

二種音源に着目したハイブリッド車の加速感推定モデルの構築 Construction of Estimation Model for Feeling Acceleration of Hybrid Vehicles Focused on Two Kinds of Sound Sources

精密工学専攻 49号 本木 耕平
Kohei Motoki

1. はじめに

近年、自動車業界ではハイブリッド車の研究開発が盛んに行われている。しかし、燃費優先の開発により、運転者が満足する加速感を得られにくいという課題がある。従来研究では、エンジン音に着目した無段変速車の加速感推定モデルが構築され⁽¹⁾、ドライビングシミュレータ(以後、DS)や実車を用いた運転動作による検討がなされている⁽²⁾。

そこで本研究では、ハイブリッド車のエンジン音と擬似モータ音(以後、モータ音)の二種音源に着目した加速感推定モデルの構築を目指す。まず、エンジン音とモータ音を模擬した二種音源の音源開始時間などを変更した際の印象変化を主観評価より把握する。次に、上記の結果に基づいてエンジン音とモータ音の特徴をそれぞれ変更し、運転者の加速感に対する印象変化を主観評価より把握する。そして、評価結果を用いて重回帰分析を行い、運転頻度別に加速感推定モデルを構築する。最後に、加速度が再現できる高性能DSを用いた評価実験より、運転操作や加速度などの影響を考慮したハイブリッド車の加速感推定モデルの有用性を検討する。

なお、本研究の全ての評価実験は、被験者に対して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. 二種音源のパラメータ変更時の印象把握

2.1 サイン波の音圧条件変更時の印象把握

2つのサイン波における音圧上昇率及び音源開始時間を変更した場合の印象変化を把握する。評価音源は音源時間が7秒であり、周波数が500 Hzと2000 Hzのサイン波を作成し、音源開始時間から2.50秒間線形状のフェードインをそれぞれに施して合成したものを基準音(Ref)とする。さらに、500 Hzと2000 Hzのサイン波に施すフェードイン時間を1.25秒間と2.50秒間に変更した場合の音源をAとし、1.25秒間と3.75秒間、2.50秒間と1.25秒間、3.75秒間と1.25秒間に変更した場合の音源をそれぞれB, C, Dとする。また、基準音の2つのサイン波のうち、2000 Hzの音源開始時間のみを1.25秒、2.50秒、3.75秒と遅らせて組み合わせた音源をa, b, cとし、500 Hzの音源開始時間のみを1.25秒、2.50秒、3.75秒と遅らせて組み合わせた音源をd, e, fとする。全評価音源の最大騒音レベルは60 dBAに調整し、スピーカより提示する。なお、5.2節を除く本研究の評価実験は全て無響室で行う。評価方法は15対の形容詞を用い、基準音との相対評価によるSD法である。被験者は20代10名である。

因子分析より得た因子負荷量から、調和因子、迫力因子、軽薄因子の3因子を抽出した。Fig. 1(a)に調和因子と迫力因子における因子得点の散布図を示す。A, BはC, Dに比べ、やや迫力性は低下するが、調和性は向上している。また、aはdに比べ、迫力性は低下するが、調和性は向上している。bとe, cとfについても同様である。これより、2つのサイン波における音圧上昇率及び音源開始時間を変更すると、低周波数音源が先行して聞こえ、後から高周波数音源が聞こえる音源の場合には、調和性が向上しやすかった。

