

脳活動を考慮した機能音の音像定位による活動支援 Activity Support by using Functional Sound Localization in Consideration of Brain Activity

精密工学専攻 46号 茂木 勇祐

Yusuke Mogi

1. はじめに

音による情報伝達は、テレビ番組、家電製品の情報音、公共空間での案内放送など、日常生活において広く利用されている。しかし、音情報の内容と、音の聞こえる方向（方向感）との関連性はこれまで考慮されず、その長所が十分生かされていない。また、音は優れた情報伝達手段である一方で、それが不要な人にとっては逆に邪魔な存在にもなり得る。

そこで本研究では、音像定位技術に着目し、音の方向感を正確に再現することで、音で方向情報を直感的に伝える新たな音環境を提案する。また、周囲の騒音を隠すマスキング音と音像定位技術とを組み合わせ、機能的かつ新たな音の活用法の優位性を定量的に評価する。

まず、自動車車室内の警報音に音像定位技術を活用する。周囲で発生した危険をドライバに知らせる警報音に方向感を付加して危険の方向を直感的に伝える手法を提案し、危険確認までの反応時間および脳活動より優位性を評価する。

次に、集中を要する作業時に音像定位技術を活用する。マスキング音を音像定位させて騒音を隠すことで、集中力を向上する手法を提案し、集中状態を想定した計算課題および脳活動より優位性を評価する。

以上より、音像定位技術およびマスキング技術を利用し、人の活動支援を目的とした機能的な音環境の構築を目指す。

なお、全ての評価は、被験者に対し十分なインフォームドコンセントを実施している。

2. 警報音の音像定位による危険認知支援

自動車事故を防ぐには、ドライバが素早く周囲の状況を知ることができるように、車載センサが取得した情報を適切な警報手段でドライバに知らせる安全運転支援が重要である。しかし、視覚や聴覚、さらには触覚など、複数の感覚を比較した上でどの警報手段が適切かを評価した研究は少ない。

これまでに、音像定位させた情報音の認知性が高いこと⁽¹⁾、また視覚（LEDの点滅）より聴覚（音像定位）で方向を伝える方が素早く反応でき、脳に負荷をかけないこと⁽²⁾が、防音室での実験から明らかにされている。

そこで本章では、音像定位を利用し、方向情報を音で直感的に伝えることで周囲の危険の確認を支援する方法（方向認知支援）を提案する。また、実際の自動車空間での、危険確認までの反応時間および脳活動から、音像定位を用いた方向認知支援の優位性を明らかにする⁽³⁾。

2.1 周囲の危険と危険認知支援

車の周囲で発生した危険を光や音でドライバに知らせるため、Fig. 1に車外の危険および車内の危険認知支援を示す。

2.1.1 周囲の危険を模擬した車外4方向の危険LED

半無響室内に設置したセダントイプ市販車の周囲4方向に白色LEDを配置し、1.6 s間点滅させる。

2.1.2 危険の存在または危険の方向を伝える危険認知支援

周囲の危険をドライバに知らせる「危険認知支援」の中で、危険の存在を伝えるものを「存在認知支援」、光の位置や音像定位で危険の方向を伝えるものを「方向認知支援」と呼ぶ。

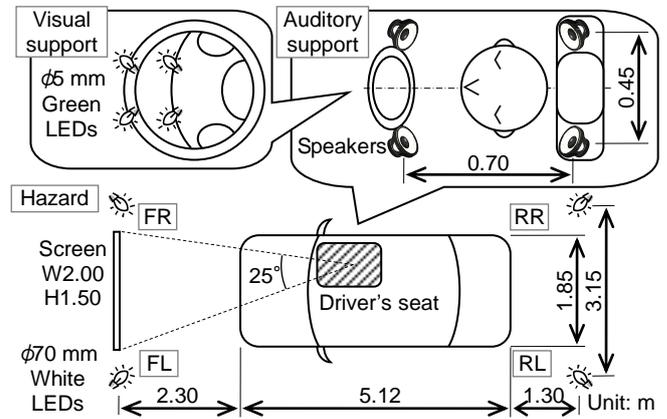


Fig. 1 Hazards and cognitive supports

Table 1 Cognitive supports

Type	Support	Method
No support	A	—
Existence cognitive support	B	Visual 4 LEDs
	C	Auditory 4 speakers
Direction cognitive support	D	Visual 1 LED
	E	Auditory 1 speaker

