

特集：新型CX-9

4

新型2.5Lターボチャージャーエンジン制御技術の紹介 Introduction of New 2.5L Turbocharger Engine Control Technology

西尾 貴史*¹ 東尾 理克*² 砂流 雄剛*³
Takafumi Nishio Masayoshi Higashio Yugou Sunagare
足利 謙介*⁴ 坊田 亮郎*⁵
Kensuke Ashikaga Akio Boda

要 約

新型2.5Lターボチャージャーエンジン（以下SKYACTIV-G 2.5T）において、SKYACTIV-Gの特長である優れた環境性能と動力性能を継承しつつ、ターボシステムの追加による更なる余裕の走りを最大限に発揮できる制御を開発し、新型CX-9に採用した。核となるコンプレッサー／タービンの仕事量（駆動力）を物理モデル化することで、ドライバーのアクセル操作に応じた目標過給圧を設定し、電動ウェイトゲートバルブと可変バルブタイミング機構（以下S-VT）や外部EGRとの協調制御により過給圧の追従性を高めた。更に、電動エアバイパスバルブ制御により過給圧を保持する運転領域を拡大し、新気吹き抜け推定制御を用いた空燃比の精度向上により優れたトルク応答性・コントロール性を実現した。また、SKYACTIV-Gから本格的に導入したモデルベース開発を進展させ、過給圧制御や新気吹き抜け推定制御などのロジック構築の効率及び設計検証の充実度を高めた。

Summary

For new 2.5L turbocharger engines, Mazda developed a new control technology that maximizes the effects of the turbo system while inheriting the excellent environmental and power performances of SKYACTIV-G, and applied it to the new Mazda CX-9. Physical modeling of the compressor/turbine workload (driving force) enabled cooperative controlling of an electric wastegate valve with variable valve timing mechanism and an external EGR, consequently improving the followability of the actual boost pressure with respect to the target boost pressure set according to the accelerator operation by a driver. In addition, excellent torque responsiveness and controllability were realized by expanding the boost pressure holding operation zone through the electric air bypass valve control and by optimizing the air-fuel ratio through fresh air blow-by quantity estimation control. Furthermore, advancement of the model-based development, which was fully introduced in SKYACTIV-G, made the review of a logical configuration of, for instance, boost pressure control and fresh air blow-by quantity estimation control more effective and enhanced the quality of design verification.

1. はじめに

SKYACTIV-Gは、優れた環境性能と動力性能を両立し、低燃費でありながらガソリン自然吸気エンジンならではのリニアな加速感を磨きあげ、マツダブランドの要である人馬一体のパワーフィールを具現化している。

その根幹となる技術は、4-2-1排気システムやキャピティピストンなどにより世界に先駆け圧縮比14.0を実現した

ハード設計構造に加え、吸排気S-VTやエレキスロットルなどのデバイスを常に最適なエンジン効率に維持するよう構築したソフト制御構造にある。

SKYACTIV-G 2.5Tでは、SKYACTIV-Gの特長を継承しつつターボシステムの効果を最大限に発揮できる制御を開発した。

本稿では、このSKYACTIV-G 2.5Tに織り込んだ主要な制御技術について紹介する。

*1 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.
*3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*2, 4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.
*5 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

2. ガソリンターボエンジンの制御技術

2.1 ターボシステム

SKYACTIV-G 2.5Tの制御システムとして、電動式のウェイトゲートバルブとエアバイパスバルブをマツダで初採用した。

どちらのバルブも、従来の機械式では吸気管内の圧力設定値によって作動させるが、電動式はその制約がなく作動の自由度を大幅に広げることが可能である。

また、インタークーラーとスロットル間に圧力センサーを設け、コンプレッサー下流圧力をセンシングしており、これらにより、ねらいの過給圧と排気圧力に制御している。

2.2 制御技術

SKYACTIV-G 2.5Tの制御において新規開発したコンプレッサー／タービンモデルを用いた過給圧制御、過給圧とS-VT・EGRバルブの協調制御、エアバイパスバルブ制御、新気吹き抜け推定制御について以下に記述する。

(1) コンプレッサー／タービンモデルを用いた過給圧制御

SKYACTIV-Gは、ドライバーのアクセル操作に応じて適切な車両駆動力となるよう制御し、目標の車両駆動力は動力源であるエンジンの目標トルクに置き換える。また、目標トルクから目標充填効率を求め、更に目標のインテークマニフォールド内空気量を求める。すなわち、ターボエンジンでは目標のインテークマニフォールド内空気量になるようコンプレッサー下流圧力及びインテークマニフォールド内圧力をコントロールすることで、適切な駆動力を実現できる (Fig. 1)。

