

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：55201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12299

研究課題名(和文)安全・安心な交通道路を目指した次世代自動車のための接近報知音デザインに関する研究

研究課題名(英文) Study on designing alert sound for electric and hybrid vehicle toward safe traffic road

研究代表者

安井 希子 (Yasui, Nozomiko)

松江工業高等専門学校・情報工学科・講師

研究者番号：80607896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：安心・安全な交通道路の提供を目指した接近報知音のデザインについて研究を進めてきた。まず、国内外の取り組みや報知音のデザインについて調査し、活用する音響特性を決定して様々な振幅変動音を作成した。環境音聴取状況において、それらの変動音を認知可能な呈示レベルを調査し、定常音よりも振幅変動を含ませた方が呈示レベルが低く、気づきやすいことが確認された。また、印象評価実験を行い、三角波や方形波で振幅変動をかけた方が、報知感や親しみ感が高く不快な印象を与えないことが確認された。以上の結果より、振幅変動を用いることで、次世代自動車の接近を歩行者が気づきやすくなる音をデザインできることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The motor sound on electric and hybrid vehicle is quiet at low speeds. Thus, pedestrians have difficulty detecting those vehicles approaching them. Although those vehicles were designed to play an alert sound to solve this problem, it hasn't been solved yet. Therefore, this study proposes an alert sound with amplitude fluctuations to enhance their ability to be detected and acceptable for neighborhoods. The alert sound with characteristics of the amplitude fluctuation of the gasoline powered vehicle was synthesized using a procedure proposed in previous study. Envelopes such as modulation wave were set for deviations for time and amplitude, and amplitude-modulated sounds were synthesized using sine wave, sawtooth wave, and rectangle wave. A detectability and acceptability by pedestrians were assessed. The result revealed that amplitude fluctuating sounds effectively enabled people to notice the approaching electric vehicles, and that those sounds are relatively acceptable.

研究分野：音響心理学，音楽知覚認知，音楽情報処理

キーワード：次世代自動車 接近報知音 準周期変動 気づきやすさ 適切性

### 1. 研究開始当初の背景

近年、日本再興戦略の一環として、プラグインハイブリッド車や電気自動車などの次世代自動車の普及が国内外で行われており、国内では2030年までに5~7割の普及を目指している。その目標を達成するために、走行可能距離の改善やインフラ整備などが行われているが、走行時の安全性に対する検討は不十分である。

最新技術によって自動車を安全走行させることが可能になりつつあるが、技術発展によって走行音が静かになった反面、低速走行時の車の接近に歩行者が気づきにくいという問題が生じており、事故発生の可能性は低くない。次世代自動車を広く普及させるためにはその問題の解決が不可欠であるが、未だに解決されていない。

そこで、そのような危険性を軽減するために、次世代自動車の接近を歩行者に知らせる音(車両接近報知音)を呈示することでその問題を解決する取組みが行われている。国土交通省は2010年1月に接近通報装置に関するガイドラインを定めて通報装置の搭載を促したが、接近報知音の音質に関する明確な記載がないため、企業や研究者が様々な接近通報音を考案してきた。これまでデザインされてきた報知音は、音の大きさが一定であったり、高さが走行速度に合わせて一定の間隔で高くなったりなど、定常的な変化を対象としてきており、それらの音はガイドラインを満たしているとは言いがたく、より気づきやすく、不快と感じにくい音のデザインが望まれている。

### 2. 研究の目的

ガイドラインで定められた条件を満たした接近報知音のデザインについて研究し、歩行者に対する危険性を軽減して安全・安心な交通道路を実現することを目指す。これまでデザインされてきた報知音は、音の大きさが一定であったり、高さが走行速度に合わせて一定の間隔で高くなったりなど、定常的な変化を対象としてきた。それに対して、本研究では定常ではなく、ランダムでもなく、ガソリン車の排気音に含まれる準周期的な変動を導入し、定常的な音に対してその変動を付与することで、自動車を想起させる接近報知音をデザインする。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究代表者がこれまで行った研究で提案した方法に基づいて接近報知音をデザイン・合成した。なお、その際に合成条件を拡充し、準周期変動の特徴に対する過去の調査結果に基づいて、準周期変動の大きさやその変動のパターン、接近報知音の振幅包絡の種類を増やした。また、音の印象は、その周波数特性によって異なるため、振幅変動させる音の周波数特性についても検討する必要がある。そこで、様々な周波数特性の

