

快適感および覚醒感向上のための 自動車車室内の音環境および振動環境の構築

Construction of Sound and Vibration Environment in the Vehicle Interior for Improving of Comfortable Feeling and Awakening Feeling

精密工学専攻 11号 江口 彰一
Shoichi Eguchi

1. はじめに

近年、ハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの次世代自動車の普及が急速に進んでいる。旧世代自動車と比較してエンジン音が低減しており、自動車車室内における音環境が大きく変化している。従来研究では、タイヤやサスペンションなどの足回りにおいて、走行性能を向上させつつ走行音の低減が報告されている⁽¹⁾。また、走行音や走行振動の変化によって乗り心地が変わることが報告されている⁽²⁾。

そこで本研究では、車室内のロードノイズを含む走行音および走行振動に着目し、走行音の音圧レベルおよび周波数特性、走行振動の振動加速度レベルおよび振動の有無などを変更した際の快適感および覚醒感への影響を主観評価および客観評価より把握する。また、自動車の運転に対する嗜好を設問調査より把握し、嗜好の違いによる評価の傾向を把握する。さらに、主観評価に基づき運転感覚モデルを構築し、快適感および覚醒感を推定する。加えて、モデルより快適感および覚醒感それぞれについて各パラメータの適切な値を推定し、快音および快振の提案を行う。

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・コンセントを行った上で、実施している。

2. 単一刺激および複合刺激による印象変化の把握

2.1 振動の有無による印象変化の把握⁽³⁾

本実験の走行音と振動有条件 (Sound+Vibration) では、被験者にドライビングシミュレータ (以下、DS と表記する) に乗ってもらい評価を行う。走行音と振動無条件 (Sound) では、防音室で評価を行い、振動の提示は行わない。Fig. 1 に実験風景を示す。被験者はイヤホンおよび外部音を遮断するためのイヤーマフを装着し、音の提示を受ける。振動の提示は DS で行う。また、被験者には Fig. 2 に示す直線道路を 60 km/h で定常走行する運転タスクを課す。提示音は平滑路 (Smooth road) で測定した 4 種類のタイヤの走行音、1S, 2S, 3S, 4S と悪路 (Bad road) で測定した 4 種類の走行音、1B, 2B, 3B, 4B を用いる。なお、全提示音の A 特性音圧レベル (以下、 L_A と表記する) を 71.2 dB(A) に統一した。平滑路の走行音を曝露する際の提示振動は、国際ラフネス指数 (International Roughness Index: 以下、IRI と表記する) より、高速道路や新しい舗装相当である IRI 2 m/km を使用し、悪路の走行音を曝露する際の提示振動は、古い舗装道路や非舗装道路相当である IRI 6 m/km を使用する。また、評価に用いる形容詞対



Fig. 1 Experiment condition



Fig. 2 Driving scene

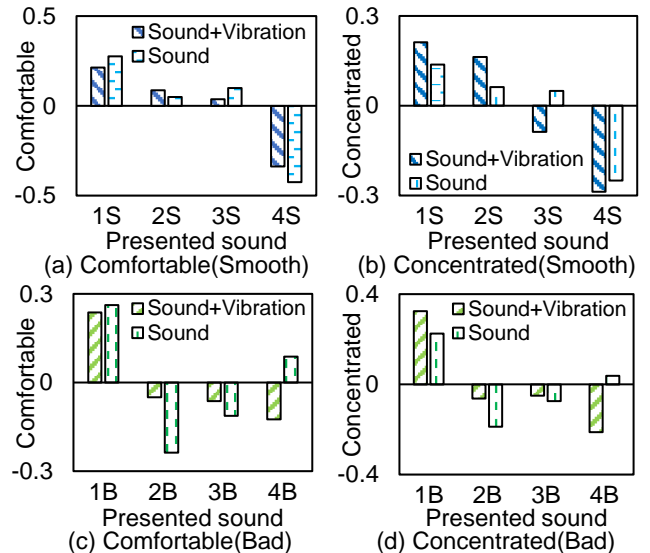


Fig. 3 Evaluation result by Scheffe's paired comparisons

は「快適な」「集中できる」とし、平滑路条件 (Smooth) と悪路条件 (Bad) のそれぞれに対してシェッフェの一对比較法 (浦の変法) による評価を行った。被験者は 20 代 10 名である。