2.2 サインスイープ波の周波数条件変更時の印象把握

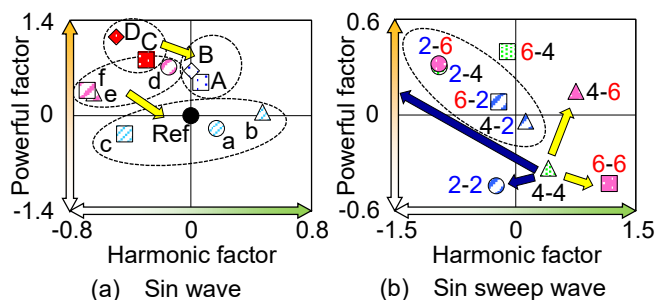


Fig. 1 Result of factor analysis

2つのサインスイープ波における周波数上昇時間及び周波数上昇率を変更した場合の印象変化を把握する。評価音源は、まず周波数上昇時間が2, 4, 6秒であり、周波数上限が500 Hzと2000 Hzのサインスイープ波をそれぞれ作成する。次に、音源時間を6秒とし、周波数上昇時間2秒の500 Hzのサインスイープ波の後には音源時間4秒の500 Hzのサイン波を結合する。同様に、周波数上昇時間4秒の500 Hzのサインスイープ波の後には音源時間2秒の500 Hzのサイン波を結合する。2000 Hzの音源に対しても同様の処理を行う。最後に、上記で作成した500 Hzの周波数上昇時間が2秒の音源と、2000 Hzの周波数上昇時間が2秒の音源を合成したものを音源2-2とし、同様に2-4, 2-6, 4-2, 4-4, 4-6, 6-2, 6-4, 6-6を作成する。なお、全評価音源の最大騒音レベルは60 dBAに調整する。実験条件は2.1節と同様とし、評価方法は15対の形容詞を用いた絶対評価によるSD法である。被験者は20代10名である。

因子分析より得た因子負荷量から、調和因子、軽薄因子、迫力因子の3因子を抽出した。Fig. 1(b)に調和因子と迫力因子における因子得点の散布図を示す。音源4-4と比較すると、2つのサインスイープ波の周波数上昇時間が同じ2-2と6-6の迫力性はあまり変化せず、両音源の周波数上昇時間が長くなるほど調和性が向上していることがわかる。また、周波数上昇時間が2秒である音源が含まれていると、調和性は低下していく傾向がある。これより、2つのサインスイープ波における周波数上昇時間及び周波数上昇率を変更した場合、特に2音源両方の周波数上昇時間が長いほど調和性は向上しやすかった。

3. モータ音パラメータ変更時の印象把握

3.1 モータ音の周波数範囲選定

Fig. 2に、ハイブリッド車が0から100 km/hまで8秒で全開加速した場合を想定したエンジン回転数変化を示す。Fig. 3に、周波数上限を500 Hz(0.5と表記)から3000 Hzまで500 Hzずつ増加させたサインスイープ波6種類を示す。エンジン音のみを基準音とし、その基準音に各モータ音を1つずつ組み合わせた6音源を評価音源とする。なお、音圧は各音源単体での再生時に最大騒音レベルが70 dBAになるよう調整し、エンジン音は本実験以降全て同じ音源を使用する。

