

自動車変速時の過渡音と過渡振動を考慮した快適な車室内空間の構築 Construction of Comfortable Interior Space in Consideration of Transient Sound and Vibration at the Shifting Time of the Vehicle

精密工学専攻 38 号 野島 恵理子
Eriko Nojima

1. はじめに

近年の自動車業界において、自動車車室内（車室内）は移動空間としての快適性が高く求められており、環境問題への対策や燃費向上もあり、ハイブリット車や電気自動車の普及が進み、研究開発が多く行われている⁽¹⁾。そのため、ロードノイズや風切り音などの車室内暗騒音が相対的に聞こえやすくなり、それらの対策が積極的に行われている⁽²⁾、⁽³⁾。一方で、スポーツカーでは、エンジン音が乗る楽しみの一つであるように音が車のイメージを作る要因にもなる⁽⁴⁾。しかし、道路の欠陥上や高速道路の継ぎ目上の走行、クラッチ操作時に発生する衝撃的な過渡音や過渡振動が運転者に伝わることもある。これらの過渡的な現象の方が、エンジン音や路面振動などの定常的な現象よりも感度が高く、乗り心地の低下に繋がるため、運転性能の悪化が懸念される⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。

そこで本研究では、走行中の過渡的な現象の中でも変速時に変速機から生じる過渡音（変速音）と過渡振動（変速振動）に着目する。まず、変速機単体および変速機を搭載した実車にて計測実験を行い、変速音の音響特性と変速振動の振動特性を把握する。次に、ドライビングシミュレータ（DS）を用いて音のみの単体刺激と、変速時に車体前後方向に生じる加速度 G （変速ショック）を組み合わせた複合刺激下において、それぞれ主観評価を行う。評価結果より得られた快適条件を導出する。さらに、上記の快適条件を再現した実車走行で主観評価を行い、得られた条件の有用性を検証する。

なお、本研究のすべての評価は、被験者に対し十分なインフォームド・コンセントを行っている。

2. 変速音と変速振動の特性把握

本章では、変速機単体での台上試験および変速機を搭載した実車試験において変速音と変速振動の計測を行い、特性を把握する。

2.1 台上試験

実車を想定した制御パラメータを用いて、変速機単体での計測実験を行う。

2.1.1 計測条件

本計測では、自由音場型のマイクロフォンと三軸加速度ピックアップで変速音と変速振動を計測する。計測点は、変速機近傍の上下前後左右の計 6 点である。車体の左右方向を x 軸、上下方向を y 軸、前後方向を z 軸とする。実車想定アクセル開度は 20%、40%、60% の 3 パターンを用意し、それぞれ 1~4 速の変速ごとに計測し、制御パラメータは全て実車を想定して設定した。なお、計測は全て無響室で行う。

2.1.2 計測結果

変速音と変速振動ともに高開度、高シフトになるにつれ大きくなるのがわかった。このことから、変速時のエンジン回転数が音圧や加速度に影響していると考えられる。また、変速音は過渡音であるため、比較的高周波帯域までフラットに出ているのがわかる。変速振動は人体に対して鉛直方向である y 軸の体感振動レベルが最も大きく、低周波帯域の体感振動レベルが大きい。しかし、変速振動としてはほとんど

運転者が体感しないレベルである。

2.2 実車試験

台上試験で用いた変速機を搭載した実車の計測実験を行う。また、台上試験との比較を行うことで、車室内の特性を検討する。

2.2.1 計測条件

本計測では、変速音は車室内運転者耳位置の左右および運転席と助手席間、台上試験より変速機近傍後面の計 4 点にて、変速振動はシートおよびフロア、台上試験より変速機近傍後面、左面および下面の計 5 点にて計測する。設定した座標軸や計測パターンは台上試験と同様である。計測は全て 1 km の周回路コースの直線部のみで行い、安全のため計測作業は助手席から行う。

2.2.2 計測結果

Fig. 1 に計測音のスペクトログラムを示す。変速音は変速機近傍に比べ、車室内では全体的に小さくなるのが確認でき、車体などにより遮音されていることがわかる。変速ごとに比較すると、2→3 速と 3→4 速では変速音の大きさに違いがあまり見られない。3→4 速の方が変速時のエンジン回転数は大きいですが、両変速での変速時前後のエンジン回転数差は大きな差がない。したがって、変速音の大きさには変速時前後のエンジン回転数差も影響していると考えられる。また、アクセル開度が大きくなるにつれて変速音も大きくなるが、エンジン音や暗騒音も大きくなるので、変速音が小さく聞こえる可能性がある。

