

視聴覚刺激および運転意志を考慮した EV加減速時のサウンドマスキングデザイン

Sound Masking Design during Acceleration/Deceleration of EV in Consideration of Audio-Visual Stimuli and Driving Intention

精密工学専攻 35号 柴橋 和真
Kazuma Shibahashi

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車室内音は、モータノイズおよびギアノイズ等と、ロードノイズおよび風切り音等で構成される暗騒音に分類される。一般に、モータノイズやギアノイズ等は純音成分、一方の暗騒音は広帯域成分とみなすことができる⁽¹⁾。昨今開発されるEVでは、内燃機関搭載車のICEV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、相対的に純音成分に対する感度が高まっている。そして、これらの純音成分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⁽²⁾。

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⁽³⁾に基づき、EV加減速時における非定常状態の純音成分に対する音量設計指針を構築する。さらに、視聴覚刺激および運転意志を考慮し、運転席、助手席、後部座席の座席別の車室内環境に応じた純音成分のマスキングに基づくサウンドデザイン、すなわちサウンドマスキングデザインを提案する。

なお、本研究における全ての評価実験は、中央大学「人を対象とする研究」倫理審査委員会の承認を得た上で、実験参加者に十分なインフォームドコンセントを得て実施している。

2. EV車室内音に対する設計指針の構築

本章では、モータノイズやギアノイズ等の純音成分に対し、共振の有無を考慮した音量設計指針を構築する。また、聴覚+視覚+運転動作による複合感覚刺激下における純音成分のマスキング特性を解明し、車室内環境に応じたサウンドマスキングデザインを提案する。なお、全評価実験は Fig. 1 の無響室にてドライビングシミュレータを用い評価を行う。

2.1 EV加速を想定した共振がない領域の音量設計指針

EV加速における車室内の共振がない領域で、純音成分は周波数掃引⁽⁴⁾する（以下、周波数掃引純音）。本評価では、周波数掃引純音に対する非定常マスキング特性を解明⁽⁵⁾し、“知覚”の視点で音量設計指針を確立する⁽⁶⁾。

2.1.1 マスキング評価方法

評価に用いるマスキャーおよびマスキューを Fig. 2 に示す。マスキャー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）を、マスキューは 100~10000 Hz までの定常純音および 100~10000 Hz まで周波数特性が平坦な周波数掃引純音を提示する。マスキューである純音成分が最小可聴音圧レベルで知覚される可聴突出量 L_p は Fig. 2 で赤字とし、各周波数の L_p を繋ぐ赤破線が定常マスキングライン、紫実線が非定常マスキングラインとなる。マスキングラインより下側の領域では、マスキャーからマスキューが突出しても聴覚上、知覚されない特性を有する。本評価では、周波数掃引速度（以下、 v_{sweep} ）毎にこのラインを特定する。

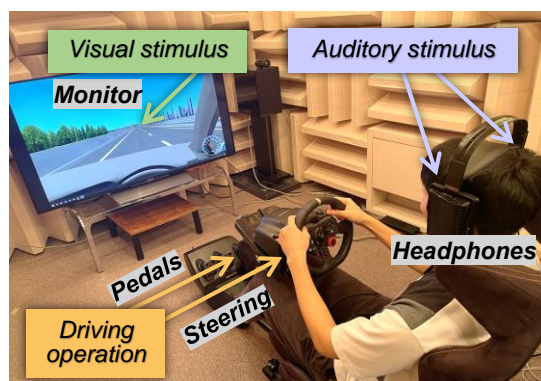


Fig. 1 Experimental setup of evaluation

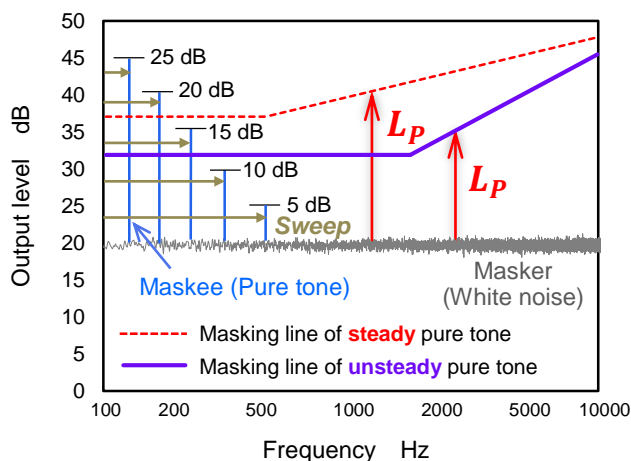


Fig. 2 Frequency spectrum of evaluation sound

全評価実験において、正確な評価音提示のため、ヘッドホンの周波数特性の補正を行った⁽⁷⁾。また、実験参加者は気導聴力検査に基づく統計処理⁽⁷⁾より、聴感特性が正常かつ同一母集団とみなせ、運転免許を保有する 20 代 10 名を選定した。

