

音声操作によるドライバーディストラクションの  
低減効果に関する研究

伊藤 一也

電気通信大学大学院 情報システム学研究科  
博士（工学）の学位申請論文

2017年9月



音声操作によるドライバーディストラクションの  
低減効果に関する研究

博士論文審査委員会

主査 田中 健次 教授

委員 大須賀 昭彦 教授

委員 栗原 聡 教授

委員 阪口 豊 教授

委員 伊藤 誠 教授 (筑波大学)

著作權所有者

伊藤 一也

2017

# A study of the reduction effect of driver distraction by voice operation

Kazuya Itoh

## Abstract

This study presents the requirement for realizing the reduction of driver distraction when operating in-vehicle equipment such as a car navigation system while driving a car with voice operation and alert sound image localization.

Chapter 1 clarifies the background of this research. In addition to the introduction, Chapter 2 organizes and extends information processing and evaluation methods in voice operation and listening to auditory information from the viewpoint of attention resource allocation during driving and explains the aim of the research.

Chapter 3 demonstrates the driver's driving performance in relation to the amount of visual information necessary for driving, the relative operation of the voice operation on the problem of the interface of the visual center by manual operation of a conventional remote controller, touch panel, etc. The superiority is shown based on the results of experiments with driving simulators and actual vehicles. However, it also shows the point where an influence on driving will occur even with voice operation.

In Chapter 4, from the viewpoint of improving safety by alert sound with sound image expression added, studies of sound image expression technology considering the acoustic characteristics in the passenger compartment and verification of the driver's recognition time are performed. If the driver checks the direction of the alert sound, the recognition time will be shortened, and safety will be improved as it becomes a reflexive action.

In Chapter 5, we showed the influence on the response time to the alert sound and the operation result in the scenes where the sound allocation attention to the auditory sense is highest and the alert sound is listened to at the same time. The results of the driving simulator experiment clarified that it is possible to predict the response time to the alert sound from the basic frequency deviation of the steering angle of the driver. Furthermore, by constructing a driver monitoring system to minimize the influence on the operation from the prediction of the reaction time to the alert sound, verified by the operation time and response time to the alert sound and the sensory evaluation, the influence on the operation by voice operation can be suppressed.

Chapter 6 gives a summary of this research, including contributions, and considers future research subjects.

# 音声操作によるドライバーディストラクションの 低減効果に関する研究

伊藤 一也

## 概 要

本論文は、自動車運転中にカーナビなどの車載機器を操作した際の「ドライバーディストラクション（意識の脇見）の低減」を、音声操作と音像表現を付加した警報音で実現するための要件の確立を目的とする。具体的には、音声操作に伴う発話や警報音聴取の際に、運転に必要な情報処理への影響に着目し、人間の認知・判断・操作において、ドライバーディストラクションの影響を最小限にしながら利便性を向上させるものであり、6章から成る。

第1章の緒論では、自動車の歴史において、自動車で移動中における利便性向上のニーズの高まりと、その中でカーナビの普及とドライバーディストラクションの関係を示して本研究の背景を明らかにしている。

第2章では、音声操作や警報音を聴取した際のドライバーの情報処理に着目して本研究の目的を示すために、Kahneman や Wickens らの先行研究事例を基に、運転中におけるドライバーの注意資源配分の考え方を整理している。また、音声操作によって影響を受けると考えられる警報音の聴取について、警報音に音像を付加することによってドライバーの対応行動に要する時間が短縮する可能性を述べている。その上で、本研究における3つの実験の目的とその関係を示している。

第3章では、ドライバーディストラクションの観点から、音声操作について、従来から存在するリモコンやタッチパネルなどの手操作インターフェースに対する相対的な優位性を明確にするために、実験により比較評価を実施している。その結果、ドライバーの運転成績やカーナビの画面への視認時間、精神的負荷の観点で優位性があることを明確にしている。同様に、ドライバーの内面における影響にも着目して、運転

に必要な視覚情報を取得する量を脳波の事象関連電位を用いて検証している。具体的には、ドライビングシミュレータ実験および実車実験の結果から、音声操作における視覚情報取得量が手操作と比べて有意に多いことを示している。ただし、音声操作であっても、視覚情報取得量は運転のみに集中した場合より有意に少なく、潜在的に運転への影響が現われる可能性があることも同時に示している。

第4章では、警報音の音像表現によって、ドライバーが短時間でリスクを認知できることを明確にするために、音像表現を明確にする警報音の周波数特性の検討と、その特性を利用した警報音を用いて、ドライビングシミュレータ実験を行っている。まず、車室内でドライバーが聴取する警報音に音圧差と時間差による音像表現を適用して、車室内の音響特性を考慮した周波数成分を決定することで、ドライバーが車室内で音像を正しく知覚できることをコンピュータシミュレーションと実車実験によって検証している。続いて、音像表現によってドライバーの認知時間が短縮することについてドライビングシミュレータ実験で検証し、ドライバーが計器確認行動を省略して、警報音の方向を直接確認することで認知時間が短縮し、安全性が向上する可能性があることを示している。

そして、第5章では、聴覚への注意資源配分が最も多いと考えられる、音声操作と警報音聴取を同時に行う場面の影響を明確にするためにドライビングシミュレータ実験を行い、警報音への反応時間の増加や車両のふらつきの拡大という影響が生じることを示している。

また、これらの影響を減らすことを狙い、ドライバーの操舵角データからドライバーの状態をリアルタイムで推定する技術を検討している。具体的には、音声操作中におけるドライバーの修正操舵が増加する傾向を操舵角の基本周波数偏差から把握し、警報音に対する反応時間が予測可能であることを示している。また、ドライバーの負担を概略予測する従来研究に対して、聴覚刺激に対する反応時間の具体的な予測について新たな知見を示している。

更に、音声操作による運転への影響を最小限に留めるために、警報音に対する反応時間の予測結果をカラーLEDの色変化でドライバーに示すドライバーモニタリングシステムを構築し、ドライビングシミュレータ実験で効果を検証している。その結果、ドライバーモニタリングシステムによって音声操作による運転への影響が抑えられ、ドライバーが運転操作に対して安心感が向上することを示している。併せて、ドライバーモニタリングシステムによって、音声操作中の警報音聴取と音声操作を両立できるように注意資源の配分の仕方を改善することも示している。

第6章では、これらの実験結果を考察して、運転支援機能が一層普及する社会変化における研究成果の貢献を含めた視点で本研究のまとめを与えるとともに、今後の研究課題を考察している。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>緒論</b>	<b>1</b>
<b>第2章</b>	<b>注意資源の配分における音声操作と警報音聴取の懸念点</b>	<b>5</b>
2.1	はじめに	8
2.2	ドライバーの注意資源配分の変化	5
2.3	警報音の聴取による運転への影響	10
2.4	本研究の目的	11
<b>第3章</b>	<b>車載機器の音声操作による注意力低下の抑制</b>	<b>13</b>
3.1	はじめに	13
3.2	実験①：音声操作による運転成績への影響の評価	13
3.2.1	基本的考え方と評価指標	13
3.2.2	タスクの決定	16
3.2.3	実験方法	18
3.2.4	実験結果	22
3.2.5	実験① 考察	24
3.2.6	実験① まとめ	28
3.3	運転場面の視覚情報取得量による検証	29
3.3.1	視覚情報取得量の評価法	30
3.3.2	サッカディック眼球運動	30
3.3.3	眼球停留関連電位	30
3.4	実験② 運転場面における視覚情報取得量の評価	32
3.4.1	実験②-1 異なる運転場面での視覚情報取得量の比較(実車実験)	32
3.4.2	実験②-2 異なる運転場面での視覚情報取得量の比較(DS 実験)	34
3.4.3	実験②-3 運転中の機器操作による視覚情報取得量の検証(DS 実験)	36
3.4.4	実験②-4 運転中の機器操作による視覚情報取得量の検証(実車実験)	41
3.4.5	実験② まとめ	45
3.5	まとめ	46
<b>第4章</b>	<b>警報音の音像表現による認知力向上</b>	<b>47</b>
4.1	はじめに	47
4.2	車室内の音像表現の課題	47
4.3	ドライバー耳位置での車室内音響特性の計測	49
4.3.1	計測方法	49
4.3.2	着座位置によらない音圧の安定化手法の検討	51

4.4	実験③ 音像表現による効果の人間工学的評価	53
4.4.1	実験③-1 音圧差と時間差の組合せによる 音像表現の検討	53
4.4.2	実験③-2 車室内における時間差と音圧差の 音像表現の評価	54
4.4.3	実験③-3 障害物把握時間の短縮効果の評価	57
4.5	まとめ	61
<b>第5章</b>	<b>音声操作中の警報音聴取に対する注意配分改善手法の効果</b>	<b>62</b>
5.1	はじめに	62
5.2	音声操作と警報音聴取が同時に生じる場合の影響	62
5.3	警報音に対する反応時間を推定する手法	64
5.4	ドライバー状態推定式検討実験(実験④)	67
5.4.1	対象および方法	67
5.4.2	実験結果	70
5.5	ドライバー状態推定技術の開発	74
5.5.1	ドライバー状態推定技術の概念	74
5.5.2	音声操作中の聴覚負担を推定する手法	74
5.5.3	推定した聴覚負担を視覚刺激で提示する手法	74
5.5.4	ドライバーモニタシステムの妥当性検証	75
5.6	ドライバー状態推定式評価実験(実験⑤)	77
5.6.1	対象および方法	77
5.6.2	実験結果	78
5.7	考察	81
5.7.1	ドライバー状態推定手法の妥当性	81
5.7.2	視覚刺激によるドライバー状態提示の有効性	82
5.7.3	ドライバー状態推定手法の妥当性	83
5.8	まとめ	84
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>85</b>
6.1	音声操作の利便性向上と安全性確保方策について	85
6.2	本研究の成果の実車適用について	86
6.3	まとめと今後の展望	87
6.4	今後の課題	87
	<b>謝辞</b>	<b>88</b>
	<b>参考文献</b>	<b>89</b>
	<b>関連論文</b>	<b>93</b>

## 第1章 緒論

自動車は、1886年にゴットリーブ・ダイムラーとカール・ベンツによって誕生し、1907年にフォードT型が大量生産されるようになった後は、大衆が個人的な移動手段として自動車を利用するようになった<sup>1)</sup>。現在では、特に公共交通手段が少ない地方においては生活に欠かせない移動手段となっている。

ここで自動車の使われ方に着目すると、100年以上の年月を経て、単なる移動手段だけではなく、移動中の時間を有意義に使うことや、移動中の快適さや便利さを向上することが求められるようになり、様々な装備が自動車に搭載されるようになった。例えば、エアコンディショナーのように移動中の時間を快適に過ごす装備や、カーオーディオのように移動中の時間を楽しむための装備が挙げられる。また、運転のしやすさを向上するシステムとして、2000年以降、車線維持支援機能や車線逸脱警報、後側方の車両との接触を警告する警報などの運転支援機能が市販車へ搭載されるようになり<sup>2)</sup>、2016年には単一車線における車線維持機能や、自動停止および自動再発進機能を有する自動運転機能の実用化<sup>3)</sup>によって、ドライバーにとって精神的な負担が大きい渋滞場面での運転のしやすさが向上した。

一方、目的地への走行経路をドライバーに提示して、ドライバーの運転しやすさに寄与するシステムであるカーナビゲーションシステム(カーナビ)が1990年代後半より普及し始めたが、走行中にカーナビを操作する際にドライバーが車両前方から目線を外すだけでなく、ドライバーの注意がカーナビに向いたままになり運転への注意が散漫になることで、車両周辺の障害物や歩行者に気づかず、交通事故に至る事例が増えて社会問題となった<sup>4)</sup>。Ranneyらは、このような運転タスクを阻害する様々な活動を総称してドライバーディストラクションと定義している<sup>5)</sup>。ドライバーディストラクションの要件として、ドライバーの経験などの内面的な部分の要件、画面デザインなどの車両側の要件、天候などの環境的な要件、緊急性の有無などの場面の要件、そして、使いやすさなどのタスクの要件があげられる。

これに対し、日本の自動車メーカーの業界団体である(公社)自動車工業会では運転中のカーナビ操作に対して、ドライバーディストラクションによる事故を減らす目的で、操作中にカーナビなど画像表示装置の画面を視認する時間の総和(総視認時間)に上限を設けるヒューマンマシンインターフェース(HMI)に関する自主規制ガイドライン(JAMAガイドライン)を策定<sup>5)</sup>。2000年以降、日本の自動車メーカーが販売するメ

カーナビ純正カーナビは走行中に使用可能な機能を制限し、JAMA ガイドラインを遵守している。その後、アメリカの The Alliance of Automobile Manufacturers(AAM)が策定する AAM ガイドラインでは、2006 年に、JAMA ガイドラインを基に、アメリカ国内で販売する車両のカーナビに同様の規制をかけるようになり<sup>6)</sup>、2013 年には NHTSA が AAM ガイドラインを基にガイドライン(NHTSA ガイドライン)を制定。車室内に搭載されるカーナビ以外の情報提示装置まで適用範囲が拡大された<sup>7)</sup>。

しかし、カーナビゲーションの普及により、運転中に車室内で利用したい機能が制限されることによる自動車ユーザーの不満が顕在化した。そのため、自動車メーカー各社は、2000 年以降、音声認識技術を用いた音声入力システムをカーナビゲーションに搭載し、リモコンやタッチパネルなど手で操作する場合に走行中使用出来なかった機能を、音声操作で使用出来るようにした。これは、ドライバーが発話する音声を音声認識機能によって判別し、操作対象の機器を制御するものである。日本においては、2002 年に日産自動車が小型車の廉価なカーナビ<sup>8)</sup>に音声操作機能を搭載し、その後も自動車メーカー各社および電装機器メーカーの商品に音声操作機能の採用が拡大している。

一般的に、音声操作機能は、機器に装着されている Push to Talk(PTT)ボタンを押下することで起動し、機器からコマンドを発話するように促すガイダンスが画面表示と音声出力によって提示される。その後、利用者がコマンドと呼ばれる文言を発話して、機器に搭載されたマイクロフォンによって音声データ化され、音声データとマッチングするコマンドを利用者の操作意図と認識し、コマンドを実行する。その際、機器が認識したコマンドは、画面表示または音声操作、もしくはその両方で利用者に提示される。

ここで、カーナビの操作方法に関する先行研究に着目すると、リモコンやタッチパネルの手操作によるコマンド入力や、TTS(Text To Speech)を用いた音声情報の聴き取りについては、操作時の総視認時間や車両挙動を調べた研究例がある<sup>9)10)</sup>。そこでは、リモコンやタッチパネルの手操作によるコマンド入力の時間の長さに比例してカーナビの画面の視認時間の合計(以下、総視認時間)が増加し、総視認時間と車両挙動のふらつきが大きくなることが示されている。また、TTS による音声情報の聴き取りにおいては、総視認時間は手操作と比べて少なく、車両挙動のふらつきへの影響はラジオの聴取と同等であることが示されている。しかし、本研究を開始した 2002 年度時点は、カーナビの音声操作機能について運転行動への影響に関する研究事例はなく、運転行動への影響について検討する必要がある。

また、2015年時点でカーナビの普及率は6割を超えており、スマートフォンなどの携帯機器によるナビゲーション用アプリケーションを利用する場合も考慮すると、カーナビの利用は今後も増加すると想定される。加えて、スマートフォンにはインターネット上の情報検索機能に音声による文字入力機能を備えており、音声による機器操作は利用者にとってなじみのある機能になることが考えられる。

更に、自動運転機能や運転支援機能を搭載した車両が、今後更に普及することが想定される。例えば、富士重工業は、ステレオカメラによる障害物検知および自動ブレーキなどの運転支援技術「アイサイト」の搭載車は、アイサイトを搭載していない同社の車両と比べて交通事故が約60%低減したと発表している<sup>11)</sup>。これより、今後、自動車から発せられる警報音が増加する可能性が高いことが考えられるが、一方、カーナビでの音声操作中に自動車からの警報音を聴取する頻度が増加して、警報音への対応の遅れや聞き逃しによる音声操作による安全性の低下が顕在化する可能性があることも意味する。自動運転機能や運転支援機能の警報音は、Table 1-1に示すように、大きく3段階のレベルに分けられる。そのうち、ドライバーに特定の操作で危険事象への対応を最優先で促すレベルHighを除くと、音声操作と警報音の聴取が同時に生じる頻度が高いと考えられ、警報音への対応の遅れや聞き逃しによる音声操作による安全性の低下は無視出来ない問題と考えられる。

**Table 1-1 Alert sound level and alert system examples<sup>2)12)</sup>**

レベル	警報音の意味	機能の例
High	即座に、特定の操作で対応する必要がある。 または、法律に抵触している状態であり、即座に対応する必要がある	衝突被害低減ブレーキ 自動運転機能のハンドル手放し警告
Middle	即座に安全確認を行う、または運転操作で危険を回避するように注意喚起する。 ただし、対応行動の内容はドライバーが自分自身で考えて決定する。	車線逸脱警報(逸脱抑止機能を含む) 後側方障害物衝突警報(衝突抑止機能を含む)
Low	ドライバーへ注意喚起を促すが、必ずしも即座の対応は必要ではない。	自動運転機能の操舵支援一時停止および支援再開の告知

以上のことから、本研究では、カーナビの音声操作によるメリットやデメリットを明確にした上で、運転支援機能や自動運転機能に用いられる警報音で安全性を更に向上させる方策を明確にすることを第一の目的とする。

その上で、音声操作中に警報音を聴取した場合の安全性への影響と、音声操作の安全性を確保する技術方策を確立することを第二の目的とする。

これにより、音声操作によってドライバーが運転中に使用できる機能の増加という利便性向上と、運転中に警報音が生じた場合のドライバーの対応行動が常に短く保たれることが両立でき、安全性を確保しながら、より魅力的な自動車の商品開発に貢献出来ることが期待される。

## 第2章 注意資源の配分における音声操作と警報音聴取の懸念点

### 2.1 はじめに

前章では、カーナビなどの音声操作における安全性を確保するための問題点と、本研究の目的を示した。

本章では、音声操作におけるドライバーの発話や警報音の聴取において重要となるドライバーの情報処理モデルに着目する。その上で、音声操作と警報音聴取を行った際にドライバーの情報処理モデルとドライバーの対応行動にどのような影響が生じるか懸念点を示した上で、3章以降の実験における仮説を述べる。

### 2.2 ドライバーの注意資源配分の変化

ドライバーの情報処理は、ドライバーが視覚や聴覚などの五感から得られる刺激の意味を理解し、意味に応じた対応行動をとることを常に繰り返すことである。本研究では、一般的な人間の情報処理モデルとして示されている Kahneman の注意資源モデル<sup>13)</sup>を適用し、人間の注意資源の割り当て方に着目する。

Kahneman の注意資源モデルは、人間の注意力を視覚・聴覚・身体の操作などに割り当て、各感覚から得られる刺激を情報として認知、対応行動の際に注意力がどのように変化するかを考察する上で用いられるモデルである。

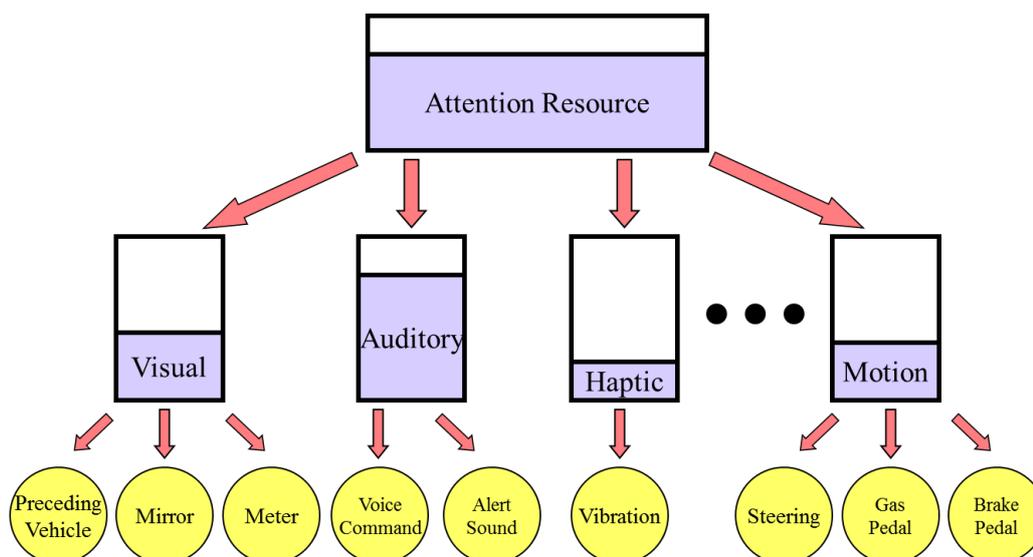


Fig. 2-1 Image of Kahneman's attention resource model

この時、各感覚に対する注意力の配分に応じて人間のパフォーマンスは変化し、聴覚で得られる情報も一定ではない。例えば、視覚に注意資源が集中している状態では、周囲の音を知覚しにくい状態となり、その後の認知や行動に影響を及ぼす。

しかも、運転中はドライバーの情報処理モデルである「認知⇒判断⇒操作」を繰り返す過程において、注意資源はダイナミックに変化する。認知の際は視覚や聴覚などの感覚器へ注意資源が多く配分され、操作においては身体を動かす方へ注意資源が多く配分されるように、注意力の配分が随時変化するものと考えられる(Fig. 2-2)。

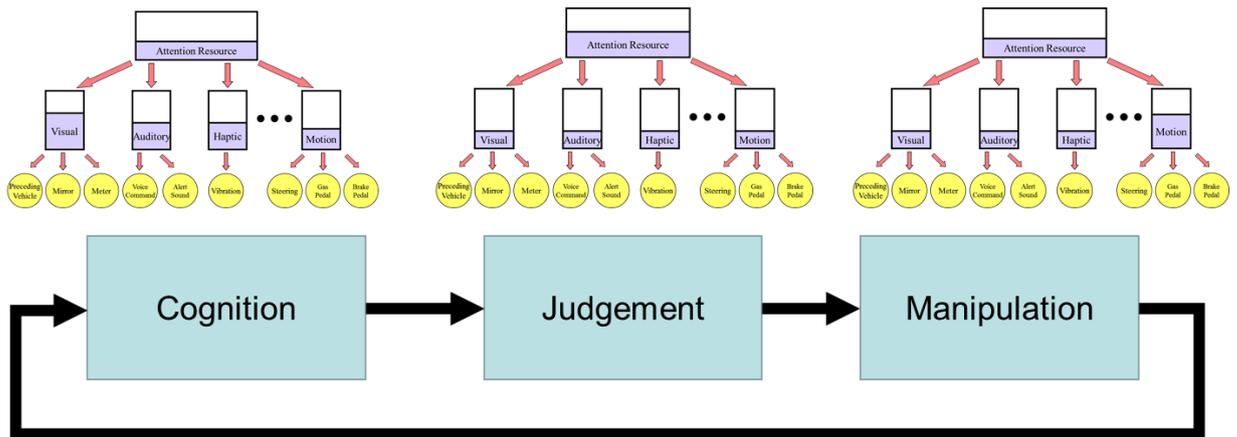


Fig. 2-2 Flow of attention resource and driver information processing model

なお、Kahnemanの注意配分モデル以外にも、Wickensらによる Multiple resources and performance prediction の考え方がある<sup>14)</sup>。この中では、認知・判断・操作というドライバーの情報処理における段階、モダリティが視覚か聴覚かの違い、表現方法が空間的か言語的かの違いという3次元で注意リソースを表している。本研究は、Wickensらのモデルの中で、主に音声操作における言語的表現による影響に焦点を絞り、認知・判断・操作のそれぞれの段階における注意リソースの配分がリアルタイムで変化すること、視覚から聴覚へモダリティが変わることによる影響の変化を検証することに相当し、前述したKahnemanのモデルと同義となる。そのため、本研究においては、Kahnemanのモデルを基に検証を進めていく。

また、Wickensらは、注意資源配分とメンタルワークロードに関連があることを述べている<sup>15)</sup>。音声操作においては、姿勢変化が少なく、車載されるカーナビなどの画面への視認時間が短くなる分、メンタルワークロードは視覚的な操作の場合よりも少ないと考えられる。一方、佐々木らの研究結果では聴覚的な注意を向けるには資源を多く必要であることも示されており<sup>16)</sup>、ドライバーがメンタルワークロードを自覚しないが注意資源を多く割り当てている可能性も考えられる。更に、Giardらは、注意資源配

分の増幅率(ゲイン)の考え方について提唱している<sup>17)</sup>。この観点から、音声操作においては、聴覚への注意配分が集中しすぎる事象がおこるものと考えられる。

また、注意資源の配分に関連して、聴覚への注意資源配分を脳波の事象関連電位である P300 成分(刺激音を聴取してから 300msec.後に励起される脳波の波形)を用いて検証された事例もある。Escera は聴覚刺激タスクに対する反応時間を P300 で検証し、タスクの負荷が上がると P300 の振幅が小さくなることを示している<sup>18)</sup>。また、杉本らの研究結果においても同様の結果が示されている<sup>19)</sup>。しかし、脳波の事象関連電位の計測は、実用化に向けては計測の難易度やドライバーを計測装置で拘束するなどの課題がある。一方、伊藤らは、認知的ディストラクションの計測において、脈波のカオス解析を用いる手法を検討して、認知的な負担が増加していることを脈波から推定することが可能であることを示している<sup>20)</sup>が、実用化においては自動車の運転操作に関わる部品から安定した脈波の計測が困難であるなど、計測上の課題がある。そのため、本研究においては、ドライバーの注意資源配分状態を検出する実用的な手段として、運転操作に関わる装置の入力データを用いることを検討する。

ここで、カーナビの音声操作と警報音の聴取の操作手順と最も注意資源が配分されると考えられる感覚に着目する。カーナビの音声操作機能は、Table 2-1 のような手順を繰り返し行うことで、手操作と同じ目的を達成する。

**Table 2-1 Operation flow and driver attention for using voice activation system**

No.	操作内容	ドライバーが運転以外に行う 情報処理	最も注意資源 が配分される 感覚
1	ドライバーがステアリングやカーナビ上にあるスイッチを押下して音声操作機能を起動	(1) スイッチを探す (Cognition) (2) スイッチの場所を認知する (Cognition, Judgement) (3) スイッチを押す (Manipulation)	(1) Visual  (2) Visual  (3) Motion
2	カーナビからコマンドを発話するように音声でドライバーへ促す。同時に、画面上にコマンドの例が表示	(1) 画面に目を向ける (Cognition) (2) 画面の表示内容を見て理解する (Judgement) (3) 音声を聞き、内容を理解する (Cognition)	(1) Visual  (2) Visual  (3) Auditory
3	ドライバーが利用したい機能を示すコマンドを発話	(1) 利用したい機能に該当するコマンドを想起する (Judgement) (2) 利用したいコマンドを音声で発話する (Manipulation)	(1) Auditory(※ 発話する内容を想起するため) (2) Auditory, Motion
4	カーナビがマイクでドライバーの発話を音声データとして記録し、カーナビに登録されている音声コマンドの音声データと照合してドライバーが発話した音声コマンドを推定	(なし)	
5	カーナビによって推定された音声コマンドを、音声と表示でドライバーへ提示。また、音声コマンドに該当するカーナビの機能を実行	(1) 画面に目を向ける (Cognition) (2) 提示された表示内容と音声と、発話したコマンドと合致するか確認する (Cognition, Judgement)	(1) Visual  (2) Visual

ここで、音声操作において最も特徴的なのは、No.2の(3)からNo.3にかけて、聴覚に対して注意資源が多く、持続的に配分されることである。手操作では、No.3は視覚と操作にそれぞれ注意が配分されるが、音声操作では視覚と操作への注意配分が減る一方で、聴覚に注意を向ける割合が多く、この時に警報音の聴取のように聴覚への注意を必要とする行為が重なった場合に、聞き逃しや発話し損ねる、発話を間違えるなどの影響が生じる可能性が考えられる。また、身体を動かす **Motion** が発話に集中して、手足の動きが一時的に止まることで運転への影響が生じる可能性が考えられる。

このような、視覚と体感覚へ注意資源が多く配分されることによる運転操作への影響は **HMI** に共通する課題であり、先行研究でも、**JAMA** ガイドライン策定のための基礎実験などで取り組まれている<sup>9)10)</sup>。

一方、音声操作機能の特徴として、聴覚へ注意資源が配分される割合が多いことが挙げられる。音声操作は、ドライバーが発話する際にハンドルやペダルを操作するための運転姿勢が崩れにくく、運転姿勢の変化による車両のふらつきや車線逸脱などの運転成績に与える影響が減ることがメリットとして想定される。しかし、前述のように、音声操作機能の使用中に警報音の聴取が同時に生じた場合は、音声操作によって注意資源が聴覚へより多く配分された上に、警報音を聴取するために聴覚への注意配分を配分しようとする。この時、ドライバーの聴覚に割り当てられる注意資源の許容限界を超えた場合には、警報音の聞き逃し、発話の遅れや発話間違いなどの影響が生じる可能性が考えられる。

