

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22680019

研究課題名（和文） 低騒音自動車の接近報知音デザインに関する多角的研究

研究課題名（英文） Multidirectional Study on Approaching Warning Sound Design for Quiet Vehicles

研究代表者

山内 勝也 (YAMAUCHI KATSUYA)

長崎大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10380718

研究成果の概要（和文）：

ハイブリッド車や電気自動車の普及に伴い、それらの静粛性が歩行者の安全を脅かす可能性が指摘され、国内外で接近報知音設置の法制化の検討が進んでいる。接近報知音の設計、またその制度設計のための科学的な知見の蓄積が強く求められている。本研究では、接近報知音が適切に機能するために必要な音量について、一連の実験によって検討した。また、接近報知音の社会的ニーズ調査やその効果の予測として国際的アンケート調査を実施した。

研究成果の概要（英文）：

Electric vehicles (EV) and hybrid electric vehicles (HEV) are quieter than conventional internal combustion engine vehicles (ICEV). It has been concerned that the reduced noise might lead dangerous situations for pedestrians. Hence, the use of warning sounds, which are radiated by the vehicle to alert pedestrians, has been discussed in some governments. To design the sound itself or to develop the regulation concerning the sound, it is much important to know the feasible sound level of the warning sounds compared to the background sounds. Aim of this study is to reveal the effect of age on feasible sound level of warning sounds. The feasible level of five possible warning sounds was examined in three different urban environmental sounds in a laboratory. Moreover, a questionnaire survey on the sound of quiet vehicles to accumulate knowledge such as social demands and feasible acoustic properties for the acoustic information.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2012年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：音響学，心理音響学

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ハイブリッド車，電気自動車，接近通報音，環境騒音レベル，バイノーラル録音，音量，社会調査，サウンドデザイン

1. 研究開始当初の背景

近年、ハイブリッド車や電気自動車が急速に普及しつつあるが、それらは従来の車から

発せられていた駆動音や排気音がほとんどなく、発生する騒音が非常に小さい。そのため、音の手がかりが少なくなり、歩行者にと

って危険な状況を生じていることが報告されている。そこで、何らかの音を出力することで歩行者に対して車の接近を知らせる（接近報知音）ことが検討されはじめている。

ただし、接近報知音が新たな騒音源となる可能性等が危惧され、拒否的意見も少なくない長期的には、低騒音車の走行音がマスクされない静かな音環境を作り出すことが本質的な解決であり、重要であろう。これは、自転車などの軽車両の存在をも気づきやすくさせ、さらには補聴器使用者などのより静かな音環境を必要とする人々の利益にもつながるなど、政治的に正しい解決と言える。一方で、接近報知音による解決方法は短中期的な対応として不可欠なものである。

ただしその際に、安易な音の付加によって、新たな騒音問題を引き起こすことがないよう、音響工学、音響心理学、音響環境学などの見地からの多角的な検討によって接近報知音に求められる事項を解明する必要があり、これを踏まえたデザインが検証されるべきである。

現在、国内外の一部機関で接近報知音の検討が始まっており、例えば Sekine らは、疑似エンジン音やチャイム、メロディー等を付加して、車の存在認知に有効であり、音としてはチャイム、メロディー等が好まれることを示している (Sekine et al., inter-noise 2009)。しかし、音単独で聴いた場合に、音楽性の音がよりアノイアンスが低いことは当然であり、様々な環境を考慮した検討も不足している。また、実車にスピーカを取り付け、いくつかの音を発生させ、音によって車の存在に気づくかどうかの検証を行った事例 (Nyeste & Wogalter, Proc. Human Factors and Ergonomics Soc. 2008; Goodes et al., Sound Quality Symposium, 2008) などがあるが、検証環境や検証対象音が極めて限定的である。さらに、環境によって適切な音響特性は異なることが予想され、そのための検討も必要であろう。

