



陰極刺激を用いた辛味制御技術の提案

小野有沙¹⁾, 原彰良¹⁾²⁾, 宮本拓¹⁾³⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

1) 大阪大学大学院情報科学研究科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5, <https://www.ist.osaka-u.ac.jp/japanese/>)

2) 脳情報通信融合研究センター (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4, akiyoshi-hara@ist.osaka-u.ac.jp)

3) 株式会社エルシオ (〒 615-8245 京都市西京区御陵大原 1 番地 39 京大桂ベンチャープラザ南館 2204 号, <https://elcyo.com/technology>)

概要: 従来の電気刺激における辛味制御においては、陽極電気刺激を用いているため、純粋な辛味提示を電気味が妨げている可能性がある。これを抑制するに、本報告では、辛味受容体の TRPV1 の発火がカプサイシンと酸に対し相互作用をもつことに着目し、電気味が少ない陰極電気刺激を用いた辛味制御手法を提案する。

キーワード: 電気刺激, 辛味

1. はじめに

VR を用いた外界とのインタラクションを体験するコンテンツは日々増加している。VR のための視覚・聴覚のインタフェースは汎用性が高く図抜けているが、一方で味覚・嗅覚・触覚のインタフェースは限定的である。味覚・嗅覚は特に食事体験の臨場感を向上させるが、食事体験は生存のための行為の枠を超えて娯楽体験へと変容しており、人々からの需要が高い体験である。そのため VR への応用を目的とした味覚に関する研究が進められている [1, 2]。

広義の味覚には辛味が含まれているが、辛味を需要するのは味蕾ではなく、熱に対して反応する侵害受容器 (TRPV1) である。TRPV1 は、唐辛子の辛味成分であるカプサイシンの存在によって、温度刺激に対する感受性が高くなる [3]。またカプサイシンだけでなく、酸も同様に TRPV1 の活性化を促す効果を持っている [4]。このように辛味を受容する TRPV1 の開口には化学物質や温度が深く関わっている。そのため、辛味の再現を行う場合、カプサイシンだけでなく、温度や酸を操作することも有用な手立てであると考えられる。

既存の味覚単体に対する提示手法の多くは、化学物質や温度の拡散現象に基づいている。吉田らはサーマルグリル現象によって辛味を提示した [5]。しかし、ペルチェ素子の温度を整えるのに 30 秒から 2 分程度の時間を要しており、知覚の即時性やダイナミックな変調を要する VR 応用においては十分ではない。また、Ohno らは化学物質を使わずに電気刺激だけで辛味の増強を試みた [6, 7]。前者は非電解質であるカプサイシンを、既存手法と比較して、時間応答性の高い電気刺激で増強した革新的な手法である。しかし舌に対して陽極の電気刺激を行うと、電気味と呼ばれる刺激のある味を呈しやすいことで知られており、この味がカプサイシン由来の辛味の知覚に影響を及ぼした可能性がある [8]。

電気味の発生原因として、電気によって味蕾が刺激されている説と、三叉神経が刺激されている説がある [9, 10]。前

者は、味蕾が刺激されることで、複数の味を知覚したように錯覚した結果、電気味という複雑な味として知覚されるという説である [11]。辛味は基本五味を抑制・増強することが報告されており、両者は相互作用する可能性が高い [12]。三叉神経は TRPV1 を含む侵害受容器が発現しており、触覚の情報を伝達している。この触覚の情報を味の情報として受け取っていることや、三叉神経の神経伝達物質が味覚を伝達する神経に影響を及ぼす可能性があるため、電気味が発生すると考えられている [13]。以上から、電気味が発生すると、TRPV1 を含む辛味の処理工程に影響し、純粋な辛味の知覚を難しくする可能性がある。そこで、純粋な辛味の知覚を観察するために電気味を極力抑えることが望ましいと考えられる。

そこで本研究では、純粋な辛味の制御手法の開発を目的とする。具体的には辛味受容体の TRPV1 の発火がカプサイシンと酸に対し相互作用を持つことに着目し、電気味が少ない陰極電気刺激による酸の電気泳動を用いた辛味制御手法を提案する。

2. 提案手法

これまでに、電気刺激により電解質を泳動させることで、味覚や嗅覚における知覚強度を変調する手法が提案されている [14, 15]。しかし、唐辛子に含まれるカプサイシンを筆頭とした辛味成分は、非電解質であるため、それを電気泳動させることは不可能である。

