

若齢者および高齢者における聴覚系の左右非対称性に関する研究

Study on Right-Left Asymmetry of Auditory System of Younger and Elderly Generation

精密工学専攻 13号 大澤 創
Tsukuru Osawa

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ており、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は視覚的な能力が劣化したり、反応時間が遅くなったり、ワーキングメモリが低下したり、状況認識が遅くなったり、聴力が低下することが分かっており、高齢者の音像定位について様々な研究がされている⁽¹⁾⁽²⁾。また、自動車車室内での音源定位は非常に分かりづらいことが判明しており危険の場所を正確に伝えることは難しい⁽³⁾。

そこで本研究では、聴力に着目し、若齢者に対して両耳間強度差(ILD: Interaural Level Difference)と両耳間時間差(ITD: Interaural Time Difference)を有した音をヘッドホンにて提示し、若齢者の音像定位を把握する。次に、高齢者を対象に音像定位実験を行い、加齢が音像定位に与える影響を考察する。最後に、若齢者を対象に自動車内にて警報音の到来方向を問う実験を行う。トレーニングによって自動車内での音像定位の向上を目指す。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

本章では音像定位能力に関わる要因と本実験で用いる実験音源についての説明をする。

2.1 音像定位に関わる要因について

まず本研究における音像定位の意味について説明する。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。本研究ではこの2つの要因をそれぞれ与えた音源を用いて音像定位実験を行う。なお、今後は両耳間強度差をILD、両耳間時間差をITDと呼ぶこととする。

2.2 本研究で用いる音源について

本研究で用いる音源について説明する。本研究では0.5, 1, 2, 0.5+2kHzの4音源を用いる。0.5+2kHzにおいては各純音を最大振幅レベルが等しくなるように組み合わせた。音源はサンプリング周波数が48kHz、量子化bit数が16bitのwav音源を用いる。実験音源の長さは1秒間であり、1秒間に7回吹鳴する。吹鳴時間については0.074秒の吹鳴と0.076秒の無音時間を交互に繰り返し、7回目の無音部分は音源の長さが1秒になるように短い。これらの音源にILD及びITDを与えることで音源を作成する。

2.2.1 ILD, ITDについて

本研究で用いるILD, ITDについて説明する。ILDは3, 6,

9, 12 dB(A)の4種類とし、ITDにおいては0.2, 0.4, 0.6, 0.8 msの4種類とする。それぞれについて右(左)耳が早い(大きい)ものと、ILDもITDもどちらも与えない音源(真ん中)も用いる。すなわち、ILDが8種類(左耳が大きい4水準+右耳が大きい4水準)とITDが8種類(左耳が早い4水準+右耳が早い4水準)と真ん中の計17種類を用いる。

2.2.2 ILD, ITDの与え方について

ILD, ITDを有した音源の作成方法について説明する。PCからDAC(TASCAM UH-7000)を通し、アンプ(STAX SRM-353X)を介してヘッドホン(STAX SL51)をダミーヘッド(HMS III. 0)に装着して音圧を計測した。

ILDを有した音源についてはwav音源の振幅を変更することで音圧を調整し、両耳の平均が60dB(A)となるように左右の音圧を調整した。

ITDを与えた音源については各耳の音圧が60dB(A)のILDもITDも与えてい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ITDを与えている。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。

3. ヘッドホンをを用いた音像定位実験

本章では2章で説明した音源を用いて若齢者および高齢者を対象にヘッドホンをを用いて音像定位実験を行う。

3.1 若齢者を対象にした音像定位実験

本節では若齢者を対象にした音像定位実験を行う。

3.1.1 若齢者実験の実験条件

実験風景をFig. 1に示す。実験に参加する被験者の数は著者と同じ研究室に所属している21歳から24歳の12名(男性11名、女性1名)とした。次に実験内容について説明する。被験者は防音室内にて壁が目の前になるように着座し、実験実施者がヘッドホンを装着する。この際、被験者ごとにヘッドホンの位置がずれないように注意して装着した。実験音源は2章で説明した0.5kHz, 1kHz, 2kHz, 0.5+2kHzの4種類にILD及びITDを与えたもの計68音源(4音源×17種類)であり、それを1回とし計8回行った。その後、ヘッドホンを逆転して同様の内容を行い、平均を実験データとする。各回でランダムな順番に流すよう作成したファイルに基づいて実験音源を流し、各回の音源が流れる順番が被験者ごとに同じになるようにした。被験者は、ヘッドホンから聞こえてくる音がどちらの方向から聞こえてくるかを「右」、「左」の2択で口頭にて回答する。被験者は1回目を始める前に十分



