

一側性難聴者の文章了解度・方向性マスキング解除の検討 —無響・残響下の比較—

辻 慎也[†] 荒井 隆行[‡]

[†] 上智大学大学院 理工学研究科 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

[‡] 上智大学理工学部 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

E-mail: [†] s-tsuji-119@eagle.sophia.ac.jp, [‡] arai@sophia.ac.jp

あらまし 本研究では、一側性難聴者 (UHL) と両側聴力正常のモノラル受聴 (MNH) ・両耳聴 (BNH) を対象に、無響下・残響下での文章了解度・方向性マスキング解除 (SRM) を測定した。文章了解度テストの結果、BNH ではその影響が有意でなかった一方、UHL・MNH で残響は音声明瞭度を有意に上昇させる要因と推定された。BNH と比べ、MNH・UHL では音声は健聴側に位置したときの SRM の効果が少なく、音声は患耳側に位置したとき SRM は負の値を取った。一方、MNH と比べ、UHL は残響下である程度 energetic masking から解除され、SRM の度合いに改善がみられ、モノラル受聴でのキューへの適応によって一側性難聴者の聴取は改善されると示唆された。

キーワード 一側性難聴, 残響, 騒音下聴取, 適応, 方向性マスキング解除

Speech Recognition and Spatial Release from Masking for Those with Unilateral Hearing Loss

—A Comparison of Hearing Under Anechoic and Reverberant Environments—

Shinya TSUJI[†] and Takayuki ARAI[‡]

[†] Graduate School of Science and Technology, Sophia University 7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554 Japan

[‡] Faculty of Science and Technology, Sophia University 7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554 Japan

E-mail: [†] s-tsuji-119@eagle.sophia.ac.jp, [‡] arai@sophia.ac.jp

Abstract In this study, speech reception thresholds (SRT) and the degree of spatial release from masking (SRM) under anechoic and reverberant environments were measured under three hearing conditions namely, unilateral hearing loss (UHL), monaural normal hearing (MNH), and binaural normal hearing (BNH). Reverberation was estimated as a factor of impairing speech intelligibility for MNH and UHL, whereas SRT in BNH was not significantly affected. MNH and UHL showed poorer degree of SRM than BNH and the degree of SRM was negative when the target sound was located on the side of the impaired ear. However, participants with UHL were released from energetic masking under reverberation and the degree of SRM was improved. Results suggest that the hearing of people with UHL could be improved by the adaptive contribution to monaural cues.

Keywords Unilateral Hearing Loss, Reverberation, Speech Recognition in Noise, Adaptation, Spatial Release from Masking

1. はじめに

ヒトは両耳を有し、両耳聴の効果により騒音下などの悪条件に置かれた環境でも音声明瞭度が保たれる[1]。騒音下での聴取について、音声とマスカが別々に位置するとき、音声明瞭度は改善する。これを方向性マスキング解除 (spatial release from masking; 以下 SRM) という。この改善は、カクテルパーティ効果 (cocktail-party effect) [2] やスケルチ効果 (binaural squelch) [3, 4] と言及されることもある。

加えて、室内で音声を聴取するとき、我々の耳には音源から直接到来する音だけでなく、部屋の壁などの面で反射した成分である残響が加わって音が到達している。残響が音声明瞭度に及ぼす影響について、self-

masking・overlap-masking の2点が指摘されている[5]。

コンサートホールのように広く残響時間が長い所では音声の時間構造が崩れ、先行する音声の残響によって後続の音声はマスキングされる。加えて、残響により音声のみかけの幅が広がり[6]、SRM の効果が減少することが報告されている[7]。

聴覚障害のあるヒトでは両耳聴の効果が損なわれ、騒音下での聴取は困難なものになる[8, 9]。また、残響下において、両耳聴では overlap-masking の解除[10]や先行音効果[11]によって、音声明瞭度・音源定位はある程度担保される。しかし、特に聴覚障害のある場合、残響は音声明瞭度を下げる大きな要因となる[12]。

聴覚障害の中には、片側耳は正常であるが、対耳側

に難聴がある場合がある。このような聴覚障害は一側性難聴 (unilateral hearing loss; UHL) と呼ばれる。難聴耳の聴力低下は軽度から重度と多様な様相を示す[13]。難聴側が重度難聴を呈するとき、片側聾 (single-sided deafness; SSD) と区別されることもある。

