

# 一側性難聴者のための水平面音源定位トレーニング - 受聴音圧レベルの音源方向依存性の影響 -\*

☆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

一側性難聴者は日常生活で様々な困難を感じており，その一つが音源定位である[1].

一側性難聴者の音源定位精度を改善するため，音源方向判断の手がかりを学習できるトレーニングの研究が進められている[例えば2, 3].

われわれは，本人の頭部伝達関数(HRTF: Head-Related Transfer Function)とヘッドホンを用いて，水平面全周の12方向を目標方向とする音源定位トレーニングを提案した[4]. このトレーニングでは，振幅スペクトルの音源方向依存性のみを再現し，受聴音圧レベルは音源方向に関わらず一定とした．結果，左右方向の音源定位精度は改善したが，前後方向の音源定位精度は改善しなかった．このトレーニングでは学習する手がかりが不足していたと考えられる．

本研究では本人のHRTFとヘッドホンを用いて，振幅スペクトルの音源方向依存性に加えて，受聴音圧レベルの音源方向依存性も方向判断の手がかりとして学習できる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 一側聾の模擬方法

被験者は20代健聴の男女3名と20代一側性難聴(UHL: Unilateral Hearing Loss)の男性1名の計4名である．右耳を患側とした．

健聴者は患側に耳栓を装着し，ヘッドホンから健側に刺激を提示する．提示する音圧レベルは，被験者ごとに一側聾(UD: Unilateral Deafness)を模擬できる最大の健側の受聴音圧レベル  $L_{max}$  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， $L_{diff}$  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を表す．

健聴の被験者の  $L_{max}$  の最小値は 71dB であった．本実験では，健側の受聴音圧レベルが最大となる音源方向で 63 dB となるように設定した．

### 2.2 音源定位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．使用機材はノート PC(MacBook Pro, Apple)，ヘッドホンアンプ(HA-P50SE, TEAC)，ヘッドホン(DT990PRO, beyerdynamic)，耳栓(meteors, Moldex)である．耳栓は健聴者のみ使用した．

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 の広帯域白色雑音に被験者本人の 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．各方向の刺激(各 10 回，計 120 回)をランダムな順に 3 セッションに分けて提示した．1 日のトレーニング時間は約 8.4 分である．トレーニングは 2 週間以内に計 5 日間実施した．

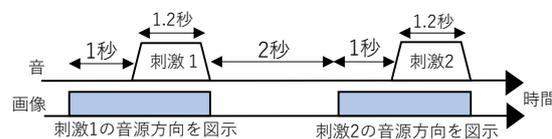


Fig. 1 Time interval of presentation of sound stimuli and presentation of sound source direction.

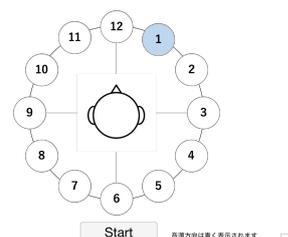


Fig. 2 GUI of the training system for sound source localization in the horizontal plane.

## 3 水平面音源定位テスト

### 3.1 音源定位テストの方法

音源定位テストはトレーニングと同じ音圧レベル，場所，機材，目標方向，提示回数で実施した．刺激は白色雑音と男声アナウンスを使

\* Sound source localization training in the horizontal plane for people with unilateral hearing loss – Effects of azimuth angle dependence of listening sound pressure level –, INABA, Haruka and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

用した。被験者はランダムに提示される刺激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 白色雑音での音源定位テストの結果

#### A) 回答分布

3名の健聴の被験者のうち、被験者1,2は同様の傾向を示したため、ここでは被験者1と3の回答分布を Figs. 3,4 に示す。また、一側性難聴である被験者4の回答分布を Fig. 5 に示す。目標方向と回答方向が一致している場合は実線上に回答が分布する。前後誤判定している場合は破線上に回答が分布する。

被験者1(Fig. 3)は、両耳聴(a)では概ね目標方向に回答した。初日のトレーニング前(b)では、目標方向にかかわらず健側の側方(270°)付近に回答した。最終日のトレーニング直後(c)では目標方向が0°と患側(30°-150°)と180°では目標方向への回答と前後誤判定の両方がみられた。目標方向が健側(210°-330°)では概ね目標方向に回答した。トレーニングから13日後(d)ではトレーニング直後と概ね同様の回答分布だった。

被験者2(Fig. 4)は、両耳聴(a)では概ね目標方向に回答した。初日のトレーニング前(b)では目標方向にかかわらず健側の側方(270°)付近に回答した。最終日のトレーニング直後(c)ではばらつきがあるものの、概ね目標方向に回答した。トレーニングから13日後(d)ではトレーニング直後と概ね同様の回答分布だった。

