

特集：新型MAZDA3

9

SKYACTIV-Xの制御システム Control System of SKYACTIV-X

津村 雄一郎*1 楠 友邦*2 竹本 和洋*3
 Yuichiro Tsumura Tomokuni Kusunoki Kazuhiro Takemoto
 木下 真幸*4 寺元 亮*5 伊藤 剛豊*6
 Masayuki Kinoshita Ryo Teramoto Takeatsu Ito

要 約

SKYACTIV-Xでは、SPCCI（火花点火圧縮着火）燃焼を実現するため、従来のガソリンエンジンには搭載されていないさまざまな新規デバイスを含む新たな制御システムを開発した。燃焼を制御する機能を実現するソフトウェア的な構造を示したのち、制御ハードウェアシステムの概略及び主要な制御機能について、量産部品として世界初の筒内圧力センサーを含む燃焼検出システムとその活用も含め、新規要素を中心に紹介する。

Summary

The SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) of Skyactiv-X poses a new challenge to the control system of the engine. To use the SPCCI combustion in the real world environment, we have developed a new control strategy and various devices. Here we introduce a basic control scheme of the SPCCI, hardware system and main control functions including the world's first mass-produced cylinder pressure sensor for automobiles and the application of the control.

Key words : Electronics and Control, Engine Control, Hardware and Software, Auto-Ignition Control

1. はじめに

SPCCI燃焼によって、さまざまな環境条件、筒内ガス状態の下でも、可変圧縮比等の複雑、高コストになりがちなハードウェア機構をもちいることなく、適切な火花点火によってねらいの着火燃焼を安定して実現できるようになった⁽¹⁾。しかし、環境条件などに応じて適切なタイミングで火花点火を行うためには、筒内状態の精確な推定、制御と、それに応じた燃料噴射、点火時期決定を行うことができる制御システムが必要である。

本稿では、まずSPCCI燃焼制御の概念を示したのち、

その実現のために新たに開発したセンサー・アクチュエーターを備えた制御ハードウェアシステムの全体像と各制御機能を紹介する。

2. SPCCI 燃焼の制御

2.1 基本構造

ドライバーの操作に応じてエンジンが出力すべきトルクが決定され、それに応じて適切な燃焼形態を選択し、そのための空気量・EGR（Exhaust Gas Recirculation）率・温度を備えた筒内状態を整え、筒内状態に合わせて燃料を噴射し、火花点火を行う（Fig. 1）。

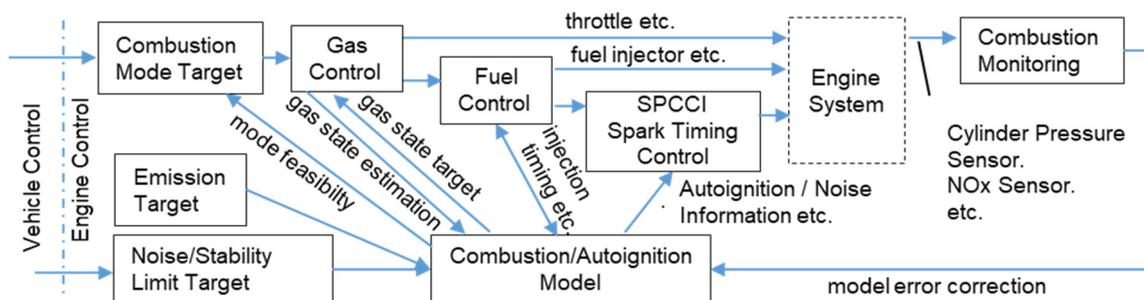


Fig. 1 Schematic Control Block Diagram

*1~6 PT制御システム開発部

Powertrain Control System Development Dept.

SPCCIの燃焼形態としては2つあり、低・中負荷かつ自着火に適した環境下において用いるA/FリーンSPCCI燃焼と、負荷全域において幅広い環境条件で利用できる、理論空燃比のG/FリーンSPCCI燃焼とがある。どちらの場合も基本的な制御の構造は同じである。

本節では、SPCCIの名前の由来でもある点火時期を手段とする自着火制御について説明する。

筒内の温度や燃料量など燃焼前のガスの状態が与えられると、点火時期に応じて、自着火燃焼の開始位置（自着火時期）及び燃焼位相が決まってくる。もし点火とそれによる自着火時期が早すぎれば(1)急速な自着火燃焼による圧力上昇で燃焼騒音などの問題を生じ、遅すぎれば(2)自着火が不安定となりトルク変動や排出ガスの悪化の問題を生じる。また、(1)と(2)の間でエンジンの効率が最良となる燃焼位相が存在する(3)。

