

特集：新型CX-5

8

新型 SKYACTIV-G 2.5 燃焼技術の開発 New Gasoline Engine "SKYACTIV-G 2.5" Combustion Technology

小谷 佳苗*1 上村 匠*2 平下 茂行*3
Kanae Kodani Takumi Uemura Shigeyuki Hirashita
西尾 貴史*4 野村 健太郎*5 平林 千典*6
Takafumi Nishio Kentaro Nomura Kazunori Hirabayashi

要 約

マツダの技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、走る喜びと環境性能を高次元で両立させた新シリーズガソリンエンジン「SKYACTIV-G」を開発し、市場で好評を得ている。今回、意のままの走りを可能とする出力性能、幅広い運転域での燃費の良さ、クリーン排気ガス性能の3点を更に進化させた「新型SKYACTIV-G 2.5」を開発し、新型CX-5に搭載した。なお、本エンジンは、排出ガス中の粒子状物質の個数（PN：Particle Number）の規制が追加された、欧州Euro 6d規制へ適合するポテンシャルを有する。

本稿では、PN低減のための燃焼技術に焦点を当て、新型エンジンの燃焼コンセプトとブレークスルーした新技術について紹介する。

Summary

The new gasoline engine series, "SKYACTIV-G", was developed under Mazda's long-term vision for technology development, "Sustainable Zoom-Zoom", and achieved high levels of driving pleasure and environmental performance. With these characteristics, the series has received a favorable reception from the market. Recently, Mazda has developed "New SKYACTIV-G 2.5" and installed it in the new CX-5. Features further enhanced for the new engine are output performance that enables highly responsive driving, good fuel economy over a wide operating range and clean emissions. The engine also has potential to comply with Euro 6d to which particle number (PN) standards have been added.

This paper introduces the combustion concept and new breakthrough technologies of the engine with a focus on PN-reducing combustion technologies.

1. はじめに

マツダは優れた環境性能と走行性能を、高次元でバランスさせることで「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」を具現化した「SKYACTIV-G」を開発し、走る喜びをお客様に提供し好評を得てきた。引き続き、お客様の更なる期待に応えるべく、モード／実用燃費の競合力向上と、燃費／走りの改善によるお客様満足度向上を図り、かつ2017年9月から強化される欧州Euro 6d規制へも対応する「新型SKYACTIV-G 2.5」を開発し、新型CX-5のパワースourceとして織り込んだ。

本稿では、新型エンジンのPN低減のための燃焼技術に

焦点を当て、理想からのバックキャストिंगを達成するための燃焼コンセプト、及びそれを実現するために導入したブレークスルー技術について紹介する。

2. 開発コンセプトと主要諸元

2.1 開発コンセプト

マツダは究極の内燃機関をゴールとして、エンジンの効率に寄与する7つの制御因子を定め、理想状態に近づける取り組みを進めている（Fig. 1）。従来の「SKYACTIV-G」（以下、従来型）では、高圧縮比化と燃焼技術の革新、抵抗低減等により、1st Stepを達成した⁽¹⁾⁽²⁾。今回の「新型SKYACTIV-G 2.5」（以下、新型）エンジンで

*1, 5, 6 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*4 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*2, 3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

は、気筒休止や冷却水制御を主体として、更に効率改善を極める1.5Stepまで進化させることをエンジンの開発コンセプトとし、ダウンサイジングエンジンを凌駕する燃料消費率を達成し、かつ出力性能を改善した⁽³⁾。

一方、乗用車用ガソリンエンジンを取り巻く環境規制では、欧州Euro 6以降、排出ガス中の粒子状物質個数を規制するPN規制が追加される。PNは酸素が少ない燃料リッチ状態の燃焼、つまりは燃焼室壁面（ライナー、ピストン等）に付着した燃料の燃焼と、筒内の局所リッチな混合気の燃焼により、多く生成される（Fig. 2）。そのため新型では、出力、燃費、他のエミッション性能を向上しつつ、燃焼室壁面への燃料付着量低減と筒内均質性向上に注力し、PN低減にも配慮し開発した。