一側性難聴の被験者4(Fig. 5)は、初日のトレーニング前(b)では目標方向が0°と健側(210°-330°)では概ね210°-330°の範囲で回答が分布した。ただし、目標方向が240°-300°の場合は270°付近に回答が集中した。目標方向が患側(30°-150°)と180°では水平面全周で回答がばらついた。最終日のトレーニング直後(c)では目標方向が0°と健側(210°-330°)ではトレーニング直前と同様の回答分布であった。目標方向が患側(30°-150°)では概ね0°-180°の範囲で回答が分布した。ただし、目標方向が150°の場合は180°付近に回答が集中した。目標方向が180°では概ね目標方向に回答が集中した。トレーニングから13日後(d)では目標方向が0°ではトレーニング直後と同様の回答分布であった。目標方向が患側(30°-150°)と180°では、180°付近の回答が増加した。目標方向が健側(210°-330°)では、270°付近の回答が増加した。

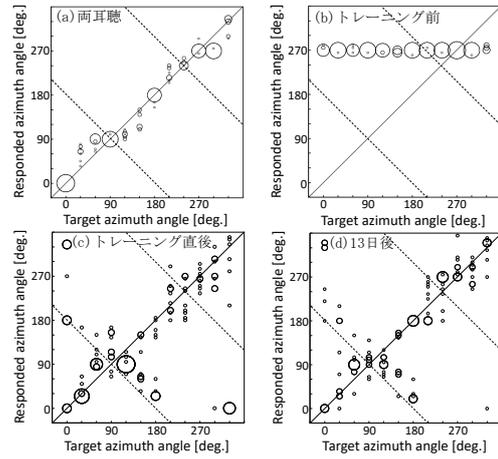


Fig. 3 Responded azimuth angle in the horizontal plane of normal-hearing listener under simulated UD (subject 1).

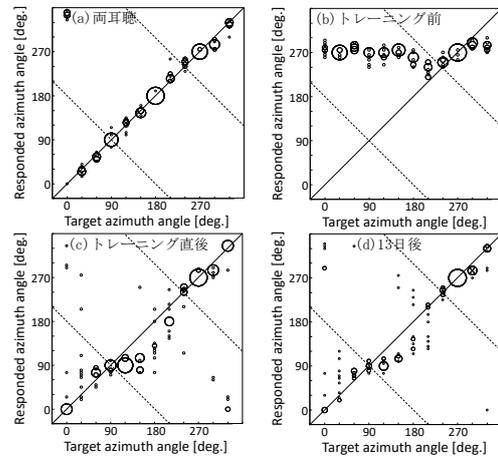


Fig. 4 Responded azimuth angle in the horizontal plane of normal-hearing listener under simulated UD (subject 3).

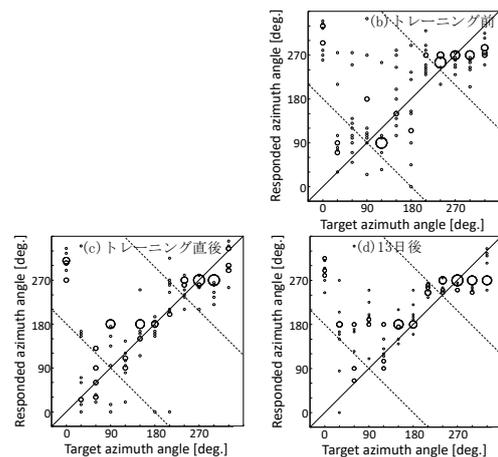


Fig. 5 Responded azimuth angle in the horizontal plane of UHL listener (subject 4).

#### B) 平均側方角誤差

Table 1 に平均側方角誤差を示す。誤差は両耳聴では8.1°-13.9°であった。トレーニング前では35.4°-80.8°であった。ただし、被験者1-3と比較すると一側性難聴の被験者4は誤差が小さい。トレーニング直後では22.4°-27.0°であった。13日後では21.0°-32.1°であった。

また、トレーニング前の値に対して、トレーニング直後と13日後の値とのDunnnettの多重比較検定を行った。トレーニング前とトレーニング直後では全被験者が有意に改善した。トレーニング前と13日後では4名中3名が有意に改善した。

Table 1 Mean lateral angle error for white noise [deg.]

