

荷重と振動計測機能を有する磁気式食感センサを用いた 弾力性食感の定量評価手法に関する研究

神戸大学大学院 システム情報学研究科

中本 裕之

1. 研究の目的と背景

食物を咀嚼し摂取することはヒトにとって生命の健康と維持に必要な行為であり、その中でも食感の嗜好を左右する重要なファクターである。また、日本語には食感を表現する言葉が他の言語に比べても非常に多く、日本人が特に食感を重要視していることがわかる。このように、ヒトが知覚する食感を設計し、食品に反映させることができれば食品開発に大きく貢献することができる。

現在、食感を評価する方法として、官能評価と市販の食感測定機器による評価の2種類がある。官能評価は結果が定性的であり、膨大な時間やコストがかかるという問題がある。食感測定機器による評価方法は定量的な結果が得られることが利点であるが、評価方法が1963年からほとんど変わっておらず^[1]、近年の食品開発技術の向上に伴う食感の多様化、複雑化に適応できているとは言い難い。そのため、食感を定量的に評価するための新たな方法の開発が望まれている。

そこで本研究では、ヒトの食感知覚に対応した食感センサを用いた食感定量評価システムの構築を行う。食感センサは、ヒトの歯の構造と2種類の異なる受容器特性に基づき、歯の構造を模倣した構造をもち、応答特性の異なる2種類の素子を備える。さらに、食感の定量評価システムにおいては、Dynamic Time Warpingを用いた手法により食感センサの計測データの類似度から食感の定量的評価を実現する。実験では、関心の高い食感であるもちもち、もちもちといった食感をもつ食品に対し、食感センサにより計測された時系列データから提案した手法により食感の定量的な評価を行う。さらに、官能評価による食感評価と、提案した食感定量評価の結果を比較し、その傾向比較の検証を行う。

2. 研究の方法

ヒトは食感を知覚する際、歯と歯槽骨の間に存在する歯根膜により食感を知覚している。歯根膜には弾力性があり、実際の咀嚼時には食品によってかかる力が歯を押し込み、それにより歯根膜が変形する。この歯根膜には2種類の異なる特性を持つ機械受容器が存在し、荷重などの静的変化にตอบสนองする遅順応受容器と、振動などの動的変化にตอบสนองする速順応受容器の2つがある。既存の食感測定機器では荷重のみの測定であることにに対し、本研究ではこれらの2つ

の特性に対応した磁気式食感センサを使用する^[2]。

本研究で使用する食感センサの構造図を図1に、実際に使用するセンサの写真を図2に示す。この食感センサは接触子、エラストマ、ベース、センサ基板から構成されており、接触子には円柱形状の永久磁石を内包している。接触子が歯、エラストマが歯根膜、ベースが歯槽骨に相当するものであり、エラストマにより接触子は可動である。また、センサ基板には磁気抵抗素子とインダクタの2種類の素子が配置されている。接触子に力が加わると、センサ基板における磁界強度が変化するため、磁気抵抗素子の出力電圧が変化する。また、磁界強度の急激な変化によりインダクタで誘導起電力が発生する。つまり、これらの出力電圧の変化から磁気抵抗素子において食品の荷重、インダクタにおいて食品の振動を計測することができる。このとき、磁気抵抗素子は歯根膜内の遅順応型の受容器、インダクタは歯根膜内の速順応型の受容器の役割を担う。

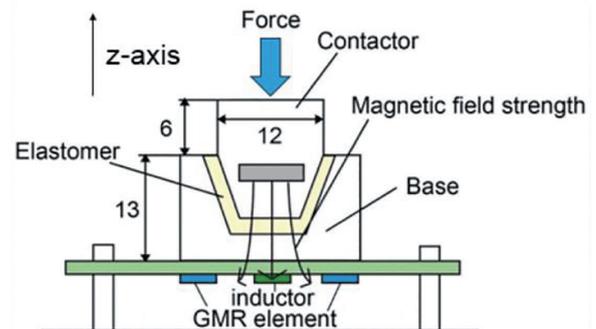


図1 Structure of food texture sensor.



図2 Food texture sensor.

