

無限電気味覚ガム：圧電素子の咬合を用いた 口腔内電気味覚装置

大場 直史¹ 青山 一真² 中村 裕美^{3,†1} 宮下 芳明²

概要：近年ではバーチャルな味覚再現や食品の味覚制御を行う研究で電気味覚が応用されている。これらのシステムでは、電源の供給方法は外部から有線で給電するか、バッテリーを内蔵するものであった。しかし前者ではケーブルの取り回しが煩雑であり、後者では利用時間の短さや液漏れが懸念される。そこで筆者らは圧電素子を用いた口腔内味覚提示装置を提案する。圧電素子は圧力を加えることで電気が生じるセラミックを主成分とする素子であり、口腔内咀嚼時の噛む力でも発電が起こる。筆者らはこれを電気味覚装置の電源として用いることで、口腔内でシンプルかつ安全な機構にできるほか、半永久的に味覚提示が可能な、いわば「無限電気味覚ガム」が実現できると考えた。本稿では実験より味覚提示に必要な電流の強さを満たすことと、味覚器で苦味と金属味を知覚できたことを報告し利用の可能性を示した。

UnlimitedElectricGum : Proposition of Electric Taste Apparatus by Chewing Piezoelectric Element in Mouth

Ooba Naoshi¹ Aoyama Kazuma² Nakamura Hiromi^{3,†1} Miyashita Homei²

1. はじめに

電気味覚とは、舌や口腔内に存在する味覚器へ電気刺激を提示した際の味のような感覚である。この現象は1752年に発見され[1]、人間の味覚器の機能を検査する電気味覚計の開発に利用されてきた[2][3]。近年ではバーチャルな味覚の提示と、食品の味を制御する試みがなされている。

Nimeshaらは電気の提示パターンでさまざまな味質を再現できることを示した[4]。さらに温度提示との組み合わせ

せ[5]や、提示箇所による味質の感じ方を調査した[6]。

また飲食時に電気刺激を提示することで、食材への味の付加や、味の制御を試みた研究がある。本稿第3筆者らは2010年に飲食物を介在させる電気味覚の提示手法を提案[7]、後に適用例として塩分を用いない塩味味覚感度制御[8]を行っている。有賀らは味覚器に提示する電気の極性を変えることで、スープの味が変化することを示した[9]。本稿第2筆者らは顎部電気刺激を用いることで口腔内に電極を設置しない手法[10]と、咽頭への味覚提示を示した[11]。食塩摂取量をコントロールする医療機器としての利用だけでなく、飲食行為の楽しさを拡張する方法としても期待されている。

これまでの研究ではいずれも電気を外部から供給する必要がある。外食時や人目に付く場所では特殊な食器類や配線の利用は難しいと考えられる。小型バッテリーを口腔内に設置する場合、利用可能な時間の長さだけでなく誤飲による人体への影響が懸念される。

そこで筆者らは圧力を加えることで電気を生じる圧電素子に着目した。人間がある程度の硬さや大きさを持つ食品

¹ 明治大学大学院 先端数理科学研究科 先端メディアサイエンス専攻

Program in Frontier Media Science, Graduate School of Advanced Mathematical Sciences, Meiji University

² 明治大学 総合数理学部

Faculty of Interdisciplinary Mathematical Sciences, Meiji University

³ 明治大学大学院 理工学研究科

Program in Frontier Science and Innovation, Graduate School of Science and Technology, Meiji University

^{†1} 現在、産業技術総合研究所 情報技術研究部門 メディアインタラクション研究グループ

Presently with Media Interaction Group, Information Technology Research Institute (ITRI), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)