視覚と聴覚の2種類の存在認知支援を、Table 1 B, Cに示す。視覚の存在認知支援は、ハンドル上部の4つの緑色LEDが点滅する。聴覚の存在認知支援は、ハンドルおよびヘッドレスト外側の4つのスピーカから、頭部中心位置で56 dBAの警報音（断続的なホワイトノイズ）を再生する。

LEDの点滅の仕方や音の再生の仕方を工夫することで、方向情報も同時に伝えることができる。視覚と聴覚の2種類の方向認知支援を、Table 1 D, Eに示す。視覚の方向認知支援は、4つのLEDの内1つが点滅し、光の位置で方向を伝える。聴覚の方向認知支援は、4つのスピーカの内1つから音を再生し、音像定位させることで方向を伝える。音量は頭部中心位置で50 dBAであり、車内の暗騒音は25 dBAである。

支援提示時間はいずれも0.8 sである。

2.2 周囲の危険を確認するまでの反応時間と運転課題

危険発生と同時に車載センサが危険を検知して認知支援を行い、ドライバが目視で危険を確認する状況を想定する。

2.2.1 反応時間計測の実験条件

Fig. 2に示すタイムプロトコルに従い、ランダムな方向、ランダムな間隔で危険が発生（周囲の危険LEDの内1つが点滅）する。1区間当たり3.7~5.2 s間隔で24回の危険が発生し、Table 1に示した支援B~Eでは危険発生と同時に認知支援が行われる。Fig. 3(a)に示す被験者は、認知支援により危険の発生を知り、危険LEDの点滅を前方は目視で、後方はサイドミラーを通して実際に確認したら、Fig. 3(b)に示す右ジョイスティックを素早く危険の方向に倒す。

存在認知支援 B, C では危険の方向を探す必要があるが、方向認知支援 D, E では直接危険の方向を向くことができ、反応時間の短縮が期待される。

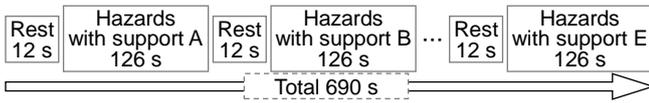
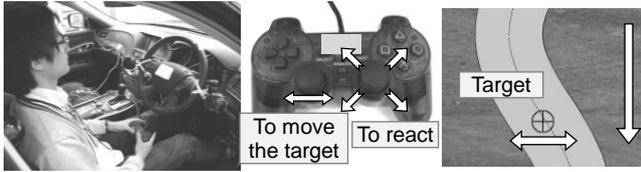


Fig. 2 Time protocol for hazard cognition experiment



(a) Patient (b) Joysticks (c) Driving task
Fig. 3 Tasks which patients perform

実験中は周囲への注意が疎かな状態を模擬して、Fig. 3(c)に示す運転課題を行う。車前方のスクリーンに投影した正弦波の曲線が、1周期3.2sの定速で流れる。被験者は、Fig. 3(b)の左ジョイスティックを左右に動かし、円と十字からなるターゲットになるべく曲線中心を通るようにする。

2.2.2 反応時間計測の実験結果

被験者は20代12名で実験を行った。危険発生から1.8sまでの反応を有効とする。支援のない場合は31%の危険LEDを確認できず、特に左後方では76%の危険LEDを確認できていない。逆に支援のある場合(Table 1 B~E)は平均5%の失敗となった。危険認知支援を利用すれば周囲の危険をドライバに的確に伝達できるといえる。

次に、認知支援のあるB~Eの条件について、方向を伝えることの効果を評価する。反応失敗のデータを除き、支援条件毎の被験者間の平均反応時間をFig. 4に示す。危険が後方(RL, RR)の場合の存在認知支援と方向認知支援を比較すると、視覚支援B→Dの条件では323~567ms、聴覚支援C→Eの条件では307~450ms、それぞれ有意に反応時間が短縮している。方向認知支援を利用すれば危険の方向を直接向くことができ、危険を探す時間が短縮できるといえる。

