

Title	聴覚に基づく物体テクスチャ認識に関する研究
Sub Title	
Author	大越, 涼史(Okoshi, Atsushi) 稲見, 昌彦(Inami, Masahiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2009
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2009年度メディアデザイン学 第7号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002009-0007">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002009-0007</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2009 年度（平成 21 年度）

聴覚に基づくテキスト認識に関する研究

---

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

大越 涼史

## 概要

近年、バーチャルリアリティ分野において、触覚提示を目的とする触覚提示システムの開発は盛んに行われている。触覚提示手法として、装着型のデバイスを用いた直接触覚受容器を刺激することで触覚を提示する方法が多く提案されている。一方で、触覚を呈示する方法として、直接触覚受容器を刺激する以外の方法はないのだろうか。一般的に人間は物を認識する際に 2 つ以上の感覚機能を介して情報を取得している。触覚と視覚、聴覚などである。これらの各感覚機能から得られた情報は脳中で統合されることにより、一つの理解・解釈としている。

本論文では聴触覚の関係性について着目し、新しい触覚提示インタフェース開発の知見を得るために、聴覚情報が与える触覚への影響を明らかにすることを目的とする。触覚提示のために対象物の表面形状をレーザー変位計による非接触式計測を行うことにより、音響情報を取得し、試料を弁別することが可能な音響情報を得られたことを実験により示す。

### Abstract:

Tactile presentation system to present the sense of touch is actively developed by the virtual reality experts recently. A lot of methods of presenting the sense of touch by stimulating a tactile receptor directly with a wearable device are proposed. Are there any methods other than stimulating the tactile receptor directly on the other hand as a method of presenting the sense of touch? Generally, when the thing is recognized, one is acquiring information by two sensory functions or more. It can be sense of touch, sight, and aural, etc. Information obtained according to these each sensory function assumes one to be understanding and an interpretation by being integrated in the brain. It aims to clarify the influence on the sense of touch that auditory information gives to pay attention about the audiotactile relation, and to find and develop the new sense of touch presentation interface in this thesis. The surface texture of the object is linked with the sense of touch presentation and it is shown to represent sound information that can be distinguished by the sample obtained by contactless measurement using the laser displacement sensor acquiring sound information by the experiment.

### Key Word:

Auditory sensation, touch, multisensory perception,

目次	
第1章 序論.....	5
1.1 研究の背景.....	5
1.2 研究の目的.....	6
第2章 聴覚と触覚.....	7
2.1 聴覚とは.....	7
2.1.1 聴覚の構造と機能.....	7
2.1.2 聴覚系での信号処理.....	9
2.1.3 音の強度の知覚.....	9
2.1.4 時間情報知覚.....	10
2.1.5 空間知覚.....	10
2.2 触覚とは.....	11
2.2.1 触覚受容器の構造と機能.....	11
2.2.2 触覚情報の伝達経路.....	12
2.2.3 触覚の基本感覚.....	12
2.2.4 触覚の時空間特性.....	13
第3章 聴覚と触覚の相互作用性.....	15
3.1 オノマトペ.....	15
3.2 異なる感覚間を結びつけるオノマトペ.....	16
3.3 聴覚と触覚の相互作用性.....	16
3.4 触覚と聴覚, 視覚の比較.....	17
第4章 Listening Touchの提案.....	19
4.1 非接触による音響情報の取得.....	19
4.2 提案する手法.....	20
第5章 実験.....	24
5.1 本手法における音の取得評価.....	24
5.1.1 表面形状に基づいた音響情報の評価実験.....	24
5.1.2 検証方法.....	24
5.1.3 検証結果.....	25
5.1.4 考察.....	28
5.2 Listening Touchで取得した音の検証.....	28
5.2.1 紙やすりを用いた音の検証.....	29
5.2.2 検証方法.....	29
5.2.3 検証結果.....	30
5.2.4 考察.....	42
5.3 なぞり動作における触覚と聴覚の関係性について.....	43

5.3.1	実験方法.....	43
5.3.2	結果.....	45
5.3.3	考察.....	50
第6章	結論と展望.....	53
謝辞	.....	55
参考文献	.....	56

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

我々はどうのように触感を得ているのだろうか。洋服の肌触り、犬や猫の毛並み、粉を触る際など、触感という情報が注目される機会が多々存在する。この触感をどのように得ているのか考えてみると、手で触れることなどによって得られる触覚が作用していることが、まず頭に浮かぶだろう。触り手は触覚を介して、対象物の質感や材質などの情報を取得していると考えられる。ではどのように触覚情報を得ているのであろうか。ここで実際に何か対象に触る場面を想像してみる。対象物への触れ方として、腕または指を動かす動作を行っている。我々は物体の空間的な情報を得るために、腕や手を動かすことによって物体の一方のエッジからもう一方のエッジの距離を把握することや、物体の細部の柔軟性を理解することによって質感や材質といった情報を得ている。

近年、バーチャルリアリティ分野において触覚提示を目的とした触覚提示システムの開発が行われてきている。安藤らは、指の爪に振動子を取り付けることによって、指のなぞり動作時に実環境へバーチャルな凸凹感を提示している[1]。また、菊池らは形状記憶合金の一種であるBioMetal Helixを利用したグローブ装着型力覚提示装置により、力覚提示に加え物体の凹凸感を表現することを目的とする力触覚提示システムを開発した[2]。

これらの触覚提示手法に見られる共通点として、装着型であること、触覚受容器を直接刺激することがあげられる。これらにはそれぞれ利点と欠点がある。まず装着型である点に関して、場所を選ばず広い範囲で操作可能である一方、装着することによる操作者への装置の負担が掛かることが懸念される。次に、触覚受容器に直接刺激を与える点に関して考えてみると、より操作者が直感的に触覚を得やすいという利点がある一方で、触覚のみでは、より細部の情報を取得することが困難である。例えば、砂と砂糖の違いを触れるだけで判断できるだろうか。実際には我々は目で見て、接触によって生じる音を聞くことによって砂と砂糖を区別して認識しているのである。

一般的に人間は物を認識する際に2つ以上の感覚機能を介して情報を取得している。そこで用いられる感覚機能として考えられるのが、触覚と視覚、聴覚などである。これらの各感覚機能から得られた情報を脳内で統合することにより、一つの理解・解釈としている。この感覚間の相互作用を利用することによって触覚を呈示することはできないだろうか。つまり、触覚を提示するために聴覚あるいは視覚を刺激する方法である。

本稿では特に、上述したように我々が物体に触れる際に生じる音に着目したい。そこで、この音を聞くことによって触覚に何らかの影響を与えていると考え、この関係性を明らかにすることにより、新たな触覚提示手法が見いだせると期待する。

## 1.2 研究の目的

本研究では、対象物に触れた際に作用する感覚機能の内、触覚以外の感覚機能である聴覚に着目した。この2つ感覚機能の関係性を明らかにすることで新しい触覚提示インタフェース開発の知見を得ることが期待できる。そこで、本研究では触覚の中でもなぞり動作をした際に生じる振動覚刺激より得られるテクスチャ情報の知覚に着目した。このなぞり動作をした際の振動覚刺激を提示するシステムは、1.1章でも触れたようにバーチャルリアリティ分野において、すでに研究されてきている[1]、しかし、それらの研究では、振動覚刺激を与えるために機械的振動や電気的刺激を与えることによる直接触覚受容器を刺激する方法がとられ、聴覚モダリティを刺激することによって振動覚刺激より得られるテクスチャ情報を取得するような試みではなかった。異なる感覚モダリティを介した触覚を提示する研究として、渡邊らのVisual Hapticsにみられるような視覚的变化を利用した擬似的な触覚提示方法が研究されている。これはディスプレイ上のカーソルの視覚的な変化に伴って、マウス操作者が擬似的な触覚を体験できるというものである[文献]。このような擬似的な触覚提示が可能となっている要因として、視覚モダリティと触覚モダリティにおける感覚間の共通性が働いていると考えられる。では、この異なる感覚モダリティ間の共通性を利用することによって、視覚モダリティを刺激するのではなく、聴覚モダリティを刺激することによる擬似的な触覚を提示することも可能ではないだろうか。そこで、本研究で着目する、本来は振動覚を刺激することにより得られるテクスチャ情報を、聴覚モダリティという異なる感覚機能を刺激することによって知覚する為に、なぞりという動作を、触覚を介した情報取得と聴覚を介した情報取得に分類し、それぞれの感覚機能より取得可能なテクスチャ情報の弁別閾を調べ、なぞり動作との関係性を明らかにする事によって、聴覚モダリティを介することによる触覚的なテクスチャ情報を知覚することが可能であるか明らかにすることを目的とする。

## 第2章 聴覚と触覚

本章では、本研究で対象とする聴覚と触覚について、それぞれにおける生理学的特性について記述する。

### 2.1 聴覚とは

聴覚は、音を通じて身に迫る危険を察知することや餌を見つける為に発達してきた遠方感覚系である。その役割は、自分の周りの状況を把握する為の情報を、耳に届いた音の断片から迅速かつ適切に脳の中で作り出し、次にとるべき行動を決める一助とすることにある。よく知られている聴覚機能には、「どこで音が鳴っているのか」を計算する音源定位機能と、「何の音か」を判断する音源識別機能の2つがある。この他にもコミュニケーションの処理、自らが発する音の安定化などの重要な聴覚機能もある。音源定位機能は、フクロウやコウモリの神経行動学的研究から、様々なことが明らかにされている。一方で、音源識別機能を含むその他の聴覚機能は、各神経系でどのような原理の信号処理が行われ、どのような特徴が抽出され統合されているか、未だに不明なことが多い[3]。このような聴覚機能において、我々がどのような音を知覚でき、逆に知覚できないかを調べることは重要になってくる。

#### 2.1.1 聴覚の構造と機能

音源の方向・距離・性質を知る重要な役割を果たす聴覚であるが、その構造はどのようなになっているのだろうか。ここでは聴覚の構造のうち、聴覚末梢系における外耳、中耳、内耳について説明する。以下に聴覚末梢系を示す[図 2.1]。



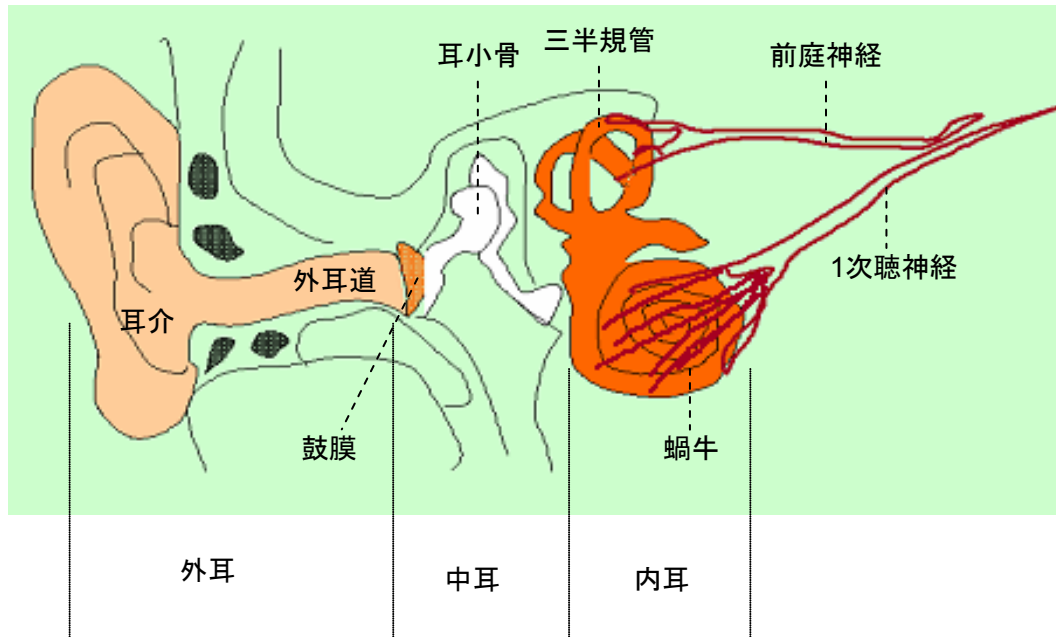


図2.1 聴覚の構造

・ 外耳の構造と機能

外耳は、耳介と外耳道で構成されている。耳介とは皮膚で覆われた軟骨であり、多くの哺乳類が随意的に動かすことが可能である。しかし、人は耳介を動かす筋肉や靭帯が退化しているため、動かすことはできない。

外耳道とはいわゆる耳の穴を指す。人の外耳道は 6~8mm、全長 25mmのクランク状に折れ曲がった管で、最奥部に鼓膜がある。外耳道の入り口と鼓膜付近の音圧比を測定すると、2.5~3kHzでは鼓膜付近の音圧が外耳道入口より約 10dB高くなる。これは、外耳道の共振特性を反映したものである。

・ 中耳の構造と機能

中耳は、鼓膜、耳小骨、内耳腔などで構成されている。耳小骨は鼓膜振動を蝸牛に伝える伝達経路で、哺乳類ではツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨と呼ばれる3つの小さな骨の連鎖で構成されている。それぞれに付着している筋肉は、大きな音が聞こえた場合、発生する場合、東武に何か触れた場合、体を動かした場合などに自動的に収縮する。この収縮は1~2kHz以下の周波数成分を伝えるにくくする役割を担う。大きな音が聞こえた場合、耳小骨筋の緊張による一時的な閾値上昇は数分から数時間も持続すると言われ、内耳を音響被爆から保護する機能と考えられている。

・ 内耳の構造と機能

内耳は音響信号の受容器である蝸牛と平衡感覚の受容器である三半規管とで構成さ

れ、硬い側頭骨の内部に位置する。内耳では、音波を神経発火に変換する機能と周波数分析の機能を担っている。数十Hzから 20kHzの音が周波数に対応した場所の聴神経の発火に変換される。中耳側の入り口は高い周波数、蝸牛の末端側では低い周波数に対応している。三半規管とは前半規管、後半規管、外販期間の3つの半規管からなり、それぞれが90度の角度で傾いており、X軸、Y軸、Z軸のように3次元的なあらゆる回転運動を感知することができる。

### 2.1.2 聴覚系での信号処理

外耳より入力された音は鼓膜を振動させる。この振動はツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨へと伝えられるが、これら3つの耳骨の構造と鼓膜、アブミ骨の面積比で音圧が約22倍に増幅される。この音圧の増幅によってアブミ骨に伝達された音は蝸牛の中のリンパ液中を伝達し、聴覚の受容器である有毛細胞に伝えられる。有毛細胞先端の毛には機械的刺激に応答してカリウムイオンを通過させるイオンチャンネルがあり、有毛細胞の毛は蓋膜に固定される。蝸牛管内部のリンパはカリウムイオン濃度が高く、音刺激によって毛が動かされると、カリウムイオンチャンネルが開き、カリウムイオンが細胞内に流入する。このイオン流によって有毛細胞は脱分極し、神経伝達物質を放出する。このインパルスは有毛細胞から蝸牛神経に伝達される。有毛細胞からの神経インパルスは背側と腹側の蝸牛神経核に入り、ここでシナプスを変え、大部分は対側の上オリーブ核へ伝達される。3次ニューロンはここから外側毛帯を通り下丘に到達する。ここから出る4次ニューロンは内側膝状体に入り、5次ニューロンとなって皮質の聴覚野に情報を伝達する。この過程を踏むことで音の認識が行われる。

### 2.1.3 音の強度の知覚

他に妨害音が存在しない場合に検知することができる、音の最小音圧のことを最小可聴閾値という。最小可聴閾値を測定する実験は古くから行われている。その中でも最も典型的な実験は、残響などの生じない無響室においてスピーカーを音源として用いる方法で行われるものである。最小可聴閾値レベルは、被験者の頭の中心位置に配置されたマイクから測定される音圧レベルの値として定義される。このような実験を通して、正弦波に関して刺激音の周波数と最小可聴閾値との関係について明らかにされてきた。最小可聴閾値は数百Hzから十数kHzの範囲で低く、それより周波数が低くなるか高くなると、急速に上昇することが知られている。

また、音の強度の違いを検地する能力を調べる実験も数多く行われている。最も典型的なものは、ある音圧レベル $L$  (dB) をもつ基準音の音圧レベルを増加させたときに、その増加を検知する為に必要な最小増加音圧レベル $\Delta L$ を測定する方法である。この最小増加音圧

レベルは強度弁別閾と呼ばれるものである。広帯域音においては、広い範囲のLにわたって $\Delta L$ はほぼ一定であることが知られている。

#### 2.1.4 時間情報知覚

我々の周りに存在する音楽や音声などの音は、時間的な変動を繰り返し、その時間変動のパターンが音についての主要な情報源となっている。音を時間軸に沿って細かくみていく。まず、2音の間に挿入されたわずかな時間的隙間を検知することをギャップ検出という。このギャップ検出閾の測定では、ギャップの挿入による長期パワースペクトルの変化に伴う時間構造以外の手がかりを被験者に与えないために広帯域白色雑音を用いることが一般的である。広帯域白色雑音については、ギャップ検出閾値の典型的な値は約 3msであり、刺激音の検出閾値より十分高い(30dB)音圧レベルでは、刺激音パラメータの変動に対して比較的安定であることが知られている。

次に振幅の時間的変動である振幅変調の閾値をみていく。振幅変調では、一定の振幅をもった音(搬送波)の振幅が、変調音に比例して変動していると考えられる。正弦波の振幅変調において、変調検出閾値を変調周波数の関数としてプロットしたものは、時間的変調度伝達関数と呼ばれる。ここでプロットされた形状は、搬送波周波数に関わらず、変調数端数が約 100Hz以下の範囲では変調検出閾値がほぼ一定であるが、その後変調周波数の上昇に伴って閾値は上昇し、変調周波数がある一定の値を超えると、再び低下することが知られている。この変曲点は、高周波数音になるほど周波数分解能が低下するために搬送波周波数によって変化する。

#### 2.1.5 空間知覚

我々人間も含めた動物にとって、音源の位置を判断する能力は重要である。音源定位研究で通常用いられるものが座標系である。両耳の外耳道入口の中間点を原点とし、両側外耳道入口の上端と眼窩下端を含む面を水平面、水平面に垂直に交わり両耳から等距離にある面を正中面とする。音源の方向は方位角と仰角の 2 つの次元で表現され、音源位置の水平面上への投射点と正中面との角度が方位角となり、左右の次元(水平面)を表わす。これに対して音源位置の正中面上への投射点と水平面との角度が仰角であり、上下および前後の次元(垂直方向)に対応する。この座標系に基づいて、空間上の様々な方向から広帯域雑音を呈示し、被験者にその方向を定位させる実験が行われている[4]。ここで得られた被験者の定位誤差は、被験者の真正面付近の音源について最も小さく、その水平方向、垂直方向の成分はともに約  $2^\circ$  および  $3.5^\circ$  であった。水平方向成分の誤差は、方位角が大きくなるにつれて増加する傾向があり、最大で  $15^\circ$ 、垂直方向成分の誤差は前方よりも後方の音について大きく、さらに仰角の絶対値が大きくなるにつれて増加した。その最大値は  $20^\circ$  であ

った。

## 2.2 触覚とは

対象となるものに触れる、または触れられた時に生じる感覚が触覚である。我々人間の身体表面は皮膚で覆われており、対象への接触がこの皮膚を通して成り立つため、皮膚感覚とも呼ばれる。触覚についての研究は古く、アリストテレスの記述にも見られる。触覚の研究は大きく分けて2つのアプローチ方法からなされてきた。

まず1つ目が生理学者や構造主義に立つ心理物理学者が注目した、触覚を分析的に解明しようとするアプローチである。これは主に「触れられる」という受身の条件を作り出して調べられ、呈示された触刺激に対する基本感覚としての触覚が何であるのか解明するものであった。

次に2つ目のアプローチ方法として、主体的に手指を動かすことによって「触れる」という行為から獲得される機能を解明しようとする方法である。これは主に機能主義に立つ心理学者によって重視されてきた。特に、機能としての触覚は対象の知覚・認識の為に重要であり、近年多く見られるロボティックスの研究やバーチャルリアリティ分野での研究に注目されている。

### 2.2.1 触覚受容器の構造と機能

皮膚感覚と他感覚との最大の相違は、身体表面全域にわたって受容器が分布していることであるが、受容器の分布が一様でないために、感度は身体部位に依存して大きく変動する。触覚では、皮膚表面が直接機械的刺激を受け、皮膚内部に生じた歪みを機械受容器が受容するため、皮膚の構造や物理的特性、あるいは機械受容器の位置などが、触覚情報処理に大きく影響を及ぼす。

人の無毛皮膚部の皮下には4つの触覚受容器があり、低周波・高周波刺激に応答するSA・FA、受容野が狭いI型、広いII型に分類される。SA Iは静的なひずみから低周波(空間的には高周波)を分担し、FA IIは高周波(空間的には低周波)を分担している。SA Iがひずみセンサ、FA Iが速度センサ、FA IIが加速度センサであるのはどのような原理によるのか、という点は今のところ不明である。

皮膚への機械的刺激を受容する機械受容器は、そこに当投射する神経終末と、それに付随する莖から構成されるが、莖の形態的多様性から明確に分類することは極めて難しい。人が外界とやりとりする際には、皮膚が肥厚した3つの無毛部、手指、手掌、および足底が主要な役割を担う。そこには多量の情報を受容するために、機械受容器が集中している。