これまでに申請者らは、音響式信号や誘導鈴を対象とし、それらの音に視覚障害者求める音量を心理実験によって検討し、その音量は、それが設置された環境騒音レベルより約 12~14dB 高いレベルであることを示している。対象音が異なるために単純な比較はできないが、車の接近報知音も、かなり大きな音でなければ役に立たない可能性が示唆される。また、接近報知音には、旧来より利用されているクラクションを活用することも考えられるが、現在のクラクションは歩行者への注意喚起には音量が大きすぎるのが問題として指摘されており (Takada et al, inter-noise2009)、対歩行者用警音器として接近報知音をデザインするとしても、その適切な音量の検証が不可欠である。

特定の立場にのみ呼応した検討をするのではなく、接近報知音の是非やそのあり方について、様々な立場からの包括的議論ができるよう、音響学の立場から多角的な検討を示すことが重要である。どのような音が、十分な安全性を確保し、かつ騒音問題を最小限に押さえられるかという問題に対して、〈気づきやすさ、聴こえやすさ等の安全性の観点〉、〈ドライバーと歩行者双方の不快感からの観点〉、〈環境騒音源としての観点〉などから多角的に検討し、さらには、現実的に利用できるシステムや規格を提案することが、包括的な議論に有効であろう。

2. 研究の目的

前述のように、限定的な状況、対象音に関しては、検討事例が見られるが、接近報知音および環境音の相互関係について、その音響特性を系統的に検討した事例はない。検討されるべき音響特性として、最も基本的な側面である音量に関してですら、有用な知見が示されていない。

本研究では、実環境を想定した感性評価実験による要求特性の解明、および安全性を確保しつつ騒音問題を最小限にとどめるサウンドデザインなどに着目し、主として以下の課題を中心とした広角的な検討を行う。

(1) 接近通報音に求められる音量の検討

本研究では、接近報知音の音量に関して、さまざまな音環境をバイノーラル録音や音響信号処理を用いてリアルに再現したシミュレーションによって、接近報知音に求められる音量に関する心理評価実験を行い、その音量を系統的に検討する。さらに、接近報知音に求められるサイン音としての機能性（メッセージ）や、聴感上の親和性についても、実験や解析によって検討を行う。

(2) 接近通報音に期待される効果の調査

また、これらに先行、平行して、アンケートや事例調査に基づいて接近報知音による補助が必要な場面の整理を行い、検討されるべき環境状況を集約する。

これらのような評価には、評価者の属する文化に依存する要因も大きく影響すると予想されるため、海外の研究機関と連携したクロスカルチャルな検討も実施する。この一連の検討によって得られた知見によって、安全性を確保し、騒音問題を最小限にとどめる接近報知音のサウンドデザイン規格を提案する。

3. 研究の方法

(1) 接近通報音に求められる音量の検討

調整法による接近報知音に求められる音

量の評価実験を行う。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、バイノーラル録音された環境音をヘッドホン提示することによって、様々な環境を再現する。

評価対象とする接近報知音についても、無響室内で評価対象音をスピーカから再生し、これをバイノーラル録音することで、歩行者と車両の方向・距離を系統的かつ安定して変化させたリアリティのある評価刺激を作成する。

評価には、評価者の属する文化に依存した要因の影響も考慮されるべきである。自動車製品が国際的に広く展開される現状を考えると、日本以外の文化圏での評価は重要な意義を持つ。そのため、海外の研究機関と連携したクロスカルチャラルな検討も実施する。

(2) 接近通報音に期待される効果の調査

接近通報装置および接近通報音に対する社会反応調査を行う。社会反応調査は、EV 等との遭遇体験や接近通報装置の必要性等を問う設問と共に、運転者として走行中に実際に走行音が歩行者に認知されずに困った体験の有無や、その場の環境状況を問う設問等により、静音性問題が、どの程度・どのような形で体験されているのかを調査する。また、英語の調査票も作成し、クロスカルチャラルな比較も実施する。

4. 研究成果

(1) 接近通報音に求められる音量の検討

バイノーラル録音された接近報知音と環境音によって、各種環境音条件下での接近報知音の音量に関する音響心理実験を行った。

評価対象とした接近報知音は、「エンジン音(Eng)」、「広帯域音(Bbs)」、「クラクション(Horn)」の3種類である。各音源は無響室内でダミーヘッドの右斜め後方2mの位置に設置されたスピーカから再生され、バイノーラル録音された。環境音刺激は、Table 1 に示す4種類で、いずれも福岡市内の歩道上でHATS (Head and Torso Simulator)を用いて録音された。

Table 1 – Noise level and road environmental conditions of each environmental stimulus.

