

自動車車室内の音環境に基づくエンジン音認知および運転性能の向上 Improvement of Engine Sound Recognition and Driving Performance Based on Sound Environment in the Vehicle Interior

精密工学専攻 37 号 野澤 駿
Shun Nozawa

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への要求が高まっており、車室内音環境のサウンドデザインが望まれる⁽¹⁾。中でもカーオーディオシステムは快適性の要素の一つとして重要な役割を担っている⁽²⁾。また、環境問題への対策や燃費向上を目的に、モータのみで走行する電気自動車などの普及が急速に進んでいる。特に電気自動車は従来に比べて格段に静かであり、ドライバが感じる車室内音環境が変化している。そのため、エンジン音の低減によりロードノイズや風切り音などの車室内暗騒音（暗騒音）が相対的に目立つようになった。一方、エンジン音からエンジン回転数（回転数）や負荷など車両の状態が知覚できるため^{(3)~(4)}、エンジン音の低減やカーオーディオの使用によるエンジン音認知の低下で、思わぬ事故につながる可能性や運転性能の悪化が懸念される。

そこで本研究では、まず加速走行中に対し、暗騒音や音楽によるエンジン音認知への影響を主観評価で検討する。また、エンジン音に付加した音楽の音圧、周波数特性、定位のパラメータを変更した際の印象変化より、エンジン音認知が向上するパラメータを把握する。次に、エンジン音認知の低下および向上による運転性能への影響を、ドライビングシミュレータ（DS）を用いた運転タスクで検討する。また、実車走行を想定したシート揺動によるエンジン音認知および運転性能から、車室内での有用性を検討する。さらに、被験者が選定した音楽や異なる音楽の分解能による運転性能への影響を、DSを用いた運転タスクで検討する。被験者の生理計測も行い、音環境が運転性能に影響する要因のメカニズムを把握する。

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. パラメータ変更によるエンジン音認知⁽⁵⁾

本章では、エンジン音に付加した音楽の音圧、周波数特性および定位のパラメータ変更による主観評価を行い、印象変化よりエンジン音認知への影響を把握する。

2.1 評価条件

シェッフェの一対比較法（浦の変法）に基づき、「エンジン音の聞こえやすさ（明瞭感）」、「音楽の大きさ（体感音圧）」、「音楽の快適さ（快適度）」、「好ましさ（嗜好度）」を7段階で評価する。無響室で評価を行い、評価音源はそれぞれスピーカーで提示し、運転席における走行映像も提示する。なお、被験者は正常な聴覚を有する成人4名である。

エンジン音は5000 rpmで変速する加速走行音をDSで作成し、基準の定位方向の前定位（F）に固定する。音楽は洋楽男声ロック（HC）の冒頭部分で、サンプリング周波数が96 kHz、量子化ビット数が24 bitのハイレゾ音源を用い、これを基準の分解能とする。音楽の変更パラメータと加工方法による音環境条件をTable 1に示す。エンジン音に音楽を付加した条件をHC（F）と定義する。この音楽のA特性音圧レベルを20 dBA低減させる音圧変更をHC_S（F）、1000 Hz以下を20 dBA低減させる周波数特性変更をHC_F（F）と定義する。スピーカ

Table 1 Evaluation sound source

Condition	Change parameters	Processing method
HC(F)	—	—
HC_S(F)	Sound pressure	Decrease all band by 20dBA
HC_F(F)	Frequency characteristic	Decrease below 1000Hz by 20dBA
HC(R)	Sound localization	Move the speaker position backward
HC_S(R)	Sound pressure and sound localization	Decrease all band by 20dBA and move the speaker position backward
HC_F(R)	Frequency characteristic and sound localization	Decrease below 1000Hz by 20dBA and move the speaker position backward

