This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2025 年 9 月）

温度刺激の提示順序が Hot-Cold Confusion に与える影響の分析

小島夏美 [1)]，羽田野将大 [1)]，橋口哲志 [2)]，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 （〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150）
2)立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 （〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150）

概要：Hot-Cold Confusion は，前腕の複数箇所に温覚刺激および冷覚刺激を同時に提示することで，温覚刺激を冷覚として，冷覚刺激を温覚として知覚する現象である．過去の研究では，温冷覚刺激の提示配置によって錯覚の発生率が異なることが示されており，特に手首側から温・冷の順序で提示した場合に錯覚が誘発されやすい可能性が指摘されている．本研究ではこの仮説を検証し，温冷覚刺激の提示順序が Hot-Cold Confusion の発生傾向に及ぼす影響を分析した．その結果，手首側から温・冷の順序で提示した条件において錯覚発生率が有意に高いことが確認され，温冷覚刺激の空間的配置が温度知覚に与える影響が示唆された．

キーワード：温冷覚，Hot-Cold-Confusion，刺激の提示順序

1. はじめに

温度感覚に関しては，Thermal Referral や Thermal Grill Illusion といった著名な錯覚現象が数多く報告されている[1][2]．また，K. Arai ら[3]は，前腕の 3 点に温覚刺激および冷覚刺激を同時に提示した際，温覚刺激を冷覚として，冷覚刺激を温覚として知覚する現象，Hot-Cold Confusion を報告している．この現象は，複数箇所に温度を提示する場合において重大な課題となり得るため，その発生条件を解明するためのさまざまな実験がこれまでに行われてきた[4-7]．

これらの研究では，提示間隔や提示温度[4]，提示面積および提示部位[5][6]の変更，さらに触覚を付与しない条件[7]が，Hot-Cold Confusion の発生傾向に及ぼす影響として分析されている．特に，過去の実験では，HCH（H：温覚刺激，C：冷覚刺激，各刺激は手首，中央，肘の順に表記）では肘側が，CHC では手首側が誤認しにくく，正答率が高いことが示されている．これらの結果は，手首側から H および C を特定の順序で提示した場合に錯覚が誘発されやすい可能性を示唆している．

しかし，温冷覚刺激の空間的配置，特に手首側からの刺激の並びが Hot-Cold Confusion の発生に与える影響については十分に検討されていない．そこで本研究では，手首側から HC の順序で構成される温度提示パターンを提示した際の Hot-Cold Confusion の発生傾向を分析する．

2. 実験

2.1 実験目的

本研究は，手首側から HC で構成される温度提示パターンを提示した際の Hot-Cold Confusion の発生傾向を分析し，温冷覚刺激の配置が温度知覚に及ぼす影響を確認する．

2.2 温冷覚刺激

本実験では，ペルチェ素子を用いた温冷覚提示装置を右前腕腹側の中央および中央から 40 mm 離れた手首側と肘側にそれぞれ 1 台ずつ，計 3 台設置した（図 1）．装置の大きさは 40×40 mm であり，温度はペルチェ温度コントローラ（VPE-20-5V，株式会社ビックス）によって制御した．参加者には，卓上に設置された 3 台の温冷覚提示装置の上に右前腕を乗せるよう指示し，3 箇所に同時に温度刺激を提示した．

提示する温度刺激は，人間の温度受容器の特性を考慮して設定した．温受容器は 32℃以上 45℃以下で興奮し，冷受容器は 10℃以上 30℃以下で興奮することが知られている[8]．さらに，45℃以上の高温および 10℃未満の低温は痛覚として知覚される可能性がある[9]．このため，本実験では冷覚刺激を 11℃，温覚刺激を 44℃に設定した．

刺激パターンは，先行研究[4][5][6]と同様に温冷覚刺激を交互に配置した HCH および CHC に加え，手首側から H と C が並ぶように配置した HCC および HHC，さらに残りの H と C の組み合わせである CHH および CCH を加え，計 6 条件で実施した．なお，過去の実験により HHH および CCC ではほとんど錯覚が発生しないことが確認されているため，これらの条件は除外した．

2.3 評価手法

回答はタブレット PC（Surface Go 3, 8VA-00015）上で行った．画面には前腕のイラストが表示されており，温度を感じた部位に対応する箇所を塗るよう指示した．この際，感じた温度に応じた色で回答し，温かいと感じた場合は赤色，冷たいと感じた場合は青色を用いた．温度を感じなか

