JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	触覚刺激提示による音声の非言語情報の知覚の基礎的検討
Author(s)	牧野, 哲平
Citation	
Issue Date	2026-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	https://hdl.handle.net/10119/20549
Rights	
Description	Supervisor:鵜木　祐史, 先端科学技術研究科, 修士(情報科学)

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

修士論文

触覚刺激提示による音声の非言語情報の知覚の基礎的検討

牧野 哲平

主指導教員 鵜木 祐史

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
（情報科学）

令和８年３月

Abstract

Hearing impairment is accompanied by reduced frequency selectivity and decreased temporal resolution in the auditory system. As a result, speech communication becomes difficult, which can consequently lead to a decline in quality of life (QoL). To address this issue, technologies that compensate for auditory function are required. Alternatively, technologies that substitute auditory function using other sensory modalities (auditory substitution) are needed. Tactile receptors are widely distributed over the body surface. Moreover, like hearing, the tactile modality can extract information from vibrations. Therefore, using tactile modality for auditory substitution has potential. Representative examples of tactile-based auditory substitution are Braille and Tactile Vocoder. These approaches are effective for conveying linguistic information. However, challenges remain in transmitting non-linguistic information, such as emotion and urgency. Smooth speech communication requires more than linguistic information alone. Non-linguistic information, such as emotion and urgency, is also important. Hence, realizing tactile-based auditory substitution that can convey non-linguistic information is expected to contribute to improving QoL.

To examine acoustic features effective for perceiving non-linguistic information, findings from auditory perception are referenced. In hearing, temporal amplitude envelope (TAE) information of speech serves as a primary cue. In particular, amplitude-modulation components below 16 Hz are considered important for perceiving emotion and urgency. Meanwhile, the tactile modality is also capable of perceiving envelope components of vibratory stimuli. Based on these findings, temporal amplitude envelope (TAE) information of speech may be utilized as a cue through tactile modulation perception. If so, tactile perception of non-linguistic information in speech may be achievable.

The purpose of this study is to clarify the feasibility of perceiving non-linguistic information in speech through tactile stimulation. To link basic tactile characteristics with outcomes of tactile perception of non-linguistic speech information, three aspects were investigated in a stepwise manner: (i) tactile sensitivity, (ii) modulation perception characteristics in tactile, and (iii) perception of non-linguistic information using speech sounds presented as tactile stimuli.

First, tactile detection thresholds were measured. Tactile sensitivity varies substantially depending on the presentation sites and the type of stimulus. Threshold measurement was required for two reasons. The first reason was to clarify site-dependent differences in sensitivity. The second reason was to obtain reference levels for setting stimulus intensity in subsequent experiments. In this experiment, 30 Hz, 250 Hz, and 1 kHz sinusoidal vibrations and white noise were used as stimuli. The presentation sites were the cheek and the palm.

Next, the temporal modulation transfer function (TMTF) was measured as a characteristic of tactile modulation perception. To discuss whether TAE can be exploited as a cue, it is necessary to determine the modulation-frequency range to which the tactile modality is sensitive. The TMTF represents modulation detection thresholds as a function of modulation frequency under a specific carrier condition. In this experiment, amplitude-modulated stimuli were generated using 30 Hz, 250 Hz, and 1 kHz sinusoidal carriers and a white-noise carrier. The presentation sites were the cheek and the palm. Based on these results, tactile amplitude-modulation perception characteristics were clarified.

Finally, emotion perception and urgency perception experiments were conducted. The stimuli were original speech and noise-vocoded speech (NVS). In the emotion-perception experiment, speech samples expressing five emotions (Neutral, Joy, Cold anger, Sadness, and Hot anger) were used. Participants selected one of the five emotions they perceived. Agreement rates between the stimulus labels and participants' responses, as well as misclassification rates, were evaluated. In the urgency perception experiment, speech samples representing four levels of urgency were used. The evaluations were conducted using Scheffe's method of paired comparisons. The primary information shared by original speech and NVS is TAE. Therefore, if perceptual outcomes are similar between the two stimuli under tactile presentation, such similarity would support the hypothesis that TAE functions as a cue for perceiving non-linguistic information.

The results revealed the following findings:

(1) Tactile detection thresholds were lower at the palm than at the cheek, indicating substantial site-dependent differences.

(2) TMTF of tactile exhibited a bandpass-like shape, and modulation components roughly below 32 Hz were perceivable.

(3) Within the same stimulation site, emotion and urgency perceptions were similar between original speech and NVS.

(4) Emotion and urgency perceptions differed between the palm and the cheek.

The ability to perceive envelope components below 32 Hz in amplitude-modulated tactile stimuli, together with the similarity of emotion and urgency perception between original speech and NVS, suggests that TAE shared by original speech and NVS may have contributed to the perception of non-linguistic information. In conclusion, the feasibility of perceiving non-linguistic information in speech through tactile stimulation can be stated.

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　はじめに 1
1.2　研究背景 2
1.3　研究目的 3
1.4　本論文の構成 3

第 2 章　関連研究 **6**
2.1　触覚の基礎特性 6
2.2　触覚の受容器 6
2.3　触覚による聴覚代行 10
2.4　触覚の振幅変調知覚 10
2.5　音声の時間振幅包絡と非言語情報知覚 12

第 3 章　研究の方略 **14**
3.1　本研究で明らかにすべきこと 14
3.2　方略 14
3.3　実験の流れ 14

第 4 章　触覚の知覚特性の計測 **16**
4.1　触覚刺激提示部位の触覚閾値計測 16
4.1.1　実験刺激 16
4.1.2　実験機器 16
4.1.3　実験参加者 19
4.1.4　刺激提示部位 19
4.1.5　方法 19
4.1.6　結果 23
4.1.7　考察 23
4.2　触覚知覚での時間変調伝達関数の計測 34
4.2.1　実験刺激 34
4.2.2　実験機器 34
4.2.3　実験参加者 34
4.2.4　刺激提示部位 34
4.2.5　方法 34

4.2.6 結果 39
4.2.7 考察 41

第 5 章 触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚 43
5.1 触覚刺激提示による感情知覚 43
5.1.1 実験刺激 43
5.1.2 実験機器 44
5.1.3 実験参加者 44
5.1.4 刺激提示部位 44
5.1.5 方法 44
5.1.6 結果 46
5.1.7 考察 46
5.2 触覚刺激提示による緊迫感知覚 49
5.2.1 実験刺激 49
5.2.2 実験機器 49
5.2.3 実験参加者 49
5.2.4 刺激提示部位 49
5.2.5 方法 49
5.2.6 結果 51
5.2.7 考察 51

第 6 章 全体考察 53

第 7 章 結論 55
7.1 本研究で明らかにしたこと 55
7.2 残された課題 55

付 録 A 刺激提示部位の選定 56
A.1 実験刺激 56
A.2 実験機器 56
A.3 実験参加者 56
A.4 刺激提示部位 56
A.5 方法 56
A.6 結果 58
A.7 考察 58

謝辞 61

参考文献 62

研究業績 66

図 目 次

1.1 研究目的イメージ 4
1.2 本論文の構成 5

2.1 刺激（皮膚変形）に対する各機械受容ユニットの神経活動の模式例 8
2.2 正弦波振動に対する触覚閾値と，1 kHz 正弦波搬送の振幅変調に対する変調閾値 13

4.1 本研究における実験系の概略図 17
4.2 触覚振動子の外観 18
4.3 触覚刺激提示部位 20
4.4 実験用 GUI（触覚閾値測定） 21
4.5 心理測定関数の例 22
4.6 4 種類の刺激に対する掌と頬の触覚閾値 25
4.7 提示部位：掌，提示刺激：30 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数. 26
4.8 提示部位：掌，提示刺激：250 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数. 27
4.9 提示部位：掌，提示刺激：1 kHz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数. 28
4.10 提示部位：掌，提示刺激：白色雑音の時の全実験参加者の心理測定関数. 29
4.11 提示部位：頬，提示刺激：30 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数. 30
4.12 提示部位：頬，提示刺激：250 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数. 31
4.13 提示部位：頬，提示刺激：1 kHz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数. 32
4.14 提示部位：頬，提示刺激：白色雑音の時の全実験参加者の心理測定関数. 33
4.15 3AFC の刺激提示パターンの例 36
4.16 実験用 GUI（TMTF） 37
4.17 触覚知覚における TMTF の計測結果 40

5.1 実験用 GUI（感情知覚） 45
5.2 感情知覚実験の結果：感情認識率 47
5.3 感情知覚実験の結果：混同行列 48
5.4 実験用 GUI（緊迫感知覚） 50
5.5 緊迫感知覚実験の結果 52

A.1 刺激提示部位 57
A.2 各提示部位の触覚閾値 60

表 目 次

2.1 触覚の受容器と役割 9

4.1 触覚振動子の仕様 18
4.2 時間変調伝達関数の計測条件 38

第1章　序論

1.1　はじめに

人間は周囲の音情報を単なる「音」として受け取るだけでなく，環境を把握し，他者と意思疎通を図るための重要な情報源として利用している．しかし，聴覚障がいは環境認識や他者との情緒的・社会的・知的交流の媒体となる音やことばの利用を困難にし，コミュニケーションに大きな影響を及ぼす．さらに，言語の獲得・発達（母語の発達）に支障を来し得るだけでなく，その延長上にある読書や文章作成といった読み書き能力にも連鎖的に影響する．その結果，同じ家庭や社会に属していても相互理解が難しくなり，深刻な心理的・社会的隔たりが生じる場合がある [1]．また，安全性の観点からも，視界の外や背後から接近する車両の音，あるいは周囲からの緊急の呼びかけや警告音に気づきにくいなど，事故リスクを高める可能性がある [2]．聴覚は周囲の全方向からの情報取得を担い，物体の位置や動きの把握に寄与するが，その機能が十分に活用できない場合，視覚など他の手掛かりへの依存を強いられることになる [2]．このように，聴覚障がいは，聴覚系の周波数選択性や時間分解能を低下させ，音声コミュニケーションの困難さや日常生活上の不利益を招き，結果としてQoL（Quality of Life）を低下させてしまう．

これらの課題に対して，補聴器や人工内耳など聴覚機能を補完する技術や，他の感覚器によって聴覚機能を代行する技術（聴覚代行）の開発が必要である．代表的な聴覚代行として視覚を利用する方法があり，手話や字幕提示として広く用いられている [3]．しかし，視覚は情報受容量が最大である反面，刺激入力から認知が成立するまでの認知時間が不安定であり，高速な時系列信号である音声への追従には限界がある [4]．また，視覚は多くの情報を担う重要な役割を持つ器官である．そのため，聴覚代行に視覚を用いて，視覚を占有することは避けたい．例えば，視覚を用いた聴覚代行により視覚を占有してしまうと，従来の口話法と併用しにくいことや，常に注視しなければならないため幼児には不向きであるなどの欠点が挙げられる [5]．加えて，聴覚障がいと視覚障がいを併発する場合には，視覚に依存する聴覚代行は利用が困難となる．そのため，視覚以外の方法で聴覚を代行するような技術もまた有用であると考えられる．

こうした背景から，触覚に着目した聴覚代行が検討されてきた．触覚受容器は身体表面に広く分布し，聴覚と同様に，振動から情報を取得可能という利点をもつ [6]．

円滑な音声コミュニケーションにおいて重要なのは，言語情報だけではない．音

声には話者の感情や態度，緊迫感，意図などの非言語情報が含まれており，これらはコミュニケーションの質に大きく関与する．

したがって，言語情報だけでなく，非言語情報の伝達も可能な触覚による聴覚代行技術の実現は，聴覚障がい者が他者の感情や状況の機微をより適切に理解することを支援し，QoL 向上に寄与すると考えられる．

1.2 研究背景

触覚を用いた音声伝達，聴覚代行の試みは古く，触覚による音声提示装置の試作や，音声信号を周波数帯域ごとに分解して指先などに提示する手法が段階的に発展してきた [6]．

聴覚代行の代表的な研究として，伊福部らの提案したタクタイルボコーダ [7] がある．伊福部らは，指先の空間分解能を活用することで母音の識別が可能であること，また触覚の時間分解能の限界を補うために子音部を時間伸長して提示する手法が有効であることを，心理物理実験により示した．その後，この知見を基に，タクタイルボコーダを提案した．タクタイルボコーダは，16×3 列の振動子アレイを用いて，音声のフォルマント情報を空間的パターンと振動の強弱として触覚提示するものであり，言語情報知覚の可能性を示した．しかし，この方法の仕組み上，感情といった非言語情報を知覚させることは困難である．

このように，従来の触覚による聴覚代行は言語情報の知覚に成果を挙げてきた．一方で，非言語情報を扱うための設計指針は整理されていない．そこで，非言語情報の知覚に有効な音響特徴量は何かという観点から，聴覚側の知見を参照する必要がある．

近年の聴覚心理学的検討により，音声の時間振幅包絡（Temporal Amplitude Envelope: TAE）が音声知覚において重要な役割を担うことが明らかになってきた．TAE は言語情報の知覚 [8–13] に寄与するだけでなく，話者の感情や緊迫感などの非言語情報の知覚 [12–17] にも深く関与する．TAE の変調周波数成分において，0〜16 Hz の成分は感情知覚 [13, 15–17] に，4〜16 Hz の成分は緊迫感知覚 [14, 18] に重要であることが報告されている．

さらに触覚においても，振動刺激の振幅包絡成分を検知する能力が備わっていることが知られている．従来，触覚が知覚可能な周波数帯域は聴覚に比べて狭く，おおむね 1 kHz 程度までと考えられてきた．しかし，高周波振動（1000–2000 Hz）であっても，適切な振幅変調を付与すれば，その包絡成分を独立した感覚として知覚できることが報告されている [19]．

聴覚において非言語情報の知覚に音声の時間振幅包絡が重要であるという知見と，触覚において振幅変調の包絡成分を知覚できるという知見を踏まえると，同じアナロジーとして，触覚の変調知覚として音声刺激の振幅包絡線情報を知覚可能であれば，触覚で音声の非言語情報を知覚することが可能かもしれない．

1.3　研究目的

本研究の目的は，触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚の実現可能性を明らかにすることである．研究目的のイメージを図 1.1 に示す．目的の達成のために，まず，触覚知覚の検知閾を調査し，触覚の変調知覚として時間変調伝達関数を調査する．次に，触覚刺激提示による音声の非言語知覚実験（感情知覚・緊迫感知覚）を行う．最後に，触覚の変調知覚の観点から，これらの結果の関係を議論し，触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚の実現可能性を明らかにする．

1.4　本論文の構成

本論文は 7 章で構成される．図 1.2 に本論文の構成を示す．

第 1 章： 本研究の背景，目的，および意義について述べる．

第 2 章： 本研究に関連する先行研究を整理し，本研究の位置づけを明確化する．

第 3 章： 触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚の実現可能性を検討するための研究方略を示す．

第 4 章： 触覚の基礎的な知覚特性として，提示部位ごとの触覚閾値および時間変調伝達関数（TMTF）を計測し，部位差と変調知覚特性を明らかにする．

第 5 章： 触覚刺激提示による感情知覚実験および緊迫感知覚実験を実施する．

第 6 章： 第 4 章および第 5 章の結果に基づき，触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚の実現可能性について総合的に考察する．

第 7 章： 本研究で明らかになったことと残された課題について述べる．

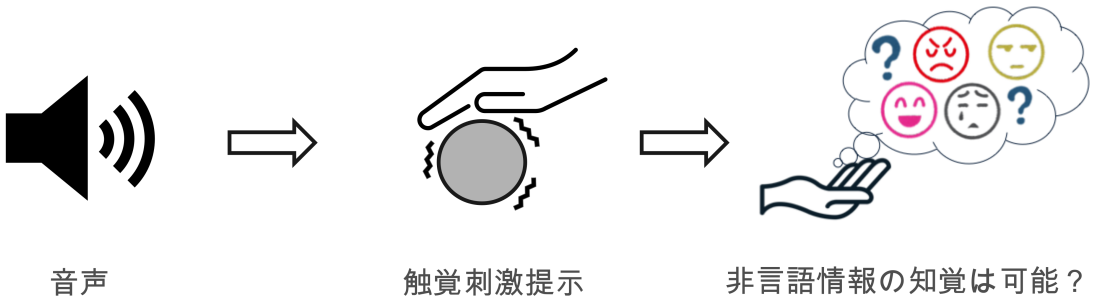


図 1.1: 研究目的イメージ

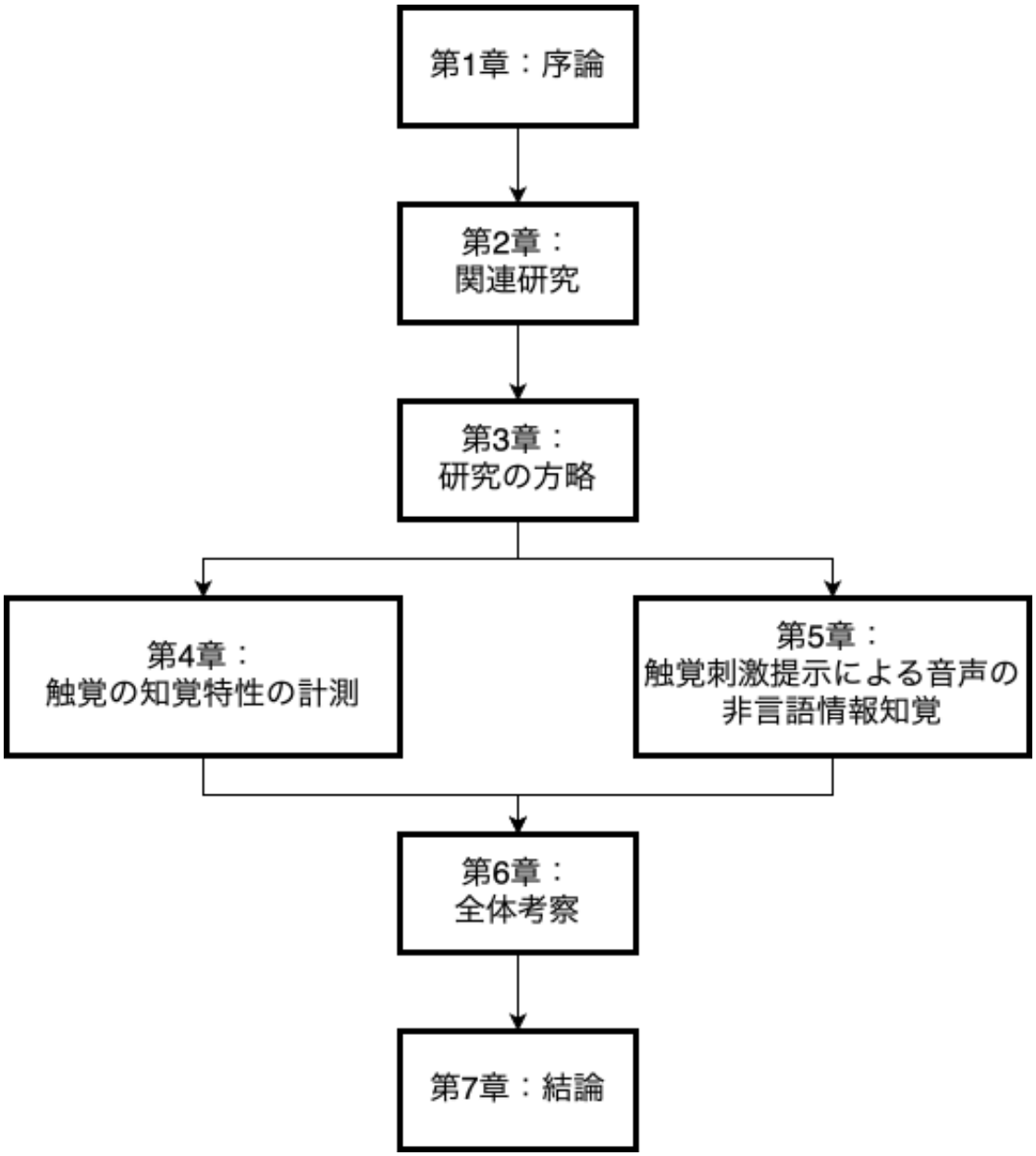

第1章：序論
第2章：
関連研究
第3章：
研究の方略
第4章：
触覚の知覚特性の計測
第5章：
触覚刺激提示による音声の
非言語情報知覚
第6章：
全体考察
第7章：結論

