

Levitation Printing: 超音波浮揚を利用したフードプリンティングの実現性の検証

川原 弘暉^{1,a)} 山尾 海斗^{2,b)} 小田 謙太郎^{3,c)} 瀧田 孝康^{3,d)}

概要: 現代の食文化はますます個別化され、エンターテインメント志向になってきている。この変化の中で、食とコンピューティングを統合することへの関心から、デジタルガストロノミーが注目を集めている。本研究では、超音波浮揚を使用して、個別化された食事体験と料理におけるエンターテインメントを目指す新しいフード 3D プリンティングのコンセプト「Magic Drops」の実現可能性を検証した。提案した方法に基づいて要件を定義し、使用する材料や機器の妥当性のための予備実験を行った後、コンセプトに沿った設計に基づいてプロトタイプを作成した。次に、超音波浮揚を使用して2つの液滴を指定された位置に移動および混合できるかどうかを検証した。検証自体は成功したが、移動中に1つの液滴が落下する現象が観察された。これらの結果に基づいて、「Magic Drops」の実現に向けて、ツイーターを用いた新たな検証を行った。これらの結果をもとに、「Magic Drops」の潜在的な応用についても議論する。

1. はじめに

食品技術の進歩は、技術の進歩と食文化の変化が融合しながら、人類の食の追求を反映してきた。基本的な調理技術から工業化による画一的な食糧生産に至るまでの過程は、この進歩の重要な段階を示している。さらに、現在の個別化された食体験への流行は、将来の食文化の形成に影響を与える可能性がある。この文脈の中で、Human Food Interaction (HFI) [2], [9] という新しい研究分野が注目を集めている。HFI は、人と食の間にコンピュータ技術を介在させることで、食事体験に新たな価値を付加し、人と食の関係性を再定義することを目指している。この分野は、食品工学、コンピュータサイエンス、心理学などの学際的アプローチを採用し、食の未来を探求している。Human Food Interaction における研究の多くは、主に拡張現実による視覚的な拡張 [14] や食器を介しての温度変化もしくは電気刺激を用いた味覚の調整 [5], [6], [11], など、調理後のフードの感覚体験の拡張に重点を置いてきた。これらの研究は新しい料理体験の可能性を示したが、調理プロセス自体に技術を直接統合することには課題が残されている。

一方、フードプリンティング技術は、カスタマイズされ

た食品の製造を可能にする手法として注目されている。しかし、従来のフードプリンティング技術は、材料の制約や精度の限界などの課題を抱えている。この状況を踏まえ、我々は先行研究で「Magic Drops」[7] というコンセプトを提案した。Magic Drops は、可食性の液滴を超音波浮揚技術を用いて操作し、3D プリンティングを行う新しい手法である。この手法では、液滴を空中で結合・移動させ、最終的に自由落下させることで、複雑な構造を持つ食品を作成できる。さらに、分子ガストロノミーの技術を応用することで、落下した液滴をゲル化し、色と風味を制御することが可能となる。本論文では、Magic Drops のコンセプトの実現可能性を詳細に検証する。具体的には、以下の3点を本研究の主要な貢献として挙げる：

- (1) 超音波浮揚を用いた新しいフードプリンティング方式の提案
- (2) 空中上での液滴混合のための基礎的なシステムの開発
- (3) 提案手法の実現可能性と課題の明確化

2. 関連研究

フードプリンティングは、デジタル技術を用いて食品を製造する革新的な手法として注目を集めている。本章では、主要なフードプリンティング技術と、本研究に関連の深い手法について説明する。

2.1 主要なフードプリンティング技術

現在、フードプリンティングの分野では主に以下の3つ

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科

² 株式会社 佐世保航海測器社

³ 鹿児島大学情報基盤統括センター

a) k2634736@kadai.jp

b) k3411091@gmail.com

c) odaken@cc.kagoshima-u.ac.jp

d) fuchida@cc.kagoshima-u.ac.jp

の方式が広く研究されている：

FDM（熱溶解積層）方式

FDM方式は、溶融した食材を層状に積み重ねて立体物を作成する。Serizawaら[17]は、ゲルベースの食材を用いたFDMプリンティングを研究し、介護食などへの応用可能性を示した。また、Mantihalら[10]は、チョコレートを用いたFDMプリンティングにより、構造密度と食感の関係を明らかにした。

インクジェット方式

インクジェット型は、敷き詰めた砂糖などの粉末材料に対して色素などを混ぜた水を吹き付けながら固める方式である[18]。この方式は複雑な色彩表現が可能だが、使用できる材料が限定的である。

レーザー方式

Saitoら[16]は、ゲル化剤の入った液滴に選択的にレーザーを照射して固形化する手法を提案した。この方法により、複雑な形状や質感を持つ食品の作成が可能になった。しかし、基本的にバスタブに入った同じゲル化剤で固形化するため、色彩表現の限界がある。

これらの主要な技術は、それぞれ独自の利点を持つ一方で、材料の制約、色彩表現の限界、形状の制約、操作の複雑さなどの課題も抱えている。

2.2 本研究に関連する特殊なフードプリンティング手法

本研究のMagic Dropsに関連する特殊なフードプリンティング手法として、以下の2つが挙げられる。

一つ目は、D'Angeloら[3]の研究は、フードプリンティングにSpherificationを適用する研究である。彼らは、卓上押出機を用いて、着色された乳酸カルシウム溶液をアルギン酸ナトリウム溶液に3次元形状で堆積させる手法を検証した。その結果、3次元形状の形成は示されたが、カルシウム溶液のゲル化プロセスが堆積物の側面でもより速く進行し、均一な平面層の堆積が阻害されるという課題に直面した。二つ目の前田ら[20]の研究は、フードプリンティングのためのブロック形状の食用ビーズの使用を検証した。彼らのアプローチは、水溶性フード成分とグミの組み合わせから作られた食用ビーズを使ってオブジェクトを作成する。この研究はブロック自体の作成と手動でブロックをカスタマイズして造形するシステムに焦点を当てていたが、ブロックを配置する実際の方法は検証していなかった。