音声操作技術によるディストラクションの可能性に関する先行研究については、**Harbluk** らは、ハンズフリーや音声操作技術は、車載機器の利用におけるディストラクション問題をしばしば解決するものと触れた上で、認知的な負担が大きいタスクにおいては影響が出る可能性があることを示しており<sup>21)</sup>、前述の仮説を裏付けているものと考えられる。しかし、この先行研究では具体的な音声操作技術を用いた検証は実施されておらず、具体的な検証が必要と考えられる。

また、**Liang** らの先行研究では、認知と視認に関するディストラクションの影響を見る上で、操舵のエラーと前方から目を離す時間による検証が適していることを述べており、操舵のエラーについては、操舵の放棄、操舵の不足、操舵の過剰の3タイプがあることを示している<sup>22)</sup>。しかし、本研究においては、音声操作は前方から視線を外さなくても操作が可能であるため、音声操作によるディストラクションの影響を見る上では、主に操舵のエラーに着目することが重要と考えられる。

さらに、西本らの先行研究では、対話において応答遅れが生じやすいことが示されており<sup>23)</sup>、音声操作における認知的な負担が大きいタスクでは、運転操作や聴覚刺激に対する反応時間が長くなる可能性があることを裏付けている。

以上に示した先行研究の結果をまとめると、音声操作によって聴覚へ注意資源がより多く配分され、身体を動かす Motion が発話のための動作に集中すること、それによって、運転操作に必要な手足の動作への注意資源が減少して、車両のふらつきなど運転への影響が生じるものと考えられる。本研究では、これらの影響を総合的に検証することが重要であると位置づけた。

### 2.3 警報音の聴取による運転への影響

音声操作に関する運転への影響を検証する必要性を述べたが、本研究では、音声操作と同じ聴覚への注意資源を用いる警報音の聴取についても、運転への影響と、安全性をより向上させる方策について考える。

警報音の主な要素として、すぐに対応しなければならない重大なリスクの存在を示す「緊急性・重大性」と、どこにリスクが存在しているかを示す、両耳での音圧差と時間差で表現する「音像」の2つが挙げられる。先行研究として、高辻らは、「緊急性・重大性」は基本周波数および周期との相関が高いことを示している<sup>24)</sup>。一方、「音像」の知覚については、樋田らの先行研究によると、周波数検出に伴う脳内処理プロセスと、遅延検出に伴う脳内処理プロセスは並列に行われている可能性を示している<sup>25)</sup>。つまり、警報音の緊急性・重大性の認知と、音像の方向を認知する脳内の情報処理プロセスは別のものである。また、警報音は、ドライバーに対して計器類へ注意を向けさせて、警告の内容を視覚情報で示す用途で使われることが多く、本研究で警報音の検討を開始した2008年時点では、音像によってリスクの方向を示すことは実用化されていない。一方、音像によって車両周辺のリスクの方向を直接示すことで計器類への視認が省略出来れば、リスク発生時の認知および対応時間が短縮できる可能性があると考えられる。これらの点からも、本研究では、音像の認知に与える影響について焦点を絞り、音像によるリスク発生時の対応時間の短縮を検証することに着目する。

また、音声操作によって警報音を聴取するための注意資源の配分が許容限界を超えた場合は、警報音の聞き逃しや、音像によって示されたリスクの方向を誤って知覚することにより、音像の認知によるリスク反応時間の短縮効果が得られなくなる可能性があると考えられる。これに対し、ドライバーへ警報音を聴取しやすい状態かどうかを常に示すことで、ドライバー自身が今の状態を自覚して、注意資源の配分を音声操作に集中しすぎないように対応することで改善できると考えられる。

また、運転中の機器利用によって聴覚刺激反応時間が増加する点に着目すると、従来研究では、Basacik らが、スマートフォン使用中に聴覚刺激反応時間が増加することをドライビングシミュレータ実験で示している<sup>26)</sup>が、カーナビの音声操作中に聴覚刺激反応時間の増加を検証した事例は2014年時点では無い。

## 2.4 本研究の目的

これまで述べた内容から、本研究では、音声操作および警報音聴取について、以下に挙げた3つの目的について、実験で検証することとした。本論文の章構成を Fig.2-3 に示しながら、それらの目的を下記に示す。

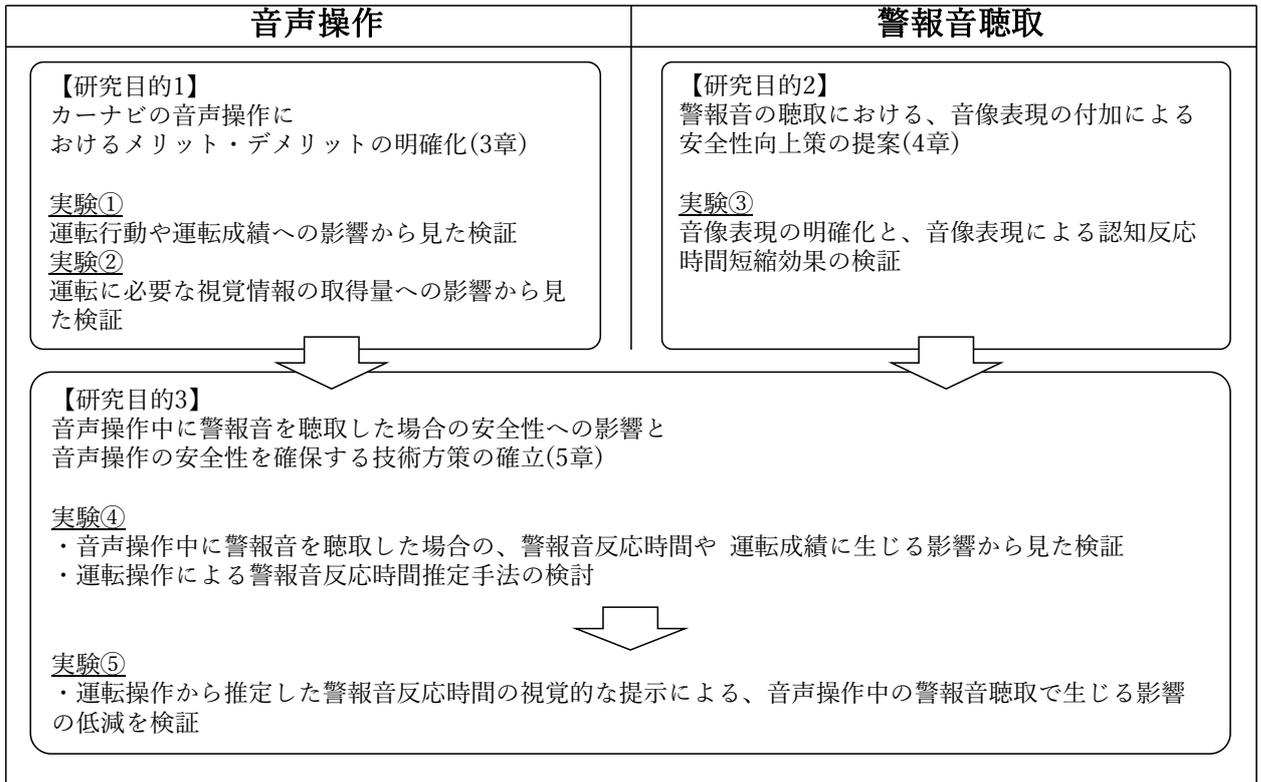
まず、3章で2つの実験を通して、カーナビの音声操作によるメリットとデメリットを明確にする。実験①では、音声操作が運転行動や運転成績にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。ここでは、音声操作は手操作の場合と比べて車両のふらつきが少なく、カーナビの画面を視認する時間が減少してメンタルワークロードが低減することが予想される。

次の実験②では、音声操作が運転に必要な視覚情報の取得量に及ぼす影響を明らかにする。ここでは、音声操作では、手操作と比べて運転に必要な視覚情報の取得量が多いことが予想される。

4章では、運転支援機能に用いられる警報音の聴取に着目し、音像表現の付加により安全性を従来の音像表現を適用しない警報音と比べて更に向上させる方策を明確にする。そのために、実験③では、音像表現の適用有無によるドライバーのリスク反応時間の短縮効果を明らかにする。ここでは、音像表現の付加によってドライバーのリスク反応時間が短縮することが予想される。

3章と4章の結果を基に、5章では、音声操作と警報音の聴取を同時に行った際の影響を明らかにした上で、これを改善する方策を明確にする。そのため、実験④では音声操作中に警報音を聴取した際の警報音反応時間や運転成績に対する影響を明らかにする。ここでは、音声操作中に警報音を聴取すると、警報音の聴取のみの場合と比べて反応時間が増大することが予想される。

また、実験⑤では、警報音反応時間を推定した結果を視覚的にドライバーへ提示することによる改善効果を検証する。ここでは、実験④で増大した警報音反応時間が低減することが予想される。



**Fig. 2-3 A block diagram of this study objectives and experiments**

## 第3章 車載機器の音声操作による注意力低下の抑制はじめに

本章では、ドライバーがカーナビの同じ目的の操作を音声操作と手操作のそれぞれで実施した際に生じる影響を2つの観点から比較して、音声操作のメリットとデメリットを明確にすることを目的とする。

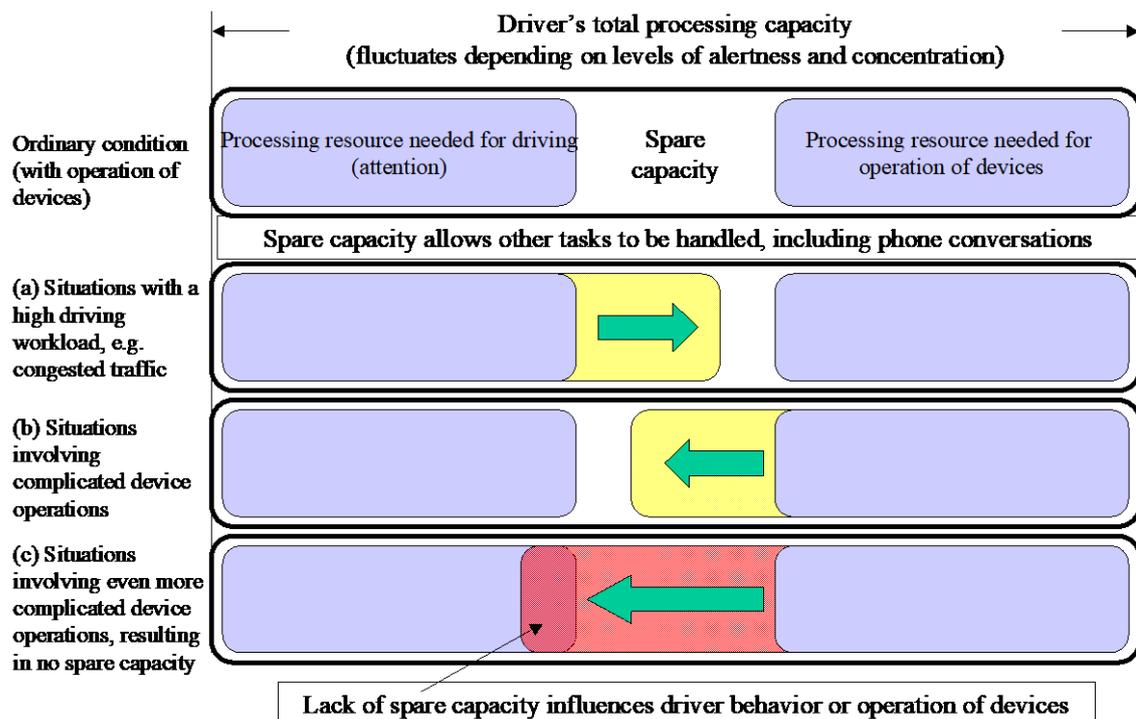
ここで、音声操作中は運転姿勢が崩れにくいと考えられることから、実験①では、ドライバーの運転行動や車両のふらつきや車線逸脱などの運転成績に着目して検証する。また、音声操作の認識結果を表示するカーナビ画面への視認時間や精神的負担の影響について検証する。

加えて、音声操作中にドライバーがカーナビの画面の視認時間が短縮されることで運転に必要な視覚情報をより多く取得出来ると考えられるため、実験②では、ドライバーの視覚情報取得量について手操作に対する変化を検証する。

### 3.2 実験①：音声操作による運転成績への影響の評価

#### 3.2.1 基本的考え方と評価指標

運転中にカーナビやオーディオなどを音声操作で操作する際は、発声すべきコマンドの想起、コマンドの発話および音声入力結果の確認を行うため、思考や聴き取りによる精神負担が増加すると考えられる。この状況を第2章で示した運転中の認知判断モデルを更に簡略にして、ドライバーの余裕度を表した図(Fig.3-1)を用いて考える。まず、運転に対する負担が上昇した場合(Fig.3-1(a))、ドライバーの余裕は減少する。同様に、カーナビなどの機器操作が複雑になった場合(Fig.3-1(b))も同様に、ドライバーの余裕度は減少する。更に、機器操作の負荷が著しく上昇して注意資源が多く配分される状況(Fig.3-1(c))では、ドライバーの余裕がなくなり、運転操作へ配分する注意資源が不足する。その結果、運転に影響が生じると考えられる。



**Fig. 3-1. Model of driver recognition and judgment.**

以上より，実験①では，以下の仮説 1-1 について検証を行うことを目的とした。

仮説1-1 ドライバーの運転行動や車両のふらつきや車線逸脱などの運転成績に着目し，音声操作が手操作に比べて運転操作や運転成績への影響が少ない。また，音声操作の結果を示すカーナビ画面への視認時間や NASA-TLX から，音声操作による視認負担やメンタルワークロードが少ない

そのため，運転の制御成績や余裕度，音声操作時の精神負担の 3 点について，以下の評価指標を用いて音声操作や手操作による様々な負荷のタスクでの比較・評価を行った。

① 運転制御成績

- ・ 車両横方向変位量

自車両の走行位置の横方向を車線中央から計測し，標準偏差を算出

- ・ 先行車との車間距離の標準偏差

自車先端から先行車後端までの距離を計測し，標準偏差を算出

## ② 余裕度

- ・ 運転中の前方監視成績(サブタスク反応時間)

運転中の機器操作時に，実験参加者正面に設置した LED 点灯に合わせてスイッチを押させた時の反応時間<sup>27)</sup>

- ・ 不安感

(7段階評価，1点：非常に不安～7点：非常に安心)<sup>28)</sup>

## ③ 機器操作の精神負担と乗員の行動特性

- ・ NASA-TLX AWWL 値<sup>29)</sup>

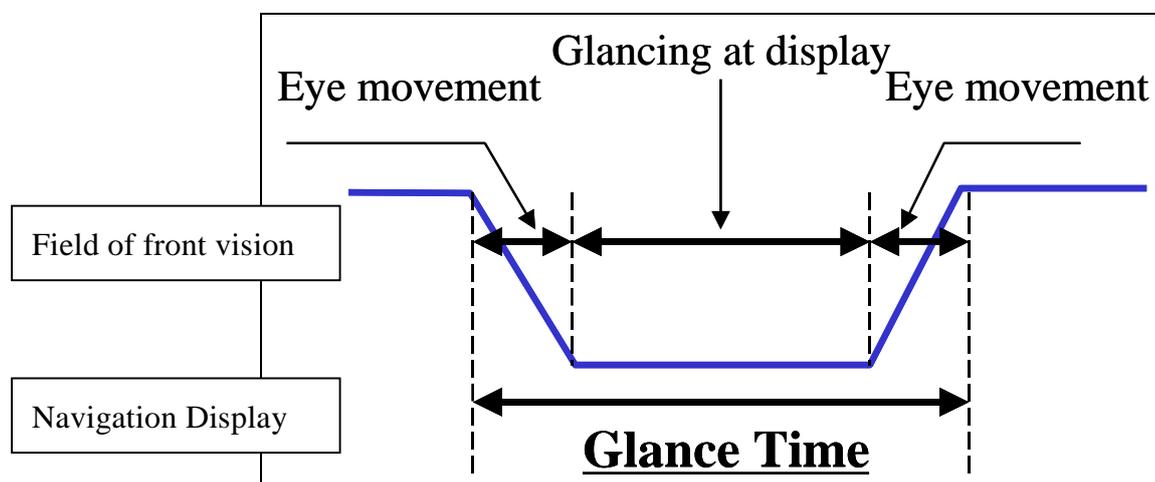


Fig. 3-2. Definition of glance time.

- ・ 画面注視時間

前方から視線を離し始めた時間から，再び視線を前方へ完全に向けるまでの時間を VTR 解析で計測 (Fig.3-2). なお，1つのタスクにおける画面注視時間の総和を総視認時間と定義する.

**3.2.2 タスクの決定** 音声操作には、ドライバーがコマンドを1回発話して操作が完了するものから、目的地設定のように数回発話する必要がある操作など様々である。本実験では、音声操作による運転行動への影響を手操作と比較することと、音声認識結果をドライバーに知らせるためのアンサーバック方法(音声、画面表示)について最適なアンサーバック方法を求めるために、アンサーバック方法の異なるタスクを設定して比較することを目的とした。

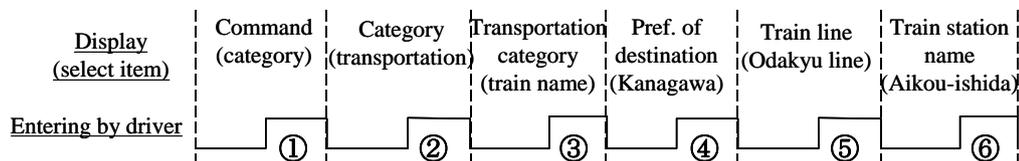
なお、機器操作の階層数や音声の発話回数をインタラクション数 (Fig.3-3) と定義し、実験パラメータとしてインタラクション数や総操作時間の違いで比較できるようにした。

**Example : “Entering destination by train”**

**1) Manual operation**

**Number of interactions: 6**

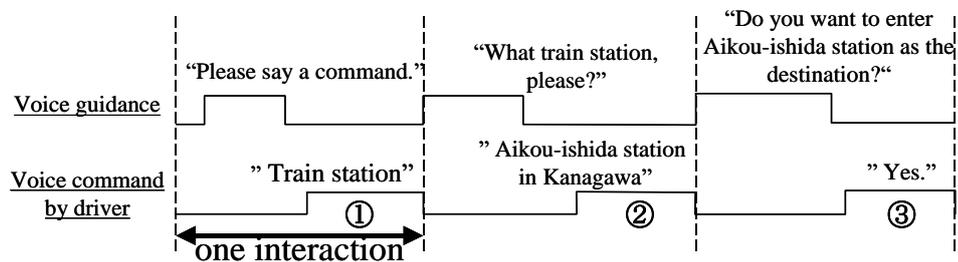
**Total task time: about 23 sec.**



**2) Voice-activated operation**

**Number of interactions: 3**

**Total task time: about 19 sec.**



**Fig. 3-3. Definition of number of interactions.**

本実験における操作タスクの一覧を Table 3-1 に示す.

**Table 3-1. Experiment tasks**

System	Task No.	Task	Total Task Time	Number of Interactions	Answer-back
	1	No load	60		
Instrument panel switches	2	Changing to the next track (CD)	2	1	Display
	3	Changing to another station (FM)	8	2	
	4	Entering destination (train)	23	6	
	5	Entering destination (previous departure)	9	3	
	6	Selecting news by TTS	10	4	
	Steering wheel switches	7	Changing to the next track (CD)	2	
8		Changing to another station(FM)	9	2	
9		Entering destination (previous departure)	10	4	
10		Selecting news by TTS	11	5	
Voice activation	11	Changing to CD, and changing to FM	17	2	Voice
	12	Entering destination (train)	19	3	Display
	13	Making a call (10 digits)	27	3	
	14	Making a call (3-3-4 digits)	32	5	
	15	Entering destination (address)	25	4	Display and voice
	16	Entering destination (address, telephone number)	44	5	
	17	Entering destination (address, two telephone numbers)	67	7	
	18	Entering destination (address)	25	4	Voice
	19	Entering destination (address, telephone number)	44	5	
	20	Entering destination (address, two telephone numbers)	67	7	

各操作タスクの考え方は下記のとおり.

#### 1) 手操作タスク(タスク 2~10)

CD のトラック送りのような簡単なタスクから, 通常は運転中の使用ができないナビゲーションシステムの目的地設定のように長時間操作が必要なタスクまでを用いた. それらは, 操作方法の違いから, 車室内のインストゥルメントパネル, およびステアリング上のスイッチの 2 種類に分けられる.

#### 2) 音声操作タスク

簡単な操作として CD から FM に切り替える操作, 難しい操作として住所や電話番号, 駅名を用いたナビゲーションシステムの目的地設定および経路地設定をタスクとして用いた(タスク 11~20). また, 音声の認識結果をドライバーに知らせるアンサーバック方法(音声, 画面表示)の違いによる影響を比較するため, アンサーバックの有無(タスク 15~20)もパラメータとしている.

#### 3) コントロール条件(タスク 1)

上記タスクによる影響を検証するために, 機器操作せずに運転操作のみを行う条件を設定した.

### 3.2.3. 実験方法

#### (1) 実験装置

実験には 180° 前方スクリーン, 6 軸電動モーション上に実車を設置したドライビングシミュレータを用いた. 走行条件は, 高速道路での追従状況を想定し, 100km/h での先行車追従走行とした.

システム構成を Fig.3-4, Fig.3-5 に示す. ドライビングシミュレータの車室内にあるインストゥルメントパネル上にディスプレイとナビとオーディオの操作部を設置した. 音声はステアリングスポーク左側のスイッチの押下で起動し, 実験参加者が発話すると画面上に音声認識結果を表示することができるようにした(Fig.3-6). 音声認識結果の音声アンサーバックはタスクに応じて ON/OFF を切り替えた. また, サブタスクを提示する LED はメーターフード上に設置し, サブタスクに反応するためのスイッチをステアリングスポーク右側に設けた. 車両挙動はドライビングシミュレータで

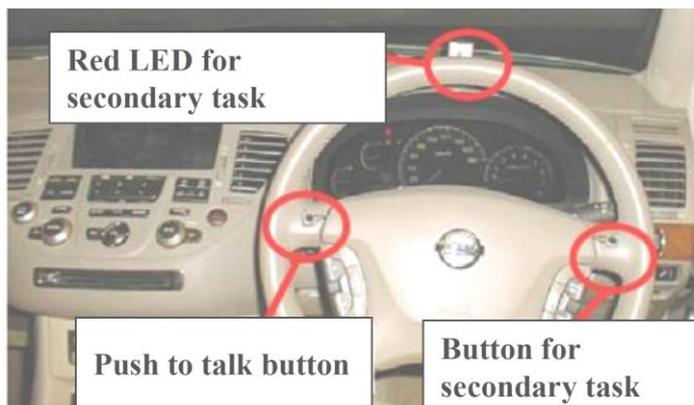


Fig. 3-4. View of cockpit devices.

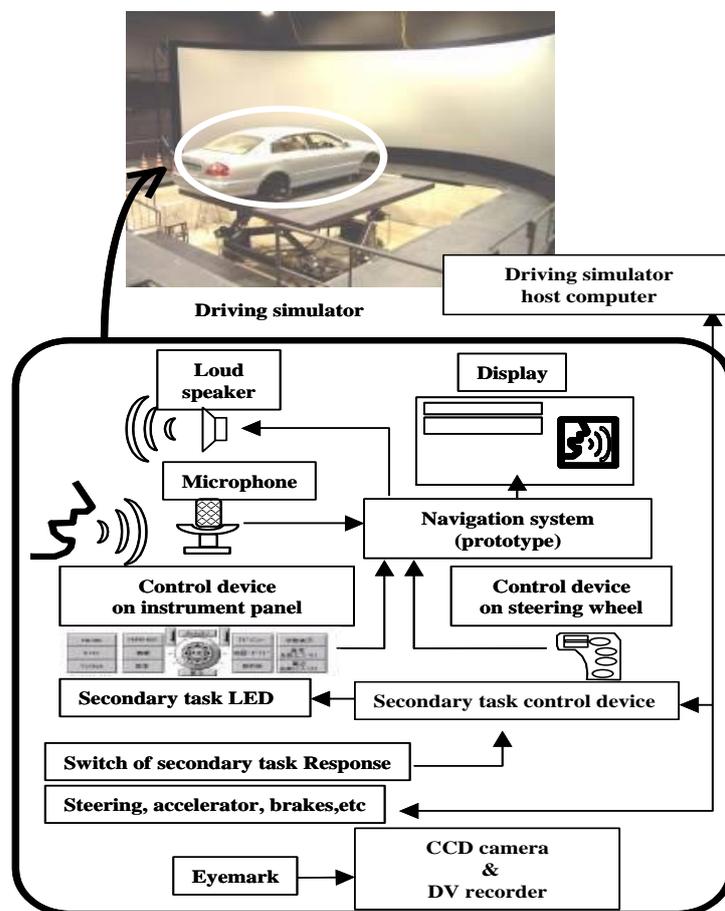


Fig. 3-5. Configuration of experimental setup.

記録した。また、視線計測用の CCD カメラをメーターフード上に設置し、視認行動を計測した。

実験参加者は男性 9 名、女性 2 名(25 歳～47 歳、平均年齢 35.1 歳)を用いた。なお、本実験は、実験参加者に実験内容の理解を確認し、同意を得た上で実験を実施した。

## (2) 実験手順

実験は、以下の実験手順で実施した。

1. 実験参加者に表 1 の各タスクについて操作方法を説明し、間違えずに操作を完了できるまで練習
2. 先行車へ 100km/h で追従走行を行い(初期車間距離 約 40m) , 先行車への追従走行が安定した時点でタスクを開始, 車両挙動や視認行動を計測
3. また, タスク実行中に, サブタスク用の LED を 5～10sec.間隔でランダムに点灯させて, 実験参加者に対しては, LED の点灯に気づいたら素早くステアリングスポーク上のスイッチを押下するように教示

なお、各タスク終了後に、NASA-TLX AWWL 値および不安感の評価を行った。

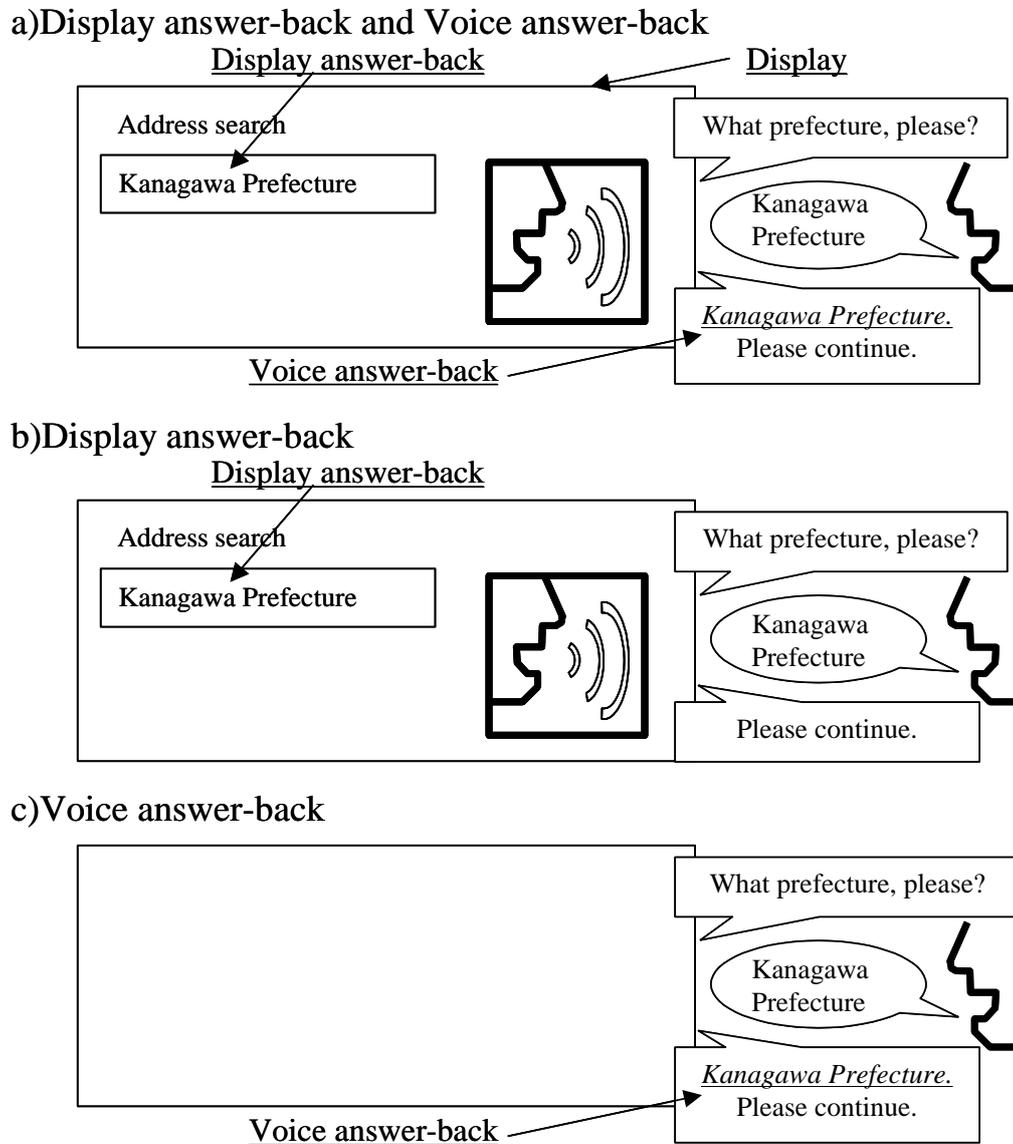


Fig. 3-6. Example of voice-activated system operation.