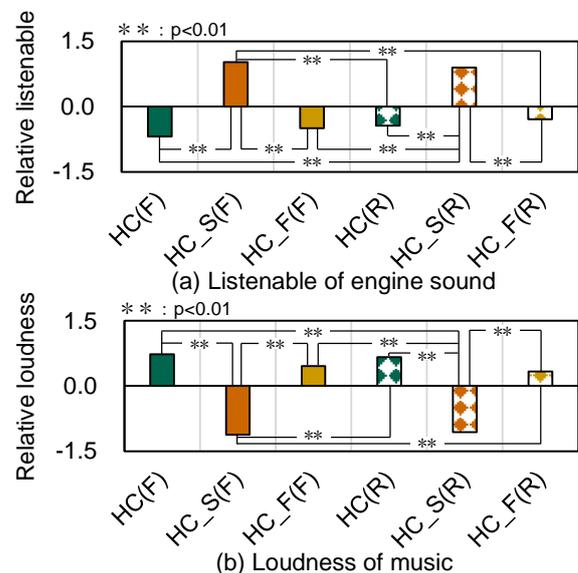


Fig. 1 Evaluation result by Scheffe's paired comparison

の配置を変え、音楽を後定位（R）に定位変更したHC（R）に対し、音圧または周波数特性の変更をそれぞれHC_S（R）、HC_F（R）とする。エンジン音は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で約70 dBAに統一し、HC（F）の音楽は約70 dBAとし、音楽の音圧変更は約50 dBA、周波数特性変更は約69 dBA、定位変更では前定位の音楽と同等の音圧とした。

2.2 評価結果と考察

一対比較法より得られたエンジン音の明瞭感および音楽の体感音圧の評価結果をFig. 1に示す。HC（F）はエンジン音の明瞭感が最も低く、音楽の体感音圧が高いことがわかる。また、音楽のパラメータ変更で体感音圧が低下し、エンジン音の明瞭感が向上することがわかる。今回の条件設定では音楽の音圧変更でエンジン音の明瞭感が最も向上するため、物理的な音圧低減の影響が大きいと考えられる。一方、音楽の定位に着目すると、前定位と同音圧の後定位でも音楽の体感音圧が低下し、エンジン音の明瞭感が向上することがわかる。

以上より、エンジン音と音楽の定位方向が異なると音楽の体感音圧が低下し、エンジン音認知が向上することが明らかとなった。

3. エンジン音認知の差異による運転性能

本章では、エンジン音の能動的な聴取は印象が変化すると考え、加速走行時のシフトアップによる運転タスクを DS で実施し、エンジン音認知による運転性能への影響を把握する。

3.1 エンジン音認知の低下および向上による運転性能

音楽付加や音楽のパラメータ変更によるエンジン音認知の低下および向上が運転性能に与える影響を明らかにする。

3.1.1 運転タスクと実験条件

DS による運転タスクとして、直線道路を静止状態から 4 速までパドルシフト操作で加速走行する。まず、タコメータを表示した練習走行を行う。次に、加速走行に十分慣れた上で、タコメータを表示せず 5000 rpm で変速するように教示した。1 回の加速走行を 1 試行とし、各条件で 4 試行を行う。

実験は 2 章の主観評価から HC(F), HC_S(F), HC_F(F), HC(R) に、エンジン音のみの条件として Ref を加え、計 5 種の音環境条件で運転タスクを行う。エンジン音は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で、5000 rpm の定常走行時を約 70 dBa とした。なお、被験者は正常な聴覚を有する成人 5 名で、その他の実験条件は 2.1 節と同様である。

3.1.2 運転性能の定義と考察方法

実験目的より、変速ごとではなく加速走行の一連の動作を検討する。Fig. 2 に被験者による運転タスクの加速走行例を示す。加速走行による 3 回の変速をそれぞれ第一変速、第二変速、第三変速とする。教示した回転数で変速する難易度が加速走行中に変化すると考えられる。そこで、各変速までの回転上昇率の比を難易度とし、各変速回転数に重みとして掛け合わせる。難易度は第一変速が 0.7、第二変速が 0.2、第三変速が 0.1 として、重み付けした各変速回転数の加算合計値を 1 試行ごとに算出する。さらに、各条件の 4 試行の平均値を運転能力とし、運転性能の指標と定義する。

