

## 基礎論文

## 手掌への振動提示後に生じる痺れの推移と感覚の変化

上堀 まい<sup>\*1 \*2</sup> 秋谷 溪太郎<sup>\*3</sup> 伊藤 弘大<sup>\*3</sup> 梶本 裕之<sup>\*4</sup> 伊藤 雄一<sup>\*3</sup>

Effect of Numbness and Changes in Sensation Following Vibration Stimulation to the Palm

Mai Kamihori<sup>\*1 \*2</sup> Keitaro Akitani<sup>\*3</sup> Kodai Ito<sup>\*3</sup> Hiroyuki Kajimoto<sup>\*4</sup> Yuichi Itoh<sup>\*3</sup>

**Abstract** – We focused on the residual numbness sensation experienced after receiving vibration stimulation for a particular duration. In this study, we investigated the conditions conducive to numbness occurrence and the intensity of numbness and its duration under those conditions. Our findings revealed that numbness occurred and vibration perception diminished following vibration exposure for 40 to 80 seconds, gradually subsiding within 10 to 30 seconds post-stimulation. Additionally, we observed that after 10 seconds from the onset of numbness, stimuli below 10 dB were less perceptible due to residual numbness, whereas vibration perception remained intact for stimuli above 20 dB. Although this experiment primarily assessed the impact of numbness on vibration perception, exploring its effects on tactile sensations beyond vibration perception could broaden the potential applications and interactions, considering the optimal vibration exposure time and duration of residual numbness identified in this study.

**Keywords** : Vibration, Adaptation, Sense of touch

## 1 はじめに

我々が日常的に使用するデバイスの中には、携帯電話やゲームコントローラのようにデバイスが振動することでユーザに情報を伝える機能を持つものが多く存在する。携帯電話は、振動を使用して通知を知らせる機能や、アラームで目覚めを促す機能が備わっている。ゲームコントローラは、ゲーム内で発生している振動をコントローラで表現し、ユーザに臨場感を与えることや、ユーザの操作に対するフィードバックを行っている。そのほかにも、装着することで進む方向を振動によって示し、歩行を誘導するデバイスなども存在する [1,2]。また近年では、振動機能を加えたヘッドセットなども開発され、音楽や動画、ゲームなどの音を振動に変換しユーザに伝達することで、没入感を表現することが可能である。このように、従来のデバイスに振動機能を追加することで新たな体験を創出する事例もあり、振動提示によって多くのデバイスの可能性を広げることができると考える。しかし、振動提示に関する研究では、振動の提示手法に着目した研究が多く、

振動によって感覚が鈍くなったり、痺れが発生したりする現象に着目した研究は少ない。

そこで我々は、振動機能を持つデバイスが、振動を刺激として提示するだけでなく、その結果として生じる順応という反応に着目する。順応とは、一定の刺激に対して体が適応しようとする反応である。視覚においては、順応した刺激が止まった際に「残効」という錯覚が生じることがわかっており、これが触覚においても起こると考えられる。実際に振動を一定時間受けると、その部位の感覚知覚が弱くなり、運動錯覚が誘発されることが分かっている [3]。痺れには摩擦覚が変化したような感覚があり、これを制御することができれば、振動による触覚提示の幅が広がることが期待できる。しかし、痺れが発生する振動提示時間についての研究 [4-6] は行われているが、痺れが発生してから収まるまでの推移や、その間の振動の感じ方の変化については調査されていない。そこで本研究では、痺れが収まるまでの推移と感覚の変化と、痺れが発生するまでに必要な振動提示時間について検証する。振動提示時間と痺れの推移の関係の調査することで、必要な振動の最小提示時間や、感覚回復に要する時間を明らかにし、痺れを効率的に誘発することが期待できる。さらに、これらの知見をもとに痺れ発生中の感覚変化を調査することで、振動提示による痺れの制御が可能となり、その応用範囲が広がると考えられる。このように、痺れの残効を活用するにあたって、痺れの持続時間や感覚の変化を把握することは重要である。一般

\*1 青山学院大学 大学院理工学研究科

\*2 日本学術振興会特別研究員

\*3 青山学院大学 理工学部

\*4 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

\*1 Graduate School of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

\*2 JSPS Research Fellow

\*3 College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

\*4 Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

的に、痺れは“ジンジン”、“チクチク”、“ヒリヒリ”といった感覚で表現されるが、本稿では、振動提示後に継続する痺れ感覚を「痺れ」、痺れが一定時間続く現象を「痺れ残効」と定義し、その特性を調査する。なお、振動提示によって生じる痺れ残効が振動への順応によるものであると考える。

本研究の貢献を以下に示す。

- 痺れが発生するまでに必要な振動提示時間と痺れ残効が続く時間の解明
- 振動知覚における痺れが生じやすい条件の特定
- 痺れが発生している際に正しく感知できる振動強度の解明

## 2 関連研究

### 2.1 振動を提示するデバイスや研究

振動を提示することでユーザの行動を支援するデバイスや研究は多く行われている。振動は視覚や聴覚の妨げとならずに刺激を与えることができる。この利点から、振動を用いるデバイスは、視覚や聴覚を必要としないナビゲーションシステムなどに活用されている [1,2]。一方で、身体への振動提示中に生じる運動錯覚に関する研究も数多く行われている。身体に振動を提示することで、錯覚が起こることが明らかになっており、特に運動錯覚は筋肉への刺激による感覚受容器の発火によって発生する錯覚である [3,7]。また、運動錯覚を多点同時に行うことで、錯覚を感じやすくなることが報告されている [8]。このように、振動を用いて活動を支援するデバイス、振動を提示している間に発生する運動錯覚の研究は多く存在するが、振動提示後に現れる感覚に着目した研究は少ない。

### 2.2 振動提示後に現れる身体の反応

人間は体性感覚器官が受け取った刺激が神経に伝達されることで振動を感知している。この体性感覚は皮膚感覚と深部感覚を合わせて呼称したものであり、皮膚感覚はパチニ小体やメルケル細胞など、多くの受容器によって感知する [9]。手掌には、主にマイスナー小体、メルケル細胞、パチニ小体、ルフィニ終末と呼ばれる 4 種類の感覚受容器が存在する [10]。マイスナー小体は、順応が速く、200 Hz 以下の低周波数の振動を感知しており、特に 20~40 Hz の振動を強く感じ取っている。メルケル細胞は、順応が遅く、低い周波数において最も感度が高く、100 Hz 以下の軽い圧力や皮膚の曲がり具合を感知している。パチニ小体は、順応が速く、70~1000 Hz の振動を感知しており、その中でも 200 Hz 付近の振動を強く検知している。ルフィニ終末は、順応が遅く、100 Hz 以下の皮膚の引っ張り検出など、皮膚の持続的な変形を感知してい

る。また、深部感覚は筋紡錘という筋肉の長さを感じ取る受容器や、腱紡錘という関節の曲がり具合を感じ取る受容器によって知覚されている。振動を皮膚に提示する際は、これらの受容器によって筋肉も振動を感知している。このことから、振動知覚を評価する際には、振動する物体に接触している皮膚だけでなく、振動を受ける身体部位の姿勢も考慮する必要がある。水野らは、指が屈曲した状態では伸展状態よりも、振動提示中の指先の振動感覚閾値が大きくなることを示している [11]。また、振動提示によって運動錯覚を発生させた場合、触覚機能が変化することが報告されている [4,5,12,13]。他にも、周波数の異なる 2 つの振動を続けて提示した際に、1 つ目の振動の周波数を低くすると、2 つ目の振動への変化がより滑らかに感じられることが明らかになっている [6]。