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング直後	13日後
1	13.9	80.8	22.4**	21.0**
2	8.9	75.7	24.9**	25.6**
3	8.1	74.8	27.0**	22.1**
4	-	35.4	26.0*	32.1

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

### C) 左右誤判定率

Table 2 に左右誤判定率を示す。誤判定率は両耳聴では0.00であった。トレーニング前では0.12-0.50であった。ただし、被験者1-3と比較すると一側性難聴の被験者4は誤判定率が低い。トレーニング直後では0.00-0.11であった。13日後では0.04-0.22であった。

また、トレーニング前の値に対して、トレーニング直後と13日後の値とのカイ2乗検定を行った。多重性を考慮し、Bonferroni補正法を用いた。トレーニング前とトレーニング直後では3名中2名が有意に改善した(1名は検定不可)。トレーニング前と13日後では4名中3名が有意に改善した。

Table 2 Ratio of left-right confusion for white noise.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング直後	13日後
1	0.00	0.50	0.00	0.04**
2	0.00	0.50	0.10**	0.12**
3	0.00	0.50	0.11**	0.07**
4	-	0.12	0.09	0.22

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

### D) 前後誤判定率

Table 3 に前後誤判定率を示す。誤判定率は両耳聴では0.00-0.06であった。トレーニング前では0.23-0.43であった。トレーニング直後では0.10-0.47であった。13日後では0.08-0.48であった。

また、トレーニング前の値に対して、トレーニング直後と13日後の値とのカイ2乗検定を行った。多重性を考慮し、Bonferroni補正法を用いた。トレーニング前とトレーニング直後では4名中1名が有意に改善した。トレーニング前と13日後では4名中1名が有意に改善した。

Table 3 Ratio of front-back confusion for white noise.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング直後	13日後
1	0.06	0.41	0.32	0.34
2	0.05	0.43	0.47	0.48
3	0.00	0.23	0.10*	0.08**
4	-	0.36	0.25	0.32

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

### 3.3 男声アナウンスでの音源定位テストの結果

トレーニングでは用いていない男声アナウンスを音源とした音源定位テストの結果をTables 4-6に示す。

平均側方角誤差(Table 4)は白色雑音(Table 1)と同様の値となった。検定結果は、被験者1-3は白色雑音と同様であった。被験者4は白色雑音と異なり有意に改善しなかった。

左右誤判定率(Table 5)は白色雑音(Table 2)と同様の値となった。ただし、白色雑音では被験者1のトレーニング直後の左右誤判定率が0.00であったのに対し、男声アナウンスでは0.12となった。検定結果は白色雑音と同様であった。

前後誤判定率(Table 6)は白色雑音(Table 3)よりもやや大きな値となった。特に被験者3,4ではトレーニング前、トレーニング直後、13日後で白色雑音より大きい。検定結果については、白色雑音では被験者3でトレーニング直後、13日後で有意に改善したが、男声アナウンスではいずれの被験者も有意に改善しなかった。

Table 4 Mean lateral angle error for male voice [deg.].

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング直後	13日後
1	13.7	80.7	29.0**	30.1**
2	11.1	72.6	28.3**	26.3**
3	6.9	80.9	38.8**	35.9**
4	-	29.9	31.5	36.3

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

Table 5 Ratio of left-right confusion for male voice.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング直後	13日後
1	0.00	0.50	0.12**	0.07**
2	0.00	0.50	0.13**	0.16**
3	0.00	0.50	0.07**	0.08**
4	-	0.15	0.14	0.21

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

Table 6 Ratio of front-back confusion for male voice.

被験者	両耳聴	トレーニング前	トレーニング直後	13日後
1	0.06	0.29	0.37	0.28
2	0.11	0.54	0.46	0.48
3	0.02	0.44	0.39	0.42
4	-	0.44	0.44	0.47

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

## 4 考察

### 4.1 一側性難聴者の改善が擬似一側聾者と比較して小さい理由

トレーニングの効果を評価するために改善率(式(2))を求めた。擬似一側聾(被験者1-3)と一側性難聴(被験者4)の改善率を比較した結果をTable 7に示す。

$$\text{改善率} = \frac{(\text{トレーニング前} - \text{トレーニング直後})}{\text{トレーニング前}} \quad (2)$$

平均側方角誤差と左右誤判定率の改善率は、どちらも一側性難聴者の方が小さい。3.2, 3.3節で述べたように被験者4はトレーニング前の定位精度が他の被験者と比較して高い。Firszt *et al.*

は、元々の定位精度が高い被験者はトレーニングでの改善が小さいと報告している。一側性難聴である被験者4は日常生活で学習を積んできたため、元々の定位精度が高く、改善率が小さかったと考えられる。

Table 7 Improvement rates of mean lateral angle error and left-right error rate for subjects under simulated UD and a subject with UHL.