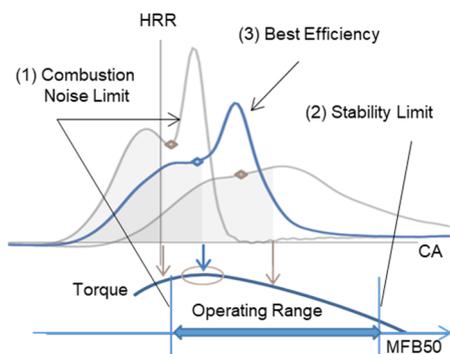


Fig. 2 Heat Release Rate (HRR) and Torque

同一負荷で点火時期を変化させたときの燃焼による熱発生率を例示するとFig. 2の上段のようになる。燃焼重心(MFB50, Mass Fraction Burned 50%)までの熱発生をグレーハッチング、自着火時期を菱形のマークで示した。下段には横軸をMFB50としたトルク及び(1)、(2)の限界との関係例を示した。

自着火時期を(1)、(2)とならない範囲内に維持しつつ、エンジン効率を決めるMFB50を可能な限り(3)の最適点に近づけるため、推定した筒内状態から燃焼モデル、自着火モデルによりそれらを予測して点火時期を決定している。自着火時期、燃焼重心等については後述する。

SPCCIの制御でポイントとなるのは、自着火がいつ起きるかは、点火時期が同じでも、点火前の筒内ガスの温度やEGR率、燃料分布などの状態によって大きく変わってくるという事実を考慮することである。

したがって、まず、点火前の筒内ガス状態を精度よく制御、推定するための吸排気制御(4章)、精度よく燃料を噴射する燃料制御(5章)に改善が必要であった。

更に、吸排気制御などを改善した場合でも、従来ガソリンエンジンから採用しているような吸気温度センサーなどには精度の限界があるため、これらの情報で筒内を推定するモデルを使うだけでは、十分な精度を達成できない。

そこで、自着火時期を含めた自着火燃焼の状態を見てモデルを補正するフィードバックが重要になる。SKYACTIV-Xでは、直接筒内圧を計測する燃焼検出システム(7章)を開発してこれを実現した。

なお、従来ガソリンエンジンでは、開発時のテスト結果に基づき各種温度センサーなどの値を入力とするエンジントルクモデルを作り、点火時期を決めていた。ノックセンサーでエンジンブロックの振動を見るなど、燃焼の結果に応じたフィードバックは行っていたが、エンジンの工業製品としての個体差や環境条件の差を考慮・吸収して熱効率最大の状態で運転するという理想には不十分な点もあった。

SKYACTIV-Xでは、全気筒、全サイクル、筒内圧力センサーにより実際の燃焼状態を見てモデルを補正する制御を導入することで、理想状態に大きく近づいた。

(1) 自着火モデル

SPCCIは点火時期によって制御するのではあるが、点火前の筒内ガス状態と点火時期の両因子から自着火時期への対応関係を直接一つのモデル式として扱うのではなく、点火からの火炎伝ば速度を表現するSI (Spark Ignition) 燃焼モデルと、それによる未燃部圧力上昇及び点火前の筒内ガス状態を入力として自着火特性を表現する自着火モデルの二つに分割してモデル式を構成した。

SPCCIのメカニズムに基づいた分割でもあるが、制御上の分割の必要性は、自着火時期そのものが毎サイクル変動してしまうことにある。

例えば、市場ガソリンの化学組成は販売場所・季節などでさまざまであり、自着火特性に影響を与えるため、自着火モデルのパラメータに補正を加える必要がある。

しかし、SI燃焼の速度は、例えばディーゼルエンジンの燃焼とは異なり、条件によるが、毎サイクル大きく変動する。その結果として、SPCCIの自着火時期は変動する。

そこでモデルの補正は、各サイクルの燃焼後に、筒内圧力データから、自着火時期に加えて火炎伝ばによるアシスト量を把握して、火炎伝ばの変動を差し引いて行っている。

火炎伝ばの変動が大きい状態で自着火モデルを検証したのがFig. 3である。左図のように筒内圧力や自着火時期そのものは大きく変化しているが、右図のように計測値とアシスト量を入力した毎サイクルのモデル予測値はよく一致しており、自着火モデルのパラメータを不要に変化させることはない。

