

[研究助成 (A)]

食品形状設計技術と高精度フード 3D 造形技術の開発による 食感デザイン法の確立

2251025

研究代表者
(助成金受領者)

東京大学 大学院工学系研究科

准教授

長 井 超 慧

共同研究者

慶応義塾大学

准教授

小 池 綾

[研究の目的]

「食」はすべての人の健康を支える重要な因子である。とりわけ食感の食のおいしさの価値を高めるだけでなく、摂食のしやすさにも直結する重要な要素である。所望の食感を有する食品を製造できるようになれば、消費者にとってよりおいしい食品の開発が期待できるだけでなく、老化や障害によって咬合力が低下した人々にとって、食べやすく心地よい食べ応えの食品の実現などが期待できる。これは、人間と深く調和して高い QoL を保証する機械・社会システムの実現であり、すべての人の健康を目指す SDGs の理念にも沿っている。

この実現には、食品に対する形状設計的視点・加工学的視点による「食感の評価・設計手法の確立」およびそれを検証するために、食品ならではの「低融点・低剛性・脆性材料へ対応可能な造形方式の開発」の 2 点の実施が有効である。そのため本研究では、高精度 3 次元形状測定に基づく食品の特性評価モデルの構築と、低融点・脆性材料に対応した高遠心場 3D プリンタの開発による高精度フード 3D プリント技術の開発を実施した (図 1)。これらにより、ソフトウェア・ハードウェアを包括した食品の形状設計とその評価を実現し、所望の食感を有する食品を製造可能な食感設計技術の基盤を確立することを目指した。

[研究の内容, 成果]

1. 概要

本研究では、食品内部の微細構造と食感の関係を明らかにするための「高精度 3 次元形状測定に基づく食品の特性評価」と「高遠心場 3D プリンタの開発による高精度フード 3D プリント技術の開発」を実施した。以下にその内容と成果を述べる。

2. 高精度 3 次元形状測定に基づく食品の特性評価

2.1 概要

食感に関する研究としては、官能試験による評価や、感覚と形状の結び付けを図る感性工学的なアプローチがなされているが、計測による実際の食品の内部構造と食感を対応付ける例は少ない。本研究では、複雑で微細な内部形状が食感に影響しうる食品を対象に、高分解能 X 線 CT スキャンによって得られる食品内部の微

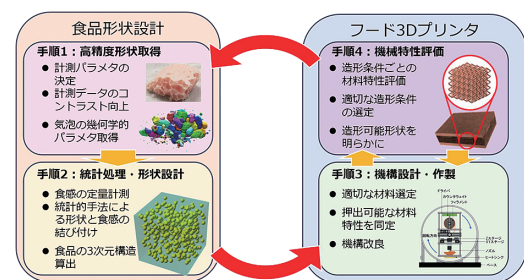


図 1 研究概要

細な三次元構造データを用いることで、より客観的かつ定量的な食感評価手法の確立を目指した。X線CTスキャンは非破壊計測の一種であり、物体内部の構造と密度情報をマイクロメートル精度のグレイスケール3次元画像として取得することができる計測法であり、医療・製造業で用いられることが多いが、食品への展開も昨今注目を集めている。

今回は、内部の気泡構造が食感に影響を及ぼす食品であるスナック菓子と納豆を対象とし、構造の幾何学的特徴と食感との対応付けを試みた。食品の吸湿や攪拌などによる内部構造の変化をX線CTスキャンで明らかにし、構造変化が食感へ与える影響について検討し、以下の成果を得た。

- ・ X線CTスキャンが水分量の変化を調べるのに有効であることを明らかにした
- ・ スナック菓子の食感に関し、説明力の高い吸湿指標を特定した
- ・ 納豆の気泡の構造とクリーミーさに相関があることを明らかにした

