

12

新型SKYACTIV-D 2.2におけるノック音を中心とした NVの更なる進化技術

Advanced Technologies for Noise-Vibration on New SKYACTIV-D 2.2

森 恒寛*1 Tsunehiro Mori	白橋 尚俊*2 Naotoshi Shirahashi	松原 武史*3 Takeshi Matsubara
長門 清則*4 Kiyonori Nagato	平田 耕一*5 Koichi Hirata	奥田 良直*6 Yoshinao Okuda

要 約

2012年にSKYACTIV-D導入以降、NVに関してノック音改善を中心とした数々の技術を織り込んできた。新型SKYACTIV-D 2.2を搭載した2018年アテンザ、及びCX-5の商品改良モデルでは、新コンセプトの燃焼技術、進化した主運動系減衰技術、及び車外アイドリング時のインジェクターノイズ低減技術を織り込んだ。これらによりディーゼルエンジン（DE）音のイメージを払拭する静粛で優れたエンジン音を実現したので、これらの技術を紹介する。

Summary

We've been improving SKYACTIV-D drastically with a lot of new technologies in terms of drivability, fuel efficiency, emission, and NVH since the first-generation CX-5 launched in 2012. The novel concept of combustion for NVH has been applied for new SKYACTIV-D 2.2 since CX-8 launched in 2017. Furthermore, the brand-new technologies are applied for the one equipped ATENZA and CX-5 launched in 2018 with, consisting of advanced Natural Sound Smoother and the new method reducing idling noise. In this paper, we introduce these innovative technologies which realize the engine sound expressing "driving pleasure".

1. はじめに

2012年モデルのCX-5にSKYACTIV-Dを初めて導入し、その後もディーゼル特有のノック音に着目した技術革新を進めてきた。2017年の新型CX-5では、燃焼の爆発力を周波数に対してコントロールする“ナチュラルサウンド周波数コントロール制御”や、ピストン・コンロッドの伸縮モードを抑える“ナチュラルサウンドスモウザー（NSS）”を織り込んだ。これによりノック音と走り、燃費との両立を実現させ、多くの方から高い評価をいただいた。

2018年モデルのアテンザ、CX-5の商品改良車（新型SKYACTIV-D 2.2を搭載）では更にこれを進化させ、ノック音をほぼ聞こえないレベルに低減するとともに、アクセルに応じたエンジン音になるよう開発を進めてきた。加えて、アイドル時の車外DEノイズの低減も検討

してきた。これらを実現するための技術である「急速多段燃焼」「スプリットNSS」、及びアイドル時の「インジェクターノイズ制御」について説明する。

2. ディーゼルノック音

ノック音は燃焼が起因となって発生する間欠的な変動音で、この低減には①起振力となる燃焼加振力を噴射制御で低減する手法と、②伝達系であるエンジン構造の伝達放射特性を低減する手法がある。一般的に①燃焼による低減は燃費やエミッションを悪化させ、②伝達放射特性の向上は剛性アップや遮音材追加となり、重量やコストアップにつながる。ねらいのノック音の達成には、これらの相反する機能特性と高次元で両立する技術、いわゆる“ブレイクスルー技術”が必要である。

*1~4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*6 品質技術部
Quality Engineering Dept.

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

3. 急速多段燃焼による加振力低減

3.1 燃焼加振力に関するこれまでの取り組み

ノック音は燃焼圧力が起振力で、これを周波数ごとのエネルギーで表したCylinder Pressure Level (CPL) が燃焼の機能特性となる。CPLは熱発生率波形の“最大傾き”や“高さレベル”と相関が強く、これらが大きいとCPLが高くなりノック音は大きくなる。

最近のディーゼルエンジンは、1サイクル中にプリ燃焼、メイン燃焼、アフター燃焼の3つの燃焼で構成されることが多い。これらの噴射タイミングや噴射圧を調整して熱発生率波形をコントロールし、CPLレベルを低減させる⁽¹⁾。2017年の新型CX-5では、これらに加え“ナチュラルサウンド周波数コントロール制御”によりCPLの特定周波数域に谷を作り、そこに構造系共振を合わせることで効果的にノック音を低減する技術を導入した⁽²⁾。