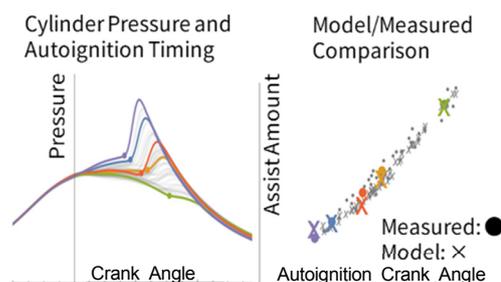


Fig. 3 Autoignition Model for SPCCI

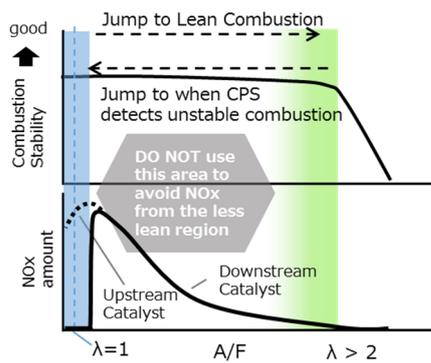


Fig. 4 A/F Lean SPCCI Control

2.2 A/FリーンスPCCI燃焼の制御

A/Fリーン混合気の排出ガスは三元触媒で浄化できないためNOxの排出が課題となるが、SKYACTIV-Xでは、尿素の補充が必要なSCR (Selective Catalytic Reduction) などの後処理装置を用いず、SKYACTIV-Dと同様、燃焼そのものの制御によりクリーンな排出ガスを実現している。

燃焼によるNOxの生成量を決める主要因子は空燃比と燃焼温度である。空燃比をリーンにすれば燃焼温度の低下を通じ生成量を下げられるが、度を過ぎると燃焼の不安定化をとまなう。エンジンの個体差や環境条件があるなかで、NOxが少なく、燃焼も安定しているFig. 4の緑のゾーンに制御するため、NOxセンサーを採用し、筒内圧センサーと合わせてそれぞれモニタしフィードバックを行っている。

なお、空燃比が決まった後でも、燃焼温度や安定性が燃焼位相により変化するため、前述の自着火制御はA/Fリーンス空燃比下においても実行されている。

三元触媒の機能する青のゾーンと、浄化の必要がない緑のゾーンのいずれかを運転条件により切り替え、中間を用いないことで、後処理の不要なリーンス燃焼を実現している。

3. 制御システム

SKYACTIV-Xの制御システムの主要なハードウェアコンポーネントについて本稿で触れたものを中心にFig. 5に示した。

4. 吸排気制御—筒内状態の推定と制御

ドライバーの加減速要求の変化に素早く追従する必要があるため、特に過渡運転で吸気量やEGR率の変化を精度良く推定できることが重要である。

吸気システムはFig. 5のように、スロットル下流に、エアサプライのためのスーパーチャージャー（以下SC）を備える過給経路と、エアバイパスバルブを備えるバイパス経路の二つの経路をもつ。EGRはバイパス経路中に導入されている。

このような吸気系の構造は、インタークーラー下部への

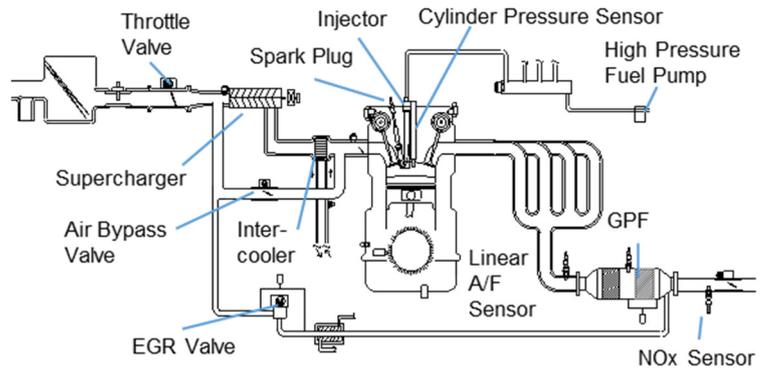


Fig. 5 Control System Components

凝縮水堆積抑制やエンジン搭載レイアウト要件を満たすために採用しているが、過給有無や加減速時にEGR率が複雑な挙動を示すため、推定技術の改良を行った。例として、過給開始時の挙動を説明する。

