

あにまる：外気圧制御によるマシュマロの膨張と収縮を被覆材料の設計により拡張あるいは変換する食品

大久保龍之介^{†1} 橋田朋子^{†1}

概要：人と食品の相互作用を扱う研究領域の Human Food Interaction において、食品の物性や機械的な制御の利用で食品を作動させる試みが盛んである。本研究ではその中で自律的に動いているように見える食品の実現を目指し、外気圧制御で可逆的に食品を作動させる仕組み“あにまる”を提案する。これは外気圧制御時に膨張と収縮を繰り返すマシュマロの性質を利用し、特定の被覆材料をマシュマロに接着させて膨張と収縮の動きを拡張あるいは変換することで実現する。具体的には、薄く全体的に接着させた被覆材料を切り分けて膨張と収縮の動きをパターンを表出と消失に拡張する手法と、厚く部分的に接着させた被覆材料によって膨張と収縮の動きを1軸方向への運動に変換する手法の二種類を実装した。

1. はじめに

動く食べ物はいつの時代も人々の関心を強く惹きつけてきた。ポップコーンやチョコレートファウンテンなどは世界中で親しまれており、最近ではプロジェクション技術により、目の前で食べ物が自律的に動いているかのように演出するレストラン[1]も注目されている。人と食品の相互作用を扱う研究領域である Human Food Interaction[2]においても、食品を作動させる試みはこれまで盛んに取り組まれてきた。特に食品の物性に着目してあらかじめ設計しておく、熱や水などの外部刺激を与えることで食品を作動させる手法が多数提案されているが[3][4][5]、これらは基本的に一回しか作動しないことが多い。別の研究領域で繰り返し作動する食品を実現する研究もあるが[6][7]、機械部品を食品に接触させて制御しているため、食べ物は装置に動かされているように見える。

筆者らは、あたかも自律的に動いているように見える食品の実現を目指しており、そのためには可逆的に作動することや、機械部品が食品に接触していないことが重要と考える。このような要件を満たすものとして、空気の入出力による外気圧制御によって可逆的に変形する食品であるマシュマロに着目する。マシュマロは容器内の外気圧を制御することによって膨張および収縮することはよく知られているが、本研究ではマシュマロに特定の被覆材料を接着させることで、マシュマロの膨張と収縮の動きを拡張あるいは変換することを可能とした。本稿ではこのような仕組みを“あにまる”と呼び、提案する。

2. 関連研究

Human Food Interaction の領域では、機械的な制御を用いず、食品自体の物性によって作動する食品の設計を主目的

とした研究が盛んに行われている。Tao ら[3]は小麦粉生地
の内部構造の設計により焼成することで特定の形に変形する食品を実現し、Elzelinde ら[4]は滴下する液体の pH によって形状を変化させる可食折り紙を開発している。さらに Bokeon ら[5]はゼラチンを用いたシェルスナップ構造による可食ジャンパーを開発している。これらの手法は食品を熱や pH、シェルスナップ構造によって変化させるため元の状態に戻らず、本研究の提案手法は可逆的に作動するという点で異なる。

また、生分解性ロボティクスの分野においても食品を作動させる手法のインタラクティブ食品への応用可能性を示しているものがある。Yuecheng ら[6]はアルギン酸の架橋反応を応用したセンシング機能を持つチューブ型生分解性アクチュエータ BioTube を開発し、呼吸と連動して膨張と収縮を繰り返すインタラクティブなデザートへの応用を示している。Gaolin ら[7]は生分解性のゼラチンベースの複合材料を用いたマッキベン型の人工筋肉 BIOGEM を実現し、体験者がマシュマロを握ると BIOGEM によって上下運動するケーキを作成している。これらの手法は可逆的な食品の作動を実現しているが、制御を行う機材やマーカー、ケーブルなどが食品に接触しており、作動させる対象である食品が動かされているように見える。本研究では機械部品が接触しない、自律的に動いているように見える食品の実現を目的とする。

3. 提案手法

あにまるはマシュマロが外気圧の制御によって膨張と収縮を繰り返す性質を活用し、あらかじめ伸縮しない被覆材料を用いてマシュマロへの覆い方を設計しておくことで、マシュマロの膨張と収縮の動きを拡張あるいは変換する手法である。

