

HMD を用いた音の視覚化情報の認知に伴う負担度評価

指導教員 藤岡 伸子 教授

深谷 晃輔

1. 研究の目的

聴覚障害者のための情報保障手段として最も有用とされるのは音の視覚化による視覚情報への代替である。ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) は視覚化した情報を被障害者に対し効率よく容易に提供可能な表示デバイスとして注目されており、HMD を用いることで聴覚障害者の生活の質向上に貢献すると期待されている。しかし歩行時の HMD の使用を想定した場合、前方確認といった周囲で刻々と起こる変化を察知しながら、HMD の表示情報にも適切に対応して行動しなければならない。このような周囲の環境や HMD の表示内容に起因する処理情報の過多が HMD 使用者の注視すべき対象を曖昧にさせ、HMD を用いた情報保障がかえって危険を招く可能性もある。そこで本研究では、歩行時の聴覚による情報取得と HMD 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行為者の精神的作業負担 (以下、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を行い、情報保障手段としての HMD 利用の安全性を検証する。

2. 実験計画

2-1. 音の視覚化 反射型ホログラム光学素子を用いた透過型単眼 HMD (表 1) を使用し、音を視覚化した図記号の提示による情報保障環境を想定し、モデル実験を構築した。検証材料として聴覚障害者が屋外で必要とする音を3種選定し、それらを表す絵文字を作成した (表 2)。音の方向を視覚化するため、方向に対応する画面位置に楕円状の記号を表示することで音が鳴っている方向を表現した (図 1)。方向は、右、後、左の3方向であり、絵文字との区別のしやすさを考慮し、記号を黄色に配色し、点滅させて表示した。実験ではこれらを刺激として被験者に提示した。

2-2. タスク設定 歩行時の視覚的注意を再現する歩行タスクと日常の音環境把握場面に相当する2種類の認知タスク (T1 及び T2) による二重課題を設定した。認知タスクでは、音を再生する「音条件」と HMD に絵文字を提示する「絵文字条件」を設けた。

【歩行タスク】 スクリーンに投影される複数のランドルト環様の妨害図形 (図 2) の中から円環に切れ目のない標的図形 (図 3) を探す視覚探索課題を用いた。図形がスクリーン奥から手前に向かって流れてくるように動画で表現し、その速さは成人の歩行速度 4km/h とほぼ等しくなるように設定した。1 度に表示される

表 1. 使用した HMD





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%

表 2. 音の視覚化 (絵文字)

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			



【方向の表現方法】

- ①三角上部を進行方向とする平面で表現
- ②記号を方向に対応する位置に点滅表示
- ③「右」、「後」、「左」の3方向を表示

図 1. 音の視覚化 (方向)

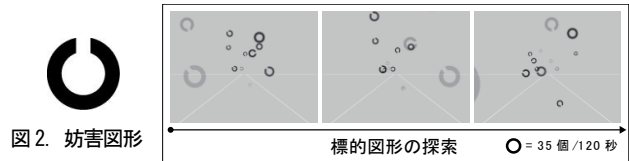


図 2. 妨害図形



図 3. 標的図形

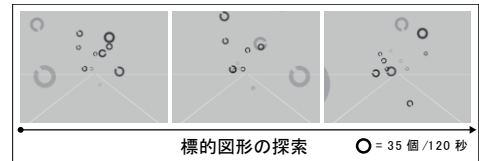


図 4. 歩行タスクの流れ

妨害図形は約 12 個で、標的図形は 1~3 個とした。歩行タスクの総時間は 120 秒であり、タスク開始から終了まで計 35 個の標的図形が表示されるようにした。被験者には標的図形を見つけ次第、1 個につき 1 回、左手でカウントボタンを押すように教示した。歩行タスクの流れを図 4 に示す。

【T1 | 音源識別タスク】 歩行タスクの最中に提示される刺激に対し音の種類を識別する選択反応課題である。音条件では被験者の後方から音が再生され、絵文字条件では HMD に絵文字のみが表示される。反応ボタンには 3 種の絵文字がキーボードに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で行い、刺激に気づき次第、正確に判断し、できるだけ素早く反応ボタンを押すよう教示した。音源識別タスクの流れを図 5 に示す。

