

音像を有する和音を用いた車室内警告音の認知機能性の向上 Improvement of Cognitive Functionality by Chord Warning Sound in Vehicle with Sound Localization

精密工学専攻 51号 森 誠史
Masashi Mori

1. はじめに

メッセージを伝える音はサイン音と呼ばれ、その中でも自動車車室内の警告音は人命に関わることもある重要な音である。しかし、自動車車室内の警告音の中には、単一周波数である正弦波を用いているものがあり、ユニバーサルデザイン⁽¹⁾の観点から見ると相応しくない。また、単一周波数では印象が単調であり、車室内で使用すると聴取位置により大きな音圧差が生じる問題がある。これまで、警告音の時間要素として吹鳴回数⁽²⁾や、スペクトル要素として倍音構造⁽³⁾の検討が行われてきたが、複数の周波数を含んでいる和音を警告音に適用した研究は少ない。

そこで本研究では、複数の周波数を含んでいる和音に着目し、警告音の印象操作や、音像定位による音圧差の平滑化、自動車車室内の聴取位置による音圧差の平滑化、集中状態や反応速度に与える影響を主観評価や物理特性の測定により検討する。まず、和音を用いた警告音の印象を主観評価により検討する。また、和音を分散和音にすることによる印象変化を把握する。次に、和音を用いた警告音の特性とその効果を物理特性の測定により検討する。音像定位の位置による音圧差や、自動車車室内で正弦波と和音を再生した際の聴取位置での音圧差を測定する。さらに、和音を用いた警告音が集中状態や反応速度に及ぼす影響を運転タスクにより検討する。運転タスク下で危険を確認するまでの反応時間、運転精度による注意散漫度を評価する。また、音像定位させることによる反応速度および注意散漫度を評価する。以上より、警告音に和音を利用し、警告音の印象操作や自動車車室内での認知機能性の向上を目指す。

なお、本研究のすべての評価は、被験者に対し十分なインフォームド・コンセントを行っている。

2. 警告音に和音を用いる検討⁽⁴⁾

本章では、和音を用いた警告音を作成し、警告感および快適感の印象変化を把握する。次に、分散和音による印象変化を把握する。

2.1 和音による印象変化の把握

本節では、和音の構成音や、構成音の数の違いによる印象変化を7段階のSD法により把握する。

本評価で使用する和音は三、四、五個の構成音からなる和音を用い、それぞれ三和音、四和音、五和音とし、評価音源をTable 1に示す。これらの和音は、一般的に楽曲等で使用頻度が高い代表的な和音を抜粋したものである。音源はすべて正弦波を合成することにより作成し、音源の時間長は1sである。また、和音の協和感、不協和感は倍音成分の有無によって異なるため、和音の協和音程を生かすために倍音成分は6倍音までとし、倍音の振幅値と位相は全て同一とする。音律は平均律を使用し、ドの周波数は523.25Hzを使用した。被験者は20代8名である。

因子分析により得られた因子負荷量をTable 2に示す。「不快-快適な」に代表される第1因子、「地味な-目立つ」に代表される第2因子、「重い-軽い」に代表される第3因子を抽

Table 1 Evaluation sound source

Chord name	Constituent notes	Chord name	Constituent notes
C	ド ミ ソ	Caug7	ド ミ ソ# シ♭
Cm	ド ミ♭ ソ	C7sus4	ド ファ ソ シ♭
Cdim	ド ミ♭ ソ♭	C7(9)	ド ミ ソ シ♭ レ
Caug	ド ミ ソ#	C7(♭9)	ド ミ ソ シ♭ レ♭
Csus4	ド ファ ソ	CM7(9)	ド ミ ソ シ レ
C7	ド ミ ソ シ♭	CM7(♭9)	ド ミ ソ シ レ♭
CM7	ド ミ ソ シ	Cm7(9)	ド ミ♭ ソ シ♭ レ
Cm7	ド ミ♭ ソ シ♭	Cm7(♭9)	ド ミ♭ ソ シ♭ レ♭
CmM7	ド ミ♭ ソ シ	Caug7(9)	ド ミ ソ# シ♭ レ
Cdim7	ド ミ♭ ソ♭ ラ		

