

特集：新型CX-5

6

SKYACTIV-D ディーゼルノック音の低減技術 Redaction Technology of Diesel Knocking Noise for SKYACTIV-D

白橋 尚俊*1 森 恒寛*2 岩田 陽明*3
Naotoshi Shirahashi Tsunehiro Mori Kiyooki Iwata
長門 清則*4 菊地 拓哉*5
Kiyonori Nagato Takuya Kikuchi

要 約

マツダは新世代クリーンディーゼルエンジンとして、優れた出力、燃費、エミッション（排出ガス）性能に加え、従来モデルから更にノック音性能を改良したSKYACTIV-D 2.2エンジンを開発し、新型CX-5へ搭載した。本稿では、ノック音低減技術として、燃焼加振力の低減や構造特性の最適化、エンジンから車両への伝達経路に基づいた車両全体での取り組みについて紹介する。

Summary

A new generation clean diesel engine, SKYACTIV-D 2.2, was developed and applied to the New Mazda CX-5. In addition to its excellent power, fuel economy and emission performance, the engine has less knocking noise than that of the previous diesel engine. To reduce the knocking noise, we worked on the reduction of combustion exciting force, the optimization of structure resonance and damping technology, and the engine-to-vehicle pathway of the noise. This report introduces the efforts presented above.

1. はじめに

近年の世界的な燃費志向の高まりと厳しくなるエミッション規制をクリアし、お客様に“走る喜び”を提供するため、SKYACTIV-Dエンジンを開発した。2012年以降CX-5、アテンザ、アクセラに順次導入し、クリーン、パワフル、エコノミーを高い次元で実現することで従来のディーゼルエンジンのイメージを一新させている。

一方、クリーンなエミッションや燃費低減など、環境性能を更に向上させるには、燃焼の高効率化が必要となる。そうなれば燃焼加振力が増大し、“がらがら”というディーゼルノック音が悪化する方向となる。

新型CX-5では、燃費、エミッション、走りに加え、エンジン音をステップアップさせた。これにより優れた環境性能⁽¹⁾を確保しながら、ディーゼルエンジン（以下DE）特有のノック音を大幅に低減させ、新世代クリーンディーゼル車として、静粛性を飛躍的に向上させた。

本稿では、この新世代クリーンディーゼルエンジンSKYACTIV-D 2.2に採用した、新たな燃焼技術である“ナチュラルサウンド周波数コントロール（以下周波数

制御）”，振動低減技術の“ナチュラルサウンドスモウザー（以下NSS）”や遮音、車体の振動伝播低減技術を紹介する。

2. ディーゼルノック音

2.1 ディーゼルノック音の概要

ディーゼルノック音（以下ノック音）は、燃焼と同期して発生する間欠的な変動音である。

ノック音低減には、従来から

- 燃料噴射のタイミングや噴射量の最適化など燃焼加振力を低減する手法
- エンジンの構造共振やダンピングの調整、吸遮音材設定などの伝達、放射を抑える手法がある⁽²⁾。

通常、燃焼加振力の低減は燃費性能や出力、エミッション性能と相反する関係にあり、構造系の伝達放射対応は重量やコストへの影響が大きい。これらの相反する要件をクリアし、ねらいのノック音を成立させるには、ノック音の発生メカニズムを解明し、主たる特性に適切な対応を施すことが重要である。

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

2.2 ディーゼルノック音の伝達経路と周波数特性

ノック音の発生メカニズムを明らかにするため、燃焼加振力がどこを伝わって音として放射されているのか、それを実験、及びCAEを使って主要な経路を調査した。その結果、80%以上がピストン、コンロッド、クランクを介してブロック表面から放射されていることが明らかになった。

このブロックから放射される音は、1.3kHz、1.7kHz、2.5kHz、3.5kHzの4つの周波数にピークがあり、主にこれらがドライバーに“がらがら”というノック音として聞こえていることがわかってきた (Fig. 1)。