SRMを得るための主要な要因は、両耳間の時間差と強度差である[14]。両耳聴では、騒音下で音声とマスクが別に位置することによって常に SRM の効果が得られる。一側性難聴者でもマスクに対して音声は健聴側にあるとき、信号対雑音比 (SN 比) の改善によって SRM の効果がみられるが、両耳聴ほどの効果は得られない[15]。一方、マスクに対し音声は患耳側にあるとき、本来は両耳間強度差の手がかりをもたらずはずの頭部陰影効果が裏目に作用し SRM は負の値を取る[15, 16]。

社会生活を送るうえで、一側性難聴者は頻繁に騒音下といった聴取困難な状況におかれ、一次的な聞こえの問題に伴って、対人関係などに問題が生じることもある[17]。過去の残響下における雑音下聴取の検討では、一側性難聴者は両耳聴と比べ、音声聴取のためにより大きな SN 比を必要とした[18]。この検討では残響下での測定のみを行い、非残響下との比較がなされず、残響が音声聴取や SRM にどのような影響を及ぼすのか明らかにされていない。

そこで本研究では、一側性難聴者の音声知覚と SRM に残響が及ぼす影響を検討することを目的として、両

側聴力正常の両耳聴・モノラル受聴と一側性難聴の 3 条件を対象に、1) 無響下の文章理解度、2) 残響下の文章理解度、3) SRM を新たに測定している。本稿では原稿作成時点までの結果について議論する。

2. 方法

2.1. 対象

調査対象者は一側性難聴者 14 名 (男性 4 名、女性 10 名; 22–62 歳)、両側聴力正常者 16 名 (男性 5 名、女性 11 名; 18–24 歳) だった。参加者はすべて日本語母語話者であった。Table 1 に一側性難聴のある参加者の属性を示す。

老化により、50–60 歳から雑音下での音声理解度が低下する[19]。本研究では老化の影響を避けるために、50 歳以上の一側性難聴者のデータは分析から外した。また、対象のうち 1 名の一側性難聴者について、患耳側の純音聴力検査が他の一側性難聴のある参加者と違う傾向を示した (125, 250 Hz で 30 dB HL, 500 Hz で 60 dB HL, その他はスケールアウト) ので、本稿では分析の対象から外した。

分析対象とした一側性難聴者について、難聴の期間は 15–48 年で、先天的発症が 6 名、後天的発症が 2 名であった。なお、本研究では難聴の発症前の記憶がないケースを先天的発症とした。難聴側は左が 2 名、右が 6 名。良聴耳の平均聴力レベル (四分法) はすべてが 25 dB HL 未満であった。患耳側の聴力は高度難聴

Table 1 Demographics of the participants with unilateral hearing loss

対象	年齢	難聴の期間	難聴耳	平均聴力レベル* (良聴耳, 難聴耳)	難聴の原因
01	25	25.0	右	3.75, 77.50	小耳症
02	38	38.0	右	5.00, SO	不明
03	27	20.0	右	12.50, SO	ムンプス
04	28	28.0	右	18.75, SO	アブミ骨形成不全
05	22	22.0	右	10.00, 97.50	ムンプス
06	33	33.0	左	6.25, SO	不明
07	50	1.5	左	5.00, 76.25	突発性難聴
08	62	0.5	左	21.25, 100.00	突発性難聴
09	51	51.0	右	13.75, SO	不明
10	58	25.0	左	23.75, SO	聴神経腫瘍
11	27	15.0	右	10.00, 91.30	突発性難聴
12	47	47.0	右	22.50, SO	不明
13	48	48.0	左	11.25, SO	不明
14	57	37.0	右	12.50, 95.00	不明
平均	40.93	27.93		12.59, 101.25	
(SD)	(13.88)	(15.79)		(6.71) (12.26)	SO: スケールアウト

* 難聴耳の平均聴力レベルは、SO = 110 dB HL として算出

が1名、重度難聴が2名、スケールアウト5名だった。一側性難聴については、American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) による、「片側の耳は正常であるが、対耳側に26 dB HL以上の難聴がある状態」[13]によって定義した。

