

超指向性スピーカーが発する警告音の心理的作用 Psychological Effects of Warning Sound Emitted by Super Directional Speaker

飯田 克弘¹, 泉谷 秀幸², 澤田 英郎³

Katsuhiko IIDA¹, Hideyuki IZUTANI² and Hideo SAWADA³

本研究では、車外からの警告音によって注意喚起を行う超指向性スピーカー-USIMPACTについて、漫然運転防止策として、覚醒維持効果の増大が期待される警告音の特定を試みた。警告音の原音を加工し、警告音が与える心理的作用が変化すると予想される警告音代替案を作成した。実験では、これらの警告音をUSIMPACTから発した状況下で被験者に走行してもらい、走行後、SD法に準拠した質問紙調査を行うことで、運転者に与える心理的印象を測定した。因子分析を行った結果、音の迫力、明瞭性、快適性を表す因子が抽出され、被験者が感じる覚醒感が迫力因子と関係があることが示された。また、因子得点に基づき相互比較した結果、警告音原音の周期波長を短くすることで、覚醒維持効果（迫力）、快適性の向上が期待されることが確認できた。

Keywords: 警告音, 覚醒維持効果, 心理的作用, 超指向性スピーカー

1. はじめに

我が国の交通死亡事故原因に着目すると、2019年では、運転者の安全運転義務違反による交通事故が全体の約6割を占めており、そのうち漫然運転が28%と最も大きな割合を占めている。また、2015～2019年の記録¹⁾においても、漫然運転による事故は全ての交通死亡事故原因の16～17%を占めており、最多の割合となっている²⁾。このことから、交通死亡事故を減少させるためには漫然運転対策が重要であると言える。

運転者に対して注意喚起を行うことで漫然運転を防ぐ手法は既往研究でも検討されているが、運転者前方のディスプレイに表示する視覚刺激を用いたサッカード誘導⁴⁾や聴覚刺激とシートの振動による触覚刺激を複合させた警告システム⁵⁾など、その多くが車内設備に依存したものである。そのため、漫然運転の防止策が用いられるかは運転者と走行車両に依存し、特定の区間を通過する運転者に対して漫然運転を防ぐための働きかけを一律に行うことは難しい。そこで、車外から働きかけを行うことが特定箇所での対策として有効と考えられるが、車外からの働きかけによる漫然運転防止の研究は、眠気防止を目的とした薄層舗装などの事例が該当するが、その数は多くない。

車外からの働きかけの一つとして、道路上に設置したスピーカーから走行車両に向けて警告音を照射して運転者に注意喚起を行う手法がある。一例として、車両注意

喚起超指向性スピーカー-USIMPACTでは超音波を用いて音を伝達することで強い指向性を与え、音が分散するのを避けることで周囲への騒音被害を軽減する効果が期待されている⁶⁾。また、上述した薄層舗装と異なり、導入のための工事を必要とせず設置箇所の変更も比較的容易である。先に述べた漫然運転対策の重要性を考えた場合、このUSIMPACTが発する現行の警告音の効果を把握するとともに、現行のものよりさらに覚醒維持効果を高める可能性がある警告音の探索は有意義である。

本研究では、USIMPACTを対象とし、その現行警告音をベースに、既往の知見に基づき、複数の警告音代替案を作成する。そして走行実験を通して、警告音が運転者に与える心理的印象を分析し、覚醒維持効果を推定する。

2. 実験用警告音の生成

2.1 音が与える心理的印象に関する既往研究

(1) 車両走行音の加工による心理的印象の変化

音の加工とそれによる心理的印象の変化について実験を行った例として、異なる周波数の周期音を付加した音から受けた心理的印象を調査し、それぞれの音が与える心理的印象を構成する因子を分析した研究⁷⁾がある。この研究結果では、明瞭性、快適性、迫力を表す3つの因子が抽出され、これらの因子の中で、「目が覚める—眠くなる」に対して最も高い因子負荷量を持つ因子が明瞭性