音に対して振幅変動を付与した接近報知音を合成した。

次に、それらの特徴が異なる接近報知音を合成し、その音を用いて聴取実験を行ない、歩行者が次世代自動車の接近に気づきやすいか否かを検討した。接近報知音としては、接近に気づきやすくなっており、安全・安心が確保されていることが適切であるとみなせるが、それだけでは不十分であり、ドライバーや近隣住人など歩行者以外の人間の接近報知音に対する印象がそれらの人間にとって適切であるか否かを検討する必要がある。そこで、気づきやすいと判断された接近報知音の印象評価実験を行ない、適切な接近報知音のデザインを行なった。

#### (1) 振幅変動を含む音の合成方法

振幅変動を含む音を聴取した際には変動感が知覚され、変動周波数が約4~8 Hzにおいて最大になると言われており、変動感が気づきやすさに影響を与えられられる。過去に、マンドリン演奏におけるトレモロ音や排気音に含まれる振幅変動の特徴と変動感の関係を調査した結果、一定の変動だけでなく、その変動における時間および振幅方向の準周期的な変動や振幅包絡の形状も変動感の知覚に影響を与えていることが示された。本研究でもそれらの特徴を活用して様々な変動音を合成した。

本研究で用いた、振幅変動に関する特徴について説明する。一定の変動を表す特徴として、変動周波数を用いる。これは変動の速さであり、振幅包絡の基本周波数に相当する。時間および振幅方向の準周期変動は、一周期あたりの変動が一定ではなく、時間および振幅方向において一定の状態からの逸脱を含んでおり、それらが信号全体において異なるために生じている。よって、それらの逸脱の変動の大きさを二つ目の特徴として用いる。時間逸脱(Deviation for Time, DT)および振幅逸脱(Deviation for Amplitude, DA)に関する概要を図1に示す。振幅包絡の形状に関しては、その形状によって変動感が異なることが示されているが、具体的な特徴との関係については調査が不十分である。そこで、数式で定義化されている波形を用いる。

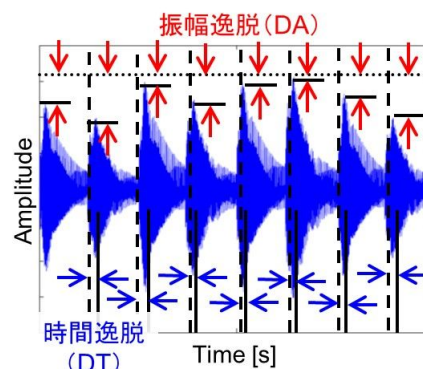


図1 時間逸脱および振幅逸脱の概要

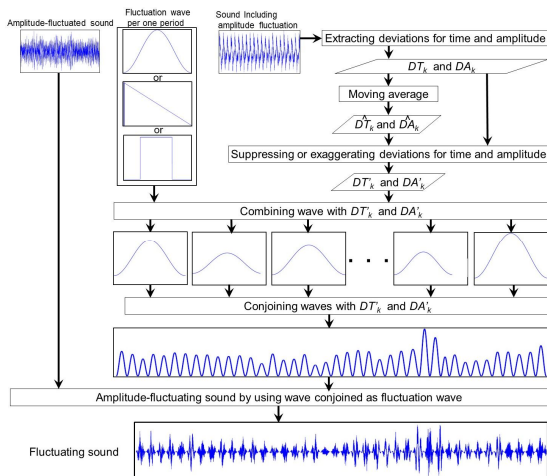


図2 本研究における振幅変動音の合成方法

ガイドラインでは、「自動車の接近を想起させる」ことが定められているため、ガソリン車の排気音のように振幅変動させた音を合成する。具体的には、任意の複合音に、排気音から抽出した時間および振幅逸脱を付与した単純波形を用いて振幅変動を与えることで、排気音のように変動する音を合成する。ただし、その方法では収録音の逸脱パターンのみ、すなわち1通りの準周期的な変動しか付与することができず、様々な大きさの準周期的な変動をもつ音を合成することができない。そこで、過去の研究で用いられていたオートバイ排気音の合成方法に基づいて、様々な大きさの準周期的な変動をもつ音を合成する。その処理方法を図2に示す。