自然吸気状態でEGRを導入すると、バイパス経路はEGRあり、SC停止のためガスがほぼ流れない過給経路はEGRなしの状態となる。この状態からSCクラッチをONすると、スロットル、EGRバルブの開度は一定であっても、SC回転開始とともに過給経路のガスが吸気ポートへ導入されるため、筒内に吸入されるEGR率は急激に低下する。この際、EGR率の低下に対応した点火時期の調整が行われないと、ノックを伴う異常燃焼が発生する。その後、SC回転数上昇によりバイパス経路の流れ方向が逆転すると、吸気ガスは循環しながら徐々に定常のEGR率に収束する (Fig. 6)。

このような過渡の複雑なEGR挙動を表現するために、インマニモデルを5つの領域に分割し、各領域のEGR率や領域間のガス流量を計算するようにした。これにより過渡のEGR挙動を精度よく推定できるようになった。結果例をFig. 7に示す。図中のCPLF (7.2節) はノッキングの指標である。検証には光学式の高応答ガスモニタを用いた。

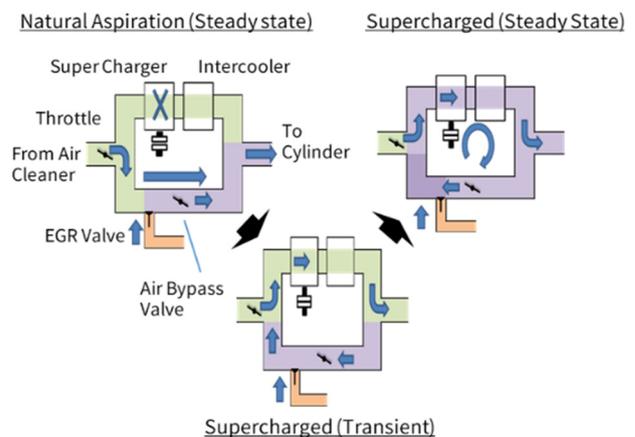


Fig. 6 Schematic Illustration of Transient EGR

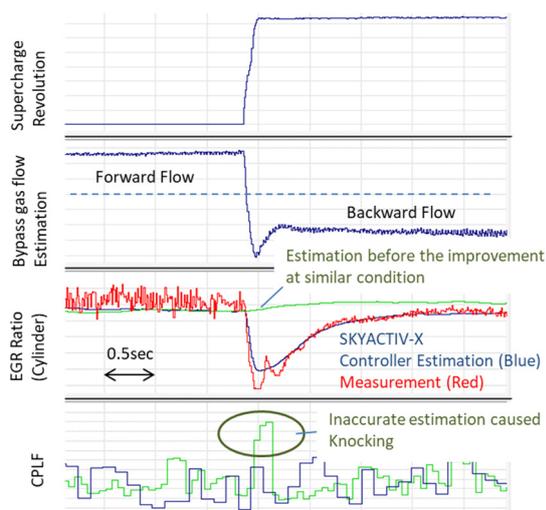


Fig. 7 Transient EGR Ratio Behavior

5. 燃料制御—高燃圧インジェクタの精密制御

SKYACTIV-Xの燃焼が求める燃料分布、均質性を得るには、従来ガソリンエンジンを超えた高燃圧を用いて微小・近接多段を含むさまざまな噴射を高精度で実現する必要があります。

高燃圧・微小噴射量の要求はディーゼルエンジン向け燃料システムの領域にまで踏み込んだ厳しいもの (Fig. 8) であるが、低コストで実現するためガソリンシステムベースのソレノイドインジェクタを用いて目標達成に挑戦した。

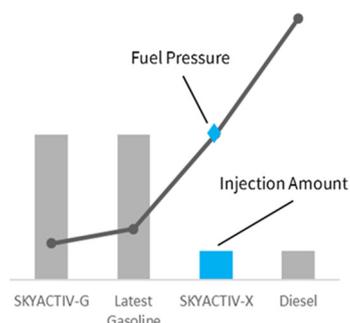


Fig. 8 Requirement Approaching Diesel System

5.1 パーシャル～フルリフト域シームレス制御

高燃圧で微小な燃料量を噴射するためには、噴射弁を引き上げるソレノイドに通電する時間 (噴射パルス幅) を短くする必要があります。一定以上短くなると、噴射弁はストッパーに突き当たって静止 (フルリフト) せず、放物線を描くようにリフトして (パーシャルリフト) 閉じる。従来のインジェクタでは、パーシャルとフルの中間領域で噴射弁のストッパーへの衝突に伴うバウンスと噴射特性逆転現象があるため、一定以上の噴射パルス幅しか使用できなかった (Fig. 9 左)。しかし、新型は高精度微小噴射の実現のため、衝突速度を低下させるハードウェア設計とともに、

