

ディーゼル燃焼音の改善

ー 主成分回帰法を用いた伝達経路解析の適用 ー

Enhancement of Diesel Combustion Noise for Interior Sound Quality
– Transfer Path Analysis Using Principal Component Regression Method –

久野 泰宏*
Yasuhiro HISANO

平出 玲子*
Reiko HIRAIDE

要 旨

ABSTRACT

2009年モデル ACCORD ディーゼル開発において、車室内で聞こえるディーゼル燃焼音を改善するために、エンジンから車室内に至る燃焼音の伝達経路に着目した解析をおこなった。伝達寄与を解析するにあたり、主成分回帰法を用いた伝達経路解析を適用した。まず燃焼音で課題となった、920-2300 Hzの放射音による空気伝播の寄与度と振動伝達の寄与度を解析し、次に振動伝達成分の入力経路を確認した。その結果、従来空気伝播が主と考えられてきた高周波帯においても振動伝達成分の影響が大きいことが判明した。伝達寄与解析の結果を基に室内音改善の検討をおこなったところ、マウント振動を抑制することで伝達成分が減少し車室内の燃焼音を改善することができた。

An analysis focusing on the transfer paths of combustion noise from the engine to the interior of the cabin was conducted in order to enable enhancement of audible in-cabin diesel combustion noise during the development of the 2009 model year ACCORD diesel. Transfer path analysis using the principal component regression method was employed to analyze the degree of contribution to noise transfer. First, the airborne and structure-borne contribution for 920-2300 Hz radiation noise, which represents an issue from the perspective of combustion noise, was analyzed. Following this, the input paths for the structure-borne component were determined. As a result, it was judged that despite the fact that airborne transfer has been regarded as the major factor in the case of the high-frequency band, the structure-borne component also has a profound effect. Methods of enhancing interior sound were examined based on the results of the contribution analysis. Reducing the transferred components by controlling vibration in the mounts has enabled enhancement of combustion noise in the cabin.

1. まえがき

近年の乗用車用ディーゼルエンジンには、高出力や低燃費と厳しい排気ガス規制への対応が求められている。またあわせて、ディーゼルエンジンが搭載された自動車の商品性において、低騒音化とともに車室内の音質改善が求められてきている。

ディーゼルエンジンでは、車室内の音質にもっとも影響している音は、燃焼加振力に起因するディーゼル燃焼騒音(以下、燃焼音)である。従来、燃焼音の改善は、パイロット

噴射とメイン噴射による燃焼適合で燃焼加振力を低減する方法が主であった。しかし、燃焼適合において騒音と燃費および排気ガスエミッションは相反する関係にあり、市場からの燃費向上の要求や排気ガス規制の要求が高くなるにつれ騒音低減の余地は少なくなっている。

本報告では、燃焼適合にたよらない対策の検討をおこなうために、伝達系による対策に着目した。そこで、燃焼音に主成分回帰法を用いた伝達経路解析⁽¹⁾(以下、PCR-TPA)を適用し、結果より判明した伝達経路内のエンジンマウント構造に振動抑制をほどこして燃焼音を改善した事例を紹介する。

*四輪R&Dセンター

2. 燃焼音の音質、特徴とこれまでの対応

燃焼音は、車室内の音色で、ガラガラ、チリチリといった変動感を伴って発生する音である。その音色は、エンジン回転や負荷、オイルや吸入空気の温度といった条件の変化により、発生する領域とレベルが変化する。

車室内音の音色解析結果を Fig. 1 に示す。完成車で燃焼音が発生の大きい場合と発生小さい場合の比較を示す。

Fig. 1 は、縦軸に社内で作成し定量化された音色指標⁽²⁾、⁽³⁾である音の変動強さを表し横軸に臨界帯域幅⁽³⁾を示す。

これにより、燃焼音は、920-2300 Hz 帯域の高周波領域(本報告では、920Hz 以上を高周波とする)で発生する音であることがわかる。

従来、高周波の車室内音の低減に際しては、吸遮音材による空気伝播の改善が主であった。その理由は、1 kHz を超える周波数帯は、周波数が高くなるほど車体感度が下がってくることと、振動振幅が小さくなることの相互作用により、振動伝達がされにくいと考えられてきたからである。したがって、開発の中で有効な手段として、吸遮音材の追加適用が進められてきた。

