

# ヒアラブルデバイスでの情報提示が特定周波数の主観的音量に与える影響調査とその回復手法の提案

金本颯太<sup>1,a)</sup> 渡邊拓貴<sup>2,b)</sup> 寺田 努<sup>1,c)</sup> 塚本昌彦<sup>1,d)</sup>

**概要：**ヒアラブルデバイスの普及に伴い、ユーザの聴覚に常に情報が提示できる環境が整えられつつあるが、聴覚への常時情報提示はユーザの聴覚特性へ影響を与える可能性がある。例えば、ある周波数帯域の常時情報提示によって該当する周波数帯域の聴覚レベルの低下が生じるのであれば、自動車の接近音など人への危険を表わす環境音への反応が鈍り、思わぬ危険に繋がる可能性が考えられ、早急に聴覚レベルの低下より回復させる必要がある。そこで本研究では、ユーザのヒアラブルデバイスの常時装着を想定し、デバイスによる特定周波数の音の提示が、ユーザが知覚する環境音の音量(主観的音量)に与える影響と主観的音量の低下の回復に有効な刺激音の調査を行った。調査では、環境音聴取を模すためスピーカにて特定周波数の音を提示し、イヤホンからスピーカ音の周波数を基準とする特定周波数の刺激音を提示する。提示されたスピーカ音について定期的に感じた音量を数値化し、その変化より特定周波数の刺激音をイヤホンにて聴取することが主観的音量へ与える影響を調査した。検証の結果、イヤホンでの全ての刺激音聴取において、スピーカ音聴取における主観的音量は10.0%以上低下し、スピーカ音とイヤホン音の周波数が近似するほど低下量が大きくなる傾向がみられた。また、低下した主観的音量の回復に関して、特定の回復用刺激音の提示が有効であるという仮説をたて、主観的音量を低下させた後に、複数のエフェクトをかけた回復用刺激音を提示し、音の提示前後での主観的音量を比較することで回復に与える影響を調査した。検証の結果、特にホワイトノイズの特定周波数にバンドストップフィルタを適用し、フェードアウトエフェクトをかけた音の聴取が主観的音量の低下の回復に有効である可能性を確認した。

## 1. はじめに

近年、イヤホンやヘッドホン等のヒアラブルデバイスの需要が高まりつつある。ヒアラブルデバイスとはイヤホン型のウェアラブルデバイスのことを指し、スマートフォン等のネットワーク接続デバイスと接続することで音声でのデバイス操作や、音声による情報取得を可能にする。現在、内蔵されたマイクを用いることで周囲の音を聞き取りやすくする外部音取り込みや雑音を低減させるノイズキャンセリング等の機能の搭載が一般化されつつあり、今後においても人本来の聴力では聞き取ることができない音を聞き取り可能にする機能 [1] やユーザの生体情報取得 [2] 等の実現が考えられ、さらなるヒアラブルデバイスの利便性の向上

が見込まれる。これらの背景より、今後の社会ではユーザがヒアラブルデバイスを常時装着するヒアラブル環境の浸透が予想される。

本研究では、人の五感の中でも重要な知覚機能の一つである聴覚に注目する。五感による知覚の割合として、11.0%の情報は聴覚情報によるものとされている [3]。音楽やアナウンスを聞くだけでなく、音によって危険を把握できるなど、聴覚情報は私たちに必要不可欠な感覚情報である。ここで、聴覚情報は聴覚末梢系における外耳から中耳、内耳へと伝達され、内耳において電気信号に変換されて得られることが明らかにされており、音の方向の知覚に関して頭部伝達関数と呼ばれる耳介によって音の周波数特性が変化する特性が物理量として表わされることが明らかになっている [4], [5]。このように様々な聴覚特性が明らかにされているが、本研究では聴覚の慣れによる人の知覚する音量(主観的音量)の変化に着目する。例えば、大音量の音楽を聞いた後の音は、音楽を聞く前よりも小さく聞こえるといった現象は主観的音量変化の一例である [6]。人の聴神経は周波数毎に反応する箇所が異なる特性をもつため、特定の周波数を聞くことで特定周波数の音における主観的音量変化

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kobe University

<sup>2</sup> 北海道大学大学院情報科学研究院

Graduate School of Information Science, Hokkaido University

a) sota-kanemoto@stu.kobe-u.ac.jp

b) hiroki.watanabe@ist.hokudai.ac.jp

c) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

d) tuka@kobe-u.ac.jp

が生じる可能性がある [4]。この現象が生じるのであれば、例えば、人への危険を表わす環境音であるクラクションや警告音と同じ周波数帯域の音をヒアラブルデバイスにより聴取すると、これらの周波数帯域の音への反応が鈍くなり思わぬ危険に繋がる。前述した、ヒアラブルデバイスにより音声を常時提示される環境が浸透した場合、ヒアラブルデバイス装着ユーザは自覚せずに主観的音量が低下している可能性がある。主観的音量の変化に関して、変化後に無音状態を一定時間維持することで正常に戻ることが確認されている [7]。しかし、ヒアラブル環境において無音状態を維持することは望ましくなく、情報提示が行われている中での回復が望ましい。鳥の鳴き声などの特定の自然音は注意力の回復やストレスの回復に寄与することが示唆されていることから、主観的音量の低下の回復に有効な音が存在すると考えられる [8]。

従って、本研究ではヒアラブルデバイスでの特定周波数の音の聴取が環境音の聴取時における主観的音量に与える影響の調査と、主観的音量の低下の回復を促進させる提示音が存在するかどうかの調査を行う。外部音取り込み機能を有効にしたイヤホンを装着し、連続して提示される環境音に模したスピーカ音の音量を特定のタイミング毎に数値化する評価実験を行う。その間にイヤホンにて特定周波数の音を一定時間提示することで、イヤホン音の聴取がスピーカ音の主観的音量へ与える影響を調査する。また、特定周波数の音の提示による主観的音量の低下後に回復用刺激音を提示し、主観的音量の低下回復に有効な提示音を調査する。

本論文は以下のように構成されている。2章では本研究に関連する研究について述べる。3章ではヒアラブルデバイスでの特定周波数の音の聴取による主観的音量変化の評価実験について述べる。4章では主観的音量低下の回復に有効な提示音の評価実験について説明し、5章で本論文のまとめを述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 ヒアラブルデバイスによる聴覚補助・拡張

