

温冷覚刺激の複数個所提示により生じる 温冷逆転現象の分析

橋口 哲志* 新井 啓介 柴田 史久 木村 朝子 (立命館大学)

Analysis of Paradoxical Phenomenon Caused by Presenting Thermal Stimulation on Multiple Spots
Satoshi Hashiguchi*, Keisuke Arai, Fumihisa Shibata, Asako Kimura (Ritsumeikan University)

When a thermal stimulation is presented on two spots, a few subjects perceived a hot stimulation as a cold sensation and/or a cold stimulation as a hot sensation. As a first step, we investigated whether this phenomenon occurs in the case expanding the stimulation from two spots to three spots.

キーワード：温冷覚, Thermal Referral, Thermal Grill Illusion
(Thermal sensation, Thermal Referral, Thermal Grill Illusion)

1. はじめに

視聴覚インタフェースの発展に伴い、更なるリアリティの向上を目指すために、触覚インタフェースの開発が活発に進められている。近年では **TECHTILE toolkit**⁽¹⁾ など振動覚刺激を用いたインタフェースは製品化された例があり、広く応用されるようになった。一方で、皮膚感覚の一種である温冷覚インタフェースの普及は困難となっている。温冷覚刺激は、他の触覚刺激では再現できない質感を再現することができ⁽²⁾、また感情や心情に影響を与える⁽³⁾。このように温冷覚は、重要な感覚であるにも関わらず、普及にあたり大きく分けて 2 つの問題がある。

1 つ目の問題として、温冷覚刺激の制御が困難であることが挙げられる。特に人は温度の空間的な変化を知覚することができるが、その時間応答性に対応する必要がある。そこで、小松ら⁽⁴⁾は、温度提示部に流れる水の流量を調節することで、ユーザの体温と水温の差を利用して冷感提示の応答速度を向上させた。また、Sato ら⁽⁵⁾が温冷覚の知覚特性を活かして、温覚刺激と冷覚刺激を 4 つの対角に配置したペルチェ素子によって温度提示の高速化を実現した。

2 つ目の問題として、温度感覚の知覚特性が複雑であることが挙げられる。温冷覚の受容器は温覚が温点、冷覚が冷点であるが、振動覚や痛覚と比べ受容器の分布が少ない。それに加えて、刺激箇所によって検知閾も異なり、年齢や性別によって個人差が大きいいため、正確に温度を知覚させることが困難である。

この温冷覚の曖昧性も相まって、他の皮膚感覚と比べて多くの錯覚現象がある。その顕著な例として、**Thermal**

Referral (以下, TR) や **Thermal Grill Illusion** (以下, TGI) といった錯覚現象が知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。TR は、振動覚刺激や圧覚刺激などの触覚刺激が温冷覚刺激の近傍に提示された場合、温度の知覚位置が触覚刺激を提示した箇所へ誘導される。TGI は、温覚刺激と冷覚刺激を皮膚上の近傍へ同時に提示した際に痛覚や灼熱感を生起させる。このように温冷覚刺激は干渉されやすいため、これらの刺激を同時に扱う際に注意が必要となる。

これらの 2 つの錯覚現象について、Watanabe ら⁽⁸⁾は前腕の 2 点に温冷覚刺激を提示することで温冷覚の移動 (TR) と痛覚 (TGI) が同時生起していることを確認している。一方、その実験中で温冷覚刺激を組み合わせて提示した場合に、温覚刺激を冷覚、冷覚刺激を温覚として回答しているケースが見られた。この結果について特に議論されていないが、複数個所に温冷覚を意図的に提示する際に致命的な問題となりうる。

そこで、本研究では提示刺激と真逆の温度を知覚する現象 (以下、温冷逆転現象) に着目し、発生傾向を分析することにした。まず、本研究では従来研究通り前腕の 2 点での発生傾向を確認し、さらに、提示部位を 3 点に拡張した場合についても実験を行った。

2. 関連研究

温冷覚は、刺激箇所検知の曖昧性や知覚の個人差を含め、錯覚現象も多く発見されている。温冷覚刺激を提示することにより生じる錯覚現象として TR や TGI が知られている。

