

基調論文 自動車分野における計測技術*

Measurement Technologies in the Field of Automobiles

伊奈敏和
Toshikazu INA

斎藤公孝
Kimitaka SAITO

In the face of numerous recent challenges for automobiles to meet today's social requirements; safety, environmental friendliness and energy conservation, yet achieve higher performance, driving pleasure and improved reliability, new products and improvements have continuously been developed.

In this technical review, the measuring and analytical technologies which have been developed in NIPPON SOKEN are described for power-electronics, in-cylinder phenomena, engine lubrication, in-vehicle communication devices and air conditioning equipment.

Key words: Measurement technology, Analyzing technology, Power-electronics, In-cylinder phenomena, Engine lubrication, Communication devices, Air conditioning equipment

1. はじめに

最近の自動車に対しては、安全・環境・省エネルギーなどの社会的な要求に加え、ユーザの要求である高性能・快適性・高信頼性を満足する必要がある、それに対応するための新製品と製品改良が継続して開発されている。

製品開発を目的とした自動車の計測は、計測の対象（現象）を精度良く測定し、現象を正しく理解することで、新製品創出と改良のアクションをとるために行われている。ここで計測技術とは、計測法立案、計測システムの構築、計測実験、計測結果の解析と言った一連の行為であって、長さ・圧力・温度・電流・電圧・光・電磁気などの物理量を直接センサで測定する以外に、可視化などで現象を観察することも計測に含まれる。

計測技術に関しては精度・分解能・応答性・信頼性・寿命・安定性が要求されるが、自動車の計測では実走行中やエンジン運転中の計測も要求されることが多く、限られた空間の中で温度、圧力など厳しい環境での計測システムを構築する必要がある。更により多くの技術者が容易に使えるようにするため、信号線取り出しなどの組み込みやすさ、メンテナンスなども考慮しなければならない。

本論文では自動車開発において環境・高性能・信頼性・快適・安全の観点から（株）日本自動車部品総合研究所（以下、総研という）で開発してきた車両パワエレ機器計測（環境、高性能）、エンジン筒内計測（高性能）、エンジン潤滑計測（信頼性）、通信機器計測（快適、安全）、空調機器計測（快適）について述べる。

2. 車両パワーエレクトロニクス機器計測

環境への社会的責任や石油価格の高騰をうけ、自動車の低燃費への要求はますます高まっている。こうした社会の要請を先取りして、量産型のハイブリッド電気自動車（Hybrid Electric Vehicle 以下 HEV）が、1997年に世界で始めて登場した。すでに10年が経過しているが、改めて「時流に先んじた自動車」であったことを認識する。こうした進化の過程では、従来の自動車に搭載された電気機器に比べ、飛躍的に大電力化した電気機器（パワエレ機器）に発生する様々な現象を、正確に計測解析する技術が重要な役割を果たした。パワエレ機器計測に要求される技術は、電力・電磁気・温度分布・振動など多岐に亘っており、こうした面で正に計測にもハイブリッドな技術が要求されている。

2.1 高電圧・大電流計測

HEVでは大出力に対応した百ボルトオーダーの高電圧と、百アンペアオーダーの大電流が、駆動と回生のエネルギーとして扱われている。従って主として配線や機器内部のオーミックな損失と、モータ駆動などのための高速スイッチングに伴う損失を低減することが、小型高効率化の重要な技術となっている。特に近年は、モータが百kWを超える大出力となっており、その重要性が増している。こうした高速スイッチング（電圧・電流波形）の正確な計測には、計測に伴うわずかな変更が回路のインダクタンスやキャパシタンスなどを変え、スイッチング特性に影響を与えてしまい誤差の要因となる。従って、要求計測精度に応じて計測方法やセンシング手段を工夫する必要がある。

* 2008年2月28日 原稿受理

2.2 電磁ノイズ計測

大電流を高速スイッチングする場合、従来の車載電気機器に比べ、非常に大きな電磁ノイズを発生する。車両の内外への放射を防ぐため、回路基板、筐体、配線などに対策を施すが、この対策を低コストで効果的に設計できることは、重要な技術になっている。

