



# 舌部電気刺激と嗅覚刺激を用いた 清涼感増強手法の提案

大野雅貴<sup>1,2)</sup>, 田中勲<sup>3)</sup>, 青山一真<sup>4)</sup>, 和田有史<sup>2)</sup>, 鳴海拓志<sup>3)</sup>

Masaki OHNO, Satoshi TANAKA, Kazuma AOYAMA, Yuji WADA, and Takuji NARUMI

- 1) 東京大学大学院学際情報学府 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, masaki@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)
- 2) 立命館大学 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, {m-ohno, yujiwd}@fc.ritsumei.ac.jp)
- 3) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {s.tanaka, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)
- 4) 東京工科大学片柳研究所 (〒 144-8535 東京都大田区西蒲田 5-23-22, aoyamakm@stf.teu.ac.jp)

**概要:** 飲食物の清涼感は、消費者の購買意欲や快感情の向上に寄与し、飲食体験の重要な役割を担う。一方、清涼成分メントールは高濃度で不快感を惹起させるため、濃度増加による清涼感向上には限界がある。本研究では、化学物質に依存しない食品の清涼感増強手法として、舌部電気刺激と嗅覚刺激を併せて呈示する方法を提案・検証した。その結果、舌部電気刺激とレモン香の同時呈示により、口腔内の清涼感が増強して感じられることが示唆された。

**キーワード:** 清涼感, ミント, 辛味, 電気刺激, 電気味覚, Human Food Interaction

## 1. はじめに

ハッカ飴, モヒートのミント, チョコミント味のアイスクリームのように、飲食物における清涼感は味わいを構成する重要な要素のひとつである。また、清涼感は嗜好性や購買意欲にも影響を与えることが明らかになっており、食体験を設計する上でも欠かせない要素として注目されている [1]。一方で、清涼感を惹起させる成分として一般的に用いられるメントールは、高濃度で使用すると不快感や灼熱感を伴う可能性があり、化学物質の濃度を単純に高めることで清涼感を増強する手法には限界がある [2]。そのため、化学物質に依存しないバーチャルな清涼感の増強手法が求められている。

ペパーミントやローズマリーによる清涼感は、TRPM8 と呼ばれるイオンチャネル型受容体が関与している [3]。TRPM8 は温度刺激や化学物質で活性化するポリモーダル受容体で、8°C ~ 28°C の冷刺激のほか、ペパーミントに含まれるメントールによって活性化する。ペパーミントを齧ると口腔内の TRPM8 が活性化され、チャンネル開口に伴う脱分極によって神経発火が誘発される。清涼感が得られる神経生理学的機序が TRPM8 の脱分極による神経発火および神経線維による電気信号の伝達であることを考慮すると、清涼感に関連する TRPM8 が発現する舌部の三叉神経系を直接刺激することで、化学物質を用いずに清涼感を変容させることが可能であると考えられる。

舌部の三叉神経系を刺激する手法として、舌部電気刺激手法が挙げられる。この手法は、舌部周辺に設置した電極と定電流刺激装置を用いて電流密度を操作することで、舌部の三叉神経系を刺激しようとする手法である。この舌部

電気刺激が辛味知覚と清涼感に与える影響を調査した研究では、陽極電気刺激を用いることでトウガラシやワサビの辛味知覚の増強効果が見られたが、ミントの清涼感の増強効果は確認されなかった [4]。清涼感に関する A $\delta$  線維の直径は、辛味知覚の受容体が発現している C 線維の直径よりも太い [5]。梶本らの経皮電気刺激モデルに基づくと、直径の太い神経線維より直径の細い神経線維の方が刺激されやすいため、清涼感に関する直径の細い A $\delta$  線維のみ刺激されなかった可能性は低い [6]。また、口腔粘膜において各感覚に関する神経システムが空間的に密集している感覚点が存在することが明らかになっている。特に、冷涼感を感じられる冷点は、痛覚や圧覚を感じられる痛点や圧点と比較して、密度分布が顕著に低い [7]。すなわち、先行研究で用いた舌部電気刺激手法では、舌部に広く電流を印加することで、清涼感や辛味感覚に関連する広域の神経システムが刺激されている可能性がある。そこで、舌部電気刺激によって惹起された微弱な清涼感をより増強させるための手法について考える。