これまで TR に関しては、初期の報告でとして人差し指と薬指の末節を温度提示装置に接した状態で、中指の末節を

常温の接触子に押し付けると、中指において同様の温度が知覚されたというものであった⁽⁶⁾。その後、指だけでなく前腕においても生起することが確認された⁽¹³⁾。手指、前腕ともに、刺激間の距離が TR の生起率に影響を与えることも知られている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

また、TGI は温覚刺激と冷覚刺激を皮膚上の近傍へ同時に提示した際に知覚される温度が、温覚刺激のみを提示した際の知覚温度よりも高くなるという錯覚現象である⁽¹⁵⁾。TGI を用いた痛覚提示は、皮膚を傷つけることなく、安全な提示が可能あり、かつ、痛みや痒みを和らげるため、医療現場でも応用もできる。

ここで、Watanabe ら⁽⁸⁾はこれまで問題とされてこなかった複数の温冷覚刺激点間における温度の相互参照現象について研究を行った。具体的には前腕の 2 点において温冷覚刺激を組み合わせて提示した際、温覚刺激と冷覚刺激が互いに影響し合うことでどのような温度感覚をもたらすのか検証した。その結果、TR と TGI の 2 つの錯覚現象は前腕の 2 点において温覚刺激と冷覚刺激を同時に提示した際に生起し、温度感覚を変化させるということが報告されている。また、温覚刺激と冷覚刺激を同時に提示した際に TGI が生起可能であること、刺激位置（手首側、肘側）によって TR の生起率に偏りが生じることが示唆された。加えて、実験結果を詳細に確認すると温冷逆転現象が生じていた。

また、温冷覚が逆転する現象として、矛盾冷覚がある⁽¹⁶⁾。例えば、熱いお湯を不意にあびてしまったとき、一瞬冷たさを感じることもある。このように、通常 40 度以上では興奮しない冷覚受容器に強い温覚刺激（45 度以上）が提示されると反応してしまうことがある。

しかし、Watanabe ら⁽⁸⁾の実験で生起された温冷逆転現象は、強い温覚刺激ではなく、通常知覚することができる温覚刺激と冷覚刺激の組み合わせだけで生起している。よって、矛盾冷覚とは異なる現象となる可能性がある。

3. 実験目的と準備

〈3・1〉実験目的 本研究では、温冷逆転現象（温覚刺激を冷覚、冷覚刺激を温覚に知覚）に着目し、他の錯覚現象の発生傾向と比較することで、発生メカニズムを分析する。

そこで、まず本稿では刺激数を 1 点、2 点、3 点と増やしていくことで、錯覚現象の発生傾向を分析する。

実験 1 では、温冷覚の提示数を 1 点にして、設定温度で温覚刺激、冷覚刺激それぞれが痛覚として認識されないこと、つまり温覚刺激が熱い、冷覚刺激が冷たいと正しく認識されることを確認する。加えて、実験では温冷覚刺激を提示すると同時にペルチェ素子を用いるため物理的な接触による触覚刺激を伴う。よって、TR が生起する可能性が考えられるので、温冷覚刺激を 1 点に提示した場合の TR の影響する範囲も確認する。実験 2 では、温冷覚の提示数を増やし、温冷逆転現象、TR や TGI の発生傾向を分析し、さらに実験 3 では 3 点にすることで温冷逆転現象がどのように感じられるのかを分析する。

