高齢者の音像定位能力における左右非対称性に関する研究

Study on Left-Right Asymmetry in Sound Localization Ability of the Elderly

精密工学専攻 25 号　白木 萌子
Moeko Shiroki

1.　はじめに

近年，日本の高齢者の人口は非常に増加傾向にあり超高齢化社会といわれ，全人口のおよそ 4 分の 1 を高齢者が占めている．一般的に年をとることによって高齢者には，視覚的な能力の劣化，反応時間及び状況認識の遅延，ワーキングメモリや聴力の低下などが起こることが分かっている．

本研究では高齢者の音像定位能力について調査する．高齢者の音像定位について様々な研究がされているが[(1)(2)]，特にヘッドホンでの音源聴取時に右耳に早い両耳間時間差(ITD: Interaural Time Difference)を有した音源で誤定位が起こりやすいことが示されている[(3)]．そこで音像定位能力の左右非対称性に着目する．まず，ITD を有した音源やそれを元に加工した音源をヘッドホンにて提示し，音像定位実験を行うことで，定位の判断要因を考察する．次に，音像定位能力の左右非対称性の原因を脳の反応から考察するため，ITD を有した音源を聴取している際の脳波を測定する実験を行う．さらに，得られた結果から誤定位の起こりにくい音源を提案し，定位の向上を検証する．

なお，本研究での実験は被験者に対してインフォームドコンセントを行い実施している．

2.　音像定位に関わる要因と本研究で用いる音源について

2.1　音像定位に関わる要因について

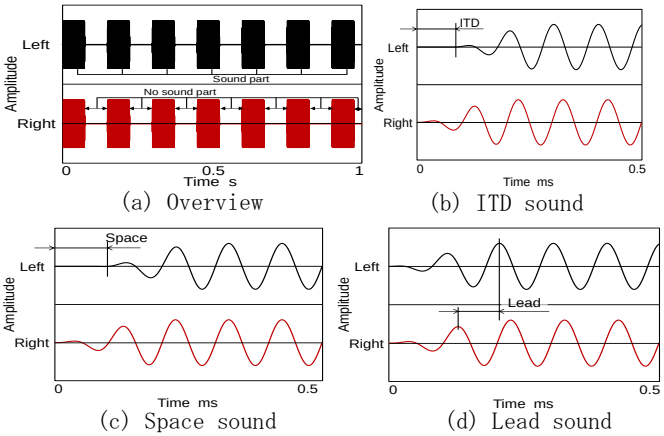
まず本研究において音像定位とは，音を聞いたときにその音がどの方向から聞こえたかを判断することである．音像定位には両耳間強度差(ILD: Interaural Level Difference)と両耳間時間差(ITD: Interaural Time Difference)の二つの要因が影響することが分かっている．両耳間強度差とは左右の耳における音圧の差のことで，右(左)耳に大きい音が提示されると右(左)側から音が聞こえたと認識する．両耳間時間差は左右の耳に届く時間の差のことで，右(左)耳に早く音が届くと右(左)側から音が聞こえたと認識する．人間はこの 2 つの要因から音の定位を判断している．本研究では ITD に着目して実験を行う．

2.2　本研究で用いる ITD 音源について

本研究では 0.5，1kHz の 2 つの周波数を用いる．1kHz の音源の波形例を Fig. 1(a)，(b)に示す．74ms の吹鳴と 76ms の無音時間を交互に 7 回繰り返す約 1 秒の音源である．音源はサンプリング周波数を 48kHz，量子化 bit 数を 16bit の wav 音源とする．なお，吹鳴時間の冒頭と末尾に 2ms 長のコサイン関数による重みづけを行い，クリック音の発生を抑制した．

ITD は 0.2，0.4，0.6，0.8 ms の 4 つとする．右耳が早いものと，左耳が早いもの，左右差を与えない音源(真ん中)の計 9 種類を作成する．ITD は，各耳の音圧が 60dB(A)の左右差を与えない音源を元にして音源の各吹鳴部分の冒頭に何も音が鳴らない空白時間を挿入して音源の開始の時間をずらすことで与えた．なお，左右の音圧については基準となった音源と同等の 60dB(A)である．

