

# 食感思考型 3D フードデザイン-咀嚼ロボは音をどう調理するか

"Texture-Thought-Based 3D Food Design - How Does the Chewing Robot cook Sound?"

鈴木 悠人<sup>1</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>,  
 エムディナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Yuto SUZUKI<sup>1</sup>, Jun OGAWA<sup>2</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>,  
 MD Nahin Islam SHIBLEE<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山形大学工学部

<sup>2</sup>山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup>Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

Implantable Gel Biter は、人間の口腔構造を模倣した圧電センシング装置であり、食べ物を咀嚼させることで波形を取得することが可能である。食感情報を波形として学習することで、咀嚼した食べ物の種類を識別することができる。3D フードプリンターは3DCAD でモデリングしたデータを基に食材を層状に造型するため、複雑な形状やデザインの食べ物を造型できる。本研究では、3D フードプリンターを用いて、さまざまな幾何学形状のクッキーを造型し、Implantable Gel Biter で 3D フードを咀嚼させて、学習モデルを構築する。食感情報とは無関係の音声データの波形をこの学習器に入力する。これにより音の波形から推測された形状のクッキーを造型することを目指す。

キーワード: 3D フードプリンター, モデリング, ソフトロボット, センシング, 機械学習

## 【Abstract】

Implantable Gel Biter is a piezoelectric sensing device that mimics the oral structure of humans, allowing it to capture waveforms by inducing the chewing of food. By learning texture information in the form of waveforms, it can identify the types of chewed food. On the other hand, a 3D food printer, based on data modeled in 3D CAD, layers food materials to create intricate shapes and designs. In this study, Implantable Gel Biter will then chew the 3D-printed food to construct a learning model by utilizing a 3D food printer to model cookies with various geometric shapes. Additionally, unrelated audio data waveforms, devoid of texture information, will be input into this learning system. The goal is to use these waveforms to model cookies with shapes inferred from the audio data, thereby exploring the creation of edible shapes based on sound information.

