F1エンジンの計測技術

Measurement Technologies for Formula One Engines

柳　澤　長　生*　花　田　尚　喜*　濱　川　　丈*
Nagao YANAGISAWA　Naoki HANADA　Takeru HAMAKAWA
荻　山　一　志*　後　藤　哲　男*
Kazushi OGIYAMA　Tetsuo GOTO

要　旨

F1エンジンという高回転で使用される計測環境下で物理的現象を正確に把握するためには，大容量で高速サンプリングできる計測システムが必要である．あわせて，センサ精度，計測器の耐振動性が重要となる．また，サーキット走行時の計測ではシステムの小型，軽量化が必要である．これらの要求にこたえるためにF1の開発においては，通常より高性能な各種エンジン計測システムを使用してきた．

その項目とは失火検知システムによる燃焼診断，サーキット走行時の指圧計測およびクランクシャフト挙動計測，油圧計測，フリクション計測，燃料噴霧および筒内流動の可視化計測である．

ABSTRACT

In order to attain an accurate grasp of physical phenomena in the high-speed measurement environment of a Formula One engine, it is necessary to be equipped with measurement systems capable of high-volume, high-speed sampling. In addition, the accuracy of sensors and the vibration resistance of measurement equipment are important factors. It is also necessary to reduce the size and weight of measurement systems in order to conduct measurements during circuit driving. To respond to these performance demands, a variety of high-performance engine measurement systems were used in Formula One development projects.

This paper will discuss combustion diagnosis using a misfire detection system, measurement of combustion pressure and crankshaft behavior during circuit driving, oil pressure measurement, friction measurement, and the visualization and measurement of the fuel spray and in-cylinder flows.

1．まえがき

F1エンジンに限らず，自動車エンジンの開発と計測分野の発達および技術進化は切っても切り離せない．振動などに代表される動的挙動，出力の高低を図り知る燃焼時の圧力，および充填効率の良否を決定する吸排気管内の圧力など，事象解析による仕様判断は，広く一般化している．

Table 1に示すように，第２期Honda F1（1983年から1992年）と第３期Honda F1（2000年から2008年）の間の約10年間で計測技術は進化し，20000 rpm までの燃焼圧や振動および挙動に対し実車でのオンボード計測を可能とした．計測技術の進化は，センサの小型化に代表されるパッケージングの高効率化，さらには，CPUの高速，大容量化による高精度，短時間計測化に拠る結果である．

Table 1　Comparison of contents of measurements

Item	Second era	Third era
Combustion pressure	Only one cylinder is measured (Only dyno)	All cylinders are measured (Dyno and circuit)
Crankshaft twist vibration	Only dyno	Dyno and circuit
Engine vibration	Only dyno	Dyno and circuit
Gear train vibration	Measurement is impossible	Measurement of all gears is possible (Only dyno)

これらの計測技術の進化にともない，計測可能な箇所も拡大し，事象の正確な解明ができるようになった．

この結果，仕様決定やトラブル解消を敏速におこなうこ

＊四輪R&Dセンター

とができ，高品質のエンジンをタイムリーに供給できるようになった．

2006 年末に，新レギュレーション施行によりエンジン仕様のほとんどが変更を制限された．2007 年以降は，レギュレーション許可範囲内での小変更による出力向上，信頼性向上に開発の主眼が置かれ，開発手法の変革も必要となった．

限られた仕様変更の中で確実な採否判断をおこなうことが重要となり，事前検討のために CAE(Computer Aided Engineering)を用いた手法への変革が求められた．

CAE を導入するためには実現象と CAE 結果の正確な合わせ込みが重要であり，単気筒エンジンを用いて徹底した検証をおこなった．

本稿では，F1エンジンの最新計測技術の概要について紹介する．

2．計測技術紹介

2.1. 燃焼計測

2.1.1. MDS(Misfire Detection System)

F1エンジンは，高回転ゆえに，燃焼行程は短時間で終了する．また，スロットル全開と全閉のオンオフ負荷が繰り返される．このため，燃焼が不安定な状態で使用される頻度は高い．このような条件下においてイオン電流を利用した燃焼状態を診断する MDS を開発し，2002 年以降から全レースに適用した．

Fig. 1 に，イオン電流の発生メカニズムを示す．以前から燃焼の過程でラジカルイオンが発生することは知られていた．イオン電流は，以下の二種類の過程で検出され，波形には二つのピークが発生する[1]．

