

温冷覚刺激の複数箇所提示により生じる温冷逆転現象の分析 (2)

～刺激位置の間隔を変更した場合について～

新井啓介¹⁾, 橋口哲志¹⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

概要：これまでに、我々は前腕の複数箇所に温冷覚刺激を提示した際、温覚刺激を冷覚、冷覚刺激を温覚として知覚する現象（以下、温冷逆転現象）を確認した。さらに提示数を前腕の 2 点から 3 点に拡張した場合、本錯覚がより発生しやすくなり、特に温覚刺激と冷覚刺激が交互になるよう 3 点に提示した場合（温冷温、冷温冷）に実験協力者の半数以上で本錯覚が発生することを確認した。次なるステップとして、本稿ではこの現象がどのような条件下で起こりやすいのかを確認するため、条件の 1 つとして 3 点（温冷温、冷温冷）の刺激位置の間隔に着目し、本錯覚の発生傾向を確認した。実験 1 では、3 点の刺激位置の間隔を変更した場合、温冷温「手首側」、冷温冷「肘側」の条件で刺激位置の間隔が本錯覚の発生に影響を与えることを確認した。実験 2 では、実験 1 で提示した 3 点のうち中間の刺激位置を変更し、実験 1 の場合よりも本錯覚の発生が全体的に減少することを確認した。

キーワード：温冷覚、温冷逆転現象、刺激位置の間隔

1. はじめに

温冷覚は複雑な知覚特性ゆえに、多くの錯覚現象が発見されている。その著名な例として Thermal Referral (以下、TR) や Thermal Grill Illusion (以下、TGI) といった錯覚現象がある [1][2]。TR は温冷覚刺激の近傍に触覚刺激（振動覚、圧覚など）が提示された場合、触覚刺激の提示位置に温冷覚が移行する現象である。TGI は温覚刺激の間に冷覚刺激が提示された場合、灼熱感や痛覚が生じる現象である。このような錯覚現象が発生することから、温冷覚を複数箇所に提示する場合に意図した感覚を提示できない可能性がある。

これまで Watanabe ら [3] は前腕の 2 点に温冷覚刺激を提示した際、TR と TGI が同時に発生することを確認した。この研究では、温覚刺激と冷覚刺激が同時に提示された際、温覚刺激を冷覚、冷覚刺激を温覚として知覚するケースが存在していた。同論文では、この提示刺激と反対の温度を知覚する現象（以下、温冷逆転現象）については特に議論されていなかったが、実に、実験協力者の 3 割程度で温冷逆転現象が発生していた。もしこのような現象が誰にでも容易に起こるのならば、意図的に複数箇所に温冷覚を提示する状況で致命的な問題になると考えられる。

そこで我々はこの現象に対し、温冷覚刺激の提示数と組み合わせに着目し、どの程度の傾向で発生するのか分析を行った [4]。その結果、提示数が 2 点よりも 3 点の方が発生しやすいこと、温覚刺激と冷覚刺激が交互に提示される場合、特に発生しやすいことがわかった。

ただしこの温冷逆転現象は、提示数と温冷の組み合わせ以外にも提示位置の間隔や提示温度、提示する体の部位など、様々な要因で発生傾向が変わると予想される。そこで本稿では、温冷逆転現象が発生しやすい条件を確認するため、まず「3 点の提示位置の間隔」に着目して分析を行う。

2. 温冷覚刺激

本研究では、温冷覚刺激の提示装置として温度を一定に保つことの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 (図 1)。このペルチェ素子の大きさは 40×40mm である。また、装置は前腕の中央と中央から手首側・肘側のそれぞれに 1 台ずつ計 3 台配置する (図 2)。本実験では、両端または中央の装置の位置を変更することで、3 点の刺激位置の間隔を調節する。3 つの装置を卓上に設置した上で右前腕をその上に乗せることで、温冷覚刺激を右前腕の腹側に提示する。また、手置き台を実験協力者の手首と肘の位置に 1 台ずつ配置し、提示箇所に過度な圧力がかからないよう配慮する。