Fig. 2 に y 軸の計測振動のスペクトログラムを示す。変

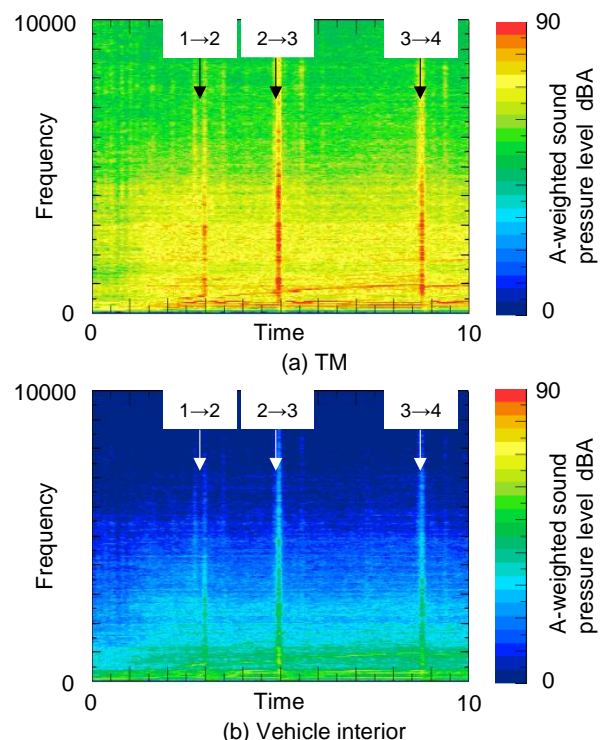


Fig. 1 Spectrogram of sound – 20%

速振動は変速機近傍に比べ、フロアでは振動レベルが小さくなっていることがわかる。また、変速音と同様に 1→2 速に比べ、2→3 速や 3→4 速にて変速振動が大きく、変速時前後のエンジン回転数差が影響していることが確認できる。加えて、アクセル開度が大きくなるにつれて暗振動が大きくなるため、運転席では変速振動が小さいだけでなく暗振動に紛れてほとんど感じないことがわかる。

2.3 台上試験と実車試験の比較

まず、変速音は変速機近傍に比べ、車室内の遮音性能などにより車室内の音圧が小さくなることがわかった。また、台上試験よりも実車試験の変速機近傍後面のエンジン音や暗騒音が大きくなっているため、実車の方が変速音は相対的に小さく聞こえると考えられる。

次に、変速振動は実車試験の x 軸の加速度が台上試験に比べて小さくなる。これは、変速機が車体に固定されているためだと考えられる。加えて、フロア振動の大きさは特に高周波帯域において変速機近傍に比べて小さいことがわかり、エンジンマウントなどによって振動が吸収されたからと考えられる。

以上より、変速音と変速振動は変速時のエンジン回転数および変速時前後のエンジン回転数差に影響を受けていることを確認できた。また、高開度になるにつれ、暗騒音や暗振動も大きくなるので、変速音や変速振動が目立ちにくい傾向にある可能性が示唆された。

3. 音の単体刺激による変速音の印象把握

自動車走行中のエンジン音や変速音の特性に着目して、変速音の影響について DS を用いた主観評価での印象変化より検討する。

3.1 評価条件

まず、シエップフェの一対比較法（浦の変法）に基づく 7 段階の相対評価を変速音の知覚度に対して「変速音が気になる」、変速音の体感度に対して「変速音が大きい」、嗜好度に対して「好ましい」の 3 形容詞で行う。評価音源は、2.2 節において車室内運転席と助手席間で計測した音源（実車計測音源）を用い、各アクセル開度の 2→3 速のみを使用する。

次に、実車を模した DS を用いて SD 法による 7 段階の絶対評価を Fig. 3 に示す 9 形容詞対で行う。評価音源として、実車を模した DS のエンジン音とアクセル開度 60%，2→3 速の実車計測音源からノイズリダクションを用いてエンジン音を抜き出した変速音を組み合わせた音源を使用する。

評価対象は変速音を含む加速走行音とし、全て防音室で評価を行う。評価における音源提示はヘッドホンで行い、順序効果を除去するため順不同に行う。評価音源の音環境条件は、相対評価および絶対評価どちらも被験者の頭部中心位置における A 特性ピーク音圧レベル約 70 dBA である。また、DS の実験において、被験者にはアクセルを踏んでいる 4 速までの評価を行ってもらい、ブレーキを踏んだ減速および停車に関しては評価しないように指示した。なお、被験者は正常な聴覚を有する成人 4 名である。