食感評価システムは、z 軸自動ステージ (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 などからなる。図 3 にシステム接続の構造図を示す。PC から z 軸自動ステージに命令を送り、ステージに取り付けた食感センサを z 軸方向に押し込むことで食品を変形させ、そのときの磁気抵抗素子とインダクタの出力電圧を AD 変換ボードでデジタル信号に変換し、PC にデータをを入力する。

ここで提案した食感センサを用いて計測を行うと、磁気抵抗素子とインダクタにより食品の荷重と振動の時系列データが出力される。これらを用いて食感の定量評価を行うには、出力波形の特徴量を抽出する方法なども挙げられるが、本研究では出力データをそのまま使用する方法を検討し、出力データ波形の類似度から食感の類似度を算出し、定量評価を目指すことにした。一般的にデータの類似度を求める際には、計算方法が単純であり計算量も少ないユークリッド距離が用いられることが多い。しかし、食感センサの磁気抵抗素子、インダクタの出力は時系列データであり、食品の個体差によって時間方向、信号の強度方向にノイズを含むため、ユークリッド距離ではデータの類似度算出を正しく行うことができない場合がある。そこで、

本研究では長さや周期性の異なるデータ間の比較、類似度の算出が行うことが可能である Dynamic Time Warping (DTW) による定量評価方法を提案する。

DTW とは、2つの時系列データを時間軸に沿って伸縮をしつつ最適な類似度を算出する手法であり、音声や動画のパターン認識などに用いられてきた^[3]。DTW は対象となる時系列データが非線形でも対応できること、伸縮制限や始末端制約の設定が可能であることなどの利点をもつ。本研究では、食感センサでの測定による磁気抵抗素子、インダクタの出力の時系列データについて DTW 距離を計算し、DTW 距離による出力データの類似度から食感の定量評価を行う。

また、本研究では DTW を用いた類似度計算をするにあたり、ある食感の標準となる時系列データを事前に生成する。その生成には DTW を応用した時系列データの平均化アルゴリズムである DTW Barycenter Averaging (DBA) を用いる^[4]。本研究では、食品の計測データからその食品の標準時系列データを決定する時と、類似の食感をもつと考えられる複数の異なる食品の時系列データの平均化を行う時の 2つの場合について DBA を使用した。

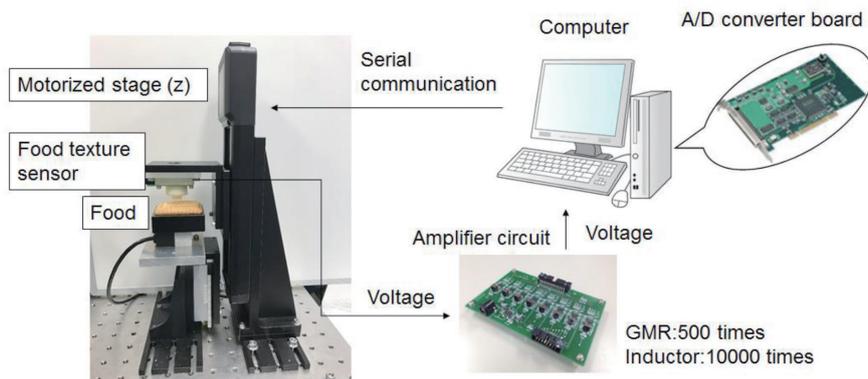


図 3 System configuration diagram.

3. 研究内容

本研究では、前章で提示した食感センサを用いた食品の測定データから、DTW 及び DBA を使用した食感の類似度算出と、官能検査における評価値との比較から、前章までに提案した食感定量評価システムを用いた食感評価がヒトの食感知覚と同じ傾向を持つことを確認するための実験を行なった。本研究における実験の流れを以下に示す。

1. 対象とする食感・食品を決定。
2. 食感センサによる食品の計測、及びそれらの食品による官能評価の実施
3. 食感ごとの時系列波形を DBA により生成
4. 食感の時系列波形と各食品の計測データによる時系列波形との DTW 距離の算出。この DTW 距離がその食