心理学および食品科学の分野では、口腔内で受容される刺激と嗅覚が皮質で結びつくことで形成される風味知覚を広義の味として捉え、特定の嗅覚刺激と味覚刺激による相互作用を誘発させることで風味を増強させる手法が提案されてきた。この嗅覚刺激によって味覚を増強させる効果は Odour-Induced Taste Enhancement (OITE) と呼ばれる [8]。OITE に関する先行研究では、醤油の匂いによる塩味の増強効果や、バニラの匂いによる甘味増強効果などが明らかになっている [9]。他方、嗅覚刺激と味刺激の情報統合に関わる島皮質は、三叉神経由来の知覚形成にも重要な役割を果たしていること

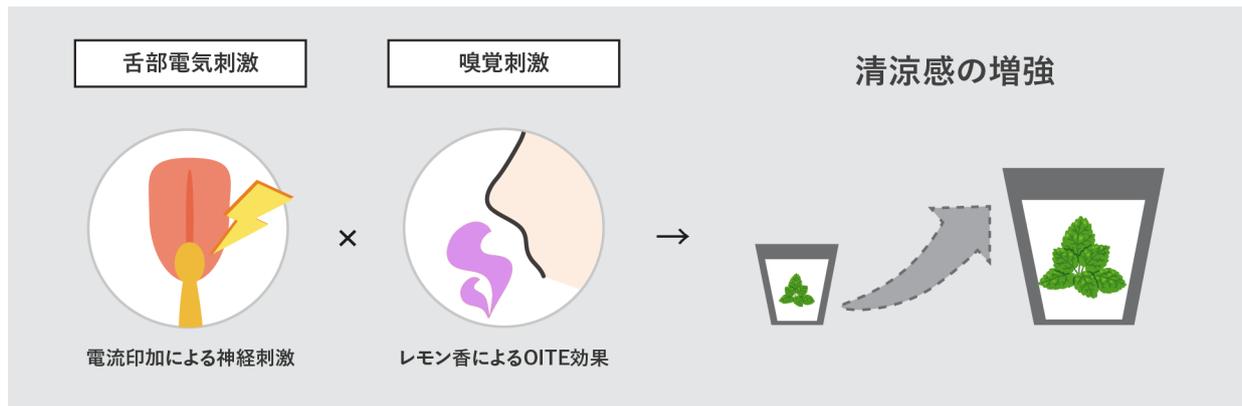


図 1: 本研究で提案する舌部電気刺激と嗅覚刺激を用いた清涼感増強手法

が示唆されている。食品科学の分野ではレモンの香料が清涼感と関連することが知られているため、清涼感の知覚機序においても三叉神経感覚と嗅覚刺激との相互作用がみられる可能性がある [10]。

これらの知見を統合すると、舌部三叉神経への電気刺激による清涼感に関連する神経発火の誘発と、嗅覚刺激の OITE による清涼感覚の増強効果を組み合わせることでより強い清涼感が惹起されると考えられる (図 1)。本研究では、清涼成分を直接添加しないバーチャルな清涼感増強手法の構築を目的として、舌部陽極電気刺激とレモン香の嗅覚刺激を同時呈示することで清涼感を増強する手法を提案する。本稿では、提案手法が口腔内の清涼感に及ぼす影響を検証する実験を行った。

## 2. 実験手法

本実験では、舌部電気刺激と嗅覚刺激の組み合わせによる清涼感の増強効果を検証するため、ハッカ油を含有する試料を口腔内に含んだ状態でユーザーに各刺激を与え、主観的な清涼感を評価する実験を行った。

### 2.1 実験参加者

本実験は 24 名 (21 歳～52 歳, 平均年齢 34.3 歳,  $SD=9.8$ , 男性 9 名, 女性 15 名) の参加者に対して、参加者内計画で行われた。実験参加者はいずれも味覚と嗅覚に異常がなく、ミントを含む飲食物に抵抗感がないことを事前に確認した。嗅覚感度に関連する知見に基づき、実験参加者は 20 歳から 55 歳の間かつ、妊娠中または授乳中の女性以外に限定して募集された [11, 12]。また、全ての参加者には身体に電気刺激を印加することを事前に伝え、同意の上で実験を施行した。本実験はヘルシンキ宣言に基づいて施行された。

### 2.2 システム構成

本実験で使用したシステムは、制御用 PC (Apple, MacBook Pro 13-inch M1 2020)・定電流電気刺激装置・嗅覚呈示装置から構成される (図 2)。

嗅覚刺激呈示は、独自に製作した嗅覚呈示装置と制御用 PC を用いておこなわれた。制御用 PC と嗅覚呈示装置はリアルタイムで接続され、TouchDesigner (Derivative 社) の