		擬似一側聾	一側性難聴
平均側方角誤差 [deg.]	トレーニング前	77.1	35.4
	直後	24.8	26.0
	改善率	0.68	0.27
左右 誤判定率	トレーニング前	0.50	0.12
	直後	0.07	0.09
	改善率	0.86	0.25

#### 4.2 前後誤判定率が有意に改善しなかった理由

Fig. 6に被験者1の健側の耳の前後(方位角:0°,180°)のHRTF(紫色の実線と破線)および左右(方位角:90°,270°)のHRTF(緑色の実線と破線)を示す。左右(緑色)と比較すると前後(紫色)のスペクトルは形状の差が小さい。今回のトレーニングでは、左右の形状の大きな差は学習できたが、前後の形状の小さな差は学習できなかったと考えられる。

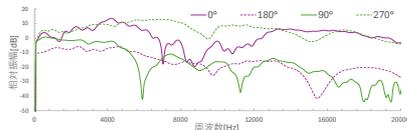


Fig. 6 HRTFs of subject 1 for azimuth angles of 0, 180, 90, 270°.

#### 4.3 患側と健側の前後誤判定率の改善率の比較

音源方向が患側の場合と健側の場合の改善率を比較した結果をTable 8に示す。

改善率を比較すると、一側聾を模擬した被験者1-3は健側と比べて患側の改善率が低く、被験者1,2に関しては悪化している。この傾向は、森本ら[5]や及川[6]などの”一側聾者は健側に比べて患側の音源に対する定位精度が低い”という報告と一致している。

Table 8 Improvement rates of front-back error rate for the sound source on the contralateral direction and the ipsilateral direction to the deafened ear.

		被験者1	被験者2	被験者3	被験者4
健側	トレーニング前	0.45	0.45	0.03	0.40
	直後	0.13	0.38	0.00	0.35
	改善率	0.72	0.17	1.00	0.13
患側	トレーニング前	0.40	0.40	0.45	0.35
	直後	0.45	0.60	0.23	0.23
	改善率	-0.13	-0.50	0.50	0.36

#### 4.4 従来のトレーニング方法との比較

スペクトルのみを音源方向判断の手がかりとして提示した従来のトレーニングと本研究

のトレーニングで比較した結果をTable 9に示す。被験者は擬似一側聾者である。

改善率を比較すると、いずれもトレーニング方法の間でほとんど差はみられなかった。

Table 9 Improvement rates of mean lateral angle error, left-right error rate and front-back error rate for the previous training method and the proposed training method.

		提示した手がかり	
		スペクトル	スペクトル&受聴音圧レベル
平均側方角誤差 [deg.]	トレーニング前	81.2	77.1
	直後	29.3	24.8
	改善率	0.64	0.68
左右 誤判定率	トレーニング前	0.50	0.50
	直後	0.07	0.07
	改善率	0.87	0.86
前後 誤判定率	トレーニング前	0.50	0.36
	直後	0.39	0.30
	改善率	0.22	0.17

#### 5 おわりに

本人のHRTFとヘッドホンを用いて、振幅スペクトルと受聴音圧レベルの音源方向依存性を方向判断の手がかりとして学習できる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結果、以下のことが示された。

1) 擬似一側聾者の平均側方角誤差と左右誤判定率は改善し、13日後も維持された。前後誤判定率は改善しなかった。

2) 一側性難聴者の平均側方角誤差は改善したが、13日後は維持されなかった。左右誤判定率と前後誤判定率は改善しなかった。

3) トレーニングで用いていない男声アナウンスでの平均側方角誤差と左右誤判定率は白色雑音と同程度だった。前後誤判定率はやや悪化した。

4) 従来のトレーニングと本研究のトレーニングで定位精度の改善率を比較すると、ほとんど差は見られなかった。

前後方向の音源定位精度の改善と、さらなる刺激での汎化検証が今後の課題である。

#### 謝辞

実験に協力いただいた卒業生の綾部杏氏と伊藤元介氏、被験者の皆様に深謝します。

#### 参考文献

- [1] Harford and Barry, ASHA, 30, 121-138, 1965.
- [2] Firszt *et al.*, Hearing Research, 319, 48-55, 2015.
- [3] Shim *et al.*, Clinical and Experimental Otorhinolaryngology, 2023. doi: 10.21053.
- [4] 稲葉と飯田, 音講論(秋), 843-846, 2023.
- [5] 森本他, 音響学会聴覚研資, H83-60, 1983.
- [6] 及川, 耳鼻咽喉科学会会報, 361-372, 1990.