2.1.2 評価結果およびマスキング特性の定式化

Fig. 3 に評価結果に基づく定常および非定常マスキング特性の定式化を示す。赤破線が定常マスキングライン、紫実線が非定常マスキングラインである。定常マスキングラインは 500 Hz にマスキング特異点があり、~500 Hz は一定、500 Hz ~ は対数的に上昇する特性を有する。一方、非定常マスキングラインの概形は定常マスキングラインと類似するものの、 v_{sweep} の差異によって低周波および高周波領域の L_p やマスキング特異点が大きく変化することが明らかとなった。

これらの複雑な特性を有する非定常マスキング特性は、人間の聴覚メカニズムに基づき、式(1)を用いて聴覚に対する感度の分類が可能であることを新たに見出した。周波数軸から、聴覚特性が考慮された Bark 軸に変換した時の純音移動速度として定義する臨界帯域通過速度 v_{CBpass} を以下に示す。

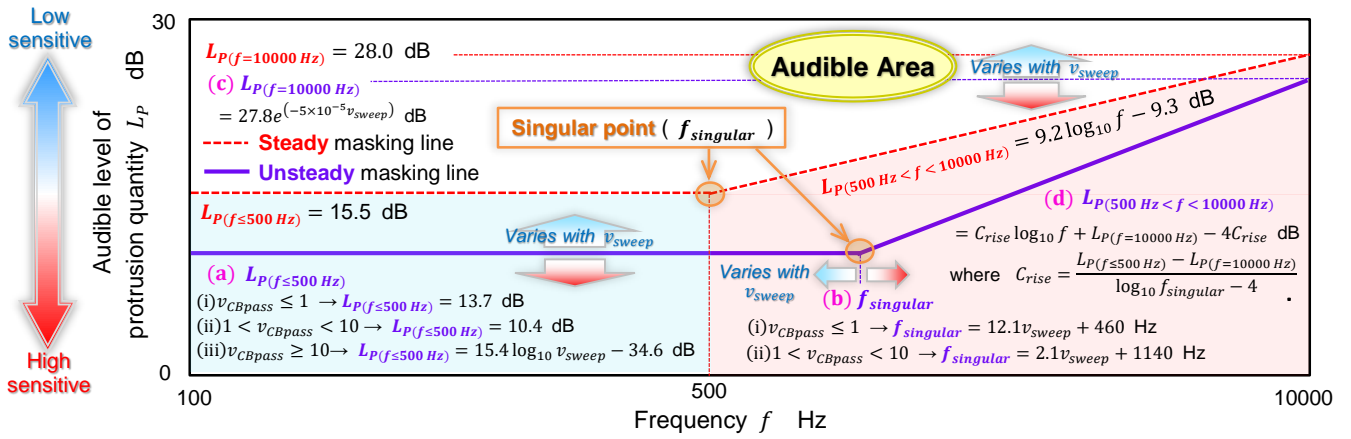


Fig. 3 Formulation of steady and unsteady masking characteristics

$$v_{CBpass} = \frac{v_{sweep}}{\Delta f_{CB}} = \frac{v_{sweep}}{25 + 75(1 + 1.4f^2)^{0.69}} \quad \dots (1)$$

v_{CBpass} : Critical Band passing velocity [Bark/s]
 Δf_{CB} : Critical Bandwidth [Hz/Bark]
 v_{sweep} : Frequency sweep velocity [Hz/s]
 f : Frequency of pure tone [kHz]