Table 2 Results of factor analysis – Factor loadings for chord

(-) Adjective pairs (+)	Comfort	Warning	Clearness
Uncomfortable - Comfortable	0.90	-0.18	-0.19
Harsh - Smooth	0.60	-0.36	0.02
:	:	:	:
Sober - Striking	0.07	0.79	0.16
Quiet - Noisy	-0.15	0.67	-0.06
:	:	:	:
Heavy - Light	0.12	0.17	0.66
Cloudy - Clear	0.41	-0.19	0.62
:	:	:	:
Contribution ratio %	16.7%	16.3%	13.4%
Cumulative Contribution ratio %	16.7%	33.1%	46.4%

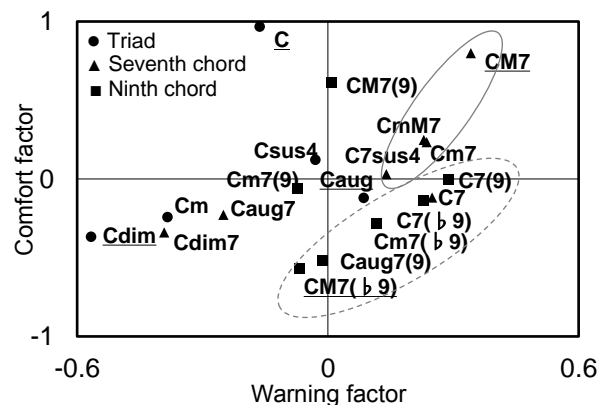


Fig. 1 Evaluation results by SD method

出し、それぞれを快適因子、警告因子、明瞭因子と定義する。Fig. 1に警告因子と快適因子の因子得点を示す。

●で示す三和音は四和音、五和音と比較すると警告感が低いことがわかる。三和音の中では、CdimやCmの警告感が低く、CaugやCsus4の警告感が高い傾向にあることが確認できる。また、音源の中で最も快適感が高い音はCである。▲で示す四和音は警告感が高く、快適感も高い傾向にあることが確認できる。音源の中で最も警告感が高いのはCM7である。

■で示す五和音は警告感が高く、快適感が低い傾向にある。音源の中でも最も快適感が低いのはCM7(b9)である。

三和音より四和音、四和音より五和音の方が高い周波数の音を含んでいるため、音の印象も高くなる傾向にある。そのため、四和音や五和音の音源の警告感が高くなったと考えられる。しかし、五和音は四和音と同等、もしくはやや低い傾向にある。これより、音源の高低だけではなくそれぞれの和音のもつ印象が影響していると考えられる。五和音は三和音や四和音と比べ和音構造が複雑であることが快適感の低下に繋がったと考えられる。以上より、高い警告感が必要な場合は四和音、中でもCM7、高い警告感が不要な場合は、三和音が適していると推察される。

2.2 分散和音による印象変化の把握

本節では、分散和音による印象変化をシェッフェの対比較法により把握する。また、分散和音の構成音の時間幅による印象変化を把握する。

対比較法の評価項目は警告感および快適感である。評価音源に使用する和音は、最も基本的な和音であるCと2.1節の因子分析より3和音の中で最も警告感の高かったCaugを使用する。評価音源は、すべての構成音が同時に鳴るCとCaug、それぞれの構成音が50msずれて鳴るC(50)とCaug(50)、100msずれて鳴るC(100)とCaug(100)の計6種類である。音源の作成方法は2.1節と同様である。

対比較法により得られた警告感および快適感をFig. 2に示す。Caug系列の音はC系列に比べ警告感が有意に高く、2.1節と同様の傾向である。Cは分散和音の時間幅が長くなるほど警告感が低下し、快適感が向上していることがわかる。一方、Caugは分散和音の時間幅が50msでは警告感が向上し、100msでは低下する結果となった。これより、警告感が低い和音は分散和音にすると警告感が低下し、警告感が高い和音は分散和音の時間幅によっては警告感が向上する可能性があると考えられる。Caug系列の快適感を見るとC系列の音同様、分散和音の時間幅が長くなるほど快適感が向上する傾向にある。快適感に関してはCaugとCaug(100)は有意な差があり、Caug(100)の方が快適感が高い。以上より、分散和音の

