

研究速報

車内快適性と走行状況の認知性能を両立する電気自動車車内音についての基礎検討*

吉田 準史*¹ 岡林 尚樹*¹ 中迫 健也*¹

キーワード 車内快適性, 車速認知性能, レーンキープ性能, ドライビングシミュレータ
Interior comfortableness, Vehicle speed recognition ability, Lane keep ability, Driving simulator

1. 背景

近年, 環境性能やエネルギー問題などからハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの普及が進みつつある。これらの自動車では従来の内燃機関エンジンによる音・振動が減少又は消失することにより走行中, 特に加速時の車内音低減や, それに伴う車内音静粛化による不快感や高級感などの音質向上が期待される [1, 2]。その一方で, 走行中の車内音は不快感増大の要因となるだけではなく, 車外の歩行者や, 時にはドライバーにとって車両の走行状況を把握するための重要なインフォメーションとなる場合もありうる [3, 4]。このことから先行研究では加速時のエンジン音を対象に, ドライビングシミュレータを用いた車内音や車速認知性能に関する調査が行われ, エンジン音が車速認知性能に寄与することも報告されている [5, 6]。

そこで本研究では, 電気自動車に着目し, エンジン音がなくロードノイズやウィンドノイズが主となる車内音を対象に, 走行中の車両インフォメーションを低下させずに車内快適性を向上するために望ましい車内音特性を把握することを目的にドライビングシミュレータを用いた車内音評価及び車両走行状態の認知性能の評価を行う。

2. ドライビングシミュレータを用いた主観評価

2.1 実験システム

本研究では, Fig. 1 に示すドライビングシミュレー

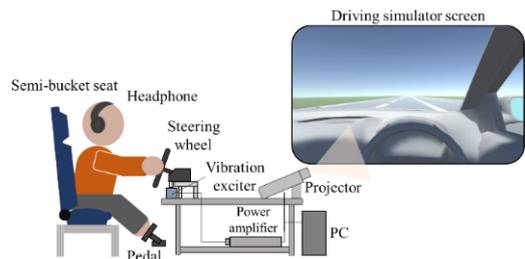


Fig. 1 Employed driving simulator system for subjective evaluation test.

タを用いて走行中の車内音や運転中の車両走行状態認知性能の評価を行った。

本シミュレータでは, アクセルペダルやブレーキ, ステアリング (Logicool 社製 G29) による車両コントロールが可能であることに加え, 走行中の車内音及び, 振動刺激としてシステムの都合上, ステアリング振動のみ再現可能なシステムを準備した。車内音提示にはヘッドホン (Audio-Technica 社製 ATH-M40x) を使いパーソナルコンピュータ (PC) から車速に応じた車内音をバイノーラル再生した。そしてステアリングからの振動刺激提示には加振器 (The Modal shop 社製 2007E) を使い, 音再生と同じ PC から振動用の信号を再生した。また, Fig. 1 右図のように車内からの前景を投影する装置としてプロジェクタ (BenQ 社製 Mw632ST) を使用し, 縦 82.14 cm × 横 148.85 cm (66 インチ) の景色を, 2.1 m 前方の位置に投影した。

2.2 提示刺激

ドライビングシミュレータを用いた主観評価実験を実施するにあたり, 電気自動車走行時に実測した各車速でのステアリング振動及び車内音と同等のレベル及び周波数特性の信号が再生されるように調整された信号が加振器及びヘッドホンから再生された。一例として, 本シミュレータ上で 60 km/h 及び 100 km/h で走行した際の車内音及びステアリング振動 (上下方向) を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 のように本シミュレータでは最大 65 dB 程度

* Consideration of electric vehicle interior noise characteristic providing compatibility between the comfort and the cognition performance of vehicle running situation, by Junji Yoshida, Nawoki Okabayashi and Kenya Nakasako.