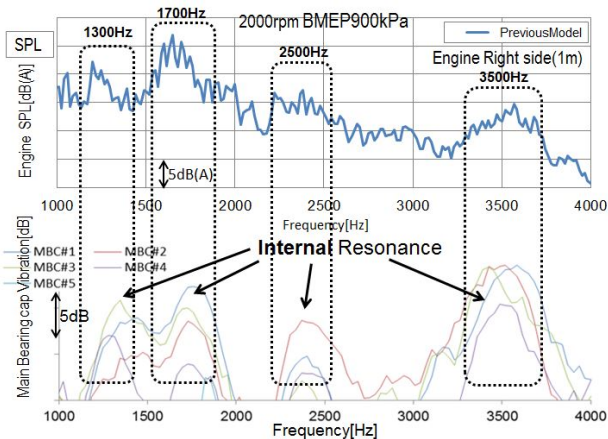


Fig. 1 Relation between Knocking Noise and Structural Resonance

これらのピークは、伝達経路となっているピストン、コンロッド、クランク等のインターナル部品の共振周波数が燃焼加振力によって励起され発生していると考えられる。そのためノック音を低減するには、これらのピークレベルを低減することが必要となる。

新型CX-5では、この4つの周波数に着目して燃焼加振力と伝達特性をコントロールすることで、大幅にノック音を低減した。これらの対応技術に関し、詳細を説明する。

3. 周波数制御による燃焼加振力の低減

3.1 燃焼加振力低減の取り組み

ノック音の燃焼加振力は、燃焼圧力をFFT処理したCylinder Pressure Level (以下 CPL) で表せ、CPLは、燃焼が急速に燃えるほどレベルが大きくなる。この燃焼の急速度合いは「熱発生率の最大傾き」と「最大高さ」で表すことができ、これらの特性をコントロールする。

一般的には噴射タイミングや噴射圧を調整し、熱発生率の傾きや高さをコントロールすることで、CPLを低減している⁽³⁾ (Fig. 2)。

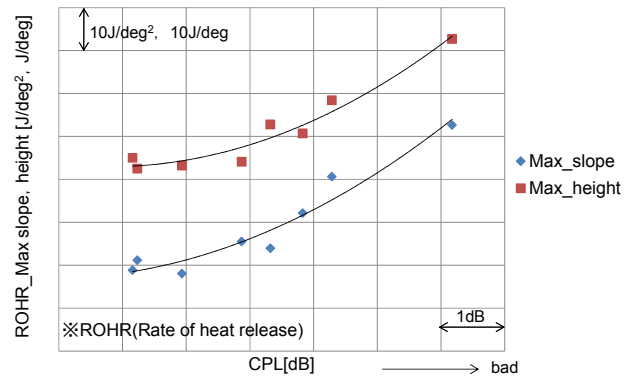


Fig. 2 Relation between CPL and ROHR

一方で、ノック音と燃費はトレードオフの関係になっており、先に述べた方法でCPLを下げると燃費の悪化を伴ってしまう。

燃費との両立には、燃費に関わらない、もしくは燃費が良くなる特性をコントロールして、CPLを低減することが必要となる。このためCPLの周波数軸に対する山や谷 (ピークやへこみ) のメカニズムをひもとき、両立化の検討に取り組んだ。

3.2 CPL周波数特性のからくり解明

CPLの周波数特性のメカニズムを明らかにするため、DE固有の噴射方法と燃焼の形態に着目した。

通常、着火燃焼を行うDEでは、メイン燃焼の他に、火種となるプリ燃焼や煤を再燃焼させるアフター燃焼など、1サイクル中に燃料を複数回噴射し、複数回の熱発生をつくるのが一般的である。この場合、各々の熱発生から圧力波が発生するが、熱発生間の時間差により圧力波に位相差が生じる。この位相差による各圧力波が波の重なりにより、増幅したり打ち消したりすることによってCPLの周波数特性を決定していると考えた⁽⁴⁾。

