

特集：MAZDA CX-60

13

CX-60のNVH開発について

NVH Development for CX-60

住田 英司^{*1} 毛利 正樹^{*2} 服部 之総^{*3} 唐津 良平^{*4} 宮東 孝光^{*5}
Eiji Sumida Masaki Mouri Yukifusa Hattori Ryohei Karatsu Takamitsu Miyahigashi
木下 晃^{*6} 富士田 拓也^{*7} 三小田 哲也^{*8} 村上 健太^{*9}
Akira Kinoshita Takuya Fujita Tetsuya Mikoda Kenta Murakami

要約

CX-60の開発コンセプトは、『どんな道でも、心驚かすことができる Driving Entertainment』である。このコンセプトを実現させるために、(1)不快な音や振動を排除し、お客様に安心感を提供する静粛性と、(2)高揚感を呼び起こし、運転の楽しさを感じるきっかけとなるPTサウンドに目標を置いた。この目標を達成するために、音源を低減させ、振動伝達特性や空気伝ば音をコントロールするための考え方を構築し、それを具体化させるための新たな構造や材料を研究するとともに、CX-60に関わる全部門との共創活動を経て、この目標を実現させた。

Abstract

We've set the concept of CX-60 as "Driving Entertainment that can excite you on any road".

In order to realize this concept, We've set the goals, (1) quietness target on cabin to provide customers with sense of ease by eliminating noise and vibration (2) Engine sounds target to evoke an elation and the driving pleasure. In order to accomplish these goals, we have constructed a concept for reducing the sound source and controlling the vibration transfer characteristics and air-borne noise. Through co-creation activities with all related departments, we've accomplished these goals.

Key words : Vibration, Noise, and ride comfort, Body structure/body material, Acoustic material, Idling vibration/idling noise/acceleration noise, Road noise/pattern noise

1. はじめに

CX-60のNVH開発では、不快な音や振動を排除しお客様に安心感を提供する静粛性目標、高揚するような感情を起こし、運転の楽しさを感じるきっかけとなるエンジンサウンド目標を定めた。本稿において、人が音を感じるメカニズムを探求し、それを具現化するための考え方とその実現手段について報告する。

2. 静粛性

CX-60の静粛性においては、車室内の音圧目標に加えて、音に関する人間研究の成果から開発指標を定めて、開発を進めた。

2.1 静粛性の指標化

走行中の車内は、エンジン、タイヤ、風の音と振動、

周囲の車や街の騒音など過酷な音環境にある。その環境下でも不要な音を排除して、同乗者全員に快適性と安心感を提供するために静粛な室内空間の開発を続けている。

(1) 粗粒路ロードノイズ

私たちは変化を敏感に感じ取ることができる。音も例外ではなく、音の変化で環境が変わったことを認知し、判断、行動のステップを取る。音の変化が小さいと認知できず、変化が大きすぎると過剰なストレスを発生させることになる。ストレスなく認知できる、この適値を良路から粗粒路への路面変化を代表シーンとして検討した。

この検討は通常の音圧データに加え、注意の誘引度を示す指標を、時間で変化する周波数特性に用いて仮説を立て、実車フィーリングで検証した。この結果から誘引度は200Hzの周波数帯域が支配的であることが示され、この帯域における時間軸での音圧変化量からストレスなく認知できる物理量を導出し、目標とした (Fig. 1)。