評価結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a), (b) より、平滑路条件において、どちらの評価形容詞においても 2S と 3S において振動の有無によって変化している。2S と 3S では音の中心周波数 63 Hz 以下および 2000 Hz 以上が異なっていることを確認しており、平滑路条件においては振動の有無によってそれらの帯域に異なる影響を及ぼしたことで評価の傾向が異なると推察される。次に Fig. 3(c), (d) より、悪路条件において、「快適な」においては 2B, 3B, 4B の嗜好順が振動の有無によって真逆になっており、「集中できる」においても 2B, 3B, 4B の嗜好順が振動の有無によって変化している。振動の影響を受けていない 1B と、振動の影響を受けた 3 音源で大きく異なるのは中心周波数 125-500 Hz の帯域であることを確認しており、悪路条件では振動の有無によって中心周波数 125-500 Hz の帯域に異なる影響を及ぼしたことで評価の傾向が異なると推察される。

2.2 音および振動の変化による印象変化の把握⁽³⁾

本実験における音および振動の提示方法、運転タスクは 2.1 節と同様である。提示する評価パターンは音の大小 (Ss, Ls) と振動大小 (Sv, Lv) を組み合わせた 4 種類である。それぞれのパターンにおける走行音の L_A と走行振動の振動加速度レベル (以下、VAL と表記する) を Table 1 に示す。評価は Visual Analogue Scale (以下、VAS と表記する) 検査による主観評価と唾液アミラーゼ計測による客観評価を行う。5 分間の安静、眠気についての VAS を回答および唾液アミラーゼ計測、10 分間の運転タスク、快適感、眠気についての VAS を回答および唾液アミラーゼ計測、の流れを 2 回行う。

Table 1 Sound & Vibration levels

	Ss_Sv	Ss_Lv	Ls_Sv	Ls_Lv
L_A [dB(A)]	60.0	60.0	63.0	63.0
VAL [dB]	79.0	86.0	79.0	86.0

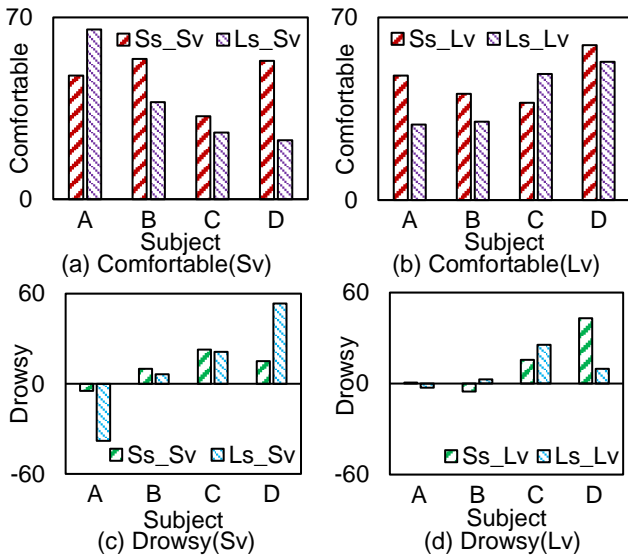


Fig. 4 Evaluation result by Visual Analogue scale(VAS)

