

一側性難聴者の音楽聴取における認知的負荷を客観測定する試み —瞳孔径の時系列変化を指標として—*

◎辻慎也, 荒井隆行 (上智大)

1 はじめに

音楽は我々の QoL (quality of life) を支える重要な要素の一つである[1,2]。両側の聴覚障害者では、ピッチ・音色などの要素の感受が損なわれ[2], QoL が影響される。

一側性難聴 (UHL; unilateral hearing loss) は片耳の聴力は正常な一方, もう片側に何らかの難聴を呈する[3]。一側性難聴者では良聴耳で音楽要素が感受できるが, 特に発症の直後, 音楽が「不自然」・「不明瞭」に感じられ, 音楽の楽しさが低く評価されるなど, 音楽体験が影響されることが明らかになっている[4]。

我々はこれまでにメロディ了解度の測定を通して, 音楽における一側性難聴者の聞こえを定量的に検討してきた[5,6]。音声知覚では, 音声了解度などによって聞こえの程度を評価することに加えて, その際の認知的負荷 (LE; listening effort) を評価することの重要性が指摘されている[7]。一方, 聴覚障害者を対象とした音楽聴取の研究では, 認知的負荷に着目した研究は少なく, 一側性難聴者を対象とした研究はさらに限られている。

そこで本研究では, 一側性難聴者が音楽を聴取する際の認知的負荷を評価することを目的として, 瞳孔径の変化を認知的負荷の客観指標[7,8]とした聴取実験を行っている。本稿では, 非残響下でターゲットのメロディを正面・健側・患側に配置したときのメロディ了解度とその際の認知的負荷について議論する。

2 方法

一側性難聴者 7 名 (男性 3 名, 女性 4 名; 22-49 歳), 両側聴力正常者 10 名 (男性 5 名, 女性 5 名; 20-25 歳) が本研究に参加した。

一側性難聴者の難聴の期間は 1-49 年で, 先天的発症が 3 名, 後天的発症が 4 名だった。難聴側は左が 6 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 以下であった。患耳側について, 四分法では聴力

正常であるが 4000, 8000 Hz に中等度の難聴がある者が 1 名, 四分法による難聴の程度が軽度・高度の者が 1 名ずつ, 残りの 4 名は重度難聴を呈した。一側性難聴模擬群との比較のため, 軽度難聴以下の 2 名の一側性難聴者のデータは本稿の分析対象から外した。

2.1 両耳インパルス応答

上智大学の無響室で測定された両耳インパルス応答[9]を畳み込んだ刺激を用いた。音源と受聴点 (HATS: Brüel & Kjær, Type 4100) は同じ高さに設置し, 距離は約 2.50 m であった。

ダミーヘッドに対する音源の角度を変え, 複数収録されたもののうち正面 (0°)・左右 (±45°), 3 点の両耳インパルス応答を用いた。

2.2 実験のセットアップ

実験は防音室で行われた。机上にモニターを置き (DELL, UZ2315H), その下部のベゼルに取り付けたアイトラッカー (Tobii, Tobii Pro Spark) によって参加者の瞳孔径と視線を収録した。アイトラッカーのサンプリング周波数は 60 Hz であった。

明るさによる瞳孔反応の変化を防ぐために室内の照度を 67.5 lux に維持し, モニターの明るさの設定も同一とした。

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。我々の過去の報告[6]と同様, 両側聴力正常者のうち半数には両側呈示 (binaural normal hearing; 以下 BNH, $n = 5$) し, もう半数には片側のみ刺激を呈示 (monaural normal hearing; 以下 MNH, $n = 5$) した。一側性難聴者 (以下 UHL, $n = 5$) には両側呈示した。

2.3 メロディ聴取テスト

メロディの音源は University of Iowa musical instrument samples database[10]より, クラリネットを用いた。マスクとして, メロディに用いた音源の長時間平均スペクトルと白色雑音のスペクトルを同一にした刺激を用いた。

* Objective measurement of listening effort during music listening in individuals with unilateral hearing loss: Using pupillometry as an index, by TSUJI, Shinya and ARAI, Takayuki (Sophia Univ.).

