

基礎論文

皮膚有毛部の体毛を介した振動感受特性

古川 正紘^{*1} 永谷 直久^{*1} 橋本 悠希^{*1} 常盤 拓司^{*2*3}
 杉本 麻樹^{*3} 梶本 裕之^{*1} 稲見 昌彦^{*3}

Sensitivity of Human Hairy Skin with Vibrotactile Stimulation through Body Hair

Masahiro Furukawa^{*1}, Naohisa Nagaya^{*1}, Yuki Hashimoto^{*1}, Takuji Tokiwa^{*2*3},
 Maki Sugimoto^{*3}, Hiroyuki Kajimoto^{*1} and Masahiko Inami^{*3}

Abstract — This paper reports the detection threshold of human hairy skin with the use of a direct vibrotactile stimulus to the hair on human hairy skin. We designed an experimental method to quantify the psychological effect and developed a stimulation instrument to directly stimulate the hair. This vibrotactile stimulation was provided from the tip of tweezers which traveled horizontally or vertically against the human skin. The stimulation point was the approximate middle region of the hair on the middle finger and forearm. A psychological experiment was conducted based on the hypothesis that a frequency characteristic exists on hairy skin with direct stimulus to the hair. As a result, a significant difference depends on frequency was obtained with ANOVA. It was described that the vibrotactile stimulus was conducted to Pacinian by the body hair on the middle finger which has so small section area. This is conflicting finding concerning the size of the contactor which can conduct the stimulus into the lower layer of skin. However, this threshold curve and also the introspection reports of participants support this novel finding.

Keywords: hairy skin, detection threshold, vibrotactile stimulus, meniscus cell, follicle receptor

1 はじめに

近年、触覚提示技術に関する研究が盛んに行われている[1]。視覚代行を目的とし記号的情報の伝達を実現するために、人体を覆う皮膚の中で最も高い空間解像度を持つ指先や掌を利用した事例が代表的である。

一方で、指先などの限られた範囲だけでなく、提示部位を全身に拡張した例も報告されている[2][3]。全身を提示対象とした触覚提示を行うとき、有毛部の知覚特性を深く理解する必要がある。ここで毛根の有無により皮膚を分類したとき、無毛部は手掌部、足の裏および粘膜部のみに限られる。つまり全身皮膚のほとんどは毛根の存在する有毛部として分類でき、頭髮から産毛まで多様な体毛に覆われているといえる。しかし、従来の触覚研究において体毛の存在は考慮されてこなかった。

体毛の存在を考慮した触覚提示にはどのような利点が考えられるだろうか。言い換えれば、有毛部皮膚「ならでは」の触覚提示とは何であろうか。我々の日常では愛情を伝えるために頭髮をなでる行為が用いられる。またヒトよりも多くの体毛に覆われたサルも、グルーミングと呼ばれる行為を通して主従関係の確認や信頼関係を

構築することが知られている[4]。これらの事実から、体毛を介した触覚刺激に関する知見は強く情動に訴えることのできる触覚ディスプレイ実現のために有用であると考えられる。

そこで本稿では、触覚提示部位として皮膚有毛部上の体毛に着目し、体毛を介した感覚の定量化を試みる。まず体毛を直接刺激した際、主観的に刺激を検出可能な最小の刺激強度である「絶対検出閾値」を測定し、基礎的な知見を得ることとする。

2 有毛部皮膚と体毛について

実際に体毛を介してもたらされる感覚について評価を行うために、定量化方針について検討する。皮膚の知覚特性は、異なる周波数応答特性を有する複数の機械受容器にて決定される。従って、広い周波数領域に対する応答を測定し周波数-閾値曲線を求めた場合、複数個の受容器の応答が重畳されながらもそれらの特徴を良く表すことが知られている。しかしながら、先行研究は有毛部皮膚に直接接触させた刺激に長らく注目しており、体毛を介して得た感覚に対して議論が深められているとは言えない[5]-[11]。

そこで本稿で取り扱う体毛を介した感覚について議論を進めるために、まず無毛部と有毛部に関する組織学的、神経生理学的、心理物理学的知見をまとめる。

*1 電気通信大学大学院 電気通信学研究科

*2 東京大学大学院 工学系研究科

*3 慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

*1 The University of Electro-Communications

*2 School of Engineering, The University of Tokyo

*3 Graduate School of Media Design, Keio University

2.1 組織学的な特徴

ヒトの体毛は全て一般毛である。一方で、哺乳類などは毛根部の構造が特徴的な洞毛(触毛)を有する[4]。これは顔面部にあるヒゲとしてよく知られている。この洞毛は毛根に多数の神経線維と血管が密集しており、解剖学的な構造はヒトの体毛と異なるものである。またヒトの皮膚を有毛部と無毛部とで比較したとき、有毛部にはマイスナー小体・メルケル細胞が存在せず毛包受容器、触覚盤があるとされる。

2.2 神経生理学的な特徴

Vallbo らは神経活動パルスの記録により、皮膚有毛部には SAI(遅順応性 type I), SAII(遅順応性 type II), FAI(速順応性 type I), FAII(速順応性 type II)の4種類の神経活動があること、それぞれの活動が触覚盤(SAI), ルフィニ終末(SAII), 毛包受容器, field unit, パチニ小体(FAII)に由来することを指摘した[10]。

体毛の毛根には毛包受容器が存在し、その神経活動は FAI(速順応性 type I)に分類される。このことは単一の毛包受容器に対し電気的に刺激した際に振動感覚を生じたことから支持される[12]。