Fig. 4に実験セットアップを、Fig. 5に加速走行中の走

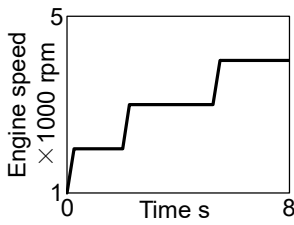


Fig. 2 Engine speed

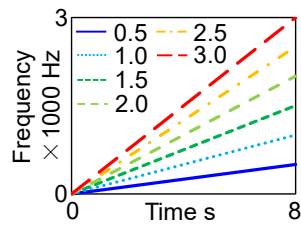


Fig. 3 Frequency of motor

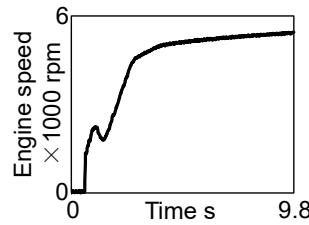


Fig. 7 Engine speed

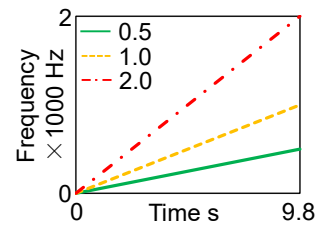


Fig. 8 Frequency of motor

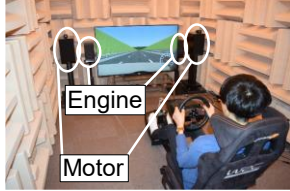


Fig. 4 Experiment setup



Fig. 5 Driving scene



Fig. 9 Experiment setup

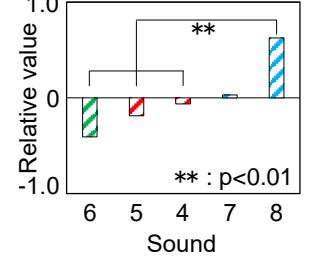


Fig. 10 Evaluation result in sound pressure ratio

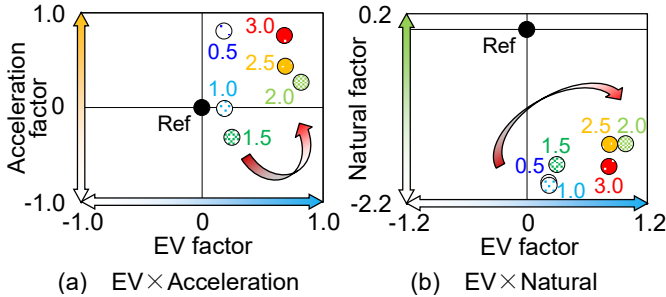


Fig. 6 Result of factor analysis

行風景を示す。エンジン音とモータ音は別々のスピーカより提示する。被験者は20代5名とし、15対の形容詞を用いた相対評価によるSD法を行う。ただし、被験者は運転操作を行わず、音源と映像のみ提示する。

因子分析より得た因子負荷量から、電気自動車らしさを表すEV因子、自然因子、加速因子の3因子を抽出した。Fig. 6に各因子得点の散布図を示す。まず、Fig. 6(a)より、周波数上限が増加すると、ある周波数上限を境に加速性は向上し、EV性は低下すると考えられる。次に、Fig. 6(b)より、評価音源のみに着目すると、ある周波数上限値に達するとそれ以上は高周波数の音が人にとって耳障りな音であるため、自然性が低下すると考えられる。以上の結果から本研究では、エンジン音とモータ音のバランス等を考慮し、EV性や自然性で上位であった「2000 Hz」をモータ音の周波数範囲とする。

3.2 エンジン音とモータ音の音圧比率変更時の印象把握⁽³⁾

Fig. 7に、実車のハイブリッド車より計測した0から100 km/hまで9.8秒で全開加速した際のエンジン回転数変化を示す。また、本実験以降基準のモータ音として使用する音源をFig. 8に示す。これより本実験で使用する基準音と評価音源を作成する。まず、エンジン音、エンジンスタート音、モータ音、暗騒音を全て合成した音源をハイブリッド車の基準音とする。音源の音圧はそれぞれ単体で音源を再生した際の最大騒音レベルが、エンジン音は70 dBA、エンジンスタート音はエンジン音の音圧より10 dBA小さく、モータ音は60 dBAになるよう調整し、E70_M60(音源4)とする。車速に応じて音圧が増加する暗騒音は本実験以降全て70 dBAとする。

これに対し、評価音源は最大騒音レベルをエンジン音は65 dBA、モータ音は60 dBAに調整したものをE65_M60(音源5)とし、以下同様にE60_M60(音源6)、E60_M65(音源7)、E60_M70(音源8)を作成する。以上、基準音を含めた5音源を本実験の評価音源とする。

Fig. 9に実験セットアップを示す。被験者は20代8名とし、評価音源5つをシェッフェの対比較法(浦の変法)によ

って評価する。評価の際は基準音を提示し、提示した後に1秒間の空白を設け、その後に評価音源を提示する。

Fig. 10に加速感の評価結果を示す。評価音源全体をみると、音源6に比べ、エンジン音の最大騒音レベルが大きい4と5よりも、モータ音の最大騒音レベルが大きい7と8の方が加速感も向上している。これは、エンジン音は加速中盤から終盤にかけてエンジン回転数がほとんど変化せず、単調に聞こえるが、モータ音は終始周波数が上昇し続けているため、常に変化しているように聞こえる。ゆえに、被験者はエンジン音よりもモータ音の周波数上昇変化に加速感を感じ、モータ音の音圧の大きい方が加速感も向上したと推察される。

