

一側性難聴者が残響下での聴取に適応していく機序に関する検討 —ガンマトーンフィルタバンクによる刺激を用いて—*

◎辻慎也, 荒井隆行 (上智大)

1 はじめに

室内において、我々は残響により歪んだ音を聴取しているが、特にコンサートホールといった残響時間が長い環境において音声明瞭度が影響される[1]。聴覚障害者では、残響による音声明瞭度の低下が顕著である[2]。

聴覚障害には多様な様相が含まれ、中には片側耳は正常である一方、対側耳にのみ軽度以上の難聴を有する、一側性難聴 (UHL; unilateral hearing loss) と呼ばれる状態がある。一側性難聴により難聴側聴取・騒音下聴取・音源定位の3点が困難を要することが従来より指摘されてきた[3]。

さらに、我々がこれまでに行ってきた検討により、一側性難聴では特にその発症直後、残響により聴取が影響されること、残響下での聴取には次第に適応していくことが示唆された[4]。発症直後の時期における支援を進めるために、一側性難聴者が残響下での聴取に適応していく機序を明らかにする必要があるが、不明な点が多く残されている。

本研究では、「発症から長期経過した一側性難聴者では、良聴耳側から入力される音の各周波数帯域から得られるキューの寄与が発症直後と比べて変化する」という仮説を立てた。以上を検証することを目的として、1) 両耳聴、2) 一側性難聴の発症直後の模擬、3) 発症から長期間経過した一側性難聴者の3群に対し、異なる帯域のガンマトーンフィルタバンクを適用した刺激による聴取実験を実施している。本稿では、文章了解度テストの一部の結果について議論する。

2 方法

一側性難聴者5名(男性1名, 女性4名; 28-48歳), 両側聴力正常者16名(男性5名, 女性11名; 20-22歳)が本研究に参加した。

一側性難聴者の難聴の期間は21-48年で、先天的発症が3名, 後天的発症が2名だった。

難聴側は左が4名, 右が1名。全て、良聴耳の平均聴力レベル(四分法)は20 dB HL以下で、患耳側は重度難聴であった(Table 1)。

2.1 両耳インパルス応答

残響を付与した刺激は上智大学の10号館講堂の両耳インパルス応答[4]の畳み込みにより作成した。音源と受聴点(ダミーヘッド)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[5]のデータベースより、ダミーヘッドを音源に対して仰角0°, 距離3.00 mに置いて収録された無響室での両耳インパルス応答を使用した。

2.2 文章了解度テスト

無響・残響の両耳インパルス応答を畳み込んだ刺激を用い、文章了解度(speech reception threshold; 以下SRT)テストを実施した。

ターゲット音声はNTT-AT音素バランス1000文[6]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)4-6文節の, 3条件を満たす425文を選択し, 20文のリストを21個, 5文のリストを1個作成した。各文では, 文節ごとにキーワードを設定した。なお, 我々の過去の検討では4-5文節の文を用いていた[4]が, 聴取実験全体での試行数が増えたことに伴い, 本研究では6文節の文を含めた。マスクとして, 選択した425文の長時間平均スペクトルと白色雑音をPraatによりマッチさせたspeech-shaped noiseを用いた。

ヒトの聴覚フィルタの特性を考慮するため, 健聴耳でみられる等価矩形帯域幅(ERBN; equivalent rectangular bandwidth) [7]の軸上で等間隔[8]の中心周波数(0.1-10 kHz), 32チャンネル[9]をもつガンマトーンフィルタバンクを刺激に適用した。フィルタバンクの実装にはMatlabのgammatoneFilterBank関数[10]を用い, 標準化周波数は22.05 kHzであった。ガンマトーンフィルタバンクの各チャンネルを足し合わせる範囲を変えて, Broadband・

* An investigation into how individuals with unilateral hearing loss adapt to hearing in reverberant environments: Using stimuli processed by a gammatone filter bank, by TSUJI, Shinya and ARAI, Takayuki (Sophia University).

Table 1 Demographics of participants with unilateral hearing loss.

