

主観および客観評価に基づく 快適感と覚醒感を両立するEVサウンドの創生

Creation of EV Sounds that Balance Valence and Arousal Based on Subjective and Objective Evaluations

精密工学専攻 1号 青柳 洸希
Koki Aoyagi

1. はじめに

昨今のモビリティ業界におけるカーボンニュートラルの流れを見据え、本研究では今後さらなる普及が見込まれる電気自動車（以下、EV）の車室内音環境を対象とする。

EV 車室内では、モータノイズおよびギアノイズは純音、ロードノイズおよび風切り音は広帯域成分とみなすことができる⁽¹⁾。EV では、従来の内燃機関車と比較して、エンジンノイズの消失による車室内の暗騒音レベル低下により静粛性が向上し、相対的に純音に対する感度が高まる。そして、これらの純音は搭乗者に不快感や耳障り等のネガティブな印象を与える要因になる。

そこで本研究では、音響学者 Eberhard Zwicker らが解明した暗騒音による定常状態の純音成分のマスキング特性⁽²⁾と、先行研究より明らかになった周波数掃引純音に対する非定常マスキング特性⁽³⁾に基づき、快適感と覚醒感⁽⁴⁾⁽⁵⁾を両立する EV サウンドを純音付加により創生する。

なお本研究では、中央大学「人を対象とする研究」倫理規程に準じ、実験参加者に十分なインフォームドコンセントを得ている。

2. 快適感と覚醒感を両立する覚醒サウンドの創生

本章では、快適感と覚醒感を両立する覚醒サウンド⁽⁶⁾を作成し、主観および客観評価を行う。

2.1 快適感と覚醒感を両立する覚醒サウンドの作成

2.1.1 実験条件

本実験では、純音が最小可聴音圧レベルで知覚されるとき暗騒音からの突出量を可聴突出量（以下、Lp: Audible level of protrusion quantity）とする。

音源は基準音に評価音を付加することで覚醒感を喚起する。基準音は、ロードノイズ、風切り音等を想定した -10 dB/oct の広帯域雑音と、モータノイズを想定した純音 1000 Hz および 2000 Hz の 2 種とする。付加音は 3 要因 3 水準の L27 実験計画法に基づき作成し、要因は純音の周波数 [A]:125 Hz, [B]:250 Hz, [C]:500 Hz, 水準は純音突出量 Lp+0, 3, 6 dB とする。

評価方法は、まず基準音を評定尺度による 7 段階で絶対評価する。評価項目は「不快な - 快適な」、「眠くなる - 目が覚める」とする。次に、評価音を基準音に対して 4 点を基準とし、相対評価する。評価項目は先ほど同様の項目を用いる。音源の提示は、スピーカを用い、基準音 5 s、無音時間 1 s、評価音 5 s の順で再生する。実験参加者は 20 代の 8 名で、音源はランダムに提示する。

2.1.2 実験結果と考察

まず基準音の 1000 Hz の快適感と覚醒感の評価得点は、それぞれ 3.9 点、3.5 点、2000 Hz がそれぞれ 3.8 点、4.3 点であった。評価得点がともに 4.5 以上を満たすときに、快適感と覚醒感が両立しているとすると、1000 Hz は快適感 0.6 点以上かつ覚醒感 1.0 点以上の上昇、2000 Hz は快適感 0.7 点以上かつ覚醒感 0.2 点以上の上昇が必要となる。実験結果を Fig. 1 に示し、p 値が 5% 未満をアスタリスクで示す。両周波数で共通して評価得点が高かった条件は、実験番号 16 番の [A]:125 Hz が Lp+3 dB, [B]:250 Hz が Lp+6 dB, [C]:500 Hz が Lp+0 dB の条件であった。以上より、快適感と覚醒感

