

味覚・嗅覚・栄養のメディア化による食の再構築

宮下芳明

本稿では、味覚・嗅覚・栄養を、記録・編集・再生可能なメディアとして捉え直し、食をプログラム可能な表現領域へ拡張する考えを述べる。個別化する健康需要、多様化する嗜好、地球規模の持続可能性への要請を背景に、食のあり方を再考し、時空を超えて味を共有するテレイト、個人ごとに栄養を自動調整する栄養メディア、探求プロセス自体を豊かにするパーソナライゼーションについて、その技術とフィロソフィーを述べる。これらを統合し、あらゆる人々が食の創造者となる未来のプラットフォーム「DFW (Digital Food Workstation)」構想を提示する。最後に、これらの技術体系が導くビジョンとして、ガス発酵や人工光合成などを家庭内デバイスに統合し、食材そのものを自給する「究極の調味家電」の構想を描き、持続可能な循環型食料体系への道筋を示す。

1. はじめに

食は、生命維持の根幹であると同時に、文化的・社会的な営みの中核をなしてきた。しかし21世紀に入り、私たちの食を取り巻く環境は大きな転換点を迎えている。グローバル化によって、かつてないほど多様な食文化へのアクセスが可能になった。ライフログ技術が発展したことで、従来の画一的な健康指導から、一人ひとりの体質に合わせた「個別化栄養」へと移行してきた。しかし私たちは同時に、人口増加に伴う食料危機、地球規模での持続可能性という課題を突きつけられている。

このような時代背景のもと、本研究室は、音や映像がアナログからデジタルへと移行し、メディア技術として社会を変革した歴史を参考に「味覚メディア」という概念を提唱・推進し、食を構成する各要素を操作する個別の「インストゥルメント」としてのメディアを開発してきた。その先には、それらを統合し、誰もが自在に食をデザイン・創造できる環境として、音楽制作で使われる DAW (Digital Audio Workstation) になぞらえた「DFW (Digital Food Workstation)」を構想している。根底には、専門家や企業に独占されがちだった表現技術を万人に解放する「表現の民主化」という理念がある。私たちが目指すのは、味覚、嗅覚、そして栄養といった、これまで物質と不可分であった食体験を、記録・編集・再生が可能なメディアとして扱うことで、食にまつわる諸課題を解決していくことである。本稿では、こうした概念が拓く未来を、具体的な研究成果と共に段階的に論じる。最後には、家庭内で食料を完全自給する「究極の調味家電」のビジョンを提示する。

2. 時空と仮想空間を超える「テレイト」

人類のコミュニケーションは、声、文字、電話、映像など、物理的な制約を超えて感覚情報を伝達する手段を発展させてきた。しかし、味覚や嗅覚は、物質の存在を前提とするため、このメディア進化の歴史から長らく取り残されてきた。本章で論じる「テレイト」は、味覚・嗅覚をメディアへと変容させる。この構想は、空間、時間、そして仮想空間という3つの軸で展開される。

空間を超える試みについては、複数の味溶液を混合して

味を自在に生成する味覚メディア TTTV シリーズ[1]によって検証してきた。初代 TTTV は遠隔での味見 (テレテイスト) を可能にし[2][3]、TTTV2 では食品に味の液体を噴霧して原材料の制約から解放された味を付与でき、味覚メディアが台所で「調味家電」として使われるビジョンを示した[4][5][6][7]。さらに開発を進めた TTTV3 では、ワイン[8]やカカオ[9]など産地や品種の違いに由来する微妙な差異まで再現することを目指し、1 那由他通りに及ぶ味のパリエーションを作り分けられるようになった[10][11]。

スプーン型の調味食器へと進化した TTTV4 では、スマートフォンに料理名を話しかけるだけで、AI が推定した味を即座に生成できる[12]。「有頭エビのブイヤベース」と話しかければ、水 8ml に対して塩味 (塩化ナトリウム) 0.040g、甘味 (パルスweet) 0.052g、酸味 (乳酸) 0.053g、うま味 (グルタミン酸ナトリウム) 0.230g、苦味 (炭酸カリウム) 0.031g を溶かしたものに相当する混合液が出力される[13]。