また，全ての実験において被験者への音源提示は，PC から DAC を通し，アンプを介してヘッドホンにて行い，音圧はダミーヘッドにヘッドホンを装着して整生した．



(a) Overview　(b) ITD sound　(c) Space sound　(d) Lead sound

Fig. 1　Waveform sample of test sound (1kHz, ITD=0.8ms for right ear leading)

3.　オンセット部分を加工した音源での音像定位実験[(4)]

3.1　オンセット部分を加工した音源について

先行研究より，高齢者は若年者と比較して音源のオンセット(冒頭)部分の認識が低下することが推測された．そこで本実験では，音源に ITD を与えた際にオンセット部分に発生する 2 要素に絞って加工した音源を用いる．音源の波形例を Fig. 2 に示す．1 つ目はオンセット部分に無音時間のみを挿入したもの(以下 Space 音源，Fig. 1(c))である．左右の位相は同じとする．2 つ目は，ITD を与えた側のオンセット部分に滑らかに音を挿入し，左右で位相差のみがずれているもの(以下 Lead 音源，Fig. 1(d))である．Space 音源の無音時間と Lead 音源の作成の際に与えた ITD 時間及び音圧は，2 章で同様に設定する．

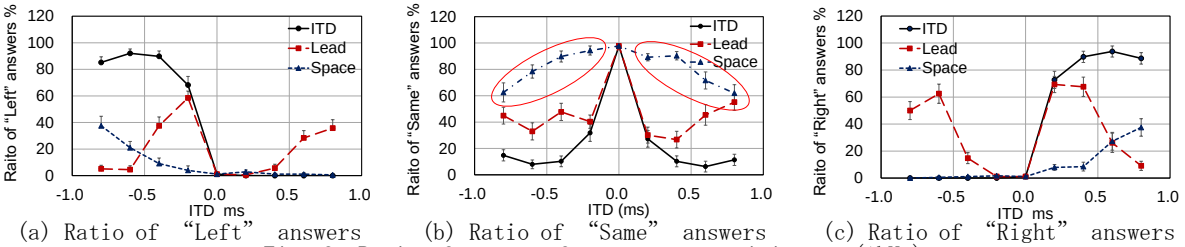
3.2　実験条件

被験者は防音室内で着座し，左右差のない基準音に比べて評価音がどの方向から聞こえたかを「左」，「同じ」，「右」の 3 択で口頭により回答する相対評価を実施する．評価音をランダムに提示し，実験は各被験者に対して休憩を設けながら 50 音源(2 周波数×(ITD8 水準+Lead8 水準+Space8 水準+中央 1 水準))を 8 回繰り返した．なお 8 回のうち 4 回はヘッドホンを左右逆にし，装置のカウンターバランスをとった．

被験者は 19 歳から 25 歳の若年者(M±S.D.=21.6±1.2 歳)計 22 名(男性 15 名，女性 7 名)と，65 歳から 88 歳の高齢者(M±S.D.=70.8±5.7 歳)計 23 名(男性 10 名，女性 13 名)である．全ての被験者について実験前に聴力検査を実施し，正常な聴力を有していることを確認した．

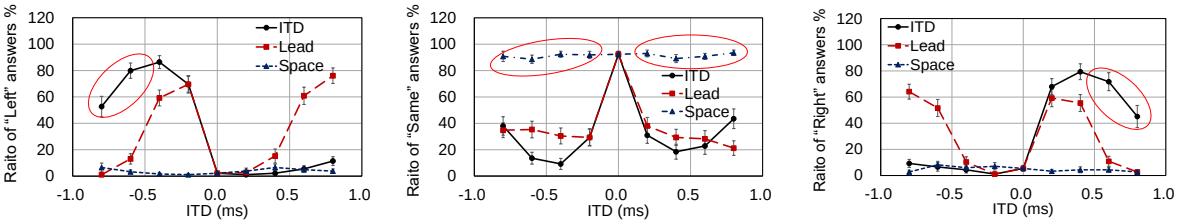
3.3　実験結果

Fig. 2，3 に実験結果を示す．縦軸は被験者の回答率を表し，横軸は ITD の大きさを示す．図中の実線は「ITD 音源」，破線は「Lead 音源」，点線は「Space 音源」の回答率である．



