

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750003

研究課題名(和文)次世代自動車の走行音デザインのための広角的研究

研究課題名(英文)Examinations on Sound Design for Next Generation Vehicles

研究代表者

山内 勝也(Yamauchi, Katsuya)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10380718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：次世代自動車の走行音デザイン、および関連する制度のデザインに活用される知見の蓄積を目的とし、(1)歩行者にとって車両の接近や挙動を理解しやすい走行音・接近通報音デザインの理解、(2)快適で運転しやすい走行音・接近通報音デザインの2つの目的を設定した。第一の目的のため、環境音条件下で十分に検知される音量と周波数特性の定量的理解のための心理音響実験、および同等の検知容易性を持ちつつ異なる聴取印象を与えられる音設計のための検討を行った。また第二の目的のため、周波数変化と加速感印象の関係を解明するため、視聴覚刺激やドライビングシミュレータを用いた印象評価実験を実施した。

研究成果の概要(英文)：To accumulate knowledge on sound design for next generation vehicles and for its related legislation design, we established following two main subjects: (1) understanding feasible sound design to make pedestrians easily realize the approaching vehicle, (2) understanding adequate sound design to achieve comfort and drivable experience. For the first subject, we conducted a series of psycho-acoustical experiments to examine the feasible sound level and frequency characteristics for the sound with wide range of subjects age. For the second subject, a series of experiments to examine the relationship between frequency shifting and accelerating impression with some audio-visual stimulation. Moreover, another subjective evaluation experiment using the driving simulator that was developed for this present project was conducted. The results were published in the journals, international conferences, and a related body of the UN/ECE vehicle regulation as well.

研究分野：音響学

キーワード：次世代自動車 走行音 接近通報音 交通騒音 NVH 電気自動車 ハイブリッド自動車 主観評価

1. 研究開始当初の背景

(1) 子供たちが自動車のおもちゃで遊ぶとき「ブーン」という擬音語を使うことが多いが、この「ブーン」は主にエンジンと排気系の走行音であろう。電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)などが交通の主流となる将来、子供たちはどのような擬音語で車のおもちゃ遊びをするだろうか？

自動車走行音は、駆動系の音とロードノイズや風切り音等から成るが、特に低速度域では駆動系の音が主要素である。近年普及しつつあるEV/HEVなどの次世代自動車は駆動系の走行音が小さく、低速度域での音響特性が従来車と大きく異なる。次世代自動車の走行音デザインを考える上で、このような静粛性は重大な意味を持つ。このような静粛性は道路交通騒音の観点では歓迎されるものである一方、歩行者が車両の接近に気づきにくく危険であるとの指摘もある。また、走行音は運転者にとっても運転操作のために重要な意味を持ち、車室内音環境の主要素のひとつでもある。これらのような背景から、以下のように、積極的に走行音をデザインしようという機運が高まっている。

(2) 静音性故に歩行者が車両の接近を知る手がかりが減ったという"静音性問題"への対策として、国土交通省から車両の接近等を歩行者に知らせるための発音装置(車両接近通報装置)の設置を推奨するガイドラインが示されている。米国でも同様の対策が2014年の施行を目指して検討されているほか、国連欧州経済委員会の自動車基準調和世界フォーラム(WP29)でも国際技術基準(GTR)の策定に向けた検討が始まっている[1]。

しかし、自動車走行音を騒音源として抑制・制御する研究に比して、情報源として利用する観点の研究は極めて少なく、適切な制度設計および製品設計のための知見が不足している。車両認知のための情報源として最適に機能するデザイン指針の解明、さらには道路沿線住民にとっても運転者にとっても快適な自動車走行音デザインの探求が求められる。

また歩行者は、走行音の変化から車両の加速・減速や接近・離退などの挙動に関する情報も得ていると考えられ、このような挙動を理解する情報源として適切に機能する音高変化や音量変化についての知見も求められている。

(3) 駆動系の走行音は、運転者にとっても重要な意味を持つ。静かなことだけではない商

品価値の訴求が求められる場合も少なくない。また、駆動系の音が静かであるために、空調系や冷却系などの稼働音がかえって目立ち不快感を誘発するという弊害も指摘されている。適切な走行音を車室内に提供することで不要な音をマスクし、不快感を低減したり、より好ましい環境を設計したりできるだろう。このように、車両接近通報音を含めて走行音を総合的にデザインし、積極的に車室内音環境を創成することで新たな価値を生み出すニーズがある。

