

**モバイル環境における  
触覚を用いた聴覚の拡張**

**岡崎 龍太**

**電気通信大学大学院情報理工学研究科**

**博士(工学)学位申請論文**

**2016年9月**

# モバイル環境における 触覚を用いた聴覚の拡張

## 博士論文審査委員会

主査	梶本 裕之	准教授
委員	兼子 正勝	教授
	坂本 真樹	教授
	広田 光一	教授
	野嶋 琢也	准教授

**著作権所有者**

**岡崎 龍太**

**2016 年**

# Augmentation of Auditory Perception by Using Tactile Stimuli in Mobile Environment

Ryuta Okazaki

## Abstract

In our daily life, the strong connection between auditory and tactile sensation caused by the same physical event plays an important role in our perception. Since sound-related tactile sensation can only be generated with the direct contact of skin with the object, or with a short distance, the associated auditory and tactile stimuli from the same object play as an important clue to perceive how close the objects are. Therefore, the presentation of sound-related tactile stimuli in digital contents such as movie and video game became a widely used technique and established some significant effects to improve the immersion of the contents.

However, these tactile presentation techniques require a large presentation field and sufficient amplitude, which is difficult to allow in recently-growing mobile environments, such as smartphones or tablet computers due to their size and weight limitations. The use of multiple heavy vibration actuators is also a critical issue for the non-restriction of user which is vital for mobile environment.

To cope with this problem, the author focuses on the auditory augmentation method using tactile presentation in mobile environment. The author utilizes tactile-auditory cross-modal effect, which may effectively enhance auditory experience with tactile presentation.

In this thesis, the author enhances users' auditory experience (i.e. contents experience with auditory signal) in mobile environment in the following situations;

- i. The vibration source is remote, and auditory sensation is generated, accompanied with tactile sensation.
- ii. The vibration source directly contacts with the skin, generating tactile sensation, accompanied with auditory sensation.

In each situation, the author also considers about two characteristics of humans' tactile perception, tactile time characteristic and spacial characteristic. That is to say, what sort of tactile stimuli should be presented and which body part should be stimulated.

This paper is composed of seven chapters. Followed by introduction, the effect of vibration to the auditory amplitude and frequency perception are examined in chapter three. The results show that auditory loudness perception could be enhanced by adding tactile stimulation. Also in the frequency perception, consonance between tactile and audio depends on their overtone relationships, which are similar to that of auditory, but they have unsharp peaks. In chapter four, the author tries to enhance music listening experiences, which belong to the first situation (The vibration source is remote, and

auditory sensation is generated, accompanied with tactile sensation) by using findings in the previous chapter. In chapter five, a novel vibration presentation method using user's collarbone is proposed to improve music listening experiences. A psychophysical experiment suggests that presenting vibration through the collarbone induces vibration transmission to wider area, and contributes user's subjective music listening experience. In chapter six, the author deals with colliding sensation during tapping with the skin, generating tactile sensation, accompanied with auditory sensation. Results showed that auditory distance perception is magnified or modified by vibration presentation. Finally, the thesis concludes with discussion about these auditory augmentation techniques using tactile presentation in mobile environment and its limitations.

# モバイル環境における触覚を

## 用いた聴覚の拡張

岡崎 龍太

### 概要

コンサートを鑑賞する、花火大会を楽しむといった日常の体験には、楽器の振動や花火の爆発という単一の物理現象によって触覚と聴覚を生じるという共通点が存在する。聴覚のみで知覚される場合に比して、触覚によっても知覚されることは、人と対象物が接している、あるいは近い距離に位置することを伝える大きな手がかりとなり、臨場感や没入感の向上に寄与していると考えられる。こうした利点から、映画、ゲームといったデジタルコンテンツにおいても、音と振動を組み合わせる試みが数多く行われており、これらのデジタルコンテンツにおける触覚は視覚、聴覚に続いて重要な感覚提示チャンネルとして注目されている。

しかしながら近年急速に普及が進んでいるモバイル環境におけるデジタルコンテンツ体験では、ハイレゾリューションオーディオ技術やヘッドホンなどを用いて環境設置型デバイスと同様の高品位な聴覚提示が可能な一方で、モバイルデバイスの重量やサイズ、ユーザの動きを妨げない非拘束性といった制約上、触覚刺激の提示方法、範囲、強度に制約があり、従来の環境設置型と同様な触覚提示を行うことが困難であった。

そこで本研究はこれらの制約を持つモバイル環境において、聴覚刺激を伴うコンテンツ体験（以下本論文では聴覚体験と定義）を触覚刺激によって拡張することを目的とする。なおモバイル環境とは狭義には手で持ち運べる環境を意味するが、本論文においては、mobile[可動性の]という言葉が示すように、ユーザの動きを妨げない非拘束性のある環境全体をモバイル環境と呼ぶ。またここで言う聴覚体験の拡張とは、本来触覚と聴覚が同時に発生するという状況を再現することにとどまらず、聴覚体験全体の主観的価値を高めることを指す。

前述のとおり、ここで扱う触覚刺激と聴覚刺激は本来同一の物理現象に端を発するものであるが、本論文では伝搬の形態によって以下の二つの状況に分類した。

- i. 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況
- ii. 振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況

i の状況に対する先行研究では、例えば体感音響装置を用いて音楽を聴覚刺激としてだけでなく振動刺激としても提示し、複数感覚への提示によって音楽への没入感を向上させている。これはすなわち聴覚体験を触覚提示によって加算的に向上させることになる。対してiiの状況は、例えば野球やテニスにおける打撃時の衝突感などをさす。衝突感は強い触覚刺激を伴うが、コンピュータゲームなどのデジタルコンテンツにおいては多くの場合音のみで提示されていた。これに触覚提示を加えることで、打撃の強度、対象物の材質感、位置、距離など聴覚刺激のみでは提示困難な情報を提示可能になると考えられる。

各状況に応じた触覚提示を行うにあたり、本論文では触覚の持つ二つの側面に着目した。一つ目は触覚が時間的に変化する信号であるという側面である。聴覚と同じく、ヒトは触覚にお

いても刺激を時間変化する信号として知覚している。このことから、触覚提示において「どのような波形を提示すればよいか」という検討が必要になる。二つ目は触覚が空間的に分布する信号であるという側面である。聴覚知覚がヒトの両耳のみで行われるのに対して、触覚の知覚は約  $1.6-1.8\text{m}^2$  の面積をもつ皮膚で行われている。それ故、触覚提示においては「どの部位に刺激を提示すればよいか」という検討も行う必要が生じる。

これらのことから、本論文では先に挙げた二つの状況における触覚提示による聴覚体験の向上を合わせて聴覚体験の拡張と定義し、状況ごとに触覚の二つの側面に対応した触覚提示を行うことで、触覚提示手法等が制限されるモバイル環境における聴覚体験の拡張を目指す。

本論文は以下の 7 章より構成される。

第 1 章では、我々が日常生活において常に知覚、利用している聴覚と触覚の関わりを基に、単一の物理現象から聴覚と触覚が同時知覚される状況を分類、モバイル環境における聴覚体験拡張の課題を見出し、本論文の目的について述べる。

第 2 章では、本論文で扱う触聴覚クロスモーダル現象の理解に必要な触覚及び聴覚に関する知見をまとめる。触覚・聴覚に関する生理学的な知見に関して述べ、次章以降で扱う触聴覚クロスモーダル現象に関して必要な知識を共有する。

第 3 章では、モバイル環境下で触覚刺激によって聴覚体験を向上させるという目的に対して、触覚刺激の波形の寄与に関する基礎的検討を 2 つの観点から行う。第一の観点は、触覚の提示によって聴覚を「強く」感じる事が出来るか、というものであり、第二の観点は、触覚の提示と聴覚が「あって」感じる事ができるか、というものである。この結果として、幅広い周波数帯域を持つ刺激であっても触覚は聴覚を強めること、また聴覚刺激と触覚刺激の周波数がオクターブ違いの関係にある時に、聴覚で知られる協和度が知覚可能であることを示す。

第 4 章では前章までの知見を元に、「振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況」の代表として、モバイル環境下における音楽の聴取に着目する。触覚と聴覚の知覚可能周波数範囲の隔たりに対処するため、聴覚刺激の周波数の 2 の階乗分の 1 の周波数となるよう分周して触覚刺激として手掌部より提示する手法を提案、検証する。

第 5 章では、モバイル環境下で触覚刺激によって聴覚体験を向上させるという目的に対して、触覚刺激の部位の寄与に関する検討を行う。手掌部への触覚提示では困難な、身体広範囲へ触覚提示可能かつ小型軽量でユーザの非拘束性を損なわない触覚提示装置の開発について述べる。提案手法としてユーザの鎖骨に振動を提示し、骨格を介して振動を上半身に伝搬させる手法の提案と、心理物理実験による主観的な聴覚体験への影響の検証を行う。

第 6 章では二つ目の分類に当たる「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」の代表として、打撃時の衝突感を触覚で提示することを試みる。触覚によって知覚可能な打撃の強度、対象物の材質感、位置、距離のうち、特に聴覚で提示が困難とされる対象物の前後方向の距離定位に対して触覚提示によって操作することを試みる。

最後に第 7 章では第 3 章から第 6 章で述べた研究を総括する。各研究を通じて得られた知見を元に、モバイル環境下における聴覚体験拡張手法とその限界、今後の展望についてまとめる。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	聴覚体験における触覚の役割	1
1.2	モバイル環境における触覚を用いた聴覚体験拡張の課題	2
1.3	本研究の目的	3
1.3.1	i の状況における提示波形を考慮した触覚提示	4
1.3.2	i の状況における提示部位を考慮した触覚提示	4
1.3.3	ii の状況における提示波形を考慮した触覚提示	5
1.3.4	ii の状況における提示部位を考慮した触覚提示	5
1.4	本論文の構成	5
第2章	触覚・聴覚に関する知見	7
2.1	触覚に関する知見	7
2.1.1	皮膚の構造	7
2.1.2	触覚受容器	8
2.2	聴覚に関する知見	15
2.2.1	聴覚器官の構造	15
2.2.2	聴覚受容器	17
第3章	モバイル環境下における聴覚体験向上のための触聴覚クロスモーダルの基礎的検討	18
3.1	研究背景	18
3.2	実験1 触覚刺激による聴覚の主観的強度変更実験	19
3.2.1	実験装置	19
3.2.2	実験条件	20
3.2.3	実験手続き	21
3.2.4	実験結果・考察	21
3.3	実験2 触聴覚間の周波数マッチング	22
3.3.1	実験条件	22
3.3.2	実験手続き	23



3.3.3 実験結果・考察 .....	23
3.4 実験 3 触聴覚間の周波数協和性検証実験 .....	25
3.4.1 実験装置 .....	25
3.4.2 提示刺激 .....	25
3.4.3 実験手続き .....	26
3.4.4 実験結果・考察 .....	27
3.5 本章のまとめ .....	32
第 4 章 分周刺激を用いた聴触覚変換手法による聴覚体験向上 .....	33
4.1 研究背景 .....	33
4.1.1 分周刺激を用いた触聴覚提示に関する先行研究 .....	34
4.2 予備実験：実験に使用する変換手法候補の検討 .....	34
4.2.1 実験装置 .....	34
4.2.2 実験及び結果 .....	36
4.2.3 音楽のタイミングと強度のみに同期した触覚提示 .....	40
4.3 聴覚体験の主観評価実験 .....	41
4.3.1 実験装置 .....	41
4.3.2 提示刺激 .....	41
4.3.3 評価方法 .....	41
4.3.4 実験手順 .....	42
4.4 結果 .....	42
4.4.1 Q1. 音と振動が合い続けているーいる .....	42
4.4.2 Q2. 振動は不自然ー自然 .....	43
4.4.3 Q3. 振動は心地よくないー心地良い .....	44
4.4.4 Q4. 振動は好みでないー好みである .....	45
4.4.5 Q5. 振動によって楽しくならないーなった .....	46
4.5 考察 .....	47
4.5.1 高音域を多く含む音源に対する分周手法の適用 .....	47
4.5.2 中・低音域を多く含む音源に対する分周手法の適用 .....	47
4.6 本章のまとめ .....	48
第 5 章 鎖骨を介した触覚提示による聴覚体験の向上 .....	50

5.1	研究背景	50
5.2	関連研究	50
5.2.1	従来型の全身触覚提示装置	50
5.2.2	装置を簡略化した全身触覚提示装置	51
5.2.3	モバイル環境における触覚提示装置	51
5.3	提案手法	52
5.4	実験 1:鎖骨への振動提示による振動伝搬効率検証	53
5.4.1	実験装置	54
5.4.2	提示波形	54
5.4.3	振動提示・計測部位	54
5.4.4	実験手順	55
5.4.5	結果と考察	56
5.5	実験 2:音楽と組み合わせた際の提案手法の評価	58
5.5.1	実験装置	59
5.5.2	振動提示部位	59
5.5.3	提示刺激	61
5.5.4	評価方法	63
5.5.5	実験手順	63
5.5.6	結果と考察	63
5.6	実験 3:分周刺激を用いた鎖骨への振動提示	66
5.6.1	実験装置, 条件	67
5.6.2	評価手法	69
5.6.3	実験手順	69
5.6.4	実験結果	69
5.6.5	考察	72
5.6.6	鎖骨への振動提示による周波数ごとの振動伝搬効率検証	73
5.6.7	考察	77
5.7	本章のまとめ	77
第 6 章	振動刺激による打撃時の衝突感提示	79
6.1	研究背景及び先行研究	79

6.1.1 打撃時の衝突感に関する触聴覚クロスモーダル現象の関連研究 .....	79
6.2 実験 1 触覚刺激による音像の距離感改変 .....	80
6.2.1 実験装置 .....	80
6.2.2 実験条件 .....	81
6.2.3 実験手続き .....	81
6.2.4 実験結果 .....	81
6.2.5 考察 .....	82
6.3 実験 2 強度の異なる触覚刺激による音像の距離感改変 .....	82
6.3.1 実験条件 .....	83
6.3.2 実験結果 .....	83
6.3.3 考察 .....	84
6.4 皮膚感覚による打撃距離知覚仮説 .....	85
6.5 実験 3 触覚分布による打撃距離知覚改変 .....	86
6.5.1 実験装置 .....	86
6.5.2 実験条件 .....	87
6.5.3 提示刺激 .....	88
6.5.4 実験手続き .....	89
6.5.5 実験結果及び考察 .....	89
6.6 本章のまとめ .....	90
第 7 章 結論 .....	92
7.1 結論 .....	92
7.1.1 分周刺激を用いた触覚提示(第 3,4 章) .....	93
7.1.2 鎖骨への触覚提示(第 5 章) .....	94
7.1.3 触覚強度を用いた対象物の前後距離感提示(第 6 章) .....	95
7.1.4 触覚強度を用いた対象物の前後距離感提示(第 6 章) .....	95
7.2 今後の展望 .....	96
謝辞 .....	98
参考文献 .....	99
関連発表 .....	104

# 図表目次

図 1-1. (左)PlayStation 用コントローラ DUALSHOCK[70] (右)4D シアター 4DX[65].....	2
図 1-2. (左)4KUHD ディスプレイ及び (右)ハイレゾリューションオーディオを 搭載したスマートフォン[57].....	2
図 1-3. (左) 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ, それに伴った触覚刺激を生じる状況. (右) 振動源から振動が直接身体に伝わり, それに伴った聴覚刺激を生じる状況. ....	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 ([64]を改変) 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. ....	7
図 2-2. 有毛部と無毛部の受容器分布([21]を改変) .....	8
図 2-3. メルケル細胞の構造([67]を改変).....	9
図 2-4. マイスナー小体の構造([67]を改変) .....	10
図 2-5. パチニ小体の構造([67]を改変) .....	10
図 2-6. ルフィニ終末の構造([67]を改変).....	11
図 2-7. 毛包受容器の構造([67]を改変) .....	11
図 2-9. 機械受容器ごとの振動閾検出曲線([64]を改変) 最も下方の曲線がヒトの振動感応曲線となる. ....	13
図 2-10. 指先部における振動覚の閾値([64]を改変) 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. ....	14
図 2-11. 様々な研究者によって測定された聴覚範囲([68]を改変) .....	15
図 2-12. ヒト耳の断面図([68]を改変). 外側側から外耳・中耳・内耳に分類される. ....	16
図 2-13. 蝸牛の断面図[68]より改変 .....	17
図 2-14. 有毛細胞図[68]を改変. 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. ....	17
図 3-1. 実験装置外観.....	20
図 3-2. 振動子が入ったプラスチックケース .....	20
図 3-3. 実験の様子 .....	21
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. ....	22
図 3-5. 実験の様子 .....	23

図 3-6. 実験結果.....	24
図 3-7. 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). .....	26
図 3-8. 実験に使用した VAS .....	27
図 3-9. 実験の様子 .....	27
図 3-10. 実験 3AB の全被験者の平均結果 .....	29
図 3-11. 実験 3B の被験者ごとの結果.....	29
図 3-12. 実験 3AB の平均結果(グループ a).....	30
図 3-13. 実験 3AB の平均結果(グループ b).....	30
図 3-14. 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) .....	31
図 3-15. 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) .....	31
図 4-1. 実験セットアップ.....	35
図 4-2. 装置単体の周波数特性.....	35
図 4-3. オルゴール音楽の周波数スペクトル .....	37
図 4-4. クラシック音楽の周波数スペクトル .....	37
図 4-5. ジャズ音楽の周波数スペクトル .....	38
図 4-6. オルゴール音楽を用いた 1OT 条件の周波数スペクトル.....	38
図 4-7. オルゴール音楽を用いた 2OT 条件の周波数スペクトル.....	39
図 4-8. オルゴール音楽を用いた 1OT+2OT 条件の周波数スペクトル .....	39
図 4-9. オルゴール音楽を用いた CTL+1OT+2OT+BP 条件の周波数スペクトル.....	40
図 4-10. オルゴール音楽を用いた 175HzAM 条件の周波数スペクトル .....	41
図 4-11. 実験概要 .....	42
図 4-12. 設問 1 の音楽・振動条件ごとの結果.....	43
図 4-13. 設問 2 の音楽・振動条件ごとの結果.....	44
図 4-14. 設問 3 の音楽・振動条件ごとの結果.....	45
図 4-15. 設問 4 の音楽・振動条件ごとの結果.....	46
図 4-16. 設問 5 の音楽・振動条件ごとの結果.....	47
図 5-1. 上半身に存在する主な骨 .....	53
図 5-2. Bone Fone(1979 年)[4].....	53

図 5-3. 鎖骨への振動提示装置.....	54
図 5-4. 振動提示及び計測部位.....	55
図 5-5. 実験 1 概要 .....	56
図 5-6. 実験 1 結果 (提示振動 100 Hz) .....	57
図 5-7. 実験 1 結果(提示振動 200 Hz).....	58
図 5-8. 鎖骨への振動提示の様子.....	60
図 5-9. 布製ゴムバンドを用いた頭部への振動提示の様子.....	60
図 5-10. ロック音楽の周波数分布 .....	61
図 5-11. トランス音楽の周波数分布.....	62
図 5-12. クラシック音楽の周波数分布.....	62
図 5-13. 振動の心地よさに関する実験結果.....	64
図 5-14. 振動の広がりに関する実験結果 .....	65
図 5-15. 聴覚体験の変化に関する実験結果.....	66
図 5-16. 高周波を比較的多く含む音楽の周波数分布 .....	68
図 5-17. 低周波を比較的多く含む音楽の周波数分布 .....	68
図 5-18. 設問 1 における回答結果.....	70
図 5-19. 設問 2 における回答結果.....	70
図 5-20. 設問 3 における回答結果.....	71
図 5-21. 設問 4 における回答結果.....	71
図 5-22. 設問 5 における回答結果.....	72
図 5-23. [再掲]機械受容器ごとの振動閾検出曲線([64]を改変) 最も下方の曲線がヒト の振動感応曲線となる.....	73
図 5-24. 50Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬 .....	75
図 5-25. 100Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬 .....	75
図 5-26. 200 Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬 .....	76
図 5-27. 400 Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬 .....	76
図 6-1. (左)聴覚刺激提示用スピーカ (右)触覚刺激提示用振動子.....	81
図 6-2. 触覚刺激による距離感改変実験結果 .....	82
図 6-3. 実験セットアップ.....	83
図 6-4. 強度の異なる触覚刺激による音像の距離感改変実験結果.....	84

図 6-5. 把持棒による物体打撃時の簡易力学モデル .....	86
図 6-6. 皮膚感覚による打撃距離知覚仮説. (左)物体の打撃位置が手元に近い場合, 棒を把持した手に生ずる振動は親指側で大きくなる. (右)物体の打撃位置が離 れている場合, 親指側と小指側に加わる振動は強度としてはほぼ等しくなる ....	86
図 6-7. 実験デバイスを用いた打撃振動の記録.....	87
図 6-8. 記録した振動を提示する様子.....	87
図 6-9. 振動提示条件.....	88
図 6-10. 刺激提示例 .....	89
図 6-11. (左)親指側に打撃時の振動を提示した場合と小指側に振動を提示した場合を 比較した(a)-(c)の組み合わせ (中)親指側と小指側両方に振動を提示した場合と小 指側に振動を提示した場合を比較した(b)-(c)の組み合わせ (右)親指側に打撃時の 振動を提示した場合と親指側と小指側両方に振動を提示した場合を比較した(a)- (b)の組み合わせ. ....	90
図 7-1. (再掲) (左) 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ, それに伴っ た触覚刺激を生じる状況. (右) 振動源から振動が直接身体に伝わり, それに伴っ た聴覚刺激を生じる状況. ....	92

# 第1章

## 序論

### 1.1 聴覚体験における触覚の役割

12歳でほとんど聴覚を失いながら、音楽分野で最も権威あるグラミー賞を受賞したイギリスのパーカッショニスト、Evelyn Glennieは「どうやって音楽を聴くのか」という問いに対して「耳を使うだけでなく、腕、頬骨、頭、腹、足を使うことで音楽を聴くことができる」と答えている。また「木が揺れるのを見て、葉が擦れる音を想像できるように、たとえ音が聞こえなくても、そこから何かが起こるのを感じ取ることができる」とも述べている[16]。これは、彼女が打楽器演奏時に生じる複数の感覚への刺激、聴覚刺激と触覚刺激を個別のものとして捉えるのではなく、一体的なものとして捉えていることを示唆している。実際、楽器の音は楽器に演奏者が振動を加え、その振動が共鳴管などを通じて増幅され空気を震わせ、内耳を通じて音が知覚される。

楽器の例に限らず、人は日常生活の多くの場面において聴覚と触覚を同時に知覚している。これは単一の物理現象である物体の振動から、空気伝搬によって内耳に伝わる刺激を知覚するのが聴覚であり、空気伝搬または直接の伝播によって皮膚に伝わる刺激を知覚するのが触覚であるためである。特に触覚は、人が対象物に接している、あるいは近距離に位置することで、直接の伝播または空気伝搬(例：花火大会などで生じる身体への振動)で皮膚が振動することによってのみ知覚が可能である。それゆえ単一の対象物から振動と音を同時に知覚することは、人と対象物が接している、あるいは近い距離に位置することを理解するための大きな手がかりとなると考えられる。聴覚刺激を伴うコンテンツ体験(以降本論文では聴覚体験と定義する)において、家庭内でヘッドホンを使用した場合と実際に体験する場合では、触覚刺激の有無によってコンテンツから受ける印象が大きく異なり、一般に後者がより“臨場感が高い”と表現されるのも、この理由によると考えられる。

本論文では臨場感を、字義通り「その場に臨んでいる感覚」と定義する。この定義上、自己がコンテンツ内の環境に囲まれていると解釈しうる感覚であれば臨場感に繋がる可能性があると考えられる。これは例えばライブ会場で大型スピーカの音圧を身体に浴びることで生じる振動によっても、我々は文字通り「自己が音楽コンテンツに囲まれている」ことを知覚することができると考えられるためである。

臨場感を向上させるために、映画、ゲーム、TVといったデジタルコンテンツにおいて、音と振動を組み合わせ提示する試みは古くから行われてきた。例えば1996年に発表されたSONYのPlayStation用コントローラDUALSHOCK[70]は、グリップ内部に搭載された偏心モータによって、ゲームコンテンツに同期した振動をユーザに提示する(図1-1左)。また昨今様々な規格で導入が進んでいる4Dシアター(4DX[65]など)では、映像や音響に同期した振動や動きなどを提示して、映画コンテンツへの没入感を向上させている(図1-1右)。現在これらのデジタルコンテンツにおける触覚提示は視覚、聴覚に次ぐ第三の感覚チャネルとして研究が盛んに行われている。





図 1-1. (左)PlayStation 用コントローラ DUALSHOCK[70] (右)4D シアター4DX[65]

## 1.2 モバイル環境における触覚を用いた聴覚体験拡張の課題

近年、我々の身の回りでコンテンツ体験のためのモバイル環境が急速に身近となり、一部の領域では従来の据え置き型の環境を凌駕しつつある。例えば従来はゲーム機の主市場は家庭用ゲーム機であり、モバイル環境におけるゲーム機は家庭用ゲーム機を劣化させた、より安価なものという位置づけであった。しかしモバイル環境において、フルハイビジョンの4倍の画素数を持つ4K UHD規格[17]の液晶ディスプレイやCDのサンプリング周波数及び量子化ビット数を超えた音源の再生が可能なハイレゾリューション規格オーディオ[78]を搭載したスマートフォン[57]などの登場により、家庭内環境と比較しても、あるいは専門設備を有するテーマパークや映画館などと比較しても同等以上の超高精細な映像、音響を自由に体験できるようになった。さらにはモバイル環境ならではの特性(GPSによるユーザの位置情報の利用等)を利用したコンテンツも台頭しつつある。



図 1-2. (左)4KUHD ディスプレイ及び (右)ハイレゾリューションオーディオを搭載したスマートフォン[57]

これに対して従来聴覚体験向上に用いられてきた触覚提示デバイスは多くのジャケッ ト型[10]やイス型[22][23][74]であり、身体広範に高エネルギーの振動を提示することでコンテ ンツ体験を向上させている。スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末においてはデバイスの重量やサイズの制約上、触覚刺激の提示範囲や強度に限界があると考えられる。なおモバイル環境とは狭義には手で持ち運べる環境を意味するが、本論文においては、mobile[可動性の]という言葉が示すように、ユーザの身体運動を妨げない非拘束性のある環境全体をモバイル環境と呼ぶ。この観点からは装着型のデバイスであっても運動を拘束しなければモバイル

環境で利用可能と考えられるが、実際これまでに提案されてきたジャケット型の触覚提示デバイスは高重量の振動子を多数配置するもので、身体運動を妨げないとはとても言えないものであった。こうした現状から、従来の触覚ディスプレイの応用先は主に大型の装置やユーザの拘束が許容される映画館やアミューズメントパークなどに限られており、モバイル環境において従来の環境設置型と同様な触覚提示を行うことは困難であった。

しかしながら、モバイル環境において、デバイスは多くの場合手にもっているのだから、本来触覚提示を行うこと自体は可能であると考えられる。特に手掌部においては、例えば近年ではタブレットに振動子を取り付けたインタラクティブな電子絵本[59]や、単に聴覚刺激の波形を触覚刺激として提示するのではなく、両者の間のクロスモーダル現象(ある感覚 A が感覚 B に影響を与える、もしくは相互に影響を与えあう現象)や知覚特性を考慮した聴触覚変換が一部試みられている[27][28]。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、機器上の制約のあるモバイル環境において、触覚提示による聴覚体験の拡張を実現することである。この目的を達成するため、本論文では音と振動の同時知覚によって生じる聴覚体験を伝搬の形態によって以下の二つの状況に分類した(図 1-3)。

i. 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況(図 1-3 左)。なお振動の周波数が高い場合には聴覚のみ生じるがその状況も含む。

ii. 振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況(図 1-3 右)

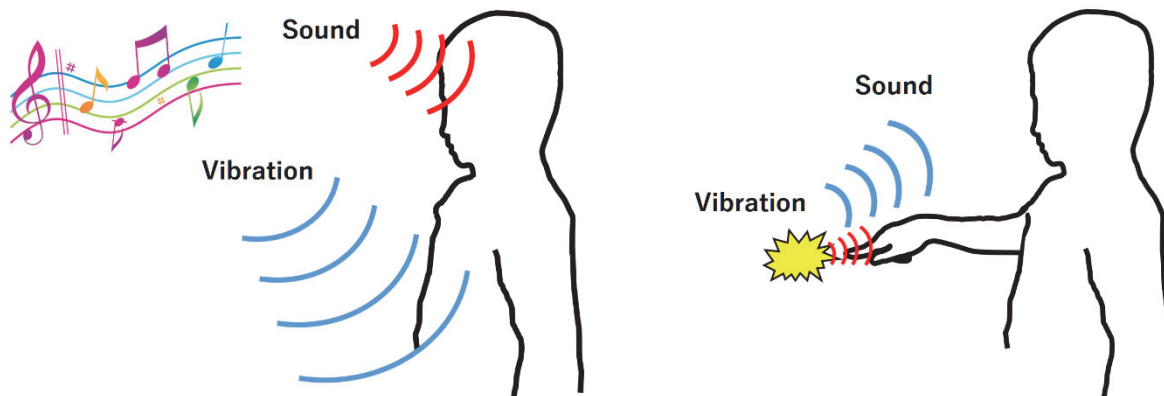


図 1-3. (左) 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況. (右) 振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況.

i の状況に対する先行研究では、例えば体感音響装置を用いて音楽を聴覚刺激としてだけでなく振動刺激としても提示し[11]、複数感覚への提示によって音楽への没入感を向上させている。これはすなわち聴覚体験を振動刺激によって加算的に向上させることになる。

対して ii の状況は、例えば野球やテニスにおける打撃時の衝突感などをさす。衝突感強い触覚刺激を伴うが、コンピュータゲームなどのデジタルコンテンツにおいては多くの場合音のみで提示されていた。これに触覚提示を加えることで、打撃の強度、対象物の材質感、位置、距離など聴覚刺激のみでは提示困難な感覚が提示可能になる。

各状況に応じた触覚提示を行うにあたり、本論文では触覚の持つ二つの側面に着目した。一つ目は触覚が時間的に変化する信号であるという側面である。聴覚と同じく、ヒトは触覚においても刺激を時間変化する信号として知覚している。このことから、触覚提示において「どのような波形を提示すればよいか」という検討が必要になる。二つ目は触覚が空間的に分布する信号であるという側面である。聴覚知覚がヒトの両耳のみで行われるのに対して、触覚の知覚は約 1.6–1.8m<sup>2</sup> の面積をもつ皮膚で行われている[64]。それゆえ、触覚提示においては「どの部位に刺激を提示すればよいか」という検討も行う必要が生じる。

これらのことから、本論文では先に挙げた二つの状況における触覚提示による聴覚体験の向上を合わせて聴覚体験の拡張と定義し、状況ごとに触覚の二つの側面に対応した触覚提示を行うことで、触覚提示手法等が制限されるモバイル環境における聴覚体験の拡張を目指す。

設定した状況と着目する触覚の側面ごとに以下に概要を示す。

### 1.3.1 i の状況における提示波形を考慮した触覚提示

本項目ではまず触覚・聴覚知覚の基本要素である刺激の強度知覚、周波数知覚に着目し、従来知られている触聴覚間クロスモーダル現象が聴覚体験向上に利用可能か検討を行う。

得られた知見を元に「振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況」の例としてモバイル環境下における音楽の聴取に着目し、「提示波形を考慮」した触覚提示を試みる。一般的に、ヒト聴覚の周波数知覚可能範囲が 20 Hz から 20 kHz であるのに対して、触覚の周波数知覚可能範囲は高々 0Hz から 1000Hz 程度と言われており、両者の知覚可能周波数範囲や周波数解像度には大きな隔りがある。それゆえ音楽波形をそのまま触覚刺激として提示した場合、音波形の周波数の上昇にともなって触覚刺激の消失が生じ、音情報を触覚的に表現することは困難である。また触覚提示装置自体も一般に提示する周波数が高くなるにつれて提示可能な振動振幅が減少する。従来の体感音響装置の場合、触覚提示を音楽情報の低周波範囲に絞り、大型の振動刺激装置から強度の強い振動を大面積に提示しているが、装置のサイズや重さに制限のあるモバイル端末は大強度や大面積への振動提示を行うことは出来ず、より効率的な触覚提示手法を検討する必要がある。

そこで、両者の知覚可能周波数範囲の隔りに対処するため、音楽波形の周波数を 2 の階乗分の 1 の周波数となるよう分周して触覚刺激として提示する手法を試みる。

### 1.3.2 i の状況における提示部位を考慮した触覚提示

モバイル環境における触覚による聴覚体験向上では、ユーザの動きを妨げない非拘束性が重要になる。従って触覚提示部は端末を把持、操作する手掌部ないし装置の脱着が容易かつ非拘束性を保つ部位に限定される。モバイルデバイス本体を振動させる手法は、デバイスのサイズやユーザの非拘束性を損なわず、かつ身体の中で最も触覚的に優れた手掌部に振動提示が可能であるというメリットがある一方、手掌部は体幹から最も末端に位置する部位の一つでもあるため、身体広範囲への触覚提示が困難というデメリットを持つ。

そこで本項目ではモバイル環境下における音楽の聴取に対し、「提示部位を考慮」した触覚提示手法を提案する。身体広範囲への触覚提示が可能で、かつ小型軽量でユーザの非拘束性を損なわない触覚提示装置の開発について述べる。

### 1.3.3 ii の状況における提示波形を考慮した触覚提示

本項目では本論文における聴覚体験の二つ目の分類に当たる「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」の代表として、従来聴覚としてしか提示されていなかった打撃時の衝突感を触覚で提示することを試みる。触覚刺激で提示可能になる打撃の強度、対象物の材質感、位置、距離のうち、特に聴覚で提示の困難とされる対象物の前後方向の距離定位[63]に着目する。以上のことから本項目では「提示波形の考慮」として触覚刺激の強度を用いた衝突感の前後距離知覚改変を行う。

### 1.3.4 ii の状況における提示部位を考慮した触覚提示

前項で述べた触覚刺激の強度は衝突自体の強度によっても変化することが予想される。そこで衝撃の強度表現と距離表現を独立に提示するため、「提示部位を考慮」した触覚提示として、提示する触覚の分布を用いた衝突感の前後距離知覚を試みる。

## 1.4 本論文の構成

本論文は本章を含む全 7 章で構成される。

第 1 章では、我々が日常生活において常に知覚、利用している聴覚と触覚の関わりを基に、触聴覚間で生じる相互作用(触聴覚クロスモーダル現象)が注目されるようになってきた背景と、モバイル環境における聴覚体験拡張の課題を見出し、本論文の目的について述べる。

第 2 章では、本論文で扱う触聴覚クロスモーダル現象の理解に必要な触覚及び聴覚に関する知見をまとめる。触覚・聴覚に関する生理学的な知見に関して述べ、次章以降で扱う触聴覚クロスモーダル現象に関して必要な知識を共有する。

第 3 章では、モバイル環境下で触覚刺激によって聴覚体験を向上させるという目的に対して、触覚刺激の波形の寄与に関する基礎的検討を二つの観点から行う。第一の観点は、触覚の提示によって聴覚を「強く」感じる事が出来るか、というものであり、第二の観点は、触覚の提示と聴覚が「あって」感じる事ができるか、というものである。この結果として、幅広い周波数帯域を持つ刺激であっても触覚は聴覚を強めること、また聴覚刺激と触覚刺激の周波数がオクターブ違いの関係にある時に、聴覚で知られる協和度が知覚可能であることを示す。

第 4 章では前章までの知見を元に、「振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況」の代表として、モバイル環境下における音楽の聴取に着目する。触覚と聴覚の知覚可能周波数範囲の隔たりに対処するため、聴覚刺激の周波数を 2 の階乗分の 1 の周波数となるよう分周して触覚刺激として手掌部より提示する手法を提案、検証する。

第 5 章では、モバイル環境下で触覚刺激によって聴覚体験を向上させるという目的に対して、触覚刺激の部位の寄与に関する検討を行う。手掌部への触覚提示では困難な、身体広範囲へ触覚提示可能かつ小型軽量でユーザの非拘束性を損なわない触覚提示装置の開発について述べる。提案手法としてユーザの鎖骨に振動を提示し、骨格を介して振動を上半身に伝搬させる手法の提案と、心理物理実験による主観的な聴覚体験への影響の検証を行う。

第 6 章では二つ目の分類に当たる「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」の代表として、打撃時の衝突感を触覚で提示することを試みる。触覚によって知覚可能な情報である打撃の強度、対象物の材質感、位置、距離のうち、特に聴覚で提示

の困難とされる対象物の前後方向の距離定位を触覚提示によって操作することを試みる。

最後に第 7 章では第 3 章から第 6 章で述べた研究を総括する。各研究を通じて得られた知見を元に、モバイル環境下における聴覚体験拡張手法とその限界、今後の展望についてまとめる

## 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

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。これにより我々は触覚、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[67]。

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できる。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 Maeno らの報告がある[31]。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。

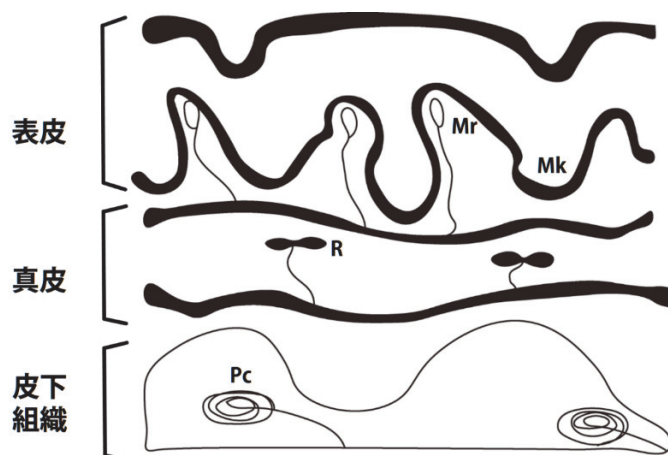


図 2-1. 無毛部における皮膚の構造と触覚受容器の分布 ([64]を改変)

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担っている(図 2-2)．

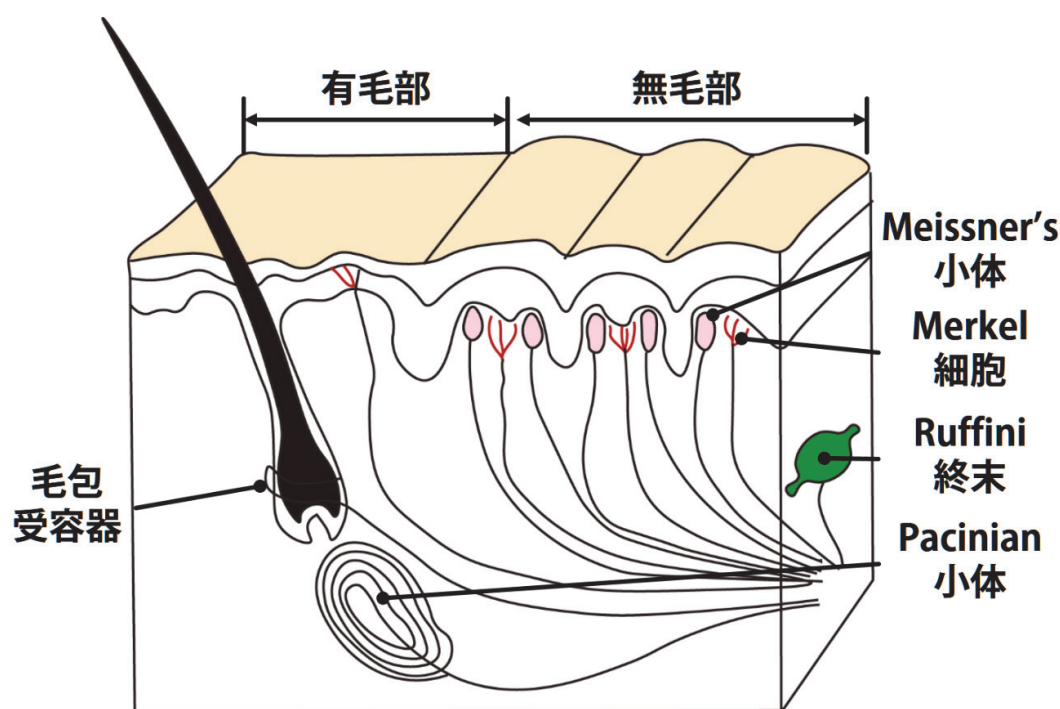


図 2-2. 有毛部と無毛部の受容器分布([21]を改変)

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 以上深部に低密度に存在する。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 以上に低密度に存在する。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。

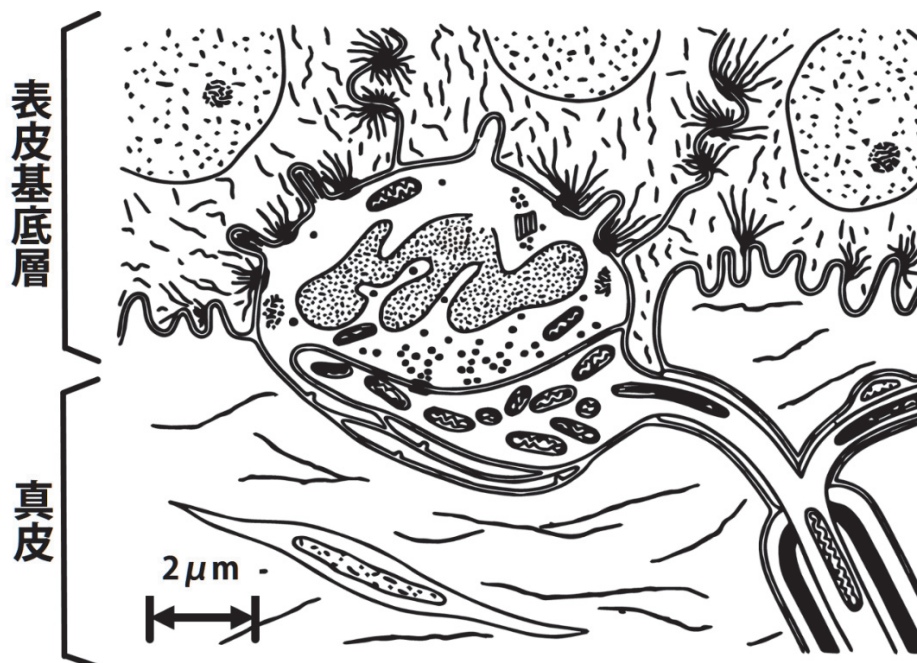


図 2-3. メルケル細胞の構造([67]を改変)





