

無段変速車の加速音に着目した加速感推定モデルの構築

Construction of Prediction Model for Acceleration Feeling Focused on Acceleration Sound of Vehicle with Continuously Variable Transmission

精密工学専攻 12 号 加茂川 隆至
Takashi Kamogawa

1. はじめに

近年、環境への配慮から燃費効率が良く、変速ショックの少ない無段変速車 (CVT 車) の普及が進んでいるが、期待する加速感が得られにくいという欠点がある。従来研究では、ドライビングシミュレータ (DS) を用いて実環境を想定した検討が行われ、加速度や自動車加速音 (加速音) が加速感に影響することが報告されている⁽¹⁾。また、加速音の音響特性と楽器音の音響特性の類似性を利用した定量的な評価方法が提案されている⁽²⁾。

そこで本研究では、CVT 車をベースとした加速音に着目し、加速音の音圧レベル、エンジン回転上昇率、エンジン回転上昇時間 (回転上昇時間)、単位時間あたりのエンジン回転上昇数 (回転上昇速度) をそれぞれ変更した際の印象変化を主観評価より把握する。次に、評価結果を目的変数、加速感への影響が大きいパラメータを説明変数とした加速感推定モデルを重回帰分析より構築する。評価結果とモデルより算出した推定結果間の相関係数などを用いて、加速感推定モデルの有用性を検討する。さらに、DS と実車を用いた実験から、運転動作を考慮した加速感推定モデルの有用性を検討する。

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. 加速音のパラメータ変更時の印象変化

本章では、加速音のパラメータを変更した際の印象変化を主観評価より把握する。

2.1 音圧レベル変更時の印象変化把握⁽³⁾

セダンタイプの CVT 車を用いた走行実験で録音した加速音 (音源 a) の音圧レベルを Fig. 1 に示す。これを基準とし、サウンドシミュレータ上で加速開始時から線形的に音圧レベルを変化させ、加速終了時に +6 dB(A) (音源 b)、+3 dB(A) (音源 c)、-3 dB(A) (音源 d)、-6 dB(A) (音源 e) となるように、デジタルフィルタを用いて作成する。評価は無響室で行い、評価音源をヘッドホンより提示する。評価方法はシェッフェの一対比較法 (中屋の変法)、評価項目は加速感、被験者は 20 代 18 名である。評価の際は、基準音を提示した後、1 秒の空白後に評価音源を提示する。評価結果を Fig. 2 に示す。これより、音圧レベルが低下すると加速感が低下し、音圧レベルが上昇すると加速感が向上することがわかった。