2.2. 両耳インパルス応答

残響を付与した刺激は上智大学10号館講堂で収録した両耳インパルス応答の畳み込みによって作成した[18]。10号館講堂の収録では12面体スピーカ (Brüel & Kjær, OmniPower 4292) からの swept-sine 信号音源と、3脚にセットしたダミーヘッド (Neumann, KU 81) を用いた。ダミーヘッドに対する音源の角度を変え、複数収録されたインパルス応答のうち正面 (0°)・左右 ($\pm 35^\circ$) の、3点の両耳インパルス応答を用いた。音源と受聴点の高さは床から約1.35 m、距離は約3.00 m、残響時間は約1.6秒であった。

無響の刺激は Kayser ら[20]によるデータベースより、音源をダミーヘッドに対し仰角 0° 、方位角正面 (0°)・左右 ($\pm 35^\circ$)、距離3.00 mに置いて収録された無響室の両耳インパルス応答を使用した。

2.3. 刺激音

文章了解度 (speech reception threshold; 以下 SRT) テストでは、ターゲット音声として NTT-AT 音素バランス1000文[21]から1) 話者が男性アナウンサー、2) 話速が7.5–9.0 モーラ/秒、3) 4–5文節の、3つの条件を満たす250文を選択した。それぞれの文で文節ごとにキーワードを設定し、20文のリストを12個、10文のリストを1個作成した。

マスクとして、選択した250文の長時間平均スペクトルと白色雑音を Praat[22]によりマッチさせた speech-shaped noise (以下、SSN) を用いた。

Matlab によって、両耳インパルス応答を畳み込み、ターゲット音声とマスクに残響を付与した。250文は振幅を RMS で正規化した。刺激の立ち上がりとしち下がりには10 msのコサイン関数によって時間包絡を付与した。

2.4. 文章了解度テスト

One-up / one-down の階段法により、50% 閾値[23]で SRT を測定した。実験参加者には提示した刺激音声の復唱を求め、各文節ごとに設定したキーワードを3つ以上復唱できた場合は SN 比を2 dB 下げ、復唱できなかった場合は SN 比を2 dB 上げた。テストは最初、マスクの等価騒音レベルは65 dB (A)、音声は75 dB (A) とした (SN 比は+10 dB からスタートした)。ターゲット音声の最大音圧は75 dB (A) とした。設定した最大音圧まではターゲット音声を音圧操作して、最大音圧の時はマスクの音圧を操作して SN 比を増減させた。SN 比の増減が2回折り返した後、6回折り返すまで試行を行い、

最後の6回の SN 比を平均することで SRT を求めた。測定の事前に、10文章リストの音声を使用して練習を行った。

無響下・残響下それぞれで、SRT は SRM をみるために3回測定した。1回目はターゲット音声とマスクの両方に同位置 (正面, 0°)、2回目はターゲットに左側 (-35°)、マスクに正面 (0°)、3回目はターゲットに右側 (35°)、マスクに正面 (0°) の両耳インパルス応答を畳み込んだ。無響下の測定では、12の20文リストのうち3つを用い、残響下の測定ではそれと重複しない3つの20文リストをターゲット音声として用いた。

2.5. 手続き

実験は上智大学の防音室で行われた。1) 紙面によるデモグラフィック要因の収集、2) オーディオメータ (RION, AA-79S) による純音聴力測定、3) 文章了解度テストの手順であった。

刺激音声の呈示と回答の正誤・SN 比の記録は Matlab の UI により行った。刺激音声はコンピュータからオーディオインターフェース (Roland, Rubix24) を介し、ヘッドホン (SENNHEISER, HDA 300) により呈示した。刺激音声の音圧レベルはヘッドホンの出力音圧を人工耳 (Brüel & Kjær, Type 4153) を介した騒音計 (RION, NA-28) により測定した。

両側聴力正常者のうち半数にはヘッドホンにより両側から呈示して (binaural normal hearing; 以下 BNH, $n = 8$)、もう半数には片側のみ呈示した (monaural normal hearing; 以下 MNH, $n = 8$)。MNH の呈示側は、左右同数・ランダムに選択した。一側性難聴者 (以下 UHL, $n = 8$) にはヘッドホンにより両側呈示した。