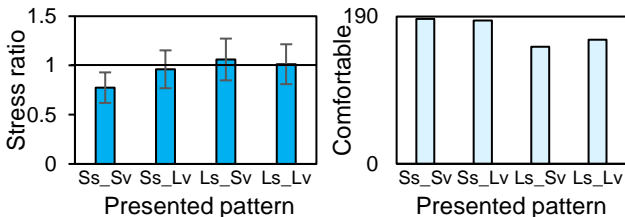


Fig. 5 Evaluation result by Saliva amylase test

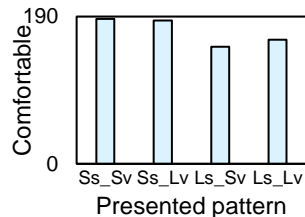


Fig. 6 Evaluation result by VAS

被験者は 20 代 4 名である。概日リズムを考慮し、評価の実施時間を被験者ごとに統一して評価する。

快適感の 1 回目と 2 回目の平均を Fig. 4(a), (b) に示す。Sv と Lv で比較すると、被験者 A と C は振動によって評価の傾向が逆転しているが、被験者 B と D は評価の傾向が変化していない。被験者 A は振動が小さいと音が大きい方を好み、振動が大きいと音が小さい方を好むことから、受ける刺激の量が変化しないことが快適感の基準であると推察される。被験者 C は被験者 A と逆の傾向であることから、各刺激の大きさが等しいと快適感が向上すると推察される。被験者 B と D は振動の影響はあまりなく、音が小さいと快適感が向上すると推察される。次に、眠気の 1 回目と 2 回目の実験前後変化量の平均を Fig. 4(c), (d) に示す。Sv と Lv で比較すると、被験者 B, C, D は評価の傾向が逆になっていることがわかる。これより、眠気は振動の大きさによって変化すると推察される。次に、Fig. 5 に安静後と運転タスク後の唾液アミラーゼ値の比を示す。また、Fig. 6 に VAS 検査における快適感の全被験者平均を評価パターンごとに示す。これより、快適感が高いときにストレス値が低くなり、快適感が低いときにストレス値が高いことがわかる。これより、唾液アミラーゼ値の比は、快適感の指標として有用であると推察される。

3. 音圧および周波数特性変更による印象変化の把握

3.1 音圧変更による印象変化の把握⁽⁴⁾

本実験では、被験者は DS に乗って評価を行う。密閉型ヘッドホンによる音の提示, DS による振動の提示を行う。また、2.1 節と同様の運転タスクを課す。提示する評価パターンは、走行音の L_A 60.0, 63.0, 66.0 dB(A) の 3 種類 (以下、それぞれ 60s, 63s, 66s と表記する) と走行振動の VAL 84.0, 87.0 dB (以下、それぞれ 84v, 87v と表記する) の 2 種類を組み合わせた計 6 パターンであり、音の種類・振動の種類 (例: 60s_84v) で表記する。また、評価に用いる形容詞対は「快適な」とし、シェッフェの対比較法 (中屋の変法) による評価を行った。被験者は 20 代 8 名であり、自動車の運転に対する嗜好の設定調査で 4 名は迫力感を嗜好する被験者 (以下、Group A と表記する)、残り 4 名は静粛感を嗜好する被験者 (以下、Group B と表記する) であることを確認した。

全体での評価結果を Fig. 7(a) に示す。63s_84v の評価が最も良く、66s_84v の評価が最も悪くなっている。また、振動の大小に関係なく 66s のパターンは最も評価が悪くなっている。また、同じ L_A のパターン間 (例: 60s_84v と 60s_87v) で有意差は確認できなかったが、66s のパターンを除き、振動が小さいと評価が良くなっている。さらに、振動が小さいときは 63s のパターンの評価が、60s のパターンの評価より良くなり、振動が大きいときは 60s のパターンの評価が、63s のパターンの評価より良くなった。これらより、音を小さく、また振動を小さくすることによって一意的に快適感が向上するわけではなく、音と振動が適切な値を取る場合に快適感が向上すると推察できる。本実験条件では、84v のときは L_A 63.0 ± 3.0 dB(A) 以内が適切であると考えられ、87v のときは 60s、またはそれより小さい値が適切であると考えられる。

次に Group ごとくの評価結果を Fig. 7(b), (c) に示す。Fig. 7(b) より、Group A において振動が小さいときは 66s が最も評価が悪いが、振動が大きいときは 60s が最も評価が悪くなっている。また、振動の大小に関係なく、60s より 63s の方が評価が良くなっている。これより、Group A では音と振動の大きさ単体ではなく音と振動のバランスによって快適さを判断していると推察できる。Fig. 7(c) より、Group B において振動の大小に関係なく、60s が最も評価が良く、63s, 66s の順に評価が悪くなることが確認できる。また、同じ L_A のパ

