

加速走行音の変化を考慮した 変速段ごとの変速操作感の創生

Creation of Gearshift Operation Feeling for Each Gearshift Stage in Consideration of Change in Acceleration Driving Sound

精密工学専攻 3号 五十嵐 啓紘
Yoshihiro Igarashi

1. はじめに

現在の自動車事情として、クラッチなどの操作を必要としないオートマチック（以下、AT）車が普及している。一方、エンジン音や変速操作などを楽しむために自動車に乗るドライバーは一定数いる。近年ではエンジン音設計による運転時の印象向上に関する研究⁽¹⁾や、セミAT車のような簡易な変速操作を楽しめる車の開発、電気自動車（以下、EV）でありながらマニュアル（以下、MT）変速を行える車の開発などが進んでいるが、変速時の音や振動に着目した事例は少ない。

一般にセミAT車は、変速時のギアの噛み合いにより生じる音や振動（以下、変速音、変速ショック）を電子制御により抑制している。そのため、変速操作により得られる満足感（以下、変速操作感）がMT車に比べて低下している。先行研究では変速操作へのフィードバックとして変速音と変速ショックの付加により変速操作感の向上⁽²⁾が図られたが、加速走行音の変化を考慮した事例は少ない。

そこで本研究では、各駆動システムにおける変速段ごとの変速音による加速感の向上、および各駆動システムで共通の加速走行音との相対的な関係の把握を行う。さらに、変速段ごとの変速音に対応した変速ショックの感性調和設計により、変速段ごとに变化する新たな変速操作感の創生を目指す。

なお、本研究におけるすべての評価実験は、中央大学「人を対象とする研究」倫理審査委員会の承諾を得た上で、被験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. 加速走行音の変化を考慮した変速段ごとの変速音の音圧設計

2.1 加速走行音の音圧変化について

内燃機関車（以下、ICEV）とEVにおける加速走行時の音圧の変化をFig. 1に示す。ICEVはロードノイズなどよりもエンジン音の方が支配的であるため、急激に音圧が大きくなり、その後ほぼ一定となる。一方、EVはモータ音よりもロードノイズが支配的であるため、徐々に音圧が大きくなる。また、そのため走行音の音圧はEVの方が顕著に変化する。

2.2 実験条件

本実験では、変速段ごとに音圧が大きくなる変速音を被験者に提示した際の印象評価を行い、加速感が向上する条件での加速走行音と変速音の音圧変化の関係を把握する。走行音および変速音はヘッドホンから提示し、加速感について評定尺度法による7段階絶対評価を行い、被験者は8人とする。また、以降で用いる変速音は、実際の変速音の周波数勾配と類似したブラウンノイズ（-6 dB/oct.）により任意の上限周波数で60 msの過渡音として作成し、一般性を確認する。

駆動システムごとの加速走行音の音圧の違いにより、先行研究⁽³⁾では加速感が向上する条件として、変速段ごとの変速音の音圧変化はICEVよりEVの方が大きいことが示されている。これより、本実験の変速音の音圧変化の条件はそれぞれの駆動システムにて設定する。変速音の音圧は、変速段1→2