さらに、方向認知支援D, Eの反応時間を評価する。Fig. 4より、危険が前後いずれの場合も、視覚支援より聴覚支援の方が反応時間が短い。危険を確認してジョイスティックを入力する動作は共通のため、認知支援を見て、または聞いて、方向を判断するまでの脳での処理時間の差が、視覚支援と聴覚支援との反応時間の差を生じさせたと考えられる。

以上より、視覚または聴覚の、存在認知支援または方向認知支援の中で、音像定位により方向を伝える聴覚の方向認知支援が、危険確認までの反応時間が最も短いことを把握した。

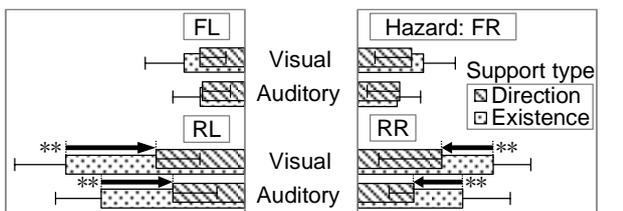
2.3 支援を認知し方向を判断する際の脳活動

反応時間の短い方向認知支援について、脳活動を検討する。

2.3.1 脳活動計測の実験条件

Table 1 D, Eの視覚、聴覚、および両者を複合した視聴覚の3種類の方向認知支援を、Fig. 5に示すタイムプロトコルに従い提示する。1区間当たり1.0~2.4s間隔で8回の支援が提示され、支援方向、提示間隔はランダムとする。

ここで、脳活動計測の際は頭部を動かさないため、危険LEDの確認動作は省略し、被験者は、支援の示す方向をジョイス



1900 Reaction time ms 400 400 Reaction time ms 1900
Fig. 4 Reaction time for recognizing hazard

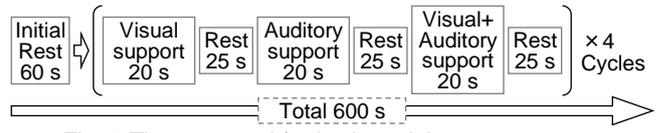


Fig. 5 Time protocol for brain activity measurement

ティックで入力する。運転課題は、2.2節と同じものを行う。実験中の脳活動を、NIRS (光トポグラフィ)⁽⁴⁾を用いて計測する。NIRSは、近赤外光を頭皮上に照射し、脳の血流量変化から大脳皮質の活性状態を2次元的に計測する。支援の方向を判断する際は思考判断と関連の深い前頭葉での活動が大きく関係するため、Fig. 6(a)に示す52chを計測する。

2.3.2 脳活動計測の実験結果

被験者は20代18名で実験を行った。NIRS計測において体動の検出されなかった12名について、支援の方向を判断する際の脳活動を評価する。支援提示区間では被験者は短い時間間隔で反応を続けており、被験者の脳に負荷を与えている。

脳が活性化し負荷が高くなると、そこへ多くの酸素を運ぶために酸化ヘモグロビン(Oxy-Hb)が増加する。このOxy-Hbについて、長周期のゆらぎや運転課題により生じる成分を除去し、Fig. 5に示したRest区間に対する方向認知支援時のOxy-Hbの増分を評価する。そのために、Rest区間の最後5s間のOxy-Hb平均値と、次の支援提示区間(20s間)のOxy-Hb平均値との差をとり、これを脳血流増分値(Δ Oxy-Hb)とする。4サイクル×12名=48試行の平均をFig. 6に示す。白のバブルはOxy-Hbの増加を、黒のバブルは減少を示し、「*」、「**」は有意にOxy-Hbの増加や減少が見られたchである。

まず、運転時に適する支援条件を考察する。(d)の視聴覚支援では、Oxy-Hbの増加したch(白のバブル)が多いが、(b)、(c)の視覚または聴覚のみの支援では、Oxy-Hbの減少したch(黒のバブル)が多い。視聴覚支援では方向を判断できる材料が2種類提示されて脳が混乱し、負荷が高くなったと考えられる。一方、視覚のみまたは聴覚のみの、1種類の支援で方向を伝えれば、脳への負荷が小さいといえる。

次に、聴覚支援について考察すると、52ch中42chでOxy-Hbの減少が見られる。3種類の支援の中では最も脳への負荷が小さく、特に白の枠線で示す前頭極でのOxy-Hbの低下が顕著である。この領域では高次の情報処理が行われているとされ、運転動作のように複雑な判断が必要ときには、極力このような部位に負荷をかけず、脳での情報処理に余裕を持たせることが望ましい。聴覚支援を利用すれば、脳に負荷をかけずに危険の方向を判断できるといえる。