そこで簡易的な熱発生波形を作成し、熱発生の間隔とCPL周波数特性との関係をシミュレーションにより分析した。その結果、熱発生の間隔の変化に応じて圧力波の干渉の仕方が変化し、CPL周波数特性の山 (増幅) や谷 (減衰) が発生することがわかった。

この熱発生間隔と山や谷が起きる周波数は、波の重なりで表せ、以下の式(1)、(2)で表現できる。

nは周期的に発生する山や谷の次数 (1, 2, 3, ...) であり、Δtはそれぞれの熱発生間の時間間隔である。

$$\text{山位置周波数 } Fn = \frac{n}{\Delta t} \times 1000 \quad (1)$$

$$\text{谷位置周波数 } Fn = \frac{n - 0.5}{\Delta t} \times 1000 \quad (2)$$

これらの関係をもとに、熱発生間隔を制御して、CPLの周波数ピークや谷をコントロールできることがわかった (Fig. 3)。

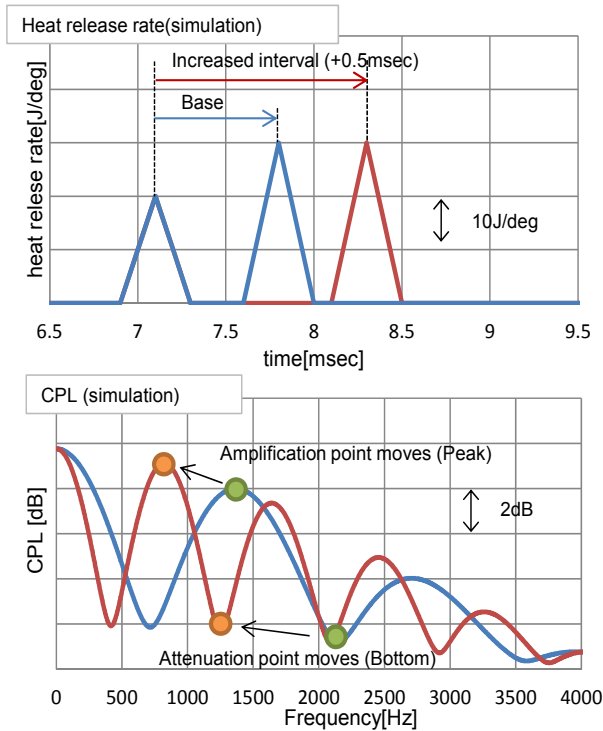


Fig. 3 Simulated of Heat Release Rate

3.3 ナチュラルサウンド周波数特性コントロール

この考えを活用してCPLの谷を作り、構造系共振に起因して発生しているノック音の低減を試みた。

DEでは、一般的にプリ燃焼、メイン燃焼、アフター燃焼の3つの熱発生を持っている。3.2節の関係式をもとに、プリとメインの熱発生間隔を調整して、1.3kHzと1.7kHzがCPLの谷になるように設定、メインとアフターの熱発生間隔で1.7kHzと2.5kHzに谷が来るように調整した。それぞれの熱発生の間隔は、パイロットやプリ噴射などの前段の噴射とアフター噴射の噴射時期や噴射量を最適化し、ねらいの間隔になるようにした。

試作エンジンにおいて、CPLの周波数制御を行った熱発生波形をFig. 4に示す。プリ燃焼やアフター燃焼位置を変えてねらいの熱発生間隔を実現し、燃費やエミッションに弊害なく、ねらいの燃焼を実現することができた。

この周波数制御によるノック音の低減効果をFig. 5に示す。構造系共振周波数に燃焼加振力の谷が重なるよう熱発生間隔をコントロールすることで、ノック音のピークが大幅に低減できることを検証した。

このナチュラルサウンド周波数コントロール技術を採用することで1.3kHz、1.7kHz、2.5kHzの加振力を低減し、ねらいどおり3つのノック音ピークを低減することができた。

