

## 陰極刺激の提示と停止による塩味味覚感度制御

中村裕美<sup>†1, †2</sup> 宮下芳明<sup>†1, †3</sup>

舌へ陰極刺激提示を行うと、刺激提示中は塩味が阻害されるが、刺激を停止した後は「塩味をさらに強く感じさせる」効果があることが Hettinger らの研究で明らかになっている。本稿ではこの知見を応用し、減塩を支援するシステムを構築した。提案システムは食器（ストローまたはフォーク）と一体化した陰極刺激付加装置をもち、さらに飲食行動検知機構を備えている。飲食行動を検知すると、食品を媒介としてユーザの舌に陰極刺激を付加し、その後停止する。ユーザは、刺激停止後に塩味が強まったような感覚を得られる。このため、塩味の物足りない食事であっても、新たに塩分を付加せずともその感覚を増強することができ、過剰な塩分摂取を防ぐことができると考えられる。

### Salinity Control by Applying and Stopping Cathodic Stimulus to Food and Drink

HIROMI NAKAMURA<sup>†1, †2</sup> HOMEI MIYASHITA<sup>†1, †3</sup>

Hettinger et al. revealed that cathodic current selectively inhibits salty and bitter-salty tastes, thus humans feel that salt taste were recovered and augmented after cathodic current was stopped. We applied this perception to our system for supporting salinity control using drinking and eating detection system and cathodic stimulus controlling system. From the experiments, we found that we can control the perception of salty taste by applying and stopping cathodic stimulus to food and drink.

#### 1. はじめに

舌に陰極刺激を与えると、提示中は塩味を阻害し、提示を止めた後には塩味をさらに強く感じさせる可能性があることが 2009 年の研究で明らかになっている[1]。著者らはこの知見を活用し、飲食物を口に含んだ直後にその食材を介して陰極刺激の提示と停止を行うシステムを構築した。本システムを用いて塩味の味覚感度をコントロールすることで、新たに塩分を付加せずとも飲食物の塩味が強まったように感じさせることができ、余分な塩分摂取の防止につながられると考えられる。

本稿では飲食行動検知機構と陰極刺激付加装置によって構成される塩味味覚感度制御システムについて説明し、システム使用時に利用者が塩味を濃く感じる事ができたかについて評価した実験について報告する。

電気味覚は舌に電気刺激が与えられた際に感じられる味覚である[2]。電気味覚の味質が極性によって異なることは、電極を直接舌面に当て調査した実験で実証されている[3]。さらに 2009 年には、Hettinger らにより陰極刺激が塩味の受容・知覚を阻害する効果が実証された[1]。ゴールデンハムスターを用いた活動電位を直接計測した電気生理学測定からは、塩化ナトリウムの提示で活性化した細胞の活動電位が、陰極刺激によって抑制されることが明らかになった。

さらに彼らが実施した人間を対象とした味質調査では、陰極刺激提示中には味全体の強度や塩味の味覚感度が低下し、提示を停止した後は回復したように感じられることが明らかになった。そして塩分濃度や塩の種類によっては陰極刺激提示前より提示を停止した後のほうが味を濃く感じるという知見も示されている。

塩分には人体に不可欠なナトリウムが含まれているため、適量の摂取が望ましい。2010 年に厚生労働省から発表された「日本人の食事摂取基準」では、食塩摂取目安量は男性 9g 未満/日、女性 7.5g 未満/日と設定されている[4]。しかし今日の食生活では塩分を摂り過ぎる傾向がある。実際に 2011 年 11 月実施の国民健康・栄養調査では、成人の食塩摂取平均量は男性が 11.5g/日、女性で 10.0g/日であり、目安量よりも多くなっている[5]。塩分の摂り過ぎは高血圧による動脈硬化、脳や心臓の血管障害を引き起こす原因ともなり、健康な食生活の維持には、食塩摂取量への配慮が必要である。

