

アルコールの揮発を利用したユビキタスな冷感提示

○浜崎 拓海（電気通信大学），高見 太基（電気通信大学），牛山 奎悟（電気通信大学，日本学術振興会），溝口 泉（電気通信大学），梶本 裕之（電気通信大学）

ALCool: Utilizing Alcohol's Evaporative Cooling for Ubiquitous Cold Sensation Feedback

○ Takumi HAMAZAKI (UEC), Taiki TAKAMI (UEC), Keigo USHIYAMA (UEC, JSPS), Izumi MIZOGUCHI (UEC), and Hiroyuki KAJIMOTO (UEC)

Abstract: Tactile technologies are important for novel user experiences. Among several tactile submodalities, cold sensation is essential for realistically portraying materials and environments. However, current cold presentations such as Peltier devices face challenges like low energy efficiency and the need for complicated equipment. Addressing these, we suggest leveraging alcohol's endothermic property during vaporization. Our prototype, a wristwatch wearable with a fan and vibrator, capitalizes on alcohol's high volatility by absorbing ambient heat upon evaporation. The device further enhances the cooling effect by circulating air around the skin. It offers advantages over Peltier devices in power efficiency, compactness, and multifunctionality like vibration and wind. Using alcohol as a cooling method was not considered conventional, but social change after COVID-19 enabled ease of procuring a tiny amount of alcohol.

1. はじめに

温度感覚は VR 環境の再現や、物体の質感の再現、情報の通知、感情の喚起など多岐にわたる用途で使用されている。温度感覚には温覚と冷覚の二つの感覚が含まれている。温覚の提示は、電気エネルギーを直接熱エネルギーに変換する性質上容易であり、様々なデバイスに導入することが可能である。しかし、熱力学第二法則よりエネルギーは高い温度から低い温度に流れるため、冷覚の提示には、高い電力や大掛かりな装置が必要とされる。そのため、本論文では温度感覚のうち冷覚提示のみに焦点を当てた。

ペルチェ素子^[1]や、水流^[2]といった現行の冷覚提示手法にはこれらの問題が常に付きまとう。近年、皮膚の神経や受容体を直接刺激する電気刺激^[3]や化学物質を用いること^[4,5]で低電力で小型な冷覚提示手法を提案されているが、これらの手法は特別な装置や専門的知識を必要とし、一般的な利用は難しいという問題がある。

この問題の解決策として我々はアルコールの揮発熱の吸熱性を利用した冷覚提示手法を提案する。この取り組みの一例としてファンと振動子を搭載した腕時計型のウェアラブル触覚提示デバイスを開発した。アルコールは揮発性が高く、気化する際に周囲の熱を吸収する性質がある。本デバイスはファンにより皮膚周辺の空気を循環させることでアルコールの冷却効果を増強させ、長期的な冷却を可能とする。また、ペルチェ素子と比較し省電力に冷覚を提示できるだけでなく、コンパクトに振動や風も提示することができる。

アルコールを塗布することで冷たく感じるの是一般的な経験であるが、冷覚提示のために利用することは、従来考えられていなかった。しかしながら、COVID-19後の現在、消毒用のアルコール製品の普及から、わずかなアルコールを用意することは極めて容易となっている。本稿ではプロトタイプの作成及び皮膚温度の計測、アルコールの冷却増強効果の持続時間の検証を行

い、提案の有効性を確かめた。

2. 実装

2.1 ハードウェアデザイン

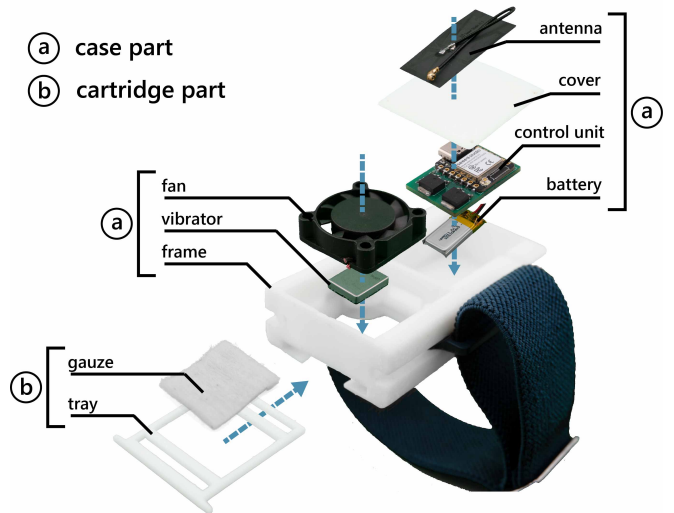


Fig.1 Device Configuration.

