

デザイン学研究 (Bulletin of Japanese Society for the Science of Design)
脳血流からみた透過型情報提示デバイスの使用に伴う負担度評価ーヘッドマウントディスプレイを使用した音の可視化研究 (2)
 --Manuscript Draft--

受付番号:	JSSDJ-D-14-00084R2
論文種別:	論文 / Original Articles
標題:	脳血流からみた透過型情報提示デバイスの使用に伴う負担度評価ーヘッドマウントディスプレイを使用した音の可視化研究 (2)
標題 (英語) :	Evaluation of Mental Workload Based on Cerebral Blood Flow in using a See-through Information Presentation Device – A Study on the Visualization of Sounds Using a Head-mounted Display (2)
筆頭著者:	須藤 正時, 学士
全著者:	須藤 正時, 学士 深谷 晃輔, 修士
責任著者:	須藤 正時, 学士 国立大学法人 名古屋工業大学 名古屋市御器所町, 愛知県 JAPAN
抄録:	本研究では透過型情報提示デバイスを用いた音の可視化による情報保障環境をモデル化し、その際の精神的作業負担 (メンタルワークロード) の評価を行った。生理的指標として前頭連合野の脳血流による脳賦活状態を計測した。その結果、音源識別タスク、音源定位タスクでは情報提示に対する脳血流の増加が観測され、認知作業による神経活動の亢進が確認できた。また両タスクにおける反応時間は1秒以内であり、危険回避に対する人の知覚反応時間の範囲に収まる結果となった。後方視界タスクでは安全基準からの遅延が見られた。音源識別タスクについては、音声の聴覚情報に対し速く反応する被験者と絵文字の視覚情報に対し速く反応する被験者の2つのグループに分けられた。さらに脳血流の増加と反応時間の短縮に相関が認められた。したがって安全な反応や行動の切り換えを行うためには、注意の切り換えを促進させるような脳の賦活化を伴う情報提示が必要となることが示唆される。
抄録 (英語) :	This study modeled an information support environment through sound visualization using a see-through information presentation device and evaluated the related mental workload. Brain activation measured by cerebral blood flow was used as a physiological index. Increased cerebral blood flow was observed in response to information presentation during sound discrimination and localization tasks. Moreover, response times in both tasks were within the range of human perception-reaction time required for danger avoidance. During the rear-visibility task, responses were slower than the safety standards. In regard to the sound discrimination task, subjects were categorized according to whether they reacted faster to the vocal auditory information or to the pictorial visual information. A correlation was also observed between increased cerebral blood flow and decreased response time. Thus, information presentation that promotes brain activation associated with attentional shifting is important for enabling a shift to safety responses or actions.
分野:	Human Factors; Design for Safety; Information Design; Interaction Design
キーワード:	See-through Information Presentation, Visible of The Sound, Cerebral blood flow, Head-mounted Display
査読者への回答:	詳細は別途添付の対応表に記載しました。 P2 査読者の指摘に沿って2.2実験デザインの記載箇所を2.評価実験 2.1目的の後に記載箇所を移動。 P5 3.結果 3.1測定結果の誤答率について分析方法の見直し P6 誤答率に有意差が認められなかった事の修正

指摘等有り難うございました。

研究論文 :

脳血流からみた透過型情報提示デバイスの使用に伴う負担度評価

—ヘッドマウントディスプレイを使用した音の可視化研究 (2)

Evaluation of Mental Workload Based on Cerebral Blood Flow in using a See-through Information Presentation Device

— A Study on the Visualization of Sounds Using a Head-mounted Display (2)

● 須藤正時

名古屋工業大学大学院

Suto Masatoki

Graduate School of

Nagoya Institute of Technology

● 深谷晃輔

名古屋工業大学大学院

Fukaya Kosuke

Graduate School of

Nagoya Institute of Technology

● Key words: See-through Information Presentation, Visible of The Sound, Cerebral blood flow, Head-mounted Display

要旨

本研究では透過型情報提示デバイスを用いた音の可視化による情報保障環境をモデル化し、その際の精神的作業負担(メンタルワークロード)の評価を行った。生理的指標として前頭連合野の脳血流による脳賦活状態を計測した。その結果、音源識別タスク、音源定位タスクでは情報提示に対する脳血流の増加が観測され、情報認知による神経活動の亢進が確認できた。また両タスクにおける反応時間は1秒以内であり、危険回避に対する人の知覚反応時間の範囲に収まる結果となった。後方視界タスクでは安全基準からの遅延が見られた。音源識別タスクについては、音声の聴覚情報に対し速く反応する被験者と絵文字の視覚情報に対し速く反応する被験者の2つのグループに分けられた。さらに脳血流の増加と反応時間の短縮に相関が認められた。したがって安全な反応や行動の切り替えを行うためには、注意の切り換えを促進させるような脳の賦活化を伴う情報提示が必要となることが示唆される。

Summary

This study modeled an information support environment through sound visualization using a see-through information presentation device and evaluated the related mental workload. Brain activation measured by cerebral blood flow was used as a physiological index. Increased cerebral blood flow was observed in response to information presentation during sound discrimination and localization tasks. Moreover, response times in both tasks were within the range of human perception-reaction time required for danger avoidance. During the rear-visibility task, responses were slower than the safety standards. In regard to the sound discrimination task, subjects were categorized according to whether they reacted faster to the vocal auditory information or to the pictorial visual information. A correlation was also observed between increased cerebral blood flow and decreased response time. Thus, information presentation that promotes brain activation associated with attentional shifting is important for enabling a shift to safety responses or actions.

1. はじめに

1.1. 聴覚障害者の現状

我が国の65歳以上の高齢者人口は2013(平成25)年で3,190万人であり、総人口に占める割合は25.1%にあたる。2035(平成47)年にはおよそ3,741万人が高齢者となり、3人に1人を上回る割合になることが推定されている[注1]。急速な高齢化が進行している現状において、高齢に伴う障害も顕著になっている。聴覚の障害である老人性難聴や中途失聴は多くの人が発症しうる障害のひとつである。2006(平成18)年での聴覚・言語障害者数は36万人であり、そのうち68%が高齢者となっている[注2]。また、聴力の低下は自覚しにくいいため、潜在的な補聴器使用者を含めた推定難聴者数はおよそ1994万人(人口比15.4%)に上ると試算されている[注3]。

聴覚障害者は一般的に補聴器を使用することで聴覚を補っているが、雑音の多い屋外や人の集まる場所では音声を正確に聞き取ることは難しいとされる。また、補聴器の使用はその使用者の障害の程度によって効果が異なることから、聴覚障害者にとって聴覚による音情報を受容することは困難となる。そのため、聴覚障害者の多くが視覚情報に頼ることで周囲環境の把握に努めているが、屋外では危険な場面に遭遇することが多い。しかし、安全な生活環境の確保が求められる一方で、歩行者としての聴覚障害者に対する環境の整備や支援は不十分である[注4]。このような日常生活での不便さ、社会における不安や孤立が人とのコミュニケーションを希薄にさせる。特に中途失聴者については発症前までの正常な聴覚に基づく生活とのギャップが大きく、より強いストレスとなることが聞き取り調査の結果から伺える[注5]。また、田中(2003)は「難聴児はコミュニケーションができないと子どもの集団に入れないとか、あるいは阻害されて孤独になり、集団を避けたり、あるいは引きこもったり、情緒不安定になる。これが高じると情緒障害にもなりうる。その結果自閉症と診断された例もあった。」と報告している[注6]。このことは子どもに関する研究報告であるが、高齢の中途難聴者にも起こりうる可能性がある。超高齢社会を迎えている今日の日本では何らかの対応が必要と考えられる。