(i) $v_{CBpass} \leq 1 \rightarrow L_{sweep}$ 領域

v_{CBpass} が 1 以下の L_{sweep} 領域では、純音成分は単位時間内に単一臨界帯域のみを刺激するため、感度が低い。

(ii) $1 < v_{CBpass} < 10 \rightarrow M_{sweep}$ 領域

v_{CBpass} が 1 を超え 10 以下の M_{sweep} 領域では、純音成分は単位時間内に複数の臨界帯域を刺激するため、感度が高い。

(iii) $v_{CBpass} \geq 10 \rightarrow H_{sweep}$ 領域

v_{CBpass} が 10 以上の H_{sweep} 領域では、純音成分は単位時間内に多数の臨界帯域を刺激し、 M_{sweep} 領域よりも感度が低い。

以上の聴覚メカニズムに基づき、聴覚感度の異なる領域別にマスキング特性を定式化する。非定常マスキング特性において、 v_{sweep} を説明変数として特性が変動する Fig. 3 の (a) ~ (d) で示す 4 種の目的変数に対し、モデル式の当てはまりの良さを表す決定係数 R^2 値が 0.95 以上の高精度な近似式を採用した。これより、(a), (b), (c), (d) の目的変数の順に任意の v_{sweep} をモデル式に代入することで、100~10000 Hz の周波数領域において、全ての周波数掃引速度に対応した可聴突出量 L_p の予測値が一意に求まる音量設計指針を確立した。

2.2 EV 加速を想定した共振がある領域の音量設計指針

EV 加速における車室内の共振がある領域で、純音成分は共振通過⁽⁸⁾する(以下、共振通過純音)。本評価では、共振通過純音に対する許容閾値を解明し、“不快感”の視点で音量設計指針を確立する⁽⁹⁾。

2.2.1 不快感の印象評価方法

評価方法は評定尺度法による 7 段階相対評価で、基準音を 0 点とし、共振通過純音が「ほとんど気にならない」-3 点から「かなり気になる」3 点とする。また、“気になる”の定義として、共振通過純音が生じて不快や耳障り等のネガティブな印象を受ける意味を内包することを、実験参加者への説明の際、予め教示して評価を実施した。暗騒音と共振通過純音を組み合わせた評価音を Fig. 4 に示す。暗騒音は全て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)で固定とし、対する共振通過純音は v_{sweep} を 50 Hz/s と 500 Hz/s の 2 パターン、共振周波数 f_0 を 0.5 kHz~8 kHz の 5 パターン、 L_p からの音圧上昇量 $\Delta Level$ を 4.4 dB~26.0 dB の 5 パターンを組み合わせた計 50 条件とする。共振がない基準音は常に L_p の音量で純音成分を周波数掃引させ、一方の評価音は共振通過時に音圧変化させる。

2.2.2 評価結果および共振通過時の聴覚特性

印象評価の結果、統計的に不快感に有意な影響を与えると思われた条件のうち、最小の音圧上昇量 $\Delta Level$ の条件をピックアップし、式(1)より臨界帯域通過速度 v_{CBpass} 、下記の式(2)よりラウドネス変化量 $\Delta Loudness$ に変換して Fig. 5 に赤丸で示す。

$$\Delta Loudness = \int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) dz \quad \dots (2)$$

$\Delta Loudness$: Loudness change quantity at resonance [sone]

N' : Specific Loudness [sone/Bark]

なお、共振通過純音という過渡音に対するラウドネス算出にあたり、非定常音に対応した Zwicker 計算法の ISO532-1:2017 を用いる。式(2)をラウドネス計算のベースとして、聴覚的非線形な時間減衰処理をラウドネス密度に施す。