また、実験中の各条件に対するコメントを実験終了後に聞き取り調査し、その回答も含めて考察を行う。ただし、被験者 5 名のうち 1 名は実験の目的にそぐわない運転を行っていたため以後の解析では除外し、被験者 4 名に対して考察する。

3.1.3 エンジン音認知の低下が与える影響

本項では、被験者ごとに音楽有無の運転性能を比較する。各被験者の運転能力を Fig. 3 に示し、5000 rpm に近いほど良いことを表す。運転能力を比較すると、音楽の影響度が被験者ごとに異なると推察されたため、被験者を 2 つの属性に分ける。運転能力の変化が小さい被験者 1 と 2 をタイプ A、

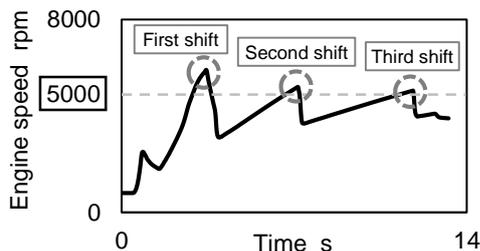


Fig. 2 Example of accelerated driving task by subject

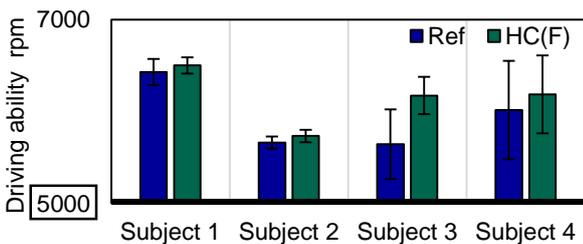


Fig. 3 Result of driving ability by with/without of music in each subject

運転能力の変化が大きい被験者 3 と 4 をタイプ B とした。

タイプ A は運転能力の変化が小さく、音楽の影響が小さい属性と推察される。音楽が流れても運転し易いとのコメントから、音楽よりもエンジン音に意識が向き、運転に集中できたと考えられる。このことから、タイプ A は運転中エンジン音に意識が向いており、音楽によるエンジン音認知の影響は小さく、意識や集中の要因が大きいと推察される。

一方、タイプ B は運転能力の変化が大きく、音楽の影響が大きい属性と推察される。これは音楽によってエンジン音認知が低下し、エンジン音のみの Ref よりも高い回転数で変速したと考えられる。また、音楽を聴きたい時はエンジン音が邪魔に感じるとのコメントから、エンジン音よりも音楽に意識が向き、運転に集中できなかったと考えられる。このことから、タイプ B は運転中音楽に意識が向いており、音楽によるエンジン音認知の影響が大きく、意識や集中の要因が小さいと推察される。

以上より、音楽によるエンジン音認知の低下が運転性能に影響し、被験者ごとに影響の生じ方に差異が見られることを把握した。また、音楽による運転性能はエンジン音認知に加え、意識や集中といった要因も影響することが示唆された。

3.1.4 エンジン音認知の向上が与える影響

本項では、音楽のパラメータ変更による運転性能を比較する。属性ごとの運転能力を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) に示すタイプ A の運転能力では、音楽のパラメータ変更による運転能力の変化が小さい。これは、エンジン音に意識を向けて運転していたため、音楽のパラメータ変更による運転能力への影響が小さいと考えられる。しかし、被験者 2 は音楽を後定位にすると運転能力が悪くなった。音楽を後定位にすると意識が向いて運転し難いとのコメントから、エンジン音への意識が低下し運転に集中できなくなったと推察される。

Fig. 4(b) に示すタイプ B の運転能力では、音楽のパラメータ変更で良くなる傾向が得られた。これは、音楽に意識を向けて運転していたため、音楽のパラメータ変更が運転能力に影響したと考えられる。特に、被験者 3 の運転能力は 2 章での主観評価によるエンジン音認知と傾向が概ね一致していることから、認知の向上が影響したと推察される。一方、被験者 4 は音楽の前定位における物理特性変更では運転能力の向上率は低いが、音楽の後定位による定位変更では運転能力が大きく向上している。音楽を後定位にすると気にならなくなるとのコメントから、音楽への意識が低下しエンジン音認知が高まり、運転に集中できたと推察される。