1 正会員, 博士 (工学), 大阪大学大学院工学研究科
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 e-mail: iida@civil.eng.osaka-u.ac.jp Phone: 06-6879-7611

2 学生会員, 学士 (工学), 大阪大学大学院工学研究科

3 正会員, 修士 (工学), 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社

を表す因子であり、明瞭性が大きくなるほど目の覚める感覚（以下、覚醒感）が増加するとしている。また、付加された周期音の周波数が高くなるほど明瞭性が高く快適性が低くなることが分かっている。

(2)電子音の物理的パラメータと心理的印象の関係

別の研究報告⁸⁾では、繰り返される電子音の音量、周波数、周期などの物理的パラメータと被験者が電子音から受ける心理的印象の関係が分析され、電子音における周期波長が短くなるほど「こもらない」印象の音となり、長くなるほど「うるさくない」「ゆったりした」印象の音になることが示されている。

ここで、前項で紹介した因子分析結果⁷⁾を参照すると、「こもらない」音は明瞭性の高い音であり、「うるさくない」「ゆったりした」音は快適性の高い音と解釈できる。同じく前項で得られた、明瞭性を向上することで覚醒感が向上するという知見と合わせると、音を短くすることで覚醒感が向上すると推測できる。

2.2 警告音代替案の生成

2章1節から、本研究では原音に対する加工として、周期音の付加と周期波長の変更を行う。現在 USIMPACT では「ピ・ポ・パ」と短い時間で3つの異なる高さの単音が連続するトーンバースト音、「ピー」と0.8秒かけて音が高くなるスイープ音の2種類が用いられており、この2つを原音とする。

周期音の付加はスイープ音にのみ行う。原音は800Hzから2500Hzまで上昇する音であり、2章1節1項の既往研究⁷⁾を参考にし、500Hz,1000Hz,2000Hzの3種類の周期音をそれぞれ付加する。また、周期波長については覚醒感の向上を期待してどちらの原音に対しても半分短縮する加工を行う。以上の方針で生成した音の一覧を表1に示す。

表1 実験用警告音代替案

種類	周波数帯	音の長さ
トーンバースト音	1500~2500Hz	1.012 秒
トーンバースト音	1500~2500Hz	0.506 秒
スイープ音	800~2500Hz	0.8 秒
スイープ音+単音	800~2500Hz+500Hz	0.8 秒
スイープ音+単音	800~2500Hz+1000Hz	0.8 秒
スイープ音+単音	800~2500Hz+2000Hz	0.8 秒
スイープ音	800~2500Hz	0.4 秒

3. 実験概要

3.1 実験参加者

被験者は、20歳から60歳までの男女30名であり、いずれの被験者も運転歴1年以上かつ週に1回以上の運転

を行っている。

3.2 実験コース

実験コースは新名神高速道路の高槻ジャンクション・インターチェンジ付近（公道外）に設置した。

実験コースの概略を図2、実験の様子（写真）を図3に示す。走行開始地点と走行終了地点を定め、二地点の間にカラーコーンとUSIMPACTを設置した。被験者には、はじめにカラーコーンの内側を通って終了地点まで走行し、開始地点に戻る際にはカラーコーンの外側を通ってもらう。

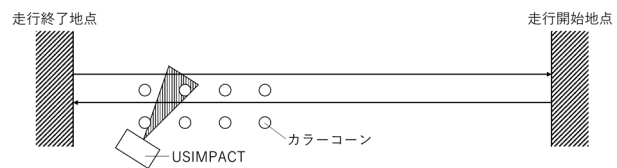


図2 実験コース(概略図)



図3 実験の様子(写真)

