

塩分を用いない塩味味覚感度制御 —陰極刺激の提示と停止による飲食物の 味質変化における評価

中村 裕美^{1,2,a)} 宮下 芳明^{1,3}

受付日 2013年6月21日, 採録日 2014年1月8日

概要: 本論文では陰極刺激による塩味阻害現象を活用した塩分を用いない塩味知覚制御システムを提案する。舌へ陰極刺激を提示すると刺激提示中は塩味が阻害されるが、刺激停止後には「塩味をさらに強く感じさせる」効果があることが Hettinger ら (2009) の実験により明らかになっている。提案装置は食器 (カップまたはフォーク) と一体化した陰極刺激提示装置と飲食行動検知機構によって、飲食行動を検知した直後に食品を媒介としてユーザの舌に陰極刺激の提示と停止を行う。この制御により、ユーザは刺激停止後に塩味が強まったような感覚を得ることができ、塩味の足りない食事に対して新たに塩分を付加せずその感覚を増強できると考えられる。本論文では提案装置のデモンストレーションから得たフィードバックを元に、5つの基本味と金属味における提示前、提示中、停止後の味質について調査を行い、本提案システムの可能性と制限について議論する。

キーワード: 電気味覚, 塩味制御, 健康支援

Controlling Saltiness without Salt: Evaluation of Taste Change with Applying and Releasing Cathodal Current

HIROMI NAKAMURA^{1,2,a)} HOMEI MIYASHITA^{1,3}

Received: June 21, 2013, Accepted: January 8, 2014

Abstract: Hettinger et al. revealed that weak cathodal current applied to the tongue inhibits the taste of salt, but perceived saltiness tends to increase after the current is released. In this study, we propose a saltiness enhancer for supporting salinity control that uses this phenomenon. Our system applies weak cathodal current for a short time when the user eats or drinks. We also conduct the experimental tests that comparing intensity of taste of fundamental taste and metallic taste before applying, during applying, after released.

Keywords: electric taste, saltiness control, health support

1. はじめに

生きるためには飲食によって必要な栄養分を摂取し続ける必要がある。しかし摂取する栄養のバランスによっては健康を害するリスクもはらんでいる。たとえば塩分は生命維持に深く関与しているものの、体内で生成することはできない。そのため食事による摂取が必要となる。しかし、過剰に摂取してしまうと、高血圧など様々な疾病を引き起こす原因ともなる。

¹ 明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻デジタルコンテンツ系

Program in Digital Contents Studies, Program in Frontier Science and Innovation, Graduate School of Science and Technology, Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan

² 日本学術振興会

JSPS Research Fellow, Chiyoda, Tokyo 102-8472, Japan

³ 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

JST, CREST, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan

a) hirominakamura.b@gmail.com

日本においては、塩分が過剰摂取される傾向が見られている。WHO が定める推奨摂取量は 5~6g/日だが、成人の平均摂取量は男性 11.5g/日、女性 10.0g/日と推奨摂取量の 2 倍以上である [1]。アマゾンでは塩分摂取量が 1~2g/日の地域も存在し、その地域での高血圧患者はほぼ見受けられないとされているが [2]、日本では約 4 割が高血圧であると診断されている。

このような背景を受けて、日本国内でも塩分の過剰摂取に対する注意喚起がなされている。2010 年に厚生労働省が定めた食塩摂取目安量では、男性 9g 未満/日、女性 7.5g 未満/日と設定している [3]。これらの目安にともない、塩分を減らした食事、いわゆる減塩食を積極的に推進する流れも見受けられる。

飲食する側が自発的に摂取量を調節することは重要である。しかし、塩分は風味や食感に影響を与えているため、塩分を減らすと風味の減損も起こりうる。塩分を減らした食品は消費者の受容性を低下させるという報告もあることから [4]、飲食する側にとっては単純に塩分量を低下させると物足りなさを感じる可能性がある。そのためたとえ調理者側が塩分量を抑えた食事を提供しても、飲食する側が食卓塩を追加することが懸念されるだろう。

このような減塩に対し、これまでも様々な取り組みがなされ、それらは「減塩食」として定着しつつある。これら減塩食は、たとえばナトリウム塩の一部をカリウム塩に置き換えた代替塩で塩味を補う手法や、焦げ目をつけて香りや食感を引き立たせる手法、酢やレモンなどの酸味で塩味を引き立たせる手法などが提案され、すでに食品業界のみならず一般家庭でそのノウハウが活用されている。

これらの手法は、新たに塩分以外の調味料を追加することで塩分の欠如を緩和させるか、ナトリウムの代わりにカリウムを用いて塩分を提示しているものである。しかし、たとえばカリウム配合の代替塩においても、摂取過多による身体への影響（通常、カリウムの過剰摂取分は体外に排出されるが、腎臓などに疾病を患っている場合、カリウム過多になり高カリウム症を引き起こす可能性がある）をふまえ、すべてをカリウム塩に置き換えることはできない。また、塩分以外の調味料の追加においても、食材に合う調味の難しさが生じるうえに、何より他の栄養素を追加することで塩味の欠如を補う点までにとどまっているのが現状である。本論文で提案する陰極刺激を用いた塩味制御は、カリウムやそのほかの調味料を追加し調理面で加工を施すのではなく、あくまで我々の知覚を制御し、塩味を強める点に新規性があると考えられる。

精神的な満足感を得るための塩分は、嗜好品として作用しているともいえる。嗜好品の制限を自らの意思で継続することは難しいとされており [5]、気持ちの緩みなどから制限を断念する例も見受けられる。このように飲食する側の自発的な塩分摂取量の抑制だけで対処してしまうと、心的