Keywords: 3D Food Printer, modeling, Soft robot, Sensing, machine learning

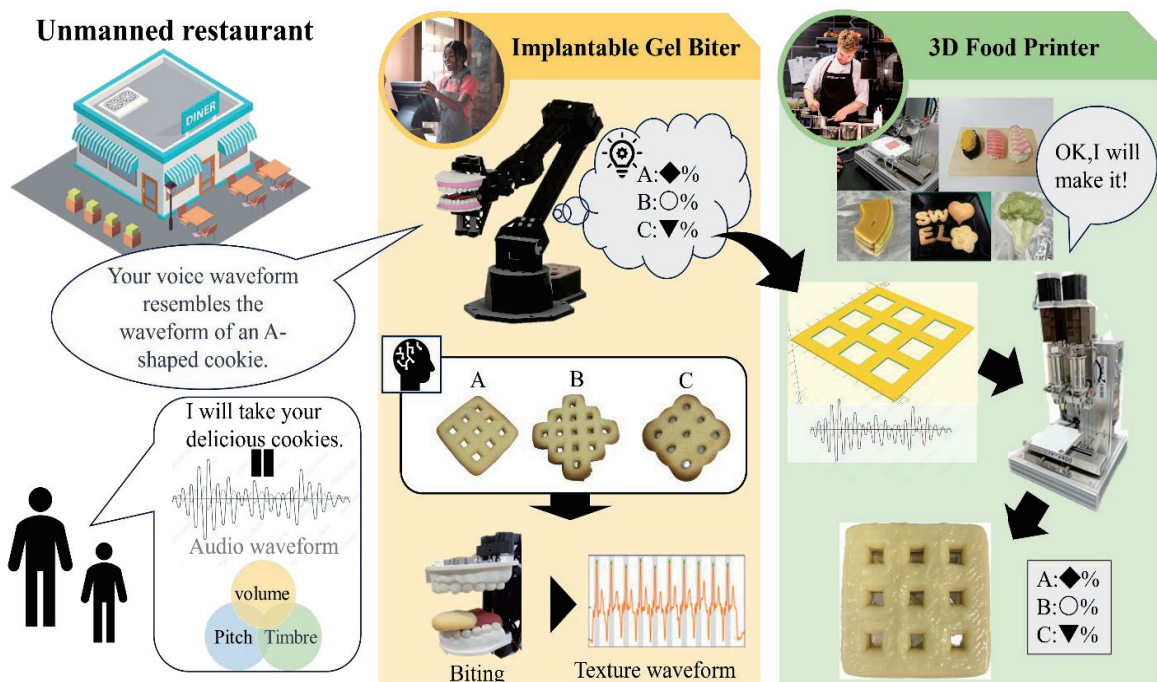


図 1 食感思考型 3D フードデザインの概念図

## 1. 序論

レストランの経営においてサービスの質や効率性は常に中心的な関心事となっている。最近ではロボットの導入により、料理の調理から配膳まで自動化され、レストランの業務形態に画期的な変革をもたらし、新たな飲食店のサービスの変容を目の当たりにする機会が多い[1]。そこで我々はロボットが本来与えられた機能をただ実行するだけに留めず、ロボットなりに状況を解釈し、新しい価値を生み出すことはできないのか？という疑問を提示する。その疑問に対し、本研究は咀嚼ロボ[2]に着目し、食品のテクスチャを分析する主機能とは別に、分析機能を食本の調理方法を考えるための解釈の手段(追機能)として成り立たせるアプローチを提案する。このような概念を創るためにはどうすればよいだろうか？我々は食べ物の食感を学習する口腔模倣型圧電咀嚼装置である Implantable Gel Biter[3]が有する圧電センサーによる咀嚼の信号と環境音の波形との間にある、両者とも高分解能の時系列離散データであるという類似性に着目する。図1にこの類似性に着目した提案システムの概念を示す。このシステムでは、お客さんが注文した声の波形を咀嚼装置が「音を咀嚼に当てはめて」解釈し、自らの解釈に合わせた形状の食品を提供する。そして調理は食品を造型できる3Dフードプリンターを用いることで、単なる機械を繋げるだけでなく、機械自身の造像的思考が介在した、いわばその機械だからこそ創り出せる食提供の新たな概念を打ち立てることを目指す。

## 2. 口腔模倣型圧電センシング装置

「Implantable Gel Biter」

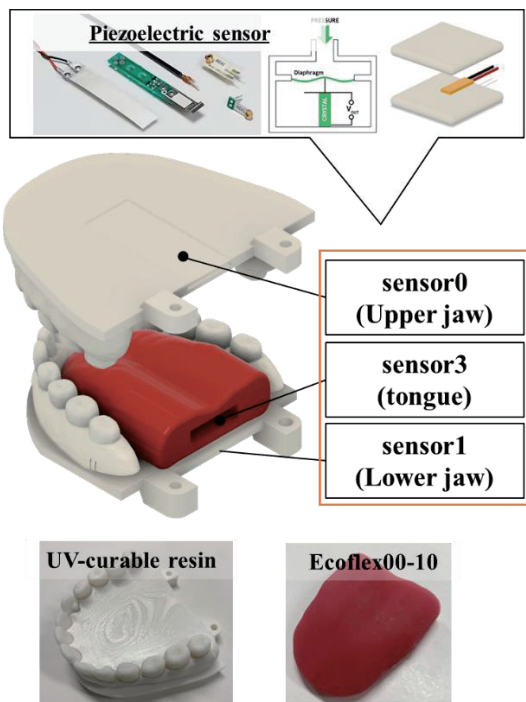


図2 圧電センサの媒体としての口腔模型

## 2.1 口腔構造の模倣

食品を定量的に評価する手法としてはクリーブメータによる測定が挙げられるが実際の口腔状況と異なることやプランジャー形状や圧縮速度が測定結果に影響を与えてしまう[4]。しかし、Implantable Gel Biterでは人間の口腔状況に近似した状況で測定することが可能なことから、得られるデータも人間が感じる食感に近いものであると考える。口腔模型の設計では人間の口腔をできるだけ正確に再現するため部位ごとに適正な材料を選定した。具体的には、歯部にはUV硬化性樹脂(Formlabs社製)を使用している。UV硬化性樹脂は高い硬度と耐久性を有していることから人間の歯の特性を適切に模倣するのに適した材料である。舌部にはEcoflex00-10™(Smooth-On社製)が使用され、舌のような柔らかさを模倣するのに適した材料である。また、この口腔模型は歯を一本一本取り外すことのできるインプラント式であるため、歯の抜け具合やグラつき具合など異なる口腔状況に応じた測定が可能である。