対象 (P#)	年齢	難聴の期間	難聴耳	平均聴力レベル*		難聴の原因
				(良聴耳)	(難聴耳)	
01	31	21	左	5.00,	SO	突発性難聴
02	48	48	左	10.00,	SO	不明
03	28	28	左	6.25,	SO	ムンプス
04	28	22	右	13.75,	SO	ムンプス
05	34	34	左	5.00,	108.75	不明
平均	33.75	29.75		8.75,	109.75	
(SD)	(8.33)	(10.88)		(3.43)	(0.56)	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

Low frequency・High frequency の各帯域ごとに SRT を測定した。チャンネル数などの詳細を Table 2 に示す。各チャンネルには異なった処理の遅延があるので、足し合わせる際には遅延を考慮した zero-padding を行った[9, 10]。

SRT の測定の冒頭では、マスクの等価騒音レベルは 65 dB (A) とし、無響の刺激は音声を 53 dB (A)、残響の刺激は音声を 61 dB (A) とした。実験参加者には呈示した刺激音声の復唱を求め、文節ごとに設定したキーワードを 3 つ以上復唱できるまで音声の音圧を 4 dB (A) ずつ上げるという試行を同一の文で繰り返した。復唱できた SN 比から one-up / one-down の階段法により、50% 閾値[11]で SRT の測定を始めた。その後の各試行では、参加者がキーワードを 3 つ以上復唱できた場合は SN 比を 2 dB 下げ、復唱できなければ SN 比を 2 dB 上げた。ターゲットの最大音圧は 85 dB (A) として、それまではターゲット音声の音圧を操作し、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 比を算術平均することで SRT を求めた。5 文のリストの音声を使用して、テスト前に練習を行った。

両耳インパルス応答の畳み込みには Matlab を用いた。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。無響の刺激では 21 の 20 文リストのうち 10 個を、残響を付与した刺激ではそれと重複しない 11 個の 20 文リストをターゲット音声として用いた。

2.3 手続き

実験は上智大学の防音室で行われた。本稿

Table 2 Center frequencies and bandwidths of gammatone filter bank for each stimulus condition.

	Channel number	Center frequency [Hz]	Bandwidth [Hz]
Broadband	1-32	100-10,000	36-1,125
Low frequency	1-16	100-1,506	36-191
High frequency	17-32	1,710-10,000	213-1,125

に関わる手続きは 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) による純音聴力の測定、3) 文章了解度テストであった (同時にメロディ聴取テストを行った)。

刺激音の呈示と回答の正誤・刺激音の SN 比の記録には Matlab の UI を用いた。刺激音はコンピュータからオーディオインタフェース (Roland, Rubix22) を介し、ヘッドホン (SENNHEISER, HD 300 PRO) により呈示した。両側聴力正常者のうち半数にはヘッドホンにより両側呈示 (binaural normal hearing; 以下 BNH, n = 8) し、もう半数には片側のみ呈示 (monaural normal hearing; 以下 MNH, n = 8) した。MNH では刺激を呈示する側の耳は左右同数になるようランダムに選択し、反対側の耳には耳栓 (3M, 1100 foam-type earplugs) を装着させ刺激の陰影聴取を防ぎ、一側性難聴の状態を模擬した。一側性難聴者 (以下 UHL, n = 5) にはヘッドホンにより両側呈示した。

無響・残響を付与した刺激のそれぞれで、SRT は 9 回測定した。本稿では、ターゲット音声とマスクの両方に正面 (0°) の両耳インパルス応答を畳み込んだ刺激を用いて、Broadband・Low frequency・High frequency の帯域ごとに測定した SRT について議論する。

3 結果

Fig. 1にSRTのraincloud plotを記す。残響下のLow frequencyでの測定において、全ての群でSN比が+50 dBであっても折り返しが収束しなかった試行が1, 2件あり、その結果は図示や分析からは外した。統計分析にはR (4.2.2)を用いた。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。各説明変数の 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。各群の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 3に各群のSRTの M ・CIを記す。

無響下でのSRTは、Broadbandでの測定でBNHとMNH($M = -3.46$ vs. -1.50 ; $\beta = -1.96$, $s.e. = 0.60$, $t = -3.29$, $p < 0.05$), MNHとUHL($M = -1.50$ vs. -3.33 ; $\beta = -1.83$, $s.e. = 0.68$, $t = 2.68$, $p < 0.05$), High frequencyでの測定でBNHとMNH($M = -0.41$ vs. 3.42 ; $\beta = -3.83$, $s.e. = 1.22$, $t = -3.14$, $p < 0.05$), MNHとUHL($M = 3.42$ vs. -0.87 ; $\beta = 4.28$, $s.e. = 1.39$, $t = 3.09$, $p < 0.05$)の間に有意差がみられた。その他の測定ではSRTに有意差はみられなかった。

