

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26390001

研究課題名(和文) 生体模倣表面を利用した食感センシング

研究課題名(英文) Sensing of food texture using biomimetic surface

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトがモノを食べたときに感じる食感の発現メカニズムを明らかにするために、口腔内で起こる物理現象を模倣したシステムを構築した。寒天ゲルとアパタイト/でん粉複合材料の表面に階層性のフラクタル構造を刻んで舌と歯のモデルを調製した。次に、フラクタル寒天ゲル上におけるゲルとエマルションの圧縮・摩擦特性を評価した。増粘剤水溶液を飲んだ時のとろみと舌モデル表面の摩擦変化の間には高い相関があることを見いだした。

研究成果の概要(英文)：We constructed a system that mimics physical phenomena occurring in the oral cavity to show the expression mechanism of the texture when human eat foods. First, a tongue and tooth model were prepared by carving a hierarchical fractal structure on the surface of an agar gel and apatite/starch composite material. In addition, we evaluated the compression and friction properties of soft gel and emulsion on fractal agar gel and showed that the rough structure on the fractal agar gel affects the behavior of food. We found correlation between the friction change and sensory scores when subjects drunk the thickener solution. These findings will be useful for understanding the origin of food texture.

研究分野：界面化学

キーワード：食感 フラクタル 寒天ゲル アパタイト 摩擦

1. 研究開始当初の背景

食品の「美味しさ」は、舌表面の受容器で知覚される化学的感覚「味覚」と、口腔内の歯根膜や粘膜で知覚される「食感」からなる。この食感、硬さ・弾力性・脆さなどの特性によって整理できることが指摘されて以来、食品物性に基づいて食感の発現メカニズムを明らかにしようとする試みが盛んになされてきた。その結果、力学的物性測定や熱分析より食べ物の特性を数値化し、テクスチャーマップ法やレオロジーに基づいた食感の評価法が開発されている。また最近では、脳神経科学からのアプローチもなされているが、繊細かつ多様な感覚が生まれるメカニズムの理解には未到達である。

われわれは、口腔内の舌や歯の表面を食物が溶解・分散した唾液が濡れ広がり、咀嚼によって食物が摩砕される口腔内の界面現象の理解の欠如が触感の起源の解明を阻んでいるのではないかと考えている。大きな凸凹の中により小さな凸凹が埋め込まれた階層性構造はフラクタル表面と呼ばれ、濡れや摩擦に決定的な影響を及ぼすにもかかわらず、この形態や界面化学的特性を再現した生体模倣モデルは存在しなかった。われわれは舌や小腸壁のモデルとして階層性凸凹で覆われたフラクタル寒天ゲルを開発、凸凹が濡れ速度を劇的に速めることや、アルコール、コロイド粒子の添加によりコントロールできることを示してきた。さらに歯の表面構造を模倣したモデルを開発することができれば、物理的・化学的に全く異なる界面で構成された口腔内の環境を忠実に模倣することも可能になる。

2. 研究の目的

本研究では下記の課題を達成することを目的とした。

- (1) 生体模倣表面『フラクタルアパタイト』の調製
- (2) 生体模倣表面における濡れと摩擦のダイナミクスの解明
- (3) 生体模倣表面を装着した食感センシングシステムの開発
- (4) 食感発現モデルの構築

3. 研究の方法

- (1) 生体模倣表面『フラクタルアパタイト』の調製

口腔内で起こるダイナミックな物理現象を、舌や歯の表面を忠実に真似た生体模倣表面上で再現し、物理刺激が味覚や食感を喚起するプロセスを界面化学の見地から解明した。生体表面の特徴である階層性の凸凹構造を、アパタイト・高分子複合材料、寒天ゲル、ウレタンエラストマーに鋳型から転写して、舌や歯と形態・力学特性・界面化学的特性が類似した生体模倣材料を創生した。

- (2) 生体模倣表面における濡れと摩擦のダイナミクスの解明と食感センシングシステム

の開発

口腔内で起こるダイナミックな物理現象を、舌の表面を忠実に真似た生体模倣表面上で再現し、物理刺激が味覚や食感を喚起するプロセスを界面化学の見地から解析した。すなわち、アルキルケテンダイマーと呼ばれる油脂の結晶が構築する階層性の凸凹構造を寒天ゲル表面に転写して、舌の表面と幾何構造および濡れ性が類似したフラクタル寒天ゲルを調製し、生態表面モデルとした。さらにこのモデルを接触子として摩擦評価装置に装着し、食べ物のモデルであるゲルやエマルジョンの力学・摩擦特性を評価した。

