This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2021 年 9 月）

口腔内への電気刺激による辛味の増強効果

大野雅貴 [1)]，青山一真 [2)]，雨宮智浩 [3)]，葛岡英明 [3)]，鳴海拓志 [3)]
Masaki OHNO, Kazuma AOYAMA, Tomohiro AMEMIYA, Hideaki KUZUOKA, 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) 東京大学先端科学技術研究センター（〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, aoyama@cyber.t.u-tokyo.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,
{amemiya, kuzuoka, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp）

概要: バーチャルな辛味操作手法には，食事の満足感向上や塩味増強，辛味の過剰摂取による健康被害抑制が期待できる．食品の呈する辛味を化学物質の添加以外の方法で増強する手法に関する既存研究では，多感覚情報提示による辛味の風味増強にとどまっており，加えて舌を覆う手法を採用しているため，実際の食事シーンを想定した場合に実用的な飲食物の辛味の操作手法は確立していない．本研究ではカプサイシンが呈する辛味に注目し，舌への電気刺激により神経を刺激し辛味を提示する手法の提案と，飲食物の辛味の増強効果を検証する．

キーワード： Human Food Interaction, 末梢神経，味覚ディスプレイ，食体験

1. はじめに

現代における食事は，生きるために必要な栄養素を摂取する行為であると同時に，精神的な満足感を得るというエンタテインメント的役割を担っている．このように食事の役割が変化する中で，計算機を介してより良い食体験を設計する Human Food Interaction（以下，HFI）という分野が注目されている [1].

これまで HFI の分野では，基本五味や風味を操作するインタフェース研究が盛んに行われてきた [2][3]．一方，食体験を設計するにあたっておいしさの構造に注目すると，基本五味（甘味，塩味，苦味，酸味，うま味）に加えて，辛味・渋味なども重要な要素であると指摘されている [4]．中でも辛味は味蕾と呼ばれる基本五味を感じる器官で受容されないため狭義の味覚には含まれないものの，食体験において重要な役割を果たしている．特に香辛料に含まれる辛味物質は世界の四人に一人が日常的に摂取していると言われるほど多くの料理に使用されており，料理に付与すると食事の精神的な満足感や満腹感を向上させる効果がある [5]．また，副腎交感神経を活性化させてアドレナリン分泌を促進し代謝を亢進させる作用や食欲の増進効果，減塩効果など健康的な生活を送る上で多くの効用があることが確認されている [6][7]．しかし，1 日あたり 3g を超えた辛味物質の過剰摂取は，胃食道逆流症を発症させるなど健康面に悪影響を及ぼす [8]．近年日本では食の欧米化が進み，成人の 20% が胃食道逆流症を発症していると推測され，問題になっている [9].

本研究では，辛味物質の過剰摂取を避けながら料理に辛味を付与するため，食品の呈する辛味を化学物質の添加以外の方法で増強するインタフェースの提案と検証を行う．

2. 関連研究

2.1 辛味の受容メカニズム

辛味は，味蕾によって受容される基本五味とは異なるメカニズムで受容されている．辛味物質はその多くが脂溶性であり，舌の上皮細胞を通り抜けて感覚神経終末に発現する受容体が感知している．この受容体の総称を TRP チャネルといい，TRP チャネルに属する複数種類の受容体がそれぞれ異なる辛味物質を受容している．特に，TRP チャネルに属する TRPV1 は唐辛子が含有するカプサイシンをリガンドとして辛味を受容するだけでなく，43 ℃以上の熱や酸，痛み刺激でも活性化するなどヒトの生体センサーとして機能をもつことが知られている [10].

2.2 辛味と辛味の風味

一般的に HFI においては，味蕾によって感じられる基本五味と，基本五味に加えて視覚や嗅覚情報などの多感覚統合によって知覚される風味を区別する．辛味においても，TRP チャネルで受容する「辛味」に加え，香りなどの多感覚情報によって辛味を拡張した「辛味の風味」が存在すると考えられる．例えば，唐辛子は賦香作用が顕著ではなく，TRP チャネルの活性化によって辛味として知覚される．一方で，辛味物質として日常的に摂取するスパイス類の中でも，クローブやミントなどは賦香作用を持ち，TRP チャネルで受容する辛味情報と嗅覚情報を脳内で統合した結果，辛味の風味として知覚される．そのため，本研究では辛味と辛味の風味を区別して扱う．