図 1 圧電素子を利用した味覚提示装置プロトタイプ（上）とカバー（凹型・凸型） 導線を折り曲げた状態（右下）。

を摂取する際は、咀嚼を必要とする。この咀嚼時の咬合で発生する力を用いて圧電素子を発電させることで、外部からの給電なく半永久的に動作する電気味覚装置を作成できると考えた。圧電素子の主要な素材であるセラミックは生体適合率が高く、誤って飲み込んでしまった場合でも人体への影響が少ないと考えられる。また装置の破損が起きない限りは連続利用できることも優れる。すなわち「無限電気味覚ガム」も実現可能で、さらには基本五味を制御して万能な味も提示可能になる将来性を秘めている。

本稿ではこの「無限電気味覚ガム」のプロトタイプを提案する。2章で装置の構成について述べ、3章、4章で咬合時の電流量測定と味覚器への提示を行った結果について述べる。

2. システム

2.1 圧電素子

圧電素子とは水晶等の結晶構造に圧力をかけた際に生じる、表面の電荷が偏る現象（圧電現象）を発電に利用するものである。この素子に力を加えることで、結晶部の歪みに応じた電圧及び電流を瞬間的に得ることができる。1880年に Jacques らが、物質の温度変化と電荷分極の知見（焦電効果）をもとに圧電効果を示した [12][13]。これとは逆に電界を与えることで物質の変形が生じる逆圧電効果も後に発見されている。現在この素子はライターの着火装置や圧力センサ、発電床に利用されている。

今回利用した圧電素子は直径 15mm（結晶部 12mm）のものを利用する。唾液や口腔接触によるショートを防ぐため、プラスチックフィルムによるラミネート加工を行った（図 1 上）。咬合時に力を加えやすくするため、アクリル製のカバーを貼り付けた。このカバーは突起をつけた側と受け皿となる側に分かれており（図 1 左下）、力を掛けることで間に挟んだ圧電素子を歪ませやすい構造になっている。

2.2 電極

電気刺激の提示方法には陰極と陽極の両方を味覚器に接

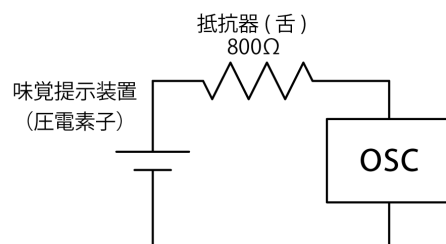


図 2 唾液の影響を受けない舌部への提示を再現する回路。

触させる両極型と、どちらか片方を他の部位に取り付ける一極型がある。提示する極性によって味質の違いや塩味阻害が生じる [14] ため、近年の研究では一極型を用いることが多い。今回は提示が容易な両極型で実験を行う。

圧電素子をラミネートする際に、陽極・陰極へそれぞれ短冊状の銀板を挟み込むことで導線並びに電極とした。この電極の横幅は 3mm 程度、厚さは 0.1mm である。一部配線はショートを防ぐため、間にプラスチックフィルムを挟んでいる。

3. 噛む力と電流量の測定

3.1 実験

作成したプロトタイプを噛むことで、電気味覚提示が可能な電流量を得られるかを調査する。年齢によって異なるが、味覚を感じる標準的な電流の閾値は $8\mu\text{A}$ 程度 [15] とされ、電気味覚計では $4\text{--}400\mu\text{A}$ の範囲で用いられる [16]。従って $4\mu\text{A}$ を超える電流量を得られれば、電気味覚提示が可能であると考えられる。

人体へ電気刺激の印可を行わず、有効な電流量を測定するには人体を模した回路構築が必要である。舌表面へ電気刺激を提示した際、通電経路は舌内部と口腔内に溜まっている唾液の 2 経路が考えられる。それぞれの抵抗値を用いた回路で電流量を求めようとしたが、有効な唾液の抵抗値は既存の文献より得ることができなかった。この実験ではすべて舌内部を通った場合の回路を構築し、測定を行う（図 2）。舌の抵抗値は人体の電気抵抗を参考にした [17]。人体の電気抵抗は内部抵抗（ 500Ω ）と皮膚の接触抵抗（濡れている場合は $0\text{--}300\Omega$ ）の合算値であるため、 800Ω を用いる。