#### 時間および振幅逸脱の抽出

時間および振幅逸脱の抽出では、過去の研究と同様に、抽出した振幅包絡を用いて発音時刻を推定し、得られた発音時刻と逸脱がない状態における発音時刻のずれを算出し、それを時間逸脱量  $DT_k (k=1 \sim M)$  とする。 $k$  は排気音における爆発音のID、 $N$  は爆発音の総数を表わす。また、得られた発音時刻の振幅と排気音の最大振幅のずれを算出し、振幅逸脱量  $DA_k$  とする。

#### 各逸脱に対する特徴強調

様々な大きさの準周期的な変動を含む音を合成するために、過去の研究と同様に、時間および振幅逸脱を強調する。その強調方法では、各逸脱の「記録データに含まれる逸脱量と逸脱傾向の差分  $p_{i,1}$ 」、「逸脱傾向における全体の変動幅  $p_{i,2}$ 」、「逸脱傾向における隣接2音間の差分  $p_{i,3}$ 」、および「逸脱傾向と逸脱がない状態における値の差分  $p_{i,4}$ 」を操作することにより、逸脱の変化傾向を保持した特徴強調を実現している。

#### 各逸脱の複合音への付与

まず、一周期分の波形に対して、各発音時刻における時間および振幅逸脱を付与する。時間逸脱を付与する場合は、合成する音にお

ける変動周波数から変動の周期を算出し、時間逸脱を付与した際の発音間隔を求める。求めた時間長の波形を合成する。振幅逸脱を付与する場合は、時間逸脱を付与したサイン波の振幅に振幅逸脱をかけ合わせる。

次に、各逸脱を付与された波形をつなぎ合わせることで、振幅変動をかける波、すなわち、振幅変調音における変調波を合成する。これによって、合成する報知音の長さの振幅包絡を用意する。

最後に、振幅変調の合成と同じ方法を用いて、得られた変調波を任意の複合音にかけることで、振幅変動音を合成する。

## (2) 気づきやすさに対する評価実験

人間は様々な環境音の聴取下において、次世代自動車の接近を気づかなければならないため、そのような状況下であっても、低い呈示レベルで接近報知音の存在がわかれば、それらの接近を気づかせやすい報知音とする。よって、環境音聴取下において、報知音を聴取可能な呈示レベルを調査した。本研究では、環境音を聴取している状態で接近報知音も同時に聴取可能な状態のことを「次世代自動車の接近を気づくことができる状態」とする。その際の接近報知音の呈示レベルが小さければ小さいほど、騒音問題にならない音の大きさを次世代自動車の接近を歩行者に気づかせることができるという理由から、ガイドラインで示された条件を満たしていると言える。

### 実験方法

変動周波数による影響の有無は過去に明らかにしているため、変動周波数と準周期的な変動、振幅包絡の形状、振幅変動させる音の周波数特性の相互効果を調査した。具体的には、防音室内で環境音聴取時における刺激音の有無を判断させた。用いた刺激音は合成した振幅変動音であり、環境音は定常的なピンクノイズである。実験は極限法を用いて行っており、刺激音と環境音における音響パワーの差を1 dB増加または減少させたものを聴かせ、刺激音が「聞こえた」または「聞こえない」を回答させており、最初の回答結果と異なる回答が4回続くまで、環境音と刺激音を重ね合わせた音を呈示した。刺激音は、STAX社のアンプSRM-313とヘッドセットSR-303を通じて呈示した。なお、呈示レベルは、評価者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた。なお、呈示する刺激音のパワーは多少異なっているため、差が無視できる程度にパワーを調整している。

