

論文・解説

08

音からの情報で意のままの運転に貢献する エンジンサウンド開発

Development of Engine Sound with Information that a Person Gets from Sound, to Contribute to Driving with the Will on

服部 之総^{*1} 原田 聖士^{*2} 光永 誠介^{*3}
Yukifusa Hattori Satoshi Harada Seisuke Mitsunaga
森田 洋明^{*4} 白石 秀宗^{*5}
Hiroaki Morita Hidekazu Shiraiishi

要 約

新型 MAZDA3 では、エンジン音や路面からのロードノイズを低減し、車内での会話や音楽を聴きやすくするだけでなく、走行中に変化するそれらの音から周囲の状況を認識できるような「質の良い静粛性」で、安心・快適な車室内空間を実現した。新世代車種においてはこれに加えて、音は人にとって次の行動を決めるための情報であることに着目し、加速・減速時のエンジンサウンドを活用することで、更に意のままに車を操れる状態へ近づけると考えた。音で伝える情報、タイミングを定義し、これらの要素を反映したエンジンサウンドの構築を行った。このエンジンサウンドが走行速度のばらつき抑制効果があると仮説し、シミュレーターを実装した車両による検証で明らかにできた。サウンドの機能として、車を意のままに操ることへ貢献できるという新しい価値を定めることができた。

Summary

Aims of Mazda's NVH performance development to enhance the value by realizing "quietness of good quality". That does not only reduce the sound pressure of the road noise from the road surface, and engine sound to make it easy to listen to conversation and music in the car, but also to be able to recognize a surrounding from those sounds to change while driving. In addition to "quietness realized from new Mazda3 of good quality", the sound paid its attention to being information to decide the next action for a person and thought that I brought it close to a state to be able to handle a car in a beck and call more by utilizing engine sound at the time of acceleration, the slowdown. We defined information, the timing to tell by a sound and built the engine sound that reflected these elements. When this engine sound could control unevenness of the vehicle speed, I hypothesized and proved it by the evaluation with the vehicle which implemented a simulator. We was able to fix the new design that I contributed to for handling a car on will as value of the sound.

Key words : Sound quality evaluation, Evaluation technology, Cognitive reaction time, Driving act, Driver behavior, Sense of hearing, Operational, Driving support

1. はじめに

マツダの NVH 性能開発は、お客様の静粛性への高まる期待に応えるために、新型 MAZDA3 以降の車種で、単に静かにするだけでなく、運転に必要な情報を適切に伝え、安心・快適な車室内空間を価値として提供し

ている。

次なる提供価値として、エンジンサウンドと走る喜びの関係性について着目した。人と音の関りを辿り、音を創造し、操作と音、更には走る喜び、所有する喜びを高めることへの貢献に向けて検討を重ねてきた。本稿では、この研究成果について報告する。

*1~5 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

なお、本研究における被験者実験は社内の倫理規定に準じ、事前審査を経て行った。また、実験内容について被験者に対し事前に十分な説明を行い、インフォームドコンセントを実施した。

2. 運転と音

2.1 人と音の関わり

人にとって音は、記憶や経験と結びついて感情に作用する機能と、危険・力の大きさ・距離など情報を得る機能に分けることができる。人は、音から情報を得る機能と、視覚や触覚からの情報、及び自身の記憶と合わせて、次の行動に活かすことを無意識に行っている⁽¹⁾。

例えば、雪道を歩行している際に、視線は前を見て周囲の情報をつかむのに活用し、足からの触覚や聴覚は、雪を踏む感触と、発生する音から、路面の状態が凍結していて滑りやすいのか、積雪状態で滑りにくいのかを判断し、次に踏み出す一步の歩幅や、足の運び方を自然と調整している。

このように音は人にとって、次の行動に必要な情報の1つである。

2.2 運転と音との関係

車の運転は、走る、曲がる、止まるをアクセルペダル、ステアリング、ブレーキ操作によって行っている。

「走る」の中には、加速・減速・定常がある。

「加速」「減速」時は、アクセルペダル操作と、車両加速度の関係や、アクセルペダル操作時の重さとストローク（踏力と作動量）、運転姿勢を支えるシートなどが関係しており、これらを連携して造り込むことで、ドライバーにとって意のままに走る車を目指し、開発を続けている。

上記に加えて、先に述べた人の行動に不可欠な音を制御することで、更に「意のままに」の価値が深化し得ると考えた。

3. 音で伝える情報と、その要件

3.1 力の大きさを伝える音

音で届けるべき情報は、ドライバーが直接コントロールしている原動機のトルクの変化と考えた。この情報を、ドライバーが遅れなく受け取ることで、次の操作に活かせると考えた。