### 3.2.4. 実験結果

音声操作による運転行動への影響を手操作と比較するため、NASA-TLX AWWL 値、車両横方向変位量、サブタスク反応時間および総視認時間について、同一の目的のタスク間で比較した。結果を Fig.3-7~10 に示す。

まず、音声操作と、ステアリングスイッチおよびインストゥルメントパネルスイッチを用いた 2 種類の手操作との NASA-TLX を比較した結果を Fig.3-7 に示す。これより、音声操作は手操作に対して精神負担が有意に低い( $p<0.01$ )ことが示された。

また、Fig.3-8 に車両横方向変位量の偏差、Fig.3-9 にサブタスク反応時間の図を示す。これらより、音声操作の平均値は総じて手操作より低く、同じタスク同士で比較すると、いずれか一方の指標について低くなる傾向が見られた。

これらより、手操作では精神負担が高い操作を音声で操作することにより精神負担が低下し、余裕度もしくは運転制御成績が向上するといえる。

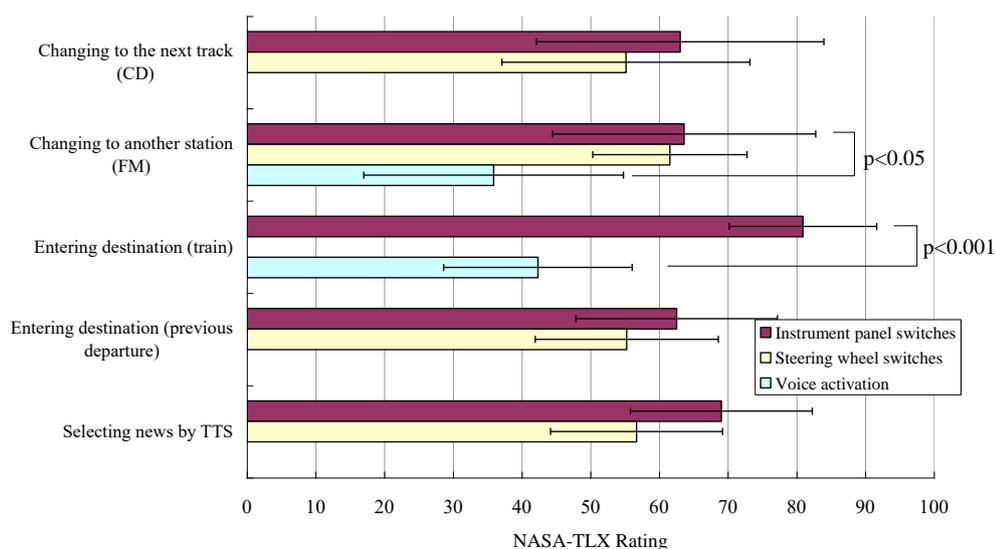
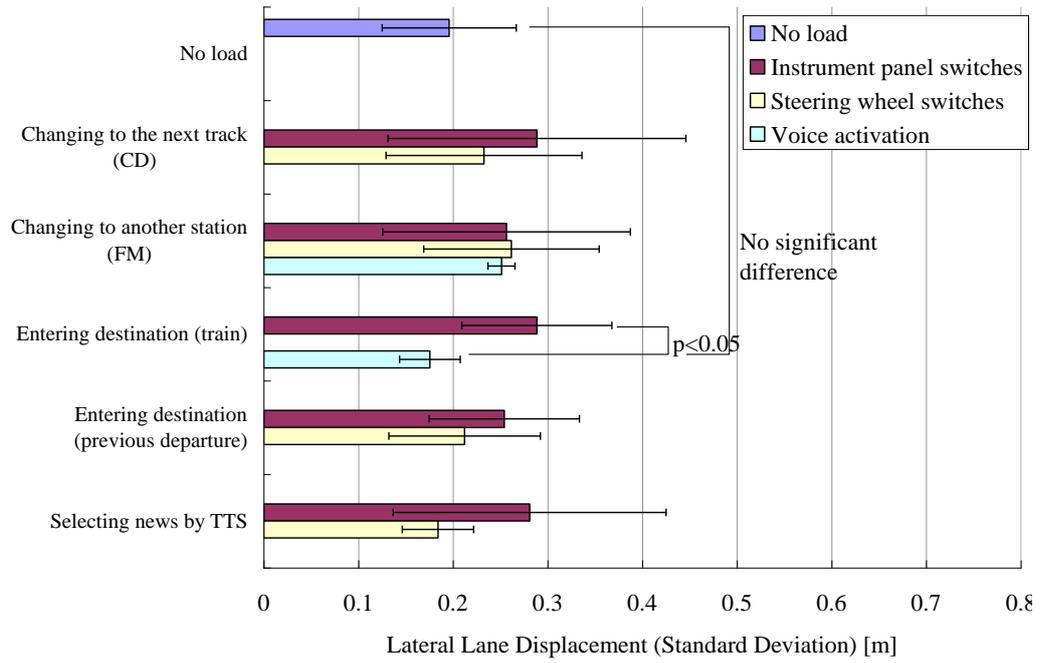
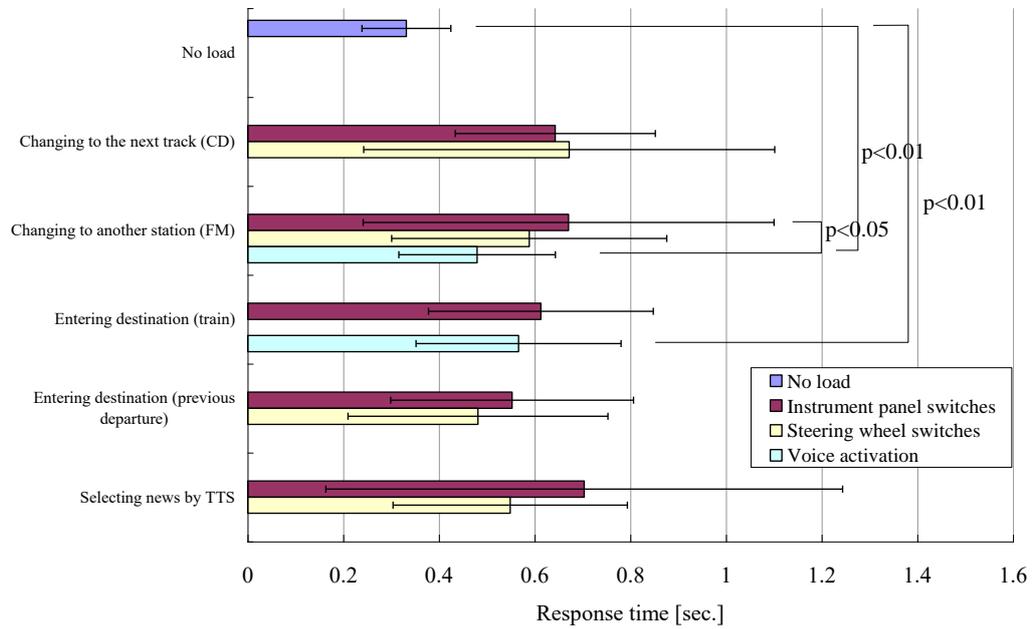


Fig.3-7. Subjective evaluation of mental workload.



**Fig.3-8. Comparison of lateral lane displacement. (standard deviation)**



**Fig.3-9. Comparison of secondary task response time.**

また、音声操作タスクと手操作タスクの総視認時間を比較した結果を Fig.3-10 に示す。これより、FM の選局タスクや駅名で目的地を設定するタスクにおいて、音声操作タスクの総視認時間は手操作より短く、視認負担低減に高い効果があることがわかる。さらに、総操作時間と総視認時間との関係を Fig.3-11 に示す。手操作では操作時間に比例して視認時間が増加しているのに対し、音声操作では総視認時間が常に低くなっていることがわかる。

なお、本実験で計測した指標の中で、車間距離変位量についてはタスク間の傾向が見られなかった。

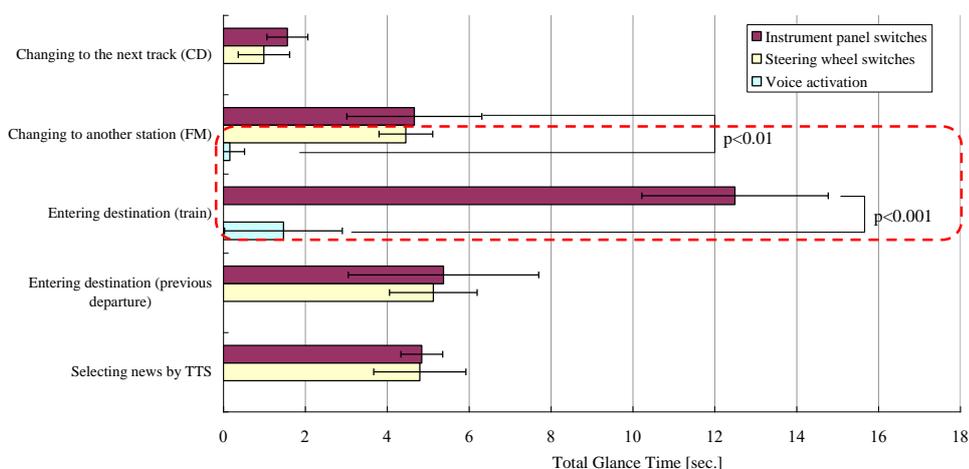


Fig.3-10. Comparison of total glance time.

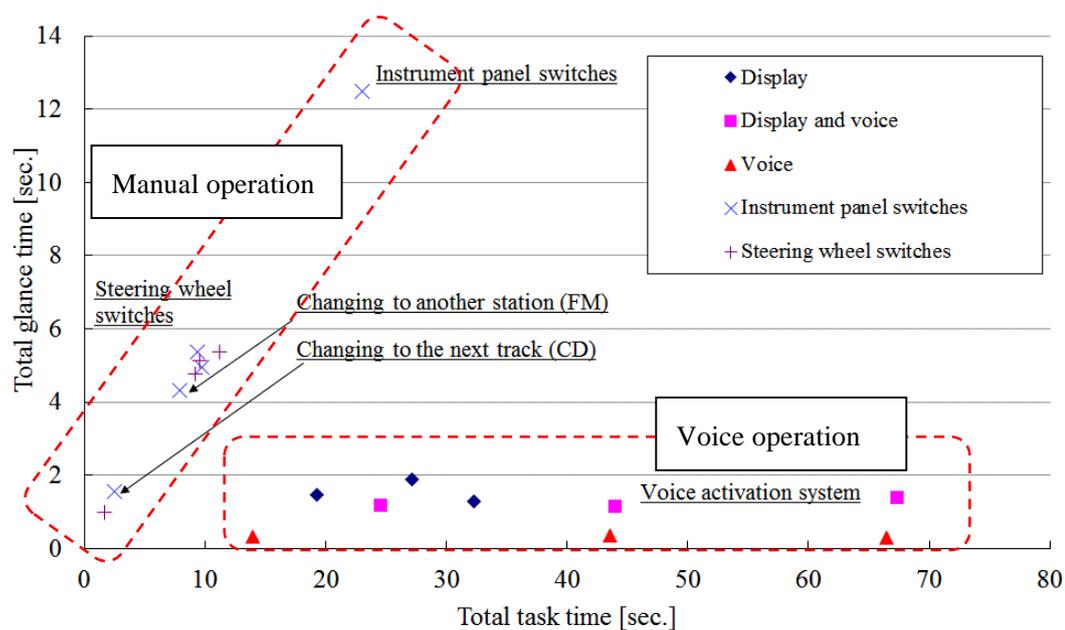


Fig.3-11. Correlation between total task time and total glance time.

### 3.2.5. 実験① 考察

#### (1) 音声操作による影響の特徴

音声操作における精神負担や余裕度，運転制御成績の相関関係を確認するために，指標間の相関分析を行った．なお，データについては，本実験と同様のドライビングシミュレータで実施した，吉次らの音声聴き取り時の精神負担確認実験<sup>27)</sup>の結果と合わせて Fig.3-12～13 に示す．

Fig.3-12 に示したサブタスク反応時間と NASA-TLX AWWL 値の関係については，過去の結果では手操作および音声情報の聴き取りについて相関関係が見られた(プロット点\*，及び破線)．実験を行った音声操作はこの回帰線に対して左側にあり，手操作よりサブタスク反応時間が短くなる傾向があることがわかる．これは，音声操作の場合，精神負担的には手操作と同等の場合でも視線が前方にあることから前方の視覚情報に対する検出力が高いためと考えられる．一方，Fig.3-13 に示した車両横方向変位量と NASA-TLX AWWL 値の関係について，吉次ら<sup>27)</sup>の結果と本実験結果を比較すると，今回の結果の方が車両横方向変位量の絶対値が小さくなっている．これは実験参

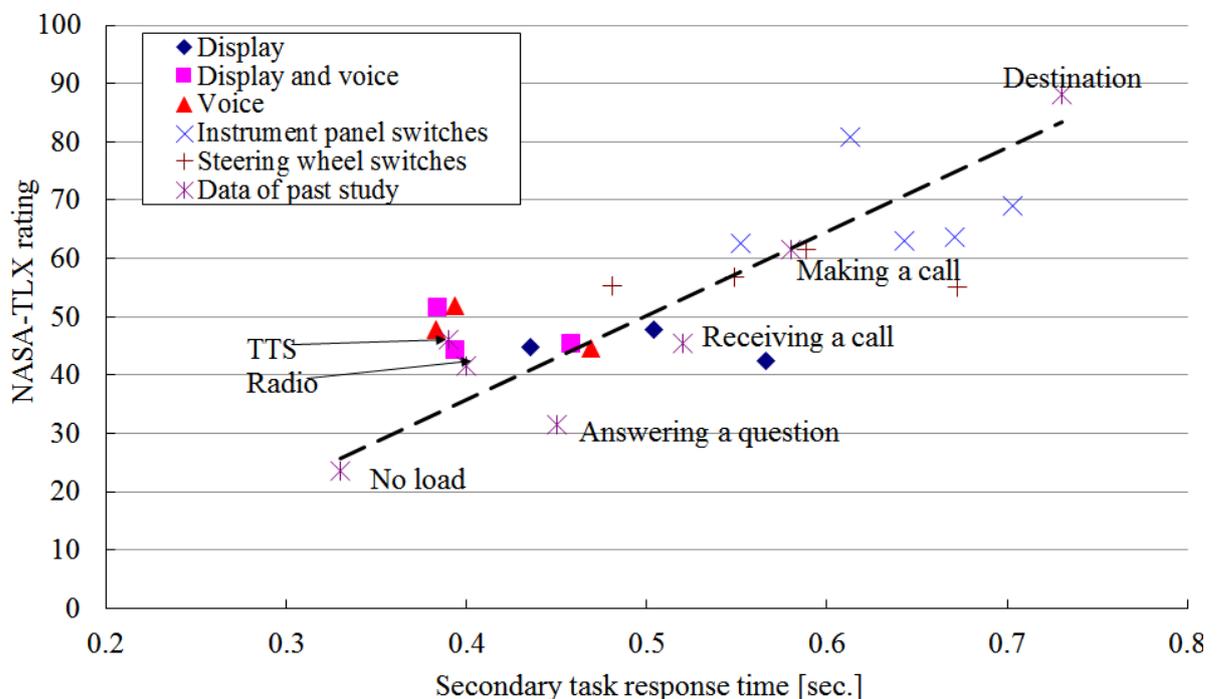
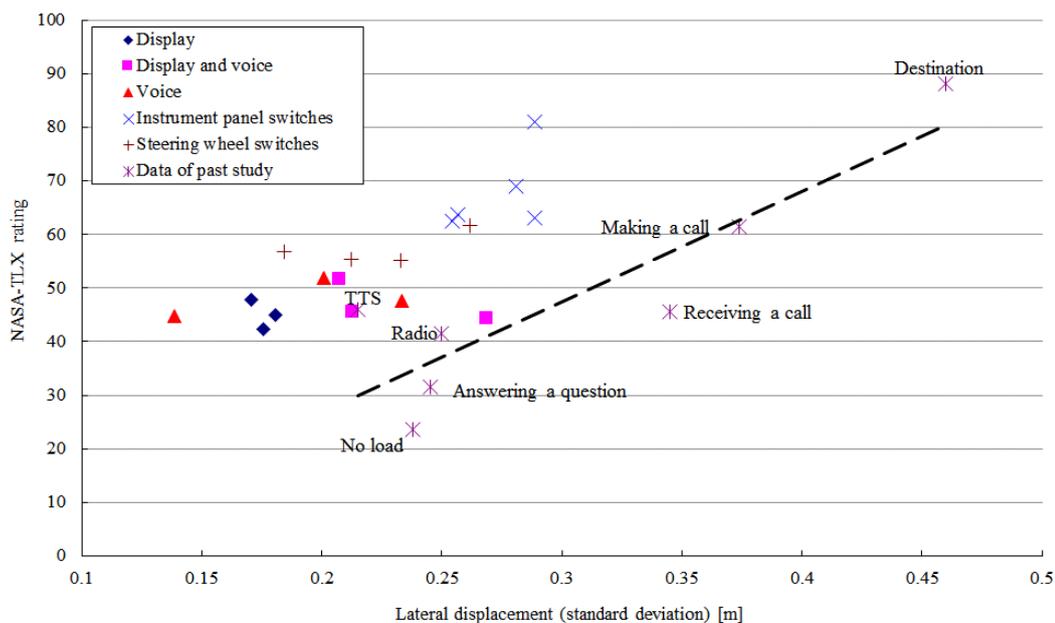
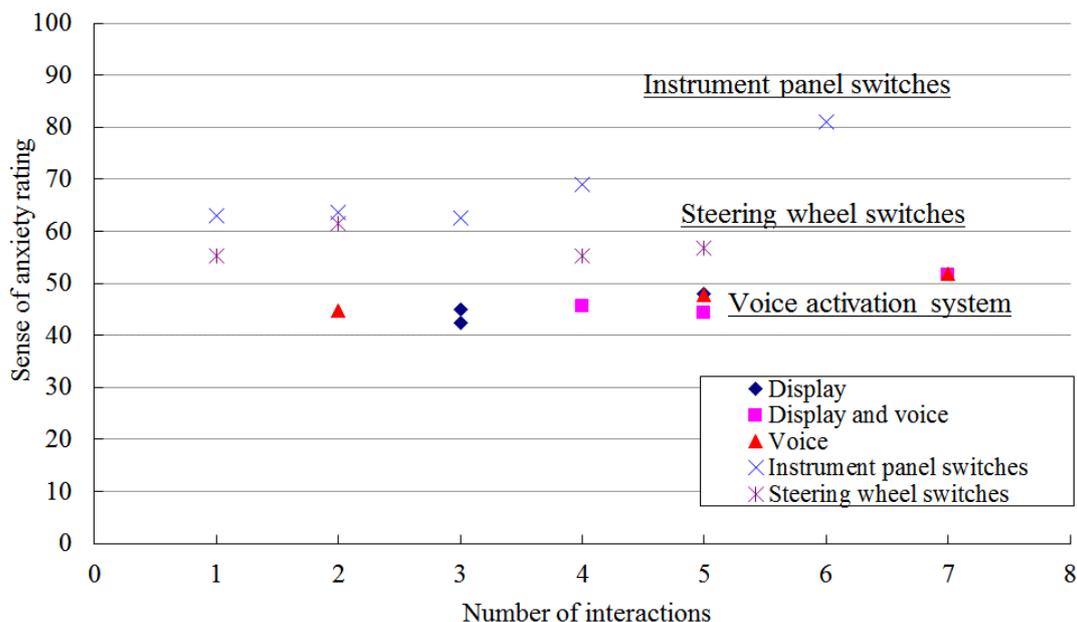


Fig.3-12. Correlation between secondary task response time and NASA-TLX ratings.

加者の運転能力の差などが影響している可能性が考えられる。また、音声操作の NASA-TLX AWWL 値と総操作時間は相関があるが、傾きは小さく精神負担の増加量は小さい(Fig.3-14)。ただし、本実験の音声操作で最も難易度が高い Entering destination(train)タスクにおいては、都道府県名、路線名、駅名を発話するのみであり、住所のように番地入力まで必要な場合は、精神的負担が高くなり、それぞれの図における Voice の NASA-TLX がより上側に配置される可能性が考えられる。



**Fig.3-13. Correlation between lateral lane displacement and NASA-TLX ratings.**

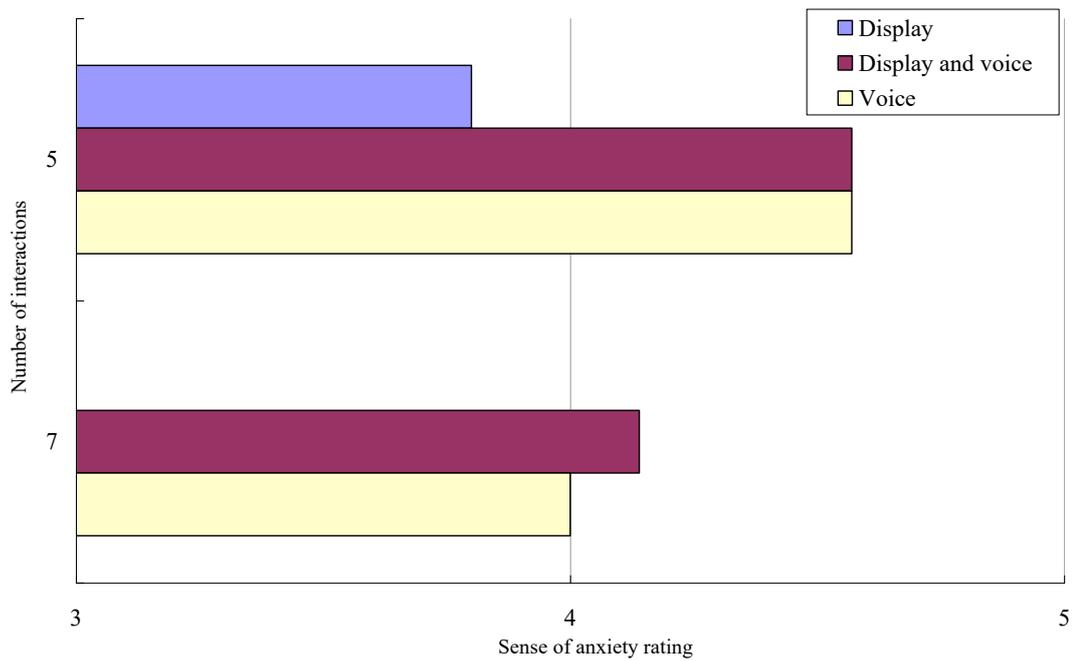


**Fig.3-14. Relationship between number of interactions and NASA-TLX ratings.**

## (2) 音声認識結果の提示方法の影響

音声認識結果をドライバーに知らせるためのアンサーバック方法(音声, 画面表示)の違いによる影響を調べるため, Fig.3-6 に示した 3 種類のアンサーバック方法について各指標間の関係を調べた.

同じインタラクション数のタスク同士で不安感を比較した結果を Fig.3-15 に示す. インタラクション数が 5 回のタスクに注目すると, 画面表示アンサーバックのみを行なった場合は, 音声または音声と画面表示によるアンサーバックがあるタスクに対して不安感が低いことから, 音声によるアンサーバックを提示することでドライバーが音声操作に対して安心することがわかる.



**Fig.3-15. Comparison of sense of anxiety ratings.**

### 3.2.6. 実験① まとめ

運転中に音声操作で機器を操作した際の運転行動や運転成績に与える影響について、下記の結果が得られた。これらの結果より、仮説 1-1 は、仮説どおりであったと考えられる。

- (1) 手操作では運転操作に影響を与える複雑なタスクでも、音声操作を用いることで精神負担を低減し、運転操作の影響を減少させることができる。また、音声操作は総視認時間が格段に短い。これは、カーナビの画面を視認するために必要な注意資源が少なく済むことを意味している。また、車線内のふらつきが少ないことから、単に前方を漫然と見ている訳ではなく、意識が車両前方に向きやすいことを示している。
- (2) 音声入力システムは、音声の認識結果を音声アンサーバックで提示することで、音声操作に対する安心感を向上させる。

### 3.3. 運転場面の視覚情報取得量による検証

近年の IT 技術の進歩に伴って、様々な情報機器が自動車に搭載されるようになってきており、運転者や同乗者の利便性が急速に高まってきている。一方、これらの情報機器の使用によって、従来の自動車運転とは異なる心的負担、具体的には機器操作を行うためのメンタルワークロードの増加が運転者に生じる可能性が指摘されてきている<sup>30)</sup>。過度な心的負担は運転者の注意機能を低下させることから、安全性への考慮が必要不可欠である。今後、更に新しい情報機器が開発する上で、安全な運転環境と利便性の高い情報機器の利用を両立させることが重要であり、そのためには運転者の注意状態を定量的に評価する技術を開発し、これに基づく製品の評価・開発が急務となっている。

ここで、音声操作に目を向けると、音声操作は運転中に車両前方を視認した状態を維持しながら音声による操作が可能であり、実験①の結果から、官能評価ではハードスイッチを用いた手操作と比べて安心感が高い。また、運転成績の観点では、音声操作による影響は運転操作に表れにくい。

一方、自動車の運転に必要な情報の 8 割は視覚情報から取得しているとも言われており、ドライバー自身が車両周辺の視覚情報をどの程度取得して処理を行っているかについては、ドライバーの視覚情報取得量を客観的に評価する指標を用いて検証する必要がある。人間は、目が瞬時に大きく動く「サッカディック眼球運動」が止まった時点で視覚情報を取得しており、取得した視覚情報の量は、後頭部付近で計測できる脳波の眼球停留関連電位(EFRP:Eye Fixation Related Potentials)で計測することが出来る<sup>31)</sup>。

そのため、実験②では、以下に示す仮説 1-2 について検証する。

仮説1-2 運転中のカーナビ操作において、音声操作では、運転に必要な車両周辺の視覚情報の取得量が手操作より多い

具体的には、以下に示すドライバーの視覚情報取得量の観点から、音声操作の優位性について検証することを目的とした。まず、ドライビングシミュレータでの走行場面と実車走行場面との視覚情報取得量の傾向を比較して実験シーンならびに実験方法を検討し、その後、カーナビの手操作と音声操作による比較をドライビングシミュレータおよび実車実験で検証した。

### 3.3.1. 視覚情報取得量の評価法

ドライバー状態の変化には様々な要因が影響するが、中でも、外部環境に対する「視覚情報処理の深さ」は適切な運転行動に必要な不可欠な要因であり、これを客観的に評価することは非常に重要である。本研究では、サッカディック眼球運動回数および眼球停留関連電位の振幅を指標として<sup>31)32)</sup>、カーナビの音声操作と手操作でドライバーの視覚情報取得量の差を評価した。サッカディック眼球運動回数は視覚情報の取り込み回数を、眼球停留関連電位の振幅は目から取り込んだ視覚情報に対する処理の深さを表していると考えられる。

本手法における生体信号計測は主観的評価などと比べて客観性が高く、記憶の変容による影響も受けない。また、実験①で用いたLED光の検出課題における反応時間などの行動計測とは異なり、運転行動と非関連な課題を挿入する必要がないため、自然な運転場面での計測が可能であるという特徴をもっている。

### 3.3.2. サッカディック眼球運動

人間は水平方向に約 $100^{\circ}$ 、垂直方向に $60\sim 70^{\circ}$ の範囲が見えると言われている。しかし、視細胞が集中しており、高空間解像度で視覚情報処理することができるのは眼球の中心にある中心窩と呼ばれる約 $1.5\text{mm}$ 部分に限定されており、視野に直すと $1^{\circ}$ 以内である。運転課題のように視野内に複数の対象が存在し、各々の対象に精緻な視覚情報処理を行うことが求められる場合には、それらの対象が中心窩に投射されるように眼球を動かす必要がある。このため、サッカディック眼球運動は今まで視覚情報処理をしていた対象とは別の対象の視覚情報処理の開始を意味しており、その回数はいくつの対象に対して視覚情報処理が行われたかを示している。

### 3.3.3. 眼球停留関連電位

人間は目を閉じていない限りはどこかに視線を向けているが、その視線方向にある対象を精緻に情報処理しているとは限らない。視線が向いているにも関わらずその対象が情報処理されていない状態は「意識の脇見」とも呼ばれている。運転中の情報機器の使用にともなう運転者状態の評価を行う際に、例えば聴覚提示された情報に意識が向いたため、視覚情報処理が疎かになる状況も考えられることから、意識の脇見がどの程度生じているかは重要な要因となる。

視線が向いた先の情報をどれくらい精緻に処理しているかを推定する方法の一つに眼球停留関連電位がある。眼球停留関連電位は、サッカディック眼球運動の終了時点を目安として加算平均処理を行うことによって後頭から導出される事象関連電位（脳

波) の一種で、基準時点から約 100 msec.後に比較的大きな陽性成分(P100 成分, ラムダ反応とも呼ばれている)が出現する. P100 成分はサッカディック眼球運動に伴う新しい注視位置での視覚情報の取り込みを反映しており, その振幅は視覚情報処理の深さを表している<sup>33)34)</sup>.