この計測に必要な技術は多岐に亘る。周波数では百kHzオーダからGHzオーダ、電流では電子信号レベルからモータ駆動レベル、計測対象では半導体部品から主機モータにおよぶ広範囲な対応技術が要求される。市販の計測器のみではこれらの要求をすべて満足することは難しい。そこで Fig. 1 に示すように先端に超小型のループコイルを実装した電磁ノイズプローブを用いることで、回路基板上の微細領域のノイズ発生源を計測することが可能となっている。

2.3 温度分布計測¹⁾

HEVでは従来のエンジンに加え、モータジェネレータ、電池、駆動制御用回路など多くの機器を搭載するため、小型化が要求される。この小型化には、機器の電気損失により発生する発熱を少なくできる高効率化と、発生した熱を放熱して機器を冷却する設計技術が必須となる。高い冷却性能を機器に持たせるためには、発熱部位と発熱量を正確に計測し、機器内の熱を速やかに機器外に持ち去ることが重要である。Fig. 2 はモータ

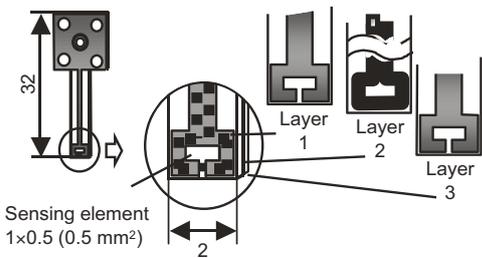


Fig. 1 Noise current sensing probe

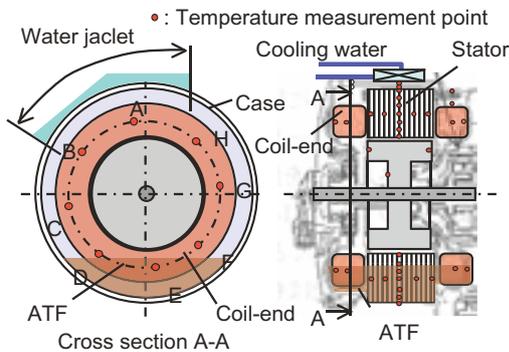


Fig. 2 Motor for evaluation to measure temperature distribution

のステータ部の温度分布を計測するために、ステータの周方向と半径方向に熱電対を埋め込んだものである。こうした多点計測により発熱部位と熱の流れを可視化でき、伝熱を阻害している部位や異常な発熱部位を特定できている。

2.4 振動・騒音計測

車両の静粛性が一段と向上しており、大型の電気部品が多数搭載されている HEV では、騒音対策も重要な要素技術となっている。HEV では先にも述べたように、高電圧、大電流が駆動と回生のエネルギーとして扱われている。高電圧の印加で発生する静電力により、平行電極を有した大型部品（コンデンサ、電池 etc.）が振動し、大電流が流れて発生する電磁力によりコイルを有した大型部品（モータ、トランス etc.）が振動する。そして、これらの振動が騒音源となっていることが多い。これらの振動を正確に解析するためには、静電力・電磁力として作用する加振力と振動モードを計測する必要がある。一般的に振動や加振力はレーザ変位計や G センサなどで計測するが、電池の電極に作用する加振力計測では Fig. 3 に示すように騒音の放射面に作用する力を、 piezofilm を挟み込み計測している。この計測により電池電極の振動発生メカニズムを明らかにすることができた。

3. エンジン筒内計測

エンジン性能は自動車の性能の中でも最も基本的な性能で、高出力・低燃費・高効率・低エミッション・信頼性を高い次元で両立させる必要がある。そのためにはエンジンの筒内での現象を精度良く計測し把握しなければならない。

