

特集：新型MAZDA3

6

SKYACTIV-X NVH技術 Innovative NVH Technology for SKYACTIV-X

神田 靖典*1 藤川 智士*2 升岡 大智*3 須藤 康博*4
Yasunori Kanda Satoshi Fujikawa Taichi Masuoka Yasuhiro Sudo
新田 雅俊*5 山本 高弘*6 松本 貢典*7
Masatoshi Nitta Takahiro Yamamoto Mitsunori Matsumoto

要約

CO₂排出量の削減に最も寄与する内燃機関の理想追求に向け、リーン圧縮着火による熱効率向上を実現する新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xを開発した。

圧縮着火による燃焼騒音増大に対し、燃焼騒音のメカニズムに基づき、『起振力である燃焼刺激力の制御』、『ピストン～エンジン表面の振動伝達特性』、『エンジン表面で生じた空気振動の吸遮音減衰特性』に最適機能配分することで、従来の火炎伝ば燃焼のSKYACTIV-Gと同等の車室内騒音レベルを達成した。

Summary

In pursuit of an ideal internal combustion engine capable of significant reduction in CO₂ emission, Mazda developed the next generation gasoline engine, Skyactiv-X with improved thermal efficiency, thanks to the lean compression ignition.

To reduce combustion noise caused by the compression ignition, "combustion force", "piston-to-engine surface vibration transmission characteristics", "acoustic absorption and insulation characteristic of air vibration at the engine surface" were controlled optimally based on our understanding of the combustion noise mechanism and reduced the noise in the engine room to Skyactiv-G level, the flame propagation combustion engine with low heat release rate.

Key words : Heat Engine, Vibration, Noise and Ride Comfort, Compression Ignition Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Acceleration Noise, Vibration/Noise, Modal Analysis/Transfer Path Analysis

1. はじめに

マツダは、理想の内燃機関追求のロードマップとして、Fig. 1に示すように熱効率向上のため、高圧縮比と比熱比改善を目指し、この実現手段として、リーン圧縮自己着火燃焼（Compression Ignition 以下CI）に取り組んだ。

しかし、CI燃焼は成立する筒内温度条件が大変狭く、可能な運転シーンも限定的となる。SKYACTIV-Xは、幅広い運転シーンでもCI燃焼を実現させるために、ブレークスルー技術を折り込んだ。それは、SKYACTIV-Dで培ってきたPre-噴射による筒内温度制御の機能を火花点火で実現し、火炎伝ばで正確なCI燃焼タイミング実現させる（Spark Controlled Compression Ignition 以下SPCCI）ことである。これにより、従来の火炎伝ば燃焼（Spark Ignition Combustion 以下SI燃焼）に対して、10%トルク

改善しつつ、20%燃費改善している。

本稿では、SKYACTIV-XのSPCCIに伴う燃焼騒音に対するNVH技術について紹介する。

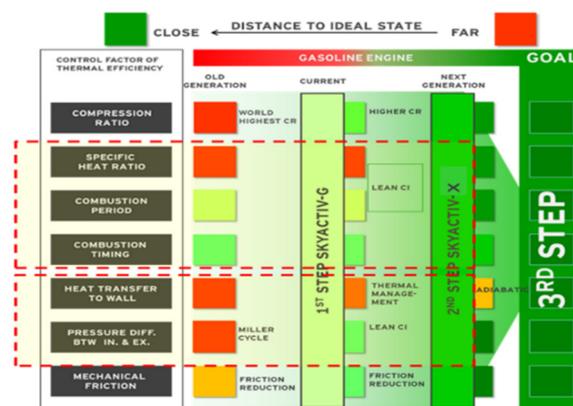


Fig. 1 Road Map of Petroleum Engine

*1,3~7 エンジン性能開発部

Engine Performance Development Dept.

*2 パワートレイン開発本部

Powertrain Development Div.