## 2.2.2 触覚情報の伝達経路

脳神経、抹消神経のいずれか関わらず、触覚情報のほとんどすべては、3個のニューロンを経由して大脳皮質に伝えられる。それらの経路は、受容部位の組み合わせにより4つに大別される。左手の情報が右脳に送られるように、各経路は基本的に途中で対側に交叉することが知られている。いずれの経路においても、3個のニューロンの機能は同じである。1次ニューロンは、機械刺激を神経信号に変換し、それを中枢神経に送り込む。2次および3次ニューロンは、いずれも情報を中継する。

触覚情報経路を構成する神経核は、いずれも中継核である。中継核は、次の核に軸索を送る投射ニューロンと、核内に投射する抑制性の介在ニューロンから構成される。視床は15の中核核からなる集合体であり、それらの中で、上行性の入力を受けて大脳皮質の特定の領域に投射する核群は、特殊核と呼ばれる。臭覚を除くすべての感覚情報は感覚性特殊核を中継する。

## 2.2.3 触覚の基本感覚

2.2節で記したように触覚についての研究は長い歴史を持っている。それら研究によって明らかにされた触覚の基本感覚を分類してみると以下のようになる。

1. 触圧覚
2. 振動覚
3. 温度覚
4. 痛覚

この中でも本研究で注目したい触圧覚、振動覚について説明する。

### ● 触圧覚

触圧覚は機械的刺激に起因する感覚であり、「触」が対象に触れた際に生じる感覚で「圧」が圧迫を受けた際に感じる感覚である。しかし、加える物理様態に対してどれが触でどれが圧であるかを感覚量として厳密に区別することは難しい。触覚が基本感覚としてどれだけの機械的な触圧に対する感度をもっているかの閾値が圧覚閾である。圧覚閾の一般的な傾向はウェインシュタインによって詳しく調べられている[5]。絶対閾以上の圧変化の感度は一般にウェーバー比で表現される。これは刺激を受けている物理量が大きくされた、逆に小さくされた際にその変化を感じた最小の変動量を、測定条件にしている物理量で割った無次元数である。圧弁別閾は測定条件になる圧を変えてもほぼ一定で、およそ0.1~0.2の範囲に当てはまる。

### ● 振動覚

触れている対象が振動しているかどうかの感度が振動覚であり、体全体で感じる地震や

乗車時の揺れなどと触覚によるものとは区別される。振動覚の閾値は皮膚に振動子を呈示した際の最小の振幅で示される。測定条件の多くは機械的振動子を正弦波で駆動することで調べられ、振幅による閾値を縦軸に、横軸を周波数で示すと 250Hz付近で閾値が最も低くなるU字型特性を示すことが知られている。

振動の知覚は低域のコツコツとあたるような感覚から震えを伴った圧覚まで広範である。知覚閾上では2種類を定義できる。1つは同一周波数において、ある振幅からどれくらい振幅を変化させるとそれが違ったかを感じる振幅強度弁別閾である。この弁別閾は圧の弁別閾とほぼ同一でウェーバー比に換算すると0.1~0.2になる。もう1つは、刺激を受けている周波数がどれだけ変化すると振動が異なるかを弁別する閾値であり、周波数弁別閾は測定可能な20~300Hzの範囲でおおよそウェーバー比0.2~0.25になる。

#### 2.2.4 触覚の時空間特性

持続刺激を受ける過程で閾値は変動することが知られている。視覚に明順応と暗順応があるように、触覚に関しても持続的に刺激を受容する過程では閾値上昇と刺激から解放される過程での閾値低下という2つの順応特性がある。時間過程でみると持続刺激を受けはじめてから閾値上昇が限界に達する時間の方が、刺激から解放されて閾値が低下する時間よりも早い。Hahnの研究によると、60Hzの振動による順応は絶対閾よりも34dB大きくした知覚閾でも時間とともに進行し、その傾向は絶対閾で調べても主観的大きさで調べても同様であるが、刺激後の回復過程は主観的閾値の方が実際の感覚的閾値よりも回復が早くなることが示された[6]。さらに、順応による閾値変動量も相違し、絶対閾では順応開始前よりも約4~5dB閾値が上昇したところで上限に達するが、主観的大きさの閾値上昇はそれよりもdB単位で3倍も大きくなることが示された。また、順応する周波数によっても相違し、例えば、100Hz以下の機械的振動による順応よりも200~800Hzの場合には時間がかかり、80s後の状態では主観的閾値が2dBレベルまで戻るのに対して、絶対閾は4dBレベルまでしか回復せず、その開きは大きくなることも指摘されている。

呈示される刺激の大きさや持続時間が増大すると閾値が低下することが知られている。このうち、刺激が呈示される領域が拡がると閾値が低下する現象を空間加重と呼ぶ。空間加重を実験によって調べるには、受容野の広い細胞を選択的に刺激することで明らかにすることが可能である。そこで、受容野と応答速度の違う触受容器に対して振動刺激を負荷する。この方法によって、明らかにされていることが以下の3つである。まず1つ目に接触子が0.02cm<sup>2</sup>以下の場合には周波数の影響を受けない。2つ目に周波数が40Hz以下の低い刺激においては閾値の変化が存在しない為、空間加重は現れない。3つ目に周波数が240Hz、320Hzと高くなると大きく閾値低下を示すため空間加重が現れる。これより、低周波域で活動する機械的受容器は受容野が狭く、その一方で高周波域では受容野が広いことが明らかにされている。

また、提示される刺激の持続時間が長くなると閾値が低下する現象を時間荷重と呼ぶ。

時間加重による閾値低下の傾向は、時定数がおおよそ 200ms で刺激の持続時間が 1000ms の範囲まで認められている。刺激の持続時間が増加するのに伴って閾値は低下して時間加重効果が認められるようになるが、 $0.005\text{ cm}^2$  と  $0.002\text{ cm}^2$  の小さな接触子では時間荷重は現れないことが報告されている[7][8]。時間加重は刺激強度にも影響を受ける。刺激強度が弱い場合には持続時間を長くすることにより閾値に到達するまで信号を蓄え、刺激強度が強い場合には持続時間が短くても閾値に到達する信号を得ることができる。さらに、刺激持続時間が 1000ms を超えてしまえば、閾値に到達するに十分な信号がされているため、その値は一定になる。

## 第3章 聴覚と触覚の相互作用性

第2章では聴覚と触覚のそれぞれの特徴について論じてきた。ここではこの2つの関係性について論じる。

### 3.1 オノマトペ

擬音語・擬声語・擬態語を表現する言葉がオノマトペである。「ゴリゴリ」「しとしと」「ドキドキ」など、我々の世界には多くのオノマトペが存在している。擬声語とは擬音語と擬態語を総称したものである。それでは擬音語、擬態語とは何か。擬音語とは物が発する音や人や動物が発生する声などを字句で模倣したものである。「バタン」や「ドンドン」などの物の音、「メーメー」、「ワンワン」などの動物の鳴き声がある。一方で擬態語とは人や物の状態や感情などの音が発しないものを字句で模倣したものである。「ぐっすり」や「めろめろ」、「つやつや」などを指す。これらの最も明確な違いは、擬音語は我々が実際に聞いた音や声をそのまま表現したものであり[9]、擬態語とはその状態を音によって象徴的に表現した言葉に過ぎないため、その状態を理解しない限りそれを表現した擬態語を理解することも難しいということが言える。例えば、「ペットにメロメロ」と「ペットに夢中」の2つを比較してみる。我々日本人にとっては、双方ともにペットが好きなことが理解できるだろう。しかし、メロメロという擬態語は実際に存在しない音であり、その意味を説明しない限り理解することは難しい。大半のオノマトペが擬音語と擬態語に区別することが可能であるが、中にはどちらとも判断が難しい言葉も存在する。例えば「ホームランをガンガン打つ」という文章では「ガンガン」という言葉が擬音語であると解釈することも可能であるが、擬態語と解釈することも可能である。このようにはっきりと区別をつけることが難しい言葉も存在するが、大抵のものは上記したような理由より区別することが可能であると言える。

数多く存在するオノマトペは世界中でも特に日本に多くみられる言葉とされている。以下にオノマトペの一例をあげてみる[表 3.1]。ここで紹介するオノマトペは、ほんの一部に過ぎず、1200種類に及ぶと言われている日本のオノマトペは特徴的であり、英語の350種類と比べると3倍以上になる。



表3.1 日本語のオノマトペの例

擬音語	擬態語	状態
カツカツ	スタスタ	歩く
ドキドキ	メロメロ	心臓の音, 思い
ムシャムシャ	パクパク	食べる
グーグー	すやすや	眠る
※	キラキラ	星が光る
※	ゆらゆら	揺れる
…	…	…
…	…	…

### 3.2 異なる感覚間を結びつけるオノマトペ

オノマトペを用いることにより本来触覚や視覚などから得るべき情報を聴覚から得た情報として取得することが可能であると考えられる。3.1 で記述したようにオノマトペとは物が発する音や人の動作している状態を音で表現している。「スタスタ歩く」という言葉は実際に存在しない「スタスタ」という音を利用して歩く様子を表している。これは耳から音を聞き取ることによってその行動を予測させていると言える。つまりオノマトペを用いることで触覚と聴覚、視覚と聴覚などの異なる感覚間を結びつけることが可能であると考えられる。知覚したイメージを記憶に保ち、再び心のうちに表れた作用を「表象」という。オノマトペで表現される音を聞くことでこの表象を促すことが期待できる。これを利用することによって我々が体を動かし手で触れて得ることができる触覚が音を聞くことにより再現されることが可能であると考えられる。通常我々は触れる、擦る、握る、叩くといった体や手を動かすことによって対象物体との間に音が生じる。これら動作を起こすことによって生じる触覚的な音はオノマトペで表現される音であり、さらにその生じた触覚的な音を聴くことにより触覚を表象することが期待できるのである。藤野らは人が運動時に発する声を被験者に聞かせることによって、握力に影響を及ぼすと報告している[10]。ここでは、人が運動時に発する声とはオノマトペで表現される音であり、それを耳から聞くことにより握力という異なる感覚を刺激したことを示している。

### 3.3 聴覚と触覚の相互作用性

視覚と聴覚、視覚と臭覚などの異なる感覚が互いに影響を及ぼし合うことが様々な研究によって明らかにされてきている。視覚と触覚における相互作用性として、Ledermanらは、

視覚と触覚に異なる粗さのサンドペーパーを知覚させる実験を行い、被験者は視覚刺激と触覚刺激のちょうど中間的な粗さのサンドペーパーであるかのように感じることを示した[11]。触覚により聴覚が影響を受ける現象が報告された例としては、Nagarajanらによって報告されたものがある[12]。連続して提示される2つの触覚刺激の時間間隔の弁別課題を繰り返し行わせると弁別成績が向上する。彼らは、触覚刺激を用いた訓練のあとに、聴覚刺激を用いても同様に訓練の成果が生じることを示した。訓練時には聴覚刺激をいっさい用いていないことから、時間知覚は感覚の違いを超越していることを示唆するものである。

また、従来、研磨紙や溝のある金属プレートを用いたテクスチャの粗さ判断において、触った際に生じる聴覚情報の影響は粗さ判断に影響を及ぼさないと考えられてきたが[13][14]、1932年にSchillerが、音が触覚におけるテクスチャの知覚に影響を及ぼすことを指摘したことを始まりに[15]、触覚と聴覚の相互作用性に関して様々な報告がされている。近年では聴覚情報がテクスチャの粗さと湿っぽさの知覚に影響を与えることが明らかにされた[16]。Ledermanらは触覚と聴覚のbimodal条件の粗さのマグニチュード測定値は、触覚的粗さと聴覚的粗さの推定値の中間に位置し、より触覚寄りの値を示すと報告している[17]。Jousmakiらは、拳の摩擦音あるいは刺激接触音の高域周波数の音圧を操作したフィードバックが触覚的な粗さ知覚に及ぼす影響について実験を行い、高域周波数を増幅してフィードバックすると、より短く、乾いて近くされることが明らかにした[18]。このように触覚的粗さ知覚に影響を与えると考えられる聴覚刺激であるが、触りに無関連な聴覚刺激では与える影響に変化がみられるのだろうか。この問いに対し、鈴木らは粗さの大きな粗大テクスチャと粗さの細かい微細テクスチャの2種類に対して、ホワイトノイズ、純音(1000Hz)、クリック音を聴覚刺激として提示し、その刺激が粗い、もしくは滑らかどちらであるか選択させる実験を行った。その結果、触りに関連のない聴覚的粗さ判断に及ぼす影響は粗大テクスチャにおいてみられ、ホワイトノイズが提示されたとき、諸核刺激がより粗く感じられることが明らかになり、微細テクスチャでは聴覚条件の間に差がみられないことを報告している[19]。

### 3.4 触覚と聴覚、視覚の比較

触覚の大きな特徴として、空間パターンを認識する際に動的触察というスキャン行為を介して凸凹分布を時刻歴波形に変換して検出していることが挙げられる。このような行為を行う理由としては、視覚と触覚の時空間分解能を比較してみると明らかである。視覚の空間分解能は視野角にして1/60度と精細だが、時間分解能は数十Hzしかない。つまり、テレビは1秒間に50枚の画像を呈示することで静止画が動いているかのように人の視覚をだましている。これに対し、触覚の空間分解能は指腹部のSA IやFA Iで約1.5mmと細かい。一方、周波数帯域は広く、FA Iは15~20 $\mu$ m程度の振動刺激に対して100Hz程度まで、FA IIはサブマイクロレベルの振動刺激に対して数100Hz程度まで応答する[20]。

また、触覚における 2 つの点への刺激を識別可能な最小距離を表す 2 点弁別閾値というものがあるが、実際にその閾値以下の情報を検出することはできないのだろうか。この問題を解く方法として、聴覚と触覚の比較が示唆を与える。人の可聴周波数は 20Hz から 20 kHz 程度であるとされている。20 kHz 以上の音をカットすると耳の良い人には音が違って聞こえる。つまり、人が音を音として知覚できる周波数は 20 kHz までだが、20 kHz 以上の音波も、聴覚受容器で検出され、脳内において何らかの形で情報処理されていると考えられている。これと同様に、人の指腹部の 2 点弁別閾値は約 1.5mm であるとされているが、これよりも空間周波数の高い刺激は全く検出不可能であるのではなく、2 点と意識上で感じないだけであって、何らかの触覚情報として検出されている可能性がある。

また、伊福部らによって、感覚統合の際には触覚と聴覚は知覚時刻がほぼ一致しているのに対し、視覚は約 30ms 遅れることが報告されている[21]。つまり、同時刻にある対象物から触覚、視覚または聴覚、視覚を介して情報を取得しても、脳内で感覚が統合されるまでの過程において、視覚よりも触覚や聴覚から得られた情報を先に取得するとしている。

## 第4章 Listening Touchの提案

第3章で記したように聴覚と触覚のような異なる感覚間を結びつけることが可能であると期待できる。これを利用することにより、本研究の目的である聴覚を介すことによる触覚的な印象を与えるを試みる。

### 4.1 非接触による音響情報の取得

本提案で求める音とは「ヒューヒュー」といった風の音や「バリーン」といったガラスの割れる音ではなく、人が何か物体に触れた際に生じる音である。洋服や犬や猫の毛、粉に触る際に生じる音である。一般に音を作成する為には音源となるものが必要となる。音楽ではギターやピアノなどの楽器がそれに相当する。これらの音源を録音することから始まり、さらに加工・編集を繰り返すことによって1つの音楽が作成されていく。では、手で触れた際の音はどのような方法で録音することが望ましいのだろうか。上記したようにこれらの音は聞こえにくい音として存在し、極めて録音することが困難であると考えられる。録音することが可能であったとしても、それを再生することによって得られる音は、果たして我々が普段耳にするような音であるのだろうか。

この問題を解決する為には本稿では、手で触れる際に音が生じる重要な要因の一つであると考えられる対象物の表面形状に着目した。対象物の表面形状もしくは構造をテクスチャ情報として考え、それを非接触に計測し、それを音響情報に変換し取得することで、物体の特徴を触覚的に音響信号としてとらえることができると考えた。つまり直接物体に触れて音を生じさせるのではなく、物体に触れずに音を取得する方法である。この方法で得られる音は物体表面が持つ物理的な音響情報であるといえる。

また、非接触で計測する利点として、普段触ることができない物体の表面を計測することが可能であるということが挙げられる。例えば、部屋の天井にキズらしき跡が見えるとする。当然ではあるが踏み台を使わない限り直接手で触れることはできない。そのような状況において、今回の非接触による計測が可能であれば、わざわざ踏み台を用意して触れる必要もなく、天井に触れた際に生じる音を聞くことができ、それがキズであったのか、または汚れであったのか判断することが可能である。

物体の表面形状を非接触で計測することによって触覚受容器を直接刺激する研究は矢野らによって行われている[22]。これはレーザー変位計と力覚デバイスを用い、擬似的に触っているような感覚を提示するシステムである。本手法と決定的に異なる点として、矢野らは表面形状のデコボコ感を触覚受容器を直接刺激することによって被験者に触覚を提示している。それに対し本提案では、表面形状を計測したデータを音響情報に変換し、聴覚を

介すことによって触覚的印象を与えることである。

## 4.2 提案する手法

第 3 章で論じたように、触覚と聴覚という異なる感覚間を結びつけることが可能であると考えられる。本稿で提案するListening Touchとは、我々人間が対象物に触れた際に生じる、聞きとることが難しい音を録音し、その音を聞くことによって触覚的印象を与えるために、レーザー変位計を用いて対象物体の表面形状を非接触に計測し、計測データを音響情報に変換する方法を採用する。なお、今回の計測にはKEYENCE社製レーザー変位計 LC-2400 を用いた[図 4.1]。レーザー変位計のヘッドの仕様を表 1 に示す。



図4.1 レーザー変位計 LC-2400 (KEYENCE)

表4.1 レーザー変位計ヘッド LC-2440の仕様

測定範囲		±3mm
作動距離		30mm
光源	波長	670nm
	出力	最大 1.9mW、平均 950 μW
	パルス幅	10 μs
最小スポット径		35*12 μm
分解能		0.2 μm
サンプリング周波数		50kHz
応答周波数		20kHz(-3dB、平均回数 1 回)
応答時間		100 μs
オフセット範囲		±2.9998mm
ゲイン調整		オートゲイン, マニュアル 4 段階切替え
入出力	アナログ変位出力	±10V 出力インピーダンス 0Ω, 6 段階切り替え

システムの構成としては以下のようになる[図 4.2]。レーザー変位計のヘッドと計測する対象物との距離を一定に保つ必要があるため、TOSHIBA MACHINE社製のリニアスライダー KBB-10E-ST-M20N-A0 にレーザー変位計のヘッドを取り付けた[図 4.3]。そこから計測された対象物との距離情報を大きさ±10Vの電圧で出力することで音響情報に変換する。変換された音をパソコンに取り込み、録音する。

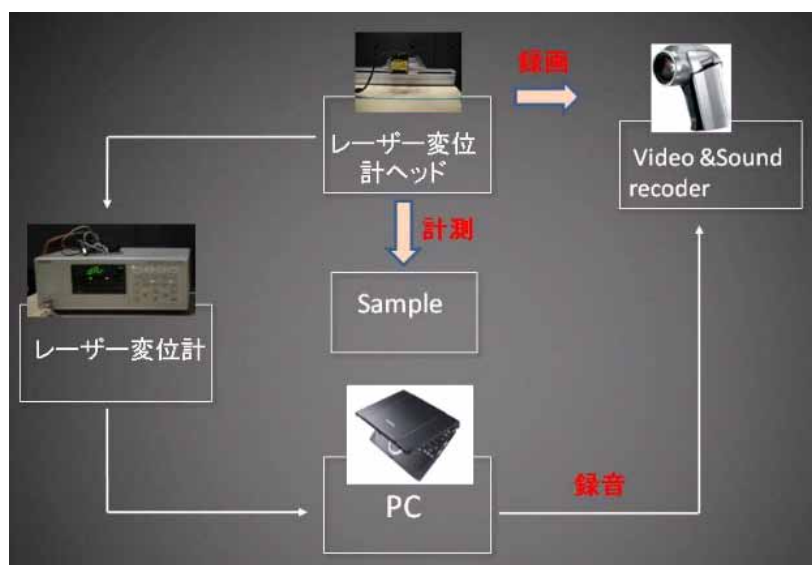


図4.2 システム構成図

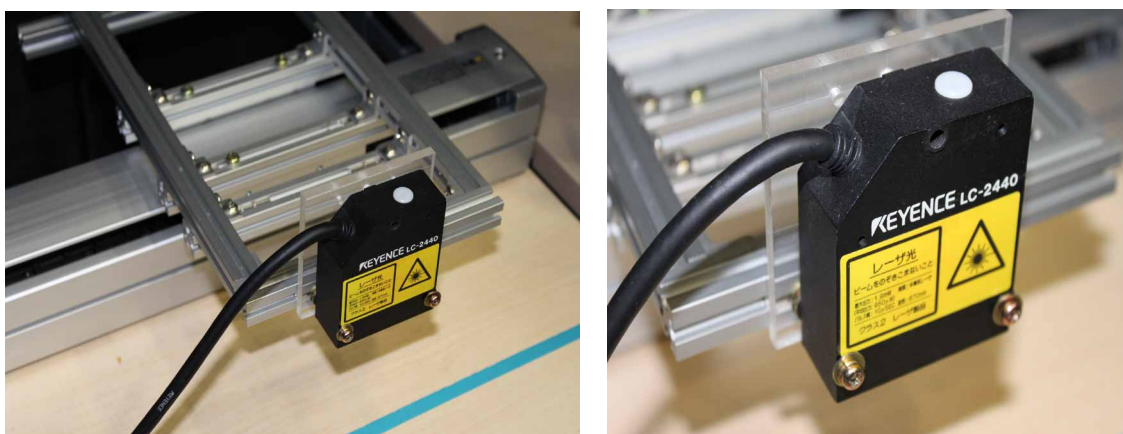


図4.3 リニアスライダーに取り付けたレーザー変位計のヘッド

表4.2 リニアスライダー KBB-10E-ST-M20N-A0の仕様

モータ	100W ACサーボモータ				
ストローク(mm)100mm単位	短スライダ	150~650	750	850	950, 1050
	中スライダ	100~600	700	800	900, 1000
最大速度(mm/s) 〈〉内は, 最大搬質量搭載時の 加減速時間(sec)	リード20mm	1200〈0.36〉	1000〈0.3〉	800〈0.24〉	600〈0.18〉
	リード10mm	600〈0.36〉	500〈0.3〉	400〈0.24〉	300〈0.18〉
	リード5mm	300〈0.36〉	250〈0.3〉	200〈0.24〉	150〈0.18〉
最大搬質量	リード20mm	水平使用時:15 垂直使用時:3(5)			
	リード10mm	水平使用時:30 垂直使用時:8(12)			
	リード5mm	水平使用時:50 垂直使用時:15(22)			
位置繰り返し精度(mm)	±0.01				
分解能(mm)	0.01				
静的許容負荷モーメント(N・m)	短スライダ形 MR:49 MP:14 MY:13 中スライダ形 MR:59 MP:59 MY:54				