3. 結果

Fig. 1 に無響下・残響下で測定した SRT の raincloud plot[24]を記す。統計分析には R (4.2.1) を用いた。BNH / MNH / UHL の比較では、SRT を応答変数、聴取条件を説明変数として、線形混合モデルによるパラメータ推定を行い、変量効果は実験参加者とした。説明変数の p 値の算出には lmerTest パッケージを用いた。多重比較では Bonferroni 法で p 値を補正した。SRT の推定周辺平均と 95% 信頼区画 (以下 M , CI) の算出には emmeans パッケージを用いた。Table 2 に各群の SRT の $M \cdot CI \cdot SRM$ を記す。

無響下の測定では、マスクとターゲット音声と同位置の時、BNH と MNH ($\beta = -2.08$, s.e. = 0.78, $t = -2.66$, $p < 0.05$)、MNH と UHL ($\beta = 2.12$, s.e. = 0.78, $t = 2.71$, $p < 0.05$) の間で SRT に有意差がみられた。マスクに対して、ターゲット音声を BNH の左側・MNH の呈示側・UHL の良聴耳側に置いたとき (以下、同側条件)、BNH と MNH ($\beta = -4.75$, s.e. = 1.37, $t = -3.47$, $p < 0.01$) の間で SRT に有意差がみられた。音声を BNH の右側・

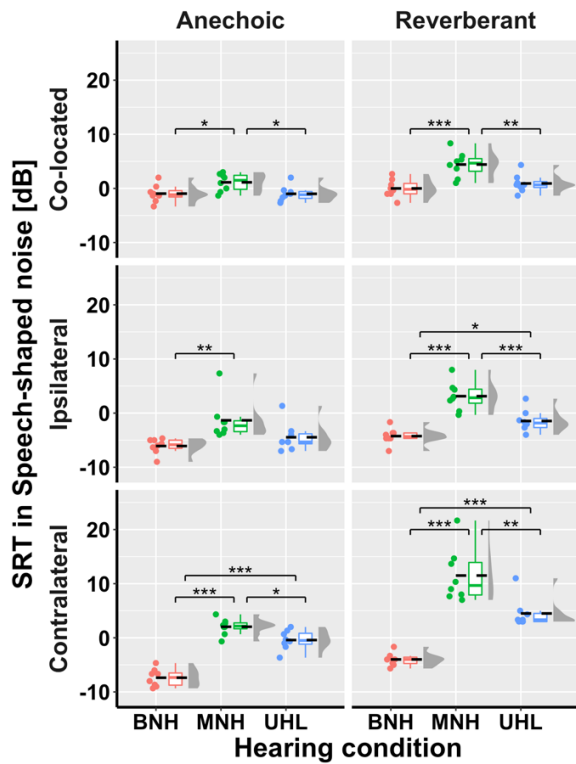


Fig. 1 Raincloud plots for the speech reception thresholds (SRT) including raw jittered data, box-whisker plots, and split-half violins for three hearing conditions; BNH ($n = 8$), MNH ($n = 8$), and UHL ($n = 8$). The solid and broken horizontal lines indicate the median and mean, respectively. *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

MNH の非呈示側・UHL の患耳側に置いたとき (以下、対側条件), 全ての群の間で SRT に有意差がみられた (BNH vs. MNH: $\beta = -9.42$, s.e. = 0.83, $t = -11.41$, $p < 0.001$; BNH vs. UHL: $\beta = -6.96$, s.e. = 0.83, $t = -8.43$, $p < 0.001$; MNH vs. UHL: $\beta = 2.46$, s.e. = 0.83, $t = 2.98$, $p < 0.05$).

