

FoodSkin: 金箔回路を用いて電気味覚を実現する食品拡張手法の提案

元村 愛美¹ 中村 裕美² 池松 香^{3,1} 五十嵐 悠紀¹ 加藤 邦拓⁴

概要：本稿では、食品表面に食用の金箔の導線や電極を形成し、回路の一部として機能させることで食体験を拡張する手法を提案する。また提案手法の応用例の一つとして、電気刺激により味覚の提示や抑制・増強（電気味覚）を実現する回路を試作したので報告する。従来の電気味覚の提示手法では、食品自体が電気回路の一部となるため、水分含有量が少なく電気を通さない食品への適用は困難であった。提案手法では、食品の表面に金箔で作成した電極を貼り付け、電源装置を接続した手袋型デバイスを通じて電流を印加した食品をユーザが口にすることで、電極から直接、口内に電気刺激を与える。これにより、クッキーやチョコレートなどの水分含有量の少ない食品を用いた電気味覚が提示可能となる。

1. はじめに

食欲は人間の生理的欲求の一つである。食事に目を向けてみると、人間の生存に不可欠な栄養素の中には、食事を通して体外から摂取する必要があるものが存在するため、食欲はそうした栄養の摂取を助けるが、過度な食欲に従つて過剰摂取することで健康が阻害されるケースも見受けられる。そのため、身体の健康を維持するためには必要な栄養素を適切なバランスで摂取する必要がある。一方、現代の人間に好まれる食品、特に菓子やインスタント食品といった嗜好品類、揚げ調理された食品やファーストフードには、糖分や油分、塩分が多く含まれる傾向がある。このような食品を好んで摂取し続けることは、糖尿病や肥満、高血圧疾患といった生活習慣病を引き起こす原因にもなる。健康を意識した食品の例として、低脂質や低糖質、減塩食品等が販売されているが、これらの食品は美味しさの面では元々の食品に劣るため、進んで選びにくいという欠点がある。このように食事に対して満足感を得るために、ただ単に必要な栄養を摂取するだけではなく、“美味しい”という感覚を体験することも必要と言える。

食体験の拡張によって現代の食生活の諸問題を解決する上で、味覚の制御に焦点を当てた例として電気味覚があげられる[22]。電気味覚は、電気刺激によって惹起された味覚や触覚を含む感覚を指すこともあるが、本稿では味覚の神経系への電気刺激によって味を惹起、抑制、増強する技

術を指すものとする。例えば、口内に陰極刺激を提示することで、電気刺激を提示しない場合よりも塩味を濃く感じさせることを可能とした研究[23]や、経皮電気刺激を用いて口腔外から陽極刺激を提示することで塩溶液を約3倍程度まで濃く感じさせることを可能とした研究[7]がある。これは、実際に含まれている量よりも強く塩味を感じさせることによって体験できる美味しさを向上させ、塩分の過剰摂取を防止することに寄与し得る。このような味質変化を提示する手法として、フォーク[21]や箸[17]、おわん[10]といった食器型の装置を用いたものや、手袋型[18]の装置を用いて金属製食器に電気味覚提示機能を付与したものも

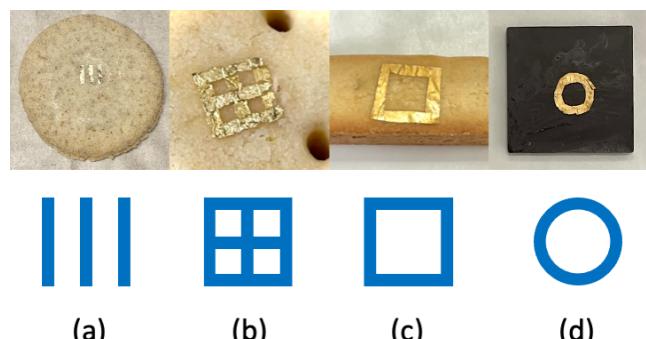


図 1 金箔を接着させた食品（上段）と接着した金箔の形状（下段）。(a) 型紙を使用して直線状の金箔をクッキーに接着、(b) 型紙を使用して直線状の金箔を複数重ね合わせてクッキーに接着（図4の(2)・(3)の手順を二回繰り返し、パターンの角度を90°回転させ重ねた）、(c) オブラーで裏打ちした金箔を四辺形の辺形状にカットしてクッキーに接着、(d) オブラーで裏打ちした金箔をリング形状にカットしてチョコレートに接着。

