

# 指を鉋に見立てる触覚提示デバイスによる提示刺激の検討

近藤芳信<sup>†1</sup> 柳田康幸<sup>†1</sup>

じゃんけんのチョキの手には鉋のイメージが広く定着している。そのイメージを実現するために指でものを切断する体験を提供するインタラクティブコンテンツを開発した。またそれに伴い、指による切断などの感覚を与えるための触覚提示装置を開発している。提示刺激は主にブレーキによる指の動作停止と指に与えられる振動である。提示可能な物質について明確にするために、これらの刺激によって得られる感覚について評価を行った。

## 1. はじめに

じゃんけんの手にはそれぞれモチーフがあり、中でもチョキの手の形には鉋のイメージがついている。しかし、現実には指を鉋などの刃物にすることは不可能である。

このような実空間上では不可能な事象を体験可能にする技術として、バーチャルリアリティ（以下：VR）が挙げられる。著者らは VR を用いて「チョキの手が鉋になる」イメージを実現するために、チョキの手、すなわち中指と人差し指を鉋の刃に見立て、指による切断感覚を提供するインタラクティブコンテンツを提案し、開発を行っている。このコンテンツの成立により、現実には用いられる手で持つ鉋とは異なる指全体での切断を行い、指が刃物になっている非現実的な体験を提供できることが期待される。

ここで指を鉋に見立てるにあたり、通常の手で持つ鉋を使用する際の感覚との違いを考える。違いの一つとして、振動の伝わる位置や伝わり方が挙げられる。手で持つ鉋は切断の際に力点である持ち手に振動が伝わるが、指を鉋とすると通常の手で持つ鉋における作用点である刃の振動が直接指に伝わると考える。また、手で持つハサミを使用する際には切断物に触れるのは刃の部分であるが、この見立ての考え方では中指・人差し指が鉋の刃となるため、指を閉じる際に切断物質が指に直接触れている必要がある。

上記の感覚を提示するために、指に装着する専用の触覚提示デバイス（以下：チョキデバイス）の開発を行っている。この装置によって2本の指全体に刺激を与え、切断時の刃全体の振動を強調し、かつ接触を再現することで、指で切断する感覚を表現することを本研究の目的としている。本稿ではチョキデバイスによって提示される刺激と与える感覚について評価を行った。

## 2. コンテンツ概要

体験の世界観はじゃんけんを模しており、切断対象を紙、岩としている。切断の可否もじゃんけんにおける相性を参照している。コンテンツは4つのフェーズで進行し、それぞれのフェーズで使用者に別々の体験を与える。紙・岩切断時にはチョキデバイスから振動などが与えられる。振動

については後述する。

第1フェーズではパーをモチーフとした紙の敵を切断する。ユーザーはこの敵を簡単に切断でき、切断の感覚を体感しやすいフェーズとなる。第2フェーズではグーをモチーフとした岩の敵が出現する。この敵は初期状態では切断できない。挟むと指を閉じることはできずにはじかれる。第3フェーズではこの敵を切断するために指を研ぐこととなる。このフェーズでは砥石装置を用いて指を研ぐ。砥石装置は使用者に指を解く感覚を提示するための振動提示装置であり、チョキデバイスとは別で制作している。この研ぐ過程を通じて第4フェーズに移行する。ユーザーは岩の敵を切断可能となり、撃破によって体験は終了となる。総じて、指が刃物となることを強調させる仕組みに富んでおり、最終的には現実では切断不可能なものまで切断できるようになる体験となっている。本稿では主にフェーズ1とフェーズ2を想定した実験を行っている。

表1 コンテンツの体験内容

	内容	感覚
1	紙を切断	ハサミによる切断
2	岩(切断不可)との衝突	硬いものにはじかれる感覚
3	砥石によって指を研ぐ	指を研ぐ感覚
4	岩が切断可能となる	現実で切断不可な物質の切断