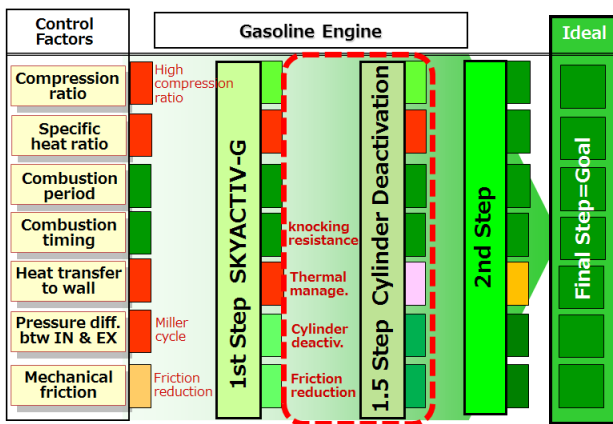


Fig. 1 Vision for Evolution of Internal Combustion

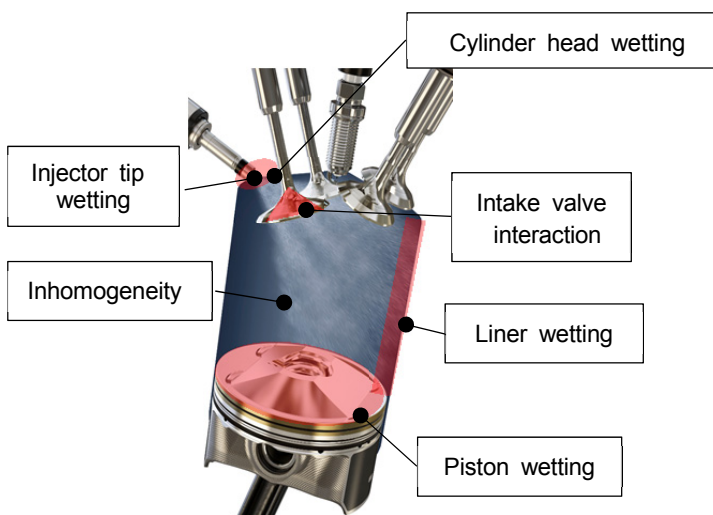


Fig. 2 PN Emission Factor

2.2 主要諸元と性能

新型の主要諸元をTable 1に示す。新型ではMode①：AWS (Accelerated Warm-up System/触媒早期暖気)，Mode②：軽負荷運転，Mode③：高負荷運転，の運転領域ごとに理想の筒内混合気分布を設計し（Fig. 3），従

来型以上のエンジン性能とPN低減を両立するためのブレークスルー技術（詳細は後述）を新たに開発した。これらの技術により、従来比、PN排出量を大幅に低減すると同時に、他のエンジン性能においても優位な改善を確認した。Fig. 4にNEDC (New European Driving Cycle) における検証結果を示す。

Table 1 Specification

Engine		(PREVIOUS) SKYACTIV-G 2.5	NEW SKYACTIV-G 2.5
Engine Type		In-Line 4	
Displacement [cc]		2488	
Bore x Stroke [mm]		89 x 100	
Compression Ratio [-]		13	
Combustion Chamber		Pentroof	
Fuel Supply System		Side Direct Injection	
Injection Spec	Number of holes	6 holes	6 holes
	Static Flow Rate	Base	about 30% down
	Fuel Pressure [MPa]	max 20	max 30
PCM (Powertrain Control Module)	Injection Pattern	max double	max triple
	Minimum Q	Base	Reduced
	Injection Timing	Base	Optimized