2. SPCCIの燃焼騒音の開発

2.1 SPCCI燃焼の特徴

従来のSI燃焼とSPCCI燃焼による熱発生率の比較をFig. 2に示す。SPCCI燃焼の特徴は燃焼期間が短く、熱発生率の傾きが急峻なことである。一般的にこのような燃焼は、ピストンにインパルス的な打撃を与え、断続的な燃焼騒音を発生させる⁽¹⁾。

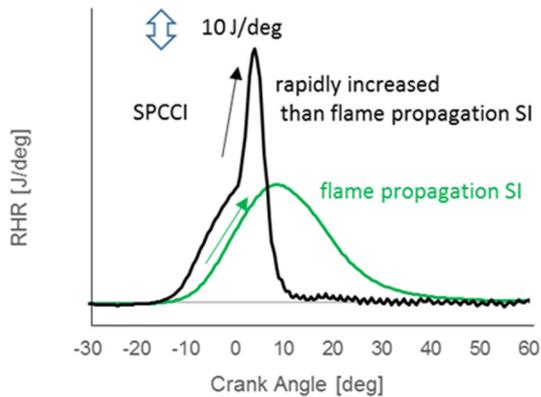


Fig. 2 Comparison of Release Heat Ratio between SI and SPCCI

Fig. 3に示すように、熱発生率が急峻になるほど燃料消費率は改善するが、ある領域から燃焼温度も急激に増え、冷却損失も無視できなくなるため、燃料消費率は横ばいとなる。一方で、それを補うNVH対策もブロックの板厚アップなどを伴うが、Fig. 4に示すように重量効率は落ちる。従って、重量やコストに無駄が生じないように、必要最小限の熱発生率を達成させるNVH技術開発を行った (Fig. 3 ☆の部分)。