DS を用いた評価実験では、被験者ごとに評価がばらつく可能性がある嗜好性を除き、8 形容詞対で因子分析を行う。

3.2 アクセル開度による印象変化

2 章にて計測した音源および実車を模した DS を用いてアクセル開度の違いによる変速音の印象を把握する。

一対比較法により得られた変速音の知覚度、体感度および嗜好度の評価結果より、アクセル開度が大きくなるにつれて変速音の注目度が下がる傾向が得られた。また、変速音の体感度でも注目度と同様の結果が得られた。一方で、嗜好度に関しては逆の傾向となった。

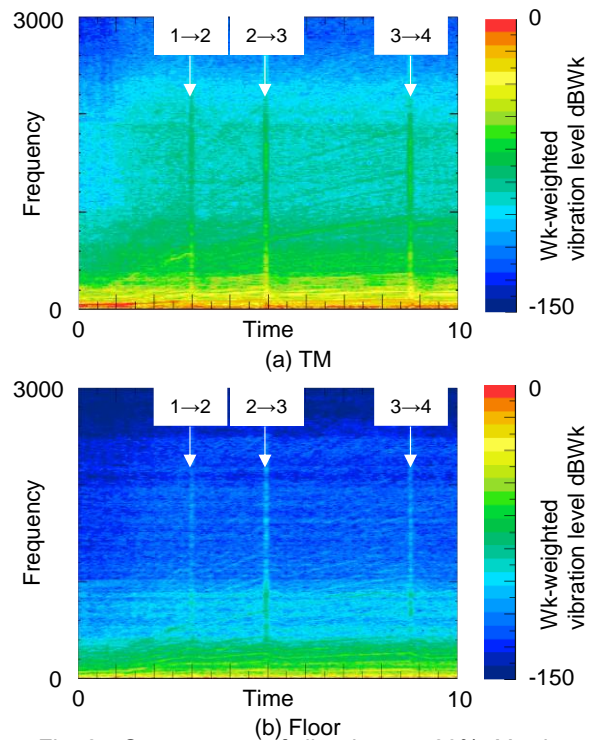


Fig. 2 Spectrogram of vibration — 20%, Y axis

	Very	Quite	Slightly	Neither Nor	Slightly	Quite	Very	
Conscious of shifting sound	1	2	3	4	5	6	7	Unconscious of shifting sound
Loud	1	2	3	4	5	6	7	Soft
Uncomfortable	1	2	3	4	5	6	7	Comfortable
No click feeling	1	2	3	4	5	6	7	Click feeling
Not powerfull	1	2	3	4	5	6	7	Powerfull
Profound	1	2	3	4	5	6	7	Light
Not high-quality	1	2	3	4	5	6	7	High-quality
No feeling of stir	1	2	3	4	5	6	7	Feeling of stir
Unpreferable	1	2	3	4	5	6	7	Preferable

Fig. 3 Questionnaire for the SD test

次に、因子分析の結果より、快適因子、迫力因子、軽快因子が得られ、累積寄与率が 85.3 %であることを確認した。快適因子より、アクセル開度が大きくなると快適感が増す傾向が得られた。一対比較法より、アクセル開度が大きいと変速音が目立ちにくくなるため、快適感が増したと考えられる。

以上より、変速音に対する印象として、アクセル開度の変化は快適感に影響することがわかり、高開度では変速音が目立ちにくくなり快適感が向上することが示唆された。

3.3 エンジン音の音色変化による印象変化

本評価で用いる音源は、DS ソフトに搭載されているエンジン音を E1 とし、乗用車で多く使われるエンジン形式を基に作成した音源を E2、スポーツカーのエンジン形式を基に作成した音源を E3 と定義する。

因子分析の結果より、変速因子、快適因子、迫力因子が得られ、累積寄与率が 88.8 %であることを確認した。快適因子×変速因子の散布図を Fig. 4 に示す。快適因子より E1 が最も良い結果となっており、変速因子においても同様の結果となった。エンジン音ごとの変速時直前の 1/3 オクターブバンドを比較すると、他のエンジン音よりも E1 は高周波帯域が大きいいため、変速音があまり目立たなかったと考えられる。