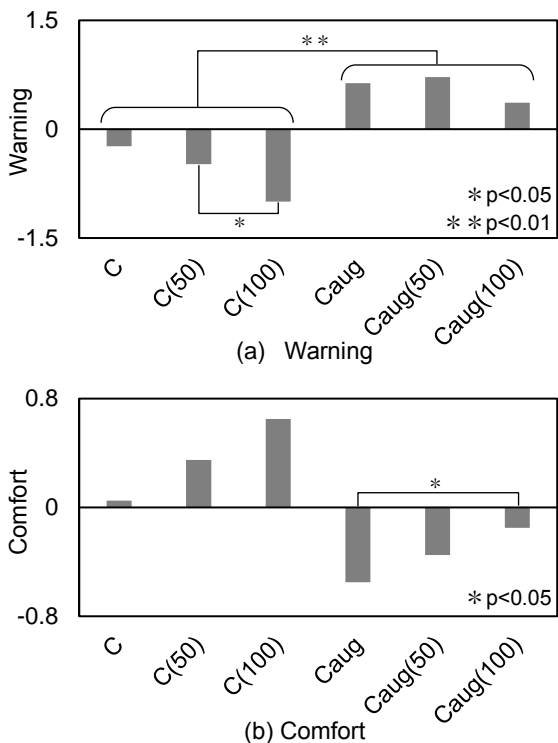


Fig. 2 Evaluation results by paired comparison method

時間幅により警告感や快適感が変化するため、警告レベルに合わせて選択する必要があると考えられる。

3. 和音を用いた警告音の特性とその効果⁽⁵⁾

本章では、和音を用いた警告音の音像定位の位置による音圧差や、自動車車室内で和音を再生した際の聴取位置による音圧差より、和音の特性を明らかにする。

3.1 音像定位による音圧差

本節では、音像定位の位置による音圧差を測定し、音源種類による特性の違いを把握する。

測定にはダミーヘッドを使用し、正面を0度とし、そこから時計回りに30度ずつスピーカを移動させ測定を行う。ダミーヘッドとスピーカの距離は1mとする。ダミーヘッドによる測定は左右対称性を考慮し0度から180度までの7ポイントとする。測定音源はホワイトノイズ、3種類の単一周波数、4種類の和音である。単一周波数は300Hz、1000Hz、2000Hzを用い、和音は2章の印象より、C(ド・ミ・ソ)、Csus4(ド・ファ・ソ)、CM7(ド・ミ・ソ・シ)、CM7(9)(ド・ミ・ソ・シ・レ)を選定した。測定場所は完全無響室であり、測定結果は正面0度を基準とし、各位置との音圧差を算出する。算出にはダミーヘッドの左右の平均音圧を用いる。また、0度~180度の結果を折り返し360度で示す。

Fig. 3(a)に示す単一周波数は、ホワイトノイズと異なる傾向である。また、300Hzと1000Hzは比較的類似した傾向であり基準との音圧差が小さいのに対し、2000Hzはすべての位置で基準より減少しており、90度では3dB程度減少している。これより、単一周波数の場合、周波数の高低により傾向が異なると考えられる。Fig. 3(b)に示す和音は、ホワ