¹ お茶の水女子大学

² 東京大学

³ ヤフー株式会社

⁴ 東京工科大学

提案されている。これらの手法の機序は諸説あるものの、食品内あるいは、食品と舌との界面での味を呈するイオン等の化学物質が、刺激電流が形成する電場によって泳動するという、イオン泳動説が提唱されている。

食品の味の増強や抑制のみでなく、電流の周波数や電極面の温度により様々な味を惹起する手法が提案されている。Nimesha らは舌界面に電極を設置して電流を印加する手法 [10] を提案し、舌の味覚を受容する神経系を刺激することで、様々な味を惹起させる可能性があることを示唆した。電気刺激によって様々な味を惹起することができるのであれば、食品の摂取と同時に電気刺激を適用することで、食品の味を増強するだけでなく、自在に味を変化させることができると可能性がある。文献 [10] のように舌面に電極を設置する手法では、舌面を電極が覆うことになるため、スープなどの液体の食品や液体を多く含む食品に対して適用が容易であった。一方で、形状変化に乏しい固形食品の場合、この電気刺激手法を適用することは困難である。

そこで我々は、食用の金箔で形成された導線や電極を食品表面に貼り付け、回路の一部として機能させることで食体験を拡張する手法を提案する。図 1 は実際に貼り付けた例である。このように食品の表面に電気回路を設置し、これを通して味覚器に電気刺激を与えることで、固形の食品（水分含有量が少ない食品）に対する電気味覚の提示を行う。本稿では、チョコレートとクッキーに対して提案手法による電気味覚が提示可能であるかを調査し、その結果を報告する。これによりユーザの新しい食体験を実現することを目指す。

2. 関連研究

2.1 食体験の拡張

食品の見た目や内部構造、味や香りを制御することで、ユーザの食体験を拡張する手法が提案されている。これらの研究では 3D プリンタ [4] やインクジェットプリンタ [19] などの機器を用いて可食素材を出力・加工・造形する手法や、外部装置を用いてユーザの視覚や嗅覚 [8]、味覚 [21] に刺激を与える手法など様々なアプローチが試みられてきた。Meta Cookie [9] は、クッキーに対して AR (Augmented Reality) を用いて視覚情報と嗅覚情報を重畠することで、クッキーの風味を変化させ、摂取する人が受け取る味の認識を変化させることを試みた。FoodFab [4] では、3D プリンタによって内部の構造や充填率の異なるクッキーを出力することで、ユーザが摂取した際の咀嚼時間を変化させ、ユーザの満腹感に影響を与えることを示した。Miyatake らは Slit Injection Printing により、任意のデザインからフラワーゼリーを生成する手法を提案した [6]。宮下は基本五味を提示する液体を噴霧混合することで、任意の食品の味を再現する味ディスプレイを開発した。また、可食インクを印刷可能なフードプリンタを用いることで、食品の

味だけでなく見た目を変化させることを可能とした [19]。一方で、食品自体に機能を持たせ、人間に対して能動的に働きかけるような食体験の実現を試みた事例は少ない。

2.2 電気味覚の提示

上述の通り、本稿では味覚を電気刺激によって制御する手法を電気味覚と呼ぶ。この電気味覚も食体験の拡張手法として研究されている。

電気味覚を食体験の拡張に利用する際のインターフェースデザインとして、HCI 分野では大きく電極直接接触型、経皮電気刺激型、食品介在型の三つが採用されている。直接接触型は舌に電極が直接接触する装置デザインで構築されている [10]。経皮電気刺激型は皮膚表面に貼り付けた電極を用いて電流経路上にある味覚の神経系を刺激する。電極の貼り付け位置によって舌にある味覚の神経系だけでなく咽喉・咽頭にある神経系も刺激できる [12][15]。

