

電気味覚による塩味増強効果の温度影響

舟川梨紗^{†1} 宮下芳明^{†1}

飲食物の温度が変化すると、味覚の感度も変化することが知られている。本研究では、温度が電気味覚による塩味増強効果に与える影響を調査した。その結果、個人差はあるが、いずれの参加者も温度によって塩味増強効果が増加することがわかった。飲食物の温度に応じて変化する電気刺激波形を個人ごとに最適化すれば、これまで以上に効果的な塩味増強を行えることが示唆された。

1. はじめに

電気味覚とは、舌やその周辺、あるいは飲食物を介して味覚器に電気刺激を提示する手法である。この手法は、舌にある味細胞の刺激や飲食物内のイオン泳動を引き起こし、味覚を制御することができる。その例として、鍛冶らは減塩生活者を対象に陰極刺激がイーズインしたのち、陽極刺激に反転する刺激波形を提案し、塩味増強効果が得られることを示した[1]。

これまで提案されてきた電気味覚の多くは、飲食物の温度を考慮していない。しかし、飲食物の温度が変化することで、味覚の感度も変化することが知られている。McBurneyらは塩味や甘味、苦味の認知閾値について、22°Cから32°Cで最も小さくなり、32°C以上で温度の上昇に伴って大きくなることを示した[2]。

そこで本研究では、温度の違いによる電気味覚の変化を解消することを目的とし、飲食物の温度と電気味覚の感じ方の関係性を明らかにする。温度の異なる塩化ナトリウム水溶液に電気刺激を与えることで、各温度での塩味増強量の違いを検証した。その結果、個人差はあるが、いずれの参加者も温度により塩味増強量が増加することがわかった。

2. 関連研究

本章では、これまでの研究で明らかになった電気味覚を用いた味覚の増強及び、味覚と温度の関係について述べる。

2.1 電気味覚を用いた味覚の増強

電気味覚を用いて味を増強させる手法として、様々な刺激波形が用いられている。鍛冶らは減塩生活者を対象に陰極刺激がイーズインしたのち、陽極刺激に反転する刺激波形を提案し、塩味増強効果が得られることを示した[1]。その際、一極型の箆型デバイスを用いて食品の摂取時に人体を通じた回路を形成し、舌へ電気刺激を提示した。提案した刺激波形では緩やかに電流を変化させることで、電気刺激の不快感を緩和できることが示唆された[3]。

また、櫻井らは連続矩形波の陰極刺激により、塩味と旨味を持続的に増強できることを示した[4]。その後、甘味、

酸味、苦味に対しても連続矩形波刺激によって同様に継続的な味覚増強が可能であることを示した[5]。

大塚らは電流量と塩味溶液の濃度が味覚増強量に与える影響を調査した[6]。電流量が増すと味覚増強量が大きくなる一方、塩味溶液の濃度は味覚増強に大きな影響を与えないことを示した。

2.2 味覚と温度の関係

温度感覚は味覚に影響を与える要因の一つであり、これまで温度による基本五味の味覚感受性の変化について様々な研究が行われている。McBurneyらは温度の異なる塩味、甘味、酸味、苦味溶液を用いて、認知閾値の変化を調査した[2]。そのうち塩味や甘味、苦味の認知閾値は22°Cから32°Cで最も小さくなり、32°C以上で温度上昇に伴って大きくなることを示した。Pangbornらは0°C、22°C、37°C、55°Cの4種類の閾値付近の塩味、酸味溶液を用いて、温度による塩味と酸味の変化を調査した[7]。その結果、極端に高い温度または低い温度の塩味溶液では、塩味の感度が低くなることを示した。

また、Greenらはグルタミン酸ナトリウムとグルタミン酸カリウムを用いて、温度による旨味の感じ方の変化を明らかにした[8]。旨味の知覚は舌先において温度依存性があり、低温で感度が低下することを示した。