今回、コンプレッサー下流圧力をコントロールするためのコンプレッサー／タービンモデルを作動理論に基づいた物理モデルとして構築した。

コンプレッサー下流圧力はコンプレッサー仕事量で決定し、コンプレッサー仕事量はタービン仕事量とバランスする。

ここで、コンプレッサー仕事量 L_{cd} は式①、タービン仕事量 L_{td} は式②、コンプレッサー仕事量とタービン仕事量のバランスは式③で表せる。

$$L_{cd} = R_a \times \frac{\kappa_a}{\kappa_a - 1} \times T1 \times G_a \times \left\{ \left(\frac{P2}{P1} \right)^{\frac{\kappa_a - 1}{\kappa_a}} - 1 \right\} \quad \text{①}$$

R_a : 空気的气体定数 κ_a : 空気比熱比
 $T1$: コンプレッサー上流温度 G_a : コンプレッサー流量
 $P2$: コンプレッサー上流圧力 $P1$: コンプレッサー下流圧力

$$L_{td} = R_g \times \frac{\kappa_g}{\kappa_g - 1} \times T2 \times G_g \times \left\{ \left(1 - \frac{P3}{P4} \right)^{\frac{\kappa_g - 1}{\kappa_g}} \right\} \quad \text{②}$$

R_g : 排気ガスの气体定数 κ_g : 排気ガス比熱比
 $T2$: タービン上流温度 G_g : タービン流量
 $P4$: タービン上流圧力 $P3$: タービン下流圧力

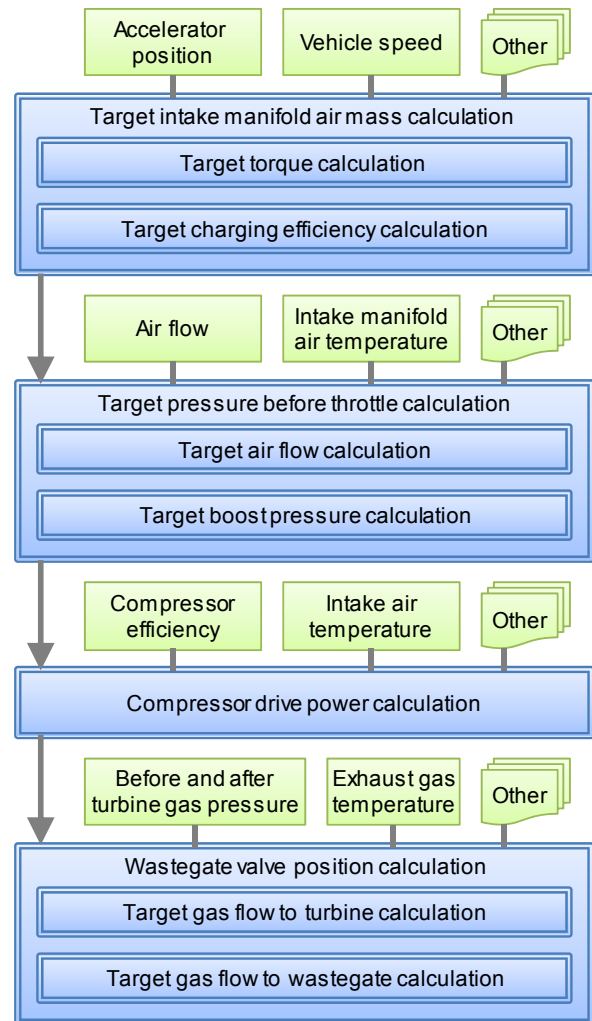


Fig. 1 Target Charging Pressure and Wastegate Valve Position Flow

$$\frac{L_{cd}}{\eta_c} = L_{td} \times \eta_t \quad \text{③}$$

η_c : コンプレッサー効率
 η_t : タービン効率

目標とするコンプレッサー下流圧力が与えられれば、これら式①,②,③からタービンの仕事量に必要となる目標のタービン排気ガス流量が決まる。この算出した排気ガス流量に比べ実際の排気ガス流量に過剰分があれば、ウェイトゲートにバイパスさせる流量としてウェイトゲート開度を算出する。予実差については、圧力センサーを用いて目標過給圧に調整するようフィードバック制御する。

本制御構造により、ドライバーが要求する駆動力に応じた目標コンプレッサー下流圧力を自動的に演算し、その目標達成に向けウェイトゲートを制御することで筒内の空気量を調整するため、標高や外気温度に左右されない過給

