

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科	総合情報学専攻 博士前期課程
氏名	岡崎 龍太	学籍番号 1130013
論文題目	触覚刺激による聴覚変調	
要旨	<p>昨今スマートフォンやタブレット端末の普及・高機能化に伴い、モバイル環境下での視聴覚コンテンツ鑑賞が確立しつつある。その中でも視覚については Retina ディスプレイ (Apple, USA) に代表される高品位ディスプレイ技術によって、モバイル環境であっても十分な高品位を保つことが可能となっている。</p> <p>一方、従来聴覚的に高品位なコンテンツ鑑賞を支えていたのが多チャンネル・高性能スピーカに代表される高臨場体感音響技術である。これらの技術では重低音の補強、多スピーカによる音場の再現、身体広範囲への振動提示等によって臨場感を高めている。しかしながら、モバイル端末は大きさの制約上大型の装置や高性能なスピーカを搭載することが難しく、たとえ実装したとしても生活雑音にあふれたモバイル環境下ではその性能を発揮することは難しい。そこで私は従来とは異なる手法を用いてモバイル環境においても聴覚の臨場感を確保することができないかと考えた。</p> <p>本研究ではモバイル環境における聴覚の臨場感を増幅することを目的とし、聴覚刺激の一部を触覚刺激で補強、代替し、「触覚を聴く」ことを提案する。聴覚-触覚変換は難聴者への福祉用途で古くから提案されているが、本提案では触覚と聴覚のクロスモーダル現象に着目し、あくまで「聴覚知覚が触覚によってうける変化」を利用する。モバイル端末は聴覚刺激の品質が制限される一方で、常に端末を把持しているため触覚刺激にとっては大変都合の良い状況であることを利用し、貧しい聴覚刺激が触覚刺激によってあたかも豊かになったかのように感じさせることを目標とする。</p> <p>本稿ではまず、触聴覚クロスモーダル現象の基礎的検討として、触覚刺激が聴覚の強度知覚に与える影響について調査した。実験結果より、振動刺激を付加することで聴覚の主観的な音圧強度が上昇することが判明した。</p> <p>次に強度と同じく触聴覚間で知覚可能な周波数について検討し、触聴覚間で“同じ”と感じる周波数の組み合わせが存在するかどうかを調査した。実験結果より、触聴覚間の周波数的なマッチングメカニズムは 2 つの周波数の組み合わせによって生じるのではなく、2 つの周波数が倍音構造をなしているかどうか依存することが示唆された。</p> <p>この知見をもとにさらに実験を行い、触聴覚間の周波数的な協和度は、触聴覚刺激の周波数が倍音構造をなしているか否かで判断され、知覚構造のことなる触聴覚間においても、聴覚で感じる和音の協和度が知覚可能であることが示唆された。また触聴覚間の協和度の判定能力は、聴覚間の協和度判定の能力に依存し、音楽経験の有無がこの能力に寄与していることが示唆された。</p>	

電気通信大学大学院 情報理工学研究科

平成 24 年度修士論文

触覚刺激による聴覚変調

学籍番号 1130013

氏名 岡崎 龍太

総合情報学専攻

メディア情報学コース

主任指導教員 梶本裕之 准教授 印

指導教員 橋本直己 准教授 印

提出日 平成 25 年 1 月 30 日 (水)

概要

昨今スマートフォンやタブレット端末の普及・高機能化に伴い、モバイル環境下での視聴覚コンテンツ鑑賞が確立しつつある。その中でも視覚については Retina ディスプレイ(Apple,USA)に代表される高品位ディスプレイ技術によって、モバイル環境であっても十分な高品位を保つことが可能となっている。

一方、従来聴覚的に高品位なコンテンツ鑑賞を支えていたのが多チャンネル・高性能スピーカに代表される高臨場体感音響技術である。これらの技術では重低音の補強、多スピーカによる音場の再現、身体広範囲への振動提示等によって臨場感を高めている。しかしながら、モバイル端末は大きさの制約上大型の装置や高性能なスピーカを搭載することが難しく、たとえ実装したとしても生活雑音にあふれたモバイル環境下ではその性能を発揮することは難しい。そこで私は従来とは異なる手法を用いてモバイル環境においても聴覚の臨場感を確保することができないかと考えた。

本研究ではモバイル環境における聴覚の臨場感を増幅することを目的とし、聴覚刺激の一部を触覚刺激で補強、代替し、「触覚を聴く」ことを提案する。聴覚-触覚変換は難聴者への福祉用途で古くから提案されているが、本提案では触覚と聴覚のクロスモーダル現象に着目し、あくまで「聴覚知覚が触覚によってうける変化」を利用する。モバイル端末は聴覚刺激の品質が制限される一方で、常に端末を把持しているため触覚刺激にとっては大変都合の良い状況であることを利用し、貧しい聴覚刺激が触覚刺激によってあたかも豊かになったかのように感じさせることを目標とする。

本稿ではまず、触聴覚クロスモーダル現象の基礎的検討として、触覚刺激が聴覚の強度知覚に与える影響について調査した。実験結果より、振動刺激を付加することで聴覚の主観的な音圧強度が上昇することが判明した。

次に強度と同じく触聴覚間で知覚可能な周波数について検討し、触聴覚間で“同じ”と感じる周波数の組み合わせが存在するかどうかを調査した。実験結果より、触聴覚間の周波数的なマッチングメカニズムは2つの周波数の組み合わせによって生じるのではなく、2つの周波数が倍音構造をなしているかどうか依存することが示唆された。

この知見をもとにさらに実験を行い、触聴覚間の周波数的な協和度は、触聴覚刺激の周波数が倍音構造をなしているか否かで判断され、知覚構造のことなる触聴覚間においても、聴覚で感じる和音の協和度が知覚可能であることが示唆された。また触聴覚間の協和度の判定能力は、聴覚間の協和度判定の能力に依存し、音楽経験の有無がこの能力に寄与していることが示唆された。

目次

第1章	序論	1
1.1	モバイル環境下において聴覚臨場感技術が必要とされる背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	触覚・聴覚に関する知見	4
2.1	触覚に関する知見	4
2.1.1	皮膚の構造	4
2.1.2	触覚受容器	5
2.2	聴覚に関する知見	12
2.2.1	聴覚器官の構造	13
2.2.2	聴覚受容器	15
2.3	クロスモーダル現象の関連研究・先行研究	16
2.3.1	触聴覚間クロスモーダル現象に関する研究	16
2.3.2	他の感覚間クロスモーダル現象に関する研究	19
2.3.3	クロスモーダル現象に関する神経学的アプローチ	20
第3章	実験1 触覚刺激による聴覚の主観的強度変化	21
3.1	実験装置	21
3.2	実験条件	22
3.3	実験手続き	22
3.4	実験結果・考察	23
第4章	実験2 正弦波刺激による触聴覚間の周波数 マッチング	25
4.1	実験装置	25
4.2	実験条件	25
4.3	実験手続き	25
4.4	実験結果・考察	26
第5章	実験3 触聴覚間の周波数協和性検証実験	28
5.1	実験装置	28
5.2	提示刺激	28
5.3	実験手続き	29
5.4	実験結果・考察	30

第 6 章	結論と今後の展望	35
6.1	結論	35
6.2	今後の展望	35
6.2.1	従来知られてきたクロスモーダル現象の応用	35
6.2.2	言語表現など用いた触覚－聴覚変換手法の検討	36
	謝辞	37
	参考文献	38

図表目次

図 1-1. モバイル端末で視聴可能なオンライン動画配信サービス Hulu[1]	1
図 1-2. 高臨場感体感音響技術.....	2
図 1-3. 触知ボコーダ[4]	2
図 1-4. 図形情報を点字に変換して提示する触覚ディスプレイ [8]	3
図 2-1. 無毛部における皮膚の構造と触覚受容器の分布（[11]を一部改変）	5
図 2-2. 有毛部と無毛部の受容器分布[12]	6
図 2-3. メルケル細胞の構造[9].....	7
図 2-4. マイスナー小体の構造[9]	8
図 2-5. パチニ小体の構造[9].....	8
図 2-6. ルフィニ終末の構造[9].....	9
図 2-7. 毛包受容器の構造[9].....	9
図 2-8. 触覚受容器の受容野と時間応答特性[11].....	10
図 2-9. 機械受容器ごとの振動閾検出曲線[11]	11
図 2-10. 指先部における振動覚の閾値[11].....	12
図 2-11. 様々な研究者によって測定された聴覚範囲[13].....	13
図 2-12. ヒト耳の断面図[13]	14
図 2-13. 蝸牛の断面図[13].....	15
図 2-14. 有毛細胞図[13].....	16
図 2-15. Suzuki らによる実験模式図[20]	17
図 2-16. Yau らによる実験で用いられた提示刺激例[22]	17
図 2-17. Yau らによる聴覚の主観的な音圧変化実験結果[22]	18
図 2-18. Yau らによる聴覚の主観的な周波数変化実験結果[22].....	18
図 2-19. Helge らによる聴覚刺激検出向上実験結果[24].....	19
図 3-1. 実験装置外観	21
図 3-2. 振動子の入ったプラスチックケース	22
図 3-3. 実験の様子	23
図 3-4. 実験結果.....	24
図 4-1. 実験の様子	26
図 4-2. 実験結果.....	27
図 5-1. ノコギリ波の FFT(高速フーリエ変換)結果	29
図 5-2. 実験に使用した VAS.....	30
図 5-3. 実験の様子	30
図 5-4. 実験 3AB の全被験者の平均結果	32
図 5-5. 実験 3B の被験者ごとの結果.....	32

図 5-6. 実験 3AB の平均結果(グループ a).....	33
図 5-7. 実験 3AB の平均結果(グループ b).....	33
図 5-8. 92.4Hz から 184.9Hz における触覚－聴覚の協和度と、聴覚－聴覚の協和度の相関関係 (グループ a)	34
図 5-9. 92.4Hz から 184.9Hz における触覚－聴覚の協和度と、聴覚－聴覚の協和度の相関関係 (グループ b)	34

第1章

序論

1.1 モバイル環境下において聴覚臨場感技術が必要とされる背景

昨今スマートフォンやタブレット端末の普及・高機能化に伴い、モバイル環境下での視聴覚コンテンツ鑑賞が確立しつつある。その中でも視覚については Retina ディスプレイ(Apple,USA)に代表される高品位ディスプレイ技術によって、モバイル環境であっても十分な高品位を保つことが可能となっている(図 1-1)。



図 1-1. モバイル端末で視聴可能なオンライン動画配信サービス Hulu[1]

一方、従来聴覚的に高品位なコンテンツ鑑賞を支えていたのが多チャンネル・高性能スピーカに代表される高臨場体感音響技術である(図 1-2)。これらの技術では重低音の補強、多スピーカによる音場の再現、身体広範囲への振動提示等によって臨場感を高めている。しかしながら、モバイル端末は大きさの制約上大型の装置や高性能なスピーカを搭載することが難しく、たとえ実装したとしても生活雑音にあふれたモバイル環境下ではその性能を発揮することは難しい。そこで私は従来とは異なる手法を用いてモバイル環境においても臨場感を確保することができないかと考えた。



図 1-2. 高臨場感体感音響技術
 (左)多チャンネルスピーカによるサラウンドシステム[2],
 (右)身体広範へ振動を提示する体感音響装置[3].

1.2 本研究の目的

本研究ではモバイル環境における聴覚の臨場感を増幅することを目的とし、聴覚刺激の一部を触覚刺激で補強、代替し、「触覚を聴く」ことを提案する。聴覚－触覚変換は難聴者への福祉用途で古くから提案されているが（触知ボコーダ(図 1-3)[5][6][7], 点図ディスプレイ(図 1-4) など), 本提案では触覚と聴覚のクロスモーダル現象に着目し、あくまで「聴覚知覚が触覚によってうける変化」を利用する。モバイル端末は聴覚刺激の品質が制限される一方で、常に端末を把持しているため触覚刺激にとっては大変都合の良い状況であることを利用し、貧しい聴覚刺激が触覚刺激によってあたかも豊かになったかのように感じさせることを目標とする。

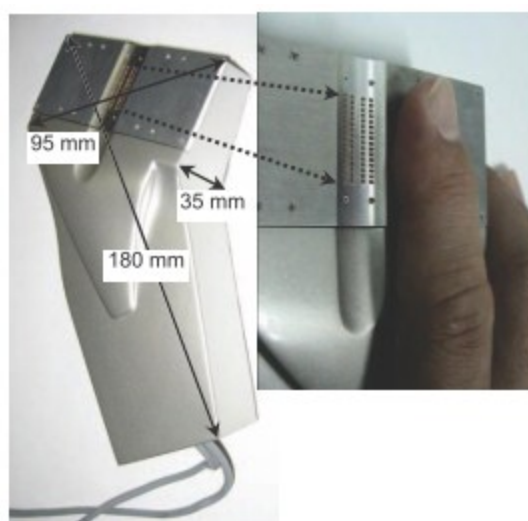


図 1-3. 触知ボコーダ[4]



図 1-4. 図形情報を点字に変換して提示する触覚ディスプレイ[8]

1.3 本論文の構成

本論文は、まず第 2 章において、触聴覚クロスモーダル現象の理解に必要となる触覚及び聴覚に関する知見をまとめる。ここでは触覚・聴覚に関する生理学的な知見と、触聴覚間あるいは他の感覚間で生じるクロスモーダル現象に関連する先行研究について紹介する。第 3 章では得られた知見を元に、触覚・聴覚知覚の基本要素である強度に着目し、振動刺激が聴覚の主観的強度に与える影響について調査する(実験 1)。そして第 4 章、第 5 章において、強度と同じく触覚と聴覚の基礎的要素である周波数知覚に着目し、触聴覚間クロスモーダル現象による感覚の変化が生起する周波数条件について検討を行う(実験 2, 3)。最後に第 6 章では、これまでの実験から得られた結論と、今後の展望について述べる。

第2章

触覚・聴覚に関する知見

本章では触聴覚クロスモーダル現象の理解に必要な、触覚と聴覚の基礎となる知見をまとめる。

2.1 触覚に関する知見

人間の五感のうち、一般に触覚と呼ばれているものを総じて皮膚感覚という。この皮膚感覚の定義には、触覚の他に圧覚、温覚、痛覚なども含まれる。またこれらの感覚に対応した感覚受容器が皮膚内部に存在し、触・圧覚、温覚、痛覚、運動感覚に対応する受容器はそれぞれ機械受容器、温覚受容器、痛覚受容器、深部受容器である。