このように、舌に電気刺激を与え電解質の呈する味を制御できること、温度により味覚が増加することは既に明らかである。しかし、本稿のように温度の違いを考慮した電気味覚の感じ方の違いについては、まだ十分に明らかにされていない。

3. 実験

本章では温度の異なる塩化ナトリウム水溶液に電気刺激を提示することで、電気味覚による塩味増強量が増加するかを調査した実験について述べる。

3.1 デザイン

本実験では、キリンホールディングス株式会社が提供する図1の箆型デバイスを使用し、コップ内の塩味溶液（以

^{†1} 明治大学
Meiji University

下、基準溶液)へ電流を印加した。基準溶液には、水と塩化ナトリウムを混ぜた濃度 0.60%の塩化ナトリウム水溶液を用いた。また、塩味増強量を定量的に測定するために、比較用の溶液(以下、比較用溶液)として、濃度 0.65%, 0.70%, 0.75%, 0.80%, 0.85%の塩化ナトリウム水溶液を用意した。比較用溶液が入った紙コップの側面には、濃度の低い順に1~5の番号を印した。

本実験は1名の参加者が4つの条件を行う参加者内計画であり、温度条件として基準溶液の温度は25°Cと45°Cの2条件を採用した。45°Cの基準溶液は、参加者が飲む直前の温度が45°Cになるようセラミックヒーターを用いて調整した。また、電流の強さによる影響も加味するため、電流量が異なる2種類の電気刺激を比較することとした。本実験で用いた箸型デバイスは、最大電流量をレベル1(0.1mA)、レベル2(0.3mA)、レベル3(0.5mA)、レベル4(0.7mA)の中から自由に選択できるため、レベル2とレベル4の2条件を採用した。なお、このとき提示した電気刺激は鍛冶ら[1][3]がデザインした刺激波形であり、陰極刺激の停止と陽極刺激の提示により、塩味増強を生起させることができる(図2)。



図1 実験に用いた電気刺激提示デバイス

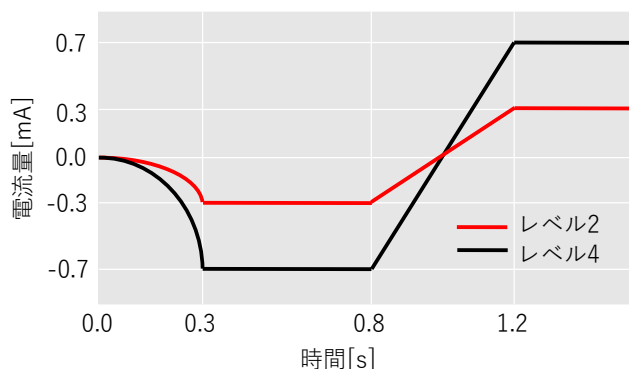


図2 箸型デバイスを用いて提示した刺激波形

3.2 タスク

参加者には、腕に腕時計型の電極を装着し、箸先の電極が基準溶液に触れた状態で溶液を摂取するよう指示した。これにより、体内を1周する回路が構成され、舌へ電気刺激を提示できる。腕時計デバイスの表面は提示する電流量に応じてライトが点灯するため、実験中はライトが見えないよう付箋で隠した。実験では、まず電流の強さがレベル2の条件で温度25°C、45°Cの基準溶液を、次にレベル4の条件で温度25°C、45°Cの基準溶液を評価させた。塩味強度のアンケートにはラインスケールを用い、比較用溶液が入ったコップの番号と対応する1~5の番号を軸とした(図3)。参加者には、箸型デバイスにより塩味増強を生起させた基準溶液と比較用溶液を飲み比べさせ、塩味の強さが最も近いと感じたところへ手書きで印を書くよう指示した。

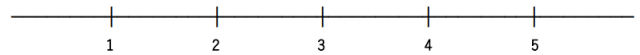


図3 実験に用いたラインスケール

3.3 確認実験

参加者には、電気刺激がない状態で25°C、45°Cの基準溶液を飲み比べ、塩味の濃さに違いを感じるかを調査する確認実験を行った。これは、McBurneyら[2]やPangbornら[7]の実験結果をもとに、温度が高い基準溶液に対し塩味を弱く感じる参加者と、反対に塩味を強く感じる参加者の結果を比較するためである。