時間の超越したテレイトにも挑んできた。たとえば映像情報から味を推定する TasteColorizer[14]がある。この技術によって、歴史的な記録映像や古い映画に登場する食事シーンからその味を推定できる。精度には改良の余地があるが、既にレシピが存在しない過去の料理や、特定の時代に生きた人々が囲んだ食卓の味を私たちが追体験できることを意味し、失われた食文化のデジタルアーカイブに新たな道を開いている。さらに、味のタイムマシン[15][16][17]によって、食品の味を熟成させたり新鮮に戻したりと、時間軸に沿って味を操作することも可能になってきた。

最後に、仮想空間との融合について述べる。TTTV4 をシュノーケルのように HMD と一体化させた「TTTVR」(図1) は、メタバースにおけるテレイトを大きく前進させる装置だと考えている。これを使えば、ユーザーは仮想空間内に出現するオブジェクトや食べ物を、視覚覚情報と同期した状態で味わうことができる。アバター同士が仮想レストランで食事をしながら同じ味を楽しんだり、ファンタジー世界のアイテムを実際に味わったりといった体験が可能になる。こうした体験は、メタバースにおける没入感を高めるだけでなく、メタバースの利用価値そのものを大きく拡張するキラーコンテンツになり得ると考えている。



図1 メタバース空間でのテレポートを実現する TTTVR (HMDにTTTV4[12]を結合)

3. 味・食感・栄養を操る調味家電

近年、個別化栄養や精密栄養への期待が高まっているが、「栄養メディア」が普及すれば実現できる。栄養メディア NutriSynth はビタミンやミネラルを混合して出力できるデバイスである(図2)。栄養素の分解を抑制するため、遮光された冷蔵ユニットに溶液が保管され、分離・沈殿を防ぐために磁気攪拌子で常に分散液を均一に攪拌され、pH調整剤で全溶液をpH4以下とすることで微生物の増殖を抑制したりするなど、味覚メディアにはない機構上の工夫も多いが、基本的にはTTTVシリーズと同様に、溶液混合を行って栄養を添加する装置である[18]。パーソナライズされた栄養添加を行うためにはスマートフォンアプリ NutriRefillを連携させる[18]。ユーザーが食事の写真を撮影しておくだけで、このスマホアプリが栄養価を推定し、不足分を算出する。そのデータに基づき、NutriSynthはビタミンやミネラルを液体として精密に混合して供給するわけである。これにより、日々の食事の楽しみを損なわずに、バックグラウンドで栄養バランスを自動的に調整できる。



図2 栄養メディア NutriSynth と内部(冷蔵ユニット)

味覚メディアにも味覚ゲームなど多くのコンテンツを用意してきたが、栄養メディアにおいても、多様なアプリケーションが考えられる[18]。たとえば、食品の栄養というのは時間経過とともに徐々に失われていくものだが、アプリ NutriRefreshは、食材の保存温度や経過時間に応じて失われた栄養素を推定して出力する。いわば「味のタイムマシン」と同様な「栄養のタイムマシン」である。また、食

品は概して加熱や煮沸や冷凍といった調理過程で栄養素を失う。ここで損失された栄養素を、調理工程と調理時間に応じて補うアプリが NutriRestore である。他にも、アレルギーや嗜好、宗教上の理由などで特定の食材を避けた場合、これに相当する栄養素を推定して不足アプリが NutriReplace である。栄養メディアは単独でもこのように多くのアプリケーションによって恩恵を与えるものである。

もちろん、人間が食事から得る満足感は栄養素だけでは補えない。味、香り、食感といった要素こそが、豊かな食体験の根幹をなす。本研究室の研究は、味や香りのメディア化に加えて、食感の生成と制御へと領域を拡張してきた。初期には、味や香りの表現に加えて食感を扱うため、油脂感を表現する Virtual Oil Generator[19]や、クリーム感を表現する Virtual Cream Generator[20]といった装置を試作した。これらは、油脂やクリームを含んでいるかのような口当たりを実現することに成功した。この技術を「ゾルフードプリント」と呼び、ゲル状の素材で立体構造を形成する「ゲルフードプリンタ」を開発する山形大学・古川英光研究室とコラボレーションを実施した。古川研究室のゲルプリンティング技術が料理のゲルの食感を形成し、本研究室のゾルフードプリンティング技術が内部のゾルの食感・味・栄養を充填する。これら2つの技術は相互に補完し合うことで、新たな食品表現を可能にしている。2024年12月の共同研究では、脂質・糖類を含まないゲル素材でシュー生地を3Dプリントし、内部には本研究室の技術で生成した脂質・糖類ゼロのカスタード風ゾルを充填し、罪悪感なく食べられる「シュークリーム」を目指した(図3)[21]。