2.2 X線CTスキャンによる水分量の変化の検出可能性の調査

吸湿により食感が変化するスナック菓子を対象とし、乾燥状態および吸湿後の状態についてX線CTスキャンを行い、内部構造およびCT値分布の変化を解析した。食品内部構造の計測には、産業用X線CT装置 Rigaku CT Lab HX130 を主として用い、より高コントラスト・高分解能な計測を実現するため、X線顕微鏡 ZEISS Xradia Versa 510 も用いた。

その結果、吸湿後の食品では、気泡構造の微

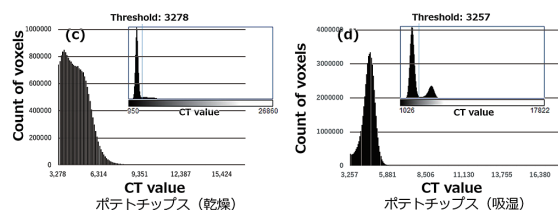


図2 吸湿前後の食品のCT値の変化（右上：閾値処理前のヒストグラム）

細化や消失が確認されるとともに、食品部分に対応するCT値分布が高輝度側へ移動する傾向が確認された（図2）。これは、水分吸収によって食品内部の密度が増加したことを示唆しており、CT値が、吸湿を考慮した新たな食感評価指標となる可能性が示された。

2.3 食感の説明力の高い吸湿指標の特定

従来研究 [Tanaya 2022] で提案されていた気泡形状に基づく食感評価式を吸湿食品に適用したところ、食品種によって傾向が一致せず、形状特徴のみでは吸湿による食感劣化を十分に説明できないことが分かった。

乾燥したスナック菓子サンプルとそれを吸湿させたサンプルについて、X線CTスキャンにより内部の気泡の形状や、密度に相関する値であるCT値を取得した。取得したCTボリュームデータに対し、ノイズ低減処理および閾値処理を行い、食品内部の気泡領域を抽出した。さらに、距離場を用いたラベリング手法を開発し、これにより気泡を従来法に比べ正確に個別に検出することが可能となった（図3）。気泡数、体積、半径、分散などの幾何学的特徴量を算出し、これらの特徴量をCT値に関する数値と共に、[Tanaya 2022] による手法を用いて食感と形状特徴の関係式の算出を行った。その結果、従来法よりも高い決定計数が得られた。これは、CT値に基づく特徴量を説明変数に加えることで、従来手法よりもあてはまりのよい食感評価式を算出することができたことを示している。

2.4 気泡の構造とクリーミーさの相関の解明

納豆を対象とした解析では、攪拌回数による内部気泡構造の変化を評価した。納豆は攪拌回

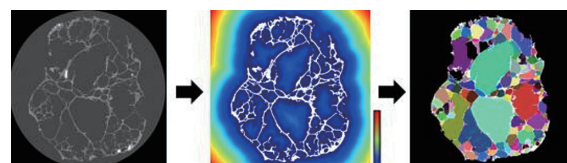


図3 気泡検出手法の概要。左から、入力CT画像の断面図、物体表面（白色部）からの符号付距離場、検出された気泡（色はランダム）

数を増やすことで「クリーミー」な食感になることが経験的に知られている。本研究ではその現象を X 線 CT スキャンによって可視化・定量化した。

実験では、市販の納豆 2 品種（納豆 A、納豆 B とする）を実験試料として用いた。X 線 CT スキャンには、Rigaku 社製 CT Lab HX 130 を使用した。また、今回の実験において、攪拌後の経過時間や、資料温度、および攪拌方法については一定であるものとして実験を行った。

気泡の幾何学的性質を解析した結果、攪拌回数の増加に伴い、内部に形成される気泡数が増加し、気泡体積および体積分散が減少する傾向が確認された（図 4）。これは、攪拌によって気泡が微細化し、より均一な気泡構造が形成されることを示している。この結果は、「クリーミーさ」の向上が、微細かつ均一な気泡構造に起因する可能性を示唆しており、感覚的に語られてきた食感変化を構造情報から定量的に説明できる可能性を示した。

