



環境温度が温度情報による材質識別に与える影響(第 3 報)

環境温度提示時間の影響に関する調査

Effect of Environmental Temperature on Material Recognition based on Thermal Cue (III)
Effect of Environmental Temperature Presentation Duration.

濱口美月¹⁾, 溝口泉¹⁾, Ho Hsin-Ni²⁾, 梶本裕之¹⁾

Mizuki HAMAGUCHI, Izumi MIZOGUCHI, Hsin-Ni HO, and Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学 情報理工学研究科情報学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {hamaguchi, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)
- 2) 九州大学 芸術工学研究院 (〒815-8540 福岡県福岡市南区塩原 4-9-1, hohsinni@design.kyushu-u.ac.jp)

概要: 我々は温度を手掛かりとした材質識別における環境温度の影響を検討してきた。その結果、前腕全体を環境温度に順応させた状態では、環境温度が通常の室温より低い、体温より高い状況においても材質識別が可能であることを示した。本報告では、環境温度に順応していない条件の追加実験を行うことにより、環境温度の提示時間が材質の識別にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とした。異なる 3 条件の環境温度下で 5 種類の実物体を用いた材質識別実験を、環境温度提示時間 10 分と 0 分の 2 条件で実施することで環境温度提示時間の影響を調査した。その結果、瞬間的な環境温度の提示においても材質識別能力が低下しないことが示された。

キーワード: 材質, 温度, 環境温度

1. はじめに

私たちは日常生活において、触った材質を複数の感覚モダリティから得られる複雑な情報に基づいて認識している[1]。材質知覚とは、視覚、触覚、聴覚などの感覚刺激に基づいて、物体の材質的な分類や表面の質、内部の状態を知覚・認識することである[2]。材質知覚に寄与する感覚情報の一つに、知覚される冷たさがある。知覚される冷たさは、接触時の皮膚温度の変化または低下から生じる。皮膚温度の変化は、接触前の皮膚と物体の温度差(初期温度差)から生じる。知覚された冷たさが物質の認識に寄与することは、1920 年代にドイツの心理学者デビッド・カッツによって実証された[3]。この手がかりの性質はまだ明らかにされていないが、おそらく初期冷却速度や終了温度など、接触時に生じる皮膚冷却曲線の特徴に関連していると思われる[4]。

一方でこれまでの研究の多くは、一定の室温における材質知覚を主に取り扱っており、環境温度というパラメータが材質知覚に及ぼす影響については詳細な検討が行われていなかった。環境温度は我々の熱的快適性や温度調節行動に重要な役割を果たすことが先行研究により明らかになっている[5][6]。手と物体との相互作用の際、素材が異なれば皮膚に異なる冷却カーブが生じる[7]。しかし、異なる

環境温度と材質の組み合わせで似た冷却カーブが生じることがある。例えば環境温度 30 °C で金属に触れた際の皮膚温度と、環境温度 25 °C で木材に触れた際の皮膚温度の終了温度はほぼ同じである。それにもかかわらず我々は温度情報のみで金属と木材を識別することができるのであれば、我々が環境温度をある種のリファレンスとして知覚しており、その知覚が材質識別に大きく貢献している可能性が考えられる。前述のカッツも同様に環境温度に着目しており、内部を 44 °C にした樽の中に手を入れ材質を識別する実験を行ったが、著書の中で逸話的な証拠を示しただけであり、その実験は約 100 年前に数人の参加者だけで行われたものである[3]。

我々は第 1 報[8]及び第 2 報[9]で、環境温度を提示する恒温箱を用い、前腕を箱に入れた状態で材質識別を行うという実験を行った。その結果、環境温度に順応した状態では高温条件において材質識別能力が低下するものの、皮膚温度より高い環境温度においても材質識別は可能であることを明らかにした。しかしこれらの実験は環境温度に順応していない条件が含まれなかった。例えば我々の身体は、環境温度に皮膚が感覚的にも物理温度の面でも順応し、その結果物体の触れた際の皮膚温度変化に主に注目して材質感を知覚するのか、あるいは皮膚温度と環境温度を同時