2.3 サーマルグリル錯覚を用いた辛味提示手法

吉田らは，温冷の急激な勾配から痛みが生起するサーマルグリル錯覚を舌表面に適用し，辛みを錯覚させる手法を提案している [11]．これは辛味受容体の中でも TRPV1 が

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会

痛みを受容する受容体であることを利用し，痛みを感じさせることで辛味を錯覚させる手法である．具体的には，45 ℃と 15 ℃のヒートシンクを交互に配置した装置と舌を接触させることで辛味の提示に成功している．

2.4 電気刺激および温度・嗅覚提示によるクロスモーダル知覚を用いた辛味の風味増強手法

Ranasinghe らは，舌部を電極で挟み込み，温度提示と嗅覚提示を電気刺激と同時に行うことで Spicy や Minty な辛味の風味を増強させる手法を提案している [12]．これは，ある感覚モダリティに対する感覚刺激が同時に与えられた別のモダリティに対する刺激の影響を受けて変化して知覚されるクロスモーダル知覚を辛味に応用した手法である．具体的には，クローブやレモンの香りを提示しながらペルチェ素子による温度提示と電気刺激を行うことで，味覚提示単体と比較して辛味の風味知覚が増強したと報告している．

これらの先行研究は，辛味の生起・辛味の風味増強にとどまっており，ユニモーダルな辛味の増強には取り組まれていない．また，両者とも舌面を電極やヒートシンクで広範囲に覆う必要があるため，事実上咀嚼は不可能で，実際の食事において辛味を増強することは困難である．

3. 提案手法

先行研究では辛味の受容体に注目していたが，本研究ではヒトが辛味を感じる仕組みに注目した．

辛味物質がまず舌に触れると，受容体によって神経発火が惹起される．その後，神経を通じて中枢神経系に情報が伝達され辛味を感じる．この神経発火は電気に関連した現象であるため，神経を直接電気で刺激することで辛味を知覚させることができると考えた．

梶本らは指先の神経を選択的に電気刺激することで触覚を提示する手法 [13] を提案しており，舌内にも辛味を伝達する神経が通っているため，この手法を舌部に応用することで辛味の増強が可能である．また，中村らが提案した「一極型電気刺激」[14] は，身体を電気回路の一部として活用することで口腔内に 1 つの電極のみを設置する電気刺激の手法である．これを応用することで，舌全面を電極で覆うことなく飲食物の辛味を増強することが可能である．

これらから，辛味の受容は神経発火を通じた現象であるため，一極型電気刺激で舌部に存在する辛味受容に関わる C 線維や A δ線維の神経を刺激することで舌部を覆わずに口腔内に辛味を惹起可能で，咀嚼を阻害しない辛味増強インタフェースが実現すると考えた．辛味物質は，最も消費されている辛味物質であり賦香作用が顕著でないカプサイシンに注目した．カプサイシンは辛味受容体である TRPV1 のリガンドであり，C 線維という神経の表皮部に特異的に発現しているため，電気刺激が容易である．

本研究では，カプサイシンが呈する辛味に注目し，一極型電気刺激による舌部に電気刺激を行うことで辛味受容に関わる神経を刺激し，化学物質を添加せずに辛味を増強する手法を提案する（図 1）．

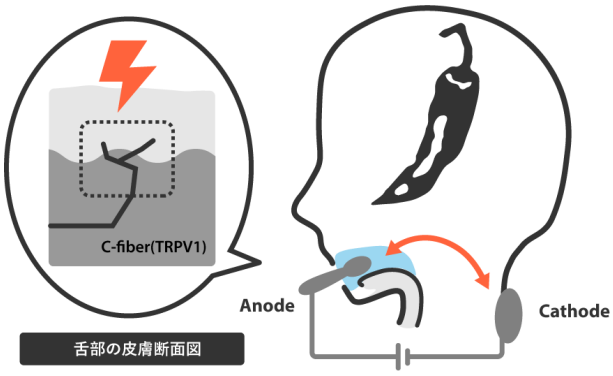

図 1: 一極型電気刺激による辛味増強手法のイメージ

4. 実験

本章では，舌部への電気刺激を用いて飲食物の辛味の増強効果を検証した実験について述べる．実験では，実験参加者は辛味飲料水を口に含んだ上で舌部に電気刺激を 2 条件提示され，どちらがより辛く感じたかを二肢強制選択で回答した．なお，実験は安全面を十分に配慮し，東京大学大学院情報理工学系研究科倫理委員会の承認を受けて実施した．