しかし、たとえ調理者が減塩を試み、塩分量を抑えた食事を作っても、食べる側は物足りないと感じれば食卓上の調味料を使用してしまう。そもそも生物は塩分に対する生理的欲求が強い。ナトリウムの体内貯蔵量はごく僅かで、体はナトリウムの欠乏に敏感であるため、欲求レベルが高い[6]。生理的欲求はおいしさにも影響を与えるので、塩味は適した濃度であれば、生物にとって好意的な味となる。そのため人間の食塩最低摂取必要量は 1.3g/日程度であるにもかかわらず、摂取目安量さえも超えた量を摂取してしまう。この点においては、もはや塩は嗜好品として作用している。そして嗜好品も、自らの意志で摂取を制限し続け

†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  
†2 日本学術振興会  
JSPS Research Fellow  
†3 独立行政法人科学技術振興機構, CREST  
JST, CREST

るのは難しく、気持ちのゆるみから制限を断念することも少なくない[7].

このように周りの配慮や自らの意志のみで食塩摂取量を控えようとするのは容易ではない。そこで本稿では、塩分の味覚感度をコントロールし、特に物足りないと感じた時に新たに加えてしまう塩分の抑制を支援するシステムを提案する。

著者らは陰極刺激提示による塩味阻害現象という理学的知見に着目し、工学的に応用することで実際の食生活での塩分摂取の減少につなげられないかと考えた。ここでは陰極刺激によって塩味が阻害される効果を利用するのではなく、提示中と比べ提示を停止した後に塩味が強く知覚される効果を活用する。飲食直後に瞬間的な陰極刺激の提示と停止を行えば、元の食材の塩味を本来より強く感じさせられる可能性があるからである。

本稿ではこれらの知見に基づき、飲食行動を検知し、飲食直後に陰極刺激の提示と停止を行う塩味味覚感度制御システムの提案を行う。2章では本研究の基礎となる知見について紹介し、3章では提案システムについて述べる。4章では提案システムを用いた陰極刺激提示時と停止後の味質における調査について、5章にその結果、6章に考察を述べ効果を検証する。7章で他の関連する研究を紹介した後、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 Hettinger らが発見した陰極刺激提示による塩味阻害現象について述べる[1]。塩味を抑制する効果をもつ成分はこれまでにクロルヘキシジンが確認されているが、ビスビグアニドもイオンの流れを阻害し、塩味を阻害することが知られている。そこで電気刺激によるイオンの流れの変化と味受容に着目し、従来から多用されていた陽極に加え、陰極刺激でも味質調査を行うことで、人間の知覚上でも味質に対する阻害効果が発生するかを調査する実験を行っている。

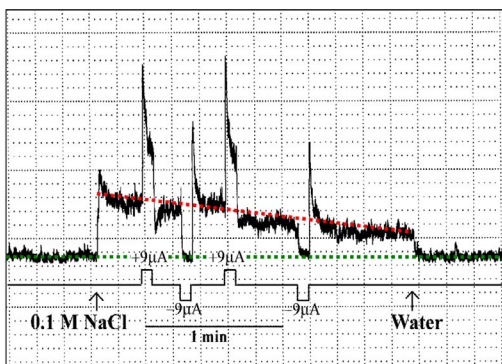


図1 ゴールデンハムスターを用いた電気生理学計測 (Hettinger らの論文[1]より引用)

Fig 1 Electrophysiological Recordings using Golden Hamster

神経細胞の電位変化を直接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ともに陽極刺激と陰極刺激を交互に提示し、活動電位の変化を計測している。図1は計測で得られた塩化ナトリウム提示時の活動電位変化のグラフである。横軸が時間経過、縦軸が活動電位の強度であり、電位の波形が正の方向に増加するほど、活動電位が大きく、神経から伝達される味の強度は強くなると考えられる。緑色の破線が通常の電位であり、赤色の破線は陰極刺激を付加しない場合の塩化ナトリウム提示による活動電位の変化となっている。このグラフから、塩化ナトリウムによって誘起された活動電位において、 $+9\mu A$  を提示した際に電位が赤色の破線より増加し、 $-9\mu A$  を提示した際には活動電位が塩化ナトリウム提示以前の通常電位と同等まで減少することが明らかとなっている。このことから、陽極刺激を提示した際には通常の塩化ナトリウム提示より活動電位が増幅され、陰極刺激を提示した際には塩化ナトリウムによって誘起された活動電位までも減少させていることが確認できる。