さらに近年、ヒトの皮膚に存在するC機械受容神経線維(C線維)の役割が解明されつつある[11]。C線維は侵害神経とは区別される無髄神経線維である。ヒトの有毛部である前腕部を刺激した際、このC線維は2.2mNというわずかな押し込み力に対しても反応し、受容野も明瞭に記録された。この神経線維の記録は人間の手甲部でも実施されており、遅順応性受容器が34%、速順応性受容器が66%を占めているという結果が報告されている[6]。

2.3 心理物理学的な知見

神経生理学的な知見は心理物理学的知見によっても裏付けが得られてきた。Bolanowski らは、垂直振動刺激を有毛部皮膚に与える心理物理実験を実施し周波数-検出閾値曲線を求めた。その結果、有毛部皮膚には P_h (Pacianian, hairy skin), NP_{h_low} (non-Pacianian, hairy skin, low frequencies), NP_{h_mid} (non-Pacianian, hairy skin, middle frequencies)の3種類の神経活動が存在することを示した[13]。これらはそれぞれ、パチニ小体、遅順応性神経(SAII)、速順応性神経(FA)という3種類の神経線維により決定付けられていることを示唆するものであるとした。

一方で、Miyaoaka らは皮膚に対してせん断方向の振動刺激を用いて同様に周波数-検出閾値曲線を求めた[9]。その結果、閾値曲線は有毛部皮膚では100Hzを境に4~100HzではSAIIが、100~250HzではFAIIが応答している可能性を示唆した。また、直径2.5mm断面積 $4.9 \times 10^{-2} \text{cm}^2$ の小さな接触子を用いた場合、4~150Hzの範囲で毛包受容器により検出閾値が決定され

ていることの可能性についても触れている。

この接触子の断面積は周波数-閾値曲線に影響を及ぼすことが知られている[14]。Vallbo らは有毛部皮膚に対して実施した実験結果から、断面積 2.9cm^2 の大きい接触子に対し断面積 $8.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ の小さいものでは検出閾値が上昇、すなわち感度が低下することを示した。特に、大きい接触子を用いた際に得られた100~500Hzの範囲に特徴的なU字型曲線は、パチニ小体が決定付けていることが知られている。一方で小さい接触子を用いるとU次曲線は浅くなるため、この場合はパチニ小体の反応が極めて弱くなることが示唆されている[5]。

ヒトの体毛に直接刺激を提示し心理物理実験を実施した数少ない例として、Hamalainen らの報告が挙げられる。Hamalainen らは、腕の有毛部に微小な空気塊を吹きつけた際の検出感度が、体毛を除去することで低下したと報告した[15]。しかし空気塊は体毛にだけでなく皮膚をも直接刺激しており、体毛に生じた機械的振動と検出感度の関連性は明らかにされていない。

3 体毛を介した有毛部触覚測定のための装置設計

本稿の対象とする範囲は、有毛部のうち実際に体毛が生えている部位である。この体毛による触覚への影響として、振動・圧力・温度などの物理量が挙げられる。ここで日常的な触覚体験を観察するとき、衣服との接触や風による作用もしくは頭を撫でる等の行為により、体毛は機械的な刺激を受けているといえる。そこで体毛への刺激として機械振動を用い、体毛を介した触覚の記述を試みる。本稿では、これを絶対検出閾値として定義し刺激周波数依存性について記述を試みる。

3.1 測定条件の設定

体毛が外力を受けて振動するときの振動方向について考える、体毛が衣服などと接する際に生じる機械的刺激は、体毛の軸方向ではなく体毛側面方向で受けると考えた方が確率的に妥当である。そこでまず、考えられる体毛の振動方向の中でも皮膚接線方向の振動に着目する。

体毛を介した物理刺激に対する絶対検出閾値は、体毛の動特性と触覚受容器の応答特性という2つの要因に影響を受けると考えられる。つまり、刺激提示位置が毛根により近いならば刺激は効率よく伝達され、絶対検出閾値は減少すると考えられる。一方で刺激提示位置が毛先により近いならば、毛根へ伝達される過程で刺激は大きく減衰すると考えられる。そこで動特性の影響を考慮するために、以下の2点をそれぞれ統制することを考える。

- (1) 体毛上での振動提示位置
- (2) 体毛へ与えられる張力

物理刺激には、刺激として制御が容易な機械的振動

刺激を用いることとする。また周波数条件として、遅順応型から速順応型まで幅広い触覚受容器を刺激可能な周波数列を用いる。詳しくは後述する。

3.2 実験器具

本稿で述べる刺激装置は、体毛を把持する機構を有する。従って体毛の張力が閾値決定に大きな影響を与えることが想定される。そこでボイスコイルを用いた振動提示機構の他に、次の項目を設計要件として挙げた。まず体毛を把持可能な機構をもつこと、そして体毛の張力を制御可能でありかつ刺激中に張力を保つことが可能であること、である。これらの要件を満たす刺激装置の模式図を図 1 に示す。振動方向である皮膚接線方向は同図の Vibration として示されている。また刺激提示中の様子および刺激器具先端を図 2 に示す。