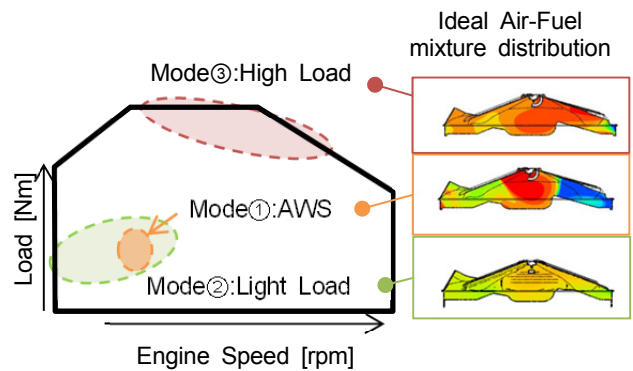


Fig. 3 Air-Fuel Mixture in Each Operation Condition

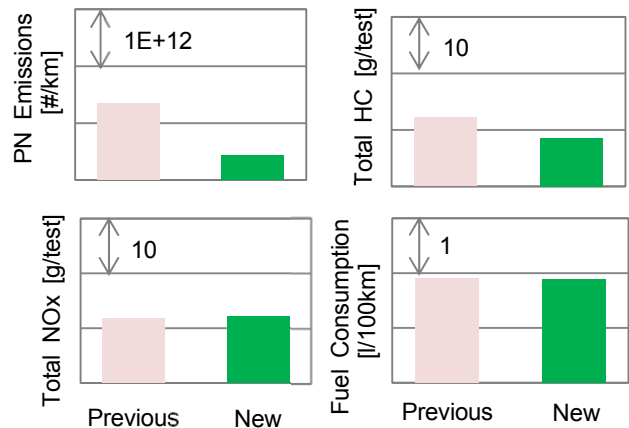


Fig. 4 Comparison of Emissions and Fuel Consumption in NEDC

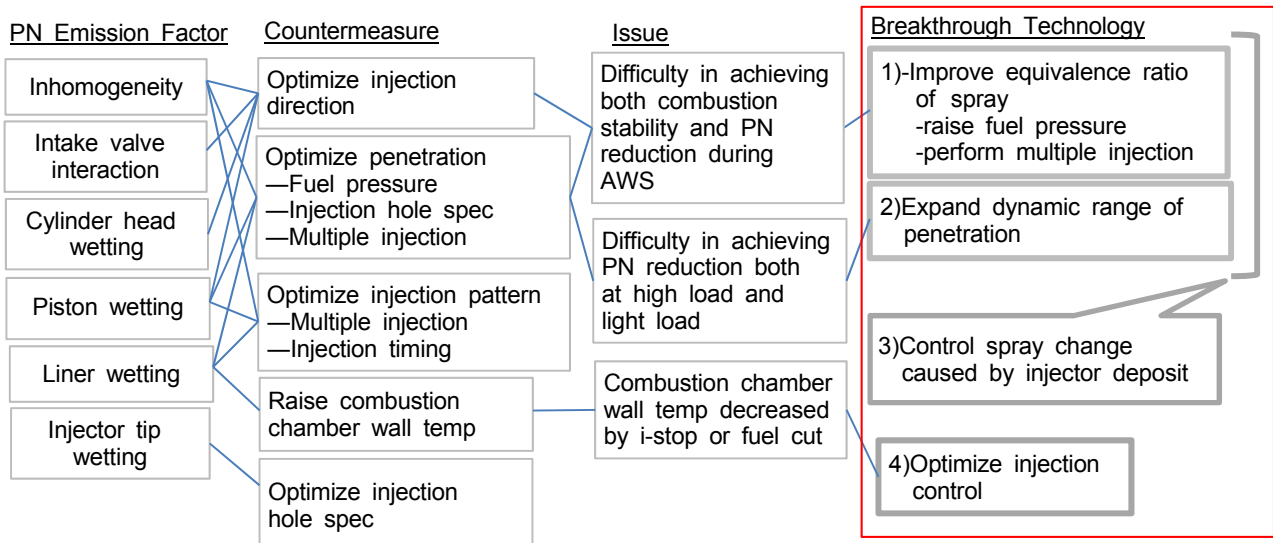


Fig. 5 Breakthrough Technologies

3. ブレークスルー技術

前述のとおり、新型ではPN低減のために、燃焼室壁面への燃料付着量の低減と筒内均質性向上に注力した。PN発生要因と対応策、それに伴う主な課題と新型で開発したブレークスルー技術の関係をFig. 5に示す。