## 第5章 実験

### 5.1 本手法における音の取得評価

本実験では対象物に触れた際に生じる音を録音することを試みる。その方法としてレーザー変位計を用いた非接触形式で物体の表面形状の計測を行うが、実際に計測結果を音響情報として取得することが可能であるか検証する。

#### 5.1.1 表面形状に基づいた音響情報の評価実験

実験 5.1 では、本手法であるレーザー変位計を用いた計測方法を用いた際に、計測データを音響情報として取得することが可能であるか検証することを目的とする。

#### 5.1.2 検証方法

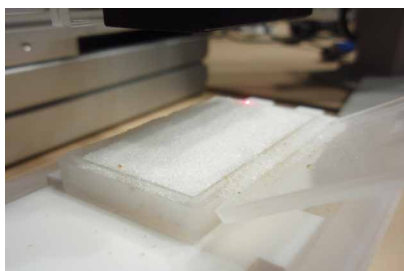
上記してきたように本実験で対象としているのは、本来手で対象物に触れることによって生じる音を録音することである。実験 5.1 では、計測する物体として、我々が普段触れる機会がある身近な以下に示すものを選択した[図 5.1]。また、それぞれの対象物より取得した音響情報をグラフに表し、さらにそれらをスペクトル解析することによって対象物間にどのような差異を見いだせるか比較していく。



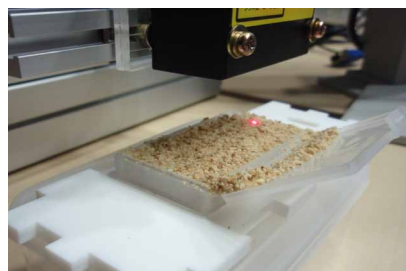
ゴマ



唐辛子



砂糖



すりゴマ

図5.1 実験5.1における計測対象物



図5.2 実験構成図

### 5.1.3 検証結果

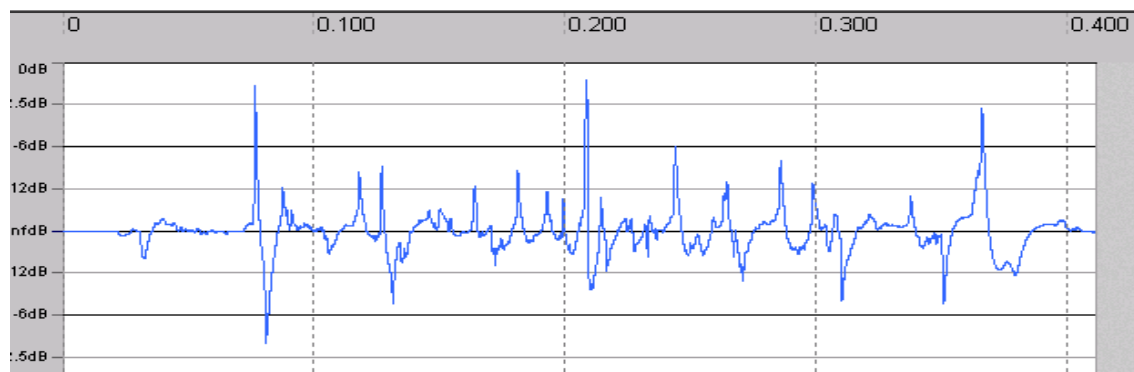
以下の表のような結果を得た[表 5.1].

この表では音を観測することができたものに○が記されている.

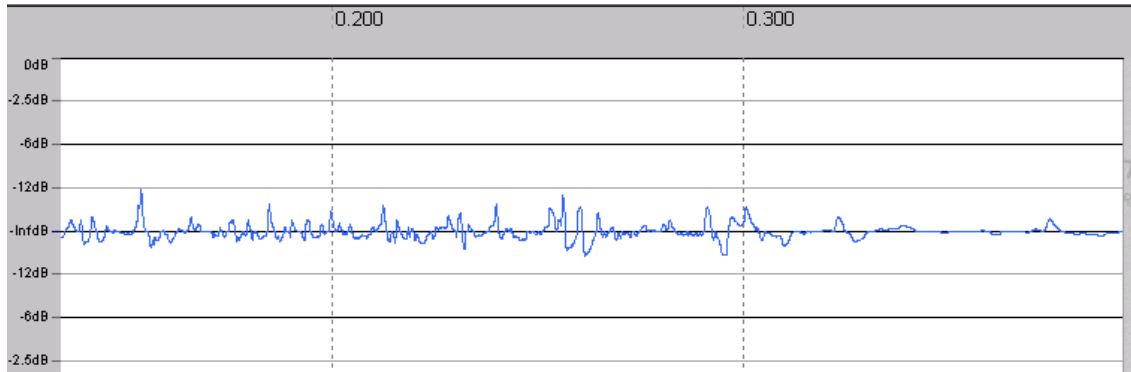
表5.1 計測結果

ゴマ	唐辛子	砂糖	すりゴマ
○	○	○	○

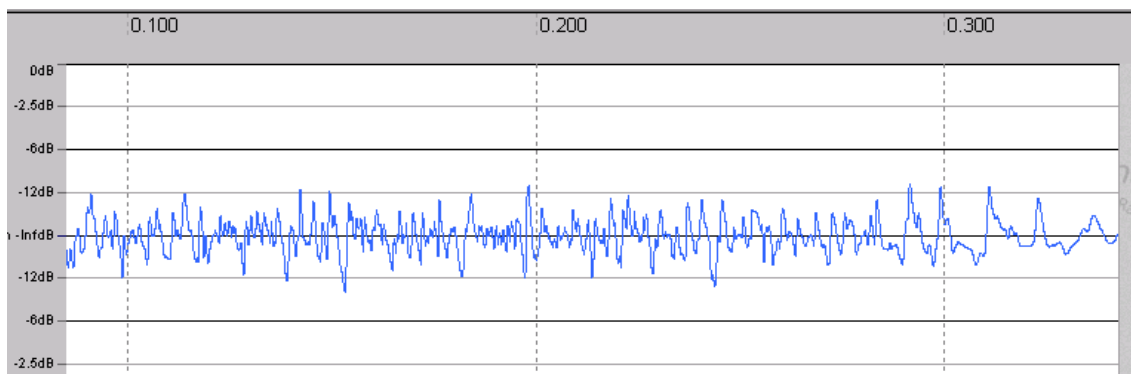
また、計測されたそれぞれの音響情報を以下に示す. 表は横軸に時間、縦軸に周波数をとっている.



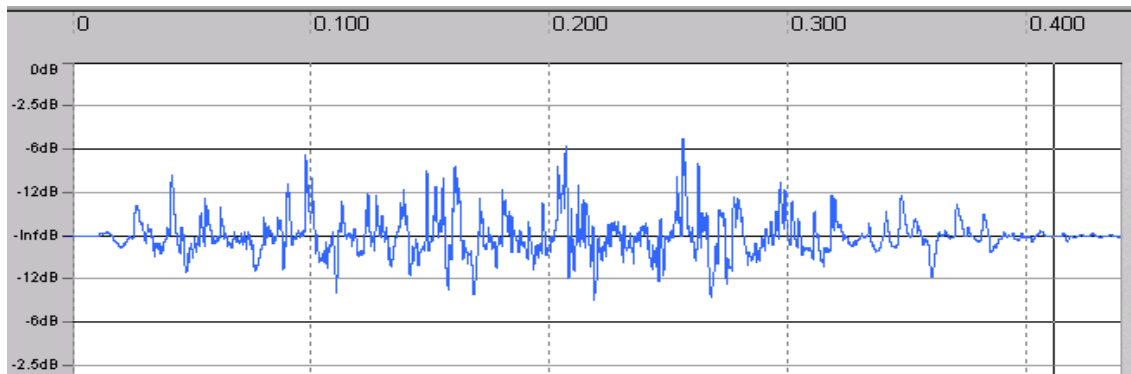
ゴマ



唐辛子

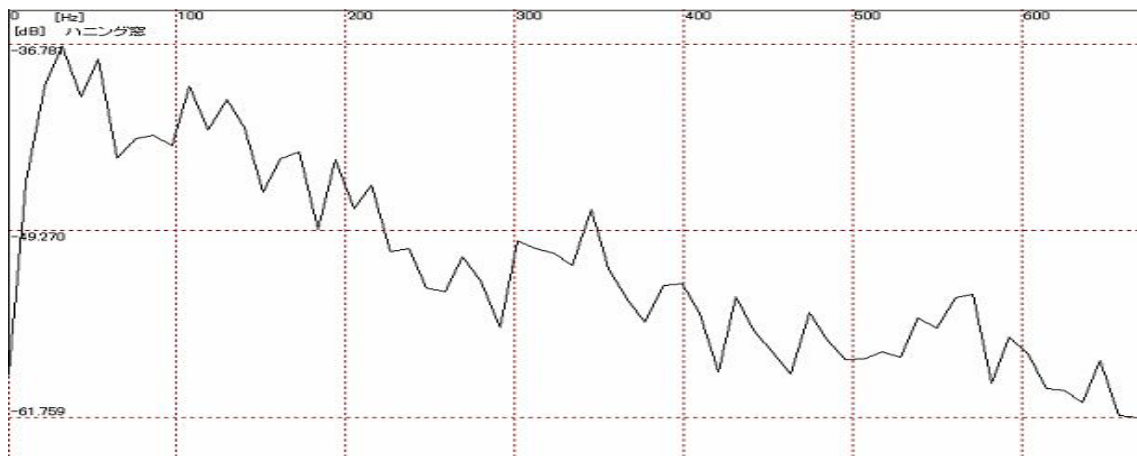


砂糖

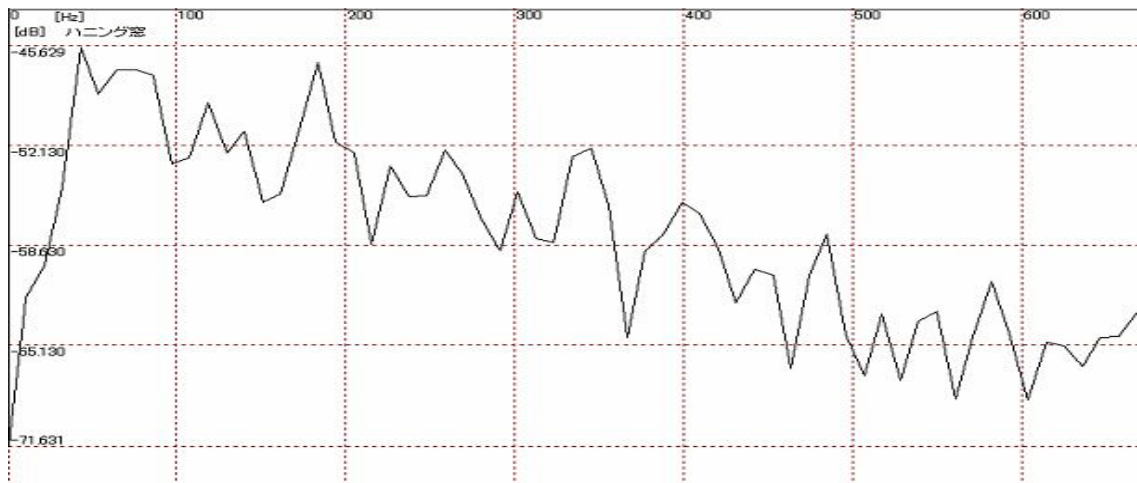


すりゴマ

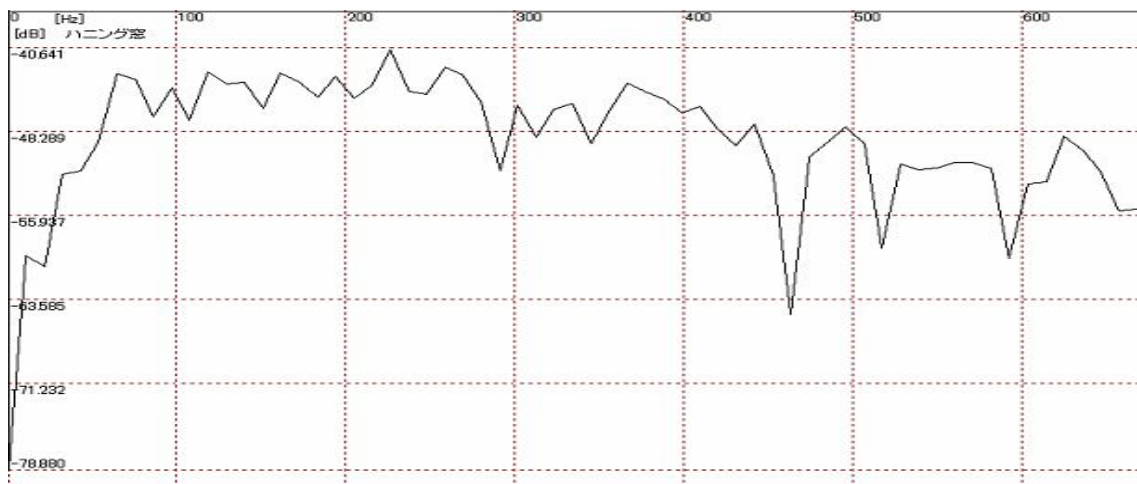
さらに、得られた音響情報をスペクトル解析した結果をそれぞれ以下に示す。表の縦軸をパワー(デシベルdB)、横軸を周波数としている。



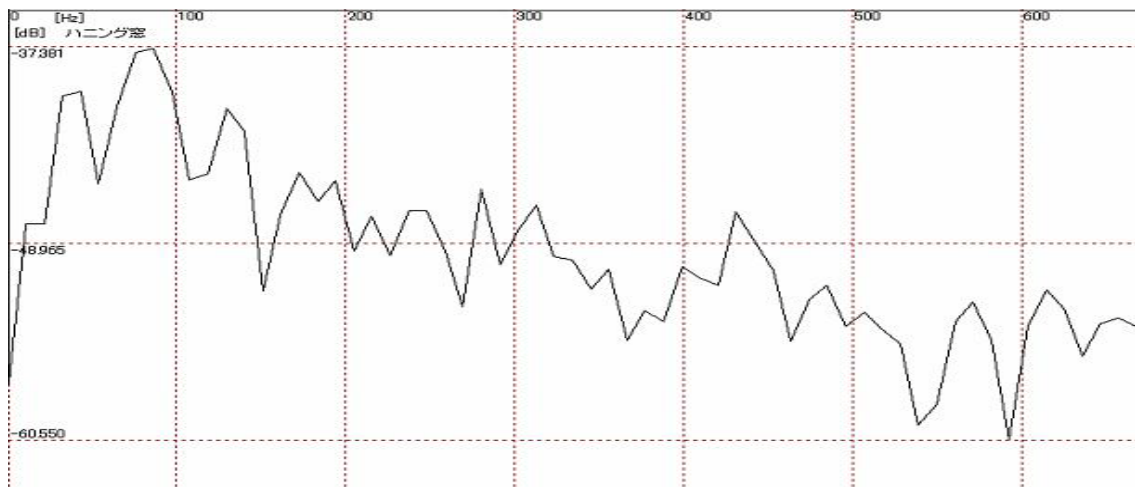
ゴマ



唐辛子



砂糖



すりゴマ

#### 5.1.4 考察

本手法において、今回計測対象とした全ての物体から表面形状を音響情報として取得することができた。よって今回提案する非接触計測による物体形状表面を音響情報として取得することが可能であることが確認された。また、今回計測した対象物においては、音を聞くことのみでそれぞれの違いを判断することが可能であった。これは、それぞれの音響情報を表わしたグラフを見比べることによっても確認された。しかし、第 2.1 章で論じたように聴覚の可聴可能な弁別閾を超える周波数においては識別することが不可能となる。それを踏まえ、得られた音響情報をスペクトル解析することによって比較した。その結果、全体として 200Hz 周辺に最も大きな周波数成分が観測され、それ以降は滑らかに下降していくグラフとなっていた。砂糖を除いた対象物において、音響情報を表したグラフで見られたようなそれぞれの対象物間における明確な違いがスペクトル解析した結果には現れにくかった。その原因として考えられるのは、対象物の粒子の大きさに統制が取れず、各対象物に様々な空間周波数が混ざってしまった為、各対象物のスペクトル成分のスペクトル分布が平均的になってしまったことが考えられる。よって、以降の実験では対象物間の空間周波数の統制をとって実験していく必要がある。

#### 5.2 Listening Touchで取得した音の検証

実験 5.1 より、本手法において音響情報を取得することは明らかになったが、対象物の空間周波数に統制がとれていなかった為に、スペクトル解析した結果において、特定の差異

がみられなかった。そこで、実験 5.2 では対象物を統制する為に紙やすりを用い、取得した音響情報に対して、表面粗さに応じた周波数特性を抽出することが可能であるか検証していく。紙やすりの粗さが細くなるほど最大周波数成分の値が大きくなることが予想される。

### 5.2.1 紙やすりを用いた音の検証

Listening Touchを用いて取得した音響情報のスペクトル解析結果を比較し、計測対象物とする紙やすりの粗さに応じた周波数特性を抽出することが可能であることを明らかにすることを目的とする。

### 5.2.2 検証方法

以下に示す 12 段階の紙やすりの表面形状を計測し音響情報を取得する。取得した音響情報に関してスペクトル解析を行い、粗さによる周波数特性が抽出されるか比較していく。ここで用いた#で表した粗さは1インチの長さに網の目がいくつ入るかを表した数値となっている。1インチとは 25.4mmであるので#40では、 $25.4\text{mm}/40=0.635\text{mm}$ がひとつの目の大きさであり、従ってこれを通過する砂粒の直径は約 0.63mmとなるが、実際には網の目を構成する線があるから砂粒の大きさはこれより小さい。以下に粗さ(#)に対応するJISで規定されている最大粒子径( $\mu\text{m}$ )を示す。

表5.2 計測する紙やすりの粗さ

粗さ(#)	#40	#60	#80	#100	#120	#150	#180	#220	#240	#280	#320	#400
単位( $\mu\text{m}$ )	710	500	355	300	212	180	150	125	110	101	94	81