3.3 モータ音の周波数成分比率変更時の印象把握⁽⁴⁾

本節では、モータ音の周波数成分における音圧比率を変更して、スペクトル重心(SC)で表し、スペクトル重心の違いによる加速感への印象変化を主観評価より把握する。

3.2節で使用した基準音(音源4)を用い、モータ音のみをTable 1に示す各サインスイープ波の最大騒音レベルの組み合わせに変更する。被験者は20代8名とし、評価方法はシェッフェの対比較法(中屋の変法)を用いる。その他の実験条件は3.2節と同様である。

Fig. 11に評価結果を、Fig. 12に各モータ音における騒音レベル[dBA]を用いて算出したスペクトル重心の時間変化を示す。スペクトル重心の時間変化によって最終的に到達したスペクトル重心の高さの順が音源14を除き、全て加速感の平均嗜好度の順位と一致している。なお、音源14が平均嗜好度の順位と一致しなかった原因は、音源14の周波数成分がほぼ2000 Hzのサインスイープ波に近いため、単一の周波数成分が耳障りに聞こえ、加速感がやや低下したと考えられる。以上より、時間変化によって最終的に到達したスペクトル重心の高さが高いほど、加速感も向上することがわかった。

3.4 モータ音の加速区間音圧比率変更時の印象把握⁽⁴⁾

本節では、加速区間を3等分し、それぞれを加速序盤、加速中盤、加速終盤とした時のモータ音の加速区間における音圧比率を変更し、加速感への印象変化を把握する。

3.2節で使用した基準音(音源4)を用い、モータ音のみをTable 2に示す各加速区間の音圧レベルに変更する。被験者は20代9名とし、その他の実験条件は3.3節と同様である。Fig. 13に評価結果を、Fig. 14に各モータ音におけるラウドネスの時間変化を示す。これより、加速感が特に向上したのは、加速中盤に急激に音圧が上昇する音源18や線形的に音圧が上昇し続けていく音源19である。

Table 1 Combination of maximum sound pressure level

Sound No.	9	10	11	4	12	13	14
Frequency [Hz]	Ratio of maximum sound pressure level [dB(A)]						
0 - 500	+20	+20	+20	0	0	0	0
0 - 1000	0	+20	0	0	+20	+20	0
0 - 2000	0	0	+20	0	0	+20	+20
SC [Hz]	252.5	326.4	439.3	451.0	495.6	703.3	968.3

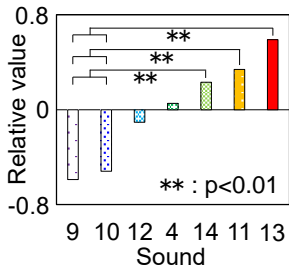


Fig. 11 Evaluation result in frequency ratio

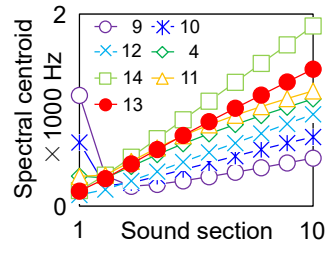


Fig. 12 Time variation of spectral centroid

一方、加速感が著しく低下したのは、加速終盤に急激に音圧が上昇する音源 20 や加速終盤や序盤に急激に音圧が低下する音源 17 と音源 15 である。ここで、2.1 節で述べた「低周波数音源が先行して聞こえ、後から高周波数音源が聞こえる音源の場合には、調和性が向上しやすい」という結果も考慮すると、モータ音の加速区間における音圧比率を変更した場合には、エンジン音が先行して聞こえ、エンジン音の時間変化が聞こえ終わると同時に、モータ音の時間変化が聞こえ始めると、加速感が向上する傾向にあると推察される。