ヒアラブルデバイスによるユーザの聴覚を補助・拡張する製品や研究は多数存在する。Nuraloop はワイヤレスヘッドホンであり、様々な音を耳に再生し生成される耳音響放射音を測定することで聴覚感度を計算し、ユーザの耳の特性に合わせて音を自動調整する [9]。LinkBuds は、耳栓型のような耳穴を塞ぐパーツが存在せず、周囲の状況や会話を聞くことができる常時装着スタイルを提案するイヤホンである [10]。オムロンは、波形信号の逆の波形をすることで相殺させる逆位相方式と、周波数の移動によって音の増幅を防ぐ周波数シフト方式を掛け合わせることでハウリング音を抑制する補聴器を販売している [11]。Jabra は、周囲のノイズによって通話の音量を最適化する機能を搭載し

たイヤホンを販売している [12]。江波戸は、耳栓型のイヤホン使用時に発生する外耳道内の共鳴音を抑えることで、音質を向上させる音響補正技術を提案した [13]。Wei らは、一般的なイヤホンよりも 10000Hz 以下の周波数帯において周波数特性が優れたイヤホンを、電気伝導性に優れた素材であるグラフェンを用いて開発した [14]。Hoshina らは、騒音下でのイヤホンからの出力レベルに対するアクティブノイズコントロール (ANC: Active Noise Control) 機能の効果を検証し、ANC 機能によって難聴リスクを回避できることを確認した [15]。Ruiz らは、3種類のヘッドホンを用いてピンクノイズを聞いた際の脳内神経活動を分析し、ヘッドホンの周波数特性によって神経活動に変化が生じることを確認した [16]。

これらの製品、研究はヒアラブルデバイス使用における快適性や音の質を高めるものであり、ヒアラブルデバイスが発する特定周波数の音による聴覚への影響を考慮したものは我々の知る限りない。

### 2.2 主観的音量の変化

主観的音量の変化に関する研究は、特にイヤホン音のみの聴取による変化を検証した研究が行われている。Carterette は、1500Hz を中心とする複数の周波数帯域幅をもつノイズの刺激音と 1500Hz の比較音の双方をイヤホンにて提示し、1 分毎に比較音の音量を調整させることでノイズが比較音聴取における主観的音量へ与える影響の調査を行った。結果として、刺激音が比較音と同一である場合に主観的音量の低下量が最大となり、ノイズが広い帯域をもつ場合に低下量が減少することを確認した [17]。Wagner らは、イヤホンにて片耳に 500Hz から 8000Hz までの 6 つの特定周波数の刺激音を 80dB SPL で提示し、その後いずれかの片耳に 70dB SPL の同一周波数で提示される比較音の聴取に与える影響をマグニチュード推定法を用いて検証した。結果として、28%から 40%主観的音量が低下し、低周波数音になるほど低下量が増加することを確認した [18]。Hellman らは、イヤホンにて右耳に 5dB SL から 40dB SL の 4 つの音量の音を提示し続け、それらの音の主観的音量の変化をマグニチュード推定法を用いて検証した。結果として、40dB SL の音にて約 20%、5dB SL の音にて 70%から 100%主観的音量が低下することを確認した [19]。Botte らは、イヤホンにて片耳に断続音を、対側耳に連続的比較音を提示し、断続音刺激下における断続速度を変化させたときの比較音聴取における主観的音量の変化について検証し、断続速度が速くなるほど主観的音量の低下量が増加する傾向にあることを確認した [20]。Charron らは、イヤホンにて片耳に断続的的刺激音と連続的比較音の双方を提示し、1 つの特定周波数の断続音刺激に対して、21 種類の特定周波数の比較音聴取時における主観的音量の変化について検証した。結果として、刺激音と比較音が同一周波数の場合に主観的音

量が最も低下し、刺激音とテスト音の周波数差が大きくなるほど低下量が減少することを確認した [21]。これらはイヤホン音聴取時における主観的音量の変化に関する研究であり、環境音の聴取によって生じる主観的音量の変化に関しても以下の研究が行われている。大和田らは、スピーカにて提示する連続音を聞き続けることによるスピーカ音聴取における最小可聴閾値の変化を検証し、特に高周波数の音において可聴閾値に近い弱い音が聞こえなくなる現象が発生することを確認した [22]。矢高らは、スピーカによる刺激音提示がイヤホン音聴取時の主観的音量へ与える影響を検証し、主観的音量はスピーカの音量によって上下することを確認した [23]。

このように主観的音量の変化に関する研究は行われているが、ヒアラブルデバイスの音刺激による環境音の聴取へ与える影響は我々の知る限り行われていない。ヒアラブルデバイスの常時装着環境を想定すると、ヒアラブルデバイスから常時情報を受け取りながら、環境音も聴取する環境が想定される。したがって、ヒアラブルデバイスによる特定周波数の音刺激による環境音聴取時の主観的音量へ与える影響の調査を行う。

## 2.3 聴力レベルの回復

聴力レベルの回復に関する研究は、主に無音状態による回復時間や傾向を検証した研究が行われている。Hirsh らは、120dB SPL で低周波数の連続音を 3 分間提示し、その後定期的に聴覚閾値の変化を調査した。結果として、連続音提示後 1 分程度で一時的に正常値に戻る、もしくは正常値よりも回復することを確認し、さらに 500Hz の音を用いた場合は正常値に戻った閾値が再び上昇することを確認した [24]。Ward らは、105dB SPL でオクターブバンドノイズ (1200-2400Hz) を 30 分間提示し、その後 95dB SPL の同音で 180 分間提示した場合の聴覚閾値と、95dB SPL の同音で 210 分間提示した際の聴覚閾値の変化の差から、14.0dB の聴覚閾値損失の回復にかかる時間は約 16 時間であることを示した [25]。また、同音を用いて約 50dB の聴覚閾値損失を与えた後、定期的に聴力閾値を測定することで聴力の回復傾向を調査した。結果として、刺激後 200 分から 500 分までは時間の対数の関数として回復するものの、その後時間に線形な関数として回復することを確認した [26]。Mills らは、低周波数帯のオクターブバンドノイズを 84dB SPL で 24 時間、もしくは 90dB SPL で 8 時間提示する 2 つの条件にて、その後の聴覚閾値の変化を定期的に検証を行うことで回復時間を調査した。結果として、前者の条件での回復に約 48 時間かかり、後者の条件での回復に約 12 時間かかることを確認した [27]。Bell らは、刺激音の周波数、音量、閾値検証までの無音時間の 3 つの変数が閾値低下と回復に及ぼす影響について調査し、聴覚閾値は刺激音の音量の大きさに比例して上昇し、連続して閾