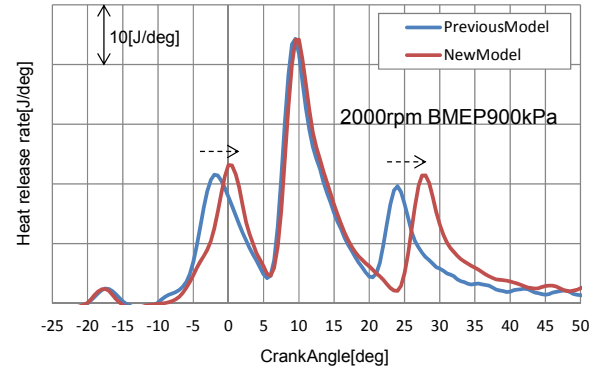


Fig. 4 Control of Heat Release Interval

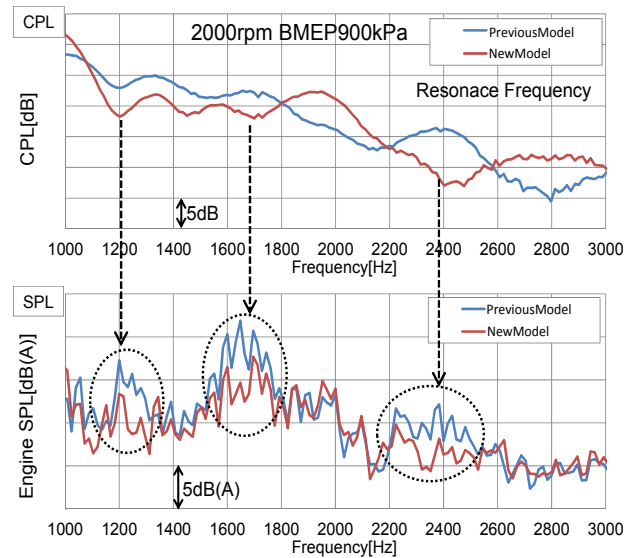


Fig. 5 Effect on the Engine Radiated Noise Due to Natural Sound Frequency Control

4. エンジン構造伝達特性の低減

4.1 NSSの最適形状検討

燃焼制御の対応に加え、ノック音のピークとして残る3.5kHzは、SKYACTIV-D 1.5 (以下1.5L) で採用したNSSをSKYACTIV-D 2.2 (以下2.2L) 用に設計して対応した。

2.2L用のNSSは1.5Lの考え方は踏襲し、ピストン重量の増加、コンロッドの伸縮特性変化を考慮して対応した (Fig. 6)。

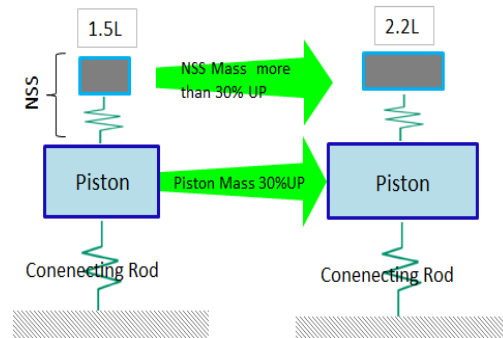


Fig. 6 Increase of Piston and NSS Mass Ratio

加えて、2.2Lはピストンやコンロッド等の主要部品は従来モデルを流用しており、NSS重量を検討する上で、レイアウトや信頼性の制約も考慮する必要がある。

そこで、振動伝達機能の代用特性であるメインベアリングキャップ（以下MBC）振動を目標の値にするために必要なピストンとNSSの重量比を検討した。

Fig. 7に示すように、NSSの重量比を大きくするほど低減効果が大きくなるが、重量比10%を超えるとその勾配は緩やかになる。これは重量比に比例してNSSで分割された反共振のレベルが増大する影響と考えられる。