4. エンジン音パラメータ変更時の印象把握

4.1 エンジン回転数上昇率変更時の印象把握⁽³⁾

エンジンの回転数上昇率を変更した際の印象変化を把握する。Fig. 15 に各エンジン回転数上昇率の時間変化を示す。72.5 Hz/s (音源 4) を基準の傾きとし、14.5 Hz/s (音源 21) は Fig. 15 に○で囲んだ 2 点間の周波数上昇率となっており、25.5 Hz/s (音源 22) は 250 Hz までのサインスイープ波と同じ周波数上昇率となっている。一方、51.0 Hz/s (音源 23) は Fig. 8 のモータ音の 500 Hz までのサインスイープ波と同じ周波数上昇率となっている。同様に、102.0 Hz/s (音源 24) は 1000 Hz まで、204 Hz/s (音源 25) は 2000 Hz までのサインスイープ波と同じ周波数上昇率である。被験者は 20 代 7 名であり、その他の実験条件は 3.3 節と同様である。

Fig. 16 に実験結果を示す。音源 21 が最も加速感が良く、上昇率が低下するほど加速感は向上する傾向にあることがわかった。これは、被験者への聞き取り調査による「エンジン音とモータ音が同じくらいの速さで上昇する方が良い」という結果と、2.2 節で述べた「2 つのサインスイープ波の周波数上昇時間が長いほど調和性は向上しやすい」という結果によるものだと考えられる。以上より、エンジン回転数上昇率が低下し、エンジン音とモータ音が同時に線形上昇する時間が長いほど、加速感は向上する傾向にあると推察される。

4.2 擬似変速音の有無による印象把握⁽³⁾

エンジンの回転数に擬似変速を施した場合の印象変化を把握する。Fig. 17 にエンジン回転数に擬似変速を施したパターンを示す。基準音 (音源 4) に対し、4.1 節で最も評価の良かった 14.5 Hz/s を 1 段階変速とした 1gear (音源 21) とし、1gear を基準に小さく 2 段階で変速するパターンを 2gear-S (音源 26)、3 段階で小さく変速するパターンを 3gear-S (音源 28) とし、それぞれが大きく変速するパターン

Table 2 Correlation of difference of sound pressure level

Sound No.	15	16	17	4	18	19	20
Time [s]	Difference of sound pressure level [dB]						
0.00 - 3.25	+5	+5	+5	0	-5	-5	-5
3.20 - 6.55	-5	0	+5	0	+5	0	-5
6.50 - 9.80	-5	-5	-5	0	+5	+5	+5
SC [Hz]	222.4	257.1	321.1	451.0	587.5	649.0	684.4