*1~8 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

*9 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

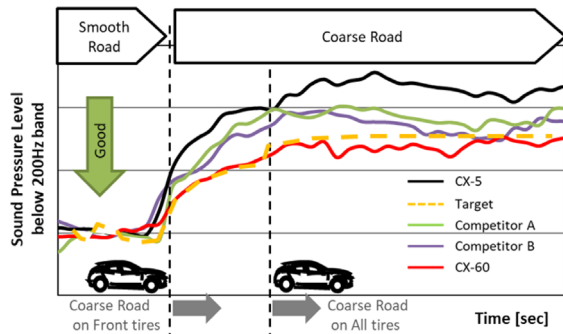


Fig. 1 Time Transition of Sound Pressure Level

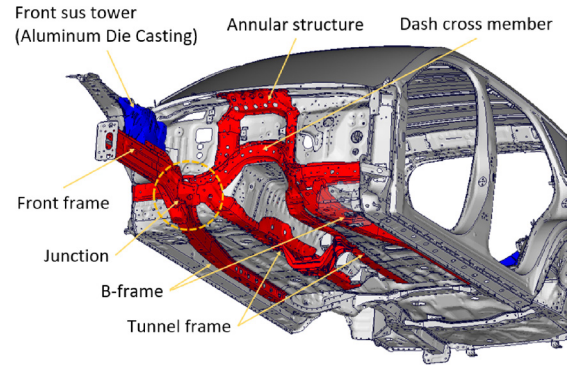


Fig. 2 Serial Cross Section of Structure Framework

(2) 風変動感

高速走行時は、走行風や自然風の影響を受け、バサバサと変化する耳障りな音（風変動感）を感じる。CX-60では、高速走行時の風変動感を抑え、快適で安心な室内空間を実現することをコンセプトとした。走行時の聴感評価点及び音圧の時間変化量と相関性が高い風洞での正対時と横風時の音圧レベル変化量を開発指標とし、その目標値を風の変化を感じにくいレベルとした。

(3) 静粛性を阻害しない振動性能

安心、快適な車室内空間で運転に集中できる環境を提供するため不要な振動は感じさせず、必要な振動は適切にフィードバックすることをコンセプトとし、振動知覚特性から感じないレベル、気にならないレベルを定量目標値とした。

2.2 走行中の安心を感じる静粛性向上技術

(1) 粗粒路ロードノイズの低～中周波音のコントロール

路面変化をストレスなく認知できる音の実現のため、タイヤからサスペンションを通して車体に入ってくるエネルギー量をコントロールし、車体に入ってきたエネルギーは音になりやすい車体モードの振幅レベルをコントロールする構想とした。

エネルギーコントロールは、エネルギーの伝達経路において剛性差があると反射する特性を利用し、サスブッシュと車体取り付け部の剛性差を、反射効率を算出して目標を設定した。実現手段はアルミダイキャストの高い構造自由度を活用し、軽量高剛性な構造とした。

車体モードコントロールの一例として、トンネルが左右に倒れるモードに着目し、その寄与が高いトンネル前端の剛性を、ダッシュクロスの環状化、Frフレームとトンネルフレーム、ダッシュクロスの骨格ジャンクションの結合部連続化によりコントロールすることで、ねらいの振幅レベルを実現した (Fig. 2)。

(2) 風変動感の低減

風変動感とは、車両周りの風の乱れ（渦）によって発生する空力騒音が車体で遮音・吸音され、車内音として乗員に伝わったものである。特に、Aピラーやドアミラーで発生する空力騒音は乗員への寄与が高く、車室内の静粛性向上のためにはこれらの部位で発生する渦を低減する必要がある。スモール商品群では、「3つの風流れ制御コンセプト」に基づいて渦を低減する形状をデザインに反映し、空力騒音を低減した。そのコンセプトを以下に示す。

- ① 沿わす：風を車体表面に沿わし、剥離渦を抑制する。
- ② 揃える：上下左右の速度を揃え、巻き込み渦を抑制する。
- ③ 減らす：剥離領域への流量を低減し、渦を抑制する。

一般的には車両サイズが拡大すると音源である空力騒音は悪化する。そこでラージ商品群では、上記3つの風流れ制御コンセプトを踏襲しつつ、ドアミラーに対しては、新たに(a)入力風の制御技術と(b)揃える制御コンセプトの定量化を導入することで、車両のサイズ拡大により悪化が予想される空力騒音の改善に挑戦した。以下に詳細を述べる。