実験で提示する温度は、人間の温度受容器の特性を考慮し、設定する必要がある。人間は 45 度以上、10 度以下の温度を痛覚として認識するということが知られているため [5]、本実験では痛覚として認識されない限界の温度と



図 1 実験装置

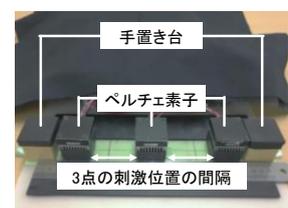


図 2 実験装置の配置

Keisuke ARAI, Satoshi HASHIGUCHI, Fumihisa SHIBATA, and Asako KIMURA, Ritsumeikan University

して温覚刺激を 44 度、冷覚刺激を 11 度に設定した。実験スペース内の室温は、 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲に設定し、室温の変化による温度知覚への影響を配慮した。

3. 実験 1：3 点の刺激位置が等間隔の場合

3.1 実験目的

実験 1 では、両端の刺激位置を変更し、3 点の刺激位置を等間隔に調節することで、その間隔の広狭が温冷逆転現象の発生に与える影響を確認する。

3.2 実験条件

実験 1 で使用する 3 点の刺激位置の間隔は図 3 に示すように 60mm, 50mm, 40mm の 3 種類とする。60mm は実験協力者の前腕に 3 つの刺激位置が収まる最大の間隔であり、40mm は実験協力者が刺激数を 3 点と知覚できる最小の距離である。また、実験で使用する温冷覚刺激の組み合わせは、温覚刺激と冷覚刺激が交互になるよう前腕の 3 点に提示する。具体的には、温冷温（左から手首側に温覚刺激、中央に冷覚刺激、肘側に温覚刺激を提示することを示す、以下同義）と冷温冷の 2 種類とする。これらは、我々の先行研究 [4] で温冷逆転現象の発生頻度が高かった組み合わせである。温冷覚刺激の提示パターンは、表 1 に示す通り、3 点の刺激位置の間隔を変えた 3 種類（60mm, 50mm, 40mm）と温冷覚刺激の組み合わせの異なる 2 種類（温冷温、冷温冷）を組み合わせた計 $3 \times 2 = 6$ 通りである。また、各提示パターンにつき 3 回ずつ実験を実施する。よって、実験協力者 1 人あたりの試行回数は $6 \times 3 = 18$ 試行である。

実験 1 では、図 2 に示すように手首側と肘側に設置した 2 つの装置の中央に実験協力者の前腕の中央がくるように右腕を置かせる。20 秒後、前腕を装置から離し、3 つの刺激提示箇所（手首側、中央、肘側）それぞれについて、最終的に知覚した温度感覚を「-3: Coolest ~ +3: Warmest」の 7 段階（図 4）から回答する。以上を 1 試行とし、計 18 試行をランダムな順序で実施した。実験協力者は成人男性 15 名である。

3.3 実験手順

- (1) 実験協力者の前腕の長さを測り、中央に印をつける
- (2) 表 1 の提示パターンから 1 つをランダムに選出する
- (3) 装置の温度を設定し、設定温度に安定するまで待つ
- (4) 各提示箇所の腕の温度を計測する
- (5) 装置の上に前腕を置かせる
- (6) 20 秒後、装置から前腕を離させ、各提示箇所最終的に知覚した温度感覚を数値で回答させる
- (7) 腕の提示箇所の温度が初期の温度に戻るのを待たため、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) で実験協力者がやり直しを希望した場合、十分な休憩を挟み、その試行についてやり直しを行った。なお、実験は実験協力者の負担を考慮して、3 日間に分けて行った。