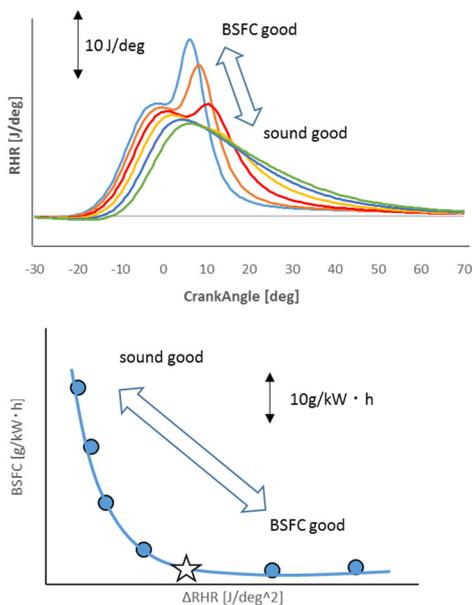


Fig. 3 Relationship between Release Heat Ratio and Combustion Noise

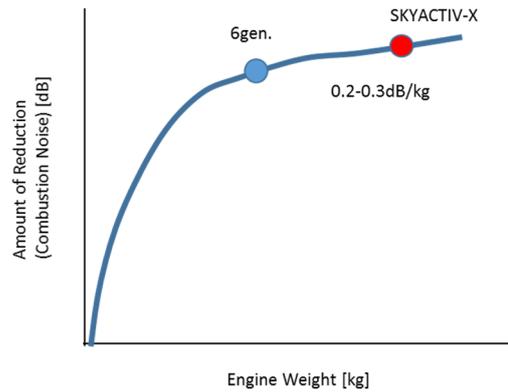


Fig. 4 Relationship between Engine Weight and Combustion Noise

2.2 車内燃焼騒音メカニズムと開発構想

車内燃焼騒音のメカニズムをFig. 5に示す。

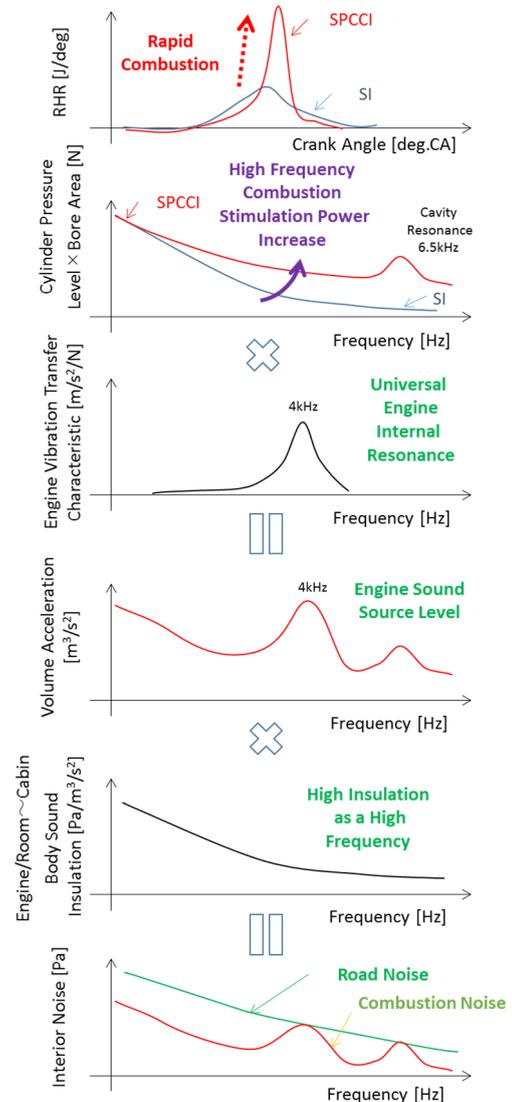


Fig. 5 Mechanism of Interior Combustion Noise

SPCCI燃焼のように熱発生率が急峻になると、筒内の燃焼刺激力 (Cylinder Pressure Level :以下CPL) は燃焼室の空洞共鳴 (6000~7000Hz) までも大きく励起し、エンジン放射面までの伝達経路で特定周波数の振動が大きくなり、放射される。放射された空気の振動はエンジンルームから車内に伝ばし、走行騒音よりも大きい場合に車内燃焼騒音として認知される。

従って、車内燃焼騒音の開発方針を以下とした。

- ①エンジン伝達特性で生じる特定周波数の大きな共振を抑制することで、突出した騒音レベルを低減させる。
- ②吸遮音機能で全周波数域を一気に低減する。特に、高周波で吸遮音効果が発揮できることから、燃焼室の空洞共鳴を大幅に低減させる。
- ③CPLを車速によって変化する走行騒音レベルに応じて制御する。

2.2.1 エンジン伝達特性の開発

Fig. 6に、SKYACTIV-XのCPLとエンジン振動の周波数領域の実測結果を示す。CPLは目立ったピークを持たないが、エンジン伝達特性には3500~4500Hzに突出したピークをもつ。このピークは、往復動機関では普遍的な現象であり、燃焼騒音増加の主因となっている^②。

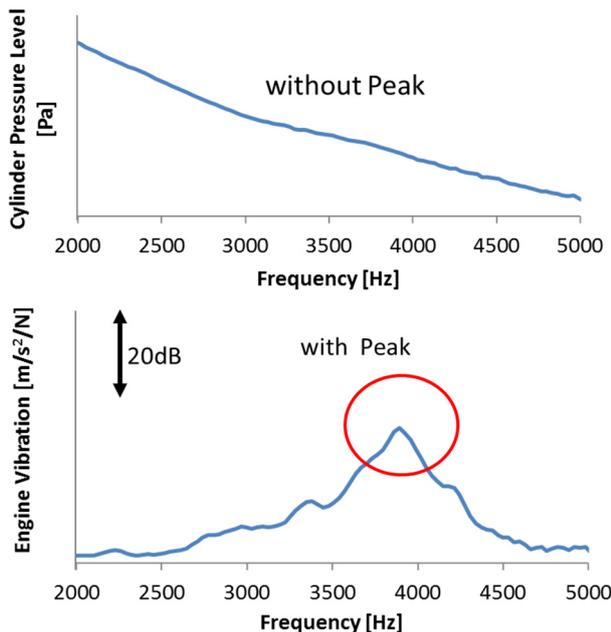


Fig. 6 Frequency Characteristics of CPL and Engine Vibration

この伝達特性でピークが発生するメカニズムは、ピストンを質量、コンロッドをバネとする共振現象である。対策コンセプトは、共振により激しく振れるピストンとは逆位相で動吸振器を動かす、ピストン振動をキャンセルさせることである。Fig. 7にメカニズムと動吸振器の概念図を示す。