本評価法では, サッカディック眼球運動回数に加えて, 眼球停留関連電位の P100 成分振幅を指標として, 「意識の脇見」状態も考慮して, 運転者の視覚情報取得量を推定する.

まず, ドライバーが走行するコース周辺の交通環境の差による視覚情報取得量の変化を P100 成分で比較出来ることを, 実車実験(実験②-1)と DS 実験(実験②-2)で検証する. その後, 運転中のカーナビ操作における視覚情報取得量の差の比較を, DS 実験(実験②-3)と実車実験(実験②-4)で検証する.

### 3.4. 実験② 運転場面における視覚情報取得量の評価

#### 3.4.1. 実験②-1 異なる運転場面での視覚情報取得量の比較(実車走行実験)

##### (1) 目的

まず、視覚情報取得量評価法が自動車の運転場面でも適用可能かどうかを検証するため、実車走行中の脳波および眼電位を計測し、市街地走行と高速道路走行における眼球停留関連電位および眼球運動回数を比較した。

##### (2) 方法

日常的に自動車の運転を行っている成人 34 名(男性 14 名, 女性 20 名)に, 排気量 4500cc のセダン型車両に乗車してもらい, 出発地点から高速道路までの片側 1~2 車線の一般道路(3.6km), 片側 3 車線の高速道路 (38.7km) を走行してもらった後, 往路と同じ経路でスタート地点へ戻るルートを行行した (Fig.3-16) . 高速道路では, 第 2 走行車線を約 100km/h で走行することが求められ, 危険の回避または実験者からの指示がない限り車線変更はしないように教示した. 本コースの走行を各実験参加者につき 2 回ずつ別の日に実施した.

運転課題中は, ドライバーの脳波および眼電位を計測した. 脳波は左右両耳朶結合を基準電極とし, 後頭(Oz)から単極導出された. また, 眼球電位は左右眼裂外ならびに右眼上下から双極導出された. 視覚情報取得量の指標としてサッカディック眼球運動の回数および眼球停留関連電位における P100 成分の振幅を用いた. サッカディック眼球運動の回数は一定時間内の新しい視覚情報の取り込み回数を, 眼球停留関連電位は 1 回の視覚情報の取り込みに対する処理の深さを反映すると考えられている.

##### (3) 結果と考察



Fig.3-16.Example of the real road environment  
(A; Express way, B; Urban road)

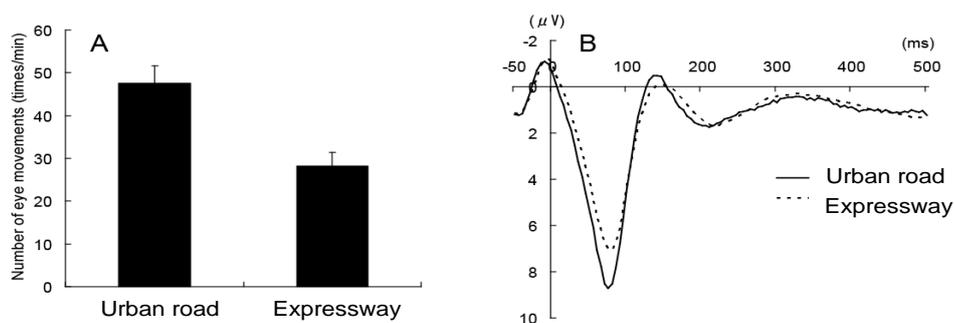
結果を Fig.3-17 に示す。Fig.3-17A は、市街地道路走行および高速道路走行における 1 分あたりの平均サッカディック眼球運動回数を示している。本データに関して  $t$  検定を行った結果、市街地道路走行において高速道路走行よりも有意にサッカディック眼球運動が増加することが明らかになった( $t[33]=8.6, p<.001$ )。この結果は、複雑な道路環境を走行する場合、より多くの視覚情報の入力が必要であることを示している。

Fig.3-17B は、市街地道路走行および高速道路走行における眼球停留関連電位の波形を示している。いずれの条件においても眼球停留の約 100ms 後に顕著な陽性成分が認められる(P100 成分)。また、この P100 成分は、高速道路走行と比べて市街地道路走行において振幅の増大が認められる。P100 成分の振幅を定量的に評価するために、眼球停留前 50ms 間の平均値をベースラインとして、50-150ms 区間の区間平均電位を算出した。その結果、市街地道路走行では  $3.92 \mu V$  であり、高速道路走行では  $3.48 \mu V$  であった。区間平均電位に関して  $t$  検定を行った結果、市街地道路走行において高速道路走行よりも有意に P100 成分の振幅が増大することが明らかになった( $t[33]=3.2, p<.01$ )。この結果は、複雑な道路環境を走行する場合、1 回の視覚情報の取り込みにおける処理が深くなることを示している。

本実験の結果から、運転者は道路環境が複雑になることで、以下に示す 2 点が明らかになった。

1. 一定時間あたりの視覚情報の入力回数(サッカディック眼球運動の回数)を増加させる
2. さらに 1 回の視覚情報の取り込みにおける情報処理を深く行っている

この結果は、高速道路走行時よりも市街地道路走行時において気を使って運転をしているという主観的経験とも一致しており、普段の運転においてごく当たり前と感じられる現象を、視覚情報取得量という客観的な指標で定量的に証明したものと言える。



**Fig.3-17. Experimental results in real road scenes (A; Number of eye movements , B; EEG waveforms)**

### 3.4.2. 実験②-2 異なる運転場面での視覚情報取得量の比較(DS 実験)

#### (1) 目的

ドライビングシミュレータ(DS)で再現した道路環境が運転者状態に与える影響を実車と同等に扱えるかを検証するため、実験②-1と同様の実験を実施した。

#### (2) 方法

日常的に自動車の運転を行っている成人10名(男性9名,女性1名)に、実験①と同じDSに乗車してもらい、3種類のコース(高速道路,郊外道路,市街地)を走行してもらった(Fig.3-18 C,D,E)。高速道路コース(東名高速道路上り御殿場IC~鮎沢PA間,片道3車線)では,第2走行車線を100km/hの速度で走行してもらった。郊外道路コース(仮想の幹線道路)では,設置された信号を守りながら60km/hの速度で走行することが求められた。市街地道路コース(神奈川県横浜市みなとみらい地区)では,信号や道路標識の速度規制(40km/hまたは50km/h)を守りながら走行してもらった。各コースにおける走行時間は約6分間で,ランダムな順番で2回ずつ走行実験を行った。脳波・眼電位の計測および本実験で用いた指標は実験②-1と同じである。

#### (3) 結果と考察

結果をFig.3-19に示す。Fig.3-19Cは,各コースにおける1分あたりの平均サッカデミック眼球運動回数を示している。本データに関して1要因の分散分析を行った結果,コースの違いによる効果が認められた( $F[2,18]=6.6, p<.01$ )。さらに下位検定(Newman-Keuls test)を行ったところ,市街地道路コースと郊外道路コースの間および市街地道路コースと高速道路コースの間に有意差が認められた( $p<.05$ )。この結果は,比較的単調な高速道路,郊外道路と比べて,市街地のように複雑な道路環境の走



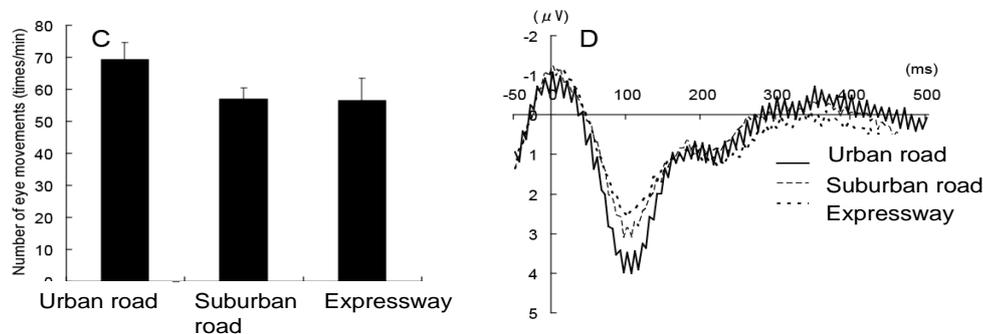
Fig.3-18.Example of the driving simulator road environment

(C; Express way , D; Suburban road, E; Urban road)

行ではより多くの視覚情報の入力が必要であることを示しており，実験②-1 で示したコース違いでの比較結果と一致している．

Fig.3-19D は，各コースにおける眼球停留関連電位の波形を示している．いずれの条件においても P100 成分の惹起が認められた．P100 成分の区間平均電位に関して 1 要因の分散分析を行った結果，主効果が認められた( $F[2,18]=6.6, p<.01$ )．さらに下位検定を行ったところ，サッカディック眼球運動回数と同様に，市街地道路コースと郊外道路コースの間および市街地道路コースと高速道路コースの間に有意差が認められた( $p<.05$ )．この結果は，複雑な市街地道路を走行する場合，1 回の視覚情報の取り込みにおける処理が深くなることを示しており，実験②-1 の結果と一致している．

一方，Fig.3-19D の波形にギザギザ模様が見られるのは，DS に搭載しているブレーキペダル用の DC75V アクチュエータから生じる電磁ノイズの影響である．実験②-2 実施前の動作確認中に脳波から P100 成分を抽出困難になる電磁ノイズが混入していることが確認されたため，アクチュエータ周囲にノイズシールド処理を行い，実車実験と同様に計測および解析が出来るようになったことで，本実験結果を示すことができた．



**Fig.3-19. Experimental results in real road scenes (C; Number of eye movements , D; EEG waveforms)**

### 3.4.3. 実験②-3 運転中の機器操作による視覚情報取得量の検証(DS 実験)

実験②-1, ②-2 の結果から, 市街地と高速道路で視覚情報取得量が異なることが示された. この点を考慮して, カーナビ操作による視覚情報取得量の影響を市街地, 高速道路の両方で検証することとした. なお, DS 実験と実車実験の結果を比較することも考慮して, 実験②-3 では DS, 実験②-4 では実車で同じ実験を実施した.

#### (1) 目的

運転中にナビゲーションシステムの操作を手操作および音声操作で行う課題を課し, ドライバーの注意状態への影響を明らかにする.

#### (2) 方法

実験②-2 と同じ DS を用いて, 東名高速道路(御殿場 IC~鮎沢 PA 間上り方面, 片道 3 車線)を用いた. 実験参加者は 9 名, 平均年齢 36 才である.

実験参加者には, 中央車線を 100km/h の速度で走行するように教示した. 実験では, 右側車線から追い越し車両がほぼ 1 分間隔で自車の前に割り込み, 再び右側車線へ戻るといった運転シナリオを用いた(Fig.3-20).



Fig.3-20. Experimental scene (DS)

実験参加者は二次課題として以下 6 条件を 2 回ずつ、計 12 試行を実施した。

- 1) 無負荷：走行課題のみを行う。
- 2) ラジオ課題：FM ラジオのニュースまたは交通情報を聞き取り，試行後に内容に対する質問に答える
- 3) 音声操作(易)：1～2 回のコマンドで操作が終了するナビゲーションシステムの操作を行う（例：「自宅に帰る」）
- 4) 音声操作(難)：5～8 回のコマンドで操作が終了するナビゲーションシステムの操作を行う（例：電話番号から目的地設定）
- 5) 手操作(易)：音声操作(易)と同じ操作をリモコンで行う
- 6) 手操作(難)：音声操作(難)と同じ操作をリモコンで行う

なお，手操作(難)条件は，日本では走行中の操作が規制されている項目であるが，本実験②-3 では比較のため課題に加えた。

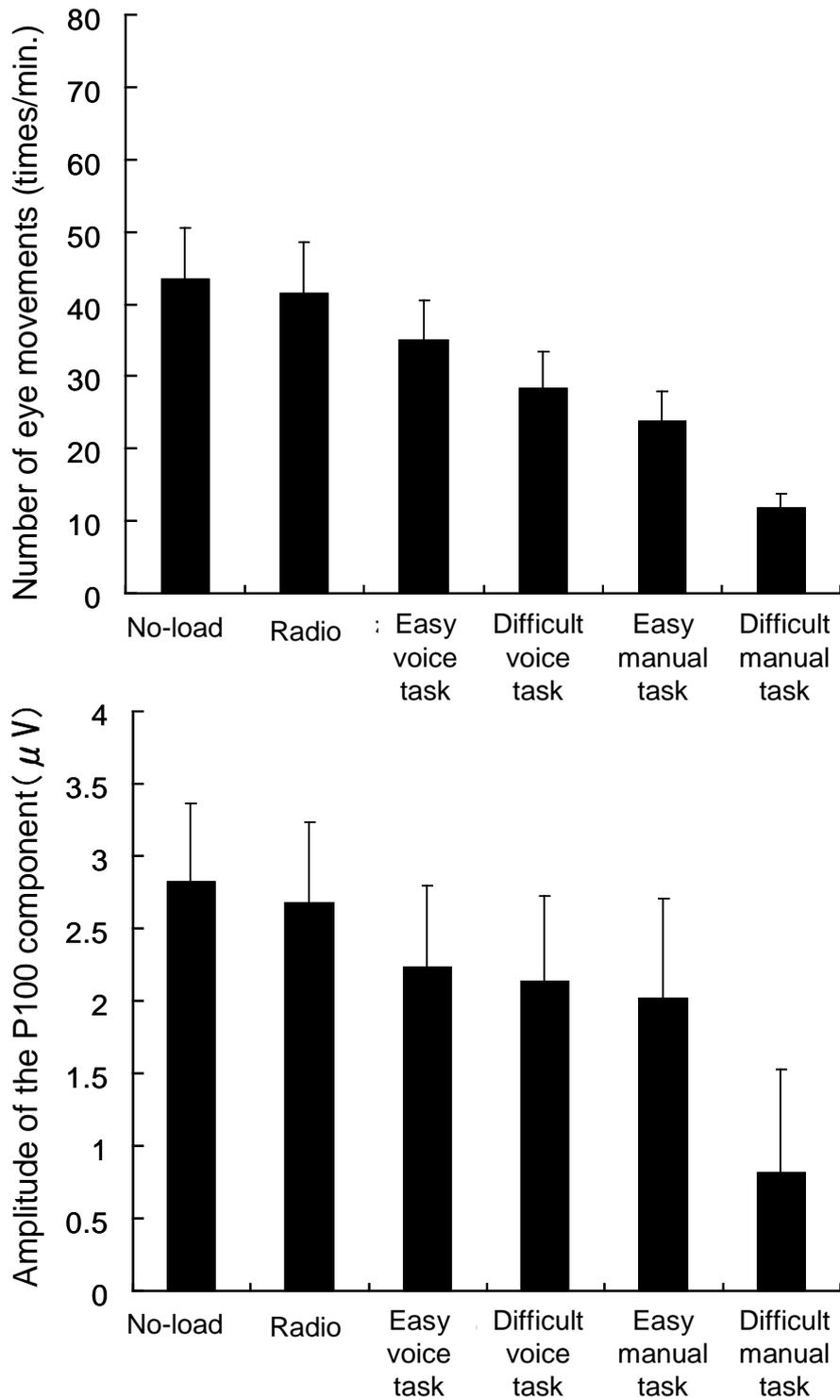
また，本実験では車内に設置されたナビゲーションシステムを利用したため，前方とナビ画面との間を往復するサッカディック眼球運動が多数観察されたが，外界情報の視覚情報取得量の推定を目的としているため，サッカディック眼球運動回数ならびに眼球停留関連電位の解析からは除外した。すなわち手操作においてはスイッチや画面を注視している時間は除いて，操作の合間に前方を見ている時間の解析を行っている。これは今回の実験が基本的には運転者が前方を見ている状態での視覚への注意資源配分を評価することを目的としているためである。従って音声操作の実験結果と手操作の実験結果を比較する場合は十分に注意する必要がある。

### (3) 結果

各条件における 1 分間当たりのサッカディック眼球運動回数を Fig.3-21(上側)に示す。無負荷条件とラジオ条件の間には大きな差異は認められなかった。それに対し，ナビゲーションシステムを利用する条件では，音声操作（易）条件，音声操作（難）条件，手操作（易）条件，手操作（難）条件の順に，サッカディック眼球運動回数が減少した。音声操作（難）条件，手操作（易）条件，手操作（難）条件において無負荷条件よりも有意にサッカディック眼球運動回数が減少していることが明らかになった( $p < .05$ )。また，音声操作（易）条件と音声操作（難）条件の間の差は有意

ではないが、音声操作（易）条件とボ手操作（易）条件の間には有意な差が認められた( $p < .05$ ).

各条件における眼球停留関連電位の 50-150ms 区間平均電位を Fig.3-21(下側)に示す。無負荷条件とラジオ条件との間には、サッカディック眼球運動回数と同様に、大きな差異は認められなかった。それに対し、ナビゲーションシステムを利用する条件では P100 成分の振幅の減衰傾向がみられた。特に手操作（難）条件における振幅の減衰が大きく、他のすべての条件よりも有意に振幅が減衰していることが明らかになった ( $ps < .05$ ).



**Fig.3-21. Driving simulator test results**

**(Upper) The number of saccadic eye movements**

**(Lower) The amplitude of P100 component of EEG**

#### (4) 考察

実験結果から、音声操作によるナビの操作においても、無負荷条件やラジオ聴取と比べて、視覚情報の取り込み回数や視覚情報処理の深さに多少影響を与えることがわかったが、手操作と比較した場合、視覚情報の取り込み回数および処理の深さの両方において、その影響は少ないことが示された。特に難易度の高い手操作の場合に比べると、その影響は著しく小さい。

この結果は、手操作の合間に前方を見ている状態と音声操作を実際に実行している状態での比較であり、手操作がさらにスイッチを見たり、画面を見たりする必要があることを考えれば音声操作の方が遥かに安全と考えられる。

特に音声操作条件においては、カーナビ操作のタスクの難易度でサッカディック眼球運動回数および眼球停留関連電位の振幅への影響がそれほど大きく変わらないのに対し、手操作ではタスクの難易度の影響を大きく受けることが示された。これは、手操作は視覚情報を多く用いる必要があるが、音声操作は視覚情報のかわりに音声ガイダンスなどの音声情報を利用するため、視覚情報の取得が必要最低限で済むことが影響していると考えられる。このことから、音声操作の優位性は複雑な操作を行う場合ほど高いといえる。

そもそも、複雑な手操作では視線を何度も車内のスイッチや情報画面に向ける必要があることから危険性が高いと言われてきたが、本実験の結果から、操作が複雑な場合はナビの操作を中断して前方を向いてもすぐには通常の運転状態に戻らないことを示している。これは、運転操作と機器操作の間で注意を向ける対象を切り替える、いわゆるタスクスイッチング行為が困難となっている結果と考えられる。

### 3.4.4. 実験②-4 運転中の機器操作による視覚情報取得量の検証(実車実験)

#### (1) 目的

実験②-3 で得られた結果の妥当性を検証するために、実車で実験 3 同様の実験を実施した。なお、実車実験は公道を使用するため、安全性への配慮から、カーナビ画面を注視する必要がある手操作（難）条件を除外した。

#### (2) 方法

本実験は、実験参加者 30 名が参加した。なお、交通事故等により道路状況が実験で想定したシーンにならなかった理由により、2 名のデータを解析対象から除外、28 名の実験データを解析した。

本実験では、出発地点から高速道路までの一般道路(3.6km)、高速道路 (38.7km) を走行し、往路と同じ経路でスタート地点へ戻るコースで実験を行った(Fig.3-22)。一般道路の走行経路はすべての実験参加者で共通である。高速道路での走行については、高速道路の中央車線を 100km/h 前後で走行すること、車線変更、追抜きは計測員の指示に従って行うことを教示した。各実験参加者は 2 回の走行実験に参加し、高速道路走行中に下記課題を課した。

- 1) 無負荷
- 2) ラジオ聴取
- 3) 音声操作（易）
- 4) 音声操作（難）
- 5) 手操作（易）

各課題は各走行の往路および復路でランダムに割り当てた。



**Fig.3-22. Experimental scene (real road)**

### (3) 結果

各条件における1分間当たりのサッカディック眼球運動回数を Fig.3-23 (上) に示す。ドライビングシミュレータ実験と同様に、無負荷条件とラジオ条件との間には大きな差異は認められず、ナビゲーションシステムを利用する条件ではサッカディック眼球運動回数の有意な減少が見られた( $p < .05$ )。但し、音声操作(易)条件、音声操作(難)条件、手操作(易)条件の間に差異は認められなかった。各条件における眼球停留関連電位の50-150ms 区間平均電位を Fig.3-23 (下) に示す。無負荷条件とラジオ条件との間には、サッカディック眼球運動回数と同様に、大きな差異は認められなかった。

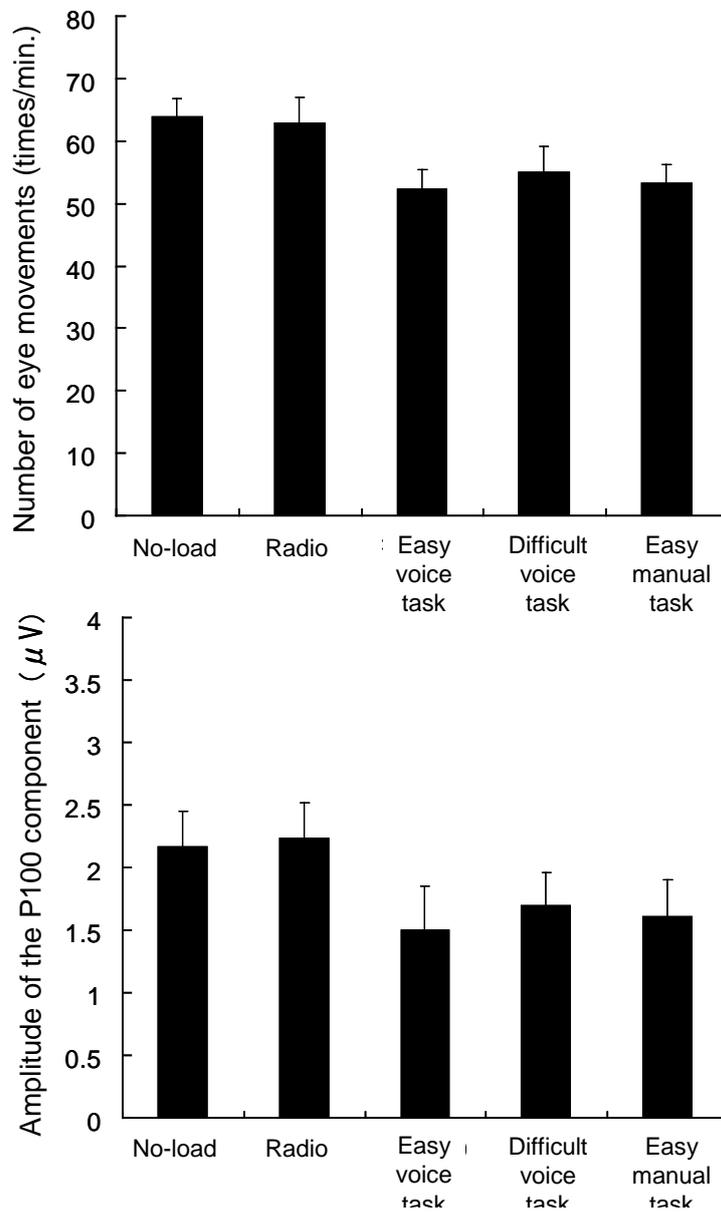
それに対し、ナビゲーションシステムを利用する条件では P100 成分の振幅の減衰傾向がみられた。但し、サッカディック眼球運動回数と同様に、音声操作(易)条件、音声操作(難)条件、手操作(易)条件の間に差異は認められなかった。

### (4) 考察

本実験の結果は、カーナビの音声操作、手操作のいずれにおいても、運転のみの場合と比べて視覚情報取得量が有意に低下するという、ドライビングシミュレータ実験の結果を再現していると考えられる。また、視覚情報の取り込み回数の減少、ならびに視覚情報取得量の両方に影響していることも、一貫した傾向であると考えられる。

さらには、音声操作の難易度の違いが視覚情報取得量にほとんど影響を与えない点もドライビングシミュレータ実験と実車実験で一致した結果であり、ドライビングシミュレータは本研究のようにドライバーの状態を客観的に評価するツールとして用いることの妥当性を示すものであると考えられる。

一方、音声操作と手操作の比較に関しては若干異なる結果が見られた。ドライビングシミュレータ実験では、音声操作（易）と手操作（易）のサッカディック眼球運動回数に有意な差異が認められたが、本実験ではほぼ同程度であった。これは、実車走行中には安全な走行に必要な視覚情報処理資源を確保するために、二次課題への情報処理資源の配分を減じている可能性がある。



**Fig.3-21. Real vehicle test results**

**(Upper) The number of saccadic eye movements**

**(Lower) The amplitude of P100 component of EEG**

### 3.4.5. 実験② まとめ

カーナビゲーションシステムが運転者の注意状態に与える影響を検討した過去の研究では、実験における安全性を考慮して比較的単調な道路環境で実施されることが多かった。しかし、実験②-1、②-2の結果は、道路環境の複雑さによって必要とされる視覚情報の取り込み回数および処理の深さが変化することを示している。このことは、単純な道路環境においては問題のない程度の運転者状態の変化が、複雑な道路環境においては注意資源がうまく配分出来ず、結果的に運転中の安全確保に多大な影響を及ぼす可能性を示唆しており、運転者の注意状態を推定するには様々な道路環境における実験的検討が必要であると考えられる。

また、実験②-3、②-4の結果から、ナビゲーションシステムで電話番号からの目的地入力などの複雑な手操作を行う場合、視線を前に向けている時にも視覚情報取得量が低下することが明らかになった。このことは、複雑な手操作を行う場合、視線を外している時間から推定される以上に、車両前方で異変が発生した時の反応が遅れる可能性を示唆している。このことから、仮説 1-2 については必ずしも仮説通りとはいえず、視線を前に向けていても視覚情報取得量が低下するという新たな知見が得られたといえる。

一方、音声操作を使用する場合、視覚情報取得量の低下は少なく、視線を車両前方およびミラー等に向けながら情報機器の操作することが可能である。これより、適切に音声操作を適用していくことで、前方への注意力の低下を抑えながらナビゲーションシステムの利便性を向上させることができると考えられる。

### 3.5. まとめ

本章では、手操作と比較した音声操作のメリットとデメリットについて以下の結果が得られた。

- ① 音声操作は、手操作と比べて車両のふらつきが少なく、ブレーキランプを模擬した光刺激に対する反応時間は運転に集中した場合と同程度である。
- ② ドライバーが運転中に音声操作を使用した際に取得する車両周辺の視覚情報量は、手操作と比べて多く、特に、複雑なカーナビ操作として代表的な、操作の手数が多い「住所でカーナビの目的地を入力する」タスクにおいては、手操作と比べて有意に多い。
- ③ しかし、音声操作であっても、運転のみでカーナビ操作を行わない場合と比べると、取得する視覚情報量は有意に低下する。

以上のことから、音声操作は手操作と比べて安全性の観点ではメリットがある操作方法だが、ドライバーの情報処理の過程において、視覚情報の取得の面で影響が生じる可能性があることが示された。つまり、音声操作であれば視線を車両前方から外しにくいため、手操作と比べてより安全と思われやすいが、運転への影響が全く生じない訳ではないといえる。

一方、住所によるカーナビの目的地設定のように、手操作では安全性に大きな影響が生じる懸念がある機能でも、音声操作は運転への影響を低減する。

これらのことから、音声操作は、ドライバーの注意資源の配分が音声操作に向きすぎず、視覚情報の取得が阻害されないような状態を維持しながら利用出来るようにすることが、安全性向上の観点から重要と示されたと考えられる。

## 第4章 警報音の音像表現による認知力向上

### 4.1. はじめに

本章では、ドライバーが自動運転機能や運転支援機能から発生する警報音を聴取して反応する際に、警報音の音像表現によって、計器類の視認を省略して、音像で表現されたリスクが存在する方向を直接確認するという仮説(仮説 2)を立てて、その結果として認知力が向上するかどうかの検証を目的とする。