作成されたデバイスは Fig.1 のように主にケース部とカートリッジ部の 2 つのコンポーネントに分かれる。ケース部はファン (PENGLIN 2PCS 2510) と振動子である linear resonant actuator (ニデックプレシジョン株式会社 LD14-002)、コントロールユニット (XIAO ESP32S3)、およびバッテリー (DATA POWER TECHNOLOGY 400mAh) によって構成されている。一方、カートリッジ部にはアルコールを補給するためのガーゼが添えられ、これをケース部に挿入する。このデバイスはバッテリー駆動であり、スマートフォンやスマートウォッチ、VR ヘッドセットとワイヤレス通信することが可能である。風の出力や帯域幅を犠牲にすることなく、このデバイスは腕時計サイズ (約

35(65(15 mm) で設計されており、総重量は 52 g 未満としている。さらに、消費電力は振動子 1.2 W, ファン 0.35 W, 計 1.55 W 以下としている。冷覚提示を行う場合は、ファンを駆動するときに必要な 0.35 W のみを使用する。

本デバイスの刺激範囲は 25 mm 四方である。同程度の大きさの一般的な 20 mm 四方のペルチェ素子 (TEC1-03103 など) の消費電力は少なくとも 11.5 W のため、約 1/30 の電力で冷却感が得られる。同程度の刺激サイズで電力を合わせた場合の冷却性能については 2.2 の項で述べる。

2.2 計測 1: 冷却性能の比較

我々はプロトタイプであるアルコールを用いたウェアラブルデバイスの冷却能力を評価した。参加者の利き手と逆の手首の甲側にサーミスタ (SEMITEC, 103JT-025) を貼り付け、皮膚表面の温度低下量を記録した。カートリッジ部のガーゼには WHO が手指消毒用の濃度として定めた 80 vol% のエタノール精製水^[6]を 0.3 g 含浸させ、ケース部に挿入した。挿入後、180 秒間デバイスを駆動させ、計測を行った。計測の条件は Table.1 に示すとおりである。C2, C4 のように皮膚と反対向きに風を送ることで冷却可能であれば、冷覚を腕に提示するだけでなく腕以外の箇所に風を送ることができる。香水を用いたユースケースでは腕の冷覚提示とともに匂いが付与された風を顔に送ることで嗅覚提示と触覚提示を同時に行い、リラックスさせることを想定しているため、反対向きに風を送る条件を計測条件に加えた。デバイスに使用しているファンのサイズが 25 mm 四方であるため、C6(20 mm 四方), C7(30 mm 四方) のようにサイズの大小が異なるペルチェ素子よりも優れた冷却を実現できている場合、提案手法の優位性が示される。デバイスはファンのみの動作で、全ての条件下で電力をファンの動作電力である 0.35 W に統一して動作させた。計測は著者を含む 3 名の参加者で行い、各条件の間に皮膚温度が元に戻る時間を確保した。室温は 25°C, 湿度は 60% に統制した。

Fig.2 は各冷却条件における皮膚温度低下量を示している。C1, C2 のようにアルコールが塗布され、風が吹くことで、他条件と比較し、皮膚温度が大幅に低下している。C1 は風が皮膚の方向に送られるため、C2 よりもわずかに冷却効果が高い。しかし、C2 でも C1 と同等の冷感を腕にもたらすだけでなく、腕以外の部位にも風を送ることができることが示されている。C1 と C3 や、C2 と C4 のように風の向きが同じでも、アルコールの有無により、最大温度低下量が約 7 倍異なる。一方、C1 と C5 のようにアルコールを塗布しても、送風の有無によって、最大温度低下量が約 14 倍変わる。これは、アルコールとファンを組み合わせることで、冷却能力が大幅に向上していることを示している。ファンのみの駆動 (C3, C4) の冷却能力はサイズの大きいペルチェ素子である C7 と同程度で、サイズの小さい C6 には及ばなかった。しかしながら、アルコールが塗布されることで C6 よりも強い冷覚を長時間提示できている。そのため、我々のプロトタイプであるアルコールを用いたウェアラブルデバイスの冷却能力は、ペルチェ素子よりも優位なものであることが示された。

Table 1 Conditions for Evaluating the Cooling Capability of the Wearable Device.