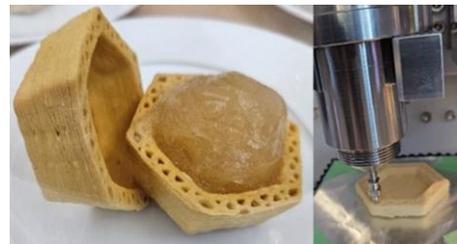


図3 宮下研究室のゾルフードプリンティングと古川研究室のゲルフードプリンティングによる「シュークリーム」

こうした食感制御の基礎を踏まえ、ゾルを精密に出力することで、とろみやなめらかさなどの食感を制御できるゾルフードプリンタ PTTVXを開発した[22]。例えば、動物性原料不使用で50kcal以下の「豚骨風ラーメン」や、脂質・糖類ゼロ、牛乳・卵不使用で20kcal程度の「カスタードクリーム風スイーツ」を出力する。カロリーや脂質を大幅に低減しつつ、酵母エキスによる旨味添加、α化デンプンやキサンタンガムによる食感調整により、従来の味覚メディアよりも高い食体験をもたらしている。

PTTVXはNutriSynthと合体できる(図4)。食感をも制御可能な味覚メディアと栄養メディアを組み合わせることで、

「好きなものを好きなだけ食べても身体は健康」というビジョンに一步近づく。夜中にラーメンやスイーツを衝動的に食べたくなっても、ゾルフードプリンタが生成する低カロリー一杯を楽しみつつ、栄養メディアで不足したビタミンやミネラルを補えるので、罪悪感はなくなるだろう。



図4 ゾルフードプリンタ PTTVX と栄養メディア NutriSynth の合体機構

健康上の理由で摂取が制限されがちな「甘味」については、甘味料を用いたパーソナライゼーションが有効な解決策となり得る。そのために開発した Sweet Synthesizer は、LLM との対話を通じて個人の嗜好に合わせて糖類ゼロの甘味料の配合を生成するシステムである[23]。



図5 甘味をパーソナライズする Sweet Synthesizer[23]

4. 嗅覚メディアと能動的探索アプリ

視聴覚メディアにおいて AI によるパーソナライゼーションは情報過多の現代で不可欠な技術となった。しかし、多くの推薦システムは、過去の行動データに基づいてユーザーの好みを予測する仕組み上、ユーザーを既存の嗜好に閉じ込めるフィルターバブルを生みやすい。本研究室では、食の領域でも同様の問題が起こると考え、単なる最適化ではなく「探求プロセス自体を豊かにするパーソナライゼーション」を模索している。

その具体的例が、嗅覚メディア AromaSynth[24]と連携するアプリケーション CoffeeQuest[25]である。AromaSynth は最大 20 種類の食品用香料を精密に混合し、コーヒーなど

の飲料に滴下して香りを自在に変化させる装置である。既存飲料の風味再現や、ユーザーの嗜好に合わせたフレーバーのカスタマイズといった、柔軟な飲料体験の提供を可能にする。連動するアプリ CoffeeQuest は、ユーザーの選択肢を広げ偶発的な発見が得られやすいように、能動的な探索を促すゲーミファイド・インタフェースとして設計された。本システムは、オープンワールド型ビデオゲームの設計思想を応用し、ユーザーが 3D 空間を自由に移動してフレーバーを探索する体験を提供する。ユーザーが仮想空間内のある地点に到達すると、その場所に対応する香りの配合データが生成される。データは QR コードを介して嗅覚デバイス AromaSynth に転送され、探索で発見した香りが付与された飲料を、実際に体験できる仕組みである。本研究は、最適化された結果の提示ではなく、探索プロセスそのものを豊かにすることで、ユーザーの主体的な嗜好発見を支援する新たなインタラクションのあり方を提案している。



