



温度刺激の提示順序が Hot-Cold Confusion に与える影響の分析 (2) —MR 型視覚刺激が及ぼす影響—

小島夏美¹⁾, 芳井創¹⁾, 橋口哲志²⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

Natsumi KOJIMA, Hajime YOSHII, Satoshi HASHIGUCHI, Fumihisa SHIBATA, Asako KIMURA

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 デザイン・アート学部 (〒603-8577 京都市北区等持院北町 56-1)

概要：Hot-Cold Confusion は、前腕への温冷刺激提示時に温覚を冷たく、冷覚を温かく知覚する錯覚である。先行研究では、MR 型視覚刺激や温度刺激の提示順序が錯覚の生起に影響し、特に手首側から温・冷の順で提示した場合に生じやすいことが報告されている。しかし、MR 型視覚刺激と提示順序の影響を統合的に検討した研究は十分ではない。そこで本研究では、両要因が Hot-Cold Confusion に与える影響を分析した。その結果、視覚刺激の一致・不一致により正答率に差が生じ、提示順序ごとに異なる傾向が確認された。

キーワード：Hot-Cold Confusion, 多感覚知覚, 提示順序, Mixed Reality

1. はじめに

温度感覚に関して、前腕の複数箇所にも温覚刺激および冷覚刺激を同時に提示した際に、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 Hot-Cold Confusion が報告されている[1]。この現象は、複数箇所への温度提示を行うシステムにおける課題となることから、その発生条件を明らかにする研究が進められている[2]。

これまでに、提示間隔や提示温度、提示部位などが Hot-Cold Confusion に与える影響が検討されており、特に、手首側から温覚・冷覚 (HC) の順で刺激を提示した場合に錯覚が生じやすいことが報告されている[3]。一方で、温度刺激のみで温度知覚を意図どおりに制御することは容易ではなく、他感覚を利用した温度知覚の制御が期待されている[4][5]。

温度知覚は視覚情報の影響を受けることが知られており、複合現実 (MR) 空間における視覚刺激は、温度の知覚位置や知覚範囲に影響を与えることが報告されている[6]。さらに、MR 型視覚刺激は Hot-Cold Confusion にも影響を与える可能性が示唆されている[7]。しかし、温冷覚刺激の提示順序と MR 型視覚刺激の影響を統合的に検討した研究は少なく、特に HC を含む提示順序における視覚刺激の影響は十分に明らかになっていない。そこで本研究では、温冷覚刺激の提示順序と MR 型視覚刺激の組み合わせが Hot-Cold Confusion に与える影響を確認する。

2. 提示刺激

2.1 温冷覚刺激

本実験では、温冷覚刺激をペルチェ素子とペルチェ温度

コントローラ (VPE-20-5V, 株式会社ビックス) を用いて提示した。ペルチェ素子の大きさは、40×40 mm であり、温度装置の位置は先行研究[1]に倣い、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)。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 箇所同時に温度刺激を提示した。実験で提示した温度刺激は、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°C 以上 45°C 以下で興奮し、冷受容器は 10°C 以上 30°C 以下で興奮することが知られている[8]。さらに、45°C 以上の高温および 10°C 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、本実験ではペルチェ素子表面温度を冷覚刺激では 11°C、温覚刺激では 44°C に設定した。以後、本稿では温覚刺激の 44°C を提示する場合を H、冷覚刺激の 11°C を提示する場合を C と表記する。また、手首側、中央、肘側の順に提示温度を表記する。例えば HCH は、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条件を表す。

本実験の温冷覚の提示パターンは、先行研究[2][3]より、Hot-Cold Confusion が発生しやすい手首側から HC を含む提示順序に着目し、2 つの実験を実施した。実験 1 では HCH および CHC、実験 2 では HHC および HCC の条件を用いた。それに加えて、すべて温覚刺激を提示するダミー刺激として HHH に対して赤赤赤を用いた (図 2)。