負担を発生させ、継続を妨げる可能性がある。また、食卓塩を追加するという行為は調理者と一緒に飲食を行う他者にも見えてしまうため、飲食する側は調理者や周りへの配慮をある程度意識せざるをえない。

著者らは、飲食する側は塩分ではなく塩味を求めている点に着目した。そこで本論文では、塩味の味覚感度を制御することで、食事中に物足りないと感じて新たに加えてしまうような塩分の抑制を支援するシステムを提案する。

このシステムの構築にあたり著者らは 2009 年に Hettinger らによって発表された陰極刺激による塩味阻害現象に着目した [6]。彼らはハムスターを用いた電気生理学測定および人間を対象とした味質評価を行い、塩化ナトリウムの提示で活性化した細胞の活動電位を陰極刺激で抑制できる点、そして停止後に陰極刺激提示前より塩味を強く感じる傾向がある点を明らかにした。

本研究では塩味を減らさずに余分な塩分の摂取を抑えるためにこれら理学的知見を活用する。そのため陰極刺激提示中に塩味が阻害される効果ではなく、提示前・提示中と比較して停止後に塩味が強く感じられる効果に着目し、飲食直後に陰極刺激の提示と停止を行い、食材の塩味を本来より強く感じさせるシステムとして提案する。

本論文ではまず 2 章で、上述した Hettinger らによる本研究の基礎となる知見について紹介する。そのうえで、3 章でこの知見を活用した塩味味覚感度制御システムについて述べる。4 章では国内外でのデモンストレーションから得られたフィードバックと、それらから得られた本研究の問題点と解決における議論を行う。5 章では 4 章で得られたフィードバックを元に行った陰極刺激提示前・提示中・停止後の塩味を含む基本 5 味と金属味での味質評価実験とその結果について述べ、考察を行う。6 章で実験から得られた結果についての考察を記述する。7 章では 2 章であげた基礎となる知見以外の関連する研究について紹介を行い、8 章で今後の展開について述べる。

2. 本研究の基礎となる知見

本章では本研究の基礎となる知見である、Hettinger らによって報告された陰極刺激提示による塩味阻害現象について説明する。塩味を抑制する効果のある成分はこれまでも発見されており、特にビスビグアニドはイオンの流れを阻害する効果で塩味受容も阻害させることが知られている。そこで Hettinger らは電気刺激を舌面に提示した場合のイオンの流れ変化と味受容に着目した。彼らは従来多用されていた陽極刺激に加え、陰極刺激でも味質調査を行い、生理学的側面に加え人間の知覚上の側面からも阻害効果が発生するかを調査している。

神経細胞の電位変化から刺激の伝達状態を計測する電気生理学測定では、ゴールデンハムスターの下顎神経を切開し計測用電極を取り付け、舌面に塩化ナトリウム溶液と

もに陽極刺激と陰極刺激を提示した際の活動電位の変化について調査している。

その結果、 $-9\mu\text{A}$ が提示された際に、活動電位が塩化ナトリウム提示以前の電位、いわゆる通常電位と同等まで減少することが示されている。よって、陰極刺激の提示は塩化ナトリウムによって誘起された活動電位も減少させていることが示唆される。また、陰極刺激停止直後に瞬間的に電位の上昇がみられる。

上記の電気生理学測定に加え、Hettinger らは人間を対象にした味質調査を行い、知覚レベルでの影響についても検証を行っている。調査では複数の塩化物水溶液に対し $\pm 40\mu\text{A}$ と $\pm 80\mu\text{A}$ の電気刺激を提示し、舌が液体に接したとき、電気刺激提示中と、電気刺激を停止した後の味質を調査している。各状態の弁別および全体の強度、味質を調べた実験では、高濃度の溶液では刺激提示中に全体の味質の強度が低下し、停止後にはまたその味質が復活することを確認した。さらに低濃度の溶液では、停止後には全体の味質の強度が提示前より強まることが確認されている。

また評価基準となる溶液で学習を行った後に全体の味質強度と塩分の強度を評価させたところ、全体の味質の強度、塩分強度のほかに酸味や甘味、苦味が低下するケースも確認された。また、低濃度の溶液では、溶液のみの時系列味質強度は時間の経過にともない減少するのに対し、途中で陰極刺激の提示と停止を行うと同じ経過時間での通常の塩分強度より強く感じられることが示されている。なお、この際に金属味も確認される事例があったことを述べている。

これらの実験結果から、以下の要素が知見として示されている。

- 陰極刺激の提示によって塩味やその他の味が阻害される。
- 提示を止めた後には阻害された味質が再度知覚される。
- 塩の種類や濃度に依存するが、提示を止めた後のほうが塩分の強度が強くなり感じられる。
- 陽極刺激は提示中につねに刺激を与えるが、陰極刺激は味質を阻害する可能性がある。

なおこの効果は塩の種類によって効果的に現れるものとそうでないものがあることが述べられている。

3. 陰極刺激の提示と停止による塩味味覚感度制御システム

本論文で提案する塩味知覚感度制御システムは、2章で説明した Hettinger らの理学的知見を工学的に応用したものである。陰極刺激提示による塩味阻害現象について調査した先行研究では、理学的知見を得る目的で実験が設定されているため、提示前、提示中、停止後の味質が調査されていた。本論文では、利用者に本来の塩味より濃く感じさせることが目的となる。そのため、図 1 のように飲食直後に陰極刺激を提示し塩味を一度減損させ、すぐに停止する

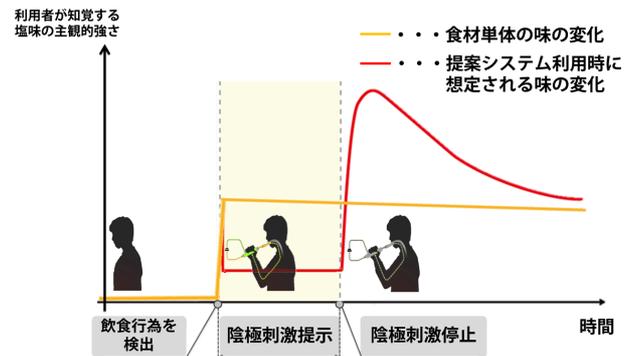


図 1 提案システム利用時に想定される塩味知覚の変化
Fig. 1 Saltiness expected by proposed system.

