

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12018

研究課題名(和文) 口腔内における非線形摩擦現象に着目した食感センシング

研究課題名(英文) Texture sensing based on nonlinear friction phenomena in the oral cavity

研究代表者

野々村 美宗 (Nonomura, Yoshimune)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50451662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトがモノを食べた時に感じる食感は多彩かつ繊細だが、これを定量的に評価し、物理的な発現メカニズムを解析する方法は確立されていない。本研究では、ハイドロゲルを用いて柔らかくて濡れているヒトの口の中の環境を模倣した口腔モデルを開発し、そこで起こる摩擦現象を解析する方法を確立した。次に、食品の基本的な剤型となるエマルションや泡の摩擦特性を評価し、一般的な潤滑特性を示すだけでなく、摩擦係数が極めて低い超潤滑状態や往路と復路でプロファイルが異なる不安定パターンを示すことを見出した。この新しい解析手法を市販の食品に応用し、摩擦ダイナミクスの観点から分類することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)学術的意義 本研究によって、エマルションや泡などの食品を構成するソフトマテリアルは動的な条件下において複雑な摩擦挙動を示すことが明らかになっただけでなく、これを解析するための物理モデルが提案された。また、摩擦パラメータを主成分分析やクラスター分析を用いて解析する方法が確立された。(2)社会的意義 本研究で提案された手法とそれによって得られる物理的なパラメータは食品の解析だけでなく、食感を設計する上で有用である。

研究成果の概要(英文)：Although the textures that humans experience when they eat things are diverse and delicate, no method has been established to quantitatively evaluate these textures and analyze the physical expression mechanism. In this study, we developed an oral model that mimics the soft and wet environment of the human mouth with hydrogel, and established a method to analyze the frictional phenomena that occur there. Next, we evaluated the frictional properties of emulsions and foams, which are the basic formulations of food products, and found that they exhibit not only general lubrication properties, but also a super-lubricating state with an extremely low friction coefficient and an unstable pattern with different profiles on the outward and return paths. This new analytical method was successfully applied to commercial food products and classified in terms of friction dynamics.

研究分野：界面化学

キーワード：食品 摩擦 エマルション 泡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

モノを食べたときに感じる食感は多彩だ。日本語には 445 語、他の言語でも 100 以上のテクスチャー用語があるという。これらの食感はいすなわち小体・メルケル盤などの機械受容器で検知されること、口腔内で起こる摩擦現象はレオロジーと並んで食感の重要な因子の一つで、なめらか感やクリーミー感に関与していることは指摘されてきた。しかし、こんなにも多くの食感を識別し、感じ分けることのできるメカニズムは不明である。

申請者は口腔内で起こる摩擦現象の非線形性が多彩で繊細な食感が発現する一つの原因なのではないかと考え、新たに『非線形食感喚起モデル』を提唱する。舌の表面は常に濡れており、大きな凸凹の中に小さな凸凹が存在する階層性のフラクタル構造が存在する。また、粘弾性を持つため力学刺激に対する応答は単純な線形モデルでは記述できない。さらに、ヒトがモノを食べるときの自然な舌の動きには多くの場合、加速度がともなっている。このように、複数の非線形効果が組み合わさることにより、極めて変則的な摩擦現象が起き、莫大な数の時空間パターンが発現している可能性が高い。例えば、ヒトの指先では指紋の振動によって高周波のゆらぎが発生し、確率共鳴現象が起こって微細な凸凹を識別する能力を高めている可能性が指摘されている。

このような力学刺激の多様性が多彩で繊細な食感を喚起しているのではなからうか？ この問いについて答えを得ることができれば、「食感」という心理現象を「非線形モデル」という一般的な物理的観点から理解することが可能になるだけでなく、テクスチャーに優れた食べ物や食感を再現するバーチャルリアリティシステムへの応用展開が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、「食感」という心理現象を「非線形モデル」という一般的な物理的観点から理解することを可能にするために、以下の研究を行った。

