

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

9

SKYACTIV-GにおけるCAEの活用  
Application of CAE to SKYACTIV-G

佐藤 圭 峰<sup>\*1</sup> 植木 義 治<sup>\*2</sup> 和田 好 隆<sup>\*3</sup>  
Kiyotaka Sato Yoshiharu Ueki Yoshitaka Wada  
本郷 均<sup>\*4</sup> 宮内 勇 馬<sup>\*5</sup> 横畑 英 明<sup>\*6</sup>  
Hitoshi Hongo Yuma Miyauchi Hideaki Yokohata

## 要 約

高圧縮比で燃料消費率・出力を大幅に向上させるSKYACTIV-Gの開発においては、きわめて多くの制御因子が存在するため、従来の実機検証を元にした開発ではその諸元決定の最適化に限界があった。開発の高品質化・短期化を狙うために、CAE (Computer Aided Engineering) をフル活用した開発を進め、基本性能だけでなくロバスト性を高めたエンジンを実現できた。本稿では、多くのCAE適用項目の中から、主に筒内流動、燃料噴霧解析を中心に説明する。

## Summary

In the development of SKYACTIV-G that greatly improved the specific fuel consumption and the engine power, traditional experimental verification development style had limitations in the optimization of specification due to a great number of restrictions. Aiming at a high quality and short-term development, we take full use of CAE (Computer Aided Engineering) to proceed with the development of the engine, which improves not only a basic performance but also robustness. We explain chiefly about the in-cylinder vortex and fuel spray analysis among a lot of CAE applications.

## 1. はじめに

従来に比べ、はるかに高い目標を掲げたSKYACTIV-Gの開発においては、エンジンの空気導入量改善、燃焼改善及び機械抵抗低減、重量低減など改善すべき項目が多岐にわたった。従来の実機計測を中心とした諸元決定では最適化に限界があるため、CAEを中心とする予測技術力を劇的に向上させ、実験とCAEを融合させることでメカニズム解明を進め、技術のブレークスルーを図ってきた。

多くのCAEの技術開発及び適用を行ってきた中で、燃費・出力に関係が深い筒内流動、燃料噴霧を中心にCAE技術の説明を行う。

## 2. エンジン筒内の流動解析技術

## 2.1 筒内流動の精度改善

SKYACTIV-Gでは、従来にない高圧縮比を実現するため、エンジン筒内の燃焼状態を、幅広い運転条件で最適に

する必要があった。良い燃焼のためには筒内の流動と混合気の分布が重要であり、その実現のためには正確な現象把握が必要である。そのため、筒内流動及び燃料噴霧の影響を精度良く予測できなければならない。まずは筒内流動の予測技術について説明する。

近年、急激なCFD (Computational Fluid Dynamics) ツールの発展により、インターカムニホールド、吸気ポートといった吸気系の流動及びエンジン筒内の流動予測が可能なレベルになってきた。しかし、筒内の流動予測の精度に関しては、実機の可視化が簡単ではないため、十分な確認が行われていなかった。筒内流動は、燃焼のベースとなるため、流動が精度良く予測できないと全ての予測精度が悪化する。そこで、まずは筒内の空気流動の可視化により、CFDの予測精度の確認を行った。

マツダでは、汎用CFDツールであるSTAR-CDを主に使って開発を進めているが、一般的に現在のCFDでは、乱流モデル、メッシュサイズ、流動パラメータなどの設定

\*1~6 エンジン性能開発部  
Engine Performance Development Dept.