1.2. 聴覚障害者支援とその問題点

聴覚障害者支援の考え方として、健聴者の音声による情報取得と同等となるように、音声を聴覚障害者が理解しやすい別の情報に変換して提供することが有効である。これを情報保障と呼ぶ。すでに確立されている字幕や手話のように、最も有用とされている情報保障手段は音の可視化による視覚情報への代替である。岩佐ら(2007)は、人間の聴覚情報処理機構を模倣した聴覚情報処理システムをパルスニューロンモデルで実現化し、「音の見える化」を行っている[注7]。これをハードウェア化した周辺環境音警報装置「サウンド・ウォッチャー」は収集した音信号からリアルタイムに音源の定位と音源種類の識別を同時に行い、装置本体や腕時計型携帯端末に絵文字で通知することができる。音の可視化による効果を最大限活用するためには常時提示情報を取得できる環境を構築しなければならない。その解決策の一つとして、透過型情報提示デバイスの利用が注目されている。透過型情報提示では、提示される情報を見ることが出来る視界と重ねて参照することができる。スマートフォンなどの一般的な携帯情報端末を用いたときよりも注視点移動の頻度を軽減し、音情報を被保障者に対し効率的に提供できる。透過型情報提示を用いることで聴覚障害者の音環境把握を支援し、生活の質向上に貢献すると期待されている[注8-10]。

しかし、歩行時の透過型情報提示を想定した場合、周囲環境の認知と提示情報の認知を同時に行い、得られる情報に基づき適切に行動しなければならない。このような状況では、身体的負荷の要素よりも精神的負荷の要素が強いと予想される。したがって、透過型情報提示デバイス使用時の歩行者の精神的負荷は、健聴者の聴覚による音環境把握と異なり否定的影響を及ぼす可能性もある。

1.3. 研究の目的

本研究は、著者による「透過型情報提示における歩行時の安全性の評価(1)」[注11]の継続テーマの研究である。(1)の研究では、被験者は中途失聴者の70代男性と60代女性、先天性難聴者の30代男性と同年代女性、健常者の50代女性と40代女性の計6名で模擬屋外フィールドテストを行った。模擬屋外フィールドテストでは屋外歩行を想定したコースでヘッドマウントディスプレイ(HMD: Head-mounted Display)を装着し、歩行してもらった。その際歩行タスクを課し、その安全性を評価した。その結果、安全な反応の指標となる知覚反応時間0.7~1秒と比較すると、被験者は音の種類を識別する課題、音源の方向を識別する課題において安全な認知反応ができていたことが示された。透過型情報提示としてHMDを用いたとき、被験者6人中3人について認知負荷は低く、安全確保を図ることができると示唆された。一方で、残る半数の被験者は1秒を超える反応も多く、個人によっては安全性が維持されるとは限らない

ことが明らかとなった。このように半数の被験者は安全速度内で反応できたが、半数は安全速度外であった。本研究では、その結果の要因を脳血流と精神的作業負担(以下メンタルワークロード)の観点から探る事が目的である。そこで本研究では、音の可視化による情報保障環境をモデル化した評価実験を行った。この実験に適した機器の一つとしてHMDを用いた。聴覚による情報取得とHMDを用いた視覚による情報取得についてその情報処理過程におけるメンタルワークロードを生理、行動、心理の3側面から定量的かつ総合的に評価、比較することで、情報保障手段として透過型情報提示デバイス使用の安全性を検証する。

1.4. メンタルワークロード

メンタルワークロード(Mental Workload)とは精神的作業負担のことである。メンタルワークロードはISO-10075(国際標準化機構, 1991: 精神的作業負荷に関する人間工学の原則)の中で、「精神的負荷(mental stress)」と「精神的負担(mental strain)」の両面から定義されている。精神的負荷は「外部から人間に対して及ぼし、かつ精神的に作用する評価可能な影響の全体」であり、精神的負担は「精神的負荷によって個人の内部に直ちに起こる影響であって、各人の対処様式を含み、個人の習慣およびその時の条件に依存するもの」である。この規格はそのまま日本工業規格に取り入れられている(JIS Z 8502)[注12]。HMDを用いた情報保障におけるメンタルワークロードに関して考えると、信号や標識、他者や自動車の存在といった周辺環境と、HMDに提示される保障情報からの様々な刺激(情報)が負荷となり、HMDを装着する被保障者のメンタルワークロードが増加すると考えられる。

2. 評価実験

2.1. 目的

聴覚障害者への情報保障手段として、音情報を絵文字などの図記号で可視化してHMDに提示する情報保障環境を想定し、屋内でのモデル実験を構築した。音とHMDの表示情報に対する人の認知処理活動を比較し、その特性を理解するため、健聴者を対象にメンタルワークロードの評価を行った。

2.2. 実験デザイン

本研究では仮説として、屋外歩行時においてHMDは聴覚障害者に音を安全に提示できる情報提示ツールであると考えている。しかし、聴覚障害者にとって死角となる後方の視覚情報を前方情報と同時に提示することで被験者にかかる負担は大きく、知覚反応時間の遅延を招くと想定できる。その遅延を回避する手がかりが本実験で明らかになれば、安全にHMDを使用するための方法が見えてくると考えた。

実験は2012年8月に名古屋工業大学で行った。実験室は室外
デザイン学研究 BULLETIN OF JSSD Vol. xx No.x 20xx 2

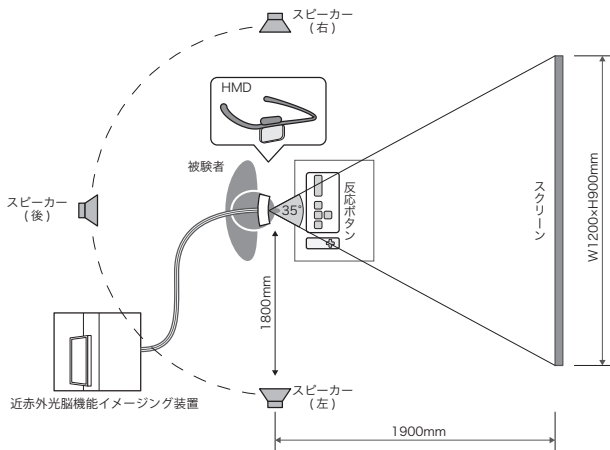


図1 実験環境

からの光を遮断し照明を消した暗室とした。被験者にスクリーンに正対する椅子に着席してもらい、インフォームドコンセントを得て実験を開始した。実験環境を図1に示す。

本実験では、各タスクを行うと同時に脳血流を測定し、反応時間と誤答率、カウンティングエラー、NASA-TLXについて1要因2水準の実験を行い、各タスク（条件）で刺激をランダムに10回提示し、刺激の提示から対応する反応ボタンを押すまでの10試行分の反応時間（msec）を計測した。刺激の提示順序はランダムとした。全被験者がすべてのタスクを行った。本試行前には各タスク10試行分の練習を行い、必要に応じて入力操作に戸惑いがなくなるまで繰り返し練習を行った。