(3) 食感発現モデルの構築

とろみ調整食品を溶解したサンプルを2枚のゲル間に挟み、11往復させ、摩擦評価を行った。また、とろみ調整食品の0~5wt%溶液について官能評価を行い実際に感じる食感を評価し、摩擦データとの関係を解析した。

4. 研究成果

(1) 生体模倣表面『フラクタルアパタイト』の調製

食感センシングシステムにおいて歯モデルとして用いるために、ヒトの歯を模して表面に階層性の凸凹構造の刻まれたフラクタルアパタイトの開発に取り組んだ。すなわち、アルキルケテンダイマー(AKD)という油脂の構築するフラクタル表面を写し取った石膏を鋳型として、リン酸カルシウム/高分子ペーストの表面に階層性の凸凹を転写、水中でインキュベートしてハイドロキシアパタイト・高分子複合体からなるフラクタルアパタイトを調製した。6種類の高分子をバインダーとして20以上の試作品を調製し、凸凹の転写性・強靱性を評価したところ、ハイドロキシアパタイト粒子をでん粉で結合したフラクタルアパタイトが最も優れていることが明らかになった。走査型電子顕微鏡を用いてその表面状態を観察したところ、数百nmのアパタイトの棒状結晶が集合して、数 μm ~数十 μm の凸凹を形成していることが確認された(図1)。幾何学的な階層性を示すフラクタル次元は約2.3次元で、階層性の凸凹を刻むことに成功したことが示された。フラクタルアパタイト表面が水が濡れ広がる様子を高速カメラを用いて観察したところ、凸凹の存在によって濡れ広がり浸透の速度が劇的に速まっていることが確認された。ただし、摩擦評価に用いるためには力学的な耐久性が低かったことから、本年度開発したフラクタルアパタイトをそのまま歯モデルとして用いることは難しいことが確認された。

一方で、チタンコーティングシリコンウエハーを擬似体液に1週間浸漬すると、基板表面でアパタイトが生成される不均一核形成が起こった。0.1 M NaOH水溶液で前処理をすると、不均一核形成が起こる確率が高くなった。チタンコーティングされていないシリ

コンウエハー表面では、擬似体液中でアパタイトが生成される均一核形成が起こった。不均一核形成によって生成されたアパタイトは半球状の粒子で、均一核形成では球状だった。また、チタンコーティング、アルカリ処理の有無に関わらず、擬似体液中に3週間浸漬するとシリコンウエハー表面はアパタイトで覆われた。しかし、本検討で得られた材料は、乾燥するとアパタイト層はウエハー表面から剥離した。

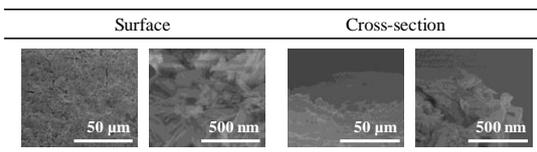


図1 フラクタルアパタイトの電子顕微鏡写真。階層性の凹凸構造が観察された。

(2) 生体模倣表面における濡れと摩擦のダイナミクスの解明と食感センシングシステムの開発

(1)において階層性の凹凸構造を有する歯のモデルの開発に成功したが、触感を評価する上で十分な耐久性をもつものは得られなかった。そこで本研究では階層性の凹凸を刻んだフラクタル寒天ゲルを舌のモデルとすることで、モノを食べた時に舌表面で起こる界面現象を再現することを試み、幾つかの興味深い物理現象を見出した。

① 舌モデル表面におけるゲルの圧縮破壊

2枚の寒天ゲル表面間に柔らかい寒天ゲルブロックを挟んだ時の圧縮挙動を観察したところ、寒天ゲル表面が平らな時はブロックが滑り出してしまう場合があったのに対して、フラクタル寒天ゲル表面間では、試行したすべての場合に押し潰された(図2)。この現象は、舌の上の凹凸は圧縮過程における物質の移動が防止し、効果的な食べ物の粉碎を可能にしている可能性を示している。