(1)燃焼初期の火炎面が電極を通過する際に発生する比較的長寿命の $C_3H_3^+$ラジカルイオン(ケミカルイオン)を検出する．

(2)2000 K 以上の燃焼ガス中において，N_2 が熱解離し NO_2^+ ラジカルイオン(サーマルイオン)となりこれを検出する．

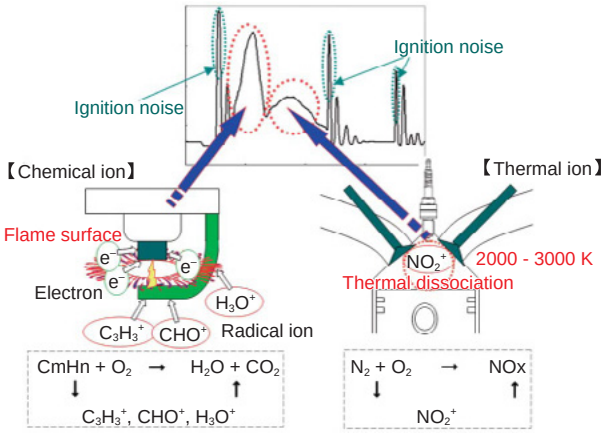

Fig. 1　Mechanism of ionic current

点火プラグの中心電極をイオンプローブとして用い300 V 程度のプラス電位を印加し，燃焼により発生した $C_3H_3^+$，CHO^+，NO_2^+等のラジカルイオンを捕捉する，これがイオン電流計測の原理(Fig. 2)である．

点火コイルのエネルギーをコンデンサに蓄え電源として利用している．

F1エンジンは，CDI 点火システム(Condenser Discharge Ignition System)を採用しており，放電時間が 70μsec と短く点火ノイズの影響が小さいため，燃焼期間の大半をモニタすることができる．

低燃費運転時は空燃比をリーンにするが，この状態で加速するとヘジテーションが起こり，コーナ出口の加速性能が損なわれる場合がある．ヘジテーションの原因は，急激な吸入空気量増加により，可燃限界以下に混合気がリーン化し，失火もしくは失火に近い燃焼となるためである．

この現象を解析するため MDS を開発した．

Fig. 3 に加速状態のパワーベスト空燃比とリーン空燃比の MDS 値の比較を示す．パワーベスト空燃比設定では，リーンからリッチへ短時間で変化し MDS 値の発生時間も少なく燃焼の安定化が早い．しかし，リーン空燃比設定では，MDS 値の発生時間が継続，燃焼の不安定な状態が続き，顕著なヘジテーションが起こっている．

このように走行中の燃焼状態をモニタする技術が開発できたことで，各サーキットの気象条件に適した空燃比のセッテングを可能とした．

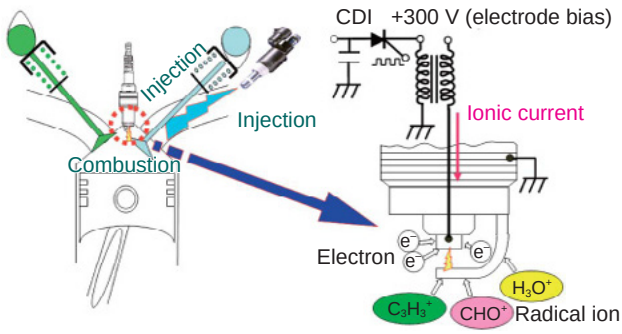

Fig. 2　Ionic current measurement principle

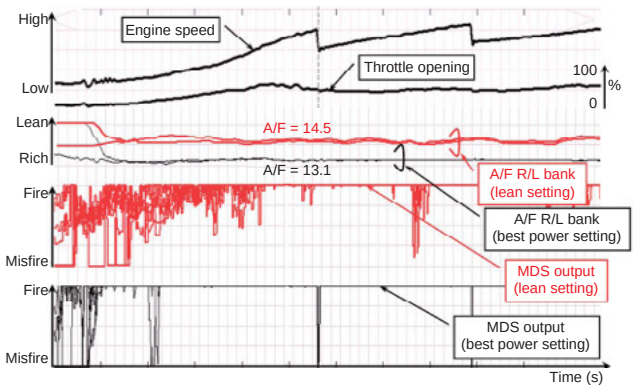

Fig. 3　Detected misfire

2.1.2. プラグ一体型燃焼圧力センサ(PS PLUG)