2.3 既存手法の課題と本研究の位置づけ

本研究で検証するコンセプト「Magic Drops」は、超音波浮揚技術を用いることで、これらの課題の一部に対処し、より自由度の高いフードプリンティングの実現可能性を探ることを目指している。

3. 研究目的

本研究では、「Magic Drops」のコンセプトに基づいて、可食性マテリアルと超音波浮揚を用いたフードプリンティング方法を提案する。本研究の目的は、プロトタイプを作成し、提案手法の実現可能性を検証することである。

4. 提案手法

4.1 Spherification

Spherificationは、分子ガストロノミーの技術で、アルギン酸カルシウム膜を用いて液滴をゲル状の球体にカプセル化する。これには、海藻由来の多糖類であるアルギン酸ナトリウムを水に溶かし、乳酸カルシウムを添加する。乳酸からのカルシウムイオンがアルギン酸イオンと反応し、ゲル化反応を引き起こす。このクロスリンクにより、液滴を球体に包み込むゲルが形成され、イオンの構造配置により「エッグボックスモデル」と呼ばれることがある[1]。

4.2 超音波浮揚

超音波の研究は、従来、ランジュバン型の超音波トランスデューサを用いていたが、2010年代以降、超音波素子を用いた研究が増加している。主な目的として、非接触触覚フィードバック[13]、指向性スピーカー[15]、超音波浮揚の研究がある。超音波浮揚は、超音波が空気中で非線形効果を生み出し、出力音源の波長の半分までの音圧差（音響放射圧）を生成し、定在波の節で小さな物体を超音波伝搬方向に浮揚させることができるときに発生する。しかし、これは伝搬方向に垂直な方向には当てはまらない[19]。

4.3 提案手法：Magic Drops

これまでの研究[10]、[17]では、ゲルやチョコレートなど冷却すると固まる材料をノズルから出力する方法を主流として、レーザーで固形化する手法[16]が用いられてきた。それに対し、提案手法では、図1に示すように、超音波浮揚を用いて複数の液滴を空中で混合し、指定位所に自由落下させる。

図1は、Magic Dropsでの主要構成要素を示している：

- (1) 3つのシリンジポンプ（図中央の円柱状の装置）：それぞれ異なる色の食用色素溶液を供給する。
- (2) 超音波装置（図左右の平板状の装置）：液滴を浮揚させ操作するための音場を形成する。
- (3) 液滴受け皿（図中央部の平面）：Spherificationにより液滴をゲル化するための溶液を含む。

特に、本装置では、食用色素で着色した液滴を空中で混合し、落下させる。自由落下する位置では、4.1節で述べたSpherificationに基づき、液滴を置くトレイを用意することで、液滴を積層する。装置はユーザから形状、色、味

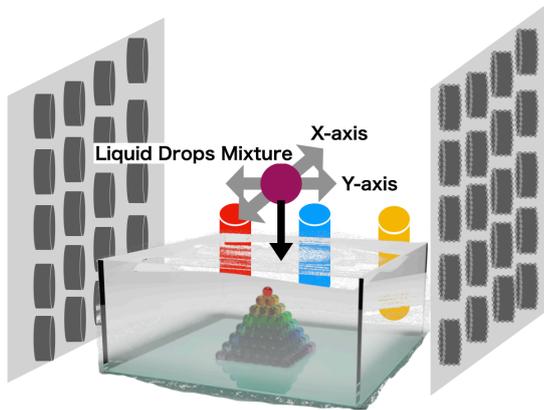


図 1 提案イメージ図

の情報を受け取り、カラフルなキャラクターを描いたり、立体的な形状を作ったりすることができる。

また、Magic Drops は、関連研究で述べた方法とは異なり、いくつかの利点を有する。超音波浮揚を使用することで、ノズルを固定し、FDM（熱溶解積層）方式に関連する狭い色域と頻繁な材料変更の要件の制限を受けない。さらに、Magic Drops は、複数の液滴の混合と堆積を正確に制御することで、Spherification ベースのフードプリンティングで直面する均一な平面層の堆積が阻害されるという課題に対処する。そして、超音波浮揚の使用により、ブロック形状のフードプリンティング方法で課題となる、ブロックを移動させるための別のシステムを必要とせず、液滴を指定の位置に直接配置することができる。

5. プロトタイプ的设计と実装

5.1 目的

プロトタイプの目的は、アルギン酸ナトリウムを指定位置で混合可能かどうかを検証することで、Magic Drops のコンセプトを検証するための最初のステップとなる。したがって、5.2 節では、この目的を達成するための要件定義を行い、5.3 節では装置の構築のための実験前の準備について説明し、5.4 節では設計要件、5.5 節では設計図、5.6 節では実装について説明する [8]。

5.2 提案手法を満すための要件

4.3 節で提案した手法を実現するためには、以下の要件を満たす必要があると考えた。

- 超音波により、液滴の状態で浮遊する水溶液が必要。
- 容器に液滴が蓄積するために、空中で落下した後にゲルまたは固体になる液滴が必要。
- 印刷材料を蓄積するための容器が必要。
- 指定された色を作成するために、液滴の噴出を制御するメカニズムが必要。
- 液滴を操作するために、超音波浮揚を制御するシステムが必要。

5.3 予備実験

5.2 節で述べた要件定義を満たすデバイスを作成するために、デバイスに使用する可食性マテリアルと部品について予備実験を行った。

5.3.1 超音波装置の選定

使用する超音波装置の選定には、以下の 3 つの基準を用いた。

- 3次元での物体の移動が可能であること。
- GUI を介して焦点位置を変更できること。
- 自由に改造できること。

上記の基準を満たす OpenMPD[12] を、MIT ライセンスで利用可能な超音波装置として選定した。そして、超音波を用いてポリエチレンの粒を 2 つ浮揚させることが可能であることを確認した。また、水を浮揚させようとすると霧化することが分かったため、超音波を当てても霧化しないような可食性マテリアルを探す必要があることがわかった。