### 2.3 残効と感覚順応

視覚や触覚における錯覚に関する研究は多く行われている。多く取り上げられる事例として、Müller-Lyer 錯視 [14] が挙げられる。Müller-Lyer 錯視は、長さの等しい直線の両端を Y 字になるように外側へ線を 2 本引いたものと、それを直線の方 (内側) に 2 本直線を引いたものでは長さが異なるように見える現象である。その他の例として、ある色の領域を見続けた後に白色の領域を見ると、白色の領域がその色の補色に見えるという現象である色の残効がある [15]。提示された色を見続けることで、その色を認識する脳の神経細胞が順応を起こし、最初に見た色への反応が弱まる結果、相対的に補色に対応する神経細胞の発火が強まることで発生する [16]。この色の残効は、静止した色において発生するが、物体の動きに順応することで生じる運動残効も確認されている [17,18]。Holins や Lerner らの実験では、視覚における運動残効のように、触覚の運動残効は確認されていないが [19,20]、林らの研究では、運動残効は視覚だけでなく触覚でも発生することが確認されている [21]。宮岡らは、定位置に振動刺激を与えることで生じる順応によって、感覚閾値の大きさを調査しており、母指球に 10 Hz の振動を提示したとき、最も明瞭に順応が発生することを報告している [22]。

宮岡らの研究のように、触覚において定位置への刺激提示によって起こる、運動残効ではない残効現象として、凹凸感覚の残効現象がある [23,24]。これらの研究は、視覚と同様に触覚においても様々な残効が存在し、その多くは順応と呼ばれる脳の反応によって引き起こされている。

これらの研究では、視覚や聴覚では残効現象が発生することは示されているが、触覚における痺れ残効の特性の調査は行っていない。そこで本研究では、振動

提示による痺れ残効の特性を、先行研究で示されている残効現象が起りやすい条件下で調査する。

### 3 振動提示環境の設定

#### 3.1 提示する振動特性の検討

本実験では、振動子としてボイスコイル式モータ Vp210(アクーヴ・ラボ製)を使用する。ボイスコイル式モータでは、振動データを音声として入力することで任意の振動が生成でき、周波数の指定が容易で、音量の調節によって振動強度を変えることができる。

また、宮岡らの先行研究 [22] をもとに振動提示環境を設定する。宮岡らの実験では、各振動提示時間で痺れが発生した際に人が感知できる最小の振動強度を調査しており、すべての振動提示時間において、振動覚の感覚閾値が大きくなり、振動を感じにくい条件は、振動提示部位を母指球、提示する振動の周波数を 10 Hz、振動強度 20 dB としたときであった。そこで本実験では、振動に対する順応に最も時間がかかる部位である手掌の母指球を提示部位とし [22]、同様の条件で比較を可能にするため、振動周波数を 10 Hz、振動強度を 20 dB とする。なお、JIS 規格より、 $10^{-5} \text{ m/s}^2$  の基準振動加速度を 0 dB とした。

2.2 節で述べたように、マイスナー小体、メルケル細胞、パチニ小体、ルフィニ終末と呼ばれる 4 種類の感覚受容器は手掌の母指球に分布している [10]。特に低周波数の振動を感知する受容器であるマイスナー小体が母指球に分布していることから、実験の対象部位を母指球とすることは効果的であると予測する。

周波数の選択において、4 種類の感覚受容器は、10 ~100 Hz の振動を感知しており [10]、渡邊らの先行研究 [25] では、10 Hz、40 Hz、150 Hz のうち 10 Hz で最も運動残効が効果的に得られることが報告されている。また、前途の通り宮岡らが行った実験において、振動覚の感覚閾値が大きくなり振動を感じにくい振動周波数の条件は 10 Hz である [22]。そのため、本実験では運動残効の原因である順応が発生しやすいと推測される 10 Hz を提示する振動の周波数とする。

なお、宮岡らの実験で使用している振動子と本実験で使用する振動子は異なるため、振動刺激における面積や刺激部位は異なるが、刺激部位に関しては、母指球に振動を提示しているという点で一致している。また、刺激に共通する主要な要素(振動の周波数や振幅)は制御可能であるため、先行研究と条件を揃えることができる。主に振動提示における残像現象は周波数や振幅に依存して発生すると考えられるため、これらの条件を一致することで比較が可能であると考えられる。

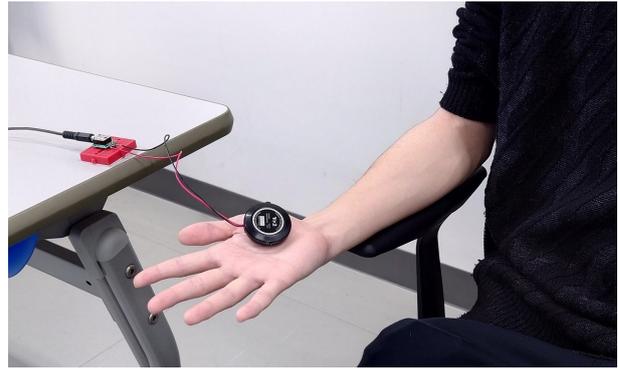


図1 実験時の姿勢  
Fig. 1 Posture during experiment

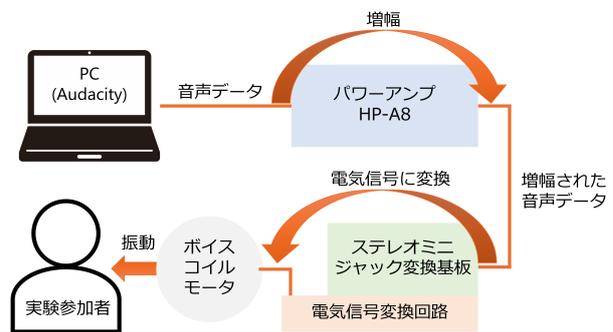


図2 システム構成  
Fig. 2 Configuration of system

#### 3.2 振動提示環境

図1に実験時の姿勢を示す。2.2 節で述べたように、振動を提示している間、提示される箇所の筋肉の状態を考慮する必要がある。実験参加者は、実験時の筋肉の緊張を一定に保つため、実験参加者は椅子に座って前腕を椅子の肘掛けに置き、手首から指先を宙に浮かせて振動提示を受ける。手は握らず開いた状態で、指を伸ばしたままの姿勢を維持して実験を行う。

図2にシステム構成を示す。ボイスコイル式モータへの入力には音声データで行うため、PC とイヤホンジャックでパワーアンプ HP-A8(Fostex)をつなぎ、増幅された音声データを電気信号に変換した後に、ボイスコイル式モータに送信する。振動データは音声編集ソフト Audacity を用いて、正弦波の音声データとして作成した。

実験を行う前に、実験環境での振動子の周波数や振動強度の正確性を検証する。図3に計測のセットアップを示す。レーザ変位計 LK-G3000A(KEYENCE 製)を用いて振動子の動作(周波数、振幅)を確認した。なお、振幅に角周波数の二乗をかけて角速度の換算を行った。実験に用いる振動強度を 20 dB に合わせるため、音声データの音量を調節した後、調節後の音声データを入力とした振動子の振幅を測定した。測定の際は固いプラスチック面の上に振動子を置き、振動子の面に