F1エンジンの開発プログラムで燃焼圧力の計測は恒常的におこなわれているが，燃焼圧力センサを用いた計測には，技術課題がある．

(1)レイアウト自由度が少ない

エンジン構造上センサ取り付け場所が限定され，全気筒指圧計測ができない．

(2)耐久信頼性が低い

高回転運転するため振動が大きくセンサが破損する．

このような状況下，全気筒指圧計測技術として，プラグ一体型燃焼圧力センサ(以下 PS PLUG)の開発をおこなった．

Fig. 4 に PS PLUG 形状と，計測した圧力波形を示す．

PS PLUGを使用した台上テストでの燃焼圧力計測については，既存センサとの出力比較結果など良好な結果を得ている．

この PS PLUG により，センサ取り付け場所が限定されず，全気筒指圧計測が可能となり気筒別の燃焼圧力の違いを把握することが可能になった．

サーキット走行時の燃焼圧力の計測と，その計測結果である図示平均有効圧(Pmi)から求めたエンジン出力の計測結果を Fig. 5 に示す．

走行時の Pmi から求まる図示出力は，ギヤボックスに取り付けたトルクメータ値と同一であり PS PLUG による燃焼圧力の計測はサーキット走行時においても正確であることが証明できた．

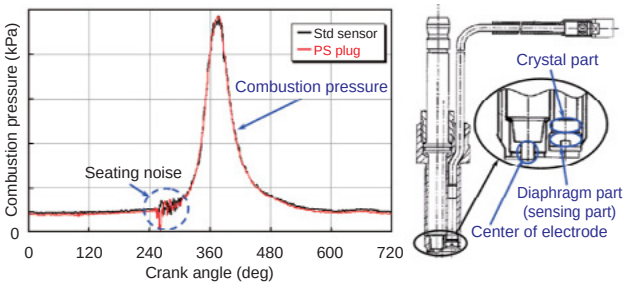

Fig. 4　Combustion pressure force and shape of PS plug

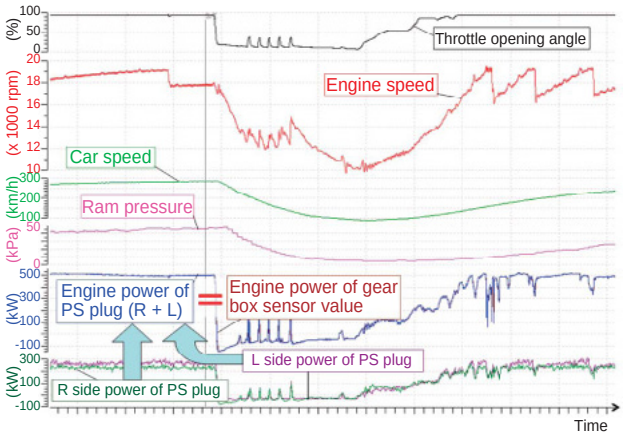

Fig. 5　Circuit running data

2.2. クランクシャフト ねじれ振動

一般的にクランクシャフトねじれ振動の加振力は，ピストンおよびコンロッドによる往復部慣性力と燃焼圧力による回転力の和で決定する．

F1エンジンは高回転で運転されるため，クランクシャフトのピンジャーナル部に加わる荷重は，往復部慣性力が支配的となり最大で 50 kN を超える．

クランクシャフトは固有のねじれ剛性と回転イナーシャにより決定される固有振動数を有するが，前述の加振力により共振を起こし，ねじれ振幅が 1 deg を超える大きな振動をともなう場合がある．

また Fig. 6 に示すように，F1 エンジンの給油方式はセンタ給油としており，一部が中空となり中実の場合より強度が低く，ねじれ共振がクランクシャフトの折損を誘発することも考えられる．

2002 年 F1 エンジンでは，高回転およびモータリング状態で回転 3 次の次数で共振するねじれ振動が課題となった．これは，サーキット走行時の条件で例えると，ストレートエンドでスロットルを閉じた状態に相当し，使用頻度も高く，エンジンの耐久性に影響を与える．実際に，サーキットで二件のクランクシャフト折損が発生した．このねじれ振動は高回転で発生しているため出力向上を目的とした高回転化の弊害にもなっていた．

Fig. 7に示すシステム構成で，ベンチとサーキット双方でクランクシャフトねじれ振動計測をおこない原因解析した．

高速サンプリングが必要なため 200 kHz まで測定可能の data Loggerを用いてクランクシャフトに取り付けた回転信号検出用のパルス信号を記録した．この信号を周波数に変換し変動する信号成分を抽出し，変動する信号成分をさらにフーリエ変換することでクランクシャフトのねじれ振動を把握することができる．