熱性のある辛味は、カプサイシンと TRPV1 と結合して、痛覚を伝達する三叉神経を刺激することで知覚される。さらに、TRPV1 と酸が結合すると、TRPV1 のカプサイシンに対する感度が高くなり、TRPV1 が通常よりも強く活性化することが知られている [16]。またカプサイシンと酸の両方が存在しているとき、カプサイシンだけと結合したときよりも、低い温度で TRPV1 は活性化する [17]。このように、酸とカプサイシンは両方とも TRPV1 と結合し、かつ

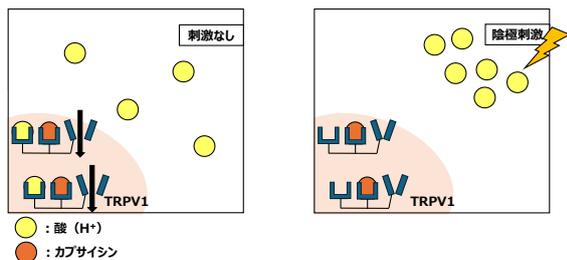


図 1: クエン酸水溶液を含んで口中を陰極刺激したときの酸の電気泳動

共に結合すると相乗効果を起こす。

この知見に基づき、電気刺激を用いて口中の酸の分布を制御することで、舌に分布している TRPV1 周囲の酸濃度を変化させ、発火温度閾値を動的に操作することが可能であると考えられる。味覚における電気刺激は、舌に対する極性で陽極刺激と陰極刺激に分けられる。酸は陽イオン H^+ であるから、陽極刺激をすれば、斥力によって酸は拡散し、陰極刺激をすれば引力によって局所的に集まると考えられる。鍛冶らは、味覚器の構造をミラクリンで変化させ、酸味がありながらも電気泳動によって甘味の変調を知覚させた [18]。本研究でも、酸を TRPV1 の構造変化を起こす触媒として使用し、これを電気泳動させることで辛味の抑制を行う。酸は酸味を呈する物質であるが、酸味として検出される場合は $pH=4$ までであり、TRPV1 が反応する酸濃度は $pH=5,6$ であると報告されている [19, 20]。そのため、理論上は酸味はないが、触覚が刺激される酸濃度を調整することが可能である。

クエン酸水溶液とカプサイシンを口に含んで、舌に対して陰極刺激をしたとき、舌にある TRPV1 周囲の電解質は図 1 のように振る舞うはずである。なぜなら陰極刺激と酸の間には引力が生じるため、電極のほうに酸が引き寄せられるからである。そのため、舌と電極が十分に離れていれば、舌周りの酸濃度は低下する。このとき、カプサイシンがあることで舌の TRPV1 は発火しやすくなっている。そのため電気刺激がなく、口中で酸が分散している状態ならば、カプサイシンと酸の相乗効果によって TRPV1 は開口する。そして陰極刺激があると、酸は TRPV1 から離れるため、TRPV1 はカプサイシンとだけ結合している状態になり、開口状態から開口準備状態へと遷移する。

3. 実験方法

3.1 実験目的

本実験は電気刺激により受容体近傍におけるクエン酸由来の H^+ 濃度を電気泳動によって制御し、辛味知覚の変調の可否を検証するための予備実験として実施された。

3.2 実験デザイン

クエン酸由来の酸味が辛味の判別に影響を与えないようにするため、クエン酸水溶液を極度に薄めることで、酸味を知覚出来ないように調整した。また、辛味の制御が H^+

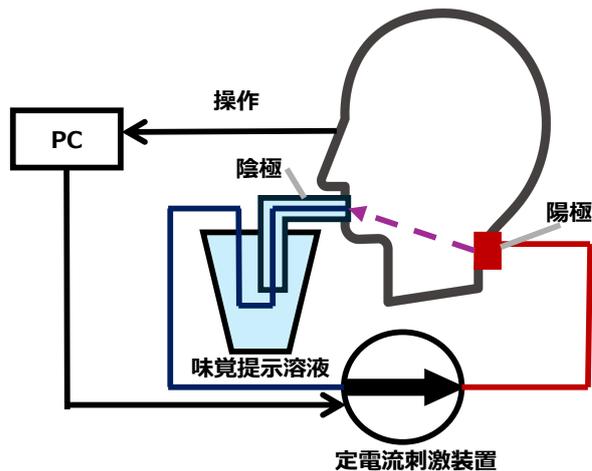


図 2: 実験環境

の電気泳動によって行われることを確認するために、対照実験として TRPV1 の受容体でない NaCl を用意し、それとカプサイシン溶液での実験も行った。NaCl 水溶液もクエン酸水溶液同様に極度に薄めて塩味を出来ないように調整した。