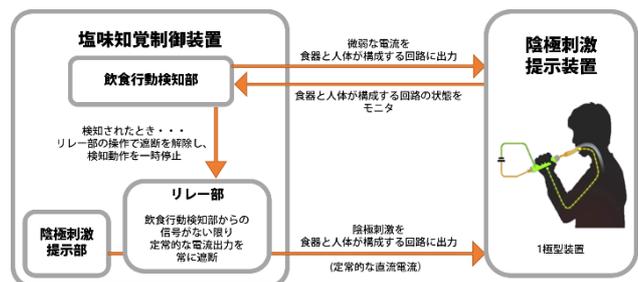


図 2 塩味味覚感度制御システム
Fig. 2 Proposed system.

ことによって、その後の塩味の知覚を増強することが適切であると考えられる。

よって本論文では、著者らが先に提案した電気味覚付加装置を活用した飲食行動検知機構 [7] を用い、検出された飲食行動を元に陰極刺激の提示と停止を行うシステムを Arduino とリレー回路、電気味覚付加装置を用い構築した (図 2)。

3.1 陰極刺激提示装置

著者らが開発している電気味覚付加装置は、大きく 1 極型装置、2 極型装置に分類できる。この装置の極数は、口内に提示される電極の数である。1 極型装置は片方の極を飲食物に接触するフォークないしはストロー接続箇所配置することで口内に提示し、もう片方の極を把持部 (フォークの持ち手、カップの側面) に配置することで人体皮膚表面に提示し、回路の構築と電気味覚の提示を行う。これに対し 2 極型装置は両方の極を飲食物に接触するフォークないしはストロー接続箇所配置することで口内に提示し、電気味覚の提示を行う。

これら装置の最も大きな差異は、提示される極性にある。2 極型装置は口内に提示する極性を変更できないが、1 極型装置は口内側電極の極性を変更でき、陽極と陰極の提示を切り替えられる。本提案の陰極刺激提示装置は、舌面に陰極刺激を提示するため、口内提示側電極に陰極を、人体皮膚表面側電極に陽極を割当てた電気味覚提示装置を用いる。

3.2 塩味知覚制御装置

3.2.1 飲食行動検知部

人体は導体であるため、電気回路内に人体を配置すると回路の一部として動作させることができる。また、回路構成によっては、人の動きを回路上のスイッチとして活用することができる。3章で述べた電気味覚付加装置（1極型）は、飲食を行った際に回路が形成され、舌に電気刺激が提示される構造である。そのため、飲食行動にともない電圧の上昇が起こる。

飲食行動検知部では、回路内の電圧上昇を検知するために、検知用電源（直流、9V）と電気味覚付加装置の間に検知用回路を設けている。検知用回路では分圧回路から出力された電圧をArduinoのアナログ入力に接続しており、アナログ入力に与えられる電圧が閾値を上回った状態を飲食時として設定している。この閾値は利用者の人体抵抗値によって若干の個人差が生じるため、非接触時と接触時の電位差を計測しキャリブレーションを行う必要がある。

3.2.2 陰極刺激提示部

陰極刺激提示部では、先に述べた飲食行動検知部によって飲食行動が検知された直後に、陰極刺激の提示と停止を行う。この陰極刺激提示部からの陰極電流刺激によって、塩味味覚感度を制御できる。陰極刺激提示部と陰極刺激提示装置の間にはリレー部が設けられており、このリレー部で陰極刺激の提示と停止を制御する。

3.2.3 リレー部

陰極刺激提示部では、先に述べた飲食行動検知部によって飲食行動が検知された直後に、陰極刺激の提示と停止を行う。この陰極刺激提示部からの陰極電流刺激によって、塩味味覚感度を制御できる。陰極刺激提示部と陰極刺激提示装置の間にはリレー部が設けられており、このリレー部で陰極刺激の提示と停止を制御する。

これらシステムを活用した陰極刺激の提示と停止によって、飲食が行われた直後に短時間の陰極刺激の提示と停止を行うことが可能となり、そのあとの塩味味覚感度を制御できる。また、システムが陰極刺激を停止する前に利用者が装置から口を離した場合は回路が切断されるが、結果として陰極刺激提示が停止されるため、同様の効果を得ることとなる。

4. デモンストレーションから得られたフィードバック

著者らは国内外の会議やイベント（CHI2013, インタラクション2013, WISS2012, MFT2012）で提案装置のデモンストレーションを行い、200名超に体験させた。デモンストレーションでは電気刺激を人体に付加すること、体験に飲食物の摂取をとまなうことを事前に伝え、同意を得られた体験者のみで行った。体験では、陰極刺激の提示と停止による味質の差異を明確に感じられるよう、検知用回路