細胞の活動電位の測定に加え、Hettinger らは人間を対象に味質について調査を行ない、知覚レベルでの効果も検証している。調査では複数の塩化物水溶液に対し $\pm 40\mu A$  と  $\pm 80\mu A$  の電気刺激を提示し、舌が液体に接した時、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、提示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、提示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、塩分強度だけでなく酸味や甘味、苦味が低下するケースも確認された。また、低濃度の溶液において、溶液のみの時系列味質強度においては時間が経過すると減少するのに対し、途中で陰極刺激の提示と停止を行った場合には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、理学的知見として示されているのが以下の事柄である。

- ・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、提示を止めた後の方が塩分の強度が強く感じられる
- ・陽極刺激は提示中に常に刺激を与えるが、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

本稿で提案する塩味味覚感度制御システムは、2章で説明した Hettinger らの知見を活用し、利用者の飲食行為を基準に陰極刺激の提示と停止を行う装置として実装したものである。陰極刺激提示による塩味阻害現象を調査した先行研究では、理学的知見を得ることを目的とした実験を行っているため、提示前、提示中、停止後の味質について調査している。本稿の提案は知見を基とした工学的応用であるため、図2のように飲食直後に塩味を一度減損させ、その後の塩味の知覚を増強させる目的で、先行研究の知見を用いる。そのため提案手法では、飲食直後に陰極刺激を提示し、すぐに提示が停止することが好ましいと考えられる。

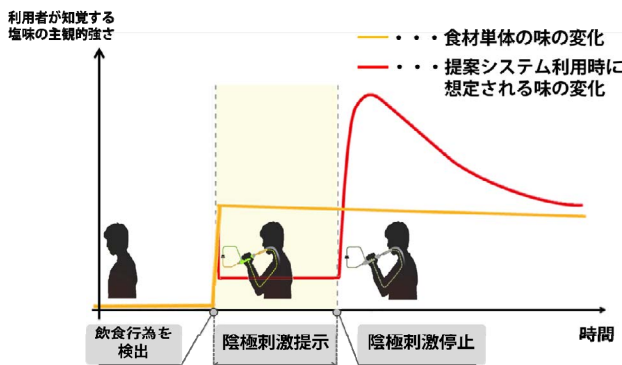


図2 提案システムが想定する塩味知覚の変化

Fig 2. Taste Intensity of Saltiness expected by Proposed System

よって本稿では、飲食行為検知機構として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為検知機構[8]を用い、機構で検出された飲食行為をトリガとして陰極刺激の提示と停止を行うシステムを構築した。

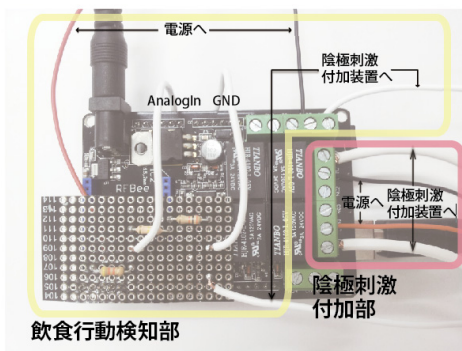


図3 塩味味覚感度制御システム

Fig 3 Proposed System

著者らが開発している電気味覚付加装置は、大きく分類して1極型装置、2極型装置の2種類がある。この極数は口内に提示される電極の数である。1極型は片方の極を口内に、もう一方の極を人体皮膚表面に配し（詳細は3.3章