## 3. デバイス概要

### 3.1 チョキデバイス

チョキデバイスは電磁クラッチ（以下ブレーキ）、ポテンシオメータ、4つの振動子（アルプスアルパイン社製ハプティックリアクタ）で構成されている（図1）。

中指・人差し指を開閉するにあたり、軸となる手の甲の部分にポテンシオメータを配置している。指の開閉に合わせてポテンシオメータの軸部分が回転し、角度の計測を行う。角度の値は Arduino を通して送信され、VR上の指の開閉を判定している。また、ブレーキはポテンシオメータの軸上に配置されている。通常時は通電しておらず、指の開

<sup>†1</sup> 名城大学  
Meijo University

閉動作を妨げない。通電することで軸が固定され、開閉動作を停止させることができる。

振動子は中指・人差し指の根元・先端にそれぞれ一つずつ、計4つを指に取り付け、振動刺激を提示する。振動については後述する。

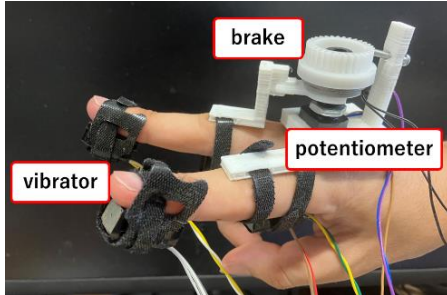


図1 チョキデバイス装着図

### 3.2 振動子による提示方法

指への振動刺激方法として2点を同時に刺激するとその中心に刺激を知覚する「ファントムセンセーション(以下: PhS)」を採用している[1]. PhSには強度差によって刺激位置が変化するという特性があり[2], 指先における接線力の連続的な変化を提示できる可能性がある[3]. 指を閉じる角度に応じて指の根元から先端にかけて強度を変化させながら振動させることで、紙を切断する際の接触位置(切断点)の移動を再現する狙いである(図2).

岩の接触時にはブレーキ駆動に合わせて指の根本・先端を同時に振動させることで、PhSの刺激像による対象との接触を再現する。振動の強度を変えることで接触位置の調整も可能と考える。特に振動子をつけていない指の中間部に接触感を与える効果が最も期待される。加えて、振動によって岩に触れた際の衝撃や指が金属になっている感覚も目指している。

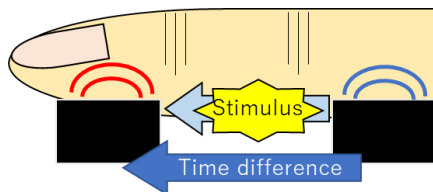


図2 触覚提示のイメージ図

### 3.3 振動提示の方法

振動はPCから出力される波形をアンプを通じて振動子に入力している。アンプはLS-01J (FX-Audio-製)とTECHTILE toolkit[4]を2台用いている。LS-01Jは2chの入力ができ、それぞれの入力を4つまで出力することが可能なアンプである。また、TECHTILE toolkitは音声入力を増幅して出力し、振動子に伝えることができるツールである。

接続は以下の図3のようにしている。初めにPCからLR

の2ch出力を行い、それぞれをLS-01Jに入力する。LとRの入力それぞれを2つずつ出力し、2台のTECHTILE toolkitに入力を行う。それぞれのTECHTILE toolkitから振動子2つずつに出力を行い、指の先端と根本に割り当てている。これによって、根本と先端で異なる振動を出力することが可能となる。

実験においてはUnityのAudio SourceをL用とR用の2種類を用意して、PCからの出力を行う。Audio Sourceのクリップやステータスを変化させることで、振動を変化させている。また、それぞれのAudio Sourceの音量調節ステータスであるVolumeの値(以下: Volume)を変化させることで根本と先端の振動の強度を操作できる。また、Audio Sourceのクリップによって任意の波形を指定することができる。本実験では周波数を変化させるために用いた。