トルクは、加える力と置き換えることができる。身の回りで起こっている加える力の差と、音の変化に着目し考察した。

私たちは、音だけで力の差をイメージすることができる。例えば遠くから聞こえる水の流れる音から、水の量や勢いのような「力の差」をイメージすることができる。この音の差を、音の発生メカニズムから説明すると、自然界の音は基準となる音（基音）と倍音で構成されてお

り、入力する力が増えるほど、全体の音圧レベルが増え、聞こえる倍音も増えるようになる。つまり、力と音の関係は、入力する力が大きいほど①低周波領域の、②聞こえる周波数の数が多くなり、③音圧が大きくなるといえる（Fig. 1）。

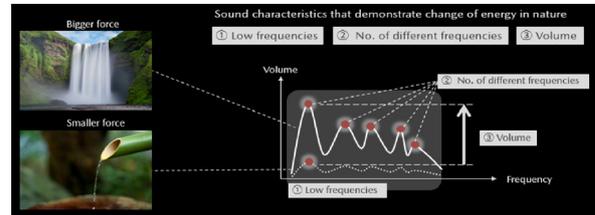


Fig. 1 Sound Characteristic Change of Energy Nature

3.2 音の因子に関する検証結果

加える力の大きさと、音の因子の関係を確かめるために、サンプル音を視聴して、評価点をつけてもらう方法にて、検証を行った。

シンセサイザーにて発生させたトロンボーン音をベースとして使用し、サンプル音の作成を行った。（Fig. 2）この音を基に周波数帯を3水準、聞こえる周波数の数を6水準、音の大きさを3水準とし、サンプル音源を作成した（Table 1）。

周波数帯の3水準、及び聞こえる周波数の数6水準については音の大きさを一定とし、各因子の変化だけで評価できるようにした。また音の大きさ3水準については、各周波数同士の音の大きさのバランスは変えずに、全周波数一律で音の大きさを上げ、音の大きさのみを評価できるようにした。

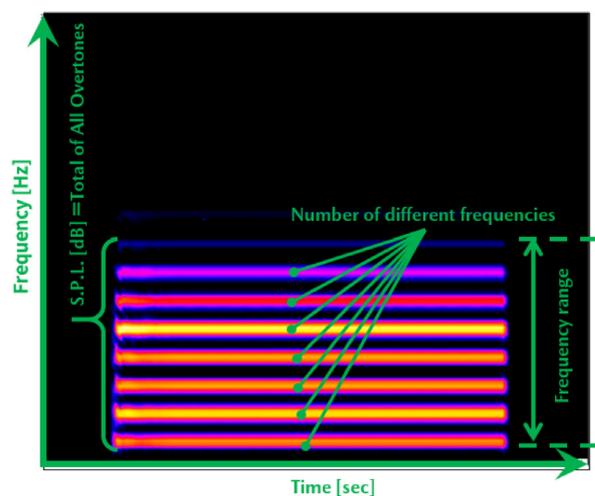


Fig. 2 Contour Diagram of Sample Sound

ヘッドホンによる試聴で評価を実施し、印象の偏りを避けるため20歳代～50歳代までの10名の被験者に、順不同でサンプル音を提示し、各サンプル音の印象を回答してもらった。力が大きいと感じるを5点、力を感じな

Table 1 Sample Sound for Auditory Evaluation

①Frequency Range

| Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1k to 2kHz for the reference sound | 500 to 1kHz for the reference sound | 0 to 500kHz for the reference sound |

②Number of different Frequencies

| Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 |
|--|---|--|
| the 1st, 2nd, and 3rd harmonics of reference sound | the 1st, 2nd, 3rd, and 4th harmonics of reference sound | the 1st, 2nd, 3rd, 4th, and 5th harmonics of reference sound |

| Sample 4 | Sample 5 | Sample 6 |
|---|--|---|
| the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, and 6th harmonics of reference sound | the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, and 7th harmonics of reference sound | the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, 7th, and 8th harmonics of reference sound |

③S.P.L.

| Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 |
|-----------------|---------------------|----------------------|
| Reference sound | Each frequency +6dB | Each frequency +12dB |

いを1点とする5段階評価で点数を付けた。

①周波数帯, ②聞こえる周波数の数, ③音の大きさ, それぞれの音の因子と, 力の大きさの感じ方について相関関係を分析した。その結果, ①音の周波数帯は低いほどに力を大きく感じる。②聞こえる周波数の数は, 多いほど力を大きく感じる。③音の大きさについても, 音が大きいほど力を大きく感じるという結果が得られた (Fig. 3)。