圧のコントロールを実現し、後述のS-VTや外部EGRとの協調を可能にした。

更に、過給を必要としないクローリング運転領域では、ウェイストゲートを開弁側に制御することで排気圧力を低減し、ポンピング損失の増加を抑え燃費性能を高めた。一方、オートマチックトランスミッションの変速時やドライバーの減速要求時には、ウェイストゲートを閉弁側に制御することでコンプレッサー下流圧力を必要以上に低下させないようにし、直後の加速応答性を向上させた。

(2) 過給圧とS-VT・外部EGRとの協調制御

ドライバーの加速要求の大きさと運転条件によっては、目標とするコンプレッサー下流圧力が高くなるため、目標のタービン排気ガス流量に対して実際の排気ガス流量が不足する場合がある。前項(1)の手順で求めた排気ガス流量の不足量を補うため、S-VTとEGRバルブの作動を定常運転時とは異なる制御を実施している。

a. S-VTとの協調制御

排気ガス流量の不足量情報から、バルブタイミングの変化によるシリンダーへの吸入空気量の増加量を算出し、追加が必要な吸入空気量を補うようにS-VTタイミングを補正する (Fig. 2)。

また、吸入空気量の増加により有効圧縮比が高くなるため、要求の点火時期が遅角し排気ガス温度が上昇する。この排気ガスのエネルギー増加を利用しタービン仕事を高める。ただし、点火時期の遅角による熱効率低下からトルク低下の弊害を発生しないようにS-VTタイミングの変化量に制限を設定している。

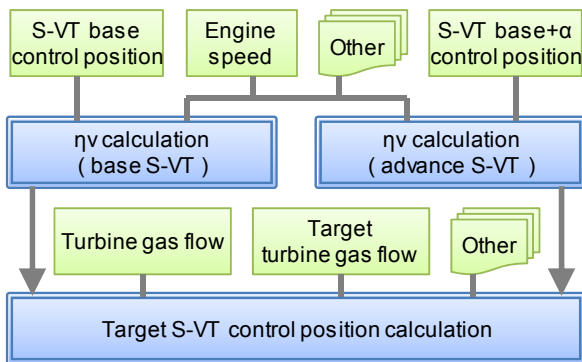


Fig. 2 Target S-VT in Acceleration Flow

b. 外部EGRとの協調制御

外部EGRを導入している運転領域では、通常、排気ポートからの排気ガスをタービンへの流路とEGRへの流路に分配する。目標とするタービン排気ガス流量が不足する場合は、EGRへ流れる排気ガス流量の内、タービン排気ガス流量の不足分を抑制するようEGRバルブ開度を算出し、EGR流量を補正する (Fig. 3)。