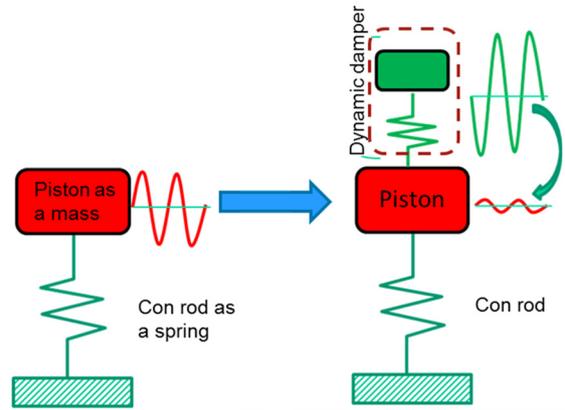


Fig. 7 Principle of Controlling Engine Vibration

この共振に対し、SKYACTIV-Dで採用している動吸振器 (Natural Sound Smoother 以下NSS) をSKYACTIV-Xにも適用する。Fig. 8にSKYACTIV-XのNSS外観図を示す。

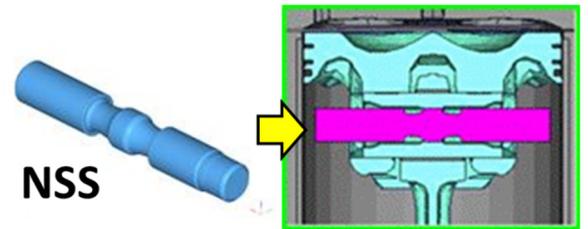


Fig. 8 Structure of Piston with NSS

Fig. 9にNSSのCAE検証効果を示す。ねらいどおり、NSSで普遍的な共振現象である4kHzのピストン振動レベルを6dB低減することができた^③。

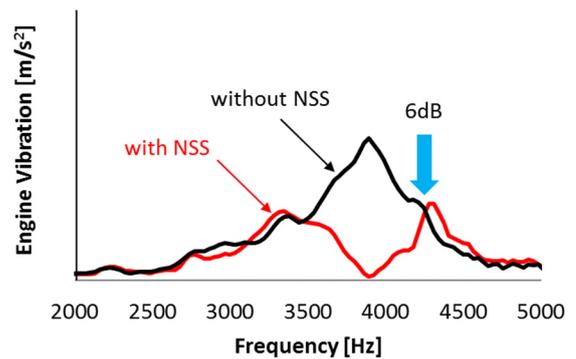


Fig. 9 Result of the NSS Influence

2.2.2 吸遮音材によるカプセル化技術

吸遮音機能の理想は、放射源を完全に覆い、外に漏らさないことである。しかし、実際のエンジンは熱害などから完全に覆うことは困難であり、透過する音が存在する。SKYACTIV-Xでは、Fig. 10に示すように、効率的に遮音効果を高めるため、音源であるエンジンに直接遮音材を付加することで、可能な限り音がエンジンルームに拡散しな

いこととした。更に、エンジンルームという囲まれた空間を利用し、反復吸音することをコンセプトとしたカプセル技術を開発した。

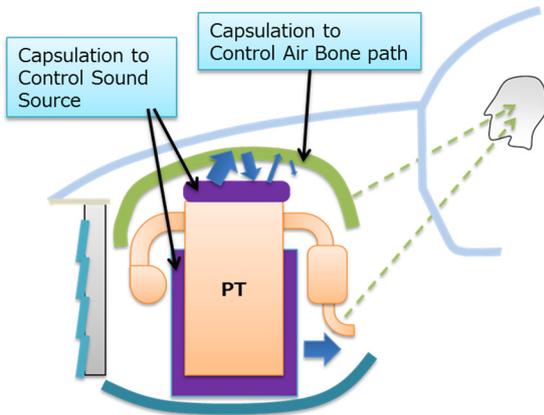


Fig. 10 Capsulation Concept

一方、SKYACTIV-Xの燃焼刺激力はSKYACTIV-G比、14倍大きく、SKYACTIV-Dと比較しても2倍近く大きい。異なるエンジンを搭載する車の遮音効果をSKYACTIV-Xに合わせてしまうと、それ以外のエンジンに対しては品質やコストともに過剰となる。このため、SKYACTIV-Xのみをカプセル技術（ユニーク構造）で適用させつつ、共通となる車体遮音でSKYACTIV-G/D/Xを成立させるよう、全体最適を図った。