を用いず、体験者または著者らが明示的に提示と停止を制御した。

デモンストレーションの結果、多くの体験者が陰極刺激提示時と停止後に味質の差異を感じる事ができた。このことから、提案装置によって著者らが意図する効果を提示することができ、広く活用できることが示唆された。しかし、提案装置が意図する効果を感じられない例も見受けられた。これらの例は以下の3種類に分類される。

第1に、提示と停止における差異が感じられなかった事例があげられる。これは評価実験でも同様の感想を述べる被験者がわずかであるが存在した。これらの体験者においては、「わずかに味が変わったのは感じられたが、通常に使用した場合には気づけない」といった感想が得られた。この原因としては、体験者の食環境や個人差から起こる味覚感度の差があると考えられる。味覚の個人差はある程度存在するほか、各味の感度は日常の食生活によっても左右される。このデモンストレーションにおいて、体験者の日常の食生活および塩分摂取量のデータの開示は求めている。そのため、今後の実験で日常の食生活の記録および味覚検査を実施したうえで、提案装置によって感じられる味質の差異についての評価を行う予定である。それによって個人差および食生活にあわせた調整を可能にする改良を試みるとともに、提案装置の限界性についても評価していく必要があると考えられる。

第2に、同電圧・同電流の提示を行ったにもかかわらず、陰極刺激提示時に金属味、またはピリピリとした刺激を感じた事例があげられる。この場合、提示する陰極刺激の強度をさらに弱くすることで、これら刺激が軽減し、提案装置が意図する刺激を感じられることがほとんどであった。これは、上記と同じように個人の味覚感度の差も考えられるが、主原因は人体抵抗の個人差にあると考えられる。人体の抵抗値は個人や発汗などの状態によって異なり、800～10,000Ω程度の差が生じる。人体抵抗が少ない場合、舌に提示される陰極刺激の強度は強まることとなる。陰極刺激は一定電圧までは塩味を阻害する効果があるが、一定以上では苦味や金属味、触覚的刺激を提示する傾向がある。今後個人の人体抵抗を考慮した改良を行うことで、これらの2種類の例での味覚差異がどの程度生じるか試みる必要性があると考えられる。

第3に、塩味の増減が感じられるものの、他の味質の変化も感じられるという事例があげられる。このような体験者の感想からは、「塩味とともに苦味も強まったように感じられる」「塩味と酸味が強まった」などの感想が得られた。これらのフィードバックにおいては、先行研究でも類似した知見が見受けられる。各種塩化物溶液を対象に行っている先行研究では、陰極刺激の提示と停止が塩味の知覚感度を変化させることを評価しているが、その結果として、苦味や酸味、甘味なども塩味ほどではないものの変化すると

いう知見も報告されている。本提案で用いる食材はより複雑な栄養素で構成されており、陰極刺激がそれらの味質にも変化を及ぼす可能性は塩化物溶液より高まると考えられる。そのため本論文では第3の例に対し、陰極刺激の提示と停止による味覚感度制御が塩味および他の風味へ与える影響について、調査を行った。

5. 陰極刺激の提示と停止による飲食物の味質変化

国内外でのデモンストレーションでのフィードバック(4章参照のこと)から、塩味以外の味の変化が報告された。そのため、本章では提案装置による塩味知覚感度制御によって発生する味質の変化において、基本味(甘味、苦味、塩味、酸味、旨味の5つ)に加えて金属味について、味質評価を行った。

5.1 実験手法

実験では食料を対象とし、試料として魚肉ソーセージ(ニッスイおさかなのソーセージ、食塩相当量75gあたり1.4g、直径20mm)を8mm幅で切りそろえたものを用いた。被験者は10名(男性9名、女性1名)で、実験で飲食物を介して電気刺激を人体に提示することを伝え、同意を得られた被験者に対して実験を行った。また、実験開始前および各呈味調査前に口内環境を整える目的で水を飲ませている。陰極刺激提示部から食材に付加される実験刺激は約 $-0.5\sim 6\text{V}$ 、 $-250\mu\text{A}$ とした。

提案装置は被験者の飲食行動を検知し提示と停止を行う検知用回路を有しているが、被験者がすべて回答するまで刺激を提示し続ける必要があるため、本実験では提示用回

路のみ使用し、実験者が提示と停止を切り替えられるものとした。

被験者には陰極刺激提示前(何も付加しない通常の試料)、陰極刺激提示中、陰極刺激停止後の3種の味質について評価させた。評価する味質は基本味(塩味、酸味、苦味、甘味、旨味の5つ)と金属味とし、先行研究[8]を参考に、0~10までの均等目盛り(0…まったく感じない、10…強く感じる)で回答させた。

まず陰極刺激提示前として、何も付加しない状態の試料を提案装置のフォークに刺し、舌に当てた状態で味質ごとに答えさせた。次にそのまま陰極刺激を付加し、同じく味質ごとに答えさせた。最後に陰極刺激を停止し、直後の味質について味質ごとに回答させた。味質ごとの回答順はランダムとし、回答させる味質を変更する段階で魚肉ソーセージを交換するとともに、水を飲ませ口内の環境を整えさせた。

被験者は飲食物を舌に当てた状態で回答するため、被験者の前に評価尺度を印刷した用紙を置き、それらを指で指して指示させた。実験者は被験者の回答にあわせ、指示を評価用紙に記入し、記入内容を確認したうえで次の実験に進むものとした。

被験者10名から得られたデータは味質ごとに一元配置分散分析(対応あり)を行った。分散分析で有意差が発生したものにおいては、多重比較で提示前、提示中・停止後に対し、Bonferroni法で有意差を算出した。