(a) Ratio of "Left" answers (b) Ratio of "Same" answers (c) Ratio of "Right" answers

Fig. 2 Ratio of answers for younger participants (1kHz)



(a) Ratio of "Left" answers (b) Ratio of "Same" answers (c) Ratio of "Right" answers

Fig. 3 Ratio of answers for elderly participants (1kHz)

横軸の正の値は右耳に早く ITD を与えたことを，横軸の負の値は左耳に早く ITD を与えたことを意味する．また，本稿における図中のエラーバーは全て標準誤差(SE)を示す．なお、本稿では顕著な特徴が見られた 1kHz の結果のみを示す．

3.3.1 若年者の実験結果

Fig. 2 に若年者の実験結果を示す．ITD 音源と Lead 音源では，与えた ITD が 0.4ms より大きいときの回答率が異なった．1 kHz の音源の場合，ITD の増加に伴い位相の逆転が発生する．若年者はオンセット部分の認識が十分に可能であるため，オンセット部分に位相差のある Lead 音源のみ ITD が長い場合に左右の逆定位が起こると考えられる．ITD 音源の場合には ITD が 0.8ms の長い場合であってもオンセット部分は無音時間があるため位相が逆転しておらず，逆定位が発生していない．また Space 音源では ITD が長くなると左右の回答率が増加することから，若年者は無音時間の認識が可能であると考えられる．

3.3.2 高齢者の実験結果

Fig. 3 に高齢者の結果を示す．ITD 音源について若年者よりも回答率が低く，ITD の時間が増加すると若年者と比較して顕著に高齢者の回答率が低下した．また Space 音源に対する回答はどの ITD の条件においても「同じ」が多くの割合を占めている．さらに，Lead 音源の回答率の推移は若年者の傾向と近いことから，高齢者は特にオンセット部分の無音時間の認識が不十分であると考えられる．以上より高齢者はオンセット部分の位相差を優位に聞き取った結果，ITD の時間が長い時に ITD 音源の回答率が低下したと考えられる．また ITD を右耳に早く与えた音源について，「右」の回答率が低下する傾向がみられ，今までの結果と一致した．

4. ITD 音源を用いた脳波測定実験[5]

4.1 音像定位能力の把握

脳波測定実験で使用する音源の音像定位能力を把握する実験を行う．

4.1.1 実験条件

実験音源は 2 章で説明した ITD 音源のうち，高齢者の正しく定位が確認された 0.4ms と，誤定位が多い 0.8ms，左右差のない真ん中の 3 種類とし，周波数は 1kHz とする．音圧や音源提示系は 2 章と同様とする．

被験者は防音室内で着座して実験音源を聴取し，音がどの方向から聞こえたかを「右」「左」の 2 択で口頭により回答する絶対評価を実施する．実験は各被験者に対して 5 音源(ITD 4 水準+中央 1 水準)をランダムに 10 回繰り返した．なお 10 回のうち 5 回はヘッドホンを左右逆にし，装置のカウンターバランスをとった．

被験者は 21 歳から 24 歳の若年者(M±S.D.=22.1±0.9 歳)計 14 名(男性 14 名) と，66 歳から 89 歳の高齢者(M±S.D.=74.6±5.7 歳)計 18 名(男性 10 名，女性 8 名)である．

4.1.2 実験結果

実験結果を Fig. 4 に示す．図中の実線は「右」の回答率，点線は「左」の回答率であり，横軸のプラスは右耳に先行して音を提示し，マイナスは左耳に先行して音を提示したことを示す．左右の回答率に関する SE は同じであるため，右の回答率のみに示す．

若年者の結果を Fig. 4(a)に示す．若年者は ITD を与えた音について，正しく左右を定位できていたことが分かる．高齢者の結果を Fig. 4(b)に示す．本実験では ITD が 0.8ms の音源について，右側だけでなく左側でも高齢者の誤定位が確認された．左の方が誤定位の割合が多かったが有意な差ではなかった．また，ITD が 0.4ms の音源では，若年者，高齢者ともほぼ 100 %の正答率であった．

