



口腔外陽極電気刺激による低濃度食塩水の味覚増強効果の検証

田中壮¹⁾, 鳴海拓志^{1,4)}, 雨宮智浩²⁾, 葛岡英明¹⁾, 青山一真³⁾

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,

{tanakaso, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学情報基盤センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp)

3) 群馬大学情報学部 (〒 371-8510 前橋市荒牧町 4-2, aoyama@gunma-u.ac.jp) 4) JST さきがけ

概要: 口腔内に電気刺激を加えて塩味を増強する手法が提案されてきた。多くの手法が舌に直接電極を接触させる必要があるのに対して、食事体験をなるべく妨げない方法として口腔外の皮膚上に電極を配置する手法が提案されている。しかし、口腔外電極による塩味増強効果は、これまでの研究では 1% 以上の比較的濃い塩味に対する効果しか検証されていない。本研究では、1% 以下の塩味水溶液を口に含んだ状態で口腔外電気刺激を加えた場合に知覚される塩味の濃度と味質を調査した。その結果、低濃度においては金属様の電気味覚が優位になり、塩味増強の効果が得られにくい可能性が示された。

キーワード: 味覚電気刺激, 味覚ディスプレイ, ヒューマンフードインタラクション

1. はじめに

食は健康のみならず、生活の質の向上にも重要な日常体験であり、人間の根幹をなす行為である。そのため、バーチャルリアリティ分野を中心に、食体験を拡張したり、擬似的に再現したりする味覚ディスプレイの研究が盛んにおこなわれてきた。味を提示したり調整したりするディスプレイ技術としては、味物質を直接出力する手法、視覚や嗅覚など他の感覚との相互作用による変調を行う手法、また電気刺激を用いて味覚の生起・抑制・増強を行う手法が提案されている。これらの味覚ディスプレイ技術は、実際の食体験と組み合わせて味を変調させることで、食事を行う際の楽しさや満足感を向上させる効果が期待されるが、その中でも電気刺激を用いる味覚電気刺激は食品側の工夫や大掛かりな装置を必要とせず味覚の調整を行うことができるという点で優れている。

味覚電気刺激のうち、舌の近くに陽極を配置して電気刺激を行う陽極電気刺激では、金属を噛んだような特有の電気味覚を呈することが知られている。他方、舌の近くに陰極を配置して電気刺激を行う陰極電気刺激では、電解質の呈味物質を口に含んだ状態で刺激を行うと、電流印加時に味覚の抑制効果 [1]、電流停止時に味覚の増強効果があることが知られている。陰極電気刺激による味覚増強は、増強効果の持続時間が課題であったが、原ら (2019) は連続矩形波刺激など刺激波形を工夫することで基本五味の持続的な増強が可能であることを報告している [2]。

電気刺激の手法としては、これまで食器型のデバイス等で舌に直接刺激を行うことで電気味覚の生起・抑制・増強を行う手法が多く提案されてきた。これらの手法では、味の変調を行う際には常に電極を舌に配置しておく必要がある。この問題に対し、近年食事時の体験を妨げずに電気刺激を行う手法として、口腔外の皮膚上に電極を配置しつつ舌に

電極を配置する手法と等価な刺激が可能な手法が提案された [3]。Nakamura ら (2021) は、連続矩形波陰極刺激による味覚の増強効果と等価な塩味の増強効果を、口腔外からの陽極刺激により可能であることを示した [4]。この手法は、食事を妨げずに電気刺激による味覚を増強可能である一方で、Nakamura ら (2021) の研究においては実際の食事よりも比較的濃い塩分濃度である 1% 以上の塩分濃度のみで効果の検証がおこなわれているため、実際の食事での有効性は不明である。実際の食体験と組み合わせる場面を考えると、1% 以下の濃度においても増強効果が得られることが望ましい。一方で、低濃度の塩味水溶液の場合、陽極電気刺激では特有の電気味のほうが強く感じられ、電気刺激を行った際の味質が塩味として感じられない可能性がある。そこで本稿では、1% 以下の塩味水溶液において、口腔外電気刺激を行った際に知覚される塩味の濃度と味質を調査する。

2. 実験

2.1 実験方法

参加者は健康な男女 10 名 (男性 9 名, 女性 1 名) であった。全ての実験参加者は実験に関する事前知識を持たなかった。全ての参加者から十分にインフォームドコンセントを得て、同意書に署名をもらった。刺激電流は 1 mA, 3 秒間とした。刺激位置は先行研究 [4] で味覚増強効果が確認されている位置を利用し、陽極を唇の下、陰極を首の後ろとした (図 1)。

実験では、4 種類の濃度の異なる食塩水を口に含んだ状態で電気刺激を印加し、参加者はその時に感じた味の濃度に近いものを 9 つの比較溶液の中から選んだ。また、その時に感じた味質が電気味覚に近いか塩味に近いかを 2 肢強制選択法で回答した。4 種類の水溶液を口に含み、電気刺激を行う試行を 1 セットとし、全部で 4 セット行った。つまり、