(a) 入力風の制御

カウルサイドに設定したフェンダーモールドの形状により、ドアミラーへ向かう入力風の向きがドアミラーと正対するように、かつスピードが遅くなるように制御することで空力騒音（渦度）を低減した (Fig. 3, 4)。結果として、正面視の面積がスモール商品群比1割程度大きくなったドアミラーでも同等の性能を実現した。

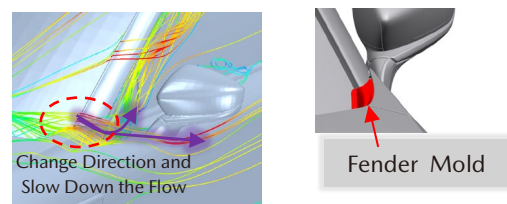


Fig. 3 Flow Streamline around Fender Mold

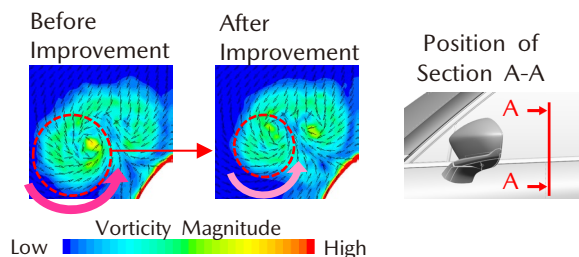


Fig. 4 Vorticity Distribution behind Door Mirror in Section A-A

(b) 制御コンセプトの定量化

デザインとの共創活動を円滑に推進にするため、風をドアミラー後端で揃えるという制御コンセプトの定量目標を設定した。定量化には、ドアミラー後端部での流速の標準偏差を「等速度指標」として用いた (Fig. 5)。また、流速が揃っていない箇所を見える化 (Fig. 6) することで、改善すべき箇所及びその方向性を容易に共有でき、効率的に目標達成形状を実現した。

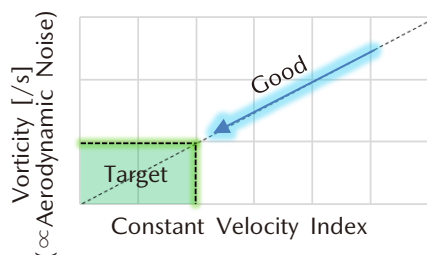


Fig. 5 Relationship between Constant Velocity Index and Aerodynamic Noise

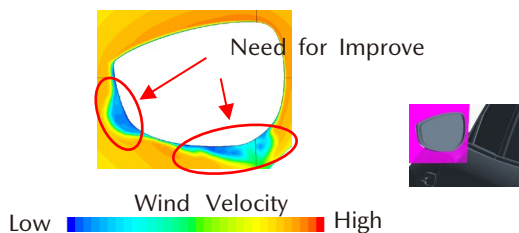


Fig. 6 Wind Velocity Distribution behind Door Mirror

(3) 低周波 NVH 性能実現構想

CX-60 は、さまざまな道で安心感のある力強い走りを実現するため、エンジンの大トルク化、高応答化を実現するためにトルコンレスが採用され、車体への振動入力が増加することが想定され、振動性能目標実現に対して大きな課題があった。

この課題に対して、既存システム共振を活用した振動打ち消しコンセプトにより、新たな付加物を追加せず、効率的に車体入力低減させた。エンジンマウントシステムに対しては、液封マウントの流体をダイナミックダンパーのマスとして活用することで減衰効果を最大化させた (Fig. 7)。

