

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

8

SKYACTIV-Gにおける開発プロセス変革 Development Process Innovation on SKYACTIV-G

増田 幸男^{*1} 渡辺 友巳^{*2} 荒川 博之^{*3}
Yukio Masuda Tomomi Watanabe Hiroyuki Arakawa
松尾 直也^{*4} 杉浦 博昭^{*5} 富澤 和廣^{*6}
Naoya Matsuo Hiroaki Sugiura Kazuhiro Tomizawa

要約

我々は、これまでにない高圧縮比化による飛躍的な燃費改善とトルク向上を実現した次世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Gを開発した。SKYACTIV TECHNOLOGYの開発においては、開発プロセス面でも新しい取り組みを進めてきた。具体的には、機能開発や品質検証のやり方、コモンアーキテクチャ（CA）構想などの取り組みである。

性能・信頼性・NVの各領域に、この新しい開発プロセスを適用することで、排気量差、仕向け地展開による仕様差に関わらず、同体質のエンジン群を一括開発することが可能となった。これにより従来よりも開発効率を大幅に高めるとともに品質のロバスト性を保証できるようになった。

Summary

We developed new generation gasoline engine called as SKYACTIV-G which achieved remarkable improvement of fuel economy and torque due to high compression ratio. In this SKYACTIV TECHNOLOGY development, we introduced new development process as well. That is the approach such as function development, quality certification method in the market field, common architecture (CA) concept and so on.

By applying this new development process to all technical attributes such as performance, reliability and NV area, bundled development of the engine family could be realized, which has same functional characteristics regardless of difference of engine displacement or difference of specification due to the market deployment plan. Finally, this approach brought about robustness of the quality guarantee, as well as drastic improvement of engine development efficiency.

1. はじめに

近年ハイブリッド車や電気自動車の開発が活発化し、電気デバイスによる燃費改善技術の採用が進んでいるが、グローバルで見ると今後も内燃機関が主流である。そしてハイブリッド車においても、その効果を十分発揮させるには、ベースとなる内燃機関の性能が重要であることはいまでもなく、その答えとしてSKYACTIV-G開発を行ってきた。

一方で、SKYACTIV-Gを初めとする競合力の高い商品をタイムリーに市場導入するためには開発、生産の効率改

善が必須であった。我々はガソリンエンジンの機能を見つめなおし、全生産車に適用できる展開性のある技術を実現するために、開発プロセス自体も新しい取り組みを進めてきた (Fig.1)。本稿では、CA（コモンアーキテクチャ）構想と機能開発および、MBC（モデルベースキャリブレーション）の考え方と開発事例を紹介する。

*1~5 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*6 エンジン設計部
Engine Engineering Dept.

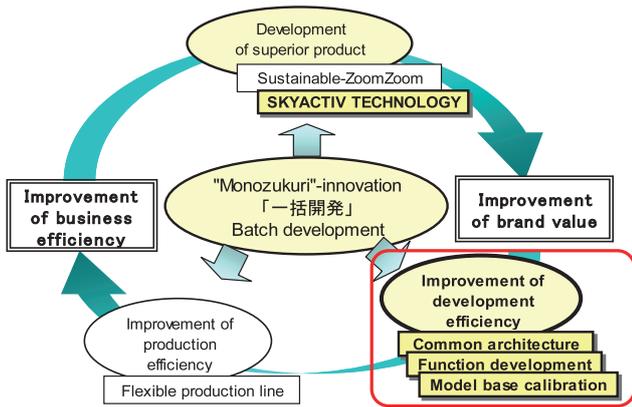


Fig.1 Mazda "Monozukuri"-Innovation

2. CA構想による機能展開の取り組み

(1) コモンアーキテクチャ (CA) 構想の概念と狙い

激変する市場環境下において、SKYACTIV-Gに代表される優れた商品がかつてないスピードと効率で開発してゆくことが必須である。これを実現するために、我々は「CA構想」に基づく「一括開発」という新しいプロセスを導入した。これは、将来の機種展開スコープを見据えたビジョンの下、各機能システムごとに、機種によらず共通のコンセプトを定め、高めるべき機能を明確化する。