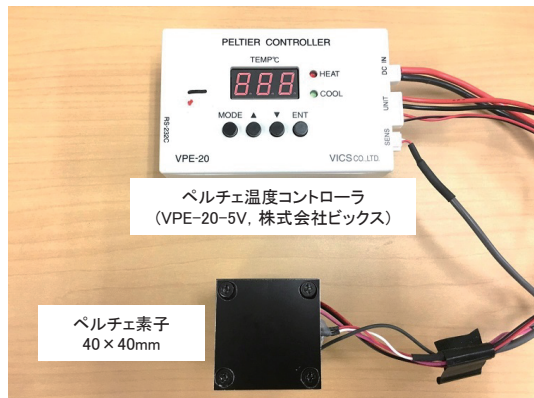


図 1 温冷覚提示装置

Fig. 1. Device for presenting thermal stimulus

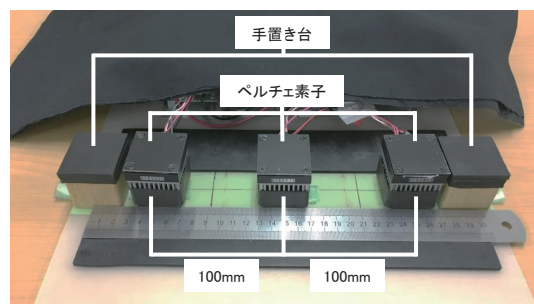


図 2 実験装置の配置

Fig. 2. Configuration of experimental device

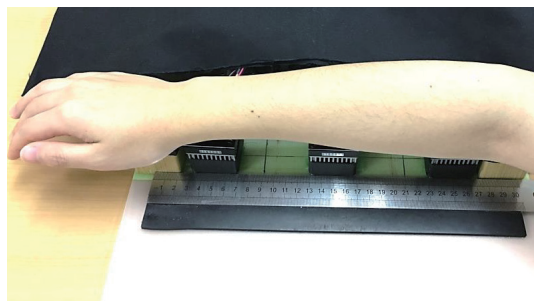


図 3 実験の様子

Fig. 3. Experimental Scene

〈3・2〉実験準備 温冷覚刺激の提示装置として、ペルチェ素子を用いる。ペルチェ素子の大きさは 40×40mm であり（図 1）、温度を一定に保つことができるペルチェ温度コントローラ（VPE-20-5V、株式会社ビックス）を用いた。装置は前腕の中央と中央から手首・肘側にそれぞれ 100mm 離れた位置に 1 台ずつ、計 3 台配置した（図 2）。また、被験者の手首と肘を置くための台を手首と肘の位置に 1 台ずつ配置し、温冷覚提示部に過度な圧力がかからないように配慮した。そして、卓上に固定した 3 つの装置を被験者の前腕腹側（以下、前腕とする）に接触させるようにして提示した（図 3）。

実験で提示する温度を決める際には、人間の温度受容器の特性を考慮する必要がある。人間は 45 度以上、10 度以下の温度を痛みとして知覚することが知られている⁽¹⁷⁾。そ

表 1 温冷覚刺激を 1 点に提示した際のパターン毎の温度感覚と痛覚の回答率 (被験者数: 10 名)

Table 1. The answer rate of temperature and pain sensation in each pattern when thermal stimulation is presented on a spot (Subjects: 10)

	回答				刺激	回答				刺激	回答				
	刺激	熱い	何も感じない	冷たい		痛い	刺激	熱い	何も感じない		冷たい	痛い	刺激	熱い	何も感じない
手首	H	80%	20%	0%	0%	N	20%	80%	0%	0%	N	0%	100%	0%	0%
中央	N	40%	60%	0%	0%	H	60%	40%	0%	0%	N	20%	80%	0%	0%
肘	N	10%	90%	0%	0%	N	60%	40%	0%	0%	H	100%	0%	0%	0%
手首	C	0%	0%	100%	0%	N	0%	70%	30%	0%	N	0%	90%	10%	0%
中央	N	0%	90%	10%	0%	C	0%	10%	90%	0%	N	0%	80%	20%	0%
肘	N	0%	90%	10%	0%	N	0%	70%	30%	0%	C	0%	0%	100%	0%

※表中の提示パターンは上から順に手首側, 中央, 肘側に刺激を提示したことを示す
 ※H, N, Cは提示刺激の種類を示す (H:温覚刺激, N:無関温度の刺激, C:冷覚刺激)

ここで, 本研究では痛覚として認識されない限界の温度として温覚刺激を 44 度, 冷覚刺激を 11 度に設定した. また, 実験は 25 度の一定室温の部屋で行った.

4. 実験 1: 温冷覚刺激を 1 点に提示した場合

〈4.1〉実験目的 実験 1 では, 前腕 1 点に温冷覚刺激を提示する場合, 各部位 (手首側, 中央, 肘側) で実験に用いる設定温度を正しく知覚すること (温覚刺激を熱い, 冷覚刺激を冷たい), または単一の温冷覚刺激で痛みを感じることがないかを確認する. この際, 温冷覚を提示していない部位にも装置を接触させることで, 全実験間で触覚刺激を統一する. それ故に, 温冷覚刺激の近傍に触覚刺激を伴うため TR が生起する可能性がある. そこで, 温冷覚刺激を 1 点に提示することで TR の発生傾向についても分析する.

