

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11994

研究課題名（和文）温度感覚の時間・空間分解能の解明とその工学的応用

研究課題名（英文）Elucidation of temporal and spatial resolution of temperature sensation and its engineering applications

研究代表者

佐藤 克成（Sato, Katsunari）

奈良女子大学・工学系・准教授

研究者番号：00708381

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、2次元の温冷分布刺激デバイスの設計指針を得るために、人の温冷感覚の時間分解能を評価した。得られた知見の工学的応用として、複数のペルチェ素子をマトリクス配線した温度分布刺激デバイスを試作、温度刺激の時空間パターンが触感提示に有用であることを確認した。また、フレキシブルペルチェの試作を行い、その有用性と課題を明らかにした。さらに、人の温冷感覚の時間分解能の評価結果に基づき、音声信号として振動と温度の情報を伝達可能なシステムを構築、温冷感覚の知覚特性に関して本研究から得られた知見の有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示した人の温冷感覚の時間分解能は、人の触知覚メカニズムのさらなる解明に貢献することに加え、温度分布刺激デバイスや温冷感覚の伝達システムなどの設計指針として活用される。これは、従来の視聴覚情報を扱うメディアに触覚の要素が加わる身体性メディアの発展や、温冷刺激を用いたヘルスケア機器の発展を促す成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, the temporal resolution of human temperature sensation was evaluated in order to obtain design guidelines for a two-dimensional temperature distribution stimulation device. As an engineering application of the obtained findings, we fabricated a prototype temperature distribution stimulation device with a matrix wiring of multiple Peltier elements and confirmed that the spatiotemporal pattern of temperature stimulation is useful for tactile sensory presentation. In addition, a prototype of a flexible Peltier device was fabricated, and its usefulness and issues were clarified. Furthermore, based on the evaluation results of the temporal resolution of the human sensation of temperature, we constructed a system that can transmit vibration and temperature information as audio signals, and demonstrated the usefulness of the findings from this study with regard to the perceptual characteristics of the sensation of temperature.

研究分野：人間情報学

キーワード：温度感覚 時間分解能

### 1. 研究開始当初の背景

温冷刺激デバイスは、バーチャルリアリティなど身体性メディア技術における感覚のフィードバックとして、また体温調整を助けるヘルスケア機器への搭載を目指して、研究開発が進められている。現状は、ペルチェ素子やフィルムヒータ（電熱線）、導電性布など、デバイス全体の温度が一樣に変化する1次元的な温冷刺激のデバイスが主である。しかし、複数箇所を異なる温度に制御する2次元の温度分布刺激を行うことにより、提示される温冷感覚の自由度が向上するだけでなく、刺激提示が効率化するという利点が指摘されている。そのため今後は2次元の温冷分布刺激デバイスへの発展が期待されている。温冷分布刺激は、従来の1次元的なデバイスを複数並べることで達成できるが、この方法は配線や制御、メンテナンスの煩雑さがあり実用的ではない。

温冷分布刺激デバイスの効率的な実現には、人の温冷感覚の知覚特性に関する知見とそれに基づく設計が必要となる（図1）。例えば2次元の視覚刺激を行うモニタは、視覚の時間分解能から表示される画像の更新周期が、また視覚の空間分解能から光素子の配置・配線が設計されている。温冷刺激デバイスも同様に、人の知覚に基づく設計により、2次元刺激を効率良く実現可能と考える。例えば、LEDによる2次元分布表示のように、温冷刺激素子のマトリクス配線・制御を行うことが想定できる。しかし、温冷感覚の時間的・空間的な特性は十分に解明されていない。時間分解能は、皮膚温度を閾値以上の振幅で周期的に変化させる必要があるが、研究代表者が実施した過去の研究では1 Hz までの評価が限界であった。また空間分解能は、温冷感覚は圧力刺激の影響を受けるため、複雑な曲面形状である皮膚表面に沿って刺激素子を配置する必要がある。しかし従来の素子は硬く平らであるため、従来は皮膚表面の平面に近似できる範囲を中心に評価されていた。