3.3 実験参加者

健康な 20 代の男性 7 名に参加してもらった。実験参加者には事前に実験の目的、手順、データ利用について説明を行った上で、書面による同意（インフォームド・コンセント）を得て実施した。

3.4 実験条件

溶液は、味弁別が不可能な、クエン酸水溶液と NaCl 水溶液の 2 種類を用意した。これらの溶液単体だけを口に含む 2 条件と、カプサイシン溶液を舌中央に塗布したうえで、それぞれの溶液を口に含む 2 条件の、計 4 条件を行った。最初はクエン酸水溶液だけを口に含んで電気刺激を行った。次に NaCl 水溶液だけを口に含んで電気刺激を行った。その次にカプサイシン溶液を舌に塗布して、NaCl 水溶液を口に含んで電気刺激を行った。最後にカプサイシンとクエン酸水溶液を口に含んで電気刺激を行った。これらの条件を行う前には精製水で口内を洗浄した。電極は首の後ろと、溶液を口内に運ぶためのストロー内に設置した。電流を流しやすくするために、実験参加者はスキンピュア（日本光電工業株式会社）で事前に皮膚処理を行った。このとき使用した電気刺激は $0mA \sim -1mA$ の範囲で $0.1mA$ ずつ変更可能な直流電流であった。

3.5 実験装置

実験は図 2 のような構成で行われた。54V の電源を供給された電流回路があり、それが PC からの入力を受けてマイコンの制御のもと電流を調整した。PC を操作するのは実験参加者であった。実験参加者は首の後ろに電極が貼付されており、もう 1 つの電極はストロー内部にあった。実験参加者が電解質を含む水溶液を口に含むことによって、舌に通電する仕組みであった。

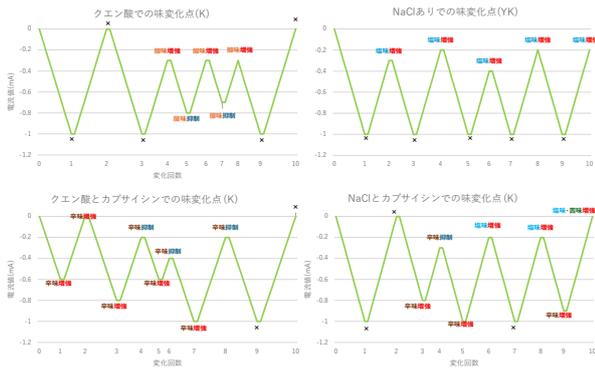


図 3: 4 条件における電流上下法

3.6 実験手続

上下法によって、電流のスイートスポットを探索した。0mA から始めて-1mA の方向へ電流値を 0.1mA ずつ変更し、味の変化があれば、その変化点から 0mA へと戻っていく下降系列と上昇系列のセットを 5 回繰り返した。このとき電流の調整を行ったのは、PC を操作している実験参加者であった。1 条件の開始から終了まで電流が通電し続けるように設計した。また、主観報告の項目選択 (五味と辛味いずれの味が変化したか、増強・抑制どちらか) を実験最中に回答してもらった。また電流値が限界であり、味の変化が起らなかった場合には×と回答してもらった。全ての実験終了後に、実験中特に印象的であったことを自由記述で回答してもらった。

4. 結果

味覚の変化があったという回答は得たものの、一貫した味の増強・抑制の知覚応答は得られなかった。図 3 は実験参加者 7 名のうちの 1 名の 4 条件における上下法の変化点のグラフである。この実験参加者は塩味・酸味・辛味・苦味の変調を回答しており、抑制よりも増強のほうが、頻度が高い。このように増強の回答のほうが、抑制よりも多い傾向は、他の実験参加者でも多く見られた。また、6 種類の味覚の回答が可能であったため、回答する味も各々異なっており、一貫した結果が得られなかった。実験参加者によっては同一の味の増強と抑制を交互に回答することもあった。また、クエン酸との対照実験のために NaCl を用意したが、NaCl 溶液でも辛味の変調を感じた参加者は 7 名中 5 名であった。