^{†1} 早稲田大学

マシュマロのような独立気泡を有した多孔質構造を持つ弾性質の食材は、外気圧を低くすると多孔内の空気が外気圧差により膨張し、全体的に体積が増大する。一方で外気圧低下状態を解除すると、内部の膨張した空気が収縮することによって外気圧低下前の状態に戻る。真空装置などを用いて外気圧の低下および低下解除を繰り返し行うことで、マシュマロの膨張と収縮を反復制御することができる。このようなマシュマロに対し、マシュマロに接着させる伸縮しない被覆材料の領域と厚みをあらかじめ設計しておくことで、マシュマロの膨張と収縮の動きを拡張あるいは変換する二種類の手法を提案する。

まず一つ目はマシュマロの表面に被覆材料を薄く全体的に、ただしいくつかの部分に切り分けて接着させる手法である。これらの部分をコーティング片と呼ぶ。このとき被覆材料はマシュマロの膨張を物理的に制限しない程度の薄さで伸縮しない素材のものを用いる。これによりマシュマロの収縮時はコーティング片同士が接するので一体として見えるが、マシュマロが膨張するとコーティング片の距離が拡大し、マシュマロが露出して境目がパターンとして表出する。マシュマロの体積膨張は等方的であるため、表面に接着したコーティング片間の相対距離も全体の膨張率と同等の比率で拡大する。このようにマシュマロの膨張と収縮の動きを、コーティング片の境目によるパターンの表出と消失に拡張する仕組みをクラック機構と呼ぶ。

二つ目の手法はマシュマロを部分的に覆うような形状の被覆材料を設計し、接着させるものである。このとき被覆材料はマシュマロの膨張圧によってき裂が発生しない程度の厚みと剛性を有する素材で成形する。マシュマロの等方的な膨張を物理的に制限することで、特定方向へ定まった膨張に整形することができる。たとえば、マシュマロの側面方向と下面を覆うように設計することで、上面方向へ定まった膨張に成形できる。このように膨張と収縮の動きを1軸方向への運動に変換する機構を、本研究ではピストン機構と呼ぶ。

4. 実装

本章では第3章で述べた指針に基づき、クラック機構によるパターン表出とピストン機構による動きの変換の2手法を実装する。

4.1 システムの構成

あにまろは、マシュマロと被覆材料からなる可食部品と、外気圧を制御するための食品用の真空コンテナとその吸引具からなる真空装置から構成される。その構成図を図1に示す。吸引具は真空ポンプを用いて手動で行うもの(以下、手動吸引と略す)と、真空ポンプのノズルを強力吸塵機(VC0820, makita 製)に接着して自動で行うもの(以下、自動吸引と略す)の2種類を設ける。マシュマロ(ホワイ

トマシュマロ, エイワ製)は直方体に近似した時、平均およそ $2.0 \times 2.0 \times 2.5 \text{ cm}^3$ の大きさのものを用いる。マシュマロに接着させる被覆材料はある程度の剛性を持ち伸縮性に乏しく、かつ加工が比較的容易なチョコレート素材(製菓用クーベルチュールチョコレート, 成城石井製)を用いる。チョコレート素材を特定の形に成形するための型は、食品用シリコン(HTV-4000, エングレーピングジャパン製)で造形するか、もしくは3DCGソフト(Blender)で設計し3Dプリンター(Bambu Lab A1 mini)で造形する。

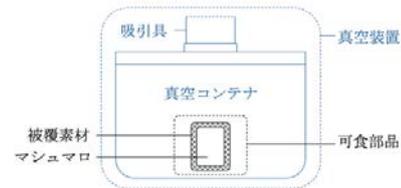


図1 あにまろの構成図

4.2 可食材料の特性調査

本実装で用いる可食部品の基礎的な特性を調べるため、2種類の簡易な実験を行った。

まず、本実装で用いるマシュマロがコンテナ内の気圧を低下させることで実際にどの程度膨張するのか、手動吸引と自動吸引とで比較した。自動吸引の結果、5回の実測値による平均で体積が1.1倍に増大することを確認した。一方手動吸引では、最大で1.3倍まで膨張することを確認した。各外気圧制御手法によるマシュマロの膨張の様子を図2に示す。なお以降のあにまろの実装はどちらの吸引手法でも動作の確認を行っているが、空気の入出力の効率化の観点から、本稿ではことわりがない限り全て自動ポンプによる吸引による結果を示す。

