。

PM計測には、ダイリユーシオントンネルを用いるのが一般的である。この装置は、排ガスを空気で希釈しフィルタにPMを捕集し重量を計測するもので、最近マイクロダイリユーシオントンネル<sup>27)</sup>という小型の計測装置も市販されている。

また、PMの一部でスモークと呼ばれる排ガスの指標がある。これは排ガスの透明度を数値にしたもので、AVL、Bosch等が独自のスモーク数値の定義を提案している。スモーク値の計測方法としては、光透過式とフィルタ捕集式がある。光透過式は、排ガス中の光透過率を計測するもので、フィルタ式は、排ガス中の不透明成分がフィルタで捕集される量を計測するものである。

### 3．計測技術のこれからの方向

以上述べてきた計測技術はエンジン分野のこれまでの研究開発のやり方を大きく変えてきている。少なくとも開発を定量的かつ科学的に変えてきた。例えば燃料噴射弁ひとつとっても開発目標をクリアしているかどうかは最新の計測技術が必要となっている。地球環境に優しいエンジンシステムにはエンジンだけでなく周辺のサブシステムやコンポーネントの計測技術そのものが必須となっていると言っても過言ではない。また紙面の関係で本論文には記述しなかったが、開発情報の提供だけでなくセンサを用いた計測値そのものをエンジンのオンボード制御情報として最適なエンジン状態で運転できるようなエンジン制御も確実に進化し

てきている。

このように従来から取り組まれてきた計測技術は今後もますます進歩していこうと考える。では究極の計測技術はどうか？筆者が考えるにそれは、今そこで運転されているエンジンや車両(走行中を含む)を安直にしかもリアルタイムに欲しい物理量、コンポーネント挙動や燃焼診断を精度良く可能とする計測技術ではないだろうかと考える。これを実現するための課題は多い。だが確実に技術はその方向に向かっているように思う。

### 4．おわりに

エンジン分野の計測技術は非常に広範囲にわたっており、しかも今後とも期待されている領域である。既存技術の地道な取り組みとその積み重ねが必要な一方で、従来にはなかった飛躍的な計測技術開発の取り組みも求められる。かつて単体噴霧や燃焼室内の噴霧可視映像が直噴ガソリンエンジンの開発に大きく貢献したように、「この計測技術があつてこそ、このエンジンシステムの開発が可能となった。」といわれるような技術開発に挑戦していきたいと考える。

本論文をまとめるに当たり、トヨタ自動車(株)第2パワートレーン開発部の古野志健男氏に終始適切な助言を賜った。ここに謝意を表する。

### <参考文献>

- 1) 大澤克幸：Engine Technology No.23 山海堂
- 2) 古濱庄一：内燃機関 森北出版
- 3) 宮下 黒木：自動車用ディーゼルエンジン 山海堂
- 4) 寺尾満：測定論 岩波書店
- 5) 古濱庄一他：エンジンの事典 朝倉書店
- 6) 可視化情報学会編：PIVハンドブック
- 7) 河村清美：ベテラン研究者による実験のこつ 第3集 豊田中研
- 8) 浅沼強：流れの可視化ハンドブック 朝倉書店
- 9) 姉崎幸信他：SAE-Paper 2002-01-0739
- 10) SAE論文集：SP1739 New Diesel Engine & Fuel injection
- 11) T. kim, J.B.Ghandhi, SAE-Paper 2001-01-3495
- 12) 松村恵理子他：SAE-Paper 2003-01-0060
- 13) 岡本敦哉他：SAE-Paper 2001-01-0962

- 14) 齋藤公孝他：SAE-Paper 950044
- 15) 今竹信夫他：自動車技術会・機械学会 共催 第13回 内燃機関合同シンポジウム
- 16) 中島樹志他：自動車技術会 2000春季大会  
20005141
- 17) 安部静生他：自動車技術会 2000秋季大会  
20005524
- 18) 伊藤輝行：Engine Technology No.23 山海堂
- 19) 角方章彦他：日本機械学会熱工学講演論文集 C118
- 20) 井上恵太：Engine Technology No.23 山海堂
- 21) HORIBA：MEXA-7000 製品説明書
- 22) 河野通方：最新内燃機関 朝倉書店
- 23) 小野測器：燃焼解析装置DS0928 取扱説明書
- 24) 吉永融：点火プラグの火花形態と燃焼に関する研究 鹿児島大学
- 25) 田中武裕他：自動車技術会 2000秋季大会  
20005466
- 26) 朱 穎：CVCCと三元触媒 一橋大学
- 27) HORIBA：MDLT-1300T 製品説明書

< 著 者 >



調 尚孝  
(しらべ なおたか)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
パワートレイン分野の研究に従事