残響下の測定では, マスカとターゲット音声と同位置の時, BNH と MNH ($\beta = -4.42$, s.e. = 0.97, $t = -4.57$, $p < 0.001$), MNH と UHL ($\beta = 3.50$, s.e. = 0.97, $t = 3.62$, $p < 0.01$) の間で SRT に有意差がみられた。同側条件では, 全ての聴取条件 (BNH vs. MNH: $\beta = -7.38$, s.e. = 1.05, $t = -7.03$, $p < 0.001$; BNH vs. UHL: $\beta = -2.79$, s.e. = 1.05, $t = -2.66$, $p < 0.05$; MNH vs. UHL: $\beta = 4.58$, s.e. = 1.05, $t = 4.37$, $p < 0.001$) で SRT に有意差がみられた。対側条件でも同様に, 全ての聴取条件 (BNH vs. MNH: $\beta = -15.5$, s.e. = 1.67, $t = -9.27$, $p < 0.001$; BNH vs. UHL: $\beta = -8.5$, s.e. = 1.67, $t = -5.08$, $p < 0.001$; MNH vs. UHL: $\beta = 7.0$, s.e. = 1.67, $t = 4.18$, $p < 0.01$) で SRT に有意差がみられた。

SRM は同位置の SRT から別位置の SRT を差分して求めた (Table 2)。BNH・MNH・UHL の各群で SRT を応答変数, ターゲット音声の呈示側 (同側 / 対側) ・

Table 2 Estimate marginal means and confidence intervals of the speech reception threshold (SRT) and spatial release from masking (SRM)

聴取条件	聴取環境	音声の位置	SRT (M) [dB]	CI		SRM (M) [dB]
				Low	High	
BNH	無響下	正面	-0.96	-2.11	0.20	
		左側	-6.08	-8.10	-4.07	5.12
		右側	-7.38	-8.59	-6.16	6.42
	残響下	正面	0.00	-1.42	1.42	
		左側	-4.25	-5.79	-2.71	4.25
		右側	-4.00	-6.46	-1.54	4.00
MNH	無響下	正面	1.13	-0.03	2.28	
		呈示側	-1.33	-3.35	0.68	2.46
		非呈示側	2.04	0.83	3.26	-0.91
	残響下	正面	4.42	3.00	5.84	
		呈示側	3.12	1.58	4.67	1.30
		非呈示側	11.50	9.04	13.96	-7.08
UHL	無響下	正面	-1.00	-2.15	0.15	
		良聴耳側	-4.46	-6.47	-2.44	3.46
		患耳側	-0.42	-1.63	0.80	-0.58
	残響下	正面	0.92	-0.50	2.34	
		良聴耳側	-1.46	-3.00	0.09	2.38
		患耳側	4.50	2.04	6.96	-3.58

M : 推定周辺平均, CI: 95%信頼区画

Table 3 Results from regression models analyzing speech reception thresholds under three hearing conditions: BNH ($n = 8$), MNH ($n = 8$), and UHL ($n = 8$)

		推定値	標準誤差	T 値	P 値
BNH	切片	-0.96	0.46	-2.09	< 0.05
	位置 (左側)	-5.13	0.51	-9.99	< 0.0001
	位置 (右側)	-6.42	0.51	-12.51	< 0.0001
	環境 (残響下)	0.96	0.51	1.87	0.06
	左側:残響下	2.42	0.73	3.33	< 0.001
	右側:残響下	0.88	0.73	1.21	0.23
MNH	切片	1.13	0.77	1.46	0.16
	位置 (呈示側)	-2.46	0.69	-3.56	< 0.001
	位置 (非呈示側)	0.92	0.69	1.33	0.19
	環境 (残響下)	3.29	0.69	4.77	< 0.0001
	呈示側:残響下	1.17	0.98	1.20	0.23
	非呈示側:残響下	6.17	0.98	6.32	< 0.0001
UHL	切片	-1.00	0.60	-1.66	0.11
	位置 (良聴耳側)	-3.46	0.60	-5.73	< 0.0001
	位置 (患耳側)	0.58	0.60	0.97	0.33
	環境 (残響下)	1.92	0.60	3.18	< 0.01
	良聴耳側:残響下	1.08	0.85	1.27	0.21
	患耳側:残響下	3.00	0.85	3.51	< 0.001

* コロンは交互作用を示す

聴取環境（無響 / 残響）を説明変数とした線形混合モデルによるパラメータ推定の結果を Table 3 に示す。それぞれのパラメータが負の方向に寄与するときは SRT の低下（音声明瞭度は上昇する方向に作用される）を、正の方向に寄与するときは SRT の上昇（音声明瞭度は低下する方向に作用される）を意味する。

