

# 一側性難聴者のための水平面音源定位トレーニング - 擬似一側聾状態でのトレーニング効果の検証 -\*

☆稲葉春香 (千葉工大・院), 飯田一博 (千葉工大・先進工)

## 1 はじめに

一側性難聴者が抱える問題の一つとして、音源定位が困難なことが挙げられる[1]. 一側聾児を対象とした水平面の音源定位実験では、ほとんどの一側聾児が音源方向に関わらず健側に回答することが報告されている[2].

一側性難聴者の音源定位能力を改善させる1つの方法として、音源方向の手がかりをトレーニングによって学習させることが考えられる. これまで、前半球水平面に設置した複数のスピーカを用いたトレーニング方法が提案され、音源定位能力の改善が報告された[3].

しかし、このトレーニング方法は大掛かりな設備が必要なため、どこでも簡単に行えるものではない. また、後半球水平面については検証されていない.

本人の頭部伝達関数(HRTF: Head-Related Transfer Function)とヘッドホンを用いたトレーニングも提案され、音源定位能力の改善が報告された[4]. しかし、この場合も目標方向は前半球水平面のみであった.

本研究では、擬似一側聾状態を模した健聴者に、本人 HRTF とヘッドホンを用いて水平面全周を目標方向とする音源定位トレーニングを実施し、音源定位テストでその効果を検証した.

## 2 水平面音源定位トレーニング

### 2.1 擬似一側聾状態の模擬方法

被験者は20代男女3名の健聴者である. 被験者の左耳に耳栓を装着し、ヘッドホンから健側のみに刺激を提示する. 提示する音圧レベルを適切に調整することにより、擬似一側聾状態を模擬した.

健側の提示音圧レベルを決定するために、擬似一側聾状態となる最大の音圧レベル  $L_{max}$  を式(1)で求めた.

$$L_{max} = L_{th} + L_{diff} \text{ (dB)} \quad (1)$$

ここで、 $L_{th}$ は耳栓を装着した患側の耳の最小可聴値であり、オーディオメータを用いて3分法で求めた.  $L_{diff}$ は健側のヘッドホンから患側の耳へ回り込む音の減衰量(健側-患側)を表す. 各被験者の  $L_{max}$  を Table 1 に示す.

提示音圧レベルは従来の音像定位実験結果との比較ができるように 63 dB とした. ただし、被験者1では  $L_{max}$  に対してマージンが 1.1 dB しかなかったため、6 dB のマージンをとって 58 dB とした.

受聴音圧レベルは目標方向に関わらず一定とした. したがって、音源方向の違いによるラウドネスの変化は、本研究では音源定位の手がかりにはならない.

Table 1  $L_{max}$  and the sound pressure level at the entrance of the normal hearing ear [dB].

被験者	擬似一側聾状態となる最大の音圧レベル	提示音圧レベル
1	64.1	58
2	70.4	63
3	81.1	63

### 2.2 トレーニングの方法

トレーニングは消灯した無響室で行った. 使用した機材はノート PC (MacBook Pro), ヘッドホンアンプ (HA-P50SE, TEAC), ヘッドホン (DT990 PRO, beyerdynamic), 耳栓 (Moldex) である.

目標方向は水平面12方向, 方位角  $0^\circ - 330^\circ$  ( $30^\circ$ 間隔)である. 刺激は上限周波数 20 kHz の広帯域ホワイトノイズに、被験者本人の HRTF を畳み込んだものである. 刺激の提示時間は 1.2 秒(前後に立ち上がり, 立ち下がり 0.1 秒を含む), 提示間隔は 2 秒である (Fig.1).

各刺激の音源方向はノート PC の画面に青色で示した (Fig.2). 提示時間は刺激提示の 1 秒前から提示終了までの 2.2 秒である.

1 回のトレーニングで各方向の刺激をランダムな順に 5 回提示した. 1 回のトレーニング

\* Horizontal sound source localization training for people with unilateral hearing loss - Validation of the effects of the training with normal-hearing listeners under simulated unilateral hearing loss -, INABA, Haruka and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

グ時間は 4.2 分である. 1 日に 2 回のトレーニングを行い, 2 週間以内に計 5 日間実施した.

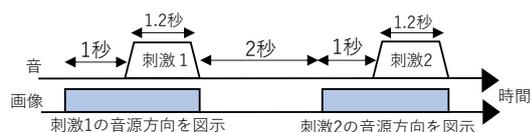


Fig. 1 Time interval of presentation of sound stimuli and presentation of sound source direction.

