技術論文

ヒトの歯の構造を持つ食感センサ

西久保大輔*, 中本裕之, 小林 太, 小島史男

神戸大学

Magnetic Food Texture Sensor Incorporating Human Tooth Structure

Daisuke Nishikubo*, Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi and Fumio Kojima

Kobe University, 1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501

Food texture plays an important role in food preferences, and contributes to health through chewing and safety during swallowing in the elderly and children. Sensory evaluation by human panelists is a general method for evaluating food texture. However, sensory evaluation is qualitative, and is affected by individual differences and environmental factors. Commercially available food texture instruments are equipped with only one load cell, and are not sufficiently sensitive for detailed food texture measurements. In this study, we present a magnetic food texture sensor, which has a structure that mimics a human tooth. The principle of the sensor is based on changes in magnetic field strength. By using giant magnetoresistive elements and inductors, the sensor measures a load and vibration occurs on the contact surface. The sensor was used to experimentally assess four foods. The results show clear differences among the four foods. In addition, we demonstrated that the measurement data could be classified using a support vector machine analysis. These results reveal the characteristics of the sensor, which measures load and vibration simultaneously.

(Received Sep. 10, 2015 ; Accepted Feb. 9, 2016)

Keywords : food texture, sensor, load, vibration, magnetism

キーワード : 食感, センサ, 荷重, 振動, 磁気

日本語における食感を表現する言葉は他国より多く、日本人が食感を重要視していることが分かる¹⁾。食感の重要性は食品に対する嗜好性のみならず、咀嚼運動による健康への貢献²⁾、高齢者や幼児の嚥下時の安全性なども含まれており³⁾、食感を積極的にデザインしていくことが今後の食品開発に必要になると考えられる。

食感の評価方法は主に、ヒトによる官能評価が用いられている⁴⁾。官能評価を用いた研究として、牛肉⁵⁾、シウマイ⁶⁾などに関する報告がある。しかし、官能評価は定性的であり、被験者の個人差や環境等により影響を受けることが述べられている。

また、食感測定機器による定量的な評価方法も用いられている。現在市販されている食感測定機器は、接触子に食物を押し付けてその時の荷重の変化をロードセルで検出するものが主である⁷⁾。荷重で評価する研究として、豆腐⁸⁾、スパゲティ⁹⁾、ウシエビ¹⁰⁾、ゼリー¹¹⁾などに関する報告がある。これらの研究では、荷重の時間変化から特徴量を決定しているが、荷重以外の測定値を併用することにより食感の詳細な評価が可能になると考えられる。

そこで、応答特性の異なる複数のセンサを用いて食感を

評価する研究が進められている。破碎時に発生する振動で評価する研究として、キュウリ¹²⁾、カキ¹³⁾、スナック菓子¹⁴⁾などに関する報告がある。また、食品に振動を加えた時の振動強度で評価する研究として、トマト¹⁵⁾、カキ¹⁶⁾などに関する報告がある。これらの研究により、応答特性の異なる複数のセンサを併用することにより食感を詳しく評価できることが明らかになりつつある。このことは、ヒトが歯根膜に存在する2種類の異なる応答特性を持つ受容器¹⁷⁾により食感を知覚するとされている¹⁸⁾ことから妥当な結果であると考えられる。これら受容器の遅順応と速順応の特性にもとづいて荷重と振動を計測する異なるセンサを持ち、ヒトの歯や歯根膜の構造を模擬した食感センサを実現することで、食感の評価の高精度化が期待される。

そこで本研究では、ヒトの知覚する食感を考慮した荷重と振動の同時計測を可能とするセンサの開発および特性評価を目的とする。本論文では、ヒトの歯の構造と受容特性に基づき接触子にかかる荷重と振動を同時に計測する食感センサを提案する。荷重と振動を計測することにより、市販の計測器と比較して、高精度に食感評価が可能であることを実験的に示し、荷重と振動を同時評価可能な本センサ