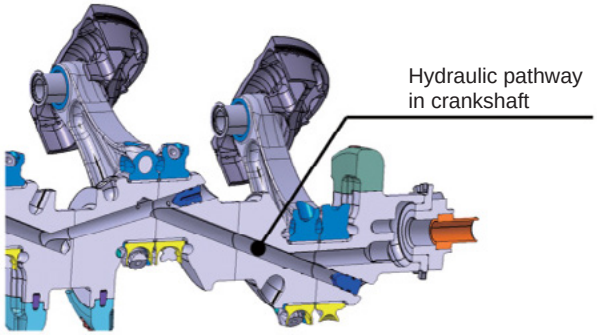

Fig. 6　Section of Formula One crankshaft

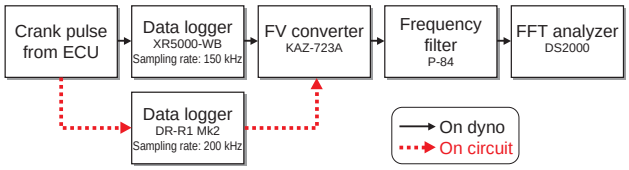

Fig. 7　Analysis system configuration

その結果，ねじれ振動増加の原因は低重心化のために採用したバンク角であることがわかった．2003 年 F1 エンジンはバンク角を94 degから90 degへ変更し，クランクシャフトねじれ振動を低減した．

計測と並行して，AVL 社製，振動シミュレーション(Blicks)による検証をおこなった．

Fig. 8 に Blicks を用いたシミュレーション結果と計測結果を示す．

2002 年 F1 エンジンで課題となっていた，高回転およびモータリング状態の振動レベルが 2003 年 F1 エンジンでは改善されている．

シミュレーションと実機の振動計測結果は精度良く一致し，このシミュレーションの有効性が証明された．

以上のように高速で運転しているクランクシャフトねじれ振動を把握するためには高速サンプリングが必要であり，data Logger の技術進化はその計測を可能とした．

2.3. 油圧計測

コンロッドベアリングの耐久信頼性の課題は，耐磨耗性や耐焼き付き性である．その対処手法として，コンロッドベアリングの材料変更や，潤滑油の粘度，給油量，圧力，エアレーション改善がある．

F1 エンジンにおいて，コンロッドベアリングへの給油は，クランクシャフトの遠心力を利用したセンタ給油方式を採用している．

このため，実際の油圧を計測するには，クランクシャフト内油路の圧力を計測するしかないが，油路内に設置した圧力センサの信号をクランクシャフトからエンジン外部へ出力する技術が必要となる．

Fig. 9 に油圧計測システム図を示す．

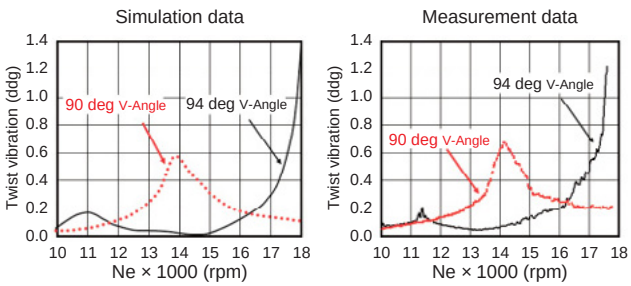

Fig. 8　Simulation results and measurement results

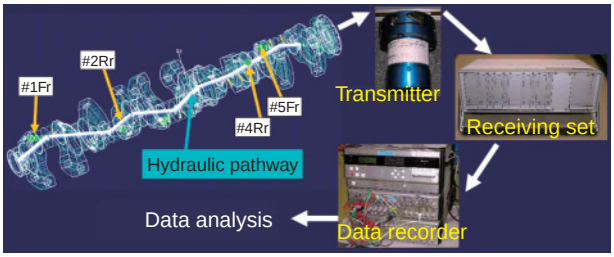

Fig. 9　Analysis system configuration

従来は水銀による物理的な信号経路を有した接触式のスリップリングを用いて信号の取り出しをおこなっていたが，高回転化にともない測定可能なエンジン回転数は限定された．その原因とは，管路内で水銀が高速流動する時の発熱や，液漏れに対するシール能力の限界であった．

それに変わる新しい計測手法として，無線化技術を応用し信号の取り出しをおこなった．無線式はスリップリングと異なり非接触式であるため，これらの課題は解決できた．また，測定可能な回転数も受信機のCPU演算の高速化により実用範囲内で十分に測定が可能となった．ただし接触式と比較して耐ノイズ性は低かったが，受信部を絶縁材で保護することで対応した．

Fig. 10 に中空クランクシャフトの測定事例を示す．

中空クランクシャフトは油路をクランクシャフト回転中心に通す必要がなくなるために，通常のセンタ給油式の課題である下流での油圧低下(内部管路圧損やコリオリの力による圧損)が少なくなり平均油圧が上昇する．その効果は計算では推測できるがクランクシャフト内部油路の圧力計測により，中空クランクシャフトの効果を証明した．また，ノイズの影響も小さく仕様の差を十分に把握できた．