5.3.2 可食性マテリアルの浮揚の検証

アルギン酸カルシウム水溶液を超音波装置の焦点に当たったところ、幅約 4mm の楕円状になって浮揚することを確認した。

5.3.3 可食性マテリアルの蓄積の検証

作成した液滴を積層できることを確認した。図 2A に示すように、赤、青、黄色の順に液滴を落とすことで、液滴によって約 5mm の厚さの層が形成された。よって、アルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウム溶液を組み合わせで作られるアルギン酸カルシウムのゲルは、立体的な形状を作るために粒を積み重ねるというコンセプトに耐えることを確認した。

5.3.4 Spherification により作成された粒の色域の検証

Spherification によって作成された液滴の色域測定を行った。液滴の色の同定は、洪氏の研究 [4] に基づいて色度図を用いて行い、作成された三角形のカバー範囲を評価した。このために、表 1 に記載された割合で調製したアルギン酸ナトリウム溶液を、表 2 に記載された割合で調製した乳酸カルシウム溶液に滴下して液滴を作成した。各色の XYZ(Yxy) 値は、コニカミノルタ社の CR-20 色彩計 (光源:D65, 測定径: 約φ 8mm, 標準光: パルスキセノンランプ, 観察条件:10° 視野測定結果から作成した色度図を図 2.B に示す。全面積の 4.63% をカバーしていることが明らかになり、コンセプトに耐える色域を有していることを確認した。

表 1 アルギン酸ナトリウム水溶液	
内容	分量
アルギン酸ナトリウム	1g
水	100ml
各食紅 (青, 赤, 黄)material	1g

青：食用青色四号，赤：食用赤色一〇二号，黄：食用黄色四号



図 2 A: Spherification により形成された液滴の蓄積過程 B: CIE1964 色度図における色の評価

表 2 乳酸カルシウム水溶液

内容	分量
乳酸カルシウム	1g
水	100ml

5.3.5 液滴出力方式の選定

当初は、チューブやシリンジを用いて食用材料を出力する方法を検討した。出力制御の精度と材料の取り扱いやすさを考慮した結果、シリンジから出力する方法を採用することにした。そこで、アルギン酸ナトリウム溶液の出力に最適なシリンジを検証するため、10ml(針径 0.5mm)、2.5ml(針径 0.6mm)、5.0ml(針径 0.7mm)のシリンジを購入した。アルギン酸ナトリウム溶液の粘度を考慮すると、針径が細いと詰まりやすくなることがわかった。その結果、針径が最も大きい 5.0ml(針径 0.7mm)のシリンジを選定した。

次に、超音波装置に対するシリンジの向きを検討した。シリンジの針の向きは、下向き、上向き、横向きの選択肢とした。超音波装置の焦点方向にアルギン酸ナトリウム溶液を出力して検証したところ、針を下向きにすることが、シリンジから液滴を安定的に分離し、空中で浮揚させるのに最も適した方法であることがわかった。

このプロセスを経て、5.0ml(針径 0.7mm)のシリンジを下向きに設置することにした。

5.4 設計要件

予備実験で述べた 5.2 節の要件定義と選定内容に基づき、プロトタイプの全体構成図を図 3 に示す。超音波装置を動作させる前に、PC に入力したファイルから、各液滴の色と落下させる予定の座標情報を取得し、この情報を超音波装置の焦点移動とシリンジからの液滴吐出のデータに変換する。その後、実際の印刷プロセスでは、シリンジから液滴を吐出し、超音波装置で浮揚・混合するプロセスを繰り返す。これを作成するためのプロトタイプシステムの設計要件を以下に説明する。

モデルファイル入力の場合

モデルファイルの入力には、印刷するモデルの構造情報だけでなく、材料の色情報も含める必要がある。

液滴出力部の配置条件

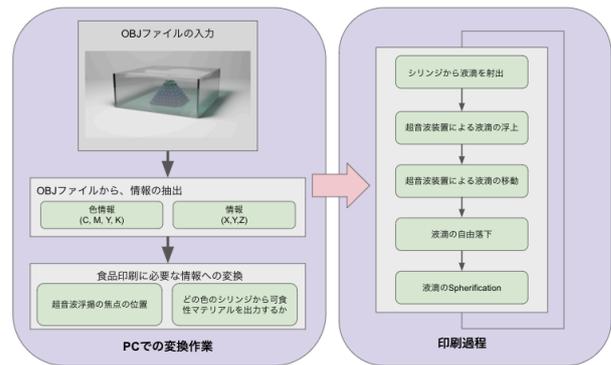


図 3 プロトタイプの全体構成図

液滴出力部は、超音波浮揚の可動範囲内に設置する。

液滴出力部の条件

定量的に浮揚させる液滴の量を制御し、超音波浮揚の安定性を確保するため、マイクロコントローラー等を用いて液滴の出力を自動化する。

液滴蓄積部の配置条件

液滴蓄積部は、超音波浮揚の可動範囲内に設置する。

超音波装置の配置条件

超音波装置は、超音波装置間の距離調整を可能にするため、レールにねじ等で固定する。

5.5 設計

5.4 節で指定した設計要件に基づいて詳細設計を行った。具体的な内容を以下に説明する。

モデルファイル入力の設計

本プロトタイプは、モデルの色情報と幾何学的構造情報の両方をサポートするファイルを使用する必要がある。そのため、入力モデルファイルは STL ファイルではなく OBJ ファイルとする。

超音波装置の設計

超音波装置はアルミフレームで固定するように設計し、5.4 節で定義した要件を満たすようにした。

液滴出力部の設計

Thingiverse1 上で CC BY 4.0 DEED ライセンスで公開されている Linus Meienberg の Syringe Pump*1 を利用し、シリンジを下向きに押し出せるように設置した。Syringe Pump は、ステッピングモーターの回転を設置したシリンジを上下に動かすギアに変換するように設計されている。さらに、シリンジから出力されたアルギン酸ナトリウム溶液は、超音波の焦点では針とアルギン酸ナトリウム溶液の表面張力により離れないことがわかった。そこで、サーボモーターを用いて Syringe Pump 自体を上下に動かすように改造した。上記のステッピングモーターとサーボモーターは、Arduino Uno R3 を介して接続し、手動でトグ