図 1 食感センサの構造

図 2 食感センサ

の特徴を明らかにする。

実 験 方 法

1. 磁気式食感センサ

(1) 設計・構造

図1に食感センサの構造を示す。接触子とベースは硬度が必要なためABS樹脂で製作した。接触子は円錐台を逆にした形状で、食品に接触する円の直径を12mmとした。接触子内部には厚さ1mm、直径6mmの円形磁石が2つ直列に固定されている。ベースは直径26mmの円形で、中央に円錐台のくぼみがある。エラストマーは接触子とベースの間にウレタンを充填、固化して製作した。接触子が1.5mm程度変位するようエラストマーの厚さを3mmとし、実験で使用するビスケットの破断に応答できるよう実験的にエラストマーのアスカーC硬度を15と決定した。ここで、エラストマーにはローパスフィルタの効果があり、硬度が高くなると振動の感度は高まるが荷重の感度は下がる。接触子と反対の面の回路基板の円周上に巨大磁気抵抗（Giant magnetoresistive : GMR）素子を、その円の中心にインダクタ素子を配置した。接触子、エラストマー、ベースはそれぞれヒトの歯、歯根膜、歯槽骨に相当する。2種類の受容器はGMR素子とインダクタ素子が対応している。図2に製作した食感センサを示す。

(2) 動作原理

接触子には永久磁石が内蔵されており、接触子に力が加わり磁石が変位することで磁界強度が変化する。この磁界強度の静的変化をGMR素子が検出することで荷重を計測し、動的变化をインダクタ素子が検出することで振動を計測する。ここで、実際に使用するGMR素子は7つであり、その出力電圧から接触子に加わるz軸方向の力の算出を以下のように行う。 $i(i=1, 2, \dots, 7)$ 番目のGMR素子の出力電圧を V_{GMR_i} とすると、クーロンの法則からz軸方向の変位 Δz はGMR素子の出力電圧の二乗に反比例するものとして、以下の式で近似される。

$$\Delta z = C_{dz1} + \sum_{i=1}^7 \left\{ \frac{C_{dz(2i)}}{(V_{\text{GMR}_i})^2} + \frac{C_{dz(2i+1)}}{V_{\text{GMR}_i}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $C_{dzj}(j=1, 2, \dots, 15)$ は各項の係数である。接触子にかかる力は、エラストマーの変形に比例するものと仮定した場合、フックの法則を用いて式(2)が成り立つ¹⁹⁾。

$$F_z = C_z \Delta z \quad (2)$$

C_z はエラストマーの弾性係数である。すなわち、式(3)を満たす係数 $C_{fzj}(j=1, 2, \dots, 15)$ と式(1)、(2)を用いて以下の式(4)となり、この式を用いて接触子に加わる力 F_z を算出する。

$$C_{fzj} = C_z C_{dzj} \quad (3)$$

$$F_z = C_{fz1} + \sum_{i=1}^7 \left\{ \frac{C_{fz(2i)}}{(V_{\text{GMR}_i})^2} + \frac{C_{fz(2i+1)}}{V_{\text{GMR}_i}} \right\} \quad (4)$$

(3) 計測システム

食感センサによる計測は、z軸全自動ステージ（シグマ光機(株)製、SGSP26-100）、アンプ回路、AD変換ボード（CONTEC社製、AIO-161601UE3-PE）、PC、以上の実験環境で行う。PCからステージに命令を送り、食感センサを動かすことで食品を破碎する。破碎して得られたGMRとインダクタの出力電圧をアンプ回路でそれぞれ100倍、10000倍に増幅し、AD変換ボードでデジタル信号に変換を行い、PCに入力することで計測を行う。

(4) 校正方法

インダクタ素子は磁界強度の動的变化を検出しているため校正の必要はない。一方、GMR素子は磁界強度の静的変化を検出しており、製作誤差や素子のばらつきの影響を受けるため、校正を行う必要がある。計測システムで Δz を変化させ、そのときのGMRの出力電圧 V_{GMR_i} を取得すると同時に力覚センサ（ビー・エル・オートテック(株)製、