	Cartridge Presence	Wind Direction	Additional Info
C1	True	Towards	-
C2	True	Away	-
C3	False	Towards	-
C4	False	Away	-
C5	True	None	No wind delivered
C6	-	-	Using 20 mm square Peltier element
C7	-	-	Using 30 mm square Peltier element

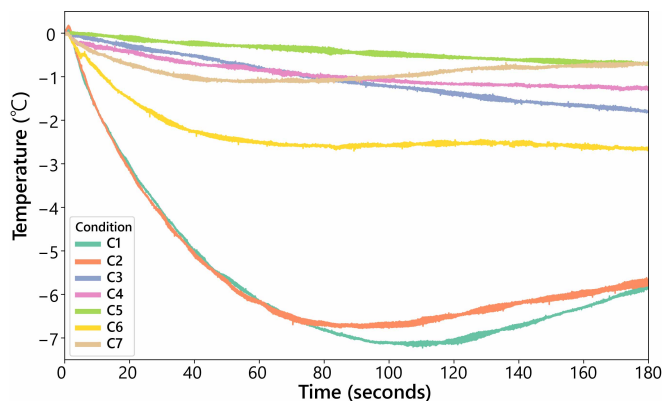


Fig.2 Amount of skin temperature decrease for each cooling condition.

2.3 計測 2: 冷却強度の制御

次に我々は冷覚の強弱を PWM 制御を通して調整することが可能であるかを検証する。2.2 と同じく、皮膚表面の温度変化を計測することで評価を行った。手順も 2.2 と変わりはないがこの計測ではファンの冷却強度を PWM 制御により調整した。具体的には、PWM の duty 比をそれぞれ 100%, 50%, 25% に設定し、ファンの強さを大, 中, 小とした。この 3 つの設定を用いて、それぞれの冷却効果を皮膚表面の温度変化により比較した。室温は 25°C, 湿度は 60% に統制した。

Fig.3 はファンを制御する PWM 制御の duty 比における皮膚温度低下量を示している。ファンの送風の強さと冷却の強さが一致しているため、PWM 制御を通して冷覚の制御も可能である。duty 比 100% の条件は Table.1 の C1 と同様であるが、低下量の最大値が異なる。この結果は、人間の体温は時間や環境によって変化し続けるため、一定の低下量ではなかったと考えられる^[7, 8]。

3. 実験

アルコールの揮発性により、皮膚に塗布した後での冷却効果は時間とともに失われると考えられる。この問題を明らかにするため、アルコールを使用した冷却がどれほどの期間、効果を保持するかを調査した。実験では、参加者にデバイスを装着させ、指定された時間が経過した後、送風を行い感覚の変化を観察した。この結果、アルコールの補充の頻度を明らかにする手がかりを得ることを期待する。

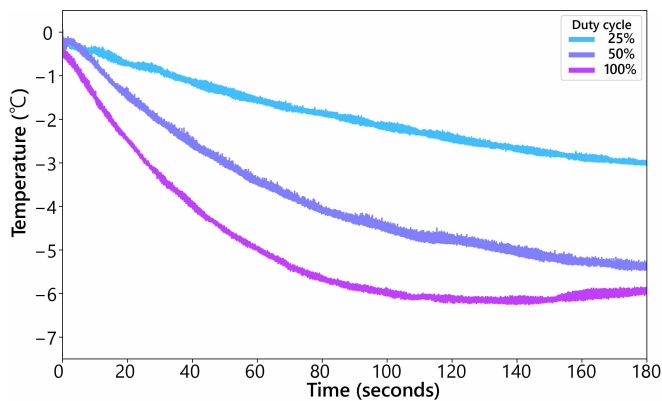


Fig.3 Skin temperature decrease during alcohol application at the duty ratio at which the fan is driven.

3.1 条件

本実験ではアルコールの塗布時間を 15 分、30 分、60 分、120 分の 4 つの条件で検証した。

3.2 実験装置

我々のウェアラブルデバイスの簡易版が使用された。この装置は実験者がボタンを押してファンが駆動するタイミングをコントロールできるようにしたものである。

3.3 参加者

参加者は 21 歳から 46 歳の男性 6 名女性 2 名の参加者が当地の教育機関から募集された。アレルギーを報告した参加者はいなかった。

3.4 手続き

実験は 1 日で行い、実験条件は順序効果を除外するため、参加者ごとにランダムに設定した。そのため、各参加者は計 4 回の試行を行った。参加者は非利き手側の腕にデバイスを装着し、アルコール入りカートリッジがデバイスに取り付けられた状態で所定時間、屋内で過ごした。この間、実際の使用を想定し、デスクワーク等の過度に身体を動かさない行動が許可された。カートリッジ部のガーゼには WHO が手指消毒用の濃度として定めた 80 vol% のエタノール精製水^[6]を 0.3g 浸透させ、ケース部に挿入した。所定時間経過後、風を皮膚側に向け、30 秒間デバイスを駆動した。参加者はその時の冷覚の強度を 1 から 9 の 9 段階リッカートスケール (1:”全く感じない”, 9:”氷のように冷たい”) で回答を行った。続いて、参加者は利き手側 (デバイス未装着の腕) にデバイスを装着した。30 秒間デバイスを駆動し、アルコール未塗布の場合として提案手法の比較対象とした (Fan-only 条件)。各条件間に皮膚温度が元に戻る時間を確保し、室温は 25°C、湿度は 60% で一定に保たれた。

