



安全音圧下での爆発音のラウドネス向上に向けた 異常聴覚の仮想提示手法の検討

Study of a Virtual Presentation Method of Abnormal Hearing
to Increase the Loudness of Explosion Sounds Under Safe Sound Pressure Levels

藤田 光¹⁾, 細井 十楽¹⁾, 伴 祐樹¹⁾, 割澤 伸一¹⁾

Hikaru FUJITA, Juro HOSOI, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, fujita_hikaru@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, jhosoi@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: VR や映像コンテンツで爆発音を提示する際、音圧を安全域に抑えながら迫力を保つことは難しい。本研究では、爆発直後の一時的な聴覚特性の変化(難聴感・耳鳴り)を再現するエフェクトを左右差付きで付加し、聴覚上の「残効」を模擬してラウドネスと臨場感を高める手法を検討する。実験から、この異常聴覚の提示は若年層で爆発音の臨場感を高めることを確認したが、ラウドネス向上や全年齢への適用は今後の課題だと分かった。

キーワード: ラウドネス, 難聴感, 耳鳴り, 残効, 音響エフェクト

1. はじめに

VR (Virtual Reality) 体験の迫力やリアリティにおいて、音声の知覚ラウドネスは不可欠な要素である。しかし、単純な音圧の増強は聴覚損傷のリスクを伴うため、安全性の確保が強く求められている [1]。そのため本研究では、安全な音圧下でいかに迫力を創出するかを課題とする。

この課題に対し、知覚研究ではクロスモーダルな増強手法 [2, 3] が知られている。一方で映画・ゲーム業界では、大音量に曝された後の難聴感や耳鳴りといった聴覚的な「残効」を模した演出が、経験則に基づいて広く用いられている。しかし、こうした「残効」の提示がもたらす心理的効果や最適な実装方法は科学的に十分検証されておらず、その体系化は遅れている。これは、触覚分野において残効で打撃感を向上させる研究 [8] とは対照的である。

そこで本研究では、爆発直後の一時的な難聴(一時的閾値上昇: Temporary Threshold Shift)や耳鳴り [4] を模擬した音響効果を「聴覚残効エフェクト」と位置づけ、その有効性を検証する。このエフェクトを付加することで、物理音圧を変えずに爆発のインパクトを強く印象づけ、主観ラウドネス (H1) と臨場感 (H2) の向上を目指す。

さらに発展的アプローチとして、予期せぬ非対称な刺激が注意を惹きつける「対称性の破綻」を視覚分野で応用した研究 [9] にない、エフェクトに意図的な左右差を導入することを提案する。これにより、自身の聴覚に異常が生じたことを強く認識させ、体験をさらに増強する (H3) と仮説を立てた。本稿では、以下の 3 つの仮説を主観評価実験で検証する。

- H1: 残効の付加は爆発音のラウドネスを向上させる。
- H2: 残効の付加は爆発音の臨場感を向上させる。
- H3: 左右差のある残効はラウドネスおよび臨場感をさらに増強する。

2. 手法

本研究では、爆発音の知覚ラウドネスと臨場感を向上させるため、爆発直後の背景音に音響エフェクトを付加する。そのエフェクトは、①現実の聴覚残効を忠実に模倣するものと、②意図的に左右差を設けるものの 2 種類である。

2.1 聴覚残効を模倣する音響エフェクト

大音量への曝露で生じる騒音性難聴 (Noise-Induced Hearing Loss, NIHL) には、一時的なものと恒久的なものがある [4]。本研究で模倣するのは、爆発音のような強高音に曝露された直後に生じる一時的な聴覚閾値の上昇 (Temporary Threshold Shift, TTS) であり、「難聴感」と呼ぶ。また、このような TTS では、キーンという高周波の耳鳴りがしばしば併発することが知られている [4]。先行研究に基づき、本研究はこの耳鳴りを 6 kHz の純音で模倣することとし、以下では「耳鳴り音」と呼ぶ [7]。

聴覚残効エフェクトのうち「難聴感」を実装するため、本研究ではオープンソースの C++ ライブラリ「3D Tune-In Toolkit」に実装されている難聴シミュレーション機能を用いる [6]。この機能は音声信号に特定の聴力損失モデルに基づいた非線形減衰処理を施すものであり、周波数帯域ごとにエキスパンダーゲートを適用するものと言える。本研究では先行研究の知見に基づき、銃声などの大音量曝露時に特