3.1ではAWS中の燃焼安定性とPN低減の両立、3.2では高負荷運転と軽負荷運転でのPN低減の両立、3.3では1～2を劣化時でも成立させる噴霧の劣化抑制技術について、そして3.4では、(1)噴射制御最適化のための最小噴射量低減技術と(2)噴射タイミング最適化によるPN低減について紹介する。

3.1 AWS中の燃焼安定性とPN低減の両立

AWSでは、始動時に触媒をいち早く活性化するため、点火時期を遅角して排出ガス温度を高める制御を行っている。点火時期遅角化は、燃焼安定性に対して不利な条件となるため、ピストンキャビティーへ燃料噴霧をトラップし、スパークプラグ火花部に燃料を集め、弱成層を形成することにより、燃焼安定性を確保している⁽⁴⁾。しかしながら、ピストンキャビティーに燃料噴霧をトラップする際、ピストンへの燃料付着が、PN発生の要因となる⁽⁵⁾。

そこで新型では、従来並みのコンパクトな噴霧を維持しつつ、インジェクター噴孔諸元の最適化と加工精度の高いレーザー加工の採用により、噴霧平均当量比と噴霧長を改善した。従来型と新型のインジェクターの噴霧比較結果をFig. 6に示す。

またFig. 7～9に示すように、噴霧の改善と合わせて、燃料噴射圧の高圧化、噴射分割数の最適化により、ピス

トンへの燃料付着量を低減させつつ、従来型並みのスパークプラグ近傍のA/Fを確保した。

これらにより、Fig. 10に示すようにAWSの定常運転条件にて、PNを大幅に低減することを実現した。

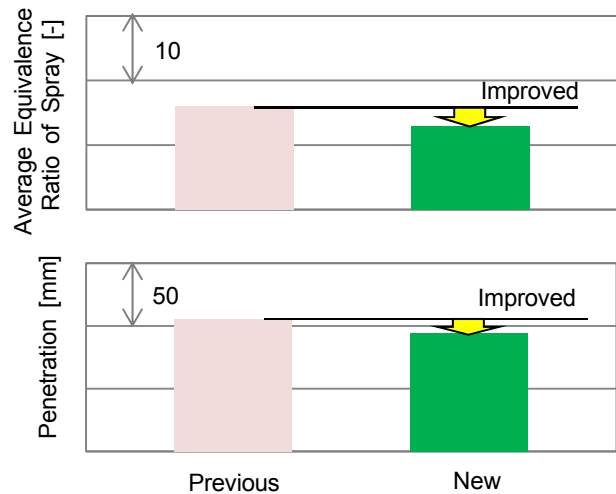
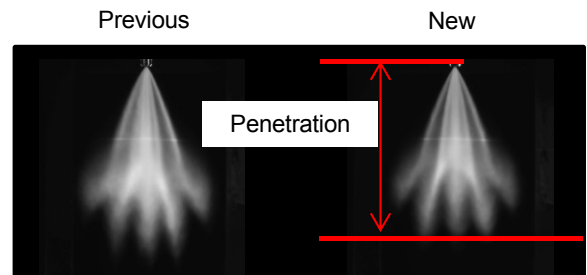