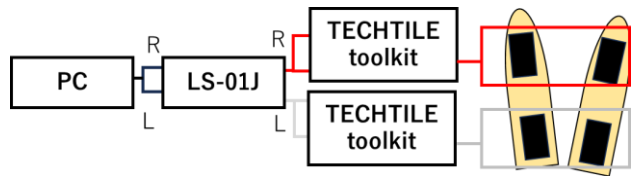


図3 振動子の接続

## 4. 実験

### 4.1 目的

本実験ではチョキデバイスによる振動の変化による切断・接触している物質の変化に着目している。具体的には、紙を切断する状況における切りやすさと、岩のような硬い物質にはじかれる際の接触物体の硬度の変化に重点を置いている。

### 4.2 実験の流れ

参加者にはチョキデバイスを装着し、開閉動作に伴う刺激提示について各実験で評価を行う。振動子からの振動の音による聴覚からの情報を排除するために参加者にはピンクノイズを流したヘッドフォンを装着させた。Unityプログラムを起動したのち、初めに指の校正を行う。ソフト上の指は最大30度まで開くよう設定されており、実験開始時に実際の指の開閉に合わせて校正を行う。その後、チョキデバイスの開閉動作の確認と注意事項の説明を行い、各実験を行った。

参加者は5名の男性と2名の女性、合計7名が実験に参加し、全員20代前半の成人であった。

### 4.3 実験1: 紙切断時の切りやすさの評価

実験1では紙を切断する状況を想定しており、振動の変化によって閉じる際の切りやすさの変化について評価するものである。参加者には基準となる振動刺激を最初に提示

した後、各試行に対して「基準刺激と比べて切りにくかったか・抵抗感を感じたか」を比較し、4を基準とした7段階評価（1：切りにくい～7：切りにくい）による回答を口頭にて行わせた。

振動刺激の変化条件は振動強度と周波数の2種類である。最大強度は Volume の最大値を変化させることによって操作している。Volume の最大値は 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 の5種類としている。また、周波数は 160 Hz, 200 Hz, 240 Hz, 280 Hz, 320 Hz の5種類としている。波形はデューティ比 0.5 のパルス波で統一している。基準となる振動は Volume 値 0.3, 周波数 240 Hz としており、参加者は比較のためにいつでも基準の刺激を確認することができる。参加者には基準の刺激から最大強度か周波数のいずれかを先述の中から変化させたものであり、刺激の種類は基準を含む9種類となる。この9種類の刺激提示及び評価を各参加者で3回ずつ行っている。

また、すべての刺激において指を閉じた角度に応じて根本と先端の振動強度が変化するものとなっており、ソフト上の指の閉じる角度に比例して根本の Volume が減少、先端の Volume が増加する。

各種類の振動について加速度センサー(ATR-Promotion 製 WAA-006)に固定して、Volume 値を変化させることなく1秒ずつ加速度の変位を確認した。振動強度の各条件におけるx軸方向の加速度の変位は Volume 値の低い順にそれぞれおよそ-230~240 mG, -430~440 mG, -620~630 mG, -780~840 mG, -970~1050 mGであった。これらはすべて240 Hz のパルス波である。

また、図5に各周波数の振動の加速度の変位について計測したものを示す。なお、図5におけるz軸のグラフについてはおよそ-1Gが無振動時の基準となっている。また、元となる波形の振幅はすべて同じであり、Volume は0.3で統一されている。ハプティックリアクタの特性上、与える波形の振幅が同じでも周波数によって計測された加速度の変位が異なる。特に図5の(a)と(e)はハプティックリアクタの共振周波数(160 Hz, 320 Hz)における振動を示す。また、図5の(b)に示される200 Hz パルス波における振動は加速度の変位が特に大きい。