しかし、従来の開発の中で、吸遮音材の追加適用だけでは車室内音は満足できる改善が得られないこともあった。そこで、燃焼音の車室内への進入経路を根本的に解析する必要性を感じ、PCR-TPA を用いた解析をおこなうこととした。

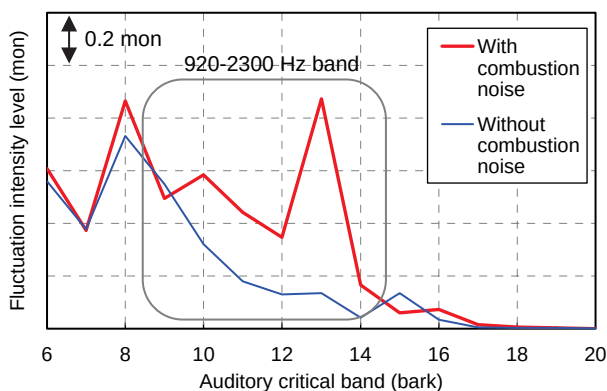


Fig. 1 Interior sound quality

3. PCR-TPA による車室内音の解析

3.1. PCR-TPA 解析の特徴と計測方法

伝達経路解析と呼ばれる解析技術は、これまで複数の手法が提案されている。これら提案された手法の多くは一般的に、実運転時の振動伝達成分と空気伝播成分を同時に計測し、それぞれの成分に分離することは困難である。音響加振力であるエンジン放射音が、構造体である車体におよぼ

す影響を知る方法として、エンジンと車体間の一点の音圧信号を参照点に用いると、参照点の音圧信号は同一にもかかわらず音波の方向や音源の大きさの違いにより、構造体への加振力が異なってしまう場合がある。このような場合、参照点の音圧信号と応答点の室内音とから算出する伝達関数において、加振力の影響を正確に把握できず、本来の値が得られない事象が発生し得る。この課題を解決するために一般的に用いられるのは、模擬音源を使つての加振実験である。振動伝達成分と空気伝播成分を精度よく得たい場合は、加振実験と実運転時の実験を併用しなければならない、実用性に欠ける場合がある。しかし、実運転時に振動と音を同時に計測し、それぞれの成分に分離し解析する手法として、PCR-TPA 技術が提案⁽¹⁾されている。PCR-TPA 解析を用いて寄与解析をすることで、空気伝播成分と振動伝達成分を精度よく分離し、燃焼音の車室内への進入経路を明確にすることが可能であると考え本解析に適用した。なお、寄与解析は、伝達経路解析で得られた空気伝播成分や振動伝達成分が、車室内音に占める割合を算出する方法である。

計測は、4 ドアセダンの直列 4 気筒ディーゼルエンジンを搭載した 2008 年モデルの ACCORD の車両を使用した。データの測定点は、振動入力による固体伝達経路と音響加振力による空気伝播経路を合わせて、Fig. 2 に示すような経路に対して振動と音の参照点を設定し、応答点は、助手席にダミーヘッドマイクロフォンを搭載し左右耳位置の 2 箇所とした。車両は、台上試験装置に設置し、エンジン負荷条件を変更しすべての参照点と応答点を同時計測した。

ディーゼルエンジンは、負荷や温度条件により燃焼が変化していき、それに伴って音色も変化していく特徴を有している。本解析では、それらの変化に対しての検証をおこなうために、暖機過程と暖機後の解析をすることとした。ここで、暖機過程とは、エンジン水温が 60℃、暖機後はエンジン水温が約 80℃以上の条件とする。