値の測定を行うと無音状態の後に測定を行った場合よりも回復が遅れることを確認した [28]。Arieh らは、80dB SPL のバースト音を複数回提示した後に、標的音と比較音の音量を比較し大きい方を選択させることで回復に要する時間を検証した。結果として、5 回提示した際に回復に要する時間は 70.5 秒であり、40 回提示した際は 129 秒と、刺激音の提示回数とともに回復時間が単調に増加することを確認した [29]。Scharf らは、60dB SPL の片耳への 160 秒間の断続音刺激によって引き起こされる主観的音量の低下からの回復を検証し、30 秒以上の無音状態にて回復することを確認した [30]。

このように聴力レベルの回復に関する研究は行われているが、主観的音量が低下した後に音を提示しない無音状態に晒し、その状態時における回復推移を検証している。常時情報提示されるヒアラブル環境において、一定時間の無音状態での聴力レベルの回復は望ましくなく、情報を受け取りながらでの聴力の回復が最も理想的な解決策であると考える。主観的音量は聴取した音によって変化することから、聴取する音によっては主観的音量を上昇させることも可能であるといえ、無音状態に晒すことなく主観的音量を回復させられる音が存在する可能性がある。したがって、ヒアラブルデバイスによって提示する主観的音量の低下の回復に有効な音の調査を行う。

## 3. 特定周波数音による主観的音量変化の調査

ヒアラブルデバイスによって与える特定周波数の音刺激が、環境音に模したスピーカ音聴取時の主観的音量へ与える影響について調査する。具体的には、提示されたスピーカ音について感じた音量を数値化させ、主観的音量の変化を評価する実験を行う。

### 3.1 実験

図 1, 2 に示す環境・音提示時間で実験を行った。被験者は外部音取り込み機能を有効にしたイヤホン (Anker Liberty Air 2 pro) を両耳に装着し、正面に配置されたスピーカ (Fostex PM0.4C) から 60dB SPL で 84 秒間連続して正弦波で作成された特定周波数のスピーカ音を聞く。その際、被験者の手元に置かれたノートパソコンによって通知される特定のタイミングで、感じたスピーカ音の音量を正の整数で数値化し、キーボードを用いて入力する。音量の数値化は図 2 に示す黒丸のタイミングで行う。スピーカ音開始から 5 秒後に 1 度目、15 秒後に 2 度目、22 秒後に 3 度目の音量の数値化を行い、以降 8 秒毎に計 10 回の数値化を行う。

イヤホン音は、70dB SPL でスピーカ音再生開始から 20 秒後に 24 秒間再生した。用いたスピーカ音、イヤホン音の周波数を表 1 に示す。用いたスピーカ音の周波数は 500Hz, 1000Hz, 3000Hz の 3 種類であり、イヤホン音は各スピー

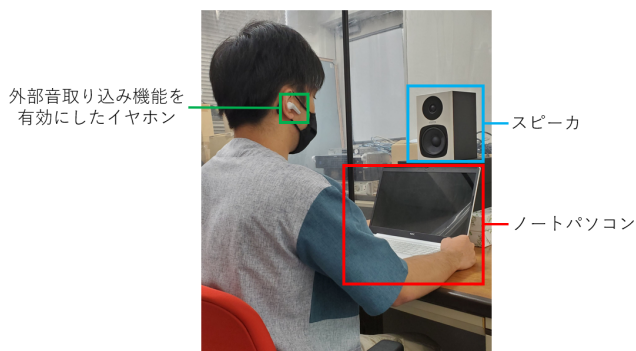


図 1 実験中の被験者の様子

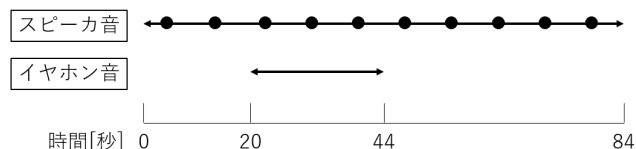


図 2 音の再生時間と音量の推定タイミング (黒丸)

表 1 用いたスピーカ音とイヤホン音の周波数

スピーカ音 (Hz)	500	1000	3000
イヤホン音 (Hz)	None	None	None
	250	500	1500
	400	840	2520
	450	920	2760
	500	1000	3000
	550	1080	3240
	600	1160	3480
	1000	2000	6000

カ音の周波数を基準とする 7 種類である。人の聴神経は周波数毎に反応する箇所が異なる特性をもち、場所毎に中心周波数と帯域幅の異なる聴覚フィルタが多数並んでいると考えられている [4]。そのため、スピーカ音の周波数に対する聴覚フィルタの帯域幅を考慮し、帯域内の 5 種類の特定周波数の音と帯域外の 2 種類の特定周波数の音について検証を行うこととした。また、イヤホン音を再生しない対照実験を行うため、被験者は 21 回 (3 スピーカ音 × 7 イヤホン音) に加え、3 回 (3 スピーカ音 × 刺激音なし) の計 24 回試行した。聴覚への影響を考慮し、各試行間で 90 秒間のインターバルをとった。被験者は 20 代男性 10 名である。なお、本実験は神戸大学の研究倫理審査委員会の承認を得て行った (審査番号 04-41)。