その機能を安定して（ロバストに）実現する仕様（＝固定要素）を選定する。その後、機種ごとに商品性・生産性・レイアウト等の要求にミートするハード（＝変動要素）を選定するアプローチである（Fig.2）。すなわち、CAとは部品の共通化ではなく、排気量等が異なっても狙いの機能が揃う（機能の転写）よう、必要な部分は構造や部品の諸元を作り分けること。そのために、目標とする機能および機能目標群をあらためて定義しなおした。この定義により、機能限界（我々は機能限界のことを「崖」と呼ぶこととした）と製造トランスをリンクさせた新しい開発のアプローチが可能になり、機能と品質、コストを同時に造りこむ開発革新が実現した。

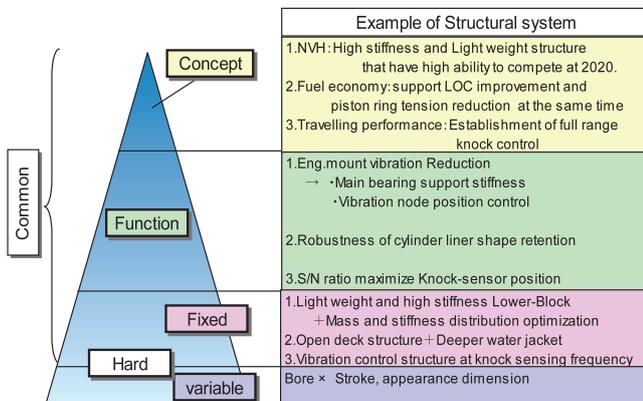


Fig.2 Concept of Common Architecture

(2) 燃焼特性のCA化

例えば、燃焼性能では、物理機能【流速・混合気濃度・

温度・圧力など】を転写することで排気量によらず、同体質な燃焼特性を実現。これにより、燃焼に起因する諸性能開発やキャリブレーションを一本化し、排気量によらない共通開発とすることで市場の性能要求の変化に対しても、柔軟かつ迅速に対応することを可能にした。

燃焼特性では、排気量違いの熱発生パターンを同一にすることを狙い、空気流動をボア径に応じて変化させた（ボア径の拡大に伴い流動を強く制御した）。また、混合気特性（混合気均質度）を同一にするために、インジェクタの噴霧方向、ペネトレーションをボア、ストロークで補正する考えにより、点火時期、噴射時期がほぼ同一になるよう諸元決定しCA化を図った（Fig.3）。

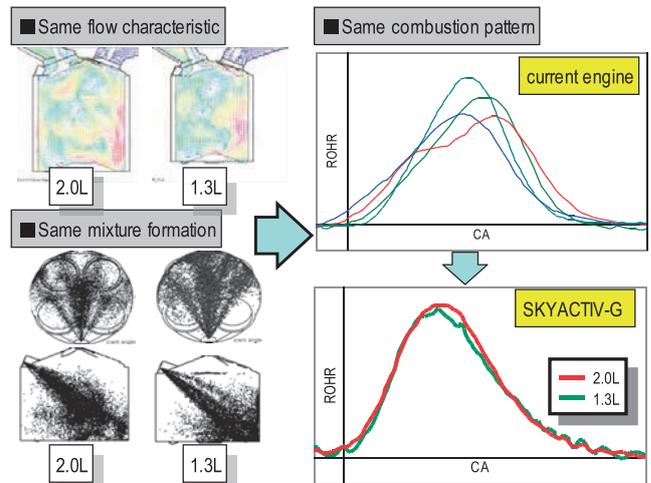


Fig.3 Combustion CA

また、出力特性を規定する主要素である体積効率のCA化に際しては、吸排気脈動、Cfの物理特性転写を目指した。例えば、吸気・排気の脈動特性を合わせることで、排気量が違っていても体積効率の特性を揃えた（Fig.4）。