3.4 実験結果と考察

表 2 は実験 1 の提示パターンで温冷逆転現象が発生した

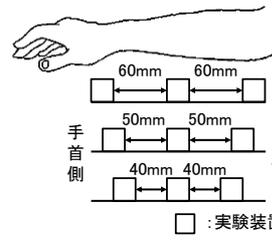


図 3 刺激位置の間隔 3 種類

表 1 実験 1 提示パターン

間隔 [mm]	温冷覚刺激 組み合わせ
60	温冷温
50	
40	
60	冷温冷
50	
40	

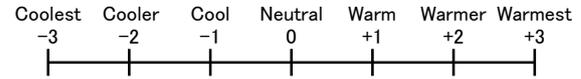


図 4 回答の選択肢 (-3~+3 の 7 段階)

人数を示す。表 2 (a) は温冷温、表 2 (b) は冷温冷の提示パターンに関する結果を表している。表中の「全体」という項目は手首側、中央、肘側の内、一箇所でも温冷逆転現象が発生した場合の人数を集計している。

続いて、図 5、図 6 に温冷温、冷温冷を提示した場合の評価値の分布を示す。図中の灰色部分は第一四分位数と中央値間、白色部分は中央値と第三四分位数間、各データの下端は最小値、上端は最大値を表す。なお、中央値は黒色の菱形、外れ値は白色の丸で図中に記載した。ここでは、縦軸の評価値が +3 に近いほど温覚をより強く知覚し、-3 に近いほど冷覚をより強く知覚したことを表す。また、0 は温覚、冷覚をともに感じない無感覚の状態を表す。図からは、温冷覚刺激を提示した際にどの程度の実験協力者が温覚/冷覚と知覚したのかわかる。

図 5 のそれぞれの提示箇所について、刺激間隔ごとに Friedman 検定を行ったところ有意差は見られなかった（手首側： $p=0.25$ 、中央： $p=0.66$ 、肘側： $p=0.91$ ）。また、図 6 についても同様に Friedman 検定を行ったところ前腕の中央で有意差が見られた（中央： $p=0.02$ ）。そこで Scheffé 法により検定を行ったところ、提示箇所中央の 60mm と 50mm 間でのみ有意差が見られた ($p=0.03$)。

実験結果をまとめると、以下の通りである。

- (i) 刺激位置の間隔を変更した全条件で、温冷逆転現象の発生を確認した
- 表 2 より、温冷温、冷温冷の両条件で、60mm, 50mm, 40mm の全ての間隔において実験協力者の半数以上で本錯覚が発生することを確認した。
- (ii) 温冷温「手首側」、冷温冷「肘側」の条件において、刺激位置の間隔が本錯覚の発生に影響を与える傾向が見られた

図 5 より温冷温での「手首側」において、40mm の条件では評価値がマイナス（冷）側とプラス（温）側に分布しているが、60mm の条件では評価値がプラス（温）側に偏って分布している。つまり、刺激位置の間隔が狭い場合に、本錯覚が発生しやすい可能性がある。

また、図 6 より冷温冷での「肘側」の条件では、60mm の条件で評価の中央値がマイナス（冷）側にある。一方、50mm, 40mm の条件では評価の中央値がプラス（温）側

表 2 各提示パターンで逆転現象が発生した人数 (名)

(a) 温冷温				(b) 冷温冷					
		間隔 [mm]					間隔 [mm]		
		60	50	40			60	50	40
全体		8	7	9	全体		7	11	10
提示箇所	手首側	3	4	5	提示箇所	手首側	0	1	0
	中央	7	4	5		中央	3	7	5
	肘側	2	1	2		肘側	6	9	9

※全体：3つの提示箇所の内、一箇所でも温冷逆転現象が発生した場合の人数
実験協力者数：15名

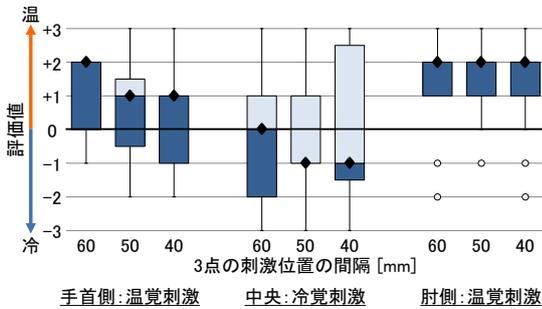


図 5 各提示パターンでの評価値の分布 (温冷温)