2.3. 実験方法

(1) 被験者

裸眼または矯正視力により健常な視力を有する学生12名（20～25歳、平均年齢21.9歳）を対象とした。

(2) 使用したHMD

コニカミノルタ株式会社が研究用に開発した反射型ホログラム光学素子による小型軽量の透過型単眼HMD（図2）を使用した。表示部は右眼側に位置し、表示される映像（1m先に10型相当）を外界の視界と重畳、透過して見ることができる。このHMDは、本研究評価に使用する室内での視認時の絵文字の大きさ、音の方向の読み取り確認の可否などを評価項目に沿って著者自ら事前の動作確認により、評価装置としての要件を満たすと確認した上で選定した。実験では無線機を介してPCからHMDに映像を出力した。

(3) 音の可視化方法

聴覚障害者が屋外で必要とする音を既存のアンケート調査[注13]を参考に3種類選定した。著者によるこれまでの調査[注14]で、音の表現について学習した上での質問に連想しやすいと答えた被験者が20名中13名いたことや、絵文字による可視化が音を連想しやすい表現として有効であることから、これらの音を画像化した絵文字を作成した（図3）。デザインは通信機器の表示用図記号[注15]をベースにHMDでの視認性を高めるため、黒地の背景に白の図で描いた。また音の方向を可視化するため、方向に対応する画面位置に楕円状の記号を点滅表示させて表現した（図4）。HMDに表示する方向は歩行時の

外観	仕様	
	画角（対角）	16°
	解像度	320x240
	輝度	200cd/m ²
	色	24bit
	重さ	27g
	表示部厚さ	3.5mm
	透過率	85%

図2 使用したHMD

HMDの映像（1m先の映像）とした場合の大きさ 単位：mm

音	車のクラクション「ブツ」	救急車のサイレン「ピーポーピーポー」	自転車のベル「チリンチリン」
絵文字			

図3 音の可視化（絵文字）

HMDの映像（1m先の映像）とした場合の大きさ 単位：mm

方向の表現方法	図解	
①三角上部を進行方向とする平面で表現する		100
②楕円記号を方向に対応する位置に点滅表示する		
③「左」、「後」、「右」の3方向をHMDに表示する		
	190	65

図4 音の可視化（方向）

死角となる、「左・後・右」の3方向とした。画面中央の三角の位置には方向と同時にその音の種類を表す絵文字も表示させた。絵文字との区別のしやすさと色覚特性[注16]を考慮し方向は黄色に配色した。本研究の目的から本実験では音源識別装置を実装した音声情報の識別、変換は行わず、実験者が定める任意のタイミングで任意の音の可視化情報をHMDに提示できるようにした。また、これら提示される情報を実験では刺激として扱った。

(4) タスク概要

安全な屋外歩行を確保するために、人は周囲で起こる予測できない事象に対し、視覚や聴覚を通して得られる複数の情報の中から必要な情報を取捨選択し適切な行動を取る必要がある。一方で、HMDを用いて情報保障を行う場合、周囲の情報やHMDの提示情報などすべてを視覚情報に依存して行動することになる。本実験ではこれら歩行時の移動、認知行動における情報処理をモデル化したタスクを設定した。歩行時の前方への視覚的注意作業を再現する課題として「歩行タスク」を、屋外の音環境把握場面に相当する課題として「認知タスク」を設け、二重課題によるタスクを遂行させた。認知タスクはT1・T2・T3の3種類とし、その概要を表1に示す。

(5) 歩行タスク

前方のスクリーン（視野角35°）内に投影される複数のランドルト環様の妨害図形（図5）の中から円環に切れ目の無い標的図形（図6）を探す視覚探索課題を用いた。ひとつの図形はスクリーンに7秒間表示され、その大きさを25～650mm（視野

表 1 タスク概要

	認知タスク	条件	刺激の提示方法	反応方法
T1	音源識別タスク	音	スピーカーから音を再生する	音の種類を識別する
		絵文字	HMDに絵文字を表示する	
T2	音源定位タスク	音	3方向(左・後・右)のスピーカーから音を再生する	音の方向を識別する
		絵文字	HMDに3方向(左・後・右)を表示する	
T3	後方視界タスク	後方 ----- 前方	HMDに映る後方視界に絵文字を表示する (同時遂行) ----- 前方のスクリーンに絵文字を表示する	音の種類を識別する

角 0.8~19.4°) で徐々に変化させ、図形が奥から手前に向かって近づいてくるように動画で表現した。一度に表示される妨害図形は 12 個で、標的図形は 1~3 個のランダムな個数とした。したがって、標的図形は約 2.3~7 秒間隔で表示されることになる。その速さは成人の歩行速度 4 km/h と同等となるように設定した。表示されるすべての図形は視力 0.7 [注 17] で判別可能である。歩行タスクの遂行時間は 120 秒であり、タスク開始から終了まで計 35 個の標的図形を表示させた。被験者には標的図形を見つけ次第、左手でカウントボタンを押すよう教示した。この連続的なタスクの遂行により、被験者は試行中常に標的図形の探索を続ける必要がある。歩行タスクの概要を図 7 に示す。

(6) 認知タスク

・T1 音源識別タスク 音の種類を識別する選択反応課題である。刺激の提示方法が異なる 2 条件を設定した。音条件では被験者後方のスピーカーから音を再生させ(約 60dB)、絵文字条件では HMD 上に絵文字を提示した。反応ボタンには刺激と同一の 3 種類の絵文字が割り当てられており、提示される刺激と対応する絵文字のボタンを押してもらった。反応ボタンの操作は右手の人差し指、中指、薬指で行い、刺激に気づき次第正確に判断してできるだけ素早く押すように教示した。これにより、音条件は健聴者の音に対する聴覚による一般的な反応をモデル化したタスクとなっている。音源識別タスクを図 8 に示す。

・T2 音源定位タスク 音の方向を識別する選択反応課題である。刺激の提示方法が異なる 2 つの条件を設定した。音条件では被験者の周囲 3 方向(左・後・右)に配置したスピーカーから音を再生させ、絵文字条件では HMD に方向と絵文字を同時に提示した。反応ボタンには片手で操作可能なリモコンの方向ボタンを使用し、提示される刺激と対応する方向のボタンを押してもらった。リモコンは右手で握りすべての方向ボタンを親指で操作させ、刺激に気づき次第正確に判断してできるだけ素早く押すように教示した。さらに、反応ボタンの選択後に提示された音の種類について頭の中で想起させた。反応方法の複雑化と発声による脳血流への影響を避けるため、被験者の想起のみで音源種類の識別に対する評価は行わなかった。本タスクはどちらから何の音が鳴っているのか状況判断を行う場面をモデル化している。音源定位タスクを図 9 に示す。