Fig. 1 Test scene

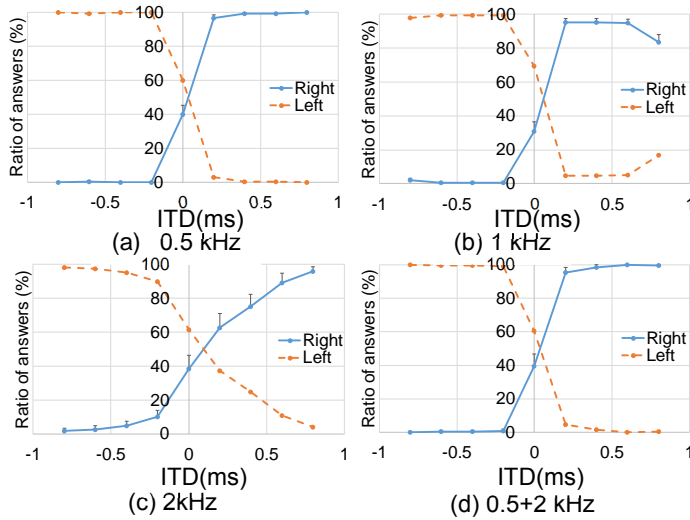


Fig. 2 Results of younger generation

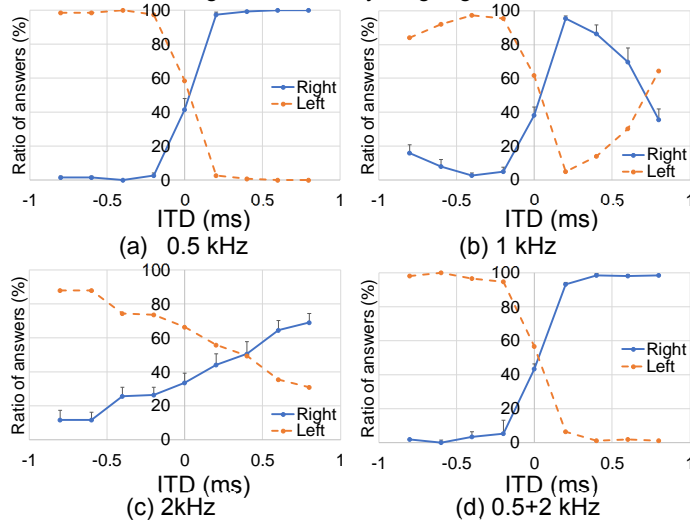


Fig. 3 Results of elderly generation

な練習を行い、実験内容をきちんと理解してもらった上で実験を行った。

3.1.2 若齢者実験の実験結果

ILDを与えた音源についてはILDが上昇するほどILDを大きく与えた方向の回答率が上昇した。Fig. 2にITDを与えた音源の実験結果を示す。縦軸は被験者の回答率を表し、横軸はITDの大きさを示す。横軸の正の値は右耳に早くITDを与えたことを意味し、横軸の負の値は左耳に早くITDを与えたことを意味する。青い実線が「右」の回答率で、赤い破線が「左」の回答率である。また、図中のエラーバーは標準誤差を示す。(a)と(d)より、0.5kHzと0.5+2kHzにおいては、ITDを早く与えた方向に音像を定位していることがわかる。(b)より1kHzにおいては、右に早くITDを与えた場合には、「右」の回答率が減少していることがわかる。しかし、左に早くITDを与えた場合にはその傾向は確認できず左右の非対称性が確認された。(c)より、2kHzの音源においては、右に早くITDを与えた場合において「右」の回答率が減少している1kHzと同様に左右の非対称性が確認された。人の音像定位についてITDが左右方向の知覚の手がかりになるのは約1.6kHz以下に限られるとされており⁽⁴⁾、今回の場合でも実験音を正確に知覚出来ていないことがわかる。このことから、若齢者において1kHzと2kHzの音源を聞いたときには音像定位の左右の非対称性が確認された。次項では高齢者を対象に同様の実験を行い、加齢の影響を把握する。