5.2 実験結果

各味質の提示前、提示中、停止後の味覚強度の平均および偏差、有意差は以下の図3のとおりである。塩味、酸味、金

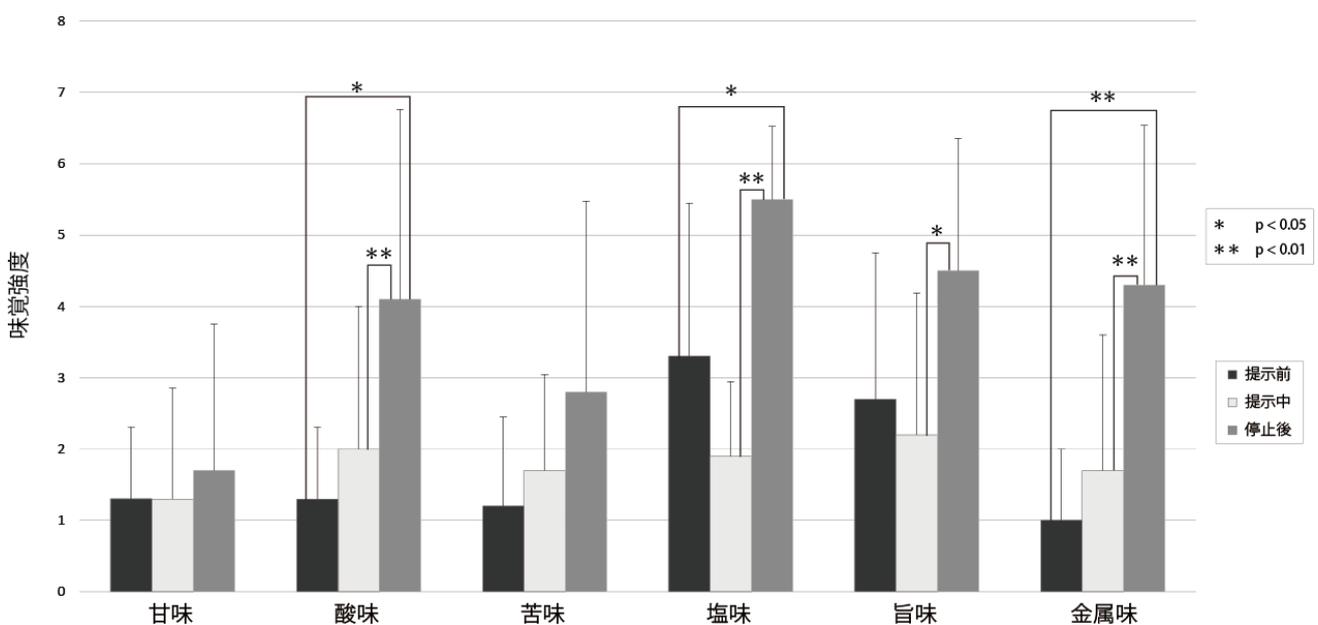


図3 味質ごとの提示前・提示中・停止後の味覚強度
Fig. 3 Intensity of taste (before applying, during applying, after released).

属味においては、3群間の差が認められた ($F(2, 18) = 6.01$, $p < 0.01$)。また、旨味においても上記3味ほどではないものの差が認められている ($F(2, 18) = 3.55$, $p < 0.05$)。苦味においては有意傾向がみられたが ($F(2, 18) = 2.62$, $p < 0.1$)、甘味においては差が認められなかった。

有意差があった3群間において行った反復測定(対応あり)の結果、金属味では提示前と停止後、提示中と停止後において停止後のほうがより濃いと認められた(有意水準1%)。塩味、酸味においては提示中と停止後が金属味と同等、提示前と停止後が有意水準5%で、停止後のほうがより濃いと認められた。

5.3 実験考察

実験結果から、塩味、酸味、金属味、旨味において陰極刺激の提示と停止による味質の差が有意に発生することが示された。さらに、金属味は特に提示前および提示中に対して停止後が有意に味を濃く感じられる結果となった。また、塩味、酸味においても提示前および提示中に対して停止後が有意に味を濃く感じられることが明らかとなった。またすべての味質において、停止後は味を濃く感じられる傾向があることが示唆されている。

このことから、提案装置を用いた陰極刺激の提示と停止による塩味味覚感度制御において、塩味が提示前および提示中に対して停止後に濃く感じられるほか、金属味、酸味は提示前および提示中に対して停止後に味を濃く感じられることが示唆された。この結果は先行研究の知見として述べられている塩味以外の味覚への影響ともある程度一致しており、妥当性があるものと考えられる。

6. 考察

基本5味と金属味における提示前、提示中、停止後の味質調査から、塩味が提示前・提示中に比べ停止後のほうが有意に濃く感じられることが明らかとなった。このことから、提案装置の使用により、塩味の味覚感度が制御され、元の食材より塩味を濃く感じさせる効果をもたらすことが示唆された。

しかし同時に、塩味だけでなく金属味、酸味においても、提示前・提示中に比べ停止後のほうが味質を濃く感じられる結果となった。これら効果はデモンストレーションから得られたフィードバックと一致するうえ、先行研究で言及されている塩味以外の味質への効果とも整合性が取れている。とはいえ、先行研究では塩味以外の味覚変化について、また複合的な組成を持つ食料において効果が得られる点については言及されていないため、今回の評価は、先行研究で解明された現象の日常的利用における指標を示すものとなったと考えられる。また著者らは、提案装置によって塩味のみが増強されることを期待したが、塩味に加え複数の味に影響を与えることが示された。この点は本論文の副次