以上より、変速音に対する印象として、エンジン音の特性

によっても快適感に影響することがわかり、高周波帯域が大きいエンジン音は変速音が目立ちにくいことから快適感が向上することが示唆された。

3.4 変速音の周波数特性変更による印象変化

本評価で使用する音源は、加工していない元音源を Ori と定義する。1000 Hz 以下を ±10 dB した音源をそれぞれ Low+, Low- とし、1000~4000 Hz を ±10 dB した音源をそれぞれ Mid+, Mid- とし、4000 Hz 以上を ±10 dB した音源をそれぞれ High+, High- とする。

因子分析の結果より、快適因子、迫力因子が得られ、累積寄与率が 72.6% であることを確認した。快適因子×迫力因子の散布図を Fig. 5 に示す。快適因子より、高周波帯域が小さいと快適感が増す傾向にあることがわかった。3.3 節にて、高周波帯域が変速音の印象に影響する可能性が示唆されたが、変速音の高周波帯域が小さくなり、変速音が目立ちにくくなることで快適感につながったと考えられる。

以上より、変速音の印象には変速音の周波数特性が関わってくるということがわかり、特に高周波帯域が快適感に影響を与えていることが示唆された。

4. 複合刺激による変速音の印象把握

音の単体刺激ではなく、変速ショックによるシート揺動を組み合わせた複合刺激下における変速音の影響について、DS を用いた加速走行時の主観評価で検討する。また、実車にて評価を行い、DS で得られた快適条件の有用性を検証する。

4.1 変速音の周波数特性および変速ショックの大きさ変更による印象変化

3.4 節の主観評価に変速ショックを組み合わせ、複合刺激下において変速音の印象がどのように変化をするのかを把握する。

4.1.1 評価条件と変速ショック

本評価で使用する変速ショックは、変速ショックが大きくなればなるほど、シートの戻りが速く、エンジン回転数の戻りもショックに合わせて速くなる。また、変速ショックの変更は全てクラッチトルクを変更することで行い、変速ショックの大きさが小さい方から S, M, L と定義する。本評価で使用する音源は、3.4 節で使用した Ori および High+, High- とし、その他の実験条件は 3.1 節と同様である。

また、被験者に変速時に変速音と変速ショックのどちらが気になったか 7 段階のアンケートを取る。得られた結果を平均化し、変速音と変速ショックそれぞれの寄与率を算出する。

4.1.2 評価結果

因子分析の結果より、迫力因子、快適因子、変速因子が得られ、累積寄与率が 79.7% であることを確認した。快適因子×変速因子の散布図を Fig. 6 に示す。快適因子より M のような変速ショックが最も快適感が大きいことが確認できた。これは、変速音によらず M のような変速ショックでは、変速時の情報として作用していると考えられる。また、変速ショックが大きいと他音源よりも High+ の方が快適感が向上する傾向にある。加えて、High+ は変速ショックによらず迫力感が向上する傾向も見られた。

変速音と変速ショックの寄与率を Fig. 7 に示す。High+ は変速ショックによらず変速音の寄与率が増すことがわかる。したがって、変速音と変速ショックが変速時の情報として機能するためには、High+ のように高周波帯域が聞こえる方が良く考えられる。また、変速ショック S と L で比べた際に、変速ショック S の方が快適感が大きく、変速音の寄与率も大きいため、変速ショックよりも変速音の方が快適感に影響していることがわかる。