エンジン筒内の燃焼は、エンジンに装着された複数の部品によって支えられているため、エンジン筒内現象の計測はカーメーカのみならず部品メーカにとって

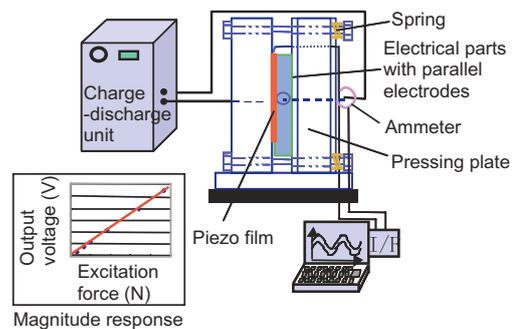


Fig. 3 Plate pressure measuring system

も、部品の使われ方把握、部品の改良、新部品創出のために必要となっている。

エンジン筒内燃焼の現象把握には筒内圧計測が基本となる技術である。燃焼によって発生する筒内圧上昇がエンジンの出力（図示）を決定する基本的要因であり、筒内圧上昇から熱発生率を求めることで、燃焼の初期から終了にかけての燃焼の進行過程を知ることができる。

しかし、筒内における現象をすべて筒内圧で評価するのは限界がある。混合気形成・分布・着火・火炎核形成・火炎の伝播・燃焼生成物などを筒内圧から推定するのは不可能である。そこで筒内現象の計測技術として総研では可視化計測を活用している。筒内可視化映像から技術者は筒内現象の全体像を視覚的・直感的にイメージできるようになる。混合気形成や燃焼がどのように進行するのか、混合気と燃焼の関係がどうなっているのか、問題が何処にあるのか、改良のためにはどうしたら良いのかなどを見つけることができる。

筒内現象の可視化計測では、筒内を光学的にアクセスできる可視化エンジン、狙う現象を正確に捉える可視化システム、高速度撮影装置（カメラ）を準備する必要がある。詳細を以下、順に説明する。

3.1 筒内を光学的にアクセスできる可視化エンジン

エンジン筒内を光学的にアクセスするためには、外部から内部を覗くため、可視化窓を装着する必要がある。総研でこれまで実施してきた可視化ガソリンエンジン（CASE I～V）を Fig. 4 に示す²⁾⁶⁾

CASE I はエンジン本体に全く改造を行わない方法で、点火プラグを利用する手法である。通常の点火プラグにはハウジングボディの内部に絶縁碍子と中心電極が収納されるが、絶縁碍子と中心電極のかわりに超小型 CCD カメラ、ストロボ照明用ファイバ、先端部には、広角撮影のためのレンズ群、石英製観察窓を収納している。

本可視化装置は、ガソリン直噴エンジンの筒内混合気挙動を解析するため開発されたもので、点火機能が失われるが、燃料噴射から点火までの混合気形成解析が可能で、エンジンを加工すること無く可視化できるメリットがある。

CASE II は、エンジンヘッドに筒内観察窓を設置する手法である。観察窓は燃焼室全体が見える大きさに設計され、燃焼室内をサイドから観察できる。観察窓は高温・高圧雰囲気さらされるので、窓の厚み、シール構造など設計上注意が必要である。

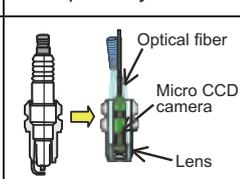
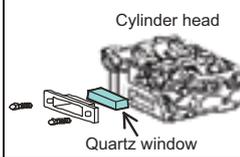
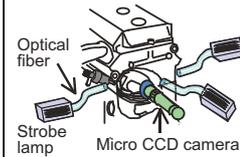
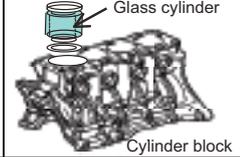
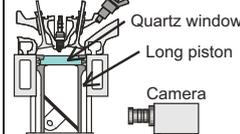
	Optical system	Observation example
CASE I		
CASE II		
CASE III		
CASE IV		
CASE V		

Fig. 4 Optical research engine

CASE III はエンジンヘッドに複数の覗き孔を IN 側・EX 側・リア側に設けて可視化する手法である。撮影は超小型 CCD カメラを直接覗き孔に挿入して撮影する。その際カメラを挿入していない覗き孔には、ストロボ光をファイバで筒内に導き、噴霧・混合気形成・燃焼を 3 次元的に解析できるようになっている。観察窓は小型で受圧面積が小さいので高回転までの観察が可能である。