2.2 エンジン回転上昇率変更時の印象変化把握⁽³⁾

本節で使用する音源の回転数を Fig. 3 に示す。エンジン

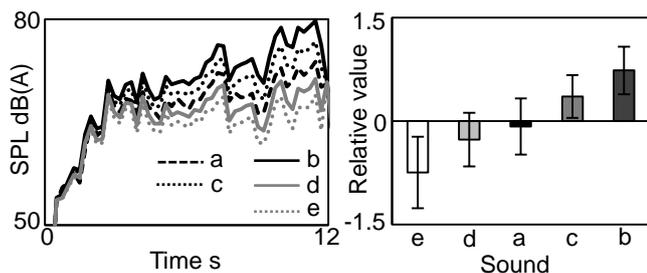


Fig. 1 SPL of sounds

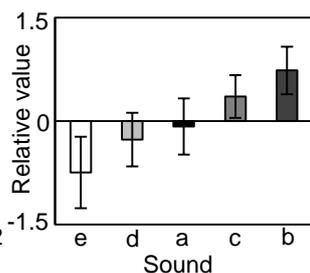


Fig. 2 Result of SPL changes

回転上昇率の加工を容易にするため、音源 a を模擬した音源 A を作成する。そして A の回転数が加速終了時に 8%、16% 上昇するよう線形的に加工した音源 B、C、変速後の回転数を A と同様にし、かつ加速終了時に 8%、16% 上昇するよう線形的に加工した音源 D、E、変速後の回転数を A と同様にし、かつ各速度域終了時に回転数が 8%、16% 上昇するよう線形的に加工した音源 F、G、変速時の回転数帯域を 5000 rpm から 6000 rpm に変更した音源 H、A の一速の回転上昇率を 20% 上昇させた音源 I、A の一速の回転上昇率を 20% 上昇させ、かつ変速時の回転数帯域を 5000 rpm から 6000 rpm に変更した音源 J の計 10 種類を使用する。なお、音圧変化による影響を除去するため、これらの音源には音圧が一定となるようフィルタ処理を行い、2.3 節、2.4 節で用いる音源にも同様の処理を施す。評価方法には SD 法による基準音との相対評価を使用する。被験者は 20 代 12 名である。

因子分析より得た因子負荷量を Table 1 に示し、迫力因子、快適因子、躍動因子の 3 因子を抽出した。Fig. 4 に各因子得点の散布図を示す。H と J は音源 A より迫力性が大きく向上し、I では迫力性がやや低下している。これは、変速時の回転数帯域の違いによって迫力性が変化したと考えられる。また、C、E、F、G は迫力性、快適性ともに向上している。特に E、F、G は変速に伴う回転下降数が大きく、この特性は総合的印象の向上に有効であることが考えられる。一方で、音源 B と音源 D をみると音源 B では快適性が低下し、音源 D は迫力性がやや低下している。これより、同様の回転数特性でも回転上昇率が低いと印象が向上しないことがわかった。

続いて、シェッフェの一対比較法を用いた評価実験を行う。評価音源は基準音の音源 A と、SD 法を用いた実験で明確な印象変化が確認された音源 C、E、G、J の 5 つとする。被験者は 20 代 19 名、評価項目は加速感である。Fig. 5 に評価結果を示す。これより、音源 G と音源 J は加速感が良く、回転数変化が大きいほど加速感が良い傾向になることがわかった。

2.3 回転上昇時間変更時の印象変化把握⁽⁴⁾

本節では、回転上昇時間を変更した際の印象変化を把握す

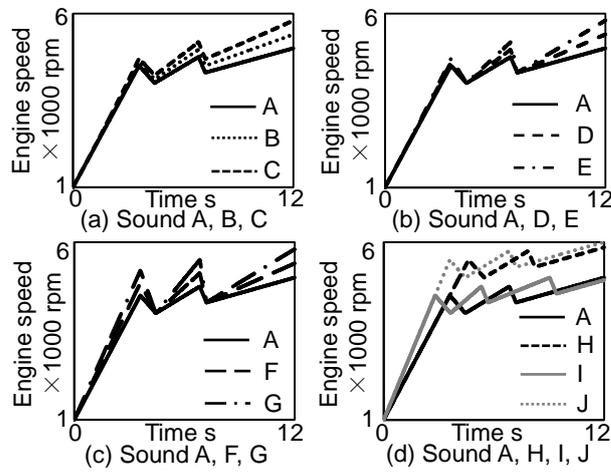


Fig. 3 Engine speed of sounds

Table 1 Result of factor analysis - Factor loadings

Adjective pairs	Factor name		
	Powerful	Comfort	Dynamic
Rough - Balmy	0.88	0.06	0.18
Concerned - Not concerned	0.74	-0.34	0.20
:	:	:	:
Desirable - Non desirable	-0.18	0.88	0.21
Comfortable - Uncomfortable	-0.04	0.77	0.00
:	:	:	:
Beat - Non beat	0.14	0.15	0.80
Greatly changed- Little changed	0.45	0.31	0.62
Contribution ratio %	34.6	19.6	11.1
Cumulative Contribution ratio %	34.6	54.6	65.7