品の食感評価値に相当する。

5. DTW による食感評価と官能評価における食感評価の結果を比較

また、本実験で対象とする食感表現として、“もちもち”、“もっちり”を取り上げる。これらを選定した理由としては、株式会社 BMFT による「おいしいを感じる言葉」と題したアンケート調査においてここ数年上位にランクインしていることが挙げられる^[5]。さらに、日本人は粘り気のある食品を好む傾向にあるなど、食品開発において近年急速にニーズの高まっている食感として選定した。

今回実験に用いるサンプルとして、図 4 に示す 9 種類の食品を選定した。これらは、もちもち、もっちりといった食感が当てはまる食品や、それらに近い食感を感じると考えられる食品から選定した。

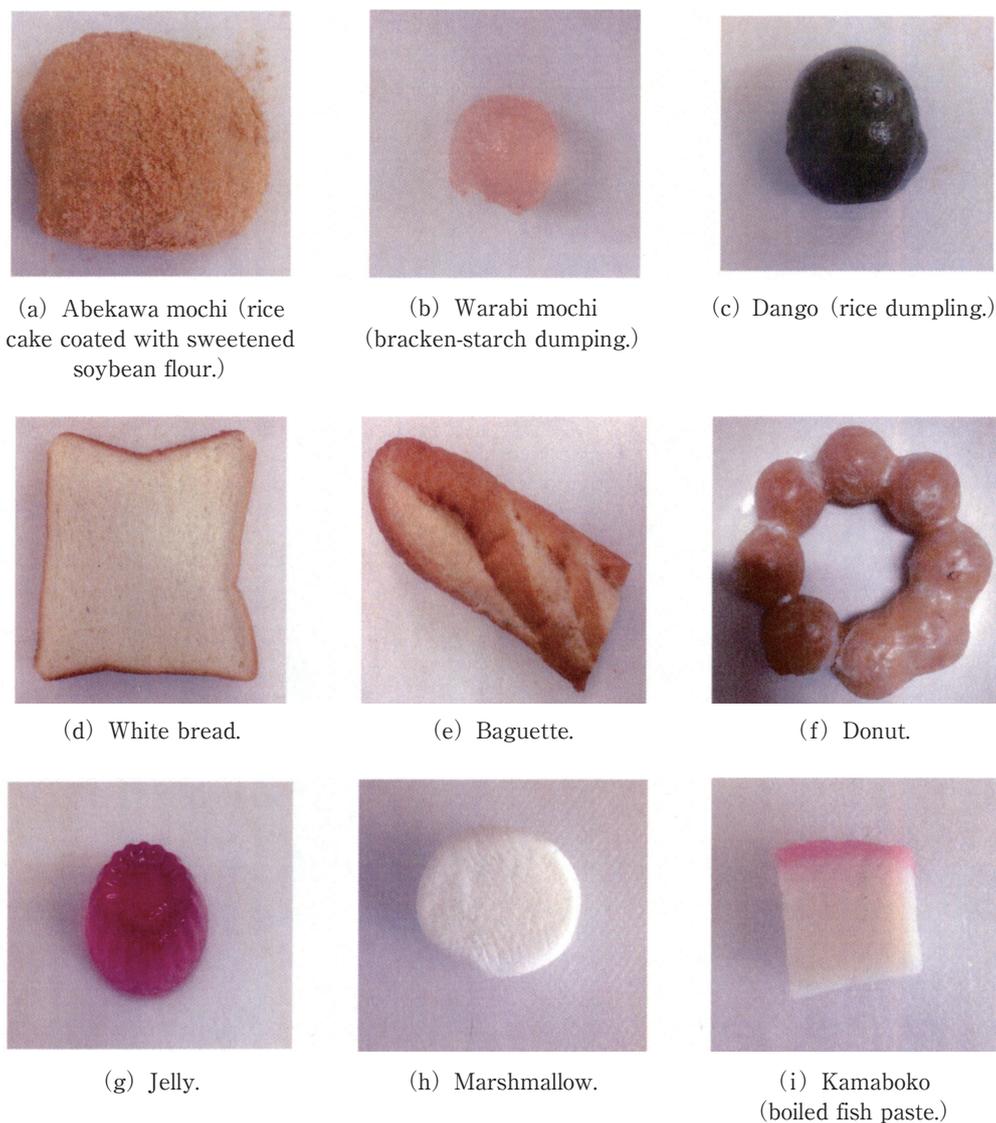


図4 Foods used for experiments.