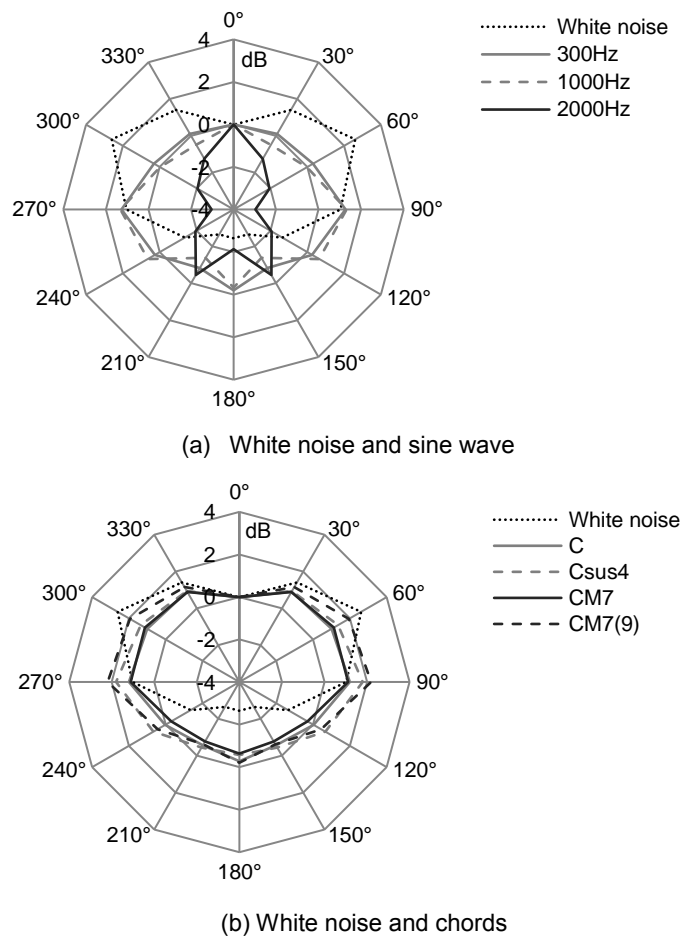


Fig. 3 Measured sound pressure each sound source

イトノイズと比較的類似していることが確認できる。また、和音種類によらず傾向が類似している。これより複数の周波数を含む和音はホワイトノイズの傾向に近づくと推察される。しかし、ホワイトノイズは150度~180度で3 dB程度音圧が低下しており、本条件の場合はホワイトノイズより和音の方が基準との音圧差が小さい。以上より、和音を用いることにより、音源種類の違いによる音圧差を平滑化することが可能であると考えられる。

3.2 自動車車室内に生じる音圧差

本節では、自動車車室内でのドライバの聴取位置による音圧差をダミーヘッドにより測定し、単一周波数と和音の特性の違いを把握する。

Fig. 4に測定ポイントとスピーカの位置を示す。測定ポイントはP1~P5の5ポイントであり、ドライバシートを前方から後方へ0.04 mずつ移動させ測定する。スピーカの位置はFrontの一か所であり、スピーカはダミーヘッドの中心を通るように設置した。測定音源は3.1節と同様である。