2.2 視覚刺激

本実験では、視覚刺激の提示に PICO4 を用いた。図に

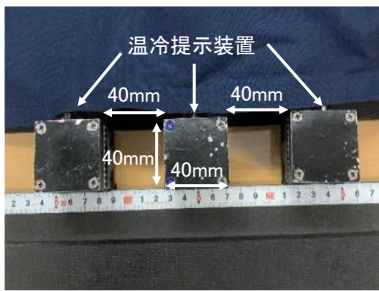


図1 温冷覚刺激の提示装置

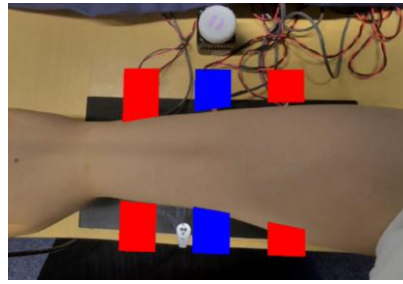


図2 視覚刺激の提示

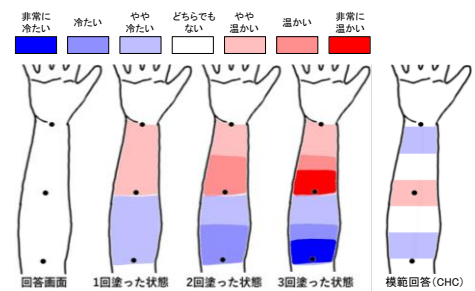


図3 回答方法と回答例

示すように、縦 200mm、横 40mm の長方形の色付きオブジェクトを 3 つ提示した。これらは、温度刺激を提示するペルチェ素子の位置と一致するように、前腕の直下に重ねて配置した。具体的には、参加者の前腕の下に配置した表示面上に視覚刺激を描画し、各温度提示位置に対応する位置に色刺激を重ね表示した。また、参加者ごとに前腕の幅が異なるため、装置の幅は個人に合わせて調整可能な構造とし、各温度刺激位置と視覚刺激の対応関係が維持されるように設計した。オブジェクトの色は、赤が温かい、青が冷たいという連想関係[11]から、青と赤の 2 色で行った。実験の際の色の組み合わせとしては、温度刺激に対して色のイメージと一致・不一致の条件で行った。

3. 実験 1 (HCH, CHC 条件)

3.1 実験目的

実験 1 では Hot-Cold Confusion が生じやすいとされる温度提示パターン (HCH, CHC) において、MR 型視覚刺激を付与し、温度知覚の一致および誤認の傾向を分析する。特に、触覚刺激と視覚刺激の組み合わせが知覚判断に与える影響を明らかにすることを目的とする。

3.2 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 3)。分析では、図に示す基準回答を作成し、参加者の回答の色をピクセル単位で比較して正答率を算出した。この際、同系色の場合は正解として扱った。

3.3 実験環境・手順

温度提示装置と PICO Motion Tracker 以外は参加者から見えなように布で覆った状態で実験を行った。サーモグラフィは回答用とは異なるタブレット (iPad Air) に装着したサーモグラフィ (Seek Compact, Seek Thermal Inc.) を用いて撮影した。実験室の温度は 20~23.5℃、湿度は 20~60% とした。実験には成人 18 名 (男性 16 名、女

