

論文・解説

22

エンジン背景音を用いたピストン打音評価技術の開発

Development of Piston Slap Noise Evaluation Technology Using Engine Background Noise

中西 潤二郎^{*1} 森 恒寛^{*2} 菊池 正和^{*3}
Junjiro Nakanishi Tsunehiro Mori Masakazu Kikuchi
山本 彩斗^{*4} 松岡 和洋^{*5} 野中 康宏^{*6}
Ayato Yamamoto Kazuhiro Matsuoka Yasuhiro Nonaka

要約

カーボンニュートラル社会の実現に向け、マツダではマルチソリューション戦略を通じて電動化と内燃機関の両立を図りながら、理想のエンジン開発に取り組んでいる。中でも、お客様に「走る喜び」という独自価値を提供するために、静粛性や高揚感を与えるエンジンサウンドを追求している。一方で、ピストンが発する打音は心地よいエンジン音を阻害するために、効率的なピストン打音予測手法の構築が求められている。これまでの予測モデルを用いたピストン打音予測は、ピストンの運動エネルギーやシリンダーブロック振動を評価指標としていたが、聴感評価と必ずしも一致しなかった。本稿では、予測モデルを用いたピストン打音の効果的な検出方法を確認するために、シリンダーブロック振動とエンジン背景音（暗振動）から飛び出し量を定量化した。その結果、聴感評価と良好な相関を示すことを確認した。これに基づき、新規開発エンジンにおいてピストン打音の予測を可能とした。

Abstract

In pursuit of a carbon-neutral society, Mazda is working on the development of an ideal engine through a multi-solution strategy that balances electrification with internal combustion engines. Among these efforts, to provide customers with the unique value of ‘driving pleasure,’ Mazda is focusing on achieving engine sound that offers both quietness and exhilaration. However, piston slap noise disrupts the desirable engine sound, necessitating the establishment of efficient prediction methods for piston slap noise. Previous piston slap noise predictions using simulation models evaluated indicators such as the piston’s kinetic energy and the cylinder block’s wall vibrations, but these have not always aligned with auditory evaluations. In this study, we quantified the exceedance value using cylinder block vibrations and engine background noise (masking vibration) to establish an effective detection method for piston slap based on a predictive model. As a result, a good correlation with auditory evaluations was confirmed. Consequently, this approach enabled the prediction of piston slap noise in newly developed engines.

Key words : Vibration, Noise, Piston slap, Engine background noise, Masking vibration

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、マツダでは各地域のエネルギー政策や発電構成、お客様のニーズに応じた適切なパワーユニットを展開するマルチソリューション戦略を進めている。電動化への準備を進めるなかでも、内燃機関においては将来的な再生可能燃料の普及や、HEV 及び PHEV への搭載で今後も重要な役割

を維持しながら存続する。そのため“走る喜び”と“優れた環境性能”を両立する理想の内燃機関の実現に向けて挑戦し続けている。“走る喜び”とは意のままに操る感覚であり、それは静粛性の中でも加速とともに高鳴るエンジン音によってもたらされる。そして、優れた環境性能の実現には高効率な燃焼が必要であり、そのためにはピストンが重要な要素となる。一方で、ピストンが発生させるピストン打音は心地よいエンジン音を阻害し、

*1,5,6 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*2~4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

不快な音の要因となる。マルチソリューションのパワースourceを提供しつつ、理想とする内燃機関の実現のためにも一層の開発効率化と、より効果的なピストン打音予測手法を構築する必要がある。本稿ではピストン打音とエンジン背景音との関係より飛び出し量を定義し、聴感評価と相関があることを確認した。これにより、ピストン打音を効果的に検出する技術を構築したので報告する。

