

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560033

研究課題名(和文)食感のバイオメカニクス

研究課題名(英文)Biomechanical Study of Food Texture

研究代表者

伊能 教夫(Inou, Norio)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70126308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：食感を客観的に評価するためには、官能評価に対応する食物咀嚼時の物理的特性が必要になる。本研究では、材料力学的観点からスナック菓子のミクロレベルの材料特性を測定し、マクロレベルの値に比べて5～700倍大きいことを示した。次にスナック菓子の構造的特徴と咀嚼時の擬音語の関係について調査し、二つの関係を説明可能な数理モデルによる表現を試みた。また、食物咀嚼時の顎運動を分析し、食物の種類によって運動軌跡が異なることを示した。

研究成果の概要(英文)：To estimate food texture quantitatively, it needs examination of mechanical properties corresponding to the sensory test. This study estimated microscopic level of material properties of snack foods. The results show 5 to 700 times larger than those of macroscopic level. Next we researched a relation between structural characteristics of snack foods and onomatopoeia in masticating these foods, and proposed a mathematical model to explain the relation. We also analyzed jaw movement in mastication of foods, and demonstrated that the movement changed by the kinds of foods.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：食感 構造力学的特徴 材料力学的特徴 数理モデル 咀嚼 バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

食べることの楽しさは、QOL（生活の質）に大きな影響を与える。なかでも菓子類は人によって嗜好が異なるため、多様な製品が提供されている。また、高齢者にとっては食事の楽しさの重要性が特に高い。すなわち、食品の味わいを改善することや新しい味わいをもつ食品を開発することは非常に重要である。とりわけ食感は味わいを決める重要な要素であり、スナック菓子においては商品価値を決定づけている。しかし、食感の従来研究は官能評価に基づく分析に留まっており、食物咀嚼時の口腔内で起こる力学現象という観点からは、ほとんど研究が行われていない。食感を客観的に評価するためには、人間が食品を咀嚼した時に生じる力学も含めて考察していく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、食感が食品と人体の力学的な相互作用で生じるという観点から、機械工学と生体工学の両面からアプローチし、食感の客観的評価手法を開発することを目的とする。研究対象は、スナック菓子とした。これは日本で種々の製品が市販されており、どの年齢層も嗜好性の高い製品であるという理由による。スナック菓子は X 線 CT 装置で撮影すると、図 1 のように種類によってさまざまな微細構造を有する。この構造的特徴と生地そのものの材料定数によって、多様な食感が生み出されていると考えられる。これを科学的に研究することによって新たな食感の創成や食感のデザイン手法の開発につながると期待される。


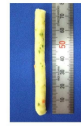

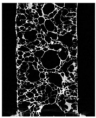

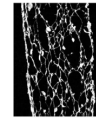


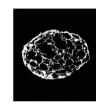
サンプル	A	B	C
菓子外観			
縦断面			
横断面			

図 1 スナック菓子の微細構造

3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 つの方法で食感の客観的評価法について検討を行った。

一つ目は、スナック菓子を対象としたマイクロレベルの材料特性の調査である。従来研究では、菓子一個体をテクスチャー試験機にかけて荷重曲線を取得することが一般的であった。しかし、微細構造を有する食品では、みかけ上の材料特性は測定できても生地そのものの材料特性は測定できない。

そこで、本研究では、マイクロレベルの材料特性が評価可能な測定法を開発した。この方法は、研究代表者の研究室で開発した微小荷重試験機（図 2）と有限要素解析を組み合わせることによってヤング率と材料強度を算出できる。まず、スナック菓子から一辺が 2～3 mm 程度の小片を取り出し、工業用 X 線 CT 装置で撮影して、断層画像を得る。この画像から図 3 左に示すような個体別の有限要素モデルを作成する。次に、微小荷重試験機で荷重特性を測定する。

この荷重条件と同じ力学条件で有限要素解析（図 3 右）を行うことにより、マイクロレベルでの生地のヤング率および材料強度を推定できる。

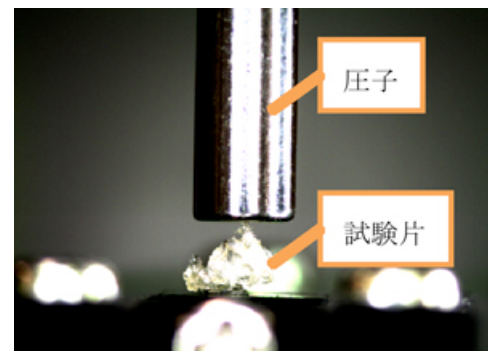
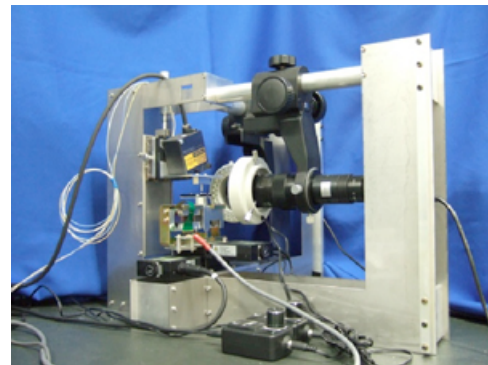