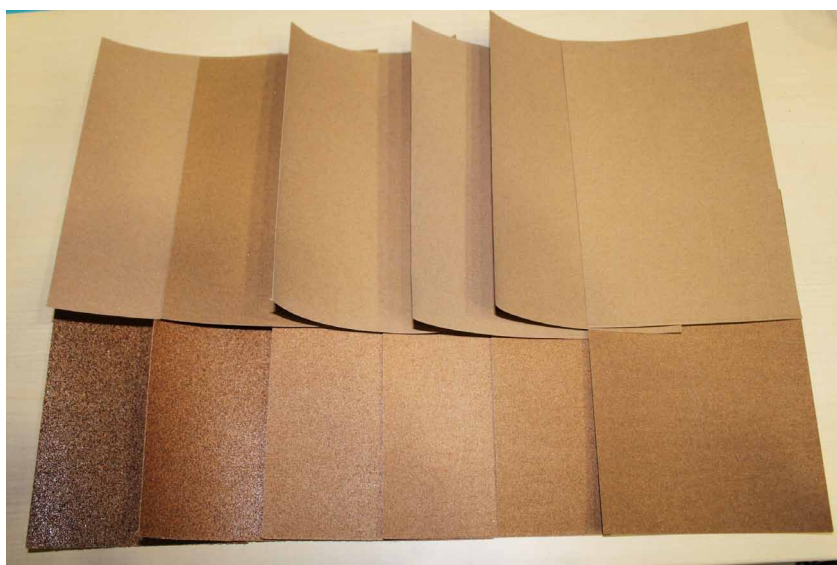
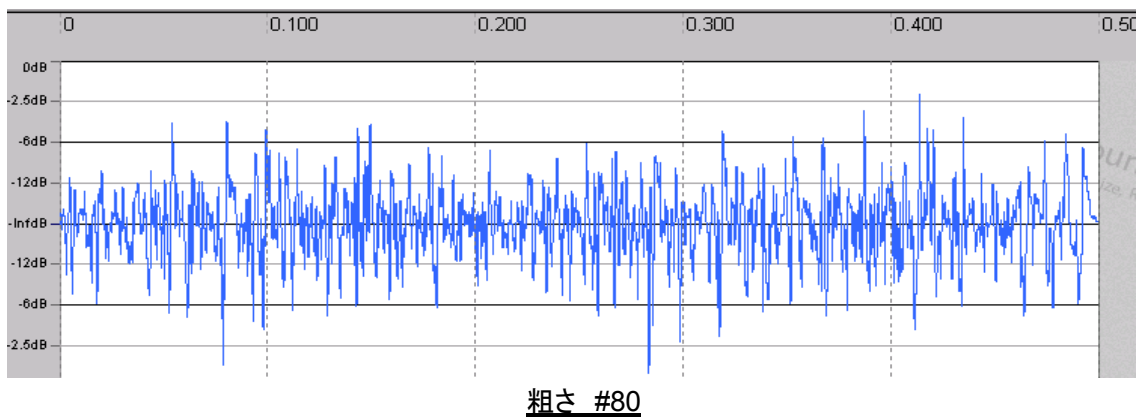
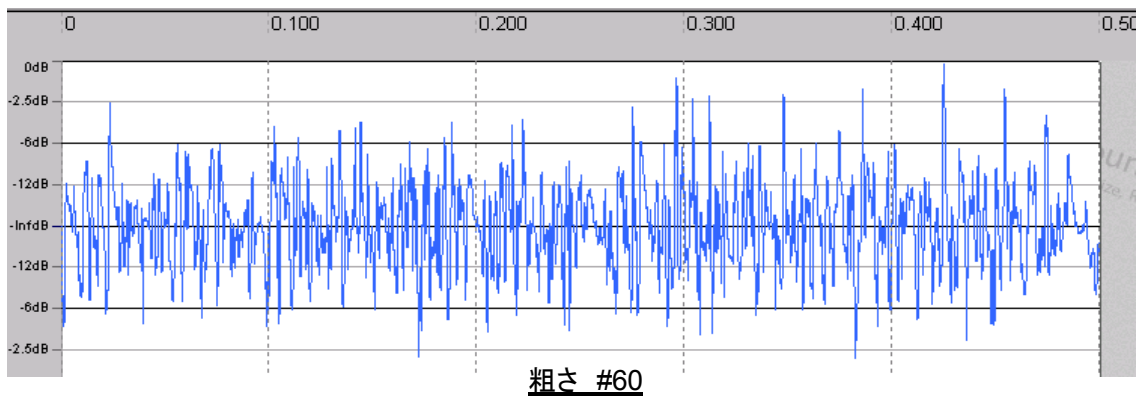
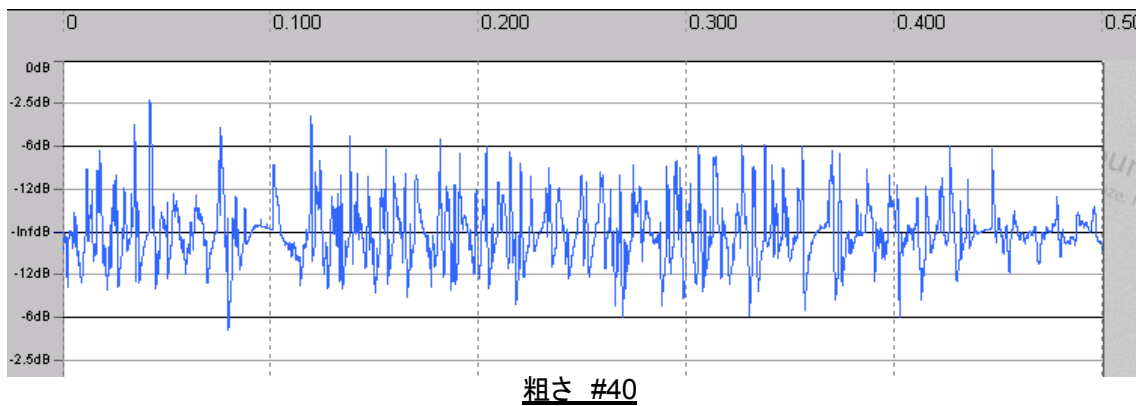
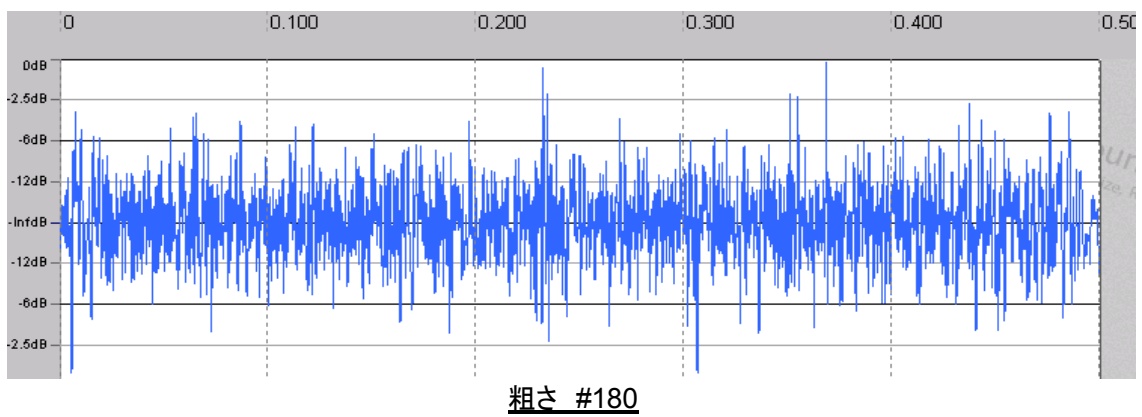
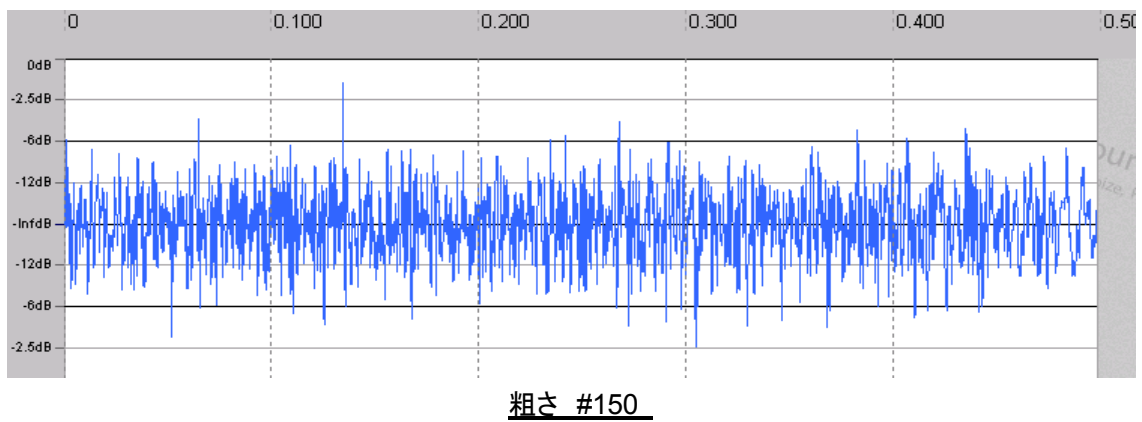
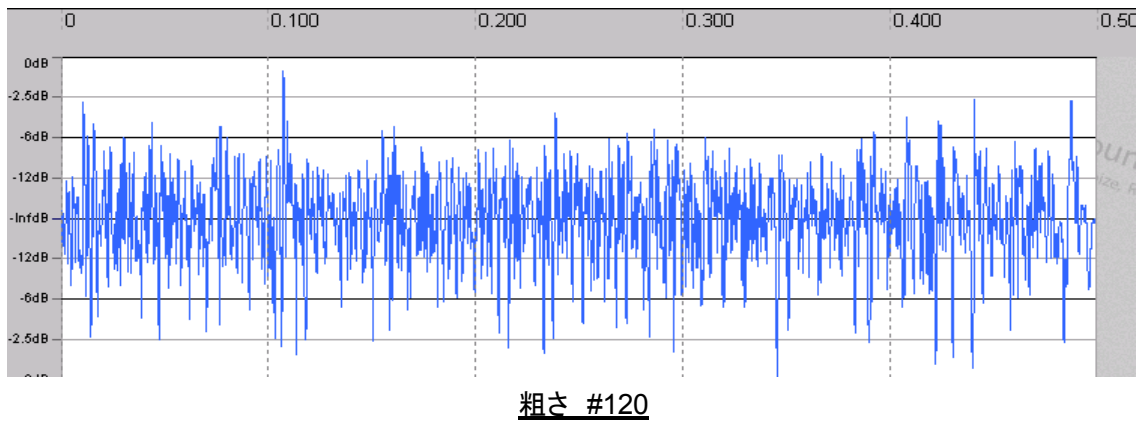
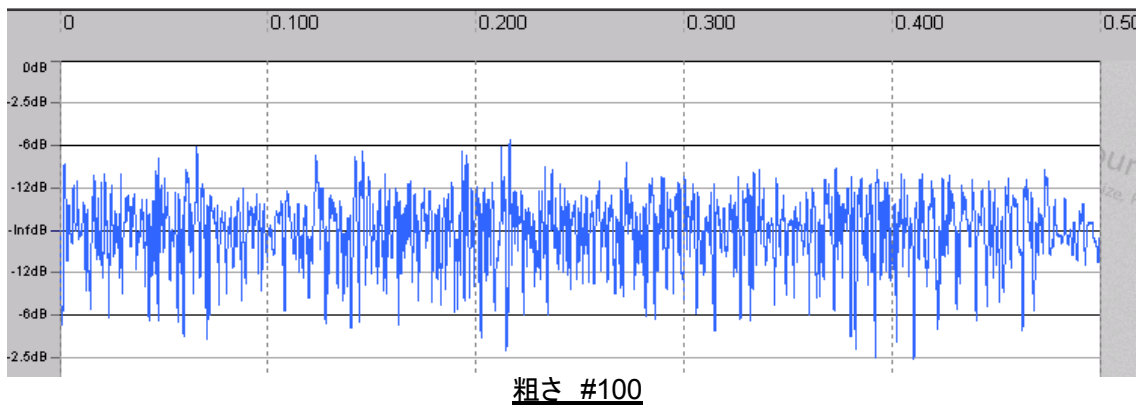


図5.3 計測する紙やすり

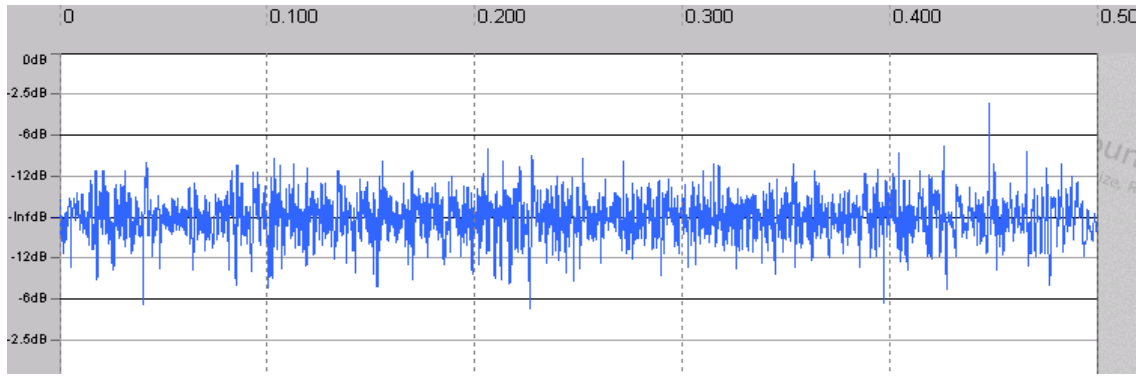
### 5.2.3 検証結果

観測された音響情報を以下に示した。縦軸に周波数、横軸に時間を示す。

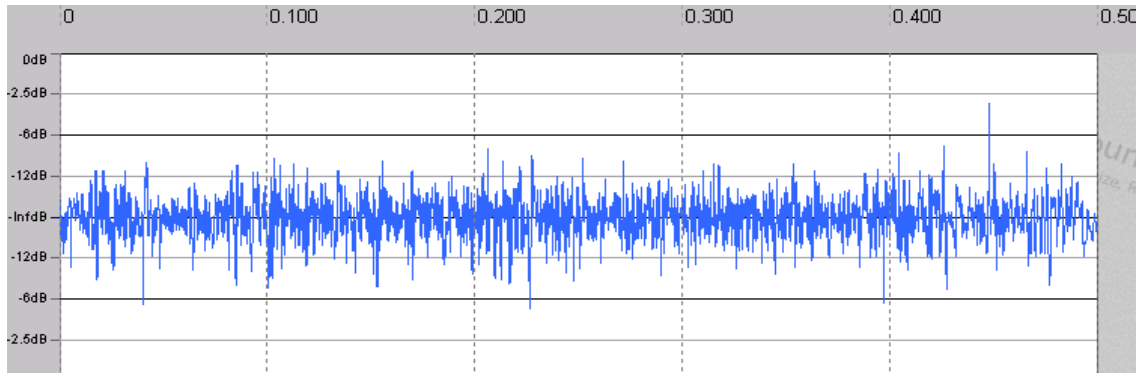




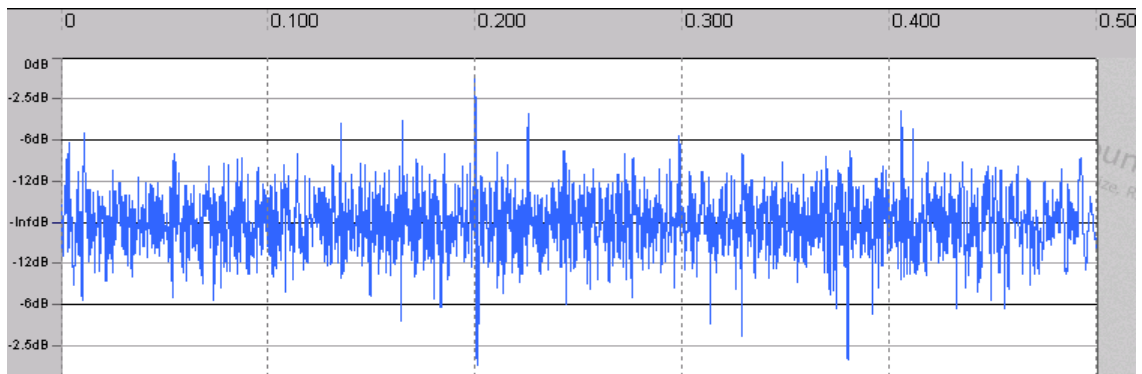




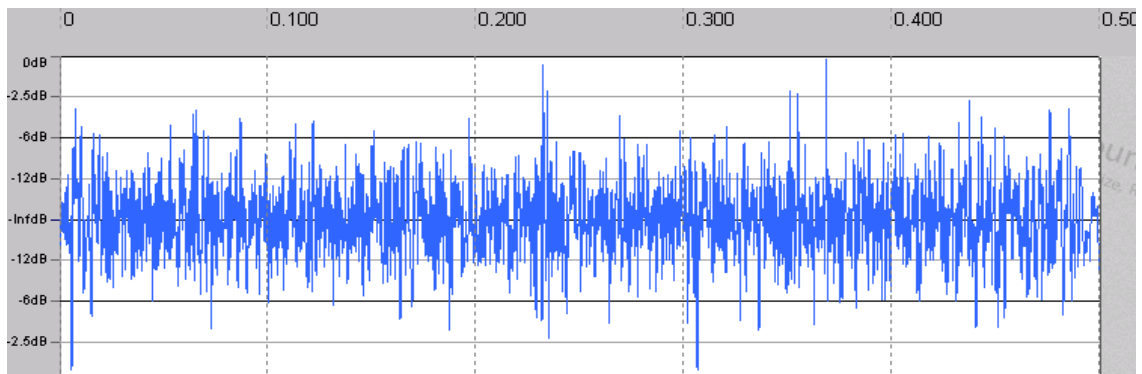
粗さ #220



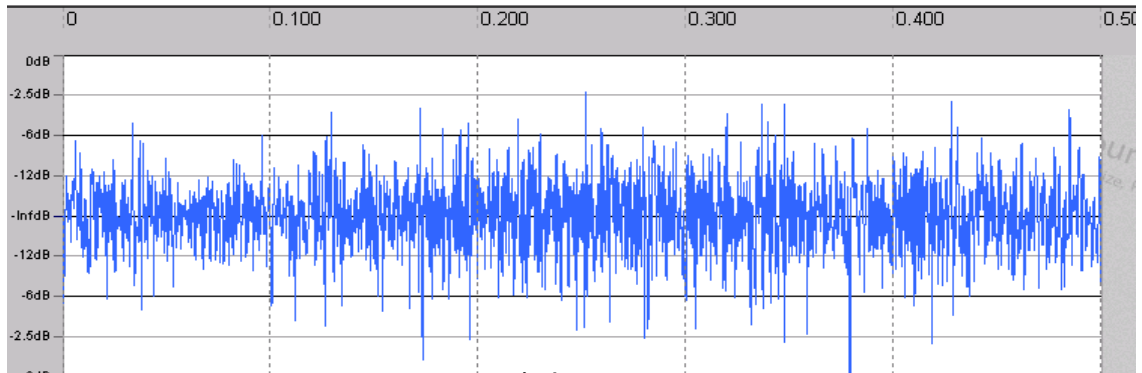
粗さ #240



粗さ #280

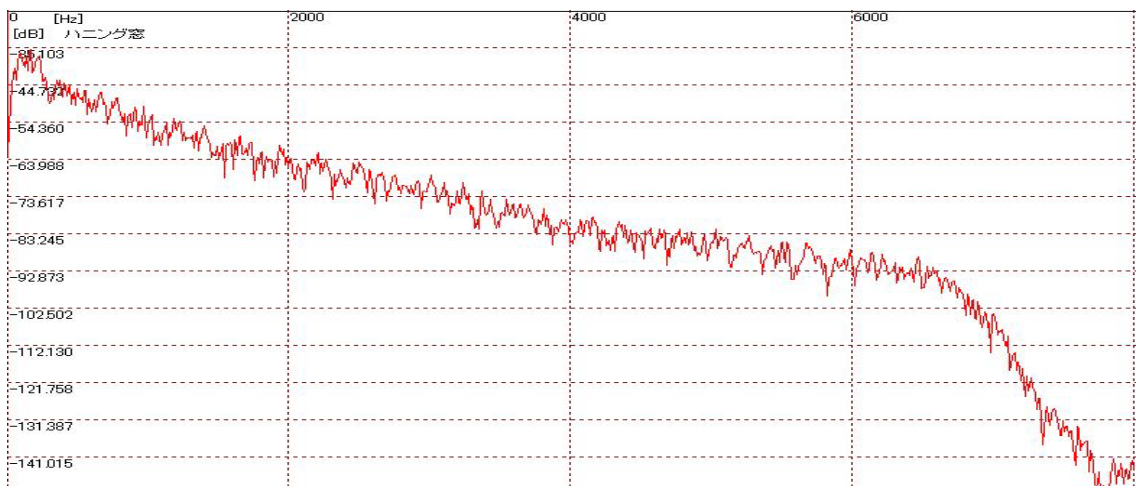


粗さ #320

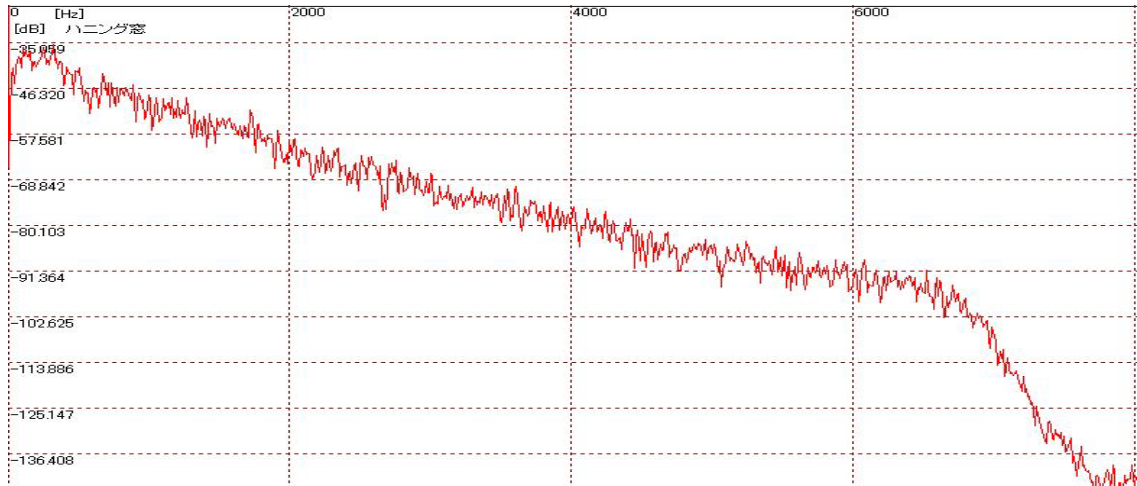


粗さ #400

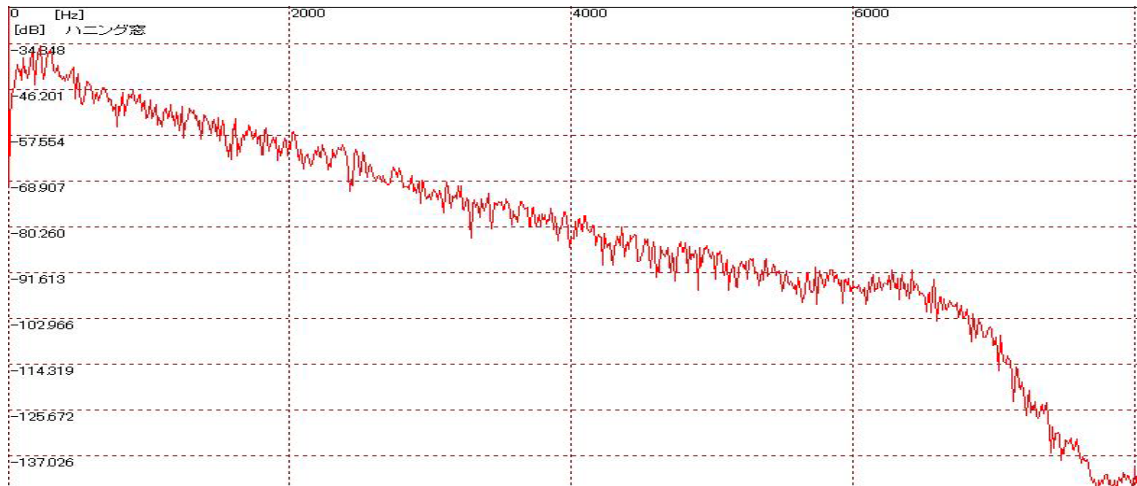
次に、上のグラフで示されたそれぞれの音響情報に対して、スペクトル解析を行った結果を以下に示す。横軸に周波数を、縦軸にパワー(デジベルdB)をとっている。