図5 嗅覚メディア AromaSynth とアプリ CoffeeQuest

5. 誰もが食のクリエイターになる時代

20 世紀後半からのデジタル革命は、音楽、映像、文学などあらゆる表現領域で「表現の民主化」を後押ししてきた。専門的な映像編集設備や高価な音響機材は PC ソフトウェアに内包され、インターネット上の動画プラットフォームでは多くのアマチュアクリエイターが作品を発表し、多くの N 次創作やリミックスのもとで CGM (Consumer Generated Media) が活性化している。私たちは、味覚や嗅覚、あるいは「食」という領域も同様のパラダイムシフトを起こし得ると確信している。その統合プラットフォームが「DFW (Digital Food Workstation)」構想である。

DFW は、これまで述べた栄養・味・香り・食感のメディア技術を統合し、ユーザーが直感的なインタフェースでそれらを組み合わせ、自由に食コンテンツを創造できる環境である。DFW が普及した社会では、味覚における CGM が起こるだろう。かつてレシピ共有サイト「クックパッド」

で大きな盛り上がりがあったが、当時はアップロードされたレシピを即座に実践・試食することは難しかった。また、料理を作る人々のコミュニティに限定されがちでもあった。しかし、アップロードされた味をそのまま即座に味見し、編集・リミックスして再共有できる環境が、料理を行わない層にも開放されれば、食を中心とした新たなクリエイターエコノミーが一気に花開くと考えられる。

6. 持続可能性への貢献

味覚メディア技術は、個人の食体験を拡張するだけでなく、結果として地球環境や食料問題のような持続可能性の課題にも解決策を秘めている。味をデータ化し、再現できるようになると、天然資源の大量消費を抑える手段が見えてくる。例えばカカオやワインなどの希少で魅力的な味を、情報として再現・複製できれば奪い合うこともなくなる。さらに、テレイトによって遠隔で味や香りをやり取りできるようになれば、食材や人々の移動が不要になりエネルギー消費を削減する。また、食品の劣化プロセスをモデル化して味を補正する味のタイムマシンは、賞味期限の概念を転換し、フードロス削減に寄与する。

しかし本稿で最後に述べたいのは、調味家電が素材を外部から入れる前提を超え、調味家電内で食料を自給自足してしまうほどのパラダイムシフトである。次章では、その「究極の調味家電」についてのビジョンを述べる。

7. 究極の調味家電

3Dプリンタやレーザーカッターの登場は、情報(CADデータ)から物理オブジェクトを生み出す概念を広め、大規模工場が担っていた製造プロセスを個人に解放した。しかし大きな課題としてフィラメントあるいはアクリル板や木材といったマテリアル供給が残っている。依然として、グローバルサプライチェーンを介して材料を購入し続ける必要があるのだ。これを乗り越えるため「生きた材料」を育てる動きが近年始まっている。例えば菌糸体(マイセリウム)を培養して断熱材や梱包材、高分子樹脂の代替物質を自前で作る「マイコファブリケーション(Myco-fabrication)」のアプローチが知られている[26][27]。きのこの根である菌糸体を型に流し込み固化させれば、まるで木のような素材に変えられる。親子で5日間ほど育てた菌糸で積み木ブロックを作るキットMYMORI[28]などもあり、こうした考え方は一般家庭にも普及を見せている。また、PHA(ポリヒドロキシアルカン酸)を微生物から抽出・精製し、3Dプリンタ用のフィラメントにする構想[29]や、酢酸菌が生み出すバクテリアセルロースを3Dプリンタ用バイオインクとして利用する研究[30]もある。これにより、板やフィラメントを買うのではなく「自ら育てる」ことが可能になる。いわば、ファブリケーターという「製造業」を凝縮した箱の中に、「林業」をも搭載する発想だといえる。