3.4 スクリーニング

官能評価を用いて塩味増強量を測定するため、実験参加者のスクリーニングを行った。25°Cの比較用溶液を飲み比べ、濃度の低い順に並び替えることができるかを測定した。大塚ら[6]のスクリーニングを参考に、0.10%以上の塩分濃度の差を判別できる参加者の結果を採用することとした。

3.5 参加者

実験参加者は、20歳~23歳の大学生11名(男性8名、女性3名)であった。そのうち、9名が電気味覚を体験したことがあり、2名が電気味覚を体験したことがなかった。

スクリーニングの結果、0.10%以上の塩分濃度の差を判別できた11名すべての参加者が本実験に参加した。

3.6 手順

本実験では、2種類の温度条件と2種類の電流量条件を組み合わせた4条件を1試行ずつ行った。実験中、これらの条件は参加者に開示していない。

まず、参加者には箸先の電極が基準溶液に触れた状態で溶液を口に含むよう指示した(図4)。次に、比較用溶液と飲み比べさせ、塩味強度についてアンケートに回答させた。評価の際、味の確認は何度でも可能とした。また、味の混同を防ぐために、水を適宜飲むよう指示した。各レベルで実験を終えた後、自由記述のアンケートを記述させた。



図4 実験の様子

4. 結果

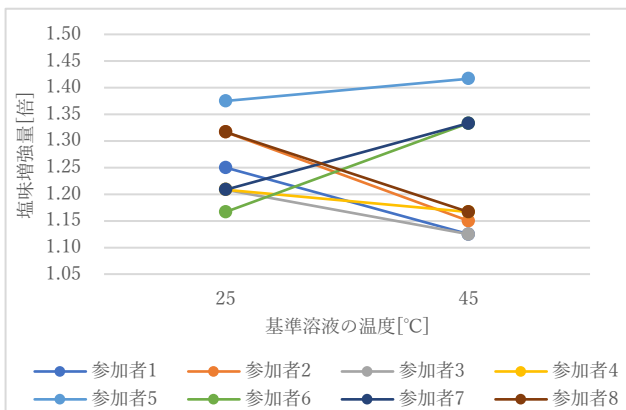


図5 レベル2条件における各温度の塩味増強量
(確認実験の結果、温度の高い基準溶液に対し塩味を弱く感じた参加者8名)

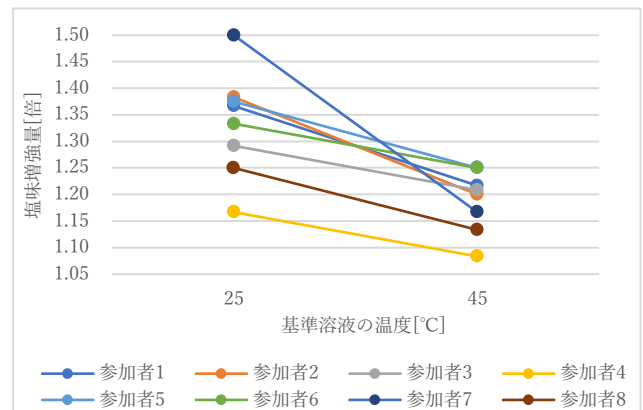


図6 レベル4条件における各温度の塩味増強量
(確認実験の結果、温度の高い基準溶液に対し塩味を弱く感じた参加者8名)