4.2 脳波測定実験

ITD を与えた音源を視聴している際の脳波を測定する実験を行い，音像定位能力との関係を考察する．

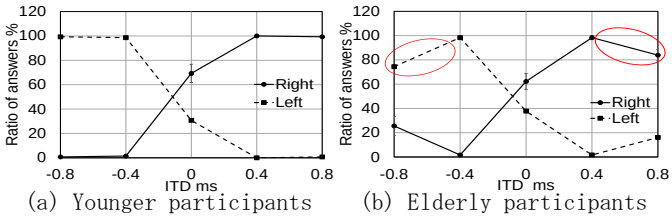
4.2.1 脳波の概要

本研究では外部刺激の変化に伴って発生する事象関連電位(ERP: event-related potential)を測定する．高頻度で現れる標準刺激で発生する ERP とその刺激系列中に低頻度で現れる逸脱刺激に対する ERP の差からミスマッチ陰性電位(MMN: Mismatch Negativity)[6]を算出し，大脳の上側頭回の一次聴覚野及び前帯状皮質の活動を確認する．

4.2.2 実験条件

実験風景を Fig. 5 に示す．被験者は 4.1 節と同じ防音室内にてディスプレイに向かって着座し，刺激に注意を向けずに漫然と実験音源を聴取する．ディスプレイには眠気防止にアニメーションを無音で提示した．なお，ディスプレイの動画表示部分は縦 28.8cm，横 39cm，対角線 48cm で，ディスプレイは被験者(目の位置)から直線距離で約 85cm，俯角約 13 度の位置関係となった．

脳波の測定位置を Fig. 6 に示す．脳波は脳波計で測定し，電極は Ag/AgCl 電極を用いた．測定点は国際式 10-20 法に基づく頭皮上 9 点(F3, F4, C3, C4, P3, P4, Fz, Cz, Pz)とし，瞬き等を監視するために同時に眼窩の垂直及び水平方向の眼電位(EOG) 4 点も測定した．また，基準電極として鼻尖を，参照電極として両耳朶(A1, A2)を短絡して測定した．サンプ



(a) Younger participants (b) Elderly participants

Fig. 4 Ratio of answers

Fig. 5 Test scene

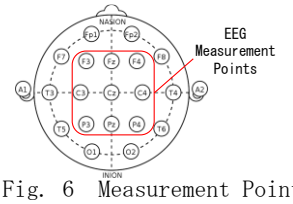


Fig. 6 Measurement Point

リング周波数は 1kHz とする．

実験音源の種類は 4.1 節と同様とし，吹鳴時間を 74ms，刺激間間隔を 500ms で提示する．音源の音圧と提示系は 2 章と同様とする．標準刺激は ITD のない音源，逸脱刺激は ITD を与えた音源とし，ITD が 0.4ms と 0.8ms の左右それぞれ 4 条件を実施した．刺激回数は標準刺激：逸脱刺激= 900:100 とし，試行回数の半分でヘッドホンを左右逆にして装置のカウンターバランスをとった．なお，音刺激の提示時間に関しては PC よりトリガボックスを通じて音の提示と同じタイミングでトリガ信号を提示し，脳波計に脳波と同時に記録した．被験者は 4.1 節と同様の若年者 14 名，高齢者 18 名である．

4.2.3 解析方法

脳波及び EOG については高帯域遮蔽 40Hz，低帯域遮蔽 1Hz のフィルタをかけたのち，脳波から EOG を除去した．その後，音刺激提示前 200ms から提示後 700ms 間を刺激種別に加算平均して ERP を算出した．さらに，音刺激提示前 50ms から音刺激時点までの平均電圧がゼロとなるように電圧補正を行った．最後に，逸脱刺激の ERP から標準刺激の ERP を除去して MMN を算出した．なお解析に用いたのは測定した 9 点のうち，聴覚刺激に関連がある F 列と C 列の 6 点である．

4.3 脳波測定実験結果

本稿では MMN の値が大きかった C3、Cz，C4 の結果を示す．また全被験者のピークの位置を考慮し，音源提示後 75-200ms の MMN の区間平均電位に着目して考察する．