3. 高遠心場 3D プリンタの開発による高精度

フード 3D プリント技術の確立

フード 3D プリンタ：低融点・低剛性・脆性材料へ対応可能な造形方式の開発

3D プリンタの多くは、熔融・凝固にもとづく造形方式を採用し、樹脂や金属など融点が数百℃を超える材料を対象としている。一方で

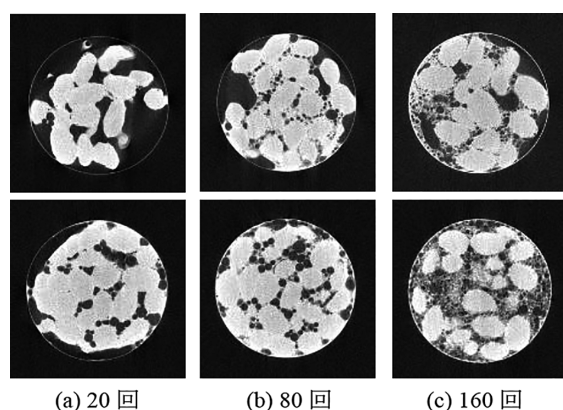


図 4 攪拌回数ごとの納豆（上段：納豆 A、下段：納豆 B）の CT ボリュームの断面

食品は基本的に数℃の違いで品質が大きく変化してしまうため、品質を維持しながら造形を行うなら、熔融・凝固のみに依らない方法も考慮する必要がある。本研究では、遠心機と 3D プリンタを融合した造形装置を実装し、高い材料流動性を実現して造形困難な食品に対応できるフード 3D プリンタを実現する。

3D プリンタの造形材料として食品を扱う例は、企業がエンタテインメントを目的として開発する以外、学術的に取り扱われる例がほとんどない。繊細な温度制御が求められる以外にも、混合材料は組成比の違いによる特性のばらつきが大きいなどの難点があるため、適切な造形条件を同定する作業から慎重に評価する必要がある。本研究は「力学的作用により造形特性を変化できる」点を提案の核としているため、材料特性のばらつきによらず学術的な新規性を示せる。

食品用 3D 造形ノズルの作製・改良を行う上で、チョコレートや飴など、高粘性・高表面張力な材料を用いることを前提とするとフィラメント化が困難であることから、図 5 に示すとおり FGF 方式のノズルが適している。

図 6 に示すように FGF タイプのノズルで材料を送る機構を構成し、図 7 のような 3 軸ステージを構成して、1G 場における実験を試みた。一般的なフィラメント材料を利用する 3D プリンタと異なり、スクリーによる材料の送り出し機構は高精度な温度制御が求められ、ペースト状材料の詰まりが生じやすい。1G 場における実験を進めているものの、市販されている粉末チョコレートの熔融・送り出しを安定的に行うこと