テストではそれぞれの試行ごとに、我々の過去の検討と同様の方法[5]を用いて、5つの基準音 (D4-F#4, $f_0 = 294\text{--}370\text{ Hz}$) に基づいてランダムに作られた正解・不正解のメロディを作成した。

テストの各条件の冒頭では、マスクの等価騒音レベルは 65 dB (A) として、メロディとマスクの音圧比 (SN 比) は -20 dB とした。各セッションの冒頭では、実験参加者にメロディが聞こえたかどうかを尋ね、4 音が聞き取れるまでメロディの音圧を 4 dB ずつ上げる試行を繰り返した。聞き取れた SN 比から、two-up/one-down の階段法により、70.7% 閾値 [11] でメロディ了解度 (MMR; melody-to-masker ratio threshold) を測定した。SN 比の増減ステップと折り返し数、MMR の算出方法は過去の検討と同様であった[5]。

2.4 手続き

実験では、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) アイトラッカーのキャリブレーション、4) メロディ聴取テストの順に実施した。

実験中、参加者にはモニターの中央に表示された固視十字を見るよう指示した。各試行では、まず 3 秒間マスクを呈示し、続いて雑音の中でターゲットのメロディを呈示した。ターゲットの終了と同時にマスクも停止させ、1 秒間の待機時間を設けて、2 つのメロディ刺激 (正解・不正解の順序はランダム) を呈示した。両刺激の間には 1 秒間の無音区間を設けた。呈示後に 2 秒間の待機時間を挟んでから、2 つの正弦波による合図音を呈示した。参加者には、手元のボタン付きデバイス (Elgato, Stream Deck) を用いて、雑音下で呈示されたターゲットと一致するメロディを二肢強制選択法によって回答させた。実験実施者はリアルタイムで参加者の瞳孔反応をモニタリングし、回答後に瞳孔径が baseline に戻ったことを確認してから次の試行を開始した。本研究では、各試行の最初に 3 秒間マスクを呈示した際の最後の 1 秒 (2-3 秒) の瞳孔径の平均値を baseline とした。

視聴覚刺激の呈示と回答の正誤・その際の SN 比の記録、刺激の呈示時刻とアイトラッカーのデータの同期には Matlab の UI を用いた。その他の瞳孔径の測定に関わる詳細は我々の

過去の報告と同様であった[9]。

正面 (0°) から到来するマスクに対し、ターゲットの位置を次のように設定した。

- 1) 同位置: ターゲットを正面 (0°) に置いた。
- 2) 同側条件: UHL では健側, MNH では音の呈示側, BNH では左側 45° に置いた。
- 3) 対側条件: UHL では患側, MNH では音の非呈示側, BNH では右側 45° に置いた。

2.5 瞳孔径データの前処理

得られた瞳孔径と視線のデータに対して Matlab により前処理を行った[8]。まず、瞬きに由来するアーティファクトを除去し、両眼のデータを 1 つの時系列に統合した。両眼とも欠損している区間は線形補間により補完し、5 サンプルの移動平均によって平滑化した。

平滑化後のデータは各試行の baseline 値により補正され、各参加者の全試行での瞳孔径レンジによって正規化された。さらに、瞳孔径データの時刻はターゲット刺激の立ち下がり基準 (0) として揃えられた。

3 結果

3.1 メロディ了解度

Fig. 1 に MMR を記す。統計分析には R (v.4.5.3) を用いた。MMR を応答変数、参加者群を説明変数として、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、