3.2 ノック音と関連性能を両立する理想燃焼

これまでの取り組みで改善は進んだが、「走る喜び」の更なる進化には、もう一步踏み込んでアクセル開度に応じたリニアなエンジン音の実現が必要である。

新型SKYACTIV-D 2.2では新たな燃焼制御技術の実現に取り組んだ。まずは、ねらいとする熱発生率波形を求めるために、熱発生率の傾きが最小となる波形をシミュレーションで作成し、その特性を維持しながら効率よくトルクを発生させるため、上死点付近から燃焼させるコンセプト的な燃焼波形を描いた。これを目標波形として、従来燃焼、全負荷燃焼波形の比較をFig. 1に示す。図中、全負荷時の波形は部分負荷と同一トルクになるようにシミュレーションで発生熱量をあわせたものである。

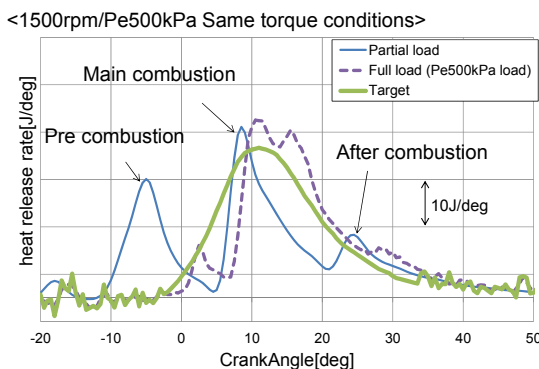


Fig. 1 Heat Release Rate Target

従来燃焼は三山の形状でねらいの波形と大きく異なっているが、全負荷の熱発生率波形はねらいの一山波形に近いことが分かる。これまで全負荷燃焼は発生する熱量が大きいためノック音の加振力が大きくなると考えられていたが、実運転ではノック音が問題になることはなかった。これは、熱発生率波形の傾きが部分負荷の燃

焼より緩やかで、有利な燃え方になっているためである。そこで詳細に燃焼特性の違いを調べると、プリ燃焼やメイン燃焼の着火遅れ期間が大幅に短いことが分かった (Fig. 2)。

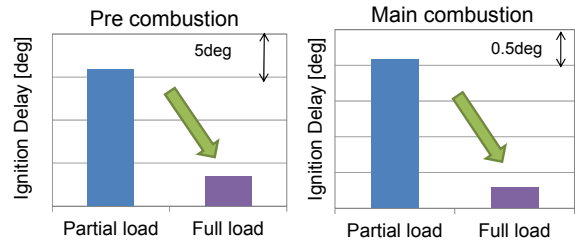


Fig. 2 Comparison of Ignition Delay

着火遅れ期間とは、燃料を噴射し燃焼が始まるまでの期間で、これが長いほど燃焼室内に未燃の燃料が混合気として蓄積される。その結果、燃焼開始時に急激な圧力上昇が起こり、熱発生率波形の傾きが大きくなることで音が大きくなる。ねらいの熱発生率波形の実現には、この着火遅れ期間のコントロールが重要であり、燃料の噴射制御を活用して着火遅れ期間短縮に取り組んだ。

3.3 急速多段燃焼技術による理想燃焼の実現

着火遅れ期間の短縮には、局所的にリッチ混合気をつくって着火性を改善できる多段噴射が有効であると考えた。この多段噴射を使って着火遅れをコントロールし、複数の燃焼を連続させる“急速多段燃焼”を考案した。これにより熱発生率波形を緩やかな傾きにし、かつ複数の燃焼を連続させ一山の形にする。ただしこの燃焼の実現には噴射間隔を短縮し、段階的に噴射量を増量する噴射制御が必要であり、従来の噴射システムでは限界があった。

そこで内部の燃料回路の最適化によって大幅な高応答化を実現した次世代型インジェクターを採用し、ねらいの噴射パターンを実現した (Fig. 3)。

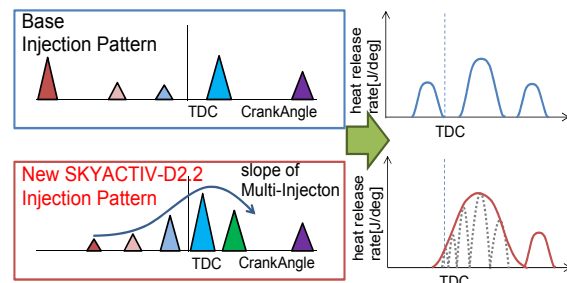


Fig. 3 Comparison of Injection Pattern

一方で、着火遅れ期間の短縮は音低減には有効であるが、燃料と空気が混ざる時間が少なくなることでスモークが不利になる。これに対し、燃料の噴射圧力を従来モデルに比べ20%~30%高め、噴霧の微粒化とペネ