### 実験で用いた刺激音の概要

実験で用いた刺激音は、(1)で述べた方法を用いて合成した音である。振幅変動させる複合音は、モーター音と1 kHzの純音、0.6 kHzと2.5 kHzの純音で構成される複合音、0.6, 1.2, 1.8, 2.4 kHzの純音で構成される複合

親しみのもてる	1	2	3	4	5	親しみのもてない
危険な	1	2	3	4	5	安全な
不快な	1	2	3	4	5	快い
あわただしい	1	2	3	4	5	ゆったりとした
警報感の強い	1	2	3	4	5	警報感の弱い
自動車らしい	1	2	3	4	5	自動車らしくない
聞き取りやすい	1	2	3	4	5	聞き取りにくい
報知感の強い	1	2	3	4	5	報知感の弱い
前進している	1	2	3	4	5	後退している
近づいている	1	2	3	4	5	遠ざかっている

図3 実験で使った形容詞対

音である。本研究では、日産車の LEAF が時速約 15 km で走行している際のモーター音を収録し、それを用いた。

変動周波数に関しては、過去の研究に基づいて、8, 14, 20 Hz を用いた。その周波数を調査した結果、約 22 Hz であったため、その値も用いることとした。時間方向の逸脱および振幅方向の逸脱の大きさに関しては、全く逸脱を含まない状態、DA のみを含む状態、DT および DA を含む状態を用いた。振幅包絡の形状に関しては、数式で定義化されている波形のうち、正弦波、ノコギリ波、方形波を用いることとした。

### (3) 振幅変動音に対する印象評価実験

(2)の実験で用いた音と三角波を振幅包絡として用いて合成した音に対する印象を防音室内で答えさせる実験を行った。実験は、Semantic Differential (SD)法を用いて実施しており、得られた全被験者のデータをもとに、各形容詞対を変量として最尤法、バリマックス回転を用いて因子分析を行なった。使用した形容詞対を図3に示す。

実験では、30秒間の刺激音を聴かせ、刺激音に対して10種類の形容詞対に対して5段階評価で回答させた。刺激音は、(2)で述べた実験で用いたヘッドセットとアンプを通じてダイオティックに呈示した。なお、呈示レベルは、被験者にそれぞれ聞きやすいレベルに調整された.1kHzの純音を用いたラウンドネスマッチングによって、これらの呈示レベルを測定した結果、その平均値は $L_A=59.6$ dBであった。なお、呈示する刺激音のパワーが多少異なっているため、差が無視できる程度にパワーを調整している。

## 4. 研究成果

### (1) 気づきやすさに対する実験結果

#### 準周期的な変動による影響

変動の不均一性による影響は、8, 14, 20 Hz の変動周波数において、3通りの準周期的な変動をモーター音に付与した振幅変動音の絶対閾(Absolute Limen, AL)を被験者10名に対して調査した。なお、振幅包絡は正弦波を用いている。