我々が触れたものを知覚する時に最も重要なものが機械受容器である。機械受容器とは、皮膚内部の歪みや振動により生じた機械的刺激を検出するものであり、機械受容器が刺激を検出すると、電気信号が脳に伝達される。これによって我々は触覚、圧覚、振動覚などを認識する。

2.1.1 皮膚の構造

ヒトの皮膚は、外側から表皮、真皮、皮下組織という3つの層から構成されている(図2-1)。さらに、表皮は3~5層から成り立つ。表皮はところどころに下へ落ち込んでいる箇所があり、これらが汗腺、脂腺、乳腺をつくる。表皮の厚さは約1mmであり著しく厚い。表皮の一つ下層の真皮は厚さが1-3mmであり、密な結合組織の層である。さらに下の層の皮下組織は疎な結合組織であり、繊維が様々な向きに伸びている。この繊維が少ないほど皮膚がずれやすい[9]。

皮膚は、手掌、足裏、口内など体毛をもたない無毛部と、うぶ毛やひげなどの体毛をもった有毛部に分類することが出来る。ヒトの表面積のうちほとんどを有毛部が占めている。また、無毛部には指紋や掌紋などがあり、それらが人間の触覚において重要な役割を担っているという前野らの報告がある[10]。前述の指紋部のみならず、皮膚は外部からの刺激を受容する感覚器である。そのため皮膚には多くの神経終末が存在している。また指や手掌部は体毛が存在せず、感覚受容のために特に分化した部分であり、受容器の分布密度が高い。

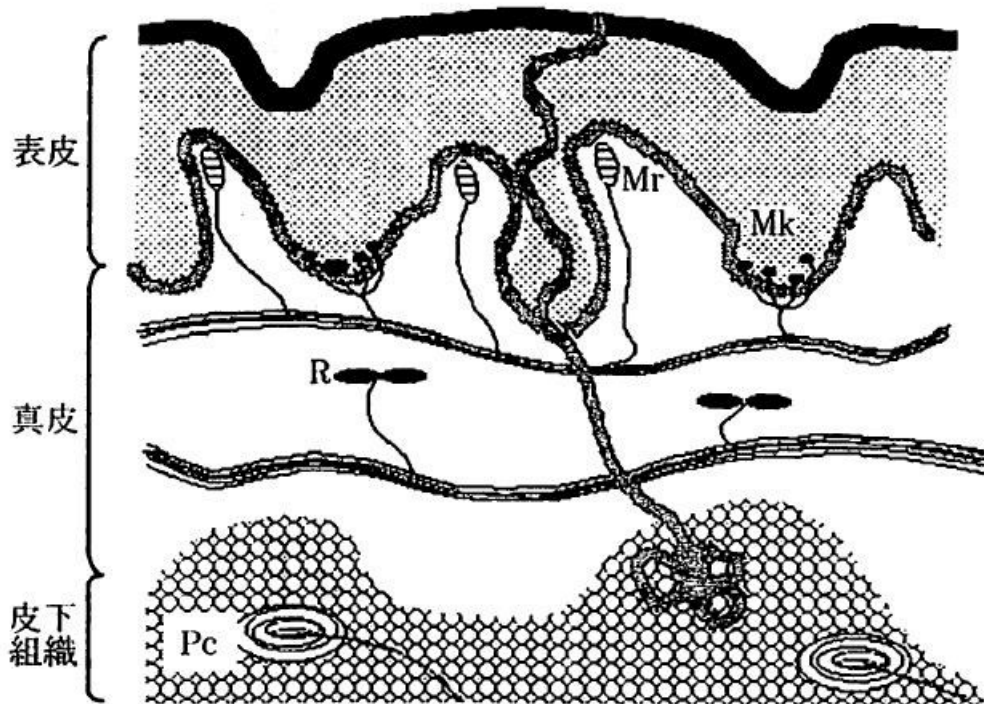


図 2-1. 無毛部における皮膚の構造と触覚受容器の分布 ([11]を一部改変)
Mr : マイスナー小体, Mk : メルケル細胞, R : ルフィニ終末, PC : パチニ小体.

2.1.2 触覚受容器

触覚の機械受容器は表皮の最深部に存在するメルケル細胞 (Merkel cell), 表皮の最外層に存在するマイスナー小体 (Meissner corpuscle), 深層に位置するパチニ小体 (Pacini corpuscle), ルフィニ終末 (Ruffini ending) などがある. また, 皮膚有毛部では体毛の根元に自由神経終末が絡みついた毛包受容器などがある.

2.1.1 節で述べたように, 人間の皮膚には無毛部と有毛部が存在するが, この二つの部分では機械受容器の種類が異なる. 無毛部には前述の 4 つの触覚受容器が存在する. これに対して有毛部にはメルケル細胞, パチニ小体, ルフィニ終末は存在するが, マイスナー小体は存在しない. そのかわりに毛包受容器が存在し, マイスナー小体の機能を代わりに担っている(図 2-2).

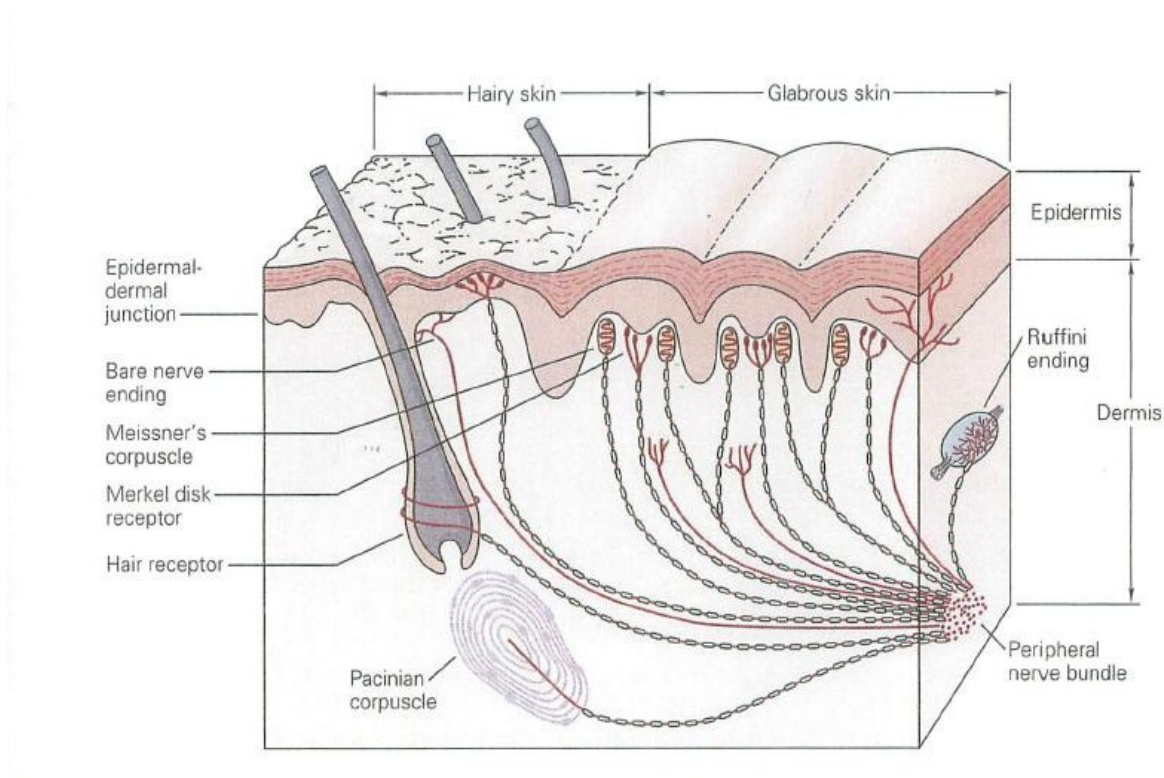


図 2-2. 有毛部と無毛部の受容器分布[12]

機械受容器の特徴として、それぞれが皮膚内の異なる深さに分布していること、またそれぞれが異なる物理現象（振動・ずれ・圧迫など）を検出する役割を担っていることが挙げられる。

- メルケル細胞 (図 2-3)

メルケル細胞は狭い定義でのメルケル細胞と神経終末であるメルケル盤から構成され、両者が一体となっている。皮膚下 0.9mm 付近に密集して存在する。皮膚無毛部では表皮最深層に集合し、皮膚有毛部ではメルケル細胞が 50~70 個集合し隆起した触覚盤として存在する。メルケル細胞が発火し神経に刺激を伝える頻度は皮膚の歪みの大きさに比例する。この受容器が単独で活動した場合、純粋な圧覚を生成する。

- マイスナー小体 (図 2-4)

マイスナー小体は他の受容器より比較的大きい受容器であり、カプセルに包まれ、手掌の皮膚表皮の細かい溝に対応する真皮乳頭（皮膚下 2mm 以上深部）に密集して存在する。低周波振動（15~100Hz）に応答し、振動を検出する。マイスナー小体が発火し神経に刺激を伝える頻度（周波数）は振動周波数に比例する。空間分解能が高くこの受容器単独の活動では振動感覚を生成し、人間の主観的な感覚で表現するとパタパタ感を生じさせる。また前述のとおりマイスナー小体は皮膚無毛部のみに存在し、皮膚有毛部には存在しない。

- パチニ小体 (図 2-5)

パチニ小体は皮膚下深部 2mm 以上深部にまばらに存在する。高周波振動(60~800Hz)に応答し、振動を検出する。パチニ小体が発火し神経に刺激を伝える頻度(周波数)は振動周波数に比例する。パチニ小体単独で活動した場合、音叉に触れたような振動感覚を生成し、指全体がしびれたような感覚を生じる。

- ルフィニ終末 (図 2-6)

ルフィニ終末は皮膚下深度 2 mm 以上にまばらに存在する。静的な横ずれに対して応答する。ルフィニ終末が発火し神経に刺激を伝える頻度は横ずれの大きさに比例する。この受容器単独で活動した場合、何の感覚も生じない。

- 毛包受容器 (図 2-7)

有毛部に存在する。体毛の毛根にからみつき、神経の終末は体毛に沿って上行または下行して終わる。1本にたいして、毛幹を取り巻くように多数の神経終末が分布し、棚状構造をなす。1本の体毛に分布する神経終末の数は、体毛の太さに比例する。

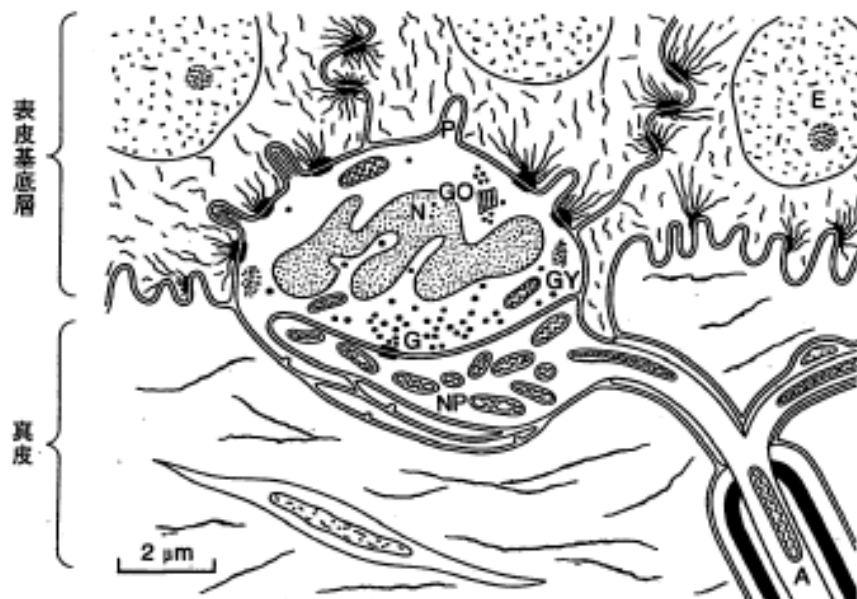


図 2-3. メルケル細胞の構造[9]

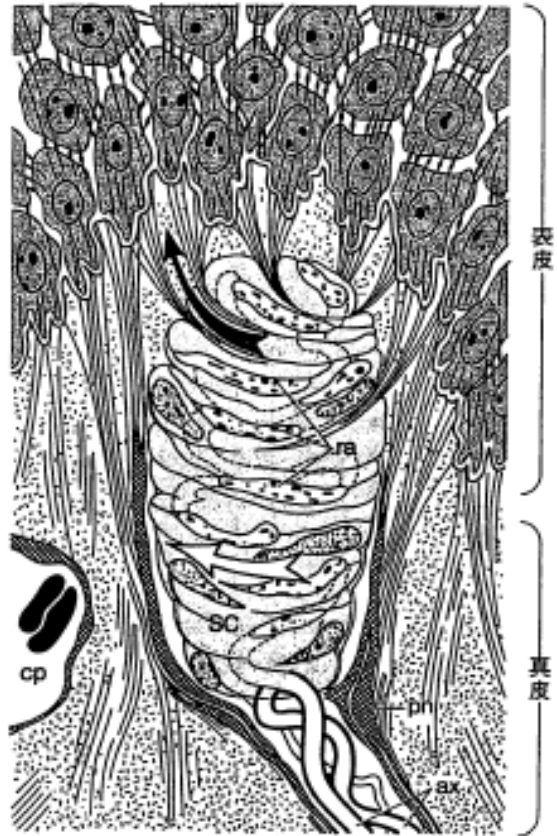


図 2-4. マイスナー小体の構造[9]

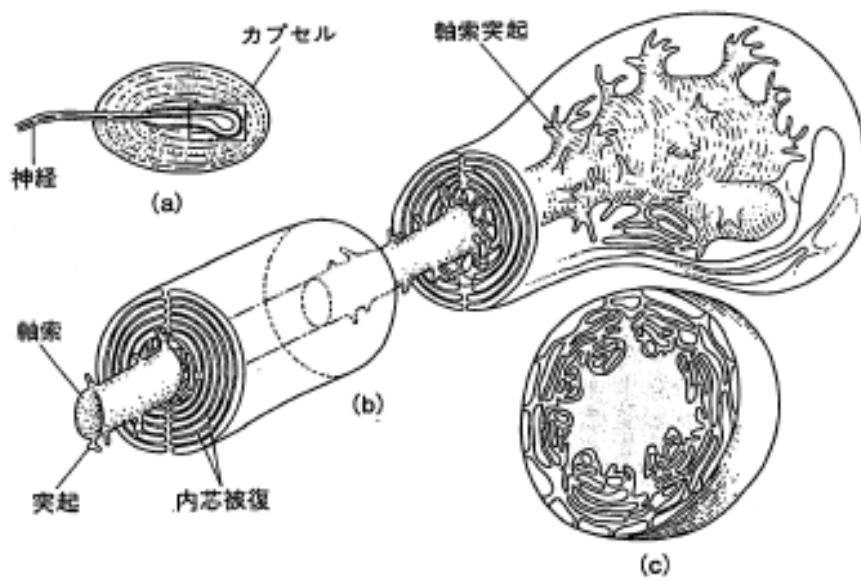


図 2-5. パチニ小体の構造[9]