2.4. リンク法

リンク法による計測手法は，目新しい技術ではなく，量産エンジンでも用いられる手法である．ただし，高回転で使用される F1 エンジンではリンクに加わる慣性力の加速度成分は 19000 rpm で運転する場合，量産エンジンの 2 倍程度の 10000 G となる．この違いはリンク機構の設計に大きく影響し，高剛性かつ超軽量のリンク方式が必須となる．

Fig. 11 に F1 エンジン用のリンク方式を示す．

F1用のリンク方式は解析用単気筒エンジンに組み込んで構成される．

軽量化のため，リンク機構はアルミニウム合金の切削加工品とした．リード線を収納するカバー類は全てCFRP製で形成し軽量化を図った．また，剛性確保のためリンク部の断面形状はBOX型とし，断面二次モーメントを確保した．連接部にはNTN製小型のベアリング(内径7 mm，外径 11 mm)を使用して円滑なしゅう動運動を与えた．

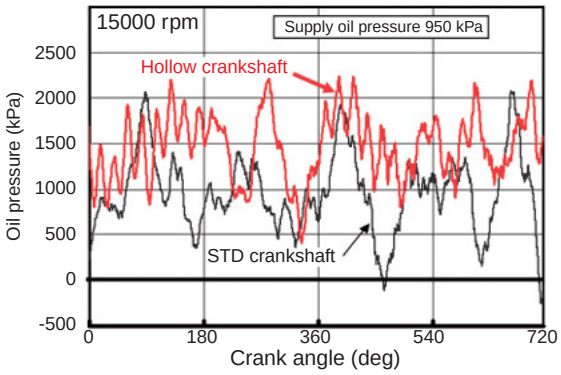

Fig. 10　Pressure in hydraulic pathway

コンロッドはピストンと連結して往復直線運動をおこなう部位を小端部，クランクシャフトと連結して回転運動をおこなう部位を大端部と呼ぶ．そして双方を繋いでいる部位を棹部と呼ぶ．特に棹部には直線運動と回転運動が合成された複雑な力が常に付加されるため，応力集中し，その応力値は材料の破損限界を超えることもある．第３期 F1 エンジン開発でも棹部の折損は発生し，信頼性保証の重要項目のひとつであった．

Fig. 12 に破損事例と CAE 解析結果，リンク法計測仕様を示す．

破損箇所は小端部に近く強度が下がる部位である．この破損事象解析として，CAE解析をおこない応力集中した原因は推定できた．その後リンク法による応力計測手法の開発を進め，2004 年より単気筒での解析を開始した．

Fig. 13にリンク法によるコンロッドねじれ共振計測結果を示す．計測結果からコンロッドはエンジン全負荷状態でねじれ共振を発生することがわかった．また，慣性力支配の無負荷状態では共振は起こらないことから，ガス圧で加振されクランクピン部の曲げでねじれていることもわかった．

以上 F1 用リンク法は 19000 rpm の測定においても十分な測定精度を確保しつつ，リンク機構の耐久性も確保できた．レシプロ運動のようにエンジン内部の現象を把握することが可能となり，その数値化技術はエンジン開発に多く貢献した．