図 2-4. マイスナー小体の構造([67]を改変)

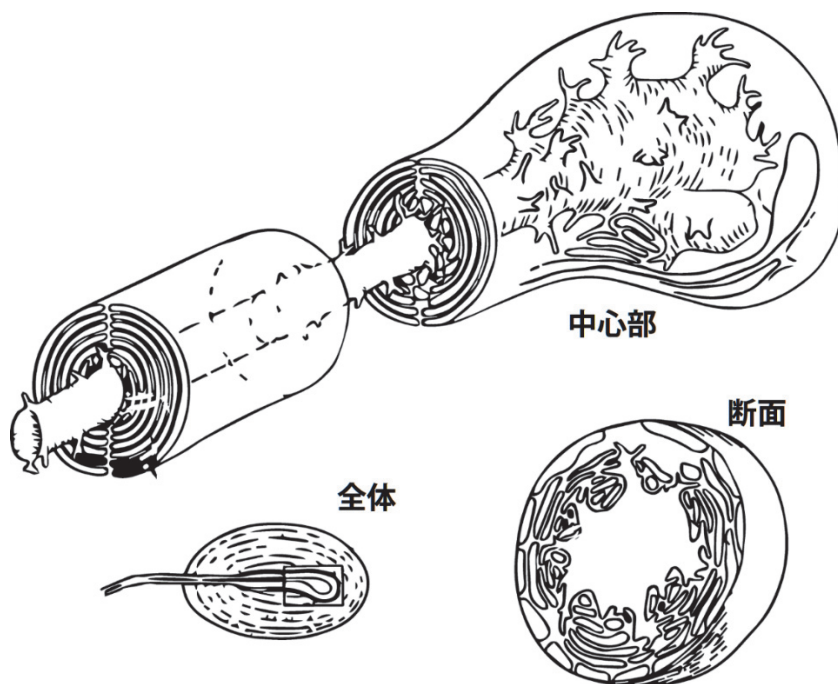


図 2-5. パチニ小体の構造([67]を改変)

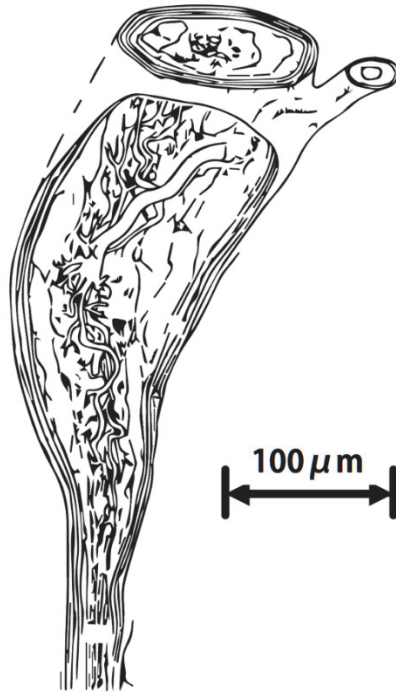


図 2-6. ルフィニ終末の構造([67]を改変)

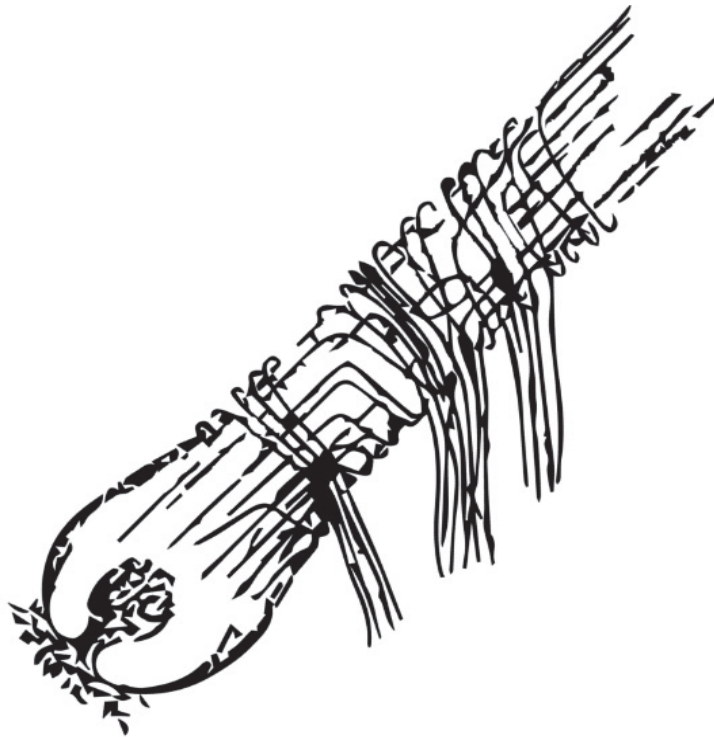


図 2-7. 毛包受容器の構造([67]を改変)

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

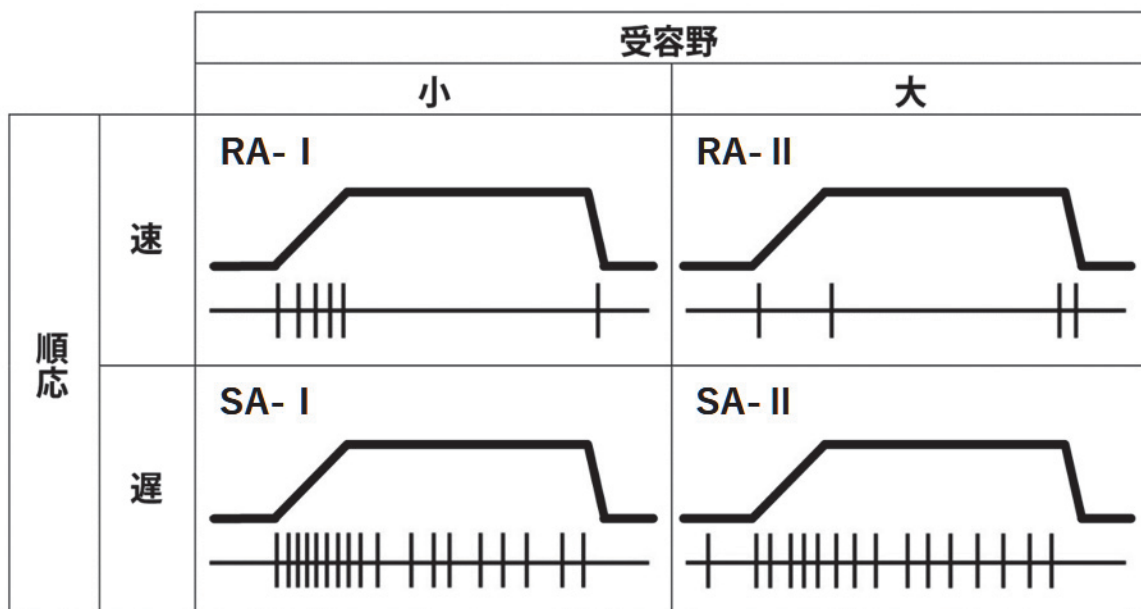
順応型 (Slowly Adapting, 以下 SA と記載), 刺激の始めと終わりのみに応答する速順応型 (Rapidly Adapting, 以下 RA と記載) となる. 前述の機械受容器では, メルケル細胞とルフィニ終末が SA であり, マイスナー小体とパチニ小体, 毛包受容器が RA にあたる.

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 (表 2-1).

表 2-1. 触覚受容器の受容野と時間応答特性([64]を改変)

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 2-8 に4チャンネル・モデルを示す.

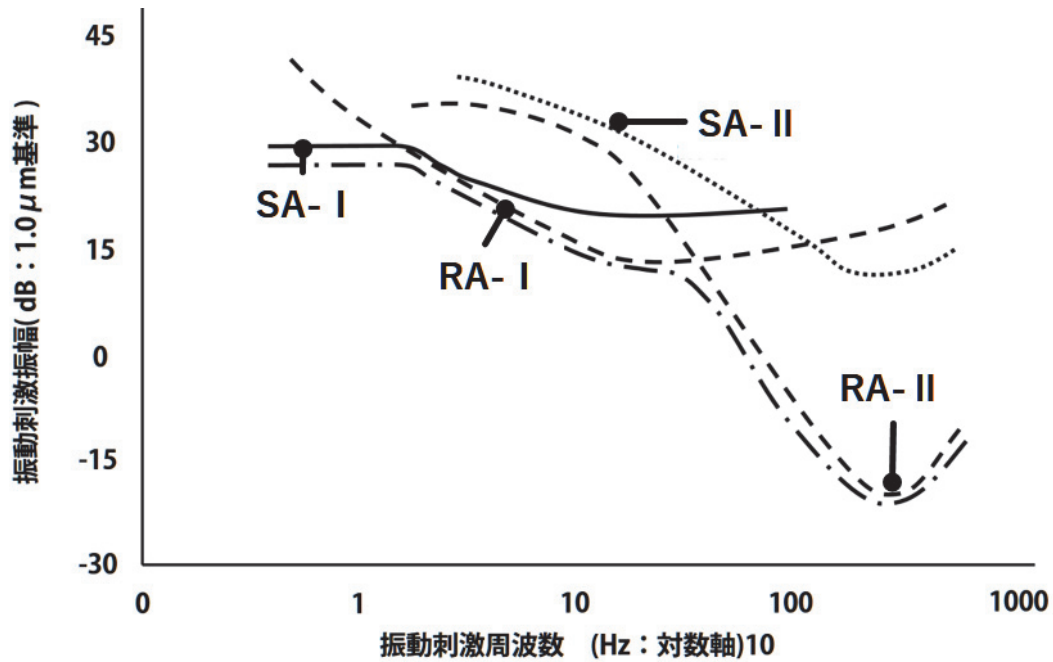


図 2-8. 機械受容器ごとの振動閾検出曲線([64]を改変)  
最も下方の曲線がヒトの振動感応曲線となる。

触振動覚の閾値は皮膚に振動子を提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 2-9 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)–1000Hz 程度であると言われている。

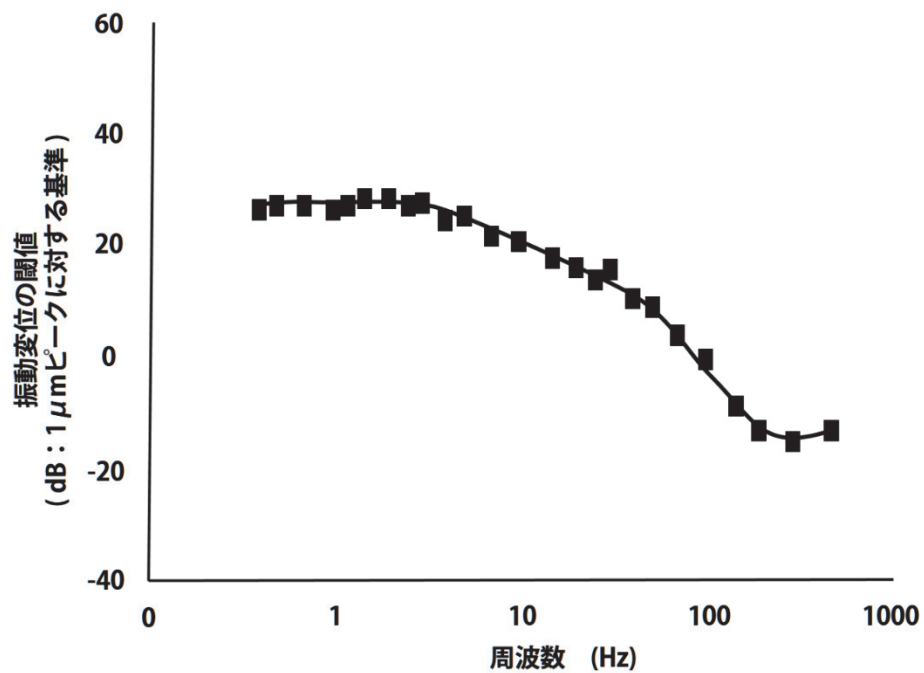


図 2-9. 指先部における振動覚の閾値([64]を改変)

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 2-10)。

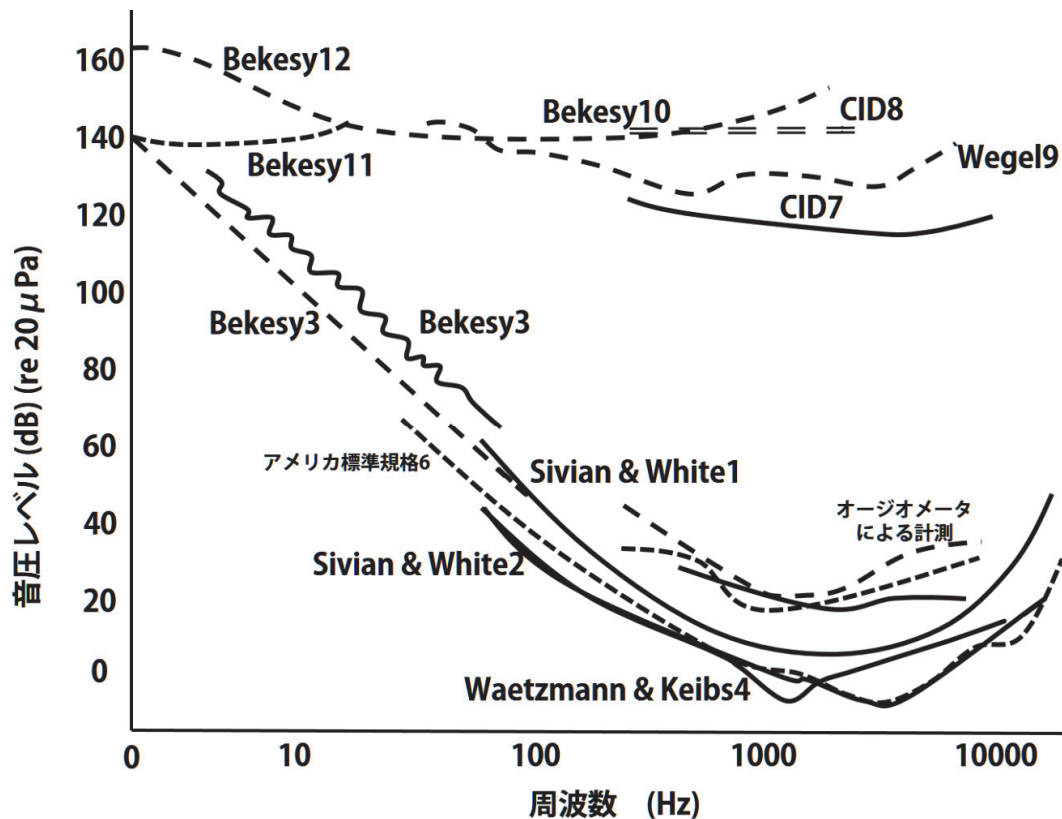


図 2-10. 様々な研究者によって測定された聴覚範囲([68]を改変)

### 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 2-11)。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。

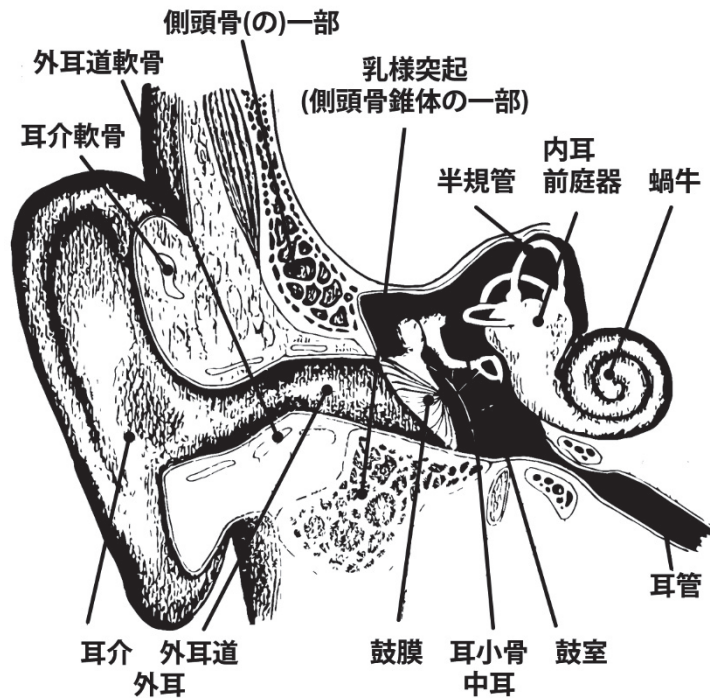


図 2-11. ヒト耳の断面図([68]を改変). 外側側から外耳・中耳・内耳に分類される.

### ● 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, への字の形をしている. 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 2-12).

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.

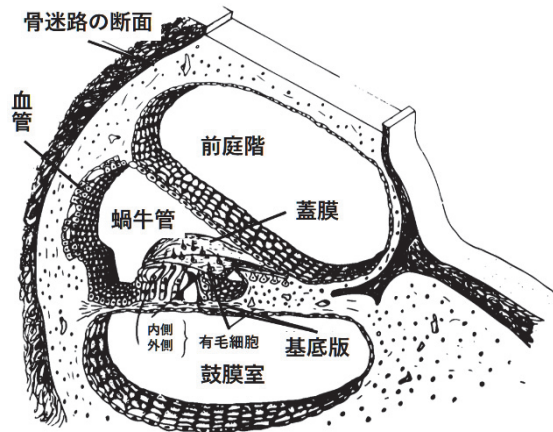


図 2-12. 蝸牛の断面図[68]より改変

### 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毛細胞と外毛細胞と呼ばれ、内毛細胞は1列、外毛細胞は3列に渡って整列して並んでいる(図 2-13)。物理振動の神経信号への変換は内毛細胞のみによって行われ、外毛細胞は内毛細胞の働きを助けるものであると考えられている。内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が異なるためである。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。

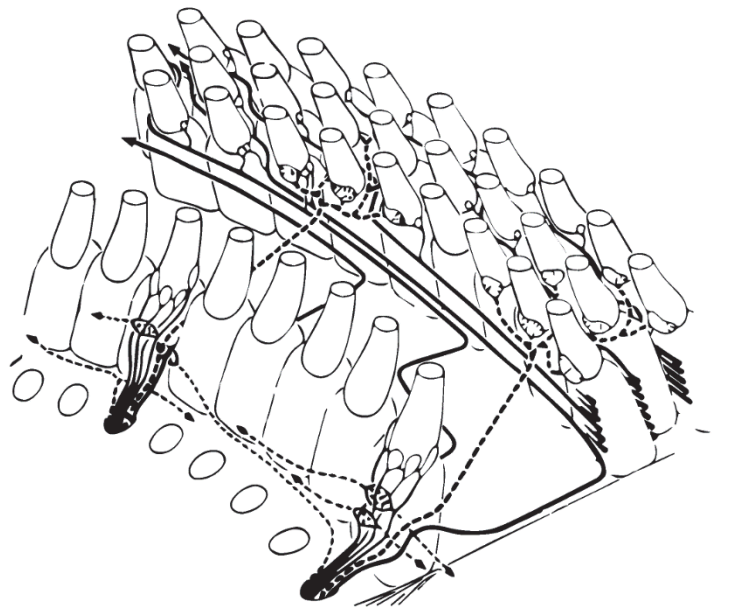


図 2-13. 有毛細胞図[68]を改変。手前側の1列が内毛細胞であり、奥側の3列が外毛細胞である。図中の実線及び破線は有毛細胞に接続された神経の構造を示す。



# 第3章

## モバイル環境下における聴覚体験向上のための 触聴覚クロスモーダルの基礎的検討

### 3.1 研究背景

本論文の目的は、モバイル環境下における聴覚体験を触覚によって向上させることである。このためのアプローチは大別して、刺激部位に対する考慮、刺激波形に対する考慮の2つがありうると考えられる。本章では、第4章で行う刺激波形に対する考慮の前準備として基礎的な検討を行う。

触覚刺激の刺激波形に対する考慮によって、どのような聴覚体験の向上が望まれるだろうか。大別して次の二つであると思われる。第一に、触覚によって聴覚がより強まったと感じられることである。これはモバイル環境下ではオーディオのボリュームを大きくすることで安全性が損なわれる場合があるためである。第二に、触覚が聴覚に「あっている」と感じられることである。これはモバイル環境下でなくても重要ではあるが、特に触覚提示部位と提示可能エネルギーが限られているモバイル環境下で、なるべく効率よく触覚提示を行うために重要な課題となる。

この二つの課題は、共に触聴覚クロスモーダル現象を利用することによって解決可能であると考えられる。以下に本分野における従来からの知見をまとめる。

モバイル環境下で望ましい触覚提示の第一の効果は、触覚によって聴覚がより強まったと感じられることである。Gillmeisterらは、ホワイトノイズによって聴覚がマスクされた環境下において、466.2Hzの正弦波聴覚刺激を圧覚刺激と組み合わせて提示することで、聴覚閾値付近の刺激の検知能力が向上し、特に聴覚刺激と触覚刺激が同期して提示される際に検知能力が最も向上することを示した。また彼らは466.2Hzの正弦波聴覚刺激と約67Hzの矩形波触覚刺激を同期提示すると、非同期の提示や聴覚単体の提示と比較して主観的な音の強度知覚が強くなることを示した[12]。Wilsonらは聴覚マスク環境下で50–2000Hzの周波数の異なる触覚刺激と聴覚刺激の組み合わせ(e.g. 触覚250Hz, 聴覚500Hz)と、周波数が同一な組み合わせを設定し、閾値付近の聴覚刺激の検知能力が触覚刺激によって変化するかを調査した。その結果、触覚刺激と聴覚刺激の周波数が近いもしくは同一に同時提示されることで、検知能力がより向上し、特に両者の刺激が125Hz–400Hz、すなわち触覚受容器のうちパチニ小体が最も活動する周波数領域で起こることを示した[54][55]。一方で閾値上の聴覚刺激については、正弦波触覚刺激と正弦波聴覚刺激を同時提示すると聴覚単体よりも主観的な音の強度が強くなり、特に触覚刺激と聴覚刺激の周波数が異なる方が知覚する音強度が大きくなることを示した[53]。Yauらは200Hzの正弦波聴覚刺激に対して200Hzまたは600Hzの正弦波触覚刺激を提示した場合、触覚刺激の周波数にかかわらず知覚する音の強度が強くなり、またその度合は提示する触覚刺激の強度に応じることを報告している[60]。

以上の関連研究より、刺激の強度に関して、触覚刺激と聴覚刺激を同時提示することで主観的に知覚する音の強度が大きくなることが示唆されている。一方でモバイル環境における応用を考えると、従来研究の多くが提示刺激として特定の周波数の正弦波刺激を用いていたのに対して、一般的に音楽などのデジタルコンテンツは正弦波刺激よりもはるかに複雑かつ含まれる周波数も様々であるため、こうした幅広い周波数を含む場合にも同様の結果が得られるかどうか

か検証する必要がある。

モバイル環境下で望ましい触覚提示の第二の効果は、触覚が聴覚に「あっている」と感じられることである。この点について、Merchelらは、統計的検定は行われていないものの、30, 90, 200Hzの正弦波を聴覚提示し、全身に提示される振動の周波数を1/3オクターブ刻みで調節し聴覚と周波数マッチングさせるタスクを行った際、両者の周波数を一致させた回答に次いで聴覚刺激周波数の1/2の振動周波数で一致したと回答する割合が多くなったことを報告している[34]。この報告は予備的なものであり、また全身への触覚提示によるものであったため、モバイル環境のように触覚提示部位の限定された部位において、触聴覚間で提示周波数が異なっても主観的に同一と感じる周波数の条件を精査する必要がある。

そこで以下に述べる実験1では、モバイル環境における聴覚体験の向上を目的に、幅広い周波数帯域を含む聴覚刺激を与えている時、同じ触覚刺激を手に把持した振動子から提示することで、制限は刺激と同様聴覚の主観的強度に影響を与えるかについて検証を行った。実験2では聴覚と触覚で「あっている」という感覚を生じるための周波数条件の検討を行った。実験3では実験2で見出された周波数の傾向についてより厳密な検討を行った。

## 3.2 実験1 触覚刺激による聴覚の主観的強度変更実験

本節では、モバイル環境における聴覚体験の向上を目的に、これまで関連研究で多く用いられてきた正弦波よりも複雑な刺激を用い、手に把持した振動子からの振動刺激が聴覚の主観的強度に与える影響について検証を行った。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[45]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。これはヒトの可聴域と可触域に共通の領域はおおよそ1000Hz(パチニ小体の活動として確認されているのは800Hz)にまで及ぶが、その中で高周波の領域は250Hzをピークとして急激に触覚閾値が上昇するためと考えられる[3][64][68]。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。

### 3.2.1 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駆動させた(図 3-2)。被験者が本ケースを両手で把持することで振動刺激が提示された。



図 3-1. 実験装置外観

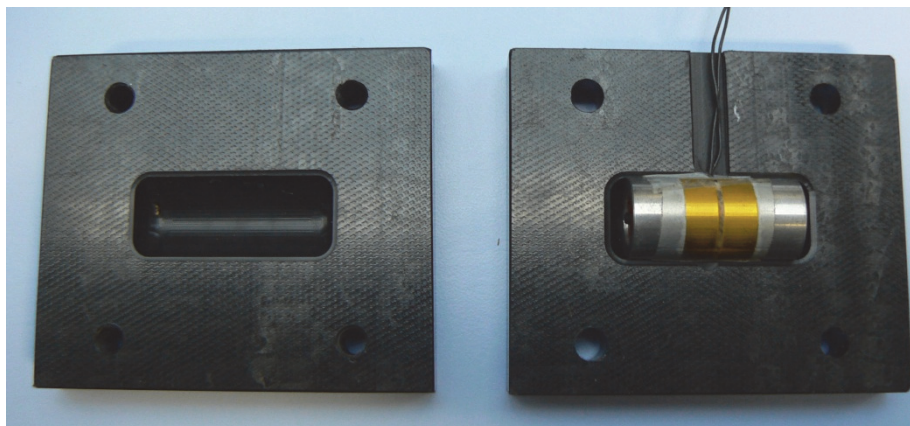


図 3-2. 振動子の入ったプラスチックケース

### 3.2.2 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 50dBSPL、触覚振動加速度が約  $2\text{m/s}^2$  であった。比較刺激の聴覚強度は、47,48,49,50,51,52,53dBSPL であった。

### 3.2.3 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, 聴覚共に健常). 視覚刺激を排除するため, 被験者はアイマスクを装着した. 被験者は椅子に座り, ヘッドホン装着し, 振動子入りのプラスチックケースを両手で把持した. 把持の仕方については, 振動刺激を被験者に十分に伝えるため, プラスチックケースに手掌部および指先を接触させ, 包み込むように把持させた(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い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

### 3.2.4 実験結果・考察

A–A 条件, A–AT 条件を比較するため, 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,  $\mu$  は主観的等価点を,  $\sigma$  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.

このことから様々な周波数を含む波形を提示した場合も, 単純な正弦波を用いた場合と同様, 手掌部への振動提示によって聴覚で知覚される主観的な音の強度が強くなることが判明した.

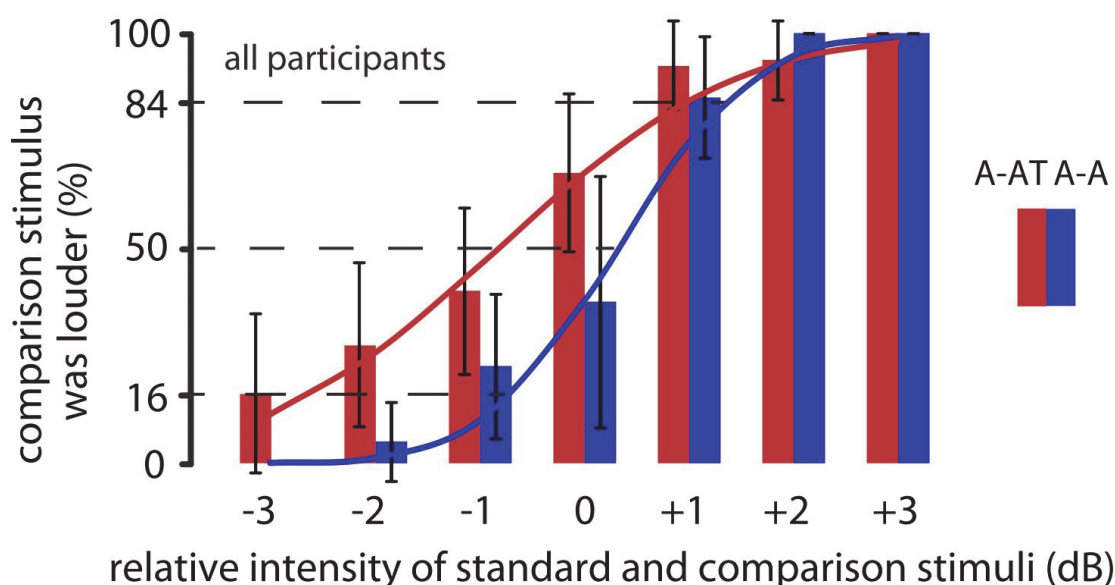


図 3-4. 実験結果. 棒グラフは各条件(赤:A-A 条件 青:A-A 条件)での実験結果を示し, 実線は実験結果を元にフィッティングした累積正規分布関数を示す.

### 3.3 実験 2 触聴覚間の周波数マッチング

#### 3.3.1 実験条件

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, ヘッドホン内に侵入する外部ノイズを除去する目的でヘッドホンをアクティブノイズキャンセリング機能搭載のヘッドホン(QuietComfort15, Bose Inc., USA)へ変更した. アクティブノイズキャンセリングヘッドホンでは, 打ち消し損ねた外部ノイズが提示音に重畳される可能性はあるが, パッシブヘッドホンよりも被験者に負担をかけず確実に装着ができ, またパッシブヘッドホンでも外部ノイズの侵入を完全に防ぐことは不可能であることから使用した. また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.

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.

### 3.3.2 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, ヘッドホンを着用した. 触覚提示は左手人差し指に振動子をテープで装着し行った.

実験開始と同時に聴覚刺激のうちの 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. 本実験の目的は, 触覚と聴覚が「あっている」と感じるための条件を探ることであるが, ここでは被験者への曖昧な指示を防ぐため, 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 秒以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 3-5).



図 3-5. 実験の様子

### 3.3.3 実験結果・考察

実験 2 の結果を図 3-6 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 2 の階乗分の 1 となる時(e.g. 聴覚：100Hz 触覚：50, 100, 200 Hz), 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 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。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、それゆえ我々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[40]。また Yoo らは触覚に周波数の異なる 2 つの正弦波振動を重畳した“触覚和音”(Vibrotactile Chords)を提示した時、その協和度が触覚で判定可能であることを示唆している[61]。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。

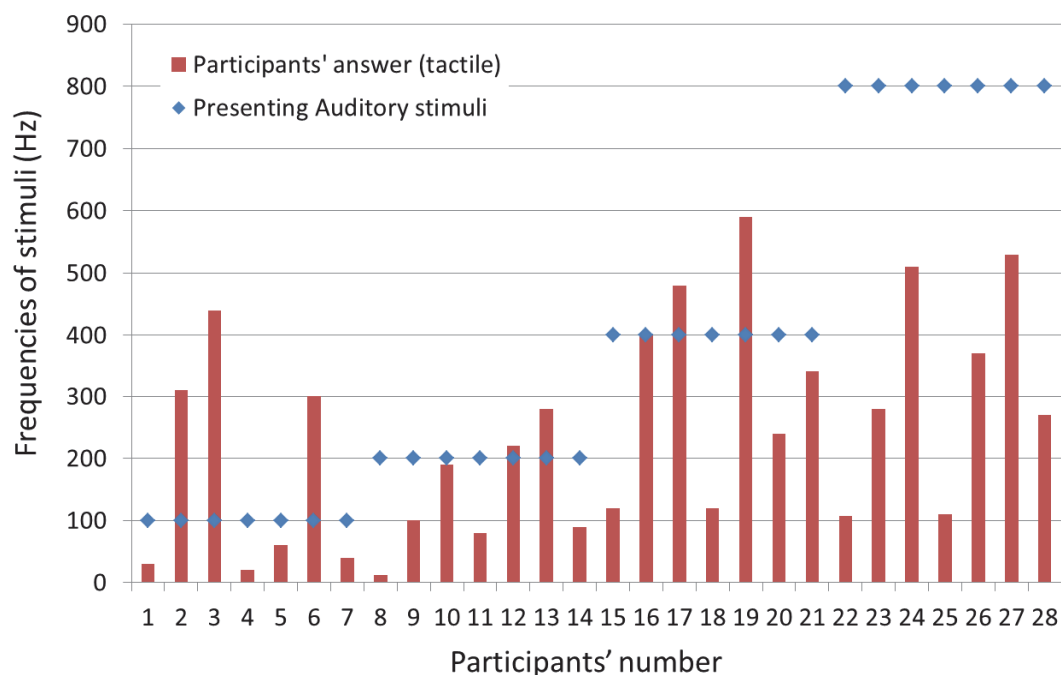


図 3-6. 実験結果

### 3.4 実験 3 触聴覚間の周波数協和性検証実験

本節では、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。

#### 3.4.1 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。

#### 3.4.2 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 3-1 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 3-7)、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 3-1. 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	×	△	×	△	×	○	×	



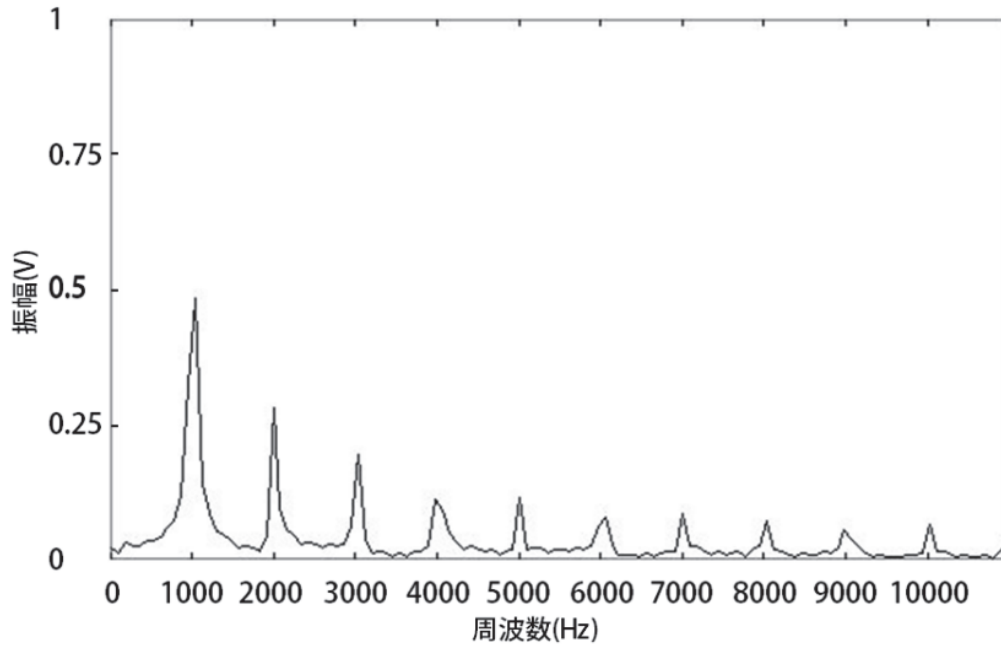


図 3-7. 基底周波数 1000Hz のノコギリ波の FFT(高速フーリエ変換)結果例. 基底周波数から等間隔にピークが出現する(N 次倍音成分).

### 3.4.3 実験手続き

9名の被験者(22-28歳, 触聴覚共に健常)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, 左手指先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, 左端を 0(不協和), 右端を 10(完全協和)とした(図 3-8). また協和度という言葉は日常生活で一般的に用いられないため, ここでは「触覚刺激と聴覚刺激の周波数的な合い具合」を協和度として回答するよう教示した. 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 3-9).

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.

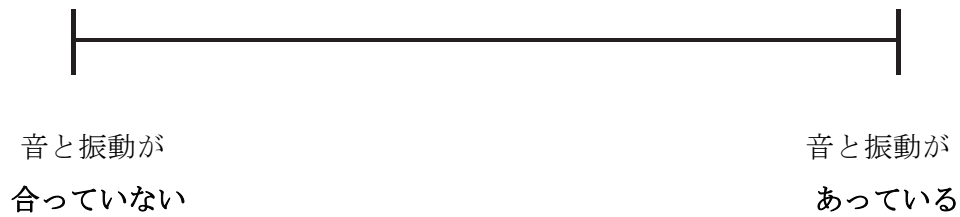


図 3-8. 実験に使用した VAS

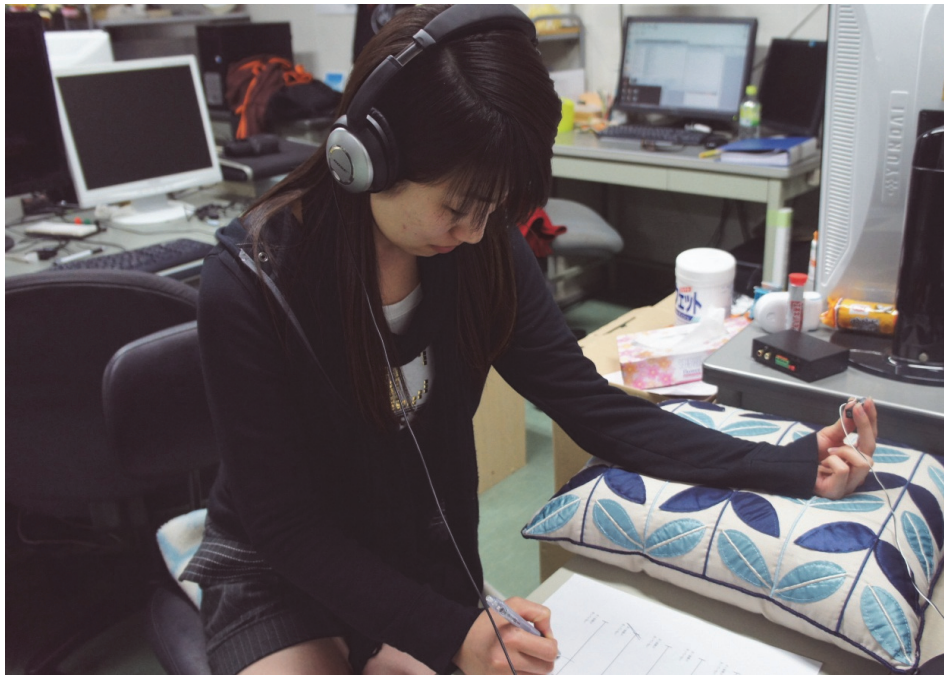


図 3-9. 実験の様子

### 3.4.4 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 3-10). 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 3-1 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 3-11). 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 3-12 と図 3-13 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 3-14 (グループ a)及び図 3-15 (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)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 [8][44], 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。

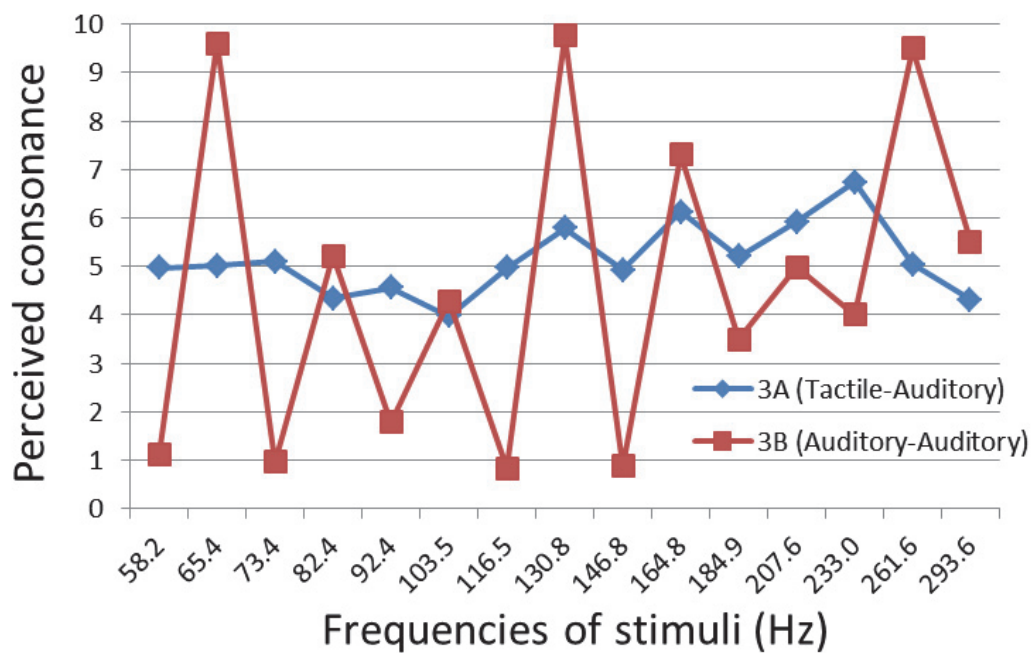


図 3-10. 実験 3AB の全被験者の平均結果

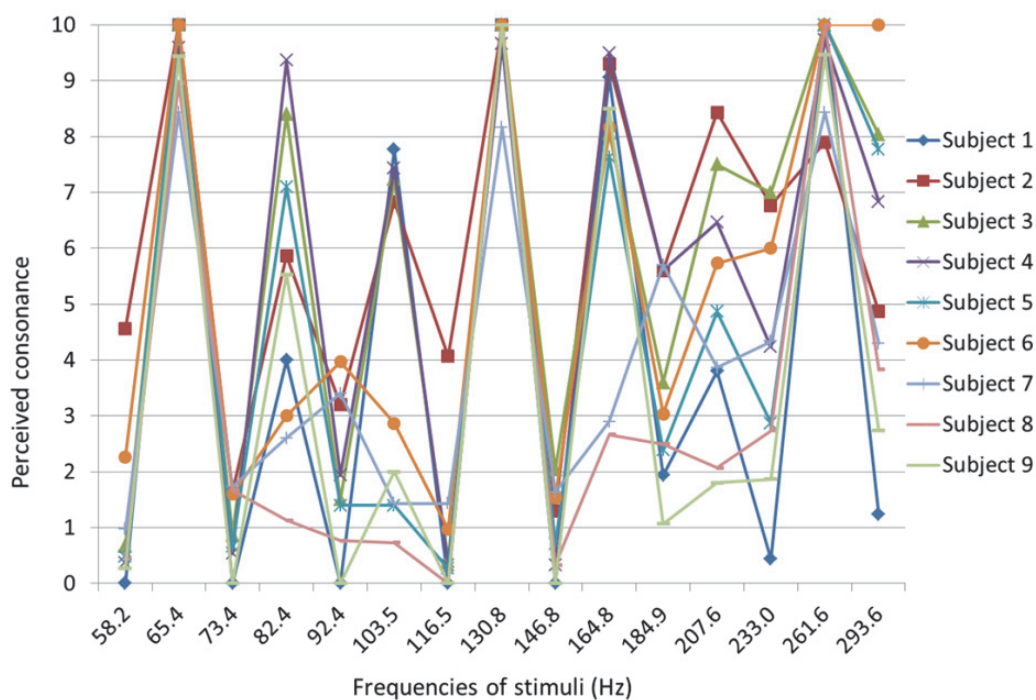


図 3-11. 実験 3B の被験者ごとの結果

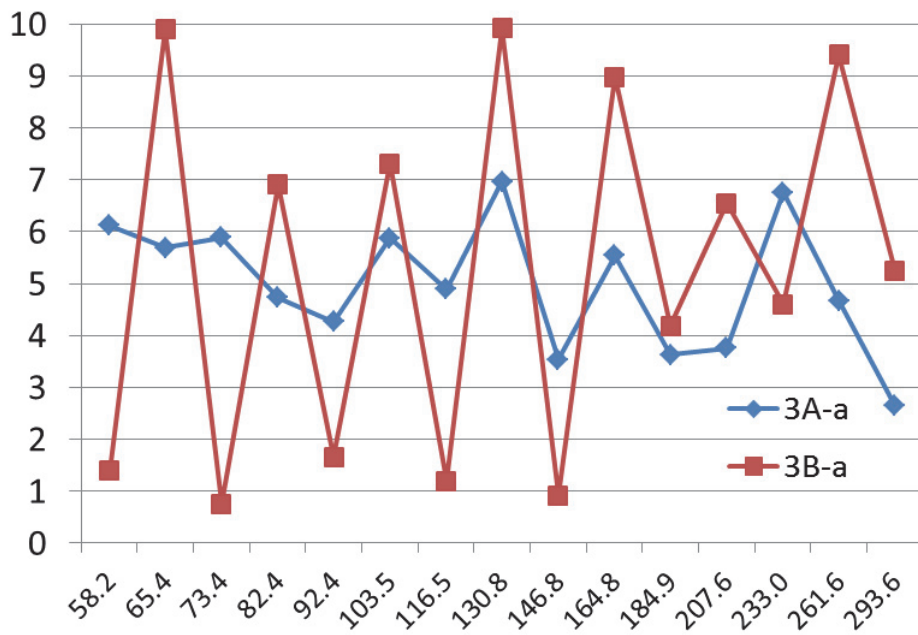


図 3-12. 実験 3AB の平均結果(グループ a)