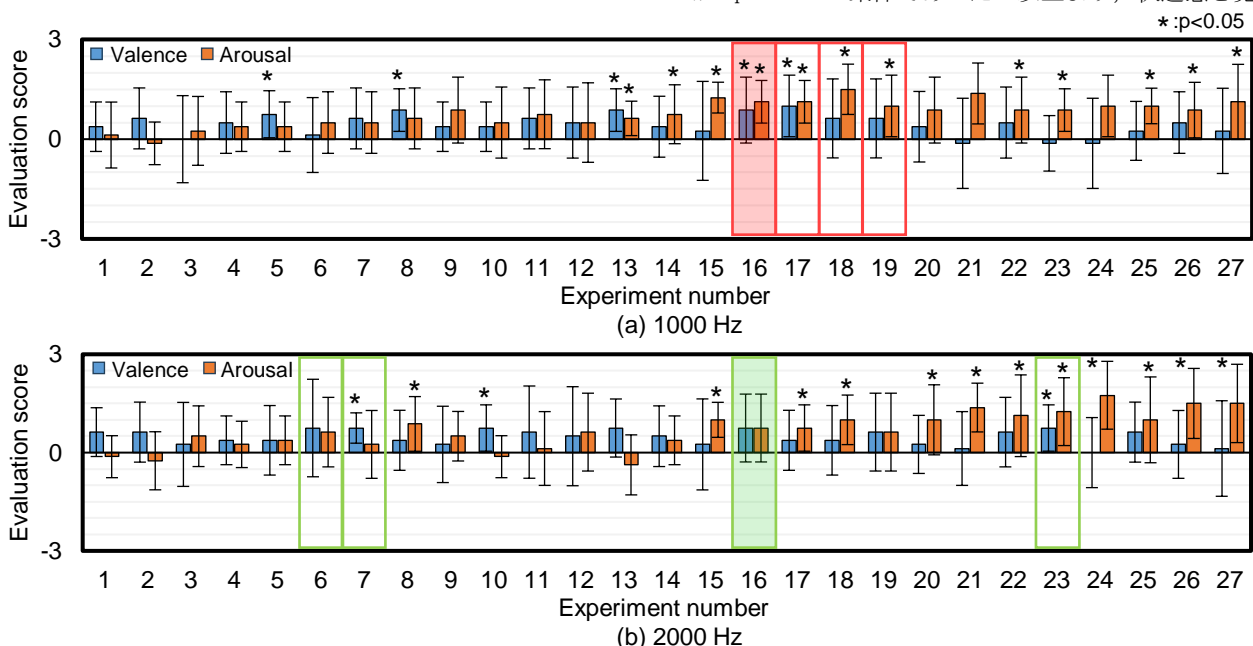


Fig. 1 Evaluation scores for valence and arousal

を両立する覚醒サウンドの設計指針を見出した。

2.2 覚醒サウンドを提示した際の脳波と運転精度の評価

2.2.1 実験条件

本実験で用いる基準音 1000 Hz と覚醒サウンドの純音突出量は、視覚の影響により体感音圧が低下することを考慮し、2.1 節の値よりそれぞれ 3 dB ずつ上昇させる。基準音は両周波数で評価得点が向上したため、今回は 1000 Hz の条件のみ実施する。

客観評価は、刺激への即応性のある脳波計測を用いる。脳波の測定には、ニューロスカイ社製の脳波信号取得チップを使用した簡易脳波計を用い、計測部位は前頭葉の Fp1, Fp2 とする。この脳波計では、 δ 波 (0.5~2.75 Hz), θ 波 (3.5~6.75 Hz), Low α 波 (7.5~9.25 Hz), High α 波 (10~11.75 Hz), Low β 波 (13~16.75 Hz), High β 波 (18~29.75 Hz), Low γ 波 (31~39.75 Hz), Mid γ 波 (41~49.75 Hz) の帯域のパワースペクトルが毎秒出力される。このうち、快適感と覚醒感に関連のある Low α 波, High β 波を用い、次の手順で解析する。

- (1) 計測されるパワーの総和を算出する。
- (2) パワーの総和に含まれる Low α 波, High β 波の相対パワー値を算出する。
- (3) 各帯域の相対パワー値の 15 s 平均を算出し、音源提示前 15 s と音源提示後 15 s の変化率をみる。

実験手順は、十分な運転練習を実施した後、120 s の安静状態を経て、運転を開始する。そして、運転開始 600 s 後に、覚醒サウンドを 30 s 提示する。再生後は 30 s のインターバルを挟む。これを 1 セットとして、5 回繰り返し計 900 s の運転を行う。

運転精度の評価は、速度 100 km/h で走路の左車線の中心を維持してもらう。その際、毎秒記録される車線中央からの車両の変位を車線逸脱量とし、そのデータを箱ひげ図にして四分位範囲を比較することでばらつきを検討する。さらに、600 s を境に車線逸脱量を比較するため、実験開始後 420 s から 600 s の条件を Before、600 s から 780 s を After とする。そして、After の四分位範囲の値を Before の値で除して、四分位範囲の変化率を算出する。