	L_{Aeq}	Condition
Env.1	65.9	Two-lane busy street in down town
Env.2	67.8	Two-lane road in residential area
Env.3	73.2	Six-lane heavy traffic road
Env.4	60.4	Narrow road in shopping area

ヘッドホンを着用した被験者に対し、まず

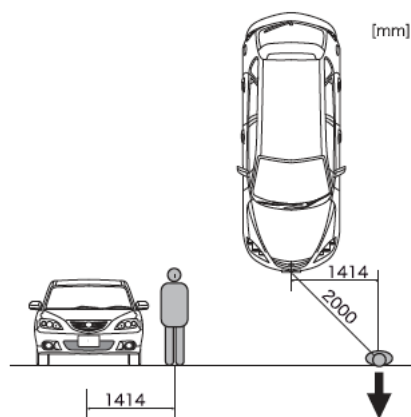


Fig. 1 – Assumed relative position of a pedestrian and the vehicle providing warning sound.

環境音を提示し、10秒ほどしたら接近報知音を重ねて提示した。環境音の提示レベルはそれぞれ録音時と等しくなるよう設定されている。接近報知音は Matlab によって作成したプログラムによって制御され、被験者の手元の画面上に表示されるスライダをマウスで操作することで音量を自由に調整できる。調整された音量は吹鳴区間の実効値で測定した。刺激音は、環境音と接近報知音の全組み合わせをランダムな順序で提示された。

被験者には、まず聴こえてくる環境音から、そのような環境に立っている、もしくは歩いていることを想像するよう求めた。その後、接近報知音が聞こえてきたら、Fig.1のように右斜め後方2mの位置にいる車両から発せられていると想像し、その音量を手元の画面に表示されるスライダをマウスで操作して調整するよう求めた。

評価は、「最適聴取レベル」と「検知レベル」の2種類の基準で行われた。ここで、最適聴取レベルは「考え事をしていたり、人と話していたりしていても車の存在に気づくためにちょうどいい音量」、検知レベルは「与えられた環境下で最低限聴こえる音量」と

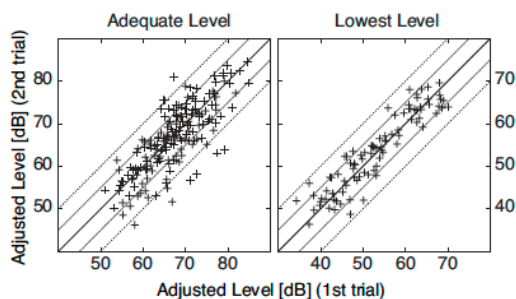


Fig. 2 Scattergram of adjusted levels in the first and second trials.

教示した。最適聴取レベルの評価には、環境音と接近報知音の全組み合わせ 12 組の刺激が提示された。検知レベルの評価には、騒音レベルが比較的安定している環境音刺激 2 種類 (Env. 3, Env. 4) と全接近報知音の組み合わせ 6 組の刺激が提示された。また、それぞれの刺激対について 2 回ずつの評価を得た。

実験終了後、被験者に対して、音量調整の際にどのようなことを考慮したのかを中心とした内観報告のアンケートを行った。

その結果、最適聴取レベルは環境騒音レベル ± 5 dB 程度の範囲に分布した。接近報知音別に見ると、クラクションが比較的大きく、広帯域音が比較的小さいレベルに調整された。被験者内での調整音量変動が 10 dB 程度 (Fig. 2) であるので、その差は十分に大きいとは言いが、より小さな音量で車の存在に気づかせられる接近報知音を設計できる可能性が示唆された。