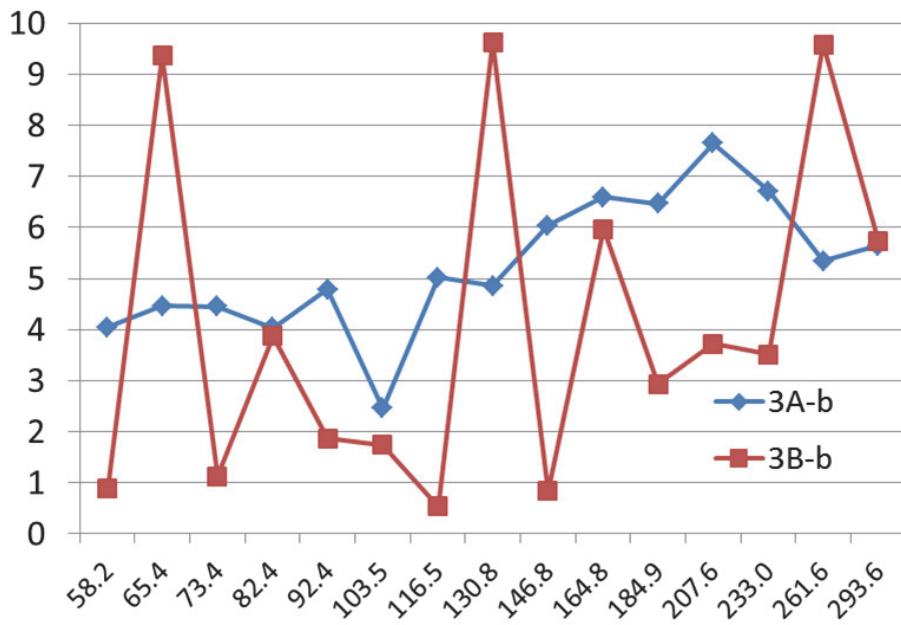


図 3-13. 実験 3AB の平均結果(グループ b)

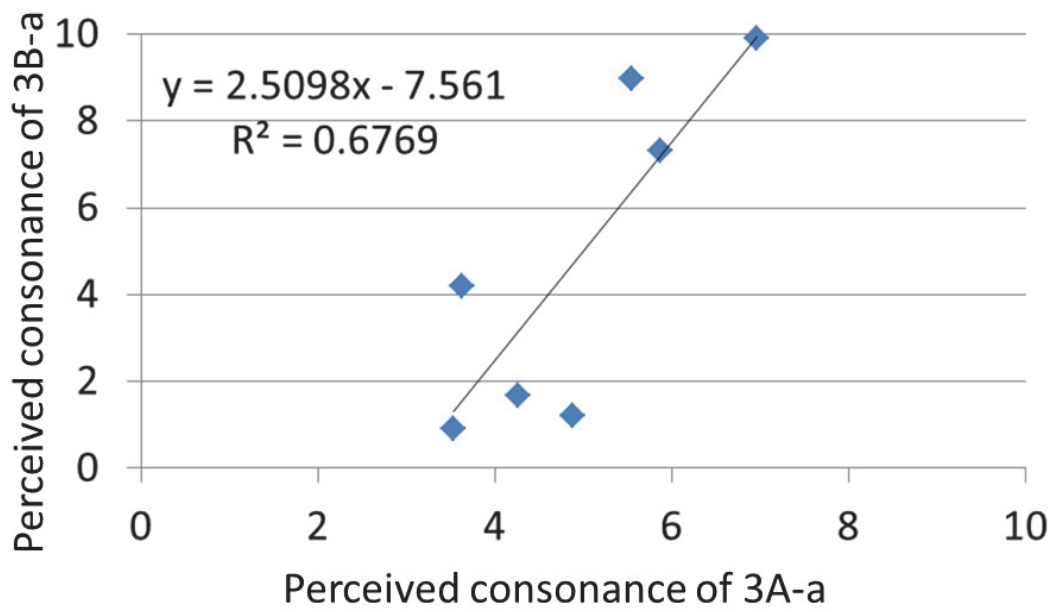


図 3-14. 92.4Hz から 184.9Hz における触覚－聴覚の協和度と、  
聴覚－聴覚の協和度の相関関係（グループ a）

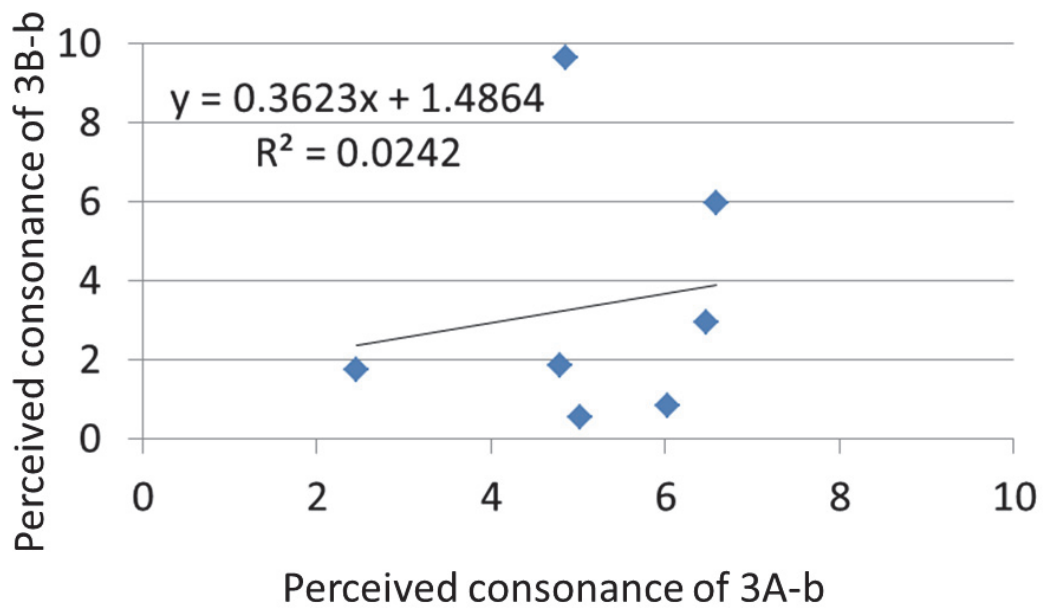


図 3-15. 92.4Hz から 184.9Hz における触覚－聴覚の協和度と、  
聴覚－聴覚の協和度の相関関係（グループ b）

### 3.5 本章のまとめ

本章では、触覚刺激によって聴覚体験を向上させるという目的に対して、触覚刺激の波形に関する検討を2つの観点から行った。

第一の観点は、触覚の提示によって聴覚を「強く」感じるということが可能かというものであり、従来研究とは異なり幅広い周波数を含むピンクノイズの振動刺激が聴覚に与える影響について調べた。その結果、関連研究で知られていた単純な正弦波刺激を用いた時と同様、複雑で多様な周波数を含むピンクノイズを用いても振動刺激によって主観的に知覚する聴覚強度が大きくなることが判明した。

第二の観点は、触覚の提示と聴覚が「あって」感じるということが可能かというものであった。特に関連研究であいまいながら知られていた知見を元に、触聴覚間で提示周波数が異なっても主観的に同一と感じる周波数条件を発見するための実験を行った。その結果、聴覚刺激と触覚刺激の周波数がオクターブ違い(聴覚刺激の周波数と比較して触覚刺激の周波数が半分)の時に、両者の間に本来聴覚で知覚されるような協和度が知覚可能であることが示唆された。

次章ではこれらの知見を基に、聴覚刺激から触覚刺激を生成し、触覚刺激によって聴覚体験を向上させる聴触覚変換手法を検討する。聴覚体験時に一般的に想定される音楽聴取を想定し、提示刺激として音楽を使用する。

# 第4章

## 分周刺激を用いた聴触覚変換手法による聴覚体験向上

### 4.1 研究背景

前章では、モバイル環境における触覚を用いた聴覚体験の向上を、提示する振動波形の考慮によって行うための基礎的検討を行った。その結果、幅広い周波数を含む刺激に対しても触覚刺激の付加によって聴覚の主観的な強度を増強可能であること、および触覚と聴覚の周波数が倍の関係にあるときに、触覚と聴覚の間で協和度が知覚可能であることが示唆された。

本章では、前章の知見を元に具体的なモバイル環境における聴覚体験の向上手法を提案、実装、評価する。第1章で分類した二つの聴覚と触覚を生じる環境のうち、「聴覚刺激が主体であり、それに伴った振動が生じる状況」に着目し、その具体例として音楽を取り上げる。

まず前章で得られた第一の知見に基づき、音楽の信号をそのまま触覚として提示する手法が考えられる。これによって触覚によって知覚される音の大きさは増大すると考えられる。しかし実際の音楽コンテンツを触覚刺激に変換することを考えると、両者の周波数知覚特性の違いから聴触覚変換時にある問題を生ずる。一般的に、ヒト聴覚の周波数知覚可能範囲が 20 Hz から 20 kHz であるのに対して、触覚の周波数知覚可能範囲は高々 0 Hz から 1000 Hz 程度と言われており、両者の知覚可能周波数範囲や周波数解像度には大きな隔りがある。それゆえ音楽波形をそのまま触覚刺激として提示した場合、音楽波形の周波数の上昇にともなって触覚刺激の消失が生じ、音楽情報を触覚的に表現することは困難となる。

これに対して、触覚で知覚できない周波数領域は無視するという考え方もありうる。序論にて述べたように、聴覚と触覚は日常生活では本来同時に生じるので、これを再現することで間隔のリアリティを向上させる、というのが体感音響の考え方だとすれば、本来は触覚で知覚できない周波数領域を触覚で提示しないのは自然であるとも言える。従来の体感音響装置の場合、触覚提示を音楽情報の低周波範囲に絞り、大型の振動刺激装置から強度の強い振動を大面積に提示している。これによって少なくとも音楽の低周波領域では触覚と聴覚が同時に、かつ十分な触覚の強度で提示される。また井手口らはスピーカから発生する音圧による空気振動を風船に伝搬させ、その風船を握りこんで振動を知覚した場合、リズムカルな曲では「迫力、乗り、臨場感、快さ」の印象が強調され、穏やかな曲では「迫力、臨場感」の印象が強調されることを報告している[62]。

しかしながら、装置のサイズや重さに制限のあるモバイル端末は大強度、大面積への触覚提示は必ずしも得意ではない。ユーザの好む音域の刺激のみを触覚提示に使用する[28]など、聴覚刺激の持つ周波数範囲の一部のみを切り出した触覚提示手法は提案されているが、どのような聴触覚変換手法が聴覚体験を増強するかは明らかではない。このことから、触覚で知覚が難しい周波数領域も触覚提示に利用する必要があると考えられる。

そこで本章では、前章で得られた第二の知見を利用する。音楽波形の周波数を2の階乗分の1の周波数となるよう分周して触覚刺激として提示することで、聴覚と触覚で「同じ」波形を提示するのではなく、「主観的にあった」、すなわち聴覚刺激に対して周波数的に分周された触覚刺激提示を試みる。



### 4.1.1 分周刺激を用いた触聴覚提示に関する先行研究

分周を用いた触聴覚提示に関しては先行研究より以下のことが報告されている。Merchelらはデジタル楽器の操作に用いられる音楽ミキサーの操作性を向上させるため、聴覚に提示される複数の楽器音と音楽ミキサーから提示される振動刺激のマッチングタスクを行った。その結果聴覚刺激に対して2分周された(1オクターブ低い)周波数の刺激を触覚提示することで楽器の同定が容易になることを報告している[32][33]。また彼らは前章で述べたように、ある周波数の聴覚刺激と2分周された周波数の触覚刺激との間で、主観的に周波数マッチングが知覚可能であることを示唆している[34]。

分周された触覚刺激を用いた聴覚体験向上として、振動を提示しない場合と、ローパスフィルタを適用した音楽波形を2分周した触覚提示(元信号にローパスフィルタを適用した後、1オクターブ低くする)を比較すると、後者の音楽体験主観評価が有意に向上することが報告されている。ただしこの手法と、ローパスフィルタのみを適用した触覚提示など他の振動提示手法を用いた場合の間に有意差は生じていない[35]。またデジタル楽器演奏の体験を向上させるため、デジタルバイオリンに振動子を装着し、音に対して2分周された振動を提示することで演奏の主観評価を向上させる試みも行われているが、統計的検定などは行われていない[9]。

これらのことから、特にモバイル環境において分周された触覚刺激を音楽コンテンツに適用した際、音楽を触覚で知覚することは可能か、またそれが聴覚体験の向上につながるかといった議論は限定的でない。

そこで本章では聴覚刺激と触覚刺激の周波数がオクターブずれた関係に保たれた触覚提示によって、触覚刺激の知覚が容易になるか、また周波数の異なる2つの刺激を触聴覚間で違和感のないものであると知覚し、それが聴覚体験の向上に繋がるかを検証する。

## 4.2 予備実験：実験に使用する変換手法候補の検討

聴覚の知覚周波数範囲は触覚と比べてはるかに広いため、様々な周波数を含む音楽に対しては、2分周しただけでは触覚の知覚可能周波数範囲に到達しない可能性がある。一方、分周の回数を増やし過ぎると、触覚刺激の周波数が必要以上に低いものとなってしまう、聴覚刺激と触覚刺激の間に乖離が生じるおそれがある。そこでまず、予備実験を通じて聴覚刺激に対する触覚刺激の適切な分周回数に関する検討を行った。

### 4.2.1 実験装置

PC、アクティブノイズキャンセリング付きヘッドホン(QuietComfort15, Bose Inc., USA)、直動形振動子(Haptuator, mark 2, Tactile Labs, CANADA)、オーディオアンプ(RSDA202, Rasteme Systems Inc., Japan)、モバイル端末(iPod touch 5gen, Apple Inc., USA)から成る実験装置を製作し、実験に使用した(図 4-1)。

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。本実験ではモバイル端末を用いた音楽コンテンツ視聴を想定し、振動子はモバイル端末背面に固着し、モバイル端末を両手で把持することで振動を提示した。振動子とモバイル端末を合わせた重量は約113gであった。製作した実験装置の周波数特性を確認するため、装置を糸で吊るし、等しい電圧振幅(10V)で50, 100, 200, 400 Hzの正弦波を印加した際の加速度を計測した。加速度の計測は装置に3軸加速度センサ(MPU9250, Strawberry Linux Co., Ltd., Japan)を貼り付けて行った。その結果を図 4-2に示す。100 Hz付近をピークとしたゆるやかな共振特性を持っていることがわかる。



図 4-1. 実験セットアップ

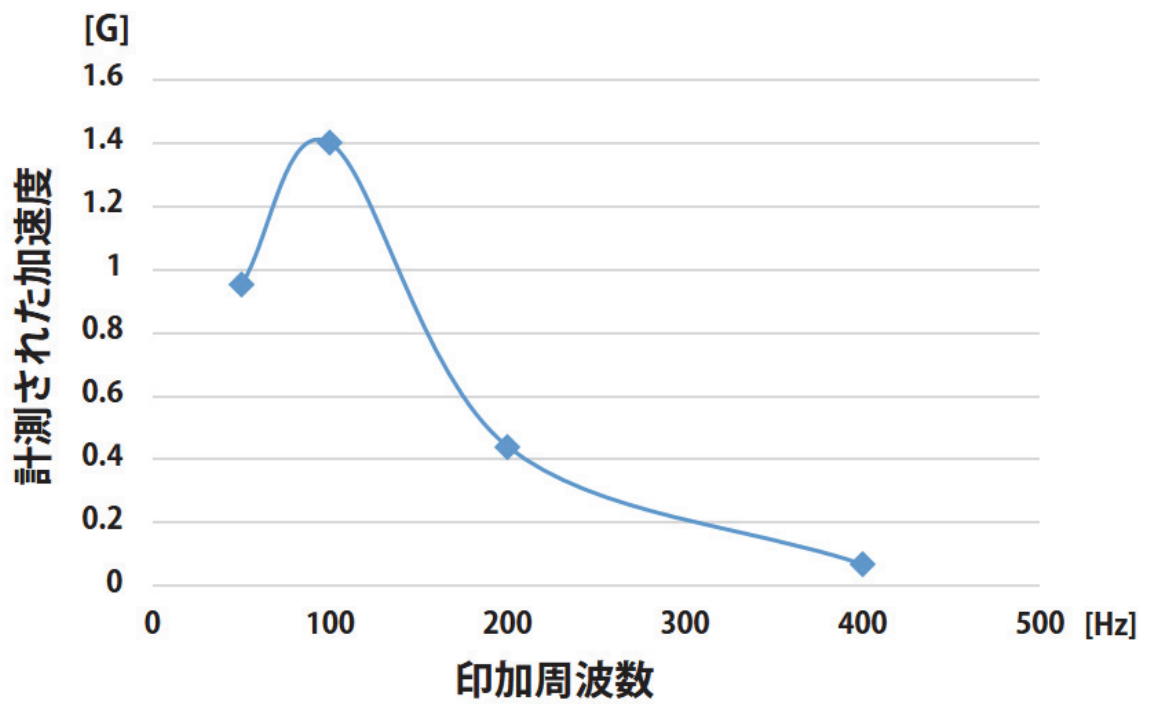


図 4-2. 装置単体の周波数特性

## 4.2.2 実験及び結果

聴覚刺激に対する触覚刺激の適切な分周回数を検討するため、周波数域が様々な音楽を分周して触覚刺激を生成した。元となる聴覚刺激として、以下の3種類の異なるジャンルの音楽を用意した。(A)高音域を多く含むオルゴール音楽(Akaneiro-op.x03, <http://www.dream-orgel.net/?p=618>), (B)中音域を多く含むクラシック音楽(スメタナ:交響曲モルダウ), (C)低音域のバス成分を多く含むジャズ音楽(Sleepin' maple syrup jazz, <http://musmus.main.jp/jazz.html>). 各々の曲を15-20秒に切り出し、音源として利用した。各音源の周波数分布を図4-3から図4-5に示す。

予備実験の結果、ジャズ音楽(C)に対して分周を繰り返した触覚刺激を提示した場合、分周の繰り返しによって提示される触覚刺激の周波数分布が低周波領域に片寄ることで、触覚刺激のリズムや強弱が明らかに知覚しにくくなった。このことから触覚刺激生成に用いる分周は4分周(2オクターブ下)までとした。

この予備実験結果より、(1)音源波形を分周せずそのまま触覚刺激として提示する条件(CTL), (2)音源波形を2分周した(1オクターブ下げた)触覚刺激を提示する条件(1OT), (3)音源波形を4分周した(2オクターブ下げた)触覚刺激を提示する条件(2OT)を設定した。

次に、より広い周波数範囲の音楽波形を振動刺激として提示することを目的として、振動刺激の組み合わせを行った。ここでは(4)音源を2分周した波形と4分周した波形を重畳して触覚刺激として提示する条件(1OT+2OT), (5)音源の元波形と2分周、4分周した波形を全て重畳した触覚刺激を提示する条件(CTL+1OT+2OT+BP)を設定した。ただし、周波数分布の異なる波形の重畳を繰り返すことで、生成される触覚刺激の周波数分布が広がり、リズムや強弱が知覚しにくくなったため、すべての波形を重畳する(5)の条件に関しては $f_0 = 250 \text{ Hz}$ ,  $Q = 1.6$ のバンドパスフィルタをかけ、分周の繰り返しによって生じるごく低い周波数成分や、元波形に含まれる高周波成分を除去した。図4-6から図4-9にオルゴール音楽を用いた場合の(2)から(5)の条件の触覚刺激の周波数分布を示す。オルゴール音楽の場合、CTL条件の周波数分布(図4-3)の下限はおおむね700 Hzであるため、元波形の大部分は触覚的に知覚困難であるが、波形を2分周ないし4分周することで、周波数分布の下限が350 Hz(2分周, 図4-6)もしくは200 Hz(4分周, 図4-7)近傍まで下がり、触覚的に知覚しやすくなることが予想される。同様に分周された刺激を組み合わせた条件(図4-8, 図4-9)も触覚的な知覚の容易化が予想される。一方クラシック音楽やジャズ音楽の場合、元波形にすでに触覚的に知覚しやすい周波数の成分が含まれていることがわかる(図4-4, 図4-5)。

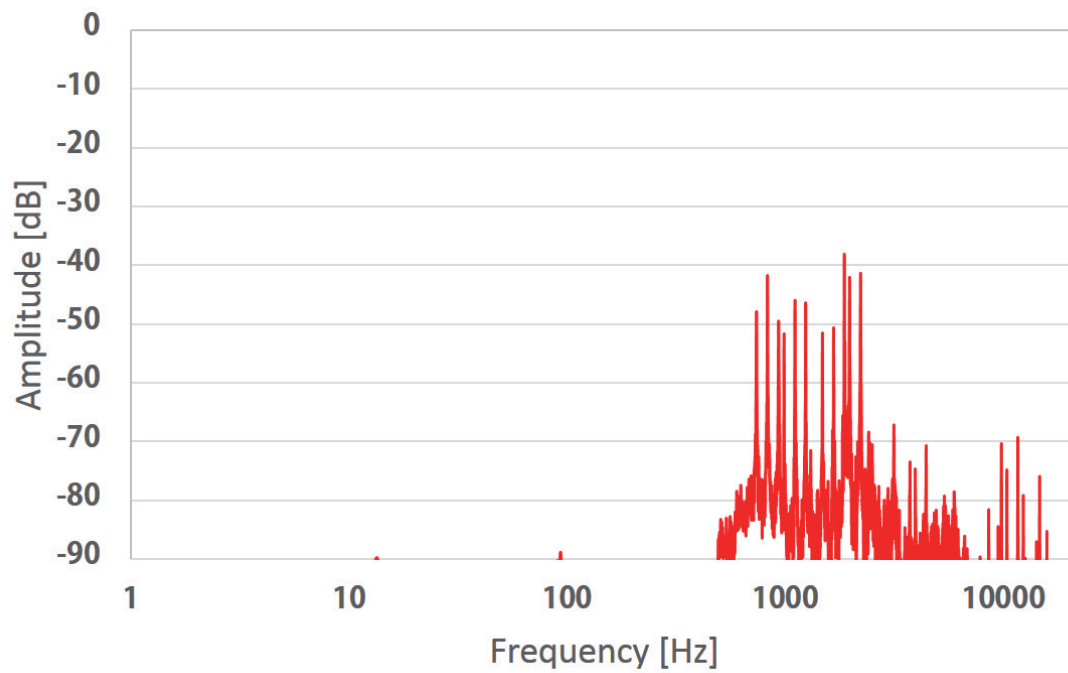


図 4-3. オルゴール音楽の周波数スペクトル

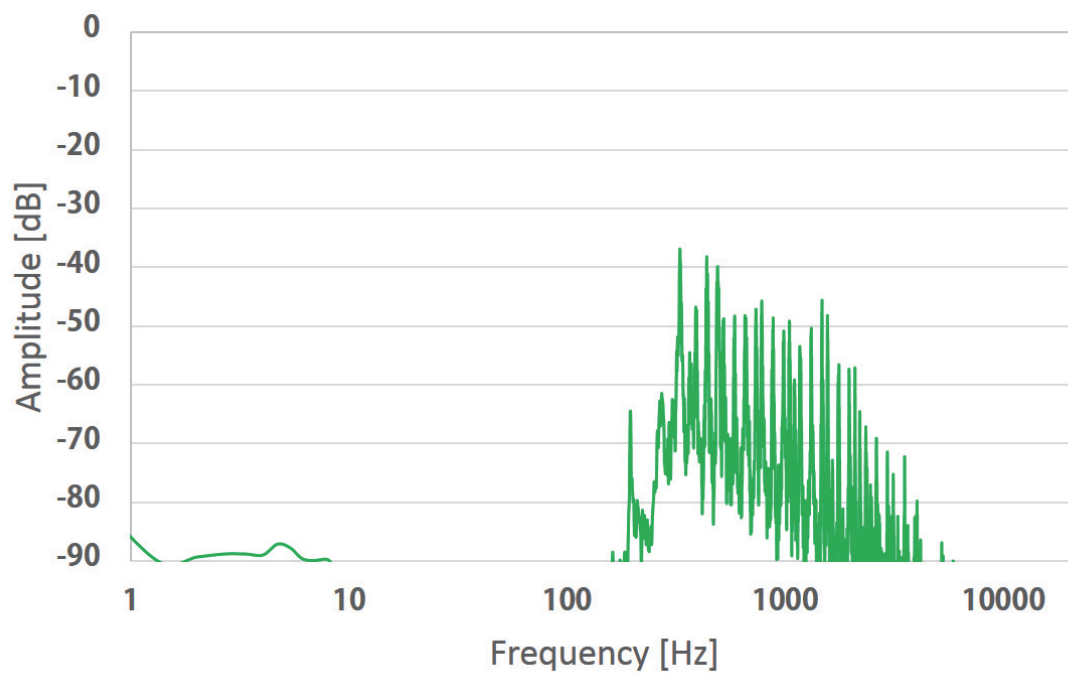


図 4-4. クラシック音楽の周波数スペクトル

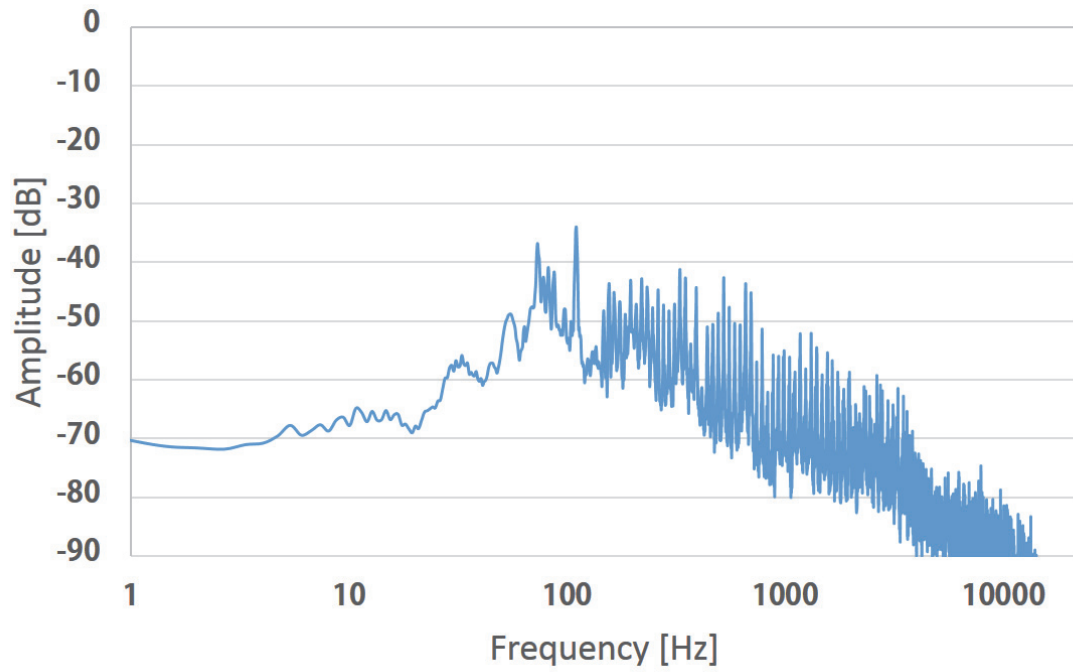


図 4-5. ジャズ音楽の周波数スペクトル

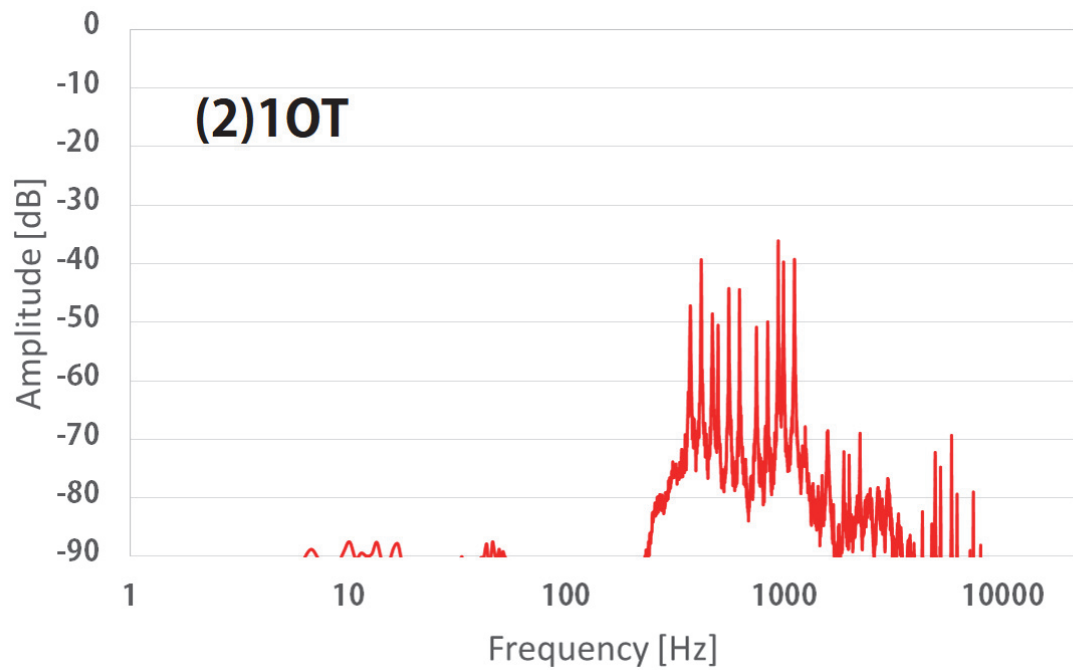


図 4-6. オルゴール音楽を用いた 10T 条件の周波数スペクトル

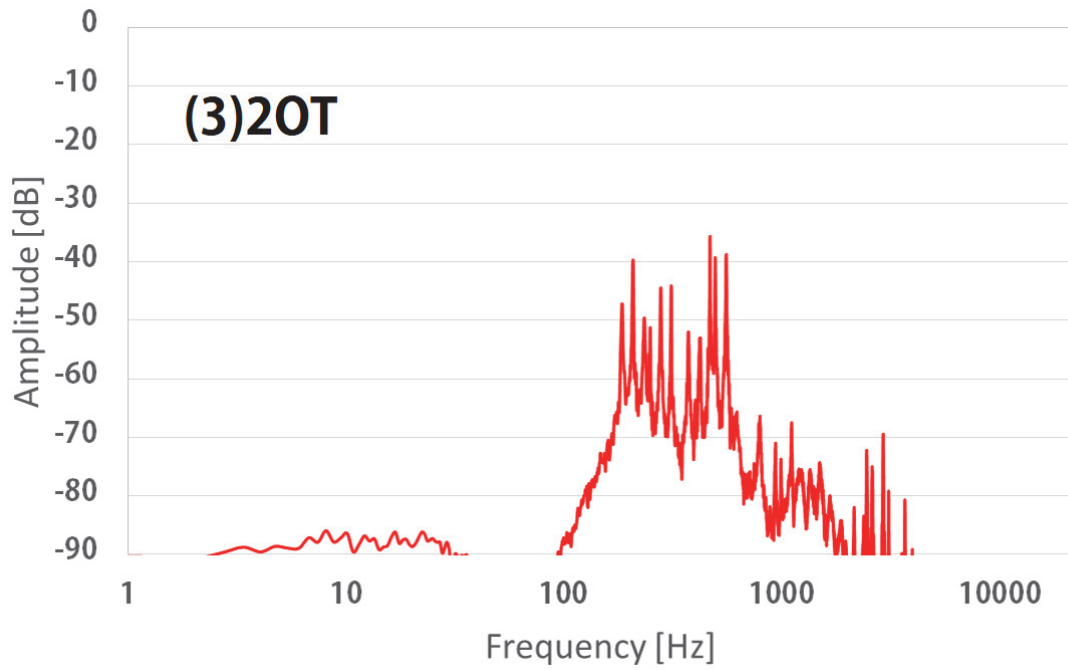


図 4-7. オルゴール音楽を用いた 20T 条件の周波数スペクトル

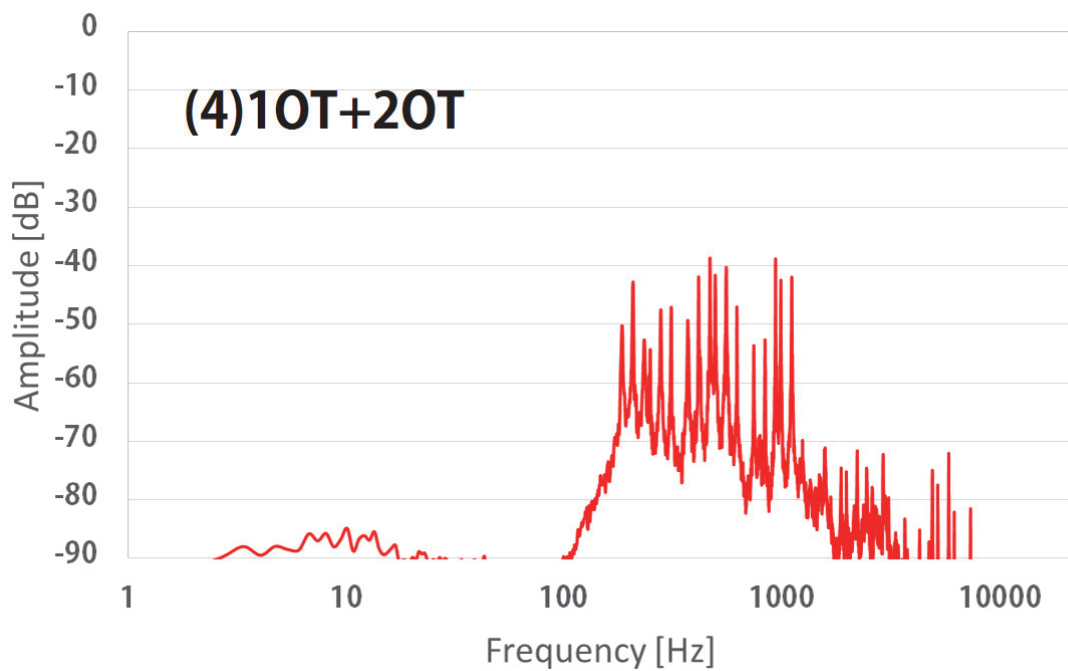


図 4-8. オルゴール音楽を用いた 10T+20T 条件の周波数スペクトル

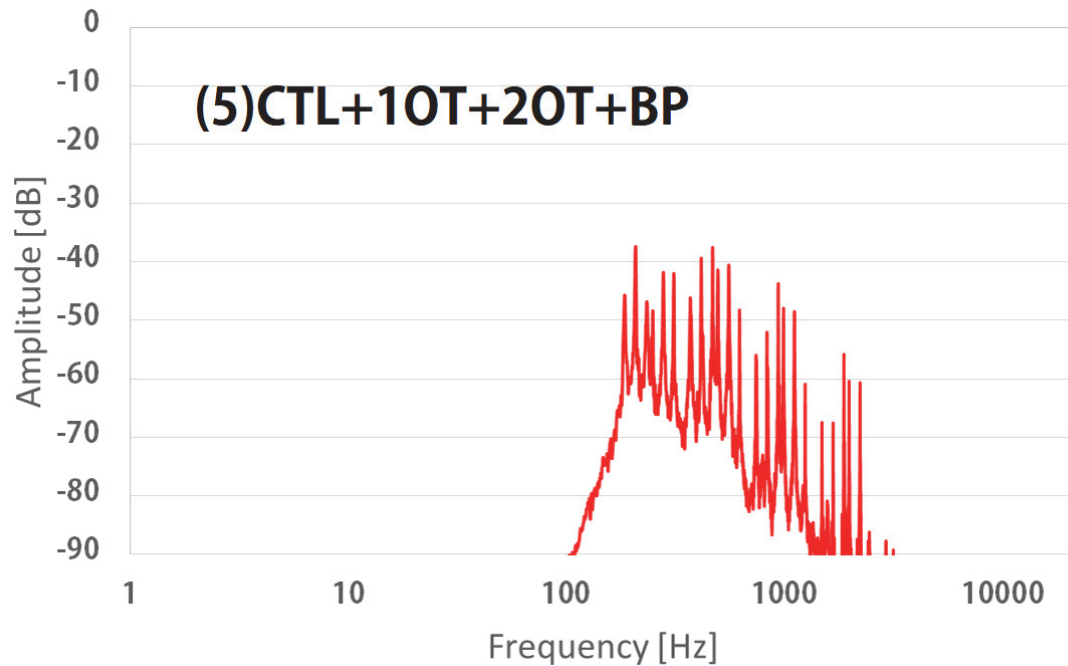


図 4-9. オルゴール音楽を用いた CTL+10T+20T+BP 条件の周波数スペクトル

### 4.2.3 音楽のタイミングと強度のみに同期した触覚提示

従来の触覚提示装置の多くは偏心おもりによる振動モータを用いている。これは強い振動を提示できる一方で応答性が悪く、また周波数と振幅を同時に制御することが出来ない。振動モータの応答性の問題を解決する手法として直動形共振アクチュエータ (Linear Resonant Actuator) が多くの携帯機器で採用されつつあるが、単一の周波数(共振周波数)しか提示できないという欠点は残っている。しかし既存の触覚提示手法としては比較すべき対象である。

そこで比較対象の一つとして、(6)音楽波形の絶対値に対して  $f_c=5$  Hz のローパスフィルタを適用して音楽波形の包絡線を生成し、それを 175 Hz の正弦波で AM 変調した振動を提示する条件(175HzAM)を設定した。この条件では音楽波形のリズムや強弱が 175 Hz のキャリア波によって振動提示される。なお 175Hz という周波数は一般的に入手可能な直動形共振アクチュエータ(日本電産コパル株式会社, LD14-002)で出力可能な周波数である。音楽のオルゴール音楽を用いた 175HzAM 条件の周波数分布を図 4-10 に示す。

次節ではこれら 6 通りの触覚刺激を音源とともに被験者に提示し、各振動刺激の聴覚体験への主観的な影響を検証した。

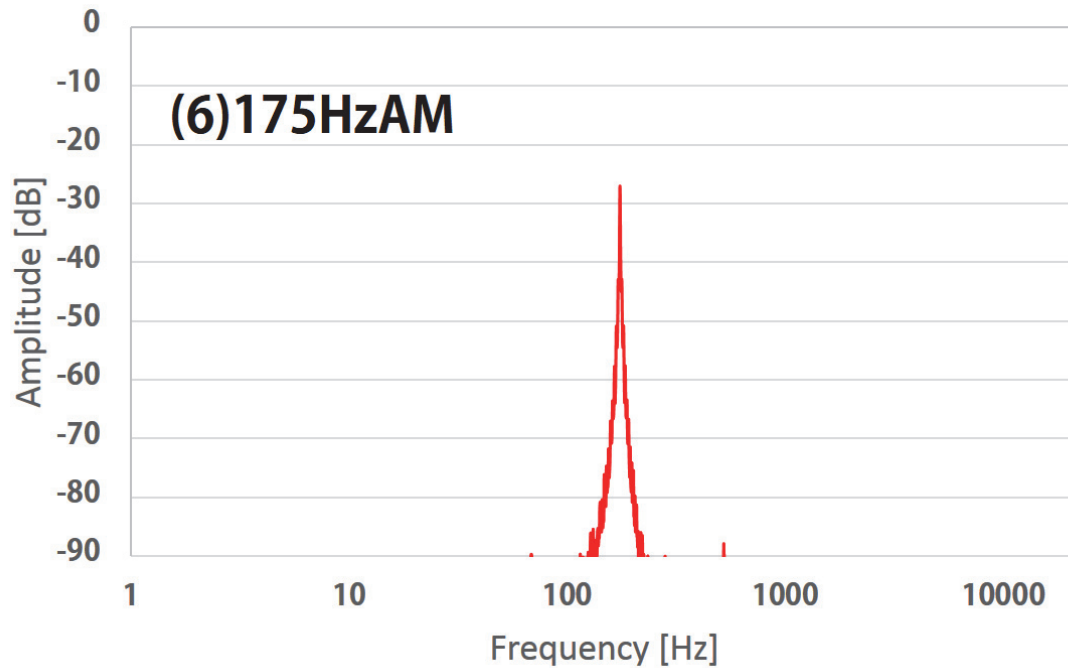


図 4-10. オルゴール音楽を用いた 175HzAM 条件の周波数スペクトル

## 4.3 聴覚体験の主観評価実験

### 4.3.1 実験装置

本実験では前章の予備実験と同様の実験セットアップを用いて実験を行った。

### 4.3.2 提示刺激

振動刺激生成の検討時に用いた 3 種類の音源を聴覚刺激とし、各音源を(1)から(6)の条件で変換した波形を振動刺激として使用した。

実験に使用する提示刺激は音楽刺激 3 組と触覚刺激 6 組を組み合わせた 18 組み合わせからなり、1 組み合わせあたり 2 繰り返しの提示を行ったため、被験者一人あたりの試行数は 36 試行であった。各刺激の平均強度はあらかじめ音圧レベルで等しくなるように調整された。その際、聴覚刺激の平均音圧は約 55 dB SPL、触覚刺激の最大加速度は約 1.4 G であった。

### 4.3.3 評価方法

振動刺激による聴覚体験の主観的な評価を測定するため、以下の 5 つの評価項目に対して VAS (Visual Analogue Scale) による評価を行った。これらの評価項目は Lee らの先行研究 [27] で用いられたものを和訳、及び一部改変して使用した。設問項目は以下のとおりであった。Q1 音と振動が合い続けている—いる；音に合わせて振動を感じ続けたか？ Q2 振動は不自然—自然；振動と音の組み合わせに違和感を覚えたか？ Q3 振動は心地よくない—心地良



い；提示された振動は不快であったか？ Q4 振動は好みでないー好みである；提示された振動は好みのものであったか？ Q5 振動によって楽しくならないーなった；振動があることでコンテンツを楽しめたか？

#### 4.3.4 実験手順

被験者(男性 5 名, 22-29 歳, 自己申告による触覚及び聴覚の障害なし)は着座の状態ですヘッドホンを装着し, 振動デバイスを両手で保持した(図 4-11). 被験者が音もしくは振動のみに集中し, 他方の刺激を無視して回答する可能性を排除するため, 実験開始前に被験者に各設問を提示するとともに, 音もしくは振動単体でなく音と振動の組み合わせから成る聴覚体験を評価するようあらかじめ教示を行った. 実験開始とともに 18 組み合わせのうち一つの音楽刺激と触覚刺激の組み合わせが提示された. 刺激提示後, 被験者は 5 つの評価項目に対して VAS により回答を行った. 評価に時間制限は設けなかったが, 一試行あたりの刺激提示と評価にかかる時間は最大でも 1 分程度であった. これを 18 通りの提示刺激に対して各 2 回ずつ行った. 刺激の提示順序は被験者ごとにランダムであった.