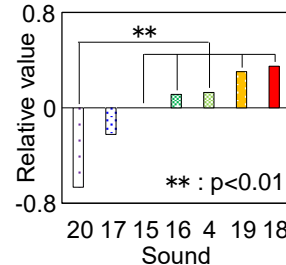


Fig. 13 Evaluation result in sound pressure ratio

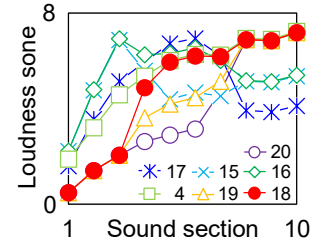


Fig. 14 Time variation of loudness

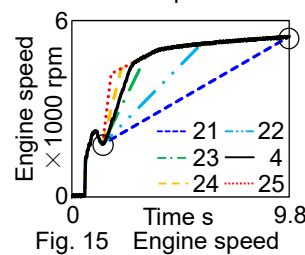


Fig. 15 Engine speed

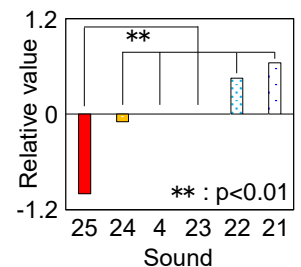


Fig. 16 Evaluation result in speed increase ratio

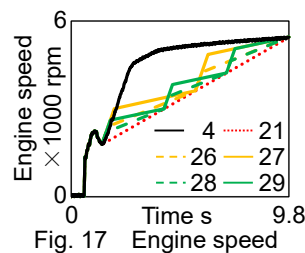


Fig. 17 Engine speed

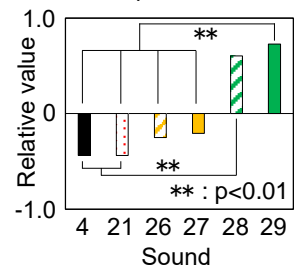


Fig. 18 Evaluation result in pseudo shift

を 2gear-L (音源 27)、3gear-L (音源 29) とする。被験者は 20 代 8 名であり、その他の実験条件は 3.3 節と同様である。

Fig. 18 に実験結果を示す。擬似変速回数に着目すると、変速回数の増加に伴い、加速感も向上することがわかる。また、わずかではあるが、変速変化量の大きい方が加速感もやや向上することがわかる。これらより、エンジン音は単調に変化するよりも、従来のエンジン音のような変速音が付加されると、より加速感が向上する傾向にあると推察される。

5. ハイブリッド車の加速感推定モデル構築

5.1 重回帰分析による加速感推定モデルの構築⁽³⁾

本節では、加速感に対して影響を与えるパラメータを全て使用し、運転頻度別に重回帰分析を用いて複数の加速感推定モデルを構築する。そして、構築した複数のモデルから決定係数などを参考に加速感推定モデルを 1 つに決定する。

5.1.1 モデル構築に用いるパラメータ検討及びデータ取得

重回帰分析に使用するパラメータは、モータ音のサインスイープ波 500 Hz、1000 Hz、2000 Hz の音圧比率を示す f_{500} 、 f_{1000} 、 f_{2000} 、モータ音のスペクトル重心 SC_{dBA} 、加速序盤、中盤、終盤のモータ音の平均音圧を示す MSF、MSM、MSL、エン

ジン音とモータ音の最大音圧をそれぞれ示す ESP_{Max} , MSP_{Max} , エンジン回転数上昇率を示す $URPM$, エンジン回転数の擬似変速回数を示す $ERCN$ である。

加速感推定モデルを構築するために必要なデータを取得する。実験方法は、基準音を7段階評価の4として聞いた後に評価音を聞き、「加速感がある」について相対評価する。基準音は3.2節で定めたハイブリッド車の基準音を使用する。評価音は3.2, 3.3, 3.4節で使用した評価音源16音源に加え、3.3節のモータ音の3つのサインスイープ波の周波数比率を0 dBAと+10 dBAに変更した場合の6音源, 0 dBAと+10 dBA, +20 dBAに変更した場合の6音源, 3.3, 3.4節で評価の最悪音源であったモータ音の周波数比率と加速時間における音圧比率の組み合わせ4音源及び、4章で使用した7音源(2gear-S, 3gear-Sは除く)の計39音源を使用する。被験者は20代から50代の計16名である。

ここで、先行研究⁽¹⁾では被験者を運転頻度によって分類しているため、本研究においても実験時の聞き取り調査より得た「週1回以上運転する」被験者8名のデータを分析する。

5.1.2 運転頻度の高いクラスターにおけるモデル構築

多変量解析の総当たり法による重回帰分析を行い、予測誤差基準の順位が複数上位であり、かつ評価結果との相関が高いパラメータを含む組み合わせを複数選択する。

上記に従って選択した推定モデルの特性をTable 3に示す。Model_W3及びModel_W4は評価結果と推定結果との相関は高いが、有意差のある偏回帰係数が少ない。Model_W2はModel_W1に比べ、評価結果と推定結果との相関及び自由度修正済み決定係数がやや低い。ゆえに、今回はModel_W1を加速感推定モデルに採択する。Model_W1を下記に示し、有意なパラメータを太字で記す。

$$Model_W1 = 0.001 \times SC_{dBA} + 0.037 \times MSF - 0.006 \times URPM + 0.395 \times ERCN + 1.626 \quad (1)$$

式(1)より、スペクトル重心やエンジン回転数の擬似変速回数を上げ、エンジン回転数上昇率を下げることで加速感は向上することがわかり、これは3, 4章の結果とも一致する。