CASE IV はエンジンブロックにガラスシリンダを挿入して可視化する手法である。可視化気筒はガラスシリンダが挿入できるよう、ブロックのボアを広げる加工が必要である。ガラスシリンダエンジンでは筒内現象の他、ピストン表面のオイル挙動も観察できる。なお、ガラスシリンダエンジンはピストン上死点位置の筒内観察が不可能となるので、CASE I～III と併用するのがよい。

CASE V は筒内現象をボトムから可視化するボトムビューエンジンで、シリンダブロックを延長してロングピストンが内蔵されている。ロングピストンにはボトムから可視化できる観察窓を設け、カメラからの光学アクセスを 90° 変更させる反射ミラーを設置してい

る。ロングピストンは無潤滑で運動し、その慣性重量も大きくなることから、高速高負荷の運転が課題である。ボトムビューエンジンは専用設計となるため、装置製作の期間・費用もCASE I～IVと比較し大幅に増加するが、撮影手法、撮影範囲、解析内容など自由度は高くなる。

3.2 狙う現象を正確に捉える可視化システム

筒内で完全に気化した燃料や、燃焼生成物、ガス流動などは直接撮影では可視化できない。そこで気体の密度差による屈折率変化を光学的に捉えるシュリーレン法や、レーザー励起によって混合気を発光させるLIF法、トレーサでガス流動を可視化するトレーサ追跡法などの工夫が必要になる。

Fig. 5は燃焼室の実像とシュリーレン像が同時に観察できるシステムである。エンジン外部から平行光線を筒内に導入し、燃焼室に設けたミラーによって反射されたシュリーレン像をハーフミラーでカメラ側に導き、実像と同時に撮影可能になっている。実像からは火炎発光が、シュリーレン像からは発光を伴わない(弱い)燃焼や、燃焼終了後の壁面からの未燃HC放出などを可視化できる。Fig. 6に実像とシュリーレン像の同時撮

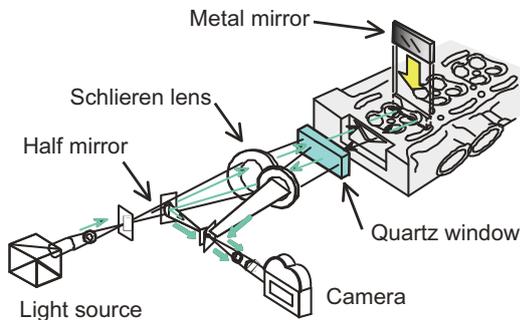


Fig. 5 Optical setup to take schlieren image and actual image



Fig. 6 Schlieren image and actual image

影結果を示す。点火ギャップからの初期火炎核成長の様子が捉えられている。

Fig. 7は燃料に蛍光剤を添加し、紫外線レーザーを照射することで気化混合気が発光することを利用した内視鏡LIF撮影システムである。エンジンヘッドには紫外線レーザー照射用とLIF映像観察用の二つの窓が設置されていて、レーザー光をシート状にすることで筒内断面の混合気濃度の解析ができる。Fig. 8はウォールガイド直噴の筒内混合気の内視鏡LIF映像を示す。筒内噴射された燃料混合気がプラグ周辺に誘導できている様子が分かる。

内視鏡LIF撮影システムでは、レーザーをダブルパルスとし、吸気にガス流動トレーサを注入すれば、筒内のガス流動を可視化する内視鏡PIV撮影システムにも変更できる。

このように、直接撮影のみでは筒内現象の可視化解析に限界があるので、狙った現象を正確に捉えるための光学的工夫をする必要がある。

3.3 高速度撮影装置(カメラ)