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

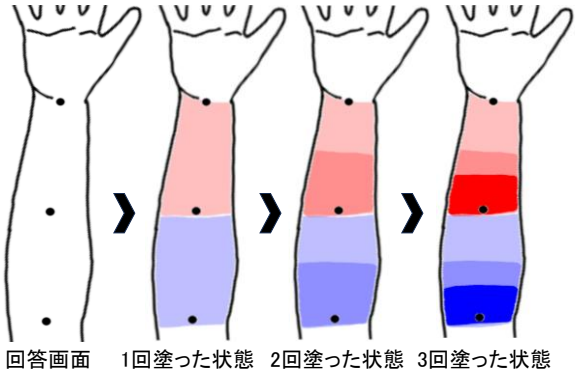


図 1　回答方法

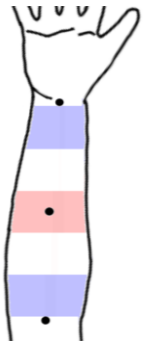


図 2　基準解答

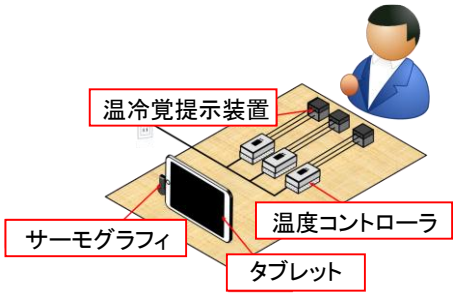
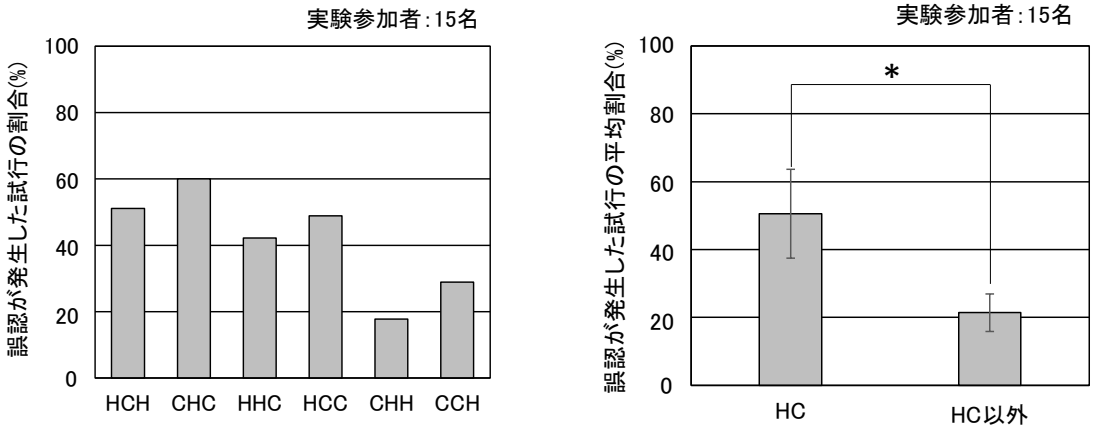


図 3　実験環境のイメージ



(a) 全条件の場合　　(b) HC の有無で比較した場合

図 4　誤認が生じた試行の割合

った場合は何も塗らず，白色のままにしておくよう指示した．また，温度の強さを区別するため，より強く感じた箇所には色を重ね塗りするよう指示した．これにより，前腕が表示された画面上に「非常に冷たい」「冷たい」「やや冷たい」「どちらでもない」「やや温かい」「温かい」「非常に温かい」の 7 段階で色を塗り重ねることが可能であった（図 1）．

分析では，図 2 に示す基準解答を作成し，実験参加者の回答の色をピクセル単位で比較して誤認率を算出した．この際，同系色の場合は正解として扱った．基準解答は，温度提示後にサーモグラフィで前腕の提示部位の温度を計測した結果と一致していたため，基準として採用した．

2.4　実験環境・手順

図 3 は，実験時における参加者と装置の配置を示す．温冷覚提示装置以外の部分は，参加者から見えないよう布で覆い，実験を実施した．3 点の刺激の提示間隔は 40 mm とした．この間隔は温冷覚提示装置の大きさと同じであり，事前の実験により本現象が発生することが確認されている．また，サーモグラフィは各試行後に提示部の温度を確認するために使用した．

実験室の温度は 25 ± 1 ° C，湿度は 40-60 %に設定し，環境を一定に保持して実験を実施した．各参加者は，全ての温度パターンの組み合わせをそれぞれ 3 回繰り返し，全 18 試行をランダムな順序で実施した．実験は 2 日間に分けて行った．参加者は成人男女 15 名（男性 14 名，女性 1 名）で，平均年齢は 21.73 歳（SD＝0.704）であった．実験前に全参加者からインフォームドコンセントを得た．実験は以下の手順で実施した．