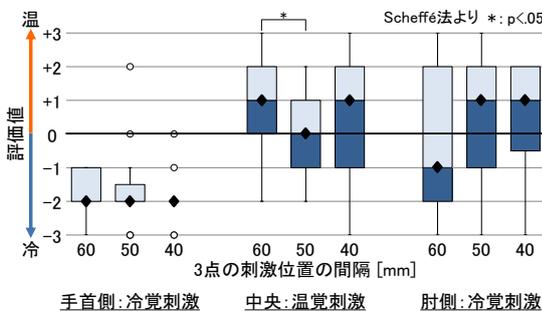


図 6 各提示パターンでの評価値の分布 (冷温冷)

にある。つまり、刺激位置の間隔の広狭による本錯覚に与える影響は、温冷温での「手首側」と同様であった。

(iii) 温冷温「肘側」、冷温冷「手首側」の条件において、本錯覚の発生が少なかった

表 2 より温冷温「肘側」、冷温冷「手首側」の条件では、他の提示箇所に比べると本錯覚の発生は 1, 2 名程度と少なかった。また、図 5, 6 より、この 2 条件では全ての刺激位置の間隔で、評価の中央値、分布ともに提示刺激と同程度の温度に位置していた。

(ii)(iii)の結果より、温冷温「手首側」では刺激位置の間隔が錯覚の発生に影響を与え、「肘側」には影響がみられなかった。一方、冷温冷「手首側」では影響がみられず、「肘側」に影響がある傾向となった。これらの結果より、例えば、間隔が狭いと本錯覚が起きやすくなる温冷温「手首側」、冷温冷「肘側」において、実験 1 の 60mm の条件よりもより広い間隔にすることで、本錯覚が発生しにくくなると考えられる。そこで次に 3 点の刺激位置の間隔を手首側、肘側において一方を広く、もう一方を狭く調整することで、本錯覚の発生傾向にどのような違いが生じるのか確認する。

4. 実験 2 : 3 点の刺激位置が等間隔でない場合

4.1 実験目的

実験 2 では、中間の刺激位置のみ変更することで、3 点

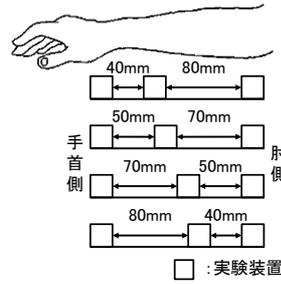


図 7 刺激位置の間隔 4 種類

表 3 実験 2 提示パターン

間隔 [mm]	温冷覚刺激組み合わせ
40 : 80	温冷温
50 : 70	
70 : 50	
80 : 40	
40 : 80	冷温冷
50 : 70	
70 : 50	
80 : 40	

の刺激位置を不等間隔 (一方の間隔を狭く、もう一方の間隔を広くする) に調節することで、その間隔の広狭が温冷逆転現象の発生に与える影響を確認する。

4.2 実験条件・手順

実験 2 で使用する 3 点の刺激位置の配置は図 7 に示すように 40:80mm (左の値は手首側と中間、右の値は中間と肘側の刺激位置の間隔を表す、以下同義)、50:70mm、70:50mm、80:40mm の 4 種類とする。このとき、両端の刺激位置は中間からそれぞれ 60mm ずつ離れたところで固定し、中間の刺激位置のみ変更することで、不等間隔に調節する。前腕 3 点に提示する温冷覚刺激の組み合わせは、実験 1 と同様、温冷温と冷温冷の 2 種類とする。よって、温冷覚刺激の提示パターンは、表 3 に示すように 3 点の刺激位置の配置パターンとして 4 種類 (40:80mm、50:70mm、70:50mm、80:40mm)、温冷覚刺激の組み合わせとして 2 種類 (温冷温、冷温冷) の計 $4 \times 2 = 8$ 通りである。実験は提示パターン 1 つにつき 3 回ずつ実施する。そのため実験協力者 1 人あたりの試行回数は $8 \times 3 = 24$ 試行となる。その他、実験条件・手順は実験 1 と同様である。