2. 研究の目的

本研究では次の2つの目的を設定し、「次世代自動車の走行音デザイン」および「関連する制度のデザイン」に活用される知見を蓄積する。

(1) 前述のように、"静音性問題"への対策として接近通報音による歩行者の車両認知支援が検討されているが、接近通報音をどのようにデザインすべきかについての知見は十分でない。本研究課題では、ラウドネス(ISO 532B)に基づいた環境音マスキング、高齢者の聴覚特性、時間変動等による認知性への影響を考慮したデザイン指針を明らかにし、国際基準の技術的根拠としてフィードバックすることを目指した。

(2) 創造的に車内音環境を設計・演出する可能性の事例として、例えば、走行速度等に応じて音の大きさや高さを変化させる関数を設計することが考えられる。これによって視覚的な加速感よりも大きな加速感を感じさせ、よりスポーティーな運転体験を提供できる可能性などが考えられる。

本研究ではそのための基礎的知見として、加速感や速度感等の心理的印象と対応する走行音の音高変化などの音響物理特性の把握を目指す。また、走行音の設計によって、不要で不快な音をマスクし快適な車室内音環境を演出する効果についても検討した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、調整法、恒常法などの精神物理学的方法による心理音響実験を実施し、環境騒音下で接近報知音に求められる音量と周波数特性を定量的な解明を目指した。

実環境下での実験では、安全性や再現性の問題から系統的な検討は不可能であるため、バイノーラル録音再生によって、歩行者と車両の方向・距離を系統的かつ安全にリアリテ

ィのある環境を再現する。接近報知音刺激は、無響室内でスピーカ再生したものをバイノーラル録音することで、車両と受聴者の位置関係に対応する伝達関数を重畳する。

実験の実施に際しては、高齢者や視覚障害者にも被験者として参加を求め、広い立場からの評価を示すことを重視する。

(2) 視覚から受ける車両の加速感と走行音から受ける加速感の関係を解明するため、それらの調和に関する心理音響実験を行う。基礎的検討として、実際の車両走行映像刺激と合成音による模擬走行音刺激を被験者に提示し、それらの調和感や加速感に関する印象評価実験を行った。

音高変化と加速感の関係は、運転操作を伴う状況と単に助手席に着座している状況とは異なると考えられる。そこで、設計対象の走行音とロードノイズや環境音などを独立に制御・提示できるドライビングシミュレータを構築した。音響的環境を統制できる防音室内で動作し、アクセル、ブレーキペダルに取り付けられたセンサによって、その信号からMax/MSP等の音響プログラミング環境によってリアルタイムに走行音と走行映像を合成するものである。このシミュレータによって、運転操作を伴った状況下での音高変化と加速感の解明のための印象評価実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 接近通報音に求められる音量と周波数特性の定量的理解のための心理実験を実施した。本課題での取り組みでは、幅広い年齢層の被験者を対象とした音量調整実験を実施した。

加齢に伴って、特に高周波数帯域での聴力低頭が著に見られることは広く知られており、接近通報音に求められる音量についても、年齢影響の検討は不可欠である。そこで、19歳から74歳の日本国内在住の男女30名を対象とした実験を実施した。被験者を、19~24歳（中央値20.5歳）の若年群、30~48歳（中央値38.0歳）の中年群、60~74歳（中央値69.0歳）の高齢群の3群に分けて結果を分析した。

環境音刺激は3種類で、刺激冒頭から30秒間の等価騒音レベルはそれぞれ、60.3、54.8、44.0 dBであった。接近通報音は、各環境音刺激の平均ラウドネス曲線（ISO-532B）からターゲットカーブを設定し、ヘッドホン出力がA特性音圧レベルで55 dBのときにいずれかの成分がこのカーブを卓越するような周波数特性を持つもの5種類（A~E）を作成