噛む力の測定には圧力センサを用いる。圧力センサは圧電素子とカバーの間に挟み、キャリブレーションを行ってから利用した。噛む位置は上下の第一大臼歯と第二大臼歯（図 3）で行うよう、測定開始前に図を用いた指示をする。

測定は左右の奥歯でそれぞれ 2 セット、1 セットあたり 5 回連続の咬合を行わせる。煎餅のようにかみ砕くのではなく、ガムを繰り返して噛むイメージで行うように指示する。セット毎に左右を入れ替え、必要に応じて休憩を設けた。実験参加者は筆者含む 23-24 歳の男性 4 人である。

実験時にデジタルオシロスコープより得られたのが図 4 の波形である。咬合に合わせて電圧が生じ、そのピークを超えた後にほぼ同じ大きさの逆の電圧を生じていること

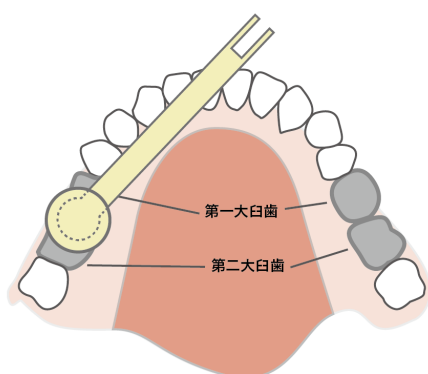


図 3 プロトタイプを噛む，第一大臼歯と第二大臼歯の位置。

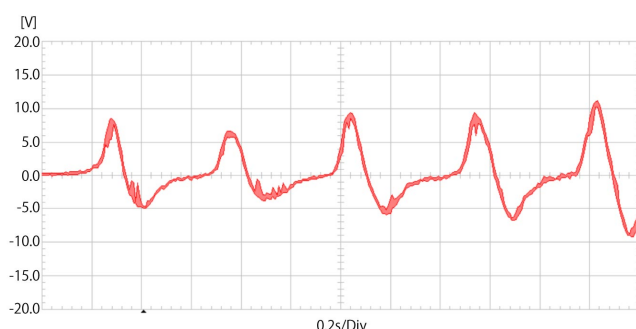


図 4 デジタルオシロスコープによる電圧の観察。

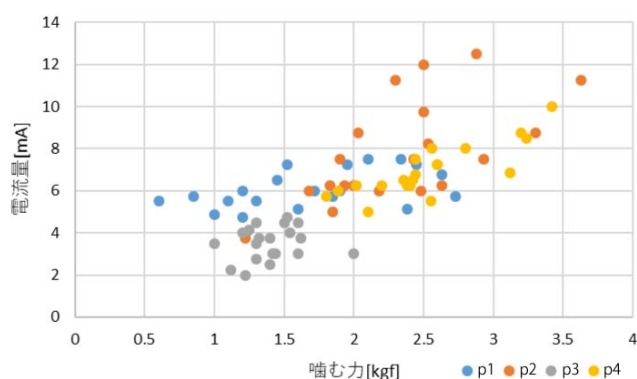


図 5 プロトタイプを噛む力と得られた電流の関係。

表 1 実験 1：参加者毎の噛む力と電流量の平均

参加者	噛む力 [kgf]	分散	電流量 [mA]	分散
p1	1.69	0.36	6.08	0.75
p2	2.34	0.31	7.84	5.66
p3	1.40	0.04	3.50	0.60
p4	2.53	1.89	6.96	1.41

が読み取れた。噛むスピードは特に指示をしていないが、1000ms 程度の周期で行われていた。

各参加者の噛む力と得られた電流のピークをプロットしたものが図 5，平均を纏めたものが表 1 である。全ての実験参加者に対して，電気味覚の提示に必要なとされる電流量を超えていることが分かった。また，掛けた力に応じて電流量が増加する傾向が読み取れた。