筒内の現象は短時間で終了することから高速度カメラが必要になる。高速度カメラの進歩は筒内現象の可視化解析に大きく貢献した。

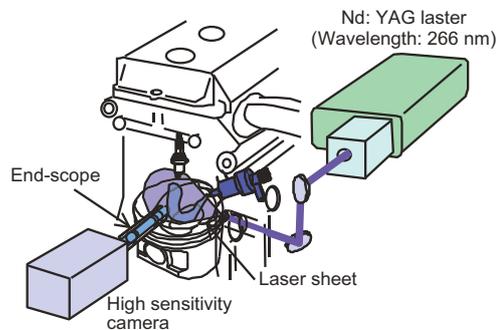


Fig. 7 Endoscopic LIF system

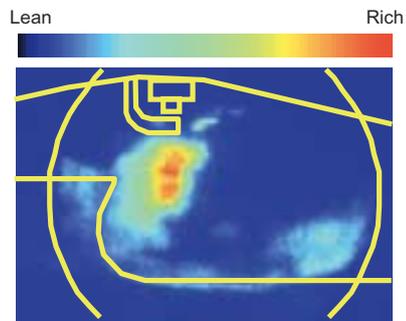


Fig. 8 Air-fuel mixture concentration

高速度カメラには光学的記録のフィルム式カメラと、電氣的記録の固体撮像素子式カメラ（高速度ビデオカメラ）に大きく分けることができるが、高速度ビデオカメラは撮影後に即時再生することができるので可視化結果をその場で確認しながら次の実験にうつれるメリットがある。また、コンピュータからの制御、映像のデジタル保存、画像処理においても優れていることから、最近では高速度ビデオカメラが使用されるようになってきた。高速度ビデオカメラの画素分解能に関しては、撮影速度との間にトレードオフの関係があり撮影速度を上げると画素分解能が低下する⁷⁾ 欠点があるが、固体撮像素子技術は年々進歩してきて解析上問題の無いレベルになりつつある。

一般に高速度撮影するビデオカメラ（CMOS 採用）は高額装置であるが、噴霧挙動などの筒内で再現性のある現象においては低価格な汎用 CCD カメラで擬似的な高速度撮影結果を得ることができる。CCD カメラのシャッターや外部発光ストロボタイミングを現象同期からスイープして数サイクル撮影し、撮影映像をつなげて1サイクルの現象として擬似的な高速度撮影結果を得ることができる。この撮影法では擬似的な撮影速度を容易に数万～数十万コマ/秒にでき、しかも画素分解能が低下することがなく、鮮明な映像を低コストで得ることができる。

4. エンジン潤滑計測

エンジンはピストン・コンロッド・クランク・動弁系など多くの運動部品で構成されていて、潤滑油を媒体とした摩擦・潤滑・冷却・洗浄などの性能が、信頼性と振動・騒音およびフリクションに影響する。近年は、厳しい軽量化・低フリクション要求や油圧による可変機構の広域な作動要求に応えつつ、信頼性や静粛性を確保するための技術開発、製品開発が進められている。対象品の信頼性保証を行うために最大負荷を確実に捉え、フリクションや異音源となり得るわずかな部品挙動や変形を正確に把握する必要があり、潤滑計測には、実機内の過酷な環境下で実働計測が可能で、しかも高精度であることが要求される。

総研の潤滑系計測技術は、可視化による油膜挙動全体像の把握に加え、潤滑の媒体である潤滑油の量と質の変化から、潤滑系を構成する運動部品の温度・歪み・圧力・変位まで、エンジンの最高回転数・最大出力条件で計測できることを前提に開発されている。

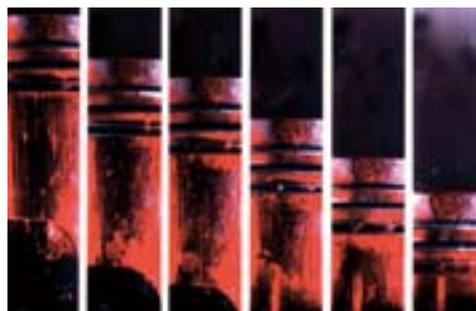


Fig. 9 Oil behavior on the piston surface

4.1 ピストンの油膜計測

ピストンの摩擦損失はエンジン全摩擦損失の中でも大きな割合を占めており、ピストン表面の油膜挙動を把握することは摩擦損失低減に大きな役割を果たす。Fig. 9 はガラスシリンダエンジンを用いてピストン表面の油膜挙動を可視化した結果で、往復運動に伴う油膜厚さの変化、ピストン合口隙間の流れなどが観察できるようになっている。⁸⁾

