

Virtual Roast: 焼かずに焦げを付加・調整するデバイス

菅原 歩華¹ 宮下 芳明¹

概要: 加熱調理における焦げは、香ばしさや苦みを生み出す一方で、多様な化学反応が急激に進行するため、特定の風味や強度を狙って制御することが難しい。そこで本研究では、加熱せずに焦げを付加・調整できるデバイス「Virtual Roast」を提案する。従来不可分であった焦げを「甘さ」「香ばしさ」「苦み」「煙感」の4つの要素に分離し、各要素に対応する粉末素材を振動式ディスペンサによって添加する。これにより、焦げを調整可能な味覚表現として捉え直し、嗜好に合わせた焦げの表現を可能にする。

1. はじめに

日常の食生活において、「焦げ」は主要な要素である。調理過程で生じる焦げの反応は、香ばしさや苦みといった独特の風味や香気をもたらす、人々の食体験をより豊かにする重要な役割を果たしている。自然に発生する焦げを味わうだけでなく、特定の風味を引き出すために意図的に焦げを生成する調理手法も広く用いられている。

しかし、焦げの生成過程は極めて複雑である。加熱温度や時間の経過に伴って多種多様な化学反応が連続的に発生し、それによって生み出される香りや味が変化する。さらに、これらの反応の移り変わりは急激であるため、特定の風味や焦げの程度を狙って調理することは困難である。

そこで本稿では、食材を物理的に加熱することなく、焦げを付加することが可能なデバイス「Virtual Roast」を提案する。本稿の目的は、実際の焦げを忠実に再現することではなく、焦げを構成する風味要素を分離し、ユーザが好みに応じて調整できるようにすることである。

2. 関連研究

2.1 味覚メディア

本稿第二著者は、食の再構築 [1] を目指し味覚メディア [2] を推進してきた。たとえば、カニクリームコロッケを粉砕して味センサで測定して再現することを試みており [3]、この際に「揚げられたパン粉」も一緒に測定することで、揚げていなくてもその苦みを表現しようとした前例がある。また、味覚メディアのひとつの魅力は、実際には味わえないものを味わえたり、味わったかのような体験をもたらすことである。たとえば、通常は食べられないベニテングダケを味わったり [4] できたり、脂質・糖類ゼロで

油 [5] やクリーム [6] を味わったりすることができる。また、口内送気によって飲食物の存在感をもたらす試み [7] もある。本稿の提案も「実際に加熱しておらず煙も出ないが焦げを味わうことができる」という意味でこれらと共通した効果をもたらしている。(対照的なアプローチとして、加熱してエアロゾルを発生させることを積極利用する TTTVape [8] や、焙煎によって味覚メディアの苦み溶液を作成する試み [9] がある。)

味覚メディアの多くは味のパーソナライズを目標として掲げている。カレーの熟成度合い [10]、日本酒の甘口・辛口具合 [11] といった調整も個人の好みに合わせることが可能。本稿も同様に、個人の嗜好に合った焦げ具合を提供することを目指している。

なお、味覚メディアは TTTV1 [12]、TTTV2 [13][14] では噴霧混合方式、TTTV3 [15]、TTTV4 [16][17] ではポンプを用いた滴下混合となっているが液体を混ぜる事例が多い。粉末のみを混合する事例として、PTTV [18]、運動条件を加味した SporTTTV [19]、および佐藤らの EMO 味 [20] がある。焦げは概して乾燥していることから、本稿では、粉末混合のシステムを用いている。

3. 対象食材と焦げの構成要素

3.1 焦げを付加する食材

本稿では、焦げを調整するデバイスの設計対象として、キャンプ等で広く親しまれるマッシュマロを取り上げる。焦げの生成反応は、対象となる食材や加熱環境に大きく依存するため、あらゆる食材を同時に網羅することは困難である。そこで本稿では、汎用的なデバイスの構築に向けた第一段階として、対象食材を絞って設計を行う。

マッシュマロは工業製品として製造されているため品質が均一であり、実装における対象としての再現性が担保され

¹ 明治大学

る。また、その加熱反応は急激に進行するため、提案デバイスによる調整の有効性を検証する上で適している。以上の理由から、焦げを付加する食材にマシュマロを選定した。

3.2 加熱反応に伴う焦げ

食品の焦げは、主にカラメル化とメイラード反応という2つの熱反応によって生じる [21]。カラメル化は糖の脱水・縮合により、メイラード反応は還元糖とアミノ化合物の反応により進行する。いずれも加熱の進行に伴って生成物が多様化し、褐色化や香り・味の変化をもたらす。生成される成分は温度・時間等の条件によって大きく変動するため、狙った風味を再現性高く制御することは化学的にも難しいとされる。本稿は、こうした反応の多様性を踏まえ、焦げの要素を分離し、複数の風味要素として捉える。

