

特集：モデルベース開発

18 SKYACTIV エンジン開発を支える燃焼圧解析システムCombustion Pressure Measurement and Analysis System for the
Development of SKYACTIV Engines

吉田 昌弘*1

Masahiro Yoshida

神邑 剛司*2

Takashi Kamimura

要約

当社のパワートレイン開発領域では長年にわたり計測適合支援システムを内製化している。燃焼圧解析領域は1999年に雛形となるシステムを開発し、業務ニーズに合わせた育成を重ねてきた。2011年には車載用燃焼圧解析システムを開発し、SKYACTIVエンジン開発をサポートした。本稿では、当社の燃焼圧解析システムの概要とSKYACTIVエンジン開発での活用事例を紹介する。

Summary

Mazda, in its powertrain development area, has developed and manufactured its own measurement and analysis systems over the years. Mazda first developed a model for combustion analysis system in 1999 and improved it to match the needs of actual engine development. Then in 2011, Mazda developed a combustion analysis system for use in automobiles, which eventually supported the development of SKYACTIV engines. This study outlines the combustion analysis system developed by Mazda.

1. はじめに

SKYACTIV以前のエンジン制御開発では、エンジンユニットの燃焼状態の検証は定常運転時が大半で、実車・過渡運転時のPCM (Powertrain Control Module) 制御開発は排ガス・燃費・ドライバビリティ等の諸性能の検証に直接頼る部分が多かった。

しかし、世界一の圧縮比14.0により出力と環境性能を高い次元で両立するSKYACTIVエンジンの実現には、定常・過渡全ての運転状態において最適な燃焼状態を制御で作り込む開発が必要である。

例えば、SKYACTIV-D⁽¹⁾では、低圧縮化により筒内温度を下げ上死点付近での燃料噴射を可能にすることで最適な燃焼を実現することを狙っているが、低温時の始動性確保や暖機中の失火回避が課題であった。これらは、始動時・暖機時それぞれの場面で最適な燃焼モードに切り替えることで解決している。

このように、回転・負荷・エンジン及び環境状態ごとに最適な燃焼モードを作り込むために、緻密な噴射制御が可能なインジェクタを採用し、過給圧・燃料圧力・EGR等と併せた燃焼サイクルごとの制御を行っている。実車走行中

は最適な燃焼モードをスムーズに切り替えることで、出力・燃費・エミッション・静粛性といった互いに背反する性能を高い次元で両立している。

つまりSKYACTIVエンジン開発では、実車走行評価を含めた全ての領域においてPCM制御による燃焼状態の育成・検証が不可欠であり、それらを支援するためのエンジンユニット評価用・実車評価用（車載型）の各燃焼圧解析システムと共に、膨大な燃焼制御データを即座に効率良く解析できる処理ソフトの開発を行った。

2. 燃焼圧解析システムの構成

以前よりエンジンユニットの燃焼圧解析は内製の計測システムにより行われ広く定着していた。しかし前述の通り、SKYACTIV開発においては過渡状態でのPCM制御と燃焼の連携解析を効率良く、より高い精度で行う必要がある。

求められる機能としては、テストコース・市場走行を含めた実車でのテスト機能、燃焼騒音指標のCPL (Cylinder Pressure Level) やトレースノックといった微細かつ高速な燃焼圧力変動の解析精度向上、燃焼と制御動作の解析効率向上である。

*1, 2 走行・環境性能開発部

Driveability & Environmental Performance Development Dept.