検知レベルと環境騒音レベルの差は接近報知音によって異なり、エンジン音およびクラクションは 10~15 dB 程度、広帯域音は 20 dB 程度である。Env. 4 での最適聴取レベルと Env. 3 での検知レベルを比較すると、静かな環境 (Env. 4) で最適なレベルのエンジン音およびクラクションは、12dB 程度うるさい環境 (Env. 3) では聴き取る事のできない可能性が読み取れる。つまり、スペクトルが広帯域に分布する音はより小さな音量でも検知される可能性があり、より聴き取りやすい接近報知音を設計できる可能性が示唆された。ガイドライン等で示される「間近で 50 dB 程度」という音量は、音の種類によっては、環境騒音レベル 45~55 dB 程度の環境では最適であるが、60~65 dB 程度以上の環境では検知されない可能性が本実験の結果から指摘された。

さらに、ドイツ・ミュンヘン市域在住の 26 歳~49 歳 (平均 31.3 歳, 中央値 30 歳) の男女 15 名 (男性 11 名, 女性 4 名), および長崎市域在住の 23 歳~55 歳 (平均 30.2 歳, 中央値 30 歳) の男女 16 名 (男性 11 名, 女性 4 名) を被験者として、音量評価に関する日独のクロスカルチュラルな比較検討を行った。

その結果、ドイツ人被験者群と日本人被験者群の間に統計的に有意な差は確認されず、接近報知音の音量評価において日本とドイツの文化的要因の影響は小さいことが確認された。ただし、本実験で得たのは気付くために十分な音量の評価であり、音質の快適性等に関しては別途検討する必要がある。

ただし、これまでの検討では、主に 20 歳

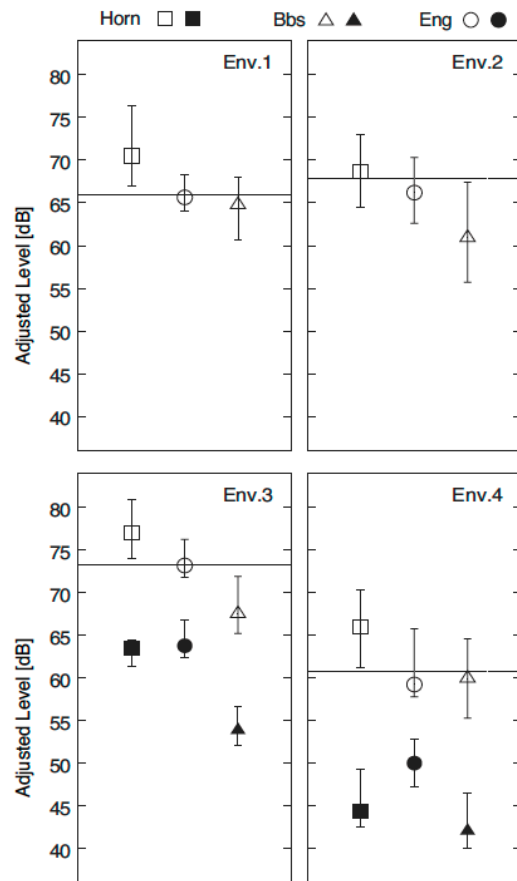


Fig. 3 Medians and interquartile ranges of the adequate levels (open markers) and the lowest levels (filled markers). The horizontal dashed line indicates the environmental noise level (L_{Aeq}) for each background condition.

~30 歳代の被験者を対象としており、高齢者は含まれていない。加齢にともなって、特に高周波数帯域での聴力低下が顕著に見られることが知られており、幅広い年齢層を対象とした知見が不可欠である。また、検討が国交省ガイドラインの公表前から行われているため、ガイドラインにそぐわない接近報知音刺激も含まれ、その種類も限定的である。そこで、平成 24 年度には、追加実験として、幅広い年齢層の被験者を対象として、国交省ガイドライン等の動向を考慮した接近報知音に求められる音量を検討した。

実験方法は、前述の方法と同等である。環境音刺激は 3 種類 (Env 1, 2, 3) で、刺激冒頭から 30 秒間の A 特性等価騒音レベルはそれぞれ 60.3, 54.8, 44.0 dB であった。いずれも Head and Torso Simulator (HATS; B&K Type 4100) によって録音した。接近通報音は、各環境音刺激の平均ラウドネス曲線 (IS0532B) からターゲットカーブを設定し、

Table 1 – Number of the subjects and their age distribution.