〈4.2〉実験条件 手首側, 中央, 肘側に温覚刺激 (H: 44 度) もしくは冷覚刺激 (C: 11 度) を 1 点のみに提示するが, 残りの 2 点には温覚にも冷覚にも感じない無関温度の刺激 (N: 32 度) を提示する. この無関温度は, 10 名の被験者が各部位で無関温度と判断できることを確認している. よって, これら刺激の組み合わせは, 温覚刺激では HNN (左から手首側に温覚刺激 H, 中央と肘側に無関温度の刺激 N を提示したことを示す, 以下同義), NHN, NNH, 冷覚刺激では CNN (左から手首に冷覚刺激 C, 中央と肘側に無関温度刺激 N を提示したことを示す, 以下同義), NCN, NNC の 6 通りとなる.

被験者は中央に設置した装置に右前腕の中心が当たるように置く. このとき, 3 つの装置を必ず前腕に接触させるように指示した. 20 秒後, 前腕を装置から離し, 各 3 つの提示部 (手首側, 中央, 肘側) ごとに, 最終的に知覚された感覚を回答する. 被験者には温度感覚に関する回答の選択肢として「熱い, 何も感じない, 冷たい」の計 3 種類を用意し, その中から 1 つだけ選択し回答させる. 次に温度感覚とは別に痛覚の有無「痛い, 痛くない」を回答させる. 以上を 1 試行とし, 各被験者は計 6 試行をランダムな順序で実施する. なお, 被験者には提示する温冷覚刺激の数は伝えていない. 被験者は成人男性 10 名 (20 代前半) で, 実験手順は以下を行う.

(1) 被験者の前腕の長さを測り, 前腕の中心に印を付ける

- (2) 提示パターンから 1 つをランダムに選出する
- (3) 温冷覚提示装置の温度を設定し, 設定温度に安定するまで待つ
- (4) 被験者は前腕を温冷覚提示装置の上に乗せる
- (5) 20 秒後, 被験者は温冷覚提示装置から腕を離す
- (6) 被験者は各 3 点の提示部ごとに最終的に知覚した温度感覚と痛覚の有無を回答する
- (7) 皮膚の温度変化の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (8) 残りのパターンについて (2)~(7) を繰り返す

ただし手順 (6) で被験者がやり直しを希望した際, 休憩を取りその試行についてやり直した.

〈4.3〉実験結果 実験結果を表 1 に示す. 表中の HNN, CNN などの文字は提示パターン (H: 温覚刺激, N: 無関温度の刺激, C: 冷覚刺激) を示し, 左から順に手首側, 中央, 肘側に提示した刺激の種類を示す. また, 数値は各提示部で知覚された温度感覚および痛覚の回答率を示す. 提示刺激通りに知覚した回答は, 網掛けされている. この結果から次のことがわかる.

(i) NHN 以外は概ね提示温度の通りに知覚された
 冷覚刺激は CNN で 100%, CHN で 90%, NNC で 100% の正答率であり, 概ね刺激通りに知覚された. 一方, 温覚刺激は HNN で 80%, NHN で 60%, NNH で 100% の正答率となり. 冷覚刺激よりも正答率が低いことがわかった. これは受容器の数が温点よりも冷点の方が多いことから, 冷覚刺激を正確に知覚できていることを示唆している.

また, NHN は中央の温覚刺激を何も感じないと 40% の被験者が回答している. これは手首側や肘側に温覚刺激を提示していないにも関わらず, 熱いと感じる被験者が多いことから, 温度が手首側や肘側に分散された可能性がある.

(ii) TR は刺激箇所が増加した場合でも生起し, 冷覚よりも温覚の方が多く生起した

TR の生起率に関して, 温覚刺激では, HNN の中央側で 40%, 肘側で 10%, NHN の手首側で 20%, 肘側で 60%, NNH の中央で 20% であった. 一方で, 冷覚刺激では CNN の中央で 10%, 肘側で 10%, NCN の手首側で 30%, 肘側で 30%, NNC の手首側で 10%, 中央で 20% であり, 温覚刺激より生起率は低いことがわかった. よって, 触覚刺激

表 2 温冷覚刺激を 2 点に提示した際のパターン毎の温度感覚と痛覚の回答率（被験者数：10 名）

Table 2. The answer rate of temperature and pain sensation in each pattern when thermal stimulation is presented on two spots (Subjects: 10)