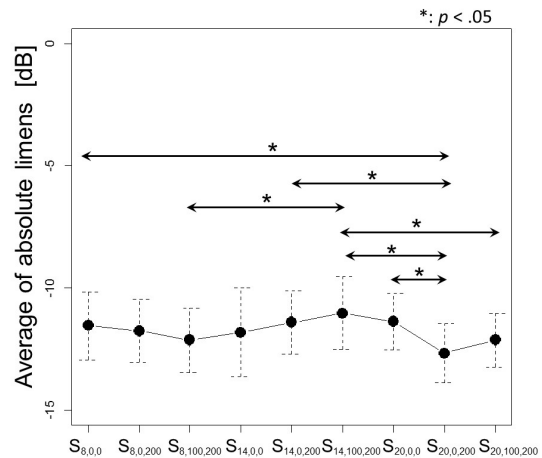


図4 準周期的な変動に関する実験結果

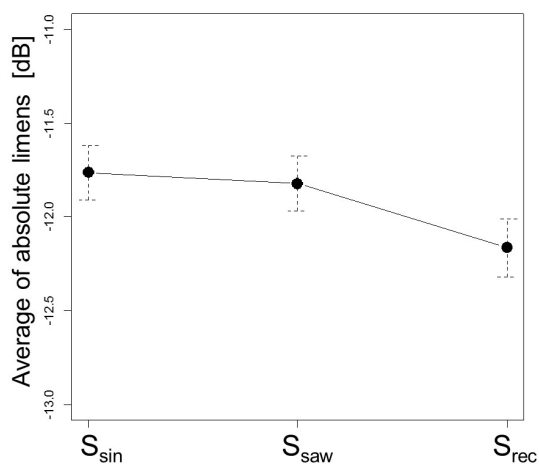


図5 振幅包絡の形状に関する実験結果

調査結果を図4に示す。図4内の $S_{f,DT,DA}$  ( $f=8, 14, 20$ ;  $DT=0, 100$ ;  $DA=0, 200$ )は合成した振幅変動音を意味している。図4より $S_{20,0,200}$ におけるALの平均値が最も小さいことが確認できる。そこで、二要因の分散分析を行った結果、10%水準において変動周波数の主効果、変動の不均一性の主効果、これら二要因の交互作用が有意であることが確認された。TukeyのHSD法を用いて多重比較も行なった結果、図4で示した刺激間で5%水準で有意な差があることが示された。

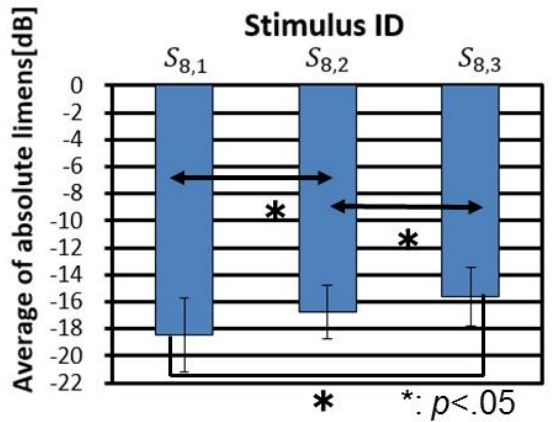
準周期的な変動、特にDAを付与することで、低い変動周波数の場合よりも絶対閾が低くなることが確認できる。

#### 振幅包絡の形状による影響

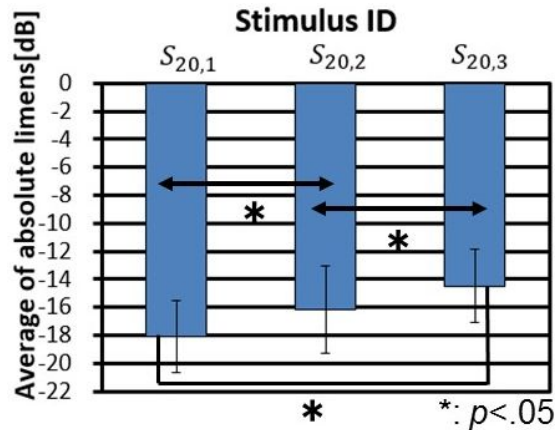
振幅包絡の形状による影響は、8, 14, 20 Hz の変動周波数、3通りの準周期的な変動、3の(2)で述べた振幅包絡の条件3通りでモーター音に振幅変動を付与した音の絶対閾を被験者10名に対して調査した。

振幅包絡の形状ごとにALをまとめた結果を図5に示す。図5内の $S_{env}$  ( $env=sin, saw, rec$ )は合成した振幅変動音を意味している。図5より、 $S_{rec}$ におけるALの平均値が最も小さいことが確認できる。





(a) 変動周波数 : 8 Hz



(b) 変動周波数 : 20 Hz

図6 周波数特性に関する実験結果

#### 周波数特性による影響

国内外において既に用いられている接近報知音の音響特性を調査した結果、特定の周波数帯域を活用しており、聴覚特性を生かした帯域を用いることで、幅広い年齢層において認知しやすいと考えられていることを確認した。そこで、過去の知見に基づいて周波数特性を選択し、1 kHz の純音、0.6 kHz と 2.5 kHz の純音で構成される複合音、0.6, 1.2, 1.8, 2.4 kHz の純音で構成される複合音における絶対閾を被験者 6 名に対して調査した。なお、用いた変動周波数は 8, 20 Hz、振幅包絡の形状は正弦波であり、準周期変動はなしとした。