上記コンセプトをより効率的&効果的に成立させるため、SKYACTIV-Xではエンジン放射源からエンジンルーム及び車室内までの複雑な伝ば径路の寄与分析（Transfer Path Analysis 以下TPA）を活用し以下を開発方針とした⁴⁾。

- ① 車室内音を構成する部分音圧のうち、突出しているものをまず抑え込む。音源と車室内経路の2つに分解することで、効率的な吸遮音設計方法を選ぶ。
- ② ①の状態から、カプセルでSKYACTIV-Gと同等なエンジンルーム内音になるよう高周波の空洞共鳴領域を含め、一気に全体レベルを下げる。

TPA概念図とSKYACTIV-Xに適用した結果をFig. 11に示す。

図上段の部分音圧から分かるように、まず抑え込むべき突出した音圧は⑥である。図中段及び下段から⑥は、音源の影響が強いことがわかる。音源の影響が強い場合は、遮音機能で抑制し、音を拡散させないようにした。次いで、車室内に対して寄与の高い部分音圧は⑤⑩⑬であることがわかる。同様に、⑤は音源起因なので遮音機能を強化し、⑩⑬は跳ね返りなど複雑なエンジンルーム空間の影響が強いことから、遮音ではなく吸音機能を強化することで、全体レベルをコントロールさせた。強化した遮音部品をFig. 12に示す。