5.2 高性能DSを用いたモデルの有用性検討⁽³⁾

本節では、加速度が再現できる高性能DSを用いた評価結果と、5.1.2項で構築したモデルより算出した推定結果を比較し、実車走行時におけるモデルの有用性を検討する。

5.2.1 高性能DSを用いた評価実験の概要

本実験では、Model_W1における加速感推定モデルの精度検証をする。Model_W1から算出した悪条件(Bad)及び良条件(Good)の2パターンに基準音(Ref)を加えた全3パターンの比較を5.1.1項と同様の方法で主観評価を行う。音源の各パラメータをTable 4に示す。なお、実験はこれまでの音と映像のみによる提示に加え、運転操作を追加した場合と、さらに加速度及びフロア振動を追加した場合の2実験を実施する。被験者は20代から50代の計7名である。

5.2.2 運転動作の有無を考慮した有用性の検討

Fig. 19(a)に音、映像及び運転操作のみ提示した場合を示す。評価結果と推定結果の誤差や標準偏差も小さく、GoodとBadに有意差があることから、モデルの推定精度が高いことを確認できた。

5.2.3 加速度及び振動の有無を考慮した有用性の検討

Fig. 19(b)に音、映像、運転操作、加速度及びフロア振動を提示した場合を示す。Refに比べ、Goodは良い結果となった。標準偏差が大きくなった原因としては、加速度と音のバランスに対する被験者の感覚の違いが評価のばらつきへとつながっていると考えられる。しかし、実車走行時での加速感推定モデルの有用性が概ね良好であることを確認できた。

Table 3 Consideration about utility of each Model W

Model	Adjusted R-square	Number of partial regression coefficient	Number of p-value <0.01	Correlation coefficient	Average error
W1	0.107	4	2	0.797	0.251
W2	0.106	4	2	0.793	0.237
W3	0.108	5	1	0.809	0.243
W4	0.108	6	0	0.813	0.323

Table 4 Parameters of sound used in experiment

Name	f_{500} [dBA]	f_{1000} [dBA]	f_{2000} [dBA]	SC_{dBA} [Hz]	MSF [dBA]	$URPM$ [Hz/s]	$ERCN$ [Number]
Bad	+10	-10	-10	379.1	44.2	72.5	1
Ref	0	0	0	873.9	50.2	72.5	1
Good	-10	-10	+10	1223.0	56.2	72.5	3

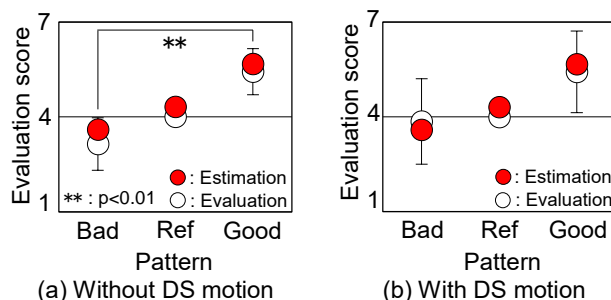


Fig. 19 Comparison of estimation and evaluation result

6. 研究成果

- (1) 2つのサイン波やサインスイープ波における音源開始時間または周波数上昇時間を変更すると、調和性の印象が変化することを明らかにした。
- (2) 主観評価より、モータ音におけるスペクトル重心や音圧の時間変化、エンジン回転数上昇率、擬似変速音が加速感に影響を与えることを明らかにした。
- (3) モータ音のスペクトル重心やエンジン音による擬似変速音などのパラメータを取り入れることで、運転頻度の高い運転者に対しては、推定精度の高い加速感推定モデルを構築できた。
- (4) 実走行環境に近い実験での評価結果と算出した推定結果より、二種音源に着目したハイブリッド車の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を検証した。

参考文献

- (1) 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)pp.2285-2290
- (2) 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) pp.1225-1228.
- (3) 本木耕平, 小田切真純, 高橋毅, 戸井武司, ハイブリッド車の音響特性に着目した加速感推定モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2020)1-11-12.
- (4) 本木耕平, 元村俊昭, 濱透, 戸井武司, ハイブリッド車におけるモータ音の周波数特徴による加速感の創生, 日本音響学会講演論文集(春), (2019)pp.1457-1458.