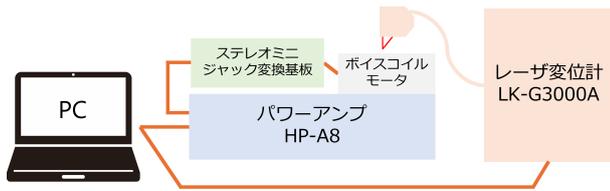


図3 計測の実験セットアップ  
Fig. 3 Experimental setup

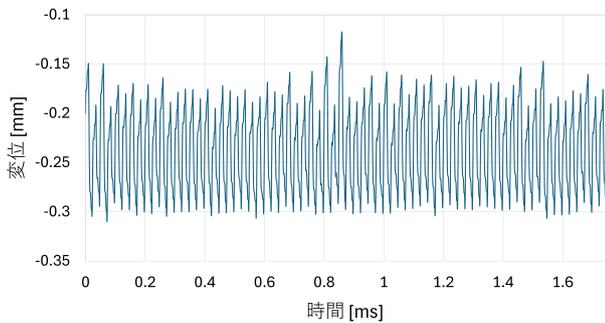


図4 振動子の振動強度計測の結果  
Fig. 4 Results of oscillator vibration intensity measurement

対して垂直にレーザを照射した。調節した周波数と音量で複数回計測を行い、そのたびに振動子を一度停止してから、再度振動させて計測した。図4に計測結果を示す。測定したデータでフーリエ変換を行い、振幅スペクトルを計算したところ、周波数は10.25 Hzが最も強く含まれていることが確認できた。また、振動子の振幅は複数回の計測で差が生じており、平均の振幅を計算したところ0.054~0.062 mmとなった。先述のように、JIS規格に基づいて、 $10^{-5} \text{ m/s}^2$ の基準振動加速度を0 dBとした。入力が正弦波であるため、振動加速度の実効値を求める際には、振動加速度の最大値を $\sqrt{2}$ で割った値を用いた。この実効値に基づいてデシベルの計算を行った結果、19.71~20.77 dBとなった。最大値、最小値ともに20 dBから大きな差が生じることなく動作しているため、本実験ではこの環境で実験を行った。

#### 4 痺れ特性測定実験

本実験では、痺れの発生に必要な振動提示時間と、時間経過とともに痺れが収まっていく推移、痺れが発生している際に正しく感知できる振動強度の閾値の3点を明らかにするために、振動提示時間ごと、振動提示後の時間ごとに条件を変えて振動覚の変化を調査する。

##### 4.1 実験手順

実験では、先述したボイスコイルモータとパワーアンプ、振動生成音声データを用いた。実験参加者は、大学生及び大学院生の男女計16名(男性12名、女性

4名、平均年齢 $22.6 \pm 0.9$ 歳)であった。本実験は刺激に対する感覚量を答える形式であるため、評価はマグニチュード推定法を採用した。

実験参加者には図1で示した姿勢をとってもらい、利き手の母指球に両面テープ(ニチバン製, NWBB-15)で振動子を貼り付けた。振動していることが視覚や聴覚で認識されないよう、振動提示部分の手が見えないよう板で視界を遮り、聴覚刺激を遮断するため、ヘッドセット(SONY製, WH-1000XM3)を装着しホワイトノイズを聞かせた。

本実験では、はじめに提示する振動を「基準刺激」、痺れを発生させるために提示する長時間の振動を痺れ「生成振動」、痺れ生成振動の後に与える刺激を「テスト刺激」と呼ぶ。実験での1試行の流れを図5に示す。まず、基準刺激として10 Hz, 1周期の振動を10 dBの強度で提示した。その5秒後に痺れ生成振動を提示し、提示終了後一定時間が経過した後、再び10 Hz, 1周期の振動をテスト刺激として提示した。実験参加者には、このテスト刺激が基準刺激と比較して何倍の強度に感じるかを、有効数字や上限値、下限値を指定せずに回答してもらった。なお、実験参加者には痺れを考慮せずに、実際に感じた振動強度の比率を回答してもらった。

実験では、提示する痺れ生成振動の長さVT(Vibration Time)(図5のA)は20秒, 40秒, 80秒, 150秒の4条件、痺れ生成振動の提示からテスト刺激までの時間BT(Blank Time)(図5のB)は10秒, 30秒, 50秒の3条件に設定した。痺れが発生している際に、テスト刺激の振動強度が痺れや感覚に与える影響を調査するために、テスト刺激は入力音声データの振幅を調整し、20 dB, 10 dB, 0 dBの3条件の強さ(大, 中, 小)(図5のC)で提示した。振動強度は、入力音声データの振幅を調整することで設定した。Audacityのgainを17に設定し、それぞれの振幅は、0 dBで0.1, 10 dBで $\sqrt{10}$ , 20 dBで1とした。0 dBの入力音声データの波形を図6に示す。20 dBの振動と同様に、振幅をレーザ変位計で測定し、デシベルの計算を行ったところ、10 dBでは9.97~11.08 dB, 0 dBでは-0.13~0.25 dBであった。

提示する痺れ生成振動の提示時間は、宮岡らの先行研究[22]を参考に、振動覚の閾値の変化量が大きい20秒, 40秒, 閾値が十分に大きくなっている150秒, 150秒での閾値の変化量の9割を満たしている80秒を痺れ生成振動の提示時間(図5のA)として設定した。痺れ生成振動提示後の経過時間の設定は、残効現象の持続時間を参考にした。北島の研究[26]では、視覚における運動残効は3分間の刺激を提示すると、55.8~93.7秒間持続することが分かっている。そのため、



図5 実験の流れ  
Fig. 5 Experiment flow

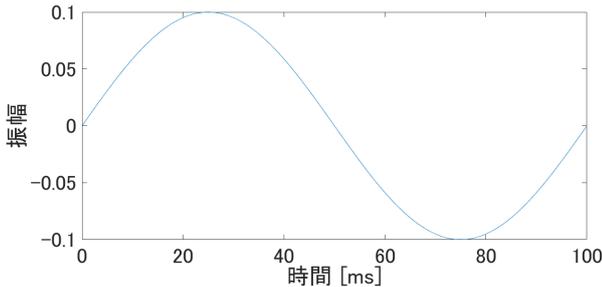


図6 入力した音声データの波形  
Fig. 6 Waveform of the input audio data

残効現象の持続時間は、刺激提示時間と比較して小さく、刺激提示時間の3~5割程度発生している。本実験では、痺れ生成振動の提示時間ごとの、痺れの推移の比較を目的としているため、痺れ生成振動の提示時間の最大値である150秒間の4割である60秒程度までを調べる必要がある。また、痺れの推移を調査するためには痺れ生成振動の提示からの経過時間は一定の間隔に設定することが望ましい。そのため、痺れ生成振動の提示からの経過時間は60秒以内とし、10秒(初期)、30秒(中間)、50秒(後期)の3条件とする。テスト刺激の強さは、痺れ生成振動の提示時間と同様に宮岡らの結果 [22] を参考に、振動覚の感覚閾値が最大値の20 dBと最小値の0 dB、中間の10 dBをテスト刺激の強さとして設定した。

以上、痺れ生成振動の提示時間 (VT: 図5のA) の4条件、痺れ生成振動の提示からテスト刺激までの時間 (BT: 図5のB) の3条件、テスト刺激の振動強度 (図5のC) の3条件、合計36条件の試行を実験参加者ごとにランダムな順番で行った。例えば、基準刺激を提示した後にVTを20秒間提示し、10秒間のBTの後にテスト刺激として20dBを提示した。実験参加者には基準刺激を正確に理解できるように、基準刺激の強さは実験を通して常に同じ強さであることを伝えた。テスト刺激で提示する振動も痺れ残効に影響する可能性があるため、一度の振動提示に対して一度のテスト刺激を提示し、次の試行に痺れが残らないよう、間隔をあけた。間隔の時間は、VTが20秒の場合には最低40秒、その他の条件では最低80秒であり、実験参加

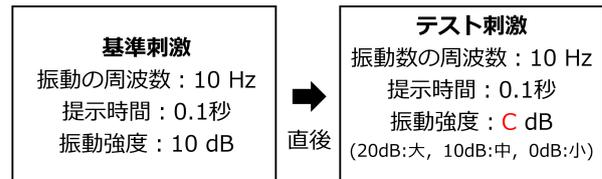


図7 感覚基準値を決定するための実験の流れ  
Fig. 7 Experimental flow for determining sensory reference values