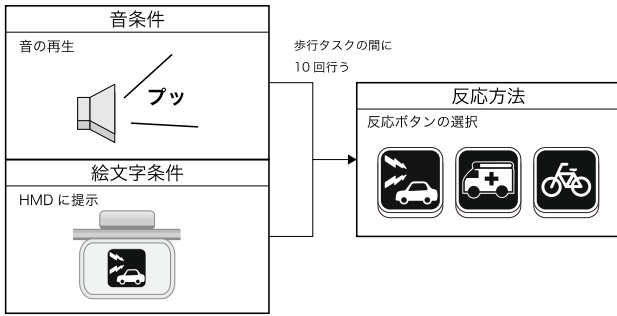


図5. T1 | 音源識別タスクの流れ

【T2 | 音源定位タスク】 歩行タスクの最中に提示される刺激に対し音の方向を識別する選択反応課題である。音条件では被験者の周囲3方向に配置したスピーカから音が再生され、絵文字条件ではHMDに方向と同時に絵文字が表示される。反応ボタンにはリモコンの十字ボタンを使用し、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。また、方向の識別後に音の種類を頭の中で想起するよう教示した。音源定位タスクの流れを図6に示す。

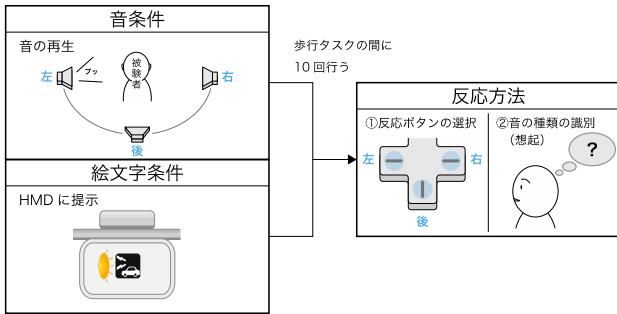


図6. T2 | 音源定位タスクの流れ

2-3. 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) による脳血流の計測を行った。計測装置には島津製作所製、近赤外光脳機能イメージング装置 (OMM-3000) を使用した。計測部位は前頭連合野とし、前額部の 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計測した (図7)。



図7. 計測部位とCH位置

計測時間はタスク遂行時間 (120 秒) の前後に被験者に安静にしてもらい休憩 (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。

データの処理には fNIRS 専用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 (Hb) データのうち、酸素化ヘモグロビン

(oxy-Hb) の変化が神経活動に伴う局所脳血流の変化と高い相関があることから、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¹⁾ 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3)。

表3. 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

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 Hb 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 秒の時間幅で構成した。

(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 (%)、及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計測した。さらに、全被験者のずれ量から平均二乗誤差 (RMSE) を算出した。

(3) 主観的指標 主観的メンタルワークロードの評価方法として、日本語版 NASA-TLX²⁾ を用いた。各条件のタスク終了直後に表4に示す評価項目について評価を行ってもらった。総合値の算出には簡易手法である AWWL³⁾ を用いた。

表4. 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か
作業成績 (良い/悪い)	課題目標について、どの程度成功したか
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か
不満 (低い/高い)	作業中に、いらいら、不安、落胆、ストレス、悩み等々どの程度感じたか (作業がうまくできなかったという思い)