を参照）、2極型は両方の極を口内に配して、電気味覚の提示を行う。そのため2極型装置で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することができる。実際に提案手法のように舌側に陰極刺激を提示するためには、口内側電極に一極を、人体皮膚表面側電極に+極を割り当てる。

また、1極型装置は提示電極が食品に触れる部分と人体皮膚表面に分かれていることから、飲食を行った際に回路が形成される構造となる。そのため電気味覚付加装置に一定の電圧を印加した場合、飲食時は人体を含んだ回路が構成され、通常時と比べ電圧が高くなる。この電気回路の電圧変化を利用したのが飲食行動検知機構である。以下に飲食行動検知機構とそれをトリガとした陰極刺激付加装置の詳細について述べる。

#### 3.1 飲食行動検知部

人体は導体となるため、電気回路内に人体を配置すれば、回路の一部として動作させることができる。また、回路の構成によっては、人の動きによって回路が形成される仕組みを構築することができる。3章で説明し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を有している。そのため飲食を行い回路が形成されると、電圧の上昇が起こる。

飲食行動検知機構では、回路内の電圧変化を監視し、電圧の上昇を検知するために、検知用電源（9V電池）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のアナログ入力に与えている。アナログ入力に与えられる電圧が閾値を上回った時、飲食行動が行われたと判断する。閾値は個人差があるため、検知用回路を用いて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 陰極刺激付加部

陰極刺激付加部では、先に述べた飲食行動検知部によって飲食が検知された際に、陰極刺激を付加する。本提案ではSeedstudio社製のArduinoシールドであるRelay shieldを用い、飲食検知が行われた直後に短時間の陰極刺激付加を行う。

陰極刺激付加用電源（9V電池2ヶ）と電気味覚付加装置の間にはリレーを配置しており、飲食行動が検知されない際には回路が切断されている。飲食行動が検知された際にリレーを制御し陰極刺激付加用回路を形成することで、飲食直後に陰極刺激を付加できる。また、提示が開始されてから一定時間の後にリレーを再度制御し、陰極刺激付加用回路を切断することで、陰極刺激の付加を止める。付加時間長は利用者が任意に設定することも可能である。

この際、飲食行動検知機構を常時稼働させたままにすると、陰極提示装置から出力された電圧を検知してしまうため、閾値として設定した値を上回り続け、誤作動を起こす可能性がある。そのため飲食行動が検知され、陰極提示装



置から陰極刺激が出力されている間は飲食行動検知機構の稼働を止めるように設定した。本装置の設定では、飲食行動検知機構から飲食行動検知用電源の陰極に接続されている配線の間に関接リレーを配置し、検知用回路を切断している。

飲食行動検知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瞬間的に陰極刺激を付加し、その後の塩味味覚感度をコントロールできる。また、万が一システムが陰極刺激付加を止める前に利用者が装置から口を離れたとしても、結果として陰極刺激の付加が止まるため、同様の効果を得ることになる。

### 3.3 陰極刺激付加装置

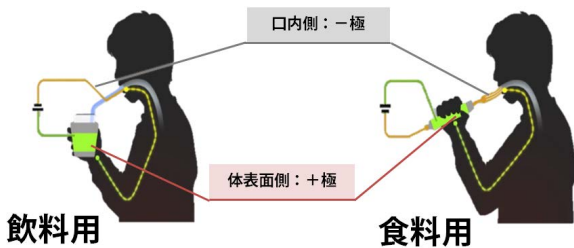
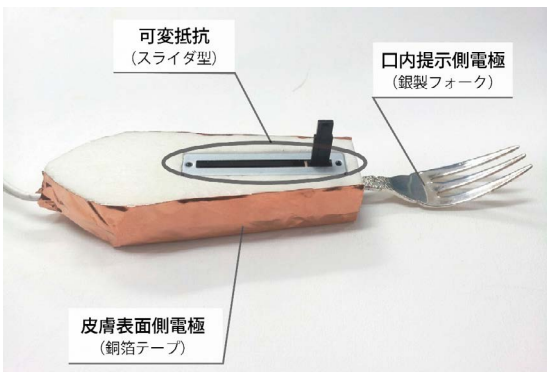