が精度に大きく影響を与えるため、事前検証が欠かせない。従来こうしたパラメータ設定の正しさを、シリンダヘッド及びライナのみを組み合わせた定常流でのタンブル・通気抵抗試験（以下定常リグテスト）で評価することが多かった。

SKYACTIV-Gの開発にあたっては、予測精度向上のため、ガラスライナ製単気筒エンジンによる実運転条件（750rpm, スロットル全開）でのPIV（Particle Image Velocimetry）を用いた流動可視化計測とパラメータ設定を行って予測精度検証を進めた。可視化計測結果と計算結果の比較をFig.1の(a), (b)に示す。この図から、当初のパラメータ設定では渦中心や流動の方向などの計算結果が計測結果と全く合っていないことがわかる。この予測と実測差の原因を探るため、メッシュサイズ、乱流モデル、乱流モデル係数を変更して検討を行った。例えば、メッシュサイズは精度と計算の安定性、計算コストを考慮し、最終的に1.5mmとし、乱流モデルは標準k- $\epsilon$ モデルとした。最終的に決定したCFDモデルでの結果をFig.1(c)に示す。この設定パラメータを使えば運転条件を変えても、実用的な精度で予測できることも確認できた。

## 2.2 流動解析の効率化

筒内の流動を大きく決定付けるのはポートやピストンの形状である。SKYACTIV-Gでは従来の定常リグテストに加え、CFDで点火時期における乱流強度などを予測し、良否の判断を行う方法を多く活用した。更にポートの製造ばらつきやカーボンデポジットの影響も勘案したロバスト

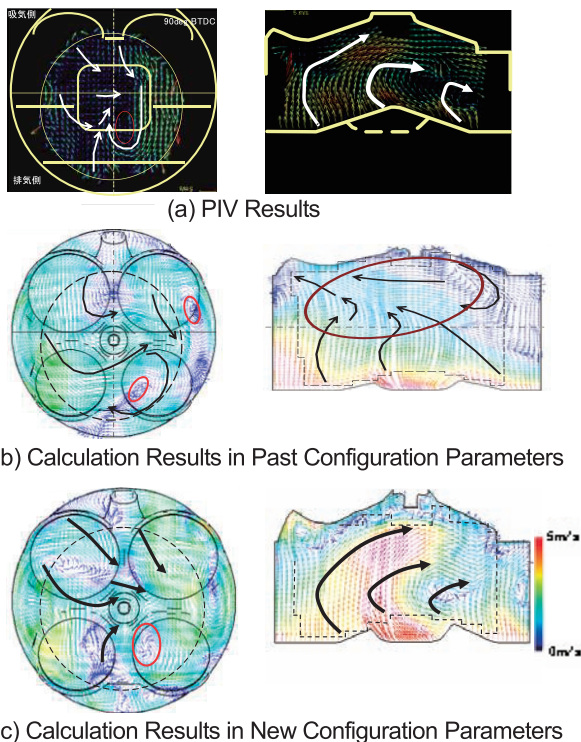


Fig.1 Comparison of PIV and Calculation Results of Internal Flow

な形状を実現するために、品質工学を活用して多くの形状検討を行ってきた。こうした検討を行うためには、従来に比べてはるかに多くの計算量と解析工数が必要となる。マツダではCFDの解析工数を大幅に削減するために、マツダ内製の設計者向けCFDシステムPT-ECS<sup>(1)</sup>を独自に開発している。このシステムは、汎用CFDツールであるSTAR-CDを解析専任者以外でも使えるようにしたプリ/ポストアプリケーションであり、これまで蓄積してきた解析ノウハウを織り込むと同時に自動化計算を可能とし、社内で広く活用している。ただ、従来は定常解析にしか対応していなかったため、SKYACTIV-Gの開発にあたって、このシステムをピストンの動きを再現する移動境界メッシュに対応できるように改善して活用した。これにより、メッシュ作成や結果処理時間を大幅に低減し、検討人員の増加を最小限に抑えながら多くの解析を実現することができた。

以上の筒内流動の精度改善と効率化の取り組みにより、狙いの流動を実現可能なポートに設計できた。混合気が均質な場では流動の予測精度が高いと燃焼の予測精度が向上するため、Fig.2示すように実用上十分な精度で均質燃焼の予測が可能になった。