トレーションを向上させ、燃焼室内の混合気形成を促進させることでスモークとの両立を図った。

試作エンジンで計測した着火遅れ期間をFig. 4に、熱発生率波形をFig. 5に示す。着火遅れ期間はプリ、メイン燃焼それぞれで大幅に短縮し、目標とする緩やかな傾きで、かつ連続した熱発生率波形を実現させた。

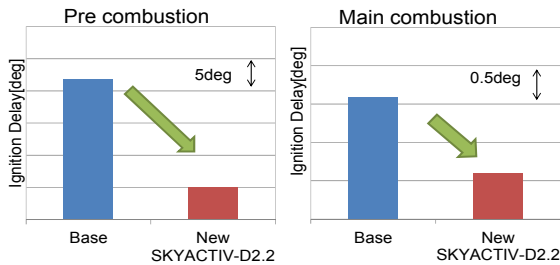


Fig. 4 Effect of Ignition Delay Reduction

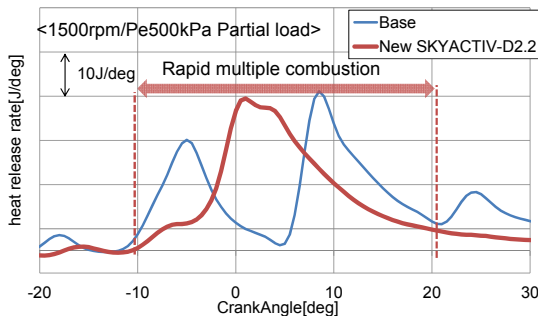


Fig. 5 Rapid Multiple Combustion

3.4 急速多段燃焼のノック音低減効果

急速多段燃焼の効果をFig. 6に示す。幅広い帯域でCPLが10dB程度低減し、ノック音を示すSound Pressure Level (以下SPL)においても大幅な低減を確認した。

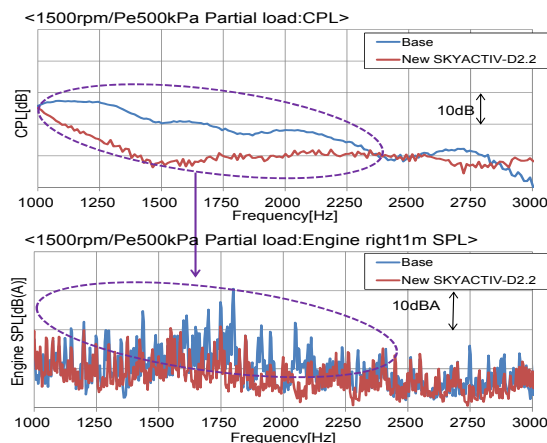


Fig. 6 Effect of Rapid Multiple Combustion

ノック音が顕在化しやすい低速でゆっくり加速する街中や住宅地で多用する低回転軽負荷領域にこの急速多段燃焼技術を採用している。アクセルを踏み込んで車速が

上昇していくシーンでもCPLの盛り上がりを抑制し、従来に比べてリニアな特性を実現している (Fig. 7)。

一方で、走りを訴求する中負荷以上のシーンでは、発生熱量の増大に伴ってCPLレベルも増大する。そのような領域ではナチュラルサウンド周波数コントロールを用い、周波数特性を整えながら高負荷から全開領域の力強いエンジン音につながるようきめ細かな制御を行っている (Fig. 8)。