油膜厚さの定量計測には、レーザ励起蛍光油膜厚さ計測（LIF）などがある。⁹⁾¹⁰⁾ これは蛍光剤を混入した潤滑油にレーザを照射すると油膜厚さに比例した蛍光強度が励起される原理から、油膜厚さを定量的に高精度に計測できる手法である。

4.2 ピストン挙動計測

ピストン挙動計測では、ピストンにギャップセンサや歪センサなどを装着し、ピストン往復運動時の首振り運動、ライナ衝突、スカート変形現象を測定できるが、高速往復運動するピストンから計測信号を送信する技術が必要である。

総研では計測信号伝送としてリンク法、電磁誘導法¹¹⁾、テレメータ法といった技術の開発を進めてきた。テレメータ法は無線で信号伝送する技術であるが、加速度 30000 m/s^2 （エンジン 6000 r/min ）に達するピストンに組み付けるため、超小型・高強度な計測モジュールをして開発してきた。この計測モジュールにはクランクシャフトとコンロッドの相対運動を活用した発電機構を有しており、電池交換の懸念なく、無線での高回転計測が長時間可能となっている。（計測事例は、“本号論文（p. 89）”を参照のこと）

4.3 クランク軸受部の油膜計測

クランク軸受は、ピストンとコンロッドを介した筒内圧やピストン・コンロッド系の回転慣性力を受け止める。高出力化や高回転化による荷重増大と、摩擦力低減を狙った軸受の小径化・薄幅化による受圧面積の減少を両立する適正な油量分配と軸受系の設計のために、軸受とクランクシャフト間の油膜圧力の挙動を精度良く計測しなければならない。そこで薄膜技術を用いて、軸受受圧面に複数の圧力センサを直接形成し計測する技術を確立している。

Fig. 10 は、ディーゼルエンジンの軸受内側表面に薄膜圧力センサを9個形成し、軸受部の圧力分布を計測した結果を示す。軸受とクランクシャフト間に介在する油膜の圧力は、筒内圧による押し付け荷重とクランク回転による慣性荷重によって変動しており、4500 r/min 全負荷条件にて、最大 100 MPa に達する圧力が捉えられている。¹²⁾

5. 通信機器計測

車両の快適性、安全性を高めるため、車両間の機器や車両と路側の機器さらには車両内の機器が相互に無線通信するシステムが急激に増加している。これらには様々な周波数帯の機器が採用されており、ETC, VICS, 電話, スマートシステムなど、数年前と比べると非常に身近な製品になっている。これら機器間の安定した通信を確保し基本性能と信頼性を向上させるには、アン