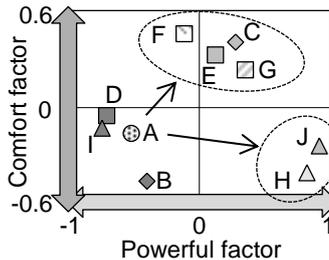


Fig. 4 Result of factor analysis

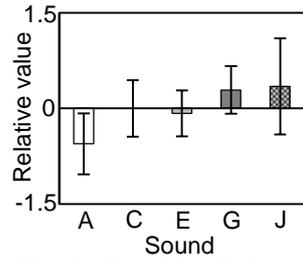


Fig. 5 Result in climb rate of engine speed

る。Fig. 6に評価音源の回転数を示す。二速の回転上昇時間を2 s, 4 s, 6 sと加工した3音源を作成し、それぞれ音源K, L, Mとする。この3音源の二速以降の回転上昇速度、変速に伴う単位時間当たりのエンジン回転下降数(回転下降速度)は同様とする。被験者は20代11名である。その他の評価条件は2.1節と同様である。

Fig. 7に評価結果を示す。これより、回転上昇時間変更による明確な傾向は得られなかった。また、3音源間に有意差が確認できないことから、今回のような回転上昇時間変更では加速感の向上は期待できないことがわかった。

2.4 回転上昇速度変更時の印象変化把握⁽⁴⁾

2.4.1 回転上昇速度変更に着目した主観評価

本項では、回転上昇速度を変更した際の印象変化を把握する。Fig. 8に評価音源のエンジン回転数を示す。二速の回転上昇速度を100 rpm/s, 200 rpm/s, 300 rpm/sにした3音源を作成し、それぞれ音源N, O, Pとする。これら3音源の変速時のエンジン回転数は同様とする。その他の評価条件は2.3節と同様である。

Fig. 9に評価結果を示す。評価結果より回転上昇速度が速いほど加速感が低下することがわかり、N, P間で有意差(p値<0.01)を確認できた。よって、本実験結果の妥当性は十分あると考えられる。ここで、この実験結果を考察する。2.2節では回転数変化が大きい、すなわち回転上昇速度が速い方が加速感の良い傾向にあり、本項の実験結果と矛盾している。つまり、回転上昇速度が速いだけでは印象向上につながらない場合があり、回転上昇速度以外の要素が影響した可能性がある。被験者からは、音源NからPについて「変速後のバランスがおかしい」という意見を得ており、変速部分に着目していることがわかった。そこで、回転下降速度を変更した際の主観評価を行い、加速感に与える影響を考察する。

2.4.2 回転下降速度による加速感への影響考察

本項では、回転下降速度が加速感に与える影響について考察する。評価に使用する音源のエンジン回転数をFig. 10に示す。音源N, O, Pの回転下降速度を1250 rpm/sから3333

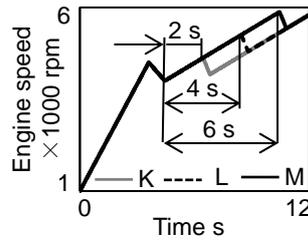


Fig. 6 Engine speed which rise time changes

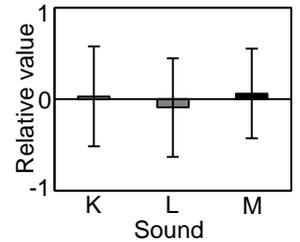


Fig. 7 Evaluation result in changing of rise time

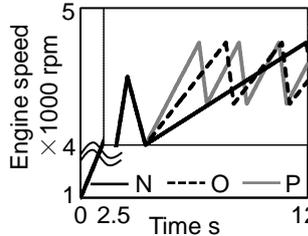


Fig. 8 Engine speed in increasing speed

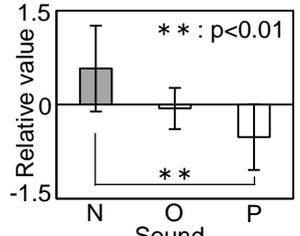


Fig. 9 Evaluation result in increasing speed

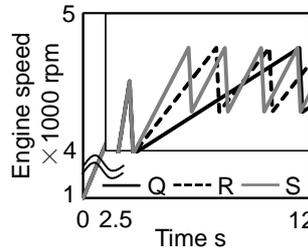


Fig. 10 Engine speed in decreasing speed

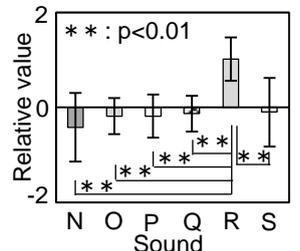


Fig. 11 Evaluation result in decreasing speed

rpm/sとし、それぞれ音源Q, R, Sとする。これら3音源にNからPの3音源を加えた6音源を評価に使用する。被験者は20代10名とし、その他の評価条件は2.3節と同様である。