(1)　実験参加者の前腕の長さを計測し，手首，中央，肘に印をつける
(2)　各提示箇所における腕の温度を計測
(3)　HCH，CHC，HCC，HHC，CHH，CCH から 1 つをランダムに選択
(4)　装置の温度を設定し，設定温度に安定するまで待機
(5)　前腕の中央を配置された装置の中央に合わせるために腕を誘導
(6)　実験者の合図と同時に実験参加者が腕を下ろすことで，温度刺激を提示
(7)　20 秒後に装置から腕を離させる
(8)　前腕が表示された画面に感じた温度を回答させる
(9)　腕の提示箇所の温度が初期温度に戻るまで，十分なインターバルを設ける
(10)　全ての組み合わせをそれぞれ 3 回ずつ，全 18 試行としてランダムな順序で実施

2.5　実験結果

誤認が発生した試行の割合を図 4 に示す．ここで「誤認

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

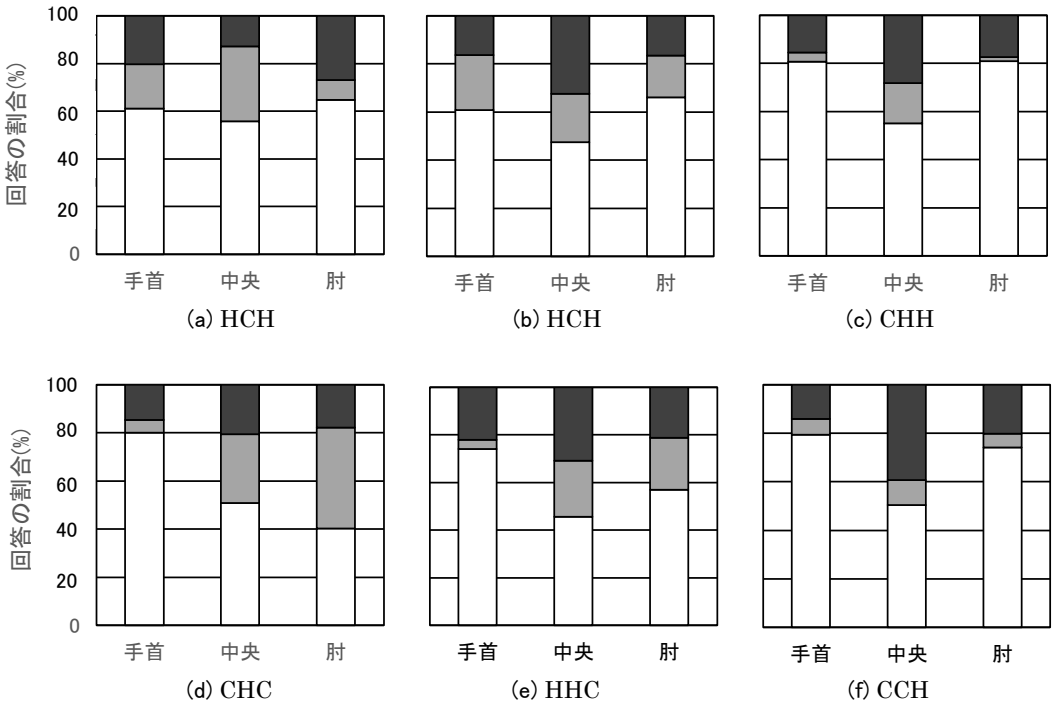


図 5 提示箇所ごとの温度知覚に対する回答の割合

が発生した試行」(以下，誤認試行) とは，温度が逆転して知覚された回答を指し，未回答 (白色) は含まれていない．図 4(a)では，左の 4 条件が手首側から HC を含む条件，右の 2 条件が HC を含まない条件である．HC 提示条件では誤認率が 40%以上，HC 以外の提示条件では 30%未満であり，HC 提示時に錯覚の発生率が高いことが確認された．

図 4(b)は HC の有無による誤認率の比較結果を示している．平均では HC 提示条件が約 50%，HC 以外の提示条件が約 20%であった．Welch の t 検定の結果，HC 提示が矛盾感覚を有意に誘発することが認められた ($p < .05$)．