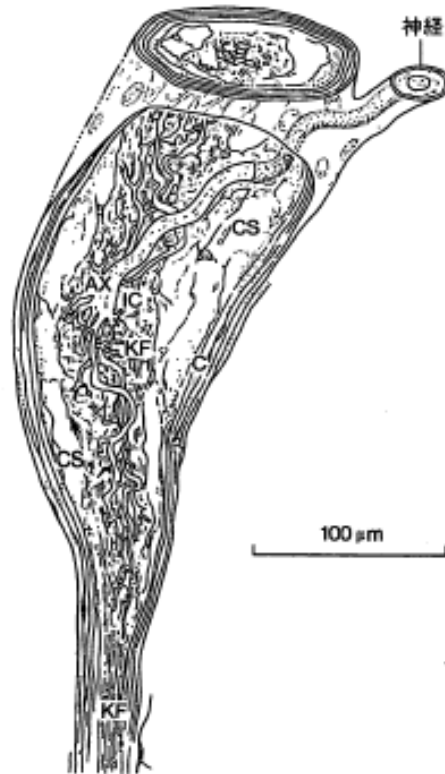


図 2-6. ルフィニ終末の構造[9]

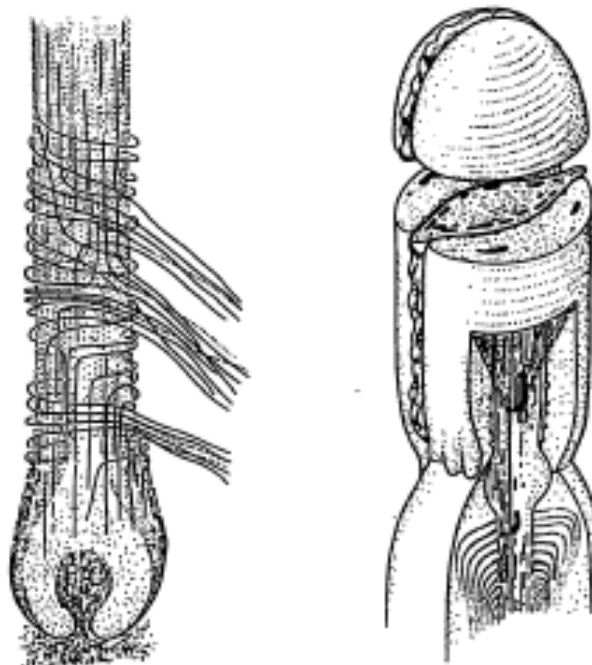


図 2-7. 毛包受容器の構造[9]

受容器を刺激に対する時間応答の特性から分類すると、刺激の間応答が持続するタイプを遅順応型 (Slowly Adapting, 以下 SA と記載), 刺激の始めと終わりのみに応答する速順応型 (Rapidly Adapting, 以下 RA と記載) となる. 前述の機械受容器では, メルケル細胞とルフィニ終末が SA であり, マイスナー小体とパチニ小体, 毛包受容器が RA にあたる.

さらに, 機械受容器の受容可能な範囲である受容野について分類する. 受容野が小さく, 境界が比較的鮮明であるタイプを I 型と呼び, 受容野が大きく, 境界が不鮮明であるタイプを II 型と呼ぶ. マイスナー小体とメルケル細胞が I 型, パチニ小体とルフィニ終末が II 型である.

以上をまとめると, メルケル細胞が SA I, ルフィニ終末が SA II, マイスナー小体が RA I, パチニ小体が RA II であると推定される. さらに断定されていないが, 毛包受容器は体毛が動いたことに対する時間特性応答が速いことと, 体毛の数だけ分布しているということより, RA I であると思われる (図 2-8).

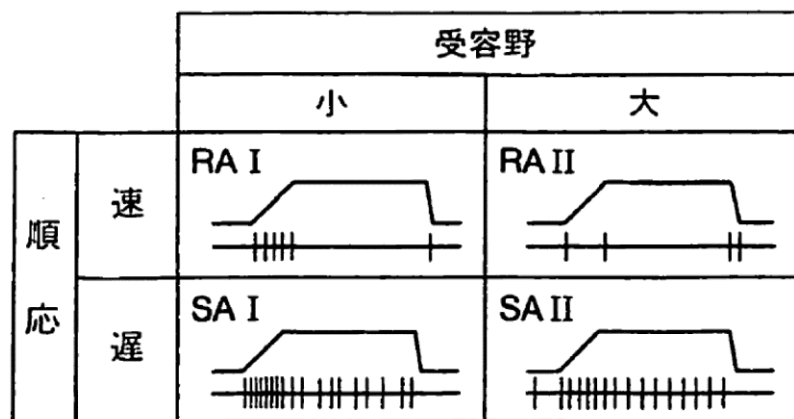


図 2-8. 触覚受容器の受容野と時間応答特性[11]

RA I がマイスナー小体・毛包受容器, RA II がパチニ小体, SA I がメルケル細胞, SA II がルフィニ終末に対応. 上の線は皮膚の歪み刺激, 下の縦線はインパルスに対応.

各機械受容器は, 先述した順応性や受容野の大きさだけでなく, 反応する周波数も異なる. マスキング刺激, 皮膚の冷却, 刺激プローブの形状変化などを巧妙に組み合わせた心理物理実験によって, 4つの機械受容機に対応した4つの周波数別振動閾検出曲線が発見された. この曲線は4種類の振動検出チャンネルがあるという意味で, 4チャンネル・モデルと呼ばれる. 図 2-9 に 4チャンネル・モデルを示す.

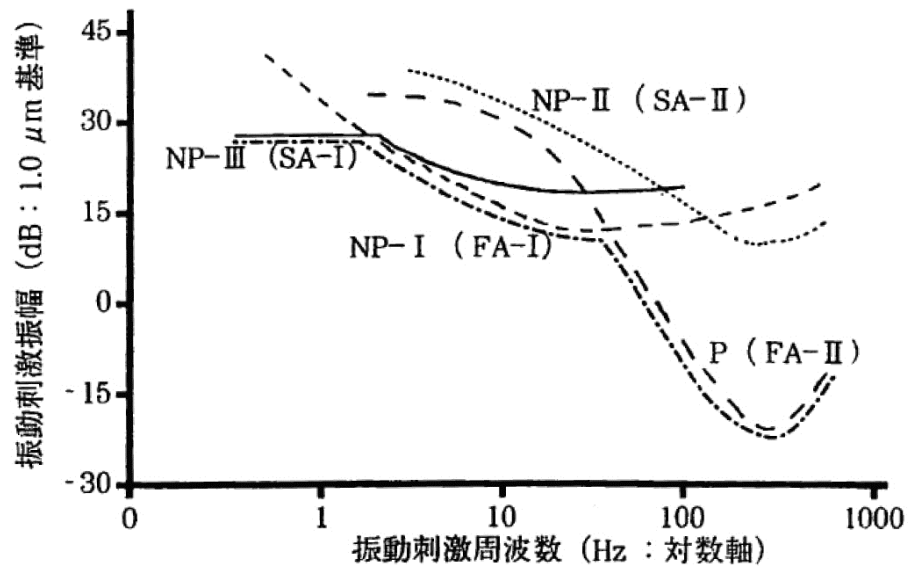


図 2-9. 機械受容器ごとの振動閾検出曲線[11]

ただし図中の FA- I および FA- II は文中の RA- I 及び RA- II に相当する。

図中の P はパチニを，NP は非パチニを意味する．括弧内は，対応すると考えられている機械受容ユニットを表し，少し下方にずらして描かれている 4 つの曲線の下側包絡線が通常ヒトの振動感応曲線となる．触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．測定の多くは機械的振動子を正弦波で駆動させることで行なっている．

振幅による閾値を縦軸に，横軸を周波数で示すと 250 Hz 付近が底になる（すなわち，閾値が最も低くなる）U字型特性を示す．図 2-10 は 0.4～500Hz の周波数範囲で閾値を調べた結果である．このことから，指先において最も微小な振動を知覚可能な周波数は 250Hz 付近であると考えられる．また振動の周波数弁別は上記の 4 つのチャンネルの発火頻度を基に行われていると考えられており，指先で弁別可能な周波数は 0Hz(圧覚)～500Hz 程度であると言われている．

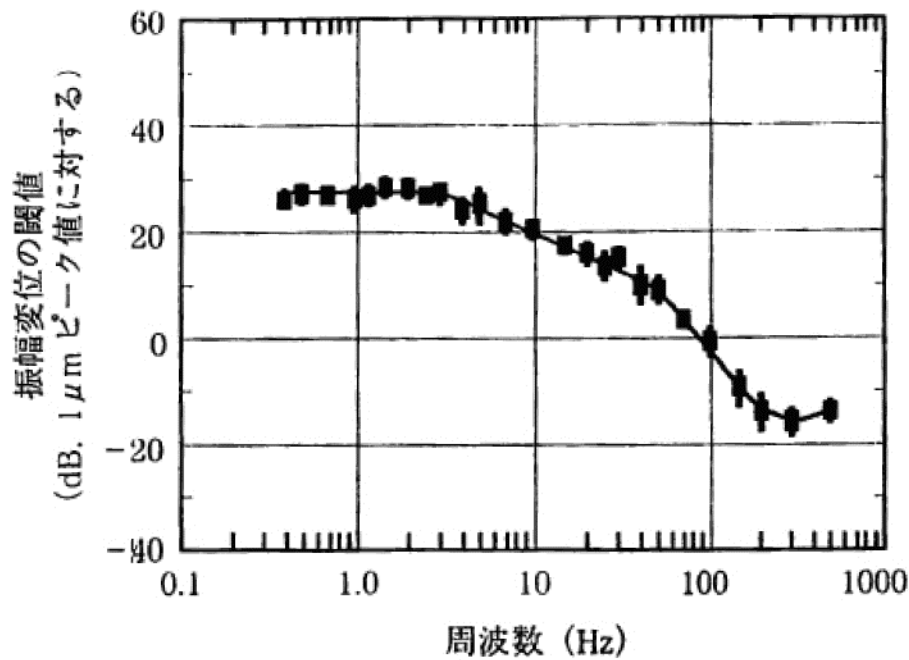


図 2-10. 指先部における振動覚の閾値[11]

縦軸は $1 \mu\text{m}$ ピークの振幅を基準にして、それよりどのくらいの変位を加えれば振動を感じるかを横軸の各振動周波数に対して dB で閾値として表している。

2.2 聴覚に関する知見

空気などを伝わって聴覚器官に達した音波のうち、ヒトが音として知覚できる音波の周波数範囲は年齢や性別によって異なるほか、個人差も大きいが 20Hz-20kHz 程度と言われている。

音として聞こえる最大・最小の音波をそれぞれ最大可聴値・最小可聴値といい、こちらも周波数範囲と同じく、年齢・性別・個人によってことなる。これらの可聴限界で囲まれた範囲内の音を可聴範囲と呼ぶ。可聴範囲は多くの研究者によって測定されている(図 2-11)。

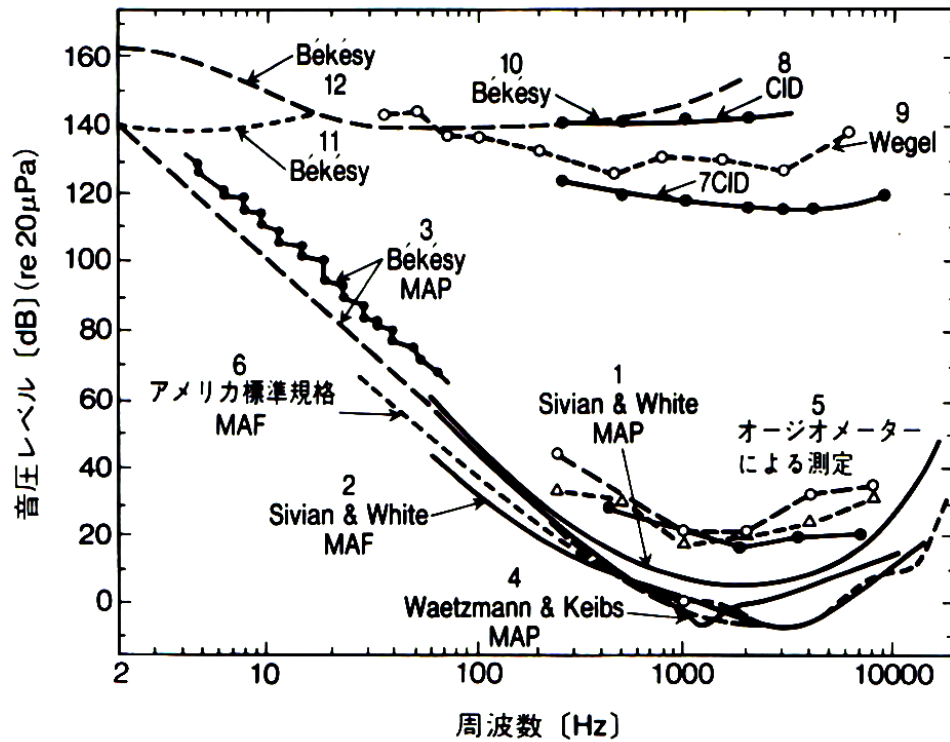


図 2-11. 様々な研究者によって測定された聴覚範囲[13]

2.2.1 聴覚器官の構造

聴覚器官の構造は外耳・中耳・内耳に分けられる(図 2-12). 空気などを伝わってきた音波は外耳ではそのまま空気の振動として伝えられ, 中耳ではそれを耳小骨の振動に変換し, さらに内耳ではそれを液体の振動を通じて基底膜の振動に変換する.