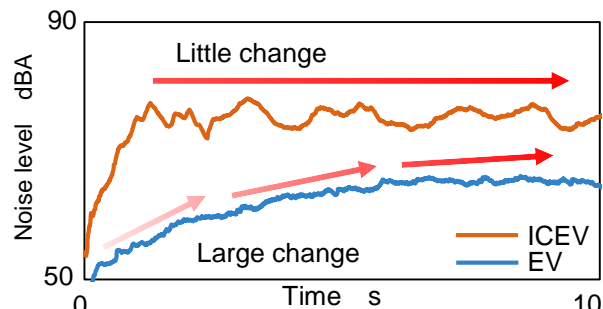
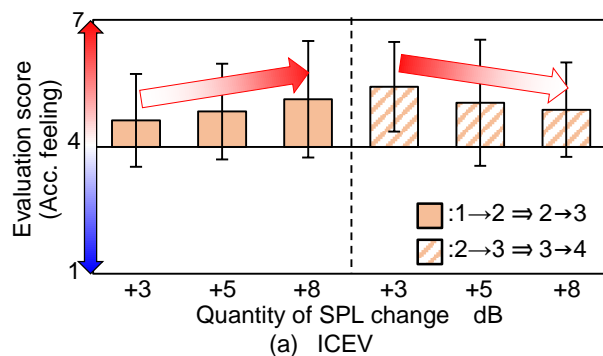
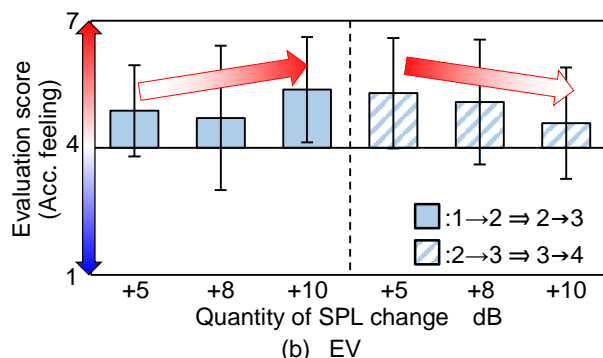


Fig. 1 Background noise SPL change



(a) ICEV



(b) EV

Fig. 2 Result of increasing SPL

⇒ 2→3 の変化、および 2→3 ⇒ 3→4 の変化を ICEV は +3, +5, +8 dB, EV は +5, +8, +10 dB を組み合わせた 9 条件とする。なお、変速段 1→2 における変速音の音圧は走行全体の加速走行音の音圧に合わせ、ICEV は 75 dBA, EV は 60 dBA とする。また、すべての変速段における変速音の上限周波数は、加速走行音の音圧が 20 dB 以上の範囲として、ICEV は 0-6 kHz, EV は 0-3 kHz に統一する。

2.3 実験結果および考察

評価結果のうち、各変速段における変速音の音圧変化が同一である条件の平均値と標準偏差を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) より、ICEV の 1→2 ⇒ 2→3 は +8 dB, 2→3 ⇒ 3→4 は +3 dB で加速感が向上した。また Fig. 2 (b) より、EV の 1→2 ⇒ 2→3 は +10 dB, 2→3 ⇒ 3→4 は +5 dB で加速感が向上した。

加速走行音の音圧は車速と共に大きくなり、特にロードノイズは車速が上がるほど緩やかに上昇する。そのため、低変速段では変速音の音圧変化を大きく、高変速段では小さくすることで加速走行音に対して変速音の音圧変化の違和感が少なくなり、加速感が向上すると考えられる。また 2.1 節で示す通り、ICEV に比べて EV の加速走行音はロードノイズが支配的であるため音圧変化が顕著である。このことから、変速段ごとの変速音の音圧変化を EV では大きくすることで駆動システムに合った加速感の向上につながると考えられる。

以上は変速音の音圧の絶対的な変化量を考察したが、以降では聴覚を考慮した加速走行音との相対的な関係を考察する。Fig. 3 で示すように、各変速区間における加速走行音の音圧の最大値に対する変速音の音圧突出量を、聴感特性を考慮した A 特性で算出し、加速走行音に対する変速音の聴こえやすさを定量化する。さらに、変速段ごとの変速音の突出量の変化量（以下、音圧突出変化量）を算出し、加速走行音に対する変速音の聴こえやすさの変化を定量化する。

Fig. 2 (a) より、ICEV の加速感が向上する変速音の音圧変化は 1→2 ⇒ 2→3 で +8 dB、2→3 ⇒ 3→4 で +3 dB だが、このときの音圧突出変化量は Fig. 3 に示すように 1→2 ⇒ 2→3 で約 +4.7 dBA、2→3 ⇒ 3→4 で約 +4.0 dBA である。同様に Fig. 2 (b) より、EV の加速感が向上する変速音の音圧変化は 1→2 ⇒ 2→3 で +10 dB、2→3 ⇒ 3→4 で +5 dB だが、音圧突出変化量は、1→2 ⇒ 2→3 で約 +2.7 dBA、2→3 ⇒ 3→4 で約 +2.6 dBA であり、変速段ごとの音圧突出変化量の差が少ないほど加速感が向上すると考えられる。