以上より、音像定位を用いた聴覚の方向認知支援では脳に負荷をかけずに素早く危険を確認できることを把握した。

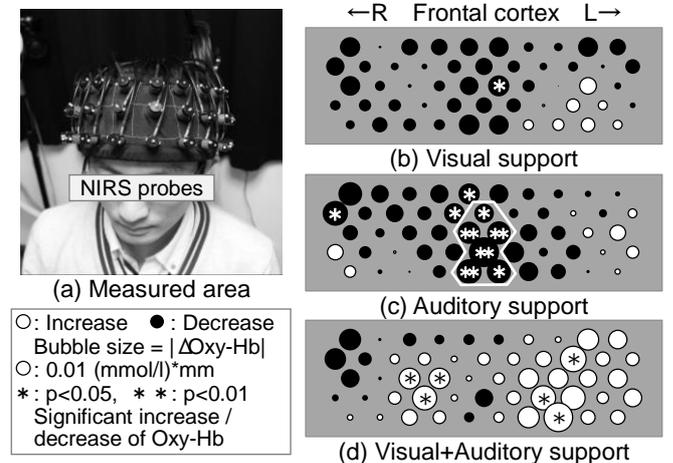


Fig. 6 Δ Oxy-Hb for recognizing direction cognitive support

3. マスキング音の音像定位による集中支援

日常生活において周囲の騒音が知的作業の効率や集中力に影響することは多くあり、建物の遮音性の向上や家電製品の構造変更などにより、騒音対策や快音化が進められてきた。しかし、近年増加している間仕切りを排した住宅などでは、騒音が筒抜けとなるため、新たな視点での対策が必要である。

そこで本章では、音像定位技術を利用しマスキング音に適切な方向感を与えることで、周囲の騒音を効果的に隠し、作業への集中を支援する手法を提案する。また提案手法の優位性を、計算課題および脳活動計測より評価する⁽⁶⁾。

3.1 マスキング実験条件

3.1.1 騒音およびマスキング音の音像定位

住空間で集中を要する作業に取り組む場合を想定し、集中を阻害する生活騒音、および集中を維持できるマスキング音として、Table 2 の組み合わせを選定した⁽⁶⁾。これらを音像定位させるため、防音室の Fig. 7(a) に示す位置にスピーカを配置する。右斜め前から発生する騒音 (Noise) に対して M1~M4 の 4 種類のマスキング音の定位 (音像条件) を考える。音量は、耳位置での左右騒音レベル平均が Table 2 の音量値となるよう調整する。これらの騒音およびマスキング音を、Fig. 8 に示すタイムプロトコルに従い再生する。

M1 は、騒音源と同位置で直接騒音を隠す。M2 は、正面から両耳に均等にマスキング音を聞かせる。M3 は、耳元のマスキング音に注意を引き付け騒音から気をそらす。M4 は、M3 より正面寄りに配置し、左右の耳の音量差を騒音のそれと合わせることで、騒音を左右均等にマスクする。

3.1.2 作業への集中状態を想定した計算課題

作業への集中を想定した計算課題 (Calculation task, 以下 Calc.) を行う。Fig. 7(b) に示す被験者正面 0.9 m に設置した画面に、1~10 同士の足し算または掛け算をランダムに提示する。被験者にはテンキーを用いてできるだけ速く多く

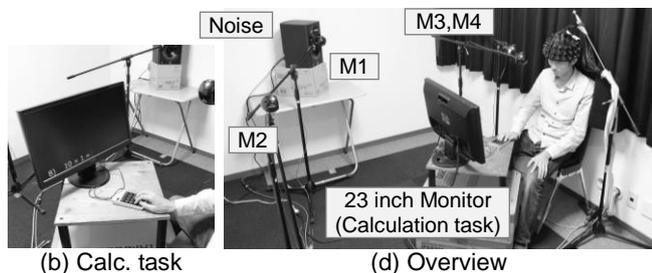
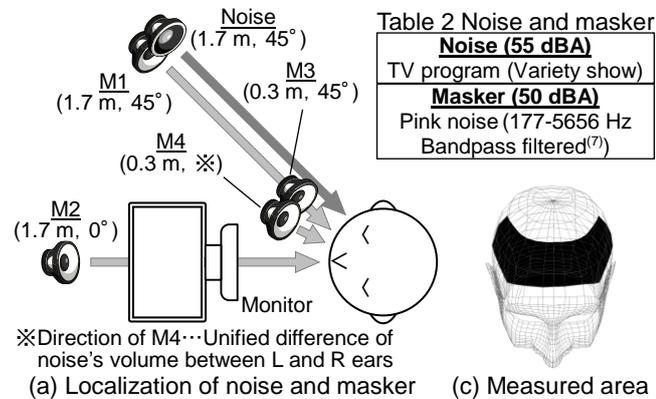