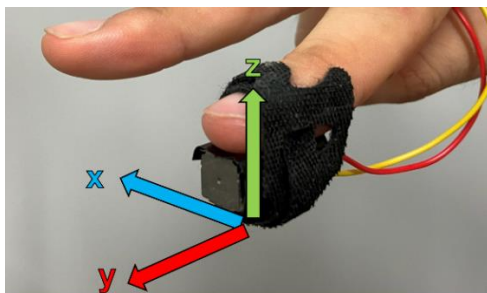


図4 振動子装着例及び軸方向

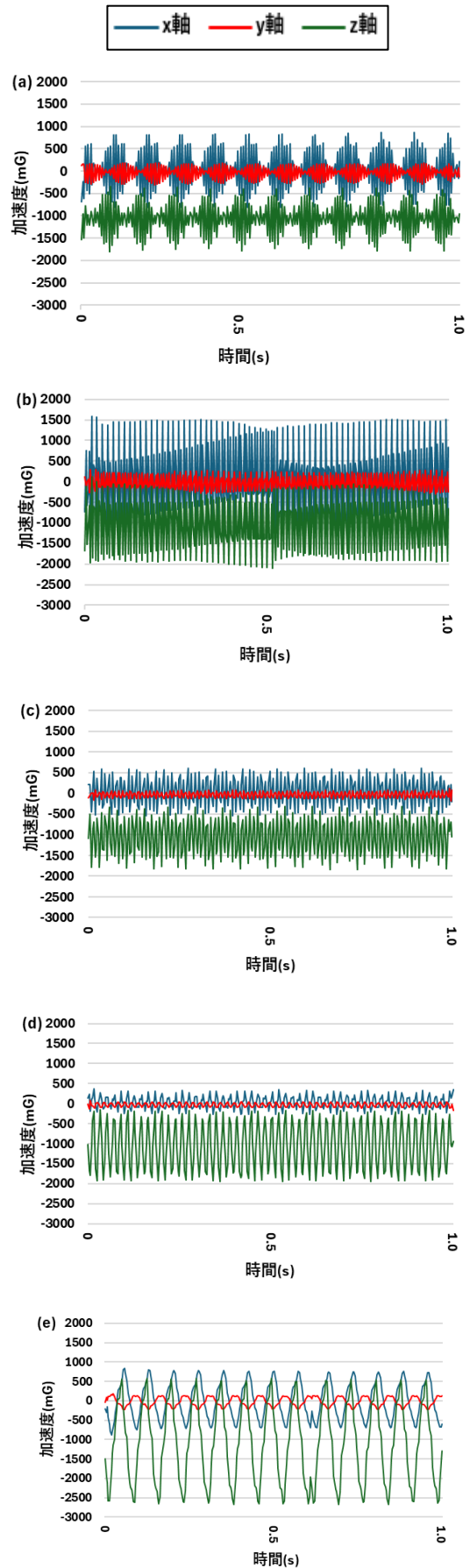


図5 周波数ごとの振動

(a)160Hz (b)200Hz (c)240Hz (d)280Hz (e)300Hz

#### 4.4 実験2：岩接触時の硬度の評価

実験1では岩を挟み込む状況を想定しており、振動の変化によって接触する物体の硬度的変化について評価するものである。参加者には基準となる振動刺激を最初に提示した後、各試行に対して「基準刺激と比べて硬かったか」を比較し、4を基準とした7段階評価（1：柔らかい～7：硬い）による回答を口頭にて行わせた。

指を一定角度まで閉じることでブレーキが1.5秒かかり、ブレーキがかかった瞬間に振動刺激が提示される。また、振動刺激はVolumeの操作により一定の時間をかけて減衰する。減衰にかかる時間は後述する持続時間に対応している。これは実験2の刺激すべてに共通する項目である。