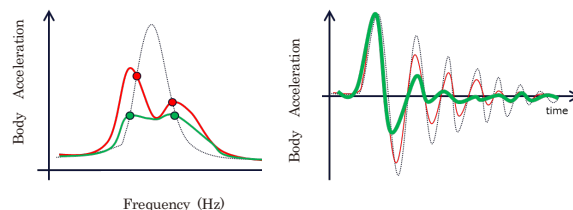


Fig. 7 Liquid Engine Mount Characteristic

リアサスペンションシステムに対しては、フルマルチリンクにデフユニット搭載のシステムを活用し、駆動系入力に対して、マウント特性で弾性主軸位置を制御し振動打ち消し設計として、車体入力を低減させた (Fig. 8)。

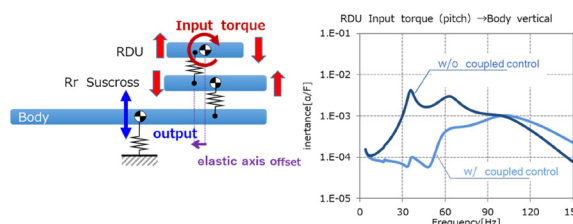


Fig. 8 Elastic Axis Decoupling in RDU (Rear Differential Unit) and Rr Suscross (Rear Sus Crossmember) System

3. サウンド

3.1 加速時の高揚感を感じる PT サウンド

(1) コンセプト

PT サウンドは、マツダの考える意のままの走りに欠かせない要素として、研究開発を行っている。近年では、人が道具を自在に扱えるメカニズムを研究し、意のままの運転と PT サウンドとの関係を解明してきた。具体的にはスモール商品群において、ドライバーが直接扱うトルクの大きさを音で伝えることで運転操作の精度が向上し、PT サウンドが意のままの走りにつながっていることを証明した⁽¹⁾。

CX-60 では、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、プラグインハイブリッド (以下、PHEV) とさまざまなパワートレインが存在する。どのパワートレインにおいても、スモール商品群で培った意のままの走りをサポートする PT サウンドの特性は保った上で高揚感を呼び起こし、運転の楽しさを感じる PT サウンド特性を造り込み、走る喜びの 1 ランクアップを狙った。

(2) PT サウンドの指標化

ドライバーが直接扱うトルクの大きさを、PT サウンドの変化で伝える。そのための指標は、トルクに対する音の大きさの変化と定め、CX-60 もこの範囲に設定した (Fig. 9)。

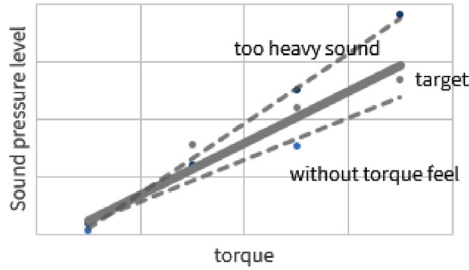


Fig. 9 The Target of Sound Pressure Level vs Torque

高揚感を感じる指標は、音色の変化とした。耳は外耳・中耳・内耳の3部位から成り、内耳には蝸牛と呼ばれる部位がある。蝸牛内にある基底膜が反応した後、聴覚系はある周波数ごとに信号を振り分ける。ここでは、聴覚フィルターと呼ばれる中心周波数の異なる帯域フィルター群がある。すなわち人間の聴覚は24個のフィルター群として、モデル化できる。その帯域幅は臨界帯域幅と呼ばれ、中心周波数が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。この聴覚フィルターの働きにより、聞いている音にどういった周波数の音が含まれているのかわかる。

この1つの聴覚フィルターに2つ以上の音が存在するときに音は干渉した音に聞こえ、音が別々の聴覚フィルターにある時は澄んだ和音に聞こえる。PTサウンドでこの干渉音が発生すると、ゴロゴロといった音に聞こえる。

ドライバーが意をもって加速する際、和音から干渉音へ音色の変化させることで、操作に対して車からの反応の変化がはっきりと感じ取れ、クルマとの一体感が増し高揚感につながると考えた。従って、高揚感を感じる音の指標は、トルクに対する干渉音の大きさとした。その目標は、意をもって加速する際に干渉音がはっきり感じ取れるように、非線形 (Fig. 10, 11) に変化させた。