## 2.2 センシング方式

Implantable Gel Biterの主な機能の一つは、上顎、舌、下顎に取り付けられた圧電センサによるセンシングである。圧電センサは圧電効果により、物理的な力や振動を電気信号に変換し、検知するセンサである。センシングのプロセスは以下のように行われる。まず、口腔模型にクッキーを噛ませることで、歯の表面や舌などの接触した部分から発生する振動が骨伝導のような形で口全体に伝わる。圧電フィルムセンサがこの振動を感知し、振動を電圧の波形に変換する。受信されたデータは、ノイズ除去を施して処理される。具体的には、線形傾向の除去と高速フーリエ変換を用いたローパスフィルタ(カットオフ周波数:300 Hz)が適用され、ノイズが除去される。このノイズ除去のプロセスは、ヒステリシスを軽減し、後のデータ解析の精度を向上させる。その後、ノイズ除去された波形データから、最も特徴的な部分であるピーク部を中心として前後100データ分が抽出される。この抽出プロセスは、データの解釈を簡素化するために重要である。そして、抽出されたピーク部分から、特徴量生成が行われる。特徴量生成は、時系列データから多次元の特徴量を自動生成するためのライブラリであるtsfleshを用いて行われる。このプロセスを経て、最終的に取得されるデータが機械学習の対象となる。取得された特徴量とそれに対応するラベルは、訓練データとテストデータ(比率は80%:20%)に分割され、機械学習モデルに渡される。ここで、機械学習モデルは学習データを用いて特徴量とラベルの関連性を学習し、その結果を基にテストデータを用いてその性能を評価する。このようにして、特徴量とラベルの間の関係性から新たなデータに対する予測性能を向上させることが可能となる。分類学習のアルゴリズムとしてはロジスティック回帰が採用されている。これにより、得られた特徴量を基に、それがどのラベルに対応するかを高い精度で予測することが可能となる。

### 3.スクリー方式 3D Food Printer (3DFP)

クッキーの造型にはスクリー方式の3Dフードプリンター装置(FP-2500:世紀(株))を用いた。図3に3DFPの模式図を示す。本装置は押出機モーター,原料供給ホッパー,スクリー,ノズル,造型テーブルから構成されており,造型最大サイズは90×90×60mm,ノズル内径は1.2mmである。造型には,スライサーソフトとして Simplyfy,制御ソフトとして Pronterface を使用した。

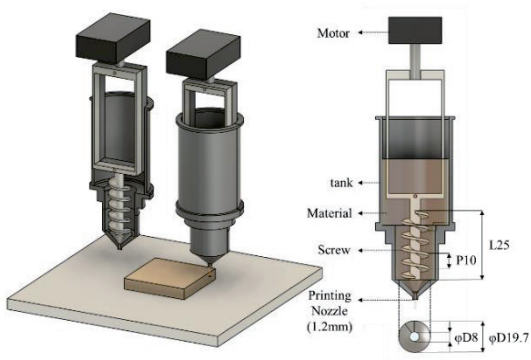


図3 FP-2500 模式図

## 4.実験及び結果

### 4.1 クッキー生地 の作成・造形・識別

クッキーの材料は「めっちゃラククッキーミックス」(ニッポン株式会社) 100 g,水 30 g を混合し,作製した。3DFP で形状の異なる3種の造形データ A,B,C を Openscad によって作成し,クッキーを造形した。造型条件を表1に造形結果を図4に示す。Implantable Gel Biter の測定では咀嚼動作を10回行い,3種類のクッキーをそれぞれ2セット実施する。得られたデータから学習モデルを構築するまた,学習性能を図るための識別精度のヒートマップを図5に示す。平行軸はロジスティクス回帰による予測ラベル,垂直軸は実際のラベルを示している。3種クッキーの平均識別精度は 94.4%であり,高い識別精度が得られた。

表1 3DFP によるクッキーの造形条件

Parameter	Condition
Layer height [mm]	0.6
Print speed [mm/min]	1000
Modeling Time [min]	15