3. 実験 I メンタルワークロード評価実験

3-1. 実験概要 タスク遂行時のメンタルワークロードの評価を行うため、被験者 12 名に対し実験を行った。各条件 1 試行のみ計測した。実験環境を図8に示す。

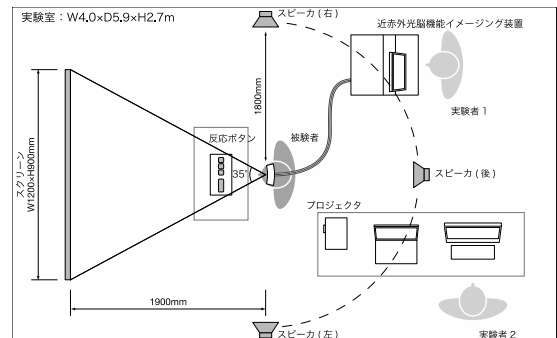


図8. 実験環境

3-2. 実験結果 左右外側部別に音源識別タスクの各条件における全被験者の総加算平均波形を図9に示す。条件間で脳血流の変化量(3.5~6.5秒範囲)を比較した結果、左外側部において音条件の脳血流が絵文字条件に比べ有意に増加する結果となった($p<.05$)。同様に、音源定位タスクの結果を図10に示す。条件間で脳血流の変化量(5.5~8.5秒範囲)を比較した結果、左右とも有意差は認められなかった。図より両タスクとも音や絵文字の刺激の提示に伴い左右外側部での脳血流の増加が観測され、刺激を弁別する認知作業による神経活動の亢進が確認できた。

反応時間、誤答率、カウンティングエラーの結果を図11、表5、6に示す。音源定位タスクにおいて音条件の反応時間が1秒を超え、100msec程遅延する結果となった($p<.05$)。この結果は、HMDによる絵文字の情報取得は音の情報取得に比べ反応時間に遅延が起るとする既往の研究⁴⁾とは反対の結果となった。また、音条件のデータのばらつきが大きく、反応時間の計測に外的要因が作用した疑いがある。よって、本実験で得られた反応時間をもとに条件間で比較し、HMD利用の安全性を検証することは妥当ではないと考える。誤答率とカウンティングエラーに差は認められなかったことから、HMDによる情報取得について認知精度は影響されないことが示された。

NASA-TLXの結果を図12に示す。音源識別タスクについて条件間で同等の結果となったのは、被験者によってAWWLが音条件の方が高い「音-AWWL(大)」群と絵文字条件の方が高い「絵文字-AWWL(大)」群にほぼ半数に分かれたためである。NASA-TLXの6つの評価項目について各群の評価値の分布を調べた結果、「努力」の評価値の分布が群によって大別される傾向が示された(図13)。したがって、AWWLが被験者によって異なる結果となったのは各条件で求められる努力の感じ方の違いによるものと考えられる。一方、音源定位タスクでは絵文字条件のAWWLが有意に高いことが示された($p<.05$)。そこで、音源定位タスクにおける各評価項目を条件間で比較した結果(図14)、「精神的要求」と「努力」の評価値に有意差が認められた($p<.05$)。したがって、音条件に比べ絵文字条件の方が方向と音の種類2つの刺激を識別する際、努力がより強く求められたのに加え、どちらの方向から何の音が提示されたか判断すべき内容が多く、知覚的活動についてもより強く感じられたことを示している。

指標間の関係を調べるため各条件で重回帰分析を行った。結果を図15、表7に示す。音源識別タスクでの音条件について、反応時間を目的変数とし、左外側部における脳血流の変化量と精神的要求の評価値を説明変数とする有意なモデルを立てることができた($p<.01$)。予測式の結果より、左外側部での脳血流が

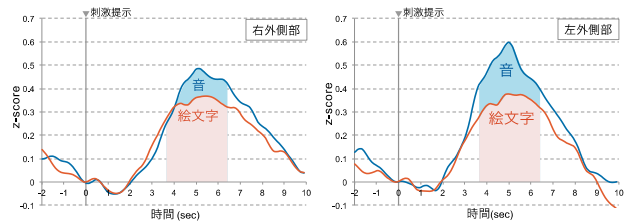


図9. 総加算平均波形 (T1 | 音源識別)

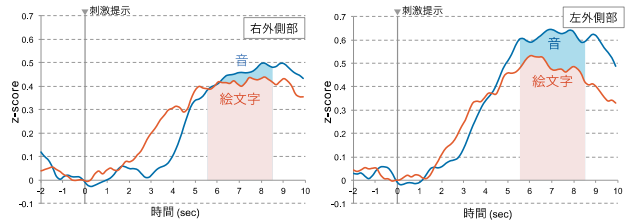


図10. 総加算平均波形 (T2 | 音源定位)