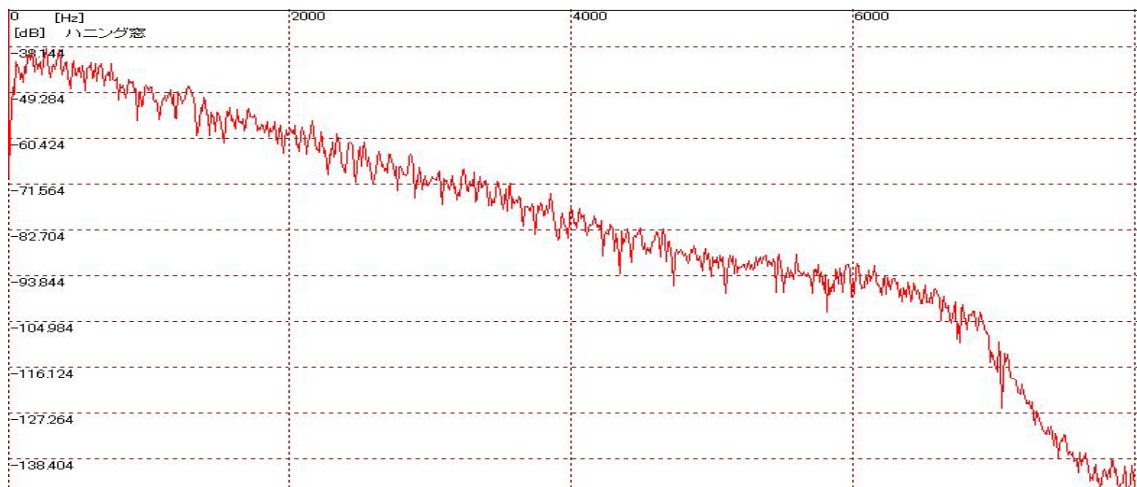
粗さ #40



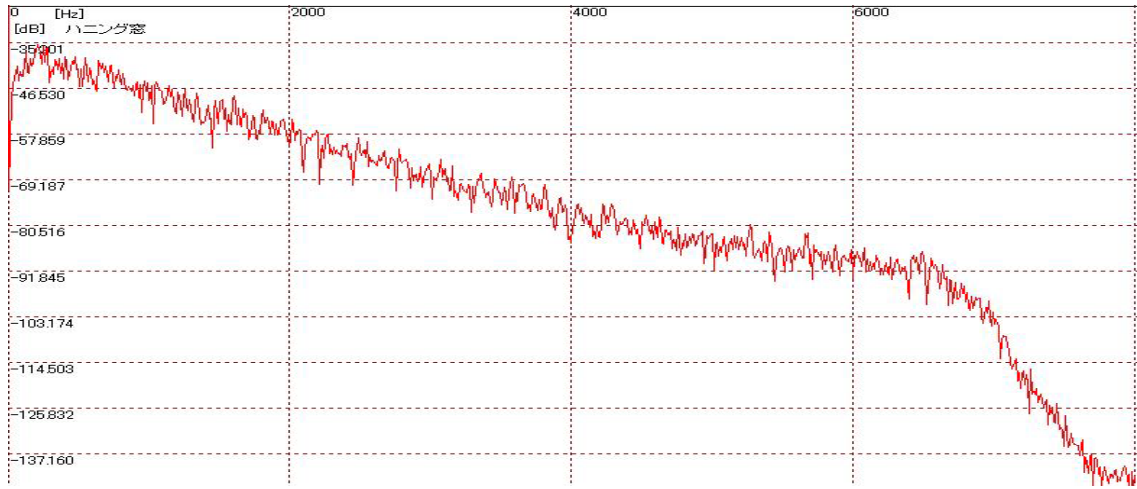
粗さ #60



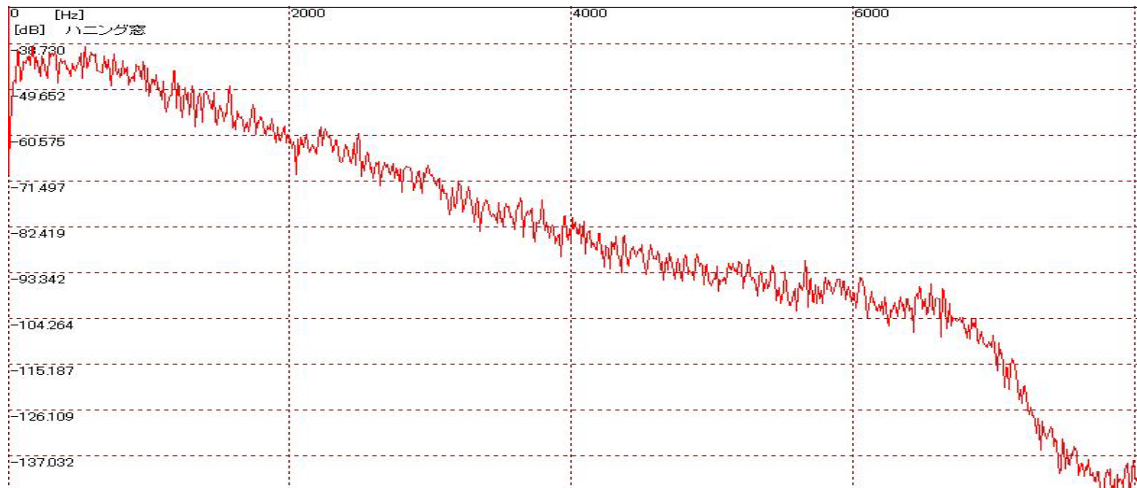
粗さ #80



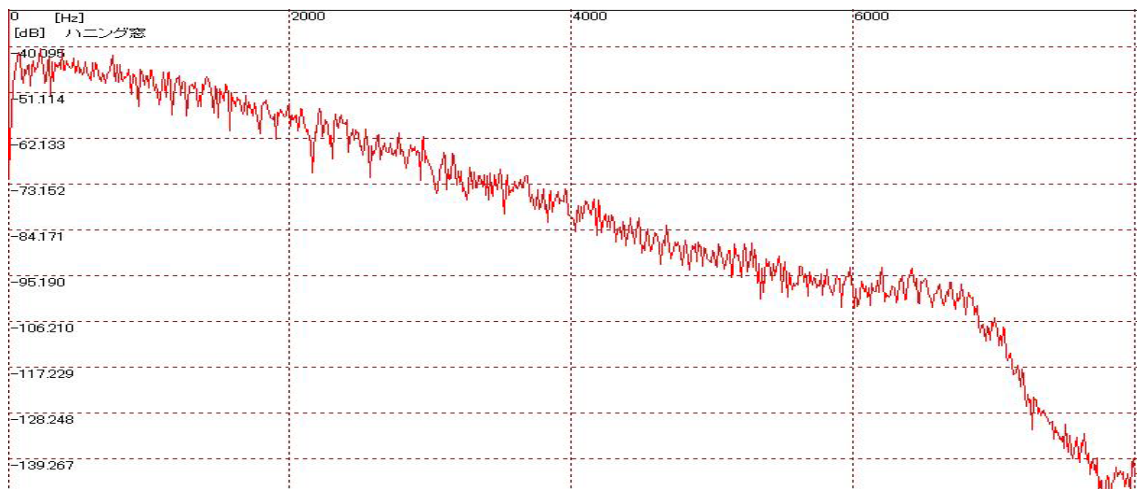
粗さ #100



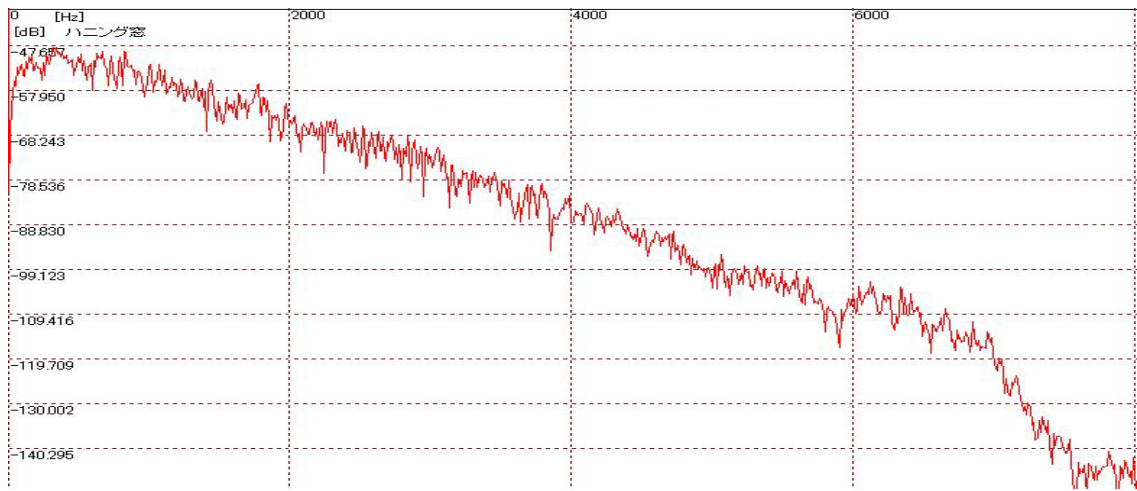
粗さ #120



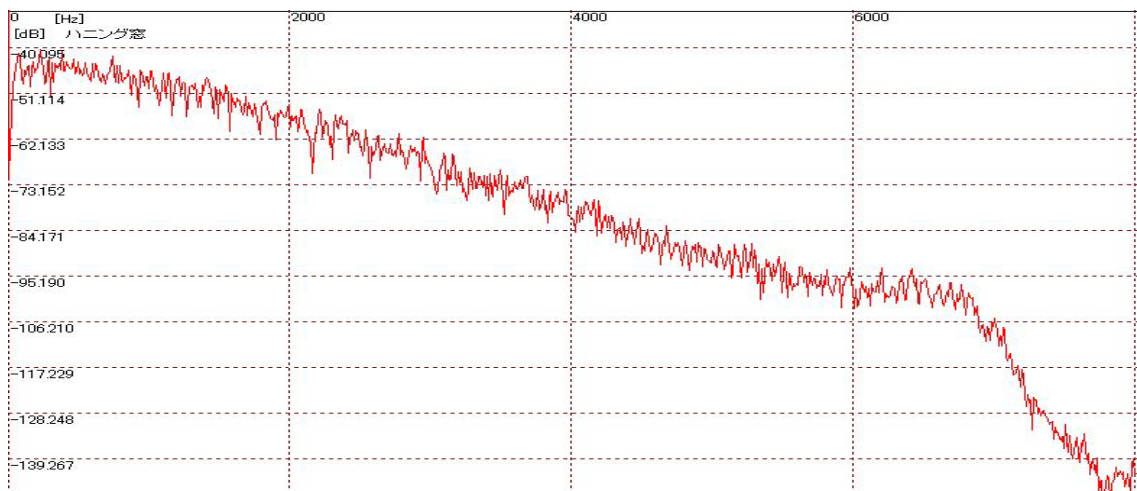
粗さ #150



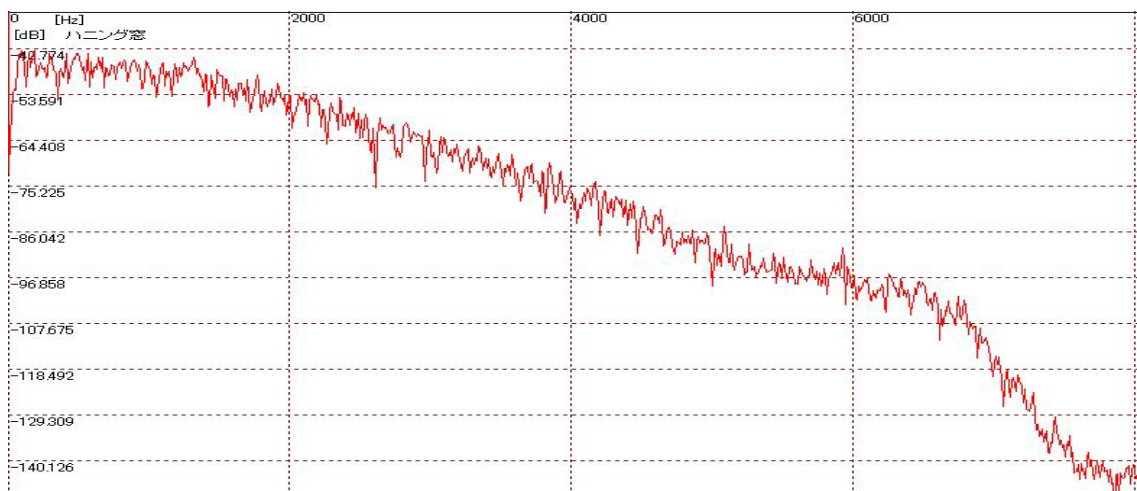
粗さ #180



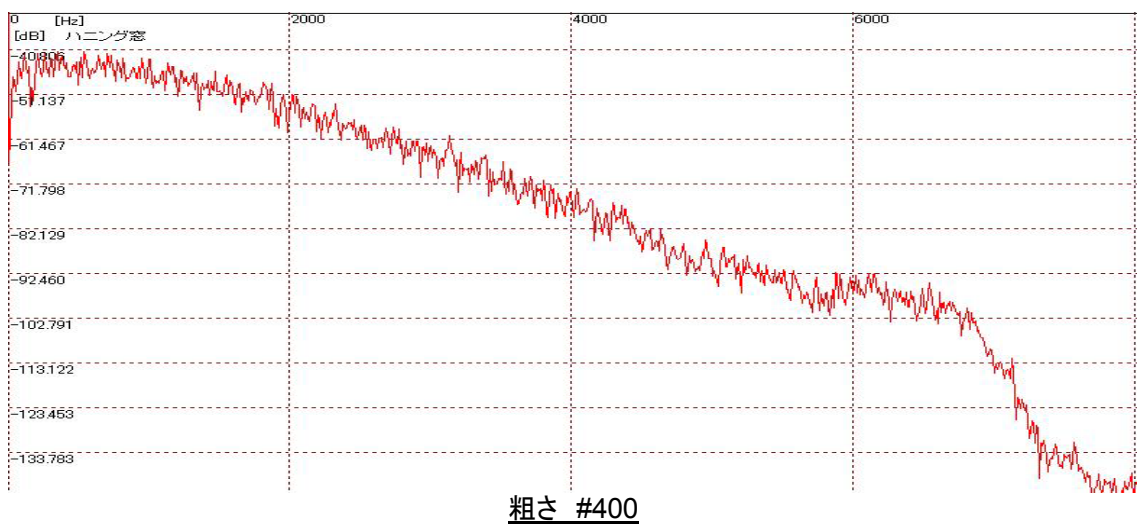
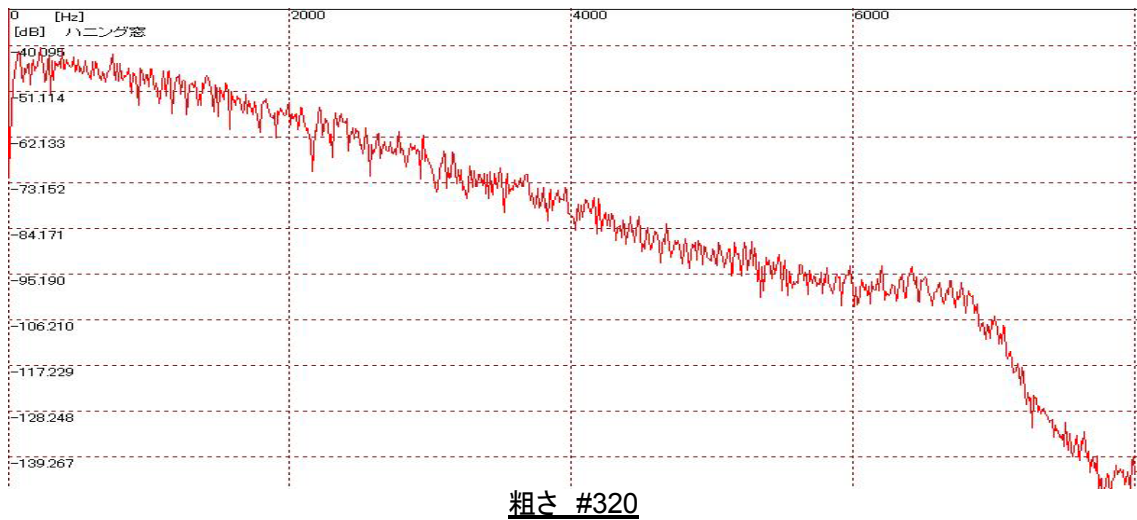
粗さ #220



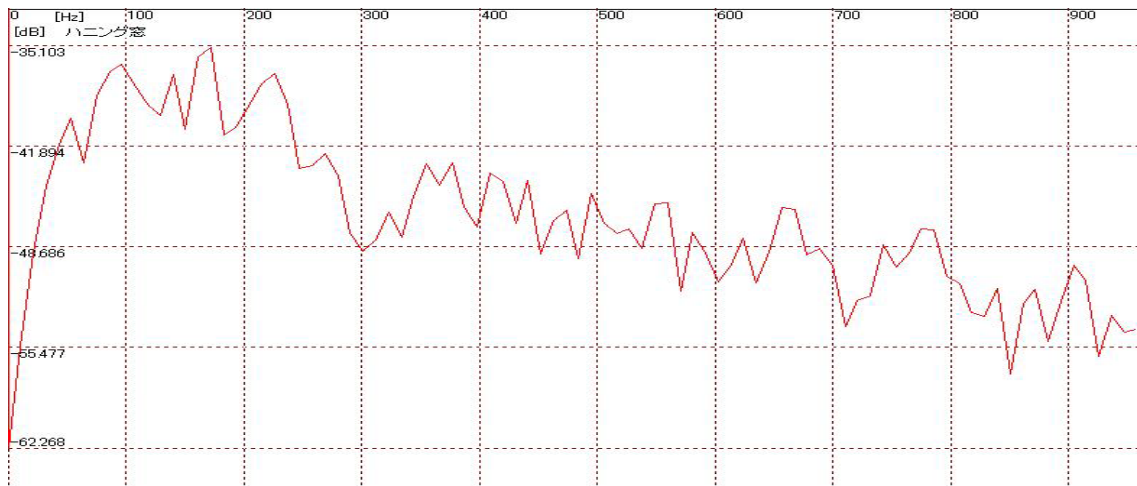
粗さ #240



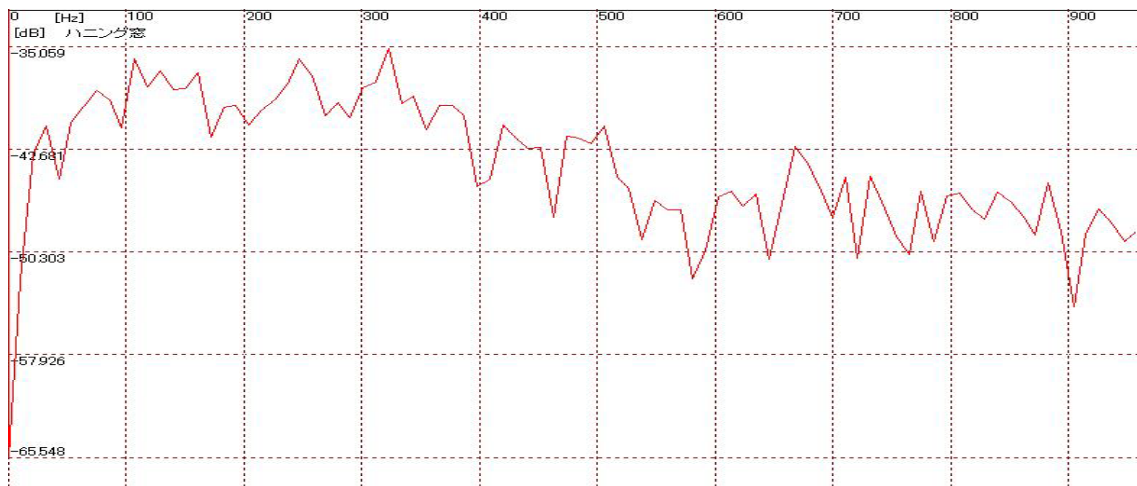
粗さ #280



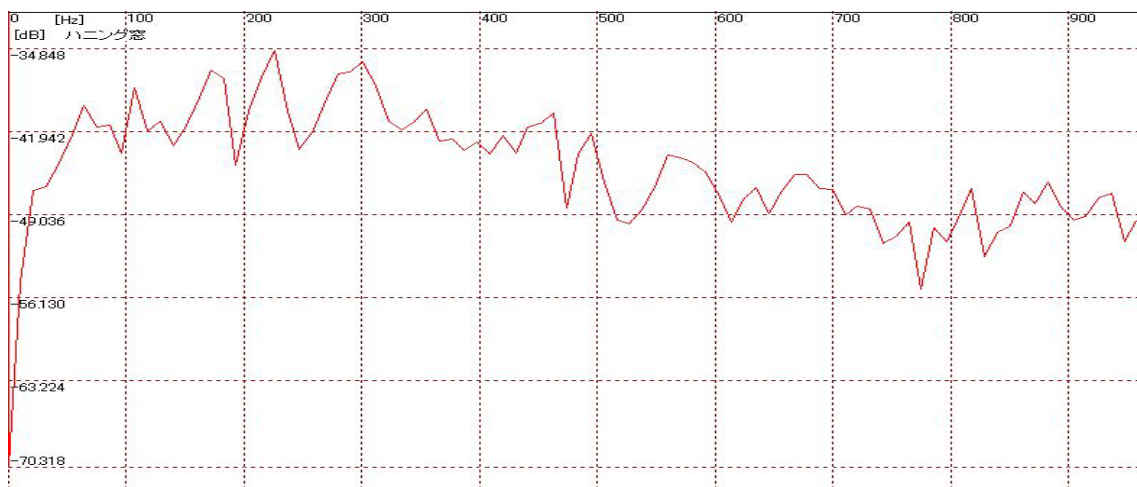
これらのスペクトル解析した結果からでは、各粗さにおける周波数特性が観測しにくい  
ため、1000Hz以下の範囲を表したグラフを以下に示す。1000Hz以下の範囲を選択した理  
由としては、触覚受容器で知覚可能な周波数閾値が1000Hz以下であり、今後行う実際に  
対象物に触れた際に生じる音との比較実験を考慮したためである。また1000Hz以下に全て  
の粗さにおける最も大きな周波数成分が含まれていることもあげられる。このグラフにお  
いても横軸に周波数を、縦軸にパワー(デシベルdB)をとっている。