同様のアプローチを信頼性、NV開発でも適用することで、個別開発を大幅に削減し、開発の効率化を実現した。

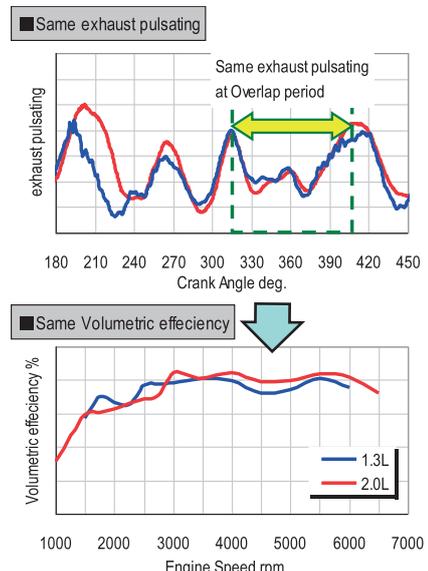


Fig.4 Volumetric Efficiency CA

3. 機能開発と品質検証の新しい取り組み

3.1 機能開発の考え方 (品質と機能の崖の見極め)

(1) 機能開発のプロセス

従来の開発は、商品性 (=品質) 目標を達成することを確認し、仕様を決定するというプロセスであったが、SKYACTIV-Gの開発では、システムに要求される機能そのものにフォーカスし、それをロバストに実現する仕様を選定する開発アプローチへの変革を図った。具体的なプロセスをFig.5, 6に示す。

- ① 機能展開・カラクリ (メカニズム) 解明: このプロセスでは、品質と機能の関連を明らかにするとともに、機種によらずに共通な(i)基本機能および(ii)機能限界を定義する。また、このプロセスでは、基本機能をコントロールする仕様である(iii)制御因子および、製造トレランス、使用環境、劣化等、コントロールができない(iv)ノイズ (誤差因子) の抽出も行う。
- ② 機能限界 (崖) に対するロバスト仕様選定: 制御因子の組み合わせにより、ノイズの影響を受けにくく、また全てのノイズの影響を考慮しても機能限界 (崖) を越えることがない仕様 (=ロバスト仕様) を選定する。
- ③ 商品性目標達成仕様決定: 機種ごとの商品性目標 (=品質限界) にミートするように制御因子の範囲を決定する。
①~③のプロセスではCAEを最大限に活用し、検証の短期化・効率化を図った。これらの結果、開発後期の実機確認段階での問題発生や仕様見直しによる開発手戻りを防止できた。
- ④ 市場検証: 上記プロセスで選定した仕様で製作した車両を実際に市場走行させ、開発の確からしさの検証を行った。