Fig. 7 Test setup of masking experiment

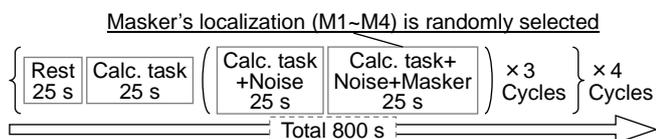
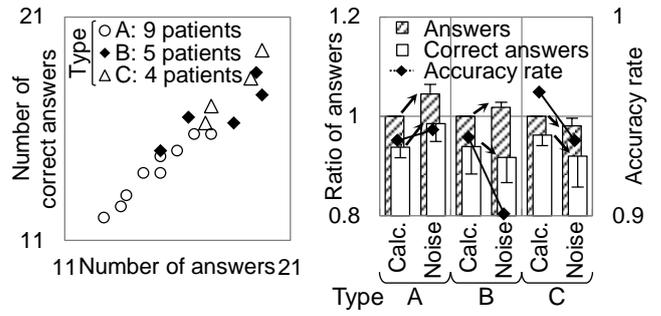


Fig. 8 Time protocol for masking experiment



(a) Answers of calc. phase (b) Answers of 3 types
Fig. 9 Calculation results

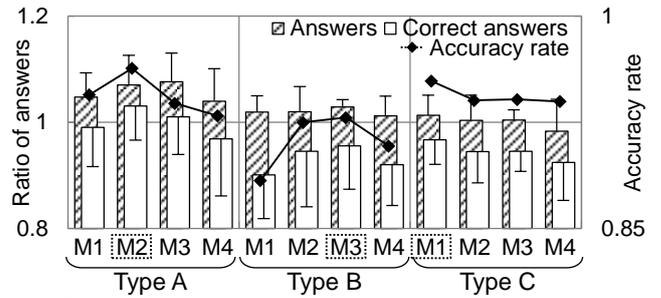


Fig. 10 Calc. result classified by noise's sensibility

の問題を解くよう指示し、解答を間違えた場合の訂正は不可とする。計算課題は Fig. 8 の Rest 区間を除く全区間で行う。

3.1.3 NIRS による脳活動計測

実験中は、Fig. 7(c) に示す位置の、思考判断に関連深いとされる前頭葉 52 ch の活動を、NIRS を用いて計測する。

3.2 マスキング実験結果と考察

3.2.1 計算課題の解答数と正答数に基づく被験者の分類

被験者は 20 代 18 名で実験を行った。1 区間 25 s 当たりの解答数および正答数を、Fig. 8 の音像条件毎に集計する。

まず、騒音付加時の解答数および正答数の増減を元に、被験者を 3 タイプに分類する。Calc. と Noise 区間を比較し、解答数、正答数ともに増加する人を A タイプ、解答数が増加し正答数が減少する人を B タイプ、解答数、正答数ともに減少する人を C タイプに分類する。分類した人数および各被験者の Calc. 区間の解答数と正答数を、Fig. 9(a) に示す。右上に位置する被験者程、計算が速いことを示す。

次に、タイプ毎の計算速度を考察する。騒音付加時に解答数、正答数ともに増加した A タイプの人は、計算が遅い。一方、騒音付加時に解答数、正答数ともに減少した C タイプの人は、計算が速い。騒音付加による作業効率への影響と、被験者の計算速度との間には、負の相関があるといえる。