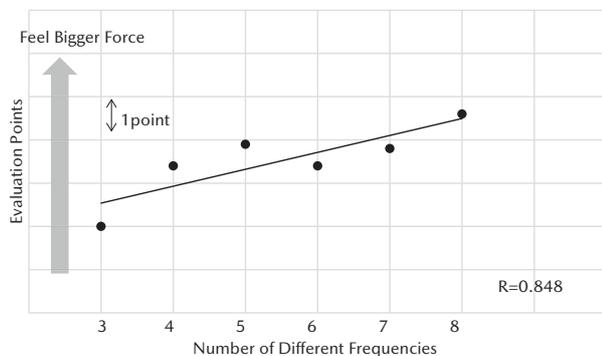


Fig. 3 Relationship between Number of Frequency and How to feel Force

次に, ①②③の因子を組み合わせたサンプルを用意し,

①②③を説明変数 (x,y,z) とし, 力の大きさの感じ方を目的変数 (f) として, 重回帰分析を行った。(Table 2) その結果, 重決定係数 R2=0.835 となり, 人が音から感じる力の大きさを 3 つの音の因子の組み合わせにより説明できることが分かった。

ここで得られた回帰式から, 力の差を 1 点分大きく感じさせるためには, ①音の周波数帯であれば 50Hz 低く, ②聞こえる周波数の数であれば 1 つ増やし, ③音圧であれば 4dB 大きくすることで実現できると示すことができた。

3.3 時間遅れに関する検証結果

トルク変化を音で, 遅れなくドライバーへ届けるため, 音の変化量とタイミングを変化させ, その感じ方について検討を行った。評価は社内のエキスパートドライバー 5 名にて実施した。

過去の検討結果から, トルクが変化し始める時間を起点とし, そこから 1 秒以上あとに, 音の変化を感じると遅れて感じてしまい, 次の操作へ活かすことができないことが分かっている。

そのため今回は, 音圧をエキスパートドライバーが変化を感じ取れるレベルの 2dB と固定し, この音圧差が発生するタイミングを 1 秒から早期化していくことで, 評価を行った。

まず 0.8 秒で 2dB の変化から評価を行ったが, 全てのドライバーがトルク発生に対し, 音が遅れてついてくるように感じ, タイミングとして遅すぎる結果となった。そのためタイミングを徐々に早期化して評価を行い, 0.4 秒で 2dB 以上の音圧変化を与えることで, 音が遅れなく変化しているように感じ取れることがわかった。微細な変化を感じ取れることのできるエキスパートドライバーが許容できることから, お客様含めてほとんどのドライバーが遅れなく感じると考え基準をトルク変化が発生するタイミングから 0.4 秒と決めた (Fig. 4)。

また, 今回の評価車両において, アクセルペダル開度と, トルク発生がほとんど同時である。(Fig. 4) このことから, アクセルペダル操作によって変化するトルク全体に対する応答性を見るために, 横軸にねらいのアクセル開度を 1 とした時の変化率, 縦軸にねらいのアクセルペダル開度に到達した際の音の大きさを 1 とした時の変化率をとり, その分布を描く指標化を行った。この指標にてアクセルペダル操作に対して, 音が遅れている状態だと下にふくらむ分布となり, 早すぎる場合には上に膨らむ分布となる。ねらいである遅れなく感じる状態とするには, 線形に分布した状態を目指せばよいことが分かった (Fig. 5)。

Table 2 Sample Sound for Multiple Correlation Analysis

| | x: ①Frequency Range | y: ②Number of different Frequencies | z: ③S.P.L. |
|-----------|--|---|------------|
| Sample 1 | Only 60 to 150Hz for the reference sound | 2 numbers (the 1st, and 2nd harmonics of reference sound) | Base |
| Sample 2 | Only 60 to 210Hz for the reference sound | 3 numbers (the 1st to 3rd) | Base +4dB |
| Sample 3 | Only 60 to 270Hz for the reference sound | 4 numbers (the 1st to 4th) | Base +9dB |
| Sample 4 | Only 60 to 330Hz for the reference sound | 5 numbers (the 1st to 5th) | Base +13dB |
| Sample 5 | Only 60 to 390Hz for the reference sound | 6 numbers (the 1st to 6th) | Base +15dB |
| Sample 6 | Only 60 to 450Hz for the reference sound | 7 numbers (the 1st to 7th) | Base +17dB |
| Sample 7 | Only 60 to 510Hz for the reference sound | 8 numbers (the 1st to 8th) | Base +18dB |
| Sample 8 | Only 60 to 570Hz for the reference sound | 9 numbers (the 1st to 9th) | Base +19dB |
| Sample 9 | Only 60 to 210Hz for the reference sound | 2 numbers (the 1st to 3rd) | Base +1dB |
| Sample 10 | Only 60 to 330Hz for the reference sound | 3 numbers (the 1st, 3rd, and 5th) | Base +11dB |
| Sample 11 | Only 60 to 450Hz for the reference sound | 4 numbers (the 1st, 3rd, 5th, and 7th) | Base +14dB |
| Sample 12 | Only 60 to 570Hz for the reference sound | 5 numbers (the 1st, 3rd, 5th, 7th, and 9th) | Base +16dB |