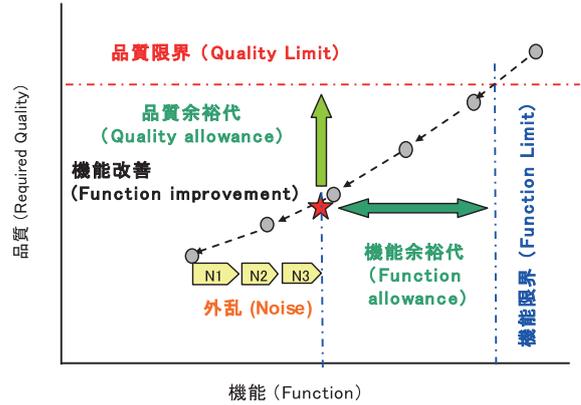


Fig.6 Philosophy of Function Development

3.2 機能開発事例

(1) LOC低減開発

機能開発プロセスに取り組んだ事例としてLOC (Lubrication oil consumption (オイル消費)) 低減開発を紹介する。従来開発では、LOC (=品質) 目標を達成することを確認し、仕様選定を行ってきたが、SKYACTIV-G開発では、基本機能として「シリンダライナー (以下ライナー) の形状保持性」と「ライナー表面油膜のコントロール性」を定義し、機能限界 (崖) に対して余裕のある仕様の選定を行った。Fig.7にライナーとリング間でのオイル掻き落としの状況を示す。ライナーはシリンダヘッドの締め付けや運転時の熱などで変形するが、この変形にピストンリング (以下リング) が追従できない場合、リングとライナーの間に隙間が発生し、リングでの十分な掻き落としができなくなってLOCは増加する。従って、運転中のライナーの真円性を保つことが、LOC低減とリング追従性改善に基づくリング張力低減による燃費改善には重要となる。

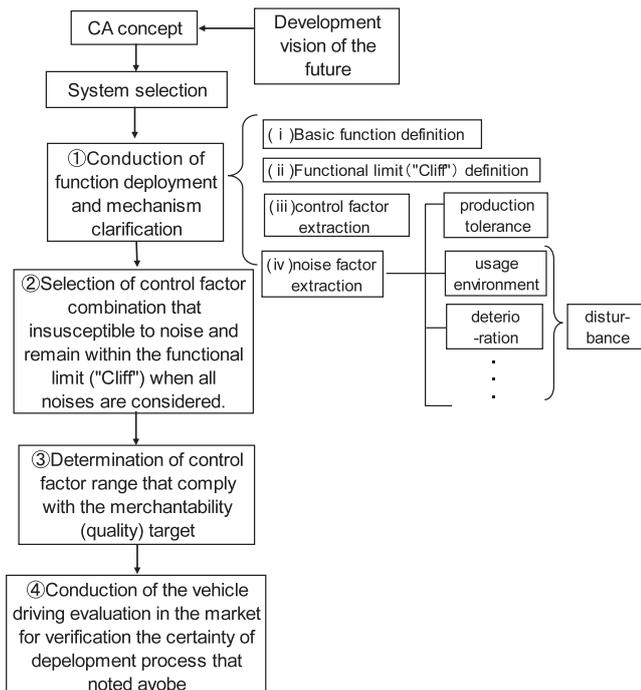


Fig.5 Function Development Process

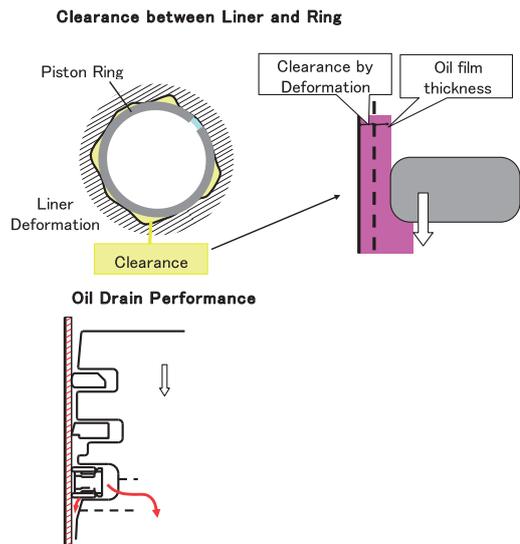


Fig.7 LOC Function Development

SKYACTIV-G開発では、上記基本機能であるライナーの形状保持性に影響する制御因子、誤差因子を抽出し、誤差因子の影響が小さく、全ての誤差因子を考慮しても機能限界 (崖) を越えない仕様を選定した。検証前後でのライ