4.1 実験参加者

本実験は 20 名（20 歳〜35 歳，平均年齢 23.5 歳，男性 9 名，女性 11 名）の実験参加者に対して，被験者内計画で行われた．実験参加者はいずれも味覚に異常がなく，辛味に抵抗感がないことを事前に確認した．また，人体に電気刺激を提示することを事前に伝え，同意の上で実験を施行した．

4.2 システム構成

実験には，自作した定電流型電気刺激装置と金属製スプーン (NORITAKE, 12Y/71G) を用いた（図 2）．定電流型電気刺激装置は，マイコンの SeeeduinoXIAO（Seeed K.K.）を搭載している．定電流型電気刺激装置は制御用の PC（Apple, MacBookPro2019）とシリアル通信を行い，自作アプリケーションを用いて装置から出力する電流値と波形を PC から制御した．

電極は陽極側を金属製スプーンに接続し，陰極側を後頸部に貼り付けた．また，後頸部に貼り付けるシール型の電極はクリアローデ（フクダ電子株式会社）を使用した．実験参加者は金属製スプーンを舌部に接触させることで体内で電気回路を形成することになる．

定電流型電気刺激装置は電流保護のために定電流回路を構築し，さらにその電流源を複製するカレントミラー回路を高耐圧トランジスタで構築した．カレントミラー回路の電流出力部には定電流ダイオードで構築した保護回路を設置した．

また，実験に使用する辛味飲料水には，180 ℃に熱したサラダ油を用いて唐辛子からカプサイシンを抽出した油脂を用いた．カプサイシンを抽出した油脂と飲料水に，乳化剤である大豆レシチンを加えて撹拌することで辛味飲料水を生成した．辛味飲料水は約 0.1%の濃度でカプサイシンが乳化されている．

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会

4.3 実験刺激

本実験では，金属製スプーンを陽極とし，後頸部に貼り付けた電極を陰極とした．実験刺激は，以下の 2 つを設定した．

条件 A. 電気刺激あり（1.5 mA，矩形波）

条件 B. 電気刺激なし

電気刺激を行う条件 A では，1.5 mA の矩形波を用いた．これは，予備実験において舌部に電気刺激を行った際に痛みを感じる直前の電流値であった 3.0 mA の半分の値である．本実験では矩形波を用いるため周波数は考慮していない．

実験では PC 側のアプリケーションから定電流型電気刺激装置を制御し，実験参加者が辛味飲料水を口に含んだ 5 秒後に各刺激を 10 秒間実験参加者に提示した．また，実験参加者が口に含む辛味飲料水は全て同じ濃度のものを使用した．

4.4 評価方法

本実験では電気刺激によって辛味が増強するかを明らかにするため，全ての参加者に対して Two-interval forced choice（以下，2IFC）タスクを課した．参加者は，条件 A・条件 B を両方体験した後に「どちらがより強く辛味を感じましたか？」という質問を提示され,「前者」または「後者」という選択肢のどちらかを強制的に選択する課題を行った．

4.5 実験手順

実験参加者は試行を開始する前に実験についての説明を受け，同意書を記入した．その後，後頸部に電極シールを貼り付け，絶縁のためゴム手袋を装着した．

試行開始後，コップに注がれた辛味飲料水 20 ml を全て口に含み，その後金属製スプーンを舌部に接した（図 2）．カプサイシンは TRPV1 を特異的に活性化させ，TRPV1 が発現する C 線維は舌尖部に局在する [15] ため，金属製スプーンのつぼ部全面を舌部の先端に配置するように指示した．辛味飲料水と金属製のスプーンを口に含んだことを確認し，5 秒後に条件 A または条件 B の刺激を 10 秒間行った．その後，辛味飲料水を吐き出すように指示し，口内環境を統制するため飲料水で口腔内をすすいだ後，休憩時間を設け，実験参加者の口腔内の辛味が完全に消失するまで待機した．辛味が完全に消失した後に，再度辛味飲料水と金属製スプーンを口に含むように指示し，1 回目の刺激とは異なる実験刺激を 10 秒間行った．辛味飲料水を吐き出した後，再度飲料水で口腔内をすすぎ,「前者と後者を比較してどちらかがより強く辛味を感じたか」を回答する 2IFC タスクを行った．回答が完了し，辛味が完全に消失すると実験参加者は次の試行を開始した．