図 4-11. 実験概要

### 4.4 結果

統計処理を行うため, VAS で得られた回答を 0-100 の数値に変換し, 多重比較(Holm 法)により検定処理を行った. CTL 条件と他の条件のみを比較する場合, Dunnett 法による対照群との比較が一般的に用いられるが, 今回は提案手法の分周条件による差や, タイミングのみが同期した条件と提案手法の条件との間の差も観察するため, 対比較の検定を行った. 設問項目ごとに得られた結果を以下に示す. 各グラフの縦軸は数値化された VAS 回答の値を示し, 横軸は振動提示条件を示す. またエラーバーは標準偏差を示す.

#### 4.4.1 Q1. 音と振動が合い続けていないーいる

この設問では, 被験者は音源のリズムに合った振動を知覚し続ける事ができたかを回答し

た。

まずオルゴール音楽の場合、音源の波形を分周せずそのまま触覚刺激として提示する(1)CTL 条件と比較して、他のすべての振動条件(2)から(6)で評価の有意な向上が見られた ( $p < 0.05$ ) (図 4-12 左)。これは、オルゴール音楽が 700 Hz 以上の比較的周波数の高い音で構成されていたため、音源の波形をそのまま振動提示する CTL 条件では部分的にしか触覚刺激として知覚できなかったためだと考えられる。また複数の被験者より CTL 条件において、音楽は定常的に流れているにもかかわらず、音階の上下に伴って触覚刺激の知覚が消失、復活を繰り返すことで音と触覚の一体感が失われるという内観報告が得られた。

一方、クラシック音楽とジャズ音楽の場合、振動提示条件の違いによる有意差は見られなかった(図 4-12 中央, 右)。これは、クラシック音楽とジャズ音楽には元々触覚で知覚可能な範囲の周波数が十分に含まれていたためだと考えられる。

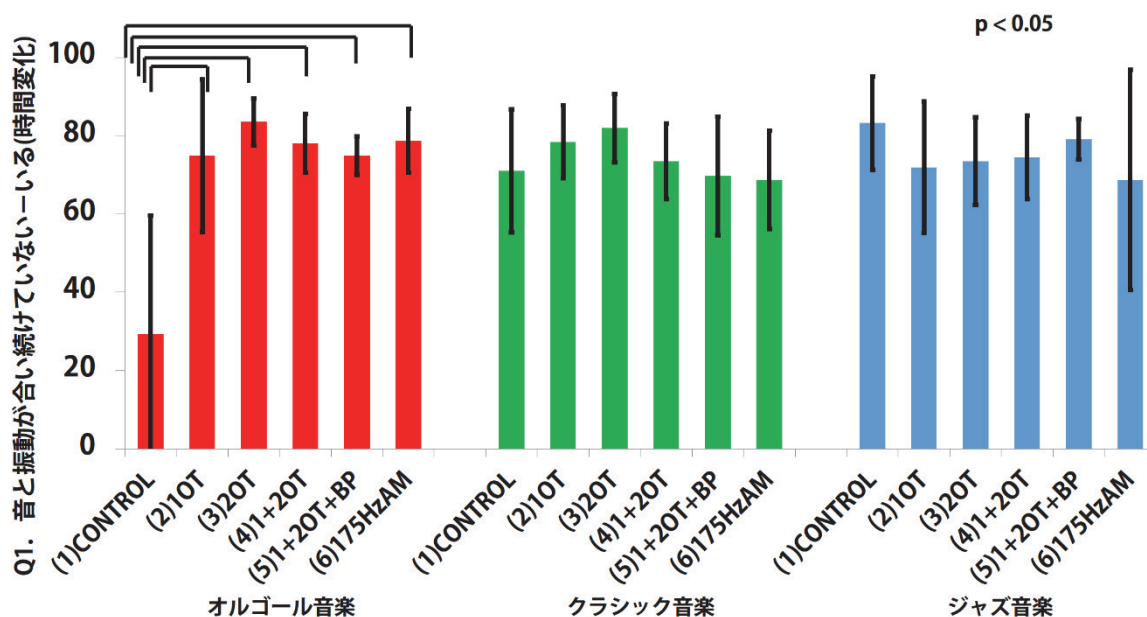


図 4-12. 設問 1 の音楽・振動条件ごとの結果

#### 4.4.2 Q2. 振動は不自然—自然

この設問では、被験者は音と振動の組み合わせを主観的に同質のものとして知覚していたかを評価した。

オルゴール音楽の場合、(1)CTL 条件と比較して、振動刺激の周波数を 2 分周する(2)1OT 条件と 4 分周する(3)2OT 条件の評価が有意に上昇した( $p < 0.05$ )(図 4-13 左)。このことから聴覚刺激と触覚刺激の周波数が実際には異なっても、周波数が 2 分周あるいは 4 分周の関係を保った 2 つの刺激は主観的に同質であると知覚されることが示唆された。一方振動を触覚的に知覚しやすい 175 Hz の正弦波で AM 変調した(6)175 HzAM 条件では評価の有意な上昇は見られなかった。

ジャズ音楽においては、(1)CTL 条件と分周を用いた(2)から(5)の条件間に有意差は生じなかったものの、(1)CTL 条件と(6)175HzAM 条件との比較では、(6)175HzAM 条件の方が有意に

評価が低下した(図 4-13 右)( $p < 0.05$ ). クラシック音楽については振動条件間で有意差は見られなかった(図 4-13 中央).

これらのことから, 触覚的に知覚しやすい周波数を用いて音楽波形のリズムと強度のみを振動提示した場合, 触覚的な知覚の容易さは向上するものの, 振動刺激と音楽波形の間に質的な乖離を生じ, 被験者にとって不自然な組み合わせとして捉えられる場合もあることが判明した.

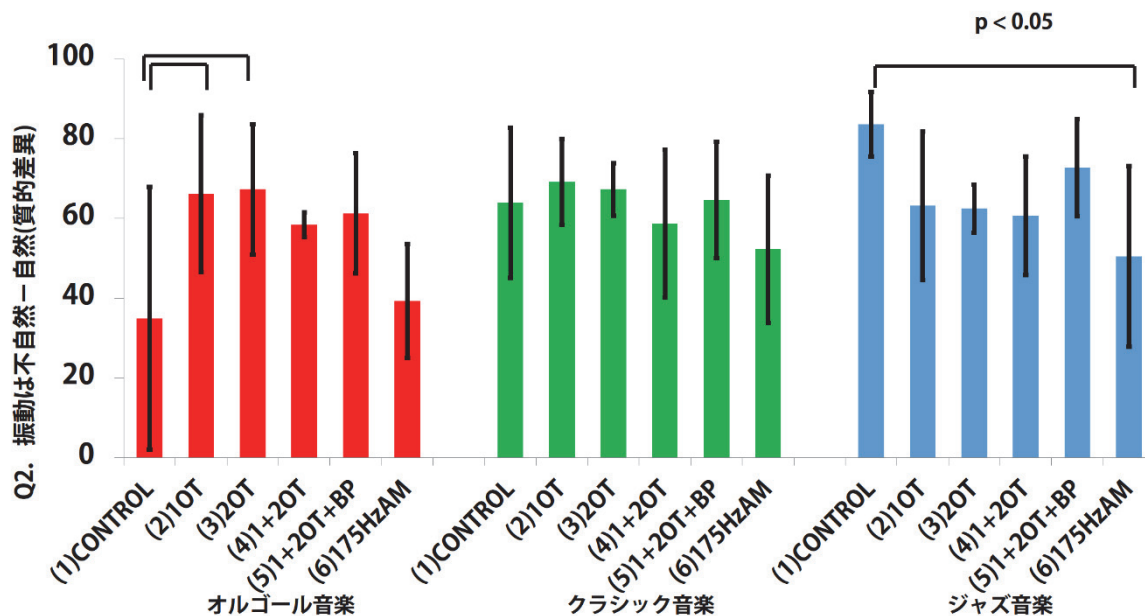


図 4-13. 設問 2 の音楽・振動条件ごとの結果

#### 4.4.3 Q3. 振動は心地よくないー心地良い

オルゴール音楽の場合, (1)CTL 条件と比較して, (2)から(5)の分周を用いた条件で評価が有意( $p < 0.05$ )に上昇した. 一方 (6)175HzAM 条件との比較では有意差は見られなかった(図 4-14 左).

また, 設問 1 と同じく, クラシック音楽, ジャズ音楽においては振動条件の違いによる差は生じなかった(図 4-14 中央, 右).

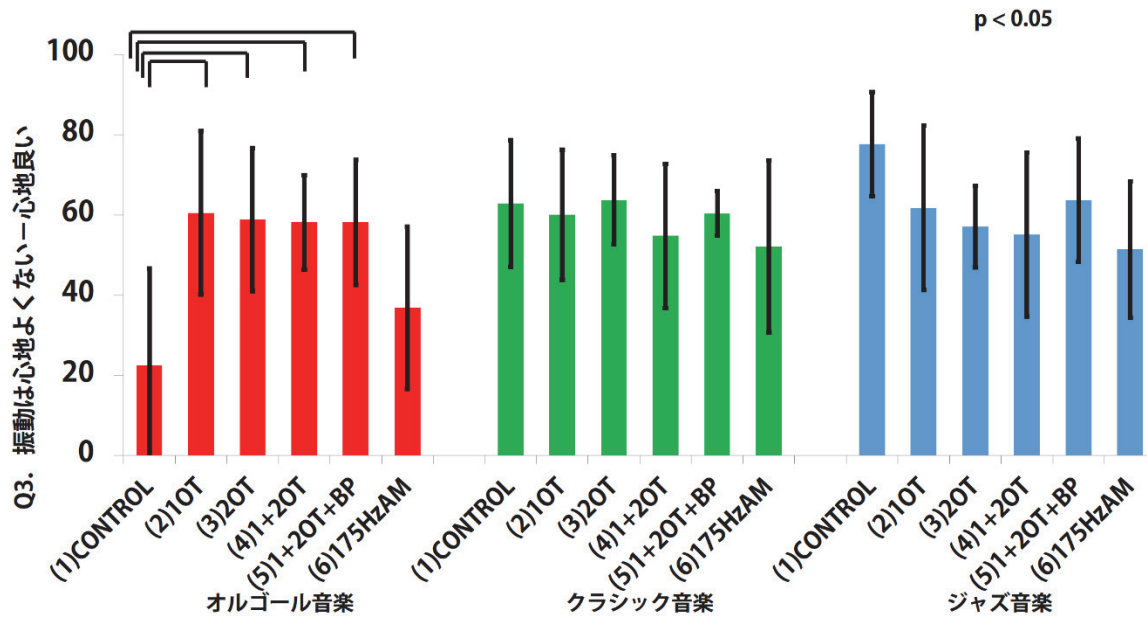


図 4-14. 設問 3 の音楽・振動条件ごとの結果

#### 4.4.4 Q4. 振動は好みでないー好みである

オルゴール音楽の場合、設問 3 と同じく(1)CTL 条件と比較して、分周を用いた(2)から(5)の条件で評価が有意に上昇した( $p < 0.05$ )。さらに、分周を用いた(2)、(5)の条件と(6)175HzAM を比較した場合も、分周を用いた条件で有意に評価が上昇した( $p < 0.05$ ) (図 4-15 左)。

クラシック音楽においては振動条件間に差は見られなかったが、ジャズ音楽において(1)CTL 条件と(6)175HzAM 条件の間に有意な評価の差が認められた(図 4-15 右)( $p < 0.05$ )。

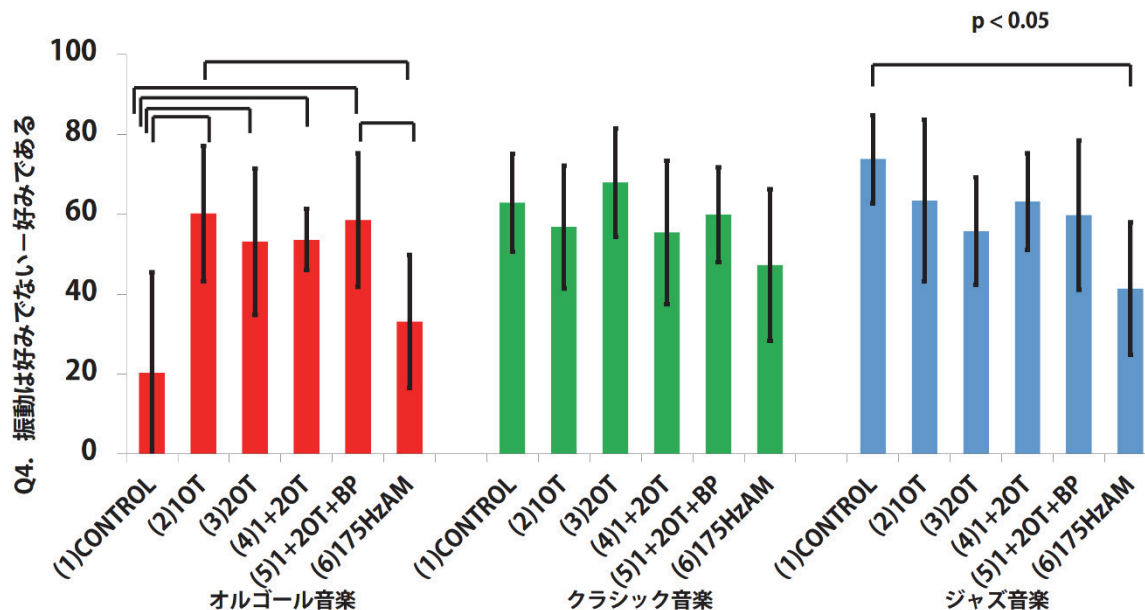


図 4-15. 設問 4 の音楽・振動条件ごとの結果

#### 4.4.5 Q5. 振動によって楽しくならないーなった

この設問の結果も Q4 と類似した傾向が得られた(図 4-16). すなわちオルゴール音楽の時, CTL 条件と比較して, 分周を用いた(2)から(5)の条件で評価が有意に上昇した( $p < 0.05$ ). さらに(4)の条件と(6)175HzAM とを比較した場合も分周を用いた(4)条件で有意に評価が上昇した( $p < 0.05$ ). クラシック音楽においては振動条件間に差は見られず, ジャズ音楽において CTL 条件と(6)175HzAM 条件の間にのみ有意差が認められた( $p < 0.05$ ).

以上の結果から, オルゴール音楽のような高音域を多く含み, 従来手法では部分的にしか触覚提示を行うことのできない音楽に対し, 提案手法を適用することで振動刺激が知覚しやすくなり, さらに主観的な聴覚体験の向上をもたらすことが示唆された. またオルゴール音楽, ジャズ音楽における結果が示すように, 音楽波形のリズムと強度のみを振動提示した場合, 振動は有意に知覚しやすくなるものの, 主観的な聴覚体験には逆効果として捉えられる場合もあることが示唆された.

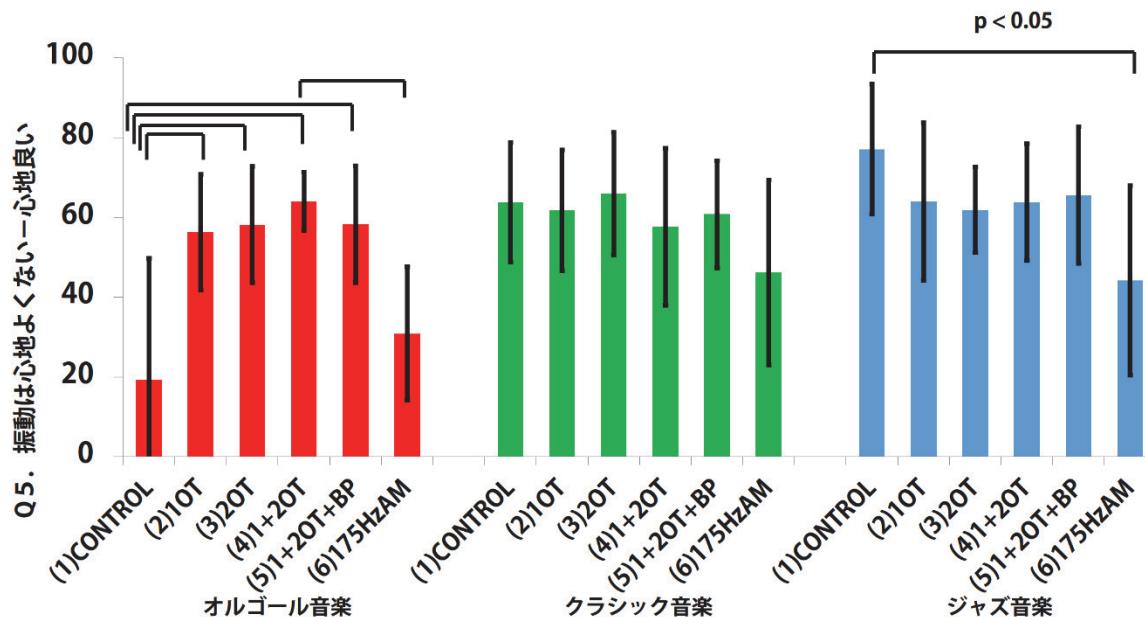


図 4-16. 設問 5 の音楽・振動条件ごとの結果

## 4.5 考察

### 4.5.1 高音域を多く含む音源に対する分周手法の適用

実験結果より、高音域を多く含み、従来手法では部分的にしか触覚提示を行うことのできない音楽に対して波形を分周した触覚提示を行うことで、音源を触覚的に知覚しやすくなっただけでなく、分周によって周波数が異なった音楽と振動の間に乖離感を生じずに主観的な聴覚体験(心地よさ、好み、楽しさ)が全体的に向上することが明らかになった。本実験で用いた高音域を多く含む音楽(オルゴール音楽)の周波数成分はおおむね 700 Hz 以上であったが、分周手法を適用することによって周波数成分の下限が 350 Hz(2 分周)もしくは 175 Hz(4 分周)近傍まで下がり、触覚的に知覚しやすくなったことがこの結果につながったと考えられる。

一方、単に音源波形を触覚的に知覚しやすい 175 Hz の正弦波で AM 変調した(6)175 HzAM 条件では、振動を音に合わせて知覚することが容易になったが、音と振動の同質感や振動の心地よさ、好み、楽しさなどの評価の上昇が見られないことから、聴覚に比べて周波数解像度の低い触覚においても、音楽のリズムや強度の触覚的な提示だけではなく、音楽の周波数の上下を触覚的に表現することが聴覚体験の向上に必要であることも示唆された。

提案した 4 つの分周条件(2)から(5)の間には有意差は生じなかったが、CTL 条件と比較した際、(2)1OT 条件と(3)2OT 条件はすべての設問項目で有意差を生じたことから、触覚的に知覚が困難な周波数成分を持つ音楽に対して周波数がオクターブずれた関係に保たれた触覚提示は聴覚体験の主観的な向上に一定の効果を有すると考えられる。

### 4.5.2 中・低音域を多く含む音源に対する分周手法の適用

一方、中音域を多く含むクラシック音楽に対して本手法を適用した場合、すべての設問項目

で CTL 条件と他の振動条件の間に有意差は生じなかった。これは、実験で用いたクラシック音楽には元々触覚的に知覚可能な周波数が含まれていたため、CTL 条件においても十分知覚可能であり、かつ音楽と提示振動の周波数に隔たりがなかった可能性が考えられる。ただし、分周手法を適用することで聴覚体験の評価が低下することもなかったことから、触覚的に知覚可能な周波数が含まれる音楽に対して本手法を適用しても聴覚体験を損なう可能性は低いと考えられる。また予備実験中、ある被験者(フルート演奏経験者)に分周触覚振動をクラシック音楽とともに提示した際、「音楽中のフルートを実際に演奏している感じがした」という内観報告を得た。これは音源中の楽器の同定が分周された触覚刺激によって容易になるという先行研究とも符合しており[32][33]、本手法が聴覚体験の向上だけでなく、コンテンツへの没入感を向上させる手法としても使用可能であることを示唆していると考えられる。

低音域を多く含むジャズ音楽に対する実験結果も、クラシック音楽の場合と同様に、分周を用いた手法(2)から(5)と CTL 条件の間に有意差は生じなかった。この結果も、実験で用いたジャズ音楽には元々触覚的に知覚可能な周波数が含まれていたため、CTL 条件においても触覚的に十分知覚可能であったためと考えられる。ただし、周波数を 175 Hz に固定してリズムのみを提示した(6)175HzAM 条件の評価は CTL 条件と比較して有意に低くなる場合が存在した(Q2: 質感, Q4: 好み, Q5: 楽しさ)。このことから、音源の周波数と乖離した、単なる音楽のリズムや強弱の振動提示だけでは逆に聴覚体験を損なう場合もあることが示唆された。

## 4.6 本章のまとめ

本章では、前章までに得られた知見を手がかりに、実際の音楽の聴覚体験を触覚刺激によって向上させることを試みた。触覚と聴覚の間で知覚可能な周波数帯が異なるという問題に対して、従来は低音領域のみを強力な触覚提示素子によって提示するという手法が取られていたが、音楽波形の周波数を分周することで周波数を落とし、触覚刺激として提示することを試みた。分周された触覚刺激を用いた聴覚体験の主観評価実験によって、主に高い周波数成分をもち、音波形をそのまま触覚刺激として用いても振動が微小にしか感じられないような音源に対して、音楽波形を分周して触覚提示を行うことで、音楽を触覚的に知覚しやすくなるだけでなく、分周によって周波数が異なった音楽と振動の間に乖離感を生じずに主観的な評価(心地よさ, 好み, 楽しさ)が全体的に向上することが明らかになった。

本実験では 3.2 節で検証した触覚刺激による聴覚の主観的強度補強に関する直接的な比較は行っていないが、複数のデモ展示を通じて「迫力が増したように感じられる」「振動刺激がないと物足りなさを感じる」などの刺激強度に関する内観報告を得た。また、単に触覚的に知覚しやすい周波数の振動で音楽のリズムや強弱を触覚提示した場合、評価の向上は見られず、逆に一部の条件で評価の低下が見られたことから、聴覚と触覚の知覚可能周波数範囲及び周波数解像度には大きな隔たりがあるものの、刺激の周波数は両者を同質なものとして結びつけ、聴覚体験を向上させるために重要であることが示唆された。また 3.4 節の触聴覚間で周波数協和性を知覚する実験においては、音楽経験を有する被験者群のみが聴覚で知覚する和音と類似した協和性を触聴覚間で知覚したのに対し、本章では被験者の音楽経験の有無を問わず聴覚体験の向上が確認できた。これは音楽を分周して触覚提示を行うことで、触覚刺激が容易に知覚可能となり、3.4 節で用いたノコギリ波には含まれない音楽のリズム、強弱なども知覚しやすくなったためと考えられる。

一方、一連の実験を通じて、多くの被験者より「振動提示が付加された時の振動の感じやすさや音楽とマッチしているかは判定できるが、そもそも自分の嗜好と合った曲でなければ振動提示の方法によらず楽しさなどの評価は向上が困難であった」という内観報告を得た。今回の実験では、含まれる周波数分布の違いを元に音楽曲を選定したが(オルゴール音楽, クラシック音楽, ジャズ音楽), 特にクラシック音楽などは明確なビートや曲調変化の少ない穏やかな

曲であり、主観的な官能評価(Q4：好み，Q5：楽しさ)などの評価を行うのは難しかった可能性がある。そのため以降の章における実験では、ロック、ポップスなど被験者にとって馴染みやすいジャンルの曲を使用することで、被験者が振動提示手法の違いにのみに集中できるようにした。



# 第5章 鎖骨を介した触覚提示による聴覚体験の向上

## 5.1 研究背景

前章までに、モバイル環境における聴覚体験の向上を目的として聴覚刺激に対して周波数的に分周された触覚刺激提示を試みた。分周された触覚刺激を用いた聴覚体験の主観評価実験によって、主に高い周波数成分をもち、音波形をそのまま触覚刺激として用いても振動が微小にしか感じられないような音源に対して、音楽波形を分周して触覚提示を行うことで、音源を触覚的に知覚しやすくなるだけでなく、分周によって周波数が異なった音楽と振動の間に乖離感を生じずに主観的な評価(心地よさ, 好み, 楽しさ)が全体的に向上することが明らかになった。

本手法はモバイルデバイス本体を振動させることで、デバイスのサイズに関する制約やユーザの非拘束性を損なわない、また身体の中で最も触覚的に優れた手掌部に振動提示が可能であるというメリットをもたらす一方、手掌部は体幹から最も末端に位置する部位の一つでもあるため、「自己がコンテンツ内の環境に囲まれている」と解釈しうる文脈を振動で提示することが困難というデメリットを持つ。

そこで本章ではモバイル環境下における聴覚体験の向上に対して異なるアプローチを行う。手掌部への触覚提示では困難な、身体広範囲へ触覚提示可能かつ小型軽量でユーザの非拘束性を損なわない触覚提示装置の開発について述べる。ユーザの鎖骨に振動を提示し、骨格を介して振動を上半身に伝搬させる手法を提案し、物理的な振動伝搬の計測を行った後、心理物理実験による主観的な聴覚体験への影響の検証を行う。

## 5.2 関連研究

これまで身体に振動提示することでコンテンツの臨場感を向上させる取り組みは数多くなされてきた。ここでは関連研究として、まず従来型の全身触覚提示装置について述べたあと、デバイスの利便性向上を目的として振動子の個数削減や提示装置の簡易化を試みた事例やモバイル環境において聴覚体験を向上させる関連研究について述べる。身体への触覚提示はコンテンツ体験の向上だけでなく、触覚を用いた遠隔コミュニケーション[49][51]や自閉症患者の治療目的[13][46]にも用いられることがあるが、ここでは主にコンテンツ体験の向上を目的とした全身触覚提示についてまとめる。

### 5.2.1 従来型の全身触覚提示装置

コンテンツ体験の向上を目的とした全身触覚ディスプレイはこれまで数多く提案されてきた。中でも最も多く提案されているものの一つがイス型の全身触覚ディスプレイである。装置をイス型にすることで、装置の重量やサイズを考慮する必要なく多数の振動子を搭載することが可能であり、またユーザが着座することで身体を振動子に密着させることが容易である。

イス型の触覚提示装置として Karam らはヒトが音の周波数を蝸牛で空間的に処理する点に着目し、この仕組みを全身触覚提示に応用した Emotichair を開発した[22][23]。椅子背面に取り付けられた振動子アレイによって、コンテンツ内の高い音は椅子背面の高い位置の振動子

から、低い音は椅子背面の低い位置の振動子から振動提示することで、ユーザは音と振動の組み合わせをより自然に感じることができる。Israrらはゲームコンテンツの視覚的な動きを触覚で提示し、コンテンツへの没入感を向上させるため、椅子背面に格子状に配置した振動子アレイを用いて、ユーザの背中に仮現運動による触覚的な動きを提示する **Surround Haptics** を提案している[19][20]。また健常者だけでなく、聴覚障害者の聴覚体験の拡張を目的として、振動を伝達しやすい木製の椅子のアームレスト、レッグレスト、背中部分に振動子を取り付け視覚効果と合わせて音楽波形を振動提示することで、聴覚障害者の音楽コンテンツ体験を向上させる試み[36]なども行われている。

イス型と同じく、多数の振動子をユーザ身体に容易に密着可能であるという利点から、ジャケット型の全身触覚提示装置も数多く提案されている。Lemminsらはジャケットの胴体部及び腕部に取り付けた 4X16 セグメントの振動子を映像コンテンツに同期させて振動させることでユーザの情動に働きかける **Tactile Jacket** を開発した[10]。ゲームコンテンツにおける臨場感向上を目的としたものとしては、Palanらのベスト型触覚提示装置[39]などが挙げられる。またVR空間における触覚提示を目的として、Lindemanらはベストに内蔵した16個の振動子を独立に無線で駆動可能な **TACTAVEST**[30]を提案している。

しかしながらこれらの全身触覚提示装置は次のような問題が未解決であった。まず身体全体に振動提示を行うために振動子を装置全体に数多く配置する必要があり、装置が高重量、大型化しやすい。さらに、これらの振動子を常にユーザの身体と密着させる必要があるため、必然的にユーザの拘束性が高いものになってしまう。従って、従来の全身触覚ディスプレイは主に大型の装置やユーザの拘束が許容される映画館やアミューズメントパークなどに限られており、モバイル環境における使用は限定的であったといえる。

## 5.2.2 装置を簡略化した全身触覚提示装置

これまでに述べた全身触覚提示装置は、多数の振動子を用いてユーザ身体広範に振動提示が可能である一方、第一章で述べた通り装置の大型化、高重量化、ユーザの拘束性といった問題を生じやすい。これらの問題に対して、装置重量の削減や小型化が試みられている。

Kuriharaらは、全身触覚提示装置における振動子の個数削減を目的として、大面積の剛性可変のクッションに振動子を組み込み、ユーザ身体をクッション内部に沈めることで全身に触覚提示する手法[26]を提案した。また山崎らは、簡便な機構で体感音響装置を実現するため、モータに取り付けられた糸をユーザ胸部に巻き付け、モータの巻取りによって糸を振動させ、身体に振動提示する手法を提案している[58][79]。Winthanaらは人体の部位ごとの共振周波数の違いに着目し、イス座面に取り付けた単一の振動子から異なる周波数の振動を提示することで、人体各部位に個別に振動提示を行う手法を提案している[56]。永野らはアコースティックギターのサウンドホール上部にスピーカを設置し、スピーカ再生時に生じる空気振動をギター内部に注入、ギター本体を触覚提示装置として使用する体感音楽聴取法を提案している[76]。

しかしながら、これらの提案においても触覚提示装置着脱の煩雑さ、ユーザの拘束性、また簡略化した装置を用いたコンテンツ体験の向上可能性などの議論は限定的であり、特に昨今急速に普及したスマートフォンやタブレット端末といったモバイル環境における使用には課題が残っている。

## 5.2.3 モバイル環境における触覚提示装置

モバイル環境における触覚提示は、装置のサイズや重さの制限などから、身体に振動子を装着するのではなく、端末自体を振動させる手法が多く試みられている[27][29]。しかしながら、

この手法に共通する問題として、振動提示可能な部位が手掌部に限られ、振動を局所的にしか知覚できないという問題がある。

そこで本章では、小型、軽量でユーザ拘束性が低いモバイル環境向け触覚提示装置の開発を目的とする。少数、小型の振動子からユーザの鎖骨に振動を提示する装置を試作し、骨伝導によって振動を上半身に伝搬させる手法を試み、伝搬振動の計測、および心理物理実験によってその聴覚体験への有効性を検証する。

### 5.3 提案手法

骨に振動を提示する骨伝導自体は、従来主に聴覚障害者向けの福祉機器[72]や雑音環境下で「骨を通じて音を聴覚に伝える」技術として使用されており、近年では携帯電話の通話補助機能[73]や聴覚を遮断しないヘッドホン[69]等として広く普及している。

これに対して本提案では骨伝導を「骨を介して振動を触覚刺激として身体に伝搬させる」技術として使用する。骨は剛体として人体の広範囲に存在するため、骨に提示された振動は別の骨を伝わり、柔らかい皮膚に振動刺激を与えるよりも広範に振動を伝達することが期待される。また一部の骨は突起して体表に非常に近い部分に存在するため、振動子を骨に密着させることは容易だと考えられる。

この刺激の提示部位として本提案では鎖骨に着目した。鎖骨は体表に大きく突起しているだけでなく、肋骨柄を通じて肋骨体や肋骨、肩甲骨などと接合しており、より広範への振動伝搬が期待できる(図 5-1)。また上腕骨、肩甲骨などの他の骨による突起部は関節上に存在することが多く、関節の駆動によって突起部が皮膚に埋没したり、位置が大きく変化することがあるが、鎖骨の突起は「くの字」状に曲がった鎖骨の形状自体によって生じており、埋没や位置変化が比較的少ないと考えられる。さらに通常我々の身体は衣服によって覆われているため、肩甲骨や背骨などは部位面積としては大きく、広範への振動伝搬が期待できるものの、振動子を密着させるためには衣服による振動減衰や位置ずれなどを考慮する必要がある。対して首元まわりは他の突起部と比較して露出しやすいため、衣服による影響を最小限に留めることができる。また実際に鎖骨に振動子を手で密着し振動を提示した所、身体に伝搬する振動が知覚でき、また特に不快感などは生じなかった。これらの理由から、振動を提示する部位として鎖骨を使用するという着想に至った。

鎖骨付近にスピーカを装着するというアイデアに基づく類似の製品として、1979年に米国JS&A社から製品化されたBone Foneが存在する[4][15]。これは帯状のデバイスを首からぶら下げ、帯の両端に取り付けられたスピーカから気導音および骨導音を用いてAM/FMラジオをヘッドホンを使わず聴取するものである(図 5-2)。機構上、鎖骨付近に振動を提示可能であると考えられるが、鎖骨にどの程度の強度の振動を提示可能であったか、鎖骨に振動を提示することで振動を身体広範に伝達可能であるか、また伝達された振動が聴覚体験の向上に寄与するかといった議論は行われていない。

そこでまず、鎖骨に振動を提示した場合と鎖骨近傍の皮膚に振動を提示した場合で体表に伝搬する振動に違いが生じるのかを検証した(実験 1)。その後、実際に音楽コンテンツを試聴することを想定し、提案手法と従来触覚提示によく用いられる部位とで主観的な聴覚体験の影響の違いが出るかを検証した(実験 2)。

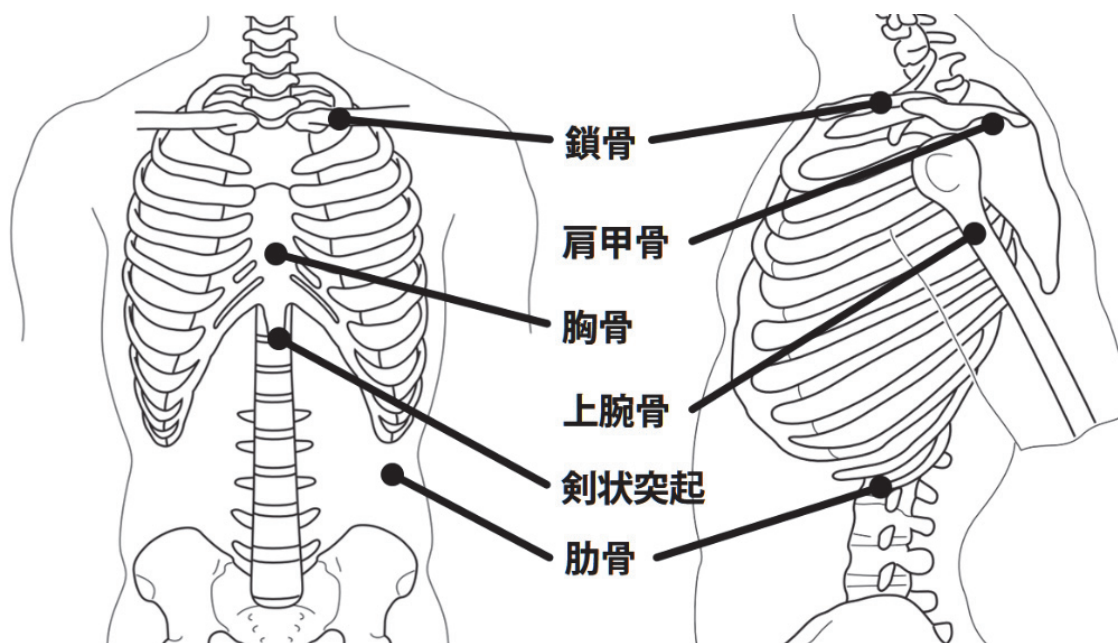


図 5-1. 上半身に存在する主な骨



図 5-2. Bone Fone(1979年)[4]

#### 5.4 実験 1:鎖骨への振動提示による振動伝搬効率検証

本項では提案手法である鎖骨への振動提示が、従来一般的に行われている皮膚への振動提示

と比べて振動の伝播効率に優れているかを検証する実験を行った。

### 5.4.1 実験装置

鎖骨へ振動を提示するため図 5-3 に示すような振動提示装置を試作し、実験に使用した。装置は 2 つの直動型振動子(Vp210, Acouve Lab), デジタルオーディオアンプ(M50, MUSE), 3D プリンタ成形のマウンタ(ABS 樹脂製)から構成される。マウンタ両端に振動子を取り付け、首から下げることで振動子を鎖骨に装着する。マウンタ中央部にはボールジョイントがあり、被験者の首の太さに合わせて装着することが可能である。同じく振動の取り付け位置も可変であり、実験では各被験者の身体に合わせてマウンタの角度と振動子の取り付け位置を調節した。デジタルオーディオアンプを除いた装置の重量は約 170 g であった。

振動提示装置より提示された振動の伝播の様子はレーザ変位計(レーザヘッド : LK-H050, コントローラ : LK-G5000, KEYENCE)を使用して計測した(サンプリング周波数 : 5 kHz)。

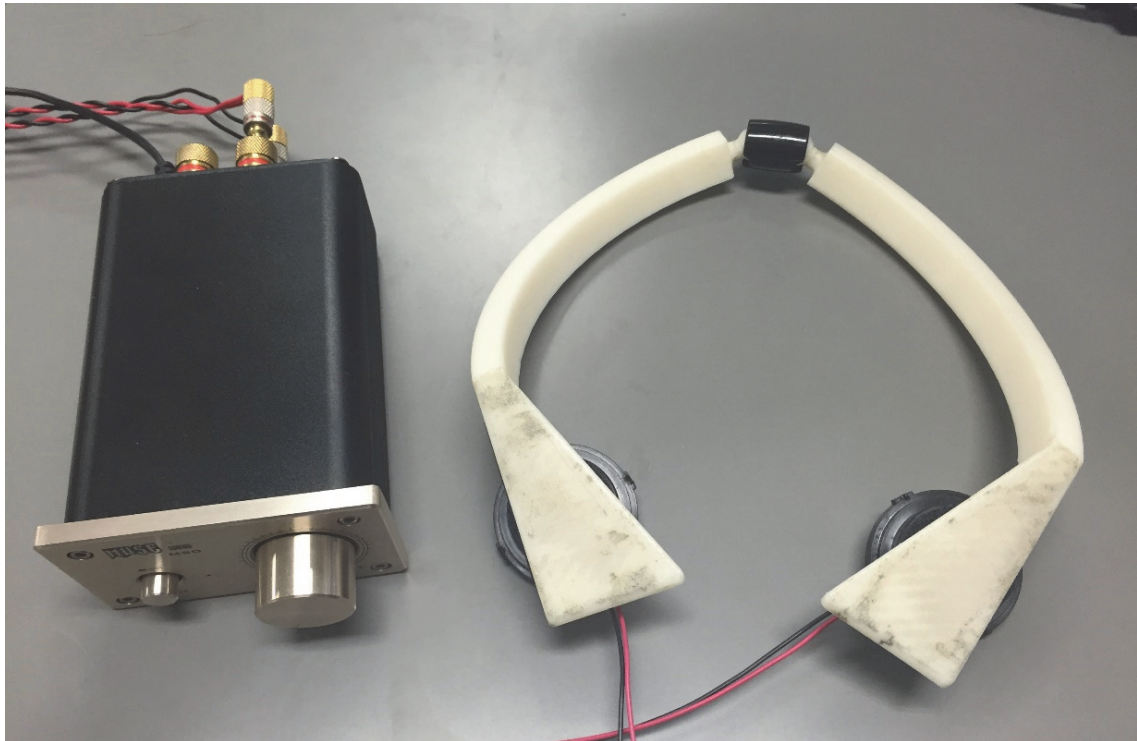


図 5-3. 鎖骨への振動提示装置

### 5.4.2 提示波形

触覚的に知覚容易な周波数の振動を提示した際の振動伝搬の様子を計測するため、100 Hz 及び 200 Hz の正弦波振動を提示刺激として用いた。各波形は PC の音声出力端子から出力され、デジタルオーディオアンプを介して振動子より提示した。提示する振動の強度は印加電圧振幅で統制し、ともに 10 V の電圧を印加した。