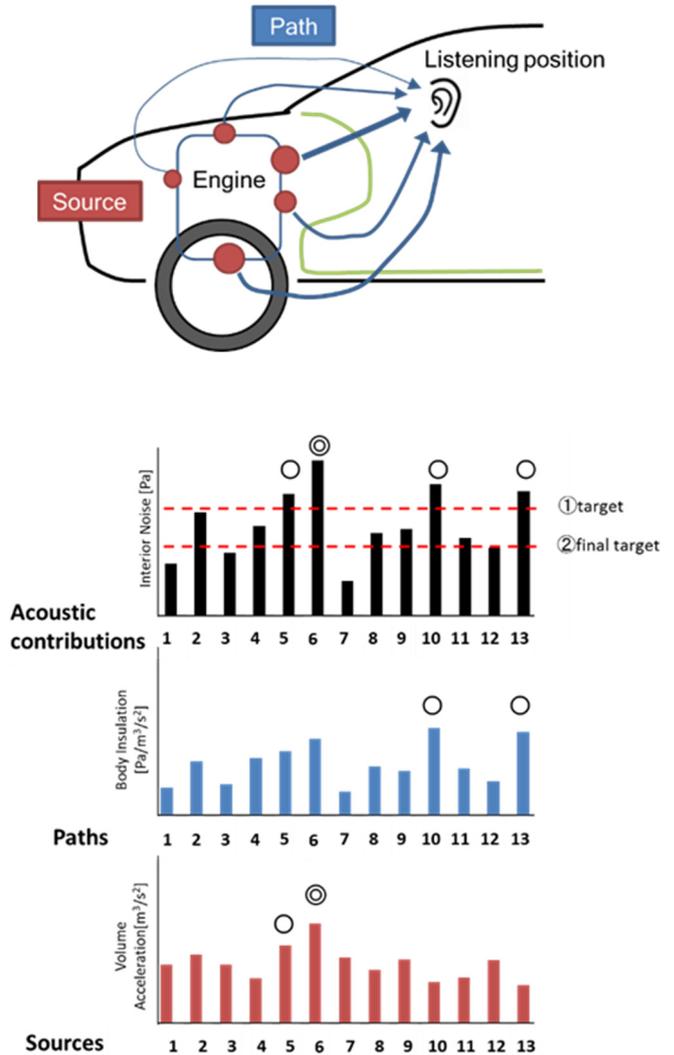


Fig. 11 Result of TPA

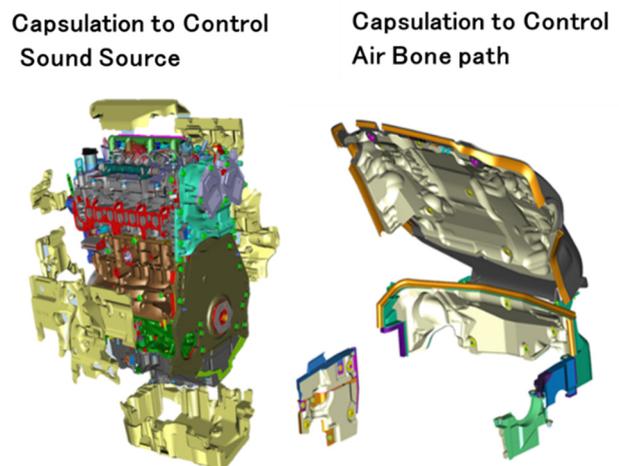


Fig. 12 Capsulation Structure

以上のコンセプトに基づいたエンジンルーム内音の効果

検証結果をFig. 13に示す。吸遮音のカプセル技術で、エンジンルームの燃焼騒音をSKYACTIV-Gと同程度まで抑制することができた。

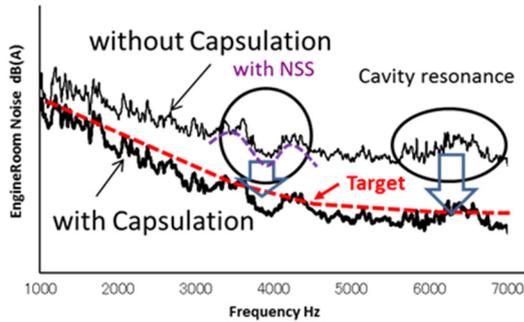
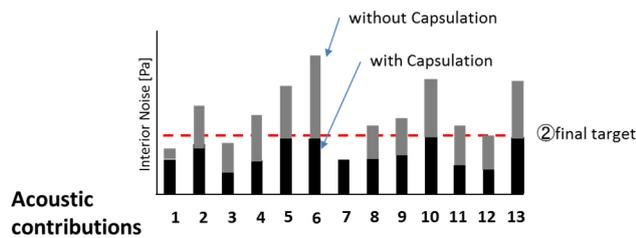


Fig. 13 Result of Capsulation Influence

Fig. 14に示すように、車室内までの複雑な径路においても、ねらいどおりのフラットな特性となり、カプセル技術の最適設計を実現した。



Acoustic contributions

Fig. 14 Result of Acoustic Contribution with Capsulation

また、カプセル技術の適用により、エンジンルーム内の保温機能も高め、実用燃費改善に貢献した(5,6)。

2.2.3 車速対応CPL制御

これらを折り込んで、走行騒音が低い低車速では聞こえるレベルになる。そのため、走行頻度が低い低車速域は燃費への影響も小さいことから、CPLを抑制した。

Fig. 15に示すように、目標CPLは運転状況に応じ、ギア段位、エンジン回転速度、平均有効圧から逐次算出している。筒内圧センサでリアルタイムに検出したCPLと目標CPLが合致するよう、点火タイミングとEGR量などで燃焼重心をねらいの位置にすることで、熱発生速度の傾き(=CPL)をコントロールするロジックを構築し、車に実装した(7)。

2.3 機能検証

以上の3つの開発構想に基づいて織り込んだNVH革新技術を車両全体で機能検証した。一般的な加速試験を行った時の筒内圧センサでのフィードバックと車内音結果をFig. 16に示す。ねらいどおりCPLを制御でき、その結果、車内音は走行騒音以下に抑制できていることを確認した。