者に完全に痺れないことを確認してから次の試行を実施した。

試行回数が多い場合、実験参加者が痺れ生成振動に慣れてしまう学習効果や疲労が伴うことを考慮し、各条件の提示は1回ずつに設定した。本実験では、マグニチュード推定法を採用しており、実験参加者は基準に対してテスト刺激の振動強度を比率で評価する。この方法により、感覚的な評価は相対的であり、絶対的な評価よりも試行回数による評価の分散が小さくなると考えられる。また、順序効果を考慮し、各条件の提示順序をランダムに設定していることや、各条件の前に間隔を設けていることから、各条件を独立させているため、試行回数の少なさは問題ないとする。

なお、実験時間は約110分(±10分)であり、本実験は青山学院大学の倫理審査委員会の承認(承認番号: H22-007)を受けて実施した。

#### 4.2 解析方法

実験参加者に基準刺激を提示した直後 (BT:0秒)、痺れ生成振動を提示せずにテスト刺激の「大」「中」「小」を提示し、基準刺激に対して何倍に振動を感じたかを回答してもらった値を「感覚基準値」と定義する。図7に感覚基準値を決定するための実験の流れを示す。これは、テスト刺激を痺れの影響なく評価した値であり、この値と比較することで痺れの影響を調査する。

マグニチュード推定法で得られたデータは個人間で尺度のスケールが異なるため、対数変換した後に、実験参加者ごとの値を平均が0、標準偏差が1となるように標準化した。標準化は、各実験参加者のデータの

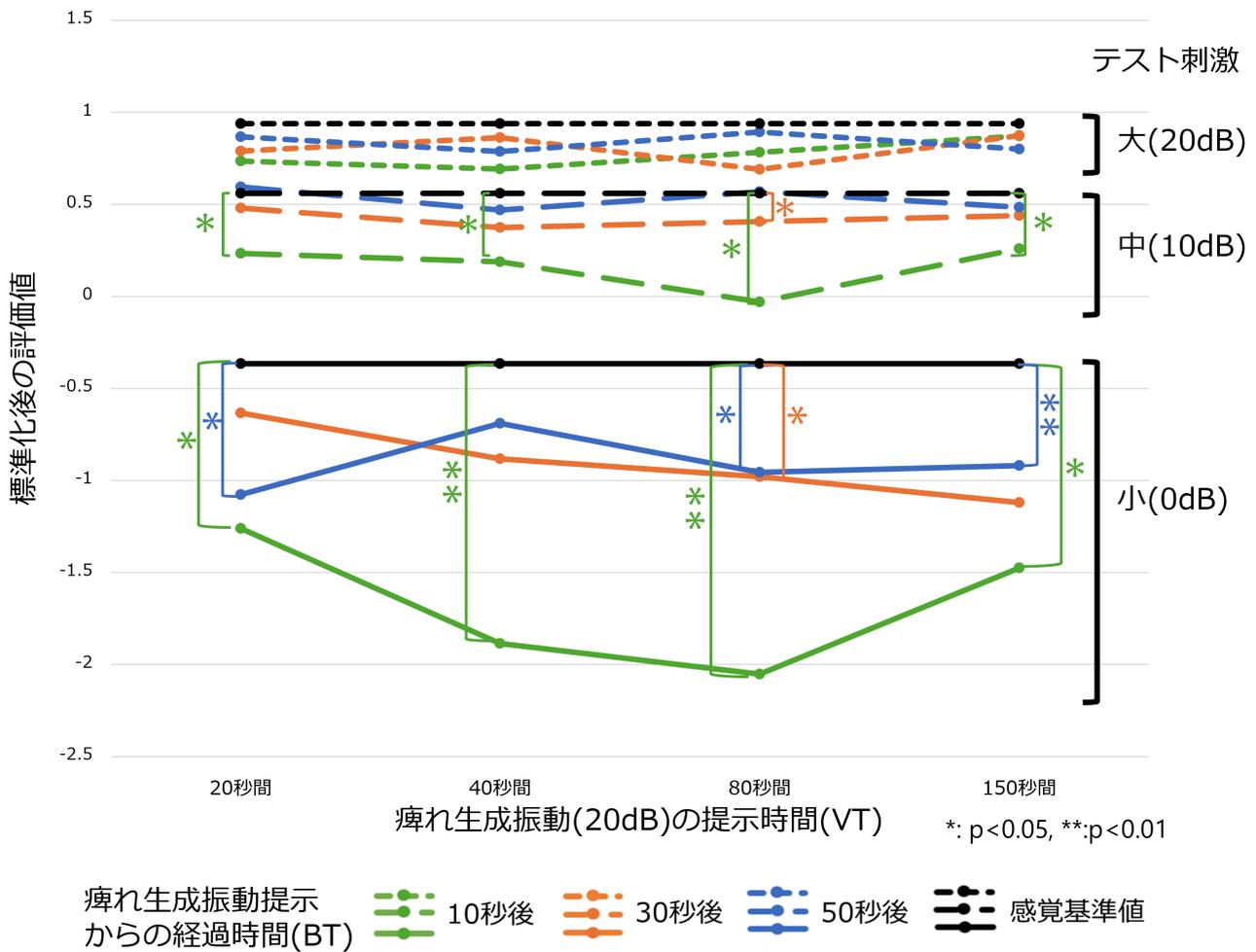


図8 痺れ生成振動の提示時間 (VT) ごとの痺れの強さ  
 Fig. 8 Numbness intensity at each Vibration Time (VT) for numbness-inducing vibration stimulation

平均値と標準偏差を求め、各評価値から平均値を減算し、さらに標準偏差で除算した。標準化したデータに対して Shapiro-Wilk 検定を実施したところ、正規分布ではなかったため、ノンパラメトリック検定である Friedman 検定を実施した。そして、Bonferroni 法で多重比較を行い、各評価データとの有意差を調査した。各テスト刺激強度と BT において、VT(20 秒間, 40 秒間, 80 秒間, 150 秒間)の評価値と感覚基準値の有意差を調査し、対数変換した後に標準化した評価データの中央値を図8に示す。各テスト刺激強度と VT において、BT(10 秒後, 30 秒後, 50 秒後)の評価値と感覚基準値の有意差を調査し、対数変換した後に標準化した評価データの中央値を図9に示す。

縦軸の値が小さいほどテスト刺激を弱く感じたことを示しており、これは痺れ生成振動の提示によって痺れが生じたためである。したがって、各条件での評価値が対応するテスト刺激の感覚基準値から負の方向に大きく離れているほど、痺れの影響が強く表れている