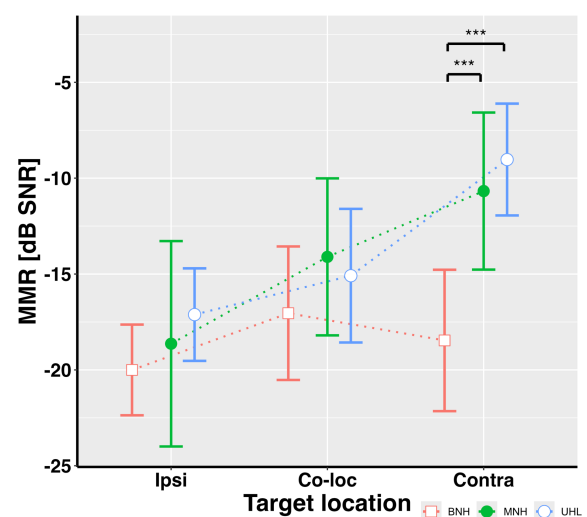


Fig. 1 Melody-to-masker ratio thresholds (MMR) for each of the BNH, MNH, and UHL groups. Symbols and error bars indicate the mean and 95% confidence intervals, respectively, for each hearing condition, as described in the legend.

Bonferroni 法で p 値を補正した。各群の MMR の推定周辺平均と 95%信頼区間 (以下 M , CI) の算出には *emmeans* パッケージを用いた。Table 1 に MMR の M ・CI を記す。

同位置と同側条件の測定では MMR に有意差はみられなかった。一方、対側条件では BNH と MNH ($M = -18.46$ vs. -10.67 ; $\beta = -7.79$, s.e. = 1.61, $t = -4.84$, $p < 0.001$), BNH と UHL ($M = -18.46$ vs. -9.03 ; $\beta = -9.44$, s.e. = 1.61, $t = -5.86$, $p < 0.001$) の間で MMR に有意差がみられた。

3.2 メロディ聴取テスト時の瞳孔反応

メロディを聴取した際の瞳孔反応の時系列変化を各群で比較するため、*mgcv* パッケージを用いて、一般化加法混合モデルによるパラメータ推定を行った[8]。応答変数は正規化された瞳孔径とした。説明変数として参加者群とターゲットの位置、それらの交互作用をモデルに含めた。各実験条件を時系列変化の平滑化項とした。視線によるアーティファクトを考慮するため、平滑化された視線データを平滑化項に含めた。また、モデルには参加者・各試行のランダム切片、時系列変化に対する試行ごとのランダム傾きを含めた。

Table 2 にパラメータ推定の結果を、Fig. 2 に推定された瞳孔反応と、*itsadug* パッケージによる時系列での有意差検定の結果を示す。

パラメトリックな固定効果として、各説明変数は瞳孔径変化に有意には寄与せず、その交互作用も有意でなかった (Table 2)。一方、時系列での検定の結果、同位置で MNH・UHL は BNH より有意に大きな瞳孔反応を示した。同側条件で MNH は同様の傾向を示したが、UHL では BNH との間で瞳孔反応に有意差はみられなかった。対側条件では同位置と同じく、MNH・UHL は BNH と比べて有意に大きな瞳孔反応を示した。一方で、試行の約半分にわたる区間で、UHL は MNH と比べて有意に小さな瞳孔反応を示した (Fig. 2)。

4 考察

ターゲットメロディとマスクが同位置から呈示された時、参加者群の間で MMR に有意差はみられなかったが (Fig. 1), MNH・UHL は BNH と比べて有意に大きな瞳孔反応 (i.e., 大きな認知的負荷) を示した (Fig. 2)。音楽聴取の際の認知的負荷について、一側性難聴者

Table 1 Estimated marginal means (M) and 95% confidence intervals (CI) of the melody-to-masker ratio threshold (MMR) for each of the BNH, MNH, and UHL groups.