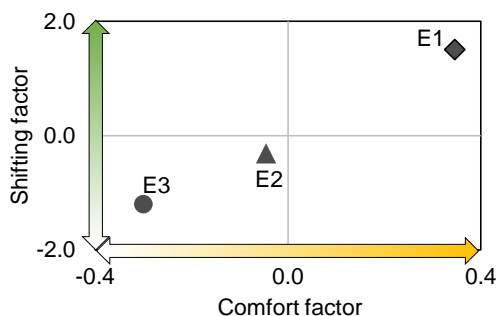


Fig. 4 Result of factor analysis for engine type

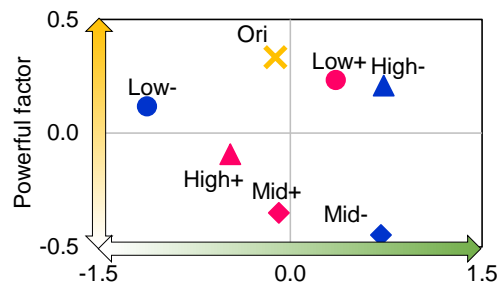


Fig. 5 Result of factor analysis for frequency characteristic

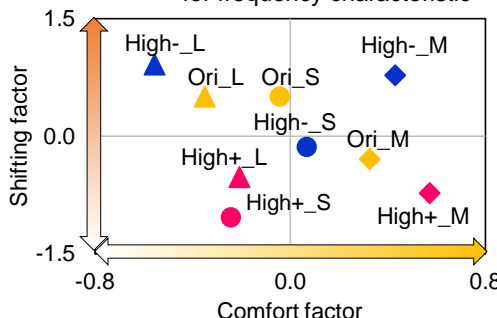


Fig. 6 Result of factor analysis for frequency characteristic and acceleration

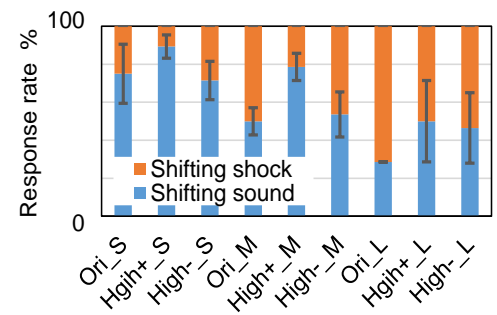


Fig. 7 Response rate of shifting sound and shock for frequency characteristic and acceleration

以上より、変速音と変速ショックの寄与率が快適感に関与していることがわかる。また、変速ショックよりも変速音の方が快適感に影響していることが示唆された。

4.2 実車試験における検証

実車にて主観評価を行うことで、変速音の印象への影響を把握し、DS で得られた快適条件の有用性を検証する。

4.2.1 評価条件

2.2 節で用いた計測点を数か所抽出し、変速音と変速振動を計測する。加えて、変速ショックの確認のために車体加速度も併せて取得する。

本評価は 1 km の周回コースにつき一音源とし、カーブを除いた直線部のみで評価する。また、評価はアクセル 30% で行う。なお、被験者は正常な聴覚を有する成人 5 名とし、その他の実験条件は 3.1 節と同様である。

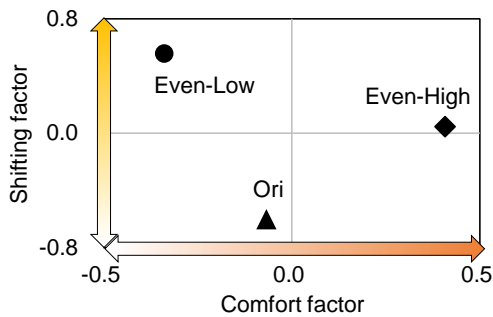


Fig. 8 Result of factor analysis for vehicle test

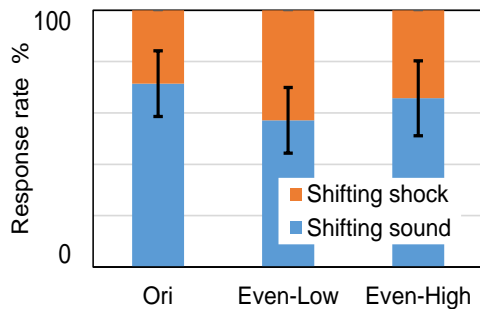


Fig. 9 Response rate of shifting sound and shock for vehicle test

DSのように全ての変速においてエンジン回転数 3000 rpm で一定に変速することが難しいため、2→3 速および 3→4 速にてエンジン回転数 3000 rpm 付近で変速するように設定した。加えて、変速ショックは変速機の変速時のかみ合いで発生するショックを使用するため、4.1 節のように変速ショックの調整は行わない。

また、変速音も変速ショックと同様に DS の評価のように音質を意図的に変化させることが難しいため、3.3 節の結果より車室内エンジン音の音質を変化させて評価を行う。本評価の加工は、1000 Hz 以上を高周波帯域とし、変速時のエンジン回転数 3000 rpm で 1000 Hz となる 20 次成分を目安とする。また、奇数成分はエンジン音の音質上の影響が大きいことが従来指摘されているため、偶数成分のみを加工する。そのため、評価音源は実車の車室内エンジン音を Ori とし、8~20 次成分を+10 dBA したエンジン音を Even-Low、20~40 次成分を+5 dBA したエンジン音を Even-High と定義する。Ori は通常通り被験者に走行してもらい、加工音源に関しては、Ori との差分をドアスピーカから出力する。なお、エンジン音の音圧ではなく、音質の違いによる評価のため、運転者耳位置の等価騒音レベルを Ori と同じになるように調整する。また、本評価ではロードノイズや風切り音は相対的に影響が小さいため、DS と同等の環境とみなす。