刺激	回答				刺激	回答				刺激	回答				刺激	回答				
	熱い	何も感じない	冷たい	痛い		熱い	何も感じない	冷たい	痛い		熱い	何も感じない	冷たい	痛い		熱い	何も感じない	冷たい	痛い	
手首	H	30%	20%	0%	10%	C	10%	0%	30%	10%	H	80%	20%	0%	0%	C	0%	0%	100%	10%
中央	H	70%	30%	0%	10%	C	0%	20%	80%	20%	C	30%	10%	60%	30%	H	60%	30%	10%	0%
肘	N	70%	30%	0%	0%	N	0%	30%	20%	0%	N	20%	50%	30%	0%	N	90%	10%	0%	0%
手首	H	70%	30%	0%	0%	C	0%	0%	100%	0%	H	70%	20%	10%	0%	C	0%	0%	100%	10%
中央	N	70%	30%	0%	0%	N	0%	20%	80%	0%	N	20%	40%	40%	20%	N	20%	80%	0%	0%
肘	H	90%	10%	0%	10%	C	0%	10%	90%	0%	C	0%	20%	30%	10%	H	100%	0%	0%	0%
手首	N	40%	60%	0%	0%	N	0%	30%	20%	0%	N	70%	30%	0%	0%	N	20%	40%	40%	0%
中央	H	70%	30%	0%	10%	C	0%	20%	80%	0%	H	40%	30%	30%	10%	C	10%	30%	60%	20%
肘	H	90%	10%	0%	10%	C	0%	0%	100%	0%	C	10%	0%	90%	10%	H	70%	10%	20%	10%

※表中の提示パターンは上から順に手首側、中央、肘側に刺激を提示したことを示す
 ※H, N, Cは提示刺激の種類を示す(H:温覚刺激, N:無関温度の刺激, C:冷覚刺激)

※点で塗りつぶされた箇所は提示刺激通りに知覚した回答を示す
 ※下線が引かれた箇所は真逆の温度を知覚した割合が特に多いことを示す

が増えた場合でも、温冷覚刺激の両者で TR が発生することを確認した。特に NHN や NCN のように中央に温冷覚刺激を提示した場合に TR が生起しやすく、NHN の場合は肘側で 60%と半数以上で TR が生起した。これは Watanabe ら⁽⁸⁾も同様の結果を示しており、触覚刺激が増えた場合でも肘側に TR が生起しやすい傾向にあることがわかった。

(iii) 全てのパターンで温冷逆転現象もしくは痛みが知覚されることはなかった

矛盾冷覚のように、1 点で痛みに達するような温覚刺激を提示した場合、刺激を冷たく感じるといった逆転現象が生起することがある。つまり、痛みとして温冷覚刺激を感じているとき、矛盾冷覚もしくは温覚として温冷逆転現象が生起する可能性がある。しかし、この結果では温覚刺激 (H: 44 度) もしくは冷覚刺激 (C: 11 度) を提示した場合、痛覚に達することはなく、温冷逆転現象も生起しなかった。このことから矛盾冷覚のように 1 点で痛覚に達して温冷逆転現象が生起しているわけではないことを示唆した。

5. 実験 2：温冷覚刺激を 2 点に提示した場合

〈5・1〉実験目的 実験 2 では、従来研究⁽⁸⁾と同様に温冷覚刺激を前腕の 2 点に提示した場合、それらの組み合わせを変更することでどのように温度が知覚されるのか確認する。この際、温冷覚刺激を 2 点に提示することで、TR や TGI や温冷逆転現象が生起することが予想される。よって、本研究の実験条件において、これらの錯覚現象の発生傾向を確認する。

〈5・2〉実験目的 実験 2 では温覚刺激 (H: 44 度)、冷覚刺激 (C: 11 度) と温冷覚刺激の提示数は 2 点のため、残りの 1 点に温覚にも冷覚にも感じない無関温度の刺激 (N: 32 度) を提示する。よって、各被験者に対して、すべての組み合わせ計 12 試行をランダムな順序で実施した。その他の実験条件と実験手順は実験 1 と同様である。

〈5・3〉実験結果 実験結果を表 2 に示す。表中の HHN, CCN, HCN などの文字は提示パターン (H: 温覚刺激, N: 無関温度の刺激, C: 冷覚刺激) を示し、左から順に手首側、中央、肘側に提示した刺激の種類を示す。また、数値は各提示部で知覚された温度感覚および痛覚の回答率を示す。