に知覚して材質感を知覚するのか、という疑問に答えるには、環境温度に順応していない条件での実験を行う必要がある。

本報告では環境温度に順応していない条件の追加実験を行うことにより、環境温度提示時間が材質の認識にどのような影響を与えるかを明らかにする。

2. 実験

2.1 実験参加者

本実験には21～23歳の10名（男性：5名、女性：5名、平均：21.8歳、SD：0.87）が参加した。実験参加者は第1報[8]と同じである。参加者は全員健康で、皮膚疾患や手の怪我は報告されておらず、熱知覚や触覚も正常であった。実験は大学の倫理委員会の承認を得て行われた。

2.2 実験条件

本実験で使用した実物体を図1に示す。本実験では、5種類の材質（アルミニウム、ガラス、アクリル、木材、発泡スチロール）からなる均一な直方体形状（上面80mm×80mm、厚さ10mm）の実物体を使用した。多くの人が日常的に接する材質の中から、熱特性の範囲が広がるように材質を選択した。

本実験では異なる環境温度下で実物体に触れる実験を行うために内部の温度を一定に保つことができる恒温箱を作成した。恒温箱内部の画像を図2に示す。恒温箱は発泡スチロール箱を加工したものであり、内部はファン、温度計、ガイドツールから構成される。参加者側にはフェルトで加工された手の挿入口が、実験者側には参加者の手の動きを監視するための監視窓がある（図3(c)参照）。

恒温箱内の温度条件は3条件（低温条件：15℃、室温条件：25℃、高温条件：40℃）とした。先行研究より、人肌に近い環境温度においては材質に触れた際にほとんど熱交換が行われず材質を識別するための温度情報が得られないため、材質を識別することが困難であることが知られている[3]。そのため本実験では高温条件を皮膚温度より十分高い40℃とした。低温条件は保冷剤を、室温条件はエアコンディショナーを、高温条件は爬虫類用パネルヒーター（KC-WH, KcBlueJp）を用いて箱内の温度を管理した。すべての温度条件の実験において室温は25℃であった。以上の実験環境、材質、温度条件はすべて我々の前報と同じである[9]。

環境温度提示条件は2条件（非順応条件：0分、順応条件：10分）とした。順応条件は第1報[8]の結果を用い、今回は同じ実験参加者で非順応条件のみ追加実験を行った。非順応条件の実験は順応条件の実験の8ヶ月後に実施された。予備実験により手のひらの皮膚温度は環境温度に入って10分間経つと安定することが分かったため、環境温度に順応する条件を10分間に設定した。環境温度提示時間が0分の非順応条件では頻りに恒温箱から手を出し入れするため、手のひらの皮膚温度が安定せず試行ごとに大きく異なることが予想される。そこで、皮膚温度を安定さ