3.2 高齢者を対象にした音像定位実験⁽⁵⁾

本節では高齢者を対象にした音像定位実験を行う。

3.2.1 高齢者実験の実験条件

被験者は65歳から81歳の高齢者19名(男性10名、女性9名)とし、正常な聴力と認知力を有していることを確認した。実験条件は3.1.1項と同様である。

3.2.2 高齢者実験の実験結果

ILDを与えた音源においてはILDが上昇するほどILDを大きく与えた方向の回答率が上昇し若齢者と同様の傾向を示した。Fig. 3にITDを与えた音源の回答率を示す。

(a)と(d)より0.5kHzと0.5+2kHzの音源にITDを与えた場合においては若齢者と同様にITDを早く与えた方向に音像を定位していることがわかった。

(b)より、1kHzにおいては若齢者のときと比較すると左に早くITDを与えた場合においても「左」の回答率が減少していることがわかる。また、右に早くITDを与えた場合では若齢者よりも大きく「右」の回答率が減少していることがわかる。このことから、若齢者と高齢者において、1kHzの音源に右に早くITDを与えた場合は、音源を誤定位しやすい傾向を示し、それは高齢者でより顕著であった。また、「左」に早くITDを与えた場合においては高齢者のみで音像を誤定位する傾向を示した。

(c)より、2kHzにおいては若齢者と同様に右に早くITDを与えた場合において「右」の回答率が減少する傾向を示したが、高齢者では左に早くITDを与えた音源でも回答率が減少していることが確認された。このことから若齢者においても高齢者においてもサイン波は左右の誤定位を起こしやすい可能性を示した。しかし、ここで左に早くITDを与えた音源で高齢者のほうが音像定位能力が低いのは若齢者より聴力レベルが低いいため、音源の音圧を若齢者よりも低く感じて音をきちんと認識できていない可能性が考えられる。そこで次章では、若齢者と高齢者を対象に音圧を変更した音源で実験を行い、若齢者と高齢者の聴力レベルを考慮した実験を行う。

4. 音圧を変更しての音像定位実験

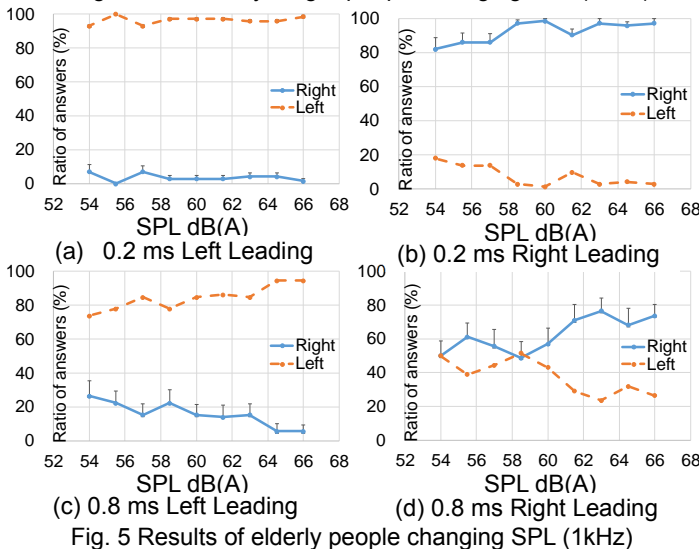
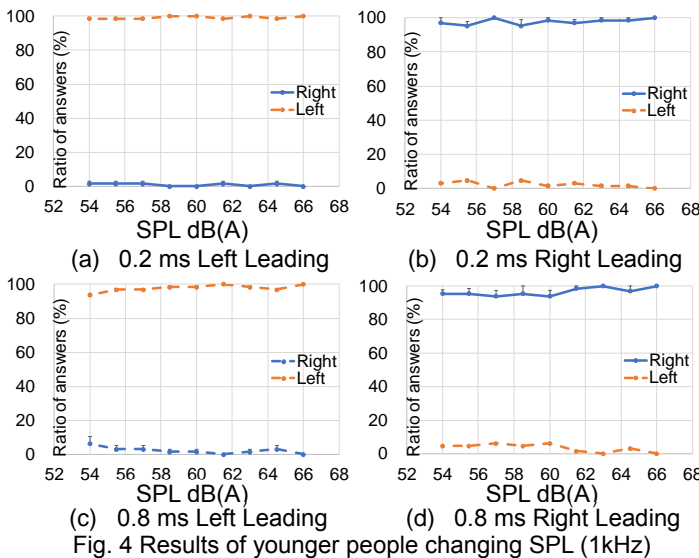
本章では音源の音圧を変更して実験を行い、聴力レベルが聴覚の左右の非対称性に影響を与えているかの検討を行う。