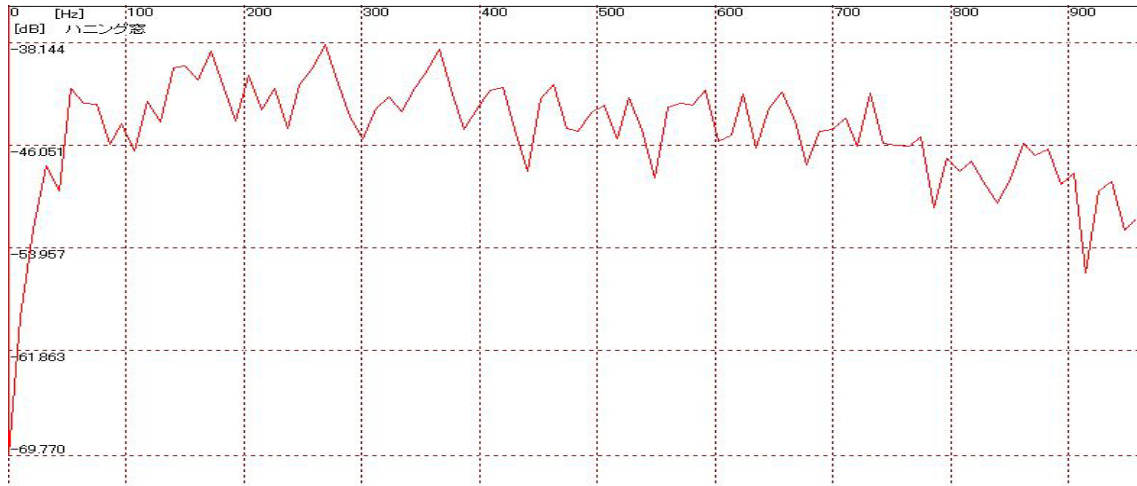
粗さ #40(1000Hz以下)



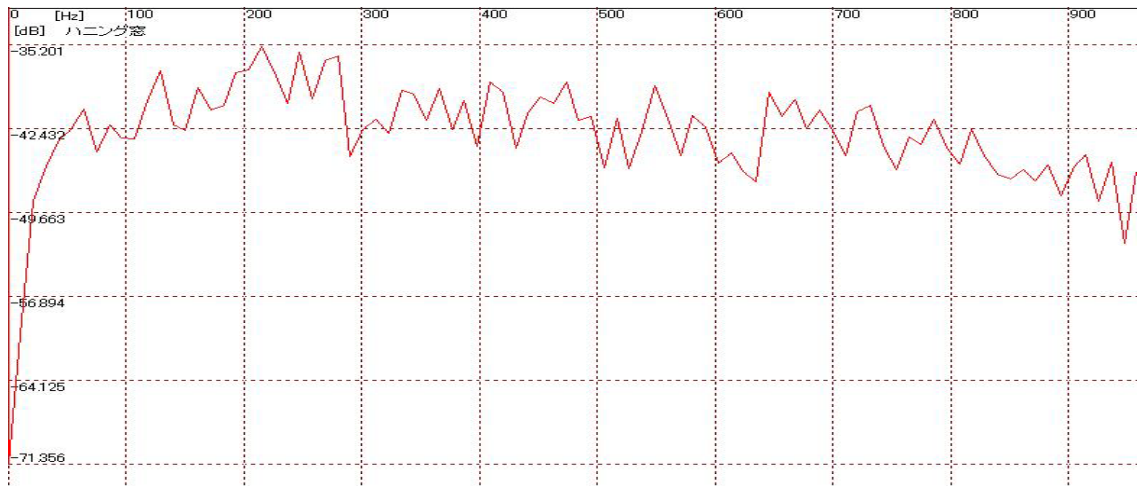
粗さ #60(1000Hz以下)



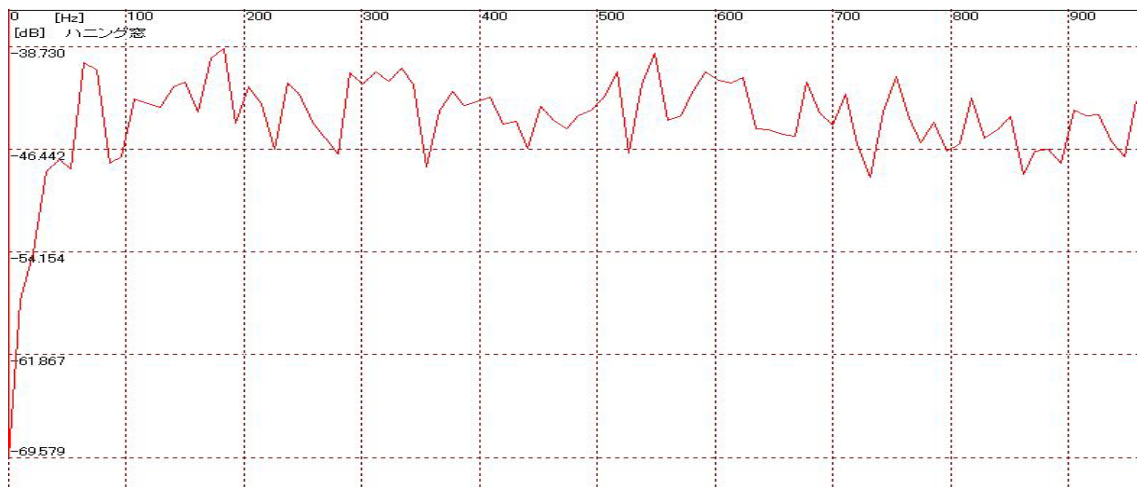
粗さ #80(1000Hz以下)



粗さ #100(1000Hz以下)

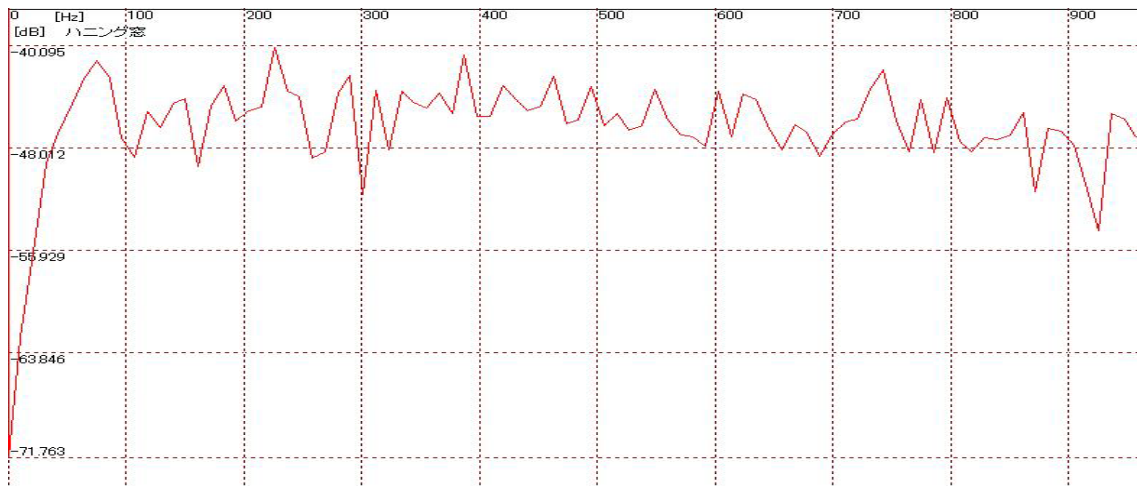


粗さ #120(1000Hz以下)

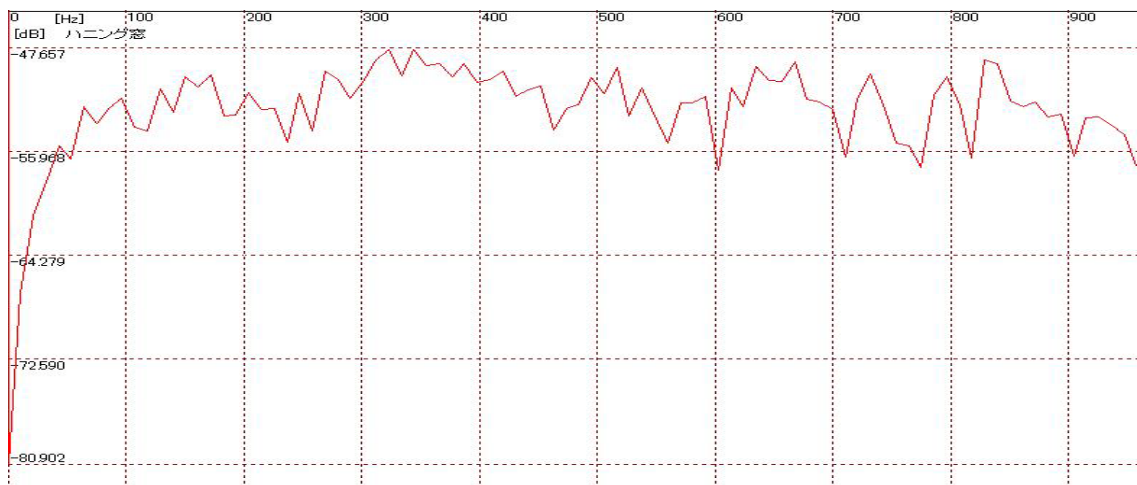


粗さ #150(1000Hz以下)

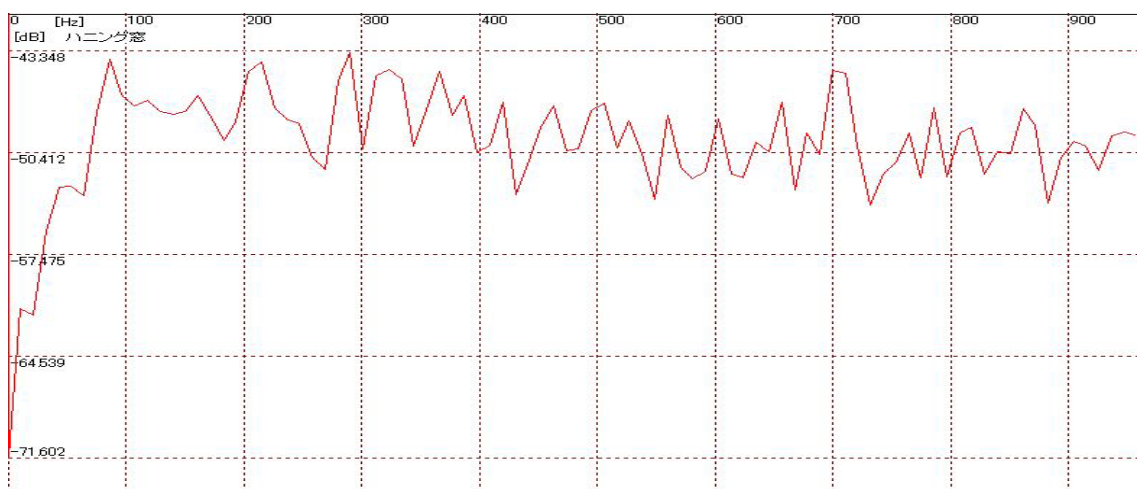




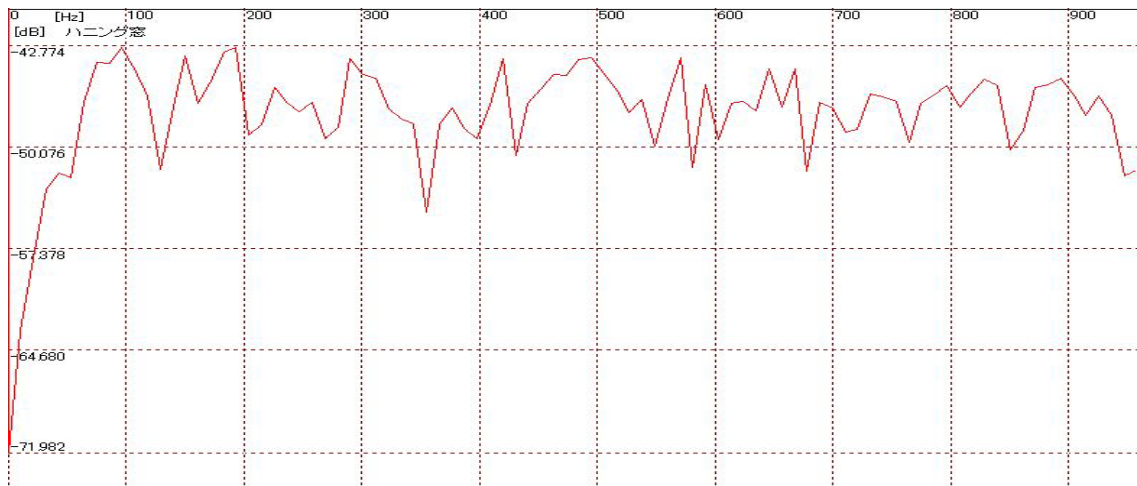
粗さ #180(1000Hz以下)



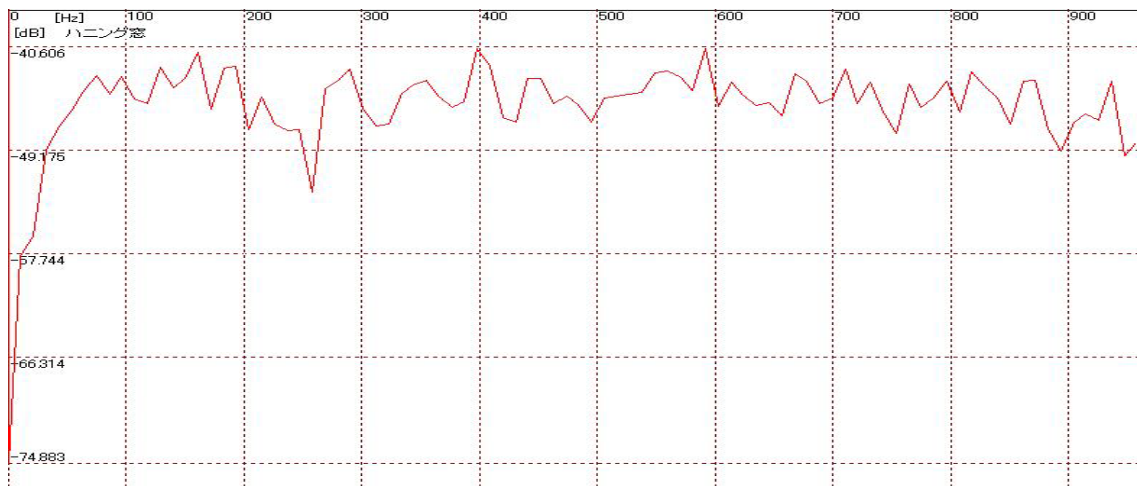
粗さ #220(1000Hz以下)



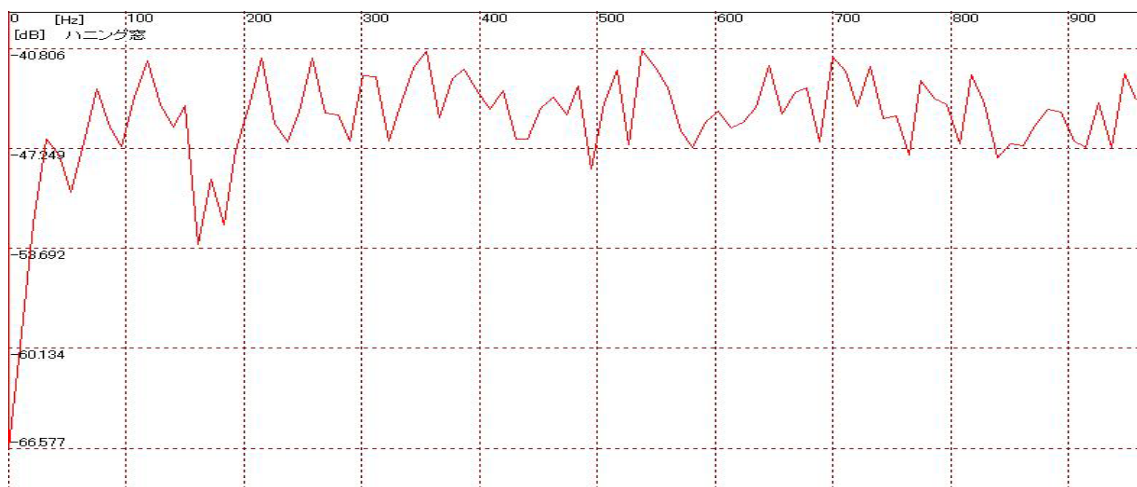
粗さ #240(1000Hz以下)



粗さ #280(1000Hz以下)



粗さ #320(1000Hz以下)



粗さ #400(1000Hz以下)

#### 5.2.4 考察

粗さの異なる 12 種類の紙やすりを計測し、それぞれから得られた音響情報をグラフに表し、さらにそれらをスペクトル解析した。その結果、表面粗さが小さい方(#300 以上)が、最大周波数の値は大きくなることが明らかになった。実際に観測された最大周波数は粗さ #400, #320 では、それぞれ 538Hz, 398Hzであったが、粗さ#80, #40 ではそれぞれ 226Hz, 172Hzとなっている。一方で、粗さ#300 以下において、実験前の粗さが細くなる(#値が大きくなる)につれて、最大周波数成分の値も大きくなると予測していたことが否定される結果を得た。この要因としては、以下の 3 つが考えられる。まず 1 つ目に対象物の表面を計測する際に微細な物質が付着していたことが考えられる。目で見ただけでは識別しきれないほど微細な物質を取り除けていなかった可能性が指摘される。2 つ目の要因として、レーザー変位計のヘッドと計測対象物の距離を一定に保てていなかったことが考えられる。計測する紙やすりが平面を保てておらず、ヘッドとの距離の差異が生じてしまった可能性がある。また、3 つ目の要因として、紙やすりにホワイトノイズが多く含まれていたことが挙げられる。粗さの定められた紙やすりを用いたが、スペクトル解析結果からもわかるように様々なスペクトル成分が混ざっている。この見解に対しては、鈴木らの意見と一致するものである[19]。

全体として最大周波数成分よりも大きな周波数域では滑らかに下降していく傾向がみられた。その影響を受けて、表面形状の滑らかなもの(#の値が大きいもの)と比較して表面形状の粗いもの(#の値が小さいもの)の方が、小さい周波数で下降を始めている。これは粗さが細くなるにつれて空間周波数が高くなる空間周波数の定義と一致する結果であり、今回の計測方法が妥当であったことが示されている。

