

指先における振動刺激提示部位への温度感覚の誘導

-温度誘導効果の振動周波数依存性-

○渡辺 亮¹⁾, 大原 淳¹⁾, 國安 裕生¹⁾, 佐藤 未知¹⁾²⁾, 福嶋 政期¹⁾²⁾, 梶本 裕之¹⁾³⁾

Referral of Thermal Sensation to Vibratory Stimulation on Tip of Finger

-Vibrational Frequency Dependency of Effect of Thermal Referral-

○Ryo WATANABE, Jun OOHARA, Yuki KUNIYASU,
Michi SATO, Shogo FUKUSHIMA and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学

2) 日本学術振興会特別研究員

3) 科学技術振興機構さきがけ

Abstract: When the heat stimulation is presented to tip of the index finger and the vibratory stimulation is presented to tip of the middle finger, the middle finger is also perceived to be warm. This phenomenon is known as a kind of the thermal illusion called Thermal Referral. To reveal the mechanism of the Thermal Referral, we focused on tactile mechanoreceptors. We varied the frequencies of vibratory stimulation to stimulate different mechanoreceptors, and we evaluate the mechanoreceptors concerned with Thermal Referral.

1. はじめに

1.1 身体の広範囲への温度刺激提示手法

近年、映画やゲームにおける臨場感の向上のために、身体の広範囲へ触覚を提示する装置が数多く提案されている[1][2]。さらなる臨場感向上のため、広範囲の触覚提示に加え、広範囲への温度感覚の提示が必要になると考えられる。

身体の広範囲に温度感覚と触覚を同時に提示する場合、ヒトの触覚と温度感覚の2点弁別閾距離に則して振動素子と温度提示素子を敷き詰める設計が考えられる。しかしペルチェ素子など温度提示素子は消費電力が高く、また放熱の為に機構を設置する必要があり、この設計では装置の複雑化や大型化が予想される。そこで我々は、少ない温度提示素子で効率よく身体の広範囲に温度感覚を提示するために、Thermal Referralという温度錯覚現象に着目した[3]。

Thermal Referralとは温度刺激の皮膚表面近傍に触刺激を提示した際に、温度刺激を提示していない触刺激提示部位にも同様に温度感覚を知覚する錯覚現象である。我々は、このThermal Referralを利用して温度刺激素子の数を減らすことで、効率的に身体の広範囲に温度感覚を提示できると考える。

1.2 Thermal Referral

Thermal ReferralはGreenらによって発見された錯覚現象であり、初期の報告は、手の人差し指と薬指の末節のみを温度提示素子に接した状態で、中指の末節を常温の接触子に押し付けると、中指においても同様に温度を知覚するというものであった[3]。その後、Greenらの報告からThermal Referralは人差し指・中指・薬指の3指において両側に温度刺激を提示する場合のみではなく、人差し指と中指や中指と薬指など2指において一方にのみ温度刺激を提示した場合にも生じることが報告された[4]。さらにこれらの現象は指先のみでなく有毛部である前腕においても生じることが報告されている[4]。

また、Hoらは手の人差し指、中指、薬指の3指のThermal Referralにおいて、3指それぞれで知覚する温度は、人差し指と薬指2指のみを温源に接した際に知覚する温度より低く知覚されると報告している。つまり、手の3指のThermal Referralにおいては、温度刺激提示部位で知覚する温度と触刺激提示部位に知覚する温度が平均化される機序で温度を知覚していると考えられる[5]。

このようにThermal Referralは様々な身体部位で生起する現象であり、その生起機序についても解明されつつあるが、Thermal Referralを生起させる触刺激については、「触刺激が必要である」程度の言及しかされて

おらず、Thermal Referral をより効率的にかつ鮮明に生起させる触刺激についての検討はなされていない。我々が目指す触覚刺激と温度刺激の両方を効率よく広範囲へ提示するデバイスを製作するためには、Thermal Referral により知覚する温度感覚を効率的に生起させる触刺激について検証する必要がある。そこで我々はThermal Referral によって生じる温度感覚と触刺激の関係を解明するために研究を進めてきた。(改行)

その為にまず我々は、ヒトの有毛部である前腕に着目し、被験者の前腕の一部に温度刺激を提示した状態で異なる部位に振動刺激を提示し、振動刺激に誘導される温度感覚と振動刺激周波数の関係を調べることで、Thermal Referral を効率的に生起させる機械受容器の特定を試みた[6]。その結果、前腕部では60Hz~90Hzで最も強く温度感覚を生起し、これらの周波数帯域で活動する毛包受容器の寄与が示唆された[7]。(改行)