図 2: 定電流型電気刺激装置と金属製スプーン（上），実験参加者の様子（下）

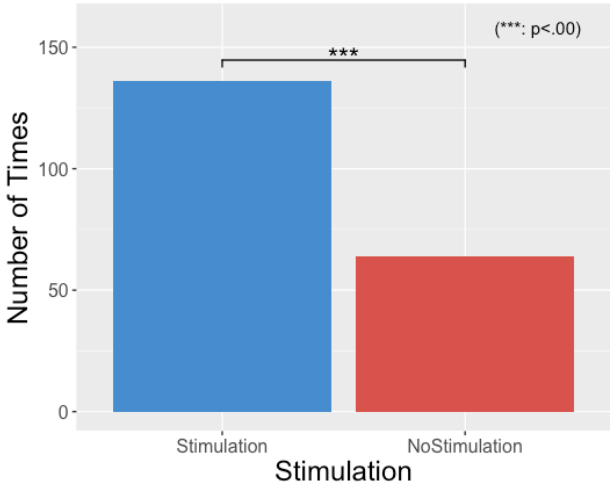

図 3: 電気刺激の有無による辛味評価タスクの結果

以上の試行を 10 試行，5 分間の休憩を挟んで行った．実験参加者間で辛味が消失するまでの時間に差はあったものの，実験全体は平均で約 120 分で行われた．

5. 結果

実験結果を図 3 に示す．実験参加者 20 名が合計 200 試行を行った．より強く辛味を感じた条件を回答した 2IFC タスクの結果，電気刺激を提示した条件 A が 136 回，電気刺激を提示しなかった条件 B が 64 回選ばれた．条件間の辛味評価に偏りが存在するかを調査するために二項検定（両側検定）を行ったところ，有意水準 5%で有意差が認められた（$p < 0.001$）．また，効果量 w は 0.36 で，中程度以上と判断された．

6. 考察

実験結果より，舌部への電気刺激でカプサイシンの呈する辛味を増強できることが示唆された．辛味知覚増強の生起原因として，次の 3 つの仮説が考えられる．

仮説 1. カプサイシンをリガンドとする受容体 TRPV1，または TRPV1 が発現する C 線維を選択的に電気刺激することで辛味知覚が増強された．

仮説 2. 電気刺激により TRPV1 以外の辛味受容体である TRPA1 や TRPM8 などの受容体，及びそれらの受容体が発現する真皮部の C 線維や A δ線維を刺激し，複合的な辛味を感じることで辛味知覚が増強された．

仮説 3. 電気刺激により舌表面上でイオン泳動が引き起こ

ⓒ 2021 日本バーチャルリアリティ学会

され，pH が 6.0 を下回ることで TRPV1 が直接活性化される [16] ため，辛味知覚が増強された．

全試行が終了した後に行った自由記述アンケートにおいて「辛味以外に感じた味や感覚があれば回答してください」という質問項目において，酸味を回答した参加者は 1 名であった．全参加者が 20 名であったことを考慮すると，電気味覚による辛味水溶液の pH 低下に伴う TRPV1 の活性化と，それに準じた辛味知覚増強が生起したという仮説 3 は考えにくい．

TRPV1 は舌部の表皮部分に存在し，TRPA1 や TRPM8 は真皮部分に存在することが多い [17] ため，本実験の電気刺激によって表皮に存在する TRPV1 及び C 線維を刺激している可能性は高い．一方で，本実験では TRPV1 に関係する神経や受容体のみを選択的に刺激できていない．そのため，本実験では表皮部の C 線維だけでなく，真皮部の C 線維や TRPA1，また TRPM8 が発現する A δ線維なども同時に刺激し，仮説 1 と仮説 2 が同時に支持されているという可能性も考えられる．もし仮説 2 が支持されるのであれば，TRPA1 や TRPM8 のリガンドを含む溶液を口に含んだ上で本実験と同様の電気刺激を用いることでも辛味の増強効果が生起されると考えられるため，今後検証を行う．