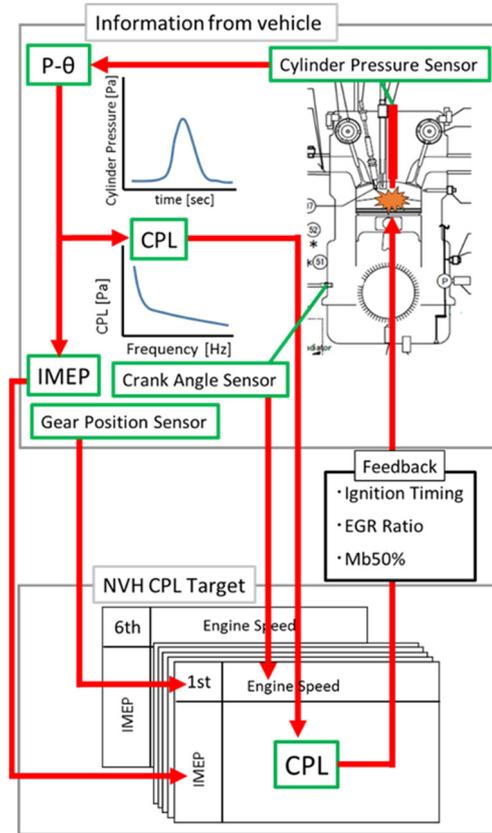


Fig. 15 Logic of Cylinder Pressure Level Control

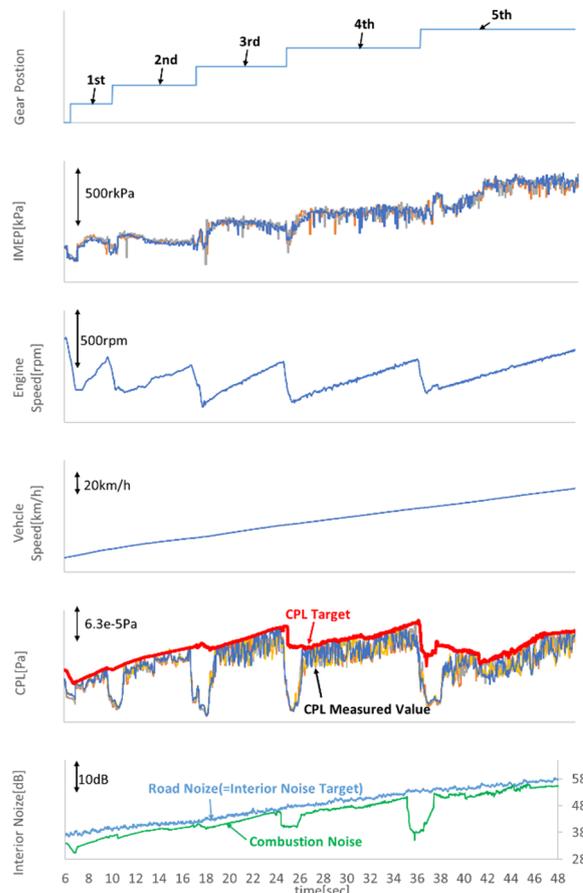


Fig. 16 Result of Vehicle Test

3. おわりに

SKYACTIV-Dで培った振動伝達制御とSKYACTIV-Xで新規開発した新規技術の導入によって、高効率で静粛性に優れた内燃機関を実現することができた。

今後の新世代商品群に対しても、NVH技術を革新していくことで、お客様提供価値の向上に貢献していく。

参考文献

- (1) Gen Shibata et al.: Optimization of Heat Release Shape and the Connecting Rod Crank Radius Ratio for Low Engine Noise and High Thermal Efficiency of Premixed Diesel Engine Combustion, SAE Paper 2015-01-0825
- (2) Otsuka. How to minimize diesel combustion noise by improving engine structure, JSAE 20055143.
- (3) Yasunori Kanda et.al: Technology to Reduce Diesel Knock Noise, SAE Paper 2016-07
- (4) Yasunori Kanda et.al: Experimental Transfer Path Analysis of Gear Whine, SAE Paper 2005-01
- (5) 磯部ほか：新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xの紹介, [マツダ技報, No.36, pp.16-23 \(2019\)](#)
- (6) 幸徳ほか：SKYACTIV-X用熱マネジメント技術, [マツダ技報, No.36, pp.32-37 \(2019\)](#)
- (7) 津村ほか：SKYACTIV-Xの制御システム, [マツダ技報, No.36, pp.59-65 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



神田 靖典



藤川 智士



升岡 大智



須藤 康博



新田 雅俊



山本 高弘



松本 貢典