一方、前述したように温度の誘導現象は毛包受容器の存在しない無毛部である指先においても生じる[3]。よって無毛部である指先と有毛部である前腕とでは、最も強く温度感覚を生起させる機械受容器が異なると考えられる。

そこで本稿では無毛部である指先において最も効率的に温度感覚を提示させられる機械受容器を特定するために実験を行った。この知見と前腕部における検証結果を合わせることで、有毛部と無毛部の両方においてThermal Referral の鮮明な生起に最適な振動周波数を明らかにすることができると考えられる。

2. 実験：振動刺激部位への温度感覚の誘導

2.1 実験概要

人差し指末節に温度刺激を提示した状態で中指末節に振動刺激を提示する。その際に振動刺激に誘導される温度感覚と振動刺激周波数の関係から、指先におけるThermal Referral に寄与する機械受容器を検証する。

2.2 実験システム

実験システムは温度刺激提示装置、振動刺激提示装置、腕固定台、指先固定台から構成される。腕固定台に被験者の前腕を固定し、指先は指先固定台に固定する。温度刺激提示装置により人差し指末節に温度刺激を、振動刺激提示装置により中指末節に振動刺激を提示する。

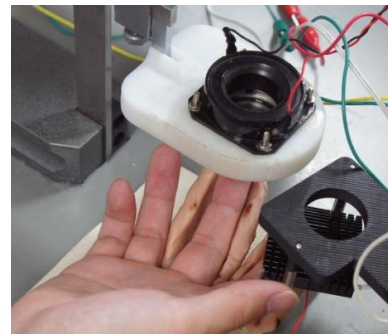


Fig. 1 Appearance of the middle finger and skin stimulator

2.2.1 温度刺激提示装置

Fig. 2 に温度刺激提示装置を示す。本装置は22.4mm×22.4mmのペルチェ素子(T151-40-071S)、放熱板、フィルム状サーミスタから構成される。この装置を固定台に装着し、装置を上下させることでペルチェ素子を指先に接触させる。

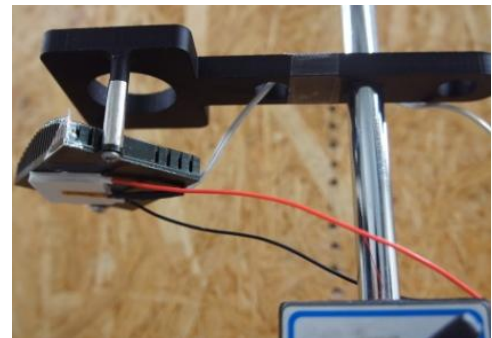


Fig. 2 Thermal stimulator

2.2.2 振動刺激提示装置

Fig. 3 に振動刺激提示装置を示す。本装置はスピーカ(NSW2-326-8A, AURA SOUND社)、円柱型皮膚接触子(ABS樹脂製、直径5mm)、ハイトゲージにより構成される。振動刺激を提示するためにスピーカのコーン部に皮膚接触子をエポキシパテで接着し、これを皮膚に接触させる。PCのDAボード(PCI 3523A, インタフェース社)から制御信号を出力し、オーディオ用デジタルアンプ(RSDA202, ラステーム・システムズ社)により制御信号を増幅し、指先に提示する振動刺激を制御する。

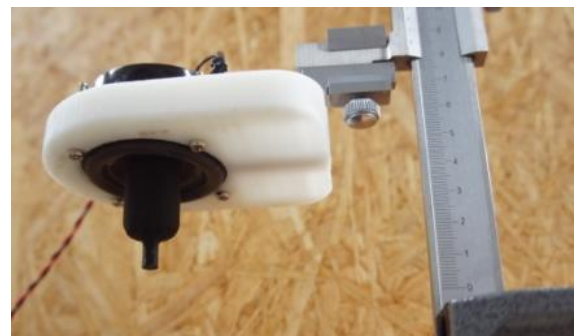


Fig. 3 Vibrational stimulator

2.3 実験条件

被験者は男性4名（年齢21～25歳）であり、全員右利きである。実験で使用した振動刺激の周波数は5, 30, 60, 90, 120, 240 Hzの6種類である。5 Hzはメルケル盤、30 Hzはマイスナー小体、240 Hzはパチニ小体が、それぞれ他の機械受容器に対して優位に応答する周波数であり、60～120 Hzは2つの振動受容器の活動比率が変化していく周波数領域である。また刺激提示温度は39度である。