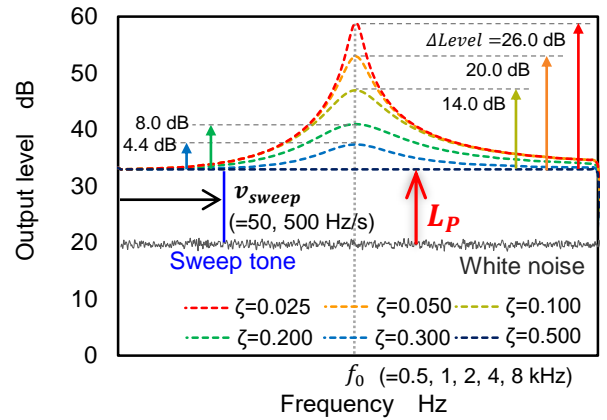


Fig. 4 Frequency spectrum of evaluation sound

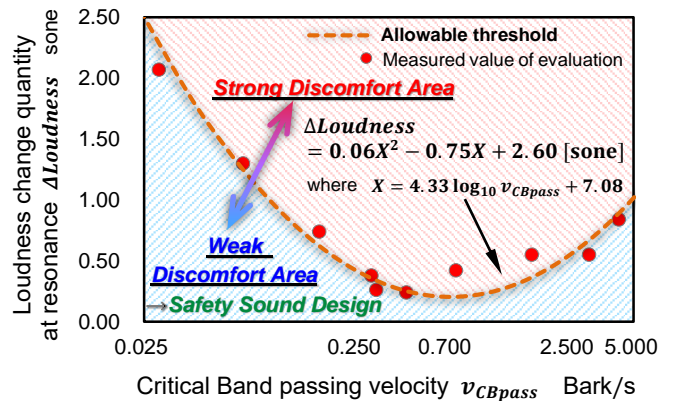


Fig. 5 Auditory characteristics for pure tone components at resonance passing

以上の処理より、共振通過純音に対し不快な印象評価を示した赤丸の全ての評価実測値に当てはまりの良い近似線は、橙破線で示す逆放物線特性を有していることを見出した。この逆放物線特性の近似式は、共振通過純音の不快感に関する許容閾値と言え。許容閾値を超える領域の共振通過純音は強い不快感となり、許容閾値を下回る領域の共振通過純音は不快感に有意な影響を与えない弱い不快感となる。臨界帯域通過速度は感覚上の周波数掃引速度を意味し、ラウドネス変化量は感覚上の音圧変化量を意味することから、人間の聴覚特性に基づく両指標を用いることで、許容閾値が式(3)、(4)より簡易的に算出できる音量設計指針を確立した。

$$\Delta Loudness = 0.06X^2 - 0.75X + 2.60 \quad \dots (3)$$

$$X = 4.33 \log_{10} v_{CBpass} + 7.08 \quad \dots (4)$$

$\Delta Loudness$: Loudness change quantity at resonance [sone]

X : $\Delta Loudness$ explanatory variable [-]

2.3 車室内における複合感覚刺激が聴覚に及ぼす影響

2.1節および2.2節の音量設計指針は、聴覚のみでの評価に基づき構築しており、実環境を想定すると助手席は視聴覚刺激、手動運転時は視聴覚刺激および運転動作を伴う複合感覚刺激下にある。そこで本節では、運転の有無を考慮した複合感覚刺激下のEV加減速時において、周波数掃引純音に対する非定常マスキング特性を解明する⁽¹⁰⁾。

2.3.1 マスキング評価方法

2.1節同様、Fig. 2に示すマスカーおよびマスキューを評価に用いる。また、周波数掃引純音の知覚に対する影響把握を目的とするため、ここではEV加減速時に生じる暗騒音変化は考慮せず、一定音圧とする。

Fig. 1に示した実験セットアップにて評価を行う。聴覚刺激はヘッドホンから提示し、視覚刺激は55 inch モニタから提示する。運転動作はドライビングシミュレータと連動したステアリングおよびペダル操作を行う。走路環境は、見晴らしが良く交通量が少ない直線路とする。なお、運転中に実験参加者は、車線から逸脱しないよう注意し加減速走行を行う。

マスキング評価はTable 1に示す [1]:車両加減速度合いによる周波数掃引速度 (v_{sweep}), [2]:車両の加減速による周波数掃引方向 (Sweep direction), [3]:提示する感覚刺激 (Sensory stimuli) の3因子の組み合わせによる計12実験パターンを、聴覚 (Aud.) + 視覚 (Vis.) + 運転動作 (Ope.) による複合感覚刺激下で行う。

2.3.2 複合感覚刺激下における要因効果

はじめに、聴覚=音刺激を知覚している状態、視覚=走行中の外部環境を目視している状態、運転動作=手動運転している状態とし、運転席は聴覚+視覚+運転動作、助手席は聴覚+視覚、後部座席は聴覚のみの環境下にあると仮定する。

複合感覚刺激下における交互作用を考慮すべく、マスキング評価の結果を用い、聴覚のみの1刺激、聴覚+視覚の2刺激、聴覚+視覚+運転動作の3刺激の感覚刺激別に上記 [1], [2], [3]の要因効果を算出し、Fig. 6に示す。