振動刺激の変化条件は振動強度、周波数、持続時間の3種類である。最大強度と周波数の内訳と操作については実験1と同様のものである。持続時間は0.1s、0.3s、0.5s、0.7s、1.0sの5種類としており、最大Volume値からこれらの時間をかけて減衰するものとなっている。基準となる振動はVolume値0.3、周波数240Hz、持続時間0.5sとしており、参加者は比較のためにいつでも基準の刺激を確認することができる。参加者には基準の刺激から最大強度、周波数、持続時間のいずれかを先述の中から変化させたものであり、刺激の種類は基準を含む13種類となる。この13種類の刺激提示及び評価を各参加者で3回ずつ行っている。

#### 4.5 追加設問

実験1と実験2の共通の条件に周波数があり、図5より周波数ごとに加速度の変位が異なることがうかがえる。そのため、参加者には実験2の後に図5に示したものと同様の振動刺激をあたえ、振動を強く感じた順位をつける追加の設問をとった。

### 5. 結果と考察

#### 5.1 実験1

##### 5.1.1 結果

図6には振動強度を変化させた刺激における切りにくさの評価をまとめた箱ひげ図を、図7には周波数を変化させた刺激における切りにくさの評価をまとめた箱ひげ図をそれぞれ示す。図6のvolume最大値0.3と図7の周波数240Hzは同じ刺激であるため、箱ひげも同じものとなっている。

これらの評価値に対してデータが関分布に従うかどうかを確認するためにShapiro-Wilk検定を行った。その結果、すべての条件において正規性が確認されなかった。そのため、ノンパラメトリックの手法であるFriedman検定を行った。Friedman検定における帰無仮説は「振動強度の違いによって、あるいは周波数によって提示される切りにくさに差はない」である。振動強度と周波数においてそれぞれ行った結果、いずれも $p < 0.01$ であったため、帰無仮説は両

条件において否定され、「振動強度及び周波数の違いによって、提示される切りにくさに差が出る」ことが確認できた。またこの結果を受け、bonferroni補正法による連続性補正を用いたWilcoxon符号順位検定による一対比較を行った。その結果は図6と図7の上部に示されており、有意水準が0.005を下回った組み合わせは“\*\*”が、0.001を下回った組み合わせは“\*\*\*”がついている。

図6より、Volumeの最大値、すなわち振動強度が高くなるにつれて切りにくさの評価値が増加する傾向がみられ、9種類の組み合わせで有意差がみられた。また、図7より加速度の変位が大きかった200Hzが切りにくく感じる傾向があり、160Hz、280Hz、320Hzは基準である240Hzと比較すると切りやすいという評価を得ている。

ここで追加設問の結果について、強く感じた順位をまとめた箱ひげ図を図8に示す。図8より周波数ごとに強く感じた順に200Hz、240Hz、160Hz、280Hz、320Hzとなっていることがわかる。この順番は図7の切りにくさの評価平均値の順位とも合致している。