残響下でのSRTは、Broadbandでの測定でBNHとMNH($M = 2.29$ vs. 6.46 ; $\beta = -4.16$, $s.e. = 1.05$, $t = -3.96$, $p < 0.01$), MNHとUHL($M = 6.46$ vs. 3.07 ; $\beta = 3.39$, $s.e. = 1.20$, $t = 2.82$, $p < 0.05$)の間に有意差がみられた。その他の測定ではSRTに有意差はみられなかった。

4 考察

本検討では両耳聴(BNH)・一側性難聴の発症直後の模擬(MNH)・少なくとも21年以上一側性難聴だった者(UHL)の3群を対象として、無響・残響を付与した刺激の ERB_N 軸上での各帯域ごとに、雑音下での文章了解度(SRT)を測定し、一側性難聴者が残響下での聴取に適応していく機序を検討した。

Broadbandでの測定では、UHLはMNHと比べ有意に低いSRT(i.e., 高い音声明瞭度)を示した(Fig. 1, Table 3)。過去の検討と同様、一側性難聴者では残響下聴取へ適応がみられるという見解[4]が支持される結果となった。

無響の刺激を用いた測定について、Low frequencyではSRTに有意差はみられなかつ

Table 3 Estimate marginal means (M) and 95% confidence intervals (CI) of the speech reception thresholds (SRTs) for each of the binaural normal hearing (BNH), monaural normal hearing (MNH), and unilateral hearing loss (UHL) groups.

聴取条件		SRT (M) [dB]	CI		
			Low	High	
Anechoic	Broadband	BNH	-3.46	-4.35	-2.58
		MNH	-1.50	-2.39	-0.61
		UHL	-3.33	-4.46	-2.21
	Low frequency	BNH	1.76	0.42	3.10
		MNH	0.54	-0.80	1.89
		UHL	2.40	0.70	4.10
	High frequency	BNH	-0.41	-2.21	1.40
		MNH	3.42	1.61	5.22
		UHL	-0.87	-3.15	1.42
Reverberant	Broadband	BNH	2.29	0.73	3.86
		MNH	6.46	4.89	8.02
		UHL	3.07	1.09	5.05
	Low frequency	BNH	30.50	23.74	37.26
		MNH	30.81	24.56	37.06
		UHL	26.17	17.89	34.44
	High frequency	BNH	2.46	0.65	4.27
		MNH	4.58	2.77	6.39
		UHL	3.40	1.11	5.69

M : 推定周辺平均, CI: 95%信頼区画

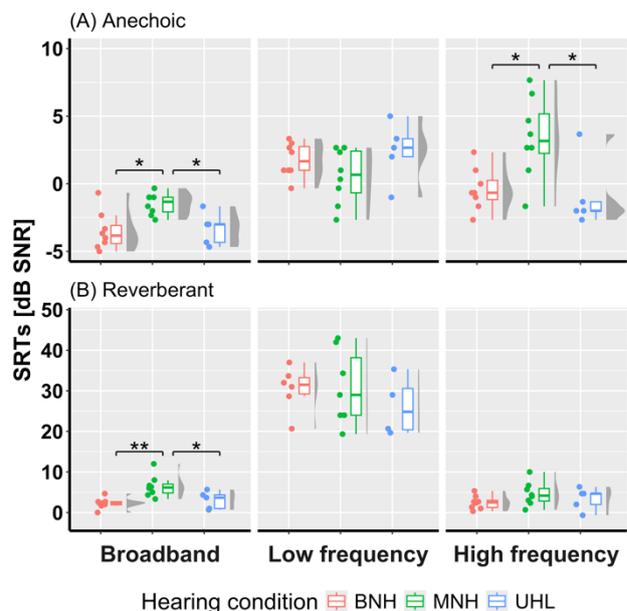


Fig. 1 Raincloud plots for the speech reception thresholds (SRTs) including raw jittered data, box-whisker plots, and split-half violins for three hearing conditions; BNH ($n = 8$), MNH ($n = 8$), and UHL ($n = 5$). The solid horizontal lines indicate the median. $**p < 0.01$, $*p < 0.05$.