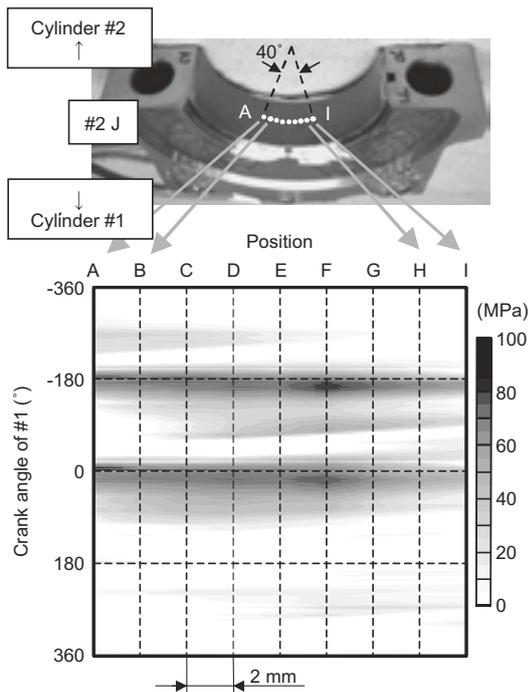


Fig. 10 Oil film pressure distribution of an engine main bearing

テナ単体の指向性、機器の車載位置、機器の周辺環境、ボデー形状など、電波伝搬特性に影響を与える物理特性を正確に把握（計測）することが重要である。

5.1 電波伝搬特性計測¹³⁾¹⁴⁾

車載無線機からの電波の放射により車体表面（ボデー形状に沿って）に電流が流れ、車両周辺への電波放射特性が変化するため、アンテナ単体の指向性はボデー形状の影響を受けている。従って、電波放射時に車両表面に流れる電流を測定し、その値を車両シミュレーションモデルに微小ダイポールの電流値として入力することで、電波放射特性のシミュレーション精度を向上することができる。Fig. 11 に車両表面電流計測用アンテナを示す。車体の形状に密着して計測できるよう、柔らかい材質であるポリイミド基板を用い、基板に生成したストリップラインをループ状に形成した。これをもう一層グランド面を生成した基板で挟み込んだ。このアンテナを用いて、電波の放射時に実際に車両の表面に流れる電流を計測した事例が Fig. 12 である。ピラー部に表面電流が集中しており、これらをシミュレーションモデルに反映することで、シミュレーション精度を向上させることができています。

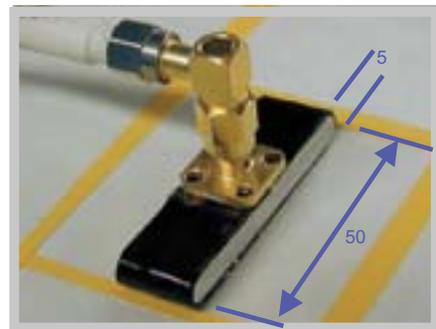


Fig. 11 Motor for evaluation to measure temperature distribution

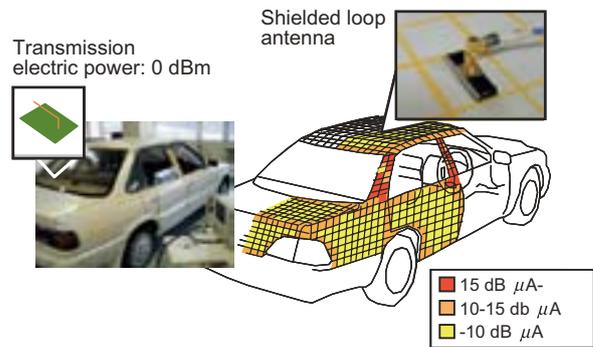


Fig. 12 Position dependence of surface current on a body

5.2 LANノイズ計測

車両内の通信技術として求められるのが、LANの品質向上である。数十個以上のECU (Electric Control Unit) がLANに接続され、高機能なシステムを実現している。ここでは、通信の高速化とシステムの大規模化により、通信信号の波形品質確保と放射するノイズの低減を両立させ、なおかつ外部からのノイズの影響をできるだけ受けない技術が重要である。そのため、ECU、ハーネスなどを經由して放射したり受信したりするノイズを、モデルベンチや車両で計測する技術が求められている。(計測事例は、“本号論文 (p. 129)”を参照のこと)

6. 空調機器計測

空調機器はコンポーネントの基本性能向上と、電子制御の高度化による高機能化によって、乗員に提供する快適性を向上してきた。近年の車両の燃費向上と静粛性への社会的要請により、更なる基本性能の向上が求められている。これに必要な計測技術として、カーエアコン用圧縮機のしゅう動部の潤滑状態を把握するための油膜厚さ計測と、ファン騒音のメカニズムを解析する計測などがあげられる。

6.1 空調機油膜厚さ計測¹⁵⁾

カーエアコン用圧縮機の潤滑は、潤滑オイルを冷媒とともにサイクル内に循環させることで、必要な部位へのオイル供給を行っている。従って、実動状態で圧縮機内のしゅう動部の潤滑状態を把握することは、耐久性を保障するうえで非常に重要である。計測例をFig. 13に示す。斜板型圧縮機の斜板・シュー間の油膜を計測した事例である。光干渉法は、ガラス面とシュー平面の反射光の干渉縞を観察することで、シュー平面の傾きを計測できる。干渉縞の分解能はフィルタの中心波長で決まるが、 $1\mu\text{m}$ 以下を得ることができる。電気抵抗法は、斜板とシュー間の電気抵抗を計測することで、この間の平均油膜厚さが計測できるもので、油膜の単位厚さあたりの電気抵抗を校正値として用いる。