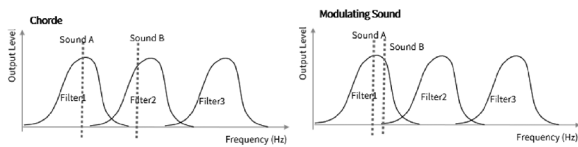


Fig. 10 Auditory Filter (2)

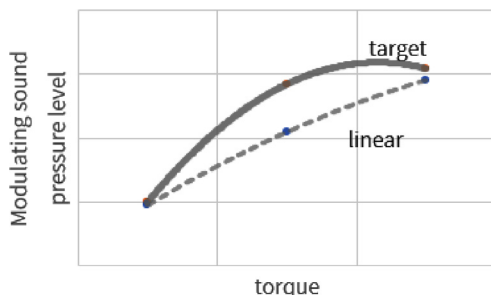


Fig. 11 The Target of Modulate SPL vs Torque

(3) PT サウンドの具体化

車内で聞こえるエンジンの音は、エンジンの振動がエンジンマウントなどのラバーを含んだつなぎ部品を伝達し、フレームに代表される車体部品を經由して乗員に届く。エンジンの振動は、基本的にトルクに対してリニアに振動が変化する。このトルクに対してリニアな振動変化を、できるだけそのまま車内へ伝えるように伝達部品や車体を造り込んだ。

また、エンジンとトランスミッションの重量と締結剛性により形成される主要な振動モードがある。このモードが発生する周波数ではエンジン振動に対して、動レベルが増幅するためエンジンマウントなどのPTを支える部品の配置は可能な限り、このような振動モードの節に当たる位置に配置し、モードにより増幅した振動を車体へ伝わりにくくした。更には、トルクによって変わる車両加速度に対して、エンジンマウントなどの変位を制御し、エンジン振動の伝達に急な変曲点を作らず、リニアに車体へ伝える特性とした (Fig. 12)。

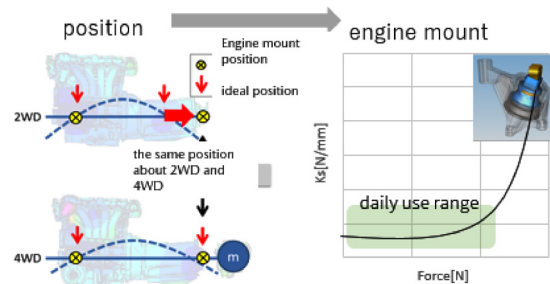


Fig. 12 Engine Mount Position and Rubber Characteristics

車体感度は、車室内の空間容積などで決まる共鳴周波数と、フレームやパネルで形成される骨格の共振モードの周波数を離間して配置させることで、周波数特性としてもフラットな車体感度を実現した (Fig. 13)。

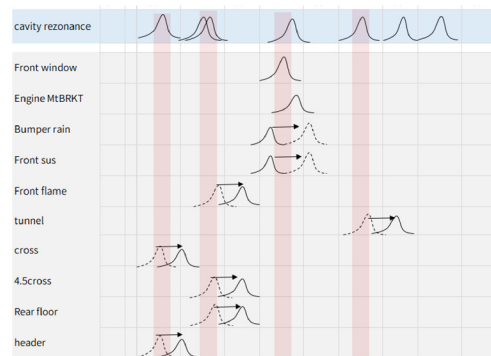


Fig. 13 Body Structure and Cavity Resonance

これらにより、日常の追い越しや、再加速のようなシーンでは主にリニアに伝わるPTサウンドを実現し、高速道路へ侵入するようなアクセルを深く、比較的長い時間踏み続けるようなシーンではオーディオからの補完だ