聴取条件		MMR (M) [dB]	CI	
			Low	High
BNH	Ipsilateral	-20.00	-22.28	-17.72
	Co-located	-17.04	-19.32	-14.76
	Contralateral	-18.46	-20.74	-16.18
MNH	Ipsilateral	-18.64	-20.92	-16.36
	Co-located	-14.11	-16.39	-11.82
	Contralateral	-10.67	-12.95	-8.39
UHL	Ipsilateral	-17.12	-19.40	-14.84
	Co-located	-15.09	-17.37	-12.81
	Contralateral	-9.03	-11.31	-6.75

M : Estimated marginal means, CI: 95% confidence intervals

Table 2 Summary of the generalized additive mixed model (GAMM) results for pupil diameter across hearing groups and configuration of the target melody. Significant p values are shown in bold.

Parametric coefficients	β	SE	t -value	p -value
Intercept (BNH, Co-loc)	0.05	0.11	0.45	0.65
Hearing group (MNH)	0.31	0.41	0.77	0.44
Hearing group (UHL)	-0.07	0.11	-0.64	0.52
Configuration (Ipsi)	0.08	0.18	0.45	0.65
Configuration (Contra)	0.02	0.41	0.05	0.96
MNH:Ipsi	-0.38	0.57	-0.66	0.51
UHL:Ipsi	-0.05	0.41	-0.13	0.90
MNH:Contra	-0.40	0.43	-0.93	0.35
UHL:Contra	-0.05	0.20	-0.24	0.81
Smooth terms	edf	Ref.df	F -value	p -value
BNH:Ipsi	9.29	9.56	76.17	<0.0001
MNH:Ipsi	17.98	18.77	452.22	<0.0001
UHL:Ipsi	14.33	15.10	98.25	<0.0001
BNH:Co-loc	8.55	8.93	179.69	<0.0001
MNH:Co-loc	9.35	9.63	1693.80	<0.0001
UHL:Co-loc	13.49	14.47	190.28	<0.0001
BNH:Contra	8.73	9.04	125.53	<0.0001
MNH:Contra	18.57	18.95	699.48	<0.0001
UHL:Contra	13.49	14.47	190.28	<0.0001
Pupil position (X , Y)	28.93	29.00	1651.62	<0.0001
Random smooth terms	edf	Ref.df	F -value	p -value
Time: Trial	555.91	560.99	705400.73	<0.0001

Note: The reference conditions for comparisons regarding hearing group and environment are binaural normal hearing and co-located configuration, respectively. Colons indicate the interaction between the variables. BNH = Binaural normal hearing; MNH = Monaural normal hearing; UHL = Unilateral hearing loss; Co-loc = Co-located configuration; Ipsi = Ipsilateral configuration, Contra = Contralateral configuration; edf = Estimated degrees of freedom, Ref.df = Reference degrees of freedom.

を対象とした検討は進んでいない一方で、損なわれた音楽体験に関わっていることが先行研究により示唆されている。例えば、中途発症の一側性難聴者を対象として音楽についてのアンケート調査を行った研究では、一側性難聴の発症によって、大編成の音楽と比べて小編成の音楽をより好むようになったことが報告されている[4,12]。本研究を通して、競合する音源がある中で選択的に音楽の要素(e.g., 本研究ではメロディ)を聴取する際により大きな認知的負荷を要することが、損なわれた音楽体験に関わる1つの要因であると示唆された。

MNHは全ての条件でBNHと比べて有意に大きな瞳孔反応を示した一方で、UHLでは同側条件でBNHとの間で瞳孔反応に有意差はみられず、対側条件では有意差はあるものの、MNHと比べて有意に小さな瞳孔反応(i.e., 小さな認知的負荷)を示した(Fig. 2)。音声の知覚に関する我々の過去の検討では、一側性難聴の発症直後の模擬群と比べて、発症から長期が経過した一側性難聴者では音声明瞭度に有意な改善がみられていた[5,13]。その後の研究では、音声を聴取する際の認知的負荷を併せて検討した結果、音声明瞭度に加えて、認知的負荷の観点からも有意な改善がみられ、一側性難聴の発症後に生じる適応についての新たな知見が得られた[9]。さらに、本研究では認知的負荷の測定を通して、これまでの知見が音楽の聴取という観点からも支持された。