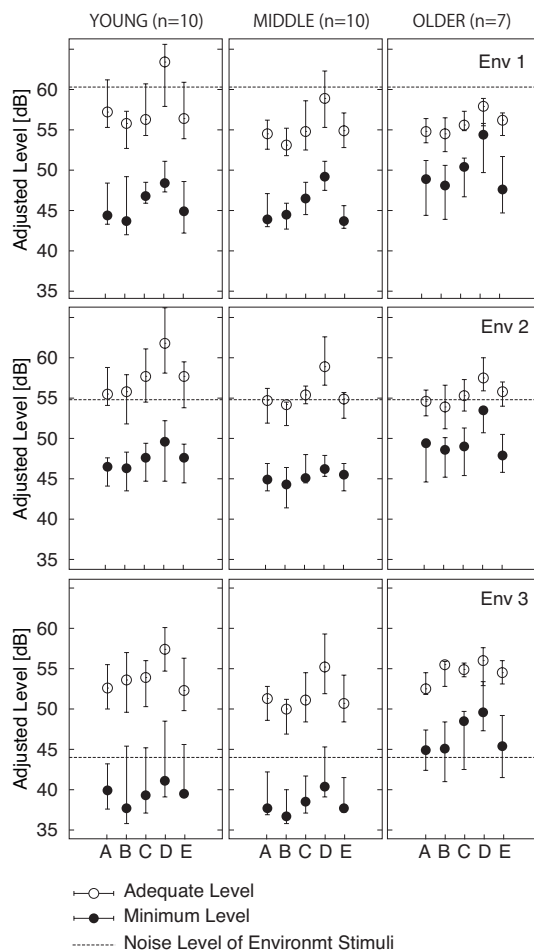


Fig. 1 — Medians and interquartile ranges of the averaged adjusted levels of possible warning sounds.

した。

Fig. 1に、各被験者の2回の試行の調整音量平均値の分布（中央値と四分位範囲）を示す。検知レベルは、環境騒音レベルに影響され、同環境条件内では若年・中年群より高齢者群で高くなる傾向が見られた。環境音刺激1, 2では、高齢者群の検知レベルが50 dB以上となる接近通報音刺激も存在しており、車両から2 mの位置でのA特性音圧レベルが50 dB程度の報知音は多くの高齢者に聞こえない可能性が示唆された。一方、最適聴取レベルは、環境騒音レベルに影響されているが、年齢群による違いは小さい。若年・中年群において、最適聴取レベルが検知レベルの+10~15 dB程度という傾向は、異なる刺激条件を用いた先行研究でも一致していた。

(2) 同等の検知容易性を持ちつつ、異なる聴取印象を与える接近通報音設計の可能性を実験的に検討した。検知容易性に関しては、想定される環境騒音の1/3オクターブ帯域レベルを設定し、2~5kHz程度の帯域の各帯域での基準レベルを設定するという接近通報音設

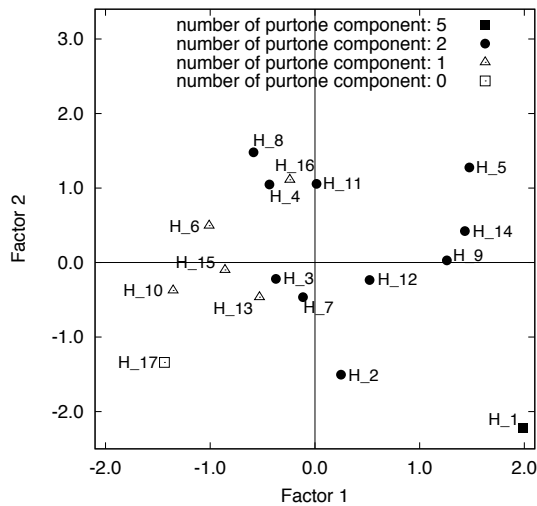


Fig. 2 — Factor scores of each stimulus.