### 3.2 結果

主観的音量の変化の指標は、次式によって求められる値  $AC_t[\%]$  とする。この値は、実験によって得られた初期知覚音量値  $E_1$  と、 $t$  度目の知覚音量値  $E_t$  の差を初期知覚音量値で除算し、100 を積算することで得られる変化量である。

$$AC_t = 100(E_1 - E_t)/E_1 \quad (1)$$

変化量  $AC_t$  は、 $0\%(E_t=E_1)$  から  $100\%(E_t=0)$  までの値

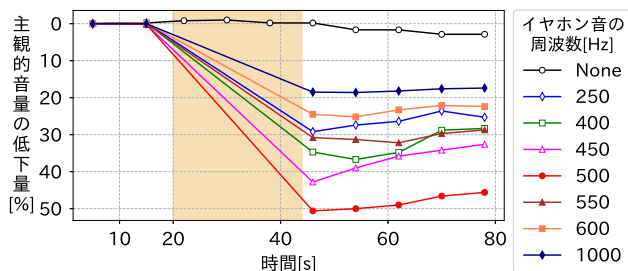


図 3 500Hz のスピーカ音における主観的音量の低下量

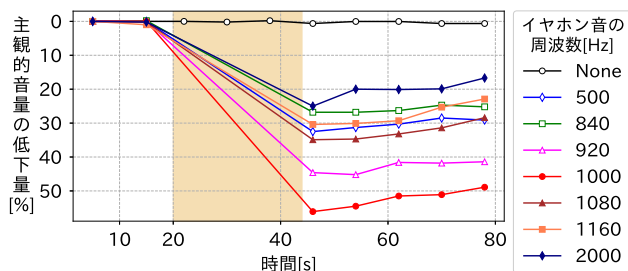


図 4 1000Hz のスピーカ音における主観的音量の低下量

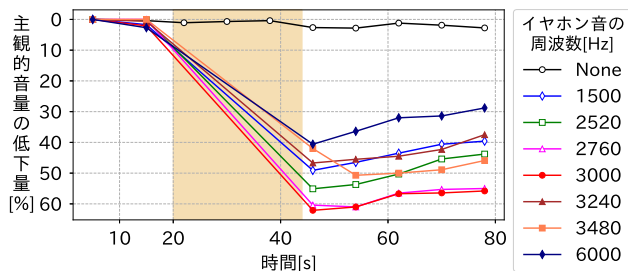


図 5 3000Hz のスピーカ音における主観的音量の低下量

をとり、値が大きくなるほど被験者がスピーカ音を聞き取りにくく感じていることを表し、主観的音量の低下量を示す。

図 3, 4, 5 に、実験によって得られた各スピーカ音 (500Hz, 1000Hz, 3000Hz) の聴取時における主観的音量の低下量の結果を示す。横軸はスピーカ音提示開始からの時間を、縦軸は主観的音量の低下量を、図中の薄茶色の範囲はイヤホン音の提示区間を示している。なお、イヤホン音を提示する 24 秒間のスピーカ音の知覚音量値は、被験者がイヤホン音とスピーカ音の両方を聴取しており、スピーカ音のみの評価が困難であったため除外した。図 3 より、500Hz のスピーカ音において最も主観的音量が低下したイヤホン音はスピーカ音の周波数と同一である 500Hz の刺激音であり、 $E_6$  時に 50.6% の最大低下量を示した。また、イヤホン音を提示する場合における主観的音量の最小低下量は 1000Hz の音による刺激であり、 $E_{10}$  時の 17.4% であった。図 4 より、1000Hz のスピーカ音において最も主観的音量が低下したイヤホン音は 1000Hz の刺激音であり、 $E_6$  時に 56.1% の最大低下量であった。また、イヤホン音を提示する場合における主観的音量の最小低下量は 2000Hz の音による刺激であり、 $E_{10}$  時の 16.7% であった。図 5 より、3000Hz の

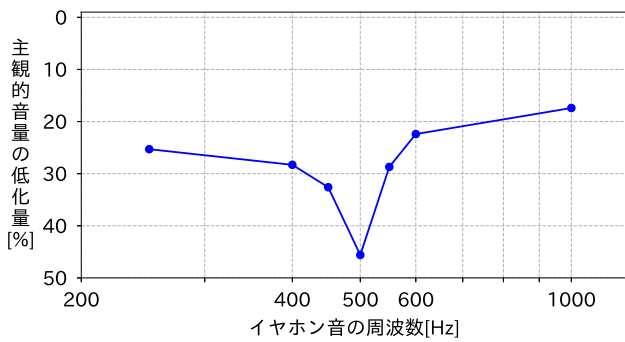


図 6 500Hz のスピーカ音における  $E_{10}$  時の主観的音量の低下量

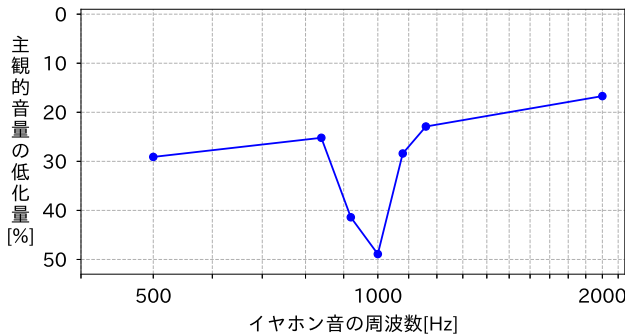


図 7 1000Hz のスピーカ音における  $E_{10}$  時の主観的音量の低下量

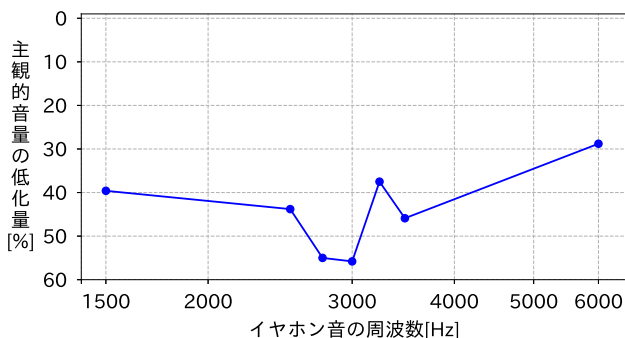


図 8 3000Hz のスピーカ音における  $E_{10}$  時の主観的音量の低下量

スピーカ音において最も主観的音量が低下したイヤホン音は 3000Hz の刺激音であり、 $E_6$  時に 62.1% の最大低下量であった。また、イヤホン音を提示する場合における主観的音量の最小低下量は 6000Hz の音による刺激であり、 $E_{10}$  時の 28.8% であった。全てのスピーカ音について、イヤホン音を提示しない場合、主観的音量は約 3% の低下とほとんど変化しなかった。一方で、イヤホン音を提示する場合、主観的音量はイヤホン音提示後急激に低下する結果となった。低下量に関して、スピーカ音とイヤホン音の周波数が同一である場合に最も低下し、主観的音量が低下した後の 40 秒間でほとんど回復しないことが確認できる。