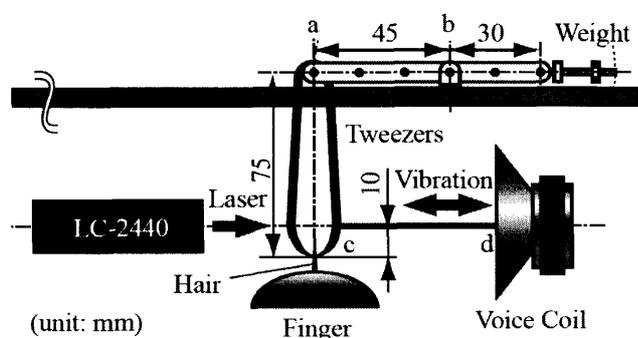


図1 刺激器具

Fig.1 Schematic of Device

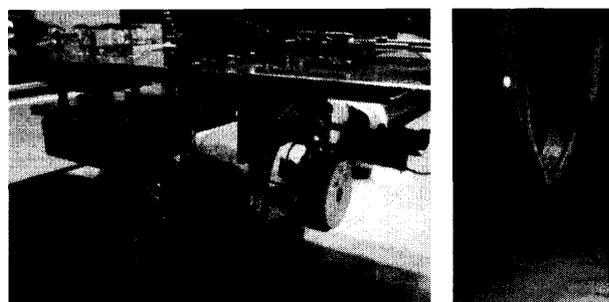


図2 左図 刺激中の様子 / 右図 刺激器具先端

Fig.2 Experimental Setup(Left) / Tip of Tweezers (Right)

3.3 体毛把持機構

図 1 の Voice Coil は、東京コーン紙製作所製 F77C123-1 のコーン部分を取り除いたボイスコイルであり、振動刺激生成のために用いている。刺激器具は市販の毛抜きを変形させ、常時把持力を持つ状態で鉛直下向きに自由回転するよう点 a に吊り下げられた。また刺激器具である毛抜き側面 c およびボイスコイル中央部 d に小型ネオジウム磁石を接着し、その間を重量 0.2gf 直径 0.8mm 長さ 50mm の金属製針金によって磁力結合させた。同針金を介してボイスコイルの振動が刺激器

具に伝達される。点 a, b は十分に空転し、同様に点 c, d も磁力結合を用いているためリンク機構として利用可能であることを事前に確認した。つまり点 a, b, c, d の 4 点で結ばれる 1 自由度のリンク機構が構成され、点 a, c の 2 点で刺激器具が支持されている。

3.4 張力維持機構

振動刺激提示中も点 a, b, c, d はリンク機構として機能し続け、体毛に一定の張力を付加し続ける。このとき毛抜きが体毛に与える張力は、図 1 の Weight で示した重りの重量を調整することで制御される。提示する張力の校正は、刺激提示直前に次の手順で行なわれた。

まずテグス糸を結びつけた分銅 2.0gf をデジタル上皿秤 TANITA KP-104 (最小表示 0.1g) 上に置き、2.0g を示すことを確認する。次にテグス糸を体毛に見立て、刺激器具に把持する。その後、刺激装置全体の高さを調節することにより、点 ab 間を水平に保つ。この水平を保ったまま、上皿秤が荷重 1.0gf を示すように図 1 の Weight を調整した。このように調整された条件を、以後本稿では張力 1.0gf と呼ぶこととする。

刺激終了後も同様の手順にて張力の再計測を行ったところ、 $1.0 \pm 0.2\text{gf}$ であることが確認されている。

3.5 振動刺激の生成および計測方法

振動刺激は音響データとして作成した。これをオーディオアンプ(東芝製パワーオペアンプ TA7252AP) で増幅し、ボイスコイルを駆動させた。これに追従する毛抜きの振動振幅をレーザ変位計で計測した。刺激器具先端より 10mm 上方にレーザ光が照射される。照射部位には拡散反射面を確保するため、光沢白色素材が貼付されている(図 2 右)。計測には分解能 $0.2\mu\text{m}$ を持つ拡散反射タイプ Keyence LC-2440 および変位計本体 Keyence LC-2400 を用いた。刺激器具の変位は 50kHz でサンプリングされ、レーザ変位計本体から電圧出力される。これを Interface 社製高速 16 ビット AD 変換ボード PCI-3178 を介しサンプリング周波数 10kHz にて記録を行った。

4 体毛を介した振動刺激を用いた絶対検出閾測定

4.1 刺激波形の設計

本稿で用いる刺激は「標準刺激」と「比較刺激」の 2 種類が 1 組となったものである。まず標準刺激は、音響信号上で無信号区間として定義され 1 秒間継続する。比較刺激は音響信号上で一定の振幅および周波数を持つ正弦波であり、標準刺激と同様 1 秒間継続する。図 3 に 1 つの比較刺激を示す。比較刺激は直流オフセットによるスパイクノイズの発生を予防するため、立ち上がり立ち下り区間として振幅包絡に 60ms の傾斜を与える。この区間に挟まれる 880ms を比較刺激の安定区間とし、レーザ変位計で計測した最大振幅を比較刺激の

強度とする。図3のAmp.が最大振幅である。

予備実験から、被験者の姿勢変化に伴い固定した指先に微小な移動が生じ、結果的に刺激器具の変異として計測されることが明らかとなった。これは実験条件の意図せぬ変動を意味するため、指をさらに強固に固定するなどの処置が考えられる。しかし鬱血の危険性から、指の強固な固定は避けた。

このような突発的な外乱の影響は、同一の刺激条件を複数回繰り返すことで平滑化することが可能だと考えられる。そこで標準・比較刺激1組を10回繰り返し、合計20秒間の刺激を1試行として定義することとした。図4に波形例を示す。この1試行の間、音響信号上で比較刺激が持つ正弦波の振幅および周波数は、安定区間内で一定に保たれる。1試行の刺激強度は音響信号上の振幅ではなく、レーザ変位計で計測された比較刺激の10回分の振幅平均として定義される。