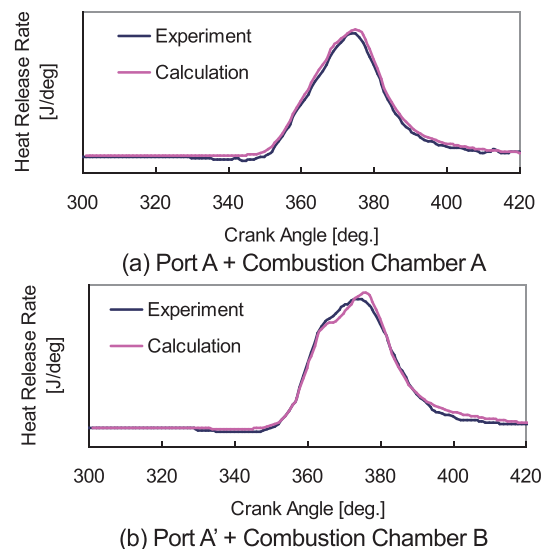


Fig.2 Comparison of Homogeneous Combustion Calculations of Different Combustion Chamber

## 3. エンジン筒内の燃料噴霧解析技術

### 3.1 燃料噴霧解析の重要性

筒内流動とともに燃焼に大きく影響を与えるのが燃料噴霧挙動である。SKYACTIV-Gは、吸気冷却効果を最大限利用可能な噴霧パターンの実現を狙い、マルチホールインジェクタ（MHI）を採用した。MHIは、従来のスワールインジェクタに比べ、噴孔数や噴孔配置の自由度が上がるため、各運転領域別の燃焼要件を高度にバランスさせることが可能である。しかし、筒内流動と噴霧の混合気形成過程

の膨大な組み合わせを最適に制御する必要があるため、筒内の複雑な混合気形成過程の噴霧解析を行い、設計諸元の決定を行った。

3.2 定容容器噴霧計測

筒内の現象は、大変複雑かつ高速な現象であるため、物理現象をモデル化した現状のCFDでは、実機計測がない状態での精度の高い予測は難しい。噴霧と混合気形成過程を高精度で予測するためには、まず定容容器でインジェクタ単体の特性を事前に計測し、その結果と整合を取れるよう噴霧モデルパラメータと噴射初期条件の適切な設定が必要である。SKYACTIV-Gでは、従来の液相のみの光学撮影計測に加え、液相及び蒸気相を同時に定量的に計測する2波長レーザー吸収散乱法<sup>(2)</sup> (Laser Absorption Scattering technique : LAS法) で正確な計測を行った。また、通常の計測を行う常温常圧場に加え、よりエンジンの運転条件に近い高温高圧場での計測も行うことで、予測精度を高めた。

噴霧挙動のモデル化にあたっては、メッシュのサイズの最適化も重要である。Fig.3はメッシュサイズの違いによる噴霧先端到達距離を比較したものであるが、大きく違うことがわかる。こうしたメッシュの影響を最小限にするために、エンジンモデルと定容容器モデルでメッシュサイズをできるだけ揃えるよう条件設定を行った。また、壁面衝突後の噴霧挙動の精度良い予測も重要であるため、同志社大学千田らのモデル<sup>(3)</sup>をSTAR-CDに組み込み、計算精度の向上を図った。

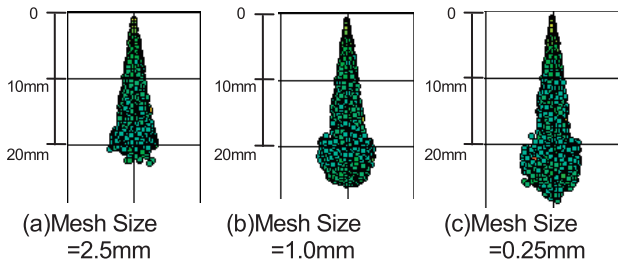


Fig.3 Comparison of Spray Tip Penetration by Different Mesh Sizes

3.3 噴霧モデルパラメータの最適化手法

上述の実機計測結果と計算結果との整合取りには、多くの噴霧モデルパラメータが対象となるため、モデル作成などに多くの工数がかかる。そこで最適化手法を活用することで大幅な効率化<sup>(4)</sup>を図った。STAR-CDと多目的ロバスト設計最適化ツール (modeFRONTIER) をカップリングさせた噴霧予測計算システムを開発し、噴霧到達距離、液相及び蒸気相質量を目的関数として、入力変数 (分裂・蒸発モデルパラメータ) の最適化を多目的遺伝的アルゴリズムを用いて行い、計測結果と計算結果の詳細な比較を実施<sup>(5)</sup>した。