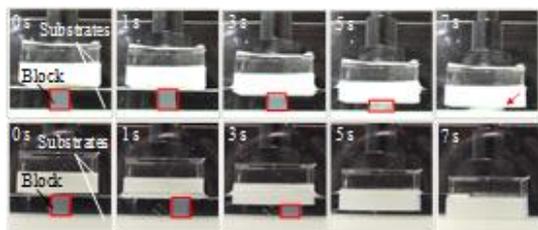


図2 フラクタル寒天ゲル間(上図)と平らな寒天ゲル表面間(下図)におけるゲルの圧縮プロセス。

② 舌モデル表面におけるエマルジョンの摩擦

水の中にノニオン性界面活性剤を用いて食品用油脂のモデルであるトリオレインを分散した Oil-in-Water 型エマルジョンを寒天ゲル表面間に挟んだ時は、平らな寒天ゲル間

でもフラクタル寒天ゲル間でも、エマルジョン中に多量の油が配合されている時だけ摩擦係数が低下する潤滑現象が観察された。ただし、フラクタル寒天ゲル間と平らな寒天ゲル間では顕著な摩擦力の変化は観察されず、フラクタル寒天ゲル間の方が滑り出しの静摩擦力が掘り起こし効果によって大きくなったのみであった。これらの知見は、凹凸構造が舌に加わる力学的刺激や食感に大きな影響を及ぼすことを示唆している。

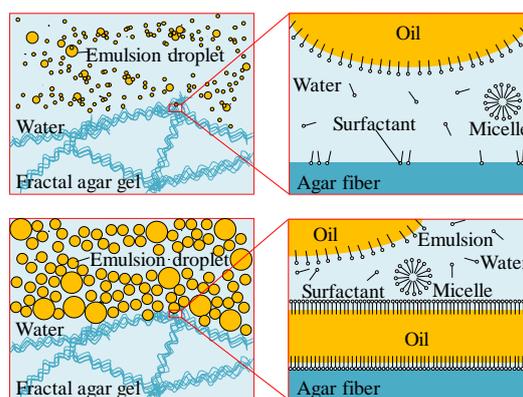


図3 寒天ゲル表面におけるエマルジョンの摩擦プロセス。

(3) 食感発現モデルの構築

官能評価によって、とろみ調整食品濃度の増加に伴いとろみ感が強まることが確認された。このとき、静摩擦力が減少し、接触子の往復とともに動摩擦力の変化量が大きい場合ほどとろみのスコアは高かった。とろみ調整食品の添加によって摩擦時の静摩擦力が減少したのは、フラクタル寒天ゲル間の膜厚が厚くなり、凝着が妨げられるためと考えられる。これらの結果は、舌と口蓋間に液状食品がある程度留まり、咀嚼過程で徐々に排出されることがとろみを認知する上で重要であることを示唆している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Evaluation of the frictional properties of oil-in-water emulsions on fractal agar gel surface, Misaki Okamoto, Koki Shinomiya, Hiroyuki Mayama, Yoshimune Nonomura* *Chemistry Letters*, 2017, 46(2), 172-174. 査読有
- ② Adhesion and disintegration phenomena on fractal agar gel surfaces, Ayano Kudo, Marika Sato, Haruna Sawaguchi, Jun-ichi Hotta, Hiroyuki Mayama, Yoshimune Nonomura* *Journal of Oleo Science*, 2016, 65(11), 909-912. 査読有
- ③ Penetration behavior of a water droplet into a cylindrical hydrophobic pore, Yoshimune Nonomura*, Tomoya Tanaka, Hiroyuki

Mayama*

Langmuir, 2016, 32 (25), 6328-6334. 査読有

- ④ Formation process of apatite layer on titanium-coated silicon wafer surfaces, Haruna Sawaguchi, Jiale Xu, Takahiro Kawai, Takashi Mineta, Yoshimune Nonomura*, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, 124 (6), 753-756. 査読有
- ⑤ Apatite/polymer composite materials with fractal rough surfaces, Haruna Sawaguchi, Hiroshi Nishida, Takahiro Kawai, Hiroyuki Mayama, Yoshimune Nonomura* *Chemistry Letters*, 2015, 44(5), 613-614. 査読有

[学会発表] (計 19 件)