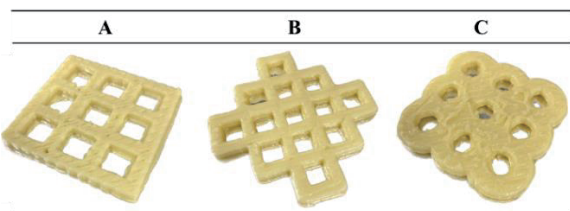


図4 学習させるクッキーの形状

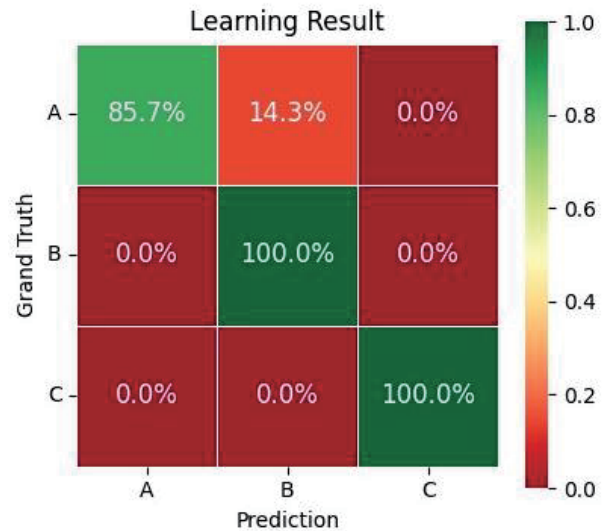


図5 3種クッキー(A,B,C)の識別結果

### 4.2 音声データから調理

#### 4.2.1 音声データの推定

音とは振動や圧力の変化が空気,水,個体などの媒体を通じて感知される現象のことであり,音の大きさ,音程,音色の大きく三つの要素からなっており,その違いを識別することによって音を認識することができる。ここでは,4.1 節で構築した学習モデルに a, b, c の3種類のBGMの波形を入力し,入力した音の波形がどのクッキーに対応するか推定する。使用した音声データ a, b, c の特徴はそれぞれ(ポップで軽快なスウィングジャズ),(ミドルテンポで落ち着いた雰囲気),(軽やかで可愛い雰囲気)のBGMである。推定結果を図6に示す。



図6 音声データ(a,b,c)の推定結果

#### 4.2.2 新規デザインの構築

図6の推定結果から Openscad を用いて,指定した割合で形状の合成を行い,作成したデータから 3D フードプリンターを用いてクッキーの造形を行う。図7に推定結果に基づいた合形状の3Dデータと造型後の結果を示す。また,造形後のクッキー(a,b,c)を Implantable Gel Biter で測定を行い,音声データを推定させた結果と類似するか検証を行う。図8にクッキー(a,b,c)を推定させた結果を示す。