これらを迅速かつ低コストで展開すべく、既存の内製システムをベースにハード・ソフトの資産を最大限活かして、計測及び処理ソフトの大幅な機能強化を実施した。更に新たな机上解析ソフト (PIAnalyzer) を新規に開発し、制御と燃焼の連携解析を非常に簡便に行えるようにした。

2.1 計測ハードウェア

計測ハードウェアとして、従来資産の完全活用・燃焼計測の精度と速度の向上・ユニット用と実車用の異なる要求ハード仕様への対応、これらを全て満足できる市販製品を慎重に選定した (Fig. 1, 3のmeasurement device参照)。

選定ハードウェアは、最大計測電圧レンジ利用時でも約0.3mV/bit計測分解能がある。これはCPL解析や一般的な指圧センサ・チャージアンプの性能に対し十分な性能である。計測速度に関しても、6気筒分の燃焼圧力を計測しても燃焼騒音やトレスノックといった高速な燃焼変動を十分にとらえられる性能を有している。

更に、計測・処理の基本ソフトウェアをバイナリレベルで一本化しシステムの開発・保守を効率化すると共に、きわめて低コストでの展開を可能にしている。

(1) ユニット評価用ハードウェア

ユニット評価用は、新旧の計測ハードウェアを同期させることにより最大32チャンネルの高速計測を実現した (Fig. 1のsynchronous measurement参照)。

燃焼圧解析では、筒内圧力の他にクランクアングル (以下、CA) 情報が必要となる。ユニット用計測システムでは、このCA情報を、クランクシャフト軸上に取り付けたロータリエンコーダから取得する。

PCM制御モニタデータに関しては、内製のPCM制御開発ツールであるMEPS (Mazda Ecu Parameter Setting tool) との通信により取得する。利用するプロトコルはASAMの通信規格ASAM MCD3-MCを独自拡張し、通信データのスループットを大幅に向上させたもので、最大1kHzでのPCM制御モニタが可能となっている。なおこの独自プロトコルはMHCP (Mazda Highspeed Communication Protocol) と呼び、HILS (Hardware In the Loop Simulation) ・ユニット・実車などの試験環境で活用されている。

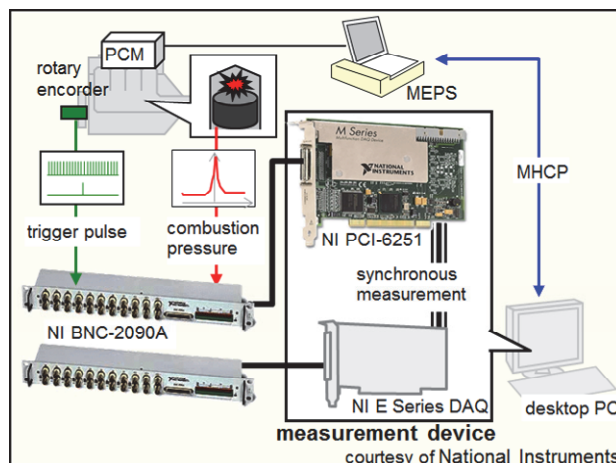


Fig. 1 Hardware Configuration for Engine Unit Testing

また当システムは、燃焼圧力の解析だけでなく、角度単位での解析機能を活かしたさまざまなメカニズム解析に利用されている。

SKYACTIV-G[®]の燃焼開発には、気筒間の排気ガス干渉を抑えたスムーズな掃気が重要な役割を果たすため、排気系開発に利用するCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析精度向上が必要不可欠であった。

そのためFig. 2のように、ユニット評価用システムを利用した排気系の主要箇所の脈動を多チャンネル計測を行い、CFD解析モデル精度を検証した。これにより、モデルの育成と解析結果の確からしさが実証され、SKYACTIVエンジン排気系のモデルベース開発の拡大にも貢献した。

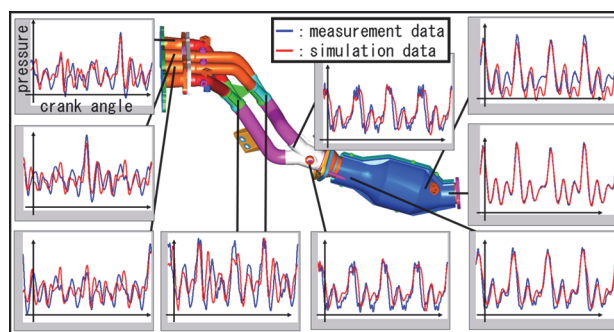


Fig. 2 Measurement Multi-Channel Exhaust Pressure for Verification of the Accuracy of CFD Simulations