<選定したサンプル>

あべかわ餅, わらび餅, 団子, 食パン, フランスパン, ドーナツ, ゼリー, マシュマロ, かまぼこ

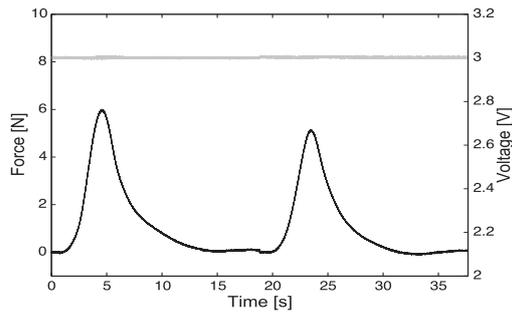
4. 研究の実施経過

食感センサによる各食品の計測データをDBAにより平均化した結果を図5に示す。ただし、各図の上部のラインがインダクタの電圧、下部の2つの山形のラインが荷重を示す。また、これらの食品を用いた官能評価も実施した。官能評価では、10名のパネルに各食品に対して“もちもち”, “もっちり”の2つの食感の強さを5段階で評価させ、

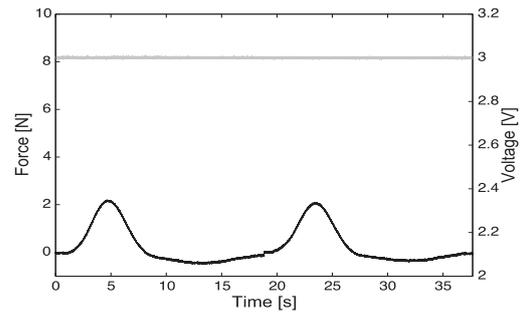
食品ごとの平均値を算出した。この平均値を比較し“もちもち”と“もっちり”のグループ分けを行なった。その結果は以下ようになる。

- もちもち … あべかわ餅, わらび餅, 団子, ドーナツ
- もっちり … 食パン, フランスパン, ゼリー, マシュマロ (フランスパンは同値であったため除外)

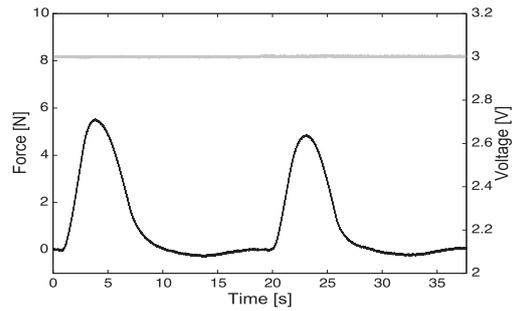
以下のようにグループ分けした食品群についてDBAにより平均波形を生成し、それぞれ“もちもち”, “もっちり”の食感の時系列波形とした。図6にそれぞれの時系列波形を示す。ただし、ほとんどの食品で振動が発生していないため、今回は荷重のみに限定した。実線が“もちもち”, 点線が“もっちり”である。



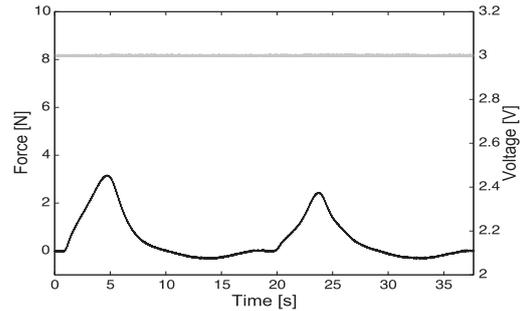
(a) Abekawa mochi (rice cake coated with sweetened soybean flour.)



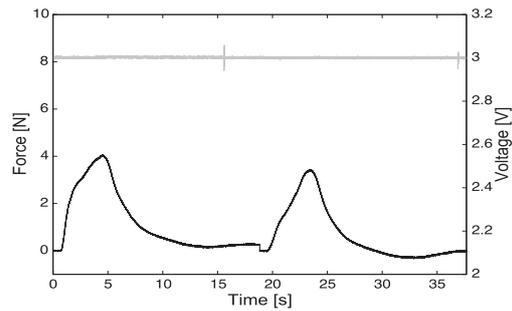
(b) Warabi mochi (bracken-starch dumpling.)