3.3 マシュマロの焦げを構成する要素

マシュマロの加熱に伴う焦げを包括的に調整するため、「甘さ」「香ばしさ」「苦み」「煙感」の4つの要素に分離し、各要素で風味を提示する素材を選定した。各要素の選定理由は以下の通りである。

マシュマロは糖を主成分とする食品であり、加熱の初期段階において糖のカラメル化が起こると、特有の甘い香り（カラメル香）が生じる [22]。そのため、焦げにおける揮発性成分由来の好ましい印象を提示する要素として「甘さ」を設定した。また、甘さを提示する素材には、カラメルクラッシュを用いた。カラメルクラッシュは原材料が砂糖のみであり、加熱によって作られているため、カラメル化由来の甘さを提示できることから選定した。

加熱が進行すると、糖のカラメル化に加えて、マシュマロに含まれるゼラチン（タンパク質）と糖の間でメイラード反応が進行する。ゼラチンのメイラード反応生成物から多種多様な揮発性化合物が生成されることから、「香ばしさ」の要素を設定した。中でもベンズアルデヒド等の成分がナッツやアーモンドのような香ばしさを付与する [23][24] ため、アーモンドパウダーを用いた。

Li らは、メイラード反応によって生成される化合物は強い苦味を持つと説明した [25]。これより、焦げの進行度合いを捉える要素として「苦み」を設定した。要素提示には、アルギニンを用いた。素材の選定にあたり、粉末状かつ焦げの苦みを提示できる素材は限られていた。そこでいくつかの素材を試食し、焦げの苦み・えぐみに近い感覚が得られたアルギニンを選定した。

焦げは、食材内部の化学反応だけでなく、加熱環境とも強く結びついている。そこで、食材の化学反応とは独立した環境的要素として「煙感」を設定した。バーベキューなどの直火調理では、木材から発生する煙に含まれる成分の影響により燻製香が食品に付与される [26]。そのため、提示素材として燻製パウダーを用いた。

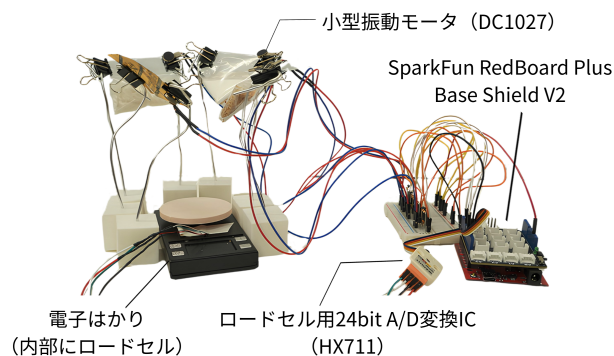


図 1 デバイスの全体像

4. システム

4.1 ハードウェア

粉末の添加には、振動によって粉末を吐出する自作のディスペンサを用いた。本ディスペンサは、粉末が入った袋を振動させ、袋に開けた穴から任意量の粉末を落とす機構である。図 1 にデバイスの全体像を示す。

針金を立てるため、中央に直径 2.5mm、深さ 25mm の穴を設けた土台を 3D プリンタで造形した。穴に差し込んだ針金の先端にバインダークリップを取り付けた。このクリップで粉末入りの袋を挟み、片方のクリップに小型振動モータ (DC1027) を固定した。モータが駆動するとクリップを介して袋全体が振動し、袋の穴から粉末が吐出される。

複数の粉末を個別に扱う場合、単一の土台上に吐出部を並置する構成では、あるモータの振動が土台を介して他の吐出部へ伝わり、意図しない素材が吐出される。そこで本機構では、各吐出部と振動モータを針金によって個別に空中支持し、土台を介した振動の伝播経路をもたない構成にした。これにより、駆動対象の吐出部のみが振動し、他の素材の袋やロードセルへ振動が伝わることを防いでいる。