しかし、ここでの EV における変速音の音圧変化は本実験条件で最大であり、より大きい音圧突出変化量の印象変化を確認できていない。そこで変速段ごとの音圧突出変化量が同程度であり、先の EV の条件より大きいものを含めて追加実験を行う。音圧突出変化量の条件は +0.8、+2.6、+4.6、+6.5 dBA とし、その他の条件は 2.2 節と同様とする。Fig. 4 に示す評価結果より、+4.6 dBA で最も加速感が向上した。

ICEV と EV の結果より、変速音の音圧は変速段ごとの絶対的な変化量では駆動システムごとの設計が必要だが、加速走行音に対する変速音の音圧突出変化量では駆動システムによらず変速段ごとに約 +4.5 dBA で加速感が向上する⁽⁴⁾。

3. 加速走行音の変化を考慮した変速段ごとの変速音の音質設計

3.1 加速走行音の音質変化について

Fig. 5 に (a) エンジン / (b) モータ音の周波数特性を示す。エンジン / モータ音は回転次数成分を有し、回転数と共に高周波成分となる。エンジン音は低次成分が主要因のため上昇速度は遅く、周波数変化は小さい。また、モータ音は高次成分が主要因のため上昇速度は速く、周波数変化は大きい。

3.2 実験条件

本実験では、変速段ごとに高周波成分が多くなる変速音を被験者に提示した際の印象評価を行い、加速走行音と加速感が向上する変速音の音質変化の関係を把握する。

エンジン / モータ音の音質変化の違いにより、先行研究⁽³⁾では加速感が向上する条件として変速段ごとの変速音の上限周波数の変化は、ICEV より EV の方が大きいことが示されている。これより変速音の上限周波数は、変速段 1→2 ⇒ 2→3、および 2→3 から 3→4 の変化を ICEV は ±0、+1、+2 kHz、EV は +1、+2、+3 kHz を組み合わせた 9 条件とする。その他の条件は 2 章と同様とする。