3.2.2 各タイプでのマスキング音聴取時の計算結果

騒音およびマスキング音聴取時の計算結果を考察する。そこで、各区間の解答数および正答数は、Calc. 区間の解答数を基準に正規化し、解答数比、正答数比 (Ratio of answers / Ratio of correct answers) とする。また正答数を解答数で除した値を正答率 (Accuracy rate) とする。解答数比、正答数比、および正答率の、音像条件毎、タイプ毎の平均値を Fig. 9(b), Fig. 10 に示す。Fig. 9(b) には、被験者を分類した際の解答数および正答数の増減の矢印を併せて示す。

まず、騒音付加時の計算結果を考察する。A タイプの人は、騒音として同じテレビ番組を繰り返し聞く内にリズム感を得、残り時間を意識した解答やベース配分の調整ができた結果、作業効率が向上し、解答数、正答数ともに増加したと推察できる。B タイプの人は、騒音付加時に A タイプの人と同様にリズム感を得るが、残り時間への意識が逆に焦りに転じ、正確さが低下した結果、解答数は増加するが正答数は減少し

たと推察できる。Cタイプの人には、騒音により計算課題への集中が阻害されて作業効率が低下し、解答数、正答数ともに減少したと推察できる。

次に、マスク音聴取時の計算結果を考察する。Aタイプ9名は、M2条件で正答数および正答率が高く、また正答数はNoise-M2間で有意に増加した。Aタイプの人には騒音により作業効率が向上したが、マスク音によりさらに正確さの向上が可能である。M2の正面のマスク音は、リズム感を維持しながら騒音の細かい部分を隠す背景音として機能し、計算の正確さが向上したと推察できる。

Bタイプ5名は、M3条件で解答数、正答数、正答率がいずれも最大となり、各ばらつきも小さい。Bタイプの人にとってM3の耳元のマスク音は、騒音から注意をそらす音として機能した結果、無音時のCalc.区間より解答数や正答数が増加したと推察できる。

Cタイプ4名は、M1条件で解答数、正答数、正答率がいずれも最大となり、また正答数はNoise-M1間で有意に増加した。Cタイプの人には騒音に気を取られていることから、M1の騒音と同位置で直接マスクすることで、無音時のCalc.区間と同程度の集中力が得られたと推察できる。

以上より、被験者の計算速度と、騒音付加時の作業効率への影響とは負の相関があり、被験者のタイプによって適切なマスク音定位があることを把握した。

3.2.3 各タイプでの脳活動

計算課題を行いながら、騒音およびマスク音を聞いた際の脳活動を評価する。脳の活性状態を表すOxy-Hbについて、長周期のゆらぎを除去し、Calc., Noise, M1~M4のそれぞれの区間での増分を評価する。そのために、対象区間(25s間)のOxy-Hb平均値と、その直前の区間の最後5s間のOxy-Hb平均値との差をとり、これを脳血流増分値(Δ Oxy-Hb)とする。被験者18名中、NIRS計測において体動の検出された区間を除き、有効試行数と平均増分値をFig. 11に示す。白のバブルはOxy-Hbの増加を、黒のバブルは減少を示し、「*」は有意にOxy-Hbの増加や減少が見られたchである。

まず、Fig. 11(a)~(c)のRest→Calc.区間を考察する。騒音により解答数、正答数ともに増加したAタイプの被験者は、高次の情報処理を担当するとされる、黒枠で示す中央の前頭極でのOxy-Hbの増加が顕著である。Fig. 9(a)において計算が遅いことから、高次の部位を活用しミスをしないう慎重に計算に取り組んだと推察できる。

解答数が増加し正答数が減少したBタイプの被験者は、複雑な手の運動や感覚刺激と動作の結び付けなどに関係するとされる、黒枠で示す左右の言語野でのOxy-Hbの増加が顕著である。Fig. 9(a)より計算速度はAタイプの人より速いことや、高次の部位を使用せずに計算可能なことから、ある程度ルーチン化して計算に取り組みたと推察できる。

解答数、正答数ともに減少したCタイプの被験者は、Oxy-Hbの増加するchと減少するchとが細かく分かれ、脳の一部のみ活性化されている。Fig. 9(a)より計算速度は最も速いことから、計算課題に適した脳回路が構成され、ルーチンワーク化していると推察できる。