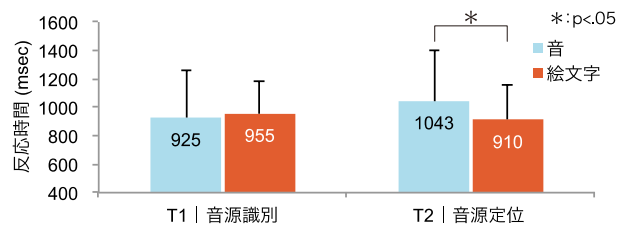


図11. 反応時間の比較 (実験 I)

表5. 誤答率の比較

タスク	誤答率 (%)		
	音	絵文字	χ^2 検定
T1 音源識別	6.7	5.0	n.s.
T2 音源定位	3.3	1.7	n.s.

表6. カウンティングエラーの比較

タスク	カウンティングエラー (RMSE)		
	音	絵文字	F検定
T1 音源識別	2.06	2.22	n.s.
T2 音源定位	2.24	1.87	n.s.

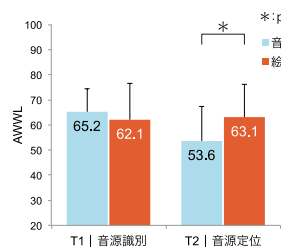


図12. NASA-TLX : AWWLの比較

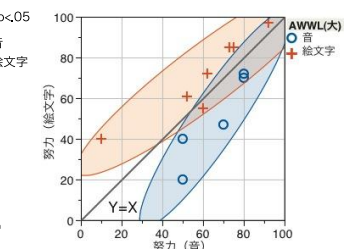


図13. 「努力」の評価値の分布

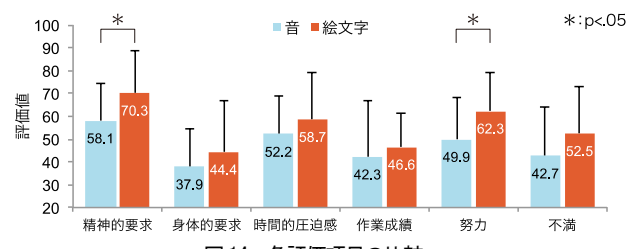


図14. 各評価項目の比較

増加するほど、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。歩行タスクの途中で音が提示された際、音に対する知覚的な活動が大きくなると、脳が強く活性化し認知活動や行動の切り替えが適切に行われ、短い時間で反応することができると推測される。同様に絵文字条件について、左外側における脳血流の変化量、カウンティングエラー、及び精神的要求の変動から反応時間を予測する有意なモデルを立てることができた($p<.01$)。絵文字がHMDに提示されることを予期し注意をHMDに向けようと意識することで脳が強く活性化し、提示された絵文字の認識が

素早く行われる結果、短い時間で反応することができると推測される。

音源定位タスクでは脳血流と反応時間、及び主観評価の各指標間に多変量解析による有意な関係性は示さなかった。

3-3. 負担度の考察 脳血流の変化量と反応時間に負の相関があること、音条件での脳の賦活度が絵文字条件に比べ大きいことから、音条件では音に対する反応の切り替えにおいて、どこに注意を向けたらいいかという情報を表象、維持しやすく、音への反応を促進させるように選択的注意としての認知機能が働いたことを示唆している。したがって、本実験で観測された脳血流の増加はその課題における負担度の増加を表したのではなく、情報の処理を短時間で効率的に行うために、処理資源を状況に合わせて適切に切り替えようとする健全な活動として捉えることができる。

一方、絵文字条件では音条件ほど賦活しなかったことから、HMD に提示された絵文字に対する処理資源が相対的に少なくなり、反応時間の遅延を起こす要因となりうることを表している。これは、同一モダリティの資源を消費する際に干渉が起こるとされる多重資源モデルの観点からも説明ができる。しかし、本実験では音源識別タスクにおける反応時間などの作業成績と主観評価の結果に条件間で差はなく、相対的なメンタルワークロードの増加は見られなかった。