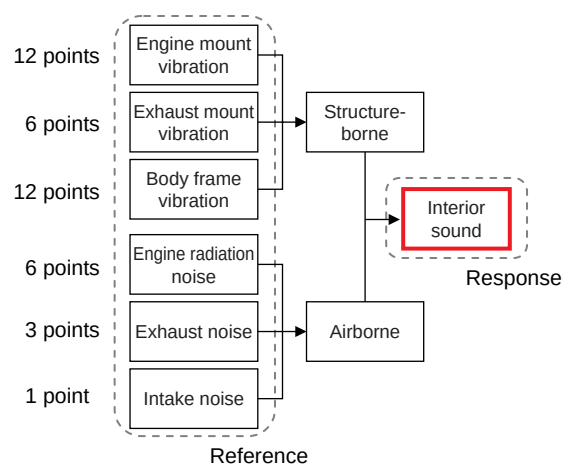


Fig. 2 Measurement setup for PCR-TPA

3.2. 空気伝播成分と振動伝達成分

Fig. 3 に、PCR-TPA により合成された暖機後の車室内音を空気伝播成分と振動伝達成分に分離した結果を示す。

燃焼音帯域である 920-2300 Hz 帯の騒音は、振動伝達成分の寄与が高いことが明確になった。

特に振動伝達成分の寄与が高い周波数は、1.3 kHz 帯と 1.8 kHz 帯である。1.8 kHz 帯は、Fig. 4 に示すように暖機過程と暖機後でレベルの変化が大きい。

3.3. 振動入力経路の特定

解析の結果伝達経路は、配置された全マウントのうち、トランスミッションマウント(以下、Tr-Mt)、およびアッパートルクロッドマウント(以下、Up-Mt)の二つのマウント(以下、Mt)らが主であることが判明した。また、Up-Mt では、暖機過程と暖機後で伝達されるレベルが変化することも確認された。車室内における音の全構造伝達成分と Tr-Mt の振動伝達成分の比較を Fig. 5 に、Up-Mt の伝達成分との比較を Fig. 6 に示す。

周波数 1.3 kHz 帯に、Tr-Mt の振動伝達成分の寄与が高

い帯域があり、車室内音へ大きな影響を与えている。Tr-Mt は、暖機過程も暖機後も入力されるレベルの変化は少ない。

周波数 1.8 kHz 帯に、Up-Mt の振動伝達成分の寄与が高い帯域があり、暖機過程の車室内音へ影響を与えている。Up-Mt は、暖機過程と暖機後で振動伝達成分のレベルに変化が見られる。

Up-Mt において、暖機過程と暖機後で振動伝達成分のレベルに変化が見られるのは、加振力である燃焼の高周波成分が暖機過程と暖機後で変化しているためと考えられる。

これまではこの高周波の加振力の変化に影響を受ける伝達経路の特徴が明確になっていなかったために、伝達経路内での燃焼音に対する有効な改善策につながってこなかった。

しかし、本解析により車室内音の高周波成分へも振動伝達成分の存在が明確になったこと、伝達経路も特定できなおかつ燃焼の変化とともに振動伝達経路も変わっていくことが明確になったことで、それらに対する有効な改善策が検討可能になった。次に、振動伝達経路での改善による燃焼音の低減手法の検討をおこなう。

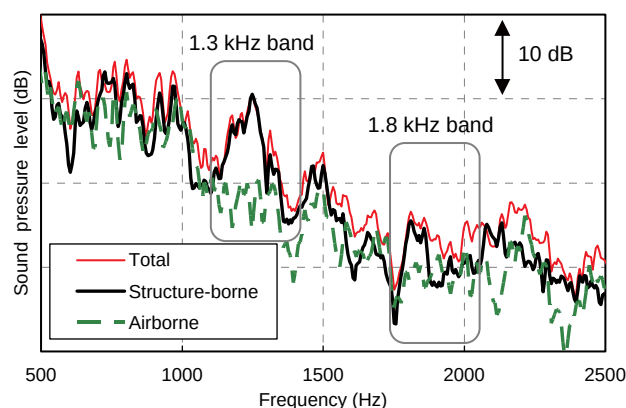


Fig. 3 Comparison of structure-borne and airborne contribution for in-cabin noise