2.4 実験手続き

2.4.1 接触子の高さ調整

被験者は右腕を腕固定台の上に置き、中指末節が皮膚接触子の真下に来るように手の位置を調整した。その状態で皮膚接触子の中指末節に接着した。接着には皮膚用接着剤（スーパーシリコン、インクリーズヘア社）を用いた。Thermal Referralが僅かな押し込みや引っ張りなどの触刺激によっても生起する可能性を考え、振動刺激提示を行わない状態での皮膚表面の歪みが生じないように接触子の高さを調整法により調整した。被験者は皮膚を接触子で十分押し込んだ状態と十分引っ張った状態の2つの起点から、押し込みや引っ張りを知覚しない状態に高さを調節した。これをそれぞれの起点に対して、3試行ずつ、計6試行を行った。なお、最初の2試行は訓練試行とし、実際に実験で用いた刺激子の高さは、後の4試行の平均値である。

2.4.2 振動刺激の強度調整

本実験で用いた振動刺激の周波数である、5, 30, 60, 90, 120, 240 Hzの6種類の周波数の主観的刺激強度を統制した。被験者に6種類の周波数の振動を提示し、振動を知覚できる閾値の刺激強度を記録した。振動刺激強度の調整起点には上昇系列と下降系列の2系列を用意し、各周波数について2系列、計24試行を被験者にランダムな順序で提示した。本実験ではここで得られた閾値の振動刺激強度の電圧値を周波数ごとに平均し、それを5倍した値を用いた。なお、被験者には聴覚手がかりを与えないよう、常にホワイトノイズをイヤフォンで提示した。

2.4.3 実験手続き

まず温度刺激提示装置を両手人差し指末節に接触させ、温度刺激を提示し、その状態で右手中指末節へ振動刺激を15秒間提示した。その後、温度刺激提示装置を両手人差し指末節から離し、左手人差し指の温度の熱さを基準に、右手人差し指と中指の熱さをアナログスケールで回答させた。振動を提示しない手（左手）への温度刺激提示部位に知覚した温度を基準としたのは、指先のThermal Referralでは同一の手に提示された

温度刺激提示部位で知覚する温度と触刺激提示部位に知覚する温度が平均化されることが報告されているためである[5]。よって本錯覚生起中にも温度刺激提示部位の主観的溫度が変化し得る可能性があると考えられる。実験で用いたアナログスケールをFig. 4に示す。

試行中の右手熱源から感じた熱さは、基準（左手）と比べてどの程度でしたか？

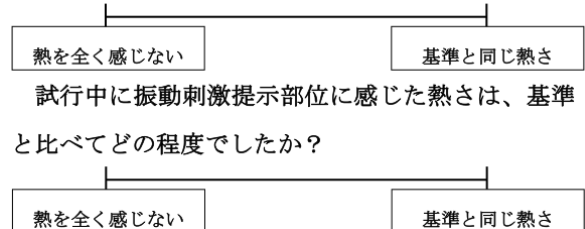


Fig. 4 Visual Analog scale

アナログスケール左端の「熱を全く感じない」とは全く熱を知覚しないことを示す。この一連の流れを1試行とし、提示する刺激周波数6種類（5, 30, 60, 90, 120, 240 Hz）に対して5試行ずつ、計30試行をランダムな順序で提示した。なお、被験者には実験中、常にホワイトノイズを提示し、振動刺激部はみないように指示した。実験中の様子をFig. 5に示す。