せるために恒温箱から手を出している間は人間の皮膚温度平均の32℃に設定したホットプレート（V-2020T, Hanchen）に手を置くように指示した。



図1：実験で用いた実物体

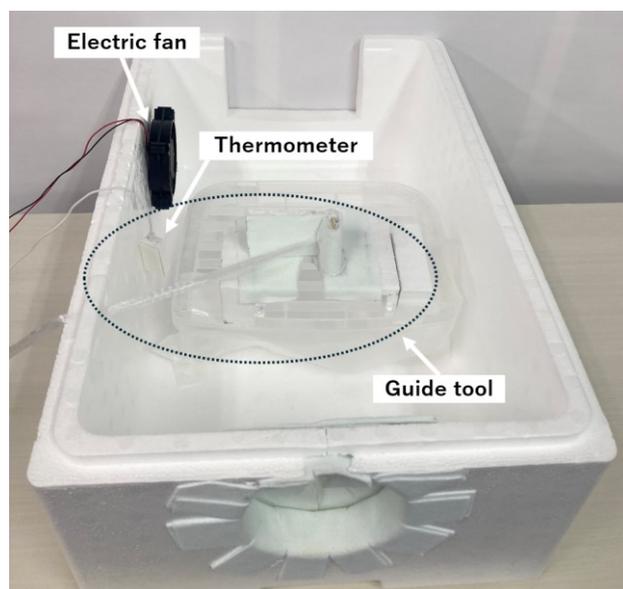


図2：恒温箱内の構造

2.3 実験手順

今回実施した非順応条件の実験手順のみを記載する。実験の様子を図3(a)に示す。参加者はまず実験について説明を受け、手に危険がないことを事前に伝えられた。実験開始前にサーモカメラ（TC004, TOPDON）を使って皮膚温度を計測した。

皮膚温度計測後、ホットプレートに非利き手を置いた状態から、（図3のように誘導具を用いて手元を見ずに音とモニターに表示される指示に従って恒温箱内の実物体に触れる訓練を行った。試料に触れるときに指を左右前後に動かせないように指の形にくりぬいたカバーを試料にかぶせており、その指の形の部分に指を移動できる誘導具になっている。実験参加者には試料にはただ触れるのみで、指を左右前後に動かして表面のテクスチャ情報を得るこ

とがないように指示した。この訓練には、実験刺激中の最も熱浸透率が高い材質と最も熱浸透率が低い材質の二種類の実験刺激を用いた。つまりこの二つは実験中に触れる最も冷たい材質と温かい材質に触れることになり、冷たさの想定範囲を事前に提示した。この手順は本実験で初めて触れる刺激に対して評価基準が揺らぐのを防ぐ役割を果たす。

訓練終了後、ホットプレートに手を置いた状態から本実験を開始した。音の合図の後に非利き手を恒温箱内に入れ、誘導具を使って人差し指で実物体に2秒間触れてもらった。そして手を恒温箱から出し、ホットプレートに手を置いた後に触れた材質がどの材質に感じたかを回答させた。回答は利き手でタブレットに入力し、ホットプレートに置いている非利き手はそのままの状態であ静にした。

次の試行では、異なる材質が提示され、それは実験者によって変更された。材質の順序は無作為化され、参加者ごとに異なる順序となった。参加者は5種類の材質ごとに3回、合計15回の試行を行った。

以上の一連の実験の流れを環境温度条件ごとに実施した。環境温度条件間は最低で30分以上時間をおいて実施した。環境温度条件の順序は参加者間で無作為化された。

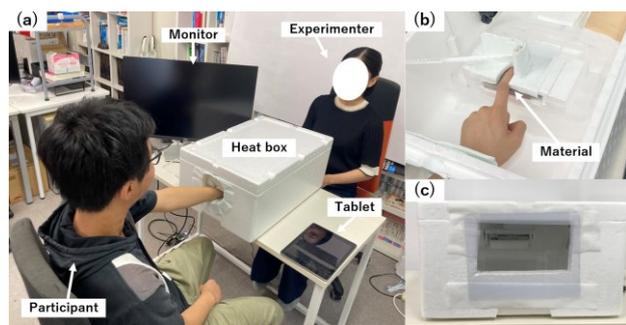


図 3: (a) 実験の様子, (b) 参加者が実物体に触れている手元の画像, (c) 実験者側から見た恒温箱

2.4 実験結果

各条件の正答率を図4に示す。本実験で提示した材質が5種類であったため、各試行における偶然水準は20%であった。この時、1条件当たりの試行回数10回を用いて比の検定を行うと、偶然水準20%を超えていると判断できる基準は40.8%となる。グラフ中にこの線を記入している。正答率がこの基準を下回ったのは順応条件で低温条件・高温条件のガラスであった。環境温度条件ごとに正答率をまとめたものを図5に示す。環境温度条件あたりの試行回数40回を用いて同様に比の検定を行うと、偶然水準20%を超えていると判断できる基準は34.9%となる。グラフ中にこの線を記入している。いずれの条件でもこの基準を上回っていた。

順応・非順応条件(2条件)、環境温度条件(3条件)と実験で使用した材質(5条件)を参加者内因子とし、正答率を従属変数として2元配置反復測定分散分析を実施した。分析の結果、順応・非順応条件($F(1, 9) = 5.44, P = 0.045$),