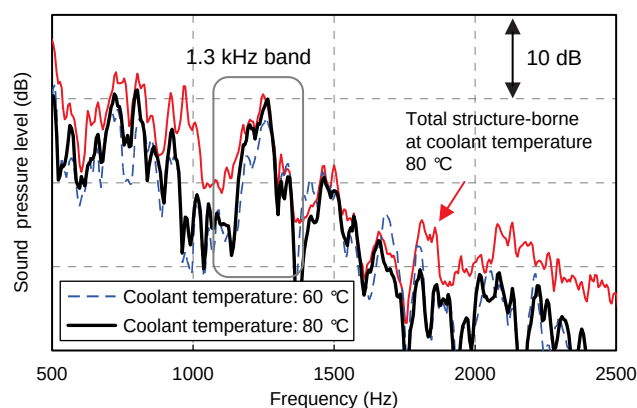


Fig. 5 Tr-Mt contribution to structure-borne noise

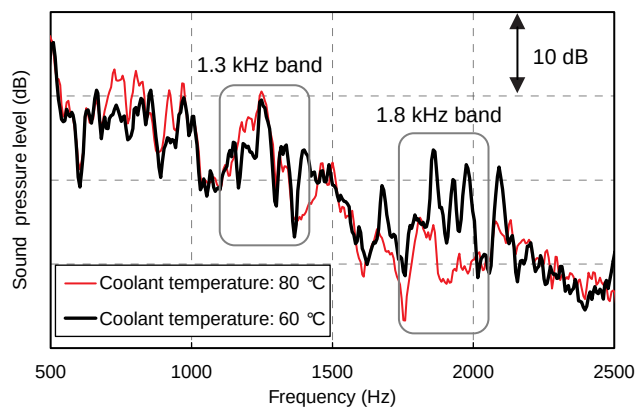


Fig. 4 Comparison of structure-borne noise by engine cooling water temperature

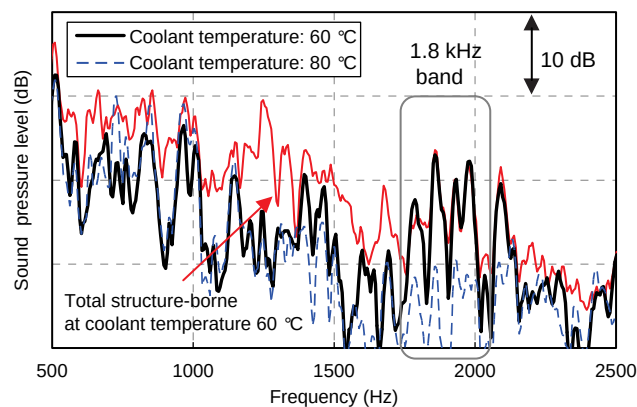


Fig. 6 Up-Mt contribution to structure-borne noise

4. 振動入力低減手法の検討と完成車改善効果

4.1. 車室内音の低減予測

PCR-TPA解析で得られた伝達成分を、経路ごとに特性を変えて室内音を再合成し、その再合成した音を聴感および音質解析にて評価するという手法を用いて、室内音の目標値を作成した。

実機計測の車室内音と再合成後の車室内音から音色解析した結果の比較を Fig. 7 に示す。この加工後のデータは、Tr-Mt 振動の 1.3 kHz 帯を変化させて得られた結果である。