測定結果はP1を基準とし、ダミーヘッドの左右それぞれ

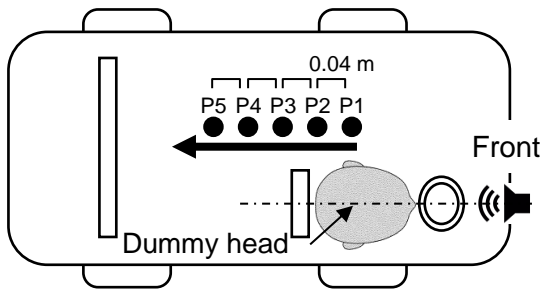


Fig. 4 Position of sources and driving seat

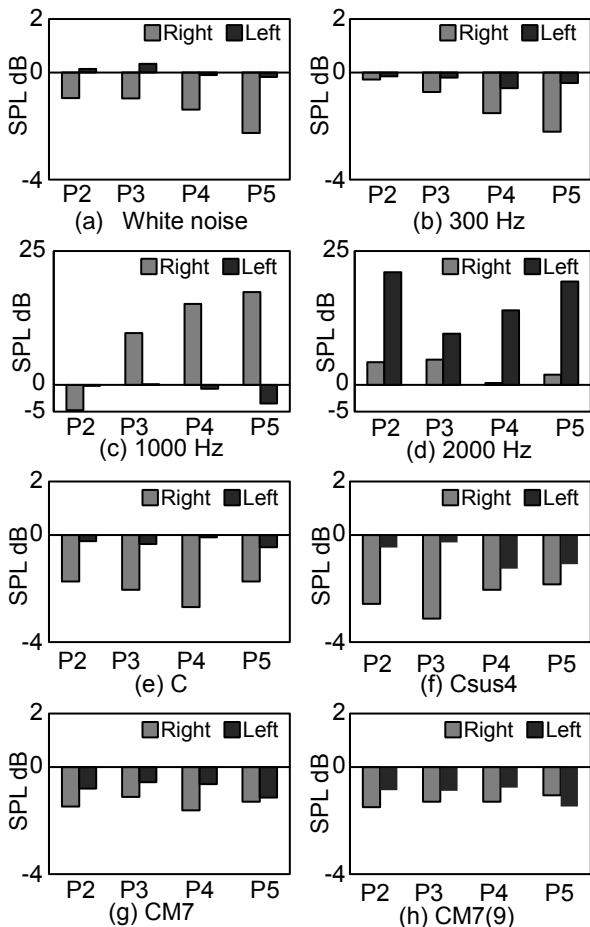


Fig. 5 Results of multipoint measurement

の各ポイントの音圧差を算出する。Fig. 5に音源種類別の計算結果を示す。Fig. 5(a)に示すホワイトノイズの各ポイントの音圧差は、最大でも2 dB程度と小さいことが確認できる。しかし、Fig. 5(b)~(d)に示す単一周波数は、300 Hzで5 dB程度、1000 Hzと2000 Hzで20 dB程度の音圧差が生じていることが確認できる。これは、自動車車室内の反射特性による定在波の影響と波長が影響したと考えられる。Fig. 5(e)~(h)に示す和音は和音種類によらず傾向が類似していることがわかる。また、基準との音圧差は最大でも4 dB程度であることが確認できる。これは、複数の周波数を含むことにより、ホワイトノイズの傾向に近づいたと考えられる。以上より、自動車車室内で単一周波数を再生すると、周波数によっては20 dB程度の音圧差が聴取音圧に生じるが、複数の周波数を含んだ和音を用いると音圧差が4 dB程度に抑えられることがわかった。

4. 和音による反応速度の検討⁽⁶⁾

本章では、音源種類、音像定位の位置が集中状態および反応速度に与える影響を把握する。

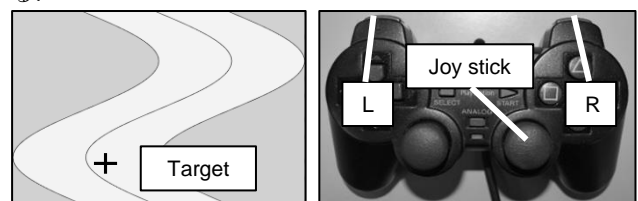
4.1 音源および時間長による反応速度

本節では、和音を用いた警告音が集中状態および反応速度に与える影響を把握する。また、音源の時間長による集中状態および反応速度を把握する。さらに、単一周波数と比較し和音の効果を検証する。

自動車運転中の集中状態を再現するために、運転タスクを用いて評価を行う。被験者正面の0度と、時計回りに60度、300度の位置に23インチのディスプレイを設置し、それぞれをD1, D2, D3とする。また、スピーカは被験者の正面0度に設置し、これをS1とする。被験者とディスプレイ、スピーカの距離はいずれも1 mである。D1にFig. 6(a)に示す運転タスクを提示する。運転タスクは道路を模擬した正弦波状の曲線が上から下に流れる。被験者はFig. 6(b)に示すコントローラのジョイスティックを左右に動かし、十字のターゲットができるだけ曲線の中心線を通るように操作する。また、十字のターゲットは左右のみに動くように動作を制限している。この時の被験者が操作したターゲットの軌跡と曲線の中心線との差を注意散漫度とする。

運転タスク中に、D2もしくはD3を赤く点灯させ危険を提示し、被験者は危険が提示された方向のボタン(LまたはR)を素早く押す。危険提示されてからボタンを押すまでの時間を反応速度とする。音源は危険提示と同時にS1から再生され、音圧は頭部中心位置で60 dBAである。1回の運転タスクは約60 sであり、その間に10回の危険が提示される。これを条件の数だけ繰り返す。危険提示の時間、方向および音源の再生順はランダムである。また、比較のため、視覚のみの条件(Vision)も実施する。被験者は20代6名である。