2. ピストン打音のメカニズム解明

2.1 ピストン打音とは

ピストン打音はスラップ音とも呼ばれ、ピストンがシリンダーライナーに衝突することで生じる振動がシリンダーブロック内を伝達し、シリンダーブロック壁面 (Cylinder Block Wall, 以下 CBW) を振動させることで発生する。そのため、衝突時のピストンの運動エネルギーや CBW 振動と、ピストン打音に一定の相関があることが知られている。一方で、エンジン排気量が異なれば機械騒音によるエンジン背景音 (暗振動) も異なるため、異音として認知されるピストン打音の聴感も異なる。Fig. 1 は互いに排気量が異なる 4 機種での CBW 加速度振動と聴感評価の相関を示している。ハッチングされた部分は、聴感評価で基準を満たさなかったものを示している。加速度振動が低い場合でも聴感評価基準を満たさない場合があり、逆に加速度振動が高い場合でも聴感評価基準を満たす場合がある。このように CBW 振動だけではピストン打音を管理することはできない。そのため聴感評価と相関のある指標が必要となる。それに先立ち本章では、ピストン打音のメカニズムを検証した。

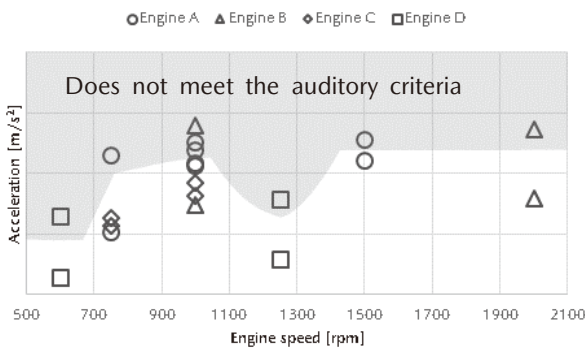


Fig. 1 Correlation between CBW Acceleration and Auditory Evaluation

2.2 実験検証

マツダでは特にエンジン背景音が小さい低回転・軽負荷条件において、お客様にとって打音が不快な音として認識されるため、これを考慮して開発管理を行っている。また、ピストンには温度管理のために冷却用オイルジェットノズル (以下、O/I) によりオイルが供給され

る。通常、O/Iによってオイルが供給されると、ピストンとシリンダーライナー間にオイルが介在し、ピストンがシリンダーライナー壁に衝突する際に減衰効果として働き、打音を低減する。そこで、実験ではO/Iによるオイル供給有無を切り替えることによって、ピストン打音の有無を聴感評価により確認し、メカニズムの検証を行った。Table 1 に実験に用いたエンジン諸元を示す。検証には6気筒3.3Lディーゼルエンジンを用い、無負荷状態の750回転で実験を行った。

Table 1 Engine Specifications and Experimental Conditions

Engine Type	In-Line 6 Diesel Engine
Displacement	3283cm ³
compression ratio	15.2
Piston material	Steel
Max.Torque/rpm	550Nm/1500-2400
Max.Power/rpm	187kW/3750rpm
Engine Speed	750rpm

(1) ピストン打音伝達経路

Fig. 2 に同一時刻、同一気筒内で計測した筒内圧力波形、CBW、及びメインベアリングキャップ (Main Bearing Cap, 以下 MBC) の振動波形を示す。CBW 振動の計測は3番気筒のスラスト側壁面に、MBC振動は3番軸受のフロント側上面にそれぞれ加速度センサーを取り付けて計測した。O/Iによるオイルの供給がない場合 (w/o O/I)、オイルの供給がある場合 (w/ O/I) に比べてCBWの振動レベルが高くなっていることがわかる。また振動のピークは燃焼TDC後であり、燃焼荷重が負荷されるとともに、ピストンがスラスト側に移動した後に振動していることを示唆している。

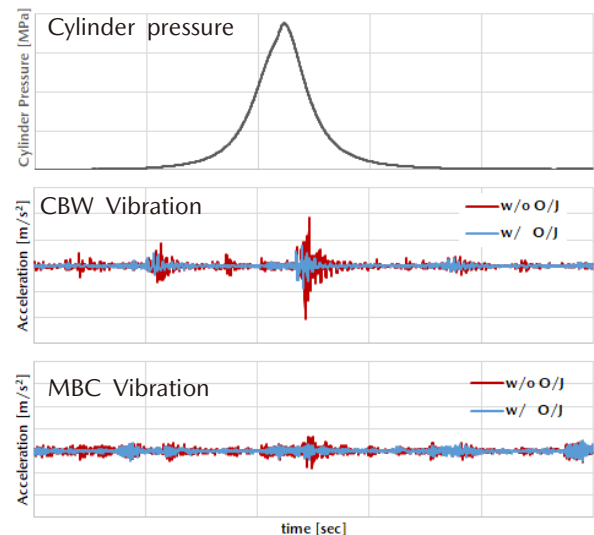


Fig. 2 Transfer Path of Piston Slap Noise

次に、MBC 振動は CBW 振動よりもレベルは低く、ピストン打音は MBC を経由せずに、シリンダーライナーに入力された振動が CBW を励振し、それによって発生することを確認できた。