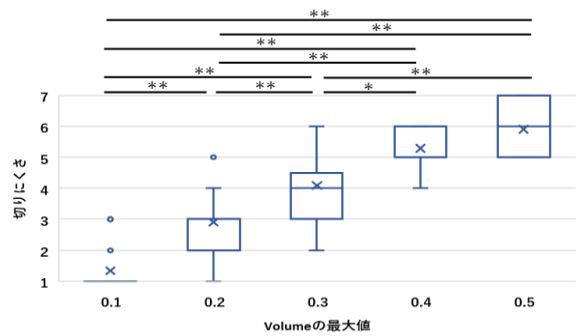


図6 振動強度ごとの切りにくさの評価値

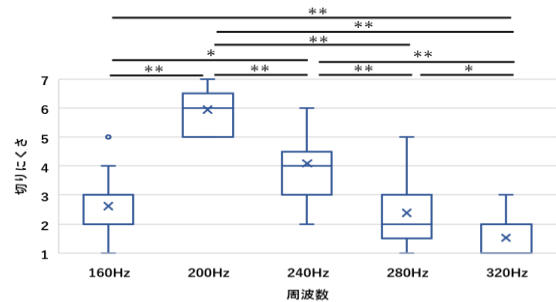


図7 周波数ごとの切りにくさの評価値

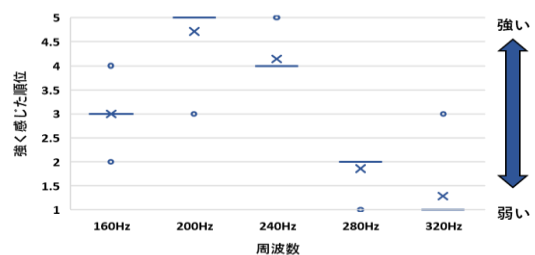


図8 参加者が感じた振動の強さ順位を表す箱ひげ図

### 5.1.2 考察

図 6 より、振動強度が上がるにつれて切りにくさ・抵抗感が有意に向上することが確認された。振動によって知覚される抵抗感として力覚様感覚というものがあり、低周波振動において 120 mG~670 mG の範囲内で 200 mG の増加ごとに知覚できる力の大きさが弁別可能であることが調べられている[6]。振動強度条件の Volume の最大値が 0.1 増えるごとに x 軸方向の最大加速度がおおよそ 200 mG 増加しており、図 6 の Volume 最大値 0.4~0.5 以外のすべての隣接する条件間で有意差が表れたことから、チョコデバイスによる指を閉じる動作に伴う 240 Hz の振動において、200 mG ほどの強度差で弁別が可能にまで切りにくさが変化することがわかった。

図 7 より最も切りにくさの評価が高かった周波数は 200 Hz であった。図 5(b)においても x 軸と z 軸の強度がほかの周波数と比較して強いことがわかり、図 8 における順位が最も高かったことから振動強度が支配的である可能性も存在する。反面、基準である 240 Hz の振動に対して 160 Hz, 280 Hz, 320 Hz の振動は有意に切りやすいことが確認されている。図 5 の(a)と(c)の x 軸加速度を確認すると(a)のほうが変位が大きいことが確認できる(それぞれの x 軸方向の加速度のおよその変位は(a) - 815 mG~865 mG と -535 mG~615 mG)。160 Hz のほうが 240 Hz に比べ 200 mG 以上強度が高いことがわかるが、切りやすいという評価となっている。また、280 Hz と 320 Hz については z 軸方向の強度が 240 Hz と比較して高くなっているが、切りやすさ評価値は有意に低くなっている。280 Hz は 240 Hz と比べ x 軸の強度が低いため、強さ知覚に影響しない可能性も考慮されるが、320 Hz においてはその限りではない。さらに 280 Hz と 320 Hz については x 軸 z 軸双方において 320 Hz のほうが強度の変位が大きかったが、切りやすさ評価は 320 Hz のほうが低かった。これらの観点から切りやすさ評価は振動強度のみに依存することはなく、知覚しやすい周波数帯ごとの知覚のしやすさも切りやすさ評価に影響を及ぼすと考えられる。原因としてはパチニ小体の特性が挙げられる。パチニ小体は皮膚の機械受容器の一種であり、250 Hz 程度の振動に対して最も感度が高い[6]。そのため、強度の大きかった 200 Hz を除き、ピーク値に近い 240 Hz が切りにくく感じられ、遠ざかるほど切りやすくなったと考えられる。また、これらの考察は図 8 の結果においても同様のことがいえると考えられる。

## 5.2 実験 2

### 5.2.1 結果

図 9 には振動強度を変化させた刺激における硬度の評価をまとめた箱ひげ図を、図 10 には周波数を変化させた刺激における硬度の評価をまとめた箱ひげ図を、図 11 には持続時間を変化させた刺激における硬度の評価をまとめた箱

ひげ図をそれぞれ示す。図 9 の volume 最大値 0.3, 図 10 の周波数 240 Hz, 図 11 の持続時間 0.5 s はすべて同じ刺激であるため、箱ひげも同じものとなっている。