6.2 ファン騒音計測¹⁶⁾

車両の車室内の静粛性向上に伴って、空調機の低騒音化がますます重要になってきている。空調機の車室内騒音の50%以上がファン騒音であり、ファンへの小型・高圧力・大風量への要求も重なって、ファンの更なる低騒音化技術が求められている。このためにはファンで発生している現象を正確に捉える計測技術がポイントとなる。ファン騒音と流れ状態との関係を知

るために、翼間の流れを可視化した例がFig. 14である。回転するファンを擬似的に静止画像として捉え、翼間の流れを連続的に可視化することができる。

7. おわりに

自動車は、ためまぬ改良と新機構の採用により、燃費・出力・信頼性・環境・快適・安全面において大幅に進化してきた。このような自動車の進化を支えたのは、計測技術とシミュレーション技術であるといつて良いであろう。本稿ではシミュレーション技術については触れなかったが、シミュレーションモデルの構築や検証においても計測技術は不可欠である。今後は開発の両輪としてこの二つの技術開発に注力していきたい。

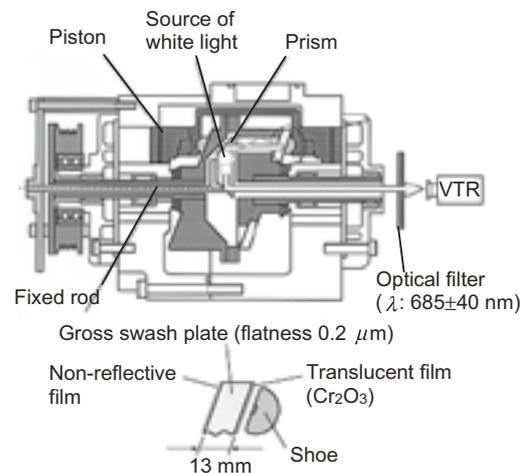


Fig. 13 Compressor structure for testing by optical interference method

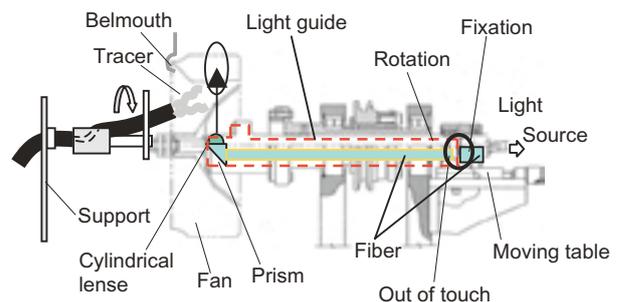


Fig. 14 Experimental apparatus for visualization

<参考文献>

- 1) 鬼丸他：JSAE Vol. 28 No. 2 JSAE200774281.
- 2) 加納他：SAE-Paper 980157.
- 3) 斎藤他：SAE-Paper 950044.
- 4) 安部他：SAE-Paper 2001-01-2029.
- 5) 中島他：SAE-Paper 2001-01-0734.
- 6) 馬崎他：SAE-Paper 2001-01-2877.
- 7) 佐々木：エンジンテクノロジー VOL.9 NO.3 p.94.
- 8) 斎藤他：SAE-Paper 892107.
- 9) Richardson, D. E: SAE-Paper 912388.
- 10) Shaw II, B. T SAE-Paper 920651.
- 11) 加藤直也：SAE-Paper 2001-01-2027.
- 12) 片岡拓実：SAE-Paper 2008-01-0438.
- 13) 高岡他：JSAE 117-02 214 2002.
- 14) 福井他：SAE-Paper 2004-01-1778.
- 15) 松田他：トライポロジ研究会 2006.
- 16) 三石他：JSAE Vol. 34 No. 4 2003 Paper 20034567.



<著者>



伊奈 敏和
(いな としかず)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究2部
車両エレクトロニクス分野の
研究・開発に従事



斎藤 公孝
(さいとう きみたか)
(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・開発に
従事