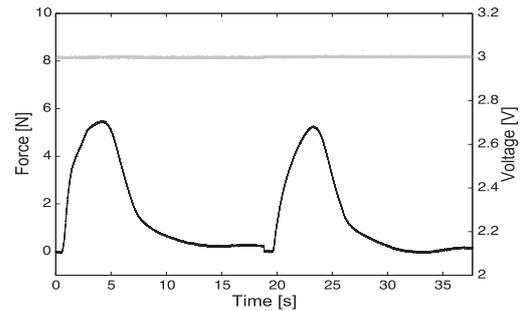
(c) Dango (rice dumpling.)



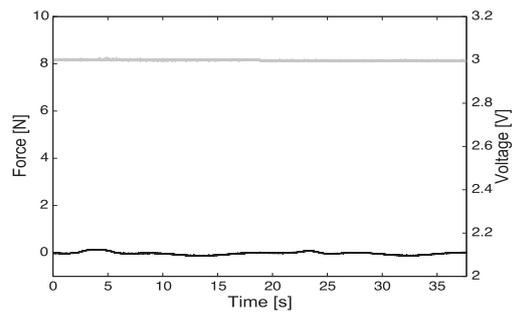
(d) White bread.



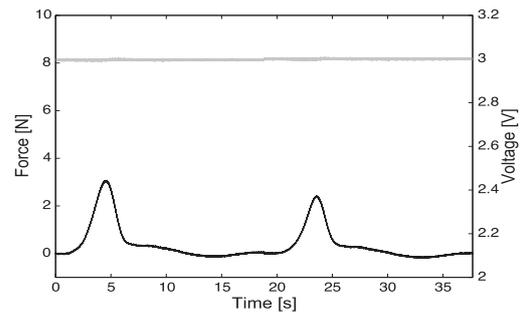
(e) Baguette.



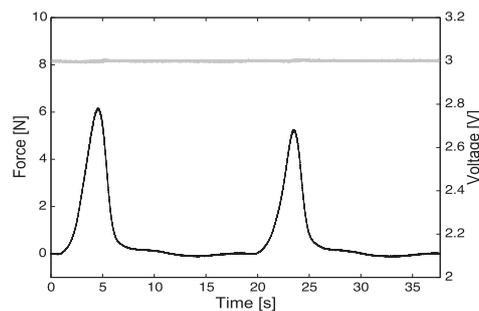
(f) Donut.



(g) Jelly.



(h) Marshmallow.



(i) Kamaboko (boiled fish paste.)

図5 平均化した食感センサによる計測結果

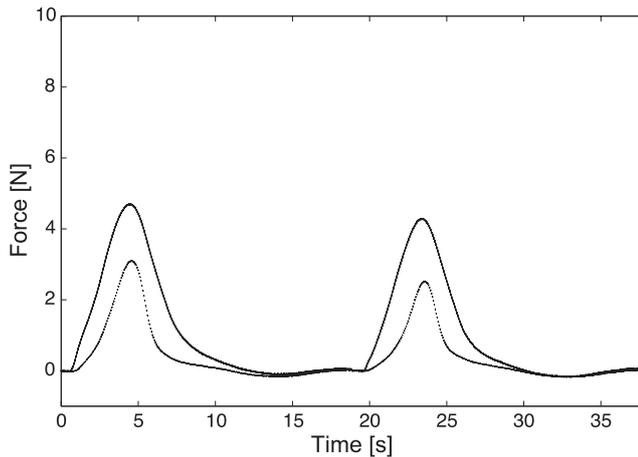


図6 Averaged time-series data of “Mochimochi” and “Mocchiri”

次に、算出したもちもち、もっちりの時系列波形に対し各食品の平均データとのDTW距離を算出した。図7にそれぞれの食品のDTW距離の値を2次元散布図にプロットしたものを示す。