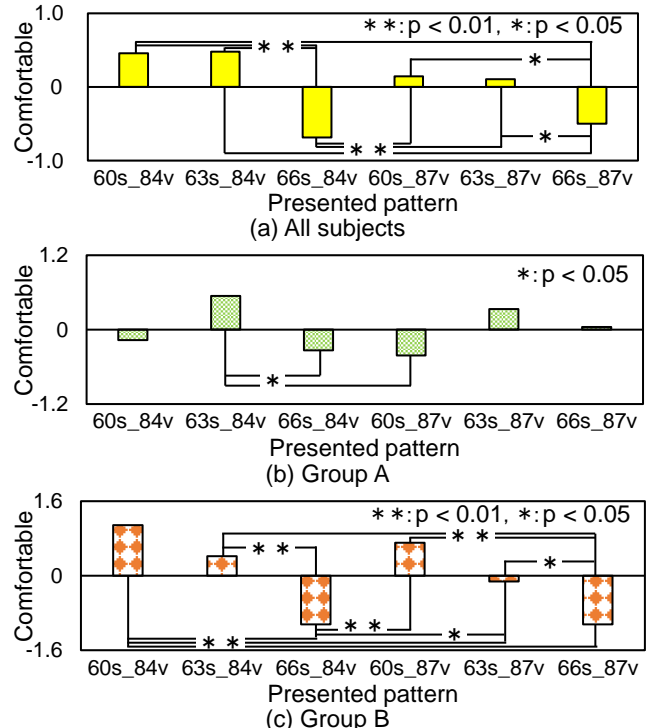


Fig. 7 Evaluation result by Scheffe's paired comparisons

ターン間で有意差は確認できなかったが、振動が小さいと評価が良くなっている。これらより、Group B では音と振動の大きさ単体の影響が大きく、また振動より音の大きさの方が影響が大きいと推察できる。さらに、60s_84v と 63s_84v および 60s_87v と 63s_87v の嗜好順に着目すると、各グループで真逆の傾向が確認できる。これより、各グループに対して異なる L_A および VAL の提案が必要であると推察できる。

3.2 主観的等価点による検討⁽⁴⁾

本実験における音および振動の提示方法、運転タスクおよび被験者は 3.1 節と同様である。被験者には、運転タスク中にアンプを操作することで提示音の音圧レベル（以下、SPL と表記する）を変更し、提示振動とバランスの良いところで止めるよう指示を行った。同じ提示音に対して評価を 3 回行い、それらの平均値を主観的等価点とする。また、外れ値を SPL \pm 3.0 dB とし除外することとする。提示振動は 84v, 87v の 2 種であり、それぞれに対して主観的等価点を算出する。提示音は実走行音を中心周波数 63 Hz、幅 1/1 オクターブバンドのバンドパスフィルタに通した音源を f_{c63S} とし、同様の処理をした f_{c125S} , f_{c250S} , f_{c500S} , f_{c1000S} である。

評価結果から Group A の方が Group B より主観的等価点が大きい傾向にあることを確認した。3.1 節で Group A は Group B と比較してより音圧の大きい評価パターンを嗜好していることから、Group A, B における主観的等価点の大小関係と快適感の良悪関係は類似していると推察される。それを踏まえ、嗜好の違いによる比較を行う。

評価結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) より、84v の振動に対して f_{c250S} 以外では Group A の方が Group B より主観的等価点が大きい傾向にあり、 f_{c250S} では Group B の方が Group A より 1.2 dB 程度主観的等価点が大きくなっている。これより、84v において、Group A は f_{c250S} が小さくなることで音と振動のバランスが取れ快適感を感じる、もしくは Group B は音が小さい方が快適感を感じる傾向にあるが f_{c250S} が大きくなって快適感を感じる、のどちらかであると推察される。Fig. 8(b) より、87v の振動に対してすべての提示音において Group A の方が Group B より主観的等価点が大きい傾向にあることがわかる。また、 f_{c1000S} 以外では主観的等価点の差が平均して 1.0 dB 程度であるのに対し、 f_{c1000S} では 2.8 dB であることがわかる。これより、87v において、Group A は f_{c1000S} が大きくなることで音と振動のバランスが取れ快適感を感じる、もしくは Group B は f_{c1000S} が小さくなることでより快適感を感じる、のどちらかまたは両方であると推察される。