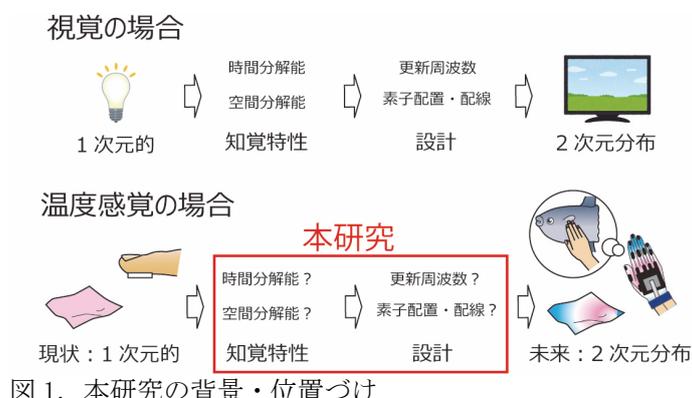


図1. 本研究の背景・位置づけ

### 2. 研究の目的

本研究は、温冷感覚の時間・空間分解能を解明する。これにより、2次元の温冷分布刺激が可能な提示デバイスの設計指針を明らかにする。

### 3. 研究の方法

時間分解能の評価には、研究代表者の提案した空間分割刺激手法を用いる。10mm<sup>2</sup>程度の温冷刺激素子を隣接させて皮膚に刺激した場合、人はそれぞれの刺激を区別できず、錯覚的に1つの刺激として知覚する。この特性を活用し、異なる皮膚部位に接する隣接した素子でタイミングをずらした刺激を行う。この場合、同じ皮膚部位の温度を変化させるよりも高速な温冷刺激が可能である。本研究では、この手法を用いて1Hz以上の温冷刺激をバーチャルに実現し、時間分解能を明らかにする。

空間分解能の評価には、研究分担者が開発したフレキシブルペルチェの実装技術を活用する。フレキシブルペルチェは、熱電変換素子が樹脂中に高密度に埋め込まれており、伸縮性があり柔らかく身体に沿って調和する。素子配置の設計も可能であり、この技術を用いて実験装置を構築することで、曲面を有する皮膚表面上における空間分解能を評価する。

さらに、解明した時間・空間分解能の知見に基づき、研究代表者と分担者の実装・制御技術を活用することで、温冷分布刺激を行うペルチェマトリクスを設計・試作する。

評価項目	時間分解能 刺激 → 知覚	空間分解能 刺激 → 知覚
課題	1Hz以上の温度変化刺激	曲面への温度分布刺激
解決	空間分割刺激手法	フレキシブルペルチェ実装技術

図2. 課題と解決法

### 4. 研究成果

#### (1) 時間分解能の評価

女子学生14名を対象として、心理物理学実験の手法である恒常法を用いた閾値評価実験を行った。実験では、温冷交互刺激を用いて、温度の上昇・下降を繰り返す刺激を提示、温度の変化

を知覚できる周波数を評価した。その結果、時間分解能の閾値は0.5Hz程度（図3）であった。また、断続的な温度刺激を提示した際に、連続的に感じる時間分解能を評価した。その結果、温度刺激間の休止時間の知覚刺激時間に対する休止に気づかない時間の限界は、約1倍であることが示された（図4）。

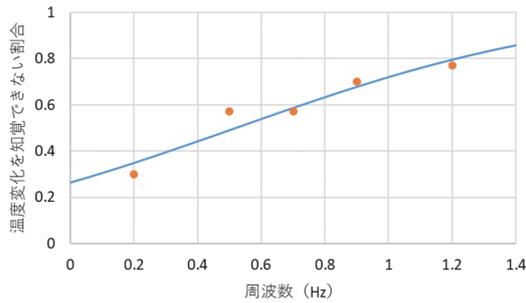


図3. 温度の上昇・下降の周波数と知覚

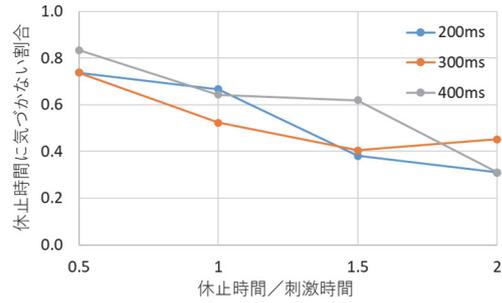


図4. 断続的な温度刺激に対する連続性知覚

## (2) 空間分解能の評価

フレキシブルペルチエを用いた空間分解能の評価については、(3)においても述べる通り、フレキシブルペルチエの接触抵抗の問題が生じたため、硬い平面のペルチエマトリクスを用いて、提示される触感の観点から実施した。ペルチエマトリクスでは、LEDなどのマトリクス制御と異なり、ペルチエ素子は加熱と冷却が必要となるため、横の配線を2本に増やした回路構成とした（図5）。1辺が約8mmのペルチエ素子を用いて、4×4のペルチエマトリクス装置を実装した（図6）。これを用いて、10mmごとに配置した温冷刺激が、湿り感の提示において有効であることを確認した。