### 4.2. 車室内の音像表現の課題

運転中にドライバーが聴覚で取得する情報は増加し、中でも駐車用ソナーや車線逸脱警報等の運転支援機能の警報音は、ドライバーが障害物の存在を瞬時に把握するために重要である。ドライバーは、警報音によって障害物の存在を把握してから視覚情報による具体的な内容を確認し、障害物に注意を向けて対応する。ドライバーが障害物との位置関係を把握するために要する時間を短縮するには、直感的にわかる警報音のデザイン<sup>24)</sup>だけでなく、警報音の音像で障害物が存在する方向を直接提示するための技術が重要となる。ここで、ドライバーは自動車運転中の監視行動義務を持っており、周囲の安全確認を行うことが大前提となる。また、サイドミラーのみでは死角の車両を確認することが困難である。一方、後側方衝突警報のインジケータをミラー周辺に搭載されていても、ドライバーがインジケータのみに頼り切ってしまうシステムへの過信につながる可能性も否定は出来ない。そのため、ドライバーに対して目視による直接的な注意監視を促すために音像で方向を示すことを前提に検討を進める。

本章では、ドライバーが左右の耳で聴覚情報を取得して音像の方向を把握するために、耳元での聴覚情報を正確に表現する技術を確立して効果を検証することを目的とする。

車室内で音像表現する手法の従来研究として、車室内オーディオ等で複数のスピーカを用いた音圧差表現や、DSP(Digital Signal Processor)を用いたサラウンド機能で音響特性を改善<sup>35)</sup>し表現する手法がある。しかし、ドライバーに対してスピーカを等距離に配置することは車両構造上困難な場合が多く、音圧差表現は車両毎の微調整が不可欠である。また、DSPによるサラウンド機能の適用はコスト面で課題がある。更に、圧電ブザー等の正弦波を用いた警報音は、閉空間である車内に定在波を生成することが考えられる。これにより、ドライバーの体格や着座位置によって左右耳の音圧が変化し、音像表現が不安定になることが予測される。

そこで、本章では、ドライバーの体格や着座位置によらず警報音の音像表現を安定に表現してリスクへの認知力を向上させるために、「車室内における着座位置の影響を受けない音像表現方法の確立」「ドライバーが音像表現をより明確に知覚する方法の確立」「音像表現による安全性向上効果の明確化」3つの観点に着目して実験する。まず、ドライバーの着座位置によらず音像表現を実現するために、車室内において警報音の聞こえ方がドライバーの体格や着座位置によって変化する原因となる車室内音響特性を明確にし、左右耳それぞれの音圧について着座位置の違いによる変動を減らして音像を安定に示す手法を検討し、コンピュータシミュレーションを用いて妥当性を検証する。また、左右耳元での音圧差だけでなく、左右耳元での時間差によって音像をより明確にする方策を台上実験(実験③-1)および実車実験(実験③-2)で検証する。そして、音像表現を付加した警報音によってドライバーが障害物の位置を把握するまでの時間が短縮される効果を、ドライビングシミュレータを用いて評価する(実験③-3)。

## 4.3. ドライバー耳位置での車室内音響特性の計測

### 4.3.1. 計測方法

ドライバー耳位置での車室内音響特性を計測するためには、頭部伝達関数(HRTF：head-related transfer function)の影響を考慮する必要がある<sup>36)</sup>。そのため、頭部の形状および耳介を模擬したダミーヘッド(B&K社製)を用いた(Fig.4-1)。

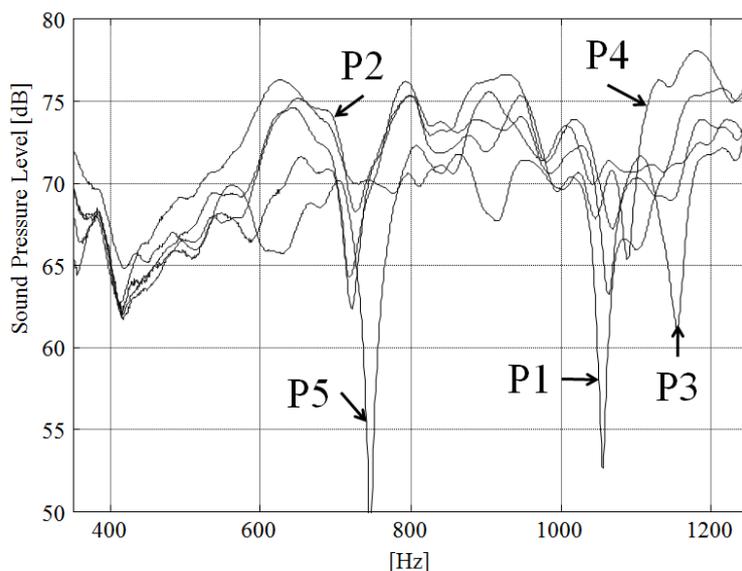


**Fig.4-1 Dummy head**

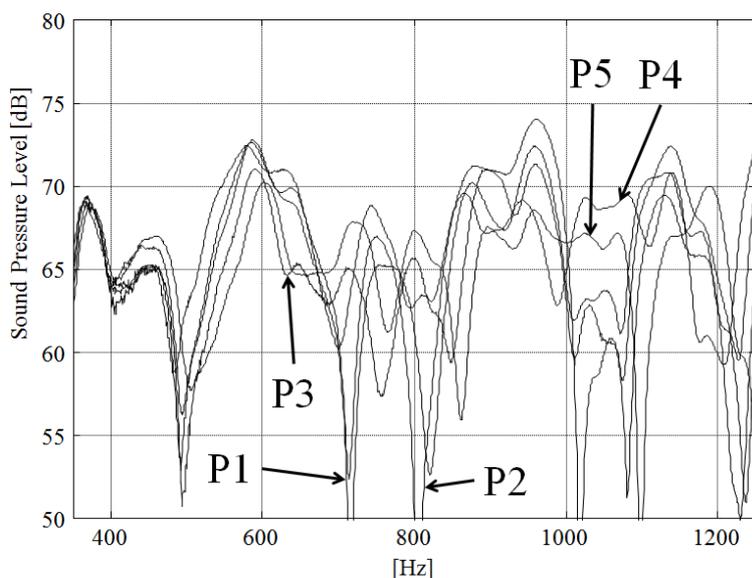
また、車室内音響特性を計測するために用いるテスト信号は、TSP(Time Stretched Pulse)を用いた(2)。TSPの利点として、インパルス信号に比べてエネルギーが非常に大きく、S/N比の高い測定が可能であることが挙げられる。また、ダミーヘッドの両耳に搭載されているマイクの基準位置は、JIS D0021に基づいてシートのバックアングルを $25^\circ$ 、ヒップポイントの直上635mmの位置に設定した。なお、複数の車両で比較評価することを考慮して、シートリフターは下端で統一した。これに加えて、TSPの発生とダミーヘッドで集音した情報の記録を同時に行えるPCとオーディオ用アンプを用いた。

ダミーヘッドのマイク位置は、ダミーヘッドの上下位置と、シートスライドによる前後位置で変更可能にした。なお、本研究においては、前後位置を40mm間隔で5水準(前:P1～後:P5)として計測を実施した。

これらを用いて、右ハンドルの3.7リッターセダン型車両の各オーディオスピーカからTSPを発生させて耳位置で計測し、周波数特性を求めた(Fig.4-2, Fig.4-3). 音の干渉によって特定の周波数成分が打ち消し合う現象(ディップ)が生じる周波数帯が存在しており、車室内で生じる定在波の影響と考えられる. また、着座位置によってディップが生じる周波数帯が変化している. また、印加電圧47mV(rms)で右前ドアツイ



**Fig.4-2 Frequency characteristics of interior acoustics from right door tweeter to right ear**



**Fig.4-3 Frequency characteristics of interior acoustics from right door tweeter to left ear**

ーターから発生した 800Hz 正弦波の音圧を Fig.4-4 に示す。この結果から、音圧は着座位置によって最大 20dB 近い差が生じていることがわかる。

#### 4.3.2. 着座位置によらない音圧の安定化手法の検討

これらの結果から、正弦波による警報音の左右の音圧差で音像を表現すると、音像の表現は難しいと推測される。どのドライバーでも意図した音像を知覚できるようにするため、音圧を着座位置によらず一定にすることが重要である。

ここで、音圧を安定させる方策の一例として 600Hz, 900Hz, 1200Hz, 1800Hz, 2700Hz の周波数成分で合成した波形の周波数を 0.5sec.間で 30%上昇させたスイープ信号を警報音として適用することを考える。音源はサンプリング周波数 48kHz の PCM 音源であり、0.68sec.間となる 32768 点で FFT を行った結果を Fig.4-5 に示す。これにより、0.5sec.間に聞こえる音の周波数成分を多く含むことで、Fig.4-2, Fig.4-3 に示されるディップの影響を受けにくくなり、着座位置によらず意図した音像を表現することが可能になると推測される。

そこで、上記計測で得られた周波数特性と、Fig.4-5 に示す周波数成分で構成される警報音をコンピュータ上で畳み込み処理して、耳元での警報音の音圧をシミュレートした。セダン型でのシミュレート結果を Fig.4-6 に示す。結果、左右耳それぞれの音圧について、着座位置による差は 1.5dB 以内になることが示された。スチーブンスの法則では、人間の聴覚特性は聴覚で知覚する音の大きさはエネルギー比の 0.3 乗で

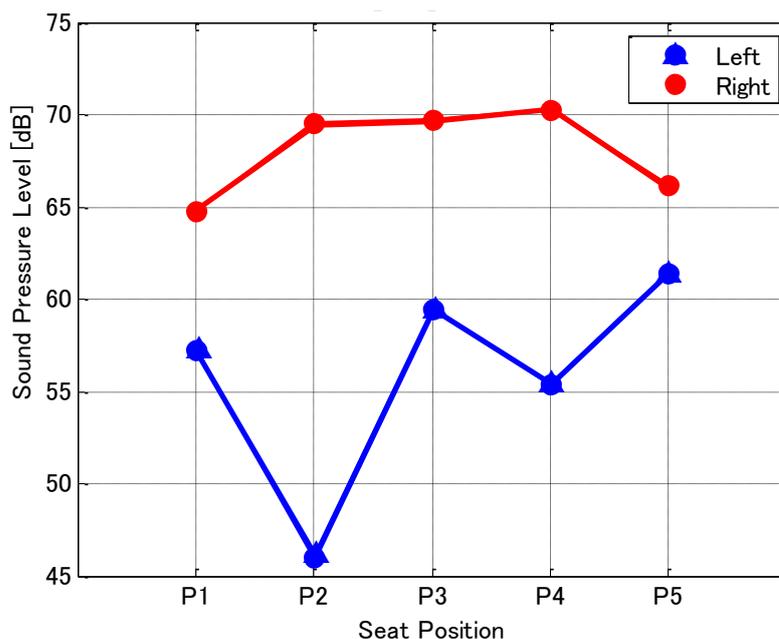
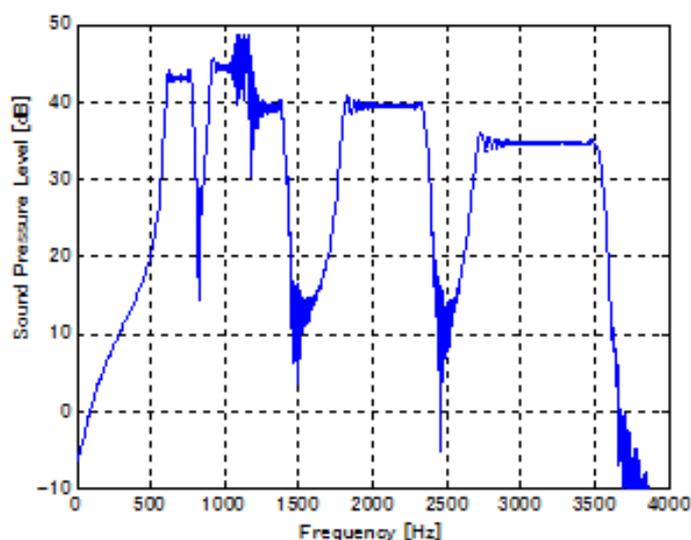
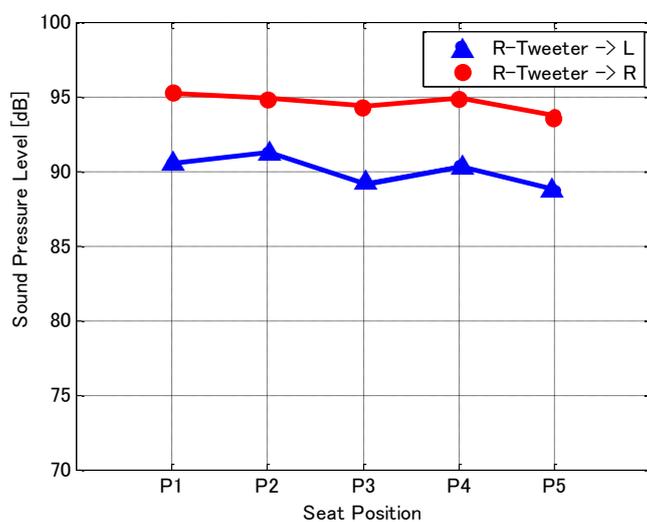


Fig.4-4 Sound pressure level (800Hz sine wave)

比例する。そのため、2dBA 以内の差は音を聴くことに意識を向けると気付く程度であり<sup>37)</sup>、位相差、時間差が無い警報音であれば着座位置によらず音圧差で音像を表現することが可能と考えられる。なお、上記のシミュレーション効果が実車の車室内でも得られることを、実験担当者3名で着座位置を変えて確認した。



**Fig.4-5** Frequency characteristics of sweep sound



**Fig.4-6** Sound pressure level (sweep sound)

#### 4.4. 実験③ 音像表現による効果の人間工学的評価

##### 4.4.1. 実験③-1 音圧差と時間差の組合せによる音像表現の検討

車室内の音圧差によって音像を知覚するために、車室内の周波数特性を考慮する音色を適用することで、意図した音像を知覚しやすくなることがわかった。更に、音響心理の観点からハース効果(第一波面の法則)による両耳へ音が伝わる時間差を考慮することで、ドライバーが感じる音像をより明確にすることになると考えられる。ハース効果を用いることで、両耳で音を知覚する時間差が 1msec.程度あれば、同じ音圧でも音像の左右方向を制御することが可能である<sup>38)</sup>。

実験③-1 では、運転支援装置に用いる警報音を想定して、音像が左右どちらかに定位しているかが明確にわかる音圧差と時間差の組み合わせを、官能評価で検証することとした。実験参加者数は 16 名で、事前に実験目的および内容に同意を得た上で実験を実施した。

##### (1) 実験③-1 実験方法

ヘッドホンと PCM 音源を再生するプレイヤー(Fig.4-7)を用いて、音圧差と時間差が異なる基本周波数 2kHz、周期 1sec.の正弦波の信号音 9 種類をランダムに 3sec.間提示し、Fig.4-8 に示す評価指標で左右方向のどのあたりに定位しているかを評価させた。実験で提示した信号音の音圧差は左右均等(0dBA)、6dBA、12dBA の 3 水準、時間差は 1msec.毎に 0~4msec.の 5 水準とした。



Fig.4-7 Headphone and PCM sound player

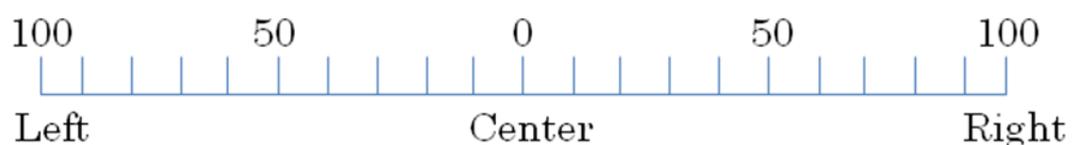


Fig.4-8 Sound image perception rating scale

## (2) 実験③-1 結果

実験結果を Fig.4-9 に示す。図中の数値は Fig.4-8 のスケールの数値を示している。また、図中の丸印は、音像が左右方向へ大きく定位する数値の大きさを表現したものである。数値は、音圧差と時間差の両方が組み合わせられるとより大きくなり、音像が左右方向へ大きく定位したと知覚している。これらの結果から、音圧差が大きくなると左右方向への定位が明確になりやすい。更に、時間差をつけることで左右方向への定位がより明確になり、右方向、左方向の両方とも横軸の時間差が 1msec. の位置で最大となる。この結果から、音圧差が大きい程音像は左右方向へ大きく定位することを知覚し、更に左右の音の時間差を 1msec. とした条件が最も明確に左右方向の音像を知覚出来ることが示された。

## (3) 実験③-1 考察

スピーカを用いた先行研究<sup>38)</sup>では時間差が 0.5msec. 以上になると音像定位がほぼ一定値に落ち着くとの結果が示されている。一方、本実験ではヘッドホンを用いることで音源と耳の距離が等間隔に統制された状態で評価した結果、時間差が 1msec. の条件が最も良く、時間差が 1msec. を超えると、音像の定位はあまり明瞭にならなかった。実験参加者の内省報告から推定される原因として、警報音を 1 つの音像として知覚されず、左右で別々に警報音が鳴ったと知覚されやすいことが考えられる。

### 4.4.2. 実験③-2 車室内における時間差と音圧差の音像表現の評価

車室内で警報音を発生させる場合の音色を決める際には、4.2 章で述べたように車室内の周波数特性を考慮した音色を適用することが重要である。一方、警報音は繰り返し聴くことがあるため、Fig.4-5 に示したような周波数成分を含むスイープ音は乗員

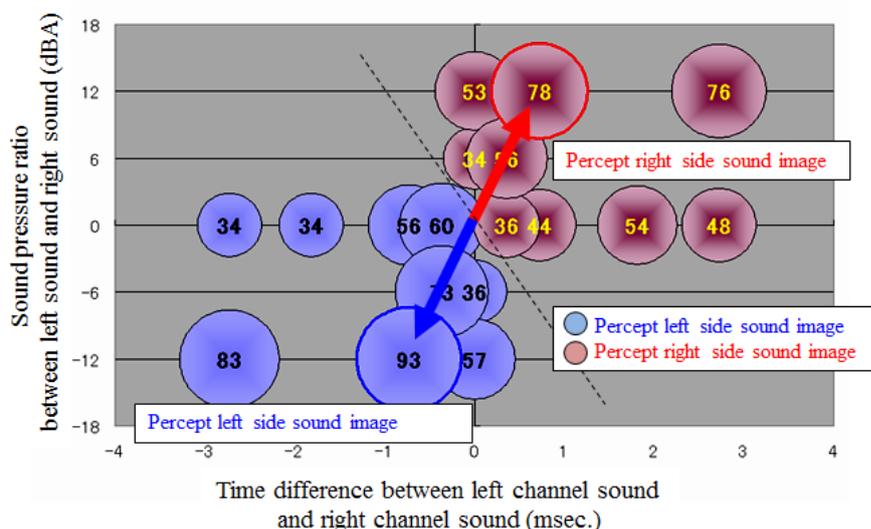


Fig.4-9 Experiment result of sound image perception

が煩わしさを感じやすい可能性がある。そこで、正弦波の警報音と、高周波成分を含むように作られた警報音を用いて、車室内における時間差と音圧差の音像表現を、実車による動的実験で評価した。

## (1) 実験方法

事前に同意を得た 8 名の実験参加者が排気量 3.5 リッターのセダン車両の運転席に着座して、閉鎖された直線路を概ね 40km/h で運転してもらった。この時、車室内の暗騒音のオーバーオール音圧は 48dBA であった。運転中は、左前、右前、正面、左後、右後、背後の 6 方向の音像表現を適用した警報音をランダムに 10sec.間聴取させた。警報音は、1100Hz 正弦波の警報音 Aと、基本周波数 1100Hz の矩形波に 2200Hz の正弦波を合成した警報音 Bの 2 種類を用いた。警報音 B の電気信号波形と FFT を Fig.4-10 に示す。前ドアおよび後ドアの左右スピーカから発生させた警報音の時間差と音圧差は、Fig.4-9 の結果を基に、音圧差 12dBA、時間差 1msec.とした。なお、聴取直後に知覚した音像との位置関係を、Fig.4-11 に示す評価スケールで回答させた。この評価スケールは、前後方向と左右方向で音像の位置を回答しやすくするために、実験参加者の頭上から俯瞰した絵で表現している。

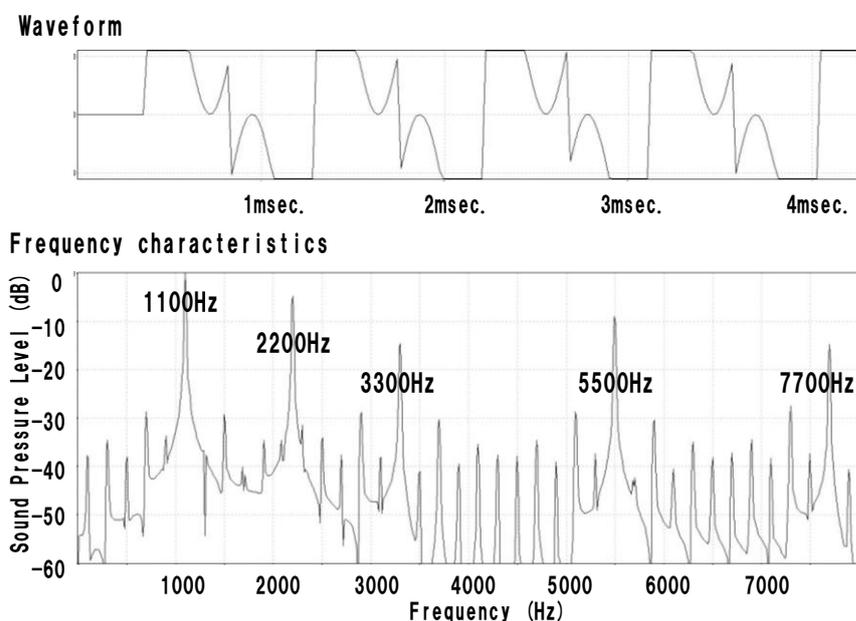


Fig.4-10 Waveform and frequency characteristics of alert sound

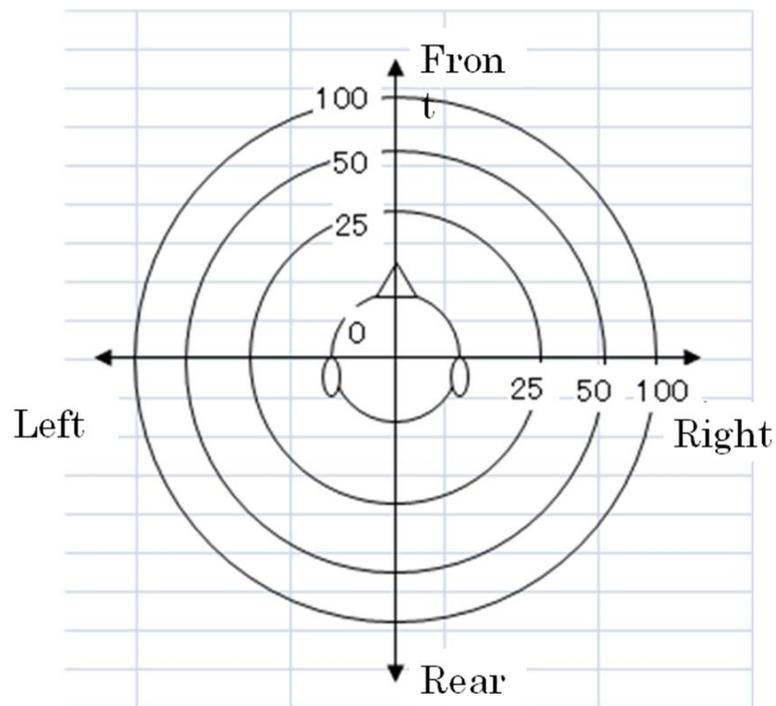


Fig.4-11 Subjective rating scale for sound field perception

(2) 実験③-2 実験結果

8 人の実験参加者の官能評価を平均した結果を Fig.4-12 に示す。警報音 B は、警報音 A に比べて左右方向の定位が明確に知覚できることがわかった。

この結果から、警報音 B を用いて、ドライビングシミュレータで運転支援機能による障害物把握時間の短縮効果を評価することとした。

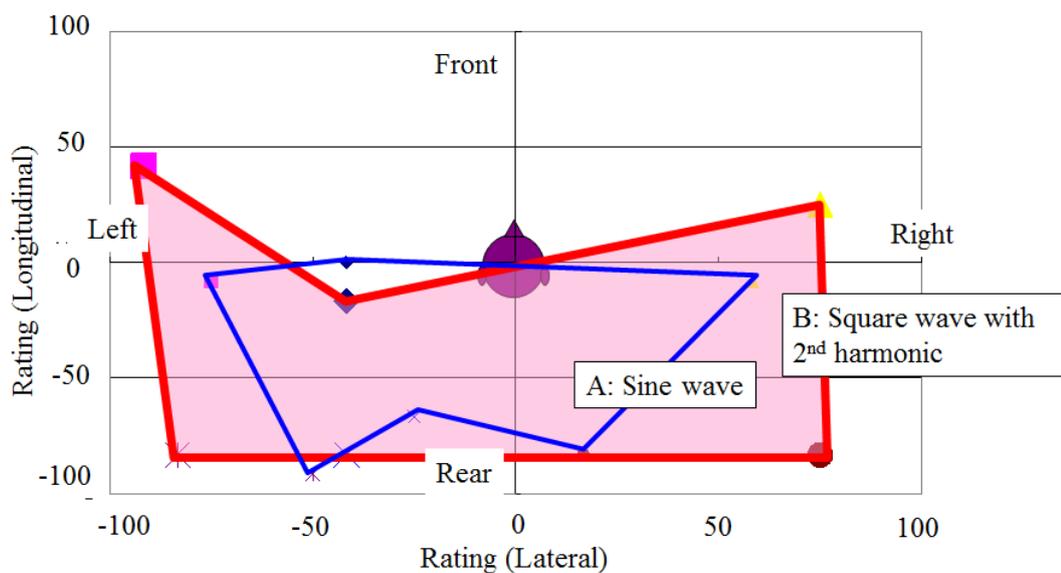


Fig.4-12 Result of subjective rating (Real vehicle evaluation)

#### 4.4.3. 実験③-3 障害物把握時間の短縮効果の評価

実験③-1, ③-2 の結果を基に, ドライバーが運転支援機能で検知された障害物が存在する位置を具体的に把握するまでの時間の短縮効果について, ドライビングシミュレータを用いた動的実験で評価した.

##### (1) 実験③-3 実験方法

実験①, ②で用いたドライビングシミュレータに, Fig.4-13 に示す仮想の警報システムを構築し, 車室内の4枚のドアに内蔵されているオーディオスピーカおよびメーター裏のスピーカから警報音を発生するようにした. 警報音の音色は, Fig.4-10 の音色を用いた1種類で統一した. ここで, オーディオスピーカによる音像表現がドライバー耳元で明確に知覚できるようにするため, ドライビングシミュレータのcockピットの周波数特性を計測し, Fig.4-14 に示す音圧差と時間差を用いて, 音像を右前, 左前, 右後, 左後に定位するように設定した.

実験シナリオは, ドライビングシミュレータで表現された片側3車線の高速道路で中央車線を走行する先行車を100km/hで追従中させた. 走行中に, 横風を模擬した外乱による車線の逸脱, 左右後方に出現する他車両の検知, 先行車の急減速に対する追突警報(ドライバーの注意状態の確認として使用)の3種類のイベントをランダムに発生させて, Fig.4-14 に示す5つの方向に注意を喚起させる実験シナリオとした. なお, 正面については音像定位の有無による差が見られなかったため, 正面を除く4つの方向を解析対象とした.

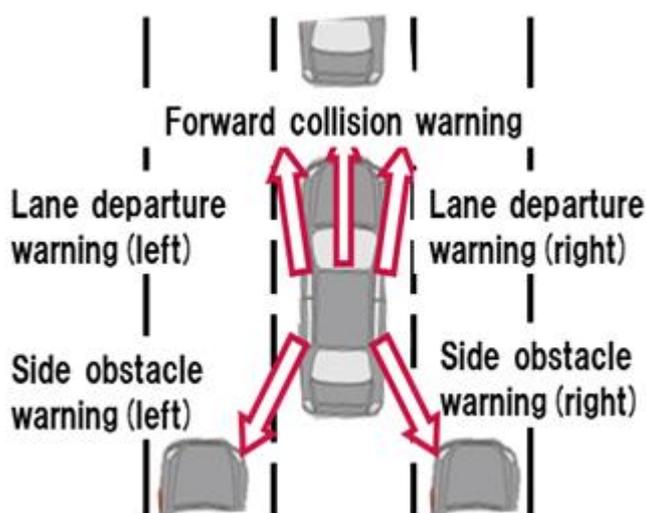


Fig.4-13 Embedded warning system in driving simulator

実験参加者には、障害物が存在する方向を目視で確認したらステアリング上のスイッチを押下し、更に口頭で障害物が存在する方向を回答するよう教示した。また、走行後に、音像表現の有無による警告音のわかりやすさと、音像表現を付加することで警告音の意味を覚えやすいと自覚するかどうかについて、5段階評価の官能評価を実施した。実験参加者は20代～30代の男性5名で、事前に実験目的および内容に同意を得た上で実験を実施した。実験の様子は映像と音声で記録した。



**Fig.4-14 Sound Pressure Level and Delay setting  
for making sound image in driving simulator cockpit**

## (2) 実験③-3 実験結果

音像表現を付加することによって、警報音のわかりやすさと警報音の意味の覚えやすさが向上する傾向が見られた(Fig.4-15). 一方、車線の逸脱および他車両の検知に関する4方向の障害物について、障害物が存在する方向を把握するまでの時間を比較した結果を Fig.4-16 に示す. これより、右後を除く3方向において、概ね0.5sec.程度時間が短縮される結果が見られた. ドライバーの確認行動の一例を Fig.4-17 に示す. なお、全ての実験参加者において、障害物の存在方向を全て正しく回答していた.