図4 陰極刺激付加装置の概観

(上：飲料用 中：食料用 下：回路の構成)

Fig. 4. Single-pole type apparatuses to apply cathodic stimulus (above: for Beverage middle: for Food Below: Circuit Construction)

本章では提案システムの提示部となる陰極刺激付加装置について説明する。これまで著者らは電気味覚を飲食物に付加する装置を作成[9]、改良するとともに、複数名での使用や味覚能力の拡張[10][11]、マルチモダリティ環境への

応用[12]などの提案に活用してきた。本稿ではこれら提案で活用し、本実験でも用いる1極型装置について説明する。1極型装置は口内提示極と皮膚用面提示極を持つ装置である。これら装置は日常の食事での活用を図るため、フォークまたはカップの形状を模した飲料用と食料用を作成している(図4)。口内提示極となるフォークまたは金属棒は、安全面に配慮し銀素材(フォーク：森銀器製、金属棒：ニラコ製)を用いている。両装置ともに出力を調整するスライダボリュームまたは可変抵抗器を有しており、利用者は手で任意に出力を調整することもできる。

電源部には直流電源(9V電池×2ヶ)、交流刺激を提示する波形出力器(15Wレベルの増幅器を含む)[11]、直流刺激の提示を任意に切り替えられる極性反転回路を接続でき、手元の抵抗器以外で出力を制御することも可能である。

### 4. 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における効果の検証

本節では3章で説明した塩味味覚感度制御システムの効果を検証するために、付加中と停止後の味質の違いと、元の食料と付加後の食料の味質に差が見受けられるかについて調査した。

実験は食料を対象とし、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14名(男性13名、女性1名)で、実験前に電気刺激を付加することを伝え、同意の元で実験を行った。また実験開始前のみ口内環境を整える目的で水を飲ませている。

本装置は実験前に検知用回路のキャリブレーションを必要とする。これは実際に装置を用いて舌面に飲食物を接触させ、接触時と非接触時の電位差を計測し、接触と判断するための閾値を設定するものである。このとき陰極刺激付加装置も同時に稼働してしまうと、本実験の提示と同様の効果を体験してしまう可能性があるため、キャリブレーション時には飲食行動検知部のみ作動させている。また、キャリブレーションで行う操作は実験と同じとし、被験者に使用法を教示した。本実験の飲食行動検知部で食材にかかる電圧は最大1.5V程度、電流は40 $\mu$ A程度であり、直接電気刺激を舌面に与えた際に感じられる弁別閾値よりは高い値となっているが、この電気刺激で食材の味が左右されたと感じる利用者は1名のみであった。また、陰極刺激付加部から食材に付加される電圧は-5.1V程度、電流は250 $\mu$ A程度となっている。

キャリブレーションでは試料を挿入したフォークを渡し、実験者の指示にあわせて食材を舌の上に乗せる、離す操作を行わせた。この際試料から電極部が露出しないように挿入している。食材を舌の上に乗せる時間は本実験の時間に合わせ、6秒程度とした。

キャリブレーション回数は3回を目安とし、飲食行動を

完全に検知できる値を設定した。ただし3回で設定できない場合は適宜追加した。キャリブレーションの1回目では実験の流れの把握として舌に乗せる、離す作業を、2回目と3回目で舌に乗せたときと実験者が用意した音刺激があった後とで味質の違いがあるかを口頭で質問し、刺激を提示しないときに味質の差がないかを確認した。