4. 考察

無響下において、ターゲット音声とマスクが同位置の時、BNH と比べ MNH は有意に高い SRT を示した。更に、残響下において、その差は大きくなった (Fig. 1, Table 2)。線形混合モデルによるパラメータ推定の結果、BNH ではその影響が有意でなかった一方で、MNH の SRT は残響によって有意に上昇すると推定された ($p < 0.0001$, Table 3)。両耳加算効果により両耳聴では単耳と比べて約 3 dB ラウドネスが上昇し、音声明瞭度にも改善がみられ [25]、残響下において両耳聴による overlap-masking 解除によって音声明瞭度が担保される [10] といった過去の報告と同様の結果となった。

一方、無響下の同位置条件の測定において、MNH と比べ UHL では有意な音声明瞭度の改善がみられた。また、残響下において、その度合いはより大きなものになった (Fig. 1, Table 2)。無響下・残響下とも、同位置では BNH と UHL の間で SRT には有意差がみられなかった。線形混合モデルによるパラメータ推定の結果、残響は UHL の SRT を有意に上昇させる要因 ($p < 0.01$, Table 3) と推定されたが、MNH と比べ推定値は少ない値を示した (MNH vs. UHL: 3.29 vs. 1.92, Table 3)。

線形混合モデルによるパラメータ推定の結果、BNH ではターゲット音声とマスクが別に位置することで、常に SRM の効果が得られた ($p < 0.0001$, Table 3)。MNH は同側条件で SRM の効果があつた ($p < 0.001$, Table 3) 一方で、その度合いは BNH と比べ少なく (BNH vs. MNH: -5.13 vs. -2.46, Table 3)、対側条件のとき SRM は負の値を取ると推定された。加えて、残響と対側条件に有意な交互作用があると推定された (i.e., 残響下で音声为非呈示側に位置したとき、SRM の負の値は更に増加する方向へ有意に作用されると推定された; $p < 0.0001$, Table 3)。

一方、同じくモノラル受聴であつた MNH と比べて、UHL は同側条件で SRT がより改善すると推定された (MNH vs. UHL: -2.46 vs. -3.46, Table 3)。また、MNH と同じく、UHL でも残響と対側条件に有意な交互作用があると推定されたが、その効果は少ない値を示した (i.e., MNH と比べて、UHL では残響下において患耳側に音声位置したときの聞き取りが改善していた; MNH vs. UHL: 6.17 vs. 3.00, Table 3)。以前我々が実施した検討では、残響下において、MNH と比べ UHL は同位置で SRT が改善し、同側条件でより大きな SRM

がみられていた [18]。今回の無響下・残響下の測定でも同様に、UHL では同位置で SRT が改善し、同側条件でより大きな SRM が得られた。さらに、残響下において特に対側条件で測定された SRM に改善がみられた。

一側性難聴では両耳間情報と代替し、頭部伝達関数 (head-related transfer function; 以下 HRTF) によりもたらされる、スペクトラルキューや音圧のキューの活用によって音源の方向を判断できる [26, 27]。また、音源定位能力はトレーニングにより向上し [26]、音源定位と難聴の期間・聴覚に関連する脳の構造や働きの変化には相関がある [27]。マスクに SSN を用いて文章理解度を検討した例では、難聴の罹患期間が短いほど音声の聞き取りにより大きな SN 比が必要という相関が (有意とは推定されていないが) みられた [28]。一側性難聴の発症後、「不自然・不快・不明瞭」と感受された音楽の聴こえ [29] は、時間経過によって改善した [30]。また、一側性難聴のある子どもの SRM を検討した例では、年齢を重ねるとともに、SRM に改善を示した [16]。

本稿で分析対象とした一側性難聴者は平均 34.13 年 (1SD: 9.23) と、長い期間一側性難聴の状態であつた。本研究では、両耳聴とは違う受聴環境におかれた MNH との比較から、一側性難聴者はモノラル受聴のキューへの適応により、残響下でマスキングから解除され、SRM の効果は改善し得るということが示唆された。