図 1.2: 本論文の構成

第2章　関連研究

2.1　触覚の基礎特性

触覚とは，対象に触れた際に生起する感覚である [20]．また，触覚は皮膚が外部刺激を受けて生起する感覚であることから，皮膚感覚とも呼ばれる [20]．

触覚は，皮膚が受ける刺激の種類や触れる対象の性質に応じて，生起する感覚が異なる．触覚は主に次の 4 つに分類される [20]．

- 触圧覚（物体に触れたり圧迫を受けたりした際に生じる感覚）
- 振動覚（振動や震えを感じ取る感覚）
- 温度覚（冷たさ・暖かさを感じ取る感覚）
- 痛覚（痛みを感じる感覚）

本研究では音声を触覚刺激として扱う．音は物理的には振動であるため，音声の触覚提示では振動覚として知覚される．そのため，以降は振動覚に焦点を当てる．

触覚は一般に数 Hz から 1 kHz の範囲で感度を示し，感度は周波数に依存して変化する [21]．正弦波振動の検知可能な振幅（閾値）を周波数に対してプロットすると，200〜250 Hz 付近で最小となる U 字型の周波数特性が報告されている [20,22]．触覚は 200〜250 Hz 付近で最も高感度であり，低周波側および高周波側では感度が低下する．

2.2　触覚の受容器

触覚は，皮膚内に存在する機械受容器の応答に基づいて生起される [20, 21]．皮膚には複数種類の機械受容器が存在し，それぞれが刺激の空間特性および時間特性（周波数成分）に対して異なる感度を示す [20, 21]．本節では，振動覚に関与する機械受容器の分類とその特性について概説する．

機械受容器とそれに対応する求心性神経線維の活動は，機械受容ユニットとして扱われる [20, 21]．機械受容ユニットは，刺激に対する順応性（応答の持続性）と応答を示す皮膚領域である受容野の範囲から，4 種類に分類される [20, 21]．順応性は，刺激の変化に対して主に応答する速順応型（Fast Adapting: FA）と，持

続的な刺激に対しても応答を維持する遅順応型（Slowly Adapting: SA）に大別される [23]．また，受容野は，領域が狭く境界が明瞭なI型と，領域が広く境界が不明瞭なII型に分けられる [23]．以上の2軸を組み合わせることで，SA I，SA II，FA I，FA IIの4種類に分類される [23]．

刺激（皮膚変形）に対する各機械受容ユニットの神経活動の模式例を図 2.1 に示す．図 2.1 から，SA Iは皮膚変位そのものと，皮膚の押し込み速度成分に応答すること，SA IIは皮膚変位そのものに持続的に応答すること，FA Iは皮膚の押し込み速度成分に応答すること，FA IIは皮膚の押し込みの加速度成分に応答することが確認できる．[20,21,23,24]

一般に，SA Iは静的な歪（垂直方向の力）に対して応答し，SA IIは皮膚の伸張や横ずれに関連した応答を示すとされる [20,21,23,24]．一方，FA Iは低周波振動，FA IIは高周波振動に対して高い感度を示すことが知られている [20,21,23,24]．また，振動の周波数の知覚は，これらの受容器の活動比率により決定されると考えられている [21]．

ヒトの皮膚は，掌や足底などの無毛部と，毛根が存在する有毛部に大別され，部位により機械受容器の種類や分布が異なる [20,21,23,24]．無毛部では，SA Iがメルケル細胞，SA IIがルフィニ終末，FA Iがマイスナー小体，FA IIがパチニ小体に対応すると考えられている [20,21,24]．一方，有毛部では，SA Iが触覚盤，SA IIがルフィニ終末，FA Iが毛包受容器，FA IIがパチニ小体に対応すると考えられている [20,21,24]．

以上の知見をまとめたものを表 2.1 に示す．

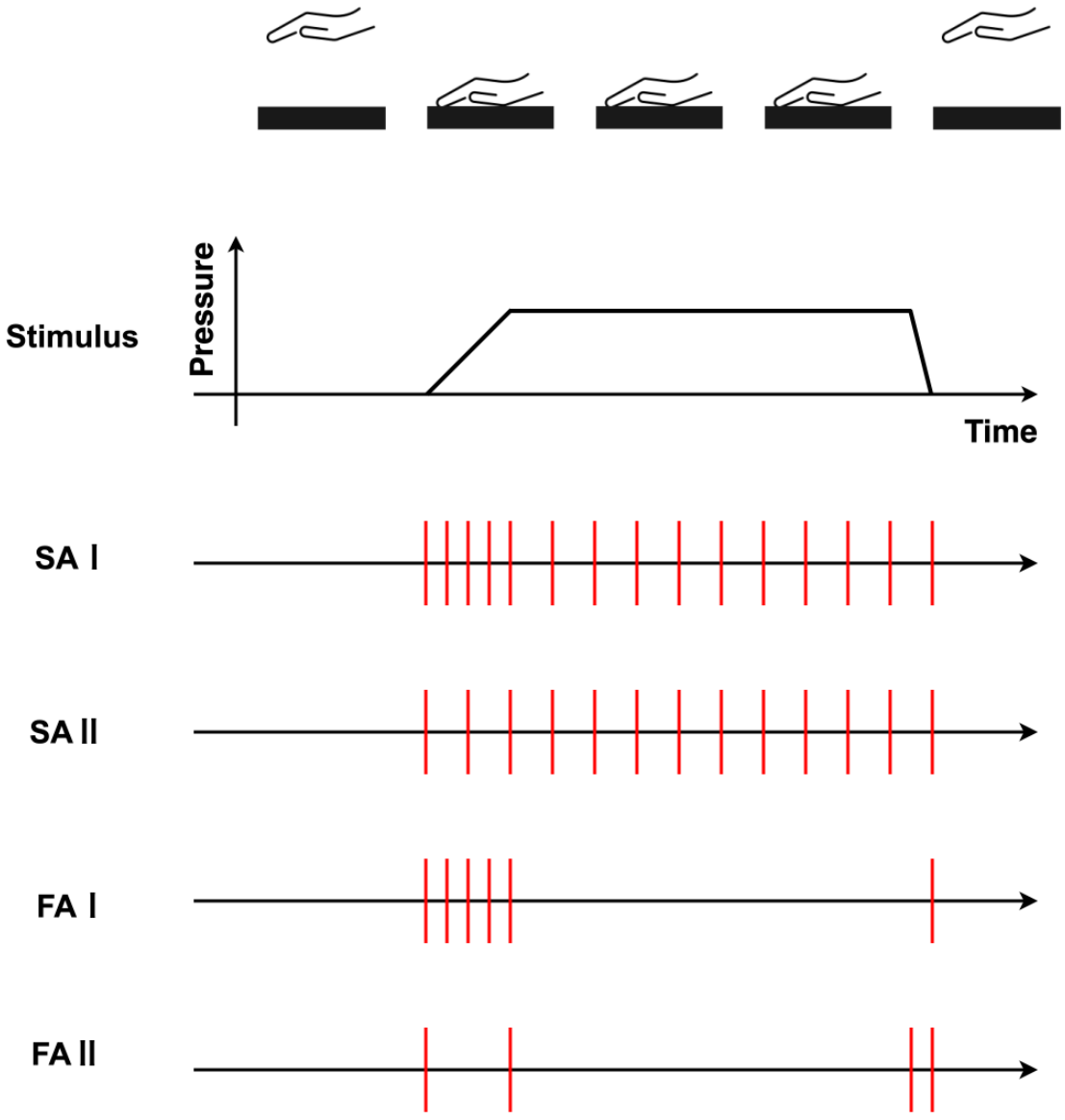


図 2.1: 刺激（皮膚変形）に対する各機械受容ユニットの神経活動の模式例．文献 [20, 21, 23, 24] を基に作成.

表 2.1: 触覚の受容器と役割

機械受容ユニット	SA I	SA II	FA I	FA II
機械受容器（無毛部）	メルケル細胞	ルフィニ終末	マイスナー小体	パチニ小体
機械受容器（有毛部）	触覚盤	ルフィニ終末	毛包受容器	パチニ小体
応答周波数 [Hz]	0〜100	–	1〜300	5〜1000
共振周波数 [Hz]	5	–	30〜50	200〜250
役割	静的な歪に応答	静的な横ずれに応答	低周波振動に応答	高周波振動に応答

2.3 触覚による聴覚代行

聴覚代行は，他の感覚器によって聴覚機能を代行する技術である．代表的なものとして，手話や字幕提示のように視覚を用いる方法が広く普及している [3]．しかし，視覚の占有や注視負荷の問題から，触覚を用いた聴覚代行が検討されてきた．触覚は視覚に比べて情報受容量は小さいものの，認知時間が非常に安定しており，音声のような高速な時系列信号の処理に適しているという利点がある [4]．さらに，触覚は，触覚受容器は身体表面に広く分布し，聴覚と同様に，振動から情報を取得可能という利点をもつ [6]．

聴覚代行の代表例として，伊福部らの提案したタクタイルボコーダがある [7]．伊福部らは心理物理実験を通じて，触覚刺激の空間分解能を用いた母音識別の可能性，ならびに触覚の時間分解能の制約を補うために子音部を時間伸長して提示する方策の有効性を示し，それらの知見に基づいてタクタイルボコーダを提案した [7]．タクタイルボコーダは，音声を帯域分割し，主にフォルマント情報に対応する強度変化を，16×3 列の振動子アレイ上の空間パターンと振動強度として提示する方式であり，触覚提示による言語情報知覚の可能性を示した [7]．

音声の韻律情報を触覚で提示する試みがある．上田・渡邉は，韻律をアクセント要素と時間要素の複合として捉え，複数要素を同時に識別する課題を通じて視覚・触覚呈示方式を比較評価する枠組みを提案した [25]．同グループはさらに，触覚呈示において話者性が母音識別の混同を招く点に着目し，ピッチとフォルマントの相関に基づく周波数軸伸縮（スペクトル正規化）を提案し，多数話者の母音識別における有効性を示している [26]．

近年は，触覚デバイスの高性能化を背景に，音声を触覚へ多チャネル変換して提示するアプローチが注目されている．Fletcher らは，複数周波数チャネルで音声を触覚提示する audio-to-tactile 変換を提案し，音声の有声・無声の対立や調音位置の伝達に有効であることを報告した [27]．同グループはさらに，振幅包絡の拡張（amplitude envelope expansion）を導入することで，母音のフォルマント特徴を強調し，静音下および雑音下での頑健性を改善できる可能性を示した [28] ．

Răutu らは，カクテルパーティ環境のような多話者雑音下において，音声由来信号の触覚提示が音声認識閾値（SRT）を改善することを報告している [29]．

これらの研究は主として語音聴取（言語情報知覚）を目的としており，本研究が対象とする感情・緊迫感などの非言語情報を，触覚で知覚可能か，どの音声の特徴量を介して触覚で知覚するのかという点は依然として不明である．

2.4 触覚の振幅変調知覚

触覚における振動知覚は，一般に数 Hz から 1 kHz 程度の範囲で議論されるが，振幅が時間的に変動する刺激（振幅変調波）の場合には，搬送波が高周波であっても包絡成分が知覚され得ることが報告されている [19]．

Lamore らは，通常は知覚できない高周波（1000〜2000 Hz）の正弦波振動に 200 Hz 付近の振幅変調を加えると振動感覚が誘発されることを報告した [19]．図 2.2 に，Lamore らによって測定された，正弦波振動刺激の周波数に対する触覚（絶対）閾値，および 1 kHz 正弦波を搬送波とした振幅変調刺激の変調検出閾値を示す．変調周波数に対する感度の曲線が，パチニ小体（FAII）の知覚特性に類似していることが確認された [19]．また Weisenberger は，正弦波搬送波（25–250 Hz）および広帯域雑音搬送波に対して変調閾値（変調伝達関数）を測定した．その結果，250 Hz 搬送波条件では約 40 Hz の変調周波数で最も良好な感度が得られ，広帯域雑音搬送波では正弦波搬送波と比較して感度が低下することを報告した [30]．

図 2.2 で示されるように，変調周波数に対する感度の曲線が，パチニ小体（FAII）の知覚特性に類似していることから，振幅変調知覚のメカニズムは，皮膚→受容器→神経発火の間に存在する非線形（整流）作用により包絡成分が生成され，その包絡成分を手掛かりとして検出されると考えられている [19,31]．このことから，受容器の分布の差により，振幅変調知覚に差が生じることが予想される．実際に，提示部位の受容器分布の違いに着目した振幅変調提示も提案されている．Akiba らは，額部にはパチニ小体が存在しないという点に着目し，一般的な振動子で出力が困難な低周波振動を振幅変調によって提示する手法を提案している [35]．そのため，本研究でも，身体部位の違いによる，触覚の変調知覚特性の違いを明らかにする必要があると考えられる．

近年では，昆陽らのグループによって，音信号や建設ロボットが物体へ接触した時に発生する振動のような高周波成分を含む振動信号に対して，振幅包絡成分に着目した提示法が報告されている [32–34]．包絡を抽出し，触覚で提示可能な周波数帯の搬送波に付与した AM 波形へ変換することで，元の振動がもつ触感情報の保持を可能にした．例えば，Takenouchi らは，遠隔操作ロボット上で計測される高周波の接触振動に対し，接触に関する手掛かり（材質や運動など）が振動の包絡に含まれると考え，計測信号の上限・下限包絡で，人が知覚しやすい周波数帯の正弦振動を振幅変調する手法を提案した [32,33]．評価実験では，ロボットアームが材料に接触しながら滑る際の振動を用い，材料種類および滑り速度の弁別課題において，提案手法が弁別可能条件数を増やすことを示し，遠隔操作における接触状態の「区別しやすさ」を向上させ得ることを報告している [33]．Yamaguchi らは，高周波振動を一般的な触覚提示デバイスで扱いやすい低周波帯へ変換しつつ，元の触感を可能な限り維持することを目的として，時間セグメントごとに強度（intensity）の時間変動を保つ Intensity Segment Modulation（ISM）を提案した [34]．さらに，音に由来する振動を映像（バイオリン演奏や花火）と同期して提示する主観評価を通じて，視聴体験を増強できる可能性を報告している [34]．これらの報告から，複雑な波形の包絡成分の知覚が，触感の保持や，接触状態の区別しやすさの向上に寄与することが考えられる．そのため，触覚は，振幅変調波の搬送波ではなく，包絡成分に基づいて知覚判断を行う可能性がある．

以上を踏まえると，触覚における振幅変調知覚に関する知見は，(1) 包絡成分が

知覚の手掛かりとなり得ること，(2) 変調周波数に対して感度が一様ではなく，成立しやすい周波数帯があること，(3) 搬送波の種類（正弦波・雑音）や提示部位により感度が変動すること，としてまとめられる．これらの点は，後述する触覚提示による音声情報提示を検討する上で重要な前提となる．

聴覚も振幅変調知覚特性を有しており，音声の時間振幅包絡線情報が，音声の非言語情報知覚に重要な手がかりであることが報告されている．次節では，聴覚における非言語情報知覚について，音声の振幅包絡に着目して述べる．

2.5 音声の時間振幅包絡と非言語情報知覚

音波形は，時間振幅包絡線と時間微細構造（Temporal Fine Structure: TFS）に分けて考えることができる．音波形を振幅変調波として捉えると，TAE は変調波に，TFS は搬送波にそれぞれ対応する．聴覚知覚においては，TAE および TFS のいずれもが重要な役割を果たしており，TAE は主に語音情報の知覚に寄与し，TFS はピッチ知覚や音源定位に貢献することが報告されている [36–38]．

雑音駆動音声（Noise Vocoded Speech: NVS）を用いることにより，音声の TAE の役割が調査されている．NVS は，音声の TAE を保持したまま，音声の TFS を帯域制限された白色雑音に置き換えることで生成される．音声の TAE が言語情報知覚 [8–13] のみならず，個人性 [12, 16] や感情 [13, 15–17]，緊迫感 [14, 18] といった非言語情報の知覚にも寄与することが報告されている ．

感情知覚について，Zhu らは低域通過フィルタを用いて TAE の変調周波数帯域を制御し，感情知覚に重要な変調周波数成分が 16 Hz 以下であることを示した [16]．さらに，Guo らは，変調フィルタバンク（Modulation Filterbank: MFB）を用いて変調周波数帯域の制御を行い，感情知覚に重要な変調周波数成分が 0〜16 Hz であることを示した [17]．

緊迫感知覚について，Unoki らは，低域通過フィルタ，高域通過フィルタを用いて TAE の変調周波数帯域を制御し，緊迫感知覚に重要な成分が 6〜8 Hz であることを示した [14]．さらに，Kidani らは MFB を用いて変調周波数帯域の制御を行い，緊迫感知覚に重要な変調周波数成分が 4〜16 Hz であることを示した [18]．

以上の先行研究は，非言語情報（感情，緊迫感）の主要手掛かりが TAE の変調周波数成分 0〜16 Hz に含まれることを示唆する．

一方で触覚は，前節で述べた通り，振幅変調波の変調成分を知覚可能である．[19,30]．触覚でも音声の TAE の変調周波数成分 0〜16 Hz を知覚可能であれば，触覚でも非言語情報知覚の可能性があると言える．