性 2 名) が参加した。すべての参加者は実験開始前に、すべての参加者から書面による同意を得た。実験は以下の手順で実施した。

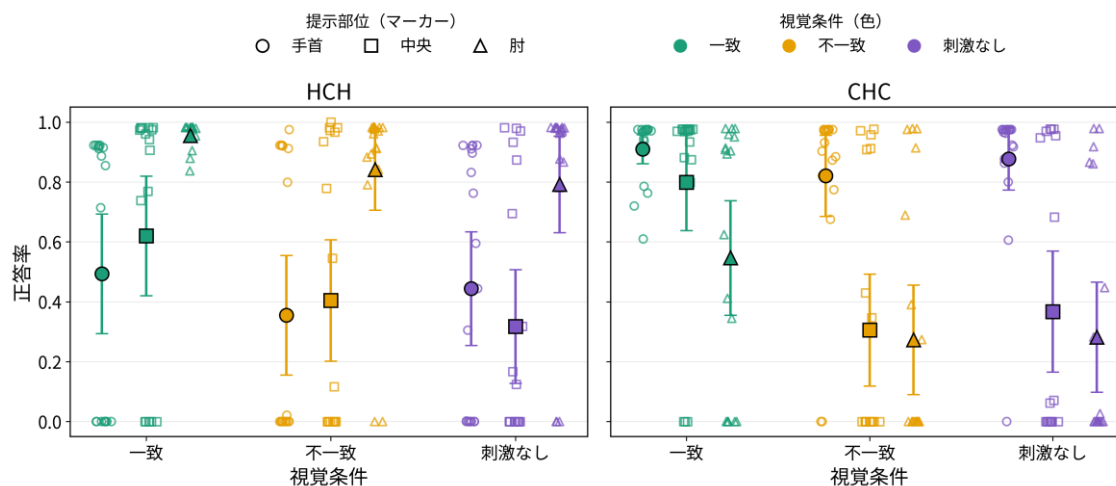
- (1) 実験参加者の前腕の長さを計測し、手首、中央、肘に印をつける
- (2) 各提示箇所における腕の温度を計測
- (3) HCH, CHC, HHH から 1 つをランダムに選択
- (4) 装置の温度を設定し、設定温度に安定するまで待機
- (5) 前腕の中央を配置された装置の中央に合わせるために腕を誘導
- (6) HMD を被らせる
- (7) 実験者の合図と同時に実験参加者が腕を下ろすことで、温度刺激と視覚刺激を提示
- (8) 20 秒後に装置から腕を離させる
- (9) サーモグラフィで温度が提示されているか確認
- (10) HMD を回収する
- (11) 前腕が表示されたタブレット PC に感じた温度を回答させる
- (12) 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
- (13) すべての組み合わせをそれぞれ 1 回ずつ、全 7 試行としてランダムな順序で実施

3.4 実験結果・考察

図 4 の結果から、提示箇所ごとの正答率の割合を算出した。イラストの腕を 5 分割し、手首・中央・肘の 3 箇所に提示した触覚刺激に該当する色を割り当て、模範解答として作成した。この模範解答と参加者の回答をピクセルごとに比較して正答率を算出した。このとき、同系色で回答したものを正答とした。

HCH 条件および CHC 条件における正答率について、視覚刺激 (一致、不一致、刺激なし) および提示部位 (手首、中央、肘) を要因とした ART (Aligned Rank Transform) による 2 要因分散分析を行った。事前に Shapiro-Wilk 検定を実施した結果、全条件で正規性が確認されなかったため、ノンパラメトリック解析を適用した。

HCH 条件では、視覚刺激の主効果 ($F(2,136)=3.95$, $p=.021$) および提示部位の主効果 ($F(2,136)=29.74$, $p<.001$) が有意であった一方、交互作用は有意ではなかった ($F(4,136)=0.95$, $p=.436$)。Holm 法による多重比較の結果、「一致」は「不一致」より有意に高い値を示した ($p=.029$)。また、「一致」と「刺激なし」の比較では有意傾向が認め



各点は参加者データ，塗りつぶしマーカーは平均値，エラーバーは95%信頼区間を示す。

図4 提示箇所ごとの温度知覚に対する回答の割合 (HCH, CHC)

られた ($p=.062$)。提示部位については，肘条件が手首条件および中央条件より有意に高かった (いずれも $p<.001$)。

一方，CHC 条件では，視覚刺激の主効果 ($F(2,136)=11.33$, $p<.001$)，提示部位の主効果 ($F(2,136)=23.67$, $p<.001$)，および両者の交互作用 ($F(4,136)=2.79$, $p=.029$) が有意であった。多重比較の結果，「一致」は「不一致」および「刺激なし」より有意に高い値を示した (いずれも $p\leq.001$)。また，提示部位については，手首条件が中央条件および肘条件より有意に高く，さらに中央条件は肘条件より有意に高かった ($p=.015$)。すなわち，正答率は「手首 > 中央 > 肘」の順であった。さらに，交互作用に対する単純主効果分析の結果，一致条件においてのみ，中央条件が手首条件より有意に高かった ($p=.035$)。

4. 実験2(HHC, HCC 条件)

4.1 実験目的

実験2では，手首からHCで構成される温度提示パターンにおけるHot-Cold Confusionの発生傾向を分析する。さらに，MR型視覚刺激を付与した場合の影響を検討し，提示順序と視覚刺激の組み合わせが温度知覚に及ぼす影響を明らかにする。