### 5.4.3 振動提示・計測部位

振動を鎖骨に提示した場合(提案手法)と皮膚に提示した場合(従来手法)の振動伝搬の差を計

測するため、鎖骨とその近傍の皮膚を振動提示部位とし、左右それぞれに振動を提示した。

これらの振動提示部位から提示された振動の物理的な伝搬を計測するため、正中線にそって上半身の3箇所（胸骨、心窩部、腹部）を振動計測部位とした。図 5-4 に振動提示部及び振動系側部の位置を示す。

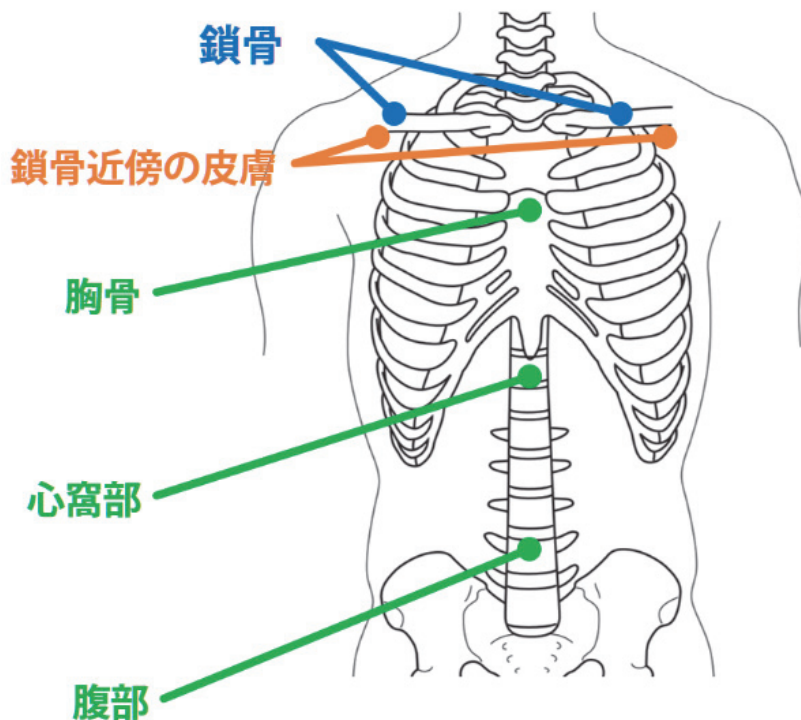


図 5-4. 振動提示及び計測部位

#### 5.4.4 実験手順

被験者が衣服を着用していると体表の伝搬振動計測が不可能なため、上半身裸の状態ですべての計測を行った。被験者は直立状態で試作した振動提示装置を装着した。

試行開始と同時に 100 Hz もしくは 200 Hz の振動を鎖骨より提示し、振動計測部位（胸骨、心窩部、腹部）における伝搬振動をレーザ変位計で計測した(図 5-5)。各部位における計測時間は約 3 秒であり、計測中被験者には通常通り一定の周期で呼吸するよう指示した。計測時のノイズを極力排除するため、計測中に被験者が大きくふらついたり、咳、くしゃみ、発言などを行った場合は計測をやり直した。

鎖骨における各周波数の振動提示及び計測後、振動提示部を鎖骨近傍の皮膚に変更し、同様の計測を行った。実験には 7 名の被験者(20-24 歳、全員男性)が参加した。被験者 1 名あたりの試行数は 2 振動提示部位×3 振動計測部位×2 振動条件の 12 試行、所要時間は約 15 分であった。

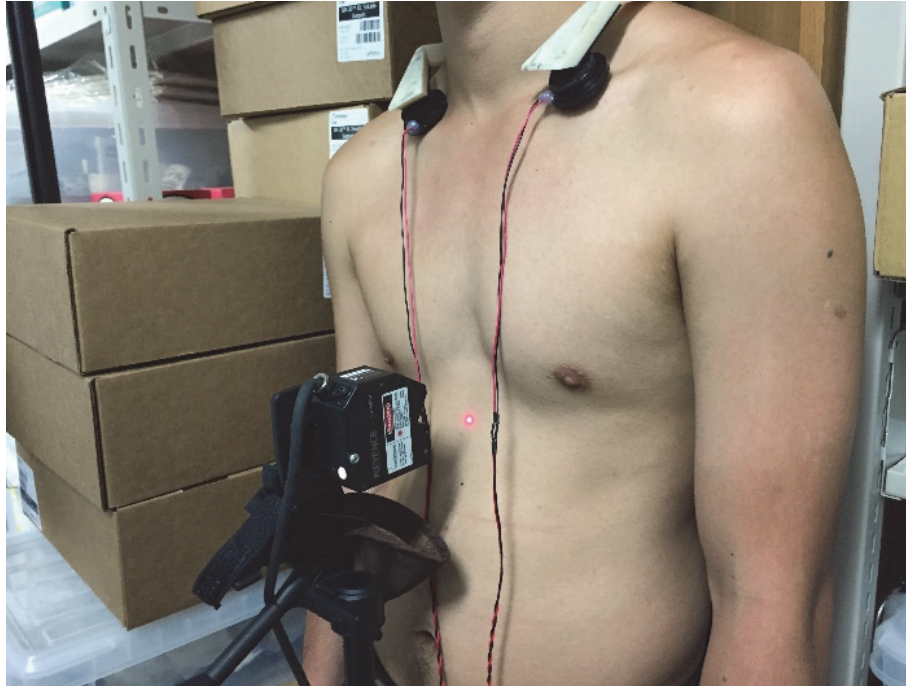


図 5-5. 実験 1 概要

#### 5.4.5 結果と考察

得られた計測値から伝搬された振動を抽出するため次の処理を行った。まず各試行の計測値に対して平滑化処理を行い、被験者の呼吸や重心動揺に伴う変位を除去した。次に平滑化処理を行ったデータから、提示振動周波数の波形を連続して 10 周期分取り出し、各周期で最大値と最小値を求めた。その後各周期の「最大値－最小値」を振動振幅とし、10 周期の平均値をその試行における計測結果とした。

図 5-6 及び図 5-7 に 100 Hz および 200 Hz の振動を提示した場合の計測結果を示す。縦軸は振動振幅を表し、横軸は振動提示部位と振動計測部位を示す。エラーバーは被験者間の標準偏差を示す。

鎖骨に振動を与えた場合と鎖骨近傍の皮膚に振動を与えた場合で結果を比較するために、振動計測部ごとにペアを作り (e.g. 胸骨における鎖骨 vs 皮膚)、Wilcoxon signed-rank test で検定を行った。

- 100 Hz の振動を提示した場合(図 5-6)

- ・ 胸骨における結果

近傍の皮膚に振動提示した場合と比べて、鎖骨に振動提示した場合の方が胸骨に伝搬する振動振幅が有意に大きくなった( $p < 0.05$ )。これは、胸骨は鎖骨と接合しているため、鎖骨に振動を提示した場合に振動が骨格を通じてより大きく伝搬したためだと考えられる。また胸骨は振動計測部の中で最も振動提示部(鎖骨及びその近傍の皮膚)に近い振動計測部位だったため、計測結果の振幅自体も他の計測部位と比較して大きくなった。

- ・ 心窩部における結果

心窩部においても、近傍の皮膚に振動提示した場合と比べて、鎖骨に振動提示した場合の方が胸骨に伝搬する振動振幅が大きくなった( $p<0.1$ )。心窩部には骨は存在しないが、心窩部直上には剣状突起があり、剣状突起は胸骨経由で鎖骨と接合しているため、胸骨における結果と同じく骨に振動を提示したほうが伝搬振動の振幅が大きくなったと考えられる。

- ・ 腹部における結果

腹部において計測された鎖骨からの振動と皮膚からの振動振幅はほぼ同程度であり、有意差は生じなかった。

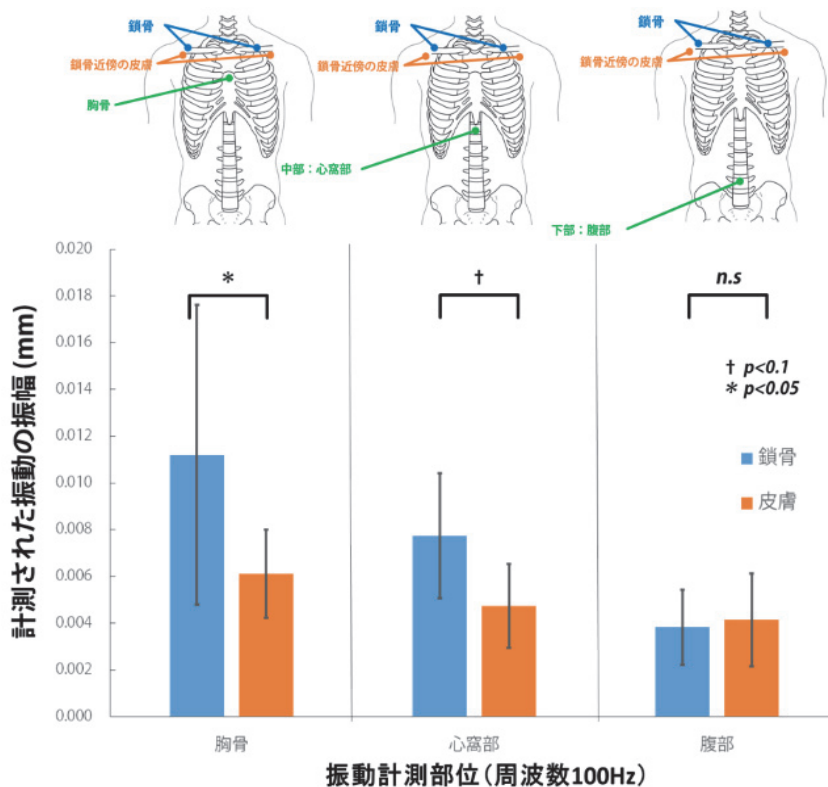


図 5-6. 実験 1 結果 (提示振動 100 Hz)

- 200 Hz の振動を提示した場合(図 5-7)

結果の全体的な傾向としては 100 Hz の振動を提示した場合とほぼ同様の結果が得られた。ただし、使用した振動子の周波数特性の影響から、計測される振幅は 100 Hz の場合と比較して全体的に小さくなる傾向にあった。

- ・ 胸骨における結果

100Hz の時の結果と同じく、近傍の皮膚に振動提示した場合と比べて、鎖骨に振動提示した場合の方が振動振幅が有意に大きくなった( $p<0.05$ )。

- ・ 心窩部における結果



心窩部において、近傍の皮膚に振動提示した場合と鎖骨に振動提示した場合を比較した場合、有意差は見られなかった。

・ **腹部における結果**

振動を腹部で計測した場合、鎖骨からの振動提示と皮膚からの振動提示の差に有意傾向が見られた ( $p<0.1$ )。

これらの結果をまとめると、鎖骨に振動を提示した場合とその近傍の皮膚に振動を提示した場合を比較すると、周波数、計測部位にかかわらず鎖骨に振動を提示したほうが伝搬される振動の振幅は等しいもしくは有意に大きくなり、少なくとも小さくなることはないことが判明した。

そこで次節では、音楽コンテンツを試聴することを想定し、提案手法と従来触覚提示によく用いられる部位とで主観的な聴覚体験の影響に違いが出るかを検証する (実験 2)。

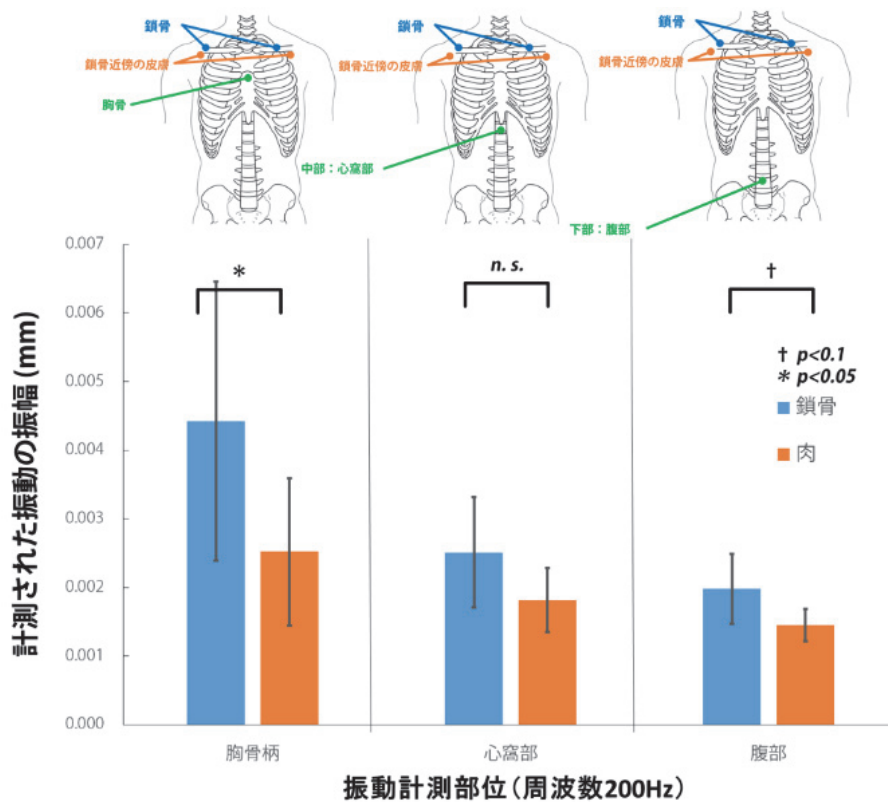


図 5-7. 実験 1 結果(提示振動 200 Hz)

## 5.5 実験 2：音楽と組み合わせた際の提案手法の評価

実験 1 の結果から、ユーザの鎖骨を介して振動提示を行うことで振動を効率よく上半身に

提示可能なことが判明した。そこで本章では提案手法を音楽と組み合わせて体験した際の聴覚体験への影響を検証した。

本節では提案手法を音楽試聴と組み合わせた際にユーザが主観的に知覚する心地よさ、振動の広がり、振動によって受ける聴覚体験の変化を評価した。また従来全身触覚提示でよく用いられる部位で同様の評価を行い、聴覚体験への影響を比較した。

### 5.5.1 実験装置

本実験では実験 1 で使用した振動提示装置に加え、音を聴覚に提示するためにデジタルノイズキャンセリング機能付きヘッドホン(QuietComfort3, BOSE)を使用した。

PC 音源出力から音楽波形をノイズキャンセリング機能付きヘッドホンとデジタルオーディオアンプを介した 2 つの振動子から振動として出力した。この構成により、振動子の振動振幅をヘッドホンの音量とは独立に調整することが可能である。

### 5.5.2 振動提示部位

本実験では実験 1 で用いた鎖骨の他に、提案手法との比較対象として臀部、頭部、手掌部を加えた計 4 箇所を振動提示部位とした。臀部は従来手法のイス型全身触覚提示装置でよく用いられる振動提示部位の一つである[11][56]。手掌部は触覚知覚の解像度が最も高い部位の一つであり、モバイル端末を把持して音楽を聞くことを想定した聴覚体験向上手法で一般的に用いられる部位である[27][28]。頭部に関しては振動提示部位としては一般的ではないが、耳との距離が近く、振動で蝸牛に音を伝える一般的な骨伝導技術[69]でよく用いられる部位であるため比較対象とした。

またこの実験では実際の使用を想定し、以下の方法で各部位に振動子を装着した。鎖骨への振動子固定には、実験 1 で用いた試作デバイスを引き続き使用した。ただし、実際の使用を想定し被験者は衣服を着用した状態で装置を装着した。(図 5-8)。臀部への振動提示は、クッションの付いた椅子の上に振動子を設置し、その上に被験者を座らせることで行った。イス型の触覚提示デバイスにおいて振動伝達を良くするために座面に硬い材質を使用することも考えられるが、ここではより一般的な環境を想定し、クッションを用いた。手掌部への刺激提示は手に振動子を把持させることで行い、頭部への振動提示は布製のゴムバンドに振動子を固定してそれを頭部に巻きつけることで行った(図 5-9)。



図 5-8. 鎖骨への振動提示の様子



図 5-9. 布製ゴムバンドを用いた頭部への振動提示の様子

### 5.5.3 提示刺激

様々な種類の音楽とともに振動を提示した際の影響をみるため、以下の3種類の異なるジャンルの音楽を提示刺激として用いた：ロック音楽(JailhouseRock, Elvis Presley), トランス音楽(Technologic, DaftPunk), クラシック音楽(新世界より, Dvorak). 実験にはこれらの曲の1フレーズ(約20秒)を切り出して使用した. 図5-10から図5-12に各提示刺激の周波数分布を示す. これらのグラフから, ロック音楽(図5-10)及びトランス音楽(図5-11)は共に100 Hz以下の低音域にピークを持ち, 特にトランス音楽は80 Hz付近に大きなピークを持つことがわかる. 一方クラシック音楽(図5-12)は他の音楽に比べて周波数分布がなめらかで, 様々な周波数の波形を含むことがわかる.

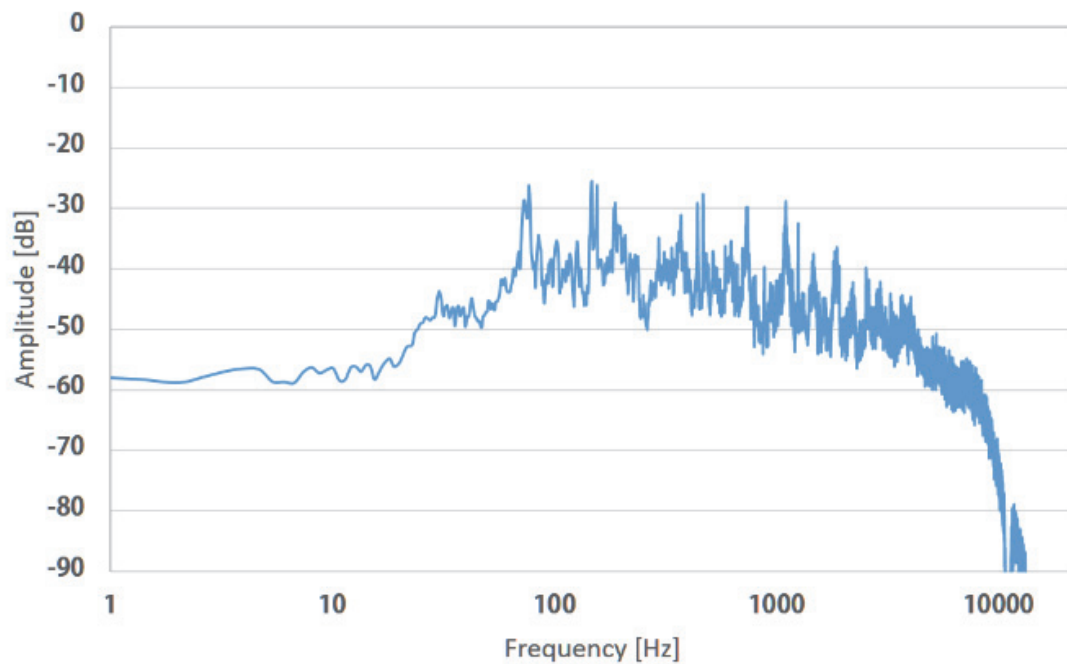


図 5-10. ロック音楽の周波数分布

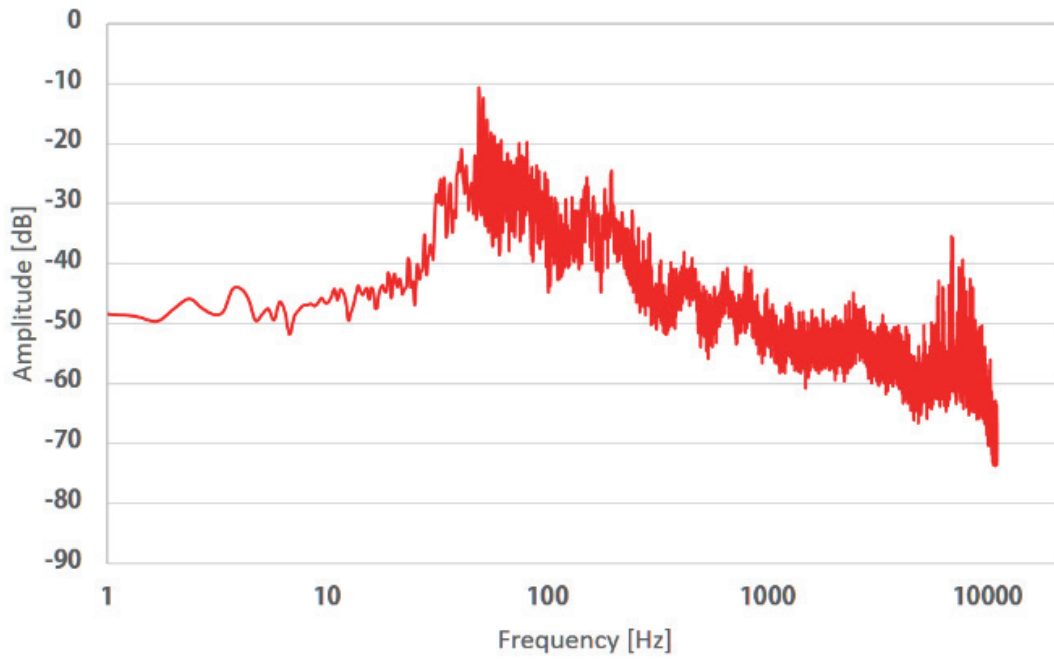


図 5-11. トランス音楽の周波数分布

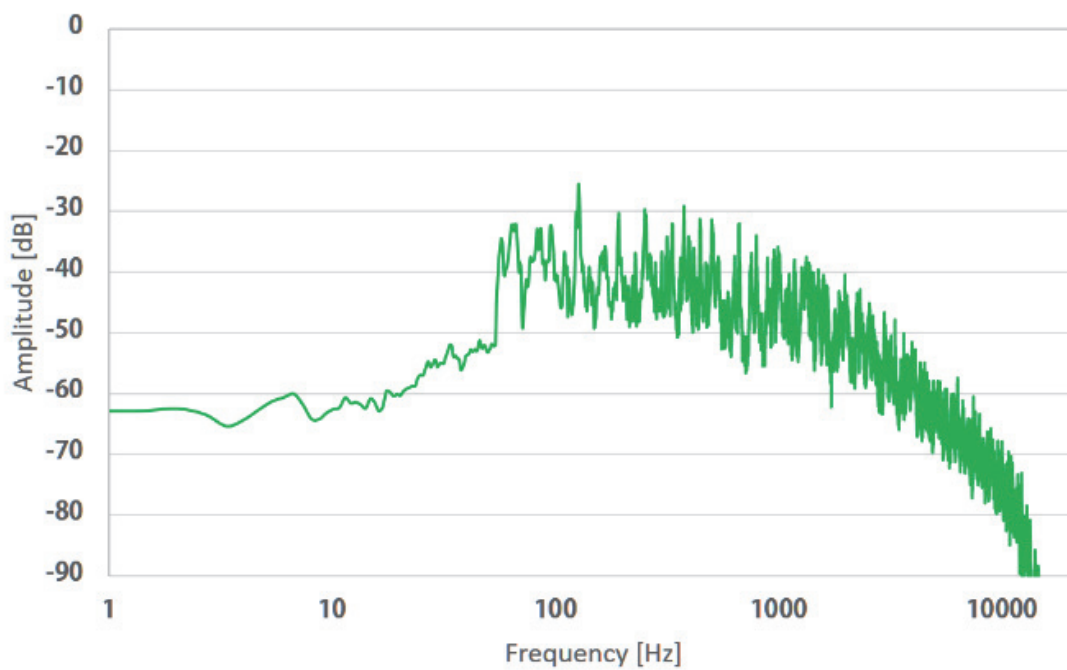


図 5-12. クラシック音楽の周波数分布

## 5.5.4 評価方法

各部位への振動提示の有無による聴覚体験の変化を検証するため、まず被験者に音のみを提示し、その後音と振動を両方提示して、音楽の印象が振動提示によってどのように変化したかを回答させた。回答には 7 段階のリッカート尺度を使用し、設問項目は以下のとおりであった。Q1. 振動は心地よく感じられたか(3 心地よい, 0 影響なし, -3 心地悪い), Q2. 音楽を全身に感じたか(6 全身に振動を感じた, 3 中程度に振動の広がりを感じた, 0 振動を局所的に感じた), Q3. 振動による聴覚体験の変化(3 好きなものに変化, 0 変化なし, -3 好みでないものに変化)。Q1.の心地よさや Q3.の好みといった設問項目は、触覚刺激を付加したコンテンツ体験の評価に共通して使用されている[27] [41]。本実験ではこれらに加えて提案手法によって身体の振動伝搬が主観的に知覚されたかを検証するため、Q2.振動の広がりを設問項目に追加した。

## 5.5.5 実験手順

実験は刺激強度調整フェーズ、音のみを提示するフェーズ、音と振動を同時に提示するフェーズの 3 つのフェーズに分けて行った。

まず刺激強度調整フェーズでは、被験者に音と振動を提示し、両方の刺激強度を各被験者にとって明瞭に知覚可能かつ不快でない強度に調整させた。音と振動の強度は独立に調整可能であり、調整に要した時間は約 10 秒程度であった。次のフェーズでは被験者に音のみを提示した。最後のフェーズでは被験者に音と振動を同時に提示し、被験者は振動による聴覚体験の変化を回答した。

これを 1 試行とし、1 被験者あたり 12 試行(3 音楽×4 振動提示部位)行った。提示する音楽の順序はランダムであり、実験には 6 名の被験者(22-24 歳, 全員男性)が参加した。

## 5.5.6 結果と考察

図 5-13, 図 5-14, 図 5-15 に設問項目ごとの実験結果を示す。縦軸は被験者が回答した 7 段階リッカート尺度のスコアを表し、横軸は提示した音楽の種類(ロック音楽, トランス音楽, クラシック音楽)及び提示部位(鎖骨, 臀部, 頭部, 手掌部)を示す。グラフ中の各箱ひげ図の上端と下端は第三及び第一四分位点を示し、赤い丸点と黄色の丸点は中央値と平均値を、エラーバーは最大値と最小値を示す。音楽の種類及び提示部位による差を観察するため、設問項目ごとにフリードマンの検定及びシェッフェ法を用いて多重比較を行った。

### ● Q1. 振動の心地よさ

最初の設問項目 Q1. 振動は心地よく感じられたか(3 心地よい, 0 影響なし, -3 心地悪い)の実験結果(図 5-13)より、まずロック音楽とトランス音楽において、頭部を除く他の 3 つの振動提示部位に振動を提示した場合、振動無しの条件と比較して評価が向上した。このことから、少なくとも鎖骨への振動提示が体験の心地よさを阻害しないことが確認できた。一方頭部に振動を提示した場合、鎖骨や手掌部への提示と比較して評価に有意な低下が見られた。(ロック音楽 鎖骨:  $p<0.1$ , 手掌部:  $p<0.05$ , トランス音楽 鎖骨:  $p<0.01$ , トランス音楽:  $p<0.05$ ). クラシック音楽では提示部位間で有意差は生じなかった。

また、提示部位ごとの結果に着目すると、鎖骨に振動を提示した場合、ロック, クラシックに対してトランス音楽における評価が有意に向上した(ロック:  $p<0.1$ , クラシック  $p<0.05$ ). トランス音楽は他の 2 曲に比べて触覚的に知覚しやすい低周波成分を多く含んでいるため、

それが心地よさの評価向上につながったと考えられる。事実、手掌部に振動を提示する場合でも、最も低周波成分の少ないクラシック音楽と最も低周波成分を含むトランス音楽の間に有意差が生じた。

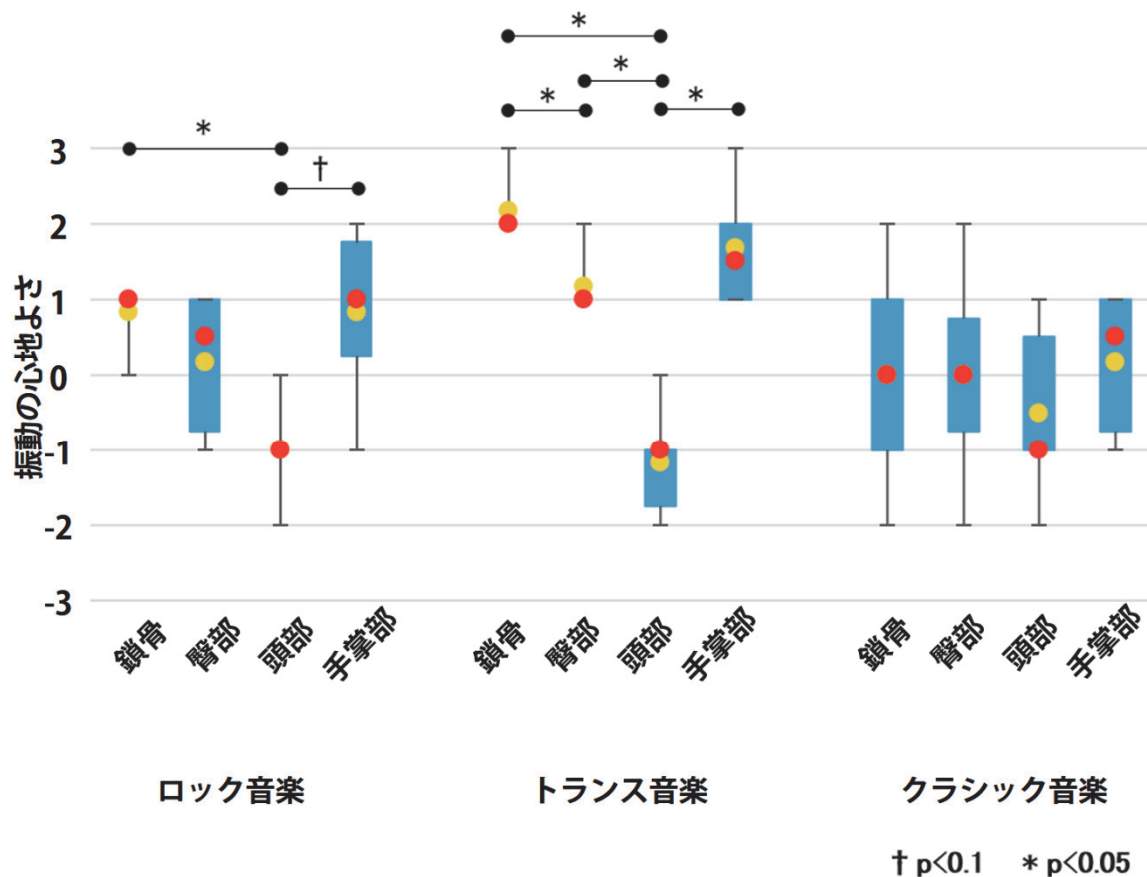


図 5-13. 振動の心地よさに関する実験結果

● Q2. 振動の広がり

二つ目の設問項目 Q2. 音楽を全身に感じたか(6 全身に振動を感じた, 3 中程度に振動の広がりを感じた, 0 振動を局所的に感じた)の実験結果より, トランス音楽において鎖骨に振動提示した場合に, 頭部や手掌部の場合と比較して主観的な振動の広がり有意に向上した ( $p < 0.05$ ) (図 5-14). また, 設問 1 と同じく, 鎖骨に着目した場合, クラシック音楽に対して低周波成分を多く含むトランス音楽の評価が向上した ( $p < 0.1$ ).

また設問 1 の結果とは逆に, トランス音楽の次に知覚しやすい低周波を多く含むロック音楽においては提示部位による差は見られず, 知覚の容易な周波数成分が最も少ないクラシック音楽の場合に, 鎖骨に対して頭部, 手掌部への振動提示の間で評価の差が見られた ( $p < 0.1$ ).

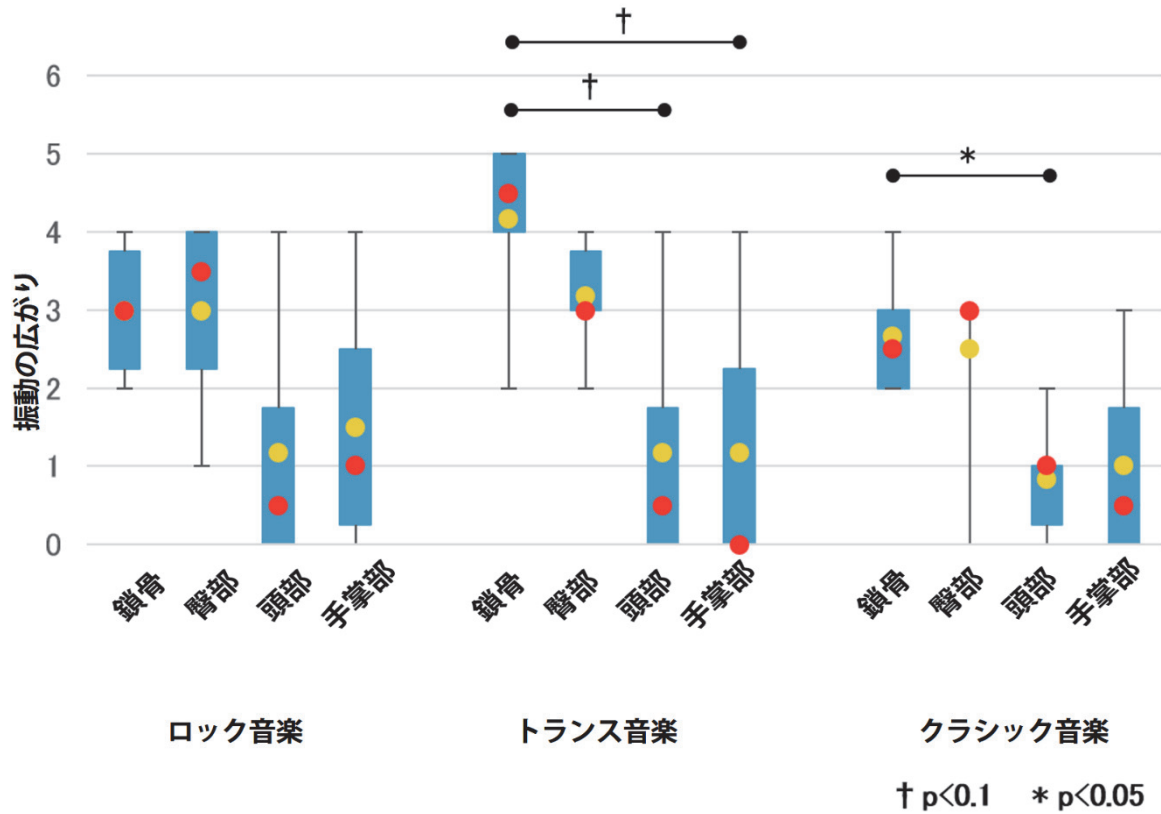


図 5-14. 振動の広がりに関する実験結果

● Q3. 聴覚体験の変化

最後の設問項目 Q3. 振動による聴覚体験の変化(3 好きなものに変化, 0 変化なし, -3 好んでないものに変化)では, 鎖骨に関して設問 1 の結果と同様の傾向を示し, ロック, トランス音楽に対して頭部との間に有意差を生じた(ロック  $p<0.1$ , トランス  $p<0.01$ ). またクラシック音楽に対して同様に手掌部と頭部との間で評価の差を生じた( $p<0.01$ )(図 5-15).