3.5 結果

それぞれの塗布経過時間とアルコール塗布の有無における冷覚の強度を Fig.4 に示す。アルコールを塗布する場合、時間が経過することによって生じる冷覚が単調に減少している。対して、アルコールを塗布しない場合は大きな変化は生じず、一定の冷覚が生起している。得られた回答に対して ART-ANOVA による解析を行った結果、アルコールの塗布の有無に主効果が見られた ($F = 9.7537, Df = 1, p < 0.01, \text{partial } \eta^2 = 0.16601$)。

また、経過時間も同様に主効果が観察された ($F = 20.5535, Df = 3, p < 0.001, \text{partial } \eta^2 = 0.55720$)。加えて、これらの因子間に相互作用も観察された ($F = 15.6067, Df = 3, p < 0.001, \text{partial } \eta^2 = 0.48862$)。全組み合わせに対して Holm-Bonferroni 補正 t 検定を用いた結果、Fig.4 に示すような有意差が見られた。さらに 30 分経過時のアルコール塗布の有無、120 分経過時のアルコール塗布の有無で有意傾向 ($p < 0.1$) が観察された。

実験後の参加者からは、「塗布時間が長くなることで冷覚が弱くなった」、「15 分後、30 分後に生じた冷覚と 60 分後、120 分後に生じた冷覚の強度や質が変わったように感じた」といった結果と一致したコメントが見られた。

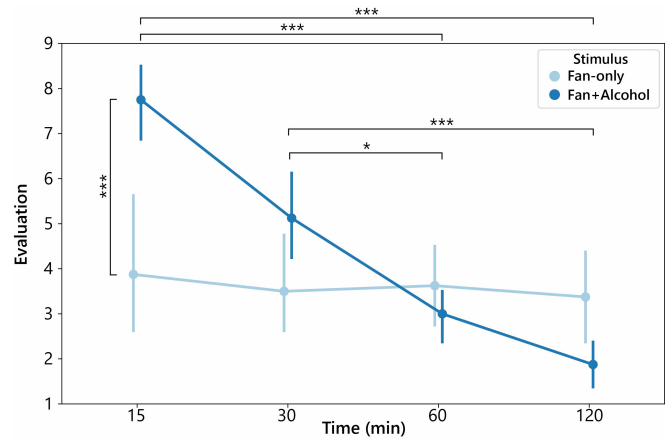


Fig.4 The results from Study (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$).

4. 考察

4.1 アルコールの冷却効果の時間的変化

この実験によって、アルコールの冷却効果が時間経過によって失われることが確認された。一方でアルコールを塗布しない場合、冷覚の回答は時間の経過によらず一定であった。そのため、アルコール塗布の有無と時間経過における相互作用が観察された。この結果は、アルコールが時間の経過とともに皮膚温度により揮発し、徐々に消失していくという特性からも予想される。

4.2 冷却効果の持続時間

アルコール塗布条件 (Fan+Alcohol) の 15 分経過時と 30 分経過時のそれぞれが 60 分経過時と 120 分経過時の間に有意差が認められた。また、30 分経過時のアルコール塗布の有無によって有意傾向が認められた。さらに、参加者からのフィードバックにより、アルコールの冷却効果は 30 分まで持続するが、60 分経過後はアルコール未塗布時 (Fan-only 条件) との差があまり見られないことが示された。このことから、冷却効果が持続する推奨時間は 30 分から 60 の間であると考えられる。

30 分という持続時間は、VR 体験や仕事の休憩時間のような短時間の活動には適しているが、長時間の作業には適していない。より冷却効果の持続時間を増幅させるための手法として複数のガーゼを重ねることや蒸発・放射統合機能性繊維状エレクトロスパン膜のような特殊な素材を使用すること^[9]、デバイス内部にア

アルコールを格納しておくリザーバーを取り付けること^[10]が考えられる。しかし、これらの手法はデバイスのサイズが大きくなってしまったり容易に手に入れることが困難になる可能性があるため、用途に応じて手法を選択することが重要である。

5. アプリケーション

最後に作成したウェアラブルデバイスの用途の一例として図5に示すVRアプリケーションと日常でのアプリケーションの2つのアプリケーションを紹介する。



Fig.5 Application Examples.