3.3 心理的印象に関する質問紙調査

一つの警告音に対する走行ごとに、SD法に準拠した質問紙調査を行うことで、運転者に与える心理的印象を測定した。本研究の質問紙を図4に示す。この質問紙に示す形容詞対の項目は既往研究⁷⁾に準じており、一般的な音の印象表現に用いられる形容詞に加えて、「気にならない」などの主観的な形容詞と、覚醒維持効果に影響する因子を判断するために「目が覚める—眠くなる」を加えた19組の形容詞対が含まれている。実験では、この質問紙(図4)を被験者に提示し、修飾語として「かなり」、「非常に」、「やや」、「どちらでもない」を加えた7段階で被験者に回答してもらった。

3.4 実験手順

はじめに、質問紙の回答に習熟させるため、表1とは異なる警告音を用いて実験手順の練習を2回行った。1回目の練習では静止した車内でノートPCのスピーカーから再生される警告音を聞いて評価してもらい、2回目

	非常に	かなり	やや	でもない どちら	やや	かなり	非常に
1.甲高い……………	1	2	3	4	5	6	7 ……落ち着いた
2.うるさい……………	1	2	3	4	5	6	7 ……うるさくない
3.好ましくない…	1	2	3	4	5	6	7 ……好ましい
4.力強い……………	1	2	3	4	5	6	7 ……弱々しい
5.美しい……………	1	2	3	4	5	6	7 ……汚い
6.騒々しい……………	1	2	3	4	5	6	7 ……静かな
7.ものたりない…	1	2	3	4	5	6	7 ……迫力のある
8.眠くなる……………	1	2	3	4	5	6	7 ……目の覚める
9.鋭い……………	1	2	3	4	5	6	7 ……鈍い
10.金属性の……………	1	2	3	4	5	6	7 ……深みのある
11.濁った……………	1	2	3	4	5	6	7 ……澄んだ
12.沈静した……………	1	2	3	4	5	6	7 ……興奮した
13.こもった……………	1	2	3	4	5	6	7 ……こもらない
14.気になる……………	1	2	3	4	5	6	7 ……気にならない
15.明るい……………	1	2	3	4	5	6	7 ……暗い
16.はっきりした…	1	2	3	4	5	6	7 ……ぼんやりとした
17.軽快な……………	1	2	3	4	5	6	7 ……重々しい
18.安っぽい……………	1	2	3	4	5	6	7 ……高級な
19.快い……………	1	2	3	4	5	6	7 ……不快な

図4 本研究で用いた質問紙

の練習では、本番走行とは異なる警告音を USIMPACT から照射し、後述する本番と同様の条件で評価してもらった。

実験では、コースに設置されたスピーカー（図2）から表1の警告音のいずれかが繰り返し照射されている。被験者は自ら運転し、コース上を走行しながら警告音を聞いてもらい、走行終了地点で車両を停車させて警告音から受けた印象について3章3節で述べた質問紙に回答してもらう。その後、スタート地点に戻る。1つの警告音について質問紙項目が全て回答された後にスピーカーから照射する警告音を変更し、7種類の警告音全てについて、この手順を繰り返す。なお、警告音の照射順序は、あらかじめ被験者ごとにランダムになるよう生成した。

全ての走行が終了した後、運転者にとってどの警告音が漫然運転防止策として優れていると感じるかを調べるために一対比較の調査を行った。被験者が静止した状態でノートPCのスピーカーを用いて、表1の警告音の中から2音ずつ続けて再生し、被験者には「居眠り運転を防止するための警告音としてどちらが適しているか」を二者択一の形式で回答するように教示した。警告音2種類ずつの組み合わせをあらかじめランダムに生成した再生順にもとづいて再生し、いずれの被験者も21組全てを評価した。