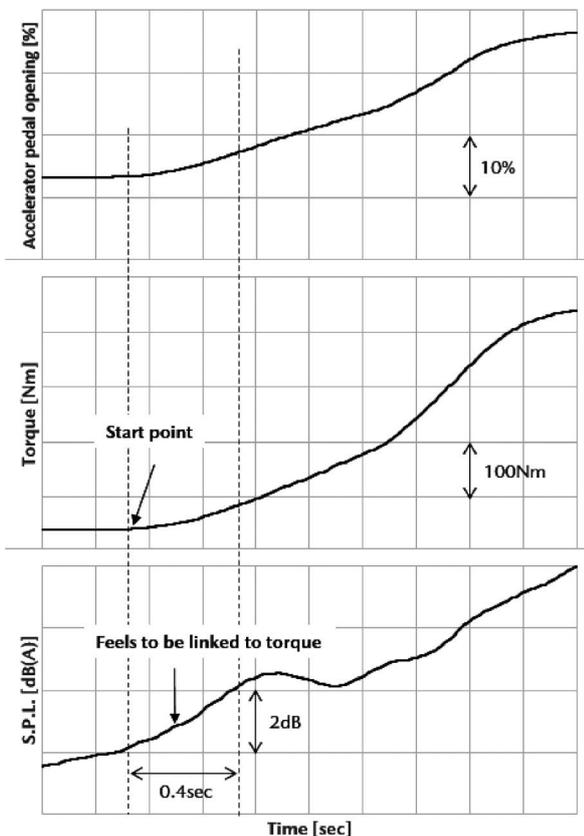


Fig. 4 Time Chart of Accelerator Pedal Operation and Engine Sound Pressure Level

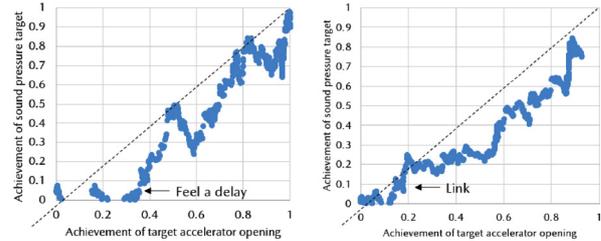


Fig. 5 Index between Change of Accelerator Pedal Operation and Sound Pressure Level

3.4 トルクの変化を伝えるエンジンサウンド

ここまで検討してきた、トルク変化が分かる音の3つの要素と、遅れなく伝える要件を織り込んだエンジンサウンドをシミュレーターで模擬し、実際に運転操作への影響の定量的な検証を行った。

構築したエンジンサウンドは、主に聞かせる周波数を500Hz以下とし、一般に20kHzまで聞こえるという人にとって低い周波数帯域で構成した。また音圧については、トルクに応じて線形に大きくなるようにした。そして聞こえる周波数の数については、次数音の数をトルクに応じて増やしていくこととした。次数音というのは、エンジン音のようにエンジン回転数に比例する周波数の音で構成される音のことをいう。

次数音の構成は通常エンジンの気筒数で決まる。しかしながら今回は全てに共通する構想の構築のため、気筒数を前提とせず基本の1つの次数だけを決め、そこから協和音の比率を基に次数音を構成した。

また、遅れなく伝えるために、アクセル開度の変化率と、音の大きさの変化率が線形になるような音にした。

これらの要素を加味して構築したエンジンサウンドはトルクに応じて音圧の変化、次数音1つ1つの増減を感じ取り、かつ不快な音にならず、内燃から電気自動車までも適用できるエンジンサウンドの基本構成を造り出すことができた (Fig. 6)⁽²⁾。