(1)VR アプリケーション: 水の魔法を使う。振動子とファンによってよりリアルな体験を提供する。アルコールは揮発するため、体験中に少なくなり、提示される冷覚が徐々に弱くなる。そこで、このデモではアルコールをMPとして表現する。体験の序盤は強力な魔法を放つことができるが、次第にMP(アルコール)が減り、放つ魔法も弱くなる。減ったMP(アルコール)をHMDのパススルーを使用することで現実のアルコールを簡単に補給することができる。MPを補給することで再度強力な魔法が放てるようになる、このようにアルコールによって生じる現象を体験のシナリオとして組み込みこんだ。

(2) 日常的なアプリケーション: 通知の使い分けを行う。振動子(振動)とファン(冷却)のモダリティを使い分けることで通知の種類を変更する例である。プロトタイプのデバイスはスマートウォッチと統合し、通信することで、緊急度に応じて通知方法を使い分ける。緊急性の高いイベントの通知は振動を提示し、屋外の気温が低いことや、天候、アプリケーションの更新といった緊急性の低い情報に対しては冷覚を提示する。

6. おわりに

本論文では、アルコールの揮発熱の吸熱性を利用し、エネルギー効率に優れた冷覚提示を実現する方法を提案した。このコンセプトの具体的な実現例として、ファンと振動子を搭載した腕時計型のウェアラブル触覚提示デバイスを開発した。ペルチェ素子と同じ電力で駆動する条件下で、アルコールとファンの組み合わせは非常に強力な冷覚を生起させることが確認された。実験を通じて、アルコールが皮膚に塗布された後、一般的な小型ガゼでの冷却効果の持続時間が30分以上であることが明らかとなった。

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP20H05957の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Roshan Lalintha Peiris et al.: “ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays”. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA: Association for Computing Machinery, 2017, pp. 5452–5456. ISBN: 9781450346559. DOI: 10.1145/3025453.3025824. URL: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025824>.
- [2] Sebastian Günther et al.: “Therminator: Understanding the Interdependency of Visual and On-Body Thermal Feedback in Virtual Reality”. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '20. Honolulu, HI, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 1–14. ISBN: 9781450367080. DOI: 10.1145/3313831.3376195. URL: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376195>.
- [3] Taiga Saito et al.: “Thermal Sensation on Forehead Using Electrical Stimulation: Thermal Sensation Using Electrical Stimulation”. *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '21. Yokohama, Japan: Association for Computing Machinery, 2021. ISBN: 9781450380959. DOI: 10.1145/3411763.3451724. URL: <https://doi.org/10.1145/3411763.3451724>.
- [4] Jasmine Lu et al.: “Chemical Haptics: Rendering Haptic Sensations via Topical Stimulants”. *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '21. Virtual Event, USA: Association for Computing Machinery, 2021, pp. 239–257. ISBN: 9781450386357. DOI: 10.1145/3472749.3474747. URL: <https://doi.org/10.1145/3472749.3474747>.
- [5] Jas Brooks, Steven Nagels, and Pedro Lopes: “Trigeminal-Based Temperature Illusions”. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '20. Honolulu, HI, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 1–12. ISBN: 9781450367080. DOI: 10.1145/3313831.3376806. URL: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376806>.
- [6] World Health Organization et al.: *Guide to local production: WHO-recommended handrub formulations*. Tech. rep. World Health Organization, 2010.
- [7] Greg Kelly: “Body temperature variability (Part 1): A review of the history of body temperature and its variability due to site selection, biological rhythms, fitness, and aging”. *Alternative medicine review: a journal of clinical therapeutic* 11, pp. 278–93, (Jan. 2007).
- [8] Gregory Kelly: “Body temperature variability (Part 2): Masking influences of body temperature variability and a review of body temperature variability in disease”. *Alternative medicine review: a journal of clinical therapeutic* 12, pp. 49–62, (Mar. 2007).
- [9] Mohammad Irfan Iqbal et al.: “Evaporative/radiative electrospun membrane for personal cooling”. *Nano Research* 16.2, pp. 2563–2571, (2023). DOI: 10.1007/s12274-022-4987-x. URL: <https://www.sciopen.com/article/10.1007/s12274-022-4987-x>.
- [10] Chutian Jiang et al.: “Douleur: Creating Pain Sensation with Chemical Stimulant to Enhance User Experience

in Virtual Reality”. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 5.2, (June 2021). doi: 10.1145/3463527. URL: <https://doi.org/10.1145/3463527>.