- (1) バイオミメティック食感センシングシステムの開発
- (2) 非線形摩擦現象に着目した食感喚起モデルの構築
- (3) 食感データベースの構築

3. 研究の方法

(1) バイオミメティック食感センシングシステムの開発

ヒトがモノを食べる時の口腔内の環境を模倣するために、口腔内の濡れて柔らかい表面をフラクタル寒天ゲルで、舌の自然で滑らかな動きを正弦運動摩擦評価装置で再現したバイオミメティック食感センシングシステムを構築し、評価法を確立した(図 1)。フラクタル寒天ゲルは油脂トリステアリンの結晶が形成する階層性の凸凹構造を 2 段階で転写して調製した。得られたフラクタル寒天ゲルを接触子とし、スコッチヨーク機構を組み、正弦運動を可能にした摩擦評価装置とした。

(2) 非線形摩擦現象に着目した食感喚起モデルの構築

エマルション、泡および増粘剤水溶液についてバイオミメティック食感センシングシステムを用いて摩擦ダイナミクスを評価し、モデル系を用いて食品の組成との関係を明らかにした。多くの食品は水相の中に油滴や気泡が分散したエマルション/泡型の製剤である。そこで、オリブオイルからなる油相を界面活性剤(Tween 60:Tween 65: オレイン酸、40:40:20、wt/wt/wt)を用いて水中に分散した水 - 中 - 油型エマルション(O/W 型エマルション)と界面活性剤(ドデシル硫酸ナトリウム(SDS):ミリスチン酸、19:1)/増粘剤(カチオン化セルロース)水溶液からなる泡について系統的な摩擦評価を行った。また、増粘剤(多糖類増粘剤、乳酸カルシウム)/シヨ糖水溶液については摩擦評価に加えて「とろみ」に関する官能評価も行った。

(3) 食感データベースの構築

飲料、乳製品、甘味料等、55 種類の食品のフラクタル寒天ゲル上における摩擦ダイナミクスを評価、得られた摩擦パラメータについて主成分分析およびクラスター分析を行って食品の組成と摩擦特性の関係を明らかにする

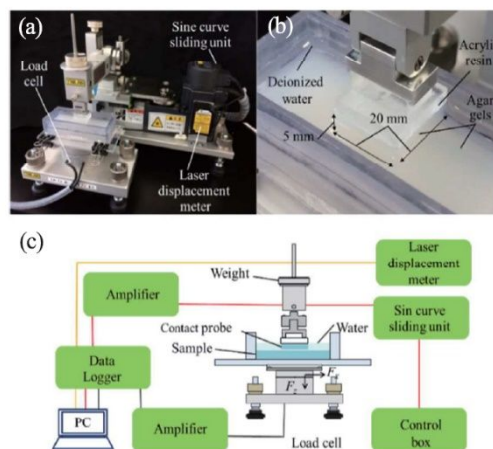


Fig.1 バイオミメティック食感センシングシステムの概要

ためのデータベースを築いた。

4. 研究成果

(1) バイオミメティック食感センシングシステムの開発

舌の柔らかく濡れた物理的特性を階層性の凸凹を刻んだフラクタル寒天ゲルを用いて再現するために、正弦波運動下における摩擦力を評価した。これまでにわれわれは、平らな寒天ゲル表面では、往復運動中に非対称な摩擦プロファイルが現れ、時に超低摩擦状態が観察されることを報告した。一方、フラクタル寒天ゲル表面では、往路と復路で同じ摩擦抵抗を示す一般的な摩擦プロファイルが得られた。フラクタル表面では、粗い構造が界面から水を排出するための溝となっているため、厚い水膜が形成されないものと予測される。これらの物理的知見は、生体機能材料の開発のみならず、舌や小腸壁などのバイオサーフェスにおける表面現象の理解にも有用である。