4.1.1 実験条件

被験者は21歳から26歳までの若齢者16名と65歳から81歳までの高齢者18名(男性8名、女性10名)である。実験音源は左右の非対称性が大きく認められた1kHzとする。実験音圧は54.0, 55.5, 57.0, 58.5, 60.0, 61.5, 63.0, 64.5, 66.0dB(A)の9段階とし、与えるITDは真ん中を除いた8水準(0.2, 0.4, 0.6, 0.8ms×左右2種類)である。回答方法は3.1.1項と同様である。

4.1.2 実験結果と考察

Fig. 4に特徴的な結果を示した若齢者の実験結果を示す。グラフの縦軸は被験者の回答率を表し、横軸は音圧の大きさを示す。(a)と(b)より、0.2msのITDを与えた場合には横軸の音圧に関わらずITDを与えた方向の回答率が高いことからITDを与えた方向に音像を定位していることがわかる。Fig. 4(c)と(d)にITDを左と右に早く0.8ms与えた音源の回答率を示す。右に早くITDを与えた場合に60dB(A)以下では回答率が若干減少しているものの音圧の増減によらずITDを与えた方向の回答率が高いことがわかる。ITDを左に与えた音源では「左」の回答率が高く、ITDを右に与えた音源では「右」の回答率が高いことから、若齢者においては今回設定した音圧の範囲では、音圧に関わらずITDを早く与えた方向に音像が定位することがわかる。Fig. 5に特徴的な結果を示した高齢者の実験結果を示す。(a)より、0.2ms左に早くITDを与えた場合には音圧が低下すると「左」の回答率が減少している



とがわかる。(b)の0.2ms右に早くITDを与えた場合と比較すると(b)のほうがより顕著に回答率が減少していることが確認された。次に(c)と(d)より、0.8ms右に早くITDを与えた音源においては、音圧が小さいと「右」の回答率が減少し誤定位を起しやすく、左に早くITDを与えた音源の「左」の回答率と比較しても低い値を示していることから、右に早くITDを与えた音源で誤定位を起しやすいたことが改めて確認された。また、その傾向は音圧が小さくなるほどより顕著に現れることを示した。

4.1.3 聴力レベルを考慮した考察

高齢者は若齢者と比較して聴力レベルが低下しているのので若齢者が聴いている音より低い音圧レベルで音を聞いていることになる。そこで、オーディオメータを用いて被験者の1kHzの聴力レベルを計測したところ、若齢者の聴力レベルの中央値が15dBで高齢者の聴力レベルの中央値は25dBであった。このことから、高齢者が聴いている音の大きさは若齢者が聴いている音と比較して10dBほど低いということが分かるので、高齢者における66dBは若齢者においては約56dB相当になる。これを考慮して若齢者と高齢者の0.8ms右に早くITDを与えたデータを比較してみると、高齢者における66dBの回答率は若齢者における55.5dBの回答率より低いことが分かる。これは音像定位を低下させる原因が聴力レベルの差以外の原因によって生じるということを示している。このことから、高齢者において音を提示する際には、十分な

音圧を保つことも必要だが、加齢の影響によって若齢者より聴力レベル以外の問題が生じるため、音を誤認識しやすいので適切な音源を提示する必要がある。

5. 自動車車室内での音像定位能力の向上

本章ではトレーニングを行うことで自動車内での音像定位能力の向上を測ることができるかどうかの検証を行う。

5.1 自動車者室内での音像定位能力の把握

自動車車室内に設置したスピーカから音源を流し若齢者の音像定位能力を把握する。

5.1.1 実験条件

実験はFig. 6に示す車の内部にFig. 8のようにスピーカを22個設置し、そのうちの8個(sp1~sp8)を実験に用いる。残りはダミースピーカとして用い、被験者にはどのスピーカを実験に用いているのかは伝えていない。実験風景をFig. 7に示す。被験者は運転席にて前を向いた状態で着座し、実験音源がどの方向から聞こえたかを評価シートに記入する。被験者の正面を0度として被験者が線を引いた角度を算出する。実験音源にはILDもITDも与えない1kHzと0.5+2kHzの音源を用い、音圧はヘッドレストの中心の位置で60dB(A)とした。