モータの制御には、SparkFun RedBoard Plus に Base Shield V2 を装着した基板を用い、Arduino IDE でプログラムを実装した。吐出量の測定には、0.001g まで計量可能な市販の電子はかりを分解し、内部のロードセルを取り出して用いた。ロードセルの値は、専用の 24bit A/D 変換 IC である HX711 を介して読み取った。制御プログラムは、ユーザ入力から得た必要グラム数に達するとモータの駆動を停止する。各要素のモータ駆動開始時に、はかりの数値をリセットし、要素ごとの計測を行った。

なお、カラメルクラッシュは吸湿を防ぐため、個包装に直接穴を開けてクリップに挟んだ。その他の提示素材は、穴を開けたチャック付きポリエチレン袋に入れ吐出した。

4.2 入力

ユーザは各要素のスライダーを動かすことで、風味調整を行う。実装環境は Processing である。システム画面を

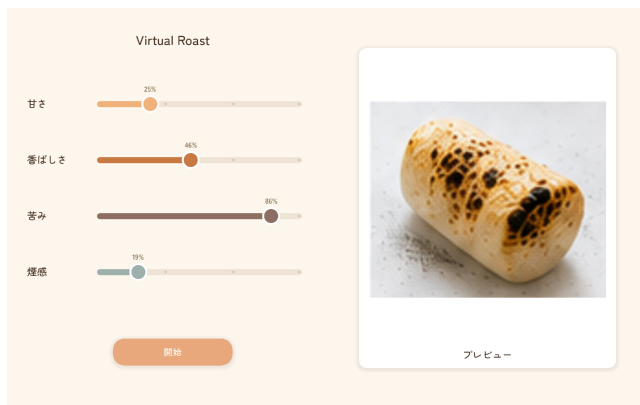


図 2 システム画面

図 2 に示す。スライダの入力は各要素の必要グラム数と対応づけており、各スライダの上限は甘さがカラメルクラッシュ 0.28g、香ばしさがアーモンドパウダー 0.25g、苦みがアルギニン 0.20g、煙感が燻製パウダー 0.08g である。これは単体要素ごとにマシュマロへ添加可能な上限量を試し、設定した。またスライダの値に伴って、画面右側にある概念プレビュー画像が変化する。この画像は、各要素を 4 段階に分け、すべての組合せ 256 パターンを GPT Image 2 に出力させたものである。スライダ値が各パターンの値に近づく、クロスフェードしながら切り替わるようにした。モータ駆動は甘さ、香ばしさ、苦み、煙感の順に行い、駆動停止から次の駆動までは 5 秒の待ち時間を設けた。

5. 予備評価

評価として、著者 1 名が提案デバイスを用いて、各要素が風味知覚に与える影響を確認した。

5.1 単体の変化

まず、各要素について、スライダ操作による添加量の変化が風味知覚に影響するかを検証した。その結果、いずれの要素においても、スライダ値の増加に伴ってより強い風味を知覚した。ただし煙感については、少量でも風味が強く、添加量の増加による風味の変化は他の要素と比較して小さかった。香ばしさについては、添加量が多いほど焦げから遠ざかる印象を受けた。また、苦み単体では焦げとして知覚されなかった。

5.2 組合せによる変化

次に、各要素を組み合わせて試食した。その結果、単体とは異なり、各要素が混ざり合った複合的な焦げとなった。

甘さと香ばしさはいずれも、スライダ値の増加にかかわらず、好ましい範囲に収まった。これらは、焦げの初期から中期に生じる好ましい加熱香と対応しているため、組み合わせた場合でも許容範囲が広い可能性がある。

一方、苦みに甘さや香ばしさを加えた場合、苦み単体を付加した場合と比較して、苦みの印象が緩和された。これは焦げにおいて、苦みは他の要素との配合比によって印象が変化することを示唆する。

また、煙感については、スライダの値が大きくなるほど不快感につながった。煙感とは異なる要素であり、環境的な要素である。そのため、過剰に付加すると食材本来の焦げから離れ、違和感として知覚される可能性がある。

5.3 実際のマシュマロの焦げとの比較

実際に加熱したマシュマロの焦げと比較すると、その風味には明確な差があった。しかし、本稿の目的である焦げの調整という観点においては、未加熱のマシュマロと比較すると焦げている印象が得られ、特に苦みを加えることで焦げをより知覚するようになった。このことは、実際の焦げと完全に一致せずとも、構成要素の操作によって焦げを付加・調整できることを示唆している。