このNSS重量比と効果の関係を踏まえ、最小の重量で最大効果が得られる重量比13%とした。

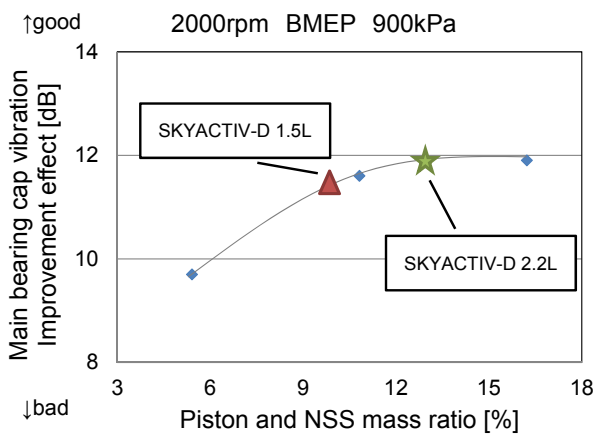


Fig. 7 Effect of Piston and NSS Mass Ratio

今回採用した、2.2LのNSSと1.5L用のNSSの比較をFig. 8に示す。1.5Lと同様に、中央部でピストンピンに圧入固定され、両端部は質量とばねの機能を備える形状としている。ボア径拡大分のスペースを活用し、マス部の長さを延長することでねらいのNSS特性を確保した。



Fig. 8 NSS of SKYACTIV-D 1.5 and 2.2

Fig. 9に試作エンジンで検証したNSS有無のMBC振動とノック音の効果を示す。

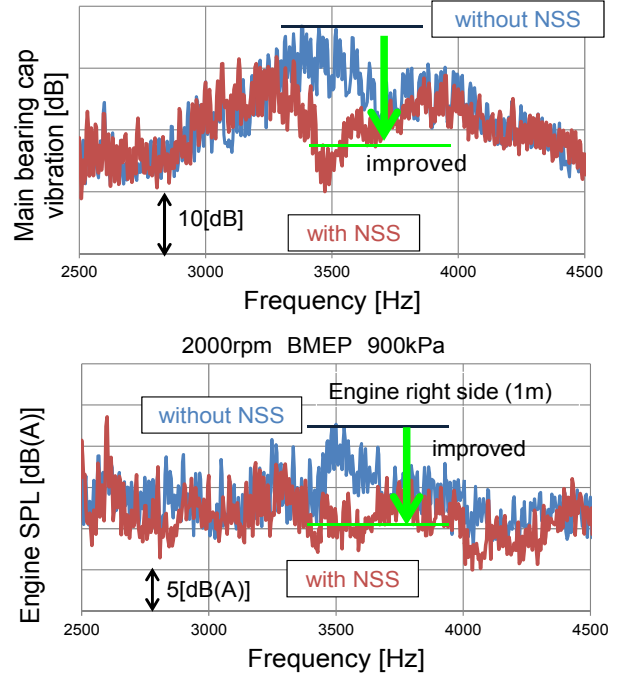


Fig. 9 Effect of NSS Vibration and SPL

3.5kHzの振動レベルと放射音レベルが共に10dB以上改善することが確認できた。2.2Lでは重量比の最適化により1.5Lの効果に対して7%の向上を実現している。

4.2 NSSの2次振動への影響

Fig. 10に、2.2Lと1.5LのNSS有無の2次振動レベルの比較を示す。NSSの設定に伴いピストン系のトータル重量は増えるが、ねらいの効果をしながら重量増加を最小限とすることで、2次振動を同等レベルに抑えている。2.2Lはバルンサー装着エンジンであり、1.5Lに比べ2次振動は低いレベルにある。