*1 <https://www.thingiverse.com/thing:2797132>

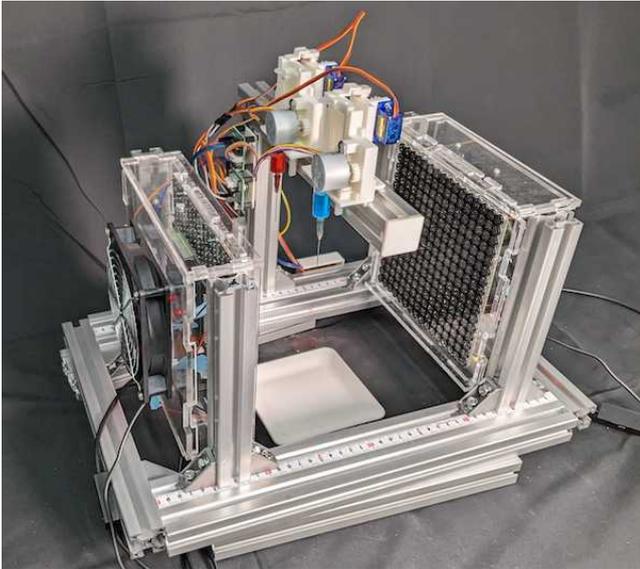


図 4 プロトタイプ

ルスイッチの切り替えでシリンジから液滴が出力されるように設計した。

液滴積層部の設計

十分なアルギン酸ナトリウム溶液を収めることができること、積層した液滴の色が見えやすいこと、超音波装置の間に収まることを考慮し、長さ 100mm、幅 100mm、高さ 40mm の白色容器を用意した。

5.6 実装

5.5 節で述べた設計に基づいて、図 4 に示すようなデバイスを実装した。以下の 5.6.1、5.6.2 節で詳細な説明を行う。

5.6.1 超音波装置部

PC では、超音波装置制御ソフトウェアを Unity で開発し、超音波装置に取り付けられた FPGA にコマンドを送信する。プログラムは GitHub^{*2} で MIT ライセンスで公開されているプログラムを利用した。筐体のモデルは、Plasencia 教授の研究室が提供する 2D モデルをベースにしている。これは、レーザーカッターを使用して 5mm 厚の透明アクリル板を切断して作成した。要件定義を満たすために、アルミフレームに取り付けるための固定穴を開けた。

5.6.2 液滴出力部

液滴出力部では、マイクロコンピュータで制御されたステッピングモーターによって、液滴を含むシリンジが押し出される。液滴積層部では、超音波浮揚が可能な範囲内に、乳酸カルシウム溶液を含む容器を設置した。

6. 実験 1: フェーズドアレイ式の超音波装置における液滴浮揚実験

6.1 実験目的

この実験の目的は、超音波浮揚を用いて、アルギン酸ナトリウム溶液 (シアンとマゼンタの食用色素を混合したも

の) の液滴を空中に浮揚させ、混合のために特定の位置に移動させることが可能かどうかを検証することである。

6.2 実験方法

- (1) シアンとマゼンタの食用色素を混ぜたアルギン酸ナトリウム溶液をそれぞれのシリンジに用意する。
- (2) 超音波装置から各シリンジの針先の位置に超音波の焦点を合わせる。
- (3) 超音波の焦点を各シリンジの中間位置に移動させる。

6.3 実験結果

図 5 は、シアンとマゼンタの食用色素を混ぜたアルギン酸ナトリウム水溶液が空中に浮いている様子を示している。左側は、指定位置での混合に成功したケースで、タイムラプス画像である。右側は、混合プロセス中にシアンの液滴が落下した失敗ケースで、こちらもタイムラプス画像である。この失敗ケースでは、混合中に液滴の一方が落下したり、超音波装置側に引き寄せられたりする現象が観察された。100 回の試行で、混合に 5 回成功した。

6.4 実験の考察

現在、超音波浮揚を用いた液滴混合の成功率は 5% である。アルギン酸ナトリウム溶液と超音波浮揚装置の両面から、液滴が落下するプロセスに寄与する要因を考察した。

アルギン酸ナトリウム溶液側の要因

アルギン酸ナトリウムは時間とともに粘度が低下する傾向がある。アルギン酸ナトリウム溶液を調製直後の失敗率が高いことを考えると、粘度が低い状態の方が好ましい可能性がある。浮揚しているアルギン酸ナトリウム溶液の液滴の着色部分のほとんどは底部に蓄積している。このことから、液滴の重量バランスが崩れ、安定性が失われていることが示唆される。

超音波装置側の要因

超音波装置側の問題としては、液滴を移動させる速度が考えられる。また、液滴が混ざる直前に、一方の音場が浮揚しにくい場所 (腹の領域に相当) を通過しなければならないことも一因となっている可能性がある。これらの要因を考慮して、以下のような改善策を検討している。

超音波浮揚中のフィードバックシステムの導入

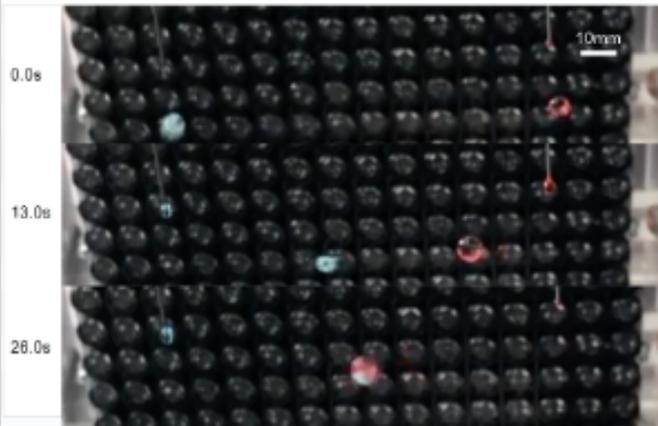
現在、浮揚中の液滴が落下しているかどうかを判断するフィードバックシステムがない。装置内にカメラを設置して画像処理を行うことで、液滴の安定性と超音波焦点に対する位置精度をリアルタイムで調整することができる。