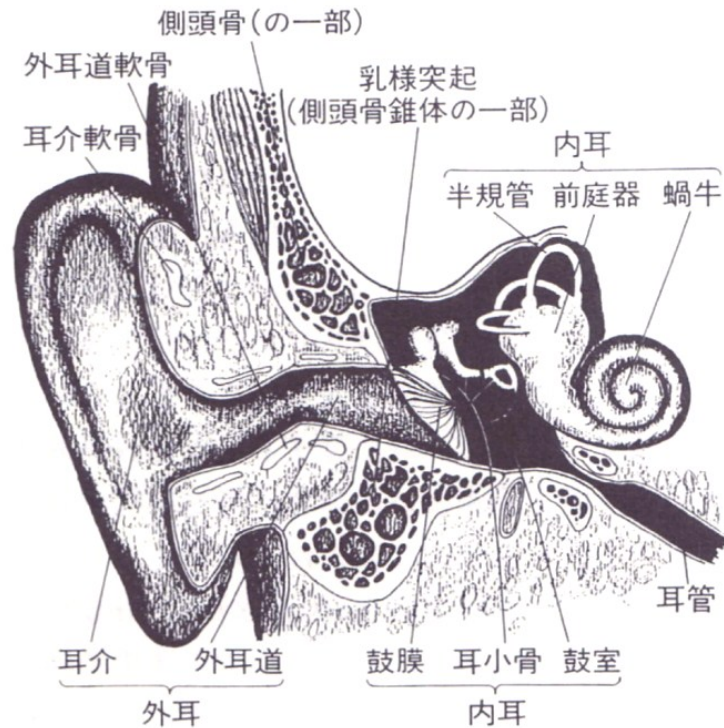


図 2-12. ヒト耳の断面図[13]

外側側から外耳・中耳・内耳に分類される。

- 外耳

外耳は外耳と外耳道から成る。耳介は集音器であり、軟骨によって外部に突き出す形態を保っている。他の哺乳類(ネコ・イヌ)では耳介を音源の方向に向ける(集音)ことができる。しかしヒトの場合、耳介を運動させる筋肉が存在し、練習によって動かすことが可能であるものの、集音に役立つほどの運動は期待できない。

外耳道はその中央部分が高まっており、へ字の形をしている。外部からの侵害による中内耳の損傷を防ぐ一方、耳垢など異物の排出や音響伝達に不利な形態をしている。

- 中耳

中耳は鼓膜・鼓室・耳小管から構成される。外耳の外耳道を通じて伝搬された空気振動によって鼓膜が振動し、その振動が鼓室内の3つの耳小骨(ツチ骨・キヌタ骨・アブミ骨)を介して増幅され、耳小管へと伝わる。

- 内耳

内耳は聴覚を担当する蝸牛と平衡感覚を担当する前庭・三半規管からなる。蝸牛は3つの空洞を持つ形をなしてリンパ液で満たされており、それらの空洞は上から前庭階・中央階・鼓室階と呼ばれている。中央階と鼓室階を仕切る基底膜の中央階側に聴覚

受容器(コルチ器)が配置されている(図 2-13).

耳小管を通じて蝸牛に達した振動は蝸牛内のリンパ液を振動させ、その振動で基底膜が振動し、基底膜上の聴覚受容器で神経信号へと変換される。

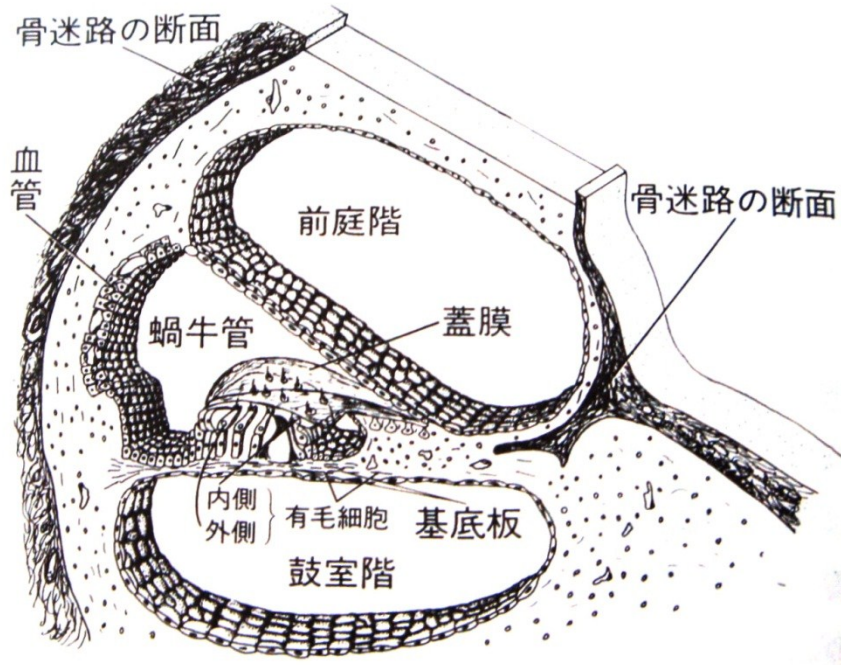


図 2-13. 蝸牛の断面図[13]

2.2.2 聴覚受容器

聴覚受容器であるコルチ器は2種類の有毛細胞とそれを支える支持細胞からなる。2種類の有毛細胞はそれぞれ内有毛細胞と外有毛細胞と呼ばれ、内有毛細胞は1列、外有毛細胞は3列に渡って整列して並んでいる(図 2-14)。物理振動の神経信号への変換は内有毛細胞のみによって行われ、外有毛細胞は内有毛細胞の働きを助けるものであると考えられている。内有毛細胞は応答する周波数が個々に決まっている。これは周波数の違いによって基底膜上の最大振幅点異なるためである。すなわち、元信号である音波の周波数の差は有毛細胞の空間上の差となって神経信号に変換され脳に送られる。

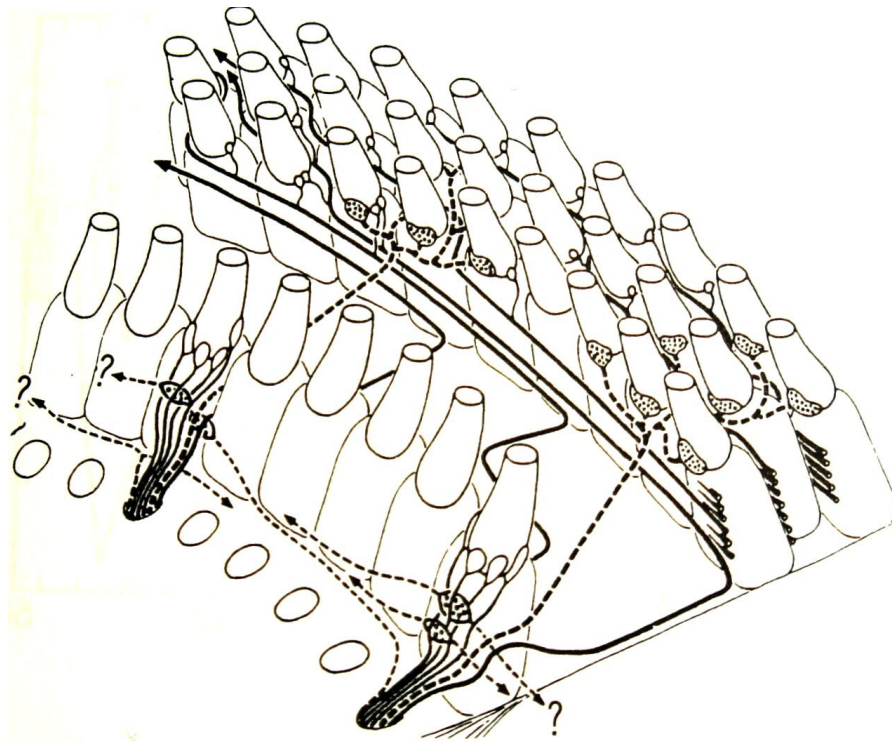


図 2-14. 有毛細胞図[13]

手前側の 1 列が内有毛細胞であり，奥側の 3 列が外有毛細胞である．

図中の実線及び破線は有毛細胞に接続された神経の構造を示す．

2.3 クロスモーダル現象の関連研究・先行研究

ヒトの複数の感覚に刺激を提示することで，ヒトの知覚が相互に影響されることが知られている．この現象はクロスモーダル現象と呼ばれている．次節では本研究の主眼である触聴覚間で生じるクロスモーダル現象について先行事例を紹介する．

また，このクロスモーダル現象は触聴覚間に限らず，視聴覚間・視触覚間などでも生起することが知られている．近年の研究により，ある感覚間で生起することが知られていたクロスモーダル現象が他の感覚間でも生起することがわかってきたため，触聴覚間以外のクロスモーダル現象についても言及する．

最後に，クロスモーダル現象が生起する際の神経メカニズムを神経学的に調査した事例について述べる．

2.3.1 触聴覚間クロスモーダル現象に関する研究

先行研究より，触覚と聴覚へ刺激を同時提示することで，知覚される刺激の主観的な質感や，知覚強度・知覚周波数，刺激の検出能力が向上することなどが知られている [14][15][16]．また，これらの知覚変化を引き起こす要因として，提示刺激の強度・周波

数・位相・同期性などが関与すると考えられている[17][18][19].

Suzuki らは、紙やすりを指でなぞる際の粗さ知覚について、ホワイトノイズを聞きながらなぞることで紙やすりをより粗く、純音をききながらなぞることで紙やすりの粗さをよりなめらかに知覚することを報告した(図 2-15)[20][21].

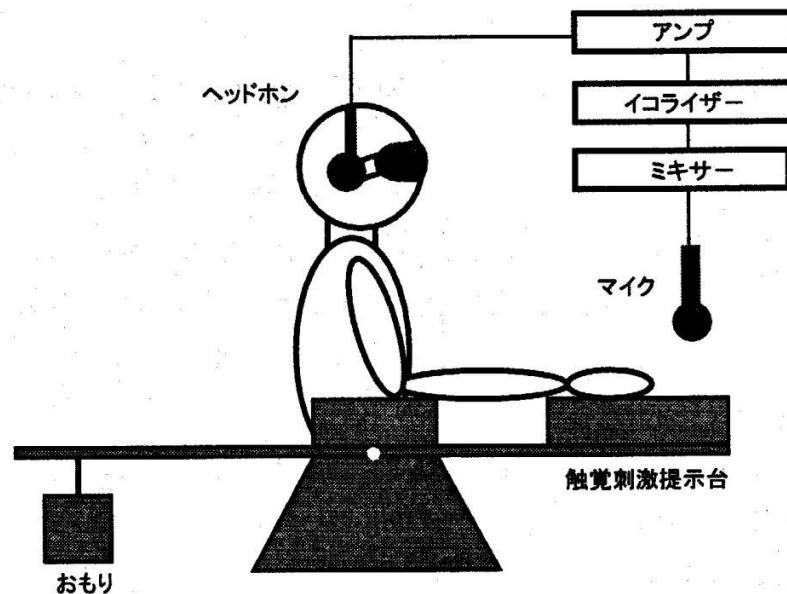


図 2-15. Suzuki らによる実験模式図[20]

手のひらで紙やすりをなぞりながらその音をマイクで取得・加工して聴覚に提示することで、紙やすりの主観的な粗さ知覚が変化する.

Yau らは、純音成分を聴覚のみに提示する場合と比べて、純音成分を聴覚に提示しながら触覚提示を行うことで主観的に感じる音の強度が大きくなるという触聴覚間の強度知覚に関する相互作用性を示した(図 2-16, 図 2-17). また彼らは触聴覚間に異なる周波数の刺激を提示することで、聴覚で知覚する音の周波数が振動によって変化するという周波数知覚に関する相互作用性も報告している(図 2-18)[22][23].

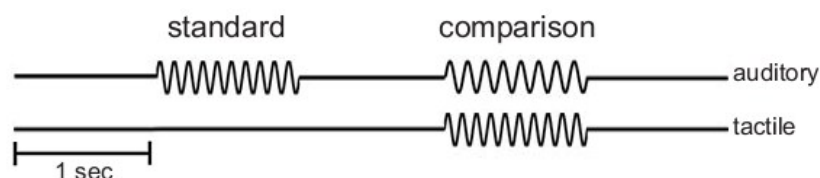


図 2-16. Yau らによる実験で用いられた提示刺激例[22]
基準刺激を聴覚のみに提示した後、触聴覚に比較刺激を提示し、主観的な音圧差や周波数差について回答させた.