・T3 後方視界タスク 後方は聴覚障害者にとって死角になる。後方視界の情報提示は後方の死角を排除する方法として効果的と考えた。そこで HMD 使用者の後方を映す小型カメラの映像を画面に映すことで情報保障を行う環境を想定し、後方視界の提示情報に対し音の種類を識別する選択反応課題を設定した。



図 5 妨害図形



図 6 標的図形

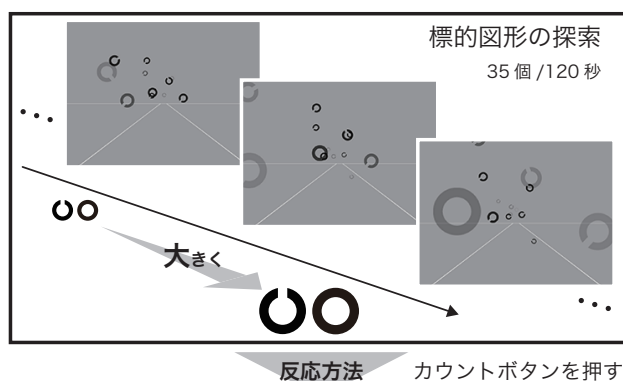


図 7 歩行タスクの流れ

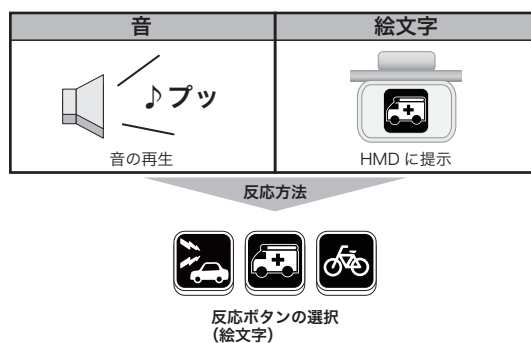


図 8 T1 音源識別タスクの反応方法

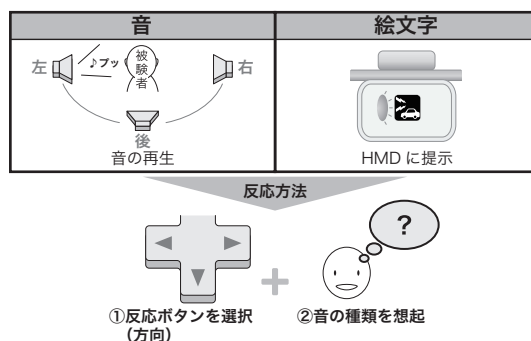


図 9 T2 音源定位タスクの反応方法

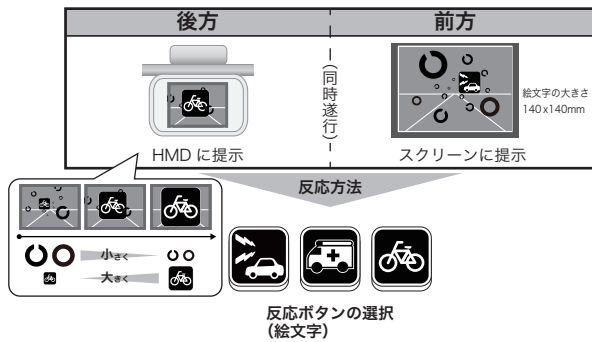


図 10 T3 後方視界タスクの反応方法



図 11 計測部位と CH 位置

HMD には歩行時の後方視界を模式的に表すため、歩行タスクの図形が遠ざかるように次第に小さくなっていく映像の中を絵文字が後方から近づいてくるように次第に拡大されていく動画を提示した(後方)。また後方視界においても前方視界同様の判断が可能かどうかを評価するため、前方のスクリーンにもランダムに絵文字を提示した(前方)。反応方法は T1 と同様である。後方視界タスクを図 10 に示す。

2.4. メンタルワークロードの評価方法

(1) 生理的指標

機能的近赤外分光法 (fNIRS: functional Near Infrared Spectroscopy) による脳血流動態を測定した。計測装置には近赤外光脳機能イメージング装置 (島津製作所: OMM-3000) を使用した。計測部位は前頭連合野とし、前額部に位置する Fpz を基準に 3×7 の送受光ファイバを取り付け、全 32 チャンネル (CH) におけるヘモグロビン濃度の変化量を測定した (図 11)。計測時間はタスク遂行時間 (120 秒) の前後に安静状態を維持するレスト時間 (各 15 秒) を含む、計 150 秒間とし、サンプリング間隔 175msec で記録した。なお、前レストを含む計測開始は、計測毎に被験者を安静にした後に目視により血流の変動が安定した時点とした。データの処理には fNIRS の解析ソフトウェア FOIRE-3000 を使用した。fNIRS によって記録されるヘモグロビンデータのうち、神経活動に伴う局所脳血流の変化と高い相関がある酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) を対象に解析作業を行った。また、前頭連合野の外側部は認知制御を司る領域である [注 18] ことから、本研究では左右外側部 10 個ずつの CH を関心領域として選択した (表 2)。各 CH 内で前レストの平均が 0、標準偏差が 1 となるようにデータの標準化を行い、標準得点 (z-score) を算出した。さらに、事象関連の脳血流動態を

表 2 関心領域の計測 CH

関心領域	計測CH
右外側部	1, 2, 7, 8, 14, 15, 20, 21, 27, 28
左外側部	5, 6, 12, 13, 18, 19, 25, 26, 31, 32

表 3 NASA-TLX の評価項目

評価項目 (端点)	項目の説明
精神的要求 (小/大)	課題を実行中に、図形を探す、音を聞く、HMDの表示を見る等どれくらいの知覚的活動が必要だったと感じましたか
身体的要求 (小/大)	課題を実行中に、反応ボタンを押すのにどれくらいの身体的活動が必要だったと感じましたか
時間的圧迫感 (小/大)	課題を実行するにあたって、課題の頻度または速度から感じた時間的圧力はどの程度だったと思いますか
作業成績 (良い/悪い)	課題目標について、あなたはどの程度成功したと思いますか
努力 (少ない/多い)	与えられた課題の維持・達成にどの程度がんばったと思いますか
不満 (低い/高い)	課題を実行中に、いらいら、不安、落胆、ストレス、悩み等どの程度感じましたか (作業がうまくできなかったという思い)

観察するため、被験者ごとに刺激提示 10 回分の Oxy-Hb データの加算平均を求め、刺激提示時に 0 となるようにベースライン補正を行った。加算結果は刺激提示前 2 秒、提示後 10 秒の計 12 秒からなる時間幅で再構成した。

(2) 行動的指標

タスク遂行時の作業成績を評価するため、刺激提示に対する反応時間 (msec)、誤答率 (%), および歩行タスクで被験者がカウントした標的図形の数と表示された全標的図形の数 (35 個) とのずれ量をカウンティングエラーとして測定した。さらに、全被験者のずれ量から平均二乗誤差 (RMSE) を求めた。