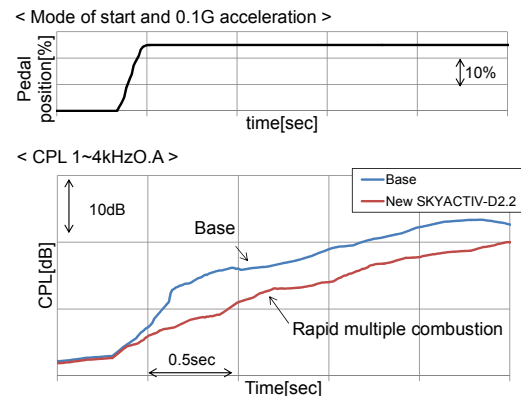


Fig. 7 Improved Knocking Noise in Acceleration Mode

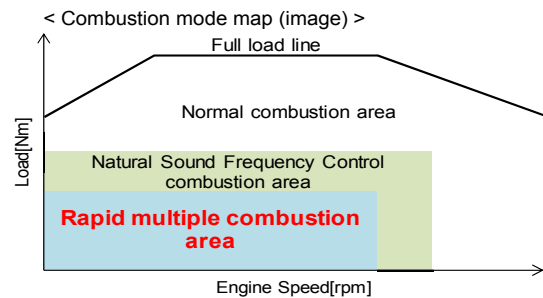


Fig. 8 Area of Rapid Multiple Combustion

4. スプリットNSSによる構造伝達特性の低減

4.1 従来のNSSの機能

ノック音改善の構造系対応として、ピストン・コンロッドの伸縮共振モード⁽³⁾を抑えるNSSをSKYACTIV-D 1.5, 2.2に織り込んでいる (Fig. 9)。

NSSは中央部がピストンピンに圧入固定され、両端は質量、その内側部がばねの機能をもつ形状である。

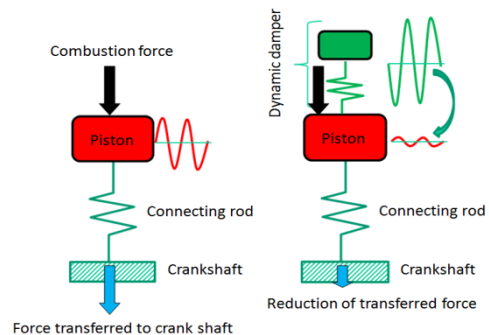


Fig.9 Piston Vibration Damping Mechanism

4.2 NSSの機能進化

新型SKYACTIV-D 2.2では先に述べた燃焼制御の対応に加え、進化させたNSSを新たに設計し織り込んだ。

従来のピストン・コンロッドの伸縮共振モードに加え、ピストン・コンロッド・メインベアリングキャップ(以下MBC)の連成モードが発生しており、この両方の振動モード抑制をねらい“スプリットNSS”の検討を行った(Fig. 10)。

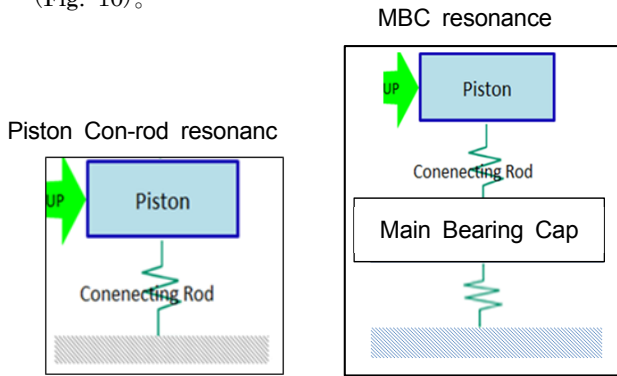


Fig. 10 Main Bearing Cap Vibration Damping Mechanism

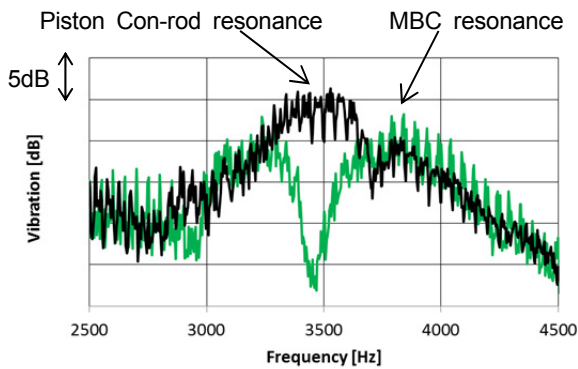


Fig. 11 Study of NSS Function Evolution

4.3 スプリットNSSの成立性検証

これまでのNSS(以下シングルNSS)は左右のダンパーマスの質量が等しく1つの振動モードをねらっていたが、質量を変えれば2つの振動モードをねらえるはずである。その場合減衰効果は半減するが、振動のピークを抑えるには十分であると考えた。左右のダンパーマスを変化させ、スプリットNSSの成立性をCAEで検証した(Fig. 12)。その結果、ねらいどおり2つのモードが発生し、この考え方が理論的に正しいことを確認できた(Fig. 13)。