「究極の調味家電」は、こうした材料を「育てる」思想を、食の領域に取り入れたものである。調味家電は「飲食品産業」を凝縮した箱だと捉えることができるが、もし空気や水、光などの基本要素と微生物を組み合わせ、家電の中で調味料や材料を「育て」られるとしたら、もはや外部から供給する必要はなくなる。従来の「農業」「畜産業」「水産業」といった生産インフラを、飲食品産業が入っていた調味家電内に内包してしまう発想である。以下では、その技術的シナリオを支える研究事例として、ガス発酵・人工光合成・精密発酵・廃水ミネラル回収技術などを取り上げ、それらがどのような完成形へ収斂するか考察したい。

7.1 ガス発酵によるタンパク質資源

未来の食料生産の根幹となり得るアプローチの一つが、微生物によるガス発酵である。例えばSolar Foods社のSoleinは、水素をエネルギー源とし、空気中の二酸化炭素(CO₂)を炭素源にして増殖する水素栄養細菌を培養し、最終的にタンパク質パウダーとして利用する[31]。Air Protein社のAir Meatも同様に、水素やCO₂を微生物に与えて増殖させ、食材化するコンセプトを提示している[32]。Soleinは乾燥重量ベースで約70%がタンパク質で、必須アミノ酸をすべて含むほぼ完全食に近いとされる[33]。ソーラーパネルからの電力で、天候や農地を問わず数日で大量生産できるため、従来の大豆栽培と比べて10倍以上の効率が期待できるとも報告されている[34][35]。将来的には技術が小型化し、家庭で水と電気さえあれば数日ごとにペースト状やパウダー状のタンパク質を「収穫」できる可能性がある。

7.2 人工光合成による糖類・デンプン合成

炭水化物、特に糖類やデンプンは生体にとって重要なエネルギー源である。植物の光合成を人工的に再現もしくは超越しようとする試みが進んでおり、2021年にはCaiらがCO₂と水、化学触媒、遺伝子組換え酵素を組み合わせ、わずか11ステップの反応でデンプンを合成することに成功したと報告している[36]。通常、植物では60を超える反応ステップを要するところを大幅に短縮し、理論上はトウモロコシ栽培の約8.5倍のエネルギー変換効率を実現できるとされる。1立方メートルのバイオリクターで生産できるデンプン量は、0.33ヘクタールものトウモロコシ畑に匹敵するとの試算もある。技術がさらに進めば、CO₂と水と再生可能エネルギーだけで、小型人工光合成リアクターが各家庭に糖をオンデマンド生産できる未来が来るかもしれない。

7.3 精密発酵による脂質・フレーバー・ビタミン創出

脂質や香料(フレーバー)、ビタミン類といった要素も、遺伝子工学によって微生物の代謝経路を組み替え、大量に合成させる「精密発酵」の手法で生み出せる可能性が高い。そもそも、うま味成分グルタミン酸ナトリウム(MSG)は1960年代から糖を発酵する方法で工業的に量産されてきた[37]。また、バニラの香り成分であるバニリンも遺伝子組換え酵母を使う発酵によって生産する技術が実用化してい

る[38]. 牛脂と分子レベルで同一の脂質を精密発酵で微生物に作らせる研究も進んでおり[39], 将来的には肉の風味や食感を決定づける脂肪酸組成まで自在に調整できる見通しが見込まれている. ビタミン類に関しては, ビタミン B2[40], ビタミン B12[41], ビタミン C[42]など, 多くがすでに発酵法で大量生産されている. これらが家庭用の小型デバイスにまで応用されれば, 「足りないビタミンをその場で培養して抽出する」「牛脂と同じ脂質を微生物から生成する」といった光景が当たり前になる可能性もある. とろみや歯ごたえなどの食感を決定づける食物繊維やゲル化剤も, 微生物が作り出している. たとえば PTTVX で豚骨風ラーメンを再現する際に用いている増粘剤キサンタンガムも, 細菌の発酵産物[43]である.

7.4 廃水からのミネラル回収

タンパク質や糖, 香り, ビタミンなどは微生物の力で合成できるとしても, 元素としてのミネラル(リン, カリウム, マグネシウムなど)は合成そのものができない. しかし近年, 下水汚泥からリンを回収する技術などが実用段階である[44]. 生活排水を回収して工程で分離・精製し, 肥料や工業用資源として還元する都市インフラが検討されている[45]. この仕組みを拡張すれば, 家庭の廃水からミネラルを再生し, 調味家電内部へ供給することも可能となる.