的效果であるといえる。しかし、これら副次的効果の発生が現時点では免れないものの、論文で目的としている塩分の抑制に対しては、塩味の増強ができていることから一定の効果があるといえる。今後、継続的使用における他の味質増強が与える効果を検討するとともに、これら他の味質増強を極力抑えるような刺激の提示手法についても評価を行う予定である。

本論文で用いた試料は、塩味を含むものに対する効果の検証として魚肉ソーセージを用いている。この試料における効果は、先に記述したように塩味・酸味、および金属味が増強されることが確認されている。しかし、ほかの塩味を含む食材、または塩味の比重の少ない食材を実験試料としては用いていない。

本章では、他の塩味を含む食材に用いたときの効果や、塩味の比重の少ない食材に対する効果について議論する。まず、他の塩味を含む食材に用いた際の効果であるが、著者らはこれまでの試行およびデモンストレーションで、チーズ、鳥の燻製など、塩味を含む他の食材での実証を重ねている。その結果、これら食材でも実験と同じく、塩味の知覚強度の変化を感じることができている。また、これらの食材の場合でも、塩味単体ではなく、味全体の変化、塩味以外の味質の濃さの変化が生じることが報告されている。

本研究で引用した Hettinger らの研究では、数種の塩化物溶液で実験を行っているが、塩化物溶液によって陰極刺激提示前、提示中、停止後の強度の変化が異なることが示されている。そのため、食材に含まれる塩分の種類によって、多少の効果の差異が起こる可能性は否めない。

また、甘味を含む食材においては、そのなかに塩分が含まれない場合、陰極刺激による味の変化は起こらないと考えられる。しかし当装置から得たフィードバックのなかには、少ないながら甘味の増強を感じるというものも寄せられた。これは、おそらく塩味の変化による甘味の相対的変化であると考えられる。たとえばスイカに塩をかけたときのように、塩味は甘味を引き立てる効果を有している。同様の効果が当装置で得られた可能性は考えられるが、この点については、さらに実験を行い、有意な効果が得られるかを試行する予定である。

7. 関連研究

電気味覚は1754年、Sulzerが2種の金属を舌面にのせたときにその存在を発見した。その後1792年にVoltaが発見原因の仮説として、一方の金属から他方へ舌組織を通り電流が流れることで発生すると述べた[9]。味についても多くの実験調査が行われており、日本人を対象にした実験でも、主に金属味、酸味や苦味、塩味を感じる事が確認されている。また感知できる刺激強度の閾値は加齢により上昇することが発見されている。味質に対する記述は実験者によって表現が異なるほか、個人ごとにも差異がある[10]。

ただしその差異は舌面提示位置の左右差や性別、喫煙の有無、歯科治療による金属冠の有無の影響を受けないことが確認されている [11]. また、極性ごとの味質として陽極刺激は酸っぱいような味、陰極刺激は苦味に近いアルカリのような味と報告され [12], 以降の実験でも類似した評価となっているが、実験者や実験の形態によって味質の表現に差異が見受けられる [10].

電気味覚は主に簡易味覚検査の用途で用いられている。電気味覚による調査は溶液を用いた調査で問題となる唾液による希釈や口内拡散による味質の違いに対する考慮を必要としない。加えて検査時間も短縮できるが、単一の味覚のみでの調査となり、甘味などが受容されているか否かなどの計測はできない。そのためがんや糖尿病などの特有の疾病患者や、細胞の応答を調べる目的で用いられている。検査のために作成された電気味覚計は各種あるが [13], [14], [15], 一般的に陽極からの刺激を口内に提示し、陰極側を皮膚表面に配置する形をとっている。その理由として、実験調査により陰極刺激より陽極刺激のほうが知覚しやすいことが根拠にあげられている [16].

電気味覚の発現機序としては複数の説があげられ、各種実験により実証が行われつつある。初期には電気刺激そのものが舌細胞を刺激する説に加え、電気刺激により舌面上のイオンが移動することにより起こるとされる説が提唱されていた [17]. その後の研究で、膜表面の陽イオン濃度が膜表面から遠いところより低いことから電気味覚が受容膜表面での塩の累積によるものでないことが明らかになっている。また、電位依存性 Ca^{2+} チャンネルの阻害剤によりシナプスでの味細胞と味神経の情報伝達の遮断で電気味覚が抑制されることから、味細胞の直接刺激のみでなく、味細胞が刺激され、その情報伝達に味細胞の電位依存性 Ca^{2+} チャンネルが関与していることが示されている [18]. しかし現段階でその味質が電流によるものか、電気分解による物質によるものか、また味質は純粋な味といえるものか、ほかの感覚器細胞への作用も含んでいるかなどは断定されていないとされている [6].

電気味覚の検査以外の用途としては、視覚情報の代替提示としての活用 [19], 味情報の伝達用途としての活用 [20] が行われている。視覚情報の代替提示としての活用では、マトリックス状に配置した電極を直接舌面に当て、その電極にカメラからの映像を処理し電気刺激に変換したものを提示している。この装置で提示される各電極からの電気刺激を知覚することで、視覚情報を代替的に舌面で知覚できることが実験により示されている。この装置における実験報告の中では出力電流が 0.4~2.0 mA であることが述べられている。また、医療分野など両手作業時の情報提示機器として用いた例も存在する [21]. 電気味覚を味情報の伝達として用いたものとしては、Nimesha らによる Digital taste Interface [20] があり、電気味覚を用いた味体験の遠