ナー変形の結果をFig.8に示す。両者とも誤差因子の影響を考慮しているが、最適化仕様ではほとんど変形は見られない。

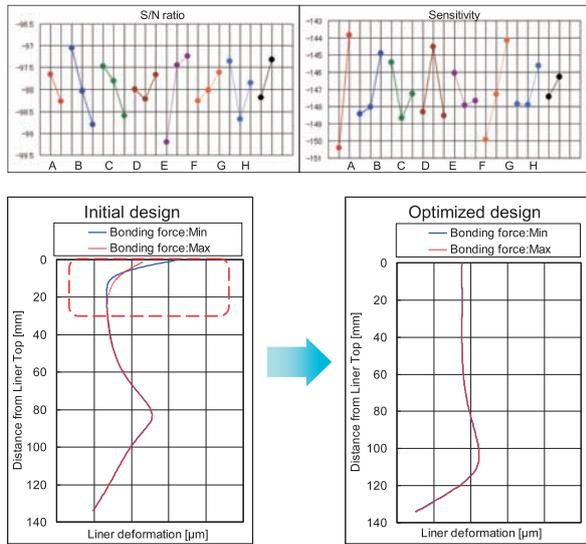


Fig.8 Function Development Result

基本機能のロバスト性を確保した結果、品質であるLOCは、低燃費化のためにリング張力を従来機種比約14%低減したにもかかわらず、ノイズの影響を考慮しても開発目標に対する余裕度を確保することができた (Fig.9)。

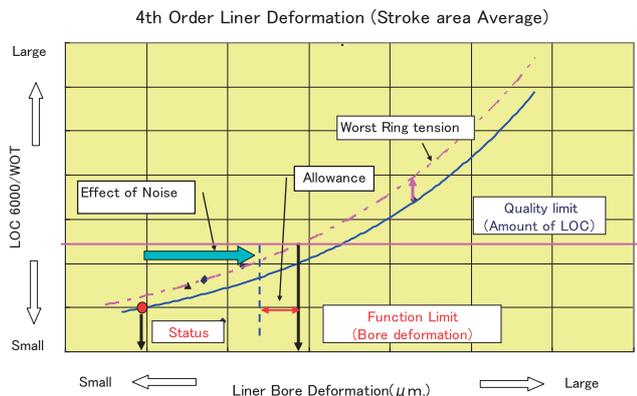


Fig.9 LOC Function Limit

(2) 燃焼開発

燃焼開発においても同様なアプローチを適用した。開発初期の段階で機能展開を行い機能、制御因子、誤差因子を明らかにし、機能目標を設定した。燃焼の機能としては、筒内へ入る空気流動と筒内の混合気均質度が最も重要である。これらを制御する主な因子は、吸気ポート形状、インジェクタ噴霧形状である。誤差因子は、部品、製造ばらつき以外に、劣化、使用環境によるばらつき、部品の応答遅れの観点から抽出した (Fig.10)。

次のステップで、設計した部品が設定した機能目標を達成できているかをCAEで検証した。このプロセスで誤差因子による影響度を明確にし、機能限界 (崖) からの余裕度を明らかにした。最終段階では、実際に試作したエンジンで検証を行い、品質目標、機能目標の達成を確認した。