(2) ピストンスラップの振動モード

Fig. 3 に先ほどの CBW 振動の FFT 結果を示す。特に、ピストン打音が確認された w/o O/J では 1100Hz と 2200Hz 付近に振動のピークを確認できる。

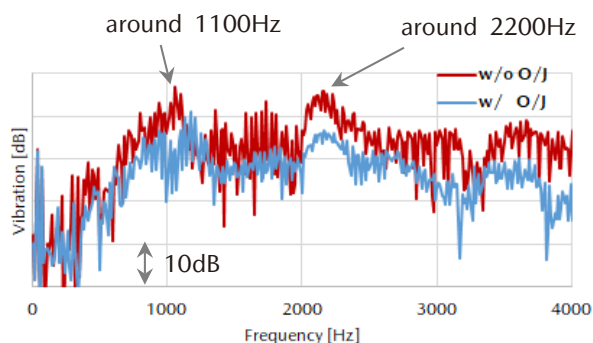


Fig. 3 Frequency Characteristics of Cylinder Wall Vibration

Fig. 4 に CBW 振動に対するピストン／コンロッドのモードの寄与を検証するために、ピストン単体及びピストン／コンロッドをアセンブリした状態でのハンマリング試験によるイナータンス特性の評価結果を示す。ピストン単体の場合、1st モードは 4000Hz 以上であるが、アセンブリ状態では 1100Hz と 2900Hz にピークをもつことを確認した。これらは計測した加速度より求めたモードシェイプより、ピストン重量に起因する首振りモードであることが分かった。しかし、CBW 振動の二つ目のピークが 2200Hz 付近に対して、イナータンス特性の二つ目のピークが 2900Hz と異なる。この要因は、実験ではピストンとコンロッドをアセンブリする際にピストン、ピストンピン、コンロッドブッシュに接着剤を用いて締結したが、実働時にはオイル潤滑されている。このためピストンピン周りの接触剛性特性が異なったためと考えられる。このことを有限要素法 (Finite Element Method, 以下 FEM) による固有値解析で検証するとピストンピン周りの締結剛性の違いにより実験値と同様の周波数特性をもつことを確認した。従って、若干の周波数の違いがあるものの壁面振動の 1100Hz 及び 2200Hz のピークはピストン-コンロッド連成振動によるものであることが分かった。

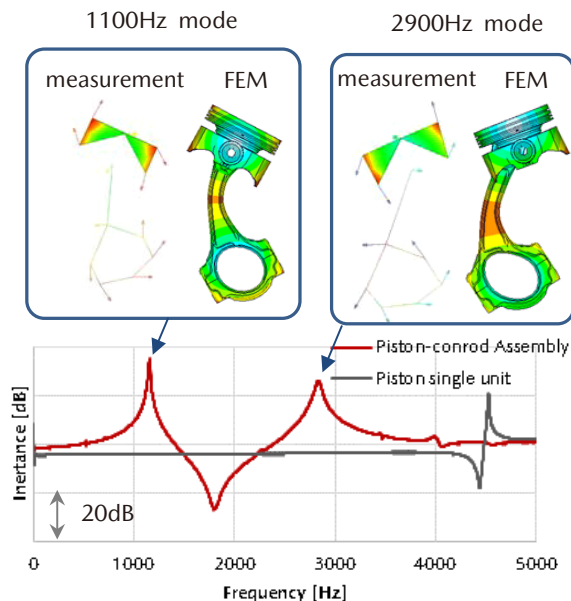


Fig. 4 Measured Frequency Response Function of Piston/Conrod Assembly

3. ピストン挙動予測モデルの確立

2章において、ピストン打音予測のためにはピストン挙動及びシリンダーブロックとシリンダーライナー間の伝達特性が重要であることを確認した。本章では、ピストン挙動予測の解析フローを示し、予測精度検証を実施したので紹介する。