提示刺激通りに知覚した回答は、網掛けされている。下線が引かれた箇所は温冷逆転現象を知覚した割合が高かったところである。結果から次のことがわかる。

(i) 同一の温冷覚刺激を 2 点に提示する場合、特に HHN, HNH, CNC は TR が生起する確率が高い

HH と N, CC と N をそれぞれ組み合わせる場合、温冷覚刺激を 70%以上の確率で正しく知覚した。しかし、実験 1 の結果よりも、「なにも感じない」と回答する確率が大きくなっている。また、特に HHN, HNH, CNC では、N の正答率が減少した。これらの組み合わせでは、70%以上の確率で提示温度に引きずられるように遷移した (例えば、HHN であれば、70%の被験者が N は熱いと回答)。これらの結果から、N に温度が遷移する TR が発生することによって、温冷覚刺激を提示した箇所での誤認識を引き起こしている可能性がある。

(ii) 温冷覚刺激を隣り合わせて交互に提示する場合 (HCN, CHN, NHC, NCH)、提示刺激と真逆の温度を知覚した

温冷逆転現象は、HCN の中央 C で 30%、CHN の中央 H で 10%、NHC の中央 H で 30%、肘側 C で 10%、NCH の中央 C で 10%、肘側 H で 20%の確率で発生した。これらの生起率は、Watanabe ら⁽⁸⁾の前腕 2 点での実験と同等の確率で発生している。よって、触覚刺激の N を追加して、提示数が増加した場合でも、同等に温冷逆転現象が生起することを確認した。

一方、触覚刺激の N は正しく知覚できない場合が多く、刺激の組み合わせによって知覚される温度が変化した。

(iii) 温冷覚刺激を交互に提示する場合、痛みとして知覚する傾向が多くなる

同一の温冷覚刺激を 2 点に提示するとき、温覚もしくは冷覚が加重されて、痛みを感じる場合があった。しかし、温冷覚刺激を交互に提示する場合の方が、痛みとして知覚する傾向が多くなった。特に HCN の中央 C で 30%、HNC の中央 N で 20%、NCH の中央 C で 20%と中央に知覚される傾向にあった。この場合は、近傍 2 点に温冷覚刺激を同時に提示した際に生じる TGI が発生している可能性が高い。

以上の結果より、温冷覚刺激を前腕の 2 点に提示した際、

表 3 温冷覚刺激を 3 点に提示した際のパターン毎の温度感覚と痛覚の回答率（被験者数：10 名）

Table 3. The answer rate of temperature and pain sensation in each pattern when thermal stimulation is presented on three spots (Subjects: 10)

刺激	回答				刺激	回答				刺激	回答				刺激	回答				
	熱い	何も感じない	冷たい	痛い		熱い	何も感じない	冷たい	痛い		熱い	何も感じない	冷たい	痛い		熱い	何も感じない	冷たい	痛い	
手首	H	90%	10%	0%	0%	H	80%	10%	10%	10%	C	0%	10%	90%	0%	H	60%	10%	30%	0%
中央	H	100%	0%	0%	20%	H	70%	0%	30%	0%	C	30%	10%	60%	10%	C	40%	10%	50%	40%
肘	H	100%	0%	0%	0%	C	30%	0%	70%	0%	H	80%	10%	10%	10%	H	90%	0%	10%	0%
手首	C	10%	10%	80%	0%	C	0%	0%	100%	0%	H	60%	40%	0%	10%	C	10%	10%	80%	10%
中央	C	0%	20%	80%	0%	H	70%	10%	20%	30%	C	30%	10%	60%	40%	H	60%	0%	40%	20%
肘	C	0%	0%	100%	10%	H	90%	0%	10%	0%	C	20%	0%	80%	0%	C	50%	0%	50%	10%

※表中の提示パターンは上から順に手首側、中央、肘側に刺激を提示したことを示す
※H, Cは提示刺激の種類を示す(H:温覚刺激, C:冷覚刺激)

※点で塗りつぶされた箇所は提示刺激通りに知覚した回答を示す
※下線が引かれた箇所は真逆の温度を知覚した割合が特に多いことを示す

その提示パターンによって提示刺激と異なる温度感覚に知覚されることが確認された。特に交互に提示するパターンにおいて、人の温冷覚が錯綜しやすくなることがわかる。

また、(ii) の結果より温冷逆転現象が生じたパターンについて回答の詳細を確認したところ、この錯覚を知覚した被験者の中で痛みを知覚した人はいなかった。つまり、温冷逆転現象は、TGI とは異なる錯覚現象である可能性が考えられる。