次にマシュマロに接着したチョコレート素材にき裂が発生しない条件を調べるため、コーティングをそれぞれ1回、2回、3回、4回行ったマシュマロを用意し、コーティングの厚さを測定したのちに手動吸引しき裂の確認を行った。まず、それぞれコーティングの厚さは2mm, 4mm, 6mm, 7mmであった。さらに図3に示すように、2mmの厚さでコーティングした場合は手動ポンプによる外気圧低下で破断したが、4mm以上の厚さのコーティングを行ったマシュマロは手動ポンプによる外気圧低下でき裂が発生しなかった。この結果より、マシュマロの膨張圧によってき裂が発生しない程度の厚みのチョコレート素材を使用する場合は厚みが4mm以上となるように設計する。

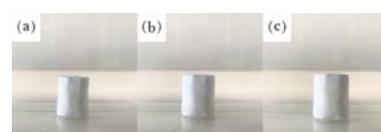


図2 マシュマロの膨張：(a) 外気圧低下なし (b) 自動吸引による外気圧低下 (c) 手動ポンプによる外気圧低下



図 3 外気圧低下後のコーティング：左から順に厚さ 2mm, 4mm, 6mm, 7mm

4.3 クラック機構によるパターン表出

クラック機構は可食部品と真空装置から構成される。この構成の全体像を図 4 に示す。クラック機構では、マシュマロが膨張した際にコーティング片の境目がそれぞれ現れることを実現するため、まずマシュマロの表面をチョコレート素材によって 1 回（厚み 2 mm に）全体的にコーティングした上で、そのチョコレートコーティング層に切れ目を入れてコーティング片を作成する。切れ目は図 5 のように縦方向、横方向、縦横方向のいずれでもよい。

作製した可食部品を真空コンテナ内に入れ、吸引具により外気圧の低下と解除を繰り返した様子を図 6 に示す。まず、通常の状態において境目は見えず、全体が一様に覆われているように見えるが、外気圧低下時に縦方向、横方向、縦横方向のいずれも境目が表出することを確認できた。また外気圧低下解除時は境目が消失し制御前の状態と視覚的に一致していた。以上よりクラック機構によるパターン表出に可逆性があることが確認できた。



図 4 クラック機構を実現するにあにまる



図 5 コーティング層に入れる切れ目（赤線部）：左から縦方向、横方向、縦横方向



図 6 クラック機構の動作（各図内左から縦方向、横方向、縦横方向）：(a) 制御前 (b) 外気圧低下後 (c) 外気圧低下解除後

4.4 ピストン機構による動きの変換

ピストン機構は可食部品と真空装置から構成される。この構成の全体像を図 7 に示す。ピストン機構では、収縮時と膨張時において特定の一軸方向の高さに差が生じることを実現するため、図 8 に示すようにマシュマロの上面のみが露出する形でチョコレート素材を周りに（厚さ 7mm 程度に）接着させる。本節では高さの差を生む方向をマシュマロの上面方向に定める。3D プリンタで造形した円柱上の型にチョコレート素材を流し込み、さらにその上にマシュマロを埋め込んで固めることで成形し、使用する。

作製した可食部品を真空コンテナ内に入れ、吸引具により外気圧の低下と解除を繰り返した様子を図 9 に示す。まず、外気圧の低下時にマシュマロ側面方向への膨張はせず、収縮時の上面方向の高さと膨張時の上面方向の高さの差が平均およそ 1.3mm（5 回繰り返して実測）であったことから、膨張方向が上面方向に制限されており、マシュマロの膨張と収縮の動きを 1 軸方向への運動に変換できていることが確認できた。また外気圧低下解除時の上面方向の高さは制御前の状態と変わらず、ピストン機構による動きの変換にも可逆性があることが確認できた。



図 7 ピストン機構を実現するにあにまる

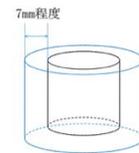


図 8 ピストン機構でマシュマロに接着するチョコレート素材（青線部）

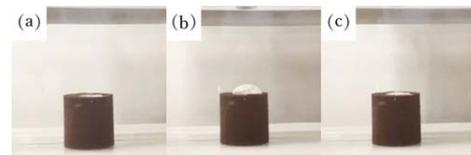


図 9 ピストン機構の動作：(a) 制御前 (b) 外気圧低下後 (c) 外気圧低下解除後

5. アプリケーション

本研究で提案・実装したクラック機構によるパターン表出やピストン機構による動きの変換を応用し、種類のアプリケーションを実現する。

(右) 外気圧低下解除後

5.1 情報の繰り返し表示

クラック機構によって表出するパターンに意味を持たせることにより、外気圧低下時に情報が出現し、低下解除時に情報が消失することで、情報の表示と消失を繰り返す機能を実現することができる。図 10 に、特定のアルファベットになるように切れ目を入れ、特定の英単語を表出した後消失したりした様子を示す。