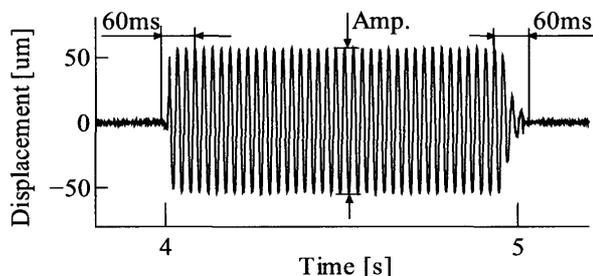


図3 刺激強度の定義と立ち上がり時間

Fig.3 Definition of Stimulating Strength and Rising Time

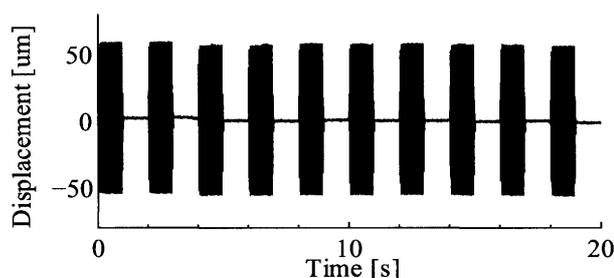


図4 1試行の刺激に用いた波形

Fig.4 Stimulation Wave for 1 Trial

4.2 実験条件

被験者は25歳から28歳の健康な男性4名である。被験者には電気通信大学倫理審査委員会から承認を得た実験である旨を伝え、事前に同意書を得た。その後、図1図2左に示すように被験者の左手甲部を上面にした状態でテーブル上の台に前腕部および指を固定した。被験者は自然に前方を向き安静を保つよう指示された。またホワイトノイズを用い聴覚遮蔽を行った。

刺激部位として左手中指背の体毛を用いた。体毛は

他の毛と干渉しない部位が選択され、周辺の毛が刺激器具に触れないよう留意しながら1本だけ毛抜き先端で把持された。

予備実験から、0.5、1.0、1.5gfの3条件で張力を変動させ絶対検出閾値を計測したところ、閾値の大幅な変動が認められなかった。従って、張力条件は前述の手順にて校正された張力1.0gfを全試行で用いた。

刺激器具で体毛を把持する位置は、皮膚表面から0.3mmと1.0mmの2条件を用いた。本稿では以後、把持長さと呼ぶ。体毛は実験者の手作業で刺激器具に把持された。把持作業の後、普通紙に印刷された0.5mmピッチのチェッカーボード模様を体毛付近に配置し、把持長さが実験条件を満たしていることを確認した。実験条件を満たさない場合、満たすまで同作業は繰り返された。また把持手順後に刺激器具先端はチェッカーボード模様とともにデジタルカメラでマクロ撮影され、詳細に把持位置が確認された。その結果、0.3mm条件では0.3~0.5mm、1.0mm条件では1.0~1.2mmの範囲で把持されていることが確認された。

同一の体毛を同一の把持長さ条件で再度把持し直すことは極めて困難であったため、一度の把持で一把握持長さ条件下における全周波数条件の刺激を提示し、回答を得ることとした。ただし被験者からの申し出があった場合ただちに体毛を開放し、この場合の実験データは解析から除外した。

また刺激周波数条件として25、40、80、100、160、250、320、600Hzの8条件を用いた。刺激は必ず低い周波数から順に提示された。

4.3 実験手順

被験者は、1試行中に10回繰り返される標準・比較刺激の出現を明瞭に区別可能か否か、強制2肢選択で報告するよう実験者から指示された。被験者は○×を記したカードを用いて意思表示を行った。実験者も同様にカードを用い実験の開始を被験者に伝えた。その後、被験者に刺激開始時刻を予期させないための0~3秒の任意の遅延時間を経て、被験者に1試行分の刺激が提示された。その後、被験者は回答を行った。

計測手順は、まず1周波数条件につき後述の手順を用いて刺激強度を変動させながら複数回の試行を実施し、1つの絶対検出閾値を算出した。この間、提示周波数は一定に保たれた。その後、次の周波数条件を用いて同様に測定を行った。これを繰り返し合計8つの周波数条件分の計測を行った。

刺激強度はPEST法[16]を元に次の手順で変更された。被験者からの回答が「×:区別できない」を提示した場合、次の試行で用いる比較刺激の強度を上昇させた。一方で被験者からの回答が「○:区別できる」であった場合、強度を減少させた。刺激強度は被験者の回答が

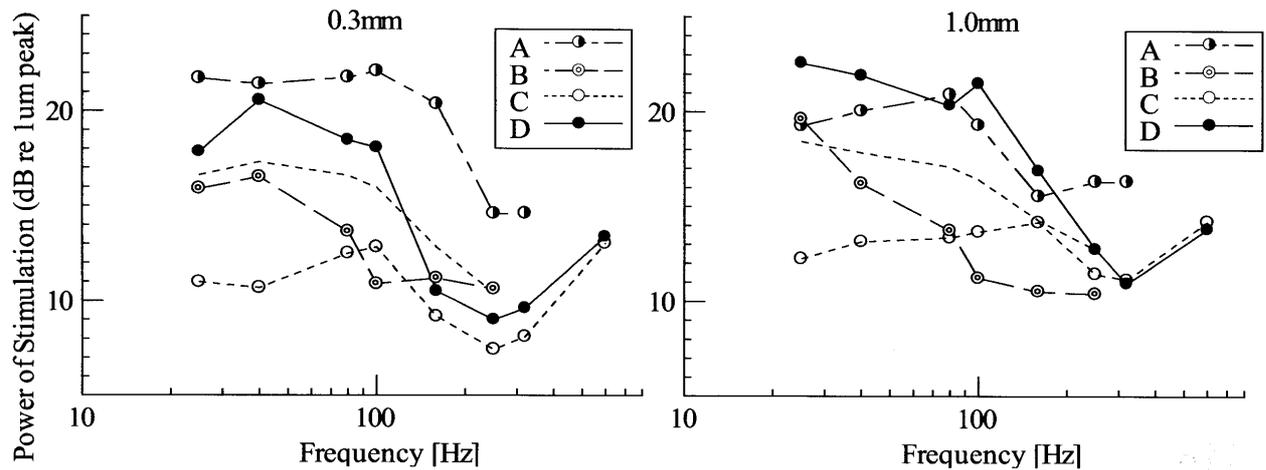


図5 被験者4名の振動検出閾値 (把持長さ条件: 左図 0.3mm, 右図 1.0mm)