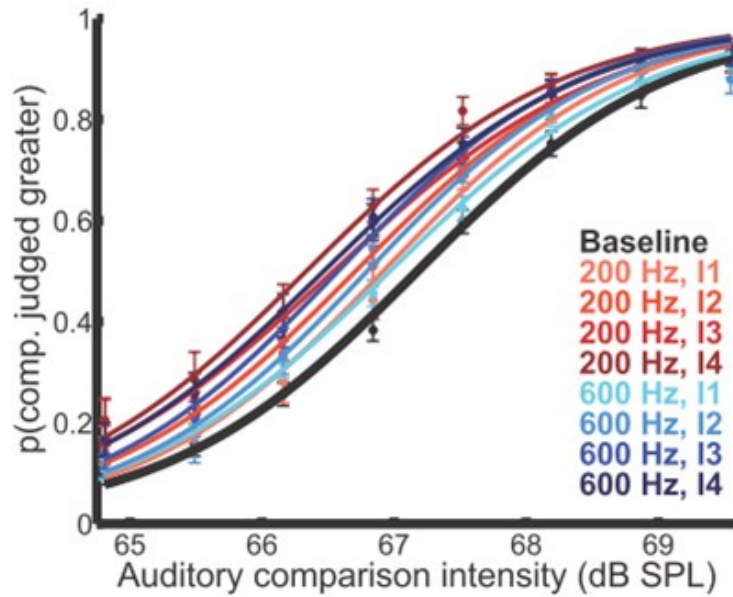


図 2-17. Yau らによる聴覚の主観的な音圧変化実験結果[22]

200Hz の聴覚刺激のみを提示した場合(黒実線)と比較して，200Hz もしくは 600Hz の触覚を聴覚と同時に提示した場合(色付き実線)，主観的な聴覚の知覚音圧が上昇した。

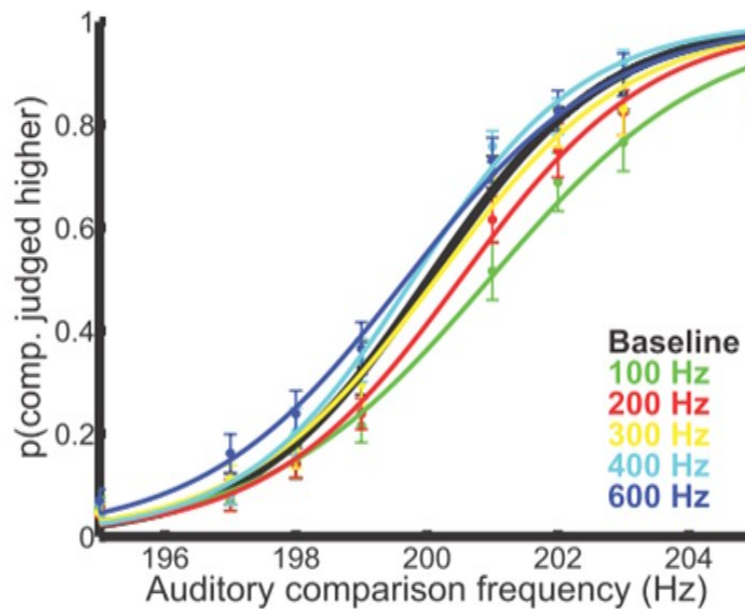


図 2-18. Yau らによる聴覚の主観的な周波数変化実験結果[22]

200Hz の聴覚刺激のみを提示した場合(黒実線)と比較して，聴覚刺激よりも低い周波数の触覚刺激を提示すると主観的な知覚周波数は低く，聴覚刺激よりも高い周波数の触覚刺激を提示すると周波数は高く知覚された。

触聴覚クロスモーダル現象は、刺激の強度知覚や周波数知覚を変化させるだけでなく、単体では知覚できない微小な刺激の検出能力を増強させることが知られている。Helgeらは聴覚単体では知覚できない微小な音が触覚を付加することで知覚可能になることを示した(図 2-19)[24]。

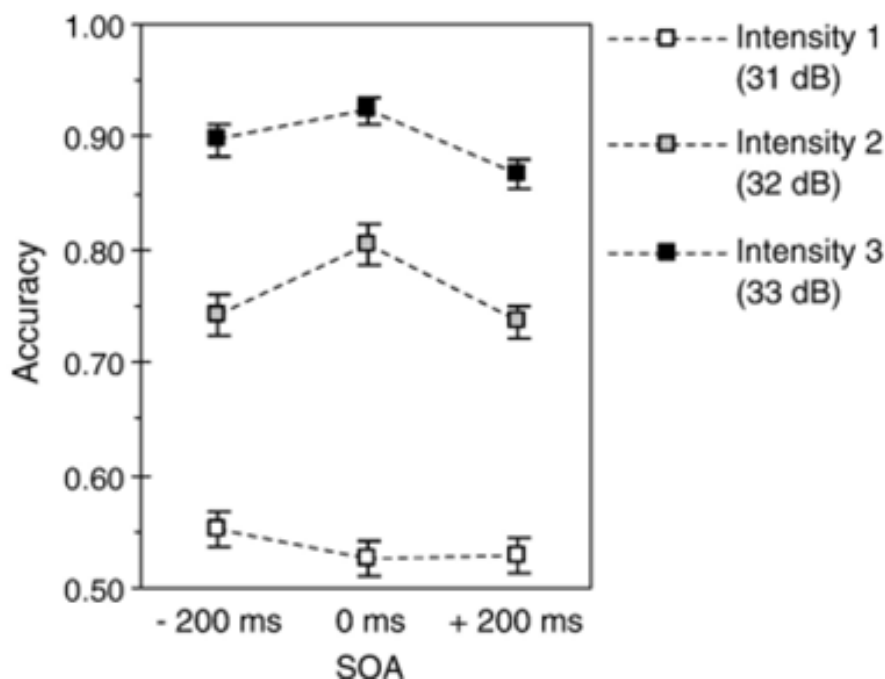


図 2-19. Helge らによる聴覚刺激検出向上実験結果[24]

閾値近傍の聴覚刺激(32dB)に対して触覚刺激を同時提示(0ms)することで、聴覚刺激の検出精度が上昇した。

これらの知見は、触覚－聴覚間にクロスモーダル関係が成立することを示唆している。こうした触聴覚間クロスモーダル現象を利用して、触聴覚で共通の刺激を用いて情報の理解を容易にする聴覚アイコン(Earcon: Ear+icon)や触覚アイコン(Tacton: Touch+icon)などが提案されている[25]。

2.3.2 他の感覚間クロスモーダル現象に関する研究

視聴覚間など、触聴覚以外の感覚間で従来知られていたクロスモーダル現象が、触聴覚間でも生起することが報告されている。例えば、視聴覚間クロスモーダル現象として、「バ」という発音に「ガ」と発音している映像を重畳することで「ダ」と聞こえてしまうマガーク効果[26]が知られているが、近年の研究によってこれに類似した現象が触聴覚間でも生起することが明らかになった[27][28]。他にも、1回の画像の点滅に合わせて2回音を鳴らすことで、視覚的に2回点滅したように知覚してしまうダブルフラッシュ

ユ錯視[29]と同様の現象が触聴覚間でも引き起こされることが報告された[30].

このように、ある感覚間で生起することが知られていたクロスモーダル現象が、他の感覚間でも生起することが判明するなどの形で、クロスモーダル現象の類似性、共通性が報告されている。

2.3.3 クロスモーダル現象に関する神経学的アプローチ

上記の触聴覚間、あるいは他の感覚間でクロスモーダル現象が生起する際の脳の神経メカニズムについて、EEG(Electro-Encelphalo-Graphy, 脳の電気活動により生じた電圧を用いた脳の計測手法)やMEG(Magneto-Encelphalo-Graphy, 脳の電気活動により生じた磁場変動を用いた脳の計測手法)を用いた神経学的なアプローチが行われている。クロスモーダル現象発生時の神経メカニズムについては未だわかっていないことが多いが、例えば健常者において触覚と聴覚が同じ神経メカニズムを共有していることが知られている[31][32].

これらの知見を元に、次章では触聴覚間クロスモーダルの基礎的検討として、まず触覚・聴覚知覚の基本要素である強度に着目し、振動刺激が聴覚の主観的強度に与える影響について調査する。

第3章

実験 1 触覚刺激による聴覚の主観的強度変化

本章ではまず，触覚刺激による聴覚の主観的な音圧強度知覚への影響を検討した．予備実験を通じてどのような状況で触聴覚間クロスモーダルによる音圧強度知覚の変化が生起するかを，触覚と聴覚で同じ信号を与えた場合について調べた．その結果，50-300Hzのバンドパスフィルタをかけたピンクノイズ[33]を提示刺激として用いたとき，触聴覚間クロスモーダルによって知覚される音量が変化しやすいことが判明した．これは50-300Hzがヒトの可聴域と可触域に共通であるためと考えられる[11][13][35]．そこでこの刺激を用いて聴覚の主観的強度が変化するかを検証した．

3.1 実験装置

PC，ヘッドホン(EX-29, DirectSound Headphones, USA)，振動子(Haptuator, Tactile Labs, CANADA)，オーディオアンプ(model PCA1, Pyle Audio, USA)から成る実験装置を製作し，実験に使用した．PCから出力された信号はそれぞれヘッドホンとアンプを介した振動子へと送られる(図 3-1)．振動以外の触覚刺激を排除するため，振動子は滑らかなプラスチックケースの中に入れて使用した(図 3-2)．



図 3-1. 実験装置外観

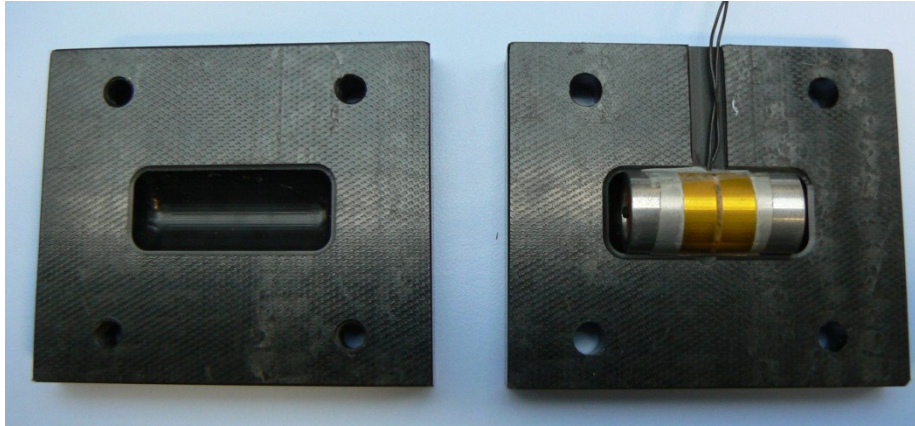


図 3-2. 振動子が入ったプラスチックケース

3.2 実験条件

聴覚刺激に触覚刺激を付加した場合とそうでない場合で聴覚の主観的強度が変化するかを調査するため、実験は聴覚刺激単体を聞き比べる条件(A-A 条件)と、聴覚刺激単体と聴覚刺激に触覚刺激を付加した刺激を聞き比べる条件(A-AT 条件)の2条件を用意した。各条件は基準刺激と比較刺激の組み合わせから成り、被験者は2つの刺激を聞き比べてどちらの音が大きく聞こえたかを回答した。

提示刺激として50-300Hzのバンドパスフィルタをかけたピンクノイズを用いた。基準刺激の強度は聴覚音圧が50dB SPL、触覚振動加速度が 2m/s^2 であった。比較刺激の聴覚強度は、47,48,49,50,51,52,53dB SPLであった。

3.3 実験手続き

実験には4名の被験者が参加した(男性、26-39歳、触聴覚共に健常)。被験者は椅子に座り、ヘッドホンを着用し、振動子入りのプラスチックケースを両手で把持した。視覚刺激を排除するため、被験者はアイマスクを着用した(図 3-3)。

被験者に基準刺激を2秒提示し、1秒の空白の後比較刺激を2秒提示した。その後、被験者は1番目に提示された刺激と2番目に提示された刺激のどちらが大きく聞こえたかを口頭で回答した。これを1試行とし、A-A 条件では7条件を各10回試行、A-AT 条件では7条件を各20試行、計210試行を行った。順番効果による影響を避けるため、半分の試行では基準刺激と比較刺激の順番を入れ替えた。すべての試行はランダムに行われた。



図 3-3. 実験の様子

3.4 実験結果・考察

A-A 条件, A-AT 条件共に順番効果は見られなかったため, 条件内で結果を統合した. 全被験者の平均値を図 3-4 に示す. グラフの縦軸は基準刺激よりも比較刺激のほうが大きいと回答した割合を示し, 横軸は基準刺激と比較刺激の実際の強度差を示す. 得られた結果を以下の累積正規分布関数(式(1))でフィッティングし, 聴覚強度の主観的等価点 (PSE : Point of Subjective Equality)を求めた.

$$f(x, \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (1)$$

ここで x は比較刺激の強度を, μ は主観的等価点を, σ は 84% 弁別閾値 (84% discrimination threshold) を示す. 結果より, 聴覚刺激単体と聴覚刺激に触覚刺激を付加した刺激を聞き比べた時, 聴覚刺激の強度が物理的に等しくても, 触覚刺激を付加した聴覚刺激の方が主観的に強度が増すということが判明した. またフィッティング結果より触覚刺激を付加することで聴覚の主観的等価点は約 1dB 上昇することが明らかになった [34].

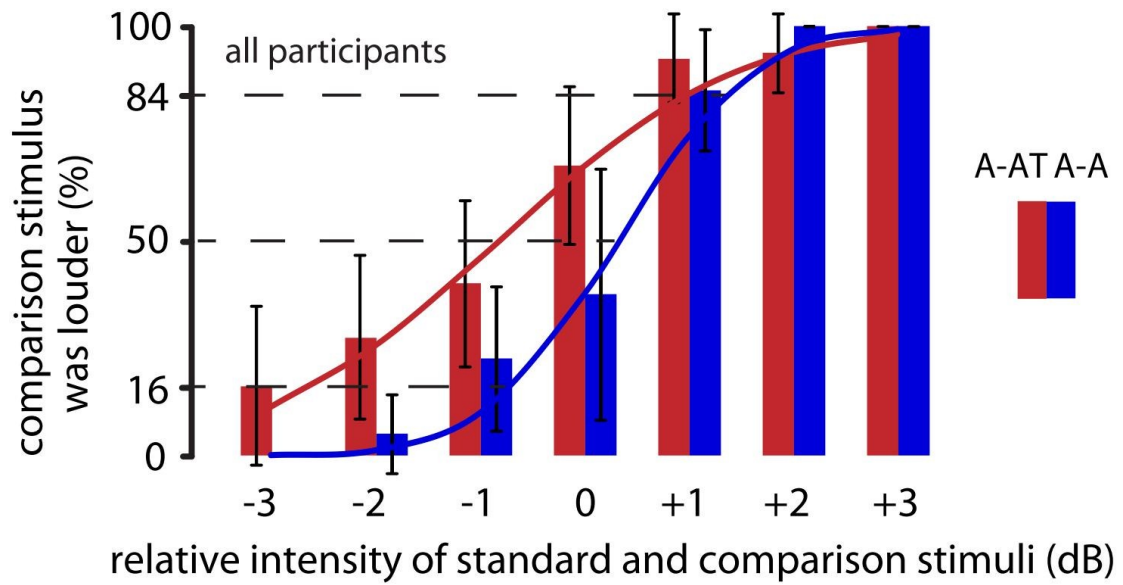


図 3-4. 実験結果

棒グラフは各条件(赤:A-AT 条件 青:A-A 条件)での実験結果を示し、
 実線は実験結果を元にフィッティングした累積正規分布関数を示す。

第4章

実験 2 正弦波刺激による触聴覚間の周波数 マッチング

触聴覚間クロスモーダルに関する先行研究では知覚される主観的音圧変化に重きが置かれていたため、そのほとんどは触聴覚への刺激としてホワイトノイズなどが使われていた。一方で、触覚と聴覚共に知覚可能であるもう一つの属性として周波数が挙げられる。そこで次に触聴覚間で知覚される刺激の周波数に関係が見られるかどうかを検討した。ここではまず、ヒトが触聴覚間で“同じ”と感じる周波数の組み合わせが存在するかどうかを検討した。