(3) 主観的指標

各タスクにおける被験者の主観的メンタルワークロードを日本語版 NASA-TLX [注 19] を用いて評価した。各タスク終了後に表 3 に示す 6 項目について 0-100 点で評価をしてもらい、各得点の加重平均から算出される総合値 AWWL (Adaptive Weighted Workload) を求めた。総合値は得点が高いほど主観的な負担が高いことを表している。

3. 結果

3.1. 測定結果

T3 後方視界タスクについては脳血流と反応時間の計測値を後方と前方に分けて評価し、その他の指標は両者を組み合わせたタスク全体の評価値として分析を行った。脳血流と反応時間、NASA-TLX については被験者内要因による対応のある t 検定、誤答率についてはマクネマー検定、カウンティングエラーについては Wilcoxon の符号付順位と検定による分析方法を用いた。

脳血流について各タスクにおける左外側部の総加算平均波形を図 12, 図 13, および図 14 に示す。脳血流の変化量 (波形ピークを含む 5 秒間の平均値, 図中灰色部) を各タスクの条件間で比較した結果, T1 音源識別タスクでは音条件の脳血流が絵文字条件に比べ有意に高かった ($t[115]=2.20, p<.05$)。T2 音源定位タスクでは有意差は認められなかった ($t[111]=0.12, p>.05$)。

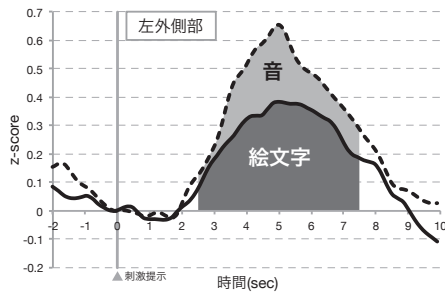


図 12 総加算平均波形 (T1 音源識別タスク)

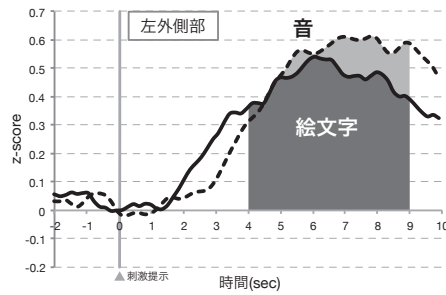


図 13 総加算平均波形 (T2 音源定位タスク)

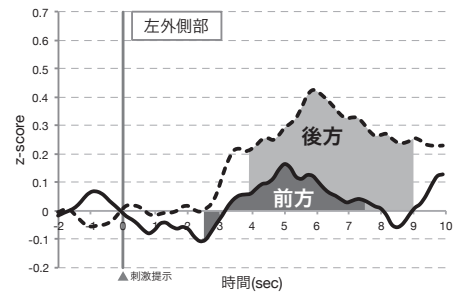


図 14 総加算平均波形 (T3 後方視界タスク)

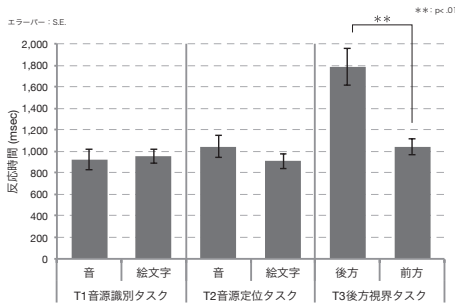


図 15 反応時間

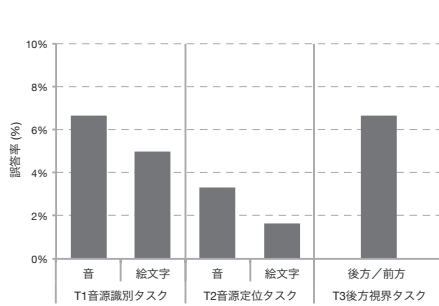


図 16 誤答率

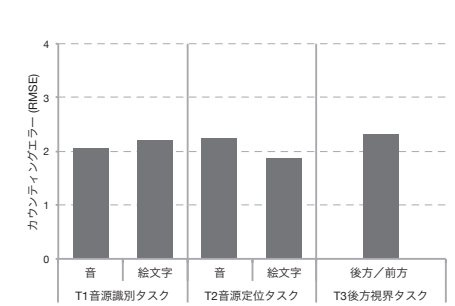


図 17 カウンティングエラー

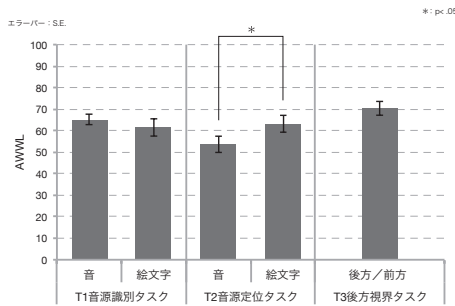


図 18 NASA-TLX

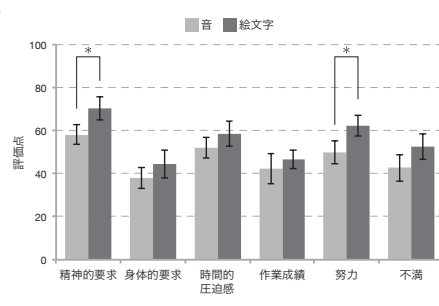


図 19 評価項目の比較 (T2 音源定位タスク)

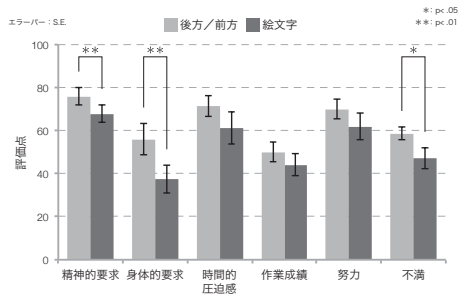


図 20 評価項目の比較 (T3 後方視界タスク)

T3 後方視界タスクでは後方時の脳血流が前方に比べ有意に高かった ($t[114]=2.34, p<.05$)。図 12 より、脳血流の時間的変化はタスクの開始から 5 秒程度遅れてピークに達するとする脳血流動態 (ヘモダイナミクス) の生理的な関数と相似する結果が得られた。また、右外側部でも同様な脳血流の変化が見られたことから、本研究で関心領域とした左右外側部において音や絵文字の刺激弁別に伴い神経活動の亢進が起こることが確認できた。

T2 音源定位タスクおよび T3 後方視界タスクの後方条件での脳血流のピークは T1 音源識別タスクに比べ 2 秒ほど遅延した。音源種類の識別だけではない方向や後方視界の刺激が HMD に提示された場合、提示刺激の識別をすべて完了するために時間を要することが予想される。したがって、このような波形ピーク時間の遅れが生じたと考えられる。

反応時間、誤答率、カウンティングエラーの結果を図 15、図 16、および図 17 に示す。T1 音源識別タスクの反応時間の平均は音条件が 913msec、絵文字条件が 956msec で有意差はなく ($t[105]=0.73, p>.05$)、音声の聴覚情報に対し速く反応する被験者と HMD の視覚情報に対し速く反応する被験者の 2 つのグループに分けられた。T2 音源定位タスクでは音条件の反応時間 (1,044msec) が絵文字条件 (909msec) と比較して遅延が起きた ($t[113]=3.36, p<.01$)。しかし、著者らが過去に行った類似の研