食品介在型は食器や手袋などの食品と直接接続される部分に電極を配し、食品を介して電流を味覚の神経に印加する手法である。食品介在型の提案初期は両極とも食品に接触させる手法が採用されていたが、その後一方を手や腕などの身体へ、もう一方の電極を食器を介して口腔近辺に配置する一極型装置が提案されている [21]。一極のみを口腔付近に設置することで、味覚の神経系を刺激する電極の極性を変更でき、極性の違いによる効果を生じさせることができる。また食品介在型の派生形式として、鍛治らが提案した手袋型デバイス [18] は、手袋に設置された電極と接触している食品を通して電流が味覚の神経を刺激する。

手袋型デバイスは、手づかみで食べる食品だけでなく、金属製の食器で食べる食品に対しても電流を印加できることが工学的に優位な点であるが、指先に設置されている電極を食品や金属食器に触れさせたり離したりすることが非常に容易、つまり、電気刺激の印加と停止の操作が容易であることも工学的に優位な点としてあげられる。一方で、食品を介して電流を印加する食品介在型の電気刺激手法は、食品の導電性が高くなければ口腔に電流を十分に印加することができない。

直接接触型の電気刺激手法は前述の通り、刺激のパターンや電極面の温度によって様々な味を惹起することができるとされている。この手法を食品を口腔に含みながら行うことで、自在な味覚の変化を引き起こすことが可能であると考えられる。この手法を食器を模した電極などで実現することも可能であるが、特に固形の食品の場合は咀嚼をそれらの電極が阻害してしまうために、咀嚼開始前に電流の印加を停止しなければならなくなる。

これらの問題を解決し、固形の食品を少なくとも咀嚼するまで電流を印加し続けられる手法として、本研究では食品上に食品用金箔を利用した電極パターン（回路）を形成し、そのパターンに指先に設置した指サック表面の電極を

接触させることにより、咀嚼に伴う回路破断が起こるまで電気刺激による味覚の変容をもたらす新手法を提案する。

2.3 電子回路のファブリケーション手法

任意の素材の上に回路を形成する手法はこれまで数多く検討されてきた。代表的な例を挙げると、カッティングプロッターによって切り出した銅箔をテープに貼り付ける手法 [2], [13], インクジェットプリンタによって銀ナノ粒子インクを印刷し紙の上に回路を作成する手法 [3], 導電性の塗料をスプレーのように吹き付ける手法 [5], レーザプリンタによって印刷したパターン上に金箔などの金属箔を定着させる手法 [20] などがある。また, Groeger らは湾曲した形状や複雑な表面構造の物体表面に、ポリビニルアルコール系フィルムを水圧転写させ、インタラクティブな入出力面を付加する手法を提案した [1]。

食品を対象としたものには、レーザ照射によって素材表面を炭化することで、食品上に炭による回路作成を可能にした手法 [14] も提案されている。しかし、この手法は、食品の表面にリン酸塩ベースの難燃剤を塗布する必要がある。また、天然素材の食品では成分や表面の曲率によっては再現性が低くなるといった制約がある。さらに、食品表面に炭の回路を生成するため、元の食品から味が変わってしまうという課題がある。本研究と関連深い提案として、EdiSeonsor [11] がある。EdiSeonsor は、食品表面に載せた金箔を電極として活用し、ユーザの口内での咀嚼を検知する手法を提案した。一方で、EdiSensor のファブリケーション手法は、金箔を食品に載せるのみで任意形状の配線やセンサの形成は実現されていない。一般に、金箔は厚みが $0.1\text{ }\mu\text{m}$ と非常に薄いので扱いが難しく、手作業で任意形状の回路の作成は困難である。我々は、型紙やオブラートを用いて金箔を任意の形状にデザインすることで、電気味覚などに適用可能な電極を形成する手法を用いた。以上のように、非可食性の素材上に任意形状の回路を形成する手法が多いが、食品表面に回路を実装する簡便手法は確立されていないといえる。