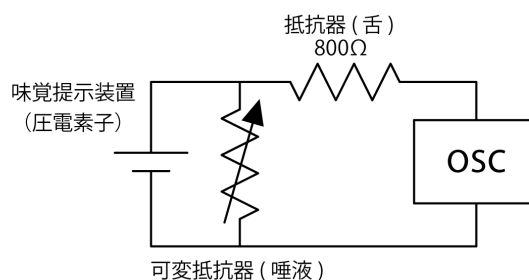


図 6 唾液の影響を含めた舌部への提示を再現する回路。

3.2 考察

電気味覚提示に必要な電流は $4\mu\text{A}$ とされ，この実験の最も弱い電流のピークは 2mA であった。よって味覚提示は可能であると考えられる。電流はごく短い時間を行っていたが，味覚提示に用いられる値を大きく上回っていた。必要に応じて提示時間を伸ばし，電流量を下げる対応が考えられる。

実験後に舌だけでなく口腔内の唾液も通電する場合を調査した。図 6 のような並列回路を構築し， $4\mu\text{A}$ を満たす唾液の抵抗値下限を求めると， 300Ω 程度であった。海水及び食塩水の電気抵抗率は $2.0 \times 10^{-1}\Omega\text{m}$ 程度とされ，唾液の電気抵抗率及び抵抗値も人体に比べて低い値を持つと推測できる。飲料を口に含んだ状態や咀嚼によって唾液が多くなった場合は感じる味が弱くなる可能性がある。

4. 味覚器への適用

4.1 実験

前章の実験では，圧電素子の咬合によって発生する電流量が電気味覚の提示が可能な値であることが示された。本章では，プロトタイプ使用時にこの電気刺激が電気味覚として感知できるかについて報告する。この実験参加者は筆者本人のみである。

導線部を折り曲げ，プロトタイプを噛んだ際に口腔内や舌に電気が流れるようにした（図 1 右下）。噛む位置は前の実験と同じ位置で行う。

筆者が噛んだ瞬間と離れた瞬間に苦味と金属味が強調された。また極端に弱い場合を除いて，噛んだ強さによる味の鮮明な変化は感じられなかった。実験中に舌などに痺れはなかったが，後に先の硬いペンで勢いよく叩いた場合は痛みを感じるがあった。

4.2 考察

先行研究 [4] では，味覚器に電気刺激を提示した際に苦味や金属味，塩味を感じたと報告している。このプロトタイプからはじわじわとした金属味を感じられたため，電気味覚提示が行えたと考えている。

ペンで勢いよく叩いた場合をデジタルオシロスコープで測定したところ，歯で噛んだ場合よりもやや強い電流が

短い時間に生じているとわかった。提示する電流のパルス回数や幅による味の違い [18] と合わせた詳しい調査が必要である。

5. 展望

本稿では提示に必要な電流の強さが得られたことに加え、味覚器で苦味と金属味を感じられたことから、圧電素子の咬合による電気味覚提示は利用可能だと結論できる。

しかし、より強い味の提示を可能にすることが今後の課題となろう。圧電素子を利用した装置によって味覚を感じることと、噛む力によって電流量が変化することは分かったが、ユーザが味の強弱をコントロールし、それを知覚する段階までには至っていない。筆者らは電流量を増加させることと、電流の流れる時間を長くする2つのアプローチによって解決を考えている。電流量の増加は、唾液の影響により舌へ流れる電流量の減少に対応するものである。利用する圧電素子の枚数を増やし、より大きな電圧及び電流を得ることで知覚がしやすくなる可能性ある。

また、噛んだ瞬間と離れた瞬間には大きな電流量が得られているが、極性の反転により減衰も速い。これをうけ、筆者らは電流の持続時間を長くする方法の一つとしてコンデンサの組み込みを考えており、その試作と有効性の検証を行いたい。