今後、参加者数を増やして結果の頑健性を検証するとともに、残響時間の長い音場など、様々な音響的条件下での認知的負荷の検討を進める必要がある。

謝辞

本研究では、実施にあたって JSPS 科研費 24K23899, および上智大学学術研究特別推進費(重点領域研究)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] K. Veekmans *et al.*, *Audiol. Neurotol.*, 14(5), 315–326, 2009.
- [2] V. Looi *et al.*, *Semin. Hear.*, 33(4), 307–334, 2012.

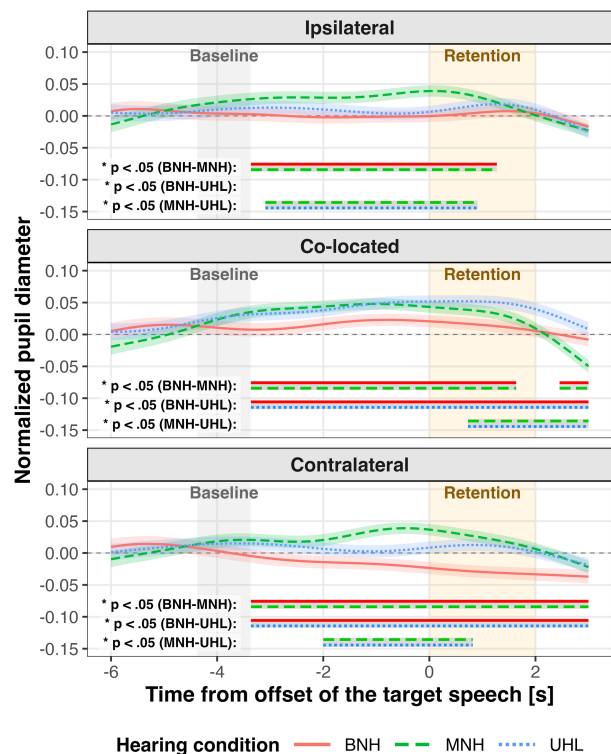


Fig. 2 Estimated time courses of normalized pupil diameter and 95% confidence intervals (shaded regions). The colored horizontal bars at the bottom of each panel indicate time windows with significant differences between groups: BNH vs. MNH (top bar), BNH vs. UHL (middle bar), and MNH vs. UHL (bottom bar).

- [3] E. Harford and J. Barry, *J. Speech Hear. Disord.*, 30(2), 121–138, 1965.
- [4] S. Tsuji and T. Arai, *Acoust. Sci. & Tech.*, 41(6), 833–836, 2020.
- [5] S. Tsuji and T. Arai, *Acoust. Sci. & Tech.*, 44(6), 419–430, 2023.
- [6] 辻, 荒井, 音講論 (秋), 873–876, 2025.
- [7] M. K. Pichora-Fuller *et al.*, *Ear Hear.*, 37, 5S–27S, 2016.
- [8] J. van Rij *et al.*, *Trends Hear.*, 23, 2019.
- [9] S. Tsuji and T. Arai, *Proc. Tech. Comm. Speech Comm.*, 6(4), SC-2026-26, 13–18, 2026.
- [10] University of Iowa Electric Music Studios, “Musical Instrument Samples Database.” <http://theremin.music.uiowa.edu/> (2026/08/03 参照).
- [11] H. Levitt, *J. Acoust. Soc. Am.*, 49(2B), 467–477, 1971.
- [12] S. Meehan *et al.*, *J. Am. Acad. Audiol.*, 28(5), 444–462, 2017.
- [13] S. Tsuji and T. Arai, *J. Acoust. Soc. Am.*, 157(4), 3070–3086, 2025.