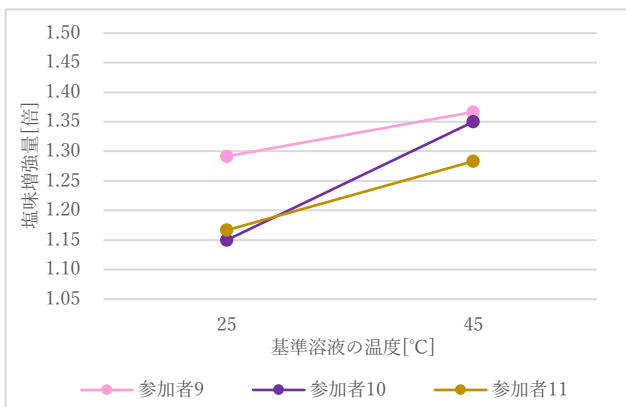


図7 レベル2条件における各温度の塩味増強量
(確認実験の結果、温度の高い基準溶液に対し塩味を強く感じた参加者3名)

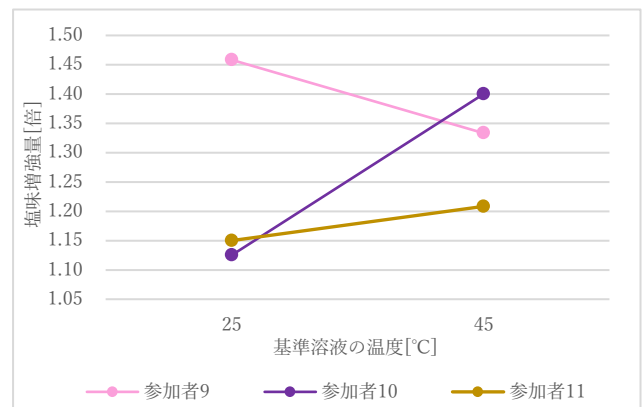


図8 レベル4条件における各温度の塩味増強量
(確認実験の結果、温度の高い基準溶液に対し塩味を強く感じた参加者3名)

実験参加者11名(男性8名,女性3名)の実験結果について、基準溶液の温度と塩味増強量の関係を表したグラフを図5~図8に示す。確認実験の結果、温度の高い基準溶

液に対し塩味を弱く感じた参加者8名の結果が図5, 図6, 塩味を強く感じた参加者3名の結果が図7, 図8である。そのうち、提示した電流がレベル2の条件を図5, 図7に、レベル4の条件を図6, 図8に記載する。

条件間の塩味増強量の差を分析するため、js-starを用いて温度を独立変数とした参加者内の分散分析を行った。多重比較には Bonferroni 法を採用した。その結果、電流がレベル2の条件では主効果は見られなかったが ($F_{1,10} = 0.13, p > 0.1$), レベル4の条件では主効果が見られた ($F_{1,10} = 3.57, p < 0.1$)。また、温度と電流量を独立変数とした2要因参加者内の分散分析を行った結果、各条件で主効果は見られなかったが、交互作用が有意であった ($F_{1,10} = 4.63, p < 0.1$)。

実験の結果、温度の違いによって参加者全員の電気味覚の感じ方が変化した。図5, 図6より確認実験で温度が高

い基準溶液に対し塩味を弱く感じた参加者は、電気刺激を提示した状態でも温度が高いほど塩味を弱く感じる傾向にあった。具体的には、レベル2条件では8名中5名が、レ

レベル4条件では全員が、基準溶液の温度が高いときに塩味増強効果を弱く感じた。自由記述アンケートでは、基準溶液が温かい方がまるやかに感じる、より金属味を感じるといった回答があった。その一方、図7、図8より確認実験で温度が高い基準溶液に対し塩味を強く感じた参加者は、電気味覚を提示した状態でも温度が高いほど塩味を強く感じる傾向にあった。参加者からは、基準溶液が温かいことでより味を感じやすくなったという回答があった。

また、グラフの傾きを比較すると、参加者の過半数がレベル4条件の方が温度による塩味増強量の変化率が大きい結果となった。

5. 考察

実験の結果、個人差はあるが、電気味覚による塩味増強効果は温度によって変化することが確認できた。これにより、温度による電気味覚の違いを解消することで、これまで以上に効果的な塩味増強が行えることが示唆された。また、レベル4条件のように提示する電流量が大きいとき、温度による塩味増強量の変化率が大きい傾向にあった。さらに、多重分析の結果、温度と電流量で交互作用が見られたことから ($p < 0.1$)、飲食物に提示する電流の強さは温度による電気味覚の違いに影響を与えたと考えられる。