Fig. 6 Comparison of Spray Characteristic

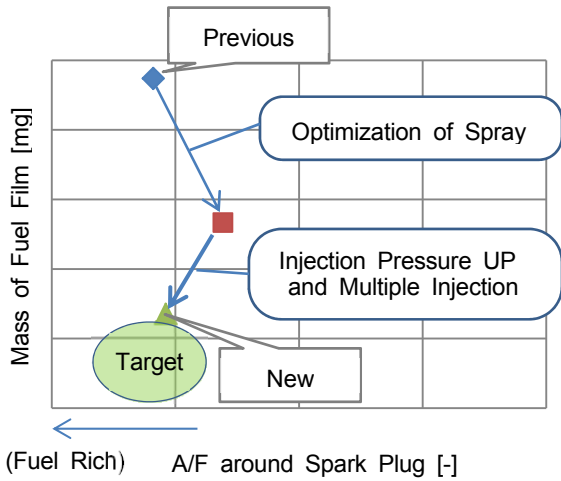


Fig. 7 Effect of Spray and Injection Strategy

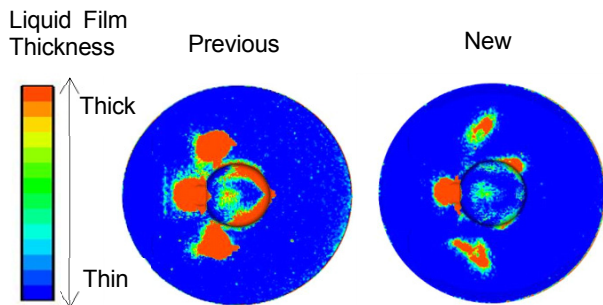


Fig. 8 Comparison of Fuel Film on Piston at AWS

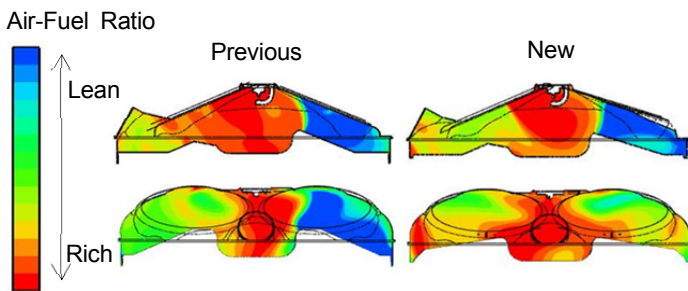


Fig. 9 Comparison of A/F in cylinder at Ignition Timing during AWS

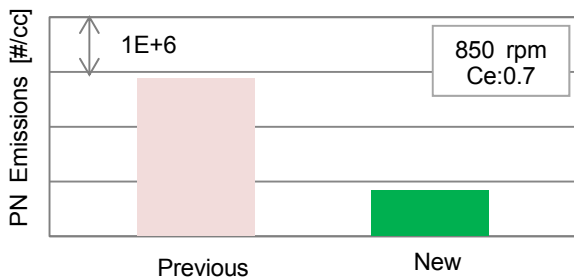


Fig. 10 Comparison of PN Emissions at AWS

3.2 高負荷運転と軽負荷運転のPN低減の両立

高負荷運転では強い流動により噴霧が流されることで、筒内に局所的なリッチ混合気形成され、PNが発生する。そのため、流動に打ち勝ち、均質度の高い混合気分布を筒内に形成するために、より強い貫徹力の噴霧を実現する必要がある。

一方、軽負荷運転では空気量が少ないため、弱い流動に噴霧が打ち勝つことにより、燃焼室内特にライナーへの燃料付着量を増加させ、PNが増加する懸念がある。そのため、燃料が付着しにくい、弱い貫徹力の噴霧が理想である。