各種外乱の影響を受けないよう、制御面での工夫を行うことで、最小パルス幅の限界を取り除いた。

5.2 制御面での対応

燃料を精度よく噴射するためには、燃料温度・脈動、コイル温度、各種劣化・バラつき、デポジット等多くの外乱に対応する必要があります。従来制御技術を基本にしつつも、従来知見が通用しない領域について多くの制御上の工夫を施している。その実現のためには、インジェクタ部品サプライヤと共同開発した制御オブジェクトとマツダ内製制御・エンジン制御ユニットのプラットフォーム制御・駆動回路の連携が重要であった。

5.3 制御の一例 (閉弁時期学習制御)

インジェクタ閉弁時の電流・電圧波形変化を元に閉弁時期を予測、バラつきを補正する一般技術に加え、初期学習の多点化・劣化への対応として運転中も通常制御に影響せず更新する制御を構築した。インジェクタ特性学習の効果をFig. 9に示した。

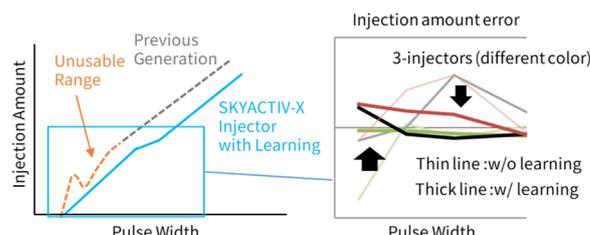


Fig. 9 Small Injection Amount

6. 点火制御—リーン混合気と高圧縮比

6.1 点火コイル・プラグ

高圧縮・高流動の筒内環境下でも初期火炎核を安定して形成できる高エネルギー型 (SKYACTIV-G比約2倍) イグニッションコイルと超高電圧での放電に耐えうる高耐カスパークプラグを新開発した。

A/F リーンSPCCI燃焼での着火性向上のため最適な位置にプラグを突出し、流動に対する側方電極の向きを組付け時に規制している。また吸気工程で放電することであらかじめ燃料を活性化させる新たな手法も採用した。

これらの最適解を筒内ガス解析モデル、放電・燃焼の可視化、及びプラグ電極消耗予測モデルにより導き出し理想の燃焼を実現している。

7. 燃焼検出

量産車として世界初の筒内圧センサーを用いた燃焼検出システムについて紹介する。

7.1 筒内圧センサー

計測装置としての筒内圧センサー (Cylinder Pressure

Sensor, CPS) は、燃焼状態を把握するための最も重要なセンサーとして、エンジン開発一般に使用されてきた。HCCI燃焼などの制御コントローラについても筒内圧センサーを用いた研究が数多くある。しかし、非常に高価であり、車載部品としての搭載性、耐久性などの要件も満たしていなかった。SPCCIの制御にはリアルタイムで燃焼状態を検知する必要があるため、車一台一台に統制できる部品としての要件を満たすセンサー (Fig. 10) の開発を行った。

(1) 構造

①フロント部で圧力を電気信号に変換する。高周波の圧力まで精度よくとらえるため、フロント部先端のダイヤフラムは燃焼室に表出させており、燃焼ガスから直接受圧する。受けた圧力は軸方向の荷重に変換され、内部にある圧電素子で電気信号に変換する。