実験ではキャリブレーションと同様、試料を挿入したフォークを渡し、実験者の指示にあわせて食材を舌の上に乗せる、離す操作を行わせた。食材を舌の上に乗せる時間はこちらも6秒程度とした。陰極刺激は舌との接触後3秒程度提示され、直後に提示が止まる。提示が止まるタイミングには、音刺激も同時に提示を行っている。その後3秒程度舌上に留めた後、被験者は飲食物を口から放す。この作業を1回とし、被験者には3回の試行を行わせた。各試行の終了後に、被験者には口頭で「味の違いを感じたか」を質問し、味の違いを感じた被験者には「前後どちらが全体の味を濃く感じたか」「前後どちらが塩味を濃く感じたか」について質問した。実験者は被験者の回答を試行ごとに記録した。また、被験者には味質の違いについて、自由回答も可能とした。

最後に、陰極刺激を付加しない試料を実験で用いたものと同じフォークで舌の上に乗せるように指示し、6秒後に舌から離すよう指示した。その後、実験で味の違いを感じた被験者には元の試料から感じられる味の濃さと提示停止後に感じられる味質の濃さを比較させた。

## 5. 実験結果

表3 試行回数に対する味覚感度制御成功回数

Table 3. Number of successes trial in all trial

味質の差異を感じた回数	39回
付加停止後の味質を強く感じた回数(全体)	39回
付加停止後の味質を強く感じた回数(塩味)	37回
味質の差異を感じなかった回数	3回

実験の結果、42試行(14名×3試行)中39試行で陰極刺激付加中と停止した後に味質の差を感じるとの回答を得た(表3)。被験者別では14名中11名が3回の試行全てで味質の差異を感じ、残り3名は3回の試行のうち2回味質の差異を感じている。

また、差異を感じたと回答があった39試行全てにおいて、陰極刺激の付加を停止した後のほうが味を濃く感じていた。塩分の濃さに対する比較では、39試行中37試行で陰極刺激付加を停止した後のほうが濃く感じるとの回答を得た。

さらに陰極刺激付加を停止した後の試料の味質と元の試料の味質との比較(表4参照)では、14名中10名が「付加停止後の試料の方が濃く感じる」、3名が「元の試料の味のほうが濃く感じる」、1名が「付加停止後の試料と元の試料の味の濃さは同程度である」と回答した。

表4 元の食材と付加停止後の味の濃さの比較(被験者毎)

Table 4. Comparison of the Taste Intensity between Original and Proposed System

元試料の味の濃さ<付加停止後の味の濃さ	10名
元試料の味の濃さ=付加停止後の味の濃さ	1名
元試料の味の濃さ>付加停止後の味の濃さ	3名

陰極刺激付加中と停止後の味質における被験者からの自由回答(複数回答を認める)は以下の通りである。

塩味の変化について述べる被験者は7名で、「塩味が振りかけられたように感じる」「自然な塩味がある」「塩辛くなった」というような意見が得られた。また、塩味に関連して、「山椒の含まれた料理を食べた後に感じる唾液の塩辛さに似ている」と述べた被験者が1名確認された。

また、塩味以外の変化について、明確に対象を述べた被験者は4名で、そのうち2名が「テクスチャに差異を感じた」、各1名が「酸味を感じる」「温度が異なる同一の食材で感じるような味の差異があった」と述べている。

さらに、付加中と停止後の差異として、味の濃さについて述べた被験者が5名確認されている。うち3名が付加中の味に対し「風味がない」、1名が「付加を停止した直後が味質の差が大きく、以降減衰した」と回答している。また、3名の被験者は「1試行目に比べ3試行目のほうがより自然な食材の味として感じる」「1試行目は電気の味が加わったように感じたが、2試行目以降塩味や魚肉の味が濃くなった」と3回の試行での推移について回答した。

## 6. 考察

実験の結果より、味質の差異を感じた試行回数は全体の試行回数の92.9%を占め、ほぼ全ての試行で味質の差異を感じる事が示された。また、味質の差異を感じた試行に対して行った味の濃さにおける質問では、全て付加中より停止後のほうが味を濃く感じられると回答がされた。塩味の濃さにおいても、全体の試行回数の88.0%で付加中より停止後の方が濃く感じられると回答がされている。さらに被験者毎に見ると全被験者が3試行中2試行以上でこれらの差異を感じているので、提案システムを用いた際に全く味質や濃さの違いを感じない被験者はいないこととなる。このことから、陰極刺激付加によって塩味やその他の味質が阻害され、付加を停止した後に阻害されていた味質を感じることができること、そして提案システムが元の食材の塩味の味覚感度を制御できる可能性が示された。