これらを両立するために、今回新型では前述の噴霧改善に加え、燃料噴射圧の高圧化と噴射分割数最適化により、噴霧長のダイナミックレンジを拡大した (Fig. 11)。

その結果として、Fig. 12~14に示すとおり、高負荷運転域のリッチ混合気量と、軽負荷運転域の燃料付着量の両方の低減を実現した。

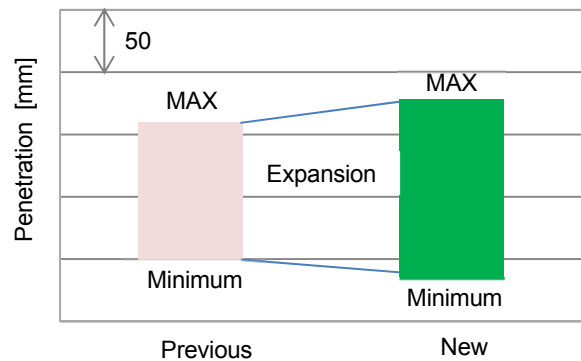


Fig. 11 Comparison of Dynamic Range of Spray Penetration

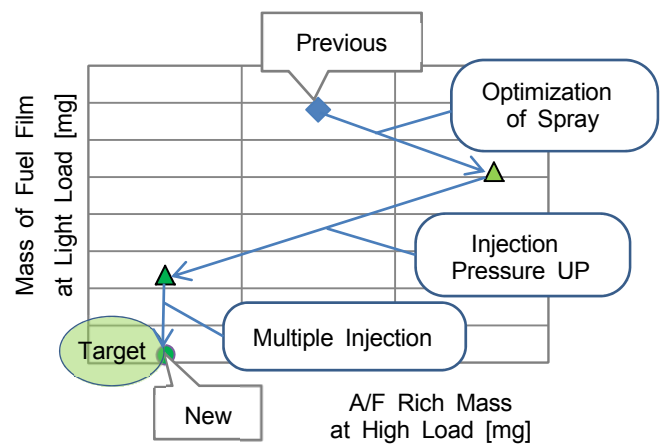


Fig. 12 Effect of Spray and Injection Strategy

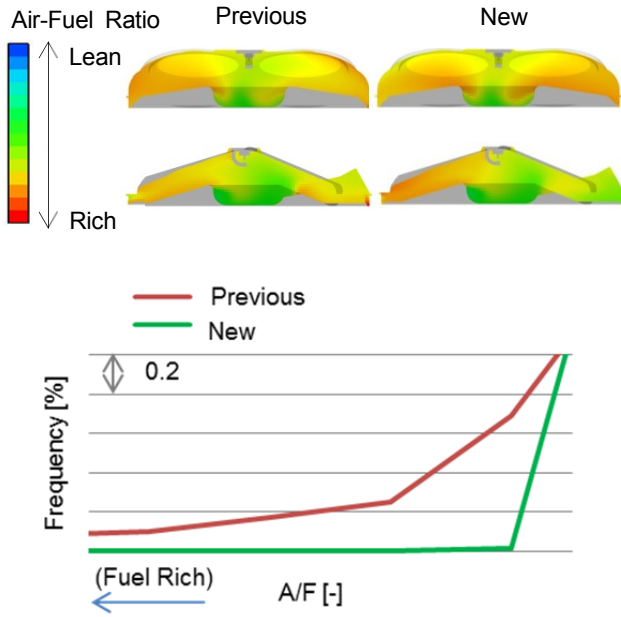


Fig.13 Comparison of A/F in cylinder at Ignition Timing during High Load

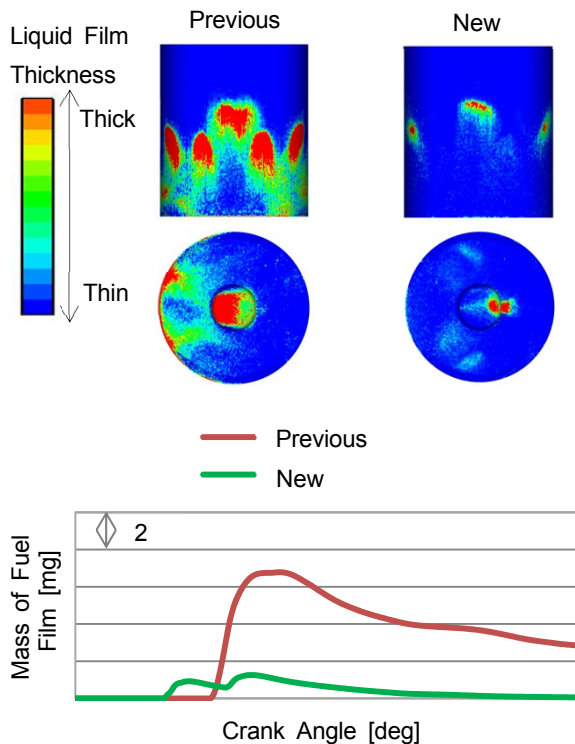


Fig. 14 Comparison of Fuel Film at Light Load

3.3 噴霧の劣化抑制

新型では、前述の噴霧の改善によるPN低減を行ったが、インジェクター先端の噴孔部にデポジットが付着すると、噴射量の低下や噴霧の変化が起こり、その結果としてPN排出量が増加する懸念がある。