図 2 微小荷重試験器
(上：装置外観、下：圧縮部分)

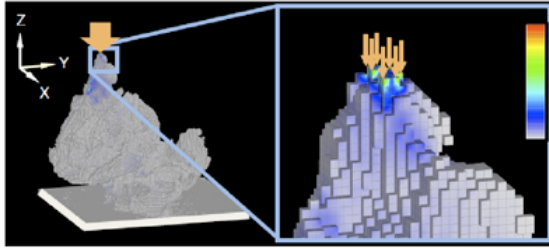


図3 CT画像に基づく有限要素モデル
(左:個体別有限要素モデル、右:解析結果)

二つ目は、菓子構造の幾何学的特徴および材料力学的特性と咀嚼時の擬音語（「さくさく」、「かりかり」、「ぱりぱり」、「がりがり」）の関係を数理モデルで表現する方法である。数理モデルは次の線形式で表現される。

$$y_k = \sum_j a_j x_{sj} + \sum_j b_j x_{mj} + \sum_j c_j x_{hj}$$

ここで目的変数 y_k は、複数個の菓子の擬音語で表現される食感であり、官能評価から得られる値である。変数 x_{sj}, x_{mj}, x_{hj} については、それぞれスナック菓子の構造的特徴量 ($j=1, \dots, 4$: 前回までの統計的変数、 $j=5, \dots, 12$: 今回追加した幾何学的特徴量)、材料特性の物性値、被験者の身体的特徴（頭の周囲）である。今回は、第一項目の特徴量を加えることで数理モデルの改善効果を検討した。

3つ目は、食物咀嚼時の顎運動の分析手法である。顎運動は、食物を荒く砕く chopping motion と食物をすりつぶす grinding motion が観察されることが知られているが、食物との関係については、詳しい研究はほとんど行われていない。咀嚼は合理的な顎運動のサイクルで構成されていると考えられる。このことから食物の機械的性状によって顎運動を制御する機構の存在が予想される。そこで本研究では、食物咀嚼時の顎運動を顎運動表示システムで解析することを試みた。

4. 研究成果

一つ目の方法から、以下の結果が得られた。5種類のスナック菓子について、ヤング率を

算出したところ、マクロレベルの値よりも5～700倍大きいことが示された。これは、スナック菓子がマイクロ構造を有しているために構造依存性が高いためである。マクロレベルで硬いと感じる菓子でもマイクロレベルでは、咀嚼力を必要としない菓子よりも小さいという結果も得られた。これは、経験的に咀嚼しやすい形状にデザインされていると考えられる。したがって本方法を発展させれば食感をデザインすることが可能になると期待される。

二つ目の方法からは以下の成果が得られた。まず、菓子の構造的特徴を表現する新たな特徴量を提案した。これまで提案した特徴量は統計的な指標 (x_{s1} :菓子の太さ、 x_{s2} :生地の空間的な占有率の平均、 x_{s3} :生地の空間的な占有率の標準偏差、 x_{s4} :生地の空間的な占有率のモーメント) を用いていた。

今回は、これらに加えて8個の幾何学的特徴量を加えた。すなわち、 x_{s5} :空隙の個数、 x_{s6} :各空隙の断面積の平均、 x_{s7} :各空隙の断面積の標準偏差、 x_{s8} :各空隙の周囲長の平均、 x_{s9} :各空隙の周囲長の標準偏差、 x_{s10} :各空隙の円形度の平均、 x_{s11} :各空隙の円形度の標準偏差、 x_{s12} :菓子断面の外形状の円形度の8個である。これらの特徴量を加えることによって、これまで数理モデル表現で自由度調整済み決定係数（合致度）の低かった「かりかり」感、「ぱりぱり」感の改善が確認できた。表1にそれぞれの食感の合致度の改善状況を示す。

表1 自由度調整済み決定係数

食感	さくさく	かりかり	ぱりぱり	がりがり
前回	0.30	0.07	0.04	0.12
今回	0.36	0.24	0.13	0.49

三つ目の方法から、以下の結果が得られた。顎運動表示システムを用いて、歯列の接触状態の軌跡を解析した。被験者がソフト煎餅、ピーナッツ、ガムを咀嚼している時に下顎の一点の運動軌跡を比較したところ、図4に示すように運動経路に違いが見られた。このことから顎運動は、食物の性状によって咀嚼状態を変化させる機能が存在することが示唆される。