と考えられる。

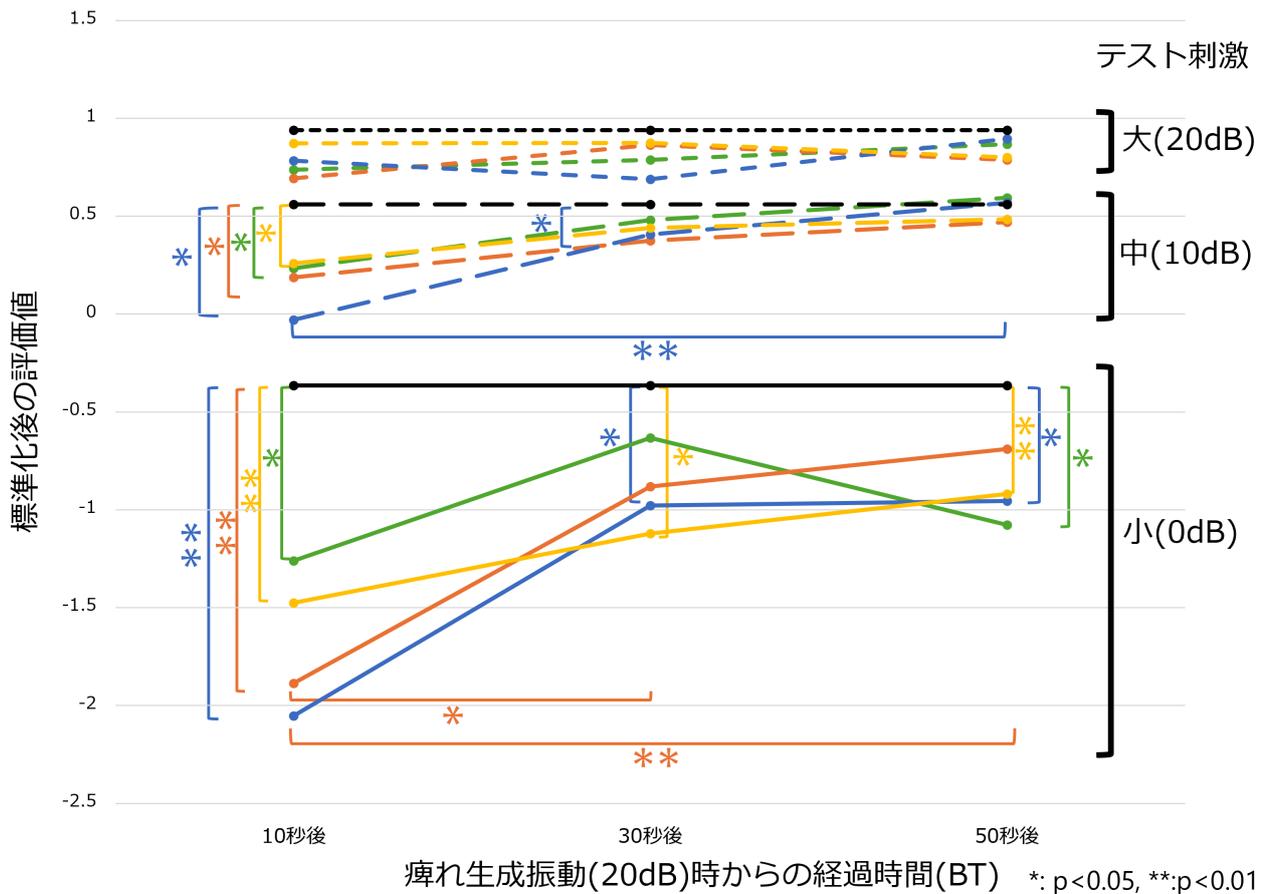
## 5 実験結果

### 5.1 痺れ生成振動の提示時間 (VT) ごとの痺れの強さの結果

VT ごとの痺れの強さの結果を図8に示す。テスト刺激「大」のデータは評価値の範囲が小さく、テスト刺激「小」のデータでは評価値の範囲が大きかった。また、テスト刺激ごとに範囲は完全に分かれている。

テスト刺激「大」の VT ごとの痺れの強さは、VT に関わらず感覚基準値と有意な差はなく、グラフも単調増加や単調減少をしていない。この結果から、本実験において、テスト刺激「大」では VT に対する痺れの有意な効果を計測できないことが明らかになった。

テスト刺激「中」の VT ごとの痺れの強さは、VT の全条件において、値の変化が大きかったのは BT が 10 秒の条件で、BT が大きくなるにつれて値の変化は小さくなった。BT が 10 秒の条件では、すべての VT に



痺れ生成振動の提示時間(VT)    ●—●— 20秒間    ●—●— 40秒間    ●—●— 80秒間    ●—●— 150秒間    ●—●— 感覚基準値

図9 痺れ生成振動提示後の経過時間 (BT) ごとの痺れの推移  
 Fig.9 Numbness transition over Blank Time (BT) after numbness-inducing vibration stimulation

において感覚基準値よりも有意にテスト刺激を弱く感じていたが ( $p<0.05$ ), 単調減少はしておらず, VTが150秒において再び値が増加していた。また, BTが30秒の条件においては, VTが80秒の場合のみ感覚基準値よりも有意にテスト刺激を弱く感じていた ( $p<0.05$ )。これらの結果から, BTが10秒で最も痺れが生じており, VTが80秒まではその効果は強くなることが明らかになった。

テスト刺激「小」のVTごとの痺れの強さは, すべてのVTにおいてBTが10秒の条件が最もテスト刺激を弱く感じており, 感覚基準値よりも有意にテスト刺激を弱く感じていた ( $p<0.05$ )。BTが10秒の条件では, VTが80秒までは単調減少であり, VTが150秒で値が増加していた。BTが30秒と50秒の条件では, VTが80秒で感覚基準値よりも有意にテスト刺激を弱く感じており ( $p<0.05$ ), BTが50秒の条件では, VTが150秒で感覚基準値よりも有意にテスト刺激を

弱く感じていた ( $p<0.01$ )。つまり, テスト刺激「中」の結果と同様に, BTが10秒で最も痺れが生じており, VTが80秒までその効果は強くなっていた。

### 5.2 痺れ生成振動提示後の経過時間 (BT) ごとの痺れの推移の結果

BTごとの痺れの推移の結果を図9に示す。BTごとの痺れの推移の結果は, VTごとの痺れの強さの結果と同様に, テスト刺激「大」のデータは評価値の範囲が小さく, テスト刺激「小」のデータでは評価値の範囲が大きかった。「大」「中」「小」それぞれの感覚基準値を比べると, 「大」と「中」の差に比べて, 「中」と「小」の差が大きかった。

テスト刺激「大」のBTごとの痺れの推移は, すべての条件で感覚基準値との有意な差はなく, BTの値が10~50秒にかけて大きく値が変化することはなかった。この結果から, 本実験において, BTごとの痺れの強さの結果と同様に, テスト刺激「大」ではBTに

対する痺れの有意な効果を計測できないことが明らかになった。

テスト刺激「中」のBTごとの痺れの推移は、テスト刺激「大」のグラフと比較して値の変化が大きく、BTの値が大きくなるほどテスト刺激を強く感じていた。また、BTが10秒のすべての条件で感覚基準値よりもテスト刺激を有意に弱く感じていた ( $p < 0.05$ )。最も値が変化していたデータはVTが80秒のデータで、感覚基準値と比較するとBTが10秒の条件だけでなく30秒の条件においてもテスト刺激を有意に弱く感じており ( $p < 0.05$ )、BTが50秒の条件よりも10秒の方がテスト刺激を有意に弱く感じていた ( $p < 0.01$ )。つまり、BTが10秒から30秒の間で痺れが収まっていたことが分かる。

テスト刺激「小」のBTごとの痺れの推移は、VTが20秒の条件を除いたすべての条件で、BTが増加するにつれてテスト刺激を強く感じていた。BTが10秒の条件では、VTが20秒のときは感覚基準値よりもテスト刺激を有意に弱く感じており ( $p < 0.05$ )、VTが40秒以外の条件では感覚基準値よりもテスト刺激を有意に弱く感じていた ( $p < 0.01$ )。また、BTが30秒の条件においてはVTが80秒 ( $p < 0.05$ )、150秒 ( $p < 0.05$ )で、BTが50秒の条件においてはVTが20秒 ( $p < 0.05$ )、80秒 ( $p < 0.05$ )、150秒 ( $p < 0.01$ )で同様に感覚基準値と有意な差があった。VTが40秒の条件においては、BTが10秒と30秒の間 ( $p < 0.05$ )と、10秒と50秒の間 ( $p < 0.01$ )の比較において、どちらもBTが10秒の条件の方がテスト刺激を有意に弱く感じていた。つまり、テスト刺激「中」と同様に、BTが10秒から30秒の間で痺れが収まっていたことが明らかになった。