このインジェクター噴孔部デポジットは、噴射した燃料がインジェクター先端に付着し、その燃料がエンジンの燃焼によって焼き固められることにより生成される。

そこで、Type AとType B、2種類の噴孔仕様のインジェクターにおいて、噴孔部にデポジットを付着させるエンジンテスト前後の噴霧を検証し (Fig. 15)、かつデポジット付着テスト前後のPN排出量を検証した (Fig. 16)。Type AはType Bと比較して、デポジットが付着した状態でも、噴霧の変化が抑えられており、その上デポジット付着テスト後のPN排出量の増加を抑制できたため、新型ではType Aを採用した。

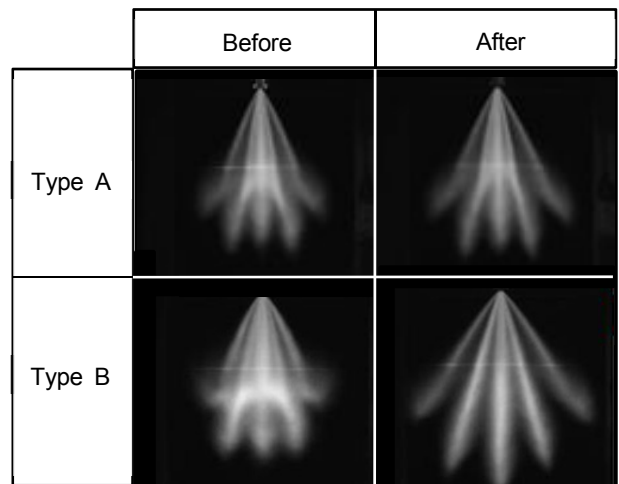


Fig. 15 Comparison of Spray Shape

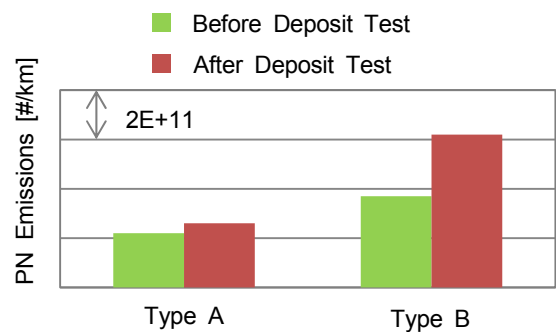


Fig. 16 Comparison of PN Emissions in NEDC

3.4 燃料噴射制御の最適化

(1) 分割噴射領域の拡大と最小噴射量低減

Fig. 17に示すように、新型では従来型の最大2分割噴射に対し、最大3分割噴射とし、更に分割噴射の運転領域を拡大した。それに伴い、運転領域ごとの異なる筒内混合気分布要求を実現する噴射量制御のイネーブラーとし