4. 心理的作用に基づく分析

4.1 因子分析結果

実験で得られた心理的印象に関する質問紙の回答データ（警告音7種×被験者30名）に対して、最尤法とプロマックス回転を用いた因子分析を行った結果（各形容詞対

表2 因子分析結果

(+) 形容詞対 (-)	迫力因子	明瞭因子	快適因子
力強い—弱々しい	0.9396	-0.0849	0.2097
騒々しい—静かな	0.8848	-0.0537	0.0106
迫力のある—ものたりない	0.8249	-0.0268	0.1278
うるさい—うるさくない	0.8105	0.0230	0.0175
目の覚める—眠くなる	0.7381	0.0570	-0.0448
興奮した—沈静した	0.6289	0.0642	-0.2101
気になる—気にならない	0.6263	0.1138	-0.1153
甲高い—落ち着いた	0.4188	0.3258	-0.1376
明るい—暗い	0.0436	0.7354	0.0614
軽快な—重々しい	-0.0736	0.7233	0.1454
こもらない—こもった	-0.0113	0.6780	0.0979
はっきりした—ぼんやりとした	0.3402	0.6698	0.0657
澄んだ—濁った	-0.2482	0.5666	0.2215
鋭い—鈍い	0.3657	0.3977	-0.1886
快い—不快な	-0.1238	0.2606	0.8183
好ましい—好ましくない	0.2154	0.1659	0.7865
美しい—汚い	-0.2619	0.3578	0.5398
高級な—安っぽい	0.3314	-0.2090	0.4942
深みのある—金属製の	0.0259	-0.3803	0.4814

寄与率(%)	26.7	15.8	12.2
累積寄与率(%)	26.7	42.5	54.7

の因子負荷量)を表2に示す。因子は固有値1.0以上となる3因子を抽出した。

最も寄与率が高い因子については、「力強い—弱々しい」や「迫力のある—ものたりない」など迫力の強さを表す形容詞対に対する因子負荷量が高い。このことから、この因子は音の迫力を表していると解釈して迫力因子と名付ける。二番目に寄与率が高い因子は、最も因子負荷量が高い形容詞対が「明るい—暗い」であり、これ以外にも「こもらない—こもった」「はっきりした—ぼんやりとした」など音がどれだけはっきりしているかを表す形容詞対に対する因子負荷量が高い。このことから、この因子が音の明瞭性を表していると解釈して明瞭因子と名付ける。三番目に寄与率が高い因子は、「快い—不快な」や「好ましい—好ましくない」など音をどれだけ受容できるかを表す形容詞対に対する因子負荷量が高い。その中でも「快い—不快な」に対する因子負荷量が最も高いことから、この因子が音の快適性を表していると解釈して快適因子と名付ける。

また、覚醒感に関係する「目の覚める—眠くなる」に対しては、迫力因子が最も大きな因子負荷量を示した。このことから、本研究で生成した警告音が与える覚醒感

は、迫力因子によって表される音の迫力と最も関係していると考えられる。

4.2 分析に用いる指標

まず、7種類の警告音（評価対象）に対する被験者30名の回答データから、4章1節で述べた3つの因子について得られる630の警告音別被験者別の因子得点を求めた。この因子得点は、各被験者が各警告音を評価するにあたって各因子にどれだけの影響を受けたかを示している。

次に、被験者30名による因子得点の平均値を警告音ごと、3因子ごとに算出した。この平均値は、各警告音を評価するにあたって各因子にどれだけの影響を受けたかについて、被験者内の傾向を示している。つまり、この平均値は警告音について、各因子が表す心理的印象（明瞭性、快適性、迫力）がどれだけ強いことを示していると解釈し、分析の指標とする。

4.3 警告音の加工による心理的作用の変化

(1)音種の違いによる心理的作用の変化

トーンバースト音の原音とスイープ音の原音の因子得点平均を比較したグラフを図5に示す。

トーンバースト音は快適性の因子得点平均がスイープ音よりも高いことから快適性が強く、同様にスイープ音はトーンバースト音より迫力が強いと考えられる。覚醒感については、より迫力の大きいスイープ音が優れていると考えられる。