しかし、レベル2条件のように提示する電流量が小さいほど、温度による電気味覚の感じ方にばらつきがあることも明らかとなった。多重分析の結果から温度条件間の塩味増強量を比較すると、電流がレベル4の条件では有意な差が見られたが ($p < 0.1$)、レベルが2の条件では有意な差が見られなかった。さらに、McBurneyら[2]やPangbornら[7]の実験結果に反し、確認実験の時点で温度の高い基準溶液に対して塩味を強く感じる参加者が11名中3名いた。これらのことから、各個人の味覚に合わせた塩味増加を行うためには、飲食物の温度に応じて変化する電気刺激波形を個人ごとに最適化する必要があると考えられる。例えば、温度の高い飲食物に対し電気味覚による塩味増強を感じにくい参加者には、温度が高いほど強い電流を提示する必要がある。一方、温度の高い飲食物に対し電気味覚による塩味増強を感じやすい参加者には、温度が高いほど弱い電流を提示する必要がある。そのため、既存の電気刺激提示デバイスにおいて、飲食物の温度に応じて刺激波形の電流量を調整するシステムが有効であると考えられる。

6. 結論

本稿では、飲食物の温度が電気味覚による塩味増強効果に与える影響を調査した。その結果、温度によって塩味増強効果に変化することが確認された。また提示する電気刺激の電流量が大きく、基準溶液の温度が高いほど塩味増強

効果が弱まる傾向がみられた。

今後、温度条件を増やし、温度によって味覚の感度に変化する甘味や苦味、旨味を対象として、温度による味覚増強量の変化を調査する予定である。さらに、飲食物の温度をリアルタイムに計測し、その温度に応じて電流量を決定する電気刺激提示デバイスへの応用も検討したい。

7. 倫理

本研究は、キリンホールディングス株式会社ヒト試験倫理審査委員会の承認を受けて実施した。参加者には、本研究の趣旨を十分に説明し、本人の文書による同意を得た。

8. 謝辞

本研究は、キリンホールディングス株式会社が提供する箸型デバイスを使用した。

参考文献

- [1] 鍛冶慶亘, 安蔵健司, 佐藤愛, 宮下芳明: 減塩生活者を対象とした電気味覚による塩味増強効果の調査, インタラクシオン 2022, pp. 97-104 (2022).
- [2] D H McBurney, V B Collings, L M Glanz : Temperature dependence of human taste responses, *Physiology & Behavior*, Vol. 11, pp. 89-94 (1973).
- [3] Yoshinobu Kaji, Ai Sato, Homei Miyashita : Design of Electrical Stimulation Waveform for Enhancing Saltiness and Experiment on Low-Sodium Dieters, *Frontiers in Virtual Reality*, Vol.3, pp.1-10 (2022).
- [4] 櫻井健太, 青山一真, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹: 連続矩形波陰極電流刺激による塩味および旨味の持続的増強効果, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 2, pp. 149-156 (2017).
- [5] 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).
- [6] 大塚勇人, 青山一真, 宮下芳明: 陰極刺激による塩味増強効果の定量化, 第2回神経刺激インタフェース研究会 pp. 1-4 (2020).
- [7] Rose Marie Pangborn, Rosalind B. Chrisp, Linda L. Bertolero : Gustatory, salivary, and oral thermal responses to solutions of sodium chloride at four temperatures, *Perception & Psychophysics* 8, pp. 69-75 (1970).
- [8] Barry G. Green, Cynthia Alvarado, Kendra Andrew, Danielle Nachtigal : The Effect of Temperature on Umami Taste, *Chemical Senses*, Vol. 41, pp. 537-545 (2016).