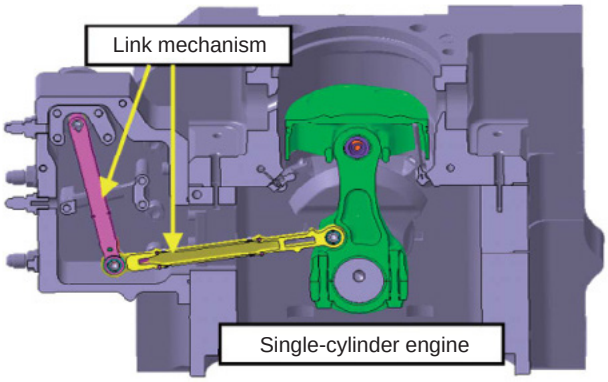

Fig. 11　Link mechanism for Formula One engines

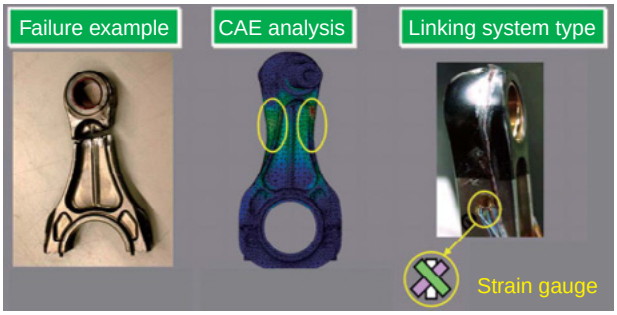

Fig. 12　Failure example, CAE result, linking system type

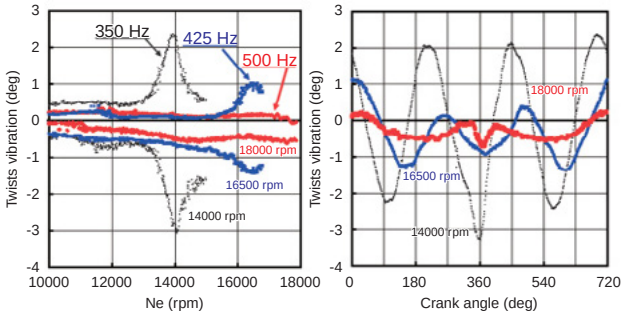

Fig. 13　Twist vibration measurement results for connecting rod

2.5. 浮動式ライナ法によるフリクション測定

エンジン内部で発生する各部フリクションは出力向上を阻む要因の一つであり，各部フリクションを正確に計測することは重要である．フリクションの中でレシプロ系フリクションは，全体の約６割を占めているが，そのメカニズムは明確になっていないのが現状である．今回，レシプロ系フリクションの新たな計測手法として，浮動式ライナ法を紹介する．

レシプロ系で発生するフリクションは以下の三種に大別される．

（1）ピストンとスリーブ間のしゅう動
（2）コンロッドベアリングとクランクピン間のしゅう動
（3）クランクケース内のオイルかくはん

これらフリクションの中で，浮動式ライナ法は（1）のピストンとスリーブ間のしゅう動フリクションを計測する目的で開発した．

Fig. 14 に浮動式ライナ法のテスト装置の断面図を示す．

一般的な浮動式ライナ法装置と比較し，本装置の特徴は高回転化対応を図っている点である．一般的な浮動式ライナ法装置は，測定範囲がエンジン回転数で 5000 rpm 以下であり，材質は鉄系合金またはアルミニウム合金で構成される．しかし，高回転ではライナ本体がピストン運動と同一方向に共振し，計測値の精度が下がる．この対策として，ライナ材質にベリリウム材を用いて軽量化を図り共振の発生を抑制した．さらに，荷重センサを上端配置にして荷重センサ取り付け部の剛性確保を図った．この配置によりファイアリング測定はできない構造となったが，後期仕様では擬似的に燃焼圧力を発生させることでファイアリング条件に

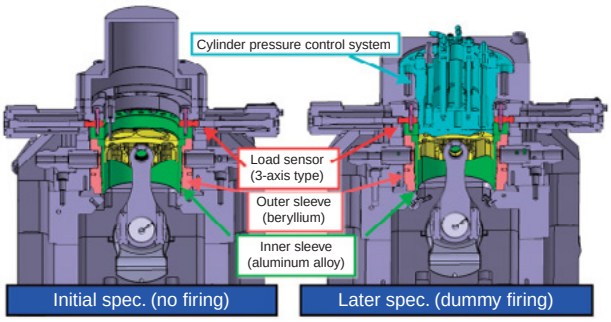

Fig. 14　Floating liner mechanism

対応した．その原理はエアを燃焼室へ導入する機構を用いてピストンによりエアを圧縮させることで 10 MPa まで任意に昇圧できるようにした．

Fig. 15 にモータリング仕様の計測事例を示す．

左図は，荷重センサの上下方向(ピストン運動と同一方向)の値である．クランク角度で整理することにより，浮動式ライナ法は各行程のフリクションを解析できる．一回転分の積分値は一気筒で発生するピストンとスリーブ間のしゅう動フリクションに相当し，その数値化が可能となった．

右図は，荷重センサの左右方向(ピストン運動と直交しクランク回転面と同一方向)の値で，ピストンのスラスト力と反スラスト力の変化を行程別に知ることができる．

以上のように，各行程のフリクション計測が可能となり，ピストンスカートフォームなどの解析に活用した．

2.6. 可視化技術

2.6.1. 燃料噴霧可視化技術の紹介

燃料の微粒化は，気化潜熱により，吸入空気を冷却し，充填効率を高め，燃焼も促進させる．これらは，燃料噴射圧力(以下燃圧)によって変化する粒径やペネトレーションによるものであるが，その数値化のための計測技術は確立されていなかった．