水分の広がりや、その境界線の移動、すなわち刺激列の変化として表現した場合と、湿り面の移動、ここでは正方形の刺激領域の移動として表現した場合とで比べた場合、境界線の移動感提示をした場合に、湿り感が有意に増加することを確認した（図7）。現状は平面的なペルチエ素子を用いており、皮膚への接触範囲に限られることや、刺激のパターンに限られているなど課題は残るが、今後の刺激設計により多様な触感再現につながることを期待できる。また、温度ファントムセンセーションの評価を行い、ペルチエ素子の密度低減の可能性を検討した。

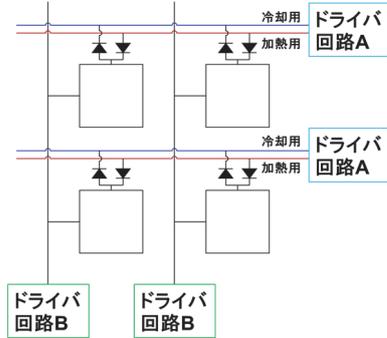


図5. マトリクス回路

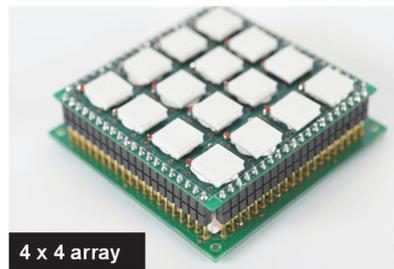


図6. ペルチエマトリクスの試作

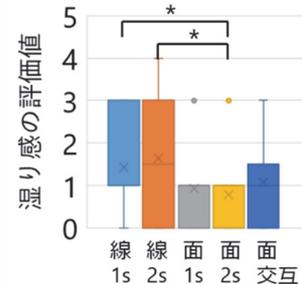


図7. 刺激の空間パターンと湿り感

## (3) フレキシブルペルチエマトリクスの設計・試作

温度提示デバイスに向けて、小型熱電変換デバイスを活用したフレキシブル・ストレッチャブル多点デバイスの開発を進めた。湾曲面に適用するために、微細な熱電半導体チップを高密度実装する。できる限り小さい接合面積の熱電半導体チップを多く実装することで、大きな出力密度や冷熱特性を得られる。しかし、実験要チップマウンター(奥原電機)を用いた試作デバイス実装の実験結果において、接触抵抗が理想的な値を取ることは非常に困難であり、できる限り接触抵抗を下げるよう半導体を実装することが、研究開発要件となった。

図8は、約20mm角の耐熱基板に、実装面積が約5mm角・15pn対の熱電半導体を高密度実装している(0.5×0.5×1mm)小型デバイスが、6つ実装されている。また、各小型熱電変換デバイスを繋ぐ伸縮性電極は、レーザー加工方法により描画切り抜きし作製した。電極間の伸縮性やギャップエリアなども、今後の熱電変換デバイス実装の開発要件となる。

小型熱電変換デバイスの性能向上や機械的安定性、マイクロプロービングによる短絡や接触抵抗の確認など積極的な研究開発を進めることで、一層の精密化により安定性や特性の向上が課題となる。

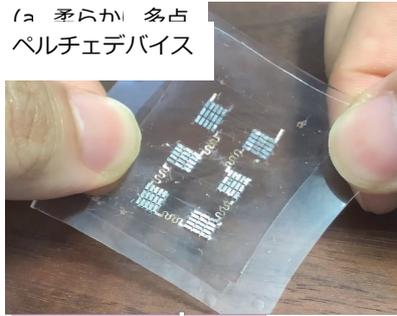


図 8. 試作した小型フレキシブル・ストレッチャブルペルチェ

#### (4) 触感伝送システム

(1) で得られた知見の工学的応用として、音声通信を介して振動と温度の単方向伝達を可能とする試作システムを構築した。

人が知覚する振動は数十 Hz～数百 Hz であり、音声信号の数十 Hz～数十 kHz に比べ帯域が狭い。提案システムではこのことを利用し、温度と圧力の情報を 1kHz～20kHz の帯域でそれぞれ変調することで、音声通信を介した触感伝達を実現する。この際圧力や温度の情報伝達に用いる帯域をある程度限定する必要がある。温度の情報を遜色無く伝達するために必要な帯域は、