②リア部ではフロントから受けた電荷をアンプで増幅しセンサーの最終的な出力に変換する。出荷時にアンプ特性の調整を行いハード上の個体差を吸収している。

③接続部はエンジンレイアウトの自由度を上げるためリード線タイプを採用。ノイズ影響を検証しシールド等の電雑保護は行わず生産性とコストを向上させた。

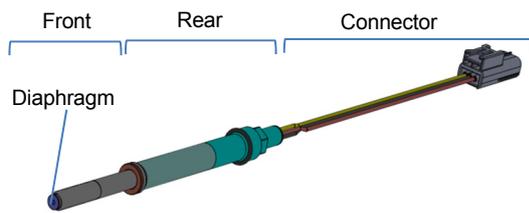


Fig. 10 Cylinder Pressure Sensor

(2) 主要課題への対応

車載する上での主要な課題である出力・信頼性・ノイズに対し、以下の対応を行って量産化を実現した。

① 信頼性と出力精度の両立

フロント部は燃焼ガスから非常に強いストレスを受ける。単に部品強度を上げると応答性や精度が悪化するため、フロント部に対して品質工学を適用して最適となるパラメータ設計を行った。また、燃焼による瞬時の温度変化に対しては高応答熱流束センサーを用いてダイヤフラムへの熱流束変化を確認しCAEによる放熱設計に組み込むことで信頼性基準を確保できるようネジ部からの放熱設計を行った。耐久寿命に関してはSPCCI燃焼時に発生する高周波の圧力変動を考慮し、通常の鉄鋼材料の耐久評価よりも厳しいギガサイクル (10^9 回) 疲労評価による検証を実施した。

② デポジットによる出力影響

ダイヤフラムを燃焼室から奥に引き込むほどセンサーへのストレス環境は緩和されるが燃焼によるデポジットが堆積しやすくなり使用過程で出力影響が発生する。出力精度を求めるため極力燃焼室側に寄せることにこだわった

(Fig. 11)。その上で、ヘッドの曲面によりダイヤフラムの一部にデポジットが堆積するのは避けられないため、堆積物のヤング率、厚み、付着面積に対する出力の影響をモデル化することで限界値を設定するとともに、運転状態によってデポジット堆積特性が変化するカラクリを明らかにし使用過程で出力限界に達しないことを検証した。

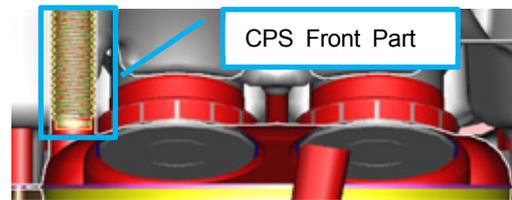


Fig. 11 CPS Placement

③ ノイズ耐性

耐ノイズ性向上のため、エンジンに接する外筒と内部部品を絶縁分離した二重構造としシールド機能を持たせている。シールド性を保証するため製造上のコンタミ管理には徹底した配慮を行なっている。

7.2 燃焼指標の検出

(1) 概要

エンジン制御ユニット (ECU) に筒内圧センサーの信号を取りこみ、信号処理を行い、燃焼状態を特徴づける指標を求めている。

筒内圧センサー本体同様、計測装置であれば信号処理にパーソナルコンピュータ (PC) と同等の高性能なCPUを用いることができるが、限られた容積、電力、さまざまな温度環境で長期間動作しなければならないエンジン制御ユニット (ECU) では、PCの数十分の一の計算能力しか持たないエンジン制御用のマイクロコンピュータ (MCU) で処理を行う必要がある。更に、前述したさまざまな制御の精度向上にも、従来以上の計算処理が求められた。

そこで、SKYACTIV-XのECUはMCUを2個搭載して相互通信を行うことで、計算能力を倍増させるとともに、燃焼指標の計算においては、搭載されたMCUのデジタルフィルタ機能を用いる、必要なクランクアングル区間のみ高周波で信号を取り込む、などの計算負荷低減を行っている。

以下では、燃焼制御のために算出している指標について説明する。

(2) 主要指標

① 燃焼重心 (MFB50)

燃焼重心とは、燃焼による熱発生が全体 (終了時) の半分まで進んだ時点のクランク角度のことである。毎クランクアングル、熱力学の方程式に従ってその時の体積とCPSで計測した筒内圧力から熱発生量を求めることができるので、燃焼終了後には燃焼重心を求められる。燃焼重心が圧縮トップ後数度にある状態が熱効率最大であることが

知られており、それを保つように制御を行っている。

② 自着火時期

自着火の発生は、自着火燃焼が火炎伝ば燃焼よりも急速に進むことから、熱発生率の急激な立ち上がり（変曲点）によって特徴づけられる。これは、筒内圧力に現れるが、燃焼変動によりさまざまな熱発生が生じる中、どの変曲点が自着火時期か特定することはそれほど容易ではない。