[1]:周波数掃引速度の影響に関して、低速掃引から高速掃引に変化した時の要因効果は、聴覚のみの場合に-2.4 dB、聴覚+視覚の場合に-1.9 dB、聴覚+視覚+運転動作の場合に-1.5 dBである。これより、感覚刺激の増加に伴い高速掃引化による影響が緩和される特性を見出した。聴覚のみの単感覚刺激下では音への感度が高いため、低速掃引と高速掃引が明確に区別できるが、複合感覚刺激下では音への感度が下がるため、低速掃引と高速掃引が区別しづらくなると推察される。そして、聴覚から聴覚+視覚になった時の高速掃引の緩和効果は0.5 dB、聴覚+視覚から聴覚+視覚+運転動作になった時は0.4 dBであり、ほぼ一定の増加率であることを見出した。

[2]:周波数掃引方向の影響に関して、加速によるプラス掃

Table 1 Patterns of masking evaluation experiment

[1]: v_{sweep} [Hz/s] (Slow or Fast)	[2]: Sweep direction (+ or - sweep)	[3]: Sensory stimuli (Number of stimuli)
90 Hz/s (Slow)	Acc. (+ sweep)	Aud. (1 stimulus)
90 Hz/s (Slow)	Acc. (+ sweep)	Aud.+Vis. (2 stimuli)
90 Hz/s (Slow)	Acc. (+ sweep)	Aud.+Vis.+Ope. (3 stimuli)
90 Hz/s (Slow)	Dec. (- sweep)	Aud. (1 stimulus)
90 Hz/s (Slow)	Dec. (- sweep)	Aud.+Vis. (2 stimuli)
90 Hz/s (Slow)	Dec. (- sweep)	Aud.+Vis.+Ope. (3 stimuli)
250 Hz/s (Fast)	Acc. (+ sweep)	Aud. (1 stimulus)
250 Hz/s (Fast)	Acc. (+ sweep)	Aud.+Vis. (2 stimuli)
250 Hz/s (Fast)	Acc. (+ sweep)	Aud.+Vis.+Ope. (3 stimuli)
250 Hz/s (Fast)	Dec. (- sweep)	Aud. (1 stimulus)
250 Hz/s (Fast)	Dec. (- sweep)	Aud.+Vis. (2 stimuli)
250 Hz/s (Fast)	Dec. (- sweep)	Aud.+Vis.+Ope. (3 stimuli)

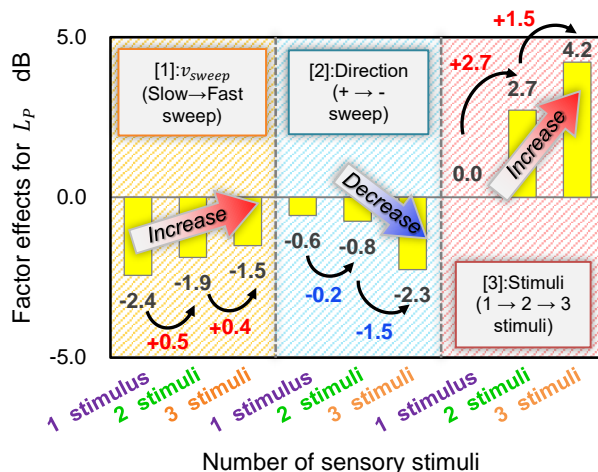


Fig. 6 Factor effects of each factor on L_p

引から減速によるマイナス掃引に変化した時の要因効果は、聴覚のみの場合に-0.6 dB、聴覚+視覚の場合に-0.8 dB、聴覚+視覚+運転動作の場合に-2.3 dBである。聴覚から聴覚+視覚になった時のマイナス掃引による L_p 低減効果は-0.2 dB、聴覚+視覚から聴覚+視覚+運転動作になった時は-1.5 dBであり、特に聴覚+視覚+運転動作の場合に顕著に L_p が低減することを見出した。