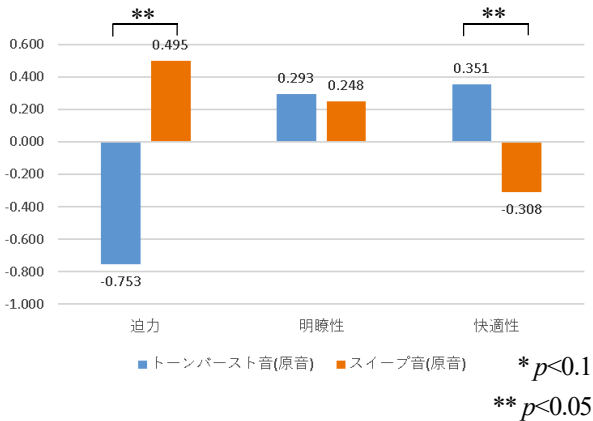


図5 トーンバースト音とスイープ音の因子得点平均

(2)音の長さの短縮による心理的作用の変化

警告音の音種ごとに原音と、原音に対して音の長さを半分にした音（以下、短縮音）の因子得点平均を比較したグラフを図6に示す。

トーンバースト音の原音と短縮音との比較では、迫力の因子得点に関して、短縮音の方が有意に大きくなった ($p < 0.05$)。スイープ音の原音と短縮音との比較では、快適性の因子得点に関して、短縮音の方が有意に大きい傾向

を示している ($p < 0.1$)。

このことから、トーンバースト音の長さを短くすることで迫力、つまり音の覚醒維持効果が大きくなり、スイープ音の長さを短くすることで快適性が増加すると推測できる。

一方、音種を区別せず迫力の因子得点を比較すると、スイープ音は原音、短縮音ともにトーンバースト音の短縮音より有意に大きくなっている ($p < 0.05$)。このことから、今回の実験条件では、スイープ音の迫力が強く覚醒感に優れていると言える。

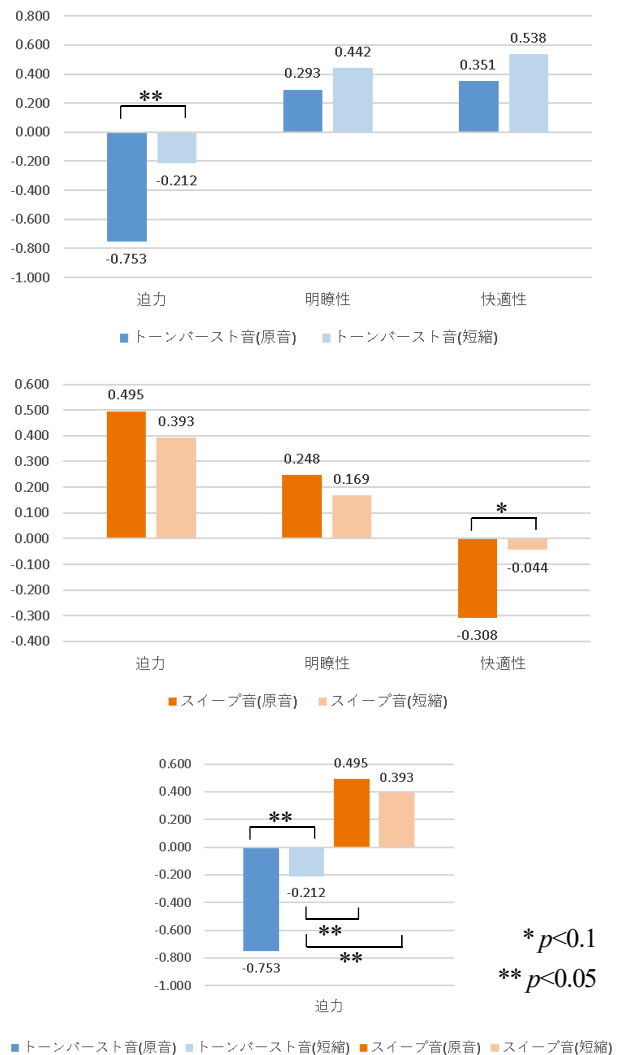


図6 原音と短縮音の因子得点平均

(3)周期音の付加による心理的作用の変化

スイープ音の原音と、周期音を付加した警告音の因子得点の平均を比較したグラフを図7に示す。

いずれの警告音でも、原音と比較して迫力・明瞭性の因子得点が低下している。このことから、今回の実験条件では、周波数帯の付加は原音となるスイープ音の覚醒感を低下させるものと考えられる結果となった。