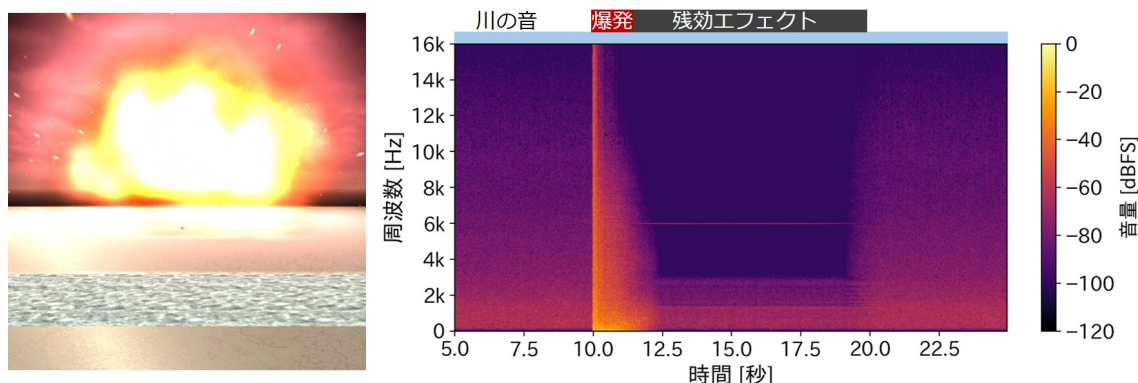


図 1: (左) Unity 上の爆発シーン。手前には川が流れている。(右) 提示する音声のスペクトログラム。10 秒後に爆発音が流れ、10 秒間残効エフェクト (川の音に難聴感を付加するフィルタと 6 kHz の耳鳴り音) が適用される。

微的な 4 kHz 付近の聴力低下 (ノッチ) を再現する聴力損失モデルを設定した [5]。具体的には、周波数 62, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k, 16k Hz に対し、聴力損失値をそれぞれ 10, 10, 15, 15, 20, 35, 60, 45, 50 dBHL とした。これは米国言語聴覚士協会 (ASHA) の定義において「Moderately Severe (中等度)」の難聴に相当する [4]。

なお、この「難聴感」提示手法は、加齢や病気等による永久的閾値上昇 (Permanent Threshold Shift, PTS) を模擬する際にしばしば用いられるが [10]、短時間で変化する TTS に用いる研究は我々の知る限り初めてである。

これらのエフェクト (TTS シミュレーションと 6 kHz 耳鳴り音) を爆発音の直後に付加する条件 (「両耳残効」条件) と、付加しない条件を比較することで、聴覚残効エフェクトが主観ラウドネスと臨場感に与える影響を調査する。

2.2 体験最大化に向けた左右差への着目

体験を最大化する発展的アプローチとして、聴覚残効に意図的な左右差を導入する。これは、左右で聞こえ方が異なるという「対称性の破綻」がユーザーの注意を強く惹きつけ、体験を増強するという仮説 (H3) に基づく。実験ではこの効果を検証するため、一方の耳にのみ先述の残効エフェクトを付加する条件 (「片耳残効」条件) を設けた。

3. 実験

提案手法の有効性を検証するため、VR 環境を用いた主観評価実験を行った。実験には、21 歳から 55 歳までの 11 名 (男性 6 名、女性 5 名、平均年齢 25.8 ± 12.8 歳) が参加した。参加者は、ヘッドマウントディスプレイ (Quest 3, Meta)、ヘッドホン (WH-1000XM5, SONY) を着用した。

3.1 刺激設計

実験用の仮想環境は Unity (6000.0.51f1) で構築し、参加者は川辺の爆発シーンを視聴覚で体験する (図 1 (左))。音響刺激は、背景音となる「川の流れる音」¹と、「爆発音」²で構成される。背景音は、(1) 周波数帯域が広い、(2) 環境

音として自然に認識される、(3) 時間的な音量変化が少ない、(4) 音自体が爆発の影響を受けにくいと感じられる、という基準から選定した。背景音の加工は、DAW ソフトウェア REAPER (v7.39 / win64) と、VST プラグイン 3D Tune-In Toolkit³を用いて行った。加工の際は、背景音を -2 dBFS peak に増幅した後、Toolkit の Non-linear Attenuation 機能を用いて 2.1 節で述べた難聴特性を適用した。フィルタには Gammatone フィルタバンクを選択した。