3.3 実験結果および考察

2 章と同様に評価結果のうち、各変速段における変速音の

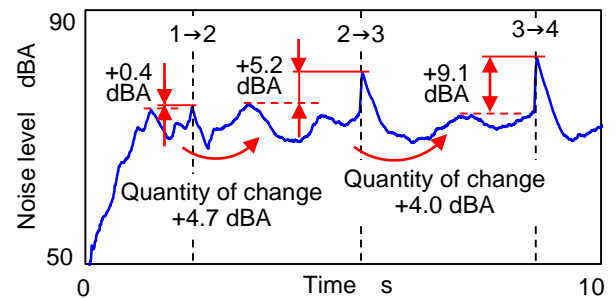


Fig. 3 Quantity of SPL protrusion change

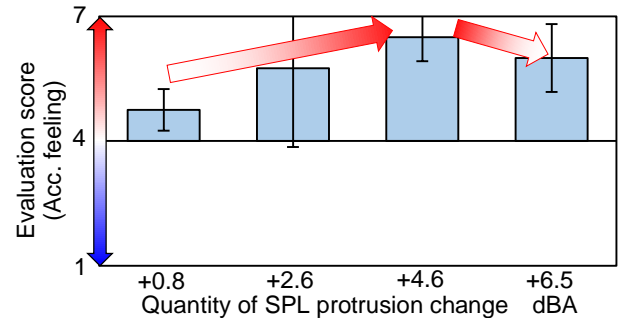
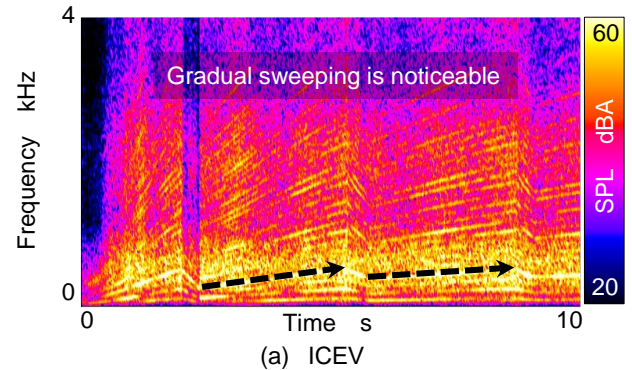
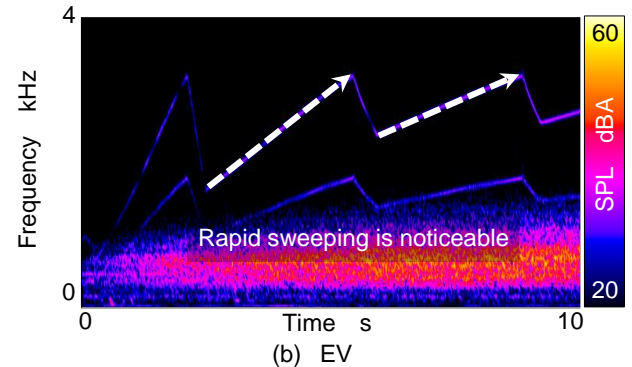


Fig. 4 Result of additional experiment on EV



(a) ICEV



(b) EV

Fig. 5 Background noise freq. change

上限周波数の変化が同一である条件の平均値と標準偏差を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) より、ICEV の 1→2 ⇒ 2→3 および 2→3 ⇒ 3→4 の両方において +1 kHz で加速感が向上した。また Fig. 6 (b) より、EV の 1→2 ⇒ 2→3 および 2→3 ⇒ 3→4 の両方において +2 kHz で加速感が向上した。

3.1 節で示す通り、エンジン音は上昇速度が遅いため単位時間当たりの周波数変化が小さい。そのため、ICEV 走行では変速音の上限周波数の変化が小さいときに違和感が少なく、加速感が向上すると考えられる。同様に、モータ音は上昇速度が速いため単位時間当たりの周波数変化が大きい。そのため、EV 走行では変速音の上限周波数の変化が大きいときに違和感が少なく、加速感が向上すると考えられる。

以上は変速音の上限周波数の絶対的な変化量を考察したが、以降では聴覚を考慮した加速走行音との相対的な関係を考察する。Fig. 7で示すように、各変速区間における変速直前のエンジン／モータ音に対する変速音のシャープネス値の突出率を算出し、さらに突出率の変速段ごとの変化率（以下、シャープネス突出変化率）を算出することで、エンジン／モータ音に対する変速音の音質変化を定量化する。ここで、シャープネス値は主観的な音の鋭さや甲高さに対応する心理音響尺度であるが、これにより聴覚上のエンジン／モータ音の音質と変速音の音質の関係を明確にする。

Fig. 6 (a)より、ICEVにおける加速感が向上する変速音の上限周波数の変化は1→2 ⇒ 2→3および2→3 ⇒ 3→4で+1 kHzだが、このときのシャープネス突出変化率はFig. 7に示すように1→2 ⇒ 2→3で約+3.7%、2→3 ⇒ 3→4で約+4.1%である。同様にFig. 6 (b)より、EVの加速感が向上する変速音の上限周波数の変化は1→2 ⇒ 2→3および2→3 ⇒ 3→4で+2 kHzだが、シャープネス突出変化率は1→2 ⇒ 2→3で約+6.2%、2→3 ⇒ 3→4で約+4.5%であり、変速段ごとのシャープネス突出変化率の差が少ない。

以上より、変速音の音質は変速段ごとの絶対的な変化では駆動システムごとの設計が必要だが、エンジン／モータ音に対する変速音のシャープネス突出変化率では、駆動システムによらず変速段ごとに約+4.6%で加速感が向上する⁽⁴⁾。