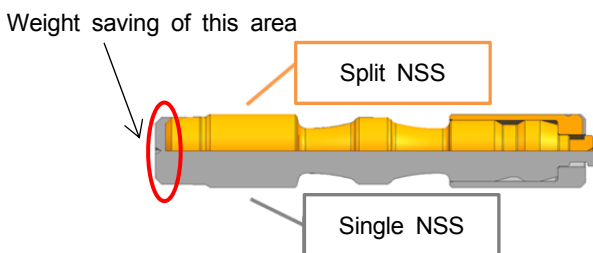
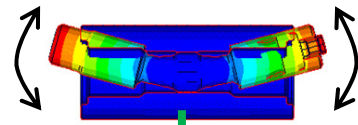


Fig. 12 Comparison of Single NSS and Split NSS

In case of same damper mass of both ends



In case of light damper mass of left side

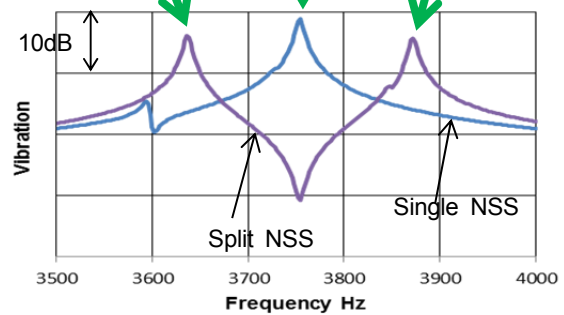
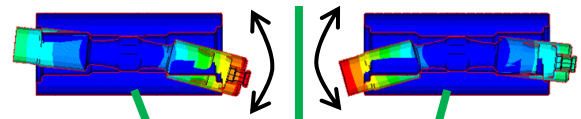


Fig. 13 CAE Study of Split NSS

4.4 スプリットNSSの効果検証

左右のダンパー周波数が近すぎるとシングルNSSと効果が変わらない(Fig. 14)。

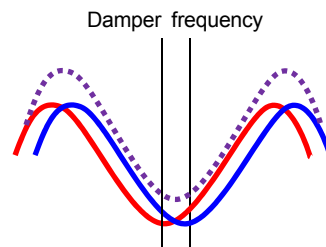


Fig. 14 Case of Close Frequency

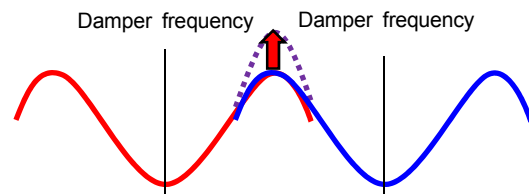


Fig. 15 Case of Far Frequency

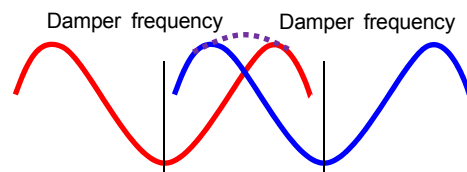


Fig. 16 Case of Optimized Frequency

離すと低周波側ダンパーと高周波側ダンパーの反共振が重なり、場合によってはベースより悪化する (Fig. 15)。最大効果を得るため、3つの反共振を同レベルにするようダンパー周波数を設定した (Fig. 16)。

これにより、スプリットNSSはシングルNSSに比べて更に2dB改善し、ノック音低減につなげることができた (Fig. 17)。

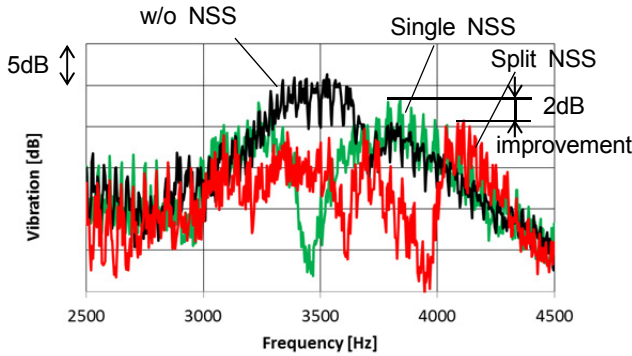


Fig. 17 Effect of Split NSS on MBC Vibration

5. インジェクターノイズ低減

5.1 インジェクターノイズの概要

一方、DE車のアイドル車外音はインジェクター (以下、INJ) の作動音が大きくINJノイズとして認知されることが分かってきた。このINJノイズは燃料を噴射する際に、制御弁がピエゾ素子で駆動され、高速で衝突することが加振力となり、INJ自体を振動させることで発生する。特にノック音や機械騒音の小さいアイドル時において、レベルは小さいが耳に障る「異音」として認知される。このINJノイズは従来、6,000Hz以上の周波数とされてきたが、アイドル車外音のうち800Hzや1,500Hzの音がINJノイズであることが分かってきた (Fig. 18)。