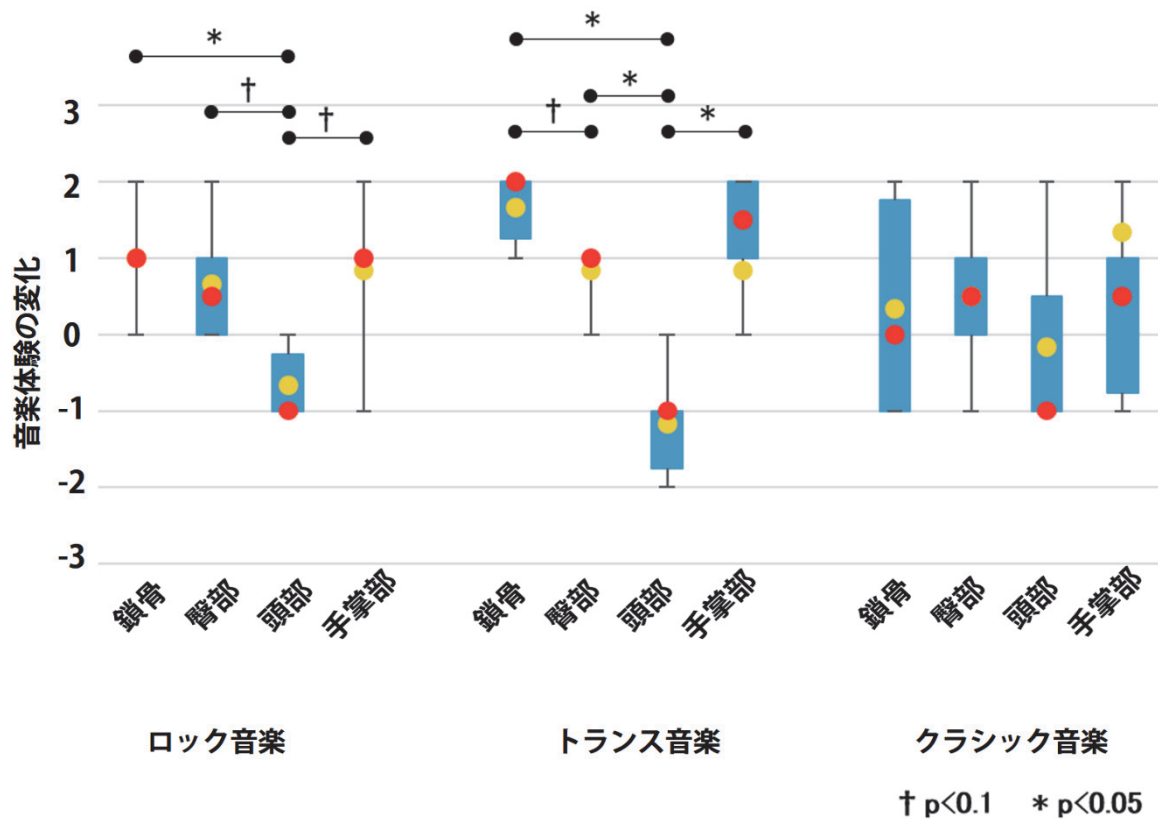


図 5-15. 聴覚体験の変化に関する実験結果

設問 1 から 3 までの実験結果をまとめると、臀部、頭部、手掌部への振動刺激と、鎖骨に振動を提示した場合とを比較した場合、鎖骨への振動提示で評価が低下することではなく、同等もしくは有意な向上が認められた。すなわち提示振動がより心地よく、全身に広がって感じられ、聴覚体験がより好みなものに変化したと感じられることが判明した。また楽曲間で評価を比較すると、低周波を最も多く含むトランス音楽における評価が高くなり、またその傾向は鎖骨への振動提示時に最も顕著に現れた。これらのことから、鎖骨に振動を提示することで、振動が主観的にも身体広範に知覚可能であり、またそれが聴覚体験の向上に寄与し、さらにその効果は触覚的に知覚しやすい低周波成分を多く含む楽曲が提示された際に最も高くなることが示された。

## 5.6 実験 3：分周刺激を用いた鎖骨への振動提示

本章ではこれまでに、ユーザの鎖骨に振動を提示し、骨格を介して振動を上半身に伝搬させる手法の提案を行った。一方、第 4 章において触覚で知覚可能な音楽の周波数範囲を広げることを目的として分周刺激を用いた触聴覚変換手法を提案している。本節ではこれらの手法を組み合わせてユーザに提示し、分周刺激が鎖骨への振動提示においても有用であるかを検証する。曲に含まれる周波数分布が異なる音楽を振動とともに被験者の鎖骨に提示し、分周手法によって知覚可能な周波数範囲を広げることで、被験者が知覚する主観的な振動の広がりを保ちつつ、音楽に対する被験者の主観的な評価がさらに向上するか検証した。

### 5.6.1 実験装置, 条件

実験には 5.5 節で用いたものと同様の実験装置を使用した。鎖骨より提示する振動波形については第 4 章において検討した聴触覚変換手法のうち、高音域を多く含む曲に対して CTL 条件と比較して評価の高かった 1OT 条件(音楽波形に対して 1 オクターブ周波数を下げた触覚刺激)と 2OT 条件(音楽波形に対して 2 オクターブ周波数を下げた触覚刺激)を採用し、音楽波形をそのまま触覚刺激として提示する CTL 条件と比較を行った。

含まれる音域の異なる音楽において鎖骨への分周刺激提示の影響を観察するため、以下の 2 種類の音楽を提示刺激として用いた：高周波を比較的多く含む音楽（ダンス音楽：Virginia set, Modern Irish Project2010）、低周波を比較的多く含む音楽（ポップス：Danza Kuduro, Danza Kuduro）。実験にはこれらの曲を約 10 秒に切り出して使用した。図 5-16 および図 5-17 に 2 つの曲の周波数分布を示す。音楽の選定基準としては 4.6 節で述べたように、クラシック音楽などの曲調が穏やかな曲ではなく、ポップスやダンス音楽といったテンポがよく、被験者が馴染みやすい曲の中から、含まれる周波数分布が可能な限り離れているものを選んだ。図 5-16 に示したようにダンス音楽では含まれる周波数の下限が 100Hz 程度であるのに対し、図 5-17 は 100Hz 以下の周波数が含まれていることがわかる。

なお第 4 章の実験では、元々触覚的に知覚できない程度の高周波が中心の音楽（オルゴール音楽）の際に、1OT 条件、2OT 条件を用いると触覚的に知覚でき、かつ聴覚体験が向上するという結果を得た。しかし今回予備的にオルゴール音楽を用いたところ、多くの被験者から強い違和感を生じるという感想を得た。これは、鎖骨による触覚提示が全身を包み込むような音楽体験をもたらすのに対して、オルゴールのような音楽は元々全身を包み込むという体験とは乖離があり、この乖離が強い違和感につながったと考えられる。逆に言えば、指先と鎖骨では、各アルゴリズムの果たす役割が異なる可能性があり、特に重低音が増強されると期待される 1OT、2OT 条件で音楽体験が増強するのではないかと考えた。このため今回は上記のように一般的な 2 種類の音楽を用い、1OT 条件、2OT 条件によって重低音が増強された時に音楽体験が向上するという仮説を検証した。

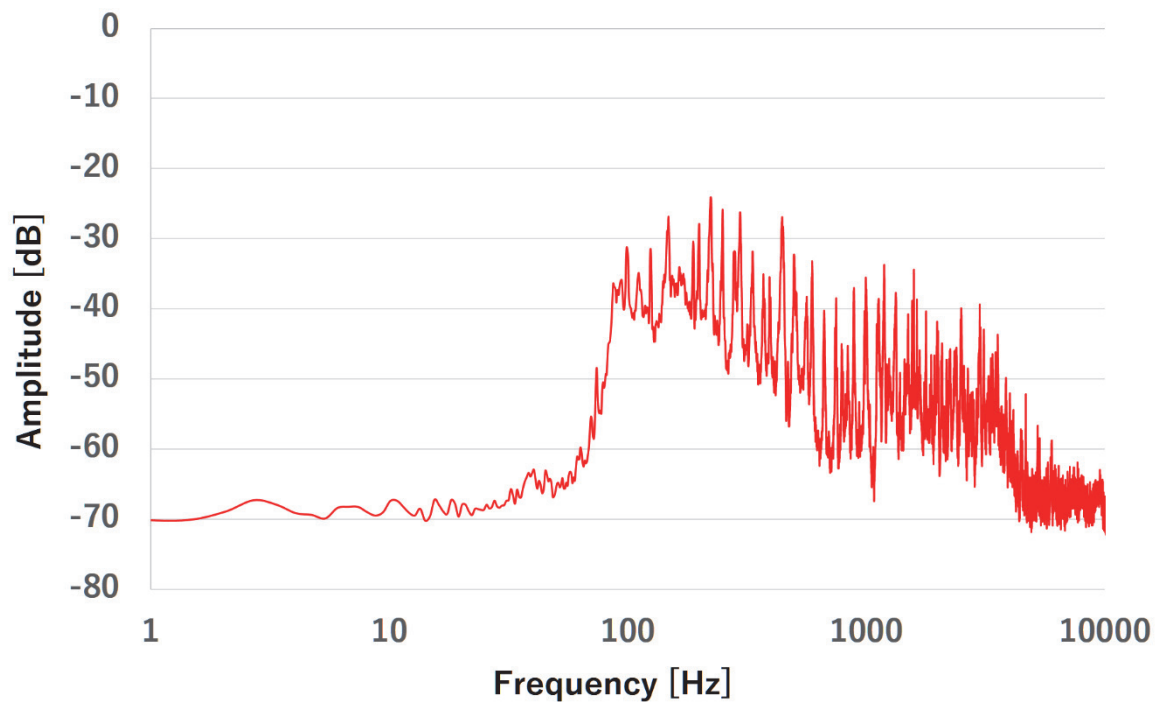


図 5-16. 高周波を比較的多く含む音楽の周波数分布

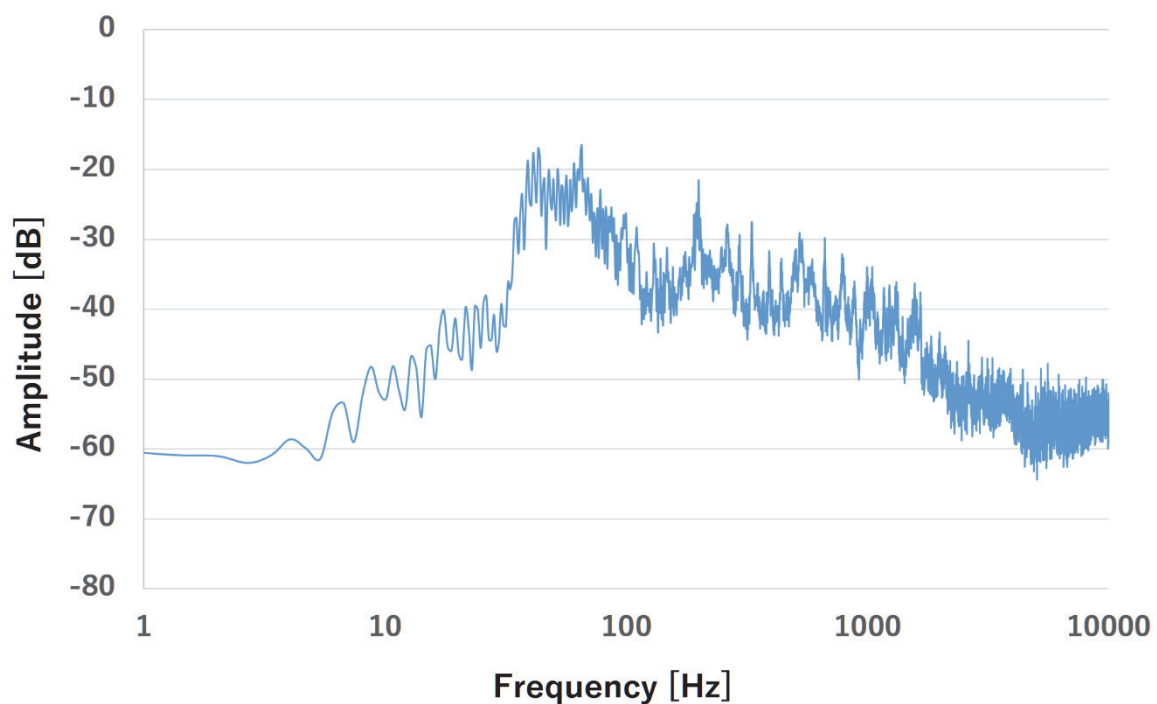


図 5-17. 低周波を比較的多く含む音楽の周波数分布

この2種類の音楽を聴覚刺激とし、(1)音楽波形をそのまま触覚刺激として提示する CTL 条件、音楽波形を1オクターブ下げて触覚刺激として提示する 1OT 条件、音楽波形を2オクターブ下げて触覚刺激として提示する 2OT 条件をそれぞれの音源と組み合わせて実験に使用し

た。

## 5.6.2 評価手法

振動提示の違いによる聴覚体験の変化を検証するため、まず被験者に聴覚刺激のみを提示し、その後聴覚刺激と振動刺激を両方提示して、聴覚体験が振動提示によってどのように変化したかを回答させた。振動提示によって被験者が音楽を全身に知覚したか、没入できたか、聴覚体験が向上したかを確認するため、設問項目はこれまでの実験で使用した項目を組み合わせで以下の通りとし、7段階のリッカート尺度を用いて回答させた。Q1. 音と振動の組み合わせによって音楽を全身に感じないー感じた。Q2. 音と振動の組み合わせによって音楽に没入出来なかったー出来た。Q3. 音と振動の組み合わせは不自然であったー自然であった。Q4. 音と振動の組み合わせは心地良くなかったー心地良い。Q5. 音と振動の組み合わせによって楽しくならなかったーなった。各項目において聴覚刺激のみを提示した場合の評価を各設問の基準(7段階リッカート尺度の4)とし、触覚刺激による聴覚体験の変化を回答させた。

## 5.6.3 実験手順

実験を開始する前に、被験者に実験で使用する音楽を提示し、聴覚及び触覚強度が被験者にとって明瞭に知覚可能かつ不快でない事を確認した。実験開始後、まず被験者に聴覚刺激のみを提示し、この時被験者が感じた聴覚体験を各評価の基準(7段階リッカート尺度の4)とさせた。次に被験者に音と振動を同時に提示し、被験者は振動による聴覚体験の変化を回答した。聴覚刺激の強度は各試行とも同一であったが、触覚刺激に関しては分周手法によって強度が変化するため、触覚刺激の強度は被験者の必要に応じて自由に調節させた。これを1試行とし、1被験者あたり6試行(2音楽×3振動提示手法)行った。触覚提示手法の順番はランダムとし、提示音楽の順番は半数の被験者で逆の順序とした。実験には16名の被験者(16-22歳、男性13名、女性3名)が参加し、うち13名は研究室公開中に実験に参加したナイーブ被験者であった。

## 5.6.4 実験結果

図5-18から図5-22に設問ごとの実験結果を示す。各グラフの縦軸は7段階リッカート尺度を、横軸は音楽及び振動提示手法を示す(左からダンス音楽CTL条件、ダンス音楽10T条件、ダンス音楽20T条件、ポップス音楽CTL条件、ポップス音楽10T条件、ポップス音楽20T条件)。箱ひげ図の上端、中央、下端はそれぞれ第3四分位点、中央値、第1四分位点を表し、箱内部のバツ印は平均値を示す。エラーバーは最大値と最小値を示し、箱外部のマル印は外れ値を示す。

得られた結果が聴覚刺激のみを提示した基準と比較して全て向上していることから、音楽、振動提示手法の違いによらず、鎖骨より振動を提示することで、音楽への没入感(Q2)、心地よさ(Q4)、楽しさ(Q5)といった聴覚体験が向上することが明らかになった。また音楽を身体広範に感じられたか(Q1)、振動と音楽の組み合わせは自然であったか(Q3)に関しても評価が向上した。

一方、振動提示手法の違いによって主観的な聴覚体験に変化が生じているかを分析するため、各設問で得られた結果から外れ値を除いたのち音楽ごとに多重比較(Steel-dwass法)をおこなったが、振動提示手法の違いによる有意差は生じなかった。

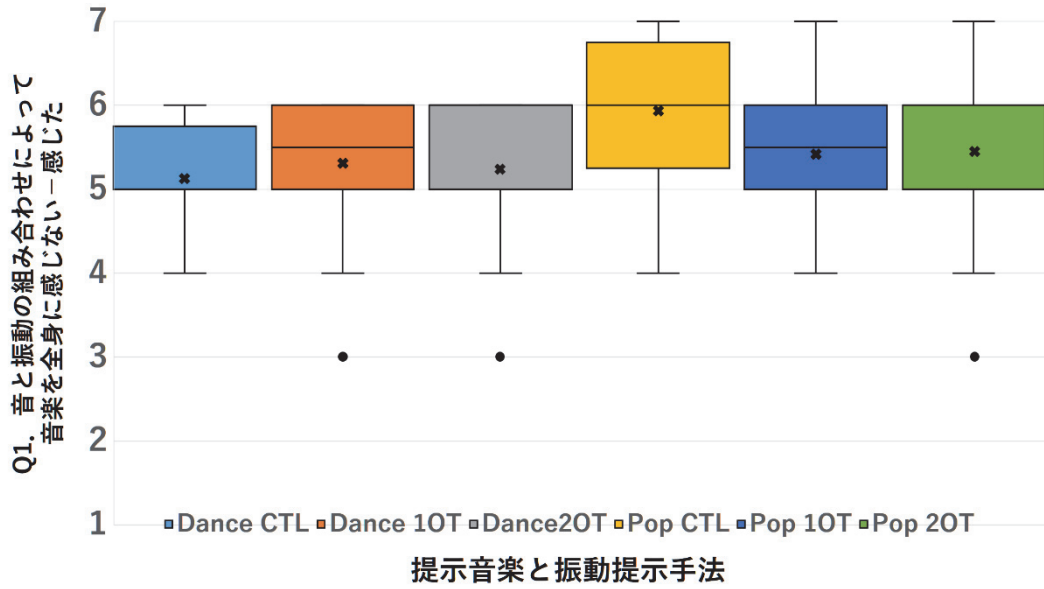


図 5-18. 設問 1 における回答結果

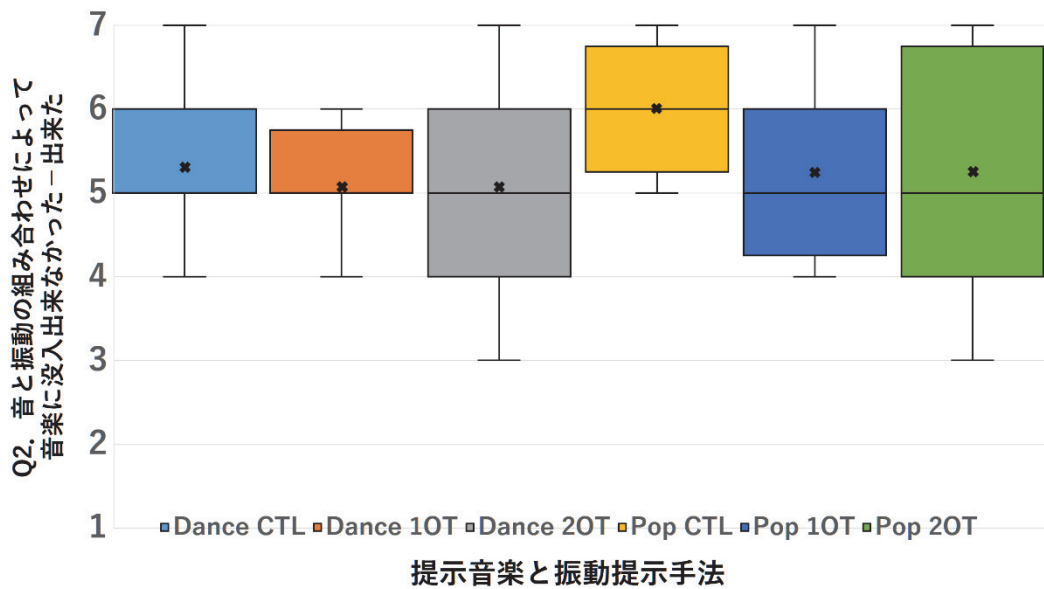


図 5-19. 設問 2 における回答結果

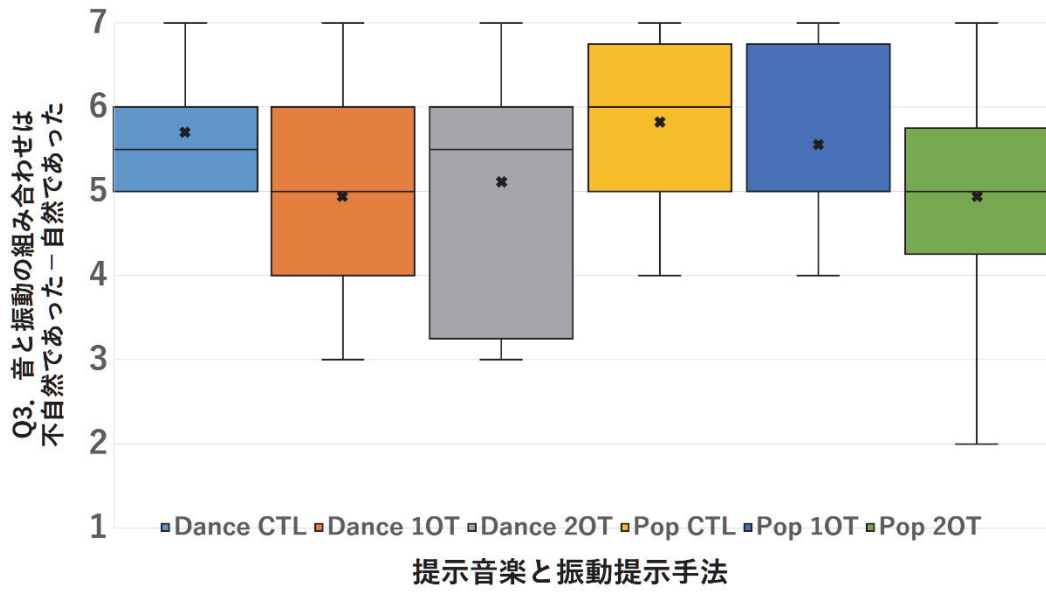


図 5-20. 設問 3 における回答結果

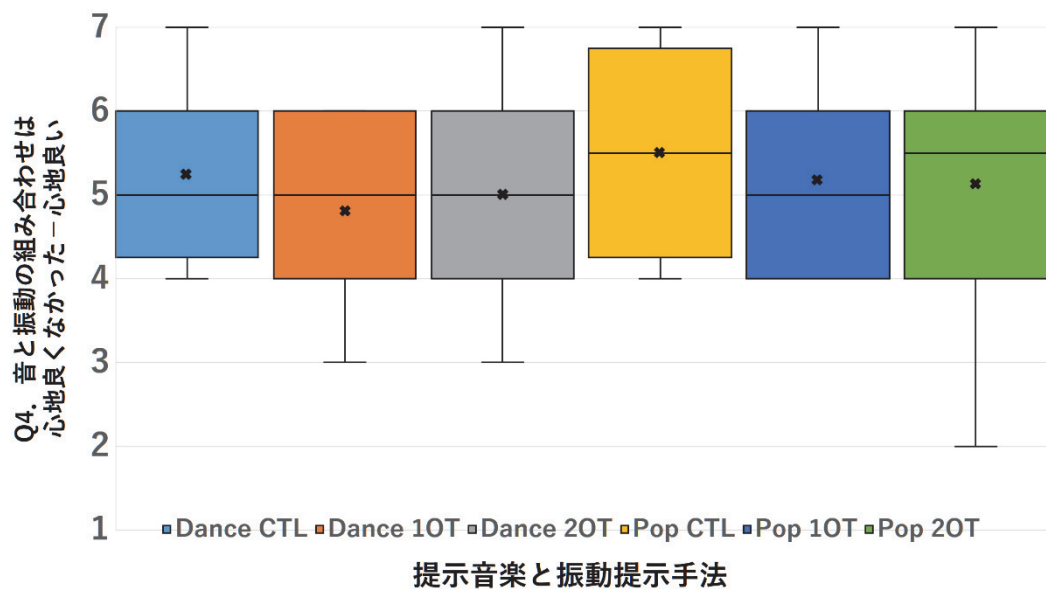


図 5-21. 設問 4 における回答結果

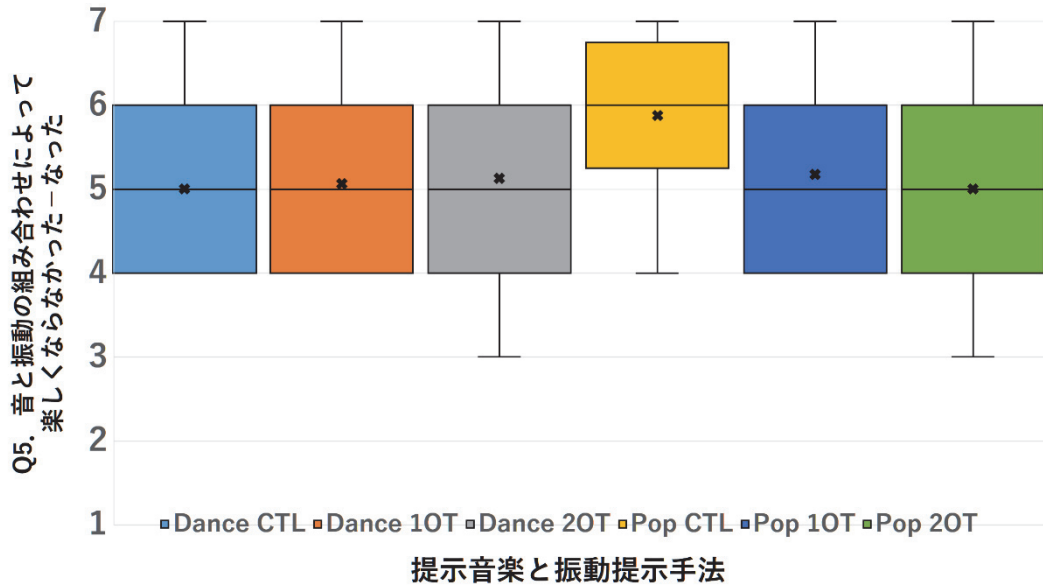


図 5-22. 設問 5 における回答結果

### 5.6.5 考察

すべての実験条件で、触覚を提示しない条件と比べてスコアが高くなっており、鎖骨による触覚提示は音楽体験の向上に役立っているといえる。

しかし一方で、音楽波形をそのまま触覚刺激として提示する CTL 条件、音楽波形を 1 オクターブ下げて触覚刺激として提示する 10T 条件、音楽波形を 2 オクターブ下げて触覚刺激として提示する 20T 条件の間に有意な差が生じなかった。

これは第 4 章の結果である、「クラシック音楽、ジャズ音楽のように元々触覚で知覚可能な周波数を含む音楽では分周手法の効果は薄い」という結論と一致している。しかし一方で、今回の提示部位は指先ではなく上半身であり、音楽体験においていわゆる重低音を感じることの多い場所と考えられ、実際に多くの全身への触覚提示を行っている関連研究[35]でも低周波を増強して提示することで音楽体験の向上を実現しているため、分周手法の効果は薄かった結果には他の理由もあると考えられる。

考えられる要因の一つとして、今回の鎖骨を用いた振動伝搬の手法が、低周波を十分伝達できていなかったことが挙げられる。今回使用したポップス音楽の周波数分布の下限は約 100Hz、ダンス音楽では約 150Hz であり、これは 2.1.2 項で述べたヒトの触覚受容器のうち、低周波振動を検知する RA-I 受容器(15–100Hz 程度で振動を検知)と高周波振動を検知する RA-II 受容器(60–800Hz 程度で振動を検知)の検知周波数領域の境界に近い。一方 10T 条件(周波数分布のピークがポップス音楽: 約 50Hz, ダンス音楽: 約 75Hz)、20T 条件(周波数分布のピークがポップス音楽: 約 25Hz, ダンス音楽: 約 32.5Hz)では低周波振動を検知する RA-I 受容器の寄与が大きくなると考えられる(図 5-23)。

RA-II 受容器と RA-I 受容器は検知可能な周波数範囲の他に、検知可能振動振幅に大きな違いを有する。高周波の振動を検知する RA-II 受容器が  $0.1\mu\text{m}$  以下の非常に微小な振動振幅(250Hz)を検出できるのに対し、低周波の振動を検知する RA-I 受容器の場合最低でも  $5\mu\text{m}$  程度の振幅(30Hz)を必要とする[64]。3.1 節で述べた Wilson ら[55]も、聴覚マスク下における振動刺激を用いた微小音の検出能力が活動触覚受容器の切り替わりによって変化することを

報告している。

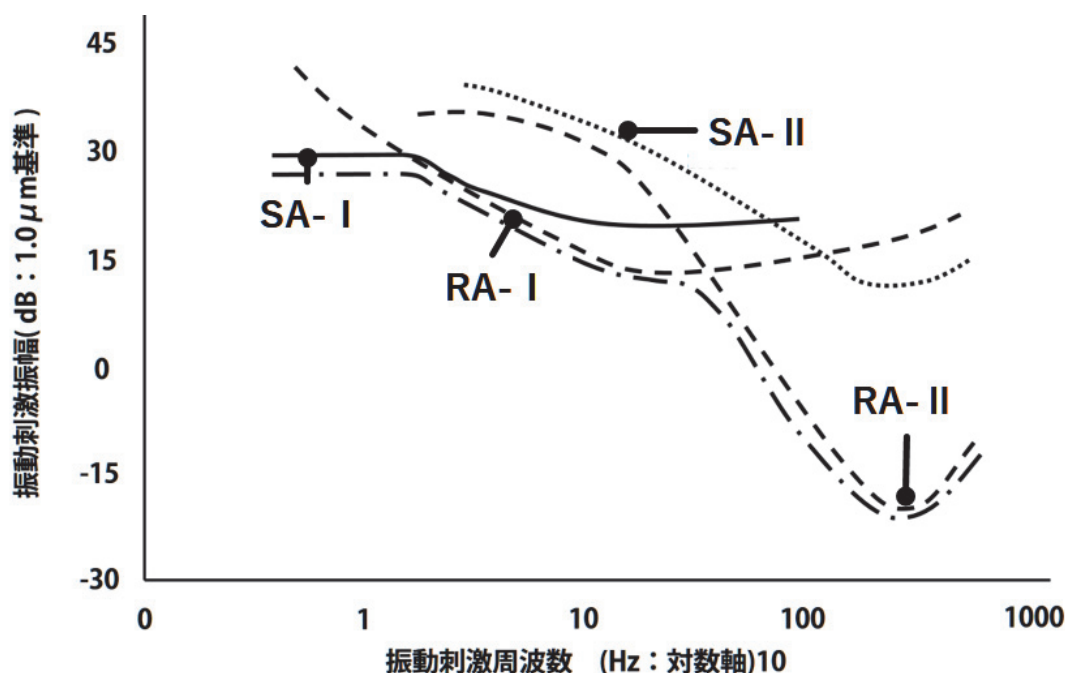


図 5-23. [再掲]機械受容器ごとの振動閾検出曲線([64]を改変)  
最も下方の曲線がヒトの振動感応曲線となる

これらのことから振動条件による活動触覚受容器の切り替わりが結果に影響したのではないかという仮説を立て、5.4 節で用いた実験セットアップを使用し、2 つの触覚受容器が振動を検知する周波数範囲の振動を鎖骨に提示し、その振動がどのように体表に伝搬しているのかを検証する実験を行った。

### 5.6.6 鎖骨への振動提示による周波数ごとの振動伝搬効率検証

本実験では鎖骨から振動を提示した場合に体表に伝搬する振動を様々な周波数を用いて測定した。実験に使用したセットアップは 5.4 節と同じ 2 つの直動型振動子(Vp210, Acouve Lab), デジタルオーディオアンプ(M50, MUSE), 3D プリンタ成形のマウンタ(ABS 樹脂製)を用い、マウンタ両端取り付けられた振動子から振動を提示し、体表に伝搬した振動をレーザ変位計(レーザヘッド: LK-H050, コントローラ: LK-G5000, KEYENCE)を使用して計測した(サンプリング周波数: 5 kHz, 最小検出変位:  $0.01 \mu\text{m}$ )。

#### ● 提示波形

周波数を変化させた場合の伝搬振動の変化を見るため、前回用いた 100 Hz 及び 200 Hz に加え、50Hz, 400Hz の正弦波振動を提示刺激として用いた。各波形は PC の音声出力端子から出力され、デジタルオーディオアンプを介して振動子より提示した。提示する振動の強度は印加電圧振幅で統制し、本セットアップで提示可能な最大の電圧 10 V を印加した。

#### ● 振動提示・計測部位

提示される周波数に応じて 5.4 節と計測結果が異なる可能性を考慮し、本実験においても振



動を鎖骨に振動提示した場合と皮膚に提示した場合の振動伝搬を計測した。同じく体表を伝搬した振動の計測位置についても正中線にそって上半身の3箇所（胸骨，心窩部，腹部）を振動計測部位とした。

### ● 手順

手順についても5.4節と同様であった。被験者が衣服を着用していると体表の伝搬振動計測が不可能なため、上半身裸、直立状態で試作した振動提示装置を装着した。

試行開始と同時に50, 100, 200, 400Hzの振動を鎖骨もしくは鎖骨近傍の皮膚より提示し、振動計測部位（胸骨，心窩部，腹部）における伝搬振動をレーザ変位計で計測した。各部位における計測時間は約3秒であり、計測中被験者には通常通り一定の周期で呼吸するよう指示した。計測時のノイズを極力排除するため、計測中に被験者が大きくふらついたり、咳，くしゃみ，発言などをした場合は計測をやり直した。実験には2名の被験者(21-22歳，男性)が参加した。被験者1名あたりの試行数は2振動提示部位×3振動計測部位×4振動条件の24試行，所要時間は約20分であった。

### ● 結果

得られた計測値から伝搬された振動を抽出するため次の処理を行った。まず各試行の計測値に対して平滑化処理を行い，被験者の呼吸や重心動揺に伴う変位を除去した。次に平滑化処理を行ったデータから，提示振動周波数の波形を連続して10周期分取り出し，各周期で最大値と最小値を求めた。その後各周期の「最大値-最小値」を振動振幅とし，10周期の平均値をその試行における計測結果とした。

図5-24から図5-27にそれぞれ50, 100, 200, 400Hzの振動を提示した場合の計測結果を示す。縦軸は振動振幅を表し，横軸は振動提示部位と振動計測部位を示す。エラーバーは被験者間の標準偏差を示す。

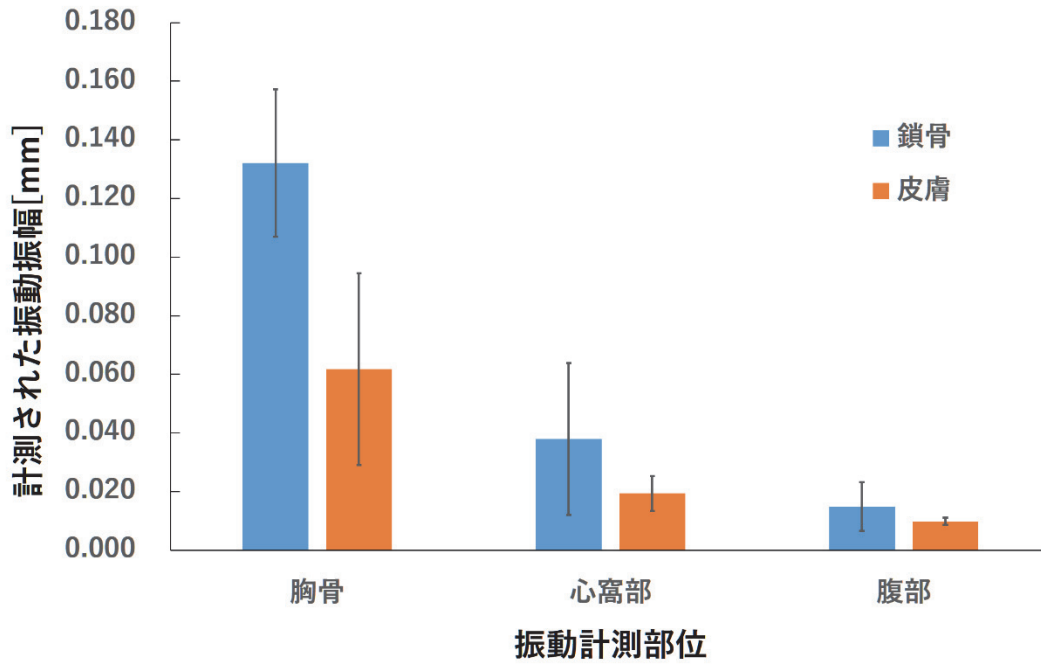


図 5-24. 50Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬

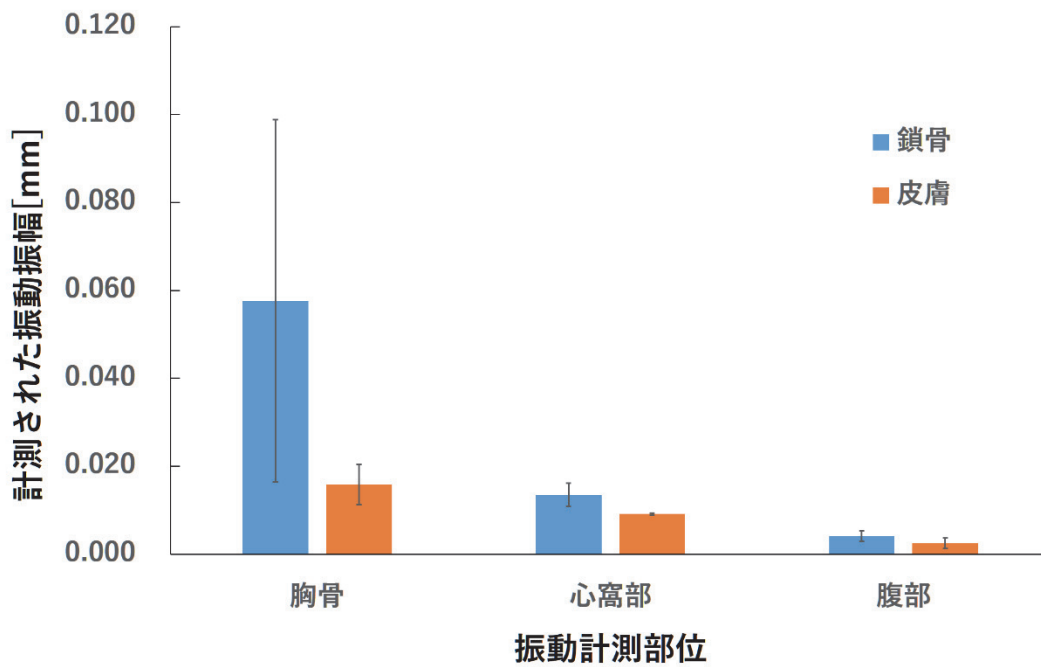


図 5-25. 100Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬

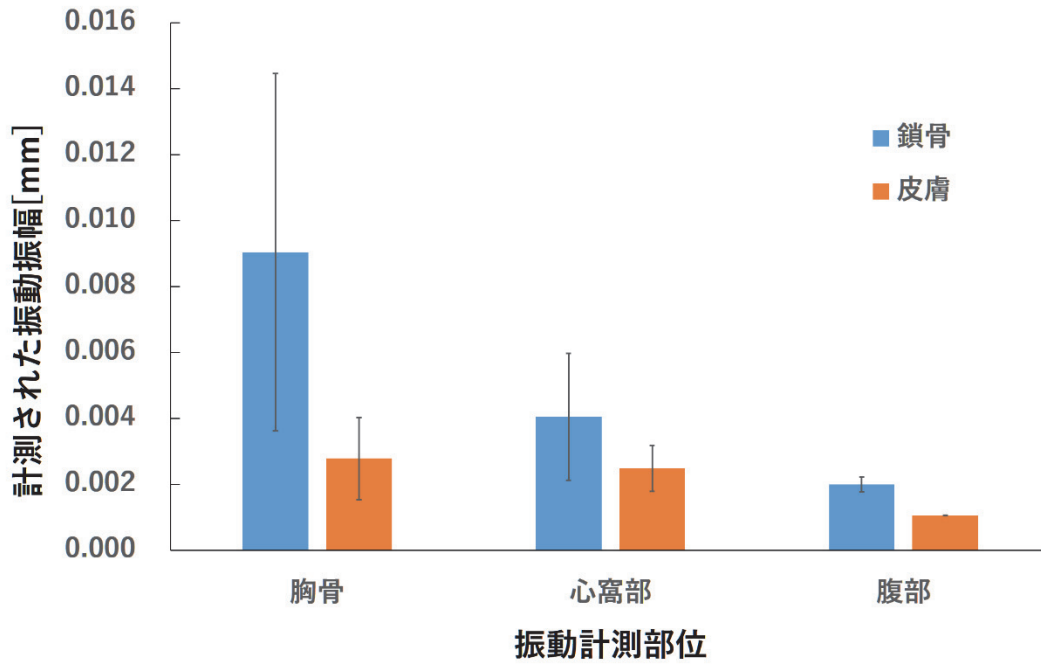


図 5-26. 200 Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬

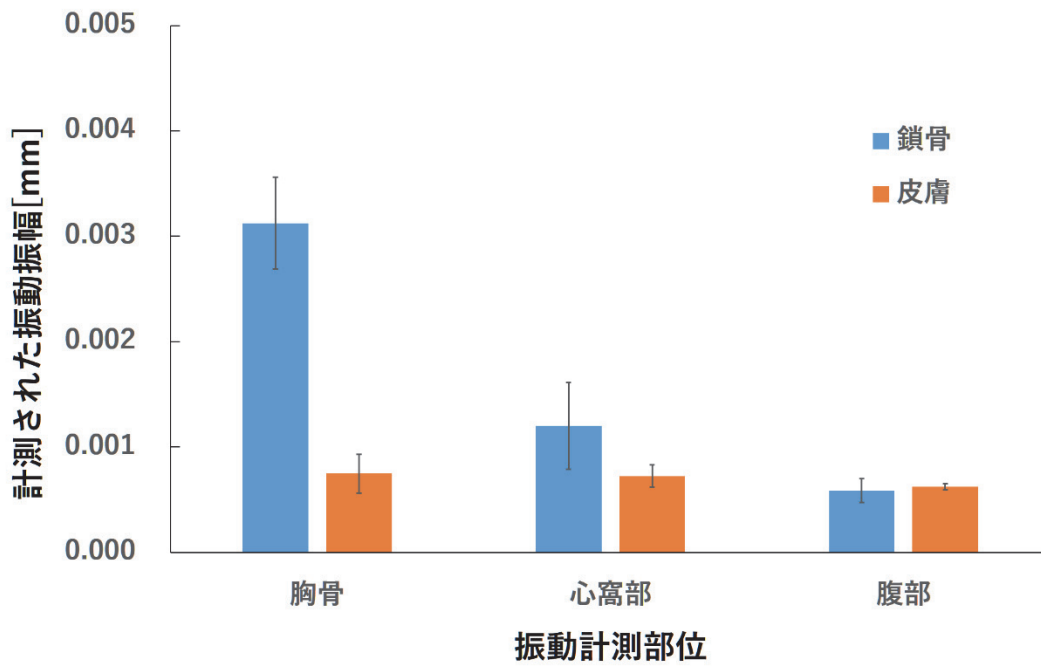


図 5-27. 400 Hz 正弦波振動を提示した場合の振動の体表伝搬

## 5.6.7 考察

実験結果より、まず鎖骨に振動を提示した場合とその近傍の皮膚に振動を提示した場合を比較すると、周波数、計測部位にかかわらず鎖骨に振動を提示したほうが伝搬される振動の振幅は等しいもしくは大きくなり、少なくとも小さくはないという、実験 1 と同様の結果をすべての周波数帯域において得た。以下では鎖骨に振動を提示した場合についての周波数帯域による違いを見る。

### ● 鎖骨振動提示時に RA-II 受容器が活動する周波数における体表伝搬振幅

提示振動周波数が 100Hz(図 5-25)、200Hz(図 5-26)、400Hz(図 5-27)における結果より、特に RA-II 受容器の共振周波数に近い 200Hz では振動の減衰が少なく、腹部においても  $2\mu\text{m}$  程度の強い振動を得た。これは RA-II 受容器が振動を検出するのに必要な振幅閾値の約  $0.1\mu\text{m}$  を十分上回っていた。400Hz においても振幅は約  $0.6\mu\text{m}$  となり閾値を上回っていた。特筆すべきは振動の減衰比であり、200Hz においては鎖骨付近での振動振幅と腹部の振動振幅の比は 4:1 程度であった。これは皮膚上の振動伝搬特性が 200Hz 付近でピークを持つという先行研究とも符合している[50]。(表 5-1)。

### ● 鎖骨振動提示時に RA-I 受容器が活動する周波数における体表伝搬振幅

一方、RA-I 受容器のみが活動する 50Hz(図 5-24)における伝搬振動振幅を見ると、振動提示部位から最も近い胸骨及び 50Hz 提示時の心窩部では閾値を上回る振幅があるものの、他の条件では閾値程度あるいはそれ以下の振幅にとどまっており、特に腹部における計測結果では閾値を下回っていた(表 5-1)。

表 5-1. RA-I 受容器及び RA-II 受容器の刺激応答特性

	RA-I 受容器	RA-II 受容器
応答周波数範囲	15-100Hz	60-800Hz
最小振幅検出閾値	5 $\mu\text{m}$ (30Hz)	0.1 $\mu\text{m}$ (250Hz)

これらの結果より、分周手法を用いて鎖骨から振動を提示した場合、10T、20T 条件では 100Hz 以下の低い周波数成分が提示されたものの、伝搬される振動振幅としては服を着ず、本装置で提示可能な最大振幅を提示する理想的な状態でも閾値と同等もしくは小さく、検知が難しかったと考えられる。一方高周波を知覚する RA-II 受容器は 100Hz-400Hz 付近では  $0.5\mu\text{m}$  以下の振動振幅を検知可能である。そのため、伝搬された振動は RA-II 受容器でのみ知覚されていた可能性が高い。今回の実験では比較的高周波を多く含むダンス音楽(最小周波数ピークが 150Hz)を分周手法によって振動提示の周波数を引き下げ、身体広範に低周波振動を伝搬させることを試みた。しかし分周手法によって生成された低周波振動は低周波の振動を知覚する RA-I 受容器の閾値を下回っており、このことが伝搬振動による身体広範の聴覚体験を評価する今回の音楽評価実験では手法間に差を生じなかった原因と考えられる。

## 5.7 本章のまとめ

本章では、小型、軽量でユーザ拘束性が低く、一般家庭やモバイル環境でも使用可能な全身触覚提示装置の開発を目的とした。本稿ではユーザの鎖骨に振動を提示し、骨格を介して振動

を上半身に伝搬させる手法の提案と、心理物理実験による主観的な聴覚体験への影響の検証を行った。

まず提案手法である鎖骨への振動提示と従来手法でよく用いられる皮膚への振動提示による物理的な振動伝搬を計測し、骨への振動提示が身体に振動を効率よく伝搬可能であることを確認した(実験 1)。

次に実際の音楽とともに振動を提示した際の振動の主観的な心地よさ、広がり、聴覚体験への影響を心理物理実験で検証した(実験 2)。実験 1, 2 を通じて、鎖骨への振動提示は従来行われてきた皮膚への振動提示と比較し、物理的にも主観的にも上半身のより広い範囲に広がり、その結果提示振動を有意に心地よく、聴覚体験をより好みなものへと向上させることが判明した。以上より本手法は聴覚体験における「音に伴った振動」を物理的、主観的に再現し、聴覚体験を向上するという目的を果たせたといえる。

その後、本章で述べた鎖骨への振動提示手法と第 4 章で述べた分周刺激を用いた聴覚変換手法とを組み合わせることを検討した。分周手法によって触知覚可能な周波数範囲を広げ、その振動を被験者の鎖骨に提示することで、被験者が知覚する主観的な振動の広がりを保ちつつ、音楽に対する被験者の主観的な評価が向上するのかを検証した(実験 3)。実験 2 の結果と同様、分周刺激を用いた場合も聴覚単体と比較して主観的な聴覚体験の評価が向上した一方、振動提示条件の違い(CTL 条件, 1OT 条件, 2OT 条件)による主観的な聴覚体験への有意差は生じなかった。