図 6, 7, 8 に、 $E_{10}$  時の各スピーカ音 (500Hz, 1000Hz, 3000Hz) における主観的音量の低下量の結果を示す。横軸はイヤホン音の周波数を、縦軸は主観的音量の低下量を示している。スピーカ音とイヤホン音の周波数が同一である場合に主観的音量は最も低下し、スピーカ音とイヤホン音

の周波数差が大きくなるほど主観的音量の低下量が減少する傾向にあることを確認できる。また、主観的音量の低下量に関して対数周波数軸上で概ね対称的な結果を示した。スピーカ音とイヤホン音の周波数が同一である場合の主観的音量の低下量を比較すると、スピーカ音が 500Hz の場合に 45.6%, 1000Hz の場合に 48.9%, 3000Hz の場合に 55.8% と周波数が大きくなるほど低下量が大きくなる結果を示した。また、全てのスピーカ音においてイヤホン音の周波数がスピーカ音の周波数の 2 倍である場合に主観的音量が最も低下しない結果となった。

### 3.3 考察

本論文では、イヤホンにて提示する特定周波数の音の刺激によって主観的音量が変化し、音の周波数毎に変化量に差が生じると仮定して実験を行った。仮説通り、イヤホン音の刺激によってスピーカ音聴取時の主観的音量が低下することに加え、イヤホン音とスピーカ音の周波数が近似するほど主観的音量の低下量が大きくなる結果が得られた。このことから、イヤホン音の聴取においても前述した特性は有効に働いており、ヒアブルデバイスが発する音によって外部音取り込み機能を用いて得られる環境音聴取時の主観的音量は低下するといえる。

イヤホンによる全ての刺激音において主観的音量は 10.0% 以上低下した。これは、イヤホン音をスピーカ音よりも 10dB SPL 大きい音量で提示したことによる影響だと考えられる。また、高周波数の音ほど主観的音量が低下する結果が得られた。24 秒間という短い刺激音提示時間であったが、イヤホン音の刺激は環境音聴取における高周波帯域の主観的音量へより影響を与えることが考えられる。これらのことから、イヤホンにてさらに大音量、長時間の刺激音を提示することでさらなる主観的音量の低下が生じると考えられる。結果には個人差が確認でき、90% 以上の主観的音量の低下が見られた被験者もいる一方で、最大低下量が約 15% となる被験者もいた。しかし、全体としてイヤホン音とスピーカ音の周波数が近似するほど主観的音量の低下が大きくなることを確認できたことから、特定周波数の音による刺激はヒアブルデバイス装着ユーザの聴覚に対して影響を与えているといえる。

主観的音量の低下後、40 秒間主観的音量低下からの回復が見られなかった。テスト音以外の音を聴取しないことが原因であると考えられる他に、90 秒間という短いインターバルによって主観的音量は正常に戻ると仮定し本実験を行ったが、主観的音量が正常に戻ったとしても、試行を重ねる毎に音に対する聴覚の抵抗力が低下し、本来の聴覚特性とは異なる性質を示した可能性がある。そのことが影響し、主観的音量の低下後回復が見られなかったことや、3000Hz のスピーカ音における  $E_{10}$  時の主観的音量の低下量に関し



て、対数周波数軸上で対称にならなかった可能性がある。そのため、試行間のインターバルに関して今後聴覚への影響をより考慮する必要があると考える。

本実験では、刺激音に特定周波数の音を用いた場合の主観的音量変化について調査を行った。実環境にてヒアラブルデバイスによって提示される音は、複数の周波数帯域を含んだ音声や音楽であることが想定される。そのため、それらの音による主観的音量の変化について今後調査する必要があると考える。また、音量についてイヤホン音が環境音よりも大きい環境を想定とした実験を行った。環境音の音量がイヤホン音の音量と同等、または大きい環境での主観的音量変化についても調査する必要があると考える。

#### 4. 主観的音量の回復に有効な刺激音の調査

前章のように主観的音量を低下させる音がある一方で、耳全体の活性化を見込める全周波数帯域成分を含む音や、耳への物理的側面ではなく心理的側面へ影響を与える音の提示によって、低下した主観的音量変化を回復させられる可能性がある。そのため本章では、低下した主観的音量の回復に有効である刺激音について調査する。具体的には、前章と同様の手順を用いて主観的音量を低下させ、その後に再度回復用刺激音を提示することで主観的音量低下の回復に有効であるかどうか調査する。

##### 4.1 実験

3.1 節と同様の図 1 に示す環境で実験を行った。また、スピーカ音とイヤホン音の提示時間を図 9 に示す。被験者は外部音取り込み機能を有効にしたイヤホンを両耳に装着し、正面に配置されたスピーカから 60dB SPL で 110 秒間連続して正弦波で作成された特定周波数のスピーカ音を聞く。その際、被験者の手元に置かれたノートパソコンによって通知される特定のタイミングで、感じたスピーカ音の音量を正の整数で数値化し、キーボードを用いて入力する。音量の数値化は図 9 に示す黒丸のタイミングで行う。スピーカ音開始から 5 秒後に 1 度目、15 秒後に 2 度目、22 秒後に 3 度目の音量の数値化を行い、以降 8 度目まで 8 秒毎に数値化を行う。さらに、スピーカ音開始から 72 秒後に 9 度目の数値化を行い、以降 8 秒毎に合計 13 回の数値化を行う。主観的音量低下を生じさせるため、前章と同様 1 度目のイヤホン音は、70dB SPL でスピーカ音再生開始から 20 秒後に 24 秒間再生した。また、2 度目のイヤホン音は、主観的音量低下を回復させることを想定とした刺激音であり、60dB SPL でスピーカ音再生開始から 60 秒後に 10 秒間再生した。