Fig. 11に評価結果を示す。評価結果よりRが最も加速感が良く、Rと他の5音源間に有意差(p値<0.01)があることを確認できた。次にOとRをみると、同じ回転上昇速度であるがRの方が加速感が大きく向上している。これより、回転下降速度を速くすることで加速感が向上すると考えられる。また、回転上昇速度が300 rpm/sであるPよりも、200 rpm/sであるRの方が加速感が良い。ここで、回転上昇速度、回転下降速度と評価結果間の相関係数を各々算出すると(回転上昇速度, 回転下降速度)=(0.12, 0.57)であり、回転下降速度との相関が高いことを確認した。これより、回転下降速度は回転上昇速度よりも影響が大きいことがわかった。

3. 加速感推定モデルの構築⁽⁴⁾

本章では、加速音の主観評価に基づき、重回帰分析より加速感推定モデルを構築する。

3.1 加速感推定モデルの構築条件検討

加速走行前半、中盤、後半に着目したモデル、Model A1, Model A2, Model A3の構築条件を検討する。被験者は月に1回以上運転し、迫力がある車を好む20代7名とする。構築に用いる評価音源は2章で使用した24音源、加速感推定モデルの目的変数は加速感評価得点である。評価得点の取得には7段階の絶対評価を用いる。また、順序効果や評価時の被験者の気分による影響を除去するため、音源の提示順番を順不同にする。評価は3回ずつ行い、外れ値は除外する。

Fig. 12に構築に使用するパラメータの一部を示す。変速(加速終了)1秒前から変速(加速終了)までの音圧実効値

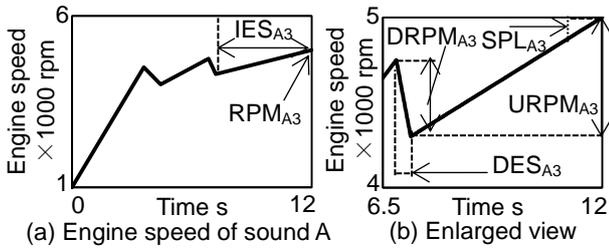


Fig. 12 Explanation of parameters used in model

Table 2 Correlation coefficients between parameters and evaluation result

Name	Model A1	Model A2	Model A3
SPL _x	0.09	0.27	0.29
RPM _x	0.28	0.39	0.63
DRPM _x	0.52		0.63
URPM _x	0.32	0.49	0.72
IES _x	0.09	0.70	0.35
DES _x	-0.23		0.05
Shift			-0.45

Table 3 Consideration of utility in each model

Name	Adjusted R-square	Correlation coefficient	Average error
Model A1	0.23	0.52	0.51
Model A2	0.60	0.81	0.34
Model A3	0.72	0.88	0.28
Model U	0.74	0.89	0.27

(SPL_x [dB(A)]), 変速 (加速終了) 時のエンジン回転数 (RPM_x [rpm]), 変速に伴うエンジン回転下降数 (DRPM_x [rpm]), 変速以降のエンジン回転上昇数 (URPM_x [rpm]), 回転上昇速度 (IES_x [rpm/s]), 回転下降速度 (DES_x [rpm/s]), 変速回数 (Shift) の計 4 から 7 種類より選択して構築する。なお、対象とする評価音源の多くが 2 回変速の加速走行であるため、中盤の DRPM_x と DES_x は今回割愛する。以上の条件に基づいて加速感推定モデルを構築する。