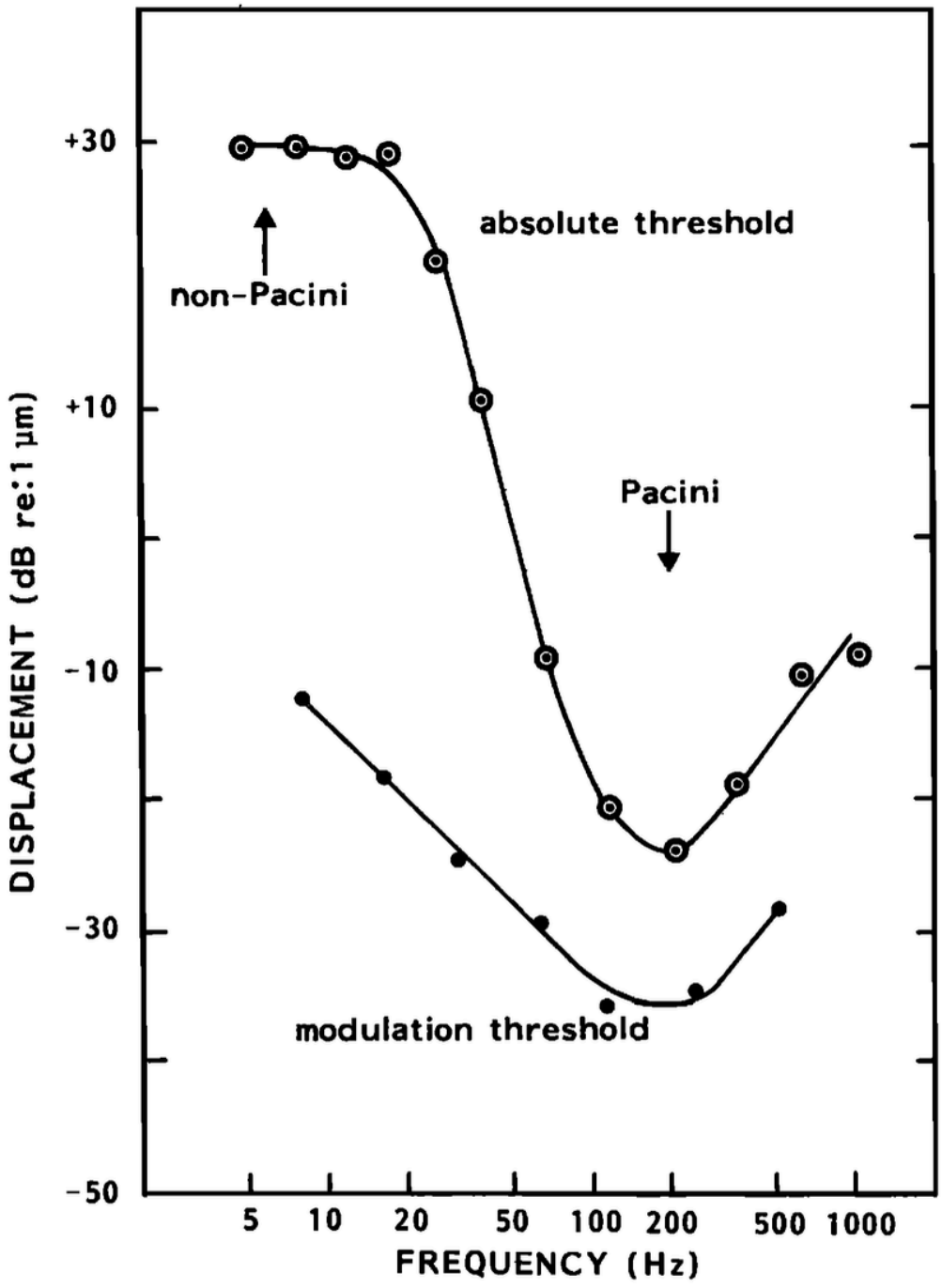


図 2.2: （上の曲線）正弦波振動に対する触覚閾値と,（下の曲線）1 kHz 正弦波搬送の振幅変調に対する変調閾値．Reprinted with permission from [19]. Copyright 1986, Acoustical Society of America.

第3章　研究の方略

3.1　本研究で明らかにすべきこと

本研究の目的の達成には，以下の点を明らかにする必要がある．

- 触覚における変調知覚特性と，非言語情報知覚に重要な変調帯域（0〜16 Hz）との関係
- 原音声と NVS の比較による，触覚提示時の非言語情報知覚への TAE の寄与
- 提示部位差（掌・頬）による非言語情報知覚の差

3.2　方略

聴覚における音声知覚では，音声波形の時間振幅包絡（TAE）が言語情報のみならず感情や緊迫感といった非言語情報の知覚にも寄与することが報告されている．特に，感情知覚および緊迫感知覚では，TAE の低変調周波数帯域（概ね 16 Hz 以下）が重要であることが示されている．一方，触覚においても，振幅変調刺激の包絡成分が知覚の手掛かりとなり得ることが報告されている．触覚の変調知覚特性と音声の TAE の重要帯域との対応関係を結びつけることで，触覚刺激提示によって音声の非言語情報知覚が成立する可能性を明らかにすることができるかもしれない．そこで本研究では，(1) 触覚の知覚特性の計測，(2) 原音声と TAE を保持した刺激（NVS）を用いた非言語情報知覚実験の 2 段階で検証する．

3.3　実験の流れ

本研究では以下の実験を段階的に実施する．

1．触覚刺激提示部位の触覚閾値計測

触覚は，提示部位や刺激周波数により感度が大きく異なる．そのため，後続実験における刺激強度設定の基準を得ること，および提示部位の差異（受容器分布・感度差）を明らかにすることを目的として，掌および頬における触覚閾値を測定

する．

2．触覚知覚での時間変調伝達関数の計測

触覚で音声の TAE を手掛かりとして利用し得るかを議論するには，触覚がどの変調周波数帯域に感度を示すかを明らかにする必要がある．そこで，複数の搬送波条件に対して変調閾値を測定し，触覚の変調周波数選択性と，音声の非言語情報知覚に重要な変調帯域との整合性を検討する基盤を構築する．

３．感情知覚実験と緊迫感知覚実験

触覚刺激提示においても，非言語情報知覚に寄与する主要な手掛かりは TAE であるかを検証するため，原音声と NVS を触覚刺激として提示し，知覚の一致性を評価する．原音声と NVS で共通する情報は TAE であるため，両刺激で知覚結果が類似すれば，TAE が主要手掛かりであることの根拠となる．本研究では，非言語情報として，感情と緊迫感について検討する．

第4章　触覚の知覚特性の計測

4.1　触覚刺激提示部位の触覚閾値計測

4.1.1　実験刺激

触覚刺激の信号には周波数が 30 Hz，250 Hz，1 kHz の正弦波と白色雑音の 4 種類が用いられた．サンプリング周波数は 48000 Hz，時間長は 500 ms とし，刺激の立上りと立下りにはテーパー処理を施した．

4.1.2　実験機器

図 4.1 に実験系の概略図を示す．実験は防音室で行われた．防音室外に設置された PC 上で再生された刺激（MathWorks MATLAB R2023a）は，オーディオインターフェース（RME Fireface UCX）でアナログ信号に変換され，防音室内に設置されたミキシングコンソール（YAMAHA MG10XUF）を介して，触覚振動子（Foster ACTUATOR 639897）へ出力された．この出力は実験参加者に触覚刺激として提示された．本研究で利用した触覚振動子の外観を図 4.2 に，触覚振動子の仕様を表 4.1 に示す．触覚振動子の出力に相当する電圧値を記録するために，オシロスコープ（Teledyne LeCroy WAVEJET324-A）が触覚振動子と並列に接続された．サージカルテープ（ニチバンスキナゲート SG25）を用いて触覚振動子を提示部位に固定した．併せて実験参加者は耳栓とイヤーマフを装着した．

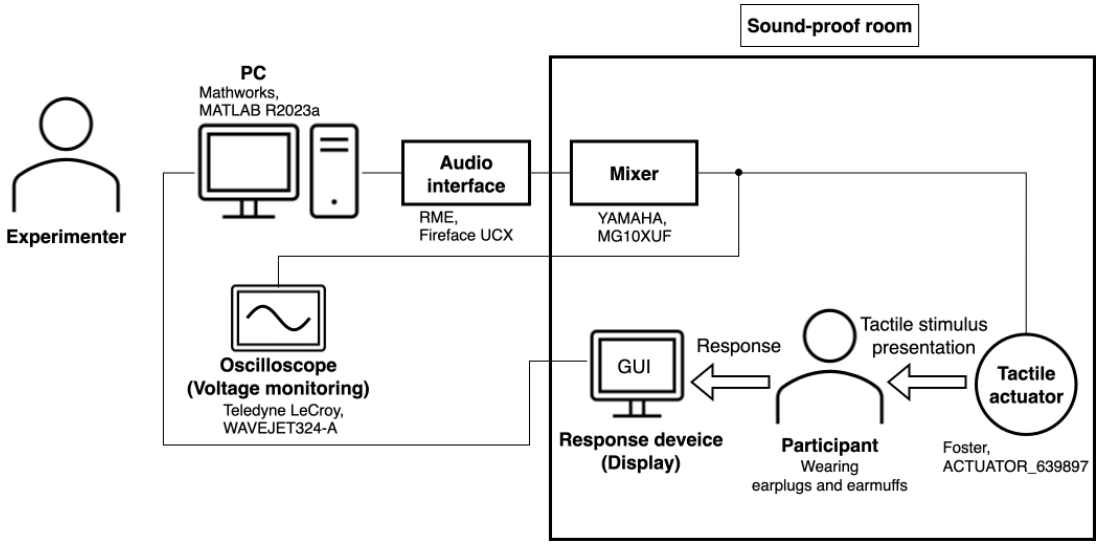


図 4.1: 本研究における実験系の概略図

表 4.1: 触覚振動子の仕様

Size	ϕ 25 mm $\times$ 27 mm
Impedance	5.7 Ω
Rated Input Voltage	1.0 Vrms
Maximum acceleration frequency	65 Hz
Vibration acceleration	2.61 Gp-p at 65 Hz (200 g)
Net Weight	28.0 g

図 4.2: 触覚振動子の外観

4.1.3 実験参加者

実験には正常聴力を有する日本語母語話者 8 名（大学院生 23〜26 歳）が参加した．男性 6 名（右利き 3 名，左利き 3 名），女性 2 名（右利き 2 名）であった．

4.1.4 刺激提示部位

図 4.3 に触覚刺激の提示部位を示す．本研究では，提示部位は 2 箇所（左半身の掌，頬）とした．刺激提示部位は，予備的検討によって決定された．選定理由および予備的検討の詳細は，付録 A に示す．

4.1.5 方法

調整法と恒常法 [39] を用いて，触覚閾値を測定した．

まず，実験参加者に触覚刺激の強度レベルを操作させ，振動覚が生じる最小の強度レベルに一致するよう調整させた．この調整を 5 回繰り返して得られた結果の平均を，各参加者の基準強度レベルとした．

次に，基準強度レベルを中心に，−9〜+9 dB の範囲で 3 dB 刻みに強度レベルを調整した 7 水準の触覚刺激（$i = 1, 2, \ldots, 7$）を用意した．刺激強度レベルは，オシロスコープ上で表示される電圧値を参照して制御された．1 回の計測につき，1 水準あたり 20 試行，7 水準で計 140 試行を実施した．ここでは 7 水準の刺激をランダムに提示し，各試行において刺激の知覚の有無を回答させた．

各刺激強度 x_i に対して，「有」回答の出現比率を

$$P_i(\mathrm{YES}) = \frac{n_i(\mathrm{YES})}{N_i} \qquad (i = 1, 2, \ldots, 7) \tag{4.1}$$

により算出した．ここで，$n_i(\mathrm{YES})$ は強度 x_i における「有」回答回数，N_i は当該強度での試行回数（本研究では $N_i = 20$）である．

得られた出現比率 $P_i(\mathrm{YES})$ を，ロジスティック関数で近似した心理測定関数

$$P(\mathrm{YES} \mid x) = \frac{1}{1 + \exp(a + bx)} \tag{4.2}$$

として表し，最小二乗法によりパラメータ a, b を推定した．本研究では，MATLAB の `lsqcurvefit` 関数を用いてフィッティングを行った．導出される心理測定関数の例を図 4.5 に示す．

最後に，心理測定関数において「有」回答率が 50% となる刺激強度を触覚閾値 x_{th} と定義した．式 (4.2) に $P(\mathrm{YES} \mid x_{\mathrm{th}}) = 0.5$ を代入すると，

$$\frac{1}{1 + \exp(a + bx_{\mathrm{th}})} = 0.5 \quad \Rightarrow \quad x_{\mathrm{th}} = -\frac{a}{b} \tag{4.3}$$

を得る．

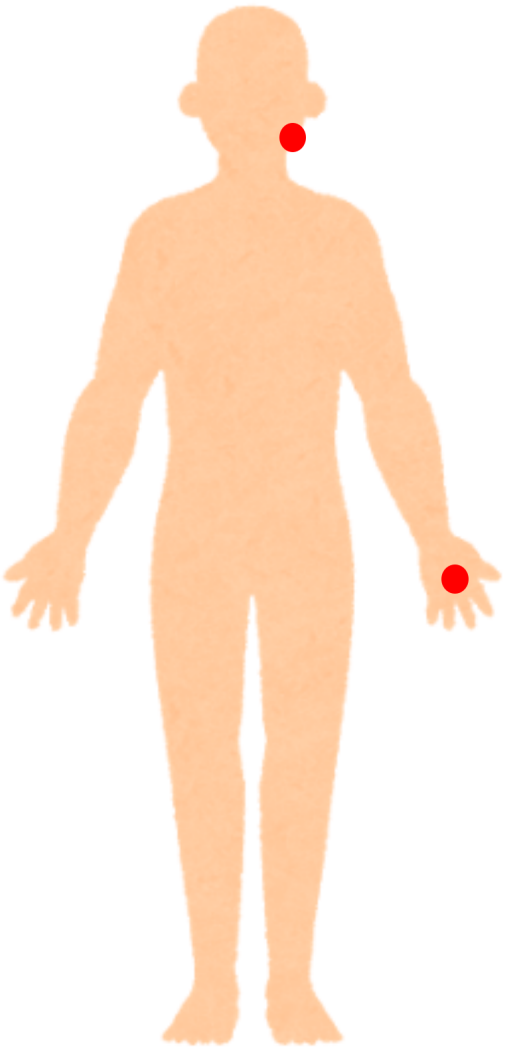
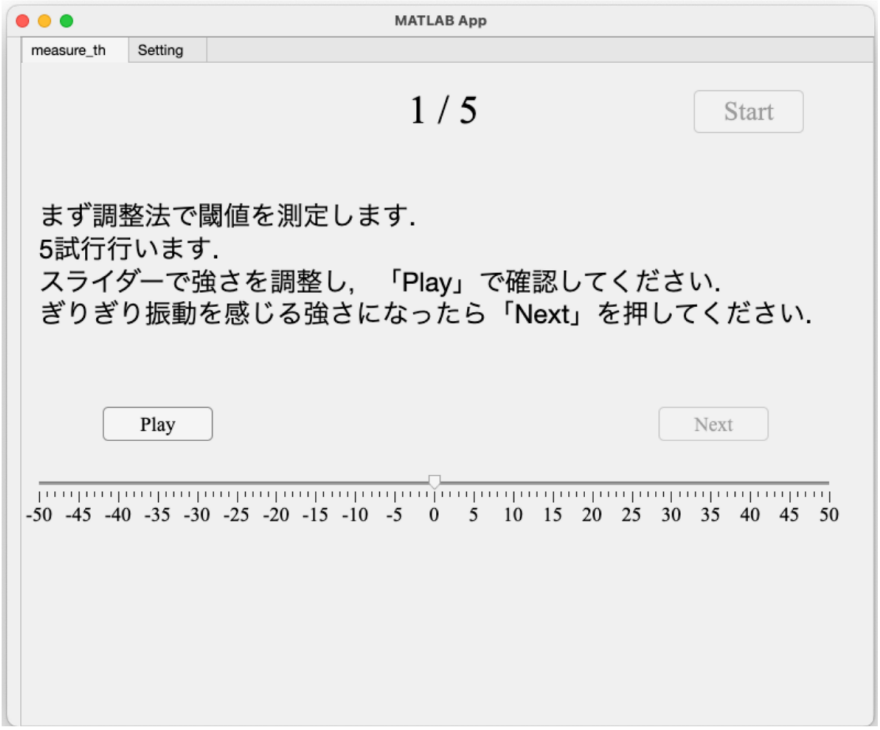


図 4.3: 触覚刺激提示部位

(a)



(b)

図 4.4: 実験用 GUI（触覚閾値測定）．(a) 調整法，(b) 恒常法.