実験結果を図 6 に示す。図 6 内の  $S_{f,c}$  ( $f = 8, 20$  Hz;  $c = 1, 2, 3$ ) は合成した振幅変動音を意味している。 $c$  の値 1 は、1 kHz の純音 (PT), 2 は 0.6 kHz と 2.5 kHz の純音で構成される複合音 (CT1), 3 は 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 kHz の純音で構成される複合音 (CT2) を意味している。図 6 より、 $S_{f,1}$  における AL の平均値が、各変動周波数において最も小さいことが確認できる。

#### (2) 印象評価実験結果

全被験者のデータに対して、因子分析を行った結果、2 つの因子が抽出された。各形容詞対に対する因子負荷量を表 1 に示す。第

表 1 形容詞対に対する因子負荷量

	親しみ因子	警報因子
親しみのもてる	-0.846	-0.065
危険な	0.491	0.259
不快な	0.560	0.251
あわただしい	0.482	0.408
警報感の強い	0.232	0.832
自動車らしい	-0.157	-0.223
聞き取りやすい	-0.497	0.411
報知感の強い	0.251	0.669
前進している	0.207	0.457
近づいている	-0.012	0.101

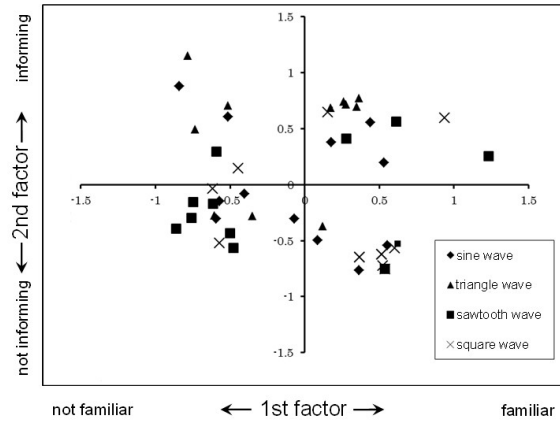


図7 振幅包絡ごとの因子得点

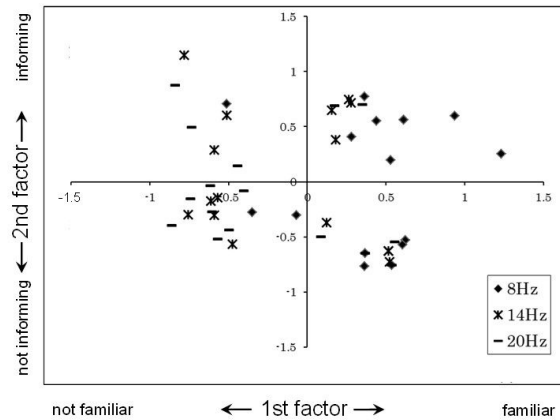


図8 変動周波数ごとの因子得点

一因子を「親しみ因子」、第二因子を「警報因子」として解釈した。次に、因子得点を求めて 2 つの因子に対する各刺激音の特徴を調査した。「親しみ因子」と「警報因子」を 2 軸にとり、それぞれの因子得点を振幅包絡の種類に表した結果を図 7、変動周波数ごとにあらわした結果を図 8 に示す。

図 7 に示した結果に対して、クラスタ分析の最近隣法を用いてグルーピングを行い、グルーピングの距離が 1.5 未満のものまでを同じグループとした。その結果、振幅包絡に関して、三角波を用いた場合、警報感と親しみ感が比較的高く、ノコギリ波の場合、親しみ感と警報感が低く、矩形波の場合、親しみ感が高いことが確認された。変動の速さに関

して、変動の速さが 8Hz の場合、親しみ感が高く、20Hz の場合は親しみ感が低いことがわかった。以上の結果より、振幅包絡の形状や変動周波数を調整することで、適切な報知音を合成可能なことが示唆された。