Mt振動の変化により、燃焼音の音色が変化することが確認され、目標とする低減量も明確になった。また、Up-Mt に関しても同様に低減量を明確にした。

4.2. Mt ブラケットの振動伝達成分の改善

解析により、伝達経路の中で振動を変化させる要因が、Tr-Mt と Up-Mt のエンジンマウントブラケット(以下、BRKT)の形状にあるとわかった。

BRKT は、主にその形状による動的特性で、エンジンより入力された振動が増減する。高周波域の振動低減のために、その特性を利用し改善検討をおこなった。

Tr-Mt の図を Fig. 8 に、Up-Mt の図を Fig. 9 に示す。

課題となった周波数において、それぞれの BRKT に共振が存在することが判明した。特定されたモードは、以下の通りである。

- (1) 1.3 kHz 帯：Tr-Mt BRKT の左右方向への倒れモード
- (2) 1.8 kHz 帯：Up-Mt BRKT のねじれモード

主要因となるモードを特定したことから、それぞれの BRKT に振動抑制の改善策をほどこし応答低減をはかった。

改善策の適用前後で PCR-TPA 解析をおこない、車室内の Tr-Mt と Up-Mt の振動伝達成分を分離した結果を、Fig. 10 と Fig. 11 に示す。Fig. 10 は、暖機後、Fig. 11 は、暖機過程の結果を示す。

車室内音の各 Mt 振動伝達成分における改善効果は、以下の通りである。

- (1) 1.3 kHz 帯の Tr-Mt 振動伝達成分が約 15 dB 低減した
- (2) 1.8 kHz 帯の Up-Mt 振動伝達成分が約 10 dB 低減した

4.3. 完成車改善効果確認

最終的な効果検証にあたっては、改善策の適用有無で完成車室内音の計測をおこなった。

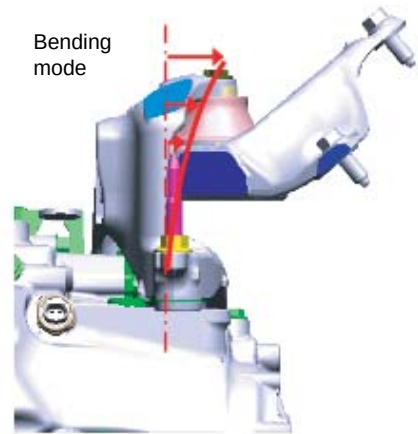


Fig. 8 Tr-Mt

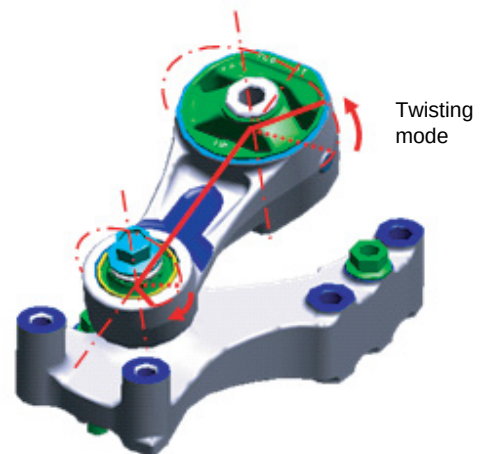


Fig. 9 Up-Mt

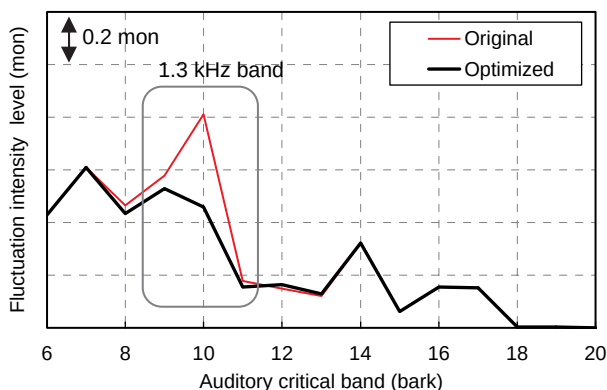


Fig. 7 Target value for optimized interior sound

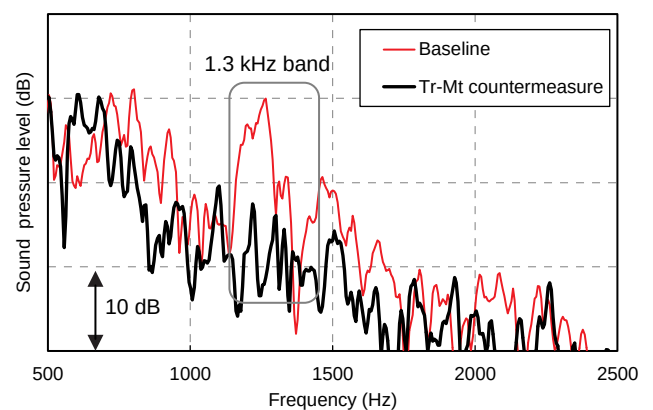


Fig. 10 Effect of Tr-Mt countermeasure on Tr-Mt's structure-borne contribution to interior sound