3.1 ピストン挙動予測モデル

(1) 解析フロー

Fig. 5 にピストン挙動予測の解析フローを示す。実働時のピストン挙動を予測するためにはピストン-シリンダーライナー間のクリアランスが重要となり、双方の変形を正しく見積もる必要がある。実働時のシリンダーライナーの変形には、ヘッドボルト締結軸力による変形と、燃焼熱や冷却水温による温間変形が生じる。ヘッドボルト軸力による変形は計測結果を使用した。温間変形は温度分布を予測するために熱伝導解析を実施した。熱境界条件に用いる入熱量は 1D シミュレーションを用いた熱勘定計算を使用し、入熱分布については 3D-CFD を使用した⁽¹⁾。続いて、熱応力解析により熱膨張量を計算した。またエンジンを動的縮退モデルとして取り込み計算を実施した。

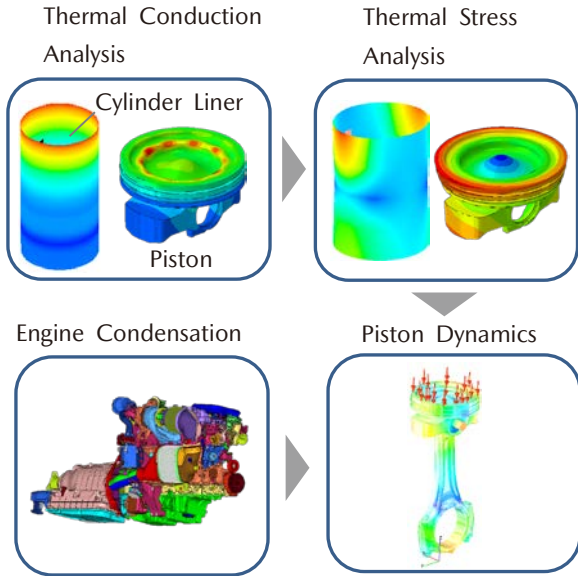


Fig. 5 Analysis Flow of Piston Dynamics

(2) 摺動部の潤滑モデル

ピストン、コンロッドの各摺動部には、例えば Fig. 6 に示すシリンダーライナー表面のクロスハッチや、ピストンスカート部の条痕などの表面性状による流れの影響を考慮するために、Patir-Cheng の修正レイノルズ方程式を用いた。また、O/J によるオイル供給の有無によるオイル量の違いの影響は、スカート上下境界部における油膜量を適切な値に設定することで考慮した。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6\eta U \left(\frac{\partial \bar{h}_T}{\partial x} + \sigma_s \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) + 12\eta \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t}$$

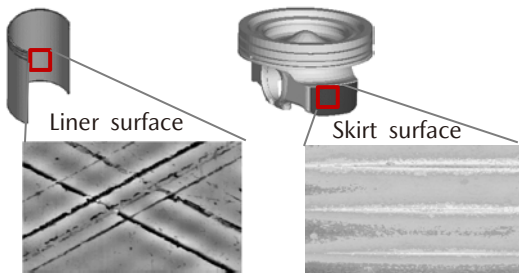


Fig. 6 Surface Texture

3.2 ピストン挙動予測精度検証

3.1 で述べたピストン挙動予測モデルの妥当性を検証するために、実働時のピストン挙動計測を実施した。Fig. 7 に実働時のピストン挙動計測装置の概略と計算モデルを示す。挙動計測はピストンスカート部のスラスト側と反スラスト側の上下にギャップセンサーを埋め込みリンク装置を用いて計測した。計算モデルには既存の部品に加えて、リンク装置の治具も含めてモデル化した。計測した4点の変位よりピストンの回転と並進方向の変位を