他の可食性マテリアルの探索

本研究では、アルギン酸ナトリウム溶液と乳酸カルシウム溶液の組み合わせを検証した。アルギン酸ナトリ

^{*2} <https://github.com/RMResearch/OpenMPD>

Success Case



Failed Case

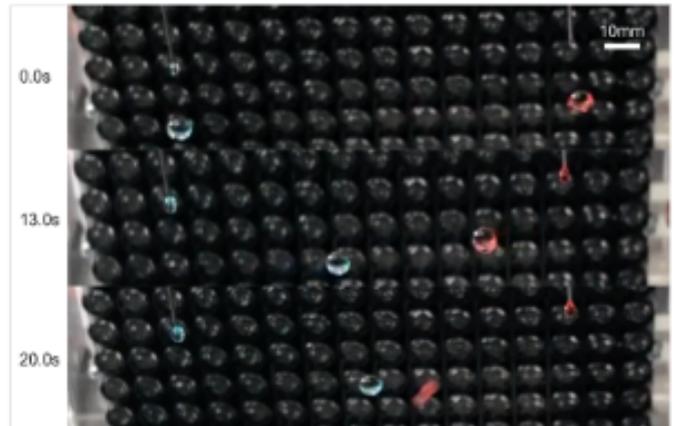


図 5 液滴を浮揚させながら混合させる実験の結果

ウムの独特の粘度により、比較的霧化の少ない超音波浮揚を行うことができた。しかし、他の食用材料を検証することで、表現の幅を広げることができる可能性がある。

7. 実験 2: 他のスピーカーとの音圧の比較

7.1 実験目的

5.6 節までの装置は、超音波素子をフェーズドアレイ状に並べて、40[kHz] でそれぞれの超音波素子の位相と音圧を制御することで焦点での音圧を制御する仕様になっていた。超音波素子は、ピエゾ素子とも呼ばれ、セラミックスを電極で挟み、電圧をかけることで振動させるものである。音波による液滴の浮揚において、操作可能な液滴の大きさは使用する音波の 1/4 波長が理論上の上限となる。より大きな液滴を安定して浮揚させるためには、より低い周波数を用いる必要がある。そこで、我々は周波数を 40[kHz] から 20[kHz] に下げることにより、より大きな液滴の操作が可能になると考えた。この周波数帯域での実験を行うにあたり、ツイーターの使用を検討した。ツイーターは通常スピーカーに使用される要素で、特に高い周波数の音を生成するのに適している。ツイーターを使用することで、異なる周波数帯域における浮揚の効率や粒子の安定性に影響を与える可能性があり、これによりより幅広いアプリケーションへの適用が可能かどうか検討する必要があると考えた。粒子の浮揚安定性を図るため、超音波素子の使用が適切かを再考し、高音域を出せるツイーターを用いて 20[kHz] での浮揚が可能かどうかを検証する。この検証により、より大きな液滴の操作と、異なるデバイスを用いた際の浮揚特性の変化を同時に調査することが可能となる。

7.2 実験環境

図 6 は、実験環境の概要図である。オーディオデバイス

を介して、入力にはマイク、出力はさらにアンプを介してツイーターもしくは超音波素子で出力した。以下でそれぞれの機器について詳細を述べる。ツイーターは、高音域を再現するスピーカーである。使用したツイーターは、Pyramid 社の TW44 である。最大 300[W]、周波数特性は 2[kHz] から 20[kHz]、感度 105[dB] となっている。同様に比較検証に用いた超音波素子は、SPL(Hong Kong) Limited 社の UT 1 0 0 7 - Z 3 2 5 R を用いている。中心周波数は、40[kHz] である。音の入出力に関しては、Python で自作した計測システムを利用している。図 7 は、入力された信号の波形を示すタブ、図 8 は、入力された波形を周波数解析した様子を示すタブとなっている。上のタブで、出力する波形の周波数の範囲及び、入出力するデバイスの指定を行い、右側のチェックボックスをクリックすると、指定した周波数の範囲のホワイトノイズが出力される。ホワイトノイズは、全ての周波数帯で均一な強度を持つ音である。統計的に見ると、ホワイトノイズは全ての周波数において一定のパワーを持ち、そのスペクトルはフラットである。これは、低い周波数から高い周波数まで、どの周波数帯でも同じ量のエネルギーを持つことを意味する。また、出力背景の最初と最後はフェーズイン、フェーズアウトすることで、ポップ音が発生することを防ぐようにしている。PC で生成された信号は、192[kHz] のサンプリング周波数で ROLAND 社のオーディオ・インタフェースを介してヤマハ社の RX-V781 を通じて増幅された後、ツイーターもしくは超音波素子に繋いでいる。これは、超音波素子の周波数である 40[kHz] を考慮した時に、少なくともサンプリング周波数は 2 倍以上ないといけないことに対応しているためである。入力に関しては、192[kHz] のサンプリング周波数で Earthwoks 社の M50 Precision Test Measurement Microphones で拾った後、ROLAND 社のオーディオ・インタフェースを介して、PC に取り込まれ