実験は無響室で実施し、前日の睡眠時間は 6 時間以上、カフェインの摂取は行わないよう教示する。音源提示はスピーカを用い、運転時の視覚刺激は 2 m 離れた 55 inch モニタから提示する。実験参加者は運転免許を保有する 20 代の 5 名で、実験前に運転頻度の調査として以下の 7 つの選択肢「1 年以上運転していない」、「数か月に 1 回」、「月に 1 回」、「月に 2~3 回」、「週に 1~2 回」、「週に 3~4 回」、「ほぼ毎日」から 1 つを回答する。

2.2.2 実験結果と考察

Fig. 2 に主観評価結果を示す。横軸の AS1 から AS5 は、覚醒サウンド Arousal sound とその提示回数を表す。快適感、評価得点が常に 5 点付近の快適側を示しており、覚醒感、AS1, AS2 において値の上昇がみられ、覚醒サウンドの 2 回目の提示までに、覚醒感が喚起されることがわかった。

このときの脳波の結果を Fig. 3 に示す。Low α 波は AS3 において上昇がみられ、その他の条件においても Low α 波の顕著な減少はみられないため、覚醒サウンドの提示により快適感が損なわれないことがわかる。次に、High β 波は、AS1~AS3 において上昇がみられ、覚醒サウンドの 3 回目の提示まで、覚醒感が喚起されることが脳波計測により客観的に示された。

また、車線逸脱量は覚醒効果が小さかった AS4, AS5 を含めた提示前後 300 s の四分位範囲の変化率では、車線逸脱量の変化はみられなかった。

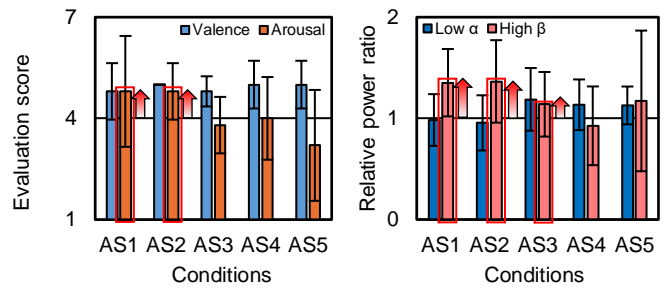


Fig. 2 Subjective evaluation

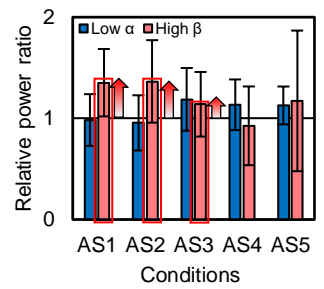


Fig. 3 Brain waves

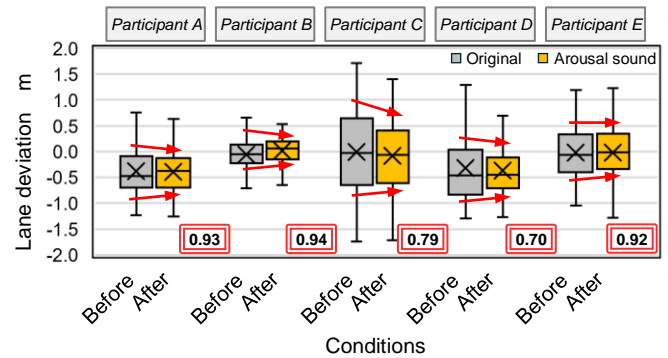


Fig. 4 Changes in lane deviation with arousal sounds

しかし、Fig. 4 に示す提示前後 180 s の四分位範囲の変化率から、覚醒サウンドの提示により、全実験参加者で車線逸脱量の減少がみられ、その変化率は平均 0.86 であった。また、運転頻度については、実験参加者 A は「週に 1~2 回」、実験参加者 B は「月に 1 回」、実験参加者 C, D, E は「数か月に 1 回」であるが、運転頻度によらず運転精度の向上がみられた。

以上より、適切な覚醒サウンドを提示することで、快適感を損なうことなく覚醒感を喚起できることが、Low α 波, High β 波の相対パワー値の変化率からわかった。そして、車線逸脱量の減少もみられ、覚醒サウンドの効果を客観評価より裏付けることができた。