温度条件($F(2, 18) = 3.93, P = 0.038$)と材質条件($F(4, 36) = 5.60, P = 0.0010$)が有意な効果を持ち、交互作用はないことが示された。Holm補正による多重比較検定を実施した。その結果、アルミニウム条件とガラス条件に有意差が見られた($P = 0.001$)。これはアルミニウム条件がガラス条件に比べて正答率が有意に高いことを示している。しかし他の材質条件間に有意差は見られなかった。また、順応・非順応条件間に有意差が見られた($P = 0.045$)。これは非順応条件が順応条件に比べて正答率が有意に高いことを示している。そして、環境温度条件間に有意差は見られなかった。

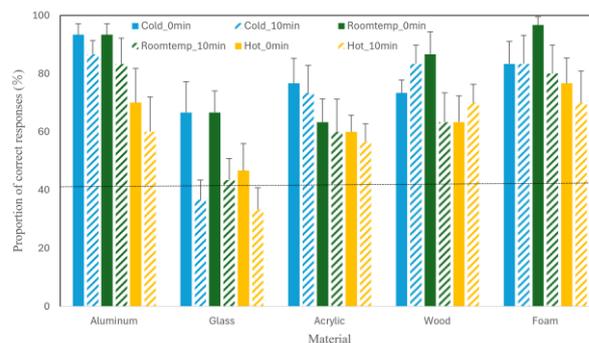


図 4: 材質ごとの正答率。エラーバーは平均の標準誤差(SEM)。破線は正答率40.8%を示しており、参加者が信頼性を持って材質を識別できたことを示す。

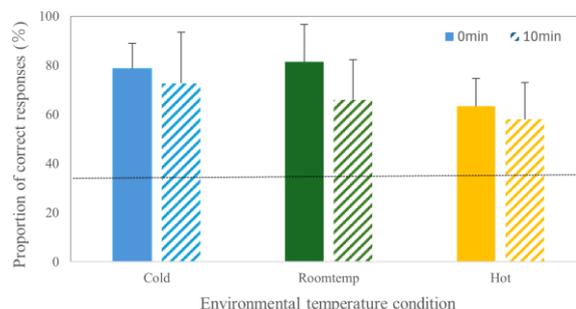


図 5: 各環境温度条件における正答率。エラーバーは平均の標準誤差(SEM)。破線は正答率34.9%を示しており、参加者が信頼性を持って材質を識別できたことを示す。

3. 考察

図4の結果から、個々の順応・非順応、材質、環境温度の組み合わせ条件において正答率が偶然水準よりも高いと言えなかった条件は、順応条件で低温条件・高温条件のガラスであった。ガラスは低温条件ではアルミニウムに、高温条件ではアクリルに誤答されることが多かった。低温条件ではより熱浸透率が高い材質に、皮膚温度より高い環境温度条件ではより熱特性を表すパラメータの一つである熱浸透率が低い材質に寄って回答されていると考えられる。

図4、図5の結果から、瞬間的な環境温度の提示は、環境温度に順応させた場合と比べて材質識別能力が低下しないばかりか、むしろ向上するという結果になった。順応

時間を設けない場合、人は対象物との接触による皮膚温度変化と環境温度を同時に明瞭に知覚する。これに対して環境温度に順応させる時間を設けた場合、人は物体との接触による皮膚温度変化を主要な手掛かりとすると考えられる。順応時間を設けないほうが材質識別能力が高くなったという今回の結果から考えると、材質を知覚するという点においては環境温度自体を明瞭に感じられることが有利に働いた可能性がある。

今回の実験結果は多くの制約がある。非順応条件は追加実験となったため、すべての実験参加者が順応条件の後に非順応条件の実験に参加した。そのため、実験や材質条件に慣れたことによって非順応条件では正答率が順応条件に比べて高くなった可能性が考えられる。非順応条件の実験は順応条件の実験の8ヶ月後に実施された。しかし、順応・非順応条件を逆の順番で実施する実験を本実験と同一人数で実施することによって、この制約を排除する必要があると考えられる。