現在は電極とカバーが分かれているが、これらの一体化によってさらに小型な味覚提示部や電極のカスタマイズを実現できる。カバー形状や素材による噛み応えのデザインについても検証予定である。

参考文献

- [1] Volta, A. On the Electricity Excited by the Mere Contact of Conducting Substances of Different Kinds. *Philosophical Trans, Royal Society of London*, Vol. 90, pp. 403-431, 1800.
- [2] リオン株式会社電気味覚計 TR-06A, <http://www.rion.co.jp/product/medical/electrogustometer/list.html#a000083> (参照日時:2017/12/19).
- [3] Bent Kramp. Electro-gustometry: a method for clinical taste examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, Vol. 49, No. 1, pp. 294-305, 1962.
- [4] Nimesha Ranasinghe, Adrian David Cheok, Owen Noel Newton Fernando, Hideaki Nii, Gopalakrishnakone Pon-nampalam. Electronic taste stimulation. In *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing (UbiComp '11)*, pp. 561-562, 2011.
- [5] Nimesha Ranasinghe, Ryohei Nakatsu, Hideaki Nii, Pon-nampalam Gopalakrishnakone. Tongue Mounted Interface for Digitally Actuating the Sense of Taste. In *Proceedings of the 2012 16th Annual International Symposium on Wearable Computers (ISWC '12)*, pp. 80-87, 2012.
- [6] Nimesha Ranasinghe and Ellen Yi-Luen Do. Digital Lollipop: Studying Electrical Stimulation on the Human Tongue to Simulate Taste Sensations. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, Volume 13, Issue 1, No. 5, 22 pages, 2016.
- [7] 中村裕美, 宮下芳明. 飲食物+電気味覚. 第18回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2010), pp. 204-206, 2010.
- [8] Hiromi Nakamura, Homei Miyashita. Controlling saltiness without salt: evaluation of taste change by applying and releasing cathodal current. In *Proceedings of the 5th international workshop on Multimedia for cooking & eating activities (CEA '13)*, pp. 9-14, 2013.
- [9] Yukika Aruga and Takafumi Koike. Taste change of soup by the recreating of sourness and saltiness using the electrical stimulation. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference (AH '15)*, pp. 191-192, 2015.
- [10] 青山 一真, 櫻井 健太, 古川 正紘, 前田 太郎, 安藤 英由樹. 顎部電気刺激による味覚提示・抑制・増強手法. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, No. 2, p. 137-143, 2017.
- [11] 青山 一真, 櫻井 健太, 前田 太郎, 安藤 英由樹. 下顎部電気刺激による咽頭への局所的な味覚提示. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, No. 2, p. 145-148, 2017.
- [12] Curie Jacques, Curie Pierre. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées. *Bulletin de la Société minéralogique de France*, Vol. 3, pp. 90-93, 1880.
- [13] TDK Techno Magazine. 第89回 力で電気を生み出す仕掛け 一身の周りにおける圧電効果-. <http://www.tdk.co.jp/techmag/knowledge/200803u/> (参照日時:2017/12/19).
- [14] Hettinger, Thomas P, Frank, Marion E. Salt taste inhibition by cathodal current. *Brain Res Bul*, Vol. 80, No. 3, pp. 107-115, 2009.
- [15] 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, No. 11, pp. 1580-1587, 1971.
- [16] 富田 寛. 味覚障害の全貌, 第十章 臨床味覚検査法, 診断と治療社, pp. 101-106, 2001.
- [17] 一般財団法人九州電気保安協会. 感電. https://www.kyushu-qdh.jp/public_interest/howto_electlic/shock/ (参照日時:2017/12/19).
- [18] G. Von Békésy. Sweetness produced electrically on the tongue and its relation to taste theories. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 19, No. 6, pp. 1105-1113, 1964.