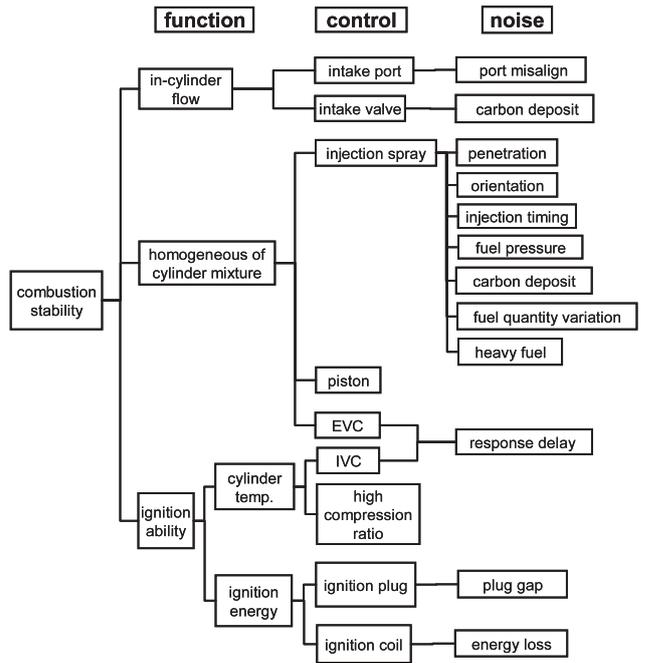


Fig.10 Combustion Function Development

Fig.11に燃焼機能の一つの混合気均質度の限界と余裕代を示す。混合気の均質度は、燃焼安定性と相関が高い筒内混合気のA/F偏差値を指標に絞り込み、混合気に関する誤差因子を抽出して検証した結果、余裕代は確保できることがわかった。この結果、重点開発項目を絞り込み、効率的な開発が可能になり、展開性のあるロバストな燃焼性能を実現した。同様に性能、信頼性、NVの各領域の重点開発項目についても、システムに要求される機能を高め、その機能を安定して実現する仕様選定を進めた (Fig.12)。

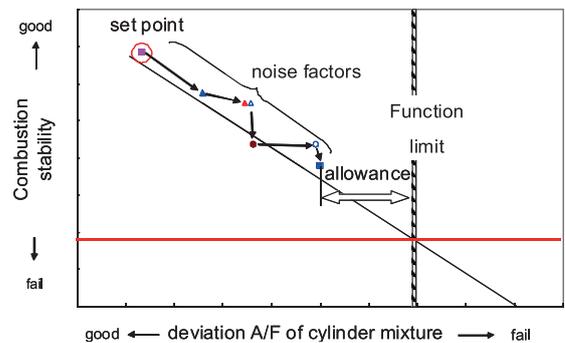


Fig.11 Function Limit of Combustion

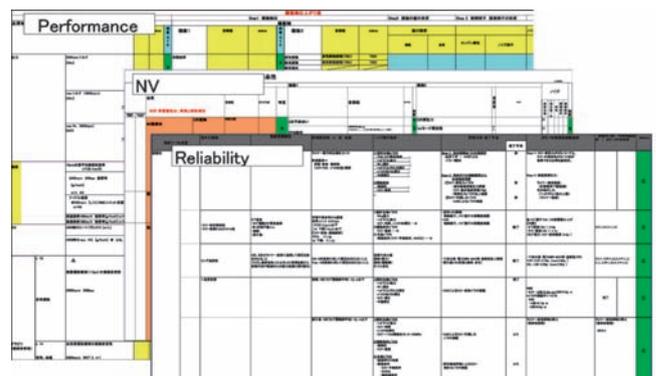


Fig.12 Application of Function Development

3.3 市場品質検証

(1) 市場品質検証活動の狙い

以上のような機能開発の仮説を検証し、我々が技術をコントロールできていることを立証するために市場検証活動を実施した（米国市場で実施）。

視点1：強化した重要機能が、市場環境下（多くの複合ノイズ、市場ユニークな使われ方）にさらされてもロバストに機能するかどうかを検証する。

視点2：ベンチ上での連続的な耐久評価ではなく、様々な環境変化の中における、実車状態での劣化に対するロバスト性を検証する。

視点3：台上評価で発見されない複合ノイズ下での潜在問題がないか徹底的に調べる。

(2) 市場品質検証結果

本活動の事例として、燃焼機能を変化させたときの市場検証結果を紹介する。Fig.13に示すように、故意に燃焼機能を高めた仕様と弱めた仕様を設定して車両に搭載し、市場走行データを収集した。その結果、我々が選定した機能が、市場環境下においても十分なロバスト性を確保していることを検証できた。

また、この状態を台上と車両で比較すると、機能の変化傾向が同等で開発での想定どおりの動きをしており、台上評価で確認した結果は、市場の検証結果を代表していると判断できた。