これらの評価値に対してデータが関分布に従うかどうかを確認するために Shapiro-Wilk 検定を行った。その結果、すべての条件において正規性が確認されなかった。そのため、ノンパラメトリックの手法である Friedman 検定を行った。Friedman 検定における帰無仮説は「振動強度、周波数、あるいは持続時間によって提示される硬さに差はない」である。振動強度と周波数、持続時間においてそれぞれ行った結果、いずれも  $p < 0.01$  であったため、帰無仮説は 3 条件すべてにおいて否定され、「振動強度、周波数及び持続時間の違いによって、提示される硬度に差が出る」ことが確認できた。またこの結果を受け、bonferroni 補正法による連続性補正を用いた Wilcoxon 符号順位検定による一対比較を行った。その結果は図 9, 図 10, 図 11 の上部に示されており、有意水準が 0.005 を下回った組み合わせは“\*\*”が、0.001 を下回った組み合わせは“\*\*\*”がついている。

図 9 について、振動強度が強くなるにつれ知覚される硬度の評価は上がっており、実験 1 と同様の傾向がみられる。図 10 における周波数による硬さ知覚の変化についても実験 1 と同様に図 8 の順位づけに基づく傾向がみられるが、有意差のあらわれた組み合わせは減少していた。そして図 11 においては箱ひげ図より持続時間が長いほど硬いと知覚される傾向はみられるが、基準である 0.5s と比較して短くなると有意に硬さに差が出ているが、0.5s 以上の組み合わせ同士においては有意差が現れることはなかった。

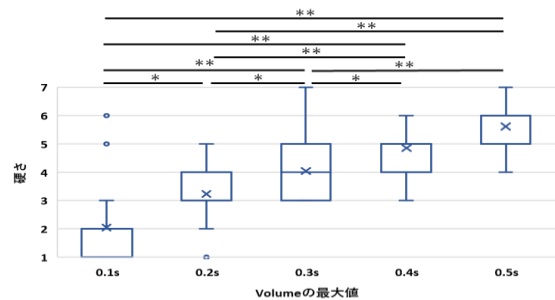


図 9 振動強度ごとの硬さ評価

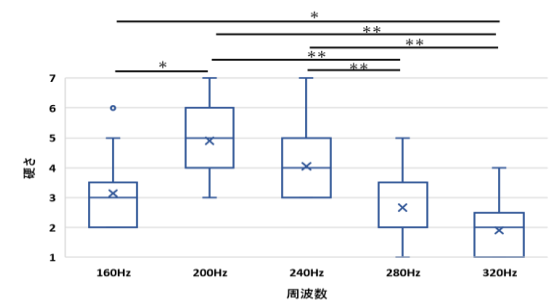


図 10 周波数ごとの硬さ評価

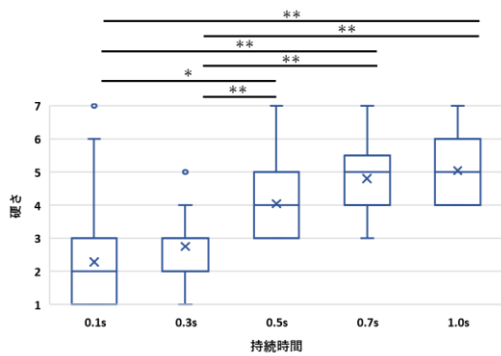


図 11 持続時間ごとの硬さ評価

### 5.2.2 考察

図 9 より振動強度が増加するにつれ硬さの知覚が増加することがわかり、弁別についても実験 1 と同様の傾向があるといえ、岩接触時の硬さ知覚においても振動強度が有効なパラメータであることを示している。仮想物体においては振幅が上がるにつれ硬さ知覚が上昇することが観測されており[7]、今回の結果と類似していると考えられる。