この結果自体は第 4 章の結果とも符合するものである。しかしながら、先行研究の多くが全身に低周波振動を伝えることで音楽体験を向上させていたこと、第 4 章の実験は手掌部における実験であることから、重低音が増強されると期待される 1OT, 2OT 条件で評価が向上しなかった理由は必ずしも第 4 章の結果のみからは説明出来ないと考えられた。この理由を検証するため、実験に用いた音楽の周波数分布とヒト触覚の周波数特性を照らし合わせたところ、CTL 条件と分周手法条件では周波数の違いにより主に活動するヒト触覚受容器が切り替わり、その受容器の感度の差によって伝搬振動を知覚できなかったのではないかという仮説が生じた。この仮説を検証するため、実験 1 と同様のセットアップでより幅広い周波数での振動伝搬の計測実験を行った。その結果、伝搬振動は高周波を検知する RA-II 受容器では十分知覚可能な振幅を持っていた一方、分周手法によって生成されると考えられる低周波振動は低周波の振動を知覚する RA-I 受容器の閾値を大きく下回っていた。このことが伝搬振動による身体広範の聴覚体験を評価する今回の音楽評価実験では手法間に差を生じなかったと原因と考えられる。この結果は現在のところ鎖骨を介した本手法の限界(重低音領域の振動は十分に提示できない)を示すものであるが、同時に必ずしも低い周波数の振動を提示しなくても音楽体験自体は本デバイスで向上することは示すことが出来たといえる。

また 5.6 節の実験 3 の予備的な検討において、オルゴール音楽を用いた場合に全身に提示されることが違和感を生じたという報告は、聴覚体験自体のもつ文脈に合った触覚提示を行う必要性を強く示唆している。4 章で述べたように、オルゴール音楽は本来触覚で知覚される周波数成分を多くは含まず、その自然な状況を「再現」という観点からは、触覚での提示を行わないという考え方もありうる。しかし実際には、4 章では手掌部に触覚を提示することで聴覚体験は有意に向上し、本章の状況では違和感によって本実験を行うに至らなかった。

## 第6章 振動刺激による打撃時の衝突感提示

### 6.1 研究背景及び先行研究

第4章, 第5章では本論文で扱うコンテンツ体験のうち, 「振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ, それに伴った触覚刺激を生じる状況」に着目し, 触覚刺激による加算的な聴覚体験の向上を行ってきた。

これに対し本章では本論文で扱うもう一つの触覚を伴う聴覚体験「振動源から振動が直接身体に伝わり, それに伴った聴覚刺激を生じる状況」について述べる。そのためこれまでの音楽聴取ではなく, ゲームコンテンツ体験時に一般的に用いられる衝突感提示に着目する。衝突感とは, 例えばテニスや野球の打撃時において生じる感覚であり, コンピュータゲーム等で表現することの多いものである。打撃時には, 「自己の運動」「反発力」「振動」「音」を生じると考えられるが, モバイル環境においてはこの反発力を実際に大型の力覚提示装置で出力することは難しく, 自己の運動に伴った振動(触覚)と音(聴覚)によって表現することが求められる。しかしこれまで多くの商用アプリケーションでは音のみで代替的に提示されていた。

打撃時の衝突感を触覚により振動刺激で提示することで, 打撃の強度, 対象物の材質感, 位置, 距離など聴覚刺激のみでは提示困難な感覚が提示可能になり, ひいては聴覚体験の向上につながると考えられる。

#### 6.1.1 打撃時の衝突感に関する触聴覚クロスモーダル現象の関連研究

打撃時の衝突感を振動刺激で提示することで, 対象物の材質感, 位置, 距離, 打撃の強度などが触覚的に提示可能になると考えられる。このうち対象物の材質感については振動提示を用いて材質感の再現を行う手法がすでにいくつか提案されている。例えば **Kuchenbecker** らは様々な対象物との接触時に生じる振動を記録, 再生することで対象物のテクスチャ感を再現する手法を提案している[24]。また **Okamura** らは物体衝突時に生じる振動を減衰正弦波を用いてモデル化し, 材質ごとに定まるパラメータを設定することで触覚的材質感を再現している[38]。またこの **Okamura** らの減衰正弦波モデルを用いて把持したスティックから振動を提示し, タッチパネルの材質感を変化させる **Hachistack**[14]や, 身体に取り付けた振動子によって身体の主観的な材質感に変調可能であること[25]が報告されている。

対象物の材質感同様, 対象物の位置, 距離に関する知覚のうち, 左右方向に関しては, ヒトの耳は左右に一つずつ存在するため, 左右の耳に伝わる音波の位相差や音圧差で左右の方向定位が可能であることはよく知られている[68]。また触覚刺激によって左右の音像位置定位の改変が可能であることが示唆されている[5][6][7]。主観的な左右の距離感についても, 床を手で叩く際の音を実際よりも遠くから再生することで, 接触位置が実際よりも遠くに感じられ, 結果として自分の腕が伸長したように感じられることが報告されている[48]。

一方で, 対象物の前後方向の聴覚的位置定位や距離知覚は左右に比べて困難であることが知られている。近藤らは被験者の身体近傍後方空間に音像を提示し, その距離知覚に対する触覚刺激の影響を調査した。その結果触覚刺激は音像の距離弁別精度には影響を与えるものの, 距離知覚には影響を及ぼさなかったことを報告している[71]。また **Tajadura-Jiménez** らの報告によると身体広範囲への振動提示で音像の前後方向の知覚が妨害される[47]。

音像の前後方向の距離知覚を打撃時の衝突感の強度(強ければ近い, 遠ければ弱い)で触覚的に表すこと自体は可能であるが, 強度は距離だけでなく, 衝撃自体の強さにも依存して変化す

るため、衝撃提示音だけでは「強い衝撃が遠くで発生した場合」と「弱い衝撃が知覚で発生した場合」を分けて表現することが困難であると考えられる。また Sreng らは物体を棒で打撃した際に生じる振動の周波数が距離知覚に寄与することを示している[43]。しかしながら、振動の周波数は棒あるいは対象物の材質や棒自体の長さによって容易に変化することが予想され(実際に Okamura らのモデルにおいて周波数は材質ごとに変化するパラメータである)、それに伴って距離知覚も変化してしまうことが考えられる。

そこで本章では、端末を把持する手掌部から触覚提示を行い、対象物とユーザの前後の距離知覚を提示することを目的とする。先述したとおり触覚刺激によって左右の音像位置定位の改変が可能であることは示唆されているが、触覚刺激による聴覚の前後方向の距離知覚改変に関する知見は存在しない。そこでまず聴覚で知覚する音像の距離知覚が触覚刺激によって改変可能かどうかを検証する。次に衝撃の強度表現と距離表現を独立に提示することを目的として、衝撃の強度に依存しない前後距離知覚の提示が可能かを検証する。

触覚刺激による音像位置の表現が実現することで、例えばテニスや野球ゲームにおけるラケットやバットの打撃位置を提示することが可能になると考えられる。またハンドヘルド型の触覚ナビゲーションデバイス[1][18]において、目的地への方向だけでなく目的地までの距離を提示するための一手段となると考えられる。

## 6.2 実験 1 触覚刺激による音像の距離感改変

本実験では聴覚の前後方向の距離知覚を触覚刺激によって改変可能かを検証する。ここでは被験者の前方に等間隔に 5 つのスピーカを設置し、そのうちいずれかのスピーカより音を提示し、被験者に音像の位置を回答させるタスクを行った。またその際触覚刺激を被験者の手元に提示することで、触覚刺激による音像の距離知覚を改変することを試みた。

### 6.2.1 実験装置

被験者の前方に 5 つの聴覚刺激提示用スピーカ(NSW2-326-8A, AURA SOUND)を 10cm 間隔で配置し聴覚刺激を提示した。聴覚提示用スピーカとは別に、被験者の手元部分に触覚刺激提示用振動子(Vp-2, Acouve Lab)を配置し、被験者がその振動子を把持することで振動を提示した(図 6-1)。各スピーカ及び振動子はデジタルオーディオアンプ(M50, MUSE)を介して独立に PC と接続した。振動子を駆動する際、振動子より音が発生するため振動子は吸音シートで覆った。また聴覚刺激提示用スピーカが振動し、視覚的に音像位置を特定する可能性があるため、実験前に実験者が目視可能な振動が生じていないことを確認し、更に実験時に各被験者にスピーカの震えが目視不可能であることを確認した。

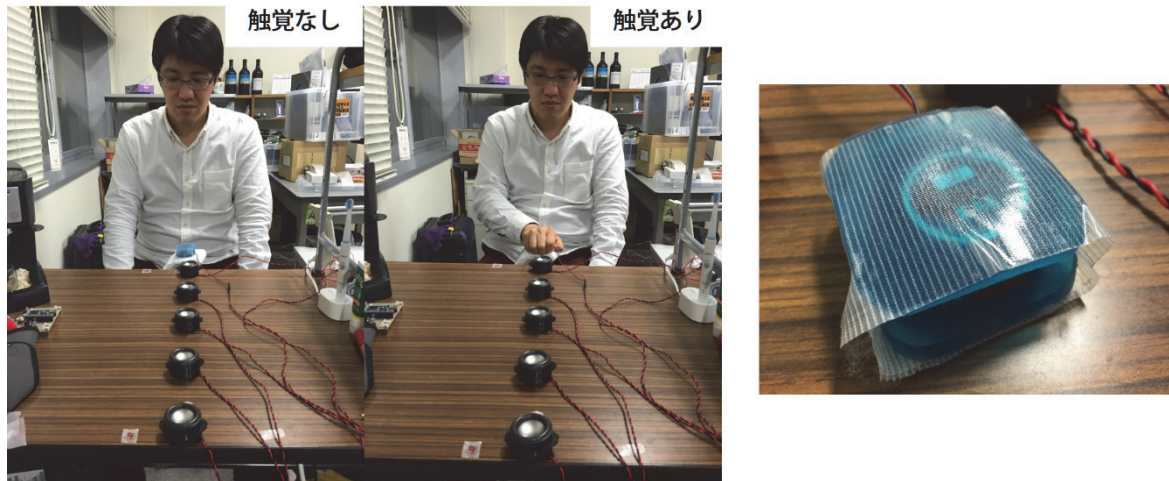


図 6-1. (左)聴覚刺激提示用スピーカ (右)触覚刺激提示用振動子

## 6.2.2 実験条件

実験は振動子を被験者が把持しない条件(振動無し条件)と把持する条件(振動あり条件)の 2 つを用意した。聴覚及び触覚刺激の提示は物体を打撃した際に実際に生じる打撃音をあらかじめ記録し、その波形を PC から再生することで行った。各聴覚刺激提示用スピーカの音量は等しく設定した。触覚提示に関しては波形の高周波成分が音としても提示されてしまうことを防止するため、波形にローパスフィルタをかけ、高周波成分を除去したものを提示した。振動の強度は振動子への印加電圧(10V)によって統制した。振動刺激なし条件(被験者が振動子を把持しない条件)でも振動子の駆動は行い、振動子から漏れ出る音の影響を最小限に抑えた。

## 6.2.3 実験手続き

実験開始とともに、着座した被験者の前方にある 5 つの聴覚刺激提示用スピーカのの一つより打撃音を 700ms の周期で断続的に提示した。被験者は聴覚で知覚する音源の位置を各スピーカに付した番号(被験者手前側より 1-5 番)を用いて回答した。スピーカは被験者前方 15cm から 15cm 間隔で 5 つ設置された(15cm-75cm)。また、音源の位置をスピーカ群より手前、あるいは奥に知覚する可能性を考慮し、スピーカ群よりも手前側に音像を知覚した場合 0 番、スピーカ群より奥に音像を知覚した場合 6 番を回答させた。実験は振動無し条件と振動あり条件でセッションわけをして行い、セッションごとに 5 つのスピーカから聴覚刺激を 4 回ずつランダムに提示した。振動あり条件では被験者は手元の振動提示用振動子を利き手で把持しながら同様のタスクを行った。なお順序効果の影響を考慮し、被験者の半数は触覚ありセッションを先に実施、のこり半数は触覚なしセッションを先に実施した。被験者は 6 名(女性 2 名、20-34 歳)であった。

## 6.2.4 実験結果

図 6-2 に実験結果を示す。グラフの横軸は聴覚刺激を提示したスピーカの位置を、縦軸は被験者が聴覚的に知覚した音像位置を示す。エラーバーは標準偏差を示す。実験条件による違いを見るため Wilcoxon signed-rank test を用いて統計処理を行った。

実験結果より、触覚刺激を提示しない振動無し条件(オレンジ色)においては、実際に音を提



示したスピーカの距離が遠くなるに従って、被験者が知覚した音源位置も遠くなっていることがわかる。一方被験者の手元に振動を提示した振動あり条件(青色)においては、実際の音源位置にかかわらず、被験者は音源位置を手元に有意に近い場所に知覚していることが明らかになった。

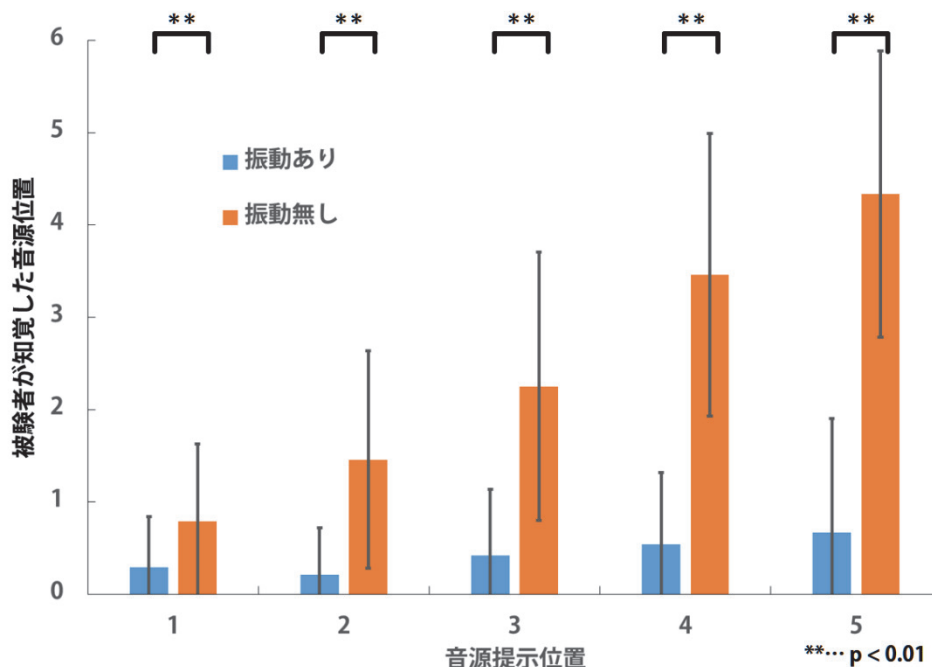


図 6-2. 触覚刺激による距離感改変実験結果

### 6.2.5 考察

本実験の結果より、聴覚音像の前後距離知覚は、手掌部への振動触覚提示によって劇的に手前側に知覚されることが明らかになった。被験者の中には実験後に種明かしをしても容易に信じていない者もいるほどであった。興味深い内観報告として「あくまで音を頼りに回答したが、同期した振動が提示されると手元からなっているように感じられる」「どちらの条件も完全に正確には回答できていないと思うが、振動ありに比べて、振動無しの方は自分と音の間に隔たりを感じた」という意見を得た。

これらの結果と内観報告は、聴覚の前後方向の距離知覚においては、手に振動触覚として伝わる打撃時の衝突感が大きく寄与するのではないかという可能性を示唆している。ただし、本実験においては前後方向の距離が様々な音像に対して触覚刺激を重畳したところ、実際の音像位置にかかわらず全ての音像距離知覚が大幅に手前側に知覚された。

そこで次に、聴覚音像位置を手掌部に伝わる振動刺激の強弱で段階的に改変可能かを検証するため、提示する振動刺激の強度を様々に変えて同様の実験を行った。

## 6.3 実験 2 強度の異なる触覚刺激による音像の距離感改変

本実験は、聴覚の前後方向距離知覚を強度の異なる触覚刺激によって改変することを目的とする。実験 1 同様、被験者の前方に等間隔に 5 つのスピーカを設置し、いずれかのスピーカよ

り音を提示し、被験者に音像の前後位置を回答させるタスクを行った。ただし、その際強度の異なる触覚刺激(触覚刺激大, 中, 小, なし)を手掌部より提示し、触覚刺激の強度によって改変される音像の距離感が異なるかどうかを検証した。

### 6.3.1 実験条件

振動条件として、提示される振動の強度が4段階に異なる条件(振動大, 中, 小, なし)を用意した。振動の強度は振動子への印加電圧によって規定し、振動大条件を0dB(1倍)とした時、振動中条件を-5dB(振動大条件に比して電圧比0.56)、振動小条件を-20dB(振動大条件に比して電圧比0.1)、振動子への電圧印加なし(振動無し条件)とした。聴覚及び触覚刺激の提示は物体を打撃した際に実際に生じる打撃音をあらかじめ記録し、その波形をPCから再生することで行った。各聴覚刺激提示用スピーカの音量は等しく設定した。触覚提示に関しては波形の高周波成分が音としても提示されてしまうことを防止するため、波形にローパスフィルタをかけ、高周波成分を除去したものを提示した。また各スピーカの高さを被験者の耳の高さに揃え、距離に応じた角度によって被験者が音源を推定することを防いだ(図6-3)。



図 6-3. 実験セットアップ

実験開始とともに、着座した被験者の前方にある5つの聴覚刺激提示用スピーカの1つより打撃音を700msの周期で断続的に提示した。同時に4つの振動条件のいずれか(振動大, 中, 小, なし)を被験者が右手で把持し、振動を同時提示した。被験者は聴覚で知覚する音源の位置を各スピーカに付した番号(被験者手前側より1-5番)を用いて回答した。また、音源の位置をスピーカ群より手前、あるいは奥に知覚する可能性を考慮し、スピーカ群よりも手前側に音像を知覚した場合0番、スピーカ群より奥に音像を知覚した場合6番を回答させた。試行回数は5音源位置×4振動条件の20試行であり、提示順序はランダムであった。被験者は11名(女性1名, 20-25歳)であった。

### 6.3.2 実験結果

図6-2に実験結果を示す。グラフの横軸は聴覚刺激を実際に提示したスピーカの位置と提

示した振動刺激の条件を，縦軸は被験者が聴覚的に知覚した音像位置を示す．エラーバーは標準偏差を示す．また触覚提示条件による違いを見るため，触覚提示条件間で多重比較 (Bonfferoni 法)を行った．

実験結果より，触覚刺激を提示しない振動無し条件(各色グラフ群の右端)を音像提示位置ごとに比較すると，実験 1 の結果と同じく実際に音を提示したスピーカの距離が遠くなるに従って，被験者が知覚した音源位置も遠くなっていることがわかる．一方，同じ位置より音を提示した場合でも(各色グラフ内)，同時提示される振動刺激が大きくなるに従って知覚する音源位置が手前側にシフトすることが判明した．

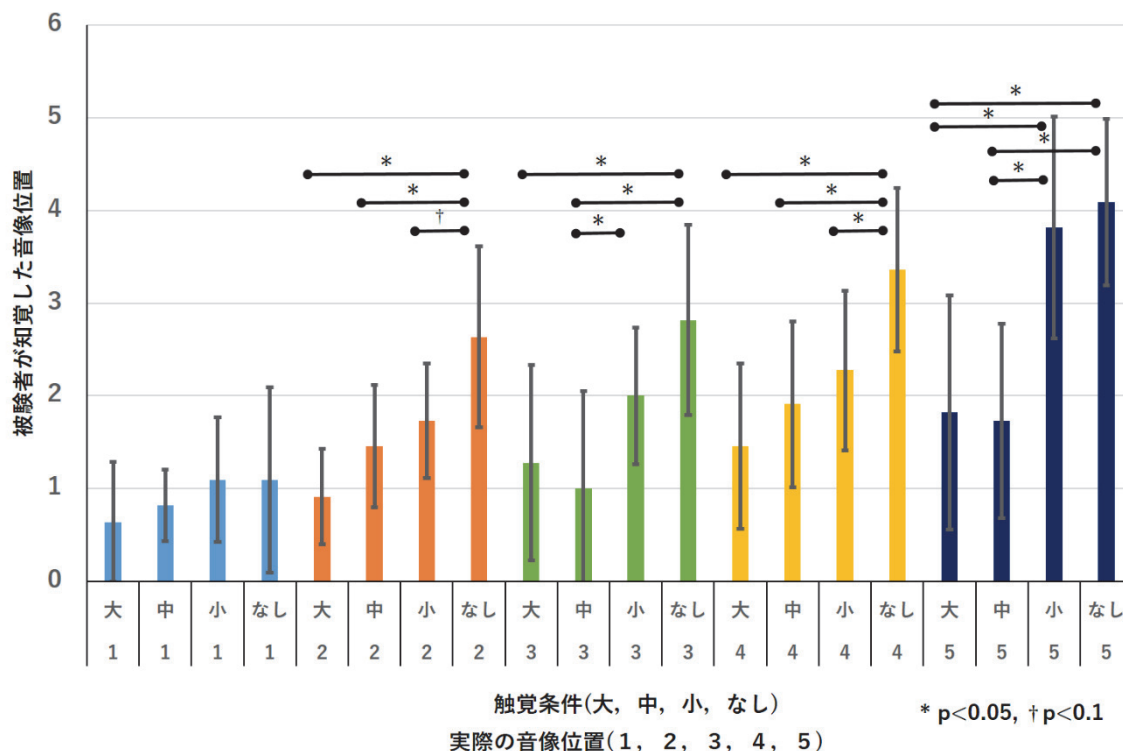


図 6-4. 強度の異なる触覚刺激による音像の距離感改変実験結果

### 6.3.3 考察

本実験の結果より，音像の前後方向距離知覚は，手元への振動触覚提示によって実験 1 同様手前側に知覚され，また提示される振動刺激の強度が強くなるごとに音源位置もより手前側に知覚することが判明した．このことから，左右の音像位置定位とくらべて劣るヒト聴覚の音像の距離知覚においては，手に打撃感として伝わる振動触覚が大きく寄与し，また触覚刺激の強度に応じて音像の距離知覚が変化するということが判明した．

ただし，前述のとおり刺激の強度の変化は距離の変化，衝撃自体の強さの変化の二通りに解釈が可能である．さらに第 3 章で示したように，触覚の提示自体によって聴覚の強さを強く感じる．このことから触覚の強度を変化させる手法には限界があると考えられる．ユーザの混乱を防ぐためには距離情報と衝撃自体の強さの情報を独立に提示可能なことが好ましい．なお実

験 1, 2 においては被験者の混乱を防ぐため、あらかじめ聴覚刺激の強度が一定であることを伝えていた。

一般に力覚提示装置を用いて衝突時のトルクを提示することで衝突部位の位置を提示することは可能である。しかしモバイル環境においてはそのような大型の装置を用いることは出来ない。そこで物体打撃時に手掌部に伝わる振動モデルを構築することで、触覚提示のみによって衝突時の距離の情報を提示する可能性があるか検討した。

## 6.4 皮膚感覚による打撃距離知覚仮説

図 6-5 に手に把持した棒で物体を叩く際の、物体と手との簡易力学モデルを示す。図中の  $P_1$  は物体の位置、 $P_2$  及び  $P_3$  は把持した手の親指側位置と小指側位置を示す。実際には棒を掌全体で握りこむが、ここでは簡単のために手の親指側と小指側だけで接しているとする。 $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  は打撃時に生じる力の大きさと向きを、 $L_1$ ,  $L_2$  はそれぞれ  $P_1$  から  $P_2$ ,  $P_2$  から  $P_3$  までの距離を示す。

ここで物体と把持棒が完全非弾性衝突を行い、把持した棒が物体衝突後静止することを考える。打撃後に手に把持した棒が並進運動も回転運動も継続しないことから、並進力、回転モーメントの合計は 0 になる。すなわち

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0. \quad (1)$$

$$F_1 * L_1 + F_3 = 0. \quad (2)$$

この 2 つの式から、物体の打撃位置  $L_1$  は次のように導くことができる。

$$L_1 = \frac{F_3 * L_2}{F_1} = \frac{-F_3 * L_2}{F_2 + F_3}. \quad (3)$$

ここで、親指と小指の間の距離  $L_2$  は定数であるため、物体との距離  $L_1$  は棒を把持した手に生じる振動  $F_2$ ,  $F_3$  の比率によって表されると考えられる。

このことから、物体の打撃位置( $P_1$ )が把持した手の親指側( $P_2$ )に非常に近い場合、 $L_1 \doteq 0$  となり、棒を把持した手に生ずる振動は親指側( $P_2$ )で大きく、小指側( $P_3$ )で小さくなると考えられる(図 6-6 左)。反対に物体の打撃位置が離れていた場合、 $L_1 \rightarrow \infty$  を実現する解は  $F_2 = -F_3$  となることであり、つまり親指側と小指側に加わる振動は強度としてはほぼ等しくなると考えられる(図 6-6 右)。

以上の単純なモデルにより、棒を把持した手に生じる振動  $F_2$ ,  $F_3$  の比率によって物体の打撃位置  $L_1$  を推定可能であると考えられる。実際には掌全体で棒に接するため厳密な状況とは異なるが、掌中で感じる振動の「重心位置」知覚が実は打撃対象との距離知覚になっている可能性は十分に考えられる。実際、複数箇所振動を与えた場合の重心知覚は **Funneling** ないし **ファントムセンセーション** としてよく知られる代表的な触覚知覚能力である [2]。

そこで次に本モデルを基に手掌部に提示される振動の強度を変化せず、振動の重心位置の変化のみで主観的な距離知覚が変化するか検証した。

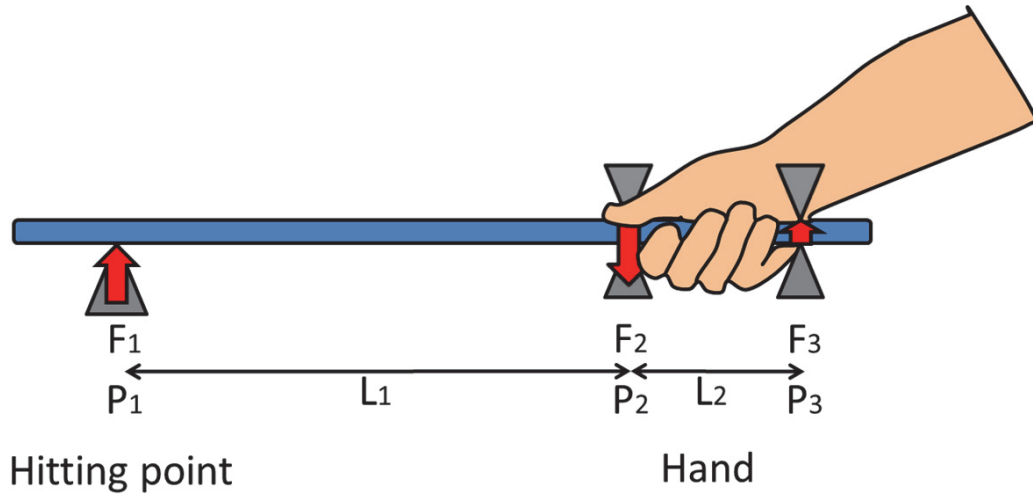


図 6-5. 把持棒による物体打撃時の簡易力学モデル

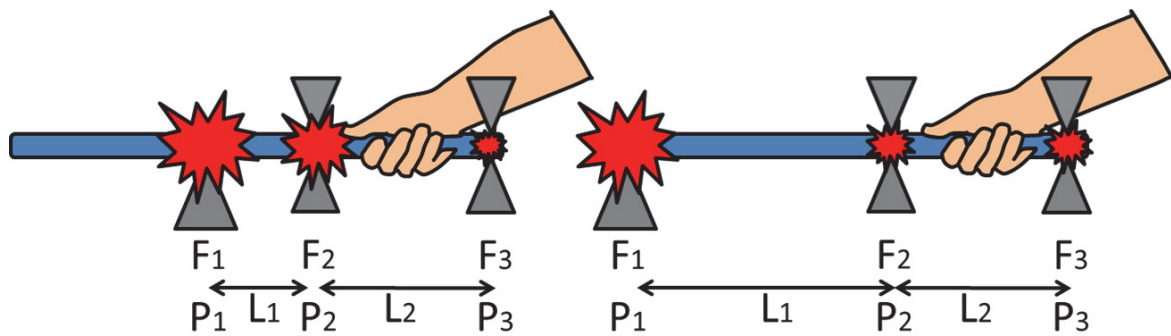


図 6-6. 皮膚感覚による打撃距離知覚仮説. (左)物体の打撃位置が手元に近い場合, 棒を把持した手に生ずる振動は親指側で大きくなる. (右)物体の打撃位置が離れている場合, 親指側と小指側に加わる振動は強度としてはほぼ等しくなる

## 6.5 実験 3 触覚分布による打撃距離知覚改変

本実験では, 打撃時の衝突感が振動刺激として手掌部に提示された際, 触覚刺激のみで前後方向の距離知覚が可能か, また振動の強度を変化せず, 振動の重心位置の変化のみで主観的な距離知覚が変化するかを検証した.

### 6.5.1 実験装置

本実験では, 物体打撃時の振動を記録・再生することで実際には打撃動作を行わずに物体打撃時の振動のみが把持棒手掌部に提示されるシステムを製作した. 本システムはアルミパイプ

(直径 15mm, 長さ 900mm, 重量 110g), 1 軸加速度センサ( $\pm 250G$ , ADXL193, SparkFun Electronics), アクリル製グリップ, 振動子 2 個(Haptuator Mark II, TactileLabs), オーディオアンプ(RSDA202, Rasteme Systems Inc.), PC から構成される.

加速度センサをアルミパイプ上端に取り付け, その出力を PC に取り込むことで物体打撃時の振動が記録される(図 6-7). 記録された振動は PC からオーディオアンプを介してアルミパイプ下方のアクリル製グリップの親指側および小指側の付け根部分に固定された 2 つの振動子より再生される(図 6-8).

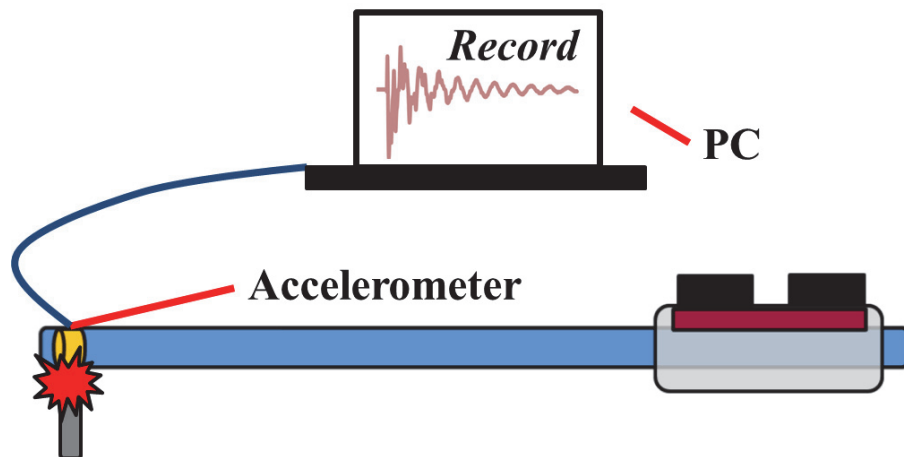


図 6-7. 実験デバイスを用いた打撃振動の記録

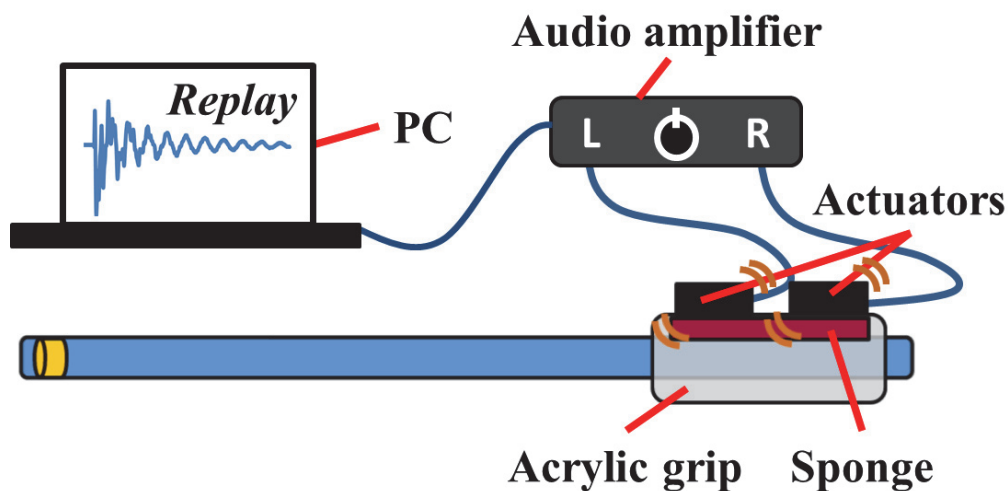


図 6-8. 記録した振動を提示する様子

## 6.5.2 実験条件

本実験では手掌部に再生される打撃振動の重心位置の変化のみで把持棒と物体の衝突距離が主観的に変化するかを検証する. 検証のためにあらかじめ実際の物体打撃時の振動を記録

し、以下の 3 つの振動条件を用意した。(a)記録した振動を親指側の振動子のみから提示する (b)記録した振動を親指側、小指側両方の振動子から提示する (c)記録した振動を小指側の振動子のみから提示する。なお条件(b)では 2 つの振動子が駆動されるため、2 つの振動子の合成加速度が他の条件と等しくなるように各振動子の振幅を調節した(図 6-9)。

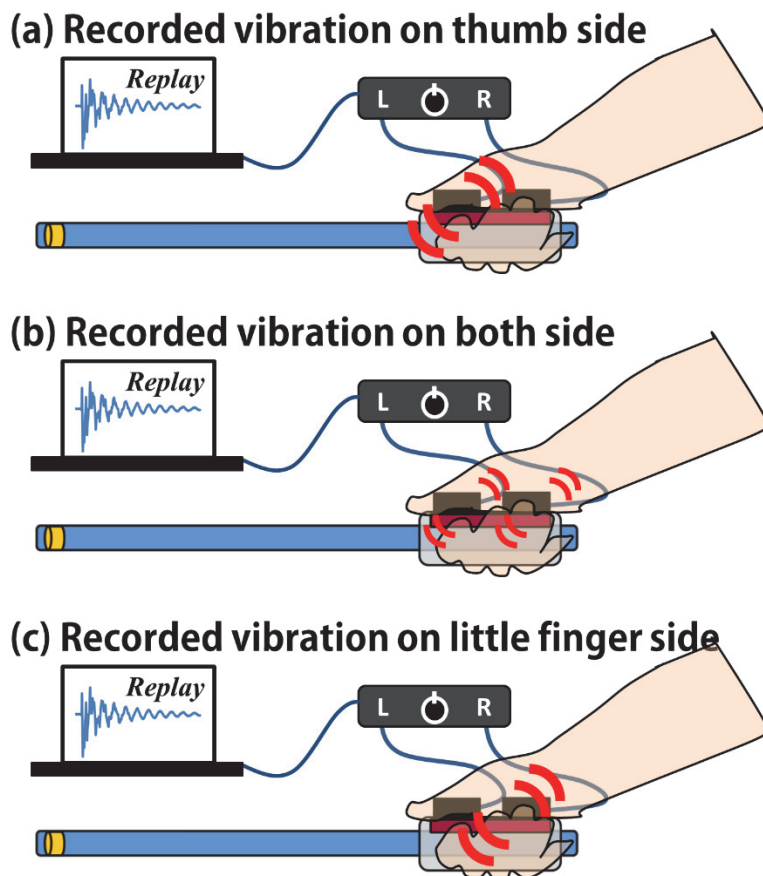


図 6-9. 振動提示条件

### 6.5.3 提示刺激

先述の(a), (b), (c)の振動条件による触覚的距離感の違いを被験者に比較させるため、(a)-(b), (a)-(c), (b)-(c)の 3 通りの組み合わせを提示刺激として用意した。各提示刺激は、まず 100ms の(a), (b), (c)のいずれかの条件の振動が 700ms 周期で 5 回提示された後、1000ms の空白を挟んで他の条件の振動が 5 回提示される組み合わせから成る(図 6-10)。被験者はデバイスを静止した状態で把持し、どちらの振動が提示された際により近くに打撃を提示されているように知覚するかを強制二択で判定した。

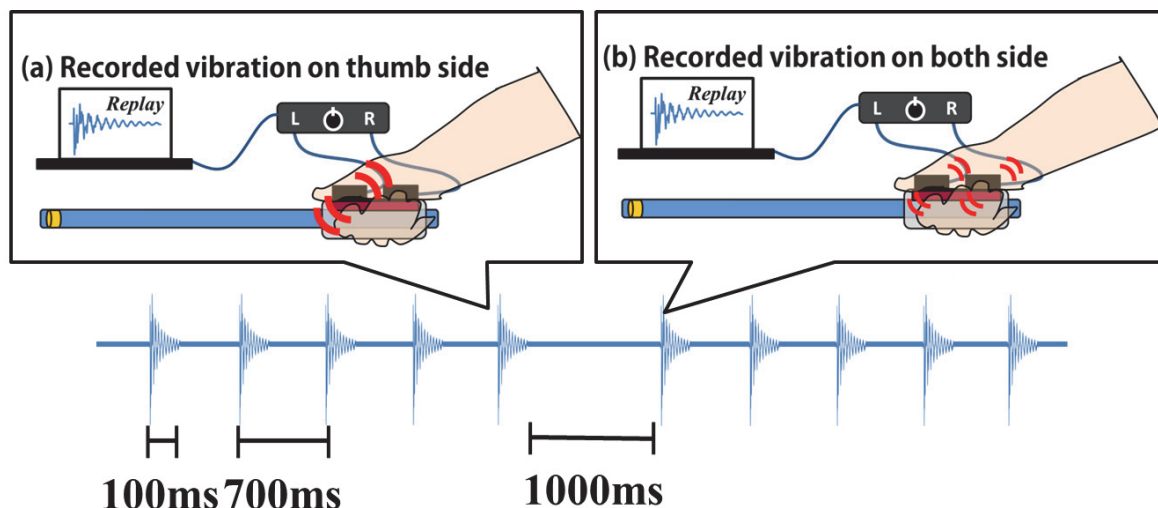


図 6-10. 刺激提示例

### 6.5.4 実験手続き

実験には 6 名の被験者が参加した(男性 4 名, 女性 2 名, 23-43 歳, 自己申告による触覚の障害無し). 被験者は椅子に座り, 棒デバイスを右手で床に対して平行になるよう把持した. 腕の疲労を防ぐため, デバイスの先端部分に支えとなる台を準備し, 実験中はデバイス先端部分を台に載せた状態で静止させた. 視聴覚によるバイアスを防ぐため, 被験者の右側には壁を設置して棒形デバイスを目視できないようにし, また実験中はアクティブノイズキャンセリングヘッドホン(QuietComfort15, BOSE)を装着し, 不快に感じない最大の音量に調節したホワイトノイズが提示された.

実験開始とともに被験者には(a)-(b), (a)-(c), (b)-(c)のいずれかの提示刺激が提示された. 被験者は各振動が提示された際, 把持した棒の打撃位置を比較し, より手元に近い部分を打撃されているように感じた方の刺激を強制二択で口頭回答した. この時, 判断に迷う場合は繰り返し刺激を提示することを許容した. これを 1 試行として提示刺激 1 組み合わせあたり 8 試行, 計 24 試行をランダムに提示した. 順序効果を防ぐため, 半数の試行では刺激の順番を入れ替えた. 実験の所要時間は 1 被験者あたり 15-20 分程度であった.

### 6.5.5 実験結果及び考察

全被験者の提示刺激ごとの実験結果を図 6-11 に示す. 各グラフの横軸は振動条件を, 縦軸は振動を比較した際, より手元に近い部分を打撃されているように感じた割合を表す.

得られた実験結果に対してそれぞれ正確二項検定を行った所, 親指側に打撃時の振動を再生した場合と小指側に振動を再生した場合を比較した(a)-(c)の組み合わせ(図 6-11 左)では, 親指側に打撃時の振動を再生した場合の方が手元の近くを打撃されたと知覚する割合が有意に高いことが判明した. 同様の傾向は, 親指側と小指側両方に振動を提示した場合と小指側に振動を提示した場合を比較した(b)-(c)の組み合わせにおいても確認された(図 6-11 中).

これらの結果は, 実際の打撃に振動を重畳して衝突距離を回答させた先行研究の結果と合致している. このことから聴覚提示を伴わず, また振動の強度を一定に保ったまま, 手掌部の振動の重心位置の変化のみで物体の衝突距離が主観的に変化することが示唆された.