国際学会

- ① Evaluation of the friction properties of oil-in-water emulsions on fractal agar gel surface, Misaki Okamoto, Koki Shinomiya, Hiroyuki Mayama, Yoshimune Nonomura, 7th International Colloids Conference, June 19, 2017(Barcelona, Spain) P-184
- ② Adhesion and disintegration phenomena on fractal agar gel surface, Ayano Kudo, Marika Sato, Haruna Sawaguchi, Junichi Hotta, Hiroyuki Mayama, Yoshimune Nonomura, 7th International Colloids Conference, June 19, 2017(Barcelona, Spain) P-185
- ③ Penetration dynamics of a water droplet into a cylindrical pore, Tomoya Tanaka, Hiroyuki Mayama, Yoshimune Nonomura, The 15th Conference of the International Association of Colloid and Interface Scientists, May 28, 2015 (Mainz, Germany) O-210
- ④ Spreading dynamics of water on biomimetic rough surfaces, Yoshimune Nonomura, Hiroyuki Mayama, *Materials Today Asia* 2014, December 11, 2014 (Hong Kong, China) O7.3.

国内学会

- ⑤ コロイドナノ粒子による寒天ゲルの摩擦ダイナミクスのコントロール、佐々木潮里、四宮功貴、野々村美宗、日本化学会第 98 回春季年会、2018 年 3 月 20 日、千葉、1E5-45
- ⑥ フラクタル寒天ゲル表面における摩擦現象、大河原雛、四宮功貴、野々村美宗、第 68 回コロイドおよび界面化学討論会、2017 年 9 月 8 日、兵庫、P034
- ⑦ 非線形運動下における寒天ゲルの超低摩擦現象、四宮功貴、眞山博幸、野々村美宗、第 68 回コロイドおよび界面化学討論会、2017 年 9 月 6 日、兵庫、1C11
- ⑧ コロイド分散液の濡れ現象のダイナミクス、野々村美宗、第 68 回コロイドおよび界面化学討論会、2017 年 9 月 6 日、兵庫、1E1S
- ⑨ フラクタル寒天表面におけるエマルシヨ

ンの摩擦ダイナミクス、岡本美咲、四宮功貴、野々村美宗、日本油化学会第 55 回年会、2016 年 9 月 8 日、奈良、P-01

- ⑩ 正弦運動下における摩擦現象の非線形ダイナミクス、會田悠城、浅沼夏海、眞山博幸、野々村美宗、第 67 回コロイドおよび界面化学討論会、2016 年 9 月 22 日、旭川、1E11
- ⑪ フラクタル寒天ゲル表面における接着・破壊現象、工藤綾乃、佐藤毬嘉、澤口晴奈、堀田純一、眞山博幸、野々村美宗、第 67 回コロイドおよび界面化学討論会、2016 年 9 月 24 日、旭川、P033
- ⑫ 触覚による液体の“とろみ”認知のメカニズム、西川聖二、野々村美宗、日本化学会第 96 年春季年会、2016 年 3 月 27 日、京都、4B7-18.
- ⑬ 撥水性表面にあいた孔への水滴の浸み込み条件、眞山博幸、田中倫哉、野々村美宗、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 16 日、神戸、16aCU-3.
- ⑭ 細孔中への水滴の浸透現象のダイナミクス、田中倫哉、眞山博幸、野々村美宗、第 66 回コロイドおよび界面化学討論会、2015 年 9 月 12 日、鹿児島、P167.
- ⑮ アパタイト被覆シリコンウエハーの調製、澤口晴奈、徐嘉樂、川井貴裕、峯田貴、野々村美宗、第 66 回コロイドおよび界面化学討論会、2015 年 9 月 12 日、鹿児島、P163.
- ⑯ フラクタル寒天ゲルの力学特性、工藤綾乃、佐藤鞠嘉、澤口晴奈、眞山博幸、野々村美宗、日本油化学会第 54 回年会、2015 年 9 月 8 日、名古屋、P09.
- ⑰ アパタイト/高分子複合材料の凸凹コントロール技術の開発、澤口晴奈、川井貴裕、眞山博幸、野々村美宗、平成 26 年度化学系学協会東北大会、2014 年 9 月 20 日、米沢、1P142.
- ⑱ 液滴の孔への浸み込み現象に関する研究、眞山博幸、田中倫哉、野々村美宗、第 65 回コロイドおよび界面化学討論会、2014 年 9 月 5 日、東京、P177.
- ⑲ 超凸凹表面を持つアパタイト/高分子複合材料、澤口晴奈、川井貴裕、眞山博幸、野々村美宗、日本化学会第 94 年春季年会、2014、名古屋、1C7-35.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織
- (1)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

(2)連携研究者

眞山 博幸 (MAYAMA Hiroyuki)
旭川医科大学医学部・准教授
研究者番号：70360948