図3 計測システム

MINI センサ) で荷重 F_z を測定し、式 (3) に代入し重回帰分析を用いることで、多項式の係数 C_{fzk} ($k=1, 2, \dots, 15$) を求める。接触子の変位 Δz が 0.0 mm から 1.4 mm までの範囲を 0.02 mm 間隔で出力電圧 V_{GMR_i} と荷重 F_z を測定し、校正を行った。計測システムを図 3 に示す。図 2 で示した食感センサの接触子が下向きになるように、食感センサを自動ステージに取り付け、接触時の荷重を計測する力覚センサをその下に配置した。図 3 に示した計測システムを用いて校正した後、食感センサの出力を確認した。接触子に 0.0 mm から 1.4 mm の変位を与えた場合の力覚センサと食感センサの計測値の比較を図 4 に示す。各センサで計測された荷重が一致していることがわかる。最大誤差は 0.44 [N] であり十分に小さい。これらのことから、荷重に関して、食感センサが力覚センサと同様の精度を持つことが明らかとなった。

2. 食品を用いた実験方法

食感センサを用いてビスケット、グミ、コーンスナック菓子、ポテトスナック菓子についてフードテクスチャの計測を行った。これらの食品の高さは、ビスケットが 8 mm、グミが 12 mm、コーンスナック菓子が 13 mm、ポテトスナック菓子が 8 mm である。食品をステージ上に置き、上から食感センサを速さ 1.0 mm/s で 6.0 mm だけ押し込み、そのときの GMR とインダクタの出力電圧を計測した。1 食品毎に 10 回ずつの計測を行った。

3. サポートベクターマシン (SVM) によるフードテクスチャ判別

食感センサで計測したデータが 4 食品の食感の違いを検出できているか検証を行うために、パターン認識の手法である SVM を用いる。SVM はニューロンモデルとして最も単純な線形しきい素子を用いて 2 クラスのパターン識別器を構成する手法である。本研究では SVM のライブラリとして LIBSVM⁹⁾ を用いた。SVM への入力形式は $\{x, y\}$ であり、 x は特徴ベクトル、 y はクラスラベル $y =$

図4 力覚センサと食感センサの計測値の比較

1, 2, 3, 4 である。本研究では特徴ベクトルとして、GMR の出力電圧から得られた荷重とインダクタの出力電圧を用いる。荷重については、6 秒間に生じた 20 ms 毎の値、時系列 300 点を特徴ベクトルとして用いる。また、インダクタの出力は同じ食品でもサンプル毎に振動の発生するタイミングのずれが生じるため、振動の周波数スペクトルを求めて特徴ベクトルとする。ここでは、インダクタの出力電圧を周期関数にするために Hanning 窓関数をかけ、離散フーリエ変換して周波数スペクトルを求める。5 KHz までの 300 点を振動の特徴ベクトルとする。加えて、荷重については市販の食感測定機器でも同様に 300 点の時系列の荷重変化を取得し比較する。特徴ベクトルがデータ数に比べて大きいため、線形 SVM を用いて交差検証を行った。4 食品の判別をするにあたり、GMR とインダクタの出力を一方だけ用いた場合と両方を用いた場合の 3 通りで判別を行った。さらに、市販の食感測定機器を用いて同様の計測を行い、その計測結果を用いて SVM による判別を行うことで食感センサと市販の食感測定機器の性能の比較を行った。

実験結果および考察

1. 食感センサによるフードテクスチャ計測

食感センサを用いて 4 食品を計測した結果を図 5 に示す。ここで、GMR 素子とインダクタ素子の出力は、それぞれ電圧変動による荷重と振動を表している。図 5 (a) より、ビスケットは荷重が大きく、振動は小さかった。これはビスケットの生地が高密度に作られており粒子も小さいため硬く、歯が徐々に押し込まれるような食感をしているためであると考えられる。図 5 (b) より、グミは荷重が小さく、インダクタの応答が無かった。これはグミが柔らかく、弾性を持っているためであると考えられる。図 5 (c) より、コーンスナック菓子は荷重が小さく、大きな振動が絶えず生じている。これはコーンスナック菓子が 4 枚の薄