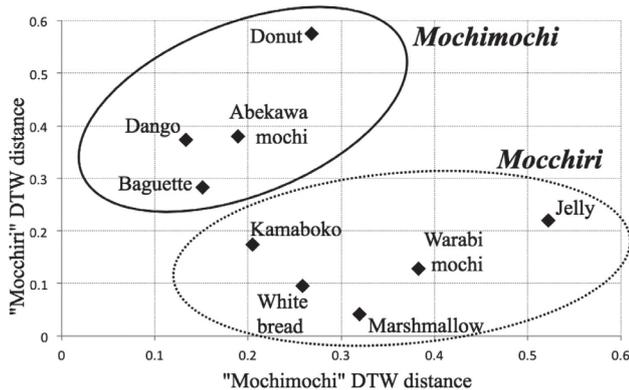


図7 Relationship between “mochimochi” and “mocchiri” DTW distances for nine foods.

5. 研究から得た結論・考察

図5に示すように、ほとんどの食品でインダクタの電圧が変化していないことから、振動が発生していないことがわかる。もちもちを感じる条件として破碎がないことが前提であることから、これらの食品で振動が発生しないのは妥当と考えられる。また、ほとんどの食品で磁気抵抗素子による荷重の曲線の高さについて、1回目の押し込みと2回目の押し込みの間にほとんど差がないことがわかる。これは凝集性や弾力性の大きな食品によく見られる傾向であり、選定した食品のほとんどに弾力性が存在することが見て取れる。一方で、ゼリーでは荷重がほとんど発生しなかったが、これはゼリーの弾力性が低いためである。このように、食感センサが取得した荷重の波形から各食品の特

徴を捉えることができる。

また、図7に示すように、官能評価と同様に2つのDTW距離の差から食品のグループ分けを行ったところ、フランスパンとわらび餅以外の7食品でDTWによるグループ分けと官能評価によるグループ分けが一致していることがわかる。ただし、フランスパンは官能評価においてももちもちもっちりの差がないという結果であり、図7において他の食品に比べ2つの値の差はあまり大きくないことから、官能評価との大きな相違はないといえる。

このように、食感センサで取得した荷重の波形に対し、もちもちやもっちりの波形とのDTW距離を算出することで、ヒトの食感で知覚したグループと同じグループに分けられることが確認できた。また、DTW距離による波形の差は数値として算出されるため、この評価システムは食感の新たな定量評価方法となる可能性をもつ。

6. 残された問題、今後の課題

今後の課題として、次の2点が挙げられる。本研究で行った食感センサ測定では押し込み速度が5.0 mm/sであったが、実際のヒトの咀嚼速度は37～74 mm/sと言われており、押し込み速度を上げることが求められる。また、咀嚼速度の違いによっても食感知覚は変化するため、様々な速度で測定を行う必要がある。次に、本研究では、もちもち感、もっちり感という2種類の食感表現を対象に定量化を進めてきたが、これらの食品は振動がほとんどないものが多かったため、振動に対してこのシステムが有用であったかどうかを確認できなかった。そのため、サクサク感やパリパリ感といった振動の大きな食感でもこのシステムが有用かどうかを検証する必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人東洋食品研究所に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. S. Szczesniak, “Texture is a sensory property,” *Food Quality and Preference*, Vol. 13 (2002), pp. 215-225.
- [2] 西久保大輔, 中本裕之, 小林太, 小島史男, “ヒトの歯の構造を持つ食感センサ,” *日本食品科学工学会誌*, Vol. 63, No. 6 (2016), pp. 268-273.
- [3] 内田誠一, “DP マッチング概説 ～基本と様々な拡張～,” *信学技報, PRMU, パターン認識・メディア理解*, Vol. 106, No. 428 (2006), pp. 31-36.
- [4] F. Petitjean, A. Ketterlin, P. Gancarski, “A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering,” *Pattern Recognition*, Vol. 44 (2011), pp. 678-693.

- [5] 大橋正房, 光岡祐子, 須藤正彦, 北村奈津子, 米山真知子, 猿渡一兵, “sizzle word シズルワードの現在「おいしいを感じる言葉」調査報告,” BMFT 出版部 (2015).