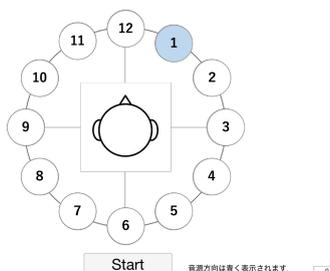


Fig.2 GUI of the training system for sound source localization in the horizontal plane.

### 3 水平面音源定位テスト

#### 3.1 テストの方法

音源定位テストはトレーニングと同じ場所, 目標方向, 刺激, 提示回数, 提示音圧レベルで実施した. 被験者はランダムに提示される音源の方位角と仰角をマッピング法で PC の画面で回答した.

#### 3.2 テストの結果

##### A) 回答分布

3 名の被験者は同様の傾向を示したため, ここでは被験者 1 の回答分布を示す(Fig. 3). (a)は両耳聴, (b)は初日のトレーニング前, (c)は最終日のトレーニング後, (d)はトレーニング最終日から 61 日後の結果である. 音源方向と回答方向の左右が一致している場合は実線枠内に回答が分布する.

(a)両耳聴では, 概ね目標方向に回答したが, 30°, 60°, 300°, 330°の回答は後方に寄った.

(b)トレーニング前では, 目標方向に関わらず 90°(健側の側方)付近に回答が集中した. この傾向は被験者 3 名中 2 名でみられ, 残りの 1 名は目標方向に関わらず, 回答は右半球水平面ではばらついた.

(c)トレーニング後では, 目標方向が 30°-90°では 90°付近に回答したが, 0°, 120°, 150°では右半球水平面ではばらついた. 目標方向 180°ではばらつきがあるものの 180°付近にも回答した. 目標方向が 240°-300°では 270°付近に回答したが, 210°と 330°では左半球水平面

ではばらついた. このように左右の判別はできるようになった.

(d) 61 日後では, 回答分布のおおよその傾向は(c)と同様であるが, 目標方向が左半球水平面の場合は 90°付近への回答の集中の度合いが増加した. また, 目標方向 180°と 330°では前後誤判定が増加した.

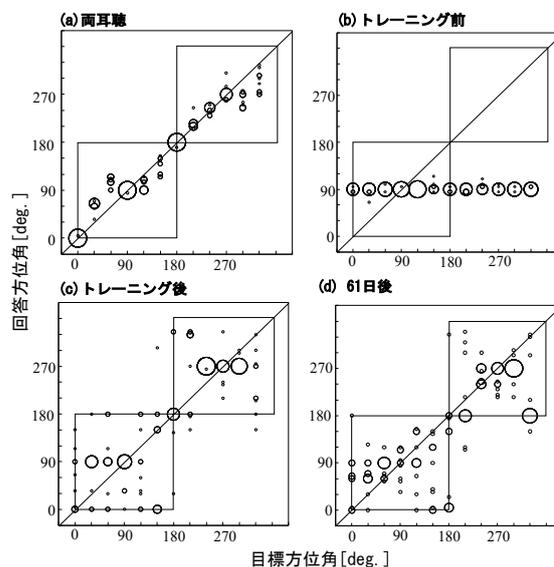


Fig. 3 Responded azimuth angle in the horizontal plane.

##### B) 平均側方角誤差

Table2 に被験者 3 名の全方向の平均側方角誤差を示す. 全被験者の平均では, 両耳聴状態は 14.9°, トレーニング前は 81.2°, トレーニング後は 29.3°, 61 日後は 27.4°であった. 誤差はトレーニングにより減少し, トレーニング後も保持されたが, 両耳聴と比較すると大きい.

Table3 に Tukey の多重比較検定の結果を示す. 両耳聴と比較すると, トレーニング前では全被験者で, トレーニング後および 61 日後では 2 名で有意な差が認められた.

トレーニング前と比較すると, トレーニング後および 61 日後で全被験者において有意な差が認められた.

トレーニング後と 61 日後では 3 名とも有意な差は認められなかった.

Table 2 Mean lateral angle error [deg.].