従来、INJノイズの対応はコスト、重量をかけてINJ周辺の構造共振や放射部位を吸遮音して対応してきた。今回はINJノイズのメカニズムを紐解き、燃料噴射間隔 (以下、噴射間隔) に着目してINJノイズ低減の検討を行った。

5.2 多段噴射によるINJノイズの発生メカニズム

INJが作動した際の衝突力はインパルス波であり、低周波から高周波までの振動が一度に励振される。そのためINJ振動のレベルと周波数は、衝突力の大きさと構造共振で決まると考えていた。燃料を多段噴射する場合は、わずか数ミリ秒の間に複数回振動が励振される。これらの振動が“波の重ね合わせ”によって増幅した場合、INJ振動悪化の要因になり得ると考えた。

アイドル時には一度の燃焼に燃料を3分割して噴射している。このときの噴射間隔は、1回目と2目が1.4ミリ秒、2回目と3目が1.3ミリ秒であった。“波の重ね合わせ”

を考えると、INJが作動することで励振される800Hzと1,500Hzの振動は同位相で重ね合っており、INJが作動するたびに振幅が増幅していることが分かった。800Hzの模式図をFig. 19 (a)に示すが、問題の周波数は構造系共振と一致していることも分かった。

多段噴射でのINJノイズのメカニズムは、3回の燃料噴射が構造系共振を同位相で増幅させ大きなINJ振動を励振させる。これが高圧管やヘッドなどの共振特性と重なって増幅され、大きなINJノイズになっていると考えられる。

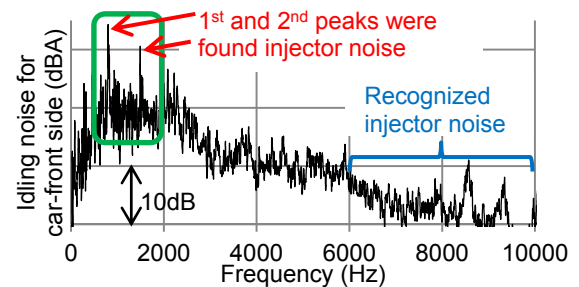


Fig. 18 Idling Noise on Developing

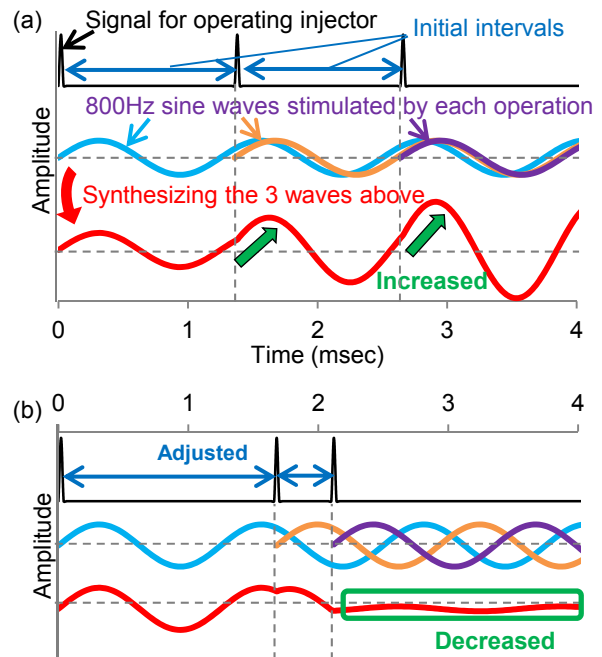


Fig. 19 Diagram of Interference between 3 Sine Waves Stimulated by Each Operation of Injector

5.3 噴射間隔最適化によるINJノイズの改善

このメカニズムに基づき、800Hzの構造共振を打ち消すのに噴射間隔を調整した一例をFig. 19 (b)に示す。これによりINJ振動を低減し、INJノイズを低減できると考えた。