3.2 重回帰分析による加速感推定モデル構築

3.1 節で設定した条件に基づき、加速感推定モデルを構築する。Table 2 に各パラメータと評価結果間の相関係数を示す。構築に用いるパラメータは評価結果との相関が高いものから順に選択する。また、多重共線性による推定精度の低下を避けるため、パラメータ間の相関が高い場合は評価結果との相関が高かったパラメータを採用する。構築した Model A1, Model A2, Model A3 を統合したモデル (Model U) を下記に記す。なお、有意であったパラメータを下線で示す。

$$\begin{aligned}
 \text{Model U} = & 5.4 \times 10^{-4} \times \underline{\text{URPM}_{A2}} + 0.1 \\
 & \times \underline{\text{SPL}_{A3}} + 4.5 \times 10^{-4} \times \underline{\text{RPM}_{A3}} + 6.9 \times 10^{-4} \\
 & \times \underline{\text{URPM}_{A3}} + 8.3 \times 10^{-4} \times \underline{\text{DRPM}_{A3}} - 11.8 \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで構築した 4 式の有用性について検討する。Table 3 に各モデルの自由度修正済み決定係数、評価結果と推定結果間の相関係数および平均誤差を各々示す。これより、Model U が他の 3 式よりも決定係数および相関係数が高く、平均誤差が小さいことから、最も有用性があることがわかる。また Model U よりやや劣るが、Model A3 も推定精度が良いことがわかる。Table 2 より、加速走行後半のパラメータは前半、中盤のものとは比べ、評価結果との相関が高い傾向にあることがわかる。以上より、加速走行後半のパラメータを多く用いることで推定精度が高い加速感推定モデルが構築できた。



Fig. 13 Experiment setup

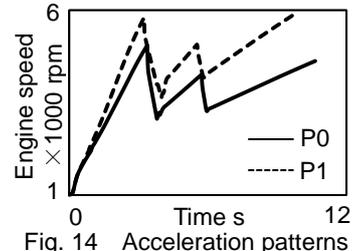


Fig. 14 Acceleration patterns

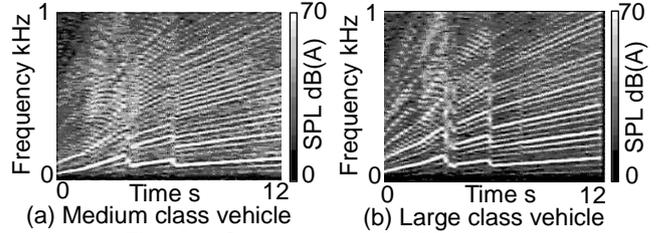


Fig. 15 Spectrogram of vehicle sounds

4. 運転動作を考慮した推定モデルの検討

3 章で重回帰分析を用いて加速感推定モデルを構築した。しかし、加速音の主観評価に基づいたものであり、運転動作は考慮されていない。本章では、DS と実車を用いた評価実験より、運転動作を考慮した加速感推定モデルの検討を行う。

4.1 ドライビングシミュレータを用いたモデルの検討⁽⁵⁾

Fig. 13 に実験セットアップを示す。実験は半無響室で行い、シート位置はペダルに足をかけた際に、足首の角度が 90° となる位置に調整する。加速音はヘッドホンより提示する。被験者は直線走行を心掛け、平坦な直線道路上を停車状態から、アクセルペダルを最大まで踏み込んだ状態で発進加速する。100 km/h に到達したらブレーキを踏んで停車し、評価得点を記入する。なお、これらの一連の動作に慣れてもらうため、評価実験前に被験者に練習を複数回してもらう。また、視覚情報による影響を少なくするため、走行中の画面にはタコメータ等の計器類は表示しない。評価方法と被験者は 3 章と同様である。評価項目は加速感、迫力、好ましさの 3 つとする。Fig. 14 に使用する加速パターンを示す。P0 を基準とし、P0 に対し回転数変化を大きくした P1 の 2 つを用意する。なお、この 2 つは予備実験より有意差があることを確認した。Fig. 15 に用いる加速音のスペクトログラムを示す。中型車 (Med.) と大型車 (Large) を想定した音質の加速音 2 種を使用する。中型車は低周波数域の次数成分が顕著に現れ、大型車は中型車よりも高次の成分が明確である。