3. 金箔回路のファブリケーション手法

本章では食品表面に金箔回路を形成する手法について述べる。ここでは、金箔を食品に接着させるステップと、金箔の形状を加工するステップに分けて紹介する。金箔の形状および貼り付け方については以下の要件を満たす必要があると考えた。

- 食品を舌に載せた際に、食品本来の味がを感じ取れるように、食品のある面全体を金箔で覆わないようにする。
- 食品を食べ進めた際に、食品の残りの部分が回路の一部として機能する。

なお、本手法が対象とする食品は、水分含有量が低くそれ

自体が導通しないものとする。

3.1 金箔の接着

金箔は接着層を用いて食品の表面に接着させる（図 2）。可食性のある接着層として、水に少量の片栗粉（濃度 2.9–3.3 wt%）を添加し、加熱して糊化させたものを用いた。食品の表面に接着層を刷毛で塗布し、その上に金箔を重ねる。自然乾燥により接着層が完全に乾燥すると、金箔が食品表面に定着する。

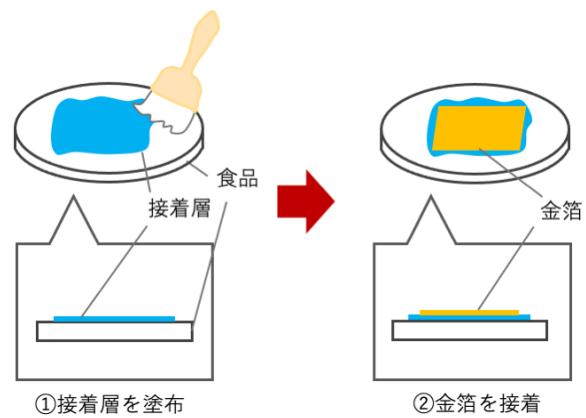


図 2 金箔のクッキーへの接着方法。

3.2 金箔の形状加工

金箔の形状加工し、食品に接着させる方法については、以下の二種類の方法を提案する。一つ目は、金箔を食品に接着する前に金箔の形状を加工する方法である。金箔は非常に薄くて脆いため加工が困難であるが、図 3 のようにオブラートを用いて補強することで金箔の耐久性を高めることが可能である。具体的には、オブラートに水分を含ませ、その上に金箔を重ねる。その後、オブラートが完全に乾燥すると金箔とオブラートが密着する。このオブラートで裏打ちした金箔は耐久性があるため、ハサミやカッターなどでの加工が可能である。加工器具により任意の形状に整形し、前述した方法を用いて食品の表面へ金箔を接着する^{*1}。

二つ目は、金箔を食品に接着した後に金箔の形状を加工する方法である。この方法では、図 4 のように必要となる金箔の形状に合わせたステンシルの型紙（金箔の形状が穴となった型紙）を用いる。型紙は、カッティングプロッター (silhouette CAMEO4) を用いてオープンシートに穴を開けて作成した。この加工方法では、食品表面に接着層を塗布後、型紙・金箔の順に接着層上に重ねる。金箔を重ねた時点で、型紙と金箔に対して、上から金箔が剥がれない程度の軽度の圧力を加えて食品に押しつけ、密着度を高める。接着層が完全に乾燥したら型紙を食品から剥がす。この際に、型紙の切り抜き形状に応じて金箔が食品表面に

^{*1} 水を含ませることでオブラートにより接着させることも可能であるが、粘着性が弱く剥がれやすいため片栗粉を用いた。

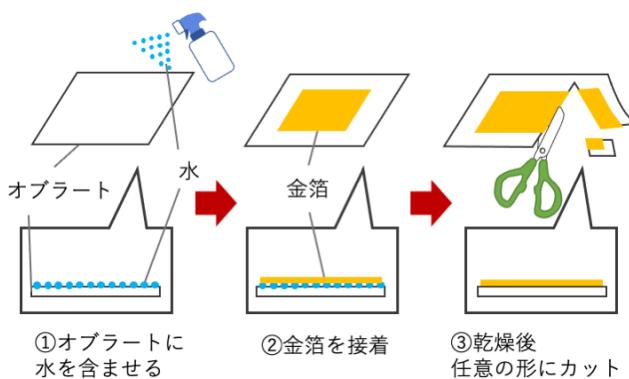


図 3 金箔にオブラーを重ね合わせることで扱いやすくする方法.