まず1kHzの実験を行い、5分の休憩時間を設けて0.5+2kHzの実験を行う。それぞれのスピーカから実験音源をそれぞれ4回ずつ、計32回流す。それを1kHzと0.5+2kHzで行う。実験音源の流れる順番は32個の中からランダムであるが、各被験者で流れる順番が同じになるようにした。被験者は正常な聴力を有する20代男性4名である。

5.1.2 実験結果と考察

Fig. 9(a)に1kHzの実際の角度と4回の回答角度の平均の差分をとったものを示す。評価の基準として30度以上のずれがあると定位を認識する上で危険があると判断したため、30度を閾値として設ける。sp7の回答角度が大きく閾値を上回っていることがわかる。

Fig. 9(b)に0.5+2kHzの実際のスピーカの角度と4回の回答角度の平均の差分をとったものを示す。1kHzのときと同様にsp7の回答角度が閾値を上回りやすいたことがわかる。また、被験者Bにおいて1kHzと0.5+2kHzの両方について、sp3で大きく回答角度が閾値を越えていることがわかる。先行研究⁽²⁾においては、sp6やsp7のスピーカを誤定位しやすくsp3の位置のスピーカは正しく定位を認識できる可能性が高い。実際の状況において前方から鳴った音を後方に定位してしまうのは非常に危険である。そこで、被験者Bに着目し、トレーニングを行うことでsp3の音像定位能力を向上することができるかの実験を行う。



Fig. 6 Experimental vehicle



Fig. 7 Test scene

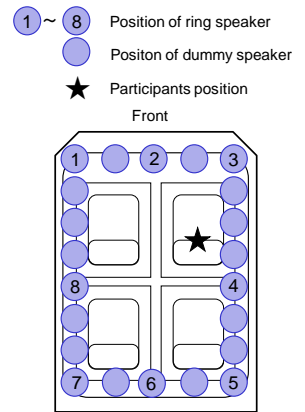
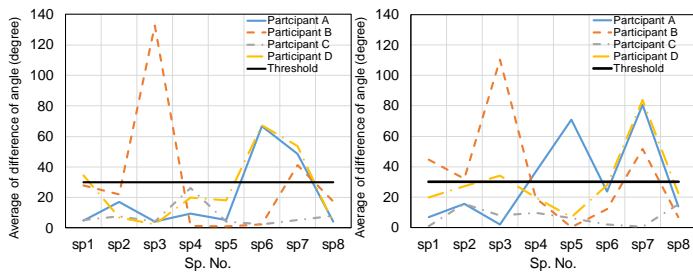


Fig. 8 Speaker Position



(a) 1 kHz (b) 0.5+2 kHz
Fig. 9 Difference of answer and true angle

5.2 完全無響室での音像定位能力の把握とトレーニング

本節では5.1.2項で特徴的な傾向が現れた被験者Bにおいて、完全無響室内での音像定位実験およびトレーニングを行うトレーニングの効果を確認する。

5.2.1 実験条件

実験風景をFig. 10に示す。完全無響室の中央に椅子を置き、その周りの半径1mの位置に45°刻みでスピーカを計8個設置する。被験者Bは椅子に着座し、実験音源がどの方向から聞こえたかを解答用紙に記入してもらう。実験音源はそれぞれのスピーカからランダムに1回ずつ流す。まず何も教えずに1kHzと0.5+2kHzの音源を流し被験者Bに回答させる。これをトレーニング前とする。その後、被験者に正面から時計回りに順番に音を流したのち、定位がわからなかった音源がある場合は被験者が満足いくまで音源を聞いてもらう。これをトレーニングとする。最後にトレーニング前と同じ定位実験を行うことでトレーニングによって音像定位能力が向上したかどうかを把握する。

5.2.2 実験結果および考察

実験結果をFig. 12に示す。四角付きの青い実線はスピーカの実際の角度で、丸付きの赤い破線はトレーニング前の回答角度、丸付きの灰色の実線はトレーニング後の角度を示す。1kHzにおいてトレーニング前に正面(0 degree)に聞こえていたが、トレーニング後に後方(180 degree)に答えていることがわかる。これはサイン波において前後の定位を聞き取ることが困難であるからだと考えられる。しかし、全体の傾向としては誤定位が収まっていることがわかる。