図 1: 水溶液を口に含む参加者の様子および電極の配置

参加者は合計 16 回の電気刺激を体験した。参加者は食塩水を口に含むたびに、口の清掃のため水で口をすすいだ。なお、電気刺激時に口に含む水溶液の提示順はランダムであり、一度の電気刺激で評価が難しいと参加者が感じた場合、3 秒間の電流は繰り返し体験できるものとした。また、参加者は、電気味覚が塩味かを判断するにあたって、塩味水溶液を口に含む試行の前に、口に何も含まずに電気刺激を受け、電気刺激単体から得られる特有の電気味覚を体験した。

4 種類の刺激用水溶液の濃度は、0.125%、0.25%、0.5%、1.0%とした。また、9 種類の比較水溶液の濃度は上記の刺激用水溶液の濃度に加えて、対数スケールで等間隔になる濃度になるよう、以下の数式の c に基づいて調整した。 $n = 2, 4, 6, 8$ は刺激用の水溶液、比較用の水溶液両方に使用された。

$$c [\%] = 2^{0.5n-4} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 9) \quad (1)$$

2.2 仮説

1%以下の低濃度水溶液でも、塩味の認知閾を超える濃度、つまり刺激時に口に含む水溶液が 0.25%以上の場合、塩味の増強効果が得られると考えられる。食塩の検知閾は 0.01 mol/L (0.0584%)、認知閾は 0.03 mol/L (0.175%) であるとされている [5]。そのため、検知閾と認知閾の間にある 0.125%では、味があることは認識できても塩味であるとは判別できないと考えられる。一方で、何も口に含まない状態で舌の近くに陽極を配置して味覚電気刺激を行うと、特有の電気味覚が生起される。このことから、検知閾と認知閾の間にある 0.125%においては、電気味覚が塩味より優位となり、塩味の増強効果は得られないと考えられる。他方、認知閾以上の濃度である場合には、刺激前に味質が塩味であると感じられるため、陽極電気刺激により塩味が増強されると考えられる。

2.3 結果

電流刺激時に参加者が感じた塩味の濃さについて、全参加者の 9 段階評価の値を平均した上で (1) 式に従って% 換算を行った。9 段階評価値の平均および、その%換算値を表 1 に示す。それぞれの濃度条件において、元の濃度の 9 段階

表 1: 電流刺激時に参加者が感じた味の濃度

濃度	平均	標準偏差	平均の % 換算値
0.125%	2.60	0.73	0.15%
0.25%	3.70	0.71	0.22%
0.5%	6.10	0.54	0.52%
1.0%	7.93	0.78	0.97%

表 2: 電流刺激時に感じた味質が塩味に近いと回答した割合

濃度	平均	標準偏差
0.125%	0.45	0.37
0.25%	0.50	0.725
0.5%	0.73	0.34
1.0%	0.93	0.12

評価と比較してウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、0.125%では帰無仮説が棄却された ($p = 0.03$)。一方、その他の条件では有意差は見られなかった。つまり、0.125%では電流印加時に口に含んだ水溶液よりも味が濃くなったと評価された一方で、それ以外の濃度条件では味の濃さの変化があるとは言えない結果となった。

電流刺激時の味質を塩味に近いと回答した割合の平均を表 2 に示す。濃度が高いほど、塩味に近いと回答する割合が高くなっている。濃度条件間でフリードマン検定を行ったところ、帰無仮説は棄却され ($p = 0.002$)、濃度条件間で差がないとは言えないという結果となった。一方で Bonferroni 補正のもとで中央値の検定を行ったが、どの条件間にも有意な差は検出されなかった。

2.4 考察

電流印加時に参加者が感じた味の濃度は、0.125%以外の条件においては、口に含んだ元の水溶液の濃度とほとんど変わらないという結果となった。1%以下の低濃度の水溶液では、1 mA の口腔外陽極電気刺激によって明確な増強効果を呈示することは難しいことが明らかとなった。Nakamura ら (2021) が行った先行研究 [4] では、同じ電極位置で 1 mA の刺激を行った際に 1%の食塩水に対して増強効果が確認されているのに対し、その結果と反して 1%の条件でも増強効果が確認されなかった。これは参加者が感じた塩味の濃度を測る手法が異なったことが原因と考えられる。Nakamura ら (2021) は、参加者自身が元の水溶液に対して水や高濃度の水溶液を使って調整することで電流刺激時に感じた塩味濃度を計測した [4]。しかし、1%以下の低濃度の水溶液においては、溶質の絶対量が少ないため、調整法によって正確な濃度を計測することは困難であると考えられる。本研究ではそのような判断から、今回の実験では予め濃度調整済みの 9 種類の濃度から近いものを選択する手法をとった。し

かし、9種類から選択する仕組みを取ったことで、元の水溶液の濃度がわからない状態となり、選択の難易度が上がってしまった可能性がある。実際、自由回答のアンケートにおいて電流印加時に味が濃くなった感覚を報告していた参加者も、9段階の選択では必ずしも元の水溶液よりも濃い水溶液を選択していなかった。