音源定位タスクについては、条件間に脳血流の差異は認められなかったが、主観評価の結果について絵文字条件の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は、平面上に変換された方向の情報を視覚的に認識しなければならず、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なり、結果として主観的なメンタルワークロードを増加させる要因になったと考える。

4. 実験Ⅱ 反応時間測定実験

実験Ⅰの結果より、反応時間を再評価するため 16名の被験者に対し同様の実験を再度行った。

4-1. 結果と考察 反応時間の結果を図 16 に示す。音源識別タスクでは絵文字条件の反応時間が音条件に比べ長く、100msec 程の遅延が見られた ($p<.05$)。これは既往の研究を反映する結果となった。実験Ⅰの脳血流の結果を当てはめた場合、この反応の遅れは、音条件に比べ左外側部での賦活度が低いという結果からも説明することができる。

一方、音源定位タスクでは実験Ⅰ同様、音条件の方が反応時間は長くなる結果となった ($p<.05$)。絵文字条件での方向の強調表示が HMD の表示に対する気づきを促すように優位に働いたことが推測される。

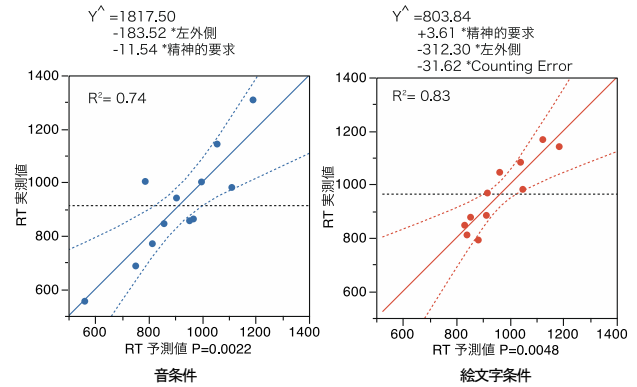


図 15. 重回帰分析の結果

表 7. 変数間の相関

音条件			絵文字条件			
	1	2	3	4		
1. 精神的要求	—				1. 精神的要求	—
2. 左外側	0.302	—			2. 左外側	0.348
3. RT	-0.683 *	-0.708 *	—		3. Counting Error	0.078
					4. RT	0.121
						-0.626 *
						-0.581

*: <.05

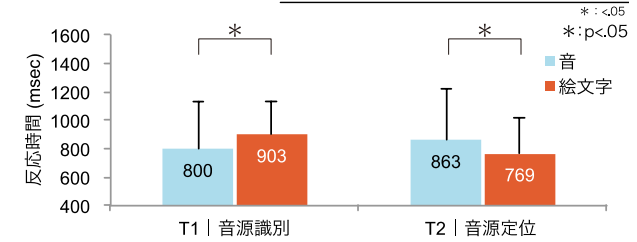


図 16. 反応時間の比較 (実験Ⅱ)

4-2. 安全性の検証 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 秒程度とされている⁵⁾。両タスクの絵文字条件の反応時間はこの指標に当てはまる結果であった。また、実験Ⅱでは被験者の実験に対する慣れによるものと考えられる全体的な反応時間の短縮も観察された。したがって、HMD を表示デバイスとした聴覚障害者のための情報保障について、健聴者の音に対する反応と同様、安全性が確保されることが確かめられた。

5. 結論

聴覚、視覚による音情報取得時の脳の賦活度に違いが見られ、HMD に提示した絵文字の認知に対する賦活度は音の認知に比べ低くなる傾向がある。また、脳の賦活度と反応時間に負の相関があることから、HMD による音情報の取得時には、処理資源が十分に配分されず、反応時間の遅延を招く恐れがある。方向の情報を提示した際には、反応時間に遅延は見られないものの、視覚による特異な認知作業が求められるため、心理的な負担度を増加させるストレスとなる。しかし、反応時間を危険回避に対する指標とした時、聴覚による音の認知と同様に反応することで、安全性は確保されると言える。

【注及び参考文献】

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Adaptive Weighted Workload：評価値の小さい順に 1~6 の重み付けを行った平均値
- 4) 深谷見輔：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
- 5) 林洋：実用 自動車事故鑑定工学, 技術書院, p.204, 2002.4