本研究では、ダミーヘッドで収録した両耳インパルス応答 (標準化 HRTF) の畳み込みで残響を付与したことにより、MNH と UHL の比較を実現した。しかし、標準化 HRTF の畳み込みで作成した刺激は、本人の HRTF との誤差により実際の聴取とは違ったキューをもつ [31]。そのため、今後、実際の音場での文章理解度や SRM の効果を検討する必要がある。また、測定ではマスクに SSN を用いて、energetic masking からのマスキング解除を検討した。音声の知覚において、マスクが雑音でなく音声の場合、違った影響をもたらす (informational masking) ことが知られている [15, 16]。informational masking に残響が及ぼす影響も、今後検討する必要がある。

5. 結論

本研究では両側聴力正常者の両耳聴 (BNH) ・モノラル受聴 (MNH) ・一側性難聴者 (UHL) を対象として無響下・残響下での文章理解度 (SRT)、方向性マスキング解除 (SRM) を測定し、以下の結果を得た。

1. BNH ではその影響が有意でなかった一方で、MNH ・ UHL で残響は SRT を有意に上昇させる要因と推定された。一方、MNH と比べて、UHL は残響による影響が少ないことから、残響下である程度の energetic masking からの解除があると示唆された。

2. マスカとターゲット音声の別の位置にあるとき、BNH と比べ MNH・UHL では音声の健聴側に位置したときの SRM の度合いが少なく、患耳側に位置したとき、SRM は負の値を取った。一方、MNH と比べ、UHL では SRM の効果に改善がみられた。