	人数 (男性/女性)	年齢中央値 (最大/最小)
若年群 (YOUNG)	10 (5/5)	20.5 (19/24)
中年群 (MIDDLE)	10 (6/4)	38.0 (30/48)
高年群 (OLDER)	10 (5/5)	69.0 (60/74)

ヘッドホン出力が A 特性音圧レベルで 55dB 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) を作成した。無響室内で、HATS の右斜め後方 2m の位置で再生された各接近通報音を録音したものを刺激とした。

被験者は、19 歳から 74 歳の、日本国内在住の男女 30 名である。被験者は、その年齢から Table 2 のように 3 群に分けられた。ただし、高齢被験者群では、環境音刺激が聴取できない (聴こえない) と申告した被験者 2 名と、実験タスクを十分に理解できなかったと判断された被験者 1 名のデータは分析対象から除外した。

その結果、高齢群では最低聴取レベルが他群より高い傾向があった。接近報知音の種類によっては車両から 2 m の位置で 50dB 程度の接近通報音が高齢者に聴取されない場合があることが示唆された。一方、最適聴取レベルに年齢群による顕著な違いは観察されなかった。また、Env 1, 2 で、若年群が最適音量を他の群よりやや大きな音量に調整している傾向読み取られ、その理由として、ポータブルヘッドホンオーディオ等の利用の影響が考えられた。国内の若年層の 97% がポータブルオーディオデバイスを所有し、日常的に使用していること、またその平均聴取レベルは道路交通騒音環境下 (LAeq=63dB) で 71.1 dB であるという報告もあり、使用中に車両の接近等に気づかずに危険な状況に遭遇したことがある者も多いことが示されている。このような音楽聴取状況を想定して、やや大きめの音量に設定した可能性が考えられた。

接近報知音刺激ごとと比較すると、接近通報音 D が他の 4 種より大きな音量に調整される傾向であった。この原因には周波数特性の違いが挙げられる。ヘッドホン出力の A 特性音圧レベルが 55dB の時の各刺激の 5 秒間

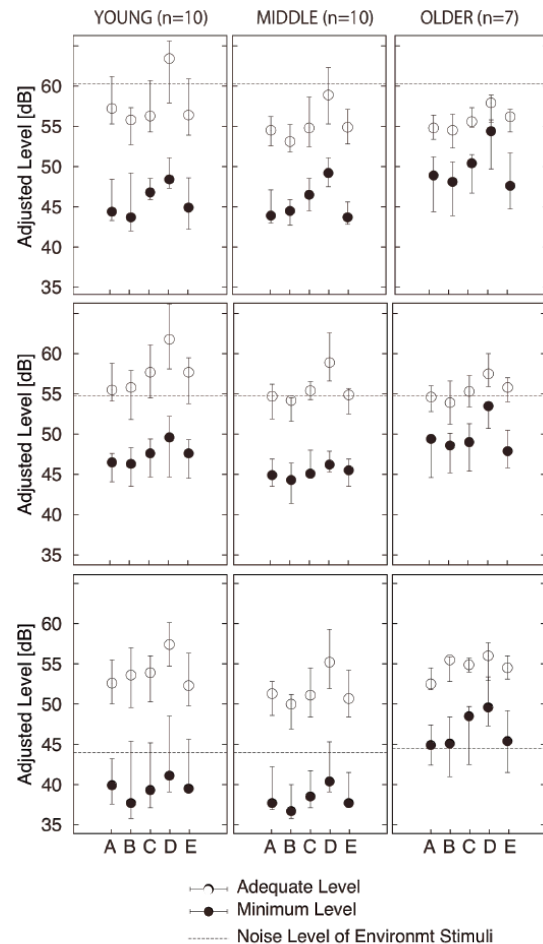


Fig. 4 – Medians and interquartile ranges of the averaged adjusted levels. (White symbols: warning sounds clearly audible.)