4.3 実験結果・考察

表 4 は各提示パターンで温冷逆転現象が発生した人数を示す。表中の表記は、表 2 と同様である。表 4 より、全体の発生傾向として、温冷温、冷温冷の両条件で、40:80mm、50:70mm、70:50mm、80:40mm の全ての配置において半数近くの実験協力者で本錯覚が発生することがわかった。このとき、4 つ刺激間隔の配置条件によって、本錯覚の発生傾向に顕著な違いは見られなかった。

続いて、図 8、図 9 に温冷温、冷温冷において各提示パターンでの評価値の分布を示す。図中の表記は図 5, 6 と同様である。また、図 8 で配置ごとに Friedman 検定を行ったところ有意差は見られなかった (手首側 : $p=0.93$, 中間 : $p=0.44$, 肘側 : $p=0.76$)。図 9 でも、同様に Friedman 検定を行ったところ有意差は見られなかった (手首側 : $p=0.79$, 中間 : $p=0.85$, 肘側 : $p=0.94$)。結果、図 8, 9 より次のことがわかる。

(i) 中間の刺激位置を変更した全条件でも温冷逆転現象が発生した

表 4 より、全体の発生傾向として、温冷温、冷温冷の両条件で、全ての配置において半数近くの実験協力者で本錯覚が発生することがわかった。表 2 の結果と比較すると、

表 4 各提示パターンで逆転現象が発生した人数 (名)

(a) 温冷温					(b) 冷温冷						
		間隔 [mm]						間隔 [mm]			
		40:80	50:70	70:50	80:40			40:80	50:70	70:50	80:40
全体		7	6	7	7	全体	7	6	4	6	
提示箇所	手首側	4	4	2	2	提示箇所	手首側	0	0	0	0
	中間	4	3	6	4		中間	4	5	2	5
	肘側	0	1	1	1		肘側	4	3	2	3

※全体：3つの提示箇所内、一箇所でも温冷逆転現象が発生した場合の人数
実験協力者数：15名

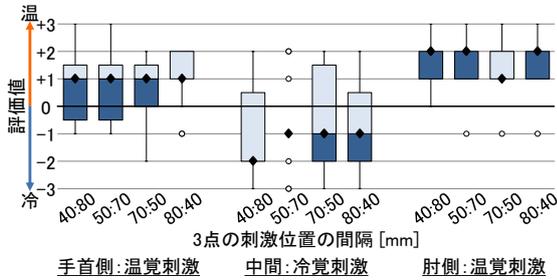


図 8 温冷温で刺激位置の間隔ごとに知覚した温度感覚

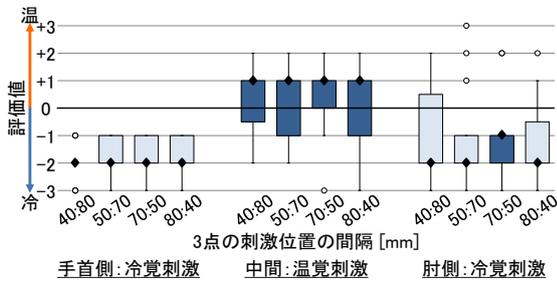


図 9 冷温冷で刺激位置の間隔ごとに知覚した温度感覚

全体の傾向としては数名程度減少したが、本錯覚の発生を阻止するには至らなかった。

(ii) 温冷温「手首側」、冷温冷「肘側」の条件において、中間の刺激位置を変更した場合、本錯覚の発生が減少する傾向がみられた

表 4 より、温冷温の「手首側」では実験 1 の結果 (表 2) と比較して、錯覚の発生人数は、2 名程度減少した。また、冷温冷の「肘側」は、実験 1 の結果より、2 名～7 名程度減少した。中間の刺激位置の調節は、特に冷温冷の「肘側」の条件で効果があった。