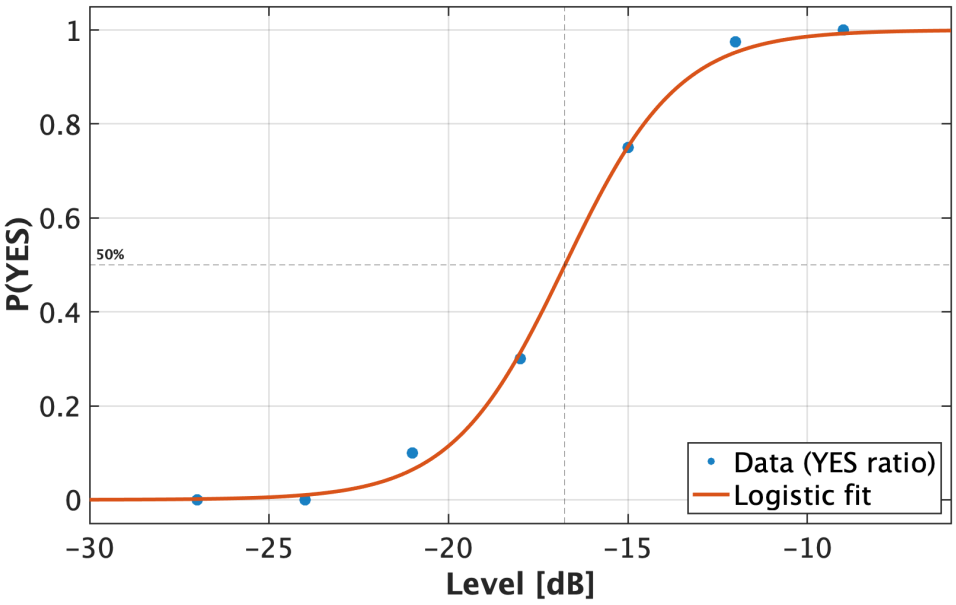


図 4.5: 心理測定関数の例

4.1.6　結果

図 4.6 に，各提示部位および各刺激条件における触覚閾値の平均値と標準偏差を示す．また，図 4.7〜図 4.14 に，各提示部位および各刺激刺激条件で導出された，全実験参加者の心理測定関数を示す．閾値は，基準電圧 1 Vrms に対する出力電圧を dB 換算した値である．掌における触覚閾値の平均は，250 Hz 正弦波刺激で最も低く −49.48 dB（SD = 7.36 dB）であった．続いて，白色雑音 −26.94 dB（SD = 5.08 dB），30 Hz 正弦波 −26.86 dB（SD = 3.27 dB），1 kHz 正弦波 −4.65 dB（SD = 4.04 dB）の順に閾値が低かった．頬における触覚閾値の平均は，30 Hz 正弦波刺激で最も低く −23.49 dB（SD = 4.78 dB）であった．続いて，250 Hz 正弦波 −19.09 dB（SD = 8.65 dB），白色雑音 −9.43 dB（SD = 12.43 dB），1 kHz 正弦波 6.89 dB（SD = 6.48 dB）の順に閾値が低かった．

掌と頬を比較すると，全ての刺激条件において掌の閾値が頬より低い傾向がみられた．

4.1.7　考察

触覚には，メルケル細胞，ルフィニ終末，マイスナー小体，パチニ小体の 4 種類の機械受容器が存在することが知られている [21]．このうち，振動刺激に対して主に応答する受容器はマイスナー小体およびパチニ小体である．マイスナー小体は約 10〜50 Hz，パチニ小体は 50〜400 Hz の振動に対して高い感度を示す [21]．また，マイスナー小体は 30 Hz 付近に，パチニ小体は 250 Hz 付近に感度のピークを有し，パチニ小体の方が一般に高感度であることが報告されている [21]．受容器の分布に関して，掌にはマイスナー小体およびパチニ小体が分布しているが，頬を含む顔面の有毛皮膚にはこれらの受容器は分布せず，マイスナー小体に類似した特性を有する毛包受容器が存在すると考えられている [40]．

本実験で得られた結果は，これらの知見と整合的である．具体的には，掌において 250 Hz 正弦波刺激の触覚閾値が最も低く，頬と比較しても大幅に低い値を示した．このことから，250 Hz 付近に高い感度を有するパチニ小体の寄与は，頬よりも掌において大きいことが考えられる．

一方，30 Hz 正弦波刺激においては，掌と頬の閾値差が小さいことが確認された．これは，30 Hz 付近に高い感度を有するマイスナー小体，あるいはそれに類似した受容器の寄与が，両部位において同程度であることを示唆している．

また，1 kHz 正弦波刺激では，両部位において触覚閾値が高い値を示した．この結果は，ヒトの触覚における知覚可能な周波数の範囲が 0.4 Hz〜1 kHz であり，周波数感度が 250 Hz 付近をピークとし，高周波数側では低下するという知見 [21] と一致している．

白色雑音刺激については，掌の触覚閾値が頬よりも低い傾向が認められた．白色雑音には広帯域の周波数成分が含まれるが，触覚知覚においては，マイスナー

小体およびパチニ小体が応答を示す 10〜400 Hz 付近の成分が閾値決定に大きく寄与すると考えられる．このため，これら受容器の分布の違いが，掌と頬の部位差として現れた可能性がある．

以上より，掌にはマイスナー小体およびパチニ小体が分布しており，頬にはマイスナー小体に類似した毛包受容器が主に分布し，パチニ小体は存在しない，もしくは掌と比較して低密度で分布している可能性が示唆される．これら受容器分布の違いを踏まえると，音声波形を触覚刺激として提示した場合，音声波形の時間微細構造（TFS）に関連する高周波成分を手がかりとして利用しやすい部位は掌である可能性が考えられる．

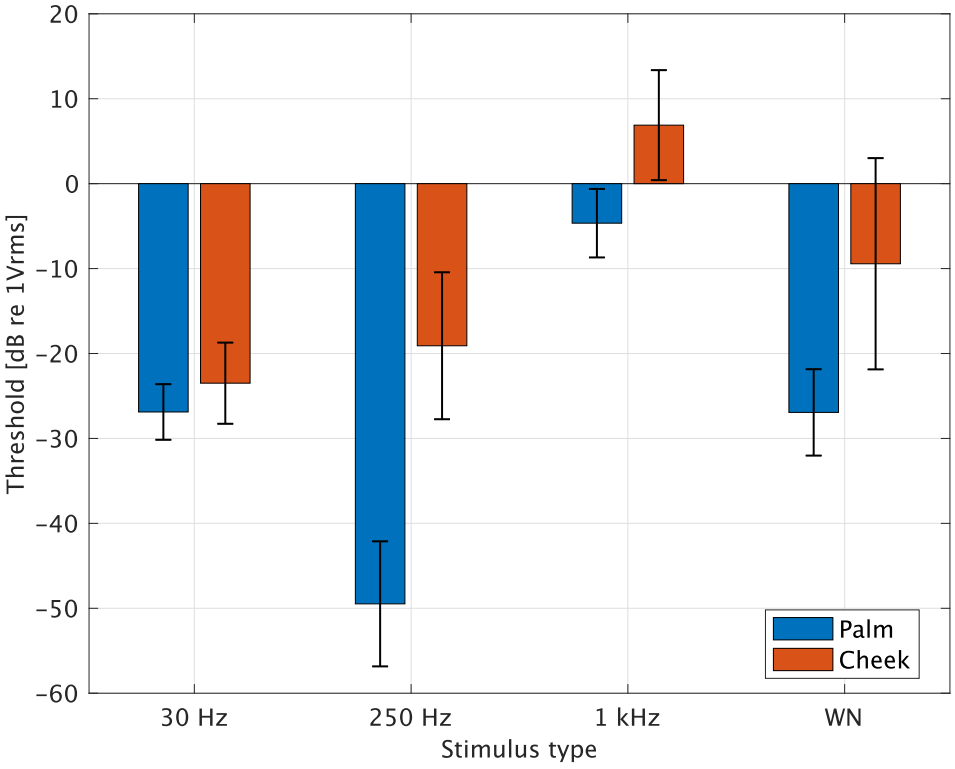


図 4.6: 4 種類の刺激に対する掌と頬の触覚閾値（平均±標準偏差）.

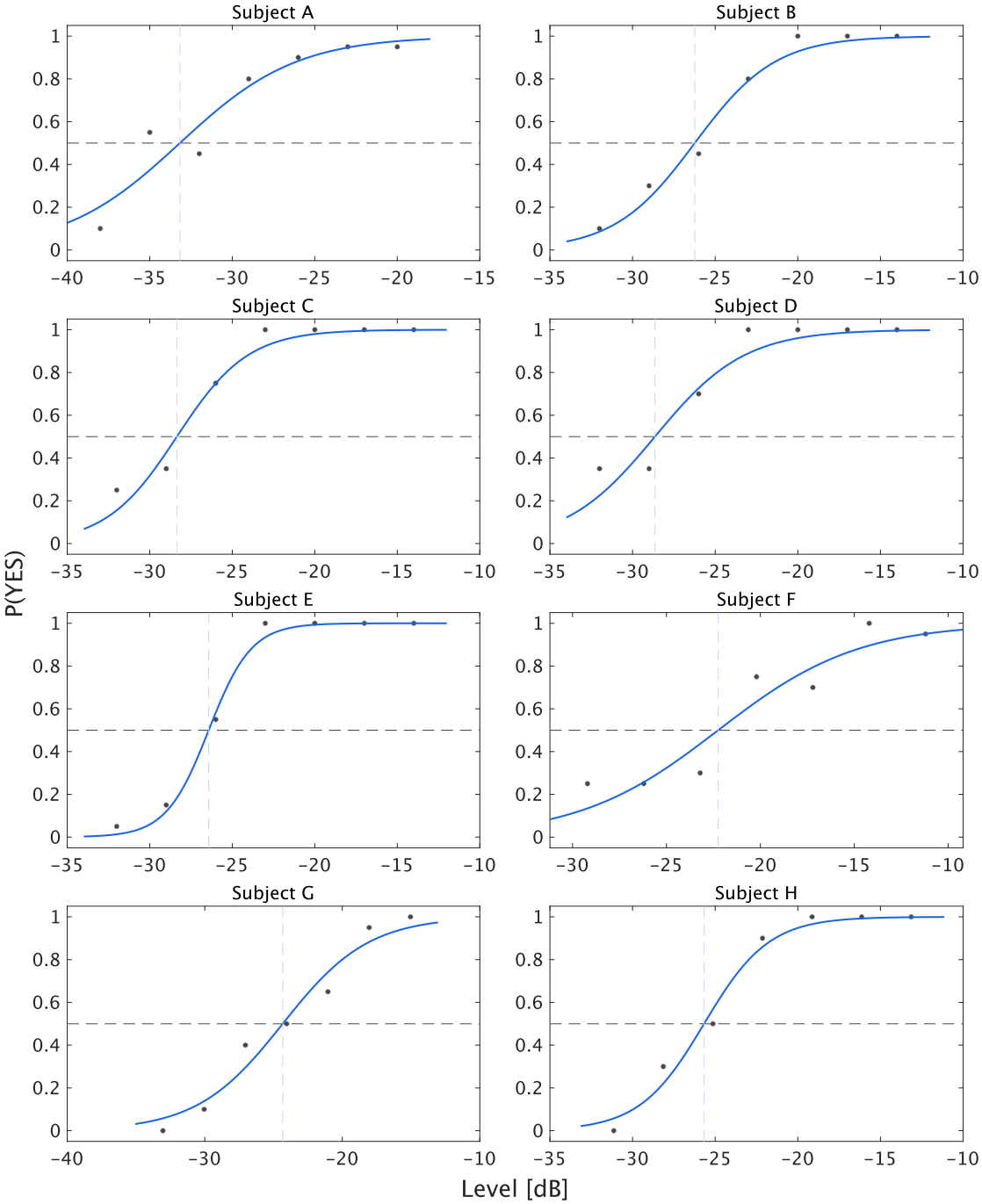


図 4.7: 提示部位：掌，提示刺激：30 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数.

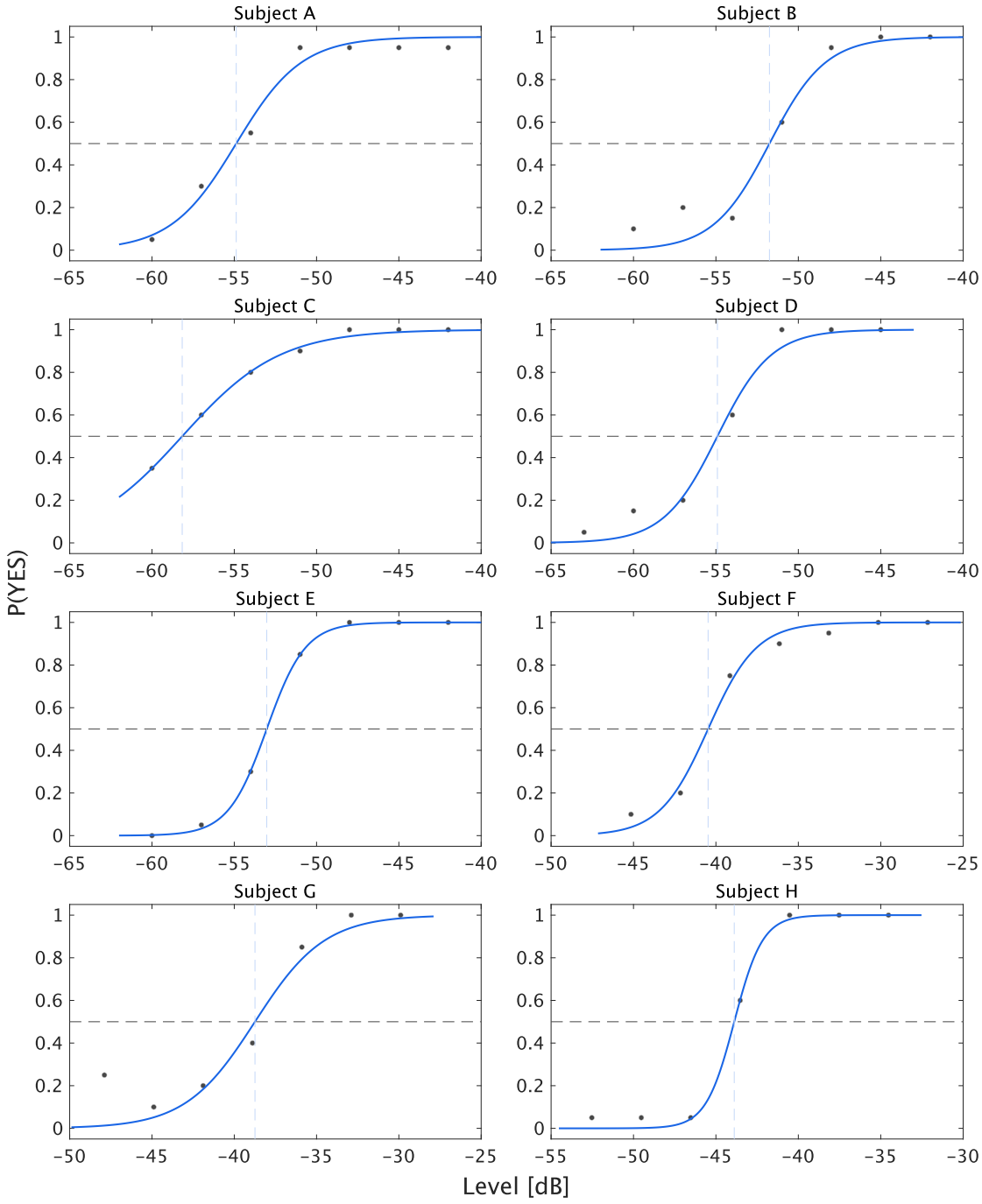


図 4.8: 提示部位：掌，提示刺激：250 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数.

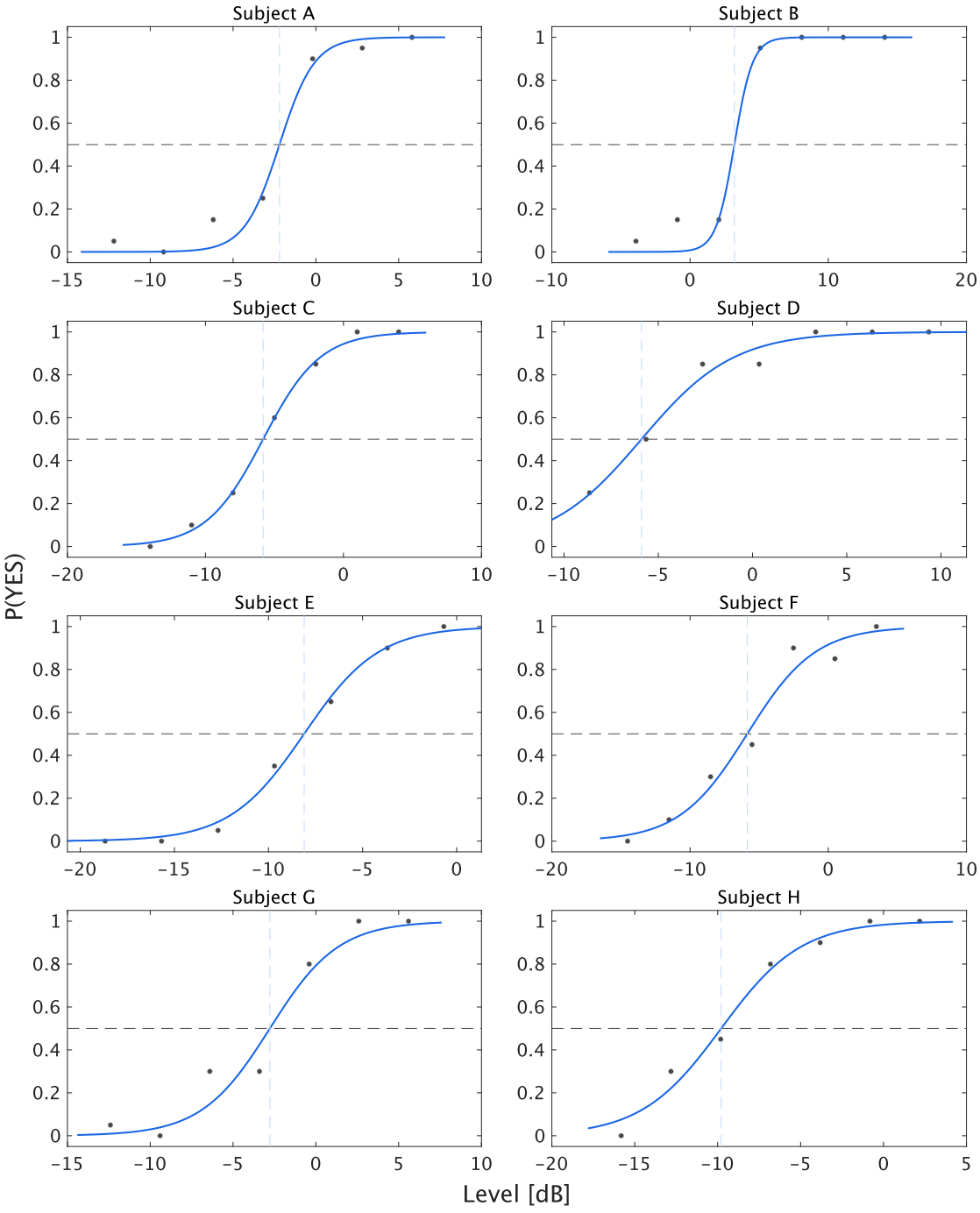


図 4.9: 提示部位：掌，提示刺激：1 kHz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数.