圧縮行程中に、蒸発しながら壁面に当たることを想定した高温・高圧下 (500K, 1MPa) の定容容器における単噴孔インジェクタから噴射した自由噴霧の予測と実測の比較

をFig.4(a)に示し、衝突噴霧をFig.4(b)に示す。本システムを活用することで、液相及び蒸気相質量分布とも、良い一致を示す結果を短期間で得ることができた。

上記で決定された噴霧モデルパラメータと噴射初期条件を使い、実エンジンでの噴霧挙動と比較した。Fig.5は単気筒の可視化エンジンを使ってモータリング運転を行った時の噴射後の混合気分布を可視化した結果と、移動境界メッシュを用いて計算した混合気分布の比較である。計測と予測は良く一致していることがわかる。こうした技術を用いることで、筒内の燃料付着や混合気分布を把握することができ、その結果として燃焼のポテンシャルなどが精度良く把握できるようになったため、SKYACTIV-Gの現象解明を進めることができた。

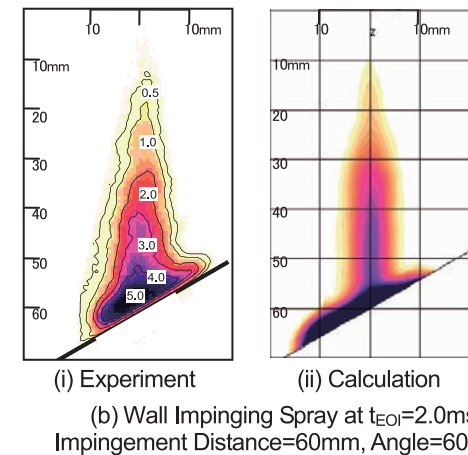
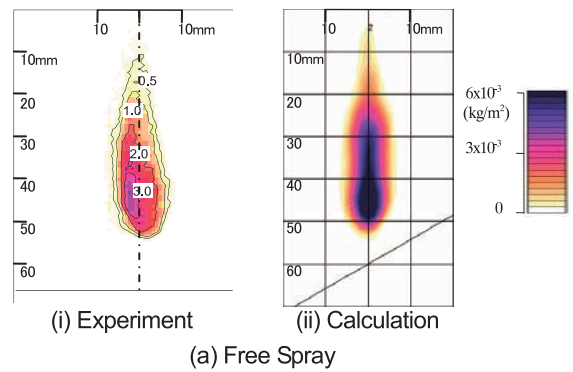


Fig.4 Comparison of Experimental and Calculation Results of Vapor Phase Mass Distributions

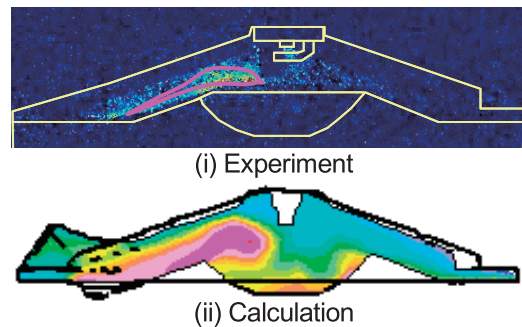


Fig.5 Comparison of Experimental and Calculation Results of Spray Behavior at 30deg. (BTDC)