さらに、非順応条件でのみ皮膚温度を安定させるホットプレートを用いたことが正答率に影響を与えた可能性がある。材質識別において皮膚温度が安定していることは重要であり、一般的に材質識別の実験を行う際にはインターバルの時間を設ける手法[8][9]、もしくはホットプレート等で皮膚温度を安定させる手法[10]が用いられる。今回の研究において、順応条件ではインターバルを設け、非順応条件ではホットプレートを用いて皮膚温度を安定させた。しかし皮膚温度を安定させる手法が異なったことによって正答率に差が生じた可能性が考えられる。今後、非順応条件においてインターバルを設ける実験を行うことによってより正確に環境温度が材質識別に与える影響について調査していく。

最後に、本研究では前腕を恒温箱の中に入れた状態で実験を行っている。これは、前腕全体で環境温度を把握しているという仮定を置いた実験と言える。先行研究より身体の部位によっては約100倍感度が異なり、有毛肌と無毛肌でも感度が異なる[11]。そこで、身体全体を環境温度下に入れる場合や、手掌部のみないし指一本のみを環境温度下に入れる場合も含めた実験をすることによって、人が環境温度によってリファレンスを取ることができる条件を探索する必要がある。

4. まとめ

本研究では、環境温度に順応していない条件の追加実験を行うことにより、環境温度提示時間が材質の認識にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とした。環境温度への順応・非順応条件、異なる3条件の環境温度下で5種類の実物体を用いた実験によって環境温度の影響を調査した。その結果、瞬間的な環境温度の提示においても材質識別能力が低下しないことが示された。今後はサ

ーマルディスプレイを用いた実験、参加者を増やした実験、身体全体やごく一部を環境温度にさらした状況での実験を行うことで、環境温度が材質の識別に与える影響をさらに調査していくとともに、温度による材質識別のメカニズムを環境温度因子を含めた状態でモデル化していきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957, 22H03679 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Fujisaki, W., Goda, N., Motoyoshi, I., Komatsu, H., Nishida, S.: Audiovisual integration in the human perception of materials, *Journal of vision*, 14(4), 12, 2014.
- [2] H. Komatsu and N. Goda.: Neural Mechanisms of Material Perception: Quest on Shitsukan, *Neuroscience*, 392, pp. 329–347, 2018.
- [3] Katz, D.: *The world of touch*. (L. E. Krueger, Ed.), Lawrence Erlbaum Associates, New York, 1989.
- [4] Tiest, W. M., Kappers A. M.: Tactile perception of thermal diffusivity, *Attention, Perception & psychophysics*, 71(3), pp. 481–489, 2009.
- [5] Cotter, J. D., Taylor, N. A. S.: The distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed humans, An open-loop approach. *J. Physiol.* 565, pp. 335–345, 2005.
- [6] Schlader, Z. J., Simmons, S. E., Stannard, S. R., Mündel, T.: The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behavior, *Physiol. Behav.* 103(2), pp. 217–224, 2011.
- [7] Ho, H.-N.: Material recognition based on thermal cues: Mechanisms and applications, *Temperature*, 5(1), pp. 36–55, 2018.
- [8] 濱口美月, 溝口泉, Ho Hsin-Ni, 梶本裕之: 環境温度が温度情報による材質識別に与える影響, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2024.
- [9] 濱口美月, 溝口泉, Ho Hsin-Ni, 梶本裕之: 環境温度が温度情報による材質識別に与える影響(第2報), ロボティクス・メカトロニクス講演 2025, 2025.
- [10] Ho, H.-N and L. A. Jones, "Material identification using real and simulated thermal cues," *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2462–2465, 2004.
- [11] Crucianelli, L., Enmalm, A., Ehrsson, H. H.: Probing interoception via thermosensation: No specific relationships across multiple interoceptive sub-modalities, *BioRxiv*, 03, 2021.