4.2.2 評価結果

因子分析より迫力因子、変速因子、快適因子が得られ、累積寄与率 79.5%を確認した。快適因子×変速因子の散布図を Fig. 8 に示す。快適因子より、Even-High の快適感が大きいことがわかる。Even-High では変速音が低く聞こえたというアンケート結果もあり、エンジン音の加工によって変速音の印象に変化があったと考えられる。加えて、変速因子より加工音源では変速音が気になりにくい傾向にある。変速ごとの音圧差もあるが、変速によらずエンジン音の加工によって Ori に比べると変速音が小さく聞こえたと考えられる。

Fig. 9 に寄与率を示すが、加工音源の方が Ori に比べて変速音の寄与率が小さいことがわかる。Even-High では、変速音の寄与率が Ori に比べて 1 割程度低くなり、加工音源によって変速音が気になりにくくなったことがわかる。また、

この変速音の寄与率が快適感に関与しているとも考えられる。一方で、Even-Low では他の音源に比べて変速音の寄与率が小さいにも関わらず、快適感が低い傾向にある。Even-Low はエンジン音に違和感があるというアンケート結果もあり、変速ショックよりも変速音だけでなくエンジン音を含めた車室内音が快適感に影響していると考えられる。

以上より、エンジン音を加工することで変速音の印象が変わることがわかり、変速音と変速ショックの寄与率が快適感に影響していることが示唆された。

4.2.3 DS での評価結果との比較

4.2.2 項にて得られた実車試験での評価結果と DS での評価結果を比較し、DS で得られた快適条件の有用性を検証する。

3.3 節にてエンジン音の形式により変速音の印象が変化することが示唆されており、特に高周波帯域が大きいエンジン音にて変速音が目立ちにくく、快適感につながるということがわかっていく。これは、実車試験でも同様の結果が得られた。

また、4.1 節にて変速音と変速ショックの寄与率が快適感に関与していることがわかり、変速ショックよりも変速音が快適感に影響していることが示唆されている。実車試験にて、Ori に比べて加工音源では、変速音と変速ショックの寄与率が DS の快適感のある寄与率と似ている。一方で、変速音だけでなくエンジン音を含めた車室内音が快適感に影響することが示唆された。

以上より、エンジン音の特性が変速音の印象に影響する点や変速音と変速ショックの寄与率が快適感に関与する点など、DS で得られた快適条件の有用性を検証できた。

5. 研究成果

- (1) エンジン音や変速音によって変速音の印象が変化することがわかり、特に変速音の高周波帯域が快適感に影響していることを主観評価より明らかにした。また、アクセル開度によっても変速音の印象は変化し、高開度では変速音が目立ちにくくなることもわかった。
- (2) 変速ショックを組み合わせることで、変速音と変速ショックの寄与率が快適感に影響を与えていることを明らかにした。また、変速音の高周波帯域が変速時の情報として機能し、快適感につながることもわかった。
- (3) 実車評価にて、エンジン音の高周波帯域が変速音に影響する点や変速音と変速ショックの寄与率が快適感に関与する点など、DS で得られた快適条件の有用性を検証できた。

参考文献

- (1) 横山一喜, 浅原康之, 戸井武司, 電気自動車のモータ音変更による加速音質への影響把握, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム論文集, **18-8**(2008)pp. 109-112.
- (2) 野澤駿, 戸井武司, 車室内暗騒音がエンジン音の認知に及ぼす影響, 自動車技術会論文集, **50-5**(2019)pp. 1415-1420.
- (3) 北原篤, 佐口隆成, タイヤの騒音低減技術, 日本音響学会講演論文集 (春), (2018)pp. 1441-1444.
- (4) 本地由和, スーパースポーツカーのサウンドデザイン—LEXUS LFA の事例—, 日本音響学会講演論文集 (秋), (2011)pp. 1451-1454.
- (5) 野島恵理子, 清水周作, 戸井武司, 自動または手動変速時における音および振動の影響把握, 日本音響学会講演論文集 (春), (2020)pp. 1369-1370.
- (6) 野島恵理子, 戸井武司, 自動または手動変速時における音と振動を考慮した操作感の向上, 日本音響学会講演論文集 (春), (2021)1-11-8.