3.4 SKYACTIV-Gへの噴霧解析の適用

SKYACTIV-Gでは、燃焼改善による燃費、出力、エミッションの大幅改善を行う必要があり、これらを高次元で実現するためにCFDによる噴霧解析を適用し、ピストン及びインジェクタ諸元への反映を行っている。触媒暖機領域 (1,200rpm)、全負荷領域 (1,500rpmWOT)、オイル希釈領域 (1,500rpm) といった運転領域の違いにおける適用事例を紹介する。エンジン諸元をTable 1に示す。

(1) 触媒暖機領域

各国の厳しいエミッション規制をクリアするための重要項目である触媒暖機領域について述べる。SKYACTIV-Gでは始動時に触媒を早期に活性化させ、浄化率を上げるために点火時期を遅角させ、排気温度を上げる制御を行っている。ただし、燃焼悪化を防ぐため、可燃混合気を点火プラグ周りに集めて燃焼させる弱成層燃焼が必要である。これを成立させるためのピストン形状決定事例を紹介する。

混合気の弱成層化のために、噴霧をキャビティにトラップさせ、更に噴霧を点火プラグ方向へ巻き上がらせるコンセプトで検討を進めている。Fig.6に検討を行ったキャビティピストン形状を示す。バスタブ型はレンズ型よりキャビティが深い。Fig.7に各キャビティピストンに上死点前 (55deg.BTDC) で燃料を噴射開始した際の噴霧粒子挙動を示す。35deg.BTDCで、レンズ型はキャビティに入った噴霧が排気側に流れてしまうのに対して、バスタブ型は点火プラグ方向に噴霧を巻き上がらせることができている。

Table 1 Engine Specifications

Bore [mm]	83.5
Stroke [mm]	91.2
Compression Ratio [-]	14

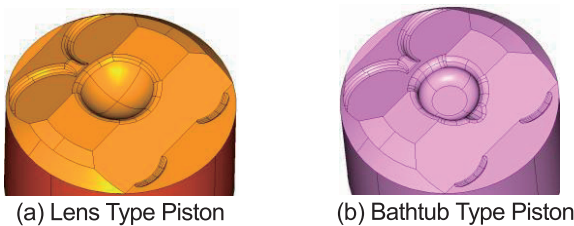


Fig.6 Cavity Piston Shape

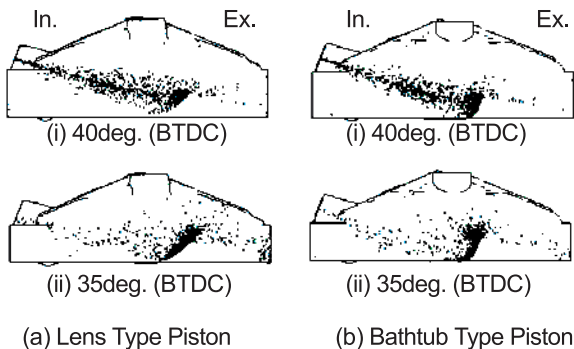


Fig.7 Spray Behavior in Cavity Pistons

この結果、Fig.8に示す点火時期における点火プラグ断面での混合気分布を比較すると、バスタブ型の可燃混合気が点火プラグ周りに集まっている様子が確認できる。また、Fig.9に点火プラグ近傍領域における混合気A/Fの頻度分布を示す。この図からも、点火プラグ近傍領域に燃料噴霧が集まっていることが確認できる。

(2) 全負荷領域

出力性能を評価する全負荷領域では、混合気の均質性が重要である。そのためには、より良く分散させる最適な噴霧レイアウトによる噴霧と空気流動との混合気形成が必要である。Fig.10に示すような噴霧レイアウト (A, B, C) のインジェクタにて、混合気の均質性評価した事例を紹介する。噴霧レイアウトAはB, Cに対し、Y噴霧間角度  $\alpha$  を 3.5deg. 拡げている。また、噴霧レイアウトA, CのX噴霧をBに対し、X-Z平面において-3deg. ずらしている。

Fig.11に噴射後の吸気行程中の噴霧粒子挙動を、Fig.12に点火時期における点火プラグ断面での混合気分布を示す。レイアウトAは他と比べ、Y噴霧間を広げることで、噴霧の筒内への分散が良くなり、均質性が向上している。これは、分散された噴霧が筒内の空気をより多く取り込む