(1) の成果より、1Hz 程度と考えられる。また圧力については、金属的な硬さを再現するためには数 kHz の帯域が必要となる一方で、コミュニケーション用途であれば数十～数百 Hz で十分であると考えられる。

開発した単方向システムによって伝達される触感情報が正確さに伝達されることを、正弦波・矩形波的に変化するバーチャルな温度と圧力情報をシステムによって伝達させ、送信側に入力した波形と受信側で計測した波形を比較することで評価した。15kHz の正弦波で変調した圧力情報は比較的ノイズが生じやすいが、4kHz の正弦波で変調した温度情報は、圧力情報に比べ 1/10 以下のノイズとなり、正確に伝達可能であることがわかった (図 9)。

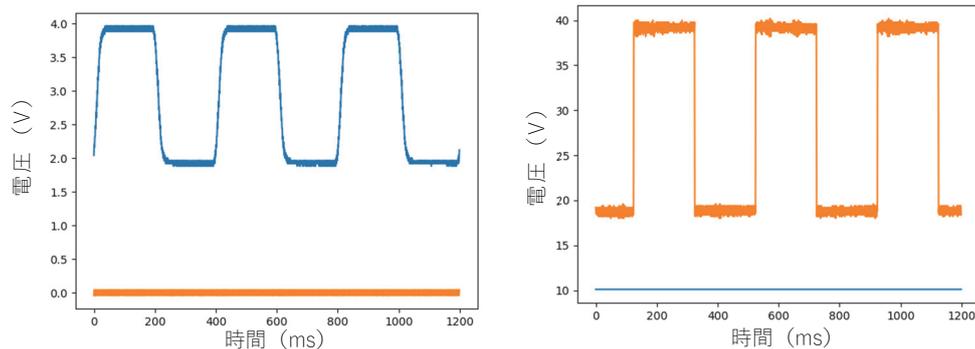


図 9. 伝達システムの評価結果の例：温度の伝達（青色，左）と圧力の伝達（オレンジ色，右）

触感情報の伝達システムを用いて、指や手首に装着する装置を設計・実装した (図 10)。男女 17 名を対象として Zoom を介した触感伝送の予備評価の結果、全員が問題なく装着でき、刺激を知覚できることを確認した。

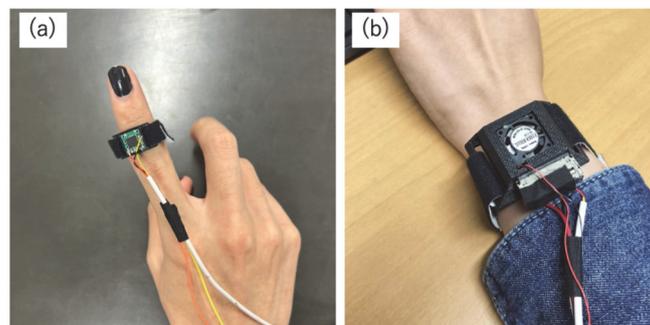


図 10. 触感伝達装置：(a) 指に装着する触感計測装置 (b) 手首に装着する触感提示装置

以上より本研究では、人の温冷感覚の時間分解能や空間分解能を評価、温冷感覚の知覚特性に関する知見を明らかにし、2次元の温冷分布刺激が可能な提示デバイスの設計指針を得た。また、その知見の工学的な有用性を触感伝達システムの実装を通して示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 菅原徹、和泉慎太郎、佐藤克成、伊藤雄一、伊庭野建造	4. 巻 33
2. 論文標題 次世代IoT社会に資するフレキシブル熱電変換デバイスと温冷提示技術の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 クリーンテクノロジー	6. 最初と最後の頁 30-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Katsunari Sato, Jun Wada, Ryota Amakawa
2. 発表標題 ThermoPhone: Transmission of Thermal and Vibrotactile Information through an Audio Call System
3. 学会等名 Asia Haptics 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土岐朱音, 佐藤克成
2. 発表標題 温度PhS刺激を用いた痒み抑制デバイスの検討
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菅原 徹  (Sugahara Tohru)  (20622038)	京都工芸繊維大学・材料化学系・教授    (14303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------