## (3) 実験③-3 考察

警報音に音像表現が無い場合は、警報音の発生後にメーター内の警告表示を確認してから障害物の存在する方向を目視で確認する行動が見られるが、音像表現を行った場合は、警報音が発生した直後に対象となる方向に顔を向けて確認することが実験参加者の行動観察(Fig.4-17)から確認された. これより、メーターで視覚情報を取得する行為と障害物が存在しない方向への確認行為が省略可能と判断できることで、時間が短縮された効果と考えられる.

一方、右後については時間短縮効果が見られなかったが、これは、ドライビングシミュレータのコックピットが右ハンドルだったため、右後の状況は右ドアミラーで視覚情報として頻繁に捉えやすい状況だったことが影響していると考えられる.

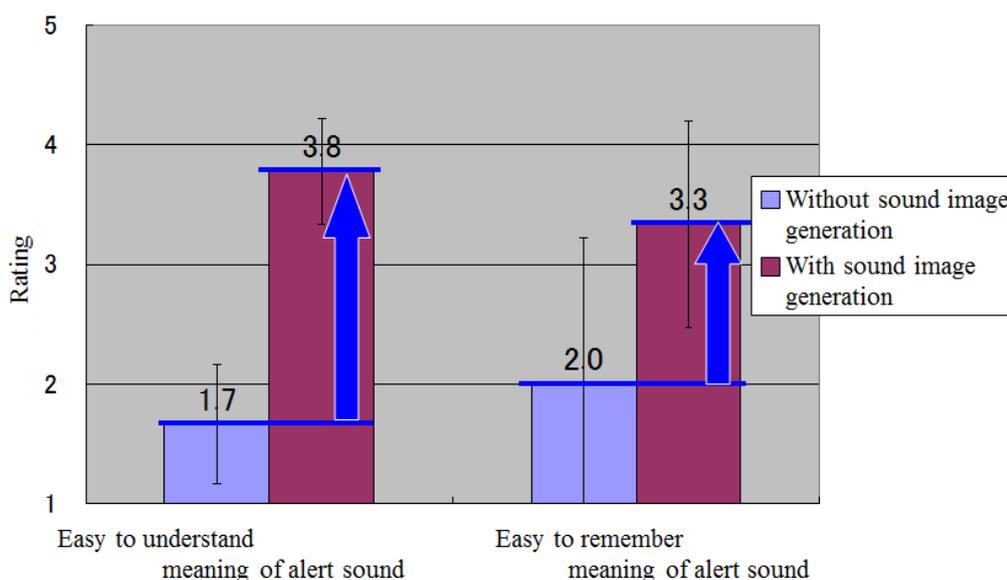
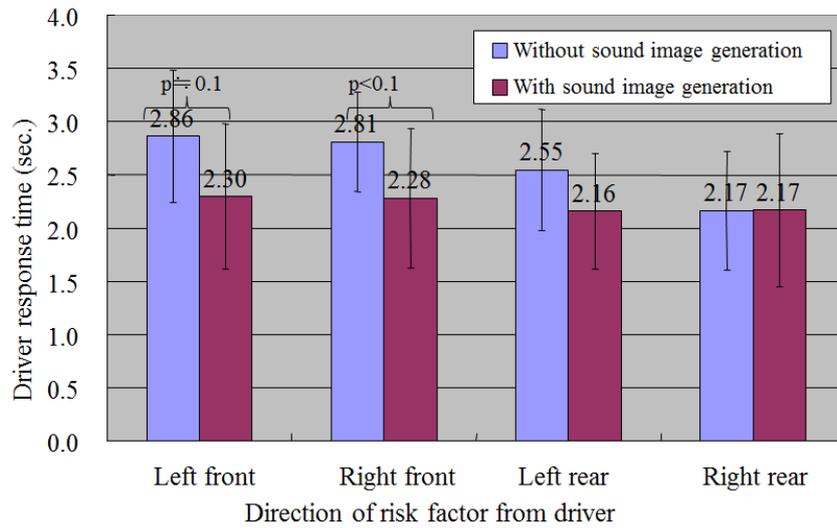


Fig.4-15 Result of subjective rating



**Fig.4-16 Response time of cognition risk factor**



**Fig.4-17 Comparing driver's reaction with sound image generation and without sound image generation**

#### 4.5. まとめ

自動車の車室内で正弦波による警報音を発生した時に、車室内で音を反射することによって生じる定在波によって、ドライバーが音像を誤って知覚する可能性があることが計測結果から示された。

また、周波数成分を多く含む警報音に時間差と音圧差による音像表現を適用することで、音像表現がより明確になった。これにより、仮説2で示したとおり、ドライバーが計器類の視認を省略して、音像で示されたリスクを直接確認する行動に変化し、警報音が発生してからドライバーがリスクのある方向を認知するまでの時間を0.3～0.5sec.程度短縮できる認知力向上効果が示された。本結果は自動車の高速道路80km/h走行場面に例えるとリスクに対応するまでの空走距離が6.7～11.1m程度短縮、普通乗用車1～2台分手前でリスクに対応可能ということを意味しており、リスク回避行動における余裕確保に効果があると考えられる。

このことから、音像表現の効果が高い様々な警報システムの音像表現機能を、DSP(Digital Signal Processor)のような高度な信号処理技術を用いずに、比較的安価に構築することができる可能性があるといえる。

一方、警報音の周波数成分については、長時間の聴取や、繰り返し聴取することによる煩わしさの検討が今後必要である。また、音像表現を自動運転機能や運転支援機能に適用する上では、センサーの誤検知等で誤報した際に生じる煩わしさや、長期間使用することによる過信・不信の発生を抑制するための方策を確立することが今後の課題と考える。

## 第5章 音声操作中の警報音聴取に対する注意配分改善手法の効果

### 5.1. はじめに

本章では、より現実的な場面として、自動車を運転しながら音声操作を使用した際に警報音が発生した場合における以下2つを目的とする。

- 1) 警報音への反応時間や運転操作ならびに運転成績への影響を明確にする
- 2) 音声操作中における運転への注意配分度合いを推定して、運転への注意配分を改善するための手法を提案し、その改善効果を検証する

### 5.2. 音声操作と警報音聴取が同時に生じる場合の影響

これまでの実験において、3章では音声操作による運転中のカーナビ操作における安全性確保を、4章では警報音に音像を付加することによるリスクに対する反応時間の短縮というメリットをそれぞれ示してきた。ここでは、ドライバーの音声操作や警報音の聴取における注意資源配分について着目し、より現実的な問題となり得る音声操作と警報音の聴取が同時に生じる場合の影響について考える。

まず、ドライバーが音声操作を行う際は、発話内容を短期的に記憶して処理するだけでなく、発話した自分の声を聴いて正しく発話出来ているかを確認する作業も同時に行っている。つまり、ドライバーは運転時の注意資源をワーキングメモリと聴覚に多く配分しているものと考えられる。

一方、ドライバーは、警報音を聴取して各警報の意味を認知し、判断に基づき対応するが、この時、警報音を聴取するために必要な聴覚リソースの確保が発話によって困難になることで、ドライバーの認知反応時間に影響すると考えられる。特に、運転中に運転以外のタスク処理が得意ではないドライバーにとっては、運転以外のタスクである音声操作に聴覚リソースを長時間費やすことで、安全な運転が阻害される懸念がある。

また、第2章でも示したように、音声操作と音像表現を付加した警報音の聴取を同時に行った研究結果は示されておらず、音像表現を付加した警報音の聴覚刺激反応時間と関連する指標は明確ではない。

一方、運転への影響の観点から、音声操作中における車両のふらつきに着目すると、第3章では、機器操作時において、タスク負荷の大きさによって車両横方向の位置の偏差に影響が表れることを示している。また、車両のふらつきは、同じステアリ

ング操作であっても車両の諸元によってふらつき量が異なるため、ドライバーのステアリング操作から状態を推定することが、本研究の成果を用いてドライバー状態を推定する上では重要である。

ここで、ドライバーのステアリング操作の特徴に関する先行研究として、田中ら<sup>39)</sup>は、ドライバーが実車の直進状態を維持する実験において平均基本周波数 0.2~0.3Hz で操舵を行う傾向を示している。これより、音声操作中に修正操舵が頻繁に行われる場合は、基本周波数の平均値が 0.3Hz よりも高くなり、偏差が相対的に小さくなると考えられる。

また、ドライバーの状態を推定する手法として、Boerらは、ステアリング・エントロピー法と呼ばれるドライバーの疲労状態の推定手法を提案している。この手法では、カーブ走行中におけるステアリング操舵角の予測値と実測値の誤差分布から得られた偏差と閾値を比較することでドライバーの疲労の有無を判定する<sup>40)</sup>が、聴覚刺激反応時間の推定に適用する目的には適さない。

さらに、3章の実験①の結果から、音声操作においては視覚刺激に対する反応時間は運転のみの場合と有意差がない。このことから、聴覚負担が高い状態をドライバーへ伝える手段として、視覚刺激を用いることが有効と考えられる。また、音声操作中における音像の弁別を考慮した聴覚刺激反応時間を推定するパラメータを明確にして、推定した聴覚刺激反応時間を視覚刺激でドライバーへ提示する効果の明確化が、安全性向上の観点で重要と考えられる。

そのため、本章では、以下の仮説について検証することを目的とした。

仮説3 音声操作中に警報音が発生した場合に、警報音に対する反応が遅れ、音像でリスクの方向を示すことによるメリットが得られにくくなる

仮説4 ドライバーの警報音への反応時間に関する状態を、聴覚と比較して余裕がある視覚情報を用いて示し、音声操作中に聴覚への注意配分の集中による警報音への反応遅れが改善する

具体的には、ドライビングシミュレータ(DS)を用いて2種類の実験を行った。

まず、音声操作中における音像の弁別を考慮した聴覚刺激反応時間を推定するパラメータを明確にするため、音声操作中に音像を付加した警報音を聴取する場面で、反応時間や車両のふらつきがどのように変化するかを計測する。また、計測結果から、ドライバーの状態を推定するパラメータの特定と推定式を確立する。(実験④)

さらに、聴覚負担が高い状態をドライバーへ伝える手段として、視覚刺激を用いることが有効であることを検証するため、実験④で求めた推定式で推定したドライバー状態を視覚刺激で提示するドライバーモニタリングシステムを構築し、効果検証を行った結果について考察する(実験⑤)。

### 5.3. 警報音に対する反応時間を推定する手法

本節では、ドライバーのステアリング操作に着目し、ステアリング操舵角を計測してドライバーの状態を推定する手法を提案する。事前に、実験参加者2名による予備実験においてドライバーの運転行動を観察したところ、発話中に手が止まり、再度ステアリングを動かす傾向が特徴として見られた。ステアリングの角度自体は運転に集中した場合と差は見られなかったが、修正操舵のためのステアリングの急な動きがランダムに発生しやすい特徴が目視で確認された。

福井<sup>41)</sup>は、ドライバーの操舵機能の低下を検出するために修正操舵に着目し、操舵角データから高周波成分をフィルタで抽出して修正操舵の有無を検出している。しかし、フィルタの使用によってドライバーの修正操舵の発生有無は抽出可能になるが、ドライバーの操舵機能が低下する程度を数値で抽出することは困難である。

ドライバーの警報音に対する反応時間を推定するためには、数値で出力することが重要である。そのため、本研究ではドライバーの操舵機能が低下する程度を数値で抽出するために、フィルタを用いずに操舵角の変化を直接測る方策を検討した。ここで、操舵角の変化を直接測る手法として、操舵角の振幅を測る方法や操舵角の振幅の偏差を測る方法、操舵角速度を測る方法が考えられるが、操舵角の振幅および振幅の偏差を測る方法は、車両の走行状態によって値が変化するため適用が困難である。また、操舵角速度を測る方法は、ドライバーの修正操舵において操舵角が変化する傾きが大きくても、操舵角の変化量が小さい場合には操舵角速度が小さくなり、ドライバーの操舵機能の低下を正確に把握するのが困難となる。

そこで、本研究では、ドライバーの修正操舵において操舵角の変化量によらず、操舵角の傾きの大きさを数値化が可能な操舵角の基本周波数に着目した。特に、修正操舵の頻度は基本周波数の偏差に影響するため、基本周波数の偏差からドライバーの操舵機能の低下度合を数値化し、ドライバー状態を推定する手法を検討した。本研究で対象とする直線走行場面においては、通常は基本周波数が低いまま推移するが、時折路面変化や横風などによって修正操舵を必要とする場面がある。また、直線走行において車両がわずかにでも進行方向よりずれたまま走行した場合がある。本研究ではドライビングシミュレータによる実験を行うため、主に車両の進行方向が道路の方向よ

りずれたまま走行した状態を修正することで、基本周波数が瞬間的に高くなる場面が生じる。この現象は運転スキルによる発生頻度の差はあるものの、車両の進行方向が道路の方向と厳密に一致しない限りはどのドライバーでも修正操舵を必要とするため、評価指標として適用可能と考えた。

ここで、本研究においては、操舵角の基本周波数を求める手法として FFT(高速フーリエ変換)を適用した。DS では操舵角をサンプリング周波数 120Hz で計測しており、可能な範囲で最も短い解析区間で 0.25Hz 以上の分解能を求めるために、解析対象となる時間窓のポイント数を 512 点(約 4.4sec.)とし、データ両端のゼロ詰めポイント数を 1024 点に増やして周波数スペクトルの分解能を約 0.12Hz とした。なお、解析対象となる時間窓のポイント数をこれ以上短くすると周波数スペクトルの分解能が低下してゼロ詰めによるデータの信頼性が低下すること、逆に時間窓を長くするとスペクトルが平均化されてドライバー状態を推定する感度が低下する点を考慮して、予備実験の結果を基に上記の解析条件と定めた。また、田中らの先行研究では 0.1Hz 単位で基本周波数成分を求めており、より微小な変化として表れることを想定して、基本周波数を 0.01Hz 単位で求めるために周波数補間公式を適用することとした。

周波数補間公式には、Pade の周波数補間公式<sup>42)43)</sup>を用いる方法などが挙げられるが、周波数領域での総和など処理が複雑になるため、リアルタイム処理を考慮すると計算量の多さがネックとなる。そのため、本研究では、ハニング窓を利用する前提で式(1)のみで周波数を補間したピーク周波数の算出が可能な、高澤の周波数補間公式<sup>44)</sup>を適用した。この公式は、Fig.5-1 のような周波数スペクトルにおいて、ハニング窓の適用と式(1)で容易に算出できる。ここで、 $m$  は本来の周波数ピークの直前にある FFT の周波数成分であり、周波数ピーク的位置を示す  $m$  からの周波数オフセット  $\beta$  は、周波数  $m$  と  $m+1$  の各パワー  $r_m$  と  $r_{m+1}$  から求められる。

$$f=m+\beta=m+(3/(1+r_m/r_{m+1}))-1 \quad (1)$$

なお、操舵していない時間窓の区間で最も大きいスペクトルが 0Hz(DC 成分)となる場合は基本周波数 0Hz として算出した。この手法を用いて、実験参加者毎に Fig.5-2 のように解析対象の時間窓 4.4sec. で基本周波数を算出、試行毎に時間窓を 120 ポイントずつずらしながら複数の基本周波数を求めて基本周波数の平均と偏差を求めた。その後、実験参加者毎に求めた偏差の平均を求めた。そして、上記手法で推定した聴覚刺激反応時間を伝える手段として、運転中の主要な情報を取得する視覚への刺激に着目する。田ノ上ら<sup>45)</sup>は、数値による平均燃費を 1sec. 間隔で提示することで、周囲への注意配分を損なわずにドライバーの燃費改善に効果があることを示している。一方、視覚刺激の手段として、数値表示より直感的なメーター盤面の色変化によるアンビエ

ント表示も実用化されている<sup>46)</sup>。本研究では、運転中に運転以外のタスク処理が得意ではないドライバーに適用することを考慮し、4章に示す、より直感的に理解しやすいアンビエント表示で聴覚刺激反応時間を提示するシステムを適用した。

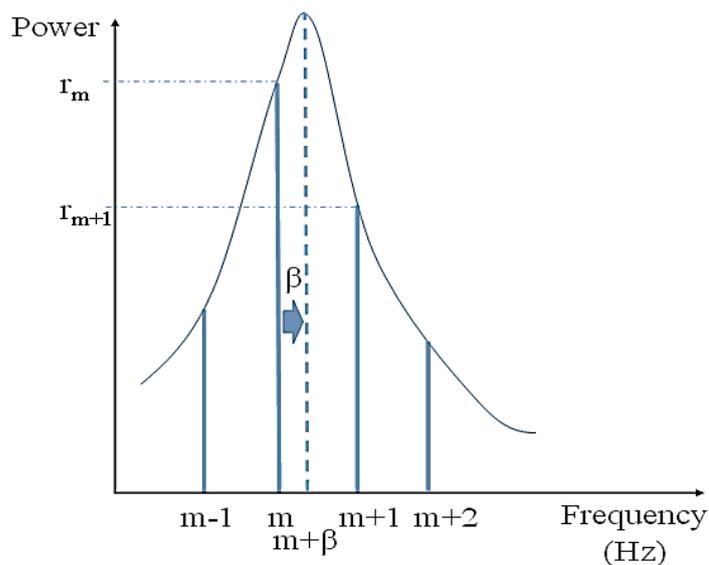


Fig.5-1 Frequency Interpolation<sup>30)</sup>

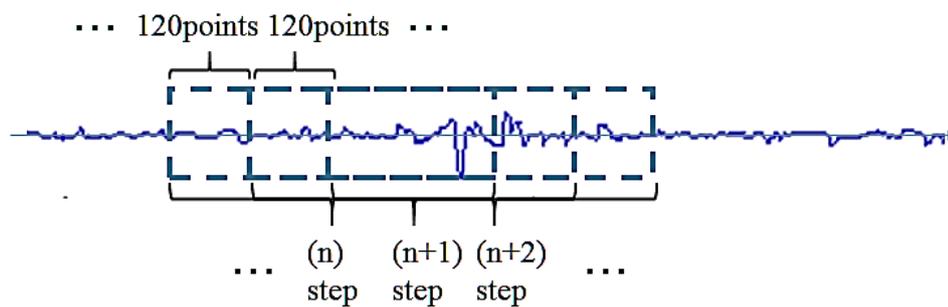


Fig.5-2 FFT time window for steering angle data

## 5.4. ドライバー状態推定式検討実験(実験④)

### 5.4.1. 対象および方法

聴覚刺激反応時間と関連するパラメータを明確にするため、ドライバーが運転中に音声操作を利用しながら車室内から提示される警報音を聴取する場面において、聴覚刺激への反応時間と運転への影響を DS 実験で検証し、実験結果の解析からドライバーの状態推定式を検討した。

#### (1) 実験参加者

実験参加者は、運転免許を保有する 10 名(男性 7 名, 女性 3 名. 内, 20 歳代男性 5 名, 40 歳代男性 2 名, 女性 3 名, 50 歳代男性 1 名)が参加した. 全員, 事前に刺激提示に対する反応時間と DS での運転習熟の練習を行った上で実験を実施した. 実験時間は, 1 人あたり 120 分で, 途中適宜休憩を設けた. また, 本実験は電気通信大学における人間を対象とする実験に関する倫理規定に基づき, 安全と実験に配慮した形で計画, 事前承認を得た上で実施した.

#### (2) サブタスク

実験④では, カーナビにおける目的地までの経路設定を音声操作で行う行為をサブタスクとして用いた. サブタスクは, Table 5-1 に示す負荷の異なる 5 つのサブタスクを課した. サブタスクは, 聴覚刺激反応時間の計測が完了するまで繰り返し試行してもらった. サブタスク C)と D)では, 試行毎の操作負荷を平準化するため毎回異なる目的地とするよう実験参加者へ教示した. サブタスク E)は音声操作によるジャンル検索, 視認による検索候補の確認, 再び音声操作で目的地設定という 3 種類の行為を連続で行わせるため, 最も操作負荷が高いとタスクとして適用した.

Table 5-1 Subtasks

	Subtask	Device	Number of interaction	Total Task Time (sec.)
A)	Driving only			
B)	Set destination to my home	Navigation system	1	15
C)	Set destination to nearby landmark	Navigation system	5	70
D)	Set destination to address	Navigation system	7	85
E)	Search and set destination to landmark	Smartphone	3	95

### (3) 刺激提示装置

刺激提示装置は、ステレオスピーカ 2 セットを運転席のヘッドレストから前後約 1 m の位置に配置して、聴覚刺激を約 5~15sec.程度の間隔でランダムに提示した。また、聴覚刺激の音色は、基本周波数 1100Hz の矩形波に 2200Hz の正弦波を付加した警報音を、ドライバー耳元の音圧約 71~72dBA、周期 125msec.で 1sec.間提示した。左右方向の音像は、左右の音圧差 18dBA、時間差 2msec.で表現した。DS のアイドリング時の音圧は約 56dBA、80km/h 巡航での走行音の音圧は約 62dBA であった。また、サブタスク試行中に、ドライバーの右前、左前、右後、左後、正面、背後からそれぞれ 3 回ずつ、計 18 回聴覚刺激が提示され、音像の方向を認知するまでの時間を聴覚刺激反応時間として計測した。サブタスクの試行時間は平均 3 分半である。なお、本研究では聴覚刺激反応時間は、全ての音像に対する反応時間の平均と偏差を求めた。

### (4) 実験条件

電気通信大学内にある定置型 DS に、聴覚刺激の提示と反応時間の計測を行うシステムを搭載した。使用した DS のコースは、全長 100km の 2 車線コース、車線幅は 1 車線あたり 3.5m である。本研究の実験では、左側車線を走行車線として使用した。聴覚刺激は、車線逸脱警報や後側方車両衝突警報を模擬した警報音を、ドライバーの四隅と正面、背後の 6 方向に音像を定位させて提示した。実験参加者には直線コースを先行車に 80km/h で追従しながら Table 5-1 のタスクを課し、その間のハンドルやブレーキの操作、車両のふらつきを求めるために必要な車両の走行位置を計測した。また、実験参加者には、聴覚刺激の音像の方向を認知したら右手親指上に装着したタクトスイッチをステアリング上に押しつけて反応するよう教示した。なお、各実験タスクの前に、停車状態で各タスクの操作を習熟してもらった後に計測を実施した。

本実験では、音声操作機能を搭載したカーナビゲーションシステムを用いた。また、操作負荷が高いタスクとしてスマートフォン音声操作によるジャンル検索と目的地設定を連続で行わせるため、音声による Web 検索が可能なアプリケーション (Google アプリ) を画面サイズ 4.7 インチのスマートフォンにインストールして実験に用いた。スマートフォンの画面の向きは、情報検索性と音声操作の起動ボタンの押しやすさを考慮して縦長画面とした。これらの機器の画面は、DS のオートマチックシフトレバー前付近に設置し、ドライバーは左手で操作出来るようにした。また、アイポイントからナビゲーションシステムの画面中心およびスマートフォンの画面中心までの下方角は、JIS D0021 で規定されるドライバーのアイポイントから下方角約 30°の位置に調整した。なお、本実験における手操作は、全てタッチパネル操作で統一した。

第3章では、運転中の機器操作の複雑さが高まるにつれて、運転操作に対する不安感を感じやすくなる傾向があることを示している。そのため、本研究では、各タスクを実施後に、実験参加者に対して運転操作に対する安心感を5段階で相対評価してもらった。その際、実験参加者の運転スキル差による評点のバラツキを減らすことを考慮し、ナビ操作なしで運転に集中しているサブタスク A)での走行時を5点、運転中の許容限界を3点として評価してもらうよう教示した。

本章の有意差検定は、各データ間のt検定を行った後、サブタスク間など複数の群間で多重比較を行うために Tukey-Kramer 法も適用した<sup>47)</sup>。

## 5.4.2. 実験結果

聴覚刺激に対する反応時間の結果を Fig.5-3 に示す。聴覚刺激に対する反応時間は、音声操作タスクの負荷により有意な差が見られ、負荷が低い B) から、負荷が高い E) になるにつれて長くなりやすい傾向が見られた。また運転操作に対する安心感を Fig.5-4 に示す。音声操作によるサブタスクが不安感を生むことがわかるが、中でも探索を伴うスマートフォンを使ったサブタスク E) が特に不安感が高く、目的地を設定するだけのナビゲーションシステムによるサブタスク B)~D) は、それに比べれば不安を

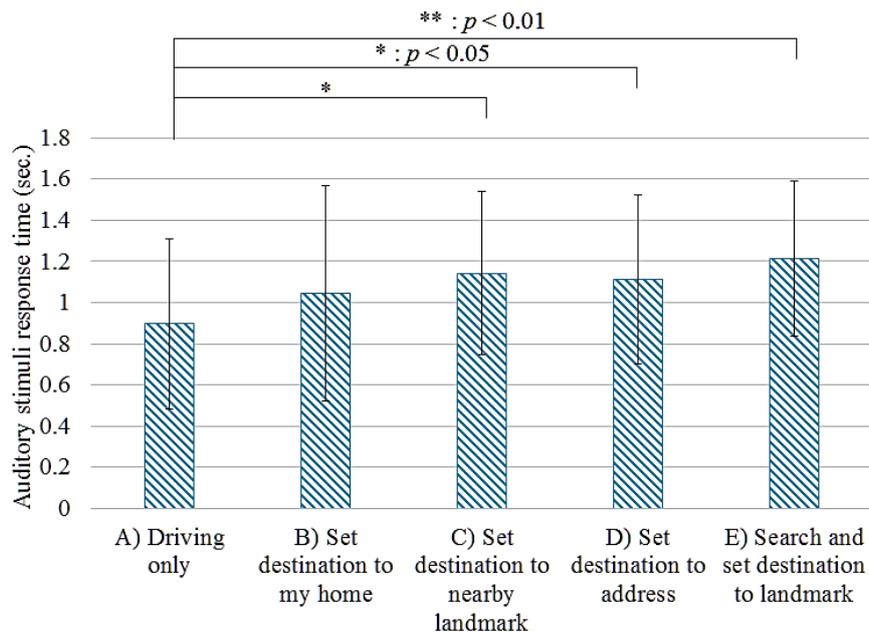


Fig.5-3 Auditory stimuli response time (experiment 1)

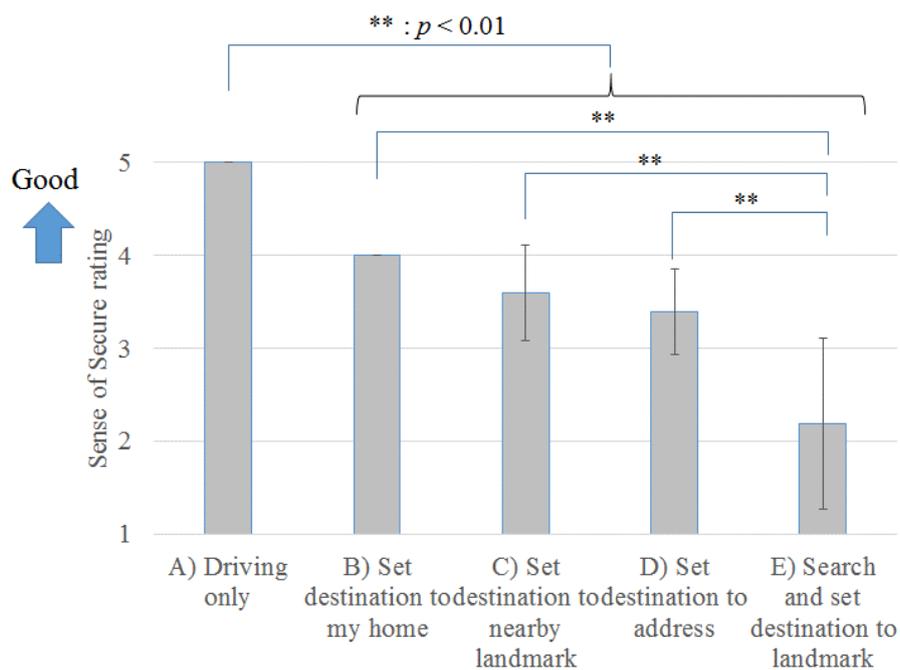


Fig.5-4 Sense of Secure Rating (experiment 1)

感じにくい傾向が見られた。各サブタスクにおける操舵角の標準偏差を Fig.5-5、同様に操舵角の基本周波数の標準偏差を Fig.5-6、自車両のふらつきを表す車線内の横位置偏差を Fig.5-7 に示す。Fig.5-5 から、タスクの負荷が高いサブタスク E)では平均操舵角の偏差が他のタスクと比べて有意に大きくなることが示された。また、Fig.5-6 から、音声操作中は運転に集中しているサブタスク A)と比べて平均操舵角基本周波数の偏差が有意に小さくなる傾向が示された。車線内横位置偏差(Fig.5-7)は、ナビゲーションシステムの音声操作は運転への影響が現れにくく、第3章の実験①と同じ傾向が見られた。また、タスク E)は他タスクと比べて、車両横位置の偏差が有意に拡大した。