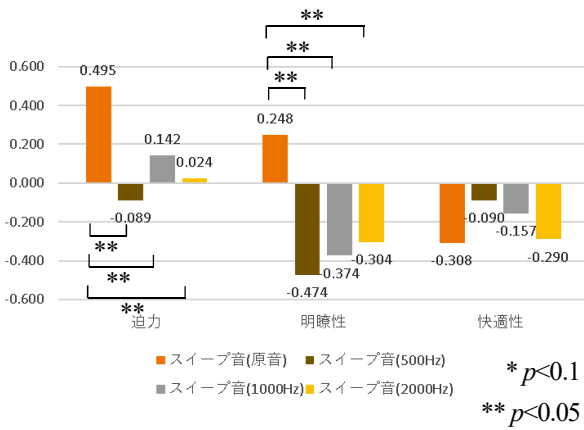


図7 スイープ音の原音と付加音の因子得点平均

(4)レーダーチャートによる比較

各警告音の因子得点平均をまとめたレーダーチャートを図8に示す。

トーンバースト音は原音と短縮音ともに、快適性と明瞭性の因子得点に優れている。しかし、迫力の因子得点はどちらの警告音においてもスイープ音と比べて低く、特に原音では、表1に示した7つの警告音の中で最も小さくなっている。

スイープ音はトーンバースト音と比較して快適性の因子得点は小さいが、迫力の因子得点が高い傾向にある。また、原音および短縮音では明瞭性の因子得点がトーンバースト音に近い値となっているが、周期音を付加した場合には、迫力と明瞭性の因子得点が低下していることが確認できる。

覚醒感と最も強く関係する迫力の因子得点のみに注目すると、これまでの項で示したようにスイープ音の原音と短縮音が優れていると考えられる。

また、他の因子得点に注目すると、トーンバースト音の短縮音は、快適性と明瞭性ともに最も高い因子得点を示しており、迫力の因子得点は、スイープ音の原音と短縮音には及ばないものの、トーンバースト音の原音より高くなっている($p<0.05$)ことが特徴として挙げられる(図6)。

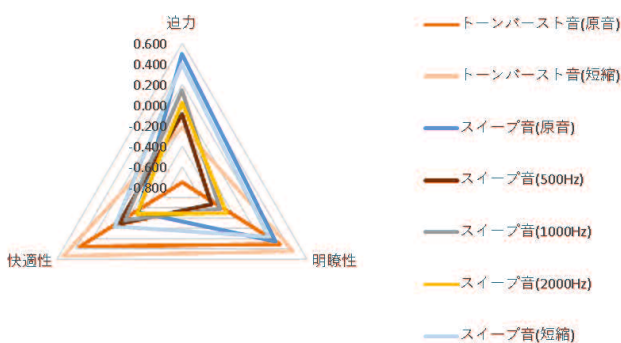


図8 警告音の因子得点

4.4 運転者による警告音としての適正評価

3章4節で述べた通り、全ての走行が終了した後、運転者にとってどの警告音が漫然運転防止策として優れていると感じるかを調べるために一対比較の調査を行った。この結果について、サーストンの一対比較法に基づいて警告音の適正評価を尺度化した。この結果を表3に示す。

表3 警告音の適正評価

警告音	適正評価の尺度値
トーンバースト音(原音)	-0.400
トーンバースト音(短縮)	0.446
スイープ音(原音)	0.215
スイープ音(500Hz)	-0.923
スイープ音(1000Hz)	-0.246
スイープ音(2000Hz)	0.000
スイープ音(短縮)	0.907