¹ 大阪工業大学
(問合せ: 吉田準史 〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1 大阪工業大学機械工学科 e-mail: junji.yoshida@oit.ac.jp)
(2023年4月17日受付, 2023年7月4日採録決定)
[doi:10.20697/jasj.79.11.548]

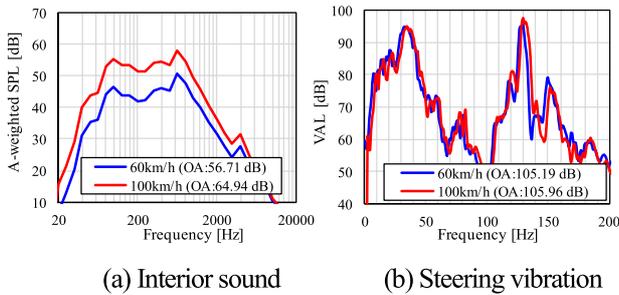


Fig. 2 Presented interior noise and steering vibration at 60 and 100 km/h.

Table 1 Presented interior sound condition.

Condition	Modified frequency band [Hz]	Modified level in SPL [dB]	Loudness at 60 km/h
A (Original)	—	—	10.1
B	~300	+15	18.3
C	~300	+10	14.5
D	~300	-10	8.2
E	300~800	+15	15.1
F	300~800	+10	12.7
G	300~800	-10	9.4
H	800~	+15	15.8
I	800~	+10	13.3
J	800~	-10	8.9

の騒音レベル及び 105 dB 程度の振動加速度レベルの音、振動が、後述する走行コースを運転中に再生された。そしてシミュレータを用いた主観評価では、実車相当のステアリング振動及び車内音を基準刺激とし、車内音の周波数特性を様々に変更した音を別途準備し、音条件を変更した際の車内音快適性や走行中の車両状態認知について評価を行った。

走行中に参加者に提示される車内音条件としては上述の基準音に対してフィルタ処理を施すことにより Table 1 に示すような A~J の 10 種類の音源を準備した。

Table 1 に示すように今回はロードノイズが主となる低周波帯 (~300 Hz)、ウィンドノイズが主となる高周波帯 (800 Hz~)、その中間にあたる中周波帯 (300~800 Hz) の 3 帯域で音圧レベルを変更した音源を準備した。提示音 A は電気自動車の実測相当の車内音 (基準音) であり、その他の音 (B~J) については、基準音に対してフィルタ処理を施し、周波数特性を変更した。B~D は低周波帯を増減 (+15~-10 dB)、E~G は中周波帯を増減 (+15~-10 dB)、H~J は高周波帯を増減 (+15~-10 dB) した音源である。これらと基準状態のステアリング振動を運転状況に応じて (車速に応じて増減する刺激として) シミュレータを操作する実験参加者に提示した。

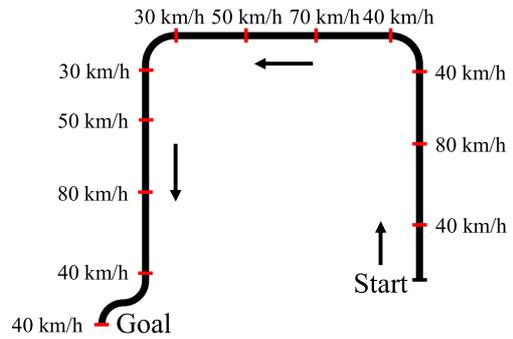


Fig. 3 Driving course of simulator for subjective evaluation.

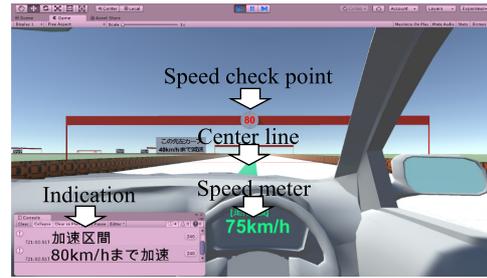


Fig. 4 Front view from driver in the evaluation test employing driving simulator.

不快感について*

- かなり不快
- 少し不快
- どちらでもない
- あまり不快ではない
- 不快ではない

Fig. 5 Prepared category for interior noise evaluation about uncomfortableness.