Fig.5 Detection Thresholds of 4 Participants

前回の回答から変更がない限り上昇・下降させ続けた。この下降系列および上昇系列をそれぞれ5回ずつ繰り返した。この間で被験者の返答が変化した特定の10試行分の刺激強度を平均し、絶対検出閾値とした。なお、被験者の回答が変化する度に強度の変動量を減少させた。このとき、比較刺激の強度は推定閾値付近に収束していく様子が観察された。また全試行において、実験者は被験者に対し刺激強度の上昇・下降を一切フィードバックしなかった。

実験は数試行分の練習後に実施された。1被験者あたりの試行回数は合計200~230試行前後、実験時間は説明、休憩、練習を含め合計3時間半程度であった。

5 結果

5.1 絶対検出閾の周波数応答

各実験条件において得られた絶対検出閾の周波数応答のグラフを図5に示す。横軸に周波数、縦軸に振動刺激の振幅を1µm基準のdB値をとり、被験者別にプロットした。被験者A~Dは順に23, 23, 24, 27歳である。被験者Bのみ左利きであり、他3名は右利きであった。プロットを伴わない破線は、把持長さ2条件下において被験者間平均値を表している。

被験者からの申し出による中断、もしくは提示可能な最大強度で刺激を行っても知覚されないと回答され続けた場合は、有効なデータを取得できなかったとしてプロットから除外した。これを理由として除外されたデータは、周波数条件320, 600Hzに集中した。

全体の傾向として、把持長さ条件0.3, 1.0mmにかかわらず25Hzから250Hzへ向けて閾値が概ね減少傾向をもつことがわかる。さらに周波数-閾値曲線の形状は被験者間では異なるが、被験者内ではよく一致している。

また被験者にかかわらず、250Hzを超え600Hzへと向けて閾値は急激に上昇傾向をもつことも観察される。被験者CDは把持長さ条件0.3mmと比較し1.0mmでは全周波数領域に対し閾値の上昇がみられる反面、被験者Bは全周波数領域に対し閾値の減少が、また被験者Aは低周波25, 40Hzの閾値が減少している。

5.2 被験者の内観報告

前述の手順を経て体毛が刺激器具に把持され適切な張力が与えられた際、実験者は被験者の心理的負担を考慮し痛みがあるか否か必ず尋ねた。その結果、全ての被験者は痛みを訴えることはなかった。刺激器具にて体毛を把持し刺激装置を徐々に上昇させている最中は牽引感を報告したが、装置が適正高さに達したために固定されてからは主観的な感覚は生起されず、被験者は体毛が把持されていることに気づかないほどであった。

計測後、実験者は被験者から任意の報告を受けた。そこで多くの被験者は、25~40Hzの低周波数領域では押されたような感覚である圧覚を、また80~600Hzの領域では振動感覚をそれぞれ内観として報告した。

全被験者は把持長さ条件にかかわらず、刺激周波数160, 250Hz条件下で腕を固定する台が振動していると報告した。多くの場合、刺激強度の変動に伴い160Hzでは掌側のみ、もしくは中指側面のみが震えているように感じるという報告がなされた。また毛根に刺激を感じるのではなく中指全体が振動していると報告する場合もあった。特筆すべきは、被験者C, Dが温かさという温度感覚を生起したことである。特に被験者Aは250, 320Hzの範囲で暖かさを知覚したと報告している。同被験者は刺激周波数250Hz条件下において、温度感覚は生起されるが振動感覚は感じないと度々回答した。

次にこのような内観報告を誘発したであろう刺激条件

について述べる。実際の実験では、試行直後に自発的に内観報告を行った被験者がいる一方で、休憩時間に内観報告を行った被験者がいた。従って内観報告と刺激条件は必ずしも一致させることができなかつたが、内観報告に対する刺激条件が明確に追跡可能な場合のみを代表値としてまとめると表1の通りであった。

表1 特徴的な内観報告がなされた刺激条件

Table 1 Stimulus Condition of Characteristics Impression

内観報告	被験者	把持条件 [mm]	周波数 [Hz]	振幅 [μm]
暖かさ	A	0.3	40	3
		0.3	100	180
		0.3	250	23
		1.0	320	75
机の振動	B	0.3	100	15
		0.3	160	11
		0.3	250	15
		1.0	100	18
		1.0	160	11

5.3 統計分析結果

図5に示した4名分の絶対検出閾値について、把持長さ条件毎に被験者間平均値と標準偏差を求めた。その結果を図6に示す。横軸は刺激周波数、縦軸は比較刺激の刺激強度を1μm基準のdB表記し絶対検出閾値の平均値をプロットした。標準偏差はエラーバーで示されている。

第3節で設定した刺激条件差が測定データに与える影響を検証するために、分散分析を実施した。本実験は同一被験者が全実験条件を試行する被験者内計画である。分散分析において要因とは、測定データの値を