音響刺激は、10 秒間の背景音 (エフェクト無し) に続き、爆発音と同時に 10 秒間の残効エフェクトを提示する構成とした。爆発音の音量は最大で -4 dBFS、背景音は平均で -34 dBFS、残効エフェクトに含まれる耳鳴り音 (6 kHz 純音) は -70 dBFS に設定した。刺激全体の時系列とスペクトログラムを図 1 (右) に示す。

なお、本実験では Unity の立体音響機能は使用せず、事前に作成したステレオ WAV ファイルを再生した。ヘッドホンから再生される音量は、爆発音が最大 89 dBA、背景音が 55 dBA であり、WHO・ITU のガイドライン (ピーク 100 dB、持続音 80 dB 以下) を遵守している [1]。

実験では、比較のため、以下の 3 つの音響条件を用意した。

- 残効無し：爆発後、背景音の変化・耳鳴り音無し。
- 両耳残効：爆発後、両耳の音に残効を付加。
- 片耳残効：爆発後、片耳の音にのみ残効を付加。(エフェクトをかける耳は参加者ごとに変更。)

3.2 実験手順と評価

参加者には実験の趣旨を説明し同意を得た後、練習を経て本番セッションに臨んでもらった。「残効無し」条件を基準刺激 (値 100) とし、3 条件の評価刺激をマグニチュード推定法で評価するタスクを計 6 回 (各条件 2 回) 実施した。評価刺激の提示順序はランダム化した。評価入力後には毎回 2 分間の休憩を設けた。実験終了後には体験全体に関するアンケートを実施した。実験全体の所要時間は約 45 分であった。

¹DOVA-SYNDROME: 「川の流れる音」

<https://dova-s.jp/se/play1115.html>

²効果音ラボ: 「爆発 2」

<https://soundeffect-lab.info/sound/battle/battle2.html>

³3D Tune-In Toolkit VST Plugins v1.1.4 for Windows

https://github.com/3DTune-In/3dti_AudioToolkit/releases

参加者に示した評価項目は「臨場感（リアルな爆発の現場にいるような感覚）」「爆発音の大きさ（音量）」「耳に感じた違和感」の3つであり、以下ではそれぞれ、「臨場感」「ラウドネス」「違和感」と記載することとする。

4. 結果と考察

4.1 結果の分析

全参加者（ $n=11$ ）における評価値の分布を図2に示す。統計検定では、「臨場感」（Friedman 検定, $\chi^2(2) = 3.85, p = .15$ ）および「ラウドネス」（ $\chi^2(2) = 0.33, p = .85$ ）に有意な向上は見られなかった。一方、「違和感」は条件間で有意な差が確認された（ $\chi^2(2) = 10.05, p < .01$ ）。Holm 法で補正した Wilcoxon 符号順位検定の結果、残効無し条件に比べ両耳残効条件（ $p < .05, r = -0.68$ ）と片耳残効条件（ $p < .05, r = -0.96$ ）はいずれも有意に高い違和感を生んでおり、提案手法が意図通りに機能したことが示された。

次に、結果が年齢層に起因するかを検証するため、参加者を若年層（40歳未満, $n=7$ ）に限定して分析した。その結果、若年層においては「臨場感」が有意に向上され（ $\chi^2(2) = 7.15, p < .05$ ）、両耳残効条件が残効無し条件に比べ「臨場感」を有意に向上する（ $p < .05, r = -1.00$ ）ことが明らかになった。このことから、全参加者での分析で効果が見られなかったのは、後述する知覚特性の違いにより、高齢層のデータが全体の評価を希釈したためと強く推察される。なお、片耳残効条件による臨場感の向上、および全条件における「ラウドネス」の向上（ $\chi^2(2) = 3.77, p = .15$ ）は、統計的に有意ではなかった。

また、評価項目間の相関を分析したところ（図3）、「違和感」と「臨場感」（ $r = .495, p < .01$ ）、および「違和感」と「ラウドネス」（ $r = .427, p < .05$ ）の間に、それぞれ有意な正の相関が確認された。この傾向は、特に若年層においてより強く見られた。この結果は、違和感を知覚することが、臨場感やラウドネスの向上に繋がる可能性を示唆している。