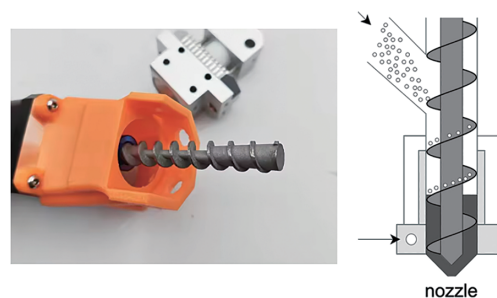


図 5 ペレット用 FGF ノズルのスクリー機構

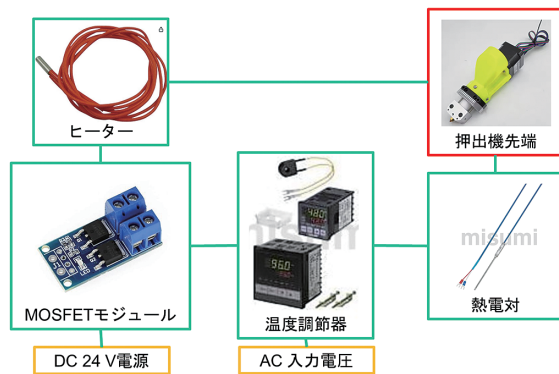


図6 チョコレート造形用 FGF 装置の構成

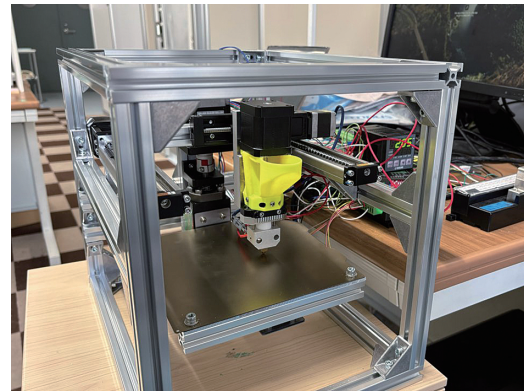


図7 FGF 形式の3軸造形装置

に苦戦している。チョコレートに含まれる油脂の割合によって溶融特性が異なることが明らかとなっており、市販品で油脂成分の高い材料の実験を進めながら、造形できることを優先して、別途油脂を追加することも検討している。

全体的に当初計画よりも遅れが生じているものの、1G 場において適切な材料の合成と造形ができれば、この装置を既存の遠心機側に搭載することで高重力場におけるプロセス特性の変化を評価できるようになる。低融点かつ高粘性の材料に対して高重力場が有効に作用するか、引き続き実験的に評価することを目指して実験を継続する予定である。

4. まとめと今後の展望

本研究では、食品内部の気泡構造だけでなく、食品材料そのものの密度変化にも着目した。従来の研究では、食品内部の幾何学的特徴量と食感との対応付けが中心であったが、本研究ではCT 値分布を解析対象に加えることで、水分量や密度変化を含めた食感の検討ができることを示した。また、異なる性状・食感の食品についてもX線CT スキャンを用いた解析が有効であることを実証した。

本研究では、食感設計技術の実現に向け、食品内部構造を制御可能なフード3D プリンタ技術についても検討を行った。特に、チョコレートや飴などの低融点・高粘性材料を対象とし、高遠心場を利用した食品造形技術の検討を進め

た。造形中に遠心力による力学的作用を与えることで、材料流動性を向上させ、従来では安定造形が困難であった食品材料についても微細構造造形を可能とすることを目指した。本研究では、ノズル形状や押出条件、温度条件などについて基礎的検討を行い、食品材料の造形特性評価に向けた知見を得た。

現在は、上記の結果を基に、水分量も考慮し、希望の食感を有する食品を設計する手法の開発を進めている。設計結果の形状を実食品で再現し検証することは先行研究において残された課題となっていたが、サブミリメートル精度で形状を制御することが可能なフード3D プリンタを用い、検証可能な手法の開発も進めている。

[成果の発表、論文など]

1. Kento Imani and Yukie Nagai, Analysis of moisture absorption index of foods by X-ray CT for texture evaluation, 15th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2026), e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 31(3), <https://doi.org/10.58286/32606> 2026 年 2 月
2. 今仁健人, 長井超慧, 小池綾, 松本紗陽花, 曾根明香里, 食感評価のためのX線CTを用いた食品の吸湿指標の解析, 精密工学会春季大会学術講演会, D105, 埼玉県 2026 年 3 月
3. 太田昂佑, 長井超慧, X線CT スキャンを用いた納豆の気泡構造解析と食感設計への考察, 精密工学会春季大会学術講演会, B82, 埼玉県 2026 年 3 月

[参考文献]

- [Tanaya 2022] Tanaya, H and Nagai, Y. Investigating the relationship between geometric features of voids and textures in aerated foods. JAMDSM, 16[6], JAMDSM0062, 2022.