究 [注 20] や人間の音や光に対する反応特性に関する知見 [注 21] として聴覚による音情報に対する反応時間の優位性が報告されている。T2 音源定位タスクの反応時間はこれと異なる結果であった。また、本タスクの測定データの分布を見ると音条件でのばらつきが大きく、計測時に外的要因が作用した疑いがある。よって、本研究では T2 音源定位タスクの反応時間を基に条件間で比較を行うことは妥当でないと考える。T3 後方視界タスクでは後方の反応時間の平均が約 1800msec となり、前方と比較しても大きな遅延が発生した ($t[50]=8.61, p<.01$)。

誤答率についてすべてのタスクにおいて有意差は認められなかった (T1: $p>.05$, T2: $p>.05$)。また、カウンティングエラーについてもすべてのタスクにおいて有意差は認められなかった (T1: $p>.05$, T2: $p>.05$)。これらは、HMD の提示情報や前方視界に対する認知精度は影響されないと言える。

NASA-TLX の AWWL の結果を図 18 に示す。T2 音源定位タスクでは有意差は認められなかったが ($t[111]=0.12, p>.05$)、絵文字条件の AWWL が音条件に比べ高くなる傾向が見られた。そこで、各評価項目の得点の平均を条件間で比較した (図 19)。その結果、「精神的要求」と「努力」に有意差が認められた (精神: $t[11]=2.44, p<.05$, 努力: $t[11]=2.22, p<.05$)。

T3 後方視界タスクにおける AWWL は他の計測条件と比較して最も高くなった。同様に、AWWL が増加した要因を調べるた

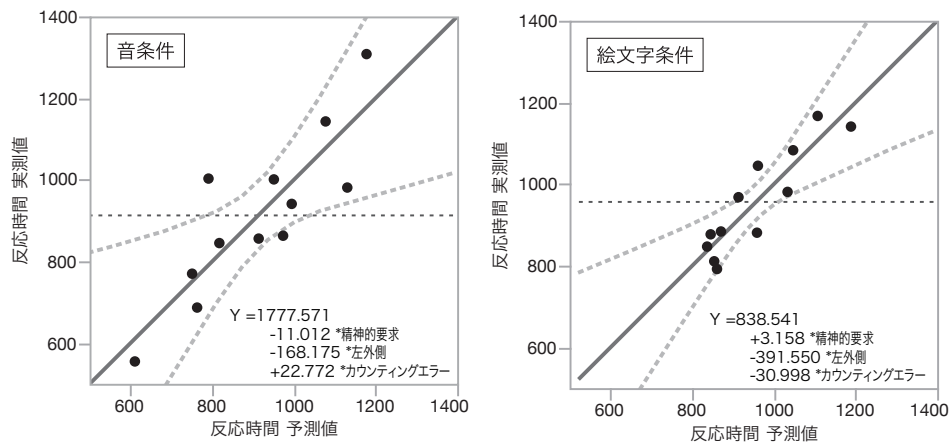


図 21 条件別の重回帰分析結果

表 4 条件別の重回帰分析結果

	音条件	絵文字条件
	標準回帰係数	標準回帰係数
精神的要求	-0.493 *	0.381 *
左外側	-0.469 *	-0.703 **
カウンティングエラー	0.235	-0.521 **
決定係数R ²	.73 *	.81 **

* : <.05, ** : <.01

め各評価項目の評価得点を同じ HMD を用いた計測条件である T1 音源識別タスクの絵文字条件と比較した (図 20)。その結果、「精神的要求」、「身体的要求」、「不満」の項目間に有意差が認められた (精神: $t[11]=3.66, p<.01$, 身体: $t[11]=4.87, p<.01$, 不安: $t[11]=2.55, p<.05$)。

3.2. 指標間の関係

本研究では安全な行動をとるための客観的な評価指標として、反応時間の測定結果が重要な目安となる。そこで、実験によって得られた各被験者の反応時間がどのような要因によるものなのか、その因果関係を調べるため各条件でステップワイズ法による重回帰分析を用いて評価を行った。T1 音源識別タスクの結果を図 21、表 4 に示す。音条件について、反応時間を目的変数とし左外側部の脳血流の変化量と精神的要求、およびカウンティングエラーを説明変数とする有意なモデルが得られた ($F[3, 8]=7.15, p<.05$)。得られた予測式より、左外側部での脳血流が増加するほど、また精神的要求が大きいほど、反応時間は短くなることを表している。同様に絵文字条件について、左外側部の脳血流の変化量、精神的要求、およびカウンティングエラーの変動から反応時間を予測する有意なモデルを得ることができた ($F[3, 8]=11.55, p<.01$)。

T1 音源識別タスクについて各被験者の反応時間の違いによって 2 群に分かれたことから、条件間ですべての指標の差分 Δ (= [絵文字条件] - [音条件]) を求め、各変数間の関係を分析した。特異な値を示した被験者一人を除くと、図 22 に示すように反応時間と左外側の脳血流に有意な相関が認められた ($r = -.75, p<.01$)。図より、絵文字条件の脳血流変化量が大きい被験者は絵文字条件の反応時間が音条件に比べ速く、反対に、音条件の脳血流変化量が大きい被験者は音条件の反応時間が絵文字条件

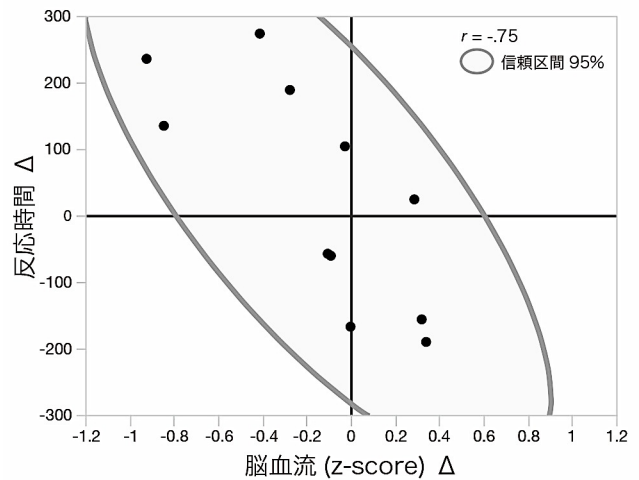


図 22 脳血流と反応時間の相関

に比べ速い関係にあることを示している。また、両条件とも脳血流と反応時間に負の相関関係があり、脳血流の変化量が大きいほど反応時間が速くなった。

T2 音源定位タスクおよび T3 後方視界タスクについては重回帰分析による有意な予測モデルを得られなかった。

4. 考察

4.1. 脳血流からみた負担度

T1 音源識別タスクでは音条件と絵文字条件の両条件で脳血流の増加と反応時間の短縮に相関が認められた。音条件では歩行タスクの途中で音が再生された際、音に対する知覚的活動が大きくなると脳の神経活動が活性化し素早く反応することができる。一方、絵文字条件では絵文字が HMD に提示されることを予期し注意を HMD に向けようと強く意識することで脳神経活動が活性化し、結果として素早く反応することができる。以上より、音や絵文字の刺激提示に対する脳の活性化により、タスク処理速度が速まり、反応の切り替えを促進するように働いたことが考えられる。前頭連合野左外側ではどこに注意を向けたいのかという情報を表象、維持する働きがあるとされている。したがって本タスクで観測された脳血流の増加は、認知過程における情報処理を効率的に行うために注意の処理資源を適切に切り替えようとする能動的な認知処理活動と解釈すること