3.3 周波数特性変更による印象変化の把握⁽⁴⁾

本実験における音および振動の提示方法、運転タスクおよ

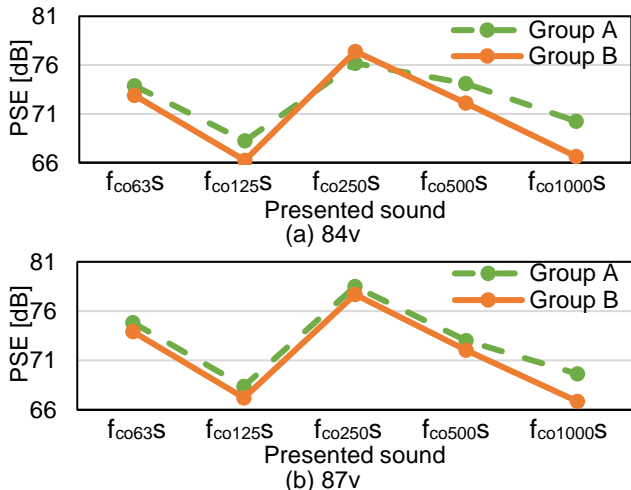


Fig. 8 Evaluation result of PSE

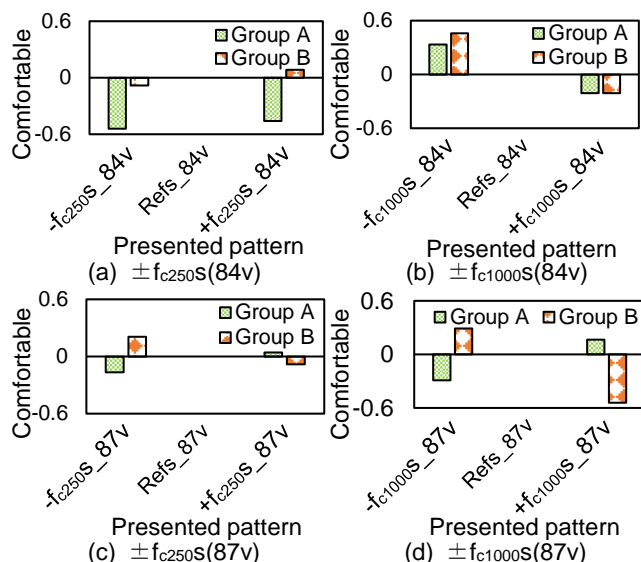


Fig. 9 Evaluation result by Scheffe's paired comparisons

び被験者は 3.1 節と同様である。評価に用いる形容詞対は「快適な」とし、提示振動は 84v, 87v の 2 種であり、提示音はテストコースで取得した走行音を L_A 63.0 dB に音圧変更した音源 Refs と、Refs の中心周波数 63 Hz の 1/1 オクターブバンド帯を +3.0, -3.0 dB した音源をそれぞれ $+f_{c63S}$, $-f_{c63S}$ とし、同様の処理を行った $\pm f_{c125S}$, $\pm f_{c250S}$, $\pm f_{c500S}$, $\pm f_{c1000S}$ である。なお、周波数特性変更後に音圧変更はしていない。提示振動 84v で提示音 Refs, $\pm f_{c63S}$ の比較を 1 パターンとし、振動および中心周波数を変更した計 10 パターンの評価をシェッフェの対比較法（浦の変法）により行った。

影響が明確だった $\pm f_{c250S}$ と $\pm f_{c1000S}$ に着目し、84v における評価結果を Fig. 9(a), (b) に、87v における評価結果を Fig. 9(c), (d) に示す。なお、周波数特性変更による影響を見やすくするため、Refs の平均嗜好度が 0 になる正規化をしている。Fig. 9(a) より、3.2 節で示した 84v において Group B は f_{c250S} が大きくなることで快適感を感じるとした推察を裏付ける結果となった。また、Group B において、高周波になるにつれて右下がりの傾向になっていくことがわかる。これより、84v において、高周波になるほど音の感度が高くなるため音の大きさを感じ、下げることで評価が向上すると推察される。次に、Fig. 9(d) より、3.2 節で示した 87v において Group A は f_{c1000S} が大きくなることで快適感を感じ、Group B は f_{c1000S} が小さくなることで快適感を感じるとした推察を裏付ける結果となった。また、Group B において、高周波になるにつれて右下がりの傾向になっていくことがわかる。これより、84v と同様に 87v において、高周波になるほど音の感度が高くなるため音の大きさを感じ、下げることで評価が向上すると推察される。