### (3) 気づきやすさと変動感に関する調査

(1)で述べた結果より、定常的な変動だけでなく、時間および振幅方向に対して準周期的な変動を持たせた方が呈示レベルを小さくすることができることが示された。特に、DA を付与することで気づきやすくなることが示唆された。振幅包絡の形状に関しては、気づきやすさに影響を与えることが確認されたが、その大きさはわずかであった。(2)で述べた実験結果より、報知音に対する印象評価に影響を与えることが確認されたため、振幅包絡の形状に関しては報知音の印象を調整する際に考慮すべきであることが示唆された。

そこで、気づきやすさが比較的高かった接近報知音に対して、B&K 社製の音質評価ソフトウェア (PULSE Sound Quality Software Type 7698) を用いて変動感を表す Fluctuation Strength を算出し、変動感と気づきやすさの関係を調査した。その結果、DT および DA を付与した方が変動感の値が最も大きく、DA を付与した方が 2 番目に大きかった。よって、変動感を大きくすることによって気づきやすい接近報知音をデザイン可能なことが示唆された。

以上の結果より、準周期的な変動を活用して変動感を高めることで気づきやすい接近報知音、振幅包絡の形状を活用して適切な印象の接近報知音をデザインできることが示唆された。

### (4) 新たに制定された規則に基づいた調査

本研究課題の申請以降、国連において規則 (UN Regulation No.138) が制定され、接近報知音として求められる音圧レベルと周波数特性に関する状況が定められた。これまでの調査で用いたモーター音や純音、複合音ではその規則を満たしていないため、その規則に則った複合音に対して振幅変動を与えた時の調査を行った。なお、これまで用いていた環境音はピンクノイズであり、現実の環境とはかけ離れていたため、比較的静かな住宅街で収録した音を環境音として用いた。

その結果、(1)で述べた結果と同様に、振幅変動を付与した方が気づきやすいことが確認された。また、聴覚の感度が良いと言われている 4 kHz の成分を含まない音を用いた方が、その成分を含む複合音よりも気づきやすいことが示された。音質評価ソフトウェアを用いてそれらの音響特徴量を調査した結果、複数の異なる点が確認された。

以上の結果より、新たに制定された規則を満たした複合音を用いても振幅変動の気づきやすさに対する有効性は確認された。しか

し、様々な交通道路環境でも気づきやすい接近報知音が求められているため、環境音の種類や被験者数を拡充したり、被験者の年齢層を広げたりして更なる調査が必要である。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計7件)

安井 希子, 三浦 雅展, "振幅変動音における変動の不均一性および振幅包絡の形状が変動感に与える影響", 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 1-13-9, pp.1207-1210 (2018).

安井 希子, "次世代自動車の接近通報音に対する気づきやすさに振幅変動が与える影響", 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 1-13-8, pp.1203-1206 (2018).

Nozomiko YASUI, Masanobu Miura, "Relationship between fluctuation strength and detectability of alert sounds for hybrid and electric vehicle", Proc. of Inter-noise 2017, pp.1943-1950 (2017).

Nozomiko YASUI, Masanobu Miura, "Relationship between frequency characteristic of fluctuated sound and detectability of warning sounds for electrical vehicle", Acoustics'17 (3rd Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the European Acoustics Association), 4pNSa6 (2017).

Nozomiko YASUI, Masanobu Miura, "Effect of amplitude envelope on detectability of warning sound for quiet vehicle", Proc. of Inter-noise 2016, pp.1698-1705 (2016).

Nozomiko Yasui, "Subjective evaluation of amplitude fluctuated sounds that warn of approaching quiet vehicle", Proc. of Inter-noise 2015, 742 (2015).

Nozomiko Yasui, Masanobu Miura, "Relationship between detectability and fluctuation strength of warning sounds for quiet vehicle", Proc. of Inter-noise 2015, 728 (2015).

[その他]

Nozomiko YASUI's website

[http://outside.matsue-ct.ac.jp/~n\\_yasui/index.html](http://outside.matsue-ct.ac.jp/~n_yasui/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安井 希子 (Yasui, Nozomiko)

松江工業高等専門学校・情報工学科・講師  
研究者番号: 80607896