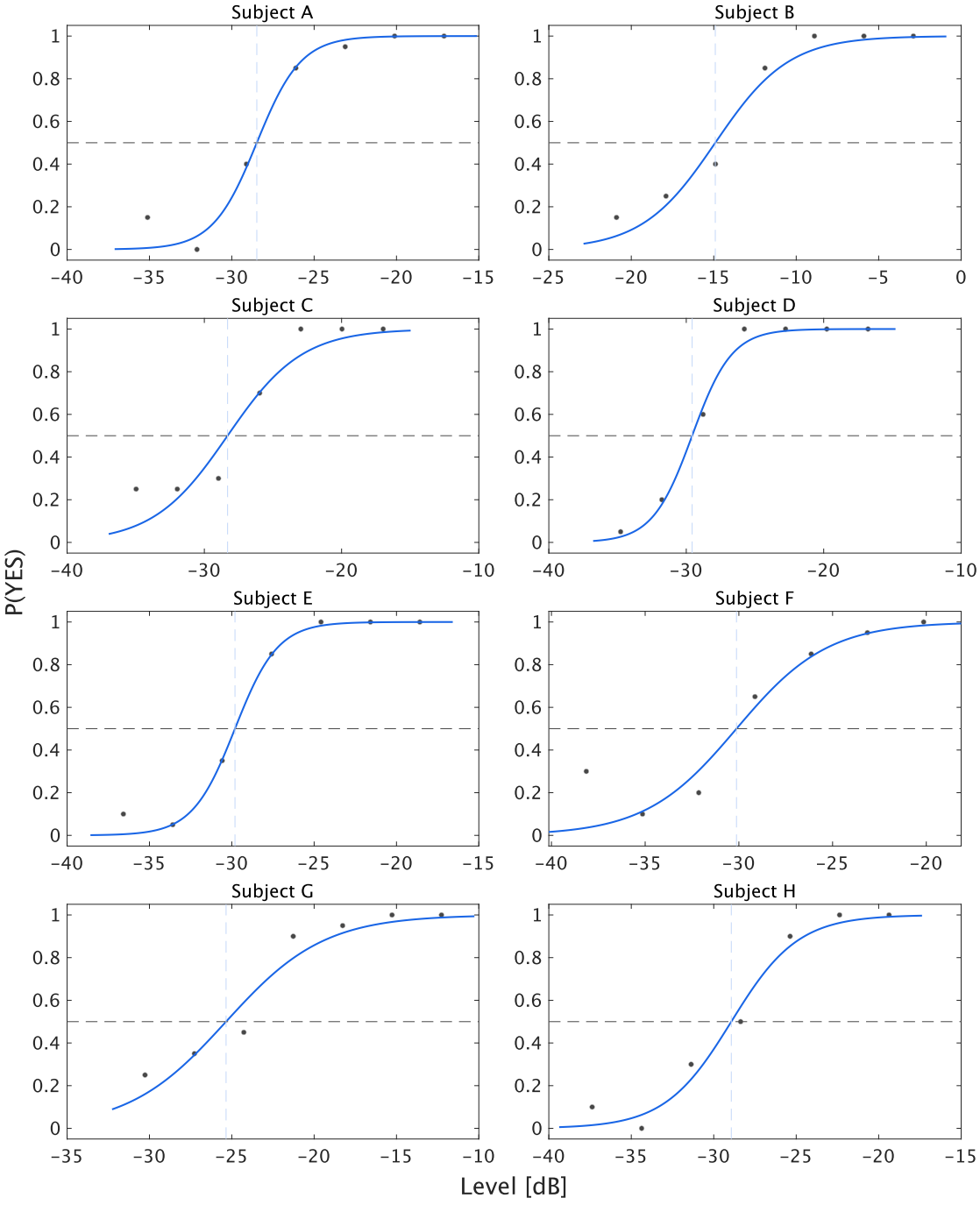


図 4.10: 提示部位：掌，提示刺激：白色雑音の時の全実験参加者の心理測定関数.

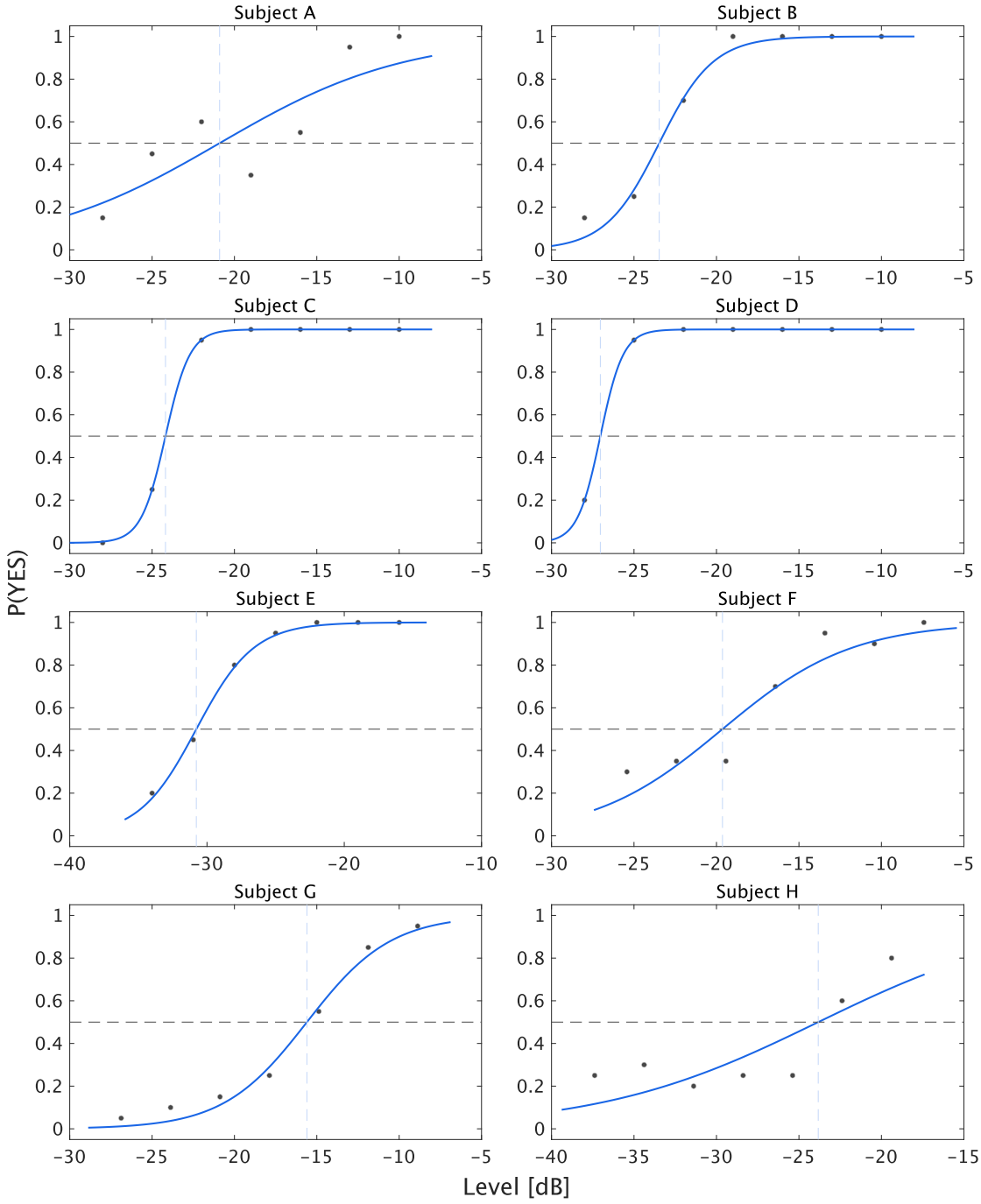


図 4.11: 提示部位：頬，提示刺激：30 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数.

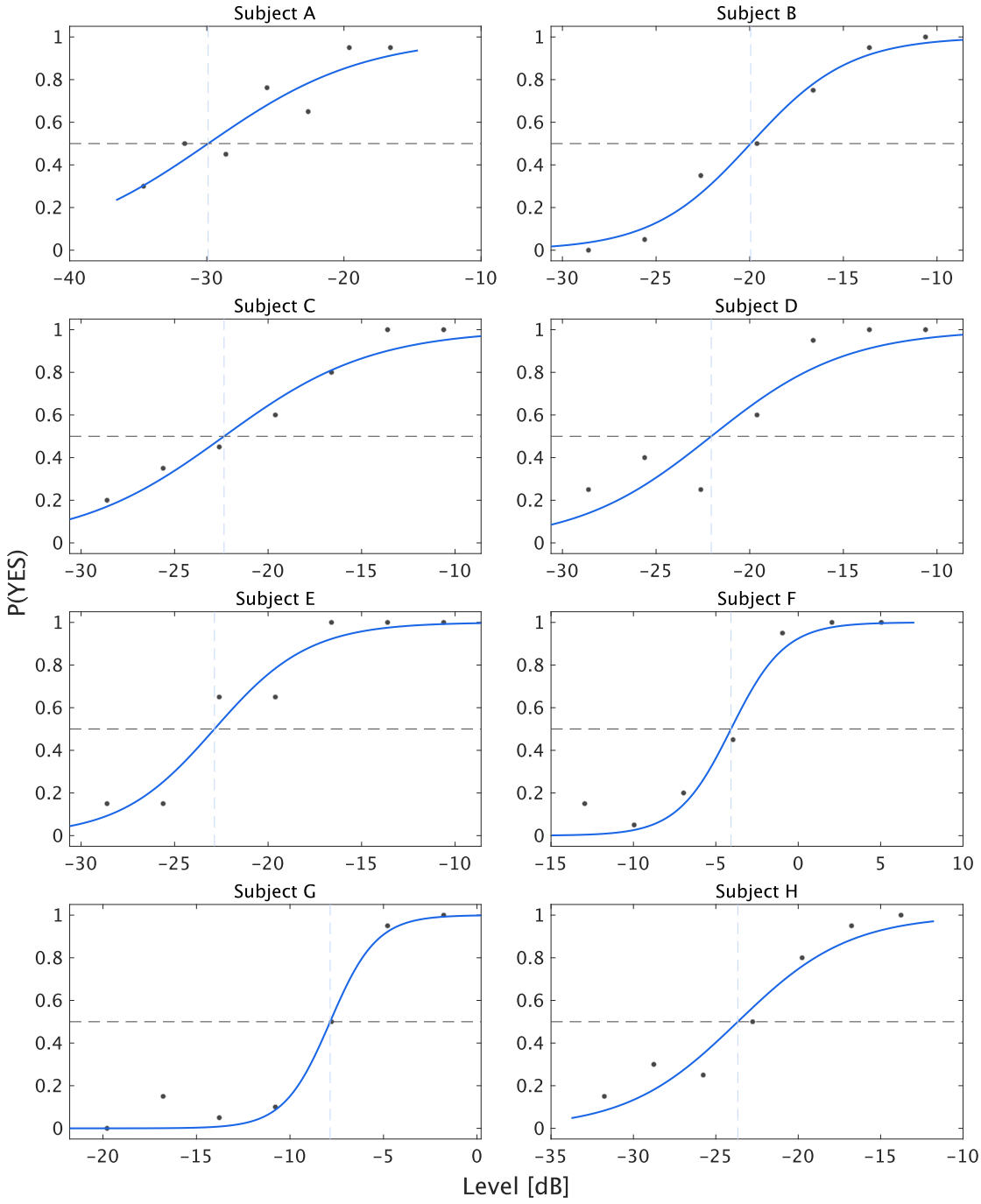


図 4.12: 提示部位：頬，提示刺激：250 Hz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数.

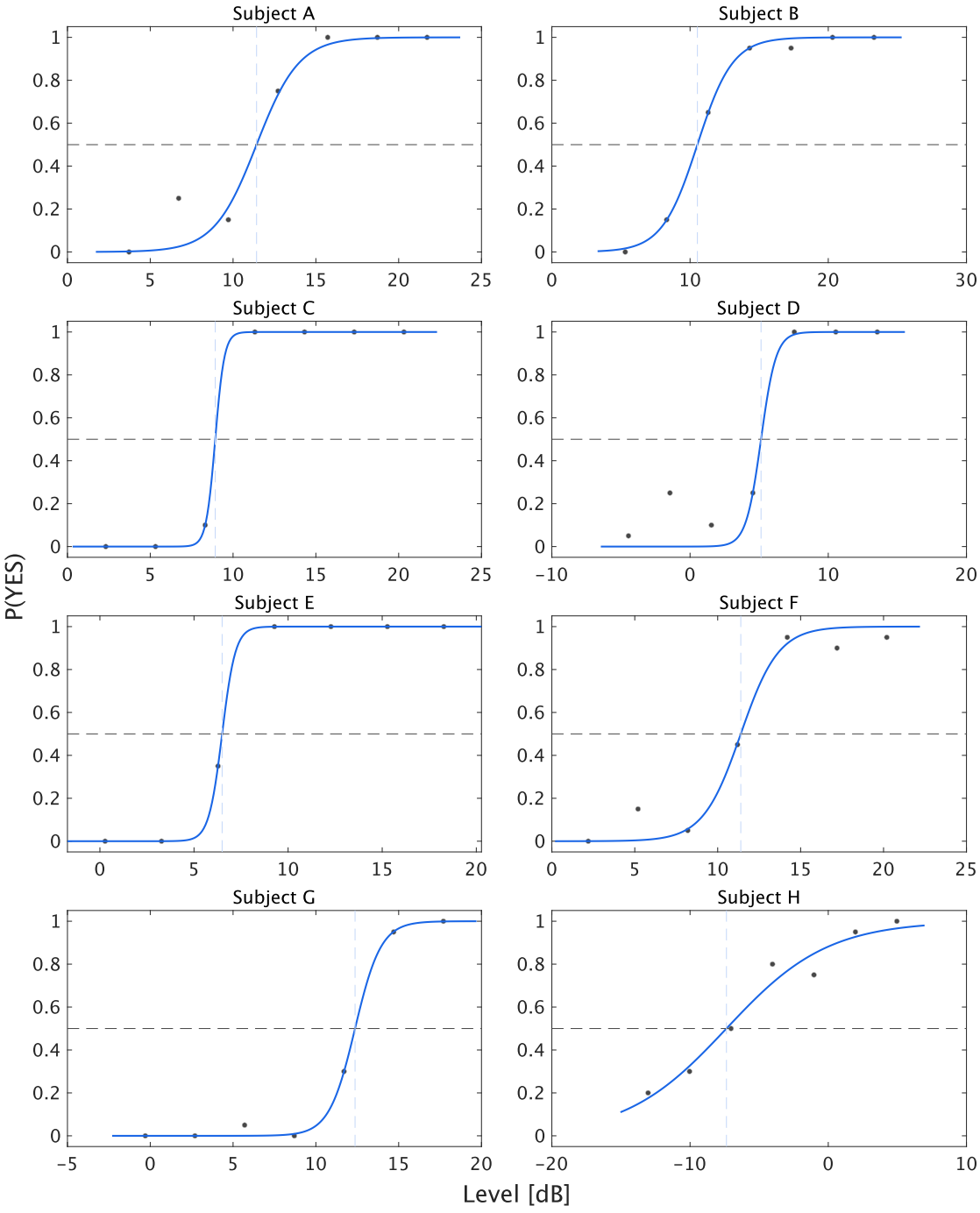


図 4.13: 提示部位：頬，提示刺激：1 kHz 正弦波の時の全実験参加者の心理測定関数.

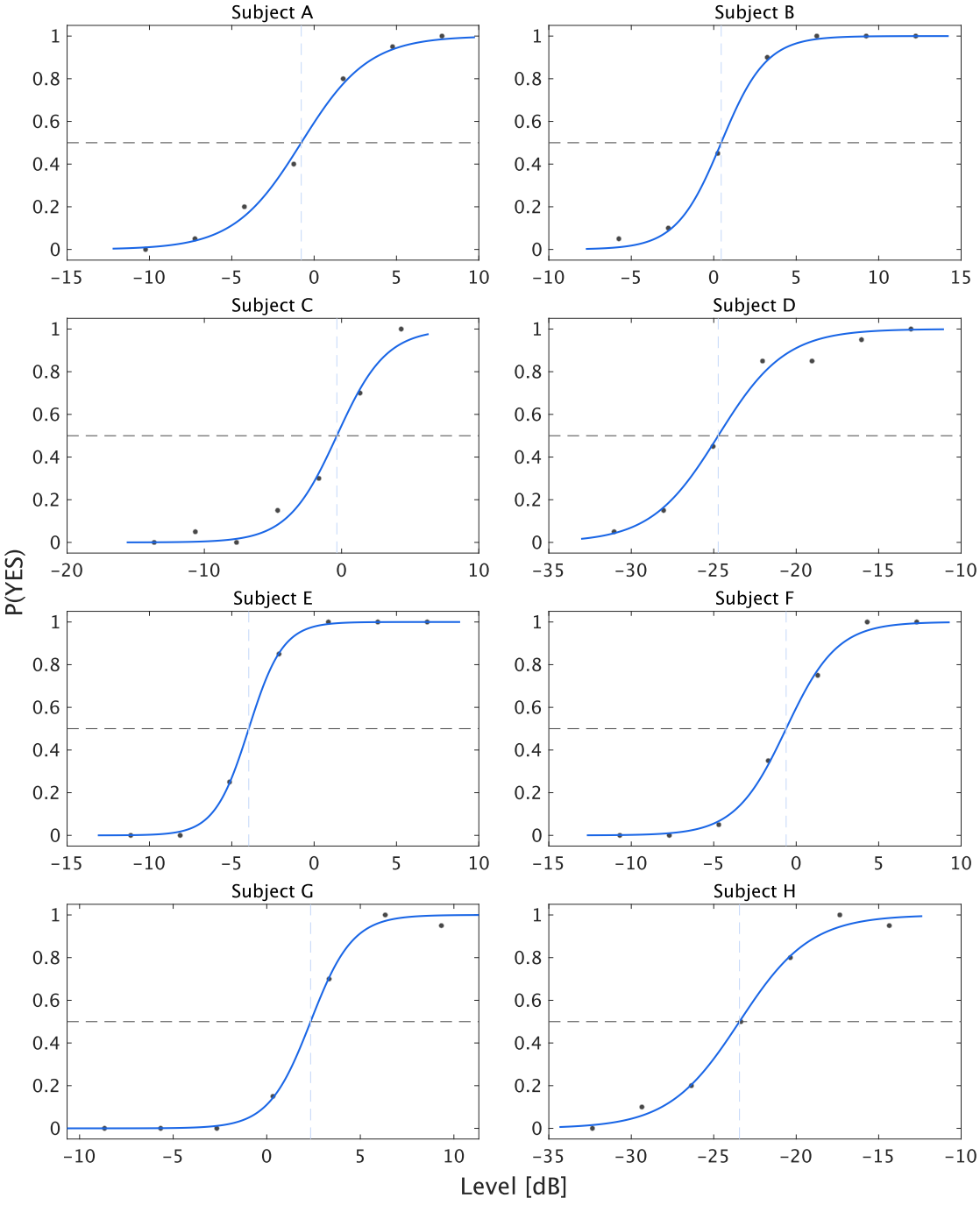


図 4.14: 提示部位：頬，提示刺激：白色雑音の時の全実験参加者の心理測定関数.