けでなく、吸気から分岐したサウンドクリエイターからの音も加え、踏み込むほどに変化を感じられ高揚感へつながるサウンドを実現した (Fig. 14)。

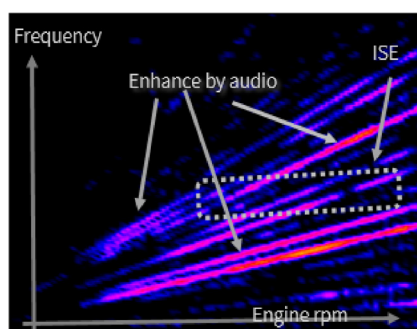


Fig. 14 Engine Sound while Accelerating

3.2 歩行者の安全に配慮した接近通報音の技術

(1) 車両接近通報音

電動車 (BEV, HEV, PHEV など) は低速でのモーター走行時に走行音が低く、歩行者は車両の接近に気づきにくい。このため、2019年以降の電動車には、自動車の接近を歩行者に知らせるため車両接近通報装置 (AVAS; 以下、接近通報音) の装着が義務化された。この装置から発せられる前進音と後退音の音圧レベルと周波数は法規で規定されており、各社で音色の工夫をしている。

(2) コンセプト

CX-60の接近通報音は、①乗員が気にならず、②歩行者が違和感なく気づきやすいこと、をコンセプトとした。このうち②では歩行者の安全性を向上させるため、人の記憶にある音 (=内燃車で聞いたことがある音) を用いることで、自動車の接近を違和感なく歩行者 (車外の人) に知らせることを目指した。

(3) 前進音

前進では、歩行者が振り返らなくても「自動車」と気づいてもらう音を研究した。結果、EV車や内燃搭載車に共通する音として「タイヤ」が回転する時の音に着目するに至った。

(4) 後退音

後退では、運転者からの死角も多く、歩行者自身に気がついてもらうことで、安全確保ができると考えた。気づきやすい音として間欠音を取り入れ、音の発生時間の間隔は、心臓の鼓動の間隔で音を吹鳴することで、歩行者が平常心で行動できるようにした。

(5) コンセプトの具体化

前進時のコンセプト実現のため、タイヤ起因の音をデータ化した。車速ごとの周波数特性を分析により、車速の変化に伴う周波数全体の音圧変化の中で、一部の帯域の周波数に変化に特徴があることを確認した。歩行者がタイヤ音と認識するには、車速に応じた周波数帯域ごとの変化を再現することが重要となる。つまり周波数を変化させる帯域とさせない帯域の音、これらを合成する

制御を織り込み、音圧と周波数を法規要件に適合させながら意図した自然な前進時の音を構築することができた。

後退時のコンセプト実現のため、前述のタイヤの音に加え、加齢による聴力の衰えが少ない周波数帯域を選択した。更に、前述した時間間隔を加えることで、歩行者に気づいてもらえる音を作成した。具体的には、人が落ち着いている平常時の心拍を参考にするすることで、歩行者に危機感を煽りすぎず、落ち着いて自動車から回避できる時間間隔とし、CX-60はねらいどおりのコンセプトを実現できた。

4. おわりに

以上、CX-60の静粛性開発について紹介した。今後とも、お客様にマツダ車を選び続けていただくために、人間中心の考えの基、お客様に喜んでいただく指標の研究と、その実現に向けたNVH性能開発技術の更なる向上に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 森下ほか：MX-30 EV MODELのモーターペダル開発、[マツダ技報, No.38, pp.20-25 \(2021\)](#)
- (2) 岩宮眞一郎：よくわかる最新音響の基本と仕組み、日本、秀和システム、pp.36-39, p.46, pp.88-89 (2014)

■ 著 者 ■



住田 英司



毛利 正樹



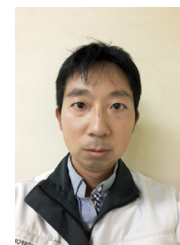
服部 之総



唐津 良平



宮東 孝光



木下 晃



富士田 拓也



三小田 哲也



村上 健太