年齢差の原因を明らかにするためアンケートを分析したところ、残効エフェクトの知覚自体に顕著な差が見られた。「耳の閉塞感」や「耳鳴り」を経験した割合は、高齢層（ $n=4$ ）がそれぞれ0%と25%であったのに対し、若年層では57%と86%に達した。このことは、エフェクトに含まれる高周波成分（4 kHz 帯中心の難聴感フィルタや6 kHz の耳鳴り音）を、加齢による聴力低下によって高齢層が知覚できなかった可能性を強く示唆している。他の設問に関しては、「爆発音の大きさが変化していたと感じた」と若年層の全員（7/7）と高齢層の多く（3/4）が回答した。また「爆発音の後に背景音に変化したか」という問いに対して、変化に「気づいていた」若年層は3/7名に留まり、高齢層では0名であった。さらに、片耳残効条件の左右差を正しく認識できた参加者は11名中2名のみであり、年齢層に関わらず多くの参加者は非対称性を明確には知覚していなかった。

4.2 考察

以上の結果を総合し本研究の仮説と発見について考察する。

第一に、仮説 H2「残効は臨場感を向上させる」は、若年層に対して支持された。この年齢差の原因は、アンケートで示された通り、エフェクトの知覚そのものにある。難聴感を模擬する4 kHz 帯中心の音響変化や耳鳴りを模した6 kHz の音といった高周波成分が加齢性難聴の影響で高齢層には知覚されにくかったことが、この差を生んだ最大の要因であろう。このことから、提案エフェクトが十分に知覚されて初めて、体験のリアリティ向上に繋がるというメカニズムが示唆される。

このメカニズムを裏付けるのが、本研究の最も重要な発見である「違和感」と「臨場感」の間の正の相関である。これは、爆発という文脈に合致した「異常聴覚の模擬」は、たとえ不快な知覚であっても、体験のリアリティを効果的に高める要素となり得ることを示している。VR 体験のリアリティ追求が、必ずしも快適性の追求と一致しないという、体験設計上の重要な知見と言える。

一方で、仮説 H1（ラウドネス向上）と H3（左右差による増強）は支持されなかった。H1 に関しては、「違和感」との正の相関や、実際は一定の音量である中で91%の参加者が「爆発音の大きさが変化した」と感じたアンケート結果から、ラウドネスを増強するポテンシャルは示唆される。実験では、この変化が「迫力」や「鋭さ」として解釈され、「臨場感」の評価に吸収されたため、統計的な差として現れなかった可能性がある。

また H3 に関しては、片耳残効条件は「違和感」を増大させたが臨場感は向上させなかった。これは、仮説の狙いであった「対称性の破綻」による聴覚への注意喚起は成功したものの、その違和感が眼前の爆発と体験的に「統合」されなかったためと考えられる。両耳残効ではこの統合が自然に行われたのに対し、片耳残効が生んだ不自然な非対称性は、爆発の自然な結果として解釈されにくかった。そのため、喚起された注意はシーンへの評価ではなく「何かがおかしい」という内部感覚の処理に留まったと考えられる。したがって残効エフェクトでは、違和感が文脈と自然に統合される提示方法（対称性など）が重要であると示唆される。

5. おわりに

本研究は、「聴覚残効エフェクト」が特に若年層において「耳の違和感」を通じて体験の「臨場感」を向上させることを明らかにした。これは、文脈に沿った不快感は必ずしも体験の質を損なわず、むしろリアリティを高める要素となることを示唆している。若者を中心にヘッドホン難聴が社会問題となる中、物理音圧を上げずに迫力を高める本アプローチは、安全な音響体験の設計に一定の意義を持つ。

今後の主要な課題は、ユーザーの多様な聴覚特性への対応である。今回効果が限定的であった高齢層にも対応するため、個々の聴力に合わせてエフェクトを個別最適化する技術の確立が不可欠である。また、ラウドネス向上は達成できなかったが、「違和感」との正の相関は確認された。この関係性をさらに探求し、より効果的に違和感を提示する