6. 実験 3：温冷覚刺激を 3 点に提示した場合

〈6・1〉 実験目的 実験 3 では、さらに温冷覚刺激を前腕の 3 点に提示した場合、その組み合わせを変更することでどのような温度が知覚されるのかを確認する。実験 2 と同様に、各種錯覚現象が生起すると予想されるが、3 点の場合は温冷覚の提示数が増加することでより錯綜してしまい、さらに各種の錯覚現象が多く発生する可能性がある。よって、温冷覚刺激を 3 点に提示した場合、各種錯覚現象とともに発生傾向を分析する。

〈6・2〉 実験条件 実験 2 では温冷覚刺激の提示数は 3 点のため無関温度の刺激は使用せず、温覚刺激（H：44 度）と冷覚刺激（C：11 度）のいずれかを提示する。実験 2 では各被験者に対して、計 8 試行をランダムな順序で実施する。その他の実験条件と実験手順は実験 1 と同様である。

〈6・2〉 実験結果 実験結果を表 3 に示す。表中の表記は、表 2 と同様である。結果から次のことがわかる。

(i) 同一の温冷覚刺激が 2 つ隣り合うパターン（HHC, CCH, HCC, CHH）を提示した場合、温冷逆転現象が発生した

温冷逆転現象は、HHC の手首側 H で 10%、中央 H で 30%、肘側 C で 30%、CCH の中央 C で 30%、肘側 H で 10%、HCC の中央 C で 30%、肘側 C で 20%、CHH の中央で 20%、肘側で 10% の確率で生じた。これらの生起率は、実験 2 の生起率よりも高くなっており、特に前腕の中央で生起することが多いことがわかった。

(ii) 温冷覚刺激を交互に提示する場合、温冷逆転現象の生起率が (i) の結果よりも高い

温冷覚の逆転現象は、HCH の手首側 H で 30%、中央 C で 40%、肘側 H で 10%、CHC の手首側 C で 10%、中央 H で 40%、肘側 C で 50% の発生率であった。このように温冷覚刺激を交互に提示するパターンが、最も温冷覚の逆転現

象を引き起こすことがわかった。

(iii) 痛覚においても温冷覚刺激が隣り合う場合、最も痛みを生起した

HCH の中央 C で 40%、HCC の中央 C で 40%、が最も痛みを感じた被験者が多い条件であった。このように HC が隣り合っている場合に痛みを知覚することが多い。他の痛みを感じた条件でも、ほとんどの場合が H と C が隣り合っている。これは実験 2 でもあったように TGI が生起している可能性がある。3 点に拡張した場合、2 点の場合よりも TGI が生起する確率も増加していることがわかる。

以上の結果より、温冷覚刺激を前腕の 3 点に提示した際、その提示パターンによって実験 2 と同様、提示刺激と異なる温度に知覚されることが確認された。

また、HCH と CHC といった温冷逆転現象が最も生じた提示パターンの回答を詳細に確認したところ、提示刺激と真逆の温度を知覚したことを示す回答をした被験者の中で、痛みを知覚した人は CHC の中央と肘側で 1 人ずつであった。この傾向は実験 2 と同様であり、温冷逆転現象は、TGI とは異なる錯覚現象である可能性が考えられる。

7. 全体考察

温冷覚刺激を 1 点、2 点、3 点と増やし、温冷逆転現象と他の錯覚現象の発生傾向を分析していくことによって、温冷逆転現象の発生要因を考察する。実験の結果から、以下のような知見が得られた。

- (a) 2 点よりも 3 点に温冷覚刺激を提示した場合、温冷逆転現象の生起率が増加した
- (b) 1 点、2 点と温冷覚刺激を増加させることで、TR の生起率が増加した
- (c) 2 点、3 点と痛みを感じる確率は増加したが、温冷逆転現象を生じた被験者は痛みを感じていなかった

これらより、温冷覚刺激の提示数を増やすことで TR, TGI や温冷逆転現象の生起率が増加し、各錯覚現象が生起し合い、正しい温度の知覚が困難になっていると考えられる。