専用アプリケーションで刺激パターンを操作した。嗅覚呈示装置は、専用アプリケーションを通じてエアポンプと電磁弁を制御し、任意の匂い源ボトルに空気経路を変更することで、選択的に 2 種類の嗅覚刺激を呈示可能である。ユーザの片側の鼻腔にシリコンチューブを 5.0 mm 程度挿入してテープで固定し、このシリコンチューブから空気に伴って嗅覚刺激を呈示した。また、マニフォールド以降のテフロンチューブ (図 2 の紫線部) に意図しない残香が滞留しないよう、活性炭による消臭済みクリーンエアを嗅覚刺激呈示後に一定時間通気するシステムを採用した。

舌部電気刺激呈示は、定電流型電気刺激装置と制御用 PC を用いておこなわれた。定電流型電気刺激装置は、制御用 PC と光絶縁された状態で接続され、刺激パターンは TouchDesigner の専用アプリケーションで操作した。実験では、参加者の後頸部にシール型電極 (3M, Red Dot) を装着し、舌尖部には洋白金メッキのスプーン (NORITAKE, 12Y/71G) を電極として設置した。これらの電極は定電流型電気刺激装置に接続された。

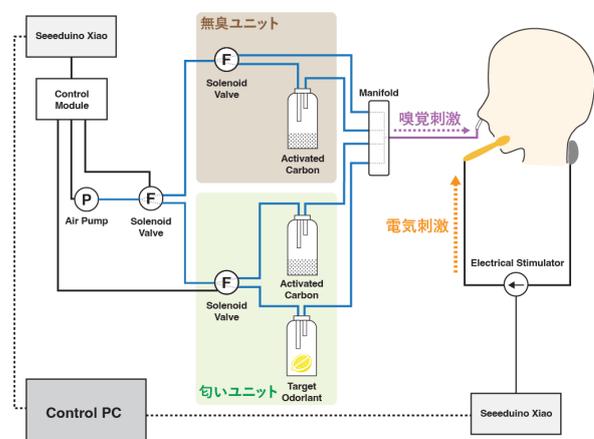


図 2: 嗅覚刺激装置および定電流型電気刺激装置を含む本実験のシステム構成

### 2.3 実験刺激

嗅覚刺激条件と舌部電気刺激条件の組み合わせが異なる4条件を採用した。

- A コントロール条件
- B 電気刺激呈示条件
- C 嗅覚刺激呈示条件
- D 電気刺激および嗅覚刺激呈示条件

嗅覚刺激として、脱脂綿にレモンエッセンシャルオイル（インセント社）を0.08g染み込ませたものをプラスチック製の匂い瓶につめたものを使用した。この匂い瓶に電磁弁を通じて空気を送ることで、ユーザにレモンの香りを呈示した。レモンの香りは、先行研究で清涼感と関連することが示されている[10]。研究室内で実施した予備実験においても、レモンの香りは清涼感との関連性が確認され、一方で辛味知覚とは関連が薄いと評価された。嗅覚刺激を呈示しない条件では、匂い瓶内の活性炭で消臭されたクリーンエアをユーザに呈示した。呈示時間は10sとし、呼吸タイミングを特に指定せず、ユーザには自然に呼吸するように指示した。

電気刺激条件では、電気刺激を呈示しない条件に加えて、最大電流値1.5mAの正の片側矩形波を用いた電気刺激呈示あり条件を設定した。両条件は、共に刺激時間を10sとした。

### 2.4 サンプル溶液

実験で使用したサンプル溶液は、飲料水（日本コカ・コーラ株式会社、い・ろ・は・す天然水）に乳化剤である大豆レシチン（株式会社マルゴコーポレーション、大豆レシチン（顆粒））を溶解後、ハッカ油（有限会社ペパーミント商会、天然ハッカ油）を徐々に加えながら攪拌することで生成した。この溶液には約0.1wt%の濃度でハッカ油を含んでおり、室温（25°）で提供された。

### 2.5 実験手順

実験は参加者内計画で実施した。参加者は開始前に実験についての説明を受け、同意書を記入した。実験開始前に、実験条件を呈示するための各実験装置を参加者の同意の上で設置した。また、電気刺激呈示のため、後頸部をアルコール消毒後にシール型電極を貼り付け、一方の電極には洋白金メッキのスプーンを接続した。また、参加者の利き手には、絶縁のためゴム手袋を装着するように指示した。また、嗅覚刺激呈示用のため、左鼻腔先端部にテフロンチューブを5.0mm程度挿入し、テープで固定した。