2.3 実験手続きと参加者

本ドライビングシミュレータを用いた主観評価では、Fig. 3 に示すようなコースを作成した。

本コースは全長 1 km 程度、幅 15 m 程度であり、複数の地点 (上図赤線部及び下図 Speed check point) に速度標識 (30~80 km/h) を取り付け、走行時の車速は常時車速計 (Fig. 4 Speed meter) で示される。参加者は運転中、速度標識を通過する際に標識で指示された速度となるように指示された。更に走行中はセンターライン (Fig. 4) から車両が逸脱しないように走行することも指示され、実走行に近い運転状況を再現した。

本コースの走行にはおおよそ 100 秒程度を要し、実験参加者は走行終了後に Fig. 5 に示すようなアンケート形式で走行中の車内音全体の快適性についてカテゴリから選択する形式で回答を行った。

また、走行中の車両状況把握のため走行時の車速及

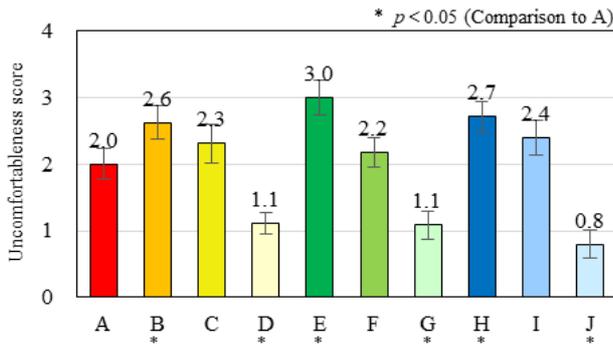


Fig. 6 Uncomfortableness score of each condition.

び位置情報を 0.5 秒ごとに記録した。本評価を 10 種類 (A~J) の音条件を対象におのおの実施した。

本実験では複数回評価を行い、その平均値や標準偏差を用いた分析を行うために、実験参加者は各条件をおのおの 3 回繰り返し評価することとした。これを全 10 音条件で行うため、全 30 回の評価を行うこととなった。また、参加者の負担を考慮し 15 分程度で終了する 5 回ごとにセッション分けして実施したため各参加者は計 6 セッションの実験を実施した。実験には、本学の倫理委員会によって承認されたインフォームドコンセントを得た 20 歳代の男性 13 名、女性 2 名が参加した。よって実験の総試行数は、30 回 × 15 人 = 450 回、同条件では 3 回 × 15 名 = 計 45 回となった。なお、本評価前に参加者は運転操作に慣れるための試行を全音条件で実施した。

3. 実験結果

ここではドライビングシミュレータを用いた音評価及び車両コントロール結果を分析し、音条件による不快感や走行状況認知性能への影響を把握する。

3.1 不快感について

シミュレータ上のコースを全区間走行した際の不快感について、非常に不快：4、少し不快：3、どちらでもない：2、あまり不快ではない：1、不快ではない：0 と数量化し、各条件ごとに平均した結果を Fig. 6 に示す。エラーバーは標準誤差を示す。

この結果、基準条件とした A 条件に対し、低周波帯、中周波帯、高周波帯をおのおの 10 dB 低減した D, G, J 条件では大幅に不快感が低減している様子が分かる。そして A 条件と各条件との不快感スコア差の有意性を検定したところ、いずれの音条件についても A 条件と比べ有意差が見られた。なお、今回の検定では A 条件とその他の条件を対象におのおの *t* 検定を行い有意確率が 0.05 未満のものを有意差ありと判断した。また、低周波帯、中周波帯、高周波帯をおのおの 15 dB 増加した B, E, H 条件では有意に不快感の増大 (悪化) が

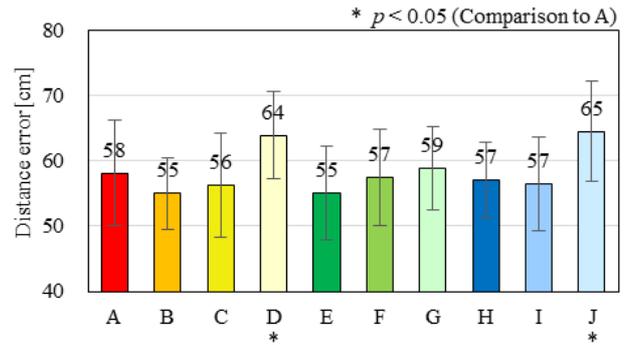


Fig. 7 Lane keep ability score in each condition.