4.1 実験装置

本実験では実験 1 で使用した構成の装置と同様のものを使用した。ただし、ヘッドホンをより強力なアクティブノイズキャンセリング機能を搭載するヘッドホン (QuietComfort, Bose Inc., USA) へ、振動子を周波数的により広範囲に安定して提示できる振動子 (Haptuator MARK II, Tactile Labs, CANADA) へとそれぞれ変更した。ただし振動強度は前回と比べて弱くなったため、実験 1 で用いたプラスチックケースは用いず、振動子を直接把持することとした。

4.2 実験条件

触聴覚間で主観的に同じと感じる周波数のペアを見つけるため、4つの異なる周波数の正弦波 (100, 200, 400, 800 Hz, 約 55dB) の聴覚刺激を基準刺激として用意し、比較刺激として 1-800Hz で被験者が任意に周波数を変更可能な正弦波を触覚刺激として用いた。

4.3 実験手続き

実験には 28 名の被験者が参加した (17-32 歳, 触聴覚共に健常)。被験者は椅子に座り、ヘッドホンを装着し、左手人差し指に振動子を装着した。

実験開始と同時に聴覚刺激のうち 1 つ (基準刺激) と触覚刺激 (比較刺激) が提示された。触覚刺激の初期提示周波数による影響を防ぐため、触覚刺激の初期周波数は 50, 250, 450Hz のうちいずれか 1 つがランダムに提示された。被験者は聴覚刺激の周波数と触覚刺激の周波数が“同じ”と感じられるように触覚刺激の周波数を調節し、被験者が調節

を終了したところで実験終了とした。触聴覚刺激以外の手がかり(刺激調節目盛りなど)から被験者が周波数を推定できないよう、調整はボタンのクリックによって周波数を上下させる GUI(Graphical User Interface)を用いた。調節に時間制限は用いなかったが、最大でも 30 秒位内に調節は終了した。試行の繰り返しによって刺激周波数の範囲を学習するおそれがあるため、被験者 1 名につき 1 試行のみで実験を行った(図 4-1)。



図 4-1. 実験の様子

4.4 実験結果・考察

実験 2 の結果を図 4-2 に示す。グラフの縦軸は刺激の周波数を、横軸は被験者番号を示す。グラフ中の青点は各被験者に提示された聴覚刺激(基準刺激)の周波数を表し、赤い棒グラフはそれぞれの被験者が基準刺激と同じ周波数になるように調節した触覚刺激(比較刺激)の周波数を表す。

実験結果より、提示された聴覚基準刺激の周波数と、被験者が調節した触覚比較刺激の周波数のペアは個人差が大きく、被験者間で相関は見られなかった。触覚的に周波数が弁別可能であることが知られている 50-300Hz の周波数領域においてすら、被験者間で相関は見られなかった。このことから、ヒトは触聴覚間で定量的な周波数マッチングを行うことがそもそも困難であることが考えられる。

一方で、その後の予備実験を通して次のような興味深い内観報告を得た。触覚刺激の周波数が聴覚刺激の周波数に対して N 倍あるいは $1/N$ 倍の関係にあるとき(e.g. 聴覚 :

100Hz 触覚：50, 100, 200, 300Hz), 両者の刺激が“同じ”と感じるというものである。実験 2 の結果の一部もこの内観報告を支持している。例えば, 被験者 2 と 6 は 100Hz の聴覚刺激に対して約 300Hz の触覚刺激を同じであると回答し, 被験者 9,22,25 はそれぞれ 200, 400, 800Hz の聴覚刺激に対して約 100Hz の触覚刺激を同じであると回答, 被験者 5 は 100Hz の聴覚刺激に対して約 50Hz の触覚刺激を同じと回答している。

このことから, ヒトの触聴覚間の周波数的マッチングは周波数そのものによって比較されるのではなく, 両者の刺激が同一の倍音構造に属しているかという基準が用いられているのではないかと推測される[36]。

周波数の倍音構造は物理的な共鳴として広く自然界に存在しており, それゆえヒトは倍音構造を日常生活を通して“自然な状態である”と学習していることが考えられ, 例えばヒトは倍音構造を聴覚における 2 和音の協和性判断などに利用している[37]。この共鳴による刺激の倍音構造は, 振動している物体に触れることで触聴覚間にも提示されるため, 被験者は振動と音が倍音構造をなしている時, 両者を“同じ”と判断したと考えられる。

この考察に基づき, 触聴覚間で周波数的に協和性を判断することが可能かを検証する実験 3 を行った。

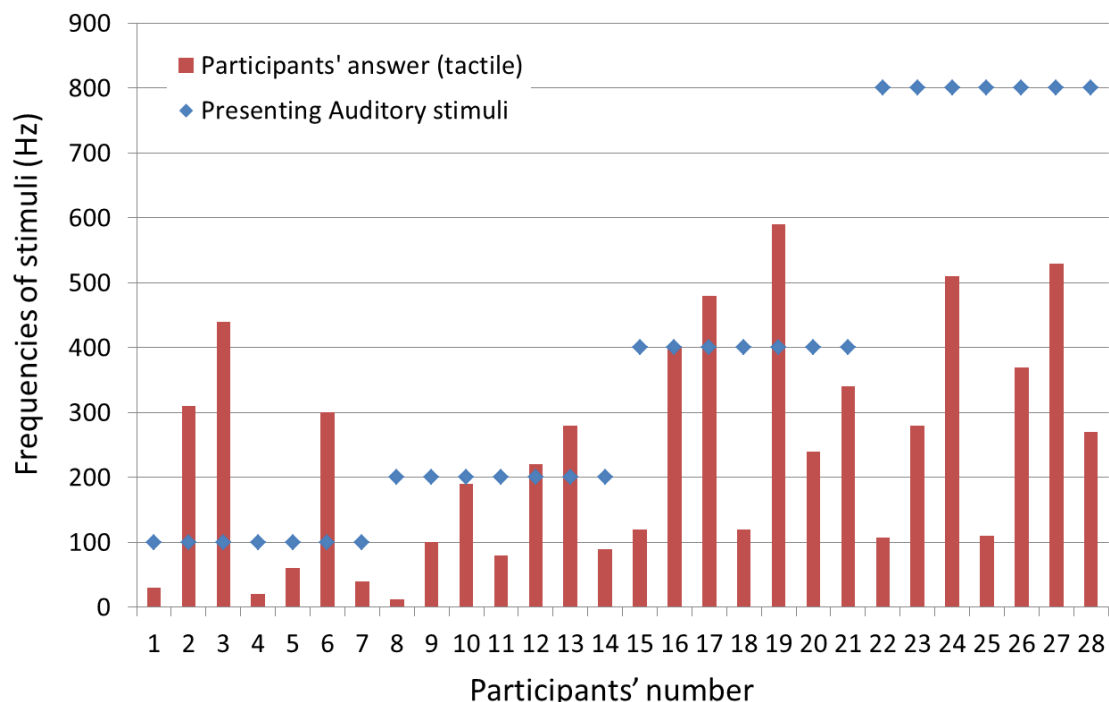


図 4-2. 実験結果

第5章

実験 3 触聴覚間の周波数協和性検証実験

本章では、触覚刺激と聴覚刺激が周波数的に倍音構造を構成している時に、聴覚における 2 和音の協和と同じような協和性が生じるかどうかを検証した。この実験は 2 つの実験 3A と 3B から構成される。実験 3A では被験者の触覚と聴覚に刺激を提示して両者の周波数的な協和性を判断させた。実験 3A で生じる協和性が聴覚における 2 和音の協和性判断と関連があるかを調べるために、2 つの刺激を聴覚のみに提示して協和性を判断させる実験 3B を同時に行った。

5.1 実験装置

実験 2 で用いた実験構成と同様のものを使用した。ただし、実験 3B では振動子は使用せず、2 つの刺激は聴覚提示された。

5.2 提示刺激

様々な周波数をもつ聴覚刺激と触覚刺激の組み合わせを提示刺激として用いた。聴覚刺激には 58.2, 65.4, 73.4, 82.4, 92.4, 103.5, 116.5, 130.8, 146.8, 164.8, 184.9, 207.6, 233.0, 261.6, 293.6 Hz の基底周波数を持つ 15 通りのノコギリ波を用意し、触覚刺激には 130.8Hz の基底周波数をもつノコギリ波を用いた。これらの刺激の組み合わせは 130.8Hz(音階表現では“ド”)を中心周波数として和音、すなわち倍音構造を形成している。例えば 65.4Hz と 130.8Hz, 130.8Hz と 130.8Hz, 261.6Hz と 130.8Hz の組み合わせは完全協和音を形成している。他の組み合わせについても不完全協和音もしくは不協和音を構成している(表 5-1 参照)。

提示刺激として実験 2 で用いた正弦波ではなくノコギリ波を用いた理由は、ノコギリ波は基底周波数の整数倍の倍音群を持つため(図 5-1)、正弦波より自然音に近く、2 つの刺激の間の倍音構造を知覚しやすくなると考えたためである。

実験 3B においては、刺激の周波数や組み合わせは実験 3A と同じであるが、2 つの刺激は共に聴覚刺激として提示された。

表 5-1. 提示刺激

130.8Hz の刺激との協和性を記号で表記.

○ : 完全協和音. △ : 不完全協和音. × 不協和音.

Stimuli No.	1	2	3	4	5	6	7	8
周波数 (Hz)	58.2	65.4	73.4	82.4	92.4	103.5	116.5	130.8
音階	ラ#	ド	レ	ミ	ファ#	ソ#	ラ#	ド
協和性	×	○	×	△	×	△	×	○
Stimuli No.	9	10	11	12	13	14	15	
周波数 (Hz)	146.8	164.8	184.9	207.6	233.0	261.6	293.6	
音階	レ	ミ	ファ#	ソ#	ラ#	ド	レ	
協和性	×	△	×	△	×	○	×	

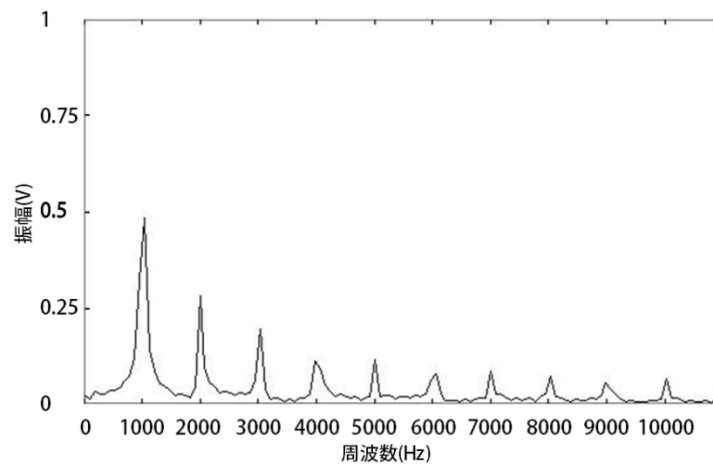


図 5-1. 基底周波数 1000Hz のノコギリ波の FFT(高速フーリエ変換)結果例
基底周波数から等間隔にピークが出現する(N 次倍音成分).

5.3 実験手続き

9名の被験者(22-28歳, 聴覚共に健常)が実験 AB を通じて参加した. 被験者は椅子に座り, ヘッドホンを装着し, 左手で振動子を把持した. 被験者は2つの刺激の協和性を判定するよう指示された. 実験開始とともに, 15組の提示刺激の内1組(聴覚: 58.2Hz-293.6Hzのいずれか 触覚: 130.8Hz)が被験者に提示され, 被験者は両者の協和度をVAS(Visual Analogue Scale)で評価した(図 5-2). 左端を0(不協和), 右端を10(完全協和)とした. 評価には時間制限を設けなかったが, 最大でも30秒以内で評価は終了した. 評価終了をもって刺激提示をやめ, これを1試行とした. すべての15組の提示刺激はランダムに3回ずつ計45試行提示された(図 5-3).

実験 3B においては2つの刺激はともに聴覚刺激として提示され, 被験者は2音の協

和性を判定するよう指示された。こちらもすべての組はランダムに3回ずつ提示され、実験 AB を通じて1被験者あたりの合計試行数は90試行であった。

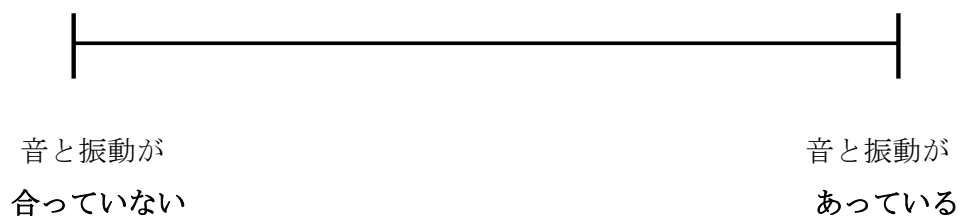


図 5-2. 実験に使用した VAS

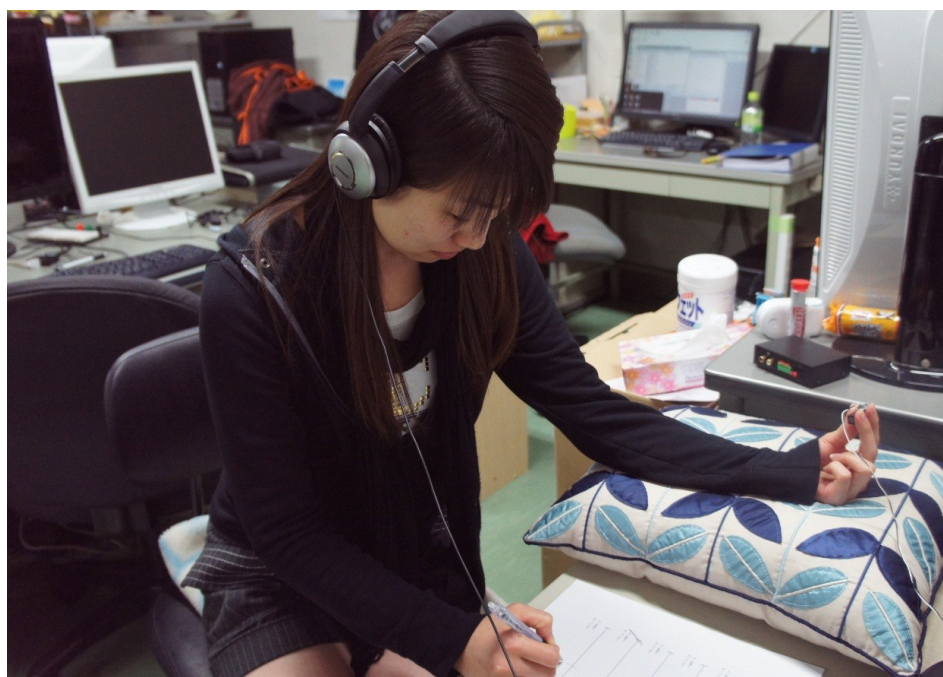


図 5-3. 実験の様子

5.4 実験結果・考察

実験 3A(触聴覚間の協和度評価・青)と実験 3B(聴覚の2和音の協和度評価・赤)の平均結果を以下に示す(図 5-4)。グラフの縦軸は被験者によって評価された2刺激の協和度を表し、横軸は提示された刺激の周波数をあらわす。2つのグラフを見比べると、聴覚の協和度判断(3B)に比べて触聴覚間の協和度判断(3A)の推移は平坦であり、一見すると触聴覚刺激の倍音構造は協和度判断に寄与していないように思われる。