計指針が考えられている。本課題では、この前提の上での、音質設計の可能性を把握することが目的である。

そこで、1/3 オクターブバンドで 2k~5k Hz の各帯域に相当する 5 つの成分を、純音性成分もしくは狭帯域雑音成分とすることで、各帯域で同等のエネルギーを持ちつつ周波数特性に変化を持たせた複数の音源を試作した。5 帯域のうち、1 帯域、2 帯域および 5 帯域を純音性成分とした 16 種類と、全帯域を狭帯域雑音成分としたものを加えた、合計 17 種類の刺激(H1~H17)を作成した。

まず、音量調整実験によって検知容易性の検証を行った。実験では、防音室内に着座しヘッドホンを着用した被験者に対し、背景騒音刺激と接近通報音刺激を提示し、接近通報音刺激の音量を調整するよう求めた。背景騒音刺激には、車道から近い駐車場でバイノーラル収録した環境音を使用した。背景騒音刺激の持続長は 60 秒であり、騒音レベルは概ね安定していた。結果、調整音量に関して、刺激間で有意な差は見られなかった。今回の刺激音源は、全て同等の検知容易性を持っていたと評価できた。

次に、音源間の聴取印象の相違を理解するために SD 法による印象評価実験を行った。実験では、防音室内に着座しヘッドホンを着用した被験者に対して接近通報音刺激を提示し、14 対の形容詞対尺度に対する評価を求めた。刺激の提示レベルは、A 特性音圧レベルが 55 dB になるように設定した。被験者は、21~24 歳の男性 9 名であった。

2 回の評価値の差が 3 未満の評価値のみを採用して平均評価値を求め、形容詞対尺度を変数とした主因子法による因子分析を行い、初期固有値 1 以上の因子を抽出した。その結

果、総合的な評価や音質の良し悪しを表す「評価因子」と「迫力因子」の 2 因子解を得た。各因子に代表される印象は、それぞれ、従来の音色因子での、美的因子と金属性因子の両面を反映するもの、および迫力因子に相当するものと考えられた。因子分析の結果から、本実験で対象とした刺激群の印象の相違においては、迫力感は総合評価とは独立であることが示された。このことは、総合的な評価や音質の良さを保ちながら、迫力感の違いを区別した音源設計の可能性を示すものである。

各刺激の因子得点を求め、印象平面上に布置させた (Fig. 2)。2k~5k Hz の全ての帯域が純音性成分で構成された刺激 (図中■印)、および 2 帯域が純音性成分で構成された刺激 (図中●印) は、いずれも第 1 因子得点が正に高い傾向があった。刺激に含まれる高周波数帯域の純音成分が、澄んだ、綺麗な印象を与え、ノイズ成分が多いことが、濁った、きたない印象に繋がったと考えられた。

(3) 視覚から受ける車両の加速感と走行音から受ける加速感の調和を検討するため、実際の車両走行映像と合成音による模擬走行音を用いて、走行音の音程感変化と加速感の関係に関するシェッフェの一対比較法 (中屋の変法) による印象評価実験を行った。

映像刺激として、交通の少ない公道で車両を停止状態から単調に加速させ、車両の前方に設置したカメラから撮影した映像 A (車外映像)、車両の助手席に設置したカメラから撮影した映像 B (車内映像) の 2 種類を用意した。音刺激は、1/3 オクターブバンドノイズ (中心周波数 100Hz, 400Hz, 2k Hz) を合成したものである。各帯域もしくは全帯域の中心周波数を、5 秒間で線形にシフトさせた。シフトさせた周波数帯域は、低域のみシフト (Low)、中域のみシフト (Middle)、高域のみシフト (High)、および全帯域シフト (All) の 4 条件であり、シフト率は 120, 150, 180% の 3 条件である。これらに周波数シフト無し条件を加えた計 13 刺激を作成した。

実験は防音室内にて実施した。被験者は椅子に着座し、被験者の前方約 1.6m の位置に

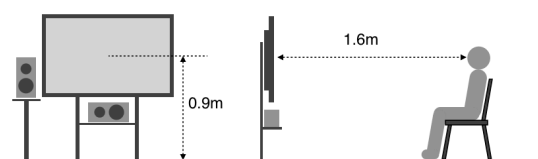


Fig. 3 — Positional relationship between subjects and presenting equipment.