4. 変速段ごとの変速音変化に対応した変速ショック設計

4.1 加速走行時の変速ショックについて

MT車の変速では、高変速段ほどギア比が小さくなり、変速ショックも小さくなる。しかし、変速音と変速ショックはギアの噛み合いにより生じ、変速音が大きいほど変速ショックも大きくなるのが一般的である。2章では変速段ごとに変速音の音圧を大きくすることで加速感の向上を行ったが、本章では変速音の音圧変化に対応した変速ショックの加速度変化を感性調和設計することで、一体感の向上を行う。

4.2 実験条件

ドライビングシミュレータ（以下、DS）を用い、加速感と一体感について評価する。変速ショックはシートに約70 msの前後加速度を付加し、変速音の変化は2、3章よりTable 1とする。なお、DSの走行はペダル操作などによる影響を少なくするため、1 kmの直線路をアクセル開度100%で走行する。

ICEVの1回の変速において、変速音の音圧10 dBAに対して変速ショックの加速度を0.10 G変化させると一体感が向上することが示されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そこで、変速段ごとの変速音の変化に対応して変速ショックも変化させることで、さらなる一体感の向上を図る。

変速段1→2の変速ショックの加速度はICEVでは0.40 G、EVでは0.25 Gとし、Table 1の変速音の音圧増加に対して変速ショックの加速度が0.005, 0.01, 0.02 G/dBAで増加する条件をそれぞれSma., Mid., Lar.としてTable 2に示す。その他の条件は2章と同様とする。

4.3 実験結果および考察

一体感に関する評価結果の平均値と標準偏差をFig. 8に示す。一体感に関して、ICEVとEVの両方においてMid.で評価得点が高くなった。また、加速感に関して、ICEVとEVの両方においてLar.で評価得点が高くなった。

Table 2に示すように、Midの変速音の変化に対する変速ショックの変化はSma.に比べて小さすぎず、Lar.に比べて大きすぎないことから一体感が向上したと考えられる。また、Lar.の変速段ごとの変速ショックの加速度変化はSma.やMid.

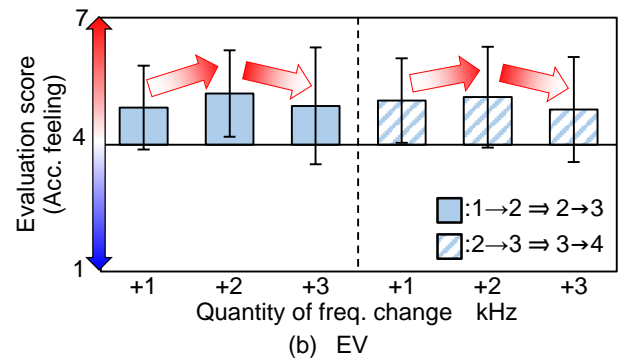
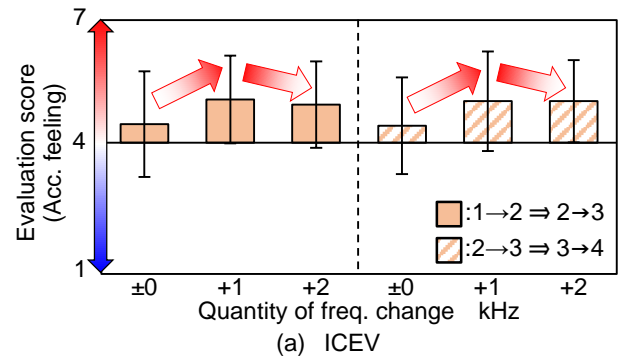