3. 快適感と覚醒感を両立する加速サウンドの創生

本章では、快適感と覚醒感を両立する加速サウンドを作成し、主観および客観評価を行う。

3.1 加速意志に適合した純音の把握

3.1.1 実験条件

暗騒音は周波数特性が平坦な 1 Hz から 20000 Hz のホワイトノイズ(音圧レベル 20 dB 一定)とする。今回、純音の音圧は Lp を基準にするため、実際の EV 加速時に生じる暗騒音変化は考慮せず、一定音圧とする。また、純音は 2000 Hz まで掃引する M_{sweep} とし、その周波数掃引速度 V_{Msweep} は緩加速時に、単位時間内に 1 臨界帯域を超えない 90 Hz/s と、全開加速時に、1 臨界帯域を超える 360 Hz/s とする。以上を踏まえ、加速意志に適合した純音の把握を行う。実験手順は、緩加速に関して、純音突出量を 21 dB から 45 dB まで順番に 3 dB ずつ上昇させた音源計 9 パターンを、運転映像と同時に提示し、1 パターン実施するごとに評価をしてもらう。数分休憩した後、全開加速に関しても同様の順序で実施する。評価方法は、評定尺度法による 7 段階の絶対評価で、評価項目は「加速している感覚に合わない (1 点) - 加速している感覚に合う (7 点)」とする。その他の実験条件は 2.2.1 項と同様である。

3.1.2 実験結果と考察

実験結果を Fig. 5 に示す. それぞれの条件で加速意志との適合度合いは, 緩加速は 33.1 dB, 全開加速は 38.7 dB であった. 以上より, 加速意志が大きい方が適合する暗騒音からの純音突出量が大きくなる⁽⁷⁾ことを解明した.

3.2 次数成分の音圧の時間変化による印象の把握

3.2.1 実験条件

本実験では実際の自動車走行音を想定し, 2000 Hz まで掃引する次数成分 M_{sweep} に加え, 500 Hz まで掃引する L_{sweep} を追加する. 一般に, 2000 Hz 以上の周波数帯域は不快とされるため⁽⁸⁾ 使用しない. 純音の音圧は, 3.1 節の実験結果を踏まえ, 緩加速に関しては, L_{sweep} 33 dB, M_{sweep} 33 dB とする. また, 全開加速に関しては, L_{sweep} と M_{sweep} の体感音圧をそろえるため, L_{sweep} の純音突出量を 2 dB 上昇させ, L_{sweep} 41 dB, M_{sweep} 39 dB とする. 評価値は 2 要因 3 水準の L9 実験計画法に基づき作成する. 要因は, 次数成分 L_{sweep} , M_{sweep} の 2 種, 水準は, 音圧を変化させない No fade, 線形増加させる Fade in, 線形減少させる Fade out の 3 種とする. L_{sweep} の周波数掃引速度 $V_{L_{\text{sweep}}}$ は, 緩加速 22.5 Hz/s, 全開加速 90 Hz/s, M_{sweep} の周波数掃引速度 $V_{M_{\text{sweep}}}$ は, 緩加速 90 Hz/s, 全開加速 360 Hz/s で付加する. 評価項目は, 「不快 (1 点) - 快適 (7 点)」, 「眠くなる (1 点) - 目が覚める (7 点)」, 「弱々しい (1 点) - 力強い (7 点)」, 「伸びのある (1 点) - 伸びのある (7 点)」とし, 基準音を評価する. その後 4 点を 0 点に置き換え, 同様の項目で相対評価を行うことで, 基準音に対する付加音の影響を把握する. その他の実験条件は 3.1.1 項と同様である.

3.2.2 実験結果と考察

基準音の結果を Fig. 6 に示す. 快適感, 力強さが 4 点を下回っていることが確認された. 次に, それぞれの形容詞の要因効果図を Fig. 7 に示す. 分散分析の結果, p 値が 5 % 未満となった要因を赤枠で, 10 % となった要因を橙枠で示す. 緩加速においては, L_{sweep} は Fade out が適しており, M_{sweep} は快適感を除き No fade が適していた. 一方, 全開加速においては, L_{sweep} は快適感を除き No fade が適しており, M_{sweep} は覚醒感を除き Fade out が適していた. つまり, 緩加速では, 低周波の次数成分を減少させることで加速感を感じることができ一方, 全開加速では, 中周波の次数成分を減少させることで加速感が得られる. 以上より, 加速度により適切な音量設計が求められることを見出した. 以降では, この結果で適切であった条件をそれぞれの基準音として実験を行う.