Fig. 12に、車室内の燃焼音の計測結果を示す。Fig. 12は、暖機過程の結果を示す。

車室内の燃焼音は、伝達経路であるエンジンMt BRKTの振動抑制により、920-2300 Hz 帯の変動感が改善された。特に 1.3 kHz 帯(10-11 Bark)と 1.8 kHz 帯(13 Bark)の低減が大きい。車室内音で聞こえる燃焼音の帯域である 920-2300 Hz帯の振動伝達成分は、改善策により低減し、車室内のフィーリングも向上した。

この結果により、燃焼音の改善に振動伝達成分の抑制が効果的であることが明確になった。

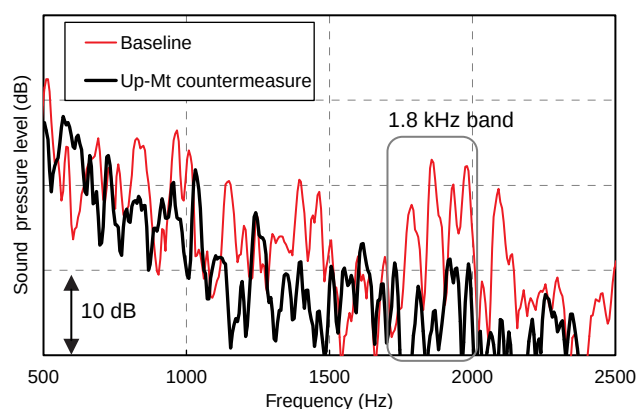


Fig. 11 Effect of Up-Mt countermeasure on Up-Mt's structure-borne contribution to interior sound

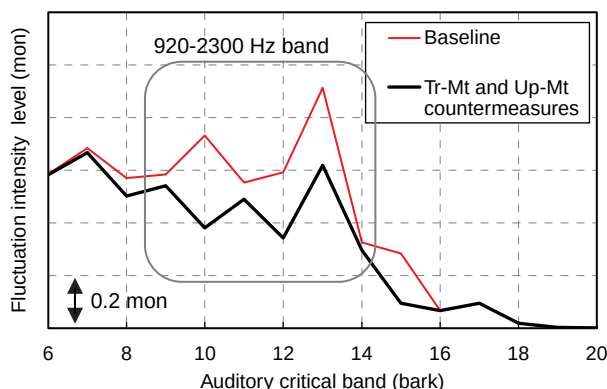


Fig. 12 Results of analysis of interior sound

5. まとめ

伝達経路解析を用いた結果、以下の知見が得られた。

- (1) 車室内で聞こえるディーゼル燃焼音は、空気伝播成分だけでなく振動伝達成分の影響もあることが明確になった。
- (2) エンジンマウント点振動を抑制することにより、伝達成分が減少し車室内での燃焼音フィーリングが向上した。

- (3) PCR-TPA 解析が燃焼音に対し有効であることがわかった。

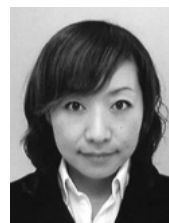
参考文献

- (1) 能村幸介, 吉田準史: 主成分回帰法を用いた車内音の伝達経路解析手法, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.136-141
- (2) 能村幸介, 吉田準史: 市場の違いを考慮した自動車室内音質の定量化, 自動車技術会論文集 Vol.34, No.4, p.187-193(2003)
- (3) 能村幸介, 岡田義裕: 聴覚特性を考慮した自動車音質評価手法, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.131-139

■著者■



久野 泰宏



平出 玲子