求めて予測精度の検証に用いた。2000回転低負荷における条件で検証した並進方向の変位結果を Fig. 8 に、同様に回転方向の変位結果を Fig. 9 に示す。

結果より、予測精度はおおむね良好であることが確認できた。

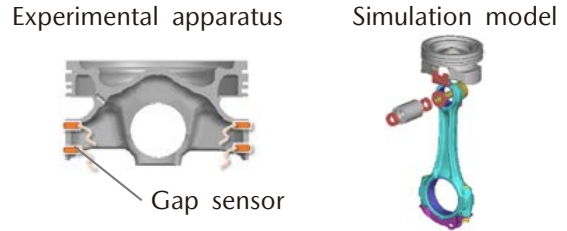


Fig. 7 Experimental Apparatus & Simulation Model

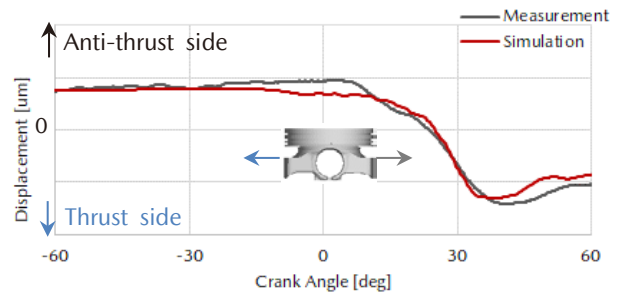


Fig. 8 Verification Results for Radius Displacement

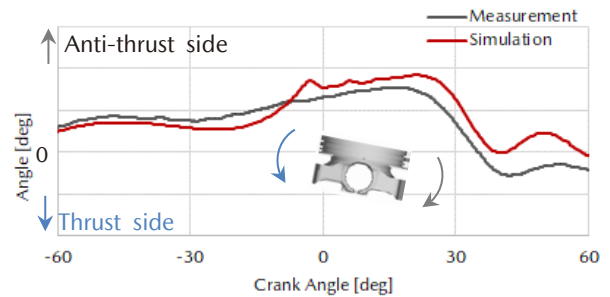


Fig. 9 Verification Results for Tilting Angle

3.3 シリンダーブロック伝達特性

先に述べたように、CBW 振動を予測するためにはシリンダーブロックとシリンダーライナー間の伝達特性が重要となる。

ここではエンジンを用いたハンマリング試験によるイナータンス特性計測と、FEM モデルを動的縮退した縮退モデルの検証を実施した。加振点はピストンが TDC 位置にいるときのスカート高さ位置とし、応答点は CBW 振動の計測位置と同じ位置とした。結果を Fig. 10 に示す。結果から両者は右上がりの特性を示し、おおむね傾向はとらえられていることを確認できた。

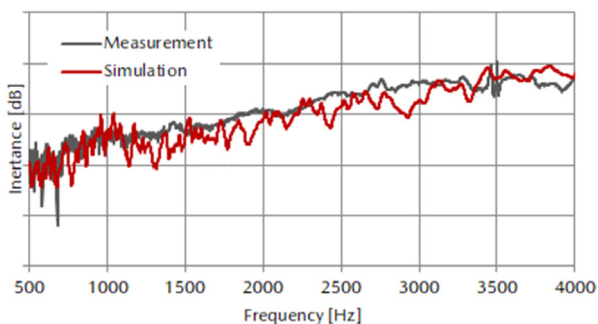


Fig. 10 Verification Results for Frequency Response Function

4. 暗振動の特定と飛び出し量評価の確立

本章ではまず実験的にピストン打音を検出するための暗振動の特定と飛び出し量の定量化を実施する。続いて3章において妥当性を確認したピストン挙動及びシリンダーブロック伝達特性予測モデルを用いて、ピストンがシリンダーライナーに衝突したときのCBW振動、暗振動及び飛び出し量の予測を実施した。

4.1 実験による暗振動の特定と飛び出し量の評価

人間の聴覚は24個のフィルター群をもち、その帯域幅は臨界帯域幅と呼ばれ、Bark尺度で表される。500Hz以下の帯域では約100Hz程度の幅で一定、500Hz以上では周波数とともに、その幅は増加していく。1つの帯域幅に2つ以上の音が存在する場合に、大きい音は小さい音をかき消す効果がある。このことからマツダのNV開発では、車両走行騒音などの背景音レベルを基準とし、異音レベルをそれよりも低く抑えることで異音として認知させないようにしている⁽²⁾。この考え方をピストン打音予測に適応した。