一方、運転操作と聴覚刺激反応時間の関係を知るため、Fig.5-5～5-6 の各指標と聴覚刺激反応時間との相関関係を求めた(Table 5-2)。この結果から、聴覚刺激反応時間との相関関係が高いのは、操舵角基本周波数の偏差であることが示された。また、操舵角基本周波数偏差と聴覚刺激反応時間の関係を示すグラフと回帰式(Fig.5-8)から、操舵角の基本周波数偏差から、運転中の音声操作におけるドライバーの聴覚刺激反応時間は操舵角の基本周波数偏差から予測可能であることが示された。なお、本回帰式

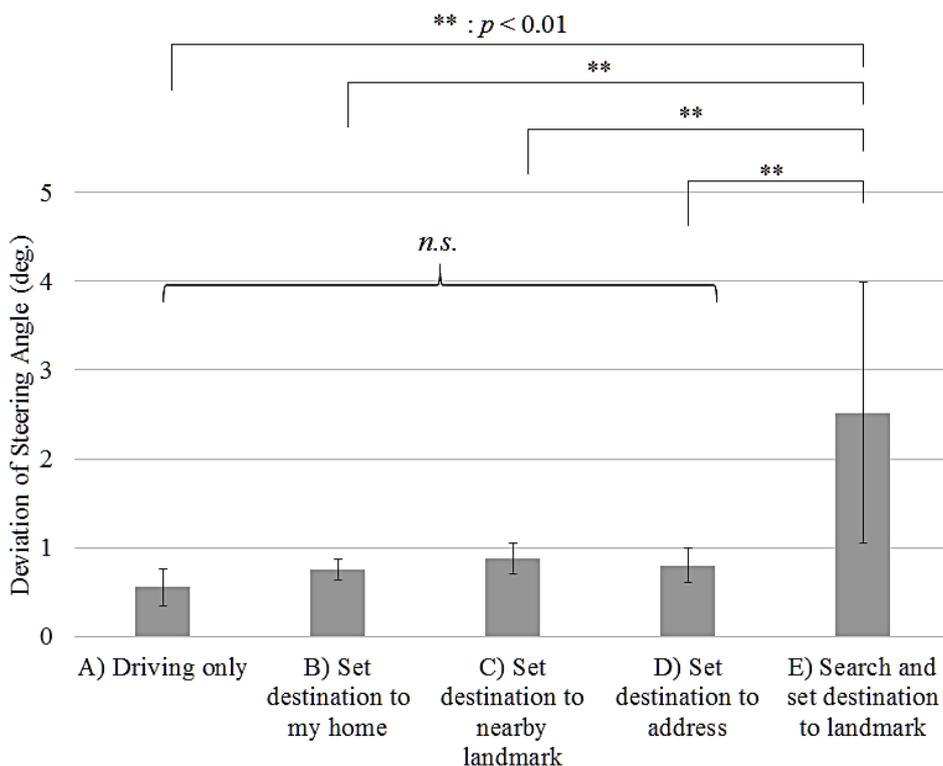


Fig.5-5 Deviation of steering angle (experiment 1)

において、音声操作中と運転のみに集中した状態を識別出来るようにするため、A)の点を付加した状態で回帰式を作成しているが、音声操作のみのデータ4点でも、音声操作中の負荷の大小を推定することは可能であると考えられる。

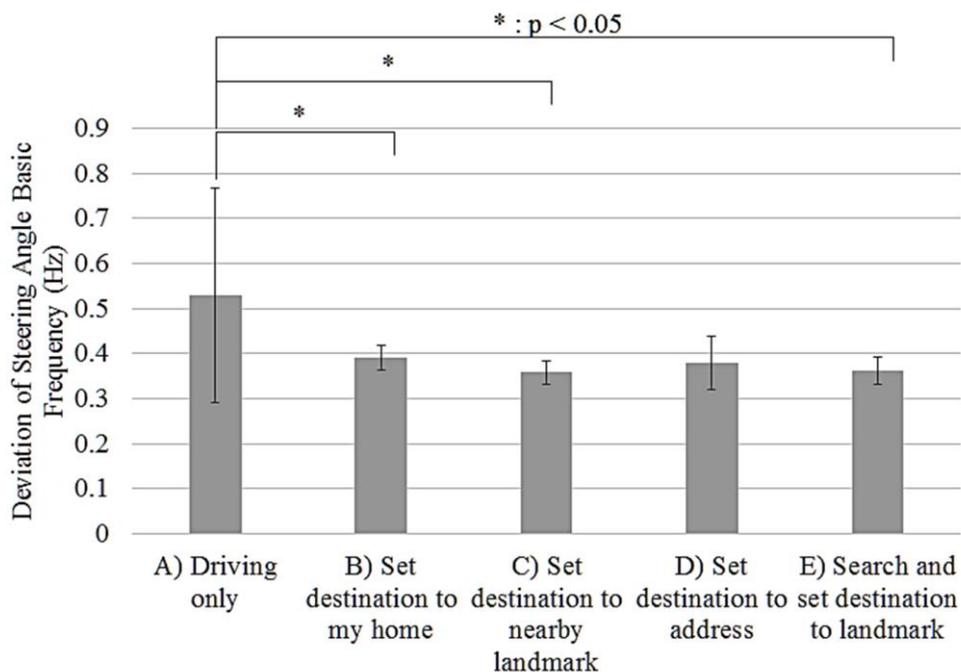


Fig.5-6 Deviation of steering angle basic frequency (experiment 1)

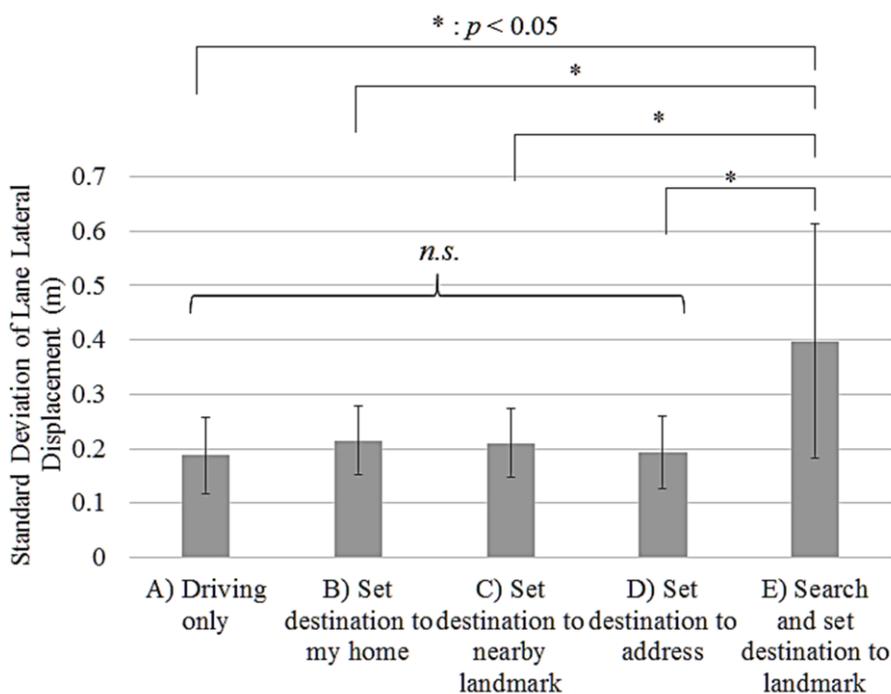
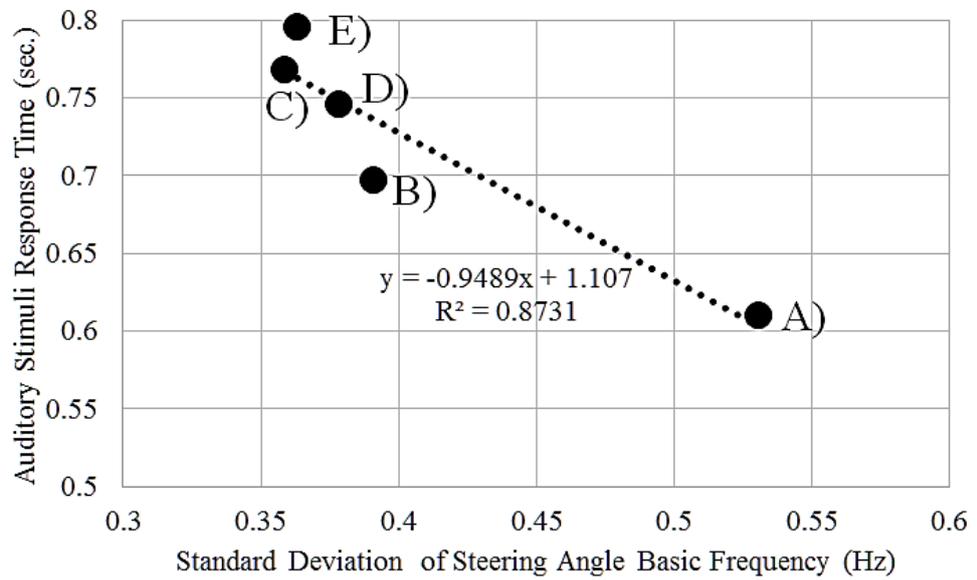


Fig.5-7 Standard deviation of lane lateral displacement (experiment 1)

**Table 5-2 Correlation of steering angle parameters and auditory stimuli response time**

Steering Angle ( $1\sigma$ )	Steering Angle Basic Freq. ( $1\sigma$ )
0.67	-0.93



**Fig.5-8 Relationship of steering angle basic frequency deviation and auditory stimuli response time**

## 5.5. ドライバー状態推定技術の開発

### 5.5.1. ドライバー状態推定技術の概念

実験④の結果を受けて、ドライバーの音声操作中における聴覚刺激反応時間の増加を抑えるための方策を考える。ドライバーの音声操作中は、聴覚に注意リソースが多く配分されているが、同時に、運転操作に必要な他の感覚への注意リソースも配分されている。そのため、聴覚以外の感覚を用いた刺激提示により、聴覚刺激反応時間をドライバーへ提示する方法を検討する。第3章の実験①の結果は、ドライバーのナビゲーションシステムの音声操作中において、視覚刺激に対する反応時間が手操作より短いことを示している。そのため、ドライバーの注意配分を改善することを目的に、以下の2つの技術から構成されるドライバー状態推定技術を検討する。

- (1)音声操作中の聴覚負担を推定する手法の実現
- (2)推定した聴覚負担を視覚刺激で提示する手法の実現

### 5.5.2. 音声操作中の聴覚負担を推定する手法

音声操作中の聴覚負担をリアルタイムで推定するために、ドライバー状態を推定するシステムが Fig.5-9 の手順で過去の操舵角データからステアリング操舵角の基本周波数偏差をリアルタイムで算出する手法を実現した。

操舵基本周波数データキューの解析対象区間を決定する際に、本研究の実験では、5～10sec.のランダムな間隔で聴覚刺激を提示していることを考慮した。本推定技術では、直前の聴覚刺激に反応してから次の聴覚刺激が提示されるまでの最長時間である過去 10sec.間をステアリング操舵角の解析対象とした。

### 5.5.3. 推定した聴覚負担を視覚刺激で提示する手法

推定された音声操作の聴覚負担を視覚刺激で提示するため、推定された聴覚刺激反応時間をカラーLEDによる光刺激の色変化で提示する手法を実現した。これは、色情報が視覚刺激の中でも情報量が少なく、かつ周辺視でも直感的に把握出来るという特性を考慮したためである。他にも、周辺視で直感的に把握出来る例として、同一色によるバーグラフの面積(例：瞬間燃費計)が挙げられるが、本研究では、色が本来持つ直感的な状態表現の意味(赤：警告、緑：良好)を考慮して、色表現を採用した。

ここで、カラーLEDはメーター内の上端中央、上端左右の計3か所に設置した。これにより、ドライバーの視線が車両前方やナビ画面を向いていても周辺視でLEDの

色変化を直観的に把握出来ることを可能にした。カラーLEDの輝度は、室内の照度でも眩しくないよう、カラーLEDの設計仕様から電流値を調整して約10cd/m<sup>2</sup>に合わせた。

また、ドライバーの聴覚刺激反応時間の推定値が運転に集中した状態から増加すると、輝度を一定に保ちながらカラーLEDの色を緑色から赤色へ段階的に変化するようにした。

#### 5.5.4. ドライバーモニタシステムの妥当性検証

以上の技術を組み合わせて、ドライバー状態を推定してドライバーへ提示するためのドライバーモニタシステムを構築した。

ここで、Fig.5-8 で得られたドライバーモニタシステムの推定式に着目すると、ステアリング操作に影響する操舵反力特性が異なる車両でも同一の推定式が適用可能かどうかを検証する必要がある。また、ドライバーモニタシステムが運転以外のタスク処理との両立が得意ではないドライバーに適用して効果が得られることも検証する必要がある。

そのため、実験④で取得した実験データから、Fig.5-3 で示されたサブタスク E)の聴覚刺激反応時間の平均値が、サブタスク A)と比べて0.5sec.以上増加した6名分のデータを用いて、Fig.5-10 に示す3仕様の推定式を構築した。この推定式は、運転に集

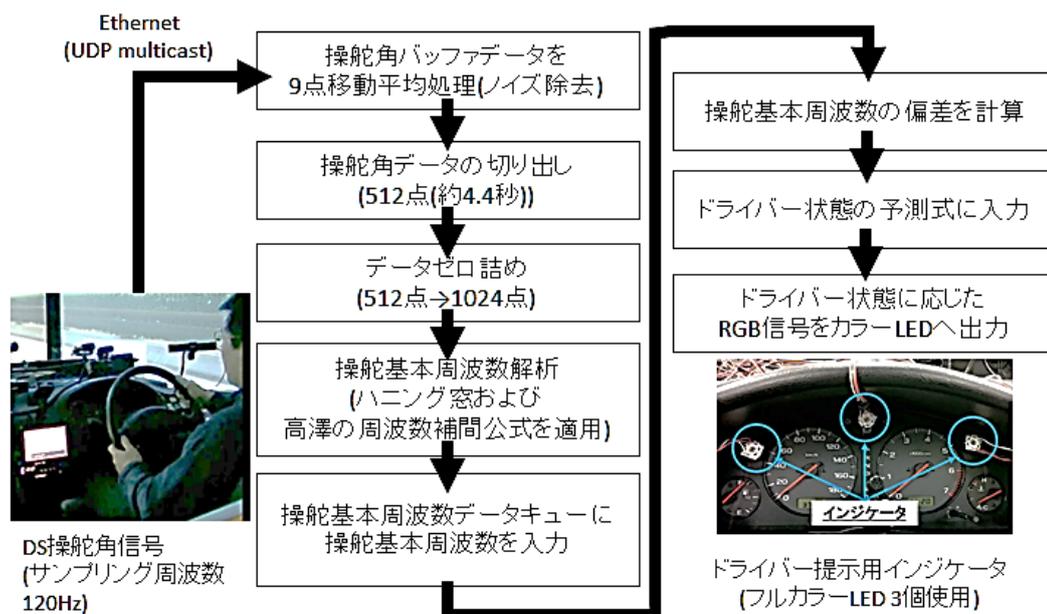


Fig.5-9 Flow chart of driver monitor

中した場合と、音声操作負荷が大きい場合のドライバー状態を明確に推定するために適用する。

仕様Ⅰは、実験④の計測データを用いて、運転に集中した場合を表すサブタスク A)と、サブタスクの総操作時間が長く操作負荷が大きいサブタスク D)と E)の3種類を用いた推定式である。

一方、仕様Ⅱと仕様Ⅲは、ステアリングの操舵反力特性が車両によって異なる場合に、ドライバーの運転行動が変化する可能性を考慮して作成した。その背景として、実験④を実施した後、DSの操舵反力装置の改修によって、ステアリングの中立位置から±5°の操舵反力が平均で3Nから2Nに減少した。これより、直線走行時に操舵角がふらつきやすくなり、仕様ⅠではカラーLEDの色変化が不安定になる可能性がある。そのため、仕様Ⅱは、仕様Ⅰに対して推定式の傾きを操舵反力の減少率に近い3/4にした。また、実験条件の1つとして、傾きを仕様Ⅰの1/2まで小さくにした仕様Ⅲも作成した。

なお、ここでデータを適用した6名は、最も音声操作負荷が高いサブタスク E)とサブタスク A)の聴覚刺激反応時間の差が、サブタスク A)の標準偏差である約0.5sec.を超えていた。そのため、この6名を運転と音声操作の両立が難しいドライバーと定義して、ドライバーモニタシステムの効果を検証する対象者のデータと仮定した。

実験⑤では、上記3仕様のドライバー状態推定式にドライバーモニタ未使用条件を加えた計4条件において、ドライバー状態推定式の妥当性を検証することとした。

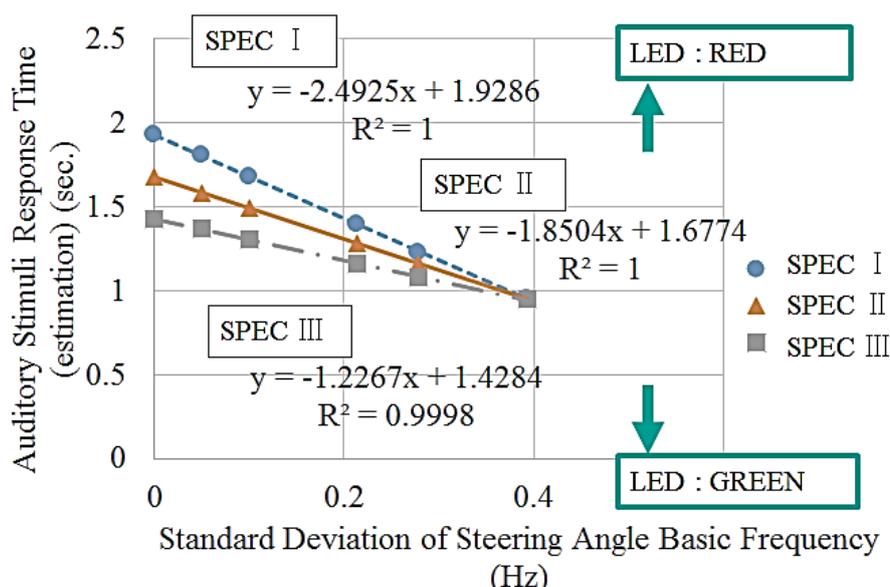


Fig.5-10 Specification of auditory stimuli response time estimation

## 5.6. ドライバー状態推定式評価実験(実験⑤)

### 5.6.1. 対象および方法

実験⑤は、ドライバーモニタの適用によって、ドライバーの注視資源の配分が聴覚に集中しすぎず、警報音への反応時間が低減する効果を明らかにするための計測実験を実施した。

#### (1) 実験参加者

実験参加者は、運転免許を保有する12名(男性11名、女性1名。内、20歳代男性8名、40歳代男性3名、女性1名)が参加した。実験④と同様に、刺激提示に対する反応とDSでの運転習熟の練習を行った上で実験を実施した。また、停車状態で各タスクの操作を習熟してもらった後に計測した。実験時間は、1人あたり約90分で、途中適宜休憩を設けた。なお、本実験は電気通信大学における人間を対象とする実験に関する倫理規定に基づき、安全と実験に配慮した形で計画、事前承認を得た上で実施した。

#### (2) サブタスク

サブタスクは実験④と同じTable 5-1を適用した。ただし、実験時間短縮のため、サブタスクは実験④でインタラクション回数および実験結果がサブタスクD)に近かったサブタスクC)を削除して実施した。

#### (3) 実験条件

走行条件、サブタスクの習熟および反応方法は実験④と同じとした。一方、実験⑤ではメーター内にドライバー状態を推定するためのカラーLEDが装着されているが、運転操作への不安と無関係に変動するとドライバーがシステムを信頼しなくなり、聴覚刺激反応時間の短縮や車両のふらつき減少などの効果が得られにくくなる可能性がある。これを検証するため、実験④で用いた運転操作に対する安心感の他に、ドライバーモニタの告知タイミングの適切さに関する官能評価項目を追加した。評点は、タイミングが丁度良い場合を0点とし、+1点：告知タイミングが早い、+2点：告知タイミングが早すぎる、-1点：告知タイミングが遅い、-2点：告知タイミングが遅すぎる、の5段階評価とした。

なお、実験⑤におけるドライバーモニタの仕様Ⅰ～Ⅲの提示順はランダムとした。また、実験参加者に対しては「カラーLEDの色変化は直進走行の運転に対する集中度合を表している」ことを教示し、聴覚刺激への反応に注意が偏らないよう配慮した。

また、実験結果の有意差検定は、実験④と同様にサブタスク間など複数の群間で多重比較を考慮して、Tukey-Kramer 法を適用した<sup>47)</sup>。

### 5.6.2. 実験結果

聴覚刺激反応時間の結果を Fig.5-11 に示す。この結果、ドライバー状態推定式の仕様Ⅱにおいて、明らかな有意差ではないが、全てのタスクで他の仕様と比べて平均反応時間が短く、運転に集中したサブタスク A)に近づく傾向が示された。また、車両のふらつきに関する結果を Fig.5-12 に示す。全てのサブタスク間、およびドライバーモニタの仕様間で有意差は見られなかったが、ドライバー状態推定式の仕様Ⅱにおいて、いずれのサブタスクでも車両のふらつきが総じて小さい結果が得られた。運転操作に対する不安感の結果(Fig.5-13)から、ドライバーモニタを適用することによって、不安感の評点が1点程度向上し、不安感を感じにくくなる傾向が見られた。また、仕様Ⅱは、どのサブタスクにおいてもドライバーモニタを使用していない場合と比べて有意に不安感を感じにくくなる結果も示された。また、ドライバーモニタの告知タイミングの適切さの評価結果を Fig.5-14 に示す。仕様Ⅱが3種類の仕様の中で最も適切であることが示された。

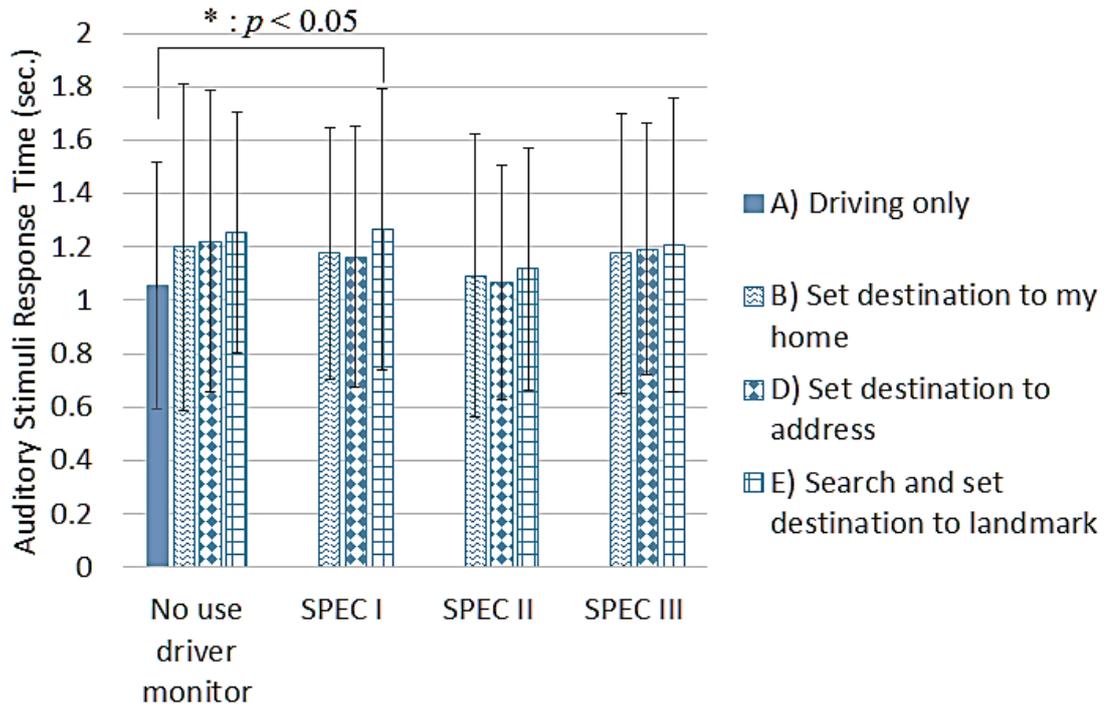


Fig.5-11 Auditory stimuli response time (experiment 2)

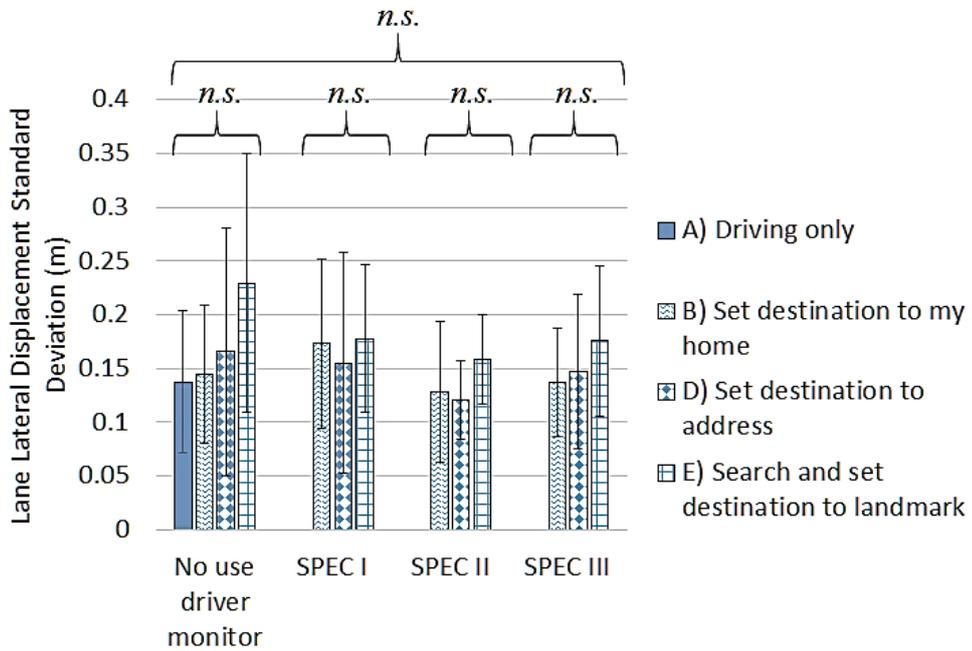


Fig.5-12 Lane lateral displacement (1SD) (experiment 2)

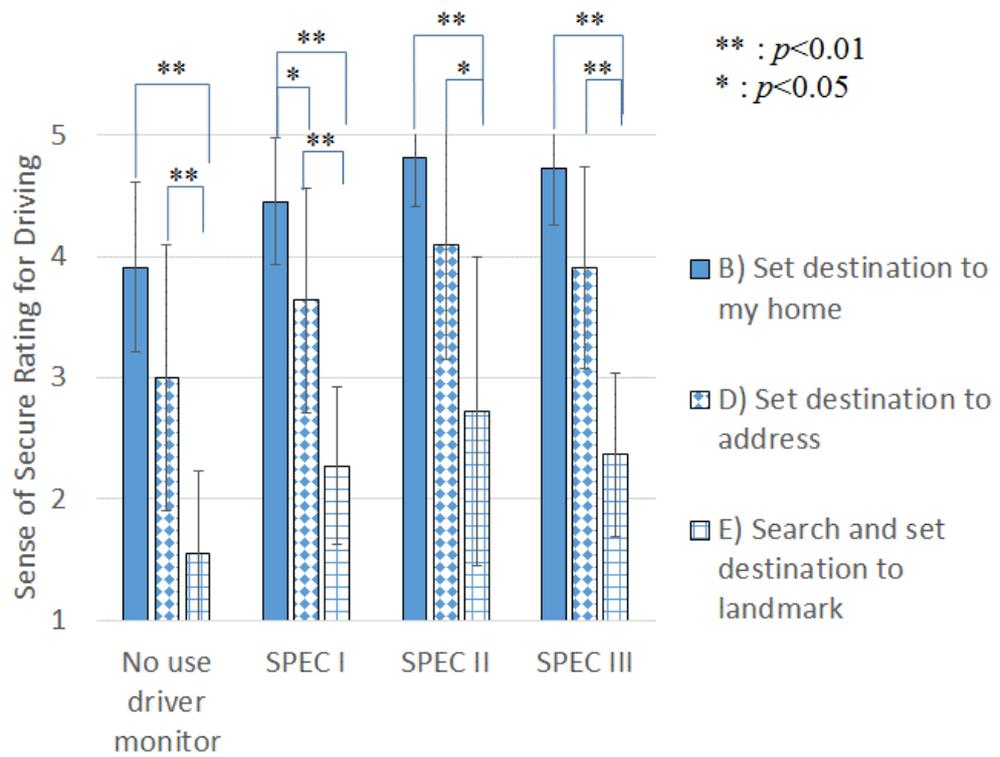


Fig.5-13 Sense of Secure Rating (experiment 2)