図 5 食感センサで計測した 4 食品の荷重と振動

い層を重ねて作られているため脆く、生地の粒子は大きく低密度のため咀嚼時に大きな振動が生じたと考えられる。ここで、コーンスナック菓子の荷重が 0 に近づいているのは、薄い層を破碎し、空洞部に達した瞬間であると考えられる。図 5 (d) より、ポテトスナック菓子は荷重がグミやコーンスナック菓子より大きく、コーンスナック菓子と同様に大きな振動が絶えず生じている。これはポテトスナック菓子の生地が高密度であるため硬く、粒子が大きく中が空洞になっているため、咀嚼時に大きな振動が生じたと考えられる。ポテトスナック菓子の荷重が 0 に近づいているのもコーンスナック菓子と同様に空洞部に達した瞬間であると考えられる。以上より、荷重と振動の大きさに食感センサが 4 食品の食感の違いを計測可能であることを示した。

2. SVM によるフードテクスチャ判別

実験結果を用いて SVM による食品の判別を行った。インダクタの出力電圧の周波数スペクトルを 100 Hz 毎に求め、10 個のサンプルの周波数スペクトルの平均と標準誤差

を図 6 に示す。標準誤差を示すエラーバーにより周波数別の振幅に振動の再現性があることが分かる。図 6 (a) より、ビスケットは低い周波数で振動があり、これは図 5 (a) の 5 秒付近の破断で生じた振動であると考えられる。図 6 (b) より、グミはいずれの周波数においても振動が無い。図 6 (c) より、コーンスナック菓子は広い周波数の範囲で振動が生じていることが分かる。図 6 (d) より、ポテトスナック菓子は広い周波数の範囲で振動が生じているが、コーンスナック菓子よりも低い周波数の振動が大きい。荷重のみを用いた場合の正答率は 92.5 % で、誤答はグミをコーンスナック菓子と判別したもののみであった。図 5 (b), (c) より、グミとコーンスナック菓子のどちらも荷重が小さく、荷重の大きい食品と小さい食品の判別はできていると言える。次に、振動のみを用いた場合の正答率は 95 % で、誤答はコーンスナック菓子をポテトスナック菓子と判別したもの、グミをビスケットと判別したもの 2 通りであった。この 2 つの誤答は図 6 を見ると、振動の大きい食品同士の誤答と小さい食品同士の誤答であった。したがって、振動

図 6 10 個のサンプルの振動の周波数スペクトルの平均と標準誤差

の大きい食品と小さい食品の判別はできていると言える。荷重と振動の両方を用いた場合の判別は 100 % であり、正確に判別できた。3 通りとも 90 % 以上という高い正答率であるが、荷重と振動の両方を用いることでより正確な判別が出来ることから、食感の計測に歯にかかる荷重と振動の両方を計測することが有効であると示せた。ここで、例えばビスケットとグミの判別は荷重、グミとコーンスナック菓子の判別は振動のみで可能であるが、4 食品を同時に判別するためには荷重と振動が必要である。また、市販の食感測定機器の計測結果を用いた場合の判別結果は 87.5 % で、誤答はコーンスナック菓子をグミと判別していた。食感センサの荷重のみを用いた場合と市販の食感測定機器の場合で、判別結果が異なっているのは、食感センサのエラストマーの弾性により荷重の変化がゆるやかになることで、破碎の過程を詳細に計測できたためと考えられる。を図 5 (b), (c) より、2 食品とも荷重が小さいことからこの誤答は妥当だと考えられる。食感センサと市販の食感測定機器の判別結果を比較すると、食感センサの方が高い正答率であり、これは食感センサが荷重の他に振動を計測して

いるからであると考えられる。以上より、歯にかかる荷重と振動の両方を計測することにより、高精度に食感評価が可能である提案した食感センサが有効であることを示せた。

要 約

本研究では、ヒトの歯の構造に基づき歯にかかる荷重と振動を計測できる磁気式食感センサを提案した。食感センサを用いて、ビスケット、グミ、コーンスナック菓子、ポテトスナック菓子の 4 つの食品の食感を計測した。4 食品において計測結果が異なることを確認し、4 つのグループに分けた。また、食感センサの結果について SVM を用いて判別を行い、その結果を市販の食感測定機器での判別結果と比較することで本センサの有用性を検証した。食感センサと市販の食感測定機器の判別結果はそれぞれ 100 %, 87.5 % であり、食感の評価には荷重と振動の計測が必要であることを確認するとともに、食感センサの有用性を示した。