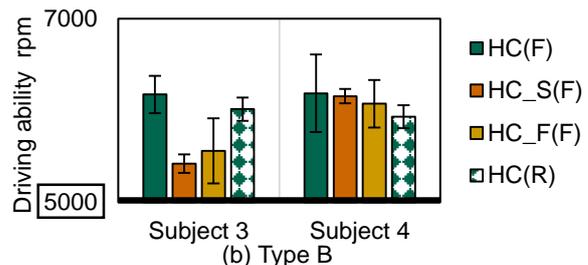
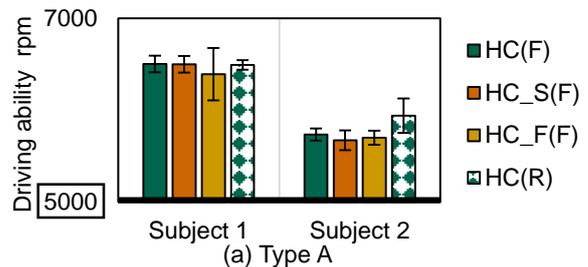


Fig. 4 Result of driving ability by change of parameter in each subject

以上より、音楽のパラメータ変更による影響は各被験者で異なるが、エンジン音認知が高まることで運転性能が向上し、エンジン音と音楽の定位方向が異なると、運転性能が向上することを把握した。さらに、エンジン音や音楽への意識をコントロールし、運転に集中させることで運転性能を向上できる可能性が示唆された。

3.2 実車走行を想定したシート揺動による運転性能

本節では、3.1節と同様の運転タスクを実施し、実車走行を想定したシート揺動によるエンジン音認知および運転性能への影響を把握する。また、シート揺動において音楽を後定位にする定位変更より、エンジン音認知が向上することによる運転性能への影響についても検討する。

3.2.1 実験条件

実験は防音室で行い、DSは7軸のモーションシミュレータを用いる。実験は3.1節の音環境条件よりHC(F)を用い、これをシート揺動がない条件とする。また、シート揺動を加えた条件をSV_HC(F)とし、音楽の後定位による定位変更をSV_HC(R)とする。なお、被験者は正常な聴覚を有する成人3名で、その他の実験条件および運転タスクは3.1.1項と同様である。

3.2.2 シート揺動の有無による影響

各被験者のシート揺動の有無による運転能力をFig. 5に示す。運転能力を比較すると、被験者5と6はシート揺動によって運転能力が悪くなることがわかる。これまで、音楽によるエンジン音認知の低下が運転能力の低下をもたらすことが確認されているため、シート揺動がエンジン音認知を低下させたと考えられる。また、エンジン音への意識が低下すると運転能力が低下することも確認されているため、シート揺動によってエンジン音への意識が低下したと推察される。一方、被験者7はシート揺動で運転能力が良くなることがわかる。シート揺動によってエンジン音に意識が向き、運転に集中できたことで運転能力が良くなったと推察される。

以上より、シート揺動はエンジン音認知を低下させ運転性能の低下をもたらす可能性が示唆された。

3.2.3 シート揺動における音楽の定位変更による影響

Fig. 6にシート揺動における音楽の定位変更による運転能力を示す。どの被験者も音楽を後定位とすると運転能力が良くなることが確認できる。そのため、シート揺動がある場合でも、エンジン音と音楽の定位方向が異なるとエンジン音認知が高まり、運転性能が向上することが明らかとなった。

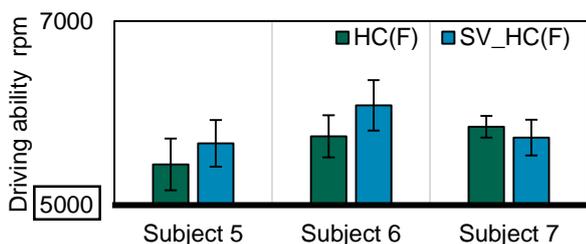


Fig. 5 Result of driving ability by with/without of seat vibration in each subject