変化させる原因であり、人為的な条件設定による実験条件を指す。そこで、被験者によっては測定データを得られなかつた周波数条件320, 600Hzを除き、条件設定差の主効果を検定するために2要因の分散分析を行った。2要因とは、把持長さ条件(0.3mm, 1.0mm) × 刺激周波数条件(25–250Hz)である。この分散分析の結果を表2に示す。刺激周波数の主効果は有意であり(F(5,15)=6.86, p<0.01)、体毛を介した機械的振動の中でも効率よく知覚し得る周波数が存在することを示している。すなわち、体毛を介した機械的振動知覚の周波数依存性があることが確かめられた。一方で、把持長さ条件の主効果は有意でなかつた(F(1,3)=1.05)。

またいずれの周波数条件間で有意な差があるかを求めるために、LSD法を用い周波数条件間の多重比較を行った。有意差が確認された条件間(p<0.05)について図6内に示した。

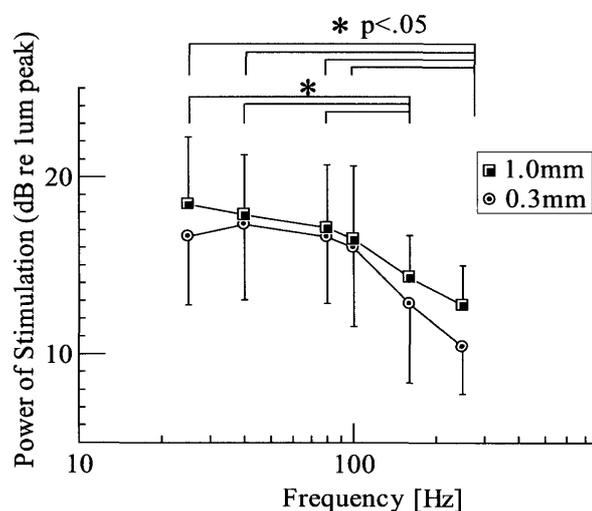


図6 振動検出閾値(4名の平均と標準偏差)

Fig.6 Mean and Dispersion of Detection Thresholds

表2 分散分析表 (個人差 × 把持長さ条件 × 刺激周波数)

Table 2 ANOVA table (Subjects × Holding height × Stimulus frequency)

Factor	SS	df	MS (SS/df)	F
個人差 (S)	456.354	3	152.118	
把持長さ条件 (A)	17.294	1	17.294	1.05 ns
S×A	49.499	3	16.500	
刺激周波数 (B)	239.069	5	47.814	6.86 **
S×B	104.570	15	6.971	
A×B	6.380	5	1.276	0.67 ns
S×A×B	28.464	15	1.898	

ns p > .10; **p < .01

SS; sum of square, df; degree of freedom, MS; mean square

6 考察

本稿では刺激器具である毛抜きの変動量を用いて刺激強度を定義している。従って、得られた閾値は毛根付近の実際の皮膚変形量に必ずしも準じたものではないことに留意する。

6.1 計測手法について

検出閾値を計測する際に一般的に用いられる手法である強制二択トラッキング法では、変動させる刺激強度を一定に保つことが前提となる[18]。一方で、PEST法では試行毎の変動量を減少させることでより少ない試行回数で検出閾値を効率よく測定することが可能となる[16]。しかし両者の手法は厳密に刺激強度を制御可能であることが必要条件となる。

しかし本稿で実施した実験条件下では、体毛を把持した体毛と刺激子の動特性が未知であったため、PEST法を実施することが困難であった。そのため、検出閾値はPEST法に準じ算出したが、試行間の刺激変動量は比例関係がなく、この観点からは厳密にPEST法に従うものではない。また1組の標準・比較刺激を10回繰り返すことで、提示波形の再現性向上を図った。この繰り返しは検出閾値を低下させた可能性があるが、被験者には明確に知覚された場合のみ知覚されたと回答するよう予め教示したことからPEST法のチャンスレベル相当となり、すなわち50%以上であるといえる。さらに被験者内の検出閾値は施行を繰り返すことで収束傾向を示したことから、安定した刺激提示が行えたと考えられる。

6.2 体毛の動特性

第5.3節で実施した分散分析の結果から、本実験で用いた体毛把持位置は閾値へ影響を与えなかったことがわかった。第3.1節で指摘した通り、体毛上の把持位置は体毛の動特性の影響を大きく受けることが予想されたが、予想に反する結果となった。この原因として考えられるのが、体毛に提示した張力の存在である。

張力を全く提示せずに初期状態で体毛が座屈していた場合、た場合、著しく絶対検出閾値が上昇することから分かってきた。そのため、本稿では一定張力を維持した条件下で実験を行った。本稿で用いた張力1.0gfという条件下において座屈することはなかった。この条件下の体毛は、毛根付近の皮膚表面を牽引力により弾性変形させることにより刺激を伝達する役割を果たすと考えられる。

なお、張力に依存し閾値の変動が生じることも推察されたが、予備実験で実施した0.5~1.5gf張力条件下では閾値の著しい変化は確認されなかった。2.0gf以上の張力条件下では、刺激提示時に毛根付近に痛覚を生じる可能性が危惧されたため実施されなかった。そこで、本稿では全試行一定の張力条件下で実験を実施した。

以上のことから、体毛の動特性と比較して触覚受容器の特性が十分に大きく閾値決定に作用したものと考えられる。

6.3 接触子としての体毛

先行研究で用いられた接触子のうち最も小さい断面積 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ の刺激子[5]で得た絶対検出閾値と比較し、今回の実験で得た結果は周波数全域におよび絶対検出閾値が高い。この点は、体毛の持つ断面積の小ささが原因の1つと考えられる。

そこで被験者の体毛をマイクロメータ Mitutoyo M210-25 で測定した。その結果、直径は約22~50 μm 、断面積 $3.8 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ であった。Vallboの用いた断面積 $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ の接触子[10][17]、もしくはMiyaoakaらの用いた断面積 $4.9 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ の接触子[9]に対し、体毛の断面積は極めて小さいことがわかる。