4.1.1 評価結果と推定結果の比較

評価結果と式 (1) より算出した推定結果を Fig. 16 にそれぞれ示す。まず、評価結果より、中型車では P0 よりも P1 の方が加速感は良く、大型車では P0, P1 ともにほぼ同様の印象であることが確認できる。また、P0 では大型車の方が加速感は良く、P1 では中型車の方が加速感は良い。次に、評価結果と推定結果を比較すると、P0 では誤差は少ないが加速感の優劣を推定できておらず、P1 では加速感の優劣を推定できているが、誤差がやや大きいことがわかる。

本報では、次に挙げる 2 つの要因に着目し考察する。

[i] 被験者の属性による推定精度への影響

[ii] 運転動作の有無による加速感への影響

4.1.2 クラスタ分析を用いた考察

クラスタ分析を用いて [i] 被験者の属性による推定精度への影響を考察する。分析より、7 名の被験者を 3 つのクラスタに分け、各クラスタの評価結果を Fig. 17 に示す。これより、各クラスタとも P0, P1 の印象が異なることが確認できる。クラスタ A では、評価結果と推定結果が類似してお

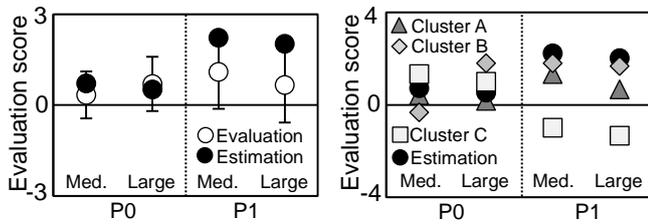


Fig. 16 Comparison of results Fig. 17 Analysis result

Table 4 Consideration in each cluster

Name	Correlation coefficient	Powerfulness	Preference
ALL	0.68	0.79	-0.14
Cluster A	0.88	1.00	0.19
Cluster B	0.47	0.64	0.80
Cluster C	-0.96	-0.86	0.96

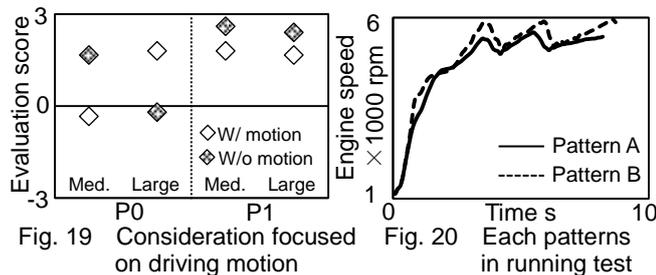


Fig. 19 Consideration focused on driving motion Fig. 20 Each patterns in running test

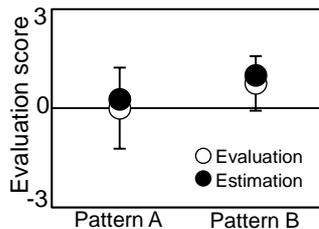


Fig. 21 Comparison of results in running test

り、評価結果と推定結果間の相関係数は 0.88 であった。次にクラスタ B では、P0 の中型車のみ加速感が悪く、他の 3 つはほぼ同様の印象であり、評価結果と推定結果間の相関係数は 0.47 であった。そしてクラスタ C では、P0 では加速感が良く、P1 では大きく低下しており、評価結果と推定結果間の相関係数は 0.47 であった。この傾向は、他の 2 つのクラスタとは大きく異なることが確認できる。

Table 4 に各クラスタの評価結果と推定結果間の相関係数、加速感と迫力間の相関係数および加速感と好ましさ間の相関係数を示す。クラスタ A では加速感と迫力間の相関が非常に高く、迫力を重視して加速感を判断したと考えられる。クラスタ B では加速感と迫力間、加速感と好ましさ間の相関が各々高く、バランスを重視して加速感を判断したと考えられる。クラスタ C は、加速感と迫力間の相関は負の相関である。また、加速感と好ましさ間の相関が非常に高いことから、好ましさを重視して加速感を判断したと考えられる。

以上から、被験者の属性による推定精度への影響は大きく、式(1)はクラスタ A に対しては有用性があることがわかった。一方で、その他のクラスタでは推定精度が悪く、誤差が大きくなることが考えられる。これを回避するには、自動車に対するこだわり度合や普段運転している車両の種類など、加速感に影響を与える被験者の属性を把握することが望ましい。