(2) 実車評価用ハードウェア

計測デバイスは可搬性を考慮し、USB接続タイプを採用した (Fig. 3)。実車評価用の最大の特徴は、CA情報をエンジンのクランクアングルセンサ (以下、CAセンサ) 信号から取得する点である。実車に搭載にされたエンジンは、スペースの制約上ロータリエンコーダを取り付けることができない。そのため、CAセンサ信号を分岐計測し、ソフトウェアで0.5deg単位に逡倍処理することで、燃焼圧解析に必要な角度基準信号を内部生成している。

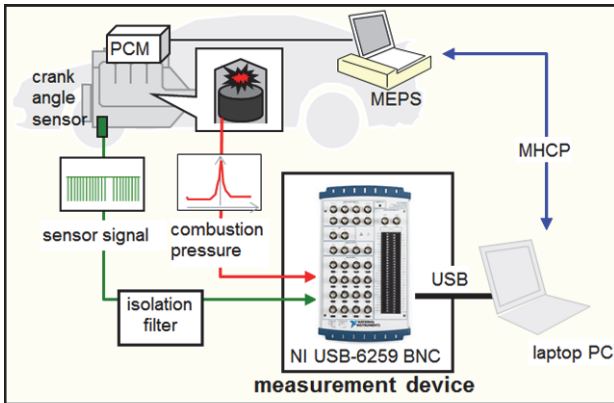


Fig. 3 Hardware Configuration for Automotive Testing

CAセンサを分岐する場合、車両の誤作動回避のため信号への絶縁処理が必須となる。市販絶縁フィルタでは車載時に余分な設置場所や電源が必要となるため、Fig. 4のように、システムの内部電源で駆動できるコンパクトな絶縁フィルタを作成した。

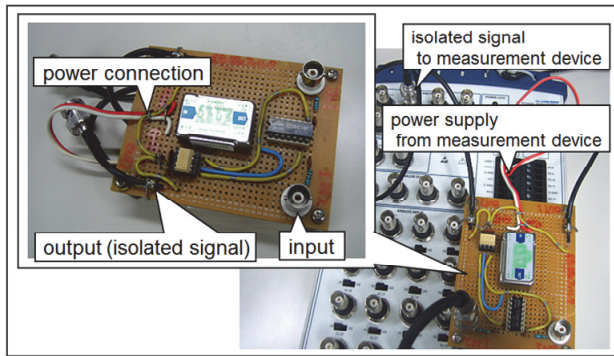


Fig. 4 Handmade Isolation Filter

2.2 計測ソフトウェア

燃焼圧解析機能として、クランク角度軸ベースの解析（以下、CA解析）と周波数軸ベースの解析（以下、Hz解析）とを持たせている。計測ソフトウェアの開発にあたり、CA解析とHz解析両方の精度の同時確保を目指した。

(1) 計測手法

市販の燃焼圧解析装置の大半は、ロータリエンコーダからの入力パルスエッジに同期してデータを計測する（以下、パルス同期計測）。パルス同期計測の場合、指定角度間隔で確実にデータを計測できる反面、計測周期がエンジン回転数に比例することにより、低回転側では必要な計測周期を確保できず正確な周波数解析ができない。

そのため本システムでは、Fig. 5の計測手法を採用している。燃焼圧力は、最大100kHzの高速一定周期計測を行うことで、全回転域で周波数解析に対し十分な計測周期を確保する。この周期計測とは別に、ロータリエンコーダやCAセンサからのパルスをカウンタで計測している。50nsの分解能でパルス間隔を計測することで、指定角度でのデータを

正確な補間処理により高精度で得ている。この高速一定周期計測とカウンタの同時計測により、CA解析精度とHz解析精度を両立させている。（詳細は、2.2(3)~2.2(4)に後述）