従来知見では、これ程までに小さい刺激子を用いた場合、周波数-閾値曲線には皮膚深部に位置する受容器の特性が反映されないことが知られている。これは微小な刺激子を介して提示された刺激は、皮膚深部へ到達する前に減衰してしまうため、皮膚深部の受容器を発火させないためである。しかし第5章の結果はこの知見と矛盾する結果を示している。この点について次節で詳しく考察する。

6.4 皮膚深部に存在するパチニ小体への振動伝搬

Bolanowskiの結果からは、有毛部に対して断面積が $8.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ の小さい刺激子を用いて刺激を行った場合、250Hzで最も閾値が減少するというパチニ小体の応答を観察している。本実験の結果もまた、このような特徴的な閾値の変化が観察された。つまり、体毛を介した振動刺激がパチニ小体へ到達したと考えられるのが妥当である。

皮膚内部での機械受容器の配置という観点からは、毛包受容器、触覚盤などと比較してパチニ小体は皮膚深部に位置するため、体毛を断面積が極めて小さい刺激子として考えた場合、前述の通り従来は刺激が到達しないとされてきた。

しかし第5.2節で述べた通り、刺激周波数160, 250Hz条件下で腕を固定する台が振動しているという内観報告を全被験者から得ている。予備実験では、台の振動は生じないことが次の方法により確認されている。つまり、体毛を把持した場合に閾値付近となる刺激強度を、体毛を把持せずに提示した場合、決して掌に振動を感じることがなかった。一方で、十分に強度が大きいため機を伝搬し台自体の振動として掌に感じられるほどの強い刺激強度は、閾値と比して十分かけ離れていることも確認された。しかしながら、被験者全員が振動提示面は指の背ではなく固定台であると誤認識した。

以上の事実から、体毛を介した機械的刺激が皮膚深

部に位置するパチニ小体を刺激していることが示唆された。特に、手掌部に刺激を感じたという内観報告からは手背部から手掌部への刺激伝搬によるものと考えられ、広い受容野を持つパチニ小体によりこれが検出されたものと考えられる。

6.5 毛包受容器および触覚盤の応答

実験において、多くの被験者が40~250Hzの領域で振動感覚を報告した。これは毛包受容器を個別に電気刺激した際に振動感覚を生じさせたことから支持される[12]。また Miyaoaka らは、4-150Hz は毛包受容器に決定付けられていることを示唆している[9]。従って、100Hz 以下の周波数領域は、毛包受容器が主に応答したと考えて妥当である。

一方で、周波数領域25~40Hzでは被験者は圧覚を報告した。このことから、同周波数領域に対して応答した受容器は、毛包受容器ではなく遅順応性の触覚盤であると考えられる。遅順応性のメルケル小体は主観的な感覚である圧覚と関連が強いと考えられており、触覚盤はこのメルケル小体の集合体であるとされる[19]。

6.6 C線維およびfield unitと温度感覚

有毛部にはC線維やfield unitが存在する。0.1mNという微小な押し込み力を用い神経発火を記録した場合、SAI(Merkel), C線維, field unitの順に高感度であると報告されている[10][11]。このことから、25~40Hzという低周波数領域の検出閾値を決定したのは、field unitではなく、触覚盤である可能性が高いと考えられる。また、field unit受容野は平均78mm²(最小52, 最大115mm²)である一方で、SAI受容野は平均11mm²(最小2.7, 最大21mm²)と小さい[10]。このため、毛根がこの受容野と重複した位置関係にあったか否かが、低周波数領域における閾値の大きな分散を生じさせた可能性があると考えられる。

また第5.2節では温度感覚を生じたと報告する被験者が存在したことを述べた。実験環境としては空調が整った防音室で実施したことから、局所的な温度変化が生じたとは考え難い。ここでC線維は温あるいは冷覚や痛覚を伝達する無髄神経として機能することが確認されている[20]。この無髄神経は温冷覚を生じさせる受容体とともに機械的刺激によってもこの受容体が応答することが分かっている。従って本実験で観察された温度感覚の生起は、このC線維の応答によるものであることが示唆される。

7 まとめ

本稿では体毛を介した刺激により生起される感覚について定量的に記述することを試みた。そこで一定張力を提示した条件下において体毛に振動刺激を提示し、周波数依存性について心理物理学的手法を用いて計

測した。

その結果、皮膚に対して水平方向に振幅を持つ機械的振動刺激に対し、160, 250Hzに条件下で絶対検出閾値が有意に減少したことが確認された。一方で、振動刺激の提示位置条件である皮膚表面から0.3, 1.0mmという違いは、閾値に有意な影響を及ぼさないことがわかった。

また刺激周波数160, 250Hz条件下で有意に閾値が減少したことから、皮膚深部のパチニ小体の活動が示唆され、内観報告もまたそれを裏付けるものであった。また100Hz以下の検出閾値は、皮膚表在受容器である毛包受容器、触覚盤により決定される可能性を述べた。さらに振動刺激により温度感覚が生起されたことについて述べた。

今後は、動特性解析のために体毛および毛根付近の応力場をモデル化し、本稿の結果と比較することで議論を深めていきたい。一方で、体毛を介した触覚刺激の主観的感覚の応用も目指したい。