また、図 8 より、温冷温「手首側」の 40:80mm, 50:70mm の 2 条件では、評価値がマイナス (冷) に分布する場合があった。それに比べて、70:50mm, 80:40mm ではマイナスに分布する評価値が少ない。即ち、手首側から中間の刺激を遠ざけることで、正しい知覚 (この場合、温覚) の回答が多くなる傾向が見られた。

図 9 より、冷温冷「肘側」ではプラス (温) 側に分布はあるが、どの配置でも、大半が正しい知覚側 (この場合、冷覚) に分布している。図 6 と比較しても概ね正しい知覚側に知覚する実験協力者が多いことがわかる。

(iii) 温冷温「肘側」、冷温冷「手首側」の条件において、本錯覚の発生が少なかった

表 4 より、温冷温「肘側」、冷温冷「手首側」の配置条

件で、本錯覚が発生したのは 1 名程度であった。また、図 8, 9 でも温冷温「肘側」、冷温冷「手首側」の全配置の条件で、概ね正しく知覚 (温冷温の場合：冷覚, 冷温冷の場合：温覚) している。この結果より、大半の実験協力者が提示した刺激通りに知覚していることがわかった。

以上の結果より、中間の刺激位置を変更した場合、全体として錯覚の発生は減少する傾向が見られた。特に、冷温冷「肘側」では錯覚の発生が減少し、温冷温「手首側」では、中間の刺激を遠ざけることで錯覚の発生は減少する傾向にあった。

一方、実験 1 でも他の刺激による影響を受けにくかった温冷温「肘側」、冷温冷「手首側」の条件では、中間の刺激の位置が変更されても、同様に隣の刺激の影響を受けなかった。

5. むすび

本稿では、3 点の刺激位置の間隔を変えた場合に温冷逆転現象の発生に与える影響を確認した。実験 1 の結果、3 点の刺激位置の間隔が変わると、温冷逆転現象への影響も変わることがわかった。特に温冷温の条件では手首側、冷温冷の条件では肘側において、刺激の間隔が狭いほど本錯覚が生じやすく、間隔が広いほど生じにくくなった。

実験 2 では真ん中の刺激の配置を変更し、刺激間隔を不等間隔に調節した場合の温冷逆転現象の発生傾向を確認した。その結果、真ん中の刺激位置を移動したことで、冷温冷「肘側」では錯覚の発生が減少し、温冷温「手首側」では、中間の刺激を遠ざけることで錯覚の発生は減少する傾向にあった。

今回の実験を通し、温冷覚刺激の組み合わせや提示箇所によって刺激位置の間隔が本錯覚の発生傾向に関係していることがわかった。そこで、今後は、温冷覚刺激の提示温度、提示時間などのパラメータを変更し、温冷逆転現象の発生傾向について実験・考察を行う。本研究の実験の一部を担当した富田麻友氏に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] B. G. Green: "Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat," Perception & Psychophysics, Vol. 22, No. 4, pp. 331 - 337, 1977.
- [2] P. Bach, S. Becker, D. Kleinböhl, and R. Hölzl: "The thermal grill illusion and what is painful about it," Neuroscience letter, Vol. 505, No. 1, pp. 31 - 35, 2011.
- [3] R. Watanabe, R. Okazaki, and H. Kajimoto: "Mutual Referral of Thermal Sensation between Two Thermal-tactile Stimuli," IEEE Haptics Symposium, pp. 299 - 302, 2014.
- [4] K. Arai, S. Hashiguchi, F. Shibata, and A. Kimura: "Analysis of paradoxical phenomenon caused by presenting thermal stimulation on three spots," Proc. Human-Computer Interaction Int. 2017, pp. 281 - 286, 2017.
- [5] 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.