本実験の各試行は、準備フェーズ・刺激呈示フェーズ・評価フェーズの3つのフェーズで構成される（図3）。準備フェーズでは、参加者にはハッカ油を含むサンプル溶液15mLを口に含み、続けて金属製スプーンを口腔内に挿入し、スプーンをつぼ部を舌尖部に設置させた。溶液および実験装置が適切に設置されていることを確認後、参加者には10秒間の待機を指示した。待機開始から10秒後に刺激呈示フェーズを開始した。刺激呈示フェーズでは、嗅覚刺激（クリーンエア

またはレモン香）および電気刺激（刺激なしまたは1.5mAの正の片側矩形波）を10秒間呈示した。刺激フェーズの前後3秒間は、活性炭入り匂い瓶を用いたクリーンエアで通気し、意図しない残香の滞留を防止した。刺激呈示後、評価フェーズに移行した。参加者は口からスプーンを出し、溶液を吐き出すように指示された。その後、刺激中に口腔内で感じられた清涼感の強度をVASで評価した。VAS評価タスクでは、左端（0）を「全く何も感じない」、右端（100）を「人生で感じた最大の強さ」として評価を行った。評価後、口内環境を統制するため飲料水（日本コカ・コーラ株式会社、い・ろ・は・す天然水）で口腔内をすすぎ、3分間の待機を指示した。この間、参加者は必要に応じてすすぎや水分補給を自由に行うことが許可された。3分間の待機後、参加者が口腔内の清涼感が完全に消失したと自己申告した場合、次の試行を開始した。清涼感が完全に消失しない場合は追加で待機時間を設け、完全消失が確認されてから次の試行を行った。実験参加者は、嗅覚刺激条件と舌部電気刺激条件の組み合わせが異なる4条件を3回ずつ反復した計12回の試行を実施した。実験全体の所要時間は、平均で約120分であった。

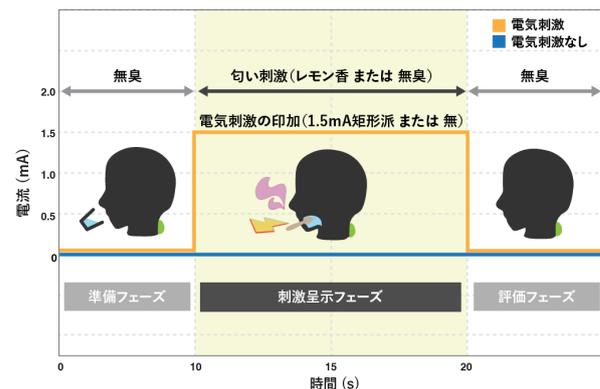


図3: 各試行におけるフェーズ遷移の流れ

## 3. 結果

実験結果を図4に示す。舌部電気刺激および嗅覚刺激の呈示が清涼感の知覚強度に及ぼす効果を評価するため、各実験参加者の主観的な清涼感の評価値の平均を算出した。得られたデータに対して正規性（Shapiro-Wilk test,  $p > .05$ ）および等分散性（Levene test,  $p > .05$ ）、球面性（Mauchly test,  $p > .05$ ）の仮定がいずれも棄却されなかった。この結果を受け、Bonferroni補正を適用したWilcoxon符号順位検定による多重比較を行った。統計分析の結果、コントロール条件と“舌部電気刺激および嗅覚刺激呈示条件”の間でのみ有意差が確認された（ $p = .024$ ）。以上の結果より、メントールを含む溶液を口に含んだ状態で舌部電気刺激とレモン香の嗅覚刺激を同時呈示した場合、ミント様の清涼感が増強して感じられることが示唆された。

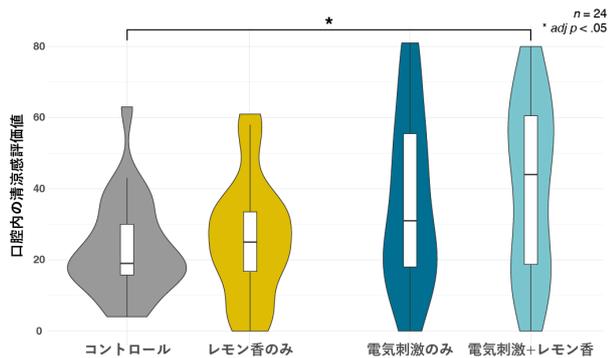


図 4: 各刺激条件における清涼感の評価値

#### 4. 考察

本研究では、舌部電気刺激と嗅覚刺激を用いた清涼感の増強手法の評価実験をおこない、1.5 mA の舌部陽極電気刺激とレモン香の嗅覚刺激を同時呈示した条件でのみ、コントロール条件よりもより強い清涼感が感じられることが明らかになった。舌部電気刺激のみ条件では清涼感の増強効果が確認されなかったことは、著者らによる先行研究の結果とも合致する [4]。これらの結果から、飲食品の清涼感の増強には、舌部三叉神経への刺激に、嗅覚刺激を併せたクロスモーダルなアプローチが有効であることが示された。一方で、提案手法が清涼感以外の知覚に及ぼす影響は本研究では検証されておらず、特に飲食品の味わいに及ぼす影響は今後検証する必要がある。酸味や甘味などの清涼感の評価に関連する味わいへの影響を検討することで、本手法が清涼感増強に寄与した機序に関する考察も深まると考えられる。