4.2 実験環境・手順

実験環境は，実験室の温度を $22\pm1^{\circ}\text{C}$ ，湿度を $20\sim40\%$ 設定した。実験には成人15名 (男性11名，女性4名) が参加した。実験手順は実験1と同様で，触覚刺激はHHC, HCC, HHHの1つをランダムで選択した。また本実験では，すべての組み合わせをそれぞれ3回ずつ，全21試行を2日に分けて行った。

4.3 実験結果・考察

3.4と同様に，模範解答と参加者の回答を比較して正答率を算出し，同様の分析を行った。視覚刺激を付与した条件における提示順序HHC, HCCの結果を図5に示す。

HHC条件における正答率について，視覚刺激 (一致，不一致，刺激なし) および提示部位 (手首，中央，肘) を

要因としたARTによる2要因分散分析を行った。その結果，視覚刺激の主効果 ($F(2,112)=5.25$, $p=.0066$) および提示部位の主効果 ($F(2,112)=14.04$, $p<.001$) が有意であったが，交互作用は認められなかった ($F(4,112)=0.63$, $p=.643$)。Holm法による多重比較の結果，一致条件は不一致条件より有意に高い正答率を示した ($p=.0059$)。また，肘条件は手首条件および中央条件より有意に高い正答率を示した (いずれも $p<.001$) が，手首条件と中央条件の間には有意差は認められなかった ($p=.574$)。

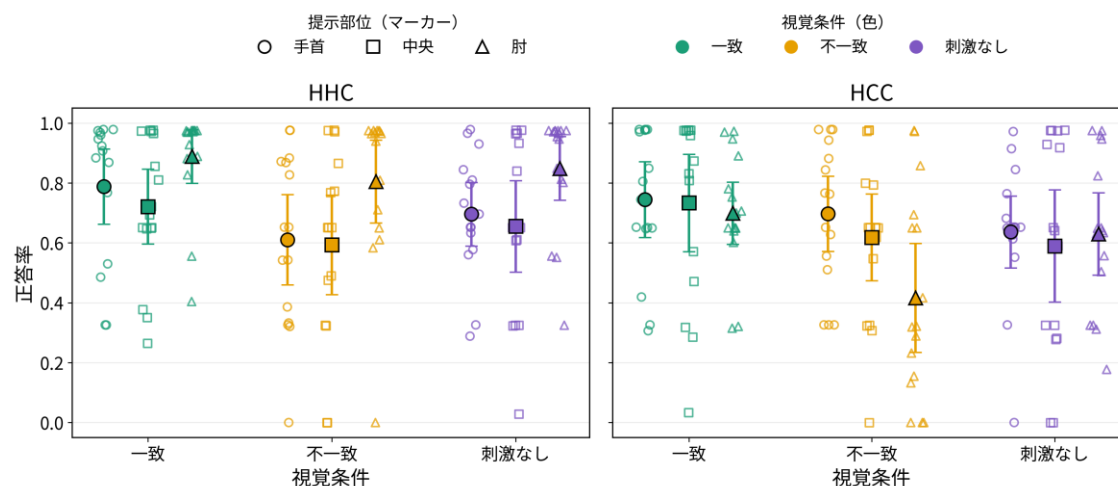
HCC条件についても同様に解析を行った結果，視覚刺激の主効果は有意であった ($F(2,112)=5.24$, $p=.0067$)。一方，提示部位の主効果 ($F(2,112)=2.93$, $p=.057$) および交互作用 ($F(4,112)=1.40$, $p=.238$) は有意ではなかった。Holm法による多重比較では，一致条件は不一致条件より有意に高い正答率を示した ($p=.0055$) が，その他の比較および提示部位間の比較では有意差は認められなかった (すべて $p>.05$)。

以上より，HHCおよびHCCのいずれの提示順序においても視覚刺激の主効果が認められ，一致条件では不一致条件より正答率が有意に高かった。また，提示部位の主効果はHHCでのみ認められ，交互作用はいずれの条件でも認められなかった。