以上の過給圧とS-VT・外部EGRの協調制御により、ド

ライバーの加速要求に応じた目標過給圧に対する実過給圧の追従を短期に実現した (Fig. 4), (Fig. 5)。

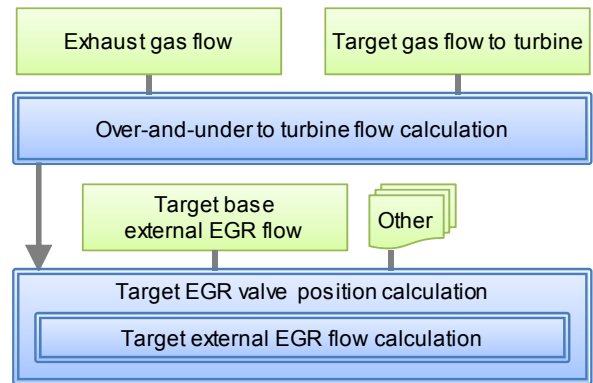


Fig. 3 Target EGR Valve Position in Acceleration Flow

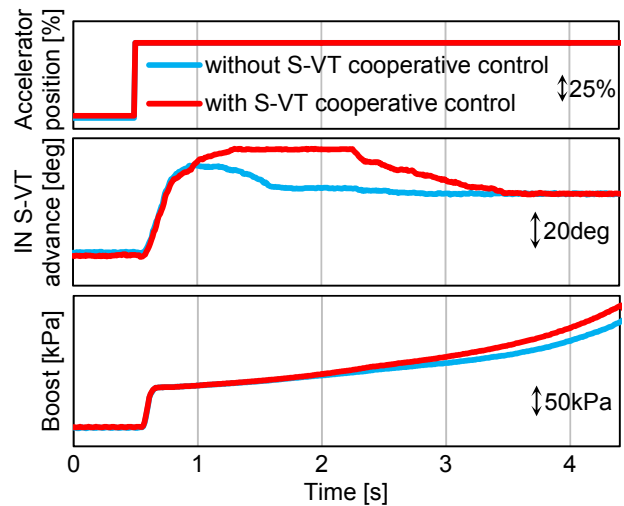


Fig. 4 Effect of S-VT Cooperative Control

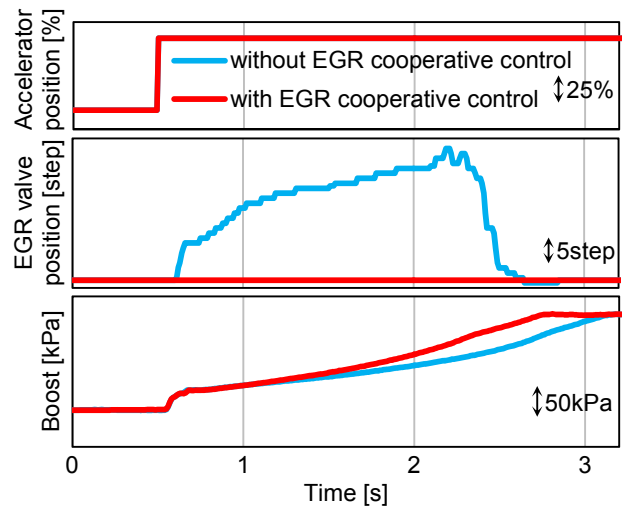


Fig. 5 Effect of External EGR Cooperative Control

(3) エアバイパスバルブ制御

エアバイパスバルブの最大の機能は、コンプレッサーのサージングによるメカニカルノイズとコンプレッサーの損傷を防ぐことである。サージングは経路の流れが不安定になった場合に発生する自励振動が原因であり、その発生の主要因子はコンプレッサー前後の圧力比及びコンプレッサーを通過する空気流量である。

よって、SKYACTIV-G 2.5Tでは、従来の吸気管内の圧力ではなく、これらの発生因子によりエアバイパスバルブを作動させるよう制御を構築することで、従来機種よりコンプレッサー下流の圧力を高く維持することを可能とし、アクセルワーク時のトルク応答性を向上した。

(4) 新気吹き抜け推定制御

SKYACTIV-G 2.5Tは、4-3-1排気ポート構造と可変バルブ機構を用いたDynamic Pressure Turbo システムにより、低エンジン回転速度の全負荷トルクを大幅に向上させている（詳細は本稿掲載の**新型ガソリンターボエンジン“SKYACTIV-G 2.5T”の開発**を参照）。これは、バルブオーバーラップ中に吸入空気を排気管に吹き抜けさせることによる掃気効果を積極的に利用したことにより得られる。

筒内の空燃比をコントロールするためには、この排気管に吹き抜ける吸入空気量（以下新気吹き抜け量）を把握する必要がある。そのため、新気吹き抜け量を決定するバルブオーバーラップ量（バルブ通路面積）と吸排気圧力のバランス、オーバーラップ時間、大気圧の因子を一部、代用特性も用いて高精度に推定する制御を構築した。

3. モデルベース開発

SKYACTIV-G 2.5Tで適応した、過給圧制御と新気吹き抜け推定制御のモデルベース開発について紹介する。

(1) 過給圧制御開発への適応

マツダの制御系の開発では、主に制御モデルの作動検証用としてエンジンやセンサー、アクチュエーターなどをモデル化したプラントモデルを用いていた。SKYACTIV-G 2.5T制御技術の開発では、ある入力を与えた際の実出力（例えば、過給圧やウェイストゲート、タービン回転など）が実機と等価となるようプラントモデルの同定を行い、机上のみで過給圧制御モデルの開発を行った。

また、網羅的に性能検証を行うためにはターボシステムの影響因子（具体的には、タービン効率、ウェイストゲート流量特性など）の特性を変化させる必要がある。それに加えて、さまざまな運転モードで評価しなければならず、評価期間が膨大になる。SKYACTIV-G 2.5T制御技術の開発では、上述したプラントモデル内のパラメーターを変更することで影響因子の特性変化を模擬して、多くの性能検証を机上で実施することで実車での検証期間を大幅に短縮した。

(2) 新気吹き抜け推定制御への適応

新気吹き抜け量は、非分散赤外線吸収法（NDIR : Non-dispersive infrared absorption method）を用いた実機のガス計測とプラントモデルでの計算を併用した。