ともできる。

Wickens の多重資源理論ではこの注意の処理資源が、視覚、聴覚の各モダリティに存在すると仮定している [注 22]。この理論によれば、同一の処理資源を消費する際に大きな干渉が起こるとされる。絵文字条件では歩行タスク（標的図形の探索）と認知タスク（HMD による絵文字の識別）の同時遂行によって両タスクで視覚モダリティの処理資源を消費したが、干渉の影響は少なく音条件と比較してメンタルワークロードの増加は見られなかった。絵文字という単一の情報からなる情報提示では、処理資源が干渉する場合であっても HMD の提示に対して容易に気づき識別することができるためだと考えられる。このような脳の活性化を伴い積極的にタスクの処理効率を高める情報刺激（負荷）を「(+) の刺激」とする。

音の方向を識別する T2 音源定位タスクについて、絵文字条件の Oxy-Hb の増加は音条件と同程度だったが、AWWL が高く、同じ評価項目間の比較では知覚的活動と努力に対する主観的負担度が大きいことが示された。健聴者にとって音が鳴った方向に注意を向けることは日常的に行われる反射的で無意識的な行為であるのに対し、HMD による方向の情報取得では方向という三次元の空間情報が平面上に変換されたものを視覚的に認識しなければならなかった。このような普段の自動化された処理とは異なる認知作業が求められることによって、より大きな心理的ストレスを感じさせる要因になったと考えられる。

T3 後方視界タスクの後方条件では刺激提示に伴う Oxy-Hb の増加が見られたが、反応時間に大きな遅延が発生した。HMD には常時後方視界の映像が表示されるため、前方視界と後方視界の情報過多により注意を適切に切り替えようとする認知機能をうまく働かせることができなかつたと考えられる。また、HMD に表示される後方視界の絵文字は、その大きさが小から大へと変化する表現であり、被験者が絵文字の出現に気づいてもその種類を特定できず、識別できる大きさになるまで時間を要したことが示唆される。HMD での後方視界の提示による被験者の認知能力の低下と視認性の悪化が主観的メンタルワークロードを増加させたと考えられる。

以上のように、メンタルワークロードの増加につながる情報刺激（負荷）が与えられる状況では、タスクによってはその人の特性により血流量が変化するため、同じ脳の活性化であっても処理能力を超える負荷となり、結果としてタスク遂行時の困難度を高めタスクの処理効率の低下を招く可能性がある。このような情報刺激を「(-) の刺激」とする。

本実験で使用した絵文字のように容易に知覚されるシンプルな情報からなる (+) の刺激に対し、(-) の刺激では後方視界を再現する画面表示のように多くの情報量を含んでいた。このような情報量の差異がメンタルワークロードの高低に分かれる

要因になったと考えられる。音情報がどのように可視化されたときに (+) の刺激 (-) の刺激) となるのかその要因を明らかにすることで、音の可視化におけるデザインの課題を解決することができる。

4.2. 安全性の検証

本実験により得られた結果から情報保障手段としての透過型情報提示の安全性を検証する。安全性の検証に当たり指標として、人間の情報処理や注意状態を反映し外的に現れる現象である反応時間を用いた。反応時間は危険回避に直接的に影響する行動的指標である。

危険回避に関する知見として、一般に人の知覚反応時間は 0.7 ~ 1 秒程度 [注 23] とされている。この数値は自動車運転時の予測できない危険に対し人が回避行動を移すのに要する平均的な時間とされ、自動車事故の過失調査では空走時間としてよく用いられている。本研究については、健聴者の一般的な音に対する反応として T1 音源識別タスクの音条件の反応に対応する行動指標として考えることができる。実際に本タスクの音条件の反応時間はこの知覚反応時間に当てはまる数値であった。同様に HMD の提示情報に対して反応する T1 と T2 の絵文字条件、および T3 の後方条件の反応時間と比較すると、T1 と T2 の絵文字条件の反応時間はこの指標に当てはまる結果となった。一方で後方条件の反応時間は 1 秒を超える大きな遅延が発生した。したがって、知覚反応時間を危険回避に対する指標としたとき、HMD を用いて音を表す絵文字や方向を提示しても安全性は確保された。ただし、後方視界を提示した場合、安全な認知反応を維持できないことがわかった。後方に対する反応時間の増加は HMD への注視時間の増加を表していると言える。このような行為は前方で起きる危険事象への回避失敗にもつながる可能性がある。

本研究では HMD による人の情報取得に対する注意や認知機能に着目して評価したため、実際に音源識別システムを実装した音情報の取得、識別、提示は行っていない。それゆえ、システム側で要するこれら一連の処理時間の影響は無視されている。この音源識別システムによる技術的な課題については、今後さらなる研究開発が進むことでその影響は小さくなると予想される。また、認知機能を司る前頭連合野はトレーニングや慣れによりその働きを強化できる一方で、加齢によって退縮し注意などの認知機能が衰える可能性もある脳部位である。したがって、実際に HMD を用いた情報保障の被保障者として想定される高齢者や聴覚障害者に対し、継続的な評価を行う必要がある。また、HMD の視認性は環境によって影響されやすい問題もあるため、屋外でのフィールド実験のように、実際の保障環境に近い評価実験を構築し、安全性に対しより詳細な評価をしておくことが求められる。

5. まとめ

本研究では聴覚障害者のための情報保障手段として透過型情報提示による音の可視化環境を想定し、実験室内で HMD を使用したモデル実験を構築した。学生を対象に聴覚による情報取得と HMD の提示情報の視覚による情報取得について、その情報処理過程におけるメンタルワークロードを生理、行動、心理計測により総合的に評価を行った。

音や絵文字の情報提示に伴い左右外側での脳血流の増加が見られ、音源識別のみの情報に対する反応時間は安全の指標となる知覚反応時間 1 秒以内に収まる結果が得られた。脳血流の賦活度と反応時間に負の相関が認められ、脳の活性化により認知機能が高められることが示唆される。一方で、HMD に後方視界を表示させた際は脳血流の増加が見られたものの、反応時間の遅延と主観的負担度の増加が確認できた。

したがって、HMD を用いた情報提示において、反応を促進させるように負担度を軽減させる情報提示と、負担度を増加させる情報提示が存在することが分かった。聴覚障害者のための透過型情報提示による情報保障を実現するためには、ユーザーに対し注意の切り替えを促すような情報提示をする必要がある。その際、注意を向けやすい提示方法や容易に識別できるアイコンデザインをどのように設計するかが課題となる。視覚情報のみでは認知機能が低下するという人の注意特性や、後方視界の死角情報の提示は歩行時では知覚反応の遅延を招くことを考慮すると、歩行時の情報提示は具体的な絵文字のような提示ではなく、抽象的な方法、例えば、光の点滅や、これら視覚情報に加えて振動などの触覚フィードバックを活用したインタフェースと併用することでより使いやすく、安心、安全な情報保障が可能となるだろう。