しかしながら、親指側に打撃時の振動を再生した場合と親指側と小指側両方に振動を提示した場合を比較した(a)-(b)のみ有意差は認められず、むしろ回答の割合としては親指側と小指側両方に振動を提示した場合(b)の方がやや大きい結果となった(図 6-11 右)。

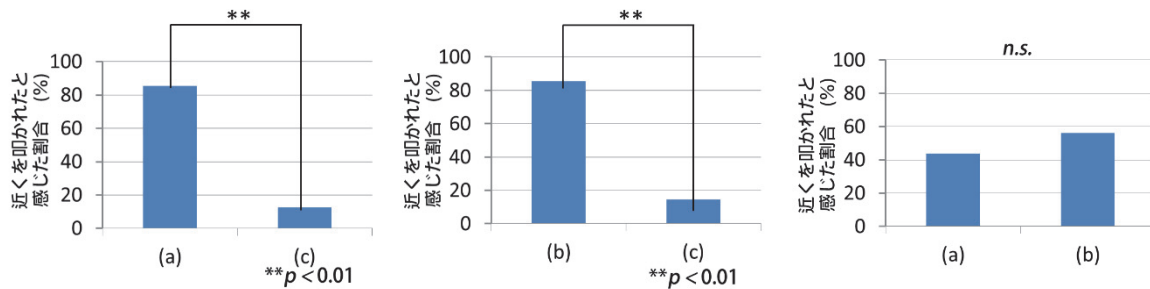


図 6-11. (左)親指側に打撃時の振動を提示した場合と小指側に振動を提示した場合を比較した(a)-(c)の組み合わせ (中)親指側と小指側両方に振動を提示した場合と小指側に振動を提示した場合を比較した(b)-(c)の組み合わせ (右)親指側に打撃時の振動を提示した場合と親指側と小指側両方に振動を提示した場合を比較した(a)-(b)の組み合わせ。

## 6.6 本章のまとめ

本章では触覚を伴う聴覚体験の第二の分類である「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」に関してゲームコンテンツ体験時に一般的に用いられる衝突感提示に着目した。打撃時の衝突感には「自己の運動感覚」「反発力の力覚」「触覚」「聴覚」が寄与していると考えられ、力覚を提示できないモバイル環境ではその他の感覚で増強することが重要となるが、従来の応用事例の多くが聴覚のみで代替的に提示していた。そこで打撃感を振動刺激で提示することで、聴覚刺激のみでは提示困難な感覚が提示可能になり、ひいては聴覚体験の向上につながると考え、一連の実験を行った。ここでは、打撃時に得る情報(距離感、材質感、打撃強度)のうち、聴覚のみでは提示が難しい前後方向の距離感の触覚刺激による提示を行った。

まず音像の前後方向距離知覚を触覚刺激によって改変する実験 1 を行った。その結果、聴覚音像の前後距離知覚は、手掌部への振動触覚提示によって劇的に手前側に知覚されることが明らかになった。

ただし、この実験では実際の音像位置にかかわらず全ての音像距離知覚が大幅に手前側に知覚されたため、手掌部に提示する触覚刺激の強度を 4 段階に分けて同様の実験 2 を行った。その結果提示される振動刺激の強度が強くなるごとに音源位置もより手前側に知覚することが判明した。このことから、左右の音像位置定位とくらべて劣るヒト聴覚の音像の距離知覚においては、手に打撃感として伝わる振動触覚が大きく寄与し、また触覚刺激の強度に応じて音像の距離知覚が変化するということが判明した。ただし、前述のとおり刺激の強度の変化は距離の変化、衝撃自体の強さの変化の二通りに解釈が可能であり、両者は独立に提示可能なことが好ましい。

そこで最後に打撃感が振動刺激として手掌部に提示された際、触覚刺激のみで前後方向の距離知覚が可能か、また振動の強度を変化せず、振動の重心位置の変化のみで主観的な距離知覚が変化するかを検証した(実験 3)。その結果、聴覚提示を伴わず、また振動の強度を一定に保ったままでも、手掌部の振動の重心位置の変化のみで物体の衝突距離が主観的に変化すること

が示唆された。

一連の実験を通じて、ゲームコンテンツにおける打撃感提示といった「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」における打撃の強度、前後方向の距離知覚といった聴覚刺激のみでは提示困難な情報を提示するための設計指針を示した。

# 第7章

## 結論

### 7.1 結論

本論文では、特に近年急速に普及が進んでいるモバイル環境の制約下で、触覚によって聴覚体験を拡張する手法について論じた。

モバイル端末においては重量やサイズ、ユーザの動きを妨げない非拘束性といった制約上、振動刺激の提示方法、範囲、強度に制約があり、従来の環境設置型と同様な触覚提示による聴覚体験拡張が困難である。本論文ではこの課題に対し、聴覚体験を以下の二つの状況に分類し、また本論文で着目した触覚の持つ二つの側面(触覚は時間的に変化する信号である、触覚は空間的に分布する信号である)ごとに課題解決を行った。

i. 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況(なお振動の周波数が高い場合には聴覚のみ生じるがその状況も含む)(図 7-1 左)

ii. 振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況(図 7-1 右)

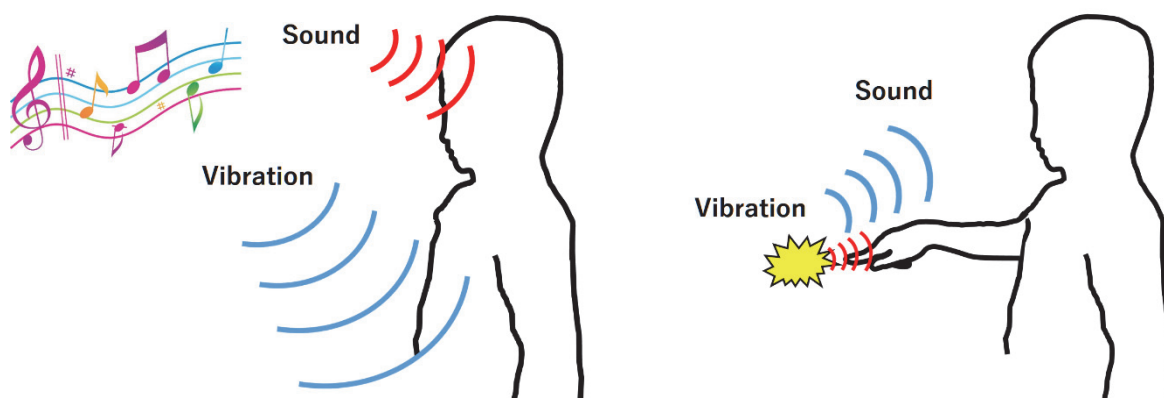


図 7-1. [再掲] (左) 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況。(右) 振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況。

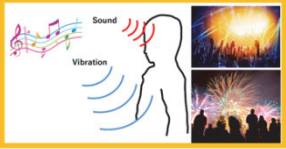





分類した状況の一つ目、「振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴って触覚刺激を生じる状況」として音楽の聴取に着目した。この分類では、「提示波形を考慮」した触覚提示手法として分周刺激を用いた聴触覚変換手法(第 3,4 章)を、「提示部位を考慮」した触覚提示手法として鎖骨を介した触覚提示手法(第 5 章)をそれぞれ実装、評価した。

分類した状況の二つ目、「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」では、打撃時の衝突感による対象物の知覚に着目した。振動源からの振動による対象物の知覚のうち、とくに触覚による対象物の前後方向の距離知覚を提示することを試みた。まず「提示波形の考慮」として触覚刺激の強度を用いた衝突感の前後距離知覚を行った(第 6 章)。ただし、触覚刺激の強度は衝突自体の強度によっても変化する。そこで衝撃の強度表現

と距離表現を独立に提示するため、「提示部位を考慮」した触覚提示として、提示する触覚の分布を用いた衝突感の前後距離知覚を試みた(第6章)。

表 7-1 に本論文で扱った個々の聴覚体験拡張を聴覚体験の分類及び着目した触覚の特性ごとにまとめる。

表 7-1. 本論文で行った聴覚体験拡張の分類

	提示波形の考慮	提示部位の考慮
		
		

以下に項目ごとに得られた結果についてまとめる。

### 7.1.1 分周刺激を用いた触覚提示(第3,4章)

本項目では音楽聴取時の聴覚体験向上を目的に、波形を考慮した触覚提示を試みた。まず第3章ではその前段階として、触覚提示の強度、範囲の限定されるモバイル環境において触覚刺激は主観的な音の強度を増強可能か、また音に主観的に「あった」振動を提示可能かという基礎的検討を行った。その結果、触覚と聴覚で共通に感じられる周波数を中心としたノイズを用いた場合も、単純な正弦波を用いた場合と同様、手掌部への振動提示によって聴覚で知覚される主観的な音の強度が強くなることが判明した。次に音に「あった」触覚提示を実現するにあたり、関連研究で知られていた知見を元に、触聴覚間で提示周波数が異なっても主観的に同一と感じる周波数条件を発見するための実験を行った。その結果、聴覚刺激と触覚刺激の周波数がオクターブ違い(聴覚刺激の周波数と比較して触覚刺激の周波数が半分)の時に、両者の間に本来聴覚で知覚されるような協和度が知覚可能であることが判明した。

第4章では、第3章での知見をふまえ、触覚提示によって音楽体験の向上が可能であるかどうかの検証を行った。音楽のように幅広い周波数を含む場合、特に高い音域がそのままでは触覚によって提示することが出来ず、モバイル環境では従来手法のように低音域のみを高エネルギーで触覚提示することも困難である。このため、第3章で見出した聴覚刺激と触覚刺激の周波数がオクターブ違い(聴覚刺激の周波数と比較して触覚刺激の周波数が半分)の時に、特に音楽楽器経験者において両者の間に本来聴覚で知覚されるような協和度が知覚可能であるという知見を元に、音楽波形の周波数を2の階乗分の1の周波数となるよう分周し、触覚刺激と

して提示した。

分周された触覚刺激を用いた聴覚体験の主観評価実験によって、主に高い周波数成分を持ち、音波形をそのまま触覚刺激として用いても振動が微小にしか感じられないような音源に対して、音楽波形を分周して触覚提示を行うことで、音源を触覚的に知覚しやすくなるだけでなく、分周によって周波数が異なった音楽と振動の間に乖離感を生じずに主観的な評価(心地よさ、好み、楽しさ)が全体的に向上することが明らかになった。また単に触覚的に知覚しやすい単一周波数の振動で音楽のリズムや強弱を触覚提示した場合、評価の向上は見られず、逆に一部の条件で評価の低下が見られたことから、聴覚と触覚の知覚可能周波数範囲及び周波数解像度には大きな隔たりがあるものの、今回の手法は両者を同質なものとして結びつけ、聴覚体験の向上に寄与することが明らかになった。これらの結果より、本手法を用いることで聴覚体験を向上させるという目的を果たせたといえる。

一方、今回の実験では提案手法の検証のため、含まれる周波数分布の違いを元に音楽曲を選定したが(オルゴール音楽、クラシック音楽、ジャズ音楽)、特にクラシック音楽などは明確なビートや曲調変化の少ない穏やかな曲であり、主観的な官能評価(Q4:好み, Q5:楽しさ)などの評価を行うのは難しかったとの内観報告を得た。このため、提案手法による主観的な聴覚体験の向上をより詳細に観察するためには評価手法や使用音楽について再考する必要がある。

### 7.1.2 鎖骨への触覚提示(第5章)

本項目では同じくモバイル環境下における音楽の聴取を目的として、部位を考慮した触覚提示を試みた。小型軽量でユーザの非拘束性を損なわないながらも、身体広範囲に触覚を提示する手法として鎖骨への触覚提示手法を提案した。これはユーザの鎖骨に振動を提示し、骨格を介して振動を上半身に伝搬させる手法であり、提案手法の効果検証を実際の皮膚振動伝搬と心理物理実験による主観的な聴覚体験の評価によって行った。

レーザ変位計を用いた計測の結果、鎖骨への振動提示によって実際に上半身に振動が伝搬していること、および鎖骨付近の皮膚への振動提示では伝搬が抑えられることが明らかとなった。このことから物理的に骨伝導による触覚伝搬が可能であることがわかった。次に実際の音楽とともに振動を提示した際の振動の主観的な心地よさ、広がり、聴覚体験への影響を心理物理実験を通して検証した。実験結果より鎖骨への振動提示は従来行われてきた手掌部への振動提示と比較し、主観的にも上半身のより広い範囲に広がり、提示振動を有意に心地よく、聴覚体験をより好みなものへと向上させることが判明した。また試作デバイスを複数の展示会でのべ100名程度にデモ展示したところ、「装着が煩わしくない」「すぐに手持ちのスマートフォンで使いたい」など、提案手法の非拘束性に関してもポジティブなコメントを得ることが出来た。これらの結果から、本手法についても聴覚体験における「音に伴った振動」を物理的、主観的に再現し、聴覚体験を向上するという目的を果たせたといえる。

ただし第4章において提案した、音信号の周波数を1/2倍または1/4倍する手法を用いたところ、特に新たな効果は確認できなかった。これ自体は4章の実験においても、元々触覚で知覚可能な周波数がふんだんに含まれている場合には効果が薄いことが示されており、結果としては矛盾していない。しかし従来研究の多くが胴部に重低音領域の振動を提示することで音楽体験の向上を図っていることとは矛盾している。この原因を探るべく、特に低い周波数での振動伝搬を再度計測したところ、低い周波数を担当するRA-I受容器の活動閾値に達するほどの振動が得られていないことがわかった。この結果は現在のところ鎖骨を介した本手法の限界(重低音領域の振動は十分に提示できない)を示すものであるが、同時に必ずしも低い周波数の振動を提示しなくても音楽体験自体は本デバイスで向上することは示すことが出来たといえる。

### 7.1.3 触覚強度を用いた対象物の前後距離感提示(第 6 章)

本項目では本論文で扱う二つ目の聴覚体験の分類「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」の代表例として、ゲームコンテンツ体験時に一般的に用いられる衝撃提示に着目し、特に聴覚では提示の困難な対象物の前後方向の距離知覚を触覚刺激で改変することを試みた。

まず触覚提示によって聴覚で知覚する音像の前後距離知覚が改変可能かを検証する実験 1 を行った。その結果、聴覚音像の前後距離知覚は、手掌部への振動触覚提示によって劇的に手前側に知覚されることが明らかになった。次に提示波形の考慮によって聴覚音像の前後距離知覚を調節可能か検証するため、手掌部に提示する触覚刺激の強度を 4 段階に分けた実験 2 を行った。その結果、提示される振動刺激の強度が強くなるにつれて、音源位置もより手前側に知覚されることが判明した。このことから、左右の音像位置定位とくらべて劣るヒト聴覚の音像の距離知覚においては、手に衝突感として伝わる振動触覚が大きく寄与し、また触覚刺激の強度に応じて音像の距離知覚が変化するということが判明した。

### 7.1.4 触覚強度を用いた対象物の前後距離感提示(第 6 章)

前項目より、手に衝突感として伝わる振動触覚が聴覚音像の距離知覚に大きく寄与することが明らかとなった。ただし触覚強度は衝突自体の強度によっても変化することが考えられることから、本項目では衝撃の強度表現と距離表現を独立に提示するため、衝撃の強度に依存しない前後距離知覚の提示が可能かを検討した。衝突感が振動刺激として手掌部に提示された際の簡易力学モデルを元に、触覚提示部位の考慮として振動の重心位置の変化のみで主観的な距離知覚が変化するかを検証した(実験 3)。その結果、聴覚提示を伴わず、また振動の強度を一定に保ったままでも、手掌部の振動の重心位置の変化のみで物体の衝突距離が主観的に変化することが判明した。これらの一連の実験を通じて、ゲームコンテンツにおける打撃感提示といった「振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況」において、打撃の強度、前後方向の距離知覚といった聴覚刺激のみでは提示困難な情報を提示するための設計指針を得ることが出来た。

ただし、7.1.3, 7.1.4 においては振動源から伝わる振動を触覚提示することで対象物の前後方向距離知覚の改変には成功したものの、前後方向距離知覚が聴覚体験にどのように寄与するかまでは検証できていない。また 7.1.4 で用いた簡易力学モデルは厳密には物体衝突時の振動ではなく物体衝突時の力学的な関係を示したものであり、実際に実験結果はモデルから構築した仮説と完全に一致するものではなかったため、この点に関してはさらなる考察が必要と考えられる。

以上の結果から本論文は、音楽聴取や対象物の前後距離知覚といった限られた状況下ではあるものの、第一章で述べた「音と振動の同時知覚が距離感の手がかりとなる」という着想を元に、聴覚と触覚が同時知覚される二つの状況

- i. 振動源から空気伝搬された振動が聴覚刺激を生じ、それに伴った触覚刺激を生じる状況
- ii. 振動源から振動が直接身体に伝わり、それに伴った聴覚刺激を生じる状況

に対して、i の状況においては音と同時知覚される触覚で聴覚体験の臨場感の拡張、ii の状況においては音と同時知覚される触覚で聴覚体験の距離感の拡張を行い、触覚提示が限定される

モバイル環境の聴覚体験において自己と対象の空間的関係の改変を達成したと考えられる。

## 7.2 今後の展望

本節では本研究の今後の展望を述べ本論文の結びとする。

前項までに述べたように、本論文ではモバイル環境における触覚による聴覚体験の拡張を提案、実証した。その中で見出した制約、および今後の課題を以下にまとめる。

音の周波数を2の階乗分の1の周波数となるよう分周して触覚として提示する手法は、元々触覚で知覚可能な周波数を多く含む音楽に対しては効果が無かった。このことを考慮して、任意の音楽に対して最適な触覚刺激信号を生成する手法をアルゴリズム化する必要がある。これは基本的に音楽に含まれる周波数成分の解析によって実現可能と考えられる。

また特に音楽に関しては、楽器の種類に応じて触覚提示の手法を変えることが効果的である可能性がある。例えば打楽器に応じた触覚が音楽体験を向上させることは容易に想像できるが、一方で弦楽器に応じた触覚は継続的に指先に振動を伝えることになり、煩わしいと感じられる可能性もある。これは楽器の種類にかぎらず、音楽がリズムカルか落ち着いたか、という内容にも踏み込んだ触覚提示の検討が必要であると考えられる。実際、第4章の実験でもちいたクラシック音楽は比較的落ち着いた音楽であったため、触覚提示によって音楽体験が向上したと感じられなかったという意見が多く見られた。こうした音楽の内容に合わせた触覚提示は今後重要な課題となっていくと考えられる。特に現在は、音楽から各楽器の楽譜を自動抽出する技術[75]も実用化されており、こうした技術を触覚提示に援用することは、今後の触覚による聴覚体験拡張の中心課題の一つとなると考えられる。

骨伝導によって広範囲に振動を効率良く伝える手法は、主に RA-II 受容器の担当する高周波においては効果が見られたものの、RA-I 受容器が担当する低周波においては効果が低かった。いわゆる重低音が腹に響く感覚までも提示できれば応用範囲が広がると考えられるため、このための手法を考える必要がある。関連する研究として、ワイヤを胸部に巻きつけ、モータによって駆動するものが存在している[58]。この手法では現在のところ、胸部に糸を巻き付けており、日常生活での利用には工夫が必要と考えられるが、モータは特に低周波を提示するためには優れた手法であり、この手法を我々の手法と組み合わせることは十分考えられる。例えばベルトに装着するような形で腹部全体に低周波を提示する手法が考えられる。

また我々は鎖骨部を、比較的衣服に覆われていない部分として選定したが、逆に衣服自体を触覚提示の媒体として利用することも考えられる。実際大石らは衣服を牽引することで身体の広い範囲に触覚を提示する手法を提案している[66]。こうした手法を組み合わせ、または取捨選択し、全身への触覚提示による音楽体験向上の最終形を示すことが今後必要となる。

さらに骨伝導を用いた予備的な検討において、オルゴール音楽を用いた場合に全身に触覚提示されることが違和感を生じたという報告は、聴覚体験自体のもつ文脈に合った触覚提示を行う必要性を示唆している。この内観報告や、第4章で得られた「落ち着いた音楽では聴覚体験が向上したと感じられなかった」「音楽の強弱やリズムのみを触覚提示した場合聴覚体験が低下する場合がある」という結果は、本論文が第一の分類で試みた「音楽を触覚で知覚しやすくさせる」ことのみが音楽聴取体験の向上につながるのではない、ということを示唆している。この点に関し、聴覚体験の向上がどのような要素で支えられているかを踏まえて再考が必要である。

触覚を手掌部に伝えることによって距離感を改変する手法については、打撃という一例に関しては比較的成功したと考えている。ただしこの項目については距離感を改変できたというクロスモーダル研究の域を出ておらず、音楽体験の向上のような、聴覚体験自体の価値向上に寄

与するということまでは示していない。このため、今後は例えばテニスゲーム、野球ゲームのような場面で触覚による前後の距離感を提示することで、主観的な体験が変化するか、またどのような変化がよりユーザにとって「好ましい」と感じられるかを確認する必要がある。また本手法では片手における振動の重心位置を変化させることで距離感を改変させたが、モバイル環境下で使用される端末はそのサイズやコンテンツに応じて把持の方法(縦持ち、横持ち、縁を掴むようにもつ、片手、両手など)が変わることが予想される。把持方法が変わっても同様の手法で距離感を改変可能についても確認する必要がある。

本論文では、触聴覚クロスモーダル現象に着目して触覚刺激による聴覚知覚への影響を検証したが、クロスモーダル現象は触聴覚間にかぎらず複数の感覚間で生じることが示されている[37][42][52][77]。実用的な聴覚体験例を考えた時、例えば映画鑑賞やゲームコンテンツには触聴覚の他に視覚など、他の感覚が組み合わせられて提示されることが考えられ、今後は触聴覚以外のモダリティによる聴覚体験への影響を考慮する必要がある。



# 謝辞

本論文は、著者が電気通信大学大学院 情報理工学研究科 総合情報学専攻 博士前期課程及び博士後期課程在学中に行った研究をまとめたものです。本論文を書き上げるにあたり、多くの方々にご指導、ご協力を頂きました。

学部時代よりご指導を賜りました指導教員の梶本裕之准教授に心から御礼申し上げます。研究者としての考え方、心構えのみならず、あらゆる面でご指導、ご助言を頂きました。先生の下で研究を行えたことは大変に有りがたく、何事にも変えられない経験であったと思います。

本論文の審査をご快諾して下さった本学 兼子正勝教授、坂本真樹教授、広田光一教授、野嶋琢也准教授には本論文の審査を通じて数多くの重要なご指摘、コメントを頂きました。深く感謝申し上げます。

本論文の 3.2 節の内容は、著者の博士前期課程時代の留学先であるフランス、パリ大六大学の Vincent Hayward 教授の研究室で計画、実施したものです。一留学生を温かく迎え入れて下さった Hayward 教授と研究室メンバーに感謝致します。

本論文の第 4 章の内容は、株式会社ニコン 栗林英範様との共同研究として行われました。栗林様には研究の進め方や論文化にあたり様々なご配慮を頂きました。感謝致します。

本論文の 5.3-5.5 章の内容は、研究室の後輩である櫻木怜君との共同研究によって得られた成果であり、本論文に大きく貢献しています。この場を借りてお礼申し上げます。

本学の小泉直也助教、研究室秘書の生田順子さん、研究室研究員の Yem Vibol 博士には研究に際しいつもご助力やお気遣いをして頂きました。深く感謝致します。また現筑波大学橋本悠希助教、現大阪大学古川正紘助教、現東京大学福嶋政期博士、現株式会社チカクの佐藤未知博士、現筑波大学蜂須拓博士を始めとした多くの先輩方には、研究室所属時はもとより、卒業後も学会や研究会などで声をかけて頂き、また様々な相談にのって下さいました。お礼申し上げます。

岡部裕之君、横山牧さんを始めとした同期、留学生として短いながらも共に研究した Merwan Achibet さん、赵姝杨さんや、渡辺亮君、池野早紀子さん、中村拓人君、櫻木怜君をはじめとした優秀な後輩達に囲まれて研究を行えたことに改めて深く感謝致します。

最後になりましたが、本研究を完遂するにあたりご協力いただきました皆様、いつも私を温かく支えてくれた家族と友人に心からの感謝とお礼を申し上げ、謝辞にかえさせていただきます。

## 参考文献

- [1] Amemiya, T. Ando, H., and Maeda, T.: Lead-Me Interface for a Pulling Sensation from Hand-held Devices, *ACM Transactions on Applied Perception*, 5(3), pp.1-17, 2008.
- [2] Bekesy, G.: Neural funneling along the skin and between the inner and outer hair cells of the cochlea. *Journal of the Acoustical Society of America*, 31(9) pp.1236–1249, 1959.
- [3] Bolanowski, S. J. Jr., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., and Checkosky, C. M.: Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5), pp.1680-1694, November, 1988.
- [4] Bone Fone: A new Concept in Sound Technology May Revolutionize the Way We Listen to Stereo Music; *Popular Science*, 215(6), 13, Times Mirror Company, Los Angeles (1979, December)
- [5] Bruns, P., and Röder, B.: Tactile Capture of Auditory Localization: an Event-Related Potential Study; *European Journal of Neuroscience*, 31(10), pp.1844-1857, May, 2010.
- [6] Bruns, P., Spence, C., and Röder, B.: Tactile Recalibration of Auditory Spatial Representations; *Experimental Brain Research*, 209(3), pp.333-344, March, 2011.
- [7] Caclin, A., Soto-Faraco, S., Kingstone, A., and Spence, C.: Tactile “Capture” of Audition; *Perception and Psychophysics*, 64(4), pp.616-630, May, 2002.
- [8] Chafe, C., O'Modhain, S.: Musical Muscle Memory and the Haptic Display of Performance Nuance. *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference*, pp1-4, (Hong-Kong, China, August 1996), 1996.
- [9] Chauhan, P.: Auditory-tactile Interaction using Digital Signal Processing in Musical Instruments. *IOSR Journal of VLSI and Signal Processing*, 2(6), pp.8-13, (2013, July-August).
- [10] Crompvoets, F., Brokken, D., van den Eerenbeemd, J., and de Vries, G. J.: A Body-conforming Tactile Jacket to Enrich Movie Viewing. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp. 7-12 (Salt Lake City, USA, 2009, March)
- [11] Dijk, E. O., Weffers, A. A., and de Zeeuw, T.: A Tactile Actuation Blanket to Intensify Movie Experiences with Personalised Tactile Effects; *Proceedings of International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment* pp. 2-3, (2010, April)
- [12] Gillmeister, H. and Eimer, M.: Tactile Enhancement of Auditory Detection and Perceived Loudness, *Brain Research*, 1160, pp.58-68, March, 2010.
- [13] Grandin, T., and Scariano, M. M., カニングハム 久子(編):我, 自閉症に生まれて; 学習研究社, 東京都 (2009)
- [14] Hachisu, T., and Kajimoto, H.: HACHISStack: Dual-Layer Photo Touch Sensing for Haptic and Auditory Tapping Interaction; *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1411-1420, (Paris, France, 27 April –2 May, 2013)
- [15] Hass, W. J.: Personal Audio Listening System; U.S. Patent US4070553 A (1978, January)
- [16] How to truly listen, TED Talk  
[https://www.ted.com/talks/evelyn\\_glennie\\_shows\\_how\\_to\\_listen?language=en](https://www.ted.com/talks/evelyn_glennie_shows_how_to_listen?language=en) (Access 2016 年 3 月 7 日)
- [17] ITU-R BT.2020-2, International Telecommunication Union, [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf) (Last Access 2016 年 4 月 14 日)

- [18] Imamura, Y., Arakawa, H., Kamuro, S., Minamizawa, K., and Tachi, S.: HAPMAP: Haptic Walking Navigation System with Support by the Sense of Handrail. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011 (Vancouver, Canada, August, 2011)
- [19] Israr, A. and Poupyrev, I.: Surround Haptics: Tactile Feedback for Immersive Gaming Experiences. Proceedings of the ACM Computer Human Interaction, pp. 2019-2028, (Vancouver, Canada, 2011, May)
- [20] Israr, A., Kim, S.-C., Stec, J., and Poupyrev, I.: Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display, Proceedings of the ACM Computer Human Interaction Extended Abstracts, pp.1087-1090, (Vancouver, Canada, 2011, May),
- [21] Kandel, E., Schwartz, J., Jessell, T. "Principles of Neural Science," Chapter 22 The Bodily Senses, p.433, McGraw-Hill Medical, Fourth Edition, 2000.
- [22] Karam, M., Branje, C., Nespoli, G., Thompson, N., Russo, A.F., and Fels, D. I.: The Emoti-chair: an Interactive Tactile Music Exhibit. Proceedings of the ACM Computer Human Interaction, pp.3069-3074 (Atlanta, USA, 2010, April)
- [23] Karam, M., Russo, F. A., and Fels, D. I.: Designing the Model Human Cochlea: An Ambient Crossmodal Audio-tactile Display; IEEE Transactions on Haptics, 2(3), pp.160-169 (2009, July-September)
- [24] Kuchenbecker, K. J., Romano, J. M., and McMahan, W.: Haptography: Capturing and Recreating the Rich Feel of Real Surfaces; Invited paper at International Symposium on Robotics Research, September,2009.
- [25] Kurihara, Y., Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., and Kajimoto, H.: Virtual Alteration of Body Material by Periodic Vibrotactile Feedback; Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference, pp.31-34, (Orlando, FL, USA, March 16-23, 2013)
- [26] Kurihara, Y., Koge, M., Okazaki, R., and Kajimoto, H.: Large-area Tactile Display using Vibration Transmission of Jammed Particles. Proceedings of the IEEE Haptics Symposium, pp.313-317, (Houston, USA, 2014, February)
- [27] Lee, J., and Choi, S.: Real-time Perception-level Translation from Audio Signals to Vibrotactile Effects. Proceedings of the ACM Computer Human Interaction, pp.2567-2576 (Paris, France, 2013, April)
- [28] Lim, J. M., Lee, J. U., Kyung, K. U., and Ryou, J. C.: An Audio-haptic Feedback for Enhancing User Experience in Mobile Devices. Proceedings of the IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.49-50 (Las Vegas, USA, 2013, January).
- [29] Lim, J.-M., Lee, J.-U., Kyung, K.-U., and Ryou, J.-C.: An Audio-haptic Feedback for Enhancing User Experience in Mobile Devices; Proceedings of the IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.49-50 (Las Vegas, USA, 2013, January)
- [30] Lindeman, R. W., Yanagida, Y., Noma, H., and Hosaka, K.: Wearable Vibrotactile Systems for Virtual Contact and Information Display; Virtual Reality, 9(2), pp.203-213, 2006.
- [31] Maeno, T., Kobayashi, K., Yamazaki, N.: Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors, Bulletin of JSME International Journal, 41(1), pp.94-100, 1998.
- [32] Merchel, S., Altinsoy, M. E., and Stamm, M.: Tactile Identification of Non-Percussive Music Instruments. Proceedings of Forum Acusticum, pp.1257-1261 (Aalborg, Denmark, 2011, June).
- [33] Merchel, S., Altinsoy, M. E., and Stamm, M.: Touch the Sound: Audio-driven Tactile Feedback for Audio Mixing Applications; Journal of Audio Engineering Society, 60(1), pp.47-53 (2012, January)

- [34] Merchel, S., and Altinsoy, M. E.: Cross-modal Frequency Matching: Sound and Whole-body Vibration. *Proceedings of Haptic and Audio Interaction Design, Lecture Notes in Computer Science*, 6306, pp.37-45, Springer (2010, September)
- [35] Merchel, S., and Altinsoy, M. E.: The Influence of Vibrations on Musical Experience, *Journal of the Audio Engineering Society*, 62(4), pp.220-234 (2014, April).
- [36] Nanayakkara, S., Taylor, E., Wyse, L., and Ong, S. H.: An Enhanced Musical Experience for the Deaf: Design and Evaluation of a Music Display and a Haptic Chair, *Proceedings of the ACM Computer Human Interaction*, pp.337-346, (Boston, USA, 2009, April)
- [37] Narumi, T., Kajinami, T., Tanikawa, T., Hirose, M.: Meta Cookie, *Proceedings of The ACM SIGGRAPH*, (Los Angeles, USA, July 25-29, 2010).
- [38] Okamura, A.M., Cutkosky, M. and Dennerlein, J.: Reality Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments; *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 6, pp.245–252, September, 2001.
- [39] Palan, S., Wang, R., Naukam, N., Edward, L., and Kuchenbecker, K. J.: Tactile Gaming Vest (TGV), <http://irobotacist.com/2010/03/26/tgv/> (Access 2016 年 3 月 7 日)
- [40] Plomp, R., and Levelt, W. J. M.: Tonal Consonance and Critical Bandwidth. *Journal of the Acoustical Society of America*, 38(4), pp.548-560, April, 1965.
- [41] Rehman, S. U.: Turn Your Mobile into the Ball: Rendering Live Football Game using Vibration, *IEEE Transaction on Multimedia*, 10(6), pp.1022-1033, October, 2008.
- [42] Shams, L., Kamitani, Y., and Shimojo, S.: Illusions: What You See is What You Hear. *Nature*, 408, p.788, December, 2000.
- [43] Sreng, J., Lécuyer, A., Andriot, C., and Arnaldi, B.: Spatialized Haptic Rendering: Providing Impact Position Information in 6DOF Haptic Simulations Using Vibrations; *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 3-9, (Lafayette, Louisiana, USA, 2009, March)
- [44] Sundberg, J.: Chest Wall Vibrations in Singers. *Journal of Speech and Hearing Research*, 26(3), pp.329–340, September, 1983.
- [45] Szendro, P., Vincze, G., and Szasz, A.: Pink-noise Behavior of Biosystems. *European Biophysics Journal*, 30(3), pp.227-231, July, 2001.
- [46] T-Jacket. <http://www.mytjacket.com/> (Access 2016 年 3 月 7 日)
- [47] Tajadura-Jiménez, A., Väljamäe, A., Kitagawa, N., and Ho, H. N.: Whole-Body Vibration Influences on Sound Localization in The Median Plane; *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(10), pp.1311-1320, October, 2010.
- [48] Tajadura-Jiménez, A., Väljamäe, A., Toshima, I., Kimura, T., Tsakiris, M. and Kitagawa, N.: Action Sounds Recalibrate Perceived Tactile Distance, *Current Biology*, 22(13), pp516-517, 2012.
- [49] Takahashi, N., Okazaki, R., Okabe, H., Yoshikawa, H., Aou, K., Yamakawa, S., Yokoyama, M., and Kajimoto, H.: Sense-Roid: Emotional Haptic Communication with Yourself; *Proceedings of Virtual Reality International Conference*, 14-17, (Laval, France, 2011, April)
- [50] Tanaka, Y., Ueda, Y., and Sano, A.: Effect of Skin-transmitted Vibration Enhancement on Vibrotactile Perception. *Experimental brain research*, 233(6), pp.1721-1731, (2015, March).
- [51] Teh, J. K. S., Cheok, A. D., Choi, Y., Fernand, C. L., Peiris, R. L. and Fernando, O. N. N.: Huggy Pajama: a Parent and Child Hugging Communication System. *Proceedings of the ACM International Conference on Interaction Design and Children*, pp.290-291, (Como, Italy, 2009, June)
- [52] Violentyev, A., Shimojo, S., and Shams, L.: Touch-induced Visual Illusion. *NeuroReport*, 16(10),

- pp.1107-1110, July, 2005.
- [53] Wilson, E. C., Braida, L. D., and Reed, C. M.: Perceptual Interactions in the Loudness of Combined Auditory and Vibrotactile Stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5), pp.3038-3043, May, 2010.
- [54] Wilson, E. C., Reed, C. M., and Braida, L. D.: Integration of Auditory and Vibrotactile Stimuli: Effects of Phase and Stimulus-Onset Asynchrony. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(4) pp.1960-1974, October, 2009.
- [55] Wilson, E. C., Reed, C. M., and Braida, L. D.: Integration of Auditory and Vibrotactile Stimuli: Effects of Frequency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5), pp.3044-3059, May, 2010.
- [56] Withana, A., Koyama, S., Saakes, D., Minamizawa, K., Inami, M., and Nanayakkara, S.: RippleTouch: Initial Exploration of a Wave Resonant Based Full Body Haptic interface, *Proceedings of Augmented Human International Conference*, pp.61-68, (Singapore, 2015, March)
- [57] Xperia Z5 Premium SO-03H, SONY, <http://www.sonymobile.co.jp/xperia/docomo/so-03h/> (Last Access 2016年4月14日)
- [58] Yamazaki, Y., Mitake, H., and Hasegawa, S.: Tension-Based Wearable Vibroacoustic Device for Music Appreciation. *Proceedings of Euro Haptics, Lecture Notes in Computer Science*, 9775, 2, pp. 273-283, Springer (2016, July)
- [59] Yannier, N., Israr, A., Lehman, F. J., and Klatzky, L. R.: FeelSleeve: Haptic Feedback to Enhance Early Reading; *Proceedings of the ACM Computer Human Interaction*, pp.1015-1024 (Seoul, Korea, 2015, April)
- [60] Yau, J. M., Weber, A. I., and Bensmaia, S. J.: Separate Mechanisms for Audio-Tactile Pitch and Loudness Interactions. *Frontiers in Psychology*, 1, pp.1-11, October, 2010.
- [61] Yoo, Y., Hwang, I., and Choi, S.: Consonance Perception of Vibrotactile Chords: A Feasibility Study. *Proceedings of Haptic and Audio Interaction Design, Lecture Notes of Computer Science*, 6851, pp.42-51, Springer (2011, August)
- [62] 井手口健, 熊田信義, 永野秀和: “印象強調を目的とした音楽聴取時の振動付与方法の検討,” *感性工学研究論文集*, 3(1), pp.53-62, 2003.
- [63] 内山恵二: 感覚・知覚の科学 3 触覚の生理学, 朝倉書店, pp.88-89, 2008.
- [64] 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.
- [65] 映画は3Dのその先へ。『4DX』 | コロナワールド. <http://www.4dx.korona.co.jp/> (Access 2016年4月11日)
- [66] 大石恵利佳, 高下昌裕, Khurelbaatar Sugarragchaa, 梶本裕之: “衣服牽引装置による移動感覚の増強,” *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿*, (2016.June)
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 骨伝導ワイヤレスヘッドホン「CODEO (コデオ)」。 <https://www.ecostation21.com/codeo/> (Access 2016年3月7日)
- [70] コントローラーの歴史 | “PlayStation 4”専用 ワイヤレスコントローラー DUALSHOCK®4 | プレイステーション®オフィシャルサイト. <http://www.jp.playstation.com/dualshock/history.html>

(Access 2016年3月7日)

- [71] 近藤雄治, 寺本渉, 小林まおり, 大谷真: “聴触覚相互作用が音像の距離弁別精度に与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(1), pp.49-52, 2016.
- [72] 坂本修一, 鈴木陽一, 川瀬哲明, 小林俊光: “一側難聴者への適用を考慮した骨伝導補聴器に関する研究,” *Audiology Japan* 49(5), pp.499-500, 2006.
- [73] 鈴木久美子, 熊川孝三, 山根雅昭, 金子康宏: “骨伝導型携帯電話 TS41 の語音聴取能,” *Audiology Japan* 48(5), pp.539-540, September, 2005.
- [74] 体感音響装置, NapFun:NF-07VH, 有限会社 玉河化成,  
<http://www.tamagawakasei.com/CL02/list.php> (Last access 2016/08/01).
- [75] 超高速・高精度 楽曲解析ミドルウェア「BEATWIZ」, 株式会社 CRI Middleware  
<http://www.cri-mw.co.jp/product/amusement/beatwiz/> (Last access 2016/08/01).
- [76] 永野秀和, 井手口健, 畑地洋彦: “アコースティックギターを用いた音楽の体感聴取方法の検討,” 電子情報通信学会論文誌, J87-A(11), pp.1460-1465, 2004.
- [77] 鳴海拓志, 伴祐樹, 梶波崇, 谷川智洋, 廣瀬通孝: “拡張現実感を利用した食品ボリュームの操作による満腹感の操作,” 情報処理学会論文誌, 54(4), pp.1422-1432, 2013.
- [78] ハイレゾの定義, 一般社団法人 日本オーディオ協会, <http://www.jas-audio.or.jp/hires/definition> (Last Access 2016年4月14日)
- [79] 山崎勇祐, 長谷川昌一: “装着型振動提示装置の提案,” バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.36-39, (2015, September)

# 関連発表

## 学術論文

1. 岡崎龍太, 栗林英範, 梶本裕之. : 分周刺激を用いた聴触覚変換手法による聴覚体験向上 ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 21(2), pp.335-343, 2016.

## 国際学会(査読付き)

2. Sakuragi, R., Ikeno, S., Okazaki, R., and Kajimoto, H.: CollarBeat: Whole Body Vibrotactile Presentation via the Collarbone to Enrich Music Listening Experience. International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments (2015).
3. Okazaki, R., Kuribayashi, H., and Kajimoto, H.: The Effect of Frequency Shifting on Audio-Tactile Conversion for Enriching Musical Experience. Asia Haptics 2014, November 18-20, 2014, Tsukuba, Japan.
4. Okazaki, R., and Kajimoto, H.: Altering Distance Perception from Hitting with a Stick by Superimposing Vibration to Holding Hand. Euro Haptics Conference2014, June 24-26, 2014, Versailles, France.
5. Okazaki, R., and Kajimoto, H.: Perceived Distance from Hitting with a Stick Is Altered by Overlapping Vibration to Holding Hand, CHI 2014, April 26-May 1, 2014, Toronto, Canada.
6. Okazaki, R., and Kajimoto, H.: Perceived Distance from Hitting with a Stick Is Altered by Superimposing Vibration to Palm. ICAT2013: The 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence, December 11-13, 2013, Odaiba, Tokyo.
7. Okazaki, R., Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., Hayward, V., and Kajimoto, H.: Judged Consonance of Tactile and Auditory Frequencies. IEEE World Haptics Conference, April 14-17, 2013, Daejeon, Korea.
8. Okazaki, R., Kajimoto, H., and Hayward, V.: Vibrotactile Stimulation Can Affect Auditory Loudness: A Pilot Study, EuroHaptics Conference2012, Tampere, Finland.

## 国内学会

9. 櫻木怜, 池野早紀子, 岡崎龍太, 梶本裕之 : 全身触覚における鎖骨部位の有効性と評価, インタラクシオン 2015(第 19 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム), 2015.
10. 櫻木怜, 池野早紀子, 岡崎龍太, 梶本裕之 : 鎖骨を介した振動伝播による体内触覚提示, エンタテインメントコンピューティング 2014 (2014年9月 明治大学 中野キャ

ンパス) , 2014.

11. 岡崎龍太, 梶本裕之: 手掌部への振動提示による触覚的距離推定, 第 15 回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会,(2014 年 12 月, 東京ビッグサイト), 2014.

12. 岡崎龍太, 梶本裕之: 把持棒による物体打撃時の振動重心変化に伴う触覚的位置推定錯誤, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (2014 年 5 月 富山市総合体育館) , 2014.

13. 岡崎龍太, 梶本裕之: 杖を把持した手掌部への振動重畳による打撃対象の距離錯誤. 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(2013 年 12 月 神戸), 2013.

14. 岡崎龍太, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, Hayward Vincent, 梶本裕之: 触覚-聴覚間における周波数的協和性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (2013 年 5 月 つくば国際会議場) , 2013.

15. 岡崎龍太, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, Hayward Vincent, 梶本裕之: 触覚刺激による聴覚強度知覚への影響, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2012 年 12 月 福岡国際会議場), 2012.

## 記事

16. (雑誌) 日経エレクトロニクス 2013/1/21 号

17. 日刊工業新聞, 「気分は” コンサート会場” 一電通大, 音に包まれる感覚のヘッドホンシステム実用化へ」, 2015 年 4 月 6 日

18. (TV) World Business Satellite トレンドたまご, [http://www.tv-tokyo.co.jp/mv/wbs/trend\\_tamago/post\\_88004/](http://www.tv-tokyo.co.jp/mv/wbs/trend_tamago/post_88004/)

## 受賞

19. 優秀講演賞, 岡崎, 梶本: 杖を把持した手掌部への振動重畳による打撃対象の距離錯誤, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2013.