しかしながら、実験 3B の結果の詳細な観察によって、実験 3 に参加した被験者を 2

つの群に分けられることが判明した。表 5-1 のとおり，15 組の提示刺激は協和音(完全・不完全)と不協和音の組が交互に配置されており，3B の平均結果も綺麗なジグザグ型をしているが，3B の被験者ごとの結果を見てみると，提示刺激の協和度を聴覚間で正しく判断できている被験者と，そうでない被験者がいることが判明した(図 5-5)。例えば被験者 4 は 82.4Hz と 130.8Hz の組の協和度を近接する 2 組とくらべて高いと判定している。この組み合わせは不完全協和音，近接する 2 組は不協和音を構成するためこの判定は正しいといえる。一方で被験者 8 はこの組の協和度を低く判定している。

この違いに基づき，実験 AB の結果をグループ a(4 名，協和度を正しく判定)とグループ b(5 名，聴覚間の協和度を一部誤って判定)の 2 群に場合分けした。図 5-6 と図 5-7 はそれぞれ実験 3AB の結果をグループ a とグループ b に群分けした結果を示す。

グループ分けされた結果より，実験 3B(聴覚の協和度判断)で生じた違いは実験 3A(触聴覚の協和度判断)にも反映されていることが判明した。すなわち，グループ b では実験 3A と 3B の協和度判断が相関していないのに対して，グループ a では両者の協和度判断は中心周波数に近い 92.4Hz から 184.9Hz の間で相関していることが判明した。この周波数帯域における触覚－聴覚の協和度と，聴覚－聴覚の協和度の相関関係を図 5-8 (グループ a)及び図 5-9 (グループ b) に示す。

この 2 つの相関が有意であるかを判定するため，スピアマンの順位相関係数の有意性検定(The Spearman rank correlation coefficient test)[38]を行った。その結果，92.4Hz から 184.9Hz におけるグループ a の相関関係は有意であり($r_s=0.82$, $p<0.05$)，グループ b の相関関係は有意でないことが明らかになった($r_s=0.21$, $p>0.05$)。検定には以下の式(2)で求められるスピアマンの順位相関係数 r_s を用いた。式中の n はサンプル数を， R_{X_i} と R_{Y_i} はそれぞれデータ X と Y の i 番目の順位を表す。

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{X_i} - R_{Y_i})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

このことから，聴覚で 2 和音の協和度を正しく判定できる被験者は，知覚構造が異なる触聴覚間においてもその協和度を中心周波数付近で正しく判定できたと言える。

被験者間で協和度の判断に違いが生じた理由を調査するため，実験後にアンケートを実施したところ，興味深い相違点を見出した。それは，グループ a(聴覚間・触聴覚間共に協和度を正しく判定できた被験者群)の被験者はみな，フルートやサクソなどの管楽器の演奏経験があったということである。先行研究より触覚刺激は聴覚パフォーマンスのフィードバックとして利用されることが示唆されており[39][40]，グループ a の被験者は演奏経験を通じて聴覚間の協和度判断(実験 3B)が鋭くなっただけでなく，おそらく楽器演奏時の振動と音の組み合わせの学習が触聴覚間の協和度判断(実験 3A)に寄与したと考えられる。

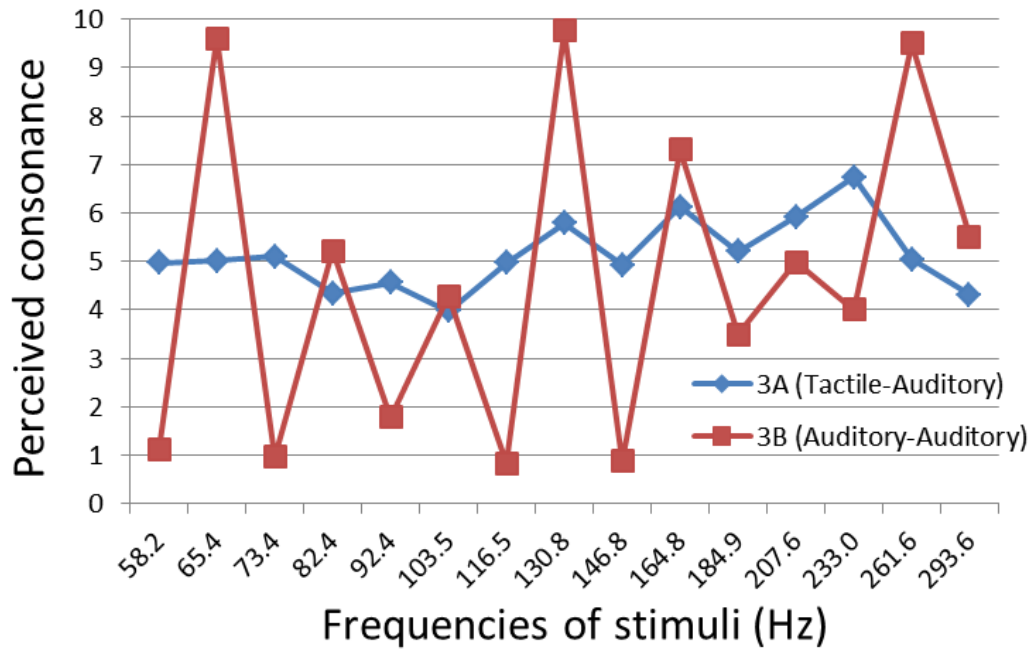


図 5-4. 実験 3AB の全被験者の平均結果

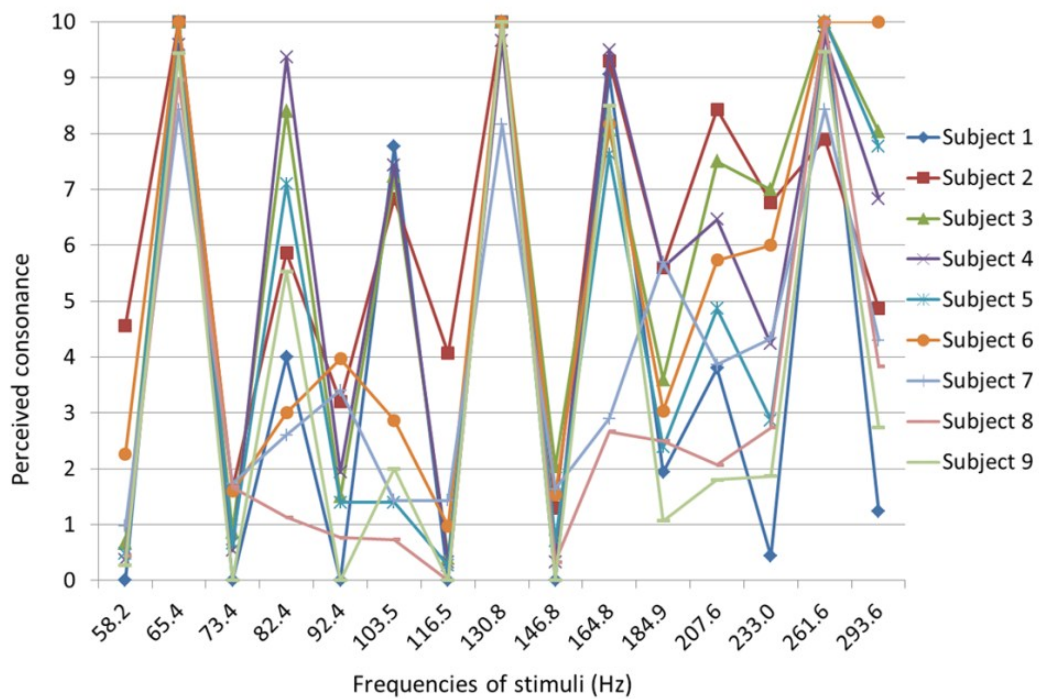


図 5-5. 実験 3B の被験者ごとの結果

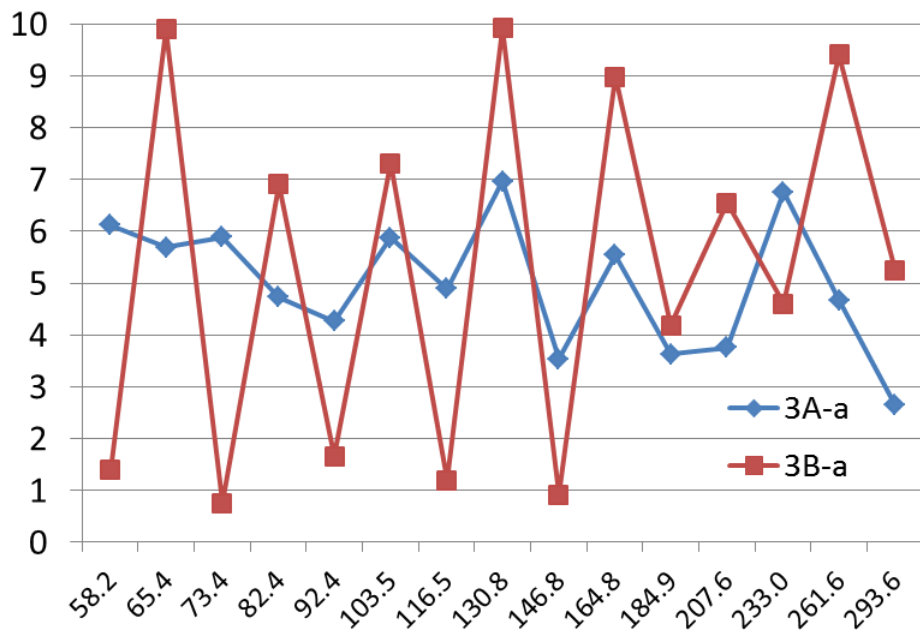


図 5-6. 実験 3AB の平均結果(グループ a)

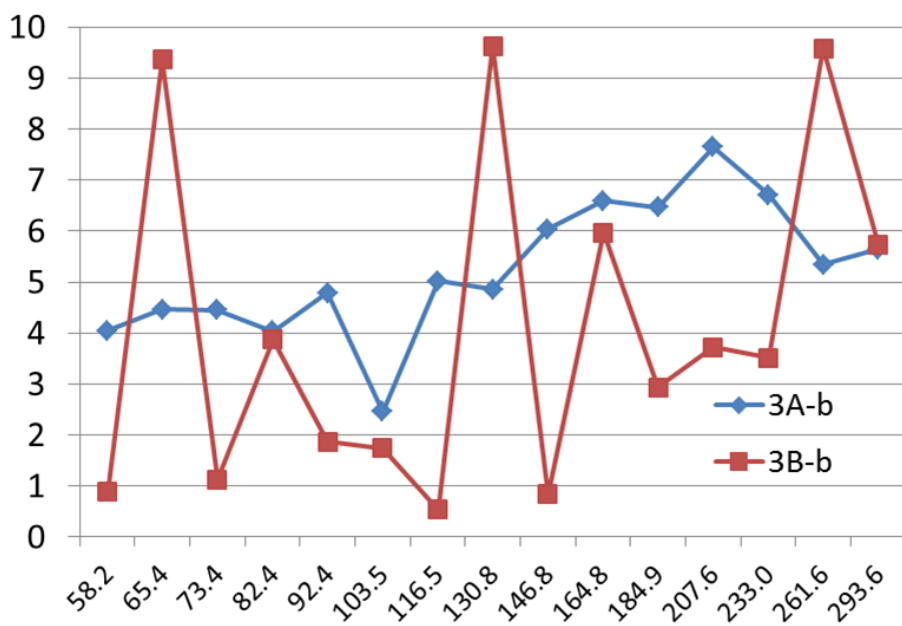


図 5-7. 実験 3AB の平均結果(グループ b)