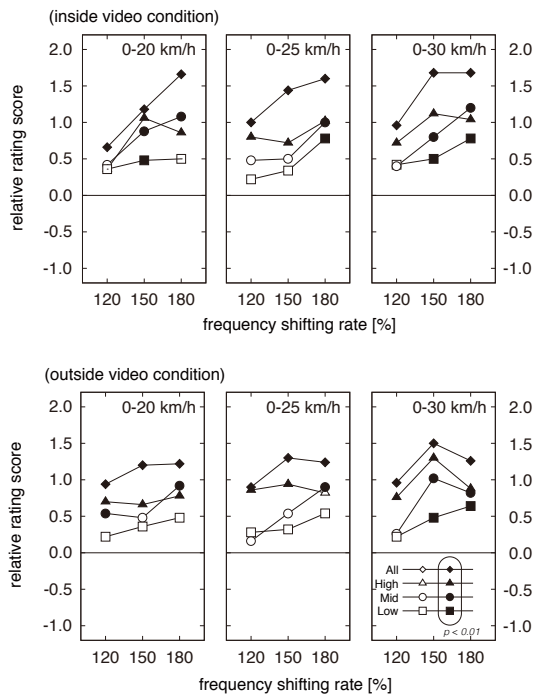


Fig. 4 — Relative rating scores of acceleration impression as differences from the control stimulus.

設置されたディスプレイに映し出される映像と、ディスプレイ（対角約 1m）に並べて設置されたスピーカから提示される音を視聴した（Fig. 3）。被験者には 2 種類の視聴覚映像を比較して、その加速感および調和感について 5 段階の尺度で評価するよう求めた。被験者は、19～48 歳の男女 10 名であった。

シフト率条件ごとに、各刺激の相対評価値を推定した。各刺激の相対評価値からシフト無し刺激の相対評価値を減じることで各シフト率条件を標準化し、シフト無し刺激の加速感もしくは調和感を 0 とした各刺激の相対評価値を求めた。加速感に関しては（Fig. 4）、シフト率が大きいほど加速感が強まる傾向が見られた。シフト帯域条件ごとに観察すると、全帯域刺激がもっとも強く、高域、中域、低域の順に加速感が弱まった。ただし、最も加速感が小さいと評価された低域 120%シフト刺激でも、シフト無しよりは相対的に加速感が強かった。つまり、周波数シフトによって加速感が強まり、その強まり方は周波数帯域とシフト率に影響されることが分かった。

(4) 運転操作を伴う能動的な状況においては、走行音と加速感の対応が異なる可能性が残されていた。本課題では、車内で運転操作を行う人を対象として、加速感印象および加速感による車速の制御への影響に関して、周波数特性変化の影響を検討した。

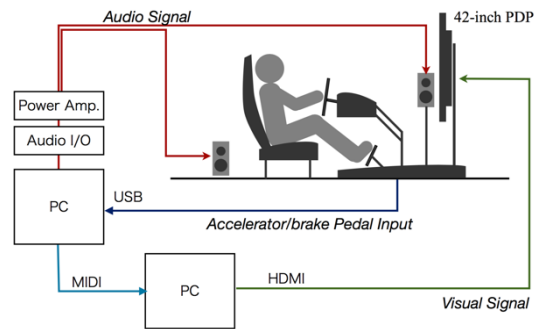


Fig. 5 — Overview of components set-up of the driving simulator.

車両物理モデルによってアクセル操作から車速を決定し、車速に応じて走行映像と付加走行音の周波数特性を生成するドライビングシミュレータを Max/MSP で構築した（Fig. 5）。シミュレータの中心となる走行音合成部では、100 Hz, 400 Hz, 2 kHz を中心周波数とする 3 つの 1/3 オクターブバンドノイズが合成され、それぞれの中心周波数を速度に応じて独立に変化させた。シフトさせた周波数帯域は、低域(100 Hz)のみシフト、中域(400 Hz)のみシフト、高域(2 kHz)のみシフト、および全帯域シフトの 4 条件で、シフト率は 120, 150, 180% の 3 条件であった。これらに周波数シフト無し条件を加えた計 13 刺激を作成した。また、車速に応じて走行音の音量も制御した。

ドライビングシミュレータを用い、加速感および運転しやすさについて、尺度評価法による印象評価実験を行った。評価値は、系列範疇法によって間隔尺度へ変換し、周波数変化無しの刺激との相対差を検討した。被験者は、22～29 歳の男女 20 名であった。

実験の結果、周波数変化幅が大きいほど加速感印象が強まることが示された。また、周波数帯域の違いに着目すると、2kHz を中心周波数とする帯域ノイズをシフトさせた条件で最も加速感印象が強まることが確認された。一方、運転しやすさについては、120%シフトが最も評価が高く、変化幅が大きいほど評価が下がる傾向にあることが示された。つまり、加速感印象に関しては能動的運転操作の影響は見られず、音の調和感や運転しやすさについて、より複雑な印象認知過程があることが示唆された。

<引用文献>

- [1] UN/ECE, "Draft Recommendations for a Global Technical Regulation Regarding Audible Vehicle Alerting Systems for Quiet

Road Transport Vehicles," ECE/TRANS/WP.29/GRB/2012/6.