Fig. 6 Result of increasing freq. range

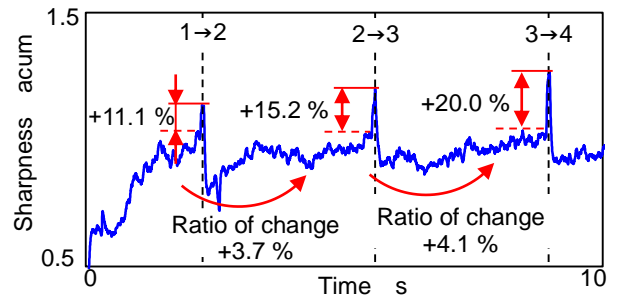


Fig. 7 Ratio of sharpness protrusion change

Table 1 Condition of gearshift sound

Driving system	Parameter	Gearshift stage		
		1→2	2→3	3→4
ICEV	Freq. range	0-6 kHz	0-7 kHz	0-8 kHz
	SPL	75 dBA	83 dBA	86 dBA
EV	Freq. range	0-3 kHz	0-5 kHz	0-7 kHz
	SPL	60 dBA	70 dBA	75 dBA

Table 2 Condition of gearshift shock

Driving system	Condition name	Gearshift stage		
		1→2	2→3	3→4
ICEV	Sma.	0.40 G	0.44 G	0.46 G
	Mid.		0.48 G	0.51 G
	Lar.		0.56 G	0.62 G
EV	Sma.	0.25 G	0.30 G	0.33 G
	Mid.		0.35 G	0.40 G
	Lar.		0.45 G	0.55 G

に比べて大きいことから、変速ショックの変化を認知しやすいため、加速感が向上したと考えられる。このことから、変速段ごとの変速ショックの変化が大きいほど加速感が向上すると考えられる。

以上のことから、変速段ごとの変速音の音圧変化に対して、0.01 G/dBA の変速ショックの加速度変化により感性調和し、加速感と一体感の向上が両立できる⁽⁷⁾。

5. 変速音および変速ショック変化の検証

5.1 実験条件

走行条件は変速段ごとに変速音と変速ショックの変化がない Ori., 変速音のみ変化する Sound, 変速ショックのみ変化する Shock, 変速音と変速ショックの両方が変化する S&S の4条件とする。

変速音の変化は Table 1, 変速ショックの変化は Table 2 の Mid. とする。また、変速段ごとの変化がない条件は Table 1, 2 の変速段 1→2 の条件を全変速段に適用する。評価項目は一体感と加速感とし、その他の条件は 4 章と同様とする。

5.2 実験結果および考察

評価得点を正規化し、平均値と標準偏差を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、Ori. から Sound, Shock の評価得点は一体感および加速感が有意に向上している。また、Ori. から S&S の評価得点は一体感および加速感がさらに向上している。

Sound は変速段ごとに変速音の認知性が向上することにより、変速操作に対するフィードバックを明確に得られることから、一体感および加速感が向上すると考えられる。同様に、Shock は変速段ごとに変速ショックの認知性が向上することにより、一体感および加速感が向上すると考えられる。また、変速音と変速ショックのそれぞれによる印象評価への寄与の大きさは同程度であると考えられる。しかし、変速音と変速ショックの感性調和を考慮した S&S では、さらに一体感と加速感が向上したと考えられる⁽⁷⁾。

6. 研究成果

本稿では、加速走行音の変化を考慮した変速段ごとの変速音の設計、および変速音の変化に合わせた変速ショックの変化の感性調和設計により以下のような成果を得た。

- (1) 変速音の音圧は、音圧突出変化量が変速段ごとに約+4.5 dBA で大きくなると加速感が向上する。
- (2) 変速音の音質は、シャープネス突出変化率が変速段ごとに約+4.6 % で高くなると加速感が向上する。
- (3) 変速音の音圧に対して、変速ショックの加速度を 0.01 G/dBA で変化させると一体感が向上する。
- (4) 変速段ごとの変化は変速ショックより変速音の方が印象向上への寄与が大きい、変速音と変速ショックの感性調和設計によりさらに印象が向上する。

参考文献

- (1) 林毅, アクティブ制御を用いたエンジンサウンドデザイン, 自動車技術会論文集, 47-6 (2016) pp. 1355-1359.
- (2) 五十嵐啓紘, 清水周作, 戸井武司, 操作系の差異および運転シーンを考慮した変速操作感の向上, 日本音響学会講演論文集 (春) (2022) pp. 1297-1298.
- (3) 五十嵐啓紘, 花井奏太, 戸井武司, 変速段ごとの変速サウンドデザインによる加速感向上, 日本音響学会講演論文集 (春) (2023) pp. 1017-1018.
- (4) 五十嵐啓紘, 戸井武司, 加速走行音変化に基づく変速段ごとの変速音設計による加速感向上, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-9-8 (2024).
- (5) 五十嵐啓紘, 戸井武司, 変速音に対応した変速ショック