4. 音および振動による運転感覚モデル構築

4.1 運転感覚モデル構築⁽⁵⁾

本実験における音および振動の提示方法および運転タスクは 3.1 節と同様である。提示する評価パターンは SPL が元の値と -3.0 dB したものの 2 種、VAL が元の値と -3.0 dB したものの 2 種、中心周波数 125, 250, 1000 Hz の 1/1 オクターブバンド帯の SPL が元の値と -6.0 dB したものの各 2 種ずつを組み合わせて、計 32 パターンとなっている。なお、テストコースで測定した実走行音および実振動のパターンを Ref としており、また中心周波数 125 Hz の 1/1 オクターブバンド帯の SPL を f_{c125} と表し、中心周波数 250, 1000 Hz においてもそれぞれ f_{c250} , f_{c1000} と表す。また、評価に用いる形容詞対を「快適な」

「眠くなる」とし、一対比較による評価を行った。被験者は快適感が20代15名、覚醒感が20代14名である。目的変数を評価得点、説明変数を SPL, f_{c125} , f_{c250} , f_{c1000} , VAL の値とし、重回帰分析により運転感覚モデルの構築を行う。

4.2 快適感における運転感覚モデルの有用性検討⁽⁵⁾

「快適な」の評価結果に対してクラスター分析を行った結果、Cluster C1, Cluster C2 に分かれた。運転に関する事前調査から、Cluster C1 は運転に際し、静粛感を嗜好する被験者が中心であり、Cluster C2 は迫力感を嗜好する被験者が中心であることを確認した。Cluster C1 のモデルを Model C1 とし式(1)に、Cluster C2 のモデルを Model C2 とし式(2)に示す。なお、自由度修正済み決定係数はそれぞれ 0.197, 0.144 であり、有意であったパラメータを太字、下線で示す。

$$\begin{aligned} \text{Model C1} = & -0.386 \times \mathbf{SPL} - 0.010 \times f_{c125} \\ & + 0.010 \times f_{c250} + 0.101 \times \mathbf{f_{c1000}} \\ & - 0.056 \times \mathbf{VAL} + 31.9 \quad \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Model C2} = & -0.033 \times \mathbf{SPL} + 0.015 \times f_{c125} \\ & + 0.088 \times \mathbf{f_{c250}} + 0.025 \times \mathbf{f_{c1000}} \\ & - 0.274 \times \mathbf{VAL} + 18.5 \quad \dots (2) \end{aligned}$$

次に、Model C1 および Model C2 の精度を検証するため、モデルから算出した最悪および最良の2パターンに Ref を加えた全3パターンの比較をシェッフェの一対比較法(浦の変法)による主観評価で行った。提示する評価パターンを Table 2 に示す。本実験における音および振動の提示方法および運転タスクは 3.1 節と同様である。評価結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、2つのクラスターで Best, Ref, Worst の順で評価が良く、また Best が Ref および Worst に対して有意差があることから、モデル精度が高いことが確認できる。これより、本実験条件においては、静かなクルマを好む被験者に対して f_{c1000} 成分の増加および SPL 低減が特に快適感向上に繋がると確認され、また迫力のあるクルマを好む被験者に対して f_{c250} 成分の増加および VAL 低減が特に快適感向上に繋がると確認できた。

4.3 覚醒感における運転感覚モデルの有用性検討⁽⁵⁾

「眠くなる」の評価結果を用いて、覚醒感における運転感覚

Table 2 Experiment pattern
(a) Model C1

Pattern	SPL [dB]	f_{c125} [dB]	f_{c250} [dB]	f_{c1000} [dB]	VAL [dB]
Worst	84.0	72.6	58.6	48.3	87.0
Ref	84.0	72.6	64.6	54.3	87.0
Best	81.0	63.6	61.6	51.3	84.0

(b) Model C2

Pattern	SPL [dB]	f_{c125} [dB]	f_{c250} [dB]	f_{c1000} [dB]	VAL [dB]
Worst	84.0	66.6	58.6	48.3	87.0
Ref	84.0	72.6	64.6	54.3	87.0
Best	81.0	69.6	61.6	51.3	84.0