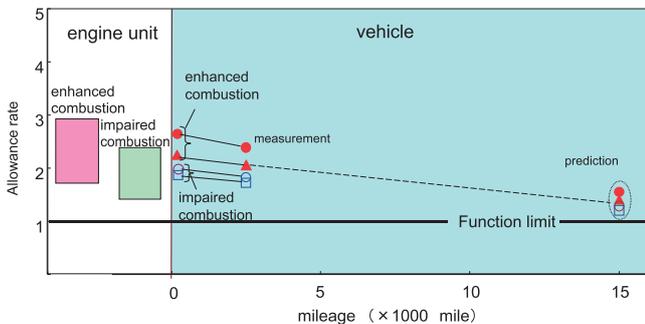


Fig.13 Dyno Evaluation Result

4. キャリブレーションプロセス変革

4.1 CA構想とキャリブレーションプロセスの変革

キャリブレーションとは、燃焼（筒内状態量）と体積効率が（ ηv ）を制御して要求性能を実現することで、Fig.14に示すように機能展開による同体質のエンジンでは、キャリブレーションも多くの部分で転写可能となる。これによりプログラム間／ユニット間の性能開発、キャリブレーション開発の共通化を図り、大幅な開発工数の削減を実現した。

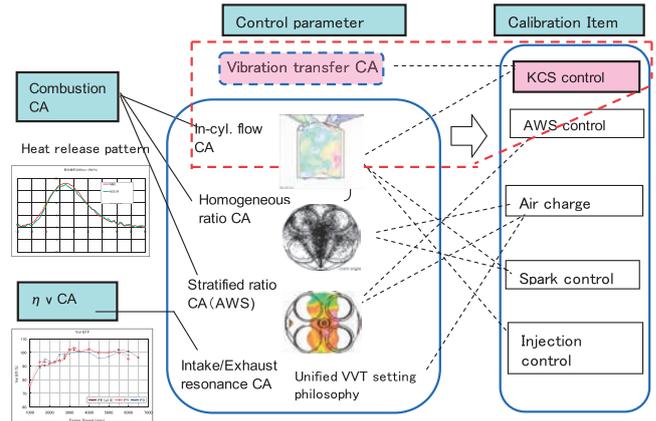


Fig.14 Calibration CA

4.2 MBCによるキャリブレーションアプローチの変革

SKYACTIV-Gのように多くの制御パラメータを扱うエンジンでは、キャリブレーションに際してあらゆる制御状態での特性を把握する必要があり、そのためのテスト量も膨大に必要であった。これまでMBC（モデルベースキャリブレーション）のアプローチにて、少ないデータ量で高品質の制御最適設定に取り組んできたが、今回のSKYACTIV-Gでは更にCA構想に則し、次の3点の効果を狙い変革キャリブレーションプロセスを設定した。

- 狙い①：既存の親エンジン特性を派生エンジンに活用することでテスト量を削減…燃焼CAに基づく
- 狙い②：既存エンジンの制御要求値をもとにあらかじめデータ収集すべき制御範囲を絞り込みテスト量を削減…制御CAに基づく
- 狙い③：既存エンジンの制御要求値をもとにあらかじめ最適キャリブレーション点を特定することで、探索時間を削減…制御CAに基づく

これらの狙いをいかに実現するかについて、採取したデータをもとにエンジン特性をモデリングする工程、そしてこのモデルをベースに最適制御値を求める最適化工程（エンジン特性が最適となるエンジン制御量を求める）の2工程に分けて紹介する。

(1) エンジン特性掌握のためのエンジンモデリング方法

前述のとおり、SKYACTIV-Gでは、燃焼CA構想にて筒内状態量をそろえることで燃焼特性を等価にできることを狙い開発を進めてきた。これはモデルを筒内状態量入力とすることで派生機種エンジンモデルとしても活用できることを狙いとしてきたものでもある。これを実現すべく、エンジンモデルはFig.15に示したように(A)(B)(C)の3つのモデルでの構成としている。