実機での計測は信頼性の高い結果を得られるが、計測時間が長くなる点がネックとなる。そこで、エンジンシステム全体のプラントモデルではなく、吸気ポートから排気ポートまでを抜粋した専用のモデルを作成し、そこに各条件で実測した吸排気ポートの圧力と温度を入力し算出した。この専用モデル化により、シリンダーへ送り込まれた空気量に対する吹き抜けた空気量で算出される吹き抜け率を、NDIRと同特性かつ誤差1%程度の高い精度で再現することができ、実験評価時間の大幅短縮に貢献した（Fig.6）。

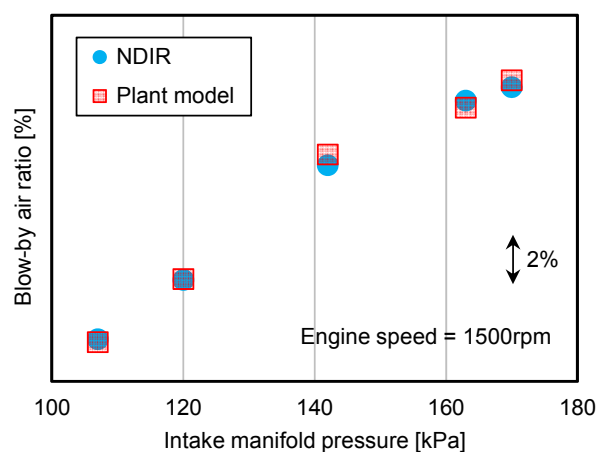


Fig.6 Comparison between NDIR and Plant Model

更に、プラントモデルを用いることにより、吸気弁・排気弁それぞれを通過する空気流量などを個別に算出することで吹き抜け現象を見える化でき、制御に必要な要件及び制御ロジックの構築に有効活用した (Fig. 7)。

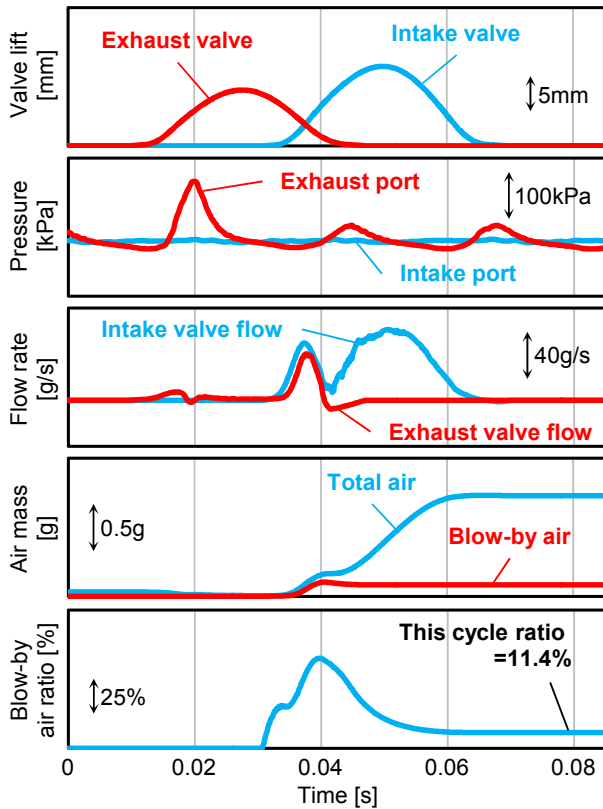
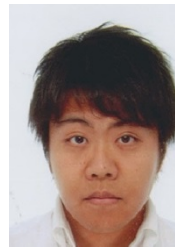


Fig.7 Calculation Result of Plant Model

■ 著 者 ■



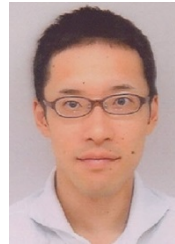
西尾 貴史



東尾 理克



砂流 雄剛



足利 謙介



坊田 亮郎

4. おわりに

量産ガソリンエンジンとして、世界で初めて14.0の高圧縮比を実現したSKYACTIV-Gの開発で培ったエンジン制御及びその開発手法を、SKYACTIV-G 2.5Tの開発で進化させ、新型CX-9のクラストップレベルの低燃費かつ高次元の走りの実現に貢献した。

引き続き、理想のパワートレインに向け邁進し、走る歓びと優れた環境性能を携えたマツダらしい商品をお客様に提供し続けていきたい。

参考文献

- (1) 江角ほか：SKYACTIV-G制御技術の紹介，マツダ技報，No.29，pp.36-40 (2011)
- (2) 小林：ターボ機械-入門編-，日本工業出版，pp.186-189 (2005)