一方で、今回取得した音響情報では、音を聞くことのみで全ての粗さを判断することはできなかった。詳しく分類していくと、粗さ#40~#150 間における音は識別することが可能であったのに対し、それ以降の粗さ(#180~#400)では識別することができなかった。これは山下らによって示された人間の弁別限に含まれない周波数の変化であったことが原因であると考えられる[23]。しかし、実際に対象物に触れた際に生じる音を聞くことによる粗さ判断は、粗さ#40~#80 間において識別可能であった。これと比較すると本手法によって計測された音響情報を用いた粗さ識別の方が識別可能な粗さ範囲が広いことが明らかになった。では、実際に対象物に触れることによって得られる振動覚知覚に対して、本手法で取得した音響情報はどのような関係性をもっているのだろうか。次の実験では、なぞり動作における触覚と聴覚の関係性を検証するとともに、提案手法である **Listening Touch** の実用可能な範囲を検証する。

### 5.3 なぞり動作における触覚と聴覚の関係性について

本来、なぞり動作をした際に生じる振動覚刺激より知覚されるテクスチャ情報を、提案手法であるListening Touchを用いて取得した音を提示することで知覚することが可能であることを明らかにする。そこで、なぞり動作を触覚と聴覚に分けて刺激することを試みる。実験に用いるテクスチャは実験 5.2 で用いたサンドペーパーの内、実験 5.2 より明らかになった聴覚刺激をした際に識別可能な範囲であるサンドペーパー(#40~#120)5 種類を用いる。

#### 5.3.1 実験方法

実験方法を以下に示す。

- なぞり動作によって得られる聴覚刺激，触覚刺激の一方を提示する
- 触覚刺激，聴覚刺激は共に視覚情報を遮断する
- 刺激に用いるテクスチャは粗さの異なる 5 種類のサンドペーパー(粗さ#40~#120)である
- 5 種類のサンドペーパーの内 2 種類を提示する(同じものも比較)。
- 被験者は各組み合わせにおいて，どちらが粗いか口答し，その際の正答率を記録する。
- 触覚刺激
  - 2 つの触覚刺激の内どちらが粗いかを口答する。
  - なぞる回数は 1 回，指の移動距離を 70mm とし，速度 100mm/s で 2 往復する。
  - 被験者は実験を始める前に，練習としてメトロノーム 85BPM に合わせて，移動距離 70mm を時間制限なくなぞることが可能である。
- 聴覚刺激
  - 2 つの聴覚刺激の内どちらが粗いかを口答する。
  - 触覚刺激の際と同様に指のなぞり動作を行う。ただし，触覚刺激は行わず，指の動きに合わせてListening Touchで取得した音響情報のみ聞く。
  - 提示する音響情報は，指で動かした紙の変位をマウスで計測し，ディスプレイ上のカーソルの動きに合わせてMax MSPを利用して再生した。
  - なぞる回数是一回，指の移動距離を 70mm とし，速度 100mm/s で 2 往復する。よって，その際に音を聞く回数は 4 回となる。
  - 被験者は実験を始める前に，練習としてメトロノーム 85BPM に合わせて，移動距離 70mm を時間制限なくなぞることが可能である。
- 被験者は 20 代の男女 6 名である。
- 触覚刺激，聴覚刺激の刺激順序が与える粗さ知覚への影響を考慮し，被験者の内 3 名は触覚刺激をした後に聴覚刺激を，他 3 名は聴覚刺激をした後に触覚刺激を行った。
- サンドペーパーの粗さの細かいものと粗いものを提示する際に，順序効果による粗さ知覚

への影響を考慮し、各被験者に同じ比較対象のサンドペーパーに対して、提示順序を変えた試行を行った。

- ・ 呈示パターンの出現頻度は一様とし、順序はランダムであるが、各被験者への呈示順序は固定する

また、実験構成図を以下に示す。

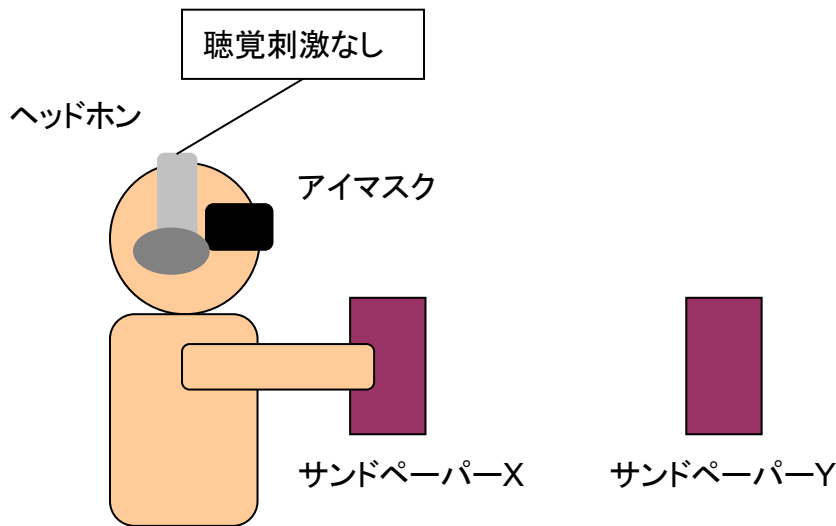


図 5.4 実験構成図(触覚刺激時)

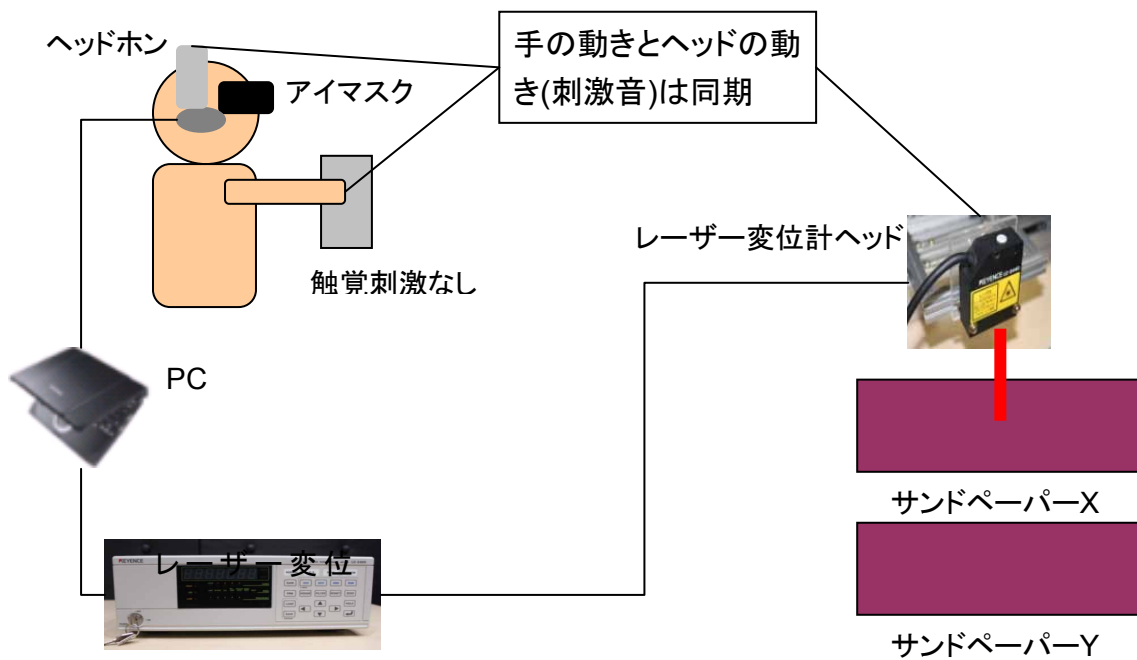


図 5.5 実験構成図(聴覚刺激時)

また、実験の手順を以下に示す。

- 触覚刺激
  - メトロノーム 85BPMに合わせて、移動距離 70mmをなぞる練習させた.
  - 被験者はアイマスク、ヘッドホンを装着し、視界と聴覚情報を遮断した.
  - 2種類のサンドペーパーを提示し、提示された順序になぞり動作を行わせた.
  - 被験者は2種類のサンドペーパーをなぞり終えた後、どちらが粗いか口答する.
- 聴覚刺激
  - メトロノーム 85BPMに合わせて、移動距離 70mmをなぞる練習させた.
  - 被験者はアイマスク、ヘッドホンを装着し、視界と聴覚情報を遮断した.
  - 指の動きに合わせて音が聞き取れることを確認させた.
  - 2種類のサンドペーパーより取得した音を指の動きに合わせて再生した.
  - 被験者は2種類の音を聞き終えた後、どちらが粗いか口答する.

一被験者に行った試行回数は、各サンドペーパーの10通りの組み合わせにおいて各3試行、粗さの提示順序を変えて3試行を行い、触覚刺激において90試行、聴覚刺激において90試行の合計180試行である。

実験では、指のなぞり動作による音響情報の再生装置(聴覚刺激時)を図に示すように配置し、実験を行った。

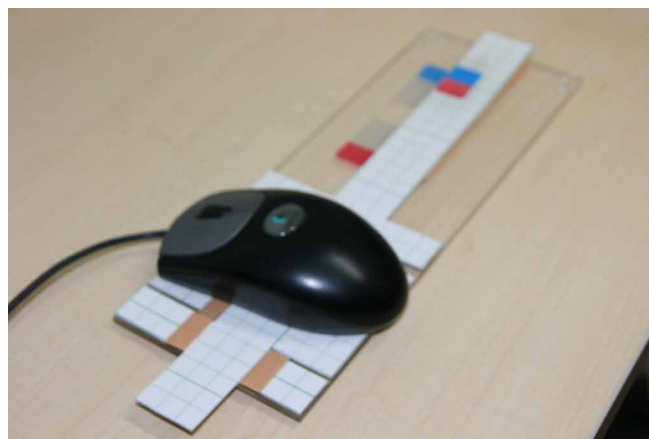
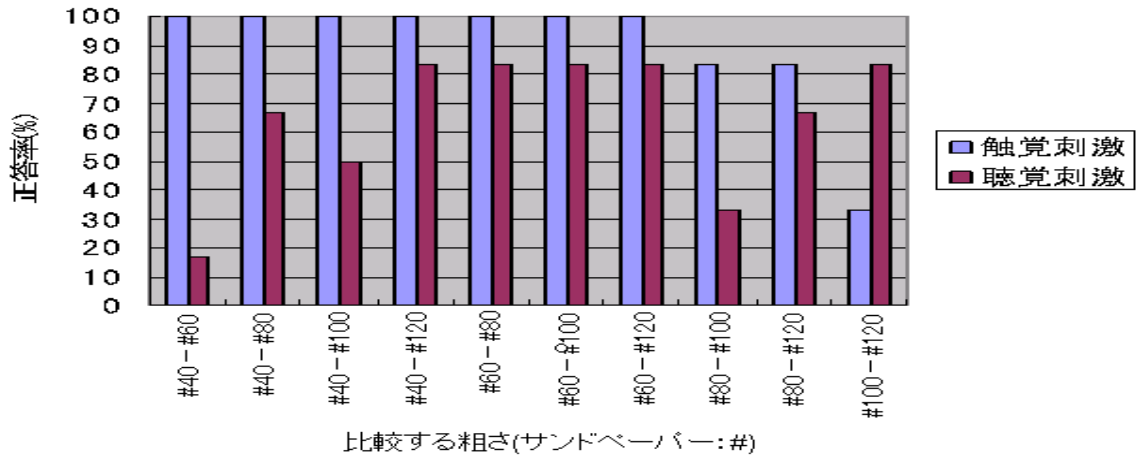