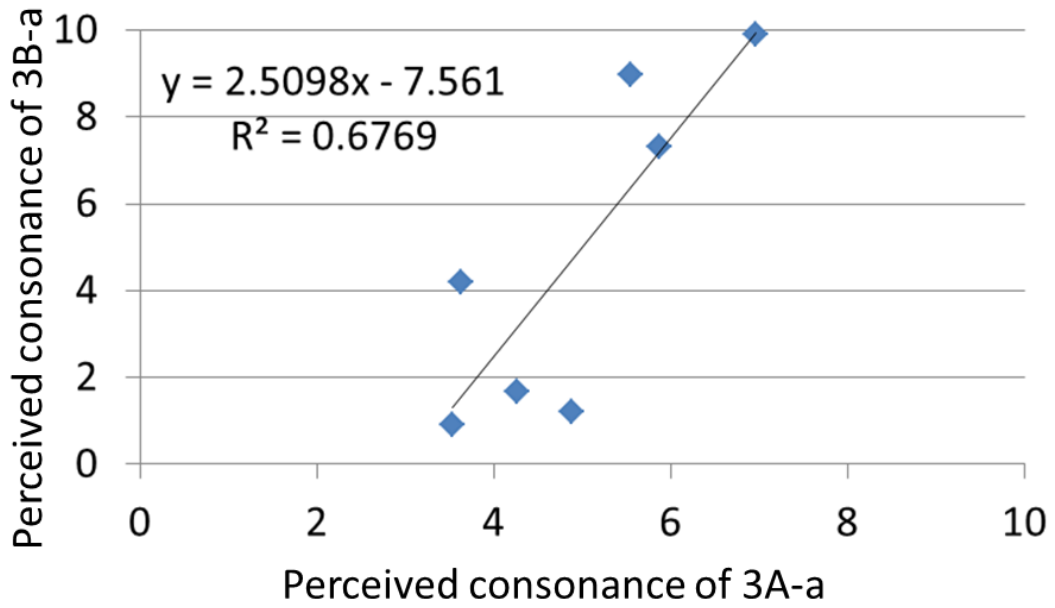


図 5-8. 92.4Hz から 184.9Hz における触覚－聴覚の協和度と、
聴覚－聴覚の協和度の相関関係（グループ a）

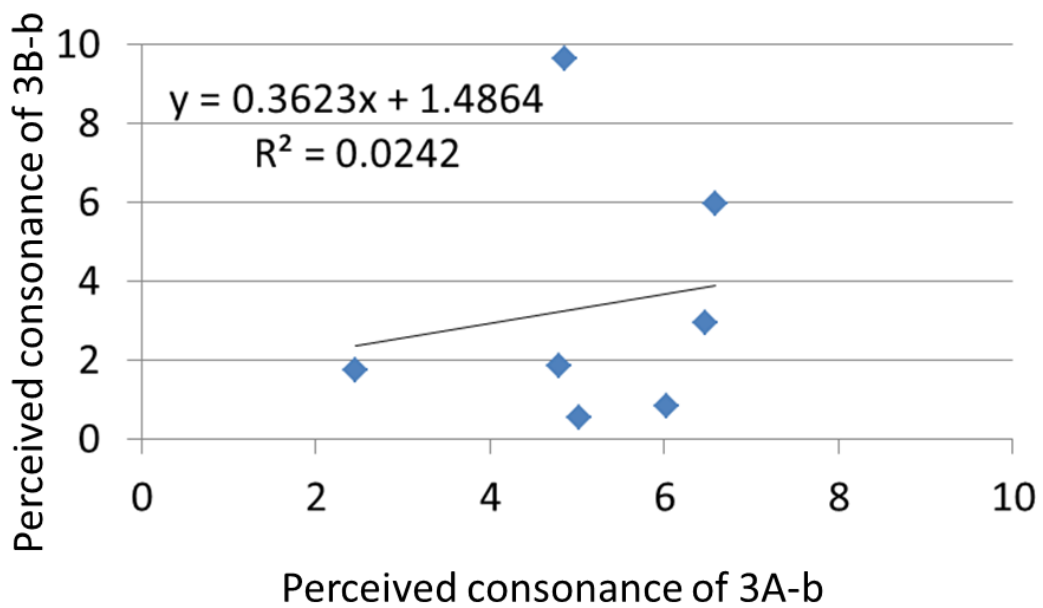


図 5-9. 92.4Hz から 184.9Hz における触覚－聴覚の協和度と、
聴覚－聴覚の協和度の相関関係（グループ b）

第6章

結論と今後の展望

6.1 結論

本稿では、触聴覚クロスモーダルの基礎的検討として、触覚刺激が聴覚の強度知覚に与える影響について調査した。実験 1 の結果より、振動刺激を付加することで聴覚の主観的な音圧強度が上昇することが判明した。

次に強度と同じく触聴覚間で知覚可能な周波数について検討し、触聴覚間で“同じ”と感じる周波数の組み合わせが存在するかどうかを調査した(実験 2)。実験結果より、触聴覚間の周波数的なマッチングメカニズムは 2 つの周波数の組み合わせによって生じるのではなく、2 つの周波数が倍音構造をなしているかどうか依存することが示唆された。

この知見をもとに実験 3 を行い、触聴覚間の周波数的な協和度は両者が倍音構造をなしているか否かで判断され、知覚構造のことなる触聴覚間においても、聴覚で感じる和音の協和度が知覚可能であることが示された。また触聴覚間の協和度の判定能力は、聴覚間の協和度判定の能力に依存し、音楽経験の有無がこの能力に寄与していることが示唆された。

6.2 今後の展望

今後の展望として、次のような観点から研究を進め、触覚-聴覚変換を用いた聴覚臨場感向上技術の実現に繋がりたいと考えている。

6.2.1 従来知られてきたクロスモーダル現象の応用

先述したように、触聴覚以外の感覚間で従来知られていたクロスモーダル現象が、触聴覚間でも生起するといった形で各クロスモーダル現象の類似性、共通性が報告されている。この手法にのっとり、従来知られてきたクロスモーダル現象を触聴覚間に応用することで、新たな触聴覚変換手法を発見可能であると考えられる。

理想的でない状況での音再生手法として現在いくつかの錯聴現象が利用されている。例えばミッシングファンダメンタルは共鳴の基本周波数が存在しなくても複数の倍音周波数の組み合わせから基本周波数を知覚する現象であり、薄型テレビの音響特性の改善に利用されている。こうした構造知覚の中に触覚を滑りこませ、例えばひとつの倍音成分を触覚に置き換えた時に気づかない、というような形での触覚-聴覚間のクロスモーダルを発見、活用していくことが考えられる。

6.2.2 言語表現など用いた触覚－聴覚変換手法の検討

本稿では聴覚と触覚の周波数・空間特性に着目し、触聴覚クロスモーダル現象の検討を行ったが、言語表現などを介したより高次のマッピング手法も検討する。感覚間の相互作用を言語表現（形容詞対比較）や色彩表現から見出す手法は共感覚の研究に盛んに用いられている。この手法を利用し、触覚刺激と聴覚刺激で同等の形容詞評価を生じる音素－触素対を見出す。これにより、音における調や和音のようなより複雑な触覚的要素の同定につながることを期待している。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，終始暖かい激励とご指導，ご鞭撻を頂いた本学梶本裕之准教授に深く感謝申し上げます．2年間という短い修士課程において，3件の国際発表，1件の国内発表，仏国への留学，論文誌への投稿，そしてそれらを修士論文としてまとめることができたのも，梶本先生の的確な指摘とご指導があったからだと思います．

本論文の起点である第3章は，修士1年時代に仏国・パリ第六大学の Hayward 研究室へ留学した際の研究をまとめたものです．Vincent Hayward 教授には留学中だけでなく，帰国後の国際学会などでも大変お世話になりました．この場をお借りしてパリ第六大学 Vincent Hayward 教授に厚く御礼申し上げます．

また，本論文の提出にあたり有用なコメントを頂きました本学橋本直己准教授に深謝致します．

梶本研究室のメンバーにも大変お世話になりました．直属の後輩である宇戸和樹くん，池野早紀子さんには私の指導力が至らずご苦勞をおかけしたこともあったと思います．今，お二人とも無事に進路を進められて大変嬉しく思っております．後輩の指導や私自身が研究に行き詰まった時に優しくフォローして下さった先輩方にも大変感謝しております．

岡部浩之くん，横山牧さんをはじめとする同期には特にお世話になりました．苦しいこと・辛いことを乗り越えることができたのも，共に研究を続ける同期がいたからこそだと思っております．卒業後はそれぞれが異なる進路を歩むことになりますが，お互い精進し合い，またどこかで再会できることを楽しみにしています．

最後になりましたが，研究を進めるにあたり，実験にご協力頂きました被験者の皆様，学会で有用なコメントを頂きました皆様，そして私事になりますが，今まで支えてくれた家族に心から感謝申し上げます．本当にありがとうございました．

参考文献

- [1] オンライン動画配信サービス Hulu. <http://www2.hulu.jp/> (Last access 2013/01/28).
- [2] 5.1ch サラウンドシステム, HTP-S727, パイオニア株式会社, 日本.
http://pioneer.jp/hometheater/lineup/http_s727.html (Last access 2013/01/28).
- [3] 体感音響装置, NapFun:NF-07VH, 有限会社 玉河化成, 日本.
<http://www.tamagawakasei.com/CL02/list.php> (Last access 2013/01/28).
- [4] M. Sakajiri, K. Nakamura, S. Fukushima, S. Miyoshi, and T. Ifukube. Effect of voice pitch control training using a two-dimensional tactile feedback display system. *Proceedings of The 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2943-2947, (Seoul, Korea, October 14-17, 2012)より引用.
- [5] 伊福部進, 湊博, 吉本千禎. "心理物理実験によるタクトイル・ボコーダーの基礎的研究," 日本音響学会誌, 31:170-178, 1975.
- [6] O. Ozcan, E. Rebecca, and O. D. Kimbrough. Tactile Vocoders for the Deaf. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, IEEE, 6(3):37-42, September 1987.
- [7] P. L. Brooks, B. J. Frost, J. L. Mason, and D. M. Gibson. Word and Feature Identification by Profoundly Deaf Teenagers Using the Queen's University Tactile Vocoder. *Journal of Speech and Hearing Research*, 30:137-141, March 1987.
- [8] Dot View, DV-2, ケーゲーエス株式会社, 日本. http://www.kgs-jpn.co.jp/b_dv2.html (Last access 2013/01/28).
- [9] 大山正, 今井省吾, 和気典二:新編 感覚・知覚心理学ハンドブック 第四部 皮膚感覚・自己受容感覚, 誠信書房, pp.1169-1315, 1994.
- [10] T. Maeno, K. Kobayashi, N. Yamazaki. Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors, *Bulletin of JSME International Journal*, 41(1):94-100, 1998.
- [11] 内山恵二:感覚・知覚の科学 3 触覚の生理学, 朝倉書店, pp.102-141, 2008.
- [12] E. Kandel, J. Schwartz, T. Jessell. "Principles of Neural Science," Chapter 22 The Bodily Senses, p.433, McGraw-Hill Medical, Fourth Edition, 2000.
- [13] 大山正, 今井省吾, 和気典二:新編 感覚・知覚心理学ハンドブック 第三部 聴覚, 誠信書房, pp.983-1168, 1994.
- [14] V. Jousmaki and R. Hari. Parchement-skin illusion: sound-biased touch. *Current Biology*, 8(6):190-191, 1998.
- [15] S. Guest, C. Catmur, D. Lloyd, and C. Spence. Audiotactile interactions in roughness perception. *Experimental Brain Research*, 146(2):161-171, 2002.
- [16] J. P. Bresciani, M. O. Ernst, K. Drewing, G. Bouyer, V. Maury, and A. Kheddar. Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental Brain Research*, 162(2):172-180, 2005.
- [17] E. C. Wilson, C. M. Reed, and L. D. Braid. Integration of auditory and vibrotactile stimuli: Effects of

- phase and stimulus-onset asynchrony. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(4): 1960-1974, October, 2009.
- [18] E. C. Wilson, C. M. Reed, and L. D. Braida. Integration of auditory and vibrotactile stimuli: Effects of frequency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5): 3044-3059, May, 2010.
- [19] E. C. Wilson, L. D. Braida, and C. M. Reed. Perceptual interactions in the loudness of combined auditory and vibrotactile stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5): 3038-3043, May, 2010.
- [20] 鈴木結花, 鈴木美穂, 行場次郎. "聴覚情報が触覚の粗さ知覚に及ぼす影響," 電子情報通信学会技術研究報告, 106(410), pp.13-18, 2006.
- [21] Y. Suzuki, J. Gyoba, and S. Sakamoto. Selective effects of auditory stimuli on tactile roughness perception. *Brain Research*, 1242:87-94, November, 2008.
- [22] J. M. Yau, A. I. Weber, and S. J. Bensmaia. Separate Mechanisms for Audio-Tactile Pitch and Loudness Interactions. *Frontiers in Psychology*, 1:160, October, 2010.
- [23] J. M. Yau, J. B. Olenczak, J. F. Dammann, and S. J. Bensmaia. Temporal frequency channels are linked across audition and touch. *Current Biology*, 19:561-566, April, 2009.
- [24] H. Gillmeister and M. Eimer. Tactile enhancement of auditory detection and perceived loudness, *Brain Research*, 1160:58-68, March, 2010.
- [25] E. Hoggan and S. Brewster. Designing Audio and Tactile Crossmodal Icons for Mobile Devices. *Proceedings of the Ninth International Conference on Multimodal Interfaces 2007*. 162-169, (Nagoya, Japan, November 12-15, 2007).
- [26] M. Harry and M. John. Hearing lips and seeing voices. *Nature* 264(5588): 746-748, December, 1976.
- [27] B. Gick and D. Derrick. Aero-tactile integration in speech perception. *Nature*, 462:502-504, November, 2009.
- [28] D. Derrick and B. Gick. Full body aero-tactile integration in speech perception. *Proceedings of INTERSPEECH 2010*, 122-125, (Chiba, Japan, September 26-30, 2010).
- [29] L. Shams, Y. Kamitani, and S. Shimojo. Illusions: What you see is what you hear. *Nature*, 408:788, December, 2000.
- [30] A. Violytyev, S. Shimojo, and L. Shams. Touch-induced visual illusion. *NeuroReport*, 16(10):1107-1110, July, 2005
- [31] C. Kayser, C. I. Petkov, M. Augath, and N. K. Logothetis. Integration of touch and sound in auditory cortex. *Neuron*, 48(2):373-384, October, 2005.
- [32] J. P. Bresciani and M. O. Ernst. Signal reliability modulates auditory-tactile integration for event counting. *NeuroReport*, 18(II):1157-1161, July, 2007.
- [33] P. Szendro, G. Vincze, and A. Szasz. Pink-noise behaviour of biosystems. *European Biophysics Journal*, 30(3):227-231, July, 2001.
- [34] R. Okazaki, H. Kajimoto, and V. Hayward. Vibrotactile Stimulation Can Affect Auditory Loudness: A Pilot Study. *Proceedings of EuroHaptics2012* (Tampere, Finland, June 12-15, 2012), Lecture Notes in Computer Science, 7283:103-108, Springer, June 2012.

- [35] S. J. Bolanowski, Jr., G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5):1680-1694, November, 1988.
- [36] 岡崎龍太, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之, Hayward Vincent. "触覚刺激による聴覚強度知覚への影響," SICE-SI2012 予稿, (博多, 日本, 12月18-20日, 2012).
- [37] R. Plomp and W. J. M. Levelt. Tonal Consonance and Critical Bandwidth. *Journal of the Acoustical Society of America*, 38(4):548-560, April, 1965.
- [38] 中村知靖, 前田忠彦, 松井仁: 心理統計法への招待—統計をやさしく学び身近にするために 12章 順位データの検定, サイエンス社, pp.223-233, 2006.
- [39] C. Chafe, S. O'Modhrain. Musical muscle memory and the haptic display of performance nuance. In *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference*, pp1-4, (Hong-Kong, China, August 1996), 1996.
- [40] J. Sundberg. Chest wall vibrations in singers. *Journal of Speech and Hearing Research*, 26(3):329-340, September, 1983.