また自由記述において、味の増強のほうが回答しやすかったことと、電気味のようなものを感じたことを、複数の実験参加者が回答した。

5. 考察

今回の電気泳動による味覚変調実験の結果で、先行研究と大きく異なるところは、実験参加者の多くが、味の増強を連続して感じていたことである。上下法を用いた先行研究では、上昇または下降系列にて味の増強・抑制を感じたな

らば、その逆系列では逆の変化を感じる事が報告されている。しかし今回の実験では、同一もしくは異なる味の増強を、系列が切り替わっても立て続けに感じている傾向にある。同一の味が増強され続けたことは、抑制を感じられるほどの電流値で刺激出来なかったからではないかと考えられる。この実験では使用できる電流値が、味覚提示電解質の濃度のために、他の電気刺激による味覚変調手法よりも小さく設定されている。そのため、口中の電解質が、電気刺激前よりも有意に局所的に集中することが出来ず、増強・抑制が対照に出現しなかったのではないかと考えられる。そのため、より大きい電流値を使用すれば、舌に対する陰極刺激において、辛味抑制の応答を得られた可能性がある。また、そもそも水溶液中の電解質が非常に少ないため、電気刺激をしても、TRPV1 周りでの電解質の濃度勾配に差が生じなかった可能性がある。

次に、直前の変調とは異なる味の増強が知覚された現象について述べる。この場合直前に増強印象が得られた味の抑制が起こっているはずである。しかし、味の抑制応答は増強応答と比較して非常に少なかった。これは本実験の感覚知覚評定法が、「味が変化したら」その味質を回答させるというものであったことに起因していると考えられる。上記のような聞き方に対しては、ある味の強度変化よりも味質の変化のほうが質問に答えるべき事象であると実験参加者に受け取られかねず、このような曖昧な聞き方をしたことが原因だと考えられる。また、この実験で使用した溶液は味覚検出閾値であり、知覚するのが困難である。そのため、味が増強が知覚しやすかったと考えられる。

また仮説では、酸とカプサイシンは TRPV1 に作用するため、カプサイシン存在下でクエン酸を陰極刺激によって舌から遠ざけたならば、辛味の抑制が起き、一方で NaCl は TRPV1 に作用しないため辛味の変調が起きないとしていた。しかし、実際には参加者の 7 名中 5 名が辛味の変調を回答している。ここで、自由記述において参加者らが電気味のような味を感じたと回答したことから、この味が辛味を増強させた可能性がある。しかし、今回のアンケートには電気味の項目を含めていなかったため、参加者らが電気味をいつ、どの電流値で感じていたのかは不明である。また陰極刺激は陽極刺激と比べて電気味が抑えられるはずである。参加者らは陰極刺激で電気味が起こったとしているが、それが先述したような陽極刺激由来の電気味と同等のものではない可能性がある。そして参加者らの多くが電気味を頻繁に体験しているわけではないため、彼らの答えた電気味は陰極刺激特有のまた別の味であることが考えられる。陽極刺激の実験も行っていた場合には、参加者らは電気味を体験することが出来たため、陰極刺激で答えた電気味という回答が変わった可能性がある。

6. おわりに

今回の実験設計では酸の電気泳動による TRPV1 の発火閾値の動的操作は検証されなかった。しかし、この実験設計

は小さい電流値しか使えず、また味の回答の選択肢が多かったことから、味覚増強の回答が続き、かつ知覚する味覚の分散が大きくなってしまった。この部分の実験設計を調整すれば、検証結果は仮説に近いものになりえる可能性がある。
謝辞:JSPS 科研費 25K21249 による支援を受けておこなわれた。