これらの関係を関係式で表すと次のようになる。時間をt、1回目と2回目の噴射間隔をT₁、2回目と3回目の噴射間隔をT₂としたとき、3回目を噴き終わった後の角振動

数 ω ($=2\pi \times$ 周波数) の振動は式(1)のように書くことができ、振動の大きさは噴射間隔 T_1 、 T_2 のみに依存することが分かる。(αは T_1 、 T_2 で決まる位相)

$$\begin{aligned} & \sin \omega t + \sin \omega(t - T_1) + \sin \omega\{t - (T_1 + T_2)\} \\ = & \sqrt{\frac{\{1 + \cos \omega T_1 + \cos \omega(T_1 + T_2)\}^2}{+ \{\sin \omega T_1 + \sin \omega(T_1 + T_2)\}^2}} \sin(\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

INJ共振周波数である800Hzと1500Hzに相当する ω の値をそれぞれ式(1)に代入し、それぞれの振動がともに打ち消されるような噴射間隔 T_1 、 T_2 を机上で検討した。噴射間隔を変えると燃焼が変化し、ノック音やエミッションが悪化する懸念があったため、他性能に弊害がなくINJノイズのみ低減できるような噴射間隔を0.1ミリ秒ごとに選定していった。その結果、Fig. 20(a), (b)に示すように、想定どおりINJ振動を低減でき、弊害なくアイドル車外音のレベルを低減することができた。

新型SKYACTIV-D 2.2では、この技術を織り込むことで、より静かなアイドル車外音を実現した。

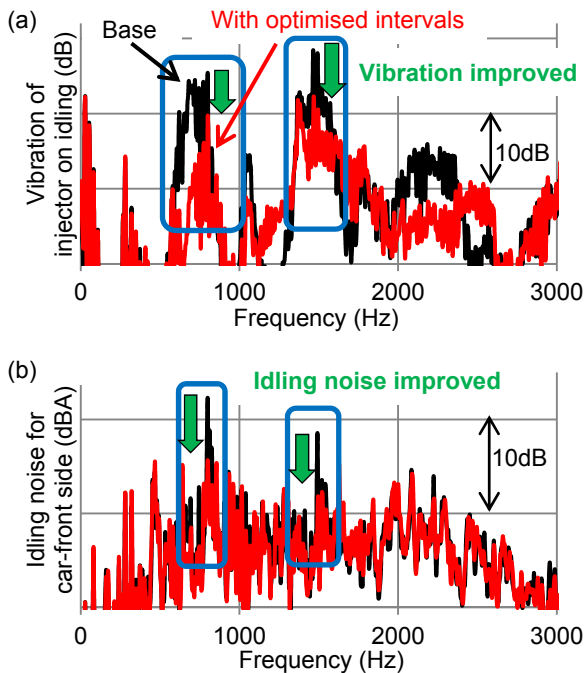


Fig. 20 Effect of Optimizing Intervals of Injections

6. おわりに

今回、新型SKYACTIV-D 2.2に織り込んだKeyとなる技術を紹介した。これらの技術によりディーゼルエンジンのノック音を大幅に改善し、車外のインジェクターノイズも気にならないレベルに低減した。これまでではゆっくりの加速時など、走りに対して音レベルの上昇がやや目立つ傾向にあった。今回の技術によりアクセル操作や走りに対して、よりリニアな音レベルを実現した。これ

により運転者のアクセル操作に対するパフォーマンスフィールをエンジン音という観点で向上させ、「走る歓び」に貢献できたと考えている。

今後はサウンドとしての音造りとSKYACTIV-Dの走りを更にマッチさせることで、最高の「走る歓び」を実現したいと強く願っている。

参考文献

- (1) 白橋尚俊ほか：SKYACTIV-D ディーゼルノック音の低減技術，マツダ技報 第34号 (2017)， 新型CX-5特集 No6. pp.29-34
- (2) 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) 2nd噴射による・ミッション・騒音低減機構の解明，自動車技術会秋季大会前刷集，No.113-13 (2013)
- (3) Y. Kanda, T. Mori : Diesel Combustion Noise Reduction by Controlling Piston Vibration, SAE, 2015-01-1667
- (4) 依田稔之：燃料噴射制御によるディーゼルエンジンの燃焼音低減，デンソーテクニカルレビュー, Vol.15, pp.110-114 (2010)

■ 著 者 ■



森 恒寛



白橋 尚俊



松原 武史



長門 清則



平田 耕一



奥田 良直