さらに図 5 は提示箇所ごとの温度知覚に対する回答の割合である．この結果について分散分析を行い，正答率・誤認率・未回答率のいずれにおいても，提示パターン (A) および提示箇所 (B) に主効果と交互作用が認められた (正答率：$A\ F(5,70) = 2.57,\ p < .05,\ \eta^2 = 0.15$；$B\ F(2,28) = 5.66,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.29$；$AxB\ F(10,140) = 2.91,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.17$，誤認率：$A\ F(5,70) = 3.89,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.22$；$B\ F(2,28) = 5.19,\ p < .05,\ \eta^2 = 0.27$；$AxB\ F(10,140) = 3.62,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.21$，未回答率：$A\ F(5,70) = 8.35,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.37$；$B\ F(2,28) = 5.50,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.28$；$AxB\ F(10,140) = 7.57,\ p < .01,\ \eta^2 = 0.35$)．

Holm 法による多重比較の結果，正答率では肘において CHC より CHH，CCH，HCC の方が有意に高かった ($p < .05$)．また HHC，CHH，CHC では，中央より手首の正答率が有意に高く，CHC では肘よりも手首の正答率が高かった．

誤認率では，提示パターンの肘に有意差があり，CHC は HHC を除くすべての条件に比べて有意に誤認率が高かった ($p < .05$)．提示箇所では HHC，CHH，CHC において中央および肘の誤認率が手首より高く，交互作用でも同様の傾向が認められた．

未回答率は提示パターンおよび提示箇所に主効果が見られ，中央では HCH より CCH，CHC より HCC および CCH の方が高い未回答率となった ($p < .05$)．肘では CHH，CHC，HCC より HHC，HCH，CCH で未回答率が有意に高いことが示された．また交互作用でも，肘の未回答率が手首より高いことが確認された．

これらの結果は，温冷覚刺激の提示順序および提示部位の組み合わせが，温度知覚の正答率・誤認率・未回答率に影響を及ぼすことを示唆している．特に，両端の温度が異なる条件では中央部の知覚が不安定化し，正答率低下および誤認・未回答の増加が見られた．

3. 考察

図 5 に示す提示部位ごとの温度知覚の回答割合から，誤認試行の割合は過去の実験[3]と同程度であり，特に HC 順序で提示された部位で誤認率が高いことが示された．このことから，HC 順序が Hot-Cold Confusion の発生に寄与している可能性がある．

加えて，肘に C を提示した場合，H を提示した条件より誤認率が高く，CHC と肘に H を提示した条件との間で有意差が確認された．一方，HHC と CHC 間では有意差が見られず，中央および肘に HC 順序が提示されても手首の温度が肘の錯覚に及ぼす影響は示されなかった．

さらに，温覚と冷覚の伝達速度の違いはこの錯覚現象に寄与している可能性がある．冷覚 (Aδ 線維) は温覚 (C 線維) よりも速く中枢に到達するため，冷覚が優先的に知覚されやすい特性が考えられる[10]．しかし，HC 順序では伝達速度による到達順序の矛盾は生じておらず，この現象

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

を伝達速度差のみで十分に説明することはできない．このことから，提示順序や空間配置が温度知覚に影響を及ぼす他の要因が関与している可能性がある．

4. むすび

本研究では，温冷覚刺激を前腕の 3 点に提示した際に生じる錯覚現象を分析し，特に温度提示順序の影響を検討した．実験の結果，手首側から温・冷の順に刺激を提示した条件で Hot-Cold Confusion の発生率が高いことが確認された．また，両端の温度が異なる条件では中央部の温度知覚が曖昧になり，一方の温度に偏る傾向が見られた．冷覚が温覚より速く中枢に到達する伝達速度差が錯覚発生の一因である可能性も示唆されたが，HC 順序の条件ではこの要因だけでは説明できず，他の要因が関与している可能性が示唆された．

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] K. Arai, M. Matsumuro, S. Hashiguchi, F. Shibata, A. Kimura: “Hot-cold confusion: Inverse thermal sensation when hot and cold stimuli coexist in a thermal localization task. Perception,” Vol. 508 - 523, 2021.

[4] 新井啓介，橋口哲志，柴田史久，木村朝子 : 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~，日本バーチャルリアリティ学会研究報告，Vol. 22, No. HDC19, pp. 33 - 36, 2017.

[5] 奥川夏輝，橋口哲志，松室美紀，柴田史久，木村朝子 : “刺激の提示面積が温冷感覚誤認現象に与える影響の分析”，第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5A-01, 2019.

[6] S. Hashiguchi: “Analysis of Hot-Cold Confusion on Fingers,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 5, pp. 1117 - 1127, 2021.

[7] 辻勇太，藤光翼，松室美紀，柴田史久，木村朝子 : “接触刺激が Hot-Cold Confusion に与える影響の分析”，第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，1E3-4 , 2021.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 岩村吉晃 : タッチ (神経心理学コレクション), 医学書, 2001.

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会