5. 全体考察

本研究では，実験1 (HCH・CHC) および実験2 (HHC・HCC) を通して，温冷覚刺激の提示順序とMR型視覚刺激がHot-Cold Confusionに与える影響を検討した。その結果，いずれの提示順序においても，**視覚刺激条件の違いによって正答率に有意な差が認められ，視覚情報が温度知覚に影響を及ぼすことが確認された。特に，一致条件では不一致条件よりも正答率が高く，視覚刺激と温度刺激との整合性が温度知覚の正確性を向上させることが示唆された。

また，提示部位の影響は提示順序によって異なり，HCHおよびHHCでは提示部位の主効果が認められた一方，



各点は参加者データ，塗りつぶしマーカーは平均値，エラーバーは95%信頼区間を示す。

図5 提示箇所ごとの温度知覚に対する回答の割合 (HHC, HCC)

HCC では有意な主効果は認められなかった。さらに，視覚刺激と提示部位との交互作用は HCC 条件でのみ認められ，その他の提示順序では有意ではなかった。このことから，視覚刺激の効果は提示順序によって一様ではなく，一部の提示順序においてのみ提示部位との相互作用が生じる可能性が示唆された。

以上より，Hot-Cold Confusion は，温冷覚刺激と視覚情報との多感覚統合によって変調される現象であり，MR 型視覚刺激は温度知覚の正確性に影響を及ぼすことが示された。一方で，視覚刺激と提示部位との相互作用は提示順序によって異なり，その効果は限定的であったことから，Hot-Cold Confusion の発生には温度刺激の提示順序に加え，視覚情報との多感覚統合が重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

6. むすび

本研究では，温冷覚刺激の提示順序および MR 型視覚刺激が Hot-Cold Confusion に与える影響について，実験 1 (HCH・CHC) および実験 2 (HHC・HCC) を通して検討した。その結果，HC を含む提示順序において Hot-Cold Confusion が生じることを確認するとともに，MR 型視覚刺激が温度知覚に影響を与えることが示唆された。特に，いずれの提示順序においても，一致条件では不一致条件より正答率が有意に高く，視覚情報と温度刺激との整合性が温度知覚の正確性を向上させることが示された。また，提示部位や視覚刺激との相互作用は提示順序によって異なり，Hot-Cold Confusion は温度刺激の提示順序だけでなく，視覚情報との多感覚統合によっても影響を受けることが示唆された。

以上より，本研究は，MR 型視覚刺激が Hot-Cold Confusion に伴う温度知覚に影響を与える可能性を示した。本知見は，MR 環境における温冷覚提示システムの設計や，視覚と温度覚の多感覚統合メカニズムの理解に寄与すると考えられる。今後は，刺激強度や提示時間，視覚刺激条件を拡張するとともに，生理学的指標を併用することで，Hot-Cold Confusion の発生機序をより詳細に解明し

ていく予定である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 羽田野将大, 辻勇太, 松室美紀, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "Hot-Cold Confusion における各温度の知覚分布に関する分析", 第 28 回日本 VR 学会大会論文集, 2A2-6, 2023.
- [3] 小島夏美, 羽田野将大, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "温度刺激の提示順序が Hot-Cold Confusion に与える影響の分析", 第 30 回日本 VR 学会大会論文集, 1A2-06, 2025.
- [4] S. Kanaya, Y. Matsushima, and K. Yokozawa: "Does Seeing Ice Really Feel Cold? Visual-Thermal Interaction under an Illusory Body-ownership," PLOS ONE, Vol. 7, pp. 1 - 7, 2012.
- [5] D. Eckhoff, C. Sandor, G. L. Y. Cheing, J. Schnupp, A. Cassinelli: "Thermal pain and detection threshold modulation in augmented reality," Frontiers in Virtual Reality, Vol. 3, pp. 1 - 10, 2022.
- [6] 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "複合現実型視覚刺激が温冷覚の知覚位置・知覚幅に与える影響", 日本 VR 学会論文集, Vol. 21, No. 3, pp. 503 - 511, 2016.
- [7] 芳井 創, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "MR 型視覚刺激の提示が Hot-Cold Confusion に与える影響の分析", 第 29 回日本 VR 学会大会論文集, 2C2-02, 2024.
- [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.