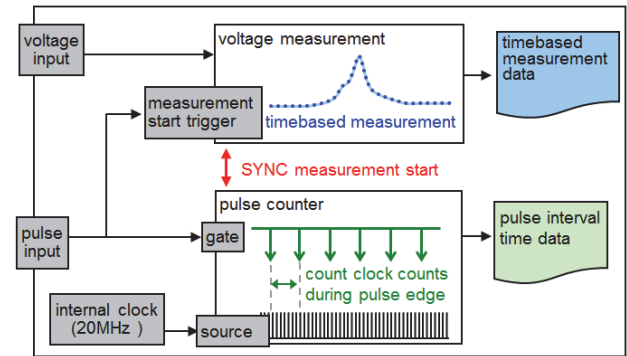


Fig. 5 Measurement Method for Improving the Analysis Accuracy

(2) 計測・解析可能範囲

当システムが採用した計測手法では、高速一定周期電圧計測とパルスエッジ間隔計測の開始同期が重要となるため、先頭パルスをトリガに電圧計測とカウンタの開始同期をとっている。これにより、クランキング開始直後からのデータ計測を実現した。

燃焼圧解析は、吸入～圧縮～膨張～排気の4工程を1サイクルとした、サイクル単位で処理する。最初に排気TDCを計測できた気筒を基準気筒としてサイクルを切り出す方式を採用することで、計測中のリアルタイム解析ができない領域は、Fig. 6の網掛け領域のように、計測開始～先頭排気TDC間と最小限の範囲にとどめた。

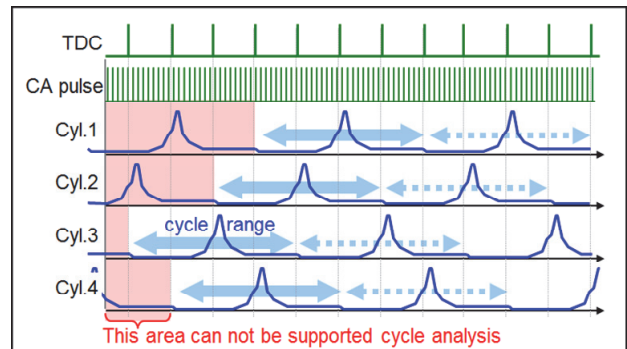


Fig. 6 The Analysis Data Range in the Measurement Data

なお、2.3で後述する机上解析ソフトウェアであれば全計測データの解析が可能となる。クランキングからの燃焼圧解析が可能になったことで、ユニットの始動時燃焼トルクと車両機構解析モデルを組み合わせ、エンジンマウント設計や車両振動の机上検証が行われている（Fig. 7）。