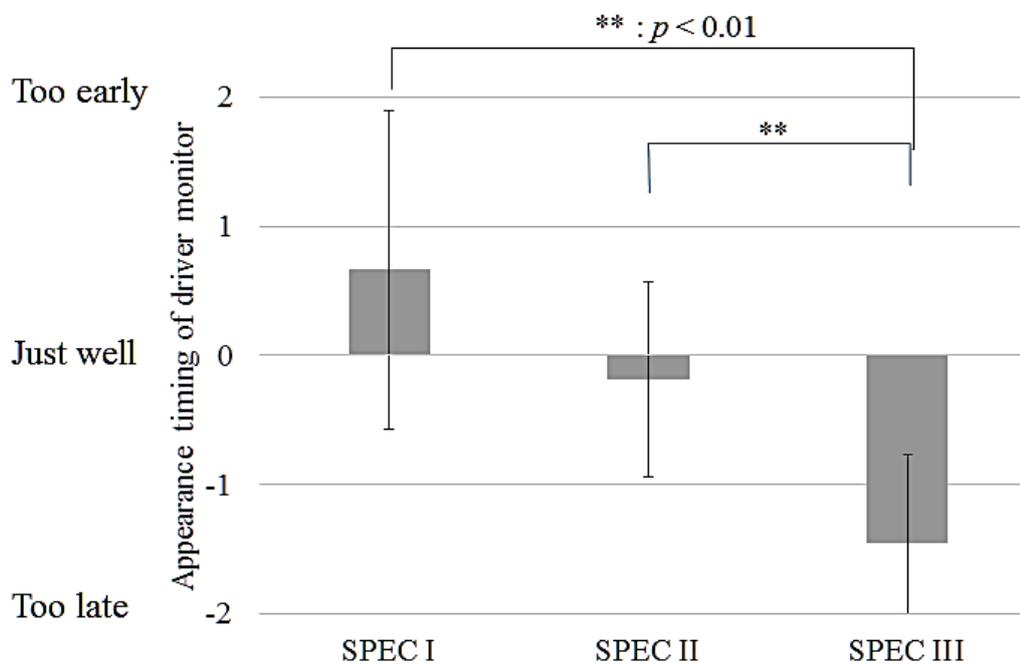


Fig.5-14 Appearance timing of driver monitor

## 5.7. 考察

### 5.7.1. ドライバー状態推定手法の妥当性

実験④において、Fig.5-4の実験結果から、ドライバーは、音声操作中において運転操作に対する不安感を感じにくい、サブタスク E)のように画面を注視する頻度が多い場合は、音声操作でも、ナビゲーションシステムの手操作と同様に、運転操作に対する不安を感じやすくなると推測される。

また、操舵角基本周波数偏差と聴覚刺激反応時間の関係(Fig.5-8)から、運転中の音声発話によって、ドライバーのタスクスイッチングと運転操作への注意資源の配分がうまくいかず、ドライバーが再び運転タスクにスイッチした際に車両の方向を修正するための修正操舵を行う頻度が増えることで、運転に集中した場合と比べて、基本周波数の平均が高くなり、一方で、基本周波数偏差が相対的に減少したものと考えられる(Fig.5-15)。これより、仮説3で示した通り、音声操作の負荷が増えると音像の弁別を考慮した警報音への反応時間が増加したこと、聴覚刺激反応時間が操舵角基本周波数の偏差との相関が高く、聴覚刺激反応時間が操舵角基本周波数から予測可能であることが示された。以上より、ドライバーの聴覚刺激反応時間を操舵角基本周波数の偏差によって推定可能であると考えられる。

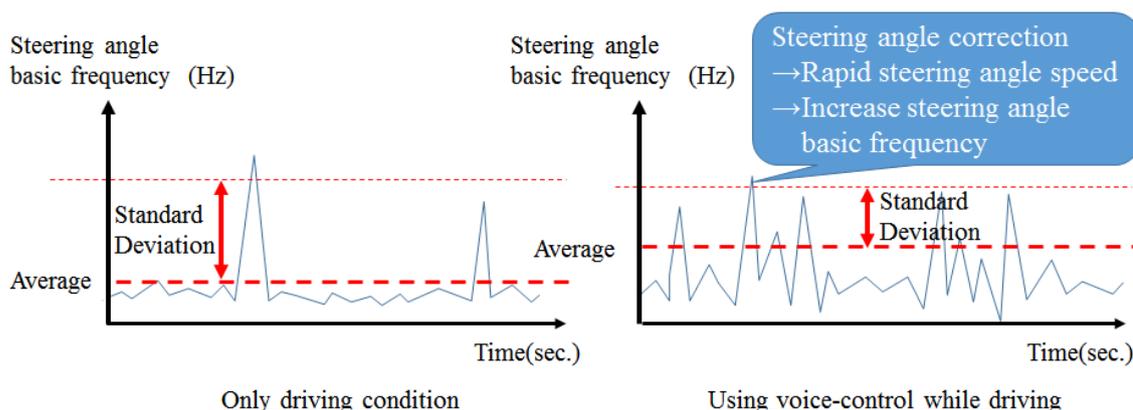


Fig. 5-15 Variation of steering angle fundamental frequency for using voice activation system while driving

## 5.7.2. 視覚刺激によるドライバー状態提示の有効性

実験⑤において、Fig.5-11 の仕様Ⅱにおける聴覚刺激反応時間より、運転と音声操作の両立が難しいドライバーがドライバーモニタの告知を信頼して、聴覚刺激に対する注意配分を調整したことで、ドライバーモニタを使用しない場合と比べて反応時間が短縮したものと考えられる。ここで、実験④と比べて平均値が 0.3 点程度上昇しているのは、運転経験が浅い 20 代の実験参加者の割合増加の影響と考えられる。更に、Fig.5-13 の官能評価の結果は、ドライバーモニタで注意配分状態を可視化することにより、ドライバーが自発的にタスクスイッチングおよび注意資源の配分を調整して、運転への不安を感じにくくなったことが影響していると考えられる。

また、Fig.5-14 の結果を踏まえると、ドライバーが、ドライバーモニタの告知タイミングと運転操作に対する不安感を自覚するタイミングが合っていると感じるとドライバーモニタを信頼するようになり、注意配分を適切に配分して聴覚刺激反応時間の増加を抑え、運転操作に注意してふらつきを抑える結果につながったものと考えられる。更に、音声操作に対する不安感が改善し、聴覚刺激反応時間の増加の抑制や、車両のふらつき低減の効果が見られた。このことから、ドライバーが音声操作を行う際は、音声操作に注意が集中しやすいが、視覚刺激の提示タイミングを適切にすることで注意配分の改善が可能であることが示されたと考えられる。すなわち、仮説 4 は正しいといえる。

また、実験④より求めたドライバー状態推定式の仕様Ⅰよりも、変化の傾きが小さい仕様Ⅱの方が最も反応時間の増加が少なく、運転への影響が小さい結果が示されたことは、DS の操舵反力特性が中立より $\pm 5^\circ$ 付近で実験④より 2/3 程度軽いためドライバーの運転操作の傾向が変わり、結果的にドライバー状態推定式の仕様Ⅱが適切だったためと考えられる。以上より、運転と音声操作の両立が難しいドライバーに対して視覚刺激によって推定されたドライバー状態を適切に示すことは、音声操作中におけるドライバーの聴覚刺激反応時間の増加を抑える上で有効である可能性が示されたと考えられる。

### 5.7.3. ドライバー状態推定手法の妥当性

ドライバーの音声操作におけるドライバー状態への影響は、音像の弁別を考慮した警報音への反応時間の増加として確認された。一方、警報音への反応時間は、ステアリングの操舵角から予測可能であり、予測した結果を LED の色変化による視覚刺激で適切に示すことで、警報音への反応時間の増加が抑制できる効果が見られた。以上より、本研究におけるステアリング操舵角の基本周波数偏差を用いたドライバー状態推定手法は、運転と音声操作の両立が難しいドライバーが運転中に音声操作を利用する場面において有効であると考えられる。

## 5.8. まとめ

本章では、ドライバーが直線走行中に音声操作を行った際における音像の弁別を考慮した警報音への反応時間について、ドライビングシミュレータ実験で検証した。結果、音声操作の総操作時間の増加につれて警報音への反応時間が長くなることが示された。

また、ステアリング操舵角の基本周波数偏差から警報音への反応時間が推定可能であることが示された。

さらに、ドライバーモニタによってリアルタイムで警報音への反応時間を推定して、これを基にドライバーが警報音に反応しやすいかどうかを色変化で提示する効果についてドライビングシミュレータ実験で検証した。結果、音声操作中に、ドライバーモニタで示された色が変わるタイミングと、ドライバーが運転操作に不安を感じたタイミングが近いと、警報音への反応時間が運転のみの場合に近づく結果が示された。

以上より、本研究におけるステアリング操舵角の基本周波数偏差による警報音への反応時間の推定とそれに基づく色変化の視覚刺激による提示を組み合わせた手法を用いることで、音声操作中の警報音聴取と音声操作を両立できるように注意資源の配分の仕方を改善する効果があると考えられる。

## 第6章 結論

### 6.1. 音声操作の利便性向上と安全性確保方策について

本研究の実験結果から得られた知見を箇条書きでまとめて以下に示す.

- A) 音声操作は、運転姿勢変化が少なく、車両のふらつきや車線逸脱のような運転への影響が表れにくい(第3章 実験①)
- B) しかし、音声操作中は車両周辺の視覚情報取得量が有意に減少するため、運転に必要な視覚情報を利用する観点では影響が表れる可能性がある(第3章 実験②)
- C) 警報音の聴取において、警報音に音像表現を付加することで、ドライバーがリスク方向を直接確認するようになり、認知反応時間が短縮する可能性がある(第4章 実験③-3)
- D) 音声操作と警報音の聴取が同時に発生する場合は、警報音への反応時間が長くなり、C)で示した認知反応時間を短縮した効果が相殺される可能性がある(第5章 実験④)
- E) 音声操作中におけるドライバーが警報音に反応する反応時間は、過去10sec.間のステアリング操舵の基本周波数を統計処理して標準偏差を求めることで推定できる(第5章 実験④)
- F) E)の推定結果を用いて、ドライバーへ色変化による視覚刺激で運転に集中している状態かどうかを示すことで、ドライバーが音声操作中に注意配分を意識的に変えるきっかけとなり、D)に示す警報音の認知反応時間の増加を抑えることができる(第5章 実験⑤)

音声操作は同乗者との会話と同様のやりとりでカーナビを操作する。Klauerらの先行研究において、会話タスクにおける事故リスクの相対比率が他タスクと比べて低いことが示されている<sup>48)</sup>が、B)で示したように、視覚情報の取得量自体は運転のみの場合と比べて有意に低下していることから、必ずしも運転のみの場合と同じ安全性とは断言しにくい。また、D)で示したように、音声操作中に警報音が発生した場合は、音像を付加していても反応時間が長くなりやすい。

しかし、E)で示したようにステアリング操舵角周波数の標準偏差からドライバーの警報音に対する反応時間を予測でき、F)の方策によって色情報による視覚情報をドライバーに示すことで、警報音に対する反応時間を運転のみの状態と有意差がない状態に近づけることができる。これらの成果によって、音声操作中に警報音が発生した場合の事故リスクの相対比率が、同乗者との会話並に近づけられると考えられる。

以上より、今後の音声操作機能の技術開発と商品適用において、開発者が意識すべき重要なポイントとして、下記2点が挙げられる。

- I. 「音声操作を適用するだけでは、運転中の機器操作の安全確保は不十分である」
- II. 「運転中に音声操作を積極的に活用するためには、音声操作機能側で、ドライバーの注意配分を適切に管理し、運転への集中を持続させることが重要」

## 6.2. 本研究の成果の実車適用について

本研究は、実験における安全性の観点から、ドライビングシミュレータによる実験が中心であったが、実車での適用も視野に入れて検証を実施した。

まず、音声操作における視覚情報取得量については、実車実験における結果からも、ドライビングシミュレータ実験の結果と同じ傾向であり、視覚情報取得量に有意な差は生じるものの、現在カーナビで運転中に操作が可能な手操作機能と同等以上であることから、本研究成果を実車に適用した際の安全性は、現在以上を確保出来ると考えられる。

また、車室内の着座位置で警報音の音像に対する知覚が異なる現象については、警報音の周波数成分を複数の周波数成分から構成される音色にすることで、着座位置の影響を受けにくく、音像を安定して知覚できることが実車実験で示しており、警報音の音像付加による反応時間の短縮効果は実車でも同様であると考えられる。

更に、ステアリングの中立付近の操舵反力特性が変化した場合は、直進走行における操舵パターンが変わる可能性があるため警報音に対する認知時間の推定式の傾きの変更が必要であり、実車に搭載する場合は、推定式の傾きの設定を変更可能にすることを前提に実車へ適用可能と考えられる。

### 6.3. まとめと今後の展望

以上のことから、自動車の運転中における音声操作と警報音の聴取による安全確保において、次に示す方策を講じることで、安全確保の効果をより高められる。

- 1) 音声操作中における警報音への反応時間を短縮する観点から、ステアリング操舵角の基本周波数偏差を用いてドライバーの状態を推定するドライバーモニタリングシステムを適用する
- 2) 音声操作中にドライバーモニタリングシステムで推定したドライバー状態は、色変化などの直感的に示す視覚情報でドライバーに提示する
- 3) 音声操作中に適用するドライバーモニタリングシステムの推定式は、操舵反力に応じて傾きを変更出来るようにする

本研究の成果は、自動運転機能がより多くの自動車に採用される際に、車室内での機器操作や自動運転機能による安全性を確保しながら、より便利にすることが可能になると考えられる。

### 6.4. 今後の課題

本研究における今後の課題として、カーブ走行場面におけるドライバー状態推定手法の妥当性検証が挙げられる。

各国のディストラクションガイドラインに記載されている評価条件は直線走行場面であり、本研究でも極力カーブ走行場面が少ないコースを用いて評価を実施している。特に、ドライバー状態を推定する手法を検討した第5章では、NHTSAガイドラインに合わせるために、全長100kmの直線コースを作成して、実験に適用した。そのため、カーブ走行場面におけるドライバー状態推定手法の妥当性の検証は、本研究の成果を発展させる上で重要と考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教員の田中健次先生には、大変お忙しい中社会人である私の都合を考慮して頂き、夜遅くのゼミや4月末～5月の長期連休中におけるDS実験の実施に向けた事務手続き、国内外の学会発表、査読論文の投稿、博士論文の作成について、大変きめ細かな御指導を頂きました。また、教員として、そして研究者としての心構えや学生との接し方について様々な御指導を頂き、大変多くのことを学ぶことが出来ました。心から感謝致します。本当にありがとうございました。

博士論文審査をご担当頂いた副指導教員の栗原聡先生をはじめ、大須賀昭彦先生、阪口豊先生、筑波大学 伊藤誠先生には、厳しくも的確なご指導、ご助言を頂きました。心から御礼申し上げます。

副指導教員の岩崎敦先生には、発表の仕方について御指導を頂き、短い文字数で情報を伝える大切さなどを教えて頂きました。心から御礼申し上げます。

大学の卒業研究および修士論文の指導教員だった高澤嘉光先生には、本研究に取り組みきっかけとなる音楽音響学の研究において、5章で用いた周波数解析および周波数補間の技術を教えて頂きました。心から感謝申し上げます。

前職である日産自動車(株)において、本研究テーマの礎となる人間工学分野の業務課題、そして本研究の3章、4章の実験で使用したドライビングシミュレータの導入および実験技術開発業務に携わらせて頂きました美記陽之介氏、吉次律俊氏、久芳憲治氏には、16年間大変お世話になりました。そして、3章と4章の基である査読論文ならびに国際学会発表論文の使用許可を頂いたことと、現職へ快く送り出して頂いたことに心から感謝申し上げます。

産業技術総合研究所の武田裕司先生には、3章の視覚情報取得量に関する実験において、脳波計測に関する専門的な知識や技術を懇切丁寧に教えて頂き、心から御礼申し上げます。

(一社)日本人間工学会の査読者の皆様には、5章の実験データの解析方法等について論文投稿時に懇切丁寧な助言を頂きまして、心から感謝申し上げます。

田中研究室の学生の皆様には、大学院博士後期課程入学後にDSの使用方法や研究生活について御支援を頂きました。心から感謝申し上げます。

現職の(独)国立高等専門学校機構 一関工業高等専門学校 未来創造工学科の教職員の皆様、そして、研究室の学生と岩手連合学生フォーミュラチームのメンバー各位には、着任早々の校務免除や部活動指導の担当日交代等、学位取得に対してご配慮と御支援を頂きました。心から感謝申し上げます。

そして、大学院への入学と現職への転職、単身赴任生活に理解を示し、学費や学業に専念する時間の面で応援し続けてくれた私の家族に、心から感謝申し上げます。

最後に、本博士論文をとおして得られた数多くの経験を大事にして、研究者兼教育者として生涯全う出来るよう、邁進する所存です。

## 参考文献

- 1) Gazoo ; 自動車誕生から今日まで (前編) -よくわかる自動車歴史館 第1話-,  
[https://gazoo.com/car/history/Pages/car\\_history\\_001.aspx](https://gazoo.com/car/history/Pages/car_history_001.aspx) (平成 29 年 3 月 23 日確認)
- 2) 日産自動車株式会社 : 日産 | 安全の取り組み | 安全技術紹介 (クルマでの取り組み) | 危険な状態になりそうな時も安全な状態に戻すようドライバーをサポートします, <http://www.nissan-global.com/JP/SAFETY/INTRODUCTION/RECOVER/> (平成 29 年 3 月 30 日確認)
- 3) 日産自動車株式会社 : What's AUTONOMOUS DRIVE? 自動運転の今と未来,  
<http://www2.nissan.co.jp/AUTONOMOUSDRIVE/06/index.html> (平成 29 年 3 月 30 日確認)
- 4) 内田信行, 浅野陽一, 植田俊彦, 飯星明 : 携帯電話会話時における運転者の注意状態評価について, 国際交通安全学会, IATSS Review Vol.30 No.3, pp.57-65, 2005
- 5) Ranney, Thomas A., et al: NHTSA driver distraction research: Past, present, and future. In: Driver distraction internet forum. 2000
- 6) 一般社団法人 日本自動車工業会 : 画像表示装置の取り扱いについて 改訂第 3.0 版, [http://www.jama.or.jp/safe/guideline/pdf/jama\\_guidelines\\_v30\\_jp.pdf](http://www.jama.or.jp/safe/guideline/pdf/jama_guidelines_v30_jp.pdf) (平成 29 年 3 月 31 日確認)
- 7) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA): Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines For In-Vehicle Electronic Devices, 2013
- 8) 日産自動車 : Blog アーカイブ: カーナビゲーション Archives, <http://blog.nissan-carwings.com/carwings/cat8883009/> (平成 29 年 3 月 31 日確認)
- 9) Kimura, K et al.: In-Vehicle Navigation System Operability while Driving. Proceeding of 6th World Congress on ITS, 1999
- 10) Niiya, K.: ISO/TC22/SC13/WG8N289 Trial Evaluation Results on Navigation Operation using Occlusion Technique. Discussion Paper on ISO/TC22/SC13/WG8 Visual Distraction TF, 2000
- 11) 株式会社 SUBARU : 株式会社 SUBARU ニュースリリース,  
[https://www.subaru.co.jp/press/file/uploads/news/2016\\_0126\\_01\\_6.pdf](https://www.subaru.co.jp/press/file/uploads/news/2016_0126_01_6.pdf) (平成 29 年 3 月 31 日確認)
- 12) 日産自動車株式会社 : 日産 | 安全の取り組み | 安全技術紹介 (クルマでの取り組み) | 万が一衝突が避けられない時に被害を最小限にとどめます,  
<http://www.nissan-global.com/JP/SAFETY/INTRODUCTION/UNAVOIDABLE/> (平成 29 年 3 月 31 日確認)
- 13) Kahneman, D.: Attention and Effort, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 13-27, 1973
- 14) Wickens, Christopher D. Multiple resources and performance prediction. Theoretical issues in ergonomics science, 3.2: 159-177, 2002

- 15) Wickens, Christopher D. Multiple resources and mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50.3: 449-455, 2008
- 16) 佐々木めぐみ：B-12 視覚-聴覚モダリティ間の注意配分について：自動車の運転場面を意識した条件での検討 (学習 B). *日本教育心理学会総会発表論文集*, 31: 315, 1989
- 17) Giard, Marie-Helene, et al.: Neurophysiological mechanisms of auditory selective attention in humans. *Frontiers in bioscience*, 5.1: d84, 2000
- 18) Escera, Carles, Corral, M. J.: Role of mismatch negativity and novelty-P3 in involuntary auditory attention. *Journal of Psychophysiology*, 21.3-4: 251-264, 2007
- 19) 杉本史恵, 片山順一：注意資源配分量の指標としての P300 体性感覚プローブ刺激と聴覚プローブ刺激の比較, *生理心理学と精神生理学*, 32.1: 18-28, 2014
- 20) 伊藤誠, 稲垣敏之：認知的負荷がドライバの脈波に与える影響に関する一考察, *日本人間工学会大会講演集 日本人間工学会第 50 回記念大会. 一般社団法人 日本人間工学会*, p. 140-141, 2009
- 21) Harbluk, Joanne L., et al.: An on-road assessment of cognitive distraction: Impacts on drivers' visual behavior and braking performance, *Accident Analysis & Prevention*, 39.2: 372-379, 2007
- 22) Liang, Yulan, Lee, John D.: Combining cognitive and visual distraction: Less than the sum of its parts. *Accident Analysis & Prevention*, 42.3: 881-890, 2010
- 23) 西本卓也, 荒木雅弘, 小林哲則：ディストラクション評価に基づく車内音声対話コンテンツの比較, *FIT2003 イベント企画 「車載情報システムにおける音声インタフェース」 予稿集*, 2003
- 24) 高辻茂, 伊藤一也, 徳永智彦, 笠原勇, 美記陽之介：音による警報の情緒的イメージの形成に関する考察, *自動車技術会学術講演会前刷集 No.22-12*, p.23-26, 2012
- 25) 樋田浩一, 他；身体運動に伴う聴覚フィードバックに対する脳活動分析 - ピッチ及び遅延弁別に関わる事象関連電位成分 -, *日本音響学会研究発表会講演論文集 日本音響学会 編*, 473-476, 2014
- 26) D.Basacik, N.Reed, R.Robbins: Smartphone use while driving – a simulator study, *TRL, Published Project Report PPR592*, 2011
- 27) 吉次律俊, 伊藤敏行, 美記陽之介, 松永充浩：音声インタラクションがドライバーのメンタルワークロードに与える影響, *自動車技術会論文集, Vol.35 No.1*, pp. 205-208, 2002
- 28) 富永茂, 麻生勤, 飯星明：音声入力カーナビゲーション操作に伴うドライバの作業負荷の評価, *自動車技術会, 学術講演会前刷集, No.18-03*, p.13-16, 2003
- 29) 三宅晋司, 神代雅晴：メンタルワークロードの主観的評価法 NASA-TLX と SWAT の紹介及び簡便法の提案, *人間工学, Vol.29, No.6*, p.399-408, 1993
- 30) Rumar, K.: The basic driver error: Late detection. *Ergonomics*, Vol.33, pp.1281-1290 (1990).
- 31) Takeda, Y. Sugai, M., & Yagi: A. Eye fixation related potentials in a proof reading task. *International Journal of Psychophysiology*, Vol.40, pp.181-186., 2001.

- 32) Yagi, A.: Visual signal detection and lambda responses. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol.52, pp.604-610, 1981.
- 33) Takeda, Y., Yoshitsugu, N., Itoh, K., Kanamori, N.: Assessment of Attentional Workload while Driving by Eye-fixation-related Potentials. *Kansei Engineering International Journal*, 11, pp.121-126, 2012.
- 34) Patten, C. J. D., Kircher, A., Östlund, J., and Nilsson, L.: Using mobile telephones: Cognitive workload and attention resource allocation. *Accident Analysis & Prevention*, Vol.36, pp.341-350, 2004.
- 35) 辻下雅啓, 田浦賢一: カーオーディオシステム音響特性改善の一検討, 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波 93(440), p.53-39,1994
- 36) 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫: 音響系の伝達関数の模擬をめぐってII, 日本音響学会誌, Vol. 45 No.1, p. 44-50,1988
- 37) 岩宮眞一郎: よくわかる最新音響の基本と仕組み, 秀和システム, p.54-56, p.112-119 ,2007
- 38) 播摩敏雄, 鈴木陽一, 曾根敏夫: 音像定位におよぼす両耳間時間差と音圧レベル差の相互作用に関する一考察, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p. 185,2000
- 39) 田中克則, 景山一郎: 車両運動特性向上のためのタイヤ設計手法に関する研究 (乗用車の直進生に対する評価指標とタイヤ特性について), 日本機械学会論文集 (C編) 68 巻 674 号, 877-882, 2002
- 40) ステアリング・エントロピー: 自動車技術ハンドブック 人間工学編<第3分冊>, 457-460, 自動車技術会, 東京, 2016
- 41) 福井勝彦: 連続運転時における操舵機能低下の評価法, 豊田中央研究所R&Dレビュー Vol.30 No.3, 57-65, 1995
- 42) Zhewang MA, Yoshio Kobayashi: Analysis of Dielectric Resonators Using the FDTD Method Combined with the Pade Interpolation Technique, *IEICE TRANS. ELECTRON.*, Vol.E84-C No.7, 2001
- 43) S.Dey and R.J.Mitra: Efficient Computation of resonant frequencies and quality factors of cavities via a combination of the finite-difference time-domain technique and the Pade approximation, *IEEE Microwave and Guided Wave Lett*, Vol.8, pp.415-417, 1998
- 44) 高澤嘉光: 離散的フーリエ変換における補間公式, 日本音響学会 音楽音響研究会資料 Vol.8 No.7, 9-18, 1990
- 45) 田ノ上明宏, 伊藤誠, 稲垣敏之: 燃費情報の視覚提示が自動車運転に及ぼす影響について, 自動車技術会論文集 Vol.41 No.6, 1421-1426, 2010
- 46) 省燃費運転の支援システム: 自動車技術ハンドブック 人間工学編<第3分冊>, 478-479, 自動車技術会, 東京, 2016
- 47) 永田靖, 吉田道弘: 統計的多重比較法の基礎, 33-40, サイエンティスト社, 東京, 1997

- 48) Sheila G. Klauser, Feng Guo, Bruce G. Simons-Morton, Marie Claude Ouimet, Suzanne E. Lee, Thomas A. Dingus: Distracted Driving and Risk of Road Crashes among Novice and Experienced Drivers, *The New England Journal of Medicine*, pp.54-59, 2014

## 関連論文

- (1) Itoh, K., Y. Miki, N. Yoshitsugu, N. Kubo, S. Mashimo  
論文題目 「Evaluation of a Voice-Activated System  
using a Driving Simulator」  
平成 16 年 3 月 SAE Technical Paper 2004-01-0232 (第 3 章 実験①)
  
- (2) Itoh, K., Y. Miki, N. Kubo, Y. Takeda, H. Tanaka  
論文題目 「A Study on Estimating the Variation of Driver's State  
by EEGs and EOGs」  
平成 18 年 4 月 SAE Technical Paper 2006-01-0575 (第 3 章 実験②)
  
- (3) 伊藤一也・山中高章・後藤昌也・美記陽之介  
論文題目 「車室内音響特性を考慮した報知音の音像定位技術の検討」  
平成 26 年 9 月 自動車技術会論文集 Vol.45 No.5, 877-882. (第 4 章)
  
- (4) 伊藤一也・田中健次  
論文題目 「音声操作中の警報音聴取に対する注意配分改善手法の検討」  
平成 29 年 6 月 人間工学 Vol.53 No.3, 75-84 (第 5 章)

## 著者略歴

### 学 歴

- 平成 9 年 3 月 24 日 電気通信大学電気通信学部（夜間主）情報工学科卒業
- 平成 9 年 4 月 6 日 電気通信大学大学院電気通信学研究科情報工学専攻  
博士前期課程入学
- 平成 11 年 3 月 24 日 同上修了
- 平成 26 年 10 月 1 日 電気通信大学大学院情報システム学研究科  
社会知能情報学専攻 博士後期課程入学
- 平成 29 年 9 月 29 日 同上修了

### 職 歴

- 平成 11 年 4 月 1 日 日産自動車株式会社入社
- 平成 29 年 3 月 31 日 同社退職
- 平成 29 年 4 月 3 日 (独)国立高等専門学校機構 一関工業高等専門学校  
未来創造工学科 入職 現在に至る

### 研 究 歴

- 平成 13 年 4 月 1 日 日産自動車株式会社テクニカルセンターにて  
「自動車の人間工学研究」に従事
- 平成 29 年 4 月 3 日 (独)国立高等専門学校機構 一関工業高等専門学校  
未来創造工学科にて「自動車の人間工学研究」に従事