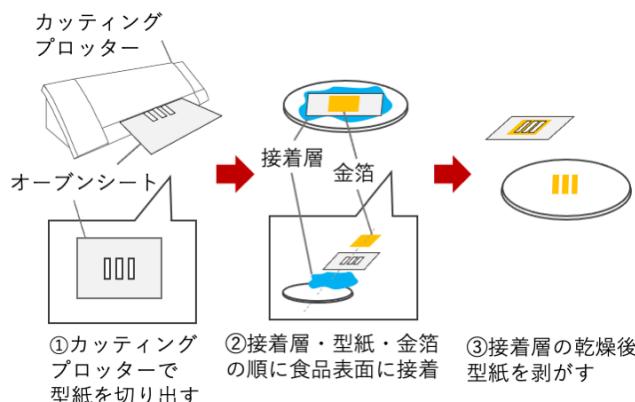


図 4 ステンシル型紙を用いた加工方法.

残るため、必要となる金箔の形状を食品に接着することができる。

以上の二種類の金箔の接着・加工方法のいずれかを用いて、食品表面に任意の形状の金箔を定着させることで、金箔部を回路やセンサの一部として使用することが可能となる。なお、図 1 に示した試作例は金箔定着後に導通することを確認した。電極幅は図 1 (a, b) が 1mm 程度、(c, d) が 3mm 程度である。

4. ハードウェア

本研究で用いるデバイスは中村らの一極型装置 [21] および鍛治らの手袋型デバイス [18] を参考に実装した。図 5 に示すように、電源部分、指先部分（導電性繊維の指サック）および手首部分（EMS 用粘着パッド）から構成される。食品表面の金箔回路の一端にデバイスの指先部分で触れつつ、金箔回路の他端を舌に接触するよう食品を摂取することで、図 6 に示す回路が形成される。

直接電極を舌に当てた場合の人の電気味覚閾値は 1–400 μA まで広く分布しており [16]、電流強度に対してウェーバー・フェヒナーの法則に沿う感覚量が概ね得られることが知られている。また、身体に電極を設置した際の電極間抵抗は、皮膚や電極の乾湿、電極の面積、設置位置、電極間

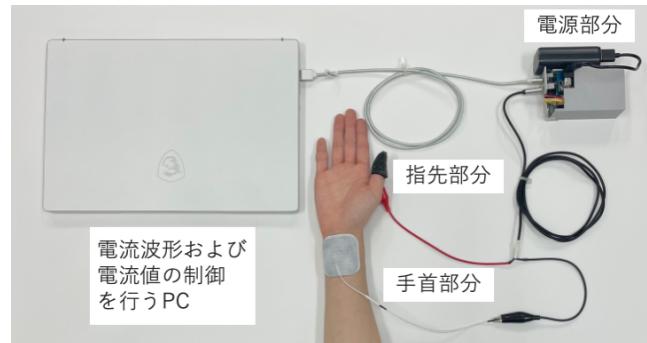


図 5 ハードウェア構成.

距離などによって大きく変動する。そのため、本研究ではオペアンプと MOSFET で定電流を発生させ、その電流をカレントミラー回路で複製することで得られた電流を刺激電流とする定電流回路を用いた。この回路で発生する電流は単一の極性の電流である。このため、PhotoMOS リレーによって構築した H ブリッジ回路によって極性を切り替える機能を付加し、過電流保護のための定電流ダイオードも実装した。電流波形および電流値はマイコン搭載の DA コンバータによって制御した。