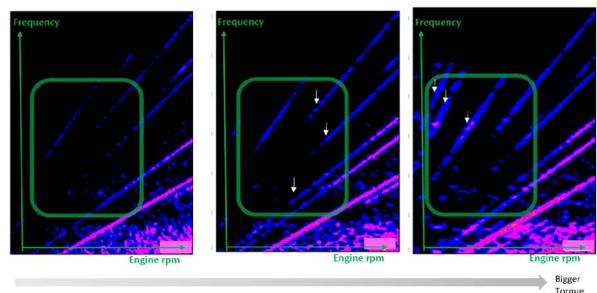


Fig. 6 Change of Engine Sound for Torque

4. 効果の検証

4.1 試験条件

シミュレーター装置でねらいのエンジンサウンドを再

生できるようにした車両を用いて、社内テストコースで評価を実施した。ドライバーは1名とし、検証内容は、上記の考えを基にしたエンジンサウンドが発生する状態と、エンジンサウンドが発生しない状態の2仕様とした。各仕様、複数回走行し、一定区間の走行速度ばらつきを計測することで、運転精度の差を検証することとした。なお車速については、各ポイントに表示されている車速をねらうこととし、評価の間、車速計は隠し見えないようにして行った。

評価区間は、加速・減速・定常を包含しているテストコース内のひとつのコーナー区間を評価対象区間とした (Fig. 7)。

4.2 検証結果

エンジンサウンドのあり、なしの2仕様にて、時間軸に対して、繰り返し計測の中での最大速度差を縦軸に取り比較を行った (Fig. 8)。

エンジンサウンドが発生している仕様は、発生していない仕様と比べて速度ばらつきが低減していることが分かる。大きいところでは5km/h程度速度差が縮まっている。これは目標速度の約10%程度に相当しており、ばらつき低減後は、速度ばらつきは5% (2~3km/h)程度になり、メーター誤差程度の差となってくるため、同じ道を、同じように安定して運転できていることといえる。

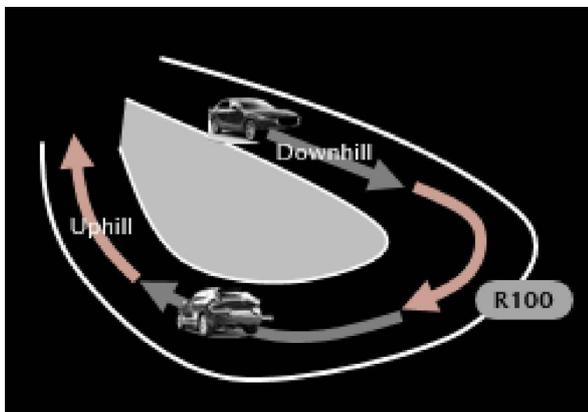


Fig. 7 Evaluation Course

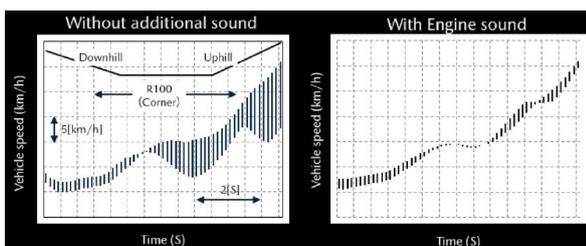


Fig. 8 Evaluation Result of Variation in Vehicle Speed

今回の考えのようにドライバーが直接コントロールしている原動機の状態を音で伝えることで、今の原動機の状態、次の車両挙動の予見精度が上がり、運転操作の精度向上につながり、今回のように速度ばらつきを低減できる結果につながったと考える。

5. おわりに

これまでエンジンサウンド開発は、音だけの観点からどのような音色にするかを中心に開発を続けてきた。しかし、そもそも人は音とどのように関わっているのから検討を進め、意のままに運転するために必要な情報を考察し、結びつけることで安心・快適からもう一歩進化した意のままに操れることに貢献し、走る喜びの提供につながるエンジンサウンド構想を構築することができた。

この考えを基にしたトルクの変化を伝えるサウンドは、今後の新型車から順次適用を予定している。

今回の成果を起点に今後、更に研究を拡張させ、ドライバーにとって意のままに操れる車となり、同乗者に安心・快適を感じてもらえる商品の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 中島祥好 (九州大学 2020年3月退官) : 耳と心 (聴覚心理学入門)
- (2) 岩宮眞一郎 (九州大学) : よくわかる最新音響の基本と仕組み

■ 著 者 ■



服部 之総



原田 聖士



光永 誠介



森田 洋明



白石 秀宗