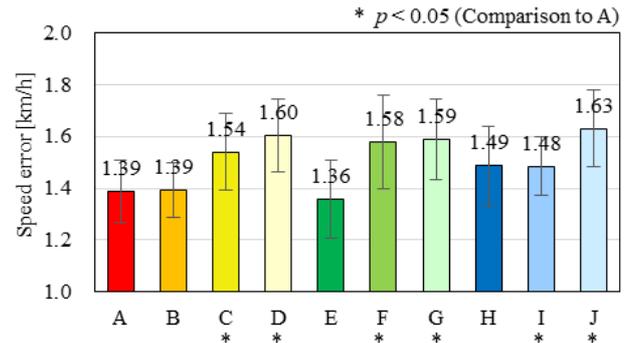


Fig. 8 Speed error score in each sound.

見られ、周波数帯に関わらず音の増大/低減により不快感が悪化/低減する傾向が見られた。この要因として Table 1 に示したように帯域ごとに音を増大/低減することによってラウドネスが変化しており、その要因が大きいことが分かる。一方で A 条件と J 条件のラウドネス差は大きくないものの、不快感の差は最大となっており、大きさに加えて周波数特性も不快感に影響を及ぼしていることが考えられる。

3.2 走行状況認知性能

ここでは代表的な走行状況認知性能の一つとして、車両を定められた位置 (レーン) で走行させることができているか否かを評価する。そのため 0.5 秒ごとに保存された車両の幅方向の中央位置とセンターラインとの位置との偏差を取得し、その値の絶対値の全記録時間での平均を当該条件でのレーンキープ性能 (距離誤差) として算出した。このレーンキープ性能を音条件ごとに平均した結果を Fig. 7 に示す。なお、ここでもエラーバーは算出されたレーンキープ性能の標準誤差を示す。

この結果、基準条件とした A 条件に対して大きな差が見られない音条件が多かったものの、低周波あるいは高周波帯の音を 10 dB 低減した D 及び J 条件ではレーンキープ性能の有意な低下 (距離誤差の拡大) が見られた。一方で、中周波帯を低減した G 条件では大きな悪化は見られなかった。また、音を増大した場合は、レーンキープ性能の有意な向上は見られなかった。こ

このことから、音の低減は不快感低減には有効であるものの、低周波帯や高周波帯の走行音低下は車両状況認知性能が悪化する可能性があることが判明した。そしてこのような結果が得られた要因としては、今回用いた電気自動車の走行中騒音において、低周波帯はロードノイズ、高周波帯はウィンドノイズが主要な音源になる場合が多い [7] ことから車速に依存してそのレベルが変化する。しかし、低周波帯や高周波帯のレベルがオリジナル条件 (A 条件) と比べ低減することで、これらの帯域の車速変化に応じた音変化の検知が鈍くなり車速認知性能が低下したことが想定される。そしてコーナリング時などで運転者が想定する車速と実車速がずれ、車両がセンターラインから離れた可能性が考えられる。その検証として、速度誤差を各音条件で求めた (Fig. 8)。ここでの速度偏差は、Fig. 3 で示した車速チェックポイントにおける指示車速と実際の車速との偏差の絶対値を全チェックポイントで平均した値を当該条件での速度誤差として求めた。ただし本車速誤差の評価では前述のレーンキープ性能のように 0.5 秒間隔での継続的な分析とは異なり、速度標識地点でのみの評価である。よって本分析ではコース走行時全体としての車速のずれ (オーバスピード, アンダスピード) は把握できず、レーンキープ性能と対応した分析でないことから参考データとしての扱いとなる。