このようにノック音の大幅な低減を図りつつ、こもり音も目標達成させることができている。

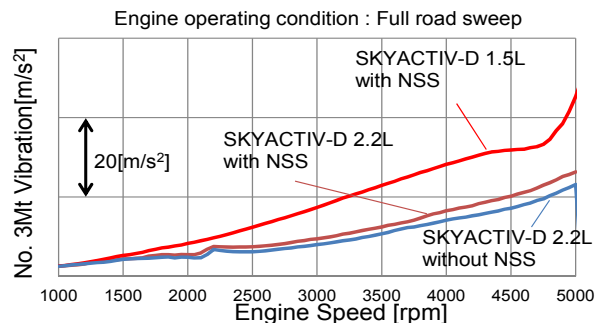


Fig. 10 Comparison of SKYACTIV-D 1.5L and 2.2L

4.3 エンジン遮音材の最適配置

燃焼と本体構造系の改善でノック音は低減しているが、まだ吸排気系などの外回り部品の共振により、音が放射されている。特に排気系はエンジンからの振動が伝わる

だけでなく、排気脈動の加振力も加わるため、放射部位として寄与が高い部品である。近年、エミッション要求から、後処理の浄化率向上をねらって排気ガス温度は高温になる傾向にあり、排気系部品が受ける圧力脈動も増大している。これらに対応するため、遮音材として耐熱性の高いシリカマットを設定し、排気系部品からの放射音を大幅に低減した。

5. 車体伝達特性の低減

5.1 車体伝達特性の対応について

新型CX-5では、エンジン本体での低減技術の織り込みに加えて、車体側での対応も行っている。これまで、ノック音などの1kHz以上の高周波音については、車体への遮音材設定などによる空気伝播の機能強化が一般的であった。昨今、車室内へ伝わるノック音は、空気伝播に加え、エンジンのノック振動が車体に伝達し、車室内に放射する振動伝達音（固体伝播）があることがわかってきた。

この振動伝達音の低減には、車体への振動伝達経路を分析し、経路に振動減衰対応や共振周波数の変更、放射特性改善などの対応を行う必要がある。

5.2 車内音場解析と振動伝達経路の特定

振動で伝わったノック音が車室内のどのエリアから出ているのか、可視化を行うことで経路の特定を行った。代表例として、車室内へ振動伝達し車内で音が発生していたインストルメントパネル（以下インパネ）のケースを紹介する。

アコースティックカメラで音の発生源を解析した結果、ノック音は主にFig. 11の①に図示しているエリアから出ていることがわかった。

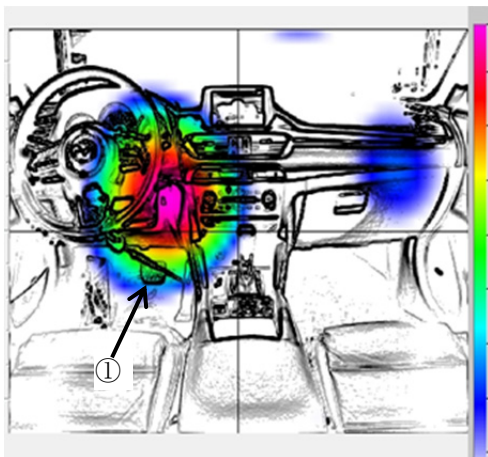


Fig. 11 Analysis of Sound Field

そこで、インパネへ至る経路を特定するために、エンジンと車体が接続されている部位をハンマリング加振し、車体への振動入力点と車室内の音の発生部位との関係を

調査した。

このハンマリング加振を行った時の音場解析結果から、Fig. 12 (a) や (b) のように、ノック音を放射しているインパネ部位と同じ場所で音が発生する経路を抽出し、分析を行った。その結果、主要経路はエンジンマウントからサスペンションを支えるクロスメンバーに伝わり、ステアリングシャフトを介して車室内のインパネから放射されていることがわかった。

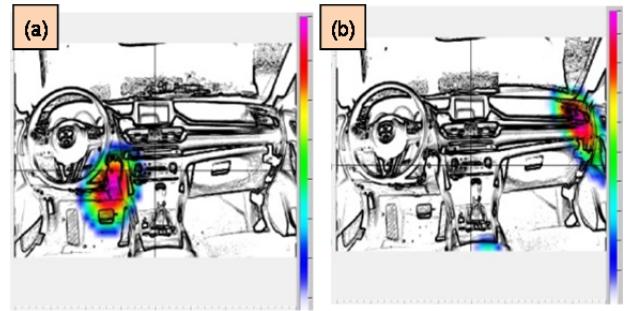


Fig. 12 Analysis of Sound Field by Excitation
(a) Consistent Path (b) Inconsistent Path