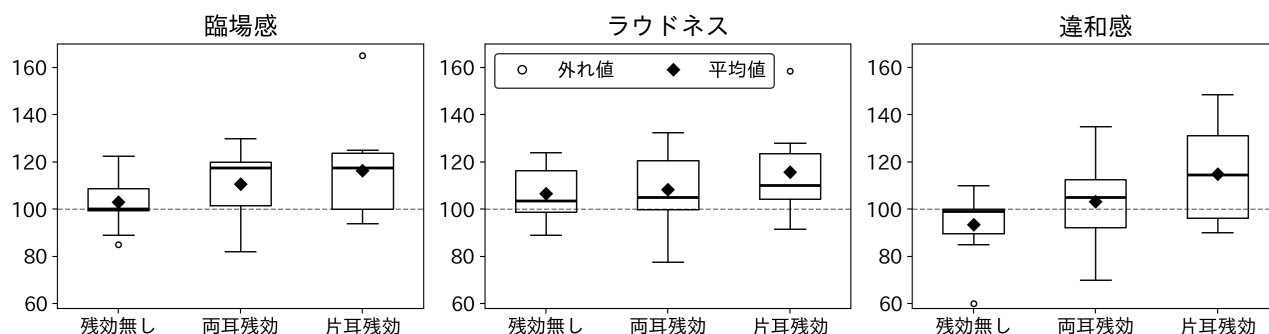


図 2: 各評価値のボックスプロット。縦軸は 100 を基準としたマグニチュード推定法での評価値。

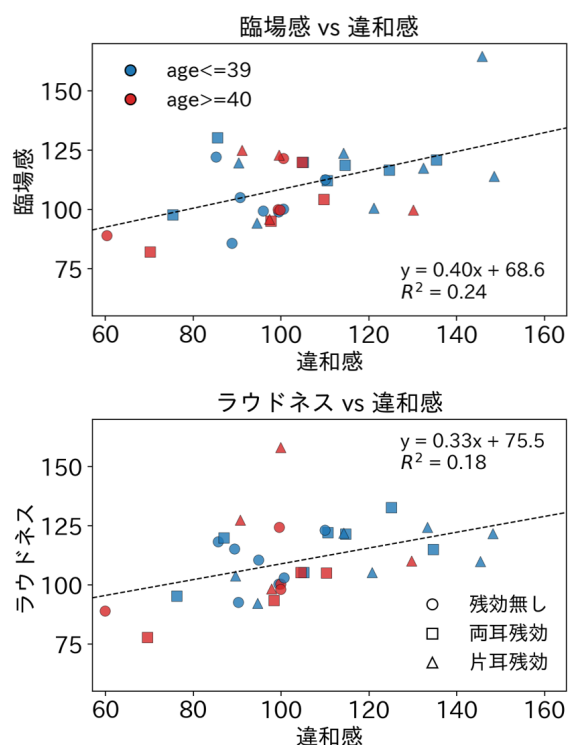


図 3: 評価値間の相関プロット。

手法を確立することで、知覚ラウドネスの増強も期待できる。評価手法に関しても、主観評価に加えて心拍や皮膚電気活動といった生体指標を計測し、効果をより客観的に分析するアプローチが考えられる。

本研究のアプローチは将来的に、エンターテインメントから産業・教育分野まで幅広い応用が期待される。VR ゲームやライブ等のエンタメ体験の向上はもちろん、爆発等が生じる危険な現場を模擬する訓練、さらに、大音量で聴き続けると一時的に異常聴覚を提示するような、自身の聴覚状態を客観視させる啓発ツールとしての応用も有望である。

本研究が、より豊かで没入感のある、そして安全な聴覚体験設計の一助となることを期待する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP25K03163, JP24H00892 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Safe listening devices and systems: a WHO-ITU standard. Geneva: World Health Organization and International Telecommunication Union, 2019.
- [2] Odgaard, E.C., et al. Brighter noise: Sensory enhancement of perceived loudness by concurrent visual stimulation. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 4, 127–132 (2004).
- [3] Aker SC, et al. Perceived auditory dynamic range is enhanced with wrist-based tactile stimulation. *J Acoust Soc Am.* 2024 Oct 1.
- [4] Ryan, A. F., et al. Temporary and Permanent Noise-induced Threshold Shifts: A Review of Basic and Clinical Observations. *Otology & neurotology.* 2016.
- [5] Kristine Sonstrom Malowski, et al. Auditory changes following firearm noise exposure, a review. *J. Acoust. Soc. Am.* 1 March 2022.
- [6] Arcadio Reyes-Lecuona, et al. Hearing loss and hearing aid simulations for accessible user experience. In *Proceedings of the XXIII International Conference on Human Computer Interaction (Interacción '23)*.
- [7] Bourez PH, et al. Improving Audiology Student Training by Clinical Simulation of Tinnitus: A Glimpse of the Lived Experience of Tinnitus. *Brain Sci.* 2023.
- [8] H. Fujita, et al. Presenting Tingling Aftereffects Using Vibro-Thermal Feedback to Enhance Impact Sensation in Virtual Reality. *2025 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*.
- [9] K. GUO, et al. Visual Presentation Method for Paranormal Phenomena Through Binocular Rivalry Induced by Dichoptic Color Differences. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.* 2025.
- [10] Valzolgher, et al. Spatial hearing training in virtual reality with simulated asymmetric hearing loss. *Sci Rep* 14, 2469 (2024).