使用音源は単一周波数と和音を用いる。和音は3和音のCsus4(ド・ファ・ソ)を用い、単一周波数は音源の高さによる影響を無くすため、Csus4のスペクトル重心である2751 Hzを用いる。音源の時間長は0.8 sと1.2 sの2種類を用いる。



(a) Driving task

(b) Controller

Fig. 6 Tasks which subjects perform

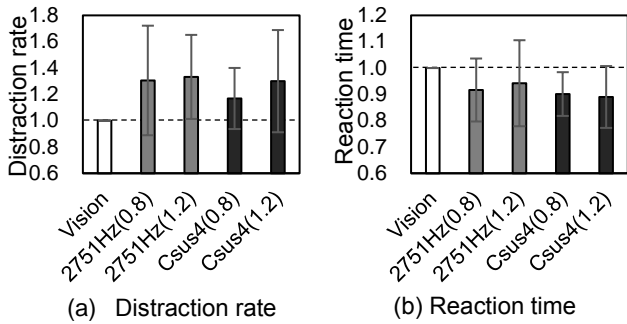


Fig. 7 Results of driving task evaluation by sound source

注意散漫度は被験者ごとに異なるため、Vison を基準に正規化を行う。Fig. 7(a)に注意散漫度の被験者間平均と標準偏差を示す。Vison に対し、音源がある条件の方が注意散漫度が大きいことがわかる。これは、音源を付加することにより情報量が増えたことが影響したと考えられる。また、単一周波数と和音を比較すると、同時間長では和音の方がやや注意散漫度が小さい傾向にはあるが、その差は小さい。さらに、音源の時間長で比較すると、0.8 秒の音源の方がやや注意散漫度が小さい。これより、音源を付加することにより注意散漫度が大きくなるが、和音もしくは時間長が短い音源を使用することで注意散漫度を小さくできる可能性がある。

一方、反応速度は被験者ごとに速さが異なるため、注意散漫度同様に Vison を基準に正規化を行う。Fig. 7(b)に反応速度の被験者間平均と標準偏差を示す。Vison に対し、音源がある条件の方が反応速度が速いことがわかる。しかし、単一周波数と和音による反応速度に大きな差は見られない。また、音源の時間長による差も小さいことが確認できる。これより、音源を加えることで反応速度の向上が期待でき、和音は単一周波数と同等の反応速度であることが推察される。

4.2 音像定位による反応速度

本節では、音源を危険提示とは異なる方向から再生した際(誤定位)と、音像定位させた際(正定位)の集中状態および反応速度の変化を把握する。また、単一周波数と比較し和音の効果を検討する。

運転タスクとディスプレイの位置は 4.1 節と同様である。スピーカは被験者正面を 0 度とし、時計回りに 60 度、120 度、240 度、300 度の 4 位置に設置し、誤定位もしくは正定位から再生する条件の 2 パターン行う。誤定位からの再生は、危険提示方向以外の 3 つのスピーカよりランダムに選出され再生される。また、比較のため視覚のみの条件(Vison)も実施する。被験者は 20 代 6 名である。使用音源は 4.1 節と同様であり、2751 Hz の単一周波数と Csus4 の和音である。4.1 節より、音源の時間長による影響は小さかったため、音源の時間長は 0.8 秒の一種類とした。また、注意散漫度と反応速度は 4.1 節同様、Vison を基準に正規化を行う。

Fig. 8(a)に誤定位させた際の注意散漫度の被験者間平均と標準偏差を示す。Vison に対し、音源がある条件の方が注意散漫度が大きく、特に和音は大きくなっていることがわかる。これは、和音は定位感が強く、危険の提示方向と音源が一致していない場合に負荷が増加し、注意散漫度への影響が大きくなったと考えられる。一方、単一周波数は定位感が弱いので、負荷が小さく注意散漫度への影響も小さいと考えられる。Fig. 8(b)に誤定位させた際の反応速度の被験者間平均と標準偏差を示す。Vison に対し、音源がある条件の方が反応速度が速い傾向にあり、4.1 節と同様の傾向である。