また、電流印加時に舌先において味が濃くなった印象を感じたものの、舌全体の印象ではあまり変化が感じられなかったと回答する参加者もいた。本実験で用いた電極位置は、口の中に何も含まない条件下では舌先部分に電気味覚を呈する傾向が確認されている [3]。陽極電気刺激による塩味増強のメカニズムを説明するものとして、塩味を呈する Na^+ イオンが電流の向きに応じて舌上を泳動して舌周辺のイオン濃度が高くなるという仮説と、陽極電気刺激による電気味覚が様々な味質を含むことで確率共鳴と同じような仕組みで塩味が増強されるという仮説がある [4]。これらの仮説と、陽極電気刺激により生じられる味覚の位置を考慮すると、口腔外陽極電気刺激で起こる塩味増強は、電極配置により舌上の全体ではなく局所で起こる効果であると類推できる。このことから、低濃度水溶液においては、局所的に味覚増強効果が感じられた可能性があるものの、口の中全体で感じられる塩味を増強するほどの効果ではなかったと考えられる。今回は舌上の場所を限定せずに知覚した味覚濃度を回答するよう参加者に求めたが、今後は舌上の部位を限定したうえで増強効果を調査する実験を行ったり、今回の実験とは異なる電極配置において増強効果が現れる位置を調査したりすることでさらなる知見が得られると期待できる。

電流印加時に参加者が感じた味質については、口に含む水溶液の濃度が高いほど塩味であると判断される割合が高く、濃度が低いほど電気味覚であると判断される割合が高くなる傾向が見られた。また、0.125%条件では、実際の水溶液よりも高い濃度の水溶液を選択する有意傾向が見られた。知覚した味の濃度を問う際に、味質が塩味と感じられない場合は、知覚した味質の濃度と等価に感じる濃度の比較水溶液を選択するよう教示した。このことから、本研究の結果は2つの解釈が可能である。

- ごく低濃度の食塩水にのみ特異的に高い味覚増強効果が表れた
- 味覚電気刺激によって生じられた電気味覚が含む塩味、または知覚した電気味覚の濃度と等価に感じる塩味濃度が0.125%の食塩水の呈する塩味よりも強かった

本研究では、明確にどちらか、あるいは2つの可能性の並立を含めた解釈をすることはできない。しかし、筆者らの主観的な体験では、1%食塩水のほうがより増強の効果が明確であった。この主観的な報告を踏まえると、低濃度の食塩水に対して特異的に高い味覚増強効果が表れる可能性は高くないと考えている。

表2より、低濃度の塩分濃度の食品では、食品の塩味よりも電気味覚が強く感じられることが示された。電気味覚は金属を噛んだときのような雑味であるため、必ずしも好

ましい味ではない。食体験を向上させるための刺激手法として陽極電気刺激を利用するためには、電気味覚は感じられず、食品の味そのものが強くなっているように感じるのが好ましい。塩味以外の味質を陽極電気刺激によって変調しようとする場合にも、低濃度の味溶液では電気味覚が本来の味よりも強く感じられることが予想される。そのため、今後、塩味以外の味質の味覚増強・抑制効果を調査する上でも、Beebe-Center & Waddell(1948) が設定した基本味に共通の感覚強度尺度であるガスト尺度 [6] に対応する、陽極電気刺激による電気味覚と主観的等価な基本5味の味物質の濃度を調査することが重要だと考えられる。

3. おわりに

本研究では、口腔外陽極電気刺激による1%以下の塩味の増強効果を調査した。0.125%から1.0%のいずれの条件においても、有意な増強効果は確認されなかった。味質については、濃度が低いほど電気味覚を感じやすい傾向が明らかとなった。低濃度においては食品の塩味よりも電気味覚が優位となり、増強効果が得られづらい可能性が示された。一方で、自由回答では局所的に味覚の増強効果が得られたと回答する参加者もいたことから、今後は口腔外電気刺激によって局所的に起こる味覚増強効果について調べていく。また、陽極電気刺激を行った際の電気味覚が味覚変調の妨げになっている可能性があることから、陽極電気刺激による電気味覚と主観的等価な味物質の濃度を調査することが重要であると考えられる。

謝辞 本研究は JSPS 基盤研究 (B)21H03477 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Thomas P Hettinger and Marion E Frank. Salt taste inhibition by cathodal current. *Brain Res. Bull.*, Vol. 80, No. 3, pp. 107–115, September 2009.
- [2] 原彰良, 安藤英由樹, 櫻井健太, 前田太郎, 青山一真. 連続矩形波電流刺激による五味の継続的増強. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 13–21, 2019.
- [3] Hiromi Nakamura, Makoto Mizukami, and Kazuma Aoyama. Method of modifying spatial taste location through multielectrode galvanic taste stimulation. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 47603–47614, 2021.
- [4] Hiromi Nakamura, Tomohiro Amemiya, Jun Rekimoto, Hideyuki Ando, and Kazuma Aoyama. Anodal galvanic taste stimulation to the chin enhances salty taste of NaCl water solution. *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1128–1134, October 2021.
- [5] 大山正, 今井省吾, 和気典二, 菊地正. 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- [6] J G Beebe-Center and D Waddell. A general psychological scale of taste. *J. Psychol.*, Vol. 26, pp. 517–524, October 1948.