この結果、わずかではあるものの、低周波、高周波帯を 10 dB 低減した D 及び J 条件での速度誤差が他条件と比べ大きいことが確認された。このことから、前述のレーンキープ性能の誤差増大は音による速度変化認知が影響している可能性が示唆された。

4. 車内快適性と車両状況認知性能を両立する条件についての考察

今回シミュレータを用いた車内快適性及び車両状況認知性能を評価した結果、いずれの周波数帯においても音圧レベル上昇の場合、不快感が増加し、低減の場合は改善が見られた。一方でレーンキープ性能については、低周波帯や高周波数帯を低減した際に車両認知性能の悪化が見られた。これは、低周波帯は主にロードノイズから構成される場合が多く [7]、この音が車内の快適性悪化の要因にはなるものの、そのレベルがある程度 (本実験では車速 60 km/h において 200 Hz 帯で 40 dB 程度) 以下になると、ロードノイズから得られるインフォメーションが低減し、車両状態の認知性能低下することが考えられる。高周波帯ではウィンドノイズが支配的 [7] となり快適性悪化に寄与するものの、今回の音源のように 60 km/h 走行時車内音の 2 kHz 帯で 20 dB 以下まで低減した際には、音の変化を知覚す

ることによる車両状態認知性能が低下する可能性が考えられる。一方で中周波帯については、その低減により快適性は有意に向上するもののレーンキープ性能に有意な低下は見られなかった。これは、中周波帯はもともとエンジン音が含まれ易い周波数帯域であることから、今回対象とした電気自動車ではそのようなエンジン系伝達音が含まれず、当該帯域の音からは車両状態を想定できるような情報が含まれていなかったことが要因として考えられる。これらのことから電気自動車を主とする次世代自動車においては、車内快適性と車両認知性能との両立には中周波数帯の低減が有効であることが示唆された。

5. ま と め

本研究では、電気自動車に着目し、エンジン音がなく、ロードノイズやウィンドノイズが主となる車内音を対象に、走行中の車両インフォメーションを維持しながら車内快適性を向上するために望ましい車内音の特性を把握することを目的にドライビングシミュレータを用いた車内音及び車両状況の認知評価を行った。実験ではドライビングシミュレータを用い、ロードノイズやウィンドノイズからなる様々な周波数特性を持つ車内音を提示し、その快適性及び運転中のレーンキープ性能を評価、分析した。その結果、低周波帯、中周波帯、高周波帯いずれの帯域の音圧レベルを低減した場合も快適性の有意な改善は見られたものの、車両状況認知については、低周波帯や高周波帯を低減した場合、その精度低下が見られたが中周波帯低減の場合には有意な低下は見られなかった。以上のことから、今回対象とした 300~800 Hz 帯のような中周波帯の低減は車内の不快感改善と走行状況の認知性能を両立するために有効な低減帯域であることが分かった。

文 献

- [1] 橋本竹夫, “自動車騒音の音質改善について,” 自動車技術, 49(6), pp. 65-70 (1995).
- [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, 34, 187-193 (2003).
- [3] 山口雅夫, 渡辺泰英, 前田 修, 大久保信行, 戸井武司, “視聴覚情報および運転意志を考慮した EV 走行音の印象変化,” 自動車技術会論文集, 45, 859-864 (2014).
- [4] 山内勝也, “次世代自動車における接近通報音のデザイン,” 音響学会誌, 75, 73-80 (2019).
- [5] Y. Sukegawa, S. Nishiwaki and J. Yoshida, “Influence of engine noise in cabin on controlling the vehicle speed,” *Proc. Internoise 2019*, pp. 1-10 (2019).
- [6] 吉田準史, 助川吉行, 吉岡毅二, “車速認知と車内快適性の両立を目的とした車内音・振動に関する検討,” 自動車技術会論文集, 52, 171-176 (2021).
- [7] 星野博之, 小沢義彦, “車内音を構成する音の要素とその評価,” 豊田中央研究所 R&D レビュー, 30(3), pp. 29-38 (1995).