## 6 議論

実験結果を踏まえて、痺れ生成振動提示後の痺れ残効について考察する。また、図8や図9の結果から、どちらもテスト刺激が小さいほど感覚基準値との差が大きく、痺れが発生した際にはテスト刺激が小さいほど痺れ残効の影響が大きいことがわかる。よって、痺れの影響を検証するためには、テスト刺激が「中」と「小」のグラフの結果から傾向が理解できると考えられる。そのため本章では、テスト刺激「中」とテスト刺激「小」の結果を中心に考察を行う。

### 6.1 痺れ生成振動の提示時間 (VT) での痺れの強さについての考察

宮岡らの研究 [22] では、振動提示時間が長いほど痺れが強く発生していると示しており、本実験でもVTが大きいほど、つまり痺れ生成振動の提示時間が長いほど、テスト刺激の振動を感覚基準値よりも弱く感じると考えられる。しかし、テスト刺激が「中」「小」の

強さの条件で、痺れ生成振動提示からテスト刺激までの時間が10秒の場合、痺れ生成振動の提示時間が80秒までは振動を弱く感じているが、150秒で再び振動を強く感じていることが明らかになった。この理由として、感覚受容器とその周辺の神経細胞の可逆性が関与していると考えられる。一時的に感度が低下した神経系が、振動を提示した後に再び適応する過程において、痺れ生成振動の提示時間が80秒の場合と比べて150秒の場合に感覚が増強されたと考えられる。さらに、本実験では基準刺激を記憶するよう指示し、実験参加者には痺れを考慮せずに実際に感じた振動強度の比率を回答してもらったが、実際には痺れ感覚とテスト刺激の振動強度を統合して1つの感覚として評価している可能性があると考えられる。そのため、痺れ生成振動提示時間が150秒の場合、痺れの感覚が強まることでテスト刺激の強度が過小評価されている可能性がある。

全体的な傾向としては、宮岡らの研究の通り、痺れ生成振動の提示時間が長くなるほど痺れが強くなっていることがわかる。しかし、振動提示20~150秒間にかけて対数的に振動強度の感じ方が増加する傾向はなかった。本実験は、痺れ生成振動の提示から最短でも10秒後にテスト刺激を与えており、痺れ生成振動の提示から0.5秒後にテスト刺激を与えている宮岡らの研究に比べて、痺れの効果が弱い状態であったと考えられる。本実験では、痺れが収まっていく推移を長い時間の範囲で確かめるために、痺れ生成振動を提示してから最も早い時点で10秒後に設定し、そこから20秒の間隔で痺れ生成振動の提示後の時間を設定したが、今後は痺れ生成振動の提示から10秒後までの短時間の痺れについてを調査する必要がある。

また、宮岡らの研究では150秒間の振動提示を行った際に、20 dBに近いテスト刺激でも痺れによって感知されなかった結果を示していたが、本実験では、最も痺れが生じている条件においても、20 dBのテスト刺激に対して痺れの影響は確認できなかった。

痺れ生成振動提示からテスト刺激までの時間が10秒の条件においての、痺れ生成振動の提示時間が20秒と40秒の比較など、同じ条件ではテスト刺激の大きさによる有意な差はなかった。この原因として、実験参加者16名のうち各条件で2~4名が、痺れ生成振動の提示時間が長いほどテスト刺激を弱く感じるという一般的な傾向と反対の回答をしていたことが挙げられる。各条件でこのような回答をした実験参加者は異なっているため、実験での試行の順番や実験参加者の疲労などが原因であると推測できる。

他にも、グラフの傾向から最も痺れが強くと感じていると考えられる、痺れ生成振動の提示から10秒後にテ

スト刺激を提示した条件に着目する。テスト刺激「小」の場合では、痺れ生成振動の提示時間が20～40秒にかけての傾きが大きい。このことから、痺れ生成振動を20～40秒間提示することで、テスト刺激「小」の感じ方に変化が起こる程度に痺れが強くなっていると推測できる。テスト刺激「中」の場合では、痺れ生成振動の提示時間が40～80秒でグラフの傾きが大きくなっている。痺れ生成振動の提示時間による有意な差はなかったが、痺れ生成振動を40～80秒間提示する間で痺れが発生していると考えられる。

これらの結果から、20～40秒間の痺れ生成振動の提示での痺れが発生しているが、この段階では弱く、0 dB程度の振動刺激に対してのみに影響を与えると考えられる。また、40～80秒間のより長い時間の痺れ生成振動を提示することで、痺れは10 dB程度のより大きい振動刺激に対して影響を与えることが明らかになった。

### 6.2 痺れ生成振動提示後の経過時間 (BT) での痺れの推移についての考察

痺れ生成振動提示後の経過時間での痺れの推移について、グラフから考えられることを述べる。痺れ生成振動提示後の経過時間の条件で行った多重比較では、痺れ生成振動の提示時間が同じ条件での比較において有意にテスト刺激を弱く感じた結果があった。テスト刺激「中」での痺れ生成振動提示後の経過時間のグラフでは、痺れ生成振動の提示時間が80秒の条件において、痺れ生成振動提示後の経過時間が10秒の方が50秒よりも有意にテスト刺激を弱く感じていた。また、テスト刺激「小」での痺れ生成振動提示後の経過時間のグラフでは、痺れ生成振動の提示時間が40秒の条件で、痺れ生成振動提示後の経過時間が10秒と30秒、10秒と50秒の比較においてどちらも10秒の方がテスト刺激を有意に弱く感じていた。しかし、すべてのテスト刺激の条件では、30秒と50秒の間の比較において有意な差はなかった。感覚基準値との比較において、痺れ生成振動提示後の経過時間が10～30秒の間で有意差の有無が変化していることが多く、テスト刺激「大」での結果を除いて、痺れ生成振動提示後の経過時間が30秒のデータに比べて10秒のデータの方が感覚基準値との比較での有意な差があった条件が多かった。グラフの傾きから、テスト刺激「小」の痺れ生成振動提示時間が150秒以外のテスト刺激「中」と「小」の条件において、生成振動提示後の経過時間が10～30秒の傾きは30～50秒の傾きに比べて大きかった。これらの理由として、振動提示によって感覚受容器が活性化し、周囲の神経細胞が興奮状態になり、振動提示後に興奮状態から平常状態に戻る過程において、痺れ生成振動提示後の経過時間が10～30秒の間で痺れ

の感覚が急速に収まったと考えられる。

また、テスト刺激が「小」の痺れ生成振動提示後の経過時間が30～50秒の傾きを比較すると、痺れ生成振動の提示時間が80秒のグラフの方が40秒の条件よりも傾きが小さいため ( $0.0012 < 0.0096$ )、痺れ生成振動の提示時間が長ければ痺れが収まるまでに時間がかかると考えられる。この理由として、痺れ生成振動の提示時間が長いほど、感覚受容器と周囲の神経状態が興奮状態となり、平常状態に回復するまでに時間を要すると考えられる。