温冷逆転現象に着目すると、(c) の結果にもあるように、TGI に関しては現在の実験条件では同時に生起することはなかった。つまり、TGI のような痛覚刺激によって、矛盾冷覚のような錯覚現象が生起しているわけではないことがわかる。

一方、TR に関しては、1 点、2 点と提示数を増やすと、温度の遷移が活発に行われるようになる。温冷逆転現象は、TR の温度遷移の結果となっている可能性がある。2 点の実験でもわかるように温冷覚刺激が隣り合う場合、無関温度刺激側やお互いの部位に温度が遷移している。また、温冷逆転現象が生じた被験者は、2 点でも TR が発生していることが多いため、TR が起因している可能性は有り得る。

8. むすび

温冷覚刺激を 3 点に提示した場合、2 点の場合よりも温冷逆転現象の生起率が上がることがわかった。また、実験結果より、TR や TGI も刺激数が増えることで生起しやすくなり、特に TR は温冷逆転現象に起因している可能性を示唆した。

今後は、温冷覚刺激の提示温度、提示位置、提示時間などのパラメータを変更し、本研究で確認した温冷逆転現象における温度遷移のメカニズムについて詳細に調査する予定である。

謝辞

基盤 B「複合現実型視覚刺激による R-V Dynamics Illusion の研究」による。

文 献

- (1) 仲谷正史, 筑康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, 舘暲: “触感表現の一般普及に向けた方法論とテクタイルワークショップを通じたその実践”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 593 - 603, 2014.
- (2) A. Yamamoto, B. Cros, H. Hasegimoto, and T. Higuchi: “Control of Thermal Tactile Display Based on Prediction of Contact Temperature,” Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation (ICRA' 04), pp. 1536 - 1541, 2004.
- (3) L.E. Williams and J.A. Bargh: “Experiencing Physical Warmth Promotes Interpersonal Warmth,” *SCIENCE*, Vol. 32, pp. 606 - 607, 2008.
- (4) 小松祐介, 坂口正道: “水を用いた温度提示システムのインタフェースへの応用に関する設計論”, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33A-01, 2016.
- (5) K. Sato, and T. Maeno: “Presentation of Rapid Temperature Change using Spatially Divided Hot and Cold Stimuli,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 25, No. 3, pp. 497 - 505, 2013.
- (6) B. G. Green: “Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat,” *Perception & Psychophysics*, Vol. 22, No. 4, pp. 331 - 337, 1977.
- (7) J. C. Stevens, and K. K. Choo: “Temperature sensitivity of the body surface over the life span,” *Somatosens Mot Res* 15, pp. 13 - 28, 1998.
- (8) R. Watanabe, R. Okazaki, and H. Kajimoto: “Mutual Referral of Thermal Sensation between Two Thermal-tactile Stimuli,” IEEE Haptics Symposium, pp. 299 - 302, 2014.
- (9) 岩村吉晃: “タッチ (神経心理学コレクション)”, 医学書院, 2001.
- (10) J. C. Stevens, and K. K. Choo: “Temperature sensitivity of the body surface over the life span,” *Somatosens Mot Res* 15, pp. 13 - 28, 1998.
- (11) 富永真琴: “温度受容の分子機構—TRP チャネル温度センサー—”, 日本薬理学雑誌, Vol. 124, No.4, pp. 219 - 227, 2004.
- (12) 富永真琴: “TRP チャネルと痛み”, 日本薬理学雑誌, Vol. 127, No. 3, pp. 128 - 132, 2006.
- (13) B. G. Green: “Thermo-tactile interactions: Effects of touch on

thermal localization,” *Sensory Functions of the Skin of Humans*, pp. 223 - 240, 1979.

- (14) B. G. Green: “Thermo-tactile interactions: Effects of touch on thermal localization,” *Sensory Functions of the Skin of Humans*, pp. 223 - 240, 1979.
- (15) B. G. Green: “Synthetic heat at mild temperatures,” *Somatosensory and motor research*, Vol. 19, No. 2, pp. 130 - 138, 2002.
- (16) 松田隆夫: “知覚心理学の基礎”, 培風館, 2004.
- (17) 熊本栄一, 藤田亜美: “末梢から脊髄後角へ入力する痛み情報の制御: シナプス伝達と神経伝導の修飾”, 日本疼痛学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 197 - 214, 2011.