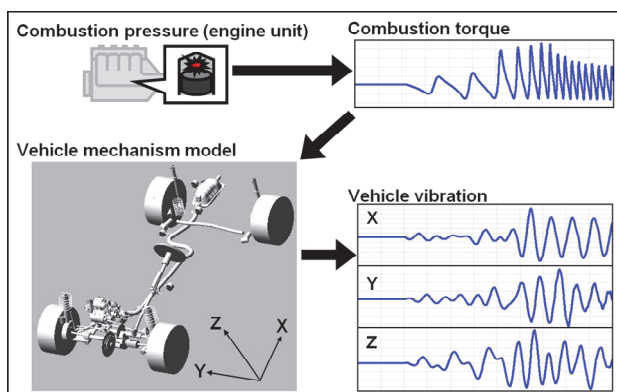


Fig. 7 Vibration Simulation Using the Vehicle Mechanism Model

(3) クランク角度解析

当システムでは、解析用途に応じて処理対象データを切り換えている (Fig. 8)。

CA解析には、パルス間隔データを元に高速一定周期計測データから生成したCA軸データを処理させている。

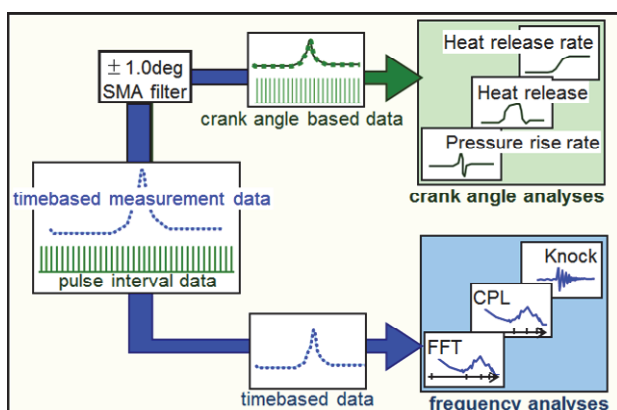


Fig. 8 Data Analysis Flow for Improving the Analysis Accuracy

この手法を採用したことで、パルス同期計測と遜色のないCA解析精度を保つと共に、入力パルス間隔幅に依存しない角度位置補正処理を実現した。

また、この計測手法はノイズ対策においても優れている。一般的に、高周波ノイズ対策には、低い周波数のみを通過させるローパスフィルタで計測信号を前処理する。しかし、燃焼圧力信号をローパスフィルタ処理した場合、燃焼騒音やノッキング解析に必要となる高速な圧力変動成分まで除去されてしまう。

しかし、高速一定周期データからCA軸データを内部生成するこの方式であれば、高周期成分が不要となるCA軸データに対してのみ演算によってフィルタ処理できる。Fig. 8に示すように、フィルタ処理には、 $\pm 1.0\text{deg}$ 相当の単純移動平均 (SMA: Simple Moving Average) 処理を採用した。Fig. 9は、SMAフィルタ有無による熱発生波形の変化を表したものである。SMAフィルタによりノイズによる変動が抑えられることが確認できる。

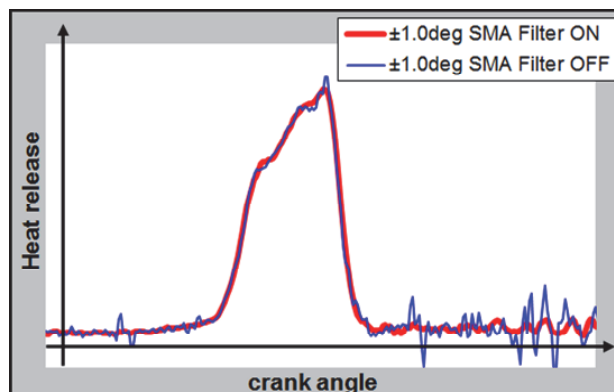


Fig. 9 Comparison of Heat Release with SMA Filter

SKYACTIVエンジン開発では、この熱発生波形やこの波形から算出する燃焼期間を解析することで、狙いの燃焼状態が実現できているか検証してきた。算出式に微分項が含まれる熱発生波形はノイズの影響を受けやすいが、SMAフィルタ処理によりその影響を最小限に抑えた。

(4) 周波数解析

SKYACTIV-Dの燃焼騒音の指標であるCPLは、FFT解析 (3)の結果を処理することで得られる解析値である。その解析精度を確保するため、既出のFig. 8に示したように、Hz解析には一定周期計測データをそのまま利用する。

以下のFig. 10は、燃焼圧力信号を分岐し、一方はパルス同期計測 (赤)、他方は75kHz一定周期計測 (青) し、それぞれのFFT解析結果をグラフ化したものである。計測周期がエンジン回転数に比例するパルス同期計測データでは、本来8kHz付近に存在する周波数特性に対して十分な計測周期を得られておらず、折り返し雑音としてその特性が4kHz付近に現れていることが分かる。

このようにHz解析に一定周期計測データを利用することで、周波数軸上の誤差を生じさせることなく解析できる。

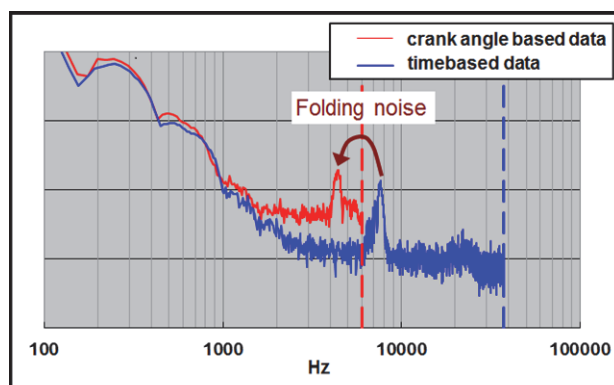


Fig. 10 Comparison of FFT Analysis (2000rpm 360ppr)