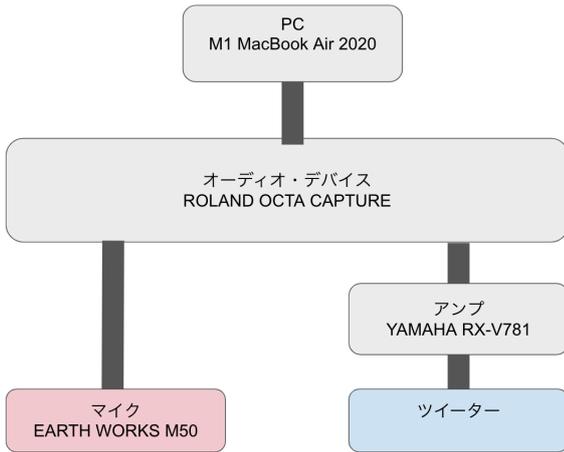


図 6 測定構成図

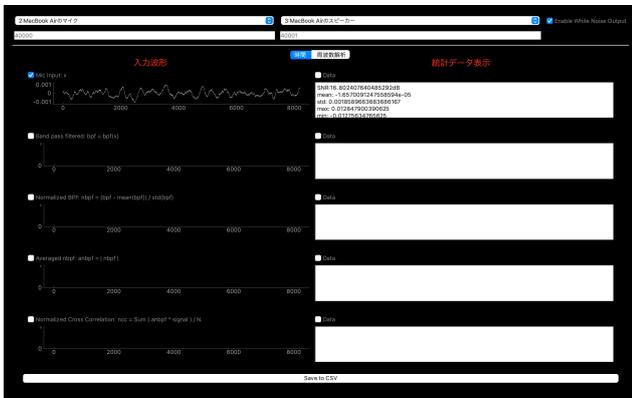


図 7 入力された信号の波形を示すタブ



図 8 入力された波形を周波数解析した様子

る仕様になっている。

7.3 実験 2-1: 計測システムにおける振幅と騒音計での音圧の関係性

7.3.1 実験目的

計測システムにおける周波数解析において、振幅を計測できるようになっているが、実際の超音波浮揚における計算を行うためには、音圧での単位での推定が必要となる。そこで、計測システムにおける振幅と騒音計での音圧の関

係性での検証を行った。

7.3.2 実験方法

使用した騒音計は、サンワサプライの CHE-SD1 である。CHE-SD1 は、周波数ウェイトリングが A 特性であった。周波数ウェイトリングは、音圧に対して重み付けが行われたものを指し、A 特性は、人間が聴覚可能な範囲の周波数に対して重み付けがされたものである。A 特性においては、1kHz が本来の音圧と同じ値であることから、ツイーターから 1[kHz] のホワイトノイズを出力した場合と環境音の GUI アプリケーション上における振幅と騒音計での音圧をツイーターから z 軸方向 50mm の位置に設置したマイクから計測した。その後、それぞれのデシベルをパスカルへ変換した後、変換式の作成を行う。なお、音におけるデシベルの単位は、SPL(Sound Pressure Level) と呼ばれ、以下の式 1 に基づく。人間が聞き取れる最も小さい音である、 $p_0=20[\mu \text{ Pa}]$ を 0dB、実測の音圧を p_A としている。

$$L = 20 \log \frac{p_A}{p_0} \quad (1)$$

7.3.3 実験結果

実験での計測結果を、表 3 に示した。騒音計の計測表示であるデシベルは対数であるためそのまま差分の計算ができないため、式 5.1 に基づいてパスカルに変換後に差分の計算を行った。表 1 の計測システム上の値である、18.864 と、騒音計の値である 0.1198 に基づいて以下の式 2 を、今後の実験における音圧の予測式として用いることにした。なお、 P は、予測される音圧 [Pa]、 A は、GUI アプリケーション上で計測された振幅値である。

表 3 計測システム上の振幅と騒音計の測定結果

	計測システム上の振幅	騒音計 [dB]	騒音計 [Pa]
出力時	19.276	76.0	0.1261
環境音	0.411	34.1	0.0063
差分	18.864	-	0.1198

$$P = 0.006350A [Pa] \quad (2)$$

7.4 実験 2-2: ツイーターと超音波素子の音圧比較

7.4.1 実験目的

ツイーターにおいては、人が聞こえない音域である 20kHz で、超音波素子に関しては、超音波領域の中でも能率が高い 40kHz に設定した時に、それぞれ 1 個ずつだと音圧がどの程度違うのかを検証する。

7.4.2 実験方法

超音波素子、ツイーターから z 軸方向 50mm の位置で、20V を流した状態で計測を行った。そして、周波数解析を行った上で、超音波素子では 40[kHz]、ツイーターでは 20[kHz] の振幅を確認する。

7.4.3 実験結果

表 4 と表 5 は、それぞれ超音波素子とツイーターの振幅及び音圧の推定値である。

表 4 ツイーターの計測値

	GUI アプリケーション上の振幅	音圧の推定値
出力音	859.849	5.463
環境音	0.012	0.00007
差分	859.837	5.463

表 5 超音波素子における振幅の計測値

	GUI アプリケーション上の振幅	音圧の推定値 [Pa]
出力音	293.795	1.866
環境音	0.411	0.002
差分	293.383	1.864

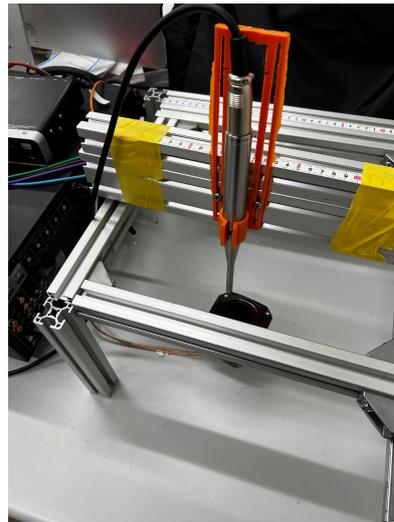


図 9 マイクと計測装置

7.4.4 考察

実験結果より、ツイーターが超音波素子よりも 2.9 倍の音圧を出していることが分かった。しかし、提供された超音波スピーカーは縦横に 16 個ずつ並んでおり、さらに 2 面となるため、超音波の焦点の位置には $1.86\text{Pa} \times 16 \text{個} \times 16 \text{個} \times 2 \text{面} = 952.32\text{Pa}$ が焦点に集まっているような計算となる。このことから、提供いただいた超音波装置と同等の音圧を出力するには、単純にはツイーターが 175 個必要であると見積もることができる。