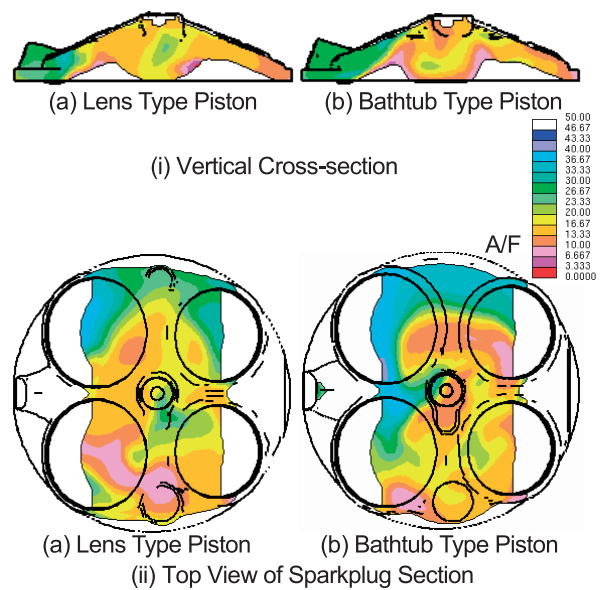


Fig.8 Mixture Distributions at Ignition Timing

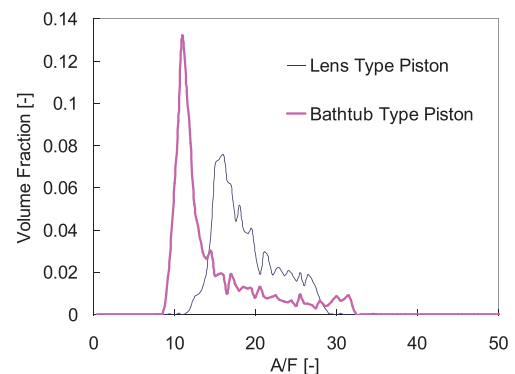


Fig.9 A/F Distribution of the Volume Frequency at Ignition Timing

ことで、噴霧の蒸発を誘起し、空気との混合が促進されて均質性が向上されていると考えられる。Fig.13に示すようにレイアウトAの点火時期におけるストイキ混合気の体積割合が最も高く、均質性が良いことが確認できた。

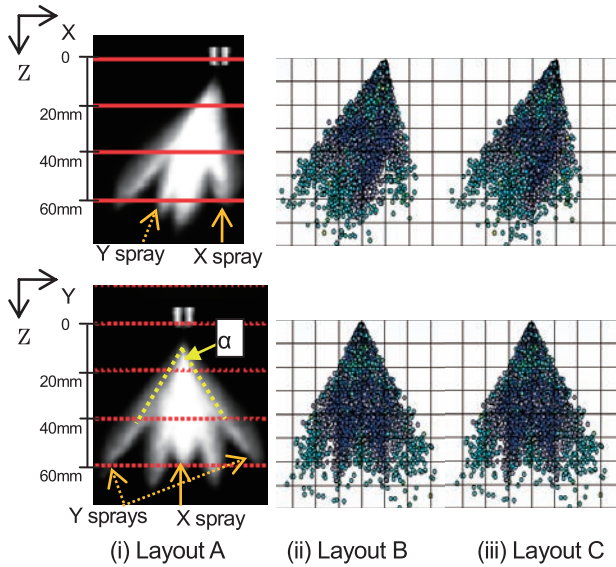


Fig.10 Spray Layout

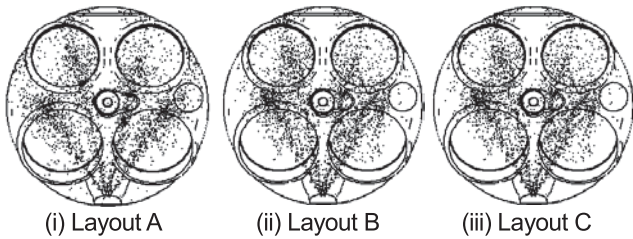


Fig.11 Spray Particle Behaviors at 265deg. (BTDC)