14名中10名が、付加停止後の味のほうが元の試料の味と比較しても濃いと回答した。このことから、塩味味覚感度の制御によって、元の食材の塩味を本来より強く感じさせられる可能性も示されたと考えられる。ただし、14名中3名は元の試料の味のほうが濃いと回答している。この原因については、電気刺激出力に対する人体抵抗の個人差も

考えられる。今後陰極刺激の強度にもバリエーションを与え、個人毎に最も効果が得られる出力の程度を検討していきたいと考えている。

被験者による自由回答では、塩味の変化に対する回答が最も多く見受けられたが、酸味等その他の味の変化についての回答も見受けられた。また食材そのものの味の濃さの変化として感じられるという回答も見られ、中には陰極刺激付加中は食材の風味が減ったかのように感じたという回答もあった。先行研究[3]を鑑みれば、付加中にも陰極刺激による何らかの味質が付加されることも懸念されるが、本実験の環境で言えば陰極刺激の付加と停止によって制御された塩味味覚感度の影響のほうがより強いと考えられる。

なお、本装置を用いた電気刺激付加における金属、金属イオンの溶け出し、金属アレルギーの危険性については、少なくとも提案装置で用いている銀素材では、これらの危険性が非常に少ないと考えられる。銀はもとより抗菌剤や製菓材料のアラザン、口中清涼剤の仁丹などの食品添加物に用いられている。金属イオンのうち有害性を認めうるものは水道法によって指標値が定められているが、銀に関しては指標がなく、世界保健機構（WHO）でも、銀化合物による発がん性、急性暴露、慢性暴露による人体への影響はないとされている。また、東京医科歯科大学で行われた18種の金属アレルギーパッチテストでも、アレルギー反応で最下位であり、186名中1-2名程度のみ反応を示す程度である[13]。この値は金属イオンが溶け出しにくいとされている金や白金より低い。上記のテストは非通電状態での接触面からの金属イオン溶出について述べたもので、通電時については触れられていない。そのため全く金属アレルギー反応が起こらないとは言いきれないが、可能性が非常に低いと考えられる。

電気味覚の味質が電極金属の溶け出しによるものではないかという指摘もあげられる。この点においては、人体に電極を固定し、通電した人体と舌が触れた状態でも電気味覚を感じることができるため、電気味覚の味質は電極金属の溶け出しによるものではないと考えられる。

## 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時にその存在を発見した。その後1792年にVoltaが発生原因の仮説として、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[2]。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、塩味を感じることが確認されている。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[3]。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[14]。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[15]、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[3]。

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[16][17][18]、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挙げられている[19]。

電気味覚の発現機序としては複数の説が上げられ、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[20]。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<sup>2+</sup>チャ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<sup>2+</sup>チャネルが関与していることが示されている[21]。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[1]。

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[22]、味情報の伝達用途としての活用[23]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0.4~2.0mA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[24]。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[23]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接触さ

せ、電気味覚を提示する形のものである。

中森らによる食ベテルミン[25]では、フォーク型のデバイスを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、中森らの装置は音響的に用いられているため、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付加されていない。

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、それによる遠隔地での味の濃さの伝達を図った[26]。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[27]。

## 8. おわりに

本稿は飲食と同時に陰極刺激を付加し、塩味を阻害することにより、付加の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もとに構築している。本稿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付加し、飲食中に刺激の付加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、新たな塩分付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、付加中と停止後で味質強度、塩味の強度に差が見られたほか、元の食材の味質よりも付加停止後に感じる味質を強く感じる傾向が見られた。そのため本装置の利用によって塩味の物足りない食事で新たに塩を振りかけてしまう可能性が減り、結果として塩分