清涼感が三叉神経に発現する受容体と嗅覚情報に関連する多感覚的な知覚現象であることを踏まえると、本手法を応用して同じく舌部三叉神経と嗅覚情報に関連するトウガラシやワサビの辛味知覚も増強できる可能性がある。これらの辛味知覚は既に舌部電気刺激による増強効果が確認されているが、ユーザの安全確保のために電流密度の制限を設けるべきであるため、辛味増強の程度が限られている。トウガラシやワサビの辛味知覚に関連する嗅覚刺激を舌部電気刺激と組み合わせることで、電気刺激単体では実現できなかった強度の辛味呈示が可能になると考えられる。

**謝辞:** 本研究は JSPS 科研費 (23H00079, 22K18424, 23KJ0587) 及び、JST CRONOS(JPMJCS24K3) の支援を受けて実施された。

#### 参考文献

[1] Jérémy Roque, Malika Auvray, and Jérémie Lafraire. Understanding freshness perception from the cognitive mechanisms of flavor: The case of beverages. *Frontiers in Psychology*, Vol. 8, p. 2360, 2018.

[2] Bailong Xiao, Adrienne E Dubin, Badry Bursulaya, Veena Viswanath, Timothy J Jegla, and Ardem Patapoutian. Identification of transmembrane domain 5 as a critical molecular determinant of menthol sensitivity in mammalian trpa1 channels. *Journal of Neuroscience*, Vol. 28, No. 39, pp. 9640–9651, 2008.

[3] Andrea M. Peier, Aziz Moqrich, Anne C. Hergarden, Alison J. Reeve, David A. Andersson, Gina M. Story, Taryn J. Earley, Ilaria Dragoni, Peter McIntyre, Stuart Bevan, and Ardem Patapoutian. A trp channel that senses cold stimuli and menthol. *Cell*, Vol. 108, No. 5, pp. 705–715, 2002.

[4] Masaki Ohno, Kazuma Aoyama, Tomohiro Amemiya, Hideaki Kuzuoka, Keigo Matsumoto, Daisuke Mine, and Takuji Narumi. Anodal electrical stimulation enhances the perceived piquancy induced by chili peppers and wasabi. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 134647–134654, 2022.

[5] Eric R Kandel, James H Schwartz, Thomas M Jessell, Steven Siegelbaum, A James Hudspeth, and Sarah Mack. *Principles of neural science*, Vol. 4. McGraw-hill New York, 2000.

[6] Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi. Tactile feeling display using functional electrical stimulation. In *Proc. 1999 ICAT*, p. 133, 1999.

[7] Mamoru Yamada, Juro Maruhashi, and Naoharu Miyake. The distribution of sensory spots on the oral mucous membrane. *The Japanese Journal of Physiology*, Vol. 2, No. 4, pp. 328–332, 1952.

[8] Nizar Nasri, Noelle Beno, Chantal Septier, Christian Salles, and Thierry Thomas-Danguin. Cross-modal interactions between taste and smell: Odour-induced saltiness enhancement depends on salt level. *Food Quality and Preference*, Vol. 22, No. 7, pp. 678–682, 2011.

[9] Charles Spence. Factors affecting odour-induced taste enhancement. *Food Quality and Preference*, Vol. 96, p. 104393, 2022.

[10] DA Zellner and Paula Durlach. What is refreshing? an investigation of the color and other sensory attributes of refreshing foods and beverages. *Appetite*, Vol. 39, No. 2, pp. 185–186, 2002.

[11] Claire Murphy, Carla R. Schubert, Karen J. Cruickshanks, Barbara E. K. Klein, Ronald Klein, and David M. Nondahl. Prevalence of Olfactory Impairment in Older Adults. *JAMA*, Vol. 288, No. 18, pp. 2307–2312, 11 2002.

[12] E Leslie Cameron. Pregnancy and olfaction: a review. *Frontiers in psychology*, Vol. 5, p. 72657, 2014.