5.4 食感や見た目との関係性

本稿で用いた素材は、カラメルクラッシュとアーモンドパウダーが褐色、アルギニンと燻製パウダーが白色であった。試食の際には、褐色の粉末が付加されている場合のほうが、味覚情報と視覚情報が一致している感覚があった。

また、実際のマシュマロは加熱すると膨張したのち、溶けて固まる。カラメルクラッシュは吐出後に固まりやすくてべたつきがあるため、実際の焦げに食感が近く、甘さ要素が付加されると食感の面でも焦げを食べている感覚が得られた。5.3 で実際の焦げとは異なると感じた要因として、食感が影響すると推測する。

6. 展望

本稿を通じて、焦げを実際の加熱を経ずに後から付加するアプローチと、従来不可分であった焦げを複数の要素に分離して調整する手法が有用である可能性を示した。各要素の上限値の設定によって焦げの知覚が変化すると予想し、著者以外の評価者による評価を行い、適切な上限値の設定について検討を進める。

本稿では、加熱を経て製造された素材や市販の食品添加物を用いて風味調整を行った。これは焦げを構成要素に分離し選択的に操作するという本稿の枠組みを検証するための第一段階である。本稿の各要素素材は製造工程において高温で加熱されているが、その過程で生成される物質の中には安全性への懸念が指摘されるものもあり、特にヨーロッパではその規制が厳しくなっている [27]。今後は、実際にマシュマロを加熱した際に発生する香気成分を GC/MS (ガスクロマトグラフ質量分析計) で詳細に分析し、主要な香気寄与成分を特定する。これにより、安全性が確認された香料を直接添加・調整することで、焦げをよ

り詳細かつ安全にデザインする。さらに、視覚的な変化の有無を選択できるようにすることで、焦げの表現が広がる可能性がある。

また、本稿ではマシュマロを対象食材にしたが、カラメル化やメイラード反応によって風味変化が生じる食材は多岐にわたる。焦げによる生成物は食材に依存しており、本稿で設定した要素や提示素材をそのまま他の食材へ適用できるとは限らない。そのため、まずはマシュマロと原材料が近い菓子類を対象として、適用範囲を段階的に広げる。一方で、焦げの要素を分離し、焼かずに付加するという本稿のアプローチ自体は特定の食材に依存しない。予備評価においても、加熱せずに焦げに近い風味を提示できたことから、他の食材でも同様の枠組みを検証する価値がある。今後は、本稿で確立した要素およびデバイスを食材ごとの特性に応じて再構成しながらより多くの食材へ展開し、より広範囲な焦げ表現としての発展を目指す。