ECU内では、筒内圧力にデジタルフィルタをかけて候補となる変曲点の位置を算出し、更にその他の圧力情報から機械学習の手法である決定木を用いて自着火の位置を絞り込んで特定している（Fig. 12）。

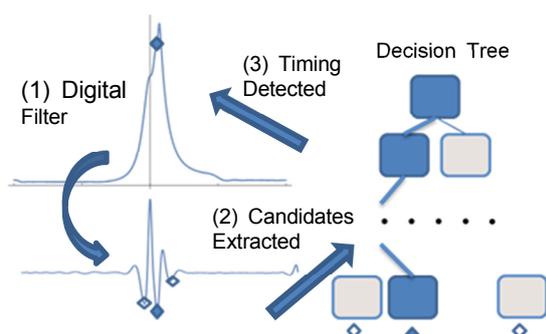


Fig. 12 Autoignition Timing Detection

③ CPLF(Cylinder Pressure Level, Filtered)

燃焼圧力でシリンダは内部から加振され、振動はエンジンブロックを伝わってエンジン外に音として放射される。筒内圧力をフーリエ変換し、周波数ごとの減衰（Filtered）を考慮して燃焼騒音を推定する指標がCPLFである。

従来のガソリンエンジンのノック音も、ディーゼルノック音も、周波数帯域は違うが、CPLFの値によって表現することができる⁽²⁾。

SPCCIの制御では、CPLFと燃焼重心、自着火時期との関係のモデルを用い、2章の制御を通じて、燃焼騒音を適切なレベルに保つよう制御している。

エンジンブロックの伝達特性は大きく変化しないものの環境条件によって燃焼が変化すると、前記のモデルは誤差をもつことがある。そこで、SKYACTIV-Xでは、実際のCPLFを筒内圧センサーの値から毎サイクル演算して、モデルの補正を行っている。

8. 排気ガスの制御

8.1 ガソリンパーティキュレートフィルター

EGR・過給経路へのデポジット堆積を防止するため、燃焼排気ガス中の粒子状物質（Particulate Matter, PM）を吸着・燃焼して浄化するガソリンパーティキュレートフィルター（GPF）をマツダのガソリンエンジンとして初めて採用した。SKYACTIV-Dのディーゼルパーティキュレートフィルターとは異なり、排気温度が高いことなどから車両

減速時の燃料噴射停止中に自己再生（吸着し堆積したPMを燃焼）させられるため、燃費等の悪化原因となる再生モード運転は一般的な運転では動作しない。Fig. 13は通常の走行では堆積しないため、別途実験的に作り出した堆積状態からWLTCモードの走行により自然と自己再生される様子を検証したデータである。

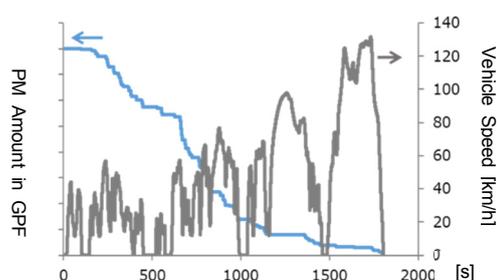


Fig. 13 GPF Self Regeneration in WLTC mod

8.2 NOxセンサー

ディーゼルエンジンのSCRシステムでは採用済みであるが、今回初めてガソリンエンジンで採用し、2.2節のA/FリーンSPCCI燃焼の制御に用いている。センサープローブの検出素子を自身のヒータで約800℃に加温するため、排気中の水蒸気成分・水滴の多いガソリンエンジンでは、凝縮水被水による熱衝撃割れ発生が課題となる。凝縮水発生時間の実機評価結果と排気管壁温の予測モデルを組み合わせたヒータ通電ロジックを完成させ、信頼性を確保した。

9. おわりに

SKYACTIV-Xに求められる精緻な燃焼制御を実現するシステムを作り上げる中で、世界初を含む新規デバイスを開発し、制御ソフトウェアにもさまざまな技術を導入した。今後も、これまでの限界を突破した燃焼を実現するべく制御技術を開発し、内燃機関の理想の燃焼に近づいていきたい。

参考文献

- (1) 漆原ほか：SKYACTIV-Xを実現する燃焼技術、[マツダ技報, No.36, pp.24-31 \(2019\)](#)
- (2) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH技術、[マツダ技報, No. 36, pp.38-43 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



津村 雄一郎



楠 友邦



竹本 和洋



木下 真幸



寺元 亮



伊藤 剛豊