参考文献

- [1] Kasun Karunanayaka, Nurafiqah Johari, Surina Hariri, Hanis Camelia, Kevin Stanley Bielawski, and Adrian David Cheok. New thermal taste actuation technology for future multisensory virtual reality and internet. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1496–1505, 2018.
- [2] 鳴海拓志, 谷川智洋, 梶波崇, 廣瀬通孝. メタクッキー: 感覚間相互作用を用いた味覚ディスプレイの検討 (lt;特集 gt; 香り・人・システム). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 579–588, 2010.
- [3] Do Hoon Kwon, Feng Zhang, Yang Suo, Jonathan Bouvette, Mario J Borgnia, and Seok-Yong Lee. Heat-dependent opening of trpv1 in the presence of capsaicin. *Nature structural & molecular biology*, Vol. 28, No. 7, pp. 554–563, 2021.
- [4] Stuart Bevan and Pierangelo Geppetti. Protons: small stimulants of capsaicin-sensitive sensory nerves. *Trends in neurosciences*, Vol. 17, No. 12, pp. 509–512, 1994.
- [5] 吉田圭佑, 小川剛史. サーマルグリル錯覚を用いた辛味提示手法に関する検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 3, pp. 189–196, 2018.
- [6] 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. Vol. 10, pp. 134647–134654.
- [7] Masaki Ohno, Kazuma Aoyama, and Takuji Narumi. タバスコ同等の辛味増強感を実現する舌部電気刺激手法の評価. 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 3B2–02. 日本バーチャルリアリティ学会.
- [8] Harry T Lawless, David A Stevens, Kathryn W Chapman, and Anne Kurtz. Metallic taste from electrical and chemical stimulation. *Chemical senses*, Vol. 30, No. 3, pp. 185–194, 2005.
- [9] Shawn L Miller, Natasha Mirza, and Richard L Doty. Electrogustometric thresholds: relationship to anterior tongue locus, area of stimulation, and number of fungiform papillae. *Physiology & behavior*, Vol. 75, No. 5, pp. 753–757, 2002.
- [10] R Grant, MM Ferguson, R Strang, JW Turner, and I Bone. Evoked taste thresholds in a normal population and the application of electrogustometry to trigeminal nerve disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, Vol. 50, No. 1, pp. 12–21, 1987.
- [11] Harry Lawless and David A Stevens. Effects of oral chemical irritation on taste. *Physiology & behavior*, Vol. 32, No. 6, pp. 995–998, 1984.
- [12] Pengfei Han, Lea Müller, and Thomas Hummel. Peri-threshold trigeminal stimulation with capsaicin increases taste sensitivity in humans. *Chemosensory Perception*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–7, 2022.
- [13] Anthony Y Huang and Sandy Y Wu. Calcitonin gene-related peptide reduces taste-evoked atp secretion from mouse taste buds. *Journal of Neuroscience*, Vol. 35, No. 37, pp. 12714–12724, 2015.
- [14] Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Satoru Sakurai, Makoto Mizukami, Taro Maeda, and Hideyuki Ando. Galvanic tongue stimulation inhibits five basic tastes induced by aqueous electrolyte solutions. *Frontiers in psychology*, Vol. 8, p. 2112, 2017.
- [15] Kazuma Aoyama, Nobuhisa Miyamoto, Satoru Sakurai, Hiroyuki Iizuka, Makoto Mizukami, Masahiro Furukawa, Taro Maeda, and Hideyuki Ando. Electrical generation of intranasal irritating chemosensation. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 106714–106724, 2021.
- [16] Torben R Neelands, Michael F Jarvis, Ping Han, Connie R Faltynek, and Carol S Surowy. Acidification of rat trpv1 alters the kinetics of capsaicin responses. *Molecular pain*, Vol. 1, pp. 1744–8069, 2005.
- [17] Eduardo Aneiros, Lishuang Cao, Marianthi Papakosta, Edward B Stevens, Stephen Phillips, and Christian Grimm. The biophysical and molecular basis of trpv1 proton gating. *The EMBO journal*, Vol. 30, No. 6, pp. 994–1002, 2011.
- [18] 鍛冶慶亘, 上野新葉, 青山一真, 中村裕美, 宮下芳明. 電気味覚で甘味を制御する手法. 第 27 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2019) 論文集, 2019.
- [19] Heather N Turner and Emily R Liman. The cellular and molecular basis of sour taste. *Annual review of physiology*, Vol. 84, No. 1, pp. 41–58, 2022.
- [20] Zoltán Winter, Andrea Buhala, Ferenc Ötvös, Katalin Jósvay, Csaba Vizler, György Dombi, Gerda Szakonyi, and Zoltán Oláh. Functionally important amino acid residues in the transient receptor potential vanilloid 1 (trpv1) ion channel—an overview of the current mutational data. *Molecular pain*, Vol. 9, pp. 1744–8069, 2013.