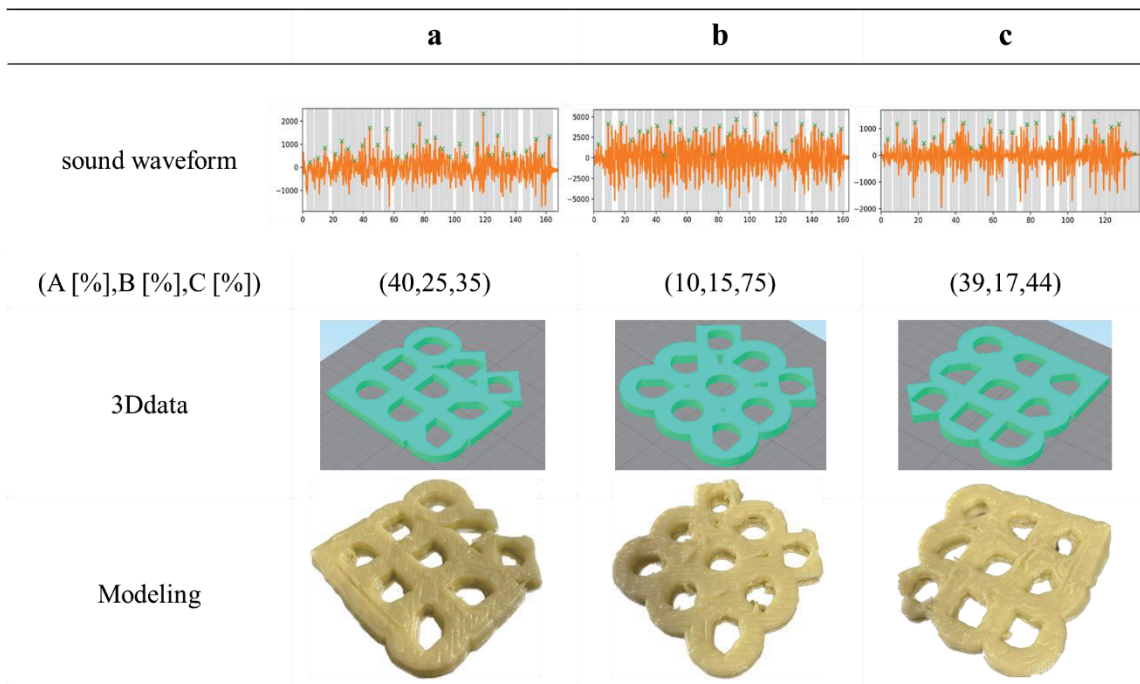


図 7 音声データ(a,b,c)からデザインされたクッキー

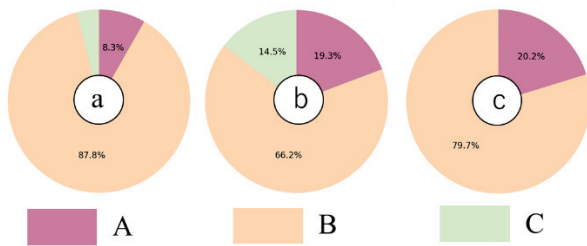


図 8 クッキー(a,b,c)の推定結果

### 5.考察

図 6,図 8 の結果より,音声データを推定させた結果と音声データから作られたクッキーを推定させた結果では大きな違いが見られることが示されている。これは,音声データが Implantable Gel Biter にとって本来求めているデータではないため音と食感の間にある明確な違いが出てしまったと考える。

図 6 の推定結果からは a と c は比較的似ているが b だけ明らかに違っている。図 7 の音の波形より,a と c は振幅が-2000 から 2000 の間であり,比較的近い波形を示している。b は-5000 から 5000 の間であり, a, c に比べ明らかに異なる波形である。よって,振幅と Implantable Gel Biter の推定結果には相関があることが確認され,振幅が大きいほど C の形状であると解釈する可能性が高い。

従って,音データは Implantable Gel Biter にとって異物なデータではあるが,与える音の波形によって推定結果が変わることや振幅との相関関係が見られることから食感思考に基づいて解釈することが可能であると示唆される。

### 5.結言

本研究で我々は,食感思考に基づいて音をデザインし,調理するシステムを構築した。これにより,新しい食体験の提供が可能となるだろう。今後は 3DFP との連携を深め自律的な食品ロボットシステムの構築を目指す。

### 謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP21H04936, JP22K17972, 管理法人 NEDO の委託業務 (JPNP14004 と JPNP20004) によって支援を受けたものである。

### 参考文献

1. Kyung Hwa Seo, Jee Hye Lee., “The Emergence of Service Robots at Restaurants: Integrating Trust, Perceived Risk, and Satisfaction”
2. Weiliang, Xu., Bronlund, J., Potgieter, J., Foster, K., Rohrle, O., Pullan, A., Kieser, J.” Review of the human masticatory system and masticatory robotics.” International Journal of Energy Research, vol.55, no.2, 2008
3. Hirose, K., Sudo, I., Ogawa, J., Watanabe, Shiblee, MD. N. I., Khosla, A., Kawakami, M., Furukawa, H. “Gel Biter: Food Texture Discriminator based on Physical Reservoir Computing with Multiple Soft Materials. “AROB Journal, vol.27, no.4, 2022
4. Michiwaki, Y., Kinumatsu, Y., Yokoyama, M., Michi, K., Sumi, Y., Ogoshi, H., Takahashi, T. “Difference of conditions of measuring food texture from masticatory movement.” The Japanese Journal of Dysphagia Rehabilitation, vol.5, no.1, pp.20-24, 2001