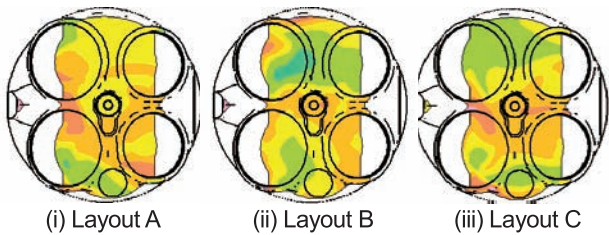


Fig.12 Mixture Distributions at Ignition Timing

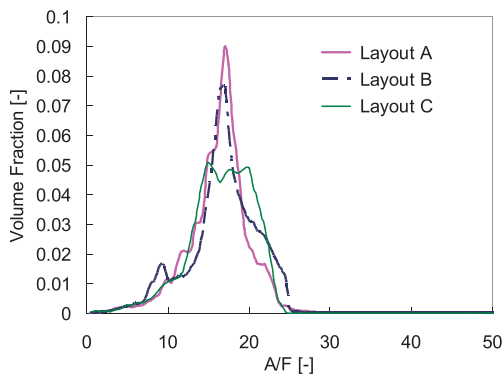


Fig.13 A/F Distribution of the Frequency at Ignition

(3) オイル希釈領域

燃料噴霧を設計する上で考慮しなければならない問題の一つに、シリンダライナ壁に付着した燃料が、ピストン挙動によってクランクケース内のエンジンオイルを希釈する問題がある。この問題を防ぐためには、前述した3.4(2)項の要件を満たした上で、できるだけ噴霧を壁面に付着させないように、シリンダライナまでの距離を長くとることで、燃料気化時間を稼ぐことのできる噴霧レイアウトを考案する必要がある。3.4(2)項で述べた噴霧レイアウトAとBでシリンダライナ壁面付着量の比較を行った。Fig.14に示すようにレイアウトAはBより壁面付着量を約15%低減させることができ、実機評価によるオイル希釈率を2.8%低減できた。

以上に述べたように、様々な運転条件に対応したMHIの各噴孔レイアウトと燃焼室形状をCAEで検討し、ロバストな燃焼を実現する諸元を選定できた。

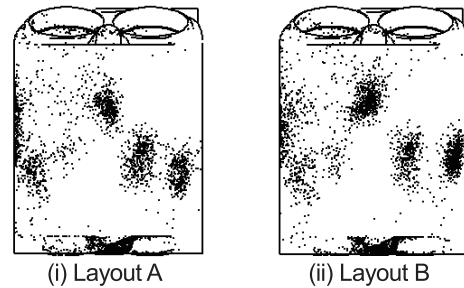


Fig.14 Comparison of Stuck Fuel at 30deg. (BTDC)

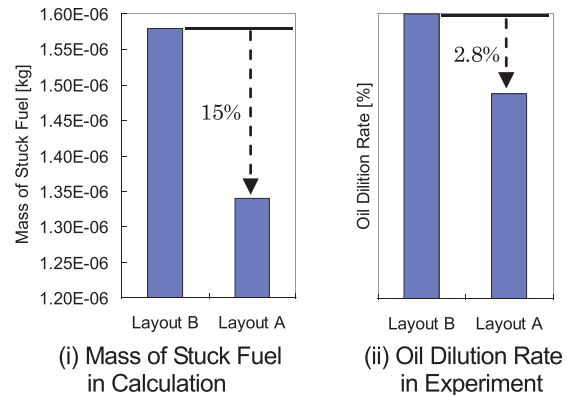


Fig.15 Relation between Mass of Stuck Fuel on the Cylinder Liner and Oil Dilution Rate