図 10 より周波数においても実験 1 と似た傾向となっており、振動を強く知覚しやすいと硬く感じられる傾向にあることが分かった。しかし本来、硬い物質をタップした際には剛性が高いほど固有減衰振動の周波数は増加するとされており[7]、今回の結果とは矛盾する。原因として考えられるのは図 8 による知覚される振動強度の方が周波数よりも硬さ知覚にもたらす影響が強い可能性である。周波数ごとに知覚される強度を統一したうえで実験を行った場合、高周波ほど硬く知覚される可能性も考えられるが、指に直接振動を与える影響上、敏感に反応する周波数の方が硬く知覚される可能性もあるといえる。

図 11 より減衰にかかる持続時間が長いほど硬く知覚される傾向があるが、条件ごとの有意差が現れにくくなっており、0.5 s より伸びても有意に硬く知覚されることはないことが確認される。反面、0.5 s よりも短いと硬さの評価が有意に減少することがわかる。実物体においては剛性が上がるほど減衰にかかる時間は短いとされており[7]、こちらにおいても今回の結果と矛盾する。原因として認識のしやすさと指を鉈に見立てる前提が考えられる。実験後に参加者から「長い方が金属の響きみたいなものを感じられて硬く感じた。」という意見があり、指が鉈となる体験を与えるという現実とは異なる表現をする足がかりになる可能性が示唆された。

## 6. まとめ

今回の実験では開発したチョキデバイスにおいて、開閉動作や停止した瞬間に提示される振動刺激を変化させることによる接触対象の変化について評価を行った。具体的

は紙を切断するときの抵抗感と岩と接触したときの硬さの印象について振動強度や周波数、持続時間を変化させることによる知覚の変化を評価した。結果として、双方とも振動の強度が高いほど切りにくく、あるいは硬く知覚されることが判明した。周波数においては振動子の特性上、振動強度の異なる点を確認され、追加設問で確認した知覚強度順位に基づくような結果がみられた。知覚しやすい周波数帯で振動を強く知覚する傾向がみられ、切りにくさや硬さ知覚にも影響を及ぼすことが確認された。硬さ知覚における持続時間も十分に長い方が硬く知覚されることが確認された。これは実際の剛性物体にタップしたときの傾向とは矛盾する結果であり、「指が金属になる」体験をユーザーに分かりやすく提供する可能性につながる。

今後は体験を完成させるとともに、今回の結果を基として表現可能な物体の幅を増やすことが目標となる。特に周波数や持続時間は切りにくさや硬さ以外の印象を変化させることができる可能性があると考えられ、模索の余地があるといえる。また、振動やブレーキのタイミングも重要であり、例えばブレーキを解放する瞬間に振動提示を行うことで硬めの物質を切断しきった時を表現できると考えられる。

### 参考文献

- 1) G. von Békésy: Neural Funnelling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 31, No.9, pp.1236-1249(1959).
- 2) G. A. Gescheider : Cutaneous Sound Localization, IEEE Trans . Man-Machne Syst., Vol. MMS-11, No.1, pp.28-35(1970).
- 3) 大丘達也, 藤田欣也: 振動ファントムセンセーションの位置制御による指先への接線力と滑りの代替提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.2, pp.263-272(2010).
- 4) 仲谷正史, 寛康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, 舘障: 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.4, pp.593-603(2014)
- 5) 水野純太, 桐ヶ谷大輔, 木村瑞生, 久米祐一郎: 指先への振動刺激によって誘発される力覚様感覚の大きさ, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol.139, No.5, pp.658-661(2019)
- 6) 岩村吉晃: タッチ<神経心理学コレクション>, 医学書院(2001).
- 7) Kosuke Higashi, Shogo Okamoto, and Yoji Yamada: Perceived Hardness through Actual and Virtual Damped Natural Vibrations, IEEE Transactions on Haptics, Vol.11, No. 4, pp.646-651(2018).