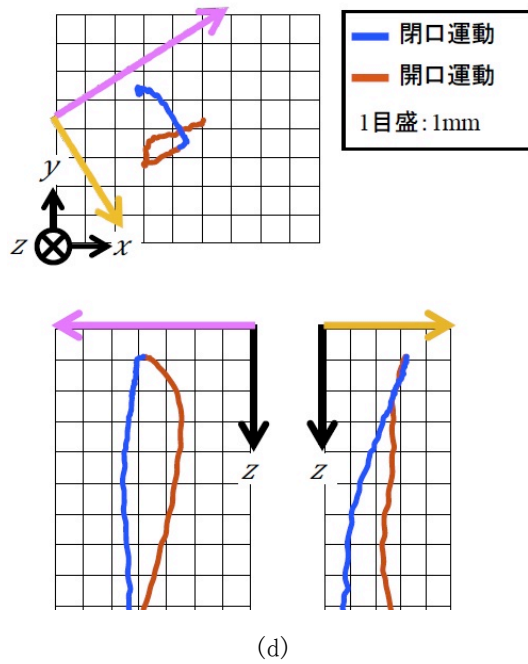
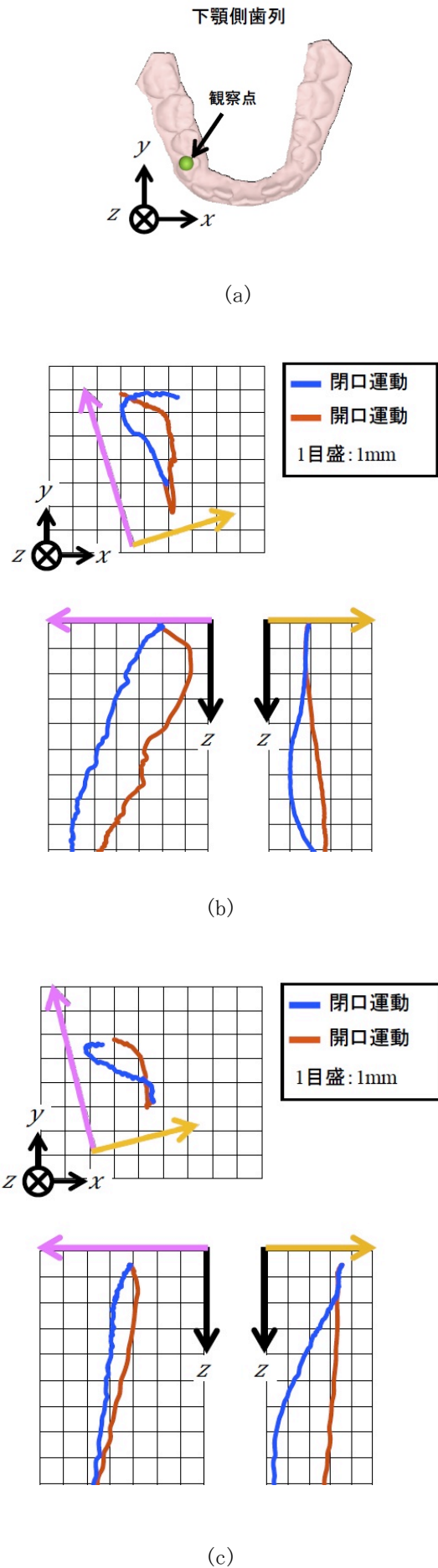


図4 食物咀嚼時の顎運動の軌道

- (a) 観察点 (下顎側の歯列の一点)
 (b) ソフト煎餅咀嚼時
 (c) ピーナッツ咀嚼時
 (d) 粒ガム咀嚼時

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

Ren KADOWAKI, Norio INOU, Hitoshi KIMURA, Measurement of Microscopic Young's Modulus of Crispy Foods, International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering, Vol.50, pp79-83, (2013) (査読あり)

DOI: 10.7763/IPCBE.2013.V50.17

〔学会発表〕 (計 1 件)

馬目佳人, 木村仁, 伊能教夫, 峯村英一郎, 榎宏太郎, 顎運動診断システムを用いた咀嚼時における臼歯部の運動分析, 第 22 回顎顔面バイオメカニクス学会大会抄録集, pp. 35-38 (2014), UK デジタル長崎店, 長崎県, 2014. 11. 22~11. 23 (査読なし)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~inouhp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊能 教夫 (INOUE, Norio)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号 : 70126308