4.2 触覚知覚での時間変調伝達関数の計測

4.2.1 実験刺激

時間変調伝達関数（Temporal Modulation Transfer Function: TMTF）[41] を測定するため，4.1 節で利用した 4 つの信号（30 Hz，250 Hz，1 kHz の正弦波と白色雑音）を搬送波とした，次式で定義される振幅変調音 $y(t)$ を実験刺激として利用した．

$$y(t) = \{1 + m \sin(2\pi f_m t)\}c(t) \tag{4.4}$$

ただし，搬送波 $c(t)$ は，正弦波の時，$c(t) = \sin(2\pi f_c t)$，白色雑音の時，$c(t) = n(t)$ である．また，$n(t)$ は白色性ガウス雑音，f_c は搬送波周波数，f_m は変調周波数，m は変調度である．

刺激強度レベルは，4 章で計測された触覚閾値から電圧値で +20 dB（感覚レベル 20 dB）に設定された．ただし，電圧値が 0 dB（触覚振動子の許容電圧）を超える場合は電圧値 0 dB を刺激強度レベルとした．

4.2.2 実験機器

使用した実験機器，および実験系は，4.1.2 節と同じである．

4.2.3 実験参加者

実験参加者は，4.1.3 節と同じく，正常聴力を有する日本語母語話者 8 名（大学院生 23〜26 歳）が参加した．男性 6 名（右利き 3 名，左利き 3 名），女性 2 名（右利き 2 名）であった．

4.2.4 刺激提示部位

刺激提示部位は，4.1.4 節と同じく，左半身の掌と頬の 2 箇所とした．

4.2.5 方法

触覚刺激の変調閾値の計測には，one-up three-down 三区間三肢強制選択法（3AFC）の上下法を用いた．刺激の提示パターン例を図 4.15 に示す．実験参加者は図 4.16 に示す GUI を使用して回答した．変調度の初期値を $m = 0.96$ に設定し，3 回連続で正答した場合は m を 40%減少させ，誤答の場合は m を 40%増加させた．変調度 m が 1 以上になった場合は計測を中止した．これを転換点が 12 個得られるまで実施し，最後から 8 個の転換点の平均値を閾値とした．この計測を 2 回行い，1 回目

と 2 回目に計測した閾値に 0.2 以上の差があれば，2 つの閾値の差が 0.2 未満になるまで同じ実験を繰り返した．この計測を表 4.2 に示す条件で実施した．

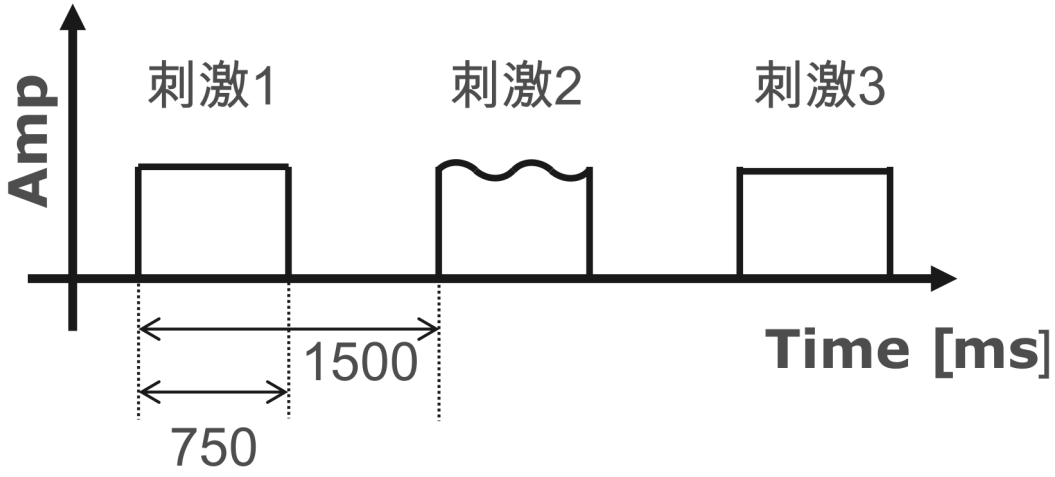


図 4.15: 3AFC の刺激提示パターンの例

図 4.16: 実験用 GUI（TMTF）

表 4.2: 時間変調伝達関数の計測条件

搬送波	変調周波数 f_m [Hz]
30 Hz 正弦波	2, 4, 8, 16
250 Hz 正弦波	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
1 kHz 正弦波	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512
白色雑音	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512

4.2.6 結果

変調度 $m = 1$ を 0 dB として，変調閾値を $20 \log_{10} m$ [dB] で求めた．図 4.17 に全実験参加者の変調度の閾値の平均と標準偏差を示す．横軸は変調周波数，縦軸は変調閾値を表しており，縦軸は上方向に負の値を示す．すなわち，値が小さいほど変調に対する感度が高いことを意味する．

図 4.17(a-1) および (b-1) より，30 Hz 正弦波を搬送波とした場合，掌および頬のいずれにおいても，変調周波数 8 Hz 付近で最も低い変調閾値を示し，変調周波数の全ての条件に対して感度を有することが確認された．

図 4.17(a-2) および (b-2) より，250 Hz 正弦波を搬送波とした場合，掌では変調周波数 4〜8 Hz 付近で最も低い変調閾値を示した．一方，頬では変調周波数の増加に伴い変調閾値が低下した．

図 4.17(a-3) および (b-3) より，1 kHz 正弦波を搬送波とした場合，掌では変調周波数 128〜256 Hz 付近で最も低い変調閾値を示した．一方，頬では変調周波数の増加に伴い変調閾値が低下した．

図 4.17(a-4) および (b-4) より，白色雑音を搬送波とした場合，掌では変調周波数 8 Hz 付近，頬では 4〜8 Hz 付近で最も低い変調閾値を示した．なお，図 4.17(a-4) に示した白色雑音搬送波・掌条件では，実験参加者 8 名中 6 名は変調周波数 32 Hz 以下の範囲でのみ変調閾値が測定可能であったのに対し，残りの 2 名では 64 Hz 以上の変調周波数に対しても変調を知覚できることが確認された．

図 4.17(b-2) と (b-3) の結果を除けば，TMTF が一種の帯域通過特性のように，ある特定の変調周波数帯域に感度をもつことがわかる．除外されたこれら 2 つの結果では，高い変調周波数領域で感度低下がみられないため，帯域通過特性にはなっていないが，TMTF として特定の変調周波数帯域に感度をもつことがわかる．特に，図 4.17(a-3) に示した 1 kHz 搬送波，掌条件における結果は，触覚における高変調周波数帯域での感度ピークを報告した Lamore らの先行研究 [19] と整合する結果である．

変調閾値は，多くの条件において掌よりも頬の方が低い値を示した．

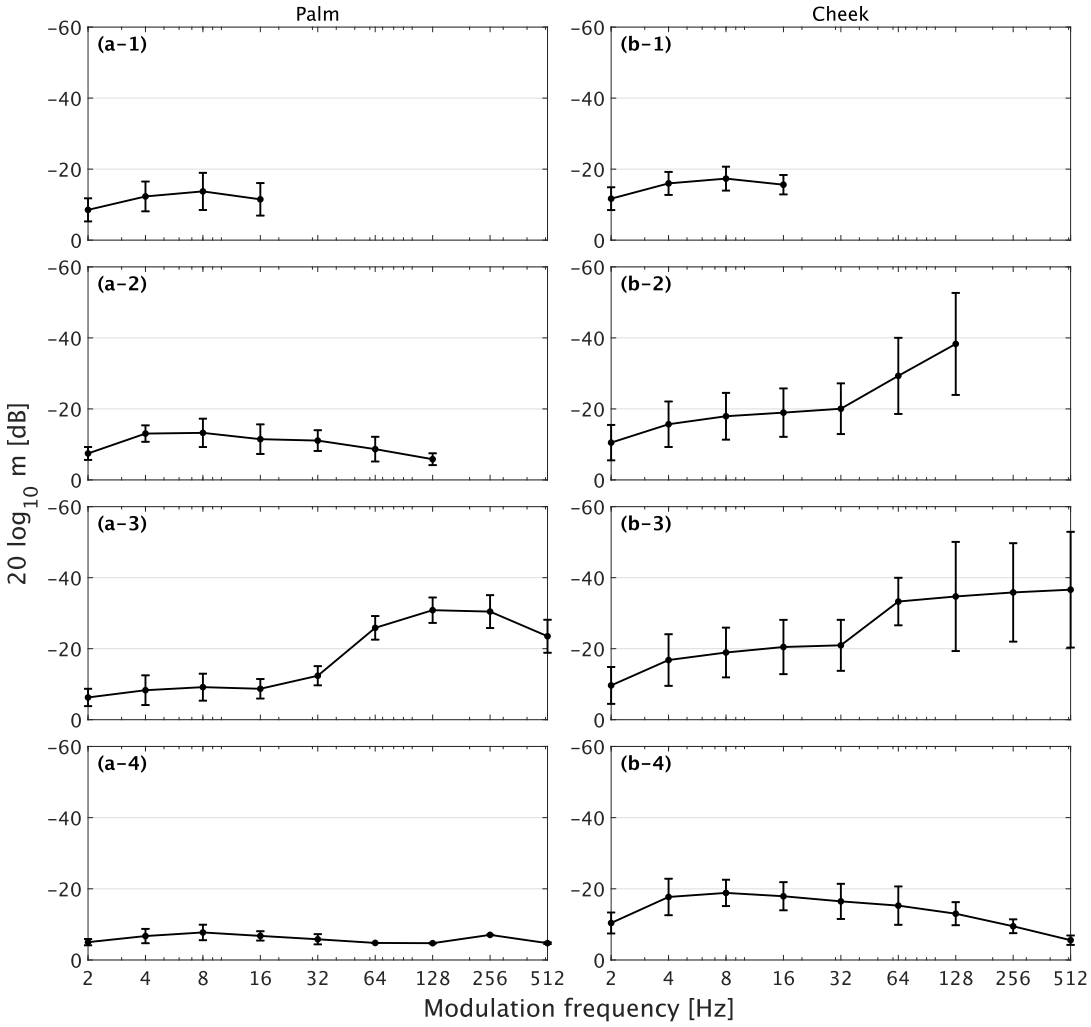


図 4.17: 触覚知覚における TMTF の計測結果（平均±標準偏差）：左から (a) 掌, (b) 頬での結果を，上段から (1) $f_c = 30$ Hz，(2) $f_c = 250$ Hz，(3) $f_c = 1$ kHz 正弦波，(4) 白色雑音の搬送波での結果を示す.

4.2.7　考察

掌では，感度のピーク（最小の変調閾値）を示す変調周波数が搬送波条件に応じて変化しつつも，一種の帯域通過特性を持つことが確認された．この帯域通過特性は，変調周波数 f_m により変調検知のしやすさが大きく異なることを示している．そのため，触覚には振幅包絡の有無を一様に検出するだけでなく，振幅包絡に対して周波数選択性をもつ処理過程が存在している可能性が考えられる．

4.1.6 節の結果で示されたように，無変調の 1 kHz 正弦波刺激に対する触覚閾値は他の刺激と比較して著しく高い．しかし，1 kHz 正弦波を搬送波として振幅変調を付与した場合には，変調の検知が可能であることが確認された．この結果は，Lamore らの報告 [19] と整合的である．さらに，広帯域成分を含む白色雑音を搬送波とした振幅変調波に対しても，変調の検知が可能であることが確認された．これは，雑音搬送波に対する振幅変調知覚を報告した Weisenberger の結果 [30] とも整合する．そのため，触覚の知覚範囲外の周波数成分を含む刺激や，周波数成分が広帯域に分布する刺激であっても，振幅変調成分（振幅包絡）を知覚する可能性がある．

頬では 30 Hz 正弦波および白色雑音搬送波において帯域通過的な TMTF が観測された．250 Hz および 1 kHz 搬送波では変調周波数の増加に伴い，変調閾値は低下した．掌と同様に，触覚の知覚範囲外の周波数成分を含む刺激や，周波数成分が広帯域に分布する刺激であっても，振幅変調成分（振幅包絡）を知覚する可能性がある．

しかし，頬は耳介近傍に位置するため，振動刺激が骨導経路を介して内耳に到達し得ることから，特に 250 Hz および 1 kHz 搬送波条件では聴覚的手掛かり（骨導音）が混入し，触覚ではなく聴覚の変調知覚特性を反映した可能性が考えられる．当該条件の TMTF は，Kohlrausch ら [42] によって調査された，聴覚における，正弦波を搬送波とした TMTF に類似する．また，変調閾値が，多くの条件において掌よりも頬の方が低い傾向を示したことについても，頬条件では，触覚だけではなく，聴覚的手掛かり（骨導音）を利用したことにより，掌条件よりも変調閾値が低くなった可能性が考えられる．したがって，頬条件における一部の結果は骨導音混入を含む可能性のある条件として位置付け，触覚由来の TMTF との分離が必要である．

以上より，音声信号のような，触覚の知覚範囲外の周波数成分を含む刺激や，周波数成分が広帯域に分布する刺激を触覚刺激として提示した場合でも，その振幅変調成分を手掛かりとして変調を知覚できる可能性が示唆された．さらに，聴覚の変調知覚に関する先行研究から，感情 [13, 15–17] や緊迫感 [14, 18] といった非言語情報の知覚では 16 Hz 以下の変調成分が重要であることが報告されている．この知見とのアナロジーから，触覚提示によっても音声の非言語情報の知覚が成立する可能性がある．この仮説を検証するためには，音声の変調周波数成分と触覚の変調知覚特性の対応関係を調査する必要がある．そのため次章では，原音声と，

振幅包絡線情報のみを保存したNVSを触覚刺激として提示した場合に，両条件で得られる知覚結果がどの程度一致するかを検討する．

第5章　触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚

5.1　触覚刺激提示による感情知覚

5.1.1　実験刺激

原音声は，Unoki & Zhu [13] で使用された日本語感情音声データベースから用いた．感情音声は，女性1名によって5つの感情（Neutral, Joy, Cold anger, Sadness, Hot anger）それぞれで発話された10文章の合計50音声から構成された．発話された文章の内容を以下に示す．

- 新しいメールが届いています
- 頭にくることなんてありません
- 待ち合わせは青山らしいんです
- 新しい車を買いました
- いらないメールがあったら捨ててください
- そんなの古い迷信ですよ
- みんなからエールが贈られたんです
- 手紙が届いたはずです
- ずっと見ています
- わたしのところには届いています

また，この音声を利用してNVSを作成した．サンプリング周波数は48000 Hzであった．前処理として波形の実効値を利用して，全ての触覚刺激信号の強度レベルを揃えた．提示時の刺激強度レベルは0 dBとした．

5.1.2 実験機器

使用した実験機器，および実験系は，4.1.2 節と同じである．

5.1.3 実験参加者

実験参加者は，4.1.3 節と同じく，正常聴力を有する日本語母語話者 8 名（大学院生 23〜26 歳）が参加した．男性 6 名（右利き 3 名，左利き 3 名），女性 2 名（右利き 2 名）であった．

5.1.4 刺激提示部位

刺激提示部位は，4.1.4 節と同じく，左半身の掌と頬の 2 箇所とした．

5.1.5 方法

本実験では実験参加者に対し，触覚刺激を触覚振動子から提示した．刺激提示後，実験参加者には，触覚刺激から知覚された感情を 5 つの感情から強制選択させた．実験参加者は図 5.1 に示す GUI を使用して回答した．提示部位の順序および刺激提示の順序は，参加者間でランダム化された．1 名の参加者につき，2（部位）× 5（感情）× 10（文章）× 2（原音声，NVS）の計 200 試行を実施した．実験終了後，触覚刺激の感情ラベルと実験参加者の回答を比較し，感情認識率を算出した．各感情について，その感情に対応する刺激が提示された回数のうち，当該感情として回答された割合を感情認識率として定義した．

図 5.1: 実験用 GUI（感情知覚）

5.1.6　結果

図 5.2 と図 5.3 に感情知覚実験の結果を示す.

図 5.2 は各条件下での全実験参加者の感情認識率の平均を表す．感情認識率のチャンスレベルは 20%である.

図 5.3 は回答の混同行列であり，各要素は全実験参加者における回答率の平均値を表す．混同行列の行は提示した触覚刺激の感情ラベル，列は実験参加者の回答に対応する．図中の N，J，CA，S，HA は Neutral，Joy，Cold anger，Sadness，Hot anger を表す．対角成分は感情認識率，非対角成分は誤認識を表す.

掌への刺激提示時，チャンスレベル以上の感情認識率が得られた感情は，原音声および NVS のいずれの場合でも，Neutral および Cold anger のみであった．Sadness，Hot anger の感情認識率は著しく低く，0〜4%であった.

原音声と NVS の結果を比較すると，図 5.3 の (a–1) と (a–2) から，感情認識率だけでなく誤認識の傾向も類似していたことが確認できる．特に Sadness と Hot anger の誤認識が顕著であった．Sadness は Hot anger と約 75%の割合で誤認識され，Hot anger は Sadness と約 50%の割合で誤認識された．両感情が相互に誤認識される傾向が示された．また，Joy も Sadness と誤認識される割合が比較的高く，その割合は原音声で 37.5%，NVS で 46.2%であった.

頬への刺激提示時，原音声および NVS のいずれの場合も，全ての感情で認識率がチャンスレベルを上回った．原音声と NVS の結果を比較すると，全ての感情において，原音声の方が感情認識率が高いことが確認された.

頬と掌の結果を比較すると，頬は掌に比べて高い感情認識率を示す傾向が確認された.

5.1.7　考察

頬と掌で感情認識率には差があり，頬の方が感情認識率は高かった．このことから，提示部位によって感情知覚に利用される手がかりが異なる可能性がある．頬条件で高い感情認識率が得られた要因として，触覚振動子の提示位置が耳に近いため，触覚刺激が骨導経路を介して聴覚的手がかりとして知覚されたことが考えられる．一方，掌条件では，チャンスレベル以上の感情認識率が得られた感情は Neutral および Cold anger のみであり，それ以外の感情では感情認識率が 10%以下であった．また，Neutral では約 35%，Cold anger では約 25%程度の感情認識率であり，頬条件と比較して低かった．このことは，同じ音声から知覚される感情が，聴覚提示と触覚提示で一致しない可能性を示唆する.

しかし，掌条件においても Hot anger や Sadness など，誤認識ではあるものの特定の感情が高い割合で回答される傾向が確認された．このことから，触覚提示においても感情判断に寄与し得る何らかの手がかりが存在する可能性が考えられる.

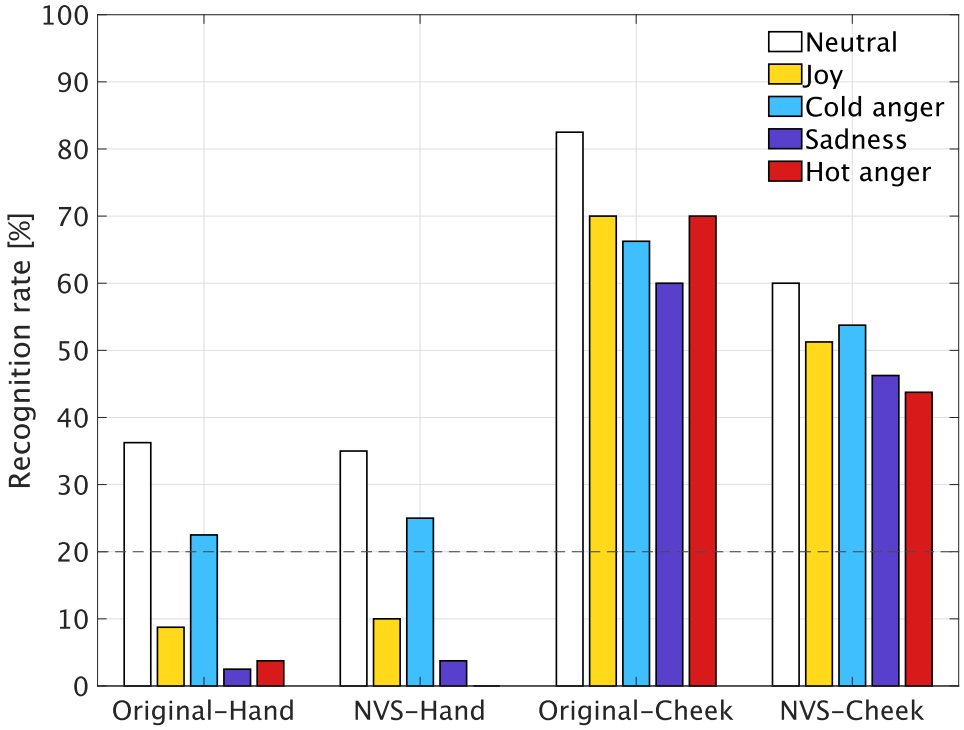


図 5.2: 感情知覚実験の結果：各条件での感情認識率を示す.