- [2] K. Yamauchi et al., "Questionnaire survey on the sound of quiet vehicles," Proc. Inter-noise 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- (1) Katsuya Yamauchi, Daniel Menzel, Masayuki Takada, Koji Nagahata, Shin-ichiro Iwamiya, Hugo Fastl: Psychoacoustic examination of feasible level of additional warning sound for quiet vehicles, *Acoustical Science and Technology*, Vol. 36, No.2, pp.120-125, 2015.
- (2) Katsuya Yamauchi, Takayuki Shiizu, Fumio Tamura and Yuichiro Takeda: Relationship between frequency shifting of vehicle sounds and acceleration impression, *Acoustical Science and Technology*, Vol. 36, No.2, pp.135-137, 2015.

〔学会発表〕 (計 11 件)

- (1) 山内勝也: 次世代自動車の静音性による新しい音デザイン課題, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 2015.9.16-18, 会津若松市. (招待講演)
- (2) 山内勝也, 高田昌幸, 岩宮進一郎: 電気自動車等の走行音に関するアンケート調査, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 2015.9.16-18, 会津若松市.
- (3) Katsuya Yamauchi: Relationship between Acceleration Impression and Frequency Shifting of Vehicle Sound. 5th session "GTR for QRTV" (UN/ECE/WP29/GRB/GTR-QRTV), 2013.12.10-12, Tokyo (Japan).
- (4) Katsuya Yamauchi, Takaichi Sano, Shin Hasegawa, Fumio Tamura, Yuichiro Takeda: Detectability and hearing impression of additional warning sounds for electric or hybrid vehicles. Inter-noise 2014, 2014.11.16-19, Melbourne (Australia).
- (5) Katsuya Yamauchi: A discussion on the problem of quietness of hybrid and electric vehicles and additional warning sound for these vehicles, Forum Acusticum 2014, 2014.9.7-12,

Krakow (Poland). (招待講演)

- (6) Katsuya Yamauchi and Jing Feng: Effect of frequency shifting of additional sound for electric vehicles on acceleration impression, Forum Acusticum 2014, 2014.9.7-12, Krakow (Poland). (招待講演)
- (7) 山内勝也, 佐野尊一, 長谷川真, 田村史雄, 武田雄一郎: EV 等の接近通報音の検知容易性と聴取印象変化に関する検討, 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 2014.9.3-5, 札幌市.
- (8) 山内勝也: ハイブリッド車などの静音性とその対策が将来の道路交通騒音に与える影響についての考察, 日本音響学会騒音・振動研究会, 2013.10.29, 福島市
- (9) 山内勝也: ラウドネスを考慮したハイブリッド車等の静音性対策音設計, 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 2013.9.25-27, 豊橋市. (招待講演)
- (10) Katsuya Yamauchi, Takayuki Shiizu, Fumio Tamura, Yuichiro Takeda: Effect of frequency shifting on acceleration impression for designing additional sound for quiet vehicles, Inter-noise2013, 2013.9.15-18, Innsbruck (Austria). (招待講演)
- (11) Katsuya Yamauchi, Takayuki Shiizu, Fumio Tamura, Yuichiro Takeda: Effect of age on feasible sound level of possible warning sounds for quiet vehicles, International Congress on Acoustics 2013 (ICA), 2013.6.2-7, Montreal (Canada).

〔図書〕 (計 2 件)

- (1) 山内勝也: ハイブリッド車等の静音性問題, 「音響キーワードブック」(日本音響学会編, コロナ社, 2016).
- (2) 山内勝也: EV/EV での接近音提示, 「自動車技術ハンドブック, 第 3 分冊 (人間工学編, 自動車技術会), 2016.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

研究代表者

山内勝也 (YAMAUCHI, Katsuya)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授

研究者番号: 10380718