て、最小噴射量の低減をハードとソフト両面から検討した。

インジェクターは、コイルへの通電によりニードルを引き上げ、通電時間により噴射量をコントロールしている (Fig. 18)。しかしながら、ニードルが最大リフト時、コアがコネクタに衝突する衝撃によりバウンスが起これ、これが原因で噴射量のバラツキが発生し、特に噴射量が小さい領域でこのバラツキが大きくなる。

そのため新型では、バウンスを低減できる新構造インジェクターを採用するとともに、インジェクター駆動電流を各噴射圧力に応じて最適化する制御により、最小噴射量を従来型比、約16%低減した。

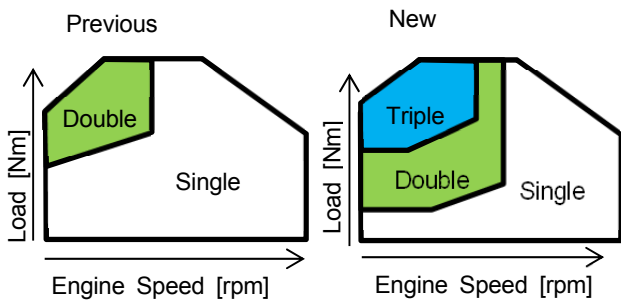


Fig. 17 Injection Strategy

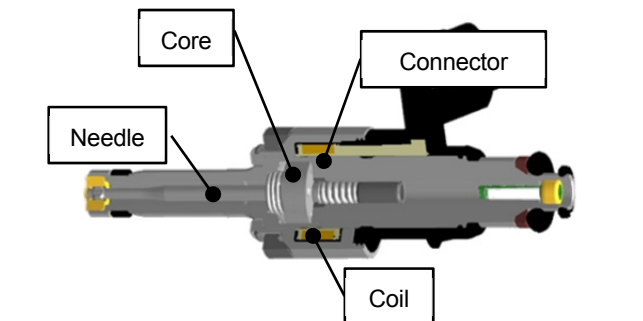


Fig. 18 New Injector Schematic

(2) 燃焼室壁温推定によるPN抑制制御

前述の噴霧等の改善に加え、更なるPN排出量低減のために、燃焼室壁温推定によるPN抑制制御を織り込んだ。

例えば、減速時の燃料カットやi-stopの制御が作動した場合、通常運転時と比較して、燃焼室内の壁面温度が低下する。そのため、壁面への燃料付着量が同一であっても燃料が気化しづらく、PN排出量増加の懸念がある。そこで、燃焼室内の温度を推定し、元々の噴射タイミングより、推定温度に応じて更に噴射タイミングを遅角させる制御によって、ピストンへの燃料付着量を抑制してPN排出量を低減した。

4. おわりに

SKYACTIV-G 2.5の進化版として、新型SKYACTIV-G 2.5の燃焼技術を紹介した。理想の内燃機関に近づけることで、環境性能の向上と意のままの走りの両立を目指した。お客様にとって、長く乗り続けることのできる一台となれば幸甚である。

今後も美しい地球を子供たちに残せるように、更なる環境性能の向上のための、究極燃焼を目指して開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 富澤ほか：新型デミオのエンジン技術, マツダ技報, No.29, pp.8-13(2011)
- (2) 長谷川ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術, マツダ技報, No.30, pp.3-8(2012)
- (3) 野田ほか：新型ガソリンエンジン「SKYACTIV-G 2.5気筒休止」の開発, マツダ技報, No.34, pp.35-40 (2017)
- (4) 藤川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの掃気性改善と触媒早期暖気のための燃焼技術開発, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.2, pp.351-356(2012)
- (5) 伊藤ほか：ガソリン直噴エンジンにおける触媒暖気時の排出微粒子数低減技術の開発, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No.447, pp.2450-2455, 2017 5447(2017)

■ 著 者 ■



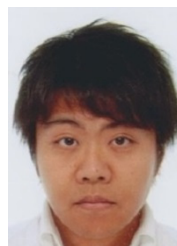
小谷 佳苗



上村 匠



平下 茂行



西尾 貴史



野村 健太郎



平林 千典