3.3 協和感を考慮した次数成分の付加による印象の把握

3.3.1 実験条件

本実験で用いる付加音は, 基準音に対する平均律での音階と, 周波数掃引音の終了周波数を組み合わせた 12 種, P5_334, P4_375, M3_397, m3_420, m3_595, M3_630, P4_667, P5_749, P5_1335, P4_1498, M3_1587, m3_1682 とする. L_{sweep} , M_{sweep} と不協和音となる次数成分と, 1.5 倍よりも離れる次数成分は除外する. 評価項目は, 3.2.1 項に加え, 「鈍い (1 点) - 鋭い (7 点)」, 「暗い (1 点) - 明るい (7 点)」, 「濁った (1 点) - 澄んだ (7 点)」で, SD 法による 7 段階の絶対評価を行う. その結果を因子分析により分析を行う. その他の実験条件は 3.2.1 項と同様である.

3.3.2 実験結果と考察

因子分析を行い, 因子負荷量を基に快適因子, 覚醒因子, 明澄因子の 3 因子を抽出した. まず, 因子得点の快適因子と覚醒因子の散布図を Fig. 9 に示す. 緩加速において, 快適に関しては, L_{sweep} より上の帯域に付加した m3_595, M3_630, P5_749 で快適感と覚醒感がともに上昇した. 一方で, 全開加速においては, L_{sweep} より下の帯域に付加した P5_334, P4_375