また、今回実験室内で HMD を使用したモデル実験として座った姿勢で評価した結果、先行研究(1)で行った研究と異なり、前方情報提示については全員が安全な反応の指標となる知覚反応時間 0.7~1 秒内で反応することができた。(1)の研究では歩行という動作がある中での評価、本研究では座った姿勢での評価であったことから、歩行する動作が加わることで反応の遅延が生じたと考える。そのため、実験室内で HMD を使用した今回のモデル実験は、今後 HMD を使用する前の安全性評価になりうるが、改良が必要である。例えば、今回の評価モデルの精度を高めるために、立った姿勢で足踏みをしながら評価をするなどの改善が必要と考える。

6. 今後の課題

本研究は、HMD が聴覚障害者にとって屋外歩行における有効な情報提示手段と考えて研究を進めてきた。この研究で歩行しながら後方死角情報を HMD へ提示した場合、安全な反応時

間内で反応することができないことが分かった。しかし、例えば後方死角情報を振動などの抽象的な方法で伝えた後、歩行停止時に視覚情報を提示することで安全を図ることができれば、HMD の後方死角に対する有効性はあると考える。したがって、後方の死角情報の提示方法について継続研究する必要がある。

本実験で用いた情報保障環境をモデル化した評価方法が、HMD 使用に関する安全面での使用判定基準になり得る可能性が得られた。またこの評価モデルは、使用に際してのトレーニングモデルにもなりうると考えられる。脳血流では、前方より後方視界のタスクの方がより多くの Oxy-Hb が流れ、且つ安全な反応時間を超えることが分かったが、評価モデルによるトレーニング後の Oxy-Hb がどのように変化していくか、また反応時間がどのように変わるかということについては継続評価が必要である。

また HMD のスタイリングデザインに関して、著者の先行研究では、生まれながらの聴覚障害者の 20 代女性から「私は屋外歩行時に身につける装置は普通であってほしい。」というデザイン面におけるリクエストがあったが、この点においては本研究の成果を活かし、操作性のデザインに活かしていく必要がある。

以上より、今後は視覚以外の情報伝達手段を活用し、屋外の実環境で同様に時間内での負担度の評価を行い、得られた結果を基に透過型情報提示による情報保障について、安全の指針となるガイドライン策定に向け取り組んでいきたい。さらに、ユーザビリティの高い情報保障デバイスの開発や GUI の提案など具体的なデザイン展開へと進めていく。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(課題番号 23500649)の助成を受けたものです。また本研究で使用した HMD はコニカミノルタ株式会社から貸与して頂きました。最後に、実験に協力し参加して頂きました本学学生の皆様に感謝の意を表します。

注および参考文献

- 1) 内閣府：高齢社会白書(平成 25 年 10 月推計)、総務省、2013
- 2) 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部企画課：平成 18 年身体障害児・者実態調査結果、2008
- 3) 補聴器供給システムの在り方研究会：補聴器供給システムの在り方に関する研究 2 年次報告書—補聴器普及のためのシーズに関する調査—、日本補聴器工業会、2003.9
- 4) 稲葉通太：聴覚障害をもつ歩行者の問題とそれに対する支援、国際交通安全学会誌、Vol.28, No.1, pp.34-40, 2003.5
- 5) 須藤正時：難聴者の生活環境向上のため「音の可視化」を目的としたウェアラブル画像入出力の形態研究、財団法人日比科学技術振興財団、生活環境向上のための報告書、Vol.1,

- No.10, pp.98, 2007.4
- 6) 田中美郷：言語教育面からみた中等度難聴児の問題，厚生労働科学研究費補助金（子ども家庭総合研究事業）分担研究者報告書，2003
 - 7) 岩佐要，黒柳奨，岩田彰：FPGA を用いたパルスニューロンモデルによる音源定位及び音源種類識別システムの実装，電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.11, pp.3079-3090, 2007.11
 - 8) 徳田浩一，駒谷和範，尾形哲也，奥乃博：音源定位結果と音声認識結果を HMD に統合提示する聴覚障害者向け音環境理解支援システム，情報処理学会全国大会講演論文集，Vol.70th, No.4, pp."4-281"-4-282", 2008.3
 - 9) 小坂井敦，奈良博之，井野秀一，吉田淳，伊福部達：音声認識技術と透過型 HMD を利用した聴覚補助方式，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.100, No.712, pp.35-41, 2001.3
 - 10) 須藤正時：難聴者の生活環境向上のため「音の可視化」を目的としたウェアラブル画像入出力の形態研究，財団法人日比科学技術振興財団，生活環境向上のための報告書，Vol.1, No.10, pp.97-110, 2007.4
 - 11) 須藤正時，深谷晃輔：透過型情報提示における歩行時の安全性の評価—ヘッドマウントディスプレイを使用した音の可視化研究（1），デザイン学研究 BULLETIN OF JSSD, Vol.61, No.2, 2014
 - 12) 日本工業規格：JISZ8502-1994 人間工学：精神的作業負荷に関する原則；用語及び定義，日本規格協会，1994
 - 13) 財団法人共用品推進機構 東京会議聴覚情報障害班：聴覚障害者が必要としている音情報～「音見本」調査報告書～，2002.3
 - 14) 須藤正時：難聴者の生活環境向上のため「音の可視化」を目的としたウェアラブル画像入出力の形態研究，財団法人日比科学技術振興財団，生活環境向上のための報告書，Vol.1, No.10, pp.105, 2007.4
 - 15) 情報通信ネットワーク産業協会デザイン委員会 図記号ワーキンググループ：通信機器の表示用図記号規格 CES-DZ
 - 16) 色覚の異常により色の見え方・感じ方が正常な人と異なる状態のこと。色の見え方は型によって異なるが，黄色は本来の色合いと近い彩りで知覚することができる。
 - 17) 普通自動車運転免許の適性検査では両眼で視力 0.7 以上であることが定められている。
 - 18) 甘利俊一（監）・田中啓治（編）：認識と行動の脳科学，pp.208-210, 東京大学出版会，2011.8
 - 19) 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 の紹介および簡便法の提案—，人間工学，Vol.29, No.6, pp.399-408, 1993.12
 - 20) 深谷晃輔：聴覚障害者のための HMD による情報保障に関する研究—音を絵文字で提示した際の認知負担度—，名古屋工業大学建築・デザイン工学科 2009 年度卒業論文梗概集，pp.99-100, 2009.12
 - 21) 勝浦哲夫：人間工学基準数値数式便覧，技術同出版，pp.163, 1992
 - 22) Wickens, C.D.: The structure of attentional resources. In R. Nickerson (ed), Attention and Performance VIII. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. pp239-257, 1980
 - 23) 林洋：実用 自動車事故鑑定工学，技術書院，pp.204, 2002.4