隔共有やそれを用いたコミュニケーションについて言及している。また装置は陽極側を舌表面、陰極側を舌裏面に直接触れさせ、電気味覚を提示する形のものである。

中森らによる食べテルミン [22] では、フォーク型のデバイスを用いた飲食による音響生成、制御システムが構築されている。このデバイスでは本提案と同じく人体を回路として用いている。回路はフォーク把持部に装着された皮膚面提示用電極と、フォークおよびフォークに刺した食材により構成され、飲食による抵抗値の変化を音響的に活用している。著者らが提案する 1 極型装置もこの装置を参考に構成している。ただし、中森らの装置は飲食行為を活用した音響制御のための装置として実装されているため、出力刺激は味質の変化を感じられない強度を用いているほか、3.3 節で著者らが構築しているような出力強度の任意調整を行うスライダなどは用いられていない。

塩分濃度を計測し、調理支援に活用する研究も行われている。村上らは温度センサつき塩分センサを用いて塩分濃度を測定する手法を提案し、その装置による遠隔地での味の濃さの伝達を図った [23]. このシステムでは遠隔地で互いの調理物の塩分濃度を一定にする支援が目的である。

鳴海らは、視覚刺激による味情報提示の応用例として、飲食した利用者の満腹感に影響を与えるシステムを作成している。この装置は HMD に装着したカメラで得られる映像から可食物を認識し、そのサイズを画像処理によって変化させている。また、手で可食物を持っている場合は手のサイズも同時に変化させている。システムを利用した実験から、画像処理による視覚的サイズの変化だけで、被験者の食事量を増減両方向に 10% 程度変化させられることが導き出されている。これは味情報を直接的に出力する直接提示型システムに類するとともに、味情報の提示を超えた食のデザインに貢献している [24]. これらのように、他感覚からの刺激で塩味の味覚感度を制御する試みも存在する。Nasri らは嗅覚情報による塩味の増強効果について検証しており、Givaudan 社の Sardine Aroma において、香りの提示によって水および塩溶液の塩味が有意に増強されることを実験から導出している [25].

8. おわりに

本論文は飲食と同時に陰極刺激を提示し、塩味を阻害することにより、停止後に塩味が強まったように感じさせる塩味味覚感度制御システムを提案、評価したものである。提案システムは 2 章で述べた陰極刺激提示による塩味阻害現象を元に構築している。本論文のように塩味が増したかのように感じさせるためには飲食直後に陰極刺激を提示し、飲食中に刺激を停止する必要がある。そのため、先に著者らが提案した電気味覚付加装置を用いた飲食検知機構を用い、飲食した瞬間に一定時間陰極刺激を付加するシステムを提案している。この効果により、利用者の塩味味覚

感度をコントロールし、新たな塩分の追加を行わずともまるで塩味が強まったかのように感じることができる。

その効果を評価した実験からも、提示中と停止後で味質強度、塩味の強度に差がみられたほか、元の食材の味質よりも停止後に感じる味質を強く感じる傾向がみられた。

さらに、提示前、提示中、停止後における基本5味および金属味での味質評価から、金属味や酸味も同時に変化するものの、塩味が有意に濃く感じられることが示唆された。金属味や酸味も同時に変化する点においては本提案の限界であると考えられるが、塩味も有意に制御されていることから、本論文が目的とする塩分抑制のための塩味制御としては一定の効果が見込まれ、利用によって塩味の物足りない食事に新たに塩を追加する可能性を減らす一助となるだろう。現時点で副次的効果である他味質の増強については、長期評価による他味質増強の影響に対する検証とともに、可能な限りこれら味質の増強を抑える刺激の提示方法についても評価を行う予定である。

今後の改良として、提示時間長や出力強度と塩味味覚感度の変化量について調査を行い、より効果的に作用する出力への調整を行うことを考慮している。また同じ材料の淡白な食物に対し甘味、酸味、苦味などそれぞれを呈する調味料を加えたもので同様の実験を行い、変化がみられるかどうか調査を行いたい。

飲食は人間の生存や健康と、精神的な充足の両方に作用する。これらはときにどちらかを優先させ、どちらかを犠牲にすることでバランスをとることが望まれる傾向があった。そのため、我々はときに健康を重視して好まない味の食料を摂取し、ときには周りの人と食べる楽しさ、おいしさを重視して健康を犠牲にした食事をとってきたともいえる。しかし、それらは元々どちらかを選択すべきものではないと著者らは考える。さらには、病気などでより健康に配慮した食事を取らなければならない人にとっては、健康への配慮は第一であるが、それでも精神的充足の恩恵を受ける食事環境が必要なのではないだろうか。