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング後	61日後
1	12.5	80.9	28.3	24.3
2	20.7	87.8	29.4	28.9
3	11.6	74.8	30.4	29.0
平均	14.9	81.2	29.3	27.4

Table 3 Results of multiple comparison tests on mean lateral angle error.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング後	61日後
1	両耳聴	-		
	トレーニング前	**	-	
	トレーニング後	**	**	-
	61日後	*	**	-
2	両耳聴	-		
	トレーニング前	**	-	
	トレーニング後	**	**	-
	61日後	-	**	-
3	両耳聴	-		
	トレーニング前	**	-	
	トレーニング後	**	**	-
	61日後	**	**	-

(\*\*: $p < 0.01$  \*: $p < 0.05$ )

### C) 左右誤判定率

Table 4 に左右誤判定率を示す. 全被験者の平均では, 両耳聴は 0.00, トレーニング前は 0.50, トレーニング後は 0.07, 61 日後は 0.08 であった. 左右誤判定率はトレーニングにより顕著に低下したが, ゼロにはならなかった. トレーニング効果は 61 日後も保持された.

Table 5 にカイ 2 乗検定の結果を示す. 多重性を考慮し, ボンフェローニ補正法を用いた. トレーニング前と比較すると, トレーニング後および 61 日後で全被験者において有意な差が認められた.

トレーニング後と 61 日後では全被験者で有意な差は認められなかった.

Table 4 Ratio of left-right confusion.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング後	61日後
1	0.00	0.50	0.08	0.12
2	0.01	0.50	0.10	0.07
3	0.00	0.50	0.02	0.04
平均	0.00	0.50	0.07	0.08

Table 5 Results of the Chi-square tests for the ratio of left-right confusion.

被験者	トレーニング前	トレーニング後	61日後
1	トレーニング前	-	
	トレーニング後	**	-
	61日後	**	-
2	トレーニング前	-	
	トレーニング後	**	-
	61日後	**	-
3	トレーニング前	-	
	トレーニング後	**	-
	61日後	**	-

(\*\*: $p < 0.01$  \*: $p < 0.05$ )

### D) 前後誤判定率

Table 6 に前後誤判定率を示す. 全被験者の平均では, 両耳聴は 0.22, トレーニング前は 0.50, トレーニング後は 0.39, 61 日後は 0.39 であった. 前後誤判定率のトレーニング効果は左右誤判定率ほど大きくはなかった. しかし, その効果は 61 日後も保持された.

Table 7 に前後誤判定率のカイ 2 乗検定の結果を示す. 多重性を考慮し, ボンフェローニ補正法を用いた. 両耳聴と比較すると, トレーニング前では全被験者で, トレーニング後と 61 日後では 2 名で有意な差が認められた.

トレーニング前と比較すると, トレーニング後では 1 名でのみ有意な差が認められた. 61 日後では 3 名とも有意な差は認められなかった.

トレーニング後と 61 日後では 3 名とも有意な差が認められなかった.

Table 6 Ratio of front-back confusion in all direction.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング後	61日後
1	0.15	0.50	0.45	0.38
2	0.29	0.53	0.53	0.46
3	0.21	0.48	0.20	0.32
平均	0.22	0.50	0.39	0.39

Table 7 Results of the Chi-square tests for the ratio of front-back confusion.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング後	61日後
1	両耳聴	-		
	トレーニング前	**	-	
	トレーニング後	**	-	-
	61日後	**	-	-
2	両耳聴	-		
	トレーニング前	**	-	
	トレーニング後	**	-	-
	61日後	*	-	-
3	両耳聴	-		
	トレーニング前	**	-	
	トレーニング後	**	-	-
	61日後	-	-	-

(\*\*: $p < 0.01$  \*: $p < 0.05$ )

## 4 考察

### 4.1 従来のトレーニング方法との比較

Firszt *et al.* [3]は前半球水平面に方位角 $-70^\circ$ から $70^\circ$ に設置した 15 個のスピーカを用いたトレーニングにより, 定位誤差の RMS 値が $10^\circ - 16^\circ$ 改善されたと報告している.

この結果と比較するため, 本研究において目標方位角が $-60^\circ$ から $60^\circ$ の場合の側方角誤差の RMS 値を算出した. その値はトレーニング前が $81.2^\circ$ でトレーニング後は $29.3^\circ$ であった. 改善量は $51.9^\circ$ であり, Firszt *et al.*の結果よりも大きい.

文献[3]には正確な RMS 値は記されていないが, グラフからはトレーニング前が $35^\circ - 40^\circ$ 程度で, トレーニング後が $20^\circ - 30^\circ$ 程度であることが読み取れる. トレーニング後の値は本実験と同程度であるといえる.