0.5+2kHzにおいて、トレーニング前には大きく誤定位を起こしていたがトレーニングを行うことによってすべての角度において正しい角度で音像定位していることがわかる。このことからトレーニングによって音像定位能力を向上できるといえる。

5.3 トレーニングによる音源定位能力の向上の有無の把握

本節では5.2.2項の実験を行ってすぐ自動車室内での実験を行うことにより、トレーニングの影響が自動車室内でも継続するかどうかを確認する。

5.3.1 実験条件

実験設備、及び実験条件は5.1.1項と同様である。また、被験者は特徴的な傾向が得られた被験者Bの1人である。被験者Bには5.2節の完全無響室での実験終了後20分程度の休憩を設けた後に実験を行い、完全無響室でのトレーニングの影響が継続しているかを確認する。

5.3.2 実験結果と考察

Fig. 13に1kHzと0.5+2kHzの実際のスピーカの角度と4回の回答角度の平均の差分をとったものを示す。青い実線がトレーニング前の回答角度で赤い破線がトレーニング後の回答角度である。Sp3においてトレーニング前には誤定位を起こしていたが、トレーニングによって音像を前に定位していることがわかる。また、ほとんどの場合において差分が小さくなっていることから音源のトレーニングの効果は自動車室内においても継続していると言える。

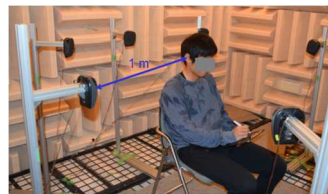


Fig. 10 Test scene

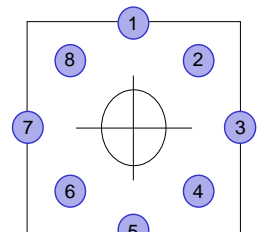
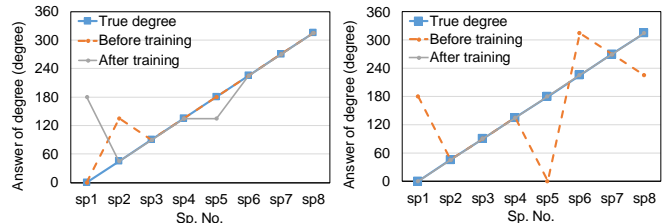


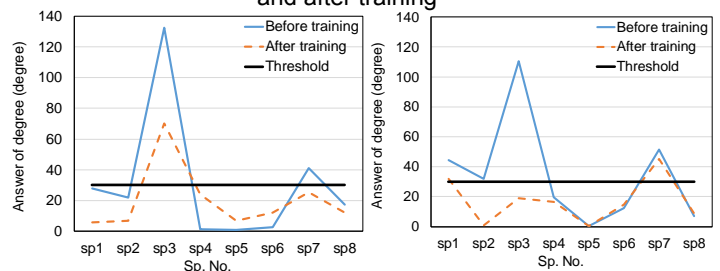
Fig. 11 Speaker Position



(a) 1 kHz

(b) 0.5+2 kHz

Fig. 12 Results of compared with before and after training



(a) 1 kHz

(b) 0.5+2 kHz

Fig. 13 Difference of answer and true angle of participant B compared with before and after training

6. 研究成果

- (1) 若齢者と高齢者においてILDが上昇するほど音像定位が向上することを示した。
- (2) 若齢者と高齢者において右に早くITDを与えた音源の回答率が減少することを確認した。その傾向は高齢者でより顕著であった。
- (3) 高齢者は聴力レベルが低下するが、十分な音圧を保っても若齢者と比較して誤定位を起こしやすく聴力レベル以外の問題が生じていることがわ
- (4) 雑音と反射の無い部屋でトレーニングによって自動車室内での音像定位能力が向上することを示した。

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) 川邊田慶介, 山口大助, 関根道昭, 森田和元, ドライブに対する聴覚支援のための車室内音源定位に関する被験者評価実験, 日本機械学会, 12-79 (2012) pp.191-192
- (4) 飯田一博, 音響工学基礎論, コロナ社, 東京 (2012) p.55.
- (5) 大澤創, 森田和元, 豊田健太, 坂下丈, 戸井武司, 高齢者における左右方向の音源定位能力の評価, 日本音響学会講演論文集(春), (2018) pp.421-422.
- (6) 北村音彦他, 音の感性を育てる聴能形成の理論と実際, 音楽之友社, 東京 (1996)