(3) 非線形摩擦現象に着目した食感喚起モデルの構築

エマルション

2枚のフラクタル寒天ゲル間のエマルションの摩擦ダイナミクスをバイオミメティック食感センシングシステムを用いて評価したところ、エマルションの組成によって、3つの摩擦プロファイルが観察された。すなわち、単純な水、界面活性剤水溶液、オリーブオイルの場合は往路と復路の摩擦プロファイルが対称な安定パターンが観察された。一方で、O/W型エマルションでは、往路と復路で摩擦力が異なる非対称な摩擦プロファイル「不安定パターン I」だけでなく、一時的に摩擦力を低下させる潤滑現象（不安定パターン II）も観察された。不安定パターンの出現確率と寒天ゲル間の接着力の関係を解析したところ、O/Wエマルション中の油相の濃度が高くなるにつれて、不安定パターンの出現確率とゲル基材間の接着力は増加した。つまり、これらの特徴的な摩擦現象は、寒天ゲルに挟まれたエマルションの強い粘着力に起因していると考えられる。

泡

われわれは、2枚のアクリル板間の泡の摩擦ダイナミクスを正弦波運動摩擦評価装置を用いて評価し、加速条件下で興味深い特性を観察した。一般的な固体表面上では対称的な摩擦プロファイルが得られ、静的摩擦と運動摩擦が観察されるが、泡では、静止摩擦を伴わない摩擦プロファイルが観察され、摩擦力は、速度のべき乗に比例して増加し、べき乗指数は <1 だった。界面活性剤水溶液からなる泡においては界面活性剤の拡散、粘性散逸、気泡の壁面スリップなど、さまざまな散逸モードが存在する。

増粘剤水溶液

"とろみ"は、液体・半固体食品における食感を表す感覚用語の一つである。本研究では増粘剤水溶液の摩擦を、バイオミメティック食感センシングシステムを用いて評価した。その結果、増粘剤水溶液の粘度の上昇が、とろみの官能評価のスコアに影響を与えることを見出した。水などの低粘度の液体では、多くの被験者はとろみを感じず、摩擦プロファイル静止摩擦係数が動摩擦より大きく、往路と復路で同じようなプロファイルを持つ「安定パターン I」が観察された。しかし、増粘剤を3wt%または5wt%含む水溶液の場合、往路と復路で異なる摩擦挙動が観察される「不安定パターン I」が観察され、多くの被験者が強いとろみを感じるようになった。これらの結果は摩擦プロファイルが触感に強い影響を及ぼすことを示している。

(3) 食感データベースの構築

多くの食品は、油を含むエマルション、分散物または水溶液である。本研究では、バイオミメティック食感センシングシステムを用いて、55種類の液体または半固体食品の摩擦特性を評価し、摩擦ダイナミクスに基づいて分類を行った。平均摩擦係数(μ)、静止摩擦係数(μ_s)、遅延時間(δ)、摩擦プロファイルの変化は、条件やレオロジー特性によって異なることがわかった。主成分分析の結果、 μ 、 μ_s のすべての摩擦パラメータとプロファイルの出現率が主成分 Z_1 、 Z_2 に関連していることがわかった。また、 Z_1 、 Z_2 を用いたクラスター分析により、食品は3つのグループに分類された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kikuchi Kei, Mayama Hiroyuki, Nonomura Yoshimune	4. 巻 37
2. 論文標題 Nonlinear Friction Dynamics of Oil-in-Water and Water-in-Oil Emulsions on Hydrogel Surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 8045 ~ 8052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.1c01339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okawara Hina, Shinomiya Koki, Fujita Minoru, Koda Tomonori, Nishioka Akihiro, Nonomura Yoshimune	4. 巻 51
2. 論文標題 Nonlinear friction dynamics in the cognitive process of food textures: Thickness of polysaccharide solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Texture Studies	6. 最初と最後の頁 779 ~ 788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jtxs.12538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kei Kikuchi, Akari Iwasawa, Mitsuki Omori, Hiroyuki Mayama, and Yoshimune Nonomura	4. 巻 7
2. 論文標題 Friction dynamics of foams under nonlinear motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 16515-16523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.2c00677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 関根涼太 菊池南海 菊池慧 野々村美宗
2. 発表標題 バイオメテック食感センシングシステムによる食品のキャラクタリゼーション
3. 学会等名 日本油化学会第60回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池慧、岩澤あかり、眞山博幸、野々村美宗
2. 発表標題 非線形運動下における泡の摩擦ダイナミクス
3. 学会等名 第71回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

野々村研究室ホームページ http://nonomura.yz.yamagata-u.ac.jp/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------