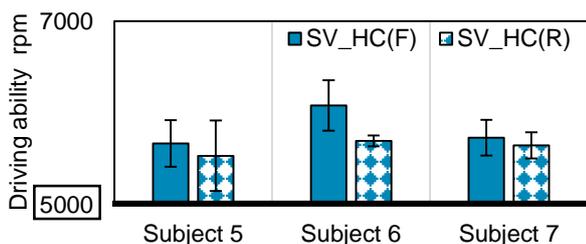


Fig. 6 Result of driving ability by change of sound localization in each subject

4. エンジン音認知以外の要因の検討

本章では、音楽の能動的な聴取では影響が変化すると考え、音楽は被験者が選定し、DSを用いた前走車追従の運転タスクを行う。また、運転性能に影響する要因として覚醒や意識、集中に着目し、被験者が選定した音楽や異なる音楽の分解能による運転性能への影響を把握し、被験者の心電や視線計測に基づき影響する要因のメカニズムを把握する。

4.1 実験概要

4.1.1 実験条件

実験は各被験者にあらかじめ調査した高揚する音楽(HH)と落ち着く音楽(LH)の2曲を使用する。サンプリング周波数が96 kHz、量子化ビット数が24 bitのハイレゾ音源(9624)に対し、サンプリング周波数を16 kHz、量子化ビット数を8 bitに分解能を変更したローレゾ音源(1608)を用いる。エンジン音に付加した各音楽のハイレゾ音源(HH_9624, LH_9624)とローレゾ音源(HH_1608, LH_1608)に、エンジン音のみのRefを加えた計5種の音環境条件で運転タスクを実施する。エンジン音は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で、50 km/hの定常走行時を約65 dBAとし、音楽は約65 dBAに統一した。なお、被験者は正常な聴覚を有する成人2名で、その他の実験条件は3.1.1項と同様である。

4.1.2 運転タスクと運転性能の定義

DSでの運転タスクは、直線道路上で加減速する前走車をアクセル操作のみで追従する。実験前に練習走行を行い、前走車追従に十分慣れた上で、車間距離を一定に保つよう教示した。なお、運転タスクでは心電と視線も同時に計測する。

前走車追従では車間距離のばらつきに着目し、運転性能の指標として車間変動を定義する。車間距離データにおける標準偏差の値を車間変動とする。車間変動の値は小さいほど車間距離のばらつきが小さく、値が大きいほど車間距離のばらつきが大きい。車間変動は小さいほど良いと判断する。

4.1.3 心電計測と視線計測

心電計測による覚醒度の評価ではLF/HFを採用する。LF/HFは交感神経と副交感神経のバランスを表し、交感神経活動の指標に利用される。LF/HFの値は大きいと交感神経優位、値が小さいと副交感神経優位の状態と考え、LF/HFの値が大きいと覚醒度が高く、値が小さいと覚醒度が低いと判断する。

視線計測による運転タスクの集中度の評価では、注視点の停留時間を採用し、運転タスクにおいて注視点が停留した時間の平均値を停留時間とする。予備実験より、停留時間が短いほど運転性能が良くなる傾向が得られたため、本研究では停留時間が短いほど集中度が高いと判断する。

4.2 被験者が選定した音楽による影響

被験者の心電、視線計測および運転タスクより、4.1節に基づきLF/HF、停留時間および車間変動を算出する。各被験者でRefを基準に正規化し、各条件を相対的に比較する。

4.2.1 高揚する音楽と落ち着く音楽による影響

被験者ごとに正規化したLF/HF、停留時間、車間変動をそれぞれFig. 7, Fig. 8, Fig. 9に示す。まず、Fig. 7に示すLF/HFより、被験者が選定した高揚する音楽は相対的に覚醒度が高くなることがわかる。そのため、主観的に選定した音楽は覚醒度としても傾向が現れることが明らかとなった。次に、Fig. 8に示す停留時間より、高揚する音楽よりも落ち着く音楽の停留時間が短くなることを確認でき、高揚する音楽よりも落ち着く音楽の集中度が高いと考えられる。