4.1.3 運転動作の有無による影響考察

本項では、[ii] 運転動作の有無による加速感への影響を考

察するための評価実験を実施する。評価音源は DS の実験で使用した P0 と P1 の加速音をダミーヘッドで録音したものである。評価は無響室で実施し、評価項目は加速感である。被験者およびその他の評価条件は 4.1 節と同様である。

Fig. 19 にクラスタ B の評価結果を示し、P0 では運転動作の有無により加速感の優劣が異なることがわかる。各クラスタの運転動作有の評価結果と運転動作無の評価結果間の相関係数は (クラスタ A, クラスタ B, クラスタ C) = (0.76, -0.05, 0.99) であった。以上より、運転動作の有無による影響が、一部の被験者に対して生じる可能性が示唆された。

4.2 実車走行時におけるモデルの有用性検討⁽⁶⁾

本節では、実車走行時の評価結果と式(1)より算出した推定結果を比較し、実車走行時でのモデルの有用性を検討する。Fig. 20 に評価する加速パターンを示す。低回転で変速し、回転下降速度を抑えた Pattern A と、高回転で変速し、回転下降速度を大きくし、回転下降速度を速くした Pattern B を評価する。被験者は、静止状態からアクセルペダル全開で 120 km/h まで発進加速し、120 km/h 到達後に停車し評価得点を記入する。被験者は月に 1 回以上運転する 30~50 代の 4 名である。評価方法および評価項目は 3.1 節と同様である。

Fig. 21 に評価結果と式(1)より算出した推定結果を示す。評価結果より、Pattern B の方が加速感が良く、2 章の結果と類似している。また、推定結果より加速感の優劣が良く推定でき、かつ誤差も小さいことが確認できた。よって、本実験のエンジン回転数の範囲では、加速 G による推定精度への影響は少なく、構築した加速感推定モデルは実車走行時の加速感を定量的に評価可能であることが明らかになった。

5. 研究成果

- (1) 加速音のパラメータ変更時の主観評価より、音圧レベル、エンジン回転上昇率、回転上昇速度および回転下降速度の変更による加速感変化を把握した。
- (2) 加速走行後半のパラメータを多く取り入れることで、推定精度が高い加速感推定モデルが構築できた。
- (3) ドライビングシミュレータを用いた評価実験より、被験者の属性による影響が大きく、加速感と迫力間の相関が高い場合、加速感推定モデルの有用性が検証された。
- (4) 実車走行実験の評価結果と加速感推定モデルより算出した推定結果の比較より、構築したモデルは実車走行時の加速感を定量的に評価可能であることがわかった。

参考文献

- (1) 福原千絵, 加村孝信, 末富隆雅, ドライビングシミュレータによる“加速感”の官能評価 -縁加速追従走行時の“加速感”評価における交互作用の定量化-, 自動車技術会論文集, **35-1(2004)pp.227-232**.
- (2) 有光哲彦, 相澤快, 花輪和人, 戸井武司, 主観および客観評価に基づく自動車加速音と楽器音との類似性評価, 自動車技術会論文集, **45-1(2014)pp.115-120**.
- (3) 加茂川隆至, 有光哲彦, 木澤千城, 郡司通晴, 戸井武司, 自動車加速音の変化による加速区間毎の加速感の印象評価, 自動車技術会論文集, **47-6(2016)pp.1381-1386**.
- (4) 加茂川隆至, 有光哲彦, 山田哲, 木澤千城, 戸井武司, 無段変速の自動車加速音における加速感推定モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2017)1-4-20.
- (5) 加茂川隆至, 有光哲彦, 山田哲, 木澤千城, 戸井武司, 自動車加速音と運転動作を考慮した加速感推定モデルの検討, 日本音響学会講演論文集(春), (2017)1-4-21.
- (6) 戸井武司, 加茂川隆至, 有光哲彦, 山田哲, 木澤千城, 無段変速車の自動車加速音に着目した加速感評価, 自動車技術会春季学術講演発表会予稿集, (2017)