トレーニング前の値の違いについては, 被

験者の違いが影響している可能性がある。Firszt *et al.*は実際の一側性難聴者を対象に実験を行ったが、トレーニング開始時点ですでに定位精度のよい被験者が数名いたと述べている。つまり、日常生活で学習が進んでいた被験者が含まれていた。一方、本実験では健聴者に対して擬似一側聾状態を模したため、単耳受聴による音源定位の従前の学習はなかった。

このように考えると、本研究で示した本人 HRTF とヘッドホンを用いたトレーニングの効果は、少なくとも目標方向が前半球水平面にある場合は、スピーカを用いたトレーニングとほぼ同等であると考えられる。

#### 4.2 トレーニング前後の患側と健側の左右誤判定率

目標方向が患側および健側の場合の左右誤判定率を考察する。

Tables 8 にトレーニング前とトレーニング後の左右誤判定率を示す。トレーニング前は全ての被験者が目標方向に関わらず健側の側に回答したので、左右誤判定率は患側で 1、健側で 0 であった。

トレーニング後は、目標方向が患側の場合 0.06 と顕著に改善した。これはトレーニングにより学習が進んだためと考えられる。一方、健側では左右誤判定率は 0.11 となり、トレーニング前と比較して増加した。これは、学習が進んだ結果、左右の判断に迷いが生じたためと考えられる。

Table 8 Ratio of left-right confusion for pre training and post training.

被験者	トレーニング前		トレーニング後	
	患側	健側	患側	健側
1	1.00	0.00	0.12	0.14
2	1.00	0.00	0.06	0.14
3	1.00	0.00	0.00	0.04
平均	1.00	0.00	0.06	0.11

#### 4.3 前後誤判定率が改善しなかった理由

トレーニングで、被験者 3 名中 2 名の前後誤判定率が改善しなかった理由について考察する。

Fig.4 に被験者 1 の右耳(健側)の前後方向(0°, 180°)と左右方向(90°, 270°)の HRTF を示す。0° と 180° の HRTF は青の実線と破線で、90° と 270° の HRTF は橙の実線と破線で表している。

左右方向(橙)のスペクトルの違いは顕著であるが、それと比較して前後方向(青)のスペクトルの違いは小さい。今回のトレーニングでは、前後方向の比較的小さなスペクトルの違いを十分に学習することができなかったのではないかと考えられる。

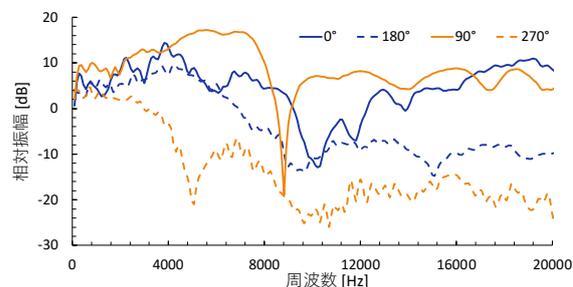


Fig. 4 HRTFs measured at the normal hearing ear.

## 5 おわりに

擬似一側聾状態を模擬した被験者に、水平面全周での本人 HRTF を用いたヘッドホン音源定位トレーニングを 5 日間実施し、両耳聴とトレーニング前、トレーニング後に行った音源定位テストから以下の結論を得た。

1) 両耳聴と比較して擬似一側聾状態では、平均側方角誤差、左右誤判定率、前後誤判定率が増加した。

2) トレーニングにより全ての被験者で平均側方角誤差と左右誤判定率が改善した。

3) 前後誤判定率は、3 名のうち 1 名は改善したが、2 名は改善しなかった。

4) トレーニング後の定位精度は、61 日間は維持された。

前後方向の音源定位精度の向上が今後の課題である。

## 謝辞

実験にご協力いただいた 3 名の被験者に深謝します。

## 参考文献

- [1] E. Harford and J. Barry, American Speech-Language-Hearing Association, vol.30, pp. 121-138, 1965.
- [2] 森本他, 日本音響学会聴覚研究会資料, H83-60, 1983.
- [3] B. Firszt *et al.* Hearing Research, Vol.319, pp. 48-55, 2015.
- [4] L. Shim *et al.* Clinical and Experimental Otorhinolaryngology, 2023. doi: 10.21053.