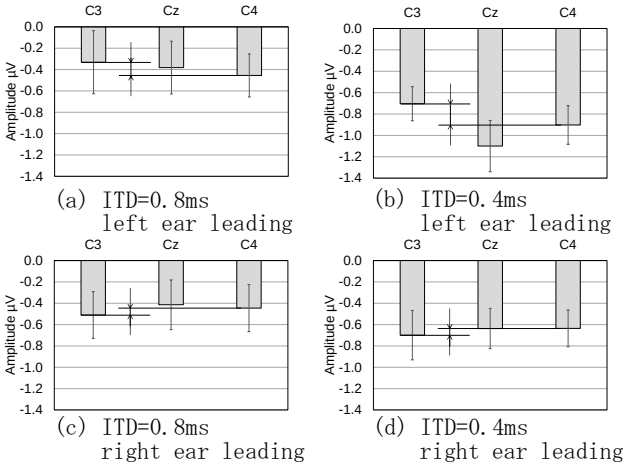
4.3.1 若年者の実験結果

若年者の区間平均電位を Fig. 7 に示す．区間平均電位について，左に早く音源を提示した場合では，左側(C3)より右側(C4)が負の方向に大きい傾向があり，同様に右に早く音源を提示した場合では，右側(C4)より左側(C3)が負の方向に大きい傾向があった．これより，音が早く提示されたのと反対側の半球における区間平均電位が負の方向に大きくなると考えられる．またどの計測点においても，ITD が 0.8ms の場合より ITD が 0.4ms の場合の方が，区間平均電位が負の方向に大きかった．

4.3.2 高齢者の実験結果

高齢者の区間平均電位を Fig. 8 に示す．区間平均電位について，左に早く音源を提示した場合では，左側(C3)より右側(C4)が負の方向に大きい傾向があり，同様に右に早く音源を提示した場合では，右側(C4)より左側(C3)が負の方向に大きい傾向があった．高齢者においても音が早く提示されたのと反対側の半球における区間平均電位が負の方向に大きくなり，若年者と一致する傾向がみられた．また若年者と同様に，どの計測点においても，ITD が 0.8ms の場合より ITD が 0.4ms の場合の方が，区間平均電位が負の方向に大きかった．

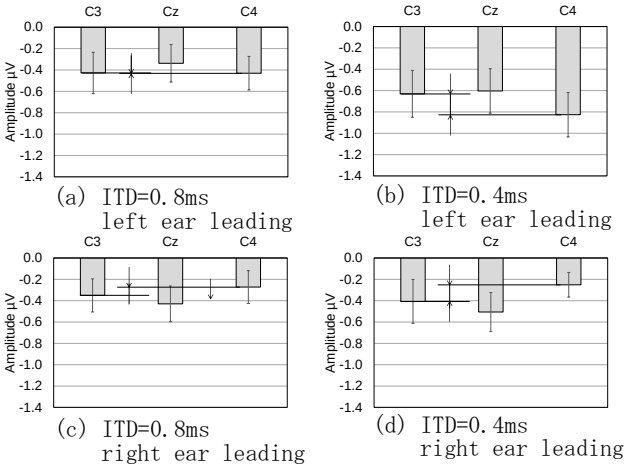
4.3.3 音像定位能力とミスマッチ陰性電位の関係



(a) ITD=0.8ms left ear leading (b) ITD=0.4ms left ear leading

(c) ITD=0.8ms right ear leading (d) ITD=0.4ms right ear leading

Fig. 7 Mean MMN amplitude of the younger participant



(a) ITD=0.8ms left ear leading (b) ITD=0.4ms left ear leading

(c) ITD=0.8ms right ear leading (d) ITD=0.4ms right ear leading

Fig. 8 Mean MMN amplitude of the elderly participant

4.3.3 音像定位能力とミスマッチ陰性電位の関係

今回の計測結果では，ITD が 0.4ms の場合と ITD が 0.8ms の場合について有意な差が認められ，ITD が 0.4ms の場合の MMN が負の方向に十分大きくなっていた．すなわち ITD が 0.4ms の場合に左右差のない標準刺激と ITD のある逸脱刺激の差が十分に知覚されており，ITD が 0.8ms の場合に比べて定位の判断に迷いが少なかったことが推測される．また左耳に 0.4ms 早く音源を提示した場合，Cz について年齢による有意傾向が確認され，若年者の方が高齢者よりも MMN が負の方向に大きいことが分かった．さらに，ITD が 0.4ms の場合，若年者の Cz について音源の方向で有意な差が認められ，右耳の早く音源を提示した場合よりも左耳に音源を早く提示した場合の MMN の方が負の方向に大きいことが分かった．なお ITD が 0.8ms の場合について，有意差は認められなかった．