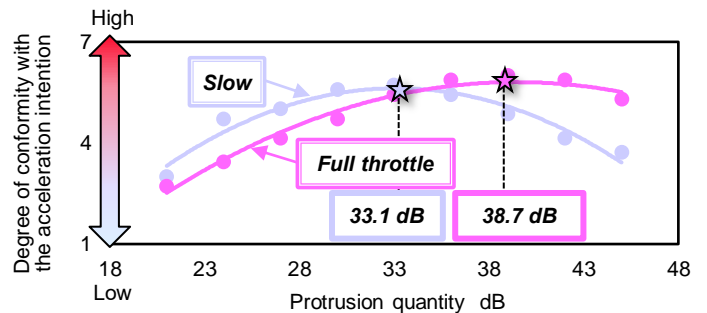


Fig. 5 Degree of conformity with the acceleration intention

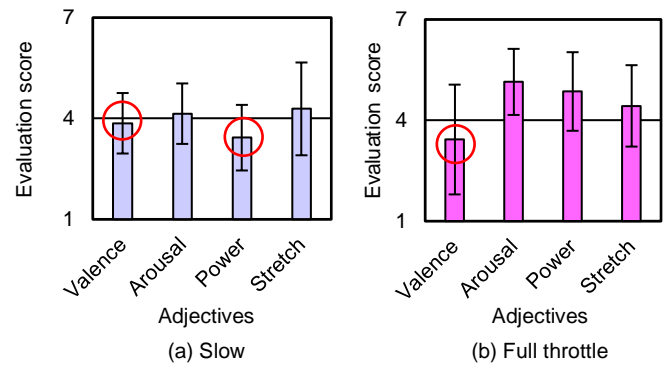


Fig. 6 Results of the original sound

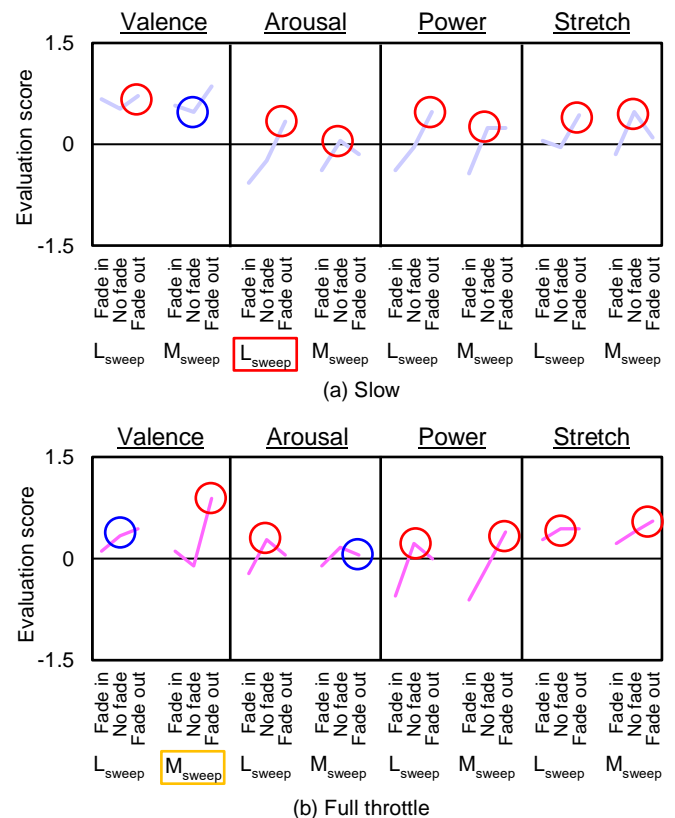


Fig. 7 Main effects plot

で快適感が顕著に上昇した. 次に, 快適因子と明澄因子の散布図を Fig. 10 に示す. 先ほど, 両加速度において快適であった評価音は, 基準音 Original と比較をすると明澄因子が低いことから, 暗く, 濁った音が適していることが示された. また, これらは L_{sweep} と完全 5 度となる協和感の高い次数成分であり, 協和感を考慮した次数成分の付加は, 快適感と覚

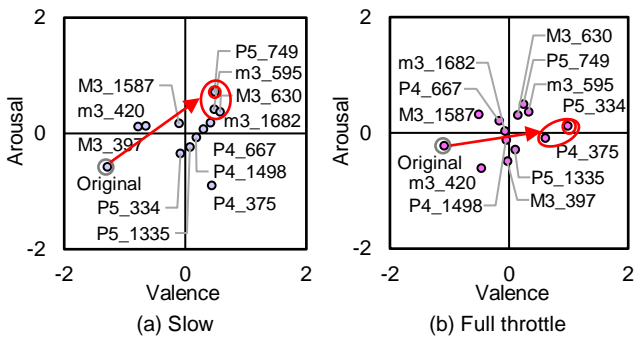


Fig. 8 Scatter plot of factor scores

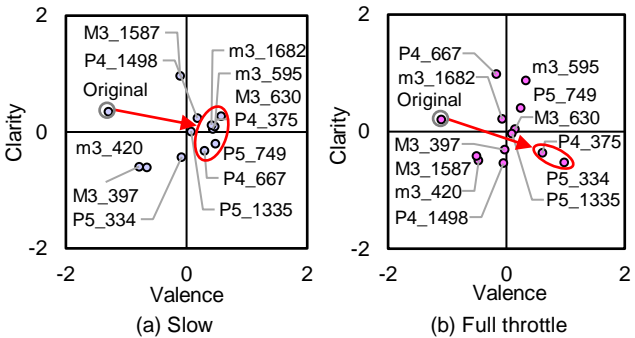


Fig. 9 Scatter plot of factor scores

醒感の向上に効果的であることがわかった。

3.4 加速サウンドの音質改善による感情推定

3.4.1 実験条件

本実験では、加速サウンドを提示した際の印象を主観および客観評価により明らかにする。評価音は、 M_{sweep} のみを提示する条件と、3.2節、3.3節より最も評価が高かった音源を提示する条件で比較する。ただし、付加音はFig. 9の散布図上で最も基準音からの距離が離れている条件の緩加速P5_749、全開加速P5_334を用いる。評価方法は、ホワイトノイズを提示した後、加速サウンドをランダムに提示する。実験参加者は運転免許を保有する20代の男女8名とする。評価項目は「不快(1点) - 快適(7点)」、「眠くなる(1点) - 目が覚める(7点)」を用い、緩加速の基準音を4点とした7段階の相対評価を実施する。脳波も基準音のパワー値からの変化率を計算する。その他の実験条件は3.3.1項と同様である。