[3]:感覚刺激の影響に関して、聴覚のみの単感覚刺激から他感覚刺激が加わり複合感覚刺激に変化した時の要因効果は、聴覚+視覚の場合に2.7 dB、聴覚+視覚+運転動作の場合に4.2 dBである。これより、本実験条件における視覚は体感音圧を2.7 dB低減させ、運転動作は体感音圧を1.5 dB低減させることを見出した。2.1節や2.2節の設計指針以上に純音成分に対する体感音圧の低減を目的とする際は、聴覚以外の感覚刺激によるマスキングの有効活用が提案できる。

2.4 視聴覚刺激および運転意志を考慮したEV加減速時のサウンドマスキングデザイン

本節では2.3節で示した感覚刺激による要因効果を、後述するベースラインサウンドを付加したEV車室内に適用する。

2.4.1 ベースラインサウンドの概念

“ベースラインサウンド”とは、EV加減速時の感性価値を向上させる機能音であり、純音成分の共振通過を緩和しシームレスな加速感や減速感を強化するための付加音である⁽¹¹⁾。先行研究より、ベースラインサウンドの付加において最も印象評価の高い条件は、加速時の純音成分と暗騒音のレベル差が L_p+15 dBの場合であった。本知見を活用して2.4.2項では感覚刺激による L_p への要因効果を考慮し、運転席、助手席、後部座席の座席別に純音成分の設計目標ラインを明示する。

2.4.2 車室内環境に応じたサウンドマスキングデザイン

座席別の車室内環境に応じた純音成分のマスキングに基

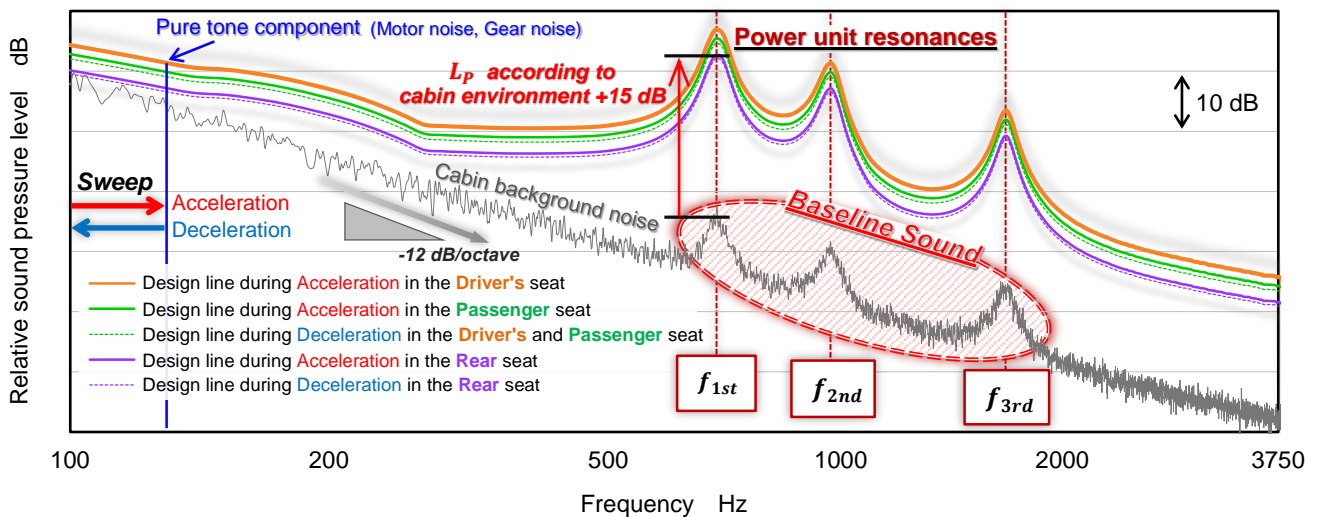


Fig. 7 Sound masking design during EV acceleration/deceleration according to the cabin environment by seat

づくサウンドマスキングデザインの概念図を, Fig. 7 にステートメントとして明示する. 純音成分を青色, 車室内相当の -12 dB/octave の周波数勾配⁽¹²⁾を有する暗騒音を灰色で示す. 純音成分は加減速に応じて時間的に周波数および音圧が変化し, 周波数毎の最大レベルを結ぶ包絡線を各種カラーの実線および破線で示す. 暗騒音は加減速時の全時間平均のスペクトラムであり, 橙色の共振通過 (f_{1st} , f_{2nd} , f_{3rd}) の緩和を目的に, 赤丸枠で囲うベースラインサウンドを付加した周波数領域のみ, 現状の暗騒音から突出する様子が確認できる.