さらに、Fig. 9に示す車間変動より、被験者8は落ち着く音楽、被験者9は高揚する音楽の車間変動が良くなることを確認できる。予備実験より、被験者8は覚醒度が低くなるほど車間変動が良く、被験者9は覚醒度が高くなるほど車間変動が良くなることを確認しているため、どちらの被験者も運

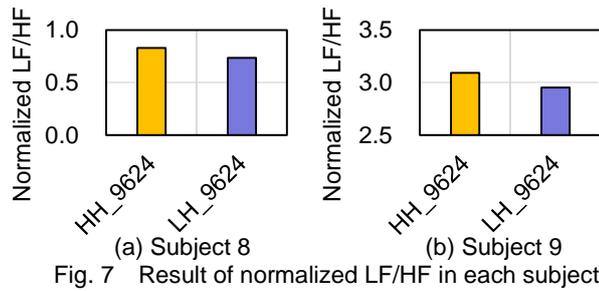


Fig. 7 Result of normalized LF/HF in each subject

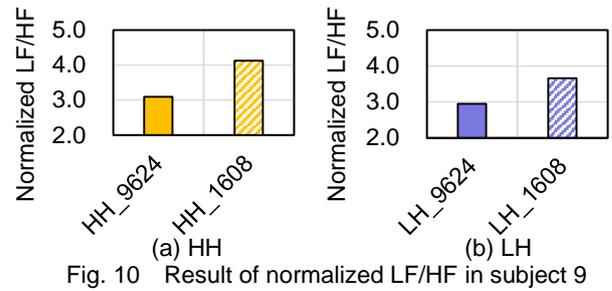


Fig. 10 Result of normalized LF/HF in subject 9

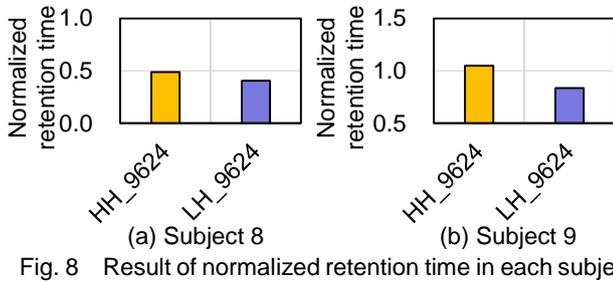


Fig. 8 Result of normalized retention time in each subject

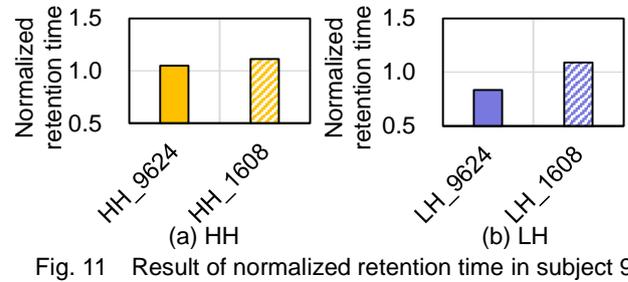


Fig. 11 Result of normalized retention time in subject 9

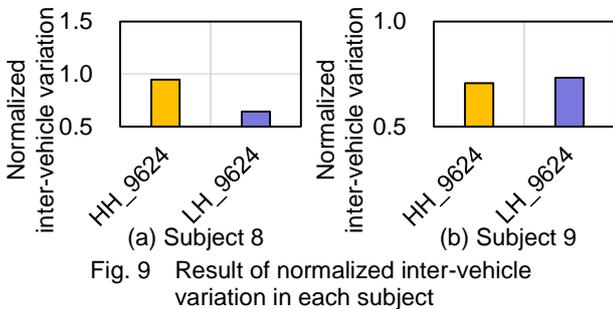


Fig. 9 Result of normalized inter-vehicle variation in each subject

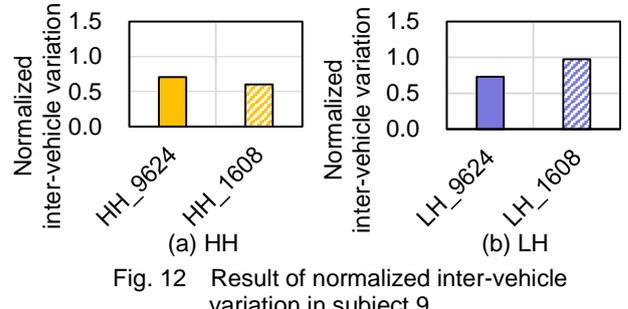


Fig. 12 Result of normalized inter-vehicle variation in subject 9

転性能には覚醒度が影響したと考えられる。また、どちらの被験者も落ち着く音楽の集中度が高いため車間変動が良くなると予測されるが、被験者9は逆の傾向を示している。このことから、被験者8は覚醒度に加えて集中度も影響し、被験者9は覚醒度の影響が大きいと推察される。

以上より、生理計測による傾向を被験者ごとに比較することで運転性能に影響した要因のメカニズムを検討でき、覚醒度や集中度が運転性能に影響することが明らかとなった。

4.2.2 音楽の分解能変更による影響

本項では、心電および視線計測のデータが安定していた被験者9に対し、音楽の分解能を変更した際の影響を検討する。各音楽の正規化した LF/HF、停留時間、車間変動をそれぞれ Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 に示す。まず、LF/HF と停留時間は各音楽の傾向が一致し、ハイレゾ音源は覚醒度が低く、停留時間が短くなるため集中度が高くなることが確認できる。これは、原音再現性による影響と考えられ、特に覚醒度よりハイレゾ音源はリラックス効果があると推察される。