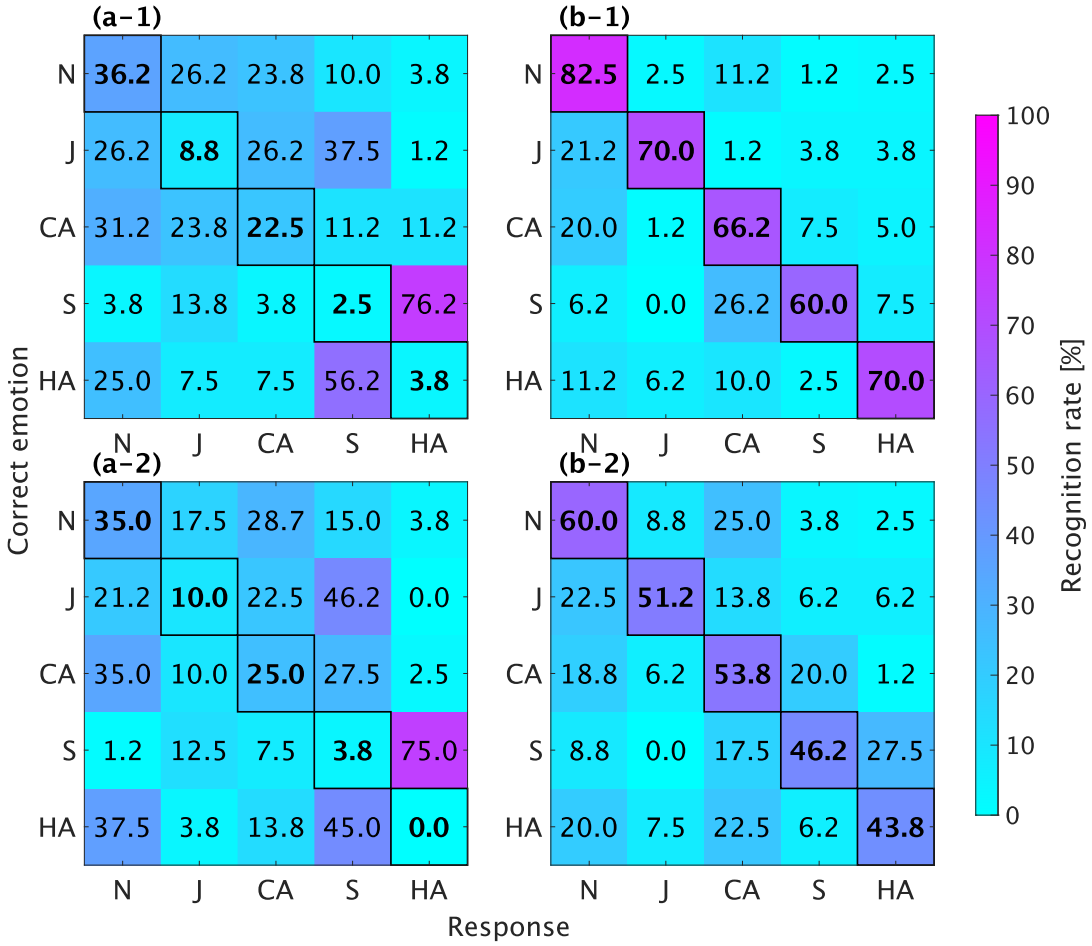


図 5.3: 感情知覚実験の結果：提示部位が (a) 掌と (b) 頬で，刺激が (1) 原音声と (2) NVS での混同行列を示す.

さらに，同一の提示部位において，原音声と NVS では感情認識率だけでなく誤認識の傾向も類似していたことから，触覚による感情知覚に用いられた手がかりは，原音声と NVS で共通していた可能性がある．

5.2 触覚刺激提示による緊迫感知覚

5.2.1 実験刺激

原音声には，小林 & 赤木 [43] や Unoki ら [14] で使用された音声が用いられた．この音声は，男性アナウンサー 1 名が発話した緊迫感の異なる 4 つの避難呼びかけ音声である．また，この音声を利用して雑音駆動音声（NVS）を作成した．サンプリング周波数は 48000 Hz であった．前処理として波形の実行値を利用して，全ての触覚刺激信号の強度レベルを揃えた．提示時の刺激強度レベルは 0 dB とした．

5.2.2 実験機器

使用した実験機器，および実験系は，4.1.2 節と同じである．

5.2.3 実験参加者

実験参加者は，4.1.3 節と同じく，正常聴力を有する日本語母語話者 8 名（大学院生 23〜26 歳）が参加した．男性 6 名（右利き 3 名，左利き 3 名），女性 2 名（右利き 2 名）であった．

5.2.4 刺激提示部位

刺激提示部位は，4.1.4 節と同じく，左半身の掌と頬の 2 箇所とした．

5.2.5 方法

本実験では，2 つの刺激を続けて提示し，1 番目に提示された刺激と比較して，2 番目に提示された刺激がどの程度緊迫しているか，5 段階（−2: かなり低い，−1: 低い，0: 同じ，+1: 高い，+2: かなり高い）で評価させた．実験参加者は図 5.4 に示す GUI を使用して回答した．これらの評価結果から，シェッフェの一対比較法（浦の変法）を利用して各音声の緊迫感の程度を算出した．

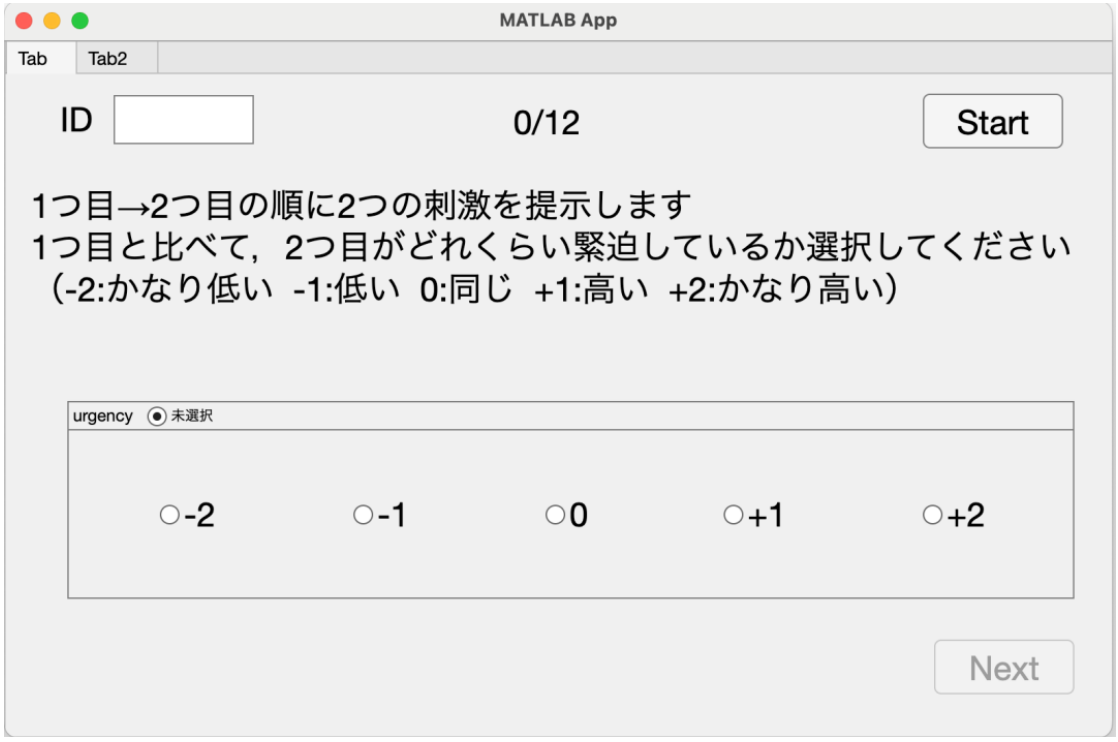


図 5.4: 実験用 GUI（緊迫感知覚）

5.2.6　結果

図 5.5 に緊迫感知覚実験の結果を示す．図の横軸は緊迫感の程度を示し，値が大きいほど緊迫感が相対的に高いことを表す．A，B，C，D は原音声，a，b，c，d はそれぞれ A，B，C，D から作成した NVS を表す．

掌への刺激提示時，各刺激の緊迫感の程度は，原音声では低い順に，A，B，D，C であった．NVS では低い順に，a，b，d，c であった．掌では A および a の緊迫感の程度が最も低く，そのほかの刺激は相対的に高く知覚された．この緊迫感の程度の順位は，同じ刺激を用いた聴覚による緊迫感知覚の報告 [14] と一致する．

頬への刺激提示時，各刺激の緊迫感の程度は，原音声では低い順に，C，D，B，A であった．NVS では，c，d，b，a であった．頬では，A および a の緊迫感の程度が最も高く，C と c が最も低く知覚された．この緊迫感の程度の順位は，同じ刺激を用いた聴覚による緊迫感知覚の報告 [14] と一致せず，逆の傾向を示した．以上より，同一部位内では原音声と NVS の順位が概ね一致する一方で，提示部位が異なると緊迫感の順位が逆転することが確認された．

5.2.7　考察

掌と頬で，緊迫感の順位が大きく異なったことから，感情知覚と同様に，提示部位によって緊迫感知覚に利用される手がかりが異なる可能性がある．触覚振動子の提示位置が耳に近いため，触覚刺激が骨導経路を介して聴覚的手がかりとして知覚されたことが考えられる．しかし，もし頬条件の判断が聴覚的手がかりのみに基づくのであれば，緊迫感の順位は聴覚の報告 [14] と同様になることが予想されるが，頬での緊迫感の順位は聴覚と逆の傾向を示すことが確認された．このことから，頬条件の緊迫感知覚は聴覚的手がかりのみに基づくとは考えにくく，触覚的手がかりを含む他の要因が関与した可能性がある．

一方で，掌での緊迫感の順位は聴覚での順位と一致したことから，掌条件では緊迫感判断に利用される手がかりが聴覚と共通である可能性が考えられる．

さらに， 同一部位において，原音声と NVS で緊迫感の順位が一致したことから，触覚提示における緊迫感判断の手がかりは，原音声と NVS で共通していた可能性がある．

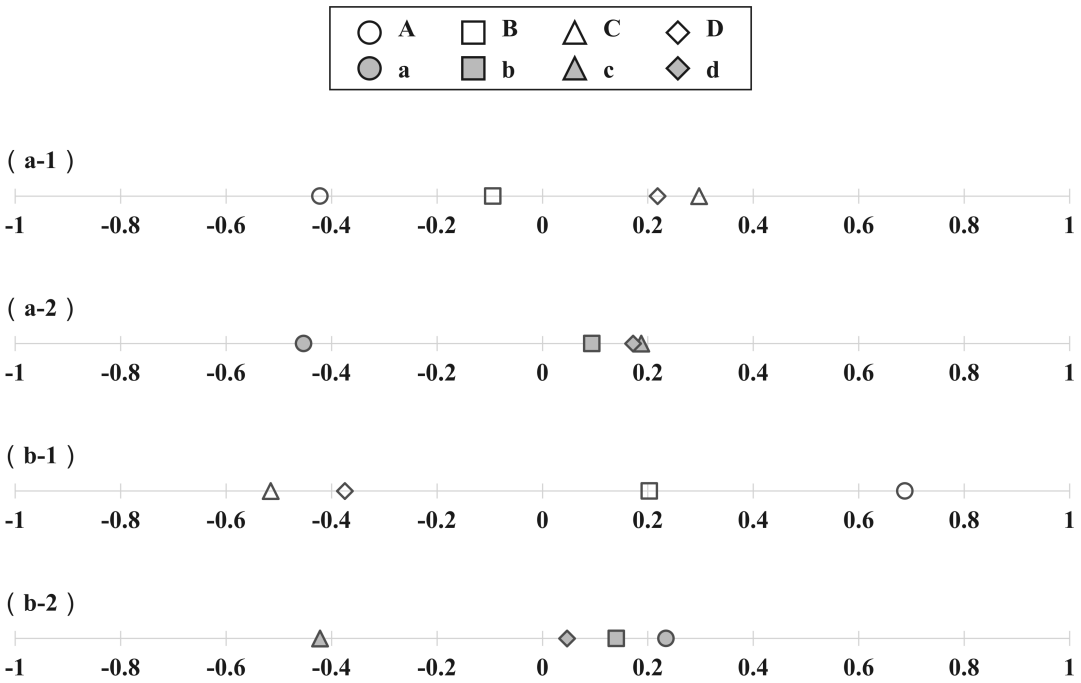


図 5.5: 緊迫感知覚実験の結果：提示部位が (a) 掌と (b) 頬で，刺激が (1) 原音声と (2) NVS の結果を示す.

第6章　全体考察

3.1 節で，本研究の目的の達成のために，明らかにするべき点として，以下の 3 つを挙げた．これらの観点から全体考察を行う．

- 触覚における変調知覚特性と，非言語情報知覚に重要な変調帯域との関係
- 原音声と NVS の比較による，触覚提示時の非言語情報知覚への TAE の寄与
- 提示部位差（掌・頬）による非言語情報知覚の差

触覚における変調知覚特性と，非言語情報知覚に重要な変調帯域との関係

第 4 章で計測した触覚の TMTF は，多くの条件において帯域通過的な形状を示すことが確認された．特に掌条件では，搬送波条件に応じて感度のピーク（最小の変調閾値）を示す変調周波数が変化しつつも，概ね信号の変調成分（32 Hz 以下）を検知するような特性であることが確認された．この変調成分は，聴覚において感情・緊迫感知覚に重要とされる変調成分（16 Hz 以下）[13, 14, 17, 18] と整合的であり，触覚提示による非言語情報知覚が成立し得るという仮説を支持する結果といえる．これに対し，頬条件では，250 Hz および 1 kHz 正弦波搬送波において，変調周波数の増加に伴い閾値が低下し，帯域通過特性を示さなかった．頬への刺激提示条件は触覚振動子が耳の近くに位置するため，振動刺激が骨導経路を介して聴覚的手がかりとして知覚されたことが考えられる．そのため，頬条件の TMTF を触覚の変調知覚特性の直接的な反映として位置づけるには，慎重な検討が必要である．

原音声と NVS の比較による，触覚提示時の非言語情報知覚への TAE の寄与

第 5 章では，感情知覚および緊迫感知覚のいずれにおいても，同一提示部位内で，原音声と NVS 提示時の回答傾向（感情認識率，感情の誤認識傾向，緊迫感の度合いの順位関係）が類似することが確認された．原音声と NVS で共通する手がかりは TAE である．そのため，この類似性は，触覚提示における非言語情報知覚に TAE が寄与した可能性を支持する．ただし，この結果は TAE のみで非言語情報が十分に知覚されることを意味するものではない．例えば，掌条件の感情知覚では，チャンスレベルを上回る感情が限定され，誤認識の偏り（例：Sadness と Hot anger が相互に誤認識）が顕著であった．このことは，触覚提示において TAE 由来の手掛かりが存在し得るとしても，聴覚提示と同等のカテゴリ識別を成立させ

るには，情報量または提示条件が十分でない可能性を示唆する．一方で，掌条件の緊迫感知覚において刺激の順位が聴覚の先行研究の結果 [14] と一致した点は，緊迫感の度合いの知覚については，触覚提示でも TAE が手掛かりとして有効に機能することを示している．本実験結果は，触覚による非言語情報知覚で TAE が手がかりになることを支持しつつも，感情認識のようなカテゴリ分類においては聴覚と一致しないことを示したと位置付けられる．

提示部位差（掌・頬）による非言語情報知覚の差

提示部位差の観点では，感情知覚において頬条件で全感情がチャンスレベルを上回り，掌条件より高い感情認識率が得られたことが確認された．また，緊迫感知覚では提示部位により刺激の順位が逆転するという顕著な差が確認された．このことは，掌と頬で利用される手掛かりが異なる可能性を示す．頬条件の高い感情認識率は骨導由来の聴覚的手掛かりの寄与で説明できる可能性がある．しかし，頬条件の緊迫感の度合いの順位が聴覚提示の先行結果 [14] と一致せず，逆の順位を示した．TAE や聴覚的手掛かりのみでは説明できない要因が緊迫感知覚に寄与した可能性が考えられる．あるいは聴覚と触覚の情報を同時に取得したことによるクロスモーダル的な作用が存在する可能性も考えられる．

以上より，同一提示部位内で原音声と NVS の知覚結果が類似したこと，および触覚の TMTF が低変調周波数帯域に感度を示したことから，触覚提示においても音声の TAE が非言語情報知覚の手がかりとして寄与する可能性が示された．

第7章　結論

7.1　本研究で明らかにしたこと

本研究では，音声を触覚刺激として提示した際の非言語情報（感情・緊迫感）知覚の実現可能性について検討した．掌および頬における，触覚知覚の検知閾を調査し，触覚の変調知覚として時間変調伝達関数を調査した．その後，触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚実験（感情・緊迫感）を実施した．

その結果，以下のことが明らかになった．

(1) 触覚閾値は全刺激条件において掌の方が頬より低く，提示部位により閾値が大きく異なること．

(2) 触覚知覚における TMTF は一種の帯域通過特性のように，特定の変調周波数帯域に感度をもち，概ね 32 Hz 以下の変調成分を検知できること．

(3) 同部位では原音声と NVS で，感情知覚および緊迫感知覚が類似すること．

(4) 掌と頬では感情知覚および緊迫感知覚が異なること．

触覚の変調知覚特性と，同部位で原音声と NVS の非言語情報知覚が類似したことは，共通する手掛かりである TAE が知覚に寄与した可能性を示唆する．

以上より，聴覚において TAE が非言語情報知覚に重要であるという知見も踏まえると，音声を触覚刺激として提示することで，非言語情報知覚を実現できる可能性が高いと言える．

7.2　残された課題

本研究で残された課題として以下のことが挙げられる．

(1) 聴覚的手掛かり（骨導音）の影響を排除した実験設定

(2) 実験参加者数を増加した検討

(3) 判断基準の形成などの学習効果の有無

(4) 感情，緊迫感以外の非言語情報を対象にした検討

(5) 非言語情報知覚に寄与する音声の振幅包絡成分の変調周波数の特定

付 録A　刺激提示部位の選定

A.1　実験刺激

触覚刺激の信号には周波数が30 Hz，250 Hzの正弦波の2種類が用いられた．サンプリング周波数は48000 Hz，時間長は500 msとし，刺激の立上りと立下りにはテーパー処理を施した．