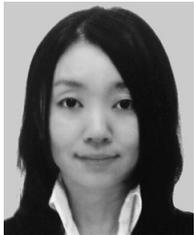
人間の自制力や注意力で補いきることが容易でない欲求を、技術による支援で制御し、健康で豊かな食生活を維持する手法は、食とコンピュータのインタラクション技術として今後発展すると考えられる。著者らが本論文で提案している塩味の味覚感度制御システムも、拡張満腹感システムと同様、欲求に対して味覚感度をコントロールすることで、健康で豊かな食生活に貢献できるはずである。本論文の実験は短時間の味質評価にとどまっているが、今後他の食材での試行、長期的な使用によって、味覚感度制御システムの可能性を追求していきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 12J10525 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 厚生労働省：平成 22 年国民健康・栄養調査結果の概要，入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000020qbb.html>).
- [2] Flegel, K. and Magner, P.: Get excess salt out of our diet, *Canadian Medical Association Journal*, Vol.180, No.3, p.263 (2009).
- [3] 厚生労働省：日本人の食事摂取基準（2010 年度版），入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2009/05/s0529-4.html>).
- [4] Breslin, P.A.S. and Beauchamp, G.K.: Salt enhances flavour by suppressing bitterness, *Nature*, Vol.387, p.563 (1997).
- [5] 金正貴美，當目雅代，野口英子，竹内千夏：嗜好品へのニーズを制限される患者が我慢を繰り返すプロセス，日本看護研究学会雑誌，Vol.34, No.5, pp.11-19 (2011).
- [6] Hettinger, T.P. and Frank, M.E.: Salt taste inhibition by cathodal current, *Brain Res. Bul.*, Vol.80, No.3, pp.107-115 (2009).
- [7] 中村裕美，宮下芳明：電気味覚による味覚変化と視覚コンテンツの連動，情報処理学会論文誌，Vol.53, No.3, pp.1092-1100 (2012).
- [8] Lawrence, G., Salles, C., Septier, C., Busch, J. and Thomas-Danguin, T.: Odour-taste interactions: A way to enhance saltiness in low-salt content solutions, *Food Quality and Preference*, Vol.20, No.3, pp.241-248 (2009).
- [9] Volta, A.: On the Electricity Excited by the Mere Contact of Conducting Substances of Different Kinds, in a Letter from Mr. Alexander Volta, F.R.S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K.B.P.R.S., Vol.90, pp.403-431, Royal Society of London (1800).
- [10] 佐藤昌彦：味覚の科学，朝倉書店 (1997).
- [11] 富山紘彦，富田 寛，奥田雪雄：電気味覚の正常値，日本耳鼻咽喉科学会会報，Vol.74, pp.58-65 (1971).
- [12] Lawless, H.T., Stevens, D.A., Chapman, K.W. and Kurtz, A.: Metallic taste from electrical and chemical stimulation, *Chem Senses*, Vol.30, pp.185-194 (2005).
- [13] リオン株式会社電気味覚計 TR-06，入手先 (<http://www.rion.co.jp/asp/product/me/ProB.asp?pos=B16>).
- [14] Kramp, B.: Electro-Gustometry: A Method for Clinical Taste Examinations, *Acta Oto-laryngologica*, Vol.49, No.1, pp.294-305 (1958).
- [15] Harbert, F., Wagner, S. and Young, I.M.: The quantitative measurement of taste function, *Archives of otolaryngology*, Vol.75, pp.138-143 (1962).
- [16] 富田 寛，少名子正彬，山田 登，都川紀正：電気味覚計 (Elgustometer) : 2, 3 の基礎的問題，日本耳鼻咽喉科学会会報，Vol.72, No.4, pp.868-875 (1969).
- [17] Bujas, Z.: Sensory effects of continuous and repetitive electrical stimulation of the tongue, *Proc. 6th International Symposium on Olfaction and Taste*, pp.265-271 (1977).
- [18] Kashiwayanagi, M., Yoshii, K., Kobatake, Y., et al.: Taste transduction mechanism: Similar effects of various modifications of gustatory receptors on neuronal responses to chemical and electrical stimulation, *J. Gen. Physiol.*, Vol.78, pp.259-275 (1981).
- [19] Arnoldussen, A. and Fletcher, D.C.: Visual Perception for the Blind: The BrainPort Vision Device, *Retinal Physician*, Vol.9, No.1, pp.32-34 (2012).
- [20] Ranasinghe, N., Cheok, A.D., Fernando, N.N.O., Nii, H. and Ponnampalam, G.: Electronic taste stimulation, *Proc. 13th International Conference on Ubiquitous*

- Computing (UbiComp '11)*, pp.561–562 (2011).
- [21] Vazquez-Buenos Aires, J., Payan, Y. and Demongeot, J.: Electro-stimulation of the tongue as a passive surgical guiding system, *Proc. IEEE ICAR'03*, Coimbra, Piscataway, de Almeida, A.T. and Nunes, U. (Eds.), pp.638–643 (2003).
- [22] 中森玲奈, 塚田浩二, 椎尾一郎: 食べテルミン, インタラクシオン 2011 論文集, Vol.2011, No.3, pp.367–370 (2011).
- [23] 村上愛淑, 早樋沙織, 鈴木 優, 佐藤修治, 三末和男, 田中二郎, 椎尾一郎: 塩味センサによる調味支援, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 論文集, pp.659–662 (2006).
- [24] 鳴海拓志, 伴 祐樹, 梶波 崇, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 拡張満腹感: 拡張現実感を利用した食品の見た目の操作による満腹感のコントロール, インタラクシオン 2012 論文集, pp.25–32 (2012).
- [25] Nasri, N., Septier, C., Beno, N., Salles, C. and Thomas-Danguin, T.: Enhancing salty taste through odour–taste–taste interactions: Influence of odour intensity and salty tastants' nature, *Food Quality and Preference*, Vol.28, No.1, pp.134–140 (2013).



中村 裕美 (学生会員)

2009 年日本大学芸術学部音楽学科情報音楽コース卒業, 2011 年明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻修士課程修了, 現在, 同大学院博士後期課程在学中. 2011 年度同大学理工学部助手. 2012 年度より日本学術振興会特別研究員 (DC2), 現在に至る. IPA 独立行政法人情報処理推進機構未踏 IT 人材発掘・育成事業 2010 年度未踏ユース採択, スーパークリエイター認定. 電子情報通信学会学生会員, ACM 学生会員.



宮下 芳明 (正会員)

1976 年生まれ. 2006 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了. 同大学科学技術開発戦略センター研究員を経て, 2007 年より明治大学理工学部情報科学科専任講師, 2009 年同准教授, 2013 年より明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科に移籍, 現在に至る. 博士 (知識科学). ソフトウェア科学会, ACM 各会員.