以上の結果から、痺れ生成振動の提示時間が長いほど、痺れの持続時間も伸びるが、痺れ生成振動提示後10～30秒後の間で収束することがわかる。

### 6.3 異なるテスト刺激の大きさでの実験結果で生じた差についての考察

本節では結果を総合して考察する。図8と図9から、テスト刺激「中」の結果がテスト刺激「小」の感覚基準値を下回るといったように、1つ小さいテスト刺激の感覚基準値を下回る結果はなかった。この結果から、痺れが発生してテスト刺激の振動に対する感覚が鈍っている場合でも、もとの振動より10 dB以上強さの異なるテスト刺激を与えると、もとの振動と強さが異なると判別できることがわかる。しかし、80秒間の痺れ生成振動の提示で「中」のテスト刺激を10秒後に提示した条件では、「中」の感覚基準値と「小」の感覚基準値の中間付近まで評価値が下がっているため、「中」のテスト刺激の強さである10 dBを、痺れが発生している際は3～5 dB程度に感じていると考えられる。また、テスト刺激ごとのグラフの結果から、テスト刺激「大」でのグラフでは感覚基準値との差が明らかに小さい。さらに、テスト刺激「中」や「小」でのグラフであった増加傾向、減少傾向がテスト刺激「大」ではないことから、本実験の条件で発生した痺れでは、20 dBのテスト刺激の振動は通常の状態と変わらず感じ取ることができたと考えられる。また、宮岡らの実験結果では、振動提示直後(0.5秒後)においても、提示した振動と同じ強さの刺激は感知したことを示している。これらの結果から、痺れ生成振動の提示時間を延ばした場合であっても、提示した痺れ生成振動強度以上の刺激は感知できると考えられる。しかし、これらは提示する痺れ生成振動強度を20 dBに限定しているため、異なる振動強度での調査が必要である。

以上より、痺れが発生すると10 dBの振動刺激を5 dB以上弱く感じることもあるが、本実験で発生させた痺れでは、痺れが強く発生しても20 dB以上の振動刺激に影響を与えないことが明らかになった。この結果から、痺れが発生する場合でも、感覚受容器には一

定の振動の強度差を認識できるメカニズムが存在する可能性があると考えられる。

#### 6.4 今後の課題

本実験では、痺れが発生する強さや痺れが収まるまでの推移を調査するために、テスト刺激として振動を提示し、痺れ発生時の振動覚への影響を調査した。実験における今後の課題として、前節にて本実験では20 dB以上での振動刺激に対して影響が出ていないことを述べたが、より痺れの生じやすい部位に振動を提示することや、より強い痺れ生成振動を提示することで、影響が出る可能性がある。本実験では、先行研究をもとに振動の周波数を10 Hzに限定したが、今後は振動の周波数を複数の条件を設けて比較することで、得られた知見を工学的な応用につなげる。

また、一つの試行から次の試行まで痺れ残効が収まるまで待機した際に、複数の実験参加者が振動提示部位である利き手の母指球をもう片側の手で撫でるように触っており、母指球の感覚が変化していると報告した。さらに、複数の実験参加者が「麻酔のような感覚である」と述べた。このことから、痺れ発生時に、痺れが発生した箇所の振動覚以外の摩擦や圧力、温度に対する感覚が変化する可能性もあり、調査が必要である。感覚への影響を調べる場合には、痺れを発生させるために付けた振動子を刺激を与えないように取り外し、調べる感覚に対して適切な実験を行う必要がある。本実験では、振動子を両面テープで張り付けることで振動を提示しており、振動覚以外の感覚を確かめるためには、痺れが発生している箇所に貼ってある両面テープをはがす必要がある。その際に生じる刺激が痺れに影響を及ぼす可能性を考慮し、振動子の固定方法を変えるなどして実験を行うことで、効果的な結果が得られると考えられる。

本実験では基準刺激の提示後、テスト刺激までの時間は実験条件によって差がある。基準刺激からテスト刺激までの時間が最も短い試行では、基準刺激から痺れ生成振動提示まで5秒間、痺れ生成振動提示20秒間、その後テスト刺激まで10秒間、合計35秒間の条件で実験を行っている。それに対して、基準刺激からテスト刺激まで最も長い試行では合計205秒間かかっており、最大170秒間の差が生じている。痺れ生成振動提示80秒間の場合、一試行全体で最も時間がかかる条件は135秒間(5秒+80秒+50秒)であり、150秒間の痺れ生成振動提示では最小でも175秒間(5秒+150秒+20秒)、最大で205秒間(5秒+150秒+50秒)かかる。この条件間での所要時間の差によって回答値に差が生じたと考えられる。実際に、複数の実験参加者が150秒間の痺れ生成振動提示の試行を行った際に「基準刺激の強さを覚えているかわからない」と述べて

いた。こうした理由から、痺れ生成振動提示が長くなるほど、回答の信憑性が低下することが推測される。感覚記憶に保存された情報は、数百ミリ秒から数秒保存されることが分かっており[27,28]、Hojatmadaniらの研究では、時間経過が熱刺激の識別に与える影響を明らかにしている[29]。そのため、今後は痺れ生成振動を提示せずに間隔を空けた条件においてテスト刺激の振動強度を回答してもらい、時間経過が振動強度の識別に与える影響を調査する。そして、本実験の結果と比較することで痺れ生成振動提示時間と痺れの強さの関係が明らかにする。他にも、今後は痺れ生成振動提示後に別の部位にテスト刺激を提示することで、回答の信憑性を担保する。

#### 6.5 応用

振動覚に痺れが発生することを活用する例として、ゲームコントローラがある。一般的なゲームコントローラでは母子球の部分でコントローラを把持するような形状が多いことから、本論文の知見が有効に活かされると考えられる。ユーザに迫力のある演出をする際には、コントローラが長時間振動しており、ユーザの手に痺れが発生している可能性がある。よって、痺れを考慮したうえで振動強度を調整し提示することで、想定した迫力をユーザに正確に伝えることができる。他にも、振動提示によって痺れを発生させることで、他の感覚提示を感じなくさせる新しいクロスモーダル知覚現象の創出が期待できる。

前節で述べたように、振動覚以外にも影響があることが確認できれば、痺れ残効を多様な応用に活用できる可能性がある。実験参加者が報告していた麻酔の感覚が痺れの効果にあるとすれば、麻酔注射などを用いない簡易的な麻酔が可能となる。特に、注射の苦手な子供や麻酔薬に対するアレルギーのある患者に対して、振動提示を行うだけで麻酔効果を簡単に与えることが可能になり、予防注射等の短い時間で完了する痛みを伴った処置に対して、麻酔を行う効果的な手段となる。

また、摩擦覚に影響があるとすれば、痺れによる物質の滑らかさの提示や、痺れが発生している部位に同時に温度変化を加えることで、濡れた感覚の提示が可能になることが期待できる。振動刺激によって物質の粗さが表現できることを踏まえると、痺れ残効は振動機能によって物質の質感をより幅広く表現するための重要な要素になる可能性がある。そのほかにも、触覚の変化が振動覚以外に存在することが確認できれば、痺れ残効の活用方法は様々な分野に広がる可能性がある。

本実験では、母指球を対象に振動提示による痺れの推移を調査したが、今後は指先や腕のような触覚提示

に頻繁に用いられる部位を対象に実験を実施し、本実験の知見をより広範囲な応用に役立てる予定である。

## 7 結論

本研究では、一定時間振動を提示した後に痺れが続く痺れ残効に着目し、痺れの生じやすい条件を調査した。痺れ残効は、振動を感知する受容器であるパチニ小体やマイスナー小体が多く分布する手掌の母指球に10 Hzの振動を提示すると生じやすく、振動を提示した箇所の筋肉の状態や姿勢なども重要である。また、実験では周波数や振動強度を正確に計測しなければならないため、実験に使う振動子であるボイスコイルモータの動作をレーザ変位計で確かめた。これらを踏まえ、痺れが発生しやすい条件下でその強さや推移について実験を行った。実験の結果から、40～80秒間の痺れ生成振動提示によって十分な痺れが発生し、痺れ生成振動提示後10～30秒の間に徐々に収束することが確認された。また、痺れが発生している状態では、10秒経過後において10 dB以下の振動刺激に対しては痺れ残効により感覚が鈍化するが、20 dB以上の振動刺激に対しては正常に振動覚が機能することが確認された。しかし、本実験の方法では、長時間の痺れ生成振動提示によって基準刺激の記憶が曖昧になり、結果の信憑性が低下する可能性があるため、手法の改善が必要である。