5. 電気味覚適用の実施例

前述した方法で実装した金箔回路を持つ食品について、電気味覚の提示が可能かを確認する予備的な調査を行った。本調査は筆者らのうち一名が実施した。電源装置に接続した指サック型デバイスを着用し（図 6）、金箔を接着した食品を摂取した。食品を摂取する際、指サックと舌の両方が金箔に触れている状態で電圧を印加した。対象食品には水分含有量が低い食品であるチョコレートとクッキー^{*2}を用いた。

以下に筆者の主観評価の結果を述べる。陽極刺激の場合には、舌の金箔が触れている部分に塩味が増強されたような味やビリビリとした刺激を感じた。また、陰極刺激の場合には、舌の箔が触れている部分では主に塩味がまろやかに感じられたり、弱い金属味が感じられたりした。陰極刺激と比べて陽極刺激の方が通電時の味質変化が大きく感じられた。

この調査では金箔を設置した固形の食品（水分含有量の少ない食品）に対して電気味覚が提示できるか調査することが目的であるため、個人の味覚感度は考慮しておらず、陽極刺激、陰極刺激ともに電流値は一定に保たれている。しかし、確認できた味質の変化は既存研究で報告された知見に沿っており、提案手法により金箔を貼り付けた食品で電気味覚が提示可能であると考えられる。

^{*2} キットカットミニホワイト塩入り（ネスレ日本株式会社）
ビスケットムーンライト（森永製菓株式会社）

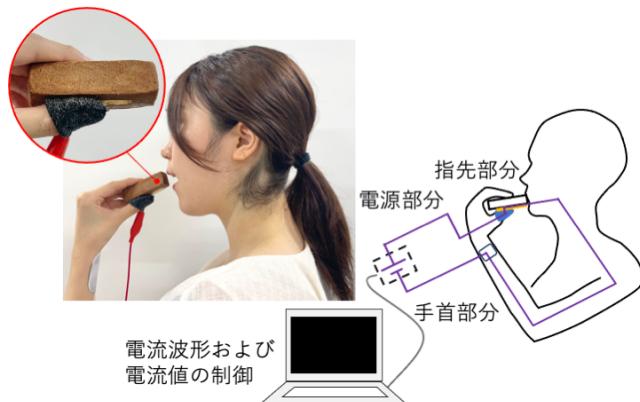


図 6 試作した指サック型デバイスおよび回路図。

6.まとめと今後の課題

本稿では、食品表面に定着させた金箔を電気回路の一部として機能させることで、人に対し能動的に働きかける機能性を食品に付与する手法を提案した。事前に金箔をオブラーートで補強する、あるいは、金箔を食品の表面に接着する際に型紙を用いることで、任意形状の金箔を接着できることを確認した。さらに、提案手法の適用例の一つとして、電気味覚を実現する回路を試作した。この回路を用いて、従来手法では電気味覚が提示困難であった、水分含有量の少ない食品でも電気味覚を付与できることを、筆者自身による予備的な調査により確認した。