図 10 クラック機構による情報の動的表示：(左) 制御前、外気圧低下解除後 (右) 外気圧低下後 外気圧低下時に「CUTE」の文字が表出する

5.2 自動調味

ピストン機構内の可食部品を2つ向き合う形で置くことで開閉式のアームのようなものを簡易的に実現することができる。本節ではマシュマロの底面と側面の半周にチョコレート素材を接着させた可食部品を用いる。この二つの可食部品でできたアームで食材を把持し、ピストン機構内に調味料の入った領域を設ける。また外気圧の低下と低下解除の操作を作り手と体験者が分担することで、インタラクティブな食品を製作できる。本機構内の真空コンテナは、コンテナのふたを開けることによって外気が流入し、外気圧低下が解除される。作り手があらかじめ外気圧を低下させ、体験者がコンテナを開封すると、外気圧低下が解除されてマシュマロが収縮し、アームで把持している食材が調味料の領域に落下することで自動調味が行われる。図 11 にこの自動調味を実現する食品の全体図を示す。また図 12 に把持する食材としてグミ、調味料としてシュガーパウダーを用い、シュガーパウダーが入った領域にグミが落下した様子を示し、図 13 にその前後のグミの様子を示す。



図 11 ピストン機構による自動調味を実現する食品



図 12 ピストン機構による自動調味：(左) 外気圧低下後



図 13 ピストン機構によって自動調味されたグミ：(左) 外気圧低下後 (右) 外気圧低下解除後

6. おわりに

本研究では非接触な制御で可逆的に作動する食品の設計手法として、外気圧を制御することによって膨張と収縮を繰り返すマシュマロの性質をいかし、マシュマロに特定のチョコレート素材をコーティングしマシュマロの膨張と収縮の動きを拡張あるいは変換することで、空気の入出力による外気圧制御で可逆的に食品を作動させる仕組み“あにまる”を提案した。さらにこれらの仕組みを用いた自律的に動いているように見える食品の例をいくつか示した。しかし本研究の手法によるマシュマロの膨張率は比較的小さく、制御可能な伸縮量に限界がある。外気圧低下量のより高い真空装置を用いることでこれらの課題を解決でき、より自由度の高いインタラクティブな食品の設計が可能になる。またユーザーの手によって動作を変更できる選択型のインタラクティブな食品の設計についても追究したい。さらに、よりユーザビリティの高い設計を可能にするため、マシュマロのような多孔質食材を自由に造形できるようなフード 3D プリンター用のフィラメントの作成についても検討する。

参考文献

- [1] Whitley. “Whitley-小人のシェフ- /渋谷のプロジェクト マップレストラン”. <https://www.mds-fund.com/cg/>, (参照 2025-12-15).
- [2] Gayle, T. et al. Exploring the Design Space for Human-Food-Technology Interaction: An Approach from the Lens of Eating Experiences. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 2022, vol. 29, issue. 16, no.2, p. 1-52.
- [3] Tao, Y. et al. Morphlour: Personalized Flour-based Morphing Food Induced by Dehydration or Hydration Method. *UIST '19*. 2019, p. 329-340.
- [4] Elzelinde, V. D. et al. Incorporating Shape-Changing Food Materials Into Everyday Culinary Practices: Guidelines Informed by Participatory Sessions with Chefs Involving Edible pH-responsive Origami Structures. *TEI '22*. 2022, no. 9, p. 1-14.
- [5] Bokeon K. et al. Edible Jumpers Powered by Shell Snapping. *Adv. Mater. Technol.* 2025, vol. 10, no. 8.
- [6] Yuecheng P. et al. BioTube: Designing and Fabricating Biodegradable Hollow Tubular Devices Through Progressive Crosslinking Alginate. *CHI '25*. 2025, no. 437, p. 1-21.
- [7] Gaolin G. et al. BIOGEM: A Fully Biodegradable Gelatin-Based McKibben Actuator with Embedded Sensing. *UIST '25*. 2025, no. 37, p. 1-15.