用いたスピーカ音の周波数は 1000Hz であり、1 度目に再生するイヤホン音は、前章で最も主観的音量を低下させたスピーカ音の周波数と同一である 1000Hz の音を用いた。イヤホンにて 2 度目に再生する回復用刺激音は、ピンクノ

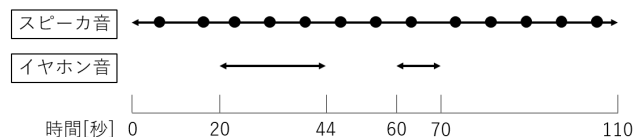


図 9 音の再生時間と音量の推定タイミング (黒丸)

イズと、ホワイトノイズにバンドストップフィルタ (BSF: Band Stop Filter)(840-1160Hz) を適用した音と、各音源に 4 種類のエフェクト (10 秒のフェードイン、10 秒のフェードアウト、各 5 秒のフェードイン/アウト、0.5 秒ごとの断続音) をかけた音と、スイープ音 (20Hz-20000Hz, 1 秒毎に計 10 回) の合計 11 種類である。これらのイヤホン音に関して、ピンクノイズは、 $1/f$  ゆらぎをもった音であることからリラックス効果を見込め、且つ全周波数成分を含んだ音であることから、BSF 適用音は、1 度目の刺激音に含まれない全周波数成分を含んでいることから、スイープ音は、内耳に存在する音を電気信号に変換する機能をもつ毛細胞全体を活性化させることができると仮定し選定した。また、エフェクトに関して、エフェクトによって刺激音の音量を変化させることでスピーカ音の聴取に影響を与えると仮定し選定した。回復用刺激音を再生しない対照実験を行うため、被験者は計 12 回試行した。聴覚への影響を考慮し、各試行間で 90 秒間のインターバルをとった。被験者は 20 代男性 20 名であり、その内 8 名は前章の実験に参加した被験者である。なお、本実験は神戸大学の研究倫理審査委員会の承認を得て行った (審査番号 04-42)。

##### 4.2 結果

主観的音量の低下からの回復の指標は、次式によって求められる値  $Rec_t[\%]$  とする。この値は、前章と同様の方法で  $t(t \geq 7)$  度目の知覚音量値と初期知覚音量値を用いて主観的音量の変化量  $AC_t$  を求め、2 度目のイヤホン音聴取直前の変化量  $AC_7$  から 2 度目のイヤホン音聴取後の  $t$  度目における変化量  $AC_t$  を減算することで得られる回復量である。

$$Rec_t = AC_7 - AC_t \quad (t \geq 7) \quad (2)$$

図 10 に、実験によって得られた各刺激音を聴取することによる主観的音量の回復量の結果を示す。横軸は音量の推定回数を、縦軸は主観的音量の回復量を、図中の薄水色の範囲は 2 度目のイヤホン音の提示区間を示している。なお、8 回目の評価値タイミングではイヤホン音とスピーカ音を同時に聞くことになり、スピーカ音のみの評価が困難であったため除外した。図 10 より、2 度目の刺激音の提示によって主観的音量がさらに低下した音はなく、9 回目の評価から 13 回目の評価において急激に主観的音量が回復する刺激音もなく、主観的音量は徐々に回復する傾向にあることがみてとれる。また、刺激音を提示しない場合と比

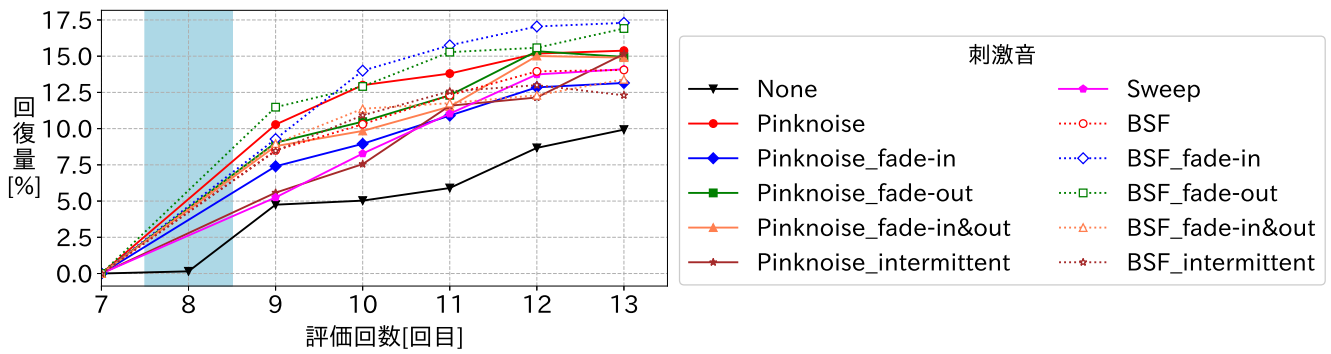


図 10 各刺激音毎の回復量

表 2 回復量の算出結果

2 度目の刺激音	None	ピンクノイズ					BSF 適用音					スイープ音
エフェクト	None	None	Fade-In	Fade-Out	In & Out	断続	None	Fade-In	Fade-Out	In & Out	断続	None
回復量 $Rec_9$	4.7	10.3	7.4	9.0	8.8	5.6	8.5	9.3	11.5	9.0	8.5	5.2
回復量 $Rec_{10}$	5.0	13.0	9.0	10.5	9.8	7.6	10.3	14.0	12.9	11.4	10.9	8.3
回復量 $Rec_{11}$	5.9	13.8	10.9	12.3	11.5	11.6	12.3	15.8	15.3	11.8	12.6	11.0
回復量 $Rec_{12}$	8.7	15.2	12.8	15.3	15.0	12.1	14.0	17.1	15.6	12.3	13.0	13.7
回復量 $Rec_{13}$	9.9	15.4	13.1	15.0	15.0	15.1	14.1	17.3	16.9	13.4	12.3	14.1

較して、全ての刺激音・評価タイミングで回復量が大きくなったことが確認できる。9 回目の評価において、BSF 適用音にフェードアウトをかけた音が最も回復量が大きくなり、スイープ音が最も回復量が小さくなる結果を示した。13 回目の評価においては、BSF 適用音にフェードインをかけた音が僅差であるが最も回復量が大きくなり、BSF 適用音に断続エフェクトをかけた音が最も回復量が小さくなる結果を示した。