以上のように、当システムはSKYACTIVエンジン開発に必要な全ての解析を高い精度で実現している。

2.3 机上解析ソフトウェア

当システムは、高速一定周期計測を採用したことで解析精度を確保した反面、計測データサイズが膨大となった。膨大な計測データに対しても、柔軟・迅速な解析を実現するため、机上解析ツール「PIAnalyzer」を開発した。

PIAnalyzerを利用することで、PCMモニタデータと燃焼計測データを連動させ、PCM制御の時間変化や燃焼状態のサイクル変化といったマクロな解析から、サイクル内の燃焼状態の角度変化といったマイクロな解析までを即座に行うことができる。

SKYACTIV-Dは、常に最適な燃焼状態を実現するため、急激な操作による燃焼モード遷移中においても振動やショックが起きないように調整を行った。Fig. 11はその調整におけるPIAnalyzer活用イメージを示したものである。

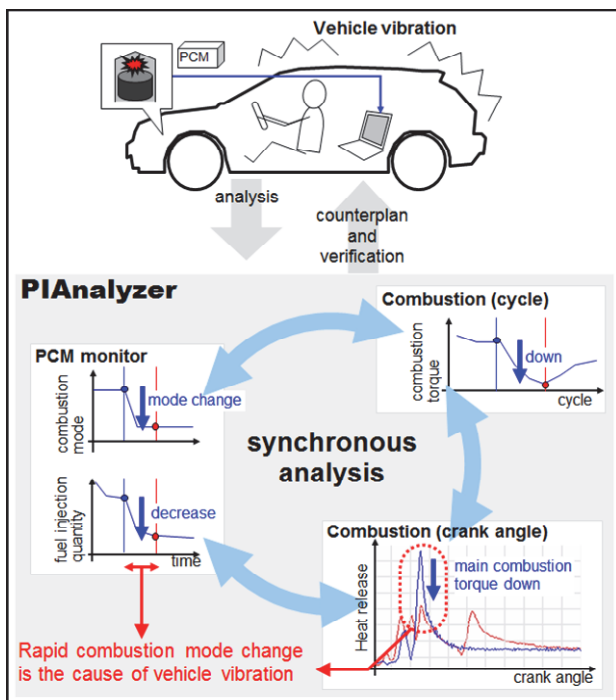


Fig. 11 Optimization of Combustion by Using Analysis Software (PIAnalyzer)

直感的な操作でPCM制御～燃焼状態～物理現象の同期解析を容易に行えるようになったことで、実車状態におけるPCM制御と燃焼状態の育成・検証を迅速かつ詳細に行うことができた。また、振動などの原因追求をテスト現場で迅速に行えるようになったことで、SKYACTIV-Dは前機種比の倍以上となる燃焼モードを有するにもかかわらず、前機種同等の期間で開発することができた。

3. おわりに

計測・解析システムに求められることは、開発エンジニアの経験やノウハウを即座にシステムに反映でき、またそれを柔軟に育成できることであると考えます。マツダは長年

にわたり計測・解析システムを内製化してきたことで、エンジニアのニーズをダイレクトに反映できる環境を構築した。今後は、全サイクルにおける走り・燃費・エミッションの最適バランスを実現するメカニズム解明に向け、軸トルクメータ・高速排気ガス分析手法・高速燃料流量計といった新たな計測技術と組み合わせた解析手法を実現していく。

参考文献

- (1) 森永真一ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13 (2012)
- (2) 長谷川裕一：CX-5 SKYACTIV-G のエンジン技術，マツダ技報，No.30，pp.3-8 (2012)
- (3) R.B.Randall：周波数分析ハンドブック，Brüel & Kjær，pp.146-184

■ 著 者 ■



吉田 昌弘



神邑 剛司