たが, High frequency では, UHL は MNH と比べ有意に低い SRT を示した (Fig. 1, Table 3)。一側性難聴では両耳間情報が損なわれるが, 一方で頭部伝達関数 (head-related transfer function; 以下 HRTF) により得られるスペクトラルキューを活用し, 例えば, 音源方向を判断し得る[12]。HRTF によって生じるスペクトルの変化は 4 kHz 以上の帯域で顕著である[13]。Agterberg ら[14]は一側性難聴者の良聴耳側の聴力と音源定位の成績の関わりを検討した。その結果, 良聴耳側での 8 kHz の聴力レベルが 40 dB HL 以上だった参加者は音源定位の成績が悪かったが, 一方で高域の聴力が良い参加者が必ずしも良い成績を示すわけではなく, 個人差が認められた[14]。本研究では UHL・MNH とともに, 参加者は全て高域の (良聴耳側の) 聴力が 20 dB HL 以下であったが, 無響の刺激の High frequency での測定にて SRT に有意差がみられた (Fig. 1)。したがって, 発症から長期経過した一側性難聴者では, 高帯域でのキューに適応することにより音声明瞭度にも向上がみられることが示唆された。

残響を付与した刺激を用いた測定について, High frequency・Low frequency とともに全ての群で SRT に有意差がみられなかった。低域の残響時間のみを様々に変化させて, 中国語の音声明瞭度を検討した研究では, 125–250 Hz の残響時間が 500 Hz 以上より長い場合, 音声明瞭度が有意に低下したと報告されている[15]。本研究において, High frequency では全ての群で Broadband と同等の SRT がみられた。しかし, Low frequency では SRT が高く, 全ての群で SN 比+50 dB でも測定が収束しなかった例があり (i.e., フロア効果が生じた), 残響による音声明瞭度への影響は低域で顕著ということが示唆された。一方で, 低域も含まれた Broadband の測定で, UHL は MNH と比べ有意に低い SRT を示した (Fig. 1, Table 3)。

一側性難聴では音の聴取時に脳が賦活する部位が違うことから, 高次における可塑性についての言及がなされている[16]。両耳聴ではスケルチ効果により残響の影響が抑えられ[17], 音声明瞭度にも寄与する[18]。一側性難聴では高域で得られるキューへ適応することに加え, 残響の影響が大きい帯域による音声明瞭度への影響を抑える, スケルチ効果のような適応が生じることが示唆された。

謝辞

本研究では, 実施にあたって JSPS 科研費 24K23899 の助成を受け, 上智大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認を受けた (2024-148)。実験にご協力いただいた方々へ感謝申し上げます。

参考文献

- [1] R. H. Bolt and A. D. MacDonald, *J. Acoust. Soc. Am.*, 21(6), 577–580, 1949.
- [2] A. K. Nábělek and D. Mason, *J. Speech, Language, Hear. Res.*, 24(3), 375–383, 1981.
- [3] E. Harford and J. Barry, *J. Speech Hear. Disord.*, 30(2), 121–138, 1965.
- [4] S. Tsuji and T. Arai, *Acoust. Sci. Tech.*, 44(6), 419–430, 2023.
- [5] H. Kayser *et al.*, *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 298605, 2009.
- [6] NTTアドバンステクノロジー株式会社, “音素バランス1000文,” 1997.
- [7] B. R. Glasberg and B. C. J. Moore, *Hear. Res.*, 47(1–2), 103–138, 1990.
- [8] D. D. Greenwood, *J. Acoust. Soc. Am.*, 87(6), 2592–2605, 1990.
- [9] K. Hopkins *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(2), 1140–1153, 2008.
- [10] MathWorks (©1984–2025), “gammatone-FilterBank,” <https://jp.mathworks.com/help/audio/ref/gammatonefilterbank-system-object.html> (参照 2025-01-12).
- [11] H. Levitt, *J. Acoust. Soc. Am.*, 49(2B), 467–477, 1971.
- [12] J. B. Firszt *et al.*, *Hear. Res.*, 319, 48–55, 2015.
- [13] K. Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, 68(8), 835–850, 2007.
- [14] M. J. H. Agterberg *et al.*, *Front. Neurosci.*, 8(8), 1–8, 2014.
- [15] S. Wu *et al.*, *Acta Acustica united with Acustica*, 100(6), 1067–1072, 2014.
- [16] J. Vanderauwera *et al.*, *J. Clin. Med.*, 9(3), 812, 2020.
- [17] W. Koenig, *J. Acoust. Soc. Am.*, 22(1), 61–62, 1950.
- [18] M. Lavandier and J. F. Culling, *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4), 2237–2248, 2008.