本研究は JSPS 科研費 25350094 の助成を受けたものです。

文 献

- 1) 早川文代, 日本語テクスチャ用語の体系化と官能評価への利用, 日本食品科学工学会誌, **60**, 311-322 (2013).
- 2) 日本咀嚼学会, 「咀嚼の本一噛んで食べることの大切さ」(口腔保険協会, 東京), pp. 25-28, 61-66 (2006).
- 3) 宮脇幸博, 横山美加, 衣松令恵, 道 健一, 稲川利光, 埋橋祐二, 検査食の硬さと誤嚥の危険性, 日本口腔科学会雑誌, **49**, 7-10 (2000).
- 4) 上田玲子, 相良泰行, 食品業界の商品開発における官能評価法, 日本食品科学工学会誌, **56**, 607-613 (2009).
- 5) 平山琢二, 北内 毅, 眞榮田知美, 藤原 望, 平川守彦, 及川卓郎, 長期肥育和牛肉の食感および食味に関する官能評価について, 日本暖地畜産学会報, **56**, 67-71 (2013).
- 6) 吉田順子, 添田 博, 菊池英夫, 神山かおる, 早川文代, 官能評価による市販加工肉シュウマイの品質特性の評価, 日本食品科学工学会誌, **56**, 85-94 (2009).
- 7) 相良泰行, 食品の力学的物性とテクスチャーの感性計測法, 日本食品科学工学会, **56**, 501-512 (2009).
- 8) 伊藤健介, 井戸川詩織, 豆腐エマルションゲルの弾性挙動に関する研究, 日本食品工学会誌, **14**, 49-57 (2013).
- 9) 酒井 孝, 長沼陽介, 製造条件の異なるスパゲティの機械的性質の調査, 日本食品工学会誌, **15**, 259-265 (2014).
- 10) 竹内友里, 高橋英史, レトルト殺菌によるウシエビ組織の脆弱化原因の研究, 日本水産学会誌, **77**, 887-895 (2011).
- 11) 東森 充, 金子 真, 福田 修, 咀嚼圧力分布に基づく食品テクスチャセンシング, 日本ロボット学会誌, **31**, 780-787 (2013).
- 12) 桜井直樹, 岩谷真一郎, 寺崎章二, 山本良一, Texture Evaluation of Cucumber by a New Acoustic Vibration Method, 園芸学会雑誌, **74**, 31-35 (2005).
- 13) 桜井直樹, 岩谷真一郎, 寺崎章二, 山本良一, Evaluation of 'Fuyu' Persimmon Texture by a New Parameter, "Sharpness index", 園芸学会雑誌, **74**, 150-158 (2005).
- 14) Makino, Y., Ono, N., Ando, S., Sano, F. and Toba, S., Bone Conduction-like Acoustic Sensor System for Evaluating Crispness, SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference, **4**, 2163-2166 (2002).
- 15) 中野有加, 桜井直樹, 藤路陽, 堀江秀樹, 中野明正, 鈴木克己, 弾性指標を用いたスライスマットの果肉硬度の非破壊評価, 園芸学研究, **7**, 543-547 (2008).
- 16) 鈴木哲也, 新川 猛, 櫻井直樹, 音響振動法によるカキ '太秋' の食感評価, 園芸学研究, **12**, 433-438 (2013).
- 17) 前田健康, 歯根膜の感覚受容装置の形態学的基礎—特にルフィニ神経週末について—, 顕微鏡 = Microscopy, **46**, 227-232 (2011).
- 18) 青山博明, 井之上明弘, 付 惟, 食品の構造とおいしさ: 多成分系における増粘多糖類の影響, 月刊フードケミカル, **30**, 19-25 (2014).
- 19) 中本裕之, 佐賀正典, 武縄 悟, 貴田恭旭, 磁気式触覚センサの小型化と性能評価, 日本機械学会論文集, C 編, **76**, 1476-1482 (2010).

引用 URL

- i) <https://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/> (14.4.30)
(平成 27 年 9 月 10 日受付, 平成 28 年 2 月 9 日受理)