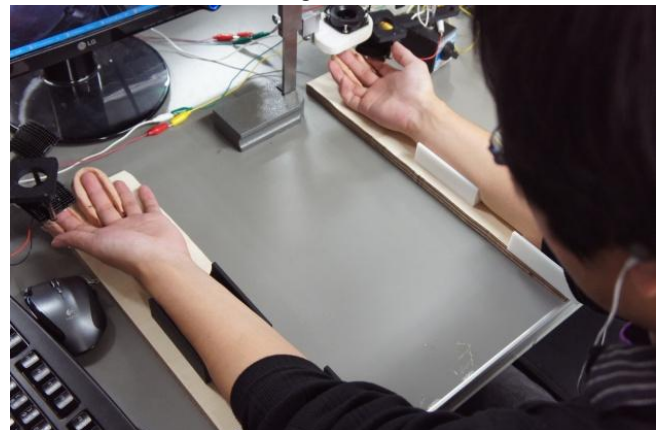


Fig. 5 Appearance of the experiment

3. 実験結果

実験結果の解析を行うため、アナログスケールの左端「熱を全く感じない」を0、右端「基準と同じ」を1として数値化した。

振動刺激提示部位および温度刺激提示部位で知覚した熱さを振動刺激周波数ごとに平均したグラフをFig. 6に示す。縦軸が基準と比較した熱さ、横軸が振動周波数である。青いグラフが振動提示部位に、赤いグラフが温度刺激提示部位に知覚した熱さを表す。エラーバーは標準偏差を表す。

振動刺激提示部位の熱さに着目した場合、他の周波数

に比べ、特に 5, 60 Hz においてやや高く熱さを知覚する傾向がある。分散分析、多重比較の結果、5 Hz-120 Hz 間、60 Hz-120 Hz 間、60 Hz-240 Hz 間において有意差が見られた($p<0.05$)。

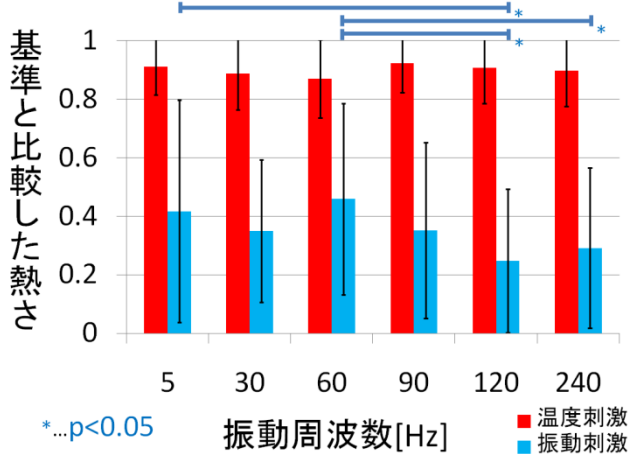


Fig. 6 Result of the experiment

4. 考察

実験結果から、5, 60 Hz の振動周波数において振動刺激提示部位をより熱く知覚する事が分かった。5, Hz はメルケル盤が優位に応答する周波数であるため、メルケル盤の活動が Thermal Referral をより強く生起させる事に寄与すると考えられる。これに対して 60Hz の振動に関しては、もしマイスナー小体の寄与であるとするれば本来のマイスナー小体の共振周波数である 30Hz での熱知覚が低いことが説明できない。

前報で報告した前腕部における同様の実験の結果と比較すると、60 Hz において高い温度を知覚した点は共通する。前報では、有毛部である前腕部にはマイスナー小体は存在せず、かつ毛包受容器の応答しやすい周波数が 100Hz 近傍であるとの知見から、前腕部の Thermal Referral に毛包受容器が関与しているのではないかと考えた[7]。今回の実験における 60Hz 振動の熱知覚は、前報と合わせて考えると振動が手の甲側にまで伝わった結果、有毛部の知覚も結果に含まれたという可能性も考えられる。この点については今後さらに検討していく。

5. 結論

本稿では、人差し指末節に温度刺激、中指末節に振動刺激を提示した際に生起される Thermal Referral に寄与する機械受容器を検証する実験を行った。その結果、5Hz および 60Hz の振動周波数において振動刺激部をより熱く感じる傾向を見出した。

参考文献

- [1] P.Lemmens et al: A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing, In Proceedings of the World Haptics '09, pp. 7-12, 2009
- [2] M.Karam et al: The Emoti-chair: an interactive tactile music exhibit, In Proceedings of CHI '10, pp. 3069-3074, 2010
- [3] B.G.Green: Localization of thermal sensation: An illusion, Perception & Psychophysics, Vol. 22 (4), 331-337, 1977
- [4] B.G.Green: Thermo-tactile interactions: Effects of touch on thermal localization, Sensory functions of the skin of humans, pp. 223-240, 1979
- [5] H.Ho et al: Mechanisms underlying referral of thermal sensations to sites of tactile stimulation, the journal of neuroscience, 31(1), pp. 208-213, 2011
- [6] 渡辺ら: 前腕部への触刺激に対する温度感覚の誘導, 日本バーチャルリアリティ学会 第 16 回大会論文集, 2011
- [7] T.Miyaoka et al: 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