表 2 に、各刺激音における回復量を算出しまとめた結果を示す。9 回目の評価から 13 回目の評価までの回復量に着目すると、刺激音を提示しない場合約 5% の回復量が確認できる。一方、刺激音を提示した場合、5% 以上回復する刺激音は 11 種類中 9 種類であった。刺激音直後の 9 回目の評価では、刺激音を提示しない場合に比べて、1.5 倍以上の回復量を示す刺激音が 9 種類あった。刺激音を提示しない場合の 13 回目の回復量と、刺激音を提示した場合の 9 回目の回復量を比較すると、2 種類の刺激音（ピンクノイズと BSF+フェードアウト）で 9 回目の評価値の方が高いことが確認でき、刺激音による回復が確認できる。また、9 回目の評価では、ピンクノイズに断続的エフェクトをかけた音とスイープ音に関して刺激音を提示しない場合とほとんど同じ回復量を示したが、13 回目の評価ではどちらも約 4% 高い回復量を示した。

#### 4.3 考察

実験結果の 9 回目の評価より、全ての刺激音において刺激音を提示しない場合よりも回復量が大きいことが示された。これは、2 度目の刺激音を与えることによって 1 度目の刺激音による音への慣れを取り除いたことが原因だと考える。同音量での刺激では主観的音量はほとんど低下しない

ことが示されている [23]。本実験では、スピーカ音と 2 度目の刺激音の音量は統一している。そのため、2 度目の刺激音の音量による影響とは考えにくく、1 度目の刺激音とは異なる周波数成分を含んだ音を聴取した影響によって回復した可能性が高い。回復量は 100% に到達しない結果であったが、この原因として、今回用いたイヤホン音 (70dB SPL) がスピーカ音 (60dB SPL) よりも大きいため生じた主観的音量の低下による影響だと考えられる。2 度目の刺激音の提示により、周波数間で生じる主観的音量の低下は改善されたが、イヤホン音とスピーカ音の音量差自体で生じた主観的音量の低下を改善することは難しかったといえる。しかし、図 10 より、11 回目から 13 回目の評価間の回復量については、刺激音の有無で大きな変化はないが、刺激音提示直後の 9 回目、10 回目の評価では刺激音無しの場合よりも回復量が大きくなることを確認できる。実際に、全刺激音の 9 回目の評価における回復量の平均は 8.5% であり、これは刺激音提示なしの場合の回復量 4.7% よりも大きい。このことから、2 度目の刺激音の提示は、特に主観的音量の低下直後の回復に有効であり、提示しない場合よりも速く正常に戻ることが考えられる。一方で、本実験では被験者に刺激音提示後の 5 回、スピーカ音の音量を推定してもらうよう設定したが、主観的音量が正常に戻るまで推定してもらう必要があった可能性がある。刺激音直後において、BSF 適用音にフェードアウトをかけた音が最も回復量が大きくなったものの、9 回目から 13 回目の評価間ではスイープ音が最も回復量が大きい結果を示した。そのため、13 回目以降も音量の推定を行っていた場合、スイープ音の回復量が最も大きくなり最短で正常に戻る可能性がある。より長時間での回復量と刺激音との関係の調査は今後の課題である。

被験者から、フェードインやフェードアウトのような音量が徐々に変化していく刺激音において、つられてスピーカ音の知覚音量が変化したとの意見が得られた。また、ノイズ音が音のイメージ的にスピーカ音の聴き取りを邪魔しているように感じたとの意見があり、心理的影響が加味される可能性がある。このことから、ピンクノイズではみられなかったが、刺激音が徐々に消えることで相対的にスピーカ音を聴取しやすくなるフェードアウトをかけた音や、徐々に音量が大きくなる刺激音が急に消えることでスピーカ音を聴取しやすくなるフェードインをかけた音において原音よりも回復量が大きくなる結果を示した可能性がある。これらのことから、聴覚への疲労や心理的影響を含め、2度目の刺激音の周波数特性や音量や提示方法について再考の余地があると考えられる。

本研究では、特定周波数の主観的音量の変化および主観的音量の回復の基礎的な調査を行うため、純音を用いた。しかし、実際のヒアラブルデバイスでの情報提示を想定すると、音声や音楽といった複数の周波数が含まれた音の提示が考えられる。また、主観的音量回復のための刺激音についても、ノイズではなくユーザに情報を与えながら回復できる刺激音が望ましい。今後は複数周波数を含んだ主観的音量の低下および回復について調査を行う必要がある。

## 5. まとめ

本研究ではヒアラブルデバイスでの特定周波数の音の聴取が環境音の聴取時における主観的音量に与える影響と、主観的音量の低下の回復に有効な音について調査を行った。本論文では、外部音取り込み機能を有効にしたイヤホンを両耳に装着し、連続して提示される環境音に模したスピーカ音の音量を特定のタイミング毎に数値化させる評価実験を行うことで、イヤホンから提示する音がスピーカ音聴取時の主観的音量へ与える影響を調査した。ヒアラブルデバイスでの音刺激が環境音聴取時の主観的音量へ与える影響を調査した結果、全てのイヤホン音による刺激後に10%以上の主観的音量が低下することが確認された。また、スピーカ音とイヤホン音の周波数が近似するほど、主観的音量が低下することが確認され、特定周波数の音の提示が環境音聴取時の特定周波数の主観的音量に影響を与えることが確認された。主観的音量が低下した後に再度イヤホンにて刺激音を提示し、提示した刺激音が低下した主観的音量へ与える影響を調査した結果、概ね全ての音が主観的音量の回復に有効であることが確認された。特に、BSF適用音にフェードアウトエフェクトをかけた音の提示直後の回復量は刺激音を提示しない場合よりも約7%大きいことが確認された。