図 5.5 聴覚刺激時の音声再生装置

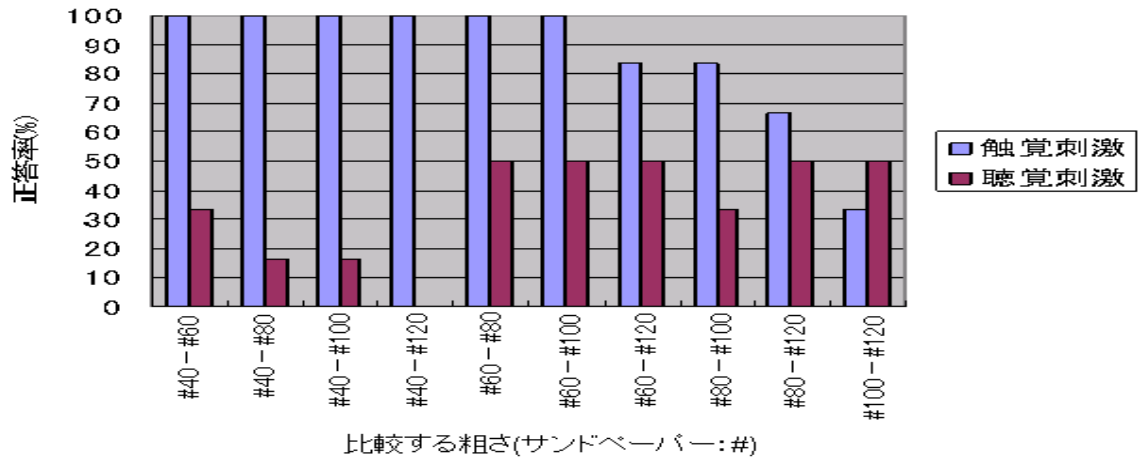
### 5.3.2 結果

各被験者において、触覚刺激と聴覚刺激に対する粗さ弁別の正答率を以下に示す。グラフは、横軸に比較したサンドペーパーの粗さ(#)、縦軸に正答率(%)をとっている。

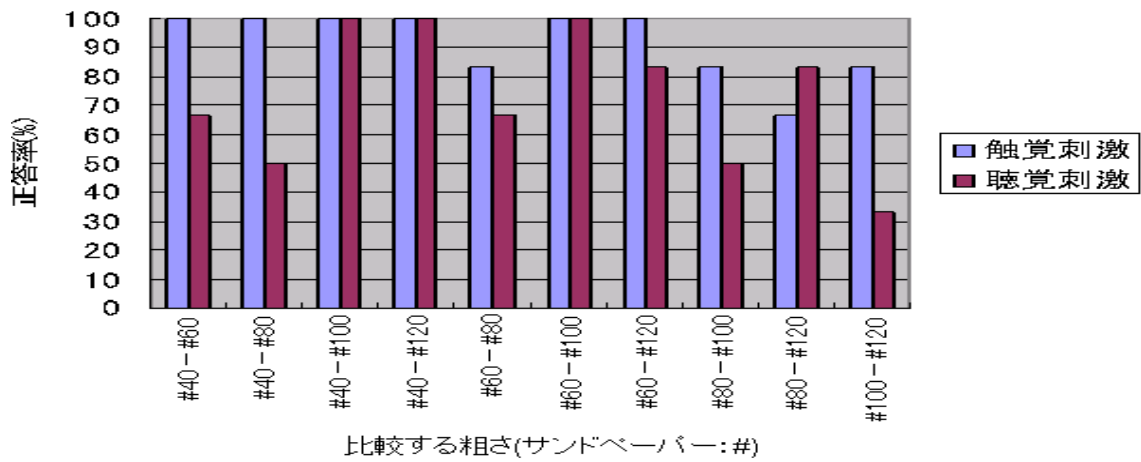
被験者A



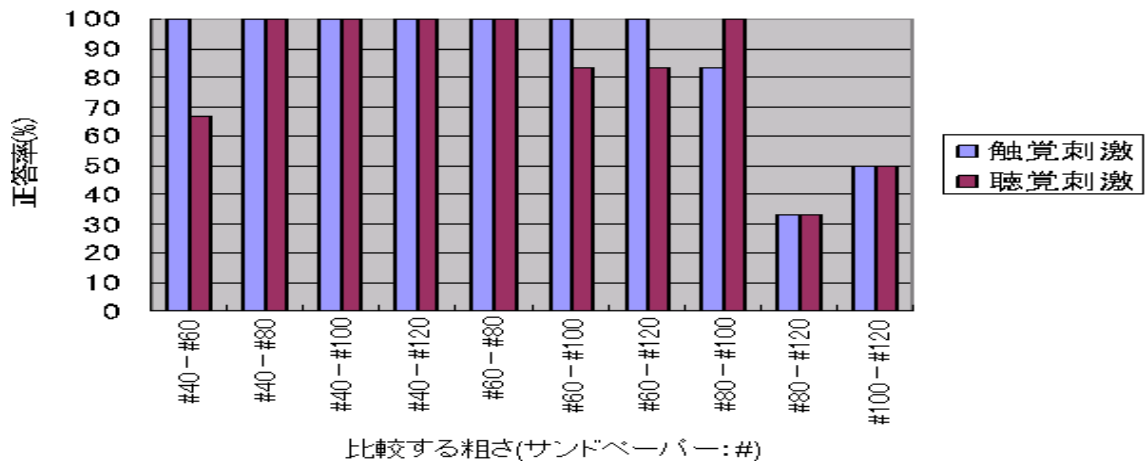
被験者B



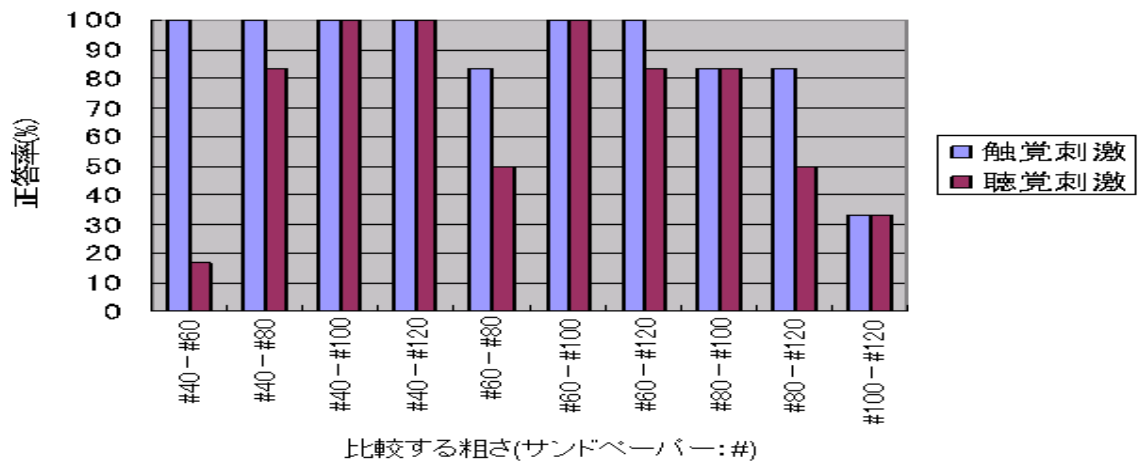
被験者C



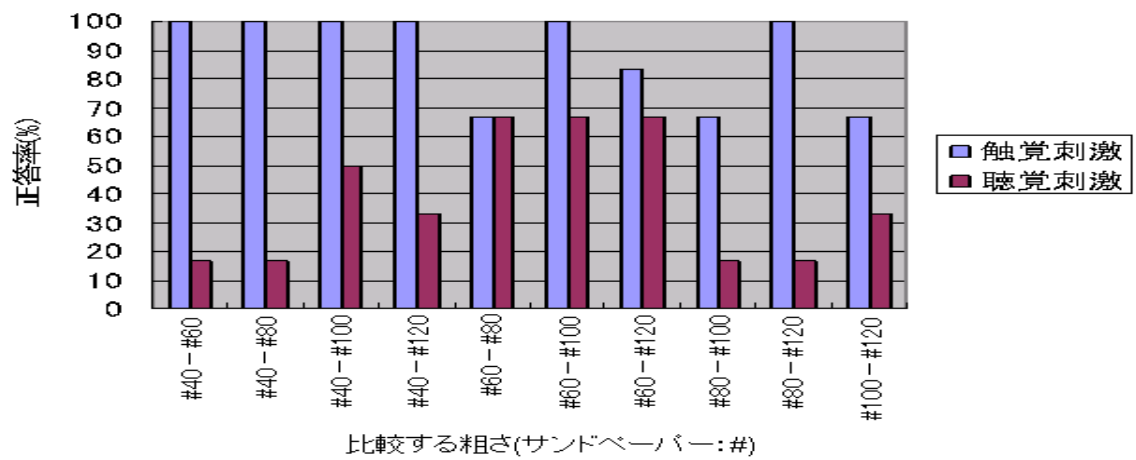
被験者D



被験者E

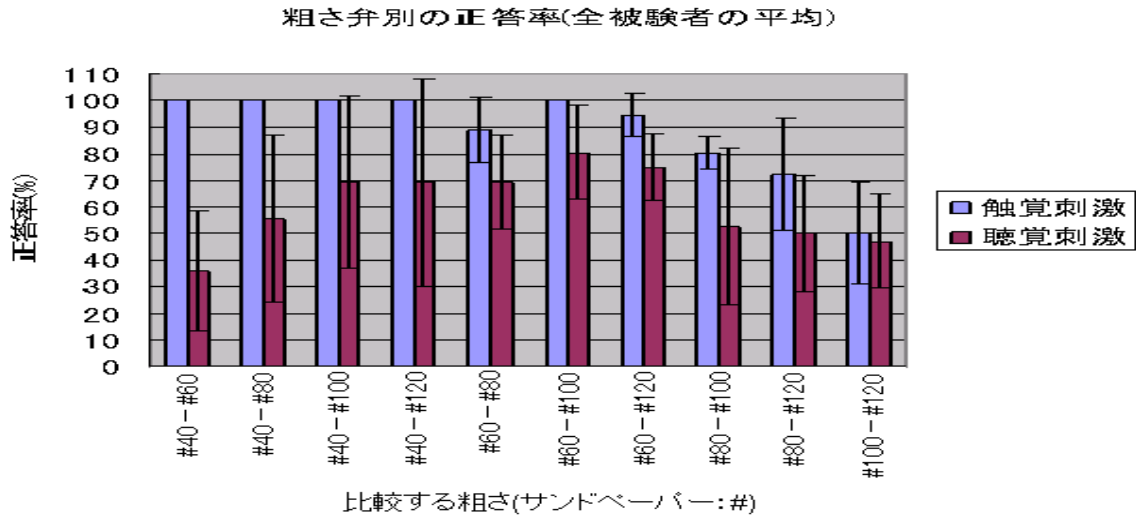


被験者F

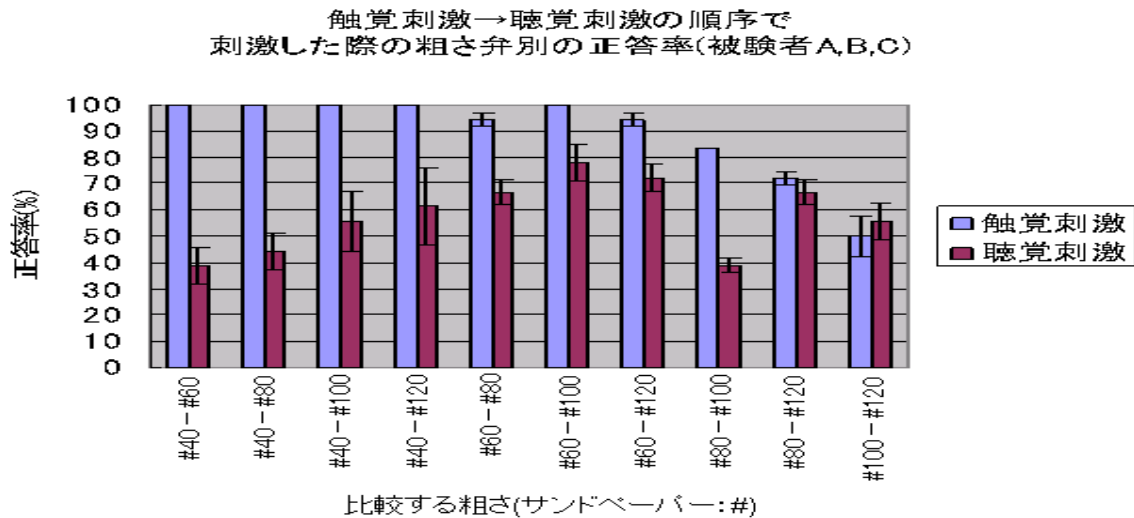




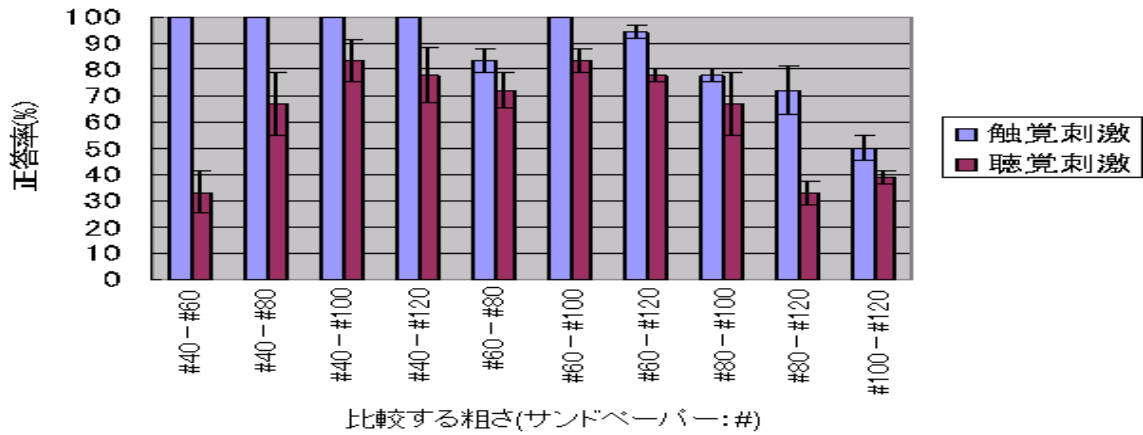
以下に、被験者 6 人の触覚刺激と聴覚刺激に対する粗さ弁別の正答率の平均を示す。グラフは、横軸に比較したサンドペーパーの粗さ(#), 縦軸に正答率(%)をとっている。



次に、触覚刺激と聴覚刺激の刺激順序による粗さ知覚の正答率の結果を示す。1つ目に触覚刺激をした後に聴覚刺激した結果を、2つ目に聴覚刺激をした後に触覚刺激をした結果を示す。グラフは、横軸に比較したサンドペーパーの粗さ(#), 縦軸に正答率(%)をとっている。

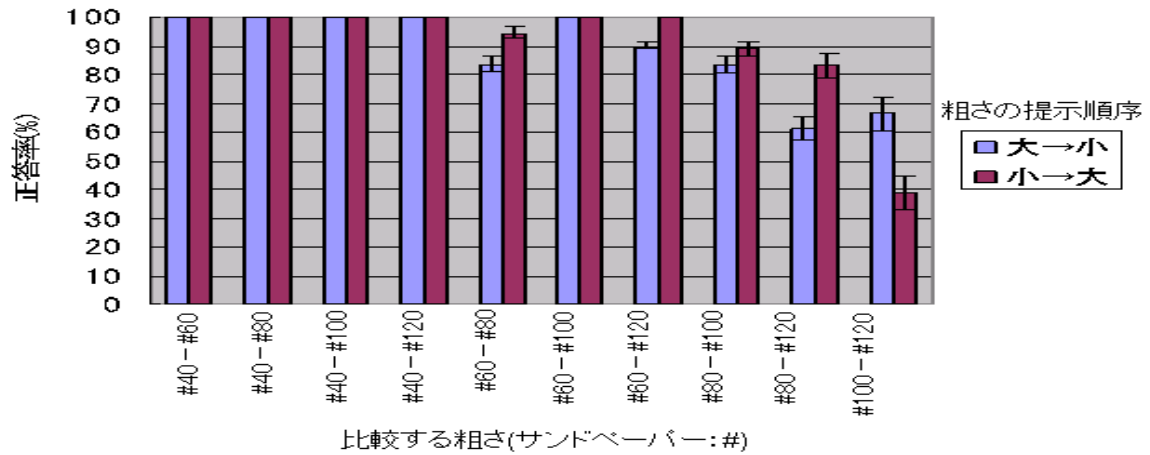


聴覚刺激→触覚刺激の順序で  
刺激した際の粗さ弁別の正答率(被験者D,E,F)

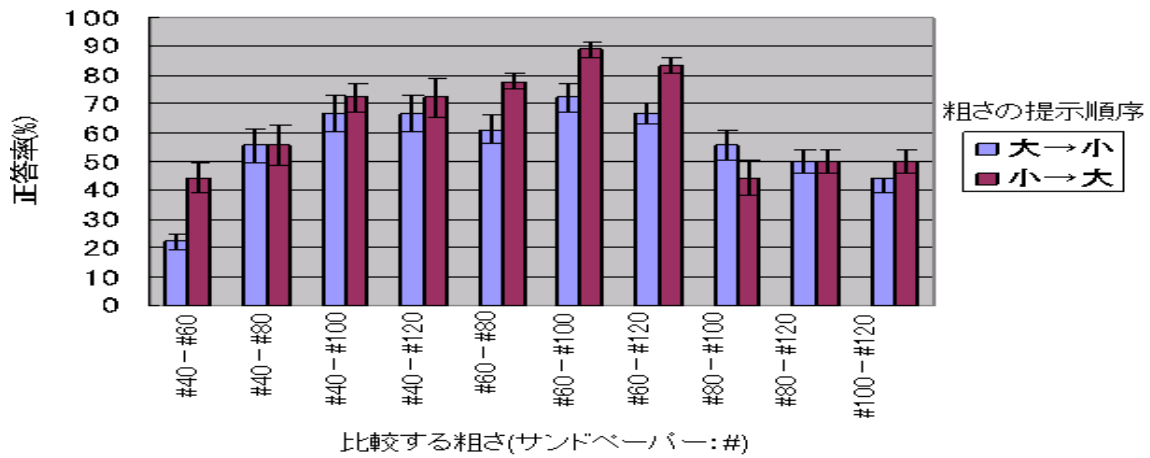


次に、提示するサンドペーパーの粗さにおける順序効果に対する結果を示す。各被験者に同じ組み合わせのサンドペーパーに対して、提示順序を変えて試行を行った結果の全被験者の平均である。グラフは、横軸に比較したサンドペーパーの粗さ(#), 縦軸に正答率(%)をとっている。

全被験者の平均(触覚刺激)



全被験者の平均(聴覚刺激)



### 5.3.3 考察

まず、各被験者における触覚刺激と聴覚刺激の粗さ弁別の正答率について考察する。全被験者において触覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率が聴覚刺激をした際の粗さ弁別に対して正答率が高い傾向が見られた。この要因としては、以下の2点が挙げられる。まず1つ目に、聴覚刺激を与える際に、指の速度が一定を保てず、より正確な音響情報を再生する事が難しかった点が挙げられる。今回再生した音響情報は、予め速度 100mm/s、移動距離 70mmで録音したものであり、この録音した音を加工することなく再生している。よって、より良い音として再生するには、再生速度も録音時と同じ速度で指を動かす事が望ましい。しかし、実際の指のなぞり動作では、速度を一定に保つ事が難しく、音響情報が最大限に再生されなかったことによって、聴覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率が触覚刺激のそれと比較して、低かったと考えられる。2つ目に、聴覚刺激時に再生された音が実際にサンドペーパーをなぞった際の音と違う印象を与えてしまったことが挙げられる。Listening Touchで録音した音は、サンドペーパーの表面形状を計測したものであって、実際に接触を伴わない音響情報の取得方法である。よって皮膚との接触によって生じる実際の音と結びつかなかったと考える。しかし、被験者A, C, D, Eにおいては、比較するサンドペーパーの組み合わせの内、半数以上の組み合わせに対して80%を超える正答率を得られた。具体的には、被験者Aでは、#40-#120, #60-#80, #60-#100, #60-#120, #100-#120間において、被験者Cでは、#40-#100, #40-#120, #60-#100, #60-#120, #80-#120間において、被験者Dでは、#40-#80, #40-#100, #40-#120, #60-#80, #60-#100, #60-#120, #80-#100間において、被験者Eでは、#40-#80, #40-#100, #40-#120, #60-#100, #60-#120, #80-#100間において正答率が80%を超えている。これらの組み合わせに関しては、触覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率も高く、触覚刺激と聴覚刺激のどちらからも高い正答率が得られた。よってこの範囲の刺激において、より多

くのテクスチャ情報を取得していると考えられる。特にこの被験者 4 人に共通して正答率が高かった組み合わせが、#40-#120, #60-#100, #60-#120 感における比較である。これらは実験 5.2 の周波数特性を表したグラフからもわかるように、より高いスペクトル成分を含むサンドペーパーとそれを含まないサンドペーパーの組み合わせであった為に、粗さ弁別の正答率が高かったと考えられる。一方で、被験者Bと被験者Fに関しては、触覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率に比べて聴覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率が特に低くなってしまった傾向が見られた。この理由として考えられるのは、この 2 人の被験者に共通して、再生された音に対して不快に感じた、あるいは音の高さの変化と粗さの変化とが結びつかなかったという感想を得た。再生された音はサンドペーパーの表面形状を計測して取得した音であり、この音はホワイトノイズに近いと考えられる。よって再生された音自体に違和感を覚え、その結果が聴覚刺激の粗さ弁別の正答率が低下した要因の一つとして考えられる。また、音の高さの変化と粗さの変化の関係性について、聴覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率が高い被験者では、高い音が粗さの細かいもの、低い音が粗いものという繋がりが連想できたと感想を得られている。この 2 つの結びつきの有無が本実験の正答率の差に影響していると考えられる。

次に、触覚刺激と聴覚刺激の刺激順序が及ぼす粗さ知覚への影響について考察する。仮説として、触覚刺激を与えた後に聴覚刺激を与える順序の方が、聴覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率は高くなる考えた。理由としては、一度触覚刺激を受けることによって、サンドペーパーをなぞるというイメージが湧きやすくなり、聴覚刺激を与えられた際に、得られた音とサンドペーパーをなぞるイメージとが結びつきやすくなるのではないかと期待できるからだ。結果としては、聴覚刺激をした後に触覚刺激を行う順序の方が聴覚刺激をした際の粗さ弁別の正答率が高い傾向が見られた。特に、聴覚刺激における粗さ遠別の正答率が高い#40-#120, #60-#100, #60-#120 間においてそのような傾向が見られた。この要因としては、仮定として考えていた、触覚刺激を受けた際のサンドペーパーをなぞるイメージと Listening Touch より再生された音響情報から連想されるサンドペーパーをなぞるイメージとが合致しなかったと考える。また、実際にサンドペーパーに触れたことにより、これまでの経験上のサンドペーパーをなぞった際の音響情報が頭に連想され、再生された音との違いが生じたのではないかと考える。

次に、提示するサンドペーパーの粗さにおける順序効果が及ぼす粗さ知覚への影響について考察する。今回、各被験者に同じ組み合わせのサンドペーパーに対して、提示順序を変えて試行を行った。その理由としては、提示する刺激の前後関係によって、後の刺激が前の刺激の影響を受けていることが考えられるからである。実験の結果としては、聴覚刺激に対して粗さ知覚の聴覚順応が生じていると示唆される結果を得た。サンドペーパーの 10 通りの組み合わせの内、7 通りの組み合わせに対して、粗さの細かい刺激を与えた後に粗さの粗い刺激を与えることによって粗さ弁別の正答率が高くなる傾向が見られた。一方で触覚刺激に関する順応効果については、粗さの大きな刺激の後に粗さの細かい刺激をし

た際に粗さ弁別の正答率が 100%でない組み合わせに関しては、順応効果が示唆される結果を得た。それは#60-#80, #60-#120, #80-#100, #80-#120 間において生じた。その要因としては第 1 の刺激の強度が第 2 の刺激の強度よりも小さい場合には、触覚における刺激増強が生じにくいとされていることが挙げられる。

## 第6章 結論と展望

物体の表面形状をレーザー変位計を用いて非接触に計測し、そこから得られる空間周波数を音響情報に変換して取得することによって、本来、振動覚刺激より得られるテクスチャ情報の知覚に影響を与えるか検証した。まず、実験 5.1, 5.2 で提案する手法で音響情報を取得することが可能であることを確認した。次に、そこで得られた音響情報を用い、なぞり動作から得られる情報を触覚刺激と聴覚刺激から得られる情報とに分類し、この関係性を示すことによって、本手法でテクスチャ情報を知覚することが可能であるか検証した。実験 5.3 の結果、サンドペーパーをなぞる際において、#40-#120, #60-#100, #60-#120 間のサンドペーパーの比較に対して、触覚と聴覚が共により高い粗さ弁別が可能であることが明らかになった。よって、この範囲において聴覚刺激を与えることによって、本来振動覚知覚より得られるテクスチャ情報を聴覚刺激によって知覚することが可能であると期待できる。

本手法はより多くの場面で利用することが可能であると考えられる。ドラマや映画で効果音を利用することはもはや当然のことである。そこで使われる効果音を作成するのがサウンドクリエイターである。彼らはどのように効果音を作成しているのだろうか。近年では、誰でも簡単にインターネットを利用して効果音を作成できるようになっている。そこには決められた音源があり、それを好きなように加工することによって、自分好みの効果音が誕生する。インターネット上で効果音を作成する人にとって音源が用意されていることは必要条件であり、重要なことである。サウンドクリエイターは彼らと同じように、与えられた音源を加工していくことも可能であるが、音源を自ら作り出すことも行う。例えば、海の波の音は、容器に入れた砂を移動させることによって「ザーザー」という音を作り出し、風の音が欲しい時には、ロープを振り回すことによって「ビュービュー」という音を作り出している。しかし、我々が注目したような人が服や毛皮に触る際に生じる音をどのように録音することができるだろうか。そのような効果音が必要なシーンは映画やドラマでも存在すると考える。例えば麻薬捜査班が白い粉に触るシーンでは、手で触れている事が重要になってくる。そのような状況で使われる効果音、そしてその効果音を作り出す音源の取得方法として、本手法を利用することが有益であると考えられる。

また、最近ではインターネットやテレビを介した通信販売が盛んに行われている。そこではバックや洋服、布団からソファまで、我々が特に触り心地を追求する物が売買されている。売り手はこれらの触り心地を何々の様な触り心地など言葉巧みに説明し、買い手に訴えかけている。しかし、買い手が実際に商品を購入し、肌触りを確かめてみると、想像していたものとは違うといったことはよく起こることである。では、ここで本手法を用いて音を伝えることが可能であったらどうだろうか。買い手としては商品の肌触りがより鮮明に理解でき、想像したものと実際に触れた際に感じる肌触りとの違いを少なくするこ

とができる。売り手としても、より商品の本質を伝えることができるのではないだろうか。本提案を用いることで、売り手買い手双方にとって有益な結果をもたらすと期待できる。

さらに、非接触で対象物の物体を計測する特徴を持つ本手法を用いることで、遥か遠方に見える山や月の表面など物体との距離が大きく離れているものについても触れることが可能であると期待される。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，稲見昌彦教授，杉本麻樹教授には多大なるご指導，ご助言，ご協力を頂きましたことを心より感謝申し上げます。また，実験や論文構成，研究の進め方などご指導を頂きました永谷直久氏，古川正紘氏，小泉直也氏，高橋征資氏に対し深く感謝申し上げます。また，共に苦勞を重ね，支えあいながら研究を進めた上間裕二氏，安謙太郎氏，牧野慎介氏，杉浦裕太氏に深く感謝します。



## 参考文献

- [1] 安藤英由樹, 渡辺淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎, “Augmented Realityのための爪装着型触覚ディスプレイの研究”, 電子情報通信学会論文誌D Vol.J87-D2 No.11 pp.2025-2033
- [2] 菊池智, 濱本和彦, “没入型VR環境で使用可能な力触覚提示装置(HAMA デバイス)の開発”, 電気学会論文誌C Vol. 129(2009), No.10 pp.1859-1864
- [3] 内川恵二: 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店, 2008.
- [4] Makous JC and Middlebrooks JC. : Two-dimensional sound localization by human listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87: 2188-2200, 1990.
- [5] Weinstein S: Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality. Kenshalo DR (Ed.): *the Skin Senses*, pp.223-261, Charles C Thomas, 1968.
- [6] Hahn JF: Vibrotactile adaptation and recovery measured by two method. *Journal of Experimental Psychology*, 71(5): 655-658, 1966.
- [7] Verrillo RT: Temporal summation in vibrotactile sensitivity. *Journal of Acoustical Society of America*, 37(5): 843-842, 1965.
- [8] Gescheider GA, Bolanowski SJ, Pope JV et al.: A four analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: Frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory and Motor Research*, 19(2): 114-124, 2002.
- [9] 田嶋香織, “オノマトペ(擬音語擬態語)について”, 関西外国語大学生留学生別科日本語教育論集, 16 pp. 193-205. 2006.
- [10] 藤野良孝, 吉川政夫, 竹中晃二, 仁科エミ, 山田恒夫, “運動教育に用いるオノマトペの基本周波数が握力に及ぼす影響”, 日本教育工学論文誌, 30(4), 305-314, 2007.
- [11] S. J. Lederman and S. G. Abott: “Texture Perception: Studies on Intersensory Organization using a Discrepancy Paradigm and Visual Versus Textual Psychophysics,” *J. Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol, 7, pp.902-915, 1981.
- [12] Nagarajan, S., Blake, D., Wright, B., Byl, N., & Merzenich, M. Practice-related improvements in somatosensory interval discrimination are temporally specific but generalize across skin location, hemisphere, and modality. *Journal of Neuroscience*, 18, 1559-1570. 1998.
- [13] M. A. Heller, “Visual and tactual texture perception: Intersensory cooperation,” *Perception & Psychophysics*, 31(4), pp.339-344, 1982.
- [14] S. J. Lederman, “Auditory texture perception. *Perception*,” 8, pp.93-103, 1979.

- [15] P. V. Schiller, "Die Rauhgkeit als intermodale Erscheinung." *Zeitschrift fur Psychologie*, 125, pp.265-289, 1932.
- [16] S. Guest, C. Catmur, D. Lloyd and C. Spence, "Auditactile interactions in roughness perception," *Experimental Brain Research*, 146, pp.161-171, 2002.
- [17] S. J. Lederman, R. L. Klatzky, T. Morgan and C. Hamilton, "Integrating multimodal information about surface touch-produced sound sources," *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual Haptics Symposium for Virtual Environment and Teleoperator Systems (IEEE VR '03, pp.151-158)*, 2002
- [18] V. Jousmaki and R. Hari, "Parchment-skin illusion: sound-biased touch," *Current Biology*, 8, R190, 1998.
- [19] 鈴木結花, 行場次郎, "触りに無関係な聴覚刺激が触覚的粗さ知覚に及ぼす影響について", 電子情報通信学会, HIP2007-102 (2007-11)
- [20] 大山他編: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- [21] 伊福部: "生体工学を基礎とする人工現実感-感覚代行研究を例にとって-" *テレビジョン学会誌* Vol. 46, No.6, pp.718-726, 1992.
- [22] 矢野博明 "Touch The Untouchable" *SIGGRAPH ASIA 2009 - EMERGING TECHNOLOGIES*
- [23] 山下泰弘, 竹前忠 "周波数変化する短音の周波数弁別限" *日本音響学会誌*, 45(6), pp.419-425, 1989.