7. まとめ

本研究では，一極型電気刺激によって舌部の神経を刺激し，飲食物の辛味を増強する手法を提案した．定電流型電気刺激装置と金属製スプーンを用いて辛味飲料水の辛味を評価する 2IFC タスク実験を行った結果，舌部への電気刺激によって辛味が増強されることが示唆された．この手法を用いることで，食事の満足感向上や塩味増強，辛味の過剰摂取による健康被害抑制が期待できる．

今回はカプサイシンがリガンドとして機能する TRPV1 及び表皮部の C 線維を対象とした．しかし，前述の通り TRPA1・TRPM8 も辛味の受容に関与している．これらの受容体は真皮部の C 線維・A δ線維という異なる神経に発現しており，これらを通じて得られる辛味はカプサイシンの呈する辛味の質とは異なる．今後は，TRPA1 を活性化させるわさび（AITC）や TRPM8 を活性化させるミント（メンソール）を含みながら電気刺激を用いた際の辛味の増強効果も検証する．梶本らによる触覚提示のための電気刺激モデル [13] によると，電流密度分布と極性を変化させることで神経の種類や方向に応じた選択的な刺激が可能になるため，舌部に応用することで TRPV1・TRPA1・TRPM8 及びそれぞれが発現する神経を選択的に刺激し，異なる辛味をそれぞれ独立に提示する辛味増強インタフェースの実現を目指す．

謝辞　本研究の一部は科学技術振興機構 JST さきがけ（JPMJPR19J1），Canon 財団理想の追求プログラムによる研究助成を受けておこなわれた．

参考文献

[1] Altarriba Bertran, F. et al. : Making sense of human-food interaction. , Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2019.

[2] Miyashita Homei: Norimaki synthesizer: taste display using ion electrophoresis in five gels. , Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2020.

[3] Narumi, T. et al. : Augmented reality flavors: gustatory display based on edible marker and cross-modal interaction. , In Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems, 93-102, 2011.

[4] 栗原堅三: 味覚・嗅覚，化学同人，1990.

[5] 永井成美ら: 香辛料を含むスープの摂取が胃運動と食欲に及ぼす作用. , 栄養学雑誌, 70.1, 17-27, 2021.

[6] 河田照雄: 香辛料辛味成分の機能に関する栄養生化学的研究. , 日本栄養・食糧学会誌, 45.4, 303-312, 1992.

[7] 坂本千科絵ら: 味覚情報伝達への影響が期待される香辛料を用いた料理への減塩効果および添加香辛料の探索方法. , 日本食育学会誌, 12.2, 147-155, 2018.

[8] German Federal Institute for Risk Assessment: Too Hot Isn’t Healthy - Foods with very high capsaicin concentrations can damage health, BfR Opinion, 053, 2011.

[9] 日本消化器病学会: 胃食道逆流症ガイド, 2018.

[10] 川端二功: スパイスの化学受容と機能性. , 日本調理科学会誌, 46.1, 1-7, 2013.

[11] 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, 23.3, 189-196, 2018.

[12] Ranasinghe, N. et al. : Digital flavor: towards digitally simulating virtual flavors., Proceedings of the 2015 ACM on international conference on multimodal interaction, 2015.

[13] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ., 電子情報通信学会論文誌, D 84.1, , 120-128, 2001.

[14] 中村裕美, 宮下芳明: 一極型電気味覚付加装置の提案と極性変化による味質変化の検討., 情報処理学会論文誌, 54.4, 1442-1449, 2013.

[15] 小松偉二ら: ラット三叉神経節における舌機械受容ニューロンの反応特性., 歯科基礎医学会雑誌, 40.3, 179-186, 1998.

[16] Tominaga, M. et al. : The cloned capsaicin receptor integrates multiple pain-producing stimuli., Neuron,21.3,531-543,1998.

[17] Alvarez‐Berdugo, D., et al. : TRPM 8, ASIC 1, and ASIC 3 localization and expression in the human oropharynx. , Neurogastroenterology & Motility, 30.11, e13398, 2018.

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会