次に，音像定位能力と MMN の関係を考察するため，ラテラリティインデックス(L.I.)を導入する．L.I.は以下のように計算する．

$$L.I. = \frac{A_{C3} - A_{C4}}{A_{C3} + A_{C4}} \quad (1)$$

A_{C3}：音源提示後 75-200 ms の C3 の MMN の区間平均電位
A_{C4}：音源提示後 75-200 ms の C4 の MMN の区間平均電位

若年者，高齢者の各条件の L.I.の計算結果を Table 1 に示す．若年者，高齢者共に，L.I. が負のとき音が左側に早く提示されたことが，L.I.が正のとき音が右側に早く提示されたことが分かる．また，若年者では ITD が 0.4ms の場合より 0.8ms の場合の方が L.I.の絶対値が大きくなっているのに対し，高齢者では ITD が 0.8ms の場合より 0.4ms の場合の方が

Table 1 Laterality index

Direction, ITD ms	Younger	Elderly
Left, 0.8ms	-0.157	-0.002
Left, 0.4ms	-0.124	-0.134
Right, 0.4ms	0.048	0.236
Right, 0.8ms	0.068	0.125

L.I.の絶対値が大きくなっている．このことから，若年者はITDが0.8msの場合の方が，高齢者はITDが0.4msの場合の方が音源の左右差に敏感に気付いた可能性がある．

これらの結果の一方で，Tadros[7]らは高周波帯の聴力が低下した老年難聴の被験者に，蝸牛の機能を測定する誘発耳音響放射及び歪成分耳音響放射の測定と，ノイズ中のスピーチを聞き取るHINTテストを行った．その結果，クリック音認識では蝸牛の劣化が関連し左耳が優位に，言語認識では脳の中枢部分の劣化が関連し右耳優位が維持されることを明らかにしている．これより，今回使用したsin音における音像定位の左右非対称性について，脳活動に関するMMNだけではなく周縁の内耳機能の劣化が関係していると考えられる．

5. 誤定位の少ないsin音の提案

5.1 本研究で提案するsin音について

本実験で提案するsin音の波形例をFig. 9に示す．高齢者の回答率が低下したITDが0.6msと0.8msの音源を用いる．高齢者はオンセット部分の無音時間より位相差を認識することが分かったが，若年者には無音時間も重要であることから，無音時間は残して音が早く提示された側の位相が早くなるように位相差の調整を行う．位相差はITD音源と逆位相になるように設定した．

5.2 提案したsin音を用いた音像定位実験

5.1節で提案した音源を用いて，回答率が上昇するのか検証を行う．

5.2.1 実験条件

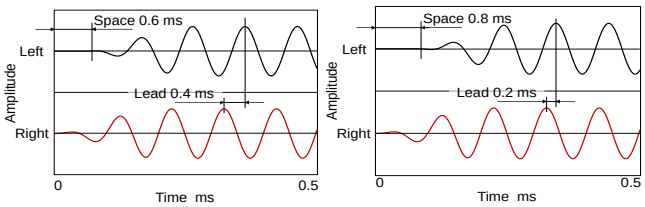
実験音源は1kHzとする．変更前音源として，ITDが0.6msと0.8msのものを，変更音源として5.1節で説明したものを使用する．音圧，音源提示系は2章と同様とする．

被験者は防音室内にて着座し，実験音源を聴取する．左右差のない基準音に比べて評価音がどの方向から聞こえたかを「左」「同じ」「右」の3択で口頭により回答する相対評価と，実験音源がどの方向から聞こえたかを「右」「左」の2択で口頭により回答する絶対評価の2種類を実施する．音源はランダムに提示し，9音源(改善前音源4水準＋改善音源4水準＋中央1水準)を8回繰り返した．なお，8回のうち4回はヘッドホンを左右逆にし，装置のカウンターバランスをとった．被験者は4章の若年被験者のうち，0.8msのITDを与えた音源の定位の結果が平均値より低かった男性2名とした．