Fig. 9(a)に正定位の注意散漫度の被験者間平均と標準偏差を示す。Vison に対し、音源がある条件の方が注意散漫度が大きいことがわかる。また、単一周波数と和音を比較する

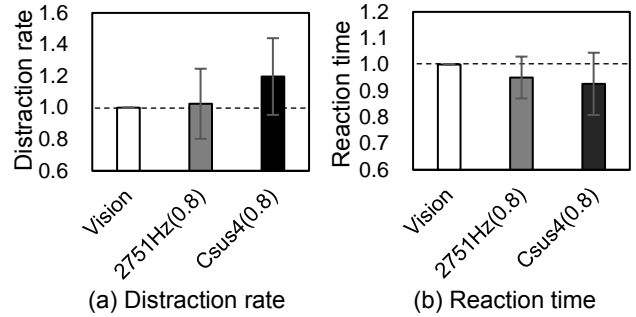


Fig. 8 Results of driving task evaluation by mislocalization

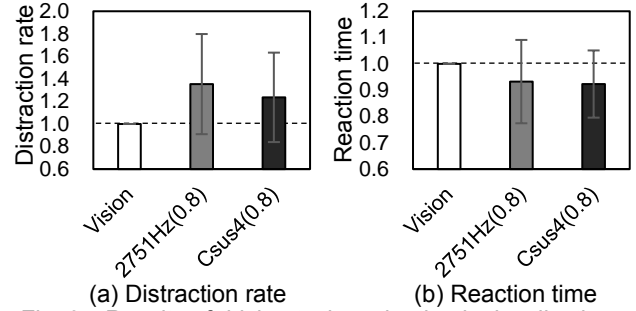


Fig. 9 Results of driving task evaluation by localization

と、有意な差は無いが和音の方が注意散漫度が小さく、4.1 節と同様の傾向である。Fig. 9(b)に正定位させた際の反応速度の被験者間平均と標準偏差を示す。Vison に対し、音源がある条件の方が反応速度が速い傾向にある。また、音源種類による差は小さいことがわかる。これは、4.1 節と同様の傾向である。

5. 研究成果

- (1) 和音による主観評価より、和音種類により警告感の印象が異なることを把握し、音が高い四和音、五和音の警告感が高いことがわかった。
- (2) 分散和音による主観評価より、分散和音は快適感が上昇し、時間幅によっては警告感が向上する可能性が示唆された。
- (3) 音像定位の位置や車室内で生じる音圧差は、単一周波数より和音の方が平滑化できることを明らかにした。
- (4) 運転タスク評価より、音源を付加すると注意散漫度が大きくなり、反応速度が向上することがわかった。また、音源が誤定位の場合に和音の注意散漫度が大きくなることから、音源は正定位させることが重要である。

参考文献

- (1) 倉片憲治, 音のユニバーサル・デザイン, 日本音響学会誌, 58-6 (2002) pp. 360-365.
- (2) 杉原大志, 岩宮眞一郎, サイン音の緊急感を段階的に制御するデザイン手法, 音講論集(春), (2015) pp. 1359-1362.
- (3) 板垣達也, 松本哲也, 竹内義則, 工藤博章, 大西昇, 倍音構造とピーク強調を用いた警告音の認識, 電子情報通信学会技術研究報告, 111-472 (2012) pp. 13-18.
- (4) 森誠史, 高谷直芳, 大池太郎, 大杉郁代, 戸井武司, 警告レベルに応じた和音を用いた警告音の提案, 音講論集(秋), (2017) pp. 1319-1320.
- (5) 森誠史, 戸井武司, 和音を用いた警告音の特性とその効果, 音講論集(春), (2018) 1-13-3.
- (6) 森誠史, 大池太郎, 大杉郁代, 戸井武司, 和音を用いた警告音が反応速度に及ぼす影響, 音講論集(春), (2018) 1-13-4.