4章3節4項で覚醒維持効果が優れている可能性のある音として挙げたスイープ音の原音と短縮音がそれぞれ1番目と3番目に高く評価された警告音であることが確認できる。

また、2番目に高く評価されたのはトーンバースト音の短縮音である。4章3節4項で述べたように快適性と明瞭性ともに最も高い因子得点を示しており、迫力の因子得点も、スイープ音の原音と短縮音には及ばないものの、比較的高くなっている。

以上の結果から、運転者が漫然運転防止策として警告音を評価する際、覚醒感と最も強く関係する迫力を重視すること、および、それに次いで、音の快適性と明瞭性を求めていることが推察できる。

5. 分析結果のまとめ

本研究では、USIMPACTを対象に、現行の警告音に対して複数の警告音代替案を作成し、それらが運転者に与える心理的印象について分析した。以下に、本研究で得られた成果を示す。

- トーンバースト音は快適性の因子得点が高く、スイープ音は迫力の因子得点が高いという特徴が確認された。音の長さを短くすることで、トーンバースト音は迫力の因子得点が高く、スイープ音は快適性の因子得点が高くなるという改善効果が見られた。しかし、迫力の因子得点に関してみると、トーンバースト音の短縮音の得点は、スイープ音の原音、短縮音より大きくはならない。
- 覚醒維持効果の観点からは、今回の実験条件では、スイープ音の原音と短縮音が優れていると言う結果になった。ただし、トーンバースト音の短縮音は快適性と明瞭性の因子得点が今回の代替案の中で最も

高く、音の長さを短くすることで迫力因子の得点が改善することが確認された。

- ・ 心理的印象に基づいて覚醒維持効果が高いと推測した警告音と、漫然運転を防止するための警告音として被験者が高く評価した警告音が一致している。ただし、明瞭性と快適性の因子得点が最も高いトーンバースト音の短縮音も、前述の警告音に並んで高く評価されていた。つまり、運転者が漫然運転防止策として警告音を評価する際、覚醒感と最も強く関係する迫力を重視すること、および、それに次いで、音の快適性と明瞭性を求めていることが示唆された。本研究では、覚醒維持効果を実際に測定することはせず、心理的印象に基づいて推測するという手法を採用した。そのため、覚醒維持効果が高いと判断された警告音を実際に照射した条件下で、運転行動から推測される覚醒維持効果を計測する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：全国・主要都市圏における高速道路・主要国道の主な区間の交通量増減，国土交通省，2021，https://www.mlit.go.jp/road/road_fr4_000090.html (2021.01.27 アクセス)
- 2) 警察庁：令和元年中における交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況等について，e-Stat，2019，https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00130002&tstat=000001027458&cycle=7&year=20190&month=0&result_back=1&cycle_facet=cycle&tclasslval=0 (2021.01.21 アクセス)
- 3) 小川洋明・石田健二・大須賀美恵子：ドライバの能動的行動に基づく覚醒維持手法に関する研究，自動車技術会論文集，No.44(6)，pp.1459～1464，2013
- 4) 星野博之：運転環境に適合したサッカード誘導視覚刺激によるドライバ覚醒維持，自動車技術会学術講演会予稿集，S150,20156150，pp.774-779，2015.
- 5) 有光哲彦・谷川裕樹・戸井武司：交差点接近時の信号見落とし防止支援のための警報音およびシート振動の複合刺激に基づく警報システムの提案，自動車技術会論文集，No.46(2)，pp.431～436，2015.
- 6) NEXCO 西日本：USIMPACT（ウルトラソニックインパクト）<https://corp.w-nexco.co.jp/techno/product/mat09.html> (2021.02.19 アクセス)
- 7) 有光 哲彦, 遠藤 佳佑, 岡崎 啓吾, 星野 博之, 戸井 武司：快適性を考慮した付加音による高速走行中ドライバの覚醒維持効果の評価，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol18, No4, p319-328, 2016
- 8) 小坂 洋明, 重松 剛史, 渡辺 嘉二郎：電子音の感性評価，計測自動制御学会論文集，Vol33, No12, p1164-1170, 1997