7.5 実験 2-3: ツイーターの指向特性の検証

7.5.1 実験目的

最終的なツイーターによる音響浮揚の試験を行うにあたって、ツイーターの指向性範囲内で干渉の検証をする必要があると考えた。そこで、まずツイーターの Z 方向及び XY 平面での指向特性の検証を行う。

7.5.2 実験方法

計測するツイーターは、20V の電圧を流した状態で、20kHz のホワイトノイズを流す。そして、マイクに関しては図 9 のように固定して、ネジで位置を変えられるような装置に設置した。まず、ツイーターから z 軸方向に 5mm ずつ離していく形で計測し、1000 回の平均における最大の振幅が計測される位置を計測する。次に、Z 軸方向に最大の音圧が出た高さにおいてツイーターに対して、水平方向の面にマイクを 5mm ずつずらして振幅を計測する。最後に、垂直方向に最大であった高さから上下 30mm の位置における平面での振幅についても同様に計測し、各 X 軸における指向性特性の図を作成する。

7.5.3 実験結果

表 6 は、ツイーターから Z 軸方向における振幅の計測結果となっている。このとき、ツイーターから垂直の向きに、50mm の位置において最大値を得ることが分かった。

表 6 ツイーターから Z 軸方向における振幅の計測結果

距離 [mm]	計測値	環境音	差分
0	791.7	0.065	791.7
5	807.3	0.037	807.2
10	791.1	0.031	791.0
15	797.1	0.032	797.1
20	775.0	0.026	775.0
25	781.2	0.046	781.2
30	770.1	0.034	770.1
35	792.4	0.037	792.4
40	798.5	0.020	798.5
45	802.5	0.040	802.5
50	812.1	0.033	812.1
55	805.4	0.024	805.3
60	782.9	0.031	782.9
65	792.4	0.049	792.3
70	788.3	0.021	788.3
75	775.1	0.020	775.1
80	782.1	0.035	775.1

ツイーターより z 軸方向 20[mm]における x 軸上の指向特性



図 10 ツイーターより Z 軸 20mm の位置における平面上の振幅計測

7.5.4 考察

実験結果における振幅の分布より、図 13 のような指向特性分布の図を作成した。線分に関しては同一平面のうち

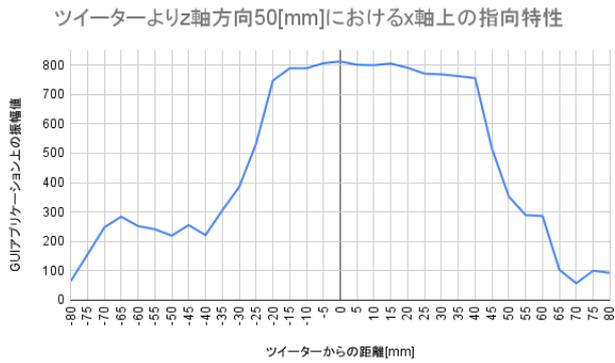
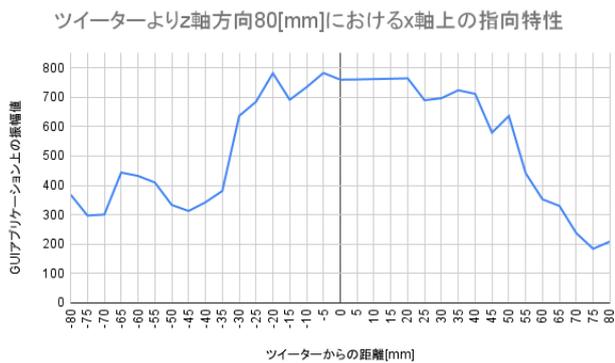


図 11 ツイーターより Z 軸 50mm の位置における平面上の振幅計測



ツイーターの指向特性分布

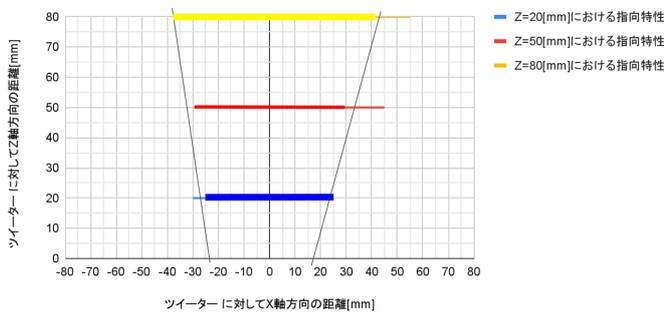


図 13 ツイーターの指向性特性

一番振幅の大きい値から-3[dB] 以内の範囲に含まれる端を結び、中心が Z 軸上になるようにしたものである。また、各線分における端点上を通る直線を引くことで指向性の範囲について確認でき、計算したところ 28.06° になることが分かった。

7.6 実験 4: ツイーターの干渉による浮揚の検証

7.6.1 実験目的

7.4 節でのツイーターの音圧の推定値と 7.5 節で検証した指向特性を参考にして、焦点の位置における振幅の計測及び 8mm 程度の発泡スチロールが浮揚するかの検証を行う。実験前の予測では、干渉により 4 倍の音圧値を得られると考えた。



図 14 4つのツイーターを並べている様子

7.6.2 実験方法

4つのツイーターを図 14 のように並べた。アンプからは、Bi-AMP の設定を行うことで、各ツイーターからは、同じ位相及び振幅の波形が出力されるように設定した。

7.6.3 実験結果

4つのツイーターの指向性範囲を重ね、干渉による強め合う箇所においても、GUI アプリケーション上の値は 850.8 になった。これは、一つのツイーターでのさらに、直径約 2mm の発泡スチロールを干渉による強めあう位置に置いて、浮揚は観察されなかった。

7.6.4 考察

まず干渉により振幅が増大すると考えられる位置においても、振幅が変化しなかった原因としては、ツイーターにつけた角度の精度不足が考えられる。また、発泡スチロールが浮揚しなかった原因としては、音圧不足や前述の重ね合わせの精度不足が考えられる。