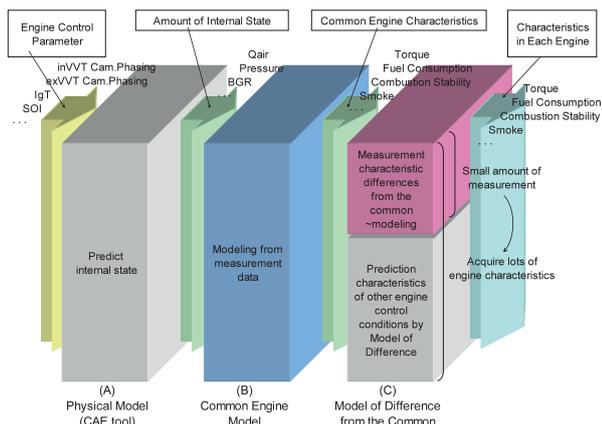


Fig.15 Approach of Engine Modeling

親とするコモンエンジン特性は、既にあらゆる運転条件毎の燃焼特性を取得できており、まずこのデータで(B)のコモンエンジンモデルを製作した。モデルの入力項は、筒内状態量(狙い①)とし、値はエンジンスペックをもとに運転条件毎に(A)のCAEツールで求めたものを採用している。

派生エンジンでは、あらかじめ絞り込んだ制御量範囲から、コモンエンジンとの特性差異のみを少量テスト(狙い②)で採取、これらのデータで(C)の差異モデルを製作する。

以上の3つのモデルを組み合わせることで、派生のエンジンモデルを製作し、運転条件毎の燃焼特性をモデル上で掌握できる状態を実現した。

(2) 制御最適値探索方法

MBCは、様々な制約条件の中でベストな性能を成立する制御因子の最適探索とその検証が可能な手法だが、更に機能転写、制御CAの取り組み効果を採用入れ、短期間で最適制御値を導く手順を設定した。

製作したエンジンモデルを用いて、あらかじめ大よそ把握できている(狙い③)制御要求値が、制約条件(崖)からどれだけ余裕を確保できているか、また燃費や出力最良か、といった性能面、品質面から最適化できていることを網羅的に確認する(Fig.16)。

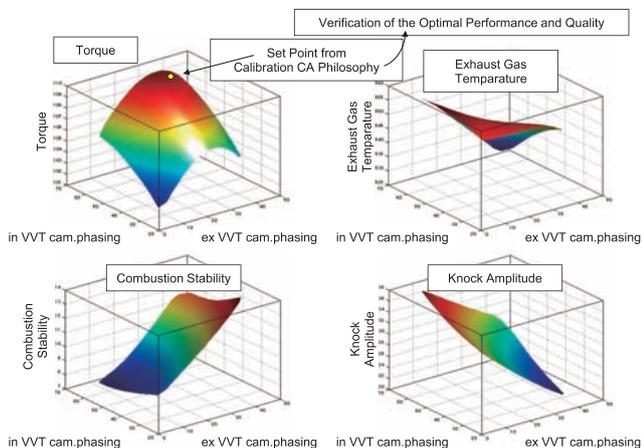


Fig.16 Approach of Optimization

先行ユニット開発と併行して開発してきた当キャリアブレーション手法を、今後のSKYACTIV派生エンジン開発に本格的に適用する。これにより、更にキャリアブレーションの大幅な効率化が期待される。

5. おわりに

SKYACTIV-G開発の中で構築してきた新しい開発プロセスを紹介したが、今後マツダが発表する車の商品力を高め、お客様の様々なニーズに柔軟にかつ迅速に応えられるよう、より機能を高め、更なる効率的な開発を目指して今後も開発プロセスの進化に取り組んでいく。

■ 著 者 ■



増田幸男



渡辺友巳



荒川博之



松尾直也



杉浦博昭



富澤和廣