燃焼荷重の影響を受けピストンがシリンダーライナー壁に衝突したときのCBW振動を「ピストン入力振動」とし、エンジン背景音によるCBW振動を「暗振動」とする。ピストン入力振動と暗振動を区別するため、CBW振動にFFTを適用する時間窓長を一定とし、時間窓をそれぞれ次のようにした。ピストン入力振動はピストンがスラスト側のシリンダーライナー壁面に衝突するTDC付近とした。また、暗振動はO/Jによるオイル供給がある条件でCBW振動を計測する3番気筒壁面において、他気筒のピストン入力振動の影響が小さいと考えられる膨張BDC付近とした。そして、ピストン入力振動レベルが同一臨界帯域幅における暗振動レベルよりも大きくなる場合、これを「飛び出し量」と定義し、聴感評価との相関を検証した。

Fig. 11にピストン入力振動と暗振動を示す。この結果、O/Jによるオイル供給がない場合、2000Hz-2320Hzの帯域(13Bark)で2240Hzにピークをもち、同帯域の暗振動は同様に2240Hzでピークをもつため、その差分と

なる飛び出し量は21 [dB]となる。

一方、O/Jによるオイル供給がある場合は、2320Hz-2700Hz(14Bark)の帯域で2490kHzにピークをもち、暗振動は2650Hzにピークをもつため、飛び出し量は16 [dB]となる。

同様の評価を回転数ごとに飛び出し量を比較した結果をFig. 12に示す。聴感評価でピストン打音を確認したO/Jによるオイル供給がない場合(w/o O/J)の飛び出し量が、ピストン打音を確認していないオイル供給がある場合(w/ O/J)より大きく、聴感評価と飛び出し量に相関があることが確認できた。

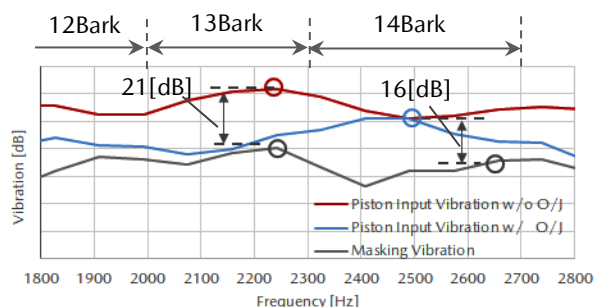


Fig. 11 Piston Input Vibration and Masking Vibration

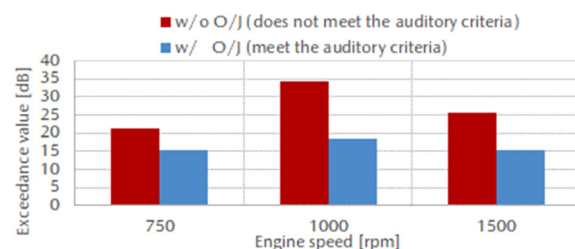


Fig. 12 Measurement Exceedance Value

4.2 モデルによる暗振動と飛び出し量の予測

予測モデルで飛び出し量を評価するために、ピストン入力振動と暗振動の予測を実施した。ピストン入力振動予測は3.1節の手法を用いて予測した。また、暗振動の予測はエンジン背景音を発生させるものとして次の加振入力を想定し、エンジン稼働部品の運動によって生じるCBW振動を予測した。

1. 暗振動に寄与するピストン入力
2. クラントレインによる入力
3. バルブトレインによる入力
4. タイミングチェーンによる入力

1は膨張BDC付近でのピストン挙動によるCBW振動を計算した。2は3.1節で述べたエンジンモデルにクラントレインモデルを追加し、MBC入力によるCBW振動を計算した。3と4も同様のエンジンモデルに対して、CAEにより計算した動弁系荷重(カム軸受、ハイドロラッシュアジャスター、カムスプリング、バルブシート)及びタイミングチェーン荷重(テンショナーやガイドの固定点)を入力しCBW振動を計算した。Fig. 13に結果

を示す。ピーク周波数や、ピークレベルが若干予測の方が低めになる傾向があるが、定性的には実験と同様の傾向を確認することができた。また、回転数ごとの飛び出し量を比較した結果を Fig. 14 に示す。