4. 構造解析による機械抵抗低減

4.1 構造系の概要

SKYACTIV-Gでは、燃焼改善による燃費、出力の大幅改善に加え、シリンダヘッドやシリンダブロックなど構造系の一新で大幅な摩擦損失低減、軽量化を図った。信頼性、NV性能との両立を図るために、従来に比べはるかに多くのCAE活用と品質工学の活用を進めた。

例えば形状最適化の技術を用いることで、大幅な薄肉化による軽量化を図ってきた。

また品質工学を用いたロバスト検討も多く行ってきたが、一例として、ピストンの検討について紹介する。

エンジン内の摩擦損失の大きな割合を占めるピストンは、アルミ材であることや燃焼ガスにさらされるため熱膨張の影響を強く受ける。熱膨張は摺動部のクリアランスを変化させるので、熱による変化があっても摩擦損失が変わらないようにしなければならない。また、オイル粘度も温度により変化するが制御できる因子ではないため、ばらつきを生む因子となる。製造による寸法の微小なばらつきも同様である。これらコントロール不可能な誤差因子を考慮して、抵抗に対してロバスト性を確保したピストンスペックを決定するため、ピストンスカートの摩擦損失、運動エネルギーを予測する弾性流体潤滑を伴う機構運動解析を実施した。計算モデルとピストンスカート部の油膜圧力及び固体接触圧力の出力例をFig.16に示す。

ピストンの摩擦損失は、弾性流体潤滑モデルとして計算で表現する。ピストンの機能は燃焼荷重をコネクティングロッドに伝えることであるため、燃焼荷重からピストンピンに伝わるエネルギーを評価特性とした。この結果得られた要因効果を分析し、ピストン機能の安定性を重視するため、S/N (信号雑音) 比の高い諸元を選定した。

こうした検討の積み重ねにより、安定性が高く従来に比べ大幅に摩擦損失を低減したピストンスペックを決定することができた。シリンダブロック、シリンダヘッド等でも品質工学とCAEを組み合わせることで、形状の最適化を図っている。

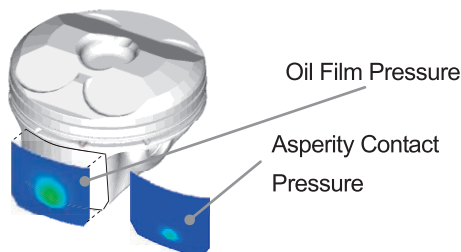


Fig.16 Calculation Model of Oil Film Pressure and Solid Contact Pressure of Piston Skirt

## 5. まとめ

マツダは、1996年から始めている量産車の企画から生産に至るまでの全プロセスにわたってデジタル革新を行う「マツダデジタルイノベーション」の中で、計算ワークステーション増強、解析手法の標準化、解析期間の短縮化、解析結果の高精度化を推進している。SKYACTIV-Gの開発では多くのCAEを開発、それを活用することで、ロバストで高品質な諸元決定を、高効率で行うことが可能となった。今後もCAEの精度改善及び予測領域を拡大させ、効率的な商品開発プロセスを推進していく。

## 参考文献

- (1) 横畑ほか：設計者向けCFDシステム (PT-ECS) の開発, マツダ技報, No.21, p.180-185 (2003)
- (2) Yamakawa, M. et al., Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distributions in a D.I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Paper, 2002-01-1644 (2002), pp.1-13
- (3) 千田ほか：噴霧液滴の壁面衝突噴霧過程のモデリング, 微粒化, Vol. 11, No.23 (2002)
- (4) 佐藤ほか：DISIエンジン噴霧モデルの最適化手法の開発, No.25, p.134-139 (2007)
- (5) Sato, K. et al., Spray and Mixture Properties of Hole-Type Injector for D. I. Gasoline Engine - Comparison of Experiment and CFD Simulation-, SAE Paper, No.2007-01-1850 (2007)

## ■ 著 者 ■



佐藤圭峰



植木義治



和田好隆



本郷 均



宮内勇馬



横畑英明