5.3 機能強化の具現化検討

車内音場解析で明らかになった伝達経路に対し、新型CX-5では、車室内でスピーカーとなって放射している部位に着目し対応を検討した。

インパネのどの部位がスピーカーとなっているのかを特定するために、インパネ内部のメンバーやブラケットなどの部品を多点振動計測し分析を行った結果、インパネメンバーのブラケット下部からノック音が放射されていることがわかった (Fig. 13)。

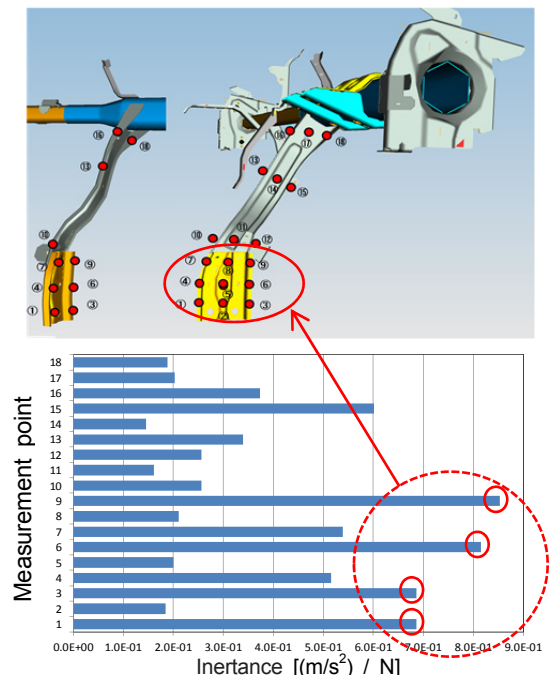


Fig. 13 Analysis of Contribution Ratio

そこで、インパネメンバーの共振モードを確認し、この共振モードを抑制する剛性部材を追加することで対応した (Fig. 14)。スピーカーとなる部位を直接制振することで、コストや重量への影響を最小限に抑えながら、振動伝達音を低減することができた。

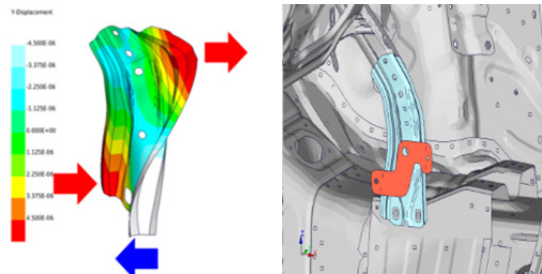


Fig. 14 Specification Study

6. まとめ

新型CX-5では、風騒音やロードノイズ改善による全体騒音低減とのバランスも考慮しながら、新技術を採用してノック音のピークを効果的に低減させることに取り組んだ。ノック音が顕在化することなく、全体の静粛性を向上させたことで、次世代クリーンディーゼル搭載車に相応しい商品に仕上げることができたと考えている。

NV性能の大幅な進化により、低速からゆっくり加速するシーンでも、リアで自然な“人馬一体”の加速フィールを実現しており、走る歓びと高い環境性能という価値を更に高い次元へ引き上げることができたと確信している。

参考文献

- (1) 森永真一ほか：SKYACTIV-Dエンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13 (2012)
- (2) 白橋尚俊ほか：新型1.5Lクリーンディーゼルエンジンの燃焼加振力及び構造伝達特性の最適化によるエンジン騒音・振動の低減，自動車技術会シンポジウム「自動車の振動騒音にもとめられるもの」予稿集，No.11-15 (2015)
- (3) 森恒寛ほか：ディーゼルノック音の低減技術，自動車技術，Vol.70，第7号，pp.38-43 (2016)
- (4) 冬頭孝之ほか：二段着火予混合燃焼を活用した高効率クリーンディーゼル燃焼 (第3報)，自動車技術会秋季大会前刷集，No.113-13 (2013)

■ 著 者 ■



白橋 尚俊



森 恒寛



岩田 陽明



長門 清則



菊地 拓哉