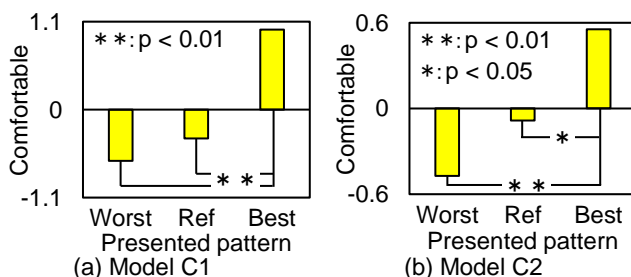


Fig. 10 Evaluation result by Scheffe's paired comparisons

Table 3 Experiment pattern

Pattern	SPL [dB]	f_{c125} [dB]	f_{c250} [dB]	f_{c1000} [dB]	VAL [dB]
Worst	81.0	63.6	61.6	45.3	84.0
Ref	84.0	72.6	64.6	54.3	87.0
Best	84.0	72.6	58.6	54.3	87.0

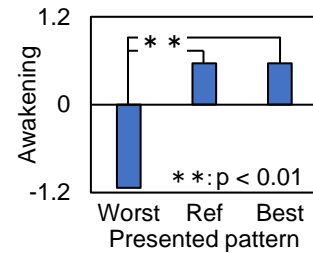


Fig. 11 Evaluation result by Scheffe's paired comparisons

覚モデル(Model A)を構築する。「眠くなる」が低いほど覚醒感が高いと判断し、各項に(-)を掛けて構築した Model A を式(3)に示す。なお、自由度修正済み決定係数は 0.342 であり、有意であったパラメータを太字、下線で示す。

$$\begin{aligned} \text{Model A} = & 0.252 \times \mathbf{SPL} + 0.018 \times f_{c125} \\ & - 0.001 \times f_{c250} + 0.053 \times \mathbf{f_{c1000}} \\ & + 0.077 \times \mathbf{VAL} - 31.9 \quad \dots (3) \end{aligned}$$

次に、4.2 節同様モデルの精度検証を行った。提示する評価パターンを Table 3 に示す。評価結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、Worst が最も悪く、Ref, Best の評価が良いことがわかる、また有意差があることからモデル精度が高いことが確認できる。これより、本実験条件においては、SPL, f_{c1000} 成分、VAL の増加が特に覚醒感向上に繋がると確認できた。

5. 研究成果

- (1) 平滑路および悪路シーンにおける主観評価より、音の大きさや振動の大きさ、有無が快適感および覚醒感に影響を与えることを明らかにした。
- (2) 音圧および周波数特性変更時の主観評価より、音の大きさおよび周波数特性や振動の大きさが快適感および覚醒感に影響を与えることを明らかにした。
- (3) 運転感覚モデルより、快適感は自動車に対する嗜好によって感じ方が異なり、各被験者に対して寄与の高いパラメータが異なることを明らかにした。
- (4) 運転感覚モデルより、覚醒感は音の周波数特性および振動の大きさの影響が高いことを明らかにした。

参考文献

- (1) 和氣充幸, 赤司篤政, 前田晋平, 杉本香居, 大福将史, 平郡久司, 共鳴器を用いたタイヤ主溝共鳴音の低減と操安性の両立, 自動車技術会秋季大会学術講演会講演予稿集, (2015) pp.478-479.
- (2) 和好, 有光哲彦, 渡邊敏幸, 戸井武司, 座席振動および車室内走行音による乗り心地推定モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2016) pp.1419-1420.
- (3) 江口彰一, 北原篤, 戸井武司, 音環境および振動環境が快適な運転走行感に及ぼす影響把握, 日本音響学会講演論文集(春), (2018) pp.1213-1214.
- (4) 江口彰一, 石原大雅, 戸井武司, ロードノイズおよびフロア振動が運転感覚に及ぼす影響, 自動車技術会秋季学術講演発表会予稿集, (2018) pp.1-4. 20186257
- (5) 江口彰一, 石原大雅, 戸井武司, 音環境と振動環境を考慮した自動車車室内の運転感覚モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2019) 1-7-13