次に、車間変動より高揚する音楽ではローレゾ音源、落ち着く音楽ではハイレゾ音源の車間変動が良いことが確認できる。これは音楽の分解能が運転性能に影響したと考えられ、高揚する音楽では覚醒度、落ち着く音楽では集中度による影響が大きいと推察される。そのため、音楽の分解能は運転性能に影響するが音楽によって影響の生じ方が異なり、適した音楽の分解能によって運転性能を向上できる可能性が示唆された。

以上より、ハイレゾ音源はリラックス効果があることが示唆された。また、音楽の分解能によって覚醒度または集中度が変化し、運転性能に影響することがわかった。さらに、人に適した音楽の分解能にすることで運転性能の向上が期待できることが明らかとなった。

5. 研究成果

- (1) 車室内における音楽はエンジン音認知に影響し、運転性能の低下の要因であることを把握した。また、音楽の体感音圧を低下させることでエンジン音認知が高まり、運転性能が向上することを明らかにした。
- (2) シート揺動によりエンジン音認知の低下が懸念されるが、エンジン音と音楽を異なる定位方向とすることで運転性能を向上できる可能性が示唆された。
- (3) 運転性能に影響する要因として、エンジン音認知に加えて覚醒度や集中度が影響することが明らかとなった。また、認知には主観評価、覚醒度や集中度には被験者の生理計測が有用であることがわかった。
- (4) 適切な音楽の定位方向や分解能にすることで、運転性能が向上するため、覚醒度や集中度など人の特性を考慮した音環境の構築が重要である。

参考文献

- (1) 戸井武司, 機能性のある快適な音をどう創るか, 自動車技術, 自動車技術会, **70-7** (2016) pp. 12-19.
- (2) 青木諒, 飯田裕介, 日高倫明, 長谷川光司, 自動車走行雑音を考慮した車室内音響の音質評価について, 音講論集(春), (2017) pp. 1217-1218.
- (3) 野澤駿, 大坪章人, 戸井武司, 走行音の周波数特性および定位変更による印象への影響把握, 音講論集(春), (2018) pp. 1211-1212.
- (4) 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, 自技会講演予稿集(秋), 20186256, 158-18 (2018) pp. 1-5.
- (5) 野澤駿, 戸井武司, シート揺動の有無がエンジン音認知および運転性能に及ぼす影響, 音講論集(春), (2019) 1-2-14.