実験の結果から、振動覚に対する痺れの影響が確認できたが、現段階では振動覚以外の感覚に生じる変化については詳細に調査できておらず、その活用方法は限定的である。しかし、実験参加者から報告された麻酔に似た感覚や摩擦感覚の変化などの効果が多くの人に確認できれば、応用の幅がさらに広がる可能性がある。今後は、振動覚以外の触覚への影響を検討し、実験で得られた痺れ生成振動の提示時間および痺れ残効の持続時間を考慮した上で、応用可能な分野やインタラクシオンの可能性を追求する予定である。

## 参考文献

- [1] 河合道成, 大矢晃久: 測域センサとベルト形振動デバイスをを用いた歩行誘導システムの提案-屋内での目的地までの誘導, 第32回日本ロボット学会学術講演会, 3E2-01 (2014).
- [2] 哲也兼古, 渚棟方, 哲雄小野: PerMan: 頭部への刺激を用いた情報提示デバイスのエンタテインメントへの利用, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2015論文集, Vol. 2015, pp. 173-178 (2015).
- [3] 本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡徹, 大岡昌博: 振動刺激条件の相違が運動錯覚の誘発と知覚量に及ぼす影響 (<特集>ハプティックコンテンツ), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 457-466 (2014).
- [4] Lakshminarayanan, K., Lauer, A. W., Ramakrishnan, V., Webster, J. G. and Seo, N. J.: Application of vibration to wrist and hand skin affects fingertip tactile sensation, *Physiological reports*, Vol. 3, No. 7, p. e12465 (2015).
- [5] 森友揮, 田中孝之, 金子俊一: 1A2-D19振動を利用した情報提示装置における慣れが振動感覚に及ぼす影響, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2010, pp. 1A2-D19-1-1A2-D19-3 (2010).
- [6] Kwon, J., Park, S., Sakamoto, M. and Mito, K.: The Effects of Vibratory Frequency and Temporal Interval on Tactile Apparent Motion, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 3, pp. 675-679 (2021).
- [7] Vignemont, de F., Ehrsson, H. H. and Haggard, P.: Bodily illusions modulate tactile perception, *Current biology : CB*, Vol. 15, No. 14, p. 1286-1290 (2005).
- [8] 牛山奎悟, 田中叡, 哲史, 梶本裕之: 多点同時振動刺激による肩関節の運動錯覚, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 26, No. 2, pp. 143-154 (2021).
- [9] 三輪俊輔: 振動感覚特性とその計測 (<小特集>人体と振動), 日本音響学会誌, Vol. 46, No. 2, pp. 141-149 (1990).
- [10] 下条誠: 皮膚感覚の情報処理, 計測と制御, Vol. 41, No. 10, pp. 723-727 (2002).
- [11] 水野統太, 佐藤充晃, 木村瑞生, 久米祐一郎: 振動刺激により指に誘発される力覚様感覚の特性, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 595-601 (2010).
- [12] 神里巖, 城野靖朋, 粕淵賢志: 振動刺激による運動錯覚が固有感覚機能に及ぼす影響, 理学療法科学, Vol. 33, No. 3, pp. 385-388 (2018).
- [13] 大住倫弘, 西祐樹, 住谷昌彦, 森岡周: 感覚閾値以下のランダムノイズ振動刺激が触覚機能に及ぼす影響, 理学療法学 Supplement, Vol. 2016, p. 0530 (2017).
- [14] Gregory, R.: Knowledge in perception and illusion, *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Vol. 352, No. 1358, p. 1121-1127 (1997).
- [15] Finke, R. A. and Schmidt, M. J.: Orientation-specific color aftereffects following imagination., *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 3, No. 4, p. 599 (1977).
- [16] 有富美代子: 色残像に関する一考察 (2010).
- [17] 蘆田宏: 2種類の運動残効と運動視機構, 心理学評論, Vol. 37, No. 2, pp. 141-163 (1994).
- [18] 天野薫, 栗木一郎, 遠藤博史, 大脇崇史, 武田常広: 運動残効における脳内過程の脳磁場解析, 医用電子と生体工学, Vol. 39, No. 3, pp. 213-224 (2001).
- [19] Hollins, M. and Favorov, O.: The tactile movement aftereffect, *Somatosens Mot Res*, Vol. 11, No. 2, pp. 153-162 (1994).
- [20] Lerner, E. A. and Craig, J. C.: The prevalence of tactile motion aftereffects, *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 19, No. 1, pp. 24-29 (2002).
- [21] 林政一郎, 渡邊淳司, 梶本裕之, 館暉: 触覚における運動残効現象の研究 (「触・力覚情報の処理と呈示」特集), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 69-75 (2006).
- [22] 宮岡徹: 手指および手掌における振動感覚順応, *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 63-69 (1986).
- [23] Vogels, I. M., Kappers, A. M. and Koenderink, J. J.: Haptic aftereffect of curved surfaces, *Perception*, Vol. 25, No. 1, pp. 109-119 (1996).
- [24] Horst, Van der B. J., Duijndam, M. J., Ketels, M. F., Wilbers, M. T., Zwijssen, S. A. and

- Kappers, A. M.: Intramanual and intermanual transfer of the curvature aftereffect, *Experimental Brain Research*, Vol. 187, pp. 491-496 (2008).
- [25] 渡邊瑞生, 水野統太, 板倉直明, 水戸和幸: 触知覚における運動残効と刺激周波数の関係, *人間工学*, Vol. 58, No. Supplement, pp. 2D4-01-2D4-01 (2022).
- [26] 北島洋樹: 運動残効が視覚-運動協応に与える影響について, *労働科学 = The journal of science of labour*, Vol. 71, No. 7, pp. p270-278 (1995).
- [27] Sperling, G.: The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74, 1-29, *Psychological Monographs: General and Applied*, Vol. 74, (1960).
- [28] Golob, E., Pratt, H. and Starr, A.: Aging: Brain Potential Measures and Reaction Time Studies, in Squire, L. R. ed., *Encyclopedia of Neuroscience*, pp. 197-201, Academic Press, Oxford (2009).
- [29] Hojatmadani, M., Rigsby, B. and Reed, K. B.: Time Delay Affects Thermal Discrimination, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, No. 2, pp. 451-457 (2022).

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22K18424 の助成を受けた。

(2024年5月28日受付)

### [著者紹介]

上堀 まい (学生会員)



2024年青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻知能情報コース修士課程修了。同年より同大学院博士後期課程に在籍。日本学術振興会特別研究員(DC1)。ヒューマンインタフェースの研究に従事。修士(工学)。

秋谷 溪太郎



2024年青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科卒業。同年より株式会社コーエーテクモゲームスに入社。学士(工学)。

伊藤 弘大



2015年芝浦工業大学大学院理工学研究科電気電子情報工学専攻修士課程修了。エヌ・ティ・ティ・ソフトウェア勤務を経て、2018年同大学院理工学研究科機能制御システム専攻博士(後期)修了。2018年4月から2021年3月まで産業技術総合研究所人工知能研究センターで産総研特別研究員として従事。2021年4月から2024年3月まで青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科助教として従事し、2024年4月よりトヨタ自動車株式会社未来創生センターに勤務。青山学院大学理工学部客員研究員、放送大学東京文京学習センター非常勤講師を兼務。博士(工学)。

梶本 裕之 (正会員)



1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業。2001年4月日本学術振興会特別研究員(DC1)。2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学、博士(情報理工学)。2003年4月東京大学助手。2006年9月電気通信大学助教授。2007年4月同准教授。2018年4月同教授。触覚ディスプレイ、触覚センサ、バーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会各会員。

伊藤 雄一 (正会員)



2000年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学大学院博士後期課程入学。2002年同大学院情報科学研究科助手。2008年大阪大学クリエイティブユニット准教授。2021年より青山学院大学理工学部教授。博士(情報科学)。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。