参考文献

- [1] 宮下芳明, 味覚・嗅覚・栄養のメディア化による食の再構築, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2025 論文集, Vol. 2025, pp. 143–148 (2025).
- [2] Miyashita, H., Taste Media: Innovative Technology Transforms the Eating Experience, *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 14986, Springer, pp. 8–16 (2024).
- [3] Miyashita, H., TTTV2 Makes It Possible for People with Shellfish Allergies to Still Enjoy the Taste of Crab Virtually, *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '22, Association for Computing Machinery, pp. 1–2 (online), DOI: 10.1145/3562939.3565669 (2022).
- [4] Miyashita, H., Virtual eating experience of poisonous mushrooms using TTTV2, *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '22, Association for Computing Machinery, pp. 1–2 (online), DOI: 10.1145/3562939.3565668 (2022).
- [5] 小平乙寧, 宮下芳明, Virtual Oil Generator: 多様な油を脂質ゼロで生成する装置実現に向けて, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2024 論文集, Vol. 2024, pp. 483–487 (2024).
- [6] 宮下芳明, 千田知佳, 奥野達也, Virtual Cream Generator: 多様なクリームを脂質・糖類ゼロで生成する装置に向けて, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2024 論文集, Vol. 2024, pp. 229–232 (2024).
- [7] 薄井夏陽, 宮下芳明, Oral Mirage: 口内送気で飲食物の存在感を幻出させる試み, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2026 論文集, Vol. 2026 (2026).
- [8] 大岩千夏, 宮下芳明, TTTVape: 気体混合方式のシェー型 嗅覚メディア, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2026 論文集, Vol. 2026 (2026).
- [9] 宮下芳明, 味覚メディアのための味物質ワンソース発酵, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2026 論文集, Vol. 2026 (2026).
- [10] 宮下芳明, Chronospoon: 時を操る調味食器, インタラクティブシンポジウム 2024 論文集, pp. 404–409 (2024).
- [11] 岸本詩乃, 宮下芳明, S.A.K.E. (Sake Amakuchi-Karakuchi Editor): 日本酒の甘口・辛口の印象を 1 本のスライダーで制御するデバイス, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2026 論文集, Vol. 2026 (2026).
- [12] 宮下芳明, 液体噴霧混合式の味ディスプレイの試作, 第 29 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 (WISS2021) 論文集, pp. 121–127 (2021).
- [13] 宮下芳明, TTTV2 (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テレイト, 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).
- [14] Miyashita, H., TTTV2 (Transform the Taste and Visual Appearance): Tele-eat virtually with a seasoning home appliance that changes the taste and appearance of food or beverages, *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '22, Association for Computing Machinery, pp. 1–2 (online), DOI: 10.1145/3562939.3565663 (2022).
- [15] 宮下芳明, 村上崇斗, 大友千宙, 深池美玖, TTTV3 (Transform The Taste and reproduce Varieties): 産地や品種の違いも再現する調味機構と LLM による味覚表現, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2023 論文集, Vol. 2023, pp. 236–243 (2023).
- [16] 笠原暢仁, 深池美玖, 宮下芳明, TTTV4: 一口ごとに味を提示する味覚のパーソナルメディア, 第 32 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 (WISS2024) 予稿集, pp. 1–6 (2024).
- [17] Kasahara, N., Fukaike, M. and Miyashita, H., TTTV4: Cutlery-Type Taste Display Toward Personal Taste Media, *Adjunct Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST Adjunct '25, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–3 (online), DOI: 10.1145/3746058.3758452 (2025).
- [18] 千田知佳, 宮下芳明, PTTV: 粉末混合式の味ディスプレイ, 第 32 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 (WISS2024) 予稿集, pp. 1–3 (2024).
- [19] 榎谷海斗, 田中涼, 山本貴之, 土屋瞳, 宮下芳明, SporTTTV: 運動条件および個人特性に応じてパーソナライズされた栄養と甘味を提供するシステムを目指して, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2026 論文集, Vol. 2026 (2026).
- [20] 佐藤祉大, 上岡玲子, EMO 味: 心を味わうインタフェース開発, 情報処理学会インタラクティブシンポジウム 2020 論文集, pp. 321–326 (2020).
- [21] Chan, A. C., Mokhtar, S. U. and Hong, P. K., A Systematic Review on the Determination and Analytical Methods for Furanic Compounds in Caramel Models, *Journal of Food Science and Technology*, Vol. 62, No. 11, pp. 1999–2012 (online), DOI: 10.1007/s13197-025-06419-4 (2025).
- [22] Kroh, L. W., Caramelisation in Food and Beverages, *Food Chemistry*, Vol. 51, No. 4, pp. 373–379 (online), DOI: 10.1016/0308-8146(94)90188-0 (1994).
- [23] Liu, J., Liu, M., He, C., Song, H. and Chen, F., Effect of thermal treatment on the flavor generation from Maillard reaction of xylose and chicken peptide, *LWT - Food Science and Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 316–325 (online), DOI: 10.1016/j.lwt.2015.05.061 (2015).
- [24] Ismarti, I., Handoko, D. D., Triyana, K., Salleh, H. M., Fadhillah, N. A. and Nordin, N. F. H., Study on Volatile Compounds of Gelatine and The Maillard Reaction Products from Different Species Us-

- ing SPME-GCMS, *Science and Technology Indonesia*, Vol. 7, No. 2, pp. 132–139 (online), DOI: 10.26554/sti.2022.7.2.132-139 (2022).
- [25] Li, H., Zhang, W.-C., Tang, X.-Y., Wu, C.-J., Yu, S.-J. and Zhao, Z.-Q., Identification of bitter-taste compounds in class-III caramel colours, *Flavour and Fragrance Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 404–411 (online), DOI: 10.1002/ffj.3652 (2021).
- [26] Rigling, M., Höckmeier, L., Leible, M., Herrmann, K., Gibis, M., Weiss, J. and Zhang, Y., Characterization of the Aroma Profile of Food Smoke at Controllable Pyrolysis Temperatures, *Separations*, Vol. 10, No. 3 (online), DOI: 10.3390/separations10030176 (2023).
- [27] European Commission, Commission Regulation (EU) 2017/2158 of 20 November 2017 establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food, EUR-Lex (online), available from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/2158/oj/eng> (accessed 2026-06-30).