5.2.2 実験結果および考察

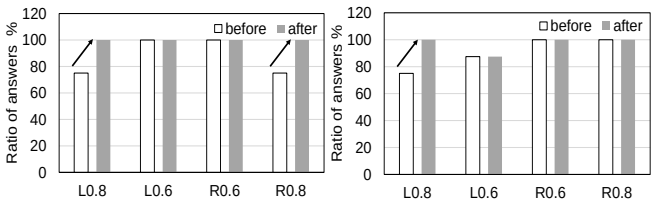
回答率が向上した被験者1名の実験結果をFig. 10に示す．横軸に音源の種類を，縦軸に回答率を示す．横軸の音源の種類は，音源の方向の左をL，右をRで表し，与えたITDの時間を数字で表す．縦軸の回答率は，音源が左耳に早い場合は左の回答を，音源が右耳に早く場合は右の回答を示す．

相対評価の結果をFig. 10(a)に示す．ITDが0.6msの場合は音源変更前後の回答率は全て100%であり，ITDが0.8msの場合は回答率の上昇が見られた．絶対評価の結果をFig. 10(b)に示す．左耳に0.8ms早く音源を提示した場合に回答率の上昇が見られ，その他の音源では回答率は変化しなかった．以上より，本実験で提案した音源での定位の向上が見込まれる被験者がいることが分かった．



(a) ITD=0.6ms (b) ITD=0.8ms

Fig. 9 Improved sound source waveform (1kHz, right ear leading)



(a) Relative evaluation (b) Absolute evaluation

Fig. 10 Changes in ratio of answers

6. 研究成果

(1) オンセット部分に位相差のみを与えた音源について，若年者，高齢者共に音像を定位することが可能であった．

(2) 両耳間時間差を与えた音源について高齢者の認識にはオンセット部分にある位相差の影響が大きく，無音時間の認識が低下することで両耳間時間差の長い音源の誤定位が発生することが分かった．

(3) 左右差のない音源と両耳間時間差を与えた音源を聴取している際のミスマッチ陰性電位を算出した結果，音源が早く提示されたのと反対側の半球において，ミスマッチ陰性電位が大きくなることが分かった．

(4) ミスマッチ陰性電位より，両耳間時間差が短い音源については左右差のない音源との差を正しく聞き取れていたことが分かり，音像定位実験と大脳の活動の一致が確認できた．

(5) オンセット部分の無音時間を残して位相差を調節した音源について，定位の向上が見込まれた．

参考文献

(1) Alan R. Palmer and Trevor M. Shackleton，両耳聴の神経機構，日本音響学会誌，58-3（2002）pp.184-192.

(2) 竹内友宏，森田和元，関根道昭，ヘッドホン受聴によって両時間時間差および両耳間レベル差を与えた場合の左右方向定位，日本音響学会講演論文集(春)，(2015) pp.671-672.

(3) Kazumoto Morita, Tsukuru Osawa, Kenta Toyoda, Jo Sakashita and Takeshi Toi, Characteristics of horizontal sound localization of elderly individuals, Mtgs, Acoust. 35, (2018).

(4) 白木萌子，森田和元，黒瀬和希，戸井武司，信号オンセットの変更による音像定位に及ぼす加齢の影響，日本音響学会講演論文集(春)，(2020) pp.733-734.

(5) 白木萌子，森田和元，岩木直，戸井武司，高齢者の音像定位能力と事象関連電位との関係，日本音響学会講演論文集(春)，(2021) 2-4-1.

(6) Näätänen R, Paavilainen P, Alho K, Reinikainen K, Sams M, Do event-related potentials reveal the mechanism of the auditory, Naatanen, Neuroscience Letters, Neurosci Lett, 27, (1989) pp.217-221.

(7) Sherif F. Tadros, Susan T. Frisina, Frances Mapes, SungHee Kim, D. Robert Frisina and Robert D. Frishina, Loss of Peripheral Right-Ear Advantage in Age-Related Hearing Loss, Audiol Neurootol,10,