今後はユーザによる正式な評価実験を行うことで、提案手法の有効性を評価するとともに問題点の洗い出しを行う。また、食品に回路を直接形成することを利用した新たな応用例についても検討していく。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20K19842 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Groeger, D. and Steimle, J.: ObjectSkin: Augmenting Everyday Objects with Hydroprinted Touch Sensors and Displays, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, DOI: 10.1145/3161165 (2018).
- [2] Kato, K., Ikematsu, K., Igarashi, Y. and Kawahara, Y.: Paper-Woven Circuits: Fabrication Approach for Papercraft-based Electronic Devices, *Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '22, No. Article 29, DOI: 10.1145/3490149.3502253 (2022).
- [3] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B. S., Zhang, C. and Abowd, G. D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-Based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, DOI: 10.1145/2493432.2493486 (2013).
- [4] Lin, Y.-J., Punpongsanon, P., Wen, X., Iwai, D., Sato, K., Obrist, M. and Mueller, S.: FoodFab: Creating Food Perception Illusions Using Food 3D Printing, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, DOI: 10.1145/3313831.3376421 (2020).
- [5] Michael, W., Ticha, S., Carlos, C., Jackson, C. S., Ollie, H., Isabel, P. Q., Mike, F., Anne, R. and Mueller, S.: Sprayable User Interfaces: Prototyping Large-Scale Interactive Surfaces with Sensors and Displays, CHI '20, DOI: 10.1145/3313831.3376249 (2020).
- [6] Miyatake, M., Narumi, K., Sekiya, Y. and Kawahara, Y.: Flower Jelly Printer: Slit Injection Printing for Parametrically Designed Flower Jelly, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, DOI: 10.1145/3411764.3445346 (2021).
- [7] Nakamura, H., Amemiya, T., Rekimoto, J., Ando, H. and Aoyama, K.: Anodal Galvanic Taste Stimulation to the Chin Enhances Salty Taste of NaCl Water Solution, *Journal of Robotics and Mechatronics*, DOI: 10.20965/jrm.2021.p1128 (2021).
- [8] Narumi, T., Ban, Y., Kajinami, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Augmented Perception of Satiety: Controlling Food Consumption by Changing Apparent Size of Food with Augmented Reality, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, DOI: 10.1145/2207676.2207693 (2012).
- [9] Narumi, T., Nishizaka, S., Kajinami, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Meta Cookie: An Illusion-based gustatory display, *the 14th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2011)*, pp. 260–269 (2011).
- [10] Nimesha, R., David, T., Thi, Ngoc, T. N., Liangkun, Y., Barry, C. and Ellen, Yi-Luen, D.: Augmented Flavours: Modulation of Flavour Experiences Through Electric Taste Augmentation, *Food Research International*, DOI: 10.1016/j.foodres.2018.05.030 (2019).
- [11] Punpongsanon, P. and Ishizuka, H.: EdiSensor: Facilitating Food Electricity for Eating Habits Analysis, *2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*, DOI: 10.1109/LifeTech52111.2021.9391948 (2021).
- [12] Ueno, S., Aoyama, K., Nakamura, H. and Miyashita, H.: Controlling Temporal Change of a Beverage's Taste Using Electrical Stimulation, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, DOI: 10.1145/3290607.3312981 (2019).
- [13] Valkyrie, S., Xiaohan, Z. and Björn, H.: Midas: Fabricating Custom Capacitive Touch Sensors to Prototype Interactive Objects, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, DOI: 10.1145/2380116.2380189 (2012).
- [14] Yieu, C., Ruquan, Y., Yilun, L., Swatantra, Pratap, S., Christopher, J. A. and James, M. T.: Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food, *ACS NANO*, DOI: 10.1021/acsnano.7b08539 (2018).
- [15] 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, pp. 145–148 (オンライン), DOI: 10.18974/tvrsj.22.2.145 (2017).
- [16] 富田 寛: 味覚障害の全貌 (第 10 章 臨床的味覚検査法), 診断と治療社 (2011).
- [17] 錢治慶亘, 安藤健司, 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、インタラクション 2022 論文集, pp. 97–104 (2022).
- [18] 鍛治慶亘, 宮下芳明: あらゆる金属製食器を電気味覚提示に用いる手袋型デバイスの試作, 第1回神経刺激インターフェース研究会 (2019).
- [19] 宮下芳明: TTV2 (Transform The Taste and Visual appearance) : 飲食物の味と見た目を変える調味家電によるレイアウト, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2022 論文集, Vol. 2022, pp. 143–150 (2022).
- [20] 加藤邦拓, 真鍋宏幸, 川原圭博, 濑川典久: Leaf Circuits: 金属箔とレーザプリンタを用いた回路作成の応用と評価, インタラクション 2020 論文集, pp. 96–105 (2020).
- [21] 中村裕美, 宮下芳明: 一極型電気味覚付加装置の提案と極性変化による味質変化の検討, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1442–1449 (2013).
- [22] 中村裕美, 宮下芳明: 食メディアにおける味情報提示手法のサーベイ, コンピュータソフトウェア, Vol. 30, No. 1, pp. 1_65–1_75 (2013).
- [23] 中村裕美, 宮下芳明: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1316–1324 (2014).