8. 考察

デジタルガストロノミーの分野では、調理後のダイニング体験の向上に主眼が置かれ、新しい調理方法の探求はあまり行われてこなかった。本研究では、超音波を用いた新しい調理方法である「Magic Drops」のコンセプトに基づいて開発したプロトタイプについて議論した。プロトタイプを実装し評価した結果、実用上の課題はあるものの、食材を宙に浮かせて調理するというユニークな食体験を提供できる可能性が示された。今後は、提案手法がエンターテインメント性のある食体験を提供できることをさらに検証するために、実用性を高めた装置の制作を目指す。このプロトタイプを実用化するためには、いくつかの課題に取り組む必要がある。

超音波浮揚と液滴出力の同期

現在の操作は、液滴出力部のシリンジを制御するための手動トグルに依存している。超音波装置との連携を

自動化することで、よりスムーズな操作が可能になると考えられる。

GUI アプリケーションの作成

現在は主に出力装置の検証に注力しているが、印刷プロセス全体を管理するためのユーザーインターフェースを改善する明確な必要性がある。印刷に必要な設計図面、OBJ ファイル、G コードファイルの作成を容易にする GUI アプリケーションを開発することで、操作性が向上する。

ビジョンの検証

このシステムの背景にあるビジョンは、超音波浮揚技術を活用して、フードプリンティングをよりエンターテインメント性のある形に革新することである。今後は、実用的で多様な料理体験を提供することで、このビジョンの検証を目指す。例えば、待ち時間の間にユーザーがこれから食べるもののデザインを行い、食事を行う目の前で現在作成しているフードプリンターで印刷する体験の提供などを考えている。これには、様々な食材の組み合わせを試し、複雑でビジュアル的に魅力的な料理を作ること、食べ物の食感や風味を詳細に分析し、感覚的な満足度を高めることが含まれる。このビジョンを検証することで、デジタルガストロノミーの可能性を広げ、食文化に革新をもたらすことを目標としている。

9. 結論

本研究では、超音波浮揚を用いたフードプリンティングの応用と実現可能性を検証した。私たちが提案した Magic Drops は、デジタルとガストロノミーを融合させ、ユニークな食事体験を生み出すものである。私たちは、超音波浮揚の実用的な応用の実現可能性を示すと同時に、装置の要件、設計、実装について議論した。私たちの評価には、使用材料の特性と、成功するための具体的な考慮事項が含まれている。将来的には、食事とエンターテインメントが融合する空間を創造し、食事体験全体を向上させることを目指している。

参考文献

- [1] Bennacef, C. et al.: Advances on alginate use for spherification to encapsulate biomolecules, *Food Hydrocolloids*, Vol. 118, p. 106782 (2021).
- [2] Bertran, A. et al.: Making sense of human-food interaction, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13 (2019).
- [3] D'Angelo, G. et al.: Molecular gastronomy meets 3D printing: Layered construction via reverse spherification, *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 3, No. 3, pp. 152–159 (2016).
- [4] Hong, H.-C.: Color Gamut and Colorimetric Color Reproduction of Printers, *Journal of the Color Material*

- Association*, Vol. 68, No. 10, pp. 638–645 (1995).
- [5] Kamihori, M. et al.: ThermoTumbler: A Tumbler-type Device that Changes Flavor Perception by Controlling Temperature to the Lower Lip, *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–7 (2024).
- [6] Kato, K. et al.: Demonstrating FoodSkin: A Method for Creating Electronic Circuits on Food Surfaces by Using Edible Gold Leaf for Enhancement of Eating Experience, *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–4 (2023).
- [7] Kawahara, H. et al.: Magic Drops: Food 3D Printing of Colored Liquid Balls by Ultrasound Levitation, *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–2 (2022).
- [8] Kawahara, H. et al.: Levitation Printing: Feasibility Study of a New Food Printing Method with Ultrasound Levitation, ICCCM '24 (2024). Accepted for publication; preprint available.
- [9] Khot, R. A., Mueller, F. et al.: Human-food interaction, *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, Vol. 12, No. 4, pp. 238–415 (2019).
- [10] Mantihal, S. et al.: Texture-modified 3D printed dark chocolate: Sensory evaluation and consumer perception study, *Journal of Texture Studies*, Vol. 50, No. 5, pp. 386–399 (2019).
- [11] Miyashita, H. et al.: Electric Salt: Tableware Design for Enhancing Taste of Low-Salt Foods, *Adjunct Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (2023).
- [12] Montano-Murillo, R. et al.: OpenMPD: A low-level presentation engine for multimodal droplet-based displays, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 42, No. 2, pp. 1–13 (2023).
- [13] Morisaki, T. et al.: Midair haptic-optic display with multi-tactile texture based on presenting vibration and pressure sensation by ultrasound, *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, pp. 1–2 (2021).
- [14] Nakano, K. et al.: A study on persistence of gan-based vision-induced gustatory manipulation, *Electronics*, Vol. 10, No. 10, p. 1157 (2021).
- [15] Ochiai, Y. et al.: Holographic whisper: Rendering audible sound spots in three-dimensional space by focusing ultrasound waves, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4314–4325 (2017).
- [16] Saito, A. et al.: RepRap SWIM-ER: low cost open-source 3D gel printer, *Nano-, Bio-, Info-Tech Sensors, and 3D Systems II*, Vol. 10597, SPIE, pp. 113–119 (2018).
- [17] Serizawa, R. et al.: 3D jet printer of edible gels for food creation, *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2014*, Vol. 9058, SPIE, pp. 80–85 (2014).
- [18] Vadodaria, S. and Mills, T.: Jetting-based 3D printing of edible materials, *Food hydrocolloids*, Vol. 106, p. 105857 (2020).
- [19] Whymark, R.: Acoustic field positioning for containerless processing, *Ultrasonics*, Vol. 13, No. 6, pp. 251–261 (1975).
- [20] 前田容那ほか: 可食ビーズを用いたフードプリント手法の提案, *インタラクション 2021 論文集*, pp. 630–632 (2021).