A.2　実験機器

実験機器は，4.1.2節と同じである．

A.3　実験参加者

実験には正常聴力を有する日本語母語話者10名（大学院生23〜26歳）が参加した．男性5名（右利き3名，左利き2名），女性5名（右利き5名）であった．

A.4　刺激提示部位

図A.1に触覚刺激の提示部位を示す．提示部位は10箇所（左右の人差し指，掌，前腕，上腕，頬）とした．

A.5　方法

恒常法を用いて，触覚閾値を測定した．

まず，各実験参加者に対して予備的に刺激強度を変化させ，刺激を知覚できる強度および知覚できない強度を確認した．その結果を基に，各実験参加者の基準強度レベルを設定し，これを中心として，−9〜+9 dBの範囲で3 dB刻みに強度レベルを調整した7水準の触覚刺激を用意した．刺激強度レベルは，オシロスコープ上で表示される電圧値を参照して制御された．1回の計測につき，1水準あたり20試行，7水準で計140試行を実施した．ここでは，7水準の刺激をランダムに提示し，各試行において刺激の知覚の有無を回答させた．各刺激について「有」

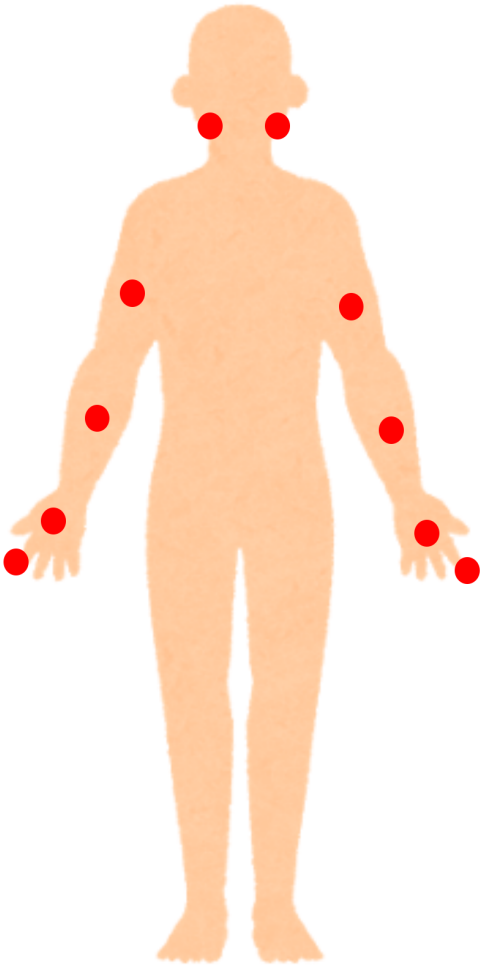


図 A.1: 刺激提示部位

と回答された割合を算出し，ロジスティック関数を用いて最小二乗法により心理測定関数を導出した．導出された心理測定関数の例を図 4.5 に示す．最後に，この心理測定関数において「有」回答率が 50% となる刺激強度レベルを触覚閾値と定義した．

A.6　結果

図 A.2 に，各提示部位および刺激条件における触覚閾値の平均値と標準偏差を示す．上段 (a) に 30 Hz 正弦波刺激を提示した結果，下段 (b) に 250 Hz 正弦波刺激を提示した結果を示す．閾値は，基準電圧 1 Vrms に対する出力電圧を dB 換算した値である．

30 Hz 正弦波の刺激提示時，平均閾値は，掌が最も低く（左：−28.57 dB, 右：−26.54dB），続いて人差し指（左：−25.04 dB, 右：−24.03 dB），頬（左：−23.80 dB, 右：−22.16 dB），上腕（左：−21.95 dB, 右：−19.64 dB），前腕（左：−17.56 dB, 右：−16.27 dB）の順で小さくなった．

250 Hz 正弦波の刺激提示時は，掌が最も低く（左：−54.02 dB, 右：−52.62 dB），続いて人差し指（左：−53.54 dB, 右：−49.11 dB），前腕（左：−30.95 dB, 右：−26.95 dB），上腕（左：−25.80 dB, 右：−23.54 dB），頬（左：−19.27 dB, 右：−16.79 dB）の順で小さくなった．

末梢部（人差し指・掌）では振動に対する感度が高く，一方で上腕や頬などの上肢・顔部では振動に対する感度が低い傾向がみられた．

A.7　考察

30 Hz 条件では，掌および人差し指で閾値が低く，前腕・上腕で高い傾向がみられた．250 Hz 条件では，掌および人差し指で閾値が低く，頬で高い傾向が確認された．これらの触覚閾値の部位差は低周波振動（数十 Hz）に応答する FA I（マイスナー小体や毛包受容器）と 250 Hz 付近の高周波振動に応答する FA II（パチニ小体）の寄与の差を反映していることが考えられる．そのため，触覚閾値の部位差は各機械受容器の分布の差を意味すると考えられる．

提示部位の選定では,「十分な知覚が得られること」と「条件差が明確に表れること」の両立が重要であると考えられる．本結果では，掌は 30 Hz・250 Hz の両条件で最も低い閾値を示すこと，30 Hz 条件では部位間の差が比較的小さいこと，250 Hz 条件では掌と頬の閾値差が最も大きいことが確認された．末梢部と顔面部の対比が明確であることから，以降の実験で提示部位による知覚差を検討する代表部位として掌と頬を選択することは妥当と考えられる．

左右（利き手）および性別で，触覚閾値に有意差は認められなかった．そのため，刺激提示部位や実験参加者を決定する上で，左右（利き手）や性別を主要な要因として考慮する必要性は小さいと考えられる．

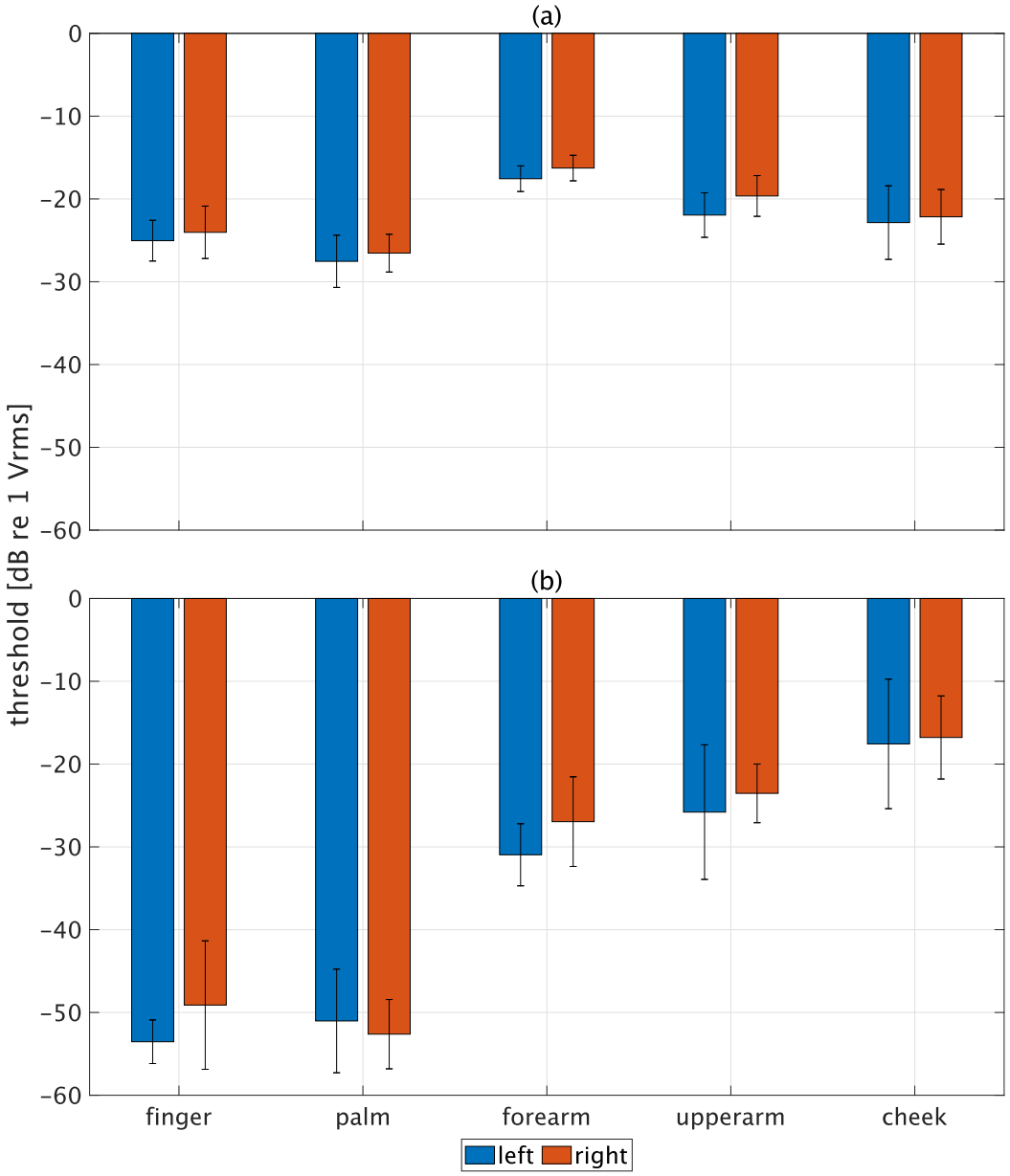


図 A.2: 各提示部位の触覚閾値．(a)30 Hz 正弦波刺激，(b)250 Hz 正弦波刺激を提示．閾値は 1 Vrms を基準（0 dB）として電圧値で表示される．

謝辞

本研究の遂行にあたり，多大なるご指導とご助言をいただきました主指導教員の鵜木祐史教授に，深く感謝いたします.

研究室会議や日常の研究活動において，数多くのご助言をいただきました木谷俊介特任准教授，上江洲安史特任助教に心より感謝いたします．また，研究に関する議論や実験実施を支えていただいた研究室の皆様に心より感謝いたします.

長時間にわたる実験にご協力いただきました実験参加者の皆様に，感謝申し上げます.

最後に，学生生活を支えていただいた家族に感謝します.

参考文献

[1] 大塚明敏, “聴覚障害について：ご理解を得たいこと,” 音響誌, 37(7), 328–335, 1981.

[2] 新岡正, 伊福部達, 吉本千禎, “ろう者用触知音像定位装置の基礎的研究,” 音響誌, 33(5), 250–258, 1977.

[3] 伊藤憲三, 新井隆行, “音声コミュニケーションに関わるバリアフリー,” 音響誌, 65(3), 132–136, 2009.

[4] 吉本千禎, “感覚補助代行の基本問題,” 音響誌, 43(5), 327–328, 1987.

[5] 伊福部達, “視覚以外の感覚を介する聾者用音声伝達方式,” 音響誌, 43(5), 368–373, 1987.

[6] 伊福部達, “音の福祉工学,” コロナ社, 1997.

[7] 伊福部達, 湊博, 吉本千貞, “心理物理実験によるタクタイル・ボコーダーの基礎的研究,” 音響誌, 31(3), 170–178, 1975.

[8] Shannon, R. V., Zeng, F.-G., Kamath, V., Wygonski, J., and Ekelid, M., “Speech Recognition with Primarily Temporal Cues,” Science, 270(5234), 303–304, 1995.

[9] Drullman, R., Festen, J. M., and Plomp, R., “Effect of temporal envelope smearing on speech reception,” J. Acoust. Soc. Am., 95(2), 1053–1064, 1994.

[10] Drullman, R., Festen, J. M., and Plomp, R., “Effect of reducing slow temporal modulations on speech reception,” J. Acoust. Soc. Am., 95(5), 2670–2680, 1994.

[11] Drullman, R., “Temporal envelope and fine structure cues for speech intelligibility,” J. Acoust. Soc. Am., 97(1), 585–592, 1995.

[12] Zhu, Z., Nishino, Y., Miyauchi, R., and Unoki, M., “Study on linguistic information and speaker individuality contained in temporal envelope of speech,” Acoust. Sci. & Tech., 37(5), 258–261, 2016.

[13] Unoki, M. and Zhu, Z., “Relationship between contributions of temporal amplitude envelope of speech and modulation transfer function in room acoustics to perception of noise-vocoded speech,” Acoust. Sci. & Tech., 41(1), 233–244, 2020.

[14] Unoki, M., Kawamura, M., Kobayashi, M., Kidani, S., Li, J., and Akagi, M., “Contributions of Temporal Modulation Cues in Temporal Amplitude Envelope of Speech to Urgency Perception,” Appl. Sci., 13(10), 6239, 2023.

[15] Zhu, Z., Miyauchi, R., Araki, Y., and Unoki, M., “Contribution of modulation spectral features on the perception of vocal-emotion using noise-vocoded speech,” Acoust. Sci. & Tech., 39(6), 379–386, 2018.

[16] Zhu, Z., Miyauchi, R., Araki, Y., and Unoki, M., “Contributions of Temporal Cue on the Perception of Speaker Individuality and Vocal Emotion for Noise Vocoded Speech,” Acoust. Sci. & Tech., 39(3), 234–242, 2018.

[17] Guo, T., Kidani, S., Isoyama, T., Birkholz, P., Akagi, M., and Unoki, M., “Important Modulation Frequency Components of Temporal Amplitude Envelope Contributing to Vocal Emotion Perception,” J. Speech Lang. Hear. Res., 68(9), 4205–4219, 2025.

[18] Kidani, S., Liu, X., Guo, T., Isoyama, T., Li, J., and Unoki, M., “Study on the modulation frequency range that contributes to the perception of urgency,” Proc. 24th International Congress on Acoustics, 2022.

[19] Lamore, P., Huijser, H., and Keemink, C. J., “Envelope detection of amplitude modulated high frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors,” J. Acoust. Soc. Am., 79(4), 1082–1085, 1986.

[20] 内川恵二, 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店, 2008.

[21] Kandel, E. R., Koester, J. D., Mack, S. H., and Siegelbaum, S. A. (eds.), 宮下保司（日本語監修）, カンデル神経科学（第 2 版）, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2022.

[22] Brisben, A. J., Hsiao, S. S., and Johnson, K. O., “Detection of Vibration Transmitted Through an Object Grasped in the Hand,” J. Neurophysiol., 81(4), 1548–1558, 1999.

[23] Vallbo, A. B. and Johansson, R. S., “Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation,” Human Neurobiology, 3(1), 3–14, 1984.

[24] 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,” 誠信書房, 1994.

[25] 上田裕市, 渡邉亮, “聴覚代行としての視，触覚による韻律情報伝達の一評価法について,” 音響誌, 47(5), 310–317, 1991.

[26] 上田裕市, 渡邉亮, “触覚呈示のための音声スペクトル正規化とその母音ベクトル表現,” 音響誌, 51(7), 519–528, 1995.

[27] Fletcher, M. D., Verschuur, C. A., and Perry, S. W., “Improving speech perception for hearing-impaired listeners using audio-to-tactile sensory substitution with multiple frequency channels,” Sci. Rep., 13, 13336, 2023.

[28] Fletcher, M. D., Akis, E., Verschuur, C. A., and Perry, S. W., “Improved tactile speech perception and noise robustness using audio-to-tactile sensory substitution with amplitude envelope expansion,” Sci. Rep., 14, 15029, 2024.

[29] Răutu, I. S., Tiège, X. D., Jousmäki, V., Bourguignon, M., Bertels, J., “Speech-derived haptic stimulation enhances speech recognition in a multitalker background,” Sci. Rep., 13, 16621, 2023.

[30] Weisenberger, J. M., “Sensitivity to amplitude-modulated vibrotactile signals,” J. Acoust. Soc. Am., 80(6), 1707–1715, 1986.

[31] Makino, Y., Maeno, T., and Shinoda, H., “Perceptual characteristic of multispectral vibrations beyond the human perceivable frequency range,” Proc. 2011 IEEE World Haptics Conference, Istanbul, Turkey, 439–443, 2011.

[32] 昆陽雅司, “高周波振動の知覚特性を活用したインタラクション,” 電学誌, 141(2), 77–79, 2021.

[33] Takenouchi, H., Cao, N., Nagano, H., Konyo, M., and Tadokoro, S., “Extracting haptic information from high-frequency vibratory signals measured on a remote robot to transmit collisions with environments,” Proc. 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Taipei, Taiwan, 968–973, 2017.

[34] Yamaguchi, K., Konyo, M., and Tadokoro, S., “Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience,” Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference, Montreal, QC, Canada, 674–679, 2021.

[35] Akiba, Y., Nakayama, S., Ushiyama, K., Mizoguchi, I., and Kajimoto, H., "Presentation of Low-Frequency Vibration to the Face Using Amplitude Modulation," IEEE Trans. Haptics, 18(3), 710–721, 2025.

[36] Moore, B. C. J., "The roles of temporal envelope and fine structure information in auditory perception," Acoust. Sci. & Tech., 40(2), 61–83, 2019.

[37] Smith, Z. M., Delgutte, B., and Oxenham, A. J., "Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception," Nature, 416, 87–90, 2002.

[38] 古川茂人, "聴覚の時間情報処理," Audiology Japan, 59(6), 615–622, 2016.

[39] 境久雄, "聴覚と音響心理," コロナ社, 1978.

[40] Corniani, G. and Saal, H. P., "Tactile innervation densities across the whole body," J. Neurophysiol., 124(4), 1229–1240, 2020.

[41] Viemeister, N. F., "Temporal modulation transfer functions based on modulation thresholds," J. Acoust. Soc. Am., 66(5), 1364–1380, 1979.

[42] Kohlrausch, A., Fassel, R., and Dau, T., "The influence of carrier level and frequency on modulation and beat-detection thresholds for sinusoidal carriers," J. Acoust. Soc. Am., 108(2), 723–734, 2000.

[43] 小林まおり, 赤木正人, "避難呼びかけ音声の心理的評価," 音響誌, 74(12), 633–640, 2018.

研究業績

国内発表

- 牧野哲平, 上江洲安史, 木谷俊介, 鵜木祐史, “触覚刺激提示による感情音声認識の予備的検討, ” 電気・情報関係学会北陸支部連合大会, H3-1, 2025.
- 牧野哲平, 上江洲安史, 木谷俊介, 鵜木祐史, “触覚刺激提示による感情音声認識の検討, ” 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 55, No.6, pp.415–420, 2025.
- 牧野哲平, 上江洲安史, 木谷俊介, 鵜木祐史, “触覚の知覚特性に基づく非言語情報知覚の検討, ” 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 56, No.2, pp.97–102, 2026.
- 牧野哲平, 上江洲安史, 木谷俊介, 鵜木祐史, “触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚の検討, ” 日本音響学会春季研究発表会, 2026.

受賞

- 電気・情報関係学会北陸支部連合大会, 音響部門優秀発表賞, 2025.