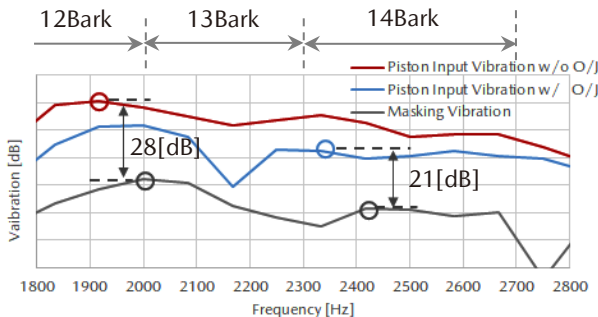


Fig. 13 Simulation Results for Piston Input Vibration and Masking Vibration

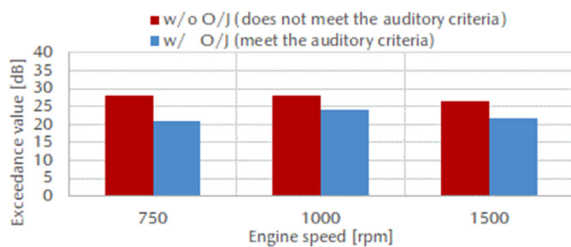


Fig. 14 Simulation Exceedance Value

4.3 開発エンジンへの適応検証

異なるエンジンでも本手法の妥当性を検証した。検証には 2.5L 4 気筒ガソリンエンジンを用いた。エンジン回転数を 850rpm とし飛び出し量を算出した。その結果を前節までの結果と併せて Fig. 15 に示す。飛び出し量の絶対値には差異があるものの定性的な傾向をとらえることを確認できた。これにより、実測及び予測モデルの両方で、ピストン打音を異音として検出可能な飛び出し量の閾値を設定することができた。

今回設定した飛び出し量の閾値を新規開発エンジンに適応し、予測モデルによる事前検討から飛び出し量が閾値より低いことを確認した。その結果、実機計測においてもピストン打音が発生しないことを確認できた。

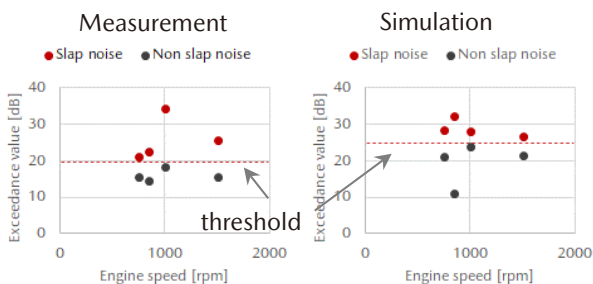


Fig. 15 Verification Results for Exceedance Value

5. おわりに

本稿ではピストン打音の効果的な検出方法の確立を目的として、ピストン打音のメカニズムを解明し、シリンダーブロック壁面振動と暗振動から飛び出し量を定量化した。その成果と得られた知見を以下に示す。

1. ピストン打音はピストン-コンロッド連成振動に起因したシリンダーブロック壁面振動である。
2. ピストン、シリンダーライナーの温間変形、ピストン摺動部の表面性状を再現することで、精度の良いピストン挙動予測モデルを構築した。また、シリンダーブロック伝達特性予測モデルを構築した。
3. 稼働部品の入力によるエンジン背景音を暗振動として定義し、燃焼に起因するピストン入力振動と区別することで、飛び出し量を同定することができた。
4. 飛び出し量は聴感評価とよい相関を示し、予測モデルを用いたピストン打音予測の飛び出し量評価基準を策定した。これを新規開発エンジンに適応することでピストン打音予測を可能とした。

以上、ピストン打音評価技術について紹介した。電動化が進むなかにおいても、今後もマルチソリューションの提供を実現し、お客様に選び続けていただくために、内燃機関を進化させていく。

参考文献

- (1) 岡澤ほか：SKYACTIV-D 3.3 の開発, [マツダ技報, No.39, pp.28-35 \(2022\)](#)
- (2) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH 技術, [マツダ技報, No.36, pp.38-43 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



中西 潤二郎



森 恒寛



菊池 正和



山本 彩斗



松岡 和洋



野中 康宏