今後の展望としては、特定の周波数帯域を強調/減衰した音声や音楽による主観的音量の変化に関して調査を行うこと、また、主観的音量の低下をより回復させる音や回復

に有効な音の提示タイミングについて調査を行っていく予定である。

**謝辞** 本研究の一部は、JST CREST(JPMJCR18A3)と、JST さきがけ(JPMJPR2138)、およびJSPS 科研費(21K11973)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 渡邊拓貴, 寺田 努: ウェアラブルコンピューティングにおける周波数操作による聴力自在化技術の提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 62, No. 2, pp. 617–630 (Feb. 2021).
- [2] C. Athavipach, S. Pan-ngum, and P. Israsena: A Wearable In-Ear EEG Device for Emotion Monitoring, *Sensors of MDPI 2019*, Vol. 19, No. 18 (Sep. 2019).
- [3] 教育機器編集委員会: 産業教育機器システム便覧, 日科技連出版社 (1972)
- [4] 大串健吾: 音響聴覚心理学, 誠信書房 (2019)
- [5] 太田信夫, 行場次郎: シリーズ心理学と仕事 1 感覚・知覚心理学, 北大路書房 (2018).
- [6] C. G. L. Prell, S. Dell, B. Hensley, J. W. Hall, K. C. M. Campbell, P. J. Antonelli, G. E. Green, J. M. Miller, and K. Guire: Digital Music Exposure Reliably Induces Temporary Threshold Shift in Normal-Hearing Human Subjects, *Article of EAR and HEARING*, Vol. 33, No. 6, pp. 44–58 (Dec. 2012).
- [7] 藤原 敏修: 聴覚疲労の回復過程に関する研究, 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol. 71, No. 9, pp. 1306–1325 (1968).
- [8] T. O. Lyendo: Exploring the Effect of Sound and Music on Health in Hospital Settings: A Narrative Review, *International Journal of Nursing Studies*, Vol. 63, pp. 82–100 (Nov. 2016).
- [9] PRINCETON: Nuraloop (2021), 入手先 <<https://www.princeton.co.jp/product/multimedia/nrlp.html>> (参照 2022-09-27).
- [10] SONY: LinkBuds (2022), 入手先 <<https://www.sony.jp/headphone/products/LinkBuds/>> (参照 2022-09-27).
- [11] omuron: AK-15 (2016), 入手先 <<https://www.healthcare.omron.co.jp/product/etc/ak/ak-15.html>> (参照 2022-09-27).
- [12] Jabra: Jabra Eclipse (2016), 入手先 <<https://www.jabra.jp/bluetooth-headsets/jabra-eclipse>> (参照 2022-09-27).
- [13] 江波戸明彦, 蛭間貴博: イヤホン再生時の外耳道音響特性に関する研究 (伝達行列法を用いた共鳴補正フィルタの導出), 日本機械学会論文集, Vol. 78, No. 789, pp. 979–983 (May. 2012).
- [14] Y. Wei, G. Yu, X. Li, H. Shuai, W. Ye, Y. Qiao, H. Tian, Y. Yang, and K. Ma: High Performance and Wireless Graphene Earphone towards Practical Applications, *Conference on 2020 4th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM)*, pp. 1–4 (Apr. 2020).
- [15] T. Hoshina, D. Fujiyama, T. Koike, K. Ikeda, and K. Ma: Effects of an Active Noise Control Technology Applied to Earphones on Preferred Listening Levels in Noisy Environments, *Journal of Audiology and Otology*, Vol. 26, No. 3, pp. 122–129 (Mar. 2022).
- [16] N. E. Naal-Ruiz, L. M. Alonso-Valerdi, and D. I. Ibarra-Zarate: Frequency Responses of Headphones Modulate Alpha Brain Oscillations Related to Auditory Processing, *Article of Applied Acoustics*, Vol. 185, (Jan. 2022).



- [17] E. C. Carterette: Loudness Adaptation for Bands of Noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 5, pp. 865–871 (Sep. 1956).
- [18] E. Wagner and B. Scharf: Induced Loudness Reduction as a Function of Exposure Time and Signal Frequency, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 119, No. 2, pp. 1012–1020 (Feb. 2006).
- [19] R. Hellman, A. Miśkiewicz, and B. Scharf: Loudness Adaptation and Excitation Patterns: Effects of Frequency and Level, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 101, No. 4, pp. 2176–2185 (Apr. 1997).
- [20] B. Scharf and E. Wagner: Loudness Adaptation Induced by an Intermittent Tone, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 72, No. 3, pp. 727–739 (Sep. 1982).
- [21] S. Charron and M. C. Botte: Frequency Selectivity in Loudness Adaptation and Auditory Fatigue, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, No. 1, pp. 178–187 (Jan. 1998).
- [22] 大和田健次郎, 古賀慶次郎: 高音域にみられる正常者の聴覚順応, *日本音響学会誌*, Vol. 17, No. 2, pp. 103–108 (June. 1961).
- [23] 矢高真一, 寺田 努, 塚本昌彦: ウェアラブルコンピューティングのための主観的音量に基づく音声情報提示手法, *研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信*, Vol. 57, No. 38, pp. 1–8 (Feb. 2011).
- [24] I. J. Hirsh and W. D. Ward: Recovery of the Auditory Threshold after Strong Acoustic Stimulation, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 24, No. 2, pp. 131–141 (Dec. 1951).
- [25] W. D. Ward, A. Glorig, and W. Selters: Temporary Threshold Shift in a Changing Noise Level, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 32, No. 2, pp. 235–237 (Feb. 1960).
- [26] W. D. Ward: Recovery from High Values of Temporary Threshold Shift, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 32, No. 4, pp. 497–500 (Apr. 1960).
- [27] J. H. Mills, J. D. Osguthorpe, C. K. Burdick, J. H. Patterson, and B. Mozo: Temporary Threshold Shifts Produced by Exposure to Low - Frequency Noises, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 73, No. 3, pp. 918–923 (Mar. 1983).
- [28] D. W. Bell and G. Fairbanks: TTS Produced by Low - Level Tones and the Effects of Testing on Recovery, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 35, No. 11, pp. 1725–1731 (Nov. 1963).
- [29] Y. Ariei, K. Kelly and L. E. Marks: Tracking the Time to Recovery after Induced Loudness Reduction (L), *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117, No. 6, pp. 3381–3384 (June. 2005).
- [30] B. Scharf, M. C. Botte, and G. Canévet: Récupération Après Adaptation Induite de Sonie, *Article of L'Année Psychologique*, Vol. 83, No. 1, pp. 9–24 (1983).