7.5 「究極の調味家電」の実現可能性

以上のように, ガス発酵によるタンパク質生産や人工光合成による糖類合成, 精密発酵による脂質・フレーバー・ビタミン生成, そして排水からのミネラル回収といった技術群を組み合わせ, 調味家電と一体化すれば, 素材の培養・合成, 味覚・嗅覚・栄養・食感の編集, 食品の造形までを内部で一貫して行えるようになる. そうして作られた食品は, 外部の農地や輸送網に依存せず, 空気や水, 光から自給自足することが可能になる. もちろん, 実現には技術的・社会的・倫理的課題が山積している. それでも, こうした完全自給の方向性は現代の科学技術の延長線上にあり, 同時に持続可能な社会を拓く鍵にもなり得る. 大量生産・大量廃棄のモデルを変革し, 世界のどこにいても安定した食料を得られるようにする一つの突破口であり, 人間の創造性を最大限に解き放つ食の新しい表現領域としても大きな魅力を持つ構想だ. 実現は 100 年以上先の未来になると想定しているが, ガス発酵, 人工光合成, 精密発酵, ミネラル回収技術の進化を鑑みれば「究極の調味家電」は決して荒唐無稽な SF ではないと考えている.

8. おわりに

本稿で論じてきたように, 味覚メディア技術の発展は, 単なる美味しさの探求やヘルスケアの効率化にとどまらない. 人々が「食」をどう捉え, どう創造し, どう共有するかという, 大きなパラダイムシフトの萌芽をはらんでいる. 私たちの社会は, 情報の世界で大きな潮流を経験した.

マスメディア全盛だった 20 世紀から, パーソナルメディアが開く 21 世紀への転換である. 新聞やラジオ, テレビが一方的に情報を発信し, 大衆はそれを受動的に消費するモデルは, インターネットと PC・スマートフォンの普及によって根底から覆った. 誰もが創造者となり得る時代となり, 音楽や映像, 文章といったコンテンツ制作の門戸は一気に個人に開かれた. さらに生成 AI 技術の進歩によって, 専門家やコンテンツ産業が独占しがちだった「表現」の領域が, 今や一人ひとりにめぐってきている.

次に起こっているのは, 物質世界で進むパーソナルファブリケーションの波である. 20 世紀のものづくりは巨大工場が大量生産し, 大量に流通・消費する構造を基本としていた. しかし 3D プリンタやレーザーカッターの登場で小規模でも多品種少量の生産が容易になり, 個人の創造性がものづくりに波及するようになった. さらに, 材料を買うのではなく育てるというアプローチが注目されている.

「マスメディアからパーソナルメディアへ」「大量生産からパーソナルファブリケーションへ」という動きが「食」に結びつけば, 人類社会に変革がもたらされる.

従来の食は巨大な食品産業や農業システムに支えられ, 私たちはその恩恵を受け取る消費者であるにとどまってきた. 日々の食が確保される恩恵は大きい, その背後には, 無数の工場や広大な農地, 複雑な物流網が連携し, 大量に生産して大量に消費し, 大量に廃棄するシステムが隠れていたといえる. もしくリエイターエコノミーの発想を食にまで適用し, 味覚や嗅覚, 栄養や食感までもデジタルデータ化できたら? タンパク質や糖質まで家庭で「育てて」発酵・合成できるようになったら? 土地や気候に縛られず, 自分の嗜好や健康状態に合わせて自由に栄養や味を作り出すことが可能になったら? そこにはきっと, 完全自給型・完全創造型の食が生み出す新たなライフスタイルが待っている. それは, かつての産業革命がもたらした分業化とは逆方向だが, 単なる原始回帰でもない. いずれにせよ, 調味家電内での完全自給という構想は, 単に次世代の便利な家電を作ろうという話ではなく, 人間の創造性と暮らしの主体性を, もう一度取り戻そうとする試みに他ならない.