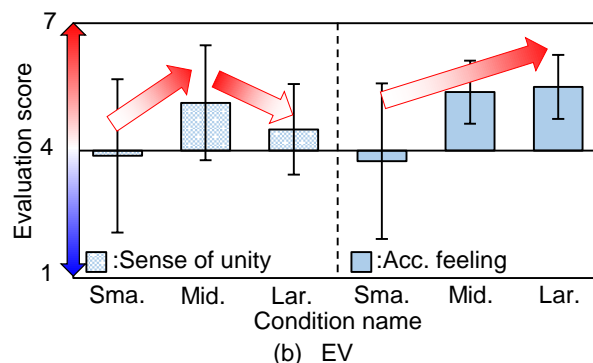
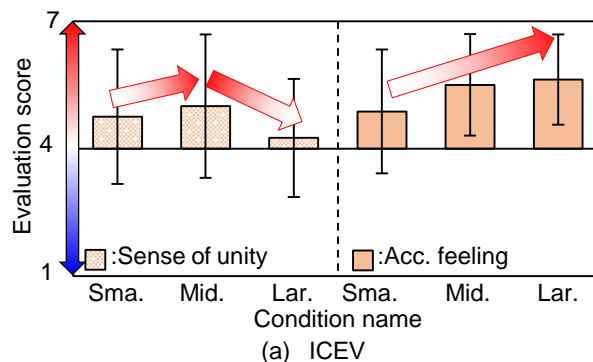


Fig. 8 Result of increasing acceleration

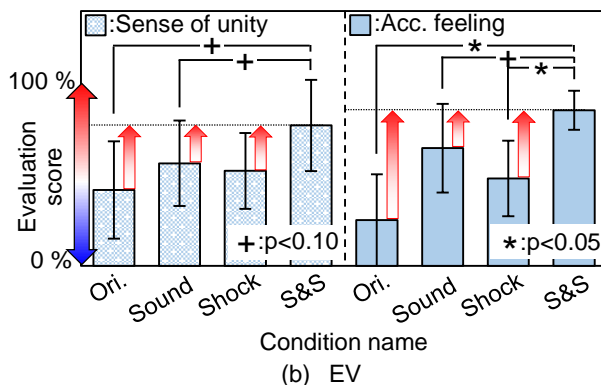
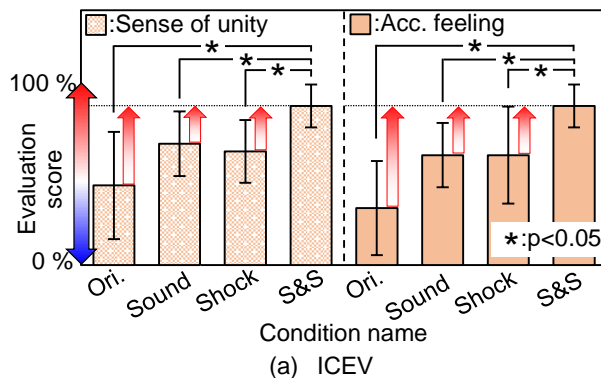


Fig. 9 Result of verification experiment

および変速操作力の設計による変速操作感の創生, 自動車技術会学術講演会講演予稿集 (秋), 20236236 (2023) pp. 1-6.

- (6) 五十嵐啓紘, 戸井武司, 変速音と変速ショックおよび変速操作力の感性調和設計に基づく変速操作感の創生, 自動車技術会論文集, 55-3 (2024). (掲載予定)
- (7) 五十嵐啓紘, 戸井武司, 変速段ごとの感性調和設計による変速操作感の創生, 日本音響学会講演論文集 (春), 1-9-9 (2024).