F1 エンジンに用いられた燃圧は，第２期 Honda F1 のターボエンジンに採用された電子制御式インジェクション(PGM-FI)で，0.25 MPa であった．その後，1987 年に 1.2 MPa まで高燃圧化したものの，第３期 Honda F1 の 2004 年まで 17 年間 1.2 MPa で使用していたが，2005 年からは高燃圧化を加速して 5 MPa を採用し，さらに 2006 年には 10 MPa となった．以下に，高燃圧における燃料粒径やペネトレーション解析に用いた燃料噴霧の可視化技術について述べる．

燃料噴霧は，時間の経過によって変化する三次元形状を持つため，以下の項目を計測した．

(１)噴霧粒径
(２)拡散性
(３)ペネトレーション
(４)フォーム角度と形状

このうちフォーム角度と形状については，ノズルの方向によって，ある程度コントロールが可能であるが，粒径，拡散性，ペネトレーションについては各噴孔の形状が影響をおよぼすため，数種のノズル形状による計測をおこなった．

Fig. 16 に PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)の計測器外観と計測原理図を示す．

PDPA は燃料噴霧に連続レーザ光を照射し，その散乱光を信号処理することで液滴の粒径や流速を計測する．流速は２本のレーザがクロスするポイントで計測をおこなう．

このポイントに粒子が入り散乱した光を受光部で捉え電気信号に変換後，FFT を用いて周波数解析し速度を算出する．

粒径の計測は複数のフォトマルで観察したバースト信号の位相差を用いて粒径を計測し，粒子の大きさや形状に応じて異なる屈折光の周波数を補正することで粒径を算出する．

Fig. 17 に PDPA で計測した燃料噴霧の粒径分布を示す．

PDPA で得られた計測結果の詳細を解析するために，La Vision 社製の拡大撮影装置(Spray Master)を用いて，インジェクタ噴孔直下の燃料噴霧形状を可視化した．

Fig. 18 に Spray Master で計測した燃料噴霧を示す．

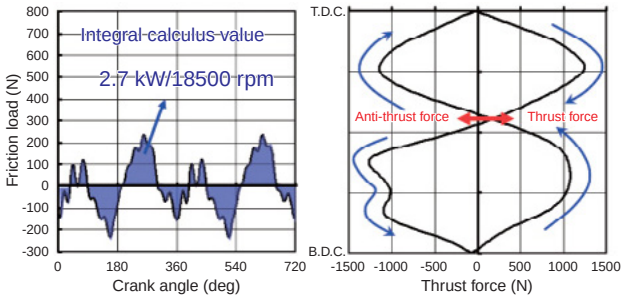

Fig. 15　Sliding friction measurement result

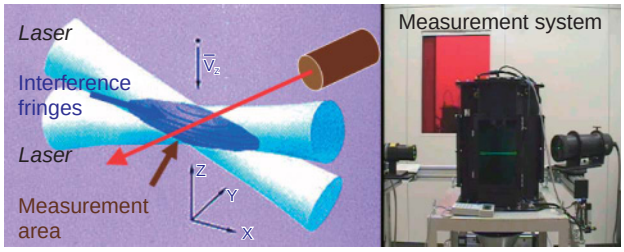

Fig. 16　External view of PDPA hardware and measurement principle

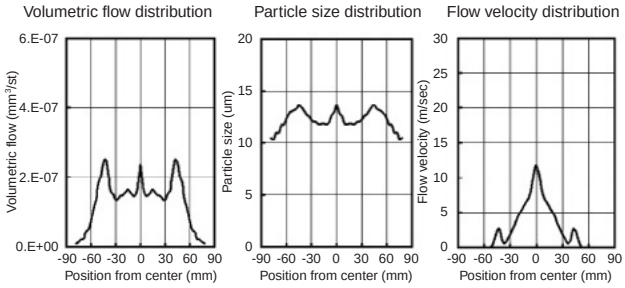

Fig. 17　Fuel spray measurement results

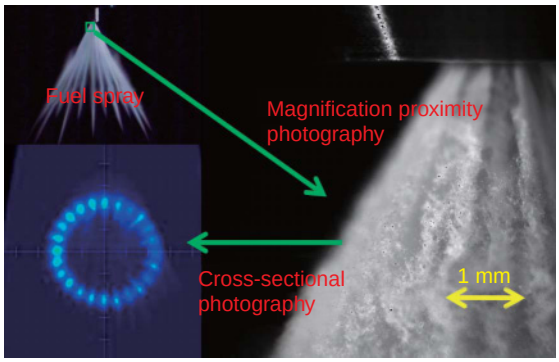

Fig. 18　Macrophotography using SprayMaster

Spray Master による拡大撮影ではレーザによる噴霧断面の透過撮影をおこない，燃圧および噴孔のパラメータ比較や，噴孔数が異なるインジェクタの噴霧特性比較もおこなった．