以上のように, 当研究室が研究開発している味覚メディアや嗅覚メディア, 栄養メディアの成果は, 小さくとも確実にその扉をあける鍵となっている. また, 「表現の民主化」を目指して本研究室が行ってきたコンテンツ制作支援やインタフェースの研究, パーソナルファブリケーションを支援する技術やインタフェースの研究も無関係ではなく, すべてはこうした未来の大転換につながっているのである.

参考文献

- 1) Homei Miyashita. Taste Media: Innovative Technology Transforms the Eating Experience. Modeling Decisions for Artificial Intelligence. MDAI 2024. Lecture Notes in Computer Science, Vol 14986, pp.8-16. Springer, Cham., 2024

- https://doi.org/10.1007/978-3-031-68208-7_2
- 2) Homei Miyashita. TTTV (Taste the TV): Taste Presentation Display for "Licking the Screen" using a Rolling Transparent Sheet and a Mixture of Liquid Sprays. UIST '21, ACM, 2021.
 - 3) 宮下芳明. 液体噴霧混合式の味ディスプレイの試作, WISS2021 論文集, pp.121-127, 2021.
 - 4) 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.
 - 5) Homei Miyashita. 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. VRST '22. ACM, 78, pp.1-2, 2022.
 - 6) Homei Miyashita. TTTV2 makes it possible for people with shellfish allergies to still enjoy the taste of crab virtually. VRST '22. ACM, 79, pp.1-2, 2022.
 - 7) Homei Miyashita. Virtual eating experience of poisonous mushrooms using TTTV2. VRST '22. ACM, 81, pp.1-2, 2022.
 - 8) 金珉志, 村上崇斗, 宮下芳明. TTTV3 を用いたワインの味表現. 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.298-301, 2023.
 - 9) 彭雪儿, 深池美玖, 笠原暢仁, 村上崇斗, 吉本健義, 湊祥輝, 富張瑠斗, 宮下藏太, 川田健晴, 宮下芳明. 産地の異なるカカオの味の違いを定量化し純物質で再現する手法, EC 論文集, Vol.2023, pp.390-393, 2023.
 - 10) 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. EC シンポジウム 2023 論文集. Vol.2023, pp.236-243, 2023.
 - 11) 村上崇斗, 宮下芳明. ポンプ混合式調味家電 TTTV3 (Transform The Taste and reproduce Varieties)の設計と実装, 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2023.
 - 12) 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.
 - 13) TTTV4 での味生成「有頭エビのブイヤベース」
https://youtu.be/5GBEtD0_v0, 2024.
 - 14) 本間大一優, 宮下芳明. TasteColorizer: 既存の映像メディアを「味わせる映像」にするシステム. インタラクシオン 2024 論文集, pp.1260-1265, 2024.
 - 15) 宮下芳明. Taste Time Machine : 食品を過去や未来の味に変える装置の実現に向けて, WISS2023 予稿集, pp.55-61, 2023.
 - 16) 藤澤秀彦, 宮下芳明. Taste-Time Traveller : 食品の時間を操る味覚 AR 装置, WISS2023 予稿集, pp.1-3, 2023.
 - 17) 宮下芳明. Chronospoon: 時を操る調味食器. インタラクシオン 2024 論文集, pp.404-409, 2024.
 - 18) 松島陽也, 千田知佳, 小平乙寧, 宮下芳明. NutriSynth: 栄養素を添加する「栄養メディア」の提案とパーソナライズされた補完への応用. 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, 2025.
 - 19) 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の実現に向けて.EC シンポジウム 2024 論文集, Vol.2024, 2024.
 - 20) 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.193-198, 2024.
 - 21) フードテック FURUKAWA, 2024.
<https://www.miraikan.jst.go.jp/events/202412083739.html>
 - 22) 千田知佳, 小平乙寧, 長谷川紗智, 飯塚奈夏, 齋藤詞音, 遠藤雅大, 堤賢太, 田崎秀征, 宮本靖久, 細田奈央子, 宮下芳明. PTTVX : 風味と食感制御を可能にするゾルフードプリンタ, 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, 2025.
 - 23) 安地遥, 千田知佳, 宮下芳明. Sweet Synthesizer: 甘味をパーソナライズ化する味覚メディア, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2025 論文集, Vol.2025, 2025.
 - 24) 小平乙寧, 千田知佳, 笠原暢仁, 藤澤秀彦, 長谷川紗智, 森口敬介, 木添博仁, 田崎秀征, 宮本靖久, 細田奈央子, 宮下芳明. AromaSynth: 飲料に多様な香りを付与する嗅覚メディア, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2025 論文集, Vol.2025, 2025.
 - 25) 藤澤秀彦, 小平乙寧, 森口敬介, 宮下芳明. 受動的最適化から能動的探索へ ゲームファイされたフレーバー探索, 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, 2025.
 - 26) Haneef, M., et al.: Mycelium-Based Composites for Sustainable and Eco-Friendly Built Environment: A Review of the State-of-the-Art, Thai Journal of Mycological Research, Vol. 15, No. 2, pp. 227-335, 2023.