次に、Fig. 11(d)~(f)のCalc.→Noise区間を見ると、A~Cのタイプに関わらず多くのchでOxy-Hbが減少した。騒音により計算課題に必要な酸素が他の部位で使われ、計算課題のために前頭葉へ送られる酸素量が低下したと考えられる。特に、Bタイプの被験者は前頭葉全体のOxy-Hbの減少が顕著であり、計算の正確さの低下と関連する可能性がある。

さらに、マスク音聴取時に有意なOxy-Hbの増加または減少が見られたch数は、最大でもBタイプのM3における11chであった。A~Cのタイプに分類しても、マスク音に対する感受性は個人差が大きく、前頭葉の活動に統一した傾向は見られなかった。

しかし、Rest→Calc.区間ではタイプ毎に特徴的な脳活動のパターンが見られることから、Calc.区間の脳活動から騒音に対する感受性を推定できると考えられる。推定した感受性に合わせ、マスク音を前述した適する定位に切り替えて再生すれば、騒音の不快感を低下させ、作業効率や正確さの向上につながるという。

4. 研究成果

自動車車室内の警報音および住空間のマスク音を音像定位させることの優位性を評価し、以下の研究成果を得た。

- (1) 危険を想定した車周囲のLEDの点滅を確認するまでの反応時間を計測し、警報音を音像定位させた聴覚の方向認知支援により、方向を伝えない場合やLEDの点滅による視覚支援と比べて反応時間が短縮することを把握した。
- (2) 支援認知の際の脳活動を計測し、聴覚支援により脳へ負荷を与えずに危険の方向を伝えられることを把握した。
- (3) 生活騒音およびマスク音を聴取しながら計算課題を行い、騒音への感受性により3タイプの傾向が得られ、それぞれに適したマスク音定位を把握した。
- (4) 計算課題時の脳活動を計測し、マスク音付加時に統一した傾向は得られないが、無音で計算時の脳活動パターンから騒音への感受性を推定できることを把握し、集中時の作業に適したマスク音定位を提案した。

参考文献

- (1) 茂木 他, 生体情報に基づく音像定位による情報音の認知性評価, 日本音響学会講演論文集(春)(2014) pp. 1519-1520.
- (2) 茂木 他, 脳活動計測に基づく情報音の音像定位による方向認知支援, 日本音響学会講演論文集(春)(2015) pp. 1363-1366.
- (3) 茂木 他, 脳活動計測に基づく車室内警報音の音像定位による危険認知支援, 自動車技術会論文集, 46-6(2015) pp. 1093-1098.
- (4) 牧, 光トポグラフィの点と線—脳,そして人間科学へ—, 日立評論, 88-5(2006) pp. 440-447.
- (5) 茂木 他, 脳活動を考慮したマスク音の音像定位による集中度向上, 日本音響学会講演論文集(春)(2016) 2-4-9.
- (6) 茂木 他, 生活騒音に効果的なマスク音の音像定位, 日本音響学会講演論文集(春)(2016) 2-4-8.
- (7) 佐伯 他, 音声をマスクするための無意味定常雑音の選定, 電子情報通信学会論文誌, J86-A-2(2003) pp. 187-191.

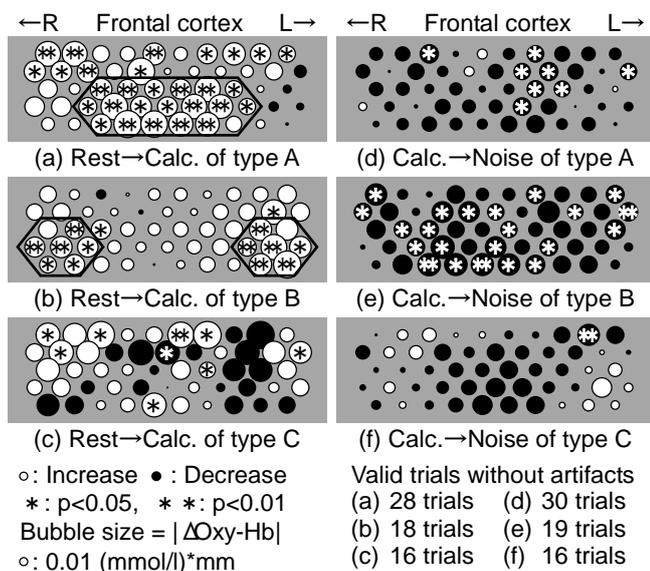


Fig. 11 Δ Oxy-Hb of each localizing condition