3.4.2 実験結果と考察

緩加速の結果を、ラッセルの円環モデルに対応させ、Fig. 10に示す。主観評価は、快適感と覚醒感が有意に上昇した。脳波の結果は、Low α 波とHigh β 波の相対パワー値の変化率が1以上となったため、快適感、覚醒感が上昇した。全開加速の結果をFig. 11に示す。主観評価は、覚醒感を維持したまま快適感が有意に上昇した。脳波の結果は、緩加速と同様であった。以上より、第1象限は「喜」、第2象限は「怒」、第3象限は「哀」、第4象限は「楽」に分類すると、快適かつ覚醒方向への感情の推移は、「喜び」や「楽しさ」の感情が喚起されたことを表す。以上より、これまでの音質改善の効果が主観および客観評価により示され、快適感かつ覚醒感を両立する加速サウンドの条件が明らかになった。

4. 研究成果

- (1) 快適感と覚醒感を両立する効果的な覚醒サウンドを提示することで、運転経験によらず運転精度の向上した。
- (2) 加速度に応じた、純音突出量、音圧の時間変化、協和感を考慮した次数成分の付加により、快適感と覚醒感を両

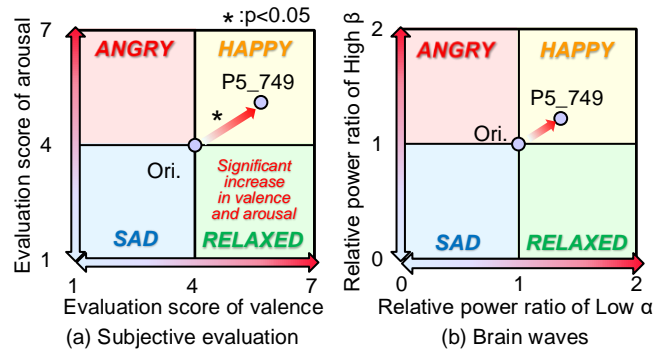


Fig. 10 Russell circumplex model of affect for slow

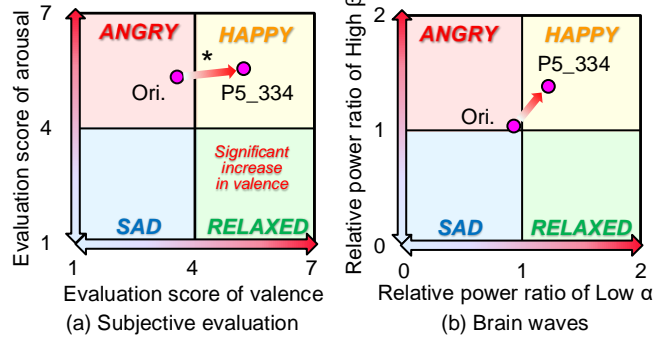


Fig. 11 Russell circumplex model of affect for full throttle

立する加速サウンドの条件を明らかにした。

- (3) 加速サウンドは、緩加速では中周波帯域を、全開加速では、低周波帯域を強調した方が好まれることを見出した。
- (4) 加速サウンドの提示により、「喜び」や「楽しさ」を喚起できることを主観および客観評価より解明した。

謝辞

本研究は2022年度、2023年度、2024年度の自動車用動力伝達技術研究組合 (TRAMI) の委託/共同研究により実施したものである。

参考文献

- (1) Timothy Whitehead Bassett et al., Study of High Frequency Noise From Electric Machines in Hybrid and Electric Vehicles, *Inter.noise* (2014) pp.1-10.
- (2) Hugo Fastl, Eberhard Zwicker, *Psycho-Acoustics 3rd ed.*, Springer (2006) pp.61-173.
- (3) 柴橋和真 他, EV加速を想定した聴覚の臨界帯域に基づく非定常マスキング特性, *日本音響学会講演論文集(秋)* (2023) pp. 1501-1504.
- (4) 有光 他, 快適性を考慮した付加音による高速走行中ドライバの覚醒維持効果の評価, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 18-4 (2016) pp. 319-328.
- (5) James A Russell, A circumplex model of affect, *Journal of Personality and Social Psychology*, 39-6 (1980) pp. 1161-1178.
- (6) 青柳洸希 他, 主観および客観評価に基づく快適感と覚醒感を両立する覚醒サウンドの創生, *日本音響学会講演論文集(春)* (2025) 1-6-16.
- (7) 青柳洸希 他, EV加速時における加速意志に適合した車室内純音の創生, *日本音響学会講演論文集(春)* (2024) pp. 1145-1146.
- (8) 佐野 真一, 福原 千絵, 新型BEVの加速サウンド開発, *自動車技術会学術講演会講演論文集*, No. 20216100, (2021) pp. 1-6.