 - 27) Ghazvinian, A. and Gursoy, B.: A review of design, fabrication, and structural properties of mycelium-based composites, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 34, No. 10, 03122003, 2022.
 - 28) MYMORI キノコの菌糸体を生かしておもちゃを「育てる」, 2025. <https://my-mori.com/>
 - 29) Mehrpouya, M., et al.: Additive manufacturing of polyhydroxyalkanoates (PHAs) biopolymers: Materials, printing techniques, and applications, Materials & Design, Vol. 209, 109992, 2021.
 - 30) Utoiu, E., et al.: Bacterial Cellulose: A Sustainable Source for Hydrogels and 3D-Printed Scaffolds for Tissue Engineering, Gels, Vol. 10, No. 6, p. 439, 2024.
 - 31) Solar Foods: A New Harvest for Humankind, 2024.
<https://solarfoods.com/science/>
 - 32) Air Protein: Air Protein – Making meat out of air, Food Planet Prize, <https://www.airprotein.com/>
 - 33) Angenent, S., et al.: Hydrogen Oxidizing Bacteria as Novel Protein Source for Human Consumption: An Overview, The Open Microbiology Journal, Vol. 16, e187428582207270, 2022.
 - 34) Pownall, A.: Solein protein powder "100 times more climate-friendly" than other food, Dezeen, 2019.
<https://www.dezeen.com/2019/07/03/solein-solar-foods-design/>
 - 35) Dirt-to-Dinner: Solein: A Space-Age Protein, 2022.
<https://dirt-to-dinner.com/solein-a-space-age-protein/>
 - 36) Cai, T., et al.: Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide, Science, Vol. 373, No. 6562, pp. 1523-1527, 2021.
 - 37) Ganguly, S., et al.: A detailed account of chronological development in this field, including biosynthesis and metabolic regulation studies in some potential microorganisms, Bull. Env. Pharmacol. Life Sci., Vol. 10, No. 4, pp. 24-41, 2021.
 - 38) Di Gioia, D., et al.: Fed-Batch-Like Ferulic Acid Bioconversion to Vanillin by a Recombinant Plasmid-Free Escherichia coli Strain, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Vol. 7, 279, 2019.
 - 39) Teng, T. S., et al.: Fermentation for future food systems: Precision fermentation can complement the scope and applications of traditional fermentation, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, Vol. 20, No. 4, pp. 3675-3710, 2021.
 - 40) Averianova, L. A., et al.: Production of Vitamin B2 (Riboflavin) by Microorganisms: An Overview, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Vol. 8, 570828, 2020.
 - 41) Martens, J.-H., et al.: Microbial production of vitamin B12, Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 58, No. 3, pp. 275-285, 2002.
 - 42) Yang, W. and Xu, H.: Industrial Fermentation of Vitamin C, In: Industrial Fermentation: from Food to Chemicals and Pharmaceuticals, pp. 161-184, 2017.
 - 43) Nwoko, C. O., et al.: Microbial Production of Xanthan Gum Using Various Agro Wastes and Molecular Characterization of Xanthan Gum Producing Isolates, International Journal of Scientific Research and Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 1-13, 2024.
 - 44) Le Corre, K. S., et al.: Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallisation: A review, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Vol. 39, No. 6, pp. 433-474, 2009.
 - 45) Doyle, J. D. and Parsons, S. A.: Struvite formation, control and recovery, Water Research, Vol. 36, No. 16, pp. 3925-3940, 2002.