の平均ラウドネス値を推定すると、接近通報音 D は他の 4 種類より値が低い (mean loudness: 8.06, 7.71, 6.60, 4.51, 8.00 sone)。周波数スペクトルを観察すると、2kHz 付近のみにエネルギーが集中しており、特定の環境音にマスクされやすい音であったと考えられた。

(2) 接近通報音に期待される効果の調査

接近報知音の設計のための基礎的知見の獲得を目的として、アンケート調査によって自動車走行音や接近報知音設置への態度の分析を試みた。

調査は、日本国内 (主に福岡市域) およびドイツ国内 (主にミュンヘン市域) にて実施した。調査原本は日本語で作成し、これを英訳したものをドイツでの調査に用いた。国内では、111 通のアンケート用紙を配布し、18 歳から 70 歳代までの男女 104 人 (男性 58 人、女性 46 人) から有効な回答を得た。回答者の年齢は 60 歳代 (40 人/38.5%) が最も多く、

次いで 50 歳代 (21 人/20.0%), 20 歳代 (18 人/17.3%) が多かった。

調査の結果を以下に示す。回答者のうち、「自動車を運転することがある」と回答した 98 人に対して運転中の走行音の音質、音量について尋ねた。98 人のうち週 2~3 回以上運転する機会がある者は 74 人 (75.5%) であった。運転中の走行音の音質については「いいとも悪いとも思わない (32 人/32.7%)」および「音質を気にした事はない (33 人/33.7%)」の回答選択数が多く、音量については「どちらでもない (48 人/49.0%)」の回答選択数が最も多かった。さらに、「運転中の走行音が聞こえないほど静かになったらどのように思うか」という設問には、「車の調子や走行状態が分からず不安 (62 人/63.3%)」の回答選択数が最も多かった。また、52 人 (53.1%) が「歩行者が自車の接近に気付かなかったために危険や不満を感じた経験がある」と回答した。全回答者 (104 人) に対して、歩行者の立場で、自動車が接近していることに気付かずに、危険を感じたり驚いたりした経験があるかを問うた設問には、59 人 (56.7%) が「ある」と回答した。その理由としては「該当車両の音が静かで聴こえなかった」「周囲が騒がしく、該当車両の音が聞こえなかった」の回答選択数が多かった。さらに、全回答者に対して、HV や EV のような低騒音車に人工的な音を取り付けることは必要だと思うかどうかを、その理由と共に尋ねた。その結果、「注意喚起のため」「現状の暗騒音を考慮したら必要」「運転習慣は変えられないので」という理由で、62 人 (59.6%) が低騒音車に人工的な音を取り付けることを「必要」と回答した。各設問間の関係をクロス集計等で分析した結果、現在の自動車の走行音について特に不満はなく、静かな走行音では不安を感じる回答者は、低騒音車に接近報知音が必要だと考える傾向があることが示された。一方、自動車の走行音は静かなほうが良いと感じている回答者は、接近報知音は不要だと考える傾向があると示された。

本調査によって、ハイブリッド車を運転している回答者が 2 名 (1.6%) だけだったにも関わらず、日常的に運転をする回答者のうち 51.6% が「歩行者が自車の接近に気付かなかったために危険や不満を感じた経験がある」と回答している。つまり、従来の車と同様の音を同程度に再現するだけでは、EV/HEV が出現する以前と同程度に問題が残ると考えられる。走行音がマスクされないような静かな環境を整備するという本質的かつ長期的な視野を持った上で、情報源として最適に機能する自動車走行音デザインのための知見獲得の重要性が示唆された。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 山内勝也: ハイブリッド車・電気自動車などの静音性対策の動向 - 車両接近報知音のデザイン. 日本音響学会誌, Vol. 68, No. 1, pp. 31-36, 2012 (査読有)
2. 山内勝也: 静音自動車対策の現状と課題. 環境技術, Vol. 40 No. 7, pp. 412-417, 2011 (査読無)
3. 上田麻理, 山内勝也, 永幡幸司: 視覚障害者が求める街頭宣伝放送の適切な音量について. 騒音制御, Vol. 36, No. 6, pp. 418-424, 2012 (査読有)

[学会発表] (計 12 件)