本装置は，インジェクタ開発の仕様選定，筒内燃料分布シミュレーションなどエンジン開発へ適用され燃料系開発の効率化に貢献した．

2.6.2. 可視化エンジン技術の紹介

燃焼室内の混合気の流れや乱れ現象を把握することは急速燃焼を実現するためには重要である．F1 エンジンの燃焼室内の流れや乱れを計測するために可視化エンジンを用いた．

可視化手法と計測結果およびシミュレーションによる検証について述べる．

Fig. 19 に可視化エンジンの断面図を示す．

可視化エンジンは前述のリンク法や浮動式ライナ法と同様に改修の利便性や汎用性から単気筒エンジンで製作した．シリンダブロックの一部に石英ガラス製の専用スリーブを取り付け，その高さを40 mmとすることで，全行程の可視化を可能とした．

燃焼室内ガス流動の計測は，PIV（Particle Image Velocimetry）を用いた．レーザはYAGの第二高調波532 nm，撮影にはクロスコリレーション用CCDカメラを使用し，シンクロナイザにより両者の同期をおこなった．

流動を可視化させるための極軽量の樹脂製トレーサには直径 40 μm 以下の中空樹脂を使用し，解析には FFT 相互相関法を使用した．

通常のピストンとは異なり頭部を延長した専用ピストンを使用しており，エンジン回転数は 10000 rpm にて計測をおこなった．

Fig. 20にPIVの測定結果とシミュレーション結果を示す．

PIV 計測により燃焼室内ガス流動の現象が把握できた．この可視化結果をもとに RICARDO 社製，ガス流動シミュレーション（VECTIS）の検証をおこない，シミュレーションにより燃焼室内ガス流動を正確に予測できるようになった．また，同様の検証をおこなうことで燃焼室内ガス流動のほかに燃焼室内の燃料挙動解析や燃焼（火炎伝播）解析を VECTIS でおこなえるようになり，開発効率が向上した．

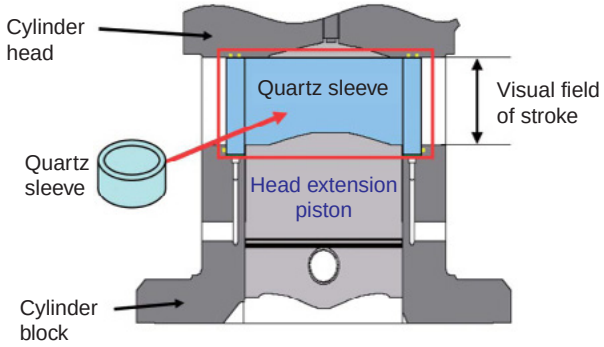

Fig. 19　Visualization engine

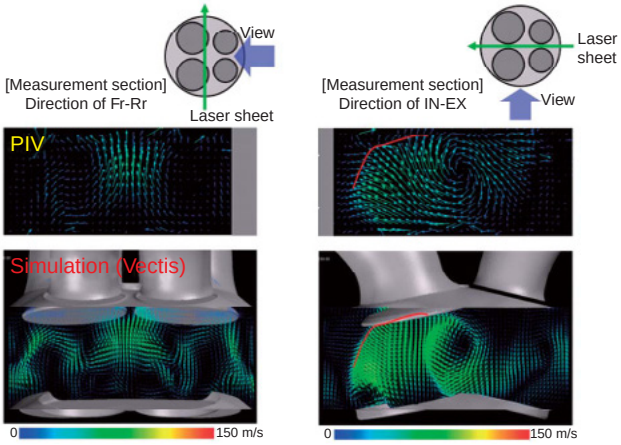

Fig. 20　Measurement result and simulation result

3．むすび

第３期 Honda F1 エンジンの開発プログラムで活用してきた計測技術について記述した．これらのほとんどが，第２期 Honda F1 エンジン開発では計測できなかった項目であり，第３期 Honda F1 エンジン進化は，この計測技術が支えたといっても過言ではない．F1エンジン開発で培われた計測技術は，今後一般車両エンジン開発の計測技術と融合させることで，環境技術開発や開発の高効率化へつながると確信している．

参考文献

（1）島崎勇一，坂口純子，牧　秀隆，鈴木宏章，加藤　彰，西澤一俊：イオン電流計測を用いたフォーミュラ１エンジンの燃焼状態検出システムの研究，Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.1, p.57(2006)

■著　者■

柳 澤 長 生

花 田 尚 喜

濱 川　丈

荻 山 一 志

後 藤 哲 男