2.3 節で示した複合感覚刺激下における Fig. 6 の要因効果に基づき提案する各種カラーの実線および破線の包絡線は, EV 加減速時における座席別の純音成分の設計目標ラインとなる. 運転席における加速時は橙色の実線で示す $L_p + 19.2$ dB, 助手席における加速時は緑色の実線で示す $L_p + 17.7$ dB, 運転席および助手席における減速時は緑色の破線で示す $L_p + 16.9$ dB, 後部座席における加速時は紫色の実線で示す $L_p + 15.0$ dB, 後部座席における減速時は紫色の破線で示す $L_p + 14.4$ dB が設計目標ラインである.

以上より, EV 加減速時における座席別の車室内環境に応じたサウンドマスキングデザインを提案した. Fig. 7 に示す純音成分と暗騒音の相対関係が実現できれば, 車室内の快音化が見込まれる. このように, サウンドデザインを目的とする場合は, 複合感覚刺激下における体感音圧の変化を考慮し, 適切な体感音圧設計を行うことで, EV の価値ある車室内音環境の創生が可能となる.

3. 研究成果

- (1) EV 加速における車室内の共振がない領域で, 周波数掃引純音に対する非定常マスキング特性を解明した. そして, 全ての周波数掃引速度に対応した可聴突出量 L_p の予測値が求まる周波数掃引純音の音量設計指針を確立した.
- (2) EV 加速における車室内の共振がある領域で, 人間の聴覚特性に基づく臨界帯域通過速度およびラウドネス変化量により, 共振通過純音の音量設計指針を確立した.
- (3) 運転の有無を考慮した聴覚, 視覚, 運転動作による複合感覚刺激下の EV 加減速時において, 周波数掃引純音に対する非定常マスキング特性を解明し, 視覚や運転動作による体感音圧の変化を定量化した.
- (4) 共振通過の影響を緩和する機能音であるベースラインサウンドを車室内に付加することで, 運転席, 助手席, 後部座席の座席別の車室内環境に応じた EV 加減速時のサウンドマスキングデザインを提案した.

謝辞

本研究は 2021 年度, 2022 年度, 2023 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 Form Electric Machines in Hybrid and Electric Vehicles, Inter.noise (2014) pp.1-10.
- (2) 柴橋和真 他, 周波数および振幅変動を考慮した純音認知の高感度パラメータの推定, 日本機械学会環境工学シンポジウム講演論文集, 2118-22-03 (2022) pp. 1-4.
- (3) Hugo Fastl, Eberhard Zwicker, Psycho-Acoustics 3rd ed., Springer (2006) pp.61-173.
- (4) 柴橋和真 他, EV 加速を想定した周波数掃引音におけるマスキング特性, 日本音響学会講演論文集 (春) (2023) pp. 1007-1008.
- (5) 柴橋和真 他, EV モータ高速回転に伴う定常および非定常純音の聴覚閾値推定, 日本機械学会環境工学シンポジウム講演論文集, J102 (2023) pp. 1-2.
- (6) 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.
- (7) 柴橋和真 他, EV パワートレインノイズ知覚に基づく車室内暗騒音のサウンドデザイン, 自動車技術会論文集, 54-2 (2023) pp. 278-283.
- (8) 柴橋和真 他, EV パワートレインノイズ知覚に基づく広帯域周波数特性のサウンドデザイン, 自動車技術会秋季学術講演会予稿集, 20226105 (2022) pp. 1-6.
- (9) 柴橋和真 他, EV 加速を想定した純音成分の臨界帯域通過速度およびラウドネス変化に基づく許容閾値, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-9-14 (2024).
- (10) 柴橋和真 他, 視聴覚刺激および運転動作を考慮した EV 加減速時の純音成分のマスキング特性, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-9-15 (2024).
- (11) 柴橋和真 他, 非定常マスキング特性を考慮した EV 加速時の暗騒音ベースラインの提案, 自動車技術会春季学術講演会予稿集, 20235109 (2023) pp. 1-6.
- (12) 柴橋和真 他, 広帯域雑音の周波数勾配を考慮した純音認知評価, 日本音響学会講演論文集 (春) (2022) pp. 673-674.