3. MNH との比較から、発症から長期間が経過した一側性難聴者はモノラル受聴でのキューへの適応により、残響環境下でマスキングから解除され、SRM の効果は改善し得るということが示唆された。

文 献

- [1] P. Avan, F. Giraudet, and B. Büki, "Importance of binaural hearing," *Audiol. Neurotol.*, vol.20, no.1, pp.3–6, May 2015.
- [2] E. C. Cherry, "Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.25, pp.975–979, Sep. 1953.
- [3] W. Koenig, "Subjective effects in binaural hearing," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.22, no.1, pp.61–62, Jan. 1950.
- [4] A. W. Bronkhorst and R. Plomp, "The effect of head-induced interaural time and level differences on speech intelligibility in noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.83, no.4, pp.1508–1516, Nov. 1988.
- [5] R. H. Bolt and A. D. MacDonald, "Theory of speech masking by reverberation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.21, no.6, pp.577–580, Nov. 1949.
- [6] P. W. Robinson, J. Pätynen, T. Lokki, H. Suk Jang, J. Yong Jeon, and N. Xiang, "The role of diffusive architectural surfaces on auditory spatial discrimination in performance venues," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.133, no.6, pp.3940–3950, Jun. 2013.
- [7] G. Kidd, C. R. Mason, and A. Brughera, "The role of reverberation in release from masking due to spatial separation of sources for speech identification," *Acta Acust. united with Acust.*, vol.91, no.3, pp.526–536, May 2005.
- [8] B. Williges, T. Wesarg, L. Jung, L. I. Geven, A. Radloff, and T. Jürgens, "Spatial speech-in-noise performance in bimodal and single-sided deaf cochlear implant users," *Trends Hear.*, vol.23, 233121651985831, Jan. 2019.
- [9] H. E. Cullington and F.-G. Zeng, "Comparison of bimodal and bilateral cochlear implant users on speech recognition with competing talker, music perception, affective prosody discrimination, and talker identification," *Ear Hear.*, vol.32, no.1, pp.16–30, Feb. 2011.
- [10] B. Libbey and P. H. Rogers, "The effect of overlap-masking on binaural reverberant word intelligibility," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.116, no.5, pp.3141–3151, Nov. 2004.
- [11] R. Y. Litovsky, H. S. Colburn, W. A. Yost, and S. J. Guzman, "The precedence effect," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.106, no.4, pp.1633–1654, Oct. 1999.
- [12] A. K. Nábelek and D. Mason, "Effect of noise and reverberation on binaural and monaural word identification by subjects with various audiograms," *J. Speech, Lang. Hear. Res.*, vol.24, no.3, pp.375–383, Sep. 1981.
- [13] ASHA (©1997–2023), "Type, degree, and configuration of hearing loss," <https://www.hearingspecialistsofmichigan.com/assets/pdf/hearing-loss-types-degree-configuration.pdf> (参照 2023/8/20).
- [14] R. Y. Litovsky, "Spatial release from masking," *Acoust. Today*, vol.8, no.2, pp.18–25, Apr. 2012.
- [15] A. M. Rothpletz, F. L. Wightman, and D. J. Kistler, "Informational masking and spatial hearing in listeners with and without unilateral hearing loss," *J. Speech, Lang. Hear. Res.*, vol.55, no.2, pp.511–531, Apr. 2012.
- [16] N. E. Corbin, E. Buss, and L. J. Leibold, "Spatial hearing and functional auditory skills in children with unilateral hearing loss," *J. Speech, Lang. Hear. Res.*, vol.64, no.11, pp.4495–4512, Nov. 2021.
- [17] 岡野由実, 廣田栄子, "一側性難聴事例における聞こえの障害と障害認識の経緯に関する検討," *Audiol. Japan*, vol.58, no.6, pp.648–659, Dec. 2015.
- [18] S. Tsuji and T. Arai, "Hearing deficits and adaptation for those with unilateral hearing loss under reverberation," *Acoust. Sci. Tech.* (in press).
- [19] T. Goossens, C. Vercammen, J. Wouters, and A. van Wieringen, "Masked speech perception across the adult lifespan: Impact of age and hearing impairment," *Hear. Res.*, vol.344, pp.109–124, Feb. 2017.
- [20] H. Kayser, S. D. Ewert, J. Anemüller, T. Rohdenburg, V. Hohmann, and B. Kollmeier, "Database of multichannel in-ear and behind-the-ear head-related and binaural room impulse responses," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol.2009, no.1, p.298605, Dec. 2009.
- [21] NTT アドバンステクノロジー株式会社 (©1976–2023), "音素バランス 1000 文," 1999.
- [22] P. Boersma and D. Weenink, "Praat: doing phonetics by computer (Version 6.1.30)," <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/> (参照 2023/8/20).
- [23] H. Levitt, "Transformed up-down methods in psychoacoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49, no.2B, pp.467–477, Feb. 1971.
- [24] M. Allen, D. Poggiali, K. Whitaker, T. R. Marshall, and R. A. Kievit, "Raincloud plots: a multi-platform tool for robust data visualization," *Wellcome Open Res.*, vol.4, p.63, Apr. 2019.
- [25] I. J. Hirsh, "Binaural summation—a century of investigation," *Psychol. Bull.*, vol.45, no.3, pp.193–206, May 1948.
- [26] J. B. Firszt, R. M. Reeder, N. Y. Dwyer, H. Burton, and L. K. Holden, "Localization training results in individuals with unilateral severe to profound hearing loss," *Hear. Res.*, vol.319, pp.48–55, Jan. 2015.
- [27] J. H. Kim, L. Shim, J. Bahng, and H.-J. Lee, "Proficiency in using level cue for sound localization is related to the auditory cortical structure in patients with single-sided deafness," *Front. Neurosci.*, vol.15, pp.1–11, Oct. 2021.
- [28] Y. W. Liu, X. Cheng, B. Chen, K. Peng, A. Ishiyama, and Q. J. Fu, "Effect of tinnitus and duration of deafness on sound localization and speech recognition in noise in patients with single-sided deafness," *Trends Hear.*, vol.22, pp.1–14, Jan. 2018.
- [29] S. Meehan, E. A. Hough, G. Crundwell, R. Knappett, M. Smith, and D. M. Baguley, "The impact of single-sided deafness upon music appreciation," *J. Am. Acad. Audiol.*, vol.28, no.5, pp.444–462, May 2017.
- [30] S. Tsuji and T. Arai, "Music appreciation and adaptation for those with unilateral hearing loss and single-sided deafness: A questionnaire survey using a social networking service," *Acoust. Sci. Tech.*, vol.41, no.6, pp.833–836, Nov. 2020.
- [31] 飯田一博, 小早川真衣子, "一側性難聴の音像シミュレーション—その社会的理解促進の試み—," *日本音響学会聴覚研究会資料*, vol.51, no.1, pp.19–25, Feb. 2021.