の摂取抑制につながることができるといえるだろう。

また、実験終了後に被験者に「電気刺激が加わっているとしたらどのあたりと考えるか」と質問したところ、13名の被験者は味を濃く感じた付加停止後であると回答し、残り1名は途中で電気刺激の種類を変えたのではないかと回答した。著者らの提案も含め従来の電気味覚活用手法は、主に付加時に感じられる味を活用している。そのため味が濃くなったのを刺激提示によるものとするのも自然である。本稿は電気味覚を用いて刺激提示後の食材にも影響を与えられる事を示しただけでなく、提示時に電気刺激を意識させない利用の可能性も切り開いているともいえる。

今後の改良として、提示時間長や出力強度と塩分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、陰極刺激の提示と停止が塩味以外の味質に与える影響についても、より詳細な調査を行なっていく予定である。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。

人は健康だが淡白な食事より、不健康でも精神的充足を満たす食事を選ぶのではないか。それは、健康に配慮した食品や献立が提案されても生活習慣病がなかなか減らないのと同様である。鳴海らが提案した拡張満腹感システムは、人間の知覚や心理の特性を元に、インタラクションや画像処理技術を活用して、我々の飲食に対する満腹感の制御を行うことに成功している[27]。

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。著者らが本稿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。本稿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** 本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費の支援を受けている。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Hettinger, Thomas P and Frank, Marion E: Salt taste inhibition by cathodal current, *Brain Res Bul*, vol.80(3), pp.107-115(2009).
- 2) . Volta, A.: On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. in a letter from Mr. alexander Volta, frs professor of natural philosophy in the university of pavia, to the rt. hon. Sir joseph banks, bart. kbprs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 90, pp.403-431 (1800).
- 3) 佐藤昌彦：味覚の科学，pp.183-189，朝倉書店(1997).
- 4) 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>

5) 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/2r9852000020qbb.html>.

6) 都甲潔: 感覚バイオセンサ-味覚と嗅覚の科学, pp.30-31, 朝倉書店(2001)

7) 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).

8) 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).

9) 中村裕美, 宮下芳明: 飲食物+電気味覚, 第 18 回エンタテイメントシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2010), pp.204-206 (2010).

10) Nakamura, H. and Miyashita, H.: Communication by change in taste, Proc. 2011 Annual Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.1999-2004 (2011).

11) Nakamura, H. and Miyashita, H.: Augmented Gustation using Electricity, Proc. 2nd Augmented Human International Conference (AH2011), pp.34:1-34:2 (2011).

12) Nakamura, H. and Miyashita, H.: Development and Evaluation of Interactive System for Synchronizing Electric Taste and Visual Content ,Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems(CHI2012), pp.517-520 (2012).

13) 井上昌幸(監), 中山秀夫, 松村光明(編): G Pのための金属アレルギー臨床, デンタルダイヤモンド社, 2003

14) 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).

15) 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).

16) 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>.

17) Kramp, B.: Electro-Gustometry: A Method for Clinical Taste Examinations, Acta Oto-laryngologica, Vol.49, No.1, pp.294-305(1958).

18) Harbert, F., Wagner, S., Young, I.M.: The quantitative measurement of taste function, Archives of otolaryngology vol.75, pp.138-143(1962).

19) 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).

20) Bujas Z.: Sensory effects of continuous and repetitive electrical stimulation of the tongue. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Olfaction and Taste, pp.265-271(1977).

21) 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).

22) 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).

23) Ranasinghe, N., Cheok, A. D., Fernando, N. N. O., Nii, H., and Ponnampalam, G.: Electronic taste stimulation. In Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing (UbiComp '11), pp561-562(2011).

24) 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).

25) 中森玲奈, 塚田浩二, 椎尾一郎: 食ベテルミン, インタラクシオン 2011 論文集 Vol. 2011, No. 3, pp.367-370(2011).

26) 村上愛淑, 早稲沙織, 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).

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).