1. Katsuya Yamauchi: Sound Design for Quiet Vehicle - a Proposal on Quiet Vehicle Problem-. Proc. Kyushu-Youngnam Joint Conference on Acoustics (2011 年 1 月 22 日, 熊本)
2. 山内勝也, Daniel Menzel, Hugo Fastl, 高田正幸, 永幡幸司, 岩宮眞一郎: 静かな車 (Quiet Vehicle) の接近報知音に求められる音量 ~ ドイツ在住者による評価 ~. 日本音響学会 (2011 年 3 月 10 日, 東京都)
3. Daniel Menzel, Katsuya Yamauchi, Florian Voelk, Hugo Fastl: Psychoacoustic experiments on feasible sound levels of possible warning signals for quiet vehicles. DAGA'11 (2011 年 3 月 22 日, ドイツ・デュッセルドルフ)
4. 山内勝也, Daniel Menzel, Hugo Fastl, 高田正幸, 永幡幸司, 岩宮眞一郎: 静かな車 (Quiet Vehicle) の接近報知音に求められる音量に関する音響心理学的検討. 自動車技術会 2011 年春季大会 学術講演会, (2011 年 5 月 16 日, 横浜市)
5. Katsuya Yamauchi, Daniel Menzel, Hugo Fastl, Masayuki Takada, Koji Nagahata and Shin-ichiro Iwamiya: Cross-cultural study on feasible sound levels of possible warning sounds for quiet vehicles. Inter-noise 2011 (2011 年 9 月 7 日, 大阪)
6. 坂部佑磨, 伊藤健二, 井上さやか, 山内勝也, 岩宮眞一郎: 自動車走行音に関する意識調査 - 電気自動車・ハイブリッド自動車の増加に伴う意識の変化を探る -. 日本音響学会九州支部 第 9 回学生のための研究発表会 (2011 年 11 月 4 日, 大分市)

7. 坂部佑磨, 井上さやか, 山内勝也, 岩宮眞一郎: ハイブリッド・電気自動車が増加してきた状況下における自動車走行音に関する意識調査—年代や性別での意識の違いを探る—, 日本音響学会 騒音・振動研究会 (2012年3月9日, 沖縄)
8. 山内勝也, 坂部佑磨, 伊藤健二, 井上さやか, 岩宮眞一郎: 安全安心と快適性を考慮した次世代自動車の走行音設計のために, 日本人間工学会第53回記念大会 (2012年6月9日, 福岡)
9. Katsuya Yamauchi, Yuma Sakabe, Kenji Ito, Sayaka Inoue, Shin-ichiro Iwamiya: Questionnaire survey on the sound of quiet vehicles. Inter-noise 2012 (2012年8月21日, アメリカ・ニューヨーク)
10. 山内勝也, 椎津貴之, 田村史雄, 武田雄一郎: 静音車両接近通報音に求められる音量に関する年齢影響の検討. 日本騒音制御工学会研究発表会 (2012年9月6日, 東京都)
11. 山内勝也, 椎津貴之, 田村史雄, 武田雄一郎: 自動車走行音の音程感変化と加速感の関係に関する基礎検討. 日本音響学会 (2012年9月19日, 長野)
12. 井上さやか, 坂部佑磨, 山内勝也, 岩宮眞一郎: 低騒音車が増加している状況下における自動車騒音に関する意識調査. 日本音響学会 (2012年9月20日, 長野)

[その他]

- ・ 国連欧州経済委員会・自動車基準調和世界フォーラム (UNECE/WP29) の騒音専門委員会/低騒音車作業部会 (GRB/QRTV) にメンバーとして参画し, 国際基準策定の基礎資料として研究成果を提出
 (2010年9月 ドイツ・ベルリン)
 (2011年1月 ドイツ・ミュンヘン)
 (2011年5月 アメリカ・サンディエゴ)
 (2011年10月 アメリカ・ボルティモア)
 (2012年7月 アメリカ・ワシントンDC)

・ ホームページによる研究成果広報
 静かな車 (Quiet Vehicle) の音に関する研究
<http://www.cis.nagasaki-u.ac.jp/~yamauchi/research/qv/index.html> (2010年4月ー)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山内 勝也 (YAMAUCHI KATSUYA)
 長崎大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 10380718