謝辞

本研究は文部科学省科研費補助金(特別研究員奨励費21-6294)および電気通信大学大学院カデット教育学生プロジェクト研究による助成によって行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 清水 豊: 見る情報を触る情報にする, 日本デザイン学会デザイン学研究. 特集号, Vol.13, No.3, pp.22-27 (2006)
- [2] C.C. Collins: Tactile television - mechanical and electrical image projection, IEEE Man-Machine Systems (1970)
- [3] Erp, Jansen: Application of tactile displays in sports: where to, how and when to move, EuroHaptics (2006)
- [4] Ahl, A. S. : The role of vibrissae in behavior: A status review, Vol.10, No.1, pp.245-268 (1986)
- [5] Bolanowski, S. J.: 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, pp.1680-1694 (1988)
- [6] Järvilehto, T., Hämäläinen, H., Soininen, K.: Peripheral neural basis of tactile sensations in man: II. Characteristics of human mechanoreceptors in the hairy skin and correlations of their activity with tactile sensations, Brain Res. 219, pp.13-27 (1981)
- [7] Mahns, D. A., N. M. Perkins, V. Sahai, L. Robinson, and M. J. Rowe.: Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin, J Neurophysiol 95, pp.1442-1450 (2006)
- [8] Merzenich MM and Harrington T.: The sense of flutter-vibration evoked by stimulation of the hairy skin of primates: comparison of human sensory capacity with the responses of mechanoreceptive afferents innervating the hairy skin of monkeys. Exp Brain Res 9, pp.236-260 (1969)
- [9] Miyaoaka, T.: Measurements of detection thresholds

- presenting normal and tangential vibrations on human hairy skin, The 22nd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics, Vol.22, pp.229-232 (2006)
- [10] Vallbo, A. B., Olausson, H., Wessberg, J., and Kakuda, N.: Receptive Field Characteristics of Tactile Units with Myelinated Afferents in Hairy Skin of Human Subjects, *Journal of Physiology*, 483. 3, pp.783-795 (1995)
- [11] Wessberg, J., Olausson, H., Fernstrom, K. W. and Vallbo, A. B.: Receptive Field Properties of Unmyelinated Tactile Afferents in the Human Skin, *Journal of Neurophysiology* 89, pp.1567-1575 (2003)
- [12] Scharf, B., Hyvarinen, J., Poranen, A., Merzenich, M.: Electrical stimulation of human hair follicles via microelectrodes, *Percept. Psychophys* 14, pp.273-276 (1973)
- [13] Bolanowski, S. J., Gescheider, G.A., Verrillo, R.T.: Hairy Skin: Psychophysical Channels and Their Physiological Substrates. *Somatosensory and Motor Research* 11, pp.279-290 (1994)
- [14] Verrillo, R. T.: Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35: pp.1962-1966 (1963)
- [15] Hamalainen, H. A., Warren, S., Gardner, E. P.: Differential Sensitivity to Airpuffs on Human Hairy and Glabrous Skin, *Somatosensory and Motor Research*, Vol.2, Issue 4, pp. 281-302 (1985)
- [16] Taylor, M. M. , Creelman, C. D.: PEST: Efficient Estimates on Probability Functions, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 41, pp. 782-787 (1967)
- [17] Johansson, R. S. and Vallbo, A. B.: Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin, *J. Physiol.* Vol.286, pp 283-300 (1979)
- [18] Zwillocki, J. J., F. Maire, A. S. Feldman and H. J. Rubin: On the effect of practice and motivation on the threshold of audibility. *J. Acoust. Soc. Am.* 30, pp. 254-262 (1958)
- [19] Willis Jr., William D., Coggeshall, Richard E.: *Sensory Mechanisms of the Spinal Cord*, Springer, pp.41-42, 2004
- [20] Torebjörk H.E., Hallin R.G.: Identification of afferent C units in intact human skin nerves. *Brain Res* 67, pp.387-403 (1984)

(2009年5月8日受付)

[著者紹介]

古川 正紘 (学生会員)



2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。現在、同研究科博士後期課程同専攻に在籍。2009年4月日本学術振興会特別研究員(DC2)。触覚知覚特性、ヒューマンインタフェース技術に関する研究に従事。日本 VR 学会学術奨励賞受賞(2008年)。

永谷 直久 (学生会員)



2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。現在、同大学大学院電気通信学研究科。知能機械工学専攻博士後期課程在籍。視覚拡張および前庭感覚提示を利用したインタフェースの研究に従事。日本学術振興会特別研究員(DC1)。

橋本 悠希 (学生会員)



2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻博士前期課程卒業。現在、同大学大学院電気通信学研究科 人間コミュニケーション学専攻博士後期課程在籍。口唇部への感覚提示、高品位触覚提示装置の開発などの研究に従事。日本学術振興会特別研究員(DC1)。

常盤 拓司 (正会員)



2001年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了, 2007年同博士課程退学。現在, 東京大学大学院工学系研究科特任研究員および慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科付属メディアデザイン研究所訪問研究員。実世界指向インタフェースの研究開発およびアカウタビリティに関連する業務に従事。

杉本 麻樹 (正会員)



2006年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士(工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教などを経て、現在、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師。画像提示装置を用いた計測と制御の研究に従事。

梶本 裕之 (正会員)



1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業。2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学。博士(情報理工学) 2001年4月日本学術振興会特別研究員(DC1)。2003年4月東京大学助手。2006年9月電気通信大学助教授。2007年4月同准教授。触覚ディスプレイ, 触覚センサ, パ

ーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会各会員。

稲見 昌彦 (正会員)



1999年東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学リサーチ・アソシエイト, 同大学助手, 電気通信大学講師, 同大学助教授, JST さきがけ研究者, MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者, 電気通信大学知能機械工学科教授を経て, 現在慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。ロボット, バーチャルリアリティ等インタラクティブ技術に関する研究に従事。情報処理学会山下記念研究賞, 同学会論文賞, 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞, 同学会論文賞, 同学会貢献賞, IEEE Virtual Reality Best Paper Award 等受賞, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE Computer Society 等各会員。